寄贈図書
昭和 62.5.26
農林水産省林業試験場

経営	132
測定	40

森林測定研究資料

（10）

昭和40年2月

農林省林業試験場経営部

森林測定研究資料（10）正誤表

頁	誤	正	説明
7 下5	beech (Fagus silvatica)について	beech (Fagus silvatica)について	
13 上3	Möller 1954 a P.47)。	Moller 1954 a P47)。	
15 下11	nce の林を間隔が	uce の林を間隔が	
〃 下7	樹冠距離が	樹幹距離が	
17 下8	Reinecks (1933, P628)が	Reinecke (1933, P628)が	
〃 下7	(1943 P109, 1955 P5 および	(1943 P.109, 1944 P.5 および	
23 下5	Danmark で	Denmark で	
〃 下1	(Möller 1954. P.12)。	(Möller 1954. P.12)	
24 上3	大部分を除却できる	大部分を除去できる	
〃 上11	35フィート)となっている。	35フィート)なっている。	削除
32 上7	示した林、色んな	示した林で、色々な	
33 上4	と対象的に.	と対照的に	
40 下8	下枝の枯上りは停止する.	下枝の枯上りが停止する.	
41 上5	グループ内の木の樹高の	グループ内の木を調べたところ、樹高の	挿入
43 上1	樹高の比は間伐度に	樹高の比が間伐度に	
〃 下6	全林木の樹木を	全林木の樹高を	
51 最の見出し、2行目	±6 b_2, ±6 b_3 など	±6 b_2, ±6 b_3 など	
57 上2	読者、Holmsgaard と	読者は Halmsgaard と	挿入
〃 下12	断面積の成長量	断面積の成長量の増加	〃
60 下15	Denmark で一般に適用する	Denmark で一般に適用する	
72 上9	材積の2/3を除去	材積の1/3を除去	
72 下2	~20%少なかったといっている.	~20%少なかったといっている。彼は強度間伐のあとでも一時的に成長量が増すことがあるといっている(P.139).	挿入

頁	誤	正	説明
72 下2	彼は（1951. P.1~15）Black Fo-	Mitcherlich と Ganssan（1951. P.1~15）は Black Fo-	
73 上1	生産量のいずれかについても	生産量のいずれについても	削除
82 上12	強度間伐で 71~76%	強度間伐で 65~70%	
96 上8	Norway から	Norway で.	
99 下3	対応する成長の	対応して成長の	
114 上13	大きさは二義なもの	大きさは二義的なもの	挿入
116 下2	優勢木を従優	優勢木と従優	
132 下4	伐倒した45年の伐採木	伐倒した45本の伐採木	
〃 下2	平均曲線で決定した.	平均曲線（Fig2）で決定した	挿入
133 下14	林分での優勢木と従優	林分での優勢木および従優	
134 下2	(Heibrg et al. 1955)	(Heiberg et al. 1955)	挿入
135 根号の中の分子	100[(b.a.)÷2]+(b.a)₁ +[(b.a.)₂÷2]	100([(b.a.)÷2]+(b.a.)₁ +[(b.a.)₂÷2])	カッコを挿入
135 下15~13	年数が2~12の間で変動するとき、断面積成長率（Presslerの公式による）推定のための可能な修正係数として綿密な検討の対象となってくる.	年数が2~12ものばらつきを示すと、断面積成長率（Presslerの公式による）推定のときに修正係数としてきいてくるかもしれないので綿密な検討を要する.	全文入れかえ
135 下4	実行の過程では間伐間隔が	実行の過程で間伐間隔が	削除
138 上1	間伐間隔に無関係に	間伐間隔と無関係に	
〃 上9~10	因子の組合せを含む重相関分析まで進めた	因子の組合せまでを含む重相関分析を進めた	挿入と削除

頁	誤	正	説明
138 下7	標準的参考文献は	主に使った参考文献は	
139 下8~7	わからなかったので、このあと統計的評価からこれらを棄却できる可能性は重相関分析においてあまり期待できなかった.	わからなかったので、統計的評価からいつでもこれらを棄却できるかどうかは重相関分析において結論できなかった.	全文入れかえ
141 上2	年令因子について若いグループ	年令因子についての若いグループ	押入
〃 上3	の0と実線）に対して	の。と実線）に対して	
142 上1	樹高の間隔（interval）	樹高成長量	
145 下14	方程式はある断面においては.	方程式はある断面積においては	挿入
146 下11	真線の傾斜は	直線の傾斜は	
155 下5	300~1,100立方フィートが各間伐に	300~1,100立方フィートの収穫が各間伐に	挿入
160 下4	成長率（地位）、間伐度に	成長率（地位）、あるいは間伐度に	〃
161 下6	急速であった を解明	急速であったかを解明	〃
162 下12	一回の作業における	一回の伐採作業における	〃
165 下2	前節で観測した	前節で観察した	
166 上4	断面積成長量の40%以上に	断面積成長量の40%以内に	
167 下1	注 金員収穫を除く	注 金員収穫の章を除く	挿入
192 上8	一方同じ群で	一方同じ郡で	
220 下9	この公式の d の調査木	この公式の d が調査木	
〃 下4	直径の二乗の距離にある	直径の2倍の距離にある	
238 表の見出し	期首 3インチ / 期末 4インチ / エーカー当り本数 5本 / —	期首 (3)インチ / 期末 (4)インチ / エーカー当り本数 (5)本 / —	カッコを挿入

頁	誤	正	説
262 上12	樹種については、収穫量の違いは　か	樹種については、収穫量の違いはあまり大きくないか	挿入
263 上4	られ、常数では	られ、常態では	
280 上11	angle-count推定値は大きさは	angle-count推定値の大きさは	
〃 下2	検視でとられられた	検視でとらえられた	
291 上7～10	地位の尺度を求める…… 反影するものである。	地位の尺度を林分の連年成長量と密接に対応ずけるため、この推定法では稚幼の時期においてのみ作用する場所的因子の影響を補正する。	全文入れ光
296 上3	もの　枯死によって	ものの枯死によって	挿入
319 上12	上層高断面積が既知なら	上層高と断面積が既知なら	

目　次

I 同令林の間伐（Peder Brathe）…… 1

II 間伐方式に関係させた収穫予想（G. C. Warrack）…… 129

III Ponderosa Pine の直径および材積成長量に対する地位指数、密度、年令および大きさの影響（P. E. Lemmon, F. x Schumacher）…… 189

IV New England の Spruce Fir 地域における平均成長率（C. A. Bickford, F. R. Longwood, Robert Bain）…… 329

I. 同令林の間伐

（欧州における文献の要約）

Norway 林業試験場研究官

Peder Braathe

（Thinnings in Even-Aged Stands
A Summary of European Literature）

Faculty of Forestry
University of New Brunswick

（1957）

目　　次

はじめに …… 7

I 間伐の定義 …… 8

1 間伐の目的 …… 8

2 間伐方法 …… 8

樹木級区分，下層間伐，上層間伐，択伐的間伐，自由間伐，間伐方法に対する尺度

3 間伐度 …… 14

密度の尺度，林分密度指数，一定密度の維持

II 林分の成長に対する間伐の影響 …… 19

1 樹高成長 …… 19

測定の方法，平均樹高と上層高，*Norway spruce*，広葉樹 *Scots pine*

2 直径成長と幹型 …… 31

平均直径，単一系列における直径成長量，収穫表の直径成長量，樹高との関係からみた直径，樹高曲線，収穫表，*Norway* の成長方程式の検討，新らしい方程式，*Sweden* の方程式，直径成長量に影響を与えるその他の因子

3 断面積成長 …… 57

Norway spruce，*beech*

4 材積生産量 …… 63

断面積との関係，形数，*Norway spruce*，*beech* 幹輪，植付間隔を変えた場合の収量

5 樹冠の活動している部分の長さと自然枯枝 …… 82
6 材の密度 …… 83

Ⅲ 被害に対する林の抵抗性と間伐との関係 …… 84
1 風 …… 84
2 雪と氷 …… 85
3 森林火災 …… 87
4 虫害 …… 87
5 菌害 …… 89

Ⅳ 土壌に対する間伐の影響 …… 91
1 落葉 …… 91
2 温度と成長期間の長さ …… 92
3 降水量 …… 94
4 フムスの分解 …… 95
5 更新のための条件 …… 97
6 下層林冠 …… 98

Ⅴ 老令の無手入林に対する影響 …… 99

Ⅵ 実際面への応用 …… 106
1 第1回間伐の時期 …… 106
2 間伐の間隔 …… 106
3 自然枯損による損失 …… 107
4 間伐収穫 …… 109
5 間伐の応用 …… 111
経済的な見方，密度

Ⅶ 混交林 …… 118
生産量，抵抗力

Ⅷ とりまとめ …… 121
引用文献（省略）

はじめに

同令林の間伐は欧州各国において100年以上の昔から実行されており、間伐効果の研究も中部欧州では85年の歴史をもっている。北欧諸国においては、この研究は少なくとも50年にわたって進行中で、文献も非常に多い。

欧州の間伐に関する文献を取まとめた本書の目的は、簡単にいうと、現在までに知られた主要な結果を与えることである。この場合、特に重点をおいたのは最近の文献で、その中でも研究報告に力を注いだ。

内容が優れていると思われる文献でも、実証的でないものはあまり考慮しなかった。古い文献はかならずしも全部を網羅していない。その理由は、これらの結果が同じ研究所の後の報告の中にとり入れられていることと、全部の報告にふれることは、本書を不必要に冗長にするからである。

間伐の文献の完全な要約に興味のある読者は、1944年に刊行された De Philipis の間伐の書物を参照されたい。その中には少数の戦後の文献も含めて、第二次大戦までの完全な要約がのっている。英語しか読めない読者には残念だが、同書はイタリア語で書かれていて、英文の要約は2ページしかない。しかし文献表はほぼ完全で、約775編の参考文献がのせられている。

この要約においては、欧州の大部分の研究者が取扱っている Norway spruce (Picea abies) と beech (Fagus silvatica) について主として述べる。

Scots pine (Pinus sylvestris) や European fir (Abies pectinata) についての結果も、関連のある場合には若干参照したが、その他の欧州産樹種については、ごく稀にしか注意を払わなかった。

I 間伐の定義

1 間伐の目的

間伐とは成熟した林分において、残存木の生育条件を改善し、品質の優れた材を生産するために、若干の林木を除去する行動である。したがって、その主要な目的は将来その林分が潜在的な土地生産力を完全に利用できるようにすることと、樹幹に付加される成長量の質を向上させることである。

間伐によって除去される材は、価値をもっているのが普通であるが、その収入を過大に考えると間伐という仕事の理解を混乱させることになる。収穫保続林業においては、将来についての考慮は極めて明白な形をとる。

北欧の幾つかの国々、特に Sweden と Finland においては、成熟した林においてそのような伐採をおこなうのは、将来の林の成長に有益な場合に限るという原則が要求されている。このような原則の完全な翻訳は March（1954. P61～80）に示されている。

間伐を定義する場合には間伐の方法と間伐度を区別する必要がある。

2 間伐方法

樹木級区分

間伐方法、間伐度を説明するため、これまで林分内の単木を樹木級区分によって特徴づけることがおこなわれてきた。そのような区分方式は、1903年 I.U.F.R.O.によって採択された。この方式は主として19世紀の終りに Kraft が定めた樹木級をもとにしている。

その後変更や追加が少しづつ、何回となく繰返された。そうして、Schotte（1912. P254）は現在も北欧において使用されている改善された分類方式を提案した。英国の Forestry Commission で使っている方式は、MacDonald（1931. P.241～51）によって与えられたものである。どちらも、実際は国際連合の方法に若干の追加をしたものである。I.U.F.R.O は1953年のローマ会議で、再びこのことを取あげその後2つの提案がなされた。

Olberg（1953. P.222）は6階級による改善された分類方式について詳細な提案をおこなった。その後、彼は残存木に対する伐採木の関係を記録することによって、間伐がどのように特徴づけられるかを例によって示した（Olberg, 1954. P.56）。

Olberg のものと幾分似通った5階級からなる別の提案が、Assmann（1954. P.152）によって提出された。Assmann の提案を検討して、Olberg（1955. P.67）は若干の別案を提示したが、この討論はまだ続くものと思われる。

この総合報告では、樹木級区分の問題にはあまり深入りしないことにする。それで、これ以上言及することを避け、主要な特徴だけをあげておく。

林分内の樹木は、通常次の4つの樹冠級にわけられる。

優勢木（Dominant trees）：これらの木は、林冠層の上部を構成し、上方からの全光線と若干の側方光線を受ける。

准優勢木（Co-dominant trees）：これらの木は優勢木より若干低い（約 2/3）が、一般的な林冠の一部を構成する。上方からの光線は全部受けるが、側方からの光線は比較的少ない。

介在木（Intermediate trees）：これらの木の高さは、優勢木の高さの大体 2/3 である。これらの多くは、梢端が解放され、若干の上方光線を受けている。しかし側方からの直接光線は非常に少ない。介在木は副優勢木（Sub-dominant trees）とよばれることもある。

被圧木（Suppressed trees）：このクラスの高さは、優勢木の樹高

の大体半分である。これらの木は、ごく少量の直接光線しか受けない。

これらの4つの樹冠級に加えて、"Over-story tree" と "under story growth" を区別しなければならないことがある。厳密にいうと、これらは主林分とはふつう林令が20年以上違っているから、その林に属するとはいえないのであるが、このような林も同令林の中に含めて考えることにする。

それぞれの木を一層完全に特徴づけるため、樹冠級のあとに文字を加える。これらの文字は片枝(a)、暴れ木(b)、幹の貧弱な暴れ木(c)、樹冠の小さいもの(d)、病木(e)、枯損木(f)などのように異状性を表わすものである(Schotte, 1912, P254)。

下層間伐と上層間伐(Low thinning and crown thinning)

この区分方式や他の類似の方法によって、2つの間伐種(thinning system)が定義され、研究に採用されてきた。すなわち下層間伐と上層間伐である。

下層間伐というのは、伐採木を下層林冠の中から選ぶものである。上層間伐は主として伐採木を上層と中層の樹冠級、特に優勢木の中から選定するのであるが、一方被圧樹冠級の木の大部分は、優勢木の大部分とともに伐り残すのである。

択伐的間伐(Selection thinning)

択伐的間伐は、同令林の間伐方法の中に分類されることもある。しかし択伐的間伐は主に最大木を伐採するもので、同令林では短期間でしか実行できない。これらの大きい木を伐採すると、林は非常に短かい期間のうちに疎用して、後継樹が侵入しはじめる(Moller and Holmsgaard, 1947, P421)。

このため、択伐的間伐を長期にわたって継続して実行するとすれば、す

べての林令の木を含む林や、択伐林型の林に対してでなければならない。

同令林分における臨時的伐採としての択伐的間伐は Borggreve (1891, P302) が提案した。これはいままであまり使われていないが、林木の形質の変動が著しく大きいようなうつな林では、第1回、第2回間伐の場合に利用できるかもしれない。Vanselow (1934 b, P130) は上層間伐でさえ20〜30年の間だけしか実行できないのだから、間伐は下層間伐、時には下層と上層の間でなければならないと強調している。同様に、Carbonnier (1954, P44) は、上層間伐が一定期間の後には下層間伐に近づくことを指摘している。

自由間伐(Free thinning)

いま述べた間伐方法のいずれかで処理したとき、天然林が良好な将来林分を誘導できる程度に、十分一様となっていることは稀である。林が土地を高度に利用し、質のよい生産をあげうるようにするためには、すべてのクラスから伐採木を選定する必要がある。自由な決定にもとづいて、全階級から伐採木を選ぶ間伐種を自由間伐という。

自由間伐は、1898年に Heck (Langsaeter) が一つの体系として提案したものであるが、そのあと、Reventlow が1811年の昔に強度間伐の概念をうち立てた Demark の beech 林において、すでに長期にわたって使われている。この方式ではどの木を伐るかを指定する規定がなく、どのような木を残すかがきめられている。それは、このような方法で最もよく言い表わせる。すなわち間伐(自由間伐)とは、適当な本数の最良木をその地域内にできるだけ一様に残すことである。

この定義では最良の木を残すべきことが述べられている。どれが最良のタイプの木であるかは、場合に応じてきめなければならない。これはある程度どのような産物を希望するかにも関係してくる。もしパルプ材の生産

が目的なら，残すべき木は最も成長の早い木である。何となれば，それらは最大量の繊維収量を与えるからである。これらの成長の早い木は，時分暴れ木になる傾向があるかもしれないが，しかし節は通例パルプの生産において問題とならない。一方目的が素材の生産なら，幹の形質が一番大切であり，伐採木よりも多少成長が劣っても通直で，枝の少ない木を残さなければならない。

この定義には，残存木をできるだけ等間隔に配置することも述べられている。この点に関して非常に屢々矛盾が生じてくる。林の中で最良な木がかならずしも等間隔になっていない。したがって，もし最良木を残さなければならないとすると，良好な配置が望めない。またもし正しい間隔が必要なら品質の劣る木を幾らか残さなければならない。実際は，これらの二つの目的を折衷するのが普通であるが，ある人々は他よりも間隔の方に重点をおいている。Eide（1933，p.8）は Norway の針葉樹林では等間隔が重要であると強調している。木が等間隔に配置されている林では，ギャップは急速にふさがり，間伐のあとすぐに根が土壌を完全に利用するようになる。北欧における生産の最終目標は，ほとんどいつも，同じ林から素材とパルプ材の両方を収穫することだから，間隔を等しくするために多少の二次的なクラス，または暴れ木を残しても面倒はおこらない。

自由間伐は，現在北欧において，研究と実行の両面から全面的に採用されている。それぞれの場合に実行すべき間伐方式は，主として林分の条件に支配される。林に暴れ木が多いときは，才1回，時には才2回の伐採も上層間伐か択伐的間伐の様相を呈することがある。しかしこのようにして林が一様になると，針葉樹の場合の自由間伐は，少なくとも輪伐期の初期においては下層間伐の形をとるのが普通である。そうして輪伐期の後半では次第に上層間伐に移行する（Eide and Langsaeter，1941，p.373

447）。品質が重要な意味をもつ広葉樹林の場合には，小数の良木の利益となるように伐採をおこなわねばならないから，上層間伐に近くなる（Möller 1934 a，p.47）。

間伐方法に対する尺度

Eide と Langsaeter（1941，p.373）の使った間伐方法の尺度は，残存木の平均直径（D）に対する伐採木の平均直径（d）の比である。この d/D が 0.70 以下であれば，実行された間伐は下層間伐である。0.70 と 0.85 の間の伐採は下層および上層間伐のはっきりした特徴を示さない。0.85～1.00 の伐採は上層間伐で，1.00 以上は択伐的間伐を示す。

Petterson（1955，p.111～123）は，収穫表を調製するために間伐を理論的に"下層間伐"と全層間伐（through thinning）に分類した。それによれば，下層間伐は非常に下位の樹冠級の伐採であって，全層間伐は $d/D = 1.00$ となるように，各直径階で一定割合の木を伐ることを意味している。下層間伐相互の間で伐採される断面積を色々に変えることによって，$d/D = 1.00$ までのすべてのタイプの間伐を示すことができる。

Petterson は極端な上層の伐採を high thinning と名付け（p.122）たが，high thinning，全層間伐そして最終的には下層間伐と相互に関連づけて変化させることにより，$d/D = 1.00$ の間伐も説明が可能である（ただし彼の研究にはそのようなタイプの間伐は含まれていない）。Ullen（1940）は伐採本数の割合と伐採材積の割合とを比較して間伐方法を特徴づけている。この関係が，もし 1.40 以上なら下層間伐，1.00 に近ければ上層間伐，0.60 以下なら択伐的間伐である（Langsaeter 1941，p.150）。

しかし林分の最初の間伐では多数の小径木を伐採するのが普通だから，これらの指数は，どれもある程度まで用をなさなくなり，伐採の性格を表

まって示すおそれがある。それからあとの伐採では、これらの尺度はすべて満足すべきものとなるが、使用にあたっては d/D の関係が一番簡単である。

3 間伐度

これまで間伐度は伐採すべき樹木級、またはその比率を示すことによって定義されてきた（Schotte, Mac Donald）。そのような定義では残存木の本数はある程度間伐前の林の状態に関係する。そのため、伐採前の断面積に対する伐採木断面積の比率のような指数が使われている。本数や材積も同じように使われている（Lagaeater 1941. p.148）が、それでもこれらは林分の当初密度に支配される相対的な数値である。

下層間伐の場合の間伐度は、A, B, C, D と名付けられているが、Aは枯死木のみを伐採する極めて弱度の間伐度で、Dは最も強度の間伐、すなわち被圧木の全部、介在木および優勢木の一部を伐採するものである。間伐度の定義については、Mac Donald（1931. p.241～51）を参照されたい。ただし各国で実行されている間伐は、これらの定義を使って科学的水準で相互に比較することは不可能である。

密度の尺度

"自由間伐"の定義の中で、適当な本数を残さなければならないと述べておいた。我々はどの木を伐採するかに重きをおかず、専ら残される木に注目したのであった。実際に必要なのは、間伐度よりもむしろ残存林分の密度である。

密度の物指に対する要求は、これまでエーカー当りの断面積、材積または本数を示すことによって部分的に満たされてきた。しかしこれらの因子は、それを収穫表のそれぞれの地位、年令などに対応する値と比較しなければ、ほとんど役に立たない。そのような収穫表は、多かれ少なかれ、もとになっている標準地の平均だから、密度の物指としてはかならずしも適当でない。

したがって林業技術者、特に研究者は、より客観的な密度の尺度を探究しつづけてきたのであるが、その進歩は遅々としたものであった。最も見込みのありそうな尺度は、樹高、一層よいのは上層高、と関係づけた本数であろう。この関係を密度の物指として提案し使用したのは、1925年以来 Java における間伐試験でそれを用いた Hart（1928. p.198）だと思われる。

Ferguson（1933. p.764）は、密度の尺度として色々な上層高（ポーランドではエーカー当り 40 本の最大樹高木の平均樹高）に対して残存すべき本数を示す図表を作成した。

この提案を知らずに、Wilson（1946. p.758）は密度について論じた。彼は、Teatchenko の教科書のように、"Keller は、Spruce の林を間隔が林分高の 1/6 になるように間伐する方法を信奉している"と書いている例もあるが、これまで樹高は密度の尺度として立木度を使う場合には無視され続けてきた、といっている。Wilson は Keller の法則が大雑把だということを見出したが、最近の論文（1951. p.693）で、樹冠距離が優勢木樹高の 20% であるような Star lake の林で試験を開始したと述べている。

欧州では、樹高と関係させた本数（あるいは樹幹距離）が密度の尺度として時々使われたが、一般にうけ入れられるにいたらなかった。このようにして、Eide（1933 p.9 および p.23）は、種々の地位における色々な平均高に対して残存すべき本数を示すことによって、彼の幹距の指針を与えた。Forestry Commission も上層高に対する本数を示すことに

よって間伐指針をつくっている。Brantseg（1951, p.51）と Braathe（1952, p.442）は、ある樹高における本数を使って、林分密度の間の比較をおこない、年輪幅と断面積成長率について若干の結論をえている。同じ尺度は Braathe（1953, p.8）も使っている。

林分密度指数

しかし1953年に、I.U.F.R.O の会議に先立つてこの問題について2つの提案がなされた。Hummel（1954, p.585）は、古い間伐度の定義が不十分であることを余すところなく指摘し、彼の"密度指数"方式を提案した。彼は林木の正方形配置を計算して、上層高の20%の間隔を標準密度とよんだ。この標準間隔を指数1とし、英国の針葉樹で実際に使われている一般的な間伐度（ただしカラマツを除く）に密接に対応させた。古い方式ではこの密度はCとDの間である。Hummel は標準密度との本数関係によって他の密度を表示した。D度は標準の stocking と比較して約3/4の本数だから、指数0.75が与えられる。このようにして、C度は約1.5、Bは2.5、Aは4.0である。E度は稀にしかおこなわれないが、その指数は0.5である。

この密度指数は、下層間伐または自由間伐で取扱われた同令林について導いたものであるが、Hummel は暗に、上層間伐のときにもこの方式が使えるといっている。しかし被圧木はこの場合無視しなければならない。色々な密度と樹高に対応する本数を Table 1 にあげておく（省略）。

同じ会議で Becking（1954, p.580）は Hummel のものと類似した提案をおこなった。相違点は三角形配置で本数を計算し、間隔を Hart と Ferguson の論文にしたがって、上層高の%の形で指数としている。彼は間伐度の間隔としては3%が適当（16, 19, 22, 25%など）であるといっている。

一定密度の維持

Becking がポーランドにおいて1947年以来実行してきた試験の経験では、Douglas fir やポプラのような樹種は、輪伐期を通じて密度指数が一定となるように取扱わなければならないが、beech やカラマツでは、多分年令に応じて指数を落してゆかなければならないといっている。同じように、Hummel も輪伐期を通じての一定指数の維持を示唆している。

北欧でおこなわれている間伐が、一定密度指数とどれ位一致しているかをみるため、Norway spruce について比較をおこなった（Braathe 1955, p.235）。結果は Fig. 1 の通りである。これから北欧の spruce の収穫表は非常に違った間伐計画に従っていることがわかる。大部分の表では、55フィートの高さに達するまで密度指数が増加し、その後低下する。しかし英国の表（Hummel と Cristie 1953 p.18～19）は大体一定密度指数で、Denmark の表は輪伐期を通じて指数が低下している（Moller 1933, p.572～83）。このように差があるのは、Norway spruce の間伐計画には一定指数が適当なためと思われ、Hummel の提案した密度指数は、最も有望な尺度ということができる。

この密度指数を、Reineckes（1933, p.628）が提案し、Mulloy（1943, p.109, 1955, p.5 および 1947 p.3）が採用した林分密度指数と混同してはならない。後者は現在でも Canada の一部で使われているが、これは樹高を考慮に入れない尺度である。

Hummel の密度方式は間伐試験で使うのに極めて簡単で、直径と無関係に林木の平均占有空間を樹高との関係において示すものだから、非常に優れた指数だと思われる。しかし、直径は林分ごとに多少違うかもしれないから、この指数は断面積や材積の尺度としては適当でない。

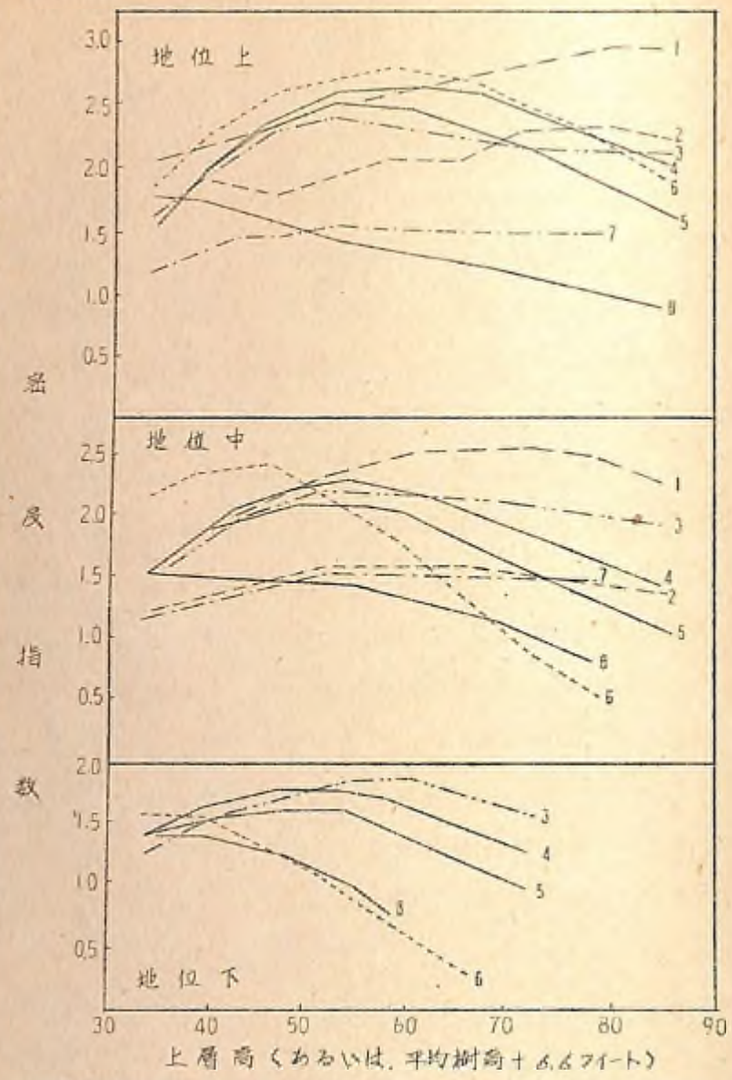


Fig. 1　北欧における幾つかの収穫表の密度指数

数字は次の著者を示す。

1　Wiedemann　中層度間伐（1949　P.249）

2　—　強度間伐　（1949　P.40～3）

3　Brantseg（1951　P.68～76）

4　Eide and Langsaeter　間伐度 I（1941　P.422～7）

5　—　〃　II（1941　P.428～33）

6　Petterson（1955　P.15～6）

7　Hummel and Cristie（1953　P.8～9）

8　Moller（1933　P.572～83）

無手入のまま放置された林や，上の方から間伐して，ところどころに被圧木が残っているような林では，指数を計算するときに被圧木を含めてはならない（Hart 1928　P.198 および Hummel 1954　P.584）。被圧木は，通常，林木間の競争に直接的な役割を果していない。しかし土壌や気温，あるいは降雨などに対する影響を通じての，それらの間接的な重要性はもっている。

II　林分の成長に対する間伐の影響

林分成長に対する間伐の影響は，一部は単木に対する影響として，また一部は林分全体に対する影響として取扱われる。この報告では，間伐によって影響をうけているままの各因子を別々に取扱うことにする。

1　樹高成長

測定の方法

樹高成長に対する間伐の影響度の決定は，欧州の間伐試験地の大部分に共通する弱点である。もちろん，これは単木樹高や樹高成長量があまり正確に測定できないことが原因である。

一番普通に使われる樹高測定用具は，Blume-Leiss と Haga の測高器である。しかし Austria や Norway では直接測定法が使われている。

Austria では立木の樹冠の間をぬってテープを繰出して測定している。この方法は Schmied（1932 p.7 および例 I. III. IV）が例示したものであるが、今でも使われている（Broathe 1953 a. p.3）。利用できるものとしては Austria の方法は確かに一番正確だが、Norway での測定値も同じように信頼できる。Norway では、樹高を継竿か、または樹高が 70～75 フィート以上なら、トランシットで測定している。これらの測定値の誤差は、常態では±4インチをこえない。結果が不正確になるもう一つの理由は、これまで標準地内で測定する木の本数が少なすぎて、樹高曲線を作らねばならないことが多かったからである。次回の再測定で同じ方法で新しい樹高曲線を作る。このような曲線からは、林分の実際の樹高や樹高成長量についてはっきりした結論が下せない。

Norway の標準地では、1インチ直径階ごとの平均樹高が信頼できる値になる位十分な本数を測定しているから、直径に対して樹高を全体的に平滑化する方法は使わない。標準地内の本数に応じて 40～100 本の木を測定し、1928 年以来再測定の度に同じ残存木を測定している。それで各測定木の樹高成長量は差として求めることができる（Eide and Langsæter 1941 p.360）。

広葉樹の場合には梢端がはっきりしないので、木の最高点をきめるのが難しい。そのため樹高の測定は一層困難である。したがって広葉樹の樹高測定の結果は針葉樹よりも不確実である。

平均樹高と上層高

平均樹高の計算には最近まで次式が使われてきた。

$$H = \frac{\sum hg}{\sum g}$$

ここで H = 平均樹高

h = 1つの直径階の平均樹高

g = 対応する直径階の断面積

しかしこの平均樹高は間伐度によって変ってくる。なぜなら、伐採木の高さは残存木より低いのが普通だから、実際の樹高成長を正しく解釈するのが非常に難かしい。

近年、上層高が使われるようになった。上層高というのは、大きい方から一定本数の木をとったときの平均樹高である（ポーランドでは樹高の高い方からとる）。Forestry Commission の上層高の定義は エーカー当り 100 本の最大周囲木の平均高である（Hummel and Cristie 1953 p.2）。欧州大陸では、上層高をきめるために使われる木の本数は一定していないが、普通はエーカー当り 40 本である。

どの定義を使うにしても、上層高は間伐度とほとんど独立である。したがって今後は上層高を利用して、樹高成長量に対する間伐効果の絶対的に信頼できる結果が、多分えられることと思う。

Norway spruce

最終的な結論ではないが、樹高成長に対する間伐の影響は、いずれの場合でも極めて小さいという結果がでている。少くとも林業で実際に使われている範囲の間伐度で影響が現れるということは、普通は疑問である。

Wiedemann（1936～37 p.147）は、彼が Prussia に設定した Norway spruce の下層間伐試験地の資料から、この問題を論じている。Table 2 は彼の結果をまとめたもので、色々な直径級に対する樹高成長量が示されている。Schnellwuchs というのは非常に強度の間伐である。

Table 2

地方 間伐度	年令	期間の始めの直径（インチ）				
		4	6	8	10	12
		期間中の樹高成長量（フィート）				
Rotgen 13						
Schnellwüchs	26～44	23.0	30.8	—	—	—
やや強度の間伐	26～44	17.1	27.5	—	—	—
Gutersberg 120						
Schnellwüchs	32～64	32.2	38.1	40.4	—	—
やや強度の間伐	32～64	26.0	33.2	35.8	—	—
Westerhof 78						
強度間伐	41～73	—	28.8	32.2	32.2	
やや強度の間伐	41～73	—	26.3	33.2	34.1	
Suhl 61						
強度間伐	55～89	—	—	21.0	25.3	24.6
やや強度の間伐	55～89	—	—	19.7	23.0	24.3
Schlensingen						
強度間伐	72～102	—	12.8	12.2	15.1	15.8
やや強度の間伐	72～102	—	13.5	13.5	15.4	15.1
弱度間伐	72～102	—	13.5	14.4	15.1	15.4

この表では、強度の間伐をおこなうと、弱度のときより若干樹高成長量が増加することが示されている。これは若い林で特に明瞭で、老令林ではそれほど差がない。

このことは、強度間伐では各直径級の大半が除去され、集団内の成長競力の優れている良木が残されることも一つの原因になっている。しかし

これらのプロットの成長量の増加は、このような間接的な効果だけでは説明できない位大きいから、ここではどうしても強度間伐のために樹高成長が促進されたと考えざるをえなかった。

このような間接効果は、Eide と Langsaeter（1941, p.378～9）がはじめて計算した。Norway spruce では、この効果は除去される断面積の10%ごとに約2%になることがわかっている。

Norway で収穫表の調製がはじまったとき（1939）、間伐が樹高成長に直接効果を与えるかどうかを判断する資料がなかったので、直接効果を考えに入れずに、色々な間伐度の収穫表を作った（Eide and Langsaeter 1941 p.377）。スイスの固定試験地で Badoux（1936, p.274）は、間伐しても樹高が変らないことを見出した（Möller 1954 a）。同様に Nyyssonen（1954, p.183）は、同令林分の優勢木と被圧木の樹高成長量にほとんど変化がないことを認めている。

Vanselow（1943 p.105）は、Munich の林業試験場の40プロットからなる14系列の間伐試験について報告している。プロットの地位は全部上で、6回から13回の測定が繰返されており、その中の幾つかは、1870年の昔に設定されたものである。B度とC度のプロットの平均樹高は、それぞれA度のプロットの平均樹高の101%と103%であった。しかしこれらの違いは見かけ上のもの（p.128）で、間伐度の異なるプロット間の樹高成長は実際には差がなかった。

Danmark で以前ヒースであったところに植栽された Norway spruce の林に、1932年に間伐系列試験地を設定した。1948年、林令27年になるまでに最大の樹高成長を示したのは強度間伐区で、試験期間を通じて年間15インチであったが、最も弱度に間伐したプロットの樹高成長量は年あたり10.5インチにすぎなかった（Möller 1954, p.12）。

この樹高はエーカー当り 404 本の最大木の平均である。Möller はエーカー当りそれだけの本数をとって樹高を計算すれば，間伐の見かけの効果の大部分を除却できると考えた。しかしこの本数は英国で上層高の決定に使っているものの4倍であり，欧州の他の国のものの10倍にもなっている。したがって樹高が，各間伐度の樹高成長量の比較において真の物指になっているかどうか非常に疑わしい。年間 4.5 インチの差は大きいから，多分これらの試験では，強度間伐によって単木の樹高成長が促進されたのであろう。1948 年の間伐後の原資（growing stock）の断面積はエーカー当り 70～150 平方フィートの範囲にあった。この地域の土壌は非常に悪くて乾燥しているから，それに伴って地位も低く（50 年で約 35 フィート）となっている。

Scotland の有名な Bowmont の Norway spruce の固定試験地（各処理について4つのプロットがある）では，15 年の期間内において間伐方法の違いに帰着しうるような上層高の違いは認められなかった（Hummel 1947 p.35）。最も新しい結果*（Hummel 1956, p.3）によれば，間伐の 25 年後においても同じ傾向がみられたが，ただ上層高のみはそのときまでに他のプロットより 2 フィート高くなっていた。

植栽間隔試験

欧州の Norway spruce の植栽間隔試験でも，造林地の植付間隔の違いによって樹高成長はほとんど変らないことが示されている。

Norway 南部における間隔 4.1 × 4.6 フィートから 11.5 × 11.5 フィート（地位上）までの試験では林令 44 年までの樹高には差がなかった（

* Bowmont の Norway spruce 試験地に関するこれらの結果は，林業委員会研究部の mensuration officer，F. C. Hummel 博士が恵与されたものである。

22 フィート）（Braathe 1952 p.443）。Mackenzie（1951 p.60）は，英国の若い造林地では，3 フィートから 8 フィートまでの間隔なら一般に樹高に差がないといっている。

独乙には 3 つの植栽間隔試験があるが，その 2 つの樹高には差のないことが示されている。第1の試験地は München の近くの Wessling にあって，地位は特上である。植付の間隔は 3.6 × 3.6 フィートから 6.6 × 6.6 フィートまでのものと，13.1 × 13.1 フィートのプロットが1つある（Vanselow 1942, p.28 および 1950, p.500）。第2のものもやはり地位のよいところで，これは Baden の Kocherhof にある。間隔は 1.6 × 1.6 フィートから 4.9 × 6.6 フィートまでであるが，樹高に差はみられない（Vanselow 1937, p.40）。

Saxony の Wermsdorf にある独乙の3番目の植栽間隔試験地は多数の著者が関係しているが，特に Kunze（1895, 1899, 1902 および 1907），Borgmann（1915），Busse and Jachn（1928），Fritsche（1948）および Wiedemann（1936～1937）が多くの報告をおこなっている。この試験地の地位は中庸であるが（50 年で約 50 フィート），その結果によれば，林令 62 年では疎開林分の方が樹高が高くなっている。使われた間隔は 2.8 × 2.8 フィートから 6.6 × 6.6 フィートまでと，3.7 × 11.2 フィートである。62 年生のときに間伐したが，その直後の本数，平均樹高および平均直径は次表の通りである。5.6 × 5.6 フィートのプロットは，一部若い年代に霜の害を受けている。ここに示した樹高は平均樹高であるが，確かにこの結果は広い間隔において若干の成長促進効果，更に適切には，高密度での抑制効果の存在を示している。

Table 3

植栽間隔	エーカー当り本数	平均高(フィート)	平均直径(インチ)
2.8 × 2.8	489	52.5	6.5
3.7 × 3.7	508	54.2	6.6
4.7 × 4.7	390	55.8	7.2
5.6 × 5.6	437	55.1	6.9
6.6 × 6.6	349	58.1	7.5
2.8 × 7.5	336	59.3	7.7
3.7 × 11.2	288	61.4	8.3

Vanselow (1950. p.503) は、降水量の多い南独乙でおこなわれたこれらの試験から、植付間隔は樹高成長に対してはっきりした影響を示さないと結論している。しかし、Norway spruce の自然的な生育範囲外にある北独乙では、降雨量が少なくて、地位も劣悪だから、密な林の樹高成長は植付間隔の広い造林地に比べて多少抑制されるように思われる。地位の悪いところでこのような反応が現れる理由は、多分土壌の湿度が増してフムスの活性が高くなるためと思われる。これらの因子についてはあとでとりあげる。

植栽間隔試験地として設定されたものでないが、独乙の幾つかの間伐系列試験には、最初の植付間隔が違っているプロットがある。Wiedemann (1936~37. p.25) によれば、Dietzhausen の 4.9 × 4.9 フィート植栽地における4本の最大木は50年生のとき、対応する 3.3 × 3.3 植栽地の4本の最大木より約16フィート高かった。彼はこの地位の特徴を絶縁型だといっているが、しかし地位下に属する程低くない(50年60~65フィート)。Dillenburg ではこの差はもっと少なく、約3フィート(p.26)であり、Gutersberg では50年のとき、はっきりした差を認めることができなかったと述べている。Wiedemann は密度と地位によって樹高成長がどのように変化するかということは、研究者にとって非常に興味があり、また重要な研究課題だと述べている。

彼は最近の著書の中で(1950. p.20)、Norway spruce の樹高成長に関する永年の経験をまとめている。それによれば、若い林を強度に間伐すると、間伐後20年くらいまで樹高成長が促進されるということである。このようにして生じた差は伐期まで持続する(p.75)。

彼のいうところによると、密な播種や天然更新の場合、競争がはげしくて成長が阻げられる。これはまた5フィート以下の植栽間隔を広いものと比べた場合にもあてはまる。この差は通常3~10フィート(p.20)である。一方、Wiedemann は孤立した位置にある単木についてはその可能性を否定していないが、非常に疎な林で樹高成長が阻害されるという例は観察していない(p.20)。

Norway spruce の樹高成長が強度間伐によって減退することを示したただ一つの研究は、Zimmerle (1938. p.343) である。彼は、林木の枝が丁度互いに接触している "Blendersaumschlag" の内側の区域に生立していた12本を含めて、全部で24本の木を樹幹解析した。他の12本はこの区域の全然外側の、大体1915年以来繰返して伐採がおこなわれたところに立っていた。これらの木は場所ごとに3つのグループにわけてとった。最近10年間の樹高成長量は、

		区域外	区域内
グループ(1~5)	(2×5本)	5.9インチ	7.1インチ
グループ(6~9)	(2×4本)	7.1インチ	8.7インチ
グループ(10~12)	(2×3本)	5.9インチ	7.1インチ

であった。平均値の標準偏差についてはなにも示されていないが、差が実在するように思えるし、また Zimmerle はこの漸進的な自由間伐によって樹高成長が衰えたと結論している。

参照した間伐系列試験や植栽間隔試験の結果をみると、Prussia の若干のプロットでは、若い年代や短期間においては影響が示されているようであるが、成育条件のよい地位の良好なところでは、Norway spruce の樹高成長は間隔の違いや間伐の程度によってほとんど影響を受けないと結論してよさそうである。これに対して、成長率の低い場合には密および過密な林の樹高成長は多少低下するようである。しかし、実際に使われている間伐の範囲では、この影響はあまりはっきりしたものでないけれども、それでも無視することはできない。この効果の大きさはまだわからないが、どの場合でもそれは二次的な意味しかもたないから、討論や計算の際はこの効果を無視して、地位の悪いところでもやはり実用されている範囲の間伐で、ごく僅かの影響があると考えた方がよい。

しかし、極端な間伐度のときは、この効果が重要となる可能性のあることを忘れてはならない。このことは全然間伐の入っていない林や、過密な林でみることができる。特に地位の悪いところでは、樹高成長は低下し、また過密な spruce 林分の間伐に対する反応も、しばしば Norway において観察されている。これは以前に丸くなっていた樹冠から新しい梢頭が出てくるからである（Langsaeter 1941. P.165）。

広葉樹

頂枝があり、また普通には通直な1本の幹からなる針葉樹に比較すると広葉樹は樹冠の形がはるかに区々である。但げられずに成長を続けている木の樹冠は広くて、多数の幹にわかれているが、林分内の木は樹冠が小さい。間伐をすると広葉樹は枝を伸して空間をうめる力が旺盛（Wiedemann 1936, P.219 および 1954a P.31）だから、側方に十分な空間があって光線を十分に受けていると、樹高成長をほとんどしていないように見える。

したがって、側方の空間と光線を増すように間伐してやると樹高成長は多少低下するものと予想される。上に指摘したように、広葉樹の樹高測定は難しいが、それでも現在までの結果は一定の傾向を示している。

Wiedemann（1932. P.150）は独乙における beech の 58 個所の試験地の結果を公表したが、その中の幾つかは 1890 年以来観測されてきたものである。彼は間伐によって影響される樹高成長量の大きさは驚くほど小さいといっている。彼は Norway spruce の場合の経験から、樹高成長は僅かに増加する傾向があると予想しているが、この傾向は beech では見られなかった。これに対し、非常に強度に間伐した5つのプロットでは、対応する中庸度間伐のプロットより 3.3 ～ 3.9 フィート樹高が低かった。Wiedemann は、これらの非常に強度の間伐をしたプロットでは樹高成長が阻害されたことは疑いをいれないと述べている。

別の論文で、Wiedemann（1943 b. P.73）は、非常に強度の間伐では中位の間伐に比べてかなり樹高成長が低下し、特に間伐が漸進的でなく急激におこなわれるときに著しいことを示している。彼は要約の中で（1950. P.20）、beech 林を非常に強く間伐すると中庸度間伐より樹高成長が 10 フィートも遅れると結論し、Seebach からの例をあげている。同じように Oak も強度に間伐すると成長が衰える（P.75）。

欧州には Badoux（1939）のおこなった beech に関するもう一つのよく知られた試験がある。これはスイスの固定標準地によるもので、その一部は 1889 年に遡ることができる。彼は（P.72～3）、強度間伐によって樹高成長が衰えた例が若干あるけれども、全体的に間伐度の違いで樹

高成長に差は生じないと述べている。

Burger（1951. P.188～9）が公表し Möller（1954. P.30）が引用している試験の結果では，スイスの beech，beech と mapple および ash の混交林については，強度間伐によって樹高が低くなる傾向がみられる。Henriksen（1951. P.394）は Denmark の若い beech 林の標準地における結果から，間伐で樹高成長は促進されそうにないと結論し，さらに間伐によって樹高成長が少しよくなると思われる Norway spruce に比較すると，これは非常に面白い現象だと強調している。

beech に関するこれらの結果は，どれも間伐によって樹高成長がよくならないことを示している。これは広葉樹の生育している場所が，Norway spruce であれば，促進効果がでてくるような，悪い地位でなかったためと思われるが，一面，間伐による成長促進が樹高よりむしろ樹冠の成長に現れるためであろう。非常に強く間伐した結果，樹高成長が悪くなるという例の解釈としてはあとの方の説明が当をえていると思われる。しかしこの差は僅かだから，樹高成長が多少衰える可能性があるということは今後の検討において留意しなければならないにしても，beech 林では間伐が樹高成長に影響しないと考えても大きな誤りはないと思われる。

Scots pine

Lonnroth（1926. P.183～4）は，非常に強度な間伐をすると Finland の Scots pine も樹高成長が衰えると考えた。この成長の衰えは直接測定したものでなく，非対称性の係数（coefficient of asymmetry）によってはかったものである。

Wiedemann も独乙の Scots pine 試験地の観測結果でこのことを確認している。彼は密なプロットと疎なプロットの樹高成長に差がなかったといっている。しかし強度間伐のプロットは若い林でも成長が悪かった。

今の強度間伐プロットの優勢木は，正常な林のそれより 3～10 フィート樹高が低かった。Wiedemann は，高密度のために樹高成長が低下するのは，極めて地位の悪い場合だけだと述べている。

これらの結果は，頂枝のはっきりしている針葉樹にもかかわらず，密度と樹高成長に関する限り Scots pine は Norway spruce より beech やその他の広葉樹と似通った傾向をもつことを示している。

2 直径成長と幹型

平均直径

過去現在を通じて，平均直径は

$$D = \sqrt{\frac{\Sigma a g}{\Sigma a} \cdot \frac{4}{\pi}} = \sqrt{\frac{\Sigma a d^2}{\Sigma a}}$$

で計算するのが普通であるが，この式は平均断面積をもつ木の直径を表わしている。この平均直径は林の伐採に対して数学的に非常に敏感で，同じ伐採をおこなったときの平均樹高よりずっと鋭敏に反応する。このことは引用した計算例（Braathe 1953 c. P.231～2）が示している。

Table 4 はほとんど同令に近い Norway spruce の直径階と樹高階

Table 4 直径の分布

直径階（インチ）	本数	平均直径（インチ）	平均高（フィート）	直径階（インチ）	本数	平均直径（インチ）	平均高（フィート）
1.38 ～ 2.16	25	1.81	12.5	6.90 ～ 7.68	5	7.48	51.8
2.17 ～ 2.95	13	2.48	17.8	7.69 ～ 8.47	7	8.15	49.8
2.96 ～ 3.73	4	3.38	25.7	8.48 ～ 9.26	10	8.74	52.0
3.74 ～ 4.52	8	4.09	29.7	9.27 ～ 10.05	2	9.50	54.1
4.53 ～ 5.31	11	5.00	36.0	10.06 ～ 10.83	5	10.45	57.6
5.32 ～ 6.10	8	5.72	41.6	10.84 ～ 11.61	2	11.08	57.6
6.11 ～ 6.89	11	6.50	43.9	11.62 ～ 12.40	3	12.08	57.3

別本数分配を示したものである。

色々な伐採方式について上式から計算した本数、直径および平均樹高を表示するとTable 5のようになる。Table 4に示した林の本数、平均直径および樹高を100%にとった。1.38～2.16インチ直径階を除去して非常に弱度の下層間伐をすると、平均直径は計算だけから12.3%増加した。これに対する平均樹高の増加は1.5%にすぎない。

Table 5 Table 4に示した林で、色んな伐採方法を適用したときの本数、平均直径

	本数		平均直径		平均樹高	
	本	%	インチ	%	フィート	%
Table 4の林	114	100	4.12	100	48.6	100
1.38～2.16インチ階を伐採	89	78.1	4.85	112.3	49.4	101.5
1.38～2.16および2.17～2.95インチ階を伐採	76	66.7	2.32	120.0	50.1	102.8
10.62～12.40インチ階を伐採	111	97.4	5.87	96.1	47.5	97.5

1.38～2.16と2.17～2.95インチ階を除去する少し強い下層間伐では直径は20%、樹高は2.8%増加する。これは極端な下層間伐で、本数の1/3を伐採したときの結果である。本数の2.6%にあたる10.62～12.40インチ階を取去る択伐的間伐においては、平均直径は3.7%、樹高は2.5%増加する。

この例から、多数の小径木からなる林に極端な下層間伐を適用すると平均直径に強い影響を与えるが、平均樹高はあまり違わない。自由間伐の場合この数学的なゆがみ(これは"見かけの効果"とよばれる)は、適用した間伐方法の性格によってきまる。通常、平均直径と平均樹高は間すが択伐的間伐のときにはかえって減少する。

間伐の効果を平均直径を研究対象として論ずる場合には、このような平均直径に対する下層間伐の見かけの効果に留意しなければならない。

しかし、このような見かけの効果にもかかわらず、直径成長量は樹高成長と対数的に、間伐によって一般に促進される。これはすべての間伐試験の示しているところである。

単一系列における直径成長量

上に述べた見かけの効果が生ずるのを防ぐには、直径そのものより、むしろ直径成長量を取扱った方が都合がよい。

Bornebusch(1933. P.180～7)は、Denmarkの有名なHastrupの試験林における最近10年間の連年の直径成長量を発表した。この試験は、30年生のNorway spruce造林地で実行されたもので、開始後22年経過している。この試験に使った間伐度は、英国のForestry Commissionが定めた定義と非常によく似ている。L度は非常に強度の間伐である。比較に便利なように、試験完了時の各間伐度の密度指数の概数を出しておいた。

Table 6 Denmark, Harstup試験林の林令42年と52年の間の連年直径成長量

間伐度	A	B	C	D	E
近似的密度指数	4.50	2.80	1.30	1.05	0.85
直径成長量(インチ)	0.07	0.11	0.18	0.20	0.21

この引用例をみれば、間伐は胸高直径の成長量に非常に大きく影響することが明瞭である。この促進効果は若い林で、しかも中位の直径階で最も大きい。古い林の大径級では非常に小さいが、それでも多くはこの効果が認められる。

これらの結果は知られているすべての間伐試験によって普遍的に確かめられている。このような試験の全部を細かく論ずる必要はないが、この問題をもっと掘り下げてみたいと思う読者の手引として、最も重要なものを列挙してみよう。間伐による針葉樹の直径成長量の促進については、Hummel（1947 P.35）、Burger（1951 P.187）、Zimmerle（1951 P.99）、Krenn（1942 P.43～4）、Wiedemann（1950 P.68）、Bonnemann（1939 P.473）、Vanselow（1937 P.41）、Henriksen（1951 P.414～5）。beech の直径成長量の増加については、Wiedemann（1932 P.166～7）が解説し検討を加えている。

植栽間隔試験における低密度（植栽間隔大）の直径成長量に対する促進効果も、やはり非常に明らかである。これまでに参照したすべての植栽間隔試験もこのことを示している（Table 3をも参照のこと）。

収穫表の直径成長量

第一の試験と違って、収穫表は多数の固定試験地の資料から作られているから、その中に示されている直径成長に対する効果は非常に興味深い。欧州の収穫表のうち2種以上の間伐度について作られているのは3つだけである。

Wiedemann の Norway spruce の表（1949 P.34 および 40）の地位中（地位Ⅱ、50年で約55フィート）では、林令80年のときの平均直径に、中庸度と強度間伐で若干の差がみられる。Table 9に本数と直径、それと参考のために密度指数の近似値をあげておく。

Eide と Langsaeter の表（1941 P.422 と 428）から求めたほとんど同じ地位、同じ年令の Norway spruce の平均直径を Table 10 に示す。ここでいう強度間伐は、断面積を中庸度よりも10％多く除去する間伐のことである。密度の違いのために、80～83年の直径成長量は

Table 7. Picea abies における Norway spruce の直径間ごとの直径成長量（Wiedemann より）

プロット	間伐度	地位	期間	残存のエーカー当り本数	期間の直径 年平均成長量（インチ） 2	4	6	8	10	12
Lotzen 13	弱度 Schnellwuchs	約 1.3	26～52	713	0.016	0.083	0.161	—	—	—
		約 1.3	26～52	311	—	0.148	0.212	—	—	—
Dietzhausen 90	中庸度 Schnellwuchs	約 1.2	36～57	585	—	0.031	0.096	0.122	—	—
		約 1.2	36～57	298	—	0.078	0.157	0.196	—	—
Sulzberge 120	中庸度 Schnellwuchs	Ⅱ－Ⅰ	32～64	523	—	0.051	0.102	0.146	—	—
		Ⅱ－Ⅰ	32～64	226	—	0.110	0.157	0.193	—	—
Bennickenstein 52～65	弱度 Schnellwuchs	Ⅳ	53～73	1225	0.016	0.087	0.118	—	—	—
		Ⅳ	53～73	364	0.028	0.106	0.138	—	—	—
Weterhof 78	中庸度	特・Ⅰ	41～73	263	—	0.043	0.146	0.187	—	—
	強度	特 Ⅰ	41～73	181	—	—	0.152	0.161	0.185	—
Suhl 61	中庸度	Ⅱ	55～89	284	—	—	—	0.075	0.122	0.122
	強度	Ⅱ	55～89	163	—	—	—	0.094	0.112	0.138
Schleusingen 123～124	弱度	Ⅱ－Ⅲ	72～111	277	—	—	—	—	0.079	0.092
	中庸度	Ⅱ－Ⅲ	72～111	187	—	—	—	—	0.079	0.108
	強度	Ⅱ－Ⅲ	72～111	120	—	—	—	—	0.075	0.098

Table 8 南Norwayにおける Scots pine の直径

間伐度	期末のエーカー当り本数	期末					
		1.57	1.96	2.36	2.75	3.15	3.54
		年平均成長量（インチ）					
弱度	2,970	0.008	0.012	0.024	0.032	0.043	0.151
中庸度	954	—	0.055	0.047	0.047	0.055	0.075
極めて強度	477	—	—	—	0.075	0.106	0.102

Table 9 Norway spruce, 80年の平均直径
（Wiedemann 地位 II）

	中庸度の間伐	強度間伐
本数	320	207
密度指数	2.50	1.60
平均直径（インチ）	10.35	11.70

Table 10 80年生のときの平均直径と直径成長量
（Eide と Langsaeter, 地位C. Norway spruce）

	中庸度	強度
エーカー当り本数	266	196
密度指数	1.80	1.25
平均直径（インチ）	10.20	10.92
連年直径成長量（70～83年, インチ）	0.094	0.114
〃 （50～53年, インチ）	0.098	0.104
50年のときの密度指数	2.45	2.20

階別直径成長量（Langsaeter より）

の直径（インチ）									
3.94	4.34	4.73	5.13	5.53	5.92	6.32	6.71	7.10	7.50
均成長量（インチ）									
0.055	0.067	0.071	0.087	0.114	0.071	0.079	0.130	0.149	0.169
0.059	0.075	0.110	0.114	0.122	0.122	0.130	0.122	—	0.242
0.102	0.130	0.146	0.146	0.134	0.177	0.181	0.145	0.185	0.185

0.094インチと0.114インチになり、直径成長量の増加は21%になっている。

しかし、50～53年の直径成長量は0.098と0.104インチで、その時点での密度の差（2.45と2.20）が少なかったため、差は6%にすぎなかった。断面積の伐採量を10%多くすると、密度の差は年令の増加とともに一層大きくなる。

種々の間伐度について示した3番目の表は、Petterson が Norway spruce と Scots pine について発表したものである。この結果は、Sweden 北部の天然生マツ林に適用するもので、色々な間伐度、間伐方法および植栽密度（当初密度）について一括して表示されている。

Table 11 78年生のときの平均直径、地位 H_{100}^{-20}
Scots pine（Petterson より）

	弱度（6%）	強度（12%）	非常に強度（18%）	極端に強度（25%）
エーカー当り本数	575	240	95	39
密度指数	2.05	0.85	0.35	0.10
平均直径（インチ）	5.75	7.00	8.70	11.05

Petterson（1955, P355～6 および 358～9）の pine の収穫表の地

位下（50年で約30フィート）に対する平均直径をTable 11に示す。これには4つの間伐度があって、それぞれ5年ごとに全断面積の6、12、18および25%を伐採する。これらの間伐度のうち、断面積の5%は極端な下層間伐によって取除き、残りの1、2、13、20%を平均直径に"見かけの効果"が生じないように全層間伐で伐採する。したがって、この場合平均直径に現れる見かけの効果は非常に僅かだから、差の大部分は間伐による直接および間接効果と考えなければならない。25%間伐の平均直径は11.05インチで、これは6%間伐のほとんど2倍に近い。このように異例な大きさの差から結論を出そうとするとき、忘れてはならないことがある。それは2つの強度間伐が極端な強さでおこなわれたことである。後述する材積成長減少の原因は、まさにこのことにあるのである。

Table 9～11をみて興味深いのは、Wiedemannが独乙で強度といっている間伐が、実は北欧において中庸度とされているものに相応していることである。このような密度に対する考え方の違いは、南独乙では一層はっきりしている。そこで強度の間伐といわれているものは、北欧では弱度に近い。これはもちろん、欧州各地の間伐を直接比較する上で障害となっていることである。

樹高との関係からみた直径

上に述べたことから、疎な林の胸高直径の成長量は、密な林と比べて例外なく促進されることが明らかである。しかし樹高成長の方はほとんど完全に等しい。もちろん、この一般的な結果は、幹型、すなわち直径対樹高の関係が林分密度によって変化するということである。

このような直径対樹高の関係の違いは、植栽間隔試験ではっきり示されている。Fig. 2はNorwayのFossumにある4.1×4.6フィート、6.6×6.6フィートおよび11.5×11.5フィート植えの例で、Braathe（1952

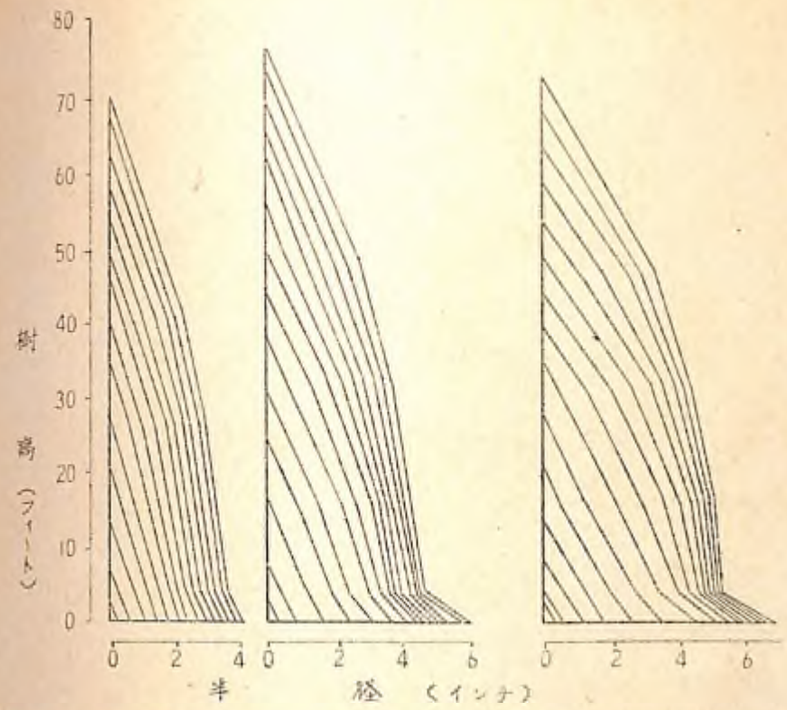


Fig. 2　4.1×4.6フィート、6.6×6.6フィート、および11.5×11.5フィート植えの成長（Braathe 1952）

P.45～6）から引用したものである。成育するための空間が十分にあって、隣辺の木の競合がない間は、幹の全部にわたって年輪幅がほぼ等しくなっている。それで樹幹はD/Hの関係が一定の完全な円錐形を保っている。しかし、木がもっと大きくなって枝が互いに接触しはじめると下枝が枯れ上って、幹の下部の直径成長は低下する。直径成長の低下は幹の上部にゆくにつれて少なくなり、幹の下部の細りは急速に減少する。空間が全部ふさがると、もとの間隔にかかわりなく成長量は大体等しくなる。広植えの木は年輪幅の広い期間が長いので、その直径は密な林よりも大きくなる。こ

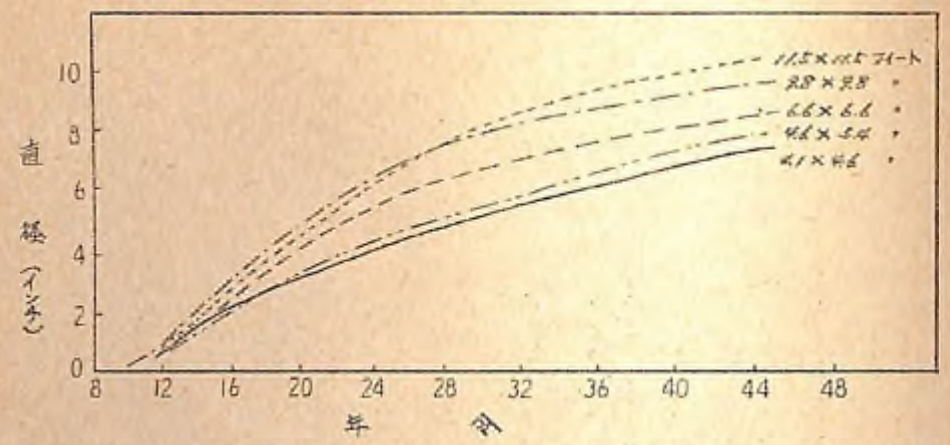


Fig. 3　種々の植栽間隔に対する胸高直径（Braathe 1952）

のことは Fig. 3 にはっきり示されている。これは色々な間隔で植えた3本の木の平均直径である（Braathe, 1952, p.448）。

樹高成長は植付け間隔が違っても同じだから、胸高から上の細り（フィート当りインチで示す）を表わす直径対樹高の関係は、間隔が密なほど小さい。

間伐試験での直径に対する効果は、植栽間隔試験の場合ほど著しくないが、一般には同じである。間伐すると成育空間が広くなり、少くとも、暫らくの間は下枝の枯上りは停止する。そのため、直径成長量の配分が変り、無間伐林に比べて胸高直径の成長量が大きくなる。間伐すると個々の木の成育条件が改善される。このため成長が促進されるのであるが、特に樹冠成長が変らないのだから、この増加分の成長量は大部分が幹の下部に生ずる。

Nyyssonen（1954, p.93, 195）は、南 Finland の pine 林を調べて、無間伐林の直径階別平均樹高は間伐林より3～6フィート高いことを示した。この効果の一部は、間伐で特に細長い木が多く伐られるので、

多分単一の直径階内においても幹型を選んで間伐されることが多いためと考えられるが、しかしこの違いは胸高における直径成長の促進効果にも原因がある。

Bornebuch（1933, p.202）は、Hastrup の試験において、それぞれ25～40本のグループ内の木の樹高の1/2のところまでの平均の細りが次のようになったといっている。

	C	D	L
樹高：50フィート	0.086	0.096	0.098
〃：62フィート	0.095	0.099	0.107

このような成長量の配分の違いは多くの試験において示されている。Hagberg（1942, p.1～46：Forestry Abstract Vol. 5 p.204 から）は中部および北部 Sweden の pine と spruce を483本樹幹解析し、形状商（form quotient）（すなわち胸高以上の1/2の位置の直径と、胸高直径との比）は、密な林では若いうちから急速に増加し、さら後も長期にわたって殆んど一定のままであるといっている。強度間伐のあとでは、形状商が低下する傾向がある。

Petrini（1937, p.566～7）は、spruce 林の blendersaumschlag の外側の領域からとった10本の樹幹解析木の結果を発表した。

1914年に樹冠をほとんど開放するように伐採してから、3年ごとに伐採を繰返したところ、胸高直径の成長は急激に増加したが、一方、胸高から上の1/2の高さのところの直径は僅かしか影響されず、胸高以上の75%のところの直径成長は全然変らなかった。これは6本からなる第1グループの平均で、平均直径は6.5インチであった。これを Fig. 4 の上半分に示してある。4本からなる第2グループ — 平均直径8.6インチ —

では，胸高の成長は3倍以上にもなって，この反応は一層はっきり現れている。樹高の50％と75％の位置での反応は，Fig. 4 の下の図に示したように僅少である。

Zimmerle（1938. p.346）は，24本の spruce の樹幹解析から全く同じ傾向を見出したが，彼の場合は外部領域の12本の木の樹高成長が若干低かったから，このことは一層顕著であったといえる。Fig. 4 から強度の間伐をしたあとの最初の期間では，成長量が減少する傾向のあることがわかる。これは他の研究でも認められている。すなわち，Johansson（1941. p.229–30. Forestry Abstracts Vol. 5 p.206 より）は，成長錐調査の結果から伐採に対する木の反応が根の部分から始まることを示した。一般に胸高における年輪幅は数年間は増加せず，伐採の直後では狭くなることも稀でない。

広葉樹では Norway spruce よりは，間伐に伴なう直径対樹高の関係の変化が当然大きいと思われる。それは樹高成長が衰える傾向があるうと，間伐による成長促進効果が少なくとも樹高については考えられないからである。直接の比較はできないが，Badoux（1939. p.141）は，与えら

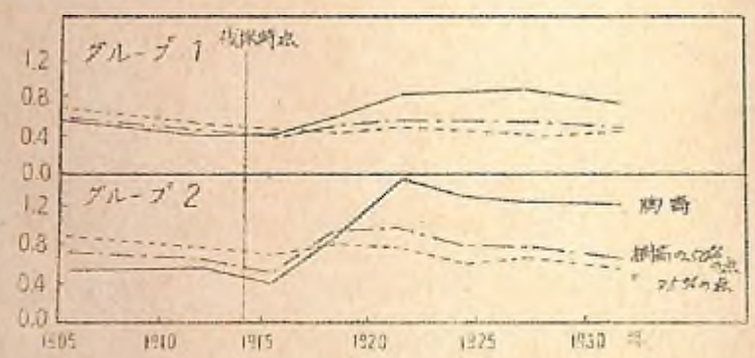


Fig. 4　自由間伐をしたあとの，色々な高さのところの年輪幅（Petrini 1937）

れた直径階の直径対樹高の比は間伐度に比例して変化することを示した。

これらの試験はすべて針葉樹，広葉樹とも成長の途中における密度に非常に敏感なことを示している。特にそれは林分が若く，樹冠の活動している部分の基部が急速に上方に移りつつあるような場合に著しい。したがって，胸高での成長が極端に低下することになる。林分が疎開していると，それほど顕著でないまでも，樹冠の基部は下に向って伸びることがないから，逆の反応を示すことも明らかである。

樹高曲線

樹高曲線についてはこれまで極めて多くの混乱があった。樹木の成長過程について知られていることから，樹高曲線は地位やある期間内の樹高成長の決定に利用できないことは明らかである。特定の樹種の樹高対直径の関係や樹高曲線は，それらの木が成育してきた周囲の密度条件によって完全に支配される。

さらに直径成長が密度によって影響されるのに対し，樹高成長は影響をうけない因子だから，直径をX軸にとり，樹高をY軸にとることは不合理である。もちろんこのような方法が採られるのは，一般に樹高の測定本数が少ないため，これらの小数の観測値を直径に対して平滑化する必要があるからである。

南 Norway でおこなわれた初期密度と成長率の関係の研究の中で，Braathe（1953 a. p.221）は，全林木の樹木を測定したデータを樹高級にまとめ，各級に対する平均直径を計算した。Fig. 5. 6. 7 は stocked quadrat パーセントが，それぞれ32.1，54.1 および82.0 であった天然更新による林令約65年の林の樹高曲線である。図には収穫表から求めた正常な樹高曲線も示してある。これから最初の stocking の小さかった林では，各樹高級の直径成長が促進されることがよくわかる。

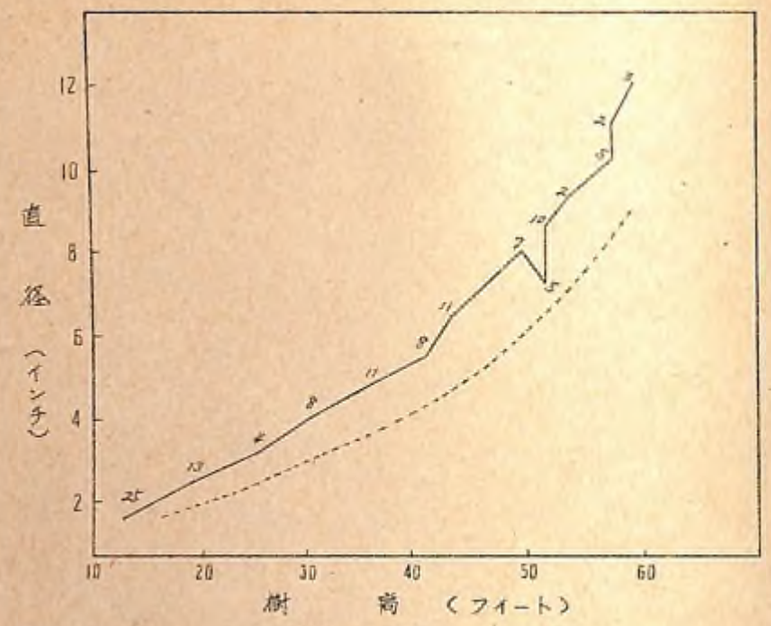


Fig. 5

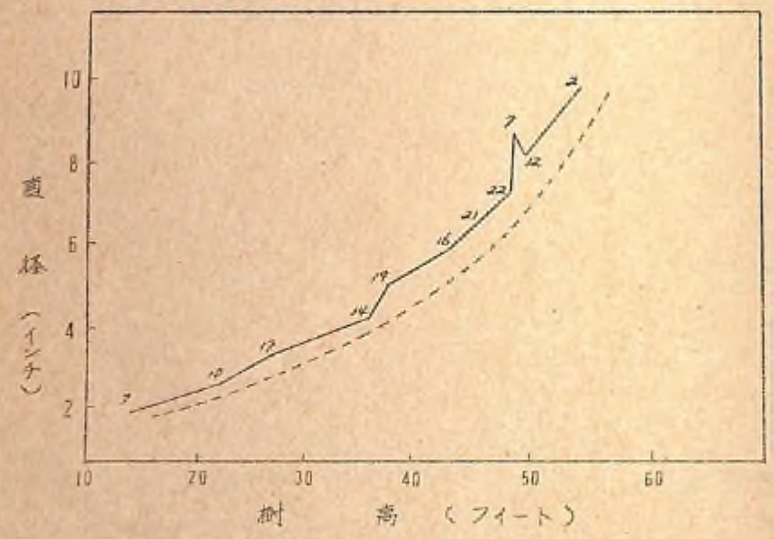


Fig. 6

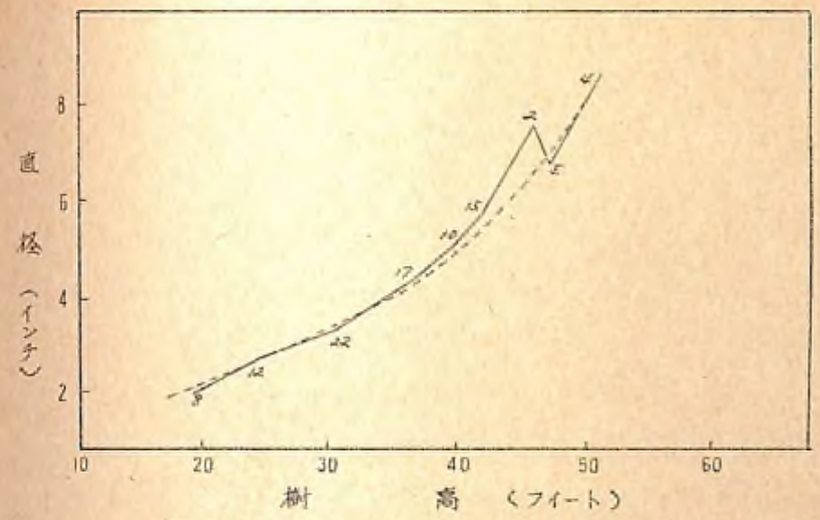


Fig. 7

もちろん，多くの場合このような曲線は求められない。それで樹高曲線を取扱うときは，直径が本当の従属変数であることを常に忘れてはならない。

収穫表

直径成長量は林分の材積生産の重要な成分である。したがって直径の増加は収穫表の重要な部分である。大部分の収穫表においては，直径または直径成長量を図上で平滑化している。もし表のもとになるデータが，地位が区々で，違った強さの間伐がおこなわれており，また年令も異なった多数のプロットから求められたものであれば，図上の平滑化はかなり面倒な仕事である。多数の測定値を取扱い，データを完全に利用するためには統計的分析を利用する必要がある。

直径成長量の平滑化や予測に，回帰分析をはじめて利用したのは Petterson（1937）である。彼は Sweden の pine の標準地に対し相

関分析を利用した例を与え、1937年に Sweden でおこなわれた北欧林業会議でその結果を提出した。しかしそのときは収穫表は作らなかった。

主として Petterson の示した原則にしたがって Eide と Langsaeter (1941, p.361) は回帰分析による最初の収穫表を調製した。この表は79個所の Norway spruce の固定試験地資料をもとにしているが、その中の若干は1920年以来測定が続けられている。208個の測定期間(通例3年から6年の期間)の成長量がこの方程式の基礎となっている。Eide と Langsaeter の方程式は直径成長量そのものに対するものでなく、断面積成長率の推定式である。彼等は幾つかの式を試みた結果、最終的に表の作成に使用した次式が最もよいことを認めた。

$$P_g = -3.518 + \underset{\pm 8.41\%}{\frac{3845.4}{(年令)^2}} + \underset{\pm 10.65\%}{\frac{14.5343}{\sqrt{G}}} + \underset{\pm 22.59\%}{0.07517\,H_{50}} + \underset{\pm 31.52\%}{\frac{14.5759}{D}}$$

$$+ \underset{\pm 18.01\%}{0.13731\sqrt{\frac{100(g'/2 + g + g''/2)}{G}}}$$

記号は、

P_g : 断面積成長率

年令 : 林分の平均年令

G : 間伐後のヘクタール当り断面積

g : 今回の間伐で伐採されたヘクタール当り断面積

g' : 前回 〃 〃

g'' : 前々回 〃 〃

H : 50年での平均樹高(地位係数)

D : 間伐後の平均直径(センチ)

各係数の標準誤差は、係数の%で示してある。推定値の標準誤差は P_g

の平均値の17.40%で、重相関係数は0.9564である。

この式から求められる P_g、h/H(間伐木樹高の残存木樹高に対する比)の方程式、d/D と樹高成長量の図上平均法によって、Eide と Langsaeter は3つの間伐種に対する収穫表を調製した。このような方程式を用いて、検討に使ったプロットで代表されるような任意の間伐後に対して予想される林の成長傾向を計算できる。

収穫表の調製方法について論ずることは、この報告の範囲外である。しかし断面積または直径成長方程式の検討と解釈は、それらが導びかれた間伐プロットでの経験の記録であって、間伐の効果を明らかにする上で極めて有用である。

Norway の成長方程式の検討

Eide と Langsaeter の公式の第1の因子は年令である。断面積成長率は平均直径との関係における林分の平均年輪幅から導びかれるから、年令(1/(年令)、または 1/(年令)^2)は重要な因子である。というのは、直径は年輪と非常に密接に関係しているからである。もし特定の期間における直径成長量が既往の平均値に等しければ、1/年令 の因子だけでその期間の断面積成長率を表現できるであろう。すなわち、

$$P_g = \frac{\Delta G \times 100}{G} = \frac{\frac{\Delta D}{2} \times D \times \pi \times n}{\frac{D^2}{4} \times \pi \times n} = \frac{2 \times \Delta D}{D} \qquad (1)$$

しかるに、

$$D = 年令 \times \Delta D \text{ の平均値} \qquad (2)$$

だから、

$$P_g = \frac{2 \times \Delta D}{年令_{(胸高)} \times \Delta D} = \frac{2}{年令_{(胸高)}} \qquad (3)$$

公式(2)で、胸高の年令の代りに林令を代入すると、その成長量は算術

平均値として求めた平均直径の、林分における成長量の計算値とほぼ等しくなると考えてよい。

上に述べた補正によって因子 $1/\text{年令}$、$1/(\text{年令})^2$（これはあまり違わない）は、各林分の主要な因子、すなわち指標であって、残りの因子はこの平均からのフレを表現する役割を果している。$1/\sqrt{G}$ の因子は直径成長に対する密度の影響をある程度表現するものである。H_{50} は地位の影響を示す。理論的にいうと、各林分には固有の指標（年令(胸高)×△D）があるから、この因子は公式の中できいてこない筈である。それにもかかわらずこの因子の標準誤差は 22.59% で有意である。この理由は多分、年令と地位が内部的に相関をもっているからであろう。高令のプロットはほとんどみな地位下で、地位の良い林は高令林分の中に含まれていない。

$1/D$ の因子も標準誤差が 31.52 で有意である。上の公式（1）と（2）によれば、これは $1/(\text{年令})$ と同等でなければならない。ここで有意な結果がでたのは、主度数が $1/(\text{年令})^2$ で、おそらくいくつかのプロットでは間伐が非常に遅れ、直径が年令にくらべて細すぎるためと考えられる。

$\sqrt{\dfrac{100(g/2+g'+g'/2)}{G}}$ の因子は直径成長に対する間伐の影響を表わしている。前々回の間伐と前の期間の間伐が両方とも今期の成長に影響を与えるということは重要である。促進効果は間伐後数年間現れないという知見によって、期首の伐採木には $g/2$ のウエイトが与えられる。前の期間の始めの間伐（3～6年前）に対しては全量（g'）を与え、その前のものには、間伐効果がこれ位の期間（6—12年）をすぎると低下してくると考えられるので、やはり $1/2$ とする。これは計算した中で最良の式であるが、直径成長に対する間伐の強さの効果について最良の式を求めるという計算は、これ以上なされていない。間伐の強さを示す因子については、多分もう少し良い式を求められる可能性があると思う。

筆者の Eide と Langsaeter（1941, P.392～4）は、この式の解釈をごく簡単にしか述べていない。断面積成長量を示すこの式を、断面積そのものに対する式にかえ、また単一因子の幾つかをおきかえて、彼等は断面積成長率を最大とする断面積の値が存在しそうだと結論した。断面積成長量は、断面積が少なすぎても多すぎても少なくなるが、しかしこの最適値はそれほど明瞭なものでなく、ある程度の幅をもっているように思われる。

この方程式はまた、胸高位置の形成層の量が最大となる断面積のところで、断面積成長量が最大となることを示しているが、これは小径木の林では大径木の林（断面積合計が同じとき）より断面積成長量が大きくなることを意味している。このことから、小径木を伐採することによって残存木の平均直径が大きくなる下層間伐よりも、すべてのクラスから伐採木を選ぶ間伐方法の方が多少断面積成長量が多くなると思われる。この点からいうと平均直径を低下させる択伐的間伐の場合に断面積成長量が最大とならなければならない。しかしそのような林はこの研究の中に含まれていないので、このことについて明確な結論を下すわけにはゆかない。しかし材積の場合には、択伐的間伐をすると平均樹高が低くなるから、おそらく成長量はふえないと思われる。

この式から、断面積成長量はかなり密な林で間伐量の多い場合に最大となることがわかる。すなわち、初期密度が大きいときに収穫量が一番大きくなると考えられる。これらの結果の幾つかは Petterson がその方程式を研究したときに、既に予想していたことである。

Eide と Langsaeter の求めた方程式はかなり満足なものであるが、筆者はもっと適合のよい方程式を研究してみる価値があると考える（1941, P.395）。

新しい方程式

Braathe はこれと別な研究に関連して，一層解釈が容易で，しかも強力な証明力をもつ一連の事実をもとにして方程式を誘導した。この計算は *Eide* と *Langsaeter*（1941. P.398～413）がその方程式を導びくのに用い，詳細が示されている資料を利用した。もっと細かい説明がえられるようにするため，計算の大部分は断面積成長量または断面積成長率の代りに，直径成長量についておこなった。

最初の問題は，林令が実際に測定期間内の直径成長に生物学的影響を与えるかどうかということである。この年令は *Norway spruce* の場合には，大体150年までである。収穫表から調べると，これはどうも疑問のようで，（1/年令）の因子が重要なのはそれが直径の大きさと相関をもつためである。*Eide* と *Langsaeter* はこの因子を含まない方程式を計算していないし，知る限りにおいて，*Petterson* もこのような試みをおこなっていない。

新しい方程式の構成においては，年令因子を除き，地位，密度，間伐と直径成長量との関連を求めることを目的とした（*Braathe* 1953 b. P.8）。本数や直径を一緒に考えなければ，$\sqrt{G}$ は密度の良好な尺度とは考えられないから，新しい尺度である $\sqrt{N}H/100$（これは樹高に関連させた林木間の平均間隔，すなわち一寸変った形の密度指数である）を独立変数に加えた。*Braathe*（1953 b）から引用した *Table.12* はこの結果を示している。

まず計算によって，$\sqrt{G}$ は密度の良好な尺度にならないことがわかった。もう一つの密度因子 $\sqrt{N}H/100$ を一緒に入れたときのこの係数の標準誤差は150％である。$\sqrt{N}H/100$ を削除すると，$\sqrt{G}$ は標準誤差が12.5％になって有意である。しかしこの場合は，推定値の標準誤差（$\bar{S}$）はⅣ式の17.27％から，Ⅴ式の20.28％に増加した。このことは，直径成長に関し

Table 12 直径成長量の相関分析

	$X_2=\frac{12}{\sqrt{G}}$ ±6 b_2	$X_3=\frac{\sqrt{N}H}{100}$ ±6 b_3	$X_4=\frac{H_{50}}{10}$ ±6 b_4	$X_5=\frac{D\sqrt{\frac{z}{2}+y'+\frac{z'}{2}}}{G}$ ±6 b_5	$X_6=\frac{DH_{50}\sqrt{\frac{z}{2}+y'+\frac{z'}{2}}}{10G}$ ±6 b_6	$X_7=\frac{H}{10}$ ±6 b_7	$X_8=\frac{H\times H_{50}}{100}$ ±6 b_8	$\bar{S}$	R
Ⅰ	−0.089432 ±1493％	−0.474873 ±11.5％	+1.883074 ±7.3％	−0.017293 ±329.5％	+0.085844 +42.1％			17.35％	0.9180
Ⅱ	−0.085758 ±1547％	−0.472789 ±11.4％	+1.912082 ±5.2％		+0.075409 ±14.4％			17.31	
Ⅲ	−0.085999 ±1570％	−0.439455 ±11.5％	+2.136407 ±4.2％	+0.111778 ±15.5％				17.53	
Ⅳ		−0.446170 ±7.8％	+1.702894 ±5.2％		+0.077174 ±13.5％			17.27	
Ⅴ	−0.802328 ±12.5％		+1.541776 ±6.8％		+0.121340 ±9.1％			20.28	
Ⅵ		−0.369721 ±11.1％	+2.177055 ±16.6％		+0.117471 ±12.9％	+0.031739 ±1046.9％	−0.245074 ±84.5％	16.83	
Ⅶ		−0.366213 ±11.2％	+1.767410 ±16.1％		+0.115248 ±13.2％	−0.343578 ±29.1％		16.86	
Ⅷ		−0.368785 ±10.8％	+2.144405 ±5.4％		+0.117617 ±12.8％		−0.227215 ±27.3％	16.80	
Ⅸ	計算のコントロール Ⅳと比較せよ	−0.446192	+1.902925		+0.077174			17.30	

くは $\sqrt{N}H/100$ の方がずっと優れた密度の指標であることを示している。これは計算した中で最も重要な点である。次に間伐木の断面積に関する因子を、単独の場合と地位と組合わせた場合の二通りの方法で試した。ある量の断面積を除去したことに対する反応は、地位によって変る可能性があるからである。この問題は、今の計算では明確な解答がえられないが、この因子を地位と一緒にすると若干良い結果がえられそうであるからII式とIII式を比較せよう。

この表をみると、H_{50} が非常に重要な部分を占めることがわかる。したがって同じ密度、同じ間伐量では、地位とともに直径成長量が非常に大きくなる。

もし地位や間伐などの他の因子が一定なら、$\sqrt{N}H/100$ で表わされる林分密度を一定にしておくと、林の成育段階にかかわりなく、直径成長量は一定になると考えた（1953 b. p.8）。

しかし計算の結果、密度を 0.35 の一定値に保った輪伐期中の直径の発育において、直径の伸びは年令とともに低下した。このことから、結局年令が直径成長量に関係していることが示せる。これはありうることだが、もっと確からしいのは一定密度のもとにおける直径成長が一定ということが誤まりなのである。この点について理論的に考えた結果、さらに一定密度のもとでは樹高対直径の形で表わした樹型が平均的にみて一定になるという仮説を加えた（1953 b. p.11）。もしこの仮説が正しければ、$\sqrt{N}H/100$ が一定のとき、D/H が一定となるためには、樹高成長が直径成長と比例しなければならないことになる。

仮説においてこの新しい要件が充たされるためには、方程式の中に、樹高成長または樹高成長と密接な関係をもつ因子を導入しなければならない。Eide と Langsaeter（1941 p.449）は、少くとも樹高が大体 25 フ

イートに達すると、樹高成長量は年令または樹高の増加とともに、急速に減少するといっている。

Table 10 のIV～VIII式では、樹高因子Hを導入した。このほか地位と結合した樹高、すなわち $H \times H_{50}$ も試してみた。

樹高の因子は、それらの1つがどこかに入っていれば意味をもつ。地位と結合した場合の方が樹高だけのときより少しよいようである。この係数が負となっていることは、他の因子を全部一定とすると、樹高の増加とともに直径成長量が低下することを示している。推定値の標準誤差は、17.27から16.80に低下した。この分析結果は、これまでのところ H/D 一定という仮説を裏づけるものであるが、それでも完全に証明されているとはいえない。近い将来もっと多くの記録についてこの方程式を調べなおす場合が、おそらくあるものと思う。というのは、Norway 林業試験場において、現在この3倍以上の期間に対する資料が集積されているからである。同様に、他の研究所でも、長い記録が要数集収されている。

この新しい方程式から、断面積成長量も過密なときは僅かに、過疎な場合には著しく低下することが示される。

この公式から、胸高の年輪幅が一定となるような密度、間伐度を決定することができる。

Sweden の方程式

Petterson はその最近の論文（1955. p.138～9）の中で、5年期間の直径成長率の回帰分析から誘導した収穫表を発表している。1937年の彼の最初の計算では、断面積成長率を使ったが、直径成長率を使う方が便利だということがわかった。彼の方程式は対数式で、Sweden 北部の天然生マツ林に対する方程式は、

$$\log P_c = 4.218 + 0.6737 \log w - 0.5925 \log (Z+t) - 122 + \frac{1}{E+30}$$

$$\pm 8.1\% \qquad \pm 10.8\% \qquad \pm 26.5\%$$

$$+ 106.9 \frac{\log (E+30)}{E+30} - 1.791 \log (Seb + 1000)$$

$$\pm 26.3\% \qquad \pm 6.4\%$$

$$+ 12.06 \frac{1}{Meb+3}$$

$$\pm 6.7\%$$

記号は，

P_c = 5年期間の直径成長率

w = 第1回間伐の前の直径の和（%/ha；初期密度）

$Z+t$ = 林令（t = 胸高に達するまでの年数，Z = 胸高に達してからの年数）

E = 第1回間伐後の経過年数

Seb = 期間のはじめにおける間伐後の本数

Meb = 期間のはじめにおける間伐後の平均直径

この方程式は66個の固定標準地に対する271個の測定期間の資料から導びかれたものである。この式の推定値の標準誤差は，0.1012 すなわち従属変数の平均値の15.68%である。

この公式は Eile と Langsaeter の提案した公式と多くの類似点をもつが，それでも重要な相異も少なくない。ここでは，$\log (Z+t)$，すなわち林令が主要な役割を果している。

間伐前の密度が高い（w が大きい）林では，その平均直径が小さいことも原因して，P_c に正の影響を与える。そのため直径成長率は年輪幅が等しいときでも低密度の林より大きくなる。しかし初期密度の高い林は，疎開した林より生産量が大きくなることも自明のように思われる。第1回の間

伐前における高密度のこのような効果は，第1回間伐の後8年目に最大になり，その後は次第に低下する（これは $\frac{1}{E+30}$ と $\frac{\log(E+30)}{E+30}$ で表わされる，p.141）。密度の効果は，本数と平均直径を組合わせて表現される（Seb と Meb）。これは幾分断面積に似通ったところがあるが，林分密度そのものを表わす尺度は，式の中に含まれていない。それと，伐採した断面積の量を示す変量もない。

直径成長量を研究するのに回帰分析を利用すると，計算量が膨大になるが，多量のデータがあるとき，それを分析し，推定値の誤差の信頼できる値を求めるには，これしか方法がないと思われる。Norway の式（Eide と Langsaeter 1941, p.362）は，主として Doolittle の方法（Ezekiel 1947, p.464～85）で求めたもので，Braathe が使った（Table 12 のところで述べた）変量削除の方法は Fisher（1948）が解説している。

しかし，最近 Woolf（1951, p.100～119）が，必要になった変数をその都度追加して回帰式を組立てることのできる新しい重回帰の計算方法を提案した。変数の削除も同様に簡単である。それで計算がずっと容易だから，この方法によれば最も適切な方程式を見つけ出すための手数が軽減される。この新しい方法を利用し，また各研究所の測定資料が増してくるにつれて，おそらく近い将来，成長現象をかなり明確に把握でき，またそれが間伐や密度，地位などによってどのように影響されるかを知ることが可能になると思われる。そうなれば，これらの因子をもとにして，期間ごとの成長量を計算し，色々な間伐方法や間伐度を比較検討することにより，場合に応じて，設定された生産目標に対して最も妥当な取扱い方法を選ぶことができる。

ここで Miley と Lehtpere（1955, p.22）が提案し実行している，

色々な間伐をおこなったあとの直径成長量を予測する方法を注意しておく必要がある。この方法の基礎になっているのは、材積成長量が間伐度によって影響されないという仮定である。この仮定は一定範囲内の密度でしか成立しない（このことは、あとで述べる）から、計算はかならずしも正しくない。Hiley と Lehtpere が述べている corsican pine の例では、45年のときの密度指数が約 0.38 で、これは上に述べた範囲のはるかに外側にある。

直径成長に影響を与えるその他の因子

しかし一つの期間の成長量を予測するとき、これが絶対的な正しさをもつものでないことを忘れてはならない。それは、成長量に関与する多くの因子のうち、公式の中にはごく僅かしか含まれていないからである。このような因子の中で特によく現れるのは、旱魃や病害、および結実年である。

最近、胸高直径の成長量に対して結実年の影響があることが証明された。Holmsgaard（1955. p.83～84）は、Denmark の beech の良好な結実を示した年の直径成長が、正常な年の 76% に低下することを示した。Norway spruce の場合、この減少量は結実のない年に比べて 25～30% であった（p.98）。豊作年のすぐあとの年でもそれ程顕著ではないが、spruce, beech とも年輪幅の狭くなるのが認められるようである。

さらに Ehlund（1955. p.58, 63）は、Sweden の spruce と scots pine の年輪幅が結実年に狭くなることを示している。

このような偶発的現象に加えて、気象そのものの変動が直径成長に著しい変動をもたらす原因になる。気温が主要な制限因子になるようなところでは、成長量は夏季の気温とともに増加する。一方、湿度がいつも低い地域では降雨によって成長量が増す。

気候と成長とのつながりは多くの著者が取扱っているが、ここではそれにふれないことにする。この問題に関心をもつ読者、Holmsgaard と Ehlund の二人が北欧におけるこの方面の文献を示しているので参照されたい。

このような変動性は、一つの期間の成長量の予測を不確実にする原因ではあるが、しかし気象の影響は、長い間には平滑化されるという性質をもっている。これは Petterson（1937）と Eide および Langsaeter（1941, p.318 および 415）のどちらもが述べていることである。断面積成長方程式の推定値の標準誤差は、一つの期間では 17.40% であったが、4期間のときは 5.3% にまで減少する。

3 断面積成長

前章において、強度間伐をすると直径成長量が増加すると述べた。しかしそれと同時に本数も減少するから、この両方に関係する断面積の成長量は比較的小さいだろう。

断面積成長量の問題は成長方程式の検討のところでふれておいた。それによれば、過密な林においては断面積成長量が少し低くなり、過疎な林では大幅に減少することがわかった。

断面積の成長量は大抵の単一シリーズの研究で論じられているが、直径は容易に測定でき、また本数も正確に数えあげができるから、結果の信頼性は非常に高いと考えなければならない。

全部の系列について述べることは不必要と思うので、ここでは重要な幾つかの結果のみをあげておく。

Norway spruce

Wiedemann（1936－37, p.124 と 127）は、Prussia における

長期間の Norway spruce の試験結果から、断面積成長量と材積成長量とを研究している。これらの結果の幾つかは Table. 2 と Table. 6 で既に引用しておいた。中庸度間伐に対する%で表わした強度間伐ならびに Schnellwuchsbetrieb の結果を Table. 13 にあげておく。

Table. 13 断面積成長量と材積成長量

地域	地位	期間	本数	立木		年あたり成長量	
				断面積	材積	断面積	材積
中庸度間伐に対する強度間伐の%							
Westerhof 78	I	35 ~ 73	61	75	73	78	98
Suhl	II	55 ~ 89	57	80	89	108	117
Schleusingen 123~24	II - III	66 ~ 111	64	82	82	100	99
Karlsberg 148	約1.9	69 ~ 81	74	89	90	105	101
Sutersbege 20-1	約1.7	70 ~ 89	41	59	61	98	93
	平均		59	77	79	102	101
中庸度間伐に対する Schnellwuchsbetrieb の%							
Boddecken 90	I	23 ~ 28	31	78	92	110	97
Lotgen 13	約1.3	26 ~ 52	44	67	68	101	92
Dietzhausen 78~79	約2.4	21 ~ 48	45	69	84	104	110
Sutersberge 120	II - I	32 ~ 64	36	72	76	113	103
Morbach 157	約 III	32 ~ 58	48	69	76	102	100
Benneckenstein 62~65	IV	44 ~ 71	30	61	67	81	80
	平均		39	69	77	102	97

これらの長期間の断面積成長量に対する強度間伐の影響は、平均的にみ

るとごく僅かであって Wiedemann は、断面積成長量は間伐度のかなり広い範囲にわたって同じだが、強度間伐においては成長が少し促進される傾向があると結論している。

Wiedeman が作った Prussia の中庸度と強度間伐に対する収穫表では、残存木の断面積（standing basal area）が、150～195 平方フィートになっているが、Assmann（1954 a. p 260～1）によれば、南ドイツの場合この値は低すぎ、5つの試験系列の結果では、林令 50～80 年の最良の地位のところで、240～280 平方フィートが望ましいといっている。同様に Wiedemann（1950. p. 127）は南ドイツで良好な結果を示す 260 平方フィートという最適断面積は、北部ドイツでは考えられない値だろうといっている。しかし Vanselow（1943 b. p. 128）は 40 プロットからなる 14 系列の試験結果の平均として、A 度間伐の%で表わした B 度間伐の断面積成長量は 103%、C 度で 105% になったと報告しているが、しかし、この差は意味のあるものでないと強調している。

Denmark においては、Bornebuch（1933 p 190）は C 度の間伐（強度指数約 130）のプロットの断面積成長量が最大で、間伐がそれより弱くても強くても成長量が少なくなるといっている。Denmark の Henriksen（1951 P. 409）のおこなった良好な地位における（50 年で約 80 フィート）Sitka spruce の試験で 1935～51 年の期間における断面積の平均成長量は次のようであった。

Table 14

間伐度	A	B	C	D
密度指数（概数）	4.5	2.0	1.2	0.8
グループⅠ（1941年の林令40）	9.78	11.15	12.91	13.08
〃 Ⅱ（〃 42）	9.37	10.50	11.60	11.65
〃 Ⅲ（〃 47）	—	9.95	11.00	11.50
平均	9.60	10.50	11.80	12.10

ここに示されたAに対するDの断面積成長量の増加量26％は，極めて大きい値で，sitka spruce は Denmark においては異郷土樹種だから，この結果が Denmark で一般に適用するとは考えられない。

Hummel（1947, p.35）は scotland の Bowmont での試験から，AからDにいたる断面積成長量の増加が，15年期間で26％に達するという結果をえたが，これは Norway spruce について観測された最も大きい増加である。

収穫表に示された間伐の効果を比較して，Schober（1955, p.57）は断面積に関する限り英国での成長はドイツより良好だと強調している。Schober はこのことの説明として，英国の気候条件がドイツより温暖で成育期間が長く，そのため直径成長が秋遅くまで続くためでなかろうかといっている。

同じことは Norway 西海岸の Spruce の成長を東 Norway のものと比較する場合にもいえる。Brantsey（1951）は，西海岸の Norway spruce 人工林の断面積成長量が東 Norway の類似林分で期待されるものより大きいと報じている。

Carbonier（1954, p.23）は南 Sweden の間伐試験系列について

報告しているが，それによれば，自己間引きのままに放置されているプロット（A）の断面積成長量は，強度の下層間伐プロット（D）のそれの75～80％であった。この場合上層間伐プロットにおいては95％になった。

Eide と Langsaeter（1941, p.422と428）は，収穫表の数値から，良好な地位のところで輪伐期の平均をとると，間伐度Ⅱ（大体C度に対応する）の生産量はⅠ（大体B度にあたる）より2～3％少ないことを示した。

Petterson の表で98年生までの平均をとると，5年ごとに断面積の20％以内を間伐するのであれば断面積成長量は増加する。しかしもっと強度の伐採をすると若干の低下がみられる（Petterson 1955, p.355～9）。

これまでにえられた結果は非常にまちまちではあるが，しかし一般的な結論を導びくことは可能である。すなわち spruce の断面積成長量は，過密な林の場合には疎な林より多少低くなることが明らかなようである。どれ位の間伐のときに断面積成長量が増加するかは地域によって差がある。英国やまた北欧，および北部ドイツにおいては，この促進効果は少なくとも強度間伐，すなわち密度指数1～1.5のところまでは明らかである。

この結果はまた断面積成長の性質が成育期間の長さと気候条件によって異なることを意味している。

Beech

beech の試験結果も大抵は同じである。Badoux（1939, p.76～7および139）は，非常に強度の間伐を実行すると20％も減少することがあるが，それ以外では，断面積成長量について特にはっきりした規則性は認められないといっている。Lovengreen（1951, p.307～9）は

Denmark の beech の平均として、大体122平方フィートの大きさまでは、断面積の増加とともに成長量も増加することを認めている。

Henriksen（1951と1953、p.215）は、これまでに6つの間伐度を適用してきたDenmark の若い beech 林の間伐系列試験の結果を発表している。1948～52年の期間では、Dプロットの断面積成長はCプロットより明らかに低かった（6.75平方フィートに対して6.30平方フィート）。もっと強度の間伐をおこなうとこれは急激に低下するが、しかしこの場合の残存木の断面積は非常に低かった（C度で76平方フィート、D度で60平方フィート、Fでは32.5平方フィートにすぎない）。

Mitscherlich（1954、p.125）は beech の固定試験地について、それまでにドイツ北西部で発表されていた論文の結果をまとめている。彼は若い林の場合、断面積成長量が最大になる最適断面積は大体87平方フィートだろうといっている。林令が高くなれば110～122平方フィートが最も適当のように思われる。地位はこの最適断面積の大きさと無関係のように思われた。

これらの一般的な結果は、spruce のときと同じような傾向で、あるところまでは間伐によって断面積成長が促進されるが、この最適断面積の大きさは、beech については多少強度の間伐のところにあるように思われる。87～110平方フィートというのは、大抵C度よりD度の間伐に近いが、spruce の場合はこれが大体最適のようである。beech の最適値が低いのは多分広葉樹の環境に対する適応力が大きいためと思われるが、これらは間伐によって樹高成長が低下する傾向にある。さらに beech やそのほかの広葉樹は不定芽を出す性質があり、実際それらの樹冠は多少低い。これによって樹冠下部の成長の度合が大きくなる。不定芽は南から北に行くにしたがって出やすくなり、Scandinavia 半島で特に著しい。

4 材積生産量

断面積との関係

前章で述べた断面積成長は林業の最終目標でなく、ただ計算のための因子にすぎない。必要とする生産物はむろん材積である。しかし断面積は非常に重要な因子であり、また測定も容易だから、過去半世紀にわたってそれが間伐試験において重要な役割を果してきたのである。この世紀のはじめ、beech 林分では強度間伐のあとでも弱度のときと殆んど同じくらいの速さで樹冠が閉鎖することが認められ、したがって強度間伐によって材積成長量が増加すると信ぜられた。断面積成長量の増加はこの考え方を裏づけている。

1911年に Schwappach は30年まで観察が続けられてきた40ケ所の beech の試験地の結果を公表した（Moller、1954、p.6）。Schwappach は、強度間伐によって成材々積（末口径7cmまでの材）を地位上で16%、地位下で7%増加させられると結論した。

これらの結果は実際には Denmark の Moldenhower が、また試験的にはスイスの Dengler が確かめている。

"Schnellwuchs" とよばれる動きが、特にドイツで盛になってきて、1930年に Gerhardt が最も強度の間伐のときに成長量が最大となるような収穫表を公表した。この表は短期間に集められた測定値から導いたもので、そのほかは断面積成長量に重きをおいた理論計算をもとにしている。

樹高成長量が同じで、強度間伐によって断面積成長量が増すとすると、材積生産量も同時に増加すると考えられる。これは Wiedeman（1932、p.150）が56個所の beech 林の結果を検討し、残存木断面積にして87～174平方フィートの範囲内の間伐度の違いでは、強度間伐のときの

断面積成長が弱度の場合より大きかったにもかかわらず成材々積の成長量にはっきりした差がなかった。と発表するまで大きい混乱をひきおこす原因になった。Wiedemannは、はじめてこの矛盾を解決し（p.177～9）たがその説明は次のようである。

林分の材積は断面積と平均樹高，および平均形数の積として与えられる。すなわち，

$$V = BA \times H \times F$$

材積成長量は樹高と形数を1つのファクターと考えると次のようにして求められる。

$$V'_{BA} = HF \times \Delta BA$$

$$V'_{HF} = BA \times \Delta HF$$

$$V'_{BA \times HF} = \Delta V \quad HF \times \Delta BA + BA \times \Delta HF$$

この公式から，材積成長量（ΔV）は2つの成分，すなわち形状高（HF）×断面積成長量と，断面積×形状高の成長量（ΔHF）からなることがわかる。この後者の成分をみると，樹高（および形数）の成長によって生ずる材積の大きさは，この成長量にかけ合わせる断面積の大きさに比例しているから，断面積そのものも材積成長のファクターになっている。

これは樹高と断面積の成長量が等しい林があれば，断面積の大きいほうが材積成長量が大きくなるということである。これに対して2つの林分の樹高成長が同じで，断面積の大きさが違っているときは，疎な林の断面積成長量が大きくなるはずだから，材積生産量は等しくなるだろう。

断面積成長量と材積成長量の間に直接の比例関係がないというWiedemannの説明は，このことをかなりの程度まで明らかにしている。この説明はAssmann（1950，p.269），Henriksen（1953，p.213）

およびCarbonnier（1954，p.27）が引用し論じているが，いまだに材積成長量が断面積成長量に比例するという混乱した結論が時々見受けられる。

形・数

ほとんどすべての間伐試験はその最終結果として材積生産量を論じている。この材積は末口径7cmまでの総材積として，あるいは北欧諸国でのように，梢端までの総材積として与えられる。

しかし材積の計算は断面積と樹高測定値だけでなく，形数のさめ方にも関係する。この決定はかならずしも正確におこなわれるとは限らず，またその方法も国によって区々である。したがって，材積や材積生産量を直接比較すると誤りを招くおそれがある。しかし同じ試験の色々な間伐度についてえた結果は大体正しく比較できると思われる。それは形数の不正確さは色々な間伐度で同じ傾向の偏りを生ずると思われるからである。

Norway spruce

材積生産量に対するWiedemannの結果の幾つかは，さきにTable. 13で示したが，それによれば，強度に間伐したときの成長量は中庸度間伐と同じ（101%）であった。若い林を極めて強度に間伐（Schnellwuchsbetrieb）すると，生産量は中庸度間伐の97%になる。Wiedemannはその著書（1950，p.84）の中で次のTable. 15に示すような結果をあげている。

Table 15　中庸度間伐プロットに対するパーセントで表わした平均連年材積成長量

樹種	伐期（rotation）と地位											
	40		60		80		100		120		140	
	I	III	I	III	I	III	I	III	I	III	I	III
Norway spruce												
強度間伐	108	113	105	105	102	103	99	99	97	96		
Scots pine												
強度間伐	106	100	103	100	101	100	100	100	99	98	99	98
Schnellwuchs	106	100	100	98	98	93	95	93	93	91	93	91
Beech												
強度間伐	103	100	100	103	99	102	100	104	98	106	96	105
Schnellwuchs							96		93		92	

これによれば伐期が短かいとき，若い林では中庸度間伐より強度間伐の方が材積生産量が大きくなる傾向がみられる。しかしこの数値は成材々積だから，ここで生産量が多いということが，かならずしも材積生産量の大きいことを意味していないことに注意すべきである。Wiedemann（1950, p.127）が指摘したように，このくい違いは強度間伐の林の場合には林木が急速に測定限界に達するためである。しかしその機弱度および中庸度間伐プロットにおける小径木が測定限界に達し，上部直径の限界に達しない木は小数の小径木だけになる。伐期が80年以上なら検討した樹種については，強度間伐プロットの方が生産量が若干少なくなる。

このような間伐方法の影響は間伐の結果を解釈するときに忘れてはならないことである。非常に若い林では，材積生産量を問題にすると面倒になる場合がある。というのは，そのように小さい木については，成材々積と

いうものが実際的な意味をもたないからである。林が成熟するまでの間は，進界成長量を考えると結果が全く変ってしまうこともある。

Moller（1954, p.28）の引用したDadoux（1936）の結果では，44年から79年までの間伐度B，C，Dに対する成材々積生産量は平均するとそれぞれエーカー当り276，264，250平方フィートで，DはBの9%減であった。

これもMoller（1954, p.30）が引用しているが，スイスのBurgerの報告した他の試験系列では，BとDの材積の間に何ら差がなかった。

Vanselow（1943 b, p.128）は，A度と比較したときの成材々積生産量が，Bで102%，Cで103%であったと述べている。この増加は有意でないが，Vanselowは，成材々積で計算した場合でも，材積生産量は間伐によってほんの少し増加すると強調している。

Assmann（1954, p.261）は，南ドイツの5つのプロットの間伐系列試験から，B度に近い（断面積240～280平方フィート）間伐のとき収穫が最大になると報告している。Bornebusch（1933, p.189～90）の報告したDenmarkのHastrup試験地はさきに述べたとおりであるが，それによれば最も収穫量の大きくなったのはC度であった。Mollerは強度間伐のプロットほど僅かに成長量が低くなる傾向がみられたけれども，プロット間におそらく地位の差があったと思われるから，信頼できる結論

をひき出すことは困難だと指摘している（Moller, 1954, p.11）。

Moller と Holmsgaard（1947, p.407）は15年間にわたって下層間伐，上層間伐および択伐的間伐を実行してきた試験地の結果を報告している。それによれば，この期間中，伐り方の相違によって特別の差はみられなかったが，択伐的間伐は長期にわたっては実行できないので，下層間伐に切かえる必要のあることがわかった（p.422）。

ささに，密なプロットで樹高成長が低下すると述べた Denmark の phalsgaard におけるとース地帯の試験では，断面積が130～65平方フィート（B～D度）の範囲では，これまでほとんど材積成長量に差がなかったが，極めて強い伐採をおこなったプロットとA度の間伐プロットでは，成長量が減少した（Moller, 1954 a, p.13）。

Ravnholt における Denmark の4番目の系列試験では，B度および大体CとD度の26～41年期間の材積成長量は，それぞれ446, 434, 422立方フィートで，D度はBに比べて5%減であった（Moller, 1954 a, p.14）。

強度間伐の場合断面積成長が非常に大きくなることを引用した Sitka spruce の試験も，同じ期間でほとんど同じような著しい材積成長量の低下を示している。Henriksen の与えた（1951, p.409）数値を Table 16 にあげておく（Table 13 と比較せよ）。

Table 16　sitka spruce のエーカー当り連年材積成長量立方フィート（1935～1951）

間伐度	A	B	C	D
密度指数（概数）	45	2.0	1.2	0.8
グループⅠ　1940年の林令40	585	532	546	520
〃　Ⅱ　〃　42	578	550	498	467
〃　Ⅲ　〃　47	—	508	455	477
平均	582	530	500	

Table 16 に示された材積成長量の著しい低下は，Moller（1954, a, p.47）が論じているが，この場合には使用した形数が正しかったかどうか一寸疑問がある。別の形数を使えばおそらく材積成長量間の差をこの半分にまで縮められると思うが，それでも強度間伐によって成長量の減少することが明らかに認められる。

南 Sweden の Norway spruce の長期間にわたる間伐系列試験において，Carbonier（1954, p.25）は，強度間伐プロット（下層間伐）の断面積成長量が無間伐プロットのものより，20%多かったにもかかわらず，材積成長量の方は差がないことを認めた。強度の上層間伐の場合，生産量は5%低くなった。さらに彼は上層間伐の効果は，ある期間の後では下層間伐のものに近くなってくることを指摘している（p.44）。Hummel（1947, p.34 および 1956, p.5）によれば，Bowmont では間伐の結果として，これまでに報告された中で最大の材積成長量の増加がみられたが，しかし彼の調べたのは成材々積（timber volume），すなわち末口径3インチまでの材積である。25年間にわたって間伐されてきた各プロットの，林令45年のときの成材々積総生産量は Table 17 の通りである。

B度に比べるとC度の生産量は8%，D度では13%多くなっている。強度の上層間伐の増加はこれらの中間で9%になっている。

Table. 17　林令45年（1955）までの成材々積総生産量（Bowmont）

間伐度	間伐後の密度指数		過去10年間の成長量	エーカー当り成材材積（立方フィート）	Bを基準とした材積生産量（%）
	1930	1955			
B	1.62	2.95	2204	6063	100
C	1.27	1.65	2665	6538	108
D	1.07	0.53	2474	6848	113
LC			2473	6612	109

このような増加は，確かに測定限界への急速な到達ということからも説明できるが，しかし，それだけでこのように大きい違いが生じたとは考えられない。したがってこの試験は強度間伐で材積生産量が実際に増加したことを示していると思われる。過去10年間の成長量では，C度の間伐の場合が最大であった。

Hummel（1950 p.87）のおこなった scots pine と Corsican pine の若い林の間伐の研究では，Bowmont の spruce におけるような強度間伐での生産量の増加は認められなかった。AからDまでの間伐度は，材積成長量に対してあまり影響しないように思われたが，D度より強い間伐の場合には，成長量は明らかに減少した。

色々な間伐度に対する材積総生産量が示されている Norway spruce の2つの収穫表では，両方とも強度間伐の収穫が減少するようになっている。Eide と Langsaeter（1941, p.389）は間伐の都度断面積にして10%余分に伐採すると，生産量は3～4%減少することを認めた。この間伐度は，近似的にBとCに対応して使える。

同じように Petterson（1955, p.198）も，最も軽度の間伐のときく

5年ごとに断面積の6%を取除く）生産量が最大になるといっている。彼の結論は scots pine についてのものであるが，Norway spruce の幾つかの試験でも，やはり強度間伐で生産量が少なくなることが示されている（p.378）。これと同時に彼の表では伐採木の断面積が同じだとすると，下層間伐の場合の生産量は"全層間伐"のときより少し多くなることが示されている。Table. 11 の林で，5年間隔で断面積の6，12，18 および20%を伐採したところ，林令98年までの平均連年成長量は，それぞれ58.7，51.5，40.0 および25.7 立方フィートとなった。Table. 11 に関連して述べた通り，Petterson の18%とか25%という伐採は，特に伐期の近くでは極めて強度だから，おそらく実際に使うのは難しいと思われる。

Moller（1954 a. p.25～6）が指摘したように，一定期間ごとに断面積の一定パーセントを伐採するという間伐方式は実際にはむしろ異例のことであろう。若い林の場合，断面積の10%までなら5年ごとに伐採を繰返しても，それは非常に弱度の間伐だといえる。しかし伐期の近くでは正常な間伐に近くなる。これより強い10%以上の間伐は若い林では正常でも，老令林では極めて強度なものになる。

Petterson（p.178）は，収穫表調製に彼の公式を実際に使ってみた経験から幾つかの修正を加えているが，これらの修正は"全層間伐"よりも下層間伐の成長をよくする方向のものである。これらの理由だけで Petterson の収穫表からあまりはっきりした結論を出すのは危険であるが，それでも不確実ながら，最も密な林で収穫が最大になるという傾向がはっきりしていると思われる。しかし，最も密度の高いプロットの場合収穫表は収穫量を過大推定する傾向があることに注意しなければならない。密度の高い林では雪害や病害などの危険が常に存在するけれども，このような偶

然現象は、これまでどんな公式にも完全に盛り込めるまでにいたっていない（Langsaeter 1941 p.182）。

Beech

Wiedemann（1932 p.166～7）はドイツの56個所のプロットの結果から、断面積において87～174平方フィートの範囲にある下層間伐林分の成材々積生産量の間には、目立った差はなかったといっている。択伐的間伐をおこなったプロットの生産量は下層間伐プロットの9%減になった。

Wiedemann（1934b）によれば、材積の2/3を除去した強度間伐プロットでは材積の連年成長量は10～20%低下した。林分を突然疎開させると樹高成長が大きく低下するために、同じ強さ（intensity）の間伐を徐々におこなう場合よりも成長量が落ちる傾向がある。

Wiedemannがbeech林について1950年にまとめた結果は前にTable 13で引用しておいた。それによれば、地位中の場合、強度間伐での材積生産量は中庸度間伐に比べて6%まで多くなる。地位特上の場合この効果は僅かで、輪伐期の後半ではかえって少し減少する。Schnellwechsbetriebでは、地位上のとき、生産量が4～8%程度少なくなる。Wiedemann（1950 p.106）は、上層間伐の場合Norway spruceでははっきりした影響を認めることができないが、scots pineでは中庸度間伐に比べて成長量が10%程度減少し、またbeechとOakでは15%くらい低下すると結論している。

Badoux（1939 p.16～17および139）は、スイスの試験地の結果から、D度間伐および上層間伐の成材々積生産量は、B度間伐に比べて16～20%少なかったといっている。彼は（1951 p.1～15）Black Forestにある高海抜の2つのbeech間伐試験地の結果を報告している。

それによれば総収穫量および取引可能生産量のいずれかについても、無間伐林の方が多かった。しかしこの標高のところは、beechの適地とはいえない。Moller（1954a. p.26～7）はこの試験を論じ、地位に少し差があるのと、2つの試験地にspruceとfirがいくらか混交しているため、無間伐と極めて強度の下層間伐の比較をこの結果から判断することはできないといっている。しかし林令140年（1940）のときの断面積が、僅か87平方フィートしかない強度間伐のプロットについては、成長量が明らかに減少し、その大きさは多分10%に達する。

Mitscherlich（1954 p.203）は、ドイツ北西部のbeechについて発表された論文を要約し考察を加えている。彼は材積生産のための最適断面積は、若い林で120～130平方フィート、その後は130～150平方フィートあたりだと結論した。前に注意したように、彼は断面積成長量の点からみた最適断面積が87～122平方フィートであることを認めている。彼は材積生産量の場合、この最適値は地位の悪いほど低くなる傾向があるといっている。

Denmarkでは、これまでbeechに関する間伐系列試験の結果が発表されている。しかしこれらは直径2インチ以下の木を除いた総材積についてのものである。非常に若い林でない限り、このような小径木を除外してもそう大きい差は生じないだろう。若いbeechのプロットで、Henriksen（1951 p.400）は、B、CおよびD度間伐（最終間伐後の断面積はそれぞれ102、96および94平方フィートであった）間に差のないことを見出した。そうして断面積129平方フィートのA度プロットの生産量は5%多く、断面積36および29平方フィートのEおよびF度の生産量は5～15%低かった。

Lovengreen（1951 p.307～9および319）は、デンマーク林業

試験場の beech 標準地資料の統計処理から，少なくとも断面積が 150 平方フィートに達するまでは，材積成長量（直径2インチ以下を除く）が増加することを見出した。

Moller と Nielsen（1951，p.175）は Moller の収穫表に対するパーセントで表わした材積生産量と，同じ表のパーセントで示した断面積とを比較している。Norway spruce と同じく，beech についても収穫表数値の 75～150％の範囲内の断面積では，材積成長量に影響がなかった。しかし Oak の場合は，Moller および Nielsen によれば，強度間伐で材積生産量が明らかに低下することが認められた。普通に使われる間伐度，たとえば収穫表に示された断面積の 130～80％の範囲内では，この減少量は大体 10％であった。

Moller（1954 a，p.14～5）は 40 年以上にわたって測定されてきた 100 年生の2つのプロットについて報告している。この期間内の間伐プロットの成長量は 712 立方フィート，また無間伐プロットのそれは 720 立方フィートであった。

結　論

これまで論じてきたことから，間伐試験の効果はかならずしもすべて同じ傾向を示していないことがわかる。多くは広い範囲の間伐において影響がないことを示しているが，しかし幾つかの試験では，材積生産量が少なくとも D 度およびそれ以上の強さの間伐で低下しており，また2つの試験結果では間伐によって材積生産量が増加することが示されている。この最後のものの1つは地位の悪いヒース土壌におけるものである。

何人かの著者は，中庸度の伐採のときに最大値が与えられたと考えている（Bornebusch，Wiedemann，Moller，Carbonier，Hummel）が，その一方では弱度の伐採あるいは無間伐のとき最大値が与えられたと考えている（Badoux，Lovengreen，Eide and Langsaeter，Petterson）人々もいる。しかし Bowmont のプロットを除く大部分の試験では，D 度およびそれ以上の強さの間伐で成長量が低下することを示している。

Langsaeter（1941，p.173）は，彼の考えを Fig. 8 のように表わした。

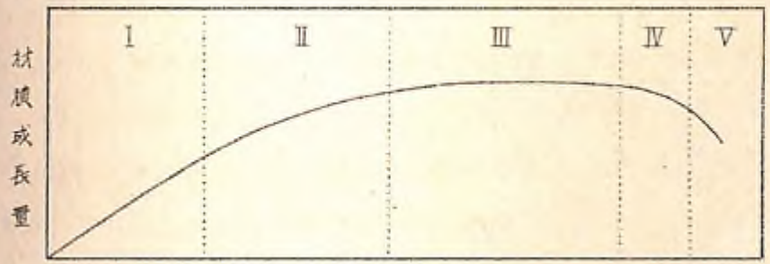


Fig. 8　立木材積と材積成長量との関係
（Langsaeter 1941）

Fig. 8 でローマ数字は Langsaeter が"密度タイプ"とよんでいるところのものを表わしている。密度タイプ I では林分は極めて解放的で，単木はその隣接木に対して影響を与えていない。したがって年収量（annual yields）は林分の成立本数または材積に比例する。密度タイプ II では，年収量が次第に水平に近づく曲線を示す。すなわち林木相互の間に次第に競争が始まってくる。

タイプ III の広い範囲では，収量曲線が殆んど水平になるが，これは収量が林分密度と無関係となるかなり広い範囲を示している。

過度の競争が始まる密度タイプ IV においては，密度の増加とともに収量の低下が生ずる。このような収量の低下はタイプ V，すなわち林木間に激しい競争が起って病害や傷害に対する抵抗が弱まり，著しい停滞が現れる

ような密度条件にいたってさらに大きくなる。

Langsaeter がこれを使ったときには、十分な資料がえられなかったので、各密度タイプにあてはまる尺度を与えることができなかった。

Langsaeter が述べた密度タイプ IV の収量の低下は、おそらく地位の悪いところとかフムスの分解の遅い寒冷地で間伐が遅れた場合に限られるであろう。このような場合についてはまたあとで取りあげることにする。過密な林で生ずる病害や傷害による成長量減少の危険についてもあとで述べる。

D度の間伐が密度タイプ II と III の境界付近にあると仮定すれば、Langsaeter の出発は上記の制限つきで樹理の如何によらず、大多数の研究者がえた結果と一致するように思われる。

Moller (1954 a. p.31〜2) はその研究の中で、主として単一の試験だけをもとにして結論を下し、相関からえた結果は二次的にしか考えていない。

彼の意見では、後者の方法は、同じ長さの期間について観察した結果によるものでなく、大量でしかも複雑な計算組織を要するものであって、多数の要因をすべてコントロールすることは困難である。

直接的な試験だけにもとづいて、Moller は beech の総材積生産量が断面積の値がその年令で可能な最大量の 50 %、あるいはそれ以上である限り変らないと結論している。彼は Norway spruce の場合も同じ結果になるはずだと考えたが、しかしこの樹理は、特に老令の場合、間伐後のうっ閉能力に差があることを注意している。

これらの主要な結果を Moller (1954 a. p.31) から再録して Fig 9 に示しておく。新しい論文の中で Moller (1954 b. p.353) は、地上部の総材積成長の絶対量にあてはまるようにこの考え方を拡張し、Fig

10 に再録したグラフを提案した。

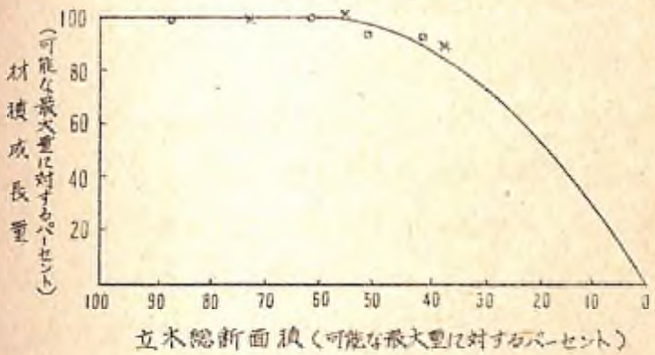


Fig. 9 断面積と材積成長量との関係

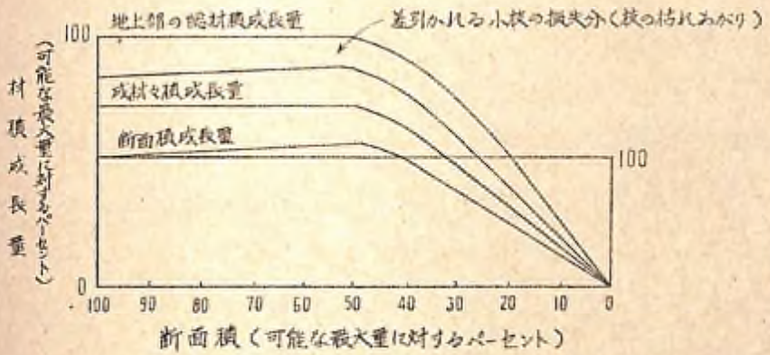


Fig. 10 材積および断面積成長量の関係（Moller 1954 b）

この図は断面積が最大値の 50 % に低下するまでは、最終の材積生産量に変化がないことを示しているが、Norway spruce の場合、何の条件もつけられていない。これらの結果は beech でも成立ちそうであるが、考慮したのが直接的な試験結果だけとしても、Norway spruce の輪伐期全体を通じてこれが成立するかどうかは疑わしい。多数のプロットの記録から作られた Norway および Sweden の収穫表は、いずれも無視で

きないが，それらの結果では間伐によって収穫量が若干低下することが示されている。密な林の場合に樹高や材積成長が停滞しがちな，地位の悪い場所では例外が認められよう。

このような欠点にもかかわらず，Mollerのグラフは大筋において Norway spruce の場合にも正しい。間伐にともなう成長量の減少は，断面積が最大値の50%に下るまでは僅かで，実際にはっきりした成長量の減少が認められるのはそれ以下になる場合だけである。

密度指数に直すと，beechの場合，おそらく1.5の密度までは収量が低下しないと思われるが，Norway spruce では密な林より少し収量がおちる（大体5%位）と予想される。密度がもっと低くなったときの減少もやはりあまり大きくなく，指数1.0のときの損失は可能な最高収量の10%以上にはならない。

欧州における経験から導いたこの一般的結論が，英国でもあてはまるかどうかは，現在のところ不明である。Bowmont の spruce試験地はまだ若すぎてはっきりした結論を出すところまでいっていないが，しかしこの場所では幾分変った成長形態の生ずる可能性が十分認められる。

実際の材積生産に対する間伐の効果がどんなであっても，林業の実際面に対して与えるこの効果の大きさは僅かで，二次的な役割をもつにすぎない。

間伐には他の面で非常にはっきりした利点があって，総材積生産量が少しくらい減少してもあまり大きな差の生ずることはない。

これまで論じてきた間伐の効果は，輪伐期の初期に開始され，比較的短いインターバルで実行されてきた試験の結果である。間伐の繰返しが非常に長い場合には，あとで説明するように，全く異なった結果がでることが多い。

植付間隔を変えた場合の収量

間伐試験の結果に関連して，造林地の植栽間隔試験の結果を簡単に注意した方がよいと思われる。

Braathe（1952，p452～3）は，さきに述べたFossumの試験結果から，材積の成長量について報告している。林令44年のとき，これはTable 18のようであった。この表によれば，11.5フィートプロットの生産量は5フィート間隔の75%である。残念なことにDプロット（10フィート）は地位上であって，他のプロットと比較できない。

Table 18

植栽間隔	林令44年のときのエーカー当り材積（ﾀﾞｰﾄﾞ）	パーセント	ウッ閉前の長い年輪幅に対する材積	林分がウッ閉する年令
A 4.1×4.6フィート	8.960	109	715	18
B 4.6×5.4 〃	8.220	100	860	20
C_I 6.6×6.6 〃	7.500	91	1.430	24
C_{II} 6.6×6.6 〃	7.100	86	1.430	24
D 9.8×9.8 〃	(8.000)	(97)	2.570	28
E 11.5×11.5 〃	6.200	75	3.140	33

一番密な林も僅かに地位の良いところにある。どのプロットについても，必要な場合には間伐をおこなったが，密度の一番高いプロットでは，これは27～28年ではじめた。C_{II}のプロットは他よりも強く伐採した。

密な林と疎な林の違いはウッ閉までの間，土壌および空間の利用が完全におこなわれなかったことが原因で，11.5フィート間隔の場合，ウッ閉まで33年を要している。地位の違う9.8フィート間隔を除けば，閉鎖後の材積成長はどの間隔でも同じになっている。そのため成長量の差は輪伐期を通じて同じ大きさとなる。間伐される木の大きさと残存木の平均直径は

Table 19

間隔	間伐木												残存木			
	1940			1943			1946			1949			1949			
	N	D	VoL	N	D	VoL	N	D	VoL	N	D	VoL	N	D	VoL	Age
4.1 × 4.6	1,000	3.9	1855	105	5.5	510	78	6.4	550	110	7.0	985	395	7.9	5560	44
4.6 × 5.4	660	4.5	1795	80	4.5	225	132	6.3	895	95	6.6	735	367	8.1	4560	44
6.6 × 6.6	237	6.2	1365	18	6.2	95	65	7.3	635	76	7.5	925	322	9.3	5610	48
6.6 × 6.6	293	6.6	1930	25	5.6	115	24	7.9	285	61	8.4	830	265	9.7	4980	48
9.8 × 9.8	39	8.3	415	61	8.5	515	4	4.1	6	61	10.0	1250	300	10.2	6100	45
11.5 × 11.5	15	8.0	150	39	8.8	345	3	4.7	8	12	12.2	315	269	11.1	6110	47

Table 19に示すように非常に差がある。

残念なことにTable. 19の最後に示した林令は，完全に同じではない。したがって数値を直接比較することはできないが，しかし最も密な2つのプロットの間伐木は，いつでも小さいことがよくわかる。最も高密度のプロットでは，44年までに生産された9,460立方フィートの中，3,900立方フィートが取去られたが，一方最も間隔の広いプロットでは47年生までの6,930立方フィートのうち820立方フィートが除去されたにすぎない。

どのプロットでも将来の材積成長量が同じままで，収穫表の値に近いものと仮定すると，輪伐期全体（地位上の場合65年前後である。）に対する総材積生産量が計算できる。この計算結果から4.6×4.6フィート植えと比較した各植栽間隔に対する伐期生産量は次のように予想される。

植付け間隔（フィート）	材積（%）
4.1 × 4.6	104
4.6 × 5.4	100
6.6 × 6.6	94
11.5 × 11.5	85

他の植栽間隔試験の結果もすべて同じような一般的傾向を示している。総材積生産量は密な林のときに最大で，間隔が広くなるにつれて次第に低下する。たとえばWermsdorfの試験地では，2.8×2.8プロットの62年のときの材積生産量が，5,760立方フィートであったのに対し，6.6×6.6フィートのプロットの生産量は，4,530立方フィートにすぎず，21%の低下を示している。成材々積で計算するとこの差は8%にしかならなかった（Braathe 1952 p.460～1）。

5 樹冠の活動している部分の長さと自然落枝

密な林の樹冠が疎開した林のものより短かく，細長いということは全く明らかである。Bornebusch（1933, P.78）は，生きている樹冠長を樹高と関係づけた値が，強度間伐によって増加することを示した。しかし樹高に対する比で表わした枝のついていない樹幹の長さは，樹幹距離と樹冠長のときほど高い相関を示さなかった。枯枝の基部の残り方は，間伐度よりも林木の自然的特性によるもののようである。自然の枯れ上りは，林分が遺伝的に斉一でない限り植栽間隔と主要な相関をもたない。

Wiedemann（1936～7, P.218）は若い Norway spruce の樹冠長が，樹高の40～50%で老令になると30～45%になることを示した。樹冠投影面積の差は意外に少なく，Wiedemann は中庸度間伐で70～83%，強度間伐で71～76%，Schnellwuchs で71～76%になることを認めた。このことから最も強度の間伐の場合に樹冠容積が最大になる。なぜならその場合樹冠長が最大となるからである。この数値は，密～中庸度でエーカー当り315,000～375,000立方フィート，Schnellwuchs でエーカー当り385,000立方フィートということがわかっている。樹冠容積が大きくても，材積成長量は大きくならないから，この理由は樹冠長の長い場合，日陰になる葉の割合が多くなることに求めなければならない（P.209）。

Hummel（1942, P.38 および 1956, P.3）は，Bowman のプロットの樹冠長を次のように報告している。

間伐度	1945	1955
A	樹高の 31%	樹高の 21.5%
B	33	30
C	44.5	41
LC	34.5	33.5

Wiedemann は beech の場合はギャップ（空隙）を急速に埋める能力が大きいため，樹幹投影面積に差がないといっている。同様に Badoux（1939, P.141）も強度間伐をおこなった beech 林の樹冠長が大きくなることを認めている。

Heikenheimo（1953, P.399）は pine 林分の自然落枝を論じ，通例過密な林ではこれは大きい影響をもたないと結論している。若い林を間伐するときは多くの枯枝を落すので，間伐後の条件も自然落枝のために好適になっている。枝のこみ方は，林木の特性や枝が旁よく生育する期間の長さに関係してくる。強度間伐では枝が長期間生きているので，結局枝のこみ方が大きくなり，節も大きくなる。

生きている枝の長さと自然落枝の状態は樹種や地位によって非常に変動が大きい。地位の悪いところでは樹冠が小さく，上まで枯あがった幹が屢々観察される。たとえば Scots pine では比較的疎開した林でもそのようなことがある。

6 材の密度

針葉樹の材の密度あるいは比重は年輪幅と密接に関係している。年輪幅は間伐することによって非常に増加するから，したがって密度は減少する。この減少量は樹種により，また若干は地位にも関係する。一般的な傾向を示すため，年輪幅に関係させた比重を示すグラフを Klem（1934）から引用する。Fig. 11 は Norway 東部の地位上の Norway spruce を網羅している。Table. 10 に引用した Norway の収穫表の年輪幅の数値にあてはめると，直径成長が0.94から1.14インチに21%増加すると比重は0.455から0.445に，すなわち2.8%減少することになる。この減少は密度指数を1.80から1.25に減少させたために生じたのである。

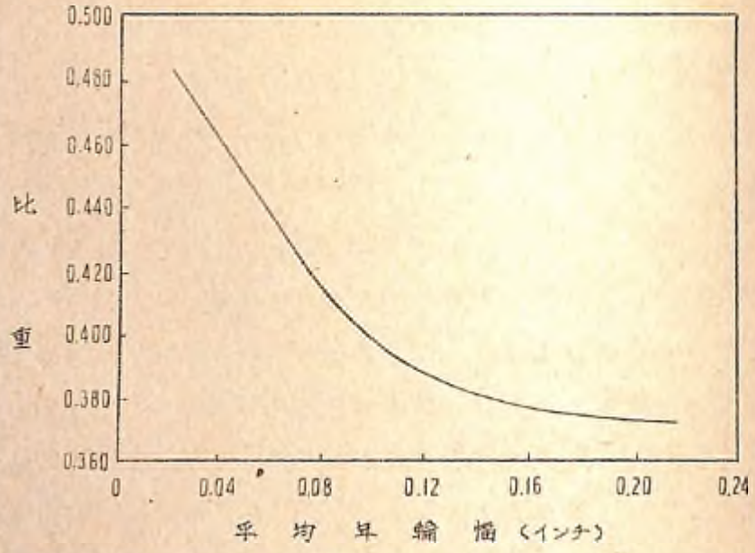


Fig. 11　年輪幅と材の比重との関係．Norway spruce
地位上．東 Norway（Klem 1934）

年輪幅が0.05から0.1インチまで100％増すことによって，比重は0.450から0.400に低下し，これは11％となる。ウッ閉前の年輪が約0.2インチであったFossumの間隔試験地で分析をおこなったところ，比重は0.351であった。ウッ閉後の年輪幅は0.1インチで，この材の比重は大体0.425になる（Klem 1953. P.488）。したがって年輪幅が0.1インチから0.2インチに増加したときの比重の減少は21％である。

III　被害に対する抵抗性と間伐との関係

1　風

間伐の結果樹冠は大きくなり，また林が疎開すると林内を吹きぬける風の強さが増す。したがって林木は強く根を張って風力に対抗しなければな

らない。間伐すると根系がある程度発達するというのは確かだが，どんな場合でも風倒を防げるほどにならない。

Wiedemann（1950. P.128）は暴風害については確実な予想ができないといっている。強度間伐の林の方が抵抗力が強いということは証明されていない。逆に多くの間伐系列試験で強度間伐プロットの被害が大きくなっている。このことは密な林の方が林木が柔軟で，ある程度林木相互間で支えあっているためと思われる。それと同時に風が弱まることも一因である。

林が風の力にどれ位耐えうるかは根の形状と深さに大いに関係する。これはまた土壌タイプと土壌の水分状態に関係している。輪伐期の終りで伐採作業をとるときには，完全に孤立させる前に強度に伐りすかし，風に対する抵抗力をつけておく必要がある。

2　雪と氷

風に対する抵抗性と逆に，雪や氷の害に対する抵抗力は間伐によって大いに増加する。Langsaeter（1941 P.170）は，北Norwayの55年生のpineの間伐系列試験の結果を報告している。1931年これらのプロットについて極めて弱度（枯死木のみ伐採），強度および極めて強度の間伐を実行した。1934～35年の冬の豪雪でTable 20に示す被害が生じた。

Table. 20　色々な強さで間伐したpineプロットの雪害

間伐	エーカー当り本数	エーカー当り材積（立方フィート）	折損木の％		
			全体	正常	異状
極めて弱度	990	2,110	53	30	61
強度	440	1,575	30	13	48
極めて強度	267	875	8	7	17

ここで異状木としてあげたのは非常に細長い木と片枝および弯曲木である。間伐したために抵抗力が非常に増加したことがわかる。

Sweden で Schotte（1922. p.496）が観察したところによると1906年以降間伐してきた55年生の pine のプロットで上と逆な結果がでている。これらのプロットは1921年の7月に間伐したが、その中の幾つかは非常に強度であった。10月におこった強い暴風雪で Table 21 のような被害が生じた。

Table 21 色々な強さの間伐をおこなった pine 林分の雪害（南 Sweden）

	1921年の間伐後のエーカー当り本数	1921年の材積の間伐率（%）	1921年10月の被害木の材積（%）
	1329	0	6.3
中庸度	421	20.9	9.4
	227	31.8	18.4
	318	33.7	27.4
	256	34.2	27.4
	220	44.5	27.6
極めて強度	186	43.9	51.8

これらの結果は、非常に強度の間伐をおこなった直後の林は弱度の林より雪に対してずっと弱いことを示している。

このことは3つの Norway spruce のプロットで確かめられている。この2つは1916年と1921年に間伐され、第3のプロットは1921年に第1回の間伐がおこなわれた。最初の2つはごく僅かの被害、すなわち材積の約5%が損傷したにすぎなかったが、第3のプロットでは17%の被害を蒙った。

したがって、密な林を強度に間伐するとその直後の雪害の危険は増すが、何年か経過すると、間伐した林の木は強靱になって、雪害に対する抵抗力が大きくなる。したがって雪害予防の最良の方法は間伐を早い時期から屢々繰返して樹冠が片枝とならないようにすることである。

Rosenfeld（1944. p.16）は東 Silesia 地方の1875年から1942年までの雪害の記録を調べて暴風雪が頻繁におこる地方では、予備として他の樹種を下層とする二段林を作る方がよいと述べている。

3 森林火災

森林火災の危険に対する間伐の影響の研究は、筆者の知る限り見当らない。しかしながら、実際のところ Scandinavia の森林火災は昔ほど広範囲でない。Petterson（1955. p.162）は、北 Sweden ではこれまで屢々森林火災が発生したが、現在ではめったにないと述べている。これは確かに人口の増加とこれらの地域における火災予防の結果であるが、またある程度は森林経営の結果でもある。多数の立枯れや倒木が出て、生の地表植生の少ない無間伐の過密な林は、森林火災の最良の温床となる可能性があり、このような林が火災になった場合の消火は容易でない。したがってよく間伐されて、枯死木や枯れかかった被圧木がなく、また少なくとも若干の地表植生のあるような林分は火災の危険が少ないと考えてよい。

Forestry Commission のパンフレット（1951. p.7）には、brashing（すなわち、頭の高さまで下枝を取去ること）は、植栽地を火災から守る上で非常に有効だと述べられている。

4 虫害

枯死木、病木、および劣勢木を伐採する間伐は、一般に有害昆虫の大量

発生の一つの予防手段になると考えられる。すなわち，正常で成長の速やかな木は昆虫の繁殖や食害に好適な条件を与えないからである。

Langsaeter（1941, p.168）は，実際の経験から，良好な取扱いをうけたNorway spruce林分は，無間伐の林よりもbark beetleの被害が著しく少なかったと述べている。

しかし数年前，さきに引用したDenmarkのsitka spruceの造林地では，Hylesinus micansの害が強度間伐プロットで最も激しかったという注目すべきニュースがもたらされた。

Gohrn, Henriksen およびBeier petersonの（1954, p.404）の与えた数値によれば，1952年の被害のパーセントは次の通りであった。

間伐度	A	B	C	D
被害率%	3	34	57	66

同一林分でも大径木に被害が集中する傾向がみられる。したがって被害率の差は，一部は強度間伐プロットで大径木が多いためとも考えられるが，同時に間伐そのものが林内気温の上昇をもたらし，そのためにこの虫の被害を誘発したということもありうる。

被害が大規模になりはじめたとき，1951年の7月11日から29日までの間，温度測定がおこなわれた。Harlow と Beier Petersen（1952, p.84）はこの観測から，散生木の樹皮温度は，A度間伐プロットの木より25%も高くなる場合がありうると述べている。

D度間伐プロットの林内気温は，A度間伐プロットより平均して約2°F高い（p.65）。

A度間伐プロットに比べると，保護樹帯（sheltered location，エーカー当り115本）の深さ40mのところでの平均地温は4.5°F高く，最高地温では8.1°F高くなっていた。

このような温度差は間伐後の被害の増加を説明する上で最も納得しうる解釈だと思われる。

5 菌　害

菌害に対して，間伐は一般に治療的な影響を与えるものと思われる。被害を拡がらせるおそれのある菌害木を取除き，抵抗力の強い良木を残すことによって，間伐は一層健全な林を作り出すものと考えられる。

しかしDenmarkの同じNystrupにあるSitka spruce造林地で，腐朽菌（Rot Fungi）について意外な結果が報ぜられている。Henriksen と Jorgensen（1953, p.226）は，間伐木でFormes annosusの被害を受けたものの本数割合を報告している。

	間伐度	A	B	C	D
腐朽菌の被害本数の%	系列 1	0	13	7	6
	〃 2	0	5	8	6
	〃 3	—	13	33	23

この3つのプロットの毎木調査から，次のようなパーセントがえられた（p.238）。

間伐度	A	B	C～D
調査本数	26	69	85
腐朽菌のついている木の%	0	6	4

若干の変動はあるにしても，強度間伐プロットで菌害が多くなる傾向がはっきり認められる。

Henriksen と Jorgensen（p.228）は，考察の中で，この造林地は昔の耕地跡に成立したもので，厚さ0.65～2.3フィートの流砂に覆われ

ていると述べている。第3系列のプロットはすべて約2.3フィートの厚い砂の層の上に成立している。第2系列でも砂層の厚い部分の被害が多くなっている。被害木と健全木の平均直径の間には差が認められなかった。

Phalsgaard のヒース地の Norway spruce 間伐試験の結果から次のような間伐木の被害率がえられている。

間伐度	A	B	B	C	D	D	D	L
腐朽菌の被害木のパーセント	6	7	15	22	30	23	28	37

4つのプロットの立木に対するパーセントは次の通りである。

間伐度	A	B	C	D
調査本数	101	100	100	85
被害のパーセント	1	10	33	25

強度間伐の場合に被害が大きくなることは疑いないれない。

Henriksen と Jorgensen (P. 226) はまた、Kohaven の Norway spruce について、次のような数値をあげている。

間伐度	B	B	D
被害木のパーセント	5	6	15

この場合地位の良いところで強度間伐をおこなうと被害が増す傾向がみられたが、あまりはっきりしたものでなく、被害率も Phalsgaard の半分以下であった。

Bornebush (1933. P 205) は、強度間伐をした結果 Fomes annosus のもっと激しい被害の起った例を示している。公表された最終間伐の結果は次のように特に明瞭な傾向を示している。

間伐度	A	B	C	D	L
1932年の間伐木中の腐朽菌による被害パーセント	18.3	18.4	18.6	26.7	31.6

Hummel (1950. P. 89) は数字はあげていないが Scots pine と

Corsican pine の Fomes annosus の被害が、強度間伐の場合に多くなる傾向があると述べている。

間伐のために腐朽菌や虫の被害が増加したというこれらの実例は、すべてその樹種の自然分布の範囲外にある造林地で生じている。造林地の幾つかはヒース地帯や流砂堆積地のように、極端な条件のところである。これまでのところ、その樹種の郷土であり、天然更新がおこなわれている地域では、上に述べたような結果は報告されていない。したがって引用した結論は一般の間伐にまで拡張して考えることはできない。現在のところ、この結論は異郷土地帯だけに限定しなければならないが、おそらくそれはある特殊なタイプの土壌、または他の局所的な条件に限られると思われる。

Ⅳ　土壌に対する間伐の影響

林の土壌条件は、多くの因子による複雑な過程から作り出される。その中でも最も重要な因子は、鉱物質の母材 — すなわち、それが肥沃であるか、やせているか、また砂質であるか粘土質であるかということである。土壌の発達には水分条件も重要な因子である。

ここで土壌やフムスの発達に影響を与える複雑なすべての因子を論ずるつもりはない。これらの多くは、人為的に変えることは不可能であるが、しかしフムスの堆積や分解に重要な意味をもつ幾つかの因子は、ある範囲内で間伐の影響を受ける。

1　落　葉

フムスが作られる場合の有機物の主要な供給源は落葉と、もしある場合には地表植生の遺体である。

林分の落葉は、樹種、林令および地位によって異なる。Handley く

1954. p.14~22)は、落葉に関する既往の文献を批評し、色々な種類の葉と針葉の養分量について論じた。Norway の試験結果の幾つかを引用して、良好な土壌条件を永続させるのに分解しなければならない有機物の量を調べてみよう。Mork(1942. p.337~41)は Norway spruce 林の落葉が、エーカー当り2,940~1,300ポンドであることを認めた。化学的組成は樹種により、また土壌の肥沃度によって変る。しかし、一般に落葉によって土壌に還元される養分量は印象的である。

40年生の Norway spruce 林で Mork は、1年間の落葉中の養分量は、エーカー当り CaO が45ポンド、K_2O が9ポンド、P_2O_5 が6ポンド、N_2 が27ポンドに上ることを認めている。

もし生葉が間伐によって新鮮な状態のまま放置されると、K_2O_5 と P_2O_5 の量は上の数字の2倍になり、また N_2 は50%増となる。

Moller(1947 p.394)は、断面積範囲48~152平方フィートの50年生の beech 林で、葉重量および葉面積がほぼ同一であることを見出した。葉の容積は、林が明らかに疎開しているときにのみ低下した。同じ結果は Norway spruce についても見られている(p.395)。

落葉は、多分間伐直後には若干少なくなると思われるが、しかしそれは間伐そのものによって地上に放置される量より多くない。そのため、間伐によって落葉量に著しい影響があるとは考えられない。

地表植生の遺体の量は、地位条件と林分密度とによって左右される。Mikola(1954 p.68)は、間伐によって草本の成長が助長されると述べたが、草本の遺体には養分が多く、また分解も早いから、間伐はこの面において土壌条件の改善に役立つ。

2 温度と成長期間の長さ

Denmark の Haarlow と Beier Petersen が、D度間伐区での気温と地温がA度間伐区のそれより2°Fおよび4.5°F高くなったと報告していることについては、前に述べておいた。

Ronge(1928. p.328)は、北 Sweden において、120年生の Norway spruce の林(小径木が密生している)について、無間伐プロットのエーカー当り本数が11,220本、2つの間伐プロットの本数がそれぞれ1,020と620本のときに間伐を実行した。間伐後の最初の冬(1923~24の冬)の無間伐区の最深積雪は3月の約1フィートで、土壌の凍結深は2.45フィートにおよんだ。凍結した土壌が最終的に融けたのは、大体8月1日であった。6月中旬には土壌表面がとけはじめている。

強度に間伐した林の3月の積雪量は2.8フィートで、土壌の凍結深は1フィートであった。最後の凍結個所が融けたのは6月の5日である。

1924年から1926年までの3年間の、6、7月の平均をとると、無間伐と強度間伐プロットの4インチの深さのところの地温は2.2°Fと13.9°Fで、8インチの深さでは6.3°Fと12.0°Fであった。この場合の温度差は6.7°Fと5.7°Fで、異例の大きさである。しかし注意しなければならないのは、密度の違い方がエーカー当りで11,220と620本で極めて大きいことと、この密生林分が非常に北にあって、気象条件が悪いということである。

地温が高く、土壌の凍結期間が短かいほど木の生育期間は長くなると考えられる。Eklund(1952 p.53)はこの試験の最終報告をおこなっているが、それによれば、この試験だけでなく、北 Sweden の他のどの試験においても、頂枝の成育状態から成育期間が延長したとは認められなかったということである。

しかし根の成長については間伐林分で生育期間の延長が期待できる。

Angstrom（1936－37）は北Sweden の155年生のspruce林分の土壌温度測定の結果を発表している。強度間伐林分（エーカー当り断面積を179から72平方フィートに減少）の夏の土壌温度は，無間伐林（エーカー当り断面積168平方フィート）よりも最高で3.5～5.5°F高くなった。冬の温度は間伐によって殆んど影響されないが，春に地表の凍結がなくなる時期が6週間位まで早くなる。

Mork（1933. P.31）は，1930年に本数で24%，材積で18%の伐採をおこなって，土壌温度が3.5°F上昇することを見出した。この試験は中部Norway のspruce 老令林でおこなわれたが，温度は地表の約1/2インチ下の発芽層（germinatinating-layer）で測った。

土壌温度に関しては，下層林冠の除去も間伐とほとんど同じ効果を示す。したがって温度が制限条件になっているような地域では，下層の被圧木や灌木を取除く必要がある。これはScandinavia では非常によく実行されることである。

3 降水量

Moller（1954. P.37～9）の引用によれば，Stalfelt は Sweden において年降水量34.5インチのうち50～60%がNorway spruceによって保持されることを観察している。林床植生によって捕捉される水の量は生育期間において18%，他の時期で9%にのぼる。年雨量のうち滲透して2.9インチ以上の深さに達するものは僅か1～5%にすぎない。1日に15.8インチの降水があった場合でさえ，深さ6.6フィート以上には滲透せず，拡散によるものを含めても，おそらくそれから数フィート以内と考えられる。

したがって，地下水の低い場所では土壌表層が地下水とは全然別個な

あるいは完全に切り離された固有の水分組織をもつということを認めるのが基本的に重要である。

間伐が葉の量に与える影響はごく僅かだから，全部葉を揺らしてしまうほど強い雨が降っても，捕捉される量が大幅に減少するとは考えられない。強度間伐の林では樹冠投影面積が若干少ないから，小雨の間の捕捉量は少なくなる。非常に疎開した林ではいつでも地上に落下する雨の量が多くなるが，地表植生が多くなるので保水量が増す。

間伐のあと，特に樹冠の伸長があまり早くない針葉樹では，間伐林の保水力は確かに低下する。Phalsgaard の地位の悪い，乾いたヒース地帯土壌で，材積生産量が増加するのは，おそらく，地表に達する雨の量が多くなるためと思われる。Lukkala（1942. P.13）はNorway spruceの過密林分で，5月から10月までの期間内に捕捉される雨量が全体の50%に達することを認めている。また密な林の捕捉量は30～40%でやや密な林のそれは20～30%であった。全く疎な林では捕捉される雨の量が一層少なくなる。Lukkala はScots pine や birch では捕捉される量がNorway spruce より少なかったといっている。

4 フムスの分解

Mork（1937）の室内実験によると，フムスの分解はNO_3収量に関する限り68°Fまで，またNH_3では86°Fまで増加する。これらの実験から，北欧の大部分では地温がフムス分解の制限因子であることがはっきりする。

独乙の間伐試験地の観測では，若干の一時的効果がみられるにせよ，beech と spruce の場合，検討した間伐度の範囲でフムスの条件に殆んど影響がみられなかった（Wiedemann 1932. P.180，1936～37

p.232 および 1950. p.110)。

Denmark でも、地位のよいところの beech 林では、土壌に対する影響はほとんど認められていない(Møller 1954 p.34)。しかし Norway spruce について Kornebush (1933) が、Hastrup の試験地のA度プロットのフムスが分解の際 NH_3 だけを生ずるモル型であったと報告している。間伐することによってフムスの分解率は増加するが、L度のプロットは NO_3 を多量に含んだムル型であった。

Norway から、Langsæter (1941. p.184) は、老令の Norway spruce 林に設定された種々の間伐度のプロットの土壌分析の結果を発表した(後に Eide が限定出版した)。これらのプロットは 1921 年に Fosnes Trondelag にある 140 年生のほとんど無間伐の林に設定された。Table.22 は 1921 年の間伐前と間伐後の密度指数と乾燥土壌 1kg あたりの窒素分をミリグラム単位で示したものである。

Table 22 Fosnes における密度と窒素

プロット	I	II	III
1921年の間伐前の近似的密度指数	2.5	2.0	2.0
〃 間伐後 〃	1.6	1.1	0.75
1933年の間伐後 〃	1.3	0.75	0.7
採取直後の乾土1kgあたり窒素重	0.0	4.7	7.4
30日貯蔵後の 〃	0.0	42.9	333.5
60日 〃 〃	56.8	290.0	2410.0

第1回間伐から14年経過した中庸度間伐の第1プロットには窒素がなかったが、一方やや強く間伐したプロットではごく僅か認められた。フムスを実験室で30日乾燥したあとでも、第1プロットでは窒素が検出されなかったが、他のプロットでは大幅に増加した。60日後になって第1プロットのフムスに窒素があらわれた。窒素分解の開始までにこのように長期の貯蔵を必要とするということは、このプロットのフムスが間伐後14年を経過してさえいかに不活性であるかを示している。

Fosnes の結果は、この地域の老令の無間伐林に対して間伐の影響が非常に大きいことを明瞭に示している。

Fosnes のように海洋に近く、湿度の高い気候条件はやや特殊で、たしかにフムスの分解には好適でない。そのため、同じ緯度のもっと乾燥した気候のところで期待されるよりこの効果が大きくなったものと思われる。

Romell (1938) は、菌根のついた伐採木の根が重要な窒素源であってこれが間伐後極めて急速に分解することを強調している。

このほか Mikola (1954. p.68) は、間伐後林床がある程度まで草本で覆われることによって間接的にフムスの条件が改善されることを強調している。草本の遺体の分析から、その中の窒素分が大きいことが示されている。

引用した結果から、北欧では土壌を最も適当な状態に保つ上で間伐が非常に役立つことが全く明らかである。Denmark やそれより南の地域では、この方面での間伐効果はあまり重要でない。

分解に対する効果は確かに複雑である。主要な因子は多分高温と、窒素の一部が緑葉の方にまわること、および伐採木の根が腐ることだと思われる。時には、一時的に地上に達する雨量が多いということも確かに役立っている。

5 更新のための条件

間伐をして根や堆積したフムスを分解させるとともに、間伐木の葉や枝、

あるいは梢端などもその中に含めて還元する方が有利である。このようにして分離された養分を利用して、主林分は商品価値の高い材を生産することになる。

この理由で、林分の生産の段階ではフムスや落葉からできるだけ多量の窒素分が分離されるようにするのが適当である。更新の段階では常に余分な窒素が存在するが、これは有害な雑草を繁らせるだけだから更新の妨げになる。

物理的、栄養的のどちらからしても、稚樹に対して好適な条件をつくり出すには、どんな場合でも、粗腐植層の一部を分解させなければならない。この理由で主伐前に間伐をおこなう方が有利である。

現在 Scandinavia においてはそのような良い基準が実際に使われている。すなわち、密あるいは過密の林分では 8〜10 年前に適当な間伐をおこなって、稚樹の生育に適した土壌条件が準備されるまで、更新のための主伐をひかえるのである。さらに、大抵はこの期間の後半から稚樹が林内に侵入しはじめるので、多くは主伐をしたときに更新が完了することになる。

土壌が非常によいところで強い間伐を実行すると、雑草が繁って稚樹と競争するから、天然更新には都合が悪い。

6 下層林冠

間伐の際、被圧された下層林冠を残すべきかどうかは、土壌に対する影響を考えてきめなければならない。下層木が成長源泉（growing stock）の樹冠を邪魔しない程度の大きさなら成長の遅い下層林冠は、通例林分の成長に対して競争的な影響を与えない。下層林冠の主な影響は光線をさえぎることと、土壌温度を低下させることである。

温度とフムスの分解が著しい制限因子となっている北方地域においては、普通は下層林冠を伐採してしまう方が有利である。

下層林冠があっても分解が順調におこなわれるようなところで、特に地位のよい場合には、必要になるまで稚樹の発生を防ぎ、また地表植生の繁茂を抑制するように、最終間伐まで下層林冠を残す方がよい。

しかし残念なことに、下層林冠を残すと経営的に非常にマイナスである。というのは、選木や伐採、また丸太の搬出などの間伐作業の邪魔になるからである。このため針葉樹林の場合非常に良い土壌条件、気候的条件のときでも下層林冠を残すことは殆んどない。

広葉樹では（これは通常最良の地位にあるが）望ましくない植生の侵入を防ぎ、また樹幹下部から不定芽が出ないようにするため、下層林冠を残しておく場合が多い。Denmark においては、beech や Oak の林に輪伐期の後半に樹下植栽（多くは他の樹種）をすることが多い。

V 老令の無手入林に対する影響

間伐は材積成長に影響しない、あるいは影響があっても二次的なものでしかないというII章で述べた結論は、正しく取扱われた林ばかりでなく、過密な場合にも、またフムスの分解が損なわれることのない良好な生育条件のもとにある無手入林分についてもあてはまる。

Denmark 以北でフムスの条件を正常に保つためには、間伐が少なくとも針葉樹林の場合には必須条件のように思われる。密度の高い無手入林分では、未分解のフムスの堆積とそれに対応する成長の衰えが予想される。

Wiedemann（1950, p.20）は、土壌条件の劣悪な（自己間引きの能力が低い）独立でさえ、Norway spruce は過密になると成長が停滞す

る傾向があるといっている。

土壌条件が劣り，成長が衰えている老令の無手入林の場合に最も分解が促進される可能性があり，したがって材積成長の増加が期待される。

天然林に対する間伐効果を検討するためにおこなわれた間伐試験はごく僅かしかない。この理由は，主として欧州の利用しうる地域においては，大抵の場合規則的な間伐が実行されていて，この問題があまり重要に考えられていなかったからである。

Nyysonen（1954 p.188）は，南 Finland の繰返して間伐がおこなわれた林の材積成長量は，容易に無間伐の pine 林分の値に達するが，しかし多少の傾向はみられるにしても，成長量が増加したとはいえないと述べている。

土壌温度に関連してさきに引用した小径木の密生している林（pole thicket）で，Näslund は，間伐が直径成長に著しい影響を与えることを観察している（Table. 23）。

Table. 23　平均年輪幅（各群50本づつ）

1923年の本数	1918～22 インチ	1918～22 %	1923～27 %	1928～33 %	1923～33 %
11.220	0.106	100	85	89	89
1.020	0.145	100	103	216	162
620	0.153	100	146	377	272

最も強度の間伐をおこなったプロットの直径成長は1923年の間伐前の値の殆んど4倍に近い。樹高成長に対する影響もやはり顕著であった。生きている樹冠長率が45%の木についていうと，本数1.020のプロットの樹高の平均連年成長は3.5インチで，620本のプロットでは5.4インチであった。結論として Näslund は，極めて強度の間伐の場合，樹高

成長が増加することが証明されたといっている（p.706）。この試験の1949年までの結果を発表した Eklund（1952 p.44）は，樹高成長に対する効果が，間伐を実行してから16～17年後に最大になることを見出した。直径成長の最大は伐採後6～7年に現われる。

材積の総生産量の場合にはあまりはっきりした傾向が認められない。生産量の値を Table. 24 にあげておく。

Table. 24　1923～49年の材積成長量（エーカーあたり立方フィート）

1923年の間伐後の本数	総材積成長	成材々積成長（>3インチ）	1944～49年の年平均成長量
11.220	967	80	26
1.020	940	472	44
620	990	767	41
2.640	1.325	668	42
410	850	749	34

最後の2プロットは，1912年に強度の間伐をしたところに設定してある。2640本のプロットは1923年には間伐しなかったが，最終間伐においてエーカー当り410本に減らした。最初の3つのプロットの材積成長量は，全期間を通じて非常に似通った値になっている。しかし最後の5年期間では無間伐林の成長量が著しく減少する傾向がみられ，一方間伐プロットでは逆の現象がおきている。Eklund は，この結果が将来を展望できる根拠となると結論している（p.49）。

末口径3インチ以上の成材々積成長量は全く違った結果を示している。すなわち強度間伐プロットの成長量は無間伐プロットの10倍も大きい。

Näslund（1942 p.94）は，北 Sweden の非常に老令の，成長の遅い Norway spruce 林に対して強度間伐を施行したときの影響を調べて

いる。最良の植生型の場合、伐採後3年で直径成長量の増加が認められた。悪いタイプの場合には、5年たっても前と変らなかった。

断面積の40～50%を伐採したとき、直径成長量の最大値が、伐採の10～15年後に現れるが、そのときの年輪幅は最良の植生型で2.5倍、良くないタイプで1.3倍の大きさになる。このような直径成長量の極大が生ずるのは、密度の増加だけによるものでなく、蓄積されたフムスの大部分が消費されるためである。

樹高成長量にも明らかな反応が現れるが、直径成長量の場合ほど大きくないようである。断面積の30%を伐採した場合に比べると、50%の伐採では樹高成長量が7～14%増加した。断面積の70%を伐採した場合には樹高成長が20～38%促進された。

直径成長、樹高成長ともこのように良好な結果が出ているにもかかわら

Table 25　Fosnes*の試験地の本数、間伐率、直径および材積成長量

年	本数 I	本数 II	本数 III	間伐率(%) I	間伐率(%) II	間伐率(%) III	直径成長量 I	直径成長量 II	直径成長量 III	エーカー当り材積連年成長量(立方フィート) I	II	III
1921	550	379	315	12.8	23.0	34.4				26.3	31.8	30.0
							0.24	0.35	0.43			
1925	482	318	241	20.1	33.4	47.6				25.0	37.8	32.8
							0.31	0.55	0.51			
1928	447	294	235	24.5	38.0	47.3				37.9	52.0	53.2
							0.51	0.86	1.10			
1933	427	239	215	24.2	43.0	48.3				62.8	63.2	58.6
							0.47	0.86	0.94			
1937	427	202	164	23.0	46.2	58.6				72.4	67.0	58.6
							0.59	1.02	1.14			
1941	414	192	152	22.1	45.4	58.8				47.5	52.9	38.6
							0.31	0.71	0.79			
1946	362	174	140	27.8	48.8	60.1				34.0	52.1	45.8
							0.31	0.75	0.90			
1951	257	134	101	44.1	58.1	67.4						

* これらのプロットの、1937年以降の期間の数値はまだ発表されていない。これらの結果は、本書のためにNorway林業試験場から提供されたものである。

す。材積成長は前に述べたように強度間伐の場合には少なくなる(p.134)。しかし調べてみると、この老令林の林木は伐採に対して反応を示しているから、間伐をして、用材用の保残林として成長を続けさせることが可能である。

Langsaeter(1941 p.183)は前に述べたFosnesの間伐試験の1937年までの結果を示しているが、そこではフムスの条件が非常に改善されたことが観察されている(Table.22をみよ)。1921年に試験地が設定されたとき、この林は140年生であった。Table.25はその主な結果を示したものである。

この表からどのプロットでも間伐後直径成長量が増加し、間伐の20年あとにピークが現れることがわかる。その後の低下は最も密な林分の場合が著しく、0.59mmから0.31mmになった。一方プロットIIIの成長量は1951年でも0.90インチあった。

総材積の成長量はFig.12にも示してあるが、1921年以前にはどのプロットもエーカー当り26.2立方フィートであった。その後2つの強度間伐プロットでは急激に増加したが、一番高い成長量を示したのはプロットIで、間伐後17～20年の期間でエーカー当り72.4立方フィートであった。最後の10年間はどのプロットでも成長量が低下したが、プロットIが特に著しかった。しかし最初の伐採後30年を経てからでも、成長量は伐採前より33～103%多かった。

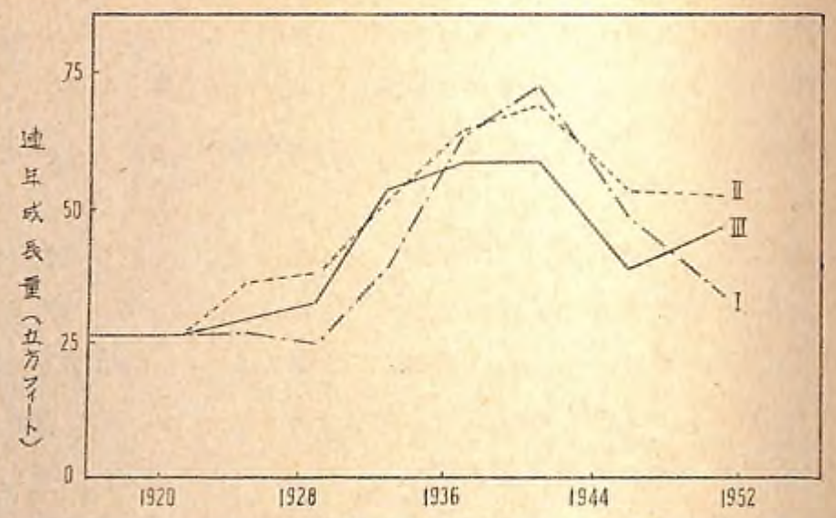


Fig. 12　老令の無手入林を間伐した場合の反応

大部分の期間を通じて，成長量は間伐を開始したときの2倍から3倍になったが，この同じ期間の総材積生産量の2/3までが間伐された。

この系列には残念なことに無間伐プロットをとってなかったから，この増加がすべて間伐によるものか，あるいは気候条件が一般的によくなったことが原因になっているのかを判断することができない。それにもかかわらず，この場合間伐により材積成長量が大幅に増加したことは全く明らかである。

間伐後の最初の2期間において2インチにすぎなかった樹高成長量はすべてのプロットで4インチに増加した。

Eidsvollは，1920年に南Norwayで Scots pine と少数の birch を交えた非常に密な100年生の Norway spruce 林に，別の間伐試験地を設けているが，そこでも同様な傾向がみられる。ただしこの系列では地位，年令に若干違いがあるから，結果についてあまり厳密な解釈ができない。たとえば No.33 のプロットは，1920年に99年生の最

間伐 Norway spruce 林に設定されている（Langsaeter 1941, p.188）。最初の5年間の成長量はエーカー当り66.8立方フィートで1925～40年期間には110.5立方フィートに増加した。しかし，これは1950～1955年期間には再びエーカー当り82.2立方フィートに低下した。同じ期間内に材積の55%が伐採された。

この最後のプロットが最も注目に値する。それはこのプロットが比較的気温の高い Norway で最良の森林地帯に存在しているからである。

引用した研究は，老令の無手入林に対する間伐の効果が，継続的に間伐をおこなった林の場合と違っていることを明瞭に示している。樹高成長はこれらの老令林では通常小さいのであるが，これは間伐によって100%増加する。2つの系列で材積成長量が明らかに増加するのがみられ，他のプロットについても増加した徴候がある。

これらの老令林の成長は，分解が遅いためこの地位の標準以下に低下していたように思われる。間伐によって，蓄積された養分の一部が利用され，ある期間この地位の生産力以上の水準にまで成長が促進されたのである。20年後には成長が衰えはじめたが，30～35年後になっても試験開始時の率を上まわっていた。おそらく，現在の率は，この地位の標準に近いところにあると思われる。

これらの老令林分の間伐の結果は非常に明るい見通しを与える。というのは，これらは主伐前に高い価値成長をさせ，同時に更新条件を大幅に改善しうる可能性のあることを示しているからである。

この成長促進効果は，寒冷地方で特に著しいが，このほか老令林に対する一時的な間伐の効果もスイスにおいて Badoux（1939, p.139）が認めており，また Möller（1947, p.400）も報告している。

VI 実際面への応用

1 第1回間伐の時期

若い林の間伐は，枝の枯あがりがある程度進行してからでないと不可能である。それより前の段階では，枝が多くて林内に入りこむことがむつかしい。

間伐開始の適期は，通常枝が10～15フィートの高さまで枯あがったときである。この時期は植栽本数にもよるし，樹種によっても違う。地位によって異なるが，欧州の大部分の収穫表の第1回目の間伐は20～35年の間になっている。

Sweden の新しい収穫表では，どの地位についても上層高が26フィートに達したときに間伐をはじめることになっているが，この基準は妥当なものと思われる。

第1回間伐をあまり遅らせると，雪害をうけやすい鞭木ができるおそれがあるので危険である。しかし第1回間伐を上層高が33フィート以上になるまで遅らせさえしなければ，永続的な障害の原因とはならない。

2 間伐の間隔

多くの収穫表では，地位によって3年～5年まで，時によると10年までの間伐間隔が示されている。これらの表の間隔のとり方は，通例輪伐期を通じて一定である。樹高成長の最も旺盛な若い林の場合，特に間伐を頻繁に繰返さなければならないのは明らかである。その後樹高成長は減少し間伐によって生じたギャップは前ほど急速にふさがることはない。したがって，輪伐期の後半には間隔を延長することができる。Forestry Commission（1951 p.5）は実用上の目やすとして，樹高が多くとも10フ

イート成長する度に間伐を繰返さなければならないといっている。Hummel（1954 p.586）は7フィートが適当といっている。地位上および中の場合大抵の樹種では7～10フィートの樹高成長が林令の大体1/10に対応する。

間伐の間隔を長くした場合，次の間伐までに林分が閉鎖しすぎるのを防ぐため，各回の間伐を強める必要がある。強度間伐をするとギャップが大きくなって閉鎖するまでに時間がかかるから，生産量が低下すると考えられる。Eide と Langsaeter（1941 p.394）によれば，間伐間隔を4年から12年に延ばすと，3～4％減少する。

Lindquist と Petrini（1950 p.394）は Scandinavia の既往の文献を整理してこの問題を論じているが，それによると間隔を5年から10年に延ばすと，成長量の低下が多い場合には4.2％となり，5年から15年に延ばしたときの材積収穫の減少は12.5％にのぼると結論している。最良の地位のときはこの損失はあまり多くなく，3～12.3％の間にあると推定されている。

このような成長量の減少が生ずるのは，強度間伐を間をおいて適用することにも一つの原因があるが，多くは疎立した林木が枯損や倒伏することが多く，また雪害や虫害を受けやすいことにもよる。そのような木は，間隔が短いと殆んど100％利用できるが，間隔が長いと多くは利用できなくなってしまう。

3 自然枯損による損失

間伐間隔をさらに延ばすと枯損木の利用率が低下し，また競争による損失（自然枯損）の割合も増加することは明らかである。

針葉樹の自然枯損の問題は Finland では研究が少なく，収穫表もこの

国では無間伐の林に対する"正常"収穫表である。Ilvessalo（1953 p.274）は、準固定試験地と固定試験地および Finland の収穫表の結果をとりまとめた。

準固定試験地では、無間伐のまま10年間放置すると枯損量は連年成長量の

5～10%　若い林の場合
5～15%　壮令林　〃
15～35%　老令林　〃

に上った。

固定標準地の場合の対応する数値は、連年成長量の15～20%、20～30%、30～40%の損失であった。間伐した地域では、枯損は常に10%を超えず、時には全く無視できる程度である。無手入の fully stocked な pine 林分の収穫表では、年令の増加につれて高い値を示している。南 Finland の110年生林分の枯損は、連年成長の50～60%であり、北部では160～200年生の林の枯損は80～90%である。Ilvessalo（1937. p.163）は birch や Norway spruce の数値は多分もっと少ないだろうといっている。あまり信頼できる値ではないが Norway spruce の160～210年生の林の自然枯損は25～50%であるといわれる。

Petterson の scots pine の収穫表の1つは、自然枯損が現に起っているような林を対象としている（Petterson 1955. p.389）。彼は算令53年までに、総材積生産量の40%までが自然枯損で失なわれるといっている。色々な期間に対する枯損は、

38～53年　その期間の成長量の42%
54～73　〃　47%

74～98年　その期間の成長量の53%
99～128　〃　58%

であった。

Moller（1954 p.14）は、年令57年まで間伐しなかった Denmark の birch 林について枯損のデータを発表している。次の39年でこの無間伐林の総材積成長量は720立方フィートであった。この生産量の中、279立方フィート、すなわち39%が自然枯損によって失なわれた。間伐プロットの生産量は712立方フィートであった。

伐期までを平均すると fully stocked な林の枯損は、全材積生産量の1/3を下らないと思われる。そうして、更新樹が非常に密生しているときは、これはもっと多く、おそらく40～50%に達するだろう。

引用した数値の多くは pine に対するものであるが、Norway spruce のような陰性の樹種では30～35%の枯損を見込まなければならない。長期間過密な状態に放置された林では、この値はもっと高くなるだろう。

4 間伐収穫

枯死した木や瀕死木を丁度取去るように間伐してやると、材積生産量の約1/3にあたる量が収穫される。そのため、直径成長を促進させる行動的な間伐では、収穫量が一層大きくなる筈である。このことは収穫表の数値からも確かめられる。Table.26は2、3の収穫表について、色々な生育段階における間伐収穫のパーセントを示したもので、近似的な密度指数も併記してある。

密度指数を2.4～1.8に保つ中庸度間伐でさえ、平均成長量最大の時期（この地位では80～90年）における総材積生産量の約50%が伐採される。Wiedemann の表について成材々積で計算すると、これは35～

40%になる。

Table 26　色々な生育段階における間伐量

Wiedemann（1949 p.34～43）地位Ⅱ（50年で約58フィート）

	年令	50	80	95	120
中庸度間伐	指数	2.4		2.1	1.6
	間伐材積累計の%	18		35	45
強度間伐	指数	1.9	1.6		1.2
	間伐材積累計の%	31	41		51

Eide と Langsaeter（1941 p.422～3 および 428～9）地位B（50年で約58フィート）

	年令	50	77	80	92
間伐度Ⅰ 中庸度間伐	指数	2.5		1.8	1.6
	間伐材積累計の%	26		48	51
間伐度Ⅱ 強度間伐	指数	2.2	1.4		1.1
	間伐材積累計の%	29	52		59

Moller（1933 p.576～7）　地位Ⅲ（50年で61フィート）

年令	50	70
指数	1.0	0.7
間伐材積累計の%	53	61

Hummel と Christie（1953 p.19）地位Ⅲ（50年で60フィート）

年令	50
指数	1.5
間伐材積累計の%	32

Bowmont の Norway spruce 試験地（地位50年で約55フィート）

間伐度	密度指数	年令	間伐材積累計の%
B	2.95	45	8
C	1.65	45	31
D	0.53	45	57
L.C	—	45	49

密度指数1.0またはそれ以下の強度間伐の場合、この間伐収穫の割合は60%に増加するが、その後これは生産量の低下が顕著になり始めるまで続く。

一般に、密度指数が1.5以下にならない限り、生産量が最大値の95%に達したと思われるときの間伐材積累計は、材積生産量の約50%と考えてよい。材積を全材積で計算すると、間伐量は多分50%より少し多くなり、成材々積で表わせば50%に少し足りない。

大径木を生産するために、平均成長量最大の時点のあとまでも伐採しないでおくと、間伐量のパーセントもむろん大きくなって、60%以上になることも珍らしくない。

5　間伐の応用

Moller（1954 p.46）や他の研究者が指摘しているように、林業においては長期的な計画が必要である。林業家は少なくとも50年先を考えなければならないが、その場合、生産目標がたとえば用材、小丸太材、パルプ用材、あるいはこれらの組合せというように明示されていると、間伐の実行が非常にやりやすくなる。林には非常な柔軟性があって、適用される間伐によってどのようにも作りかえることができるから、林業におい

ては異なった無数に多くの方法が考えられるのである。

経済的な見方

間伐の問題には、ある程度まで経済的な考慮がからんでいる。用材生産が目的なら、密度指数1.0以下の強さの間伐でも採算がとれる。というのは、それによって伐期における林木の大きさが増大し、あるいは短い期間に一定の大きさに到達させられるからである。しかし欧州では、それが純粋に経済的な観方からして妥当と思われる場合にも、無条件で強度間伐を実行できない。その理由は最強度の間伐を実行すると、各国の法規に抵触する程の成長量の低下が直ちに生ずるからである。

純粋経済的な考え方は、特に利率の高いときにそうであるが、一番大きくて一番価値の高い木の中から間伐木を選定し、価値の低い木を伐採しないということになりやすく、そのため将来の成育を阻害するおそれがある。利率の高いときには、将来の収入は直接所得に比べると二次的なものになる。たとえば25年後に支払われる1ドルを現在に直すと、利率4%で37.5セント、5%では29.5セントにすぎない。したがって後日の収入が多くなるように林を仕立てるより、伐採して早期に収入をあげる方が得策と思われる。

Gron（1940）がNorway spruceについておこなった経済計算によれば、Denmarkの条件ではMollerの収穫表より30%強い間伐の方が、表に示された間伐度より有利で、表より30%弱い間伐に比べるとなお一層有利となった。

Carbonnier（1954 p34）は、間伐収入と将来林分の資本価値は材積成長が同一にもかかわらず、どちらも無間伐林より間伐林の方が大きくなることを示した。

間伐による金銭収穫は小径木の需要と、市場までの距離に密接に関連している。間伐材から収益があがる場合は、間伐林分の生産量が無間伐とほとんど差がなく、また少ない資本で高い利益がえられるので経営に非常に有利である。同時に、間伐収穫は新規の投資にまわすこともできる。

直接的な利益がない場合でも、林分の第1回の間伐がその直後の林分成長の増加で十分以上償なわれると思われるから、間伐することは有利である。第1回間伐から収益をあげる問題は現在Scandinavia諸国（Denmarkを除く）で真剣に取あげられている。パルプおよび製紙工業では末口径2インチまでの材を利用できるが、このような小径木は伐採と輸送の費用がかさむから、それで採算のとれることは稀である。これは技術的な問題と考えられ、現在一層適切な伐採および搬出の方法を見出すために大きい努力が払われている。

これはまた造林的な問題とも考えられるので、最近小径木の生産の減少をはかり、また完全になくすることを目的として、若い天然更新地で間隔規制が一部おこなわれるようになった。この方法は希望する間隔（通常これは5～6フィート）をおいて1本づつを残し、他を全部伐採するのである。このような除伐は、更新樹が3～5フィートの高さになったときに行なうと都合がよい。

このような規制をすると、確かに第1回間伐時に伐採しなければならない小径木の数を減らすことができるが、このための試験地は設定されたばかりで、樹高成長や材積生産量に対する影響はまだ何もわかっていない。材積成長量に対するこのような規制の影響は、間隔が5～6フィートならおそらく僅かなものだろう。

除伐方法の説明と、適切な用具についてはAnderson（1952）、Collin（1954）およびFodnæs（1956）が述べている。

密な天然更新地の除伐費用は比較的高くつくから、早期に間隔規制を実

施するか，または第1回間伐において赤字の出るのを覚悟してかかるかの何れかを選ばねばならない。

しかし経済計算は市場や伐採搬出の条件，あるいはこれらの因子が変動する可能性があるので，それぞれの特殊事情によって制約をうける。したがって，ここではこれ以上経済的な問題に深入りすることはできない。これはまた本書の目的外のことでもある。

密　度

密　度

経済的観点より造林的な見方をとるなら，用材生産のための適正密度はおそらく1.5～1.0の間になるだろう。この密度なら良好な大きさの材を短期間に生産することができ，また材積成長の損失も10%をこえないと思われる。

生産目標がパルプ材であれば，材積が最も重要で大きさは二義なものになる。したがってこの場合，間伐によってえられる利益の主なものは，間伐しないときの枯損材の利用ということになるが，このほか大きい木の方が伐採搬出の費用がやすくてすむから，直径成長が促進されるということもある程度有利に作用する。

森林所有者がパルプ工場をもっている場合には，生産量の測定が材積でなく重量でおこなわれ，材の密度が考慮に入ってくるから，材の販売を目的とする所有者より林分を少し密に保つ方が得策と思われる。

パルプ材生産の最適密度はNorway spruceや，同じ位の高さの樹種では，おそらく1.5と2.0の間だろうと思われる。

ここで推奨した密度は，上および中の地位に限られる。地位の悪いところでは樹冠が過小となるのを防ぐためと，降水量と温度を最大に保つため少し強度に間伐する方が有利である。

推奨したこれらの間伐は，独乙で広く行なわれているものより強めであるが，しかし少なくとも伐期近くでは，現在Denmarkで採用されているものに非常に似通ってくる。最も早い時期に間伐をすることに関連して，現在Denmarkでは2通りの密度の考え方がおこなわれている。それは"待機観察法（Wait-and-see）"と"行動法（Active）"である。

Abell（1954 P.51）のいう"Wait-and-see"法では，第1回間伐後の最初の20～30年間，林分を比較的密に保つ。この期間中の自然淘汰によって幹を希望する長さまで無節の状態に仕上げる。その後間伐を強度に切替えて樹冠を拡張させ，直径成長の増大をはかるのである。

Jagd（1954 P.59）の述べた"Active"法では，小数の質のよい木を非常に早期から急速に成長させるために，第1回間伐から強度に間伐する。そうして必要な場合には枝打ちも併用する。

この方法によれば，輪伐期の初期から小数の木に成長量を集中させられるので，短期間に大径木を生産できる。たとえ総成長が若干少なくなっても，これは経済的に有利だといわれる。特に幹の大きさが不揃いで，完全に良木といえるものが少ないときには，全林の成長量のできるだけ多くの部分をこれらの良木に付加するように考えなければならない。

各生産目標について設けられた密度の幅の中で，間伐タイプの選定について多くの余地が残されている。しかし，自由間伐方式では最良の木を残さなければならないから，この方法のときに生産量が一番大きくなることは間違いない。同令林分の場合，成長能力に関して最良の木というのは，大抵が最大木である。

Guillebond と Hummel（1949 P.7）は，英国の12ヶ所の試験地で副優勢木（介在木，sub-dominant）のうち，間伐後15～35年まで生存していたのは，僅か5%にすぎなかったといっている。この内訳は

被優勢木（co-dominant）が1%，副優勢木が2%，被圧木が2%であった。

2つを除く他の全プロットで，優勢木の90%以上が常に同じクラスに属していた。他のクラスからも少数のものが優勢木級に移ってきたが，これらはすべて被優勢木からのものである。被優勢木と副優勢木（介在木）の起源はあまり一様でなかった。

この結果は，早い時期に思い切った伐採をおこなって十分な条件をとのえてやれば，被優勢木も優勢木に交って完全な成長をとげるということを示している。介在木ではこのようなことは起らない。Guillebaud と Hummel（p.12）は，このことは幹型の悪い木を残そうというのでなくただ優勢木の周囲に介在木しかないとき，その中のどれかが，伐期収穫で主要な位置を占める位にまで成長する可能性は少ないということだと述べている。ギャップが極端に大きくない限り，与えられた空間は大抵の場合優勢木によって満度に利用され，残された介在木は，最後には被圧木として終る。

このような樹型級の移動における下降の傾向は，特に介在木についてであるが，初期の間伐で下級の木の選木にあまり時間をかけても意味のないことを示している。

これらの結果は，1907～38年にわたって，Zimmerle（1940 p.116～7）が Norway spruce について観察したことと全く一致している。すなわち，樹型級は一般に下降する傾向があり，間伐を繰返すと林分内の優勢木の割合が急激に増加する。

Vanselow（1951 p.313～7）は色々な樹型級の収穫について詳しく述べている。Norway spruce の場合，弱度間伐林分の優勢木（被優勢木の成材々積生産量は，全林の75%を占める。Scots pine と Beech

ではこの値は67と59である。彼は低位の樹型級の木の生育条件を改善するために，上層林冠の伐採が許されるには，特別の理由がなければならないと結論している。

樹型級の一般的な下降の傾向（被優勢木の一部では上昇する）に対する生態的な説明は，1立方フィートの材を生産するのに必要な葉の量を，長期間，多数の樹種について広範に研究した Burger が示している。

Burger（1953 p.106）は Norway spruce について，被優勢木と，最も自由に成育している介在木が一番能率がよくて，1立方フィートの幹材を生産するのに113ポンドの針葉の重が必要だといっている。優勢木では少し能率がおちて，約125ポンドの葉が必要であり，被圧木では375ポンドの葉がいる。このような木は殆んど全部のエネルギーが葉の更新に使われ，材の生産の方にはごく少量しかまわらない。Burger は年あたり1ポンドの材を生産するのに要する葉の量は，地位指数の低下と海抜高の増加につれて大きくなることを認めている（p.181）。

Burger（1950 p.458）は beech のプロットについても同様な結果を示している。すなわち，被優勢木が最も能率がよく，優勢木は時によるとこれより若干能率が悪かった。彼の結果では，直径12インチの木で1立方フィートの材の生産に要する葉の重は44ポンドで，2インチでは同じ量の生産に63ポンドの葉が必要であった。

同様に Badoux（1939 p.141）も，beech の被優勢木の樹冠容積からみた成長量は，他の樹型級よりも大きいことを認めている。

Moller（1947 p.395）は，強度に間伐した Norway spruce の造林地では樹冠の最も小さい木（これらの強度間伐プロットでは被優勢木）の材の生産が最も効率的であることを示した。彼はこの結果が，そのような木の像葉率の低いことで説明しなければならないと考えた。

樹型級の移動と相対的な生産力の両面を扱ったこれらの研究をみると，品質の良い木の生産を目的とする限り，上層を占める木に生産を集中するのが一番よいという結論になる。

同令林分の場合には，必ず最大木が潜在生産力に関して優れた遺伝的地位を占めている。これは，その木が大きくなった理由の1つにもなっている。年令に変動があると，色々な大きさの木の成長能力の判定が一層難しくなる。

Ⅶ 混 交 林

木材の生産に混交林が有利か，単純林が有利かという問題は，間伐の問題の範囲外ともいえるが，間伐は混交率を規制する手段の1つでもあるから，簡単にここで考察しておくことにする。

混交した更新林分においては，色々な混交樹種の割合を規制することが可能である。しかしそのためには，早期に間伐をおこなう必要がある。というのは，どれか1つの樹種が優先する場合が非常に多いから，それを開放しないと，他の樹種の一部が被圧されたり，枯死したりするからである。

有用でない樹種については，その占有する空間を有用樹種のために開放してやることが大切だから，これらの樹種を一回で除去すべきであることはいうまでもない。

利用価値の類似した樹種では，成長の早いものを優先するのが正しい。

生 産 量

単純林と混交林の相対的材積生産量の問題については，欧州で幾つかの結果が知られている。

Vanselow（1937. p.125）は，European fir と Norway spruce の6個所の混交林試験地における60年までの成材々積生産量は，6つの純林（そのうち5つは Norway spruce，あとの1つは fir）のそれより22%多かったと述べている。

Vanselow は，この試験系列の間に地位差がなかったと強調しているが，混交林では fir の競争を緩和するため強度に間伐した。これは成材々積生産量の大きくなった理由の1つであろうが，このほかに，fir の混植に成長量の増加をもたらしたことも明らかである。しかし発表された時点での連年成長はどちらの系列でも等しかった（p.126）。

Lappi-Seppala（1938）は birch がある比率で混交していると，特に輪伐期の後半の pine の成長が良くなることを見出した。

同じように Bonnemann（1939. p.481）も，pine 林に beech を混植すると pine 純林の収穫表の値より材積生産量が増加することを見出した。すなわち，

60年のときの生産量	102%
120年 〃	112%
160年 〃	127%

Erteld（1953）も，pine と beech の合計材積が，pine だけの場合の生産量より多くなることを認めている。しかし beech の混交は pine の成長を少し低下させる。混植によって pine の成長が良くなるという結果は全然えられていない。

Wiedemann（1943. p.129）は，混交林に対する彼の収穫表の生産量を pine 純林のそれと比較している。140年の輪伐期で，Oak を混植した beech の成長量は，エーカー当り99から107立方フィートに増加した。pine と beech を混植した場合の，140年のときの平均成長量はエーカー当り117立方フィートであったのに対し，pine の単純

林では107立方フィートになった。

beech に spruce を混植したときの輪伐期120年の生産量は、エーカー当り166立方フィートであるが、spruce の純林では170立方フィートである。幾つかのプロットの beech は、樹高成長において spruce に及ばなかった。したがって生産量はエーカー当り僅か141立方フィートとなった。

spruce と pine を混植すると平均成長量はエーカー当り142立方フィートになったが、pine の純林では107立方フィートにしかならなかった。

これらの試験や収穫表から一般に樹高の高い樹種に陰性の樹種を混交すると総生産量が大きくなると結論してよさそうである。たとえば pine や oak に beech を混植したり、spruce に fir、また pine に spruce を混植するような場合である。陰性の樹種では、特に林分をかなり疎開させなければならない輪伐期の後半においては、潜在的土地生産力を完全に利用できないから、これらの結果は理論的にも納得できる。

逆に陰性の樹種に樹高の高い樹種を混ぜると、陰性樹種の成長促進のために、上層を伐りすかせても、十分にそれが利用されないから、普通は成長が減少する。

混交林を成功させるための要件は、むろんどちらの樹種にも地位が適合しくいることである。地位のよいところでは、樹高が一番高くなる樹種が最大の生産をあげる。

抵抗力

混交林対純林の問題には、材積生産量以外の面、すなわち主として林の健全性と抵抗性に関するものがある。

フムスの条件はおそらく混交林の方がよいだろう。針葉よりなる広葉樹の葉の方

が分解しやすいから、針葉樹に広葉樹を混交させると特に有利である。さらに広葉樹の落葉は、窒素含量が高いことが多いく Mikola 1954. p 48)。

根の深さは樹種によって違うから、混交林は風に対する抵抗力が最も強いと思われる。

虫や病気も、混交林では単純林ほどひろがらない。またもし1つの樹種が被害をうけたり、枯死したりするとしても、多くの場合他の樹種で将来林分を形成できる。

最後に針葉樹と広葉樹を混植すると、針葉樹の単純林と違って火災の危険が少くなる。したがって、殆んど同価値の2つまたはそれ以上の樹種が混交している場合には、純林を造成するために努力する必要は全くない。混交林はある程度まで将来の成長を保証し、同時に、林分に樹高の高くなる木をもつことによって収穫量を増加させる。

現在中部欧州においては、混交林の造成に進もうとする強い動きがみられる。Leibundgut (1943. p.148) は、土壌保全のために混植する必要のあることを強調し、また Ryle (1948) は、独乙における単純林礼讃は、主として針葉樹単純林に対する暴風害および虫害の度重なる被害によって消え失せたと報じている。

Ⅷ とりまとめ

1 要約にあたっては、最も新らしい研究成果のみをとりあげた。

2 主として Norway spruce と beech を対象としたが、一部 Scots pine や European fir についても言及した。

3 欧州における間伐の主要な原則は、林分の将来成長を可能な最良のも

のとすることである。

4　このことは自由間伐によるとき最もよく達せられる。これは適当な本数の良木を地域全体にわたってできるだけ均等に残す方法である。

5　間伐の方法を表わす適切な指数は、伐採木の直径と伐採前の直径間の関係、すなわち d/D である。

6　林分密度の最良の尺度は、林分密度指数のように思われる。これは平均幹距と上層高の関係で与えられる。

7　地位の良い場合、樹高成長量に対する間伐の影響は、実際におこなわれている密度の範囲においては僅少である。

8　乾燥した地位の悪いところの *Norway spruce* の樹高成長は、非常に密な林の場合、低下することが知られている。

9　広葉樹では、非常に強度の間伐をすると樹高成長が若干低下することが知られている。

10　一方、直径成長は間伐によって非常に促進され、特に樹幹下部で影響が顕著であって、短期間に肥大する。

11　このため幹の細りが増す。

12　直径成長量は収穫表調製において最も重要な因子であるが、固定標準地資料の回帰分析を使って、種々の密度に対する直径成長を期間を通って予測することが可能である。

13　間伐や密度のほか、直径成長は気候や病害、また結実年によっても影響をうける。

14　断面積成長は、通常密度1～1.5までは促進される。強度間伐では断面積成長が低下する。

15　断面積成長と材積成長との間には直接的な関係がない。残存木の断面積が大きく変ると、断面積成長量が増加しても、材積成長の方は減少することがある（また逆もある）。

16　地位の悪いところで促進効果が現れるという例もあるが、新しい研究においては、間伐によって材積成長が促されるという古い考え方の確証があげられていない。

17　*Norway spruce* の大多数の研究においては、間伐度が増すとともに、成長量が僅かに低下する傾向があり、最も密な林からほぼC度の間伐、すなわち密度指数約1.5に密度をおとすと、総材積成長量は約5％減少する。

18　強度の間伐では、材積成長の減少が大きくなる。D度、つまり密度指数約1.0での減少量は10％に近い。

19　この一般的な傾向に対する例外は、*Scotland* の *Bowmont* の間伐系列試験である。ここではD度間伐が35年での最大収穫を与えるようである。

20　*beech* の総材積生産量は、密度指数1.5～1.0までの間伐では変らないようである。しかし、それ以下になると *Norway spruce* と同じように減少する。

21　成材々積（末口径3インチのところまで）で計算すると、輪伐期の初期の間伐で成長量が増加することが多い。それは測定限界への進級が早くなるからである。

22　輪伐期のあとの方では、弱度間伐プロットでも小径木が測定限界に達するから、総材積と成材々積の差はなくなるか、あっても僅かになる。

23　植栽間隔試験においては、最も密な場合の収穫量が最大である。

24　65年の輪伐期で、11.5フィート間隔のときの生産量は、平均5フィート植えの場合の85％程度と思われる。

25　間伐木、残存木とも、間隔の広いプロットの方がずっと大きい。

26 生きている樹冠の長さは，間伐度が強いほど大きいが，自然淘汰はまた林木の遺伝的な特性でもある。

27 針葉樹では，疎開した林分で作られる材は比重が小さい。広葉樹の場合には，年輪幅が違っても比重にはあまり差がない。

28 間伐したあとは根の残度が増加するが，風に対する抵抗力はそれほどふえないように思われる。

29 間伐した林分は，氷雪害に対して抵抗力を増す。ただし，非常に密な林を間伐したすぐあとはかえって抵抗力が落ちる。

30 間伐すると森林火災の危険が減少する。

31 一般に間伐を実行すると，虫害の危険は少なくなるが，しかし異郷土に植えた場合には，樹種によってあまり強く間伐すると bark beetle の激害を蒙ることがある。樹皮の温度は，疎開林分の方が高くなることがわかった。

32 菌の寄生についても，一般に間伐は予防効果を示すと思われるが，この場合も，異郷土に植栽された樹種を強度に間伐すると激害をうけることがある。

33 長期間についてみれば，間伐によって落葉量に差の生ずることはないが，新鮮な状態の落葉の一部を分解させることによって，地上に還元される力，燐，窒素の量は 50～100% 増加する。

34 間伐すると，普通なら土壌温度が 3～4°F 上昇する。しかし極端な条件のもとでは，この上昇が 6～7°F 以上になることもある。

35 間伐の後，林分が閉鎖する限りにおいては，地上に達する雨量はごく僅かしか増加しない。

36 Denmark と Scandinavia 北部では間伐するとフムスの分解率が増し，無間伐林では分解が遅れる。

37 間伐すると更新のための物理的，生態的条件が改善される。ただし単本が雑樹と競合するような地位のよいところは別である。

38 Scandinavia においては，ほとんどの場合下層林冠は温度の低下を招き，伐採作業の妨げになるから，有害である。しかし広葉樹では樹幹下部に枝の出るのを防ぎ，また土壌条件を良好に保つために下層林冠を残しておく方がよい。

39 粗腐植層が堆積し，成長が衰えている老令の無手入林においては，通常間伐に対する反応が極めて大きい。直径成長，樹高成長とも促進され，間伐後の短い期間では成長量が 3 倍になった例もある。20～30 年後になると，成長量はその地位に相応した水準に落ちつく。

老令の無手入林分の反応は，気温が低く好ましくない気候条件のときに最も著しい。それほど大きくはないが，同様な一時的効果は Switzerland や他でも観察されている。

40 第1回間伐の正しい時期は，林分の初期密度によっても異なるが，通常第1回間伐は上層高が 28～33 フィートに達したときにおこなわねばならない。

41 大部分の収穫表に示されている間伐の間隔は 3～5 年で，地位によって違っている。しかし樹高成長が 7～10 フィートに達するごとに間伐を繰返すことが望ましい。これは若い林では 3～5 年の間隔で，老令林では 10 年あるいはそれ以上に相当している。

42 間伐間隔を延長すると（特に若い林では）各回の間伐を強くしなければならないから，成長量の低下が生ずる。期間中に枯死した木は利用できないから，間隔を 5 年～15 年に延ばすときの収穫量の損失は 12～17% にのぼると推定される。

43 無間伐林で自然枯損のために生ずる損失は，輪伐期中の総材積生産量

の約1/3になると思われる。林を成熟後も伐採しないとすると、この損失は非常に大きなものになる。

44 実際に伐われている間伐に対応させてつくられている収穫表によれば、中庸度間伐の輪伐期中の伐採量は、材積生産量の約50%で、強度間伐においては約60%になる。

林を、たとえば大径木生産のために、平均成長量最大の時点以後まで残そうとすれば、間伐で除去される割合は更に大きくなる。

45 生産目標が、たとえば、用材、パルプ材というように明示されていると間伐が実行しやすくなる。

46 森林法に定められた範囲で経済的な見方を取入れることができる。しかし、全く私的な経済的考慮は、林の将来の成長を損なうおそれがある。これは利率が高いときに特にその傾向が強い。

47 才ノ回間伐の際小径木から利益をあげることは、現在の主要な問題である。いまのところ、これは更新樹の間隔を規制することで一部分充たされている。

48 経済的考慮を僅かに加味した造林的観点からすると、用材生産の最適密度は、1.0～1.5位の密度指数と思われる。パルプ材生産ではこれより少し高い密度、多分1.5～2.0が適当であろう。地位の悪いところ、あるいは陽性樹種については、おそらく少し強度に間伐する方がよいと思われる。

49 介在木が優勢木に伍して成長してゆける場合は比較的少なく、上層林冠を占める木が最も生産能率が高い。すなわち生産量ノ立方フィート当りの針葉量が少くてすむ。したがって収穫量は優勢木と亜優勢木の生産による場合が最大である。

50 混交林が成育するとき、色々な樹種間の関係を規整するため早期に間

伐をおこなう必要がある。

51 地位がどちらの樹種にも適していれば、樹高の高い樹種に陰性樹種を混植すると生産量が増加する。一方陰性樹種に樹高の高くなる樹種を混交させると、ふつう生産量は低下する。

52 混交林はおそらく、風害、虫害、病害などに対する抵抗力が強いものと思われる。

53 針葉樹に広葉樹を交ぜると、フムスの条件が改善され、またある程度森林火災の危険も少なくなると思われる。

Ⅱ. 間伐方式に関係させた収穫予想

（Douglas fir について）

G. C. Warrack

I　断面積および樹高成長量の予測について
— Douglas Fir の間伐方法に関連して —

間伐収穫表は与えられた地位について，特定の間伐方式を適用した場合の結果を表示するものだが，一方現実にはそれらの表示された取扱い方は，経済的変動の圧力によって規則的な実行が不可能になるという欠点をもっている。その上間伐方法の解釈が厳密でないとそれを実際にあてはめる場合に違った方法が適用されることになる。それでここでは計画された間伐方式の期間において，不規則な間隔で適用された実際の間伐方法に一層厳密に成長量を関係づけることのできる改善された予測方法を提示する。このような目的で，断面積と樹高の成長を研究したが，本節ではその理論的な部分を述べることにする。これは十分な吟味と改善を加えれば，実用的かつ有用な予測手段となるであろう。

1　方　　法

この研究の方法は Norway において（Eide and Langsaeter, 1941 および続いて 1957）同令の spruce 林分の Production table を作るのに用いられた方法からヒントを得たものである。中間と最終生産量の連続的な記録を求めるべき地方的間伐試験地の不足（Joergensen 1957 p.22）を解決するため，欧州の研究機関から 49 試験地の経過記録を請い，さらに英国の 11 の収穫表と 11 ケ所の British Columbia の固定試験地の資料を加えた。標準地の年令は 10～68 年にわたっており，また多くは 40 年以上にわたって施業が行なわれている。成長および間伐処理の完全な経過記録を恵与された Prof. Eidmann, Prof. Wiedeman, Prof. Zimmerle, Prof. Mitscherlich および Oberinspektor Otto Breyer（Austria and Germany），M. Huet（Belgiu-

m). Mr. Loevengreen (Denmark), Inspector Schaeffer (France), Dr. Hummel and Mr. Ackers (Great Britain), Prof. Becking (Holland) および Badoux (Switzerland) の各位に感謝申上げる。

送付された標準地資料は、単位も測定も区々であった。記載因子はデータの初まり、プロットの名称、間伐の年月日（ときには年）、本数、平均木の直径（胸高、皮付、通常断面積で表わす）、平均木の樹高、断面積および幹材積（総材積あるいは末口径3インチまでの取引可能材積）であった。あとの5つの測計量はどの試験地の経歴においても"間伐"と"間伐後"にわけて記載されていたが、ごく僅かの標本記録では"間伐前"のデータを別にあげていた。資料の性質が一様でないため、共通の様式で取まとめるのがやっかいであったが、結局全資料をエーカー単位で表わした。

地位指数、密度指数、間伐方法および間伐の強さは次の方法で求めた。

地位指数をきめるため、地位指数曲線のグラフ上に各プロットの上層高の傾向線を書き入れた（Fig. 1）。地位指数は指数の曲線に対する傾向を考えに入れて、最も近い整数値で推定した。地位指数は普通50年で読みとるが、50年に満たないプロットについてはその年令まで傾向線を延長して読んだ。

2つの点で苦心を要した。それは一連の地位曲線を20年以下まで延長することと、上層高を推定することであった。

地位指数曲線は Vancouver Island の Cowichan Lake（B.C. Forest Service）で伐倒した45年の伐採木の連年成長量の測定値にもとづき、2～55年までの成長量を組合せて3つの地位指数110, 130, 170を代表するように調整した全体的な平均曲線で決定した。他の地位の連年成長量も年令にかかわりなく、主曲線の上下同じパーセントの位置

にあるという仮定を検討したところ、正しくないことがわかった（それは幼令の場合変動係数が非常に大きかったためである（Fig. 3））ので曲線群（Fig. 1）の位置つけにおいては必要な修正をほどこした（Bruce & Schumacher, 1950）。全プロットの土壌別の年令対樹高曲線の分類は不可能だったが、基準曲線（Fig.）の形は古い Valley terrace や氷河堆積物から導びかれた土壌に生育する Douglas fir の修正された地位曲線（Carmean, 1956, Fig.）と非常によく似ている。

上層高は普通エーカー当り100本の最大木の平均樹高とした。この実際の値が記録されているのは英国の収穫表、オランダ、British Columbia の全標本およびドイツの標本である。残りは間伐後の平均木の樹高に5フィートを加えて上層高に換算した。この5フィートの出てきた意味は次の通りである。pacific N.W. の手を入れない林分での優勢木と非優勢木の平均高と優勢木の樹高との線型回帰（Steabler, 1948）および Fig. 4 は有用な手掛りを与える。この関係は回帰直線の差以下の違いを読みとるために修正しなければならないことがわかった。というのは間伐した林分では優勢木級に属する林木の割合は間伐方法によって異なるからである。実際の関係をプロットすると（Fig. 4）、上層高が30～120フィートの範囲では傾向は回帰線から規則的に僅かの差しか示しておらず、平均するとその大きさは一様に約5フィートであった。上層高を推定するため、平均樹高に一様に5フィートを加えるという任意的な方法を採用するに当って、オランダの標準地資料から12の平均樹高をランダムに選んで、それらの平均樹高＋5フィートの値に対してプロットした（Fig. 4）。プロットした値（＋印で示してある）は殆んど直線上にのっているから、平均的に5フィートを加えた傾向線は採用してよいと思われる。オランダの処理を選んだのは、それらが上層間伐（若い林で採用されると思われる）

を行なった後の平均木の樹高を表しているからである。

全標本プロットについて最も近い密度指数を読みとり、各間伐度の林分密度指数を求めた（Fig.5）。この図は第11回のI.U.F.R.Oの会議での提案（Hummel 1954）を採用したもの（Braathe, 1957 P.7. Table 1）で、樹木間隔（正方形配置）÷上層高＝20%のときの密度指数を1とし、これを規準指数とよぶ。本研究でこの指数を用いたのは、分析している間伐方式を比較するためである。ここで規準指数によって示された密度水準のフレの大きさを2、3の例で示しておく（Fig.6）。これは特に60～80フィートの樹高範囲および地位の良好なところで著しいように思われる。

間伐方法を表わすため、各間伐ごとにd/D（D＝間伐前の平均直径、d＝間伐木の平均直径）を計算した。これを計量的な指数とすると、次のように間伐のタイプを分類できる（Joergensen, 1957 P.16）。

0.65以下	改良伐（cleaning または improvement cutting）
0.65～0.75	下層間伐（low thinning）
0.75～0.90	強度の下層間伐～弱度の上層間伐（Crown thinning）
0.90～1.00	強度の上層間伐
1.00以上	択伐的間伐（selection thinning）

密度指数と組合せると、この比から次々の期間における方法適用の一貫性と強さが示せるから、過去の間伐試験のようにルーズな間伐方法の定義を用いるという誤った考えを正すことになる。代表的な試験地経歴をみると、次々の伐採間でこの比が変動していることがわかる（Fig.7）。これは計画され間伐方法（Heibrg et al. 1955）そのままの傾向線－38を除き、樹高が高くなると0.9あるいはそれ以上になる傾向がある。

間伐度（thinning degree）は公式（Eide and Langsaeter, 1941）から導いた。これは間伐時点で次のように計算した。

$$\text{間伐度} = \sqrt{\frac{100\{(b.a.)\div 2\}+(b.a.)_1+\{(b.a.)_2\div 2\}}{B.A.}}$$

(b.a.)＝今回の間伐木断面積

$(b.a.)_1$＝前々回の間伐木断面積

$(b.a.)_2$＝前回の　〃

B.A.＝今回の間伐前の断面積

函数$(b.a.)_1$と$(b.a.)_2$とは2ないし3回の間伐がおこなわれて、公式に0でない値が代入できるようになるまで無視する。

間伐間隔は間伐の間の年数が2～12の間で変化するとき、断面積成長率（Presseler の公式による）推定のための可能な修正係数として綿密な検討の対象となってくる。間伐間隔に対する断面積成長率の回帰を求めるため190個の間伐間隔を用いたが、その平均値は4.3年となった（Fig.8）。7～12年の間には負の傾向を示す比較的少数の点しかなかったが、これらの観測値の影響力は統計的に有意でないことがわかったから、2～6年の間では期間の長さで修正を加えてもさして利益がないことが明らかである。したがって間伐間隔は引続く分析では修正因子から除外した。

このような行動をとるについては一層の証明が必要と思われる。

解放の程度（間伐度）によってもたらされる樹冠の拡張のために、開放の持続期間（間伐間隔）の影響を分離することは困難である。回帰が有意にならなかったことは、間伐計画実行の過程では間伐間隔が知らず知らずの間に断面積の水準、個々の間伐の強さおよび間伐方法などの変動を補償する手段になっていることも一つの理由ではなかろうか。同様に7～12年の間の9個の点（Fig.8）は地位下に設定された標準地のものくS.1.

Table 1　断面積成長量の相関分析（P.B.A. > 25）

	X_1 = 年令	$X_2 = 100/\sqrt{B.A.a}$	$X_3 = 100/D_a$	$X_4 = H_{50}$	X_5 = T.D	$X_6 = d/D$	X_7 = D.I.	$\bar{S}$ %	R	a
1	−0.07222**	+0.79071**	+0.09991*	+0.01249**	−0.00469 n.s.	+5.76852**	+0.14143	20.09	0.8949	−6.53089
2	−0.06776**	+0.71009**	+0.12210**	+0.01585*	+0.00969 n.s.	+5.41560**		20.04	0.8949	−6.15695
3	−0.06794**	+0.71282**	+0.12092**	+0.01575**		+5.44303**		19.96	0.8946	−6.12455
4	−0.10776**	+0.79139**		+0.00650**		+4.0586**		20.1	0.8927	−2.42886
5	−0.10987**	+0.75241**				+3.95575**		20.96	0.8823	−0.68468
6		+1.04471	+0.25566	+0.07439				21.1	0.8809	−14.39057
7		+0.64913	+0.24111			+5.76142		22.6	0.8619	−8.32766
8	−0.08817	+0.80721	+0.03786					22.6	0.8618	+0.73878
9	−0.10318	+0.80851			+0.06555			22.6	0.8611	+0.14409
10	−0.10130	+0.82817		−0.00192				22.7	0.8603	+1.70919
11	−0.11224	+0.65104				−2.13470	−0.38804	22.6	0.8597	+5.81085
12	−0.10573	+0.74347						23.5	0.8480	+2.37731
13			+0.33661		−0.09086	+3.30375	−0.81457	23.9	0.8461	−0.27180
14	−0.03927**		+0.17225**	−0.01561*		+6.51042**		22.7	0.8425	+2.00476
15	−0.14871**					+3.19640**	−0.47527**	22.9	0.8232	+8.36067
16		+0.77254	+0.17964		+0.13003			25.2	0.8225	−4.85397
17		+0.84197	+0.18733					25.2	0.8216	−4.65582
18		+2.04331		−0.20379		+1.09189	−0.40738	25.7	0.8159	+7.79080

注）空欄は検定をおこなわなかったところである。** 1%水準で有意。　* 5%水準で有意。　n.s. 有意でないことを示す。

80～114）であって，間伐間隔に無関係に成長量が少ない条件にある。

断面積成長量の予測に関する分析は連年の断面積成長率を190個の間伐間隔に対する年令，間伐後の断面積，間伐後の平均直径，地位指数，密度指数，d/D比について取まとめることから始めた。次に期間の隔りの年令によって25年以上と25年未満の2つの年令級に分割した。このようにしたのは，層化しないと，若い年令級では散らばりが大きくなり，また年令に対する断面積成長率の線型回帰の弯曲が強くなったからである。それで2つの組について別々の相関分析を行なった。年令の高い組についてはまず2因子の回帰から始めて，3，4，5，6，7の因子の組合せを含む重相関分析まで進めた。これらの組合せの各々は公式として表わし，また予測機構（メカニズム）としての効率を統計的に評価した。年令の高い組のデータの分析を通じてえた経験が役立って若い組の成長を予測するための簡単な公式が非常に迅速に求められた。すなわち3因子の組を1つずつ検討を加えただけでそれを採用した。

すべての分析において，問題の解は重相関によった。線型に直すためデータに直線があてはまるような函数に因子を変換した。たとえば間伐後の断面積と平均直径は函数 $100/\sqrt{B.A.a}$ と $100/Da$ に変えた。一方25年未満のグループでは年令を（100/年令）^{2}とし，d/Dの因子は二乗して（d/D）^{2}とした。標準的参考文献は Bruce と Reineke（1931）の著書であるが，一番多く用いた記号は下表の通りである。

a	公式の常数
B.A.a	間伐後の平均断面積
d/D	間伐木の平均直径／間伐前の平均直径
Da	間伐後の平均直径
H	D.B.H.の成長量1インチ当りの樹高成長量

H_{50}	地位指数
h/H	間伐木平均樹高／間伐後に残される木の平均樹高
P.B.A＞25	25年生以上の林の断面積成長率
P.B.A＜25	25年生未満の　〃
R	重相関係数
$\bar{S}$	推定値の標準誤差
T.D	間伐度

2 結　果

断面積成長率（記号 P.B.A＞25）

分析の目的は，間伐後の断面積が90～200平方フィート以上で，d/D比が0.7～1.1の間にあるとき，妥当な精度で連年成長量を補正できる1つ以上の公式を導くことであった。P.B.A＞25と7つの独立変数の関係を細かく検討してみると，P.B.A＞25は年令，地位（H_{50}）および間伐後の断面積および直径と良好な相関を示すが，間伐度（T.D.），間伐方法（d/D）や林分密度指数（D.I.）などはあまりはっきりした効果を示さず，特にT.D.においてそうであった。しかしすべての因子がどのように作用しているかがわからなかったので，このあと統計的評価からこれらを棄却できる可能性は重相関分析においてあまり期待できなかった。

プロットされた5つの因子の平均値は非常にきれいな直線関係を示したが，B.A.a と Da は曲線性を修正するため，それぞれ $100/\sqrt{B.A.a}$ と $100/Da$ とに変換した。

これらの個々の因子とP.B.Aとの偏回帰（Fig.7）および因子の実験的な組合せの結果（才1表）はこの分析の手掛りを提供する。27種類の実験式を試みたが，表にはその中の18個だけをあげてある。除外した式の

相関係数は0.68～0.81の間にあった。表示した公式について、重相関係数(R)、推定値の標準誤差のパーセント(S̄)、見込みのある公式の数つかについては個々の係数の有意性と常数の"a"を示してある。7つの公式(才1表の公式1～5、14と15)は他の方法で再計算した。

断面積成長率(記号 P.B.A<25)

この目的は限られた10～25年の年令群について、P.B.A.<25を予測するための公式を求めることであった。標本は最終的には3つの因子、d/D、B.A.a および年令によって配列した。線型にするため、これらの因子を函数 $(d/D)^2$、$100/\sqrt{B.A.a}$ および $(100/年令)^2$ に変換し、P.B.A<25に対する偏回帰をそれぞれ計算した(Fig.10)。P.B.Aとの個々の相関($(d/D)^2$ と +0.6281、$100/\sqrt{B.A.a}$ と +0.5785、$(100/年令)^2$ と 0.7358)、および $(100/年令)^2$ と $100/\sqrt{B.A.a}$ の間の相関(+0.3861)および $(100/年令)^2$ と $(d/D)^2$ の間の相関(+0.2310)から、すべての函数を組合せると高い相関がえられると考えられた。その結果重相関係数は0.9240に増加し、推定値の標準誤差は11.77%になった。また分散分析によって因子の和(組合せ)の回帰は極めて有意なことが証明された。それで目的が達せられたと思われるので、次のような公式を導いた。

$$P.B.A.<25 = +6.0209\,(d/D)^2 - 0.9706\,(100/\sqrt{B.A.a}) + 0.1305\,(100/年令)^2 - 8.1516$$

当然ながら同一断面積水準、同一d/D比については、P.B.A<25の値は年令の高いグループより大きくなった。これは高令級の予測には別の公式を導く必要があることを証明している。

この公式と才1表にあげた式とを共通の年令域23±2年のところで結合するという試みは特にしなかった。この範囲の観測値はまた25年以上のグループの分析でも一緒になっているから、ある程度の関連をもつこと

が予想される。この程度を表わすため、年令の高いグループの線型回帰(Fig.10.1の破線)を年令因子について若いグループの平均値(Fig.10.1の0と実線)に対してプロットした。この因子はそれだけで二つのグループの変動の55.80%と54.14%を説明する。さらに推定値の類似していることは、例えば、年令25、断面積90、d/D=0.8なる値を才1表の5式と25年グループに対するこの公式に代入して計算すると、P.B.A>25とP.B.A<25の断面積成長率がそれぞれ7.67%と8.03%となることからもわかる。

平均木の樹高成長量

間伐後の平均樹高の増加は"真の(true)"、"見かけの(false)"および"間接の(indirect)"増加の混合したものである。"真の増加"は2回の引続く間伐の間に生ずるもので"見かけ"の増加は平均樹高が通例間伐木の伐採後算術的な意味で増加することによるものである。間接的な影響は樹冠の活力についての林木の割合が変化することから生ずる。大きい木は小さい木よりも平均して樹勢が強いと仮定すれば、d/Dは任意の間伐におけるこの割合いを大まかに表現するといえる。"真の増加"と"間接的な"影響の結合したものおよび"見かけの"増加そのものは、二つの公式によって修正できると考えられたので、以下の分析ではこの点について考えることにする。

d/Dで表わした"真の"樹高成長と"間接"的効果

200個の期間の中央の年令に対して樹高の連年成長量を3つの地位級ごとにプロットし、各々の地位級についてフリーハンドで平滑な曲線を画いた。しかし地位曲線の平均値間の連年成長量の差は非常に小さく、45年以上まで統計的に有意でないと考えられたので、この方法による予測は採用できない。もう一つの方法として、DBHの平均成長量/インチ当り

の樹高の間隔（interval）を99個の観測値から求めた。それでもデータのバラツキが相当残っていたが，期間の初めにおける直径（胸高，皮付）d/D 比，D.I 比によって標本を層化したところ相関係数が0.738に，推定値の誤差率は39%になった。そうして分散分析からこれらの因子の組合わされた効果は有意であることが統計的に確かめられた。これらの因子と樹高成長量（$H\Delta$）との偏回帰（Fig. 11）は $H\Delta$ と Da との関係に明瞭な曲線的傾向の存在することを示している（Fig. 11. 2）。Da を比較的簡単な $1/D$，$1/D^2$，$1/\sqrt{D}$ のような函数に変換してもこの線型関係はあまり改善できそうになかったので，直径範囲2～14インチの間では直線関係で十分な推定値がえられ，また14インチ以上の推定値は最大の17インチの上限まで3フィートで一定と推論した。

D.B.H の1インチ当り平均樹高成長の予測に適当なものとして誘導した公式は，

$$H\Delta = -0.4533\,Da - 8.7067\,d/D - 0.9072\,D.I + 19.8263$$

である。

見かけの樹高成長量

樹高成長量を分析する第2段階の目的は，3つの独立変数 d/D，$(d/D)^2$ および年令を用いて，h/H 比の125個の値を修正することにより，見かけの成長量を考慮に入れることである（Fig. 12）。Fig. 12・1 の平均点の位置から強い曲線的傾向がうかがわれるので，直線による予測を改善するため函数 $(d/D)^2$ を加えた。3因子との相関係数は0.8561で $\bar{5}$ は5.8%であった。分散分析によりこの重回帰は t_{01} 水準で有意なことが示された。誘導した公式は，

$$h/H = -0.0351 + 1.6004\,d/D - 0.6078\,(d/D)^2 + 0.0010\,(Age)$$

である。

3 考　察

第1表の各公式について

公式はすべて良好な予測の機能を示していると考えられる。まず予測を最も正確に修正する公式3を検討する。明らかに X_5（T.D）を6番目，X_7（D.I）を7番目の変数として含めても R の値は少ししか大きくならない。それによって1ないし2の自由度が犠牲にされるから推定値の精度が少し落ち，したがって公式3は理論的に最良といえるだろう。しかし他の公式，たとえば5，6，12などは単純なので，予測のためにはずっと使い易く，R の値も比較的高くて推定値の精度の低下も僅かである。この点では公式5が実用と理論の両面をかね備えていて良いと思われる。この公式に含まれている3つの因子の中，年令と断面積を組合せたもの（12式）は良好な予測を与えるが，d/D を加えると推定値の改善に特に有効でないようである。d/D は実際に適用するのが簡単だから，この因子が強い影響力をもつことを確認できたことは有益である。理論的にはこの比は1本の伐採だけでも，また殆んどの木を伐採したときでも数値的に表現されるから，この適用は D.I や T.D あるいは断面積などの間伐度の因子が含まれていないときに敏感に作用するはずである。

H_{50} というのは地位の影響を表わす因子である。この公式は1～4では推定値に有意な寄与を示したが，その実際の利益を考えると予測のための不可欠の函数とは考えられない。

1～2の公式で T.D が有意にならなかったのは，ここで分析したような間伐の強さ（intensity）の範囲内では，T.D の決定に用いた式からみて連年成長率との間に相関がないのだと解釈できる。

函数 $100/\sqrt{BA.a}$ は D.I. の場合でも同じだが，ある程度直径成長に対する密度の影響を表わしている。しかしこれらの試算において，5および15

式から証明されるように、推定値の精度は $100/\sqrt{B.A.a}$ を含めた場合に高くなっているから、なぜ1式でD.Iの因子が有意でなくなっているかの説明が一部分与えられたことになる。

しかし才1表の結果を最終的に解釈する場合、その最大の利点は、予測の効率において僅かの差しかない18通りの実験式が与えられ、その中から各構成函数を使用者の希望通りに選択できるようにしたことである。

間伐方式による断面積成長量の比較

実際の取扱い（operation）において間伐方式の適用が首尾一貫した形で行なわれることは稀である。幾つかの取扱い（operation）によって蓄積（growing stock）が色々な水準にあることが多いから、間伐表（thinning table）の指示と異なる収穫量の予測が要求される。このため才1表の公式5のような柔軟性のある予測手続きが特に有利となる。これらは、林分構造や既往の取扱いが異状なものでなければ任意の年令における現在値を代入して、採用された間伐方法によったときの予想される収穫量を一目で与えることができる。期間のはじめにおける年令、断面積および d/D の値を5式に代入することによって、3つの間伐方法——択伐的間伐、上層間伐、および下層間伐に対して予想される成長量を比較することが可能である。実際には d/D 比は高、低の値の間で次々に振動すると思われるし、また連続的に経営された同令林では、高令級になると択伐的間伐を弱度の上層間伐におきかえなければならない。しかし次の説明は Fig 13 に示した結果にもとづくものである。

100年の輪伐期（rotation）の最初の半分で択伐的間伐をおこなうと、断面積の将来の絶対成長量が最大になる可能性（potential）がある。この可能性は年令とともに小さくなるから、130平方フィートの一定断面積の場合、下層間伐に対比した成長量の増は20、40、60年でそれ

ぞれ20.6、19.4、および11.1%である。例示したような上層間伐（$d/D=0.98$）も大体13.8、11.3、および8.3%位成長量が多くなる。

年令60年においては90～130平方フィートにわたって絶対成長量が低下しない範囲がある。この範囲の外では土地生産力の完全な利用が行なわれないので損である。下層間伐によれば年令40年のとき、損失を止めるには170平方フィートの水準が必要だが、経営林で予想される110～140平方フィートの断面積水準では年間の損失は0.4平方フィートである。強度の間伐方式の場合には同じ密度でこの損失は平方フィート当り0.1～0.2位増加する。択伐的間伐と上層間伐の成長量が大きくなることは、この方法が残存林分の直径分配に与える影響によって説明がつけられる。Eide と Langsaeter の方程式の変換を論じて、Braathe（1957 p.32）は"この方程式はある断面においては、胸高における形成層が最大のときに断面積成長が最大となることを意味しているが、これは小径木からなる林は大径木の林より（断面積が同じなら）断面積成長が大きいということである"と述べている。それですべてのクラスから、伐採木をとるような方法は伐採木を多数の小径木に限定する下層間伐より成長量を増加させる道をひらく。20個の非常に強度の上層間伐の標本と択伐的間伐の1例を含めたデータにもとづく分析は、この主張を立証しているように思われる。

樹高成長量の分析の結果

これは胸高直径成長量1インチ当りの樹高成長量であって、d/D 比に関連する樹高成長量そのものでないことに注意すべきである。d/D の値の変化で影響されるのは樹高成長量だけではないが、回帰の急激な低下（Fig 11.1）、特に優勢木が伐採木の主要な部分を占めるとき、d/D 比が1.0以上のところまで外挿しようとすると、そのような関係に著しい低下が生

することに注意しなければならない。極端な上層間伐では大部分の活力旺盛な木を、HΔの"間接的"な成分をマイナスにする点まで伐採してしまうだろう。Fig. 11.1 と 11.3 を論評して Dr. Braathe は"私はデータに内部相関があると推測する。……1インチの直径あたりのHΔを表わすことは、その結果がHΔとDΔの両方に依存することから、DΔが密度に非常に敏感なことが実験的にわかっているので危険であるくしたがってこの傾回帰（Fig. 12.1）は d/D とHΔの間の関係でなく別のものを表現しているのではないかという危惧がある。私は d/D が大きい（0.8～0.9）のは多くの場合強度の間伐を意味していると思う。大きい木を間伐すると小さい木を伐った場合より孔（ギャップ）が大きくなって、より疎開した林になるのが普通だから…… 直径成長は促進されるが、一方HΔについてはこのような刺戟を与えないのが普通だから、その結果1インチ直径あたりのHΔが低下することになる。

"Fig. 12.3 の曲線はおそらくHΔとD.I.の間の真の関係を表わしていない。もしそうならこの知見は重要なものである。真線の傾斜はこの場合も但密度のため直径成長が促進されたことによるもので…… ここに地位が入ってくる。密度の低い林は（Fig. 8）その大部分が地位下だから、1インチ直径あたりで表現されていても、これが多分密度が低いときにHΔが低くなるという一つの理由なのだろう。"

明らかに Fig. 12 の解釈は"なぞ解き"と同じである。これは基礎的なデータがないため、現在利用できる樹高成長の記録を"間接"効果に関して補正できないことからそう思われるのであるくそのような修正を目論むことはできないだろう。というのは間伐に先立つ期間において、各直径級で測定した間伐木のHΔがわからなかったので、同じ期間の同じ直径級の全林木のHΔと比較できなかったからである。この比較をしないと、間伐

木と残存木の間の活力の関係については何も導くことができない。したがって"間接効果"をはっきり分離できなかったので、樹高成長に対する間伐の直接効果を正確に評価できなくなった。それで実際に使える予測方法を導く手段としての一時的な有用性を暗示する以上の Fig. 11 の検討はもとの分析の目的をこえている。

4 公式の応用

プロット 204/5 の 39 年および 44 年のデータ（第2表）を用いて、予測の際のこの公式の応用法を説明する。同じ d/D、間伐間隔および間伐の強さ（伐採木断面積のパーセント）を公式に使った。

見やすくするため、これらの公式に番号をつけておく。

I　年あたり断面積成長率（%）＞25年

II　〃　〃　＜25年

III　D.B.H 1インチ当り樹高成長

IV　h/H 比

Table. 2　Plot 204/5 に対する実測値と予測値

年令	上層高	地位指数	密度指数	d/D		本数	胸高直径（観測）	平均樹高	断面積	
39	85	150	2.00	0.83	間伐後	287	9.1	82	130	実測
					間伐前	287	9.9	88	153	〃
					間伐	117	9.0	84	52	〃
44	93	160	1.50	0.91	間伐後					
					間伐前	287	10.3	90	166	予測
					間伐	116	9.4	87	56	〃
44	96	160	1.50	0.91	間伐後	171	10.9	91	110	〃

予測値は実際の値の下に記入してある（第2表）。

1　期間の終りにおける断面積の推定には

a）公式Ⅰ（第1表の5式）に必要な数値を代入する。たとえばこの場合

期間の始めの断面積　＝　130

年　令　＝　37

d/D 比　＝　0.83

で断面積連年成長率（P）を求める（P＝4.9261）。

b）Pの値を次式に代入する。

期間の終りの断面積

$$= \frac{(200 + P \times \text{期間年数})\ \text{最初の断面積}}{200 - P \times \text{期間年数}}$$

2　平均直径の予測（B.H.）には

計算した断面積を期間のはじめの本数で割る（間伐林では短期間なら自然枯損は生じないと仮定する）。

3　期間の終りにおける平均木の樹高を推定するには

a）公式Ⅲに9.1"（期間の始めの直径）、0.83（d/D 比）と20（D.B.H.）を代入してD.B.H.1インチ当りの樹高成長量を求める。

b）予測した直径成長量によって（これは1インチ以下かもしれないし以上かもしれない）樹高成長量を補正する。

c）期間の始めの平均木樹高に成長量を加える。

4　適用すべき間伐方法を表示する d/D 比を用いて、間伐木の平均直径を予測する。

この場合には

10.3" × 0.91 ＝ 9.4"

5　立木の断面積に（任意の）比率を乗じて間伐木の断面積の大きさを推

定する。

たとえば　166 の 34% ＝ 56.4

6　間伐木の断面積を間伐木の平均断面積で除して間伐木本数を求める。

7　残存木の本数と断面積を引算で求め、断面積を本数でわって間伐後の平均直径を求める。

8　間伐後の平均木の樹高を推定するには

a）公式Ⅳに0.91（d/D 比）、44（年令）という値を代入して h/H 比を計算する。

b）次式に代入して間伐後の樹高を計算する。

$$H = \frac{\text{間伐前の平均樹高} \times \text{間伐前の断面積}}{\text{間伐後の断面積} + \text{間伐木断面積} \times h/H}$$

9　Hに h/H 比を適用して間伐木の平均樹高を求める。

10　間伐後の平均樹高に5フィートを加え、年令対上層高のグラフから（Fig.1）地位指数を読みとる。

11　上層高対残存木本数の関係のグラフから密度指数を求める。

この手続きを一連の間伐間隔、方法および強さに対して反復することにより、長期的な方式の計算が可能で、試行錯誤の過程から与えられた輪伐期のもとにおいて、特定の平均直径の木を作り出すのに必要な本数減少のスケジュールができ上るまで修正してゆく。

一方そのような予測は造林経営の計画においては価値が少なく、予測は材積生産量、特に取引可能材積の予測がなければ不完全である。このための方法および2つの計算された間伐方式間の材積生産量の比較は次節の主題である。

5 要　約

British Columbia には長期にわたる間伐試験地の測定結果が少ないため，間伐収穫表の作成が困難である。経営されている未熟林分の収穫量の推定方法を見出す目的で信頼できる測定結果をイギリスおよび欧州大陸の研究機関から譲りうけ，British Columbia の7つの間伐試験地のデータとこみにして検討を加えた。分析に先立って，色々な出所からのデータをインチおよびエーカー当りフィートに基準化し，地位指数，密度指数，間伐度および間伐方法に対して求めた表現方法で分類した。分析を通じて，間伐方法に関連させたく（これは d/D 比によって計量的に定義した）断面積成長量の予測を主としく詳細に分析した。

この特別の研究の結果から，年令 10～60年の同令林分の断面積成長量について，次のような結論が導かれた。統計的な判定から，25年以上の林の連年断面積成長率について，18個の公式が十分な予測手段となることがわかった。これらの中，第1表の第5式は実用と理論の両方のバランスが最もよくとれている。相関係数 0.8823 と推定値の標準誤差 20.96% がこの式から予想さるべき精度の域を表わしている。公式の中の色々な因子の組合せ，あるいはそれらの代表的函数は，年令と間伐後の断面積が推定値の補正に最も重要な寄与をなしており，また他の2つの因子はそれ以上の変動の意味ある（$t = 0.01$）説明に役立っていることを示している。これら2つの因子の中 d/D 比が予測の改善に最も役立っており，H_{50} はその影響を無視できる位の二次的な重要度しかもたない。25年未満の林分においては連年断面積成長率の正確な推定値が，年令，間伐後の断面積および d/D 比の組合せでえられ，これによって変動の 85% が説明される。

択伐的間伐，強度の上層間伐，下層間伐法を表わす断面積と d/D 比を用いて断面積成長量の絶対値を比較したところ，第1番目の方式の成長量が

大きいことが指摘された。同様に最良の収穫は間伐後の断面積を最大にしたときにえられ，20～40年の間では 170 平方フィート以下のところで収穫の損失が予想される。これらの損失は 60 年まで年令とともに減少するが，出発水準 90～130 平方フィート間における間伐方式間の差は小で，ほとんど一定水準のままである。

林令および地位指数に対する樹高の連年成長量は散らばりが大きく，平滑化した平均曲線ではそれを推定できなかった。これより優れた推定方法は，間伐の間における直径成長量インチ当りの樹高の回帰によるものであった。しかしこの樹高成長量の直径，d/D 比，あるいは D.I. などの因子に対する相関は，全変動の 54% 以上とはならず，推定値の標準誤差は 39% であった。

h/H の比は d/D 比と年令を組合せた適当な公式で修正した。これら二つの因子の中，直径比の方が補正に重要であって，函数 $(d/D)^2$ は著しい曲線性を除去し，許容可能な限界内での直線関係を保つために加えなければならない。

各プロットは色々な間伐処理を示しているが，大部分は過去 50 年間ヨーロッパで取扱われてきた標準地にみられる蓄積水準，程度の間伐，長伐期に結びついた成長率を反影している。したがってこれらの予測方式（これはそのようなプロットの平均と考えられる）は古い時代の間伐スケジュールに属すると考えられる。確かにこれらは，たとえば南アフリカの Pinus spp などに適用されているような非常に早期の強い間伐に対する予測には正確にあてはまると思えない。しかし，これは 20～60 年で間伐が望まれているような Douglas fir の二次林，あるいは植栽林に対して，はっきりとした適用の場をもつと信ぜられる。

II　立木蓄積（Cubic volume）の決定と二つの間伐方式の計算

前節では断面積成長率とD.B.H.1インチ当り樹高成長量の予測公式を論じた。この節では研究の次の段階を述べる。まずCubic foot volumeの予測方法を概観した。次に前に述べた予測手段とともにこの方法を用いて2つの間伐方式を展開する。これらの仮設的方式は提案というよりむしろ模範的なものとして[1]述べるのであるが、しかしこれらは実際の林の取扱いとして全く容易に実行できるものである。それで、このスケジュールの比較から、"遅らせた場合"対"早期の"林分処理によってもたらされる生産量やrotation（輪伐期）などの予想される差についてはっきりした認識がえられる。この研究は色々な間伐方式に対するそのような情報を求めるのだから、経営林の中間および最終収穫を推定する有効かつ単一の推定手段を求めることが必要であろう。

1　材積の決定

British Columbiaにおいて、そのような取扱いが一貫してとられるようになったとき、好ましい形式として影響を与えそうに考えられる間伐方式を採用している標準地のデータから、（皮付）全材積と上部直径3インチまでの（皮付）取引可能材積を示すform-factorの傾向線をフリーハンドで画いた（Fig.14）。上の曲線は平均木の材積（皮付）を計算するためのもので、上と下の曲線の位置は取引可能材積の全材form-factorに対する比を平均直径に対して画いたものである。この率をエーカー当り（皮付）材積に対して適用することにより、上部直径3インチまでの取引可能材積（皮付）を求めることができる（Fig.15）。

1）林業家は間伐の方法や間隔、強さなどを経営目的にあてはまる様におきかえることができる。

皮内材積を求めるため、樹皮率を一定として14%にみた。[2] 下側の傾向線（Fig.15）はD.B.H.7インチ以上の林木の上部直径6インチまでの取引可能材積（皮内）を推定するための全材積（皮内）に対する100分率を表わす（Annual Report of B.C. Forest Service p.18. Table. 1948）。これらのグラフによって、平均直径に対応するform factorを読みとり（Fig.14）。次に（本数×平均直径（平方フィート）×平均高×form factor）－（この材積の14%の樹皮）によって全材積が計算できる。それから全材積に対する率を用いて（Fig.15）取引可能材積を求めれば材積収穫の予測が完了する。

2　計算した2つの間伐方式

ここにおいて本節で説明した4つの公式、4つのグラフおよび2つの常数を全部使って、2つの対照的な間伐方式を説明することができる。すなわち、第一回間伐を更新後（a）29年、（b）14年に行なった場合である。公式の基本的な成分に対する成長データをB.C. Cowichan lakeのForest experiment Stationにおける未経営林と経営林とからとり、10回と8回の間伐繰返し期間における予測の結果をスケジュールA、Bとしてそれぞれ第3表、第4表に示した。

3　考　察

スケジュールAが林令29年に開始されるまでの単木の記録からエーカー当り100本の最大木の平均的直径成長が1インチ当り7年であることがわかった。したがって、仮定された目標を経営されている標準地にあて

2）Vancouver Islandで伐倒した144本の木の他の分析から、平均木の直径（B.H.o.b.）と地位指数は樹皮材積予測の修正因子として重要でないことが確かめられた。

Table 3 スケジュールA. *Douglas fir*, 地位指数150

（エーカー当りのプロットデータは29年生のときの実測値を使い、その後は予測した）

年令	d/D	上層高（フィート）	密度指数	形数		本数	平均直径（インチ）	平均樹高（フィート）	断面積（平方フィート）	材積（立方フィート）取引可能	材積（立方フィート）全	年当り成長量（立方フィート）
29	0.80			—	間伐前	1.150	5.1	58	166	3560	4430	
				0.55	間伐	310	4.1	50	28	490	710	
		65	3.00	0.53	間伐後	840	5.5	60	138	3070	3720	
												310
34	0.84			0.52	間伐前	840	6.3	66	179	4620	5370	
				0.53	間伐	313	5.3	62	48	1100	1355	
		73	2.50	0.51	間伐後	527	6.9	68	131	3520	4015	
												270
37	0.88			0.50	間伐前	527	7.4	72	159	4330	4870	
				0.51	間伐	104	6.5	68	24	620	715	
		78	2.25	0.50	間伐後	423	7.6	73	135	3710	4165	
												333
40	0.80			0.48	間伐前	423	8.3	78	155	4710	5120	
				0.51	間伐	101	6.6	71	24	650	750	
		84	2.00	0.48	間伐後	322	8.7	79	134	4060	4370	
												313
43	0.82			0.48	間伐前	322	9.4	84	154	5000	5380	
				0.50	間伐	90	7.7	77	29	860	960	
		90	1.75	0.47	間伐後	232	9.9	85	125	4140	4420	
												253
46	0.91			0.47	間伐前	232	10.6	90	143	4900	5165	
				0.48	間伐	28	9.6	87	14	465	500	
		95	1.75	0.46	間伐後	204	10.8	90	129	4435	4665	
												244

はめると、1インチ当り平均して7年の割合で一様に成長している100本の木は間伐の結果として70年における林分を構成することとなる。全スケジュールについて予測を完了（第3表）すると理論的にこの目標が達成できることが計算できる[3]。これを実現するには、主として上層間伐を普通には3年の間隔で引続き適用して、28年間に提案された標準密度の1.25倍まで本数を減少させなければならない（Fig.5）。この期間の間に、エーカー当りの連年成長量に等しいか、あるいはそれより若干多い量の断面積を各期間の終りで伐倒しなければならないだろう。57年後には材積連年成長量が最良の幹型の木の形で累積される。材積で表わした連年成長量は平均して約258立方フィートで、途中の収穫量は粗生産量（*gross production*）の51.5%に達するだろう。取引可能材積でいえば、300～1,100立方フィートが各間伐において期待される。

間伐木本数の2/3～1/2はおそらく現在の利用基準の下では取引上副次的（*Sub-merchantable*）となる。これに反して

3) 6は根株と胸高との間の年令とみた。

年令	d/D	上層高（フィート）	強度抵抗	形数		本数	平均直径（インチ）	平均樹高（フィート）	樹冠幅（フィート）
50	0.86			0.45	間伐前	204	11.8	95	154
				0.47	間伐	45	10.1	92	25
		100	1.50	0.45	間伐後	159	12.2	95	129
52	0.91			0.45	間伐前	159	12.7	98	139
				0.46	間伐	14	11.5	95	10
		103	1.50	0.45	間伐後	145	12.8	98	129
57	0.98			0.44	間伐前	145	14.1	104	157
				0.44	間伐	25	13.8	104	26
		109	1.25	0.44	間伐後	120	14.2	104	131
63	0.98			0.43	間伐前	120	15.7	110	161
				0.43	間伐	9	15.4	110	12
		115	1.25	0.43	間伐後	111	15.7	110	149
70	0.90			0.42	間伐前	111	17.1	114	175
				0.43	間伐	11	15.4	112	14
		119	1.25	0.42	間伐後	100	17.2	114	162

同一年令で d/D 比が 1.0 をこえる，より軽度の間伐を頻繁におこなうと，初期の間伐で取引可能な小丸太（pole）がえられる。しかしこの等級のメカニズムでは，基礎データにそのような間伐を行なった標準地が少ないので，択伐的間伐や，強度の上層間伐の場合の結果を充全に評価することはできない。

基礎になったデータの範囲内でのこの公式の用法の第2の例として植栽林について計算された間伐度から（第4表），早期に多量の本数を減

材積（立方フィート） 取引可能	材積（立方フィート） 全	年当り成長量（立方フィート）
5410	5700	
870	930	
4540	4770	
		280
5100	5310	
300	320	
4800	4990	
		238
5990	6180	
980	1020	
5010	5160	
		223
6350	6550	
460	480	
5890	6070	
		169
7070	7920	
560	580	
6510	6710	

少させて密度を1に近づける必要のあることが示されている（Fig. 5）。植栽林に対するこのスケジュールBと天然下種二次林（Fig. 16 と 17）に対するスケジュールAの著しい成長状況の相違は注目すべきものがある。焦点としての時間的因子と併せてくこれは人工造林地の経営においては極めて重要である），取引可能木を急速に成長させるために一連の間伐を慎重に実行して，総成長量の不当な損失を防ぐには明らかにスケジュールBが好ましい（第4表）。これによってスケジュールAと同一本数の1フインチ直径木が生産されるが，年数は27年，すなわち38.5％短縮される。その間輪伐期（rotation）を通じて，これに見合うだけの量の取引可能材積が早期に回収されたことになる。

スケジュールBの本数減少を調べるとき（第4表）最初の小数の取引できない（sub-merchantable）間伐木をなくするために，植栽本数をエーカー当り400本以下にすることが考えられる。このために生ずる面積当りの潜在成長量の減少は，直径成長を多少とも孤立木的成長状況に近づけるために受け入れるのである（Fig. 15）。色々な植栽間隔に対して予想される林分成長の知識は，すでに27年生の Douglas fir の試験でえられている（Eversole 1955）が，それによれば取引可能 board foot 材積という重要な側面に関しては，間隔

Table 4　スケジュールB　Douglas fir　地位指数 170

（プロットデータは14年と17年の実測値を使い、その後は予測した）

年令	d/D	上層高（フィート）	品等指数	形数		本数	平均直径（インチ）	平均樹高（フィート）	材積（立方フィート）	材積（立方フィート）取引可能	材積（立方フィート）全	年当り成長量（立方フィート）
14	0.96			0.58	間伐前	1,073	2.2	19	23	−	270	
					間伐	286	2.1	19	3	−	10	
		24	0.4	0.58	間伐後	787	2.5	19	25	−	260	
												203
17	0.92			0.552	間伐前	787	3.9	28	60	570	870	
				0.558	間伐	391	3.6	27	27	210	360	
		33	0.4	0.548	間伐後	396	4.1	28	37	360	510	
												330
22	0.82			0.513	間伐前	396	6.6	52	94	1880	2160	
				0.532	間伐	63	5.4	47	10	180	220	
		58	1.0	0.509	間伐後	333	6.8	53	84	1700	1940	
												372
27	0.90			0.486	間伐前	333	8.6	68	134	3500	3800	
				0.497	間伐	133	7.7	65	43	1080	1200	
		74	1.0	0.480	間伐後	200	9.1	69	91	2420	2600	
												296
32	0.80			0.462	間伐前	200	11.1	76	135	3870	4080	
				0.434	間伐	35	8.8	68	15	390	420	
		82	1.0	0.457	間伐後	165	11.5	77	120	3480	3660	
												376
37	1.00			0.445	間伐前	165	13.4	90	161	5320	5540	
				0.445	間伐	30	13.4	89	29	950	990	
		95	1.0	0.445	間伐後	135	13.4	90	132	4370	4550	
												396

の狭い他のすべての場合より、植栽間隔10フィートおよび12フィートの場合に造林投資の早期かつかなりの額の回収が可能である。このような事実は植栽計画をたてる際に最も有用であることが証明されたので、直ちに次の問題である植栽林の経営、すなわち林の取扱い方を考えなければならないこととなる。その場合第4表で計算したような間伐方式のその値の値が、特に短伐期に関連して、適切な間伐法の選択に大きい助けとなるだろう。

4　結　論

地方的間伐収穫表（local thinning yield table）ができあがるまでの間、この研究の結果から、Douglas fir の若い林分で計画される間伐方法について、収穫量の予想の直接の概念が与えられる。当然これらの予測は、この分析に用いた諸外国の試験地の経過に代って、この地方の間伐研究の結果が更に更に累積されたとき改訂する必要がある。しかし林業家が現在実際に間伐方式を計画することのできるこのような手段を有するという単純な事実は、中間的な結論として重要なものと思われる。

年令	d/D	上層高（フィート）	密度指数	形数		本数	平均直径（インチ）	平均樹高（フィート）	断面積（平方フィート）	材積（立方フィート）取引可能	材積（立方フィート）全	年当り成長量（立方フィート）
43	0.84			0.431	間伐前	135	15.9	100	187	6720	6930	
				0.445	間伐	35	13.3	93	34	1160	1210	
		106	1.0	0.427	間伐後	100	16.8	101	153	5560	5720	
												320
49	1.00			0.418	間伐前	100	18.9	109	194	7410	7640	
				0.418	間伐	16	18.9	109	31	1170	1210	
		114	1.0	0.418	間伐後	84	18.9	109	163	6240	6430	
												276
55	—			0.408	間伐前	84	21.1	113	204	7930	8090	
				—	間伐							
		119	1.0	—	間伐後	(76)						

その上この研究方法は Canada では今までのところ一般的になっていないが，古い間伐実験（これは近代的な反復実験の要件を備えていないが，それらが長期にわたる記録であるということから棄ててしまうにはまことに惜しい）から有用なデータを導き出す一つの方向を示すものである。

Ⅲ　粗材積成長量（gross volume increment）の推定

単純な材積成長量推定法を述べている中で"材積成長量は樹高とともに変動するが，取扱いの方法が異状でない限り，成長率（地位），間伐度にはよらない"ということがいわれている（Hummel and Britt, 1950）。この研究で使ったデータを分析することによって，Douglas fir について同様な関係のあることを強調し，また拡張することができ，"長期間における材積成長量は広い範囲内の間伐度から影響をうけない"という理論（Moller et al. 1954）を支持する証明がえられる。本節の目的はこの分析を簡単に報告することである。

1　方　法

与えられた上層高に対する全標準地の総材積生産量は非常によく似通っているから，これらの二つの因子の回帰の直線性を検定し，最後に次の公式をえた。

$$V(\text{皮付}) = +0.905H^2 + 54.54H - 1340$$

ここで　V＝平均粗材積（gross volume），H＝上層高

年令，密度指数，d/D 比，あるいは間伐後の立木材積等の因子を追加してこの推定値を改善できるかどうかをみるため重回帰分析を行なった。これは特に，なぜ上層高 80 フィートのところで急に樹高 1 フィート当り成長率が高い値から低い値へと変化したのか，また個々の標準地経歴の中でさえ次々の間伐においてと同じように急速であった を解明しようとしたのである。この試みは失敗した。2つの変数と組合せたときの傾斜因子（DV/DH）[1]の相関係数は，上層高（CC 0.5407），年令（CC 0.5158）および間伐後の残存木材積（CC 0.5428）などの単一因子に比べて，無視できる程度の改善しか示さなかった。これらの関係の偏回帰は 0.01 確率水準では有意となったが，d/D 比および D.I についての DV/DH のそれ

1) DV/DH = Gross volume increment ＝ 与えられた樹高間における上層高成長量

は有意でないことが証明された。分析はこれ以上進めなかったが、3つの結論がえられた。

2 結　論

(1) 取扱いの方法、計算された材積および用いた手法の範囲内において、データの変動の30％以上は分離できず、試みた因子のどのような組合せも gross volume と上層高との関係を改善するようにはみえなかった。単独の場合この関係は全変動の29％を説明する。ただ立木材積の gross volume に対する単独の C.C は上層高より少しよかったけれども、後者は現地での測定が容易だし、また間伐の強さとも全く独立と考えられる利点がある。

(2) gross volume increment は調べている間伐方法および間伐の強さの範囲内では変らないというある程度の証明がえられた。この範囲は一回の作業における立木材積の伐倒が、平均して12％（4％～25％）のところで累計は平均すると、上層高110フィート（90フィート～120フィート）に至るまでの gross volume に対して55％（40％～75％）のところである。

(3) 上層高のノフィート当り gross volume 成長量（上層高についての直線関係としてあてはめた）（Fig. 18）を用いて、短い予測期間における連年成長をもととした間伐収穫の手引きがえられる。この式の形は英国の Douglas fir について求められた上層高による成長量推定値と比較することができる（Hummel & Brett. 1950）。この予測は80フィートまではよく似ている。この限界の上さはこの研究に用いた標準地の樹高成長量の傾向から、20～80フィートクラスの方が80～140フィートクラスより正確な値であると結論される。

Ⅳ　間伐の強さが断面積成長におよぼす影響

本節の目的は Vancouver Island の Cowichan Lake の近くの39個の Douglas fir 標準地について、断面積成長に対する間伐の強さの影響を知ろうとするものである。これまでこの効果についてはその限界の厳密な定義がなされていなかったが、一般にうけ入れうる仮定から次のような指針が導びかれている（Heiberg et al. 1955）。すなわち、著しい減少を避けるには、ある年令で可能な gross production の1/2以下に断面積を減少させてはならないということである。ごく最近指定された処理（取扱い）を理解するのに役立つ成長量と蓄積の間の純数学的な関係が導かれた（Steabler. 1958）。直径と直径成長量で表わしたそのような測樹学的な一面から、直径成長量と単位面積当り成長量を一定に保つなら、断面積成長量の50％は林木の直径を増加させるために蓄積内にくり入れねばならないことが明らかになる。

厳密な試験によって、適当な間伐の強さの水準がきまるまでの間、中間的な観察値から断面積で表わした間伐度のこのような面について幾つかの事実がえられる。

1 資料と方法

39個の標本プロットの経歴から求めたデータによって、それぞれの間伐後の断面積およびその後の成長量を一緒に設けた無間伐（コントロール）標準地での同じ観測値の100分率として表わした。この関係のプロットした値は2つの類似した処理プロットについて示したように（Fig. 19）著しい変動を示している。その上反復がないので統計的推論から決定的な証明を与えることができない。

2 結　果

(1) 35個の観測値の中20個の位置から普通最大値（コントロールプロット）の60%以上に断面積を維持した場合には，10%以上の成長減は生じないことがわかる。

(2) 観測値の74%の位置は最大値の20%をこえない成長減に対応している。

(3) 標本プロットの記録によれば，これらの限界は，林分断面積の15～20%の断面積を5年間隔で繰返し伐採した場合のものに対応している

(4) 3年間隔の2回の強度の間伐によって樹幹断面積のパーセントを最大値（コントロール）の60%以下まで急激に落した場合，このpotentialな成長は22%から35%減少する（例えば個同様の最後の点，Fig.19）。

(5) 13年生の植栽林に対し一連の強度の間伐を施じてエーカー当り1200本からそれぞれ800，600，400本に本数を落した場合，Potential incrementは最大値の29%，47%，98%に低下した，次の3年間における損失は大体それぞれの断面積の減少に比例していた。（Fig.19に⊕で示した3個の平均点をみよ）

3 考　察

このような成長減退の理由は，林内で何本かの木が伐られることによるpotential growthの減少量が残存木の成長率の増加を上まわるからである。間伐の強さを一定にしておいて，間伐の方法をかえるとき最損失の少ないのが上層間伐（crown thinning）だということは興味深い。この結果は間伐される断面積の大きさを構成する林木の優勢度（dominance class）の分布が重要だということを示している。

過年成長量に対するこのような間伐木の分布の影響を，良，中庸，貧弱の幹級に分配するという一つの考え方がlodge pole pineについて展開されており（Smithers，1954），またこれはプロットした値の散らばりに対して方向づけを与えるためにDouglas firについても用いられた（Fig.19において貧弱，中庸，優良の幹級配分を表わす3本の平行線をみよ）。この方法によって，樹冠処理（crown-treatment）のプロットが良好な幹級分布をもつのに対し，最大値の100分率でpotential incrementで表わされたところでは，下層間伐（low thinning）（明らかにこれは少し低い地位の地域の1/3のプロットで代表される）は最も悪い分布であることがわかる。同様に13年という若い年令で強く間伐すると，まるでプロットの半分を皆伐し，残りの半分を処理後の3年間全然手を加えないでおいたのと丁度同じ効果をpotential incrementに対して与える。

4 結　論

3年の間伐間隔で最大値の60%にまで急激に林分断面積を減少させるとpotential incrementにおいて，22～35%の減少が生ずる。最大値の60%以上の断面積を維持する保守的な間伐の強さ（コントロール）とか，特に慎重に5年ごとに間伐したりすると，断面積成長量に到達できる最大値の80%を下らない値に維持できる。

▽　間伐木の直径級に対する間伐の強さの影響

前節で観測したDouglas firの間伐後の望ましい断面積の水準から，断面積および同一年令で表わした場合，エーカー当りの成長量を最大値の

80%に維持するには，断面積は無間伐林の60%以下であってはならないことがわかる．このことを間伐の強さで表わすと，もしエーカー当りの最大成長量を20%以上低下させないためには，間伐を繰返したときの断面積累計をgrossな断面積成長量の40%以上に止めるべきことを意味している．しかし実際は間伐の強さがそれぞれの中間の収穫において利用しうる林木の大きさの区分に非常に大きく影響するところから，多くの"強度間伐"方式では50年[1]までのgross productionの約60%を伐採している．したがって本節の目的は，この区分をVancouver IslandのCowichan Lake近くの39個の標本プロットの間伐の実行に関連して記録することである．

これらの試験の大部分はあまり期間が短いので，統計的分析に適する包括的なデータとはなりえないのであるが，間伐本数と対応する間伐木の平均直径に関して簡単な検討を行なったところ，間伐の強さについての非常に実用的な面について幾つかのかくされた点がまとめられた．

方法と結果

42個の度数分布曲線を求めるため，1インチ直径階ごとの間伐木本数とその全間伐本数に対する100分率を間伐木の（断面積）平均直径に関係づけた．これらの曲線はそれぞれ20～50年までの多くの同令林において立木断面積の9～44%を間伐したときにえられる伐採木の木の大きさによる区分を与える．d/D比で分類した間伐方法は下層および弱度の上層間伐（0.70～0.89）および強度の上層，択伐的間伐（0.90～1.2）に対応している．1つの度数曲線当りの本数は2つのd/D比のグループにつ

1) Growth and yield of Douglas fir in thinned stands-Evergreen plot histories Unpublished Report, Research Division B.C. Forest Service

いて平均してエーカー当り327本と141本である．間伐木の平均直径を2インチ階ごとに更に分類し，平滑な度数曲線を画くと，本数は6つの主要な関係に帰着するから，これらを一連の重なり合った分布として示した（Fig. 20）．

考　察

曲線の傾向について明らかに2つのタイプが認められる．間伐木の平均直径が2～6インチの間のときは，殆んど下層および弱度の上層間伐の場合に被圧樹冠級に属する木が多数伐採されている．この場合には1つのはっきりしたピークをもつ典型的な分布が現れる．しかし年令の高いところで，平均直径が7～12インチの場合，強度の上層間伐では下層林冠より伐採される本数は少ないが，被圧木，優勢木の両方に伐採木が広く分布しているので，屡々2つまたは3つのピークをもつ分布が現れる．

他の顕著な状態を反影する試験から，多くの観測値がえられればこの曲線の位置（Fig. 20）は改善でき，また間伐木の直径分布の間伐木平均直径，間伐の強さおよび方法に対する回帰によって重回帰分析を実行することが可能である．

それまでの間Fig. 20の曲線は数多くの正常な間伐度の間伐木区分に対する効果の地方的な予測方法を与える．

注　金頁収穫を除く．

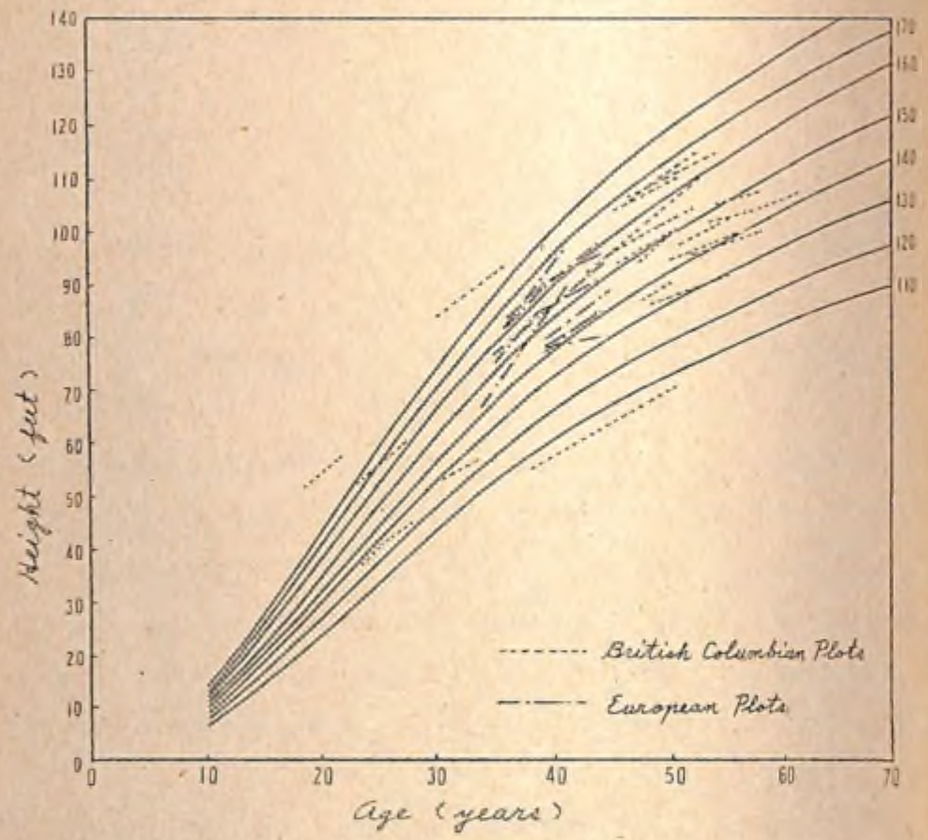


Fig. 1 Height Trends of Sample Plots in Relation to Site-Index Curves.

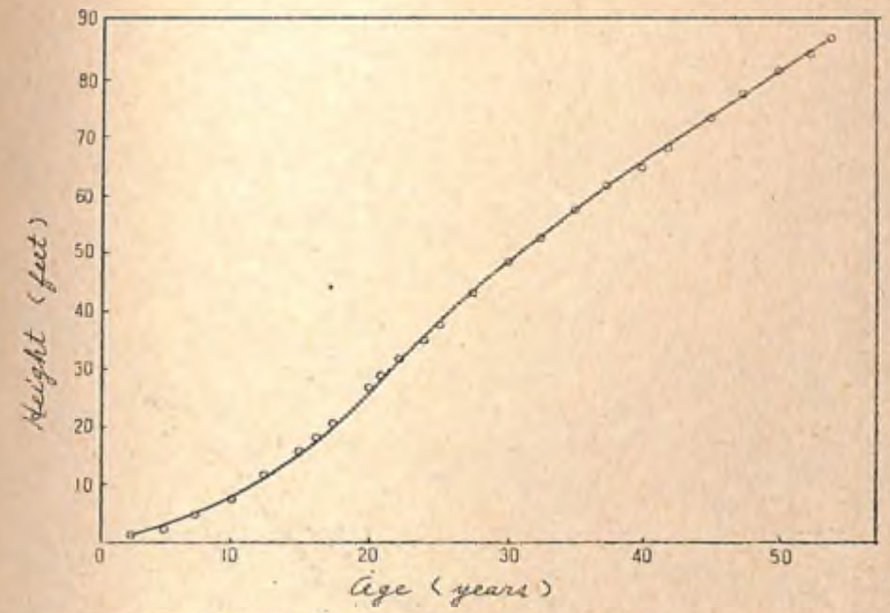


Fig. 2 Grand Average Curve of Height to Age.

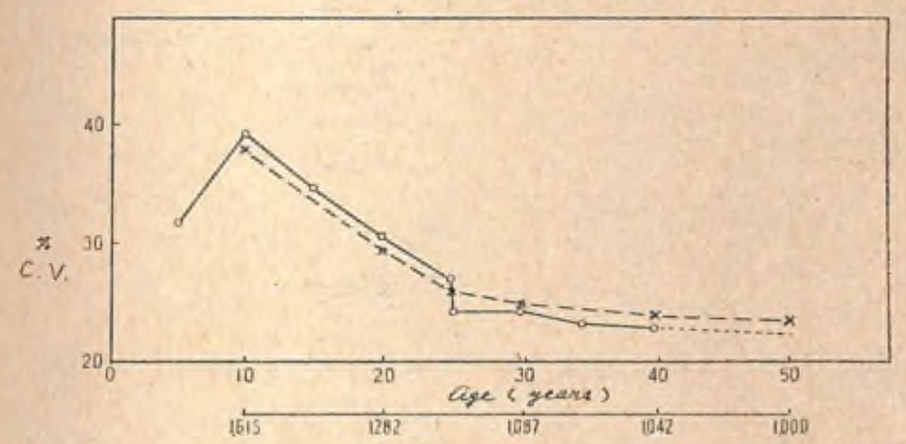


Fig. 3 Relationship of Coefficient of Variation to Age

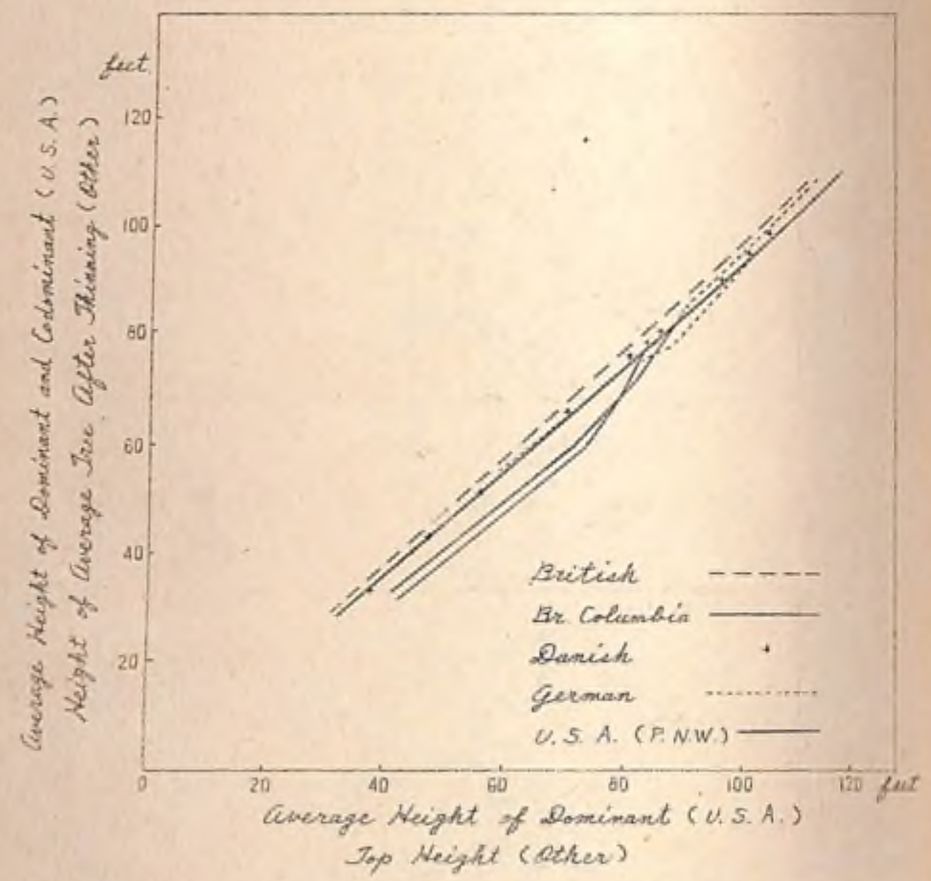


Fig. 4 Height Relationships

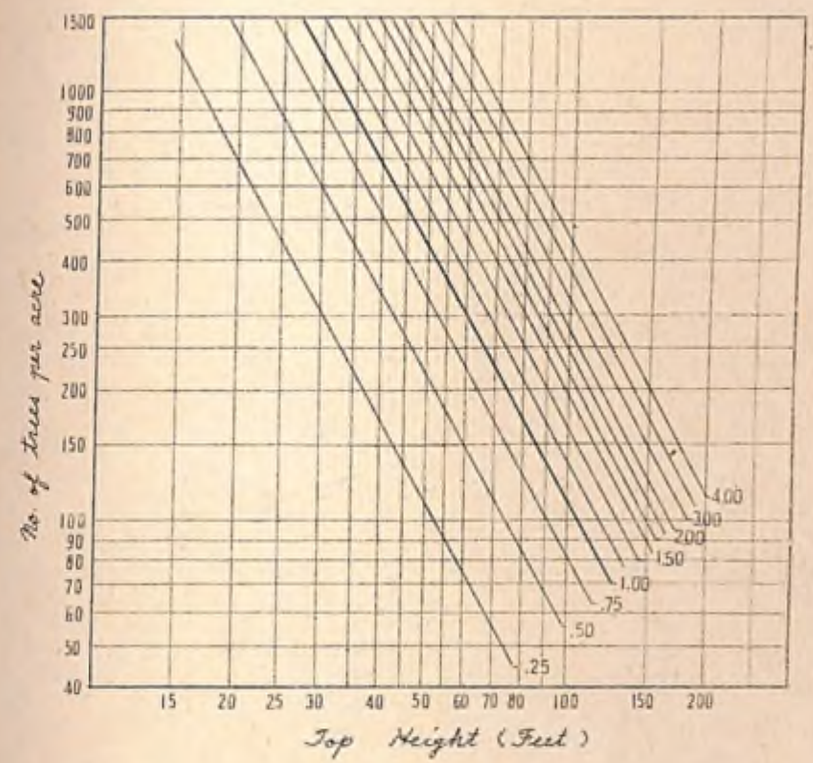


Fig 5 Density Index Chart

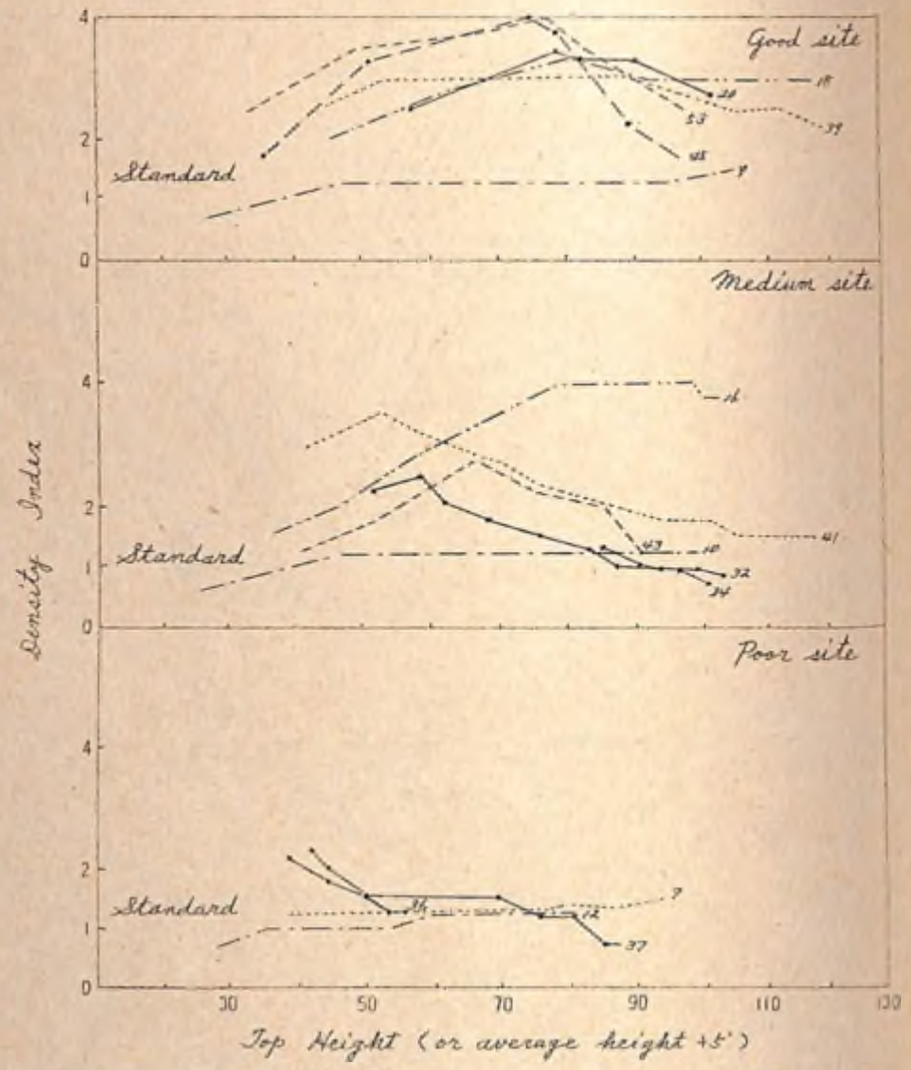


Fig. 6 Density Indices for Selected Regimes

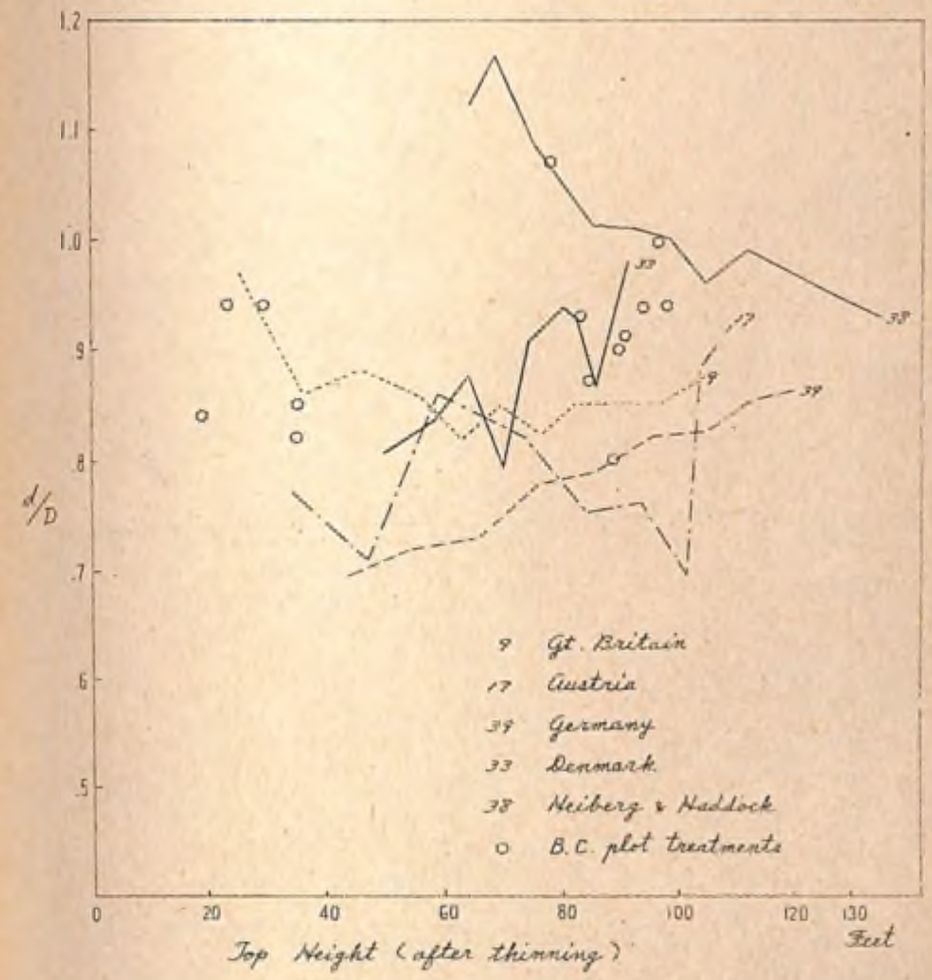


Fig. 7 d/D Ratios for Selected Regimes

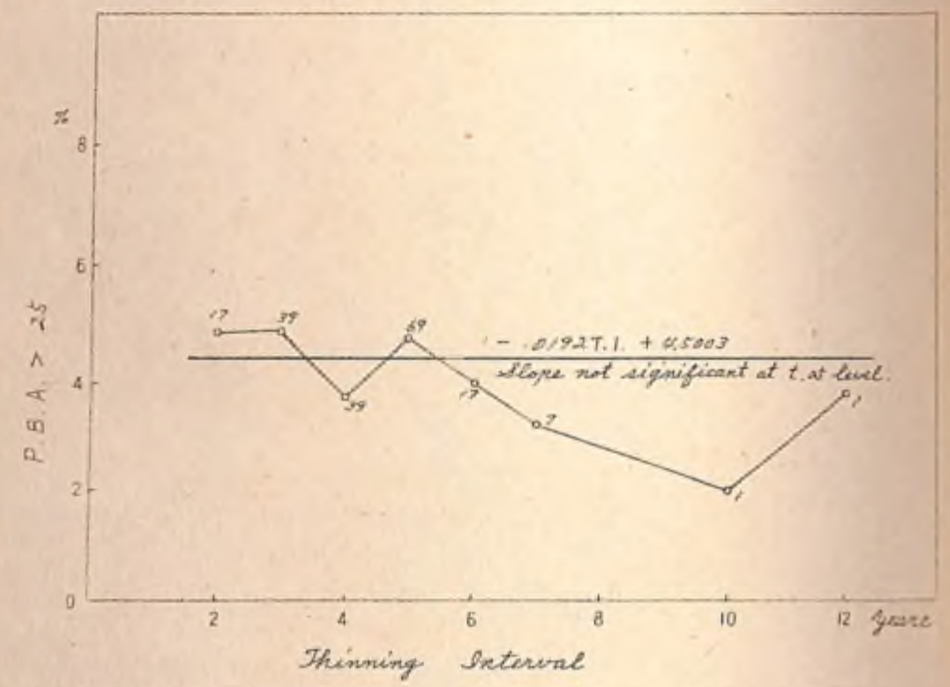
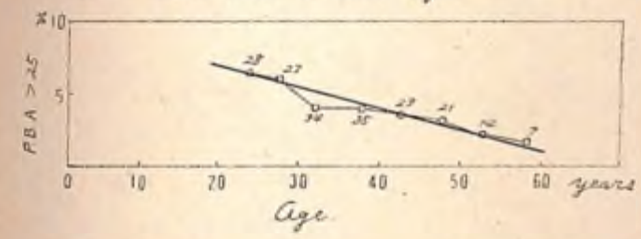
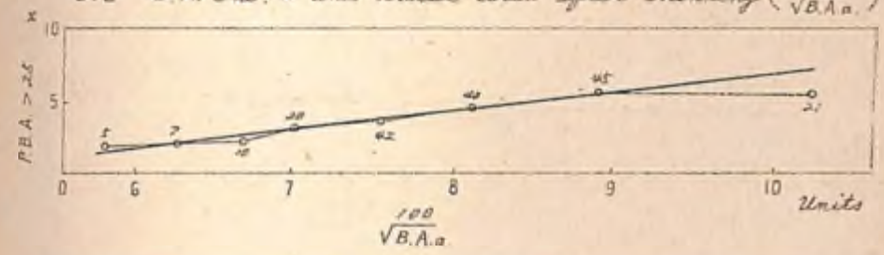


Fig. 8 Regression of P.B.A. > 25 on Thinning Interval

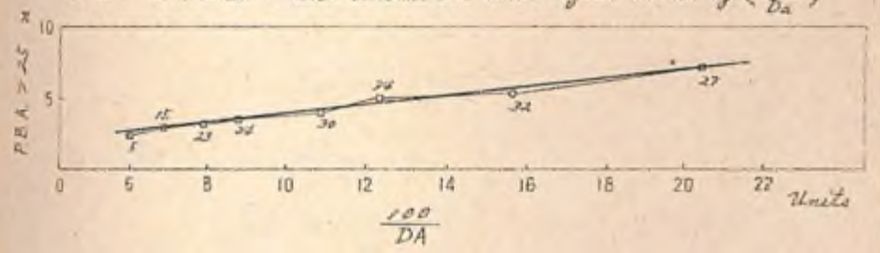
9.1 B.A. Inc. % and Age



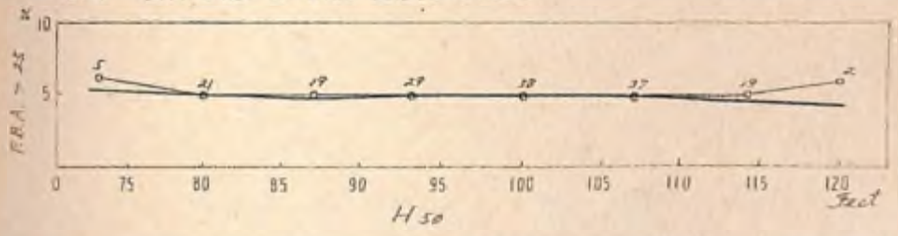
9.2 B.A. Inc. % and Basal Area after Thinning ($\frac{100}{\sqrt{B.A.a.}}$)



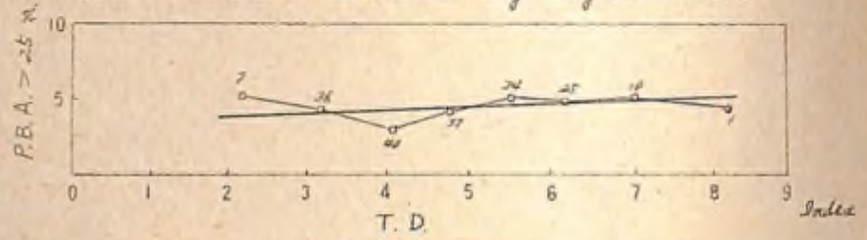
9.3 B.A. Inc. % and Diameter (o.b) after thinning ($\frac{100}{Da}$)



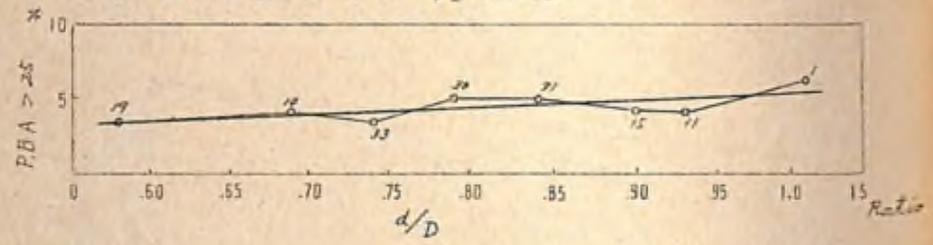
9.4 B.A. Inc. % and Site (H_{50})



9.5 B.A. Inc. % and Thinning Degree (T.D.)



9.6 B.A. Inc. % and d/D Ratio



9.7 B.A. Inc. % and Density Index (D.I.)

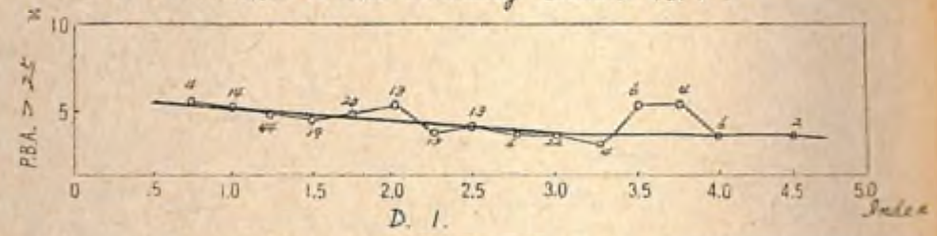


Fig. 9 Partial Regressions

-0.1468 Age $+ 9.393$ 1

$+ 1.267 \frac{100}{\sqrt{B.A.a.}} - 5.792$ 2

$+ 0.2962 \frac{100}{DA} + 0.799$ 3

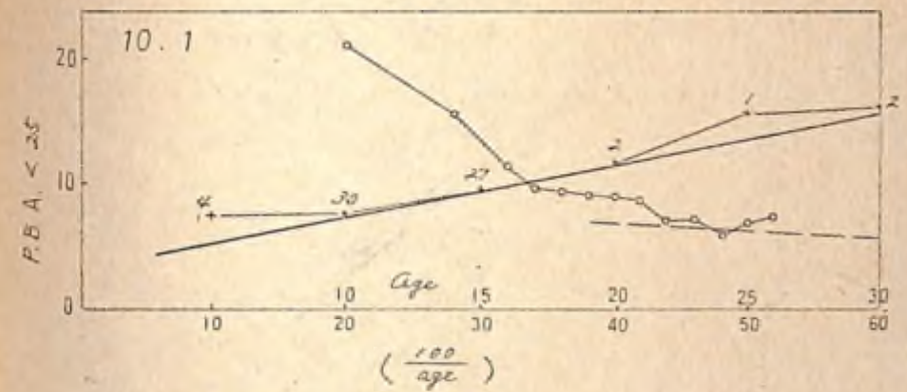
$- 0.442$ Hso $+ 8.735$ 4

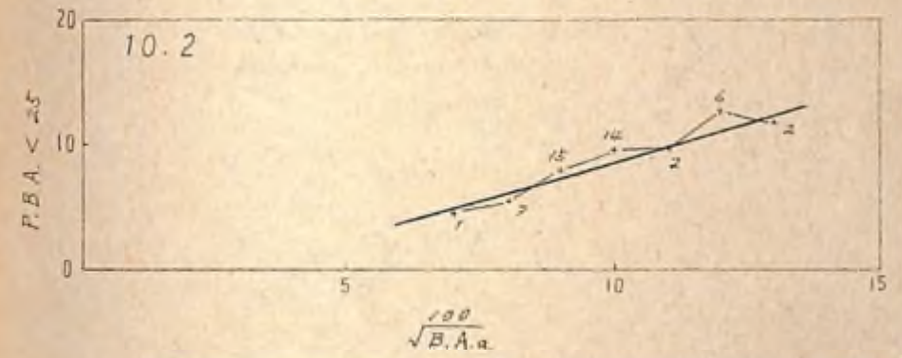
$+ 0.1968$ T.D. $+ 3.487$ 5

$+ 3.923$ d/D $+ 1.318$ 6

$- 0.7561$ D.I. $+ 5.3989$ 7

All slopes highly significant at t .01 level with exception of the regression of P.B.A. > 25 on Thinning Degree.





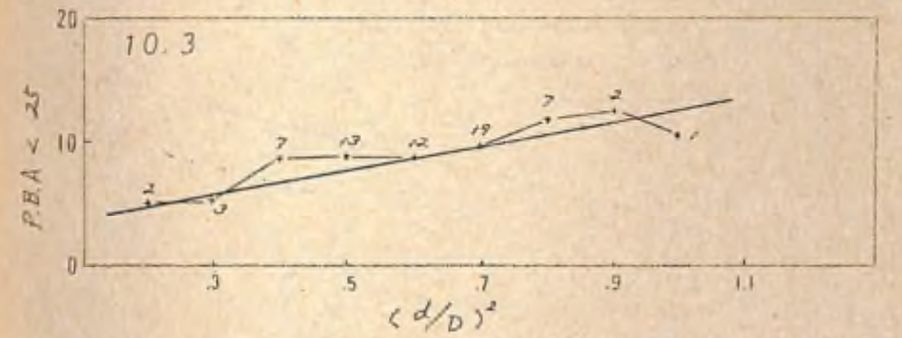


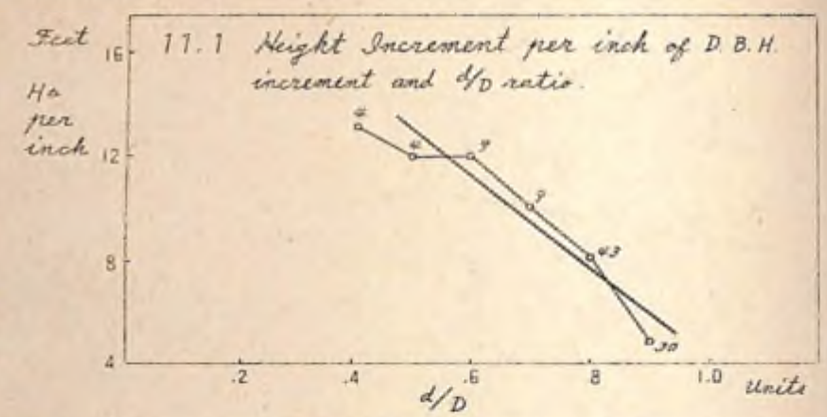
Fig. 10 Partial Regressions

$+ .2032 \left(\frac{100}{age}\right)^2 + 3.28$ 1

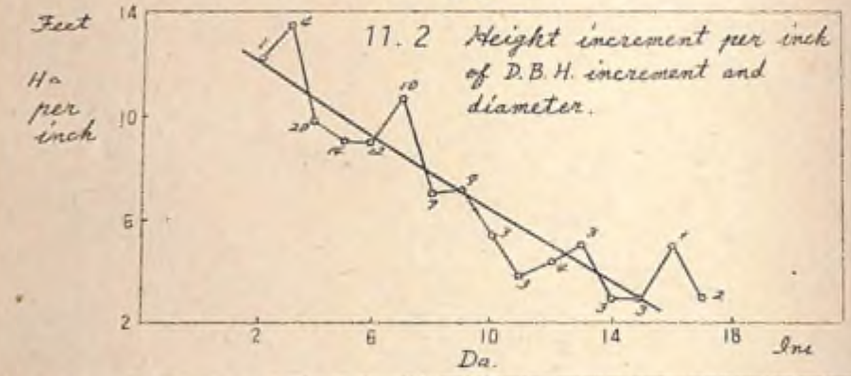
$+ 1.208 \frac{100}{\sqrt{B.A.a}} - 3.42$ 2

$+ 9.856 (d/D)^2 + 2.9264$ 3

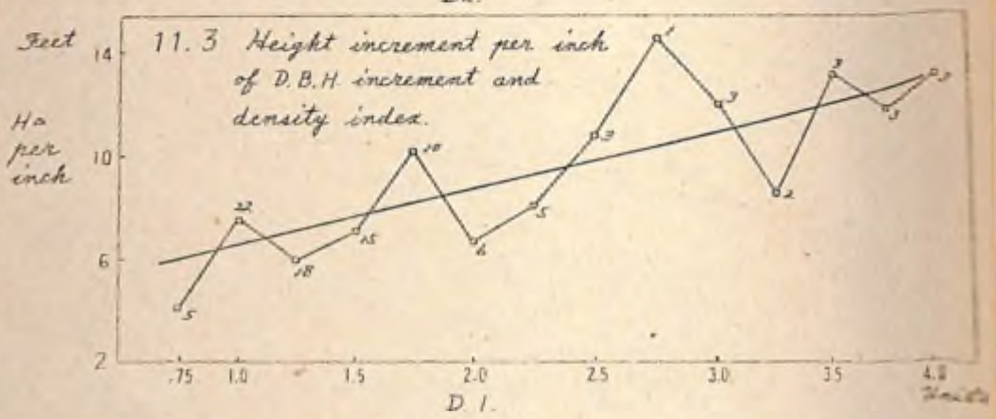
All slopes highly significant at t .01 level



11.1 Height Increment per inch of D.B.H. increment and d/D ratio.



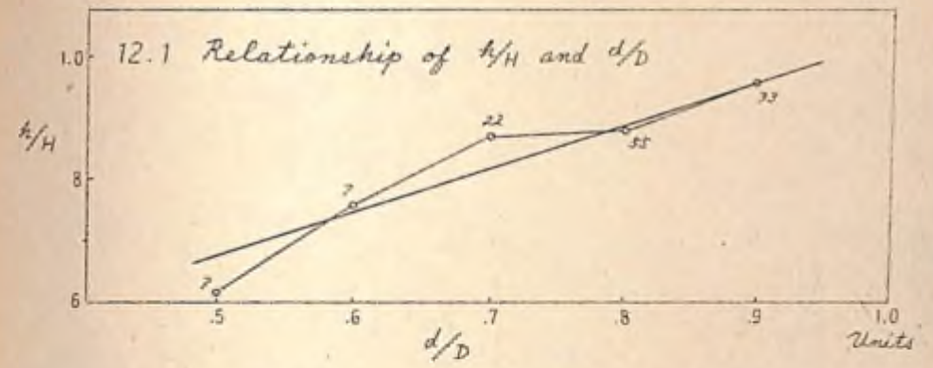
11.2 Height increment per inch of D.B.H. increment and diameter.



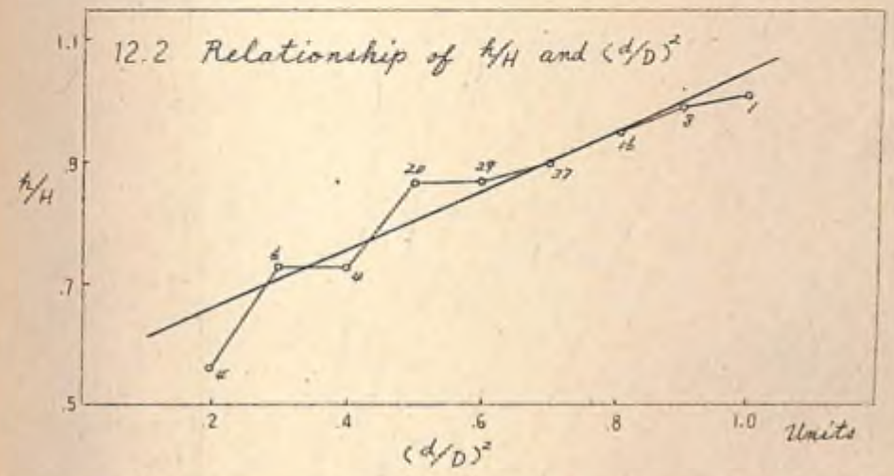
11.3 Height increment per inch of D.B.H. increment and density index.

Fig. 11 Partial Regressions $-17.711\ d/D + 21.977$ 1
$-6.786\ Da + 13.093$ 2
$+2.237\ D.I + 4.223$ 3

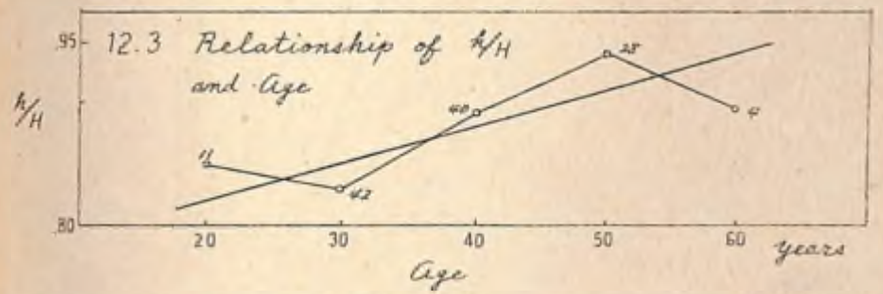
All slopes highly significant at t .01 level



12.1 Relationship of h/H and d/D



12.2 Relationship of h/H and $(d/D)^2$



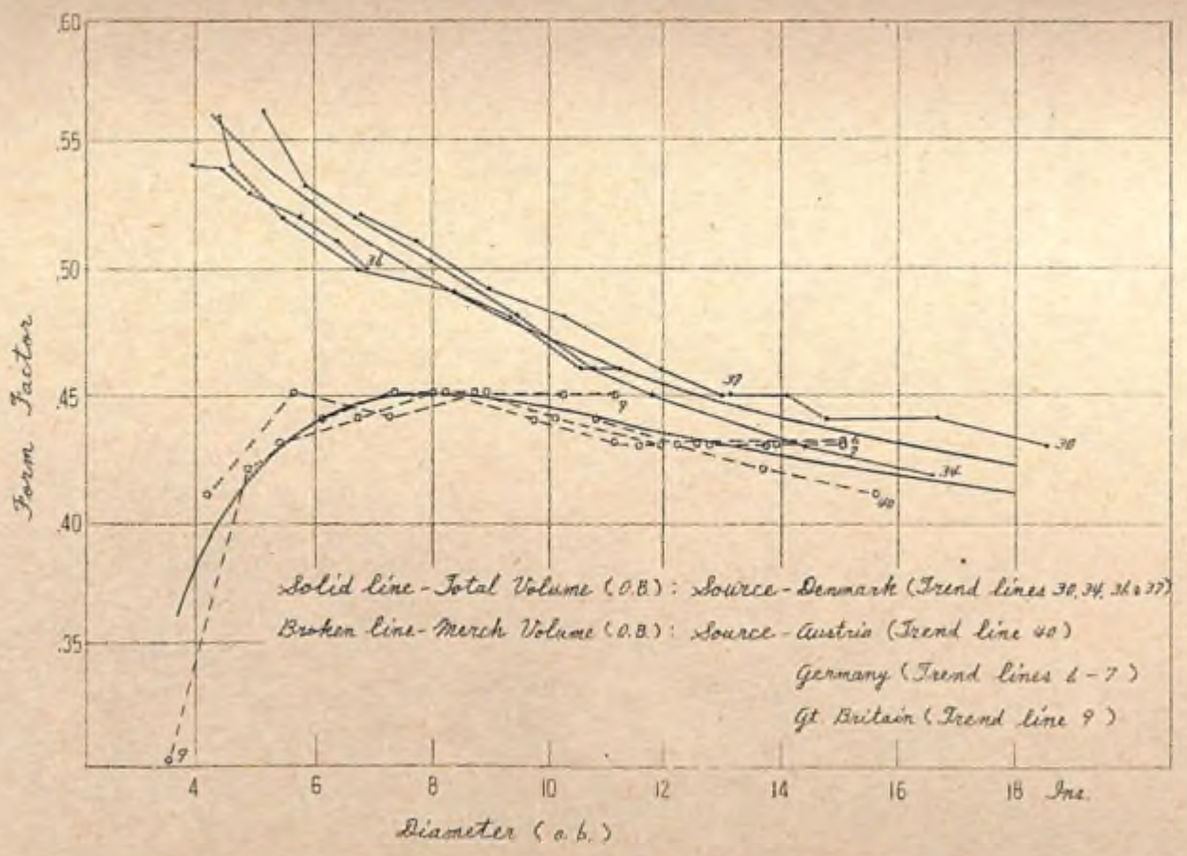
12.3 Relationship of h/H and Age

Fig. 12 Partial Regressions $+0.7302\ d/D + 0.3022$ 1
$+0.4823\ (d/D)^2 + 0.5723$ 2
$+0.0032\ Age + 0.7558$ 3

All slopes highly significant at t .01 level

Fig. 13 Absolute B. A. Increments by Basal Area and 3 d/D Ratios

Fig. 14 Form Factor Relationship with Diameter



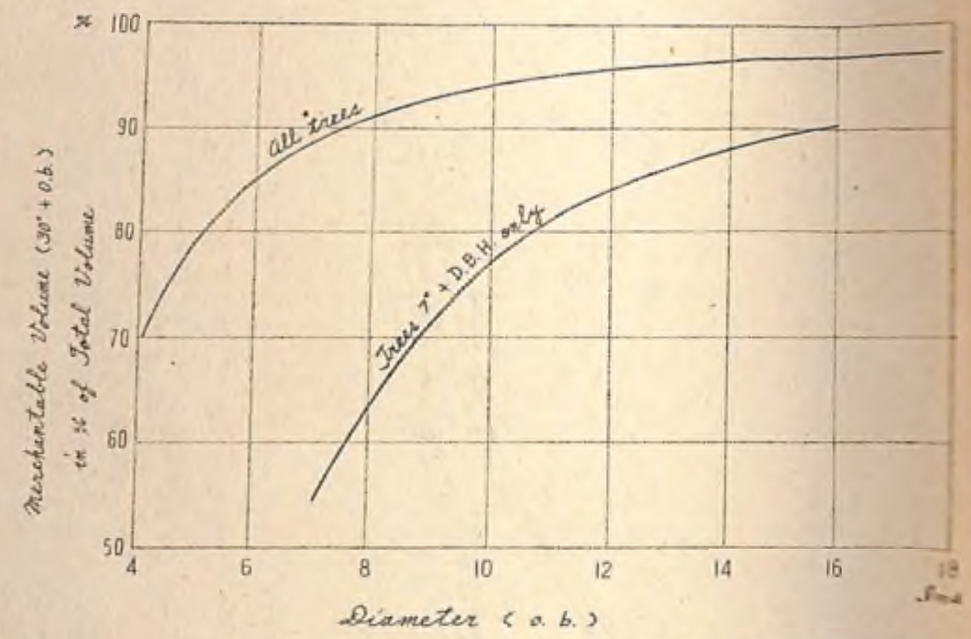


Fig. 15 Merchantable Volume % of Total Volume

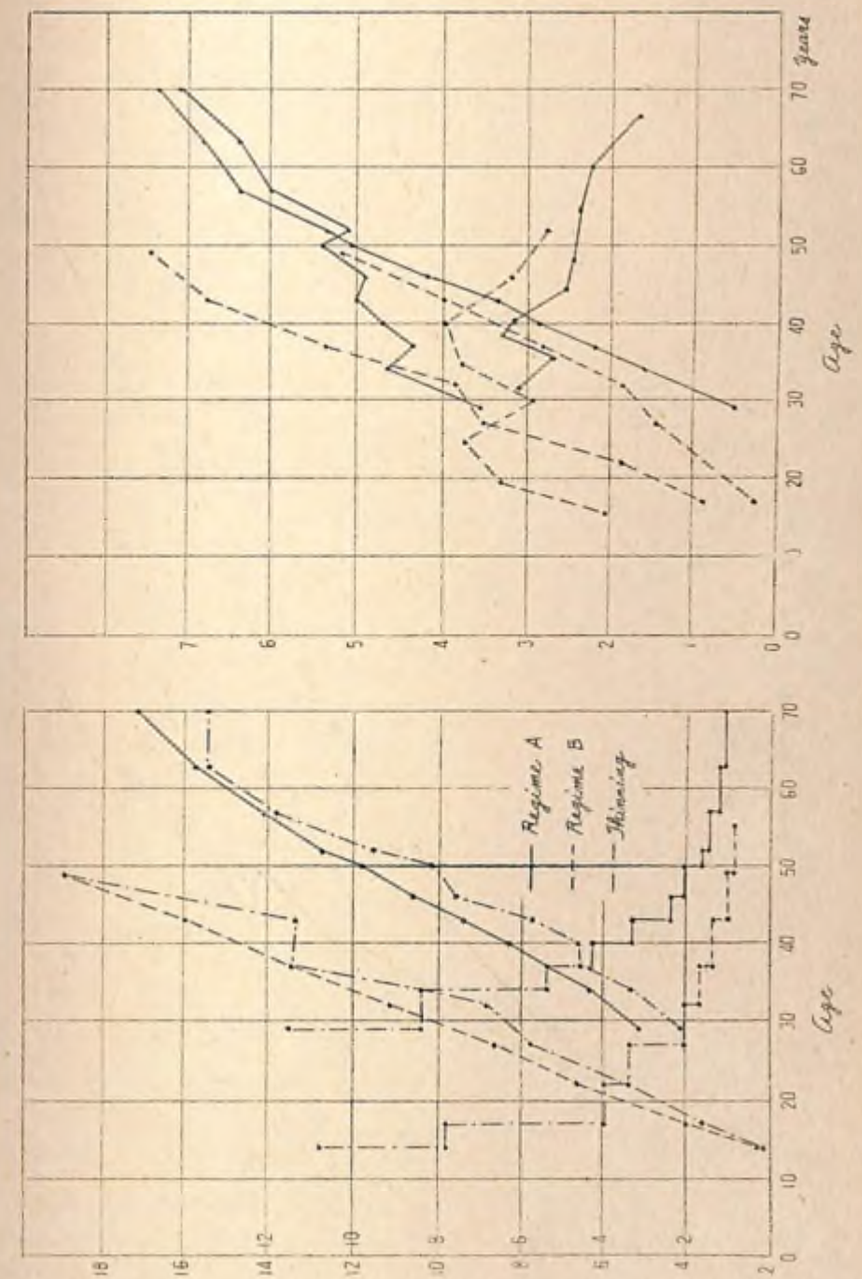


Fig. 16

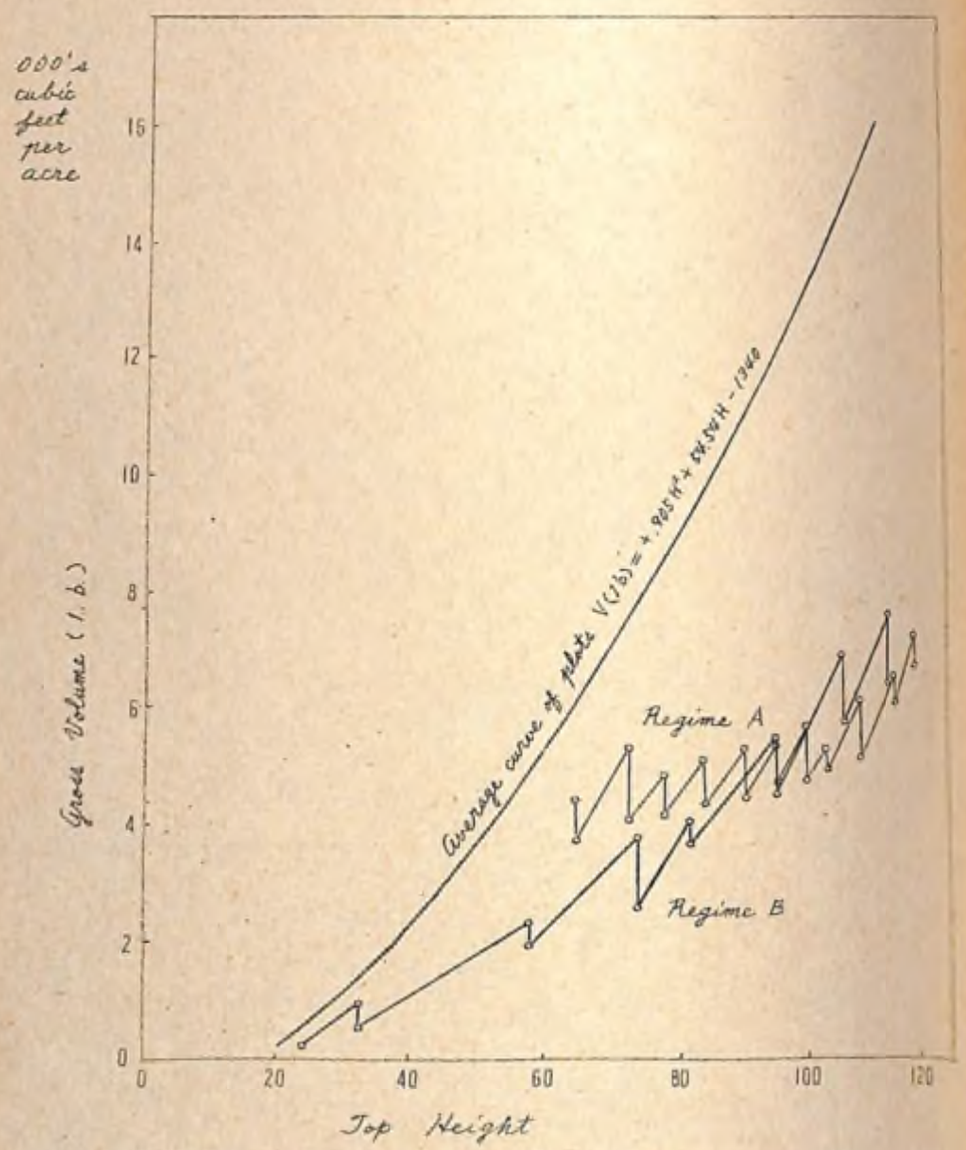


Fig. 17 Regression of Gross Volume on Top Height and The Trend of Two Calculated Regimes.

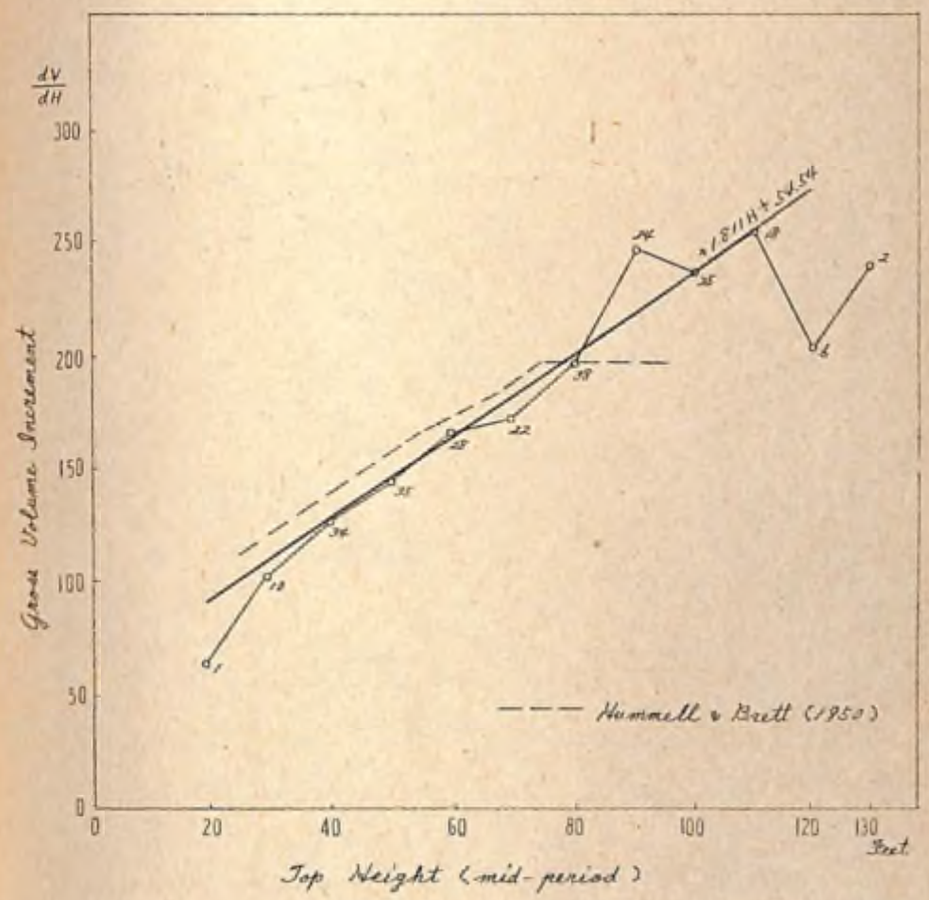


Fig. 18 Volume Increment Per Acre Per Foot of Top Height

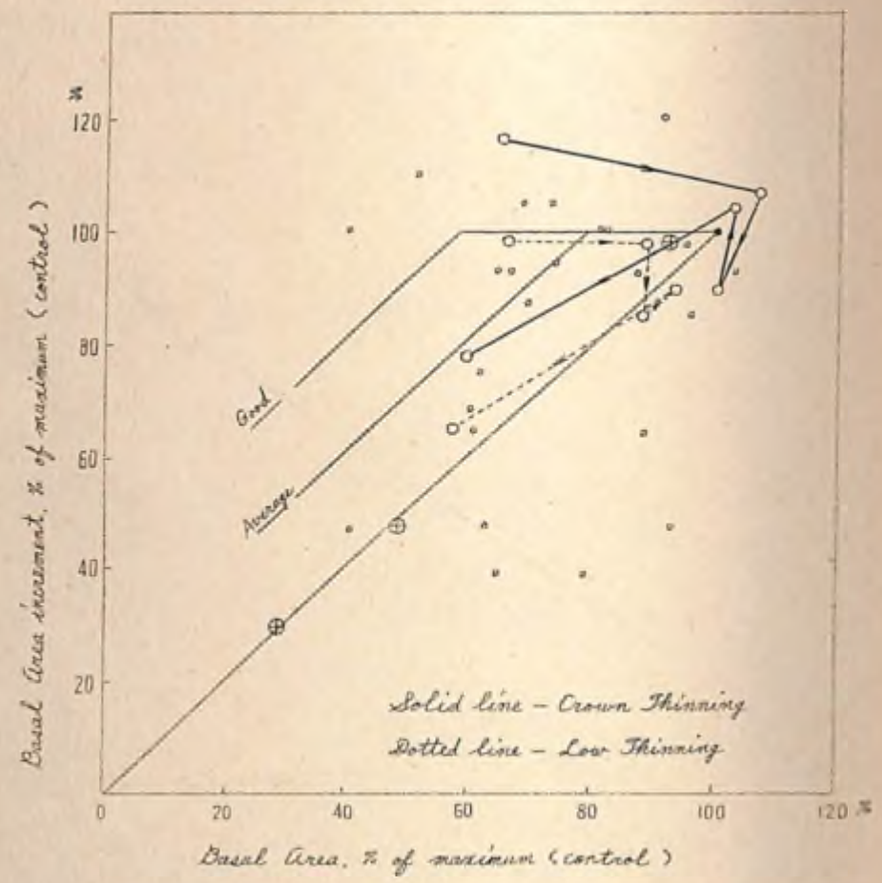


Fig. 19 The Effect of Thinning Intensity on Increment

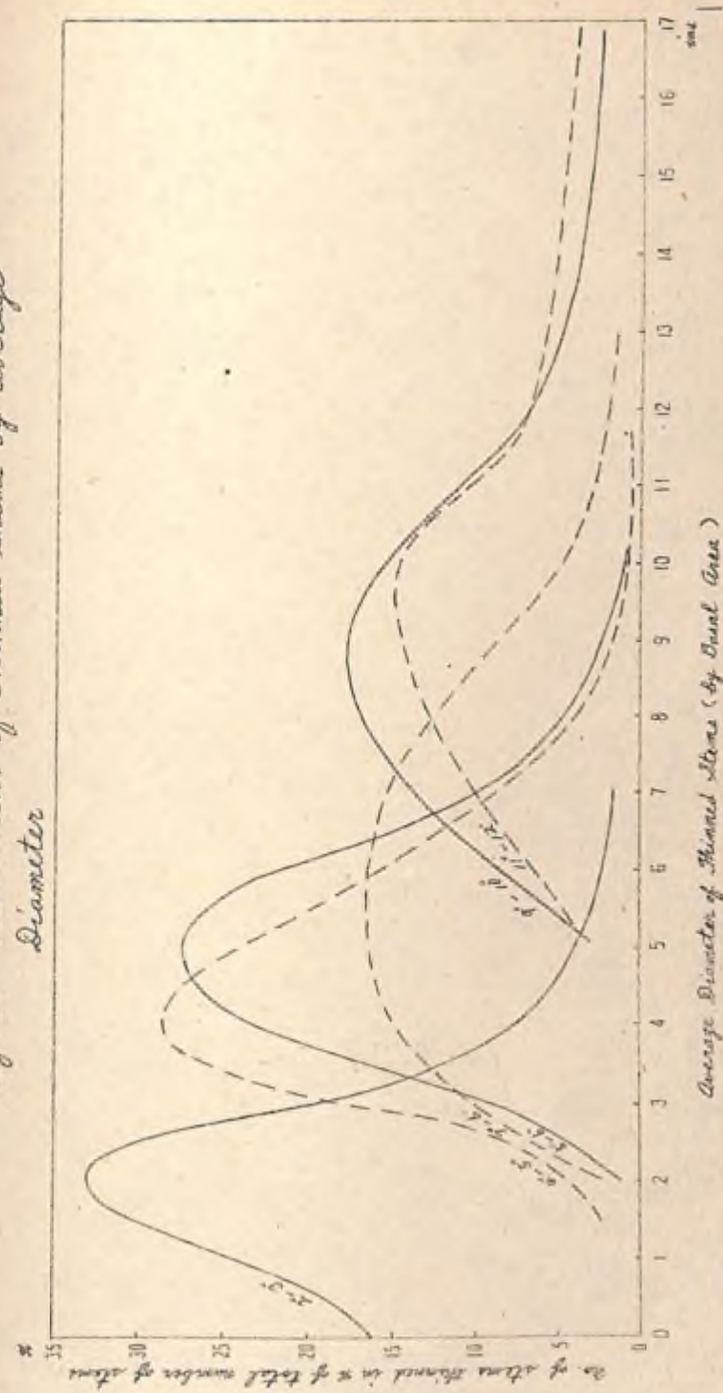


Fig. 20 Assortment of Thinned Stems by Average Diameter

Ⅲ Ponderosa pine の直径および材積成長量に対する地位指数，密度，年令及び大きさの影響

Volume and Diameter Growth of Ponderosa Pine Trees as Influenced by Site Index, Densiby, Age and Size.

By P.E. Lemmon, F.X. Schumacher

Forest Science 1962 No.3

Ⅲ *ponderosa pine* の直径および材積成長量に対する地位指数，密度，年令および大きさの影響

Volume and Diameter Growth of Ponderosa Pine Trees as Influenced by Site Index, Density, Age and Size

By P. E. Lemmon, F. x. Schumacher

Forest Science 1962, No. 3

国営協同土壌調査（*National coorporative Soil Survey*）の一部には図化済または図化予定の重要な森林土壌ごとに，生産性の情報を組立てることが含まれている。そのような情報は，他の土地利用の方法を考える際に基礎となるものである。これは有効かつ継続的な生産をあげるのに必要とされる妥当な施業ならびに経営処理を策定する上で本質的である。土壌調査方法の林産物生産性からみた解釈は，ふつう林木の地位指数と既存林分における色々な土壌の種類（系統，土壌型，土壌相）との相関を求めることによってえられる。これらは現地調査の測定値およびこれまでに測定された研究から求められる。このような相関は，土壌図を土地利用計画の基礎として使用するときに要求される不可欠の幾つかの解釈が与えられさえすれば，標準的な土壌調査の完了と同時に明らかにされるのである。この解釈は郡（*county*）ごとの土壌調査報告，および土地資源地域ごとの特別報告にまとめられている。

この種の知識の利用は次のように例示することができる。*Washington* 州の *Spokane* 郡の *Springdale* 礫質の砂壌土に生育する無手入の正常な *Ponderosa pine* の平均的な地位指数は 62 である。このことは無手入という条件のもとにおける正常林は，約 170 年の輪伐期（*rotation*）

において、年あたりエーカー当り約1,372ボードフート（Scribner rule）の収穫が期待されるということである（Meyer, 1938）。

現在の経済的条件のもとでは、投資と土地所有税、防災（protection）および収穫の経営費用を考えに入れれば、そのような土地は林地として採算のとれるボーダーラインにあると思われる。

この種の土壌においては、集約な林業経営における多大な支出は妥当なものでない。この土壌については補助的な牧野、採草のような別の利用方法を考える必要があろう。一方同じ群で平均地位指数が73のもっと良い土壌、すなわち Eloika 沈泥（silt）壌土[1]に生育する正常で無手入の ponderosa pine では、年あたりエーカー当り約3,146ボードフートの収穫が期待できる。この土壌での林木の生育状況から、輪伐期はずっと短かくて、130年である（Meyer 1938）。ponderosa pine に対する土壌の生産性からもたらされる潜在的収益を考えれば、集約な経営、たとえば択伐あるいは補植（interplanting）などの作業も妥当だろう。

米西部全体にわたって ponderosa pine について土壌と地位指数間の相関の資料を収集する間に、林木の成長と土壌の関係をもっと完全に理解する上で重要と考えられる補助的な測定値を集める機会があった。林地経営において土壌生産力の知識を実用化し完全に利用するためには、単木の成長率が大きさや年令、上層木（over story）や樹幹密度（stem density）などによって、どのように影響されるかについて、もっと多くの知識が必要のように思われる。幾つかの新しい用具や手法によって（空間的な densiometer, Lemmon 1956 および point sampling, Grosenbaugh, 1952）、周囲の上層木の幹密度が正確かつ迅速に測定でき

1）土壌と成長との相関を求めている間での暫定的な系統

るようになった。それで土壌—地位指数間の相関を定めるために、通常の方法で調べた木について、連年直径成長量（periodic diameter increment）、大きさ、樹冠および幹密度（stem density）の補助的測定値を求めた。土壌と地位指数の幅はできるだけ広範囲のものを網羅した。

データは筆者等二人の共同作業で検討し分析した。単木の連年材積および半径成長量を、周辺林分の年令、直径、樹高、地位指数、上層木（林冠）および断面積密度、それにそれらの間の妥当な組合わせとの函数として数学的に検討した。蓄積（stocking）条件が既知で、しかも色々な地位を示す土壌の上で生育している単木の測定値をもとにして、ponderosa pine の連年成長量を予測するための方程式を導いた[2]。

この論文では十分説明できなかったけれども材積成長量の予測の目的は基本的には最も一般に使われている地位指数法によらずに、潜在的な土地生産力を評価するもう一つの研究方法の可能性を探究することであった。ponderosa pine はこのような方法を検討するには都合のよい林型である。というのは、えられた結果を、ふつうの地位指数法と直ちに比較できるからである。選ばれた標本木の過去5年または10年間の平均連年材積成長量の測定値によって、地位を色々な潜在的土壌生産力のクラスに層化できると考えるのは当をえていると思われる。そうしてこれらの測定値は調べている期間中において優勢な条件のもとで、健全かつ既知の生育空間、あるいは密度条件のもとで生育してきた林木を選んで求めなければならないことも明らかである。そのような条件は現在の年令、直径、樹高などとともに、調べる期間が短かければ（たとえば5年または10年）大体正しく定めることができる。

2）これらの方程式は1958年中に求められた。この方程式の計算に使った基礎データはこの報告に対応する index をつけて表にされ、U.S. Dept Agric. library に保管されていかつて利用できる。

種々の間伐施業（*thinning management*）をとらせたときの仮想的林分に対して、理論的な林分の姿および収穫量の数値を単純かつ実用的な形で計算することのできる、直径成長予測の方法を導いた。そのような計算から誘導される理論的な概念によって、色々な地位の土壌に生育する林を経営してゆく場合、種々の地位の潜在的能力を林木生産に一層効果的に利用させるような林業系に対する指針の基礎がえられると思う。モデルと理論的概念の提示は、筆者らの次の論文の主題である（*Lemmon and Schumacher 1963*）。

この論文では、分析に用いた原データの種類と量を取まとめて報告する。これは幾つの成長方程式を作成した数学的分析を説明することでもある。標本木の成長量に対する周囲林分の優勢木のグループと、下層木のグループの影響力を比較検討した。周囲林分のうち優勢木と被優勢木からなる林分の相対的制令を全標本木について決定し、これをもとにして色々な地位級と年令における正常かつ無手入林分の優勢な部分についての近似的な情報を計算した。*ponderosa pine* に対するこのような知識は、他の方法では入手できないのである。

資料の収集

データは *ponderosa pine* の地位と土壌の種類の間の相関をしらべるために行なわれた既定の資料の収集の補足調査の中で *Soil Conservation Service* が、1954～1957年の間に集めたものである。標本点の分布（*Table. 1. Fig. 1*）は十分広範囲にわたっているから、この関係は普遍的に応用できる筈である。

Fig. 1 調査地の分布

数字はそれぞれの地域内で測定した木の本数を示す。

測定は最近では被害を受けていない天然生の同令林分中の生育が正常で健全な、優勢または被優勢木についておこなったが、これらは樹幹距離または断面積密度、上層林冠、密度、年令、直径、地位および地理的分布の広い範囲を代表するようにとった（*Table 2. Fig. 2*）。全部で557本の木を測定したが、初期の測定値の幾つかでは、変数の一部を測定しくいなかったので、すべての分析から除外した。

それぞれの木について記録したデータは、

(1) 樹冠級　(2) 年令　(3) 樹高　(4) 胸高直径

(5) 地位指数　(6) 周囲林分の断面積密度

(7) 上層林冠密度　(8) 過去5年間と10年間の半径成長量

(9) 外側から1インチの幅の中にある年輪数

Table 1　標本木をとった地域と、それらの地域における10フィート地位級ごとの測定本数

地域[1]	26～35	36～45	46～55	56～65	66～75	76～85	86～95	96～105	106～115	116～125	126～135	136～145	146～155	156～165	166～175	計
Judith Gap Mont.	0	10	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16
Helena, Mont.	2	3	2	2	7	2	4	1	0	0	0	0	0	0	0	23
Missoula, Mont.	0	0	0	3	8	5	5	2	0	0	0	0	0	0	0	23
Sandpoint, Idaho	0	0	0	3	5	14	8	9	4	0	0	0	0	0	0	43
Moscow, Idaho	0	0	0	3	2	1	2	3	2	0	0	0	0	0	0	13
Spokane, Wash.	0	1	10	13	13	14	12	11	0	2	1	0	0	0	0	77
Republic, Wash.	0	0	2	9	15	19	12	1	7	0	0	0	0	0	0	85
Ellensburg, Wash.	0	0	0	2	1	2	3	3	0	0	0	0	0	0	0	11
Goldendale, Wash.	0	0	3	9	21	13	13	9	18	6	3	2	1	0	0	98
Wallowa, Oregon	0	0	0	8	5	11	12	9	4	1	0	0	0	0	0	50
Bend, Oregon	0	0	4	3	7	13	3	1	2	0	0	0	0	0	0	33
Klamath Falls, Ore.	0	0	4	3	9	10	8	2	1	0	0	0	0	0	0	37
Placerville, Calif.	0	0	0	0	2	3	2	1	9	4	7	6	3	4	2	43
Prescott, Ariz.	0	1	9	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25
計	2	15	38	65	100	112	84	52	47	13	11	8	4	4	2	557

1）各地域の名称には、その中に含まれる最も著名な町の名をとった。

である。

樹冠級は優勢木か準優勢木かの何れかである。年令は成長錐で調べた樹高における年令に、Meyer（1938）が与えた種々な地位級に対する一定値を加えて修正した。樹高はテープで0.1インチ単位で測定した。それぞれの木の地位指数は Meyer（1938）の地位曲線から読みとった。周囲林分の断面積は、係数10、20、30、40のアングルゲージ（Grosenbaugh

1952）によって決定した。どの場合でも測定木の中心を標本点とする一様なやり方を使用した。断面積は全林と優勢木のグループ（測定木は優勢木＋準優勢木の中に含まれている[4]）とについて別々に求めた。周囲林分の上層林冠の平均密度は空間的 densiometer（Lemmon 1956）を使

4）10の factor について求めた測定値が最も信頼できることがわかったので、分析に使用した。標本木の生育している林分の断面積密度の最も妥当な表わし方の吟味およびこの手法の検討は次の論文の主題である。

5）Meyer 1938 により示された Pacific Northwest Forest and Range 試験場のから提供された。

Table 2 測定した変数の分布[1)]

断面積密度(係数10) 全林 間隔	本数	D+C 間隔	本数	I+S 間隔	本数	胸高直径 間隔	本数	樹高 間隔	本数	年令 間隔	本数
平方フィート		平方フィート		平方フィート		インチ		フィート		年	
< 20	1	< 19	7	< 11	108	3.5~4.4	0	26~35	4	31~40	6
20~56	29	20~56	48	12~20	59	4.5~5.4	1	36~45	61	41~50	57
57~92	82	57~92	89	21~29	0	5.5~6.4	1	46~55	96	51~60	116
93~128	86	93~128	84	30~38	34	6.5~7.4	9	56~65	113	61~70	107
128~164	127	129~164	87	39~47	30	7.5~8.4	23	66~75	101	71~80	62
165~200	104	165~200	27	48~56	23	8.5~9.4	28	76~85	77	81~90	52
201~236	59	201~236	10	57~65	24	9.5~10.4	44	86~95	36	91~100	34
237~272	38	237~272	2	66~74	16	10.5~11.4	92	96~105	24	101~110	22
273~308	18	273~308	0	75~83	19	11.5~12.4	44	106~115	25	111~120	22
309~344	11	309~344	0	84~92	9	12.5~13.4	47	116~125	7	121~130	17
345~380	1	345~380	0	93~101	6	13.5~14.4	45	126~135	4	131~140	13
> 380	1	381~416	0	102~110	7	14.5~15.4	43	136~145	4	141~150	12
				111~119	0	15.5~16.4	48	146~155	3	151~160	9
				120~128	5	16.5~17.4	26	156~165	0	161~170	2
				129~137	1	17.5~18.4	34	166~175	1	171~180	2
				138~146	6	18.5~19.4	15	176~185	1	181~190	1
				147~155	3	19.5~20.4	21			191~200	2
				156~164	1	20.5~21.4	16			201~210	0
				164	3	21.5~22.4	12			211~220	0
						22.5~23.4	15			221~230	0
						23.5~24.4	7			231~240	1
						24.5~25.4	6			241~250	1
						25.5~26.4	5			251~260	0
						26.5~27.4	10			261~270	0
						27.5~28.4	4			271~280	1
						28.5~29.4	4			281~290	0
						29.5~30.4	0			291~300	0
						30.5~31.4	0			301~310	1
						31.5~32.4	1			311~320	0
						32.5~33.4	0			321~330	0
						33.5~34.4	1			331~340	1
						34.5~35.4	1			341~350	0
						35.5~36.4	2			351~360	1
						46.5~47.4	1				

地位指数 間隔	本数	上層林冠密度 間隔	本数	平均年成長量 最近5年間の材積成長 間隔	本数	最近10年の材積成長 間隔	本数	最近5年間の生径成長 間隔	本数	外側から1インチ内の年輪数 間隔	本数
フィート		%		立方フィート		立方フィート		インチ			
26~35	2	0~2	1	<.10	14	<.10	13	<.15	62	5	1
36~45	15	3~7	1	.11~.20	36	.11~.20	36	.16~.20	61	6	3
46~55	38	8~12	4	.21~.30	49	.21~.30	51	.21~.25	84	7	18
56~65	65	13~17	6	.31~.40	34	.31~.40	39	.26~.30	80	8	22
66~75	100	18~22	6	.41~.50	46	.41~.50	45	.31~.35	69	9	36
76~85	112	23~27	7	.51~.60	41	.51~.60	52	.36~.40	51	10	37
86~95	84	28~32	10	.61~.70	50	.61~.70	39	.41~.45	48	11	28
96~105	52	33~37	13	.71~.80	46	.71~.80	53	.46~.50	32	12	48
106~115	47	38~42	21	.81~.90	44	.81~.90	34	.51~.55	22	13	32
116~125	13	43~47	24	.91~1.00	24	.91~1.00	28	.56~.60	19	14	43
126~135	11	48~52	27	1.01~1.10	19	1.01~1.10	17	.61~.65	16	15	33
136~145	8	53~57	41	1.11~1.20	20	1.11~1.20	23	.66~.70	2	16	23
146~155	4	58~62	27	1.21~1.30	22	1.21~1.30	21	.71~.75	9	17	24
156~165	4	63~67	37	1.31~1.40	20	1.31~1.40	20	.76~.80	0	18	17
166~175	2	68~72	55	1.41~1.50	12	1.41~1.50	16	.81~.85	1	19	19
		73~77	67	1.51~1.60	14	1.51~1.60	9	.86~.90	0	20	18
		78~82	52	1.61~1.70	15	1.61~1.70	15	.91~.95	1	21	18
		83~87	41	1.71~1.80	11	1.71~1.80	11			22	17
		88~92	35	1.81~1.90	3	1.81~1.90	4			23	13
		93~97	10	1.91~2.00	4	1.91~2.00	2			24	14
		98~100	1	2.01~2.10	4	2.01~2.10	2			25	10
				2.11~2.20	2	2.11~2.20	1			26	9
				2.21~2.31	3	2.21~2.30	2			27	6
				2.31~2.40	5	2.31~2.40	6			28	6
				2.41~2.50	4	2.41~2.50	3			29	5
				2.51~2.60	1	2.51~2.60	1			30	4
				2.61~2.70	1	2.61~2.70	3			31	6
				2.71~2.80	3	2.71~2.80	2			32	4
				2.81~2.90	1	2.81~2.90	2			33	5
				2.91~3.00	2	2.91~3.00	1			34	1
				3.01~3.10	2	3.01~3.10	0			35	9
				3.11~3.20	0	3.11~3.20	0			36	4
				3.21~3.30	2	3.21~3.30	1			37	2
				3.31~3.40	1	3.31~3.40	0			38	2
						3.41~3.50	1			39	5
						3.51~3.60	1			40	2
						3.61~3.70	0			41	2
						3.71~3.80	0			42	1
				4.81~4.90	1	3.81~3.90	2			43	0
										44	1
										45	2
						4.61~4.70	1			46	1

断面積密度（係数10）						胸高直径		樹高		年令	
全林		D＋C		I＋S							
周隔	本数	周隔	本数	周隔	本数	周隔	本数	周隔	本数	周隔	本数
						インチ 32.5～33.4	1				
計	557		354		354		557		557		557

1) 測定した全範囲にわたる各変数の級周隔と，各級における測定木の本数．係数10で測定した林分である．残り（I＋S）林分は，介在木と被圧木から構成される．

って，それぞれの測定木の東，西，南，北で求めた4つの測定値から決定した．この場合測定木から十分離れて，測定木の樹冠が含まれないようにした．外側から1インチ内の年輪数と，インチ数で示した最近5年間および10年間の平均直径成長量の測定値は，各測定木の胸高で4方向から採取したコアーから求めた．各測定木について，調査時点，5年前，10年前および（現在直径－1インチ）のときのそれぞれについて材積を計算した．この資料から3つの期間の各々に対する材積成長量を求め，平均連年立方フィート成長に換算した．材積は樹高を1フィート単位（幼木の年令に対しては地位指数曲線で修正した），直径を0.01インチ単位として両対数グラフ式の材積表から計算した[5]．

地位指数		上層林冠密度		平均年成長量							
				最近5年間の材積成長		最近10年の材積成長		最近5年間の平径成長		外側から1インチ内の年輪数	
周隔	本数	周隔	本数	周隔	本数	周隔	本数	周隔	本数	周隔	本数
				立方フィート 5.51～5.60	1					47	0
										48	2
										49	1
										50	0
										51	0
										52	2
										53	0
										54	1
										55	1
										56	0
										57	0
										58	0
										59	0
										60	1
	557		448		557		557		557		557

注 断面積密度はエーカー当り平方フィートで示してある．D＋C林分というのは優勢木と準優勢木からなる

標本木の最近5年間の連年材積成長量

材積の連年成長は0年から始まり，以後長期にわたって成長率が増加しながら推移し，その後この増加は漸減して連年成長最大の時期で0となることが知られている．そのあとこの成長率の増加は負になってゆく．つまり成長量は林木の増加とともに減少する（Bruce and Schumacher, 1950）．したがって林木の5年間の連年成長量を Y_1 とすると，これは

$$\log Y_1 = a + b\left(\frac{1}{A}\right) + c\left(\frac{1}{A}\right)^2$$

と表わすことができる．ここでAは年令である．しかし係数の a，b，c，……などは周囲林分の密度や地位に関係し，また他の変数たとえば年令や直径，樹高などにも影響される．したがってこれを式で表わすと　上述

のことは、

$$a = a_0 + a_1 B + a_2 S$$

$$b = b_0 + b_1 B + b_2 S$$

$$c = c_0 + c_1 B + c_2 S$$

となる。ここでBは、密度をエーカー当り断面積で示したもので、Sは地位指数である。最初の式にこれらの等式を代入し、最小二乗解を求めやすいように独立変数を整理すると、

$$\log Y_1 = a_0 + b_0(1/A) + c_0(1/A)^2 + a_1(B) + b_1(B/A) + b_2(S/A) + a_2(S) + c_1(B/A^2) + c_2(S/A^2)$$

となって、式の中には全部で9つの未知数が含まれる。

この考え方を拡張して、周囲林分のエーカー当り断面積密度の影響を2つの部分、すなわち優勢林分の影響（B_D）と下層林冠の影響（B_I）とにわけ、また全林冠に対する割合で示した上層林冠（O）、標本木のd、h、h（D）とその樹高間のよく知られた関係を含めることにして、次の式を採用した。

$$\log Y_1 = a_0 + b_0(S) + c_0(B_D) + d_0(B_I) + e_0(O) + f_0[\log(DH)] + \{a_1 + b_1(S) + c_1(B_D) + d_1(B_I) + e_1(O) + f_1[\log(DH)]\}(1/A) + \{a_2 + b_2(S) + c_2(B_D) + d_2(B_I) + e_2(O) + f_2[\log(DH)]\}(1/A)^2$$

この方程式を資料の完全な358本の標本木にあてはめ、回帰の平方和に対する寄与の順位によって、独立変数の影響を削除した結果はTable 3の通りである。

最初の9つの変数は極めて有意な影響を与えているが、残りの8つは5

Table 3　方程式(1)の変数にもとづく$\log(100Y_1)$の平方和と残差平方和

変動因	自由度	平方和	平均平方
S	1	25.9673	
B_D	1	4.6330	
$1/A$	1	3.0751	
B_D/A	1	0.3515	
$\log(DH)$	1	0.2275	
$1/A^2$	1	0.9823	
$1/A[\log(DH)]$	1	0.4049	
S/A^2	1	0.5672	
O	1	0.1787	
O/A	1	0.0493	
$1/A^2[\log(DH)]$	1	0.0349	
S/A	1	0.0355	
B_D/A^2	1	0.0296	
B_I	1	0.0151	
O/A^2	1	0.0031	
B_I/A^2	1	0.0013	
B_I/A	1	0.0226	
残差	340	4.4205	0.0130
全体	357	46.9994	

%水準で有意とならない（Table 3）。9番目の変数の上層林冠の密度（O）は有意であるが削除した。それはこれと競合する変数の、優勢林分

断面積の方が、単独（B_D）に使っても、また標本木の年令と組合わせ（B_D/A）てもずっと寄与が大きいからである。この分析でえた回帰式は次の通りである。

$$\log(100Y_1) = -0.047516 - 2.526773(100/A) + 0.14743(S/100)$$
$$+[0.322185 - 0.269474(S/100)](100/A)^2$$
$$-[0.336434 - 0.213000(100/A)](B_D/100)$$
$$+[0.545598 + 0.858123(100/A)][\log(DH)] \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで

Y_1 ＝ 標本木の最近5年間の材積連年成長量（立方フィート）

D ＝ 現在胸高直径（インチ）

H ＝ 現在樹高（フィート）

A ＝ 現在樹令

B_D ＝ 周囲の優勢林分の断面積（エーカー当り平方フィート）

S ＝ 地位指数（基準年令100年）（フィート）

有意となった8つの変数の $\log(100Y_1)$ に対する重相関係数は0.949である。

最近10年間の材積連年成長量

この分析は前節の最近5ヶ年間の成長量の分析と同じ方法によった。記号の定義は前と同様である。標本木の10年間の連年材積成長量（立方フィート）Y_2 について、次のような方程式がえられた。

$$\log(100Y_2) = -0.975754 - 1.704786(100/A) - 0.048085(S/100)$$
$$+[0.174541 - 0.196847(S/100)](100/A)^2$$
$$-[0.251678 - 0.148610(100/A)](B_D/100)$$
$$+[0.814533 + 0.683792(100/A)][\log(DH)] \quad \cdots\cdots (2)$$

この分散分析は Table 4 の通りである。S/A^2 以外の変数は、すべて極めて有意である。しかし（1）と回帰式の形をそろえるため、この変数も含めておいた。これらの8変数の重相関係数は0.962であった。

Table 4　方程式（2）の変数にもとづく $\log(100Y_2)$ の平方和と残差平方和

変動因	自由度	平方和	平均平方
$\log(DH)$	1	33.7328	
$1/A[\log(DH)]$	1	6.6602	
S/A	1	0.8488	
B_D	1	0.4743	
$1/A$	1	0.2819	
B_D/A	1	0.2516	
$1/A^2$	1	0.1983	
S/A^2	1	0.0021	
残差	349	3.4380	0.00989
全体	357	45.9180	

最近5年間の標本木の半径連年成長量

材積の連年成長量と同じ形の基礎方程式を使うと、5年間の半径成長量の形式は次のようになる。

$$\log Y_3 = a_0 + b_0(1/D) + c_0(H)$$
$$+d_0(S) + e_0(B_D) + f_0(B_I)$$
$$+[a_1 + b_1(1/D) + c_1(H) + d_1(S) + e_1(B_D) + f_1(B_I)](1/A)$$
$$+[a_2 + b_2(1/D) + c_2(H) + d_2(S) + e_2(B_D) + f_2(B_I)](1/A)^2$$

ここで、

Y_5 = 最近5年間の標本木の半径成長量（インチ）

D = 現在直径（インチ）

H = 現在樹高（フィート）

A = 現在年令

S = 地位指数（基準年令100年でのフィート）

B_D = 周囲の優勢林分のエーカー当り断面積（平方フィート）

B_I = 対応する下層林分の断面積

この回帰の分散分析をTable. 5 に示す。この中で最初の6つは極めて有意であるが、残りの変数はいずれも5%水準にも達しないことがわかる。有意となった6つの独立変数を使うと、回帰方程式は

$$\log(100Y_5) = 1.270997 - 0.044422(B_D/100) + [0.627631 + 0.079909(B_D/100) - 0.042797(S/100)](100/A) - 0.117322(100/A)^2 \quad \cdots\cdots (3)$$

となる。この場合の重相関係数は0.743である。

Table 5　方程式(3)の変数に帰因する$\log(Y_5)$の平方和と残差の平方和

変動因	自由度	平方和	平均平方
S/A	1	4.9903	
B_D	1	1.3194	
$1/D$	1	0.2005	
$1/A$	1	1.1053	
$1/A^2$	1	0.1834	
B_D/A	1	0.1574	
S/A^2	1	0.0327	
$(1/D)(A)$	1	0.0633	

変動因	自由度	平方和	平均平方
B_I	1	0.0357	
B_I/A^2	1	0.0503	
B_I/A	1	0.0230	
B_D/A^2	1	0.0216	
H	1	0.0161	
H/A^2	1	0.0019	
H/A	1	0.0008	
S	1	0.0018	
$(1/D)(A^2)$	1	0.0001	
残差	340	6.4460	0.01896
全体	357	14.6496	

この方程式を使いやすくするため、交互作用（積）の変数S/A　B_D/Aおよび年令の二乗の項$1/A^2$を回帰から削除した（Table 5の変数を参照）。再計算すると回帰式は

$$\log(100Y_5) = 1.340788 - 0.037462(100/D) - 0.072116(B_D/100) + 0.334945(100/A)$$

（(3)の簡略形）

この中で地位指数Sの効果は有意にならなかったので削除した。この簡略形によれば、予測値が少し低くなることがわかった。簡略形では重相関係数は0.743から0.714に低下した。地位指数が5年間の半径成長量に対して有意な寄与をしないことを意外に思うかもしれない。しかし地位は年令と一緒になって半径成長量に影響することが知られており、ここでは直径と年令の2つの独立変数を含めてあるから、地位指数の影響が間接的に

十分盛りこまれているのである。

標本木の外側1インチ当りの年輪数

直径の外側1インチ内の年輪数で示した平均的な半径成長量と，(3)式におけるように，インチ数で表わした半径成長量との間には近似的な関係が認められる。したがって，直径成長量の2通りの表わし方については，どちらも同じ形の回帰方程式を使わなければならない。

直径の外側1インチ以内の年輪数をY_4とすると，回帰式は次のようになる。ただし他の記号は(3)式と同じである。

$$\log(10Y_4) = 2.491114 + 0.041110\left(\frac{100}{D}\right) + 0.173112\left(\frac{B_D}{100}\right) - \left[0.711220 + 0.075428\left(\frac{B_D}{100}\right) - 0.052989\left(\frac{S}{100}\right)\right]\left(\frac{100}{A}\right) \quad \cdots\cdots (4)$$

$\log Y_4$に対するこの回帰の分散分析をTable.6に示す。

Table.6　(4)式の変数に帰因する$\log(Y_4)$の平方和と残差平方和

変動因	自由度	平方和	平均平方
S/A	1	5.6704	
B_D	1	1.3814	
$1/A$	1	0.3128	
$1/D$	1	1.0837	
$1/A^2$	1	0.2261	
B_D/A	1	0.0897	
残差	351	5.2745	0.0150
全体	357	14.0386	

これは$\log Y_3$の回帰で極めて有意となった6変数の各々の寄与が示されている。

これらの6つの独立変数の重相関係数は0.790である。

(3)式のときと同じように，交互作用変数S/A，B_D/Aと$1/A^2$を削除して再計算すると，簡略式は

$$\log(10Y_4) = 2.377827 + 0.032852\left(\frac{100}{D}\right) + 0.081531\left(\frac{B_D}{100}\right) - 0.361198\left(\frac{100}{A}\right) \quad \text{((4)の簡略形)}^{7)}$$

この簡略式の重相関係数は0.774である。

成長方程式の検討

まえがきで述べたとおり，方程式(1)，(2)の誘導は，最も一般的に使われている地位指数法によらないで，潜在的土地生産力を評価する方法が存在するかどうかを検討する仕事の一部として実行されたものである。この問題が完全に解決されたとはいえないが，手許のデータ，方程式(1)，(2)およびそれらの修正式はそのような可能性のあることを示している。

回帰分析では，各独立変数に変動範囲内の色々な値をとらせたとき，どのような影響が現れるかを示す目的で，他の変数の値をそれらの平均のところに固定しておくことが多い。

この方法によれば，方程式(3)からFig.3，方程式(4)からFig.4の結果がえられる。5年期間の連年直径成長量および外側から1インチを成長するのに要した年輪数（年）に対する断面積密度，平均直径および年令の関係は図から明らかである。

7) 今後方程式(4)というときにはこの簡略式をさす。

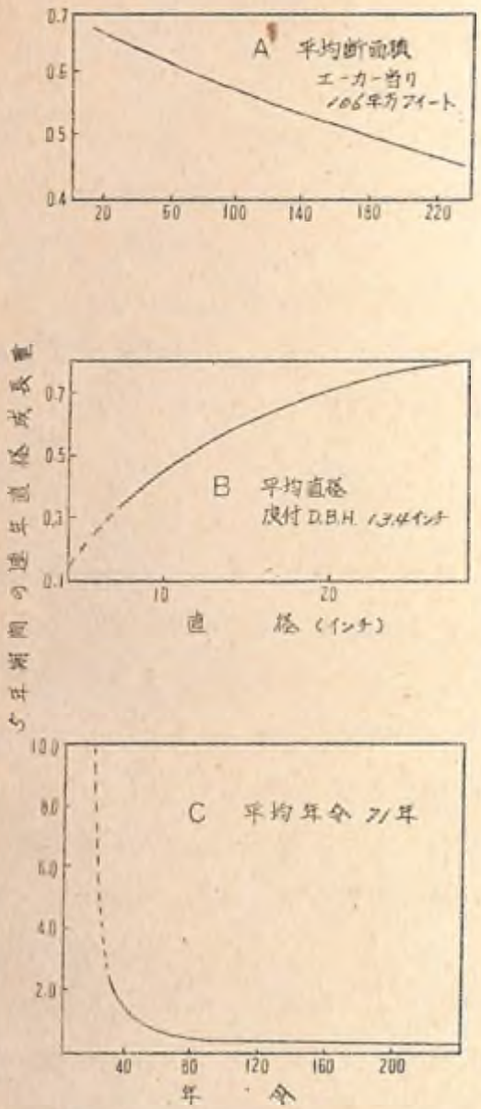


Fig. 3 方程式3（簡略形）で示した標本木の過去5年間の連年直径成長量と周囲の優勢林分の断面積密度および標本木の直径、年令間の関係。独立変数の値は調べているもの以外は、その平均値に固定してある。

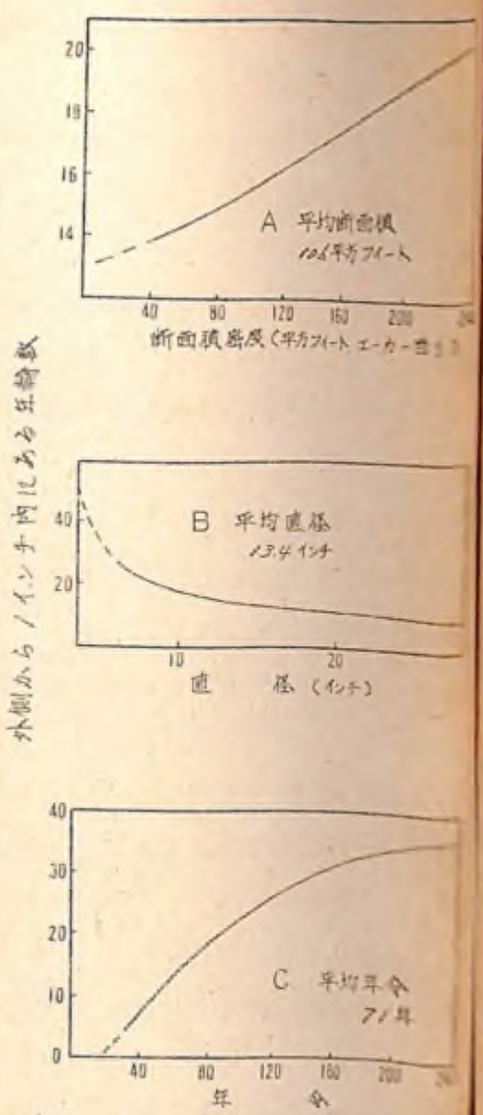


Fig. 4 方程式4（簡略形）で示した標本木の外側から1インチ当りの年輪の数と周囲の優勢林分の断面積密度、標本木の直径、年令との関係。独立変数は調査した以外のものは平均値とした。

無間伐林分の優勢な部分に対する近似的統計量の計算

林分の優勢な部分と、下層林分のそれぞれの影響が4つの成長方程式で検討された。その結果、測定木の成長に対して意味のある影響を与えるのは、優勢な部分だけだということがわかった。このことから、実際的かつ合理的な間伐方法というものは、林の優勢な部分を処理する（変化させる）ものでなければならないと考えられる。この仮定によれば、間伐後の優勢林分が、通常無間伐の *fully stocked* な林でみられるより少なくならない限り、残存木には実質的な競争からの解放は生じないように思われる。色々な地位に対する林分の統計量や優勢な部分の収穫量については、*Meyer* の著書（1938）にも他の文献にも示されていない。しかしこの研究の結果を使えば、全林について発表されている資料から、無間伐の正常林の優勢な部分に対する近似的な知識を求めることができる。

測定した354本のデータに次の方程式をあてはめた。

$$B_D = b_1(B_D + B_I) + b_2(B_D + B_I)(A) + b_3(B_D + B_I)(S)$$

ここで B_D は各測定木を含めた周囲林分の優勢木と準優勢木の部分の断面積で、B_I は介在木と被圧木（下層林冠の部分とよぶことにする）の断面積、またSは地位指数、Aは測定木の年令で、b_1, b_2, b_3 は未知常数である。この式の第2、第3項は有意とならなかったので削除した。再計算の結果

$$B_D = (0.7097)(B_D + B_I)$$

$B_D + B_I$ は全林の断面積だから、優勢部分の断面積はこの値の71%を占めている。係数0.7097の標準誤差は10%であった。この知識を使うと、色々な年令や地位に対する優勢部分のエーカー当り平均本数、断面積および平均直径を全林分の資料（*Meyer* 1938, *Table* 28）から計算できる。なお、各地位に対して直径階ごとの断面積の値を大きい直径階から小

さい直径階に向って、全体の断面積の7/8の値となるまで次々に加算して累計和を作った。これは同時に各直径階の本数も累積和をとった。どの場合でも最後の直径階の加算では、そのクラスを分割しなければならなかった。このようにして、総断面積の7/8を表わす優勢木の本数を計算することができた。Table 7にはこの情報とともに、無手入林分全体の林令構成因子、それに収穫量の知識（Meyer 1938. Table 3. 4. 5より）を示してある。林の優勢部分について求めた値をFig. 5. 6. 7の上にプロットした。優勢木のエーカー当り断面積の曲線（Fig. 7. Table 7）は非常に地位の悪いところの若い林と、地位のよいところでの老令林を除くと、Meyerの表から計算した7/8の値とよく一致している。

色々な間伐処理をしたときの仮想的な林分の成長と収穫量を計算するため、スタートのデータとして使用した。これは最も効果的な間伐経営は、林分の優勢および亜優勢部分に手を加えるものでなければならないという、この研究において裏づけられた考えにもとづいている。この詳細は次の報告の主題である。

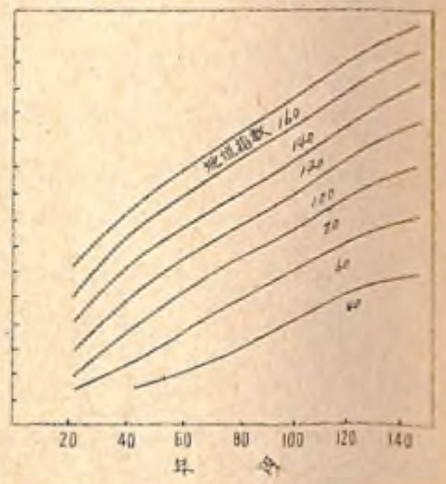


Fig. 5　地位級ごとの年令と直径の関係（同令無間伐のponderosa pine林分における優勢または亜優勢部分に属する平均断面積木について）

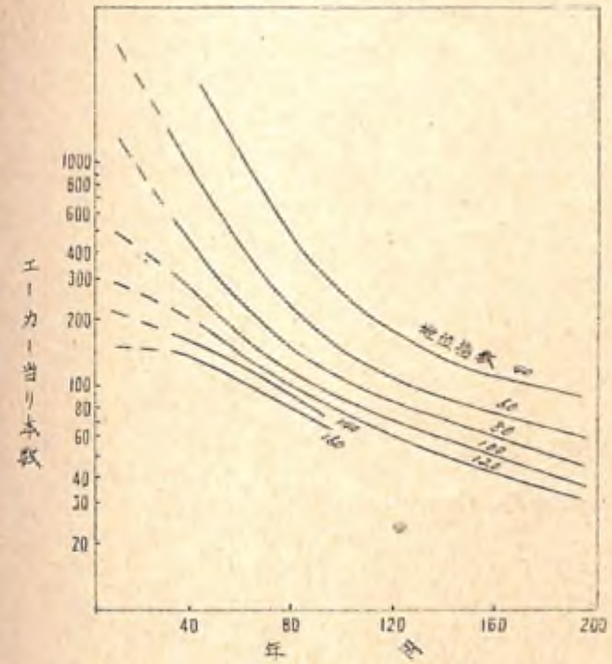


Fig. 6　同令のPonderosa pine林分における年令とエーカー当り優勢木、亜優勢木本数間の関係

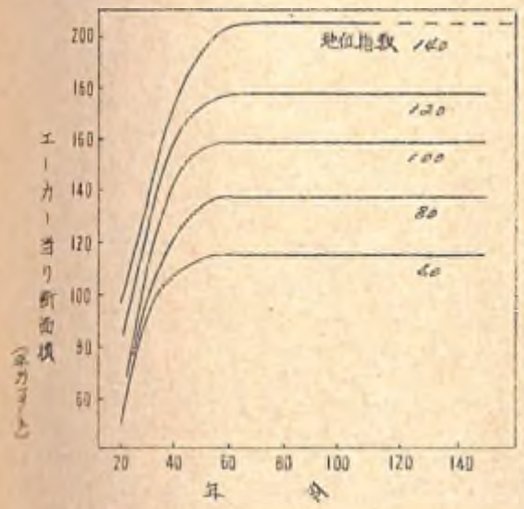


Fig. 7

地位ごとの優勢木、亜優勢木の年令と断面積との関係（同令無間伐のponderosa pineについて）

Table. 7 Ponderosa pine 同令天然林の全林分と優勢林分との比較[1]

年令	項目[2]	地位 40 全体	40 優勢林分	60 全体	60 優勢林分	80 全体	80 優勢林分	100 全体	100 優勢林分	120 全体	120 優勢林分	140 全体	140 優勢林分	160 全体	160 優勢林分	備考
20	N	…	…	4600	1213	2250	903	1280	407	779	256	561	197	394	145	N：エーカー当り本数
	G	…	…	46	48	70	56	93	62	115	80	137	95	159	108	G：〃 断面積
	V_1	…	…	400		1000		1700		2400		3350		4350		V_1：〃 立方フィート材積
	V_2	…	…	…		…		600		2800		7300		16500		V_2：〃 ボードフィート材積
	D	…	…	1.3	2.7	2.4	3.4	3.6	5.3	5.2	7.6	6.7	9.4	8.6	11.7	D：平均直径（インチ）
40	N	6960	2348	2700	946	1270	430	705	274	539	203	405	162	316	138	
	G	123	101	151	111	180	126	210	148	238	164	264	181	287	200	
	V_1	1050	××	1750		2750		4100		5650		7500		9350		
	V_2	…	××	500		3700		11900		23900		39000		55200		
	D	1.8	2.8	3.2	4.6	5.1	7.3	7.0	10.0	9.0	12.2	10.7	14.3	12.9	16.3	
60	N	2800	1081	1145	396	662	231	445	168	340	139	269	120	224	105	
	G	141	106	169	114	198	140	228	156	258	177	288	205	317	225	
	V_1	1800	××	2750		3950		5850		8150		10900		13700		
	V_2	100	××	3700		12600		27000		45400		68400		88300		
	D	3.0	4.2	5.1	7.3	7.4	10.5	9.7	13.0	11.8	15.3	[illegible]	17.7	16.1	19.8	
80	N	1300	458	634	223	393	148	286	120	225	102	185	89	162	80	
	G	141	97	169	118	198	136	228	159	258	181	288	205	318	220	
	V_1	2400	××	3400		4900		7100		9950		13500		16950		
	V_2	1000	××	8800		23100		40200		62200		88700		116400		
	D	4.5	6.2	7.0	9.8	9.6	13.0	12.1	15.6	14.5	18.0	16.9	20.5	19.0	22.5	
100	N	744	257	400	150	266	109	199	90	162	78	139	68	123	63	
	G	141	98	169	117	198	138	228	162	258	181	288	205	318	209	
	V_1	2900	××	3900		5650		8100		11350		15450		19350		
	V_2	3200	××	14600		31200		50300		75600		107000		140200		
	D	5.9	8.4	8.8	12.0	11.7	15.2	14.5	18.1	17.1	20.6	19.5	23.5	21.8	24.7	

1) 全林に対する数値は Meyer（1938）の Table. 3, 4 から とった。優勢林分の数値の計算方法については本文をみよ。

2) 平均直径は平均断面積をもつ木の直径である。　3) International rule（1/8 - インチ kerf）

年令	項目	地位 40 全体	地位 40 優勢林分	地位 60 全体	地位 60 優勢林分	地位 80 全体	地位 80 優勢林分	地位 100 全体	地位 100 優勢林分	間数 120 全体	間数 120 優勢林分	間数 140 全体	間数 140 優勢林分	間数 160 全体	間数 160 優勢林分	備考
120	N	512	178	281	112	196	86	152	72	125	62					
	G	141	99	169	116	198	138	228	161	258	178					
	V_1	3300	××	4400		6200		8850		12400						
	V_2	6200	××	20000		37300		58200		86400						
	D	7.1	10.1	10.5	13.8	13.6	17.2	16.6	20.2	19.5	22.9					
140	N	375	139	219	90	153	70	120	59	99	50					
	G	141	99	169	118	198	143	228	159	258	178					
	V_1	3600	××	4800		6650		9450		13250						
	V_2	9300	××	24400		42500		64800		95200						
	D	8.3	11.4	11.9	15.5	15.4	19.4	18.7	21.2	21.9	25.5					
160	N	302	110	181	80	126	60	98	49	81	42					
	G	141	100	169	120	198	139	228	160	258	171					
	V_1	3800	××	5100		7050		10000		13950						
	V_2	12000	××	28300		46900		70600		102800						
	D	9.3	12.9	13.1	16.5	17.0	20.6	20.7	24.5	24.2	27.3					
180	N	254	101	152	69	106	51	82	42	68	36					
	G	141	98	169	121	198	137	228	158	258	173					
	V_1	4000	××	5400		7450		10500		14550						
	V_2	14400	××	31600		50900		75900		109600						
	D	10.1	13.3	14.3	17.9	18.5	22.2	22.6	26.3	26.4	29.7					
200	N	218	87	130	60	92	45	70	37	58	32					
	G	141	96	169	120	198	135	228	157	258	166					
	V_1	4200	××	5600		7300		10950		15100						
	V_2	16700	××	34600		54700		80800		115600						
	D	10.9	14.2	15.4	19.1	19.9	23.5	24.4	27.9	28.6	30.8					

Ponderosa pine 単木成長に対する周囲林分の密度の関係について

Stocking Density around Ponderosa pine Trees

By P. E. Lemmon & F. X. Schumacher

(For. Sci. 1962, No. 4)

前報では（Lemmon & Schumacher, 1962）ponderosa pine の単木成長に対する地位指数，密度，年令および大きさの影響を取扱った。成長量を測定した標本木のまわりの競争関係にある木の間隔を，周囲林分のエーカー当り断面積によって評価した。これは測定したそれぞれの木の中心を sampling point を使って，アングルゲージ（Grosenbaugh, 1952）から求めた。各調査木に対する周囲林分の断面積を測定するアングルゲージには4種類の断面積乗数（1本のカウントに対して，エーカー当り10, 20, 30, 40平方フィート）を使った。これまでのところ，断面積乗数10のアングルゲージの測定値が最も妥当な結果を示したので，前報では乗数10の測定値による分析を述べた。この報告の目的は2つ以上の断面積乗数を使用する理由を論じ，結局乗数10の測定値で分析を進めることになった（断面積乗数の）テストの結果について述べる。

データの検討と修正

エーカー当りの平方フィート単位で表わした断面積密度は，多くの林業家が林分内の林木の直径成長量に影響を与える重要な因子であると考えている。これは色々の面で有用である。というのは，エーカー当り平均本数理論的に導かれた一様な間隔と分布のもとでの，平均樹幹距離と関係づけ

ることができ，また平均直径による樹幹距離の公式で表現できる（Lemmon & Schumacher, 1963）からである。

調査対象木の中心を抽出点に使ってアングルゲージで測定した断面積はその木のまわりの林木の競争関係を正しく評価していると仮定した。しかし測定のために選んだ木は，実際には理論通りの一様な間隔，あるいは分布を示していなかった。調査木の隣りの木はすぐ近くにあるが，他の木はずっと離れたところにしかないこともあり，また逆のこともある。競争は調査木の全方向で一様なのでなく，隣接木までの間隔や木の大きさによって方向ごとに強さが違っていることが多い。

このような不規則性を補正するには，断面積乗数の異なる4つのアングルゲージを使ってテストを行ない，その結果調査木の成長量に対する関係が最もつじつまの合っている測定値を正しいものとして採用すればよい。テストは個々の測定値ごとに，またそれらを色々に組合わせて行なってもよい。このほか，他の幾つかの方法も可能性がありそうに思えたので，以下に述べるような検討をしてみた。

調査対象の優勢木または従優勢木と直径が同じ位の遠く離れた"木まで手を伸ばして"数めると，調査木の生育している場所の真の断面積を"弱めてしまう"傾向がある。これは断面積乗数10のように，拡大円の半径（plot radius factor）の大きいゲージを使った場合に生ずる。逆に断面積乗数40のように，拡大円半径の小さいゲージでは，調査木のまわりの優勢林分の競合木をカウントすることができない。[1]

アングルゲージを測定している林分の平均直径に対応させて選ぶと，多

1) plot radius factor は最近スリット幅1インチ当りの標本点からの許容しうる距離（フィート）を示す水平距離係数（horizontal distance factor；略して HDF）として知られるようになった（Grosenbaugh）。

少もっと信頼できる測定値がえられる（Bell and alexander 1957）この研究では plot radius factor 2.75, 1.944, 1.588 および 1.375 のゲージで各調査木のまわりの測定をおこなったが，しかし広範囲の直径をもつ調査木が含まれ，したがって，これらが調査木を選んだ各林分の優勢木，被優勢木をよく代表するという理由で，上記のどれかの factor が最良だと確信しくいたわけではない。この factor を調査木の直径と関係づけられるある一貫した基礎によって調査木ごとに選べるだろうか？ この選ばれた factor を使用することにより，調査木の直径成長量に影響を与える周囲林分の断面積密度について一層信頼できる評価ができないものだろうか？ 最初の問題に対する答えは以下の諸節で述べる。第2の問題の答えが本報の研究目的の1つである。

Bell と Alexander は断面積乗数（B.A.F.）について次の公式を与えた。

$$B.A.F. = 43.560/1+4(d/w)^2$$

ここで d は測定点からスリットまでの距離で，w はフィート単位で表わしたスリット幅である。

この公式の d の調査木（ここでは測定点を表わしている）の直径と関係づけられていると仮定して，d の値を調査木の直径の2倍にきめる（インチで測定するが，フィートとして表わしておく）。w の値は1フィートにきめておく。そうすると B.A.F. を各調査木の直径に関係づけて計算する公式がえられる。要するにこのようにして選んだ B.A.F. のゲージでは，調査木の直径の二乗の距離にある直径1.2インチの木を1度カウントすることになる。

B.A.F. を小数以下1位まで正確に出す簡略式（この研究ではこの値を使った）は，Bell と Alexander の式の分母を調査木の直径の4倍の二乗でおきかえてえられる。すなわち，

$$B.A.F. = 43.560/(4d)^2$$

である。ここで d はインチ単位で測定した調査木の直径をそのままフィートとして使った値である。Bell と Alexander の公式の d として，調査木の直径の2倍を選んだことには，特別の理由はない。調査木の周囲林分の断面積を測定してから，調査木の直径成長と最も適当として選んだゲージの測定値との関係を求めるには，ゲージの選定にあたって2倍だけでなく，もっと多くの値を使う必要があろう。しかしこの研究では直径の2倍という値しか使わなかった。

手もとにあるデータは断面積乗数 10, 20, 30 および 40 のゲージを使ったときの断面積測定値だけである。しかし選ばれた断面積乗数*は机上の計算だけで十分テストできると考えた。それで，各調査木のまわりの断面積の測定値に直線関係 $Y = a + bx$ をあてはめた。x は Y という断面積推定値を求めるのに使った 10, 20, 30 あるいは 40 などの断面積乗数で，a と b は未知常数である。これらの計算は 557 本のそれぞれの木について周囲の全林分と周囲林分のうちの優勢な部分の2つについて行なった。

調査木（その中心が調査線にのっている）はかならず優勢木あるいは被優勢木のどちらかだから，いつも数えあげに含めた。これによって，推定値に多少偏りのでることがわかった。上に述べた簡略式 $B.A.F. = 43.560/(4d)^2$ を使って，それぞれの木について上に選んだ断面積乗数を計算し，これらの値を各調査木の回帰式に代入して，選ばれた断面積乗数のゲージを使ったときにえられたと思われる"修正"断面積を推定した。これらの計算は電子計算機をつかって，直線のあてはめと同時におこなった。

---

* ここに述べた 2D フィート：1フィートの拡大率に対する断面積乗数
但し D = 直径（インチ単位で測定）

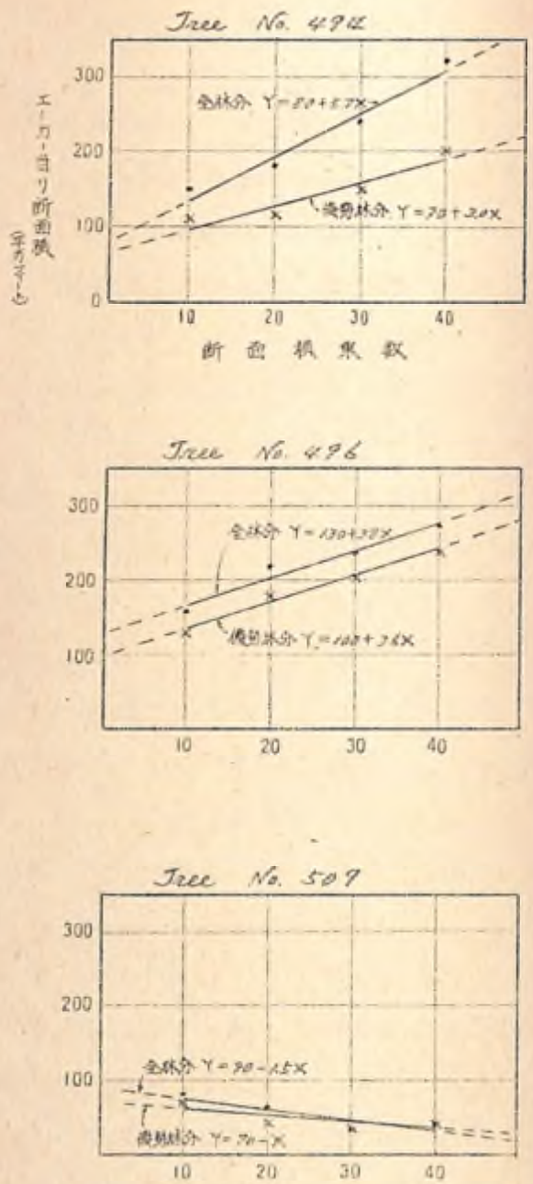


Fig. 3　4種類の断面積乗数を使って測った No. 494, 496, 509 のまわりの断面積密度

断面積対アングールゲージの係数の関係式の回帰係数の値（すなわち直線の傾き）から競争状態にある木の空間的な関係について若干の知見がえられる。たとえば、傾斜が負の場合（No. 509　Fig. 3）には、競争は測定木から距離が遠くなるにしたがって激しくなっていると考えられる。傾斜が正の場合（No. 494, 496、Fig. 3）に、調査木に近いところの方が競争が激しいと考えることができる。

各調査木の直径に関係させて選んだ断面積乗数が、いつもデータの範囲内にあるとは限らない。たとえば、計算した断面積乗数が10以下であったり（全体の32%）、40より大きくなったりしたく全体の5%）。したがって選ばれた断面積乗数がデータの外側に落ちるようなときには、それぞれの木について次のような取扱の基準を適用することにした。すなわち、計算した乗数が40以上となったら、乗数40で求めた測定値を使えば数も良い結果がでると考えることにし、計算した乗数が10以下で、断面積の測定値と使用した4つの断面積乗数との関係を示す回帰直線の傾斜が正となるときには、4つの乗数10, 20, 30, 40でえた測定値を平均し、これを修正値として使う。また計算した乗数が10以下で、傾斜が負のときは、乗数10と20で求めた測定値の平均を"修正"値とする。

第1表と第2表、それにFig. 3は上の3つの場合の代表的な例を3本の調査木について示したものである。これらの木はFig. 1と2（省略）の写真に示したものである。

林分の全体と優勢部分の両方について、各調査木のまわりの断面積密度の8種類の表現形式をテストした（乗数10, 20, 30, 40で測定したもの、各調査木の直径に関係づけて選んだ修正乗数に対する回帰からの推定値、10, 20, 30, 40の乗数の測定値の平均、乗数10と20の平均、乗数30と40の平均の8種類）。林分の下層の部分、すなわち介在木や被圧

Table. 1　色々な断面積乗数のゲージで測定した調査木のまわりの *Ponderosa pine* の全林および優勢林分のエーカー当り断面積（平方フィート）

調査木 No	種類	アングルゲージの断面積乗数				
		10	20	30	40	修正値[1]
494	全林	150	180	240	320	156
	優勢	110	120	150	200	110
496	全林	160	220	240	280	193
	優勢	130	180	210	240	160
509	全林	80	60	30	40	70
	優勢	70	40	30	40	55

1）断面積乗数の計算は次のようにしておこなった。

B.A.F（No.494について）$= 43560/(4d)^2$

ここで　$d = 14.3$（Table. 2）だから、

B.A.F $= 43560/3271.84 = 13.3$

B.A.F（No.496）$= 43560/(4d)^2 = 43560/(4\times12.8)^2 = 16.6$

B.A.F（No.509）$= 43560/(4d)^2 = 43560/(4\times18.7)^2 = 7.8$

"修正"断面積測定値は次のようにして求めた。

Y（No.494について）$= 70 + 3.0X$（Fig. 3 優勢林分）

ここで $X = 13.3$ だから　$Y = 109.9$

Y（No.496について）$= 100 + 3.6X$（　〃　）

ここで $X = 16.6$　〃　$Y = 159.8$

Y（No.509について）$= 70 - X$（　〃　）

ここで $X = 7.8$　〃　$Y = 62.2$

しかしこの場合は、Xが10より小さく、また傾斜が負だから、断面積乗数10と20の断面積を平均した55という値を使う。

木についても、計算によって同じような値が求められるが、ここではテストしなかった。

Table. 2　代表的な3本の *poderosa pine* の測定値

調査木 No.	樹高（フィート）	樹令（年）	地位指数	胸高直径（インチ）	上層林冠密度（%）	材積の定期連年成長量（立方フィート）		過去5年の半径成長（インチ）	外側から1インチ内にある年輪数
						過去5年	過去10年		
494	70	97	71	14.3	43	0.89	0.85	0.47	14.2
496	67	102	66	12.8	53	0.56	0.57	0.29	13.9
509	72	66	93	18.7	24	1.53	1.62	0.62	7.4

蓄積密度（*stocking density*）の最も妥当な表わし方のテスト

林木の材積の連年成長量は、0年の0から始まって長い年数にわたって増加の速度を増しながら大きくなり、後次第に増加速度を減じて、遂には連年成長最大の時点において0となる。その後は増加率は負、すなわち成長は木の老化とともに次第に低下する（*Bruce and Schumacher*, 1950. *Lemmon and Schumacher*, 1962）。したがってもし Y_1 で5年間の平均連年成長量を表わすことにすれば、これは

$$\log Y_1 = a + b(1/A) + c(1/A)^2$$

で表わせる。ここでAは樹令である。しかし係数 a, b, c の1つ以上が周囲林分の密度や地位指数に関係するかもしれない。したがって、もし密度をエーカー当りの断面積Bで表わすとすると、上の仮定から

$$a = a_0 + a_1B + a_2S$$

$$b = b_0 + b_1B + b_2S$$

$$c = c_0 + c_1B + c_2S$$

が考えられる。ここでSは地位を表わす。これらの式を最初の式に入れ、最小二乗解を求めるために独立変数をまとめると、

$$\log Y_1 = a_0 + b_0(1/A) + c_0(1/A)^2 + a_1(B) + b_1(B/A) + b_2(S/A) + a_2(S) + c_1(B/A^2) + c_2(S/A^2)$$

となって、全部で9つの未知常数を含む式がえられる。

Bは8種類の形で示されるから、問題は上式において $\log Y_1$ と一番重相関係数の大きくなるBの形を求めることに帰着する。すなわちもっとわかりやすくいうと、回帰と独立な残差平方和がどのBのときに最小となるかをみればよい。

前報の成長量測定値（Lemmon and Schumacher, 1962）を使って上式に8通りのBを入れて残差を計算した。これは全林分の断面積を表わすBの形ごとに8回行なわねばならない。次は556本の調査木データについて求めた $\log(100Y_1)$ の残差平方和である。

断面積の表現形式	Bの記号	残差平方和
修正常数によるもの	X_1	19.841
点数 10	X_4	19.110
20	X_7	19.721
30	X_{10}	20.649
40	X_{13}	21.257
点数10, 20, 30, 40の平均	X_{16}	19.881
点数10, 20の平均	X_{19}	19.336
点数30, 40の平均	X_{22}	20.860

この場合、林分密度の効果は点数10のゲージによる断面積であらわすべきだということは明らかである。

引用文献

Bell, J. F. & L. B. Alexander. 1957 Application of the variable plot method of sampling forest stands Ore State Board of Forestry. Research note No. 30. 22 pp

Bruce, D. and F. X. Schumacher 1950 Forestr Mensuration McGraw Hill

Grosenbaugh, L. R. 1952. Plotless timber estimates -new, fast, easy. J. Forestry 50: 32–37

——. 1958. Point sampling and line-sampling: probability theory, geometric implications, synthesis. U. S. Dept. Agric Southern For. Exp. Sta. Occas paper 160. 34 pp

Lemmon, P. E. 1956. A spherical densiometer for estimating forest overstory density. For. Sci 2: 314–320

——, and F. X. Schumacher. 1962, Volume and diameter growth of ponderosa pine trees as influenced by site index, density, age and size For Sci 8: 236–249

——, and F. X. Schumacher. 1963. Theoretical growth and yield of hypothetical ponderosa pine stands as influenced by different thinning regimes For Sci 9

仮想的な ponderosa pine 林分に種々の間伐方式を適用したときの理論的な成長および収穫量について

Theoretical Growth and yield of Hypothetical ponderosa pine Stands Under Different Thinning Regimes

By P. E. Lemmon, F. X. Schumacher (For Sci 1963 (9) 33)

摘　要

色々な間伐方法を適用したときの理論的な結果を計算する方法を提案した。種々の地位級に属する正常な，無手入林の優勢部分の蓄積量から，30年の出発点におけるデータを求めた。成長方程式を使って，間伐後の直径成長量を推定する。立木度（stocking）をコントロールするため，直径にもとづく2種類の占有面積の基準を検討した。すなわち (1) Mitchell の与えた $S=(D+X)^2$ および (2) あらたに考案した生物的（biological）占有面積の規準 $S=(D+X)^2F$ である。ここでSは単木当りの平均占有面積（平方フィート）で，Dは優勢木と被優勢木の平均断面積直径で，Xはこの直径に加算する常数（インチ），またFは各地位級ごとに定められ，50年までは年令とともに変り，その後一定となる常数である。Fの値は曲線（グラフ）から読みとる。占有面積（Xの値）と間伐繰返し年数との妥当な組合わせは，Mitchell の規則では，すべての地位でX＝6で，このときの繰返し年数は地位60で20年，80で12年，100で9年，120で7年，140で5年である。一方，生物的規則では適切な組合わせは5年ごとでは $(D+0.5)^2F$，10年ごとでは $(D+1.1)^2F$，15年ごとでは $(D+1.8)^2F$，20年ごとでは $(D+2.2)^2F$ である。他の組合わせもグラフから読みとることができる。この2通りの規則による理論的な成長と収穫量の例を，地位指数60，80，100，120および140について計算した。2つの方法の間では伐期平均直径に少し差ができた。残存木が"自由に生育"できるような条件になるときは，その組合わせは適当である。地位80（事実上は差がない）と地位60（非常に小さい）を除けば，間伐をすると正常な無手入林の優勢な部分より平均直径が大きくなる。伐期における立方フィート材積およびボードフィート材積での総収穫量は，生物的規則の方が Mitchell の規則より大きくなったが，2例を除きこれらは正常な無手入林のものより大きくなった。

土壌地位相関を取扱った前報において，地位のわかっている土壌の上に生育する，既知の年令と大きさをもつ ponderosa pine の直径と材積成長を樹幹距離ごとに予測できる方程式を提出した（Lemmon and Schumacher 1962）。さらに，この研究から残される優勢木と被優勢木間の競争を効果的に緩和するためには，林分の優勢な部分に間伐を適用しなければならないことが，かなり明瞭に示された。これとともに，地位級と年令ごとの優勢な無間伐林分の蓄積量をも誘導し，無手入林分について発表されている数値と比較した（Meyer 1938）。

本報では，このようにして誘導した無手入林分の優勢な部分の数値を出発点にとり，直径成長量の予測方程式を使って上述の2通りの一般的な間伐方式を適用したときの仮想的 ponderosa pine 林分の，定められた輪伐期内の成長および収穫量に対する情報を計算しようとするものである。検討した方法の一つは，特に小林地の実情にそって考案された，実行の容易な Mitchell（1943 および 1962）のプログラムの効果であり，もう一つは，実用性はともかく，収穫量の最大を目標として組み立てた間伐方法の効果を検討することである。この2通りの方法はどちらも無手入林分

での結果と比較した。

モデル

仮想的な収穫計算をおこなうモデルは，30年生の正常な無手入林とする[1]。これらの林分の色々な地位級に対する優勢部分の平均直径，エーカー当り本数および断面積の値を出発点のデータとした。これらの統計量は，正方形地区の間に等間隔に配置された同じ大きさの木にあてはまるものと仮定した。これらの林分に以下に述べる間伐方法を実際に考えられる伐期まであてはめた。それぞれの間伐後の直径成長量を過去5年間の半径成長を表わす式から5年間隔，あるいはそのあとの端数の期間ごとに投影して計算した。各間伐期間の始めと終りのエーカー当り本数，材積および断面積を計算した。その際，反復して間伐することにより，経営林においては枯損が生じないと仮定した。

使用した直径成長の方程式は（Lemmon and Schumacher 1962, Eq. 3 簡略形）

$$\log(100Y_3) = 1.340788 - 0.037462(100/D) - 0.072116(B_0/100) + 0.334945(100/A)$$

で，Y_3 は過去5年間の半径成長量（インチ）

D は胸高直径（インチ）

B_0 は周囲の優勢林分の断面積（エーカー当り平方フィート）

A は現在樹令

立方フィートおよびボードフィート材積（International rule）による材積計算は，公表されている結果（Meyer, 1938）によった。胸高

1) これより早い年令から始めることは適当でない。それは成長予測式を作るのに使ったデータの中に，30年以下のものが少なかったからである。

直径4インチ以下の木については立方フィート材積，また8インチ以下の木についてはボードフィート材積はないものとして取扱った。

間伐前と間伐後の密度はエーカー当り断面積で表わした。したがって各間伐繰返し期間の始めと終りの競争の強さは，間伐した仮想的林分のエーカー当り断面積と，同一林令，同一地位の場合の正常で無手入の林の優勢な部分を比較することによって示される。間伐林分のエーカー当り断面積が，同様な地位，林令の正常な無間伐林の優勢な部分と同じになったとき，競争が単木の成長率を低下させる大きさに達したと考えることにした。このようなときは，もう一つの間伐が必要である。間伐によって除去すべき断面積の大きさは，成長率と間伐の繰返し年数によってきまる。主要な目的は，次の間伐のときまで残された木が十分旺盛な成長を持続できる程度に（過度でなく），各間伐時に立木度を減少させうるような間伐方法を考え出し，このような条件を実際に使われる輪伐期全体を通じてあてはめることである。

間伐のルール

これまで間伐によって生ずる開放の程度を表わすのに，多くの方法が用いられてきた。たとえば，

(1) 各間伐時の残存木材積の比率，または大きさを一定に保つ。

(2) 総断面積を間伐前の値に対する一定比率または大きさまで減少させるか，または同様な地位，林令の正常な無手入林の断面積に関係づけて定める。

(3) エーカー当り残存木を指定する。

(4) 残存木の間の平均幹距が一定となるように考える。

(5) 残存木の間隔を，平均直径，樹高，樹冠の広がりあるいはその他の

残存木の大きさに関する特性の単独または組合わせによるある種の測定値函数に対応させる。

Mitchell（1943）の間隔のルールは

$$S = (D + X)^2$$

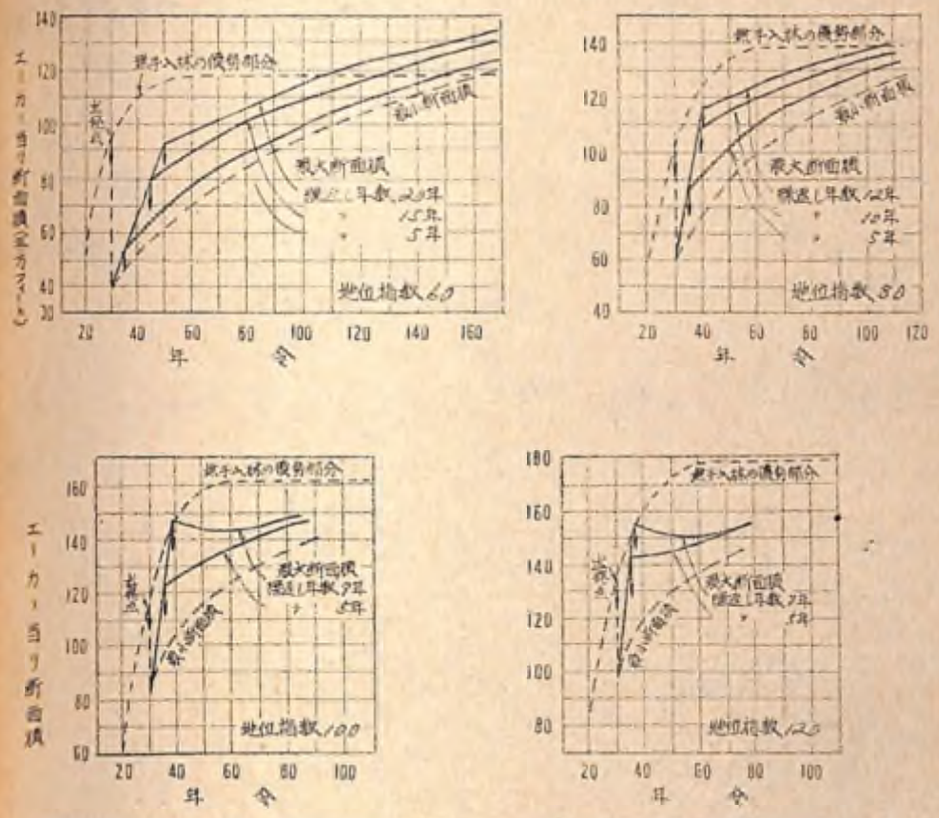
で表わされる。ここでSは指定された地位において、定められた期間内で単木当りに必要とされる占有面積（平方フィート）、Dは平均直径（インチ）、Xは常数。

南部において主要な4種類の pine では、Mitchell は常数Xの標準の値として6を使い、輪伐期を通じて間伐を一様に繰返す。すなわち、間伐の繰返し間隔を一定とする。どの地位についても、同じ配置の規則を使ったが、間伐繰返し年数は地位ごとに変えた。

これは地位指数40の12年から地位指数120の4年までの範囲にある。このようにして、どの場合にも次の間伐時点まで十分な成育空間が与えられることとなった。

Mitchell の規則は合衆国東南部で長い間使われ、良好な結果をおさめてきたので、この方法を仮想的な ponderosa pine 林分に適用したときの結果を直径成長量の予測式を使って計算した方がよいと考えた。色々な地位に対する断面積をコントロールするため、予備的な計算をおこなった。実際に使われる輪伐期の全体にわたって、一様な間伐間隔の系列を使って、常数Xの色々な値を試してみた。用材林作業では、どの地位級の場合でも常数Xに6を使うとほぼ十分なことがわかった。Fig 1は正常な無手入林の優勢部分の断面積と比較したコントロールの値を示す。

これとは別に、各残存木に対して正常な無手入林分の優勢部分の断面積に比例した大きさの成育空間を伐期まで一貫して与えることのできる、樹冠をもととする間隔の規準を考案した。これは次のようにしてきめた。主



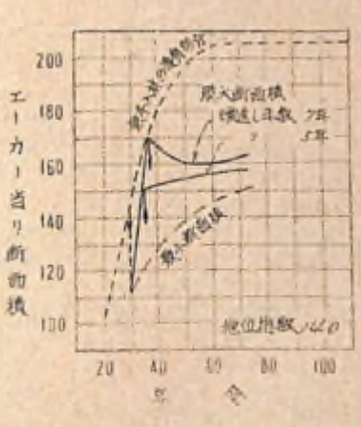


Fig. 1

色々な地位指数に対する年令対断面積曲線の比較

種々の繰返し年数を使ったときの、$(D+6)^2$の幹距による仮想的 ponderosa pine 対無手入林分の優勢部分　矢印は第1回および第2回間伐をおこなう時点を示す。

常な然手入林分の優勢部分の統計量から単木当りの平均占有面積（平方フィート）S（ヘクタールをエーカー当り本数で割る）と、平均断面積をもつ木の直径Dを求める。

これから、

$$S/D^2 = F$$

すなわち、

$$S = D^2 F$$

地位級ごとにこのFの値を全年令範囲にわたって計算し、グラフにおとした（Fig. 2）。

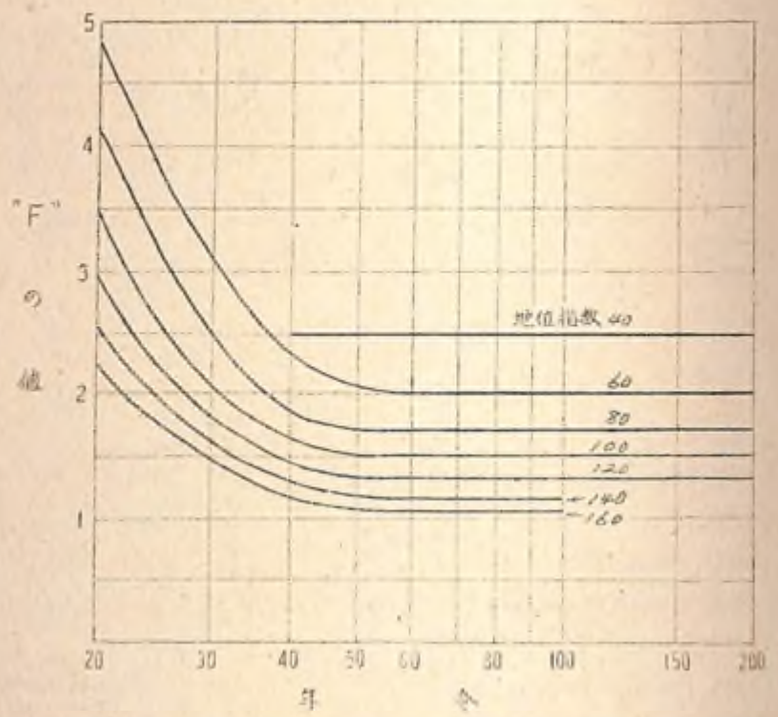


Fig. 2　地位指数、年令級ごとの、正常な然手入林分の優勢部分に対する生物的幹距公式（$D+X)^2F$ の常数Fの値

これらの値が地位ごとに指定され、林令が大体50年になるとあとは一定となることに注意されたい。林令50年およびそれ以上のときのFのすべての値の平均を地位級ごとに示せば次の通りである。

地位指数	F
40	2.5
60	2.0
80	1.7
100	1.5
120	1.4
140	1.2
160	1.1

この間伐基準（$S = D^2F$）を生物的幹距の公式ということにする。これは単木あたりの利用可能な空間を優勢林分の平均直径を使って表現したもので、平方する前にDに一定数を加えることにより、どのような地位、年令についても、立木密度（*stocking density*）を予定された水準に際らせても近づけることができる。したがって生物的幹距の公式は

$$S = (D + X)^2 F$$

となる。ここで、記号は前と同じで、Xは加算する一定数、1、2、3、4などである。

生物的幹距式のXに色々な値をあてはめ、実際に使われる伐期について、色々の一様な間伐繰返し年数を使ったときの結果を地位級ごとに試験した。この断面積コントロールをFig. 3 に示す。

Mitchell の間隔式による理論的間伐方式の結果

2つの間伐方式の成長量と収穫量を正しく比較するためには　まず2つ

の問題を解決しておかねばならない。

(1) $(D+X)^2$ 公式で，すべての地位の範囲内で最もあてはまりのよい X の値をきめること。

(2) 色々な地位級に対して，最も適切な一定の間伐繰返し年数をきめること。

最初の問題はこれまである程度論じてきたが，Mitchell の公式の X に 6 を使うと，ponderosa pine の場合，すべての地位，年令に対する条件が殆んど完全に満たされるということは，以下に述べる成長量と収穫量の情報を完全に検討してからでないと結論できない。

第2の問題は成長量と収穫量のデータの多数の組合わせを計算すれば決定することができる。正常な無手入林分が，地位指数 60, 80, 100, 120 および 140 の土壌の上に成立していると仮定する。これらの林分の林令 30 年のときの優勢な部分の平均直径に 1/2 インチを加えて，これを出発点にとる。第1回間伐によって残存木の平均直径は無手入林のものより若干大きくなると考えた。

引続く平均直径の計算ではこのような補正はおこなわなかった。$(D+6)^2$ の幹距を使って各間伐時の立木密度（stocking density）を調整した。各地位級に色々な間伐繰返し年数をあてはめてみて，その中から地位級ごとに最も適当なものを選んだ。Table 1 は地位指数 80[2] について計算したこれらの成長量と収穫量の数値を示したものである。仮想的な間伐をおこなったとき，間伐期間の終りで到達すると思われる断面積と，同一地位，同一林令の無手入林の優勢部分の断面積との比較を Fig. 1 に示す。

2) Mitchell の公式と生物的幹距の公式を用いて計算した地位指数 60, 80, 100, 120, 140 に対する成長量と収穫量の数値は，計算の細目の説明，標本木の測定データおよび成長方程式の誘導に使ったデータと一緒にすべて National Agricultural Library に，この報告に対応する見出しをつけて保管してある。

どの地位級についても，一定の（uniform）間伐繰返し年数で完全なものがなかったので，各地位級で $(D+6)^2$ と組合わせて使用する繰返し年数の最適値の選定には折衷案が必要となった。それぞれの地位級について選んだ繰返し年数を Table 2 にまとめておく。

Table 2 には $(D+6)^2$ を幹距の指針とする間伐経営を採用したときの，林分コントロールのための基準数値も一緒に示してある。

Table 2　ponderosa pine の間伐経営のための林分コントロール基準

	地位指数										
	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
間伐繰返し年数（$(D+6)^2$ の幹距による）（年）[1]	20	15	12	10	9	8	7	6	5	4	3
伐期 Int. rule（年）[2]	170	135	114	100	93	86	79	72	70	66	63
伐期平均直径[3]	14.6	15.7	16.8	18.3	19.3	20.8	21.8	22.5	23.1	23.9	24.7
最終間伐のときの間伐木直径（インチ）[3]	13.5	14.7	15.7	17.3	18.8	19.8	20.8	21.8	22.3	23.2	24.2
伐期における主林木本数（本数）[4]	114	102	92	80	71	65	61	57	56	51	48
当あたりエーカー当りの収穫すべき木の割合[5]（本数）	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

1) 本文に述べた方法で求めた。

2) Meyer の与えた値をもとにしく曲線を画き，林令 30 年から，間伐繰返し年数の倍数値となるように調整した。

3) Table 1 に示した成長量と収穫量の計算値をプロットして曲線を画き，それを延長して読みとった。

4) 公式 $0.3646/(D+6)^2$ を使って 4 欄の値から計算した。主林木は伐期の残存木をいう。

5) 2 欄の値で 5 欄を割って求めた。

ここで重要なのは，林分の更新の促進を目的として収穫することのできるエーカー当りの本数割合（6 行目）である（Mitchell 1943 および 1962）。

林木の配置が経営林の伐期におけるものと適当な関係にあり，また正し

Table 1　$(D+6)^2$ 幹距公式による3通りの間伐計画の場合の仮想的 *ponderosa pine* 林分の成長と

間伐間隔		直径		エーカー当り本数	エーカー当り断面積（平方フィート）			成長木のエーカー当り材積	
					間伐された林分		無間伐の優勢林分		
No. (1)	年令 (2) 年	期首 3インチ	期末 4インチ	5本	期首 (6)	期末 (7)	(8)	立方フィート (9)	ボードフィート (10)
地位指数80 ― 繰返し年5年, ―$(D+6)^2$ 幹距									
開始	30	5.4	……	635	……	……	102	1270	
1	30～35	5.4	7.1	307	58	84	115	1105	……
2	35～40	7.1	8.2	253	70	93	124	1341	278
3	40～45	8.2	9.1	216	79	98	131	1555	410
4	45～50	9.1	9.9	191	86	102	135	1776	592
5	50～55	9.9	10.6	172	92	105	137	2030	774
6	55～60	10.6	11.3	158	97	110	139	2259	980
7	60～65	11.3	11.9	146	102	113	139	2482	1183
8	65～70	11.9	12.5	136	105	116	139	2720	1387
9	70～75	12.5	13.1	127	108	119	139	2908	1588
10	75～80	13.1	13.6	119	111	120	139	3094	1773
11	80～85	13.6	14.1	113	114	123	139	3322	1955
12	85～90	14.1	14.6	108	117	126	139	3510	2106
13	90～95	14.6	15.1	103	120	128	139	3739	2266
14	95～100	15.1	15.6	98	122	130	139	3900	2421
15	100～105	15.6	16.1	93	123	131	139	4055	2548
16	105～110	15.1	16.6	89	126	132	139	4192	2624
17	110～115	16.1	16.9	86	128	134	139	4343	2375

に対する，地位指数80

収穫量の計算値

間伐木材積（エーカー当り）		成長木＋間伐木累計材積	
立方フィート (11)	ボードフィート (12)	立方フィート (13)	ボードフィート (14)
……	……	1270	……
656	……	1761	……
194	……	2191	278
196	41	2601	451
180	48	3002	681
177	60	3433	923
166	63	3827	1192
172	74	4222	1469
170	81	4630	1754
180	92	4998	2047
183	100	5367	2332
156	89	5751	2603
147	87	6086	2841
163	98	6478	3099
182	110	6821	3364
199	124	7175	3615
174	110	7486	3811
141	89	7778	4061
3435	1266		

い造林的取扱いがおこなわれている場合には，収穫木の本数をおさえることによって，単純かつ実際的な立木度のコントロールができる。そのような収穫は，通常各間伐の中間で計画されるが，伐採は間伐と別個におこなわれる。林分の優勢な部分の平均直径が10インチに達したとき（第1回の収入間伐をおこなう時期と考える）に，$(D+6)^2$ 規則を使って間伐を開始した。仮想的な林分について同様な表を作成した。しかし本報ではこの結果は省略する。

生物的幹距の公式を使った理論的間伐の結果

林令20～150年，地位指数60，80，100，120，140の仮想的な林分模型にしたがって，生物的幹距公式から成長と収穫のスケジュールを計算した。選定したXの値は0，1，2，3および4で，それぞれについて一様な繰返し間隔5，10，15，20年を使った。繰返し年数の終りく at the end of each thinning

間伐間隔		直径(インチ)		エーカー当り本数	エーカー当り断面積(平方フィート)			残存木のエーカー当り材積	
					間伐された林分		無間伐の優勢林分		
16	年令	期首	期末		期首	期末		立方フィート	ボードフィート
(1)	(2) 年	(3)インチ	(4)インチ	(5) 本	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
地位指数80 —繰返し年10年— $(D+6)^2$ 幹距									
開始	30	5.4	----	635	----	----	102	1270	----
1	30 ~ 40	5.9	6.1	307	58	110	124	1596	338
2	40 ~ 50	8.1	9.8	219	78	115	135	2015	635
3	50 ~ 60	9.8	11.2	174	91	119	139	2453	1044
4	60 ~ 70	11.2	12.4	147	101	123	139	2867	1461
5	70 ~ 80	12.4	13.5	128	107	127	139	3277	1882
6	80 ~ 90	13.5	14.5	115	114	132	139	3682	2470
7	90 ~ 100	14.5	15.4	104	119	135	139	4025	2496
8	100 ~ 110	15.4	16.2	95	123	136	139	4304	2708
地位指数80 —繰返し年12年— $(D+6)^2$ 幹距									
開始	30	5.4	----	635	----	----	102	1270	----
1	30 ~ 42	5.9	8.4	307	68	118	127	1811	368
2	42 ~ 54	8.4	10.4	210	81	124	137	2352	819
3	54 ~ 66	10.4	11.9	162	96	125	139	2803	1345
4	66 ~ 78	11.9	13.2	136	105	129	139	3240	1809
5	78 ~ 90	13.2	14.4	118	112	133	139	3729	2289
6	90 ~ 102	14.4	15.5	105	119	138	139	4169	2525
7	102 ~ 114	15.5	16.5	94	123	140	139	4512	2817

間伐木材積(エーカー当り)		残存木+間伐木累計材積	
立方フィート	ボードフィート	立方フィート	ボードフィート
(11)	(12)	(13)	(14)
----	----	1270	----
656	----	2252	338
458	97	3129	732
414	131	3981	1272
381	162	4776	1831
371	186	5557	2458
333	191	6305	2837
353	198	6991	3461
348	216	7618	3889
3314	1181		
----	----	1270	----
656	----	2427	368
572	116	3580	935
538	187	4569	1648
450	216	5480	2328
432	239	6377	2847
411	230	7228	3615
437	275	8008	4130
3476	1263		

interval)における断面積の値を同様な地位，年令の熟手入林に対する100分率で表わした。個々の幹距および一様な間伐繰返し年数の間伐スケジュールの中で，これらの値は50年以後あるいは地位級によって多少の違いが出てきた。地位指数60，100，140についてこれらの値を平均し，グラフにおとした結果はFig. 4の通りである。

各曲線と100%の線との交点が，図の間伐繰返し年数を使ったときどの地位についても正しい幹距を与えるものと考えた。これらの点を生物的幹距公式で表わすと，5年間隔では$(D+0.5)^2F$，10年間隔で$(D+1.1)^2F$，15年間隔で$(D+1.8)^2F$，20年間隔で$(D+2.2)^2F$である。これらは指示された繰返し年数に対しては理論的に最適な幹距(spacing)で，すべての地位で適用できると考えられる。

次に同じ5つの地位級について，$(D+X)^2$公式のときと同じ方法で林令30年を出発点にとって，あら

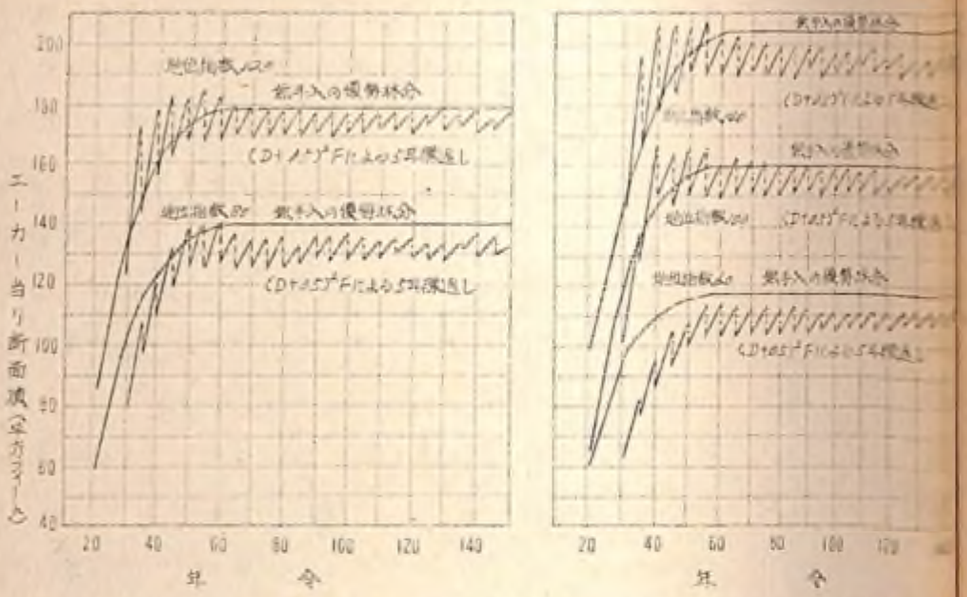


Fig. 3　色々な地位の *ponderosa pine* 林の年令対断面積の関係

生物的幹距公式による理論的な最適間伐をおこなったときの仮想的林分の成長経過と無手入の優勢部分の比較を示す（間伐林の実際は成長による所面積の増加を示す。破線は間伐したことによる断面積の減少を示す）。

ためく成長と収穫量の計算をおこなった。この際 5, 10, 15, 20年の間伐繰返し年数について，理論的に導いた最適幹距（optimum spacing）を使った。成長量と収穫量は，幹距と繰返し年数の4通りの組合わせの間で僅かの差がみられた。間伐繰返し年数を5年としたときの結果を使って Mitchell の公式で間伐した仮想的林分の結果および正常な無手入林分の結果との比較をおこなった。

2種類の幹距公式で間伐した仮想的林分の成長および収穫の比較

この研究の成長方程式の誘導に使ったデータは，Meyer のデータと全

く異なるものである。そのためモデルにしたがって計算した仮想的林分での結果は，正常な無手入林分について示された結果とは厳密な比較は困難である。

Meyer の資料は，計算の出発点の値を求めるためと，生物的幹距公式の誘導のため，またその値より大きくなると，残存木の成長率が低下するような，林分の優勢部分の断面積の最大値を求めるために使用した。これは正常な無手入林と比較する仮想的な間伐林について，以下に述べる立木量コントロール，直径および材積成長の知識を検討する場合に考慮する必要が生ずる。これらのことを十分考慮しないと，Fig 5 の A, B, C の比較で誤解を生ずるおそれがある。

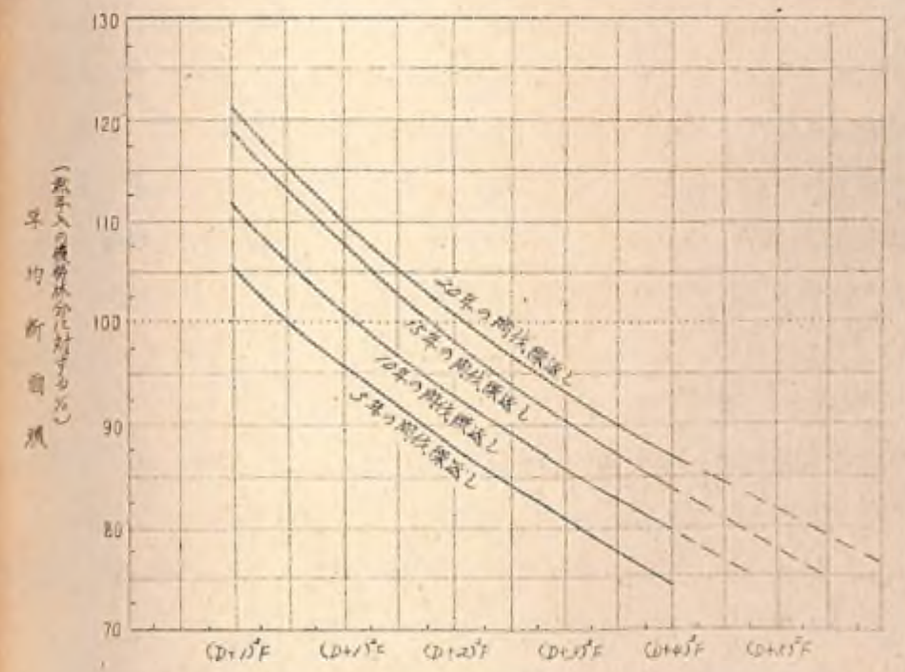


Fig. 4　50年以後の成長期間の終りにおける平均断面積（地位指数 40, 100, および140の平均）を対応する年令における（同じ地位級の）無手入の優勢林分の断面積に対する%で表わしたもの

立木度コントロール

Fig. 1と3は2通りの幹距ルールで与えられるコントロールを示している。Fig. 3は、幹距と繰返し年数の最適な組合わせ（$(D+0.5)^2F$と一緒に5年の繰返し年数）による生物的幹距式での立木度コントロールである。同じように有効なコントロールが他の正しい組合わせについてもえられる。すなわち、$(D+1.1)^2F$と10年ごと、$(D+1.8)^2F$と15年ごと、$(D+2.2)^2F$と20年ごとである。

直径成長

仮想的林分の直径成長は2つの公式を使うことによって、輪伐期の途中および終りで多少違っている（Fig. 5A）。これはどの場合でも残存木が解放され、自由な成育ができたことを示している。$(D+6)^2$公式の方が幾分解放の程度が大きく、特に地位の悪いとき、また輪伐期の前期においてその傾向が強い。そのためこれらの場合は、伐期に近くなると直径成長が少し大きくなった。しかしいずれの場合にも、与えられた解放によって残存木の成長率はその最大の値に近くなった。

材積成長量

仮想的な間伐林分の残存木材積は、同一地位、同一林令の無手入林分の総材積より小さくなった（Fig. 5B、C）。これは間伐による蓄積（growing stock）減少の収穫量に対する影響を論じている Steebler（[illegible]）その他の多くの研究者の結果を裏づけるものである。

Fig. 5BとCには、間伐された仮想的林分の材積総収穫量（残存木＋輪伐期内に収穫された間伐材積累計）も示してある。伐期における総収穫量は立方フィート材積で表わした地位140の場合と、ボードフィート材積で

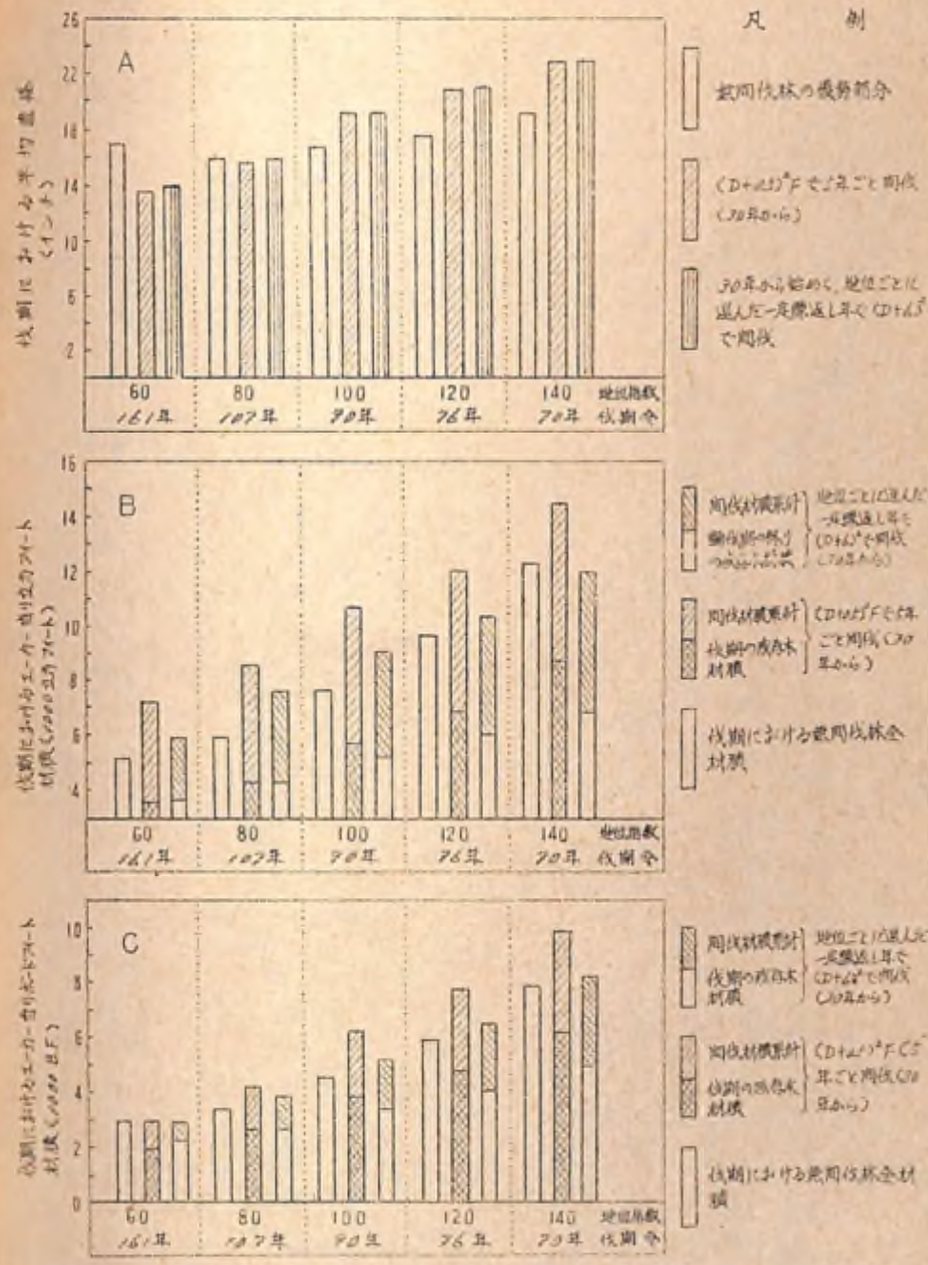


Fig. 5　無間伐林の優勢部分の値と比較したときの、種々の地位に対する ponderosa pine の仮想的林分における伐期 (A) 平均直径、(B) 立方フィート材積、(C) ボードフィート材積（2種類の間伐方法）

Table 3　地位指数 80 の仮想的 ponderosa pine 林分に4種類の間伐方式を適用したときの成長量と収穫

間伐の繰返し		直径(インチ)		エーカー当り本数	エーカー当り断面積(平方フィート)			エーカー当り材積	
					間伐林分		無間伐優勢林分		
No. (1)	年令 (2) 年	期首 (3)	期末 (4)	(5)	期首 (6)	期末 (7)	(8)	立方フィート (9)	ボードフィート (×10) (10)
地位指数 80 —5年繰返し— (D+0.5D²F の幹距									
開始	30	5.4	……	635	……	……	102	1270	……
1	30 ～ 35	5.9	7.0	400	76	107	115	1400	……
2	35 ～ 40	7.0	8.0	348	93	121	124	1811	348
3	40 ～ 35	8.0	8.9	307	107	133	131	2170	522
4	45 ～ 50	8.9	9.7	271	117	139	135	2520	786
5	50 ～ 55	9.7	10.4	239	123	141	137	2872	1052
6	55 ～ 60	10.4	11.1	209	123	140	139	2968	1333
7	60 ～ 65	11.1	11.7	184	124	137	139	3091	1598
8	65 ～ 70	11.7	12.2	165	123	134	139	3218	1851
9	70 ～ 75	12.2	12.7	153	124	135	139	3443	1744
10	75 ～ 80	12.7	13.3	141	124	136	139	3610	1875
11	80 ～ 85	13.3	13.7	129	124	132	139	3715	2000
12	85 ～ 90	13.7	14.2	122	125	134	139	3964	2172
13	90 ～ 95	14.2	14.7	115	126	136	139	4060	2333
14	95 ～ 100	14.7	15.2	107	126	135	139	4141	2481
15	100 ～ 105	15.2	15.7	100	126	134	139	4200	2570
16	105 ～ 110	15.7	16.1	94	126	133	139	4291	2679
17	110 ～ 115	16.1	16.5	90	127	134	139	4410	2824
18	115 ～ 120	16.5	16.9	86	128	134	139	4558	2950
19	120 ～ 125	16.9	17.3	81	126	132	139	4617	3021
20	125 ～ 130	17.3	17.7	77	126	132	139	4697	3142
21	130 ～ 135	17.7	18.1	74	126	132	139	4747	3241
22	135 ～ 140	18.1	18.6	72	125	136	139	4768	3324
23	140 ～ 145	18.6	19.0	68	128	134	139	5032	3441
24	145 ～ 150	19.0	19.4	64	127	131	139	5056	3426

対して、理論的に最適な量の計算

エーカー当り間伐木		残存木+間伐木の累計(エーカー当り)	
立方フィート (11)	ボードフィート (×10) (12)	立方フィート (13)	ボードフィート (×10) (14)
……	……	1270	……
476	……	1870	……
182	……	2453	348
213	41	3045	563
255	61	3641	888
298	93	4191	1247
348	132	4735	1560
355	148	5213	1873
319	144	5659	2170
334	117	[illegible]	2416
270	137	6555	2744
307	160	6967	3029
262	189	7358	3310
224	125	7738	3598
232	162	8101	3886
271	161	8431	4156
252	154	8779	4419
183	114	9076	4681
196	126	9426	4930
265	172	9744	5173
228	149	10052	5443
183	122	10385	5664
131	88	10637	5895
276	188	10977	6099
296	200	11297	6323
6241	2899		

の地位 40 の場合を除き、間伐林の方が無間伐林より大きくなった。しかしさきに述べた立前な数手入林の結果と比較する際の注意事項を忘れてはならない。

設けられることのできる色々な間伐公式、あるいはそのほかの立木度(stocking)コントロールに適切な方法の中からどれかを選び出すときのきめ手は現実に応用できるかどうかということにかかっている。

しかし、林分コントロールを完全におこなうためには、間伐の程度と繰返し年数の両方を考慮しなければならない。ここに述べた資料は、長期の成長および収穫研究の結果が利用できるようになるまでは、その自然的生育範囲を通じ、また色々な地位の上級について林業家が ponderosa pine の実際的間伐計画(プログラム)を考えるに役立つであろう。

間伐の繰返し		直径(インチ)		エーカー当り本数	エーカー当り断面積(平方フィート)			エーカー当り材積	
					間伐林分		無間伐優勢林分	立方フィート	ボードフィート(×10)
No (1)	年令 (2) 年	期首 (3)	期末 (4)	(5) 本	期首 (6)	期末 (7)	(8)	(9)	(10)
地位指数80 — 10年繰返し — (D+1.1)²F の幹距									
開始	30	5.4	----	635	----	----	102	1270	----
1	30 ~ 40	5.9	8.1	335	64	120	124	1742	335
2	40 ~ 50	8.1	9.8	262	94	137	135	2437	760
3	50 ~ 60	9.8	11.1	209	109	140	139	2963	1233
4	60 ~ 70	11.1	12.3	168	113	139	139	3216	1579
5	70 ~ 80	12.3	13.3	139	115	134	139	3558	1849
6	80 ~ 90	13.3	14.3	120	116	134	139	3840	2136
7	90 ~ 100	14.3	15.3	105	117	134	139	4064	2412
8	100 ~ 110	15.3	16.1	92	117	130	139	4264	2652
9	110 ~ 120	16.1	16.9	84	119	131	139	4452	2881
10	120 ~ 130	16.9	17.7	77	120	132	139	4697	3142
11	130 ~ 140	17.7	18.5	70	120	131	139	4901	3390
12	140 ~ 150	18.5	19.3	65	121	132	139	5135	3678
地位指数80 — 15年繰返し — (D+1.85)²F の幹距									
開始	30	5.4	----	635	----	----	102	1270	----
1	30 ~ 45	5.9	9.0	277	52	122	131	1847	471
2	45 ~ 60	9.0	11.3	205	91	143	139	2911	1210
3	60 ~ 75	11.3	13.0	145	101	134	139	3263	1653
4	75 ~ 90	13.0	14.6	114	105	133	139	3643	2029
5	90 ~ 105	14.6	16.1	92	107	130	139	3864	2316
6	105 ~ 120	16.1	17.4	78	110	129	139	4132	2675
7	120 ~ 135	17.4	18.7	68	112	130	139	4354	2939
8	135 ~ 150	18.7	19.9	59	113	127	139	4561	3157

エーカー当り間伐木		残存木+間伐材積累計(エーカー当り)	
立方フィート (11)	ボードフィート (12)	立方フィート (13)	ボードフィート(×10) (14)
----	----	1270	----
600	----	2362	335
320	73	3417	833
493	154	4441	1460
582	242	5331	2048
561	273	6179	2591
486	253	6947	3131
480	267	7651	3677
503	299	8294	4183
561	328	8908	4670
571	340	9524	5171
427	286	10154	5605
350	235	10739	6028
5604	2550		
----	----	1270	----
716	----	2683	471
511	122	4138	1332
852	354	5342	2129
698	353	6425	2358
704	372	7345	3585
588	360	8203	4256
530	347	9053	4902
570	394	9850	5475
5189	2218		

引用文献

Lemmon, P E and F X. Schumacher 1962. Volume and diameter growth of ponderosa pine trees as influenced by site index, density, age and size. For. Sci 8 : 236 – 249.

Meyer, Walter H. 1938. Yield of even-aged stands of ponderosa pine. Forest Service, U. S. Dept Agric. Tech. Bull. 630.

Mitchell, H. C. 1943. Regulation of farm woodlands by rule of thumb. J. For. 41 : 243 – 248.

——. 1962. A guide to stocking southern pine stands. U. S. Dept. Agric., Soil Conservation Service

間伐の繰返し		直径(インチ)		エーカー当り本数	エーカー当り断面積(平方フィート)			エーカー当り残存木材量	
					間伐林分		無間伐標準林分		
No. (1)	年令 (2) 年	期首 (3)	期末 (4)	(5)	期首 (6)	期末 (7)	(8)	立方フィート (9)	ボードフィート (×10) (10)
地位指数80 —20年繰返し— (D+22)²Fの幹距									
開始	30	5.4	……	635	……	……	102	1270	……
1	30～50	5.9	9.9	250	47	134	135	2325	725
2	50～70	9.9	12.6	170	91	147	139	3315	1598
3	70～90	12.6	14.8	114	99	136	139	3648	2029
4	90～110	14.8	16.6	86	103	129	139	3930	2451
5	110～130	16.6	18.4	70	105	129	139	4270	2856
6	130～150	18.4	20.0	59	109	129	139	4661	3107

エーカー当り間伐木		形成木+間伐材積累計(エーカー当り)	
立方フィート (11)	ボードフィート (×10) (12)	立方フィート (13)	ボードフィート (×10) (14)
……	……	1270	……
770	……	3095	725
744	232	4829	1830
1092	526	6254	2787
892	498	7432	3707
731	456	8503	4568
671	449	9565	5318
4904	2161		

Sept
Steabler, George R. 1959.
Theoretical derivation of numerical thinning schedules for Douglas-fir. For. Sci. 6 : 98～109.

間伐度および間伐種の客観的尺度について

Objective measure of thinning grades and methods[1]

By P. E. Vézina[2] (Forestry Chronicle 1963 (39) No. 3)

摘　要

最近、ドイツ、英国、オランダ、ノールウェイ、およびカナダにおいて、間伐強度および間伐種を表わす新しい尺度が考案されている。これらについて、カナダの天然林で最も普通に現れる条件に照らして、得失を検討した。結論として、これらの指標を実地に試みる場合、単独で用いるべきでなく、むしろ、それらの幾つかを比較の基準の意味で併用した方がよいことがわかった。更に研究を進めてゆけば、最終的には林分密度や林分構造を測定するための改善された方法を見つけることができよう。それによって、色々な林分パラメーター間の関係も一層よく理解できるようになろう。

はじめに、

長い間、特に欧州各国において、造林研究者は5階級の間伐度、すなわ

---

1) Department of Forestry, Canada Forest Research Branch Contribution No. 523

2) Research officer Forestry, Forest Research Laboratory, P.Q. Box 35, Sillery, P.Q.

ち A. B. C. C/D および D度を使ってきた。Aは枯死木と潮死木のみを伐採する非常に弱度の間伐で、Bは被圧木、介在木の全部と、被優勢木の一部または大部分を伐採する強度の下層間伐である（MacDonald 1931, Hummel ほか 1959, Smith 1962）。1947年に導入された6番目の間伐度Eは、立木度（stocking）をD度の約2/3にまで減ずる場合に用いられる（Hummel ほか 1959）。このほか間伐の強さはどのクラスの木を伐採するかを指定しても定義できる。これと違った指数（index）、たとえば林分の間伐直前の全体に対するパーセントで示した伐採木本数、断面積あるいは材積も使われてきた（Braathe 1957）。しかしこれらの値はすべて林分の初期密度と関係している。したがって、それらは相対的な数値であって、科学的なレベルで間伐を比較するときには使えない。

このため間伐の強さをもっと客観的に表わす尺度を求めようとする努力が続けられて、過去20年間にこの方向で著しい進歩がみられた。5つの新らしい方法が特に注目に値する。ドイツの Assmann（1954, 1956）の方法、英国の Hummel（1954）の方法、オランダの Becking（1954）の方法、米国の Lexen（1943）の方法、およびカナダの Smith, Ker, Cajmazia（1961）の方法である。

同様に間伐種（方法）も、長い間林分内の単木を樹木級区分によって特徴づけるという方法で定義されてきた。そのような区分方式も、Kraft が19世紀の昔に古典的な樹木級の定義を発表して以来、多くの提案がなされている。そうしてこのような論議はまだまだ続くものと思われる。しかし、最近間伐種をもっと客観的に測定しようとする動きが出てきた。ノールウェイの Ullen（1940）によるものと同じく、Eide と Langsæter（1941）の創始した2つの表現方法が多数の研究者によって用いられているが、これらは非常に有望と思われる。

本稿の目的はこれらの新しい方法を紹介するとともに、それらの適用の仕方とそのための条件を、カナダの天然林との関連において簡単に説明することである。

間伐度の客観的な尺度

Assmann の相対断面積

Assmann（1954, 1956, 1960）は、樹高および年令で測ったとき、与えられた年令および地位の天然生（無間伐）林分は、それらの生育している物理的な広がりを完全に利用（占有）することを見出した。換言すれば、当初正常な立木度をもっていて、その後自然のままに成育してきた林より密な林というものは考えられないのである。このように特別な場合においては、最大断面積というものを考えることが可能になってくる。これから、間伐の強さはこの最大断面積を使って表現できる。

Bavaria の間伐プロットの成長を分析した結果、Assmann は収穫量と材積成長量がどちらも間伐の強さと完全には独立でないことを知った[3]。

さきに述べた最大断面積を100とすると、次々の間伐で断面積が少なくなるにつれて、林分収穫あるいは材積成長量は増加して、その後"最適な断面積"に到って収穫が最大となる。そうして最後に100%の線を通り抜けて減少し、間伐が強くなるにつれて、ますます低下するようになる（Fig. 1）。Assmann は材積成長量が最適断面積のときの値の5

3) 一方 Riley と Lehtpere（1955）は、過去成長量は間伐の強さの影響を受けないという仮定のもとに、英国の針葉樹について年輪幅から数量的な間伐スケジュールを計算する新しい方法を提案している。

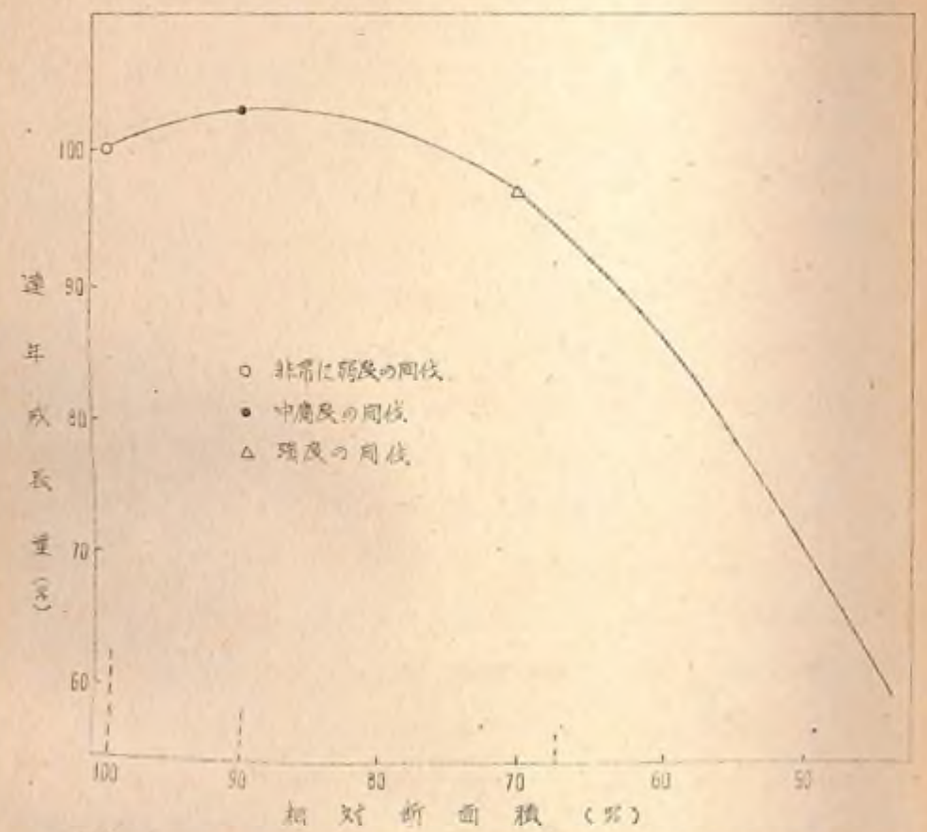


Fig 1 Assmann の林分密度指数の根本仮定は、材積成長量が林分の断面積に支配されるということである。彼の理論によれば、最大の材積成長量は林分が"最適断面積"をもつときにえられ、林分の断面積がこれより多くても少なくても成長量は低下する。与えられた樹種の最適断面積は所(Locality)によって異なる。

%にまで低下するときの断面積を"限界断面積"とよんだ。

Assmann の最初の観察は Norway spruce (Picea abies (L) Karst) 林分についてなされたが、この結果は他の樹種についても同様にあてはまることが証明されている。

欧州産樹種の同令林分の材積成長量と相対的断面積の関係については、各国で設定された間伐プロットから求めた幾つかの例が Assmann の報告(1961, P.239 以下参照)に示されている。

したがって、林業研究者あるいは造林家にとっては、"限界断面積"の決定が何よりも重要である。もしその限度をこえれば林分収穫は著しく低下する。この点に関して、Smithers (1954) が Petawawa Forest Experiment Station の red pine および white pine に対する間伐計画の研究で見出した、断面積が fully stocked な林の約70%より少なくならなければ、成長量の低下はそれほど著しいものでないという結果は注目に値する。

ドイツの研究では、実用的な目的の場合、最大すなわち自然的な断面積は、一般に間伐度Aに対する平均断面積とされている(Fig 1)。たとえば Dittmar (1960) は、最初の10年間におけるA度の平均断面積を100とし、他の間伐度の相対断面積をすべてこのA度の断面積と比較して決定している。

Assmann (1954) は、最適断面積の値は場所によって違うという意見を述べている。Norway spruce の場合、これは成長のよいところほど高くなっている (Holmsgaard, 1958)。

Assmann の方法は2つの段階からなっている。

(a) 与えられた樹種について最大断面積を定めること。

(b) 与えられた林について、実際の断面積を最大断面積に対する比(パーセント)で表わすことにより、間伐度を決定する。

Hummel の林分密度指数

これは Mulloy (1943, 1944, 1947) その他が採用している

Reineke（1933）の林分密度指数と混同してはならない。Reineke の指数では樹高を考えていないのである。Hummel の指数は，樹高に対する幹距の比ということができる。

Hummel（1954）は正方形配置を使うと林分をうまく表現できると考えた。平均樹幹距離をd，エーカー当りの本数をNとすると，

$$N = \frac{43,560}{d^2}$$

すなわち

$$d = \sqrt{\frac{43,560}{N}}$$

Hummel ら（1959, p.97）は，色々な正方形配置に対するエーカー当り本数の表を与えている。相対間隔は，林木が正方形配置にしたがうとして計算した樹幹距離の，林分上層高（H）に対する百分比で定義される。このやり方では，上層高の20％の幹距に対応する密度を標準密度にとって，その指数を任意に1.0ときめる。他の密度は，いずれもエーカー当り本数を標準密度のものと比較して表わす。HとNから直接密度指数を求めるための表ができている（Braathe 1957 P.7）。

この指数は，林の平均配置を上層高に対する比として表わすもので，直径は考えにいれていない。最近，New Zealand，Australia および南 Africa で研究をおこなっている Penistan（1960）は，これらの国で針葉樹について計画されている間伐方式の分析に Hummel の指数を採用している。

Becking の間隔係数（spacing factor）

Becking の方法は，エーカー当り本数を三角形配置で計算することと，上層高に対する平均間隔のパーセントをそのまま指数とすることを除けば

Hummel のものと同じである[4]。すなわち，

$$N = \frac{43,560}{\frac{d^2\sqrt{3}}{2}}$$

これから

$$d = \sqrt{\frac{43,560}{0.866N}}$$

で，

$$SF = \frac{d(100)}{H}$$

Becking（1954）によれば，間伐度の間隔としては3％が適当である。たとえば，弱度間伐は16％，中庸度が19％，強度間伐22％，極めて強度の間伐が25％など。

Becking の間隔係数はオランダで普及しつつある。樹種ごとに最適な間隔係数が存在するであろう。22％は Douglas fir に適当と思われる。間隔係数は樹種によっては輪伐期を通じて一定のこともあろうが，一方他の樹種では年令が増すにつれて大きくしなければならない。

Lexen の樹幹表面積

Lexen（1943）は，エーカー当り断面積よりも樹幹表面積の方が林分の立木度の尺度として優れていると述べている。それは，樹幹表面積が新しい成長量が累積される実際のベースになっているからである。

樹幹表面積は，上層高，平均胸高直径およびエーカー当り本数の積である。この積を通常10^4で除して，光の要求度の高い樹種の強度に，間伐した林に対する0.25から，耐陰性樹種の強度間伐林の1.2までの範囲にある取扱いやすい数値にする。

この指数は林分の形成層面積，すなわち樹幹表面積の尺度を与えるも

4) この考え方は，Hart（1928）が最初に採用した。

のである。

樹幹表面積は、英国の標準地試験（sample plot work）でこれまで林分密度の指数として使われてきた（Hummel et al., 1959）上層高に関係づけて測定した林分密度は、頻繁に間伐を繰返した林では、樹幹表面積と高い相関をもつという徴候がある（Wilson 1953）。種々の林分パラメータに対する林分構造および取扱いの影響を取扱った最近の研究（Weidmann, 1961）によれば、任意の与えられた間伐度について、材積成長量、樹幹表面積および平均年輪幅の間には高い相関がみられた。Fig. 2 は Silver fir（Abies alba Mill）の地方的タリフ表から引用したこの関係を Weidmann の論文（1961）から造り直したものである。

ここで色々な間伐度および上層高に対して、間伐後に到達すべきエーカー当り本数の大略の値は、対数方眼紙に目盛った林分密度計算図（Wilson 1955）から求められることを注意しておく。Hiley（1952）は、収穫表をもとにして上層高ごとのエーカー当り平均本数を示す同じようなグラフを発表している。

CW/D および H/W 比[5]

このほか正方形配置の幹距または樹冠直径と胸高直径の比による指数が、Smith, Ker および Csizmazia（1961）によって研究されていて、平均直径と一緒にして使うと、林分密度を表わすのに非常に便利なことが知られている。これらの著者達は西部産の幾つかの重要樹種について、開放されて成長してきた木と、密立して成長してきた木の、胸高直径に対する

5）Krajicek, Brinkman および Gingrich（1961）の考案した"樹冠閉塞率"は、樹冠に関係させたもう一つの林分密度の尺度であるが、これについて最近 Wiqins（1962）が有用性を評価した。

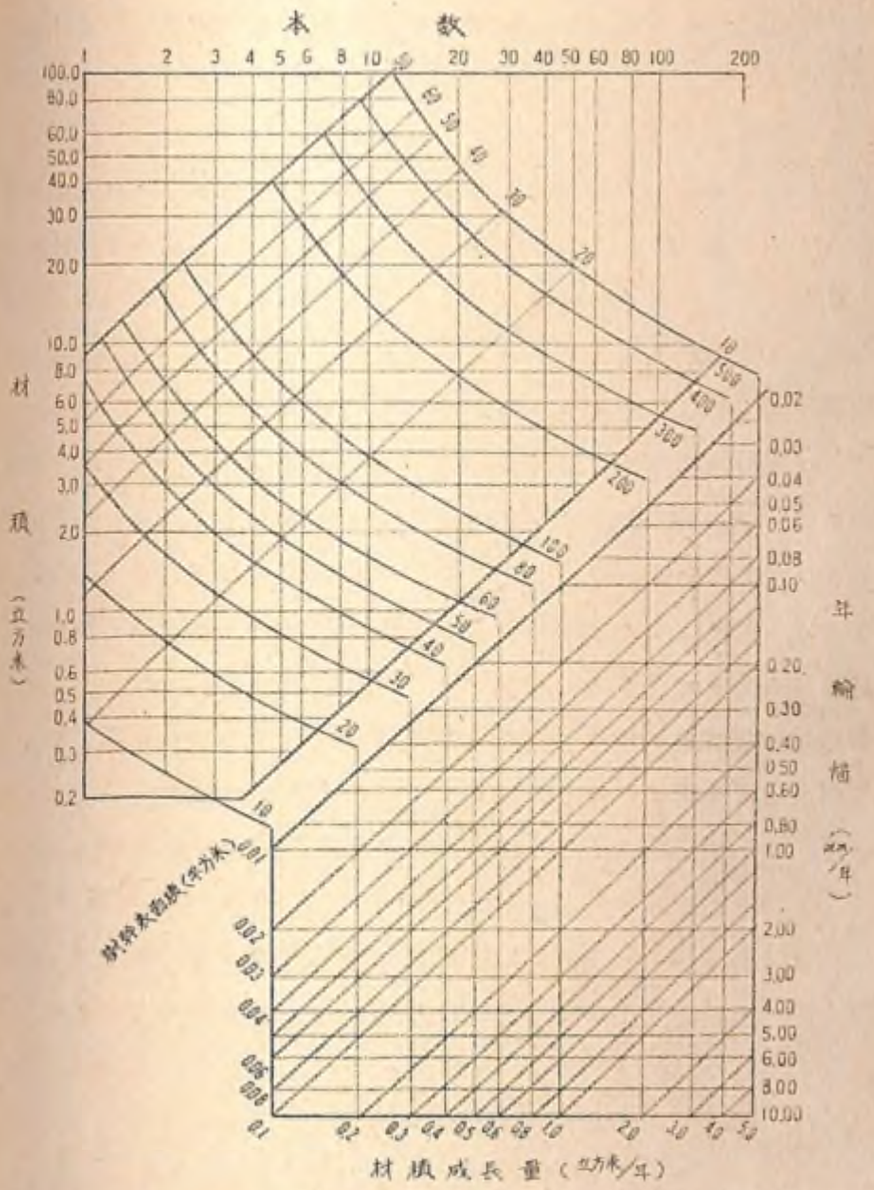


Fig. 2　材積成長量と色々な林分パラメーターを表わす5つの独立変数（本数、胸高直径、材積、樹幹表面積および平均年輪幅）との重回帰で示した間伐度の影響（Weidmann 1961 より）

樹冠直径の比を求めている。地位を完全に利用し、開放されて成長してきた林では、CW/D 比は2で、fully stocked な林のそれは1と考えることができる。

この比は Davis（1954）が論じた林分密度指数の"直径倍"に類似している。Smith, Ker, Csizmazia ら（1961）は与えられた比については、エーカー当り断面積が一定になることを示した。しかし彼等は、断面積が正常よりも幾分低めの方が、成長と成長原資（growing stock）の最適の組合わせに近くなると主張している。

H/CW 比は、樹高の平均幹距に対する比や Hummel の指数と密接な関係がある。Smith らは H/CW や CW/D が密度のコントロールにおいてある程度役に立つと述べている。CW/D の相関係数は H/CW より高くなるようである。これらの比は、必要なら Smith らのあげている回帰式で相互に換算することができる。

単木の占有面積やそれと同等な幹距の値は、プロット面積に対する総本数の関係から面積的に定めてもよく、また無作為に選んだ木とそのすぐ隣りの木、または5番目までの任意本数の隣接木との平均距離から推定できることを注意しておく。

この報告に述べる研究では、5番目までの任意本数の隣接木との平均距離も、同じように、面積的に求めた平均幹距と高い相関を示した。

間伐種（方法）の定量的な定義

d/D 比

間伐木平均直径 d の間伐前平均直径 D に対する比。d/D は間伐方法の有用かつ客観的な表わし方である（Hummel 1954）。これは間伐方法のタイプわけをおこなう一つの数量的指標である（Joergensen 1957,

Braathe 1957 Warrack 1959）

0.70 以下 ＝ 下層間伐

0.70～0.90 ＝ 極端な（severe）下層間伐～弱度の上層間伐

0.90～1.00 ＝ 極端な上層間伐

1.00 以上 ＝ 択伐的間伐

Braathe（1957）によれば、d/D は間伐方法の表現方法の中では最も簡単である。しかし、林分の第1回の間伐では、通常多数の小径木が除かれるから、多少 d/D 比が影響をうけて、伐採の性格があいまいになりやすいことに注意しなければならない。

d/D 比は Eide と Langsaeter（1941）、Joergensen（1957）、Warrack（1959）が間伐プロットに適用して良い結果をえている。最近 Vézina（1961）が balsam fir の間伐系列試験に使ったところでは、12の処理プロットは全部 d/D 比が 0.8～0.9 となって、弱度の上層間伐を示した。

t/v 比

Ullen（1940）は伐採本数の%（t）と伐採材積の%（v）を比較して間伐方法を特徴づけた。もしこの関係が 1.40 以上なら伐採は下層間伐であり、1.00 に近ければ上層間伐、0.60 以下なら択伐的間伐である（Langsaeter 1941（Braathe 1957 より））。

Vézina（1961）の研究では、t/v 比は胸高直径 3.6 インチ以下の木を除いて計算しても、この方法では伐採の性格をはっきり示すことができなかった。

各指数の得失と応用

間伐の説明や指定に、計量的、すなわち数量的な方法を採用すること

の利点は Miley（1952）が強調しているところである。

数量的な形式で表わした場合、間伐の説明は覚えやすく、しかも実行しやすい。量的な方法を使うと間伐度や間伐方法が異なる場合の結果も比較することができる。しかし、どの指数についても、どんな条件のもとでも使えるというものでないから、特定の試験で指数を使おうとするときには、色々な方法の中から一番適当なものを選ばなければならない。

Assmann の方法は確かに優れているが、同時に、その適用範囲はかなり制限をうけると思う。カナダのように、いまだに全く手をつけられたことのない天然林があって、多数の樹種について最大断面積を容易に決定しうるようなところでは、その応用性は明らかである。経営林にこの方法を適用するときにも問題は生じないだろう。それは通常の間伐度を使えば、少くとも上層林冠を占める樹種については、収穫量の違いは　　からである。"生態的な地位の最大値（ecological site maximum）"を考えれば、間伐度を選ぶとき局所的な生態的条件を調整できる。ここで断面積測定値は、多くの場合、Bitterlich の angle-count 法あるいは Spurr の angle-summation 法（Spurr, 1962）によって、正確さを犠牲にすることなく簡単に求められることをつけ加えておく。

一方 Assmann は密生した更新木から成立して、無手入のまま放置された林の断面積から求めた最大値を考えている。そのような最大断面積は、無手入で残すべき林内に標準地を設定した後でなければ知ることができない。経験によれば、1つないし数個くらいのプロットからでは正確な推定値は求められない。たとえば Quebec の Boreal 森林では、同調した balsam fir 林の断面積は c. 196 平方フィートの最大断面積に急速に近づきつつあることが観察されている（G. J. Lemieux[6]）。しかし over

6）私信による。

stocking と考えられるエーカー当り 220 平方フィートという例外的な断面積も現れている。

したがって、筆者は丁度よい立木度（well stocked）の天然林でみられ、常数では収穫表から求められるところの、"平均的な最大断面積"を使った方がよいと考える。

ドイツ北東部で研究を進めている Dittmar（1960）は、長期にわたって観測をおこなう間伐プロットの間伐度の特徴づけに幹距（spacing factor）がうまく使えるかどうかを検討した。幹距と相対断面積、幹距と林令の間には有意な相関があった。老令林では、与えられた相対断面積に対する幹距の値は大きくなった。このように、幹距と断面積の関係は年令によって変るが、一般に地位とは無関係のように思われる。最大（自然的）断面積と林令間には有意な関係は見出されなかった。Dittmar は数量的基準で間伐をおこなう場合、Becking の方法は極めて優れていると結論している。フランスではまだそのような分析はおこなわれていないが、Pardé（1961）は最近林業家に新しい数量的物指に対する意見を求めている。

Nommel や Becking の指数をあてはめるときには、プロット間の平均直径の変動が小さくなるように注意しなければならない。実際、樹高と関係させた幹距にはこの変量を考慮してないから、平均直径があまり大きく違っている間伐試験では、間伐後の断面積と幹距または林分密度指数の間にほとんど関係がないようなことも起りうる。

間伐である程度常用できる都合のよい尺度は、樹幹表面積である。というのは、これは胸高周囲、樹高および林木の細りの函数だからである。しかし、一様な林では細りの変動は非常に少ないから、上層高と胸高周囲の積をとれば樹幹表面積と同等な性格のものとなる。林分の樹幹

表面積の十分な指数として使える（Hiley and Lehtpere 1955）。これは樹高が殆んど一様な林ではもっと簡単になる。樹高と直径の両方が一定なら，エーカー当り直径の和は，樹幹表面積の指数（"幹密度指数"）となる。なぜなら周囲の和は，直径の和にπをかけたものだからである（Smith, 1962）。したがってエーカー当り直径の合計は，幹表面積の或る大事な函数である。これの調査は線状調査（line sampling）の方法を使えばよい（Grosenbaugh, 1958）。

幹の直径は形成層の表面積とほとんど正比例する。一方樹幹断面積は平方根函数の形で形成層面積に関係づけられる。直径と形成層表面積の直接的な関係から，エーカー当りの直径の和が，成長率を低下させる林分密度の影響を表わす尺度として，断面積よりも優れていることが証明される（Cooper, 1961）。

ある事情のもとでは，Johnston と Waters（1961）と同じように，全く量的な意味で普通の表わし方，たとえば"C/D 度"などを使えることを注意しておく。

このほか，単木の研究に適用される新しい方法によって，胸高直径と樹冠直径（または幹距）とを関係づけ，林分密度の決定を改善できる（Krajicek et. al. 1961. Vezina. 1962）。

成長量と色々な林分パラメーター間の関係から導いた方程式をもとにして，林分密度を調整する問題に統計的に接近してゆこうとする Wenzel（1959）. Czarnowsky（1961）. Smith, Ker, Leignazie（1961）. Lemmon and Schumacher（1962）らの最も新しい方法によって，最終的には，林分密度の生物的現象と林分の生産する材の価値に対する経済的現象間の関係を確定するための最良の手段がえられるであろう。この研究方法については Kirby（1962, p52）と Smith（1962）が推奨している。

これらの数量的な指針を実際にどのように使うかはまだよくわかっていない。Hummel らは（1949）によれば，これらは間伐度や間伐方法の古い定義の代りに用いるのではなく，むしろ追加のチェックとして使うべきものである。これらの数学的な指針を種々の間伐度，方法を代表している実験的な間伐の特定の場合，実際にあてはめるためには一層の研究が必要である。たとえば Hummel らは（1959）は上層間伐をおこなった林に，数値的な指針があてはまるかどうか疑問を表明しくいる。問題は結局林分密度と成長との関係を明らかにするために，林分密度の正しい科学的なパラメーターを見つけ出すということである。これらの数量的な指数と成長および，数量的指数と他の林分密度の指数間の関係を知ることにより，間伐度の記述におけるそれらの有用性が評価される。しかし多くの場合，間伐は林業家がその経営する林を仕立てるのに使うことのできる唯一の手段であることを認識しなければならない。選木の際，林業家は自分が何を目的としてそれをしているかを明確にしておかねばならない。そうして，何よりもこれが厳格な分類や指数より優先するのである。

文　献

Assmann E. 1954. Grundflächenhaltungs und Zuwachs tung Bayerisher Fichten Durch-forstungsreihen. Forstw Cbl. 73 : 257～271

——　1956. Naturlicher Bestockungsgrad und Zuwachs. Forstw. Cbl. 75 : 257～265

——　1960. Ueber Brauchbarkeit des Verfahrens von

Hart-Becking zum Festlegen der Durchforstungsstarke. Forstw. Cbl. 79: 65–72

—— 1961. Waldertragskunde. B.L.V Verlagsgesellschaft. Munich xv + 490 pp

Becking, J.H. 1954. Einige Gesichtpunkte für die Durchführung von vergleichenden Durchforstungsversuchen in gleichaltrigen Beständen. Proceedings of the 2nd congress of I.U.F.R.O., Rome 1953: 580–582

Braathe, P 1957. Thinnings in even-aged stands .....

Cooper, C.F. 1961. Equations for the description of past growth in even-aged stands of Ponderosa pine. For. Sci. 7: 72–80

Czarnowsky, M.S. 1961. Dynamics of even-aged stands. .....

Davis, K.P. 1954. American forest management. McGraw-Hill Book Co.

Dittmar, O. 1960. Untersuchungen über die Eignung der Becking-Zahl zur zahlenmassigen Festlegung Durchforstungsgrades auf langfristigen Kiefern-Durchforstungsreihen. Arch. Forstw. 9: 266–283

Eide, E. and A. Langsaeter. 1941. Produksjonsundersökelser i granskog. Medd. f. Det norske Skogforsoksvesen 7: 356–500

Grosenbaugh, L.R. 1958. Point sampling and line-sampling: probability theory, geometric implications, synthesis. Southern For Exp Sta. Occ. Paper 160.

Hart, H.M.F. 1928. Stambal en dunning. Medd. v.h. Proefstation voor het boschwesen, gl. 219 pp.

Hiley, W.E. 1952. Numerical thinning: with special reference to Japanese larch. Forestry 24: 10–28.

Hiley, W.E. and R. Lehtpere. 1955. Thinning grades based on the thickness of annual rings. Forestry 28: 17–32

Hummel, F.C. 1954. The definition of thinning treatment. Proc. 2nd congress of I.U.F.R.O. 1953. 582–588.

—— et. al. 1959. Code of sample plot procedure. Forestry Commission Bull. No. 31.

Jorgensen, C. 1957. Thinning experiment. B.C. Forest Service Publ. T 45.

Johnston, D.R. and W.J. Waters. 1961. Thinning control. Forestry 34: 65–74.

Kirby, C.L. 1962. The growth and yield of white spruce-aspen stands in Saskatchewan. Sask. Dept. of Nat. Res. For. Br. Tech. Bull. No. 4. 58 pp.

Krajicek, J.E. et. al. 1961. Crown competition-A measure of density. For. Sci. 7. 35–42

Lemmon and Schumacher. 1962. Volume and diameter growth of ponderosa pine trees as influenced by site index, density, age, and size. For. Sci.

Lexen, B. 1943. Bole area as an expression of growing

stock. J. For. 41: 883～885

Mac Donald. J. 1931. Sample plot methods in Great Britain. Emp. For. Jour. 10: 241～258

Mulloy, G. A. 1943. A practical measure of stock density in white and red pine stands. For. chron. 19: 108～118

——— 1944. Empirical stand density yield tables. Canada. Dept. Mines and Res., Dom. For. Serv. Silv. Res. Note 73. 22 pp

——— 1947. Empirical stand density yield tables II. Canada. Dept. Mines and Res., Dom. For. Serv. silv. Res. Note 82. 41 pp

Pardé. J. 1961. Comment préciser l'intensité d'une éclaircie? Rev. for. fr. 11: 551～557

Peniston. M. J. 1960. Thinning practice. Forestry 33: 149～173.

Reineke. L. H. 1933. Perfecting a stand density index for evenaged stands. J. Agric. Res. 46: 627～638.

点密度の尺度について

A measure of point density

By Spurr, S. H. For. Sci. 1962
((8): p. 85～96)

造林学、生態学の研究において、特定の一点における林分密度を評価したいことがよくある。そのような一点から視準したときの樹木の張る角度やエーカー当りの断面積で表わした中心密度、すなわち点密度の推定値を与えるのによく使われる。この密度を計算するためにここで提案する angle summation 法は、林木の張る角を利用する。すなわちもっと正確にいうと、一定角以上の木の本数を利用する Bitterlich 法とは違ったものである。この方法は林木の成長と その木をとりまく林木間の相関、更新状況と点密度の間の相関、および角膜におけるプラス木の選抜などの研究において利用する必要が生じている。ここで提案した方法は、森林調査における平均密度を求めるためにではなく、造林や生態研究に関連して、林分内の個々の場所の点密度の有用な測定値を与えるために考えられたものである。

林業の研究において林分密度はふつう単位面積あたりの胸高断面積（エーカー当り平方フィートあるいはヘクタール当り平方メーター）で測定される。胸高断面積はふつうは標準の大きさの標本プロット内の全林木の樹幹直径の測定値から計算される。林分内の与えられた点に影響を与えている林分密度の推定が屢々問題となるが、標準地による測定法は近似的な密度しか与えることができない。その1つの理由は中心が共通であってもプロットの大きさが違えば断面積は違った値になる。またテストしている点のすぐ近くにある木は遠くの木よりも明らかにその点に対する影響が大き

い。さらに，標本プロット法では密度を知りたい点に対する個々の木の分布とは無関係にプロット内の全林木がその大きさに応じて林分密度に影響している。

与えられた点から見たとき，一定の限界角をこえる木の本数をもとにするBitterlichのWinkel-Zahl（angle count）法は中心密度，あるいは点密度の近似的尺度を与える。点密度とは与えられた面積全部ではなく，林分内の1点で測定したときの林の断面積である。Bitterlichの方法は林分全体を通して色々な間隔でとった多数のangle countを平均するという方法で林分密度の推定のために広く採用されている。しかしこれは明らかな限界のために正確な点密度の決定にはあまり使われない。その1つの理由はこの方法では臨界角を超える木の総本数しか教えないからである。この臨界角でほんの1本を加えたり除いたりしても，測定値に大きく影響する。3 diopterの検視（臨界tangent = 0.030）の場合，エーカー当りの断面積推定値に対して，数えられたそれぞれの木は9.8平方フィートの寄与を示している。4 diopter検視（tangent = 0.020）ではそれぞれの木は1.4平方フィートの寄与をする。一方5 diopterのプリズム（tangent = 0.025）では，それぞれの木の寄与は27.2平方フィートである。angle countで推定した一点の密度推定値の精度は1本の木の寄与以上とはならない。

更にangle count法は1点で数えられた木の分布や相対的な大きさを考慮していない。臨界角すれすれの木は，検視したときの角度の大きさに比べると小さい木であって，検視点よりの距離も遠い。これに反して検視角の大きい木は比較的大きく，検視点への距離も近い。さらにangle count法によるエーカー当り断面積推定値に対しては，これらはどちらも同じ大きさだけ影響する。換言すれば，数えられた木が11本ということ

は，臨界角以上の角を張る本数がそれだけあったということで，それらが臨界角よりどれだけ大きいとか，それらが標本内でどのように分布しているかを示すものではない。標本点のすぐ近くにある一群の大径木はある広い円周に沿って分布する同数の木と全く同じangle countを与えることができる。それでも前者は実際の点密度に対してずっと大きく影響する。

したがって，点密度の正確な尺度を求めるには，点のまわりの全林木の張る角を利用する必要がある。この報告で取扱うのは，そのような点密度の"angle-summation"法の展開とその吟味である。ここで示した手法はBitterlichのangle-count法と原理を同じくするが，しかし単に臨界角をこえる木の本数を数えあげるだけでなく，与えられた点のまわりの林木の実際に張る角を測定しようとするものである。このangle-summation法は，測定点から検視したときの林木の張る角の測定値に順序をつけるというやり方で，Bitterlichのangle-count法とDice，Cottam，森下，あるいは他の研究者らの離距法を組合わせるものである。

しかし，これは試験のために選んだ単木またはそのほかの点の周囲の密度を測定するようにあえたもので，一連の無作為標本によって，断面積で表わした林分密度を推定しようとするものではない。

Angle summation 法の誘導

しかしBitterlichのangle count法では，臨界角は任意に選ばれ中心から検視したときの木の張る角がこの限界角以上となる木の本数を数える。angle summation法ではプロット内に入る木が1本となるように限界角を選び，断面積推定値を求める。第2の角は2本の木が

プロット内に入るように選び，第2の断面積推定をおこなう．この手続きは，希望する本数が測定されるまで続ける．断面積の最終推定値は，プロット内の個々の木の張る角をもとにして求めた個々の推定値の平均である．

Bitterlich の理論によれば，1本だけのプロットに対するエーカー当り平方フィート単位の断面積は，次の公式で極めて正確に近似できる．

$$B_1 = \left(1 - \frac{1}{2}\right) 75.625 \left(\frac{D_1}{L_1}\right)^2 \qquad (1)$$

ここで D は胸高直径（インチ）で，L は標本点から木までの距離（フィート）である．定数75.625は，1エーカー＝43560平方フィート/平方インチの平方フィートへの換算係数144と，半径を直径に直すための係数2の二乗との積である．

ここで注意しなければならないのは，臨界角を木の張る角と丁度同じになるようにきめると，プロット内に含まれる木の断面積は 1/2 だけだから，ここで示したように推定値を2で割らなければならない．実際には境界木のプロットに含まれる部分は，臨界角の大きさとは殆んど無関係に 1/2 よりごく僅か少ないが，この大きさは平方フィート単位で断面積を推定する場合には殆んど影響がない．一方，理論的には境界木が常にプロット外になっていると考えることもできるが，そのように仮定するといつも密度を過少推定することになる．境界木の 1/2 を含めると点密度の極めてよい近似値がえられる（但しほんの少し過大側になる）．

1本よりなるプロットは視準点からみたとき，一番角度が大きくなる木をもとにしてきめる．したがってこれは視準点に一番近い木でも最大木でもないことがある．

またここに示した手法において，サンプリングポイントは，ランダムに配置するというよりは，むしろ実験的な理由で配置されるということに注意しなければならない．密度は全林の平均としてでなく，むしろその点に対する値が求められているのだから，サムプリングの要素は含まれない．さらに比 $(D/L)^2$ の値は，選ばれた木の張る角と丁度同じになるように選ばれる．簡単のために $(D/L)^2$ 推定値（検視の補正をしないで）を使い，また木の断面積の半分がこのようにして定めたプロット内に含まれると仮定したことによる推定値の誤差は極めて低いオーダーの量である．

2本のプロットの場合，臨界角は2本目の木の直径の二乗と，標本点からその木までの距離の比で定める．2番目の木は張る角が2番目に大きいということで，かならずしも標本点からの距離が二番目とか，標本点の近くで2番目に大きい木であるとは限らない．最初の木の断面積はすべてこの新しいプロットの中に含まれるが，2番目の木，すなわちこの臨界すれすれの木の断面積は 1/2 しか含まれない．このようにして，プロットを定めると断面積の推定値は

$$B_2 = \left(2 - \frac{1}{2}\right) 75.625 \left(\frac{D_2}{L_2}\right)^2 \qquad (2)$$

となる．

比 D/L を n 番目の木の張る角で定めた n 本のプロットでは，断面積推定値は

$$B_n = \left(n - \frac{1}{2}\right) 75.625 \left(\frac{D_n}{L_n}\right)^2 \qquad (3)$$

となる．しかしもしこの木だけで断面積を推定すると，それより多張る角の大きい木の $(D/L)^2$ 比からえられた情報は，中心すなわち点密度の推定からは除外される．このように次々に推定したときの変動から，中心点のまわりの林木の空間的な分布を知ることができる．しかし，単一

の点密度の尺度というものは、とられた標本の大きさによって変化するにしても、実際的観点よりするとそのような尺度が必要である。

推定値を総合せる最も単純な方法は、それぞれの木を同じウエイトで直接平均してしまうことである。angle-summation 法は1本の木の測定値から導かれるn個の断面積推定値の平均をもとにするもので、それらの木は次々に1つのプロットの境界木になっているから、n本の測定木による推定値の平均（断面積）は

$$B_n = 75.625\,\frac{\frac{1}{2}\left(\frac{D_1}{L_1}\right)^2+\frac{3}{2}\left(\frac{D_2}{L_2}\right)^2+\cdots\cdots+\left(n-\frac{1}{2}\right)\left(\frac{D_n}{L_n}\right)^2}{n} \qquad (4)$$

となる。

angle-summation 法による点密度の決定にはすべてこの公式を適用した。立木が密度を求めようとする点になっているときは、中心の木を除外してこの公式から周囲密度を決定することもできるし、また全林の密度を求めるように中心木を含めて使ってもよい。最初の場合は張る角の一番大きい木に1のランクを与える。第2の場合、ランク1は中心の木である。しかし中心からの距離が0だから計算では無視する。それで張る角の一番大きい木には2のランクを与える。以下同様。

実際の場合、angle count 法や標準地法でえた断面積推定値に最も近いのは、上に述べた単純算術平均だと思われる。それでも推定値の重みづけの方法については議論の余地がある。張る角が最大、したがってランク1の木は多分標本点に対して最も強い影響を与えるだろう。この点からすると、その$(D/L)^2$の値から導いた断面積推定値に最大のウエイトを与えてよいかもしれない。一方、実際上ランク1から求めたこの推定値は張る角の名っと小さくて、しかも大きいれと結びついている木よりずっと変動が大きい。言い換えれば、競争効果の考え方からすると、nの小さい木につ

いては荷重を大きく、一方変動性を考えると、nの大きい木による動きのふさい（一貫性のある）推定値の方にウエイトを大きくする必要がある。この報告で単なる算術平均を使ったのは、これらの2組の考慮は略々等しい効果をもち、単純な算術平均が簡単で合理的、かつ常識的な答えを与えるという主観的判断によるものである。この両面の考え方を十分とり入れた重みづけの方法の展開が可能でなければならない。筆者の試みた簡単な荷重の方法は angle count 法や標準地法でえられるものと対比される断面積推定値を求めるには、単なる算術平均よりも十分でないことがわかった。荷重方法の考察と評価に当っては、この尺度が中央密度、すなわち点密度を評価するためのもので、林分を構成する林木の母集団の密度を求めるものでないことを忘れてはならない。もう一つ注意すべきことは、林分内の木の直径は色々であるから等直径の仮定による仮説は用心して解釈しなければならないということである。

angle-Summation による点密度の計算

第一表は New Zealand の Douglas fir 人工林内のある標本木の位置における angle-Summation 法による点密度の計算を詳細に示したものである。これには中央木を除外して推定する場合（6～9欄）と中央木を含めて推定する場合（10～13欄）の両方を示してある。この表には計算機を使って点密度を計算するときには不要になる部分もあるがこれは方法を段階を追って細かく説明するために含めたものである。

第1表で、もとのデータは1～5欄に記入してある。胸高直径（2欄）を観測点からの距離（3欄）で割って商を記入する（4欄）。D/L比の大きい木から順番にランクをつける（1欄）。最後に4欄の二乗を5欄に記入する。これが以後の計算の基礎データになる。木の張る角は直径

第1表　ある標本での angle summation 法による点密度の計算

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
順位 n	胸高直径	L	D/L	$(D/L)^2$	(5欄) $\times(n-1/2)$	中心木を除く			(5欄) $\times(n+1/2)$	中心木を含む		
						6欄の累積和	7欄/n	断面積		10欄の累積和	11欄/n	断面積
1	(50.8 cm) 20.0	(2.44 m) 8	(20.8196) 2.500	(433.4557) 6.250	(216.7279) 3.125	(216.7279) 3.125	(216.7279) 3.125	(54.19 m²) 236	9.375	9.375	9.375	709
2	18.4	10	1.840	3.386	5.079	8.204	4.102	310	8.465	17.840	8.920	675
3	12.2	10	1.220	1.488	3.720	11.924	3.975	301	5.208	23.048	7.675	580
4	9.1	10	0.910	0.828	2.898	14.822	3.706	280	3.726	26.944	6.694	506
5	13.3	18	0.739	0.546	2.457	17.279	3.456	261	3.003	29.777	5.955	450
6	15.0	21	0.714	0.510	2.805	20.084	3.347	253	3.315	33.092	5.516	417
7	12.0	17	0.706	0.498	3.237	23.321	3.332	252	3.735	36.827	5.262	398
8	7.8	12	0.650	0.442	3.165	26.486	3.311	250	3.757	40.584	5.073	384
9	14.2	22	0.645	0.416	3.536	30.022	3.336	252	3.952	44.536	4.948	374
10	13.3	21	0.633	0.401	3.810	33.832	3.383	256	4.210	48.746	4.875	369
11	15.0	25	0.600	0.360	3.780	37.612	3.419	259	4.140	52.886	4.808	364
12	17.9	30	0.597	0.356	4.094	41.706	3.476	263	4.450	57.336	4.778	361
13	15.3	26	0.588	0.346	4.325	46.031	3.541	268	4.671	62.007	4.770	361
14	11.1	19	0.584	0.341	4.604	50.635	3.617	274	4.944	66.951	4.782	362
15	15.9	28	0.568	0.323	4.684	55.319	3.688	279	5.006	71.957	4.797	363
16	16.5	30	0.550	0.302	4.681	60.000	3.750	284	4.983	76.940	4.809	364
17	15.4	29	0.531	0.282	4.653	64.653	3.803	288	4.935	81.875	4.816	364
18	10.6	21	0.505	0.255	4.462	69.115	3.840	290	4.718	86.593	4.811	364
19	9.1	17	0.479	0.229	4.236	73.351	3.861	292	4.466	91.059	4.793	362
20	12.4	26	0.477	0.228	4.446	77.797	3.890	294	4.674	95.733	4.787	362
21	18.8	41	0.459	0.211	4.326	82.123	3.911	296	4.536	100.268	4.775	361

と観測点からの距離とから計算しなくても、直接観準して測定できるのは明らかである。そのような場合は2欄と3欄は省いてよい。

中心の木を除いた断面積点密度は6〜9欄で計算される。それぞれの行は、その行に測定値が記入されている木から求めた個々の点密度の推定値を示す。6欄は5欄の$(D/L)^2$に1欄のランク、すなわち$(n-1/2)$をかけて求める。この値に75.625をかけると、その木だけによる点密度の推定値となる。しかしこの係数をかける前にn本の木の平均を計算する方が簡単である。7欄は6欄の数値の累積和である。すなわち3.125＋5.079＝8.204、この値に3.720を加えると11.924となる等々。8欄は7欄の値をnで割った平均値である。最後に9欄は8欄の平均値に75.862をかけてえられる断面積（エーカー当り平方フィート）推定値である。最後の4欄は、中央木を含んだ断面

積を各サイズの標本について求めたものである。この場合は中心の木のランクが1だから、前の No. 1 の木のランクは2になる。したがって、5欄の値には（n＋1－1/2）すなわち n＋1/2（10欄）をかける。11欄でこれらの値の累積和をとり、数値の個数が n だから n で割って平均する。これらの平均値に 75.625 をかけて断面積に換算する（12欄）。

普通の場合は、7、8欄あるいは11、12欄は必要でない。それは6欄と10欄の値は計算機でかけ合わせるときに、同時に必要な本数のところまで累積され、断面積推定値はその本数のところだけ計算する。第1表には標本サイズの大きくなるごとに新しい断面積推定値を示したが、これによって標本サイズが変るときどれ位推定値が変化するかがわかる。

方法の比較

ここに提案した点密度の angle-summation の尺度をテストする方法は林内の一点における林分密度を推定するこの方法の有用性を評価するのに使うことができる。これは点がそのまわりの競争の尺度を求めようとしている標本木の位置と一致していてもいなくても同じことである。この方法の妥当性と有用性に関する幾つかの問題の少くとも一部分は実験例によって解決できる。

点密度の angle-summation による推定値は、断面積の angle count の推定値、あるいは標準地密度推定値のどれとも直接の比較はできない。angle-summation の尺度は、一連の推定値から計算されるもので、これらの推定値はいずれも中心から検視したときの角の大きさによって順序つけた周囲の林木の張る角から求められている。angle count の推定値は n 番目の木だけの張る角とこの角より検視角が大きくなる木（それらの木の張る角の大きさは考えずに）の本数（n）とから計算する。プロット

または任意に定めた大きさのコドラートまたはプロット内の実測値をもとにしている。それでも一様な林分ではこれらの方法は全部同じ位のオーダーの推定値を与える筈である。

この前提を検討するため、New Zealand の Kaingaroa Forest にある35年生の Douglas fir 林内に設定された3つの固定試験地（いずれも1/2エーカー）の中で、3種類の方法を使ってそれぞれ標本を抽出した。3つの試験地は同一標高で隣接しており、地位条件も火山灰質で一様であった。1つの試験地は無間伐であるが、他の2つは12年の間3年間隔で間伐が行なわれている。この間伐は1/60エーカーの小プロットを使って伐採が全林で一様になるようにしてある。林分の平均上層高（エーカー当り100本の最大直径木の平均樹高）は1960年の時点で102フィートであった。

各試験地の中で13～17本の林木を含む中心の小プロット（2つの間伐試験地では0.1エーカー、無間伐試験地では0.043エーカー）を系統的に配置し、この小プロット内のそれぞれの木を angle summation 測定の中心に使った。また angle count の方は4、5、6ジオプターの尺等棒を使って検視し、すべての木は実測してチェックした。angle-summation による点密度は任意の本数の木について求められるが、比較を容易にするため、推定値は angle-count 法のカウント数と同じ本数で求めた。無間伐試験地の中心コドラート内におけるそれぞれの木のまわりの angle-count と angle-summation による断面積推定値を Table 2 にあげてある。angle-count 法では臨界角をこえる木の本数を数え、それに乗数をかけて断面積を求めた。たとえば4ジオプターの検視で21という同じ angle count が7個所でえられている。それでも中心点のまわりの林木の大きさと間隔の変動は同じ木について

求めた angle-summation 推定値がエーカー当りで 363～442 平方フィートとなるほど違っている。この比較から angle-summation の鋭敏なことがうかがわれる。

中心コドラート内の断面積はエーカー当り 396 平方フィートで、1/2 エーカー、プロット全体のそれは 370 平方フィートであった。したがって点密度の推定に含まれる本数が多くなるほど断面積推定値は小さくなることが予想される。これは標本が広い範囲にわたると、林内の疎な部分も含むようになるからである。このことは angle-summation の推定値から証明される。すなわち平均本数で 8 本しか数えないときには、387 平方フィートであるが、13 本を測定すると 372、20 本を使うと 365 平方フィートになる。表から angle-count 推定値は大きさは類似しているが、変動性が大きく不正確なことがわかる。

第3表は Douglas fir の3つの試験地全部の密度の推定値を示したものである。サムプリングの方法が違うとどの場合にも違った結果が出ているが、それでも全体的にみると3つの方法 — 面積測定、angle-count、angle-summation — による推定値は大体同じオーダーの量を示している。angle-summation の方法ですれすれの木の断面積の 1/2 を含めない場合 — すなわち実際におこなわれているように、その寄与の 1/2 を含める方法をとらず、すれすれの木を一貫して含めるとか、除外するとかした場合には、angle-summation の推定値はいつも過大あるいは過少のいずれかとなる。

angle-summation 法の別のチェックくデータは D. A. N. Cromer から提供された）をオーストラリアの胸高直径 8～12 インチの radiata pine の林分でおこなったが、4ジオプターの検視でとられられた 13 本の木から求めた angle-summation の点密度の値は、エーカー当り 209

第2表　色々な大きさの標本での angle count と angle summation の点密度推定値の比較

樹木番号	ジオプター					
	angle count			angle summation		
	6	5	4	6	5	4
G_6	6	16	21	360	360	369
G_7	11	16	21	458	462	442
G_8	10	15	21	359	370	373
G_9	6	12	19	450	362	363
G_{10}	10	11	21	420	407	373
H_6	6	13	23	381	342	361
H_7	6	10	17	394	323	308
H_8	9	16	21	387	389	383
H_9	10	13	20	444	428	396
I_8	9	13	21	368	363	363
I_{10}	9	15	21	413	408	393
J_4	10	12	20	459	440	397
J_5	9	10	17	332	329	308
K_6	7	15	20	369	347	359
K_7	8	11	18	275	283	299
K_9	7	12	17	372	336	325
K_{10}	9	17	24	346	382	396
平均	8.35 = 327 平方フィート	13.35 = 363 〃	20.12 = 351 〃	387	372	365

平方フィートであった。比較のため angle-count 法で推定した点密度

は 13×17.4＝226 平方フィートで、この値とすぐ近くの他の4点で推定した値の平均はエーカー当り 207 平方フィートになった。

angle-summation 法の目的は林分を通じての平均密度ではなく、1点における密度を測定することであるが、上に述べたような限られた数の比較からも、慣用の林分密度の尺度と大きさにおいてオーダーの類似した推定値がえられることがわかった。

第 3 表　New Zealand の3つの Douglas fir 試験地における色々の方法による断面積推定値の比較（R_{23} ハプロット）

方法	A	B	C
	強度間伐	中庸度間伐	無間伐
1/2エーカのハプロット	185	224	370
中心部でのコドラート	207	235	396
Angle count			
4ジオプター検視	196	242	351
5 〃	216	240	363
6 〃			323
Angle summation			
4ジオプター検視	223	248	365
5 〃	231	252	372
6 〃			387

1) 点密度は中心のコドラート（2つの間伐試験地では 1/2 エーカー、無間伐試験地では 1/4 エーカー）内の全林木を中心にして測定した。angle summation の点密度は、特度のテストで指示された最小角以上となる間隔の全林木についてえられた値の平均である。

点密度に対する標本の大きさの影響

次に取あげなければならない問題は、点密度の推定に含めるべき本数である。明らかに、張る角の最も大きい数本の木から求めた推定値は変動性は大きいが、しかし局所的な密度条件は非常によく表わすという二つの面をもっている。一方、多くの本数による推定値は点密度ではなくむしろ林分密度の方を表わす傾向がある。

中心の木を点密度の推定から除くと、推定値は標本に含める本数を多くするほど大きくなる筈だと思われる。事実このことは第1表の例で示されている。すなわち、大きさ8本の標本までの間では推定値の上下のブレが大きいが、その後中心の木のまわりの点密度の推定値は別の標本木が追加されるごとに大きくなってゆく。しかし、小標本の推定値は大きいブレを示すことがあるから、取扱いには注意が必要である。

同様に中心の木を点密度の推定に含める場合には、十分な数の標本木をとると推定値は非常に安定してくる筈だと考えられる。このことも第1表の例から確認される。すなわち標本サイズの小さいときはブレがあるが、その後林分密度の推定値は次第に低下して最終的には 361—364 平方フィート（エーカー当り）に落ちつく。

標本サイズが増すときの点密度推定値の平均的傾向を Fig. 1 に示す。これは New Zealand 北島にある Kaingaroa Forest の 35 年生の Douglas fir 無間伐林内の標本プロットでとった 21 本の木のデータである。傾向は中心の木を含めたときの推定値（実線）と、除いたときの推定値（点線）の両方について示した。21 本の木の全部の平均的傾向は、全部の木を含めれば一定の推定値がえられること、また中心の木を除くと傾向線が上昇することの2つを全く明瞭に示している。各点における 21 本の林木のグループについて 6 本の標本をとれば、20 本と

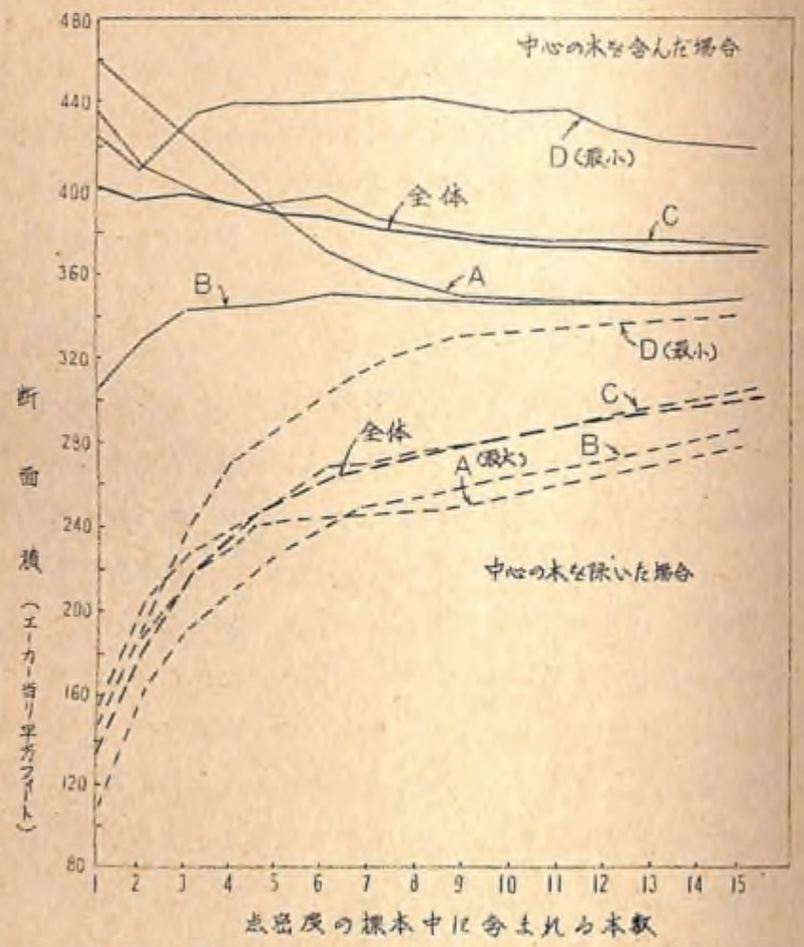


Fig 1　標本サイズが大きくなるときの点密度推定値の傾向　New Zealand における Douglas fir について

でを含めたときの推定値と，事実上変りのない林分断面積の推定値がえられる（曲線は15本のところまでしか画いてない）。

次に21本の木を大きい方から4つのグループにわけた。すなわち，一番大きい木のグループ5本（Aグループ，平均径18.6インチ），次の

大きさの木6本のグループ（Bグループ，平均径15.0インチ），その次の大きさの木5本のグループ（Cグループ，平均径11.5インチ），一番小さい木のグループ5本（Dグループ，平均径7.1インチ）。各グループの標本サイズを増したときの点密度推定値の傾向を中心木を除いたときと含めたときにわけて Fig.1 に示してある。

この場合にも前と同じ一般的傾向がみられる。中心木を除いたときの推定値は標本サイズが増すにつれて大きくなるが，中心木を含める場合には低下する。さらに大きい木の成育空間（growing space）は小さい木のそれより大きい。大標本では最大の5本のグループ（Aグループ）に対する点密度の推定値は次のグループ（B）より小さい，等々である。

ここで angle-summation 法は angle count 法に比べてすれすれの木を含めたり除いたりしても，断面積推定値はあまり変らない。10～12本以上の標本をとると全くよく似通った密度の値がえられ，場合によってはもっと本数が少なくてもよい。与えられた点の測定と計算には angle-count 法より手数がかかるが，angle summation 法の推定値は点密度と関連をもつ変数とより高い相関をもつ筈である（後述の例参照）。

現地での単木の角度の測定

angle-summation 法では，選ばれた臨界角内の全本数の数えあげでなく測定が必要だから angle-count 法より手間のかかる断面積推定法である。しかし精度が高いから測定点数は少なくてすむし，また各点で判定しなければならない本数も少なくてすむ。いま述べたこの方法の研究では，張る角が任意にきめられた最小の値より大きくなる木について胸高直径と標本点からの距離を実測した。木の選出にプリズムを使い，直径と距離との最小の組合せを計算した表を使って，すれすれの木が標本に含まれるか

否かを決定することにすれば、このことは決して面倒ではない。

もっと外の、そしておそらくもっと迅速に angle-summation する方法が可能である。たとえばセオドライトを使って標本木の張る実際の角度を作り出すこともできる。もっと簡単には目盛のついた回転可能な台にプリズムを取つけ、プリズムで作られる最大角までのタンジェントが直接読みとれるようにしてもよい。そうしてプリズムをまわして、1つはプリズムを通して、もう一つはプリズムの外側から見える木の右側と左側の縁を一直線になるようにする。そうするとタンジェント（あるいは目盛の仕方ではタンジェントの二乗）を回転角の目盛りから直接読みとることができる。

angle summation 法の応用

点密度の正確な測定値は、特定の一点のもつ林分密度の評価が必要な造林的あるいは生態的研究において特に貴重である。そのような応用では、angle-summation 法は標本プロットすなわち面積を基準とするどのような断面積推定値より精度がよいという特徴を遺憾なく表わす。多くの造林的あるいは autecological な研究では、単木を実験単位とすると好都合だから、これらの木のまわりの angle-summation 法で正確に測った点密度は、周辺の断面積の一層正確な尺度を与える。同様に孔状伐採（small clearings）個所における更新樹を含めて、下層の樹種の成立と成長は、周囲林分の密度（樹幹の断面積の形で測定できる程度における）と非常に深い関係をもっているから、点密度の方法によって最も精度のよい評価が与えられるだろう。点密度の精度のよい推定値は、木の選抜にも有効なことが証明される。多くの場合林内で大きい表現型をとる木（形の大きい木）がその大きさになったのは、主としてより多くの成長空間を利用できたためである。多分隣接の大きさが多少小さめの木の方が、周囲林分の密度からみてより急速に成長しているようなことがある。点密度に対して成長量あるいは木の大きさをグラフに表したとき、はっきり回帰線の上に出るような木は、それらの成育している林分密度のもとで、大きい成長量を示していることで、全く遺伝学的に望ましいものであろう。

そのような応用では、いつでも点密度推定値に対する標本サイズの影響を考慮に入れなければならない。標本が小さいと、局所的な密度条件を測定できるが、変動が大きくなる。一方大標本は（点密度でなく）林分密度を測定することになるから、推定値を必要とする点での樹冠や根系のどちらの競争にも無関係な木の断面積まで含めてしまうことになる。Douglas fir 林分のテストで説明した条件のもとでは、Fig. 1 のデータから必要な標本サイズについての指針がえられる。各中心木のまわりで7本の木を測定するまで、4つの直径級の平均密度は中心木のまわりの最小直径級で密度が一番高く、最大直径級が一番小さいという順序の通りには並はない。（最大と最小の密度の）差の一番大きいのは8および29本の標本サイズのときで、点密度に対する直径級のこの関係は予期したように、標本サイズが大きくなるにつれてなくなってゆく。競争の条件が異なれば当然違った結果がえられるであろう。

点密度と単木の成長量との関係

この報告は中心密度の尺度を提案することで、その応用の仕方を探究することではないが、そのような使い方の少くとも1つをあげることは興味をよぶであろう。このため点密度と断面積の（平均）連年成長量（1957～1960年）の関係を、さきに述べた New Zealand の Douglas fir の造林地内の3つの小プロットで検討した。点密度の標本には

テスト木から5ジオプターのプリズムで検視してえた全部の木を含め、密度をangle summation法で計算した。

テスト木の樹冠の成育条件が周囲の点密度と密接な関係をもっていることは容易に想像されよう。しかし根の成育条件は全くのところそれほど深い関係をもたないかもしれない。これは特に根系が広くはりめぐらされ、またそれが林木相互および間伐によって伐倒された木の生根間の根のからみ合いのために結合されてしまうからである。

間伐試験地内の3つの小プロット全部についての、点密度と断面積の連年成長量間の全体的回帰は、

$$I_B = 0.109 - 0.000271\,B$$

となった。ここで I_B はエーカー当り平方フィートで表わした断面積の連年成長量で、Bは周囲のエーカー当り平方フィートで表わした点密度である。但しこの密度は中心木すなわちテスト木を除いた5ジオプター検視でとらえられた全部の木から計算してある。相関係数(r)は−0.677できわめて有意である。推定値の標準誤差は0.0210平方フィート、すなわち単木あたり0.0488平方フィートの連年成長量に対して43%となった。

3つの小プロットに対する個々の回帰も似たような結果で、こみにした全体の回帰と有意な差はみられなかった。3つのプロット全部についての個々の関係の分布状態はFig.2に示した通りである。

同様な分析をangle-summationでなくangle count法による点密度の推定値を使って行なった。angle countとangle summationの相関は高かった(56本の木全部について $r = 0.854$)が、各小プロット及びこみにしたデータでえられた推定値の標準誤差は大きくなった(第2表)。点密度を単木の連年成長量と関係づける場合には明らかにangle count法よりangle summation法の測定値の方が優れているように思

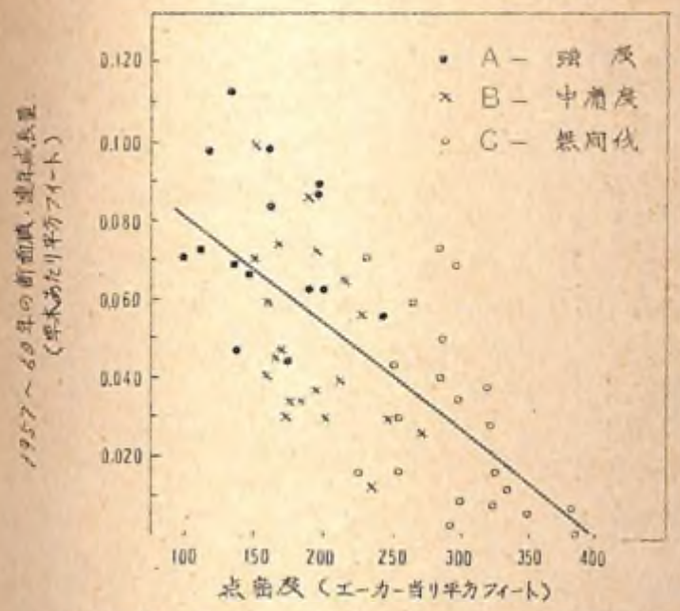


Fig. 2 点密度に対する平均連年成長量の回帰
(New Zealandのdouglas firについて)

われる。成長と密度の関係を調べる場合、ここに提案した新しい尺度の使用を正当化するのはこの事実だけである。

成育空間と成長量の間の明瞭ではあるが多少弱い関係は、ここで述べた高さ10パフィート、林令35年の林分における個々のDouglas firの成長を支配する根のからみ合いと根の競争関係の重要性を間接的に証明している。林木の間隔が広いと成長率が大きくなることは3つの間伐度のプロット内およびプロット間で同じようにはっきり認められたが、無間伐林分と比較したとき、成長に対する成育空間の影響が間伐林の場合に違っているという徴候はみられなかった。

要　約

林分内の特定の一点に影響を与える林分密度の正確な測定値が周囲の

第4表　単木の成長量に対する点密度の関係（35年の Douglas fir の3つ小プロットについて）

区　分	A 強度間伐	B 中庸度間伐	C 無間伐	こみにした全体
本　数	15	20	21	56
Angle summation の尺度				
a（常数）	0.094	0.113	0.114	0.109
b（傾斜）	−0.000121	−0.000333	−0.000282	−0.000271
r^2	0.058	0.240	0.266	0.458
r（相関係数）	−0.241	−0.490	−0.515	−0.677
S（推定値の標準誤差）	0.0133	0.0201	0.0208	0.0210
Angle count の尺度				
S（推定値の標準誤差）	0.0201	0.0217	0.9223	0.0243
相関係数				
a summation 対 a count	0.617	0.521	0.569	0.854

木の張る角度を加えあげることによって求められる。与えられた地域の全部についてでなく、与えられた1点についてエーカー当り断面積を求めるための公式と計算方法を示した。

angle summation 法は Bitterlich の angle-count 法と同じ原理に立つものであるが、前者では、中心からの検視角がある与えられた最小角度以上となる木の本数だけでなく、標本に含まれる各林木の大きさと相対的位置が断面積推定値に寄与するから、精度が高くなる。angle summation 法は、平均的な林分密度の尺度を与えるものでないが、与えられた地域全体よりはむしろ与えられた1点における林分密度の評価が要求される造林的、および生態的研究、あるいは精英樹の選抜において有用である。

Grand Fir の多型的地位指数曲線の作成について

Mathematical approach to polymorphic site index curves for Grand Fir.

By Albert R. Stage（For. Sci. 1953. No.2）

要旨：樹幹解析木のデータにS状曲線 $H = a\exp(-b/A)$ をあてはめて、Abies grandis の多型的地位指数曲線が導びける。この方法では林木を地位推定のための phytometer に使う。地位の尺度を求めることは、林分の連年成長量の把握と密接に対応しているが、この推定方法は成育の稚幼の時期だけに林木に影響する地位因子の効果を反影するものである。地位指数はここでは、林木が55フィートのときの連年樹高成長量で定義したが、50年生のときの指数を表わすには樹高を使うことにした。多型的地位指数曲線の中から適当な樹高対年令曲線の組を選ぶには、胸高におけるズイから1.5インチ以内にある年輪数を使う。樹幹解析から作ったそのような曲線は、どの年令についてもエーカー当り同数の最大樹高木に適用しなければならない。この本数は暫定的にエーカー当り25本ときめた。

樹高成長曲線は林業において色々な用途に供せられる。これは地位指数曲線の形において、最も一般的な地位分類の方法を提供する。実際多くの地位分類の方法は、生態的、植物に及ぼす土壌の影響、あるいはまた気候のいずれによらず、誘導または使用の際において樹高対年令の関数関係を利用する。成長予測の立場からすると、樹高対年令曲線は、（将来）林分を投影する場合の樹高成長の成分の予測に都合のよい手段を提供する。地位指数曲線というものは、樹高成長量と1つあるいはそれ以上の独立

変数間の関数関係を示す1つの表現形式にすぎない。慣用の方法では、年令と地位指数の2つの独立変数だけを考えている。したがって年令と地位だけが独立変数だという仮定では与えられた年令の林木については、樹高と地位指数の間に一対一の対応が成立する。

多型的（polymorphic）地位指数曲線は、上のような仮定にはとらわれない。この研究は、同じ地位指数の土地でも、色々な曲線型のありうることを認識することである。すなわち樹高成長量は年令と地位指数、それにあとで定める他の変数との関数である。樹高対年令曲線は、この樹高成長量関数を時間について積分したものである。

特定の樹種の樹高対年令曲線は、種々の気候区、植生型、土壌および競争の程度によってその形状が変る。Bull（1931）の red pine の曲線は地位によって変っている。Wiedemann（1934）と Ilvessalo（1927）は植生型に応じて種々の特徴的な樹高曲線が現れることを指摘した。Lynch（1958）がおこなった地位分類に対する競争の影響の研究では、stocking の色々な水準に対して一連の地位指数曲線がえられている。土壌断面の違いによって地位曲線が変るという可能性は Spurr（1955）が指摘しており、Carmean（1956）が Douglas fir について実際に示している。

Heiberg と White（1956）は、彼等の current site index（変動地位指数）の考え方を提示している中で、与えられた条件のもとにおける樹高成長量は、地位決定の源をはっきりしたよりどころであると推測している。樹高成長量は与えられた点での樹高対年令曲線の傾斜で表わされるから、土壌、植生、あるいは林分構造に応じて形を変える曲線は current site index の考え方（概念）を具体化するものである。

樹高対年令の成長曲線はまた単木の遺伝的な成長のパターンをも表現する。Schröks（1957）は scotch pine を調べて、若い時期に早急に伸びた木は成長の開始の遅れた木より早い時期に衰えるといっている。彼はこの成長のパターンの違いを遺伝的な構成の差に帰している。Krauter（1957）は識別できる樹冠特性および枝の出し方を成長パターンの違いに結びつけようとした。western white pine で squillace と Bingham（1958）は、北面、南面の地位指数の差に対応する成長率は遺伝的なものであることを見出した。すなわち成長曲線は環境の外部的要因と生物体の内部構造の両方に関係する。

初期における成長の抑圧（被圧）は特定の年令での樹高に著るしい差を生ずる原因になるから、この樹高は地位の差に対応しない。

後や密生した雑樹あるいは保護樹（shelter wood）の競争によって初期の樹高成長は減退する。McLintock と Bickford（1957）は、とりわけ過去において被圧状態にあったと考えられそうな優樹の地位区分の問題を論じている。しかし比較的同令な林型として成育する林は、一度被圧の原因が除かれてしまうとふつう成長は規則的なパターンで進む。すなわち、樹高対年令曲線の上部（upper portion）の傾きと形状は、特定の基準年令（index age）で到達する樹高よりも地位条件を一層よく表示する。これは、若い林の立っている地域の地位を区分する5年の intercept 法（Wakeley 1954. Warrack and Fraser 1955. Ferree et al 1958）の背景になっているのと同じ論法である。しかしこの方法は歪みやすい樹幹下部の成長率の測定に限定される。

多型的地位指数の定義

多型的曲線を導入すると、基準年令における樹高で地位指数を定義する普通のやり方では、その場所の潜在的生産力を十分に表わすことができな

い。伝統的な仮定（樹高は年令，地位の関数であるという）のもとでは，樹高成長量は（ハ）年令，（ロ）樹高を一定とすると，地位指数が高いほど大きくなる。慣用の地位指数の定義を多型的曲線にあてはめると，これらの単調な関係はどちらも成立しない。たとえば，ある場所の50年のときの林の樹高は60フィートで，これがその場所の樹高のほぼ上限だとすると，樹高の成長率は低いだろう。才又の場所に同令で同一樹高の林があって，この方は丁度樹高成長の旺盛になる時期に当っているかもしれない。

最も有用な折衷案はふつうとられている輪伐期の全期間を通じて，成長率との相関が最大となるように地位指数を定義することである。木の成長率を生理学的にコントロールするという考えからすると，年代的な樹令よりも，木の物理的な大きさに重点がおかれることになる。同じように，与えられた林産物に対してその木が向くか向かないかも大きさ ——年令でなく—— に関係してくる。

したがって，以下の議論のもとになる地位指数の定義では，地位を標準の高さの優勢木が到達できる成長量の大きさによって区分する。この樹高は通常の輪伐期内の中間に選ぶべきだから，成長率と地位指数との単調な関係が成長の主要な期間にわたって成立する可能性が最も強い。

地位指数の番号づけ（*numbering*）は勝手でよい。しかし多型的曲線の区分を，基準年令における樹高という慣用の定義にできるだけ密接に対応させておくことが望ましい。そのためには，地位指数が同じになる多型的曲線の組について，普通の基準年令のときにその平均樹高にしたがってそれらの曲線に番号をつければよい。このようにすると，基準年令のところでは地位指数に対応する樹高の上下に何本も曲線が出てくることに注意。

多型的地位曲線を求めるには2通りの方法が考えられる。その1つは

Lynch, Wiedemann, Ilvessalo, Carmean などのように，追加した独立変数（土壌的，生態的など）の同一と見做せる値ごとに，地位指数曲線（慣用の意味での）の組（*family*）を導くやり方である。もう一つは樹木そのものを引抜き *phytometer* として使う方法である。この方法では多型的曲線の組（*family*）をその場所に生育している林の，ある同一視できる特性にしたがって選ぶのである。後者の方法によれば，生態的，土壌的あるいはそのほかの地位因子の色々な組合せの影響を1つの変数の中に盛りこむことができる。このように *phytometer* の方法は解析に都合がよいが，しかしこれは基礎因子の性格を解明しようとするものではない。

慣用の地位指数曲線の場合には，樹高成長のパターンは関数形と，ある年令で観察された樹高だけできまる。多型的曲線では，成長のパターンにもっと融通性をもたせるので，余分の情報が必要である。1つの地位指数のクラスについて樹高対年令曲線上で才又の点をとると，1点だけのときより当然樹高成長の決定は正確になり，また曲線に一層複雑な形をとらせることができる。与えられた関数形について曲線上で追加の点をとることは，地位区分に使用する曲線の組を選定することと同じである。

成長曲線の決定

北アメリカで使われている地位曲線の多くは，多数の一時的標準地の年令にともなう平均樹高の変化を調べて導かれている。*Spurr*（1952, 1955）は，この単型的（*anamorphic*）曲線の方法の欠点を指摘したが，この欠点は年令と地位からみた林の分布が偏っている場合に特にはっきり現れる。したがって現在の樹高対年令曲線のひき方は，樹幹解析の資料を基本にしている（*Spurr* 1952, *Bishop et al* 1958）。

樹幹解析から導いた曲線は，エーカー当り一定本数の最大樹高木に対し

てあてはめなければならない。この方法は優勢木本数が年令とともに減少するため、年令にともなう平均樹高の trend の一部は優勢木中の下位のもの、枯死によっておこるというBruce（1928）の批難にこたえるものである。たとえば、現時点では林の25本の最大樹高木は、優勢な樹冠級の⅔からなっているかもしれない。しかし将来のある時点で、25本の最大樹高木（これは殆んどの場合前と同じ木であろう）は優勢な樹冠級の全部で構成されることになる。すなわち地位指数をエーカー当り一定本数の最大樹高木をもとにして決定することにより、いかなる年令についても比較可能な母集団の標本がえられる。したがって、それらの樹高は樹幹解析した個々の木の成長曲線に対応する。

ここで一定本数の最大樹高木をサムプリングする方法には偏りのあることに注意しなければならない。長期にわたって枯損や梢頭の折損の続いてきた老令林では、もとの最大樹高木の母集団のうち一部しか残っていないだろう。この偏りを補正する最良の方法は、多分若い林の標本で極端に大きい木を少し除去することであろう。取除く本数は年令に対する樹高の大きい木の枯損の累積関係から推定しなければならないだろう。

形状が明確な数学公式できめられる曲線は、グラフ上で求めた曲線より色々な点で都合がよい。まず曲線の形に影響しそうな規準や植生型、あるいはその他の因子と関係のつけられるパラメーターがえられることである。第2に電子計算機を利用する効率的な分析に適応した計算方法がとれることである。一般的にいって、これまで利用できるデータに適合する融通性のあるS状曲線の方程式が求められてきた。成長曲線の変曲点から上の部分だけを表わさねばならないとき、往々にしてS状曲線の上の部分を表わすのに、いつでも凸となる曲線が使われてきた。

樹高対年令データにあてはめるため、色々な成長曲線が提案されている。

これらの方程式の検討では次の記号を使う。

H = 樹高（フィート）

I = 10年間の樹高成長量（フィート）

A = 年令

D = 胸高直径

$\exp x = e^x$

$\ln x$ = xの自然対数

$\log x$ = xの常用対数

a, b, c, d = 未定常数（これらは方程式によってかならずしも同じ意味でない）

Schumacher（1939）はS状曲線の方程式として

$$\log H = a - b\left(\frac{1}{A}\right)$$

を提案した。これは多くの土壌地位の研究で、樹高の年令に関する成分を表わすのに用いられた。Lynch（1958）のponderosa pineの地位曲線はSchumacherの式をもとにしている。Meyer（1940）は、

$$H = 4.5 + a[1 - \exp(-bD)]$$

なる方程式を提案した。これはMc Lintock と Bickford（1957）が直径をもとにしてred spruceの地位区分をするのに使っている。Meyerの曲線は全体を通じて凸だから、樹高成長が変曲点に達したあとでないとあてはまらない。欧州の測樹学者（たとえばWeck（1953））や遺伝学者は樹木の成長曲線を特徴づけるために、Backman（1942）のWuchsgesetz

$$H = h\int_{-\infty}^{A} \exp(a + b\ln x - c\ln^2 x)\,dx$$

を使用した。

これに対応する樹高成長量の方程式は、

$$in\ I = \ln h + a + b \ln A - c \ln^2 A \ ^{*}$$

で与えられる。この式を使って回帰定数 $a + \ln h$、b および c が求められる。a は定数 b と c に関係してきまるから、** 樹高方程式を作るのに必要な係数は全部求められる。残念なことに、樹高を表わすこの積分は初等的でない。しかしこれは正規確率積分の形に直せるから、表からその値が求められる。

Lundqvist (1957) は *pine* と *spruce* の林で、樹高成長量の測定値から樹高曲線をあてはめる方法を考え、良好な結果をえている。その函数は、

$$H = a \cdot \exp(-b/A^c)$$

で、樹高成長量は、

$$I = [c\, b\, a \exp(-b/A^c)]/A^{c+1} \ ^{***}$$

すなわち、

$$I = c \cdot b \cdot H/A^{c+1}$$

で与えられる。

両辺を H で割って対数をとると、

$$\ln(1/H) = \ln c\, b - (c+1) \ln A$$

---

* $in\ I$ は $\ln I$ の *misprint* ?

** $\ln I$ の回帰式で、定数項として求められるのは $h = (\ln h + a)$ である。概述のように正規確率積分の表を利用するためには、積分記号内の *exponential* の肩が完全平方とならなければならない。この条件と $\ln A$、$\ln^2 A$ の係数 b、c から a は次のようになる。$a = -b^2/4c$。そうすると $a + b \ln A - c \ln^2 A - b^2/4c = -(\sqrt{c} \ln A - b/2\sqrt{c})^2$。よって最小二乗法でえられる回帰定数を h とおくと $a = -b^2/4c$、$\ln h = h + b^2/4c$ となる。

*** $I = H' = a \exp(-b/A^c) \cdot \left(\frac{b \cdot c A^{c-1}}{A^{2c}}\right) = a \exp(-b/A^c)(b \cdot c\, A^{c-1-2c})$

$= a \cdot b \cdot c \exp(-b/A^c)/A^{c+1} = c\, b\, H/A^{c+1}$

すなわち年令の対数に対する樹高成長率の対数の線型回帰によって、S状の樹高曲線を推定することができる。

年令に関する樹高の変曲点、すなわち樹高の連年成長量が最大となる時期は、

$$A_i = [c\, b/c+1]^{1/c}$$

である。

Lundqvist と *Schumacher* の方法とは密接な関係がある。*Schumacher* の式を同じ変数を使って表わすと、

$$\ln(1/H) = \ln b - 2 \ln A$$

すなわち、

$$H = a \cdot \exp(-b/A)$$

となる。

したがって $c = 1$ のとき、この2つの式は一致する。*Lundqvist* の成長量の方法を使うと、*Schumacher* の方法での仮定が検定できる。

任意常数が4つの *Backman* の *Wuchsgesetz* は3定数の *Lundqvist* の式より適応性が高いS状曲線である。しかし後者は面倒な積分をしなくてよいから計算が簡単であり、また十分な柔軟性をもっているように思われる。これらの理由で、以下に述べる分析では *Lundqvist* の式を使うことにした。

Grand fir についての研究

次節で説明する地位の分類方式は、内陸 *Empire* の *grand fir* (*Abies grandis* (*Dougl.*) *Lindl.*) の成長と収穫を研究するために開発したものである。陰樹である *grand fir* は高い成長能力をもっている。この樹種が開放によく反応すること、また競争によって成長が著しく減退する

ことは Fig. 1 から明らかである。

データの収集

内陸におけるこの樹種の分布地の全域から、66本の grand fir を選んで伐倒し、樹幹解析した。年令は50年から160年の範囲であった。この際次の条件にあてはまるもののみを選んだ。

1 全生涯を通じて優勢木であったと認められるもの、一貫して優勢であったかどうかを判断する資料として、成長錐で直径成長に被圧の時期があったかどうかを調べ、また過去において隣接木の中から枯死木が出たか否かを確かめた。

2 樹冠や梢端部に損傷がなく、又木などでないもの。樹冠部の異状な細り、あるいは不規則な直径成長から過去における梢頭部の損傷が示されることが多い。

それぞれの木について随伴樹種のリスト、Daubenmire (1952) の植生型 (habit type) および胸高直径を記録した。伐倒してから樹高を測定し、断面の年輪数から胸高における年令を決定した。これによって1956年の樹高成長の先端を起点とする10年ごとの樹高成長量を測定した。枝節の数を10年ごとの年輪数でチェックした。これは grand fir が頂部が損傷してもなおかつ成長を続けるという強い性質をもっているためである。これとともに、中間の多数の不定枝のために樹幹下部の枝節の数えあげは不確実なものとなる。10年きざみの樹高に対応する胸高直径(平均直径の方向で1/20インチ目盛のスケールで測定した)も同時に記録した。

地位曲線の誘導

地位曲線の組を誘導するための分析は次の基準にしたがっておこなった。

1 地位の階級づけは樹高がある基準の高さに達したときの樹高成長量をもとにしておこなう。このようにすると林の若い時代の経歴とある程度無関係な地位分類ができる。

2 地位の階級は、ふつうの地位指数(基準年令における樹高)と同じ名称にしなければならない。

3 曲線の形状のパラメータは、立木について迅速に識別できるものでなければならない。

地位曲線は次の手順で導いた。

1 基礎資料から10年間の成長量を使って $\ln I/H$ を計算する*。

2 $\ln I/H = \ln cb - (c+1)\ln A$ の共通解(こみにした解)からの残差で示された10年ごとの樹高成長率の差によって $\ln I/H$ を調整する。

3 それぞれの木に対する調整済データを使って、上にあげた式の常数 $\ln cb$ と $c+1$ を決定する(準木ごと)

4 樹高が55フィートのときの成長率を使って、手順3の個々の方程式をとく。こうして推定した成長量からその木の地位指数をきめる。

5 定数 b と c および林木またはその環境因子(地位指数を含む)の間にはっきりした回帰があればそれを求める。

6 手順5で見出された回帰から定数 c と b を決定する**。

基準年令における樹高を幾つか選んで、

$$H = a\ \exp(-b/A^c) \qquad (1)$$

に代入し、定数 a を計算する。

7 これらの a、c および b の値を使って色々な年令について Eq 1 を解

---

* この論文ができあがってから、平均成長率 I/H を一層迅速かつ正確に計算できる式のあることを知った。正しい公式は $I/H = \ln H_i - \ln H_{i-1}$ である。

** 10年間の成長率を使うときは、Eq 1 の b の代りに $b/10$ を入れなければならない。

き地位曲線の組を求める。

8 基礎データに対する曲線の適合状態をチェックし，必要なら調整をおこなって最終的な地位曲線を求める。

計算の細目

手順1　以下の計算で使う解析的公式は，もとのS状曲線の式を微分して導いた（Eq. 1）。この微分方程式のパラメータを推定するには無限微分小の代りに差分（樹高成長量 I）を使わなければならない。近似の誤差は差分（樹高成長量）に対応する樹高と年令の平均値を使うことによって減少する。

樹幹解析のデータから求めた10年ごとの樹高と対応する年令をパンチカードに写し，以後の計算を電子計算機で行なった*。樹高成長量（I）は計算のプログラムの中に10年ごとの樹高の引算を組込んで機械に計算させた。

年令は胸高で測った。しかし成長函数を表わす曲線の形は，地際年輪数を使うと一番直線に近くなる。したがって胸高年輪数に1.2年（自由に成長した grand fir が胸高に達するまでの平均年令を表わす）を加えて地際年令を近似した。以下の式のAは，このようにして決定した地際年令である。

手順2　標本木全部の資料をこみにして，線型式

$$\ln I/H = \ln cb - (c+1)\ln A \qquad (2)$$

の定数 $\ln cb$ と $(c+1)$ を計算した。この方程式からの残差を林令（10年ごと）とそれに対応する樹令で分類した。最近70年間の残差の数は

* プログラミングは Washington State Univ. の計算センターの Mrs Emma Iob が組んだ。

年令と歴年の二重分類表のどの区画にも一様に分布していた。この二重分類表にまとめた残差の分散分析をおこなったところ，7つの歴年（10年間隔の）に対する $\ln(I/H)$ の間に有意な差のあることがわかった*。したがって各歴年について $\ln(I/H)$ の値に残差の歴年平均間の差と70年間の全平均を加えて補正をおこなった。データは対数だからこの補正は結局，各10年間の成長量にその期間に対する一定常数をかけることになる。

手順3　未調整データと調整済データの両方を使って Eq. 2 の常数を決定した。一般に調整済データの方があてはまりがよかった。2本の木にあてはめた曲線と実測値を Fig. 2 に示す。

手順4　樹幹解析から地位指数曲線を誘導するには，各標本木の地位指数をきめなければならない。ある標準樹高のときの樹高成長量で地位指数をきめたから，Eq. 2 に樹高が 55 フィートに達する年令を入れ，それを $\ln I/H$ について解けばこの値が求められる。以後式の中で使う場合，この値を R_i で表わすことにする。55フィートを選んだ理由は，成長量最大の樹高の少し上で，通例の輪伐期のほぼ中間に当ること，また単木データからこれを求める場合，補間がほとんどいらないためである。

曲線の係数の解釈

手順5　さきに述べたように，polymorphic 曲線をもとにして地位を分類するには，曲線の形状をきめるための鍵が必要である。このため曲線形のパラメータである，c，b と植生型および地理的位置の関係をグラフと重回帰を使って調べてみたが，良好な結果はえられなかった。曲線の形状について，環境条件から手掛りがえられなかったので，pytometer

* F=4.43，1% 水準での有意点は 2.90 である。

の手法に立帰って，林木そのものから必要情報を求める必要がある．さきに注意したように，樹高対年令曲線の上に第2の点をとることによって，適切な polymorphic 曲線の組を選ぶことが可能となる．この第2の点は次のようにして間接的に決定した．

初期の樹高と胸高直径の成長率の間には高い相関がある．したがって樹高が15～20フィートに達するまでの年令は，対応する直径に達するまでの年令から推定できる．後者の年数は，年令の決定に使った成長錐片から直ちに求められるから，余分の労力を必要としない．したがって髄から1.5インチの半径の中にある年輪数を曲線形の index に選んだ全標本に対する常数 $c+1$ と $\ln cb$ の関係は Fig. 3 の通りである．樹高対年令曲線の変曲点（A_i）が35年となるような係数の組合せを結ぶと図に示した曲線がえられる．

この曲線の上側にある点は下側にあるものより

(1) 胸高での髄から1.5インチ半径内の年輪数 n が大きい．

(2) 年令（地際での年輪数）50年の樹高（H_{50}）が低い．

(3) 55フィートのときの樹高成長量（R_i）が幾分小さい．

という特徴をもっている．

樹高対年令曲線の変曲点は樹高成長量最大の点を表わしている．各標本木について，そのときの年令と樹高を係数から計算した．変曲点が早くくる木は遅いものより55フィートでの成長量が比較的大で，50年のときの樹高も大きい．55フィートのときの成長量が大きく，N の値の大きい木は，55フィートでの成長量が小さくまた早期に直径成長を開始した木より変曲点における樹高が高い．

55フィートでの相対樹高成長量（R_i）と胸高における髄から1.5インチ半径内の年輪数（N）に対する，50年のときの樹高（H_{50}）の関係は，

Fig. 4 の実線で示した平行線のようになる．この関係は次の重回帰方程式で表わされる．

$$H_{50} = 128.175 + 74.45\,R_i - 1.988\,N \qquad (3)$$

この回帰は50年のときの観測された樹高変動の84%を説明する．H_{50} は基準年令における樹高という慣用の意味での地位指数で，R_i はここで提案した成長量の考え方で定義した地位指数である．しかしこれらの地位の表現はいずれも誤差を伴っている．したがって，この関係を表わすため，回帰直線に垂直な偏差で測って最もよく適合する直線を計算した*．この直線は Fig. 4 の対角線で与えられる．この直線と50年のときの樹高（10フィート間隔で示してある）を示す x 軸に平行な直線との交点から，色々な R_i の値に対応するふつうの意味の地位指数が決定される．これらの値を第1表に示してある．50年の年令で30～90フィートの範囲をとると実際に現れる地位はすべて含まれる．

Fig. 4 でこの範囲の外に出る点は，地際年輪数の近似が実際と合わなかったか，あるいは初期の被圧が長すぎて，成長に対する地位の影響が正確に表現できなかった木である．

樹幹解析をしないで（without sectioning）特定の木の $c+1$ の値を確認する方法はないように思われる．Eq. 2 の $c+1$ の平均値を，こみにした単木内の平方和と積和から計算した．こみにした回帰は1.909で，標準誤差は±0.017であったから，この値を使って地位曲線の family を求めた．$c+1$ を一定にしたとき，$\ln cb$ の値は各標本に同じウェイトを与えて求めた．N，H_{50} および R_i に対する重回帰式から決定できる．この方程式は，

* 回帰直線の傾斜と適切な重みをきめる公式は，Deming, W. E., Statistical Adjustment of Data 1943, 261 Vpp に与えられている．

$$\ln c_b = 7.378 + 1.1755\,R_i - 0.01315\,H_{50} + 0.01324N \qquad (4)$$

このときの重相関係数は0.917であった。

手順6　Eq.(4)にEq.(3)を代入し，$\ln c = -0.0965$を差引く。

$$\ln b = 5.7872 + 0.1965\,R_i + 0.03938N \qquad (5)$$

第1表の7つの地位指数に対応するR_iのそれぞれについて，5組の地位曲線が必要であった。すなわちNの等間隔の値10，15，20，25に対するものと，第1表にあげた地位指数ごとのNの値に対するものである。これらをEq.(5)に代入して各曲線のbをきめる。対応するaの値は(3)式で求めたH_{50}を

$$a = H_{50}\left[\exp\left(b/50^{0.909}\right)\right]$$

に入れて求める。

手順7　次にEq.1を使って20年から200年までの樹高を10年きざみで算出する。Nの色々な値に対する地位指数80の曲線をFig.5に示す。

これらの曲線の形から，成長開始の遅れた木は早期に成長を開始した木より最後には樹高が高くなることがわかる。次節で述べるが，このような事態は曲線のあてはめで柔軟性が不十分であったことが原因である。最終的な地位曲線は，曲線の上の方の部分の原データに対する適合がよくなるように順次修正を施して決定した。[1]

手順8　最終曲線のあてはまりを調べるため，2つの方法を用いた。まずNと55フィートのときの$\log I/N$に対する回帰から常数a，bを求め，これを使って(Eq.3とEq.5)各標本木に対する曲線を計算した。次に残差をNと年令級によって分類したところ，残差の標準偏差が±1.4フィートとなった。これらの曲線は樹高を全然使わずにあてはめたのだから，この程度の偏差は当然と考えられよう。しかし偏差を調べてみると

と，変動の主な原因は，成長開始の特に遅れた（Nの大きい）木の高令の部分でこの曲線が高すぎたためである。このように適合が悪くなったのは，これらの木の樹令を正確に知ることができなかったことと，パラメータcに全部同じ値を使ったためと思われる。しかしそれらの値をグラフに落してみると，$N=15$の木の曲線が非常によく合っている。そこで計算した地位曲線の修正では，曲線が$N=15$の曲線と交叉するところまでは計算値を使い，それからあとは15リンプの曲線に乗りかえることにした。したがってこの点から上の方では，同じ地位指数の曲線はみな同じ高さになっている。

ここで2組の最終的地位曲線の例をあげておく。Fig.6は第1表に示した地位指数とNの値に対応する曲線で，Fig.7は$N=15$のときの曲線である。$N=10$，20，25についても同じような曲線が作られている。[6]

最終的地位曲線の2番目のテストとして，曲線上でそれぞれの木の3つの年令に対する地位指数を読み取った。そうして読みとった30年と80年の間の地位指数の差，および80年と130年の間の差を計算した。これらの差の平均値と標準偏差は，

年令の間隔	偏差の平均	標準偏差
30年～80年	＋1.64フィート	12.6フィート
80年～130年	＋0.18 〃	6.6 〃

であった。若い年令の方の偏差の平均は0とはいえない。これはNの値が丁度グラフのものと一致していなくても，補間をしなかったためで，これは曲線の下の方に行くにしたがって益々はげしくなる。標準偏差が大きいことは，若い時代での地位区分が信頼できないことを物語ってい

6）地位指数とNの組合せに対する全部の曲線がIntermountain For. & Rge Expt. Sta.（Ogden Utah）のRes. Note 71にのっている。

る。

これらの曲線を地位分類にどのように使うか。

1　頂部に被害をうけていない優勢木を樹高の高い方から数えてエーカー当り25本[7]の割合で選定する（すなわち1/5エーカープロットで5本）。

2　次の項目を測定する。

a　樹高（フィート）

b　胸高での年令

c　胸高における1.5インチ半径内の年輪数[8]

3　胸高における髄から1.5インチ内の年輪数に対応する曲線の値を選定する。

4　それぞれの木が、選定した地位指数グラフの曲線のどの位置にあるかによってそれらの地位指数を決定する。

5　えられた幾つかの地位指数を平均して、その地域の地位を決定する。

もし胸高での髄から1.5インチ内の年輪数がわからなければ、Fig.6を使って地位区分をする。この曲線は地位指数とともに増加する初期成長率の平均値をもとにして作られている。

このgrand fir研究の進展とともに、もっと多くのプロットが調査されれば、エーカー当りの最適調査本数とか地位指数測定値の変動係数について更に詳細な情報がえられるであろう。その際単木の地位指数を決定してから平均的地位指数を求める方法と、もう一つの単木測定値の平均をもとにして単一の地位指数をきめる方法の比較を行なう。

7）エーカー当り25本というのは仮りのもので、現在進行中のgrand firの成長についての研究がまとまれば改善されるかもしれない。

8）樹高150フィート以上の場合は初期の成長率は地位級と逆関係である。よってその場合にはこの項は不要である。

樹高から地位指数を推定する方法も改善の余地がある。これは樹高成長に対する累積された競争効果を補正する方法によるのであるが、これらの補正は、プロットの測定値と樹幹析解との綜合分析によらなければならない。これについては引続いて報告する。

引用文献

Backman, G. 1942. Das Wachstum der Bäume. Roux' Archiv 1942. pp 455～499.

Bishop, Daniel M., Floyd A. Johnson, & George R. Staebler. 1958. Site curves for red alder. U. S. Forest Serv., Pacif. Nthwest For & Range Expt. Sta. Res. Note 162. 7pp（proceed）

Bruce, D. 1926. A method of preparing timber yield tables. J. Agric. Res. 32: 543～557

Bull, Henry. 1931. The use of polymorphic curves in determining site quality in young red pine plantations. J. Agric. Res. 43: 1～28

Carmean, Willard H. 1956. Suggested modifications of the standard Douglas-fir site curves for certain soils in southwestern Washington. For. Sci 2: 242～250

Daubenmire, R. 1952. Forest vegetation of northern Idaho and adjacent Washington and its bearing on concepts of vegetation classification. Ecol. Monog. 22: 301～330

Ferree, M. J., J. D. Shearer, and E. L. Stone, 1958. A method of evaluating site quality in young red pine plantations. J. For. 56: 328–332.

Heiberg, Svend O., and Donald P. White, 1956. A site evaluation concept. J. For. 54: 7–10

Ilvessalo, Yrjö. 1927. Methods for preparing yield tables Silva Fenn 5: 1–30

Krauter, G. 1957. Wachstumsuntersuchungen an Einzelstämmen aus Kiefernbestanden. Forest. u. Jagd. 7: 565–571

Lundqvist, Bengt. 1957. Om höjdutvecklingen i Kulturbestand av tall och gran i Norrland. Medd. skogsforskn. Inst. 47: 64 pp

Lynch, D. W. 1958. Effects of stocking on site measurement and yield of secondgrowth ponderosa pine in the ingland Empire. U. S. Forest Serv. Intermountain For. Range. Expt. Sta. Res. paper. 56. 36 pp

McLintock, T. F., and C. A. Bickford. 1957. A proposed site index for red spruce in the Northeast. U. S. Forest Serv. Ntheast For. Expt. Sta. paper. 93 32 pp

Meyer H. A. 1940. A mathematical expression for height curves. J. For 38: 415–420

Schröck, Otto. 1957. Vergleichende Untersuchungen des Wachstumsganges an Einzelbäumen aus verschiedenen alten Kiefernbeständen. Sonderdruck aus Archiv für Forst-wesen (Akademie-Verlag Berlin). 6 (11/12): 828–847

Schumacher, F. X. 1939. A new growth curve and its application to timber yield studies. J. For. 37: 819–820

Spurr, S. H. 1952. Forest inventory 476 pp illses.

—— 1955. Soils in relation to site index curves. Soc. Amer. Foresters Proc. Oct 1955. pp 80–85

Squillace, A. E., and R. T. Bingham 1958. Localized ecotypic variation in western white pine. For. Sci. 4: 20–34

Wakeley, philip C. 1954. The growth intercept method of site classification. Third Annual Forest Symp. Proc. Louisiana State Univ. Batonkouge pp 32–33

Warrack, G. C., and A. R. Fraser. 1955. Estimation of site quality in juvenile Douglas fir stands. Brit. Columbia Forest. Serv. Res. Note. 28.

Weck, J. 1953. Anwendung von Wuchs-gesetzen als Methode der forestlichen Zuwachsforschung. Allg. Forstzeitschr. 8: 39–43

Wiedemann, E. 1934. Über die Beziehung des förstlichen Standortes zudem Wachstum und den Wirtschafts-

rfolg im Walde. Deutsch. Forschung 34: 5–103.

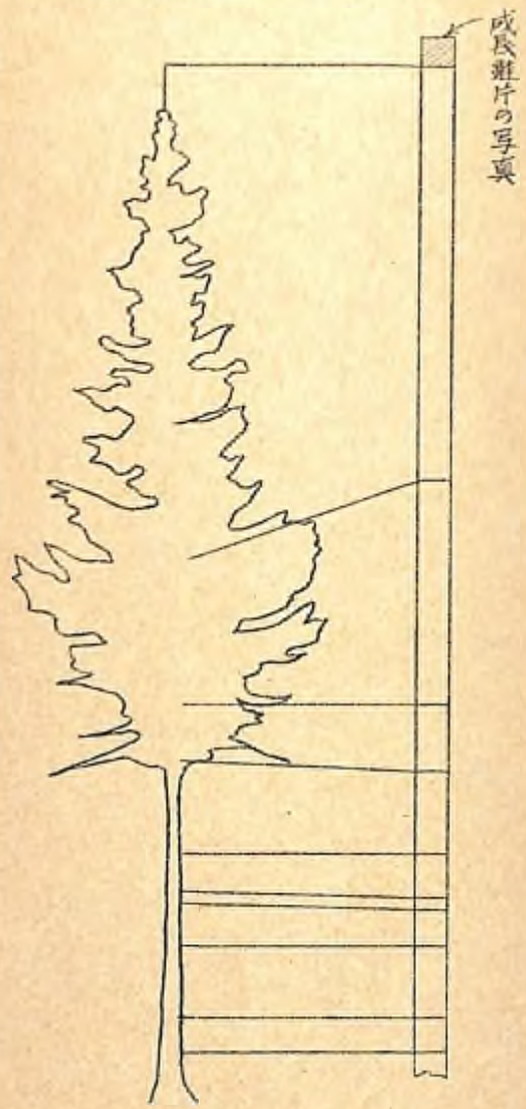


Fig. 1　この grand fir の樹冠が開放されたのは、この写真をとる14年前、上層木を伐採したときである。樹高と直径成長の相関を示すため、対応する10年ごとの点を直線で結んである。

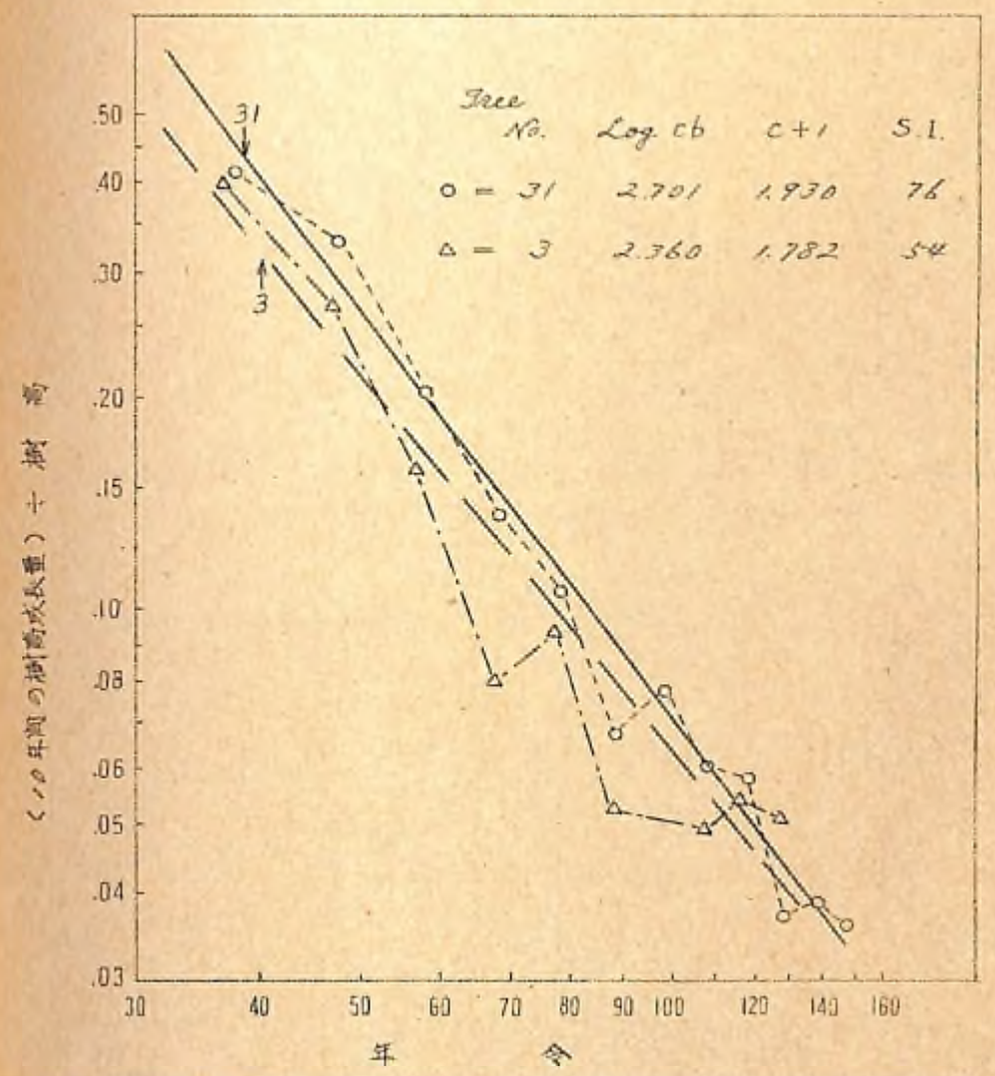


Fig. 2　成長率式のあてはめを説明するために示した2本の木についての成長量データ。矢印は樹高が45フィートに達する年令を示している。この点での成長率によって地位指数（S. I）をきめた。

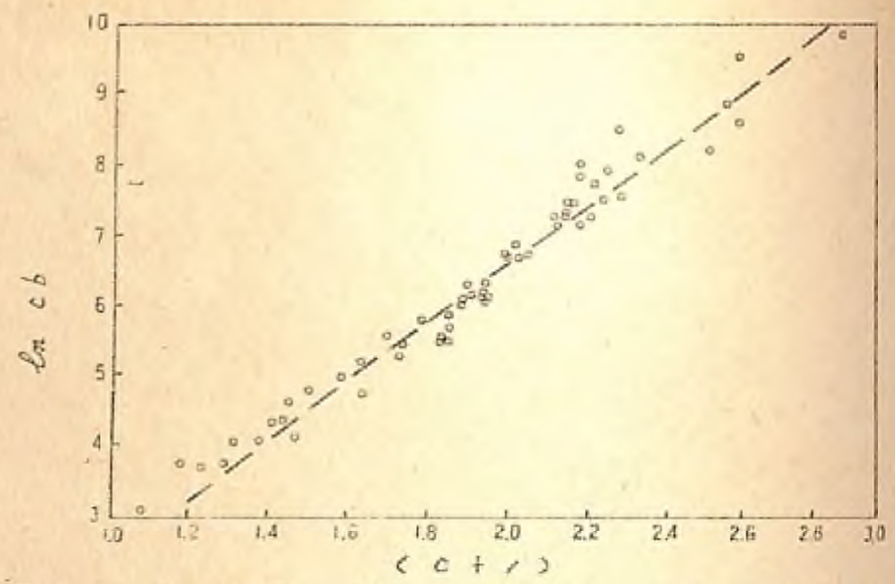
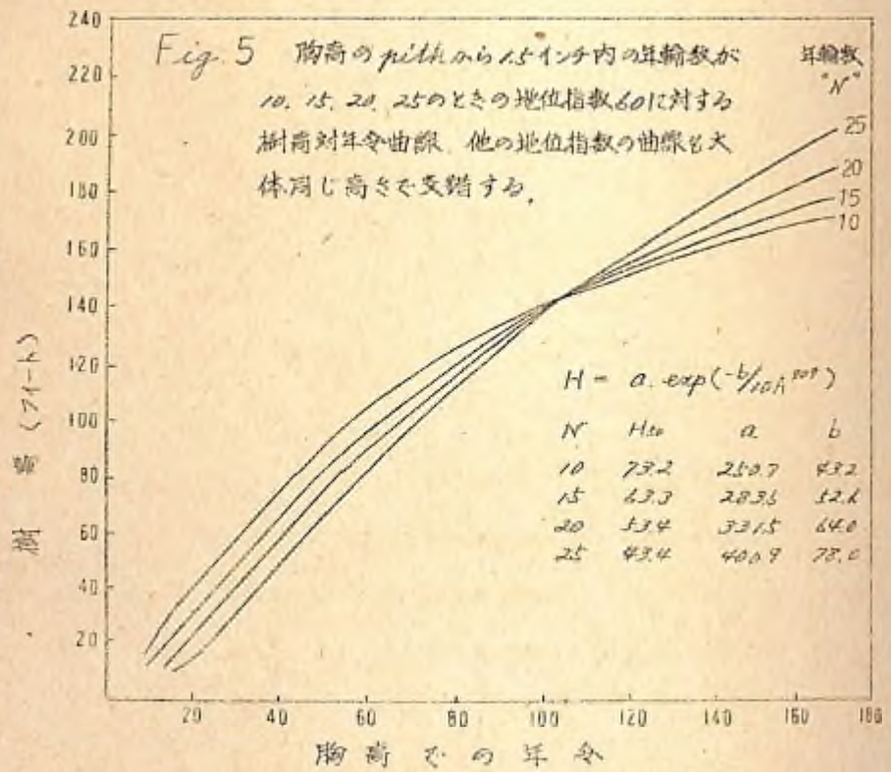


Fig. 3　成長率方程式 $\ln 1/H = \ln cb - (c+1)\ln A$ の係数には強い相関がある，破線は35年に変曲点が来る係数の組合せを示している．



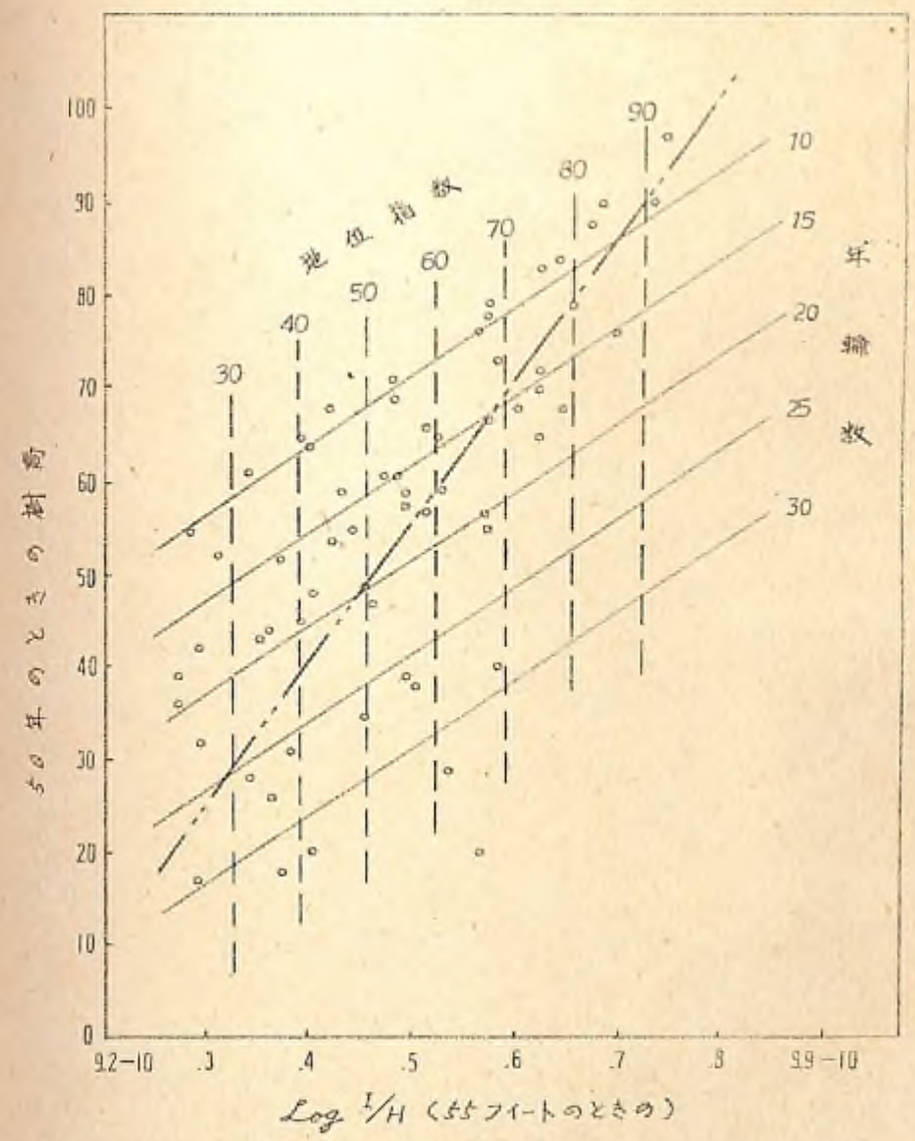


Fig. 4　成長率にもとづく地位指数，50年のときの樹高，胸高の pith から1.5インチ内の年輪数の関係，実際は $H_{60} = 128.175 + 24.45R_i - 1.988N$ を示す．縦の破線は成長量による地位指数，これらの2組の直線の交点を決って最終の地位曲線つ50年での樹高をきめる．対角線は成長量による地位指数と50年での樹高による地位指数の平均的関係を示す．

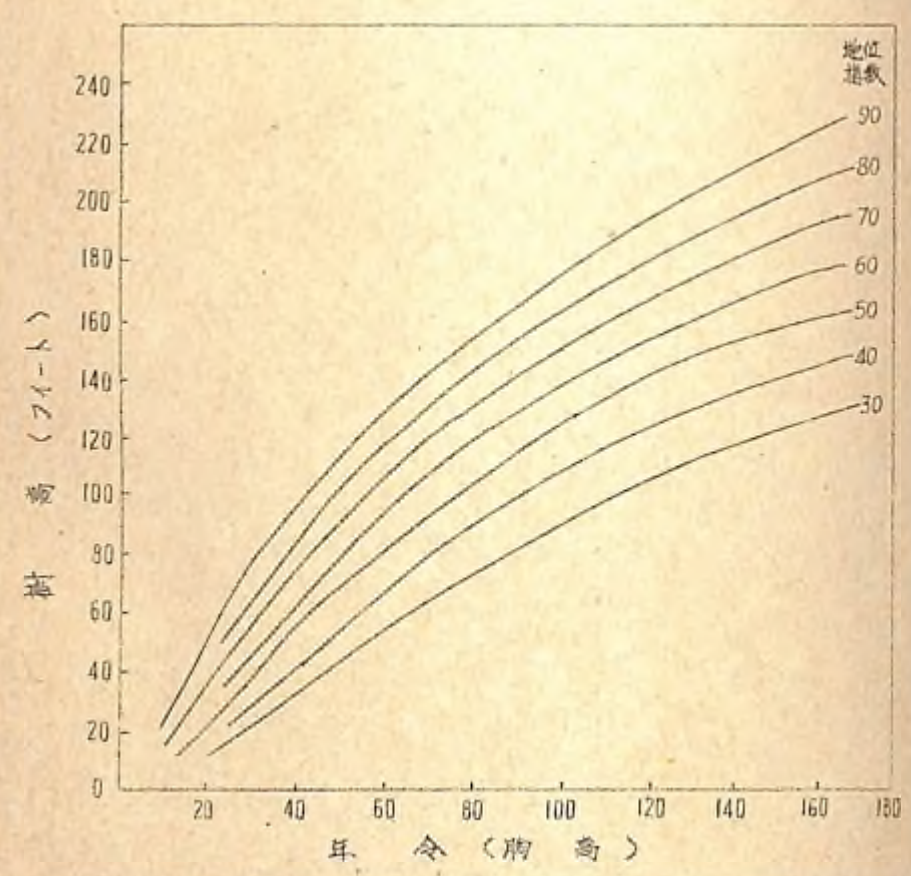


Fig. 6　年輪数(N)のデータがないときに使用する Grand Fir の地位指数曲線

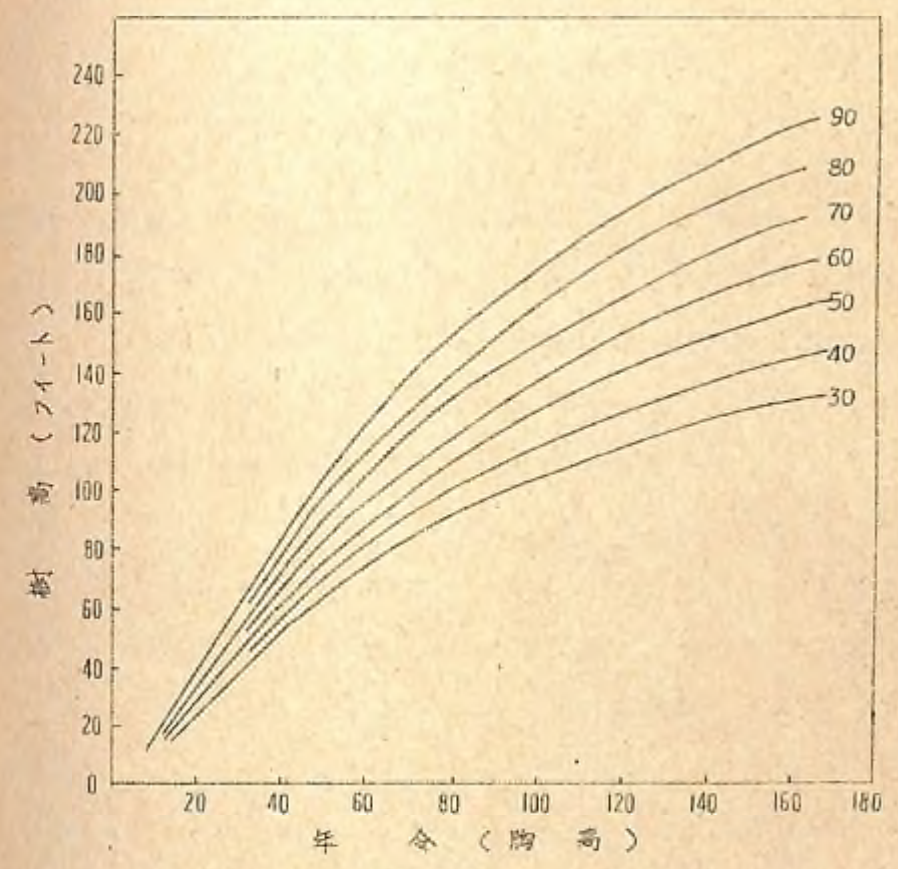


Fig. 7　胸高の pith から 1.5 インチ内年輪数が 15 のときの Grand Fir の地位指数曲線。対応する曲線は N = 10, 20, 25 の場合にも作られている。

New zealand における P. radiata の普通的収穫表

By E. R. Lewis

（後述の地位計算図表がどの様にして作製されたか，またどの様に使用すべきかを解説した著者の要約の概要）

1 fully-stocked な正常林分と反対に，不規則，無間伐の正常でない林分に適用するには，図表形式の"変数密度収穫表（variable density yield table）"が適当である。この型式の表は S.H. Spurr（1952）が推奨しているものであるが，林木の断面積と樹高が全く別個に予測されるという理由で，彼はこれを"二段形式（two-way form）"といっている。

2 以下において定義する次のような術（用）語を用いる。

d.b.h. —胸高直径，すなわち地上 4 ft 6 in での直径

o.b. —皮付の測定値

i.b. —皮内の 〃

エーカー当り断面積 — d.b.h. o.b. 1.5 インチ以上の全生立木の胸高における皮付のエーカー当り総断面積

平均直径 — d.b.h. o.b. 1.5 インチ以上の全生立木の胸高における平均断面積に対応する直径

上層高 —平均樹高曲線上で，エーカー当り 100 本の最大直径木の平均直径（断面積平均直径）に対応する樹高

地位指数 —年令 20 年における期待上層高

直径指数 —年令 20 年における期待平均直径

総材積 — d.b.h. o.b. 1.5 インチ以上の全生立木の皮内地上総幹材積この場合，異状な木については，同一直径の平均木の材積を与える。

取引可能材積 — 根本直径 6 インチ以上の木の，皮内上部直径の与えられた最小限界までの皮内幹材積，異状な木については，同じ直径の正常木の平均材積を与える。4 インチ top volume の場合，少なくとも長さが 4 ft ないと材積は求められない。またその他の取引可能材の基準の場合には 10 ft 以下の長さの材積は除外した。

3 将来の上層高と将来の断面積は，それぞれ第 1 図と第 2 図とから独立に予測する。第 1 図には林分材積表も組入れてある。もし現在または将来の上層高断面積が既知なら，総材積は，第 1 図で既知の上層高に対応する断面積（1 平方フィート）当りの材積を読みとり，この材積に既知の断面積を乗じて求められる。

4 第 3 図は年令の増加に伴う平均直径の成長を示すものである。第 4 図は，取引可能材積を総材積から求める際の割引率である。第 5 図は，本数の直径級ごとの分布を示すものである。第 6 図は直径 6 インチ以下の木を除く全林木について，上部直径 6 インチまでの材積の直径級別分布である。

5 理想的には，収穫表は固定試験地の資料から調製すべきである。もしそのような試験地がない場合の方法としては，多数の一時的標準地の測定値を用いる。散布図を作り，与えられた年令における極端な収量の値から，将来の平均値に向ってプロットの傾向線を延長してゆくには，どのようにするのが最もよいかを考えながら，曲線をひく。

6 林分の大径木から求めた，上述の上層高は，ある場所での生産力の良

好な指数である。大径木から求めた上層高は、材積推定に対する価値判断において、林分の全林木の平均樹高と比較される。大径木から求めた上層高は客観的であり、したがって樹冠級による測定値よりも優れている。上層高の決定に用いる標準地面積は 0.1～0.5 エーカーでなければならない。

7　p.128において前に定義した地位指数は、2乃至3の地位級によるよりも、情報を犠牲にすることなく、また、内挿を要しない点で優れた方法である。この2つの考え方は本質的には異なるものでない。換算は容易に行なえる。

8　計算図表は、表形式よりもまとまりがよく、また、算術的な内挿を要しないので良い型式である。計算図表についての情報は、単純図上法（simple graphical methods）から導かれている。

9　オ1図で、上層高と林分年令を結ぶ直線はその地位指数を通る。それでこの地位指数を通る別の直線をひけば、任意の将来における上層高の推定値を与える。オ1図には断面積の平方フィート当り総材積をも示してある。この数値は将来樹高と同時に読みとることができる。この数字はまたエーカー当り断面積が既知のとき、両者をかけ合せて、エーカー当り総材積を計算するのにも必要である。オ1図の右手の軸は林分材積表で、林分材積を推定する場合単木材積表の代りに使用できる。現在材積の推定には林令を知る必要はない。

10　オ2図は密度指数、年令およびエーカー当り断面積の関係を与える。林分密度の尺度（指数）として、林分密度指数は地位指数と類似して定義される。オ2図でエーカー当り断面積と林分の現在林令を結ぶ直線は、その密度指数を通る。それでこの密度指数を通る別の直線を引けば任意の将来における断面積が推定される。オ9節で説明したように、エーカー当り総

材積はエーカー当り断面積に断面積／平方フィート当り総材積を乗じて計算される（断面積／平方フィート当り総材積はオ1図から読みとる）。

11　オ3図は直径指数、年令および平均直径間の関係を与える（直径指数は地位指数および密度指数と同じようにして定義される）。林分の平均直径と現在林令を結ぶ直線はその直径指数を通る。それでこの直径指数を通る別の直線をひけば任意の将来における平均直径が推定される。

12　オ4図は（与えられた上部直径に対する）取引可能材積の総材積に対するパーセントを、林分の平均直径に対して示したものである。

総材積の推定値に、オ4図からオ3図で予測した平均直径を使って求めたパーセントを乗ずれば、取引可能材積の推定値となる。

13　オ5図は、直径級への本数分配を予想するものである。これは材積の予測には不要であるが、この分布を知っておくと（都合のよい）便利なことが多い。オ5図で林分平均直径とある直径限界を結ぶ直線を引けば、この限界より小さい木の本数割合（パーセント）がえられる。すなわち、平均直径 15 インチの林では本数の 93% が d.b.h. 20 インチ以下であり、54% が 15 インチ以下である。特殊な場合には、オ5図から読んだ推定値にあまり信頼をおいてはいけない。というのは、個々の林は共通な平均直径のまわりで変動するが、fully stocked でない林では、この変動が大きくなるからである。

14　オ6図は上部直径 6 インチまたは長さ 10 フィート以上の丸太による成材（millable）材積を示す。調製の方法と使用法はオ5図と同じである。

15　正確さの検定は可能な限り行なった。林分材積表は New Zealand の地位 stocking および地方性（locality）の非常に広い範囲にわたって、よくあてはまるように思われる。

16　計算図表の使用例として、New Zealand の南島の北部にある Golden

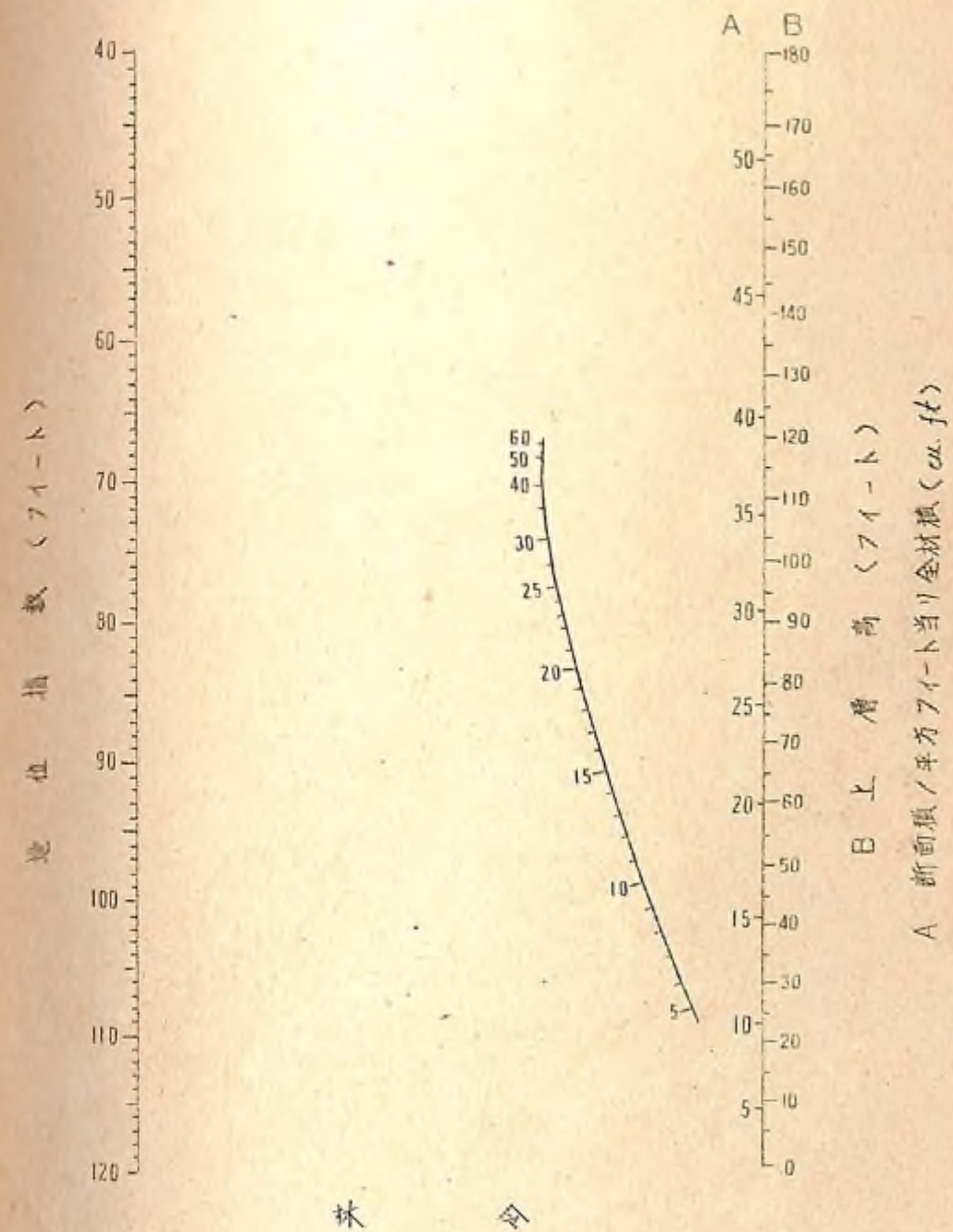
Downs Forest の平均的条件のもとにおける P. radiata 地方的，すなわち経験的収穫量を以下に示す。これは全く無作為に設定された25ケ所の成長量および枯損量調査プロットのデータから作ったものである。それらの平均地位指数は79フィート，平均密度指数は245平方フィート，および平均直径指数は11インチである。

本数は断面積と平均直径の数値から導いたエーカー当り本数は若い年令では不正確であるかもしれない。というのはこれらは現在林分の過去の条件を推定することによって間接的に求められたものであり，また，データも色々な植栽本数のものが混っているからである）。

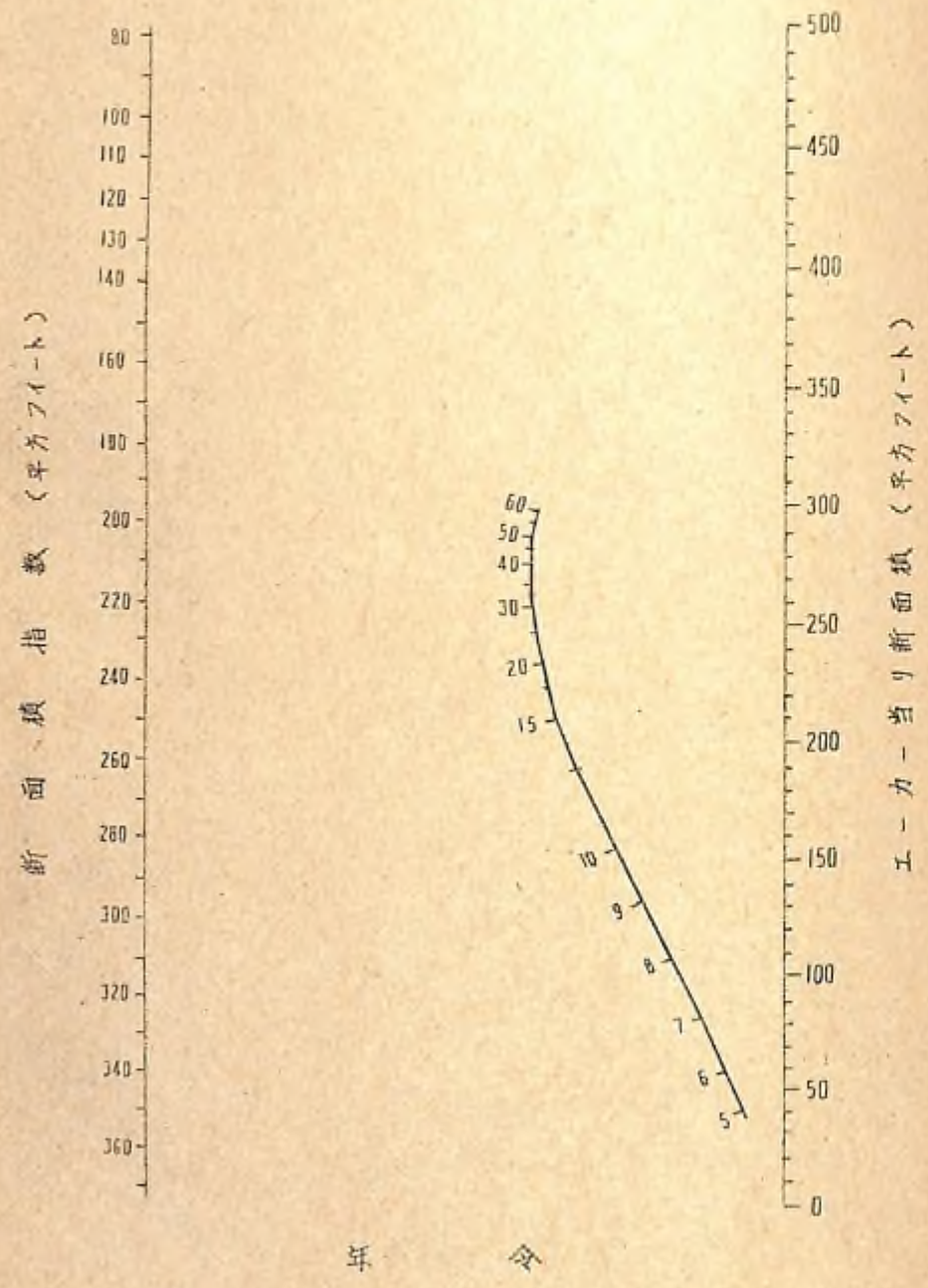
P. Radiata の地方的収穫表 — Golden Downs, New Zealand

林令	上層高	エーカー当り断面積	平均 d.b.h	エーカー当り本数	収穫量 計	収穫量 上部直径4インチ	収穫量 上部直径6インチ
5	18	28	2.1	1,200	230	—	—
10	36	130	4.9	1,000	1,790	890	170
15	57	208	8.0	600	3,970	3,420	2,340
20	79	245	11.0	370	6,350	5,940	5,140
25	99	268	13.5	270	8,680	8,360	7,740
30	111	287	15.4	220	10,400	10,100	9,640
35	118	302	17.0	190	11,600	11,400	11,000
40	123	316	18.3	173	12,600	12,400	12,000
45	127	326	19.5	157	13,400	13,200	12,900
50	130	335	20.7	143	14,000	13,800	13,500
55	133	343	21.8	132	14,600	14,400	14,200
60	134	351	22.8	124	15,100	14,900	14,700

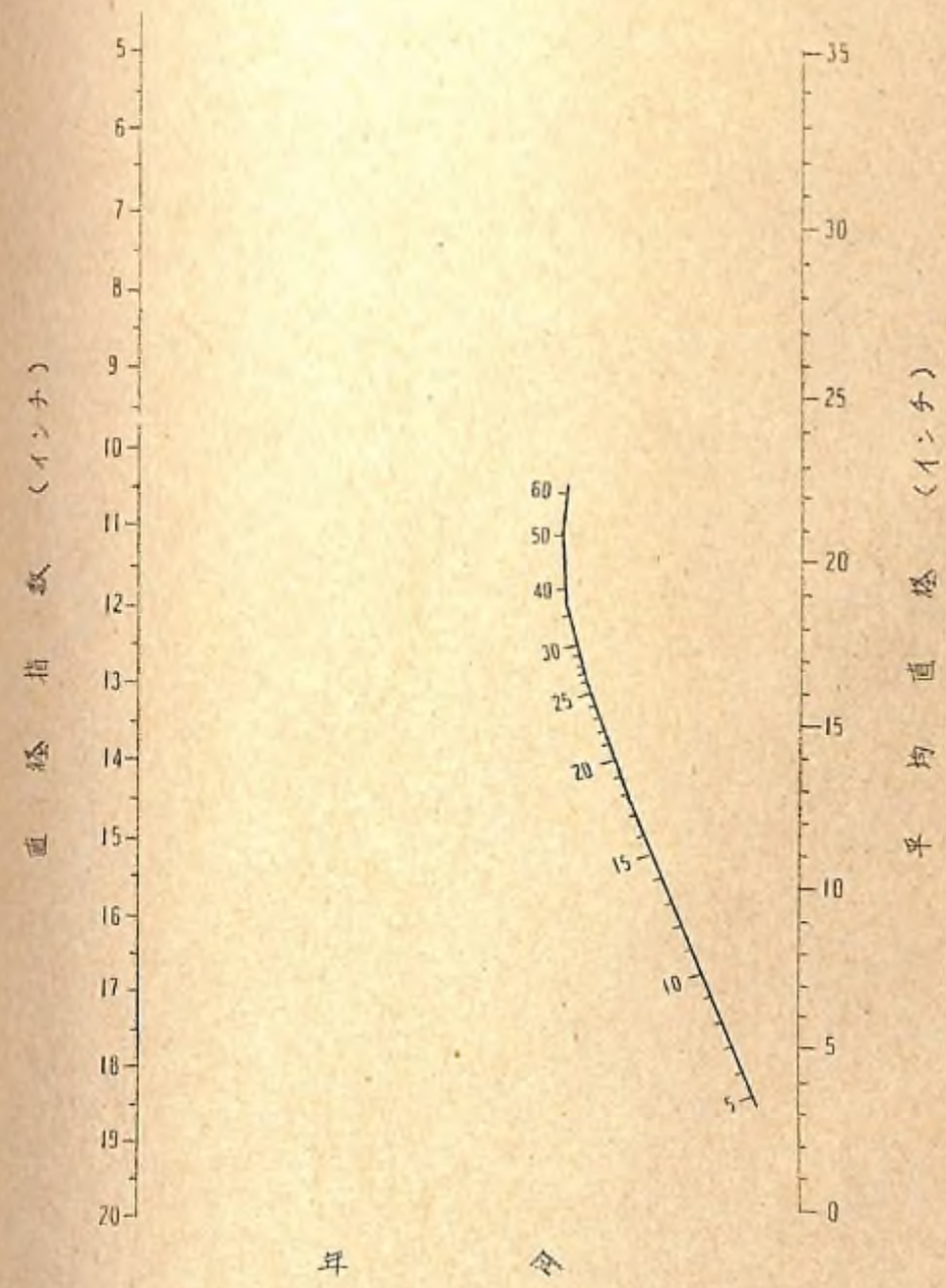
第1図　上層高および断面積1平方フィート当り全材積



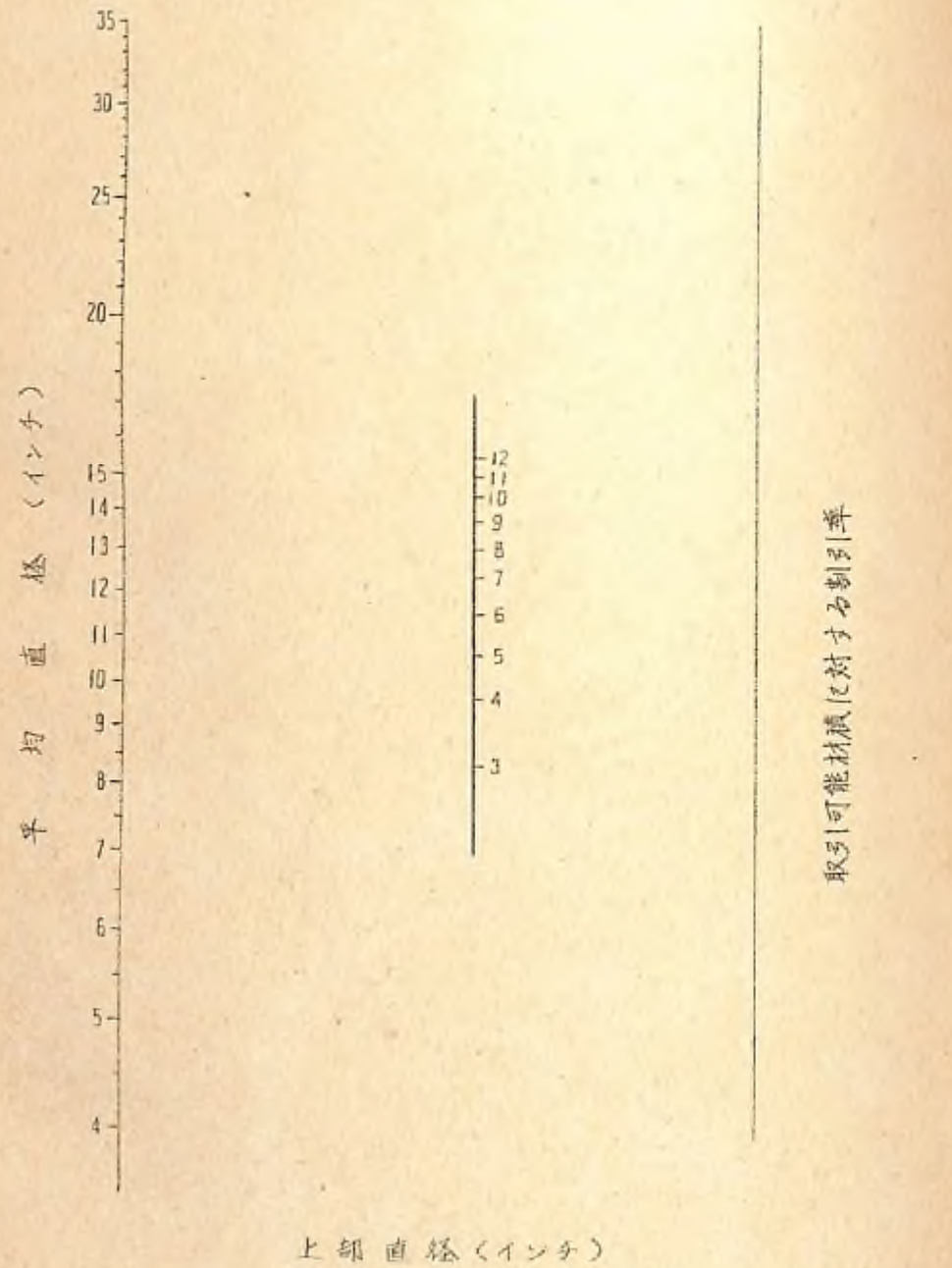
第 2 図　エーカー当り断面積



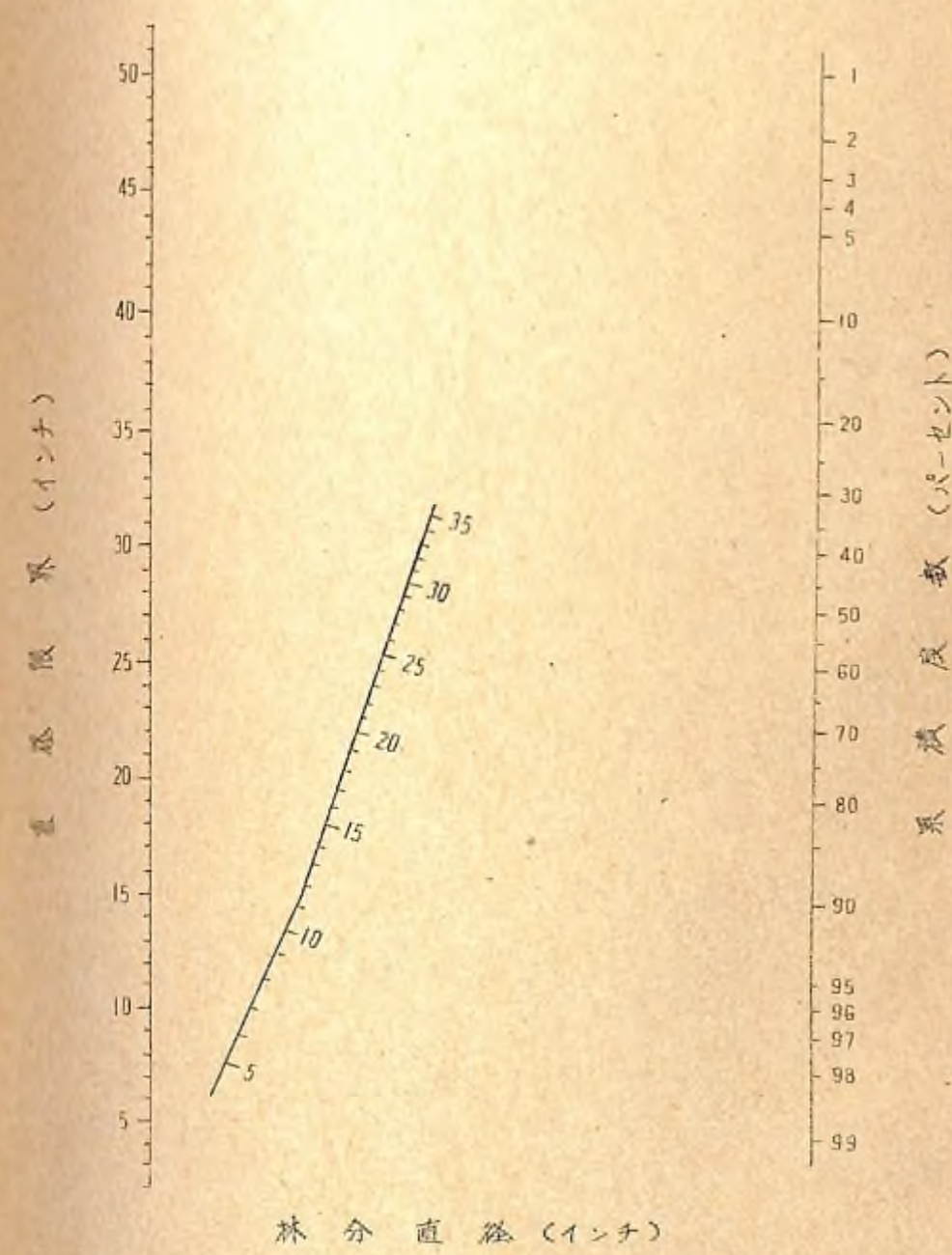
第 3 図　平　均　直　径



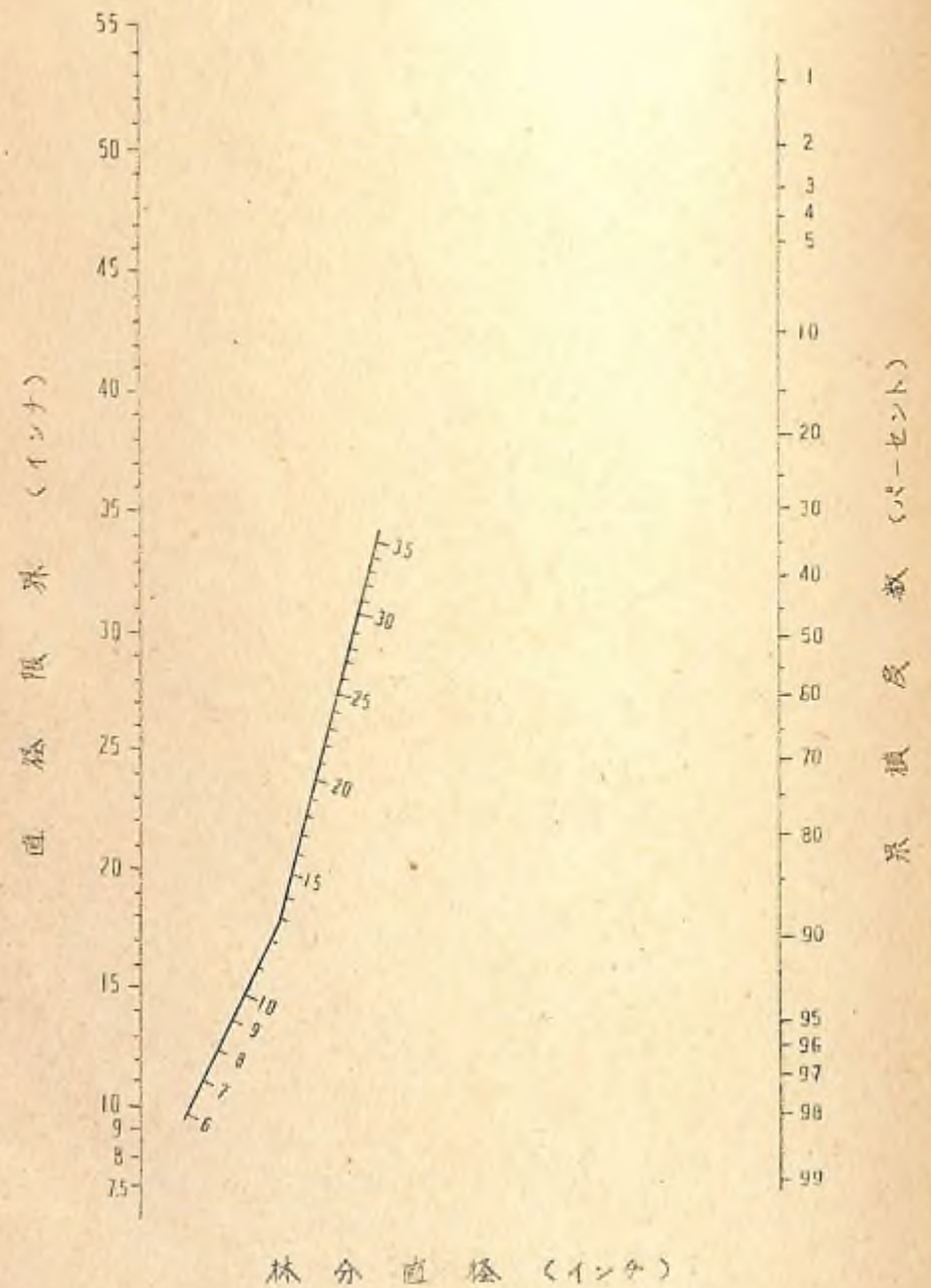
第 4 図　取引可能材積の全材積に対する比率



第 5 図　直径階別本数分布



第 6 図　末口径6インチまでの材積の直径階別分布



Ⅳ. New EnglandのSpruce Fir地域における平均成長率

(Average Growth Rates in the Spruce Fir Region of New England)

By C.A. Bickford, F.R. Longwood, Robert Bain
(Northern Forest Experiment Station.

Station paper No. 140. 1961)

Ⅳ New England の Spruce Fir 地域における平均成長率

(Average Growth Rates in the Spruce Fir Region of New England)

By C. A. Bickford, F. R. Longwood, Robert Bain

(Northern Forest Experiment Station, Station paper No. 140. 1961)

はじめに

林木が成長するということは，森林からの丸太や bolt の生産を，鉱山業の生産と異質なものにしている。どの鉱山でも埋蔵量には限りがあり，鉱脈を掘り盡すとか鉱石コストの高騰などの理由で，早晩放棄しなければならない事態が生ずる。しかし正しく経営されている林 ― すなわち保続的な経営が行なわれている ― では収穫だけによって資源が涸渇することはない。

林木は木質層を次々に積み重ねることによって成長する。これは材の連年生長を トウモロコシや馬鈴薯のようには収穫できないことを意味している。その代り，林業経営者は伐採で取り去る材積を成長によって付け加えられる材積との関連において考えるのである。

北東地域の林は一般に立木度が低い(understocked)から，望ましい形の林が作りあげられるまでは，伐採量は成長量を越えてはならない。すなわち，林業経営者にとっては，成長量の知識が極めて重要である。

成長データの必要性

北部 New England では，今世紀の始め頃から木材からの紙の生産が重要になってきた。そうして30年以上の間，この産業の需要を十分満たすだけの木材が供給されてきたが，技術の進歩によって多くの樹種が次々に製紙用として利用できるようになり，水上輸送は重要性を失なった。その後第2次大戦中および戦争直後には，労働力，設備の不足とともに資源不足のため，木材の入手が難しくなってきた。大多数の会社の役員は適当な材の次第に激化する不足に対処していたが，一部ではその所有する林がもう荒廃してしまったのではないかと考えられていた。どちらの疑問に対する解答にも彼らの林の成長量について，1940年代の後半に利用できた以上の正確な知識が必要であった。永年の間成長量は"めのこ勘定"で，年間エーカー当り"1/10～2/10コード"と推定されていた。しかし林業技術者は，これまではともかくとして，現在ではこの公式があてはまらないと考えている。

New England のこの地域では，木材を原料とする産業は，雇用や賃金，あるいはこれらに関連するサービス業に深い影響を与えている。Maine 州の[2]人口の約1/3が林業または木材を原料とする産業に従事している。彼等は州全体の価値生産額の2/5近くを生産している。したがってそのような産業がどれ位閉鎖または移転するか，あるいはどれ位拡大発展

1) この研究のデータは次の森林所有者が設定し測定したプロットからえたものである。Brown Co. Dead River Co. Great Northern paper Co. International paper Co. Penobscot Development Co. St. Regis paper Co. Scott paper Co. Standard Packaging Corp. (Eastern Corp.) James W. Sewall Co. および S. D. Warren Co. これらは Maine 州および隣接する New Hampshire 地方の Spruce fir 地域の成長研究に協同してあたったものである。

2) Census of Maine manufacturers. Maine Dept. of Labor & Industry Rept. 262. 44 pp (mimeo) 1957.

するかということに関連して，人々はこれらの森林の成長量の一層正確な知識に多大の関心をよせている。

成長量の定義

ここで我々は成長量とは何か，すなわち林業経営との関係における成長量を考えてみなければならない。この問題は必らずしも十分理解されているとはいえない。increment の方が growth より長いと思われるが，これまで一般に使用されるに至っていない。同じ地域の木を2つの連続する時点で測定すれば，真の材積成長はこれらの2つの測定値の差になる。

このことは，もとになる測定が注意深く，一貫性をもって行なわれることの重要性を示している。林木を引き続く2つの時点で測定するとき，それらの直径，樹高，材積の差が成長量である。したがって測定誤差を最小にするには，同じやり方，同じ場所で同一定義に従って測定しなければならない。さらに材積成長量の推定に偏りが生じないようにするため，各時点で同一の材積表を使わなければならない。この場合必要があれば，樹高や形状の変化に対する補正も行なう。

net growth の性質をよく理解するには，測定から測定までの期間内における変化を考えてみればよい。一部の木は枯死し，また伐採されるものがあるかもしれない。残った木はその大きさが増加する。この残りの中若干は腐れやその他の欠点が大きくなって利用できないかもしれない。その他は取引可能な大きさに成長してゆく。大きさが増してゆく健全な木で，前に測定した木に加わる材積は accretion で，測定限界に到達した木の全材積は ingrowth である。枯死した木の材積は mortality である。accretion には期間中に枯死したり伐採された木につけ加った材積も含んでいる。ingrowth の中には，測定できる大きさに達しながら期間中に枯

死したとか、前の測定のとき cull と考えられていて今回取引可能となった木を含んでいる。mortality には前に測定されなかった一部の木の材積が含まれることがあり、また最初から測定されていて期間中に枯死した木に加わった材積が含まれる。cull となった木はまだ生きていても、実際的には mortality と同じである。

これらの accretion, ingrowth および mortality の3つは、上に定義したような成長の構成要素である。

（実成長量）　（増加量）　（進界成長量）　（枯損量）

Net growth は accretion + ingrowth − mortality

であり、gross growth は net growth + mortality すなわち

accretion + ingrowth

である。

net growth に影響する因子は、成長量と木の生存に影響する因子である。これらの中で特に重要な因子は、樹種、地位密度、気象、年令および随伴する植生である。これらの多くは、識別や測定が困難である。成長に影響を与える因子は内部的な関連をもっていることが多いので、樹種、地位、気象や植生などはある程度まで林相級（forest type）のような巾の広い分類の中に含まれている。

計画された成長に関する共同研究

1940年代の中葉および後期にかけて、十分な量のパルプ用木材を継続的に供給することについて関心が深まった。そうして、このことから spruce fir 地域、特に Maine および New Hampshire 北部に対する一層信頼できる成長データを求めることに注意が払われるようになった。この成長に関する共同研究は、これらの必要を満たしうるデータを求めるため組織されたもので、仕事の大部分は小数の会社の技術者の興味と努力の結果である。この project の指針となる研究計画[3]は1950年に起草され承認された。外業は同じ年に始められ、1955年に最後のプロットが設定された。

本報告の目的

プロットの 3/4 以上は1958年末までに第1回の測定が終ったが、関心と要望が益々強くなったのに応えて、Longwood が1959年3月の Society of American Foresters の会合の New England 部会で予備的な結果を発表した。この報告はこれらの予備的な結果を一層容易に入手できるようにするためと、会合の後におこなった分析結果を補足するため取まとめたものである。

この報告は予備的なものであって、計算された統計の中には、設定したプロットの中の200以上のデータが除かれている。しかしこれらの追加プロットは、それらが予想したのと同じ母集団に属しているとすれば、おそらくここに計算した平均値や分散に実質的な変化を与えないと思われる。全プロットの再測定が済んだ時に予定されている報告は、もっと完全な分析を行なうので、本質的に異なったものになると予想される。これは1962年に行なう予定であるが、そこでは平均値や分散に必要な修正を加えるとともに、成長に対する基礎的な関係を組立て、またそれに影響する因子の識別をも行なうつもりである。

---

3) Working plan for joint coorative growth study for spruce-fir-region of Maine. Northeast Forest Exp Sta. and Maine Timber land Owners. 1950.

研究の組みたて

計画が発案者である8つの協力会社[4]の賛成をうるとすぐプロットの設定を開始した。

計画にはプロットの選出，設定および再測定に対する現地作業の基準の詳細な説明が含まれている。設定と再測定は各会社が受持ち，Northeastern Forest Experiment station は研究の調整ととりまとめ，および分析を担当した。

研究全体の目的が平均成長率を知ることであったから，協力した会社はその所有する spruce および fir の成長を一層正確に推定できる，誤差の許容限界は，spruce fir の平均値の10%と定めた。成長量は林相（forest type）によって変化し，また主林分の密度や樹高に影響すると思われた。他の因子の影響も考えたが，それらを協力会社の全部について含める実際的な方法がないように思われた。これらの3つの因子，すなわち密度，樹高および林相（forest type）によって林地を層化したが，これは連年成長のサムプリングの場合，他の基準よりずっと効率が良いと思われる。全協力会社からえたデータはプールして層ごとの総平均を求めた。この方法は層ごとの平均がすべての会社で同じということを前提にしている。

抽出計画

この研究に用いたクラス（層）わけは，発案者である5つの会社において，空中写真による森林調査のために同じような分類を使っていたので，Spurr[5]の書物から採用した。ほかの協力会社はこれらのクラスわけによ

4) 脚注1)で示した最初の7つの会社＋Northeastern experiment station
他の3つはすぐあとで加わった。

って面積を推定でき，したがって必要な層のウエイトを定めることができる。最終的に取あげたクラスは，所有林地の空中写真をもっているこれらの会社の所産となった。林相，林分密度，林分樹高の3つの因子の各々について，3つの水準を区別して，全部で27の層を定めた。これらの水準は次の通りである。

林　相

(S) 針葉樹林	針葉樹	66～100%
(M) 針広混交林	〃	21～65%
(H) 広葉樹林	〃	0～20%

林分樹高

(1) 35フィート以下
(2) 35～64フィート
(3) 64フィート以上

林分密度

(A) 樹冠閉鎖度		71～100%
(B)	〃	41～70%
(C)	〃	11～40%

したがって，3つの記号の組合せによって特定のクラスが示される。たとえばS1Aは林分樹高が35フィート以下で，71～100%の林分密度をもつ針葉樹林ということになる。

使用した空中写真

空中写真が利用できる場合には，これらのクラスは写真によって判定し

5) Spurr, S. H. Aerial photographs in Forestry
340pp New York. 1948

た。しかし共同研究に加わりたい会社をできるだけ多く包括するため、空中写真のあることが望ましかったが、必要条件としないことに意見が一致した。抽出計画はそのような空中写真をもとにして作ったが、空中写真のないものについては、写真のある会社のものとデータをプールできないだろうということがわかった。

この他にも問題があった。それは会社間の写真判読に差ができるかもしれないことである。この問題は熟練した写真判読者[6]がすべてのプロットを写真上で分類することにして解決した。その後の分析は、実際に差があるかどうか、また必要な場合どのように調整すればよいかをきめることであった。この分析は、全プロットの再測定が一通り終ったとき実行する。

プロットの数と配分

目標精度は再測定するプロットの数をきめる場合の基礎である。前に注意した通り、誤差の許容限界は spruce fir 成分に対する平均値の 10% と定めた。標本の大きさを定める場合、精度のこの標準は、全クラスの荷重平均値にあてはめるものとした。northern New Hampshire の森林調査で求めた面積と、入手できた固定プロットのデータから推定した分散を使って、必要な標本数を計算した（面積が所有者ごとに違うので、すべてのクラスに 10% の精度があてはまるのではない）。このようにして推定したプロットの数は 860 であった。これらのクラスごとの配分は第1表の通りである。その結果これらのプロットは、1950年8月林分概（stand class）を考えずに協同研究者ごとにわりふった（第2表）。

6) J. G. Grieg が写真判読をおこなった。

第 1 表

樹高級	林相（林分密度 %）								
	針葉樹林			針広混交林			広葉樹林		
	11～40	41～70	70＋	11～40	41～70	70＋			
0～34 (1)									
35～64 (2)									
65＋ (3)									

現地調査の方法

空中写真のあるところでは、適当に林相区分をしたクラス内で無作為にプロットを設定した。写真がない場合固定調査プロットを林相、樹高、密度をもとにして分類してから、その中で無作為にプロットを選んだ。クラスごとのプロット数は会社別には指定しなかった。その代り各外業期間の終りく（プロットの設定が完了したと考えられるまで）に設定の完了したプロット数を全協力者に通知することにした。次のシーズンに各会社は第1表から必要性の最も大きいと思われるプロットを設定することとした。その結果共通的なクラスでは必要以上のプロットが設定された。樹高の高いクラスと低いクラス、それに密度の低いクラスではプロット数が不足であった。このようにして全部で1122個所のプロットが設定され、その中845個所が再測定されている。この報告に使ったのは、この845個所の再測定プロットのデータである。

これらのプロットの再測定で、よくある困難が生じた。毎木調査ごとに欠落漏れや重複等の誤りがあるし、目盛りの読み違いや樹種の識別あやまり記帳の誤りも勿論生ずる。このような理由で、成長量測定のため当然そのような考慮が行なわれたにもかかわらず、同じプロットの引続く毎木調

査を必らずしも完全に一致させることができなかった。重要な点はそのような誤りがあったということではなく、この研究ではこのような誤りの影響を受けたプロットの割合が少なかったことである。

第2表　会社別のプロット数

協力会社	割当	設定	再測 (1959.1.1まで)
Brown	90	78	78
Dead River	60	228	185
Great Northern	350	357	342
International	90	94	0
Penobscot	90	120	119
St. Regis	90	78	22
Scott	90	110	87
S. D. Warren	0	18	0
James W. Sewall	40	25	23
Standard Packaging (Eastern corp.)	0	14	9
計	900	1.122	865

第3表　クラスごとの再測定プロット

樹高級	林相（林分密度%）								
	針葉樹林			針広混交林			広葉樹林		
	11～40	41～70	70+	11～40	41～70	70+	11～40	41～70	70+
0～34 (1)	4	13	41	8	3	5	0	2	2
35～64 (2)	34	166	164	28	189	66	60	34	20
65+ (3)	0	0	4	0	2	6	2	6	6

これはプロットを再測定するときには避けられない問題で、測定の際なぜそのような特別の注意を払わねばならないかという理由である。これは再測定プロットによる成長量推定の弱点であるが、それでも普通に使われるほかの方法に比べると問題にならない。

これらの865プロットの再測定の結果は1959年3月にBostonで行なわれたS.A.F.の会合でLong-woodが発表した。プロットのクラス別配分は第3表の通りである。

データの分析

材積計算

もとになったデータは、865個所のプロットの設定時と再測定の樹種ごとのd.b.h.の毎木調査結果である。これらのデータをAustin caryの表[1]を用いて次のようにして材積を求めた。SpruceはCaryの第6表の値から12.5%をひいて皮内材積とした。他の針葉樹は形状の違いを考えて割引率を更に8%大きくした。広葉樹はcaryの表で1933～1934のForest commissioner（Main州）の報告をのせてある138～146ページの値から推定した。

材積データは皮内の立方フィートで示した。これは客観的、かつ一貫して測定できることから一般に用いられている材積である。結果の一部はコード当りそれぞれ80と96立方フィートの換算率で粗材および皮剥ぎ材のコードになおした。勿論コードは木材の売買での標準になる取引単位である。しかしこれは木材の八工積の経験者ならよくわかっていることだが、測定の単位としては不正確だから、もとの計算は立方フィートで行なった。

1) Cary Austin Woodman's manual. Forth Ed 323 pp Harvard Univ. Press Cambridge 1932.

結果は5つの樹種群，すなわち Spruce-fir-hemlock，全針葉樹，beech-birch-mapple，全広葉樹，全樹種の計について示した。これらのグループは，将来の木材産業において重要と思われるものを選んだ。Beech-birch-mapple は beech，yellow birch，sugar mapple および red maple を含むが white birch は除いてある。他のグループの名称ははっきりしている。グループごとのもっとこまかい資料は次の報告で取まとめる予定である。以下この報告で使用する net new growth は連続した二回の毎木調査材積の差のことである。

検　定

分析しなければならない第1の問題点は，空中写真で分類したプロットと地上調査のみで分類したプロットを区別する必要があるかどうかである。この手数は spruce-fir-hemlock の net growth を用いて統計的に検定した。クラスごとの平均値間の差は十分小さくて，抽出変動と考えることができた。したがって，全資料をプールし，それが出現した限りもとの27のクラスをそのまま使った（第3表参照）。それで写真のない協力会社も他の協力会社全部の結果を利用できることとなった。

この検定では2組のデータ間に有意な差を見出せなかったが，Grisety と会社の判読者の間で一貫した判読の違いのある可能性がある。もしそうなら，会社の判読者の林相区分で求めた層ウエイトを使うと，成長量推定値に偏りが生ずることになる。この問題は全プロットの再測定が済んでから検討する。

次に27個の層の全部が必要かどうかを知るため，spruce-fir-hemlock の net growth を使って分散分析を行なったところ，各クラスに対するF比は極めて有意であった。各成分を分析すると，林相と高さにはクラスは別々に用いなければならないが，密度の方は，B（41～70%）

とC（11～40%）を合併できることがわかった。したがってこれらのデータをこみにして，階層第4，5表に示したような18個のクラス（その中の1つは該当プロットなし）ができた（他の樹種群または全樹種の net growth では違った結果がでると思われる。適当な検定は全プロットの再測定が済んでから実行する予定である。）

結果と使用法

以上によってクラスごとの平均を計算し，5つの樹種群について成分ごとの成長量を示した（第4表参照）。全樹種に対するもとの材積，gross growth および net growth も一緒に示してある。あとで述べるように，この表は主に編列のために使う。もちろんその外に，spruce-fir-hemlock や他の同様な組合せについて，accretion を推定することもできる。不十分なサムプリングの結果，この表の幾つかの欄は明らかに予値している。たとえば，H1Aクラス（樹高0～34 feet，密度70～100%の広葉樹）の，beech-birch-maple が実際に成長していないなどとは考えられないのであるが，このクラスに属する2つのプロットでは，たまたま beech，birch あるいは maple が1本もなかったのである。それでも表に示した平均値は入手できる最良の推定値である。

Net growth とその成分

林業の経営者にとっては，上記の成分に対する成長の研究も大切であるが，それ以上に net growth に関心があるものと思われる。net growth とそれに対応する分散およびプロット数を第5表に示す。これらのデータは特定地域の林地について，全成長または平均成長を推定する場合の基礎となるものである。

成長データの利用方法

さて，これらのデータを，特に森林所有者がどのようにして個々の場合

第4表　Maine および northern New Hampshire の spruce fir 地域における林相級、樹種群および成長成分ごとの材積の平均連年相成長量

（エーカー当り立方フィート）

林相級			Spruce-fir-hemlock accretion	Spruce-fir-hemlock Ingrowth	Spruce-fir-hemlock Mortality**	針計 accretion	針計 Ingrowth	針計 Mortality**	Birch accretion	Birch-maple Ingrowth	Birch-maple Mortality	広計 accretion	広計 Ingrowth	広計 Mortality**	計 accretion	計 Ingrowth	計 Mortality**	最初の林積	Gross Growth	Net Growth
針葉樹林	0～34	70+*	22.8	29.0	3.3	27.0	30.4	4.7	0.5	0.1	0.0	0.5	0.2	0.2	27.5	30.6	4.9	849	58.1	53.2
	35～64	70+	47.7	21.1	10.2	52.8	22.1	13.8	2.4	1.4	3.7	3.7	1.8	4.8	56.5	23.9	18.6	1,858	80.4	61.8
	64+	70+	56.5	5.6	28.9	58.6	6.8	38.4	2.3	3.8	.0	2.3	3.8		60.9	10.6	38.4	1,966	71.5	33.1
針葉樹林	0～34	11～70	21.9	23.9	3.4	26.1	23.9	3.4	.4	.5	4.2	1.1	1.9	4.6	27.2	25.8	8.0	430	53.0	45.0
	35～64	11～70	43.1	20.5	12.3	50.0	21.4	18.3	2.2	1.6	4.8	3.6	2.3	6.1	53.6	23.7	24.4	1,559	77.3	52.9
	64+	11～70	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
針広混交林	0～34	70+	28.8	16.1	.0	30.9	16.1	0.7	.0	.0	.0	2.9	.0	1.3	33.8	16.1	2.0	947	49.9	47.9
	35～64	70+	38.3	18.8	12.2	40.4	19.3	12.3	7.6	2.9	9.0	9.9	4.2	11.2	50.3	23.5	23.5	1,698	73.8	50.3
	64+	70+	17.3	4.6	17.9	17.7	4.9	17.9	3.5	1.5	40.5	3.5	1.5	40.5	21.2	6.4	58.4	2496	27.6	70.8
針広混交林	0～34	11～70	12.7	12.5	.6	12.7	12.5	0.6	3.2	4.9	1.1	4.9	10.8	3.7	17.6	23.3	4.3	273	40.9	36.6
	35～64	11～70	32.9	13.5	10.0	35.9	14.2	11.6	8.7	4.5	10.3	10.2	5.3	12.4	46.1	19.5	24.0	1428	65.6	41.6
	64+	11～70	30.4	11.5	1.2	30.4	11.5	14.4	14.4	6.7	5.2	14.4	6.7	5.2	44.8	18.2	19.6	1910	63.0	43.4
広葉樹林	0～34	70+	6.7	.0	.0	8.7	.0	0.0	.0	.0	.0	4.5	16.1	.0	13.2	16.1	.0	247	29.3	29.3
	35～64	70+	8.8	3.3	4.7	8.8	3.5	4.7	7.4	2.0	11.4	13.8	15.8	17.4	22.6	19.3	22.1	896	41.9	19.8
	64+	70+	11.0	1.9	9.3	11.0	1.9	9.3	14.2	3.6	9.7	14.9	5.1	9.7	25.9	7.0	19.0	2132	32.9	13.9
広葉樹林	0～34	11～70	.0	.0	.0	.0	.0	.0	21.7	9.0	11.1	21.7	14.3	11.1	21.7	14.3	11.1	492	36.9	24.7
	35～64	11～70	10.7	5.2	2.8	10.9	5.2	2.9	17.4	6.2	15.3	18.7	6.9	16.6	29.6	12.1	19.5	903	41.7	22.2
	64+	11～70	8.3	2.7	.4	8.6	2.7	0.4	16.9	9.2	34.4	16.9	9.2	34.4	25.5	11.9	34.8	1308	37.4	2.6

* ＋は以上を示す。

** Mortality の中には、cull となった木および説明なしに伐採された小数の木を含んでいる。

第5表　樹種群および林相級ごとの粗材積年当り平均net growthとその分散

林相級									プロット(個数)	分散[1]				
樹種群	樹高(フィート)	密度(%)	spruce fir hemlock	針計	Beech birch maple	広計	計			spruce fir hemlock	針計	Beech birch maple	針計	計
針葉樹林	0～34	70+	48.4	52.7	0.6	0.5	53.2		41	787	786	3	6	787
	35～64	70+	58.6	61.1	.1	.7	61.8		164	922	1201	165	193	1384
	64+	70+	33.2	27.0	6.1	6.1	33.1		4	2471	2512	33	33	2750
針葉樹林	0～34	11～70	42.4	46.6	−3.3	−1.6	45.0		17	831	1477	84	134	1701
	35～64	11～70	51.3	53.1	−1.0	−.2	52.9		200	1719	2184	177	216	2511
	64+	11～70	...	...	...	...	...		0	...	...	...	...	...
針広混交林	0～34	70+	44.9	46.3	.0	1.6	47.9		5	1880	1705	0	22	1951
	35～64	70+	44.9	47.4	1.5	2.9	50.3		66	1106	1151	394	519	1775
	64+	70+	4.0	4.7	−35.5	−35.5	30.8		6	1624	1578	2259	2259	3092
針広混交林	0～34	11～70	24.6	24.6	7.0	12.0	36.6		11	369	369	92	240	88
	35～64	11～70	38.4	32.5	2.9	3.1	41.6		217	1708	1780	621	767	2372
	64+	11～70	40.7	27.5	15.9	15.9	43.4		2	131	32	853	853	1215
広葉樹林	0～34	70+	6.7	8.7	.0	20.6	29.3		2	1	16	0	302	180
	35～64	70+	7.4	7.6	4.0	12.2	19.8		20	311	310	572	901	1006
	64+	70+	3.6	3.6	8.1	10.3	13.9		6	731	731	841	878	711
広葉樹林	0～34	11～70	.0	.0	17.6	24.9	24.9		2	0	0	882	473	473
	35～64	11～70	13.1	13.2	8.3	9.0	22.2		42	352	343	1317	1573	1806
	64+	11～70	10.6	10.9	−8.3	−8.3	2.6		3	137	139	3193	3193	3208

1) 分散はプラスのnet growthのプロット間変動の尺度である。
これは、よく用いられる標準偏差の二乗である。

にあてはめたらよいかを説明する。2つの例を考える。

まず、ある所有地の成長を推定したいものとする。第5表のデータの外に、そこに示されたクラス別の面積が必要である。そうすると、その所有地の成長量は、面積と平均net growthとの積和として推定される。計算の1例を第6表に示したが、面積は仮想のものである。

例1

northern Mainの51,350エーカーの仮想的林地について、写真上で林分級ごとの面積を求めるため林相区画を行なった。

この所有林のspruce-fir-hemlockのnet growthを推定するための計算は、第6表の通りである。面積データは仮定された写真判読から求められ、成長率は第5表から読みとる。面積と成

第6表　spruce-fir-hemlockの総net growthの推定

林相級			面積		平均 net growth (立方フィート)	総net growth (立方フィート)	net growthの分散 (立方フィート)
樹種群	樹齢 (フィート)	密度(%)	(エーカー)	(全体に対する比)			
針葉樹林	0～34	70+	9.830	0.171	48.4	475.772	787
	35～64	70+	7.040	.137	58.6	412.544	922
	0～34	11～70	11.720	.228	42.4	496.928	831
	35～64	11～70	13.100	.255	51.3	672.030	1.719
針広混交林	0～34	11～70	6.410	.125	24.6	157.686	319
	65+	11～70	1.570	.031	40.7	63.899	171
広葉樹林	35～64	11～70	1.110	.022	13.1	14.541	352
	65+	11～70	570	.011	10.6	6.042	137
計			51.350	1.000	…	2.299.442	

長重の積は最後から2番目の欄に示してある。これらの積の和は皮内の立方フィートで表わした全所有林の年あたりのnet growthの推定値である。同じ結果は第6表の第7欄に示した面積比率を使っても計算できるだろう。これらの比率と平均成長量の積和は、全地域のエーカー当り平均成長量となる。この例では44.8立方フィートである。そうして、この平均値に全面積をかけると、丸めの誤差を除くと、全所有地の年あたりnet growthは等しくなる。成長量の差だけについては、前と比べて別に利点はない。しかし抽出誤差を計算するにはこれらの比率が必要だから、これまでよく使われている方法より、後者の方が多分有効だろう。

例2

再測定した865個所のplotは、実際上MaineおよびNorthern

New Hampshireのspruce fir地域の卸売無作為標本と仮定し、またこの地域の面積が1.500万エーカーだとしよう。

必要な計算は第7表の1、2、3、4、6欄に示してある。2欄のプロット数は第3表から転記したものである。3欄の平均成長率は第5表からとった。4欄の比率は2欄のプロット数から計算した。このようにして、この地域全体の全樹種の平均連年net growthは、エーカー当り45.53立方フィートと推定される。この地域全体の連年成長量は、平均値に地域面積を乗じて推定される。この例の場合く1500万エーカーと仮定してうには成長量は682.950.000立方フィートと推定される。

これらの計算は、この研究において単木やプロットの測定に使った立方フィート単位で示してきた。この結果は、コード当りの適当な立方フィート数で割ることにより、コード単位でも表わせる。次の結果は、素材についてはコード当り80立方フィート、皮剥材については96立方フィートの換算率で求めたものである。

例1	素材(コード)	皮剥材(コード)
エーカー当り平均	0.56	0.47
所有地全体	28.743	23.953
例2		
エーカー当り	0.569	0.474
地域全体	8.536.900	7.114.000

抽出誤差

この共同研究は、平均成長率を求めるために行なわれたものだから、協力会社は平均値の10%以下の抽出誤差で成長量を推定できる。計算の方法を最初に示し、そのあとで抽出誤差がこのデータの利用者にとってどの

第7表　全樹種に対する平均成長量とその抽出誤差の計算

(1)			(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
林相級			プロット	面積		分散	割合×平均成長	(4)×(5)	(4)×(7)	(8)/(2)
樹種群	樹高(フィート)	密度(%)	(個数)	(エーカー)	(全体に対する比)		(立方フィート)			
針葉樹林	0～34	11～70	17	45.0	0.020	1784	0.900	35.680	0.714	0.041976
	35～64	11～70	200	52.9	.231	2511	12.220	580.041	133.989	.669947
	64+									
針葉樹林	0～34	70+	41	53.2	.047	787	2.500	36.989	1.738	.042402
	35～64	70+	164	61.8	.190	1384	11.742	262.960	49.962	.304649
	64+	70+	4	33.1	.005	2750	0.166	13.750	.069	.017188
針広混交林	0～34	11～70	11	36.6	.013	88	.476	1.144	.015	.001352
	35～64	11～70	217	41.6	.251	2372	10.442	595.372	149.438	.688656
	64+	11～70	2	43.4	.002	1215	.087	2.430	.005	.002430
針広混交林	0～34	70+	5	47.9	.006	1951	.287	11.706	.070	.014047
	35～64	70+	66	50.3	.076	1775	3.823	134.900	10.252	.155339
	64+	70+	6	30.8	.007	3092	.216	21.644	.152	.025251
広葉樹林	0～34	11～70	2	24.9	.002	493	.476	.986	.001972	.000986
	35～64	11～70	94	22.2	.109	1806	10.442	196.854	21.457	.228267
	64+	11～70	8	2.6	.009	3208	.087	28.872	.260	.032481
広葉樹林	0～34	70+	2	29.3	.002	180	.059	.360	.000720	.000360
	35～64	70+	20	19.8	.023	1006	.455	23.138	.532174	.026609
	64+	70+	6	13.9	.07	711	.097	4.977	.0348	.005806
		計	865		1.000		45.53			2.257746

ような意味をもつかを説明する。

計算方法

この研究は層化抽出をもとにして計画されているから、樹種構成、林分高、および林分密度による成長量の違いを調整できる。そのため、抽出誤差の計算ではこれらの同じ層を判別する必要がある。ここで用いた公式は Chockran[8] が示した

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\Sigma\left(\frac{p_i^2 s_i^2}{n_i}\right)}$$

である。ここで p_i はあるクラスの面積比率、s_i^2 はクラスの分散、n_i はそのクラスの平均成長と分散を求めるのに使ったプロットの数である。$s_{\bar{x}}$ は実際は平均値 $\bar{x}$ の標準誤差で抽出誤差の計算に使われるものである。

第6表に示したのは、第1例の場合面積比率の二乗に分散をかけ、第3表のプロット数で割る。そうして8つのクラスの全部について加え上

8) Cochran. W. G. Sampling Techniques (p.69) 320pp Willey New York.

げてから，その和の平方根をとる。S I A（0～34，70＋の針葉樹）を例にとると，

$$\frac{[(0.191)^2\times(787)]}{41} = 0.700257$$

がこのクラスの寄与である。そうすると抽出誤差は，このようにして求めた8つの値の和の平方根である。この例では2.125平方フィートとなった。記号からわかるように，これは前に計算したエーカー当り44.8立方フィートという平均値に対するものである。所有地全体の誤差は，この2.125に面積を乗じたものである。これは，このデータでは109,119立方フィートとなる。%で表わすと，この誤差は4.7%（すなわち2.125は44.8の4.7%）である。

第7表に示した例7を考える。ここでは一般に使われる方法を詳細に示してある。第7欄は比率と分散の積である。次に第8欄の$P_i^2 S_i^2$を求めるため，これらの数値に比率をかける。そうして，これをプロット数で割ると第9欄の値となり，これを集計すると2.25になる。この和の平方根は1.503で，これは抽出誤差の推定に使われる平均値の標準誤差であって，$\bar{x}$ = 45.53の3.3%にあたっている。地域全体の対応する抽出誤差は，22,545,000立方フィート（682,950,000立方フィートの3.3%）である。

抽出誤差の解釈

抽出誤差は，標本ごとの変動をはかる物指であるが，偏りは検出できない。同じ調査員が同じ林を繰返し測定して，調査の度に全材積を推定したとすると，どの2つの推定値も一致することはないだろう。しかし，それらは比較的狭い範囲内で変動すると考えてよい。抽出誤差によって測られるものはこの変動である。

プロット又は調査帯を目盛りの正しくない巻尺で設定したとすると，全材積の推定値には偏りが生ずるが，これは抽出誤差では検出できないだろう。計算されている抽出誤差およびそれを求めるのに使った分散は，一般に偏りやその他の非標本誤差の結果を反影しない。そのような誤差がない場合には，平均値や総計の抽出変動は正規分布に従う。すなわち，計算された特定の平均値およびその抽出誤差から，すべての可能な推定値の平均値について確率的に明確な説明を与えられることになる。上の第1例では，平均値は44.8立方フィートで，抽出誤差は2.1立方フィートであった。これらは，44.8±2.1立方フィートというように，記号的に表わすと便利である。関連する仮定がすべて成立つとき，すべての可能な推定値の平均が42.7（44.8－2.1）から46.9（44.8＋2.1）の間にある確率は0.68…（約68%）である。この区間は，対応する確率が増せば広くなり，小さくなれば狭くなる。

これらの概念を成長研究の結果に拡張することは容易である。抽出誤差の計算には，クラス内で研究に使ったすべてのプロットと，そのクラスの分散を利用する。推定されたクラスごとの面積に抽出誤差があれば，これらの誤差は推定された成長量の精度に大きい影響を与える。そのような抽出誤差は写真上で点を分類するとき，あるいは面積を慣用の地上調査の strip またはラインプロットで定める場合に生ずる。しかし写真が全部揃っていく，全地域の林相区分がなされる場合には，過誤を除けばクラス面積の抽出誤差は生じない。すなわち，"抽出誤差は……ある推定値が，すべてのそのような推定値の平均からかけ離れると予想される大きさ"で

---

1) Hendricks, Walter A. The Mathematical Theory of Sampling 314 pp. Scarecrow press New Brunswick N. J. 1956.

あることがわかる。

抽出誤差は対応する平均値の適切な信頼の指標を与えるということから、林業経営の実務家に有用なものである。しかしまた、この信頼は偏りによって損なわれるということも認識しておかねばならない。抽出誤差が40のとき40という推定値はもろん信頼できない。抽出誤差を小さくして4にすれば信頼性は高まるが、しかしこれは偏りの可能性をなくしてしまうことにはならない。偏りの原因は無数にある。この研究では偏りをできるだけなくするように努めた。しかし完全に偏りがないとは考えられない。

結果の検討

この研究に使ったクラスごとの面積または比率がわかっていれば、この spruce fir 地域内のどの所有者の林地についても、上に述べた方法で平均または全成長量と誤差を推定できる。しかしこれらのデータの代表性については検討を行なっていない。2つまたはそれ以上の会社からえたデータをプールするためには、クラスごとの平均値が等しくなければならない。この仮説は全プロットの再測定が一通り済んでから正式に分析する。

厳密にいうと、これらのデータの適用は実際に調べた期間に限定されることになる。これは勿論研究の目的を無効にしてしまうものである。これらのデータを他の期間にあてはめるためには、クラスごとの平均値が時間の経過によって変化しないという仮定が必要である。測定を繰返えせばクラス平均が変化しないという仮定を吟味するための資料が求められるだろう。birch dieback と beech scalenectria による被害は birch と beech の枯損量を異なるものにし、したがって net growth を低下させるだろう。あるいはまた、一方では早い年代での枯損のために密度が著しく低くなって、他の樹種の成長が当然なる筈のものより大きくなるかもしれない。このような因子のために、ある期間での成長量の平均値を別の期間にあてはめるときには、慎重な配慮が必要である。

net growth に影響する因子

第4表で net growth の成分を示しただけで、検討はあとまわしにした。データが代表性をもつ限り、これらの結果から、

(1) 針葉樹は成長量に対して、広葉樹に対する比率以上の寄与を示しており、

(2) spruce-fir-hemlock と beech-birch-mapple は、それぞれ針葉樹と広葉樹の成長量の大部分を占めている。

ことがわかる。これらの色々な樹種群は独立でないことに注意しなければならない。立木度の高い場合は針葉樹で、空間の少ないのは広葉樹である。これは逆もいえる。同じような考えは任意の排反な樹種のグルーピングにもあてはまる。樹種群ごとの抽出誤差の分散は、たとえば針葉樹全体では変動が大きいため、全樹種の合計のものより大きくなる傾向がある。

枯損の影響

これらのデータの他の面は、net growth の accretion、ingrowth および枯損への配分関係である。原生林の場合は、枯損が（accretion + ingrowth）に近くなるため、限られた期間と面積でしか net growth は出てこない。一方よく施業されている林では、良い木の成育空間をたげるために劣勢および被圧木は枯れる前に伐採されるので、（accretion + ingrowth）は枯損をはるかに上まわっている。したがって林業経営の質が向上すれば、枯損による損失は無視できることになる。これらのプロットでは、一般に重みづけの平均 net growth に対する割合で表わした枯損

量は，spruce-fir-hemlockで16%，針葉樹全体では18%，beech-birch-mappleで123%，全広葉樹で180%，全樹種で26%であった。

ingrowthの影響

ingrowthは林分がそれまでに受けてきた取扱いの質を知る手掛りを与える。丁度取引可能な大きさに達した木を伐採することは，明らかに不経済である。同様にingrowthのない場合には，結局収穫すべき木がなくなってしまうことも明らかである。したがって林業経営を成功させるためには，ingrowthが必要である。ingrowthはaccretionの%で表わすと多分最も有用と思われる。この%の最適値は，測定の単位，取引可能限界，および普通的に評価できない経営目標によって変ってくる。この研究でえたデータから，この%は非常に一貫した傾向を示すことが示された。この値はspruce-fir-hemlock，全針葉樹，beech-birch-mapple，全広葉樹，全樹種について，それぞれ.48，45，50，53および47であった。経営林についての知識がえられれば，特定の目標に対する経営の良の手引としてこれらの%を研究すべきである。

経営の影響

経営の経験がなくても，net growthが，林に対する取扱いでどのように変ってゆくかを知ることができる。伐採を全然しないか，あるいは非常に長い間隔で伐採すると，net growthを減少させる収穫できない枯損を生じ，したがって土地生産力の若干を犠牲にすることになる。勿論適当な時期に収穫できない程小量の枯損は，直接の経済的損失を与えない。同様に強すぎるとか，頻繁すぎる伐採，あるいは誤った選木もnet growth

を減少させるか，あるいはnet growthに対するingrowthの割合を過大にするだろう。林木の収穫の際，経営者は累積された成長量を確保するような選木をおこなうことが出来る。このような選木を正しく行なうことによって，林からの純収入を最大にすることができるか，それが経営者の目標でなければならない。

成長量の推定の場合，伐採はクラスごとの面積に影響を与えると思われる。したがって偏りをなくするには，必要な場合は，クラスの面積を補正しなければならない。ある場合には，伐採によって，残存林分が非常に少なくなり，新しい林が成林するまでの間，実質的な成長がなくなることがある。

要　　約

この第1報では spruce fir の成長量の共同研究の結果から，林地のクラスごとの平均成長率が求められた。1つを除く他の全クラスについて報告した使用しうる平均値は，この研究の目的の一部である。これによって Maine および northern New Hampshire の spruce fir 地域の，特定の林地について，成長量を推定するとともにその抽出誤差を計算することが可能である。全プロットの再測定が済めば，若干の変化があるかもしれないが，この報告の平均値を正しく使用すれば，そう大きい誤りは生じないと思われる。

データを正しく利用するためには，それらの限界と代表性を認識しなければならない。この研究は，サムプリングを行なった地域内の林地で，普通にみられるクラスについて平均成長量を求めるように計画したものである。目標は，所有者がその色々な所有林地について，成長量の信頼できる推定値を求められるようにすることであった。そのため，この研究でえた

平均成長率のほかにクラスごとの面積が必要である。これらの面積は勿論推定する期間の正しい姿を与えるため、伐採やその他の因子による変化を反影しなければならない。クラスごとの平均値が、時間によって変化せず、またクラスが大体この研究の中のデータで代表されている場合は、地域全般のそのような所有林について、良好な結果がえられると思われる。たとえば、2つのプロットからは、信頼できる推定値は求められない。しかし一般にこれらのデータを使うことによって、Maine および Northern New Hampsher の spruce fir 地域の林地については、成長量とその誤差の正しい推定値がえられる筈である。

この研究でえた平均値は年当り、エーカー当り 1/10 コードより著しく大きい。これらはまた普通に考えられていたよりも多少大きいが、しかし spruce budworm の、予想される被害の効果を調べるために伐採された地域内で設定されたプロットの測定結果などの他の研究で示されたものと、それ程違わない。この研究の結果から会社の経営方針あるいは政策について若干の再考が必要となるかもしれない。現在この spruce fir 地域内の木材資源は、一般に考えられている以上の継続的作業（continued operation）を魅力あるものにしているようである。おそらくこの地域では、木材利用産業の拡張の余地があるものと思われる。さらに gross growth において、すでに年あたりエーカー当り1コードになっている少なくとも1つのクラスについては、施業方法を改善することによって、net growth を年あたりエーカー当り1コードに引きあげることが多分可能と思われる。