

同齡單純林における密度と成長の関係

に関する測樹学的研究

栗 屋 仁 志⁽¹⁾Hitoshi AWAYA : Mensurational Studies on the Relation between
the Density and the Growth in Even-Aged Pure Stand

要 旨 : 本研究は測樹学的立場から、林分および林木の成長に最も関連の深い密度の尺度を探究し、この尺度を用いて成長過程の解析を行なったものである。

解析にあたって、対象を林分と林木とに分け、さらに前者を成長量測定の有無により分類して、それぞれの場合について、最適の密度の尺度の選定および成長過程の解析を行なった。

林分構成因子の現在値のみを用いた解析では、樹木占有度で林分を層化し、比較的高い占有度をもつ林分から導いた基準本数と、現実林の本数との比で表わした密度百分率を密度の尺度として、これを変量を含む重回帰分析により、密度の変化に対応する林分の成長過程を解明した。

成長量を用いる解析では、単位面積あたりの断面積を密度の尺度とし、これを変量を含む林分構成因子の推定式の微分形で示した成長量推定式を解く方法により、林分の成長と密度の関係を明らかにし、さらに両者について、各種の密度管理方式に対応する収穫予測の方法を示した。

林木の場合には、同一林分内における各林木の成長差は、受光量の相違によるものと想定し、ヒノキ苗による実験から相対的受光量が受光角で表示できることを明らかにし、林木の成長と受光角との関係解析から周囲木と関連させた林木の成長過程を解明し、シミュレーションによる成長解析の基礎を確立した。

目 次

ま え が き	3
I 林分を対象とした解析	4
1. 林分密度の尺度	4
2. 暫定的標準地による成長解析	6
1. 概 説	6
2. 資 料	7
3. 直径と関係させた単位面積あたりの立木本数による尺度	11
4. 林分高と関係させた単位面積あたりの立木本数による尺度	19
5. 林分密度の尺度の妥当性の検討	20
6. 断面積平均直径の推定式	22
7. 林分材積の推定方法	25
8. 林分密度の変化	28
9. 収穫予想表の作成方法	31
10. 各種の密度管理方式による収穫量の比較	34
3. 固定標準地による成長解析	35
1. 概 説	35

1973年12月17日 受理

(1) 経 営 部

2. 成長量推定式による解析	36
3. 林分断面積, 材積推定式から誘導した成長量推定式および収穫量予測式による解析	38
4. 収穫予測表の作成方法	41
II 周囲密度と林木の成長	45
1. 概 説	45
2. 現在までの周囲密度に関する研究	46
1. BITTERLICH の理論を応用した周囲密度の尺度	46
2. 単木の利用可能面積による周囲密度	51
3. 樹冠を用いた周囲密度	51
3. 林木の成長と陽光との関係	53
1. 概 説	53
2. 林木の受ける陽光量の算定方法	54
3. 受光角と日照時間, 日射量との関係	56
4. ヒノキ苗木による実験	60
1. 受光量管理装置	60
2. 実 験 方 法	63
3. 成長モデルの検討	64
4. 成長予測式の検討	66
5. 受光量の表示方法の検討	68
5. 受光角で表わした周囲密度による林木の成長の解析	72
1. 林木の受光空域の表示方法	72
2. 受光角の計算	73
3. 単一林分における樹高成長	73
4. 解析に用いた資料	76
5. 受光角と単木材積との関係解析	78
6. 受光角と胸高直径との関係解析	79
7. 過去の受光角による関係解析	80
8. 単木材積, 胸高直径の推定精度	81
9. 単木材積の推定方法	84
6. 受光角を用いた予測方法の応用	86
1. 単一林分における間伐効果の比較	86
2. 林分の成長過程の解析方法	88
要 約	90
文 献	94
Summary	96

ま え が き

林木の生育空間すなわち林分の密度の調整により、経営目的を達成するために必要な林木を生産することは、林業技術者にとって重要な問題である。わが国の先進林業地と呼ばれている地域では、その自然環境と社会経済の条件から、経験的に保育形式の一部として、林分密度の調整方法を発展させてきた。しかし、経済の高度成長と貿易の自由化にともなう、外材の輸入は増加の一途をたどる一方、国産材については、量のはかに質に対する要望が強まり、さらに科学技術の発達により、各種の代替物が開発され、市場に登板し急進している。

このような情勢のなかで、先進林業地における主要林産物のなかには、需要の低下するものもあらわれ、経営者としては従来の経営目標を変更し、保育形式の再編成を迫られている場合も起こっている。

幸いにも、林木の利用方法は融通性に富んでいるので、人為的な処理により、農作物のように作目を全面的に変更する必要はなく、特殊な場合を除いて、現在の林分を需要側の要望する製品の生産できる林分に、近づけることは可能であろう。

閉鎖を完了した林分、特に針葉樹人工林に対する処理としては、間伐による林分密度のコントロールと施肥による成長促進が、現在考えられる有力な手段である。

現在、林分収穫量予測の基準として用いられている収穫表や収穫予想表では、ただ一種類の密度管理方式による収穫量、成長量が予測されるにすぎず、林分密度の管理方式をいろいろ変えた場合の予測には利用できない。

わが国の林学では、収穫表を基準とした立木度が従来から林分密度の尺度として用いられており、間伐試験の結果も強、中、弱などという抽象的表現が用いられ、間伐率も現存量の百分率で示されているので、具体的な比較の尺度については、ほとんど研究されていなかった。最近、本数であらわした林分密度による密度管理についての生態学的研究が進み、各種の密度管理方式による収穫量や成長量の予測が行なわれるようになった。

これに対して、米国などでは古くから林分密度の具体的尺度について多くの研究が発表され、特に1950～1960年代にかけて、林分密度と林分の成長との関係について、重回帰式を主体とする数式による解析結果が多く公表されている。

しかし、これらの研究成果はいずれも履歴の異なる林分から得られる資料を、いわば統計的に処理して得られたもので、現実の林が予測どおりの成長過程をたどるか否かを実証するためには、固定試験地による長期にわたる観測結果が必要となる。さらに最近では、労働力の不足を補うため育林関係にも機械の導入が盛んに行なわれるようになり、従来の保育方式は機械の使用に適したように変えられつつある。

したがって、従来から密度管理に関する研究の主流となっていた試験地資料に基づく解析では、林業経営者の要望に対処できなくなってきた。

このため、1960年代になって、単木の生育空間と成長との関係解析についての研究が盛んに行なわれるようになり、電子計算機を利用したシミュレーションにより、仮想林分について多数の密度管理方式の比較を行ない、需要側の要望に沿った林木の生産ができる方式を探索し、保育形式ごとに短期間に収穫量の比較を行ない、収穫予想表を作成しようとする気運にある。

このような観点に立って、本研究では第I編において、最近発表された文献を中心として林分密度の尺

度、およびこれを用いて行なった林分成長の解析、収穫予測の方法などについて論じ、単純同齡林に適した林分密度の尺度を検討した。さらに、この尺度を変量に含む重回帰式を用いて林分の成長過程を、暫定標準地と定期成長量の測定されている固定標準地資料について、検討を行なった。

第Ⅱ編では、現在までに発表されている単木の生育空間の尺度と、成長との関係解析の結果を述べ、生育空間の尺度として新たに考案した受光角による解析結果を論じている。

稿を草するにあたり、本研究の端緒を示され、特に受光角による周囲密度の表示についてのご指導、ご助言をいただいた前林業試験場九州支場長、現佐賀大学経済学部教授 甲斐原一郎博士、研究を進めるにあたり、ご指導をいただいた九州大学農学部教授 木梨謙吉博士、経営部経営第2科長 西沢正久博士、ご後援を賜った九州大学農学部長 井上由扶博士、同助教授 青木尊重博士、同 関屋雄偉博士に心から感謝します。

さらにこの研究を進める上で、常にご助力いただいた九州支場育林部経営研究室 本田健二郎技官に厚く感謝の意を表します。

I 林分密度と成長の関係

1. 林分密度の尺度

林分密度または立木密度は、単位面積上にある立木の疎密の程度、すなわちその林地が林木によって利用される程度をあらわすものである。しかし、その内容は決して簡単なものではなく、これまでに林分密度に関する研究が数多く発表されているにもかかわらず、完全な尺度と考えられるものはいまだにない現状である。

従来発表され、あるいは使用されてきた林分密度の尺度は、絶対的な項で表わされるものと相対的な項で表わされるものとに分類される。前者は単位面積あたりの断面積、立木本数、材積などの林分の量的測定値で、これは、ある林地における樹木の集合度を示している。これに対して、後者は経営目的に対する与えられた林分の妥当性を説明するのに用いられ、基準に対する相対的数値で示され、他の林分と相互に比較できるものである。

米国では、前者には stand density、後者には stocking という術語を用いて区別している。

1971 年版の Forest Terminology では、stocking を over-stocking, full-stocking, irregular-stocking, effective-stocking のように最良の結果を得るために望ましい本数と比較した、現実林分の立木本数の幾分主観的な尺度であると定義している。

わが国で用いられてきた立木度は、基準材積（一般に収穫表に示されている材積）に対するある林分の単位面積あたり材積の比率を表わしている。

また、嶺²⁷⁾は、日本林学会が文部省の諮問によって学術用語の統一を審議した際、密度がどの要素で表わされるかを明らかにするため、次のような提案を行なった。

材積密度（従来の立木度）

断面積密度（断面積の比率による密度）

クローネ密度（従来のうっ閉度）

本数密度

つぎに、林分密度の尺度として望まれる条件は、明解で矛盾がなく、客観的でしかも適用の容易なものということである。さらに SPURR⁴³⁾ によれば、林分特性、林齢、地位に無関係でなければならない。

これまでに発表された林分密度の尺度の多くは、このような条件を念頭に置いて考案されていると考えることができ、実証されているものもある。

絶対的な項、あるいは相対的な項で表わした林分密度の尺度は、いずれも単位面積あたりの立木本数を重要な因子として含んでいる。しかし、立木本数だけを尺度として使用しても意味がなく、林分の平均直径、林分高、あるいは単位面積あたりの材積などと組み合わせて使用する必要がある。

ここでは、絶対的な項と相対的な項の区別を行わずに、林分密度という術語を使用することとし、BICKFORD⁹⁾ らの用いた 1 個以上の林分構成因子と組み合わせた、立木本数に基づく分類に準じて、これまでに発表されている林分密度の尺度を次のように分類し、重回帰式の形で成長量推定式あるいは収穫予測式を解析するため、要因として採用できるものについて、林分の成長に密接な関係のある密度の尺度を探究し、この尺度により林分の成長過程の解析を行なうこととした。

1. 平均直径に関係させた単位面積あたりの立木本数

REINEKE⁸⁶⁾ の林分密度指数 (stand density index, SDI)

坂口⁸⁸⁾ の本数密度比数 (SDR)

CHISMAN と SCHUMACHER⁶⁾ の樹木占有度 (tree-area ratio, TAR)

KRAJICEK³⁴⁾ らの樹冠競争係数 (crown competition factor, CCF)

STAHLIN⁴²⁾ の stocking 百分比

単位面積⁴⁹⁾あたりの胸高断面積

2. 林分高に関係させた単位面積あたりの立木本数

平均幹距比 (WILSON⁵⁹⁾ の式から誘導)

CZARNOWSKI⁷⁾ の crowding factor

RALSTON³⁷⁾ らの本数百分比

HUMMEL¹⁸⁾ の本数指数 (stock index)

3. 平均直径と林分高に関係させた単位面積あたりの立木本数

BRIEGLER²⁾ の樹冠投影面積および樹冠表面積

4. 単位面積あたりの材積と関係させた立木本数

安藤¹⁾ の収量比数

寺崎⁴⁹⁾ らの密度指数と生産指数

5. その他の尺度

COOPER⁸⁾ の単位面積あたりの胸高直径合計

STAGE⁴⁵⁾ の相対利用度 (stocking fraction)

GRUSCHOW¹⁶⁾ らの優勢木の樹冠長比

大友⁹⁸⁾ の林分生産係数

木梨¹⁹⁾²⁰⁾ の蓄積度

2. 暫定的標準地による成長解析

1. 概 説

これまでわが国で作成された収穫表や収穫予想表は、いずれも適正に閉鎖された林分で被害のこん跡がなく、かつ十分経験を積んだ林業技術者が、その地方の代表と判断した林分内に設けた暫定的な標準地の測定資料に基づいて、主として林齢との関係で林分構成因子の値を定め、さらに因子相互間の関係で修正した値を用いている。したがって、前述したような林分密度に対する考慮は直接的には払われておらず、これらの表の示す林分密度による森林施業が、はたしてどの程度有利なものであるか判断することは困難であり、またいろいろな密度で施業されている現実の林分に適用する場合、いろいろな修正方法が必要である。

収穫表の密度管理状態を、坂口⁸⁹⁾は、平均直径に対して本数密度比数 (SDR) をプロットした曲線を用いて比較検討したが、ここでは熊本営林局⁹⁰⁾が調製した「九州地方ひのき林林分収穫表」について、後述する樹木占有度 (TAR) を地位別林齢ごとに求め、地位別に林齢に対してプロットした Fig. 1 で密度の管理状態を調べてみた。

林齢に対する TAR の関係は、地位により若干その位置が異なるが、ほぼ同じ傾向を示し、林冠閉鎖後の 75~77% からしだいに低下し、60 年では 64~66% となっている。このような結果となった原因の一つとして、資料とした暫定的標準地が過去に受けた各種の施業 (植栽本数、除間伐の程度など) については、特に老齢林では記録がないため無視せざるを得ず、現在の幼齢林が林齢を重ねればかくなるであろうという想定のもとで、現存する林分のなかから標準地が選ばれているためと考えられる。

したがって、このような密度管理は、健全なヒノキ林分の平均的現況を示してはいるが、目的に適したものか否かを収穫表から判断することは不可能である。

また、只木、安藤の本数密度を用いた競争密度効果理論を適用した密度管理図による方法は、新植地の密度管理計画をたてる際には非常に便利な手段であるが、現実林の収穫量を予測する場合には、対象林分の測定値が管理図の等樹高曲線上にのらないことがしばしば起こり、予測精度について問題がある。

したがって、本研究ではモリシマアカシア林およびヒノキ林の暫定的標準地資料を用いて、林分密度を独立変量に組み込んだ多項式による収穫予測方法の検討を行った。

なお、一般に収穫表の調整などに用いられる暫定的標準地で得られる因子は、林齢、胸高直径、林分高、ha あたり立木本数、ha あたり断面積、材積であるので、このような標準地資料に適用できる密度の尺度は自ら制約を受ける。また絶対的な項であらわされる密度の尺度のなかで、実用されているのは、単位面積あたりの断面積のみであり、断面積を尺度として用いるにはその成長量を知る必要があるので、暫定的標準地の資料には適用できない。

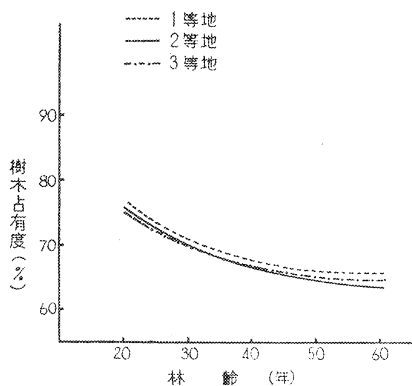


Fig. 1 収穫表の密度管理状態
Managed condition of stand density
in the yield table of Kyûshû district.

よって本章では、次の林分密度の尺度について検討することとした。

- 1) 直径に關係させた單位面積あたりの立木本数
- 2) 林分高に關係させた單位面積あたりの立木本数

2. 資 料

(1) モリシマアカシア林分の資料

本研究で用いた資料は、只木ら⁴⁸⁾が密度効果式による收穫予測のため福岡県鞍手地区および熊本県天

Table 1. 林齡に対する林分高, ha あたり断面積, 立木本数で分類した plot 数

Number of plot classified by height-age, basal area-age and number of stems-age

林齡—林分高 Height-age

Age (yrs.) \ H(m)	3.0~3.9	4.0~4.9	5.0~5.9	6.0~6.9	7.0~7.9	8.0~8.9	9.0~9.9	10.0~ 10.9	11.0~	Total
2	3	1								4
3				1	1					2
4				2	5	4				11
5				3	2	4	11	5	2	27
6					1	2	5	2		10
7						1	2	2	1	6
8										
9										
10									1	1
計 Total	3	1		6	9	11	18	9	4	61

林齡—ha あたり断面積 Basal area-age

Age (yrs.) \ G(m ²)	~5.0	5.1~10.0	10.1~15.0	15.1~20.0	20.1~25.0	25.1~30.0	30.1~	Total
2	4							4
3		1	1					2
4	1	1		5	2	2		11
5		5	6	8	6	2		27
6		1	2	2	4	1		10
7				3	2		1	6
8								
9								
10		1						
Total	5	9	9	18	14	5	1	61

Age (yrs.) \ n	~1,000	1,001 ~ 1,500	1,501 ~ 2,000	2,001 ~ 2,500	2,501 ~ 3,000	3,001 ~ 3,500	3,501 ~ 4,000	4,001~	Total
2		1	1	1	1				4
3						1	1		2
4	1		1	2		2	2	3	11
5	1		2	9	3	5	1	6	27
6		1	1	4	2	1		1	10
7			1	1	3		1		6
8									
9									
10	1								1
Total	3	2	6	17	9	9	5	10	61

注：只木らによる。 Note : TADAKI's data.

Table 2. 林齢に対する林分高, ha あたり断面積, 立木本数で分類した plot 数
Number of plot classified by height-age, basal area-age and number of stems-age

林齢—林分高 Height-age

Age (yrs.)	H(m)	3.0~3.9	4.0~4.9	5.0~5.9	6.0~6.9	7.0~7.9	8.0~8.9	9.0~9.9	10.0~ 10.9	11.0~	Total
2		1	1	1							3
3				1	1	3					5
4				1	1	1	2	2			7
5				1				1		1	3
6						1		2	2		5
7						1	1	2	1		5
8								1	2	1	4
9										4	4
10							1		1	1	3
Total		1	1	4	2	6	4	8	6	7	39

林齢—ha あたり断面積 Basal area-age

Age (yrs.)	G(m ²)	~5.0	5.1~10.0	10.1~15.0	15.1~20.0	20.1~25.0	25.1~30.0	30.1~	Total
2		1	2						3
3			1	4					5
4			4	2	1				7
5			1		2				3
6				1	3	1			5
7					4	1			5
8				1	1	2			4
9						2	1	1	4
10					1	1	1		3
Total		1	8	8	12	7	2	1	39

Age (yrs.)	n	~1,000	1,001 } 1,500	1,501 } 2,000	2,001 } 2,500	2,501 } 3,000	3,001 } 3,500	3,501 } 4,000	4,000~	Total
2								1	2	3
3							2	1	2	5
4				1	2	1	1	1	1	7
5					1	1		1		3
6						2			3	5
7						2	2		1	5
8					2	1	1			4
9					2	1	1			4
10					1		1	1		3
Total				1	8	8	8	5	9	39

注：瀬上による。 Note : SENOE's data.

草, 水俣地区で収集したものと, 瀬上³⁹⁾ が天草地方のせき悪地に植栽されたものを対象として作成した収穫表の標準地資料である。

林齢に対応する林分高, ha あたり断面積, 立木本数で分類した plot 数が Table 1, Table 2 に示してある。

なお, 只木らの資料は, 林分全体すなわち主副林木合計についての値のみであるが, 瀬上の資料には主副林木の区別がなされていた。

しかし、Table 2 では林分高は主林木、断面積、本数は主副林木合計の値を用いた。

(2) ヒノキ林分の資料

林業試験場九州支場で定期調査を行なっているヒノキ人工林収獲試験地の、各調査時における林分構成因子の測定値を独立な plot の値として使用した。

これらの試験地の林分高、材積は、5 年ごとの定期調査のたびに少数の標本木を選び、その胸高直径と樹高との關係から、free-hand または NÄSLUND 式を当てはめた直径—樹高曲線から求めているが、選ばれる標本木が、調査のたびに異なるため、試験地ごとの直径—樹高曲線群は、調和のとれた傾向を示さないものが多く、そのために林分高や材積成長量が、説明のできない異常な値となる場合がみられた。

CURTIS¹¹⁾ は Douglas fir の 2 次林について、各種の直径—樹高曲線式の当てはまりの比較を行なった際、林齢を变量に加えた直径—樹高曲線式を提案し、この方法により調査時ごとに作られる直径—樹高曲線が、調和のとれたものに修正できると述べている。

本研究では、これらの試験地で良好な適合を示している NÄSLUND 式に、变量として林齢を加えて、調査時ごとの曲線の修正を行なうこととした。

NÄSLUND 式は、次のように変形して、最小二乗法で係数を求めることができる。

$$h = 1.2 + (d/(b_0 + b_1 d))^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$d/\sqrt{h-1.2} = b_0 + b_1 d \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 h = 樹高、 d = 胸高直径

調和のとれた直径—樹高曲線群は、林齢の増加とともに曲線の位置は高くなり、曲率はゆるやかとなることが一般に認められているので、(2) 式の係数は林齢と次の關係があると仮定した。

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= b_0' + b_1' A \\ b_1 &= b_0'' + b_1'' A \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 A = 林齢

(3) 式の關係を (2) 式に代入した次式により、調和のとれた曲線群が得られ、調査時ごとの曲線を用いた場合の林分高、材積成長量の不合理性が除かれるか否かを多羅原、霧島、木田野、万膳 1 号の 4 試験地について調べた。

$$d/\sqrt{h-1.2} = b_0 + b_1 A + b_2 d + b_3 d A \dots\dots\dots (4)$$

調査時ごとに求めた NÄSLUND 式の係数を Table 3 に、(4) 式の係数を Table 4 に示す。

なお、(4) 式の林齢は簡略化のために、次のような値を用いた。

$$A = (\text{調査時林齢} - \text{第 1 回調査時林齢}) + 1 \dots\dots\dots (5)$$

調査時ごとの曲線と、林齢を加えた (4) 式で求めた曲線とを比較すると、Fig. 2 に示すように後者の曲線群は調和のとれたものとなり、また林分高の成長過程も Fig. 3 に示すように平滑化される。

さらに前者では、断面積成長量と材積成長量の間に不合理の生ずることがあるが (断面積成長量が低下するのに対して材積成長量が増加する。またはその逆)、後者ではこのような不合理性は除かれる。その例を Table 5 に示す。

したがって、試験地ごとに (4) 式で直径—樹高曲線を修正し、林分高、材積を算出することとした。

試験地ごとに求めた (4) 式の係数を Table 6 に、調査時ごとの林分構成因子の値を Table 7 に示す。

Table 3. 調査時ごとの NÄSLUND 式の係数など
Coefficient of the equation (2) and its standard deviation for each plots

試 験 地 Name of plot	林 齢 (年) Stand age(yrs.)	標 本 木 数 Number of sample trees	係 数 Coefficient		標 準 偏 差 Standard deviation
			b_0	b_1	
多 羅 原 Tarahara	49	129	1.2857	0.1955	0.2556
	54	123	1.3259	0.1971	0.2224
	60	71	1.6918	0.1758	0.3528
霧 島 Kirishima	43	20	1.2651	0.2158	0.1755
	48	41	1.2007	0.2107	0.2348
	53	424	1.1468	0.2109	0.2221
本 田 野 Hontano	45	202	1.2851	0.2328	0.2714
	59	138	2.0887	0.1946	0.3352
	55	635	1.6149	0.2152	0.2866
万 膳 1 号 Manzen No.1	43	91	0.9427	0.2302	0.1822
	49	203	0.7189	0.2447	0.0989
	54	743	0.8544	0.2215	0.1310

Table 4. 林齢を加えた NÄSLUND 式の係数など
Coefficient of the equation (4) and its standard deviation for each plots

試 験 地 Name of plot	係 数 Coefficient				標 準 偏 差 Standard deviation
	b_0	b_1	b_2	b_3	
多 羅 原 Tarahara	1.1806	0.0499	0.2018	-0.0024	0.2726
霧 島 Kirishima	1.3759	-0.0259	0.2099	0.0001	0.2162
本 田 野 Hontano	1.5281	0.0124	0.2215	-0.0008	0.2956
万 膳 1 号 Manzen No.1	0.6744	0.0172	0.2535	-0.0029	0.1468

Table 5. 調査時ごとおよび林齢を加えた直径—樹高曲線による
材積成長量の比較
Comparison of the volume increments estimated from height-diameter
and height-diameter-age equations

試 験 地 Name of plot	林 齢 (年) Stand age (yrs.)	断面積成長量 Basal area increment per ha. (m^2)	材 積 成 長 量 Volume increment per ha	
			調 査 時 ごと Equation (2) (m^3)	林 齢 を 加 え る Equation (4) (m^3)
多 羅 原 Tarahara	49~54	0.7916	5.088	7.748
	54~60	0.2206	7.664	4.746
霧 島 Kirishima	43~48	1.2751	11.277	12.949
	48~52	0.4613	6.800	7.843
本 田 野 Hontano	45~50	1.9477	17.358	15.045
	50~55	0.9398	6.201	7.306
万 膳 1 号 Manzen No.1	43~49	1.0053	6.372	12.857
	49~54	0.2081	10.880	6.870

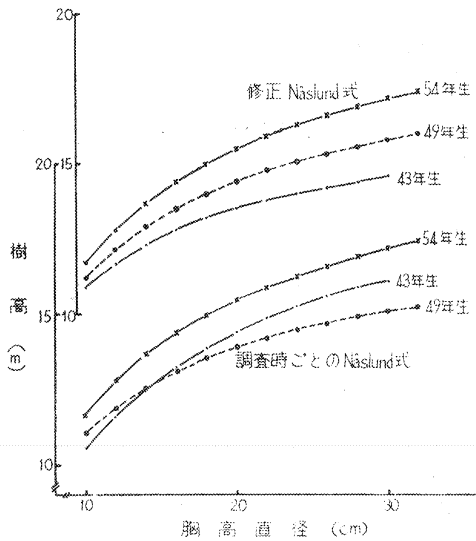


Fig. 2 調査時ごとおよび林齢を加えた直径—樹高曲線の比較
Comparison between height-diameter curves at each remeasurements and height-diameter-age curves.

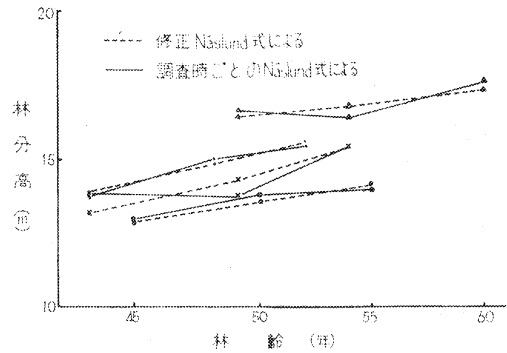


Fig. 3 調査時ごとおよび林齢を加えた直径—樹高曲線から算出した林分高の比較
Comparison between the stand height derived from height-diameter curves at each remeasurements and height-diameter-age curves.

Table 6. 試験地ごとの (4) 式の係数
Coefficient of the equation (4) for each sample plots

試 験 地 Name of plot	係 数 Coefficient				調 査 時 林 齢 (年) Age at remeasurement (yrs.)
	b_0	b_1	b_2	b_3	
越 差 Koshisashi	1.4038	-0.0393	0.2147	-0.0008	48, 53, 58
丸 山 Maruyama	1.1290	-0.0118	0.2112	0.0007	43, 48, 53
端 海 野 Tankaino	0.9122	-0.0114	0.2239	-0.0011	46, 51, 57
尾 鈴 Osuzu	1.2433	0.0050	0.2243	-0.0013	42, 47, 53
夏 木 Natsuki	0.8278	0.0096	0.2235	-0.0018	40, 45, 50
青 井 岳 Aoidake	1.2044	-0.0128	0.2086	-0.0003	42, 47, 52
万 膳 2 号 Manzen No. 2	0.6432	0.0096	0.2685	-0.0019	43, 49, 54
万 膳 3 号 Manzen No. 3	0.6949	0.0009	0.2708	-0.0019	43, 49, 54
杉 崎 Sugisaki	1.8037	-0.0376	0.1814	0.0009	48, 53, 58

3. 直径と関係させた単位面積あたりの立木本数による尺度

(1) 樹冠競争係数

KRAJICEK ら²⁴⁾ の提案した樹冠競争係数 (CCF) は、いわゆる fully stocked とは逆に、林木が正常な生育をするのに必要な最大の生育空間を基準としている。このような生育空間は、競争のない孤立木の樹冠の広がりによって表わすことができるので、熊本県の金峰山付近で、枝打ちをされた形跡がなく、枝下高が樹高の 1/10 以下で、比較的孤立状態で生育している胸高直径 8~44 cm のヒノキを 85 本選び、胸高直径に対する樹冠直径 (最大樹冠幅とこれに直角方向の樹冠幅との平均) の関係を次式で求めた。

$$d_c = 1.604 + 13.919 d \quad \dots \dots \dots (6)$$

Table 7. 収穫試験地の調査時ごとの林分構造
List of stand structure for each permanent sample plots

試 験 地 Name of plot	面 積 Area (ha)	林 齢 Age (yrs.)	平均直径 Av. dia. (cm)	林 分 高 Stand height (m)	本 数 No. of stems	断 面 積 Basal area per ha (m ²)	材 積 Volume per ha (m ³)
越 差 Koshisashi	0.23	48	22.0	14.2	1,201	47.39	344.7
		53	22.9	15.5	1,202	51.16	398.5
		58	23.9	17.2	1,165	54.21	471.5
丸 山 Maruyama	1.88	43	17.6	14.2	2,168	55.68	421.3
		48	18.5	14.7	2,098	59.63	458.0
		53	19.1	15.2	2,035	62.03	492.2
端 海 野 Tankaino	0.50	46	18.3	14.6	2,408	65.97	502.8
		51	19.5	15.6	2,306	71.22	570.3
		57	20.6	17.1	2,188	75.04	661.9
尾 鈴 Osuzu	0.49	42	17.1	12.4	1,337	32.53	213.3
		47	17.9	12.9	1,290	34.42	237.0
		53	19.5	14.0	1,237	38.96	286.6
		58	21.0	15.1	1,201	42.94	332.8
本 田 野 Hontano	1.02	45	22.1	12.9	1,109	44.20	291.3
		50	24.5	13.6	1,108	53.94	366.6
		55	25.8	14.0	1,083	58.64	403.1
夏 木 Natsuki	0.77	40	20.1	15.5	1,526	49.86	396.9
		45	21.9	16.6	1,491	57.46	480.4
		50	22.9	17.7	1,482	62.74	558.4
		55	23.7	18.9	1,471	66.91	638.2
霧 島 Kirishima	0.31	38	18.7	12.9	1,466	42.27	289.1
		43	19.6	13.9	1,466	46.21	335.2
		48	21.1	14.8	1,444	52.58	399.6
青 井 岳 Aoidake	0.63	37	19.3	14.1	1,639	50.86	379.5
		42	20.0	14.9	1,602	54.35	425.4
		47	21.5	15.7	1,574	60.14	489.9
		52	22.3	16.5	1,511	61.61	523.7
万 膳 1 号 Manzen No.1	1.02	38	17.9	12.2	2,146	55.22	348.9
		43	18.4	13.2	2,101	57.38	391.3
		49	19.6	14.3	2,042	63.42	468.5
		54	20.2	15.4	1,956	64.46	502.8
万 膳 2 号 Manzen No.2	0.25	38	18.2	11.5	1,661	43.94	263.2
		43	18.7	12.2	1,649	46.22	284.8
		49	20.0	12.9	1,645	52.59	341.9
		54	20.5	13.5	1,637	54.73	377.3
万 膳 3 号 Manzen No.3	0.25	38	16.1	10.7	2,578	53.95	299.4
		43	16.7	11.5	2,554	57.43	340.1
		49	17.4	12.3	2,522	61.95	398.4
		54	17.7	13.1	2,474	61.99	420.0
杉 崎 Sugisaki	0.53	48	23.2	16.0	1,085	47.51	389.7
		53	24.1	16.7	1,077	51.12	433.0
		58	25.2	17.5	1,041	53.75	466.5

注：数値は ha あたりである。

Note: Number of trees, basal area and volume are values per ha, respectively.

ここで, d_c = 樹冠直径 (m), d = d. b. h. (m)

この式の決定係数は 81%, 標準偏差率は 14.8% であった。

最大樹冠面積 (MCA) は, 次式から求められる。

Table 8. 試験地ごとに各種の尺度で表わした林分密度
Stand density expressed with various measure for each sample plots

試 験 地 Name of plot	林 齢 Stand age (yrs.)	ha あ たり 断 面 積 Basal area per ha (m ²)	樹冠競争係数 Crown competition factor (%)	樹木占有度 Tree-area ratio (%)	密 度 比 数 Stand density ratio (%)	密度百分比 Stand density % (%)
越 差 Koshisashi	48	47.3	208.4	77.9	58.4	56.0
	53	51.2	218.7	81.8	61.3	60.1
	58	54.2	225.1	84.4	63.1	64.5
丸 山 Maruyama	43	55.7	283.9	105.3	77.3	100.3
	48	59.6	292.5	108.7	80.1	100.0
	53	62.0	296.2	110.2	81.3	100.0
端 海 野 Tankaino	46	66.0	329.6	122.4	90.9	114.1
	51	71.2	340.4	126.7	94.6	116.0
	57	75.0	345.6	128.8	96.5	120.4
尾 鈴 Osuzu	42	32.5	169.4	62.8	46.0	55.5
	47	34.4	172.9	64.2	47.2	55.2
	53	39.0	184.2	68.6	50.8	56.6
	58	42.9	194.8	72.7	54.4	58.7
本 田 野 Hontano	45	44.2	193.0	72.1	53.9	47.5
	50	53.9	220.8	82.8	61.8	49.5
	55	58.6	232.2	87.3	64.9	49.5
夏 木 Natsuki	40	49.9	234.0	87.2	65.4	76.3
	45	57.5	254.6	95.1	71.6	79.7
	50	62.7	269.2	100.7	75.7	84.6
	55	66.9	280.3	105.0	78.8	90.2
霧 島 Kirishima	38	42.3	206.8	76.9	57.0	62.8
	43	46.2	218.8	81.5	60.6	66.6
	48	52.6	236.6	88.3	65.9	69.3
青 井 岳 Aoidake	37	50.9	241.6	89.9	66.5	75.4
	42	54.4	252.2	94.0	69.6	77.2
	47	60.1	265.6	99.2	73.7	79.7
	52	61.6	266.8	99.8	74.5	80.2
万 膳 1 号 Manzen No.1	38	55.2	283.2	105.0	78.1	88.1
	43	57.4	287.5	106.7	79.5	91.6
	49	63.4	302.9	112.7	84.4	95.1
	54	64.5	301.3	112.2	84.1	97.3
万 膳 2 号 Manzen No.2	38	43.9	223.5	82.9	62.0	65.4
	43	46.2	229.9	85.4	64.0	67.7
	49	52.6	249.2	92.8	69.9	70.4
	54	54.7	255.2	95.1	71.6	72.6
万 膳 3 号 Manzen No.3	38	53.9	300.6	111.1	81.6	96.7
	43	57.4	310.8	115.0	84.9	100.5
	49	61.9	323.6	120.0	88.9	104.2
	54	62.0	321.6	119.2	88.7	107.2
杉 崎 Sugisaki	48	47.5	201.2	75.3	56.3	55.9
	53	51.1	210.8	79.1	59.0	57.9
	58	53.7	216.0	81.1	60.5	58.7

$$MCA = \frac{\pi}{4}(dc)^2$$

$$= 2.010 + 34.890d + 151.376d^2 \dots\dots\dots (7)$$

このような MCA をもつ木で、林地が完全に被覆されている場合の樹冠面積合計は、つぎのようになる。

$$S_c = \sum_{i=1}^n (MCA) \\ = 2.010(n) + 34.890\left(\sum_{i=1}^n d\right) + 151.376\left(\sum_{i=1}^n d^2\right) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $n=1$ ha あたり本数

したがって、1 ha の林地面積に対する百分率で表わした樹冠面積合計、すなわち樹冠競争係数 (CCF) は、次式から求められる。

$$CCF = 0.0201(n) + 0.3489\left(\sum_{i=1}^n d\right) + 1.5138\left(\sum_{i=1}^n d^2\right) \dots\dots\dots (9)$$

ヒノキ収獲試験地の調査時ごとの CCF の値を Table 8 の 4 列目に示す。

(2) 樹木占有度

樹木占有度 (TAR) は、CHISMAN と SCHUMACHER⁹⁾ の提案した林分密度の尺度で、樹冠競争係数が孤立木を対象としたのと対照的に、fully stocked の林分を対象として、林木が正常な生育をするのに必要な最小の生育空間に対する現実林の生育空間の百分比である。

しかし、fully stocking の定義は抽象的であり、樹木占有度式から健全な生育をしている林分における単木あたりの最小の占有面積が導かれるので、逆に完全に林冠が閉鎖され、被害にかかったことがなく、健全な生育をしている林分の中で、単木あたりの平均生育空間ができるだけ小さい林分を、fully stocked 林分として扱うこととした。

1) モリシマアカシア林分

林分における単木あたりの生育空間、すなわち占有面積を直接測ることはできないので、Table 1 に示してある plot は林冠の閉鎖した健全な林分内に設けられていることから、この plot の資料を用いて樹木占有度式を求めた。

$$Y = 0.0522(n) - 0.9318\left(\sum_{i=1}^n d\right) + 7.0388\left(\sum_{i=1}^n d^2\right) \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 Y = 百分率で表わした樹木占有度

d = m 単位で表わした胸高直径

(10) 式は、このような林分の、平均的なものを基準とした樹木占有度を表わしていると考えることができる。

したがって、(10) 式で算出した plot ごとの樹木占有度を用いて、Table 9 に示すように 3 つの密度レベルに分類した。

各密度レベルに含まれる plot の値を用いて、樹木占有度式を求め、これから導いた同一直径に対応する占有面積は、Table 10 に示すように密度レベル I について得られるものが最小であった。

なお、密度レベルごとの樹木占有度式は、次のとおりである。

密度レベル I

$$Y = 0.0159(n) - 0.05650(\sum d) + 1.92597(\sum d^2) \dots\dots\dots (11)$$

密度レベル II

$$Y = 0.05843(n) - 1.04908(\sum d) + 8.02640(\sum d^2) \dots\dots\dots (12)$$

密度レベル III

Table 9. 樹木占有度で分類したプロット数
Number of plots classified by tree-area ratio

密度レベル Density level	樹木占有度の範囲 Range of tree-area ratio	プロット数 Number of plots
I	100 ~ 149 (%)	17
II	75 ~ 99	26
III	50 ~ 74	10

Table 10. 密度レベルごとの樹木占有度式から求めた占有面積
Allocated ground area for a tree estimated from tree-area ratio
equations for each density levels

平均直径 Average diameter (cm)	密度レベル Density level		
	I	II	III
6	1.95 (m ²)	2.44 (m ²)	3.34 (m ²)
10	2.96	3.38	4.11
14	4.59	6.89	8.74
18	6.83	12.98	17.24

$$Y = 0.09443(n) - 1.74108(\sum d) + 12.08334(\sum d^2) \dots\dots\dots (13)$$

さらに各密度レベルごとに、plot の ha あたり立木本数と林分高を前者を対数、後者を実数として片対数方眼紙にプロットすると、散らばりは大きいが直線的傾向が認められるので、密度レベルごとに次式をあてはめた。

$$\log n = b_0 + b_1 h \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 n = ha あたり本数、 h = 林分高

(14) 式の係数などが Table 11 に示してある。

密度レベル I ~ III に対する (14) 式の係数を比較すると、Table 12 に示すように傾斜係数 b_1 の間には差が認められないが、高さの係数 b_0 の間には差が認められる。したがって (14) 式の関係は、密度レベルごとに平行的に変化していると考えることができ、密度レベル I に属する plot は、同じ林分高の林分の中で最も多い立木本数をもっていると考えることができる。

これらのことから、密度レベル I の plot から求めた (11) 式による樹木占有度を、十分な密度の林分を基準としたもの、(10) 式による樹木占有度を、平均的な林分を基準としたものとした。

Table 11. 密度レベルごとの (14) 式の係数
Regression coefficient of the equation (14) for each density level

密度レベル Density level	係数 Coefficient		決定係数 Coef. of determination (%)
	b_0	b_1	
I	3.8858	-0.0359	32.5
II	3.6142	-0.0219	27.8
III	3.4480	-0.0170	8.0
全体 All	3.6466	-0.0228	9.3

Table 12. 密度レベルごとの (14) 式の比較
Covariance analysis of the equation (14) for each density level

要 因 Source	傾 斜 係 数 Slope	d. f.	Sum. of sq. of residuals	Mean squares	F
Level I	-0.0359	15	0.07701		
Level II	-0.0216	24	0.12316		
Level III	-0.0170	8	0.09956		
原因不明 Unknown		47	0.29973	0.00638	
Between slopes		2	0.00597	0.00299	1/F=2.134 39.936**
Common regression	-0.0235	49	0.30570	0.00624	
Between level		2	0.49840	0.24920	
Compound regression	-0.0228	51	0.80410		

2) ヒノキ林分

収穫表の調製に用いられる標準地は fully stocked の林分から選ばれていると考えられるが、「九州地方ひのき林分収穫表」の調製に用いられている標準地資料について、前項で求めた樹冠競争係数を算出したところ 100~330 の範囲にあり、いろいろな競争状態の林分が含まれていることがわかった。したがって、この資料に Table 7 に示している収穫試験地の資料を加え、(9) 式で算出した樹冠競争係数で、

Table 13. CCF で分類した密度レベルごとの樹木占有度式の係数
Coefficient of the TAR equation classified by CCF

密 度 レ ベ ル Density level	CCF の 範 囲 Range of CCF	プ ロ ッ ト 数 No. of plot	係 数 Coefficient			標 準 偏 差 Standard deviation
			b_0	b_1	b_2	
I	250 ~ 300	48	0.72	12.29	60.46	4.7
II	200 ~ 250	62	1.70	3.63	105.16	5.7
III	150 ~ 200	46	2.20	2.97	137.46	8.2
全 資 料	Total data	156	2.99	-19.84	188.21	15.5
収穫表資料	Yield table's data	95	1.70	-9.90	176.79	14.9

Table 14. 密度レベルごとの単木あたり占有面積
Average ground area allocated to a single tree in terms of stand
average diameter for each CCF classes

密度レベル Density level	I		II	III	IV
CCFの範囲 Range of CCF	250~300		200~250	150~200	100
平 均 直 径 Average diameter (cm)	占 有 面 積 Allocated area (m ²)	IVに対する% % to level IV (%)	占 有 面 積 Allocated area (m ²)		
10	2.55	36.4	3.16	3.87	7.01
14	3.63	36.8	4.27	5.31	9.86
18	4.89	37.1	5.76	7.19	13.20
22	6.35	37.3	7.59	9.51	17.01
26	8.00	37.5	9.75	12.26	21.32
30	9.86	37.8	12.25	15.46	26.10
34	11.89	37.9	15.09	19.10	31.37
38	14.12	38.0	18.27	23.18	37.13
40	15.31	38.1	19.98	25.38	40.19

Table 13 に示すように 3 つの密度レベルに分類し、各レベルごとに樹木占有度式を求めた。その係数は Table 13 の 4 列～6 列に示してある。

各レベルごとの樹木占有度式から求めた、同一の平均直径に対する単木あたりの占有面積は、Table 14 に示しているようにレベル I (CCF 250～300) に属する林分が最小となり、最大の占有面積をもつ CCF 100 の林分に対して、ほぼ一定の占有面積比を示している。

したがって、レベル I の plot について求めた樹木占有度式から算出される樹木占有度を、fully stocked の林分を基準としたものとして用いることとした。

$$Y = 0.72(n) + 12.29(\sum d) + 60.46(\sum d^3) \dots\dots\dots (15)$$

ここで、Y = 百分率であらわした樹木占有度、

d = m 単位の胸高直径、 n = ha あたり立木本数

ヒノキ収穫試験地の調査時ごとの樹木占有度を、Table 8 の 5 列目に示す。

(3) 本数密度比数

坂口⁴⁸⁾ が林分密度の尺度として用いている本数密度比数 (SDR) は、わが国の主要造林樹種について求めた最大本数密度線から求めた、同一直径に対する最大本数と現実林の本数との比である。かれの示しているヒノキに対する最大本数密度式は次のとおりである。

$$\log n_{\max} = -1.3563 \log \bar{d} + 5.1365 \dots\dots\dots (16)$$

ここで、 $n_{\max}$ = 最大本数、 $\bar{d}$ = 平均直径

収穫試験地の調査時ごとの本数密度比数を Table 8 の 6 列目に示す。

(4) 基準断面積と現実断面積との比

CHISMAN と SCHUMACHER の提案した樹木占有度を、直接林分密度の尺度として利用した例は少ないが、南部産マツの収穫表に示されている平均直径と断面積の係数が、テーダマツおよび Slash pine について求めた、樹木占有度式から導いた直径と断面積の係数とよい一致を示していることから、STAHELIN⁴²⁾ はこの基準断面積と現実林の断面積との百分率を、林分密度の尺度として用いることを提案し、GRUSCHOW ら¹⁶⁾、NELSON ら⁵²⁾、WENGER ら⁵²⁾ が、材積成長量推定式の変量として採用している。

STAHELIN の導いた平均直径から fully stocked 林分の断面積を求める式は、近似式であるので、本研究ではヒノキ林分について求めた (15) 式から導いた単木の占有面積を直接用いて、ha あたりの基準断面積を求めた。

$$y = 0.72 + 12.29 \bar{d} + 60.46 \bar{d}^3 \dots\dots\dots (17)$$

$$G_{\text{TAR}} = \pi \bar{d}^2 \times 10^4 / 4 y \dots\dots\dots (18)$$

ここで、 y = 単木の占有面積、 $\bar{d}$ = 平均直径、 G_{TAR} = 樹木占有度から求めた基準断面積

林分の平均直径と ha あたり断面積との係数を示す基準としては、このほかに樹冠競争係数、本数密度比数が考えられる。

これらの尺度の基準密度 (100%) のときの断面積 (基準断面積) は、次式で求められる。

樹冠競争係数：

$$G_{\text{CCF}} = \pi \bar{d}^2 \times 10^4 / 4 \text{ MCA} \dots\dots\dots (19)$$

ここで、 $\text{MCA} = 2.010 + 34.890 \bar{d} + 151.376 \bar{d}^2$

G_{CCF} = 樹冠競争係数から求めた基準断面積

Table 15. 断面積比と TRA, CCF および SDR との関係
Relationship between the basal area ratio and TAR,
CCF and SDR

密 度 の 尺 度 Measure of density	係 数 Coefficient		決 定 係 数 Coef. of determination (%)	標 準 偏 差 S. D (%)
	b_0	b_1		
樹木占有度 Tree-area ratio	0.445	1.016	99.9	0.66
樹冠競争係数 Crown competition factor	1.442	1.016	99.8	0.75
林分密度比数 Stand density ratio	1.021	1.022	99.6	1.18

Table 16. TAR, CCF, SDR の相互関係を示す一次式の係数
Linear correlation between tree-area ratio, crown competition factor
and stand density ratio

密 度 の 尺 度 Measure of density	係 数 Coefficient		決 定 係 数 Coef. of determination (%)	標 準 偏 差 S. D (%)
	b_0	b_1		
TAR CCF Between TAR and CCF	-2.252	2.709	99.0	0.38
TAR SDR Between TAR and SDR	0.203	0.743	99.8	0.74
CCF SDR Between CCF and SDR	0.881	0.274	99.7	1.00

本数密度比数：

$$G_{SDR} = \pi d^2 n_{max} / 4$$

$$= 1.0316 d^{0.6437} \dots \dots \dots (20)$$

ここで、 G_{SDR} = 本数密度比数から求めた基準断面積

(18), (19), (20) 式で算出される基準断面積と現実断面積との比に対する、そのもととなった各密度の尺度との関係を、収穫試験地の資料について、次に示す一次回帰式で調べた。

$$Y = b_0 + b_1 X \dots \dots \dots (21)$$

ここで、 Y = 基準断面積と現実断面積の比、

$$X = \text{TAR, CCF および SDR}$$

3種類の密度の尺度について求めた(21)式の係数などを Table 15 に示すが、断面積比とそのもととなった密度の尺度との関係は、(21)式の形でほとんど誤差なしに表現できる。

したがって、断面積比を密度の尺度とした場合の成長量、収穫量の推定精度は、基準断面積を求めるために用いた密度の尺度によるものと同じ結果となるので、ここではこれ以上の検討は行なわなかった。

(5) 樹木占有度、樹冠競争係数、本数密度比数の関係

直径階ごとに求めた樹木占有度式による占有面積と、樹冠競争係数の誘導に用いた MCA との間には、Table 14 に示すようにほぼ一定の関係が認められ、NELSON⁸²⁾らは定期材積成長量を推定する場合、林分密度の尺度として STAHELIN の stocking %, acre あたり断面積、REINEKE の林分密度指数、期首材積のいずれれを用いても推定精度は変わらないと述べている。

本研究では、Table 8 に示してある試験地の調査時ごとの、3種類の林分密度の尺度間の関係を、(21)式と同じ一次回帰式で検討した結果、Table 16 に示すように、前項の場合と同じく3種類の尺度は一次回帰式で、ほとんど誤差なしに関係付けることができるので、ここで検討した林分密度の範囲では、成長

量または收穫量に対する影響は、いずれか1つの林分密度の尺度について調べれば、他の2つの尺度についてはほぼ同じ結果が得られると考えた。

4. 林分高と關係させた單位面積あたりの立木本数による尺度

林分高は、人工林を対象とした場合には、密度の影響を受けることが少なく、地位、林齡の要素を兼ね備えているという長所があるため、林分高と關係させた單位面積あたりの立木本数による林分密度の尺度については、前節と同様に多くの提案がなされている。これらの尺度の中で、直接成長と關係付けて用いている CZARNOWSKI⁷⁾ の crowding factor, RALSTON⁸⁾ らの尺度は、正常または fully stocked の林分を基準(100%)として作られている。

本報告では、前節で述べた密度レベル I の林分から導いた、樹木占有度が 100 に近い林分を基準となる fully stocked 林分とし、これらの林分の林分高と立木本数の關係を次式で表わし、同一林分高における基準本数と、現実林の本数の比を密度の尺度として用いることとし、これを密度百分率と呼ぶこととした。

$$\log n = b_0 + b_1 h \quad \cdots (22)$$

ここで、 n = fully stocked 林分の ha あたり立木本数 (基準本数), h = 林分高

(22) 式の係数を求めるために用いる plot の立木本数としては、樹木占有度が 100 に近い plot の現実の立木本数を用いることにした。モリシマアカシア林分については、密度レベル I に属する plot の樹木占有度は、すべて 100 に近い値となっているので、これらの plot の立木本数と林分高の關係に (22) 式をあてはめた結果、次式を得た。

$$\log n = 3.8858 - 0.0359 h \quad \cdots (23)$$

この式の決定係数は、32.5% であった。このように決定係数が低くなった原因として、これらの plot の樹木占有度が、正確に 100 でないためと考えられるので、(11) 式から単木の平均占有度を表わす (24) 式を求め、各 plot の林木の平均直径に対応する占有面積を算出し、この値で單位面積を除して本数を求めた。

$$y = 1.5954 - 0.0565 d + 0.0193 d^2 \quad \cdots (24)$$

$$n_t = 10^4 / y \quad \cdots (25)$$

ここで、 y = m² 単位の占有面積, d = cm 単位の直径, n_t = 本数

この本数と林分高の關係を、密度レベル I および全プロットについて求め、次のような式を得た。

密度レベル I の plot :

$$\log n = 3.9391 - 0.0381 h \quad \cdots (26)$$

全 plot :

$$\log n = 3.9259 - 0.0374 h \quad \cdots (27)$$

両式の決定係数は、それぞれ 56.7%, 61.5% であったが、算出される基準本数にはほとんど差はなかった。したがって基準本数としては、(23), (27) 式で算出されるそれぞれの値を用いることとした。

ヒノキ林分についても同様な方法を採用し、(15) 式で算出した樹木占有度を 用いて基準となる林分を選び出すこととした。

Table 8 に示してある收穫試験地の調査時ごとの樹木占有度は、62~129 の範囲にあるので、その値が 80~120 および 100 以上の調査時ごとの測定値を、基準となる十分な密度を持つ林分として、林分高に對

する基準本数を示す (14) 式の係数を求めた。

樹木占有度 80~120 の測定値を使用した場合：

$$\log n = 3.6909 - 0.0322 h \quad \dots\dots\dots (28)$$

樹木占有度 100 以上の測定値を使用した場合：

$$\log n = 3.7039 - 0.0260 h \quad \dots\dots\dots (29)$$

(23) および (27)~(29) 式で算出される同一林分高における基準本数と、現実林の立木本数との比すなわち密度百分率を、それぞれ密度の尺度として、次節でその妥当性を検討することとした。

5. 林分密度の尺度の妥当性の検討

収穫表の調製などに用いられる暫定的標準地で、一般に測定される林分構成因子の中で、林分密度の影響を最も受けるのは林分の平均直径である。平均直径を林分高に対してプロットすると、ある幅を持った直線的傾向が認められ、この幅は密度の相違によるものと考えることができる。したがって、断面積平均直径と林分高の間に次のような直線的関係を想定し、係数 b_0 は密度によって変わると考えることができる。

$$\bar{d}_g = b_0 + b_1 h$$

$$b_0 = b_0' + b_1' D$$

この関係をまとめると次式のような関係が得られる。

$$\bar{d}_g = b_0 + b_1 h + b_2 D \quad \dots\dots\dots (30)$$

ここで、 $\bar{d}_g$ = 断面積平均直径、 h = 林分高、 D = 林分密度

(30) 式で平均直径の代わりに断面積平均直径を用いているのは、林分材積の計算に便利なためである。本研究では林分密度の尺度の妥当性を、主として (30) 式による断面積平均直径の推定精度で判断することとした。なお、この式は RALSTON が収穫予想表の作成に用いたものと同じ形である。

まず、モリシマアカシア林分について、(10) 式で算出される平均的密度の林分を基準とした樹木占有度と、(11) 式で算出した十分な密度の林分を基準としたものを密度の尺度として、(30) 式の係数を求めた結果、Table 17 に示すように平均直径の推定精度は変わらず、決定係数は 66% であった。

またヒノキ林分についても、(9) 式で算出した樹冠競争係数および (15) 式で算出した樹木占有度を密度の尺度として、(30) 式を当てはめた結果、第 3 節で述べたように両尺度による推定精度はほぼ等しく、決定係数は、それぞれ 64.0%、64.5% であった。

これらのことから樹木占有度は、うっ閉が完全な林分の場合には、かならずしも占有面積の最も小さい、いわゆる fully stocked の林分を基準とした樹木占有度を用いる必要はなく、最大の占有面積をもつ林分を基準とした、樹冠競争係数を密度の尺度として用いても、断面積平均直径に及ぼす影響は変わらないと考えられる。

つぎに、林分高に関係させた単位面積あたりの立木本数による尺度として、モリシマアカシアについては、密度レベル I に属するプロットから求めた (23) 式、および理論的本数から求めた (27) 式で算出される基準本数と、現実林の本数の比で表わした密度百分比を採り上げることとした。さらに基準とする林分の検討のため、前に仮定した fully stocked 林分 (密度レベル I) よりいくぶん低い密度水準にあると考えられる、樹木占有度 80~120 の plot の立木本数と林分高の関係を示す次式から求めた基準本数による密度百分比についても検討を加えた。

Table 17. 密度の尺度ごとの $\bar{d}_g = b_0 + b_1h + b_2D$ の係数と推定精度
Regression coefficients and precisions of the equation (30) for each measures of density

樹種 Species	密度の尺度 Measure of density	係数 Coefficient			決定係数 Coeff. of determination (%)
		b_0	b_1	$b_2 \times 10^2$	
モリシマアカシア <i>Acacia mollissima</i>	(10) 式による TAR TAR derived from (10)	1.5712	0.8942	-0.6322	66.5
	(11) 式による TAR TAR derived from (11)	1.4100	0.9034	-0.6365	66.3
ヒノキ Hinoki	樹木占有度 Tree-area ratio	-1.3602	-0.05461	0.9649	64.0
	樹冠競争係数 Crown competition factor	-1.2061	-0.02048	0.9566	64.5

Table 18. 各種の密度百分比による $\bar{d}_g = b_0 + b_1h + b_2D$ の係数と推定精度
Regression coefficients and precisions of the equation (30) for each density per cent

樹種 Species	基準本数 Standard number of trees	係数 Coefficient			決定係数 Coeff. of determination (%)
		b_0	b_1	$b_2 \times 10^2$	
モリシマアカシア <i>A. mollissima</i>	(23) 式による Derived from eq. (23)	2.0893	0.9413	-1.9472	73.0
	(27) 式による Derived from eq. (27)	2.0774	0.9427	-2.1138	73.0
	(31) 式による Derived from eq. (31)	2.2421	0.9213	-1.5745	73.0
ヒノキ Hinoki	(28) 式による Derived from eq. (28)	9.4848	1.1432	-5.3469	89.8
	(29) 式による Derived from eq. (29)	10.5690	1.0637	-6.6726	88.9

$$\log n = 3.7339 - 0.0284 h \quad \dots\dots\dots (31)$$

これらの密度の尺度を (30) 式に入れて推定した断面積平均直径の推定精度は、Table 18 に示すように、いずれの尺度についても等しく、決定係数で 73% となった。

ヒノキについては、樹木占有度 80~120 および 100 以上の調査時ごとの測定値を十分な密度の林分として求めた (28), (29) 式から算出した基準本数による密度百分比を用いて、(30) 式による断面積平均直径の推定精度を比較した結果、Table 18 に示すように決定係数は 89.8%, 88.9% となり、推定直径にはほとんど差は見られなかった。

いずれの樹種についても、樹木占有度の場合と同じく、基準として選んだ林分に関係なく、断面積平均直径の推定精度はほぼ等しく、さらに樹木占有度を直接用いた場合より推定精度は向上した。

したがって林分密度の尺度としては、樹木占有度などの林分平均直径に関係させた立木本数による尺度を直接用いるより、これにより対象林分を密度レベルに分類し、比較的に高い密度レベルの林分における林分高と、立木本数の関係を基準とした密度百分比が適当であると考えた。

本報告では、後述する正常密度への接近の仮定との関係から、樹木占有度が 100 以上の林分を十分な密度の林分とし、これらの林分から導いた (23) および (29) 式で算出される立木本数を基準とすることとした。

しかし、これらの検討はいずれも現存している林分に関するものであり、理論的にどのような林分を基準に選ぶべきかは、理想的な密度の尺度の検討とともに、単木の成長と周囲密度の関係を解明することによって、明らかにされるであろう。

6. 断面積平均直径の推定式

前節で密度の尺度の妥当性を検討するため用いた (30) 式は、断面積平均直径の推定式としても使用できるが、この式が他の資料に対しても良好な適合を示すかどうか調べるため、瀬上の「天草地方せき悪林地モリシマアカシヤ林分収穫表」の標準地資料、および九州支場経営研究室が昭和 35 年から昭和 42 年まで継続的に調査を行ってきた、鞍手地区のモリシマアカシヤ固定標準地資料について、(23) 式で算出される基準本数による密度百分比を用いて、(30) 式をあてはめた。その結果、Table 19 に示すように、Table 18 に示す只木らの資料によるものより良い適合が得られた。

断面積平均直径の推定式として、(30) 式のほかに M. S. CZARNOWSKI⁷⁾ の提案している次式の推定精度を、只木らの資料で調べた。

$$\bar{d}_g = \alpha(h-1.2) \frac{2}{z+1} \dots \dots \dots (32)$$

ここで、 z = 正常林分と現実林分の本数比 (こみ合い係数, crowding factor),

α = 定数

Table 19. 天草および鞍手地区の資料に対する (30) 式の係数と推定精度
Regression coefficients and precisions of the equation (30) for data of Amakusa and Kurate district

資 料 Data source	係 数 Coefficient			決定係数 Coeff. of determination (%)	標準偏差 Standard deviation (cm)
	b_0	b_1	$b_2 \times 10^2$		
天 草 主 林 木 Amakusa dominant	1.3970	1.0311	-2.4091	88.6	0.98
天 草 全 林 木 Amakusa all trees	0.5904	1.0954	-1.4946	87.0	0.99
鞍 手 試 験 地 Kurate plot	-1.1593	1.4080	-5.1392	92.4	0.44

Table 20. 密度の尺度ごとの (33) 式の係数と推定精度
Regression coefficients and precisions of the equation (33) for each measures of density

基 準 本 数 Standard number of trees	係 数 Coefficient		決定係数 Coeff. of determination (%)	標準偏差 Standard deviation (cm)
	b_0	b_1		
(23) 式による Derived from eq. (23)	2.4149	1.2635	64.7	1.24
(27) 式による Derived from eq. (27)	2.2461	1.2560	65.9	1.21

本報告では、 z の代わりに (23) 式で算出される基準本数による密度百分比を用い、(32) 式を次のように変形して使用した。

$$\bar{d}_g = b_0 + b_1 h (2/z + 1) \dots\dots\dots (33)$$

なお参考のため、十分な密度の林分の理論的本数による (27) 式で算出した、基準本数によるものについても推定精度を求め、その結果を Table 20 に示す。(33) 式による決定係数はそれぞれ 64.7%, 65.9% となり、(30) 式の決定係数 73.0% より推定精度は低くなった。

これらの結果から、断面積平均直径の推定式として (30) 式を採用することとした。

つぎに、密度管理のために間伐を行なう場合、同じ式で間伐前後の断面積平均直径の推定が可能であるか否かを検討するため、天草地方収穫表標準地の主林木および全林木について求めた次式の係数を比較した。

$$\text{主林木: } \bar{d}_g = 1.3970 + 1.0311 h - 2.4091 D \dots\dots\dots (34)$$

$$\text{全林木: } \bar{d}_g = 0.5904 + 1.0954 h - 1.4946 D \dots\dots\dots (35)$$

Table 21 に示すように、係数間には差は認められず、共通の式で断面積平均直径の推定できることが明らかとなった。

さらに只木らの資料と瀬上の資料をこみにして資料数を増し、モリシマアカシアの主要産地を対象とした収穫予測の可能性を検討するため、前節で求めた只木らの資料による次式と前掲の (34), (35) 式とを比較した。

$$\bar{d}_g = 2.0893 + 0.9413 h - 1.9472 D \dots\dots\dots (36)$$

Table 22, 23 に示すように、只木らの資料による (36) 式と (34), (35) 式の間には差は認められなかったが、只木らの資料と主副林木合計をこみにした場合の方が、主林木とこみにした時より推定精度がいくぶん良いので、前者について求めた (37) 式で、モリシマアカシアの主産地の断面積平均直径を推定することとした。

Table 21. 主林木と全林木に対する (30) 式の比較
Comparison between the equation (30) for dominant and all trees

要 因 Factor	自 由 度 <i>d. f.</i>	残 差 平 方 和 S. S. of residuals	平 均 平 方 <i>M. S.</i>	<i>F</i>
係 数 間 Between slopes	2	0.4987	0.2494	$1/F = 3.40$ 2.34
定 数 間 Between levels	1	1.9471	1.9471	
原因不明 Unknown	72	61.1081	0.8487	

Table 22. 只木らの資料と主材木に対する (30) 式の比較
Comparison between the equation (30) for
TADAKI's data and dominant trees

要 因 Factor	自 由 度 <i>d. f.</i>	残 差 平 方 和 S. S. of residuals	平 均 平 方 <i>M. S.</i>	<i>F</i>
係 数 間 Between slopes	2	1.1343	0.5672	$1/F = 1.935$ 1.005
定 数 間 Between levels	1	1.0917	1.0917	
原因不明 Unknown	94	103.1885	1.0978	

Table 23. 只木らの資料と全林木に対する (30) 式の比較
Comparison between the equation (30) for TADAKI's data
and all trees

要 因 Factor	自 由 度 d. f.	残 差 平 方 和 S. S. of residuals	平 均 平 方 M. S.	F
係 数 間 Between slopes	2	2.0114	1.0057	$1/F = 1.104$
定 数 間 Between levels	1	0.3021	0.3021	$1/F = 3.375$
原因不明 Unknown	94	95.8862	1.0201	

Table 24. (37) 式における林分高と密度百分比の貢献度
Degree of contribution of stand height and density
in the equation (37)

要 因 Factor	自 由 度 d. f.	平 均 平 方 M. S.	F
林 分 高 による 貢 献 Contribution by stand height	1	363.6621	359.24**
密度百分比による貢 献 Contribution density %	1	23.1868	22.91*
原 因 不 明 Unknown	97	1.0123	

Table 25. 資料別の (30) 式を用いる場合の許容誤差
Minimum allowable error of estimate in the equation (30)
for each data source

資 料 Data source	許 容 誤 差 Allowable error (cm)	資 料 Data source	許 容 誤 差 Allowable error (cm)
只木ら TADAKI <i>et al.</i>	1.83	全林木 All trees	1.36
主林木 Dominant	1.54	共 通 Compound	1.74

$$\bar{d}_g = 1.6834 + 0.9932 h - 1.9431 D \dots \dots \dots (37)$$

なお、 $\bar{d}_g$ の推定に及ぼす林分高と密度百分率の影響は、Table 24 に示すように、いずれもきわめて有意であった。

これまで述べた推定精度は、決定係数、標準偏差あるいは標準偏差率で比較しているが、これのみでは推定式が目的とする正確さを満足しているかどうかを判断する基準とはならない。

この問題を解決するため F. FREESH⁽¹⁹⁾ は、仮定分散として許容誤差を用いて、次式で求められる χ^2 の値が自由度 n の χ^2 表の 5% 値より小であれば、この推定式は満足のいくものと結論できると述べている。

$$\chi^2 = (1.96) \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 / E^2 \dots \dots \dots (38)$$

ここで、 $\hat{y}_i$ = 推定値、 y_i = 実測値、 E = 許容誤差

(38) 式を次のように変形して、危険率 5% で、 χ^2 の値が有意とならないためには、どの程度の誤差まで認める必要があるかを調べた。

$$E^2 = (1.96)^2 \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 / \chi_0^2 \dots \dots \dots (39)$$

ここで、 χ_0^2 = 自由度 n の χ^2 表の 5% 値

資料別に求めた (30) 式で推定する場合の許容誤差を Table 25 に示す。

モリシマアカシアの資料を込みにして求めた (37) 式で推定する場合には、1.74 cm の誤差を認める必要のあることがわかった。

7. 林分材積の推定方法

(1) 断面積平均直径と林分形状高の推定式による林分材積の推定

単位面積あたりの林分材積は、単位面積あたりの断面積と林分形状高の積として表わすことができる。

$$V = GhF \quad \dots\dots\dots (40)$$

ここで、 $V = ha$ あたりの材積、 $G = ha$ あたりの断面積、

$hF =$ 林分形状高

単位面積あたりの断面積は前節で述べた、断面積平均直径の推定値と密度百分率と基準本数の積から求められる単位面積あたりの立木本数から計算できる。

$$G = \frac{\pi}{4} (\bar{d}_g)^2 \cdot n_0 \quad \dots\dots\dots (41)$$

ここで、 $\bar{d}_g$ = 断面積平均直径の推定値、 $n_0 = n \cdot D$

林分形状高を推定するには、断面積平均直径の推定に用いた (30) 式と同じ形の式を用いることとした。

$$hF = (V/G) = b_0 + b_1 h + b_2 D \quad \dots\dots\dots (42)$$

ここで、 $h =$ 林分高、 $D =$ 林分密度

第5節で林分密度の尺度として、モリシマアカシア林分については (23) 式、ヒノキ林分については (29) 式で算出される基準本数による密度百分率を用いることとしたが、参考のため Table 1 の資料を用いて (11) 式で求められる樹木占有度、および理論的本数を用いた (27) 式で算出される基準本数による密度百分率について、(42) 式による林分形状高の推定精度を比較した結果、Table 26 に示すように、直径の場合と同じ結論が得られた。

天草地方モリシマアカシア林の収穫表調製に用いられた、標準地の主林木と主副林木合計 (Table 2)、および鞍手地区の固定試験地の測定値ならびにヒノキ収穫試験地の調査時ごとの測定値 (Table 7) に対し、それぞれ (42) 式をあてはめた結果、Table 27 に示すようによく適合することがわかった。

林分形状高に及ぼす林分高と林分密度の影響を調べたところ、只木らの資料を除いて、林分密度は有意な貢献をしていないことが明らかとなったので、林分形状高の推定は次式で行なうこととした。

Table 26. 密度の尺度別の (42) 式の係数、推定精度
Regression coefficient and precision of the equation (42)
for each measure of density

密度の尺度 Measure of density	係数 Coefficient			決定係数 Coeff. of determination (%)	標準偏差 Standard deviation
	b_0	b_1	$b_2 \times 10^2$		
(11)式による樹木占有度 Tree-area ratio derived from eq. (11)	0.1260	0.4597	0.6694	63.7	0.700
(23)式による密度百分比 Density per cent derived from eq. (23)	0.2251	0.4471	0.8049	80.6	0.688
(27)式による密度百分比 Density per cent derived from eq. (27)	0.2292	0.4466	0.8752	80.6	0.688

Table 27. 資料別の (42) 式の係数, 推定精度
Regression coefficient and precision of the equation (42) for
each data sources

資 料 Data source	係 数 Coefficient			決 定 係 数 Coeff. of determination (%)	標 準 偏 差 Standard deviation
	b_0	b_1	$b_2 \times 10^2$		
主 林 木 Dominant	0.4793	0.4838	0.0676	99.1	0.115
全 林 木 All trees	0.2650	0.5384	0.2004	96.1	0.217
鞍 手 試 験 地 Kurate plot	0.3596	0.5021	-0.0588	98.2	0.064
ヒノキ収穫試験地 Hinoki permanent plots	0.3625	0.4776	0.1702	98.2	—

Table 28. 資料別の (43) 式の係数, 推定精度
Regression coefficient and precision of the equation (43) for
each data source

資 料 Data source	係 数 Coefficient		決 定 係 数 Coeff. of determination (%)	標 準 偏 差 Standard deviation
	b_0	b_1		
主 林 木 Dominant	0.5392	0.4818	99.1	0.113
全 林 木 All trees	0.4564	0.5346	96.0	0.217
鞍 手 試 験 地 Kurate plot	0.3020	0.5041	98.2	0.064
ヒノキ収穫試験地 Hinoki permanent plots	0.4768	0.4813	98.0	—

$$hF = b_0 + b_1 h \dots \dots \dots (43)$$

これらの資料別の (43) 式の係数および推定精度を Table 28 に示す。

(30) および (43) 式で推定した断面積平均直径および林分形状高を用いて, (40) 式で算出した林分材積の推定精度を後述する別の林分材積の推定方法と比較する関係上, ヒノキ収穫試験地の資料について調べた。

ヒノキ林に対する林分密度の尺度は, 前述した (29) 式で算出される同一林分高における基準本数と, 現実本数の比で表わした密度百分率を用いることとした。

$$\log n = 3.7039 - 0.0260 h \dots \dots \dots (29)$$

断面積平均直径, 林分形状高はそれぞれ次式で推定した。

$$\bar{d}_g = 11.90 + 0.9696 h - 0.06605 D \dots \dots \dots (44)$$

$$hF = 0.4768 + 0.4813 h \dots \dots \dots (45)$$

断面積平均直径の推定式の妥当性を判断するため, 決定係数, 標準偏差などのほかに, (39) 式で算出される許容誤差も使用すべきことを述べたが, 林分材積推定方法の比較の場合には許容誤差率で行なうこととした。F. FREESE¹⁹⁾ の提案している方法に, あらかじめ定めた誤差率に対して, 次式で算出される χ^2 の値が危険率 5% で有意ならなかった場合, この推定方法は妥当なものと判断するものである。

$$\chi^2 = (196)^2 \sum_{i=1}^n [(\hat{y} - y)/y]^2 / P^2 \dots \dots \dots (46)$$

ここで, $\hat{y}$ = 推定値, y = 実測値, P = 想定すべき許容誤差率

本報告では断面積平均直径の場合と同様に, (46) 式を次のように変形して求めた許容すべき誤差率を用いることとした。

$$P^2 = (196)^2 \sum_{i=1}^n [(y_i - \bar{y})/y_i]^2 / \chi^2 \dots\dots\dots (47)$$

ここで、 χ^2 = 自由度 n の χ^2 の値

収穫試験地の測定値をヒノキ林分の代表と仮定すれば、この方法を適用する場合には 16.1% の誤差率を許す必要のあることがわかった。

この方法の安定性を見るため、試験地と無関係に調査の行なわれた収穫表調製に用いられた標準地のなかで、林齢 20~60 年の資料について、(15) 式で算出した樹木占有度が 85~115% のものについて林分高に対する基準本数の関係を求め、この本数による密度百分比を密度の尺度として使用した。

$$\log n = 3.7729 - 0.0358 h \dots\dots\dots (48)$$

林齢 20~60 年の標準地について、断面積平均直径、林分形状高の推定式を求めた。

$$\bar{d}_0 = 10.15 + 1.0613 h - 0.06296 D \dots\dots\dots (49)$$

$$hF = 1.611 - 0.4252 h \dots\dots\dots (50)$$

(49), (50) 式による推定値を用いて、収穫試験地の林分材積を推定する場合には、17.7% 以上の誤差率を認める必要のあることがわかった。

(2) 競争密度効果式による林分材積の推定

安藤¹⁾ は、ヒノキ林の収穫表の標準地資料を用いて、収量密度効果式の係数 A , B を林分高の関数として (52) 式で表わしている。

$$1/V = A + B/n \dots\dots\dots (51)$$

ここで、 $V = ha$ あたりの材積、 n = 立木本数

$$\begin{aligned} \log A &= -1.0056 - 1.4288 \log h \\ \log B &= 3.0780 - 2.6017 \log h \end{aligned} \dots\dots\dots (52)$$

収穫試験地の調査時ごとの林分高に対応する係数を (52) 式から求め、これを (51) 式に入れて林分材積を推定した。

この推定方法で試験地の林分材積を推定する場合には、28% の誤差率を許容しなければならない。同じ標準地資料を用いた前項の断面積平均直径、林分形状高の推定式による方法のほうが良好な結果をえることができることがわかった。

(3) 樹冠競争係数と林分高を用いた林分材積式による推定

収穫試験地の調査時ごとの測定値について、(9) 式を用いて樹冠競争係数を求め、全測定値を 50% 間隔の 3 クラスに分類し、クラスごとに ha あたり断面積、材積と林分高の関係を次式で求めた。

$$G = b_0 e^{b_1 h} \dots\dots\dots (53)$$

$$V = b_0 + b_1 h \dots\dots\dots (54)$$

ここで、 $G = ha$ あたり断面積、 $V = ha$ あたり材積、

e = 自然対数の底

樹冠競争係数のクラスごとに求めた (53), (54) 式の係数を Table 29 に示す。

両式についてクラスごとの係数を比較したところ、傾斜係数 (b_1) には差は認められなかったが、高さの係数 (b_0) の間には差があり、樹冠競争係数の増加とともにその絶対値が人となる傾向がみられるので、次式で ha あたり断面積、材積を推定することとした。

$$G = b_0 e^{b_1 h + b_2 (CCF)} \dots\dots\dots (55)$$

Table 29. CCF のクラス別に求めた (53) (54) 式の係数
Regression coefficient of the equation (53) and (54) for
each CCF classes

CCF クラス CCF class (%)	断 面 積 Basal area per ha.		材 積 Stand volume per ha.	
	b_0	b_1	b_0	b_1
150 ~ 200	1.3265	0.1596	-7.9451	2.6927
250 ~ 250	1.4151	0.1696	-8.9189	3.1085
250 ~ 300	1.4590	1.1851	-9.5528	3.5690

$$V = b_0 + b_1 h + b_2 (CCF) \dots\dots\dots (56)$$

ここで、CCF = 樹冠競争係数

ヒノキの試験地資料に、これらの式をあてはめて次式を得た。

$$\log G = 1.1462 + 0.01545 h + 0.001412 (CCF) \dots\dots\dots (57)$$

$$V = -406.80 + 39.069 h + 0.9331 (CCF) \dots\dots\dots (58)$$

これらの式の決定係数はそれぞれ 90.3%, 87.0% であり、林分高、樹冠競争係数はいずれも有意な貢献をしていることがわかった。

この方法で林分材積を推定する場合、16% 以上の誤差率を認める必要がある。

樹冠競争係数と樹木占有度および林分密度比数との間には完全な直線的関係が存在するので、これらの尺度のいずれを用いても同様な結果がえられるであろう。また、断面積平均直径の推定式の検討結果から、密度百分率を密度の尺度として用いれば、林分材積の推定精度はいくぶん良くなると想像される。

8. 林分密度の変化

どのような尺度で表わした林分密度でも林分の生育にしたがって変化し、過小または過大密度の林分はしだいに安定した正常な密度に接近していくことが一般に認められている。

RALSTON ら³⁷⁾ は、林分密度の変化を林分高の変化と関連させて次のように説明している。閉鎖時における密度が過小である林分を例にとると、密度は林分の生育が進むにつれ、すなわち林分高が増加するにしたがってしだいに増加し、正常な密度に接近する。したがって、かれらは、対数で表わした期首、期末の密度と正常密度との差は、それぞれの林分高に逆比例すると仮定し、密度の対数を縦軸に、林分高の逆数を横軸にとって正常密度への接近状態を Fig. 4 に示すグラフで表わした。直線 PP' が密度の変化を示し、その勾配は、

$$h_0(2 - \log D_0)$$

となる。したがって、期末密度は次式で求められると述べている。

$$\log D_1 = 2 + (\log D_0 - 2)(h_0/h_1) \dots\dots\dots (59)$$

ここで、 D_0 , D_1 = 期首および期末の密度、

h_0 , h_1 = 期首および期末の林分高

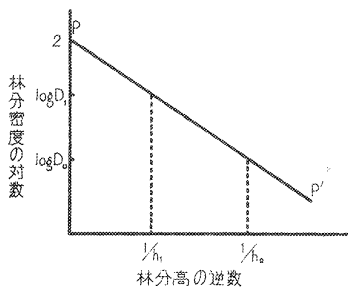


Fig. 4 林分密度の変化状態
Change of stand density.

木梨¹⁹⁾²⁰⁾ は SCHUMACHER の提案にしたがって、この関係は、林齢に逆比例すると仮定し、次式で林分密度の変化を示している。

Table 30. 林分密度の変化についての仮定の検討 (ヒノキ収穫試験地)
Examination of hypothesis on change in stand density (Hinoki permanent plots)

試 験 地 Name of plot	期首密度 Initial density	期 末 実 測 密 度 Final observed		(59)式による推定 Estimation from eq. (59)		(60)式による推定 Estimation from eq. (60)	
		5 年 後 After 5 yrs. (%)	10 年 後 After 10 yrs. (%)	5 年 後 After 5 yrs. (%)	10 年 後 After 10 yrs. (%)	5 年 後 After 5 yrs. (%)	10 年 後 After 10 yrs. (%)
越 差 Koshisashi	55.99	60.12	64.51	58.78	61.95	59.14	61.87
	60.12	64.51		63.22		62.82	
丸 山 Maruyama	100.31	100.02	100.00	100.30	100.29	100.27	100.25
	100.02	100.00		100.01		100.02	
端 海 野 Tankaino	114.12	116.03	120.43	113.16	111.94	112.65	111.25
	116.03	120.43		114.53		114.23	
尾 鈴 Osuzu	55.54	55.22	56.56	56.82	59.40	59.05	62.75
	55.22	56.56	58.65	57.86	61.70	59.13	61.80
	56.56	58.65		58.96		59.41	
本 田 野 Hontano	47.47	49.46	49.51	49.33	50.33	51.14	
	49.46	49.51		50.46		52.73	
夏 木 Natsuki	76.32	79.65	84.56	77.70	78.93	78.65	80.56
	79.65	84.56	90.18	80.78	81.89	81.48	83.01
	84.56	90.18		85.47		85.86	
霧 島 Kirishima	62.75	66.63	69.26	64.89	66.62	66.24	69.15
	66.63	69.26		68.30		69.51	
	69.26						
杉 崎 Sugisaki	55.92	57.88	58.69	57.30	58.75	59.07	61.81
	57.88	58.69		59.35		60.67	
青 井 岳 Aoidake	75.38	77.23	79.67	76.53	77.58	77.96	80.05
	77.23	79.67	80.24	78.25	79.19	79.38	81.16
	79.67	80.24		80.55		81.43	
万 膳 1 号 Manzen No.1	88.09	91.56	95.05	88.94	89.75	89.40	90.63
	91.56	95.05	97.25	92.18	90.44	92.55	93.22
	95.05	97.25		95.40		95.50	
万 膳 2 号 Manzen No.2	65.38	67.69	70.42	66.99	68.46	68.69	71.92
	67.69	70.42	72.64	69.14	69.62	71.00	73.29
	70.42	72.64		71.53		72.74	
万 膳 3 号 Manzen No.3	96.74	100.54	104.15	96.96	97.16	97.11	97.46
	100.54	104.15	107.18	100.50	100.48	100.47	100.43
	104.15	107.18		103.89		103.76	

$$\log D_1 = 2 + (\log D_0 - 2)(A_0/A_1) \dots\dots\dots (60)$$

ここで、 A_0 , A_1 = 期首および期末の林齢

このような密度の変化についての妥当性を検討するためには、長期間にわたり継続調査の行なわれた固定試験地の資料が必要であるが、ヒノキ収穫試験地は10~15年間の記録しかないので、ここでは5年後および10年後の林分密度の変化を、密度の尺度として密度百分率を用いて検討した結果をTable 30に示す。密度百分率が100%を越えて増加している端海野、万膳3号を除いて、(59), (60)式による予測値は、実測値とかなりよい一致を示している。さらにこの方法で、将来の林分材積を推定する場合の精度を調べるため、両式で予測した、5年後および10年後の密度百分率を用いて、(44), (45)式で算出した断面積平均直径、林分形状高による林分材積を、実測した密度百分率を用いて求めた林分材積と比較した

Table 31. 実測および推定密度百分比で求めた林分材積の推定精度
 Precisions of stand volume derived from observed and estimated density per cent

推 定 精 度 Precisions	標 準 偏 差 Standard deviation		許 容 誤 差 Allowable error	
予 測 期 間 Predictive period (yrs.)	実 測 Observed (m ³)	推 定 Estimated (m ³)	実 測 Observed (%)	推 定 Estimated (%)
5	33.08	34.11	15.3	15.6
10	32.28	34.78	12.9	13.0

Table 32. 林分密度の変化についての仮定の検討 (モリシマアカシア)
 Examination of hypothesis on change in the stand density

試 験 地 Location	試 験 区 Plot	期 首 密 度 Initial density (%)	期 末 密 度 Final density		
			実 測 Observation (%)	(59) 式 Eq. (59) (%)	(60) 式 Eq. (60) (%)
鞍 手 Kurate	2	75.9	84.1	79.0	81.3
	3	69.6	77.5	73.5	76.0
	4	68.9	77.3	73.0	75.6
	5	66.2	74.9	71.2	73.4
水 俣 Minamata	A-I	43.2	45.0	50.0	51.1
	A-II	48.6	48.9	52.9	56.2
	B-I	80.1	84.8	83.0	83.8
	B-II	85.6	91.1	87.2	88.3

ところ、実測林分材積に対する推定精度は Table 31 に示すように、ほとんど差はない。したがって、密度の変化は (59), (60) 式のいずれを用いても、少なくとも 5~10 年の予測期間については満足のいく結果を与える。

モリシマアカシア林については、九州地方で植栽されはじめてから日も浅く、成林後収穫時まで調査を継続した試験資料がなく、鞍手地区に設けた試験地は設定後 2 年目の冬に雪害を受け、かなりの雪損木を生じ林冠が著しく疎開してしまったので、設定時 (4 年生) と 1 回目の調査時における測定資料および、水俣営林署管内に設定した合短試験地の 4 年生と 5 年生の資料を用いて、(59) および (60) 式の妥当性を検討した。Table 32 に示すように、推定値と実測値の一致性はヒノキ林の場合と同程度であるので、林分材積の推定精度も変わらないと判断した。

なお端海野、万膳 3 号の両試験地の密度の推移が、(59), (60) 式で表わされる正常密度への接近の仮設に適合しなかった理由として、基準本数を定める (27) 式の誘導にあたって、現実林のなかで占有面積が比較的小さい林分を対象とし、その平均的關係を基準としたためと考えられ、基準本数の決め方についてはさらに検討する必要がある。

また、これまで述べてきた断面積平均直径と林分高の推定式を用いて、5~10 年後の林分材積を推定する方法によれば、たとえばヒノキに対しては 15% 程度の誤差を許す必要のあることがわかった。このように誤差がかなり大きくなったのは、資料に用いた試験地のうち、尾鈴と本田野の両試験地の断面積平均直径の測定値と推定値の差が、すべての調査時について同じ方向の大きな偏りを示しているためである。その原因として、特に尾鈴試験地は地位が低いにもかかわらず、成立本数が少なく、林冠が極度に疎開し

ているためと考えられ、現実林にこの方法を適用する場合には、うっ閉度状態を表わす尺度を別に考慮する必要がある。

この面試験地の測定値を除くと、林分材積を推定する場合の許容誤差は15.5%から8.4%に減らすことができた。

9. 収穫予想表の作成方法

収穫予想表は、経営目的を達成するのに必要な密度管理方式ごとに作られるべきものであるが、ここでは(23)式で算出される基準本数(密度100%)で管理した場合と、漸上の調製した「天草地方せき悪林地モリシマアカシア林分収穫表」に示されている本数密度で管理した場合について、予想表を作成することとした。

林分高の成長過程を示す地位指数曲線は、前記収穫表の林齢ごとの林分高の地位間差の平均を標準偏差の代わりに用い、中等地の林齢—林分高曲線を基準線、10年を基準齢として標準的な方法で地位指数曲

Table 33. 基準本数で管理した場合の収穫予想
Prediction of yields controlled with standard number of tree

地位指数 Site index	林 齢 (年) Age (yrs.)	残 存 本 Surviving trees				
		平均直径 Av. stand diameter (cm)	林 分 高 Stand height (m)	立 木 本 数 Number of stems (本)	断 面 積 Basal area per ha. (m ²)	材 積 Volume per ha. (m ³)
10	4	6.5	6.2	4,481	13.66	50.3
	5	7.2	6.9	4,250	15.76	63.0
	6	7.8	7.5	4,034	17.77	76.4
	7	8.4	8.1	3,833	19.75	90.8
	8	9.0	8.7	3,654	21.62	105.4
	9	9.5	9.2	3,500	23.27	119.3
	10	10.0	9.7	3,364	24.71	132.4
	11	10.4	10.1	3,260	25.86	143.3
12	12	10.8	10.4	3,159	26.99	154.5
	4	7.8	7.5	4,038	17.74	76.2
	5	8.6	8.3	3,770	20.40	95.7
	6	9.3	9.0	3,555	22.67	114.1
	7	10.1	9.7	3,350	24.86	133.8
	8	10.8	10.4	3,156	27.02	154.8
	9	11.4	11.0	3,001	28.73	173.0
	10	12.0	11.7	2,852	30.46	192.5
14	11	12.5	12.2	2,731	31.82	209.1
	12	13.0	12.7	2,616	33.09	255.7
	4	9.0	8.7	3,641	21.75	106.4
	5	10.1	9.7	3,347	24.89	134.0
	6	10.9	10.5	3,130	27.31	157.7
	7	11.7	11.3	2,930	29.54	182.0
	8	12.5	12.2	2,725	31.80	209.1
	9	13.2	12.9	2,573	33.58	232.3
14	10	14.0	13.7	2,417	35.37	257.6
	11	14.7	14.3	2,288	36.75	279.4
	12	15.3	15.0	2,167	38.10	301.7

注：これらの表では平均直径として断面積平均直径を示す。

Note: These table shows the diameter of average basal area tree for the average stand diameter

Table 34. 収穫表の本数密度で
Prediction of yields controlled with number

地 位 指 数 Site index	林 齢 Age (yrs.)	林分高 Stand height (m)	主 林 木 Dominant			
			平均直径 Av. dia. (cm)	本 数 (本) Number of stems	密度百分比 Density per cent (%)	断 面 積 Basal area per ha. (m ²)
10	4	6.5	6.6	3,625	80.9	12.40
	5	7.2	7.4	3,124	73.5	13.40
	6	7.8	8.1	2,771	68.7	14.28
	7	8.4	8.8	2,522	65.8	15.23
	8	9.0	9.4	2,326	63.7	16.11
	9	9.5	9.9	2,180	62.3	16.88
	10	10.0	10.4	2,044	60.8	17.46
	11	10.4	10.8	1,942	59.6	17.92
12	12	10.8	11.2	1,852	58.6	18.34
	4	7.8	8.1	2,730	64.6	14.10
	5	8.6	9.0	2,400	63.7	15.30
	6	9.3	9.8	2,160	60.8	16.19
	7	10.1	10.5	1,985	59.3	17.22
	8	10.8	11.2	1,845	58.5	18.31
	9	11.4	11.9	1,738	57.9	19.20
	10	12.0	12.5	1,645	57.7	20.12
14	11	12.5	13.0	1,565	57.3	20.77
	12	13.0	13.5	1,505	57.5	21.61
	4	9.0	9.6	1,985	54.5	14.37
	5	10.1	10.7	1,770	52.9	15.77
	6	10.9	11.5	1,620	51.8	16.74
	7	11.7	12.3	1,500	51.2	17.77
	8	12.5	13.1	1,405	51.6	19.02
	9	13.2	13.8	1,336	51.9	20.00
	10	14.0	14.6	1,277	52.8	21.26
	11	14.7	15.2	1,224	53.5	22.21
	12	15.3	15.8	1,194	55.1	23.50

注：直径は断面積平均直径を示す。Note: This table shows the diameter of average basal area tree for the

線を作成した。

予想表は収穫表の地位上，中，下に相当する地位指数 10, 12, 14 について作成した。予想表の作成に用いた予測式は，前節までの結論にしたがって次式を採用した。

(1) 基準本数：

$$\log n = 3.8858 - 0.0359 h \quad (23)$$

(2) 断面積平均直径の予測式

$$\bar{d}_g = 1.6834 + 0.9932 h - 1.9431 D \quad (37)$$

(3) 林分形状高の予測式

$$hF = 0.5392 + 0.4818 h \quad (61)$$

(4) 正常密度への接近

$$\log D_1 = 2 + (\log D_0 - 2)(A_0/A_1) \quad (60)$$

予想表の作成は，次の順序で行なった。

管理した場合の収穫予想

of trees in the yield table of Amakusa

材積 Volume per ha. (m³)	全 林 木 All trees				材積 Volume per ha. (m³)
	平均直径 Av. dia. (cm)	本数(本) Number of stems	密度百分比 Density per cent (%)	断面積 Basal area per ha. (m²)	
45.7	6.2	4,547	101.5	13.73	50.6
53.6	7.2	3,625	85.3	14.60	58.4
61.4	7.9	3,124	77.4	15.43	66.3
70.0	8.6	2,771	72.3	16.25	74.7
78.5	9.3	2,522	69.0	17.06	83.2
86.5	9.9	2,326	66.5	17.72	90.9
93.6	10.4	2,180	64.8	18.38	98.5
99.3	10.8	2,044	62.7	18.62	103.2
105.0	11.2	1,942	61.5	19.06	109.1
60.5	7.8	3,305	81.9	15.92	68.3
71.8	8.8	2,730	72.4	16.76	78.6
81.5	9.6	2,400	67.5	17.52	88.2
92.7	10.4	2,160	64.5	18.39	98.9
104.9	11.2	1,985	62.9	19.42	111.2
115.6	11.8	1,845	61.5	20.14	121.3
127.2	12.4	1,738	60.9	21.06	133.1
136.5	13.0	1,645	60.2	21.67	142.4
147.4	13.5	1,565	59.8	22.30	152.1
70.3	9.4	2,344	64.4	16.30	79.8
84.9	10.5	1,985	59.3	17.25	92.9
96.7	11.4	1,770	56.6	18.00	104.0
109.5	12.2	1,620	55.3	18.94	116.7
125.1	13.1	1,500	55.1	20.09	132.1
138.6	13.8	1,405	54.6	20.92	144.8
154.9	14.5	1,336	55.3	22.09	160.6
168.9	15.2	1,277	55.8	23.05	175.2
186.1	15.8	1,224	56.5	24.00	190.1

average stand diameter.

(1) あらかじめ定めた密度百分比を, 地位曲線から求めた林齢ごとの林分高を (23) 式に代入して算出した基準本数に乗じて, 立木本数を求める。または, 定められた本数を基準本数で除して, 密度百分比を求める。

(2) 地位曲線から求めた林齢ごとの林分高と密度百分比を用いて, (37), (61) 式で断面積平均直径, 林分形状高を求める。

(3) 立木本数と断面積平均直径から, ha あたり断面積を計算する。

$$G = \frac{\pi}{4} (\bar{d}_g)^2 \cdot n_0 = \frac{\pi}{4} (\bar{d}_g)^2 \cdot n \cdot D \dots \dots \dots (41)$$

ここで, $\bar{d}_g$ = m 単位の直径, n = 基準本数

(4) ha あたり断面積に林分形状高に乗じて, ha あたり材積を計算する。

(5) 収穫表の管理方式では, 毎年間伐を行なうので枯損はなく, 現在の主林木本数が次の年の全林木の本数であるとして, (1)~(4) の順序で主副林木合計の材積を求め, 同じ林齢の主林木との材積差を

間伐収穫とした。

この2つの管理方式による収穫予想表を、Table 33, 34 に示す。

10. 各種の密度管理方式による収穫量の比較

前節で述べた収穫予想表作成の手順は、いろいろな密度管理方式を適用した場合の収穫量の予測に利用できる。

ここでは前節に示した2とおりの管理方式のほかに、密度百分率60%で管理し毎年間伐を行なう場合と、80%に達したとき60%になるように間伐を行なう場合について、地位指数12の仮想林分について予想表を作成した。

前者の管理では、収穫表の場合と同じく毎年間伐が行なわれるので、現在の残存本数を次年の全林木の本数とした。後者の管理では、間伐が行なわれるまで数年間を経過するので、密度の変化は(60)式で求めることとした。なお、(60)式から算出した密度に基準本数を乗じて求められる本数が、前年の本数を越えるときは、前年の本数を現在の本数として、基準本数に対する百分率で現在の密度を求めた。

前者の管理方式では全林木の密度は、Table 35 に示すように林齢の増加にともなうて、65.0～62.7% としだいに低くなっているが、(60) 式から求めた密度は平均して 64.3% となる。しかし、この 2 とおりの密度百分率を用いて、(37) 式で算出した断面積平均直径の差は 0.20～0.35 mm で無視できる。したがって、(60) 式で林分密度の変化を表わしてもよいと考えた。この 2 とおりの管理方式による収獲予想表を Table 35, 36 に示す。

前節および本節で収穫予想を行なった4種類の密度管理方式による収穫量を、地位指数12、伐期12年、4年から間伐収穫があるとして求めた結果をTable 37に示す。なお、参考として収穫表の値も記載してある。

基準密度の決め方およびつう閉度による密度の補正など、若干問題は残っているが、(23)式から算出される基準本数による密度の尺度を用いて(37)式、(61)式および(60)式から、経営目的を達成するのに必要と思われる密度管理方式による収穫量の予測が可能であり、密度管理を主体とする各種施業方法の

Table 35. 残存密度が60%になるように毎年間伐を行なう場合の収穫予想
Prediction of yields controlled with survived stand density 60%
at every year

[illegible]

Table 36. 密度百分率が80%に達したとき残存密度が60%になるように間伐する場合の収穫予想

Prediction of yields with schedule that will be thinned to survived density 60% at density 80%

林 齢 Age (yrs.)	密度百分比 Density per cent (%)	平均直径 Av. dia. (cm)	本 数 No. of stems (本)	材 積 Volume per ha. (m ³)	収 穫 量 Yields (m ³)
2	60				
4	77.5	7.9	3,129	66.2	
5	81.5	8.6	3,072	83.5	
間伐 Thinning	60.0	9.0	2,262	67.7	15.8
6	63.6	9.6	2,262	82.2	
7	67.5	10.3	2,262	99.3	
8	71.7	10.9	2,262	120.3	
9	75.3	11.4	2,260	137.9	
10	77.5	11.9	2,210	154.8	
11	79.3	12.3	2,166	169.2	
12	82.7	12.7	2,163	187.0	187.0
				Total	202.8

Table 37. 各種の密度管理方式による予想収穫量の比較
Comparison between prediction of yields by various density control methods

管 理 方 式 Control methods	主伐収穫 Final yield (m ³)	間伐収穫 Thinning yield (m ³)	総 収 穫 Total yield (m ³)
基準本数（密度百分比＝100%） Standard number of stems	225.7	—	225.7
収 穫 表 の 本 数 No. of stems in yield table	152.1	51.3	203.4
60%で 毎 年 間 伐 Thinning to 60% at every years	158.2	36.4	194.6
80%に達したとき60%に間伐 Thinning to 60% at arrived 80%	187.0	15.8	202.8
収 穫 表 Yield table	162.9	8.7	171.6

比較ができる。

4. 固定標準地による成長解析

1. 概 説

前章で述べた暫定的標準地による収穫予測は、ある時点における林分構成因子の推定値をつないで林分の成長過程を示す方法で、資料として用いる標準地は、各時点において、ある林分が、ある成長期間後にはこのような林分になるであろうという想定に基づいて選ばれている。したがって、収穫予測をより正確に行なうには、長期間にわたって継続調査を行なった固定標準地の成長過程に基づくことが理想的な方法である。しかし、前述したヒノキ収穫試験地は、3～4回（15～20年）継続調査されたに過ぎず、この期間の成長過程について時系列分析的な解析を行なうには、資料が不十分であると考え、また収穫予想表を作

成する場合、長期間にわたる継続調査資料に基づく方法は、現段階では現実的でないと判断し、短期間の継続調査で求められる成長量を用いて、収穫予測を行なう方法について検討することとした。

資料としては Table 7 に示している、収穫試験地の連続した 2 つの調査時ごとの測定値を、1 つの固定標準地の継続調査における測定値として扱うこととした。なおこの場合、資料数の関係から試験地ごとの内部相関は無視することとした。

2. 成長量推定式による解析

林分材積の連年成長量は、最初は林齢とともに急速に増加するが、その後加速度はしだいにゆるやかとなり、ある林齢で最大に達し、その後は林齢の増加とともに減少する。この変化の状態は、地位、林分密度で変わってくる。したがって、最近発表されている成長量推定式の多くは、林齢のほかに地位、林分密度およびこれらの交互作用項を含んだ多項式を基礎式として、回帰分析によって有意でない項を削除して推定式を定めている。

本報告では、資料として利用できる試験地の資料数が、新たに成長量推定式を開発するには不十分であり、すでに発表されている推定式は、ほとんどあらゆる 3 要因の組み合わせを含んでいるので、その中で推定精度の良好であった 3 種の推定式を選び、各種の林分密度の尺度を変量として用い、成長量推定式の妥当性を検討することとした。

成長量推定式はまず基礎式について解き、川端²²⁾ のプログラムにより有意な項だけの推定式を求めた。

検討を行なった成長量推定式は、次のとおりである。

(1) GRUSCHOW と EVANS¹⁶⁾ が Slash pine に適用したもの

$$I_0 = b_0 + b_1(A) + b_2(S) + b_3(D) + b_4(D^2) + b_5(AS) + b_6(AD) \\ + b_7(AD^2) + b_8(SD) + b_9(SD^2) \dots\dots\dots (62)$$

(2) DAHMS¹²⁾ が Lodgepole pine に適用したもの

$$I_0 = b_0 + b_1(A) + b_2(A^2) + b_3(A^3) + b_4(S) + b_5(S^2) + b_6(D) \\ + b_7(AS) + b_8(AD) + b_9(SD) \dots\dots\dots (63)$$

(3) NELSON ら³²⁾ がテーダマツに適用したもの

$$I_0 = b_0 + b_1(A^{-1}) + b_2(S) + b_3(D) + b_4(D^2) + b_5(SA^{-1}) \\ + b_6(DA^{-1}) + b_7(D^2A^{-1}) + b_8(SD) + b_9(SD^2) \dots\dots\dots (64)$$

ここで、3 つの要因、すなわち林齢、地位、林分密度および成長量は、原論文に用いられているものと関係なく、次のように定めた。

I_0 = 5 年間の定期材積成長量

S = 後述する地位曲線から求めた 50 年における林分高

D = 林分密度で、樹木占有度、林分密度指数、ha あたり断面積を使用した。

さらに、DAHMS が地位の代りに ha あたり断面積、密度として樹冠競争係数を用いて良好な結果を得ているので、次式についても検討した。

$$I_0 = b_0 + b_1(A) + b_2(A^2) + b_3(A^3) + b_4(G) + b_5(G^2) + b_6(D) \\ + b_7(AG) + b_8(AD) + b_9(GD) \dots\dots\dots (65)$$

ここで、 D = 樹木占有度

基礎式による各成長量推定式の推定精度を、決定係数と標準偏差で Table 38 に示す。

決定係数はいずれの推定式についても、原論文に示されている 70% 以上に比べて、かなり低くなった。

GRUSCHOW らおよび NELSON らの提案した (62), (64) 式では、ha あたり断面積を密度の尺度として用いた場合が、他の 2 種の尺度を用いた場合に比して、かなり良い結果となった。

これに対して DAHMS の提案した (63) 式では、いずれの尺度を用いても同じ程度の推定精度となったが、林分密度比数、樹木占有度を密度の尺度として用いた場合、他の 2 式よりいくぶんよい結果となった。

変量削減法で求めた、有効な変量のみによる成長量推定式の推定精度を Table 39 に示す。有効な変量の多いほど決定係数は高くなっているが、推定式および密度の種類による差は、9 変量を用いた基礎式の場合ほど大でなく、さらに各推定式からの標準偏差には、ほとんど差が認められなかった。

Table 38. 各種の成長量推定式の推定精度
Precision of various growth prediction equations

推 定 式 Equation	GRUSCHOW		DAHMS		NELSON	
	決定係数 R^2 (%)	標準偏差 S. D. (m^3)	決定係数 R^2 (%)	標準偏差 S. D. (m^3)	決定係数 R^2 (%)	標準偏差 S. D. (m^3)
密 度 の 尺 度 Measure of density						
林 分 密 度 比 数 Stand density ratio	38.4	17.4	48.0	16.0	38.6	17.4
樹 木 占 有 度 Tree-area ratio	37.3	17.5	47.4	16.1	37.6	17.5
ha あたり断面積 Basal area per ha.	52.6	15.2	46.9	16.1	52.8	15.3
断面積を地位, TAR を密度 Basal area for site, TAR for density			49.4	15.8		

Table 39. 有効変量による成長量推定式の推定精度
Precision of various growth prediction equations used
significant variables

推 定 式 Equation	密 度 の 尺 度 Measure of density	有 効 な 変 量 Significant variables	決定係数 R^2 (%)	標準偏差 S. D. (m^3)
GRUSCHOW	林分密度比数 (SDR) Stand density ratio	$A, A \times SDR, S \times (SDR)^2$	35.6	15.6
	樹木占有度 (TAR) Tree-area ratio	$A, A \times TAR, S \times (TAR)^2$	35.2	15.6
	ha あたり断面積 (G) Basal area per ha.	$G^2, S \times G^2$	33.1	15.6
DAHMS	SDR	SDR, $S \times SDR$	33.2	15.6
	TAR	TAR, $S \times TAR$	32.8	15.6
	G	SA, $A^2, A^3, S \times G$	35.0	16.0
NELSON	SDR	$(SDR)^2, S \times (SDR)^2$	34.5	15.4
	TAR	$(TAR)^2, S \times (TAR)^2$	33.8	15.5
	G	$G^2, S \times G^2$	33.1	15.6
DAHMS	TAR	$A, A^2, A^3, TAR, TAR \times G$	40.5	15.6

注 : A = 林齢 S = 地位指数 Note : A = Age S = Site index

このことから推定精度はあまり高くないが、有効な変量のみによる成長量推定式を用いる場合、DAHMS や NELSON らの結果と同様に、林分密度比数、樹木占有度、ha あたり断面積さらに樹冠競争係数、基準断面積と現実断面積の比のいずれを密度の尺度として用いても、同じような推定精度が得られると推察した。

有効な変量のみによる成長量推定式で求めた成長量を、期首材積に加えて算出した推定材積の精度を、(47) 式で計算される最小の許容誤差率で検討した結果、どの密度の尺度についても基礎式では約 30%、有効変量のみでは約 35% となり、収穫試験地の資料に対する適合はあまり良いとは考えられなかった。

3. 林分断面積、材積推定式から誘導した成長量推定式および収穫量予測式による解析

前章第 7 節では、暫定的標準地の資料による材積の予測方法を検討し、前節では各種の林分密度の尺度を変量に含めた材積成長推定式による方法について論じた。

しかし、推定した成長量と材積（収穫量）の関係については、それぞれ独立に求めているので、関係づけて考察できず、特に林分密度の変化については、暫定的標準地資料の場合で用いたような仮定を設ける必要がある。

このため第 II 章で述べたように、CLUTTER⁹⁾ はテードマツについて、MOSER と HALL²⁸⁾ は、Oak-hickory の混交林について林分断面積、材積推定式を微分して成長量推定式を導き、その積分によって期首の値を考慮した材積収穫量予測式を求めている。

本研究でも、このような方法で固定標準地の継続調査資料で成長量が算出できる場合の予測方法について検討した。

(1) 地位指数曲線

第 2 節で述べた林齢を加えた直径—樹高曲線から算出した試験地ごとの林分高の成長曲線は、収穫表の地位曲線に比して、林齢が増すにつれて傾斜がいくぶんゆるやかとなる傾向がみられるので、試験地資料について新たに地位指数曲線を作成した。

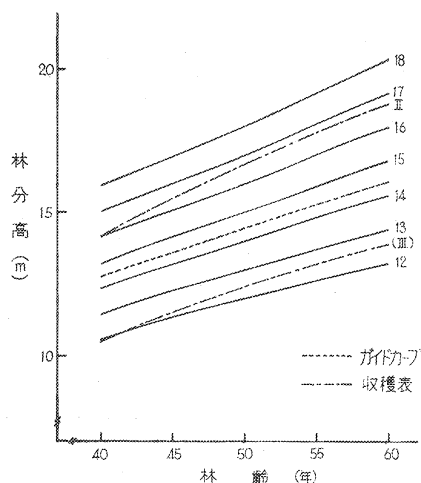


Fig. 5 地位指数曲線
Site index curves for the data
of permanent sample plots.

試験地ごとの林分高の成長曲線を、5 年を限度として、補外して、38~58 年について 5 年間隔で林分高の平均値を求め、次式で中心線を定めた。

$$h_c = 75.77 - 63.02(0.9864)^t \quad \dots\dots\dots (66)$$

ここで、 h_c = 中心線の平均林分高、

$$t = (\text{林齢} - 38)$$

5 年ごとに中心線からの標準偏差を求め、これを平滑化し、50 年を基準年齢として標準的な方法で地位指数曲線を求めた。

この地位指数曲線のあてはまりは、CURTIS¹⁰⁾ の方法にしたがって測定期間 38~58 年の中央にあたる 48 年を標準年齢とし、試験地ごとの 38 年および 58 年の林分高を出発点として、Fig. 10 に示す地位指数曲線から読みとった 48 年の林分高と、林分高の成長曲線から求めた 48 年

における林分高とを用いて、(38) 式で算出される x^2 の値が5%の危険率で有意とならないため想定すべき誤差で調べた。その結果、期首、期末のいずれの側から推定しても、0.75 m の誤差を認める必要のあることがわかった。

試験地ごとの林分高の成長曲線を比較すると、50 年を過ぎても旺盛な成長をする群としたいにゆるやかとなる傾向を示す群に分類されるが、資料の関係もあってこれらを一括して曲線を作成したことを考えれば、この程度の許容誤差を認めることはやむを得ないと判断した。

(2) 断面積、材積成長量推定式

CLUTTER⁹⁾ の用いた林分材積式 (67) を試験地資料に適用して (68) 式を得た。

$$\log V = b_0 + b_1 S + b_2 \log G + b_3 A^{-1} \dots\dots\dots (67)$$

ここで、 $V=ha$ あたり材積、 $G=ha$ あたり断面積、

$S=$ 地位指数、 $A=$ 林齢

$$\log V = 0.7049 + 0.0285 S + 0.9758 \log G - 10.1611 A^{-1} \dots\dots\dots (68)$$

この式の決定係数は 98.7%，標準偏差率は 3.5% であった。

MOSER²⁸⁾ の用いた、断面積だけを変量とした林分材積式

$$\log V = b_0 + b_1 \log G \dots\dots\dots (69)$$

を試験地資料に適用すると、次のようになった。

$$\log V = 2.1778 + 1.2604 \log G \dots\dots\dots (70)$$

この式の決定係数は 79.6%，標準偏差率は 11.6% であった。

この結果から、基礎となる林分材積推定式として (68) 式を採用することとした。

断面積成長量推定式としては、CLUTTER と同じ形の式を採用し、試験地資料にあてはめ次式を得た。

$$dG/dA = -G(\ln G)A^{-1} + 3.6986 A^{-1}G + 0.0661 GSA^{-1} \dots\dots\dots (71)$$

この式の決定係数は 99.6% で、CLUTTER がテューダマツに適用した場合の 65.3% に比して、著しく良い適合が示された。

(67) 式を微分して導いた材積成長量推定式を試験地資料にあてはめ (72) 式を得た。

$$\begin{aligned} dV/dA = & -0.4984 V*(\ln G)A^{-1} + 3.0209 V*A^{-1} + 0.05329 V*SA^{-1} \\ & - 31.9208 V*A^{-2} \dots\dots\dots (72) \end{aligned}$$

この式の決定係数は 92.8% であった。これに対して CLUTTER の例では 69.7% であった。

(3) 断面積、材積収穫量予測式

(71) 式で示される断面積成長量に関する微分方程式を解けば、断面積収穫量予測式が得られる。

(71) 式を次のように変形する。

$$\begin{aligned} dG/dA &= G^{-1}(3.6986 + 0.0661 S - \ln G)A^{-1} \\ G(3.6986 + 0.0661 S - \ln G)^{-1}dG &= A^{-1}dA \end{aligned}$$

この式の両辺を期首、期末の値の範囲で積分すれば、

$$\begin{aligned} \int_{G_0}^{G_p} G(3.6986 + 0.0661 S - \ln G)^{-1}dG &= \int_{A_0}^{A_p} A^{-1}dA \\ &= -\ln(3.6986 + 0.0661 S - \ln G_p) + \ln(3.6986 + 0.0661 S - \ln G_0) \\ &= \ln A_p - \ln A_0 \end{aligned}$$

この式の両辺を整理し、期末断面積の予測式として次式を得た。

$$\ln G_p = 3.6986 + 0.0661 S - A_0 A_p^{-1} (3.6986 + 0.0661 S - \ln G_0) \quad (73)$$

ここで、 G_p = 期末断面積、 G_0 = 期首断面積、

A_p = 期末林齢、 A_0 = 期首林齢

(73) 式で推定する場合には、危険率 5% で 6.0% の誤差率を認める必要がある。

同様に、(72) 式で示される材積成長量に関する微分方程式を解いて、材積収穫量予測式を求めた。

(72) 式から

$$\begin{aligned} 1/V \cdot dV/dA &= -0.4984(\ln G)A^{-1} + 3.0209A^{-1} + 0.05329SA^{-1} \\ &\quad - 31.9208A^{-2} \\ dV/V &= (-0.4984 \cdot (\ln G)A^{-1} + 3.0209A^{-1} + 0.05329SA^{-1} \\ &\quad - 31.9208A^{-2})dA \end{aligned}$$

$\ln G$ に (73) 式の関係を入れ、両辺を期首、期末の値の範囲で積分して整理し、次に示す期末材積の予測式を得た。

$$\begin{aligned} \ln V_p &= \ln V_0 + 31.9208(A_p^{-1} - A_0^{-1}) + (1.1776 + 0.02035S) \\ &\quad \times (\ln A_p - \ln A_0) - A_0(1.8433 + 0.03294S - 0.4984 \ln G_0) \\ &\quad \times (A_p^{-1} - A_0^{-1}) \quad (74) \end{aligned}$$

ここで、 V_p = 期末材積、 V_0 = 期首材積

(71) 式で推定する場合、危険率 5% で、6.7% の誤差率を認める必要がある。

(4) 断面積平均直径の予測

材積収穫量予測式を誘導するために用いた (67) 式で示す林分材積推定式と同じ形の式を、断面積平均直径推定式として用いた。

$$\log \bar{d}_g = b_0 + b_1 S + b_2 \log G + b_3 A^{-1} \quad (75)$$

この式を、試験地資料にあてはめて次式を得た。

$$\log \bar{d}_g = 1.5668 + 0.01814 S - 0.1580 \log G - 11.6950 A^{-1} \quad (76)$$

決定係数は、61.0% であった。

(75) 式を微分して、試験地の資料について次に示す成長量推定式を得た。

$$\begin{aligned} d(\bar{d}_g)/dA &= -0.2459 \bar{d}_g^* (\ln G) A^{-1} + 1.6231 \bar{d}_g^* A^{-1} \\ &\quad + 0.0227 \bar{d}_g^* S A^{-1} - 25.2239 \bar{d}_g^* A^{-1} \quad (77) \end{aligned}$$

ここで、 $\bar{d}_g^*$ = (76) 式を算出した平均直径

この式の決定係数は、85.5% で、断面積、材積成長量推定式の場合に比して低くなっているが、これは基礎とした (76) 式の適合性が悪いためと考えられ、今後検討する必要があるが、CLUTTER の断面積、材積成長量推定式より適合がよいので、(77) 式を用いて平均直径予測式を導くこととした。

前項と同じ方法により、期末平均直径の予測式として次式を得た。

$$\begin{aligned} \ln(\bar{d}_g)_p &= \ln(\bar{d}_g)_0 + 25.2238(A_p^{-1} - A_0^{-1}) + (0.7136 + 0.0064 S) \\ &\quad \times (\ln A_p - \ln A_0) - A_0(0.9095 + 0.0163 S - 0.2459 \ln G_0) \\ &\quad \times (A_p^{-1} - A_0^{-1}) \quad (78) \end{aligned}$$

この式で平均直径を推定する場合、危険率5%で、2.8%の誤差率を許す必要がある。

4. 収穫予想表の作成方法

固定標準地を設けて、5年間の成長量が測定されているような資料を用いて収穫予想を行なう場合には、第2節で述べた成長量推定式による方法より、前節の方法を用いるほうがはるかに良好な推定結果を与えることがわかった。

また、前章で述べた暫定的標準地の資料を用いる各種の予測方法のいずれよりも、ヒノキ収穫試験地の資料に対して良い推定結果を与えることがわかり、収穫予想表の作成方法としては、固定試験地の継続調査の資料を用いて前節で述べた方法を採用することが効果的であると考える。

したがって、前節で求めた ha あたり断面積、材積および断面積平均直径の予測式を用いる収穫予測方法について説明する。

本研究で論じている収穫予測方法は、前述したように林分密度の各種の管理方式による収穫量の比較方法を主体としているので、(73)、(74)、(78)式を用いて、電子計算機で管理方式ごとに収穫予測を行なうことも可能であるが、一般の使用に便利のように、グラフによる予測方法について説明する。

収穫表の2等地に相当する地位指数17について、30年における断面積を基準として次の順序で、収穫予測グラフを作成することとし、林齢を30~60年、30年における断面積を10~60 m^2 として、5 m^2 ごとに断面積、材積、平均直径の予測曲線を描いた。

- (1) 30年における断面積を(73)式の $\ln G_0$ に入れ、35年の断面積を求める。
- (2) 35年の算出断面積を(73)式の $\ln G_0$ に入れて、40年の断面積を求める。この手順を60年までくり返す。
- (3) 30年における断面積を用いて(68)、(76)式から、期首の材積(V_0)、平均直径($\bar{d}_{90}$)を求める。
- (4) 30年における G_0 、 V_0 、 $\bar{d}_{90}$ を(74)、(78)式に入れて35年の材積、平均直径を求める。
- (5) 35年の算出断面積、材積、平均直径を期首の値として、40年における材積、平均直径を求める。この手順を60年までくり返す。

このようにして求めた値を、30年における断面積のクラスごとに、林齢に対してプロットして得られる予測グラフの曲線群を Fig. 6-1~6-3 に示す。

このグラフによる収穫予測方法を、地位指数が17で、30年における断面積が35 m^2 の林分に、各種の密度管理方式を適用した場合について説明する。

(1) 30年以後無間伐で、55年で収穫する場合

無間伐であるから、断面積、材積、平均直径は、Fig. 6-1~6-3 に示してある30年における断面積（基準断面積）35 m^2 の曲線に沿って成長すると考えられる。したがって、これらのグラフから読み取った伐期（55年）におけるそれぞれの値は、62.2 m^2 、470 m^3 、22.6 cm である。

(2) 収穫表に示されている主林木断面積に等しくなるように、5年ごとに間伐を行なう密度管理方式で55年で収穫する場合

Fig. 6-1 から、30年で断面積35 m^2 の林分は、35年で41.7 m^2 の断面積を持つ。同様に Fig. 6-2 で、35年の材積は271 m^3 、Fig. 6-3 で、35年の平均直径は18.4 cm となり、いずれも間伐前の値を示している。

収穫表では35年の間伐で残存断面積を37.5 m^2 としている。間伐は劣勢木を主体として行なうのが普通であるから、残存木は優勢な木が大部分を占めている。したがって、これらの林木は、30年においてよ

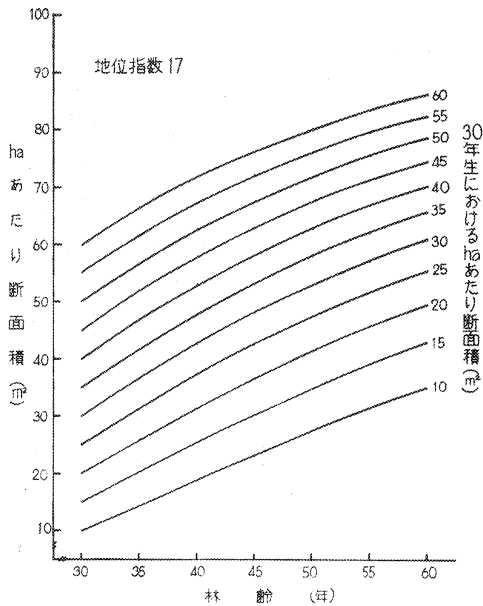


Fig. 6-1 断面積予測曲線 (地位指数17)
Projected basal area per hectare at various ages and initial basal area for site index 70.

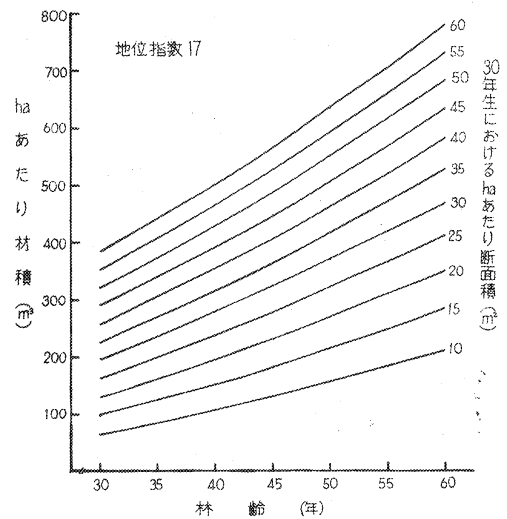


Fig. 6-2 材積予測曲線 (地位指数17)
Projected volume per hectare at various ages and initial basal area for site index 17.

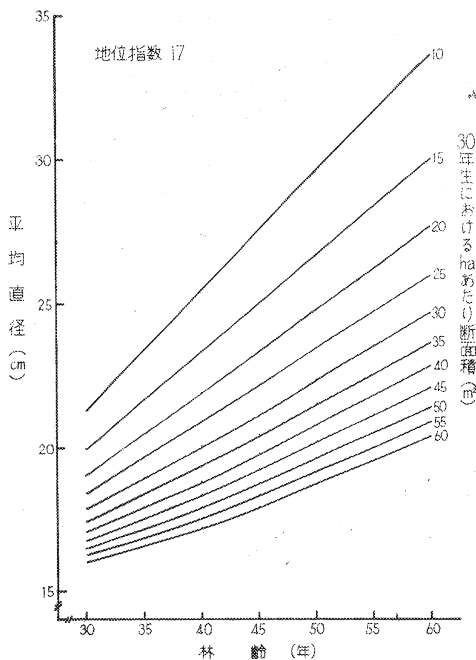


Fig. 6-3 平均直径予測曲線 (地位指数17)
Projected tree diameter of the average basal area for site index 17.

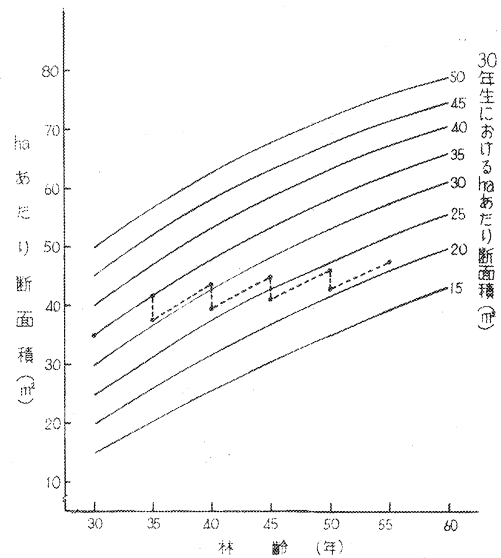


Fig. 7-1 断面積の予測
Prediction of basal area per ha.

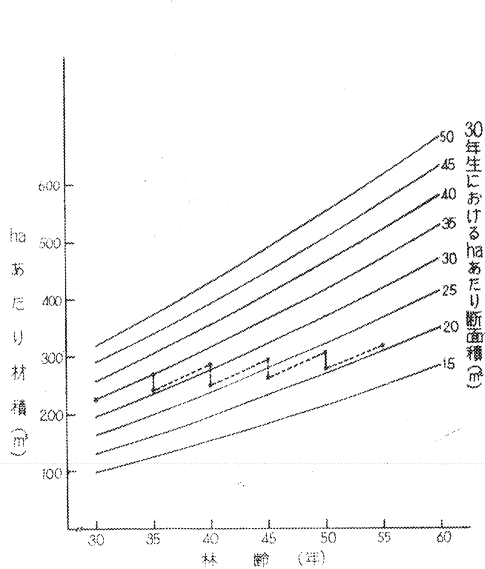


Fig. 7-2 材積の予測
Prediction of volume per ha.

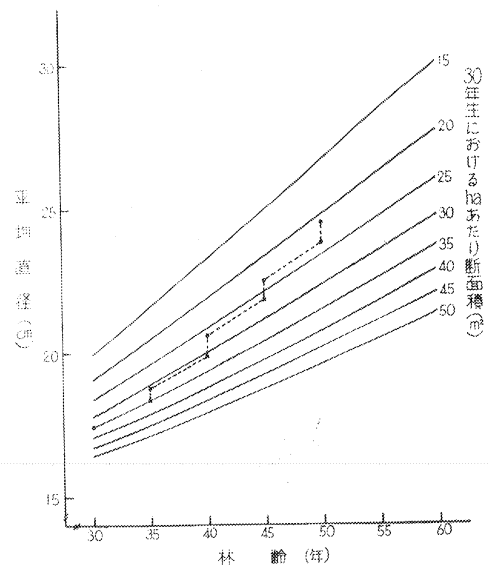


Fig. 7-3 平均直径の予測
Prediction of average diameter.

Table 40. 収穫表の主林木断面積で密度管理を行なった場合の収穫予測

Predictive yield controled with basal area of main crops
in the yield table of Kyūshū district

林 齢 (年) Age (yrs.)	平 均 直 径 Av. diameter		断 面 積 Basal area per ha.			材 積 Volume per ha.		収 穫 量 Yield (m³)
	間伐前 Before thin. (cm)	間伐後 After thin. (cm)	間伐前 Before thin. (m²)	間伐後 After thin. (m²)	基 準 Standard (m²)	間伐前 Before thin. (m³)	間伐後 After thin. (m³)	
30		17.9		35.0				
35	18.4	18.8	41.7	37.5	31.0	271	245	26
40	19.9	20.6	43.5	39.5	27.0	287	253	34
45	21.8	22.5	44.8	41.2	23.5	295	267	28
50	23.9	24.5	46.0	42.7	21.0	310	280	30
55	25.9		47.5			320		320
計 Total								438

り有利な断面積密度を持っていたと考えることができる。ここでは35年のとき、残存木断面積に等しい値の得られる基準断面積を、30年で持っていたと仮定することとした。35年で37.5 m²となる基準断面積は、Fig. 6-1 から31.0 m²である。Fig. 6-2 を補間して、基準断面積31.0 m²の曲線上の、35年における材積245 m³が得られる。これが残存木(主林木)材積で、先に求めた間伐前の材積271 m³との差26 m³が間伐材積である。

同様に、Fig. 6-3 から残存木の平均直径18.8 cmが得られる。

つぎに、Fig. 6-2, 6-3 から、基準断面積31.0 m²に相当する40年における材積、平均直径28.7 m³, 19.9 cmを求める。Fig. 6-1 で、40年における残存木断面積39.5 m²に相当する基準断面積27.0 m²を読みとり、前掲の2図から、45年における残存木材積253 m³, 平均直径20.6 cmを求める。

Table 41. 5年ごとに残存木断面積を 40m^2 とするように管理する場合の収穫予測
 Predictive yields controlled with the schedule that will be thinned
 back at subsequent five-year intervals to a basal area of 40m^2

林 齢 (年) Age (yrs.)	平 均 直 径 Av. diameter		断 面 積 Basal area per ha.			材 積 Volume per ha.		収 穫 量 Yield (m^3)
	間 伐 前 Before thin. (cm)	間 伐 後 After thin. (cm)	間 伐 前 Before thin. (m^2)	間 伐 後 After thin. (m^2)	基 準 Standard (m^2)	間 伐 前 Before thin. (m^3)	間 伐 後 After thin. (m^3)	
30		17.9		35.0				
35	18.4	18.6	41.7	40.0	33.0	271	260	11
40	19.6	20.4	46.1	40.0	27.5	300	265	35
45	21.7	22.7	45.5	40.0	23.0	311	265	46
50	24.0	25.4	45.0	40.0	18.5	310	257	53
55	26.8		44.0			280		280
計 Total								425

Table 42. 3種類の密度管理方式による材積収穫量
 Predictive volume yields depended on three
 control methods of stand density

管 理 方 式 Control method	伐 期 収 穫 Final yield (m^3)	間 伐 収 穫 Thinning yield (m^3)	総 収 穫 量 Total yield (m^3)
無 間 伐 Unthinning	422	0	422
収穫表の断面積 Basal area in yield table	320	118	438
断面積 40m^2 まで間伐 Thinned back to 40m^2	280	145	425

このようにして求めた予測値を Table 40 に、成長過程を、Fig. 7-1~7-3 に示す。

(3) 5年ごとに残存木の断面積が 40m^2 になるように間伐を行ない、55年で収穫する場合

(2) と同じ方法で5年ごとに残存木の断面積が 40m^2 に相当する基準断面積を、Fig. 6-1 から読みとり、Fig. 6-2, 6-3 において、この基準断面積に対する曲線から5年ごとの材積、平均直径を求める。この密度管理方式による予測値を Table 41 に示す。

この場合の伐期総収穫量は 425m^3 となり、(2) の管理方式より 13m^3 少なく、特に伐期収穫量は 280m^3 と 40m^2 の差が生じているが、平均直径は約 1cm 大となっている。

なお、必要があれば、断面積平均直径から算出した単木あたりの断面積で ha あたり断面積を除して、ha あたり本数を求めることもできる。

この3種類の密度管理方式による収穫量を比較すると Table 42 のようになる。

このように、成長量の既知の資料から求めた (77), (78), (82) 式から作成される Fig. 11 に示すような予測グラフを用いれば、経営目的を達成するのに必要な断面積を林分密度の尺度とした管理方式の選択、あるいは特定の管理方式による収穫量の予測を簡単に行なうことができる。

II 周囲密度と林木の成長

1. 概 説

I 編では、暫定的標準地および固定標準地資料を用いて、林分密度を変量に含む重回帰式の形で表わした推定式、予測式による収穫予測の方法を検討し、いろいろな密度管理方式による収穫量予測が可能であり、経営目的を達成するに必要な管理方式の探索が、競争密度効果式による本数密度管理方式とは別の立場で可能であることを示した。

しかしこれらの解析は、固定標準地の資料を用いた場合でさえも、保育履歴の異なる林分に基づいて行なわれており、現在高密度の林分でも、過去には低密度であったものが収穫試験地資料で多くみられる。また林冠閉鎖後の密度管理の主要手段である間伐も、劣勢木の除去を主体として行なわれてきたものである。したがって、資料とした林分が受けてきた管理方式と全然異なる方式を採用したときの収穫量を、これらの予測方法で推定した場合、その正確さを確かめるためには、その管理方式を適用した現実林分で、長期間にわたって観察する必要がある。このために林業試験場では、植栽密度、間伐方法、くり返し期間などを変えた保育形式比較試験を行なっているが、結果が判明するまでには数十年の歳月が必要である。さらにこのような試験には、周縁効果を除くため試験 plot のほかに、相当面積の周囲林分を設ける必要があり、試験対象林地として広大な面積が必要となり、たとえ高度の実験計画にしたがって試験設計が組まれたとしても、立地条件の補正の仕方によって、異なった結論の生まれる恐れがないとはいえない。

さらに、林業労働力の不足を補うため機械化が促進され、各種の保育方法は、機械の使用に便利ようにしだいに変わりつつある。現在でも、二条造林、階段造林あるいは列状間伐など機械の使用に適した方法が実用化されつつある。このような密度管理方式に対しては、従来の管理方式にしたがって生育している林分からの資料に基づく予測の方法は、無力となってしまうであろう。

このような問題に対処するためには、単木の成長と周囲密度すなわち、単木を中心として考えた密度の関係を明確にし、どのような保育方法に対しても、即座に対応できる情報の集積が必要である。また、この関係を利用して、無用な林木を合理的に林分から除去し、森林の生産力の向上を計ることが可能となるであろう。

このため BITTERLICH の理論による ha あたり断面積測定方法が、点の周りの断面積を表わすことから、この理論から導いた周囲密度の各種の尺度を中心として、周囲密度と単木成長の関係を解明しようとする研究が、1960 年代より行なわれるようになった。

周囲密度を表わす合理的かつ効果的な尺度が確定され、周囲密度と林木の成長との関係が究明されたならば、この関係から仮想林分について、シミュレーションにより各種の密度管理方式による成長過程を推定し、経営目的、保育手段ごとに収穫を予測することが可能となる。さらに現在設定されている固定試験地は、研究資料の提供源としてよりも、これらの仮想林分による予想結果を吟味する基礎として利用することにより、合理的な森林経営のための有力な情報を提供するであろう。

2. 現在までの周囲密度に関する研究

1. BITTERLICH の理論を応用した周囲密度の尺度

前章で述べたように, BITTERLICH の理論を応用した angle gauge による測定値は, 点のまわりの ha あたり断面積を表わすことから, 標本木を中心点として, 各種の angle gauge で測定した断面積を, 直接周囲密度の尺度としたものから, この理論に関する幾何学的な説明や確率論的証明を利用して尺度としたものが発表されている。

(1) 定角測定法

LEMMON と SCHUMACHER²⁶⁾ は, 標本木の中心を抽出点として angle gauge で測定した断面積は, その木と周囲木との競争関係を正しく評価しているとの仮定に立って, 4 種類の断面積乗数の angle gauge を用いて, 次に示す方法で, Ponderosa pine の plot で選んだ標本木の周囲の acre あたり断面積を測り, これを周囲密度として用いている。

(1) 断面積乗数, 10, 20, 30, 40 の angle gauge で測定した各断面積

(2) (1) で測定した 4 種類の angle gauge による断面積の平均

(3) 乗数 10, 20 の angle gauge による断面積の平均

(4) 乗数 30, 40 の angle gauge による断面積の平均

(5) 次に示す修正乗数で算出した断面積

(i) 各標本木ごとに, 4 種類の乗数の angle gauge で測定した acre あたり断面積を, 乗数に対してプロットし, 次の一次回帰式を求める。

$$G = b_0 + b_1(\text{BAF}) \dots\dots\dots (1)$$

ここで, G = acre あたり断面積, BAF = 断面積乗数

(ii) 次式で, 標本木の d. b. h. に対応する断面積乗数を算出する。

$$\text{BAF} = 43560 / (4d)^2 \dots\dots\dots (2)$$

ここで, d = in 単位で表わした d. b. h.

(iii) (2) 式で求めた BAF を, (1) 式に代入して acre あたり断面積を求める。

(1)~(5) で求めた acre あたり断面積を, 次に示す直径成長量推定式に入れて, 残差平方和で推定精度の比較を行なった。

$$\begin{aligned} \log I_d = & b_0 + b_1(1/A) + b_2(1/A)^2 + b_3(G) + b_4(G/A) \\ & + b_5(S/A) + b_6(S) + b_7(G/A^2) + b_8(S/A^2) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここで, I_d = 5 年間の直径成長量, A = 林齢,

G = acre あたり断面積, S = 地位指数

Table 43 に示すように, 断面積乗数 10 の angle gauge で測った acre あたり断面積による推定精度が最もよかった。

(2) 角度加算法

SPURR⁴⁴⁾ は, 一定の断面積乗数を持つ angle gauge で測定して得られる標本木の周囲密度は, 林分全体の断面積の一推定値にすぎず, 正確な尺度を求めるには標本木のまわりの全林木が, その点に対して張る角を利用する必要があるとして, 角度加算法 (angle summation method, AS 法) を提案している。

Table 43. 各種の断面積係数で求めた周囲密度による (3) 式の推定精度
Precision of the equation (3) in which the measure of point density is estimated by various basal area factors

周囲密度の尺度 Measure of point density	残差平方和 Sum of square of residuals
断面積乗数 10 で推定した acre あたり断面積 Basal area per acre estimated from basal area factor 10	19, 110
" 20 " " 20	19, 721
" 30 " " 30	20, 649
" 40 " " 40	21, 257
断面積乗数 10, 20, 30, 40 で推定した平均断面積 Average basal area estimated from basal area factor 10, 20, 30, and 40	19, 881
" 10, 20 " " 10 and 20	19, 336
" 30, 40 " " 30 and 40	20, 860
修正乗数で推定したエーカーあたり断面積 Basal area per acre estimated from modified factor	19, 841

BITTERLICH の理論によると、 i 番目の木までの距離は、その木の d. b. h. と断面積乗数を用いて、つぎのように表わせる。

$$L_i = 33\sqrt{10/F_i} \cdot D_i / 12 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 L_i = 中心点から i 番目の木までの距離 (f_i),

D_i = i 番目の木の d. b. h. (in.), F_i = 断面積乗数

したがって、 i 番目の木が検視されるために必要な断面積乗数は、次式で求められる。

$$F_i = 10(33 D_i / 12 L_i)^2 = 75.625 (D_i / L_i)^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

中心点のまわりで、いちばん大きい張る角で求めた断面積乗数で得られる acre あたり断面積は、

$$G_1 = \left(1 - \frac{1}{2}\right) 75.625 (D_1 / L_1)^2$$

n 番目の大きさの張る角で定められる、 n 本の木を含む plot の acre あたり断面積は、次のようになる。

$$G_n = \left(n - \frac{1}{2}\right) 75.625 (D_n / L_n)^2$$

標本点のまわりにある n 本の木について、このようにして求めた acre あたり断面積の算術平均を、角度加算法による周囲密度 (point density) としている。

$$G = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_i \\ = 75.625 \left[\frac{1}{2} (D_1 / L_1)^2 + \frac{3}{2} (D_2 / L_2)^2 + \dots\dots \left(n - \frac{1}{2}\right) (D_n / L_n)^2 \right] / n \quad \dots\dots\dots (6)$$

かれは、New Zealand の Douglas fir の造林地内に設けた 3 個の間伐 plot で、角度加算法および一定乗数の angle gauge で測定した断面積を用いて、次式で標本木の断面積成長量を推定した。

$$I_g = b_0 + b_1 G \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 I_g = 標本木の断面積連年成長量

この場合、周囲密度として用いている断面積は、5 diopter のプリズムで検視して、数えられるすべての木について求めたものである。

Table 44. 角度加算法と定角測定法による断面積を用いた (7) 式の推定精度
Precision of the equation (7) used with the basal area follow to
angle-summation and angle-count method

方 法 Method	強 度 間 伐 Heavy thinning	中 庸 間 伐 Moderate thin.	無 間 伐 Unthinning	平 均 All combined
角 度 加 算 法 Angle-summation	0.0133	0.0201	0.0208	0.0210
定 角 測 定 法 Angle-count	0.0201	0.0217	0.0223	0.0243

注：精度は標準誤差で示してある。

Note: Precision expressed by standard error.

Table 44 に示すように、角度加算法による断面積を用いた方が標準偏差が小となり、単木の連年成長量と関係付ける場合、定角測定法 (angle count method, AC 法) によるものよりすぐれていると述べている。

西沢³⁰⁾ は New Zealand の Radiata pine の 4 個の固定標準地資料について、5 年間の直径成長量と次に示す周囲密度の尺度との関係を、相関、回帰分析方法を用いて検討した。対象とした周囲密度の尺度は、次に示す方法で測定した acre あたり本数、断面積、REINEKE の林分密度指数、HUMMEL の相対幹距比、VEZINA の樹冠幅直径比である。

- (1) 一定半径の円形 plot (0.001~0.05 acre)
- (2) 標本木の 1/5 樹高の半径を持つ円形 plot
- (3) BROWN の利用可能面積
- (4) 定角測定法 (乗数 8 と 16)
- (5) 角度加算法 (ランク 1~15)

各周囲密度の尺度の対数と 5 年間の直径成長量の対数との関係を、相関、回帰分析方法で検討した結果、角度加算法で推定した acre あたり本数が、最も合理的な結果を与えると述べている。

なお、角度加算法による acre あたり本数は、次式で求めている。

$$N = \sum_{i=0}^n F_i \left(\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{g_i} + \frac{1}{2g_i} \right) / n$$

$$= 75.625 \sum_{i=0}^n \left(\frac{D_i}{L_i} \right)^2 \left(\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{g_i} + \frac{1}{2g_i} \right) / n \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 N =acre あたり本数、 g_i =ランクされた周囲木の断面積、 n =ランク、

D_i =周囲木の d. b. h., L_i =標本木と周囲木との幹距

さらにランク 10 を用いて、角度加算法で求めた acre あたり本数、断面積を周囲密度の尺度として、前掲の 4 標準地ごとに次式で直径成長量を推定した。

$$\log I_d = b_0 + b_1 \log d + b_2 \log M \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 I_d =5 年間の直径成長量、 d =標本木の b. d. h.

M =標本木の周囲密度

Table 45 に示すように、acre あたり本数、断面積のいずれを周囲密度として用いても、同じように良好な結果が得られた。しかし、acre あたり本数の方が周囲密度の尺度としていくぶんすぐれていると述べている。

Table 45. 角度加算法で求めた acre あたり本数と断面積による直径成長量の推定精度
Precision of diameter increment of individual tree estimated from number of stems and basal area per acre by angle summation method

林 分 Stand	標 準 誤 差 率 Percentage of standard error		重 相 関 係 数 Multiple correlation coeff.	
	本 数 Number	断 面 積 Basal area per acar	本 数 Number	断 面 積 Basal area per acar
A	1.0 (%)	1.0 (%)	0.853	0.870
B	1.1	1.2	0.881	0.860
C	1.4	1.3	0.908	0.925
D	2.4	2.4	0.871	0.871

(3) 帯勘定法

Op⁸⁰ は、林木が、現在の立地条件下で、獲得または競争しようとしている林地面積で定義される影響帯 (zone of influence) の概念を用い、acre あたりの断面積で表わした帯の重複の程度で、周囲密度を表わそうとした。

137 本の *Eucalyptus camaldulensis* について調べた結果、最大の影響帯に関して次の結論を得た。

- (1) 影響帯はほぼ円形である。
 - (2) 帯の半径は対象木の d. b. h. にほぼ比例している。
 - (3) 地位の上中下に対して帯の半径は、d. b. h. の 1 in について、それぞれ 1.20, 1.35, 1.45 feet である。
- このことから影響帯の半径は、断面積乗数が、52, 41, 36 ft²/acre の angle gauge を用いて、次式で求められる。

$$R = (75.625/BAF)^{1/2} \cdot d \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 d = 対象木の d. b. h., R = 影響帯の半径,

BAF = 断面積乗数

標本木および周囲木について、地位に適した BAF で、各林木を中心にして最大影響帯を描き、標本木の帯全体にわたって設けた無限の標本点から得られる重複した帯の平均数を、次式で求めた。

$$S = BAF \cdot \sum_{i=1}^n A_i \cdot i / A \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 S = 断面積密度, n = 最大の重複数, A_i = 標本木の帯内で i 回重複している面積,

A = 標本木の影響帯の面積

かれはこの方法を、“zone count (model)” と呼んでいる。

さらに現場での近似法として、適当な BAF の angle gauge を用いて、標本木の中心およびその最大影響帯の半径の 2/3 だけ標本木から離れた 4 点で検視して数えられた本数を用いて、次式で求めた断面積密度を用いることを提案している。

$$S = BAF \sum_{i=1}^5 C_i / 5 \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 C_i = i 番目の点で数えられた本数

この方法を、“zone count (field)” と名付けた。なお、標本木を中心としたときは、標本木も本数に含めることとしている。

さらに、他の断面積で表わした周囲密度の尺度と比較するため、Central Victoria 州の *Eucalyptus oblique* と *E. viminalis* の、同齡林内に設けた 6 個の plot で選んだ標本木の断面積成長量を次式で推定し、推定精度を比較している。

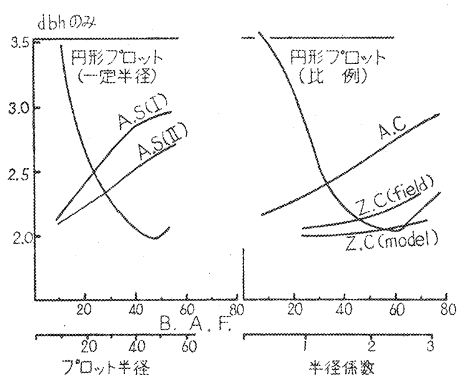
$$I_g = b_0 + b_1 d + b_2 S \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 I_g = 4 年間の断面積成長量、 d = 標本木の期首の d. b. h.

S = 期首の周囲密度

いろいろな大きさの plot または gauge について、求めた各種の周囲密度の尺度による (13) 式の残差の平均平方の傾向を Fig. 13 に示す。図からわかるように、zone count 法を除く他の周囲密度の尺度は、測定に用いた plot または gauge による変動が大で、安定した値の得られる範囲は狭く、その選び方いかんによっては、精度の低い成長量推定値となることを指摘している。

いろいろな周囲密度の尺度ごとに、plot または gauge の最適範囲と、推定精度をまとめると Table 46



AC = 定角法
AS(I) = 角度加算法 (中心木を含む)
AS(II) = 角度加算法 (中心木を除く)
ZC = 帯勘定法

Fig. 8 各種の周囲密度による (13) 式の残差平方

Residual mean square obtained by the equation (13) used various measures of point density.

Table 46. 各種の周囲密度の測定方法による単木の断面積の推定精度
Precision of basal area increment of individual tree estimated from various point density estimation methods

周囲密度の測定方法 Point density estimation method	最適の大きさ Optimum size	決定係数 Coeff. of determination (%)
一定半径の円形プロット Circular plot with constant radius	40~50 feet	82.1
d. b. h. に比例させた半径の円形プロット Circular plot with radius proportional d.b.h. of subject tree	2.3~2.5 ft/inch of d. b. h.	80.7
定角測定法 Angle count	7~8 ft ² /acre	80.2
角度加算法 (中心木を含む) Angle summation (including subject tree)	7~8 ft ² /acre	79.9
“ “ (“ “) (excluding subject tree)	7~8 ft ² /acre	80.3
帯勘定法 (model) Zone count	25~50 ft ² /acre	81.0
“ “ (field)	25~40 ft ² /acre	80.6
d. b. h. のみ No density variable		65.8

のようになる。

この結果、探索的な研究や調査対象木の多い場合は、angle count 法が適しており、成長量や収穫量推定の場合には、zone count (field) が最も効果的であり、混交林における各樹種の相対的競争能力を比較するような基礎的研究では、zone count (model) が最適であると述べ、角度加算法は面倒であり、競争木に重みを付ける方法は独断的であるとして高く評価していない。

2. 単木の利用可能面積による周囲密度

Brown⁴⁾ は、従来造林学の研究では、しばしば単位面積あたりの本数で表わした林分密度を用いて、単木的に測られた効果について論じている場合がみられるが、密度を plot 単位で測っているため得られた結果に対する潜在的精度が低くなると考え、標本木と周囲木を結ぶ直線の中点に立てた垂線で囲まれた面積を、利用可能面積 (area potentially available, APA) として、周囲密度の尺度とすることを提案している。APA を求める方法を Fig. 9 に、また林地を APA に分割したものを Fig. 10 に示す。

APA を測定するため Brown は、1 点が 1 ft² に相当する dot grid を用いている。

かれが、Rotochu State Forest の *Pinus patula* の林分

で調査した結果、単木あたりの林地面積は通常の plot 法では 32~67 ft² であるのに対して、APA 法では 27~117 ft² となり、周囲密度の尺度として鋭敏であり、標本木の断面積と APA との関係は、資料数が増すにしたがってはっきりした傾向を示すようになると述べている。

西沢³⁰⁾ も、APA 法で推定した acre あたりの本数、断面積は直径成長量と有意な相関のあることを認めている。

3. 樹冠を用いた周囲密度

樹冠の大きさと林木の成長との関係については、多くの研究、考察が行なわれ、特に樹冠長/樹高は林木の成長活力を示すものとして、間伐の必要性を判断する基準として古くから用いられてきた。同齡單純林内の林木の樹冠長/樹高で代表される樹冠の大きさを表わす指標は、周囲木の影響によって生じた結果であり、周囲密度の具体的な尺度と考えることができるので、単木の成長と樹冠の大きさとの関係についての研究成果を調べてみた。

SMITH ら⁴⁶⁾ は、North Carolina 州にある 3 個の若いテグマツ林の試験地内に設けた、それぞれ 22~26 個の plot 資料を用いて、いろいろな樹冠の大きさの表示方法と直径成長量との関係を、次式で検討した。

$$I_d = b_0 + b_1 C \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 I_d = 3 年間の直径成長量、 C = いろいろな表示方法による期末の樹冠の大きさ

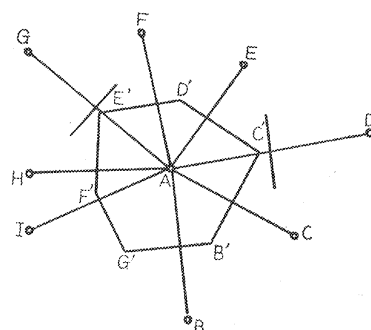


Fig. 9 利用可能面積の求め方
Diagram to obtain the "area potentially available".

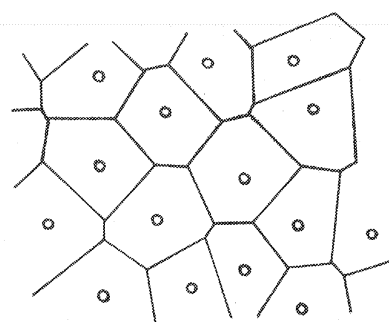


Fig. 10 利用可能面積による林地の分割
Division of stand area by the "area potentially available" method.

Table 47. 各種の樹冠の大きさの表示方法による直径成長量の推定精度
Precision of diameter increment estimated from various
expression of crown size

林 分	Stand	A	B	C
林 齢 (年) Age (yrs.)		19	15	13
樹冠の大きさ Crown size				
樹冠長と枝下高 Crown length and clear stem length		62.5 (%)	56.7 (%)	59.0 (%)
樹 冠 長 (c) Crown length		57.9	54.7	48.1
樹 高 (h) Total height		58.2	48.4	57.9
樹冠長/樹高 Ratio of (c) and (h)		42.4	40.5	26.7
枝 下 高 Clear stem length		2.8	2.4	11.6

注：精度は決定係数で示してある。

Note: Precision expressed by coeff. of determination.

Table 47 に示す決定係数で表わした推定精度を比較すると、直径成長量の予測には、樹冠長と枝下高を用いた場合が最もよく、樹高を用いると、樹冠長だけを用いた場合と同程度の精度が得られるが、老齢林に対してはあまりよい結果は得られなかった。

樹冠長/樹高は、林木の成長活力の指標としては多くの矛盾を含んでいるので、比の形で用いるより、直接樹冠の大きさに関する測定値を用いるべきであると述べている。

成長量との関係を直接検討していないが、良質の広葉樹材を生産するため、欠点のない材の割合と関係の深い樹冠長/樹高に影響する要因の探索を、Red oak について Ward⁶³⁾ は行なっている。

かれは、優勢木または準優勢木からなる標本木の樹冠を直接被陰する木を競争木と考え、Hawley と Smith の定義にしたがって、競争木を5つの樹冠級に分類し、各林分ごとに競争木に含まれる準優勢木の平均直径に指数4を与え、各樹冠級ごとの平均直径との比を平均して、各樹冠級すなわち優勢木、準優勢木、介在木、被圧木、枯死木に対し、5, 4, 3, 2, 1 という指数を与えた。

林木間の樹冠競争は、各樹冠級の指数に比例し、標本木と競争木との間の幹距に反比例すると仮定し、次式で定められる値を樹冠競争指数 (crown competition index, CCI) と名づけ、周囲密度の尺度として用いている。

$$CCI = \sum_{i=1}^n CI_i / D_i \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで、CCI=樹冠競争指数、CI=競争木の樹冠級に与えた指数、

D=標本木と競争木との幹距

Red oak の5個の同齢林分について、樹冠長/樹高と CCI との関係を次式で解析した。

$$LCR = b_0 + b_1(CCI) \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここで、LCR=樹冠長/樹高

この式の決定係数を、Table 48 に示す。

5 林分の資料をこみにして、CCI、林分高、および交互作用項の対数、非対数を用いた 24 組の推定式を比較した結果、次式によるものが最良で、決定係数は 44% であった。

Table 48. 樹冠競争指数および Σ d. b. h. /距離による樹冠長/樹高の推定精度

Precision of live crown ratio estimated from the crown competition index and the sum of ratio of d. b. h./distance

林 分 Stand	林 齢 Age (yrs.)	樹 冠 競 争 指 数 CCI	Σ (d. b. h./距離) Σ (d.b.h./distance)
		決 定 係 数 Coeff. of determination (%)	
天然生 Nature	10	42	18
人工林 Plantation	16	38	37
"	28	15	27
天然生 Nature	25~30	60	41
"	35~40	55	37

$$LCR = 161.35 - 37.78 \log(CCI) - 60.12 \log k \dots\dots\dots (17)$$

さらに CCI の代わりに、d. b. h./距離の和を周囲密度の尺度として用いると、Table 48 に示すように天然林では適合が悪いが、人工林では良好な結果を得た。

3. 林木の成長と陽光との関係

1. 概 説

前章で述べた周囲密度の尺度は、林分密度の尺度との関係から平面的な尺度が主体となっているが、周囲密度は立体的な尺度で表現するのが妥当であると考えられる。樹冠量を用いた尺度は、直接単木の成長に影響する要因を対象としているが、本研究ではさらに成長に直接関係する陽光量を対象として、樹冠量を含めた新しい尺度により、林木の成長過程を解析することとした。

林木の成長の源は、生理学的にいえば葉の光合成によって生産される同化物であり、葉量の多寡が、立地条件の等しい一林分内の林木の成長を支配する重要な要因であると考えられることができる。

一般に、葉で光合成を行なっている高等植物の個体重の成長率は、次式で表わされる。

$$r = 1/w \cdot dw/dt \dots\dots\dots (18)$$

ここで、 w = 個体重、 r = 成長率

個体あたりの葉面積を μ とすれば、成長率は (18) 式から、次のように表わすことができる。

$$r = \mu/w \cdot 1/\mu \cdot dw/dt \dots\dots\dots (19)$$

$1/\mu \cdot dw/dt$ は、純同化率 (net assimilation ratio, NAR), μ/w は葉面積比 (leaf area ratio, LAR) と呼ばれ、これを用いると成長率は次のように表わすことができる。

$$r = \text{NAR} \times \text{LAR} \dots\dots\dots (20)$$

BLACKMAN らの研究によると、光の強さ (直射光を 100% とした相対値) に対して、純同化率 (NAR), 葉面積比 (LAR) は、次の関係にあることが認められている。

$$\begin{aligned} \text{NAR} &= a \log I + b \\ \text{LAR} &= C - d \log I \end{aligned} \dots\dots\dots (21)$$

ここで、 I = 光の強さ

(21) 式の関係を (20) 式に入れば、次の関係が得られ、成長率は光の強さで表わすことができる。

$$r = b_0 + b_1 \log I + b_2 (\log I)^2 \dots\dots\dots (22)$$

したがって成長率は、一般に葉量の代わりに、光の強さで表わすことができる。

$$r=1/w \cdot dw/dt=f(I) \dots \dots \dots (23)$$

林木の場合、全重量（絶乾重量）と幹材積との間には、相対成長の法則⁴⁷⁾⁴⁸⁾の成立することから、次の関係が得られる。

$$1/v \cdot dv/dt=k \cdot 1/w \cdot dw/dt \dots \dots \dots (24)$$

ここで、 v =幹材積、 w =全重量、 k =定数

したがって、材積成長率は(23)式と(24)式の関係から、次のように表わすことができる。

$$p_v=1/v \cdot dv/dt=kf(I) \dots \dots \dots (25)$$

ここで、 p_v =材積成長率

(25)式より、材積成長量は次のように、光の強さの関数として表わすことができる。

$$dv/dt=v \cdot kf(I) \dots \dots \dots (26)$$

同じ問題を、別の観点から検討すると、成長量は葉の光合成作用と林木全体の呼吸作用とのバランスによって決まり、一般に、ある時点における林木の同化器官の量、非同化器官の量、同化器官の光合成率と呼吸率、非同化器官の呼吸率から、成長量は次の形で表わすことができる。

$$dv/dt=F \cdot (a-r) - C \cdot R \dots \dots \dots (27)$$

ここで、 F =同化器官の量、 C =非同化器官の量、

a =同化器官の光合成率、 r 、 R =同化、非同化器官の呼吸率

同化、非同化器官の量は、相対成長の法則から次のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} F &= A_1 v^{k_1} \\ C &= A_2 v^{k_2} \end{aligned} \dots \dots \dots (28)$$

したがって、

$$C = A_2 / A_1 \cdot F^{k_2/k_1} = A' F^k \dots \dots \dots (29)$$

また光合成率(a)は、葉齢および光条件に支配され、呼吸率(r 、 R)は、生育段階と温度条件による影響が特に大であるが、同齢単純林内の林木については、単位時間あたりの純同化率($a-r$)は、相対光度の関数で表わされ、非同化器官の呼吸率(R)は一定と考えられるので、(27)式は次のように書き直すことができる。

$$\begin{aligned} dv/dt &= F \cdot f(I) - A' F^k \\ &= f(F \cdot I) \end{aligned} \dots \dots \dots (30)$$

材積成長量は、葉量と光の強さと関数的関係にあり、自然界では光の強さを、林木が受ける陽光量で表現できるとすると、林冠の閉鎖した同齢単純林内では、葉量は陽光量と比例的関係にあるので、(30)式は次のように表わすことができよう。

$$dv/dt=f(I) \dots \dots \dots (31)$$

これらの結果から林木の成長は、陽光量と関数的に関係づけることができる。

2. 林木の受ける陽光量の算定方法

樹葉が受ける陽光は、林冠層による吸収、反射などにより、入射光の相対照度は林冠の上部から下にさがるにしたがって、しだいに減衰していく。その状態は、BEAR-LAMBERTの法則により、次式で表わされる。

$$I/I_0=l^{-KF} \dots \dots \dots (32)$$

ここで、 F ＝林冠各層の葉面積指数、 I_0 ＝林冠への入射光の照度、

I ＝各層の照度、 K ＝吸収係数

I_0 は、時間の経過とともに変化すると同時に、周囲木による遮蔽、天候などによって支配され、直接測定することはむずかしく、したがって (32) 式より I を求めて、(31) 式から林木の成長量を直接的に求めることは、現段階では不可能であろう。

入射光の照度 I_0 に影響する諸因子の中で、周囲木による遮蔽の程度は林木ごとに 変化するが、その他の因子は同一林分内では、ほぼ等しいと考えることができる。

生態学的には、光因子は瞬間的な絶対光量より比較光量のほうに意義があるので、 I_0 を日射量や日照時間の比数で表わすことが必要である。これを行なうには、日照計や日射計などの器材を用いて、多くの位置で同時測定により直接求めることもできるが、ここでは鈴木、細井の行なった天文学的、幾何学的方法による比較光量の算出方法により、林木の受ける陽光量の算出方法を検討した。

鈴木⁴⁰⁾⁴¹⁾は、地形的に制限される日照時間と植生との關係を解明するために、受光空域図形を考案した。その方法は次のとおりである。

- (1) 測定しようとする群落の中央から、 30° 間隔の 12 方位にある遮蔽物の高低角を測る。
- (2) 任意の大きさの半径で円を描き、円周を 12 等分する。
- (3) 円周上の各点より中心に向かい、対応する方位にある遮蔽物の高低角（遮蔽角）の正弦に等しい距離をとる。
- (4) これらの点を結んで閉多角形を描く。

このようにして求めた閉多角形を、全光空域と呼び、夏至と冬至の太陽軌跡の間にはさまれた部分は直射光の射入を許す空域を示すので、これを直射光空域と名づけている。かれは、全円の面積に対する全光空域および直射光空域の面積百分率で、地形によって制限を受けるこの群落の年間光量の概略値を求めている。さらに比例的な意味を持たせるために、直射光空域の東および西側で、それぞれの側の空域の面積が等しくなるような円弧を描き、その半径を角度で表わしたものの和を用いることも提案している。

細井¹⁷⁾は、林縁による日照時間の短縮が、伐採跡地の更新稚樹の成長におよぼす影響を調べるために、次のように比較光量を求めている。

- (1) その地点における太陽軌跡を、各月のほぼ中央の日について求める。
- (2) 30° 間隔の 12 方位について遮蔽物の高低角を測る。
- (3) 太陽軌跡図の中心から遮蔽角の余弦に等しい距離をとり、これらの点を結んで閉多角形を描く。
- (4) 各日の太陽軌跡と閉多角形との交点から、その日の日照開始時刻および停止時刻を読みとる。
- (5) 日照開始時刻と停止時刻の間を、その地点におけるその日の日照時間とする。
- (6) 同じ方法で、各月の中央の日の日照時間を求め、その合計を算出する。

かれは、このようにして求めた地点ごとの日照時間の合計と、障害物のない開放地の日照時間の合計との百分比を、年間の日照率、3～9 月の日照時間の合計と同じ期間における開放地の日照時間の合計との百分比を、成長期間の日照率として稚樹の成長との關係を解析した。

しかし、このような受光空域図の手法では、樹冠上の任意の点における受光量の比較は可能であるが、樹冠全体について比較することはむずかしく、その計算方法も複雑で実用的ではないと考えられる。この問題を解決するため甲斐原²¹⁾は、受光角という巧みな概念を導入した。

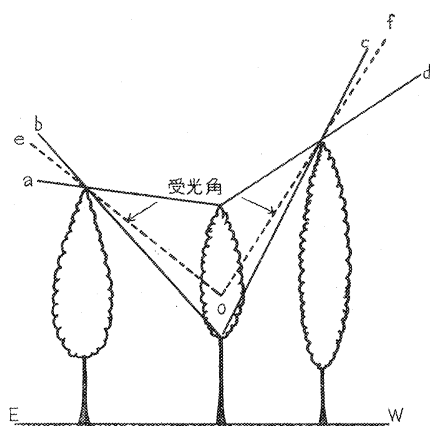


Fig. 11 受光角の説明
Diagram to explain the exposing angle.

する地点の東側と西側に等距離隔たって、南北方向に平行に配列した一定高さの壁状の遮蔽物と、その地点を中心とする円筒状の遮蔽物について、受光角と日照時間、日射量との関係を検討した。

地球上の任意の地点における、ある日、ある時刻における太陽高度および方位は、次式で求められる。

$$\begin{aligned}\sin h &= \sin \theta \sin \delta + \cos \theta \cos \delta \cos t \\ \sin A &= \sin \omega t \cos \delta / \cos h\end{aligned}\quad \dots\dots\dots(33)$$

ここで、 h =太陽高度、 δ =赤緯、 θ =緯度、 t =時刻、 $\omega=15^\circ/\text{hour}$ 、 A =太陽の方位角

また、ある斜面の受ける日射量、日照時間は、岡上³⁴⁾の提案した方法にしたがって次のように求めた。傾斜方位 l 、傾斜角 k の斜面が単位時間に受ける日射量は、次式のように表わされる。

$$\begin{aligned}I_s &= I_0 \{ [1 - (\sin k \cos l \cos \theta + \cos k \sin \theta)^2]^{1/2} \cos(\omega t + \alpha) \cos \delta \\ &\quad + (\sin k \cos l \cos \theta + \cos k \sin \theta) \sin \delta \} \quad \dots\dots\dots(34)\end{aligned}$$

ここで、 I_s =日射量、 I_0 =日射の強さで、かりに $60 \text{ cal cm}^{-2} \text{ hour}^{-1}$ とする。

$$\alpha = \tan^{-1}(\sin k \sin l / \cos k \cos \theta - \sin k \cos l \sin \theta)$$

t_1 を日の出、 t_2 を日の入りの時刻で表わした時刻とすれば、この斜面の 1 日あたりの日射量は、次式で算出される。

$$\begin{aligned}I &= \int_{t_1}^{t_2} I_s dt \\ &= I_0 \left[\frac{1}{\omega} \{ 1 - (\sin k \cos l \cos \theta + \cos k \sin \theta)^2 \}^{1/2} \sin(\omega t + \alpha) \cos \delta \right. \\ &\quad \left. + (\sin k \cos l \cos \theta + \cos k \sin \theta) \sin \delta \cdot t \right]_{t_1}^{t_2} \quad \dots\dots\dots(35)\end{aligned}$$

なお、この斜面の日の出、日の入りの時刻は、(34) 式で $I_s=0$ とおいて、 t について解いて求めたものである。

日射時間は、 t_1 、 t_2 を時間単位に換算した t_1' 、 t_2' の和として求めた。

この場合、(34) 式から算出した t_1' 、 t_2' が

$t_1' < \text{その地点の実際の日の出時刻}$

$t_2' > \text{その地点の実際の日の入り時刻}$

かれは、樹冠の受ける陽光量(受光量)は、東および西側にある隣接木の樹冠によって影響され、Fig. 11 に示すように太陽が $a \sim b$ 、 $c \sim d$ の間にある時間の 1/3 と、 $b \sim c$ の間にある全時間、すなわち点線で示した $e \sim f$ の間に太陽がある時間中、樹冠全体が陽光を受けると仮定し、角 eof をこの林木に対する受光角と名付け、比較光量として使用できることを提案している。

林木の成長と陽光量との関係を解析するに先だって、受光角と日照時間および日射量との関係を調べることにした。

3. 受光角と日照時間、日射量との関係

周囲木の樹冠によって形成される遮蔽の状態は複雑であるが、ここでは単純化のため、受光量を算定しようと

であれば、

午前の時間 (t_1'') = 南中時刻 - 實際の日の出時刻

午後の時間 (t_2'') = 實際の日の入り時刻 - 南中時刻

を求め、 t_1'' , t_2'' の和を日照時間とし、これを時角に換算して (35) 式の t_1 , t_2 の代わりに用いて、日射量を求めた。

ここで問題としているのは、樹冠による遮蔽状態を模型的に考えたときの受光角と日照時間、日射量との關係であるから、平坦地 ($l=0$, $k=0$) における關係について検討を行なった。

なお、植物の成長には直射光のほか、散光が大きな働きをしているが、遮蔽の状態では、散光量は直射光量にほぼ比例するという仮定に立って、直射光だけを対象とした。

林業試験場九州支場の苗圃の位置を北緯 33° 、東経 131° として、当地におけるヒノキの生育期間と考えられる 3 月上旬から 11 月上旬まで、10 日間隔で各時刻における太陽高度および方位を (33) 式から求めた。その例として、10 月 18 日について計算した結果を Table 49 に示す。

Table 49. 太陽軌跡の計算 (10月18日)
Calculation of the sun locus (18. October)

地方時 (時) Time (hour)	時 角 Hour angle ($^\circ$)	太陽方位 Azimuth ($^\circ$)	太陽高度角 Declination of the sun ($^\circ$)
日の出 Sunrise	-84.5	-79.2	0.4
7	-75	-73.6	7.2
8	-60	-64.4	19.0
9	-45	-53.4	29.5
10	-30	-39.3	39.0
11	-15	-21.2	45.3
12	0	0	47.5
13	15	21.2	45.3
14	30	39.3	39.0
15	45	53.4	29.5
16	60	64.4	19.0
17	75	73.6	7.2
日の入り Sunset	85.0	79.3	0.5

この場合、時間としては、その地点の南中時刻を正午 (時角=0) とする地方時を用い、日の出、日の入り時刻は、理科年表⁶¹⁾ によった。

日の出、日の入り時刻の太陽高度の算出値が 0 とならなかったのは、理科年表に示してある時間が分単位であることと、計算途上における丸めの誤差などのためである。

一定半径の円を天空の投影図と見たてて、細井の方法に準じて、円の中心から (33) 式で算出した 10 日間隔の各日、各時刻ごとの太陽高度と方位を用いて、太陽の位置を点で定め、各日ごとにこの点を結んで太陽軌跡図を作成した。この結果を Fig. 12 に示す。

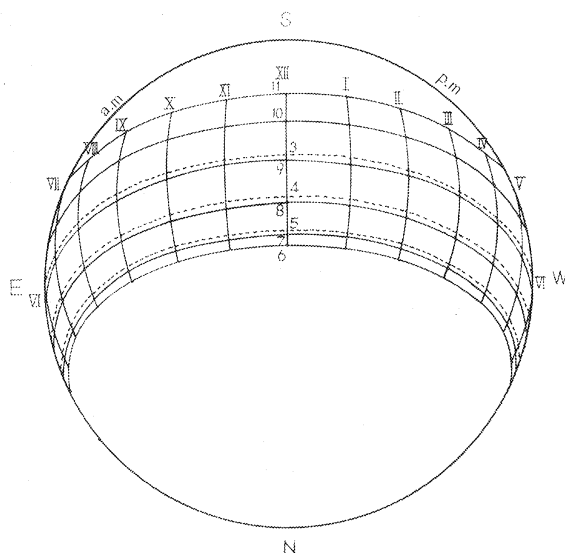


Fig. 12 林業試験場九州支場苗圃 (北緯 33° 、東経 131°) における太陽軌跡
The sun locus at the nursery in Forest Experimental Station Kyûshû Branc. (35° N. L., 131° E. D.), during tree growing season.

図に示してある太陽軌跡は、その月のほぼ中央の日のものであり、ローマ字は地方時、算用数字は月を表わしている。

東および西（真方位）にある遮蔽物の上端と、その地点を結んだ線のなす狭角をその地点の受光角として、いろいろな大きさの受光角について、前述した平行型と円筒型の遮蔽物に対して、その地点から遮蔽物の各位置の高低角と方位を求め、太陽軌跡図と同じ半径の天空投影図上にその位置を定め、これらの点を結んで受光空域図を作成した。

太陽軌跡図の中心と受光空域図の中心を一致させて重ね合わせると、その地点の直射光空域図が得られる。その結果を Fig. 13, 14 に示す。

これらの図から、受光角ごとに各日の日照時間を読みとることができるが、円筒型遮蔽物については次のように計算で求めた。

この地点に直射光が入射するのは、次のような時間の範囲である。

太陽高度 $\geq 90^\circ - \frac{1}{2}$ (受光角)

したがって、入射開始の時刻は (33) 式より

$$\begin{aligned} \cos t &= (\sin h - \sin \theta \sin \delta) / \cos \theta \cos \delta \\ &= (\cos(\phi/2) - \sin \theta \sin \delta) / \cos \theta \cos \delta \\ t' &= \frac{1}{w} \cos^{-1} \{ [\cos(\phi/2) - \sin \theta \sin \delta] / \cos \theta \cos \delta \} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (36)$$

ここで、 t' = 入射開始の時刻、

ϕ = 受光角

なお日射量は、平坦地であるので (35) 式から導いた次式で算出した。

$$I_s = I_0 \left[\frac{1}{w} (\cos \theta \cos \delta \sin \omega t + \sin \theta \sin \delta \cdot t) \right]_{t_1}^{t_2} \quad \dots\dots\dots (37)$$

受光角 100° の円筒型遮蔽物の日照時間、日射量の計算結果が、Table 50 に示してある。

受光角 180° (open 区) から 20° までについて、10 日間隔および 30 日間隔で、前述の生育期間 (3 月 15

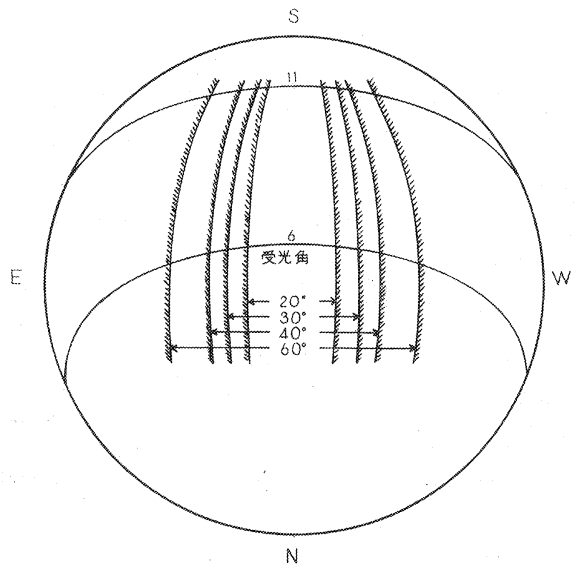


Fig. 13 平行型遮蔽物の受光空域
Exposing area for each parallel type shading equipments.

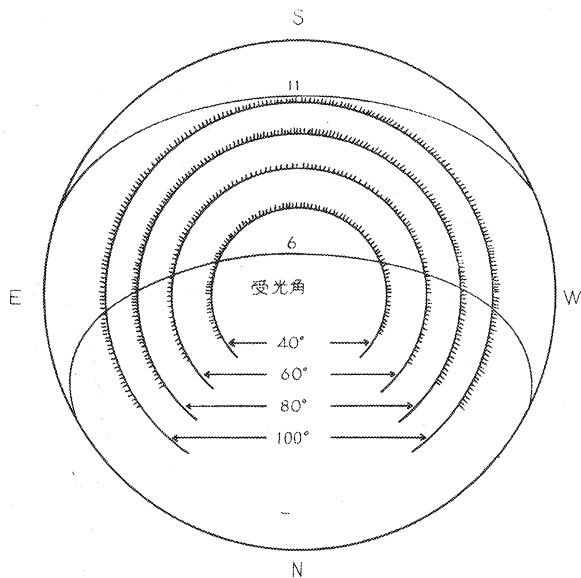


Fig. 14 円筒形遮蔽物の受光空域
Exposing area for cylindrical type shading equipments.

Table 50. 受光角 100° の円筒形遮蔽物の日照時間と日射量
 Period and intensity of the solar radiation for the cylindrical
 type shading object with the exposing angle 100°

月 日 Date	赤 緯 Solar latitude ($^\circ$)	日 照 時 間 Period (hour)	日 射 量 Intensity ($\text{cal cm}^{-2} \text{day}^{-1}$)
3. 22	0 22	5.40	503
4. 21	11 37	6.62	661
5. 21	20 02	7.28	752
6. 20	23 26	7.52	782
7. 20	20 48	7.34	760
8. 19	13 01	6.74	678
9. 18	2 09	5.62	530
10. 18	- 9 21	3.76	320
11. 7	-16 04	1.48	115

Table 51. 円筒型遮蔽物の受光角ごとの1日あたりの平均日照時間, 日射量
 Average period and intensity of the solar radiation per a day for each
 cylindrical type shading object with various exposing angles

受 光 角 Exposing angle	日 照 時 間 (時) Period (hour)		日 射 量 Intensity ($\text{cal cm}^{-2} \text{day}^{-1}$)	
	10 日 間 隔 Interval of 10 days	30 日 間 隔 Interval of 30 days	10 日 間 隔 Interval of 10 days	30 日 間 隔 Interval of 30 days
180	12.64	12.64	448	448
160	10.98	10.98	419	419
140	9.30	9.30	389	389
120	7.58	7.58	346	346
100	5.62	5.58	278	278
80	3.74	3.70	204	202
60	2.20	2.10	123	118
40	0.94	0.86	54	50
20	0.04	0.06	3	4

Table 52. 平行型遮蔽物の直射光入射開始および停止時刻における太陽高度 (受光角 40°)
 Declination of the sun at period of the light begin to come and
 finish by the parallel type shading object (Angle 40°)

月 日 Date	太 陽 高 度 Declination ($^\circ$)	月 日 Date	太 陽 高 度 Declination ($^\circ$)	月 日 Date	太 陽 高 度 Declination ($^\circ$)
3. 22	53 48	6. 20	68 42	9. 18	55 15
4. 21	62 23	7. 20	67 46	10. 18	45 26
5. 21	66 48	8. 19	63 22	11. 17	36 50

日～11月7日とした) について求めた日照時間, および $I_0=60 \text{ cal cm}^{-2} \text{hour}^{-1}$ として算出した日射量の
 1日あたりの平均値を Table 51 に示すが, いずれの間隔でもほぼ同じ値となっているので, 両遮蔽物の
 日照時間, 日射量の平均値は, 30日間隔で算出した値を用いることとした。

平行型遮蔽物の場合には, 直射光の入射の開始または停止の時刻における太陽高度は, Table 52 に示
 すように日によって変化するので, 直射光空域図からその時刻を読みとり, 遮蔽物の高さで次式で求めた
 算出高とが等しくなるように時刻の修正を行なって, 日照時間, 日射量を求めた。

$$H_c = d_s \cdot \tan h / \sin A \quad \dots\dots\dots (38)$$

Table 53. 平行型遮蔽物の受光角ごとの 1 日あたり日照時間と日射量
Average period and intensity of solar radiation per a day for each
parallel type shading objects with various exposing angles

受光角 Angle (°)	日 照 時 間 Period (hour)	日 射 量 Intensity (cal cm ⁻² day ⁻¹)	受光角 Angle (°)	日 照 時 間 Period (hour)	日 射 量 Intensity (cal cm ⁻² day ⁻¹)
180	12.64	448	80	5.08	253
160	11.04	422	60	3.38	192
140	9.46	396	40	2.46	129
120	7.92	355	30	1.84	97
100	6.42	308	20	1.22	65

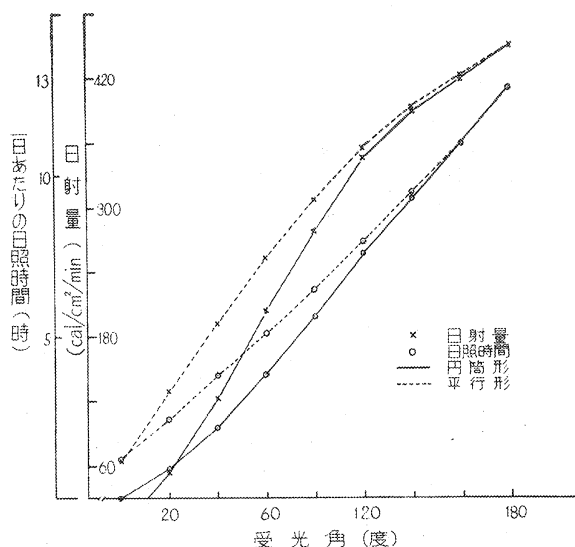


Fig. 15 受光角と日照時間、日射量との関係
Relations between average period and
intensity of solar radiation per a day,
and the exposing angles.

ここで、 H_c = 算出高、 d_s = その地点
から遮蔽物までの距離

h , A = 直射光空域図から読み取
った時刻における太陽高度と方位
平行型遮蔽物の受光角ごとの 1 日あた
りの平均日照時間、日射量が Table 53
に示してある。

受光角と 1 日あたりの平均日照時間、
日射量との関係を図示すると Fig. 15 の
ようになり、受光角が 120° 以上とな
ると両遮蔽物すなわち受光空域の形状の相
違による差は、わずかなものとなり、受
光角の増大に対応する日照時間、日射量
の増加傾向は、120° 以下に比べていく
ぶんゆるやかになっている。

4. ヒノキ苗木による実験

1. 受光量管理装置

林分内の各林木が、陽光を受ける状態を苗木を用いて再現し、受光量と成長との関係をモデル化するため、次の仮定に基づいて受光量管理装置（遮光装置）を作成した。

仮定 1:

隣接木の樹冠によって遮蔽される林木の受ける陽光量を代表する、樹幹上のある高さの位置における直射光空域は、Fig. 16 に示すように複雑な形状をしているが、ここでは前述した平行型および円筒型の遮蔽物の作る直射光空域を持つものとした。

仮定 2:

直射光空域は、対象木と隣接木との成長差によって日ごとに変化するが、その変化は年間を通じてわずかと考えられるので、直射光空域の広さは変わらず、したがってこれと関数的関係にある受光角は、年間

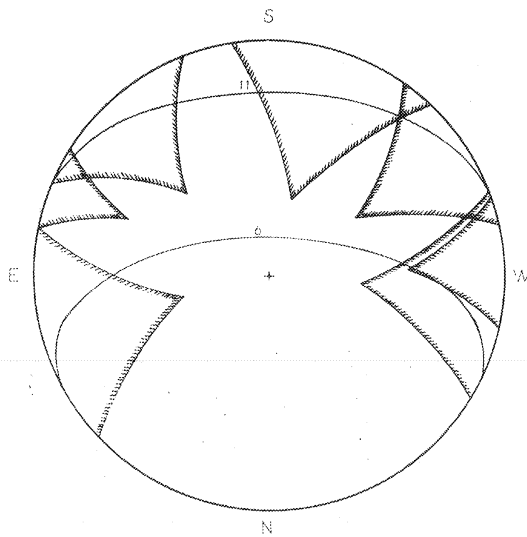


Fig. 16 樹幹上のある点における直射光空域
Exposing area at a point on the stem
of the subject tree.

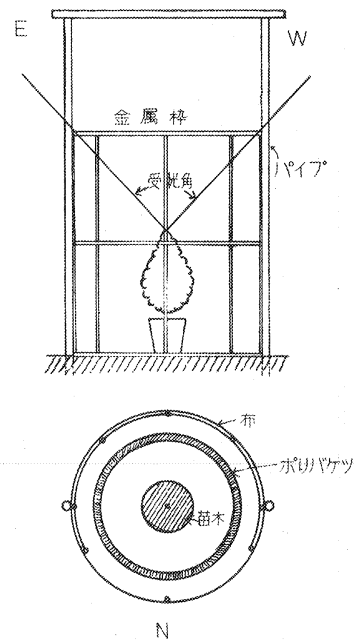


Fig. 17 円筒型遮光装置
Cylindrical type shading
equipment.

を通じて一定であるとした。

仮定 3:

苗木の頂点における受光量は、全樹冠の受光量に比例する。

仮定 4:

樹冠の受ける散光量は、直射光量に比例する。

この場合、受光量をコントロールする受光角は、苗木の頂点と、その東側および西側の遮光装置の上端とを結んだ線のなす狭角で表わすこととした。

円形の受光空域を作る円筒型遮蔽物をモデル化した円筒型遮光装置は、Fig. 17 に示すように、中心に苗木を置いた直径 50 cm の金属わくの側面の約 2/3 を、緑色のブロード布でおおい、防水と遮光効果を考慮して緑色のペンキを 2 重塗りし、直射光の入射に関係のない、北側面を通風のため開放状態としたものである。

このわくの東および西側（真方位）に接して塩化ビニールパイプの支柱をたて、金属わくをこれに取りつけ、苗木の成長に応じてわくを上昇させることにより、年間を通じてほぼ一定の受光角が保持できるようにしてある。

ビール樽形の受光空域を作る平行型遮蔽物をモデル化した、平行型遮光装置は、緑色ペンキを塗布した防水ベニヤを、苗木の東および西側等間隔の位置に南北方向に平行に設置したものである。

しかし、年間を通じてある受光角を保持するためには、苗木とベニヤ板までの距離を 35 cm とすると、遮光装置としてのベニヤは約 170 cm 必要で、このまま実験すると相当広い場所が必要になる。したがって、Fig. 18 に示すように、50 cm 間隔で苗木を植え、苗木の東および西側等間隔の位置に支柱をたて、

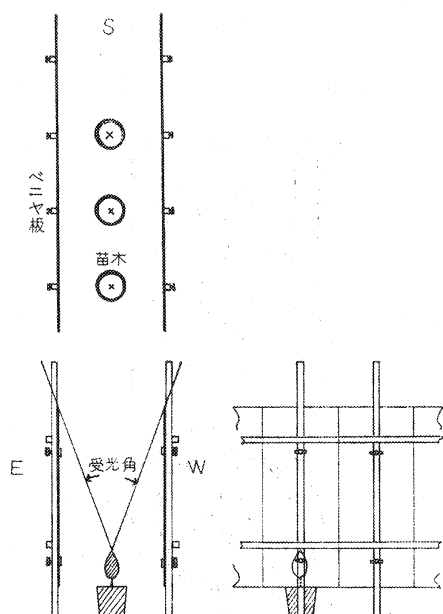


Fig. 18 平行型遮光装置
Parallel type shading equipment.

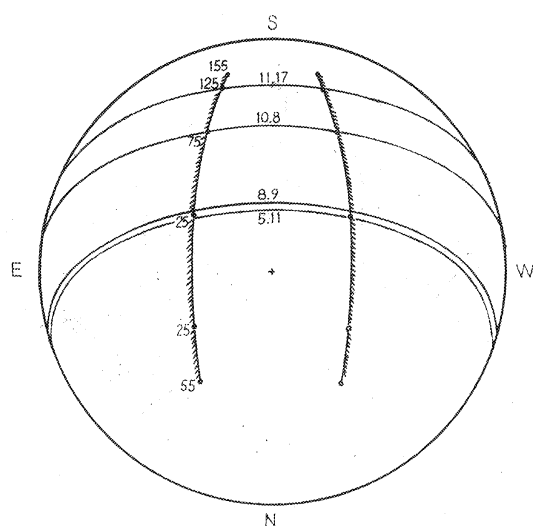


Fig. 19 平行型遮光装置でベニヤ板と
太陽軌跡が交さる月日
Date crossed the boundary of veneered
plates and the sun locus at Kumamoto.

50 cm 幅のベニヤ板の中央部にあけた小判形の穴を通して、ボルトで支柱に固定した。苗木の伸長に応じて側方のベニヤ板を上昇させ、Fig. 19 に示すように、太陽軌跡が前方のベニヤ板の直射光空域に含まれるようになった時点で、その板を対象とした苗木の伸長量に等しい高さだけ上昇させ、年間を通じて一定の受光角が維持できるようにした。受光角ごとに高さの調整を行なったベニヤ板の位置と期間は、Table 54 のとおりである。

なお、前後にある苗木との高さの成長差のために、板の高さに凹凸を生じ、苗木の全葉の受ける陽光量は、1枚の板を用いたときと若干違ってくるが、わずかであるので無視することとした。

Table 54. 与えられた受光角を維持するため、高さを調整する板の位置と期間
Position of veneered plates and period for adjusting
their height to keep up the given angle

受光角 Angle (°)	苗木と板の距離 Distance from seedling to plate (cm)	板 の 位 置 Position of plate			
		Side	First	Second	Third
20	25	6.10~ 7.10	4.10~ 6.10 7.10~ 9.80	3.15~ 3.22 9.18~10.80	10.18~11.17
30	40	6.10~ 7.10	4.11~ 6.10 7.10~ 9.80	3.15~ 4.10 9.18~10.80	10.18~11.17
40	35	5.11~ 8.10	3.15~ 5.10 8.90~ 9.29	10.80~11.17	
60	50	5.10~ 8.90	3.15~ 4.21 8.19~10.80	10.18~11.17	

注：板の境と苗木との距離は 25, 75, 125cm である。

Note: The distances to the seedling position from the boundary of plates position are 25, 75 and 125 cm.

2. 実験方法

林分内の個々の林木が受ける陽光量によって、その木の成長が影響される状態を探索するため、前述の受光量管理装置を用いて、ヒノキの1~2年生苗木で実験を行なった。

実験は、土壤成分による影響を少なくするため、15ℓ入りポリバケツの側面と下面に通水用の小穴を多数あけ、九州林木育種場内で採取した黒色土壌100ℓあたり硫酸71g、過リン酸石灰80g、硫化カリ20gを混じ、バケツごとに1本の苗木を植え、各装置の中心にバケツの上部が10cm程度出るように埋め込んだ。

受光角は実験場所の關係もあって、円筒型遮光装置では40°, 60°, 80°, 100°, 平行型遮光装置では20°, 30°, 40°, 60°を用いた。

陽光以外の土壤、水分などの環境条件は同じと見なされるので、隣接した装置の影響が及ばない程度の間隔をあけて、円筒型では東西方向に1列に、80°, 40°, 60°, 100°の順に配列したものを3組作った。平行型では前述したように、受光角ごとに1本の苗木専用の装置は作れないので、苗木を南北方向に50cm間隔で3~4本配列し、各列ごとに与えられた受光角の得られる遮光装置を、東側から20°, 30°, 40°, 60°の順に配列した。

なお、南側からの光条件を等しくするため、最南端に配置した苗木は解析に使用しなかった。

所要の受光角を得るために、円筒型ではわくと苗木との距離が一定(25cm)であるので、Table 55に示すようにわくの高さで調整したが、平行型では距離と高さで調整を行なった。

林分内の各林木の受光角は、隣接木との樹高成長差によって変化しているが、ここでは假定2にしたがって、受光角は年間を通じてほぼ一定であるという条件を満たすために、20日間隔で苗木の伸長量を測り、その量だけ遮光装置の金属わくまたは板を上昇させた。

なお、わくなどの上昇によって装置の下部に間げきを生ずるが、その大部分は隣接した装置の影でおおわれている。しかし、直接陽光が苗木にあたるような間げきとなった場合には、補助布または板で間げきをふさぎ、直射光がさえぎられている条件は、すべての苗木について等しくなるようにした。

Table 55. 受光角ごとの遮光装置の高さと幅
Height and width of each shading equipment for various exposing

装 置 Equipment	円 筒 型 Cylindrical type	平 行 型 Parallel type	
受 光 角 Angle (°)	高 さ Height (cm)	Width 幅 (cm)	高 さ Height (cm)
20		25	142
30		40	149
40	69	35	96
60	43	50	87
80	30		
100	21		

注：幅、高さは苗木から測ったものである。

Note: The width and height are measured from a seedling position.

3. 成長モデルの検討

林木の成長過程を表わす式は数多く発表されており、変量として時間的因子だけでなく、各種の環境要因を考慮した式が提案されている。

しかし、観測値に対する適合の良否だけでは、成長過程を表わす式の妥当性の保証とはならず、提案された式のパラメーターが、なんらかの生物学的意味を持っている必要がある。前編で論じた林分の成長過程の解析では、林分密度の概念が固まらなかったのも、成長量または収穫量の推定精度の良否で密度の尺度の選択を行なった。

しかし、受光角で表わした相対的受光量で単木の成長過程を解析するためには、生物学的意味を持つパラメーターで構成される成長モデルが必要であろう。

吉良ら²⁸⁾が提案した、密度効果のべき乗式、逆数式は、一般化したロジスティック曲線から導かれており、安藤¹⁾、只木⁴⁷⁾⁴⁸⁾は林分に適用して、本数管理の理論的基礎としている。ここではこれらの式が、単木の成長モデルとして適しているか否かを、受光量を要因としたヒノキ苗木の実験結果で検討を行なうこととした。

密度効果理論によれば、与えられた時点における平均個体重と成長要因量との関係は、次式で表わされる。

$$1/w = A/f + B \quad \dots\dots\dots (39)$$

ここで、 w = 平均個体重、 f = 成長要因量、

A, B = 時間で変化するパラメーター

本数密度は、成長要因の一つである単木あたりの占有面積の逆数であるから、(39) 式は、本数密度を用いて次のように表わせる。

$$1/w = A\rho + B \quad \dots\dots\dots (40)$$

ここで、 ρ = 単位面積あたりの本数 (本数密度)

また、限られた ρ の範囲では、経験的近似式として次式が成立する。

$$w\rho^a = K \quad \dots\dots\dots (41)$$

ここで、 a, K = 定数

(40)、(41) 式の関係は分布が一様でなくても成立し、 ρ は初期密度でも調査時の密度でも成立する。

逆に (40) または (41) 式の関係が成立すれば、一般化されたロジスティック曲線でその成長過程を表現することができる¹¹⁾。

前述の占有面積は、個体の受ける陽光量とある関数的関係にあると考えることができ、また受光角は第 3 章に示したように、日照時間、日射量で表わした受光量と直接関連があるので、受光角を成長要因として、平行型遮光装置による 3 回の観測資料を用いて、次の関係の成立について検討した。

$$w\phi^{-b} = K \quad \dots\dots\dots (42)$$

$$1/w = b_1/\phi + b_0 \quad \dots\dots\dots (43)$$

ここで、 ϕ = 受光角

測定年度別、苗木の大きさ別の (42)、(43) 式の傾斜係数および決定係数を、Table 56, 57 に示す。

この結果、根元直径、全重量 (生重量) については密度効果が認められ、したがってその成長過程は、一般化されたロジスティック曲線に従うと考えることができる。

Table 56. 測定年ごと苗木の大きさごとの (42), (43) 式の傾斜係数
Slope coefficients of the equation (42) and (43) for various
dimension of seedling at each measurement years

苗木の大きさ Dimension of seedling	根元直径 Basal diameter(%)	苗木の高 Height (%)	全重量 Total weight (%)
測定年 Measurement year	$w\phi^{-b}=K$		
1966	0.4260 **	0.2041	1.1354 **
1967	0.2643 **	0.2290	1.0985 **
1969	0.1278 **	0.0925	
	$1/w=b_1/\phi+b_0$		
1966	3.2540 **	0.1555	2.2281 **
1967	2.2075 *	0.2696	5.0064 **
1969	0.9104 *	0.0975	

Table 57. 測定年ごと苗木の大きさごとの (42), (43) 式の決定係数
Coefficients of determination of the equation (42) and (43)
for various amount of seedling at each year of measurement

苗木の大きさ Dimension of seedling	根元直径 Basal diameter(%)	苗木の高 Height (%)	全重量 Total weight (%)
測定年 Measurement year	$w\phi^{-b}=K$		
1969	83.5 **	28.9	86.5 **
1967	51.7 **	43.6 *	77.0
1969	54.2 **	10.5	
	$1/w=b_1/\phi+b_0$		
1966	83.5 **	13.7	89.7 **
1967	44.0 *	35.5 *	75.3 **
1969	44.8 *	6.0	

Table 58. 経過日数ごとの根元直径に対する (43) 式の係数
Regression coefficients of the equation (43) for
basal diameter of seedling at each days elapsed

経過日数 Days elapsed (day)	回帰係数 Regression coefficient	
	b_1	b_0
110	0.2788	0.3402
152	0.3070	0.2989
207	0.2891	0.2391
251	0.2208	0.2112

さらに定期的に測定した根元直径が、受光角に対して測定時ごとに変化する状態を、1967年度の測定値について (43) 式をあてはめた結果、実験開始後 110 日目の測定以後については、受光角を成長要因とする密度効果式が成立し、その係数が Table 58 に示すように、時間とともに変化することが認められた。

経過日数ごとの (43) 式による推定根元直径と実測値は、Table 59 に示すように良好な一致がみられた。

このような結果から、受光角あるいはこれと関数的関係にある日照時間、日射量で表わした受光量は、

Table 59. 経過日数ごとの根元直径の推定値と実測値
Comparison between observed and estimated base
diameter of seedling at each days elapsed

受 光 角 Angle (°)	経 過 日 数 Days elapsed							
	110		152		207		251	
	推 定 Est. (mm)	実 測 Obs. (mm)	推 定 Est. (mm)	実 測 Obs. (mm)	推 定 Est. (mm)	実 測 Obs. (mm)	推 定 Est. (mm)	実 測 Obs. (mm)
20	2.09	2.10	2.21	2.20	2.61	2.64	3.11	3.20
30	2.31	2.22	2.49	2.50	2.98	2.99	3.51	3.49
40	2.49	2.60	2.66	2.76	3.21	3.25	3.75	3.85
60	2.59	2.41	2.86	2.74	3.48	3.54	40.3	4.20

林分を対象としたときの本数密度に相当する、単木を対象とした場合の密度要因と考えることができる。

4. 成長予測式の検討

前節で示したように、ヒノキ苗木の根元直径、全重量の成長過程は、一般化されたロジスティック曲線にしたがっており、受光量を密度要因とした密度効果式 (42), (43) 式を、成長予測式として使用できる。

そのほかに、同じロジスティック理論から、次のようにして導いたものについても検討した。

制限された生育空間における population の単位あたりの増加率は、次のように表わされる。

$$1/N \cdot dN/dt = r_m - CN \dots\dots\dots (44)$$

ここで、 N = ある時点における population の大きさ、

r_m = 固有の自然増加率、 C = 定数

COOPER⁸⁾ は、Ponderosa pine について (44) 式をあてはめて検討した結果、次式で材積成長率が表わされると述べている。

$$\begin{aligned} 1/v \cdot dv/dt &= r_0 + r_1/t - CS \\ &= 2.91/t - 0.0000359 S \dots\dots\dots (45) \end{aligned}$$

ここで、 S = 林分密度の尺度で直径和を使用、 t = 期間

S の代わりに受光角を用い、 $t=1$ とすれば、次式で成長率を表わすことができる。

$$1/w \cdot dw/dt = b_0 + b_1/\phi \dots\dots\dots (46)$$

ここで、 w = 苗木の大きさ、 ϕ = 受光角

上式の左辺 $1/w \cdot dw/dt$ は、次のように表わすことができる。

$$1/w \cdot dw/dt = (\log w_E - \log w_S) / (t_E - t_S) \dots\dots\dots (47)$$

ここで、 w_S , w_E = 期首および期末の大きさ

t_S , t_E = 期首および期末の苗齢

$t_E - t_S = 1$, すなわち 1 年の生育期間について、(47) 式の関係をも (46) 式に入れれば次式が得られる。

$$\log w_E - \log w_S = b_0 + b_1/\phi \dots\dots\dots (48)$$

さらに、期首の大きさも成長要因と考えれば、期末の大きさを次式で予測することも可能である。

$$\log w_E = b_0 + b_1 \log w_S + b_2/\phi \dots\dots\dots (49)$$

(49) 式で独立変数として用いている期首の大きさ、受光角で代表させた受光量が期末の大きさに及ぼす貢献度を、FRESE¹⁷⁾ の方法で調べた。

Table 60. (49) 式における各変量の貢献度
Degree of contribution of each variable in the equation (49) to
estimate base diameter and total weight of nursery

測 定 年 度	Measurment year	1966	1967	1969
		根 元 直 径 Basal diameter		
受 光 角	Exposing angle	22.4**	11.4**	43.0**
期首の大きさ	Initial dimension	14.8*	2.4	23.4**
		全 重 量 Total weight		
受 光 角	Exposing angle	47.5**	34.0**	
期首の大きさ	Initial dimension	10.7*	0.0	

注：数値は F の値を示す。

Note: Numerical values shows the F value.

Table 61. 測定年ごと成長予測式ごとの決定係数 (%)
Coefficients of determination for various estimating equations
at each measurement years (%)

測 定 年 度		Measurment year			
予 測 式 Equation	1966		1967		1969
	根 元 直 径 Basal dia.	全 重 量 Total weight	根 元 直 径 Basal dia.	全 重 量 Total weight	根 元 直 径 Basal dia.
(42)	83.5	86.5	51.7	77.0	54.2
(43)	83.5	89.7	44.0	75.3	44.8
(48)	70.6	82.4	52.2	73.6	86.8
(49)	95.4	94.1	56.8	77.5	84.8
(50)	85.9	81.6	46.6	77.4	45.3

Table 62. 成長予測式の適合指数
Index of fitness for various estimating equations

測 定 年 度		Measurment year			
予 測 式 Equation	1966		1967		1969
	根 元 直 径 Basal dia.	全 重 量 Total weight	根 元 直 径 Basal dia.	全 重 量 Total weight	根 元 直 径 Basal dia.
(42)	0.381	3.488	0.354	1.855	0.212
(43)	0.372	3.031	0.390	2.224	0.229
(49)	0.219	2.525	0.351	1.923	0.129
(50)	0.398	4.085	0.373	1.836	0.231

Table 60 に示すように、1967 年度の測定値を除いて、いずれの変量も有意な貢献度を示しているが、期首の大きさによる貢献度は受光角に比べて低いと考えられるので、(49) 式の期首の大きさの項を削除した次式も、検討の対象とした。

$$\log w = b_0 + b_1/\phi \cdots \cdots (50)$$

(42), (43), (48), (49), (50) を成長予測式として、1966 年、1967 年、1969 年度に測定した根元直径、全重量の資料にあてはめた結果を、決定係数で Table 61 に示す。

これらの予測式の従属変量は、(43) 式が逆数で示されている以外は、対数で表わされているので、(43) 式を他の 4 式と決定係数または標準偏差で比較しても意味がない。したがって、FURNIVAL¹⁵⁾ の提案している適合指数で比較を行なった。

従属変量が逆数の場合：

$$I = [w^2]s \dots\dots\dots (51)$$

従属変量が対数の場合：

$$I = [w]s (2.3026)$$

ここで、 I = 適合指数、 w = 苗木の大きさ、

s = 各予測式からの標準偏差、 $[]$ = 幾何平均

なお、(48) 式は成長率の推定式であり、推定精度は他の式とあまり変わらないように考えられるので除いた。

Table 62 に示すように、期首の大きさを変量に含む (49) 式が最も推定精度が良く、受光角のみを変量として用いた他の 3 式は、同じ程度の推定精度であった。

したがって、予測式としては期首の大きさを変量に含む (49) 式のような形の式がすぐれているが、周囲密度の尺度を検討する場合には (42)、(43)、(50) 式で十分であろう。さらに (42) 式は、吉良らが指摘しているように、(43) 式の一部を説明するにすぎないので、今後は (43)、(50) 式を用いて検討を進めることとした。

5. 受光量の表示方法の検討

前節では受光量を受光角で代表させて論を進めてきたが、本節では苗木の受ける陽光量が、遮光装置について計算した日照時間、日射量に比例するという仮定に立って、(43)、(50) 式の受光角の代わりに、これらの量を用いた場合の結果を決定係数で Table 63 に示す。

このことから受光量の表示方法として、受光角、日照時間、日射量のいずれを用いても、同じような結果が得られると考えた。

複雑な形状をしている林分内の各林木の、受光空域のモデルとして作成した円筒型と平行型の遮光装置による実験を行なった 1967 年度の資料に、(43) 式をあてはめた結果を、Table 64 に示す。なお、日射

Table 63. 受光量の表示方法ごとの (43)、(50) 式の決定係数 (%)

Coefficients of determination of the equation (43) and (50) used with various criterion of the quantity that a seedling taken the sun beam (%)

測定年度	Meas. year	1966		1967		1969	
予測式	Equation	(43)	(50)	(43)	(50)	(43)	(50)
表示方法	Criterion	根 元 直 径 Basal diameter					
受 光 角	Angle	85.5	85.9	44.0	46.6	44.08	45.3
日 照 時 間	Period	83.5	82.0	43.9	47.5	44.6	45.2
日 射 量	Intensity	83.7	82.3	44.0	47.8	45.4	46.0
全 重 量 Total weight							
受 光 角	Angle	89.7	81.6	75.3	77.4		
日 照 時 間	Period	89.6	81.4	75.3	77.4		
日 射 量	Intensity	89.8	81.9	75.3	77.5		

量は 60 で除した値を用いた。

装置ごとの (43) 式の係数にはかなりの差がみられ、実際の林分にこのような予測式を適用する場合、受光空域の相違により係数の異なる予測式を使用するのでは、実用的価値がなくなるであろう。

したがって、この 3 種類の受光量の表示方法、すなわち受光角、日照時間、日射量について、装置ごとの資料をこみにして使用できる受光量の表示方法を探究するため、受光量の表示方法ごとに、装置別の (43) 式の係数を比較した。

この結果 Table 65 に示すように日照時間、日射量で受光量を表わした場合、根元直径については共通の成長予測式が使用できるが、全重量については使用できない。また、根元直径の推定精度が全重量に比べて低いため、このような結果になったとも考えられ、この 3 種類の受光量の表示方法では、装置に関係のない共通の成長予測式は得られないと判断した。

BERRY⁶⁾ は、条播きした作物の密度効果を調べるため、配列の違いを考慮して (43) 式を次のように括

Table 64. 装置ごとの (43) 式の係数と推定精度
Coefficients and precision of the equation (43) for each light intercepting equipments

装 置	Equipment	平 行 型 Parallel type			円 筒 型 Cylindrical type		
		b_0	b_1	R^2	b_0	b_1	R^2
根 元 直 径 Basal diameter							
受 光 角	Angle	0.2112	2.2075	44.0(%)	0.2056	4.4494	48.5(%)
日 照 時 間	Period	0.2107	0.0599	43.9	0.2406	0.0324	46.5
日 射 量	Intensity	0.2121	0.0668	44.0	0.2431	0.0321	46.5
全 重 量 Total weight							
受 光 角	Angle	-0.0216	5.0064	75.3	0.0370	5.2504	55.2
日 照 時 間	Period	-0.0229	0.1359	75.3	0.0772	0.0392	55.8
日 射 量	Intensity	-0.0195	0.1515	75.3	0.0802	0.0389	55.8

Table 65. 装置ごとの (43) 式による共分散分析
Covariance analysis of the equation (43) for each light intercepting equipments

受 光 量 表 示	要 因	根元直径 Basal diameter			全 重 量 Total weight		
		自由度 <i>d. f.</i>	平均平方 Mean square	F	自由度 <i>d. f.</i>	平均平方 Mean square	F
受 光 角 Angle	Unknown	20	0.000919		20	0.001110	
	Between coeff.	1	0.001580	1.72	1	0.000018	$1/F=61.7$
	Between const.	1	0.004679	4.92*	1	0.013562	12.83**
日 照 時 間 Period	Unknown	20	0.000935		20	0.001104	
	Between coeff.	1	0.001731	1.85	1	0.018198	16.48**
	Between const.	1	0.000166	$1/F=5.86$	1		
日 射 量 Intensity	Unknown	20	0.000936		20	0.015826	
	Between coeff.	1	0.001278	1.37	1	0.015826	14.35**
	Between const.	1	0.000031	$1/F=30.71$	1		

張している。

$$w^{-\theta} = b_0 + b_1(1/x_1 + 1/x_2) + b_2/x_1x_2 \quad \dots\dots\dots (52)$$

ここで、 x_1 = 列内作物間の間隔、 x_2 = 列間の間隔、

$1/x_1x_2$ = 単位面積あたり本数

θ は、成長過程がここで仮定しているように、ロジスティック曲線のような逓減曲線で示された場合には、1 とおかれる。

(52) 式では x_1 と x_2 が対称的、たとえば 2 単位間隔の列で 1 単位離れている場合と、1 単位間隔の列で 2 単位離れている場合とを区別していないが、列の配置によって収量の異なることを考慮に入れると、次式で説明できると述べている。

$$\begin{aligned} 1/w &= b_0 + b_1(1/x_1 + 1/x_2) + b_2(1/x_1 - 1/x_2) + b_3/x_1x_2 \\ &= b_0 + b_1'/x_1 + b_2'/x_2 + b_3/x_1x_2 \quad \dots\dots\dots (53) \end{aligned}$$

単木の密度要因として前節までは、苗木の頂点と東西方向の遮蔽物の上端とを結ぶ線のなす狭角を、受光角として用いてきたが、遮蔽物の存在する方位によって、受光量は当然変わることが予想される。この実験に用いた両遮光装置の最も著しい相違点は、円筒型では南側が遮蔽されているのに対して、平行型では開放されていることである。したがって、東西方向および南北方向について受光角を求め、(53) 式の x_1 、 x_2 に代入することとした。なお、北側の遮蔽は直射光の受光には直接関係がないので、南北方向の受光角は苗木の頂点と南側の遮蔽物の上端を結んだ線と、苗木の軸の延長線とのなす角の倍数で表わした。

また (53) 式で x_1x_2 は作物あたりの占有面積を示しているが、この場合には直接意味づけることができないので、交互作用項として扱い、両装置の資料をこみにして次式をあてはめた。

$$1/w = b_0 + b_1/\phi_1 + b_2/\phi_2 + b_3/\phi_1\phi_2 \quad \dots\dots\dots (54)$$

ここで、 w = 苗木の根元直径または全重量、 ϕ_1 = 東西方向の受光角、

ϕ_2 = 南北方向の受光角で、平行型では $\phi_2 = \infty$ 、円筒型では $\phi_1 = \phi_2$

(54) 式の係数と決定係数を、Table 66 に示す。

装置別に求めた (43) 式と (54) 式の決定係数を比較すると、同程度の推定精度の得られることがわかった (Table 67)。

つぎに、(54) 式の交互作用項の有意性を検定した結果、Table 68 に示すように根元直径、全重量のいずれについても、有意な貢献は認められないので、この項を削除して、成長予測式として次式を採用することとした。

$$1/w = b_0 + b_1/\phi_1 + b_2/\phi_2 \quad \dots\dots\dots (55)$$

(55) 式の係数および決定係数を、Table 69 に示す。

同様に (50) 式も、遮蔽物の配列を考慮すれば次のように表わすことができる。

$$\log w = b_0 + b_1/\phi_1 + b_2/\phi_2 \quad \dots\dots\dots (56)$$

(56) 式の係数および決定係数を、Table 70 に示す。

(55) 式と (56) 式の推定精度を、(51) 式に示す FURNIVAL の適合指数で比較したところ、Table 71 に示すようにほぼ等しいことがわかった。

両装置で生育させた苗木の根元直径を約 50 日間隔で測定した値と、経過日数ごとに求めた (55) 式によ

Table 66. (54) 式の係数と推定精度
Regression coefficients and coefficients of determination for
the equation (54)

苗木の大きさ Dimension	係 数 Regression coefficient				決定係数 R^2 (%)
	b_0	b_1	b_2	b_3	
根元直径 Basal dia.	0.1967	2.5958	3.7640	— 6.3726	47.4
全重量 Total weight	0.0478	5.6510	10.9393	—30.8833	73.2

Table 67. (43) と (54) 式の決定係数による推定精度の比較
Comparison between the precision of the equation (43) and (54)
by thier coefficient of determination

苗木の大きさ Dimension	Eq. (43)		Eq. (54)
	平行型 Parallel type	円筒型 Cylindrical type	
根元直径 Basal dia.	40.0 (%)	48.5 (%)	47.4 (%)
全重量 Total weight	75.3	55.2	73.2

Table 68. (54) 式の交互作用項の有意性の検定
Test of the significance of an interaction term in the equation (54)

要 因 Source	根元直径 Basal dia.	全重量 Total weight	
	Mean square	F	Mean square
交互作用項 Interaction term	0.000161	1/ F 5.59	0.003784
原因不明 Unknown	0.000900		0.001018

Table 69. (55) 式の係数と決定係数
Regression coefficients and coefficients of determination for
the equation (55)

苗木の大きさ Dimension	係 数 Regression coeff.			R^2 (%)
	b_0	b_1	b_2	
根元直径 Basal dia.	0.2073	2.3070	2.0831	46.9
全重量 Total weight	0.0584	4.2512	2.7934	68.2

Table 70. (56) 式の係数と決定係数
Regression coefficients and coefficients of determination for
the equation (56)

苗木の大きさ Dimension	係 数 Regression coeff.			R^2 (%)
	b_0	b_1	b_2	
根元直径 Basal dia.	0.6722	— 3.6593	—3.2957	48.2
全重量 Total weight	1.3250	—13.3976	—9.9634	67.6

Table 71. (55) と (56) 式の適合指数
Index of fitness for the equation (55) and (56)

苗木の大きさ	Dimension	Eq. (55)	Eq. (56)
根 元 直 径	Basal dia.	0.3836	0.3784
全 重 量	Total weight	2.3584	2.0918

Table 72. 経過日数ごとの根元直径の実測値と (55) 式による推定値 (mm)
Comparison between observed base diameter and estimated value by
the equation (55) for each days elapsed (mm)

受 光 角 Angle		経 過 日 数 Days							
		110		152		207		251	
E-W (°)	S-N (°)	Est.	Obs.	Est.	Obs.	Est.	Obs.	Est.	Obs.
平 行 型 Parallel type									
20	∞	2.13	2.10	2.23	2.20	2.62	2.64	3.10	3.20
30	∞	2.30	2.23	2.49	2.50	2.98	2.99	3.52	3.49
40	∞	2.40	2.62	2.64	2.77	3.20	3.25	3.77	3.85
60	∞	2.51	2.46	2.81	2.74	3.46	3.54	4.07	4.20
円 筒 型 Cylindrical type									
40	40	2.24	2.33	2.59	2.65	2.90	2.94	3.15	3.19
60	60	2.38	2.32	2.77	2.73	3.21	3.17	3.56	3.42
80	80	2.47	2.38	2.88	2.80	3.40	3.42	3.81	3.92
100	100	2.52	2.63	2.94	3.04	3.53	3.55	3.98	4.07
R ² (%)		29.9		53.4		52.1		46.9	

る推定値は、Table 72 に示すようにかなりよい一致を示している。

このような結果から、(55) 式または (56) 式で示す成長予測式により、受光角を周囲密度の尺度とした成長解析が、受光空域の形状に関係なく行なえるものと判断した。

5. 受光角で表わした周囲密度による林木の成長の解析

1. 林木の受光空域の表示方法

受光量の表示方法として、甲斐原²⁴⁾の提案した受光角を用いて、ヒノキ苗木について円筒型および平行型遮光装置で実験を行なった結果、東西方向の受光角のほかに南北方向の受光角を考慮すれば、受光空域の形状の相違に関係なく、(55) 式または (56) 式の形で表わした成長予測式で、成長解析のできることを示した。

林木の場合は、前述したように周囲木の樹冠による直射光の遮蔽状態は、方位によって異なり、また樹冠の重複によって透過光量にも差を生ずるが、これらの複雑な要因は、ほぼ等間隔に植栽されている同齡単純林の場合には、最も大きな影響を及ぼす周囲木の受光角で表わした受光量に包含されると仮定し、ヒノキ苗木による実験の場合と同様に、北側の周囲木は、その樹冠が対象木を被圧していない限り直射光の遮蔽には無関係であるので、夏至における太陽軌跡を基準に、標本木を中心として東北東から西北西に至

る方位を、45° 間隔の 5 区、すなわち東北東～東南東、東南東～南南東、南南東～南南西、南南西～西南西、西南西～西北西の 5 方位区および東北東～南東、南東～南西、南西～西北西の 3 方位区の 2 とおりに区画し、周囲木を、区画の方法別に方位区で分類した。

葉量は立地条件の等しい一つ同齡單純林分内では、受光量と密接な關係があると考えられ、また樹冠長と密接な關係も認められている。したがって、受光量と樹冠長の間には、ある關係の存在することが想像される。また、枝下高の変動は樹高に比して小さく、樹冠長したがって葉量の相違は、樹高の差でかなりの部分の説明ができる。このことから、林木の受光角は枝下高から測るより、ヒノキ苗木の場合と同様、梢頭を基点とするほうが妥当と考えた。しかし、後述する受光角計算の便宜を考えて、本研究では樹高の 2/3 に相當する樹幹上の点と、周囲木の梢頭とを結んだ線と、その木の幹軸とをなす狭角で受光角を表わすこととした。

また、各方位区に含まれる周囲木の中で、最小の受光角を持つ木が最大の影響を及ぼしているの、この木の受光角で、その方位区の受光角を代表させることとした。

したがって、前章で説明した (55) 式を拡張して、5 方位区および 3 方位区に分類した場合について、それぞれ次式で林木の成長の解析を行なうこととした。

$$1/w = b_0 + b_1/\phi_1 + b_2/\phi_2 + b_3/\phi_3 + b_4/\phi_4 + b_5/\phi_5 \dots (57)$$

$$1/w = b_0 + b_1/\phi_1 + b_2/\phi_2 + b_3/\phi_3 \dots (58)$$

ここで、添字は方位区を示している。

2. 受光角の計算

調査対象林分の立木位置図を作成し、標本木の周りの木を 5 方位区または 3 方位区に分類し、各方位区ごとに枯損木を除いて標本木に近いほうから、3～5 本の周囲木を選び、標本木までの距離を図上で測定し、次式で周囲木ごとに受光角を算出した。

$$\phi = \tan^{-1} [d / (h + h_0 - 2/3 h_s)] \dots (59)$$

ここで、 h = 周囲木の樹高、 h_s = 標本木の樹高、 h_0 = 標本木と周囲木の基部の高低差で、周囲木の基部が標本木より上にあれば正、下にあれば負の値をとる、 d = 標本木と周囲木の幹距、 ϕ = 度単位で表わした受光角

受光角の計算のため、農林研究計算センターで使用している TOSBAC-3400 を利用して、受光角を計算するプログラムを作成した。

このプログラムは Table 73 に示すように、標本木ごとに標本木番号、周囲木番号、方位区、各測定時における受光角が out put されるように組んである。各方位区ごとに、算出された受光角の中で最小のものを、その方位区の受光角とした。

3. 単一林分における樹高成長

閉鎖された林分の上層林冠を構成する林木の樹高成長は、その木の遺伝質や地力に支配され、同齡單純林内における各林木の樹高成長曲線は、地位指数曲線に似た曲線群で表わされると想像できる。

この仮定を検討するため、高崎営林署管内の霧島国有林および西都営林署管内の多羅原国有林内に設定されているヒノキ収獲試験地の定期調査の際、霧島試験地では優勢木 4 本、準優勢木、中庸木を各 3 本、多羅原試験地では各樹木級から 2 本の標本木を選び、樹幹解析を行なって、現在の林齢を基準に 5 年間隔で過去の樹高を求めた。

Table 73. 電算機による計算結果の例
Example of out put

EXPOSING ANGLE TO THE SUM					
TREE DIREC	NUMBER OF MEASUREMENT				
NO TION	1	2	3	4	5
134 CENT	0.0000	0.0000			
646 E	168.6125	22.6043			
204 E	43.8222	40.3681			
140 E	49.0089	52.8889			
135 SE	14.2396	13.2405			
137 SE	34.6850	34.9920			
139 SE	44.6803	48.6778			
117 SE	32.1070	31.1916			
119 S	22.3202	25.3073			
116 S	33.2184	33.4389			
118 S	31.8572	33.0550			
133 SW	41.0986	35.9628			
123 SW	27.9769	31.9055			
122 SW	145.7988	42.7132			
131 W	30.8402	29.5253			
130 W	43.0196	43.9823			
216 W	45.2451	46.0247			
129 W	56.1873	53.0450			

Table 74. 標本木一覽表
List of sample trees

霧 島 Kirishima (52 yrs.)			多 羅 原 Tarahara (60 yrs.)		
胸高直径 d.b.h. (cm)	樹 高 Height (m)	樹 木 級 Crown class	胸高直径 d.b.h. (cm)	樹 高 Height (m)	樹 木 級 Crown class
26.1	16.94	優 Dom.	22.5	18.11	準 優 Codom.
14.1	12.03	中 庸 Int.	12.8	14.26	中 庸 Int.
16.2	14.58	準 優 Codom.	15.8	16.21	" "
18.3	14.06	" "	38.0	23.50	優 Dom.
19.6	15.82	優 Dom.	17.5	18.47	" "
17.8	14.72	準 優 Codom.	22.2	17.26	準 優 Codom.
22.0	15.58	優 Dom.			
13.1	12.08	中 庸 Int.			
15.1	13.97	" "			
21.5	15.28	優 Dom.			

標本木の一覽表を Table 74 に、各標本木の樹高成長曲線を Fig. 20, 21 に示す。

試験地ごとの各標本木の樹高成長曲線は、ほぼ規則的な変化を示しているので、一般に用いられている地位指数曲線の作製方法を適用して、単一林分における平均化した樹高成長曲線群を次のようにして作成した。

(1) 霧島試験地では 22~52 年、多羅原試験地では 20~60 年について、5 年間隔で測定した標本木の樹高の平均値に次に示す修正指数曲線式をあてはめ、ガイドカーブを作成した。

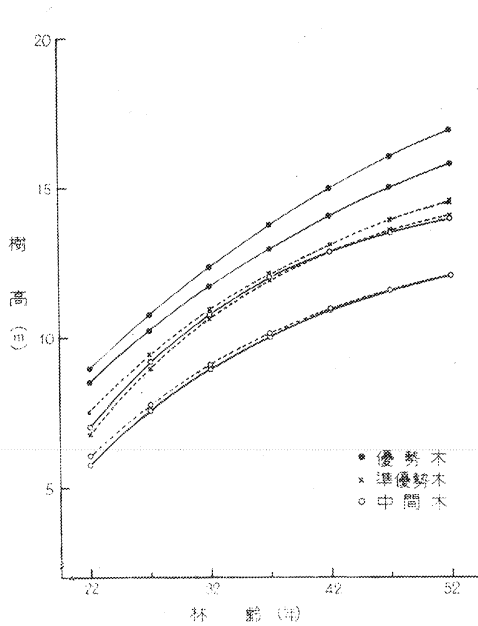


Fig. 20 樹高成長曲線 (霧島試験地)
Tree height growth curves
(Kirishima plot).

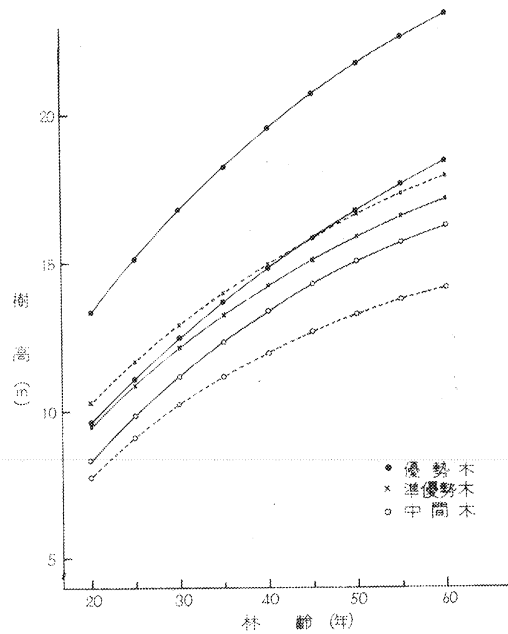


Fig. 21 樹高成長曲線 (多羅原試験地)
Tree height growth curves
(Tarahara plot).

Table 75. 試験地ごとの修正指数曲線の係数
Coefficients of the modified exponential equation for each plots

試 験 地 Plot	係 数 Coefficient		
	K	a	b
霧 島 Kirishima	17.06	-11.73	0.8047
多 羅 原 Tarahara	22.73	-12.93	0.8844

$$h_s = K + ab^t \quad \dots\dots\dots (60)$$

ここで、 h_s =平均樹高、 t =林齡、 K, a, b =定数

試験地ごとに求めた (60) 式の係数を Table 75 に示す。

(2) 5年間隔で測定した各標本木の樹高と、対応する林齡におけるガイドカーブ上の樹高との偏差から、林齡ごとに標準偏差を求め、図上で平滑化して修正標準偏差を求めた。

(3) 測定期間の中央の林齡を基準齡とした。霧島試験地では 37 年、多羅原試験地では 40 年を基準齡とした。

(4) 基準齡における樹高を任意に定め、各林齡における樹高を次式で算出した。

$$h_t = \bar{h}_t + s_t(h_s - \bar{h}_s)/s_s \quad \dots\dots\dots (61)$$

ここで、 h_t = t 年における樹高、 $\bar{h}_t$ = t 年におけるガイドカーブ上の樹高、

h_s =基準齡における任意に定めた樹高、

$\bar{h}_s$ =基準齡におけるガイドカーブ上の樹高、 s_t = t 年における修正標準偏差、

s_s =基準齡における修正標準偏差

Table 76. 単木の樹高成長曲線の適合性
Fitness of tree height growth curves for each plots

試 験 地 Plot	期 首 → 基 準 齡 Beginning → Base age	期 末 → 基 準 齡 End → Base age
霧 島 多 羅 原 Kirishima Tarahara	23.54* 11.20	6.81 4.50

注：許容誤差を 0.5m としたときの χ^2 の値。

Note: value when the allowable error is 0.5m.

(61) 式から、単一林分内における平均化した樹高成長曲線群が得られる。

このような曲線群の適合性を判定する方法として、第 I 編で触れたように CURTIS¹⁰⁾ は、標本木ごとに、期首または期末の実測樹高に対応する基準齡における樹高を、(61) 式で得られる曲線群から読みとり、その標本木の基準齡における実測樹高との差を求め、試験地ごとに t 検定で適合性を判断している。

$$t = |\bar{h}_d| / (\sum (h_d - \bar{h}_d)^2 / n(n-1))^{1/2} \dots\dots\dots (62)$$

ここで、 h_d = 基準齡における曲線群からの推定樹高と実測樹高との差、

$\bar{h}_d = h_d$ の平均、 n = 標本数

$\bar{h}_d = 0$ の仮説が捨てられないとき適合が良いとしている。

しかし、FRESE¹³⁾ の指摘しているように、 t 検定では試験地ごとの推定樹高と実測樹高との差の標準偏差が結果を左右し、差の平均値が等しくても標準偏差の大ききで逆の結論が導かれる。したがって、第 I 編の (38) 式と同じく、 χ^2 - 検定で適合性の判断を行なうこととした。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{h}_S - h_S)^2 \cdot (1.96)^2 / E^2 \dots\dots\dots (63)$$

ここで、 h_S = 基準齡における実測樹高、

$\hat{h}_S$ = 基準齡における推定樹高、 E = 許容誤差

この場合、 $\hat{h}_S$ は、次式から求めた。

$$\hat{h}_S = \bar{h}_S + s_S(h_t - \bar{h}_t) / s_t \dots\dots\dots (64)$$

ここで、 $\bar{h}_S$ = 基準齡における推定樹高、

h_t = 期首または期末の実測樹高

許容誤差を 0.50 m とすれば、Table 76 に示すように (63) 式で求めた χ^2 の値は、霧島試験地で期首から推定した場合を除いて有意でなかった。

霧島の場合も許容誤差を 0.60 m とすれば、 χ^2 の値は有意でなくなった。そのほかの試験地について行なった検定でも、許容誤差 0.5 m で χ^2 の値は有意でなかった。したがって、単一林分における各林木の樹高は、(60)、(61) 式で求めてもさしつかえないと思われ、平均化した樹高成長曲線群によって、危険率 5% で、0.50 ~ 0.60 m の誤差を容認すれば推定できると考えられる。

受光量は当然樹高成長にも影響するが、直径や材積に比べて影響の小さいことがヒノキ苗木の実験から予想され、また受光角は標本木と周囲木の樹高差から求められるので、本研究では樹高は平均化した樹高成長曲線群から求めることとし、受光角による解析は胸高直径と材積を対象とした。

4. 解析に用いた資料

受光角と林木の成長との関係解析のため、資料として、林業試験場九州支場実験林のテーダマツ林と、

Table 77. 調査時ごとのテーダマツ試験地の林分構造
Stand structure in Loblolly pine experimental plot
at each time of measurement

林 齡 Age (yrs.)	平均直径 Average dia. (cm)	林 分 高 Stand height (m)	立 木 本 数 No. of stems	断 面 積 Basal area (m ²)	材 積 Volume (m ³)
2,000本区 Plot planted 2,000 seedlings					
8	12.7	7.7	2,175	27.3	123.7
9	13.6	8.4	2,075	31.9	154.1
10	14.4	9.4	1,975	33.8	179.6
11	15.1	10.0	1,850	34.8	191.6
12	15.9	10.6	1,775	37.8	219.0
4,000本区 Plot planted 4,000 seedlings					
8	9.0	6.7	3,733	25.8	107.0
9	9.4	7.0	3,667	28.8	125.9
10	10.0	7.5	3,467	30.2	138.7
11	10.5	8.3	3,300	31.2	157.7
12	11.3	9.1	3,033	33.4	181.8
6,000本区 Plot planted 6,000 seedlings					
8	8.3	6.9	5,233	30.1	129.0
9	9.1	7.4	4,600	32.5	147.5
10	9.8	7.9	4,067	32.9	155.8
11	10.4	8.8	3,700	32.8	169.9
12	11.0	9.5	3,467	35.6	196.5

Table 78. ヒノキ収穫試験地の地況および林分構造
Stand environment and structure for each permanent
sample plots of Hinoki

試 験 地	Plot	仁 川 1 号 Nikawa No.1	仁 川 2 号 Nikawa No.2	万 膳 1 号 Manzen No.1	万 膳 3 号 Manzen No.2
面 積	Area (ha)	0.30	0.24	1.00	0.49
海 拔 高	Elevation (m)	340	350	720	800
傾 斜	Slope (°)	緩	緩	緩	緩
方 位	Direction	南	南	北西	北西
林 齡	Age	38	38	53	53
平均直径	Av. diameter (cm)	18.8	17.6	20.2	17.6
林 分 高	Stand height (m)	15.5	16.2	15.4	13.1
立木本数	No. of stems	1,949	2,037	1,985	2,474
断 面 積	Basal area (m ²)	56.2	51.4	65.4	62.0
材 積	Volume (m ³)	454.2	429.5	510.4	461.9

熊本営林署および加治木営林署管内に設定されているヒノキ収穫試験地の定期調査の測定値を用いた。

テーダマツ (*Pinus taeda* L.) 林は、昭和32年に2年生苗を ha あたり 2,000 本、4,000 本、6,000 本の3種の植栽密度で植栽したもので、昭和36年3月より、毎年測定を行ってきたものである。なお試験区面積は、3,000 本区、6,000 本区は 0.04 ha (20×20m)、4,500 本区は 0.03 ha (20×15m) で、西向きの緩斜面に設置されている。

試験区ごと調査時ごとの林分構造を、Table 77 に示す。

各試験区の中央部で、各20本ずつの標本木を選び解析に使用した。

ヒノキ収穫試験地は、熊本営林署管内の仁川 1 号と 2 号試験地、および加治木営林署管内の万膳 1 号と 3 号試験地を対象とした。各試験地の地況および林分構造を、Table 78 に示す。

仁川 1 号および 2 号試験地は、5 年前の 33 年生のとき、下層木を主な対象として第 1 回目の間伐を実施している。間伐歩合は本数で約 30%，材積で 14～15% であった。間伐後の閉鎖の回復は順調で、5 年後の調査時には林冠はほぼ完全に閉鎖されていた。

これに対して万膳 1 号および 3 号試験地は、37 年生の時設定した後、枯損木の除去を除いて間伐は行なわれていない。

標本木は、周囲の林冠が閉鎖状態にある林木の中から、各直径階ごとに 1～2 本、計約 30 本あて、試験地ごとに選んだものである。

5. 受光角と単木材積との関係解析

テーダマツの 3 種の植栽密度試験区については、8 年生から 12 年生まで、ヒノキ試験地については、最近の調査資料について、5 方位区の受光角と単木材積との関係を (57) 式の形で表わした、次式で検討した。

$$1/v = b_0 + b_1/\phi_1 + b_2/\phi_2 + b_3/\phi_3 + b_4/\phi_4 + b_5/\phi_5 \dots\dots\dots (65)$$

ここで、 v = 標本木の材積、 ϕ_i = i 方位区の受光角

Table 79. テーダマツ試験区ごとの (65) 式の決定係数 (%)
Coefficients of determination of the equation (65) for each Loblolly pine experimental plots at each time of measurement (%)

試 験 区 Plot		林 齢 Age (yrs.)				
		8	9	10	11	12
2,000本区	2,000 seedlings	85.8	85.5	91.7	89.5	82.4
4,000本区	4,000 seedlings	81.8	79.6	82.9	79.0	73.1
6,000本区	6,000 seedlings	50.8	60.7	47.6	56.9	59.6

Table 80. ヒノキ試験地ごとの (65) 式の決定係数 (%)
Coefficients of determination of the equation (65) for each permanent sample plots of Hinoki

試 験 地 Plot	仁 川 1 号 Nikawa No. 1	仁 川 2 号 Nikawa No. 2	万 膳 1 号 Manzen No. 1	万 膳 3 号 Manzen No. 3
R^2 (%)	58.7	57.0	46.9	65.8

Table 81. 樹種、試験地ごとの (66) 式の決定係数 (%)
Coefficients of determination of the equation (66) for each species and plots (%)

樹 種 Species		Loblolly pine		Hinoki	
試 験 区 Plot		林 齢 Age (yrs.)		試 験 地 Plot	決 定 係 数 R^2
		11	12		
2,000本区	2,000 seedlings	85.1	81.0	Nikawa No. 1	42.1
4,000本区	4,000 seedlings	82.5	77.7	" No. 2	56.4
6,000本区	6,000 seedlings	67.5	65.6		

(65) 式の適合状態を決定係数で Table 79, 80 に示すが、テグマツの 6,000 本区が他の試験区に比して適合が悪くなったのは、枯死寸前の木まで含めて受光角を算出したためと考えられる。

なお、テグマツ林の解析は手計算で行なったが、ヒノキ試験地の解析に必要な重回帰式の解は、すべて林業試験場の NEAC-1240 により、その多変量解析のプログラムを利用して求めたものである。

同様に、3 方位区に区分した場合の受光角と標本木の材積との關係を、テグマツの 11, 12 年生および仁川 1 号、2 号試験地の資料について、(58) 式と同じ形の次式をあてはめた結果を決定係数で Table 81 に示す。

$$1/v = b_0 + b_1/\phi_1 + b_2/\phi_2 + b_3/\phi_3 \dots\dots\dots (66)$$

両方位区分による単木材積の推定精度を比較すると、テグマツの 2,000 本区、およびヒノキでは 5 方位区分の方がいくぶんよくなっているが、テグマツの 4,000 本区、6,000 本区では、3 方位区分が良い結果となっている。

これは、周囲木との幹距が長くなるほど、標本木の樹冠により多くの周囲木が影響するのに対して、幹距が短いと、1 木の周囲木による遮蔽の範囲が広くなり、5 方位区分では影響の小さな木まで含まれるのに対して、3 方位区分では、大きな影響を及ぼす周囲木だけを対象とすることになり、わずかではあるが推定精度が向上したのと考えることができよう。

このことは、ha あたり本数は似ているが、いくぶん粗な部分で標本木を選んだ仁川 1 号試験地では、3 方位区分の決定係数が低下したのに対して、いくぶん密な部分で標本木を選んだ第 2 号試験地では、ほぼ同じような値の得られたことから推察される。

6. 受光角と胸高直径との關係解析

受光角と単木材積との關係解析の場合と同じ資料を用いて、5 方位区分の受光角と標本木の胸高直径との關係を、(65) 式と同様の次式で検討した。その結果を決定係数で Table 82, 83 に示す。

$$1/d = b_0 + b_1/\phi_1 + b_2/\phi_2 + b_3/\phi_3 + b_4/\phi_4 + b_5/\phi_5 \dots\dots\dots (67)$$

ここで、 d = 標本木の胸高直径

Table 82. テグマツ試験区ごとの (67) 式の決定係数 (%)
Coefficients of determination of the equation (67) for each
Loblolly pine experimental plots at each measurement times (%)

試 験 区 Plot		林 齢 Age (yrs.)				
		8	9	10	11	12
2,000本区	2,000 seedlings	86.0	85.3	91.3	89.0	81.0
4,000本区	4,000 seedlings	78.3	75.3	79.1	75.8	71.1
6,000本区	6,000 seedlings	49.0	61.2	59.1	54.3	58.4

Table 83. ヒノキ試験地ごとの (67) 式の決定係数
Coefficients of determination of the equation (67) for
each Hinoki permanent sample plots

試 験 地 Plot	仁 川 1 号 Nikawa No. 1	仁 川 2 号 Nikawa No. 2	万 膳 1 号 Manzen No. 1	万 膳 3 号 Manzen No. 3
R^2 (%)	60.7	56.8	47.6	66.5

Table 84. 樹種, 試験地ごとの (68) 式の決定係数 (%)
Coefficients of determination of the equation (68) for
each species and plots (%)

樹 種 Species	試 験 区 Plot	Loblolly pine		Hinoki	
		林 齢 Age (yrs.)		試 験 地 Plot	決 定 係 数 R^2
		11	12		
2,000本区	2,000 seedlings	82.9	80.2	Nikawa No. 1	46.9
4,000本区	4,000 seedlings	78.3	74.5	" No. 2	55.5
6,000本区	6,000 seedlings	64.2	65.8		

3 方位区分の受光角と標本木の胸高直径に対して, 次式をあてはめた結果を決定係数で Table 84 に示す。

$$1/d = b_0 + b_1/\phi_1 + b_2/\phi_2 + b_3/\phi_3 \dots\dots\dots (68)$$

この場合も単木材積と同様に, テーダマツでは植栽密度の高いほど, 5 方位区分に比べて推定精度は向上し, 粗な部分で標本木を選んだ仁川 1 号では, 推定精度が低下したのに対して, 比較的密な部分で標本木を選んだ仁川 2 号では, いずれの方位区分についてもほぼ同様の結果が得られた。

7. 過去の受光角による関係解析

林木の成長はその年の環境条件のほかに, これまでに蓄積されたその木の成長活力に影響されることが大きいと考えられる。その例として, 林木の連年成長量の間には高い相関が認められている。蓄積された林木の成長活力は, 過去の各時点における林木の大きさで表現できると仮定すれば, これまでの結果から, 過去の各時点における受光角と関係づけることができる。

したがって, 標本木の現在の単木材積, 胸高直径を過去の受光角で推定する方法を検討した。資料として, テーダマツの各試験区の 11 年生と 12 年生の測定値を用い, 4 年前までの受光角を変量とする (66)

Table 85. 過去の受光角を用いた (66), (68) 式の決定係数 (%)
Coefficients of determination of the equation (66) and (68)
estimated from the past exposing angle to the sun (%)

木の大きさ Dimension	試 験 区 Plot	林 齢 Age (yrs.)	受光角の測定時期 Measurement time of the angle				
			現 在 Present	1 年 前 1 year ago	2 年 前 2 yrs. ago	3 年 前 3 yrs. ago	4 年 前 4 yrs. ago
単 木 材 積 Tree volume	2,000 本区 2,000 seedlings	12	81.0	85.8	84.5	75.7	68.7
		11	85.1	86.0	75.0	70.0	
	4,000 本区 4,000 seedlings	12	77.7	82.8	85.8	81.5	81.3
		11	82.5	85.8	81.9	81.9	
	6,000 本区 6,000 seedlings	12	65.6	72.0	64.9	64.4	54.0
		11	67.5	68.0	65.5	55.7	
胸 高 直 径 d. b. h.	2,000 本区 2,000 seedlings	12	80.2	85.6	85.0	77.4	73.1
		11	82.9	83.2	76.3	73.0	
	4,000 本区 4,000 seedlings	12	74.5	78.9	80.8	77.3	73.6
		11	78.3	80.7	77.3	76.0	
	6,000 本区 6,000 seedlings	12	65.8	70.0	62.7	65.5	55.5
		11	64.2	65.0	64.7	56.1	

Table 86. 現在および1年前の受光角による (65), (67) 式の決定係数 (%)
Coefficients of determination of the equation (65) and (67) estimated from
the exposure angle to the sun measured at present and 1 year ago (%)

單 木 材 積 Tree volume		胸 高 直 徑 d. b. h.	
受光角の測定時期 Measurement time of the angle			
現 在 Present	1 年 前 1 year ago	現 在 Present	1 年 前 1 year ago
58.7	58.1	60.7	59.5

式, (68) 式をあてはめた結果を, 決定係数で Table 85 に示す。

(40), (41) 式に示す本数密度効果式の密度は, 期首, 期末のいずれを用いても, 期末における林木の大きさと関係づけることができるといわれているが, 受光角の場合も, ここで検討した4年前までの受光角のいずれを用いても, (66), (68) 式は統計的に有意であった。しかし, 推定精度は1年前の受光角を用いた場合が, 平均して良いようである。

ヒノキ試験地では, 標本木の過去の樹高測定値がないため, 測定精度の吟味を目的として, 定期調査の前年に試験地内の全林木の胸高直径, 樹高の測定を行なった仁川1号試験地の資料に, (65) 式, (67) 式をあてはめた。その結果を決定係数で Table 86 に示す。

この場合には現在の受光角を用いたほうが, わずかながら良い結果が得られた。いずれにしても, 現在または前年の受光角を用いれば (65)~(68) 式により, 胸高直径, 単木材積と受光角との関係を説明できると考えられる。

8. 単木材積, 胸高直径の推定精度

前節までの検討結果から, テーダマツ林については3方位区分による前年の受光角を用いた (66), (68) 式, ヒノキ試験地については5方位区分による現在の受光角を用いた (65), (67) 式による単木材積, 胸高直径の推定方法が比較的良い結果を与えることがわかった。これらの各式の係数および決定係数で表わした推定精度を Table 87~89 に示す。

なお, これらの式は受光角, 胸高直径に対しては1/10の値, 単木材積は10倍の値を用いて求めたものである。

これまでの検討は同一試験区の標本木の胸高直径, 単木材積を推定する場合, 最良の結果の得られる受光角を探究してきたので, 決定係数の大ききで比較を行ってきたが, この係数は従属変量の変動の程度で変わるので, 試験区間の推定精度を直接対比させることはできない。

推定精度を示す指標としていろいろな提案があるが, 本研究では実用的観点から, 推定値が実測値に対して, ある確率で, 許容できる誤差の範囲内にあれば, その推定方法は満足のいくものと考えることとして, FRESE¹⁶⁾の提案している第I編の(47)式に示す χ^2 -検定を採用し, 危険率5%で χ^2 の値が有意とならないために想定すべき許容誤差率を求めた。

$$\begin{aligned}\chi^2 &= (196)^2 \sum_{i=1}^n [(\hat{y}_i - y_i)/y_i]^2 / P^2 \\ &= (196)^2 \sum_{i=1}^n [\hat{y}_i/y_i - 1]^2 / P^2 \dots\dots\dots (68)\end{aligned}$$

ここで, y_i =実測値, $\hat{y}_i$ =推定値, P =許容誤差率

Table 87. テーダマツの試験区ごと測定時ごとの (66), (68) 式の係数
Regression coefficients of the equation (66) and (68) for each Lobolly
pine experimental plots and each time of measurement

林 齡 Age (yrs.)	胸 高 直 径 d. b. h.				單 木 材 積 Tree volume			
	係 数 Regression coefficient							
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_0	b_1	b_2	b_3
2,000本区				2,000 seedlings				
12	-0.1508	1.1597	0.7486	0.9553	-1.8770	4.4562	2.7329	3.2279
11	-0.0536	1.1585	0.6035	0.9866	-1.7770	4.8268	2.5452	3.5469
10	0.0074	1.2783	0.3473	1.1380	-1.7286	5.9037	1.6526	4.3824
9	0.0641	1.3399	0.1955	1.3032	-1.7388	6.6906	1.4242	
4,000本区				4,000 seedlings				
12	-0.0638	0.5550	0.5530	2.0290	-5.9537	5.7728	1.7892	19.6378
11	-0.0807	1.1017	0.6098	1.6460	-6.6024	12.5935	3.3478	13.8577
10	-0.1014	1.4328	0.5318	1.6361	-6.7894	14.1837	2.0324	17.3717
9	-0.0795	1.4502	0.5635	1.9154	-7.2137	15.5951	2.8474	19.2735
6,000本区				6,000 seedlings				
12	0.3045	0.2994	0.8249	0.4435	-1.2990	1.7458	4.6323	2.2620
11	0.5292	-0.0517	0.7954	0.4081	-0.2810	-0.0089	4.7959	2.1990
10	0.4917	0.0438	0.8300	0.5204	-0.5123	0.7307	4.9585	3.1204
9	0.5740	-0.0880	0.9511	0.3818	-0.0416	-0.1451	5.9909	2.1020

Table 88. テーダマツの試験区ごとの (66), (68) 式の決定係数 (%)
Coefficients of determination of the equation (66) and (68) for
Loblolly pine experimental plots (%)

木の大きさ Dimension	試 験 区 Plot	林 齢 Age (yrs.)			
		9	10	11	12
単 木 材 積 Tree volume	2,000 本区 2,000 seedlings	70.2	76.0	86.4	85.8
	4,000 本区 4,000 seedlings	84.6	85.3	85.8	82.8
	6,000 本区 6,000 seedlings	55.2	67.9	68.0	72.0
胸 高 直 径 d. b. h.	2,000 本区 2,000 seedlings	70.2	76.0	83.2	85.6
	4,000 本区 4,000 seedlings	78.2	79.9	80.7	78.9
	6,000 本区 6,000 seedlings	57.0	66.7	63.0	70.0

テーダマツ林の6,000本区は枯損が多く、決定係数も低いので、これを除いた他の2区について (66) 式, (68) 式, ヒノキ試験地について (65) 式, (67) 式で単木材積, 胸高直径を推定したとき, この推定方法が満足できるものとして採用できるために想定すべき, 最小の許容誤差率を次式から求めた。

Table 89. ヒノキの収穫試験地ごとの (65), (67) 式の係数と決定係数
Regression coefficients and coefficients of determination of the equation (65) and (67) for permanent sample plots of Hinoki

試 験 地 Plot		係 数 Regression coefficient						決定係数 R^2 (%)
		単木材積 Tree volume						
		b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	
Nikawa	No. 1	-0.4524	0.4779	0.5412	0.9508	0.8821	-0.1277	58.7
"	No. 2	-0.3353	0.8023	0.3418	0.1920	0.1983	0.5388	57.0
Manzen	No. 1	-0.3861	0.8431	0.2997	0.3835	0.2314	0.1210	46.9
"	No. 3	-1.1816	0.3398	0.8482	1.5055	0.8041	1.5638	65.8
胸 高 直 径 d. b. h.								
Nikawa	No. 1	0.0771	0.2542	0.2517	0.4546	0.3595	0.0047	60.0
"	No. 2	0.1411	0.4382	0.2006	0.1175	0.1180	0.1824	56.8
Manzen	No. 1	0.0242	0.5084	0.2034	0.1971	0.1120	0.1119	47.6
"	No. 3	-0.2658	0.1719	0.3677	0.6609	0.3939	0.7387	66.5

Table 90. 想定すべき最小の許容誤差率 (テーダマツ試験地) (%)
Minimum percentage of the allowable error in the equation (66) and (68) (Loblolly pine) (%)

試 験 区 Plot	式 Equation	木 の 大 き さ Dimension	林 齢 Age (yrs.)			
			9	10	11	12
2,000 本区	(66)	単木材積 Tree volume	42.6	41.6	38.0	40.3
2,000 seedlings	(68)	胸高直径 d. b. h.	19.8	20.6	18.8	20.8
4,000 本区	(66)	単木材積 Tree volume	34.3	34.3	27.1	31.1
4,000 seedlings	(68)	胸高直径 d. b. h.	17.3	16.0	14.4	15.2

Table 91. 想定すべき最小の許容誤差率 (ヒノキ試験地) (%)
Minimum percentage of the allowable error in the equation (66) and (68) (Hinoki) (%)

木 の 大 き さ Dimension	式 Equation	試 験 地 Plot			
		Nikawa No. 1	Nikawa No. 2	Manzen No. 1	Manzen No. 3
単木材積 Tree volume	(65)	38.2	39.0	43.4	43.2
胸高直径 d. b. h.	(67)	17.8	18.7	19.7	14.9

$$P = \left[(196)^2 \sum_{i=1}^n \left[(\hat{y}_i/y_i - 1)^2 / \chi_0^2 \right] \right]^{1/2} \dots\dots\dots (69)$$

ここで、 χ_0^2 = 自由度 n , 危険率 5% の χ^2 -表の値

この結果を, Table 90, 91 に示す。

この結果, テーダマツ林, ヒノキ試験地のいずれについても, 胸高直径の推定では 14~20%, 材積推定では 27~43% の許容誤差率を想定する必要があると考えられる。

9. 単木材積の推定方法

前節で示したように受光角を独立変量として、(65) 式または (66) 式で単木材積を推定する場合、27～43% の許容誤差率を認める必要があるが、これに対して、胸高直径の推定では 14～20% と約 1/2 の誤差率を許容すればよい。

単木材積は胸高直径と樹高を用いて材積表から求めることができ、樹高は受光角を算出するために用いられるので、(67) 式または (68) 式で推定した胸高直径と、受光角算出に用いた樹高とにより、材積表から材積を算定する方法を検討した。Table 92 に示すように、テーダマツ林では 6～10%、ヒノキ試験地では 8～10%、低い許容誤差率を想定すればよいという結果が得られた。

したがって、受光角を用いて単木の成長解析を行なう場合には、(67) 式または (68) 式で推定した胸高直径と、第 3 節で述べた樹高成長曲線群で推定した樹高を用いて、材積表から材積を算出する方法が適当と考える。

立木の利用材積の算定や評価などは、胸高直径に基づいて行なわれているから、この推定精度の向上を計る必要がある。

前章で述べたヒノキ苗による実験の解析結果では、期首の大きさを変量に含めた (49) 式の推定結果が最良であった。

さらに従属変量に、対数および逆数を用いた (55) 式と (56) 式の推定精度は、Table 78 に示すようにほとんど等しくなっている。

したがって、前章での解析結果を活かして、期首の胸高直径を変量に含めた次式で検討を行なった。

Table 92. 単木材積の直接推定法と実樹高と推定直径による推定方法の許容誤差率 (%)

Percentage of the allowable error in the direct and the two way approach to tree volume estimation (%)

テーダマツ試験地 Experimental plot of Loblolly pine					
試 験 区 Plot	推 定 方 法 Estimation method	林 齢 Age (yrs.)			
		9	10	11	12
2,000 本区	(66) 式 Equation (66)	42.6	41.6	38.0	40.3
2,000 seedlings	(68) 式と実樹高 Eq. (68) and actual height	29.3	31.0	29.7	33.2
4,000 本区	(66) 式 Equation (66)	34.3	34.3	27.1	31.1
4,000 seedlings	(68) 式と実樹高 Eq. (68) and actual height	26.5	25.5	21.4	23.9
ヒノキ試験地 Experimental plot of Hinoki					
推 定 方 法 Estimation method	試 験 地 Plot				
	Nikawa No. 1	Nikawa No. 2	Manzen No. 1	Manzen No. 3	
(65) 式 Equation (65)	38.2	39.0	43.4	43.2	
(67) 式と実樹高 Eq. (67) and actual height	29.8	31.1	34.9	32.4	

$$1/d = b_0 + b_1/\phi_1 + b_2/\phi_2 + b_3/\phi_3 + b_4/\phi_4 + b_5/\phi_5 + b_6/d_s \dots (70)$$

ここで、 d = 期末の胸高直径、 d_s = 期首の胸高直径

仁川 1 号と 2 号試験地では、10 年前および 5 年前の胸高直径、万膳 1 号と 3 号試験地では、5 年前の直径を用いて、(70) 式をあてはめた結果を、決定係数と想定すべき最小許容誤差率で Table 93 に示す。

このことから、(70) 式を用いて胸高直径を推定する場合、10 年前の直径を用いるときには 10%，5 年前の直径を用いるときには 5% 程度の許容誤差率を設けることができる。

このような結果が得られたのは、Table 94 に示すように期間が短いほど、期首直径と期末直径の相関が高くなるためである。

(70) 式で推定した胸高直径と実測樹高を用いて、材積表から材積を算出する場合、Table 95 に示すような誤差率が許されれば、危険率 5% でこの方法は満足のできるものと考えることができる。

Table 93. ヒノキ試験地に対する (70) 式の適合
Fitness of the equation (70) for experimental plots of Hinoki

期 首 直 径 Initial dia.		試 験 地 Plot			
		Nikawa No. 1	Nikawa No. 2	Manzen No. 1	Manzen No. 3
10 年 前 10 years ago	決定係数 Coeff. of determination	95.2	96.3		
	許容誤差率 % of allowable error	8.7	7.9		
5 年 前 5 years ago	決定係数 Coeff. of determination	98.8	99.1	99.9	99.9
	許容誤差率 % of allowable error	4.2	3.8	1.2	0.7

Table 94. 期首と期末直径との相関係数
Correlation coefficients between the last and initial diameter

期 首 直 径 Initial dia.		仁 川 1 号 Nikawa No. 1	仁 川 2 号 Nikawa No. 2
10 年 前	10 years ago	0.963	0.975
5 年 前	5 years ago	0.991	0.993

Table 95. 推定直径と実樹高による材積推定方法の許容誤差率 (%)
Percentage of the allowable error for the volume estimation method
from the estimated diameter and the actual height (%)

期 首 直 径 Initial dia.		試 験 地 Plot			
		Nikawa No. 1	Nikawa No. 2	Manzen No. 1	Manzen No. 3
10 年 前	10 years ago	17.5	17.8		
5 年 前	5 years ago	11.7	9.9	4.9	3.2

6. 受光角を用いた予測方法の応用

1. 単一林分における間伐効果の比較

前章で述べた受光角を用いた予測方法は、さらに推定精度を向上させるため改善の余地はあるが、この方法を用いることにより立地条件、試験地面積などの制約で実行できなかった各種の間伐方法の比較を、単一林分について机上で行なうことができるであろう。

各試験地ごとに求めた (70) 式は、その林分の成長期間における成長過程を示すので、この式に含まれる期首直径の測定時に施した、各種の間伐の効果と比較する基礎として使用できる。

ここではヒノキ試験地について、10 年前の直径を用いて仁川 1 号、2 号試験地で得られた予測式およびテードマツ林について、4 年前の直径を用いて 2,000 本区で得られた式によって、成長過程が示されると仮定した林分について、期首直径の測定を行なった 10 年前、または 4 年前に、各種の間伐を施した効果を期末直径の推定値と比較した。

各林分に適用した胸高直径の予測式は、次のとおりである。

仁川 1 号試験地：

$$1/d = -0.01254 - 0.05685/\phi_1 - 0.00266/\phi_2 + 1.44591/\phi_3 \\ + 0.13351/\phi_4 - 0.05313/\phi_5 + 0.97373/d_0 \dots\dots\dots (71)$$

仁川 2 号試験地：

$$1/d = -0.00947 + 0.08052/\phi_1 - 0.03122/\phi_2 + 0.06314/\phi_3 \\ - 0.04431/\phi_4 + 0.01613/\phi_5 + 0.97292/d_0 \dots\dots\dots (72)$$

テードマツ 2,000 本区：

$$1/d = -0.01935 + 0.23231/\phi_1 + 0.33374/\phi_2 + 0.28109/\phi_3 \\ + 0.81790/d_0 \dots\dots\dots (73)$$

ここで、 ϕ_i = 度単位で表わした i 方位区の受光角、

d_0 = 期首直径、 d = 期末直径

各方位区の受光角が期末直径に及ぼす影響は、林地の傾斜方位、植栽列の方向などで変わるが、ここでは比較のため次のような仮想林木について、期末直径を推定することとした。

(1) 各林木は、Fig. 22 に示すように、平坦な林地上に各辺が東西および南北方向を指す正方形に配置されている。

(2) 幹距は立木位置図から判断して、1.8m とした。

(3) 期首において、各試験地の平均直径および最大直径を持つ木を対象木とした。

(4) 各対象木の期末の樹高は、平均直径木については平均樹高、最大直径木については実樹高とした。

(5) 周囲木の期末の樹高は、すべて平均樹高に等しいとした。

間伐方法として、今後広く使用され则认为られる次のような系統的な方法について、比較を行なった。

(1) A 法：交互の列（南北方向）ごとに、1 本おきに間伐を行なう（A, C, E を除去）。

(2) B 法：1 行（東西方向）おきに間伐を行なう（B, C, D, F, G, H を除去）。

(3) C 法：1 列おきに間伐を行なう（B, A, H, D, E, F を除去）。

(4) D法:無間伐

標本木ごと間伐方法ごとの受光角および胸高直径の予測値を, Table 96 に示す。

ここで示した間伐方法は, 間伐率は同じであるが間伐木の除去の仕方によって, 直径成長におよぼす効果の異なることを示している。

このような手法は, 実際の立木配置について行なうことも可能であり, 電算機の利用体系が整えば, 対象とした林地の全林木について期末直径を予測し, 期末樹高を用いて材積を予測することができる。

(70) 式の係数は, 単一林分でも林齢によって変わることが想像されるので, はほぼ同じ林齢で間伐された後, 被圧による下層木の枯死を除いて, 立木間の配置がほとんど変わっていない林分について, 成長錐調査などで過去の直径を測定し, この値を期首直径として, 期末における受光角と (70) 式の形で組み合わせることににより, 実際には行なわれなかった間伐方法の効果も推定すること

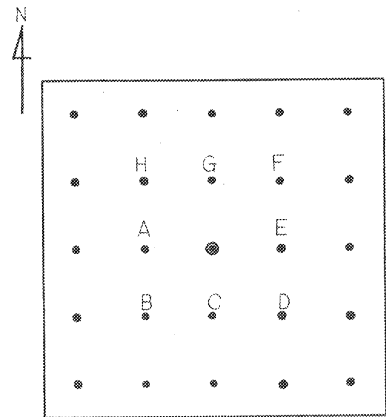


Fig. 22 仮想的林分の位置図

Scatter diagram of trees in a hypothetical stand.

Table 96. 標本木ごと間伐方法ごとの受光角と期末の胸高直径

Exposing angles to the sun and estimated diameters for each sample trees and thinning schedule

試 験 地 Experimental plot	標 本 木 Sample tree		間伐方法 Thinning schedule	周囲木樹高 Height of neighborhood (m)	受光角 Exposing angle					期末直径 Esti- mated d.b.h. (cm)
	期首直径 Initial dia. (cm)	樹 高 Height (m)			方 位 Direction					
					E (°)	SE (°)	S (°)	SW (°)	W (°)	
仁 川 1 号 Nikawa No. 1	14.9	15.5	A	15.5	34.9	26.3	34.9	26.3	34.9	17.3
			B		19.2	44.7	34.9	44.7	19.2	18.7
			C		34.9	37.9	19.2	37.9	34.9	16.7
			D		19.2	26.3	19.2	26.3	19.2	17.0
	22.0	17.5	A	15.5	43.2	33.7	43.2	33.7	43.2	28.0
			B		25.2	53.1	43.2	53.1	25.2	30.6
			C		43.2	46.4	25.2	46.4	43.2	26.9
			D		25.2	33.7	25.2	33.7	25.2	27.6
仁 川 2 号 Nikawa No. 2	14.1	16.2	A	16.2	33.7	25.3	33.7	25.3	33.7	16.5
			B		18.4	43.4	33.7	43.4	18.4	15.6
			C		33.7	36.7	18.4	36.7	33.7	15.9
			D		18.4	25.3	18.4	25.3	18.4	15.5
	23.3	17.1	A	16.2	36.9	28.0	36.9	28.0	36.9	29.7
			B		20.6	46.7	36.9	46.7	20.6	27.2
			C		36.9	40.0	20.6	40.0	36.9	27.9
			D		20.6	28.0	20.6	28.0	20.6	27.0
テーダマツ 2,000 本区 Loblolly pine 2,000 seedling	12.7	10.6	A	10.6	35.9		45.6		35.9	14.9
			B		27.0		45.6		27.0	14.0
			C		45.6		27.0		45.6	14.6
			D		27.0		27.0		27.0	13.1
	16.5	11.9	A	10.6	43.7		53.4		43.7	20.6
			B		34.0		53.4		34.0	19.4
			C		53.4		34.0		53.4	20.1
			D		34.0		34.0		34.0	18.1

とが可能で、このような多数の標本林分についての結果を用いて、経営目的に適した間伐方法が探索できるであろう。

2. 林分の成長過程の解析方法

期首直径と受光角を組み合わせた期末直径の予測式の係数が、林齢によってどのように変化するか、5年ごとに継続調査を行なっている収穫試験地の単木資料が10年前以降のものだけであるので、資料に基づいて検討することはできなかったが、テーダマツの解析結果から、前節でも述べたように(70)式の係数は、林齢にしたがって変化すると考えることができよう。したがって、各林分ごとに過去における(70)式の関係を求める必要がある。

長期にわたる固定試験地の単木調査資料、すなわち位置図、単木の胸高直径、樹高の測定資料がある場合には、その資料を用いて任意に選んだ標本木の期首、期末直径および期末の受光角を用い、たとえば5年間隔ごとに(70)式の形で表わした期末直径の予測式を求め、この式を用いて前節と同じ方法で、任意の林齢で施される各種の間伐方法の効果が比較できると考える。

しかし、このような試験地資料が整備されるのはかなり後のことになるので、近似的な方法であるが、多数の林分について受光角による解析結果が今後研究しようとしているシミュレーションによる経営目的別の収穫予想表の作成や、新しい育林技術に対応する収穫量の予測のために必要となるので、次に示すような樹幹解析木による方法を考えてみた。

(1) 周囲木との幹距が過去についてもわかる林分、すなわち間伐された林木の位置が想定できるか、間伐後かなりの年数の経過した林分を対象に選ぶ。

(2) 林分内で周囲の林冠が比較的に閉鎖状態にある林木の中から、径級別に標本木を選ぶ。

(3) 標本木を中心に、周囲にある上層木の位置図を描く。この場合間伐木の伐根の位置もできるだけ記入する。

(4) 標本木を樹幹解析し、前章で述べた方法にしたがって平滑化した単木の樹高成長曲線群を求める。

(5) 標本木の調査時における皮付直径と皮内直径との関係を用いて、5年ごとに測定した皮内直径を皮付直径に換算する。

(6) 標本木の5年ごとの実測樹高の2/3と、平滑化した樹高曲線群から推定した周囲木の、その林齢における樹高との差を、立木位置図から求めた幹距で割って、方位区ごとの受光角を求める。この場合、調査時において、各方位区で最小の受光角を持つ周囲木は、樹高成長曲線群が交差していないので、間伐が行なわれていないかぎり、過去においても最小の受光角を持っている。したがって、同じ木について、過去の受光角を求めればよいことになる。

(7) 5年ごとに求めた標本木の直径に対する受光角、および10年前の直径との関係を求める。

$$1/d_i = b_0 + b_1/\phi_{1i} + b_2/\phi_{2i} + b_3/\phi_{3i} + b_4/\phi_{4i} + b_5/\phi_{5i} \\ + b_6/d_{i-10}$$

ここで、 i = 林齢

万膳3号試験地において、前章で用いた標本木の中から10本を選び、別に求めた胸高直径および樹高成長曲線を用いて過去の胸高直径、樹高を推定し、その値を用いて次のような予測式が得られた。

この場合、過去25年間における枯損木は無視し、また受光角は計算の都合上方位区ごとの値の平均を

用いた。

$$1/d_{33} = -0.5608 + 1.0349/d_{43} + 0.0264/\phi_{33} \quad \dots\dots\dots(74)$$

$$1/d_{48} = -0.5860 + 0.9856/d_{38} + 0.0652/\phi_{48} \quad \dots\dots\dots(75)$$

$$1/d_{48} = -0.0045 + 0.9412/d_{38} + 0.0233/\phi_{48} \quad \dots\dots\dots(76)$$

$$1/d_{38} = -0.0216 + 0.9554/d_{28} + 0.0224/\phi_{38} \quad \dots\dots\dots(77)$$

ここで、添字は林齡。

(8) 競争開始時の直径を期首直径とする予測式を出発点とする。

予測期間が短いと受光角による影響がはっきりしなくなるので、成長の旺盛な時期に対しては5年くらいとするが、その後は10年以上が望ましいと考える。

たとえば、競争開始時期を18年とすれば、(74)式～(77)式のほかに次の予測式が必要である。

$$1/d_{33} = b_0 + b_1/d_{28} + b_2/\phi_{33} \quad \dots\dots\dots(78)$$

$$1/d_{28} = b_0 + b_1/d_{28} + b_2/\phi_{28} \quad \dots\dots\dots(79)$$

$$1/d_{23} = b_0 + b_1/d_{18} + b_2/\phi_{28} \quad \dots\dots\dots(80)$$

このようにして、樹幹解析木により必要な1組の予測式を求めることができる。

つぎに、林分の成長過程の解析は、次のようにしてシミュレーションによって行なうことができる。

(1) 競争開始時の直径分布を定める。たとえば、正規分布を仮定し、既往の資料などから分布範囲を定め、直径階別本数を求める。

(2) 立木位置を定める。

(3) 各林木に(1)で求めた直径を割りつける。

(4) 適当な数の標本木の成長錐調査により、競争開始時の胸高直径を求め、その標本木の現在樹高から、樹高成長曲線群を用いて、その時点における樹高を推定し、直径階別の樹高範囲を定める。

(5) 競争開始時の樹高に基づいて、樹高成長曲線群をいくつかのクラスに分類する。

(6) (3)で割りつけた直径に対応して、(4)で求めた樹高を割りつけ、各木ごとに樹高成長曲線を固定する。

(7) 各林木とその周囲木の樹高と幹距から、林齡ごとの受光角を求める。

(8) 周囲木の樹高が、中心となる木の樹高の2/3以下のときは枯損すると仮定する。

(9) 前節と同じく(70)～(80)式に示すような予測式により、間伐時期、方法を変えた場合の各林齡における胸高直径を推定する。

(10) 各林木の林齡ごとの胸高直径と樹高から、単木材積を求め、その集計により林分材積を算出する。

(11) 直径の割りつけを、いろいろ変えた場合の間伐方法別の各林木の大きさ、林分構成因子の値を求める。

(12) この方法をいくつかの林分について行なう。

このようなシミュレーションにより、長期間を必要とした間伐効果の比較試験、あるいは成長量、収穫量の推定が可能となるであろう。

今後このような方法の妥当性を検討するため、詳細な記録の残されている試験地について解析を行ない、さらに合理的なものにしたいと念願している。

要 約

林木の成長に影響する諸要因は大部分自然の力によるものであるが、そのなかで密度は人為的にコントロールできる最も重要な要因である。したがって、林木の成長と密度との関係を解明することは、森林経営上きわめて重要な問題である。

この報告は測樹学的立場から、林分および林木の成長に最も関連の深い密度の尺度を探究し、密度を独立変量に含む重回帰式の形で表わした各種の成長量推定式や収穫予測方法を比較検討して、同齢単純林に適した予測方法を選び、これらの方法を用いて密度の変化に対応する林分および林木の成長過程を解析し、各種の密度管理方式に適用できる普遍的な収穫予測方法を導くことを目的としている。

第 I 編は、林木の集団すなわち林分を対象として、成長と密度との関係を解明したものである。

第 1 章では、林分密度の尺度についての概要を述べている。

林分密度の尺度について多くの提案があるが、この報告では通常の森林測定値を使用したものを対象にすることとし、平均直径と ha あたり立木本数および林分高と、ha あたり立木本数の関係で表わした尺度を用いて、成長量の測定の有無により、暫定的標準地と固定試験地の資料による場合に分けて密度と成長過程との関係を解析し、収穫予測方法を導いた。

第 2 章では、モリシマアカシアおよびヒノキの林分収穫表調製に用いた標準地、および固定試験地の定期調査時の測定資料を用いて、暫定的標準地による密度と成長との関係解析を行なった。

林分密度の尺度を決めるために必要な基準となる密度を持つ林分を、林冠が閉鎖され、健全な生育をしている林分の中で、単木あたりの平均的な生育空間が、できるだけ小さい林分 (fully stocked 林分) であるとして、次のような方法で対象林分を選定した。

モリシマアカシア林分の場合は、全標準地の資料を用いて、(10) 式に示す樹木占有度式を求め、この式で算出した樹木占有度で標準地を 3 クラスに分類し、クラスごとに求めた直径階別の平均占有面積が最も小さく、同一林分高に対して最大の立木本数を示す、樹木占有度 100~149 の林分を fully stocked 林分とした。

$$Y = 0.0522(n) - 0.9318(\sum d) + 7.0388(\sum d^2) \dots\dots\dots(10)$$

ただし、 Y = 樹木占有度 (%), n = 立木本数, d = 胸高直径 (m)

ヒノキ林分では、熊本県の金峰山近傍で収集した孤立木の胸高直径と樹冠直径の関係から、(9) 式に示す樹冠競争係数式を求めた。

$$CCF = 0.0201(n) + 0.3489(\sum d) + 1.5138(\sum d^2) \dots\dots\dots(9)$$

ただし、 CCF = 樹冠競争係数

収穫表の標準地と固定試験地の調査時ごとの測定資料について、(9) 式から樹冠競争係数を算出し、これにより標準地を 3 クラスに分類し、各クラスごとに求めた樹木占有度式から導いた、直径階ごとの平均占有面積が最も小さい CCF 250~300 の林分を、基準となる fully stocked 林分とした。

直径と関係させた ha あたり立木本数による尺度として、坂口の林分密度比数 (SDR)、(9) 式で求められる樹冠競争係数、fully stocked 林分から求めた樹木占有度およびモリシマアカシア林分について (10) 式から求められる樹木占有度、次式で求められる基準断面積と現実林の断面積との比について検討した。

$$G_{(TAR)} = \pi \bar{d}^2 \times 10^4 / 4 (0.72 + 12.29\bar{d} + 60.46\bar{d}^2) \dots\dots\dots (18)$$

$$G_{(CCF)} = \pi \bar{d}^2 \times 10^4 / 4 (2.010 + 34.890\bar{d} + 151.376\bar{d}^2) \dots\dots\dots (19)$$

$$G_{(SDR)} = 1.0316\bar{d}^{0.6487} \dots\dots\dots (20)$$

ヒノキ固定試験地の調査時ごとの資料を用いて、これらの密度の尺度間の相互關係を調べた結果、各尺度は他の尺度とほとんど完全な直線的關係にあることを明らかにした。

林分高と關係させた ha あたり立木本数による林分密度の尺度としては、fully stocked 林分について求めた樹木占有度式から算出した、占有度が 100 に近い標準地の林分高と、立木本数の關係から求めた次式による基準本数と現実林の本数との比で表わした密度百分比を用いることとした。

モリシマアカシア：

$$\log n = 3.8858 - 0.0359 h \dots\dots\dots (23)$$

ヒノキ：

$$\log n = 3.6909 - 0.0322 h \dots\dots\dots (28)$$

(占有度 80~120%)

$$\log n = 3.7039 - 0.0260 h \dots\dots\dots (29)$$

(占有度 100% 以上)

これらの尺度の妥当性は、次式による断面積平均直径の推定精度で判断することとした。

$$\bar{d}_g = b_0 + b_1 h + b_2 D \dots\dots\dots (30)$$

ただし、 $\bar{d}_g$ = 断面積平均直径、 h = 林分高、 D = 林分密度

樹木占有度を主体とする平均直径による尺度を用いた場合は、平均直径の推定精度は両樹種とも決定係数で約 65% であるのに対して、林分高による尺度を用いた場合はモリシマアカシアで 73%、ヒノキで約 90% とかなり良い結果が得られた。この結果から平均直径による尺度で林分を分類し、比較的の高い密度レベルの林分の林分高と、立木本数の關係から求めた基準本数と、現実林の本数との比で表わした密度百分比が、密度の尺度として適當であると判断した。

林分材積の成長過程を解析するため、ヒノキ固定試験地の資料を用いて検討した結果、各調査時における林分材積は、密度百分比を独立変数に含む断面積平均直径推定式と、林分形状高推定式による方法が最も良い結果を示し、次式で求められる χ^2 が危険率 5% で有意とならないためには、少なくとも 16.1% の誤差率を認める必要のあることがわかった。

$$\bar{d}_g = 11.90 + 0.9696 h - 0.06605 D \dots\dots\dots (44)$$

$$hF = 0.4768 + 0.4813 h \dots\dots\dots (45)$$

ここで、 hF = 林分形状高

$$\chi^2 = (1.96)^2 \sum_{i=1}^n \{(y_i - \hat{y}_i) / y_i\}^2 / P^2 \dots\dots\dots (46)$$

ここで、 y_i = 実材積、 $\hat{y}_i$ = 推定材積、

P = 許容誤差率

(44)、(45) 式で成長過程を推定するためには、林分高および密度百分比の林齢に対する変化を知る必要があるが、前者は地位指数曲線作成の方法を用いて推定し、後者は次式で推定することとした。

$$\log D_1 = 2 + (\log D_0 - 2)(A_0 / A_1) \dots\dots\dots (60)$$

ここで, D_0, A_0 = 期首における密度百分比および林齢,

D_1, A_1 = 期末における密度百分比および林齢

これらの結果から, モリシマアカシア林分について, 次に示す推定式で各種の密度管理方式による収穫予想表の作成方法を示した。

基準本数:

$$\log n = 3.8858 - 0.0359 h \dots\dots\dots (23)$$

断面積平均直径:

$$\bar{d}_g = 1.6834 + 0.9932 h - 1.9431 D \dots\dots\dots (37)$$

林分形状高:

$$hF = 0.5392 + 0.4818 h \dots\dots\dots (61)$$

第 3 章では固定試験地の資料, すなわち成長量が既知の場合の林分密度と関係付けた成長過程の解析を行なった。なお, この報告では長期間にわたる継続調査資料がないため, 各調査時ごとの測定値間の差で求められる定期平均粗成長量を用いて, 次に示す 2 とおりの方法を検討した。

(1) 成長量推定式による方法

地位指数, 林齢および前述した各種の林分密度の尺度を変量に含む, いろいろな形の成長量推定式による推定精度を比較したが, 密度の尺度, 推定式による差はほとんど認められず, また推定精度もあまり高くなく, 決定係数で 33~40% であった。

(2) 林分構成因子の推定式から誘導した推定式による方法

固定試験地の調査時ごとの測定値に対して, 次に示す林分構成因子の推定式は良好な適合を示した。

$$\begin{aligned} \log G &= b_0 + b_1 S + b_2 A^{-1} + b_3 (\log G_0) A^{-1} + b_4 S A^{-1} \\ \log V &= b_0 + b_1 S + b_2 \log G + b_3 A^{-1} \dots\dots\dots (67) \end{aligned}$$

$$\log \bar{d}_g = b_0 + b_1 S + b_2 \log G + b_3 A^{-1} \dots\dots\dots (75)$$

ただし, S = 地位指数, A = 林齢, G = 断面積,

G_0 = 期首断面積

これらの式を微分して求められる成長量推定式を, 試験地の定期平均粗成長量に対してあてはめた結果良好な結果を得たので, これらの式を積分した次式で各時点の値を推定した。

$$\ln G_p = 3.6986 + 0.0661 S - A_0 A^{-1} (3.6986 + 0.0661 S - \ln G_0) \dots\dots\dots (73)$$

$$\begin{aligned} \ln V_p &= \ln V_0 + 31.9208 (A_p^{-1} - A_0^{-1}) \\ &\quad + (1.1776 + 0.0235 S) (\ln A_p - \ln A_0) - A_0 (1.8433 + 0.03294 S \\ &\quad - 0.4984 \ln G_0) (A_p^{-1} - A_0^{-1}) \dots\dots\dots (74) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ln (\bar{d}_g)_p &= \ln (\bar{d}_g)_0 + 25.2238 (A_p^{-1} - A_0^{-1}) \\ &\quad + (0.7136 + 0.0064 S) (\ln A_p - \ln A_0) - A_0 (0.9095 + 0.0163 S \\ &\quad - 0.2459 \ln G_0) (A_p^{-1} - A_0^{-1}) \dots\dots\dots (78) \end{aligned}$$

(74) 式で期末材積を推定する場合, (46) 式の χ^2 の値が有意とならないためには, 6.7% の誤差率を許容する必要があることがわかった。

基準林齢における断面積が既知であれば, (73) 式により各林齢における断面積で示される密度を推定し, この値を (74), (78) 式に入れて, 林分材積および断面積平均直径を求めることで, 林分の成長過程

を推定することができる。また間伐が行なわれた場合、その後の断面積成長は、残存断面積に相當する基準林齡における断面積を用いて、(73) 式で推定できると假定した。

基準林齡を 30 年として、各種の管理方式による収穫予想表の作製方法を示した。

前編で論じた林分を対象とした予測方法では、資料とした林分が受けた保育方式と異なる方式を採用しようとする場合、その適合性に疑問が生じ、各種の保育形式を比較するには莫大な経費と長年月を要するという欠点を持っているので、第 II 編は単木を対象とした密度と成長の關係を解明し、シミュレーションにより、各種の保育方式による収穫予測を行なうための基礎を確立したものである。

第 1 章では概説を、第 2 章では BITTERLICH の理論を応用したものを主体とした、局所密度についての既往の概略を説明している。

第 3 章では、これまで発表された局所密度の多くは平面的な密度を対象としているのに対して、立地条件が同じ林分内の林木の成長差は、遺伝的なものを除いて各林木の受ける陽光量の差であると考え、受光量と関係づけた尺度の表示方法を検討した。ある林木の受ける陽光量の具体的な尺度として、その木の樹幹上の点と、周囲木の梢頭とを結ぶ線が樹幹の中心線とのなす角で表わした受光角を選んだ。周囲木の樹冠で形成される受光空域は、複雑な形状をしているが、単純化のためある地点の東および西側に、等距離隔たった平行な一定高の壁状遮蔽物と、その地点を中心とする円筒形の遮蔽物について、生育期間における平均 1 日あたりの日照時間と 1 時間あたりの日射量と受光角との關係を調べた結果、日照時間、日射量のいずれも、受光角と密接な關係のあることが明らかとなった。

第 4 章では、林分内における林木の成長と受光量の關係を模型的に考察するため、前述の平行形および円筒形の遮蔽装置を作製し、ヒノキ苗を用いて各種の受光角で陽光量を制限して、1 年間生育させた実験結果を解析した。両装置で生育した苗木の期末における根元直径、全重量は、受光角によって差を生じたが、苗高はほとんど影響されなかった。受光角を密度要因として、ロジスティック曲線から導かれる各種の成長モデル式について検討した結果、両装置は極端に異なる受光空域を持つにもかかわらず、次式で満足のいく推定のできることを示した。

$$1/w = b_0 + b_1/\phi_1 + b_2/\phi_2 \dots\dots\dots (55)$$

ただし、 w = 単木の大きさ、 ϕ_1 , ϕ_2 は東西および南北方向の受光角

第 5 章では、各林木に対する複雑な受光空域を単純化するため、東北東から西南西に至る方位を 5 方位区と 3 方位区に区画し、各方位区に含まれる周囲木について次式で算出される角度のうち、最小の値をその方位区の受光角とし、成長との關係を解析した。資料としては、九州支場実験林内のテーダマツ植栽密度試験区の 8~12 年生時の測定値と、ヒノキ収穫試験地の調査資料を用いた。

$$\phi = \tan^{-1}[d/(h+h_0-2/3 h_s)] \dots\dots\dots (59)$$

ただし、 ϕ = 受光角、 d = 樹間距離、 h = 周囲木の樹高、

h_s = 標本木の樹高、 h_0 = 高低差

各測定時における胸高直径、材積を次式で推定すると、直径については 15~20%、材積については 30~40% の誤差率を認める必要がある。

テーダマツ： $1/w = b_0 + b_1/\phi_1 + b_2/\phi_2 + b_3/\phi_3$

ヒノキ： $1/w = b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i/\phi_i$

受光角として、現在または過去のいずれを用いてもほぼ同様の結果が得られた。また材積推定精度を高めるため、5年前および10年前の直径を変量に含めた次式で推定した直径と、受光角を求めるのに用いた実測樹高から材積表で材積を推定すると、推定精度の向上することがわかった。

$$1/d = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i/\phi_i + b_j/d_0$$

ただし、 d_0 = 期首直径

第6章は、前章で求めた受光角による直径の推定式を用いて、間伐率は同じでも、間伐木の除去方法によって直径成長の異なることをモデル計算で示し、実際に行なわれなかった間伐方法の効果をシミュレーションで近似的に推定することができ、さらに樹幹解析の資料で求めた林分因子の成長過程を利用して、同様な方法で各種の密度管理方式による成長過程や収穫量の予測が可能となることを暗示した。

文 献

- 1) 安藤 貴：同齡單純林の密度管理に関する生態学的研究，林試研報，210，1～153，(1968)
- 2) BRIEGLEB, P. A. : An approach to density measurement in Douglas-fir. J. For., 50, 529～536, (1952)
- 3) BICKFORD C. A., F. C. BAKER and F. G. WILSON : Stocking, normality and measurement of stand density. J. For., 55, 99～104, (1957)
- 4) BROWN G. S. : Point density in stems per acrs. New Zealand Forestry Research Notes, 38, 11 pp., (1965)
- 5) BERRY G. : A mathematical model relating plant yield with arrangement for regularly spaced crops. Biometrics, 23, 505～515, (1967)
- 6) CHISMAN H. H. and F. X. SCHUMACHER : On the tree-area ratio and certain of its applications. J. For., 38, 311～317, (1940)
- 7) CZARNOWSKI M. S. : Dynamics of even-aged forest stands. Louisiana State University Press, (1961)
- 8) COOPER C. F. : Equations for the description of past growth in even-aged stands of ponderosa pine. For. Sci., 7, 1, 72～80, (1961)
- 9) CLUTTER J. L. : Compatible growth and yield models for loblolly pine. For. Scie., 9, 3, 354～371, (1963)
- 10) CURTIS R. O. : A stem-analysis approach to site index curves. For. Sci., 10, 2, 241～256, (1964)
- 11) ————— : Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. For. Sci., 13, 4, 365～375, (1967)
- 12) DAHMS W. G. : Relationship of lodgepole pine volume increment to crown competition factor, basal area and site index. For. Sci., 12, 1, 74～82, (1966)
- 13) FREESE F. : Testing accuracy. For. Sci., 6, 1, 139～145, (1960)
- 14) ————— : Liner regression methods for forest research. U. S. Forest Service Research Paper. FPL 17, 136 pp., (1964)
- 15) FURNIVAL G. M. : An index for comparing equation used in constructing volume tables. For. Sci., 7, 4, 337～341, (1961)
- 16) GRUSCHOW G. F. and T. C. EVANS : The relation of cubic-foot volume growth to stand density in young slash pine stands. For. Sci., 5, 1, 49～55, (1959)

- 17) 細井 守: アカマツの带状皆伐天然更新に関する研究—林縁が更新稚樹に及ぼす影響, 林試研報, 78, 35~58, (1955)
- 18) HUMMEL F. C.: The definition of thinning treatment. IUFRO Sec. 23, No. 4, (1953)
- 19) 木梨謙吉: 北九州スギ林を対象とする正常林分, 平均林分, および無作為標本による収穫表, 暖帯林, 14, 12, 14~37, (1959)
- 20) 木梨謙吉: Yield table study of cryptomeria growing in northern Kyushu. 九大演集, 12, 1~42, ()
- 21) 甲斐原一郎: 計量造林の手法, 寒帯林, 108, 87~98, (1963)
- 22) 川端幸蔵: 変量選択型の重回帰分析, 農林研究センター報告, A 4 号, 103~143, (1969)
- 23) 吉良童夫編: 植物生態学 [2], 生態学大系 2 上, 古今書院, 272~304, (1960)
- 24) KRAJICK J. E., K. A. BRINKMAN and S. F. GINGRICH: Crown competition—a measure of density. For. Sci., 7, 1, 35~42, (1961)
- 25) 林野庁・林業試験場: 九州地方ひのき林林分収穫表調製説明書, 収穫表調製業務資料, 19, 49 pp., (1957)
- 26) LEMMON P. E. and F. X. SCHUMACHER: Stocking density around ponderosa pine trees. For. Sci., 8, 4, 397~402, (1962)
- 27) 嶺 一三: 収穫表に関する基礎的研究と信州地方カラマツ林収穫表の調製, 収穫表調製業務研究資料, 12, 201 pp., (1955)
- 28) MOSER J. W. Jr. and O. F. HALL: Deriving growth and yield functions for unevenaged forest stand. For. Sci., 15, 2, 183~188, (1969)
- 29) 西沢正久: 林分成長量の推定と予測方法に関する研究, 林試研報, 129, 1~159, (1961)
- 30) ———: 周囲密度の尺度を用いた直径成長量の推定, 昭和43年度経営部担当官会議講演集, 33~57, (1969)
- 31) ———・真下育久・川端幸蔵: 数量化による地位指数の推定方法, 林試研報, 176, 1~54, (1965)
- 32) NELSON T. C. and E. V. BRENDER: Comparison of stand density measures for loblolly pine cubic-foot growth prediction. For. Sci., 9, 1, 8~14, (1963)
- 33) 大友栄松: 収穫表の使用法について, 山林, 872, 29~34, (1957)
- 34) 岡上正夫: 斜面の受ける日射量を求める簡単な方法, 日林誌, 39, 435~437, (1957)
- 35) OPI J. E.: Predicability of individual tree growth using various definitions of competing basal area. For. Sci., 14, 3, 314~323, (1968)
- 36) REINEKE L. H.: Perfecting a stand-density index for even aged forest. Jour. Agric. Rec., 46, 627~638, (1933)
- 37) RALSTON C. W. and C. F. KORSTIAN: Prediction of pulpwood yield of loblolly and short leaf pine plantations. For. Sci., 8, 2, 149~161, (1962)
- 38) 坂口勝美: 間伐の本質に関する研究, 林試研報, 131, 95 pp., (1961)
- 39) 瀬上安正: 天草地方せき悪林地モリシマアカシア林 分収穫表調製について, 昭和43年度業務成績報告書, 7, 熊本県林業研究指導所, 73~90, (1969)
- 40) 鈴木時夫: 東亜の森林植生, 古今書院, 137 pp., (1954)
- 41) ———: 生態調査法, 古今書院, 155 pp., (1958)
- 42) STAHELIN R.: Thinning even-aged loblolly and slash pine stand to specified densities. Jour. For., 47, 538~540, (1949)
- 43) SPURR S. H.: Forest inventory. Ronald Press, 275~370, (1954)
- 44) ———: A measure of point density. For. Sci., 8, 1, 85~96, (1962)
- 45) STAGE A. R.: A growth definition for stocking units, sampling, and interpretation. For.

- Sci., 15, 3, 255~265, (1969)
- 46) SMITH H. F. and D. A. DUBOW : Crown length and crown ratio as indicators of diameter growth of loblolly pine. For. Sci., 6, 2, 164~168, (1960)
- 47) 只木良也 : 競争密度効果式を用いて検討した間伐と幹材積収穫との関係—アカマツ林の場合, 林試研報, 166, 1~22, (1964)
- 48) —————・尾方信夫 : 密度効果式を用いた収穫予測—モリシマアカシアの場合, 日林九支講, 17, 104~105, (1963)
- 49) 寺崎康正・小坂淳一・金 豊太郎 : 林分の構造と成長 収穫に関する研究 (1), 秋田 地方 スギ人工林の成長と収穫, 林試研報, 168, 306 pp., (1964)
- 50) 東京天文台 : 理科年表, 丸善, (1966)
- 51) WARD W. W. : Live crown ratio and stand density in young, even-aged red oak stand. For. Sci., 10, 1, 56~65, (1964)
- 52) WENGER K. F., F. C. EVANS., T. LOTTI., R. W. COOPER, and E. V. BRENDER : The relation of growth to stand density in natural loblolly pine stand. U. S. F. S. Southeast For. Expt. Sta. paper, 97, 10 pp., (1958)
- 53) WILSON F. G. : Numerical expression of stocking in terms of height. J. For., 44, 758~761, (1946)

Mensurational Studies on the Relation between the Density and the Growth in Even-Aged Pure Stand

Hitoshi AWAYA⁽¹⁾

Summary

Even though the growth process of forest trees depends mostly on natural forces, the density is a most important factor of them for it can be artificially controlled.

Therefore, the explications of the relation between the growth process of forest trees and the density are very important problems in forest management.

In this report, the author examined various theories for the measure of density and then compared different growth estimation equations or yield prediction methods which used the multiple regression equation containing the measure of density as an independent variable. From these examinations, he has derived the measure of density which is suitable for even-aged pure stand and the universalized yield prediction method that can be employed to various density control systems.

In Part I, the relation between growth or yield and density for the mass of trees, i. e. the stand was discussed.

In Chapter 1, the measure of stand density and their features were discussed.

There were many theories for the measure of stand density, but in this report, merely the measures derived from the usual forest measurements as in the following were examined.

Received December 17, 1973

(1) Forest Management Division

- 1) Number of trees per hectare in relation to average stand diameter.
- 2) Number of trees per hectare in relation to stand height (average height of dominant and codominant).

Accordingly, to carry out the growth measurement, the yield prediction method was divided into two cases which methods were based on temporal sample plot data and permanent sample plot data; therefore, the suitable measure of density and the prediction method for each case were examined.

In Chapter 2 the relation between growth and density for the former was analyzed by the statistical method about the sample plot data for the yield table (Hinoki and *Acasia mollissima*) and the periodical measurements of permanent plots.

In the permanent plots of Hinoki, stand heights and stocking volumes were calculated by the diameter-height-age curves for each plot as follows:

$$d\sqrt{h-1.2} = b_0 + b_1A + b_2d + b_3dA \quad \dots\dots\dots(4)$$

where d , h and A denote the diameter of b. h., tree height, and stand age respectively.

For the purpose of determining the measure of stand density, it is necessary to define the stand with standard density.

The stands having average growing space per tree as narrow as possible among the closed and sound stands were designated as the fully stocked one.

These were selected as follows:

In *Acasia*, the tree-area equation based on average density was calculated from all sample plot data of the yield table for Amakusa district as follows:

$$Y = 0.0522(n) - 0.9318(\sum d) + 7.0388(\sum d^2) \quad \dots\dots\dots(10)$$

where Y , n and d denote the tree-area ratio, the number of trees per hectare, and diameter of b. h. respectively.

Sample plots were divided into three density levels according to calculated tree-area ratio and then tree-area equations for each level were obtained. Based on the comparison of the average growing space for each diameter class calculated from these equations, stands having range of tree-area ratio from 110 to 149 were defined fully-stocked stand because they had minimum growing space and maximum number of trees per hectare for same stand height.

In Hinoki, the equation of crown competition factor was determined from the relation between diameter of b. h. and crown diameter of isolated trees collected nearby Kinpoo-Zan in Kumamoto Prefecture.

$$CCF = 0.0201(n) + 0.3489(\sum d) + 1.5138(\sum d^2) \quad \dots\dots\dots(9)$$

where CCF is crown competition factor in percentage.

Data of sample plots for the yield table for Kyūshū district and periodical measurements of permanent plots were combined and classified into three density levels according to CCF. Then tree-area equations for each level were obtained. The average growing space of density level ranged CCF from 250 to 300 showed minimum to the space of other levels and constant ratio to the space of open growth stands. From these findings, he concluded that the plots involved in this level was the fully-stocked stand.

Based on such fully-stocked stand, the author obtained various measures of stand density as follows:

Acasia:

- (1) Tree area ratio calculated from the following equation.

$$Y=0.0159(n)-0.05650(\sum d)+1.92597(\sum d^2) \dots\dots\dots(11)$$

(2) Tree area ratio calculated from the equation (10).

(3) Ratio of number of trees of actual stand to standard stand with same stand height (stocking percentage). Number of trees of standard stand is decided by the next equation.

$$\log n=3.8858-0.0359 h \dots\dots\dots(23)$$

where n is the standard number of trees and h is the stand height.

Hinoki:

(1) Tree area ratio in percentage calculated from the following equation.

$$Y(\%)=0.72(n)+12.29(\sum d)+60.46(\sum d^2) \dots\dots\dots(15)$$

(2) Stand density ratio expressed by ratio of the number of trees of actual stand to maximum number. The maximum number is obtained by the following equation.

$$\log n_{\max}=5.1365-1.3563 \log \bar{d} \dots\dots\dots(16)$$

(3) Crown competition factor calculated by the equation (9).

(4) Ratio of basal area of actual stand to standard basal area which are given by the following equations.

$$G_{\text{TAR}}=\pi \bar{d}^2 \times 10^4 / 4(0.72 \times 12.29 \bar{d}+60.46 \bar{d}^2) \dots\dots\dots(18)$$

$$G_{\text{CCF}}=\pi \bar{d}^2 \times 10^4 / 4(2.010+34.890 \bar{d}+151.376 \bar{d}^2) \dots\dots\dots(19)$$

$$G_{\text{SDR}}=1.0316 \bar{d}^{0.6487} \dots\dots\dots(20)$$

where $\bar{d}$ is average diameter.

(5) Stocking percentage based on standard number derived from the following equations.

$$\log n=3.6909-0.0322 h \dots\dots\dots(28)$$

$$\log n=3.7039-0.0260 h \dots\dots\dots(29)$$

where the equation (28) is obtained from sample plots having tree area ratio ranged from 80 to 120, and the equation (29) based on sample plots having 100 over.

The relation between tree-area ratio, stand density ratio and crown competition factor, that were expressed by the function of the average diameter and the number of trees, were considered almost perfectly linear. Moreover, the relationship between the ratio of basal area and the measures described above were indicated by a straight line.

Therefore in the following description, the tree-area ratio was used mainly as a measure of stand density. The validity of these measures was decided by the precision of the diameter corresponding to average basal area estimated from the following equation.

$$\bar{d}_g=b_0+b_1 h+b_2 D \dots\dots\dots(30)$$

where $\bar{d}_g$ is the diameter corresponding to average basal area and D is a measure of stand density.

For both species, the measure depending on the stand height showed good precision in the average diameter estimation as compared with the measure depending on the average diameter.

Therefore, the stocking percentage based on the relation between the number of trees and the stand height for the stand having higher tree-area ratio was regarded the suitable measure for the density of even-aged pure stand.

For the investigation of the adequate method for estimating stocking volume, the precision of various methods for data of the permanent plots were compared with each other.

(1) The method using the formulas for estimating the diameter corresponding to average basal area and the stand form height.

Multiplying the estimated diameter corresponding to average basal area by the actual number of trees, we can obtain the basal area per hectare. The stocking volume of the stand are determined by the multiplication of the basal area described above and the stand form height estimated from the following equation.

$$hF = b_0 + b_1 h \quad \dots\dots\dots (43)$$

where hF is the stand form height.

When the stocking volumes are estimated by this method, it will be necessary to permit the error of 16.1%, due to the fact that the values of the chi-square computing from the equation (46) does not register significant at the 5 per cent level.

$$\chi^2 = (1.96)^2 \sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2 / P^2 \quad \dots\dots\dots (46)$$

where $\hat{y}$ and y denote the estimated value and the actual value respectively, and P is the allowable error.

(2) The method using the equation of competition-density effect. When the equation with the coefficients published by T. ANDO are used in the estimation, it will be necessary to allow the error of 28.0% over.

(3) Stand volume equation involved the crown competition factor as an independent variable.

When the following equation is used for estimating the stocking volume, the last allowable error will be 16.1%, the same as the first method.

$$V = b_0 + b_1 h + b_2 (\text{CCF}) \quad \dots\dots\dots (56)$$

where V is the stocking volume and CCF is crown competition factor.

Change of stand density according to the growth of the stand could be approximate by the following relation except a few experimental sample plots that the stocking are increasing over 100%.

$$\log D_1 = 2 + (\log D_0 - 2)(A_0/A_1) \quad \dots\dots\dots (60)$$

where D_0 is the initial stocking percentage, D_1 is the future stocking percentage, and A_0 and A_1 are initial and future stand age.

In order to showing an explanatory example of the yield prediction methods based on the data of the temporally plots, the yield prediction tables for *Acacia* were constructed from the following equations in which the various method of stand density control were adopted.

Standard number of trees:

$$\log n = 3.8858 - 0.0359 h \quad \dots\dots\dots (23)$$

Stand density: $D = n_0/n$

$$\text{Average diameter: } \bar{d}_g = 1.6834 + 0.9932 h - 1.9431 D \quad \dots\dots\dots (37)$$

$$\text{Stand form height: } hF = 0.5392 + 0.4818 h \quad \dots\dots\dots (61)$$

Approach to standard density: the equation (60)

As a next step, the author researched the methods based on the continuous inventory of the permanent plots (in order to improve the precision of yield prediction).

Since he had not the observations extending over long periods, the following analyses were carried out on the hypothesis that the gross periodic growth of each plot had an independent relationship to each other.

(1) The method depending on the growth equation.

Various equations in which the site index, stand age and the measures of stand density described above are included as the independent variables, were fitted to the data, and then their precision was compared. From these comparisons, it was made clear that the difference

of the precision ascribed to measures and forms of the equation had almost never been recognized, and the test of goodness of fitness were not significant.

(2) The method depending on the fluxional calculus of the equations for estimating stand parameters.

Following equations will indicate the good fitness for the data of the permanent plots.

$$\log V = b_0 + b_1 S + b_2 \log G + b_3 A^{-1} \dots\dots\dots (67)$$

$$\log G = b_0 + b_1 S + b_2 A^{-1} + b_3 (\log G_0) A^{-1} + b_4 S A^{-1}$$

$$\log \bar{d}_g = b_0 + b_1 S + b_2 \log G + b_3 A^{-1} \dots\dots\dots (75)$$

where V is the growing stock per hectare, G is the sum of the basal area of b.h., $\bar{d}_g$ is the diameter corresponding to average basal area, S is the site index, A is the stand age and G_0 is the sum of initial basal area.

The equations for estimating the growth derived from the differentiation of the above equations, provide the good fitness for all stand parameters; accordingly, projected values for stand parameters were calculated from the following equations derived from these differential equations.

$$\ln G_p = 3.6986 + 0.0661 S - A_0 A_p^{-1} (3.6986 + 0.0661 S - \ln G_0) \dots\dots\dots (73)$$

$$\begin{aligned} \ln V_p = & \ln V_0 + 31.9208 (A_p^{-1} - A_0^{-1}) \\ & + (1.1776 + 0.02035 S) (\ln A_p - \ln A_0) \\ & - A_0 (1.8433 + 0.03294 S - 0.4984 \ln G_0) (A_p^{-1} - A_0^{-1}) \dots\dots\dots (74) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ln(\bar{d}_g)_p = & \ln(\bar{d}_g)_0 + 25.2238 (A_p^{-1} - A_0^{-1}) \\ & + (0.7136 + 0.0064 S) \times (\ln A_p - \ln A_0) \\ & - A_0 (0.9095 + 0.0163 S - 0.2459 \ln G_0) (A_p^{-1} - A_0^{-1}) \dots\dots\dots (78) \end{aligned}$$

where the subscript 0 and p indicate the initial and the final value of the period respectively. When the final stocking volume of the period are estimated by the equation (78), we should allow the error of 6.7% for about 5 years period.

From these results, the method described above will be given a reliable estimation in comparison with the methods based on temporal sample plot data. For reference, then, the construction method of the yield prediction table for various control method is indicated, according to the equation (73), (74) and (78).

In Part II, the relationship between growth and density of each tree in a stand was discussed in order to provide the yield prediction methods by means of the simulation analysis. Because the yield prediction methods for the stand discussed in the previous part had the following weak points:

(1) When we want to determine the various control systems from the data used to the construction of the yield prediction tables, their goodness of fitness will be not very appropriate.

(2) For the purpose of the comparison with various control systems directly, enormous expense and a long experimental period will be necessitated.

In Chapter 1 and 2, introduction and previous studies related to the point density based on BITTERLICH's theory were mainly investigated.

In Chapter 3, the author examined the point density expressed with the quantity of the

solar radiation that a single tree in the stand received. As the previous suggestion for the point density took into account mostly the measure of the density in the horizontal direction, it was thought that the difference of tree growth in a stand depended on the possibility of the received solar radiation. As a concrete evaluation of the possibility, the author adopted the angle that is formed by the line connecting a point on the stem of a subject tree and the tips of surrounding trees, and the center line of the stem, defining this angle as the exposing angle.

The exposing area to the sunbeam formed with the crowns of surrounding trees shows a complex shape, but, for simplification, the relationship between the average period and intensity of solar radiation per a day in a growing period, and the exposing angle for the following shelters are examined.

- 1) Shelters like a wall with constant height setting in equal distance from the point to east and west side.
- 2) Cylindrical shelters centered at the point.

From these examination, it was proved that the exposing angles had an exact functional relationship for the period and intensity of solar radiation.

In Chapter 4, the author made parallel and cylindrical type shading equipment previously described, and then analyzed the result of the experiment in which seedlings of Hinoki were grown under the condition limiting the quantity of the solar radiation for various exposing angles. From these experiments, the difference of the exposing angle produced a distinct effect for the base diameter and total weight of seedlings at the end of a growing period, but the effect for the height of seedlings could almost never been recognized.

Various formulas of growth model derived from the logistic curve in which the exposing angles were used as a measure of density, were fitted to these data.

Such equipment makes extremely different shapes in exposing area and in both cases the following equation was indicated to have sufficient suitability of fitness.

$$1/w = b_0 + b_1/\phi_1 + b_2/\phi_2 \quad \dots\dots\dots (55)$$

where, ϕ_1 is the sum of exposing angles in the east and the west direction, ϕ_2 is twice the exposing angle in the west, and w is size of seedlings.

In Chapter 5, the direction from the east-northeast to the west-southwest was divided into 3 or 5 sections for the simplification of the exposing area of a tree in the stand, and then angles for the surrounding trees included in each section were calculated from the following equation, and the minimum values of these angles were adopted as the exposing angle in the section.

$$\phi = \tan^{-1}[d/(h + h_0 - 2/3 h_s)] \quad \dots\dots\dots (59)$$

where, ϕ is the exposing angle in degree, d is the distance from the subject to the surrounding tree, h is the total height of surrounding tree, h_s is the total height of the subject tree and h_0 is the difference of level between the base of the subject and the surrounding tree.

The relationship between the growth of tree and these exposing angles was examined for the following data.

- (1) Continuous measurements on loblolly pine experiment plots in the Kyûshû Branch, Government Forest Experiment Station.
- (2) Data of continuous inventory plots on Hinoki in Kyûshû district. When the diameter of b. h. and the stem volume are estimated from the following equations, at least, it will be

necessary to permit the following error.

- 1) From 15% to 20% for the diameter of b. h.
- 2) From 30% to 40% for the stem volume.

loblolly pine: $1/w = b_0 + b_1/\phi_1 + b_2/\phi_2 + b_3/\phi_3$

Hinoki: $1/w = b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i/\phi_i$

When the past exposing angle was used in place of the present angle in the previous equation, similar result was obtained.

When the diameters are estimated from the following equation in which the past diameter is included in the independent variables and the tree volumes are calculated from the tree volume equation by means of these diameters and actual heights of sample tree, the allowable error in percentage of volume estimation has been reduced to about 5~10%.

$$1/d = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i/\phi_i + b_j/d_0$$

where, d_0 and d are the diameter of beginning and end of the growing period respectively, and i is the directional section; in this report, 3 and 5 sections for Loblolly pine and Hinoki were used respectively.

In Chapter 6, the author showed that the growth of diameter was effected by the rejection method of thinning trees, even though the same intensity of thinning was applied, according to the equations for estimating diameter described in the previous chapter, and suggested that the effect of imaginary thinning could be estimated approximately by the simulation method. Still it will be possible to predict the growing process and the yield for various control methods of density according to the similar method, if we can predict the development of the stand parameters by means of the stem analysis.