

わが国主要造林樹種の栄養および 施肥に関する基礎的研究

塘 隆 男⁽¹⁾

緒 言	3
第1編 苗木の栄養と施肥に関する研究	5
第1章 苗木の栄養生理に関する2, 3の基礎的実験	5
第1節 苗木の水耕法についての検討	5
Ⅰ 実験—1 苗木の水耕実験—主として水耕液の濃度についての検討	5
Ⅱ 実験—2 苗木の水耕実験—主として水耕液の窒素形態についての検討	6
Ⅲ 考察	10
第2節 苗木の根系媒質に対する通気の影響	11
Ⅰ 実験—3 水耕されたアカマツに対する通気効果	11
Ⅱ 実験—4 水耕されたスギ, ヒノキ, アカマツ, カラマツに対する通気効果の比較	13
Ⅲ 実験—5 水耕液の窒素形態と通気効果 (アカマツ)	15
Ⅳ 実験—6 水耕液の窒素形態が $\text{NH}_4\text{-N}$ である場合の通気効果ならびに Mn 添加の影響 (スギとアカマツの比較)	16
Ⅴ 実験—7 苗木の還元的土壌に対する抵抗性	17
Ⅵ 考察	18
第3節 苗木の根系の呼吸	18
Ⅰ 実験—8 水耕液の溶存酸素が常態の場合のスギ, アカマツの根の呼吸の比較	19
Ⅱ 実験—9 水耕液の溶存酸素が欠乏状態の場合のスギ, アカマツの根の呼吸の比較	20
Ⅲ 実験—10 アカマツの根の菌根着生部分と非着生部分の呼吸の比較	22
Ⅳ 実験—11 水耕液の溶存酸素が欠乏状態の場合のスギ, アカマツの直 根 (菌根非着生部分) からの酸素の排出	23
Ⅴ 考察	25
第4節 苗木の耐酸性と可溶性 Al に対する抵抗性	26
Ⅰ 実験—12 スギとヒノキの耐酸性の比較	27
Ⅱ 実験—13 スギとヒノキの生育に及ぼす Al の影響 (水耕実験)	27
Ⅲ 実験—14 スギとヒノキの生育に及ぼす Al の影響 (土耕実験)	29
Ⅳ 考察	30
第5節 苗木の養分吸収過程	33
Ⅰ 実験—15 スギとアカマツの窒素の吸収	33
Ⅱ 実験—16 スギとアカマツのリン酸, カリ, 石灰の吸収	38
Ⅲ 実験—17 ヒノキとカラマツの窒素の吸収	41
Ⅳ 実験—18 ヒノキとカラマツのリン酸, カリ, 石灰の吸収	42
Ⅴ 考察	48
第6節 苗木の養分欠乏	48
Ⅰ 実験—19 苗木の窒素, リン酸, カリ, 石灰, 苦土, 鉄, マンガンの 各要素の欠除培養	49
Ⅱ 実験—20 スギのカリ欠除培養	51
Ⅲ 実験—21 スギの石灰欠除培養	55
Ⅳ 実験—22 スギのカリ, 石灰, 苦土の同時2要素欠除培養	56
Ⅴ 調査—1 スギ苗の苦土欠乏調査	60

VI 考察	63
第 2 章 苗畑施肥の本質に関する実験的考察	65
第 1 節 育苗の目標と苗畑施肥	65
第 2 節 苗木の形質に及ぼす肥料要素の影響	65
I 実験—23 窒素, リン酸, カリの施用が苗木の形質におよぼす影響	66
II 実験—24 カリがスギの形質に及ぼす影響	70
III 実験—25 苗木の発根時に地上部より根部へ移動する肥料要素	73
IV 実験—26 スギ苗の下位葉または下枝の発根に及ぼす影響	74
V 考察	75
第 3 節 苗畑施肥技術としての葉面施肥	76
I 実験—27 リン酸塩の葉面散布液の pH と肥効	76
II 実験—28 根系媒質の養分の多少が葉面施肥効果に及ぼす影響	78
III 考察	80
第 3 章 総括	80
第 2 編 林木の栄養と施肥に関する研究	89
第 1 章 林地肥培に関する序説	89
第 1 節 林地肥培に関する研究史	89
第 2 節 林地肥培無用論の解析	91
第 3 節 林地肥培必要論の解析	92
第 2 章 林木の養分吸収量	94
第 1 節 林木の養分含有量に関する基礎調査	94
I 調査—2 スギ林の養分含有量	94
II 調査—3 アカマツ林の養分含有量	97
III 考察	102
第 2 節 林木の養分吸収量の推定	104
第 3 章 林地の養分経済	105
第 1 節 林地の養分循環率の試算	105
第 2 節 林地の養分経済とその考察	106
第 4 章 林地肥培機構に関する論議	107
第 1 節 林地肥培機構を論ずるための基礎試験ならびに調査	107
I 試験—1 アカマツ林の肥培試験	108
II 調査—4 スギ肥培林の実態調査 (その 1)	116
III 調査—5 スギ肥培林の実態調査 (その 2)	119
IV 考察	121
第 2 節 林地肥培機構を論ずるための基礎実験	122
I 実験—29 養分を根の一部に与えた場合と, 根全体に与えた場合との養分吸収	122
II 実験—30 養分を根の一部に与えた場合の他の根の部分からの養分吸収	123
III 考察	125
第 3 節 林地肥培機構に関する考察	125
第 5 章 総括	127
第 3 編 総括論議ならびに本研究の林業上への応用	131
第 1 章 苗畑施肥に関する論議	131
第 1 節 苗畑施肥の特異性	131
第 2 節 苗畑施肥の造林技術への応用	133
第 2 章 林地肥培に関する論議	134
第 1 節 今後のわが国林業における林地肥培の重要性	134
第 2 節 林地肥培の育林への導入の可能性	135

緒 言

わが国の林業の歴史は古く、徳川時代に発達した地方的林業技術には欧米をしのぐものが少なくない。しかし近代科学的基礎付けのある技術の展開は明治の中葉、北欧の林学がわが国に導入されてからのことであり、さらに林学に森林土壌学の研究が導入されたのは昭和にはいつてからのことである。肥料学の研究が導入されたのはさらに新しく、しかも従来肥料はただ苗畑で養苗時に用いられたにすぎなく、その技術水準もきわめて低かつたので、苗畑施肥や苗木の栄養の問題は研究項目としてほとんど取りあげられることなく、戦前にはわずかに、津田¹⁾ (1909)、守屋²⁾ (1910)、³⁾ (1921)、⁴⁾ (1922)、守屋ら⁵⁾ (1925)、明永⁶⁾ (1925)、芝本⁷⁾ (1933)、⁸⁾ (1943)、石原ら⁹⁾ (1934)、原田¹⁰⁾ (1939)、中塚¹¹⁾ (1942)、肥後¹²⁾ (1943)などの文献が見られるのみで、まことに寥々たるものがある。

しかし今次大戦後の荒廃した林野に直面して、国土の緑化はまず優良苗木からのスローガンのもとに苗木の増産が要請され、それに伴い苗畑施肥の研究も小規模ながら行なわれだした。さらに昭和25年ごろからは将来の木材需要の激増に対処して、林地肥培が森林生産力増強の一方途として期待され、この方面の研究もようやく開始されるに至った。このように、林業における肥料関係の研究は森林土壌のそれよりも、はるかに歴史が浅く、2、3の例外を除けば戦後において開始されたといつても過言ではない。

肥料が農業の発達に多大の貢献をなしたのに対して、天然林のまだ豊富に存在した過去の林業においては、一般に肥料を施用する必要もなく、施肥を行なわないことが、同じ土地生産業でありながら、林業を農業と区別する一つの相違点と考えられてきた。しかるに今次大戦により、わが国は面積において約45%、蓄積において約32%の森林資源を失い、林業事情は一変した。森林資源総合対策協議会の資料によると、わが国の木材需要は今後ますます激増し、その需給関係は昭和47年度には約11,000万石、同57年度には約13,000万石のばく大な量にのぼる過伐をよぎなくされるといわれる。このような森林蓄積の減少に対処して、外材の輸入に頼らないで、自力で森林生産力の増強を企図しなければならないであろう。これに対する技術的方策としては造林の拡大とともに林木育種、外来樹種の導入、林地肥培の3方途が考えられているが、これらのうち林地肥培は現時点において直ちに実行できるものとして期待されている。

以上のような客観的背景下に、林業林学領域下において、林木の栄養や施肥の研究が今日ほど強く要請される時代はないであろう。著者はこのような観点から、本研究を行なつてきた。そして第1編の苗木の栄養ならびに施肥に関する研究と、第2編の林木の栄養ならびに施肥に関する研究との2編に分けて研究を進めたのは、苗木は林業生産の材料であり、苗畑はいうまでもなくこれを育成するところであり、また林木は林業生産の直接対象物であり、林地はこれを生産する本格的、最終的な場であり、両者は一連の林業生産過程の中にありながら、まったく別個の次元に属するからである。

本論文の第1編は、苗木の栄養ならびに苗畑施肥の本質に関する研究を取りまとめたものである。すなわち、苗木の養分吸収に対する特性、根の通気に対する適性、Alに対する抗毒性などを調べ、苗畑土壌に対する肥培管理の基礎的事項としての苗木の養分吸収や栄養生理学的特性を明らかにしたのち、苗木に要求される諸形質とそれらの形質を付与する肥料要素との関係について研究を行ない、苗畑施肥の特異性を解明し、現下の急務とされている苗木の標準規格調整に対する考察を行なつた。第2編は、主として林木の養分吸収とその肥培に関する研究を取りまとめたものである。すなわち、わが国において林地肥培を

必要とする諸条件について考察したのち、基本的事項として林木の養分吸収とその養分循環について調べ、さらに林地肥培のメカニズムに対して実験的考察を加え、林地肥培の可能性について論じ、林地肥培の特性を解明した。第3編は第1編、第2編を総合的に考察して、苗畑ならびに林地の肥培の特性を解明し、林業における肥培技術の今後のあり方、方向性などについて論究した。

本研究において取り扱った樹種は、わが国林業で最も重要と思われるスギ、アカマツを中心にヒノキ、カラマツをくわえた4樹種である。

また本論文においては、本研究を構成する各研究項目ごとに、その内容や性格がかなり異なり、したがってその研究方法にも異なるものがあるので、研究方法の記載についてはこれを一括して行なうことなく、各項目ごとに記述することにした。

本研究のうち、苗畑施肥については、主として前林業試験場造林部長、現東京大学教授大政正隆博士の指導のもとに開始したものであり、また林地肥培については、東京大学教授芝本武夫博士に多大のご啓示を賜わり開始したもので、取りまとめにあつても両博士のご懇切なご指導を賜わつた。また、本稿を草するにあたり東京大学教授三井進午博士のご校閲を賜わつた。ここに心から感謝の意を表します。

また、本研究を遂行するにあつては、林業試験場土壌調査部長宮崎 榊博士、同前土壌肥料科長橋本与良博士によりたえざるご指導と格別のご配慮を賜わつたことを特記して心から感謝の言葉を申しのべます。また、本研究の実行にあつては、土壌肥料研究室員の皆様に絶大なご協力を仰いだ。すなわち、道仙喜一技官には実験15—18、調査—1について、原田洸技官には調査2—3について、藤田桂治技官には実験12—14、19—30、調査4—5について、また及川伸夫技官（もと室員、現東北支場員）には実験20—23、森田禰代子技官には実験—10についてそれぞれとくにご援助いただいた。また、佐藤久男技官、岩崎美代技官には、実験、計算、資料整理、浄書などのご助力をいただいた。ここにこれらの土壌肥料研究室の皆様方に心からお礼の言葉を申しあげます。

第1編 苗木の栄養と施肥に関する研究

第1章 苗木の栄養生理に関する2, 3の基礎的実験

本章では合理的な育苗技術、とくに苗畑施肥の基礎的事項として重要と思われる2, 3の栄養生理に関する基礎的事項について述べる。

著者はまず栄養生理に関する研究に必要な苗木の水耕法について検討したのち、水耕法を応用して苗木の根の通気に対する適応性、可溶性 Al に対する抗毒性の樹種による相違を、また水耕法に砂耕法を加味した方法で養分欠乏症を研究した。また、苗木の養分吸収の実態を把握し、苗畑施肥の基礎資料とすることができた。そして以上の諸項目を中心として、苗木の栄養生理学的特性を系統的に取りまとめることに努力した。以下各項目ごとに詳述することにする。

第1節 苗木の水耕法についての検討

高等植物の無機栄養生理に関する研究は農作物についてのものが大部分で、林木についてのものは少ない。栄養生理の研究を進めてゆくうえには、水耕法は根系媒質を純粹に、かつ所要の条件を任意に調節できるため都合のよい培養法とされているが、林木を対象とした水耕実験例は、農作物を対象としたものにくらべれば、またきわめて少ない^{8)12)~19)}。

植物の水耕法は、がんらい土壤中に發育する根系を不自然な水耕液中に發育させるのであるから、水耕培養された植物はとかく土壤に栽培された植物とくらべた場合に、いろいろの点で正常な生育を示さない場合が多い。このように正常な生育を示さない水耕実験では、その成績から所期の結論を求めることが困難である。すなわち、水耕法で所期の結論を求めようとすれば、水耕によつて得られた植物が土壤中に正常に栽培されたものと、ほとんど変わらない生育状態であることが必要である。このため、水耕培養法の改良につき多くの研究者が苦心をかさねてきたところであるが、わが国でも長年にわたる春日井²⁰⁾(1939)による水稲についての、また森ら²¹⁾(1955)のリンゴについての水耕法に関する研究は、この点をとくに検討したものである。

林木の栄養生理のひとつの研究手段として水耕法のもつ利点を応用しようとするれば、上述のような観点から、林木が正常に生育する林木に適した水耕法を知る必要がある。筆者はまず水耕法の成否を握る重要なポイントと思われる、(i) 水耕液の濃度、(ii) 水耕液の窒素源、(iii) 水耕容器、などについて、実験—1 および実験—2 において検討を加えることにした。

I 実験—1 苗木の水耕実験——主として水耕液の濃度についての検討

I—A 実験目的および実験方法

針葉樹稚苗の水耕に適した水耕液の濃度を検討するための水耕実験を行なった。

実験計画は一般高等植物の水耕用として、多くの人に使用されてきた K_{NO₃} 氏液を暫定的に用い、その濃度を K_{NO₃} 氏液濃度の 1/5 (K/5 とかく)、1/10 (K/10 とかく)、1/20 (K/20 とかく) の3段階に区別し、そのおのおのについて水耕液の窒素形態を NO₃-N と NH₄-N に、さらに水耕液の初発 pH (Initial-pH) を pH 6.5 と pH 5.0 とに分け、合計 18 の試験区を設けた。

実験材料にはスギ満1年生苗を用い、これを 600 ml 三角フラスコに、中央に径 1 cm の孔をあけた木製板に綿栓で固定して水耕した。水耕液の更新は週に2度行ない。苗木の蒸散作用で減量した水耕液は適

時補給した。水耕は林業試験場の硝子室で行ない、水耕期間は昭和18年4月26日から10月4日までの184日間である。

I—B 実験成績とその考察

10月4日の水耕終了時の苗木の苗長、生体重を測定した結果を表示すれば、第1表のとおりである。また最高の生育をとげた濃度が $K/10$ 区で、窒素源が NO_3-N 区、初発 pH 5.0 区の苗木の苗長、生体重をそれぞれ 100 として各区苗長、生体重をそれぞれ指数であらわせれば、第1表の太字のとおりである。

これらの成績について考察を加えると、つぎのとおりである。

(1) 培養液の濃度については、実験の範囲では培養液の窒素形態や初発 pH 値に関係なく、 $K/10 > K/20 > K/5$ の順に成績がよく、スギ稚苗に対しては $KNOP$ 氏標準液の $1/10$ 程度、またはそれよりやや低濃度のものが好適であるように思われた。この成績は従来の林木の水耕実験のうち、佐藤ら²²⁾(1935)がエゾマツ、トドマツを $KNOP$ 氏液で培養した結果の一部と一致する。

(2) 培養液の窒素の形態について検討すると、初発 pH 5.0 区の培養においては、濃度のいかんにかかわらず、 NO_3-N 区のは NH_4-N 区のものより良好な生育を示し、また初発 pH 6.5 区の培養においては、濃度のいかんにかかわらないで、 NH_4-N 区のは NO_3-N 区のものよりも良好な生育を示している。すなわち、 NO_3-N は比較的酸性側において、 NH_4-N は比較的塩基性側において有効であることが推察される。

(3) なお、 NO_3-N 区において初発 pH 6.5 区のスギ稚苗に5月下旬から6月にかけて黄化現象 Chlorosis を起こし、地上部および根部ともにその発育が不良であつた。その程度は濃度の高いほど大きかった。この黄化現象は、水耕液の pH が 6.5 以上であるために、添加した $FeCl_3$ がリン酸鉄や水酸化鉄の形で沈殿するため起こる、鉄欠乏による黄化現象と考えられる。しかし、 NO_3-N 区でも初発 pH 5.0 区の苗は枝葉部の緑色濃く、最良の生育を示した。

II 実験—2 苗木の水耕実験——主として水耕液の窒素形態についての検討*

II—A 実験目的および実験方法

$KNOP$ や $SACHS$, $PFLEGER$ などの古い時代の学者が考案した古典的水耕液の窒素源の形態は、 $HOMCAMP$ ²³⁾(1931)によればすべて NO_3-N である。しかしながら、水耕液の窒素形態が NO_3-N がよいか、 NH_4-N がよいかについては多くの論争があり、植物の種類によっても異なるといわれる。

著者はこのような観点から、針葉樹稚苗の生育に及ぼす水耕液の窒素形態を検討するために、つぎのような水耕実験を行なった。

実験計画の要は水耕液の窒素形態により、 NO_3-N 区、 NH_4-N 区および NO_3-N と NH_4-N の等量混合区の3区を設け、さらにそのおのおのについて水耕液の pH の相違により pH 6.2 区と、pH 4.2 区とに分け、合計6区の試験区を設けて、スギならびにアカマツ満1年生苗の水耕培養を行なった。水耕容器には12ℓ容陶製ワグネル鉢を用い、1試験区に2鉢用意した。水耕液の更新は週に2回、盛夏の候には週に3回行なった。

実験のおもな目的は、苗木の水耕に適した窒素形態を求めることにあるが、同時に水耕液の組成、水耕容器などについても検討するため、下記の諸点については、実験—1の方法に2、3の改良を加えて実験を行なった。

* 本実験の成績の一部を文献 28) に発表した。

第1表 苗木の水耕実験成績(主として水耕液の濃度について)

Table 1. Data on water culture of two years old Sugi seedling (On the concentration of culture solution).

濃度 Concentration of culture solution	苗木の生育状態 Growth of seedling	窒素形態および pH Source of nitrogen and pH		NO ₃ -N				NH ₄ -N			
				pH 6.5		pH 5.0		pH 6.5		pH 5.0	
				Max.	Min. Average	Max.	Min. Average	Max.	Min. Average	Max.	Min. Average
K 5	培養前 Before culture	苗木長	Top length cm	9.0—7.0	7.8	10.0—6.0	8.5	10.0—6.0	8.2	8.0—6.5	7.5
		生体重	Fresh weight g	3.3—1.5	2.3	2.6—1.5	2.2	2.4—1.6	2.0	2.2—1.7	1.9
	培養後 After culture	苗木長	Top length cm	15.0—11.0	12.8	23.0—16.5	20.1	19.5—13.5	16.7	21.0—13.0	16.8
		生体重	Fresh weight g	14.5—4.2	11.8	26.8—17.5	22.2	22.0—14.5	17.7	17.8—14.8	16.1
	増加量 Increments	苗木長	Top length cm	6.0—4.0	5.0	14.0—11.0	11.8	9.5—8.5	8.5	13.0—6.5	7.3
		生体重	Fresh weight g	11.3—7.7	9.5	24.7—16.0	20.0	19.6—12.4	15.6	15.6—13.1	14.2
		生体重指数	Index of fresh weight		26		62		48		44
K 10	培養前 Before culture	苗木長	Top length cm	10.5—8.5	9.4	10.5—10.0	10.4	10.0—9.5	9.6	10.0—8.5	9.3
		生体重	Fresh weight g	2.8—2.5	2.6	3.5—2.0	2.9	3.5—2.0	2.9	2.6—2.0	2.2
	培養後 After culture	苗木長	Top length cm	22.0—15.0	18.8	25.0—17.0	21.4	21.5—15.0	17.8	22.0—18.0	20.2
		生体重	Fresh weight g	32.5—17.5	25.5	40.5—31.0	35.1	28.5—24.5	26.4	23.0—15.0	18.7
	増加量 Increments	苗木長	Top length cm	12.0—6.0	9.4	14.5—7.0	11.0	12.0—5.5	8.1	13.5—8.0	10.8
		生体重	Fresh weight g	30.0—15.0	22.9	37.0—28.3	32.2	25.7—21.0	23.5	20.4—13.0	16.5
		生体重指数	Index of fresh weight		71		100		73		51
K 20	培養前 Before culture	苗木長	Top length cm	8.5—5.0	7.0	9.5—7.0	8.4	11.5—9.0	9.8	9.0—6.0	7.5
		生体重	Fresh weight g	2.1—1.6	1.8	2.2—1.5	1.9	3.7—1.4	2.4	2.6—1.6	2.0
	培養後 After culture	苗木長	Top length cm	16.5—13.0	14.5	18.0—11.5	16.3	24.0—15.0	18.9	17.5—14.5	15.9
		生体重	Fresh weight g	18.0—14.0	16.3	23.5—21.0	22.2	31.0—14.0	22.3	19.5—15.5	17.9
	増加量 Increments	苗木長	Top length cm	11.5—5.5	7.5	9.5—4.5	7.9	12.5—5.0	9.1	11.0—5.5	8.4
		生体重	Fresh weight g	15.9—12.4	14.5	21.3—19.1	20.3	29.4—12.3	19.9	17.4—12.9	15.9
		生体重指数	Index of fresh weight		45		63		62		49

(1) 水耕液の組成：多くの水耕液の中から針葉樹稚苗に好適なものを選ぶことは、はなはだ困難なことである。筆者は実験—1において、 KNO_3 氏標準液をいちおう暫定的に用い、濃度に関する実験を行なつたが、その成績は不満足な点多かつたので、実験—2においては、 KNO_3 液に用いられている塩類を基礎として、以下のべるように若干の改変を行なつた。すなわち、 KNO_3 液の CaO の含有量ははなはだ多く、したがって CaO/MgO の値は約 8.5 で著しく高い。筆者は KNO_3 液は $N : P_2O_5 : K_2O : CaO : MgO = 4 : 2.6 : 4 : 6.8 : 0.8$ であるが、苗木体の無機組成の分析成績などから考察して、本実験においては $N : P_2O_5 : K_2O : CaO : MgO = 4 : 2.5 : 3 : 2 : 1$ である水耕液を試作して使用した。その組成は第 2 表に示すとおりである。

第 2 表 水 耕 液 の 組 成

Table 2. Composition of water culture solution.

窒素源 Nitrogen sources	(1) NH_4-N	(2) NO_3-N	(3) NH_4-N NO_3-N	要 素 量 Element
使用塩類 Salts used	g/l	g/l	g/l	
$(NH_4)_2SO_4$	0.1886		0.0943	
$NaNO_3$		0.1821	0.0911	N 40p.p.m.
$Ca(NO_3)_2$		0.0585	0.0293	P_2O_5 25 "
KH_2PO_4	0.0472	0.0472	0.0472	K_2O 30 "
KCl	0.0261	0.0261	0.0261	CaO 20 "
$CaCl_2$	0.0396		0.0198	MgO 10 "
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	0.0615	0.0615	0.0615	Fe_2O_3 2 "
3% $FeCl_3$	0.14cc/l	0.14cc/l	0.14cc/l	

水耕液の濃度については、実験—1の成績の範囲では KNO_3 液の 1/10 ていどの濃度がよいのであるが、(1)でのべたように水耕容器をワグネル鉢を用いることにしたので、pH 値の激変なども緩和されるので、 KNO_3 液のやく 1/5 の濃度に相当するように調整した。

(2) 水耕容器：実験—1の成績によると、最高の生育を示した区のスギ苗でも平均苗長 21 cm、平均生体重 35 g で、一般の苗畑土壤中に育成したものよりは生育不良であつた。著者はこの原因を主として、水耕に用いた容器が 600 ml で著しく小さいためと考えて、実験—2においては 12 l 容ワグネル鉢を用い、1鉢に 3本の苗木を培養した。

(3) 水耕液の通気：毎朝 1回やく 5 分間フイゴを用いて水耕液中に通気を行なつた。

第 3 表 苗 木 の 水 耕 実 験 成 績

Table 3. Data of water culture for two years old Sugi seedling

培養液の窒素形態および pH Source of nitrogen and pH of culture solution				$NH_4-N + NO_3-N$		
苗の生育状態 Growth of seedling				pH 6.2		pH 4.2
				Max.-Min.	Average	Max.-Min. Average
培養開始時 Before culture	苗 生 体 重	長 Top length cm	Fresh weight g	13.0—10.0	11.4	13.0—10.5 11.9
				6.1—4.8	5.3	6.0—5.0 5.2
培養終了時 After culture	苗 生 体 重	長 Top length cm	Fresh weight g	54.5—35.0	45.1	56.0—40.0 48.3
				156.0—106.5	137.8	176.5—116.0 143.4
増 加 量 Increment	苗 生 体 重	長 Top length cm	Fresh weight g	42.0—24.5	33.7	43.5—28.0 36.4
	生体重指数	Index of fresh weight		149.9—101.5	132.5	172.5—94.2 138.2
				96		100

なお、水耕液の更新時に pH 値の測定を行ない、pH 値が±0.5 以上に变化した時だけ $N/10-H_2SO_4$, $N/10-NaOH$ で矯正した。またワグネル鉢を用いたため、苗の固定には春日井法に準じて、竹ザルと罌を用い、昭和19年4月5日から10月5日までの184日間、雨天および夜間のほかは硝子室外で水耕した。水耕液の更新は週2回行なつた。また、7月中旬から9月上旬の盛夏の候は週3回更新を行ない、晴天の日は10時半ごろから4時ごろまでヨシズをかけて、水耕液の温度上昇による障害をできるだけ防ぐように努めた。

II-B 実験成績とその考察

10月5日の水耕終了時のスギの苗木の苗長、生体重を測定した結果は第3表に示すとおりである。また最高の生育を示した NO_3-N , NH_4-N 混合区で、pH 値4.2区の苗の苗長、生体重を100として、それぞれ各区の苗長、生体重を指数で示せば第3表の太字のとおりである(写真—1参照)。

これらの成績について考察を加えてみるとつぎのとおりである。

(1) 水耕液の窒素の形態

NO_3-N , NH_4-N の等量混合区に水耕された苗木は、 NO_3-N ならびに NH_4-N の各単用区のどれよりも良好な生育を示した。

また NO_3-N 区と NH_4-N 区とに水耕された苗の生育を比較すると、水耕液の pH によつて異なり、 NO_3-N 区では pH 4.2 区の苗が pH 6.2 区のものよりも、 NH_4-N 区では逆に pH 6.2 区の苗が pH 4.2 区のものよりも良好であり、実験—1の結果と同様であつた。このように NO_3-N は比較的酸性側で、 NH_4-N は比較的に微酸性ないし中性側でより有効であつたという結果は CLARK²⁴⁾(1934), DAVIDSON²⁵⁾(1934), その他多くの研究者が農作物でえた成績と一致する。しかし総合的にみると、 NO_3-N と NH_4-N とを各単独に用いた場合よりも、両者が混在する方がより有効であることが認められた。

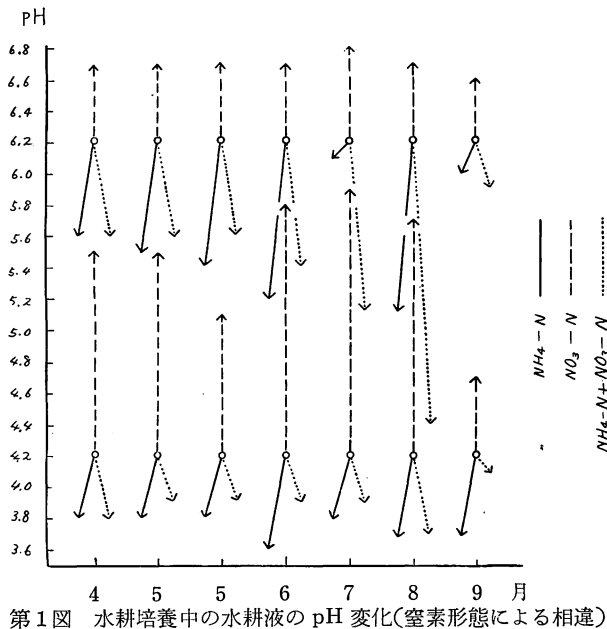
(2) 水耕液の pH の変化

この実験中のある一定期間に毎日水耕液の pH を測定して、その変化を図示すると第1図に示すとおりで、水耕液の pH の変化は水耕液の窒素源や、初発 pH 値により異なる。すなわち、水耕液の窒素源が NO_3-N の場合には、初発 pH 4.2 の方が、また窒素源が NH_4-N の場合には、初発 pH 6.2 の方が pH の変化が大きい。これは理論的には pH の変化が大きいときほど、苗木はその場合に含まれている形態の窒素を多く吸収しているものと考えてよく、またこのように考えると苗木の生育結果ともよく対応する。

(主として水耕液の窒素形態について)

(On the relation between nitrogen sources and pH of culture solution).

NO_3-N						NH_4-N					
pH 6.2			pH 4.2			pH 6.2			pH 4.2		
Max.-Min.	Average		Max.-Min.	Average		Max.-Min.	Average		Max.-Min.	Average	
13.5—5.5	9.0—4.0	12.2—4.9	14.0—5.9	9.0—4.0	11.7—5.0	14.0—5.7	10.0—4.6	11.5—5.1	12.0—5.5	9.0—3.7	10.2—4.6
29.5—55.0	22.0—37.0	25.2—43.9	50.0—136.5	39.0—119.0	44.2—130.6	50.5—152.5	37.0—107.5	41.0—123.2	52.0—169.0	40.0—80.0	47.0—114.4
16.0—49.8	9.5—31.6	13.0—39.0	37.0—130.7	26.5—115.0	32.5—125.6	40.0—147.7	24.5—101.8	29.5—118.1	43.0—163.5	29.5—83.0	36.8—109.8
29			91			86			80		



また第1図にみると、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の等量混合区の水耕液のpHの変化は、いずれの初発pH区の場合にもすべて酸性側に变化した。このことは深城²⁶⁾(1930)が水稻の水耕実験で測定した結果と一致する。この現象は、植物が $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ との両形態の窒素の供給を同時に受けた時は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の方が、 $\text{NO}_3\text{-N}$ よりも多く吸収されるのが、一般的傾向といわれている²⁷⁾ことからよく理解される。

また、初発pH 6.2区の水耕液のpHの変化の方が、初発pH 4.2区のものより大きい。このことから $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸収利用はpH 6.2の場合における方が、pH 4.2の場合にくらべてよいものと考えられる。

なお、水耕液のpHの変化を季節別にみると、4～5月よりも6月から8月中旬にかけてのスギ苗の生育最盛期の方がpHの変化が大きく、9月になるとふたたび小さくなっている。

なお、最良の生育を示した $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 混合区のスギ苗は、苗畑で育成した苗木と比較した場合、同等またはより以上の良好な生育を示した。したがって、著者が試作したところの $\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{NH}_4\text{-N}$ の両形態の窒素を窒素源とした、第2表(3)に示す水耕液を、12l容ワグネル鉢に入れて、液の更新を週に2～3回行なつたこの水耕法は、少なくともスギ苗に対して好適な水耕法の1つであると考えられる。ただし、鉄源については、塩化鉄を用いるよりは、後述の(p.54 実験—20)クエン酸鉄を用いる方が適当である。

III 考 察

ひとくちに窒素肥料といつても、それが施用される時の形態は有機体の場合もあれば無機体の場合もあり、それぞれ異なるが、これらはすべて土壌中で分解されて、植物が吸収利用するときの窒素形態は $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ の両形態であることは、今さらいうまでもないが、いずれの形態の窒素をよく吸収するかについては、古くから多くの論争が繰り返されてきたところである。1930年代にはいつてPIRSCHLE²⁹⁾(1936)、その他多くの学者により $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ との効果は他のいろいろな条件により支配されることを指摘してから同種の研究が相ついで発表され、坂村³⁰⁾(1938)、³¹⁾(1958)などにより総説された。これらを要約すると、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ の両形態の窒素の吸収利用には、植物自体の選択性や植物の生育期、植物体内の栄養状態の内的条件のほかに、培養液のpH、リン酸、カリ、石灰などのほかのイオンの濃度、鉄、Mnなどの重金属の共存など外的因子が相互に関係していて、複雑な生理的現象を呈しているものと考えられている。

このように、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ とは程度の差はあつても、とにかく両者とも吸収され、有機窒素化合

物に同化されるのであるが、この両形態の窒素を化学的見地からみると、両者は全く正反対の性質をもっている。すなわち、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は N の最も酸化された形であり、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は最も還元された形である。また NO_3^- は anion, NH_4^+ は cation であり、したがって前者は生理的アルカリ性を、後者は生理的酸性を示すものである。両者のこれらの基本的性質の相違から、植物体に吸収利用される機作にいろいろの相違を生じ、植物体の生育にも不同を生じることになるものと思われる。

したがって水耕液の窒素源としても、両形態の窒素のいずれか片方に偏しないで、両形態の窒素が混合している方が、いかなる条件にもよく適応して、植物の生育に適しているものと思われる。このように考えると、スギ苗の生育は水耕液が $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ とが等量混合している場合の方が、いずれか一方の形態の窒素を含む場合よりも良好であつたという、実験—2の成績はきわめて妥当なものであるように思われる。

第2節 苗木の根系媒質に対する通気の影響

実験—2においてのべたように、スギ苗とアカマツ苗の水耕実験を行なつたとき、スギ苗に枯損苗がでなかつたのに反して、アカマツ苗は7月から8月にかけて、約80%程度の枯損苗を生じた。枯損したアカマツ苗を注意してみると、その根系が水耕液の表層にだけ密生して水耕液中深くはほとんど生育できないでいたことが見受けられた。写真Aはかろうじて枯損を免れた苗を撮影したもので、これを見るとよくその状態がわかるであろう。

この原因として、アカマツは天然には比較的好氣的土壤の所によく生育することから、水耕液中の酸素不足によるものではないかという疑いを抱いて、試みに WINKLER 氏法の朝比奈変法³²⁾で水耕液中の溶存酸素を定量してみると、 $1.8\sim 2.5\text{ mg/l}$ 程度に溶存酸素が著しく減少する事実が認められた。そこで、著者は夏期水耕液の温度が上昇し、水耕液中の溶存酸素が過度に減少することが生育障害を示すおもな原因ではないかと考えて、これを実証する目的で、実験—3～実験—6においてアカマツを中心にスギ、ヒノキ、カラマツなどを水耕した場合の通気の影響を調べ、さらにこれに関連して、第3節において根の酸素要求度や、耐湿性などについても考察することにした。

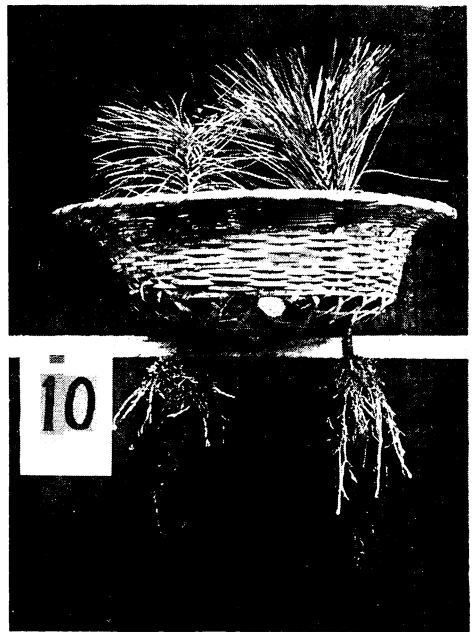


写真 A 水耕された2年生アカマツの根系
通気を行なわないと、根が水面付近に集まる
Photo A Root system of two years
Akamatsu seedling grown in culture
solution.

I 実験—3 水耕されたアカマツに対する通気効果

I—A 実験目的および実験方法

アカマツの水耕中において、人工的に通気を行ない、その生育に及ぼす影響をみるため、通気水耕実験を行なつた。

実験計画のあらましは、アカマツの満1年生苗を内径26cmのワグネル鉢に実験—2と同様の方法で水

耕して、水耕液中に空気の気泡を通じた通気区と、気泡を通じない対照区の 2 系列を設け、さらに各系列の水耕液の窒素源を $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ の両窒素源に分けた。1 区 2 鉢制として、1 鉢に 3 本の満 1 年生アカマツの苗木を板で固定した。

通気装置としては、ゴム管の側壁に 5 mm 間隔に 4 列に錐で孔をあけたものを使用した。なるべく同じ大きさの気泡を、一様に液中に拡がらせる方法に苦心したが、この方法が最も有効のように思われた。このゴム管をワグネル鉢の底部に横たえ、Air compressor で昼間約 8 時間空気を水耕液中に送った。

使用した培養液の組成は前記のスギ稚苗に用いたものと同一にした。アカマツの水耕に好適な組成を考案する必要があるとも考えられたが、通気の影響を見るためにはむしろ組成を変更することは好ましくないと考えたので、暫定的にこの液を用いたのである。培養液の反応は pH 5.4 に調節し、液の更新は週に 2 回盛夏の候は 3 回とした。実験期間は昭和 23 年 4 月 10 日から同年 10 月 14 日までの 194 日間である。なお、水耕は林業試験場の硝子室で行ない、夜間ならびに雨天、強風の日以外は室外に出した。また、実験 2 の場合と同様に、7 月中旬から 9 月上旬の高温の期間は、水耕液の温度が過度に上昇して水耕液中の溶存酸素が激減するのを防ぐためヨシズを設けた。

I—B 実験成績とその考察

各区の苗の生育状況を調べた結果を平均値で示すと第 4 表のようになる。また、第 4 表の右欄に示した通気による成長増加率を図示すると第 2 図のようになる。

第 4 表 水耕されたアカマツ 2 年生苗木に対する通気効果
Table 4. Effect of aeration for two years old Akamatsu seedlings grown in culture solution. (Average)

月 日 Date	窒 素 源 Source of nitrogen of culture solution	苗木の生体重 Fresh weight g		通気による増加率 Weight incre- ments by aeration %
		無 通 気 Non-aeration	通 気 Aeration	
4 月 4 日 Apr. 4	$\text{NO}_3\text{-N}$ $\text{NH}_4\text{-N}$	2.8 2.9	3.2 2.5	
6 月 4 日 Jun. 4	$\text{NO}_3\text{-N}$ $\text{NH}_4\text{-N}$	5.3 4.2	6.1 5.0	15.1 19.0
8 月 4 日 Aug. 4	$\text{NO}_3\text{-N}$ $\text{NH}_4\text{-N}$	10.4 0.6	11.4 0.4	9.6 27.3
9 月 4 日 Sept. 4	$\text{NO}_3\text{-N}$ $\text{NH}_4\text{-N}$	18.1 10.8	19.9 15.0	9.9 38.9
10 月 4 日 Oct. 4	$\text{NO}_3\text{-N}$ $\text{NH}_4\text{-N}$	25.8 20.0	29.4 23.5	15.0 17.5

第 4 表ならびに第 2 図からアカマツは通気によりその生育が促進される。この場合に通気の効果は窒素源で異なり、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 区の方が $\text{NO}_3\text{-N}$ 区より効果が大きい。ただし、この現象は 4 月 4 日に培養を開始して以来、8 月から 9 月にかけて顕著にあらわれ、10 月 14 日培養を打ち切った時は不明りようであつた。このことを統計的に検討し、通気区と無通気区との生体重の平均値の差についても検定を行なうと、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 区においては 8 月 4 日の測定値については 10 %、9 月 4 日の測定値については 5 % の有意水準で有意義であるが、10 月 4 日の測定値については有意性は認められなかつた。8 月から 9 月にかけて最も通気効果が大きく現われたのは、夏季には水耕液の溶存酸素が最も著しく減少するので、この時期に通気効果が最も大きく現われるものと考えられる。また、通気の影響を地上部と根系に分けて観察す

ると、根系に対して著しいように見受けられた。

以上により、実験—3において無通気の水耕法では枯損が多く、正常な培養が不可能であつたアカマツも通気を行なうことによつて正常な水耕培養が可能であることが認められた。そしてアカマツの根はスギよりも酸素要求度が高いものと考えられる。

II 実験—4 水耕されたスギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツに対する通気効果の比較*

II—A 実験目的および実験方法

実験—3において、アカマツの水耕には少なくとも夏季に通気が必要であることを認めたが、実験—4においてはアカマツのほかにもスギ、ヒノキ、カラマツを加えて、これらの4樹種の通気効果の比較を行なう目的で通気水耕実験を行なつた。

実験計画の大体は、前記の各樹種につき通気区と対照区の2系列を設けて、実験—3と同様の方法で通気水耕実験を行なつた。ただし、水耕液は窒素源として $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ との両形態の窒素を等量含んだ、第2表(3)に示す組成のものを用いた。

II—B 実験成績とその考察

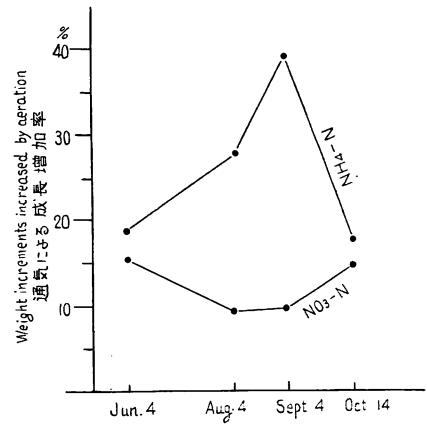
7月10日および11月10日における実験成績を要約して平均値で示すと、第5表および第3図に示すとおりである(写真—2 参照)。

第5表 水耕された苗木の通気効果(スギ、ヒノキ、アカマツおよびカラマツの2年生苗木)

Table 5. Effect of aeration on two years old seedling of Sugi, Hinoki, Akamatsu and Karamatsu grown in culture solution. (Average)

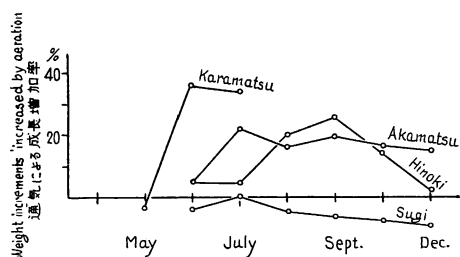
樹種 Species	通気処理 Treatment	苗木の成長 Growth of seedling					
		7月10日 July, 10		11月10日(培養終了時) Nov. 10			
		生体重 Fresh weight g	通気による 増加率 Weight increased by aeration %	苗長 Top length cm	根長 Root length cm	生体重 Fresh weight g	通気による 増加率 Weight increased by aeration %
スギ Sugi	通気 Aeration	43.0	0.2	34.0	39.9	107.9	— 9.5
	無通気 Non-aeration	42.9		35.2	37.2	119.2	
ヒノキ Hinoki	通気 Aeration	11.4	4.6	31.3	33.3	44.6	4.2
	無通気 Non-aeration	10.9		28.6	28.3	42.8	
アカマツ Akamatsu	通気 Aeration	41.5	21.7	25.4	29.3	65.5	14.5
	無通気 Non-aeration	34.1		24.1	23.2	57.2	
カラマツ Karamatsu	通気 Aeration	64.6	33.7				
	無通気 Non-aeration	48.3					

* 本実験の成績の一部を文献 33) に発表した。



第2図 水耕されたアカマツの通気効果の月別変化

Fig.2 Effect of aeration for Akamatsu seedlings grown in culture solution.



第3図 水耕された苗木の通気効果
(樹種による相違)

Fig. 3 Effect of aeration for two years old seedlings of Sugi, Hinoki Akamatsu and Karamatsu grown in culture solution.

(1) 7月10日の成績

この時季は、実験—2でのべたように、夏季水温の上昇にともなう水耕液中の溶存酸素の欠乏により、通気効果が最も高く現われる時期である。第5表および第3図によると、この時期における通気効果はカラマツが最も高く、つぎにアカマツが高く、ヒノキ、スギには効果がほとんど認められなかった。

(2) 11月10日(水耕終了時)の成績

11月10日水耕を打ち切つて生育状態を生体重量、苗長、根長などにつき調査した結果は、第5表

のとおりである。なお、カラマツは7月28日に枯死した。すなわち、7月初旬から根の発育が衰弱して黒褐色を呈し、根腐れの状態となり枯死した。これは7月にはいり高温のため溶存酸素が欠乏したのが原因と思われる。

第5表について無通気区の生体重量を見るに、スギ 119.2 g, ヒノキ 42.8 g, アカマツ 57.2 g で相当良好な生育を示し、水耕液その他の培養方法に不適當な点がなかったといえる。通気効果による生体重量の増加率はアカマツ 14.5 %, ヒノキ 4.2 %, スギ -9.5 % で通気の効果はアカマツに大きく、ヒノキは小さく、スギには負の効果が認められた。通気の影響は苗木の地上部よりも根に大きく現われ、一般に根長が長くなる。通気効果が負に現われたスギでも、第5表および写真—2によると、通気により根長は長くなっている。

(3) 通気の効果による成長増加率の月別変化

各樹種の通気の効果による成長増加率の月別変化を図示した第3図によると、通気の効果のないスギを除いてはいずれも通気効果が顕著に現われる時期がある。すなわち、アカマツは6月から7月にかけて、ヒノキは7月から9月にかけて、カラマツは5月から6月にかけて通気効果が急激に上昇し、以後しだいに下降している。したがって、通気の影響は生育の前半期において特に効果があるものと考えることができるであろう。

なお、無通気区と通気区との生体重量の平均値の差についても検定を行なった。その結果は、6月、7月におけるカラマツについては、5 % 以内の危険率で有意な差が認められた。ヒノキ、アカマツについては7月から10月までの間は10~20 % の危険率で認められ、5 % 以内の危険率で有意な差は認められなかったが、前述のような通気効果の大体の傾向は察知できるものと考えてよいであろう。スギについても検定を行なった結果は、通気効果が有意的に負とは認められなかった。すなわち、通気効果が計算上負に現われるのは見掛け上の問題である。

スギに通気効果が現われないのは、スギの根は酸素不足に対する耐性が強いことにもよるであろうが、通気方法にも欠点があるものと思われる。本実験に用いた通気装置では、気泡の発生とともに水耕液が動揺し、これにともない苗木の根系も動揺して、物理的に根系が軽度の障害を受けたものと推察される。アカマツやカラマツは根の酸素要求度が強いので、このような障害を受けても、なお通気効果が現われるものと理解される。

Ⅲ 実験—5 水耕液の窒素形態と通気の効果 (アカマツ) *

Ⅲ—A 実験目的および実験方法

通気の効果の最も大きいアカマツについて、水耕液の窒素形態が $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ とでは異なり、通気の効果は $\text{NH}_4\text{-N}$ に大きいことを実験—2において認めたが、昭和24年度においては窒素源を $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ のほかに、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ を等量あて混合した区をさらに設け、窒素源を3種類の系列として、そのおのおのについて通気区と無通気区とを設けて、通気の実験した。1区2鉢制として、1鉢に3本の満1年生苗木を板で固定した。水耕ならびに通気の方法は実験—3と同様である。実験期間は昭和25年4月12日から同年10月16日までの187日間であつた。

Ⅲ—B 実験成績とその考察

10月10日に水耕を打ち切つた時の苗木の生育状況を平均値で示すと第6表のとおりであり、また通気の効果による生体重量の増加率の月別変化を現わせば第4図に示すとおりである。

第6表 水耕液の窒素形態と通気効果 (アカマツ2年生苗)

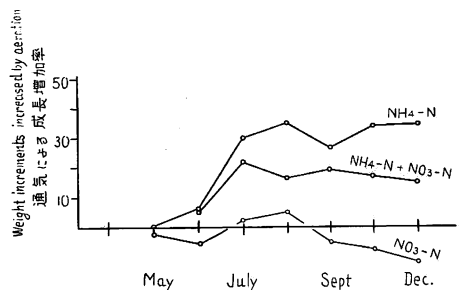
Table 6. Relation between nitrogen sources of culture solution and aeration
(Two years old seedling of Akamatsu). (Average)

窒素源 Sources of nitrogen of culture solution	通気処理 Treatment		生育状態 Growth of seedling			
			苗長 Top length cm	根長 Root length cm	生体重量 Fresh weight g	通気の効果による増加率 Weight increments increased by aeration %
$\text{NO}_3\text{-N}$	通気	Aeration	21.6	31.1	44.6	— 12.5
	無通気	Non-aeration	23.2	27.1	51.0	
$\text{NH}_4\text{-N}$	通気	Aeration	23.3	27.3	64.1	33.3
	無通気	Non-aeration	22.2	25.6	48.1	
$\text{NO}_3\text{-N}$ $\text{NH}_4\text{-N}$	通気	Aeration	25.4	29.3	65.5	14.5
	無通気	Non-aeration	24.3	23.2	57.2	

第4図によると、通気の効果は水耕液の窒素源の形態によつて異なる。すなわち、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の水耕液の場合に大きく、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の水耕液の場合に小さく、この点実験—3の実験結果を再確認することができた。そして、 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ とが混在している場合の通気効果は、両者の中間であつた。

通気効果が $\text{NH}_4\text{-N}$ に大きいことは、すでに ARRINGTON & SHIVE³⁴⁾ (1937), ARNON³⁵⁾ (1937) がそれぞれトマト、大根について認めているが、著者のアカマツについての実験でも同様の結果を得た。これはおそらく、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の時は硝酸の酸化能

により細胞内の酸化作用が酸素の供給がなくても行なわれ、すなわち、一種の無気呼吸が行なわれるものとする。すなわち、GILBERT and SHIVE³⁶⁾ (1942), ³⁷⁾ (1945) も指摘したように、硝酸が根の呼吸作

第4図 水耕液の窒素形態と通気効果
(アカマツ2年生苗)Fig. 4 Relation between nitrogen sources of culture solution and aeration
(Two years old Akamatsu seedling).

* 本実験の成績の一部を文献33)に発表した。

用に対する酸素の給源として役だつものと考えられるであろう。これに反して $\text{NH}_4\text{-N}$ の場合には、このような酸化機能がないために、通気の効果が大いものと考えられる。

IV 実験—6 水耕液の窒素源が $\text{NH}_4\text{-N}$ である場合の通気ならびに Mn 添加の影響（スギとアカマツとの比較）

IV—A 実験目的および実験方法

実験—4 の水耕実験において、窒素源として $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の両形態の窒素を含む水耕液を用いた場合に、スギには通気効果を認めることができなかった。このことは本節IIにおいてのべたように、通気の方法に難点があるにしても、なおスギの根の酸素要求度がアカマツなどに比べて低いことによるものであると考えられる。本実験は以上のような性質をもっているスギではあるが、通気効果の大きく現われる $\text{NH}_4\text{-N}$ を含む水耕液を用いた場合においても、なお通気効果が現われないかどうかをみる目的で行なつた。

実験計画のあらましは、スギ 1 年生苗と、比較のためにアカマツ 1 年生苗とを $\text{NH}_4\text{-N}$ を含む水耕液で培養し、通気区と無通気区の 2 系列を設け、さらに参考のため通気と同様の効果があるといわれる⁸⁵⁾ Mn 塩添加の効果を予備的に検知するために、それぞれの系列を Mn 添加区と Mn 無添加区（対照区）とに分け、合計 4 試験区を設け、通気ならびに Mn 添加の効果を実験した。水耕、通気など実験の方法は実験—4 と同様で、実験期間は昭和 27 年 4 月 12 日から同年 9 月 16 日までの 157 日間である。

なお、Mn は硫酸マンガン MnSO_4 を Mn_2O_3 として 3.0 p. p. m. 相当量を添加したが、添加区のスギの中には葉先 5 mm ていどの部分がやや橙—黄色に変化した苗があり、明らかに Mn 過剰障害のように思われたので、それ以後は Mn 添加量を 1.5 p. p. m. として、水耕液の更新時ごとに添加した。

IV—B 実験結果とその考察

9 月 16 日水耕を終了した時の苗木の生育状況を平均値で示すと第 7 表のとおりであり、また通気ならびに Mn 添加の効果による生体重量の増加率の時期的変化は、第 5 図に示すとおりである。

これらによると、スギは最も通気効果の期待できる $\text{NH}_4\text{-N}$ を単独に含む水耕液中においても、通気ならびに Mn 添加の効果が現われなばかりでなく、マイナスの効果を示している。これに対してアカマツには著しい効果が認められ、また Mn 添加の効果もプラスに現われている。すなわち、スギは水耕

第 7 表 水耕液の窒素源が $\text{NH}_4\text{-N}$ の場合における通気および Mn 添加の影響

Table 7. Influence of aeration and Manganese on growth of two years old Sugi and Akamatsu seedling grown in culture solution containing $\text{NH}_4\text{-N}$ as source of nitrogen.

処 理 Treatment	ス ギ			ア カ マ ツ		
	苗長 Top length cm	生体重 Fresh weight g	生体重指数 Index of fresh weight	苗長 Top length cm	生体重 Fresh weight g	生体重指数 Index of fresh weight
通気 Aeration	36.6	88.4	(83)	15.8	39.4	(177)
通気および Mn 添加 Aeration and supply of Mn	35.7	87.7	(83)	13.7	32.9	(148)
無通気で Mn 添加 Non-aeration and supply of Mn	36.5	94.0	(89)	15.3	23.2	(105)
無通気(対照) Non-aeration (Control)	9.0	106.0	(100)	14.1	22.2	(100)
生体重に及ぼす通気効果 Effect of aeration on weight growth		—6.6%			+77.4%	
生体重に及ぼす Mn 添加の効果 Effect of Mn on weight growth		—5.1%			+26.3%	

液中で普通におこる酸素欠乏の状態に対しては、ヒノキ、アカマツ、カラマツと異なり障害を受けることなく、きわめて耐性強いものと考えられる。

V 実験—7 苗木の還元的土壌に対する抵抗性

V—A 実験目的および実験方法

実験—4～6の結果によると、スギは水耕時における通気効果がないことが認められた。すなわち、スギの根系は還元的媒質にもよく耐えて生育する特性があるものと考えられるが、これをさらに別の方法で証明したいと考え、つぎのような(a)、(b)の2種類の実験を行なった。

その方法は、(a)の実験ではワグネルポットを8個用意して、これに林業試験場目黒苗畑の土壌をつめ、スギおよび比較のためヒノキ、アカマツ、カラマツの1年生苗を3月12日に植栽し土壌の含水量の約50%の含水量を目標に灌水して正常に生育させた後、7月10日から土壌水分を含水量の100%ちかくまで灌水して飽水状態におき、これら4樹種の耐湿性を苗木の生育状況の変化を観察することにより比較した。

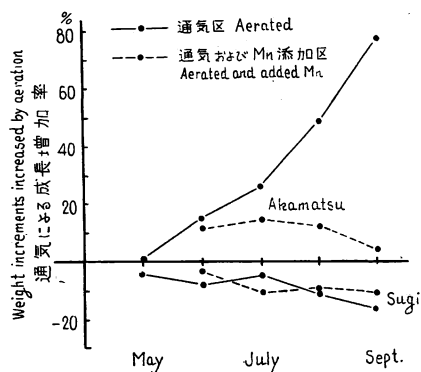
また、(b)の実験では四角のスギ板製の根箱(縦横30cm、高45cmの大きさで、一方の側面が根系を観察しやすいように、とりはずしができるように作製した)の底の部分に、排水のため鹿沼土を約2cm敷き、その上部に黒土15kgとデンプン300g(黒土の約2%相当量)を混合したものを充填して還元状態とし、さらにその上部には対照のため通気性のよい川砂をつめ、酸化的状態にしてスギおよび比較のためヒノキ、アカマツ、カラマツの2年生の苗木を6月1日に川砂の部分に植栽した。これら4樹種の苗木の根系が根箱の下半部にあるデンプンを混合した黒土層、すなわち、還元的土壌層を貫通して伸長する状況を、9月20日に根箱の側面から観察して、これら4樹種の還元的土壌に対する抵抗性を比較した。

V—B 実験成績とその考察

実験成績を要約すると第8表に示すとおりである。

実験(a)によると、スギは土壌水分を過飽和状態におくと、8月ごろから葉色が淡褐色を帯びて生育状態が不良になるが、それでも対照の8割でいどの生育を示し、還元的土壌に対する抵抗性は他の3樹種にくらべて最も強いことが認められる。これに対してカラマツとヒノキは還元的土壌に対する抵抗性がきわめて弱く、実験終了時にはカラマツは大部分、ヒノキはその一部が枯死した。アカマツは葉が黄色になり、針葉の長さも対照の苗に比較して短く、生育状態が不良であつたが枯死するには至らなかった。また苗木をポットから掘り出しその根を観察すると、カラマツとヒノキの根は著しく障害を受けており、アカマツもかなりの障害を受けているのに対して、スギの根はそれほど障害を受けていない。すなわち、今回の実験の範囲では写真—3に示すように、これら4樹種の根の耐湿性は、スギ>アカマツ>ヒノキ>カラマツの順に大きく、スギの耐湿性はきわめて強いことが認められた。

実験(b)において、苗木の根が根箱の下半部においた還元的土壌層(黒土+デンプン)を貫通する状



第5図 水耕液の窒素源が $\text{NH}_4\text{-N}$ の場合における通気ならびに Mn 添加の影響(2年生アカマツ苗)

Fig. 5 Influence of aeration and Manganese on growth of two years old Sugi and Akamatsu seedling grown in culture solution containing $\text{NH}_4\text{-N}$ as source of nitrogen.

第8表 苗木の根の還元的土壌に対する抵抗性

Table 8. Relative tolerance for reductional soil on some conifer seedlings.

実験 Experiments	調査事項 Item investigated	スギ Sugi	ヒノキ Hinoki	アカマツ Akamatsu	カラマツ Karamatsu
実験 (a) 耐湿試験 Exp. (a) Tolerance for excess-moisture soil	障害程度 Degree of injury	1952. 8. 20	+	+++	+++ 一部枯死 Partially dead
		1952. 10. 1	+	+++ 一部枯死 Partially dead	+++ 大部分枯死 Mostly dead
	飽水土壌区の苗木の生体重 対照区の苗木の生体重 Index of excess- moisture injury	83	60	41	35
実験 (b) 還元的土壌に対する 抵抗性 Exp. (b) Tolerance for reductional soil	還元的土壌層に根が貫 通する程度 Degree of development of root through reductional soil layer	貫通 Root penetrated	一部貫通 Penetrated partialy	貫通しない Root did not penetrate	

態を観察した結果は、写真—4に示すとおりである。すなわち、スギの根は還元的土壌層の下部まで貫通しているが、アカマツの根はその一部が還元的土壌層に侵入しても、そこで障害を受け伸長を停止しており、またヒノキの根はわずかに貫通しているが、スギにくらべて劣っていることが認められた。なお、カラマツは植栽直後枯死したので実験計画からはずした。

以上の (a), (b) の実験成績からスギは還元的土壌に対する抵抗性がきわめて強い特性をもっているものと考えられる。

VI 考 察

植物の根はその種類によりそれぞれ酸素要求度が異なり、通気の良否は植物の生育と深い関係があることとはいうまでもない。植物に対する通気の影響を調べるには、しばしば通気水耕法が用いられる。林木については中山³⁸⁾ (1950)、芝本ら³⁹⁾ (1952) などの研究成績があるが、いずれもフサアカシヤ、クスなどの広葉樹を対象としたものであり、針葉樹を対象としたものは荻住ら⁴⁰⁾ (1958) の通気土耕試験があるのみである。

本節の実験の範囲では、スギはヒノキ、アカマツ、カラマツなどと異なり、水耕液中において通気効果が認められない。また、飽水状態の過湿土壌やデンプン添加によつて還元的状態にした土壌に対しても他の樹種よりは障害を受ける程度が少ない。これらの実験結果からスギの根の酸素不足ないし還元的状態に対する抵抗性は、他の樹種にくらべてきわめて強いものがあり、スギの生理的特性の1つであると考えることができる。スギがBe型ないしB_F型土壌⁴¹⁾のような還元的傾向の土壌の所によく生育するのも、上述のような特性によるものと理解される。

これに対して、カラマツは地下水位の高い所では心腐れ病が発生することが多く、またアカマツは尾根筋の酸化的土壌の所に好んで更新する事实は、これらの樹種の根の酸素要求度が高いことを示すもので、同時にこれらの樹種が水耕時において通気効果の大きいことによつてもよく理解される。

第3節 苗木の根系の呼吸

前節においてスギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツなどの根系媒質に対する通気効果は、樹種により相違することが認められた。このことはまた、これらの樹種の根の酸素欠乏に対する耐性の強弱をもあらわすものとも考えられる。この現象は、根の呼吸強度がこれらの樹種により相違することにも起因するのでは

ないかと考えて、根の呼吸に関する 2, 3 の実験を行なつた。実験は主としてスギとアカマツとを対照的に行なつたが、その理由はスギは沢筋のやや過湿の場所でもよい成長を示すのに対して、尾根筋の土壌で乾燥している場所では成林が困難であるが、アカマツは乾燥地でもよく成林するという事実から、スギの根の呼吸の強さはアカマツよりも弱いのではないかと考えたからである。

I 実験—8 水耕液の溶存酸素が常態の場合のスギ、アカマツの根の呼吸の比較*

I—A 実験目的および実験方法

スギ、アカマツの根の呼吸度を比較するため、根による水耕液中の溶存酸素の呼吸消費量（これはほぼ呼吸量と見なして差しつかえないであろう）を測定した。

実験方法の概要は、あらかじめ水耕培養して準備しておいたスギおよびアカマツの 2 年生苗木を約 1l 容の広口ビン（外側は黒いエナメルを光線がはいらぬように塗つてある）に入れ、木製のふたで固定す

第 9 表 水耕液中の溶存酸素が常態の場合の根による酸素消費量

Table 9. Dissolved oxygen consumption by root of two years old seedlings of Sugi and Akamatsu (In case of normal dissolved oxygen level).

実験番号 No of experiment	樹 種 Species	供 試 苗 木 の 重 量 Size of seedling			ポット内の溶存酸素(p.p.m.) Dissolved oxygen content in pot (O ₂ in p.p.m.)			絶対乾細根 1 g あたりの酸素 消費量 Dissolved oxygen consumption (p.p.m.) (per 1 g of dry fine root)	備 考 Remarks
		苗木の部分 Part of seedling	生 体 重 Fresh weight g	絶乾重量 Dry weight g	実験開始時 (A) Initial value	3時間後 (B) After 3 hours	消費量 (A) - (B)		
1	スギ Sugi	T. T.R. F.R.	37.5	0.8103 0.5752	8.1	3.7	4.4	7.6	水温 26°C
	アカマツ Aka- matsu	T. T.R. F.R.	12.0	0.5735 0.2792	8.1	5.2	2.9	10.4	
2	スギ Sugi	T. T.R. F.R.	37.5	0.6937 0.7135	7.0	2.2	4.8	6.7	水温 26.5°C
	アカマツ Aka- matsu	T. T.R. F.R.	14.0	0.4569 0.4497	7.0	3.2	3.9	8.6	
3	スギ Sugi	T. T.R. F.R.	61.5	2.6020 1.1077	7.9	0.9	7.0	6.3	水温 27~ 28°C
	スギ Sugi	T. T.R. F.T.	53.0	2.7956 1.0307	7.9	2.4	5.5	5.2	
	アカマツ Aka- matsu	T. T.R. F.R.	13.5	0.7497 0.0815	7.9	5.2	2.7	32.9	
	アカマツ Aka- matsu	T. T.R. F.R.	16.0	1.8996 0.3299	7.9	3.0	4.9	14.9	

注 N. B.: T.: 苗木の地上部 Top of seedling, T. R.: 直根 Tap root,
F. R.: 吸収根 (細根) Fine root.

* 本実験の成績の一部を文献 50) に発表した。

る。このポットを台秤上にのせて、水耕液をサイフォンを用いて静かに 1,000 g 入れる。なお、水耕液中の溶存酸素はあらかじめ測定しておく。つぎに手早く流動パラフィンで広ロビンの液面をおおい、空気と遮断して 3 時間培養したのちに、水耕液の一部をサイフォンを用いて酸素ビンの中に静かにとり、液中の溶存酸素を分析する。そして培養前後の溶存酸素量の差を求めて、根の酸素吸収量とした。なお、苗木をいれないポットを 1 組つくり、苗木をいれたものと同様に処理してコントロールとした。

この種の実験には実験材料である苗木が正常に生育しているか、していないかによつてかなりの誤差があるものと考えられるので、供試苗の選択には細心の注意をはらい、地上部はもちろんのこと、根部の発育、健全度などもできるだけ同一なものを用い、実験材料に由来する実験誤差をなるべく避けるように努めた。

水耕液中の溶存酸素の分析は WINKLER 法を改変した朝比奈法³²⁾を用い、mg/l で表示した。また、根の酸素吸収量は 1 時間あたりの絶乾細根（表皮が木化していない部分）1 g あたりで表示した。

I—B 実験成績とその考察

実験成績をまとめて表示すると、第 9 表に示すとおりである。この表から水耕液中の溶存酸素の減量 (A)—(B) の値はスギとアカマツの間に一定の傾向が認められないが、細根の絶乾重 1 g あたりの溶存酸素吸収量はスギよりもアカマツの方が大きかった。すなわち、水耕時の通気効果がアカマツの方がスギよりも大きかったという実験—4 の結果は、上述のアカマツの根の方がスギよりも溶存酸素吸収量が大きかったという本実験の結果によつてよく理解され、通気効果と根の酸素要求度との間には、ある生理的關係があるものと考えられる。

II 実験—9 水耕液の溶存酸素が欠乏状態の場合のスギ、アカマツの根の呼吸の比較 *

II—A 実験目的および実験方法

実験—8 において、水耕液中の溶存酸素が夏期においても 7～8 p. p. m. 程度の、すなわち溶存酸素の常態の場合におけるスギとアカマツの根の呼吸量についての実験を行ない、アカマツの根の単位重量あたりの呼吸量がスギのそれよりも大きいことを認めた。そこで第 2 段階として、溶存酸素の欠乏状態の水耕液中におけるスギとアカマツの根による溶存酸素の消費量を測定して、嫌気状態における両樹種の呼吸の模様を調べることにした。実験方法の概要は、実験—8 と同様であるが、ただ N₂ ガスを吹き込み、溶存酸素を 1 p. p. m. 以下に低下させた水耕液を用いた点が実験—8 と異なる。

水耕液中の溶存酸素量を減少させる方法については、一般に BOILING 法と N₂ ガス吹き込み法があるが、BOILING 法では溶存酸素を 4 mg/l 以下まで減少させることは困難であつたが、N₂ ガス吹き込み法によると溶存酸素を 0.4 mg/l 程度まで減少させることができた。すなわち、窒素ボンベからゴム管を通じて N₂ ガスを水中に吹き込むのであるが、ゴム管の先端にはガラスフィルターを付けて気泡がこまかくなるようにした。この場合水面と空気の接触面が大きい場合には、BOILING 法と同様に溶存酸素を 4～5 mg/l 以下に減少させることはできなかつたが、細ロビンを用いて接触面を小さくすることにより 0.4 mg/l まで減少させることができた。N₂ ガスを吹き込んだあとは速やかに流動パラフィンを加え、空気との接触を切断しておく。

II—B 実験成績とその考察

実験成績をまとめて表示すると、第 10 表に示すとおりである。これによると水耕液中の溶存酸素が 1

* 本実験の成績の一部を文献 50) に発表した。

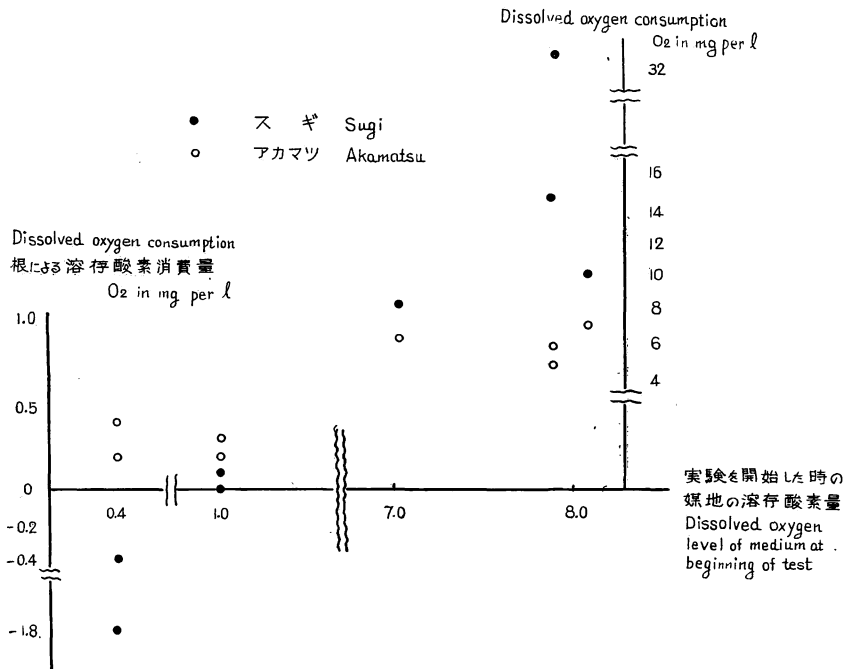
第10表 水耕液中の溶存酸素が欠乏状態の場合の根による酸素消費量

Table 10. Dissolved oxygen consumption by root of two years old seedlings of Sugi and Akamatsu (In case of deficient dissolved oxygen level).

実験番号 No. of experiment	樹種 Species	供試苗木の重量 Size of seedling		ポット内の溶存酸素(p.p.m.) Dissolved oxygen content in pot (O ₂ in p.p.m.)			絶対細根1gあたりの酸素消費量 Dissolved oxygen consumption (p.p.m.) (per 1 g of dry fine root)	備考 Remarks
		苗木の部分 Part of seedling	生体重 Fresh weight g	絶乾重量 Dry weight g	実験開始時 (A) Initial value	3時間後 (B) After 3 hours	消費量 (A) - (B)	
1	スギ	T.	51.5					
		T. R.		2.9893		0.5	0.5	水温 28°C
		F. R.		1.8483	1.0			
	アカマツ	T.	36.0					
		T. R.		2.3332		0.7	0.3	
		F. R.		1.7518				
2	スギ	T.	19.0					
		T. R.		1.5191		1.0	0	
		F. R.		0.2721	1.0			
	アカマツ	T.	14.5					
		T. R.		1.4132		0.9	0.1	
		F. R.		0.7020				
2	スギ	T.	78.0	2.1432				
		T. R.		1.2965		0.1	0.3	水温 24.5°C
		F. R.			0.4			
	アカマツ	T.	70.0					
		T. R.		2.1240		0.1	0.3	
		F. R.		0.7012				
2	スギ	T.	14.0	0.5996				
		T. R.		0.5272		0.7	-0.3	
		F. R.			0.4			
	アカマツ	T.	11.0					
		T. R.		0.6851		1.2	-0.8	
		F. R.		0.4423				

注 N.B.: T.: 苗木の地上部 Top of seedling, T. R.: 直根 Tap root,
F. R.: 吸収根 (細根) Fine root.

p.p.m. の場合には、スギはアカマツより溶存酸素の消費量が大きく、実験—8と反対の結果を得た。また、溶存酸素をさらに0.4 p.p.m. まで低下させた場合は、スギの根はこのような酸素欠乏の場合でも、なおよく溶存酸素をその極限にいたるまで吸収消費したのに対して、アカマツは逆に水耕液中の溶存酸素が増加して、酸素が液中に排出しているかのように見受けられた。このように酸素欠乏の還元的な状態における、スギとアカマツの根の呼吸の様子は、前述の実験—8の場合のような比較的酸化的状態の場合とはまったく反対の結果を示した。いまこの関係をさらに明りようにするために、実験—8および実験—9の成績を一括して図示すると第6図のようになる。これらの実験成績から、スギは水耕液中の溶存酸素が低下しても、微量の酸素をよく利用する特性があるのに対して、アカマツの根はある程度の酸素分圧がなければ、正常な呼吸作用が営まれないものと考えられる。スギはヒノキやカラマツと異なり、成長は劣るが過湿な土壌にもなおよく耐えて生育するのは、スギの根は上述のような特性があるためであると理解される。



第 6 図 スギおよびアカマツ 2 年生苗の根による溶存酸素消費量の比較

Fig. 6 Dissolved oxygen consumption by root.

Ⅲ 実験—10 アカマツの根の菌根着生部分と非着生部分との呼吸の比較 *

Ⅲ—A 実験のいとぐち、目的および実験方法

実験—9 においては、溶存酸素が 1 p. p. m. 以下の酸素欠乏状態でも、スギの根はなおよく微量の溶存酸素を消費するが、アカマツは逆に根から酸素を排出するのを見受けられた。

アカマツ苗の根は太い直根と、菌根の着生した細い吸収根の部分に大別できるが、吸収根は好気的な地表の部分によく発達するのに対して、直根は酸素欠乏と思われる下層にも伸長するのが、野外で観察される。そこで著者は、実験—9 における、少なくとも見掛けの上はアカマツの根から水耕液中へ酸素が排出されているように思われる現象は、おそらく直根の部分に関係しているのではないか、すなわち同じ根でも菌根の着生している細根の部分と菌根の着生していない直根の部分とでは、呼吸の強さが違うのではないかと考え、細根の部分と直根の部分との組織の呼吸の比較を行なった。

実験方法は正確度は劣るが、小林⁴²⁾が行なった簡便法によつた。すなわち、N/10-NaOH で微アルカリ性にした蒸留水 50 cc 中 (フェノールフタレンで呈色させておく) に 1 g の根部組織片を浸漬したのち、組織呼吸による CO₂ の排出によりフェノールフタレンの赤紅色の脱色時間を測定して、その長短により呼吸作用の強弱を表わすことにした。

実験に用いたアカマツの根部は、これを菌根のまったく着生していない直根の部分と、直根に多少菌根が着生した部分、および菌根の部分の 3 つの種類の根部組織片に分けて、これらを実験に供した。

Ⅲ—B 実験成績とその考察

* 本実験の成績の一部を文献 50) に発表した。

実験成績を要約すると第7図に示すとおりで、菌根の着生した部分の方が直根の部分より脱色時間が短く、組織呼吸が盛んであることが察知された。苗畑においても、林地においても、アカマツの菌根が土壌の最も酸化的部分である表層に限り発達したり、また過湿な土壌のところでは発達しなかつたりすることは上述のように、アカマツの菌根の呼吸作用が強いことによるものと考えられる。これに対してアカマツの直根部分は呼吸作用も弱く、したがって菌根着生部分よりは比較的還元的な土壌にも生育することができるものと思われる。またアカマツの直根が比較的酸素不足と思われる下層土にまで伸長するもの、上述の理由によるものと考えられる。

IV 実験—11 水耕液の溶存酸素の欠乏状態の場合のスギ、アカマツの直根からの酸素の排出*

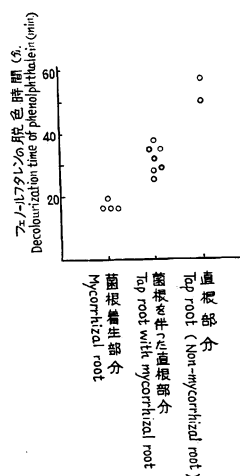
IV—A 実験のいとぐち、目的および実験方法

実験—10により、アカマツの菌根の多く着生している細根の部分の呼吸の強さは、菌根のほとんど着生していない直根の部分より大きいことを認めた。しかしこれは根を蒸留水に入れた、すなわち溶存酸素が常態の場合の現象であり、第2段階として溶存酸素が欠乏状態の嫌気的な場合においても実験を進めておく必要があると考えられる。その理由は実験—4において、アカマツは酸素が欠乏状態の時には、あたかも根から酸素を排出するような現象が見られたのであるが、もし根からの酸素排出が行なわれるとすれば、それは直根（菌根非着生部分）により行なわれるのではないかと考えたからである。そこでアカマツの直根は酸素欠乏状態になると酸素を排出するのではないかという仮説を立て、これを証明するためつぎに述べるような実験を行なった。

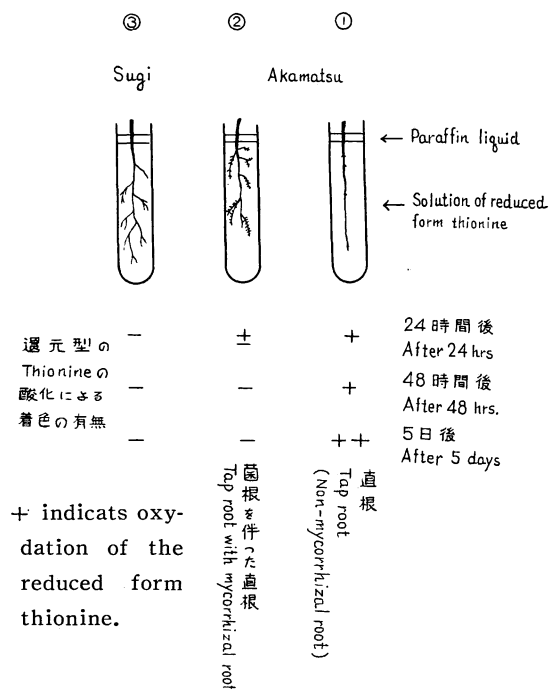
実験方法の要は、根からの酸素排出を、外界と遮断した無色透明の還元型 thionine 溶液中に根を浸漬し、還元型 thionine が紫色に着色して酸化型の thionine に変化するかどうかを観察することによって、検知することにした。

実験の順序は、大型試験管（内径 3.5 cm, 高さ 22 cm）を8本用意して、第8図に示すように、

* 本実験の成績の一部を文献 50) に発表した。



第7図 アカマツの根の部分による組織呼吸の相違
Fig. 7 Tissue respiration of tap root (non-mycorrhizal root) and mycorrhizal root of one year old Akamatsu seedling.



第8図 アカマツの根による還元型 thionine の酸化
Fig. 8 Oxydation of the reduced form thionine by the tap root of two years old Akamatsu seedling.

- ① 菌根の着生した側根を除去して直根部分だけを残したアカマツ苗
 ② ①のように特に菌根の着生した側根を除去しない無処理の完全な根系のアカマツ苗
 ③ 比較のための普通のスギ苗

の3種類の苗を試験管に入れ、これに還元型 thionine 溶液を空気をしや断しながら加え、そして流動パラフィンで thionine が空気により酸化されて淡紫色に変化するのを防いだ。そして試験管を暗所において、24時間、48時間および5日後の状況を観察した。

なお、還元型 thionine 溶液の調整方法は、酸化型 thionine 0.1g を 2l の水に溶解して、この溶液にガラスフィルターを使つて N_2 ガスをボンベから吹き込み、酸素分圧を低下させる。この thionine 溶液に $H_2S_2O_4$ を加えると thionine が還元されて、無色透明の還元型 thionine になる。この溶液の表面に第8図に示すように流動パラフィンを加え、外界の空気としや断しておく。

IV-B 実験成績とその考察

実験成績を要約すると、第11～12表ならびに前掲の第8図に示すとおりである。

第11表 スギとアカマツの根による還元型 thionine の酸化程度 (その1)

Table 11. Oxydation of reduced form thionine by the non-mycorrhizal root of Akamatsu seedling. (1)

試験管番号 No. of test tube	樹 種 Species	根 の 処 理 Kinds of root	還元型 Thionine の色調変化の程度 Degree of oxydation of reduced form Thionine			
			24時間後 After 24 hours	48時間後 After 48 hours	5 日 後 After 5 days	最終色調 Color after 5 days
1	アカマツ Akamatsu	直根のみ (菌根除去) Tap root (Non- mycorrhizal root)	+	++	++	[5.0 P ⁿ] 9/2
2	アカマツ Akamatsu	同 上 Ditto	+	++	++	[7.5 P ⁿ] 10/4
3	アカマツ Akamatsu	同 上 Ditto	+	++	++	[5.0 P ⁿ] 8/2
4	アカマツ Akamatsu	無処理 (直根と菌根) Tap root with mycorrhizal root	—	—	—	MUNSELL の Color book による。
5	アカマツ Akamatsu	同 上 Ditto	±	—	—	
6	スギ Sugi	無処理 Non-mycorrhizal fine root	—	—	—	
7	スギ Sugi	同 上 Ditto	—	—	—	
8	苗木なし Blank		—	—	—	

備考 —……無 色, ±……やや染色, ++……青色がやや見える, +++……青色が明りよう。

これらをみると、菌根の着生した側根を除去して、直根だけになったアカマツ苗を挿入した試験管のみ淡紫色に着色し、還元型 thionine の一部が酸化型 thionine に変化していることが観察された。このことはアカマツの直根はたしかに酸素欠乏状態の場合には、根から酸素を排出して還元型 thionine を酸化しているように見受けられ、実験—9において溶存酸素が欠乏状態の場合に、あたかもアカマツの根が水耕液中へ酸素を排出しているように見受けられた現象は、この直根部分 (菌根非着生部分) によつて行なわれているものではないかと考えられ、著者が設定した仮説はほぼ正しいものであるように思われる。そして菌根の着生した細根を除去しなかつたアカマツ苗を挿入した試験管が、着色しないのは、一度直根により排出された酸素が直ちに呼吸作用の強い菌根の着生した細根により、呼吸消費されてしまった

第12表 スギとアカマツの根による還元型 thionine の酸化程度 (その2)

Table 12. Oxydation of reduced form thionine by the non-mycorrhizal root of Akamatsu seedling. (2)

試験管番号 No. of test tube	樹 種 Species	根 の 処 理 Kinds of root	還元型 Thionine の色調変化の程度 Degree of oxydation of reduced form Thionine			
			24時間後 After 24 hours	48時間後 After 48 hours	5 日 後 After 5 days	最終色調 Color after 5 days
9	アカマツ Akamatsu	直根のみ (菌根除去) Tap root (Non- mycorrhizal root)	±	+	++	[10.0P ^B] 9/4
10	アカマツ Akamatsu	同 上 Ditto	+	++	++	[7.5 P ^B] 9~ 8/4
11	アカマツ Akamatsu	同 上 Ditto	±	+	++	[7.5 P ^B] 9/4
12	アカマツ Akamatsu	無処理 (直根と菌根) Tap root with mycorrhizal root	±	—	—	MUNSELL の Color book による。
13	アカマツ Akamatsu	同 上 Ditto	—	—	—	
14	スギ Sugi	無処理 Non-mycorrhizal fine root	—	—	—	
15	スギ Sugi	同 上 Ditto	—	—	—	
16	苗木なし Blank		—	—	—	

備考 —……無 色, ±……やや染色, +……青色がやや見える, ++……青色が明りよう。

めであると考えられる。また、スギの根も還元型 thionine を着色させなかつた。

なお、還元型 thionine が着色することは、根からの酸素排出の直接的証明にはならないが、酸素排出の可能性は考えられる。要するに、アカマツの直根部分は酸素欠乏状態の場合には、一時的な適応現象として外界を酸化してゆく作用があるものではないかと考えられるが、今後の確認実験にまちたい。

V 考 察

実験—8～11について総合的に考察、検討を加えてみることにする。

(1) 実験—8においては、根系媒質の酸素含有量が7～8 p. p. m. で、常態と思われる水耕液中での、スギとアカマツの根の呼吸作用を比較したところ、アカマツの根はスギからも酸素消費量が大きいことが認められた。このことはスギとアカマツとを水耕培養した場合に、その通気効果がスギよりもアカマツの方に大きく現われる実験—4の成績をよく説明しているように思われる。そして実験—10の成績からアカマツの根がスギよりもその呼吸作用が強いということはアカマツの菌根の呼吸作用が強いということに起因しているものと考えられる。

(2) イネやヤナギ、あるいは多くの沼沢植物は、酸素の不足ないし欠乏状態の根系媒質に発育するものである。これらの植物の根はその呼吸に必要な酸素の供給を十分に根系媒質より受けることが困難なため、地上部から、茎、根の通導組織を経て根の末端まで移行してくる酸素を消費して、呼吸作用を営むことが多くの学者により指摘されてきた^{44) 45)}。

いまこの点を追究した吉原ら⁴⁶⁾(1953)の研究成績をみると根の呼吸に必要な酸素がもし地上部から移行するものであれば、地上部を切断した場合の根は、地上部からの酸素の供給を受けることができないため、その呼吸に必要な酸素を根系媒質にあおがなければならないので、根を切断しない場合より酸素の消費量が多いはずであると考え、実験—8と同様の方法でイネやヒエなどについて実験を行なったところ、

根を切断した場合は根を切断しない場合よりも、著しく酸素消費量の大きいこと、およびイネは酸素分圧が 3 mg/l 、ヒエは 5 mg/l 以下に低下すると根からの酸素の排出が行なわれることを認め、これらの植物は根の呼吸に必要な酸素を、地上部に求める種類のものであることを指摘した。

実験—9における実験成績と上記吉原ら⁴⁶⁾の実験成績を比較考察すると、アカマツが根から酸素を外部に排出しはじめる酸素分圧の限界点は、イネやヒエに比べてかなり低い点にあるものと考えられる。そして根を切断した場合と、切断しない場合の酸素消費量の差はわずかであるので（実験成績省略）、地上部からの酸素の移行の程度は、林木の場合はイネやヒエにくらべて弱いものであると考えられる。

しかし実験—9によれば、とにかくアカマツはその根系媒質が著しい酸素欠乏の状態になると、根から外部への酸素排出が行なわれているような現象が認められたのである。LEYTON⁴⁷⁾ (1957) もヤナギやカバの根について、やはり酸素の排出を認めているが、その根部組織には特別の酸素運搬機能が認められないともいつている。そしてこの酸素は植物体内からの内部供給であることに相違ないのであるが、その給源が地上部から根部へ移行してくるものか、あるいは無気呼吸（分子間呼吸）によるものかは今回の実験の範囲では不明である。

(3) これに反して、スギは実験—9によれば、少なくとも酸素分圧が 0.4 mg/l のきわめて酸素の欠乏状態においても、その根はなおよく微量の酸素を吸収、消費していることが認められた。このことはスギがヒノキやカラマツなどと異なり、比較的過湿土壤にもよく耐えて生育している現実の一端をよく説明しているものと考えられる。

スギの根が根系媒質の酸素欠乏にもよく耐えるということは、実験—9および実験—11の成績によると、根からの酸素排出が行なわれているような現象も認められないので、イネやヒエなどのように、呼吸に必要な酸素を地上部から供給されるのではなくて、スギの根自体が酸素欠乏の根系媒質から、微量の酸素をその極限にいたるまで吸収する特性があるためであろうと考えられる。

(4) アカマツの根は一般に顕著な直根 Non-mycorrhizal root と菌根の付着した側根 Mycorrhizal root からなるが、上述の根からの酸素排出はアカマツの直根により行なわれ、菌根の着生した細根は呼吸作用が強く酸素を消費するのではないかと仮説をたて、実験—11を行なつたのであるが、その成績はこの仮説のほぼ正しいことをよく示してくれたわけである。すなわち、アカマツの根は少なくともその呼吸機能に関しては、分化が行なわれているものと考えられ、菌根の着生した Mycorrhizal root は好氣的な根系媒質中に伸長し、スギの根よりも強い呼吸を行ないながら、養分ならびに水分を吸収し、Non-mycorrhizal root すなわち、直根は垂直方向に、しだいに酸素欠乏の根系媒質中に伸長してゆくが、その際酸素欠乏に耐えてよく伸長してゆくのは、三井⁴⁸⁾ (1949)、熊田⁴⁹⁾ (1949) らがイネの根について指摘した性質、すなわち根から酸素を排出して根系媒質を酸化しながら伸長してゆく性質と、類似の性質がアカマツにあるからではないかと思われるが、今後さらに研究を進める予定である。

このように考えると、アカマツは水耕実験によれば通気効果が大きく、したがって現実には好氣的な土壤条件である乾燥地にもよく生育しうる反面、その生育状態は必ずしも良好ではないが、湿地などにも成立している現実の姿をよく説明することができるように思われる。すなわち、アカマツの根には Non-mycorrhizal root と Mycorrhizal root との2種類の部分があることによつて、生理的に強い Plasticity をもっているものということができるであろう。

第4節 苗木の耐酸性と可溶性 Al に対する抵抗性

酸性土壌の有害原因は高濃度の水素イオンのほかに、土壌の酸性化に伴い溶出する Al イオンの害作用によるものであるといわれ^{51)~53)}、また、耐酸性の強い植物は同時に Al に対する抗毒性も強く、相見⁵²⁾ (1952) によれば両者は相対的關係にあるといわれている。

著者はわが国の苗畑土壌には強酸性で、可溶性 Al の多い土壌も多く、育苗成績に悪影響を及ぼしている場合もあることを認めたので、従来針葉樹のうちでは酸性に弱いとされているスギ^{5) 54)}と、比較的強いとされているヒノキの苗について、まず実験の順序として、耐酸性についての従来の成績を追試したのち、Al に対する抗毒性について比較実験を行なった。

I 実験—12 スギとヒノキの耐酸性の比較 (水耕実験)

I—A 実験目的および実験方法

本実験はスギとヒノキの稚苗の水耕培養を行ない、水耕液の反応を pH 3, 4, 5, 6 の4段階にして、反応に対する影響、とくに強酸性反応に対する抵抗性を調べる目的で行なった。

約 9 l 容の陶器製の水カメ (直径約 22 cm, 高さ 24 cm) を用い、1鉢に4本の2年生苗を板で固定して水耕培養を行ない、培養液の pH を N/10-H₂SO₄ および N/10-NaOH で、pH 3, 4, 5, 6 にそれぞれ調整して4試験区を設けた。使用した培養液は実験—2に用いた液と同様である。水耕液の更新は週に2~3回行なつて、各試験区の pH の変化を ± 0.2 以内にとどめたが、夏季は 0.2 以上になった。

I—B 実験成績とその考察

4月8日から水耕を開始して以来、各試験区の苗木は順調な生育を示したが、8月にはいり pH 3 区の苗にかなりの枯損苗が生じたので、7月8日の測定値をもつて実験成績の大体の傾向をみることにした。7月8日の測定を平均値で表示すると第13表のとおりである。第13表の成長量の指数をみてもわかるよ

第13表 スギとヒノキの耐酸性の比較 (水耕実験による)

Table 13. Relative tolerance for acidic root medium on two years old Sugi and Hinoki seedlings (Water culture). (Average)

調査時期 Dates	調査項目 Item investigated	スギ Sugi				ヒノキ Hinoki			
		pH of culture solution				pH of culture solution			
		3	4	5	6	3	4	5	6
4月8日 (水耕開始時)									
Apr. 8	苗長 Length cm	12.8	13.1	13.5	12.5	14.2	14.1	14.2	14.6
At beginning of culture	生体重 Fresh weight g	5.4	5.3	5.4	5.1	2.3	2.3	2.4	2.3
7月8日									
July 8	苗長 Length cm	18.2	26.0	27.0	22.5	16.6	19.5	17.2	18.8
	生体重 Fresh weight g	15.2	28.5	29.9	21.1	4.7	10.8	6.3	7.9
成長増加量 Increments	苗長 Length Index cm	5.4 (40)	12.9 (96)	13.5 (100)	10.0 (74)	2.4 (44)	5.4 (100)	3.0 (56)	4.2 (78)
	生体重 Fresh weight Index g	9.8 (40)	23.2 (95)	24.5 (100)	16.0 (65)	2.4 (28)	8.5 (100)	3.9 (46)	5.6 (66)

うにスギ苗では苗長、生重量ともその最大値が pH 5 であるのに対して、ヒノキ苗ではその最大値が pH 4 にあらわれる。すなわち、ヒノキの方がスギよりも耐酸性が強く、従来の説を再確認することができた。

II 実験—13 スギとヒノキの生育に及ぼす Al の影響 (水耕実験)

II—A 実験目的および実験方法

スギおよびヒノキの稚苗の生育に及ぼす Al イオンの影響を調べる目的で、Al を添加した水耕実験を行なった。

実験計画の概要は、これら両樹種ごとに Al 添加区と対照区との2系列を設けた。Al の添加は初めは Al_2O_3 が 15 p. p. m. になるよう添加したが、この程度の Al 濃度では Al の障害作用が外見的にはほとんど認められなかつたので、8月1日から Al 濃度を2倍として 30 p. p. m. Al を添加して実験を進めた。

水耕容器は2 l 容(内径 15 cm, 高さ 15 cm)の陶器で、これに各3本の2年生苗を板に綿栓で固定して、昭和26年4月28日から同年10月6日までの170日間にわたり水耕培養した。使用した水耕液は Knop 液を構成する塩類を基礎として著者らが改変した第2表(3)に示す液である。Al の添加にあつては McLEAN and GILBERT⁵⁵⁾(1927)の Alternating solution method を用いた。すなわち、Al が水耕液中の KH_2PO_4 により AlPO_4 となつて沈殿するのを防ぐため、1週間のうち前半の3~4日間には、各区とも水耕液中から KH_2PO_4 を除き、Al 添加区には Al を所定の濃度になるように添加した。そして後半の3~4日間には両区とも KH_2PO_4 を除くことなく完全水耕液で培養し、Al 添加区にも Al を添加しなかつた。

なお、水耕液の pH は $\text{N}/10\text{-H}_2\text{SO}_4$ を用いて pH 5.2 に調節し、水耕液の更新は週に2~3回、盛夏の候は毎日更新した。また、盛夏の候は10時半ごろから3時半ごろまではヨシズを設けて、水耕液の液温上昇による障害を防いだ。

II-B 実験成績とその考察

10月6日の水耕終了時における苗木の生育状態を平均値で示すと第14表に示すとおりである。

第14表 スギとヒノキの Al の毒性に対する抵抗性の比較(水耕実験による)

Table 14. Tolerance of two years old Sugi and Hinoki seedlings for aluminium toxicity (Water culture test). (Average)

樹種 Species	処 理 Treatment	苗 長 Length cm	生 体 重 Fresh weight g	指 数 Index	根元直径 Basal diameter mm	備 考 Remarks
スギ Sugi	Al添加区 With Al	28	53±13	55	6.2	全体的にみて根系の発育が不良で8月ごろからの新根の発生は全く見られなかつた。枝葉はやや赤褐色を帯びている。
	対照区 Control	37	97±24	100	6.7	
ヒノキ Hinoki	Al添加区 With Al	25	30±6	83	4.5	
	対照区 Control	26	36±12	100	4.5	

水耕培養の容器が1.8 l で小さかつたにもかかわらず第14表に示すとおり、対照区のスギの生体重は平均 97 g, ヒノキは 36 g で、相当良好な生育を示し、この水耕培養がかなり良好な条件で正常に行なわれたことがわかるので、ここに得られた結果はかなりの信頼度をもつものと考えてよい。

スギ、ヒノキの生育に対する Al の影響は第14表に示されるとおり、スギには明らかな害作用がみられるが、ヒノキには少なくとも今回の実験の範囲(Al 30 p. p. m.) ではごく軽度の害作用しか認められなかつた。すなわち、スギの Al 添加区の苗木は7月からしだいに根系の発育が悪くなりだし、新根の発生が減り、9月には葉先が青黄色を帯び、しだいに枝葉全体の葉色がうすくなり、10月にはいと赤褐色を帯びて生育が著しく阻害されていることが観察された。10月6日水耕を終了した時の生体重量について、分散分析を行なうと、スギの場合は Al 添加による障害作用は統計的に有意であるのに対して、ヒノキの Al 添加区の苗木は外見的には特別の異状も観察されることなく、Al の有害作用は認められなばかりか、苗長ではむしろ対照のものよりわずかではあるがまさつていた。そして生体重量では、Al 添

加区の方がやや劣っていたのが、その差は統計的に有意ではなかった。

つぎに水耕されたスギとヒノキの葉の先端の一部をとり、切片を作り Haematoxylin で染色して顕微鏡下で観察したところ、皮層に接した細胞が帯紫色に染色され、Al の存在するのが認められた。そして染色された部分の帯黄紫色の濃度については、とくにスギとヒノキとの間に差異を認めなかった。しかし、Al 添加区のスギは帯黄紫色に染色された部分が対照区のスギに比べて著しく大きかったが、ヒノキについては両区の差がほとんど認められなかった。このように Al の障害を受けたスギの方が、葉部に Al をより多く含んでいることは、スギは Al を容易に吸収して苗木体内に集積し、一種の自己中毒のような現象を起こし、その結果生育障害となつて現われるものと考えられる。

Ⅲ 実験—14 スギとヒノキの生育に及ぼす Al の影響（土耕実験）*

Ⅲ—A 実験目的および実験方法

実験—13の Al を添加した水耕実験で、スギよりもヒノキの方が Al の毒性に対する抵抗性の強いことを認めたので、本実験においては、土壤に Al を添加した場合の影響をみる目的で、次の実験を行なった。

1/20,000 ha のワグネル植木鉢に林業試験場目黒苗畑の表層土をつめ、下記に示すようにそれぞれ異なる量の硫酸アルミニウム $Al_2(SO_4)_3$ を約 20 cm の深さにまぜ、A, B, C, D, E, F の 6 区を設け、1 区 2 連制として、昭和 29 年 4 月 5 日にスギとヒノキの 2 年生苗を 1 鉢あたり各 3 本植え付け、植木鉢による土耕試験を行なった。ただし、() 内数字は $Al(SO_4)_3$ の添加量である。

A. 対照区	D. 8 g Al_2O_3 添加区 (52.3 g)
B. 2 g Al_2O_3 添加区 (13.1 g)	E. 16 g " (104.6 g)
C. 4 g " (26.1 g)	F. 32 g " (209.2 g)

そして同年 10 月 24 日に栽培を終わり、苗木の苗長、生体重量などの生育状態を調査したのち、苗木体中のリン酸 (P_2O_5) と Al の含有率を測定した。苗木体のリン酸の分析にあたっては $HNO_3-H_2O_2$ による湿式灰化を行なったのち、モリブデン青法により、また Al の分析にあたっては、永原⁵⁶⁾により改良された Alminon 法を用い、いずれも光電比色計を用いて測定した。Al のほか特にリン酸を測定したのは、Al は土壤中においても植物体中においてもリン酸の一部と結合して、リン酸を不活性にし、またこのことが Al の有害原因の 1 つとして考えられているからである⁵⁷⁾。

Ⅲ—B 実験成績とその考察

昭和 30 年 12 月 8 日に植木鉢試験を打ちきり、苗木を掘りとり、その生育状態を調査し、また苗木体の地上部の P_2O_5 および Al の含有量を測定した結果は次のとおりである。

(1) 生育調査

12 月 8 日における各植木鉢の苗木について苗長・生重量を測定した結果をまとめると、第 15 表および写真—7 のとおりである。

また、対照の A 区の苗木の生重量（平均値）を 100 として、各区の平均生重量を指数であらわし、これを図示すると第 9 図に示すとおりである。

第 15 表および第 9 図からスギとヒノキの生育に対する Al の添加の影響をみると、添加された Al_2O_3 が 1 鉢あたり 2～8 g までの範囲においては、スギでは Al の添加によつて約 2 割ていど成長が衰え、

* 本実験の成績の一部を昭和 30 年度の林学会関東支部大会席上で発表した。

第15表 スギとヒノキの Al の毒性に対する抵抗性の比較(土耕実験による)

Table 15. Tolerance of two years old Sugi and Hinoki seedlings for aluminium toxicity(Soil culture test).

Plot	処理 (Al ₂ O ₃ 添加量) Al ₂ O ₃ added in g per pot	スギ Sugi						ヒノキ Hinoki					
		苗 長 Length			生 体 重 Fresh weight			苗 長 Length			生 体 重 Fresh weight		
		Pot 1	Pot 2	平均 Ave.	Pot 1	Pot 2	平均 Ave.	Pot 1	Pot 2	平均 Ave.	Pot 1	Pot 2	平均 Ave.
A	Al ₂ O ₃ 0(Control)	25.0	26.6	25.8 (100)	133	100	117 (100)	32.7	19.0	25.9 (100)	39	33	36 (100)
B	Al ₂ O ₃ 2 g	25.7	26.3	26.0 (101)	88	99	94 (80)	25.3	29.0	27.2 (105)	50	61	56 (156)
C	4	20.0	25.3	22.7 (88)	88	86	87 (74)	27.0	24.3	25.7 (99)	50	46	48 (133)
D	8	23.7	25.7	24.7 (96)	91	99	95 (81)	24.7	30.3	27.5 (106)	48	42	45 (125)
E	16	25.3	19.7	22.5 (87)	97	74	86 (74)	17.3	21.0	19.2 (74)	20	29	25 (69)
F	32	12.3	13.3	12.8 (50)	5	8	7 (6)	11.3	12.7	12.0 (46)	2	3	3 (8)

Al の障害作用が認められたのに対して、ヒノキでは Al の添加でかえって成長がよくなり、プラスの効果を示した。そして添加された Al₂O₃ が 16 g/pot になると、スギ、ヒノキともに成長が著しく阻害され、32 g/pot (F区) になるとスギ、ヒノキともにほとんど成長を停止するが枯死はしなかつた。

以上から、Al の添加が比較的少ないB, C, D区 (Al₂O₃, 2~8 g/pot) では、Al の影響はスギとヒノキとは異なり、スギにはマイナスの効果を、ヒノキにはプラスの効果を与えている。

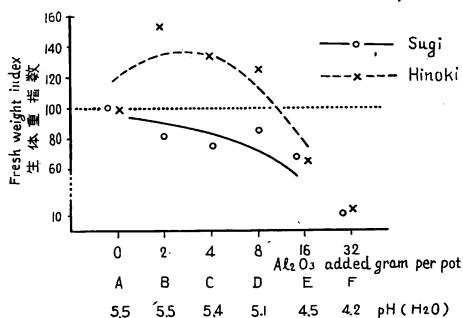
(2) 葉部における P₂O₅, Al の含有量

葉部における P₂O₅, Al の含有量を分析した結果は第10図に示すとおりである。これによると添加されたAlの量が多くなるに従い、葉部の P₂O₅ %はスギでは少なくなり、ヒノキでは多くなっている。また添加された Al の量が多くなるに従い、葉部の Al はスギでは多くなり、ヒノキでは反対に少なくなる傾向が見受けられた。

IV 考 察

(1) 実験—13の水耕実験においては、Al 添加による生育阻害の影響が、スギにもヒノキにもあらわれたが、その生育阻害の程度はスギには大きく、ヒノキにはほとんどあらわれなかつた。すなわち、Al の毒性に対する抵抗性はヒノキはスギよりも強いことが認められた。実験—14の土耕試験においては、Alの添加の少ない区を設けたため、添加された Al₂O₃ が 2~8 g/pot の範囲では、Al 添加の影響はヒノキにはプラスにあらわれた。

多くの研究者は Al の有害作用を認めているが、植物の種類によっては微量に存在する時はかえってそ



第9図 2年生のスギおよびヒノキ苗の生育に及ぼす Al の影響

Fig. 9 Tolerance of two years old Sugi and Hinoki seedlings for aluminum toxicity.

の生育に好影響をもたらすものがあることが、MIRASOL⁵⁶⁾によつて指摘されているが、ヒノキも微量の Al の存在が、その生育にプラスの効果をもたらす種類の 1 つであると考えられる。

(2) Al の生育阻害作用ないし毒作用のメカニズムについては、

- (i) Al イオン自体の有害作用
- (ii) Al イオンの溶出に伴うリン酸の固定によつて起こるリン酸欠乏の阻害作用

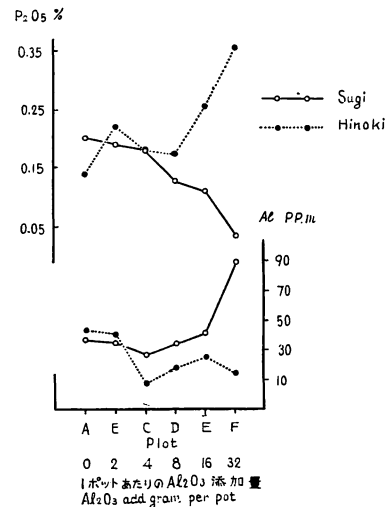
の 2 要因が指摘されている。

筆者らが、スギとヒノキについて、少しく調べたところによると、スギの葉部組織中にはヒノキにくらべて Al が多く存在し (実験-13)、またスギは Al の添加量が増すと葉部の Al % が高まる (実験-14) ことを認めた。すなわち、Al の害作用の大きいスギの方が、かえつてその葉部に Al を多く含む現象がみられる。これはスギの根の方が Al イオンを透過しやすく、そのため Al をよく吸収して、前述のように一種の自己中毒に似た現象を起こし、生育阻害を起こすのではないと思われる。

相見⁵²⁾ (1952) は耐酸性の異なる数種の作物について、Al の透過性の難易を試験し、耐酸性の弱い作物は強い作物にくらべて、Al の透過性の大きいことを明らかにしたが、スギはヒノキよりも耐酸性は弱いことが、本節の実験-12 および野外で確認されているので⁵⁴⁾、スギの方が苗木体中に Al を多く含み、Al の害作用が大きく現われた本実験の結果は、相見氏の理論とよく一致するように考えられる。

また、植物の Al の障害作用の 1 つの原因として、Al が吸収されることによつて、Al が根に集積したり、また植物体中のリン酸が、Al と結合して不活性化することがいわれている⁵⁷⁾。この関係を実験-14 における第 10 図からスギについてみると、スギは Al の添加量の増すに従い、その葉部の P_2O_5 % が少なくなっているが、これはスギは Al の吸収により、根部のリン酸が一部固定して、地上に移動しないためであろうと考えられる。そしてこの現象も、スギの Al の有害作用の 1 つの原因になっているものと思われる。しかし、ヒノキが Al の添加量の増加するに従い葉部の P_2O_5 がむしろ増加して、Al が減少していることについてはどのように解釈したらよいかわからないが、このように Al が与えられてもリン酸の吸収移動に障害が起こらないという例外的な現象が、ヒノキが Al に対する抵抗性の強い原因の 1 つになっているのではないかと考えられる。この点については、 P^{32} を用いてさらに追求してみる予定である。

(3) McLEAN and GILBERT⁵⁵⁾ (1927) は農作物について、また GILBERT and PEMBER⁵⁸⁾ (1931) は雑草についての、Al に対する抵抗性について報告している。これらによると、Al に対する抵抗性は農作物や雑草の種類によつてもそれぞれ相違があるが、ごく概観的にみると雑草の方が農作物よりも抵抗性が強いことがうかがわれる。林木の Al に対する抵抗性が、これら農作物や雑草にくらべていかなる位置にあるかは、今回の実験ではわからないが、上記両氏の報告と比較対照して考察すると少なくともヒノキは雑



第10図 Al の施用が 2 年生のスギおよびヒノキ苗の葉の Al および P 含有率に及ぼす影響

Fig. 10 Influence of aluminium supply on Al and P concentration in needles of two years old Sugi and Hinoki seedlings.

第16表 スギ、ヒノキ、アカマツおよびカラマツ2年生苗を0.2%硫酸アルミニウム溶液に浸漬した場合の障害程度

樹 種	実験番号	測 定 月 日 () 数 字 は 累 計 日 数																		
		7月 27日 (1)	28日 (2)	29日 (3)	30日 (4)	31日 (5)	8月 1日 (6)	2日 (7)	3日 (8)	4日 (9)	5日 (10)	6日 (11)	7日 (12)	8日 (13)	9日 (14)	10日 (15)	11日 (16)	13日 (18)	14日 (19)	15日 (20)
スギ	No. 1								+	+	+	+	+	+	++	+++	+++	++++	++++	+++++
	No. 2								++	++	++	++	++	++	++	+++	+++	++++	++++	+++++
	No. 3								++	++	++	++	++	++	++	+++	+++	++++	++++	+++++
	No. 4								++	++	++	++	++	++	++	+++	+++	++++	++++	+++++
ヒノキ	No. 1								+	+	+	+	+	+	+	+	++	++	++	+++
	No. 2																			+
	No. 3																+	+	++	++
	No. 4																+	++	++	++
アカマツ	No. 1										+	+	+	+	+	++	+++	+++	++++	+++++
	No. 2													+	+	++	++	++	+++	+++
	No. 3													+	++	++	+++	+++	++++	+++++
	No. 4							+	+		++	++	++	+++	+++	+++	++++	++++	++++	+++++
カラマツ	No. 1							+	+	+	+	++	++	+++	+++	+++	+++	++++	++++	+++++
	No. 2							+	+	+	+	++	++	+++	+++	+++	+++	++++	++++	+++++
	No. 3							+	+	+	+	++	++	+++	+++	+++	+++	++++	++++	+++++
	No. 4							+	+	+	+	++	++	+++	+++	+++	+++	++++	++++	+++++

注 +……葉色がわずかに変化する状態。++……葉色の变化とともに萎凋の徴候がわずかに認められる状態。+++……萎凋の状態。
++++……葉色が褐色になり枯死寸前の状態。+++++……完全枯死。

草のうちでも比較的抵抗性の強い種類と同程度に強いものであると思われる。

(4) 本節ではスギとヒノキを比較研究したが、これにアカマツ、カラマツを加えてこれら4樹種の A1 の毒性に対する抵抗性をつぎのような簡便法で調べた⁵⁹⁾。すなわち、400 cc 三角フラスコに 0.2% 硫酸アルミニウム溶液を入れ、これら4樹種の萎調状況を観察した。その成績は第16表に示すとおりで、これら4樹種の A1 に対する抗毒性は、ヒノキ>アカマツ>スギ>カラマツの順に強かつたが、これを概観的にみればヒノキ以外の樹種はみな弱く、ヒノキは A1 の毒性に対して異常にまで強い特性をもっているものと考えられる。

第5節 苗木の養分吸収過程

苗木の窒素、リン酸、カリ、石灰などの主要な無機養分組成を時期別に調べることは、苗木の養分吸収の実態をはあくし、合理的な苗畑施肥の有力な資料となるとともに、苗木の養分吸収と成長現象との相互関係を洞察し、その無機栄養生理学的特性を知るうえにも有力な手がかりとなるものと考えられる。

林木の苗木の無機養分組成ならびに養分吸収についての研究成績については、古くは BAUER (1910) のモミ、トウヒ、アカマツ、カラマツの4年生苗木についての成績があり、その後 MANSHARD⁶⁰⁾ (1933), MITCHELL⁶¹⁾ (1936) などの研究が発表された。これら諸外国の研究成績の総括は BECKER-DILLINGEN⁶²⁾ (1939), AALTONEN⁶³⁾ (1948) などによつて行なわれた。最近では YOUNGERBERG⁶⁴⁾ (1955) をはじめ多くの研究が行なわれている。

わが国では戦前には津田¹⁾、石原ら⁹⁾の研究があるが、津田の成績は単に苗木の無機組成を調べたものであり、また石原らの成績は北海道の樹種についてのものである。戦後には、安藤⁶⁵⁾ (1952)、芝本⁶⁷⁾ (1958)の研究があるが、いずれもまき付苗についてのものである。苗畑では床替苗の面積が8割程度を占め、応用的見地からみれば床替苗についての成績が重要と思われる。床替苗については芝本⁶⁷⁾ (1952)の研究があるが、6月以降の養分吸収経過を調べたものであり、中塚⁶⁷⁾ (1952)、津田⁶⁹⁾ (1957)の成績はそれぞれアカマツ、カラマツについてのもので、わが国主要造林樹種であるスギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツの4樹種について同時に比較検討を行なつた成績はまだない。本節ではこれら4樹種の床替苗について、4月から11月までの全成長期間にわたり、その養分吸収の実態をはあくして、苗畑施肥の基礎資料を得ようとするものである。

I 実験—15 スギ、アカマツ苗の窒素の吸収 *

I—A 実験目的および実験方法

スギ、アカマツ1年生苗の窒素の含有率の時期的変化を調べ、苗木の養分吸収過程を知る目的で、次のような実験を行なつた。

林業試験場目黒苗畑で、昭和26年度および27年度の2回にわたり、スギとアカマツの当年生苗を4月床替えしてから、1ヵ月ごとに掘り取り、苗木を地上部 top と根部 root に分けて、そのおのおのについて窒素の含有率を測定した。また、この含有率から窒素の含有量を算出して、スギとアカマツの窒素の吸収過程を調べることにした。

その方法の詳細についてのべると次のとおりである。

(1) 実験用苗木の育成

成長調査用、分析用苗木の育成は第17表に示す要領で行なつた。また、目黒苗畑の土壌分析の結果は

* 本実験の成績の一部を文献72)に発表した。

第17表 供試苗の育苗管理の概要

期 日	作 業 の 種 類
3 月 10～12 日	耕耘, 床作り, BHC 施用 ($10 \text{ kg}/0.1 \text{ ha}$)
3 月 18 日	消石灰施用 ($50 \text{ g}/\text{m}^2$)
3 月 23 日	施 肥 (g/m^2) 硫 安 75 g , 過 石 67 g , 硫酸カリ 19 g
3 月 28 日	床 替 ($49 \text{ 本}/\text{m}^2$)
4 月 ～ 11 月	毎月1回6斗式ボルドー液散布, また適時除草を行なった。

第18表 林業試験場目黒苗畑土壌の性質

Table 18. Soil conditions of Meguro nursery bed.

化 学 的 性 質 Chemical properties		機 械 的 組 成 Mechanical composition	
熱 HCl 可溶成分 Hot HCl soluble components	活性酸度 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 5.50	粗 砂	39.8%
SiO_2 0.40%	置換酸度 y_1 2.50	Coarse sand	
Fe_2O_3 13.24	Exchange acidity	細 砂	35.9%
Al_2O_3 16.42	置換性石灰 0.039%	Fine sand	
Mn_2O_3 0.34	Exchangeable calcium	微 砂	17.3%
CaO 0.50	全 窒 素 0.38%	Silt	
MgO 0.95	Total nitrogen	粘 土	8.0%
P_2O_5 0.40		Clay	
K_2O 0.38			

第18表に示すとおりである。

(2) 実験用苗木の抽出, 掘り取り

毎月5日前後に苗木の掘り取りを行ない, 成長状態を測定した後, 風乾して分析用試料とした。なお, 5月の掘り取りは苗木の大きさが床替え時と大差がないので行なわなかった。

苗木の掘り取りにあたっては, 幅 1 m の苗床を約 0.5 m ごとに带状に区切り, 各带状区域 ($1 \times 0.5 \text{ m}$) を任意抽出して, その区域内の苗木を掘り取った。各区域の抽出数は苗木の本数が約100本になるよう4区域としたが, 10, 11月は3区域にとどめた。

(3) 分析方法

風乾した苗木は $0.5 \sim 0.7 \text{ mm}$ のふるいを通るまで粉砕機で粉砕したのち, この試料につき窒素をケルダール常法により分析した。

I—B 実験成績とその考察

(1) 苗木のN%の月別変化

苗木体のN%を分析した結果は, 第19, 20表に示すとおりである。分析は地上部と根部とに分けて行なわれたが, 苗木全体としてのN%の月別変化を図示すると第11図のとおりである。

第19, 20表, 第11図から次のことがわかる。

i) スギのN%は $1.7 \sim 0.8 \%$, 平均 1.36% であるのに対し, アカマツのN%は $2.0 \sim 1.4 \%$, 平均 1.67% で, アカマツのN%の方が高い値を示している。

ii) スギのN%は春季床替え時より上昇し, 夏季7～8月間に最高に達し, 秋季になるとしだいに減少し, やや凸型に近い変化を示すのに対して, アカマツのN%は4月床替え時よりしだいに減少し, 6月

第19表 スギ苗の窒素の吸収量

Table 19. Uptake of nitrogen of two years old Sugi seedling.

試料採取 月 日 Date of sampling	苗木の部分 Part of seedling	昭和26年度 1951				昭和27年度 1952			
		苗木の長 Top length cm	絶乾重量 Dry weight g	窒素含有率 N % of dry matter %	苗木1本あたりの 窒素吸収量 N content per seedling mg	苗木の長 Top length cm	絶乾重量 Dry weight g	窒素含有率 N % of dry matter %	苗木1本あたりの 窒素吸収量 N content per seedling mg
4月5日 Apr. 5	地上部 Top	14.0	0.46	0.82	3.77	10.0	0.18	1.05	1.89
	根部 Root		0.14	0.95	1.33		0.06	0.91	0.55
	苗木全体 Whole seedling		0.60	0.85	5.10		0.24	1.03	2.44
6月5日 Jun. 5	地上部 Top	16.2	1.11	1.52	16.87	11.2	0.94	1.01	9.49
	根部 Root		0.39	1.33	5.19		0.31	1.02	3.16
	苗木全体 Whole seedling		1.50	1.47	22.06		1.25	1.01	12.65
7月5日 July 5	地上部 Top	20.5	1.81	1.80	32.58	16.7	1.56	1.35	21.06
	根部 Root		0.82	1.33	10.91		0.50	0.99	4.95
	苗木全体 Whole seedling		2.63	1.65	43.49		2.06	1.26	26.01
8月5日 Aug. 5	地上部 Top	33.7	4.92	1.68	82.66	21.2	1.70	1.60	27.20
	根部 Root		0.99	1.20	11.88		0.82	1.16	4.51
	苗木全体 Whole seedling		5.91	1.60	94.54		2.52	1.46	36.71
9月5日 Sept. 5	地上部 Top	41.8	10.26	1.83	187.76	26.8	6.47	1.24	80.23
	根部 Root		2.10	1.20	25.20		1.71	1.11	18.98
	苗木全体 Whole seedling		12.36	1.72	212.96		8.18	1.21	99.21
10月5日 Oct. 5	地上部 Top	54.6	14.28	1.67	238.48	30.6	8.95	1.32	118.14
	根部 Root		2.98	0.99	29.50		1.73	1.23	21.28
	苗木全体 Whole seedling		17.26	1.55	267.98		10.68	1.31	139.42
11月5日 Nov. 5	地上部 Top	60.5	24.24	1.30	315.12	42.8	10.94	1.34	146.60
	根部 Root		5.27	0.86	45.32		2.67	1.03	27.50
	苗木全体 Whole seedling		29.51	1.22	360.44		13.61	1.28	174.10

わが国主要造林樹種の栄養および施肥に関する基礎的研究 (塘)

第20表 アカマツ苗の窒素の吸収量
Table 20. Uptake of nitrogen of two years old Akamatsu seedling.

試料採取 月 日 Date of sampling	苗木の部分 Part of seedling	昭和26年度 1951				昭和27年度 1952			
		苗 長 Top length cm	絶乾重量 Dry weight g	窒素含有率 N % of dry matter %	苗木1本あたり の窒素吸収量 N content per seedling mg	苗 長 Top length cm	絶乾重量 Dry weight g	窒素含有率 N % of dry matter %	苗木1本あたり の窒素吸収量 N content per seedling mg
4月5日 Apr. 5	地上部 Top	13.2	0.70	1.86	13.02	12.1	0.62	2.26	14.01
	根 部 Root		0.29	0.93	2.70		0.17	1.22	2.07
	苗木全体 Whole seedling		0.99	1.59	15.72		0.79	2.04	16.08
6月5日 Jun. 5	地上部 Top	21.4	1.81	1.54	27.87	20.8	1.34	1.46	19.56
	根 部 Root		0.41	1.22	5.00		0.31	1.10	3.41
	苗木全体 Whole seedling		2.22	1.48	32.87		1.65	1.39	22.97
7月5日 July 5	地上部 Top	22.3	3.00	1.73	51.90	20.9	2.45	1.63	39.94
	根 部 Root		1.01	1.42	14.34		0.45	1.60	7.20
	苗木全体 Whole seedling		4.01	1.65	66.24		2.90	1.69	47.14
8月5日 Aug. 5	地上部 Top	23.0	5.40	1.83	98.82	22.0	4.06	1.75	71.05
	根 部 Root		1.51	1.32	19.93		1.03	1.22	12.57
	苗木全体 Whole seedling		6.91	1.72	118.75		5.09	1.64	83.62
9月5日 Sep. 5	地上部 Top	23.2	8.00	1.92	153.60	23.1	6.91	1.91	131.98
	根 部 Root		2.50	1.31	32.75		2.10	1.24	26.04
	苗木全体 Whole seedling		10.50	1.77	186.35		9.01	1.75	158.02
10月5日 Oct. 5	地上部 Top	26.0	8.67	2.26	195.94	24.0	8.58	1.85	158.73
	根 部 Root		3.10	1.12	34.72		2.96	1.02	30.19
	苗木全体 Whole seedling		11.77	1.96	230.66		11.54	1.64	188.92
11月5日 Nov. 5	地上部 Top	26.8	12.33	1.97	242.90	24.4	9.11	2.03	184.93
	根 部 Root		4.94	1.12	55.33		3.41	1.07	36.49
	苗木全体 Whole seedling		17.27	1.73	298.23		12.52	1.77	221.42

ごろに最低値を示し、以後わずかながら増加し、秋季10～11月にはふたたび上昇し、凹型の変化を示す。

iii) アカマツのN%の変化が凹になることから、次のことが考えられる。アカマツの春の伸長は前年度に形成された冬芽が展開して伸びるもので、1年間の伸長成長の7～8割は、この春季4～5月の間に行なわれる。この時期においては、第20表に示すように、

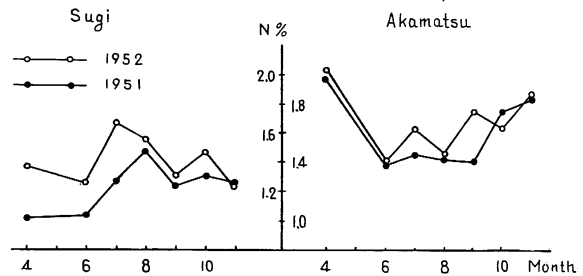
Nの吸収はきわめてわずかであり、その伸長成長は前年度に吸収した養分によつて行なわれるものと考えられる。このことから、アカマツは春季はNの吸収に対して乾物成長が上廻る時期であり、夏から秋季にかけては、乾物成長に対してNの吸収が上廻る時期であると考えることができる。これに対して、スギのN%がやや凸型に近い変化を示すことは、スギは春季から夏にかけて、乾物成長を上廻つてNの吸収を行なう時期であり、夏から秋にかけてが、それまでに吸収したNを利用して成長する時期であると考えられるであろう。WHITE⁷⁰⁾ (1954) も12年のマツの針葉のN%は6月から8月にかけて急に低下し、9月以降しだいに上昇することを認めており、著者の成績と一致する。マツ類 (*Pinus* 属) はこのようなN%が凹型となることは、秋季に窒素を蓄積することを意味し、LEYTON⁷¹⁾ (1957) がマツ類の春季の伸長成長は前年度の貯蔵養分に支配されるといっているのは、以上のことからよく理解される。

(2) 苗木体の窒素吸収量

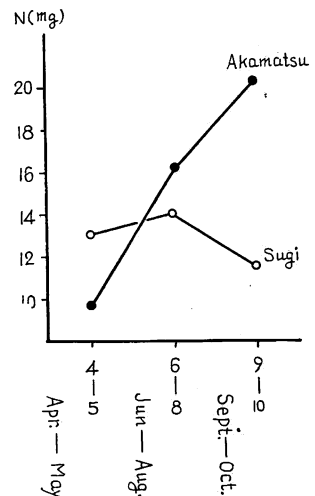
第19, 20表に示した苗木体の乾物重にN%の値をかけて、各月の苗木の窒素量を求めると後掲の第14図に示すようになる。これによると両樹とも4月から5月にかけての床替え後の2カ月間に吸収される窒素量はきわめて少ないが、6月以降しだいに増加して8月以降は著しく増加する。そしてアカマツのN%はスギのN%よりかなり高い値をとるので、その吸収絶対量はスギよりも多い。

(3) 苗木の乾物1gを生産するに要するNの値 (mg)

苗木1本あたりの1カ月間におけるNの吸収量を、1カ月間の乾物増加量で割り、苗木がその乾物を1gあたり生産、増加してゆく間に吸収したNの値の月別変化を求めると、アカマツは生育の末期である10月、または11月にNの値のピークが見られる。この値を生育の前期、中期、後期に大別してみると第12図に示すとおりで、前述の苗木の乾物1gを生産、増加してゆく間に吸収したNの値は、スギは中期より後期に低い値をとるのに対して、アカマツは中期より後期に著しい高い値を示す。すなわち、Nの吸収ならびに利用の状態を時期的に比較した場合に、スギとアカマツ苗ではかなり著しい相違が認められる。



第11図 スギ、アカマツ2年生苗のN%の季節的变化
Fig. 11 Seasonal variation of nitrogen concentration in Sugi and Akamatsu seedlings.



第12図 乾物1gを生産するに要する窒素の時期別変化
Fig. 12 Efficiency of nitrogen for yield of dry matter (N in mg per 1g dry matter).

II 実験—16 スギとアカマツのリン酸, カリ, 石灰の吸収 *

II—A 実験目的および実験方法

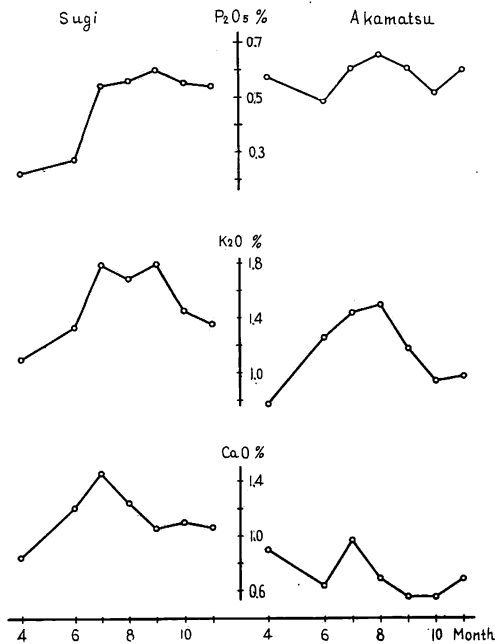
スギ, アカマツ1年生苗のリン酸, カリ, 石灰の含有率の時期的変化を調べ, これら養分の吸収過程を明らかにする目的で, 実験—15の昭和27年度の試料につき, リン酸, カリ, 石灰の含有率を測定し, またこれから苗木1本あたりの含有率からリン酸, カリ, 石灰の含有量を算出して, 養分の吸収過程を調べた。

分析方法は石灰は電気炉で試料を乾式灰化した灰分を, 塩酸で溶解して珪酸分離したのち, 常法によりリン酸は燐モリブデン酸アンモンの沈澱をつくり, 過剰の NaOH に溶かして N—HCl で逆滴定して求め, 石灰はシエウ酸石灰の沈澱をつくり, H_2SO_4 に溶かして $KMnO_4$ で滴定して求めた。また, カリはパーキンエルマー焰光光度計を用いて測定した。

II—B 実験成績とその考察

(1) 苗木の $P_2O_5\%$, $K_2O\%$, $CaO\%$ の月別変化

苗木体の $P_2O_5\%$, $K_2O\%$, $CaO\%$ を分析した結果は第21, 22表に示すとおりである。分析は地上部と根部とに分けて行なわれたが, 苗木全体としての $P_2O_5\%$, $K_2O\%$, $CaO\%$ の月別変化を図示すると, 第13図のとおりである。



第13図 スギ, アカマツ2年生苗の $P_2O_5\%$, $K_2O\%$, $CaO\%$ の季節的变化

Fig. 13 Seasonal variation of phosphorus, potassium and calcium concentration in Sugi and Akamatsu seedlings.

第21, 22表および第13図から次のことがわかる。

i) スギとアカマツ苗の $P_2O_5\%$ の変化は, 両樹種とも, わずかに凸型に近い変化を示しているように見受けられる。そしてスギの7月以降, およびアカマツの4月から11月までの変化の幅は比較的小なく, スギは0.5%から0.6%の間を, アカマツは0.5%から0.65%の間を変化している。これに対して, スギとアカマツ苗の $K_2O\%$ の月別変化は, 両樹種とも凸型状を示し, スギは1.1%から1.8%の間を, アカマツは0.8%から1.5%の間を $P_2O_5\%$ の月別変化の場合よりも大きな幅で変化している。つぎにスギ, アカマツ苗の $CaO\%$ の変化は, スギが凸型状に近い変化を示すのに, アカマツはやや凹型状に近い変化を示し, 両樹種のN%の変化の相違に類似している。なお, アカマツ苗の11月における $P_2O_5\%$, $K_2O\%$, $CaO\%$ およびN%のいずれもが10月から上昇しているのは

アカマツが芽, とくに頃芽の翌春における伸長成長にそなえて, これらの無機養分を晩秋に蓄積するためと考えられ, これらの現象はスギとアカマツ苗の栄養生理学的特性の相違点の1つであると考えられる。

* 本実験の成績の一部を文献(72)に発表した。

第21表 スギ苗のリン酸・カリ・石灰の吸収量
Table 21. Uptake of phosphorus, potassium and calcium of two years old Sugi seedling.

試料採取 月日 Date of sampling	苗木の部分 Part of seedling	絶乾重量 Dry weight g	リン酸含有率 P ₂ O ₅ % of dry matter %	苗木1本あたりの リン酸吸収量 P ₂ O ₅ content per seedling mg	カリ含有率 K ₂ O % of dry matter %	苗木1本あたりの カリ吸収量 K ₂ O content per seedling mg	石灰含有率 CaO % of dry matter %	苗木1本あたりの 石灰吸収量 CaO content per seedling mg
4月5日 Apr. 5	地上部 Top	0.18	0.23	0.41	1.20	2.2	0.93	1.68
	根部 Root	0.06	0.18	0.11	0.67	0.4	0.57	0.34
	苗木全体 Whole seedling	0.24	0.22	0.52	1.08	2.6	0.84	2.02
6月5日 Jun. 5	地上部 Top	0.94	0.27	2.52	1.37	12.9	1.17	10.96
	根部 Root	0.31	0.29	0.89	1.16	3.6	1.26	3.91
	苗木全体 Whole seedling	1.25	0.27	3.41	1.32	16.5	1.19	14.88
7月5日 July 5	地上部 Top	1.56	0.58	9.10	2.02	31.5	1.35	21.06
	根部 Root	0.50	0.40	2.01	1.02	5.1	1.75	8.73
	苗木全体 Whole seedling	2.06	0.54	11.11	1.78	36.6	1.45	29.79
8月5日 Aug. 5	地上部 Top	1.70	0.65	10.99	2.08	35.4	1.28	21.82
	根部 Root	0.82	0.37	3.07	0.88	7.2	1.15	9.42
	苗木全体 Whole seedling	2.52	0.56	14.06	1.69	42.6	1.24	31.24
9月5日 Sept. 5	地上部 Top	6.47	0.64	41.46	2.00	129.4	1.05	68.23
	根部 Root	1.71	0.47	7.96	1.00	17.1	1.04	17.79
	苗木全体 Whole seedling	8.18	0.60	49.42	1.79	146.5	1.05	86.02
10月5日 Oct. 5	地上部 Top	8.95	0.60	53.28	1.58	141.4	1.04	92.87
	根部 Root	1.73	0.33	5.74	0.73	12.6	1.37	23.75
	苗木全体 Whole seedling	10.68	0.55	59.02	1.44	154.0	1.09	116.62
11月5日 Nov. 5	地上部 Top	10.94	0.55	60.03	1.49	163.0	1.05	115.39
	根部 Root	2.67	0.50	13.23	0.78	20.8	1.02	27.34
	苗木全体 Whole seedling	13.61	0.54	73.26	1.35	183.8	1.05	142.73

わが国主要造林樹種の栄養および施肥に関する基礎的研究 (糖)

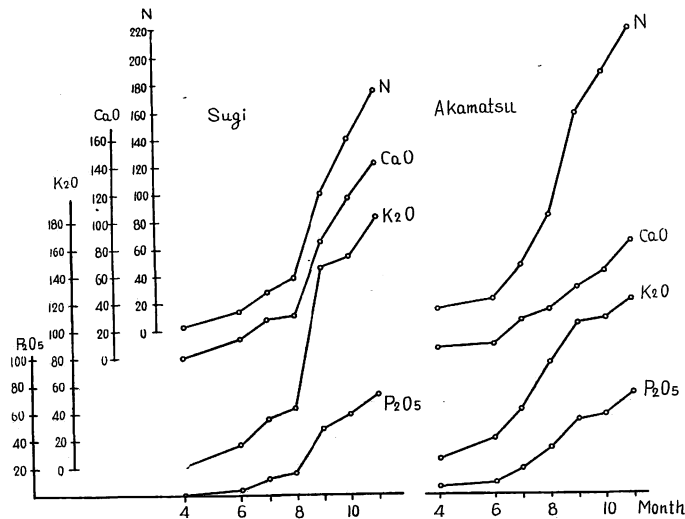
第22表 アカマツ苗のリン酸・カリ・石灰の吸収量
Table 22. Uptake of phosphorus, potassium and calcium of two years old Akamatsu seedling.

試料採取 月 日 Date of sampling	苗木の部分 Part of seedling	絶乾重量 Dry weight g	リン酸含有率 P ₂ O ₅ % of dry matter %	苗木1本あたりの リン酸吸収量 P ₂ O ₅ content per seedling mg	カリ含有率 K ₂ O % of dry matter %	苗木1本あたりの カリ吸収量 K ₂ O content per seedling mg	石灰含有率 CaO % of dry matter %	苗木1本あたりの 石灰吸収量 CaO content per seedling mg
4月5日 Apr. 5	地上部 Top	0.62	0.63	3.88	0.83	5.1	0.78	4.83
	根部 Root	0.17	0.36	0.62	0.58	1.0	1.29	2.20
	苗木全体 Whole seedling	0.79	0.57	4.50	0.77	6.1	0.89	7.03
6月5日 Jun. 5	地上部 Top	1.34	0.46	6.16	1.31	17.6	0.50	6.70
	根部 Root	0.31	0.55	1.69	0.98	3.0	1.18	3.65
	苗木全体 Whole seedling	1.65	0.48	7.85	1.25	20.6	0.63	10.35
7月5日 July 5	地上部 Top	2.45	0.56	13.81	1.46	35.7	0.88	21.48
	根部 Root	0.45	0.79	3.57	1.28	5.8	1.39	6.27
	苗木全体 Whole seedling	2.90	0.60	17.38	1.43	41.5	0.96	27.75
8月5日 Aug. 5	地上部 Top	4.06	0.50	20.50	1.63	66.2	0.57	23.04
	根部 Root	1.03	1.21	12.48	0.96	9.9	1.14	11.72
	苗木全体 Whole seedling	5.09	0.65	32.98	1.49	76.1	0.68	34.76
9月5日 Sept. 5	地上部 Top	6.91	0.60	41.45	1.19	82.2	0.55	37.74
	根部 Root	2.10	0.62	12.94	1.09	22.9	0.62	12.94
	苗木全体 Whole seedling	9.01	0.60	54.39	1.17	185.1	0.56	50.68
10月5日 Oct. 5	地上部 Top	8.58	0.48	41.41	1.01	86.7	0.51	43.54
	根部 Root	2.96	0.58	17.04	0.72	21.3	0.66	19.53
	苗木全体 Whole seedling	11.54	0.51	58.45	0.94	108.0	0.55	63.07
11月5日 Nov. 5	地上部 Top	9.11	0.56	51.10	1.01	92.0	0.63	57.10
	根部 Root	3.41	0.66	22.36	0.88	30.0	0.82	28.13
	苗木全体 Whole seedling	12.52	0.59	73.46	0.97	122.0	0.68	85.23

ii) スギとアカマツ苗の $P_2O_5\%$, $K_2O\%$, $CaO\%$ の値の大小を比較すると、各月により異なるが、年平均的にみると、今回の実験の範囲内では、 $K_2O\%$, $CaO\%$ はアカマツよりもスギの方に大きく、反対に $P_2O_5\%$ はスギよりもアカマツの方に大きい。これはスギとアカマツの無機栄養上の相違点の1つであると考えられる。

(2) 苗木のリン酸、カリ、石灰吸収量

第21, 22表に示した苗木体の乾物重に、それぞれの $P_2O_5\%$, $K_2O\%$, $CaO\%$ の値を掛けて各月の苗木1本あたりの要素含有量を求めると、第14図に示すようになる。これによるとアカマツはスギにくらべ



第14図 スギ、アカマツ苗の窒素、リン酸、カリ、石灰の吸収
(苗木1本あたりのmg数)

Fig. 14 Uptake of nitrogen, phosphorus, potassium and calcium in Sugi and Akamatsu seedlings (mg per seedling).

て4～7月の生育前半期において、苗木体の P_2O_5 の吸収割合が大きい。すなわち、スギは1年間に吸収する P_2O_5 の全量の約19%をこの期間に吸収するのに対して、アカマツは約41%の P_2O_5 をこの期間に吸収している。このことと、アカマツの $P_2O_5\%$ はスギよりも高く、リン酸欠乏の発現しやすい樹種であることとをあわせ考えれば、アカマツの育苗に際してはとくに生育初期におけるリン酸の供給が重要であるように思われる。

これに対して、スギはアカマツにくらべて、8～10月の生育後半期における K_2O の吸収割合が大きい。すなわち、アカマツは1年間に吸収する K_2O の全量の約40%をこの期間に吸収するのに対して、スギは約78%をこの期間に吸収している。このことと、スギは生育後半期に窒素を多量に吸収して徒長しやすい性質があることとをあわせ考えれば、スギの育苗に際してはとくに生育後半期におけるカリの供給が健苗育成の観点から重要であると思われる。

III 実験—17 ヒノキとカラマツの窒素の吸収

III—A 実験目的および実験方法

苗木の窒素の含有率の時期的変化を調べ、苗木の窒素吸収過程を知る目的で、スギおよびアカマツ1年生苗について行なつた実験—15と同様の実験をヒノキ、カラマツ1年生苗について行なつた。すなわち、

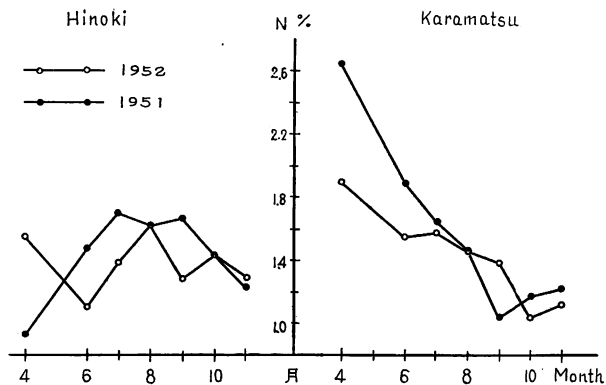
林業試験場構内の目黒苗畑で昭和26年度および27年度の2回にわたり、ヒノキとカラマツの1年生苗を4月に床替えてから1カ月ごとに掘り取り、苗木を地上部と根部に分けて、その窒素含有率を調べた。

実験用苗木の養苗管理や、供試苗の抽出方法、分析用試料の調整方法および窒素の分析方法などは、すべて実験—15の場合と同様である。

III—B 実験成績とその考察

(1) 苗木のN%の月別変化

苗木体のN%を分析した結果は第23、24表に示すとおりである。苗木全体としてのN%の月別変化を示すと第15図のとおりである。これらによると、つぎのことがわかる。



第15図 ヒノキ、カラマツ2年生苗のN%季節的变化
Fig. 15 Seasonal variation of nitrogen concentration in Hinoki and Karamatsu seedlings.

i) ヒノキのN%は1.7~0.9%, 平均1.3%であるのに対して、カラマツのN%は2.7~1.1%, 平均1.9%を示し、カラマツの方が高い値を示している。

ii) ヒノキのN%の月別変化は凸型形状で、ほぼスギと同様の変化を示すのに対して、カラマツのN%は4月に著しく高い値をとり、以後急激に低下し、9月から10月にかけてふたたび上昇する。この変化は前述のアカマツの凹型変化にやや類似しているが、カラマツは

落葉性針葉樹のため、4月の新芽の開序期の新葉は著しく高いN%を示すのが特徴である。また、秋季のN%の上昇の程度は著しくないのでアカマツと異なる点である。

しかし、前述のようなスギとアカマツとの相連とほぼ同様な相連がヒノキとカラマツとの間にもみられる。すなわち、ヒノキは春季から夏にかけて乾物成長を上廻わつて窒素の吸収が行なわれ、9~10月にかけてはそれまで吸収した窒素を利用して成長するのに対して、カラマツは春季は窒素の吸収に対して乾物成長が上廻わる時期であり、夏から秋にかけて乾物成長より窒素の吸収が上廻わる時期である。すなわち、カラマツは、秋季に窒素を蓄積して翌春の成長にそなえ、ヒノキとはまったく異なつた性質があるものと考えられる。

また、カラマツ苗の乾物1gを生産するに要するNの値の月変化を計算すると、4月から8月ごろまでは13~15mgで、ほぼ一定であるが、9月に約7mgに低下したのち10月には16mgにふたたび急激に増加する。すなわち、カラマツは成長休止期にはいる前に窒素を蓄積することが一層明りように理解される。

IV 実験—18 ヒノキとカラマツのリン酸、カリ、石灰の吸収

IV—A 実験目的および実験方法

苗木のリン酸、カリ、石灰の含有率の時期的変化を調べ、これらの養分の吸収過程を明らかにする目的で、スギおよびアカマツ1年生苗について行なつた実験—16と同様の実験をヒノキ、カラマツ1年生苗に

第23表 ヒノキ苗の窒素の吸収量

Table 23. Uptake of nitrogen of two years old Hinoki seedling.

試料採取 月 日 Date of sampling	苗木の部分 Part of seedling	昭和26年度 1951				昭和27年度 1952			
		苗 長 Top length cm	絶乾重量 Dry weight g	窒素含有率 N% of dry matter %	苗木1本あたりの 窒素吸収量 N content per seedling mg	苗 長 Top length cm	絶乾重量 Dry weight g	窒素含有率 N% of dry matter %	苗木1本あたりの 窒素吸収量 N content per seedling mg
4月5日 Apr. 5	地上部 Top	10.8	0.58	0.89	5.16	9.0	0.11	1.54	1.69
	根 部 Root		0.14	1.05	1.47		0.03	1.59	0.48
	苗木全体 Whole seedling		0.72	0.92	6.63		0.14	1.55	2.17
6月5日 Jun. 5	地上部 Top	14.2	0.90	1.46	13.14	13.9	0.57	1.10	6.27
	根 部 Root		0.28	1.56	4.37		0.14	1.15	1.61
	苗木全体 Whole seedling		1.18	1.48	17.51		0.71	1.11	7.88
7月5日 July 5	地上部 Top	17.8	1.30	1.76	22.88	16.5	0.65	1.44	9.36
	根 部 Root		0.37	1.45	5.37		0.19	1.19	2.26
	苗木全体 Whole seedling		1.67	1.69	28.25		0.84	1.88	11.62
8月5日 Aug. 5	地上部 Top	22.2	2.79	1.68	46.87	20.3	1.26	1.71	21.55
	根 部 Root		0.53	1.20	6.36		0.28	1.24	3.47
	苗木全体 Whole seedling		3.32	1.60	53.23		1.54	1.62	25.0
9月5日 Sept. 5	地上部 Top	28.6	4.78	1.73	82.69	24.7	2.44	1.25	30.50
	根 部 Root		0.80	1.25	10.00		0.55	1.41	7.76
	苗木全体 Whole seedling		5.58	1.66	92.69		2.99	1.28	38.26
10月5日 Oct. 5	地上部 Top	33.4	6.28	1.44	90.43	32.2	3.79	1.46	55.33
	根 部 Root		1.37	1.19	16.30		0.75	1.28	9.80
	苗木全体 Whole seedling		7.65	1.40	106.73		4.54	1.43	64.93
11月5日 Nov. 5	地上部 Top	39.8	7.35	1.27	93.35	34.1	5.36	1.34	71.82
	根 部 Root		1.85	1.00	18.50		1.28	1.07	13.70
	苗木全体 Whole seedling		9.20	1.22	111.85		6.64	1.29	85.52

わが国主要造林樹種の栄養および施肥に関する基礎的研究 (塘)

第24表 カラマツ苗の窒素の吸収量
Table 24. Uptake of nitrogen of two years old Karamatsu seedling.

試料採取 月 日 Date of sampling	苗木の部分 Part of seedling	昭和26年度 1951				昭和27年度 1952			
		苗 長 Top length cm	絶乾重量 Dry weight g	窒素含有率 N% of dry matter %	苗木1本あたり の窒素吸収量 N content per seedling mg	苗 長 Top length cm	絶乾重量 Dry weight g	窒素含有率 N% of dry matter %	苗木1本あたり の窒素吸収量 N content per seedling mg
4月5日 Apr. 5	地上部 Top	15.8	0.17	2.91	4.95	14.0	0.10	1.95	1.95
	根 部 Root		0.10	2.22	2.22		0.03	1.72	0.52
	苗木全体 Whole seedling		0.27	2.66	7.17		0.13	1.90	2.47
6月5日 Jun. 5	地上部 Top	17.2	1.10	2.03	22.33	15.4	0.15	1.84	2.76
	根 部 Root		0.34	1.45	4.93		0.17	1.30	2.21
	苗木全体 Whole seedling		1.44	1.89	27.26		0.32	1.55	4.97
7月5日 July 5	地上部 Top	20.7	3.02	1.69	51.04	17.5	1.53	1.65	25.25
	根 部 Root		0.53	1.34	7.10		0.32	1.21	3.87
	苗木全体 Whole seedling		3.55	1.64	58.14		1.85	1.57	29.12
8月5日 Aug. 5	地上部 Top	31.6	5.83	1.53	89.20	29.0	3.88	1.55	60.14
	根 部 Root		1.30	1.19	15.47		0.78	1.00	7.80
	苗木全体 Whole seedling		7.13	1.47	104.67		4.66	1.46	67.94
9月5日 Sept. 5	地上部 Top	40.3	13.53	1.07	144.77	41.6	7.72	1.54	118.89
	根 部 Root		2.71	0.94	25.47		2.20	0.86	18.92
	苗木全体 Whole seedling		16.24	1.05	170.24		9.92	1.39	137.81
10月5日 Oct. 5	地上部 Top	53.0	20.50	1.27	260.35	45.8	12.50	1.21	151.25
	根 部 Root		5.13	0.70	35.91		2.43	0.77	18.71
	苗木全体 Whole seedling		25.63	1.16	296.26		14.93	1.14	169.96
11月5日 Nov. 5	地上部 Top	60.2	28.41	1.29	366.49	48.4	13.02	1.38	179.68
	根 部 Root		6.32	0.84	53.09		5.13	0.83	42.58
	苗木全体 Whole seedling		34.73	1.21	419.58		18.15	1.22	222.26

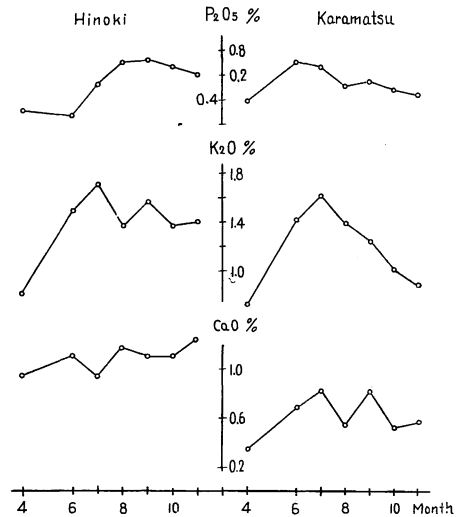
ついて行なつた。実験の概要は実験—16 とまったく同様である。すなわち、実験—15 の昭和 27 年度の試料につき、リン酸、カリ、石灰の含有率を測定し、この含有率から苗木 1 本あたりのリン酸、カリ、石灰の含有量を算出して、ヒノキとカラマツの養分吸収過程を調べ、かつ実験—16 のスギとアカマツの成績とも比較した。分析方法は実験—16 と同様である。

IV—B 実験成績とその考察

(1) 苗木の $P_2O_5\%$ 、 $K_2O\%$ 、 $CaO\%$ の月別変化

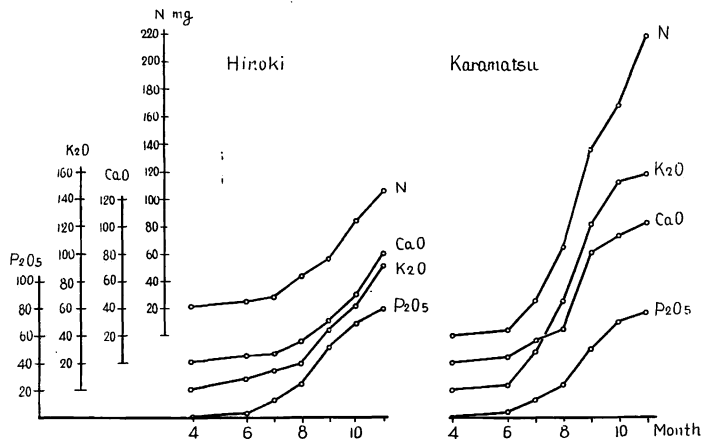
苗木体の $P_2O_5\%$ 、 $K_2O\%$ 、 $CaO\%$ を分析した結果は第 25、26 表のとおりであり、苗木全体としての月別変化は第 16 図に示すとおりである。これらによると、つぎのことがわかる。

i) ヒノキとカラマツの $P_2O_5\%$ の変化はわずかに凸形状に近い変化を示すが、ヒノキは 6 月から 8 月にかけて、カラマツは 4 月から 6 月にかけて上昇し、その後の変化の幅は少ないのはスギと同様の傾向である。カラマツの $N\%$ が 4 月から 6 月まで急激に低下するのに対して、 $P_2O_5\%$ が上昇するのは興味あることである。 $K_2O\%$ の変化は両樹種とも凸形状の変化を示し、ヒノキは 0.79% から 1.70% の間を、カラマツは 0.72% から 1.61% の間を、 $P_2O_5\%$ の月別変化の場合よりも大きな幅で変化していることも、前述のスギ、アカマツと同様である。 $CaO\%$ の変化はヒノキはしだいに上昇し、カラマツはやや凸形状の変化を示したが、両樹種とも変化の幅はあまり大きくない。



第 16 図 ヒノキ、カラマツ 2 年生苗の $P_2O_5\%$ 、 $K_2O\%$ 、 $CaO\%$ の季節的变化

Fig. 16 Seasonal variation of phosphorus, potassium and calcium concentration in Hinoki and Karamatsu seedlings.



第 17 図 ヒノキ、カラマツ苗の窒素、リン酸、カリ、石灰の吸収 (苗木 1 本あたり mg 数)

Fig. 17 Uptake of nitrogen, phosphorus, potassium and calcium in Hinoki and Karamatsu seedlings (mg per seedling).

第25表 ヒノキ 苗 の リン 酸 ・ カ リ ・ 石 灰 の 吸 収 量
Table 25. Uptake of phosphorus, potassium and calcium of two years old Hinoki seedling.

試料採取 月 日 Date of sampling	苗木の部分 Part of seedling	絶乾重量 Dry weight g	リン酸含有率 P ₂ O ₅ % of dry matter %	苗木1本あたり のリン酸吸収量 P ₂ O ₅ content per seedling mg	カリ含有率 K ₂ O% of dry matter %	苗木1本あたり のカリ吸収量 K ₂ O content per seedling mg	石灰含有率 CaO% of dry matter %	苗木1本あたり の石灰吸収量 CaO content per seedling mg
4月5日 Apr. 5	地上部 Top	0.11	0.31	0.34	0.89	0.9	1.03	1.13
	根部 Root	0.03	0.27	0.08	0.68	0.2	0.63	0.19
	苗木全体 Whole seedling	0.14	0.30	0.42	0.79	0.1	0.94	1.32
6月5日 Jun. 5	地上部 Top	0.57	0.26	1.47	1.40	8.0	1.14	6.49
	根部 Root	0.14	0.31	0.44	1.78	2.5	0.90	1.26
	苗木全体 Whole seedling	0.71	0.27	1.91	1.48	10.5	1.09	7.75
7月5日 July 5	地上部 Top	0.65	0.52	3.39	1.88	12.2	0.90	5.87
	根部 Root	0.19	0.51	0.96	1.12	2.1	1.08	2.05
	苗木全体 Whole seedling	0.84	0.52	4.35	1.70	14.3	0.94	7.92
8月5日 Aug. 5	地上部 Top	1.26	0.72	9.06	1.38	17.4	1.21	15.19
	根部 Root	0.28	0.64	1.78	1.24	3.5	1.00	2.79
	苗木全体 Whole seedling	1.54	0.70	10.84	1.36	20.9	1.17	17.98
9月5日 Sept. 5	地上部 Top	2.44	0.75	18.40	1.61	39.3	1.19	28.95
	根部 Root	0.55	0.57	3.13	1.33	7.3	0.65	3.56
	苗木全体 Whole seedling	2.99	0.72	21.53	1.56	46.6	1.09	32.51
10月5日 Oct. 5	地上部 Top	3.79	0.69	26.22	1.45	54.9	1.16	43.97
	根部 Root	0.75	0.58	4.35	0.97	7.3	0.82	6.18
	苗木全体 Whole seedling	4.54	0.67	30.57	1.37	62.2	1.10	50.15
11月5日 Nov. 5	地上部 Top	5.36	0.62	33.26	1.48	79.3	1.33	71.41
	根部 Root	1.28	0.46	5.91	1.02	13.0	0.46	10.22
	苗木全体 Whole seedling	6.64	0.59	39.17	1.39	92.3	1.23	81.63

第26表 カラマツ苗のリン酸・カリ・石灰の吸収量
Table 26. Uptake of phosphorus, potassium and calcium of two years old Karamatsu seedling.

試料採取 月 日 Date of sampling	苗木の部分 Part of seedling	絶乾重量 Dry weight g	リン酸含有率 P ₂ O ₅ % of dry matter %	苗木1本あたり のリン酸吸収量 P ₂ O ₅ content per seedling mg	カリ含有率 K ₂ O% of dry matter %	苗木1本あたり のカリ吸収量 K ₂ O content per seedling mg	石灰含有率 CaO% of dry matter %	苗木1本あたり の石灰吸収量 CaO content per seedling mg
4月5日 Apr. 5	地上部 Top	0.10	0.48	0.48	0.71	0.7	0.29	0.29
	根部 Root	0.03	0.47	0.14	0.77	0.2	0.50	0.15
	苗木全体 Whole seedling	0.13	0.38	0.62	0.72	0.9	0.34	0.44
6月5日 Jun. 5	地上部 Top	0.15	0.74	1.11	1.51	2.3	0.62	0.93
	根部 Root	0.17	0.66	1.12	1.32	2.2	0.74	1.26
	苗木全体 Whole seedling	0.32	0.70	2.23	1.41	4.5	0.68	2.19
7月5日 July 5	地上部 Top	1.53	0.68	10.36	1.66	25.4	0.66	10.16
	根部 Root	0.32	0.60	1.92	1.36	4.4	1.52	4.85
	苗木全体 Whole seedling	1.85	0.66	12.28	1.61	29.8	0.81	15.01
8月5日 Aug. 5	地上部 Top	3.88	0.53	20.51	1.46	56.6	0.53	20.65
	根部 Root	0.78	0.41	3.16	1.04	8.1	0.57	4.47
	苗木全体 Whole seedling	4.66	0.51	23.67	1.39	64.7	0.54	25.12
9月5日 Sept. 5	地上部 Top	7.72	0.53	41.30	1.28	98.8	0.63	48.32
	根部 Root	2.20	0.50	10.97	1.06	23.3	1.48	32.52
	苗木全体 Whole seedling	9.92	0.53	52.27	1.23	122.1	0.81	80.84
10月5日 Oct. 5	地上部 Top	12.50	0.42	52.82	1.06	132.5	0.52	68.90
	根部 Root	2.43	0.75	18.16	0.82	19.9	1.02	24.67
	苗木全体 Whole seedling	14.93	0.48	70.98	1.02	152.4	0.52	93.57
11月5日 Nov. 5	地上部 Top	13.02	0.43	56.30	0.89	115.9	0.60	77.65
	根部 Root	5.13	0.46	23.48	0.04	43.1	0.47	23.89
	苗木全体 Whole seedling	18.15	0.44	79.78	0.88	159.0	0.56	101.54

わが国主要造林樹種の栄養および施肥に関する基礎的研究 (埔)

ii) ヒノキとカラマツの $P_2O_5\%$, $K_2O\%$, $CaO\%$ の値の大小は各月により異なるが、年平均の値と比較すると、今回の実験の範囲では $P_2O_5\%$ はヒノキよりもカラマツの方がわずかに大きく、反対に $K_2O\%$, $CaO\%$ はヒノキの方がアカマツよりも大きい値を示し、この関係は前述のスギとアカマツの関係と同様である。

(2) 苗木のリン酸, カリ, 石灰吸収量

第25, 26表に示した苗木体の乾物重に、それぞれの $P_2O_5\%$, $K_2O\%$, $CaO\%$ の値を掛けて、各月の各要素含有量を求めると、第17図に示すようになる。これによるとヒノキは各養分ともに春季からしだいにその吸収量を増し、11月の成長休止期まで吸収するのに対して、カラマツは各養分とも7月ごろから急激に吸収量を増すが、10月になると衰える点がヒノキと異なる。

V 考 察

(1) 1回床替山出苗に含まれる窒素, リン酸, カリの含有量を第19~26表の成績をもとに、*ha* あたりの養分吸収量に概算すると、つぎのとおりである (*kg/ha*)。

	N	P_2O_5	K_2O
ス ギ	85	36	90
ヒ ノ キ	48	22	57
ア カ マ ツ	124	41	68
カ ラ マ ツ	109	39	78

この苗木の養分吸収量を農作物、たとえば小麦の吸収量と比較すると同等または小麦を上廻る量であり、したがって少しく大形の苗木を育成しようとするれば、その養分吸収量は農作物より多いものと考えられる。とくに Lutz and CHANDLER⁷⁸⁾ (1946) も指摘するように、苗木は根系まで収穫され、土壌への養分還元は皆無であることをあわせ考えれば、畑地を苗畑として利用する場合には農地として利用する場合以上に、肥培管理が重要であると思われる。

(2) 苗木の各要素の吸収量についてみると、YOUNGBERG⁶⁴⁾ (1958) の Douglas fir の据置2年苗の養分吸収量 (*kg/ha*) を調べた成績では、平均してその吸収量は N 96 *kg*, P_2O_5 20 *kg*, K_2O 52 *kg* で、窒素>カリ>リン酸の順に大きいことを認めた。これは小麦のような禾穀類や荳科牧草類や果樹などと同様の傾向である。しかし、(1)でのべた成績によると、アカマツ、カラマツは上述の順位であつたが、スギとヒノキについてはカリの吸収量の方が窒素の吸収量をやや上廻る傾向を示した。このように苗木のカリ吸収量は窒素に劣らず大きい、著者の苗木の肥料3要素試験⁷⁴⁾によると、無カリ区の苗木の生育は3要素区について良好であり、苗木に対するカリの天然供給量は3要素の中で最も大きいので、実際の施肥量は窒素>リン酸>カリの順に多く施用するのが適当と考えられる。

第6節 苗木の養分欠乏

林木の養分欠乏症を明らかにしておくことは、苗畑の肥培管理の上で重要なことはいうまでもない。農作物の養分欠乏症の研究成績は多いが⁷⁵⁾⁷⁶⁾⁷⁷⁾、これにくらべて林木の養分欠乏症についての成績は少なく⁷⁸⁾⁷⁹⁾⁸⁰⁾⁸¹⁾⁸²⁾、わが国でも、養分欠除水耕試験が2, 3⁸³⁾⁸⁴⁾⁸⁵⁾⁸⁶⁾⁸⁷⁾⁸⁸⁾行なわれたが、あるものは養分欠乏症の究明を直接の目的としたものではなく、またあるものは培養液中の養分欠除が完全に行なわれていないため、所期の目的を達していない。

しかし宮崎およびその協同研究者たち⁸⁹⁾⁹⁰⁾により、スギ、カラマツ、アカマツ稚苗について、主とし

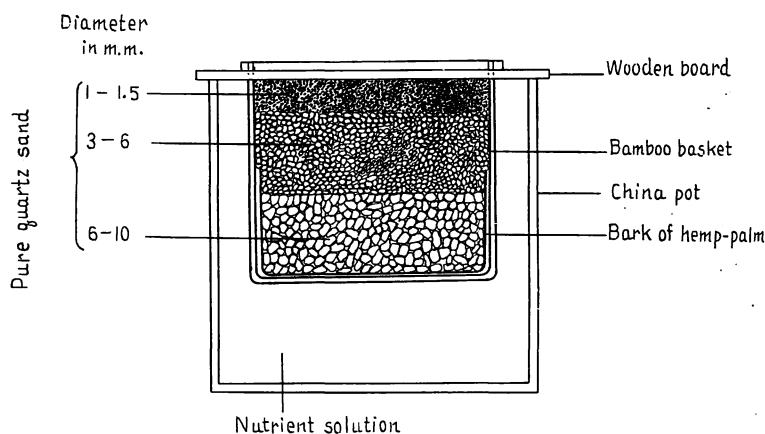
て窒素、リン酸、苦土についての欠乏症が明らかにされ、また植村ら⁹¹⁾によりモリシマアカシヤ、フサアカシヤなどの肥料木について、窒素、リン酸、カリなどの欠乏症が報告されているが、これらの研究は単に外観的な養分欠乏症を明らかにしたもので、苗木体の分析を行ない栄養生理学的な立場からの考察は加えられていない。

以上を通覧すると、わが国では2、3の樹種について窒素、リン酸、苦土の欠乏症についてはすでに明らかにされているが、石灰の欠乏症についてはまだ報告されたものがなく、またカリの欠乏症についても不明な点が多い。これはカリ、石灰の養分欠除培養の方法にまだ改良の余地が残されているためであると思われる。著者はこれらカリ、石灰は苦土などとともに、苗木の量的成長よりも後述の苗木の形質に関係が深い要素であるという観点において、特にその重要性を認め、これらについて研究を進めた。実験の順序としてまず窒素、リン酸、苦土の各欠乏症を追試したのち、従来の方法に2、3の改良を加えて、カリおよび石灰の欠除培養実験を行ない、さらにカリ、石灰、苦土の3要素のうち、いずれかの2要素が同時に欠乏した場合についても実験を行なった。その理由は現実の苗畑では、2要素ないし3要素が同時に欠乏する場合も多く、養分欠乏にはいろいろの中間的症状ないし変形された症状が現われているものと考えたからである。またこれら3要素のうち、最も現実の苗畑で現われやすい苦土欠乏症の実態調査を行ない、苦土欠乏症の発現とその土壌条件との関係を考察し、本研究の応用性を高めることに努めた。

I 実験—19 苗木の窒素、リン酸、カリ、石灰、苦土、鉄、マンガンの各要素の欠除培養

I—A 実験目的および実験方法

スギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツ苗の窒素、リン酸、カリ、石灰、苦土の各養分の欠乏症を知る目的で、上記各要素の単独欠除の培養実験を行なった。実験方法の要は水耕法を併用した砂耕法により行なった。すなわち、竹製ザル（内径12cm、深さ10cm）に石英砂をつめ、これを第18図に示すように水耕液を入れた陶製ポットに懸垂して、石英砂上に種子をまきつけ培養を行なった。実験計画の要は各樹種ごとに完全区、窒素欠乏区、リン酸欠除区、カリ欠除区、苦土欠除区、石灰欠除区と、なお参考のために、鉄欠除区とマンガン欠除区をも設けた。各試験区の水耕液の組成は第27表のとおりである。水耕液の更新は1週間に1回行ない、また水耕に用いた水はイオン交換樹脂による脱塩水で比抵抗100万 Ωcm 以上



第18図 養分欠除実験に用いた培養容器

Fig. 18 Apparatus used for nutrients deficiency works.

第27表 養分欠除実験の培養液組成

Table 27. Composition of culture solution for mineral deficiency works.

供試塩類 Salts used	完全培養 Complete	— N	— P	— K	— Ca	— Mg	備考 Remarks
	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	
NH ₄ NO ₃	0.0572	—	0.0572	0.0572	0.1143	0.0572	要素量 p.p.m.
KH ₂ PO ₄	0.0383	0.0383	—	—	0.0383	0.0383	Element
NaH ₂ PO ₄ ·2H ₂ O	—	—	—	0.0440	—	—	N : 40
KCl	0.0264	0.0264	0.0475	—	0.0264	0.0264	P ₂ O ₅ : 20
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.2449	0.2449	0.2449	0.2449	0.2449	—	K ₂ O : 30
Ca(NO ₃) ₂ ·H ₂ O	0.1299	—	0.0129	0.0129	—	0.0129	CaO : 40
CaCl ₂	—	0.0792	—	—	—	—	MgO : 40
FeC ₆ H ₅ O ₇ ·H ₂ O	0.0165	0.0165	0.0165	0.0165	0.0165	0.0165	Fe ₂ O ₃ : 5
MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	Mn ₂ O ₃ : 1.5

の水を使用した。この培養実験は昭和32年と33年度に、それぞれ4月から10月の期間にわたり行なつた。なお7月から9月上旬までの高温の季節には、各ポットを水槽に置き、水槽中の水を流動させて培養液の温度上昇による障害を防いだ。

各欠除区の苗に欠乏症らしい変色その他の異常を認めた時は、1試験区のうち1ポットを完全培養に切りかえ、その症状が消滅した時は当該要素の欠乏症と認めることにした。

I—B 実験成績とその考察

実験は昭和32年度と33年度の2回にわたり行なわれたが、その成績は一括してのべることにする。培養期間を前期(4～5月)、中期(6～7月)、後期(8～9月)にわけ、各養分の欠乏症を観察した結果ならびに培養終了時の苗木の生育状況ならびに外観的症狀は第28、29表に示すとおりである。これらを通覧すると1926年度の実験よりは1927年度の実験の方が各要素によつて多少の相違はあるが、欠除の影響は大きく現われている。欠除培養の成績を各要素ごとにのべると次のとおりである(写真—5、写真—6および写真—10参照)。

i) 窒素、リン酸、カリならびに苦土の各欠乏症については従来の成績^{89) 90)}を再確認した。ただし、スギの苦土欠乏症は黄褐色に現われる場合もあつた。

第28表 養分欠除水耕培養
Table 28. Growth data on

欠除要素 Treatments	1 9 5 6								
	スギ Sugi			ヒノキ Hinoki			アカマツ Akamatsu		
	苗長 Length	生体重 Fresh weight	生体重 指数 of fresh	苗長 Length	生体重 Fresh weight	生体重 指数 of fresh	苗長 Length	生体重 Fresh weight	生体重 指数 of fresh
	cm	g	wt.	cm	g	wt.	cm	g	wt.
完全培養 Complete culture	11.9	4.40	100	8.4	1.19	100	6.1	1.67	100
窒素 — N culture	5.9	0.62	14	4.6	0.12	10	5.2	0.70	32
リン酸 — P	6.6	0.98	22	4.9	0.15	13	4.8	0.78	47
カリ — K	7.0	0.88	20	4.7	0.26	22	4.5	0.70	42
石灰 — Ca	9.2	2.99	68	8.9	1.31	110	6.7	2.32	139
苦土 — Mg	5.4	0.37	8	6.5	0.27	23	5.3	1.36	82
鉄 — Fe	10.0	3.39	77	7.2	0.91	76	5.6	1.60	96
マンガン — Mn	11.7	3.38	77	7.5	1.08	91	5.7	1.63	98
全養欠 Control	2.9	0.13	3	3.2	0.06	5	3.6	0.36	2

ii) 従来未発表であつたヒノキの窒素, リン酸, 苦土ならびにカリの各欠除症を明らかにした。その症状は第 29 表に示すとおりである。

iii) 石灰欠除培養の苗木はスギのほかは外観的に特別の症状が認められないばかりか, 枝葉は濃緑色となり完全培養の苗木よりもかえつて生育がよかつた。スギは頂芽の部分が萎縮して伸長を停止したが, 苗木全体の成長は良好であつた。

iv) 鉄欠除培養の苗木は 6 月から 7 月にかけて頂端部が黄白色に変色したが, 8 月以降その症状はしだいに弱まつた。マンガン欠除培養の苗木には 1 年目においては, 何らの異常を認めなかつたが, 2 年目も引き続いて培養すると 6 月ごろから苗木の頂端部が黄白色に変色した。

II 実験—20 スギのカリ欠除培養 *

II—A 実験目的および実験方法

スギ苗のカリ欠乏症を知る目的で, 実験—19の方法に 2, 3 の改良を加えて, カリ欠乏培養試験を行なつた。

実験方法の要は, 水耕法を併用した砂耕法により石英砂上にスギ種子をまきつけ, カリを欠除させた培養液を用いて砂耕培養し, スギ苗に現われるカリの欠乏症状を観察した。改良の要点は培養に用いた容器から汚染する K をできるだけ少なくするため, ポリエチレンの容器を使用した。すなわち, 側面に孔をあけた 1 l 容ポリエチレンビーカーを用い, それに石英砂をつめた。別に 2 l 容ポリエチレン容器を用意して, これに培養液を入れ, さらにこの中に前記の石英砂をつめた 1 l 容ポリエチレンビーカーが懸垂するように装置した。写真 B はこの装置を分解したものを示している。

石英砂は 50 % HCl 溶液中に 1 週間浸漬した後, まず水道水で洗浄し, 最後に Cl の反応のなくなるまで脱塩水 (純水) を用いて洗浄して使用した。

実験計画の要は, カリ欠除の程度を K_2O 0 区 (完全欠除区), 2 p. p. m. 区, 4 p. p. m. 区, 10 p. p. m. 区の 4 段階とし, K_2O 30 p. p. m. の標準区とあわせて, 合計 5 試験区を設け, 1 区 2 ポット制で培養試験を行なつた。

実験の生育調査 (平均値)
mineral deficiency works. (Average)

			1 9 5 7											
カラマツ Karamatsu			スギ Sugi			ヒノキ Hinoki			アカマツ Akamatsu					
苗長	生体重	生体重指数	苗長	生体重	生体重指数	苗長	生体重	生体重指数	苗長	生体重	生体重指数	苗長	生体重	生体重指数
Length	Fresh weight	Index of fresh	Length	Fresh weight	Index of fresh	Length	Fresh weight	Index of fresh	Length	Fresh weight	Index of fresh	Length	Fresh weight	Index of fresh
cm	g	wt.	cm	g	wt.	cm	g	wt.	cm	g	wt.	cm	g	wt.
12.1	2.37	100	9.7	8.71	100	7.8	1.24	100	4.7	2.24	100			
4.6	0.40	17												
4.3	0.43	18	3.6	0.26	4	2.7	0.09	7	4.4	0.68	30			
			3.1	0.09	1	2.1	0.06	5	3.9	0.10	5			
			10.0	6.10	70	3.2	1.24	100	5.5	1.23	55			
6.0	0.30	13	9.5	0.13	2	7.7	0.07	6	5.7	0.55	25			
8.2	2.10	89	8.8	7.15	83	6.3	0.77	62	5.3	1.28	57			
8.3	1.78	75	11.3	6.41	74	6.7	1.01	89	6.3	2.23	99			
2.8	0.11	5	2.1	0.13	2	1.2	0.05	4	3.2	0.30	13			

* 本実験の成績の一部を文献(92)に発表した。

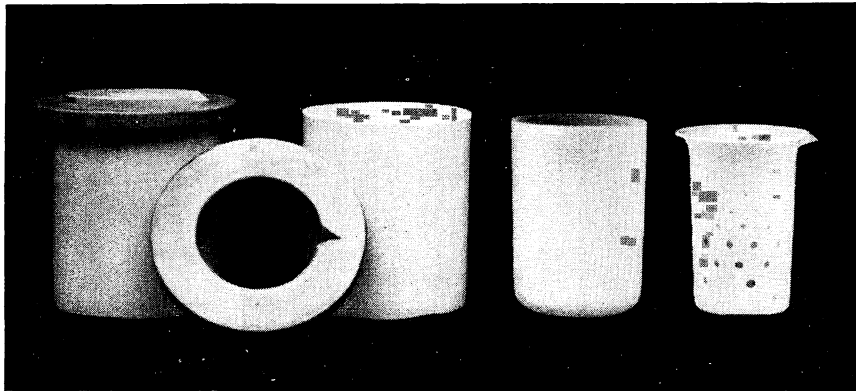
第29表 スギ, ヒノキ, アカマツおよび
 Table 29. Nutrient deficiency symptoms of Sugi, Hinoki,

欠除養分 Element	樹 種 Species	欠 乏 症 の	
		生 育 前 期	生 育 中 期
窒 素 Nitrogen	ス ギ Sugi	苗全体が緑色を呈する。	黄緑色を呈する。特に梢葉部に強く現われる。
	ヒ ノ キ Hinoki	梢葉部が緑色を呈する。	梢葉部は黄緑色を呈し他の葉は緑色を呈する。
	アカマツ Akamatsu	緑色を呈する。	黄緑を呈する。
	カラマツ Karamatsu	黄緑色を呈する。	梢葉の一部が淡黄緑色, 他は黄緑色を呈する。
リン 酸 Phosphorus	ス ギ Sugi	梢葉および葉の付根より暗緑色を呈する。	幹および上葉部が暗緑色となる。
	ヒ ノ キ Hinoki	梢葉が緑褐色を呈する。	苗全体が暗緑色となる。
	アカマツ Akamatsu	下葉部のつけ根に緑紫色を呈する。	梢葉部を除き緑紫色を呈する。
	カラマツ Karamatsu	葉の先端に暗紫色を呈する。	梢葉部を除き緑紫色—紫色となる。
カ リ Potassium	ス ギ Sugi	梢葉部緑紫色を呈する。	梢葉部の緑褐色がしだいに下葉へ移行。
	ヒ ノ キ Hinoki	苗全体が暗緑色を呈する。	梢葉部の一部褐色を呈する。
	アカマツ Akamatsu	苗全体が暗緑紫色を呈する。	下葉黄緑色になる。
	カラマツ Karamatsu	苗全体が淡黄色を呈する。	下葉より黄褐色となる。
苦 土 Magnesium	ス ギ Sugi	下葉部に褪色が現われる。	苗全体が淡褐色を呈する。
	ヒ ノ キ Hinoki	下葉部に褪色が現われる。	苗全体が淡黄緑色を呈する。
	アカマツ Akamatsu	上部先端葉に紫色を呈する。	紫色が全葉におよび先端葉に黄色を呈する部分が現われる。
	カラマツ Karamatsu	葉の先端より淡緑色を呈する。	苗全体が淡黄緑色を呈する。
石 灰 Calcium	ス ギ Sugi	濃緑色を呈する。	葉の先端(頂芽)は緑褐色を呈する。
	ヒ ノ キ Hinoki	確実な症状は認められないが後期に入り濃緑色を呈する。	
	アカマツ Akamatsu		
	カラマツ Karamatsu		
鉄, マンガン Iron, Manganese	ス ギ Sugi	スギ, ヒノキ, アカマツ, カラマツともに梢端部が白色~黄白色	
	ヒ ノ キ Hinoki		
	アカマツ Akamatsu	4樹種ともに症状は見られなかつたが Complete の生育は減少	
	カラマツ Karamatsu		

カラマツ苗の養分欠乏症概要

Akamatsu and Karamatsu seedlings grown in culture solution.

概 要 生 育 後 期	General symptoms of nutrient deficiencies
黄緑色—淡黄緑色を呈する。 葉全体が黄緑色を呈する。 梢葉の一部に緑紫色を混じえた黄緑色を呈する。 梢葉部は淡緑色を呈し他の葉は淡黄緑色を呈する。	Yellowish-green→yellowish. Branch and needle sparse, short needle. Root abnormally long.
苗全体が帯紫暗緑色となる。 暗緑色—暗紫色となり特に下葉は帯紫色が強い。 梢葉は淡緑色下葉は鮮明な紫色を呈する。 紫色、赤紫色を呈する。	Stem and older needle purplish-bronze→purplish. Becoming necrotic in older needle, but youngest needle retains dark green.
苗全体が緑褐色となる、特に下葉に赤褐色が強く現われる。 苗全体が緑褐色となる、特に下葉に強く赤褐色が現われる。 下葉淡褐色を呈し梢葉部丸く閉じる。 下葉淡褐色を呈し梢葉は丸く閉じる。	Stem and branch limber, needle sparse. Older needle reddish brown, necrotic or dying, but needle at tips of branch remaining good green in color. See p. 149.
淡褐色—桃褐色と変化、特に下葉に強く現われる。 葉全体が黄色を呈する。 黄色、赤紫色を混じえ一様に黄色を呈する。 淡黄緑色—淡黄色を呈する、葉の尖端は黄色が強い。	Older branch at the lower top turned yellow→yellowish brown or reddish.
苗全体が濃緑色—暗緑色を呈し、葉の尖端(頂芽)は淡褐色を呈し、枯死する。	See p. 150.
を呈する。 している。	Bud or needle at upper top turns white or yellowish white.



写真B. 著者が改良を加えた養分欠除砂耕培養装置
Photo. B Apparatus used for nutrients deficiency work.

第30表 カリ欠除培養液の組成
Table 30. Composition of culture solution
used for potassium deficiency work.

使用塩類 Salts used	含有量 Amounts g/l	要素量 Element p. p. m.
NH_4NO_3	0.0572	N 40
$\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.0439	P_2O_5 20
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.2449	CaO 40
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	0.1299	MgO 40
$\text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7$ 溶液	Fe_2O_3 5 p.p.m相当量	Fe_2O_3 5
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.0038	Mn_2O_3 1.5

注：K については KCl を使い、1 cc 中 2 mg の K_2O を含む水溶液を作製して、それぞれ所定の濃度になるように添加した。

昭和33年4月19日に石英砂上にスギの種子をまきつけ、発芽後の5月1日から前記の培養液で培養を始めた。なお、実験一9と同様に7月から9月上旬までの期間は各ポットを水槽に置き、水槽内の水を流動させて培養液の温度の上昇を防いだ。

苗木体の分析方法は窒素はケルダール法により、またカリは湿式灰化した試料を焰光光度計を用いて測定した。

II-B 実験成績とその考察

培養の経過ならびにその成績は次のとおりである。

(1) カリ欠乏症の発現

培養開始後30日目ごろは標準区は濃緑色を呈しているのに対し、完全欠除区ならびに K_2O 2 p. p. m. 区は黄緑色を呈し、いくぶん欠乏症状を現わしはじめた。苗長については早くも完全区、 K_2O 10 p. p. m. 区と、他の欠除区との間にわずかな差が認められた。

50日目ごろには完全欠除区はすでに生育を停止し、下葉は赤味を帯び、苗全体はさらに黄緑色の程度を増加してきた。 K_2O 4 p. p. m. 区にあつては前回と同様黄緑色を呈してきた。苗長は標準区に次いで、 K_2O 2, 4, 10 p. p. m. 区と完全欠除区の3段階に区別することができた。

7月中旬、80日目ごろには完全欠除区の苗木は写真一12に示すように、下葉が赤褐色を呈し、下葉を除いた上葉部は黄緑色を呈し、成長はほとんど停止した。2 p. p. m. 添加区はしだいに葉色を回復し淡黄

欠除試験に用いた水耕液の組成は第30表のとおりである。水耕液に用いた薬品はとくに純度の高いものを用い、また Fe 源については水耕液中に Fe の沈でんを防ぐため、クエン酸鉄を使用した。このクエン酸鉄は電解鉄をクエン酸に溶解させたもので、とくに試作させたものを用いた。水耕液は1週間ごとに更新し、また水耕に用いた水はイオン交換樹脂による脱塩水で、比抵抗 100 万 $\Omega \text{ cm}$ 以上のものを使用した。

緑色を呈し、標準区との間に、以前のような色調の差はあまりみとめられないようになったが、苗木の生育は著しく不良であった。

(2) 苗木の生育ならびに無機組成

昭和33年10月26日に培養を打ち切り、苗木の生育調査ならびに苗木体の K_2O % のほか、2, 3 の成分について分析を行なった。その結果は第31表ならびに写真—8 に示すとおりである。

第31表 スギ1年生苗のカリ欠除培養実験(平均値)
Table 31. Data on potassium deficiency work. (Average)

培養液の K_2O 濃度 Concentration of culture solution	苗木の生育状態 Growth of seedling					苗木の K_2O , N 含有量(対乾物%) K_2O and N content (% of dry matter)			
	苗長 Length cm	生体重 Fresh weight g	根元直径 Basal diameter cm	弱さ度 Slender- ness	K欠乏症 Degree of potassium deficiency	K_2O		N	
						枝葉部 Top	根部 Root	枝葉部 Top	枝葉部 Top
0 p.p.m. (完全欠除)	2.4 (12)	0.18 (2)	0.07 (24)	80	++++ 激甚成長停止	Tr.	Tr.	—	
2	12.8 (65)	6.07 (56)	0.23 (79)	13	+	0.23	0.14	2.09	9.09
4	16.7 (84)	8.32 (76)	0.28 (97)	13	—	0.54	0.46	1.20	2.22
10	18.9 (95)	9.52 (88)	0.29 (100)	11	—	0.78	0.78	1.37	1.75
30 (標準区)	19.8 (100)	10.88 (100)	0.29 (100)	9	—	2.02	1.34	1.22	0.60

カリの完全欠除区のスギ苗については、7月以降はまったく伸長成長が認められなかった。その平均苗長は2.4 cm, その平均生体重はわずかに0.18 gであり、その K_2O % は痕跡程度(Trace.)であったので、このカリ欠除培養はかなり高い精度で行なわれたといえることができるであろう。

培養液に K_2O を2 p.p.m. 添加した場合には、生育の初期において、針葉の先端に軽度のK欠乏症とおもわれる症状が認められたが、培養終了時においては、外観的にほとんどこれを認めることができなかった。そして標準区の6割程度の成長が見られたが、枝葉部の K_2O % は0.23 %で、著しく低い値を示した。培養液の K_2O が4 p.p.m. および10 p.p.m. の場合には、K欠乏症は外観的には認められなかったが、枝葉部の K_2O % はそれぞれ0.54 %および0.78 %で、かなり低い値を示した。

なお K_2O 2 p.p.m. 区の枝葉部の N/ K_2O は、 K_2O 30 p.p.m. 区にくらべて著しく大きい値を示した。したがって、総合的に考えて、 K_2O 2 p.p.m. 区の苗木はある程度の生育を示しているが、カリが絶対的に欠乏の状態ではないにしても、かなり欠乏の状態にあるものと考えてよいであろう。

III 実験—21 スギ苗の石灰欠乏培養 *

III—A 実験目的および実験方法

スギ苗の石灰欠乏症を知る目的で、実験—20と全く同様の培養装置を用いて石灰欠除試験を行なった。

実験は完全培養区と石灰欠除区の2区を設け、1区2ポット制で行なった。本実験に用いた培養液の組成は第32表に示すとおりである。

昭和33年4月19日に石英砂上にスギの種子をまきつけ、発芽後の5月1日から表記の培養液で培養をはじめた。

* 本実験の成績の一部を文献92)に発表した。

第32表 石灰欠除培養液の組成
Table 32. Composition of culture solution
for calcium deficiency work.

使用塩類 Salts used	含有量 Amount g/l	要素量 Element p. p. m.
NH ₄ NO ₃	0.1143	N 40
KH ₂ PO ₄	0.0383	P ₂ O ₅ 20
KCl	0.0269	K ₂ O 40
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.2449	MgO 40
FeC ₆ H ₅ O ₇	Fe ₂ O ₃ 5 p.p.m相当量	Fe ₂ O ₃ 5
MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.0038	Mn ₂ O ₃ 1.5

III—B 実験成績とその考察

培養の経過ならびにその成績は次のとおりである。

(1) 石灰欠乏症の発現

6月上旬から根部における白根の発育が悪くなり、6月下旬には白根の発生は全く見られず、暗褐色に変化してきた。根の発育停止と同時に苗木の新梢の発育も停止

し、しだいに茶褐色を呈し、一部分枯死しているように見受けられた。

7月中旬には、根は黒褐色を呈し、あたかも根腐れのような症状を呈し、新根の発生はまったく停止し、また写真—11に示すように、上葉部においては新梢のみならず、側枝の先端部が茶褐色となり、しだいに枯死した。しかし他の枝葉の部分はむしろ濃青緑色を呈していた。

(2) 苗木の生育ならびに無機組成

昭和33年10月26日に培養を打ち切り、苗木の生育調査ならびに苗木体のCaO%, K₂O%, MgO%, P₂O₅%などの分析を行なった。この分析にあたり、石灰欠乏症はスギ苗の頂端部に現われたこと、および石灰は移動し難い要素であるという^{94) 95)}ことから、苗木を上部、中部、下部および根部の4部分に分けて分析を行なった。その成績は第33表に示すとおりである。

第33表 石灰欠除培養の1年生スギ苗の石灰ならびにカリ、苦土、リン酸の含有率(対乾物%)

Table 33. Calcium and other mineral elements concentration of one year seedling of Sugi grown in culture solution without calcium (% of dry matter).

処 理 Treatments	苗木の部分 Parts of seedling	CaO	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅
石灰欠除 —Ca culture	地上部 { 上部 Upper part	0.20	2.25	0.90	0.90
	中部 Middle part	0.26	1.44	0.85	0.88
	下部 Lower part	0.28	1.39	0.99	0.93
	根部 Root	0.25	0.60	0.31	0.38
完全培養(対照) Complete culture	地上部 { 上部 Upper part	0.81	1.57	0.74	0.54
	中部 Middle part	1.05	0.91	0.66	0.55
	下部 Lower part	1.08	0.88	0.71	0.56
	根部 Root	0.39	0.90	0.44	0.39

苗木体のCaO%は完全培養区に比し著しく少ない値を示しており、さらに欠乏症状の現われた上葉部のCaO%は下葉部のそれよりも低いことが認められた。また、この分析の範囲では苗木体地上部のP₂O₅%, K₂O%およびMgO%はCaを欠除すると、完全培養区にくらべて大きい値を示した。

IV 実験—22 スギのカリ、石灰、苦土の同時2要素欠除培養*

IV—A 実験目的および実験方法

実験—20, 21において、スギ苗のカリ欠乏症ならびに石灰欠乏症についてのべた。しかし実際問題としては、カリや石灰などの栄養素が単独に欠乏する場合よりも、むしろ各栄養素のうち、2要素ないし3要素が同時に欠乏ないし不足する場合が多いのではないかと考えられる。

* 本実験の成績の一部を文献⁹⁶⁾に発表した。

実験—22においてはカリ、石灰、苦土の3要素のうち、相互に2要素が同時に欠乏した場合の、苗木に現われる欠乏症や苗木体の養分吸収状態を調べる目的で、これらの2要素同時欠除培養試験を行なった。この実験はスギ1年生苗と2年生苗との両者について行なった。

1年生苗について行なった実験は、前述の実験—20と同様の、水耕法を併用した砂耕法を用いて行なった。2年生苗について行なった実験は、9 l 容の水耕用カメを用いて水耕法で行なった。

実験計画の概要ならびに各試験区の培養液の組成は、第34表に示すとおりである。

第34表 カリ、石灰、苦土の同時欠除培養実験の培養液組成

Table 34. Composition of culture solution for two elements deficiency work: potassium-calcium, potassium-magnesium and calcium-magnesium.

使用塩類 Salts used	欠除要素 Deficient elements							
	完全培養液 Complete solution	— K	— Ca	— Mg	— K, Ca	— K, Mg	— Ca, Mg	— K, Ca, Mg
A 液	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l
NH ₄ NO ₃	0.057	0.057	0.114	0.057	0.114	0.057	0.114	0.114
KH ₂ PO ₄	0.038		0.038	0.038			0.038	
NaHPO ₄ ·2H ₂ O		0.044			0.044	0.044		0.044
KCl	0.027		0.027	0.027			0.027	
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.244	0.244	0.244		0.244			
B 液								
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	0.168	0.168		0.168		0.168		
MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
FeC ₆ H ₅ O ₇ 溶液								
		Fe ₂ O ₃ 5 p.p.m 相当量添加						

備考 (1) A液とB液とは等量混合する。

Remarks A solution and B solution are mixed equivalently.

(2) 完全培養液の要素量 (p.p.m.)

Amounts of each elements in complete solution are as follow:

N: 40, P₂O₅: 20, K₂O: 30, CaO: 30, MgO: 30, Fe₂O₃: 5, Mn: 1.5 (p.p.m.)

1年生苗についての実験は、昭和34年3月26日にスギ種子を石英砂上にまきつけ、発芽後5月15日から前記の培養液で同年10月26日まで培養した。また2年生苗についての実験は、昭和34年4月27日に前年度に育成した1年生スギ苗を、1ポットに5本あて板を用いて固定し、5月11日から10月6日まで培養した。

IV—B 実験成績とその考察

(1) 養分欠乏症の発現

培養期間中にあらわれたスギ苗の色調やそのほかの変化は次のとおりである。

a. スギ1年生苗

完全培養区のスギ苗は発芽後順調に生育してきたが、7月下旬ごろから頂芽の開序が停止しているように見受けられた。その原因は不明であるが、微量元素として、B, Zn, Cu をそれぞれ 0.05 p.p.m. 添加(他の各欠除区にも同時に添加)した。8月中旬ごろから頂芽も伸長し、順調に生育した。

K欠除区のスギ苗は7月上旬ごろから生育が幾分停滞しているが、はつきりとした欠乏症状は見受けられなかった。8月上旬ごろから下葉先端の一部が赤味を帯びて、K欠乏症が現われた。

Ca 欠除区のスギ苗は6月下旬ごろから頂芽の部分が少し褐色を呈しはじめ、7月上旬には緑褐色となり頂芽の生育を停止して、Ca 欠乏症が現われたが、その程度は前年度の実験—21にくらべて弱かった。

Mg 欠除区のスギ苗は6月上旬ごろから下葉の一部が帯状に褪色し、先端に進行し、褐色を呈しながらしだいに上葉に及んだ。7月下旬、葉先が赤褐色を呈し、特に下葉の部分に強く現われ、赤褐色—桃褐色を示し生育が停滞して、顕著な Mg 欠乏症が現われた。

K, Ca 欠除区のスギ苗は6月上旬頂芽の部分が緑褐色を呈し、しだいに暗褐色となり、8月上旬生育を停止しているように見受けられた。Ca 欠乏区の症状に似た症状を呈した。

K, Mg 欠除区のスギ苗は6月下旬ごろから下葉の先端から黄緑色を呈し、しだいに上葉に進行して黄褐色に変化した。8月上旬ごろから赤褐色を帯び、ほとんどその生育を停止して、Mg 欠乏区に似た症状を呈した。

Ca, Mg 欠除区のスギ苗は6月下旬ごろから頂芽の部分は緑褐色を呈し、また葉先は黄褐色を呈した。とくに下葉部に強く現われている。7月中旬苗全体が赤褐色となり、生育を停止した。全体としては、Ca 欠除区の症状よりも Mg 欠除区に似た症状を呈した。

b. スギ2年生苗

スギ2年生苗については前述のスギ1年生苗とほぼ同様の成績がえられた。ただし石灰を欠除した各欠除区(-Ca, -KCa, -Ca Mg区)は、いずれも Ca の欠乏症の方が強く現われた。すなわち根系の発達が悪く、白根の発生はとまり、しだいに暗褐色を呈した。これにともない枝葉は濃緑色を呈し、梢葉部は緑褐色—褐色となり、ついには枯死するにいたつた。

またカリ欠除区は、当年生苗に見られたような顕著な欠乏症状は認められなかつた。これはまきつけ苗時代に吸収したカリの影響があらわれたためではないかと思われる。

(2) 苗木の生育および無機養分の組成ならびに吸収状態

i) 培養終了時の苗木の生育状態、無機養分組成ならびに吸収量は、第35～37表のとおりである。第32

第35表 カリ、石灰、苦土の欠除がスギ苗の生育に及ぼす影響 (平均値)

Table 35. Data on two elements deficiency work: potassium-calcium, potassium-magnesium and calcium-magnesium. (Average)

処 理 Treatments	苗 長 Length cm	絶乾重量 Dry weight g	弱さ度 Slender- ness	欠乏症の現われかた Visual deficiency symptoms
(A) 完全培養 Complete culture	15.2	2.95(100)	7.7	
(B) K 欠除培養 -K	10.0	1.15(39)	11.5	
(C) Ca " -Ca	7.0	0.75(25)	13.7	
(D) Mg " -Mg	11.2	0.66(22)	20.0	
(E) K, Ca " -K, Ca	4.9	0.36(12)	18.3	Ca 欠乏症の方が強く現われる*
(F) K, Mg " -K, Mg	5.0	0.33(11)	21.1	Mg 欠乏症の方が強く現われる**
(G) Ca, Mg " -Ca, Mg	4.3	0.17(6)	36.4	Mg 欠乏症の方が強く現われる***
(H) K, Ca, Mg " -K, Ca, Mg	3.1	0.15(5)	35.2	

* Symptom of calcium deficiency appears more remarkably than other elements.

** Symptom of magnesium deficiency appears more remarkably than the other element.

***Symptom of magnesium deficiency appears more remarkably than the other element.

表から、K, Ca, Mg の各要素の単独欠除ならびに各2要素の同時欠除培養が、苗木体の組成に及ぼす影響について考察すると、つぎのとおりである。すなわち、苗木体の地上部においては K, Ca, Mg のうち、いずれか1要素が単独に欠除すると、他の2要素の含有率は高くなる。また K, Ca, Mg のうち、いずれか2要素が同時に欠乏すると、他の1要素の含有率は高くなる。根部においても、2, 3の例外はあるが、ほぼ同様の傾向がみられる。

第36表 カリ, 石灰, 苦土の欠除が苗木のこれら養分組成に及ぼす影響 (対乾物%)

Table 36. Potassium, calcium and magnesium concentration of one year Sugi seedling grown in culture solution without these two elements.
(% of dry matter.)

処 理 Treatments	K ₂ O%		CaO%		MgO%	
	地 上 部 Top	根 部 Root	地 上 部 Top	根 部 Root	地 上 部 Top	根 部 Root
(A) Complete culture	1.48	0.81	1.06	0.58	0.94	0.68
(B) -K	0.25	0.25	1.09	0.44	1.15	1.01
(C) -Ca	1.94	0.61	0.19	0.08	1.02	0.51
(D) -Mg	2.05	2.02	1.29	0.61	0.16	0.05
(E) -K, Ca	0.28	0.21	0.19	0.13	0.99	0.66
(F) -K, Mg	0.50	0.38	1.92	0.73	0.26	0.21
(G) -Ca, Mg	1.91	0.74	0.26	0.19	0.12	0.13
(H) -K, Ca, Mg	0.39	0.02	0.49	0.23	0.31	0.29

第37表 カリ, 石灰, 苦土の欠除が苗木の養分吸収量に及ぼす影響 (苗木1本あたり mg 数)

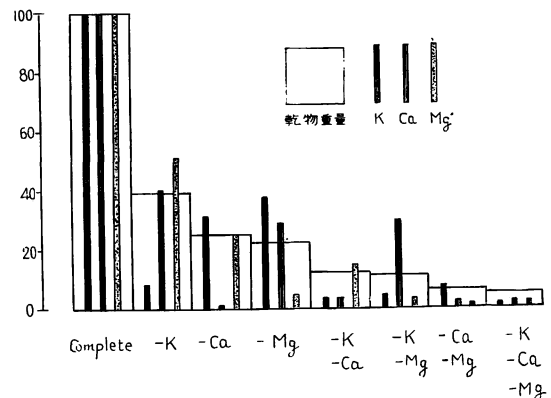
Table 37. Potassium, calcium and magnesium uptake of one year Sugi seedling grown in culture solution without these two elements.
(mg per seedling.)

処 理 Treatments	K ₂ O (mg)			CaO (mg)			MgO (mg)		
	地 上 部 Top	根 部 Root	全 体 Whole seedling	地 上 部 Top	根 部 Root	全 体 Whole seedling	地 上 部 Top	根 部 Root	全 体 Whole seedling
(A) Complete	27.83	7.89	36.72	20.92	5.65	26.57	18.55	6.62	25.17
(B) -K	2.09	0.69	2.78	9.48	1.21	10.69	10.00	2.79	12.79
(C) -Ca	9.92	1.43	11.35	0.11	0.19	0.30	5.22	1.19	6.41
(D) -Mg	11.49	1.97	13.46	7.23	0.60	7.83	0.90	0.05	0.95
(E) -K, Ca	0.75	0.20	0.95	0.51	0.33	0.84	2.65	0.65	3.30
(F) -K, Mg	1.19	0.20	1.39	4.55	0.38	4.93	0.62	0.11	0.73
(G) -Ca, Mg	2.27	0.45	2.72	0.31	0.12	0.43	0.14	0.08	0.22
(H) -K, Ca, Mg	0.34	0.01	0.35	0.43	0.08	0.51	0.27	0.11	0.38

ii) 完全培養区の苗木体の絶乾重量ならびに K₂O, CaO, MgO の吸収量を 100 として, 各欠除区のそれらを比較指数で現わすと第19図に示すようになる。これによると, K, Ca, Mg の単独欠除ならびに各2要素の同時欠除の影響については, 上記 i) においてのべた傾向がなお一層明らかに認められる。すなわち, K, Ca, Mg のうち, いずれか1要素が欠除すると, 他の2要素は乾物の生産割合にくらべて多く吸収していることが明らかに認められる。

iii) 苗木の地上部に含まれる K, Ca

および Mg の含有量をそれぞれの化学当量で示すと, 第38表に示すとおりになる。これによると, これら3要素のいずれか1要素が欠除しても, 3要素の化学当量の和はほぼ等しくなる。この結果は HUNTER⁹⁸⁾ (1949) の行なつた実験成績とよく一致する。このことから K, Ca, Mg の各要素は, ある部分につい



第19図 カリ, 石灰, 苦土の欠除が苗木のこれら養分元素の吸収に及ぼす影響 complete culture の苗木の乾物重量およびカリ, 石灰, 苦土の吸収量を 100 として表示して各欠除区の相対的關係を示す。

第38表 カリ、石灰および苦土の欠除とスギ苗の地上部のこれら養分元素の化学当量
Table 38. Chemical equivalent value of potassium, calcium and magnesium
of Sugi seedling grown in culture solution without these two elements.

処 理 Treatment	(1) M.E./100 g dry matter				(2) M.E./100 g dry matter			
	K	Ca	Mg	Sum	K	Ca	Mg	Sum
(A) Complete culture	30	38	47	115	26	36	36	98
(B) -K	5	39	57	101	6	34	32	72
(C) -Ca	41	7	51	99	18	31	23	72
(D) -Mg	44	46	8	98	27	45	2	74
(E) -K, Ca	6	7	49	62	10	35	30	75
(F) -K, Mg	11	68	13	92	7	45	3	55
(G) -Ca, Mg	40	9	6	55	17	39	1	57
(H) -K, Ca, Mg	8	17	15	40				

ては相互にある程度の代償作用を営むものであると考えてよいであろう。

しかし、K, Ca, Mg の3要素のうち、いずれか2要素が同時に欠除した場合は、前記3要素の化学当量の和は、1要素が単独に欠除した場合にくらべて小さくなり、またその値も各欠除要素の組合わせにより必ずしも等しくならない。すなわち、2要素が同時に欠除した場合は、残りの1要素では欠除した2要素の代償作用が十分行なわれにくいものと考えられる。

V 調査—1 スギ苗の苦土欠乏調査*

本節1—IVにおいては、水耕ないし砂耕法により養分欠除培養を行ない、主としてカリ、石灰、苦土の各欠乏症を明らかにした。これらの3要素のうち、苦土は苗木による吸収量がかかなり多量であるにもかかわらず、従来苦土は堆肥などによつて補給される以外は特に肥料としては施用されることがなかつたので、近年苗畑ではカリや石灰欠乏症はほとんど見受けられなくても、苦土欠乏症の発現は多く見受けられるようになり、スギ苗では赤変病などと呼ばれる場合もでてきた。そこで本研究の応用的見地から、実際の苗畑において、スギ苗の苦土欠乏症発現の実態を調査して、苦土欠乏症発現の条件を土壤肥料的見地から検討することにした。

V—A 調査目的および調査方法

苗木の苦土欠乏症発生の条件ならびにその対策を考察する目的で、スギ苗の苦土欠乏症発生の実態調査を行なった。

調査した苗畑は東京営林局管内における静岡県下の6営林署の苗畑で、下記のとおりである。

静岡県田方郡	天城営林署	本谷苗畑
静岡県沼津市	沼津営林署	三明寺苗畑
静岡県榛原郡	千頭営林署	青部苗畑
静岡県掛川市	掛川営林署	三沢苗畑
静岡県周智郡	気田営林署	気田苗畑
静岡県浜松市	浜松営林署	釣苗畑

まず、各苗畑の苗木に現われた苦土欠乏症を概観的に観察したのち、とくにスギ苗の苦土欠乏症について調査した。また、各苗畑で苦土欠乏症の発現程度の異なつた場所があれば、そのおのおのについて、苗木の苦土欠乏の模様や、その土壌断面、苗畑の肥培管理の状態などを調べ、また分析のため苗木や土壌

* 本実験の成績の一部を文献(100)に発表した。

を採取した。スギ苗の苦土欠乏症の調査にあたっては、その程度により第20図に示すように4段階に分けて調査した。

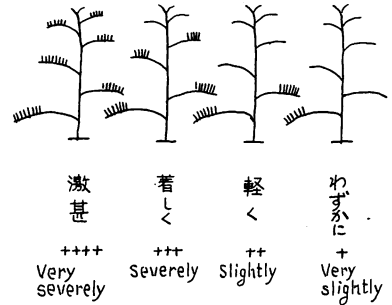
V-B 調査成績とその考察

静岡県下の前記6苗畑を調査した結果を要約すると、第39表のようになり、これについてスギ苗の苦土欠乏症の発現と土壌の化学的性質、とくに土壌の pH と置換性塩基との関係を考察すると、つぎのとおりである。

(1) 調査した6カ所の苗畑のスギ苗には、いずれも苦土欠乏症が認められた。そして三沢、青部両苗畑には著しく現われ、本谷、三明寺両苗畑ではわずかであり、気田、釣両苗畑は中程度であつた。

(2) つぎに各苗畑のスギ苗の苦土欠乏症の標準的に現われていると思われる所の土壌(地表下0~10cm)の2、3の性質を第39表により考察すると、苦土欠乏の著しい

三沢、青部両苗畑は、土壌100gあたりの置換性 MgO が、いずれも10mg以下であるが、そのほかの苗畑はいずれも置換性 MgO が10mg以上あり、苦土欠乏症は軽度である。農作物では一般に第21図に示すように、土壌100gあたりの置換性 MgO が10mg以下の場合、ほとんど例外なく苦土欠乏症



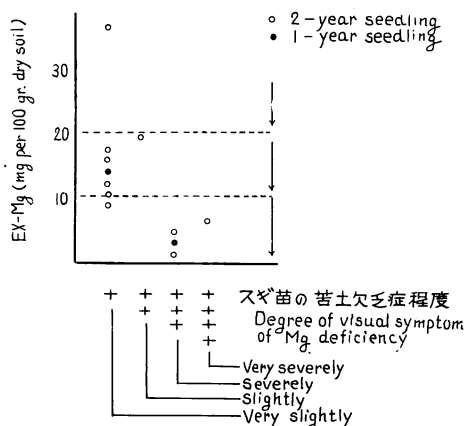
第20図 スギ苗に現われた苦土欠乏症の程度の分け方

Fig. 20 Classification of visual symptom of magnesium deficiency appeared in Sugi seedlings.

第39表 静岡県下の苗畑におけるスギ苗の苦土欠乏調査

Table 39. Data on magnesium deficiency of Sugi seedling on nurseries in Shizuoka Pref.

営林署名 苗畑名 Location of nursery		全体的にみた Mg 欠乏程度 General degree of Mg deficiency	スギ苗の Mg 欠乏症の発現と土壌の性質 Mg deficiency of seedling and some properties of soils							Mg 欠乏発現の条件(推定) Reason for Mg deficiency
			苗齢 Age	Mg 欠乏の程度 Degree of Mg deficiency	発現率 %	pH (H ₂ O)	Exchangeable-bases (mg/100 g soil) MgO CaO K ₂ O			
天城 本谷 Amagi	軽度 Slightly	2	+	18	6.0	10.2	270	12.7	0.80	
		1	—	0	5.4	19.6	319			
沼津 三明寺 Numazu	軽度 Slightly	2	+	27	5.9	17.8	417	12.2	1.46	
		3	+	19	5.7	12.0	290			
千頭 青部 Senzu	著 Remarkably	3	++++	68	4.9	3.2	50	15.0	0.21	Mg の不足 Deficiency of Mg
		2	++++	93	5.2	2.4	75	12.2	0.20	
		2	++++	27	5.8	4.0	397	12.2	0.33	
掛川 三沢 Kakegawa	激甚 Severely	2	++++	65	6.4	6.4	260	15.5	0.41	Ditto
気田 気田 Keta	軽度—著 Slightly~ Remarkably	2	+	16	4.8	16.6	169	31.5	0.53	K の過剰 Excess of K
		3	+	4	4.5	14.0	124	19.3	0.73	
		1	++	90	5.5	7.8	156	12.2	0.64	
		1	—	0	5.9	11.6	154	13.6	0.85	
浜松 釣 Hamamatsu	軽度—著 Slightly~ Remarkably	2	+	34	6.9	36.4	478	44.7	0.82	Ca の過剰 Excess of Ca
		2	++	49	6.6	20.4	343	44.6	0.46	



第21図 土壤中の置換性苦土と、スギ苗の苦土欠乏症発現との関係

Fig. 21 Relation between exchangeable magnesium content of soil and degree of visual symptom of magnesium deficiency of Sugi seedling.

青部苗畑での苦土欠乏症の発生した苗木ならびにその土壤条件について分析した結果は第40、41表に示すとおりで、これについて2、3の考察を加えてみると次のとおりである。

(1) 青部苗畑においてPlot-1の苦土欠乏の著しい所の土壤は、Plot-2の苦土欠乏の軽度の所にくら

第40表 スギ苗の苦土欠乏症が発生した土壤の性質と苗木の化学的組成

Table 40. Growth and mineral concentration of two years old Sugi seedling grown under magnesium deficient soils.

Plot	Mg 欠乏程度および発現率% Degree of Mg deficiency %	土 壤 の 性 質 Some chemical properties of soil						苗木の性状ならびに地上部の化学的組成 Growth and mineral concentration of seedling. (% of dry matter).					
		pH (H ₂ O)	y ₁	Ex-base mg/100 g soil			MgO K ₂ O	Len- gth cm	Fresh weight g	MgO %	CaO %	K ₂ O %	MgO CaO
				MgO	CaO	K ₂ O							
Plot 1	著 Remarkably 44 28 28	4.4	4.7	1.9	18.6	28.4	0.07	24	26	0.07	1.08	1.19	0.06
Plot 2	軽度 Slightly 4 75 21	4.6	6.2	7.8	175.8	10.7	0.73	31	59	0.21	1.00	1.00	0.21

第41表 苦土欠乏症発現の程度の相違するスギ2年生苗の化学的組成(対乾物%)

Table 41. Chemical composition of two years old Sugi seedling with various magnesium deficiencies. (% of dry matter).

Mg 欠乏症の発現程度 Degree of Mg deficiency	苗木の性状ならびに地上部の化学的組成 Growth and mineral composition of seedling								
	苗 長 生体重 Length Fresh weight cm g		N %	K ₂ O %	CaO %	MgO %	MgO K ₂ O	MgO CaO	
0	19.2	35.2	0.95	1.24	1.07				
+	18.4	38.7	0.89	0.99	1.11	0.98	0.97	0.88	
++	17.0	36.5	0.80	1.10	1.39	0.41	0.37	0.29	
+++	16.8	36.9	0.88	1.16	1.45	0.28	0.24	0.19	
++++	16.0	36.2	0.87	1.17	1.44	0.30	0.20	0.21	

が発現するが、10~20 mg ていどではかなり、欠乏の恐れがあり、20mg 以上の場合にはほとんど欠乏の恐れがないといわれているが⁹⁷⁾、いまこの関係は調査の範囲内ではスギ苗の場合も農作物の場合とよく一致するように見受けられる。

(3) 苦土とカリとの間には、antagonism 拮抗作用があり、MgO/K₂O の値が小さい場合に苦土欠乏が起こりやすいことは多くの人に指摘されているが^{98) 99)}、第39表によると苦土欠乏が著しい青部、三沢苗畑では、MgO/K₂O の値がいずれも0.5以下で、ほかの苗畑よりも小さい値を示している。しかしこの両苗畑はもともとMgOの絶対量が少ないので、その苦土欠乏の起こる主要因はMgO/K₂Oの値が小さいことによるよりも、むしろMgOの絶対量が少ないことによるものと考えられる。

べて置換性 Mg および置換性 Ca が少ないが、反対に置換性 K_2O は多く含まれている。したがって苦土欠乏の著しい所の土壤は、 MgO/K_2O の値は 0.07 を示して著しく小さい。また、Plot-1 の苦土欠乏の著しい所に生育した 1 年生スギ苗の苗木体の苦土含有率は、Plot-2 の苦土欠乏の軽度の所に生育した苗木体の苦土含有率よりも著しく少ないが、苗木体のカリ含有率について苦土と反対に苦土欠乏の著しい所に生育した苗木体のカリ含有率の方が、苦土欠乏の軽度の所に生育した苗木体のカリ含有率よりも大きい値を示している。したがって、上にのべた土壤の分析結果と、苗木体の分析結果との両者を総合して考察すると、Plot-1 において苦土欠乏の著しく発生した原因は、土壤中の MgO 含量が絶対的に不足しているためと、土壤中の MgO 含量に比較して K_2O 含量が多過ぎるため、スギ苗の養分吸収過程において苦土とカリとの antagonism が起こり、苦土欠乏をさらに助長しているものと考えられる。そして、Plot-2 における苦土欠乏の軽度のところの土壤の置換性 MgO は 7.8 mg で、苦土欠乏の著しいところよりは多く含まれているが、 10 mg 以下であるので、一般的には小さいといえることができる。それにもかかわらず、苦土欠乏の発生が軽度なのは置換性 K_2O が比較的小さく、 MgO/K_2O の値も 0.73 で 0.5 より以上の値を示し比較的大きい。すなわち、Plot-2 において苦土欠乏が軽度であつた主要因は、Plot-2 では苦土とカリとの間に、Plot-1 の場合におけるような antagonism が起こらなかったことによるものであろうと解釈することができる。

(2) つぎに、スギ 2 年生苗の苦土欠乏症の程度と苗木体の化学的組成、とくに MgO , CaO , K_2O について第 41 表の結果により考察を加えると、苦土欠乏症の程度が著しくなるに従い苗木体の MgO は明らかに減少する。これに対して、苗木体中の CaO は苦土欠乏が著しくなるに従い増加する傾向が認められ、 K_2O については今回の実験の範囲では特別の傾向が認められなかつた。すなわち、第 41 表に示した実験範囲内では、スギ苗の苗木体内においては、カリと苦土の antagonism よりも、むしろ石灰と苦土の antagonism が認められるように見受けられた。

VI 考 察

筆者はまず実験—19において、わが国の代表的造林樹種であるスギのほか、2, 3 の主要針葉樹について、窒素、リン酸、苦土の欠乏症に関する既往の研究成績を追試、確認したうえで、実験 20—22 において、従来明らかにされていなかったカリ、石灰欠乏症に関する実験を行ない、最後に調査—1において現実の苗畑に最も多く見受けられる苦土欠乏症の実態についても調査を行ない、その発生条件を土壤肥料的見地から検討した。以上の研究成績をもとにして考察を行なうと、次のとおりである。

(1) カリ欠乏症について

カリ欠乏症の研究成績に関しては、農作物については、前述の WALLACE⁷⁶⁾ (1951) などにより、また林木については BECKER-DILLINGEN⁶²⁾ (1939) により要約されている。最近では MITCHELL¹⁰¹⁾ (1939), HOBBS⁷⁸⁾ (1944), HEIBERG ら⁷⁹⁾ (1951), WALKER⁸¹⁾ (1956), WILDE⁸²⁾ (1957) などの報告にカリ欠乏症の記載がある。これらの外国樹種にみられたカリ欠乏症と、本実験でスギ苗にあらわれたカリ欠乏症の共通点は、いずれも針葉が黄緑色からしだいに赤味を帯びた、いわゆる葉焼 (ハヤケ) に類似したような necrosis の状態になるのが特徴である。

針葉樹の外見的なカリ欠乏症の現われる場合の針葉の $K_2O\%$ については、WHITE⁷⁰⁾ (1954) はマツ類、トウヒについて 0.3% 以下の場合に、Van Goor¹⁰²⁾ (1956) は欧州アカマツは 0.35%, コルシカマツは 0.3% 以下の場合にカリ欠乏症が現われるといっている。実験—20 においては、 K_2O 2 p. p. m. 区まで

外見的なカリ欠乏症が現われたが、 K_2O 2 p.p.m. 区の針葉の $K_2O\%$ は 0.23%, K_2O 4 p.p.m. 区の $K_2O\%$ は 0.54% であり、上記の外国樹種の成績とよく一致する。すなわち、一般に針葉樹では針葉の $K_2O\%$ が 0.3% 以下に低下した場合に、カリ欠乏症が起こるものと考えてよいであろう。

しかし、林木は農作物とちがい、外観的に明白なカリ欠乏症が現われることは少ないが、しかし、外観的には明白な欠乏症が現われなくても、カリ欠乏により苗木体にはいろいろの abnormal な変化が起こり、潜在的なカリ欠乏の状態はかなり多く見受けられるものと考えられる。

高橋¹⁰³⁾ (1958) はカリ欠乏症は窒素の供給過剰で強調されるといつているが、N と K_2O との供給比ならびに植物体内の N/K の値については、いろいろ論ぜられている^{103) 104)}。今回の実験において、 K_2O 10 p.p.m. 以下の場合には枝葉部の N/ K_2O の値は 2 以上となつていのは、カリの不足と同時にカリに対する窒素の過剰吸収による一種のアンバランスの害作用が現われているものと考えてよいであろう。したがって、 K_2O 4 p.p.m. 区の苗木はかなりの生育を示し、カリ欠乏症も外見的には見られないが、内部的にはカリ不足ならびにカリに対して相対的に窒素過剰の状態にあるものと考えられる。養分欠乏とは、一般には外見的に特有の養分欠乏症の現われる状態をいうのであるが、その前駆の状態として、外見的な養分欠乏症は認められないが、苗木体内にある特定の養分の著しい欠乏が起こらなくても、ある特定の養分と他の養分との間にアンバランスが起こり、ある種の生理作用に異常が起こる場合がある。この状態は養分の内的欠乏の状態と表現して、前者と区別することができる。要するに、前者の養分欠乏に対して後者は養分不足の状態と考えてよく、われわれは養分欠乏症の現われる前段階の養分不足の状態を早く、はあくすることが重要であり、栄養診断技術の応用的見地からみて有意義であると考えられる。

(2) 石灰欠乏症について

農作物の石灰欠乏症は一部の作物については明らかにされているが⁷⁷⁾、カリや苦土の欠乏症のように十分明らかにされていない。林木の石灰欠乏症については、まだ報告がない。

実験—21で、スギ苗に現われた石灰欠乏症は、新梢部の頂芽および頂芽に近い先端の部分が暗褐色になり、necrosis の状態になる点で農作物の 2, 3 の例⁷⁷⁾ と一致している。

スギ苗に現われた石灰欠乏症のもう 1 つの特色として、根系が黒褐色になり、根腐れを起こすことであるが、この点については農作物についての研究でもまだ指摘されていない。このように養分欠乏症は根系にも顕著に現われることがあり、このことは養分欠乏症を実際に应用する場合にはなほ重要であり、根系による栄養診断技術の完成は今後に残された重要課題であろう。

(3) 苦土欠乏症について

谷田沢¹⁰⁵⁾ (1953) の苦土欠乏症に関する研究成績の総合抄録によれば、林木の苦土欠乏症は 1932 年に LABNG 氏が水耕法により *Pinus excelsa* について報告したのが最初のものである。その後 BECKER-DILLINGEN¹⁰⁶⁾ (1937), JENSSEN¹⁰⁷⁾ (1939), HOBBS⁷⁸⁾ (1944), VOIGT⁹⁹⁾ (1958) などの研究成績があり、わが国では宮崎¹⁰⁸⁾ (1951) により、スギ苗の赤変病といわれたものは苦土欠乏症であることが発表され、さらに宮崎およびその協同研究者らにより追究された。そして著者の調査観察によれば、林木ではカリや石灰欠乏症よりも苦土欠乏症の方が実際に発現するが多い。これらを要約すると、一般に針葉樹の苦土欠乏症は、針葉が褐色味を帯びた黄色に変化する点で共通の特徴があるといえるであろう。

筆者の実験—19における追試では、苦土欠乏症も、ほぼ同様の傾向を示すが、スギは鮮明な赤紅色を呈する人が多いのが特徴で特異な苦土欠乏症を示すものである。苦土欠乏症のもう 1 つの特徴は一般に下

部から、しだいに上部にかけて変色が現われることである。このことは農作物ではすでに知られているが、実験—19において林木でもよく上記の特徴が認められた。とくにスギとヒノキはこの傾向が著しく、スギは下位の枝葉から、またヒノキは下位の枝葉の基部から変色が始まり、しだいに上位に及んだ。このように苦土欠乏症も1種のクロロシス(chlorosis)であるが、その発現部位と進行過程を観察することにより、他の要素欠乏によるクロロシスと区別することができる。

カリ、石灰、苦土の各要素の欠乏症のうち著者の調査によれば、苗畑ではカリ欠乏症は現われることが比較的少なく、また石灰欠乏症の出現はほとんど皆無といつても過言ではない。しかし苦土欠乏症はかなり多く見られ、またその程度も著しい場合も往々にして見受けられる。したがって、苦土欠乏症の発現状況とその土壌条件との関係を調査することは苗畑土壌の肥培管理上重要な意味があり、調査—1を行なつたのである。この調査結果から農作物での研究で指摘されているように、スギ苗の苦土欠乏症は置換性苦土が10 mg/100 g以下の時にほとんど例外なく現われており、また苦土とカリとの間には明りような antagonism が認められ、土壌中の置換性カリ含量が多い場合に苦土欠乏症の発現が著しい。このことは苗畑では健苗育成の立場から、カリ肥料を多用することがあるが、苦土の不足または欠乏土壌ではカリの施用により苗木に苦土欠乏を起こさせるから注意が必要である。

また、調査—1および著者の多くの調査成績によれば、苦土欠乏症の発現はカリとの antagonism ばかりでなく、石灰過用の場合に発現することを認めた。これと同様の現象を五島ら¹⁰⁹⁾(1953)はコムギにつき、BECKER-DILLINGEN¹⁰⁶⁾(1937)は欧洲アカマツについて認めている。

第2章 苗畑施肥の本質に関する実験的考察

第1章においては合理的な苗畑施肥の基礎的事項として、重要と思われる苗木の2、3の栄養生理学的特性を明らかにした。苗畑施肥はこれらの苗木の特性を利用することによって合理化され、苗木の増産がはからなければならないことは農作物の場合と同様であるが、苗木は生産の終点において必ず移植されるものであるから、苗木には量的成長とともに、移植に適合した特別の形質が要求され、いわゆる充実した健苗の育成が重要視される。したがって、苗畑施肥の基本線もこの線に沿って行なわれなければならない点にその本質があるように思われるので、本章ではこれらの点につき研究を進めることにする。

第1節 育苗の目標と苗畑施肥

苗木の育成にあたっては、その量的成長、すなわち苗長や重量などの問題も重要であるが、苗木は多くの場合、かなり遠い距離まで運ばれて、それが生産された苗畑とは異なつた環境条件のところに植栽され、特別の保護管理を受けることもなく放置されるのであるから、移植に適合したいろいろの形質をそなえていることが、また重要なことである。したがって、苗畑施肥の目標もよく苗木に要求されるいろいろな条件、またその条件を満たすに必要な苗木の形質を付与するような線にそつて行なわれなければならない。

第2節 苗木の形質に及ぼす肥料要素の影響

上述の観点から、著者は肥料3要素が苗木の形質にどのような影響をおよぼすかを明らかにする目的で実験—23を行ない、その結果、カリとリン酸が苗木に必要な形質を付与するのに重量な要素であることが判明したので、さらにカリについては実験—24において、またリン酸については実験—25において研究を進め、最後に苗木の発根に対してその下位葉の重要性を実験—26において実証した。そしてこれらを総

合的に考察して、育苗の目標と、これに適合した苗畑施肥理論の解明を本節の最終的研究目標とした。

I 実験—23 窒素、リン酸、カリの施用が苗木の形質におよぼす影響 *

I—A 実験目的および実験方法

肥料3要素である窒素、リン酸、カリが苗木の成長ならびに苗木の形質におよぼす影響を調べる目的で、つぎのような実験を行なった。

(1) 実験用苗木の育成

実験材料としてスギ1年生苗を用いた。すなわち、林業試験場目黒苗畑において、(a) 窒素、リン酸、カリの3要素施肥区、(b) 窒素単用区、(c) リン酸単用区、(d) カリ単用区、(e) 無施肥区の5試験区を設け、スギをまきつけ育苗した。その育苗成績は第42表のとおりである。第42表の苗体の養分含有率をみると、窒素、リン酸、カリ各単用区のそれぞれの要素含有率はいずれも大きく、各要素単用の効果は十分あらわれており、ここに育成した苗木は上述の目的の実験に使用することができる条件を、よくそなえているものと認められる。

第42表 実験用苗木の育成
Table 42. General description of sample seedlings.
(One year old Sugi seedling.)

施肥区別 Fertilization treatments	施肥量 Amounts of fertilizer g/m ²			苗木の生育状況 Growth of seedling		苗木体の養分含有率 Nutrient concentration of seedling (%)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	苗長 Length cm	生体重 Fresh weight g	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
(a) 肥料3要素施用の苗木 Seedlings fertilized with N, P, K	20	30	20	9.2	2.4 (200)	1.37	0.33	1.40
(b) 窒素単用の苗木 Seedlings fertilized with only N	20			9.3	2.7 (225)	1.22	0.31	1.10
(c) リン酸単用の苗木 Seedlings fertilized with only P		30		7.8	1.8 (150)	1.14	0.49	1.30
(d) カリ単用の苗木 Seedlings fertilized with only K			20	6.1	1.3 (108)	1.09	0.26	1.56
(e) 無施肥の苗木 Seedlings unfertilized				6.5	1.2 (100)	1.08	0.39	1.00

(2) 苗木の成長ならびに形質の調査

上述の(1)で育成された苗木の生育状態を苗長、生重量などについて、また2、3の重要と思われる苗木の形質について調べて、それぞれの肥料要素との関係を求めた。

苗木の形質については、どのような形質を重要視して調べたらよいか、まだ明らかにされていないので、著者の考え方をもとにして、便宜上ここでは苗木の形質を、i) 苗木の充実度、ii) 苗木の根の形質、iii) 苗木の水分消失度、iv) 苗木の移植後の成長の4種類に分けて、そのおのおのについて必要と思われる項目を調べた。これらを詳細についてのべると次のとおりである。

i) 苗木の充実度

苗木の充実度という言葉の意味は不明確であるが、ここでは常識的に苗木の健康度あるいはかたさというような意味に解釈して、この言葉の内容に関連があると思われる弱さ度¹¹⁰⁾、組織粉末比重、可溶性窒素の含有量などについて調べた。

* 本実験の成績の一部を文献(117)に発表した。

ii) 苗木の根の形質

苗木の根の形態、T/R 率、吸収根率、発根力などについて調べた。

吸収根率(仮称)とは、WILDE¹¹²⁾(1955)が提唱した Absorbing capacity of root systems の値を、さらに著者が根の重量で除して得られた数値に仮りにつけた名称で、根系全体のなかで吸収作用をよく行なう部分の多少を示すものであり、吸収作用に対して有効な部分の割合を示すものであると考えてよいであろう。

Absorbing capacity of root systems は苗木を地上部と根部とに分け、根の部分に付着している土壌をよく水洗したのち、濾紙にて水分をとり、3N-HCl に浸漬する。15 秒間浸漬したのち 5 分間流水中で過剰の酸を取り除き、次にこの根を 250 cc の蒸留水を入れたビーカーに移して、10 分間攪拌したのち、10 cc をとり、0.3N-NaOH で phenolphthalein を指示薬として滴定して得られる値で、WILDE は Titration value とも呼んでいる。

また、発根力については、その大小、強弱を判定するのに慣行的な方法もないので、著者は苗木の根を地際から 2 cm ほど残して切断して、その切り口の部分を水(とくに養分を与えない水)に浸漬させて水耕して、一定期間中における発根量を測定して、これを地上部の重量で除した値を求め、これを発根率と仮りに呼ぶことにした。

iii) 苗木の水分消失度

WILDE ら¹¹³⁾(1949)の提案した方法により測定した。その方法を簡単にのべると、この実験のために特に作製した箱の右側に根部を切断した苗木を置き、約 40~42°C で 20 分間、箱の左側から温風を送り、前後の重量差を torsion balance で測定して、苗木 1 本あたりの水分消失による蒸散量を求めた。この箱の構造は第 22 図に示すようなものであるが、WILDE の原図とは多少異なつた点もある。

WILDE はこの水分蒸散量を、ii) でのべた titration value で除した値を Absorption-transpiration quotient と呼び、苗木が多汁質であるかどうか、また皆伐地の不良環境地に対する抵抗性の強弱を指標するものとしている。著者はこの用語に「吸水-蒸散平衡係数」という訳語を用いることにした。

iv) 苗木の移植後の成長

各処理区の苗木を 4 月 18 日から 6 月 30

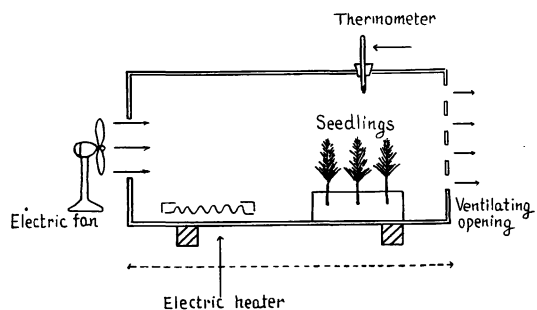
日まで水耕培養して、その間の生重量の増加量で移植後の成長を比較した。

I—B 実験成績とその考察

(1) 苗木の充実度

実験成績を要約すると第 43 表に示すとおりである。

第 43 表から、N, P, K 施用区の苗木は弱さ度は最も低い値を示すのに対して、組織粉末比重は最も大きい値を示し、他の区の苗木にくらべて最も充実した苗木であることが認められる。つぎに N 単用区の苗木の全 N に対する可溶性 N の含有割合は 10.3% で最も高く、苗木の外見的成長はよいが、不健全な苗木



第 22 図 苗木の水分消失度測定箱

Fig. 22 Transpiration chamber for determination of water loss by crown of seedling.

第43表 N, P, K が苗木の健全度に及ぼす影響
Table 43. Influence of nitrogen, phosphorus and potassium on some qualities of seedling. (Two years old Sugi seedling.)

施肥区別 Fertilization treatments	弱さ度 Slenderness	組織粉末比重 Volume weigh of tissue g/100 cc	可溶性 N
			全 N Soluble-N Total-N
(a) 肥料3要素施用の苗木 Seedlings fertilized with N, P, K	21	42.3	5.7
(b) 窒素単用の苗木 Seedlings fertilized with only N	26	39.7	10.3
(c) リン酸単用の苗木 Seedlings fertilized with only P	27	39.7	3.3
(d) カリ単用の苗木 Seedlings fertilized with only K	25	40.1	3.8
(e) 無肥料の苗木 Seedlings unfertilized	31	38.8	3.6

注 N.B. * 弱さ度 Slenderness¹¹⁰⁾ = Top length/Top dry weight.

** 組織粉末比重: 額額氏による

Volume weight described here means volume weight of powders of tissue.

であることを示している。そしてN単用区の苗木にP, Kを併用した場合、すなわちN, P, K施用区の苗木の全Nに対する可溶性Nの含有割合は5.7%と低下している。したがって総合的にみれば、N, P, Kの完全施用区の苗木は健全度が最も高いといえることができるであろう。

沖永¹¹⁴⁾ (1951) も窒素多用の苗は可溶性窒素とくにアミノ酸態窒素が多いことを認めている。また、原田¹¹⁵⁾ (1959) も窒素の過用は徒長苗をつくりやすく、水溶性窒素/全窒素が高まることを認めている。これらの現象はいずれも成長最盛期においては苗木の成長現象が盛んであることを意味するが、晩秋の成長完了期には苗木の充実度が低く不健全であることを意味するものと考えてよいであろう。

弱さ度はBAKER¹¹⁰⁾ (1945) により提案され、この値の大きいことは窒素肥料の過剰、陽光の不足、土壌水分の過多にもとづく軟弱多汁な、いわゆる充実していない苗木を意味するものとされているが、N単用区の苗の弱さ度はとくに大きい値を示さなかったが、N, P, Kの完全施用区の苗は他区の苗にくらべて、いちだんと小さい値を示した。

(2) 根の形質

実験成績を要約すると第44表ならびに写真—9のとおりである。

これによると、P単用区の苗の根系は、細長く下方に張らないで床替しやすい形態をしており、またT/R率は小さく、根の全量(この場合根の生重量)に対する吸収根の割合(Ab/Rw)も大きく、総合的にみて良好な形質の根であることが認められる。

発根性については第44表および写真—13に示すように、P単用区およびN, P, K施用区の苗の発根率が高い。このことから苗木の根に関しては、3要素のうちPが最も関与していることが考えられる。一般に窒素肥料の増施とともにリン酸肥料も増施する必要があるが、このことは育苗の場合には根の形質向上の面からみても重要な意義をもつものである。

(3) 苗木の水分消失度

実験成績を要約すると第45表のとおりである。

第45表によると、WILDEの吸水—蒸散平衡係数は窒素単用の苗木が最も大きく、カリ単用の苗木は最も小さい。したがって窒素は苗木の水分消失量を大きく、したがって乾きやすい苗木をつくり、またカリは乾きにくい苗木をつくるものと考えられる。山下¹¹⁶⁾ (1951)によれば、カリは植物細胞の滲透価を高め蒸散作用を調節するといわれるが、カリ単用の苗の吸水—蒸散平衡係数が小さい値を示すのは上述の関係

第 44 表 苗木の根の形質ならびに発根に及ぼす肥料 3 要素の影響
Table 44. Influence of nitrogen, phosphorus and potassium on some qualities of root of seedling. (One year old Sugi seedling.)

施肥区別 Fertilization treatment	根の形態 Feature of root system	T/R	Ab/Rw	発根率 Rate of rooting
(a) 肥料 3 要素施用の苗木 Seedling fertilized with N, P, K	最 良 Favourable	2.4	1.4	37%
(b) 窒素単用の苗木 Seedling with only N	不 良 Unfavourable (細根少なく、直根性の根が下方へ伸長しすぎて、移植に不適当な形になる傾向がある。)	3.8	1.0	18
(c) リン酸単用の苗木 Seedling with only P	最 良 Favourable (細根多く側方にもよく拡がり、移植に適した形である。)	2.0	1.6	36
(d) カリ単用の苗木 Seedling with only K	不良～中 Unfavourable～Moderate (N 単用区の根に似ているが多少細根が多い。)	2.5	1.3	28
(e) 無肥料の苗木 Seedling unfertilized	中 Moderate	2.0	1.3	14

注 N.B. Ab/Rw=吸収根率 (著者仮称)

Ab=Absorbing capacity of root.

Rw=Fresh weight of root.

第 45 表 蒸散率および移植後の成長におよぼす 3 要素の影響
Table 45. Influence of nitrogen, phosphorus and potassium on transpiration and growth of seedling after transplanting.
(Two years old Sugi seedling.)

施 肥 区 別 Fertilizer treatments	Tr/Ab	移植後の成長率 ($\frac{8 \text{ 月の重量} - 4 \text{ 月の重量}}{4 \text{ 月の重量}}$) Growth rate of seedling after transplanting
(a) 肥料 3 要素施用の苗木 Seedling fertilized with N, P, K	0.22	8.62
(b) 窒素単用の苗木 Seedling with only N	0.31	6.47
(c) リン酸単用の苗木 Seedling with only P	0.21	4.76
(d) カリ単用の苗木 Seedling with only K	0.19	5.27
(e) 無肥料の苗木 Seedling unfertilized	0.19	8.30

注 N.B. Tr/Ab=WILDE (1955)¹¹²⁾ の Absorption Transpiration Quotient.

蒸散吸水平衡係数と著者仮称。

によるものと思われる。ただし、第 45 表から窒素を施用しても、リン酸、カリを併用すれば、吸水蒸散平衡係数は小さくなるのがわかる。これは窒素・リン酸・カリの併用が、苗木の充実度および根の形質に総合的に作用して、この結果が苗木の吸水—蒸散平衡係数に影響をおよぼしているものと思われる。ここで、標題に苗木の水分消失量という言葉を用いたのは、WILDE の Absorption-transpiration quotient は直訳すれば吸水—蒸散平衡係数と訳される言葉であるが、WILDE の規定した実験方法による苗木の水分減量は、苗木の生理的な蒸散作用によるもののほかに、物理的な蒸発作用も多少関与しているものと考えて、著者はあえて水分消失度という言葉を用いたのである。

なお、カリの蒸散作用におよぼす影響については実験—24 でさらに追究することにする。

(4) 苗木の移植後の成長

苗木が移植され、雑草との競合に打ちかつて成長するためには、苗木がある一定の大きさをもっていることとともに、移植後の旺盛な成長が要求される。

実験方法の項でのべたように、窒素、リン酸、カリの施用を異にして育成した5種類の苗木を4月から8月まで低濃度の水耕液で培養し、その生長状況を調べた結果は、前掲の第45表および写真—14に示すとおりで、植栽後の成長は、 $N > N, P, K > P > K$ 施用区の苗木の順序に良好であり、苗木の形質や水分消失度にマイナスの影響を与えていた窒素も、移植後の成長にはリン酸、カリよりもプラスの影響を与えているものと考えられる。

(5) 以上(1)~(4)においてのべたことを整理すると、つぎのように考察される。

i) 充実した苗木をうるためには、Nの単用(ないし過用)はマイナスの影響をおよぼすが、P、Kの併用において、Nの施用は著しくプラスの影響をおよぼす。

ii) 根の形質および発根性については、とくにPがN、Kにくらべてプラスの効果を示す。

iii) 苗木体の根による吸水作用に対する枝葉からの水分消失(蒸散)のバランスについては、Nの単用(ないし過用)はマイナスの影響をおよぼすが、P、Kを併用すればNのマイナスの影響は少なくなる。

iv) 移植後の成長についてはP、KよりもNがプラスの影響をおよぼし、P、Kを併用することにより更にプラスの結果をきたすように見受けられる。

以上を総合的に考察すると、N、P、Kの3要素の完全施用が、苗木に良好な形質を与えているが、N、P、Kの各要素はそれぞれ異なつた作用をもち、おのおのがそれぞれ異なつた形質に關与しているものと考えられる。上述の実験成績は、苗木にある特定の形質を付与しようとする場合に役だつものとして、また苗畑施肥の目標に技術的基礎を与えることができたものとして有意義である。

II 実験—24 カリがスギの形質におよぼす影響*

II—A 実験目的および実験方法

実験—23において、スギ1年生苗の成長ならびにその形質に対する肥料3要素の影響を調べた。すなわち、苗木の形質として重要であると思われる苗木の充実度、根の形質とくにその発根性、苗木の水分消失度、移植後の成長などに対して、N、P、Kの各要素はそれぞれ異なつた作用をもち、それぞれ異なつた形質に關与していることを指摘した。本実験ではとくにカリのスギ苗の生育ならびにその形質におよぼす影響について調べることにした。

(1) 1年生スギ苗についての実験

スギ苗は秋季にそれまでに吸収した窒素を利用して成長する性質が強い。この秋季における成長が異常な場合が、いわゆる徒長現象と呼ばれるものである。著者らは秋季にスギ苗にカリを施用すると、その成長が抑制されることを予備実験で観察したので、昭和26、27年の兩年度にわたり、林業試験場砧苗畑において、窒素多用区(N区)と窒素多用カリ追肥区(N+K区)とを設け、カリが苗木の形質におよぼす影響を調べた。

すなわち、苗木の生育状態を調査し、また苗木体内の還元糖、非還元糖、可溶性窒素など、苗木のいわゆる充実度に関係があると思われる2、3の有機成分を分析した。

分析の方法については、還元糖は80%の熱アルコール抽出液の1定量をとりペルトラン法により、また非還元糖は同じ抽出液を、1.5% HClで加水分解したのち常法により測定した。また、上記の加水分解した溶液中のNをケルダール法により定量して可溶性Nとした。

また、昭和27年度の実験でえた苗木についてその蒸散量を測定した。その方法は300 cc 容三角コルベ

* 本実験の成績の一部を文献118)および118a)に発表した。

ンに苗木を1本挿入し、コルク栓と綿で固定、密封し、重量法で一定期間の蒸散量を求めた。蒸散量は苗木の生体重1gあたりの1日の蒸散量(cc)で表示した。また、昭和26年および昭和27年に育成したスギ1年生苗を4月に掘りとり、25本を1束として重量を測定したのち放置した(根は乾燥を防ぐため紙で包んだ)。そして苗木の重量が蒸散作用などにより、始めの20%まで減少した時、すばやく移植(床替え)して、その活着率を測定した。これを仮に乾燥移植試験の活着率と呼ぶことにする。

(2) 2年生スギ苗についての実験

実験—19において、カリ欠除培養を行なった苗を、さらに継続して水耕培養を行ない、カリの欠乏状態の苗木を育成して、これをカリを十分に供給した標準水耕液で培養した苗と比較して、その生育状態や苗木中の2, 3の有機成分、またその蒸散量などを調べた。蒸散量の測定は実験—24と同様に重量法によった。

II—B 実験成績とその考察

2年生スギ苗についての実験成績を要約すると第46表のとおりであり、また1年生スギ苗についての実験成績を要約すると、第47表に示すとおりである。

以下第46表、第47表を通じて考察を加えることにする。

(1) カリが苗木の2, 3の有機成分に及ぼす影響

実験—23では、苗木のいわゆる充実度の指標として弱さ度、組織粉末比重、可溶性窒素/全窒素などをとりあげ、カリの施用がこれらに及ぼす影響についてのべた。今回はスギ2年生苗およびスギ1年生苗において、苗木のいわゆる充実度に関係があると思われる2, 3の有機成分を分析して、スギ苗に対してカリの供給がこれら有機成分の消長に及ぼす影響を調べた。すなわち、第46表ならびに第47表の成績から、カリを追肥した苗木は追肥しない苗よりも、冬季においては非還元糖の含有量が増加する。したがつ

第46表 カリのスギ2年生苗の形質に及ぼす影響

Table 46. Influence of potassium on qualities of two years old Sugi seedling.

(1) 苗木の生育状況ならびに無機成分組成 Growth of seedling, K% and N% of needle, and K deficiency symptom.					
処 理 Treatment	苗 長 Length cm	生体重 Fresh weight g	葉 分 析 Needle analysis K ₂ O% N%		欠 乏 症 そ の 他 Visual symptoms of K deficiency
K欠乏培養 — K	40	184	0.56	0.54	{葉色は濃緑色が濃い、冬季は濁濃緑色、葉先にK欠乏症である黄褐色のネクロシスをわずかに認める。根系の発達が不良。枝葉が軟弱。
標準培養 Control	58	338	1.20	0.94	

(2) 苗木の有機成分ならびに蒸散量 Some organic components and transpiration of seedling								
処 理 Treatment	還 元 糖 非還元糖		澱 粉 Starch %	可 溶 性 N 全 N		蒸 散 量 Loss of water by transpiration*		
	Reducing sugar			Soluble-N Total-N	測 定 期 間			
	Non reducing sugar				1959.10.25 ~11.8	11.8~22	1960.3.5 ~19	3.19~4.6
K欠乏培養 — K	3.00		0.7	20.4	0.36	0.36	0.37	0.67
標準培養 Control	2.60		1.5	2.1	0.16	0.20	0.15	0.33

注 * 1日の蒸散量を苗木(根部を除く)の生体1gあたりのcc数で示す。

N.B. * Data are calculated as cc/g of fresh crown of seedling / day.

第47表 カリのスギ1年生苗の形質に及ぼす影響

Table 47. Influence of potassium on qualities of one year old Sugi seedling.

(1) 苗木の生育状況ならびに有機成分 Growth and some organic component of seedling							
実験年度 Year	施肥 Fertilizer treatment	苗長 Length cm	生体重 Fresh weight g	還元糖 Reducing sugar (A) %	非還元糖 Non reducing sugar (B) %	$\frac{(A)}{(B)}$	可溶性N 全N Soluble-N Total-N %
1953~54	N	12.3	2.6	22.1	4.0	5.52	7.3
	N + K	11.7	2.4	14.1	5.9	2.39	4.6
1954~55	N	12.8	2.0	14.1	8.0	1.76	
	N + K	11.9	1.8	23.4	13.7	1.07	

(2) 苗木の蒸散量ならびに活着率 Transpiration and survival of seedling				
実験年度 Year	施肥 Fertilizer treatment	蒸散量 Loss of water by transpiration*		乾燥移植試験の活着率 ** Survival rate of seedling after transpiration %
		測定 3.11~20	期間 3.21~30	
1953~54	N	0.56	0.52	39.3
	N + K	0.45	0.48	56.5
1954~55	N			12.5
	N + K			21.2

* 蒸散量は1日における苗木の生体重1gあたりの蒸散量(cc)

注 N.B. * Data are calculated as cc/g of fresh crown of seedling / day.

** 乾燥移植試験は、それぞれ16回繰り返して行ない、 χ^2 検定の結果有意差を認めた。

て非還元糖に対する還元糖の割合が小さい。これはカリの供給により還元糖より非還元糖への合成が順調に行なわれる結果によるものと考えられる。またカリを追肥した苗木の冬季における全窒素に対する可溶性窒素の割合は、カリを追肥しない苗木のそれよりも少ない。これはカリの供給により可溶性窒素の蛋白態窒素への移行が順調に行なわれていることを示すものと考えられる。これらのことは成長休止期における苗木のいわゆる充実度を高めることを意味するものと考えてよいであろう。

なおカリ欠除培養のスギ苗の枝葉は写真—15に示すように針葉の着生が粗であり、また機械的にも軟弱で、緊張度が少なく、下垂する傾向が見受けられる。

(2) カリが苗木の蒸散量に及ぼす影響

実験—23において第45表の成績から、苗畑でカリを単独施用した苗木は、窒素を単独施用した苗よりも、WILDE¹¹³⁾ (1949) のいわゆる吸水—蒸散平衡係数の値が小さく、カリは苗木の蒸散ないし水分消費量を小さくする作用があるように考えられた。

今回は1年生スギ苗については、苗畑で初秋にカリ肥料を追肥して育てた苗と追肥しないで育てた苗との蒸散量を、また2年生スギ苗については、カリ欠乏の状態の水耕した苗と、カリを十分供給した状態で水耕した苗との蒸散量を測定して、カリがスギ苗の蒸散量に及ぼす影響を比較した。その成績を第46表ならびに第47表からみると、いずれもカリ欠乏の苗は1日あたりの苗木の生体重1gあたりの蒸散量が大きく、水分の供給が順調に行なわれなくなった場合、すなわち苗の仮植や輸送、あるいは移植などにあたり、不利な性質をもっていることが考察される。

(3) カリが苗木の活着に及ぼす影響

(1) において、成長休止期におけるスギ苗について、カリが欠乏すると非還元糖に対する還元糖の割合や全窒素に対する可溶性窒素の割合が増加するし、またデンプンのようなより高分子な炭水化物が減少することから、苗木のいわゆる充実度が低いものと考えた。また、(2) においてカリが欠乏すると苗木の蒸散量が大きくなり、このことは苗木の移植に対して不利な条件になることを考察した。

これらの推察が、苗木の移植にあたり実際にどの程度の影響を与えるものかを検討するために、乾燥移植試験を行なったのであるが、その活着率は、第 47 表の成績によると、カリが欠乏すると活着率が悪くなることを示している。したがって、遠距離に運ばれたり、また乾燥するような環境に植えられる苗木の生育にあたっては、なるべく水分を浪費しない、いわゆる充実した苗木をつくる意味において、カリの施用がとくに重要であると思われる。

Ⅲ 実験—25 苗木の発根時に地上部より根部へ移動する肥料要素 *

Ⅲ—A 実験目的および実験方法

実験—23 において、施肥を異にしたスギ 1 年生苗の根部を切断した後、水中で再発根させると、リン酸肥料を単用して育成したリン酸含有率の高い苗木の発根量が最も大きかった。したがって、苗木の発根現象にはリン酸が他の要素よりも大きく関与しているのではないかと考えて、次にのべる 2 つの実験を行なった。

(1) まずはじめに窒素、リン酸、カリ、石灰の 4 要素のうち、発根に際してどの要素が最も苗木の地上部から根部に移動して、根の形成に用いられるかをみる目的で次のような実験を行なった。

スギの 2 年生苗の根部を地際から 2 cm ほど下方のところで切断して、その切口を養分を含みぬ水中に浸漬して、一定期間水耕培養して再発根させた後、地上部と根部の窒素、リン酸、カリ、石灰の 4 要素を分析して、地上部から根部へのこれら 4 要素の移動率を算出した。

(2) つぎにこれら 4 要素のうち最も発根に関与していると思われるリン酸について、ラジオアイソトープ P^{32} を用いて次のような実験を行なった。すなわち、スギ 1 年生苗を水耕液 1 l に対して P^{32} 80 μ c を添加して 15 日間水耕培養したのち、地際から下方 1 cm 以下の根を切断して、地上部のみを挿木のような状態で水に浸漬して 35 日間培養し、再発根させて、地上部からの P の移動を、 P^{32} を分析することにより、またオートラジオグラフによつて追跡しようと試みた。

Ⅲ—B 実験成績とその考察

実験成績を要約すると、第 48 表および第 49 表に示すとおりである。

(1) 第 48 表によると、発根により苗木の地上部から根部へ移行する要素はリン酸が最も多量であり、次に窒素で、カリと石灰は比較的少量である。すなわち、これら 4 要素のうちでは発根にはリン酸が最も大きく関与しているものと考えられる。また、窒素もリン酸について発根に関係ある要素と考えられるが、カリと石灰はリン酸と窒素にくらべれば発根に関与している程度が少ない要素と考えられる。

(2) 第 49 表および写真—16 のオートラジオグラフによれば、地上部に吸収された P^{32} は発根に利用されて、ふたたび根に移行する。そしてオートラジオグラフによれば根の先端部に最も多く分布していて、P は発根ないし根の伸長に大きな役割りを果たしていることがうかがえる。また、オートラジオグラフによれば、幹部の P^{32} および上位葉の P^{32} よりも、下位葉の P^{32} の方が発根後少なくなっているように見受けられる。これより発根に利用される P は、下位葉ならびに幹部の P が主として用いられ、上位

* 本実験の成績の一部を文献(117)に発表した。

第48表 発根に際して苗木の地上部から根部への肥料要素の移動

Table 48. Translocation of nutrient elements to root from top of seedling at rooting (Sugi Seedling).

事 項 Item	供試苗の 絶乾重 Dry weight of sample seedling g	窒 素 N Nitrogen		リン酸 P ₂ O ₅ Phosphorus		カリ K ₂ O Potassium		石灰 CaO Calcium	
		N%	mg per seedling	P ₂ O ₅ %	mg per seedling	K ₂ O %	mg per seedling	CaO %	mg per seedling
地 上 部 Top (T)	0.908	0.87	7.89	0.082	0.74	1.13	10.26	1.90	17.36
根 部 Root (R)	0.399	0.66	2.62	0.109	0.43	0.33	1.32	0.80	3.19
苗木全体 (T)+(R)	1.307		10.51		1.17		11.58		20.55
地上部より根部への移行率 Rate of translocation of nutrients (R) (T)+(R) × 100 (%)			24.9		36.8		11.4		15.5

第49表 発根にあたりリン酸は如何に行動するか (スギ苗)

Table 49. Translocation of phosphorus at rooting of Sugi seedling.
(Data on experiment with radioisotop P³²)

苗木の部分 Part of seedling		P ³² の 濃 度 乾物 1 g あたり c. p. m P ³² concentration (c. p. m of dry matter)	Index	地上部より根部への P ³² の移行率 Rate of translocation of P ³² to root from top
発 根 前	上位葉 Upper part of top	230	100	
Before	中位葉 Middle part of top	188	82	
rooting	下位葉 Lower part of top	170	72	
発 根 後	上位葉 Upper part of top	147	100	
After	中位葉 Middle part of top	77	52	
rooting	下位葉 Lower part of top	57	39	
	根 Root	208	141	23%

葉の P は主として苗の伸長に利用されるのではないかと考えられる。

IV 実験—26 スギ苗の下位葉または下枝の発根に及ぼす影響

IV—A 実験目的および実験方法

実験—25の成績によると、スギ苗の発根にはリン酸が、窒素、リン酸、カリ、石灰の各要素のうち最も多く利用され、またそのリン酸の行動を些細にみると、下位葉中に含まれるリン酸が上位葉のリン酸に比較して、より多く利用されることを、また苗木の幹の部分に含まれるリン酸もよく利用されることを認めた。そこでスギ苗の発根には、苗木の下位葉（まきつけ苗の場合）または下枝（床替苗の場合）の発達したものや、また苗木の幹の直径の太いものほどよく発根するものと考えられるので、これを証明するために、つぎにのべるような(a)、(b)の2種類の実験、すなわち、(a)苗木の地際直径ならびに下位葉の発達している苗木と発達していない苗木の発根力の比較実験を、また、(b)スギ1回床替山出苗について下枝の発達している苗木と発達していない苗木の発根力の比較実験を行なった。その方法は、(a)の実験の場合は苗長が等しくて地際直径の太い苗木と、細い苗木、したがって下位葉の発達した苗木と発達していないスギの床替用苗（満1年生）を各20本あて選び、地際から切断して、その切り口を5cmでいど水に浸漬して、その発根重量を調べた。また、(b)の実験の場合は苗長がほぼ等しくて、下枝の発達している苗木と発達していないスギ山出苗を各40本あて選び、土壌条件の様な苗畑に植栽して2年間の成長状況ならびに発根状況を調べた。

なお、(a)の実験は昭和34年4月10日から4月30日まで林業試験場硝子室内で行ない、また(b)の

実験は昭和 33 年 4 月から同 35 年 11 月までの約 2 カ年間にわたり林業試験場目黒苗畑で行なつた。

IV—B 実験成績とその考察

(a) のスギ床替用苗および (b) のスギ山出苗についての成績を要約すると第 50 表に示すとおりである。

第 50 表 スギ苗の下位葉または下枝の発根に及ぼす影響

実験 (a) 苗長が等しくて直径の異なる苗木の発根量 (各 20 本の平均値)								
区 別	移 植 前 の 状 態						移植水耕後の 発 根 量	
	地際直径	苗 長	下位葉 風乾重	上位葉 風乾重	枝 数 下 枝	枝 数 上 枝	発根重	指 数
	mm	cm	g	g				
直 径 が 細 い 苗 木	1.8	13.2	0.19	0.32	3.1	5.2	0.49	100
直 径 が 太 い 苗 木	2.6	13.5	0.57	0.62	5.8	5.5	0.97	198
実験 (b) 下枝の発達の良否の発根に及ぼす影響 (各 32 本の平均値)								
区 別	移植前の状態		植 栽 2 年 後 の 生 育 状 態					
	苗 長	生体重	苗 長	生体重	発 根 量	根部形態		
	cm	g	cm	g	g			
下枝の発達していない 苗木(対照)	42	65	131(100)	994(100)	216(100)			
下 枝 の 発 達 し た 苗 木	36	104	132(101)	1206(121)	284(131)	根張りもよく深く 伸長している		

これによると、(a) の場合は苗長が等しくても地際直径が太く、同時にまた下位葉の発達している苗木は発根がよく、その発根重は対照の直径が細い苗の約 2 倍であつた。しかし今回の実験の範囲では、発根重の大小が直径の大小によるものか、下位葉の大小ないしその状態の相違によるものか区別して解析することはできないが、おそらくこの両者が総合的に作用して発根に影響を与えたものと思われる。また、(b) の場合は苗長が等しくても下枝の発達している苗の方が対照の苗より根の重量が多く、写真—17 に示すように根の張り方も良好で全般的に根の発達が良好であつた。以上 (a)、(b) の成績を総合すると、苗木の直径や下枝ないし下位葉の発達しているものほど、その発根力が大きいものと考えられ、このことは苗木の形質として重要である。

V 考 察

苗木に必要な形質についての研究は皆無といつても過言でなく、ただ WILDE⁹⁸⁾ (1958) の成績があるのみで、総合的な研究はまだ行なわれていないので、著者はとりあえず、苗木の充実度、根の活力と発根力、水分消失度、移植後の成長などについて研究を進め、その結果、これらの苗木に必要な形質と肥料要素との間には深い関係のあることを認めた。

苗木は移植して初めて林業生産過程における価値を生ずるものであるが、苗木の移植は床替えにしても、山出しにしても水稻の移植のように集約に行なうことが不可能であり、距離的にもかなり遠い場所に運ばれて移植されることが多いので、その活性化を高めるためには特に根の形質や発根力が重要である。苗木の場合は一般農作物と異なり、その根系は生育するためにのみ存在するのではなく、移植のために重要な役割を演ずるのであるから、根系の形質と地上部の発根力とは苗木を評価するうえに重要な因子である。そして実験—25 で述べたように、根の発生は地上部の貯蔵養分が作用するので、発根にともない地上

部の栄養状態は一時的に悪化するものと考えられる。この一時的悪化の程度のできるだけ少ないような苗木を育成することが望ましく、このためには実験—23でのべたような肥料3要素の完全施用が必要である。すなわち、苗木に対する肥料3要素の合理的施用は農作物の場合のように単に成長促進という意味のほかに、苗木の形質向上という意味が大きく含まれている点に苗畑施肥の本質があるものと考えられる。

なお、耐寒性の問題も苗木に必要な形質として重要視されなければならない。カリが苗木の耐寒性と深い関係のあることは、芝本⁶⁷⁾(1952)、宮崎ら¹¹⁹⁾(1951)によつて、すでに実証されているので、本研究では実験の運行上にも困難があつたのでこれを行なわなかつたが、今後はこの問題も含めて、施肥と苗木の形質との関係について研究が進められるべきであろう。

第3節 苗畑施肥技術としての葉面施肥

苗畑施肥の本質は苗木に必要な形質を付与し、また向上させることにあると考えられるが、前節でのべたように、苗木の形質は窒素の単独施用または過用により低下するので、苗畑においては窒素肥料の過用をさけるため、その一部を葉面施肥で施用することも有効と考えられ、本節では記述をさけるが、著者はこれらの点につき尿素の葉面施肥試験を行なつてきた¹²⁰⁾。また、前節でのべたように、苗木に対するリン酸肥料の施用はとくに根の形質を向上させるのに有効であるが、リン酸肥料の土壌施肥は土壌のリン吸収係数の大きい場合には肥効が低いので、リン酸塩の葉面施肥がより有効であることを認めた¹²⁰⁾。

本節では以上のように、葉面施肥は苗畑の施肥技術としては特殊の利用場面があるものと考えられ、また実際に用いられる場合もあるので、苗畑に葉面施肥を導入する場合に参考となるであろうと思われる点につき、1、2の基礎的実験を行なつたので、その成績を述べることにする。

I 実験—27 リン酸塩の葉面散布液の pH と肥効 *

I—A 実験目的および実験方法

リン酸塩の葉面散布液の pH 値の相違が、その散布効果に及ぼす影響を知る目的で、ポット試験を昭和32年および33年の両年度にわたり行なつた。

実験方法の概要は 1/2000a ワグネルポットを用い、供試土壌としては土壌中のリン酸の影響を少なくするため、目黒苗畑の心土を主体とし、これに表層土壌ならびに川砂を混合したものを使用した。その割合は 3:1:1 である。供試土壌の pH は 5.2 (KCl)、リン酸含有量は 0.002% (1/5N-HCl) である。

各ポットには N:1.2 g に相当する硫酸を、また K₂O:0.5 g に相当する硫酸カリを施用し、P₂O₅:1.2 g は葉面散布により施用した。そして前年度まきつけしたカラマツ1年生苗を4月上旬に1ポットあたり3本植えた。

リン酸塩としては32年度は NaH₂PO₄ の 0.5% 液を使用し、散布液の pH を 3, 4, 5, 6, 7 の5段階に調整し、それぞれの散布区および無散布区の6処理区を設け、5月22日から7月31日までの期間に12回散布した。33年度には、リン酸塩として CaH₂PO₄ の 0.5% 液を使用し、散布液の pH 値を、4, 5, 6, 7, 8 の6段階に調整し、それぞれの散布区および無散布区の7処理区を設け、4月25日から7月25日までの期間に12回散布した。

散布液の pH は 1/10 N-H₂SO₄ および 1/10 N-NaOH を添加して調整した。なお、NaH₂PO₄ 0.5% 液は pH 6, CaH₄(PO₄)₂ 0.5% 液は pH 4 であつた。

さらに1958年度にはラジオアイソトープ P³² を用いて追究した。すなわち、あらかじめ植木鉢に植栽

* 本実験の成績の一部を文献¹²²⁾に発表した。

したカラマツ 2 年生苗を使用し、第 23 図に示すように最下葉の先端から 10 cm までの葉の部分 T_3 に、pH 3, 4, 5, 6, 7, 8 にそれぞれ調整したリン酸液 (1 cc あたり $1 \mu\text{C}$ の P^{32} を含む) を筆を用いて塗布し、最上部葉 10 cm の部位 (T_1) に現われる count 数の多少により、その効果を判定することにした (T_1 , T_3 以外の、すなわち T_2 の部分の葉は除去した)。

I—B 実験成績とその考察

(1) 苗木の生育状況

実験終了時 9 月 6 日の苗木の生育状況は第 51 表のとおりである。これによると無リン酸区のカラマツの成長は著しく不良であるが、リン酸塩を葉面施肥したものは無リン酸区の約 2 倍から 10 倍の成長を示し、リン酸塩の葉面施肥の効果はかなり高いことが認められた。

リン酸塩散布液の pH の相違による苗木の生育は、32 年度 NaH_2PO_4 の場合は

$$\text{pH } 6 > \text{pH } 5 > \text{pH } 4 > \text{pH } 7 > \text{pH } 3$$

33 年度 $\text{CaH}_4(\text{PO}_4)_2$ の場合は

$$\text{pH } 5 > \begin{matrix} \text{pH } 4 \\ \text{pH } 6 \end{matrix} > \begin{matrix} \text{pH } 3 \\ \text{pH } 7 \\ \text{pH } 8 \end{matrix}$$

の順に良好な生育を示している。

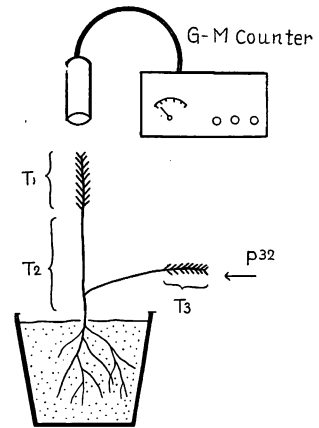
第 51 表 リン酸塩の葉面散布液の pH の相違が 2 年生カラマツ苗の生育に及ぼす影響 (ポット試験)

Table 51. Influence of pH of phosphate spraying solution on growth of two years old Karamatsu seedling.

実験年度 Year	調査事項 Item investigated	散布液の pH pH of phosphate spraying solution						—P (No spraying)
		3	4	5	6	7	8	
1957	苗 長 Length cm	21.7	25.8	25.2	28.9	23.5	—	18.3
	生 体 重 Fresh weight g	23.5	29.8	30.7	34.2	26.3	—	3.8
	同上指数 Index of fresh weight	620	774	790	1,003	692	—	100
1958	苗 長 Length cm	23.0	28.7	26.8	24.5	24.0	25.7	22.0
	生 体 重 Fresh weight g	16.7	21.0	27.0	20.3	15.9	16.1	5.8
	同上指数 Index of fresh weight	288	362	466	350	274	278	100

(2) 苗木体の分析

昭和 33 年度の実験終了時に、苗木を葉、幹、枝、根の 4 部分に分け、そのリン酸含有率を測定し、リン酸の吸収量を求めた。その成績は第 52 表のとおりである。これより散布液の pH の相違がリン酸吸収量に及ぼす影響をみると、pH 5 区の苗木のリン酸吸収量は 20.2 mg を示し最も多く、苗木の生育結果とよく一致している。pH 5 区の苗の葉部におけるリン酸の濃度は pH 6, pH 7 区にくらべて低い値を示しているが、これはいつたん吸収されたリン酸が乾物生産に消費され、その結果低下したものである。



第 23 図 P^{32} の葉面施肥に関する実験
Fig. 23 Radio-isotope P^{32} was applied on T_3 part and measured at T_1 by G-M counter.

第52表 リン酸塩の散布液の pH の相違が2年生カラマツ苗のリン酸の吸収に及ぼす影響

Table 52. Influence of pH of phosphate spraying solution on phosphorus uptake of two years old Karamatsu seedling.

リン酸散布液の pH pH of spraying phosphate solution	苗木のリン酸含有率 P ₂ O ₅ in seedling (% of dry matter)			苗木1本あたりのリン 酸吸収量 mg Phosphorus content P ₂ O ₅ in mg per seedling	指 数 Index
	針 葉 Needle	枝 Branch	根 Root		
— P (No. spraying)	0.23	0.20	0.21	6.4	100
pH 3	0.30	0.24	0.23	14.3	223
4	0.30	0.22	0.20	16.5	258
5	0.30	0.22	0.26	20.2	316
6	0.32	0.22	0.23	15.4	241
7	0.35	0.21	0.27	14.0	219
8	0.23	0.21	0.23	14.0	219

また、この試験苗について別に測定した窒素吸収量をみてもリン酸吸収量の多い pH 5 区の苗木が最も大きい値を示し、この点からも pH 5 の散布液が最もその効果を現わしたものと考えられる。

(3) P³² を用いた実験成績

P³² を塗布してから6日後における T₃ の部分から T₁, T₂ の部分への P³² の吸収移動の様子は第53表に示されるとおりである。なお、吸収率は次式によつて求めた。

第53表 リン酸塩の葉面散布液の pH の相違がカラマツ苗のリン酸の吸収に及ぼす影響 (P³² を用いた実験)Table 53. Influence of pH of phosphate spraying solution on phosphorus uptake of two years old Karamatsu seedling. (Experiment with radioisotope P³²).

調 査 事 項 Items investigated	苗木の部分 Part of seedling*	散布液の pH pH of phosphate spraying solution					
		3	4	5	6	7	8
P ³² の含量 (c. p. m.)	T ₁	31	57	109	49	77	28
p ³² content	T ₂	39	31	50	12	21	95
c. p. m. per each part of seedling	T ₃	42.375	49.075	28.025	30.475	42.975	53.500
P ³² の吸収率 (%)	T ₁	0.09	0.14	0.49	0.30	0.22	0.08
Rate of P ³² -	T ₂	0.11	0.08	0.25	0.07	0.06	0.23
absorption (%)	T ₁ + T ₂	0.20	0.22	0.74	0.37	0.28	0.30

* See Fig. 23

$$\text{吸収率} = \frac{\text{全計数} - \left(\frac{\text{塗布した葉の counts} \times \text{塗布した葉の重さ}}{\text{塗布しない葉の重さ}} \right)}{\text{全計数 (Total counts)}} \times 100$$

第53表から吸収率は pH 5 区において 0.74% を示し最も高く、(1) および (2) でのべた前述の植木鉢試験の結果とよく一致する。

II 実験—28 根系媒質の養分の多少が葉面施肥効果に及ぼす影響 *

II—A 実験目的および実験方法

葉からの養分の吸収利用は、根からの養分の供給と関係があり、したがつて肥料の葉面散布効果は根からの養分の供給の多少に左右されるものと考えられる。この点を明らかにすることは葉面施肥の正しいあり方を知る上に重要なことと考え、次のような実験を行なつた。

* 本実験の成績の一部を文献(123)に発表した。

ワグネルポット (1/2000a) を用い、水耕法により培養液中の窒素含有量を 40 mg/l, 10 mg/l, 0 の 3 段階に分け、さらにそのおのおのを尿素の散布区と無散布区のとに分け、合計 6 処理区を設け、根からの窒素の供給の多少が尿素液の散布効果に及ぼす影響を比較した。各処理区とも 2 ポットを用意して、スギ 2 年生苗 4 本を板で固定した。水耕培養液の組成は第 54 表に示すものである。

尿素散布液の濃度は 0.5% 液とし、その散布量は 8 ポットあたり 500 cc~1,000 cc とし、苗木の成長とともに散布量も増加した。葉面散布は水耕液を更新する直前に行ない培養液中に散布液の尿素が混入しないよう細心の注意をはらった。葉面散布は 5 月 14 日から 8 月 6 日までの期間に 12 回、尿素として 50 g を散布した。散布当初の 5 月 21 日から 6 月 4 日までの期間には 4 回、1 回 500 cc あて散布し、6 月 11 日以降 8 月 6 日までの期間には 8 回、1 回 1,000 cc あてを散布した。水耕による培養期間は 5 月 14 日から 11 月 10 日までの 181 日間である。なお、散布にあたり展着剤はとくに併用しなかつた。

II-B 実験成績とその考察

水耕終了時における苗木の生育状況は第 55 表および写真—18 に示すとおりである。第 55 表によると、根からの窒素の供給の多少にかかわらず、尿素の散布効果はあらわれているが、少し詳細に検討すると、つぎのことがわかる。

- (1) 尿素の散布による枝葉の N% の増加は、根からの窒素の供給が少ないほど大きく、したがって、葉分析よりの見掛けの上の散布効果は根からの窒素の供給が少ないほど大きいように見受けられる。
- (2) しかしながら、尿素の散布による苗木の成長増加は、根からの窒素の供給が多いほど大きく、真の散布効果は根からの窒素の供給が多いほど大きい。

このことから、葉面施肥を実際に行なう場合には、葉面施肥は単独に行なうものでなく、土壌施肥と併行的に行なうのが、その効果を、より高めるものであると考えられる。

第 55 表 根よりの窒素の供給の多少がスギ 2 年生苗の尿素の葉面散布効果に及ぼす影響
Table 55. Effect of urea spraying application on growth of two years old Sugi seedling with increasing nitrogen content of water culture solution.

水耕液の窒素含量 Nitrogen level of water culture solution	処 理 Treatment	苗 長 Length cm	苗 木 の 生 体 重 Fresh weight g			葉面散布 による生 体重の増 加率* %	針葉の N% N% of needle	葉面散布 による N % の増加 率
			地上部 Top	根 部 Root	苗木全体 Whole seedling			
N 40 p. p. m.	無散布 散 布	No spraying	36	98	45	143	32	2.05
		Spraying	46	134	54	188		2.19
N 10 p. p. m.	無散布 散 布	No spraying	35	91	42	133	13	1.59
		Spraying	38	106	46	152		1.78
N 0 p. p. m.	無散布 散 布	No spraying	25	62	40	102	6	0.89
		Spraying	32	92	36	108		1.36

* Weight increments by urea spraying

第 54 表 実験—28 に用いた水耕培養液の組成
Table 54. Composition of culture solution used for test of urea spraying application.

使 用 塩 類 Salts used	含 有 量 Amount g/l	要 素 量 Element	p. p. m.
NH ₄ NO ₃	0.1143	N	40
KCl	0.0213	P ₂ O ₅	25
KH ₂ PO ₄	0.0472	K ₂ O	30
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.0615	CaO	20
CaCl ₂	0.0277	MgO	10
FeCl ₃	3%液 0.14 cc	Fe ₂ O ₃	2

注：N 0 p. p. m. は上表より NH₄NO₃ を除いた培養液を調整し、N 10 p. p. m. 区には別に N 10 p. p. m. になるよう NH₄NO₃ を添加した。

第56表 尿素の葉面散布が根からのリン酸、カリの吸収に及ぼす影響（対乾物％）

Table 56. Influence of urea spraying application on potassium and phosphorus concentration of needle of Sugi seedling with increasing nitrogen content of water cultured solution (% of dry matter).

水耕液の窒素含量 Nitrogen level of water culture	処 理 Treatment	P ₂ O ₅ %		K ₂ O %	
		地上部 Top	根部 Root	地上部 Top	根部 Root
N 40 p. p. m.	無 散 布 散 布 No spraying Spraying	0.72	0.59	1.56	1.56
		0.78	0.89	1.08	0.79
N 10 p. p. m.	無 散 布 散 布 No spraying Spraying	0.85	0.98	1.55	1.57
		0.84	0.84	1.57	1.64
N 0 p. p. m.	無 散 布 散 布 No spraying Spraying	1.04	0.53	1.80	1.65
		0.76	0.50	1.42	1.14

つぎに尿素の葉面散布が苗木のリン酸、カリの含有率に及ぼす影響をみると、第56表に示すとおりである。これによると、今回の実験の範囲では根からの窒素の供給の多少にかかわらず、尿素の葉面散布が苗木地上部の P₂O₅%, K₂O% に及ぼす影響には一定の傾向が見られなかった。

III 考 察

葉面施肥は土壤を肥培管理することにはならないので、土壤施肥よりも明らかに有効である場合にのみ利用すべきものと考えられるが、その実行にあたって、肥効を高めるためには土壤施肥と平行して行なうのが合理的であることは実験—30の成績から明らかである。

また、葉面施肥は苗畑では苗木の成長促進よりはむしろ苗木の形質向上、形質管理の意味での利用場面が少なくないと考えられる。とくに苗木の発根と関係の深いリン酸塩の葉面施肥は農作物と違った利用場面であり、その実行にあたって、散布液の pH に好適範囲があることは実験—29の成績から明らかである。そして散布液の pH を適正に矯正することは、土壤の pH を矯正するのと同様な意味で重要なことと思われる。

第3章 総 括

苗木の増産は拡大造林の施策に対応して現下の急務である。しかも奥地林の開発に伴い、造林は年々奥地へと進み、造林の技術的困難性はしだいにその度を高めつつある。したがって、その困難性に打ちかつためには、いわゆる健苗の育成が今後ますますその重要性を増してくるものと思われる。このためには、まず基礎的事項としての苗木の栄養生理学的特性をはあくしたのち、健苗育成のための育苗技術を確立しなければならない。第1編は上述の観点に立ち、苗木の形質向上を目標とした苗畑施肥について研究を行なったものであるが、研究の概要はつぎのとおりである。

I 林木の水耕法に関する 2, 3 の実験

1. 林木に好適な水耕法を知るために、水耕法の重要点と思われる、i) 水耕液の濃度、ii) 水耕液の窒素源、iii) 水耕容器などについて検討を加えた。その成績はつぎのとおりである。
2. 水耕液の濃度については、600 cc 容の小型水耕容器を用いた場合は、水耕液の窒素形態 (NO₃-N, NH₄-N) や初発 pH に関係なく、K_{NO₃} 氏標準液の約 1/10 の濃度が好適であつた (実験—1)。
3. 水耕液の窒素形態については、NO₃-N は酸性側 (pH 4.2) で、NH₄-N は微酸性側 (pH 6.2) で有効であつた。また、NO₃-N と NH₄-N の両形態の窒素源を等量含む場合は pH に関係なく最も有効であつた (実験—2)。

4. 水耕液の容器については、水耕液の pH の日変化の少ない点などから、大型の 2 l 容ワグネル鉢が好適である (同上)。
5. 前記の 12 l 容ワグネル鉢を用いて、著者が KNO₃ 氏標準水耕液を構成する塩類を基礎として、これを改変した第 2 表 (3) に示す水耕液を用いて、1 週間に 2~3 回あて水耕液の更新を行なう水耕法は、スギ苗 (満 2 年生まで) の生育に好適であるように思われる (同上)。

使 用 塩 類	含 有 量 g/l	要 素 量 p.p.m
(NH ₄) ₂ SO ₄	0.0943 g/l	N 40 p.p.m
NaNO ₃	0.0911 "	P ₂ O ₅ 25
Ca(NO ₃) ₂	0.0293 "	K ₂ O 30
KH ₂ PO ₄	0.0472 "	CaO 20
KCl	0.0261 "	MgO 10
CaCl ₂	0.0193 "	Fe ₂ O ₃ 2
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.0615 "	
FeC ₆ H ₅ O ₇ 溶液	Fe ₂ O ₃ 2p.p.m相当量	
pH 6.2~4.2		

II 林木の根系媒質に対する通気の影響

6. アカマツの水耕培養は水耕液中へ通気を行なわないと、枯損が多いので、アカマツの通気水耕実験を行なつたところ、通気により枯損を回避することができた。そこで林木の根系の還元的媒質に対する抵抗性には強弱があるものと考え、これを検討するため、主として通気水耕試験を行ない比較した。その成績はつぎのとおりである。
7. アカマツおよびスギ、ヒノキ、カラマツの 4 樹種の水耕時における通気効果の比較実験を行なつたところ、水耕液中の溶存酸素が最も低下する夏季には、カラマツ>アカマツ>ヒノキの順に通気効果が大きく、スギには効果が認められなかつた (実験—4)。
8. 通気効果の大きいアカマツについて、水耕液の窒素形態と通気効果の関係を明らかにするため通気水耕実験を行なつたところ、通気効果は水耕液の窒素源が NO₃-N の場合よりも NH₄-N の場合に大きく現われた。この結果に対する理論的考察を行なつた (実験—5)。
9. 通気効果のほとんど認められないスギについて、通気効果の最も期待できる NH₄-N を窒素源とする水耕液を用いて、通気水耕実験を行なつてもなお、通気の効果は明らかでなかつた (実験—6)。
10. 上記の通気水耕試験で、スギはアカマツなどに比べて、水耕液中のように通気性の低い根系媒質にもよく耐えて生育する特性をもつことが判明したが、この点をさらに別の方法で確認するため、過湿土壌ならびにデンプン添加土壌にこれらの樹種を植栽して、還元的土壌に対する抵抗性を主として観察によりしらべて、上記の通気水耕試験成績と比較することにした。
11. ワグネル鉢に植栽された、スギ、アカマツ、ヒノキ、カラマツ稚苗を、水位をあげて一定期間過湿状態におき、これらの樹種の還元的土壌に対する抵抗性を観察したところ、スギはその抵抗性が強く、カラマツ、ヒノキは弱く、アカマツはその中間であつた (実験—7)。
12. 木製の箱 (30 cm 角, 高 45 cm) の上部に砂を、下部に黒色土にデンプンを添加した土壌すなわち還元的土壌をおき、スギ、ヒノキ、アカマツ稚苗を植栽して、下層の還元的土壌に根が侵入、伸長する状

況を観察したところ、スギの根は下層土壌を完全に貫通したが、アカマツの根は下層土壌の上部でその伸長が停止し、ヒノキの根はその中間の状態であつた（実験—7）。

13. 以上の6~12を通じて、スギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツの4樹種の根系が酸化的媒質を要求する順位は、カラマツ>アカマツ>ヒノキ>スギである。また、還元的媒質に対する抵抗性はスギが最も強く、カラマツ、ヒノキはきわめて弱く、アカマツはその中間である。以上により、アカマツは酸化的媒質を好むが、還元的媒質にもよく耐性を示し、土壌水分に対する適応性が強い樹種であるように思われる。

III 林木根系の呼吸の強弱

14. IIにおいて、スギとアカマツとを水耕した場合に、通気効果が著しく異なる現象を認めたが、これはこれら両樹種の根系の呼吸作用に相違があるためではないかと考え、水耕液中における根の呼吸量を水耕液中の溶存酸素の消費量から求めて判定した。その成績はつぎのとおりである。
15. 水耕液中の溶存酸素が常態の時には、アカマツの根の呼吸作用はスギのそれよりも強かつた（実験—8）。このことから水耕時にアカマツはスギよりも通気効果が大きく現われた前述の実験—4の成績がよく理解される。
16. 水耕液中の溶存酸素が欠乏状態の時には前述の場合と反対で、スギの根の呼吸作用の方がアカマツのそれよりも強かつた。また、アカマツの根は溶存酸素が欠乏状態の時には根から酸素を水耕液中に排出しているように見受けられた（実験—9）。
17. このように、溶存酸素が欠乏状態の場合には、アカマツの根系はスギの根系と異なり、異常な呼吸作用を営むものと推察される。これはアカマツの根系は、外生菌根の着生した部分 mycohrryzal root と、着生しない部分 non-mycohrryzal root（主として直根の部分）とがあり、両者の組織呼吸を調べた結果は前者、すなわち外生菌根の着生部分の方が後者よりもその呼吸作用が強かつた（実験—10）。
18. そこでアカマツの根系はそれが酸素欠乏状態におかれた場合に、その呼吸作用を営むのは主として菌根着生部分で、菌根非着生部分は、酸素欠乏状態に適応して体外への酸素の排出などの一種の呼吸調節作用を営むものではないかとの仮説を立て、これを証明するためにアカマツの根系全体と、菌根着生部分を除去した直根部分との還元型 thionine に対する酸化反応を調べた結果は、直根部分は還元型 thionine を酸化型 thionine に変化させた。この結果から前述の仮説がほぼ正しいことが判明した。なお、還元型 thionine が着色することは必ずしも根からの酸素排出の直接的証明にはならないが、酸素排出の可能性もいちおう考えられてよいであろう。要するにアカマツの菌根着生部分と直根部分とは一種の分業を行ない、根系媒質が還元的の場合には直根部分は周囲を酸化しながら伸長するものと考えられ、これにより乾燥地にも成林するアカマツがまたよく湿地にも耐える現象を説明することができるであろう。

IV 林木の耐酸性と Aluminium に対する抵抗性

19. 従来の研究成績によると、スギとヒノキを比較した場合、スギよりもヒノキの方が土壌酸性に対する抵抗性が強いとされている。この点につき、水耕法により追試を行ない再確認を行なつた（実験—12）。
20. Al を添加した水耕試験によると、Al に対する抗毒性は、スギにおいては弱く、ヒノキにおいては比較的強い（実験—13）。
21. Al を添加した土耕試験の成績も、水耕試験の場合と同様の傾向を示した。そしてヒノキについては

- Al の添加量が少ない場合には、Al の存在がかえつて成長増加のプラスの効果を示した。すなわち、スギよりも耐酸性の強いヒノキは同時に Al に対する抵抗性も強いものと考えられる (実験—14)。
22. Al に対する抗毒性の弱いスギの方がヒノキよりも、体内の Al 含有量が多く、したがって、スギの Al の毒性はその根細胞に対する Al の透過性がつよく、そのため体内に吸収蓄積された Al の一種の自己中毒現象によるものと考察される。
23. 林木と一般農作物とを概観的にくらべると、林木は農作物より土壤酸性に対する抵抗性が強いが、また同時に Al の毒性に対しても林木は農作物より抵抗性が強いように考えられる。
24. つぎにスギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツ稚苗を 0.2% 硫酸アルミニウム溶液に浸漬して、これら 4 樹種の Al に対する抵抗性を同時に比較した結果は、ヒノキ>アカマツ>スギ>カラマツの順に抵抗性が強かつた。以上を総括的にみると、これら 4 樹種の Al に対する抵抗性はヒノキ以外の樹種はみな弱く、ヒノキは Al の毒性に対して異常にまで強い性質をもっているものと考えられる。

V 苗木の養分吸収

25. 苗木の養分吸収過程を知り、苗木の栄養生理学的特性を知るために、スギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツの 4 樹種を 4 月初旬に床替えしたのち、1 カ月ごとに、すなわち 6, 7, 8, 9, 10, 11 月の各月の初旬に苗木を掘りとり、地上部と根部とに分けてそれぞれの窒素、リン酸、カリ、石灰の 4 要素を分析した。その成績はつぎのとおりである
26. 苗木の N% の月別変化はスギ、ヒノキは夏季に高い値をとり、凸型の変化を示すが、アカマツは夏季に低い値をとり凹型の変化を示す。カラマツは春季に著しく高く、以後急激に低下して、晩秋にふたたび高まりアカマツに類似の変化を示す (実験—15, 17)。
27. アカマツの N% の月別変化が凹型の変化を示すのは、アカマツの伸長成長は春季に行なわれ、しかもその場合前年度に蓄積された N を利用して行なわれるためであると考えられる。これに対して、スギの N% の月別変化が凸型を示すのは、春季より夏季に至るまでの期間に N を吸収、蓄積したのち、その N を利用して秋季に著しい成長を行なうためであると考えられる。このように、スギとアカマツの N% の月別変化とその成長経過との間には密接な関係があり、両樹種の窒素栄養には大きな相違点があるものと考えられる。
28. 苗木の $P_2O_5\%$ の月別変化は、樹種により多少の相違はあるが、おおむね凸型に近い変化を示すが、変化の程度は N% や後述の $K_2O\%$ にくらべて少ない (実験—16, 18)。
29. 苗木の $K_2O\%$ の月別変化は、いずれの樹種においても夏季に著しく高く、典型的な山型の変化を示す (実験—16, 18)。
30. 苗木の $CaO\%$ の月別変化は、スギとカラマツは山型ないし凸型の変化を示すが、アカマツはやや凹型に近い変化を示し、ヒノキは春季より秋季にかけてわずかながら上昇する変化を示す (実験—16, 18)。
31. 苗木の N%, $P_2O_5\%$, $K_2O\%$, $CaO\%$ の樹種による相違についてみると、N% はアカマツがスギ、ヒノキ、カラマツに比較して高い値をとり、 $P_2O_5\%$ はカラマツ、アカマツがスギ、ヒノキに比較して高い値をとり、 $K_2O\%$ および $CaO\%$ は $P_2O_5\%$ とは反対にスギ、ヒノキがアカマツ、カラマツに比較して高い値をとるが、この傾向は同時にこれら 4 樹種の栄養学的特性を示すもので、苗畑施肥の基礎的事項として重要である。
32. 苗木の窒素、リン酸、カリ、石灰の吸収量をごく概観的にみれば、いずれの要素も 4 月から 5 月にか

けての床替え直後の期間はわずかで、6月からしだいに増加し8月以降は急激に増加する。しかし、詳細にこれをみると、スギ、ヒノキにくらべてアカマツは4月から7月の生育前半期にとくに P_2O_5 の吸収量が大きく、またスギとヒノキは8月から10月の生育後半期に K_2O の吸収量がアカマツ、カラマツより大きく、このことはそれぞれの樹種の無機栄養生理学上の特性であると考えられる。

33. 苗木の N, P_2O_5 , K_2O , CaO の年間吸収量は、実験の範囲ではつぎのような値を示した。すなわち、Nは $1m^2$ あたりスギ 8.5 g, ヒノキ 4.9 g, アカマツ 12.4 g, カラマツ 10.9 g 程度であり、Nの吸収量は、スギ>カラマツ>アカマツ>ヒノキの順に多い値を示す。 P_2O_5 は $1m^2$ あたりスギ 3.6 g, ヒノキ 2.2 g, アカマツ 4.1 g, カラマツ 3.9 g 程度であり、 P_2O_5 の吸収量はアカマツ>カラマツ>スギ>ヒノキの順に多い値を示す。 K_2O は $1m^2$ あたり、スギ 9.0 g, ヒノキ 5.7 g, アカマツ 6.8 g, カラマツ 7.8 g 程度であり、 K_2O の吸収量はスギ>カラマツ>アカマツ>ヒノキの順に多い値を示す。CaO は $1m^2$ あたり、スギ 7.0 g, ヒノキ 4.5 g, アカマツ 4.8 g, カラマツ 5.0 g 程度であり、CaO の吸収量はスギ>カラマツ>アカマツ>ヒノキの順に多い値を示す。以上の数値は苗畑の施肥設計にあたり基礎的数値として利用することができる。また、苗木は水稻や麦類のような農作物と異なり、根系もその生産対象物であり、根系まで掘りとり、収穫されるので養分循環は全く行なわれない。したがって、スギ、カラマツのような成長量の大きい樹種の養分吸収量は水稻や麦類のような農作物と同程度またはそれ以上の量に及び、苗畑土壌の肥培管理が農耕地以上に重要であることが察知される。

34. 苗木の乾物 1 g を生産するのに吸収した窒素量の季節的变化は、苗木の成長期間を前期（4～5月）、中期（6～8月）、後期（9～10月）に大別してみた場合に、スギは中期より後期に低い値をとるのに対して、アカマツは中期より後期に高い値を示す。すなわち、苗木の窒素成分について、吸収蓄積とその利用の2つの側面からみると、スギは秋季に窒素を利用して成長するのに対して、アカマツは秋季に窒素を吸収蓄積して翌春の伸長にそなえるもので、スギとアカマツとの窒素の吸収利用の状況には著しい相違が認められる。

また、カラマツ苗の乾物 1 g を生産するに要する N の値の月変化は、4月床替時から8月ごろまでは 13～15 mg 程度であるが、9月は約 7 mg に低下し、10月にはふたたび 16 mg と急激に増加する。このことからカラマツはスギと同様に秋季にはそれまで吸収した窒素を利用して徒長する性質があるが、成長休止期にはいる直前にはアカマツと同様に翌春の伸長にそなえて N を蓄積するものと考えられる。

VI 林木の養分欠乏症

35. スギ、アカマツ、カラマツの稚苗の養分欠乏症についてはすでに窒素、リン酸、苦土の各欠乏症が報告されているが、研究の順序として、まず上記3要素の欠乏症について追試を行なった後、まだ究明されていないヒノキの窒素、リン酸、苦土の各欠乏症ならびに主としてスギを供試材料として、カリおよび石灰の欠乏症について研究を行なった。その成績はつぎのとおりである。

36. スギ、アカマツ、カラマツの窒素、リン酸、苦土の欠乏症については既往の成績を再確認した。ヒノキのこれら要素の欠乏症はつぎのとおりである。

ヒノキの窒素欠乏症は枝葉部全体が淡緑色→黄緑色を呈し、その成長を停止する。局所的な necrosis の現象は見られない。根系は細長く伸長し、分岐が少ないのが特徴である。リン酸欠乏症は下葉から暗

濃緑色を呈し、新梢端部は暗紫色となりしだいに成長を停止する。苦土欠乏症は下葉から主軸部に沿い黄色～黄褐色となりしだいに上方に及び、成長が衰える(実験—19)。

37. スギのカリ欠乏症は、初期においては稚苗全体が黄緑色を呈し、やがて下葉の色が赤味をおび、しだいに赤褐色の necrosis をおこし、成長はほとんど停止するにいたる。また、カリ欠乏症の苗木はその N%が増加し、したがって N/K の値が大きくなり、また後述 (VII) するように、全窒素に対する可溶性窒素の割合が大きくなり、全般的に軟弱になる(実験—20)。
38. スギの石灰欠乏症は、まず根部に現われる。すなわち、白根の発生がなくなり、しだいに暗黒褐色に変化し根腐れの現象を呈する。それと同時に地上部の新梢の発育も停止し、しだいに褐色の necrosis をおこす。さらに進行すれば側枝の先端部まで褐色となり、最後には枯死する(実験—21)。
39. 石灰欠乏苗の CaO% は上位部は下位部よりもかなり低い値をとるが、他の K₂O%, MgO%, P₂O₅% の値にはこのような傾向は認められない。すなわち、石灰は下位部より上位部への移動性が少ない要素であるため、石灰に欠乏した場合は枝葉の先端部に、necrosis を起こすものと思われる(実験—21)。
40. カリ、石灰、苦土のうち、同時に2要素が欠乏した場合の養分欠乏症は、つぎのとおりである。カリ、石灰の2要素が同時に欠乏した場合は石灰欠乏症の方が強く現われる。石灰、苦土の2要素が同時に欠乏した場合は苦土欠乏症の方が強く現われる。また、カリ、苦土の2要素が同時に欠乏した場合も苦土欠乏症の方が強く現われる(実験—22)。
41. カリ、石灰、苦土の3要素のうち、いずれかの1要素が欠除すると他の2要素の吸収が高まり、また苗木体中に含まれるカリ、石灰、苦土の3要素の化学当量の和はほぼ同一となり、これらの各要素間には、一種の代償作用がある程度行なわれるもののように考えられる。これら3要素間の吸収には明かな antagonism が認められた(実験—22)。
42. しかし、カリ、石灰、苦土の3要素のうちいずれか2要素が同時に欠除した場合は残りの1要素では欠除した2要素の代償作用は行なわれ難く、苗木の生育も著しく低下する(実験—22)。
43. 以上主としてスギ苗についてカリ、石灰、苦土の欠乏症を明らかにしたが、これらの3要素のうち最も苗畑で出現度の高いスギ苗の苦土欠乏症について、静岡県下における東京営林局の天城、沼津、掛川、千頭、気田、浜松各営林署の苗畑を調査地として、応用的見地からその発生の実態を調査し、これを土壤肥料の面から考察した。その成績はつぎのとおりである。
44. 土壤 100 g あたりの置換性 MgO が 10 mg 以下の場合には、ほとんど例外なく苦土欠乏症が発生し、20 mg 以上の場合にはほとんど発生しないという農作物の場合と同様の傾向が見受けられた。
45. 苦土とカリとの間には明かに antagonism が認められ、MgO/K₂O の値が小さい場合には必ず苦土欠乏症の発生が見られた。また、苦土と石灰との間にも明かな antagonism があり、土壤の反応が pH 6.5 以上の微酸性—中性付近のところで発生する苦土欠乏症は石灰との antagonism によるものであると考えられる。
46. 以上1—45にわたり、苗畑施肥の基礎的事項として、苗木の栄養生理学的性質について研究を行なったが、その成績を一括表示すると第57表に示すとおりで、スギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツのそれぞれの栄養生理学的特性の一端を比較することができた。

第57表 苗木の栄養生理学的特性の比較総括表

Table 57. Systematic summary of characteristic of some important coniferous seedlings in Japan from viewpoint of nutritional physiology.

研究項目 Items investigated	スギ Sugi	ヒノキ Hinoki	アカマツ Aka- matsu	カラマツ Kara- matsu	備考 Remarks			
苗木の養分組成 Nutrient concentration of seedling								
N %	○	+	○	+	アカマツはN%がとくに高いのが特徴である。			
P ₂ O ₅ %	○	+	○	+	スギ, ヒノキ<アカマツ, カラマツ			
K ₂ O %	○	++	○	+	スギ, ヒノキ>アカマツ, カラマツ			
CaO %	○	++	○	+	スギ, ヒノキ>アカマツ, カラマツ			
苗木の養分吸収過程における特性 Uptake of nutrients				○凹型ないしL型				
N%の季節的变化 Seasonal variation of N%	○凸型 Convex	○凸型 Convex	○凹型 Con- cave	Conca- ve or L type	スギは夏季までは窒素を蓄積, 秋季にそれを利用して伸長し, アカマツは秋季に窒素を蓄積, その貯蔵養分が翌春の伸長を支配するのが特性。			
窒素の吸収 Uptake of N	○	○	○	○				
リン酸の吸収 Uptake of P	○	○	○	○	アカマツは生育前半期(4~7月)に多いのが特色。			
カリの吸収 Uptake of K	○	○	○	○	スギ, カラマツは生育後半期(8~10月)に多いのが特色。なお, スギは N/K が苗木の形質を左右することが大きい。			
石灰の吸収 Uptake of Ca	○	○	○	○				
苗木の養分欠乏症 Mineral deficiency symptoms								
窒素 N	△	○	△	△				
リン酸 P	△	○	△	△	リン酸欠乏症はカラマツ, アカマツに現われやすい。			
カリ K	○				明りようなカリ欠乏症が現われることは比較的少ない。			
石灰 Ca	○		○		石灰欠乏症が現われることはまれである。頂芽, 側芽の部分が枯死し, 根腐れを起すのが特色。			
苦土 Mg	△	○	△	△	苦土欠乏症は一般に現われやすく, スギは紅赤色を呈する場合が多いのが特色。なお, Mg は K および Ca との拮抗作用が著しい。			
苗木の通気効果 Effect of aeration	○	+	○	++	○+++			
根の酸素吸収(呼吸量) Respiration of root	○	+		○	++	スギは水耕液中では通気効果が現われない。スギは溶存酸素が減少してもその極限まで吸収利用する。アカマツの菌根着生部分は O ₂ の消費が著しい。直根部分は還元状態になると, あたかも O ₂ を排出するような現象が認められる。		
苗木の水分効果 Effect of soil moisture	◎++++	◎	++	◎	+			
苗木の耐旱性 Drought resistance	◎	+	◎	++	◎++++			
蒸散係数 Transpiration coefficient	◎	++	◎	+	◎++++	◎++++以上 カラマツは蒸散係数が特に大きい。		
苗木の耐湿性 Resistance for excess moisture	○++++	○	+	○	++	○	+	スギは還元的土壌に対する耐性が強い。
還元的土壌に対する抵抗性 Resistance for reductional root medium	○++++	○	++	○	+			
苗木の耐酸性 Resistance for acidic root medium	△	+	△	++	◎++++			
Al に対する抗毒性 Tolerance for aluminium toxicity	○	+	○++++	○	++	○	+	ヒノキは Al に対する抗毒性が異常に強い。

- 注 ○印は著者が本研究で明らかにしたことを意味する。
 ○ indicates the result obtained by writer's work.
 △印は著者が本研究で追試を行なったことを意味する。
 △ indicates the result ratified by writer's work.
 ◎印は他の研究者の成績を引用したことを意味する。
 ◎ indicates the result obtained by other worker.
 +++は ++ よりも相対的に大きい(または多い, 強い, 程度が高い)ことを意味する。
 ++ は+++よりも相対的に小さい(または少ない, 弱い, 程度が低い)ことを意味する。
 + は++ よりもさらに相対的に小さい(または少ない, 弱い, 程度が低い)ことを意味する。
 +++ (++, +) mark shows the comparative difference between species of investigated items as follows.
 +++ is greater (or larger or stronger or higher) than ++
 + is less (or smaller or weaker or lower) than ++

VII 育苗の意義, 目標と苗畑施肥

47. 育苗は苗畑において林地に植栽する苗木を育成することであるから, 苗畑から林地へ移植する(狭義の造林行為)のに適応した諸形質を具備した苗木を育成することが必要であり, したがって苗畑施肥の目標もこの点に置くことが重要である。

以上の観点から苗木に必要なと思われる諸種の形質と窒素, リン酸, カリの肥料3要素との関係を究明した。その成績はつぎのとおりである。

48. 苗木の充実度を示す指標として弱さ度, 組織粉末比重, 可溶性窒素/全窒素, 還元糖/非還元糖などを調べた結果は, 窒素の施用は苗木の組織粉末比重を小さくし, また可溶性窒素/全窒素の値を大きくして, 苗木の充実度を低下させる。しかし, リン酸, カリを併用すれば, 窒素のマイナスの影響はなくなり充実度の高い苗木が得られる。また, カリの施用は可溶性窒素/全窒素および還元糖/非還元糖の値を小さくして, 苗木の充実度を高める(実験—24)。
49. 苗木の水分消失度については WILDE (1956) の吸水—蒸散平衡係数 Absorption transpiration coefficient ならびに蒸散量を測定して検討した結果, 苗木の吸水—蒸散平衡係数は窒素を施用すると大きくなり, 反対にカリを施用すると小さくなり, またカリの施用は苗木の蒸散量を抑制する。すなわち, カリの施用は苗木の水分消失度の少ない, したがって, 移植にあたり乾きにくい苗木をつくるのに有効である(実験—23)。
50. 49—50においてカリが苗木の充実度を高め, その水分消失度を低下させ, 総合的にみて, いわゆる健苗を育成するのに有効であることを論述したが, これが苗木の移植にあたり, 実際にどの程度の影響を与えるものかを検討するため, 苗木の乾燥床替試験(著者仮称, 苗木をその含水率が20%低下するまで乾燥させたのち移植して, その活着率をみる)を行なったところ, その活着率はカリを施用すると高まり, 前述の推論の正しいことを証明した(実験—24)。
51. 苗木の根系の形質を, 根の形態, T/R 率および WILDE (1956) の Absorbing capacity を用いて著者が提案した吸収根率, またその発根性などを指標として調べた結果は, リン酸を施用すると苗木の根の形態は移植に適合したようになり, T/R 率は小さくなり, その吸収根率は大きくなり, したがって根の活性は強くなり, またその発根性もよくなる。すなわち, リン酸は肥料3要素のなかで根の形質を最も高める要素である(実験—23)。
52. 前項において苗木の発根性については3要素中リン酸が最も深い関係をもつことをのべたが, このリ

ン酸はまた発根にあたり、肥料3要素のなかで最も多量に地上部から根部へ移行する(実験—25)。

この場合、ラジオアイソトープ P^{32} を用いた実験によると、苗木の地上部に含有されているリンのうち、下位葉および幹部のリンが発根にあたり根部の方に移行して、根の形成に直接関与するものと考えられる。このことは下位葉の存在ならびに太い幹部が苗木の形質とくに発根性に対して重要な因子であることを意味する(実験—25)。

53. 上述のことから、発根が下位葉ならびに幹部の直径に支配されるという仮説を立て、これを証明するために、苗長が等しくて根元直径の異なる2組のスギ満1年生の苗木を選び、根元から切断して水中で再発根させたところ、直径の太いもののほど発根量が多く、上述の仮説はほぼ正しいものと理解された(実験—26)。

54. さらにまた下枝が発達したスギ1回床替山出苗と、発達していない苗木とを植栽して、その発根状態を比較調査した結果は、下枝の発達した苗木の方が発根量が多く、植栽後の伸長成長も良好であつた。すなわち、よく発達した下枝の存在は移植後の苗木の発根を促進するのに有効である(実験—26)。

55. 苗木の移植後の成長については、苗木の充実度、水分消失度や根の形質にマイナスの影響を与えていた窒素がリン酸、カリよりもプラスの影響を与える。また、窒素にリン酸、カリを併用すればさらに移植後の成長を促進する(実験—23)。

56. 以上を総合すると、窒素、リン酸、カリの3要素の完全施用が苗木に総合的に良好な形質を与えているが、これらの各要素はそれぞれ異なつた作用をもち、異なつた形質に関与している。

Ⅷ 苗畑施肥技術としての葉面施肥

57. 上述のように、苗畑施肥の本質は苗木に必要な形質を付与または向上させることにありと考えられる。前項Ⅶにおいて述べたように、窒素の過用は苗木の形質を低下させるので、窒素肥料の一部を葉面散布で行なうのも有効であり、またリン酸はとくに根の形質を向上させるのに有効である。このように葉面施肥は苗木の形質管理を行なう意味において、農作物の場合と異なつた利用場面があるように考えられるので、葉面施肥を導入する場合の参考になるであろう1、2の点につき基礎的実験を行なつた。

58. リン酸の葉面施肥の効果と散布液のpHとの関係を調べる目的で、植木鉢試験ならびに P^{32} を用いた実験を行ない、 CaH_2PO_4 の0.5%溶液の場合にはpH5に調整した場合が最も有効であることがわかつた(実験—27)。

59. 土壌の肥培と葉面施肥との関係を知る目的で、水耕法により根からの窒素の供給量を異にして尿素の葉面散布を行なつたところ、根から窒素を供給しない場合よりも、供給した場合の方が尿素の葉面散布の効果が認められた。したがつて、土壌施肥と葉面施肥を平行的に行なうのが合理的であるように考えられる(実験—28)。

〔付 記〕

本論文において、1年生苗とは春季に種子をまき付けて翌春に至るまでの苗を指し、2年生苗とは満1年を経過して満2年に至るまでの苗を指すが、1年目と2年目との境界の時点では満1年生苗というような表現も適宜用いた。また、床替苗、山出苗などと表現した方が適当な場合には、必要に応じこのように表現した。

第2編 林木の栄養と施肥に関する研究

第1章 林地肥培に関する序説

林地肥培についての試験研究は欧州の林業先進国では、すでに1800年代から研究が行なわれてきたもので、その歴史にはかなり古いものがある。これらの研究を通覧すると、林地肥培の重要性を指摘するものがある反面、後述するように、林地では落葉が林地へふたたび還元するため、農地ほど施肥の重要性がないことを指摘したものもある。今次大戦後の新しい森林資源的背景のもとに、新しい観点から登場した林地肥培に対して、正しい認識をもち、新しい技術形成のため過去の研究を概観し、考察を加えることはきわめて有意義のことと考えられる。

本章においては、上述の観点からまず林地肥培の研究史的考察を行ない、つぎに林地肥培無用論と必要論を解析してみることにする。

第1節 林地肥培に関する研究史

林地に肥料を施すことが、いつごろから試みられたかは、わが国には参照すべき史実がないので知る由もないが、鐔木氏の著書「森林肥料論」(1958)によれば、栃木県黒羽藩士で林業先覚者として誉れ高い与野市左衛門翁は、植樹のとき鰯1尾を肥料に施したということが口碑に残っているそうであるが、近代化学肥料の硫酸などを施用した例は新潟県の山井記三郎氏をもつて嚆矢とするようで、今から約40年前のことである。

欧州においてはかなり古く、1755年ごろに JUSTI, BROCKEN などによりすでに林地施肥が論じられていたようであり、ドイツの著名な林学者 SCHWAPPACH (1916) によれば、今からやく100年前に BIERMANN によつて林地肥培試験が行なわれたというが、ドイツ、旧オーストリーなどの各地で、多くの人により施肥試験が行なわれたしたのは今から約50年前の1900年代の初頭であり、LEININGEN-WESTERBURG¹²⁵⁾(1930)により要約されている。しかしこの時代には林地肥培の効果を強調する学者もある反面、その効果に疑義をいだく学者も多かつた。たとえば、SCHWAPPACH (1916)は Forstdüngung (森林肥培) という小著に、林地肥培の進展が遅いのは、多くの林地は林木の成長に十分な養分をもち、一時的な施肥の効果は少なく、林地肥培は普通の経済林には価値の低いものであるとし、また VATER¹²⁶⁾ (1927), JUNACK¹²⁷⁾ (1928)なども林地肥培は農地肥培と異なり、実用上非常に困難が伴うものとして、その価値に疑義を表明している。しかし林木の養分吸収や養分循環のはあくに関する研究が行なわれ、林地の養分経済に対する考察が行なわれ、将来を見とおして林地肥培の基礎的研究が徐々に行なわれていた。

このように近代科学としての林学の発展過程からみると、林地肥培の研究史はかなり古いものがあるが、実際の林業に肥培が導入されなかつたのは、森林資源にまだ余裕があり、経済的にも林地肥培が成立しなかつたためと考えられる。

しかし今次大戦を契機として近代的科学の進歩、産業構造の変化と相まつて森林資源の弱体化、木材需給の不均衡という資源的また産業的背景のもとに、林地肥培による木材の増産、森林資源の維持、増強の必要性が叫ばれ始めた。これに伴い林地肥培試験が随所に展開され、また森林の栄養と森林土壌の立場からもこの問題にメスが加えられ、当面する現実の問題としてしだいに本格的な研究が進められようとしている。

戦後における内外の林地肥培に関する研究を文献により概観すると、まず欧米においては森林の栄養という立場から、林木の葉の養分組成や養分含有量を調べたものに TARRANT ら¹²⁸⁾ (1951), LOUIS¹²⁹⁾ (1952), WHITE⁷⁰⁾ (1954), TAMM¹³⁰⁾ (1957) などの研究があり、また林木の無機養分の栄養状態と林木の成長との関係を取り扱ったものに LEYTON¹³¹⁾ (1954),¹³²⁾ (1956),¹³³⁾ (1956), FLETCHER ら¹³⁴⁾ (1956), TAMM¹³⁰⁾ (1957) などの研究があり、また林木の養分欠乏を取り扱ったものに HEIBERG ら⁷⁹⁾ (1951), GESSEL ら⁸⁰⁾ (1951), WALKER¹³⁵⁾ (1955),⁸¹⁾ (1956) などの研究がある。これらはいずれも林地肥培の基礎的事項としての林木の栄養問題を取り扱ったものである。これらの基礎的分野に対して、実際の林地で施肥試験を行ない、林地肥培の効果を実践的に解明してゆこうとする立場において、多くの学者により林地肥培試験が行なわれ、LUNT¹³⁶⁾ (1945), VIRO¹³⁷⁾ (1950), MITSCHERLICH¹³⁸⁾ (1950), McDERMOTT¹³⁹⁾ (1951), ALTEN ら¹⁴⁰⁾ (1952), NEMEC¹⁴¹⁾ (1953), LOHWASSER¹⁴²⁾ (1953), THEMLITZ¹⁴³⁾ (1954),¹⁴⁴⁾ (1958), GESSELL ら¹⁴⁵⁾ (1956), HAUSER¹⁴⁶⁾ (1956),¹⁴⁷⁾ (1958), MITSCHERLICH ら¹⁴⁸⁾ (1958), SCHAIRER ら¹⁴⁹⁾ (1958) などによりそれぞれ中間成績の報告が行なわれた。

わが国では、いち早く芝本¹⁵⁰⁾¹⁵¹⁾ (1952) によりこの問題の重要性が強調され、その後芝本¹⁵²⁾、柴田¹⁵³⁾¹⁵⁴⁾、安藤¹⁵⁵⁾、朝日¹⁵⁶⁾、岸¹⁵⁷⁾、宮嶋¹⁵⁸⁾、竹下¹⁵⁹⁾、宮崎¹⁶⁰⁾、茨木¹⁶¹⁾¹⁶²⁾、および著者¹⁶⁴⁾¹⁶⁵⁾ によりそれぞれ試験研究の中間成績が発表された。これらの研究を欧米の研究にくらべるとその数もきわめて少なく、とくに林地肥培の基礎分野にあたる森林の栄養関係の研究はほとんどない。

以上の研究の中間的取りまとめとして、著者¹⁶⁵⁾は従来の文献資料を取りまとめ総説を試みたが、欧米においては RENNIE¹⁶⁶⁾ は 1955 年に林木の養分吸収量ならびに養分循環などについて、従来の研究資料を用いて総合的考察を行なった。また林地肥培に関する文献集として 1950 年に WHITE および ALBERT ら¹⁶⁷⁾ により Forest Fertilization がアメリカの Syracuse 大学から出され、西ドイツでは 1958 年には Allgemeine Forstzeitschrift の 10 月号として、林地肥培特集号が出された。この特集号において WITTICH¹⁶⁸⁾¹⁶⁹⁾ (1958) は森林土壌の肥沃度ならびに植物養分必要量という植物生理学の立場から、MAYER-KRAPOLL¹⁷⁰⁾ (1958) は林地の養分経済の立場から林地施肥を論じ、また HAUSER¹⁴⁷⁾ (1958) は林地施肥を経済的効果のうえで解析し、KIRSCHFELD¹⁷¹⁾ は林地施肥の設計について論じている。また同年の Der Forst und Holzwirt 誌においては MITSCHERLICH¹⁴⁸⁾ (1958) は伐採など人為による土壌の悪化を指摘して、森林の収穫を維持することを目標に幾多の試験成績をもとに林地肥培を論じている。

これらはいずれも林地肥培に関する試験研究が、前述の戦後における林業のおかれた諸般の客観的背景下にきわめて有意義なものとして認識されて、企画されたものであろうと解せられ、さらに上述のように HAUSER¹⁴⁷⁾、MITSCHERLICH ら¹⁶⁸⁾ などにより、林地肥培の経済性についてその有意性が考察されているのは、林地肥培が林業の現実問題として取りあげられようとしている段階にきていることを示すものである。なお最近の研究の内容も多面的になり、たとえば MERKER¹⁷²⁾ (1958), OLDIGES¹⁷³⁾ (1958) などにより林地施肥が虫害の予防に役だつことが例証されており、また CHANDLER¹⁷⁴⁾ (1938), WENGER¹⁷⁵⁾ (1953) などにより施肥の種子増産に及ぼす影響なども研究されており、さらに従来あまり顧みられなかつた 50 年生以上の中齢ないし老齢林分に対する施肥試験も THEMLITZ¹⁴⁸⁾ (1954), MITSCHERLICH U. WITTICH¹⁷⁶⁾ (1958) など多くの学者により行なわれている。これらの中には PAWLICK¹⁷⁷⁾ (1957), SCHAIRER ら¹⁷⁸⁾ (1958) の成績のように肥効がほとんど認められなかつたものもあるが、今後もこの分野の試験研究は従来のように一時的な風潮に終わることなく、さらに各種の分野からの観点によつて研究が進展するであらう。

うと思われる。

第2節 林地肥培無用論の解析

農業に肥料を用いるようになってからも、林業には肥料を用いた例はごくまれである。これには森林資源がまだ豊富であつたという理由以外に、それ相当の理由があるものと考えられる。すなわち、林木は一般に土壤から養分を要求する割合が少なく、伐採収穫に際して幹の部分だけが林地の外に持ち出されるが、枝葉はふたたび林地に還元されるので、特に肥料を施す必要はないと考えられてきた。しかしこの施肥無用論は、まだ天然林が豊富で木材の需給関係に余裕があつた時代に、森林が正しく取り扱われて、落葉や雑草が採取されることもなく、かつ林地の傾斜が緩で、皆伐による土壤の流亡の影響が少ない北欧のような林業地帯において、成立する考え方であつたと解することができるであろう。

この施肥無用論の根拠について、森林の養分経済の面から少しく検討を加えてみると、次のとおりである。すなわちイネやムギのような農作物は、根株を除いて地上部全体が、また苗木は根も地上部とともに収穫物として取り去られる。これが毎年繰り返されると、収穫に伴い多量の養分が土壤から奪い取られることになる。農耕地や苗畑が無肥料栽培を続けると、やがては収穫が激減するのはこのためである。しかし、林木の場合は農作物と異なり、数十年に1回、短伐期の場合でも30年に1回ていど収穫されるだけであり、また収穫に際して幹材部だけが外部に持ち去られ、枝や葉は林地へ還元される。しかも林木は第58表に示すように、幹材部の方が葉部より養分含有率が少ないから、数十年に1度の伐出では、収穫に

第58表 林木の生育に要する養分摂取量 (kg/年/ha)

樹 種	生産部位	Ebermayer 氏などによる				
		リン酸 P ₂ O ₅	カリ K ₂ O	石灰 CaO	苦土 MgO	窒素 N
欧 州 モ ミ	木 材	1.5	4.1	9.2	2.0	10~13
	葉 材	6.4	4.8	60.9	7.0	30~32
欧 州 ア カ マ ツ	木 材	1.1	2.6	10.9	1.7	6
	葉 材	3.7	4.8	18.9	4.8	28
欧 州 ブ ナ	木 材	2.9	4.7	14.4	3.9	9~10
	葉 材	10.5	9.9	81.9	12.2	42~44

よる養分のロス(損失)は割合に少ない。すなわち、林地の場合は農耕地と異なり、林地—林木間における養分の循環が行なわれることに特徴がある。この養分の循環について ALBERT¹⁷⁹⁾ は第59表に示すように、アカマツ林とブナ林の1haあたり、伐採した木材の搬出のため林地から取り去られる養分量が、枝条や落葉などにより林地に還元される量に比べてはなはだ少なく、養分循環率が農作物に比べて大きいことを指摘した。したがって落葉さえ林地に還元すれば木材の伐採搬出による養分消失(奪取)量は僅少なものであるということができよう。しかも林地に還元された落葉は分解して腐植となり、その際生成する有機

第59表 養 分 循 環 率 (%)

	窒 素	リ ン 酸	カ リ	石 灰
林 木	78 ~ 80	77	65 ~ 75	65 ~ 85
農 作 物	25	20	71	75

酸類は土壌化作用を促進し、土壌の養分天然供給量を増大する。このように考えると、一般には林地は農地のように施肥しなくても、地力の維持はできるものとも考えることもできるであろう。

第3節 林地肥培必要論の解析

前節において、林地肥培無用論を成立させる基礎条件について考察を試みたが、ひるがえつてわが国森林の現状を顧みるに、はたして上記の諸条件がそのままあてはまるであろうか。この点について少しく検討を加えてみることにする。

(1) わが国の林地は北欧と異なり、一般に傾斜が急で土壌の侵蝕、流亡が起こりやすい。土壌の流亡は養分の流亡を意味し、その結果は地力の低下を招く。この程度は林地が急峻で、かつ雨量が多いほど大きく、森林の施業方式が択伐作業の時よりも皆伐作業の場合に著しい。

(2) しかも、わが国における林業の現状は奥地天然林は別として、経済的立地条件のよい林地ではしだいに針葉樹単純林の短伐期の皆伐施業が行なわれており、これが地力低下の主要因になつているように考えられるので、この点において著者の見解を述べてみたい。

(3) 森林土壌は農地土壌と土壌層の構成が異なる。後者が作土層と心土層とに分けられるのに対して、前者は一般に最上部に有機物層があつて、その下部に鉱物質土壌層がある。すなわち落葉や落葉の分解してできた A_0 層と呼ばれる有機物の層のあるのが特徴である。この A_0 層が、その下にある土を保護しているものと考えられる。そのため急傾斜の山であつても、土がむやみに流れることもなく安定しているわけである。ところが一たび森林を皆伐すると、 A_0 層が急激に日光の直射を受け、あるいは雨が今までは樹冠に一度あたつて、ゆつくりと地面に到達していたのが直接地面にたたきつけることになり、そのため A_0 層が分解したり、流されたりしてうすくなり、極端な場合はなくなり、鉱物質土壌である A 層が直接地面に裸出するという状態になる。このような状態になると、第60表の芝本¹⁸⁰⁾(1951)や WILDE¹⁸¹⁾

第60表 森林の皆伐による土壌の悪化(塘 調整)

区 分	機 械 的 組 成 (%)				pH	有機物 %	全窒素 %	置換 容量 M.E./100g soils	置換性 石灰 %	備 考
	粗砂	細砂	微砂	粘土						
(1) カラマツ林地 同上皆伐地	21.6 32.8	49.0 52.6	17.8 7.3	11.6 7.3		15.3 9.4			12.5 6.5	芝本 ¹⁸⁰⁾ による
(2) レジノーザ松, ス トロープ松林地 同上皆伐地					5.7 5.9	0.12 0.03	6.3 3.9	2.9 1.8		WILDE ⁸¹⁾ による
ハードメーブル林 同上皆伐地					6.3 5.7	0.21 0.06	14.7 8.9	9.4 3.3		

(1946)などの成績に示されるように、傾斜が急で雨量が多いわが国の林地では、どうしても表層の土壌がわずかではあるが流亡しやすい。しかも土壌の流亡に際しては、粒径の細かい粘土の部分の流亡しやすい。粘土は土壌粒子中最も活性度の高い部分であり、また最も養分に富み、地力を支配する重要な部分である。すなわち、土壌の流亡が起こるとしだいに地力低下を招く結果となるわけである。したがつて、わが国のように針葉樹の皆伐作業をやつていく以上は、伐採ごとに地力が衰えていくのも当然のなりゆきである。その結果、地力の減退が現実の問題として訴えられている。たとえば、吉野地方のスギ林では、スギの造林が3代、4代と繰り返されるに従い、その成長が著しく衰えるといわれる。また尾鷲地方では、もともと針葉樹ではスギが80%の造林面積を占めていたにもかかわらず、地位の低下が大きく影響し

で、現在では、ヒノキの造林地が大部分となっており、極端なところはクロマツが植栽されているという。また堤ら¹⁸²⁾ (1957)によると、徳島県木頭林業地帯において、1代目、2代目、3代目の林地を調査したところ、皆伐を繰り返して代をかさねるごとに土壌のA層の厚さはうすくなり、A層の有機物の含有量は減少し、地力は低下しているという。またMITSCHERLICH¹⁴⁸⁾ (1958)も2代目造林地の成長は、1代目造林地に比べて劣ることを指摘している。

このように、皆伐の繰り返しが地力の減退をもたらすことについては、もはや議論の余地がない。したがって、針葉樹の短伐期の皆伐施業方式をとる以上、伐採ごとに地力が低下することを考慮して、林地生産力を維持増進する何らかの手段をとらなくては、後日に恨を残すことになるものと考えられる。

(4) 農家に近接した、いわゆる丘陵性の里山では営農上の必要から落葉や雑草の採取が行なわれる所が多い。前述のように林地では落葉が還元されて初めて地力の維持ができるので、もし落葉採取が行なわれると、相当量の養分が毎年林地から奪取されることになる。このことは河田¹⁸³⁾ (1921)、大政ら¹⁸⁴⁾ (1937)などの落葉調査成績を著者が要約した第61表をみてもよく理解できる。これらをみても、落葉、

第61表 落葉採取により林外に持ち去られる養分量 (kg/0.1ha)

林 相		窒 素 N	リン 酸 P ₂ O ₅	カ リ K ₂ O	備 考
ア ス コ ク ク	カ マ ツ 林	22.4	4.1	3.3	大政・森による
	ス ギ 林	37.0	10.0	13.0	〃
	コ ナ 林	22.0	3.0	7.0	〃
	ク ロ マ ツ 林	33.0	6.8	4.9	河田による
ク	ヌ ギ 林	39.4	5.9	10.1	〃

地被類の採取の影響がいかに大きいかが察知できる。このような落葉、地被類の掠奪林地に対しては、これらの採取を中止するとともに適当な肥培手段を講じなければ、地力の維持、増進は不可能と考えられる。

(5) 人為による林地の破壊が著しく、瘠悪林地、ないし瘠悪林地化しつつある林地が多く、全国では約30万町歩に達するものといわれる¹⁸⁵⁾。元来森林が法正な取扱いを受けていれば、土壌断面の上部にはある程度のA₀層（腐植化しない分解過程にある有機物層）が発達して、養分の給源となり、また下部にある鉱物質土壌層の裸出を防いで、林地土壌の悪化を防いでいる。ところが、人為により森林が粗雑な取扱いを受けると、林地の表面侵蝕作用が起りやすくなり、正常な森林土壌断面でみられるような成層状態（A₀|A₁, A₂|B|C層）が破壊され、A₀層を欠いたり、A層の発達のきわめて悪い、いわゆるB-C型土壌になる。このような土壌は物理性と同時に化学性も悪く、窒素・リン酸・カリ・石灰・苦土などの養分に乏しいのが普通で、森林の適正な取扱いを期するとともに、積極的な肥培手段を講じなければ、その改良が困難であることは、多くの経験により、今日ではすでにわれわれの常識になっている。

(6) またわが国の森林土壌の生産力は、芝本¹⁸⁶⁾ (1952)が指摘するように、温暖多雨の気候条件のもとに塩基の溶脱作用が激しく、酸性化した土壌を生成するため、本質的に低位のものと考えられる。この低位性に加えて、さらに本節の(4)、(5)で述べたように、落葉、地被類の採取など粗放な掠奪的取扱いを受けて地力が著しく低下した林地も多く、また比較的法正な森林経営が行なわれた林地でも、(1)～(3)において論述したように今後のわが国林業において、施業能率の最も高い針葉樹の皆伐施業方式とられる以上、それ自体に地力低下の要因をはらんでおり、さらに従来の肥培を行なわない林業方式のもとで、たとえば育種による早生種の導入のように収穫の増加を期待する手段をとれば、それは立地の自然

能力以上のことを要求することになる場合もあり、その結果は土壌の悪化を招くことになる。いずれにしても今後のわが国における林地生産力は、総合的にみて下降の一途をたどるものと考えられ、林地生産力の低下を予防する上で増産をはからなくては、一時的増産にとどまり、収穫の保続性は保たれないであろう。以上が現在のわが国林業における林地肥培必要論を成立させる諸要因である。

第2章 林木の養分吸収量

林地肥培の基礎事項として、まず林木の養分吸収量を調査することは重要である。これにより、林木の無機栄養学的特性を知るとともに、林木の養分経済を考察し、施肥量の問題をとおして林地肥培の可能性を考察することができるからである。

欧州における林木の養分吸収量についての研究には古い歴史があり、Lutz⁷⁹⁾ (1946) によると EBERMAYER (1876), RAMANN (1890), VATER (1910), HACKMANN (1930), OELKERS (1930) などにより鉱物質養分の平均年間消費量が求められているが、わが国においてはまだこの種の研究成績はないので、本章において2, 3の調査例を述べ考察を加えることにする。

第1節 林木の養分含有量に関する基礎調査

林木の伐期に至るまでの全期間を通じて、その養分吸収量を実測することははなはだ困難であり、実行不可能であるといつても過言ではない。すなわち農作物の養分吸収量はふつう植物体の分析を行なうことにより求めるが、林木はその生育期間が長く、その間には落葉現象があり、農作物のように単に植物体を分析したのみではその養分吸収量は、はあくできない。したがって本章においては第1節において、まず林齢の異なる各林木について葉、枝、幹、根の各部位別にその養分含量を調査し、第2節において、葉の部分の養分含量から落葉現象による養分の還元量を推定し、その結果から総体的な養分吸収量を推定することにした。

I 調査—2 スギ林の養分含有量*

I—A 調査目的および調査方法

本調査は本節冒頭において述べたような観点にたち、立地条件のほぼ同様な所に生育するスギについて肥料3要素である窒素、リン酸、カリの含有量を測定する目的で行なつた。

この調査は、山形県真室川営林署、安楽城経営区内の6, 11, 17, 21, 30, 40年生のスギ造林地でおこなわれた。いずれも出羽丘陵に属する第3紀層の海拔250~350mの範囲の造林地である。

調査地の概況は第62表に示すとおりである。なお、この調査は昭和29年9月および昭和30年8月の2回にわたり行なつた。

各調査林分で50本のスギの胸高直径（6年生のスギのみは地際直径）を測定し、その算術平均値に相当する木を供試木として、6年生林分から5本、11年生林分から3本、その他の林分からは2本あて選定して調査した。

供試木は根を切断しないように注意して掘りさげて倒し、幹、枝、葉、根の各部分に分けてそれぞれの生重量を秤り、その一部をすみやかに秤量管（6×6cm）にとり、実験室に持ち帰り含水量を測定した。またその他の部分は実験室まで持ち帰り、乾燥したのち細粉して化学分析の試料とした。なお毬果および枯枝は、この測定から除外した。

* 本実験の成績の一部を文献186)に発表した。

第62表 調査林分の概要
Table 62. General condition of the investigated stand
in Mamurogawa, Yamagata Pref.

林 齢 Stand age	方 位 Direction	傾斜度 Inclination	土 壌 型 Soil type	平均樹高 Height m	成 立 本 数 Tree numbers per ha	材 積 Stem volume per ha m ³
6	S	10°	B _D	2.6	2,025	約 4.0
11	S	25	B _D	4.3	1,525	9.2
17	S	30	B _D	5.5	1,625	39.0
21	SW	15	B _D	8.8	1,150	80.1
30	SW	20	B _D	14.3	875	189.9
40	SW	15	B _D	18.8	1,500	634.5

この調査における幹とは、主幹の褐色の部分进行指し、梢端部の当年の成長部分に相当する緑色がかつた部分は葉とみなした。(スギでは枝と葉を正確に区別することが困難なので、この調査では便宜上緑色部分を全部葉とみなした。枝も同じように、緑色部分は葉とみなした。すなわち、ここでいう葉とは、葉緑素の存在により同化作用を営んでいると思われる緑色部分の全部を指している。)

現地での生重量の測定は、感量50g、秤量3.2kgの自動秤と、感量200g、秤量80kgの竿秤を用いた。

分析試料の調整は葉の部分は苗木の場合と同様であるが、幹などの木質部は小さなチップとして熱風乾燥したのち粉碎机で0.5~0.7mm程度に粉碎した。なお、試料は供試木の各部分の平均値が得られるよう特別の注意を払った。

分析方法の要は、窒素は常法によりケルダール法でおこない、リン酸の分析は試料を湿式灰化したのち、モリブデン青を発色させ、ルメトロン光電光度計で透過率を測定してもとめた。カリの分析は同じく試料を湿式灰化したのち、塩化リチウムを加え、パーキンエルマーの焰光光度計で測定して求めた。

I—B 調査成績とその考察

(1) 重量調査

各調査地のスギの平均木を葉、幹、枝、根の各部位に分けてその生重量を測定し、またその含水率を測定して算出した絶乾重量は第63表に示すとおりである。

第63表 スギ年齢別の生重量と絶乾重(1本あたりkg)
Table 63. Fresh weight and dry weight in each part of Sugi (kg per tree).

林 齢 Age	樹 高 Height m	胸高直径 Diameter at breast cm	生 重 量 (kg) Fresh weight (kg per tree)					絶 乾 重 量 (kg) Dry weight (kg per tree)				
			幹 Stem	枝 Branch	葉 Needle	根 Root	合計 Total	幹 Stem	枝 Branch	葉 Needle	根 Root	合計 Total
6	4.6	2.6	1.65	0.33	2.45	1.28	5.71	0.66	0.12	0.76	0.44	1.98
11	6.2	4.3	8.52	1.26	6.68	6.11	22.57	3.49	0.49	2.00	1.77	7.75
17	9.9	5.5	19.80	1.88	8.23	10.30	40.21	10.49	0.80	3.05	3.91	18.25
21	14.0	8.8	57.95	6.20	18.51	19.45	102.11	31.87	2.98	6.29	5.84	46.98
30	20.0	14.3	171.30	11.00	36.00	67.50	285.80	75.37	4.95	11.88	31.05	123.25
40	25.0	18.8	377.00	21.50	53.50	125.30	577.30	196.04	11.83	16.05	58.89	282.81

この表から林木の各部位の生重量については、6年生の木では葉の部分最重く、葉>幹>根>枝の順に少なくなっているが、木の年齢が増すに従い、幹と根の重量が急激に増加して、40年生の木では幹が最重く、幹>根>葉>枝の順に少なくなっている。この傾向は、絶乾重量についても同様である。

いま6年生の木の各部位の絶乾重量を1として、各年齢の木の各部の絶乾重量を指数であらわしてその

第64表 スギの年齢別にみた各部位別の絶乾重量比（1本あたり）

林 齢	絶 乾 重				
	幹	枝	葉	根	合 計
6	1	1	1	1	1
11	5.3	4.1	2.6	4.0	3.9
17	15.9	6.7	4.0	8.9	9.2
21	48.3	24.8	8.3	13.3	23.7
30	114.2	41.3	15.6	70.6	62.2
40	297.0	98.6	21.1	133.8	142.8

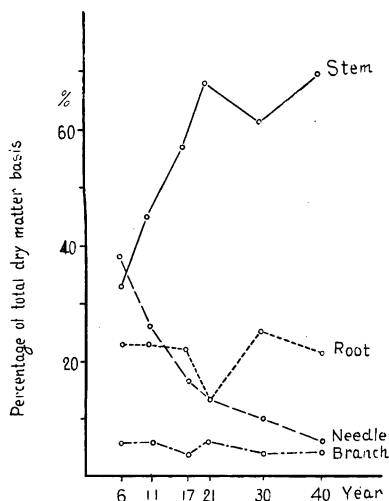
増加の模様をみると、第64表に示すようになる。

この表をみると、木の年齢が増加するに従い単木あたりの幹の乾物の増加割合は、最初のうちは徐々に増加するが、17年以降になると急激に増加し、40年の時の乾物重量は6年生の時の約300倍にも達している。幹と同様に根や枝の乾物重量も、最初のうちは徐々に増加するが、根は21年以後になると、また枝は30年以後になると急激に増加してゆき、40年の時の根は6年の時の約120倍に、また枝は約100倍になっている。しかし葉の乾物は40年になるまで、大体一定の割合で徐々に増加してゆくのみで、40年

の時の葉の乾物重量は、6年生の時のわずか20倍であるにすぎない。

つぎに各林齢における木の各部位の絶乾重量の、全絶乾重量に対する配分割合を計算して図示すると第24図に示すようになる。

第24図からみると6年生の木の全乾物量に対する葉の乾物量の配分割合は36%で、幹の35%とほぼ同じであるが、林齢の増すに従い葉の乾物重量の配分割合が減少し、逆に幹の乾物重量の配分割合が増加し、40年生の木では、幹の乾物重量が全体の70%をしめすのに対して、葉ではわずか全体の5%をしめしているにすぎない。また枝の乾物重量の全乾物重量に対する配分割合は、木の年齢に関係なくほぼ一定であり、根については明らかな増減の傾向を示さなかった。葉が木の年齢とともに著しく減少するのに対して、枝の配分割合は一定であるが、枝の発達は除間伐の影響を大きく受けるので、今回の調査では枝の配分割合が一定であるのがスギの個性であるのかどうかはわからない。



第24図 年齢別にみたスギの各部位の重量配分（全乾物量に対する%）
調査地 真室川

Fig. 24 Dry matter disposition in each parts of tree at various ages.

—Sugi in Mamurogawa—

（2）窒素、リン酸、カリの含有量

供試木の各部位の肥料3要素—窒素（N）、リン酸（ P_2O_5 ）、カリ（ K_2O ）の含有率は第65表に示すとおりであり、この数値を絶乾重量にかけて求めた各部位の3要素の含有量は第66表に示すとおりである。

第65表から、スギの窒素の含有率（N %）は林齢に関係なく葉の部分に最も多く、0.86~1.54%程度含まれているのに対し、幹、枝、根の各部分では、それぞれ0.2~0.3%程度含まれているにすぎない。

第65表 スギ標準木の3要素含有率(対乾物%)

Table 65. Nitrogen, phosphorus and potassium concentration in each part of Sugi at different ages.

林 齢 Age	Nitrogen (N %)				Phosphorus (P ₂ O ₅ %)				Potassium (K ₂ O %)			
	幹	枝	葉	根	幹	枝	葉	根	幹	枝	葉	根
Stem	Branch	Needle	Root	Stem	Branch	Needle	Root	Stem	Branch	Needle	Root	Root
6	0.21	0.30	1.18	0.20	0.02	0.06	0.27	0.05	0.14	0.34	1.21	0.32
11	0.26	0.40	1.48	0.23	0.05	0.05	0.28	0.03	0.25	0.31	1.26	0.28
17	0.22	0.28	1.01	0.23	0.04	0.05	0.24	0.05	0.14	0.16	0.84	0.29
21	0.30	0.21	1.54	0.33	0.05	0.03	0.25	0.07	0.18	0.23	0.88	0.31
30	0.24	0.30	1.03	0.19	0.02	0.06	0.18	0.03	0.15	0.23	0.66	0.23
40	0.14	0.23	0.86	0.21	0.01	0.03	0.16	0.04	0.13	0.11	0.72	0.19

第66表 スギ標準木の肥料3要素含有量(1本あたりg数)

Table 66. Nitrogen, phosphorus and potassium contents in each part of Sugi (g per tree).

林 齢 Age	窒 素 (N) Nitrogen					リン酸 (P ₂ O ₅) Phosphorus					カ リ (K ₂ O) Potassium				
	幹	枝	葉	根	合計	幹	枝	葉	根	合計	幹	枝	葉	根	合計
Stem	Branch	Needle	Root	Whole tree	Stem	Branch	Needle	Root	Whole tree	Stem	Branch	Needle	Root	Whole tree	Whole tree
6	1.4	0.4	9.0	0.9	11.7	0.1	0.1	2.1	0.2	2.5	0.9	0.4	9.2	1.4	11.9
11	9.1	2.0	29.6	4.1	44.8	1.7	0.2	5.6	0.5	8.0	8.7	1.5	25.2	5.0	40.4
17	23.1	2.2	30.8	9.0	65.1	4.2	0.4	7.3	2.0	13.9	14.7	1.3	25.6	11.3	52.9
21	95.6	6.3	96.9	19.3	218.1	15.9	0.9	15.7	4.1	36.6	57.4	6.9	55.4	18.1	137.8
30	180.9	14.9	122.4	59.0	377.2	15.1	3.0	21.4	9.3	48.8	113.1	11.4	78.4	71.4	274.3
40	274.5	27.2	138.0	123.7	563.4	19.6	3.5	25.7	23.6	72.4	254.9	13.0	115.4	111.9	495.4

リン酸の含有率(P₂O₅%)は3要素のうちで最も小さく、最も多く含まれている葉の部分でも0.16~0.28%であり、幹、枝、根ではそれぞれ0.1%以下である。カリの含有率(K₂O%)は窒素について多く、葉の部分で0.66~1.26%、幹、枝、根の部分ではそれぞれ0.2~0.3%程度である。一般に養分の含有率は、林齢の増加に伴って減少する傾向があるものと考えられるが、今回のスギについての調査の範囲では、明りような漸減的傾向は認められなかった。

林木の肥料3要素の含有量を各部位別にみると、17年生のころまでは窒素、リン酸、カリともに葉の部分に最も多く含まれている。これは、幼齢時代は木全体に対する葉の割合が多く、しかも葉に含まれる3要素の含有率が他の部分よりも高いための当然の結果である。しかし、林齢の増加にともない、窒素とカリについては幹や根の含有量がしだいに多くなり、40年生の木では幹における含有量が最も多く、根における含有量は葉の部分とほぼ同程度になる。リン酸の含有量も、林齢の増加に伴って幹や根においても増加してゆくが、窒素やカリとことなり40年生の木でも、葉の部分に最も多い点異なる。

つぎにN, P₂O₅およびK₂Oの含有量の各部位の合計、すなわち1本の木全体が含有している3要素の量は、窒素が最も多く、カリは窒素について多く、リン酸はこれらの1/5~1/7程度である。そして6年生の木では窒素、カリが12g程度、リン酸が2.5g程度含まれているが、40年生の木では窒素は約560g、カリは約500gとなり、リン酸は約70g程度である。

II 調査—3 アカマツ林の養分含有量*

II—A 調査目的および調査方法

* 本実験の成績の一部を文献187)に発表した。

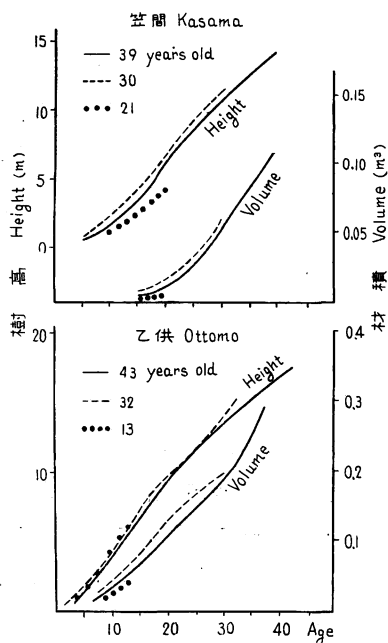
本調査は調査—2 と同様な観点から、アカマツの窒素、リン酸、カリの含有量を測定する目的で、青森県乙供営林署乙供経営区の6, 13, 32, 43年生のアカマツ人工造林地および茨城県笠間営林署笠間経営区の10, 21, 30, 39年生のアカマツ天然更新地で行なわれた。各年齢の調査林分の立地条件はほぼ同様であり、その概況は第67表のとおりである。

第67表 調査林分の概要
Table 67. General conditions of the investigated stand in Kasama,
Ibaragi Pref. and Ottomo, Aomori Pref.

調査場所 Location	林 齢 Stand age	方 位 Direction	傾 斜 度 Inclination	土 壌 型 Soil type	平均樹高 Height m	ha あたり 立木本数 Tree number per ha	材 積 Stem volume per ha m ³
笠 間 Kasama	10	N 80° W	10	B _B	2.7	3775	約 7.6
	21	S 60° W	10	"	4.6	4325	" 34.6
	30	S 20° W	5	"	11.3	1825	" 116.8
	39	S 50° W	10	"	14.3	1125	" 160.9
乙 供 Ottomo	6	SW	10	B _L D	1.6	—	—
	13	S	5	"	5.5	2900	約 53.1
	32	平 坦	0	"	14.3	1377	" 222.2
	43	W	8	"	18.3	1111	" 377.8

各林分の土壌型は乙供の場合はすべて B_LD 型、笠間の場合はすべて B_B 型である。なお調査は乙供は昭和32年10月、笠間は同年8月に行なつた。

各調査林分内に約 20×20 m の標準地をとり、標準地内のアカマツの胸高直径を毎木調査して、単級法



第25図 調査木の成長経過(アカマツ)
Fig. 25 Growth process of
sample trees (Akamatsu).

により標準木直径を算出して、これに近似の胸高直径のアカマツを数本選定して、その中から樹型が正常と考えられる木を3本調査木として選定した。調査木の概要は第67表のとおりである。また調査木の成長経過を樹幹析解して求めた結果は第25図に示すとおりである。この結果からみると乙供の場合は、各調査林分はほぼ同様の成長経過をたどり、したがって、ここに選定した調査林分の地位もほぼ同じであり、調査結果を各林齢ごとに比較できて調査目的によく適合することが認められる。また笠間の場合は30年および39年生の林分は、ほぼ同様の成長経過をたどるが、13年の林分はこれらよりやや成長が劣るようであるが、この程度の相違は調査目的からすれば許容される範囲のものと考えられる。

アカマツの葉の部分と枝の部分とは、スギの場合と異なり明りように区別できるので、部位別の試料採取に困難な点はなかつたが、ただし主幹の先端部の芽条の部分は幹とは見なさなかつた。また、毬果および枯枝はスギの場合と同様に測定から除外した。

供試木からの分析用試料の採取の方法、また分析用試料

の調整法や、窒素、リン酸、カリの分析方法は調査—2 の場合と同様である。

II—B 調査成績とその考察

(1) 重量成長

笠間、乙供両調査地のアカマツ供試木を葉、幹、枝、根の各部分に分けて、その生重量を測定し、またその含水率を測定して算出した絶乾重量は第 68 表に示すとおりである。

第 68 表 アカマツの年齢別の絶乾重量 (1 本あたりの kg)
Table 68. Dry weight in each part of Sugi at different ages.

調査地 Location	林 齢 Age	樹 高 Height m	直 径 Diameter at breast cm	絶 乾 重 量 Dry weight (kg per tree)				
				幹 Stem	枝 Branch	葉 Needle	根 Root	計 Whole tree
笠 間 Kasama	10	2.7	3.1	0.78	0.94	1.09	0.37	3.18
	21	4.6	5.3	2.29	0.99	1.17	0.85	5.30
	30	11.3	12.1	30.88	6.36	3.68	8.10	49.02
	39	14.3	15.1	51.40	9.21	4.95	13.28	78.84
乙 供 Ottomo	6	1.5		0.32	0.34	0.44	0.16	1.26
	13	5.5	7.8	6.36	3.48	2.21	2.49	14.55
	32	14.5	17.3	60.33	5.19	3.45	14.97	83.93
	43	17.8	20.6	146.79	12.93	6.53	37.66	203.91

この表から林木の各部位の生重量ならびに絶乾重量についてみると、笠間の場合も、乙供の場合も、6～10 年生時代すなわち幼齢時においては葉が最も重く、葉>幹>枝>根の順に少なくなっているが、木の年齢が増すに従い幹と根の部分の重量が急激に増加し、笠間、乙供両調査地の区別なく 30 年以上になると幹が最も重く、幹>根>枝>葉の順に少なくなっている。

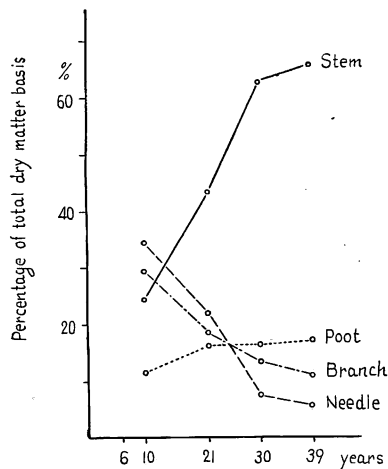
いま笠間の場合は 10 年生の木の各部位の絶乾重量を、また乙供の場合は 6 年生の木の絶乾重量をそれぞれ 1 として、各年齢時における乾重量の増加の模様を指数であらわすと、第 69 表となる。

第 69 表 アカマツの年齢別にみた各部位別の絶乾重量比 (1 本あたり)

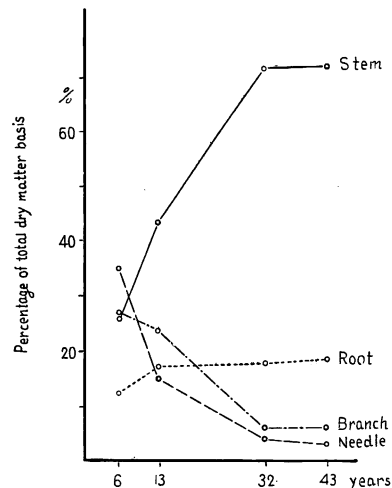
調査地	林 齢	絶 乾 重				
		幹	枝	葉	根	計
笠 間	10	1	1	1	1	1
	21	2.9	1.1	1.1	2.3	1.7
	30	39.6	6.8	3.4	21.9	15.4
	39	65.9	9.8	4.5	35.4	24.8
乙 供	6	1	1	1	1	1
	13	19.9	10.2	5.0	15.6	11.5
	32	188.5	15.3	7.8	93.6	66.6
	43	458.7	38.0	14.8	35.4	161.8

この表により、笠間、乙供両調査地とも木の年齢が増すに従い、木の各部分の乾物量がいかに増加してゆくかをみると、幹の部分の増加割合が最も大きく、次に根の部分で、両者とも 10～20 年生ごろから急激に増加するが、これに対して葉の乾物の増加割合は最も少なく、ほぼ一定の割合で徐々に増加しているのは、前述のスギについての調査例と一致する。

つぎに、各林齢における木の各部位の絶乾重量の、全絶乾重量に対する配分割合を計算して図示すると第 26、27 図のようになる。この図から、林齢の増すに従い葉の配分割合が減少して、幹の配分割合が著



第26図 年齢別に見たアカマツの各部位の乾物重量の配分関係 (全乾物重量に対する%)
Fig. 26 Dry matter disposition in each parts of tree at various ages.
—Akamatsu in Ottomo—



第27図 年齢別にみたアカマツの各部位の乾物重量の配分関係 (全乾物重量に対する%)
Fig. 27 Dry matter disposition in each parts of tree at various ages.
—Akamatsu in Kasama—

しく増加する。すなわち、笠間の場合は39年生の幹の配分割合が約67%、乙供の場合は43年生の幹の配分割合が約72%に及んでいるが、葉の配分割合は10%以下で、スギの場合と全く同様であり、樹種の違いによる相違がみられないのは興味あることである。ただアカマツの枝の配分割合が、年齢が増すに従い著しく減少するのもスギと異なる点で、これはアカマツの葉の方がスギよりも陽光に対する要求度が強いためであると思われる。これに対して根の配分割合は年齢の増加するにしたがい明らかな増減の傾向を示さなかつたのはスギの場合と同様である。またアカマツについて乙供と笠間の場所による相違は、今回の調査範囲ではまったく認められなかつた。

(2) 窒素、リン酸、カリの含有量

供試木の各部位の窒素、リン酸、カリの含有率および1本あたりの含有量は第70表および第71表に示すとおりである。

第70表からアカマツの肥料3要素の含有率の大小は、各部分とも窒素の含有率(N%)が最も大きく、つぎにカリで、リン酸の含有率が最も小さい。

また各部位別に3要素の含有率の大小をみると、3要素とも葉に最も多く、ついで枝で、幹と根では少ない。すなわち3要素含有率を部位別にみると、アカマツの窒素の含有率(N%)は林齢に関係なく、葉の部分に最も多く、笠間の場合では1.08~2.00%程度、乙供の場合では1.17~1.53%程度含まれ、ついで枝、根、幹の順に多く含まれているが、いずれも葉のN%の1/2~1/10程度にすぎない。リン酸の含有率(P₂O₅%)はいずれの林齢の時も葉に最も多く、笠間の場合では0.16~0.20%、乙供の場合では0.26~0.33%程度含まれ、枝、幹および根の順に減じているが、いずれも葉のP₂O₅%の1/2~1/10程度にすぎない。カリの含有率(K₂O%)も葉に最も多く、笠間の場合では0.28~0.70%、乙供の場合では0.61~1.03%程度含まれ、ついで枝、幹および根の順に減じているが、いずれも葉のK₂O%の1/2~1/10程度にすぎない。林齢の増加にともない、養分の含有率は3要素とも幹の部分ではあきらかに低下している。

第 70 表 アカマツ標準木の 3 要素の養分含有率

Table 70. Nitrogen, phosphorus and potassium concentration in each part of Sugi at different ages.

調査地 Location	林 齢 Age	窒 素 Nitrogen (N %)				リン酸 Phosphorus (P ₂ O ₅ %)				カ リ Potassium (K ₂ O %)			
		幹 Stem	枝 Branch	葉 Needle	根 Root	幹 Stem	枝 Branch	葉 Needle	根 Root	幹 Stem	枝 Branch	葉 Needle	根 Root
笠 間 Kasama	10	0.21	0.35	1.08	0.22	0.03	0.09	0.16	0.03	0.18	0.12	0.28	0.11
	21	0.16	0.38	1.20	0.17	0.02	0.08	0.20	0.02	0.08	0.18	0.68	0.15
	30	0.11	0.33	1.16	0.22	0.01	0.07	0.17	0.02	0.06	0.19	0.70	0.18
	39	0.09	0.48	1.08	0.13	0.01	0.09	0.18	0.03	0.07	0.23	0.53	0.16
乙 供 Ottomo	6	0.27	0.44	1.53	0.28	0.07	0.10	0.30	0.06	0.20	0.35	0.80	0.28
	13	0.21	0.28	1.17	0.29	0.05	0.06	0.26	0.06	0.13	0.14	0.86	0.22
	32	0.13	0.27	1.36	0.16	0.03	0.06	0.33	0.03	0.09	0.19	1.03	0.10
	43	0.16	0.25	1.44	0.16	0.04	0.05	0.29	0.03	0.08	0.13	0.61	0.13

第 71 表 アカマツ標準木の肥料 3 要素含有量 (1 本あたり g 数)

Table 71. Nitrogen, phosphorus and potassium contents in each part of Akamatsu (g per tree).

調査地 Location	林 齢 Age	窒 素 (N) Nitrogen					リン酸 (P ₂ O ₅) Phosphorus					カ リ (K ₂ O) Potassium				
		幹 Stem	枝 Branch	葉 Needle	根 Root	合計 Whole tree	幹 Stem	枝 Branch	葉 Needle	根 Root	合計 Whole tree	幹 Stem	枝 Branch	葉 Needle	根 Root	合計 Whole tree
笠 間 Kasama	10	1.6	3.3	11.8	0.8	17.5	0.2	0.8	1.7	0.1	2.8	1.4	1.1	3.1	0.4	6.1
	21	3.7	3.8	14.0	1.4	22.9	0.5	0.8	2.3	0.2	3.7	1.8	1.8	8.0	1.3	12.9
	30	34.0	21.0	42.7	17.8	115.5	3.1	4.5	6.3	1.6	15.5	18.5	12.1	25.8	14.6	72.1
	39	46.3	24.7	53.5	17.3	141.8	5.1	8.3	8.9	4.0	26.3	36.0	21.2	26.2	21.2	98.0
乙 供 Ottomo	6	0.9	1.5	6.8	0.4	9.6	0.2	0.3	1.3	0.1	1.9	0.7	1.2	3.5	0.4	5.8
	13	13.4	9.7	25.9	7.2	56.2	3.2	2.1	5.8	1.5	12.5	8.3	4.9	19.0	5.5	37.7
	32	78.4	14.0	46.9	24.0	163.3	18.1	3.1	11.4	4.5	37.1	54.3	9.9	35.5	15.0	114.6
	43	234.9	32.3	94.1	60.3	421.5	58.7	6.5	19.0	11.3	95.4	117.4	16.8	39.9	49.0	223.0

しかし幹以外の部分ではこのような傾向がみられない。たとえば笠間の場合では、枝の窒素、カリ、葉のリン酸、カリ、根のカリの含有率は逆に林齢の増加にともない増加する傾向を示している。

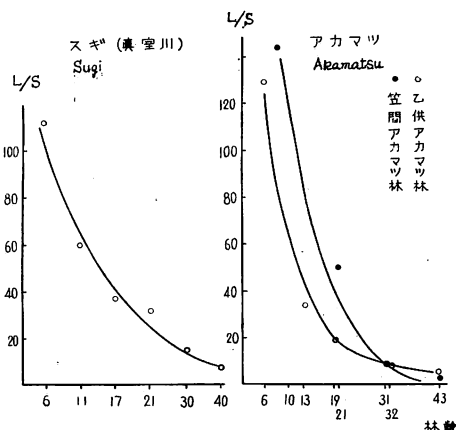
調査木の各部位の肥料 3 要素の含有量および年齢による変化をみると、第 71 表のとおりで、13 年生の調査木の場合までは、窒素、リン酸、カリの 3 要素とも葉の部分に最も多く含まれているが、32 年生および 43 年生の調査木の場合は、3 要素とも幹の部分に最も多く含まれているのは調査—2 の場合と同様である。調査木 1 本あたりの窒素、リン酸、カリの含有量（各部分の合計）は年齢にともない増加してゆくが、各年齢ともに窒素の含有量が最も多く、カリは窒素の $2/3 \sim 1/2$ 程度であり、リン酸の含有量は窒素の $1/4 \sim 1/5$ 程度で最も少ない。そして乙供の場合についてみると、6 年生の木では窒素が約 10 g、カリが約 6 g、リン酸が約 2 g 程度含まれているが、43 年生の木では窒素が約 420 g、カリが約 220 g、リン酸が約 100 g 程度含まれている。

つぎにアカマツの針葉の 3 要素含有率を、調査—2 のスギの場合と比較すると、N % および P_2O_5 % はアカマツの方が高く、 K_2O % はアカマツの方が低い値をとる。この傾向は第 1 編第 11、13 図に示されるように、肥培して育てた苗木についての実験値とよく一致するので、アカマツとスギの栄養生理上の相違点と見なすことができるであろう。

III 考 察

落葉の無機養分元素の組成を調べた報告は多いが、これらの成績では、各樹種の相対的な栄養生理学的な特性をあらわすことができるにしても、林木の養分吸収量そのものを表わすことはできない。これを求めようとすれば林木の幹、枝、葉、根の各部分について、その無機養分元素の含有率を測定して、林木の各部分の含有量の合計を求めることが必要であるが、このように林木全体の養分吸収に言及した論文は比較的少なく、いずれも諸外国で発表されたものであり、その成績は BECKER-DILLINGEN⁶²⁾ (1938) によつて集録されており、また RENNIE¹⁶⁶⁾ (1955) によつて要約されている。これらは、いずれも諸外国の樹種の成績であり、わが国の樹種についての研究はまだ見あたらない。そこで著者は上述のように林齢の異なるスギ、およびアカマツについて、幹、枝、葉、根の各部位ごとに窒素、リン酸、カリの肥料 3 要素の含有量を求め、これから林木の栄養と林木生産の関係を考究しようと努めたのであるが、その成績につき 2、

3 の考察を加えらるゝつぎのとおりである。



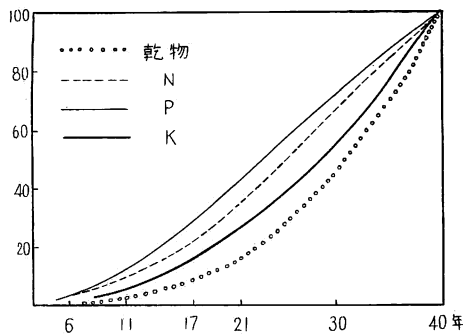
第 28 図 林木の葉 (L) と幹 (S) の絶乾重量比 (L/S) の林齢による変化

(1) 調査—2、3 の成績によると、林木はその年齢が大きくなるにしたがい葉の部分が増加して幹の部分が増加することを述べたが、さらに葉の部分 (L) と幹の部分 (S) の絶乾重量比 L/S の値の林齢による変化をみると、第 28 図に示すとおりで、この傾向はいつそう明らかになる。このことは、幼齢時代の林木は栄養器官である葉の部分が多く、年齢が増すにしたがい、貯蔵器官であり、林業生産の直接の対象物である幹材部の部分が著しく増加してゆくためであり、またこのことは同時に林木生産過程の特質であると考えられる。

(2) 以上の点をさらに養分の面から吟味するとつぎのとおりである。いま調査-2のスギを例にとると、6年生の時の幹、枝、葉、根の各部分に含まれている各養分の含有量をそれぞれ1とすると、年齢が進むにしたがい各養分とも幹の部分に含まれる量が最も著しく増加するが、そのなかでカリの含有量がとくに著しく増加する。さらにこの関係を各年齢ごとに各養分の幹、枝、葉、根の各部分へのカリの集積割合を計算して図示すると、第29図のとおりで、前述の関係はさらに明確に示される。これはカリは幹材部の主成分であるセルロース、リグニンなどの高分子炭水化物の生成に関与し、これらの炭水化物が木の年齢が進むにつれて幹材部に集積するのに伴い、カリもまたそれと平行的に幹材部に集積するためであると考えられる。

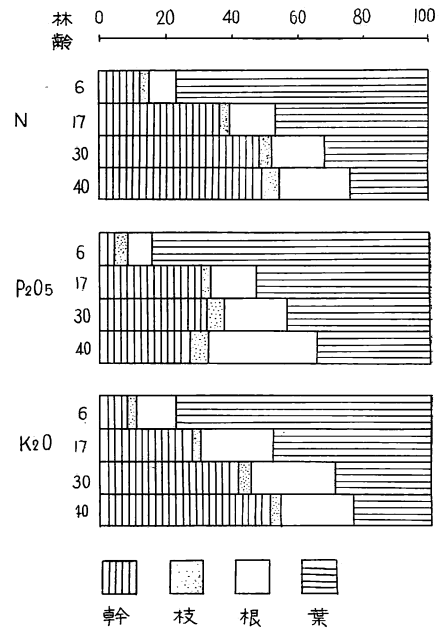
(3) (1)でのべたL/Sの値の変化の模様から、葉部の各養分の幹材部に対する生産能率は年齢とともに増加するものと考えられるが、調査-2のスギ林の調査成績から、0~6年、6~11年、11~17年、21~30年、30~40年の各期間に木が着けている平均葉量を求め、またその期間における幹材部の平均増加量を求め、後者の値を前者の値で割り、各期間ごとに一定の養分量が幹材部を生産する能率を求めて、これを図示すると第30図に示すとおりで、これによると、葉部の各養分の一定量の幹材部生産能率は年齢とともに著しく増加するが、とくにカリは窒素より幹材部生産能率が高くなることが認められる。

(4) 林木全体の肥料3要素の全期間を通じての吸収経過

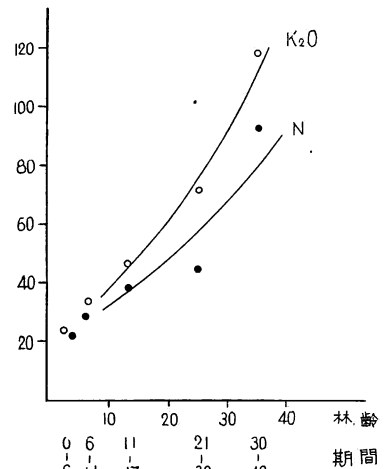


第31図

林木の養分吸収経過(真室川のスギの場合)
— 40年の時の値を100とする —



第29図 林木の各部位への養分集積割合の年齢による変化(真室川のスギの場合)



第30図 葉に含まれる窒素およびカリの幹材部生産能率の年齢による変化(真室川のスギの場合)

を、調査-2のスギの場合を例にとり考察すると第31図に示すとおりで、各養分は乾物の生産に先行して吸収されるが、とくにリン酸と窒素はその傾向が著しい。これは、これ

らの要素が栄養器官である葉部の生産が盛んである幼齢時代に、とくに関係が深いものと考えられる。これに対してカリの吸収は 30～40 年の壮齢時代に急激に増加するので、幹材部の生産にとくに関係が深く、カリの吸収は窒素やリン酸に比較すると、幹材部の生産とほぼ平行的に行なわれるものと考えられる。

第 2 節 林木の養分吸収量の推定

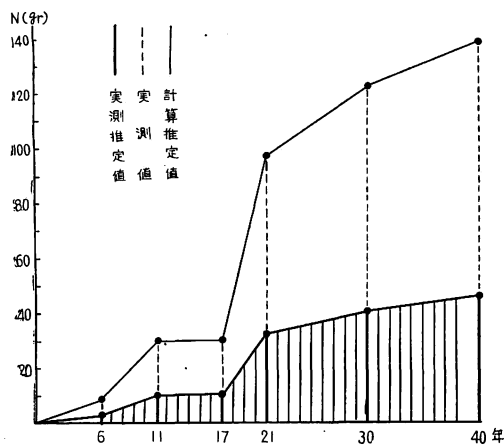
前述のように、林木の養分吸収量を正確にはあくすることは困難であるので、前節の林木の養分含有量の測定値を基礎として、真室川のスギ、乙供のアカマツについてその吸収量の大体の傾向を推定してみることにした。養分吸収量推定の方法はいろいろ考えられるであろうが、著者は一定年齢時における林木の養分吸収量 (A) を次式によつて求めた。

$$A = B + C$$

ただし、A：林木の養分吸収量

B：一定年齢における林木の養分含有量

C：一定年齢に達するまでに落葉により還元された養分量



第 32 図 落葉による養分還元量の推定法
(図は窒素の場合を示す)

上式において B の値はスギでは 40 年生の時の養分含有量の値 (第 66 表), アカマツでは 43 年生の時の値 (第 71 表) を用いた。また C の値としては、各調査林齢時における調査木の葉の養分含有量の 1/3 に相当する量が、落葉による養分の還元量と仮定して求め、実測した林齢以外の林齢における養分還元量は第 32 図に示すように、互いに相隣れる調査林齢時の落葉による養分還元量を直線で結び、図上で求め、これらの総合計の値を用いた。このようにして、上式 $A = B + C$ によつて計算した結果は、第 72 表に示すとおりである。ただし、落葉時には葉部の養分の一部は葉部以外の樹体内に移動す

第 72 表 林木の養分吸収量の推定値 (1 本あたりグラム数)

Table 72. Amounts of nutrients uptake of mature trees (g per tree).

項 目 Items	スギ (40年) Sugi (After 40 year's growth)			アカマツ (43年) Akamatsu (After 43 year's growth)			備 考 Remark
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
B. 一定年齢時における林木の養分含有量 Nutrient immobilized within tree g	563	72	495	421	95	223	第 66 表および第 71 表による。
C. 一定年齢時に達するまでに落葉により還元された養分量 Nutrient returned to soil by fallen litter g	496	88	340	328	69	206	
A. 一定年齢時に達するまでに吸収した全養分量 $A = B + C$ Total amounts of nutrient uptake g	1,059	160	835	750	164	429	

るため、落葉の養分含有率は低下する。著者は暫定的に落葉の含有率を生葉の0.6掛けとして計算した。第72表によると、1本あたりの窒素の吸収量はスギで約1,060 g, アカマツ 750 g, リン酸の吸収量はスギ, アカマツともに 160 g, カリの吸収量はスギで約 840 g, アカマツで約 430 g である。また *ha* あたりの本数をスギ 1,500 本, アカマツ 1,000 本とすると *ha* あたりの窒素の吸収量はスギで約 1,600 kg, アカマツ 750 kg, リン酸の吸収量はスギで約 240 kg, アカマツ 160 kg, カリの吸収量はスギで約 1,250 kg, アカマツ 430 kg と概算される。またこれらの吸収量を年平均的にみると, *ha* あたりスギは窒素 40 kg, リン酸 6 kg, カリ 31 kg, アカマツは窒素 18 kg, リン酸 4 kg, カリ 10 kg と概算される。スギとアカマツを比較すると, スギはアカマツより約 2 倍程度養分吸収量が多く, スギの方がアカマツより肥沃な立地を要求するという従来の経験的な通説も, 上述の成績によりよく理解することができる。

第3章 林地の養分経済

林地と農地との養分経済の基本的相違点は, 林地においては落葉, 落枝により, 土壌から吸収された養分がふたたび林地にかえる——すなわち土壌と林木との間に養分循環が行なわれることにあるといつても過言ではないであろう。もつとも農地でも根菜類などを除けば, 多くの作物は収穫後にその根株が残し, それが土壌に還元されるが, 養分循環の程度はわずかである。

この林地における土壌と林木間の養分循環を明らかにすることは, 林地における養分経済の特質を明らかにし, 林地肥培を林地の養分経済の面から考察するのに重要な役割を果たすので, 本章ではこれらの点について考究することにした。

第1節 林地の養分循環率の試算

林地の土壌と林木間の養分循環の実態を正確にはあくすることは, 方法論的にいろいろ困難な点が多いが, 著者が第2章の第66, 71表の成績から暫定的に求めた成績は, 第73表に示すとおりである。

第73表 林木養分循環率の試算 (kg/ha)
Table 73. Estimate of nutrients cycle of forest trees (kg/ha).

項 目 Items calculated	スギ (40年) Sugi (40 years)			アカマツ (43年) Akamatsu (43 years)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
A. 伐採収穫による養分持出量 (幹材部) Nutrients immobilized within stem timber (Nutrients removal via clear felling) <i>kg</i>	275	19	255	235	59	117
B. 伐採時の還元量 (枝・根・葉) Nutrients immobilized within branch, needle and root (at clear felling) <i>kg</i>	289	53	240	187	37	106
C. 落葉としての還元量 Nutrients returned to soil by fallen litter <i>kg</i>	495	88	340	328	69	206
D. 伐採時までの全吸収量: D = A + B + C Total amounts of nutrients taken up	1060	160	835	750	164	429
E. 養分循環率 $\frac{B+C}{D} \times 100$ (%) Rates of nutrient cycle	74.1	88.1	50.6	68.6	64.6	72.7
F. 落葉を採取した場合の循環率 $\frac{B}{D} \times 100$ (%) Rates of nutrient cycle when fallen litter are removed	27.3	33.1	28.7	24.9	22.6	24.7

ただし、第73表において

A：スギの場合では40年目に、アカマツの場合では43年目に伐採して、幹材部だけを利用して、林外に持ち出した場合の養分持出量。

B：Aの場合、幹材部以外の枝、葉、根はすべて林地に残すものとして、その際林地に還元されると考えられる養分量。

C：スギの場合では40年目まで、アカマツでは43年目まで、毎年の落葉によって林地に還元される推定養分量。ただしアカマツの葉は一般に3年たつと落葉するので、毎年の落葉量を、その年に保有する葉量の1/3として、その中に含まれる養分量の0.6掛け（落葉の無機養分含有量は生葉の0.6と推定した）を計上した。

D：A、B、Cの合計で、この値がスギの場合では40年間、アカマツの場合では43年間に林地から吸収される養分量といちおう見なすことができる。

第73表のCの値を算出するときに、若干の仮定や推定値を用いてあるので、正確なことはわからないが、伐採に際して幹材部だけを林外に持ち出す場合の養分循環率は、第73表の範囲ではスギ、アカマツそれぞれ窒素は74%、67%、リン酸は88%、65%、カリは51%、73%である。

また農地に接した林地で、営農上の必要から落葉が採取される場合の養分循環率は各養分とも約20~30%の値をとり、落葉の採取が林地生産力にいかにも悪影響を及ぼすかが察知される。

第2節 林地の養分経済とその考察

本節では、林木の養分奪取量を中心に林地の養分経済についてのべ、また林木の養分循環の立場から考察を加えてみる。

前節の第73表から、スギを40年程度の伐期で施業するとして、伐期に1度だけ収穫物である幹材部を林外に持ち出すが、枝葉はすべて林地にもどすかぎりにおいては、スギは1本あたり約窒素275g、リン酸20g、カリ255gの養分が、また1haあたりの成立本数を1,500本とすると、1haあたり窒素412kg、リン酸30kg、カリ382kgの養分が林地から収穫物とともに持ち出されることになる。この値を40で割り、1年間あたりの養分奪取量に換算すると、1haあたり窒素は約10.31kg、リン酸は約0.75kg、カリは約9.55kgとなる。

またアカマツを43年程度の伐期で施業するとして、1本あたり約窒素235g、リン酸59g、カリ117gの養分が、また1haあたりの成立本数を1,000本とすると、1haあたり窒素235kg、リン酸59kg、カリ117kgの養分が林地から収穫物とともに持ち出されることになる。この値を43で割り、1年間あたりの養分奪取量に換算すると、1haあたり窒素は約5.46kg、リン酸は約1.37kg、カリは約2.72kgとなる。

農作物では、たとえば小麦を例にとると、1年間の1haあたりの養分吸収量は窒素84.71kg、リン酸34.84kg、カリ49.09kgと概算される。これと林木の年間養分奪取量とを比較すると、林木は窒素で農作物の約1/8~1/15、カリで1/5~1/17、リン酸では1/25~1/40で、きわめてわずかなものである。MAYER-KRAPOLL¹⁷⁰⁾ (1958)も林木の窒素成分の掠奪量は農業の場合の約1/10であることをのべているが、上述の成績もほぼこれと一致する。

つぎに林地における養分循環を考察するために、筆者ならびに他の研究者の算出した養分循環率の値を一括表示すると、第74表に示すとおりである。

すなわち林地における養分循環は、一般にリン酸>窒素>カリの順で、カリの循環率がもつとも低い。

第 74 表 森 林 の 養 分 循 環 率

樹 種	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	研 究 者
スギ	74	88	51	塘 DENGLER
アカマツ	69	65	73	
カラマツ	78	77	65	
カブツナ	80	77	67	
林 作 木 物	80	80	73	BAKER
	25	20	71	

これに対して農作物の養分循環率は、カリ>窒素>リン酸の順で、窒素、リン酸は20%程度で著しく悪く、カリだけが71%であり、カリの循環率をもつともよいのが林木と著しく異なる点である。

このように林木の場合に、カリの循環率が悪いのはカリが幹材部の主成分であるセルロース、リグニンなどの高分子炭水化物の生成に関与するとともに、幹材部に集積したあげく、伐採収穫されるためであり、農作物の場合、リン酸の循環率がわるいのは、その収穫物である種子にリン酸が集積するためであろう。このことは林地と農地の養分経済を考えてゆくうえに、興味ある重要なことであろうと思われる。

以上に述べた養分循環は、落葉の分解が順調に行なわれた場合の計算である。しかし、北欧のように寒冷なため落葉の分解が悪く、粗腐植のたまる林地では、粗腐植中の養分は循環が行なわれ難い場合もある。このような場合に、施肥は養分循環を促進させるのに有効であることを THEMLITZ¹⁴⁴⁾ (1958) らは指摘しているが、わが国でも、北海道地方や内地の亜高山地帯の森林についてはこのような措置が必要であろう。また一般の林地でも落葉中に含まれている養分の全量が有効化することは考えられないし、また傾斜の急な林地の多いわが国では、比較的多雨な気象条件とあいまって、たとえ全量が有効化したと仮定しても、その有効化した養分の流亡による損失量もかなりな量に及ぶものと考えなくてはならないであろう。したがって上述の第74表に示す計算がほぼ成立する場合は比較的少ないものと考えられ、この点に森林の養分経済よりみた林地肥培の必然性があるように思われる。

第 4 章 林地肥培機構に関する論議

林木は農作物と異なり永年生であるため、これを肥培した場合にいかにして効果が現われるか、すなわち林木が肥培されてゆく過程やその機構は、おのずから農作物と異なるものがあるであろう。林地の肥培過程や、その肥培機構を考察することは、林木が超永年生であるだけに農作物にくらべて重要なことであり、また林地肥培の理論形成の基礎としてきわめて重要な役割をはたすものと思われる。

以上の観点から、本章においては林地肥培機構に関する論議の資料とするため、まず林地肥培地の実態を調査し、また林木の養分吸収に関する2, 3の基礎的実験を行ない、これらの成績をもとに総合的に論議を進めることにした。

第1節 林地肥培機構を論ずるための基礎試験ならびに調査

林地の肥培過程やそのメカニズムを論ずるためには、まず論議の材料となる現実の肥培林が必要である。しかもこの肥培林は施肥後少なくとも6~7年以上経過して、林分がほぼ閉鎖した林でなければ所期の目的に適合しない。しかし林地肥培が試行されてからまだ経過年数も浅く、適当な林分もないので、著者らが昭和26年以来実施中の埼玉県下の林業試験場赤沼試験地におけるアカマツの肥培試験成績のほか、群馬県下における民間のスギ肥培試験地の調査成績を材料として用いることにした。また根系の一部分を

とりあげ、その養分吸収についての模型実験を行なった。以下これらの試験、調査ならびに実験の成績をのべる。

I 試験—1 アカマツ林の肥培試験*

I—A 試験の目的

林業試験場赤沼試験地(埼玉県比企郡今宿村)の付近一帯は関東平野と秩父山塊との接触地帯で、なだらかな丘陵状の里山が続いている。そして、その多くは雑木林か成長のよくないアカマツ林になつている。いずれにしても土地生産力の低い地帯である。しかもこの辺では、林地の生草や落葉などを年2~3回採取するのが習慣で、またこれを禁止すれば営農上著しい支障をきたすのが実情である。いまアカマツの落葉だけ採取されると考えても、10カ年の間に失われる肥料要素量は0.1 haあたり、窒素(N) 224 kg, リン酸(P_2O_5) 41 kg, カリ(K_2O) 33 kg, 石灰(CaO) 209 kg に及ぶものと概算される**。実際には落葉以外に生草も採取されるから、林地から奪いとられる肥料成分量は相当な量にのぼり、林地はしだいに瘠悪になり、アカマツの生育は漸次衰えてくるものと考えられる。

戦後パルプ資源としてのアカマツが重要視され、その生産力増強が要請されている今日、著者はこのように落葉や生草が採取されるアカマツ林の改良に対しては、施肥あるいは肥料木の混植が有効ではないかと考え、その効果がどの程度現われるかを検討する目的で、昭和26年度から、アカマツの肥培試験に着手した。

I—B 試験地と試験設計

(1) 試験地の立地条件

林業試験場赤沼試験地内の、山頂がほぼ平たんに近い、海拔約80 mの丘陵上に試験地を設けた。この丘陵の基盤は第3紀層(中新世中期)に属し、その上部には鮮新世—洪積世といわれる水成堆積物層(上部に粘土層、下部に小角礫を含む円礫層がある)がおおつている¹⁸⁸⁾。土壌はこれらの水成堆積物の影響を強く受け、粘質でしかも著しく堅密である。

試験地内の土壌断面は層の分化が不明りようであるが、次のように分けられる。

A₀層 落葉がわずかに認められる程度である。

A層 約10 cm, 暗黄褐色, 腐植の混入が認められるが、色はB層よりやや暗色を帯びる程度である。堅密であるが、B層に比べればやや軟らかい。圧結度 82。

B層 50 cm 前後, 黄褐色, 著しく堅密で、根系も少ない。圧結度 87。

C層 小角礫を含む円礫層。

土壌の理化学的性質について調べた結果は第75表に示すとおりである。これによれば、粘土分が多くて孔隙量が小さく、堅密な土壌で、しかも酸性が強く、養分にも乏しい。物理的にも化学的にも不良な土壌ということができよう。

試験地付近一帯はもとアカマツ林であつたが、昭和20年に伐採して、その後天然更新がよく行なわれている。試験を開始した昭和26年におけるアカマツの樹齢は5~6年生で、平均樹高は38 cm, 平均成立本数は0.1 haあたり3,000~4,000本程度であつた。なお平均気温は14.9°C, 年平均雨量は1,452 mmで

* 本試験の成績の一部を文献 163) 164) に発表した。

** 計算基礎は、大政・森：落葉に関する2, 3の研究, 帝室林野局：林試報, 3, (3): p. 39~107 (1937) による。

第75表 アカマツ林肥培試験地の土壌の性質

Table 75. Soil properties of 6 years old, naturally regenerated Akamatsu stand.

(1) 理学的性質 Physical properties									
層位 Horizon	深さ Depth	機 械 的 組 成 Mechanical composition				孔 隙 量 Porosity	容 積 重 Volume weight	最 大 容 水 量 Maximum water holding capacity	
		粗 砂 Coarse sand	細 砂 Fine sand	微 砂 Silt	粘 土 Clay			重 量 % Weight %	容 積 % Volume %
	cm	%	%	%	%	%	%		
A	0~10	17.5	22.3	28.0	32.2	55	120	62	67
B	25~35	15.4	15.5	26.6	42.6	49	114	66	75

(2) 化学的性質 Chemical properties											
層位 Horizon	深さ Depth	土 壤 酸 性 Soil acidity			置換性 石 灰 Ex-CaO	全炭素 Total C	全窒素 Total N	N 5 HCl-soluble		養分吸収係数 Absorption coefficient of soil.	
		pH (H ₂ O)	pH (KCl)	y ₁				P ₂ O ₅ %	K ₂ O %	N	P ₂ O ₅
A	0~10	5.7	4.4	1.29	0.123	2.30	0.15	Tr.	0.0016	307	827
B	25~35	5.3	4.0	12.48	0.017	0.30	0.03	Tr.	0.0012	339	821

ある。

(2) 試験設計

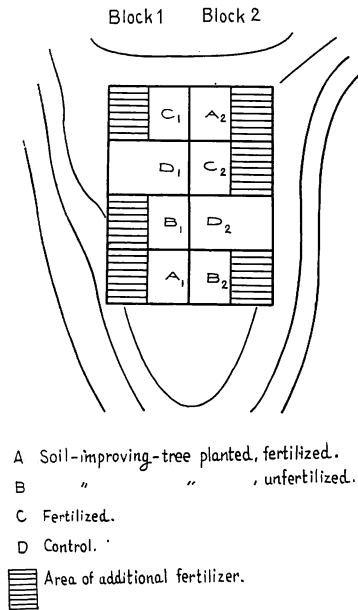
試験設計は第76表に示すように A, B, C, D の4試験区を設け、各試験区の面積は 0.1 ha で、その配列は第33図のように 2 Block の乱塊法によつた。

試験地内の立地条件や、植生そのほかの条件が均一であることが必要であるが、とくに肥培の対象となるアカマツの樹高の均一性を推計学的に検定した。その方法は予備調査により、1試験区 (=1,000 m²) から 1 m² のコードラートを無作為に 21 個以上選んで調査すれば、アカマツの樹高を信頼度 95%、誤差

第76表 アカマツ林肥培試験の設計

Table 76. Design of fertilization trial.

区 Plot	処 理 Treatment	備 考 Remarks
A	肥料木植栽ならびに施肥 Planting of soil-improving-tree and fertilization	各試験区の面積 1 段階 (0.1 ha=1,000 m ²) Area of each plot: 1,000 m ² 肥料木: ヤマハシノキ Soil-improving-tree: Alder 施肥量 (段あたり) Amounts of fertilizer applied (per 1,000 m ²) 硫 安 Ammonium sulphate (N 20%) 25.0 kg 過リン酸石灰 Super phosphate (P ₂ O ₅ 18%) 27.5 kg 硫酸カリ Potassium sulfate (K ₂ O 48%) 8.0 kg 消 石 灰 Lime 75.0 kg 堆 肥 Compost 375.0 kg 500 カ所に孔をあけて施肥
B	肥料木植栽 Planting of soil-improving-tree	
C	施 肥 Fertilization	
D	無 処 理 Control	



第 33 図
アカマツ肥培試験地の試験地の配列
Fig. 33 Arrangement of plots.

区 2.45 m, 施肥後の伸長量は施肥区が 2.93 m, 無施肥区 2.09 m で約 90 cm の差が認められる。また施肥後 8 年目の根元直径については, 施肥区 4.8 cm, 無施肥区 4.2 cm, 施肥後の直径肥大成長量は施肥区 4.3 cm, 無施肥区 3.7 cm で約 0.6 cm の差が認められる。

樹高成長, 直径成長の年変化を, 無施肥区

率 5% で推定できることを知つたが、安全のため 35 個のコードラートをえらんで、そのなかのアカマツについて調査した。その結果は各試験区間に有意な差がないことを確認した。なおこのコードラートによる標本抽出調査方法は、毎年の樹高測定のとくにも用いた。

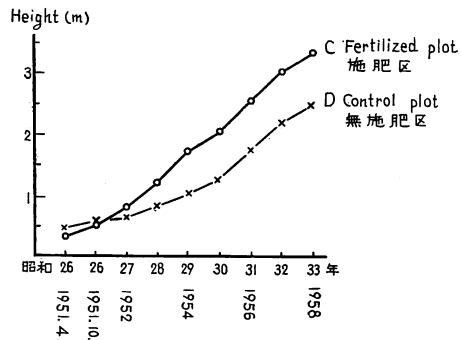
I—C 試験成績とその考察

その1 施肥後8年間の調査

試験開始後 8 年目（昭和 33 年秋季）の成績を要約すると、
第 77 表ならびに第 34 図に示すとおりである。

第77表によれば、ヤマハシノキの混植はアカマツの生育にはまだ効果が現われていないので、A、Bの両区を除いてCの施肥区とDの無施肥区について、その成長経過や施肥による土壌の変化、下草収量などを検討することにする。

(1) 施肥後の8年目の樹高は、施肥区 3.30 m, 無施肥



第 34 図
アカマツの樹高成長に現われた施肥の効果
Fig. 34 Effect of fertilization on annual
height growth of Akamatsu stand.

第 77 表 施肥後 8 年目のアカマツ林の生育状況
Table 77. Effect of fertilization on height and diameter growth (平均値)
of Akamatsu stand in 1958 (the 8th year after treatment). (Average)

試験区 Plot	処 理 Treatment	処理後の樹高成長量 Height incre- ments after treatment		処理後の根元径成長量 Diameter incre- ments after treatment	
		樹 高 Height		根元直径 Basal diameter	
		cm	cm	mm	mm
A	肥料木植栽ならびに施肥 Planting of soil-improving-tree and fertilization	336	299	51.6	46.6
B	肥 料 木 植 栽 Planting of soil-improving-tree	237	231	44.2	39.2
C	施 肥 Fertilization	330 (135)	293	47.8 (114)	42.8
D	無 処 理 Control	245 (100)	209	42.2 (100)	37.2

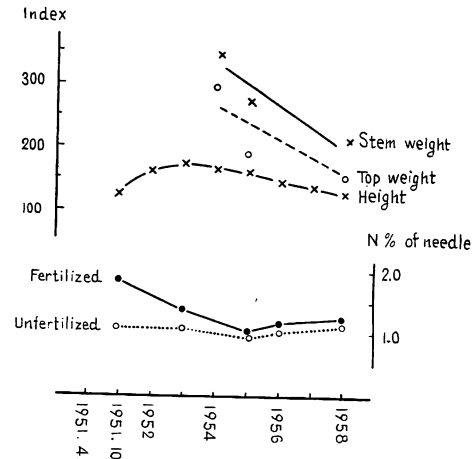
を 100 としたときの施肥区の指数 (Index) についてみると、施肥区と無施肥区との間には昭和 27～30 年、すなわち施肥後 4 年ぐらいまでの間に比較的大きい差が認められ、以後しだいに小さくなっている。これは施肥の効果が樹高に現われるのは、施肥後 3～5 年程度のものであらうと考えられる。(第 35 図)

(2) 幹材部の重量成長を調べる目的で、昭和 29, 30, 33 年の秋季に、平均樹高、平均根元直径に相当する木を 2 本あて掘りとり、枝葉部と幹部とに分けて重量を測定した。そして無施肥区を 100 として施肥区の指数を求めて図示すると第 35 図のとおりになる。

なお第 35 図には樹高の指数の年変化、葉部の N% の年変化も付記して、施肥効果の増減の模様を考察することにした。

第 35 図によると、施肥の効果は樹高の増加よりも重量の増加の方に大きく現われている。また枝葉部を含めた地上部重量の成長増加よりも、幹部だけの重量の成長増加に大きく現われている。したがってこの場合、施肥の効果はわれわれが生産目標とする幹部の生産増加に、よく現われているものといえることができるであらう。

(3) 林地に肥料を施せば、肥料が直接林木に吸収されてその成長を増加させるばかりでなく、施肥によつて養分に富んだ葉が、落葉となつて多量に林地に還元することによつて土壌の性質を良好にするものと考えられる。この点を実証するために、各区の土壌につき 2, 3 の理化学的性質を調べたが、その結果は第 78 表ならびに第 36 図に示すとおりである。



第 35 図 アカマツの施肥による樹高および幹と地上部全体の重量の増加指数の年変化ならびに針葉の N% の変化

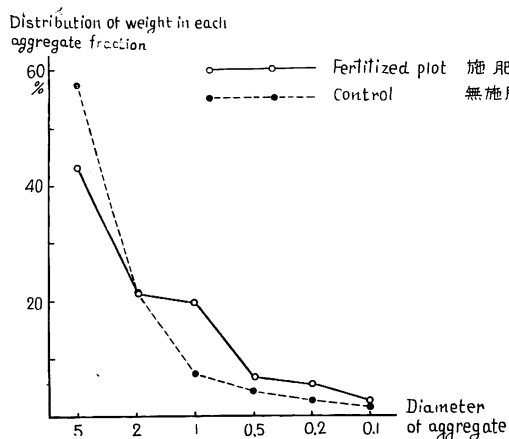
Fig. 35 Annual variation of index of height and weight growth in fertilized plot (C) and N% of needle of fertilized Akamatsu tree.

第 78 表 アカマツ林の肥培による土壌変化
Table 78. Influence of fertilizer application on soil properties of Akamatsu stand.

試験区 Plot	現地透透量* Percolation rate at field (min/400 cc water)			pH (H ₂ O)	置換酸度 Exchange acidity y ₁	全炭素 Total C %	全窒素 Total-N %		C/N	置換性石灰 Ex-CaO M.E./100 g soils
	Max.	Min.	平均 Average				4年目	8年目		
C. 施肥区 Fertilized	38	—	7	21	5.0	6.9	2.68	0.16 0.18	15	1.90
D. 無施肥区 Unfertilized	110	—	75	92	4.9	13.1	2.78	0.12 0.15	19	1.04

注 * 現地透透量は内径 8 cm の円筒を土の表層に差しこみ、水 400 cc を加え、その水が完全に土の中に透透するに要する時間で表わした。

これらの成績によると、土壌の化学性については施肥区の土壌の置換酸度 y_1 の値は小さくなり、C% はわずかに減るが、N% はかなり増大し、したがって C/N の値は小さくなり、また置換性石灰の量も多くなっている。土壌の物理性については、施肥区の土壌は水分の透透量も多く、直径 2 mm の耐水性団粒構造も多くなっていることがわかる。すなわち、施肥によつて土壌の性質が化学的にも物理的にも良くな



第36図 アカマツ肥培試験地における土壌の耐水性、
団粒分析
Fig. 36 Data of aggregate analysis in fertilized
plot (C) and control plot (D).

は前年度に蓄積された養分で行なわれ、その年の土壌養分の影響を受けることは比較的少ないであろうと考えられること。

の2つの原因によるものと考えられる。

しかし、施肥の効果がアカマツの樹高成長に現われなかったが、アカマツの針葉部分に変化を与えてはいないかと考え、試みに昭和27年1月（すなわち春に施肥して、その翌年の冬）アカマツの葉について2, 3の有機成分を測定した結果は、蛋白態窒素や単糖類、多糖類、ヘミセルローズ類などいずれの成分も施肥したアカマツの方に多く、施肥により針葉の栄養状態が良好になっているものと想像される。

(5) 第35図によるとアカマツの針葉のN%は、施肥後4年目ではほぼもとの状態にもどっている。これと同様のことを HAUSER¹⁴⁷⁾ (1958) は欧州アカマツなどの造林地に対する施肥試験で、また TAMM¹³⁰⁾ (1957) は30年生欧州アカマツに対する試験において認めており、いずれも施肥後に上昇したN%の値は、3年目にはほぼ施肥前の状態にもどつたことを報告している。

(6) アカマツのN%は高く、その値は1.8~1.6%を示すのが正常と思われるが、本試験地のアカマツの針葉のN%は1.0%程度で、はなはだ低い値で土壌が肥沃でないことを示している。一般に肥沃でない立地の林分に施肥すると、葉部のN%が最も顕著な反応を示すもので、たとえば GESSEL ら¹⁴⁵⁾ (1956) は15~20年生のモミ林に窒素肥料を施用したところ、無施肥のモミの針葉のNが1%以下であったのに対して、施肥区の針葉のN%は1.2~1.8%に上昇したことを報告しているが、本試験においてもアカマツの針葉のNは2.0%程度に上昇した。

(7) またこの試験地で施肥区の無施肥に対する相対的效果が高く現われたのは、試験開始時の土壌のN%が0.15%程度の瘠悪な林地であつたことによるものであると考えられる。GESSEL¹⁸⁹⁾ (1957) も土壌のN%が0.10~0.12%程度の30年生モミの林地に対する施肥試験で、5等地の年間成長量がほぼ3等地の成長量に達する顕著な効果を認めている。

(8) 一般に林地に最も不足する肥料要素は窒素であり、したがって窒素の効果が最も大きいことは WITTICH¹⁶⁹⁾ (1958), HAUSER¹⁴⁷⁾ (1958), BECKER-DILLINGEN⁶⁴⁾ (1937) などの、多くの学者により指摘

つていることが認められ、このことがアカマツの生育に2次的に作用して、間接的に肥培効果をあげているものと考えられる。

(4) 第34図から、施肥の効果は施肥1年目（昭和26年）の樹高成長には現われなかった。これは、

(i) スギ、ヒノキなどと異なり早春伸長成長を開始するアカマツに対して、肥料の施用時期がおそかつたこと。

(ii) 実験-15においてのべたように、アカマツ苗木体の窒素含有率の月別変化は凹型状に近い変化を示し、乾物1gを生産するに消費する窒素の量が生育後期（9~10月）に多く、アカマツの伸長

されている。この試験では窒素、リン酸、カリ、石灰、有機物の完全肥料を施用しているので、その中のいずれが特に大きい肥効を示しているかはわからないが、本試験地土壌は第75表の分析結果からもわかるように極端なリン酸欠乏土壌であり、しかもアカマツはスギ、ヒノキなどよりリン酸の含有量が多く、リン酸に対する要求度が比較的高いように思われることを考えれば、本試験においてリン酸も窒素とともに大きな肥効を示しているものと考えてよいであろう。

(9) 肥料木として植栽したヤマハンノキの無施肥のものは、その生育が不良で枯損も多く、肥料木といえども本試験地のような瘠悪な土壌のところでは、その効果をよく発揮させるためには施肥は絶対必要なものであると考えられる。ヤマハンノキの成長を調べた結果は、第79表に示すとおりである。

第79表 アカマツに混植されたヤマハンノキに対する施肥の効果
Table 79. Effect of fertilizer application on growth of Alder
planted in Akamatsu stand.

処 理 Treatment	樹 高 Height m	地上部重量 Fresh weight g	葉 の N% N% of needle	葉全体のN* Nitrogen content of needle g
C. 施 肥 区 Fertilized tree	2.5 (192)	967 (706)	2.97 ± 0.32	1,040
D. 無 処 理 区 Unfertilized tree	1.3 (100)	137 (100)	2.11 ± 0.30	94

* 0.1 haあたりの計算推定値 Estimate calculated in g per 0.1 ha.

すなわち、施肥の効果はアカマツに比べてヤマハンノキの方に大きく現われている。特に葉部の窒素含有量(N%)に著しい相違をきたし、0.1 haあたり、施肥区のアカマツの葉全体の窒素量は無処理区の約11倍にもなっている。したがって肥料木を植栽する時は、施肥を行なうことにより、その肥培的效果を一層大きくすることができるものと考えられる。

(10) つぎに施肥と下草との関係を調べた結果は第80表のとおりで、施肥により下草の収量は著しく増加した。この下草を採取しないで林地に還元させるものとすれば、アカマツは下草を通じて間接的に肥培されるものと考えられる。また施肥区の下草と無施肥区の下草の収量差に含まれる肥料3要素量を、かりに下草による肥料の吸収量と見なして推算すれば、第80表の(2)に示すようになる。これは1例にすぎないが、比較的流亡しやすい窒素やカリも2〜3割は下草に吸収されると推算される。したがって下草を刈り取り林地に還元すれば、下草の存在はかえって肥料成分の流亡や土壌による固定を防ぎ、間接的に肥料の利用率を高め、養

第80表 アカマツ肥培林における
施肥と下草との関係

(1) 施肥と下草収量 (kg/0.1 ha)			
	施肥後1年目 kg	施肥後2年目 kg	
施 肥 区	270 (321)	127 (179)	
無 施 肥 区	84 (100)	71 (100)	
(2) 下草による肥料の吸収率			
	下草に吸収さ れた肥料成分 kg	施肥量に対す る 割 合 %	
窒 素 N	約 1.1	約 22	
リ ン 酸 P ₂ O ₅	0.4	8	
カ リ K ₂ O	1.7	34	

分循環を良好にするものと考えられる。STEPANOFF¹⁹⁰⁾(1929)もスコッチ松林で林地へ落下する有機物の12.8%は下草であると報告し、下草も養分循環に一部の役割をはたすことを認めている。

(11) なおアカマツの根系を調べたところ、施肥区のアカマツの根系の方は水平方向に 1 m 以上も伸長しているのに対して、無施肥区のアカマツは 60 cm 程度で、施肥により根系の水平的拡がりも大きくなっているのが認められた。下方への伸長はともに約 60 cm 程度で施肥による相違はあまり認められなかったが、全体的にみると、施肥により根系の発達がよくなっていることが認められた。下方への伸長の相違が認められないのは、この試験地の土壌が物理的にかたい土壌で、根の下方への伸長が困難なためであると考えられる。

I—D 試験成績とその考察

その 2 施肥後 8 年目における追肥の効果

第 34 図をみてわかるように、施肥の効果は昭和 28～29 年度、すなわち施肥後 3～4 年目を境としてしだいに下降の一途をたどっている。このことは、第 35 図の窒素成分の葉分析の結果からみても理解することができるであろう。そこで昭和 33 年 4 月に A 区、B 区、C 区の各試験区の 1/2 の面積、すなわち第 33 図の斜線の部分に追肥を行なった。追肥の量 (kg/0.1 ha) は硫安 95 kg, 過石 105 kg, 硫加 21 kg で、施肥の方法は約 1 m 幅の带状にこれらの肥料を混合したものを地表面にまき、鍬で地表下 3 cm ぐらゐの所に施肥されるよう処理した。

追肥の効果を同年 9 月ならびに翌年 (昭和 34 年) の 9 月に調査した結果は、第 81 表および写真—19, 写真—20 に示すとおりである。

第 81 表 施肥後 8 年目におけるアカマツ林に対する追肥の効果

Table 81. Effect of the second fertilizer application in 1958 on growth of Akamatsu stand.

処 理 Treatment in 1951	追 肥 の 有 無 Treatment in 1958	樹 高 Height m	葉の長さ Length of needle cm	葉 分 析 % Needle analysis		
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O
C. 施 肥 区 Fertilization	追 肥 区* Fertilization	3.5	9.2	1.82	0.36	0.96
	無 追 肥 区 Unfertilization	3.3	5.6	1.17	0.25	0.81
D. 無 施 肥 区 Unfertilization	追 肥 区* Fertilization	2.3	11.2	1.78	0.34	0.90
	無 追 肥 区 Unfertilization	2.5	5.5	1.21	0.24	0.45

注 N.B. * 追肥の量 Amounts of fertilizers applied in 1958.

N 20, P₂O₅ 20, K₂O 10 (kg/0.1 ha).

これによると、追肥の効果は樹高成長にはまだわずかしが現われていないが、追肥区の針葉の長さは無追肥区の約 2 倍になっており、また葉分析の結果は、追肥区のアカマツの針葉の N %, P₂O₅ %, K₂O % は無追肥区の値よりも高い値を示し、著しい施肥の影響が認められる。アカマツの伸長成長は前年度の栄養状態に支配されることをあわせ考えれば、この追肥の効果は次年度に現われるものと考えられる。

I—E 試験成績とその考察

その 3 施肥後 9 年目の面積的な重量調査

従来の林地肥培試験の調査では、単木的に樹高や直径を測定する方法が多くとられてきた。本試験でも I—C, D においては単木的に調査して、その成績について考察した。しかし土壤肥料学的な観点にたつと、施肥の効果は一定面積における木の乾物生産増加量を目印として測定する方が、より合理的であるこ

第 82 表 アカマツ肥培林の単位面積あたりの重量成長
Table 82. Effect of fertilization on weight growth in 1958
(the eighth year after treatment).

試 験 区 Plot	調査標準地 Quadrat (1)				調査標準地 Quadrat (2)			
	n	H	W ₁	W ₂	n	H	W ₁	W ₂
C. 施 肥 区 Fertilized	21	384 (148)	96.4 (161)	4.6	23	378 (174)	80.2 (186)	3.5
D. 無 施 肥 区 Control	36	259 (100)	60.0 (100)	1.7	48	217 (100)	43.2 (100)	0.9

試 験 区 Plot	調査標準地 Quadrat (3)				平 均 Average			
	n	H	W ₁	W ₂	n	H	W ₁	W ₂
C. 施 肥 区 Fertilized	23	352 (145)	50.0 (124)	2.2	22	371 (155)	75.5 (158)	3.4
D. 無 施 肥 区 Control	40	242 (100)	40.2 (100)	1.0	41	239 (100)	47.8 (100)	1.2

注 n : $9m^2$ あたりのアカマツの本数 Numbers of tree per $9m^2$.

N.B. H : 平均樹高 Average height in cm.

W₁ : $9m^2$ あたりのアカマツの生重量 Fresh weight of tree per $9m^2$.

W₂ : アカマツの単木の生重量 W₁/n Fresh weight per tree in kg.

とはいうまでもない。著者はこのような見地から、施肥後 9 年目の昭和 34 年 11 月に試験地の一部に $3m \times 3m = 9m^2$ の調査区域を 3 カ所〔Plot (1), Plot (2), Plot (3) とする〕設定し、この区域内のアカマツを全部伐採して、その重量を測定した。その成績は第 82 表に示すとおりである。

(1) 第 82 表の W₁ の値は一定面積 ($9m^2$) の地上部の重量を示すもので、施肥区の W₁ と無施肥区の W₁ との差が、土壤肥料学的にみた施肥効果であると考えられる。また W₂ は W₁ を n (本数) で割った単木の重量を示す。無施肥区を 100 とした場合の Index の値は W₂ より W₁ のほうが小さい。このこと

第 83 表 アカマツ肥培林の養分吸収 ($9m^2$ の調査標準地あたりの測定値)
Table 83. Uptake of nitrogen, phosphorus and potassium of fertilized
Akamatsu (per $9m^2$ quadrat).

施 肥 処 理 Fertilizer treatment	絶乾重 ($9m^2$ あたり g) Dry weight in g per $9m^2$ quadrat			窒 素 Nitrogen		リ ン 酸 Phosphorus		カ リ Potassium	
				N % 含有量 N content g	g	P ₂ O ₅ % 含有量 P ₂ O ₅ content g	g	K ₂ O % 含有量 K ₂ O content g	g
施 肥 木 Fertilized trees	幹 枝	Stem	23.128	0.15	34.46	0.04	8.79	0.13	29.14
	枝	Branch	6.578	0.33	21.44	0.10	6.78	0.27	17.05
	枯枝	Dead branch	3.970	0.14	5.52	0.03	1.19	0.15	5.88
	葉	Needle	3.966	1.04	41.33	0.24	9.34	0.68	27.05
	根	Root	14.352	0.23	32.44	0.03	4.45	0.11	14.35
	計	Total	51.994		135.19		30.55		93.47
無 施 肥 木 Unfertilized trees (Control)	幹 枝	Stem	14.291	0.14	15.03	0.04	3.76	0.13	13.42
	枝	Branch	5.912	0.29	10.82	0.08	3.07	0.22	8.31
	枯枝	Dead branch	2.252	0.14	3.13	0.19	0.56	0.03	0.56
	葉	Needle	3.468	1.00	34.64	0.03	6.52	0.59	20.43
	根	Root	8.550	0.22	18.90		2.31	0.09	7.78
	計	Total	28.744		82.52		16.22		50.50
肥料の吸収率 (見掛け上の推定値)				135.2—82.5		30.6—16.2		93.5—50.5	
				45.0		44.6		34.6	
				×100=117		×100=32		×100=124	

は、従来のように単木的に調査した場合は面積的に調査した場合よりも過大に現われることを示すものである。これは本数 n の値が異なるからである。すなわち施肥区のアカマツは成長が早かつたため、それだけ早く被圧木が生じて本数が減り、無施肥区との間に本数の相違が生じたためである。

(2) 第 82 表の Plot (2) のなかの木の窒素、リン酸、カリおよび石灰の 4 成分を分析して、その養分吸収状態を調べた。その成績は第 83 表に示すとおりである。

昭和 33 年春季に追肥してその年の秋季のアカマツ針葉の $N\%$ 、 $P_2O_5\%$ 、 $K_2O\%$ 、 $CaO\%$ は第 81 表に示すように著しく上昇したが、その翌年の 34 年度秋季には第 83 表に示すように、施肥による影響は葉においてわずかに認められたにすぎなかつた。これと同様のことを T_{AMM}^{180} (1937) も 30 年生マツの針葉の $N\%$ について認めている。

つぎに第 83 表から常法により肥料の吸収率を算出すると、窒素とカリの吸収率は 100% をこえる矛盾した値となる。この点については後述の III において考察を加えることにする。

II 調査—4 スギ肥培林の実態調査(その 1)

II—A 調査目的

林地肥培の効果の実態を明らかにするとともに、肥培機構を考察する資料をうるために、スギ林の肥培例の調査を行なつた。

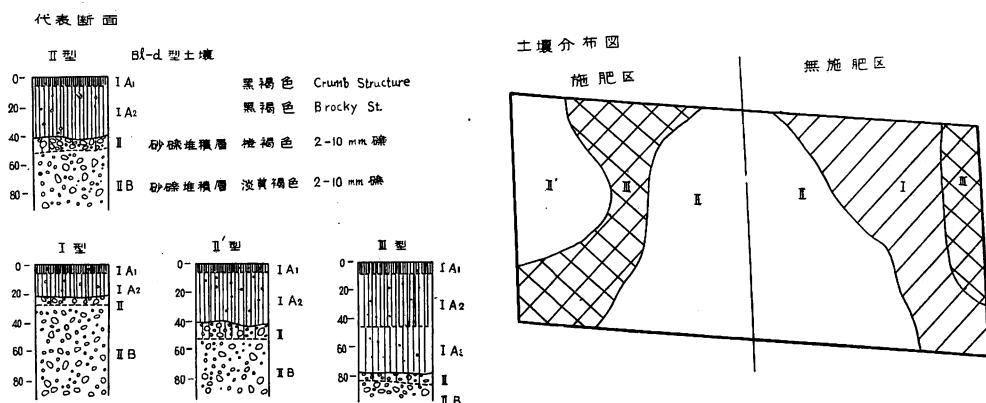
II—B 調査方法

(1) 調査したスギ林

調査したスギ肥培林は群馬県渋川市宇字上の原の町田義雄氏所有のスギ 7 年生林分(昭和 34 年現在)である。この林分は個人所有のものであるが、群馬県渋川市林業事務所当局の指導のもとに、面積がおおの 0.1 ha ずつの施肥区と無施肥区とが設定されていて、繰り返してはならないが試験地のようになっているので、肥培効果を調べるのには好都合である。

調査地は榛名火山東側の広大な山麓北側緩斜面上にあつて、付近一帯は地形開析が進んでいなく、わずかに波状の起伏がみられる。表面は火山灰で被覆され、その下部に火山砂礫層があるが、下層は火山泥流で構成されている。

調査したスギ肥培林(第 37 図参照)は昭和 28 年に植栽され、28、30、31 年の 3 回にわたり固形肥料 2 号(5—3—3)が植栽木 1 本あたり 14 個ずつ施用されている。植栽本数は 3,000/ha である。



第 37 図 群馬県渋川市のスギ肥培林の調査地土壌

(2) 調査地内の土壤調査

試験地内の土壤はほぼ均等でなければ、施肥区と無施肥区との正確な比較はできない。本調査の正確を期するため、試験地内の土壤を念のため調査したところ、第37図および第84表に示すように、その土壤断面がかなり異なっており、I型、II型、II'型、III型の4種類に区分されることがわかった。そこで植栽木の樹高、胸高直径は試験地全体にわたり測定したが、施肥と無施肥の比較は、施肥区と無施肥区の境界線を境として、ほぼ対象的に出現するII型土壤のところの植栽木について行なうことにした。

第84表 施肥が土壤の2, 3の化学的性質に及ぼす影響

Table 84. Influence of fertilization on some chemical properties of soil of Sugi stand.

調 査 区 Plot	層 位 Horizon	深 さ Depth in cm	pH (H ₂ O)	置換酸度 Exchange acidity y ₁	全窒素 N%	置換性 石 灰 Ex-Ca (M. E.)	可溶性 リン酸 Soluble P ₂ O ₅ %
無 施 肥 区 Unfertilized	A ₁	2~10	5.4	1.0	0.61	5.87	0.029
	A ₂	15~25	5.2	1.0	0.56	5.06	0.020
	A ₂	30~38	5.2	1.2	0.59	3.27	0.021
施 肥 区 Fertilized	A ₁	2~10	5.7	0.9	0.65	7.73	0.027
	A ₂	15~25	5.7	0.9	0.48	6.48	0.015
	A ₂	30~40	5.5	0.7	0.43	3.55	0.013

II-C 調査成績とその考察

(1) 試験地全域にわたり植栽木の樹高、胸高直径などを測定した結果を、I型からIII型までの土壤の区分別にまとめると第85表および写真-21に示すとおりである。

第85表 スギ肥培林の土壤型別の生育調査表

土 壤 別	施 肥 区				無 施 肥 区			
	樹 高 cm	胸高直径 cm	(枝 張)		樹 高 cm	胸高直径 cm	(枝 張)	
			水平方向 cm	傾斜方向 cm			水平方向 cm	傾斜方向 cm
I 型					294	2.8		
A 層の厚さ 30 cm 以内								
II 型	430 (137)	5.4 (174)	170	180	313 (100)	3.1 (100)	130	140
A 層の厚さ 30 cm 以上 60 cm 以内								
II' 型	468	6.3						
A 層の厚さ 30 cm 以上 60 cm 以内(湿潤)								
III 型	457 (122)	5.8 (129)			376 (100)	4.5 (100)		
A 層の厚さ 60 cm 以上								
全 体 の 平 均	455 (149)	5.8 (167)			304 (100)	3.5 (100)		

前述のような観点から、II型土壤の所で施肥効果を比較すると、施肥区の平均樹高は無施肥区100に対して137、その平均直径は無施肥区100に対して174で、かなりの効果が認められた。このように施肥の効果は樹高よりも直径の方に大きく現われる。また木の重量を測定すれば、それはほぼ乾物生産量をあらわすから施肥の効果をみる上にはより適切であるので、つぎに標準木を選びその重量を測定した。

(2) II型土壤の所の平均樹高、平均直径に相当する木を標準木として選び出し、伐倒して重量を測定し、またその根系も掘りとり重量を測定した。その結果は第86表に示すとおりである。

すなわち、無施肥区の地上部重量を100とした場合に施肥区のそれは319で、施肥効果は樹高や直径よ

第86表 スギ肥培林の標準木の生育調査

Table 86. Effect of fertilization on 7 years old Sugi stand in Shibukawa, Gunma Pref. (Growth data of sample tree).

処 理 Fertilizer treatment	樹 高 Height cm	胸高直径 Diameter at breast cm	生 重 量 Fresh weight (g)					
			幹 Stem	枝 Branch	葉 Needle	地上部 Top	根 Root	全 体 Whole tree
施 肥 木 Fertilized tree	437 (137)	5.6 (189)	8600 (324)	3375 (427)	11955 (295)	23930 (319)	7400 (329)	31330 (321)
無 施 肥 木 Unfertilized tree	318 (100)	3.0 (100)	2653 (100)	790 (100)	4052 (100)	7495 (100)	2250 (100)	9745 (100)

りも重量でみる方が大きくあらわれる。

また根部の重量についてみると、無施肥区の重量を100とすると施肥区のそれは329で、地上部と同様約3倍に達している。しかも写真—21に示すように、根の張る範囲が施肥区は無施肥区のものよりも大きい。とくに細根の数や張り方に著しい相違が認められ、安藤ら¹⁵⁵⁾(1960)がさきにカラマツについて認めた事実と一致する。

(3) 標準木の各部分の窒素、リン酸、カリの含有量を測定し、その成績から施肥木の肥料3要素の吸収率を算出した。その結果は第87表に示すとおりである。

第87表によると、標準木の各部分とくに葉の養分含有率は施肥木の方が対照木よりも低い値を示している。これは不足している養分を肥料として人為的に供給すると、養分の吸収量は増加するが、それ以上に一時的に乾物生産量が増加して、そのため養分含有率が低下するものと解せられ、これと同様の現象をWITTICH¹⁶⁹⁾(1958)が欧州アカマツその他について、またLEYTON¹⁸⁹⁾(1956)も日本カラマツで認めており、この現象はLUNDEGÅRDH¹⁹¹⁾(1945)の養分の希釈効果 Verdünnungseffekt と呼ばれるものである。

第87表 スギ施肥木の養分吸収

Table 87. Uptake of nitrogen, phosphorus and potassium of fertilized tree (7 years old Sugi in Shibukawa, Gunma Pref.).

絶 乾 重 (1本あたり <i>g</i>) Dry weight per tree			窒 素 Nitrogen		リン 酸 Phosphorus		カ リ Potassium	
			N %	1本あたり 窒素含有量 N content per tree <i>g</i>	P ₂ O ₅ %	1本あたり リン酸含有量 P ₂ O ₅ content per tree <i>g</i>	K ₂ O %	1本あたり カリ含有量 K ₂ O content per tree <i>g</i>
(A) 施 肥 木 Fertilized tree	幹 Stem	4.193	0.15	6.29	0.04	1.68	0.14	5.87
	枝 Branch	1.657	0.32	5.30	0.05	0.83	0.18	2.90
	葉 Needle	5.603	0.71	39.78	0.22	12.33	0.88	49.03
	根 Root	3.483	0.27	9.40	0.08	2.79	0.11	3.83
	計 Whole tree	14.936		60.77		17.63		61.63
(B) 無 施 肥 木 Unfertilized tree	幹 Stem	1.419	0.19	2.70	0.05	0.71	0.14	1.92
	枝 Branch	0.354	0.33	1.17	0.07	0.25	0.30	1.05
	葉 Needle	1.675	0.83	13.91	0.19	3.18	0.97	16.25
	根 Root	0.861	0.32	2.76	0.07	0.60	0.11	0.91
	計 Whole tree	4.309		20.54		4.74		20.12
肥 料 の 吸 収 率 (見 掛 け 上 の 値)			$\frac{60.8-20.5}{31.5}$ ×100=127.7		$\frac{17.6-4.7}{18.9}$ ×100=68.2		$\frac{61.6-20.1}{18.9}$ ×100=219.5	

7 年間における肥料の吸収率を一般肥料学で示す方法に従い算出してみると、窒素とカリの吸収率は 100% をこえる値となり一見矛盾して解釈に苦しむ値を示すが、この点については本節の IV において考察を加えることにする。

なお施肥区の土壌の表層は無施肥区の土壌に比べて第 84 表に示されるように、置換性石灰が多く、土壌の酸性もわずかながら弱いのは、施肥区の方が石灰に富むスギの落葉が多量に林地に還元するためであると考えられる。

III 調査—5 スギ肥培林の実態調査 (その 2)

III—A 調査目的

本調査は、調査—4 とまったく同様の目的で行なつた。

III—B 調査方法

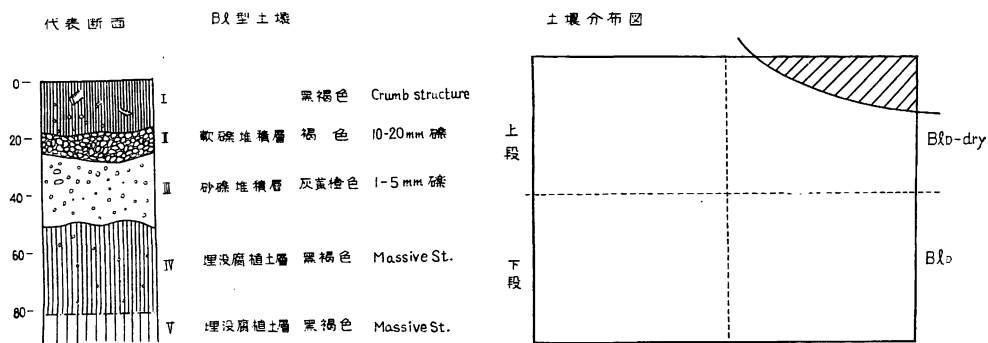
(1) 調査したスギ林

調査したスギ肥培林は群馬県碓氷郡横川町字坂本の青森孝雄氏所有のスギ 7 年生林分 (昭和 34 年現在) である。この林分は個人所有のものであるが、群馬県高崎林業事務所当局の指導のもとに面積がおのおの 0.1ha ずつの施肥区と無施肥区とが設定されていて、繰返しはないが試験地のようになつていたので肥培効果を調べるには好都合である。

調査地付近は碓氷峠の東方山麓部に位置して開析が進み、急峻な斜面が発達している。調査地は東南向きの傾斜約 30° の平衡斜面 (斜面の長さは約 50 m) で、浅間火山の火山灰砂礫で被覆されている。

調査したスギ肥培林は昭和 28 年に植栽され、同 28 年、30 年の 2 回にわたりそれぞれ、ちから粒状肥料 2 号 (5—3—3) が植栽木 1 本あたり 30 匁あて施用されている。植栽本数は 3,000 本/ha である。

(2) 調査地内の土壌調査と成長調査



第 38 図 群馬県横川町、スギ肥培林の調査地土壌

第 88 表 施肥が土壌の 2, 3 の化学的性質に及ぼす影響

Table 88. Influence of fertilization on some chemical properties of soil of Sugi stand.

調査区 Plot	層位 Horizon	深さ Depth in cm	pH (H ₂ O)	置換酸度 y ₁	全窒素 N%	置換性 石灰 Ex-Ca (M. E.)	可溶性 リン酸 Soluble P ₂ O ₅ %
無施肥区 Unfertilized	A ₁	2 ~ 10	5.2	1.3	0.56	6.28	0.039
	A ₂	10 ~ 18	5.2	1.8	0.48	5.56	0.035
施肥区 Fertilized	A ₁	0 ~ 10	5.8	0.7	0.59	11.04	0.037
	A ₂	10 ~ 18	5.7	0.8	0.50	8.26	0.047

試験地内の土壌は火山灰性の Bl_D 型土壌である。多数の簡易試坑を行ない調査したところ、表層は火山灰砂礫で 20 cm 前後、その下部に厚さ 40 cm 程度の浮石層があり、その下部に埋没した A 層があり、その標準断面および土壌図は第 38 図に、またその分析成績は第 88 表に示すとおりで、調査地の上方一部にはやや乾燥した Bl_D (dry) 型土壌のところもあるので、この部分を除けば調査林分の施肥区と無施肥区の土壌は、ほぼ同様と見なされる。そこで Bl_D (dry) 型土壌の部分を除き、調査地を傾斜方向に沿い上半部と下半部に分け、おのおのにつき樹高、胸高直径を測定した。

III—C 調査成績とその考察

(1) 成長調査の成績をまとめると、第 89 表および写真—22 に示すとおりである。すなわち、施肥区

第 89 表 肥 培 地 生 育 調 査 表

試験地内の区別	施 肥 区				無 施 肥 区			
	樹 高 cm	胸高直径 cm	枝 張 cm		樹 高 cm	胸高直径 cm	枝 張 cm	
			水平方向	傾斜方向			水平方向	傾斜方向
試 験 地 上 段	348 (130)	4.0 (160)	180	190	267 (100)	2.5 (100)	150	150
試 験 地 下 段	365 (132)	4.1 (158)	—	—	277 (100)	2.6 (100)	—	—
全 体 の 平 均	357 (130)	4.1 (158)			275 (100)	2.6 (100)		

の平均樹高は無施肥区 100 に対して 130、また施肥区の平均直径は無施肥区 100 に対して 158 で、かなりの効果が認められた。また試験地の上半部と下半部による肥効の差は認められなかった。

(2) 成長の良好な試験地の下半部において、その平均樹高、平均直径に相当する標準木を選び出し、その重量を調査—4 の場合と同様に調査した結果は第 90 表に示すとおりである。すなわち、施肥区の地

第 90 表 スギ肥培林の標準木の生育調査

Table 90. Effect of fertilization on 7 years old Sugi stand in Yokogawa, Gunma Pref. (data on growth of sample tree).

処 理 Treatment	樹 高 Height cm	胸高直径 Diameter at breast cm	生 重 量 Fresh weight (g)					
			幹 Stem	枝 Branch	葉 Needle	地上部 Top	根 Root	全 体 Whole tree
施 肥 木 Fertilized tree	370 (137)	4.2 (168)	4,610 (292)	1,430 (283)	7,770 (329)	13,810 (311)	4,750 (321)	18,560 (313)
無 施 肥 木 Unfertilized tree	270 (100)	2.5 (100)	1,580 (100)	505 (100)	2,360 (100)	4,445 (100)	1,480 (100)	5,923 (100)

上部重量は無施肥区の 100 に対して 311 で、調査—4 の場合と同様に施肥効果は樹高や直径よりも重量でみる方が大きくあらわれる。また施肥木の根部の重量についてみると、無施肥 100 に対して 321 を示し、写真—22 に示すように、根の張る範囲も施肥木の方が大きい。

(3) 標準木の幹、枝、葉、根の各部分の窒素、リン酸、カリの含有量を測定し、その成績から肥料 3 要素の吸収率を算出した結果は第 91 表に示すとおりである。

第 91 表によると、施肥標準木の葉の N% は無施肥標準木のそれよりも低い値を示しているが、この理由については調査—4 の場合と同様に養分の希釈効果と考えてよいであろう。これに対して P₂O₅%, K₂O

第 91 表 スギ施肥木の養分吸収

Table 91. Uptake of nitrogen of fertilized tree
(7 years old Sugi in Yokogawa, Gunma Pref.).

	絶乾重 (1本あたりg) Dry weight per tree	g	窒素 Nitrogen		リン酸 Phosphorus		カリ Potassium	
			N %	1本あたり 含有量 N content per tree g	P ₂ O ₅ %	1本あたり 含有量 P ₂ O ₅ content per tree g	K ₂ O %	1本あたり 含有量 K ₂ O content per tree g
(A) 施肥木 Fertilized tree	幹 Stem	2,341	0.16	3.74	0.04	0.94	0.13	2.93
	枝 Branch	805	0.35	2.81	0.07	0.56	0.23	1.85
	葉 Needle	3,147	0.76	24.30	0.27	8.63	1.38	43.96
	根 Root	2,613	0.28	7.32	0.07	1.83	0.11	2.75
	計 Whole tree			38.17		11.96		51.48
(B) 無施肥木 Unfertiliz- ed tree	幹 Stem	957	0.20	1.91	0.04	0.38	0.15	1.44
	枝 Branch	268	0.34	0.91	0.07	0.19	0.29	0.78
	葉 Needle	1,002	0.86	8.62	0.22	2.20	2.36	11.83
	根 Root	814	0.31	2.52	0.07	1.57	0.10	0.82
	計 Whole tree			13.96		3.26		14.85
肥料の吸収率 (見掛け上の値)			$\frac{38.2-14.0}{11.3} \times 100 = 214$		$\frac{12.0-3.3}{6.8} \times 100 = 127$		$\frac{51.5-14.9}{6.8} \times 100 = 538$	

%はいずれも施肥木の方がやや高い値を示している。また、K₂O % が異常に高い値を示したがこの原因については不明である。

肥料の吸収率（見掛け上の値）も調査—4 の場合と同様に 100% を越える値を示しているが、この点に關しては、本節のIVにおいて考察を加えることにする。

なお施肥区の表層土壌の置換性石灰は第88表によると無施肥区のそれよりも多く、酸性が弱まっているのは調査—4 の場合と同様である。（調査—4 および調査—5 の実施にあつては、群馬県林務課の皆様にご協力をいただいたことを特記して感謝の意を表します。）

IV 考 察

わが国で林地肥培が唱導されてから、まだ数年を経過しているにすぎない。したがつて、肥培経過を追究するのに適当な肥培林がないので、著者は本節において、やむをえず暫定的に施肥後7～8年を経過したアカマツ林およびスギ林を材料として調査したのであるが、2, 3の新しい知見をうることができて、ある程度その目的を達したように思われる。つぎに、これらの点につき考察を加えてみることにする。

(1) 試験—1, 調査—4, 5でのべたアカマツおよびスギ肥培林で、その標準木の根系を調べるといづれの場合も、施肥木の根系の方が水平的にも、垂直的にも大きく拡張しており、したがつて地力の活用も大きいものと考えられる。

(2) 前述の林分について、施肥した林分の土壌の理化学的性質はいずれの場合にも対照の無施肥林分の土壌よりも良好になつている。

(3) 前述のアカマツおよびスギの肥培林について、肥料の吸収率を算定してみると、第84, 87, 91表に示したように、窒素、カリの吸収率はいずれも100%をこえる矛盾した値となる。この点につき考察を加えてみると、肥料学でいう吸収率とは、施肥された植物の土壌養分の天然供給量は無施肥の植物の天然供給量と同一であるという前提の上になつて計算されるものであるが、この前提は1年生作物の場合はあ

る程度許容されるであろうが*, 林木のような永年生植物の場合は, この前提は成立しないためである。その理由は後述するように, 施肥木の根は無施肥のものよりもより拡大伸長するので, 必然的に無施肥木よりも天然供給量が大きくなると考えられるからである。したがって, 本節で求めた吸収率の値はあくまでも計算上のものであり, 真の吸収率ではない。しかし, 計算上の吸収率でも農作物や苗木の場合には100%をこえる値を示すことはない。この点が林木の肥培と農作物の肥培との大きな相違点であり, したがって後述するように, 肥効の現われるメカニズムについての相違もこの点に胚胎しているように思われる。

第2節 林地肥培機構を論ずるための基礎実験

林地に施肥する場合には, 農耕地に施肥する場合のように, 一般に, 全面的に耕耘して施肥することが困難であるため, 必然的に部分的ないし局所的に施肥する場合が多い。したがって根全体が肥料に接することなく, 根の一部が肥料に接することになる。このように根の一部に肥料が接した場合に, 残余の根の養分の吸収の模様をはあくしておくことは, 林木に対する基本的施肥法を検討し, また林地肥培の効果を解析し, その機構を究明するのに有力な手がかりとなるものと考え, ラジオアイソトープを用いて, つぎの実験—29, 30に述べるような2, 3の基礎的模型実験を行なった。

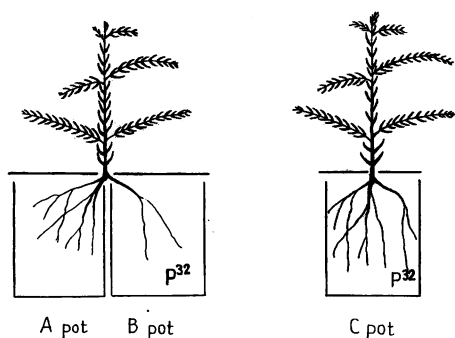
I 実験—29 養分を根の一部に与えた場合と, 根全体に与えた場合との養分吸収

I—A 実験目的および実験方法

林木に施肥する場合には, 農作物の場合のように耕耘が行なわれないのが普通であるから, 植栽木の周囲に3~4カ所の穴をあけ, 肥料を施す方法がとられる場合が多い。この場合, 肥料に接する根は根系全体の1/2以下であると考えられる。このように肥料が根の一部分に接した場合に, はたして肥料が根全体に接した場合と同様の養分吸収が行なわれるかどうかを知る目的で, つぎのような実験を行なった。

実験方法の概要は第39図に示すように,

(1) スギ2年生苗の根をA, Bの2つのポットに分けて水耕し, Bのポットには根の全量のほぼ1/4に相当する根を入れて, ラジオアイソトープ P^{32} ($20 \mu\text{Ci}$) を添加する。



第39図 実験—29に用いた分根培養装置
B Pot と C Pot には放射性同位元素 P^{32} が与えられている。

Fig. 39 Method of culture of Sugi seedling which root system is separated in two parts.

(2) 比較対照のため, 根を2分することなく常法のとおり, 根全体を1つのポットに入れて水耕したCのポットを設け, これにもBのポットと同量の P^{32} を添加する。

一定期間水耕したのち, 地上部に吸収された P^{32} を測定して, (1)の養分が根の一部に与えられた場合と, (2)の根全体に与えられた場合との養分吸収量について比較した。 P^{32} の分析は試料を10% MgNO_3 を添加して電気炉で乾式灰化し, 10% HCl で溶解したのち一定容とし, その1ccを測定皿にとり赤外線ランプで蒸発乾涸し, その放射能を科研製GMカウンターで測定した。

I—B 実験成績とその考察

* 1年生農作物の場合でも厳密に考えると, この前提は成立しない。現在農業方面ではアイソトープの使用により肥料の吸収率を新しい観点から研究している。

第 92 表 根の一部に養分を与えた場合の養分吸収 (ラジオアイソトープ P^{32} を用いた実験)Table 92. Absorption of nutrient labelled by radioisotope P^{32} via a part of root system of Sugi seedling.

処 理 Treatment	ポット Pot	苗木の部分 Part of seedling	絶 乾 重 Dry weight g	P^{32} の 濃 度 Concentration of P^{32} C.P.M./g of dry matter	Specific activity	備 考
根全体に養分を与える P^{32} was supplied in whole rootsystem	1	幹 Stem	1.57	21592	4307	
		葉 Needle	6.26	33877		
		全体 Whole seedling	7.83	23419		
	2	幹 Stem	1.65	22461	3063	
		葉 Needle	8.50	20252		
		全体 Whole seedling	10.15	20611		
根の一部に養分を与える P^{32} was supplied in a part of rootsystem	1	幹 Stem	1.55	23304	3131	分根率 18%
		葉 Needle	7.73	18260		
		全体 Whole seedling	9.28	19099		
	2	幹 Stem	1.44	13455	5684	分根率 30%
		葉 Needle	8.48	44026		
		全体 Whole seedling	9.92	39573		

実験成績の概要を示すと、第 92 表に示すとおりである。これによると (1) の根の一部に P^{32} を与えた場合と、(2) の根全体に P^{32} を与えた場合との、苗木地上部の絶乾物 1g あたりの P^{32} (C.P.M./g) の量には大差が認められなかった。すなわち、肥料が根の一部に接した場合は、その部分は強い吸収力を示すものと思われる。

この実験成績から、天然更新の林分あるいは植栽後数年を経過して、根がよく伸長している林地では、とくに肥料を全面散布して根全体から養分を吸収させる必要はなく、点状に施肥して根の一部から養分を吸収させてもよいことが察知される。

試験—1 のアカマツの 6 年生天然更新地に対する肥培試験では、0.1 ha に 500 カ所の穴 (2.4 m に 1 カ所の割合) をあけて、そこに施肥した。

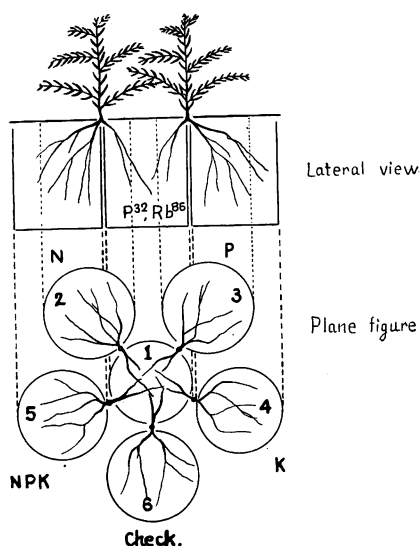
このような方法では、肥料が根の一部にのみ接触した木と、根の大部分に接触したものが生じて、肥効にムラができるのではないかとされた。しかし、施肥の結果は全面的にアカマツの針葉が濃緑色になり、肥効にムラを生じなかったのであるが、この現象は本実験の成績からも、よく理解することができる。

II 実験—30 養分を根の一部に与えた場合の他の根の部分からの養分吸収

II—A 実験目的および実験方法

実験—29 により、肥料が根の一部に接触すればその根は強い養分吸収力を示し、肥料が根の大部分に接触した場合と同様に養分を吸収することがわかった。そこで第 2 段階として、養分が根の一部に与えられた場合に、他の根の部分からの養分吸収の模様を調べる目的で、次のような実験を行なった。

実験はスギ 2 年生苗を材料として、分根水耕培養法で行なつた。すなわち、根をほぼ 2 等分して、第 40 図に示すように、第 1 回の実験では片方の根は窒素を含んだ培養液を入れたポットに浸漬し、また残りの片方の根はラジオアイソトープ P^{32} (50 $\mu\text{C}/\text{l}$) と Rb^{86} (20 $\mu\text{C}/\text{l}$) を含んだ培養液を入れたポットに浸漬し、



第 40 図 実験—30 に用いた分根培養装置

Fig. 40 Apparatus of root separating water culture (Two years old seedling of Sugi).

Pot-1 contains the radio-isotope P^{32} and Rb^{86} , Pot-2 contains N, Pot-3 contains P, Pot-4 contains K and Pot-5 contains N, P, K, Pot-6 is check pot

第 93 表 根を 2 等分して、片方の根に養分を与えた場合、他の片方の根からの養分吸収 (ラジオアイソトープ P^{32} , Rb^{86} を用いた実験)

Table 93. Rootsystem of Sugi seedling was separated into two parts—Root A and Root B. How to absorb nutrients labelled by P^{32} , Rb^{86} via Root A when various nutrients are supplied in Root B.

実験 Experiment	根を 2 等分し片方の根に与えた養分 Nutrient supplied in Root B.	残りの片方の根から吸収した養分 Amounts of nutrients taken up via Root A (C.P.M per dry matter in mg)			
		P^{32} (Index)		Rb^{86} (Index)	
第 1 回 No. 1	窒素 Nitrogen	13028	(230)	1735	(138)
	無窒素(対照) Without nitrogen (Control)	5673	(100)	1260	(100)
第 2 回 No. 2	窒素・リン酸・カリ Nitrogen, Phosphorus, Potassium	5760	(781)	22	(550)
	窒素 Nitrogen	172	(234)	64	(1600)
	リン酸 Phosphorus	240	(325)	19	(475)
	カリ Potassium	213	(289)	0	(—)
	無添加(対照) Non (Control)	74	(100)	4	(100)

また第 2 回の実験でも片方の根に養分を与えると、他の片方の根からの P^{32} , Rb^{86} の吸収は高まるが、 P^{32} の吸収は窒素、リン酸、カリを各単独に与えた場合よりも、これらの 3 要素を同時に与えた場合が最も高まる結果を示した。また今回の実験の範囲では Rb^{86} の吸収は P^{32} と異なり、窒素を与えた場合が最も高まる結果を示した。いずれにしても根のある一定の部分に養分が供給されると、残りの根の部分からの養分吸収は高まるものと考えられる。以上の結果からつぎのことが考えられる。すなわち、試験—1、

また第 2 回の実験では片方の根は窒素、リン酸、カリの 3 要素および窒素、リン酸、カリなどの養分をそれぞれ単独に入れたポットに浸漬し、また片方の根はラジオアイソトープ P^{32} , Rb^{86} を入れたポットに浸漬し、一定期間水耕したのちスギ苗に吸収された P^{32} , Rb^{86} を分析した。

分析は根際で切断した苗木の地上部を、実験—29 と同様の方法で灰化した後、10%塩酸で溶解して定容としたのちその一定量を取り、イオン交換樹脂 Amberlite-120 で P^{32} と Rb^{86} とを分離する。それぞれの Fraction の一定量を蒸発、乾燥させて常法により G-M Counter で測定した。実験は昭和 35 年 4 月に林業試験場アイソトープ用硝子室内で行なつた。

II—B 実験成績とその考察

実験成績を要約すると、第 93 表に示すとおりである。これによると、苗木の根をほぼ 2 等分して養分を吸収させた場合、第 1 回の実験では片方の根に窒素を与える、他の片方の根からの P^{32} と Rb^{86} の吸収は片方の根に窒素を与えない場合に比較して高まる。そしてこの場合 P^{32} の方が Rb^{86} よりもその吸収が高まる。

調査—4, 調査—5 においてのべたように, 林地に肥料を施用して, 数年間経過すると, 肥料の吸収率が 100% に近くなるか, または 100% 以上の値をとる現象が見られる。この現象は施肥によつて林木の根が拡張して伸長することにより, 土壌中の天然供給量が増大するという生態的な要因のほかに, 本実験の成績が示すような生理的な要因が関与しておこるものと考えられる。

III 考 察

本節 I, II でのべた実験成績からつぎのことが考察される。

(1) 林地では一般に農耕地のように耕耘して施肥することが困難であるので, 施肥は必然的に林地の一部分に局所的に行なわれる。したがつて, 林木の根全体に肥料が接する機会は少なく, 根の一部分に肥料が接する場合の方が多い。このような場合でも, 実験—29 の結果によれば肥料に接した根は強い養分吸収力を示し, 肥料の効果が現われるものと考えられ, 試験—1 でのべたアカマツの肥培試験成績がよくこのことを証明しているものと考えられる。

(2) また林地用肥料は運搬費の節減から高成分の肥料が要求される場合もあり, またその遅効性や施用法の簡便さをねらつて, 粉状よりも塊状化した肥料（たとえば固型肥料）が要求される場合もある。このように肥料が高成分化すればするほど, また塊状化すればするほど, 肥料は全面的に均等に施すことは困難になり, 必然的に根の一部に施すようになる。このような場合でも 実験—29 の結果によれば, 肥料に接した根は強い養分吸収力を示し, よくその効果を現わすものと考えられる。

実験—30 で得られた成績と同様のことが, ソ連でコムギについて P³² を用いて研究されているが, 三井ら¹⁹²⁾ (1955) はこれを植物生理学的側面からみた肥料の塊状化の理論であると考察しているが, いずれにしても今後林地用肥料の考案は, 以上のような林木の根系の生理的機能の基礎の上に立つてなされなければならないものと考えられる。

第3節 林地肥培機構に関する考察*

第1章の冒頭に, 林地が肥培されてゆく過程や, その機構を究明することの重要性をのべた。これらのことを考察するにはいまだ資料が十分でないが, 本章の第1, 2節においてのべた調査ならびに実験成績を基礎として, 不十分の点は諸学者の研究成績を引用して, 著者の意見をのべると次のとおりである。

(1) 1年生の農作物は, 施した肥料の一部を吸収してその収量を増し, 吸収されなかつた肥料分は一部は流亡し, そして残りの部分は土壌に固定され, あるいは固定されないままに土壌中に残留し, 後作に残効の形であらわれる。

すなわち, 農作物に施肥すれば増収するばかりか肥料の一部は土壌に残り, 跡地土壌を肥沃にする。しかしこの作用は, たとえば硫酸を施せば窒素分の一部は土壌に残り, 跡地土壌をいくらか肥沃にするだけで, 土壌有機物は一般に消耗するし, 堆肥などの有機質肥料のほかは, 土壌の物理性に変化を与えないのが普通である。

林木の場合も, 施した肥料分の一部が吸収され, 一部は土壌から流亡するか, または土壌中に残留する。この点, 林木も農作物も変わりがない。

しかし林木の場合は, その生育期間が長いために, 肥料の直接的効果以外にいろいろの間接的な効果が現われる。

たとえば, 一度吸収された養分の一部は, 落葉とともに林地に還元される。しかも無機養分だけでな

* 本考察の一部を文献 194) に発表した。

く、落葉という形の有機質となつて林地に還元され、化学的にも物理的にも土壌を良好にするものと考えられる。その事例については、すでに本章第1節において埼玉県下の林業試験場赤沼試験地にあるアカマツ肥培試験地の調査成績や、群馬県下のスギ肥培林の調査成績で示したが（第78表、第36図および第84表、第88表参照）、これを要約すると、施肥区の土壌は無施肥にくらべて全窒素や置換性石灰が多くなり、また C/N の値が小さくなるなど化学的に良好になるとともに、粒径 1 mm 程度の有効な耐水性団粒を増し、したがって、透水性が良くなるなど物理的にも良好になつていくことがわかる。

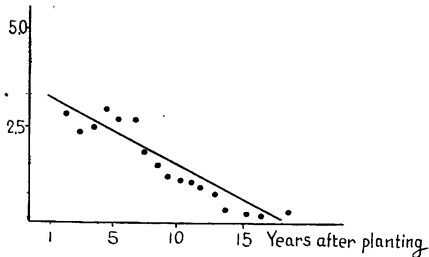
化学的な肥料を与え、しかも土壌の物理性まで良好になるのは、林木が永年性であるために、その間に無施肥の場合よりも養分に富んだ落葉が多量に林地へ還元することによつて、間接的に林地の土壌を化学的にも、物理的にも良好にする作用が早く現われてくるためである。

同じ永年性といつてもクワやチャは需葉作物で、毎年葉を採取するため、林木の場合におけるような施肥の間接的効果は少ないものと考えられる。

（2） つぎに、林業は平地林という特殊な場合を除けば、一般には傾斜地で行なわれる土地生産業であるから、林業には多かれ少なかれエロージョンによる地力低下の問題が随伴する。このエロージョンによる地力低下は、森林が皆伐された時に大きく現われることは古今の多くの学者の指摘するところである。

皆伐前後の土壌の変化を調査した一例については、すでに第1章の第60表に芝本¹⁸⁰⁾(1951)や WILDE¹⁸¹⁾(1946)などの成績を要約して引用したが、同表(1)によると皆伐跡地の土壌の置換容量が小さくなつていのは、皆伐するとその跡地の表層において、わずかではあるがエロージョンが起り、粘土分が流亡するためであると考えられる。また同表(2)に示すように、カラマツ林の皆伐跡地は明らかに土壌の粘土分が減少している。この粘土分の流亡は同時に養分の流亡を意味する。このような森林の皆伐跡地のエロージョンによる地力低下を防ぐには、再造林してなるべく早く、ウツ閉→成林させることである。森林

Amounts of soil loss (mm)



第41図 土壌の流出量が植栽木の生育に伴い減少する例（川口、山本による）

Fig. 41 The amounts of soil loss decrease with tree growth (KAWAGUCHI et al).

がウツ閉→成林するに従いエロージョンによる土砂の流出量を減少させてゆくことは第41図¹⁸²⁾に示す川口らの成績によつて理解されるであろう。林地肥培により造林木の初期成長を促進すれば、ウツ閉→成林も早くなり、したがって、皆伐直後の林地がいわば裸地状態にある期間を短縮でき、そのことが傾斜した林地においては必然的にエロージョンを防ぎ、土壌保全的な効果をあげることができるはずである。このことは施肥の間接的効果であるということができよう。（なお肥培により皆伐による地力低下や林地土壌のエロージョンが、全面的に防

止できると主張するものではないことを念のためお断りしておく。これらの問題に対しては総合的な育林技術の駆使が必要であろう。)

（3） 農作物に施肥すると、施した肥料分が吸収されてその収量が増す。そして施肥された作物の根は、無施肥の作物よりも根系がよく発達して、それだけ地力をよく活用し、また施肥された作物の根は生理的にも強い養分吸収力を示すことが指摘されている。この点林木も農作物となら変わりないはずであるが、ただ林木は1年で収穫される農作物と異なり永年性であるため、施肥により無施肥の場合よりも根

系の発達がよくなる現象が連年累積されるため、それだけ地力の活用が無施肥の場合よりも大きくなるはずである。

具体的な例をあげてみよう。第42図は7年生のスギで施肥と無施肥の根系の比較である。いま施肥と無施肥の根系の占有する容積の比較を行なうと第42図に示すようになり、施肥した木の方が約 0.634 m^3 の容積に相当する土壤に根を張り、無施肥との差は約 0.280 m^3 の容積になる。 1 m^3 の土壤を $1,000 \text{ kg}$ 、またその $\text{N} \%$ を 0.5% とすると、 0.28 m^3 の土壤中には約 1.40 kg の N が含まれることになり、施肥木はそれだけ天然供給量が増大し、無施肥の場合よりも地力をよけいに活用していることになる。このことも、施肥の間接的効果の一部であるということができよう。

施肥により根の拡張範囲が拡大する程度を前述の調査—4の例についてみると、施肥木の根は水平に 120 cm 、下方に 20 cm 拡張しているのに対して、無施肥木の根は水平に 90 cm 、下方に 15 cm であり、調査—5の場合は施肥木の根は $120 \times 25 \text{ cm}$ に対して、無施肥木の根は $90 \times 20 \text{ cm}$ 程度の拡張を示している。要するに、林木は施肥により地上部の生育が旺盛になり、そのことが2次的に作用して根系の発達をまた良好にして、施肥の間接的効果をもたらすものと考えられる。

(4) また施肥された木はその養分吸収力まで強くなるものと考えられる。このことは実験—30で証明したが、前掲の第84, 88表によると、窒素、リン酸、カリの肥料3要素しか施用されなかつた木でも、それにより養分吸収力が強まることにより土壤中の石灰までも強く吸収して、その落葉により施肥区の土壤の置換性石灰が増加する現象が見られるが、これも間接的効果の1つと見なすことができるであろう。

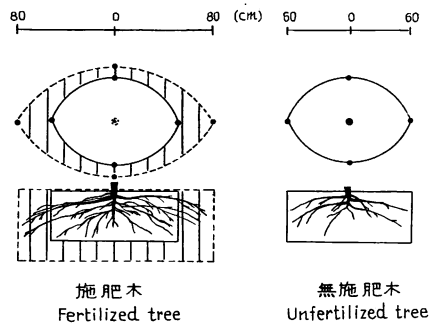
以上を通覧すると、施肥の間接的効果の内容は施肥による土壤の物理性の改善、土壤の侵蝕軽減、地力活用度の増大に要約され、これらが総合的に作用して林地肥培の間接的効果をもたらしているものと考えられる。この点については、本編の主論点であるので、さらに第3編において論究することにする。

第5章 総 括

森林の生産力増強は現下の急務であり、その技術的方途としての林地肥培への期待は大きい。このためには、林木の成長に伴う養分吸収の実態をはあくし、林地の養分経済を考察し、さらに林地の肥培される過程を追究することにより林地肥培の機構を究明して、林地肥培の特性を解明し、合理的肥培技術形成の基盤をきずかなければならない。第2編は以上の諸点につき研究を行なつたものであるが、研究の概要はつぎのとおりである。

I 林地肥培の背景

1. 林地肥培の既往の研究を歴史的に概観した(第1章第1節)。
2. 過去の林業における林地肥培無用論を森林の養分経済の面から解析し、林木と林地間に養分循環が行なわれる点に森林の養分経済の特質があることを指摘し、林地肥培無用論の学的背景について考察した



第42図

施肥木の根系拡張による地力活用の増大
Fig. 42 Root system of fertilized tree and unfertilized tree.

(第 1 章第 2 節)。

3. 前述の林地肥培無用論は森林資源がまだ豊富であつた歐洲の林業において、2, 3 の学者により唱導されたものであるが、この無用論を成立させていた基礎条件が、わが国林業の現状においては、そのままではまらないことを主として地力の低下、すなわち森林土壌学の立場から考察して、林地肥培の重要性を指摘した(第 1 章第 3 節)。

II 林木の養分吸収量

4. 林木の養分吸収量をはあくすることは林木の栄養学的特性を知り、林木の養分経済を考察し、また施肥量の問題をととして林地肥培の可能性を論究するのに重要である。著者はこのような観点から、わが国の代表的な主要樹種であるスギとアカマツについて、調査木を幹、枝、葉、根の各部分ごとに窒素、リン酸、カリの養分含有量を測定したのち、これらの成績をもとにして養分吸収量を推定した。その成績はつぎのとおりである。
5. 林木の各部位への乾物配分割合は、10 年生ごろまでは同化器官である葉部に大きく、35% ぐらいであり、林齢が進むに従い貯蔵器官である幹部の配分割合が大きくなり、40 年生ぐらいでは 75% 程度になる(調査—2, 3)。
6. 林木の養分含有率は窒素、リン酸、カリの 3 要素とも同化器官である葉部において高い値を示し、幹部、枝部、根部では葉部のほぼ $1/3 \sim 1/6$ の低い値を示し、その中でも貯蔵器官である幹部においては最も低い値を示す(調査—2, 3)。
7. スギとアカマツの養分含有率を比較すると、年齢に関係なく窒素およびリン酸の含有率(%)はアカマツの方がスギよりも高く、カリの含有率はスギの方がアカマツよりも高い。この傾向は苗木についても同様で、スギとアカマツの栄養学的にみた特性の 1 つであると考えられる(調査—2, 3)。
8. スギ(6, 17, 30, 40 年生)とアカマツ(6, 13, 32, 43 年生)の窒素、リン酸、カリの養分含有量を幹、枝、葉、根の各部位別に調査した。これらの調査成績によると、林齢が増すに従い各養分とも幹に含まれる量が、他の部位にくらべて急激に増加する。林業では幹材部が生産の対象であり、また収穫物であるから、この幹材部に含まれる養分量が、すなわち、伐採収穫とともに林地から持ち出される養分量である(調査—2, 3)。
9. 調査の範囲では、伐採に際して幹材部の林外搬出に伴う養分持ち出し量は、スギの場合(40 年伐期, 1,500 本)には ha あたり $N\ 412\ kg$, $P_2O_5\ 30\ kg$, $K_2O\ 382\ kg$, アカマツの場合(43 年伐期, 1,000 本)には $N\ 235\ kg$, $P_2O_5\ 59\ kg$, $K_2O\ 117\ kg$ である。この値を伐採時年齢で割り、林木の 1 年間あたりの養分持ち出し量を苗木における苗木や農作物にくらべると少なく、スギの場合を例にとると、 N は約 $1/8$, P_2O_5 は約 $1/40$, K_2O は約 $1/5$ である(調査—2, 3)。
10. スギ 1 本あたりの養分吸収量の推定値は、今回の調査の範囲では、だいたい $N\ 1,060\ g$, $P_2O_5\ 160\ g$, $K_2O\ 840\ g$, アカマツの 1 本あたりの養分吸収量は $N\ 750\ g$, $P_2O_5\ 160\ g$, $K_2O\ 430\ g$, また ha あたりスギでは $N\ 1,600\ kg$, $P_2O_5\ 240\ kg$, $K_2O\ 1,250\ kg$, アカマツでは $N\ 750\ kg$, $P_2O_5\ 160\ kg$, $K_2O\ 430\ kg$ と概算される(第 2 章第 2 節)。

III 森林の養分経済および養分循環率

11. 1 で指摘したように林地と農地との養分経済の基本的相違点は、林地においては土壌と林木間に養分循環が行なわれる点にあり、この現象の実態を明らかにすることは、林地肥培を養分経済の面からはあ

くする上に重要なことである。このような観点から前項の林木養分含有量の調査成績をもとに、林地の養分循環率の試算を行なった。その結果はつぎのとおりである（第3章）。

12. 林地の養分循環率は、今回の調査の範囲では、窒素はスギ74%，アカマツ69%，リン酸はスギ88%，アカマツ65%，カリはスギ51%，アカマツ73%であり、農作物の場合にくらべて、きわめて高い養分循環率を示す。
13. また落葉採取が行なわれる場合においては、窒素はスギ27%，アカマツ25%，リン酸はスギ33%，アカマツ22%，カリはスギ29%，アカマツ25%であり、落葉を採取する場合の養分循環率はきわめて低く、落葉の採取が林地の地力維持上に有害であるかが推察される。
14. 林木ではカリの循環率が最も低く、農作物ではカリの循環率が最も高く、この点が農地と林地の養分経済上の大きな相違点である。これは林木の場合はその生産対象となる部位が幹材部であり、この幹材部にカリが集積するためであると考えられる。しかし、落葉中の養分全量が有効化するものとは考えられないので、上述の養分循環率は見かけ上のもので、とくにわが国森林の立地条件、気象条件などもあわせ考えると実際にはより低いものであると思われる。

IV 林地肥培の肥効

15. 林地肥培を行なった場合の肥効の程度を知り、また林地が肥培されてゆく過程を追究して、林地肥培のメカニズムを考察することは、林地肥培の本質を解明する上に重要なことである。この考察の材料として、アカマツ林の肥培試験を行ない、その経過を調査し、またスギ林の肥培例を調査した。その成績はつぎのとおりである。
16. 埼玉県下の林業試験場赤沼試験地におけるアカマツ林の肥培試験成績によれば、無施肥区の樹高ならびに地上部重量を100とすると、施肥区のそれはそれぞれ145～147, 126～186を示し、かなりの肥培効果が認められた（試験—1）。
17. 群馬県渋川市の民間スギ林肥培例の施肥後7年目の調査成績によれば、無施肥区の樹高ならびに全重量を100とすれば、施肥区のそれはおのおの137, 321を示し、著しい肥培効果が認められた（第1節、調査—4）。
18. 群馬県横川町の民間スギ林肥培例の施肥後7年目の調査成績によれば、無施肥区の樹高ならびに全重量を100とすれば、施肥区のそれはおのおの137, 313を示し、著しい肥培効果が認められた（調査—5）。
19. 施肥により根系は拡大伸長するのではないかと考え、調査を行なったが、その結果は試験—1の8年生アカマツの場合についてみると、施肥木の根は水平方向に1m以上、垂直方向に60cm、無施肥木の根は水平方向に80cm、垂直方向に20cm拡張しており、また調査—4の7年生のスギの場合は、施肥木は120×20cm、無施肥木は90×15cm程度、調査—5の7年生のスギの場合は、施肥木は120×25cm、無施肥木は90×20cm程度拡張しており、いずれも施肥により拡張していることが認められた。

V 林地肥培機構を論ずるための2, 3の基礎実験

20. 林地肥培の実際の肥効については、その肥培方法が不適当であつたため、肥効があまり現われていない場合もあるが、16～18でのべたように、顕著な肥効が認められる試験例や実行例もある。このような肥効の顕著な実行例は、林地肥培の可能性を示すものとして有意義であり、この実行例を資料にして、顕著な肥効の現われる要因を解析することは重要である。著者は前節の肥培実行例について、比較的少量の施肥量で顕著な肥効の現われる要因の1つとして、施肥木の根系の発達が必然的に地力の活用

の程度を高め、土壤養分の天然供給量を増大させる効果をもたらすものと考察した。これは生態学的側面からみた施肥の効果であるが、本節では施肥の効果を生理的側面から考察するため根の一部に養分が供給された時の養分吸収の模様について、また根の一部に、ある養分が供給された時残りの部分の根からの養分の吸収の模様を、苗木にラジオアイソトープ P^{32} 、 Rb^{86} などを用いて模型実験を行なった。その結果はつぎのとおりである。

21. スギ苗の根の一部に P^{32} を与えた場合と、根全体に P^{32} を与えた場合とでは、地上部に吸収された P^{32} の量に大差が認められなかった。すなわち、肥料が根の一部にしか接触しなかった場合でも、その根は強い吸収力を示すものと考えられる（実験—29）。
22. スギ苗の根を A、B の 2 部分に分け、A に養分を供給すると、B の養分吸収作用は A に養分を供給しない場合よりも強いことが認められた。この事実は林木の根の一部に肥料が接触した場合に、その肥料養分が吸収されて林木全体の生理的活動が高まり、その結果残りの部分の根の生理作用も強くなり、したがって、連鎖的に地力の活用程度も高められるものと考えられる（実験—30）。

VI 林地肥培機構

23. 林地肥培の肥効を構成する要因を解析し、その機構を解明することは、林地肥培の特性を解明し、また林地肥培の可能性に対して理論的根拠を与える意味において重要である。以上の点について論究した結果を要約すると、つぎのとおりである。
24. 施肥木の根を調査すると、無施肥区の場合よりも発達が良好で、その伸張範囲が広く、したがって施肥は林木の地力活用の程度を、すなわち土壤の養分天然供給量を増大する効果がある。
25. 林地は一般に耕耘を行なわないので、農耕地のように耕耘時に肥料を施用することができない。そのため林地に局所的に肥料を施用する方法がとられる場合が多く、したがって、施用した肥料は林木の根全体に接することなく、根の一部に接触することになるが、この場合上述のように肥料に接触した根も接触しなかった根も強い養分吸収力を示すので、施肥の効果は期待できるものと考察される。
26. 林地施肥が行なわれ、林木の成長が促進すると、無施肥の場合よりも養分に富んだ落葉が多量に林地へ還元して、土壤の化学的性質を良好にするとともに、土壤の物理的性質も改善する。すなわち、施肥は単に林木に養分を供給するだけでなく、落葉を媒体として土壤の理化学的性質を改善する効果がある。
27. その他施肥による林木の成長促進作用はウツ閉成林を早め、地表を早く被覆するため、施肥は土壤の侵蝕ならびに養分の流亡を防ぐ効果があるものと考えられる。
28. 以上は、いずれも肥料が林木に吸収されて成長増加をもたらすという、いわば肥料の直接的効果が、さらに 2 次的に作用してもたらす肥料の間接的效果であるということができよう。これらの直接的、間接的效果はある時には単独に、ある時には相乗的に、また連鎖的に作用して、実際の林地肥培効果を構成するものと考えられる。要するに、林地肥培の機構は農地肥培の機構とまったく異質なものであるが、このような独特の林地肥培機構の存在こそ林地肥培成立の可能性を示すものである。

第3編 総括論議ならびに本研究の林業上への応用

林業生産の場合は、苗畑と林地とに分けられる。苗畑は林業生産の最終の場である林地に植栽する苗木を育成する所で、施肥の必要性は絶対的である。また粗放な天然林の採取的林業においては林地への施肥は無用であるが、林地を高度に利用する育成的林業においては林地に対する施肥の必要性もしだいに醸成されつつある。このように林業における施肥は、苗畑施肥と林地施肥の2つの分野に分けて考えることができるが、この苗畑と林地における施肥の理論はまったく異なつたものがあり、また農業における施肥と比較した場合にも異なつた特質をもつものであると考えられる。以下これらの点について、第1編、第2編での実験や調査成績を基調に、著者の考え方をのべ、林業における施肥の本質について論じ、林業技術の応用的見地からも所見をのべることにする。

第1章 苗畑施肥に関する論議

第1節 苗畑施肥の特異性

米、麦のような農作物の生産には収量という概念があり、この収量を高めるためには施肥、土壌改良、病虫害防除などの農業技術が駆使されるわけである。しかし、苗木の生産には収量という概念は存在するであろうか。平均苗長 40 cm、平均苗重 100 g のスギ山出苗が反あたり 40,000 本生産されたと表現すれば、いちおう収量を問題にしているようにも考えられるが、その内容は米作や麦作の場合とは著しく異なる。米や麦の場合はその味がよいとか、また貯蔵がよくきくとかいう質の問題もあるけれども、これより収量そのものの多少がより重要な問題である。

苗木の場合は苗長 40 cm、平均苗重 100 g の苗木であつても根系が悪くては移植が不可能であるし、また徒長苗であれば乾燥地や寒冷地に植栽するのには不適當である。すなわち、苗木の場合は平均苗長 40 cm、平均苗重 100 g の苗が反当 40,000 本生産されたとしても、そのような収量的概念だけでは苗木の生産を評価することは不適當で、さらに苗木の形質的要素を多方面から検討して評価することが必要である。

また農作物では1株、1株の収量の変異はそれほど問題ではないように思われる。パレイシヨを例にとると、イモの大小の不ぞろいはあつても、きよくたんな場合を除いては大きな問題ではなく、反当収量の多少の方が重要な問題である。しかし、苗木の場合は苗木1本、1本が林業生産の素材であり、独立した使命をもつものである。苗木の場合は反当本数やその合計重量、すなわち農作物の反当収量に相当する量がいかに大きくても、それらが形態的に、また形質的に変異が大きく不ぞろいであれば、選苗の結果実際の植林に使用できないいわゆる不合格の苗木が相当数出るわけで、農作物での反当収量という表現形式では、苗木の生産を適格に表現することも、また評価することもできない。このように苗木の生産はその1本、1本の合計量は農作物におけるような絶対的な意味をもつものでなく、それぞれが独立した価値をもつものである。したがつて、苗木の生産には量的な要素とともに質的な要素がより重要である。このような意味で、苗畑施肥の意義とその目標は一定の大きさの苗木をうることに以外に、その形質を向上することにあるといつても過言ではないであろう。ここに苗畑施肥の農地施肥と異なつた面があり、特質がある。

農業生産物で質的要素をとくに重要視するものにクワ、タバコなどがある。とくにクワについては葉質

が養蚕の成績に大きく影響するところから、施肥と葉質との関係についての研究があるが、この場合質的要素が重要視されるのは葉という特定の部分であるのに対して、苗木の場合は根部も含めて苗木全体が生産の対象であるため、その見方、考え方もクワなどとは全く異なつたものであるはずである。

このよのような苗畑施肥の特異性については、まだ内外の林学者、林業技術者の言及していないところであつて、筆者は第 2 章第 2 節で、これらの点を解析するため、独自の構想で、実験—23—26 でのべたような内容の研究を進めてきた。その実験成績についてはすでにのべたが、ここでは総合的にとりまとめ、苗木が必要とする形質と肥料要素の関係を系統的に表示して考察すると第 94 表のようになる。

第 94 表 苗木に必要な形質とこれらの形質を付与する肥料要素
Table 94. Relationships between favourable qualities of nursery stock and nutrient elements.

苗木に必要な条件 Qualification required for nursery stock	左記の条件をみたすに必要な苗木の形質 Some qualities concerned with qualification required for nursery stock	苗木が左記の形質を具備するために、とくにプラス (+) に作用する要素およびマイナス (-) に作用する要素 + indicates element affecting positively - indicates element affecting negatively			
		窒素 N	リン酸 P	カリ K	NPKの 相乗作用
A. 活着性が良いこと High survival	I 移植後すぐ水分の供給が受けられる吸収根の多いこと Many fine roots (High absorbing capacity of root)	—	+		+
	II 根の形が移植に適していること Favourable root system for transplanting	—	+		+
	III 発根力の強いこと High root activity		+		+
	IV 水分消失量 (または蒸散量) が少ないこと (乾きにくい苗木であること) Small loss of water through the crown of stock by transpiration	—		+	+
B. いわゆる充実度が高いこと High healthiness	V 弱さ度が小さいこと Low slenderness	—			+
	VI 組織粉末比重が大きいこと High volume weight of tissue			+	+
	VII 可溶性 N/全N が小さいこと Low soluble-N/total-N ratio	—		+	
	VIII 還元糖/非還元糖が小さいこと Low reducing sugar/non-reducing sugar ratio	—		+	
C. 移植後の成長が良いこと High growth after transplanting	IX 貯蔵養分が多いこと Large accumulated nutrients	+			+
D. 諸害に対する抵抗性の強いこと High resistance for damages 雑草の害 Damage by weed 病害 Damage by disease * 早害 Damage by drought	X 苗木が大きいこと Large size stock	+			+
		—		+	
		—		+	

備考 実験—23, 24 による。

* 原田¹¹⁵⁾の成績より考察した。

第2節 苗畑施肥の造林技術への応用

第1編、第2章で実験的にのべ、また本編第1章、第1節で要約したところの苗畑施肥についての論議を、林業技術的見地、とくに造林技術的見地より、その応用場面の主要点について論述してみたい。

（1）適地適苗技術の提案

苗木は苗畑から林業生産の場である林地へ移植（狭義の造林行為）されるものであり、そのためにはある種の形質が必要である。これらの形質と施肥との関係については、すでに本編の第1節、第94表において摘記したとおりである。たとえば根の発育や発根性にはリン酸肥料が深い関係があり、また水分の消失しにくい苗木を育成するには、カリ肥料が最も深い関係をもっている。また移植後の苗木の成長には窒素肥料が最も関係が深い。この実験的事実を造林技術的見地からみると、畑苗より遠くはなれた林地や、乾燥した立地に植栽する苗木はリン酸やカリ肥料を十分施用して、発根性や水分消失量の少ない苗木を育成することが合理的である。また苗畑より比較的近い所で、下草の繁茂している沢沿いの林地に造林する場合の苗木は、苗木が乾燥して活着が困難であるというような危険は少ないので、植栽後盛んに伸び出す苗木、すなわち比較的大型で窒素を蓄積させた苗木を植えることが合理的である。

このように造林時の樹種の選定には、いわゆる適地適木の知識を利用するように、造林にあたっては、苗木はそれが植栽される造林地の立地条件や、造林事業の集約度に適応するような形質を具備する苗木を用いることが必要であると考えられる。著者はこれを適地適木に対して、かりに適地適苗と表現したい。苗畑施肥もこの適地適苗の考え方にもとづいて、要求される形質を具備した苗木の育成を目標として行なわれなければならない。このように考えると、苗木は育成の出発時点から、それが造林される場所の立地条件や輸送、その他の苗木の取り扱いの関係を想定して、これは沢沿いの水分は多いが雑草も繁茂するところに植栽する苗木、これは海拔の高い寒冷地に植栽する苗木、これは乾燥地に植栽する苗木、これは遠隔地に輸送する苗木などと区分して、それぞれに適応した施肥や育苗操作を講ずることが合理的である。著者は適地適苗の実施により、造林成績の著しい向上を期待することができるものと確信する。

（2）苗木の評価と規格の作製に対する意見

前節でのべたように、育苗には農業でいうような反当収量というような概念はない。したがって収量による、すなわち量的要素のみによる評価も成立しない。すなわち、苗木の評価は量的要素と同等に質的要素が重要視されなければならない点に、育苗の特異性があり、育苗行政の困難性が存在する。

要するに、苗畑より急に環境の異なつた林地に植栽されるので、移植に適合している形質をよく具備しているかどうか、その価値を決定する。すなわち苗畑における苗木は、育苗過程においては苗畑の最終生産物であるが、育苗—造林—保育—伐採という一連の林業生産過程からみると最終生産物ではない。苗木は必ず移植されるもので、移植されてはじめて林業的価値の生ずるものである。この点の認識が従来の苗木の評価や、また暫定的に行なわれてきた苗木の規格の作製に欠除していることを指摘するものである。

これらの欠点の補正は現下の急務であるが、前述の適地適苗の線に沿って行なわれなければならない。本研究は著者の主張するような苗木の評価、あるいは苗木の規格作製について、苗畑施肥の面から若干の科学的基準を与えることができるものと確信する。

以上にのべてきた本研究の内容と、それより導き出された最終的論議はここに著者が主張する適地適苗について、また適地適苗を実施する上に必要な苗木の評価や規格の作製について、苗畑施肥の面から科学

的基礎を与えたもので、造林技術、ひいては林業技術の発展に大きく寄与することができるものと確信する。

第2章 林地肥培に関する論議

第1節 今後のわが国の林業における林地肥培の重要性

第2編、第1章においてのべたように、林業においては数十年に一度しか伐採、収穫が行なわれないため、収穫物である木材の搬出による養分奪取量は、落葉などにより林地に還元される養分量にくらべて少なく、土壌—林木間の養分循環率は農作物のそれにくらべて大きい。したがって落葉の採取が行なわれないという前提のもとに、林地の傾斜が緩でエロージョンによる土壌養分の流亡が僅少であるという条件のもとにおいては、幹材部の伐採収穫による養分の奪取量は比較的少ない。しかも落葉は分解して腐植質となり、その際に生成する有機酸類は土壌母材の風化を促進して、土壌養分の天然供給量を増大するので、林地は農地のように特別施肥を行なわなくても、地力維持ができるという考え方が過去の林業には支配的であり、そして、この林地施肥無用論はある程度首肯できるものであつた。

しかしながら、わが国の森林、また林業の現状は、この林地肥培無用論を成立させた諸条件がそのままあてはまらないことについて、著者は土壌学的見地から考察した。これらを要約すると第95表に示すようになる。すなわち、わが国の森林は現在の施業法を繰り返すかぎり、地力低下をもたらす自然的、人為的諸条件がそろっており、このまま放置すれば、森林生産力は下降の一途をたどるものと考えられる。われわれはまずこのことを認識しなければならないし、この認識の上に立つて、森林土壌の養分経済の立場から、総合的に広義の林地肥培の必要性を論理的に痛感する。

第95表 林地肥培の必要性

Table 95. Necessity of forest fertilization.

過去において林地肥培不用論を成立させた北欧の諸条件 Condition of forestry in north european countries in the past	日本の森林の現状 Condition of forestry in japan at present	対策 Counter plan
A. 自然的条件 Natural condition 地形が緩 Topography : lenient	地形が急峻 Topography : steep	→ 林地生産力の低下 Decreasing of productivities of forest land → 林地肥培による生産力増強 Increase of forest productivities by fertilization
B. 人為的条件 Artificial condition 森林の取扱いが法正 Forest : fully regulated	森林の取扱いが異なる Forest : unfully regulated	
① 落葉を採取しない No removing of fallen litter	① 里山では落葉採取 Removing of fallen litter	
② 長伐期施業 Long cutting-age management	② 短伐期施業 Short cutting-age management	
③ 択伐混交林施業など Selection cutting management Mixed forest	③ 皆伐単純林施業 Clear cutting management	→ 蓄積の減少 Decreasing of growing stocks
C. 経済的条件 Economical condition 木材の需給関係に余裕あり Sufficient supply of timbers	Pure plantation 木材の需給関係が逼迫 → Unsufficient supply of timbers 伐採量 > 成長量	

第2節 林地肥培の育林への導入の可能性

前節において、今後のわが国林業における林地肥培の重要性について論述したが、現実問題として林地肥培の可能性を検討するために、第2編、第2～4章において述べたような研究を行なつた。著者はまずスギ、アカマツなどについて林木の養分含有量の1例を調べ、その成績から林木の養分吸収量の推定を行ない、また、林木—林地間の養分循環について試算を行なつた。これらの結果から、林地肥培に対する施肥量の問題について、窒素成分を例にとり考察を加えてみることにする。ここで施肥量の問題をとくに取りあげたのは、現実問題としての林地肥培が可能であるか否かを決定するのに、最も密接な関係因子と考えたからである。

第96表 窒素吸収量と施肥量との関係 ($kg/0.1ha$)Table 96. Comparison between the amounts of nutrients taken up and the amounts of fertilizer applied ($kg/0.1ha$).

植 物 Plant groups or species	総 吸 収 量 Total amounts of nutrients taken up	年間吸収量	慣行施肥量 Amounts of fertilizer applied	備 考 Remarks
農作物 Agricultural crops				
水 稲 Rice	9.4	9.4	9.1	(反収 2.0石)
大 麦 Wheat	9.5	9.5	8.3	(反収 2.5石)
温州ミカン Orange	23.9	23.9	19.9	(反収 1,000貫)
林 木 Forest trees				
ス ギ Sugi (40年伐期 40 years)	160	4.0		p. 105 参照
アカマツ Akamatsu (43年伐期 43 years)	75	1.7		

著者はまず農作物の窒素成分必要量と施肥量との関係を示す第96表を調整した。これによると、農作物や果樹などの肥培においては、その窒素必要量とほぼ等量の窒素を施用している。このことは窒素肥料の吸収率を50%とすれば、窒素必要量の1/2は土壌からの天然供給によるものであり、残余の1/2は肥料で補給されるものと理解することができる。林木の肥培においても、上述の農作物の場合のように、窒素吸収量とほぼ等量の窒素肥料を施用するとすれば、ばくだいな施肥量となり、木材によほどの稀少価値が生じないかぎり経済的にその施用は困難である。すなわち、農地肥培の場合における施肥量の考え方を林地肥培の場合に準用すると、林地肥培には多量の施肥量が必要となるわけで、経済行為としての林地肥培の可能性は特殊な場合を除いては、はなはだ現実性の少ないものになるであろうと考えられる。

しかしながら、林地肥培の実際については、もとより前述のようにすでに確立された農耕地に対する長年の肥培研究の歴史を背景に、その蓄積された経験と理論を応用することも必要であろうが、その前提条件として、われわれはまず林木と農作物との相違、林地と農地との相違を考察してみる必要があるであろう。林木は農作物と異なり超永年生であるため、林木が肥培されてゆく過程やメカニズムは、おのずから農作物と異なるものがあるものと考え、著者は第2編、第4章において林地肥培のメカニズムについて考究した。その成績は第97表に示すように要約される。すなわち、林地肥培の効果は農地肥培の場合と比較して、施肥の間接的効果が大きく、多面的な内容をもっている。この林地における施肥の間接的効果は、林地の大部分は傾斜地であり、常に土壌侵蝕の危険を内蔵しているかぎり有意義である。また施肥の間接的効果は林木が超永年生であるために、それが期待できる時間的要素があるから現われるのである。すなわち、林地肥培の間接的効果は、施肥後1～2年の短期間に現われるものではなく、この期間におい

第 97 表 林木と農作物の肥培効果の現われ方の相違
Table 97. Consideration on difference of effects of fertilization
in forest trees and agricultural crops

施肥の効果 Effect of fertilization	— 直接的効果 Direct effect (Effect on growth) — 間接的効果 Indirect effect (Effect on soil ameriolation etc.)	林木の場合 In case of forest trees		農作物の場合 In case of agricultural crops.	
		++	現われる appears	+++	現われる appears remarkably
	*	++++	現われる appears	+	わずかに現われ るにすぎない appears slightly

* 林地肥培の間接的効果の内容 Indirect effects of fertilization in forest are as follow:

- | | |
|-----------------------------|--|
| ① 落葉還元量増大による土
壌改善 | Soil ameriolation by increasing of nutrient return
through the fallen litter |
| ② ウッ閉促進による土壌侵
蝕の軽減 | Decreasing of soil erosion by promoting of crown
closure |
| ③ 根系の拡張による養分天
然供給量の増大……等 | Increasing of natural supply of soil nutrients by
expansion of rootsystem……etc. |

ては、林木が肥培されてゆく過程は農作物が肥培されてゆく過程と、大局的にみて大同小異であろう。しかし施肥後 4～5 年を経過して落葉還元の現象が起り、林地—林木間の養分循環が開始され、また根系の発達が進展すると、施肥の間接的効果が現われはじめ、以後しだいにその効果が大きくなるものと考えられる。すなわち植栽、活着期を脱却したこの期間における林木の肥培されてゆく過程やそのメカニズムは、林木に独特のものである。この林地肥培過程における施肥の間接的効果は、林木の側面からみると、林木の自己促進作用であり、林地の側面からみると、林木という植生の進行に伴う土壌の改善であり、これらを総合的にみると、林木と土壌の相互作用が施肥により連鎖的に促進した結果によるもので、一種の施肥の後作用と見ることができるであろう。すなわち、林地肥培の総合的効果は上述の肥培過程における施肥の間接的効果—施肥の後作用によりあげられるものと考えられる。この施肥の後作用現象が現われることにより、農作物の場合と異なり、自然状態における林木の養分吸収量よりはるかに下回る施肥量で、総合的な肥培効果をあげることができる理である。この点に林地肥培の特異性があり、したがって、経済行為としての林地肥培の実現性も理論的には期待できるものと考えてよいであろう。

要するに前節で論じたように、今後のわが国には林地肥培の必要性を是認する自然的、人為的、経済的諸条件があり、このような背景のもとに昭和 35 年における林業基本問題に対する政府の答申にも指摘されたように、林業経営の後進性を克服しながら、将来の木材の需給関係に対処するため、林木生産の増大をはからなければならない。林木の増産は地力低下を防止する方法を考えた上で行なう必要があり、一時的増産では林業生産の恒続をはかることは不可能であることは KIRSCHFELD¹⁷¹⁾ (1958) の見解どおりである。このためには、今後の育林過程のなかに林地肥培技術の導入が必要であろうと考えられ、また多くの期待をかけられている。MAYER-KRAPOLL¹⁷⁰⁾ (1958) も指摘しているように、林地施肥は林木の成長を増大させるばかりでなく、立地の悪化を防止する役目を果たすからである。本論文の第 2 篇における研究は、林地肥培と農地肥培の基本的相違点を指摘して、林地肥培の技術形成、ならびにその可能性についての学的基盤を与え、今後の林業技術にいさざかりとも貢献することができるものと確信する。

文 献

- 1) 津田重政：苗木鉍物質成分の研究，林試研報，7，(1909) p. 87～92
- 2) 守屋重政：杉苗の施肥期に関する研究，林試研報，10，(1910) p. 163
- 3) 守屋重政：窒素肥料の肥効並に施肥期について，林試彙報，3，(1921) p. 43
- 4) 守屋重政：苗木に対する肥料3要素試験，林試研報，22，(1922) p. 71
- 5) 守屋重政・永井芳雄：酸性土壌に対する樹種の抵抗性について，林試研報，26，(1925) p. 1
- 6) 明永久次郎：硫酸アンモニヤの施肥期について，林試研報，26，(1925) p. 25
- 7) 芝本武夫：スギ，ヒノキ，アカマツ苗木の鉍物質養分要求度に関する研究，林試研報，33，(1933) p. 1
- 8) 芝本武夫：春日井水稲用水耕液の反応がヒノキ及びアカマツ苗木の生育に及ぼす影響，日林誌，25，(1943) p. 338
- 9) 石原供三・内田丈夫：北海道主要針葉樹苗木の肥料要素摂取状態について，日林誌，16，(1934) p. 545
- 10) 原田 泰：土壌の種類および肥料を異にせる場合トドマツ，エゾマツの生育状態と施肥料について，御料林，133，(1934) p. 2
- 11) 中塚友一郎：樹木および樹苗の生理化学的研究 I，日林誌，25，(1942) p. 251
- 12) 肥後 純：杉稚樹の形態に及ぼす肥料3要素の影響について，昭17日林論集(1943)
- 13) HOWELL, J.: The effect of the concentration of the culture solution on seedlings of Ponderosa pine. Jour. For., 30, (1932) p. 829
- 14) ADDOMS, R. M.: Nutritional studies on Loblolly pine. Plant Physiol., 12, (1937) p. 199
- 15) OLSON, R. V.: The use of hydroponics in the practice of forestry. Jour. For., 42, (1944) p. 264
- 16) 芝本武夫：林木稚苗の水耕法に関する研究 I～II，東大演報，36，(1948) p. 64
- 17) 芝本武夫・高原末基：同上 III，東大演報，38，(1949) p. 59
- 18) 芝本武夫：スギ，アカマツ当年生苗木の水耕栄養液の組成に関する研究，日林誌，33，(1949) p. 443
- 19) WALKER, R. B., GESSEL, S. B. and HADDOCK, P. G.: Greenhouse studies in mineral requirements of conifers: Western cedar. Forest Sci., 42, (1955) p. 264
- 20) 春日井新一郎：水耕法に関する研究，土肥誌，13，(1939) p. 669
- 21) 森 英男・山崎利彦：水耕法によるリンゴ樹の養分吸収に関する研究 I，園芸学会誌，23，(1955) p. 205
- 22) 佐藤義夫・山口千之助：水中培養による樹苗の生育と窒素源及水素イオン濃度との関係，北大演報，38，(1935) p. 59
- 23) HOMCAMP, C.: Handbuch der Pflanzenernährung u. Düngerlehre. Bd. I, (1931) s. 689
- 24) CLARK, H. E. and J. W. SHIVE: The influence of the pH of a culture solution on the rates of absorption of ammonium and nitrate nitrogen by the tomato plant. Soil Sci., 37, (1934) p. 203
- 25) DAVIDSON, O. W. and J. W. SHIVE: The influence of the hydrogen-ion concentration of the culture solution upon the absorption and assimilation of nitrate and ammonium nitrogen by peach trees grown in sand culture. Soil Sci., 37, (1934) p. 357

- 26) 深城貞義：稲の水中培養におけるN源としてのアンモニア及硝酸塩の栄養的価値について，九大農学芸雑，3，(1930) p. 244
- 27) 田口亮平：作物生理学，東京(1958)
- 28) 大政正隆・塘 隆男：林木稚苗の水耕法に関する2，3の実験，日林誌，32，(1950) p. 305
- 29) PIRSCHLE, K. P.: Nitrate u. Ammoniumsalze als Stickstoffquellen für höher Pflanzen bei konstanter Wasserstoffionenkonzentration. Z. Pflanzenernähr. Düng. u. Bodenk. A 22, (1931) p. 51
- 30) 坂村 徹：植物栄養素源としての硝酸とアンモニアとの吸収，植及動，7，(1939) p. 63
- 31) 坂村 徹：植物生理学(上) 東京，(1958) p. 894
- 32) 三宅泰雄：水質分析，東京，(1949) p. 58
- 33) 塘 隆男：針葉樹稚苗の成育に及ぼす通気の影響について，育苗研究会記録(日林会東北支部)(1951) p. 23
- 34) ARRINGTON, L. B. and J. W. SHIVE: Oxygen and Carbon dioxide content of culture solutions in relation to cation and anion nitrogen absorption by tomato plants. Soil Sci., 42, (1936) p. 341
- 35) ARNON, D. I.: Ammonium and nitrate nutrition of barley at different seasons in relation to hydrogen ion concentration, manganese, copper, and oxygen supply. Soil Sci., 44, (1937) p. 91
- 36) GILBERT, S. G. and J. W. SHIVE: The influence of oxygen in nutrient substrates for plants. I. Soil Sci., 53, (1942) p. 145
- 37) GILBERT, S. G. and J. W. SHIVE: The influence of oxygen in nutrient substrates for plants. II, Soil Sci., 59, (1942) p. 453
- 38) 中山一郎：樹木水耕における通気量の影響，日林誌，32，(1950) p. 108
- 39) 芝本武夫・川名 明：クスの水耕培養における通気の影響 II，東大演報，43，(1952) p. 101
- 40) 荻住 昇・寺田正男：苗木の成長におよぼす土壌空気中の酸素濃度の影響，68回日林講集，(1958) p. 97
- 41) 大政正隆：ブナ林土壌の研究，林野土調報，1，(1951)
- 42) 小林 章：果樹と水分の問題，農及園，24，(1949) p. 605
- 43) 北大植物生理学教室編：植物生理実習，東京，(1951) p. 295
- 44) 山田 登：作物体内におけるガスの通導，作物の生理生態，(1957) p. 82~86
- 45) 山崎 傳：畑作物の湿害に関する土壌化学的並に植物生理学的研究，農技研報，B(1)，(1952) p. 1
- 46) 吉原 潔・川鍋祐夫・岡田忠篤：飼料作物の耐湿性に関する研究，G(7)，(1953) p. 125
- 47) LEYTON, L. and L. Z. ROUSSEAU: Root growth of tree seedlings in relation to aeration (1957). THIMANN, K. V.: The Physiology of Forest trees, (1957) p. 467~472 より
- 48) 三井進午：水稻秋落の本質とその改良，農及園，24，(1949) p. 173
- 49) 熊田恭一：水稻幼植物の根圏土壌に関する研究 I，日土肥誌，19，(1949) p. 119
- 50) 大政正隆・塘 隆男・佐々木恵彦：スギとアカマツの根の呼吸に関する2，3の実験，69回日林講集，(1959) p. 205
- 51) 大杉 繁：土壌反応論，東京，(1947)
- 52) 相見靈三・小寺 高：作物細胞に対するアルミニウムイオンの透過性とアルミノンによる耐酸性の検定について，農及園，27，(1952) p. 27
- 53) MAGISTARD, O. C.: The aluminium content of the soil solution and its relation to soil reaction and plant growth. Soil Sci., 20, (1925) p. 181
- 54) 大政正隆：スギ人工林土壌の酸度ならびに塩基飽和度について，帝室林野局，林試研報，3，

- (1935) p. 1
- 55) McLEAN, F. T. and B. E. GILBERT: The relative aluminium tolerance of crop plants. *Soil Sci.*, 24, (1927) p. 163
- 56) 永原太郎・久保彰治: 植物無機成分分析法, 奥田東編: 植物栄養生理学実験書, (1953) p. 211
- 57) WRIGHT, K. E.: *Plant Physiol.*, 18, (1943) p. 708 永田武雄: Al が養分吸収に及ぼす影響 I, *日土肥誌*, 24, (1954) p. 255 より再引用
- 58) GILBERT, B. E. and F. R. PEMBER: Further evidence concerning the toxic action of aluminium in connection with plant growth. *Soil Sci.*, 31, (1931) p. 267
- 59) 森 隆也: アルミニウム毒作用に対する植物の抵抗性, *生態学的研究*, 5, (1939) p. 1
- 60) MANSARD, E.: Untersuchungen über den Nährstoffgehalt der Äschen forstlichen Kulturpflanzen aus den Halstembecker Forstbaumschulen. *Tharandt forstl. Jahrb.*, 84, (1933) p. 105
- 61) MITCHELL, H. E.: Trends in the nitrogen, phosphorus, potassium and calcium content of the leaves of the some forest tree during the growing season. *Black Rock Forest Bull.*, 11, (1936)
- 62) BECKER-DILLINGEN, J.: *Die Ernährung des Waldes.* (1939)
- 63) AALTONEN, V. T.: *Boden und Wald.* (1948)
- 64) YOUNGBERG, C. T.: The uptake of nutrients by western conifers in forest nurseries. *Jour. For.*, 56, (1958) p. 337
- 65) 安藤愛次: スギ, ヒノキ稚苗栄養要素含有量の季節的变化について, *東大演報*, 42, (1952) p. 152
- 66) 芝本武夫・中沢春治: アカマツ稚苗の成長にともなう無機養分の吸収について, *日林誌*, 40, (1958) p. 385
- 67) 芝本武夫: スギ, ヒノキ, アカマツの栄養並に森林土壌の肥沃度に関する研究, *林野庁*, (1952)
- 68) 中塚友一郎: アカマツ苗の生長並に窒素及磷酸含量に関する 2, 3 の実験, I, *日林誌*, 34, (1952) p. 326
- 69) 津田耕治: カラマツの肥料試験 12, カラマツ養苗の養分吸収の季節的变化について, 67 回日林講集, (1957) p. 158
- 70) WHITE, D. P.: Variation in the nitrogen, phosphorus, and potassium contents of pine needles with season, crown position, and sample treatment. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 18, (1954) p. 326
- 71) LEYTON, L.: The relationship between the growth and mineral nutrition of conifers. (1957); Cited from THIMANN, E. V.: *The Physiology of Forest tree.* (1957) p. 323~345.
- 72) 塘 隆男・道仙喜一: スギ, アカマツ床替苗の養分吸収について 69 回日林講集, (1959) p. 184
- 73) LUTZ, H. J. and R. F. CHANDLER: *Forest Soils.* New York., (1946)
- 74) 塘 隆男: 苗畑土壌と施肥, *林業技術シリーズ*, 24, (1951)
- 75) McMURTREY, J. E.: *Hunger signs in crop.* Washington, (1949)
- 76) WALLACE, T.: *The diagnosis of mineral deficiencies in plants.* New York, (1953)
- 77) 三井進午・今泉吉郎 監修: 作物の要素欠乏—診断と対策—, 東京, (1958)
- 78) HOBBS, C. H.: Studies on mineral deficiency in pine. *Plant Physiol.*, 19, (1944) p. 590
- 79) HEIBERG, S. O. and D. P. WHITE: Potassium deficiency of reforested pine and spruce stands in northern New York. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 15, (1951) p. 369
- 80) GESSEL, S. P., L. C. WALKER and P. G. HADDOCK: Preliminary report on mineral deficiencies in Douglas fir and Western red cedar. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.*, 15,

- (1951) p. 364
- 81) WALKER, L. C. : Foliage symptoms as indicators of potassium deficient soils. *Forest Sci.*, 2, (1956) p. 113
 - 82) WILDE, S. A. : Malnutrition Symptoms ; Cited from STOECKER, J. H. and G. W. JONES : *Forest nursery practice in the Lake State*, (1957) p. 49~50
 - 83) 佐藤義夫・武藤憲由 : トウヒ属に関する栄養生理学的基礎研究 I, 北大演報, 16, (1953) p. 205
 - 84) 佐藤義夫・武藤憲由 : アカエゾマツに関する栄養生理学的基礎研究, 61 回日林講集, (1952) p. 98
 - 85) 佐藤義夫・武藤憲由 : クロエゾマツに関する栄養生理学的基礎研究, 日林会北海支講集, 2, (1953) p. 29
 - 86) 武藤憲由・滝川貞夫 : 培養液中の窒素, 燐酸, 加里, 苦土, 石灰, 硫黄 6 要素の濃度がカラマツ稚苗の生育に及ぼす影響, 65 回日林講集, (1956) p. 166
 - 87) 宮崎 榊・佐藤 亨・及川恵司 : 窒素, 燐酸, 加里の給与および欠除期間がスギ稚苗の生育に及ぼす影響, 林試研報, 88, (1956) p. 21
 - 88) 武藤憲由・早稲田収 : 窒素, 燐酸, 加里の欠除時期及び期間がメジロカンバ稚苗の生育に及ぼす影響, 67 回日林講集, (1957) p. 148
 - 89) 大鹿糠春蔵・斎藤勝郎 : 林木稚苗の栄養生理に関する研究 (1), スギ苗の要素欠乏に関する 2, 3 の実験, 70 回日林講集, (1956) p. 82
 - 90) 宮崎 榊 : 苗木育成法, 東京, (1957)
 - 91) 植村誠次・岩川幹夫・北村嘉一・原 敏男 : 肥料木の栄養生理に関する研究 I, 林試研報, 99, (1957) p. 1
 - 92) 宮崎 榊・塘 隆男・藤田桂治・及川伸夫 : スギ苗の加里, 石灰欠乏症について, 69 日林講集 (1959) p. 180
 - 93) 高橋治助 : 無機養分の吸収と移行, (1955), 戸刈ほか 4 氏共編 : 作物の生理生態, (1955) p. 87~93
 - 94) 田中 明 : 葉位別に見た水稻葉の生理機能の特性及びその意義に関する研究, IX, 日土肥誌, 29, (1958) p. 241
 - 95) HUNTER, A. S. : *Soil Sci.*, 67, (1949) p. 53, 中田 均 : イオウ, マグネシウムおよびカルシウムの生理作用, (1959), 奥田東編 : 肥科学新説, 東京, (1959) p. 209 より再引用
 - 96) 宮崎 榊・塘 隆男・藤田桂治・及川伸夫 : スギ苗の加里, 石灰, 苦土の相互欠除試験, 70 回日林講集, (1960) p. 193
 - 97) 山崎 傳 : 微量要素欠乏問題 地力増進に関する総合研究, (1954) p. 122
 - 98) WILDE, S. A. : *Forest Soils*, New York, (1958) p. 232
 - 99) VOIGT, G. K., J. H. STOECKER and S. A. WILDE : Response of coniferous seedlings to soil applications of calcium and magnesium fertilizers. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.*, 22, (1958) p. 343
 - 100) 塘 隆男・道仙喜一 : 苗畑におけるスギ苗の苦土欠乏について, 69 回日林講集, (1958) p. 178
 - 101) MITCHELL, H. L. : The growth and nutrition of white pine seedlings in cultures with varying nitrogen, phosphorus, potassium, and calcium. *Black Rock Forest Bull.*, Cited from *Forest Fertilization*, 1956, (1939)
 - 102) VAN GOOR, C. P. : The influence of nitrogen on the growth of Japanese larch. *Plant and Soil*, 5, (1956) p. 29
 - 103) 高橋達郎 : タバコのカリ栄養について, カリシンポジウム, 1957, (1958) p. 71
 - 104) 森 英男・山崎利彦・阿部 勇 : りんご樹のカリ栄養について, カリシンポジウム, 1958,

- (1959) p. 23
- 105) 谷田沢道彦・石原 隆：高等植物のマグネシウム欠乏症に関する研究集録，滋賀短大学術報，第1部(5)，(1953) p. 23
- 106) BECKER-DILLINGEN, J. : Die Gelbspitzigkeit der Kiefer, eine Magnesia Mangelerscheinung. Die Ernährung der Pflanzen, 33, (1937) p. 1
- 107) JESSEN, W. : Kalium and Magnesiummangelerscheinungen und Wirkung einer Düngung mit Kaliumchloride und Kaliummagnesia auf das Wachstum verschiedener Holzarten. Die Ernährung der Pflanzen, 35, (1939) p. 228
- 108) 宮崎 榊：育苗について，育苗研究会記録，日林会東北支部，(1951) p. 29
- 109) 五島善秋・谷田沢道彦・山本満二郎：植物のマグネシウム欠乏症に関する研究 I，滋賀短大学術報，第1部(5)(1953) p. 1
- 110) BAKER, F. S. : Effect of shade upon coniferous seedlings grown in nutrient solutions. Jour For., 43, (1945) p. 428
- 111) 篠田理一郎・深城貞義：九大農芸雑誌，2，(1927) p. 273，田口亮平²⁷⁾(1958) より再引用
- 112) WILDE, S. A. and G. K. VOIGT : Analysis of Soils and Plants for Foresters and Horticulturists. Michigans, (1955)
- 113) WILDE, S. A. and G. K. VOIGT : Absorption-Transpiration Quotient of Nursery Stock. Jour. For., 47, (1949) p. 643
- 114) 沖永哲一：スギ苗の肥料試験 II，窒素について，第3回林試研究発表会記録(林試青森支)，(1951) p. 8
- 115) 原田 洗：いわゆる徒長形態をしたスギ苗木の生長と養分含有状態についての調査の1例，日林誌，41，(1959) p. 382
- 116) 山下知治：カリウム供給量と植物体の蒸散度・蒸散効果・含水度並びに組織粉末比重及び組織粉末吸湿度との関係，植物学雑誌，64，(1951) p. 18
- 117) 塘 隆男・藤田桂治：肥料3要素が苗木の形質におよぼす影響について，69回日林講集，(1959) p. 112
- 118) 塘 隆男・藤田桂治：加里がスギ苗の成長ならびに2，3の形質におよぼす影響について，70回日林講集，(1960) p. 198
- 118a) 塘 隆男：林木とカリとの関係について，カリ-シンポジウム，1959，(1959) p. 85
- 119) 宮崎 榊・大鹿榊春蔵：苗木の育成に関する研究(予報)，栄養素の施与変更がスギ苗の発育並に耐寒性に及ぼす影響，第3回林試研究発表会記録(林試青森支)，(1951) p. 5
- 120) 塘 隆男：葉面施肥，林業技術，146，(1954)
- 121) 塘 隆男・塩田 勇：磷酸欠乏土壌におけるカラマツ当年生苗木に対する磷酸塩の葉面施肥効果について，尿素葉面撒布研究会記事，3，(1954) p. 288
- 122) 塘 隆男・藤田桂治：磷酸塩の葉面撒布液のpHの相異がその撒布効果におよぼす影響について，69回日林講集，(1959) p. 195
- 123) 塘 隆男・藤田桂治：根よりの窒素の供給の多少が尿素の葉面撒布効果におよぼす影響について，69回日林講集，(1959) p. 186
- 124) 鍋木徳二：森林肥料論，東京，(1933)
- 125) LEININGEN-WESTERBURG, W. G. : Forstwirtschaftliche Bodenbearbeitung, Düngung und Einwirkung der Waldvegetation auf den Boden. (1930), BLANCK, E. : Handbuch der Bodenlehre. Vol. IX. 126, (1930)
- 126) VATER, H. : Frostliche Anbauversuche, insbesondere Düngungsversuche. Deuten Landwirtschaft, (1927)
- 127) JUNACK, : Resultat eines forstlichen Düngungsversuche von Jahre Z. f. Forst-

- Jagdw., (1928) p. 321
- 128) TARRANT, R. F., L. A. ISSAC and R. F. CHANDLER : Observation on litter fall and foliage nutrient content of some pacific northwest tree species, Jour. For., 49, (1951) p. 914
- 129) LOUIS, J. M. : Weight and nitrogen and calcium content of the annual litter fall on forests in south Carolina Piedmont. Proc. Soil. Sci. Soc. Amer., 16, (1952) p. 38
- 130) TAMM, O. C. : The effects of nitrogen fertilization on tree growth and foliage composition in forest stand. Cited from Analyse des plantes et problems des fumure minerals, (1957) p. 150
- 131) LEYTON, L. : The growth and mineral nutrition of spruce and pine in heathland plantations. Imp. For. Inst. Pap. (Oxford), 31, p. 109. Cited from Forest Fertilization, 1956, (1954)
- 132) LEYTON, L. and K. A. ARMSON : Mineral composition of the foliage in relation to the growth of Scotch pine. For. Sci., 1, (1955) p. 210
- 133) LEYTON, L. : The relationship between the growth and mineral composition of the foliage of Japanese Larch. Plant and Soil., 7, (1956) p. 167
- 134) FLETCHER, P. W. and OCHRYMOWYCH, J. : Mineral nutrition and growth of eastern redcedar in Missouri. Univ. of Missouri Agri. Exp. Sta. Res. Bull., 577, (1955) p. 16
- 135) WALKER, L. C. : Foliar analysis as a method of indicating potassium deficient soils for reforestation. Proc. Soil. Sci. Soc. Amer., 19, (1955) p. 233
- 136) LUNT, H. A. : Effect of fertilizer treatment on field-planted spruce Proc. Soil. Sci. Soc. Amer., 10, (1945) p. 406
- 137) VIRO, P. J. : Fertilization trials on forest soil. Commun. Inst. for Finland. Cited from Forest Fertilization, 1956, (1950)
- 138) MITSCHERLICH, E. A. : Melioration und Forstdüngung. Forstwirtschaft Holzw., 4, (1950) p. 256
- 139) McDERMOTT, R. E., P. Y. BURNS : Effect of fertilizer on planted pine. Jour. For., 49, (1951) p. 633
- 140) ALTEN, F. and W. DOEHRING : Die Düngung in der Forstwirtschaft. Z. Pflanzenernähr. Düng. u. Bodenk., 59, (1952) p. 145
- 141) NEMEC, A. : Effect of fertilizers on the degraded soils of the Lovcice in Bohemia Pháce vyzkum. Ust. lesn. CSR., 3, (1953) p. 149, Cited from Forest Fertilization, 1956
- 142) LOHWASSER, W. : Kalkdüngungsversuche im Eggegebirge und Hunsrück. Forstarchiv., 24, (1953) p. 213
- 143) THEMLITZ, R. : Die Anwendung von kalkstickstoff zur Rohhumswandlung und Ertragssteigerung im Walde. Z. Pflanzenernähr. Düng. u. Bodenk., 64, (1954) p. 54
- 144) THEMLITZ, R. : Kalkdüngung auch bei Stickstoffdüngung im Wald. Allgemeine Forstz., 13, (1958) p. 142
- 145) GESSEL, S. P. and R. B. WALKER : Height growth response of Douglas-Fir to nitrogen fertilization. Proc. Soil. Sci. Soc. Amer., 20, (1956) p. 97
- 146) HAUSSER, K. : Ergebniss von neuen Forstdüngungsversuchen im Württembergischen Schwarzwald. Allgemeine Forstz., 20, (1956) p. 1
- 147) HAUSSER, K. : Waldbauliche und betriebswirtschaftliche Erfolge der Forstdüngung, erläutert an Beispielen aus dem Buntlandsteingebiet des Württembergischen Schwarzwaldes. Allgemeine Forstz., 13, (1958) p. 125

- 148) MITSCHERLICH, E. A.: Bodenverschlechung und Düngung in ertragskundlicher Sicht. Der Forst u. Holzwirt., 21, (1958) p. 415
- 149) SCHAIRER, E., and MOOSMAYER, H. U.: Ein Düngungsversuch an Douglasie. Allgemeine Forstz., 13, (1958) p. 143
- 150) 芝本武夫: 森林土壌の肥培, 林野庁, (1952)
- 151) 芝本武夫: 林地肥培, 山林, 848, (1955) p. 22
- 152) 芝本武夫・中島主一・井上円治: 愛知県瀬戸地方の荒廃林地土壌改良に関する研究 I, 水平溝設置と施肥との効果について, 東大演報, 48, (1955) p. 153
- 153) 柴田信男: アカマツ林の肥培に関する 2, 3 の実験的考察, アカマツ研究論集, (1954) p. 1
- 154) 柴田信男: 林地肥培に関する研究 III, 日林会関西支講集, 7, (1957) p. 21
- 155) 安藤愛次・小島俊郎: 林地肥培—固形肥料の用量試験, 山梨県林試報, 1, (1958)
- 156) 朝日正美: 施肥造林試験, 日林会北海道支講集, 7, (1958) p. 1
- 157) 岸 善一・田中悦郎: 林地肥培試験, 広島県林試報, (1957) p. 51~62
- 158) 宮嶋 寛: シナブラギリ幼齡林の施肥試験について, 九大演報, 19, (1951) p. 55
- 159) 竹下純一郎: 林地肥培に関する研究 III, 岐阜県林試報, 3, (1958) p. 7
- 160) 宮崎 穉・佐藤 亭・及川恵司: アカマツ造林地と施肥, 日林会東北支誌 (第5回講演集), (1954) p. 20
- 161) 茨木親義・伊藤忠夫・小田 明: 林地肥培試験 予報, 64 回日林講集, (1955) p. 162
- 162) 茨木親義・伊藤忠夫・小田 明: 同 上, 第2報, 65 回日林講集, (1956) p. 205
- 163) 塘 隆男・道仙喜一・三宅 勇・飯塚三男: 天然更新した6年生アカマツ林に対する施肥の効果 (予報), アカマツ研論集, (1954) p. 31
- 164) 塘 隆男・藤田桂治・三宅 勇・飯塚三男: 同 上 (第2報), 69 回日林講, (1959) p. 201
- 165) 塘 隆男: 林地肥培, 林総協編 (1958): 早期育成林業, 第I編 (1958)
- 166) RENNIE, P. J.: The uptake of untrients by mature forest growth. Plant and Soil., 7, (1955) p. 49
- 167) WHITE, D. P. and L. L. ALBERT: Forest Fertilization. Syracuse Univ., (1956)
- 168) WITTICH, W.: Bodenkundliche und pflanzenphysiologische Grundlagen der mineralische Düngung im Walde und Möglichkeiten für die Ermittlung der Nährstoffbedarfes. Allgemeine Forstz., 13, (1958) p. 121
- 169) WITTICH, W.: Auswertung eines forstlichen Düngungsversuches auf einen Standort mit für weite Gebiete Deutschlands typischem Nährstoffhaushalt. Auswertung von Düngungs- und Meliorationsversuchen in der Forstwirtschaft. Ruhr- Stickstoff Ak., (1958)
- 170) MAYER-KRAPOLL, H.: Nährstoffversorgung und Normaldüngung bei landwirtschaftlichen und forstlichen Böden. Allgemeine Forstz., 13, (1958) p. 137
- 171) KIRSCHFELD, : Planung und Nachweis von Düngungsmassnahmen in den Forstwirtschaft. Allgemeine Forstz., 13, (1958) p. 130
- 172) MERKER, E.: Forstschutz gegen Insekten durch Düngung der Baum bestände Allgemeine Forstz., 13, (1958) p. 314
- 173) OLDIGES, H.: Waldböndendüngung und schadlings Fauna des Kronenraumes, Allgemeine Forstz., 13, (1958) p. 138
- 174) CHANDLER, R. F.: The influence of nitrogenous fertilizer applications upon seed production of certain deciduous trees. Jour. For., 36, (1938) p. 761
- 175) WENGER, K. F.: The effect of fertilization and injury on the corn and seed production of loblolly pine seed trees. Jour. For., 51, (1953) p. 570

- 176) MITSCHERLICH, G. and W. WITTICH : Düngungsversuche in ältern Beständen Bodens. Allgemeine Forst u. Jagd., 129, (1958) p. 169
- 177) PAWLUCK, S. and ARNEMAN, H. F. : The residual effects of lime added for the growth of various conifers in Minesota. Proc. Soil Sci. Soc. Amer., 21, (1957) p. 653
- 178) SCHAIRER, E. und H. U. MOOSMAYERS : Ein Düngungsversuch an Douglasie. Allgemeine Forstz, 13, (1958) p. 143
- 179) ALBERT, R. : BAKER, F. S. : Principles of Silviculture, (1950) p. 151 より再引用
- 180) 芝本武夫・中島幸雄 : 開墾による森林土壌の変化, 演習林, 8, (1951) p. 67
- 181) WILDE, S. A. : Forest Soils and Forest Growth. (1946)
- 182) 堤 利夫・徳丸始郎 : 治山造林地の林力回復過程に関する調査報告, 治山事業調査報告, 第8輯, (1957)
- 183) 河田 杰 : 黒松林落葉採取試験の成績, 林試研報, 31, (1921) p. 1
- 184) 大政正隆・森 経一 : 落葉に関する 2, 3 の研究, 帝室林野局林試報, 3, (1937) p. 39
- 185) 橋本与良 : 瘠悪林地とその改良, 林野庁, (1956)
- 186) 塘 隆男・原田 洸 : 林木の養分含有量に関する研究, I 年齢別にみたスギの重量と肥料3要素の含有量について, 66 回日林講集, (1956) p. 75
- 187) 塘 隆男・原田 洸・及川伸夫 : 林木の養分含有量に関する研究, II, 年齢別にみたアカマツの養分含有量について, 69 回日林講, (1959) p. 182
- 188) 渡辺・菅野・村山 : 関東地方北東緑部第3 紀層の地質学的研究, 秩父自然科学博物館 研究報告, 1, (1950) p. 93
- 189) GESSEL, S. P. and A. SHAREFF : Response of 30-years-old Douglas Fir to fertilization. Proc. Soil. Sci. Soc. Amer., 21, (1957) p. 236
- 190) STFPANOFF, N. N. : Chemische Eigenschaften der Waldstreu als des Grundfaktors der Wald verjüngung. Cited from 73), (1929)
- 191) LUNDEGÅRDH, H : Die Blattanalyse. Jena., (1945)
- 192) 東大農学部三井研究室 : ソ連における同位元素の生物学, 農業上への利用, アイソトープ, 1, (1955) p. 17
- 193) 林野庁編 : 林地における土砂及び水の流出, p. 4 より再引用
- 194) 塘 隆男 : 林地肥培に関する 2, 3 の基礎的問題について, 季刊「肥料」, 昭和 35 年 4 月号, (1960)

Studies on Nutrition and Fertilization of Some Important Japanese Conifers.

Takao TSUTSUMI

(Résumé)

Fertilization in forestry falls into two very distinct categories, namely in nursery fertilization and in forest fertilization.

From olden times, nursery fertilization has customarily been carried into practice and considerable studies have already been done. On the other hand, forest fertilization has not been carried out extensively because of being an abundance of wood provided naturally, and only a few studies on this problem have been undertaken.

But, recently forest fertilization has been given much attention as a technique increasing forest production in Japan as well as in many other countries.

Because of the two widely different aspects of the problem of using fertilizers in forestry—one in the nursery and the other in forest land—, this paper is written for the purpose of summarizing the writer's studies separately as follows:

Part I Nutrition and fertilization of seedlings.

Part II Nutrition and fertilization of forest trees.

The writer is indebted to Dr. M. OHMASA; Dr. T. SHIBAMOTO and Dr. S. MIYAZAKI for guidance in this work; and Mr. H. HARADA, Mr. K. FUJITA and other members of the writer's laboratory have rendered valuable help in some of the experiments conducted in this work.

Sugi=*Cryptomeria japonica* D. DON

Hinoki=*Chamaecyparis obtusa* SIEB. et ZUCC.

Akamatsu=*Pinus densiflora* SIEB. et ZUCC.

Karamatsu=*Larix leptolepis* SARG.

Part I Nutrition and fertilization of seedlings.

I Water culture method for seedling—on the nitrogen sources and pH of culture solution.

The question of the relative efficiency of $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ as sources of nitrogen for green plants is one which has often been investigated since the days of LIEBIG. However, considerable disagreement has been evident concerning the relative efficiency of these two forms of nitrogen, and the controversy apparently is not yet closed.

The main purpose of the research described here have been to study the relative efficiency of $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ for seedlings, and to study the influence of the pH of culture solution upon the availability of these two nitrogen sources.

Two years old Sugi seedlings were grown in a complete culture solution including the following three different sources of nitrogen as shown in Tab. 2.

Solution A : approximately equal proportions of $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$ as source of nitrogen.

Solution B : only $\text{NO}_3\text{-N}$ as source of nitrogen.

Solution C : only $\text{NH}_4\text{-N}$ as source of nitrogen.

And the culture solutions in these three series were adjusted to pH 6.2 and pH 4.2.

The results obtained are shown in Tab. 3, Photo. 1, and summarized as follows :

(1) The seedlings made better growth in culture solution including both sources of nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$) than in a sole source of nitrogen (only $\text{NO}_3\text{-N}$ or only $\text{NH}_4\text{-N}$).

(2) The seedlings made much better growth at pH 4.2 than at pH 6.2, in solution with only $\text{NO}_3\text{-N}$. On the contrary, in solution with only $\text{NH}_4\text{-N}$, the seedlings made better growth at pH 6.2 than at pH 4.2.

(3) Knop's solution modified by the writer seems to be suitable for the culture of coniferous seedlings in Japan.

II Sensibility for aeration and resistance of reductional root medium.

The necessity of adequate aeration for normal healthy root development of most species of mesophytic plants has often been pointed out by many investigators. The experiments described below were undertaken to make clear the aeration and resistance sensibility of reductional root medium on some Japanese conifer seedlings.

1. Sensibility for aeration.

(1) Two years old Sugi, Hinoki, Akamatsu and Karamatsu seedlings were grown in aerated and non-aerated culture solution including both $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$ as the source of nitrogen. The results obtained showed that the effect of aeration in the summer season when dissolved oxygen in culture solution decreased, increased in the following order (Tab. 5, Fig. 3 and Photo. 2).

Karamatsu > Akamatsu > Hinoki > Sugi

It will be seen that the roots of Sugi are able to tolerate for an oxygen-poor medium, but the roots of Karamatsu and Akamatsu require an oxygen-rich medium.

(2) Two years old Akamatsu seedlings were grown in aerated and non-aerated culture solution including the following different nitrogen sources : (a) $\text{NO}_3\text{-N}$, (b) $\text{NH}_4\text{-N}$.

The results obtained showed that the effect of aeration in $\text{NH}_4\text{-N}$ solution is more distinct than in $\text{NO}_3\text{-N}$ (Tab. 4, 6 and Fig. 2, 4).

2. Excess soil moisture injury (resistance of submergence).

Two years old seedlings of Sugi, Hinoki, Akamatsu and Karamatsu were cultured in soils for 120 days, and thereafter the following treatments were given.

(a) Soils in pot were irrigated so far as to be saturated.

(b) Non-treatment was done (control).

The results obtained are shown in Tab. 8 and Photo. 3. According to this, resistance for the excess soil moisture injury was weak in the following order:

Resistance of excess
moisture injury

(Weak) ← ————— → (Strong)

Karamatsu
Hinoki
Akamatsu

Sugi

3. Tolerance for reductional root medium.

Two years old seedlings of Sugi, Hinoki and Akamatsu were grown in soils treated as described in Photo. 4, and the development of rootsystem of seedling was observed. The result showed that the tolerance for reductional root medium was weak in the following order:

Akamatsu>Hinoki>Sugi (Tab. 8, Photo. 4).

III Respiration of root.

As above mentioned, it was recognized that the effect of aeration was greater in Akamatsu than in Sugi.

As it might be assumed that the effect of aeration was concerned with tissue respiration of root, the studies as described below were carried out.

(1) Two years old seedlings of Sugi and Akamatsu were water-cultured in a vessel for 3 hours, and the consumption of dissolved oxygen of culture solution was analyzed to determine the rate of respiration of root.

The results showed that respiration of root was more vigorous in Akamatsu than in Sugi when the dissolved oxygen in culture solution was adequate (Tab. 9).

(2) On the contrary, when the dissolved oxygen in culture solution was deficient, respiration of root was weaker in Akamatsu than in Sugi, and it seems that the oxygen is exhausted out of the root in the case of Akamatsu (Tab. 10, Fig. 6).

(3) The rootsystem of Akamatsu is divided into two parts; the one is mycorrhizal root, the other one is non-mycorrhizal root, and it may be considered that respiration of the mycorrhizal root is more vigorous than that of the non-mycorrhizal root as shown in Fig. 7.

(4) Two years old Akamatsu seedlings were cultured in a reduced form of thionine solution whose dissolved oxygen was excluded as shown in Fig. 8.

The results revealed that only the non-mycorrhizal root oxydated reduced-form thionine to oxygenated-form thionine (Tab. 11, 12).

This being so, it may be considered by reason of the above-mentioned phenomena that oxygen may be exhausted out of the root of Akamatsu seedling under unaerobic condition activated by the non-mycorrhizal root.

IV Aluminum toxicity for tree seedlings.

It is well known that the low yields of certain crops grown in acid soils are due to the relatively high concentration of aluminum in acid soils.

Having in mind that no experimental data on the relationships between soil acidity and aluminum toxicity for tree seedlings have been published to date the studies described below were undertaken.

(1) Water culture trial—two years old seedlings of Sugi and Hinoki were grown in the following two culture solutions:

(a) Complete solution containing aluminum but phosphate in order to prevent the precipitation of aluminum phosphate.

(b) Complete solution (control).

The seedlings treated with aluminum were alternated in complete solution to supply phosphorus three or four days a week.

The results obtained are shown in Tab. 14 and may be briefly summarized as follows:

(i) Aluminum was definitely injurious to the growth of Sugi seedlings, but not injurious to Hinoki seedlings, and it seems that the Hinoki seedlings having a strong tolerance for acidic medium, as is verified by Tab. 13, have also a strong tolerance for aluminum toxicity.

(ii) And the results of this trial show that aluminum may be less injurious

to conifer seedlings than to general food plants.

(2) Soil culture trial—two years old seedlings of Sugi and Hinoki were grown in soils to which various amounts of soluble aluminum were added, and analyzed for aluminum and phosphorus.

The results obtained and shown in Tab. 15; Fig. 9, 10 and Photo. 7 are summarized as follows:

(i) By the addition of 2~8 g Al_2O_3 per pot, the growth of Sugi seedling was injured, but the growth of Hinoki seedling was somewhat promoted.

(ii) The concentration of Al in Hinoki seedlings decreased, and the concentration of P increased with increasing aluminum.

On the contrary, the concentration of Al in Sugi seedlings increased with increasing aluminum and the concentration of P decreased.

V Nutrient uptake by seedlings.

The investigation described below was carried out in order to make clear the nutrient uptake of some coniferous seedlings from the viewpoints of nutritional physiology and nursery fertilization practice.

Two years old seedlings of Sugi, Hinoki, Akamatsu and Karamatsu were raised in a nursery at the Government Forest Experimental Station, Meguro, Tokyo. Some soil properties of the nursery are as shown in Tab. 18.

The sample seedlings were removed from the nursery every month through the growing season, and measured for length and weight, and analyzed for nitrogen, phosphorus, potassium and calcium.

The results obtained are shown in Tab. 19~26 and Fig. 11~17 and summarized briefly as follows:

(1) Seasonal variation of nitrogen concentration of Sugi and Hinoki showed a concave curve, whereas that of Akamatsu showed a convex curve, and that of Karamatsu showed a convex curve similar to the letter L.

(2) Seasonal variation of phosphorus concentration of seedling was somewhat similar to a concave curve.

(3) Seasonal variation of potassium concentration of seedling showed a typical concave curve without distinction of species.

(4) Seasonal variation of calcium concentration of Sugi and Karamatsu showed a curve similar to concave, and that of Akamatsu showed one similar to convex; that of Hinoki was comparatively linear.

(5) Regarding the difference of nutrient concentration between species, it will be seen that nitrogen concentration was high in Akamatsu, phosphorus concentration was high in Karamatsu and Akamatsu, and potassium and calcium concentration was high in Sugi and Hinoki.

(6) Regarding the process of nitrogen, phosphorus, potassium and calcium uptake by seedlings, the amounts of phosphorus uptake in the early period of growing season (Apr.~Jul.) was larger in Akamatsu than in Sugi and Hinoki, and the amounts of potassium uptake in late period of growing season (Aug.~Oct.) was larger in Sugi and Hinoki than in Akamatsu and Karamatsu.

This tendency may be considered characteristic from the viewpoint of nutrition, and important for nursery fertilization practices.

(7) Efficiency of nitrogen absorbed for the yield of dry matter in early period was high in Sugi and low in Akamatsu; whereas in the late period it was low in Sugi and high in Akamatsu (Fig. 12).

Such being the case, it may be considered that Sugi accumulates nitrogen in its tissues in the early period and Akamatsu accumulates nitrogen in the late period, and therefore, the top growth of Akamatsu seedling is affected by nitrogen absorbed and accumulated in autumn of the previous year.

Karamatsu has also such a tendency similar to Akamatsu.

VI Mineral deficiency of seedlings.

As to mineral nutrient deficiencies of some Japanese conifer seedlings, only a few studies have so far been done. Particularly as no experimental data on potassium and calcium deficiencies of seedlings have been published in Japan to date, the writer ratified the visual symptoms of nitrogen, phosphorus, and magnesium deficiencies, and thereafter work was undertaken on potassium and calcium deficiencies.

1. Visual symptoms of nitrogen, phosphorus, magnesium, iron and manganese deficiency.

One year old seedlings of Sugi, Hinoki, Akamatsu and Karamatsu were grown successively in sand culture solution without each of the following elements: Nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, iron and manganese.

Apparatus of culture is shown in Fig. 18 and the composition of culture solution is shown in Tab. 27.

Results obtained are shown in outline in Tab. 28, 29, and Photo. 5, 6, 10.

In this experiment, the symptoms of nitrogen, phosphorus and magnesium deficiency were distinctly observed, and the indistinct symptoms of potassium, calcium deficiency were observed.

The symptoms of iron and manganese deficiency appeared slightly.

2. Potassium deficiency.

One year old Sugi seedlings were grown successively in sand culture with nutrient solution containing varying amounts of potassium.

The composition of solution used is shown in Tab. 30, and iron in the form of $\text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7$ (Fe-citrate) was added in quantities necessary to prevent seedlings from iron chlorosis.

In order to avoid the influence of potassium dissolved from culture vessels, polyethylene pots designed by the writer were used (Photo. B). Each polyethylene pot was put into a clay pot which excluded most of the light from the roots. The solution was renewed twice a week and initial pH was adjusted at pH 5.0.

The results obtained are shown in Tab. 31, Photo. 8, 12 and summarized briefly as follows:

(1) Sugi seedlings grown in solution without potassium showed obvious potassium deficiency symptoms, seedlings in 2 p.p.m. K_2O solution showed slight symptoms and seedlings grown in solution above 2 p.p.m. K_2O showed indistinct symptoms.

(2) The following symptoms could be observed as potassium deficiency symptoms.

- i) Decreased height and weight of seedling.
- ii) General chlorosis followed by browning (after 30~50 days).
- iii) Finally, necrosis of needles of lower top (after 80 days).

(3) The yield of seedlings grown in solution without potassium was very low

(height 2.4 cm, fresh weight 0.18 g), and their potassium content was only in trace.

(4) Although the growth of seedlings grown in 2 p.p.m. K_2O and 4 p.p.m. K_2O solution were fairly good (each index of fresh weight were 56 and 76 respectively), their potassium concentrations were very low, 0.23 and 0.54 respectively.

It has been assumed that the critical level of potassium in needles is 0.5 % of dry matter, and therefore the seedlings grown in 2 p.p.m. K_2O solution were under condition of potassium deficiency, and the seedlings of the 4 p.p.m. K_2O treatment just at the threshold value of potassium deficiency.

(5) There are any discussions as to the nitrogen-potassium ratio (N/K) of plants. In this experiment, N/ K_2O value of seedlings grown in solution of 4 p.p.m. K_2O are higher about 2.

It may be said, therefore, that the seedlings were under abnormal condition because of excess nitrogen.

3. Calcium deficiency.

One year old Sugi seedlings were grown in culture solution without calcium as shown in Tab. 32. Method of experiment was for the most part similar to potassium deficiency work above described.

The results obtained are shown in Tab. 33, Photo. 11, and summarized below.

(1) Following calcium deficiency symptoms were observed.

i) Green color maintained in lower branch.

ii) Browning of root.

iii) Browning and necrosis at the tips of the leader and branch shoots.

(2) Calcium concentration of seedlings grown in culture solution without calcium was very low.

(3) Calcium concentration of upper part of seedling was lower than that of middle or lower parts, and potassium concentration of upper part of seedling was the highest.

According to this, it appears that calcium is more difficult to translocate in seedling than potassium and magnesium.

4. Potassium-calcium, potassium-magnesium and calcium-magnesium deficiency.

Two years old Sugi seedlings were grown in culture solution with the following eight different treatments: (A) Complete, (B) without potassium, (C) without calcium, (D) without magnesium, (E) without potassium and calcium, (F) without calcium and magnesium, (G) without calcium and magnesium, (H) without potassium, calcium and magnesium. The composition of culture solutions are shown in Tab. 34.

The results obtained are shown in Tab. 35~38 and summarized briefly as follows:

(1) Potassium deficiency symptoms were dormant when the supply of both, potassium and calcium, or potassium and magnesium, was stopped at the same time. Calcium deficiency symptoms were dormant when the supply of calcium and magnesium was stopped at the same time. These phenomena are very important in the study of nutritional diagnosis on seedlings.

(2) Antagonism was recognized between these three elements, particularly between potassium and magnesium.

(3) Sum of chemical equivalent value of each element was almost constant when one element of three elements was deficient.

(4) Accordingly, it may be assumed that these three elements each had another

compensatory working effect.

5. Magnesium deficiency of Sugi seedlings in nurseries.

In order to make clear the soil condition when magnesium deficiency appears, some field investigations were carried out in nurseries in Shizuoka Prefecture.

The results obtained are shown in Tab. 39~41, Fig. 20, 21, and summarized as follows:

(1) Magnesium deficiency symptoms appeared when exchangeable magnesium was less than 10 *mg* per 100 *g* dry soil, and scarcely appeared at all when exchangeable magnesium was more than 20 *mg*.

(2) As magnesium deficiency symptoms appeared when MgO/K_2O ratio of soil was very low, there is antagonism between magnesium and potassium likewise in agricultural crops.

VII Essential characters of nursery fertilization.

It seems that the essential purpose of fertilization in nursery practice is to improve the qualities of nursery stock as well as to promote the growth of stock.

As no experimental data on this point had been published in Japan, the studies on the relationship between some qualities of nursery stock and application of fertilizer were undertaken as described below.

(1) One year old seedlings were grown in Meguro nursery, and the following four treatments were used as shown in Tab. 42:

(a) N, P, K application, (b) only N, (c) only P, (d) only K, (e) no fertilizer.

After one year, the seedlings were removed from the nursery and their growth was measured; next their nutrients concentration and some important qualities of the seedlings were analyzed.

The results obtained are shown in Tab. 43~45 and may be briefly summarized as follows:

- i) Slenderness of seedlings with N, P, K was the smallest.
- ii) Volume weight of seedling with N, P, K was the largest.
- iii) Soluble nitrogen—total nitrogen ratio of seedlings with only N application was greater than the others.
- iv) Feature of rootsystem of seedlings with only P was very good and may be suitable for transplanting (Photo. 9).
- v) Top/Root ratio of seedlings with only P was the smallest.
- vi) Absorbing capacity of root¹¹⁸⁾/Total fresh weight of root of seedlings with only P was greatest of all, and that of seedling with N was the smallest (Fig. 22).
- vii) Rooting activity of seedlings with only P was very high as well as that of seedling with N, P, K (Photo. 13).
- viii) WILDE'S Absorption-Transpiration Quotient¹¹⁸⁾ of seedlings with only K was the smallest.
- ix) Rate of growth after transplanting of seedlings with only N was greater than that of seedling with only P or only K (Photo. 14).

(2) The influences of potassium on some qualities of Sugi seedlings were investigated. The results obtained were as shown in Tab. 46, 47 and may be summarized briefly as follows:

- i) Reducing sugar/Non-reducing sugar ratio of seedlings without K was smaller

than that of seedlings with K. On the contrary, Soluble nitrogen/Total nitrogen ratio of seedlings without K was very low.

ii) Water losses by transpiration through crown of seedlings without K were greater than that of seedlings with K.

iii) Rate of survival after transplanting of seedlings with K was higher than that of seedlings without K

(3) It will be seen that the rooting activities of nursery stocks are very important from the viewpoint of nursery stock's qualities. Hence, the nutrients translocation from top to root in rooting of nursery stock was investigated, and the results are shown in Tab. 48, 49. They may be summarized as follows:

i) Phosphorus was the most translocated nutrient from top into root with rooting.

ii) According to an experiment using radioisotope P^{32} , the behaviour of phosphorus was as shown in Photo. 16, and phosphorus contained in the lower branches translocates into the root more than in the upper branches with rooting.

This result indicates that the development of lower branches is very important as the quality of nursery stock. The writer proved this point positively by field trial (Photo. 17).

Judging from the results above mentioned in (1)~(3), fertilization of three elements (N, P, K) give good qualities for nursery stock, but each elements are respectively concerned with different qualities.

This is very important regarding nursery fertilization for the purpose of improving a certain quality of nursery stock.

VIII Nutrient spray application as nursery fertilization technique.

As it was considered that nutrient spray application was effective in improving the qualities of nursery stocks, some experiments on nutrient spray were undertaken and the following results obtained.

(1) It will be seen that phosphate spray is effective in improving the root qualities of the seedling. The optimum pH of phosphate spraying solution was pH 5 as shown in Tab. 51, and the same result was obtained by experiment using radioisotope P^{32} as shown in Fig. 23 and Tab. 53.

(2) Two years old Sugi seedlings were grown in culture solution with the following three nitrogen levels:

(a) N : 40 p.p.m., (b) N : 10 p.p.m., (c) N : 0 p.p.m. and in addition the spray application was done in each case.

The result showed that the effect of spray was greater in the case of (a) than in the cases of (b) and (c) as shown in Tab. 55, 56 and Photo. 18.

This result indicates that spray application should be performed in parallel with application to soils.

IX Discussion on nursery fertilization.

The results above described in I~VI are summarized as shown in Tab. 57, and this table indicates the characters of Sugi, Hinoki, Akamatsu and Karamtsu seedlings from the viewpoint of nutritional physiology.

And, on the basis of the results given above in VII, VIII, the writer will describe the importance of nursery fertilization and discuss the essential character of nursery fertilization from the viewpoint of planting techniques.

(1) Characters of nursery fertilization.

The production of agricultural crops, such as rice and wheat, centers on the idea of yield.

To increase the production, the agricultural techniques of fertilization, soil amelioration and protection of damage must be adopted.

But as regards the production of nursery stock, should we consider the idea of yield as the basic aim?

In the case of agricultural crops such as rice and wheat, the amount of their yield is rather more important than the problems of qualities such as taste, storing, and so on.

In the case of nursery stock, however, the problems of qualities are more important than the amount of yield.

We should evaluate the production of nursery stocks with qualities such as feature of top and root, slenderness, rooting activities, water-absorbing capacity of root and the like, as well as yield.

Again, in agricultural crops, the variation of yield of each stock, generally speaking, does not seem to be of primary importance. Taking white potatoes, for example, the size or shape is not uniform; what matters is the amount of yield per hectare, this being more important than size or shape of the potatoes, except in extreme cases.

But in the case of nursery stocks, each member of the stock is the mother material of forest products and has its own mission independently.

No matter how large the total amount of yield of nursery stock may be, if it is irregular in size and varies greatly in feature and quality, there will be raised a lot of disqualified stock which is actually not suitable for transplanting.

Therefore, it is impossible to evaluate the production of nursery stocks on the basis of the idea of yield per hectare as is done in the case of agricultural crops.

Accordingly, the purpose of fertilization in nursery practice is to improve the qualities of the stocks as well as to promote the growth of them.

This is an aspect of nursery fertilization and a very important difference compared with fertilization of agricultural land.

As no silviculturists or forest technicians in Japan have conducted studies on this point, the writer decided to study this problem on the basis of his own idea set forth in paragraph VII and VIII, and the writer will consolidate the results in Tab. 94 which indicates systematically the relation between suitable features, necessary qualities of the stocks and fertilization.

(2) The application of nursery fertilization to reforestation techniques.

A certain feature and quality is required for nursery stock which is to be transplanted in forest land for the purpose of forest production.

The relationship between feature, quality and fertilization has already been explained in Tab. 94.

For example, there are close relations between feature of root, rooting activity, and phosphate fertilizer.

Potassium fertilizer is important in raising nursery stock with strong drought resistance, and nitrogenous fertilizer is important in raising the stock with better growth after transplanting.

From the consideration of the results of the author's experiments, the application

of sufficient phosphorus or potassium fertilizer is required to raise nursery stock having strong root activity and minimum water transpiration rate by the crown in order to be able to transport the stock to a far distant place for planting on a dry site.

In the case of transplanting the nursery stock on a forest site near the nursery or a site along a valley with many weeds, we have to select stock with relatively larger accumulating ability of nitrogen compounds and with better growth after transplanting, as there is little danger of the stock withering on account of dryness.

The writer would like to summarize the above-mentioned idea of him as "suitable stock for suitable site". Nursery fertilization also must be based on the fundamental idea of "suitable stock for suitable site" and carried out so as to raise stocks with suitable features and qualities.

Part II Nutrition and fertilization of forest tree.

I Introduction and history.

The author reviewed briefly the forest fertilization works undertaken in European countries, the United States of America, and Japan, and considered the background and the necessity of forest fertilization.

II Uptake of nitrogen, phosphorus and potassium by mature tree.

This investigation was carried out to determine the nitrogen, phosphorus and potassium content and its variation depending upon the stand ages of the following Sugi and Akamatsu stands.

Sugi stand : 6, 11, 17, 21, 30 and 40 years old stand in Mamurogawa area, Yamagata Prefecture.

Akamatsu stand : 10, 21, 30 and 39 years old stand in Kasama area, Ibaragi Prefecture.

Akamatsu stand : 6, 13, 32 and 43 years old stand in Ottomo area, Aomori Prefecture.

General condition of each stand is shown in Table 62, 67 and Fig. 25.

Sample trees on each stand of each age were divided into four parts (stem, needles, branches and roots), weighted, and analyzed for nitrogen, phosphorus and potassium.

The experimental data are shown in Tab. 63, 65, 66, 68, 70 and 71, and can be summarized as follows:

(1) The weight of dry matter in each part of the tree is shown in Tab. 63 and 68.

According to these data, the disposition of dry matter in the needle part, which is the assimilation organ in trees of young age (up to 10 years old), is greater than in trees of old age (30~40 years old); whereas the disposition of dry matter in the stem part, which is the storage organ, increases with increasing age (Fig. 24, 26 and 27).

(2) The nutrient content in each part of the trees is shown in Tab. 65 and 70.

From these data we see that the nutrient content of the needle part is greater than that of the stem, branches, and roots, and that of the stem is the lowest of all parts.

(3) Nitrogen and phosphorus concentration of Sugi are lower than Akamatsu regardless of part and age of tree.

On the contrary, potassium concentration of Sugi is higher than that of Akamatsu.

As this tendency is shown in seedlings as well as in matured trees, it may be one of the differences between Sugi and Akamatsu from the viewpoint of tree nutrition.

(4) Potassium concentration of needles decreases with increasing age of tree, but

that of stem remains rather constant.

(5) The amount of nutrients in each parts of the tree are shown in Tab. 66 and 71.

According to these data, the amount of nutrients in the stem increases with the increase in age as compared with other parts.

Particularly noticeable is the fact that compared with the amounts contained in the stem at the age of 6 years, the rate of increase in the case of potassium is higher than in the case of nitrogen and phosphorus.

III Cycle of nutrients between forest soils and trees.

It is characteristic of forest land that a large portion of the nutrients taken from the soil is returned to the soil by fallen litter.

This is called the cycle of nutrients.

We are unable to measure exactly the total amounts of nutrient in the cycle, but a rough estimate based on Tab. 66 and 71 is shown in Tab. 73.

According to these data, about 50~80% of the nutrients (nitrogen, phosphorus and potassium) are retained in the nutrient cycle when fallen litter is not brought out of forest land.

In the case of agricultural crops, the rate of phosphorus cycle is lowest, whereas in the case of forest trees, the rate of potassium cycle is lowest.

From the viewpoint of plant nutrient economy, this difference is very important and interesting.

But, when the fallen litter is brought out of forestland, only 20~30% of the nutrients are retained in the nutrient cycle.

IV Effect of fertilization on growth of Akamatsu plantation (forest fertilization trial).

This trial was undertaken to confirm the responses to fertilization on the growth of a young pine stand on poor soil as shown in Tab. 75.

A natural-regenerated, 6 years old Akamatsu stand at Akanuma (Saitama Pref.) was chosen for this trial, and the following four plots (A, B, C and D) were taken in 1951.

- A. Planted soil-improving-tree and fertilized.
- B. Planted soil-improving-tree and unfertilized.
- C. Fertilized.
- D. Control.

The design of this trial is shown in Tab. 76 and Fig. 33 and the results obtained are shown in Tab. 77~79 and Fig. 34, 35, which can be summarized as follows:

- (1) The effect of fertilization on height and diameter growth is evident for about three years; there after the effect decreases slowly (Fig. 34, 35).
- (2) Average height index of fertilized trees in 1958 (the 8th year after fertilization) was 155 and average weight index of fertilized trees (per 9 m² quadrat) was 158 (Tab. 82, Photo. 19).
- (3) The effect of additional fertilization in 1958 was also evident as shown in Tab. 81 and Photo. 20.
- (4) The rates of nutrient uptake of the fertilized tree was very large in comparison with the unfertilized tree. It will be considered that this is due to the expansion of rootsystem caused by fertilization (Tab. 83).

(5) The growth of Alder planted as soil-improving-tree in Akamatsu also increased by fertilization (Tab. 79).

(6) Properties of soils of Akamatsu stand improved by fertilization as shown in Tab. 78 and Fig. 36.

V Effect of fertilization on growth of Sugi stand (Investigation of forest fertilization examples).

In order to estimate the effect of fertilization on the growth of forest trees, some investigations as described below were carried out on a 7 years old fertilized plantation of Sugi in Shibukawa and Yokogawa, Gunma Prefecture.

Results obtained are summarized briefly as follows:

(1) The effects of fertilization were remarkable, as the data verifies, revealing that the average weight index of fertilized trees was 346 in Shibukawa and 313 in Yokogawa (Tab. 86, 90 and Photo. 21, 22).

(2) The fertilization caused the expansion of the root system as shown in Photo. 21, 22. From this phenomenon, it can be considered that the fertilized trees utilize the natural supply nutrients of soils more than the unfertilized trees.

(3) Therefore, the rates of nutrient uptake increase remarkably by fertilization as shown in Tab. 87, 91.

(4) Properties of soil of Sugi stand improved by fertilization as shown in Tab. 84, 88.

VI Some fundamental experiments dealing with forest fertilization mechanism.

In order to consider the mechanism of forest fertilization, the following fundamental experiments were undertaken.

(1) Experiment on nutrient absorption when the nutrients are supplied only in a part of the rootsystem of Sugi seedling.

Fig. 39 presents the outline of method of this experiment.

Data in Tab. 92 show that even if the nutrients are supplied only in a part of the rootsystem of two years old Sugi seedling, the amounts of nutrients absorbed are as much as when the nutrients are supplied in the whole rootsystem.

(2) Experiment on nutrient absorption when the nutrients are supplied only in a part of the rootsystem of Sugi seedling.

Fig. 40 presents the outline of this experiment method.

As seen from Fig. 40, the rootsystem of Sugi seedling was separated into two parts, and the radioisotopes (P^{32} , Rb^{86}) as tracer were applied in one part and the nitrogen, phosphorus and potassium were applied in the other part.

The radioisotopes absorbed in the crown of the seedling were measured, and the data are shown in Tab. 93. According to this, when some nutrients are applied in a part of the Sugi seedling rootsystem, the nutrients (P^{32} , Rb^{86}) are absorbed more actively through the other parts of the rootsystem.

VII Discussion on forest fertilization.

On the basis of the studies mentioned in I~VI, the writer will state his opinion as to the importance of fertilization in forestry of Japan in future, and the possibility of introducing forest fertilization to silviculture.

(1) Importance of fertilization in forestry of Japan in future.

As mentioned in III, provided that the fallen litter is not brought out from forest land, the rate of nutrient cycle between forest tree and soil is larger than that of

during the same period.

But, 5~6 years later, the indirect effects of fertilization gradually develop according as the phenomenon of return of nutrients through the fallen litter and the expansion of rootsystem.

Thus, as large indirect effects of fertilization appear in the forest, we shall be able to introduce forest fertilization to silviculture practice.

Laboratory of Soil and Fertilizer,
Government Forest Experiment Station,
Meguro, Tokyo, Japan.

agricultural crops, and the necessity of fertilization in forestry is less than in the case of agriculture.

This is the basis of a former theory that forest fertilization was unnecessary.

This being so, the writer have considered the conditions of Japanese forestry as applying to the future from the viewpoint of soils and many other factors, and summerize his findings briefly in Tab. 95.

As can be seen from Tab. 95, we shall be able to agree that the above-mentioned theory (e. q. forest fertilization is unnecessary) is not applicable to the present condition of forestry in Japan. If the present forest practice is continued, many conditions which deteriorate the forest soils may be brought about, and forest productivities will gradually decrease.

So the writer believes in the necessity of forest fertilization which will improve forest nutrient economy, maintain soil fertilities, and answer the excess demand of timbers.

(2) Possibility of introducing forest fertilization to silviculture.

As mentioned in II, the writer experimentally estimated the amounts of nutrient uptake of the tree, taking Sugi and Akamatsu as examples, to consider forest fertilization as an actual problem, and prepared Tab. 96 to compare the relation between the amount of nitrogen uptake and the amount of nitrogen fertilizer in the forest tree and agricultural crops.

According to Tab. 96, nitrogen is applied as much as the amount of uptake in the case of agricultural crops.

Supposing the rate of absorption of nitrogenous fertilizer to be 50%, this fact means that 50% of the amount of nitrogen uptake is given by natural supply of the soil and the rest (50%) is supplied by fertilizer.

If the amount of nitrogen were applied in the forest as much as in the case of agricultural crops and fruit trees, it would run up to a large amount of fertilizer, and it would be difficult to apply the fertilizer to forest land economically unless the timbers had scarcity value.

On the other hand, there are many examples of fertilized stands in which appreciable effects have been appearing in spite of using smaller amounts of fertilizer than those used in the case of agricultural land.

The writer investigated these examples as described in III and IV and deliberated upon the mechanism of the effect of forest fertilization; the findings are briefly summarized in Tab. 97.

As seen in Tab. 97, the effects of fertilization in the forest have been classified into two groups: the one is direct effect (effect on growth), the other is indirect effect (effect on soil amelioration), the two showing that the indirect effects of fertilization appear more markedly in forest land than in agricultural land, which fact would be significant in forest land which is subjected to soil erosion because of its inclination.

Moreover, the indirect effects of forest fertilization can appear, as the forest tree is a perennial plant and its growth period is very long.

Explaining this more in detail, the indirect effects of forest fertilization do not reveal themselves for 1~2 years after fertilization, as is the case in agricultural land

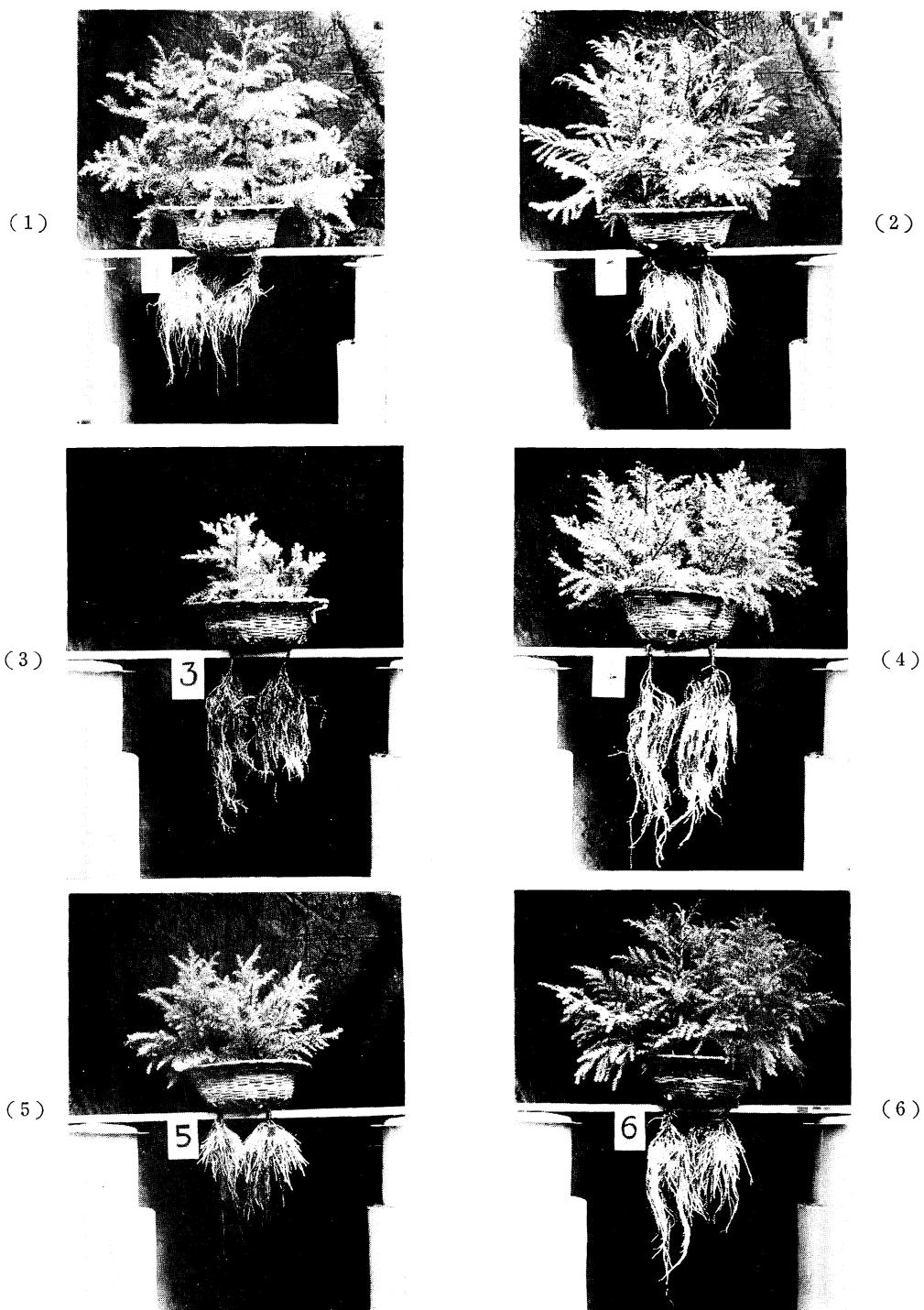
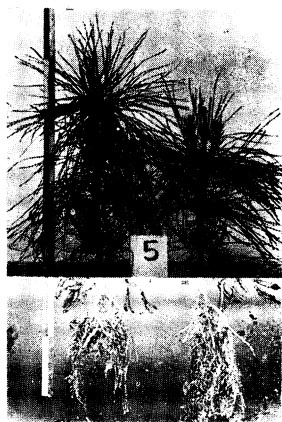


写真 1. 水耕液の窒素源と pH との関係 (スギ 2 年生苗)
 Photo. 1 Relation between nitrogen sources and pH of culture solution.
 (Two years old Sugi seedling)

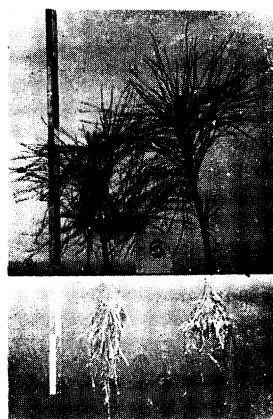
- | | | | |
|---|--------|---|--------|
| (1) $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$ | pH 4.2 | (2) $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$ | pH 6.2 |
| (3) $\text{NO}_3\text{-N}$ | pH 4.2 | (4) $\text{NO}_3\text{-N}$ | pH 6.2 |
| (5) $\text{NH}_4\text{-N}$ | pH 6.2 | (6) $\text{NH}_4\text{-N}$ | pH 4.2 |

—Plate 2—

アカマツ Akamatsu

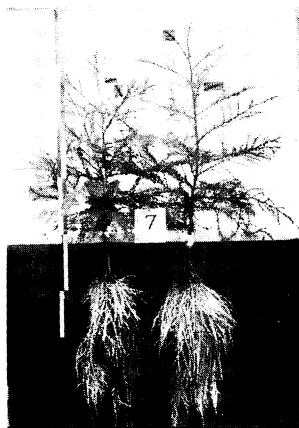


Aeration

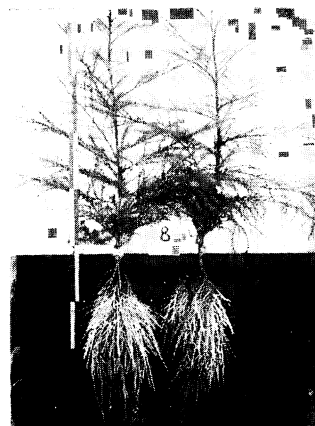


Control

スギ Sugi

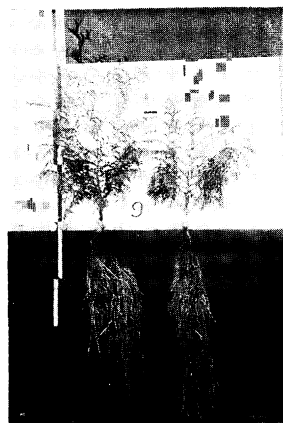


Aeration

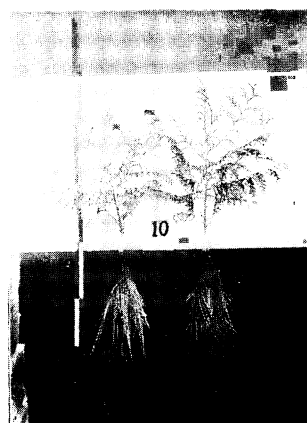


Control

ヒノキ Hinoki



Aeration



Control

写真 2 スギ、ヒノキおよびアカマツ 2 年生苗に対する通気の影響
(水耕試験による)

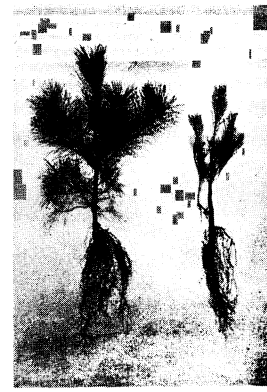
Photo. 2 Response of aeration on growth of two years old seedlings of Sugi, Hinoki and Akamatsu grown in culture solution.



(b) (a)
Sugi



(b) (a)
Hinoki



(b) (a)
Akamatsu



(b) (a)
Karamatsu

写真 3. スギ, ヒノキ, アカマツおよびカラマツ 2 年生苗の湿害 (ポット試験による) (a) 湿害苗 (b) 対照苗

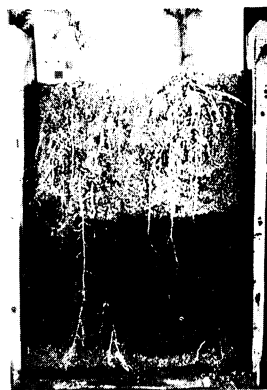
Photo. 3 Excess-moisture injury of two years old seedling of Sugi, Hinoki, Akamatsu and Karamatsu.

(a) Seedling injured by excess-moisture. (b) Control.

砂 の 層

Sand layer

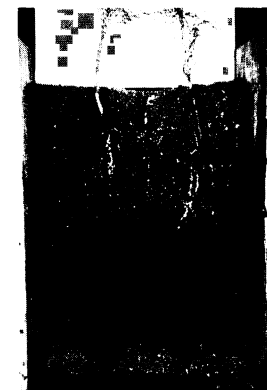
澱粉を加えた黒土の層
Black soil layer applied with
starch (Reductional layer).



スギ Sugi
根が黒土の層を貫通してい
る。



ヒノキ Hinoki
根の一部が黒土の層を貫通
している。



アカマツ Akamatsu
根が黒土の層を貫通してい
ない。

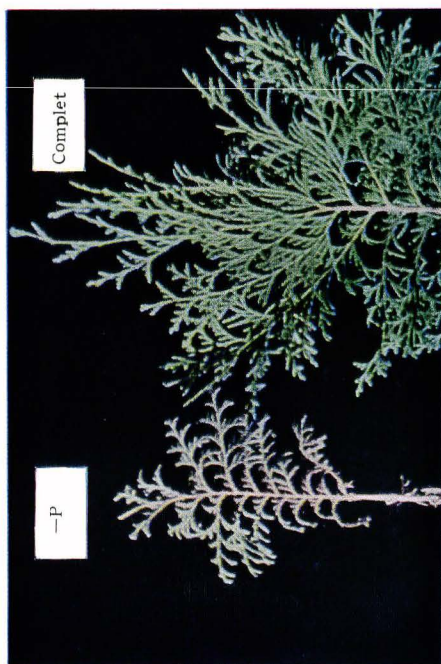
写真 4. スギ, ヒノキおよびアカマツの還元土に対する抵抗性の比較 (2 年生苗木)
Photo. 4 Relative tolerance of reductional soil on Sugi, Hinoki and Akamatsu.
(Two years old seedling.)



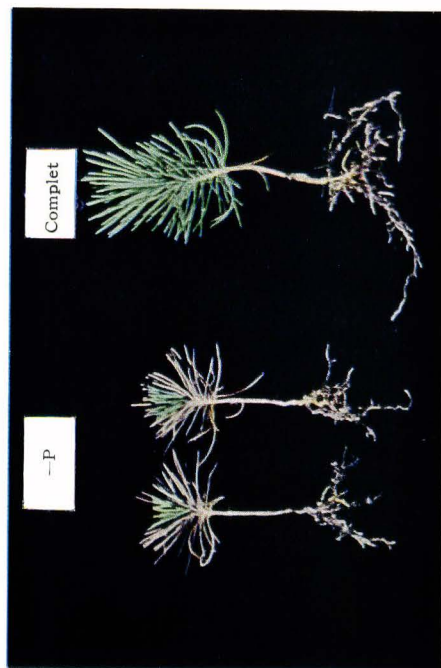
スギ Sugi



スギ Sugi



ヒノキ Hinoki



アカマツ Akamatsu

写真 5. 苗木のリン酸欠乏症

Photo. 5 Visual symptoms of phosphorus deficiency of seedlings.



スギ Hinoki



スギ Sugi



スギ Hinoki



アカマツ Akamatsu

写真 6. 苗木の苦土欠乏症
Photo. 6 Visual symptoms of magnesium deficiency of seedlings.

スギ Sugi



Amounts of Al_2O_3 added. (gram per pot.)

0 (Control)

2

4

8

16

32 g

ヒノキ Hinoki

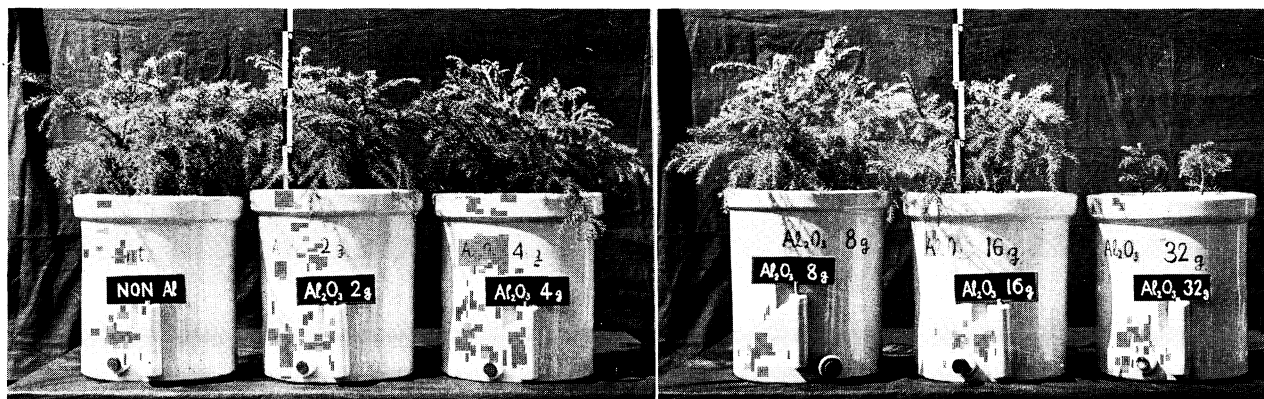


写真 7. スギおよびヒノキ 2 年生苗の生育に対するアルミニウムの毒性の比較

Photo. 7 Relative tolerance of aluminum toxicity for two years old seedlings of Sugi and Hinoki.

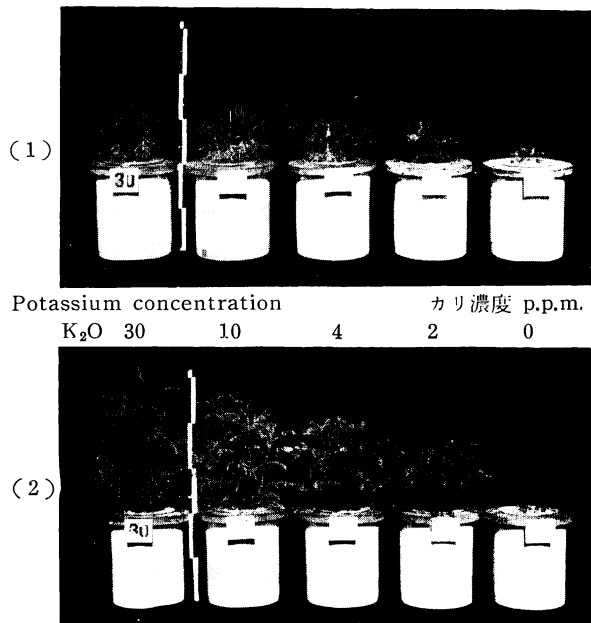


写真 8. カリ欠除培養実験成績
 (1) スギ1年生苗 (2) アカマツ1年生苗 (参考)
 Photo. 8 Potassium deficiency works.
 (1) Sugi (one year seedling)
 (2) Akamatsu (one year seedling)

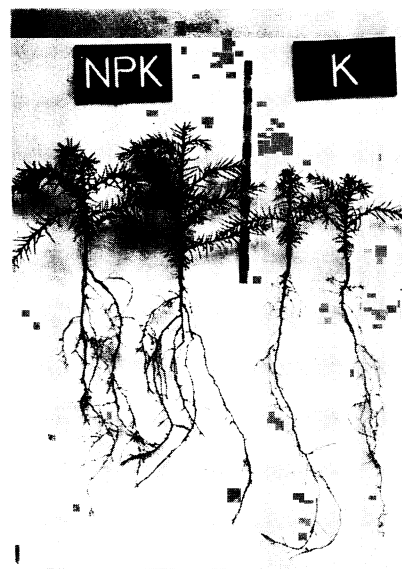
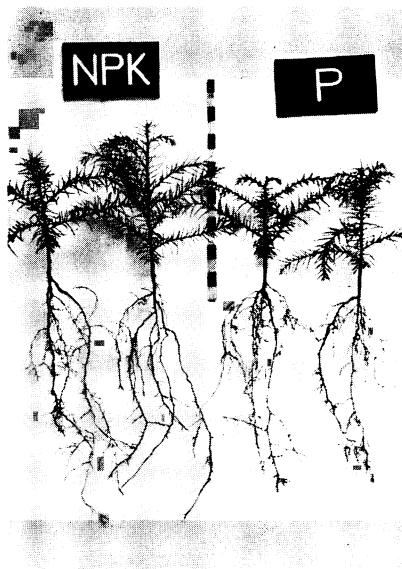
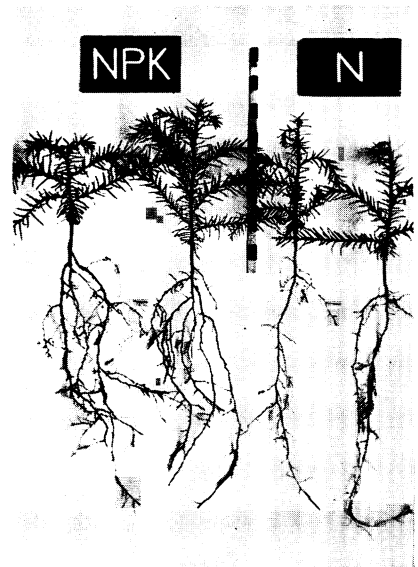


写真 9. スギ苗の根系形態に及ぼす肥料要素の影響
 Photo. 9 Influence of nitrogen, phosphorus and potassium on
 the feature of root system of Sugi seedling.



(1) スギ Sugi



(2) アカマツ Akamatsn



(3) ヒノキ Hinoki

写真 10. 苗木の鉄, マンガン欠乏症

Photo.10 Visual symptoms of iron and manganese deficiency.

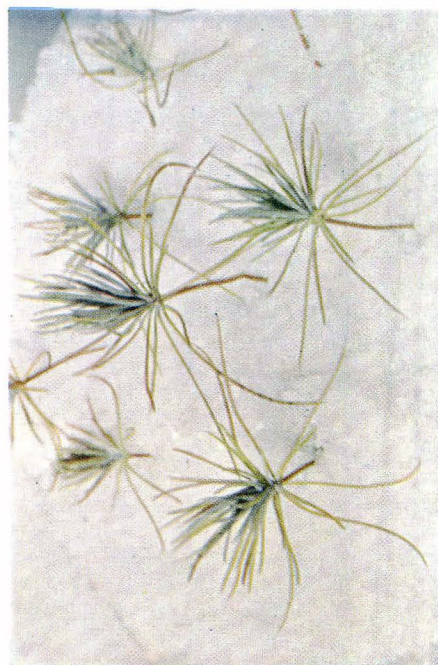
(1), (2) 鉄欠乏症 Iron deficiency.
(3) 鉄, マンガン欠乏症 Iron and manganese deficiency.



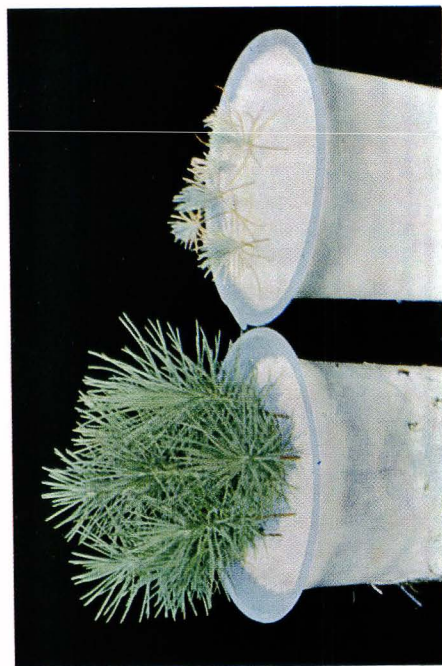
(4) スギ Sugi

写真 11. 苗木の石灰欠乏症

Photo.11 Visual symptoms of calcium deficiency.



スギ
Sugi



アカマツ
Akamatsu

写真 12. 苗木のカリ欠乏症
Photo. 12 Visual symptoms of potassium deficiency of seedlings.

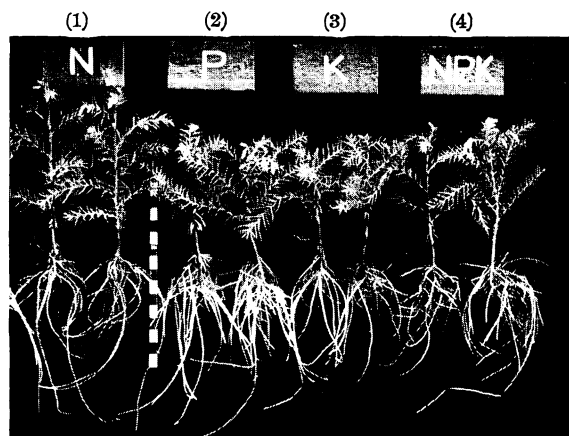


写真 13. スギ苗の発根に及ぼす肥料要素の影響

- (1) 窒素を施用した苗
- (2) リン酸を施用した苗
- (3) カリを施用した苗
- (4) 肥料3要素を施用した苗

Photo. 13 Influence of nitrogen, phosphorus and potassium on the rooting activities of Sugi seedling.

- (1) Seedling applied with N.
- (2) Seedling applied with P.
- (3) Seedling applied with K.
- (4) Seedling applied with NPK.

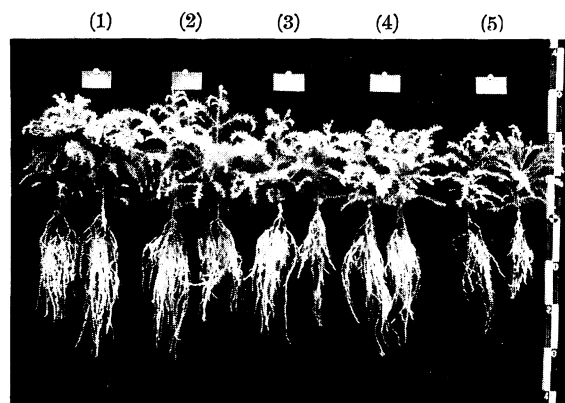


写真 14. 基肥として与えた各肥料要素が移植後の成長に及ぼす影響 (スギ2年生苗)

- (1) 肥料3要素を施用した苗
- (2) 窒素を施用した苗
- (3) リン酸を施用した苗
- (4) カリを施用した苗
- (5) 無肥料の苗

Photo. 14 Influence of nitrogen, phosphorus and potassium on growth after transplanting (two year old Sugi seedling).

- (1) Seedling applied with NPK.
- (2) Seedling applied with N.
- (3) Seedling applied with P.
- (4) Seedling applied with K.
- (5) Seedling unfertilized (Control).

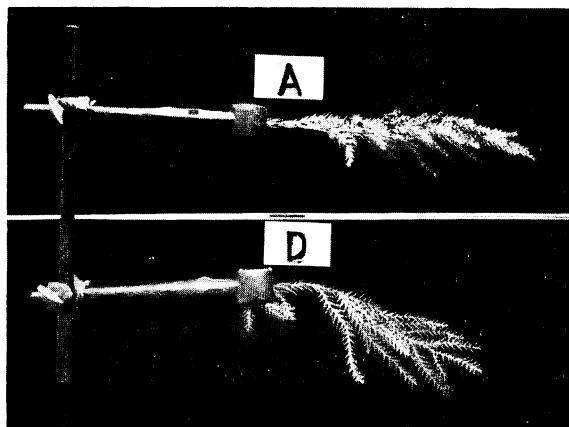


写真 15. カリ欠乏のスギ2年生苗の葉

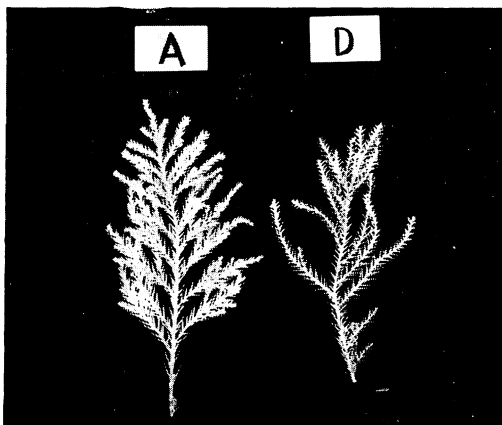
A. 標準培養苗の葉

D. カリ欠乏苗の葉——針葉の着生の仕方が粗であり、また軟弱で機械的に弱く、下垂する傾向がある。

Photo. 15 Needle of Sugi seedling (two years old) grown in culture solution without potassium.

A. Check

D. Without potassium



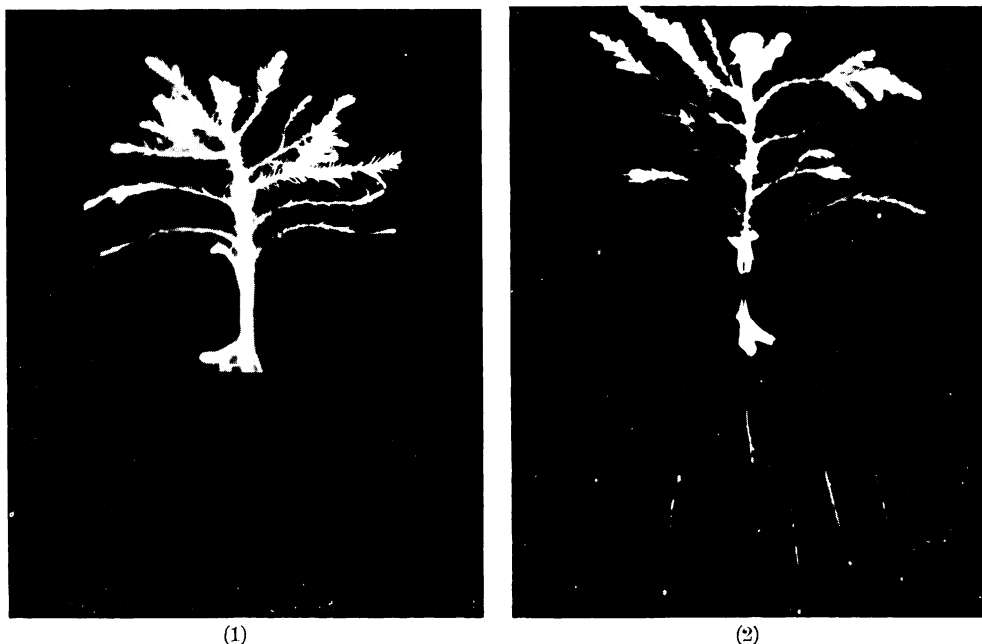
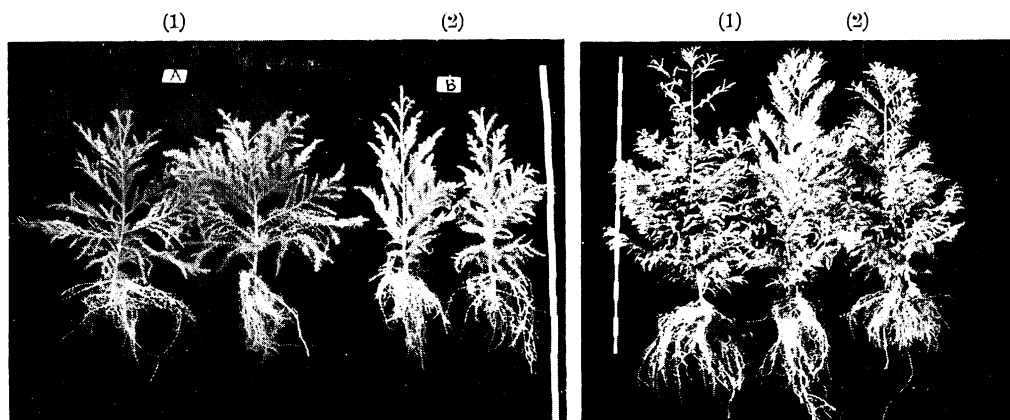


写真 16. ラジオオートグラフ (P^{32} を用い苗木体のリンが発根に伴い移行する模様を示したもの)
(1) 発根前 (2) 発根後

Photo. 16 Radio-autograph of P^{32} .

(1) shows before rooting. (2) shows after rooting.



植栽前

植栽2年後

写真 17. スギ2年生苗の下枝葉の発達程度が移植後の成長に及ぼす影響

- (1) 下枝葉の発達した苗
(2) 下枝葉の発達していない苗

Photo. 17 Effect of development of branches at the lower part of crown on growth transplanted stock.

- (1) Branches at the lower part of crown are well developed.
(2) Branches at the lower part of crown are poor developed.



	Nitrogen concentration culture solution	Urea spray
A	N : 40 p.p.m.	—
E	Ditto	+
B	N : 10 p.p.m.	—
F	Ditto	+
C	N : 0 p.p.m.	—
G	Ditto	+

写真 18. 根かからの窒素の供給の多少が尿素の葉面施肥効果に及ぼす影響 (スギ 2 年生苗を用いた水耕試験による)

Photo.18 Effect of urea spraying application on two years old Sugi seedling grown in culture solution controlled with three nitrogen levels.



(C) 施肥区 Fertilized plot.



(D) 無処理区 Unfertilized plot.

写真 19. アカマツ林の施肥効果 (埼玉県 林試赤沼試験地) 昭和 26 年に施肥, 昭和 34 年の状況を示す。

Photo.19 Effect of fertilization on growth of Akamatsu stand. (9th year after fertilization.)

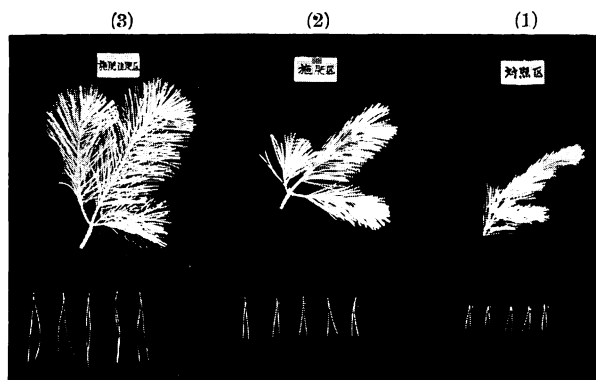


写真 20. 施肥したアカマツの針葉 (施肥後 9 年目の状態 林試赤沼試験地)

- (1) 無施肥木 (2) 施肥木
(3) 2 回施肥木

Photo. 20 Needle of fertilized Akamatsu.

- (1) Needle of unfertilized tree.
(2) Needle of fertilized tree.
(3) Needle of twice fertilized tree.

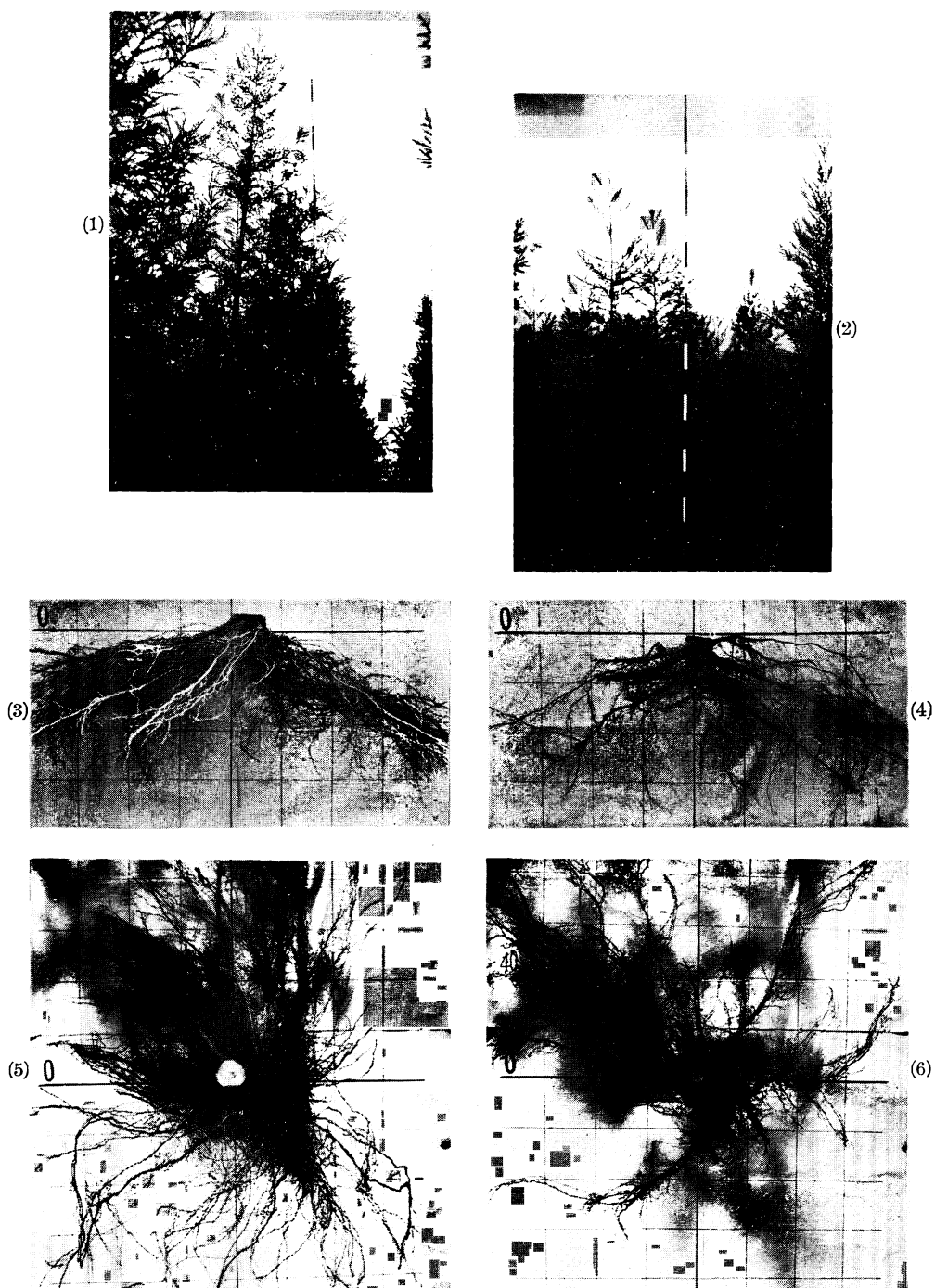


写真 21. スギ7年生肥培林（群馬県 渋川市）

(1) 施肥区 (3), (5)は施肥木の根系
 (2) 無施肥区 (4), (6)は無施肥木の根系

Photo. 21 Fertilized stand of 7-years old Sugi in Shibukawa.

(1) Fertilized plot. (3), (5) Root system of fertilized tree.
 (2) Unfertilized plot. (4), (6) Root system of unfertilized tree.



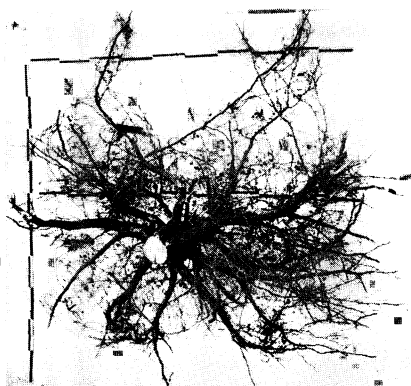
(1)



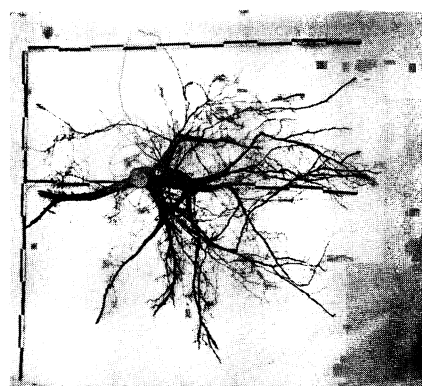
(2)



(3)



(4)



(5)

写真 22. スギ7年生肥培林（群馬県 横川町）

(1) 全景（左側は施肥区）

(2), (4) 施肥木とその根系 (3), (5) 無施肥木とその根系

Photo. 22 Fertilized stand of 7-years old Sugi in Yokogawa.

(1) Bird's eye view of investigated area.

(left part is fertilized plot.)

(2) Fertilized plot. (3) Unfertilized plot.

(4) Root system of fertilized tree.

(5) Root system of unfertilized tree.