

同齡単純林の密度管理に関する 生態学的研究

安 藤 貴⁽¹⁾

目 次

緒 言	2
I 密度と成長に関する基本的な関係	3
1. 密度と成長に関するこれまでの研究	3
2. 密度と成長の数式化に関するこれまでの研究	8
3. 密度効果式とその適用例	12
4. 最多密度曲線	26
5. 密度効果式の常数 A , B の生育にともなう変化の近似	29
6. 修正係数	50
7. 密度効果線または等平均樹高線上の特性値	55
8. 考 察	72
9. 摘 要	73
II 林分密度管理図ならびに密度管理のモデルとその収穫量	75
1. 林分密度管理図	75
2. 密度管理と収穫量	93
3. 考 察	111
4. 摘 要	113
III 収量比数と現実林の諸量との関係	113
1. 収量比数と林分構成要因	114
2. 収量比数と生産材の形質	117
3. 考 察	120
4. 摘 要	120
IV 密度管理の指針	120
1. 植栽密度決定の指針	121
2. 間伐の指針	122
3. 考 察	127
4. 摘 要	140
総 括	140
文 献	143
Résumé	150

(1) 四国支場造林研究室長・農学博士

緒 言

本邦各地の古くから発達している林業地では、その自然環境と経営の条件から、それぞれ独自の経営方式がとられ、生産材は長期間にわたる経験から、経営方式によって違った用途にむけられている。

坂口¹¹⁰⁾ は、本邦における有名林業地の本数密度比数の解析から、目的とする形質をそなえた丸太を生産するために固有の密度管理のあることを示し、これらの林業地における植栽密度や間伐形式によって決まる密度管理と伐期の長さおよび伐期に収穫される丸太の量と質の関係を明らかにし、これらの違いによるそれぞれの経営方式を保育形式と名づけた。

しかしながら、具体的にある生産目標に対し、最適と考えられる保育形式を決定するには、実数的な事例についての知見にも乏しく、未解決な分野がまだまだ多い。

保育形式を特徴づける密度管理とそれに応じた林分の構造や収穫量などは、それぞれの保育形式を対象とした収穫表からある程度のことをうかがい知ることができる。しかし収穫表の調製方法や表示の方法が地域によって違うので必ずしも同一の基盤に立って比較することはできない。まして収穫表に示されていない密度管理についての比較は困難である。

また、林業においては幹が利用の中心となるから、同化産物をできるだけ多く幹に蓄積させることが有利になる。このためには、同化生産物の配分は林分構造によってかわるから、林分における生産構造と、これをかえる要因について知ることが必要である。そのため林分構造と物質生産に関する研究が近年さかんにおこなわれ、密度は群落構造をかえ、また同化生産物の配分をかえるもっとも重要な因子であることが明らかにされている。

密度と植物群落の物質生産に関しては、数多く研究されてきたが、吉良を中心とする大阪市立大学の 1 年生作物を主としたすぐれた研究があり^{89)44)45)59)~63)123)~127)}、林木に関しては扇田ら¹¹⁶⁾¹¹⁷⁾、佐藤ら¹¹³⁾、坂口ら¹⁰⁸⁾¹¹⁰⁾、四手井^{120)~122)}、加藤^{48)~50)}、只木・四手井¹³⁸⁾¹⁴⁰⁾、只木ら¹³⁹⁾¹⁴¹⁾¹⁴³⁾¹⁴⁴⁾、安藤ら^{4)~6)9)}、蜂屋ら^{28)~30)32)} など数多く報告され、本邦における研究成果は量・質ともに諸外国におけるこの種の研究成果を上まわると判断される。

同齢単純林の密度管理は、これらの密度と物質生産に関する研究を基礎としておこなわれるべきで、先に述べた吉良らの研究を基礎として安藤⁴⁾⁶⁾、只木・四手井¹⁴²⁾、只木¹⁴³⁾¹⁴⁴⁾、四大学および信大合同調査班¹⁷⁴⁾¹⁷⁵⁾、加藤ら⁵⁰⁾などの報告があるが、只木・四手井¹⁴²⁾、只木の¹⁴³⁾¹⁴⁴⁾ 報告は最初に育林技術の段階に実用化したものとして高く評価されるべきであろう。

本報においては、同齢単純林の密度管理の基礎として、幹材積についての密度効果式と最多密度曲線式との結びつきを求めた筆者⁶⁾の 1962 年の研究にもとづいて、林分の樹高階別に密度と幹材積、直径の関係を林分密度管理図と名づける一つの成長予測図にまとめ、この林分密度管理図の地域性や精度にもふれ、またモデル的に作った密度管理、すなわち植栽密度と間伐形式の組合せとそれにもなう総幹材積収穫量を、密度の一つの相対的な尺度である収量比数との関連で検討し、また収量比数と林分構造要因、ならびに生産物との関係を明らかにし、これらの総合的な判断の下で密度管理に必要な指針を与えた。

稿を草するにあたり、本研究の端緒を示され、研究遂行上のご指導をいただいた林業試験場長坂口勝美博士に厚くお礼申し上げます。とりまとめについて終始ご懇切なご指導を賜った東京大学教授佐藤大七郎博士、ご後援を賜った東京大学教授門司正三博士、同扇田正二博士、同平田種男博士、同助教塩根岸

賢一郎博士に心から感謝いたします。

研究をすすめるにあたり終始ご助言、ご指導をいただいた林業試験場造林部長加藤善忠技官、統計的な計算についてご助言いただいた経営部測定研究室長西沢正久博士に謝意を表します。また未公表の秋田地方スギ林分収穫表調製資料のご提供をいただいた東北支場経営部長寺崎康正技官、長野営林局管内のカラマツ林分調査資料のご提供をいただいた長野営林局計画課試験係長新井健三技官、国有林の収穫表調製業務研究資料ならびに収穫試験地調査資料を基礎資料とさせていただいたことについて担当官に厚くお礼申し上げます。さらにこの研究をすすめる上で常にご助力いただいた造林第一研究室長土井恭次技官、造林第二研究室棚秋一延技官、調査室企画室成田忠範技官、別して全体のとりまとめについて終始多大のご助言とご援助をいただいた造林第二研究室長蜂屋欣二技官に厚く感謝の意を表します。

また、本研究は筆者が林業試験場造林部造林第二研究室在動中におこなったものであるが、現在の勤務場所である四国支場造林研究室において印刷のための仕事をした。ご便宜をいただいた前四国支場長福田秀雄技官、元四国支場造林研究室長、現本場除草剤研究室長真部辰夫技官にお礼申し上げます。

I 密度と成長に関する基本的な関係

1. 密度と成長に関するこれまでの研究

密度と林分または林木の成長に関しては、これまでも多くの報告がある。これらの報告について坂口 109)111)、只木・四手井¹⁴²⁾は間伐との関連において総括し、SPURR¹⁸¹⁾、嶺⁷⁸⁾は収穫表調製の立場から論評を加え、また BRAATHE¹⁷⁾はヨーロッパにおける、植栽密度試験や間伐試験を Norway spruce, Scots pine, Beech の3樹種について詳細に抄録し、さらに KRAMER⁸⁶⁾はドイツにおける植栽距離試験の結果を総括した。これらの報告を中心に、他の報告も加えて、これまでに示されている密度と成長についての一般的な傾向について述べよう。

樹高は密度の影響をうけることが少ないので、収穫表の地位を示す指標としてもちいられてきている。本報においても後述の論議を進める上で、樹高を生物的な時間の尺度と考え、樹高を基礎に密度と成長の問題が取り扱われるので、この関係は基本的に重要な問題である。そこで、これまでの植栽密度試験（植栽距離試験, Spacing experiment, Kulturverbandversuche, Pflanzenverbandversuche）や間伐試験から樹高成長を中心にとりまとめ、他の要因については前述の報告にとりまとめられた結果をおもに述べよう。

i) 密度と樹高

植栽密度試験または間伐試験における樹高の代表値は、さまざまな方法によって示されており、その詳細は嶺⁷⁸⁾にくわしい。主要なものをあげれば次のとおりである。

a) 算術平均による方法。

いま単木の樹高を h_i 、本数を n_i とすれば平均樹高 $\bar{H}$ は

$$\bar{H} = \frac{\sum n_i \cdot h_i}{\sum n_i}$$

b) 胸高断面積 (g_i) を重みとして平均樹高 $\bar{H}_g$ を求める法。

$$\bar{H}_g = \frac{\sum n_i \cdot g_i \cdot h_i}{\sum n_i \cdot g_i}$$

c) 上層高 (upper height, Oberhöhe) をもちいる方法。一般に大きな直径の順 (オランダにおいては樹高の高い順) に単位面積あたり一定本数の樹高を平均した樹高。

c₁) イギリスの Forestry Commission では最大100本/エーカーの平均による。

c₂) ヨーロッパ大陸では国によって違うが普通40本/エーカーの平均による。

d) 優勢木と準優勢木の平均樹高をもちいる方法。

a) の方法は本邦はじめ多くの国で用いられているが、ヨーロッパ諸国では b) の方法がかつては多くもちいた。しかし、近年は HUMMEL⁴¹⁾ が Norway spruce の間伐試験地で、a) b) の方法は間伐の影響をうけるが、c₁) の方法は間伐の影響をうけないことを示してから、c) による表示が多くなった。またアメリカでは d) の方法が一般的ようである。

また、平均樹高を上層高に換算する方法として、WARRACK¹⁶⁰⁾ は主林木平均樹高に5フィートを加える方法を提案し、HUMMEL らは補助表による換算方法を示し、この方法は真辺⁷⁵⁾ により紹介されている。

これから述べる樹高と密度との関係では、上記のどの樹高の表示をとっているか明らかに記載することにつとめるが、一般に mean height あるいは Mittelhöhe と記載されたものは a) b) のいずれによったか明らかでないので、いずれも平均樹高と記載する。

密度試験における密度 (または植栽距離) と樹高成長の関係を樹種別に示せば次のとおりである*1。

Norway spruce ドイツにおける密度試験地をとりまとめた KRAMER⁶⁶⁾ は、Dietzenhausen 試験地 (49年, 52年*; 1×1m~1.5×1.5m**; 3***), Marienthal 試験地 (56年; 1×1m~1.75×1.8m; 4), Wermsdorf 試験地 (62年; 0.85×0.85m~2×2m; 5) で疎な林分ほど平均樹高は大であると述べた。Wermsdorf 試験地は BRAATHE¹⁷⁾ によるともっとも有名な植栽密度試験で、KUNZE, BORGMANN, BUSSE and TAEHN, FRITSCH および WIEDEMANN により報告されている。KRAMER⁶⁶⁾ はさらに Güntersberge 試験地 (58年; 1×1m~1.5×1.5m; 3), Nesselgrund 試験地 (51年; 1×1m~1.5×1.5m; 3), Meisenheim 試験地 (23年; 1.25×1.3m~1.75×1.8m; 3), Wessling 試験地 (43年; 1.1×1.1m~4×4m; 11), Köcherhof 試験地 (64年; 0.5×0.5m~1×1m; 2) で樹高成長は密度の影響をうけないことを示した。特に Wessling 試験地については別に VANSELOW¹⁵⁵⁾⁻¹⁵⁷⁾ が詳細に報告している。またノルウェーの Fossum 試験地 (44年; 1.25×1.4m~3.5×3.5m; 5) について、BRAATHE¹⁶⁾ は平均樹高が密度の影響をうけないことを報告した。

European larch England に 3×3ft.~8×8ft. の4段階、Wales に 4×4ft.~8×8ft. の3段階の植栽距離試験地が数か所ずつ設定されているが、MACKENZIE⁷³⁾ はいずれも平均樹高は密度の影響を受けないと報告している。

Japanese larch 小根山試験地 (39年; 1,708~6,231本/ha; 6) について河田⁵⁴⁾、佐田ら¹⁰⁶⁾、河田・金谷⁵⁶⁾は疎な林分ほど平均樹高の高いことを報告し、SCHÖBER¹¹⁵⁾ (23年; 1×1m~4×4m; 4) は密で平均樹高がやや良いと報告し、MEYER-WEGELIN はこの試験地の枝の長さと太さを調査した。また MACKENZIE⁷³⁾

*1 本邦における植栽密度試験地は戦後に設定されたものが多く、その設定報告や林分閉鎖以前の中間報告があるが、これらはのぞいてある。

*: 調査林齢 (生育期間), **: 樹間距離または密度の範囲, ***: 樹間距離または密度の段階, 以下すべて同じ。

(European larch と同じ設計で England と Wales に数か所の試験地がある) と加藤⁴⁸⁾⁴⁹⁾ (苗畑におけるモデル試験; $2.8 \sim 35.5$ 本/ m^2 ; 3) は密度によって平均樹高はかわらないと報告している。

Douglas fir MACKENZIE⁷³⁾ (European larch と同じ設計で England と Wales に数か所の試験地がある) は平均樹高が密度の影響を受けないことを示し, EVERSOLE²⁴⁾ (27年; 4×4 ft. $\sim 12 \times 12$ ft.; 6) は疎な林分ほど優勢木と準優勢木の平均樹高が高くなることを示した。

Scots pine WIEDEMANN¹⁶⁶⁾ は Hundeluft 試験地 (26年; 50年; 1×1 m $\sim 1.5 \times 1.5$ m; 3) Waldfriedeck 試験地 (55年; 1×1 m $\sim 1.5 \times 1.5$ m; 3, 3角植 1 m; 1, 列植 1.2×0.6 m $\sim 2.0 \sim 0.75$ m; 4), Walfgang 試験地 (51年; 1×1 m $\sim 1.5 \times 1.5$ m; 3, 3角植 1 m ~ 1.5 m; 3, 列植 1×1.5 m $\sim 2 \times 0.75$ m; 4), また Guschinen 試験地 (23年, 51年; 1×1 m $\sim 1.5 \times 1.5$ m; 3, 3角植 1 m ~ 1.5 m; 3) でいずれも平均樹高は密度によってかわらないことを示した。また KRAMER⁶⁶⁾ は WIEDEMANN の示したほかに Markersbach 試験地 (63~64年; 0.85×0.85 m $\sim 1.98 \times 1.98$ m; 5, 列植 0.85×2.27 m $\sim 1.13 \times 3.40$ m; 2), Deudnitz 試験地 (64~66年; 前同) でも平均樹高に差がないことを示した。

Slash pine WARE and STAHELIN¹⁵⁹⁾ (14年; 4×4 ft. $\sim 16 \times 16$ ft., 7) は疎な林分で優勢木と準優勢木の平均樹高がわずかに大となることを示し, BENNETT¹⁴⁾ (7年; 6×6 ft. $\sim 15 \times 15$ ft.; 8) は平均樹高に差のないことを示した。

Loblolly pine WARE and STAHELIN¹⁵⁹⁾ (14年; Slash pine と同じ) は疎な林分で, 優勢木と準優勢木の平均樹高がわずかに大となることを示した。

Longleaf pine WARE and STAHELIN¹⁵⁹⁾ (14年; Slash pine と同じ) は疎な林分で, 優勢木と準優勢木の平均樹高に差のないことを示した。

Red pine STEVENSON and BRATOO¹⁸⁶⁾ (30年; 5×5 ft. $\sim 10 \times 10$ ft.; 4) は林齢 8年, 11年, 16年の測定で平均樹高は密度の影響を受けないことを示したが, 同じ試験地の25年の測定で BRAMBLE *et al.*¹⁸⁾, 30年の測定で BYRNES and BRAMBLE¹⁹⁾ は疎な林分で平均樹高がわずかに大となることを示し, また BALDWIN¹⁸⁾ (23年; 4×4 ft. $\sim 8 \times 8$ ft.; 7) は優勢木の平均樹高に, LEMMIEN and RUDOLPH⁶⁸⁾ (25年; 6×6 ft. $\sim 10 \times 10$ ft.; 3) は平均樹高に差がないことを示した。

Jack pine ADAMS¹⁾ (8年; 2×2 ft. $\sim 8 \times 8$ ft.; 4) はもっとも密な林分で若干平均樹高のおちることを示した。

アカマツ 小根山試験地 (40年; 1708~6,231本/ha; 6) について河田⁵⁴⁾, 佐田ら¹⁰⁶⁾, 河田・金谷⁵⁶⁾ は密植区ほど平均樹高の高いことを示し, 扇田ら¹¹⁶⁾, 佐藤ら¹¹⁸⁾ は千葉県演習林 (15年; 0.5×0.5 m $\sim 2 \times 2$ m; 4) で平均樹高に差がないことを示し, また安藤ら⁵⁾ のアカマツ天然生除伐試験林 (18年; 5,000~13,500本/ha; 3) でも平均樹高に差がないことが示された。

クロマツ 柴田¹¹⁸⁾ (6年; 2,500~40,000本/ha; 3) は疎な林分ほど平均樹高が高いことを示した。

スギ 藤島²⁵⁾ (11年; 4×4 尺 $\sim 6 \times 6$ 尺; 3), 周ら¹²⁹⁾ (25年; 1.5×1.5 m $\sim 3.1 \times 3.1$ m; 5) は密度により平均樹高に差のないことを示した。

ヒノキ 山本¹⁷³⁾ (23年; 3,000~9,000本/町, 2) は疎な林分で平均樹高が大となることを示したが, 麻生¹¹⁾ は同一林分の5年後の測定で平均樹高に差がないことを示した。

間伐度合と樹高成長についてみると次のとおりである。

Norway spruce についてみると VANSELOW¹⁷⁾ は平均樹高に, NYSSÖNEN⁹¹⁾ は優勢木と準優勢木の平

均樹高に間伐度合が影響しないことを示し、WIEDEMANN¹⁶⁵⁾ は幼齡時に間伐により樹高成長が促進されるが、老齡林では差がないことを述べ、MÖLLER⁸²⁾ は乾燥した土地の悪いところで最強度の間伐が樹高成長を増したことを報告した。HUMMEL⁴¹⁾ は Scotland における4種の間伐試験地で最大木 100本/acre の平均樹高には差がないが、全林木の平均樹高はB種または上層間伐区に比べCとD種間伐区で大であることを示した。

Sitka spruce について HENRICKSEN³⁷⁾ は平均樹高に差がないことを示した。**Scots pine** について LÖNNORTH⁷¹⁾ は最強度の間伐で平均樹高が低いことを示し、WIEDEMANN¹⁶⁶⁾ は一般に差がないが、幼時は強度間伐で若干おくれ、また極端に土地の悪いところでは過密林分で樹高成長が停滞すると述べた。**Slash pine**について BENNETT¹⁴⁾ は、**Shortleaf pine** について ROBERT¹⁰⁵⁾ は、**Red pine** について WILSON¹⁶⁸⁾、SCHANTZ-HANSEN¹¹⁴⁾ は、**White pine** について WAHLENBERG¹⁵⁸⁾ は、また **Loblolly pine** について ZAHNER and WHITMORE¹⁷⁶⁾ は間伐度合が樹高成長に影響を与えないと述べた。**Ponderosa pine** について STAGE¹³³⁾ は差がないことを、MYERS⁸⁴⁾ は間伐区で樹高成長が大となることを、TEEGUARDEN and GORDON¹⁵⁵⁾ は過密林分を間伐したところ樹高成長が増加したと述べ、また **Jefferey pine** についても TEEGUARDEN and GORDON¹⁴⁶⁾ は同様の結果を示した。**Douglas-fir** について WORTHINGTON and STAEBLER¹⁷¹⁾、WORTHINGTON¹⁷¹⁾ は樹高成長は間伐の影響を受けないと述べ、STEELE¹³⁵⁾ は多少密な林分で樹高成長が若干促進されることを示し、STAEBLER¹³²⁾ は強度間伐で樹高成長の衰えることがあるが、一般には間伐の程度には影響されないことを示した。

また本邦における間伐試験地、すなわちスギについて寺崎・金¹⁴⁷⁾、河田⁵⁵⁾、ヒノキとカラマツについて寺崎¹⁵⁰⁾¹⁷⁷⁾ の結果などをみても、間伐種により樹高成長が大きく影響を受けたとは思われない。

さらに広葉樹では **Beech** について、WIEDEMANN¹⁶⁴⁾、MÖLLER⁸²⁾ は強度間伐で樹高成長がおち、HENRICKSEN³⁶⁾ はかわらないことを示している。

これらの報告は、さきにも述べたように多くの研究者により総括されている。すなわち、WIEDEMANN¹⁶⁵⁾、BRAATHE¹⁷⁾ は **Norway spruce** について「地位の良いところでは密度によって樹高成長に差があるとは思われない。しかし、地位の悪いところでは過密になるとごくわずかであるが樹高成長が衰える」と結論づけ、**Beech** について BRAATHE¹⁷⁾ は「間伐が樹高成長を増加させたという例はない」と述べ、また **Scots pine** については「密度による樹高成長の影響は **Beech** などの広葉樹と同じ傾向をもっている」と述べた。また、WORTHINGTON and STAEBLER は **Douglas fir** について「樹高成長は密度の影響を受けない」と結んでいる。さらに SPURR¹³¹⁾ は、「人工林においても天然林においても、密度が多少かわっても平均樹高が密度によってうける影響はきわめて少ないが、極端に過密あるいは過疎な林分では若干平均樹高が低くなる」と述べ、このような傾向のあることは、また蜂屋・安藤³⁴⁾ が苗畑でおこなったスギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツなどの密度試験でも十分に密度の幅がとられているときには同様な傾向がうかがえた。しかしながら、一般に密度による樹高の変異は嶺⁷⁸⁾や坂口¹¹¹⁾ が述べているように、「収穫表の調整または育林的な立場からみれば、密度による樹高成長の変異を無視してもさしつかえない」と考えてよいと判断される。また、樹高の表示方法としては、間伐の影響を受けることの少ない上層高または優勢木と準優勢木の平均樹高がすぐれているといえよう。

ii) 密度と平均胸高直径、平均胸高断面積、平均幹材積

平均胸高直径、平均胸高断面積、平均幹材積が密度の影響を受け、低密度ほど成長の促進されることは

さきに述べた密度試験や間伐試験に例外なく認められる共通した現象で、たとえば SPURR¹⁸¹⁾, BRAATHE¹⁷⁾, KRAMER⁶⁶⁾, VANSELOW^{154)~157)}, WIEDEMANN^{164)~166)}, ASSMANN¹²⁾, 嶺⁷⁸⁾, 坂口¹¹¹⁾, 佐藤ら¹¹³⁾, 只木・四手井¹⁴¹⁾など密度試験や間伐試験について論じた報告で、すべて一致した傾向が述べられている。

iii) 密度と単位面積あたり胸高断面積

密度と単位面積あたり現存胸高断面積の関係は、密度が高くなるほど大となる。しかし、その増加傾向は飽和曲線的で、高密度になると断面積は一定化する傾向がある。ヨーロッパにおいては、間伐と断面積の定期成長量の関係について多く論じられてきた。すなわち、Norway spruce について WIEDEMANN¹⁶⁵⁾ は間伐度合の広い範囲内で断面積の定期成長量は同じであるが、強度間伐ではわずかに増加すると述べ、BRAATHE¹⁷⁾ によると VANSELOW は14シリーズで40プロットの平均から、A種間伐に対し、B種間伐の断面積定期平均成長量は103%、C種は105%であるが、このちがいは有意でないことを強調した。また BORNEBUSCH¹⁵⁾ は、デンマークにおいて最高の断面積定期成長量はC種間伐で認められ、それより強度でも弱度の間伐でも減少すると述べた。Sitka spruce について HENRIKSEN⁸⁷⁾ は、間伐度合が強くなるほど断面積の定期成長量の増加することを示した。また、Beech について BADOUX は極強度間伐で定期平均成長量がおちるほかに間伐の強さとの関係の認められないことを示したと BRAATHE¹⁷⁾ は述べ、LÖVENGREEN⁷²⁾ は断面積が約 122sq.ft./acre までは断面積定期成長量が増加することを示し、HENRIKSEN⁸⁶⁾ は強度間伐で断面積成長量が減少すると述べ、さらに MISCHERLICH はドイツの多くの試験地の結果から断面積の定期平均成長量に最適断面積密度があり、それは幼齢林で約 87sq.ft./acre、老齢で 110~112sq.ft./acre となり、この値は地位によりかわらないと述べた¹⁷⁾。

これらの試験結果から、MÖLLER⁸²⁾⁸³⁾ や BRAATHE¹⁷⁾ は断面積定期成長量に最適断面積密度のあることは間違いないと述べている。

iv) 密度と単位面積あたりの幹材積

林業の主要な収穫目的部分である幹の量、すなわち幹材積と密度との関係を論じた報告は著しく多く、その論議の歴史的な経過は KÖSTLER⁶⁵⁾, BRAATHE¹⁷⁾, 坂口¹¹¹⁾ などに詳しい。

SCHWAPPACH は30年間にわたる 40 plot の Beech の間伐試験結果から、強度間伐によって利用材積の成長が増加することを示した。この報告は多くの支持をうけ、GERHARDT らにより成長促進運動 (Schnellwachs) がおこされたことはあまりにも有名である¹¹¹⁾。この運動は WIEDEMANN¹⁶⁴⁾ が 56 plot の Beech 林の試験結果から「断面積が87~174sq.ft./acre の範囲に間伐された間伐度合において、断面積定期成長量は弱度間伐より強度間伐で大であったにもかかわらず、利用材積の定期平均成長量には差が認められない」という結果を示すまで混乱の大きな原因となった。ここであげた SCHWAPPACH, GERHARDT, WIEDEMANN らの取り扱っている幹材積* は利用材積 (成材材積 timber volume, Delbhaly; ドイツにおいては末口 7cm 以上の材についての材積) であって、梢端までを含んだ全材積 (total volume, Totalmassen) でないことに注意する必要がある。林齢の若い密度試験 (たとえば KRAMER) や間伐試験 (たとえば WIEDEMANN) では、利用材積で示すと低密度に処理されるほど直径成長は促進されるから、多くの利用材積を生産するという結果が示される。BRAATHE¹⁷⁾ も述べているように、利用材積の生産量が多いということは、かならずしも全材積生産量の大きいことを意味しないことに注意すべきである。その後、WIEDEMANN¹⁶⁷⁾

* 本報において幹材積とは特にことわらない限りここに示す全材積を意味するが、本節においては利用材積と全材積を使いわけて示した。

は他の樹種の多くの試験結果から、間伐度合によって利用材積の定期平均成長量はかわらないか、あるいは強度間伐または極度間伐でややおちることを示し、間伐の強さは間伐収穫を含む全生産期間の材積収穫の多少に影響をおよぼすものではなく、差があってもおおむね誤差の範囲であると述べ、この結果は本邦でも支持をえている¹¹¹⁾¹¹²⁾¹⁴¹⁾。

MÖLLER⁸²⁾⁸⁸⁾ は最大可能の断面積に対する百分率で断面積を示したとき、50%以上の断面積では利用材積成長量はかわらないが、それ以下になると減少することを示し、また幹と枝の全材積生産量(増加量)には最適密度のあることをモデル的に示した。また、蜂屋ら³²⁾は枝の成長量を含めた全材積の1年間の成長量が、密度とともにわずかに増加することを示した。ASSMANN¹²⁾ は、Norway spruce や Beech の間伐試験の結果から、利用材積の定期平均成長量に最適な断面積密度のあるばあいと、断面積密度とともに減少する傾向をもつ場合のあることを示しているが、このうち前者は林齢の若い場合にみられ、後者は老齢の場合にみられることから、さきに述べた利用材積と全材積の関係があらわれているように考える。

このようにヨーロッパにおいては、主として断面積密度と利用材積の定期成長量の関係に検討が加えられてきたが、本邦における密度と全幹材積成長量の研究をみると、坂口ら¹⁰⁸⁾¹¹⁰⁾、蜂屋・安藤²⁹⁾、蜂屋ら³²⁾はいずれも密度とともに最近1年間の成長量は増加する傾向を示している。また、全材積の現存量は、断面積と同様に密度とともに増加し、高密度になると一定化する傾向があるが、一定化の傾向は断面積より弱い。このような密度と全幹材積の関係は、これまで述べてきた密度試験や間伐試験においても共通の現象として認められる。

2. 密度と成長の数式化に関するこれまでの研究

前節で示したように、胸高直径、断面積、幹材積などはそれぞれ一定の傾向をもって密度の影響を受けることがわかる。密度とこれらの成長との関係を数式化することによって、間伐にともなうこれら要因の成長量を予測しようとする試みは、かなり古くからおこなわれてきている。

林分の取扱いの違いによる成長予測は立木密度別収穫表(variable density yield table)の調製や間伐指針表(thinning regime, thinning schedule)の作製に関連して、おもに測樹学的手法で、統計学を基礎としておこなわれた。このような研究の主要なものについて述べると次のようである。

WIMMENAUER¹⁷⁰⁾ は平均胸高直径(D)と密度(N)の関係を

$$\log D = -b \log N + a \dots\dots\dots (1)$$

で示し、この関係は地位、林齢に関係なく同一の取扱いを受けた林分では、同一曲線により示されると述べた。この式は今日まで多くの支持を受け、WIMMENAUERの法則として収穫表調製上重要な式として用いられている。

寺崎¹⁴⁹⁾ は、あらかじめ密度の疎密により林分を分類し、それぞれについて曲線式を求めて立木密度別の収穫表を調製した。

同齢単純林について密度や他の要因(地位、林齢など)とある特定の要素(胸高直径、断面積または材積)との関係を重回帰によって示した最初の研究は、BRAATHE¹⁷⁾によるとPETTERSON(1937年)によっておこなわれたという。PETTERSONはScots pineについて回帰分析をおこなったが、その計算結果は実用的なものではなかった。

PETTERSONによって示された方法もちいて、EIDE and LANGSAETER²³⁾ はNorway spruceの断面積成長率について検討を加え、最上のものとして次式を示した。

$$P_g = -3.18 + \frac{3845.4}{(\text{age})^2} + \frac{14.5343}{\sqrt{G}} + 0.07517 H_{50} + \frac{14.5759}{D} \\ + 0.13731 \sqrt{\frac{100 \left(-\frac{g}{2} + g' + \frac{g''}{2} \right)}{G}} \dots\dots\dots (2)$$

P_g : 断面積成長率, age : 林齡

G : 最後の間伐の残存木の断面積

g : 最後の間伐の間伐木の断面積

g' : 1 回前の間伐の間伐木の断面積

g'' : 2 回前の間伐の間伐木の断面積

D : 平均胸高直径

H_{50} : 地位指数

EIDE and LANGSAETER はこの式をもちいて 3 種の間伐度合別にその収穫表を計算した。BRAATHE¹⁷⁾ は EIDE and LANGSAETER のもちいた資料によって直径成長量を予測する式を求めた。

PETTERSON¹⁷⁾ はまた北部スウェーデンの天然生 Scots pine の直径成長率について検討を加え, ANDERSON⁸⁾ はこの式によって初期密度 1,500 本/ha~4,000 本/ha について LUNDGUST の樹高地位曲線をもとに間伐率, 繰返し期間をかねて 31 種の収穫表を計算した。

HILEY and LETPERE³⁸⁾ は材積成長量は間伐度合により影響をうけないという前提のもとに, 年輪密度が 1 インチあたり 7 以上あるならば, 材の強度はかわらないことから, 年輪密度を 7 とするよう HUMMEL の立木密度指数 0.38 により間伐指針表を示したが, これは材積成長量が間伐度合により影響をうけないという範囲を, はるかに越えていると BRAATHE¹⁷⁾ により批判された。

SPURR¹³¹⁾ は Douglas fir の永久標準地の資料より断面積成長量についていくつかの式を検討し, 期首の林齡と断面積のばあいをもっともよく, それ以上変数を増しても推定値はよくならないと述べた。

また, WARRACK¹⁶⁰⁾ は同じく Douglas fir について, PETTERSON の方法にしたがって回帰分析をおこない, 次式によって 2 つの間伐指針について成長予測をおこなった。

$$P. B. A > 25 = -0.68468 - 0.10987 \text{ age} + 0.75241(100/\sqrt{B. A. a}) + 3.95575 (d/D)$$

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

$P. B. A > 25$: 25 年以上の林分の断面積成長率 (1 年間)

$P. B. A < 25$: 25 年以下の林分の断面積成長率 (1 年間)

$B. A. a$: 間伐後の断面積

d : 間伐木の平均直径

D : 間伐前の平均直径

age : 林齡

このような重回帰の研究は Loblolly pine についてもおこなわれている。すなわち, 1948 年から 1950 年にかけてアメリカの Southeastern Forest Experiment Station では 152 個の永久標準地を設け, 5 年ごとに再測をおこなっているが, この 1 回の再測値をもちい WENGER *et al.*¹⁶³⁾ が, また 2 回目の再測値をもちい NELSON⁸⁸⁾ が, またこれまでの資料によって CLUTTER²¹⁾ が重回帰式を示した。CLUTTER は分散分析により有効な関係式を求め次式によってどのような取扱いをうけた林分の成長も予測できると述べた。

Cu. ft./acre の収穫量について

$$\ln V = 2.8076 + 0.015108 S + 0.95931 (\ln B - 21.863 A^{-1}) \dots\dots\dots (5)$$

初期条件に対する断面積の予測値として

$$\ln B = 4.6012 + 0.013597 S - A_0(4.6012 + 0.013597 S - \ln B_0)A^{-1} \dots\dots\dots (6)$$

初期条件に対する Cu. ft. 材積の予測値として

$$\begin{aligned} \ln V = & \ln V_0 - 5.7907(A^{-1} - A_0^{-1}) + (0.059626 - 0.006781 S) \times (\ln A - \ln A_0) \\ & - A_0(3.5966 + 0.010628 S - 0.78166 \ln B_0) \times (A^{-1} - A_0^{-1}) \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

V : 材積, A : 林齢, S : 地位指数, B : 断面積, V_0, A_0, B_0 は同上の初期条件

また, LEMMON and SCHUMACHER⁷⁰⁾ は Ponderosa pine について直径成長の重回帰式を示し, それにもとづいて MITCHELL の spacing rule と biological rule の 2 つの間伐方式について, 成長量の予測をおこなった。さらに ALEXANDER²⁾ は, Logepole pine について 20 年後の直径または断面積を現存の直径または断面積と密度から推定する重回帰式を示し, これにもとづいて除伐 (precommercial thinning) の基準を示した。

本邦において, 木梨⁵⁸⁾は福岡県のスギ林で密度別収穫表を作製した。これは現実林の密度を代表させるために, ランダムに標準地をとり, その資料から地位水準, 密度水準, および形状高水準を決めて, 生育段階ごとの林分構成因子の動きを, この 3 因子の組合せで表現しようとするものである。真辺⁷⁵⁾は木梨の方法によってえられた結果について, 地位・密度に対する成長曲線とみなしうるかどうかは疑問であると述べている。

真辺⁷⁵⁾は北海道のカラマツ林に対し, 直径成長量と断面積成長量と成長率に関係すると思われる要因について相関分析をおこない, その結果から,

$$Pg = 3.1258 - 0.202185 A + 32.69868 \sqrt{G} \dots\dots\dots (8)$$

Pg : 断面積成長率, A : 林齢, G : 断面積

が相関も比較的高く, 最も簡単であることを示し, この式により 5 段階の初期断面積水準に対し収穫予想表を示した。

以上述べてきたようなこれまでの研究は, 胸高断面積または胸高直径の成長あるいは成長率を予測するものが主で, 材積成長を予測するためには, これらの関係をもとに SPURR¹³¹⁾ の 2 段階 (two-way method) によって代表されるような方法がとられてきている。また, これまでに示したいくつかの式からわかるように, 回帰式は研究者によって異なり, 常に一定の関係によって示されてはいない。これは森林の場合, その環境が複雑で, 取扱いもさまざまなところから, 成長に関与する要因の種類や結びつき方が違ってくるのは当然と考えられてきたものと思われる。

しかしながら, 林学における研究とは別に, 生物学特に生態学の分野で環境要因と成長の関係を数式化する研究がおこなわれ, すでに述べたように大阪市立大学の吉良を中心とする研究グループは大きな成果を生んだ^{39)44)45)59)~64)123)~127)}。1953 年, この研究が吉良らにより発表されたあと, 佐藤ら¹¹³⁾, 四手井¹²²⁾, 坂口ら¹⁰⁸⁾¹¹⁰⁾等の支持をうけ, 密度を環境要因と考えることによって, 造林学において密度問題を取り扱う上で中心的な役割を果たし, これらの業績を基礎とした収穫表や除・間伐の指針表が後藤²⁶⁾²⁷⁾, 只木・四手井¹⁴²⁾, 只木¹⁴³⁾¹⁴⁴⁾, 安藤⁶⁾, 蜂屋・安藤³⁰⁾, 四大学および信大合同調査班¹⁷⁴⁾¹⁷⁵⁾によりすでに示されている。

篠崎・吉良¹²⁴⁾は成長曲線の満足すべき条件として次のように示した。

- 1) 成長曲線で取り扱う生物系は均質で閉鎖系である。
- 2) 成長する量(重さ, 長さ, 個体数等) n は正の実数で連続である。
- 3) 理想的によい条件の下では, 生物は指数函数的に成長する。
- 4) 成長曲線は原則的に時間 t に関して微分方程式の形で与えられる。

$$\frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dt} = f(n, t, \dots)$$

- 5) 成長率 $\frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dt}$ はその生物特有の正のある値より大きくはならない。負の方へは $n \rightarrow 0$ のとき $-\infty$ になりうることはありうる。
- 6) 有限な条件下では n には上限がある。
- 7) 有限な条件下で理想的なばあいには, n は単純ロジスチック曲線と与えられる。

篠崎・吉良¹²⁴⁾は, このような条件を考えると過去における成長曲線のほとんど大部分が不適格であったと述べ, これは, これまでの成長曲線に対する考え方が不備であったことを意味し, そのなかでいちばん重要な点として, これまでの成長曲線の取扱いが, 単なる機械的な曲線のあてはめに終わっていた事実を指摘できようとして述べ, また, 過去における成長曲線の研究で単なる曲線のあてはめに終わらず, 数理的に成長の統一理論を組み立てようとした従来の研究はごく少なく, MITSCHERLICH, BLACKMAN の理論があげられるにすぎないと述べている。

鈴木¹³⁷⁾は林地肥培効果の評価に際し, MITSCHERLICH の法則によると都合のよいことを示し, その結果から吉良らのロジスチック曲線のような複雑な式をもちいなくとも, 次に示す(9)式で十分ではないかと述べ, また南雲・佐藤⁸⁹⁾は森林の成長予測にこの式をもちいた。

MITSCHERLICH は古くから知られた収量漸減の法則を定式化して, ある土壌要因 f が変化したとき植物の個体重 w は

$$w = M(1 - e^{-kf}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

で与えられるとした。 M は w の上限値, k はその要因に特有な Wirkungsfactor と呼ばれる定数である。MITSCHERLICH は(9)式を満足する成長要因として個体密度や時間までを含め, この式を統一的な成長理論におこうとした。(9)式は飽和型の曲線を示し, 実験値にもよく合う。しかし, もっとも重要な k の値が要因に特有でなく, f または t とともに変化する点を指摘され, また篠崎・吉良¹²⁴⁾によりその欠点が批判されている。

適当な成長様式を仮定して, それに含まれている parameter が成長とともに, あるいは環境条件とともにどのように変化するかを追って, 法則性をつかもうと試みたものに BLACKMAN とその一派がある。BLACKMAN は成長は元来, exponential であるとしてこれを成長の複利法則とよび, 成長率 $S = \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dt}$ を efficiency index と名づけ, これがどのような動きを示すかを調べ, これから植物成長の純同化率 (net assimilation rate) という重要な概念が生まれた。

この一連の業績と発展の経過は佐伯¹⁰⁷⁾が「植物の成長解析」として詳しくまとめている。

吉良を中心とした研究グループは BLACKMAN の exponential の代わりに単純ロジスチック曲線を採用し, 植物成長のロジスチック理論を体系づけようと試み, 多くの成果をえている。

このロジスチック理論にもとづく密度と植物の成長の関係を示した密度効果式は本報をこれからすめ

る上でも基本的な役割を果たすので、節を改めて述べよう。

3. 密度効果式とその適用例

i) 密度効果式

前節で述べたように、吉良を中心とした研究グループは密度と成長の関係を統一的に記述説明できることを示した。この記述は植物成長のロジスチック理論として、密度のみならず、肥料、光など多くの成長要因と植物の成長の関係をも一般化して説明でき、詳細な報告が数多くあるが、ここでは本論をすすめるに必要な最小限について解説を加えるにとどめる。

植物個体の重さを w , w の上限を W , 成長係数を λ , 時間を t とすると、単純ロジスチック曲線は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{w} \cdot \frac{dw}{dt} &= \lambda \left(1 - \frac{w}{W}\right) \\ w &= \frac{W}{1 + ke^{-\lambda t}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 k は初期条件によって決まる積分常数である。(10)式において λ だけが t の関数となるばあい、 $[\lambda = \lambda(t), W = \text{const.}]$ を λ 型、 $[\lambda = \text{const.}, W = W(t)]$ を N 型、 $[\lambda = \lambda(t), W = W(t)]$ を λN 型のロジスチック曲線といい、 $[\lambda = \text{const.}, W = \text{const.}]$ の単純型をふくめた 4 型のすべてを一般化ロジスチック曲線という。

もっとも一般化された λN 型を(11)式に示す。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{w} \cdot \frac{dw}{dt} &= \lambda(t) \left[1 - \frac{w}{W(t)}\right] \\ w &= \frac{e^{\tau}}{\int \frac{e^{\tau}}{W} d\tau + K} \quad \text{ただし, } \tau = \int \lambda dt \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

K は積分常数である。

同種植物のいくつかの個体群を同じ外界条件のもとにおき、個体密度 ρ (No./area) だけを個体群ごとに数段階に変えて、成長を測定する。そのとき次の 4 項目がなりたつと仮定する。

- 1) 個体群の平均個体重 w の成長は一般ロジスチック曲線(11)式で示される。
- 2) 成長係数 λ の値は密度に無関係、すなわち $\partial \lambda / \partial \rho = 0$
- 3) 時間が十分たったとき単位面積あたりの収量 ($y = w\rho$) は、密度に無関係に一定となる (最終収量一定の法則)。すなわち、 $y|_{t \rightarrow \infty} = Y$ とすると $W(t)\rho = Y(t)$, かつ $\partial Y / \partial \rho = 0$
- 4) 密度に関係なく同時に成長がはじまり、そのときの植物体の平均重量は一定。すなわち、 $w|_{t=0} = w_0 = \text{const.}$, かつ $\partial w_0 / \partial \rho = 0$

以上 4 項のうち、3) については実験的に認められており、4) は一様な種子または苗を同時にまきつけ、または植栽すればみたされる。この 4 つの仮定から、つぎの(12)式が導かれる。

$$\frac{1}{w} = A\rho + B \quad \dots\dots\dots (12)$$

A および B は時間によって決まる常数で、一般ロジスチック曲線の 4 つの型に応じてそれぞれ Table 1 の内容をもつ。林木は一般に最も複雑な λN 型にしたがう。(12)式は成長の各段階における個体密度の個体重におよぼす作用をあらわすもので、競争密度効果の逆数式(reciprocal equation of competition-density

Table 1. 密度効果の逆数式の A および B の内容
Contents of A and B in the reciprocal equation of density effect.

	ロジスティック曲線の型 Types of general logistic curve			
	単 純 Simple	λ 型 λ -type	N型 N-type	λ N 型 λ N-type
A	$(1-e^{-\tau})/Y$	$(1-e^{-\tau})/Y$	$e^{-\tau} \int (e^{\tau}/Y) d\tau$	$e^{-\tau} \int (e^{\tau}/Y) d\tau$
B	$e^{-\tau}/w_0$	$e^{-\tau}/w_0$	$e^{-\tau}/w_0$	$e^{-\tau}/w_0$
τ	λt	$\int \lambda dt$	λt	$\int \lambda dt$

Y : Upper limit of yield per unit area.

w_0 : Initial condition of average weight.

λ : Growth factor.

effect, 略して C—D 効果の逆数式) と呼ばれている。

(12)式から $y=w \cdot \rho$ により

$$\frac{1}{y} = A + \frac{B}{\rho} \quad \dots\dots\dots (13)$$

が容易に導かれる。(13)式は成長の各段階における個体密度の単位面積あたり収量におよぼす作用をあらわすもので、収量密度効果の逆数式 (reciprocal equation of yield-density effect) と呼ばれている。

吉良ら⁶⁹⁾は逆数式に先だち

$$w = K\rho^{-a} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$y = K\rho^{(1-a)} \quad \dots\dots\dots (15)$$

で密度と生産量の関係を示した。常数 a を競争の度合を示す尺度として、競争密度指数 (competition-density index, C—D index) と呼んだ。(14)(15)式は両対数軸上で直線関係を示すが、成長開始時にはどの個体も密度による差はないから、 $a=0$ である。生育がすすむにつれて高密度から競争がはじまり、 a の値は大きくなる。しかし、 a はどんなに競争が強くおこっても 1 を越えることはない。 $a=1$ であるとき (15)式は $y=K$ となり、単位面積あたりの収量は密度に関係なく一定となり最終収量一定の法則が成立する。(15)式は (12)(18)式と区別するため、競争密度効果の冪乗式、収量密度効果の冪乗式と呼ばれている。(14)(15)式は密度の幅がせまいときには密度効果をよく近似し、都合のよい式であるが、一般には逆数式の方がすぐれている。

(12)(13)式の密度効果式は全植物体重について導かれたものであるが、部分重もよく近似することが知られている³⁹⁾⁵⁹⁾¹²³⁾。このことは次のことから導かれる。生育段階が等しく、密度 ρ がちがうとき、全体重 w に対する部分重 x の密度方向の相対成長関係が微分形で

$$\frac{1}{x} \cdot \frac{dx}{d\rho} = h \cdot \frac{1}{w} \cdot \frac{dw}{d\rho} \quad \dots\dots\dots (16)$$

として示され、積分形で

$$x = Kw^h \quad \dots\dots\dots (17)$$

と示される。

(12)式

$$\frac{1}{w} = A\rho + B$$

において、 w と x の関係が(15)式で示されると、(15)式で $h=1$ ならば

$$\frac{1}{x} = \frac{A}{K} \rho + \frac{B}{K} \quad \dots\dots\dots(18)$$

となり、部分重 x も全体重 w に対すると同様解析が可能である。しかし、 $h \neq 1$ ならば、

$$\frac{1}{x} = \frac{(A\rho+B)^h}{K} \quad \dots\dots\dots(19)$$

となり、解析は困難となる。しかしながら、 $h \neq 1$ の場合でも $h \neq 1$ が普通で、後に例示するように逆数式で十分近似できることが多い。(19)式はまた x の単位面積あたりの量を y_x とすると

$$\frac{1}{y_x} = \frac{(A\rho+B)^h}{K\rho} \quad \dots\dots\dots(20)$$

と書き換えられるが、さきにも述べたように $h=1$ であれば(18)式を y_x に書きかえたものとなり、収量一定の法則がなりたつが、 $h < 1$ のときには高密度ほど収量が多くなり、また $h > 1$ のときには y_x を最大にする最適密度の存在することを穂積・篠崎³⁹⁾は示した。

林木の根量の相対成長係数について荻住⁴⁷⁾は0.957という値を示したが、また T/R 率について検討を加え T/R 率は密度に関係なく一定であると述べている⁴⁶⁾。 T/R 率が一定ということは $h=1$ であることを示すから、根量を測定していない林分の平均個体の部分重と地上部重の相対成長係数によって、密度方向の全体重に対する部分重の相対成長係数を論じても、一応さしつかえないだろう。密度方向の地上部重に

Table 2. 18年生アカマツ天然生除伐試験林の密度方向の相対成長関係
Density dependent allometric relation of 18-years-old *Pinus densiflora*.
Density dependent allometric relation is shown by following equation;

$$\log x = h \log w + K'$$

x : Part weight (kg),

w : Above-ground part weight (kg),

h, K' : Constants.

部 分		h	K'
Parts			
幹	Stems	0.9090	-0.1139
枝	Branches	1.2246	-0.9014
葉	Leaves	1.1946	-0.9763

Table 3. スギの保育形式調査資料による密度方向の相対成長関係
Density dependent allometric relation of *Cryptomeria japonica*.
See the explanation in Table 2.

齡 階 Age class (yrs.)	幹 Stems		枝 Branches		葉 Leaves	
	h	K'	h	K'	h	K'
10	0.8748	-0.2726	1.1338	-1.1136	1.0646	-0.3947
15	0.8259	-0.0010	1.6270	-1.8547	1.1694	-0.7415
20	0.8804	+0.0312	1.5764	-2.0155	1.0833	-0.7851
25	0.8833	+0.0935	1.6979	-2.5021	1.1435	-1.0230
30	0.9601	-0.0228	1.4190	-1.9521	0.9963	-0.8769
35	0.9410	+0.0545	1.4376	-2.1412	1.2088	-1.4693
45	0.9532	+0.0239	1.3835	-2.0473	1.1085	-1.2316

対する部分重の相対成長関係をアカマツ⁵⁾ とスギ⁹⁾ について Table 2~3 に示しておく。

表からわかるように幹は $h < 1$ で、したがって幹の単位面積あたりの量は、一般に密度とともに漸増する傾向にあり、枝は $h > 1$ で、単体面積あたりの量に最適密度が存在する。葉は $h > 1$ であるから理論的には最適密度が存在することになるが、これまで知らされている資料ではそのような例はない。この理由は、 $h > 1$ であるが枝に比べると1に近く、また根の相対成長係数が1であるという前提で論じているが、根の $h=1$ であるという資料はまだ十分でなく、これが多少でもかわれば、葉の h がより1に近くなることも考えられ、さらに後述する自然間引のために現実には測定しうる密度には、密度とともに葉量の減ずる部分が含まれないのであろうなどと考えられる。

ii) 密度効果式の適用例

A) 密度試験への適用

(12)(13)式* は1年生物種はじめ、林木においても例外なく密度試験の結果を満足する。林木における密度試験の結果を解析した例としてアカマツ天然生除伐試験林⁶⁾ の例を Fig. 1, Table 4 に示す。林木における密度試験の結果を解析して、苗畑におけるモデル実験について加藤⁽⁴⁸⁾⁽⁴⁹⁾⁽⁵⁰⁾、高田・豊島¹⁴⁵⁾、加藤・蜂

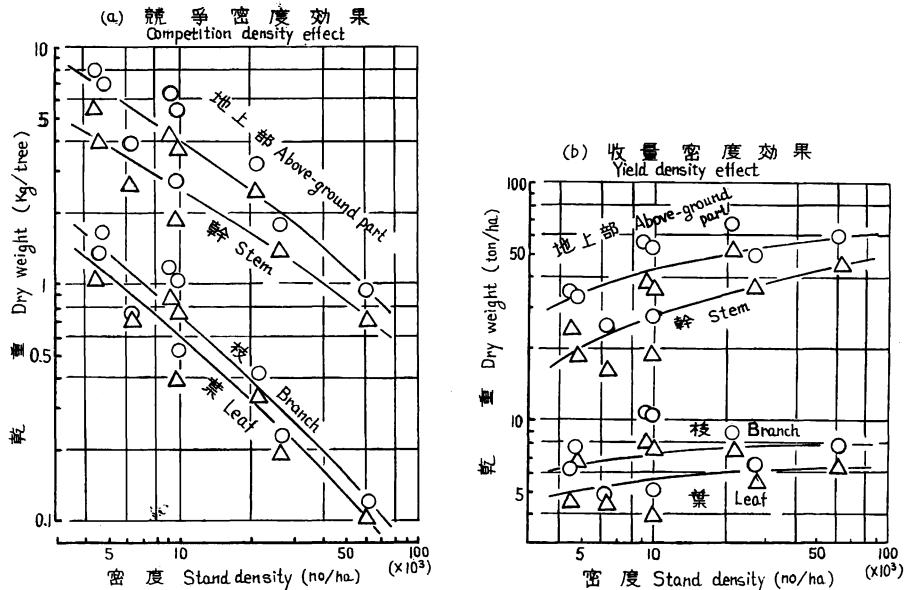


Fig. 1 18年生アカマツ天然生除伐試験林の密度効果
Density effect in the stand density experiment plot of 18-years-old *Pinus densiflora*.

* (12)(13)式の常数 A , B は最小自乗法により求められるが、最小自乗法は穂積・篠崎³⁹⁾ が示した次式によった。

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{\sum y \sum w^2 - \sum w \sum y \cdot w}{\sum y^2 \sum w^2 - (\sum y \cdot w)^2} \\ B &= \frac{\sum y^2 \sum w - \sum y \sum y \cdot w}{\sum y^2 \sum w^2 - (\sum y \cdot w)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

この式は $1/w$ の誤差が、 w が小さくなるほど相対的に大きくなることから、 w^2 の重みづけにより導かれたものである。なお、点のバラツキの小さいときには SHINOZAKI and KIRA¹²⁸⁾ が示した $C-D$ rule によるとつごうがよい。

屋⁵²⁾が示し、幼齢林について佐藤ら¹¹³⁾、柴田¹¹⁸⁾、蜂屋・安藤²⁹⁾が報告している。

Fig. 1の競争密度効果の図からわかるように、平均個体重は低密度から高密度に移るにしたがい漸減するが、減少率は低密度部分では小さく、高密度部分になると大になる。また、同図の収量密度効果の図のように、単位面積あたりの量は、さきにも述べたように、平均個体量とは逆に密度とともに増加するが、高密度になるにしたがい増加率は減少して、面積あたりの量は一定化してくる。この一定化の傾向は葉量

Table 4. アカマツ天然生除伐試験林（18年生）の地上部部分重の密度効果式の常数

Constant values of reciprocal equation of part amount in the stand density experiment plot of 18-years-old *Pinus densiflora*.

The reciprocal equations are shown by following equations;

$$1/w = Ap + B \quad \text{or} \quad 1/y = A + B/\rho$$

w : Amount of average individual,

y : Amount per unit area,

ρ : Stand density (number per ha),

A, B : Constants determined by growth stage.

部 分 Parts	A	B
地 上 部 重 Above-ground part weight	0.0163	75.4
幹 重 Stem weight	0.0204	147.3
葉 重 Leaf weight	1.559	181.2
幹 材 積 Stem volume	0.0095	58.9
胸 高 断 面 積 Basal area	0.0330	175.4

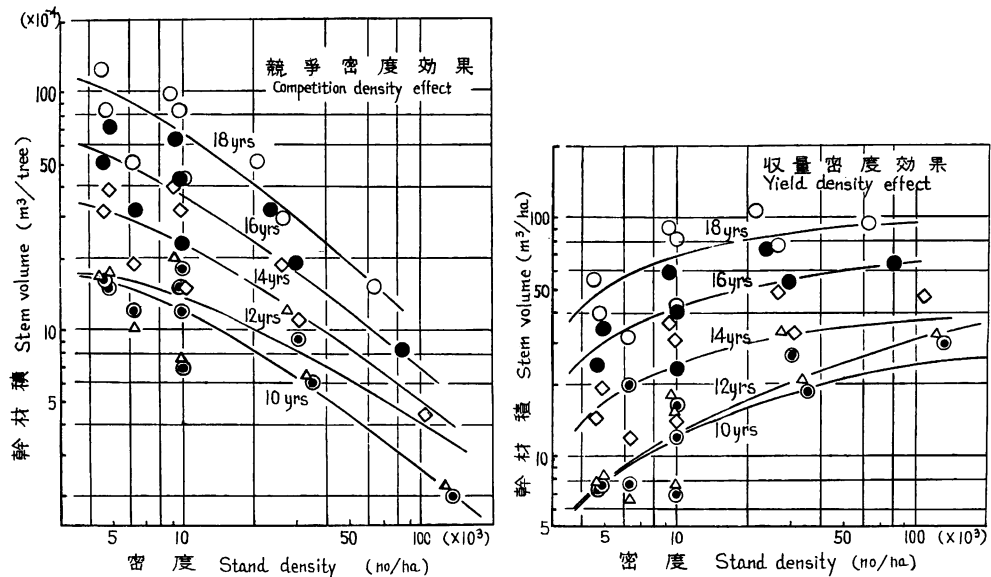


Fig. 2 アカマツ天然生除伐試験林の幹材積の密度効果の時間的経過
Time variation of the density effect of stem volume in the stand density experiment plot of *Pinus densiflora*.

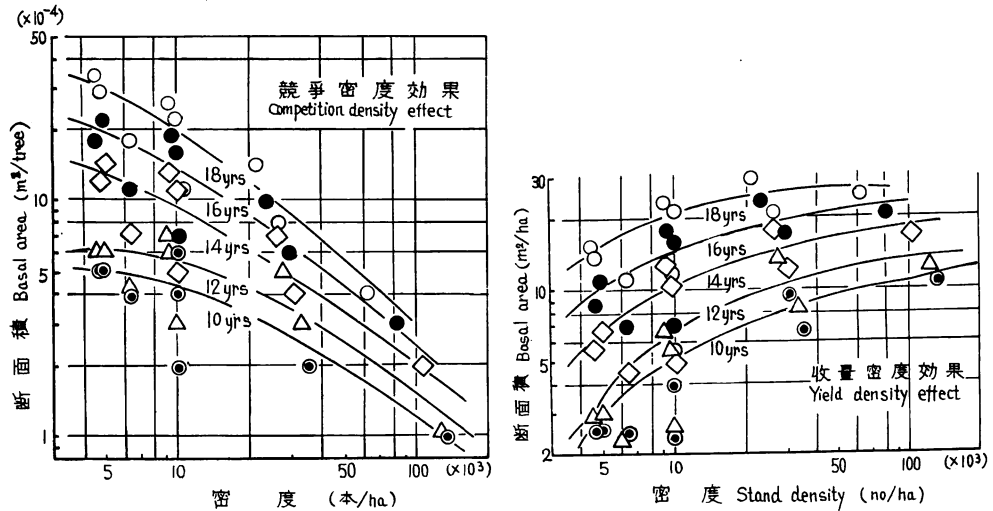


Fig. 3 アカマツ天然生除伐試験林の断面積の密度効果の時間的経過
Time variation on the density effect of basal area in the stand density
experiment plot of *Pinus densiflora*.

で著しく、十分に閉鎖した林分の葉量が種ごとにほぼ一定であることは、これまでもよく知られている⁵²⁾
¹⁴²⁾。枝量は密度に対し最適曲線の形を示し、枝量が最大になる密度が存在すると考えられる。蜂屋・安藤²⁹⁾が示したスギの例などでは密度とともに増加する傾向を示し、佐藤ら¹¹³⁾のアカマツ、扇田・佐藤¹¹⁷⁾のストロブマツの、安藤ら⁹⁾のスギの例では密度とともに減少する傾向を示しているが、これは密度の幅が十分でないためで、密度の幅が十分に広いときには最適曲線を示し、このような例は加藤・蜂屋⁵²⁾のカラマツ幼齢林について見られる。さきにも述べたように、密度効果式は全植物体の重量について導かれたが、地上部重、幹重、葉重、漸増形を示すときの枝重などの部分量や、次に示す幹材積や胸高断面の密度との関係を良く近似できることがわかる。

Table 5. アカマツ天然生除伐試験林の幹材積と胸高断面積の密度効果式の常数の時間的経過
Time variation of the constant values of reciprocal equation of stem volume
and basal area in the stand density experiment plot of *Pinus densiflora*.

The reciprocal equations are shown by following equations;

$$\begin{aligned} 1/v &= A_1\rho + B_1 & \text{or} & & 1/V &= A_1 + B_1/\rho \\ 1/g &= A_2\rho + B_2 & \text{or} & & 1/G &= A_2 + B_2/\rho \end{aligned}$$

v : Average stem volume(m³), V : Stem volume per ha(m³), ρ : Stand density(No./ha),
 g : Average basal area (m²), G : Basal area per ha (m²).

林 齡 Stand age (yrs.)	幹 材 積 Stem volume		胸 高 断 面 積 Basal area	
	A_1	B_1	A_2	B_2
10	0.03285	520.50	0.07507	1571.97
12	0.02178	597.62	0.05052	1345.04
14	0.02104	207.10	0.04668	550.67
16	0.01361	119.86	0.03841	312.53
18	0.00952	58.85	0.03302	175.41

すでに述べたように、林木は λN 型にしたがうから、密度効果は時間によりかわる。幹材積と断面積の密度効果の時間的経過を Fig. 1 の例について Fig. 2~3, Table 5 に示す⁶⁾。このような時間的経過の例を安藤⁴⁾は周ら¹²⁹⁾の台湾におけるスギの植栽密度試験について、只木・四手井¹⁴⁰⁾はアカマツのモデル林について、只木ら¹⁴¹⁾はコジイ天然生除伐試験林について、高田・豊島¹⁴⁵⁾はスギ床替苗の密度試験について示している。

筆者⁶⁾は Table 5 に示した A, B の時間的経過から、Table 1 の A, B を規定する τ, λ, Y などについてさきに解析した。生育にともなう τ, λ, Y の値がかわると、それをもとに A, B の値を求め、この値から成長にともなう幹材積と密度の変化をとらえることができるようになる。しかしながら、このためには τ, λ, Y を時間 t とのなんらかの函数形として示さなければならない。そうすると、一般に Table 1 に示した λN 型の A の積分は不可能となるので¹²⁷⁾、 A, B の変化をこのような解析を経ないでより直接的に推定できる方法が求められている^{4)6)9)141)~148)}(29ページ参照)。

B) 生育段階が等しく密度がちがうときの密度効果

密度効果式は、密度試験でなくとも間伐試験地のように生育段階が等しく、密度が違うときにも良く近似することができる。Table 6 は筆者ら⁹⁾がすでに報告したスギの保育形式の調査結果について年齢別に

Table 6. スギの保育形式調査資料における密度効果式の常数の時間的経過

Time variation of the constant values of density effect equation of *Cryptomeria japonica*.
See the explanations in Table 4 and Table 5.

林 齢 Stand age (yrs.)	地 上 部 重 Above-ground part weight		幹 重 Stem weight		幹 材 積 Stem volume		胸 高 断 面 積 Basal area	
	A	B	A	B	A_1	B_1	A_2	B_2
10	0.01049	76.642	0.01643	152.816	0.00549	54.389	0.01606	202.027
15	0.01564	9.119	0.01693	27.377	0.00545	8.973	0.02751	36.087
20	0.00836	2.886	0.01080	7.207	0.00327	2.795	0.02409	7.581
25	0.00677	1.783	0.00738	4.223	0.00249	1.431	0.02137	5.813
30	0.00543	1.738	0.00659	2.581	0.00213	0.864	0.01805	4.541
35	0.00431	1.180	0.00484	1.754	0.00163	0.576	0.01842	1.936
45	0.00376	0.982	0.00481	0.770	0.00161	0.256	0.01638	1.142

密度効果式の常数を示したものである。この資料は密度試験とはいいがたく、間伐がおこなわれている。しかしながらこの例のように、調査の場所が離れていても樹高で判定した地位に大きな差がなく、同一年齢の林分間で密度がちがうばいもよく近似することができる。このように、ほぼ地位の等しい同じ林齢または年齢にある林分を調査し、坂口ら¹⁰⁸⁾¹¹⁰⁾はアカマツ天然生幼齢林について、扇田・佐藤¹¹⁷⁾は間伐率をかえたストロブマツ壮齢林について、只木らはシラカンバ天然生幼齢林¹³⁹⁾について、COOPER²²⁾は Ponderosa pine 壮齢林について、蜂屋ら³²⁾はアカマツ壮齢林について、また加藤ら⁵⁰⁾はアカマツ幼齢間伐試験林について解析した。

C) 幹材積と胸高断面積の等平均樹高線

これまで述べてきた密度効果式の適用例は、いずれも同一地位ということが条件であった。しかしながら、収穫表調製資料や収穫試験地の調査資料で、樹高階が等しい林分の密度と幹材積、密度と断面積の関係も密度効果式によってよく近似できることが知られている。すなわち、このような関係に一定の法則性

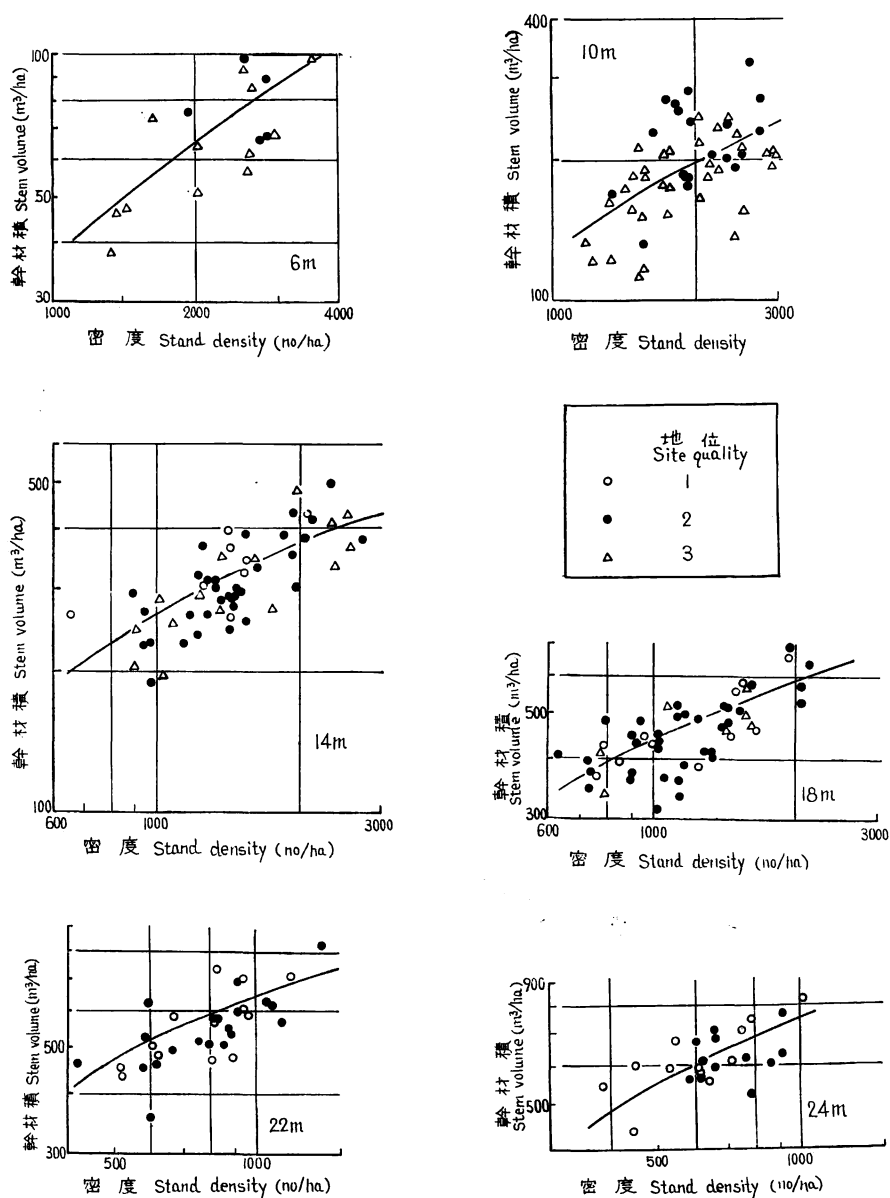


Fig. 4 スギの秋田地方の地位と幹材積等平均樹高線
Equivalent height curve of stem volume and site quality in Akita district of *Cryptomeria japonica*.
Equivalent height curves of stem volume have not difference among site quality.

があることを最初に示したのは四手井¹²⁰⁾で、その後只木・四手井¹⁴²⁾、只木¹⁴³⁾¹⁴⁴⁾、四大学および信大合同調査班¹⁷⁴⁾¹⁷⁵⁾、いろいろな樹高階に応じて密度と幹材積の関係を予測する方法を示し、著者も同様な解析でえられた暫定的な結果を、植栽密度の決定指針表や間伐指針表として応用できることから報告してきた⁸⁰⁾。

Fig. 4~5 は、秋田地方のスギ林分収穫表調製資料と同地方のスギ林収穫試験地調査資料⁹⁵⁾⁹⁶⁾を、主

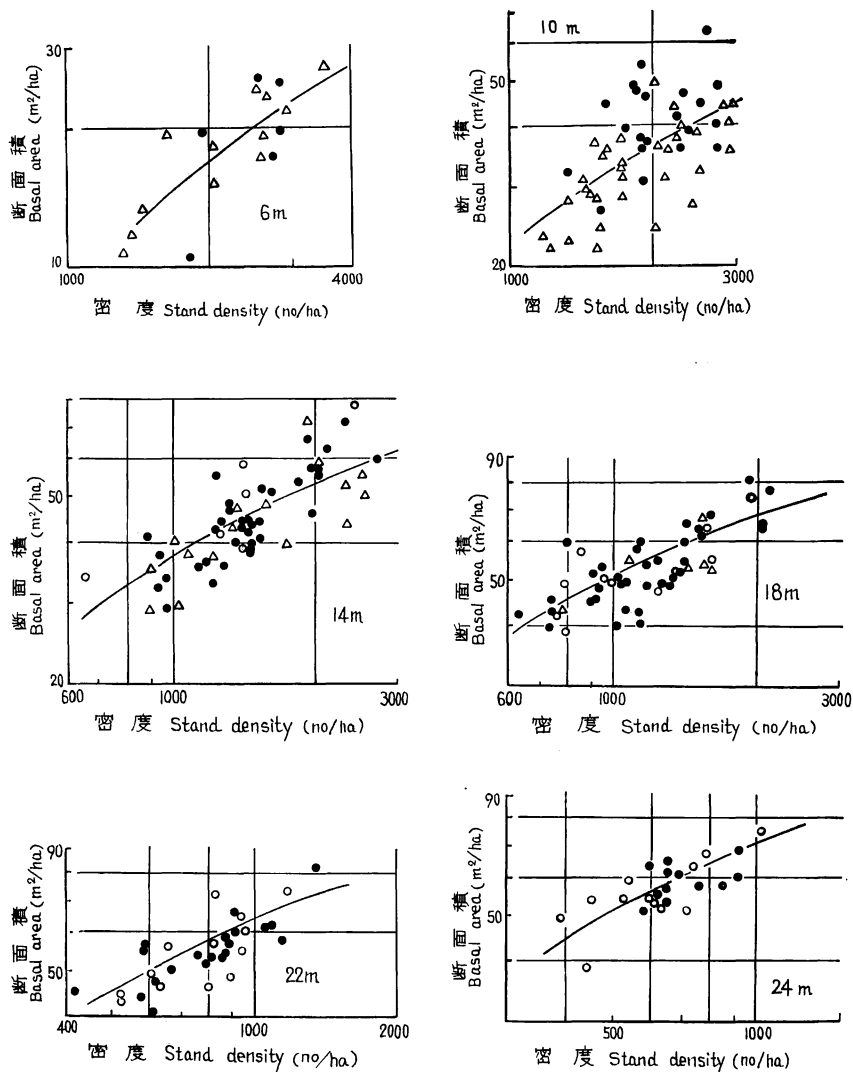


Fig. 5 スギの秋田地方の地位と断面積等平均樹高線
Equivalent height curve of basal area and site quality in Akita district of *Cryptomeria japonica*.

Equivalent height curves of basal area have not difference among site quality.

林木により2mごとの樹高階に分け、秋田地方スギ林分収穫表から各林分の地位を決め、密度と幹材積、および密度と断面積を樹高階別に地位によって、符号をかえてプロットしたものである。当然、樹高階の低いところでは3等地が多く、高いところでは1等地が多いという傾向はあるが、同一樹高階における関係は、地位が違って同じ程度の範囲に分布し、地位に関係なく密度効果式を適用できることがわかる。このように地位を考えるとなく、樹高のみによって密度と幹材積または断面積の関係を示せることは、I-1)で述べたように、樹高は密度の影響がきわめて少なく、実上用はその変量を無視してもさしつかえないから、密度と幹材積または断面積との関係が樹高成長にともない、どのように変化するかを知るのにつづがよく、論議をすすめることが単純化される。このような関係を、密度効果式によって近似した

曲線を密度効果線と区別して只木・四手井¹⁴²⁾は等平均樹高線 (equivalent-height curve) と名づけた。

このあと本論をすすめる上で、密度を ρ とし、平均幹材積を v , ha あたり幹材積を V , 平均胸高断面積を g , ha あたり胸高断面積を G としたとき、その密度効果線または等平均樹高線を示す密度効果式を

$$\frac{1}{v} = A_1 \rho + B_1 \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$\frac{1}{V} = A_1 + \frac{B_1}{\rho} \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$\frac{1}{g} = A_2 \rho + B_2 \quad \dots\dots\dots (24)$$

Table 7. 各地のスギの幹材積等平均樹高線に関する逆数式の常数

Constant A_1 and B_1 in the reciprocal equation used as the equivalent height curves of stem volume of *Cryptomeria japonica* in each district by the data of preparation of yield table⁹⁷⁾ and others⁹⁵⁾⁹⁶⁾¹⁵²⁾.

See the explanation in Table 5.

樹高階 Height class (m)	飫 肥 Obi		熊 本 Kumamoto		土 佐 Tosa		愛知・岐阜 Aichi-Gifu		紀 州 Kishu		天 城 Amagi	
	A_1	B_1	A_1	B_1	A_1	B_1	A_1	B_1	A_1	B_1	A_1	B_1
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	0.00327	1.950	—	—	0.00334	4.218	—	—	—	—	0.00378	0.735
12	0.00291	0.546	0.00223	0.938	0.00272	2.123	—	—	—	—	0.00316	0.366
14	0.00201	0.993	0.00158	1.116	0.00208	1.777	0.00261	1.716	0.00183	1.995	0.00245	0.440
16	0.00239	0.230	0.00112	1.063	0.00216	0.916	—	—	0.00174	1.486	0.00205	0.217
18	—	—	0.00118	0.755	—	—	0.00132	0.805	0.00124	1.380	0.00181	0.150
20	0.00155	0.216	—	—	0.00164	0.302	0.00132	0.694	0.00130	0.855	0.00141	0.173
22	0.00082	0.311	—	—	0.00141	0.180	0.00117	0.606	0.00105	0.769	0.00139	0.072
24	—	—	0.00084	0.332	—	—	0.00070	0.628	—	—	—	—
26	—	—	—	—	0.00085	0.338	0.00118	0.219	—	—	—	—
28	—	—	0.00059	0.266	—	—	0.00062	0.383	—	—	—	—
樹高階 Height class (m)	次 城 Ibaragi		北関東・阿武隈 Kitakanto- Abukuma		越後・会津 Echigo-Aizu		山 形 Yamagata		秋 田 Akita		青 森 Aomori	
	A_1	B_1	A_1	B_1	A_1	B_1	A_1	B_1	A_1	B_1	A_1	B_1
6	—	—	—	—	0.00492	14.601	0.00669	18.240	0.00405	22.454	—	—
8	—	—	—	—	0.00359	7.731	0.00762	3.541	0.00266	11.229	0.00190	9.406
10	—	—	0.00432	3.510	0.00143	7.160	0.00362	2.432	0.00256	4.571	0.00095	7.107
12	—	—	0.00162	4.943	0.00123	4.598	0.00296	1.279	0.00152	3.874	0.00097	4.490
14	0.00172	2.375	0.00201	1.904	0.00187	1.479	0.00287	0.303	0.00141	2.420	0.00076	3.069
16	0.00213	0.549	0.00158	1.439	0.00197	0.493	0.00212	0.327	0.00151	1.391	0.00072	2.166
18	0.00124	0.974	0.00122	1.133	0.00165	0.436	0.00208	0.084	0.00127	1.007	0.00104	0.866
20	0.00109	0.669	0.00121	0.776	0.00088	0.945	0.00137	0.338	0.00092	0.917	0.00100	0.584
22	0.00127	0.364	0.00104	0.503	0.00101	0.426	0.00123	0.311	0.00099	0.607	0.00064	0.594
24	—	—	—	—	—	—	0.00094	0.338	0.00091	0.434	0.00070	0.422
26	—	—	—	—	—	—	0.00075	0.326	0.00072	0.390	—	—
28	—	—	0.00064	0.265	—	—	0.00098	0.041	—	—	—	—

$$\frac{1}{G} = A_2 + \frac{B_2}{p} \quad \dots\dots\dots (25)$$

とし、区別を要するときには(22)(23)式で示される等平均樹高線を競争密度効果、または収量密度効果の幹材積等平均樹高線、(24)(25)式を同じく断面積等平均樹高線と呼ぶことにする。

等平均樹高線を各地の収穫表調製資料や収穫試験地、およびその他資料収集の調査法や材積推定法が等しいと考えられる資料を集めて、計算した結果を Table 7~14 に示す。15ページの脚注で述べたように、C—D rule をもちいることにより常数 A 、 B の値を求めることができるが、このような例では密度試験などと違いバラツキが大きく、C—D rule をどのようにあてるか判断に苦しむことが多い。そこで

Table 8. 各地のスキの胸高断面積等平均樹高線に関する逆数式の常数

Constant A_2 and B_2 in the reciprocal equation used as the equivalent height curves of basal area of *Cryptomeria japonica* in each district by the data of preparation of yield table⁹⁷⁾ and others⁹⁵⁾⁹⁶⁾¹⁵²⁾.

See the explanation in Table 5.

樹高階 Height class (m)	飼 Obi		熊 本 Kumamoto		土 佐 Tosa		愛知・岐阜 Aichi-Gifu		紀 州 Kishu		天 城 Amagi	
	A_2	B_2	A_2	B_2	A_2	B_2	A_2	B_2	A_2	B_2	A_2	B_2
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	0.0180	11.803	—	—	0.0194	23.650	—	—	—	—	0.0205	8.527
12	0.0197	2.364	0.0226	13.661	0.0163	14.912	—	—	—	—	0.0197	1.681
14	0.0162	5.219	0.0145	6.394	0.0165	10.033	0.0151	16.090	0.0126	12.329	0.0171	3.331
16	0.0184	0.668	0.0112	8.738	0.0148	9.674	—	—	0.0132	11.793	0.0161	1.612
18	—	—	0.0095	8.093	—	—	0.0105	8.230	0.0106	11.039	0.0145	2.294
20	0.0158	1.384	0.0102	7.193	0.0166	2.173	0.0107	8.507	0.0114	8.340	0.0141	1.441
22	0.0085	2.974	—	—	0.0152	1.358	0.0116	6.509	0.0110	6.815	0.0136	1.351
24	—	—	0.0084	3.932	—	—	0.0075	6.993	—	—	—	—
26	—	—	—	—	0.0099	3.672	0.0091	4.438	—	—	—	—
28	—	—	0.0074	3.228	—	—	0.0066	5.203	—	—	—	—

樹高階 Height class (m)	茨 城 Ibaragi		北関東・阿武隈 Kitakanto- Abukuma		越後・会津 Echigo-Aizu		山 形 Yamagata		秋 田 Akita		青 森 Aomori	
	A_2	B_2	A_2	B_2	A_2	B_2	A_2	B_2	A_2	B_2	A_2	B_2
6	—	—	—	—	0.0173	55.041	0.0153	78.769	0.0176	79.200	—	—
8	—	—	—	—	0.0179	26.883	0.0246	27.931	0.0127	51.753	0.0097	41.296
10	—	—	0.0227	18.583	0.0075	36.661	0.0168	15.914	0.0104	30.965	0.0096	34.322
12	—	—	0.0094	33.583	0.0072	28.525	0.0210	49.043	0.0088	25.291	0.0091	22.914
14	0.0132	16.924	0.0137	15.606	0.0122	11.951	0.0192	2.669	0.0086	18.879	0.0090	16.691
16	0.0157	7.128	0.0137	10.705	0.0166	2.919	0.0143	4.398	0.0110	11.696	0.0091	12.403
18	0.0115	8.440	0.0122	8.812	0.0133	5.208	0.0180	3.220	0.0104	9.332	0.0064	11.261
20	0.0099	7.531	0.0104	8.421	0.0073	10.190	0.0118	3.632	0.0088	8.539	0.0084	6.715
22	0.0124	5.115	0.0107	5.800	0.0099	5.164	0.0114	4.132	0.0096	6.398	0.0070	5.938
24	—	—	—	—	—	—	0.0099	3.978	0.0098	4.925	0.0077	4.812
26	—	—	—	—	—	—	0.0085	3.932	0.0087	4.414	—	—
28	—	—	0.0083	3.761	—	—	0.0117	0.890	—	—	—	—

スギは鉄肥，熊木，土佐，愛知・岐阜，紀州，天城，茨城，北関東・阿武隈，越後・会津，山形，秋田，青森の諸地方で，林分収穫表調製業務資料⁹⁷⁾に天城地方では東京営林局成長量試験資料¹⁵²⁾，秋田地方は収穫試験地資料⁹⁵⁾⁹⁶⁾を加えた。ヒノキは九州，土佐，紀州，飛騨，木曽，愛知・岐阜，大井・天竜，天城，富士・箱根，北関東の諸地方で，林分収穫表調製業務研究資料⁹⁸⁾に大井・天竜，天城，富士・箱根地方では東京営林局成長量試験資料¹⁵²⁾を加えた。アカマツは北九州，土佐西部，四国内海，中国内海，磐城，岩手の諸地方で，林分収穫表調製業務研究資料⁹⁹⁾によった。カラマツは信州，岩手地方で林分収穫表調製業務研究資料⁷⁸⁾¹⁰⁰⁾に信州地方では長野営林局計画課の調査資料と筆者も参画した林業試験場のカラマツ実態調査資料⁷⁾³¹⁾⁴⁸⁾を加えた。

Constant A_1 and B_1 in the reciprocal equation used as the equivalent height curves of stem volume of *Chamaecyparis obtusa* in each district by the data of preparation of yield table⁹⁸⁾ and others¹⁵²⁾.

[illegible]

Table 10. 各地のヒノキの胸高断面積等平均樹高線に関する逆数式の常数

Constant A_2 and B_2 in the reciprocal equation used as the equivalent height curves of basal area of *Chamaecyparis obtusa* in each district by the data of preparation of yield table⁹⁸⁾ and others¹⁵²⁾.

See the explanation in Table 5.

樹高階 Height class (m)	九州 Kyushu		土佐 Tosa		紀州 Kishu		飛騨 Hida		木曽 Kiso	
	A_2	B_2	A_2	B_2	A_2	B_2	A_2	B_2	A_2	B_2
6	0.0173	110.886	—	—	—	—	0.0279	130.012	0.0311	54.089
8	0.0205	26.964	0.0228	27.436	0.0144	53.240	0.0267	29.166	0.0182	35.496
10	0.0189	14.090	0.0161	19.632	0.0129	26.870	0.0206	29.126	0.0227	13.258
12	0.0163	13.067	0.0235	23.506	0.0166	17.020	0.0113	29.769	0.0195	11.361
14	0.0184	10.744	0.0138	9.182	0.0136	14.304	0.0125	19.942	0.0142	14.313
16	0.0163	7.076	0.0150	4.817	0.0115	14.540	0.0145	12.000	0.0167	9.438
18	0.0156	6.124	0.0102	6.087	0.0117	9.448	0.0143	9.103	—	—
20	0.0133	5.035	—	—	—	—	—	—	—	—

樹高階 Height class (m)	大井・天竜 Ooi-Tenryu		愛知・岐阜 Aichi-Gifu		天城 Amagi		富士・箱根 Fuji-Hakone		北関東 Kitakanto	
	A_2	B_2	A_2	B_2	A_2	B_2	A_2	B_2	A_2	B_2
6	—	—	—	—	0.0165	61.253	0.0192	75.966	0.0581	92.043
8	0.0294	16.723	0.0170	48.367	0.0143	39.001	0.0221	17.422	0.0148	63.411
10	0.0216	15.646	0.0135	37.408	0.0133	13.360	0.0183	11.699	0.0172	30.088
12	0.0155	12.469	0.0132	21.254	0.0132	7.000	0.0114	21.129	0.0174	13.853
14	0.0142	9.704	0.0121	19.692	0.0142	3.552	0.0123	17.965	0.0134	14.288
16	0.0129	6.903	0.0127	12.300	—	—	—	—	0.0135	13.020
18	0.0113	6.563	0.0130	7.587	—	—	—	—	0.0094	14.915
20	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0158	6.257

Table 11. 各地のアカマツの幹材積等平均樹高線に関する逆数式の常数

Constant A_1 and B_1 in the reciprocal equation used as the equivalent height curves of stem volume of *Pinus densiflora* in each district by the data of preparation of yield table⁹⁹⁾.

See the explanation in Table 5.

樹高階 Height class (m)	北九州 Kita- kyushyu		土佐西部 Tosaseibu		四国内海 Shikoku- naikai		中国内海 Chyugoku- naikai		近畿 Kinki		磐城 Iwaki		岩手 Iwate	
	A_1	B_1	A_1	B_1	A_1	B_1	A_1	B_1	A_1	B_1	A_1	B_1	A_1	B_1
6	0.00734	14.493	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01222	8.537
8	0.00624	6.130	—	—	—	—	0.00728	10.666	—	—	0.00458	10.433	0.00949	4.239
10	0.00439	3.893	—	—	0.00558	4.626	—	—	0.00249	17.583	0.00362	4.297	0.00606	1.437
12	0.00384	0.722	0.00206	4.472	0.00321	2.532	0.00567	2.301	0.00245	6.448	0.00215	3.700	0.00386	3.434
14	0.00253	1.641	0.00215	2.170	0.00311	1.160	0.00309	3.065	0.00322	1.675	0.00284	1.575	0.00393	0.984
16	0.00331	0.260	0.00159	1.276	0.00188	1.440	—	—	0.00234	1.821	0.00290	0.444	0.00385	0.297
18	0.00166	0.687	0.00131	0.785	0.00209	0.796	0.00230	1.179	0.00242	0.541	0.00197	0.542	0.00224	0.961
20	—	—	0.00106	0.753	0.00195	0.506	0.00263	0.371	0.00138	0.888	0.00135	0.662	0.00195	0.130
22	—	—	0.00132	0.288	—	—	—	—	0.00171	0.449	—	—	—	—

Table 12. 各地のアカマツの胸高断面積等平均樹高線に関する逆数式の常数

Constant A_2 and B_2 in the reciprocal equation used as the equivalent height curves of basal area of *Pinus densiflora* in each district by the data of preparation of yield table⁹⁹⁾.

See the explanation in Table 5.

樹高階 Height class (m)	北九州 Kita-kyushu		土佐西部 Tosaseibu		四国内海 Sikoku-naikai		中国内海 Chyugoku-naikai		近畿 Kinki		磐城 Iwaki		岩手 Iwate	
	A_2	B_2	A_2	B_2	A_2	B_2	A_2	B_2	A_2	B_2	A_2	B_2	A_2	B_2
6	0.0328	55.189	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0344	46.547
8	0.0228	69.183	—	—	—	—	0.0328	54.165	—	—	0.0233	39.511	0.0292	55.121
10	0.0315	8.005	—	—	0.0336	23.966	—	—	0.0287	27.058	0.0204	21.763	0.0262	43.627
12	0.0263	3.266	0.0110	26.128	0.0225	15.123	0.0337	15.092	0.0238	23.931	0.0147	19.933	0.0225	20.148
14	0.0203	10.338	0.0156	17.775	0.0231	8.589	0.0219	22.192	0.0255	6.925	0.0211	10.124	0.0249	5.264
16	0.0241	3.464	0.0118	12.210	0.0150	11.296	—	—	0.0181	12.476	0.0236	2.834	0.0267	1.750
18	0.0151	5.315	0.0120	7.331	0.0170	10.016	0.0192	10.447	0.0205	3.970	0.0192	3.369	0.0179	6.820
20	—	—	0.0108	7.779	0.0190	5.800	0.0206	7.740	0.0144	6.055	0.0132	6.398	0.0211	1.437
22	—	—	0.0106	4.751	—	—	—	—	0.0183	3.401	—	—	—	—

Table 13. 各地のカラマツの幹材積等平均樹高線に関する逆数式の常数

Constant A_1 and B_1 in the reciprocal equation used as the equivalent height curves of stem volume of *Larix leptolepis* in each district by the data of preparation of yield table⁷⁸⁾¹⁰⁰⁾.

See the explanation in Table 5.

樹高階 Height class (m)	信州 Shinshu		岩手 Iwate	
	A_1	B_1	A_1	B_1
6	0.01129	13.689	—	—
8	0.00384	11.261	—	—
10	0.00438	6.965	0.00650	5.801
12	0.00428	2.489	0.00375	2.571
14	0.00196	4.202	0.00201	3.558
16	0.00210	2.123	0.00173	2.691
18	0.00170	1.548	0.00174	1.758
20	0.00176	1.081	0.00173	1.245
22	0.00157	0.802	0.00209	0.668
24	0.00203	0.472	0.00179	0.664
26	0.00136	0.524	—	—

Table 14. 各地のカラマツの胸高断面積等平均樹高線に関する逆数式の常数

Constant A_2 and B_2 in the reciprocal equation used as the equivalent height curves of basal area of *Larix leptolepis* in each district by the data of preparation of yield table⁷⁸⁾¹⁰⁰⁾.

See the explanation in Table 5.

樹高階 Height class (m)	信 州 Shinshu		岩 手 Iwate	
	A_2	B_2	A_2	B_2
6	0.0375	42.175	—	—
8	0.0326	27.194	—	—
10	0.0274	24.401	0.0300	47.861
12	0.0261	14.554	0.0175	26.086
14	0.0188	23.642	0.0140	26.821
16	0.0186	15.687	0.0135	22.200
18	0.0174	7.603	0.0165	14.138
20	0.0189	9.516	0.0163	4.331
22	0.0183	7.900	0.0200	7.784
24	0.0238	5.200	0.0178	8.377
26	0.0209	5.084	—	—

4. 最多密度曲線

i) 自然間引

密度効果の逆数式は、理論的には無限に大きい密度まで考えることができるが、現実には、自然間引

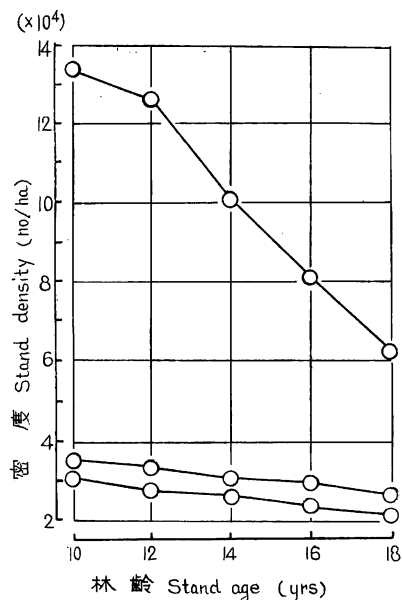


Fig. 6 自然間引の経過 (アカマツ天然生除伐試験林)

Examples of natural thinning in unthinned stands of *Pinus densiflora*.

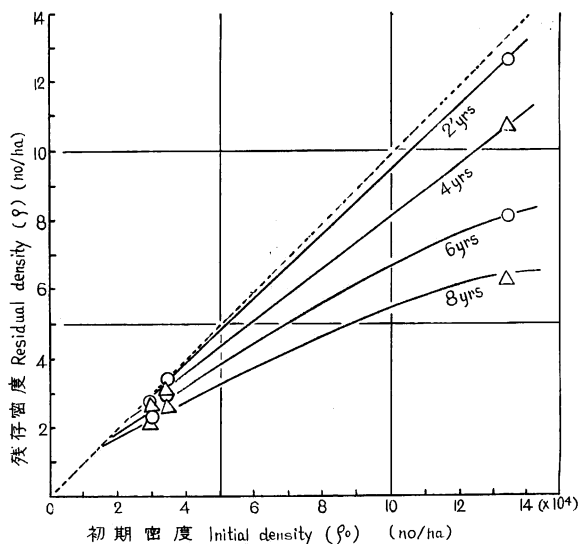


Fig. 7 初期密度と残存密度との関係 (アカマツ天然生除伐試験林, 年数は試験開始時からの年数)

Relation between initial density and residual density in unthinned stands of *Pinus densiflora* (The years in figure indicate the years from beginning of investigation).

(natural thinning) のため、生育段階に応じて上限の密度が存在する。

Fig. 6 にアカマツ天然生除伐試験林⁹⁾の無処理区の自然間引による本数の経過を示す。Fig. 7 は Fig. 6 を初期密度と残存密度の関係に書きなおしたものであるが、これから、初期密度が違っても十分に時間が経ると、それぞれの生育段階に応じある一定の密度に収斂していく傾向のあることがうかがえる。

吉良ら⁶⁸⁾、篠崎¹²⁴⁾ は、1 年生作物の密度試験から、自然間引について次のような一般的な関係のあることを示した。

初期密度 ρ_0 だけをかえて苗を畑に植え、密度の減少を起こるにまかせると次のような規則性が認められる。

- 初期密度 ρ_0 が大きいほど密度の減少は大きい。
- ある時期における現実密度 ρ は ρ_0 が大きいほど大きい。
- ある時期における ρ には上限がある (これを ρ^* とする)。
- 十分に時間がたつと ρ は ρ_0 に関係なくある値に収斂する。

このような規則性を次のように説明している。すなわち、 ρ と ρ_0 の間には

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_0} + \varepsilon(t) \quad \dots\dots\dots (27)$$

が成立する。ただし、 $\varepsilon(t)$ は ρ_0 に無関係な時間だけの函数であつて、自然間引を規定する主要な量である。ここで $\rho_0 \rightarrow \infty$ とすると

$$\rho^* = 1/\varepsilon$$

となり、 ρ は ρ_0 に関係なく $1/\varepsilon$ に収斂し、この逆数が理論的なそれぞれの生育段階に応じた密度の上限値

といふことができる。

(27) 式が成立していれば $1/\rho$ と $1/\rho_0$ とは 45° の傾きの直線関係になければならない。Fig. 7 を書きかえてこの関係を Fig. 8 に示す。

また初期密度 ρ_0 ではじまり、自然間引を起こしながら生育していくとき、その生育密度とそのときの平均幹材積 v の関係は経験的に SHINOZAKI and KIRA¹²⁶⁾ のいう C—D 曲線の第 VI 型、すなわち

$$1/\rho = Av + B \quad \dots\dots\dots (28)$$

で示されることが知られている¹⁴³⁾¹⁴⁴⁾。

さきに示したアカマツ除伐試験林の資料によりこの関係を Fig. 9 に示す。これらの関係はそれぞれの初期密度 ρ_0 に対し次式で示される。

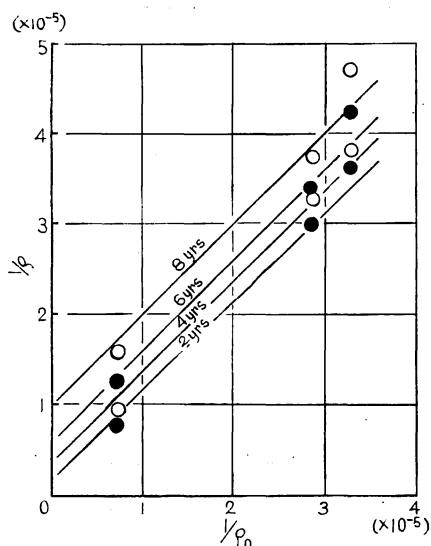


Fig. 8 $1/\rho_0$ と $1/\rho$ の関係の時間的経過 (アカマツ天然生除伐試験林, ρ_0 : 初期密度, ρ : 残存密度)

Relation between $1/\rho_0$ and $1/\rho$ in unthinned stands of *Pinus densiflora* (ρ_0 : Initial density, ρ : Residual density. The years in figure indicate the years from beginning of investigation).

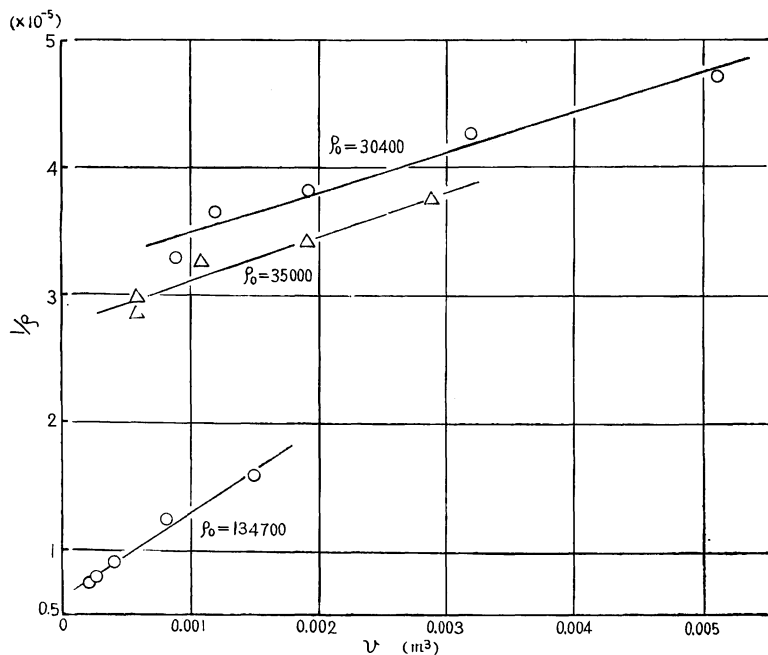


Fig. 9 ρ (密度) — v (幹材積) 関係における自然間引の経過
(アカマツ天然生除伐試験林)

The course of natural thinning on the $1/\rho$ (Stand density)
— v (Stem volume) relation in unthinned stands of *Pinus densiflora*.

ρ_0 (本/ha)		
134,700	$1/\rho = 0.006722v + 0.00000625$	}(29)
35,000	$1/\rho = 0.003441v + 0.00002764$	
30,400	$1/\rho = 0.003158v + 0.00003166$	

(28) 式の A , B はまた、後に述べる最多密度曲線と初期密度からその値を求めることができる¹⁴⁴⁾。

ii) 最多密度曲線

現実密度にはその生育段階に応じ上限の密度のあることを前節で述べた。この上限の密度に達した個体群の密度と、平均個体の大きさにも一定の関係がみられる。

このような関係を最初に示したのは REINEKE⁹⁴⁾ で、収穫表調査資料の平均胸高断面直径 (D) と密度 (N : エーカーあたり本数) を両対数軸上にプロットすると、直径に応じた密度の上限を樹種に関係なく同一の傾きの直線で示すことができるとして、この線を基準線 (reference curve) とよび次式を示した。

$$\log N = -1.605 \log D + K \quad \text{.....(30)}$$

K : 樹種により決まる常数

また、本邦主要樹種の平均胸高直径 D と上限の密度、すなわち最大本数密度 N_m の関係を坂口¹¹¹⁾は次のように示している。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{ス　　ギ} & \log N_m = -1.6307 \log D + 5.5010 \\ \text{ヒ　ノ　キ} & \log N_m = -1.3563 \log D + 5.1365 \\ \text{アカマツ} & \log N_m = -1.6383 \log D + 5.3330 \\ \text{カラマツ} & \log N_m = -1.7273 \log D + 5.3773 \end{array} \right\} \dots\dots\dots(31)$$

これらと同じように、十分な密度をもった個体群の密度 ρ と平均個体重 ω との間にも一定の関係がみられる。この関係は草木植物など高等植物の間で広く認められている基本的な現象で、

$$\omega = K\rho^{-a} \dots\dots\dots(32)$$

K, a : 常数

により示され、吉良ら⁶³⁾は a の値が種に関係なくほぼ $1.5=3/2$ で一定であることから、この関係を自然の同種群落の個体密度に関する $3/2$ 乗則、または単に乗則と呼んだ。(30), (31) 式で示される関係も $3/2$ 乗則で示される関係の一つのあらわれとみることができる。

この $3/2$ 乗則と同様な関係は十分な密度をもった林分の密度 ρ と、平均幹材積 v または単位面積あたりの幹材積 V の間にもよくなりたつことが知られている。すなわち

$$v = K\rho^{-a} \dots\dots\dots(33)$$

$$\text{または} \quad V = K\rho^{(1-a)} \dots\dots\dots(34)$$

K, a : 常数

幹材積のこの関係は樹種ごとに密度に対する特性をあらわすものとして、吉良ら⁶³⁾により特性曲線と呼ばれ、また只木により full density curve¹⁴⁰⁾、自然間引線¹³⁸⁾、幹材積に関する $3/2$ 乗線¹⁴²⁾ などとも呼ばれたが、四手井¹²²⁾は最多密度曲線と呼んでいる。筆者は前に full density curve をもちいたが、最近四手井にならい最多密度曲線をもちいている。浅田¹⁰⁾はこれまでに報告された樹種別の最多密度曲線を取りまとめ示している。

5. 密度効果式の常数 A, B の生育にともなう変化の近似

密度と単木または単位面積あたりの量を予測するためには逆数式の 常数 A, B が生育にともないどのように変わるかを知らなければならない。しかしながら、 A, B はすでに述べたように Table 1 に示した複雑な内容を持ち、また A, B を規定する τ, λ, Y と時間 t との函数形が求められても、 λN 型の A の積分が一般に不可能と考えられるので¹²⁷⁾、このような解析によって、逆数式によりいろいろな密度の林分成長を予測することは困難である。

このような立場から筆者は逆数式 $1/w = A\rho + B$ の常数 A, B が林齢 t または平均樹高 H と両対数軸上で近似的に直線関係を示すことを見いだした⁴⁾⁶⁾。

すなわち

$$\left. \begin{array}{l} A = aH^{-b} \\ B = a'H^{-b'} \end{array} \right\} \dots\dots\dots(35)$$

または、

$$\left. \begin{array}{l} A = ct^{-d} \\ B = c't^{-d'} \end{array} \right\} \dots\dots\dots(36)$$

$a, b, a', b', c, d, c', d'$: 常数

これらの関係が求められると生育段階に応じて A , B の値を知ることができる。このような関係は (22) 式で示した幹材積の $1/v = A_1\rho + B_1$ や (24) 式で示した胸高断面積の $1/g = A_2\rho + B_2$ の A_1 , B_1 , A_2 , B_2 についても同様になり立つ。これらの関係は本報において、今後も多く取り扱われるので、符号化して次のように示しておく。すなわち

$$A_1 = a_1 H^{-b_1} \quad \dots\dots\dots (37)$$

$$B_1 = a_1' H^{-b_1'} \quad \dots\dots\dots (38)$$

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= c_1 t^{-d_1} \\ B_1 &= c_1' t^{-d_1'} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (39)$$

$$A_2 = a_2 H^{-b_2} \quad \dots\dots\dots (40)$$

$$B_2 = a_2' H^{-b_2'} \quad \dots\dots\dots (41)$$

$$\left. \begin{aligned} A_2 &= c_2 t^{-d_2} \\ B_2 &= c_2' t^{-d_2'} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (42)$$

$a_1, b_1, a_1', b_1', c_1, d_1, c_1', d_1', a_2, b_2, a_2', b_2', c_2, d_2, c_2', d_2'$: 常数

(35)~(42) 式の関係は Fig. 10~11, Table 15 に示すように密度効果式の適用例 (Fig. 2~3, Table 5 参照) で示した密度試験の例も、また Table 16 に示すように生育段階が等しく密度が違う例 (Table 6 参照) でも、さらに Fig. 12~19, Table 17~24 に示すように等平均樹高線 (Table 7~14) のばあいにもよくなりたつ。

したがって (35)~(42) 式の関係を求めることにより、生育段階に応じた密度効果を知ることができ、応用的には林分の密度管理に関する基準数値を計算することができる。応用的な意味を含めて林齢 t に対する関係と平均樹高 H に対する関係を比べてみると、 t との関係は、ある環境条件 (地位) における密度効果式の常数の時間的な経過を示すから、地位が変化すればこの関係もかわることになり、それぞれの地位に応じた関係を求めておく必要があり、問題は複雑になる。また、現在ある資料で、地位に応じこの

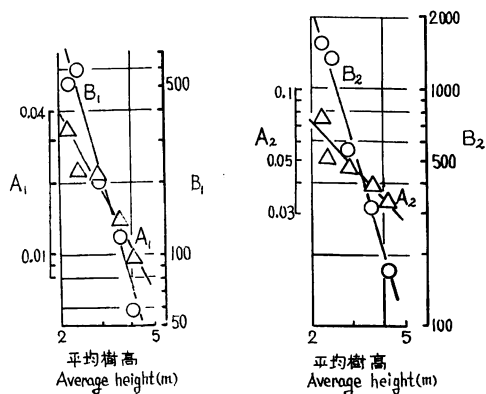


Fig. 10 密度効果の逆数式の常数と樹高との関係 (アカマツ天然生除伐試験林)

Relation between the constants of reciprocal equation of density effect and average height in the stand density experiment plots of *Pinus densiflora*.

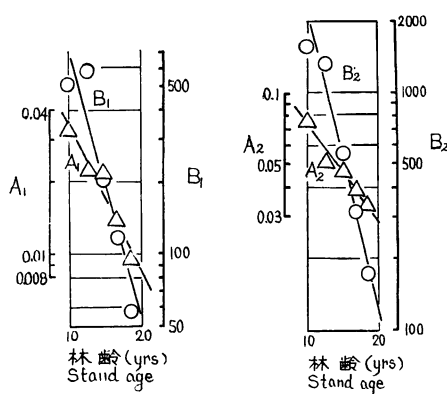


Fig. 11 密度効果の逆数式の常数と林齢との関係 (アカマツ天然生除伐試験林)

Relation between the constants of reciprocal equation of density effect and stand age in the stand density experiment plots of *Pinus densiflora*.

Table 15. 密度効果の逆数式の常数と樹高および林齢との関係 (アカマツ天然生除伐試験林)

Relation between the constants of reciprocal equation of density

effect and average height or stand age (stand density

experiment plot of *Pinus densiflora*).

These relations are shown by following equations.

$$\left. \begin{array}{l} \log A = -b \log H + \log a \\ \log B = -b' \log H + \log a' \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} \log A = -d \log t + \log c \\ \log B = -d' \log t + \log c' \end{array} \right\}$$

 A, B : Constants of reciprocal equation of density effect. H : Average height, t : Stand age, $a, b, a', b', c, d, c', d'$: Constants.

See Table 5.

樹高との関係 Height relations	幹材積 Stem volume	$\log A_1 = -1.7032 \log H - 0.9366$ $\log B_1 = -3.5440 \log H + 4.0085$	(-0.9686) (-0.9786)
	胸高断面積 Basal area	$\log A_2 = -1.0823 \log H - 0.8180$ $\log B_2 = -3.4480 \log H + 4.3916$	(-0.9383) (-0.9954)
林齢との関係 Stand age relations	幹材積 Stem volume	$\log A_1 = -1.9862 \log t + 0.5161$ $\log A_1 = -3.9804 \log t + 6.5865$	(-0.9688) (-0.9431)
	胸高断面積 Basal area	$\log A_2 = -1.3201 \log t + 0.1711$ $\log A_2 = -3.9345 \log t + 7.2341$	(-0.9821) (-0.9746)

() は相関係数を示す。The numbers in parentheses indicate correlation coefficient.

Table 16. 密度効果の逆数式の常数と樹高および林齢との関係 (スギ保育形式調査資料)

Relation between the constants of reciprocal equation of density effect

and average height or stand age (*Cryptomeria japonica*).

See Table 6 and the explanation in Table 15.

樹高との関係 Height relations	地上部重 Above-ground part weight	$\log A = -1.5385 \log H - 0.4468$ $\log B = -2.3558 \log H + 2.9908$	(-0.9949) (-0.9787)
	幹重 Stem weight	$\log A = -1.4584 \log H - 0.4663$ $\log B = -3.6281 \log H + 4.6758$	(-0.9968) (-0.9811)
	幹材積 Stem volume	$\log A_1 = -1.3879 \log H - 1.0336$ $\log B_1 = -3.7042 \log H + 4.2950$	(-0.9964) (-0.9899)
	胸高断面積 Basal area	$\log A_2 = -0.5706 \log H - 1.0406$ $\log B_2 = -3.4884 \log H + 4.6415$	(-0.9743) (-0.9709)
林齢との関係 Stand age relations	地上部重 Above-ground part weight	$\log A = -1.2809 \log t - 0.3600$ $\log B = -1.9273 \log t + 3.0752$	(-0.9795) (-0.9468)
	幹重 Stem weight	$\log A = -1.2016 \log t - 0.4020$ $\log B = -3.1040 \log t + 4.9994$	(-0.9711) (-0.9926)
	幹材積 Stem volume	$\log A_1 = -1.1428 \log t - 0.9727$ $\log B_1 = -3.1548 \log t + 4.6050$	(-0.9702) (-0.9790)
	胸高断面積 Basal area	$\log A_2 = -0.4868 \log t - 0.9917$ $\log B_2 = -2.9630 \log t + 4.9220$	(-0.9829) (-0.9751)

() は相関係数を示す。The numbers in parentheses indicate correlation coefficient.

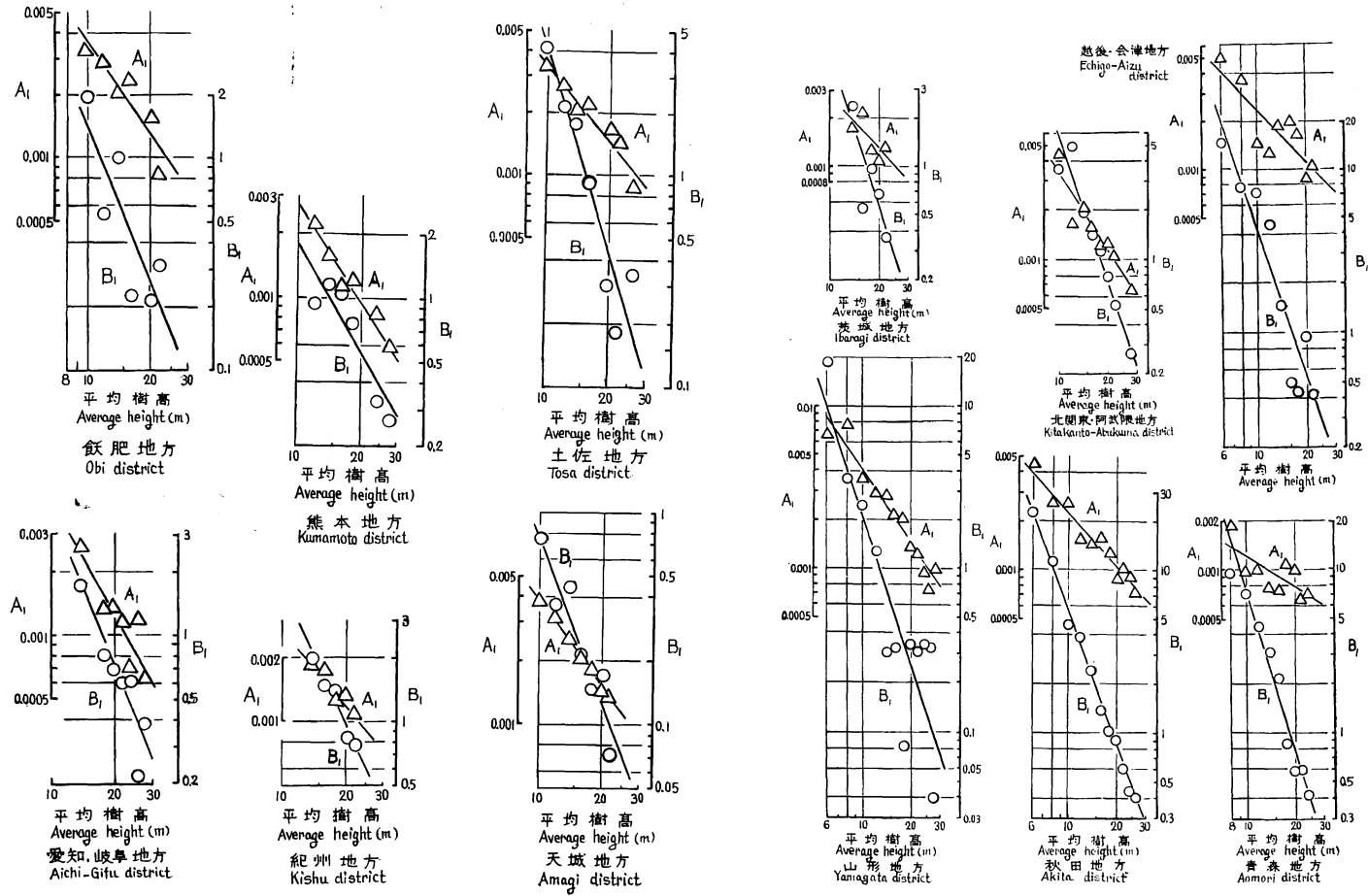


Fig. 12 スギの平均樹高と逆数式の常数の関係 (幹材積平均樹高線の場合)
 Relation between the constants of reciprocal equation of density effect and height (The cases of equivalent height curve of stem volume in each district of *Cryptomeria japonica*).

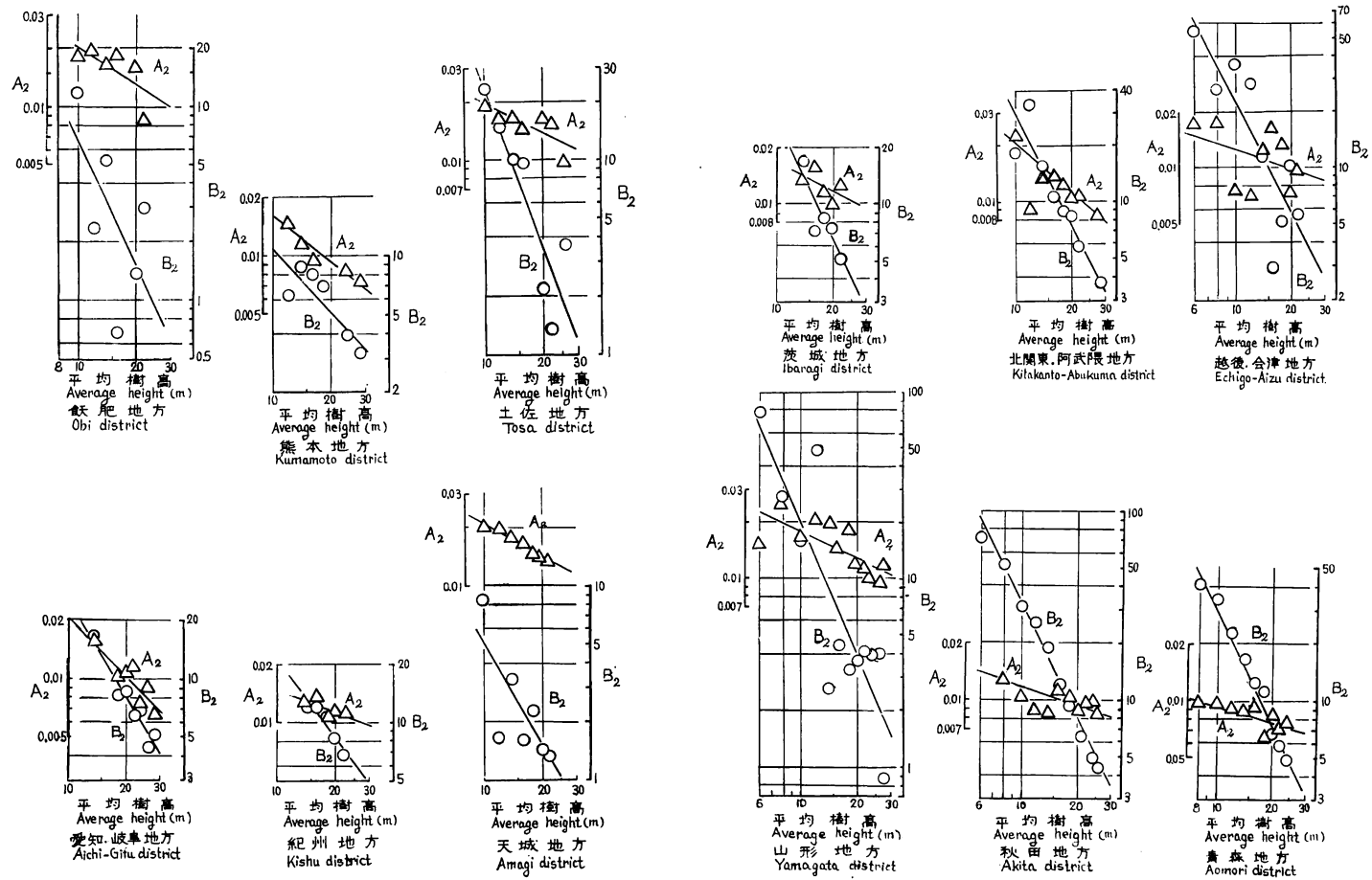


Fig. 13 スギの平均樹高と逆数式の常数の関係 (断面積等平均樹高線の場合)
 Relation between the constants of reciprocal equation of density effect and height (The cases of equivalent height curve of basal area in each district of *Cryptomeria japonica*).

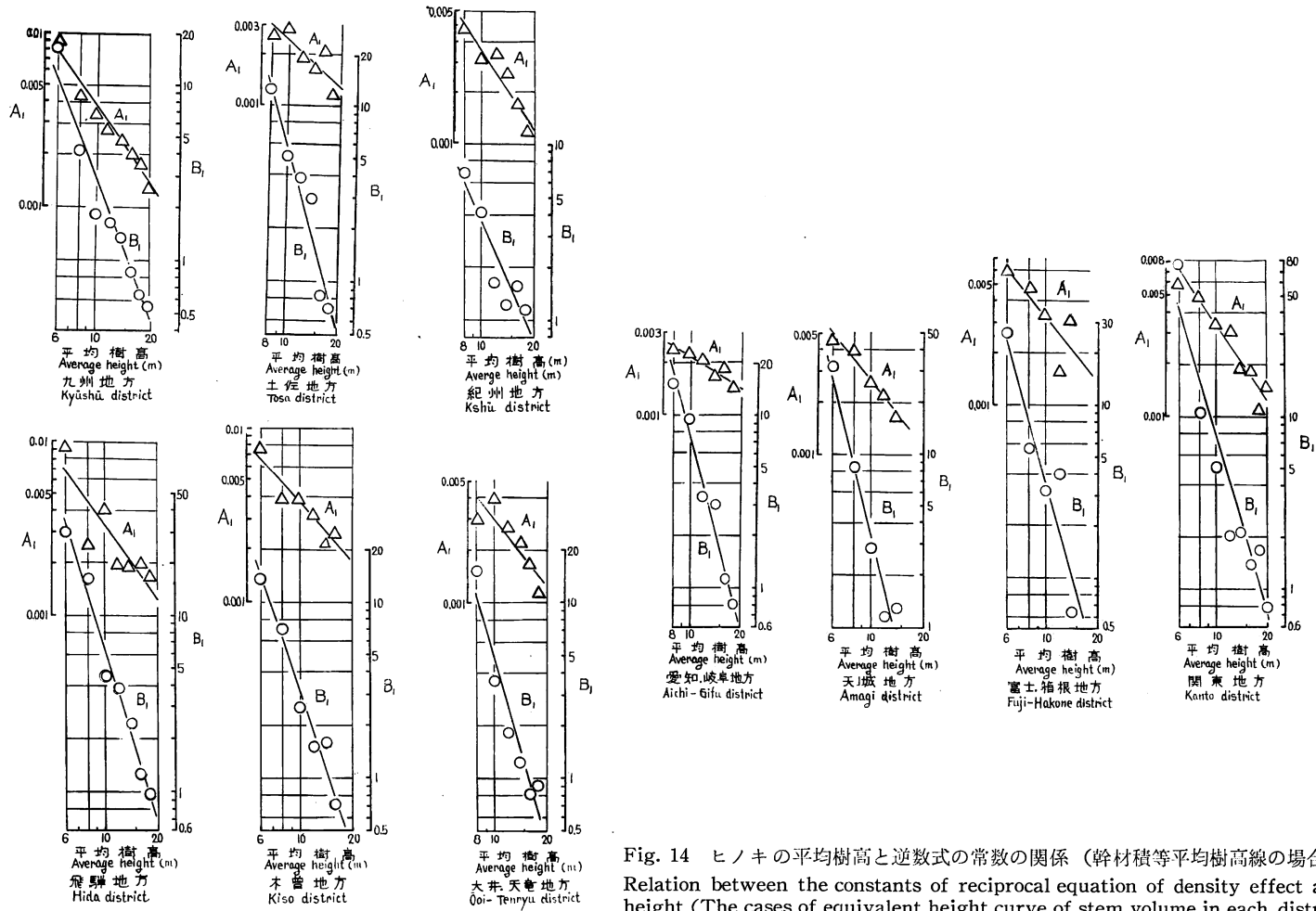


Fig. 14 ヒノキの平均樹高と逆数式の常数の関係 (幹材積等平均樹高線の場合)
Relation between the constants of reciprocal equation of density effect and height (The cases of equivalent height curve of stem volume in each district of *Chamaecyparis obtusa*).

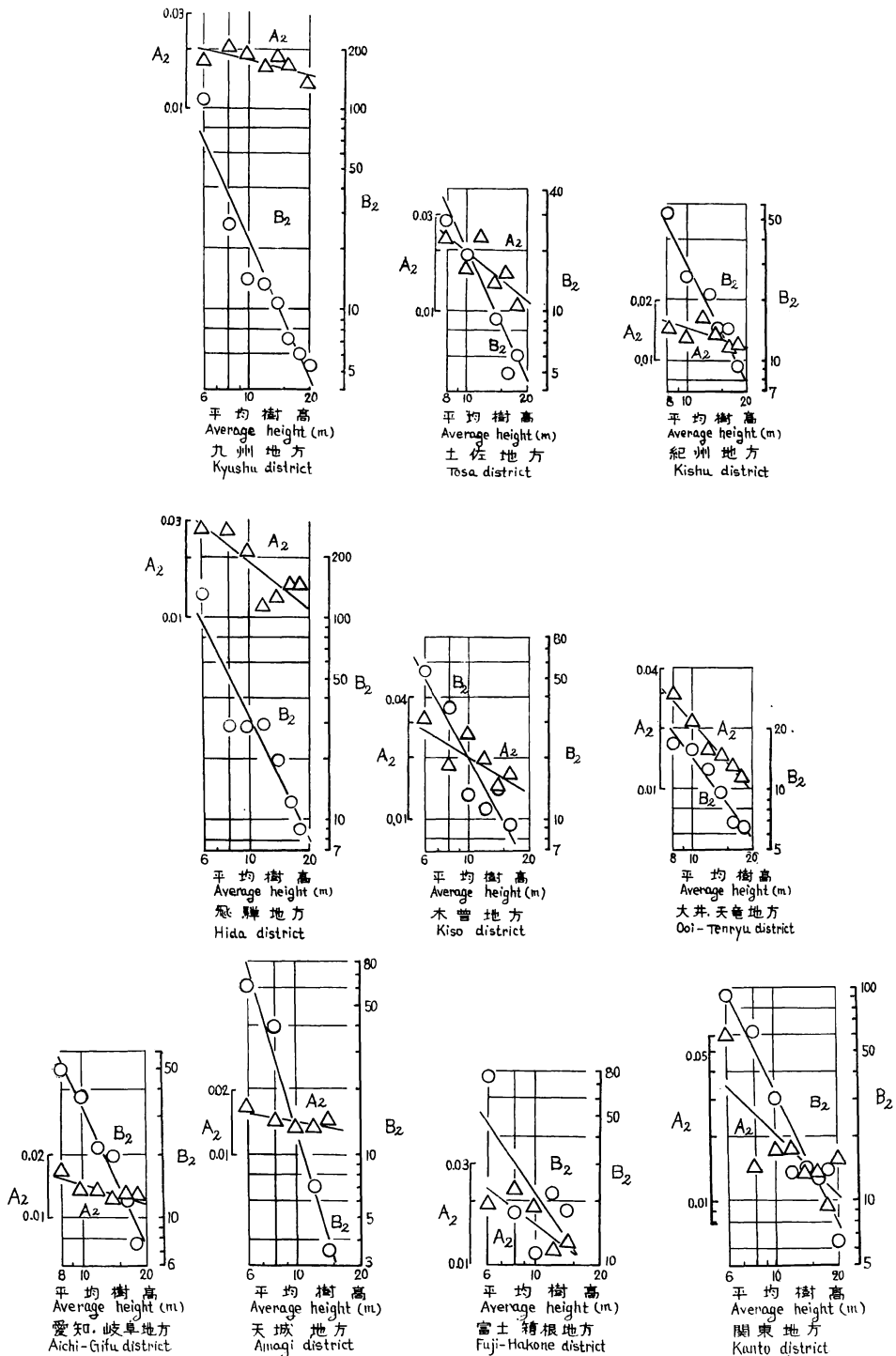


Fig. 15 ヒノキの平均樹高と逆数式の常数の関係 (断面積等平均樹高線の場合)
Relation between the constants of reciprocal equation of density effect and height (The cases of equivalent height curve of basal area in each district of *Chamaecyparis obtusa*).

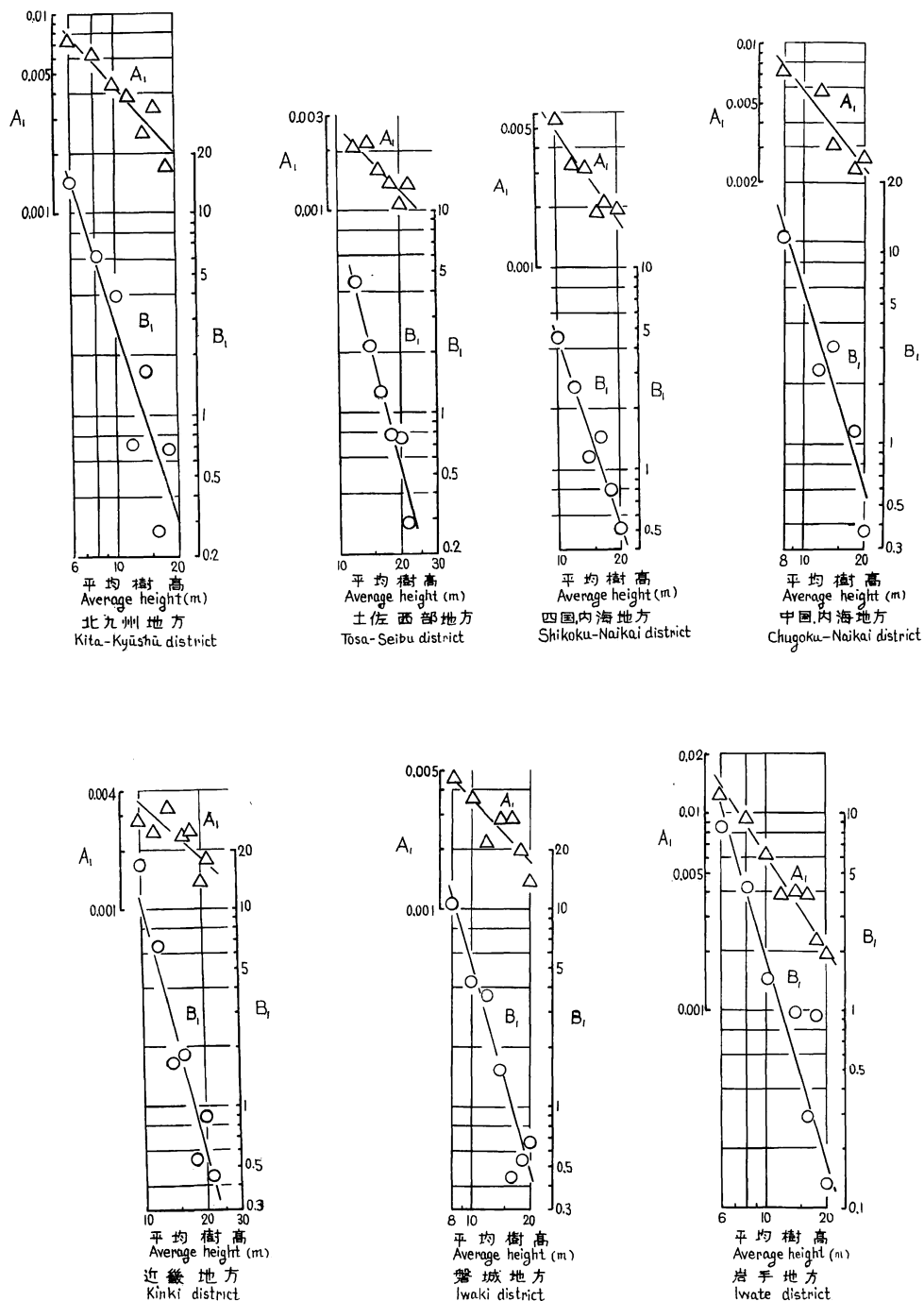


Fig. 16 アカマツの平均樹高と逆数式の常数の關係 (幹材積等平均樹高線の場合)
Relation between the constants of reciprocal equation of density effect and height (The cases of equivalent height curve of stem volume in each district of *Pinus densiflora*).

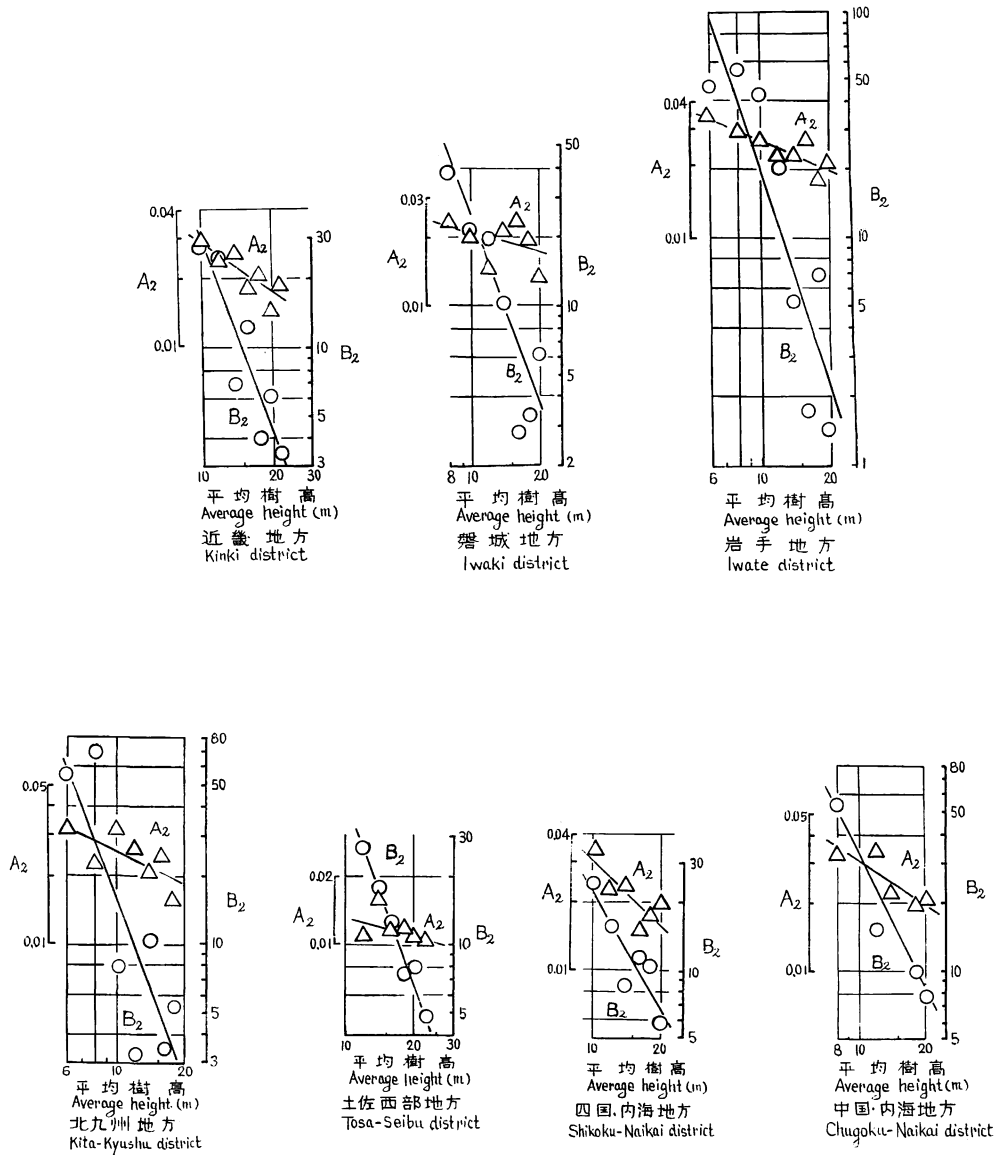


Fig. 17 アカマツの平均樹高と逆数式の常数の関係 (断面積等平均樹高線の場合)

Relation between the constants of reciprocal equation of density effect and height (The cases of equivalent height curve of basal area in each district of *Pinus densiflora*).

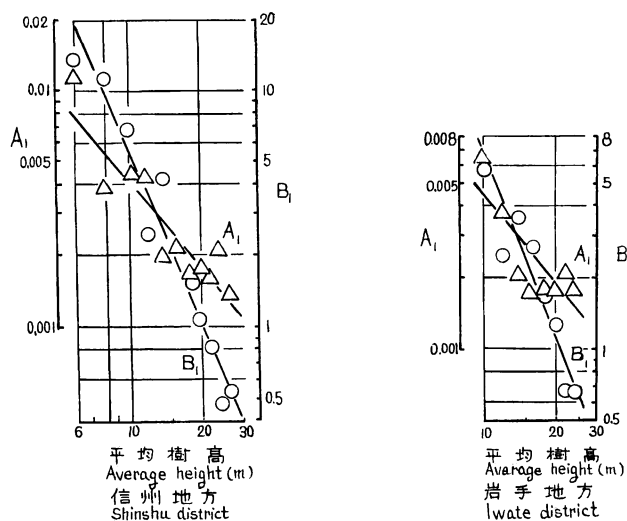


Fig. 18 カラマツの平均樹高と逆数式の常数の関係
(幹材積等平均樹高線の場合)

Relation between the constants of reciprocal equation of density effect and height (The cases of equivalent height curve of stem volume in each district of *Larix leptolepis*).

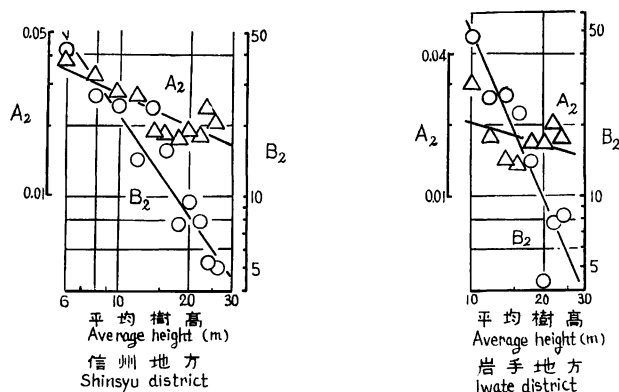


Fig. 19 カラマツの平均樹高と逆数式の常数の関係
(断面積等平均樹高線の場合)

Relation between the constants of reciprocal equation of density effect and height (The cases of equivalent height curve of basal area in each district of *Larix leptolepis*).

Table 17. 各地のスギの幹材積等平均樹高線を示す密度効果式の常数と樹高との関係
Relations between average height and constant A_1 or B_1 in the reciprocal equation used as the equivalent height curve of stem volume of *Cryptomeria japonica* in each district. These relations are shown by following equations.

$$\log A_1 = -b_1 \log H + \log a_1, \quad \log B_1 = -b_1' \log H + \log a_1'$$

A_1, B_1 : Constants of reciprocal equation in equivalent height curve of stem volume, H : average height.
 a_1, a_1', b_1, b_1' : Constants.

This table was calculated by the values in Table 7. Corrected values of $\log a_1$ and $\log a_1'$ by correction factor are shown in Table 28.

地 方 District	A_1			B_1		
	b_1	$\log a_1$	対数による 残差分散 Variance of logarithmic value	b_1'	$\log a_1'$	対数による 残差分散 Variance of logarithmic value
飫 肥 Obi	1.5199	-0.9159	0.010339	2.4185	2.5544	0.057817
熊 本 Kumamoto	1.4939	-1.0801	0.002603	1.6737	1.9224	0.015277
土 佐 Tosa	1.1987	-1.2789	0.003674	3.2928	3.9143	0.033703
愛 知・岐 阜 Aichi-Gifu	1.7688	-0.5911	0.009633	2.4176	2.9911	0.017136
紀 州 Kishu	1.2420	-1.3011	0.001586	2.1706	2.7988	0.002148
天 城 Amagi	1.4023	-0.9954	0.000434	2.6156	2.5000	0.017901
茨 城 Ibaragi	1.1388	-1.4171	0.008517	3.1887	3.8832	0.045293
北関東・阿武隈 Kitakanto-Abukuma	1.5482	-1.9409	0.008601	2.8107	3.5272	0.012962
越 後・会 津 Echigo-Aizu	1.0762	-1.5559	0.021000	2.9770	3.6084	0.051535
山 形 Yamagata	1.5017	-0.8909	0.006629	3.0517	3.3654	0.118039
秋 田 Akita	1.1037	-1.5493	0.002490	2.7973	3.5430	0.002482
青 森 Aomori	0.6231	-2.2963	0.013406	3.2072	4.0578	0.009642
全 国 平 均 Average of all districts	1.3014			2.7185		

Table 18. 各地のスギの胸高断面積等平均樹高線を示す密度効果式の常数と樹高との関係

Relations between average height and constant A_2 or B_2 in the reciprocal equation used as the equivalent height curve of basal area of *Cryptomeria japonica* in each district. These relations are shown by following equations.

$$\log A_2 = -b_2 \log H + \log a_2, \quad \log B_2 = -b_2' \log H + \log a_2'$$

A_2, B_2 : Constants of reciprocal equation in equivalent height curve of basal area,

H : Average height, a_2, a_2', b_2, b_2' : Constants.

This table was calculated by the values in Table 8. Corrected values of $\log a_2$ and $\log a_2'$ by correction factor are shown in Table 29.

地 方 District	A_2			B_2		
	b_2	$\log a_2$	対数による 残差分散 Variance of logarithmic value	b_2'	$\log a_2'$	対数による 残差分散 Variance of logarithmic value
飫 肥 Obi	0.6476	-1.0394	0.011938	2.1461	2.9818	0.128342
熊 本 Kumamoto	0.8565	-0.9216	0.002341	1.0561	2.0912	0.009104
土 佐 Tosa	0.4666	-1.2513	0.004875	2.7173	4.0904	0.068602
愛 知・岐 阜 Aichi-Gifu	1.0089	-0.6704	0.004646	1.6098	3.0106	0.003942
紀 州 Kishu	0.3750	-1.4617	0.001051	1.3262	2.6495	0.002175
天 城 Amagi	0.5656	-1.1144	0.000148	1.7785	2.4716	0.040387
茨 城 Ibaragi	0.5152	-1.2628	0.005013	2.1048	3.5492	0.013183
北関東・阿武隈 Kitakanto-Abukuma	0.7204	-1.0343	0.008940	1.9175	3.3724	0.012893
越 後・会 津 Echigo-Aizu	0.3431	-1.5616	0.026367	1.9710	3.3221	0.063346
山 形 Yamagata	0.4789	-1.2698	0.010020	2.3698	3.6589	0.091713
秋 田 Akita	0.3409	-1.5893	0.004091	2.0218	3.5259	0.001745
青 森 Aomori	0.3005	-1.7216	0.001928	2.1279	3.6443	0.001820
全 国 平 均 Average of all districts	0.5516			1.9289		

Table 19. 各地のヒノキの幹材積等平均樹高線を示す密度効果式の常数と樹高との関係

Relations between average height and constant A_1 or B_1 in the reciprocal equation used as the equivalent height curve of stem volume of *Chamaecyparis obtusa* in each district.

See the equations of explanation in Table 17. This table was calculated by the values in Table 9. Corrected values of $\log a_1$ and $\log a_1'$ by correction factor are shown in Table 30.

地 方 District	A_1			B_1		
	b_1	$\log a_1$	対数による 残差分散 Variance of logarithmic value	b_1'	$\log a_1'$	対数による 残差分散 Variance of logarithmic value
九 州 Kyushu	1.4288	-1.0082	0.002567	2.6017	3.0631	0.014838
土 佐 Tosa	0.9154	-1.7059	0.006930	3.5367	4.2942	0.007984
紀 州 Kishu	1.5795	-0.8685	0.007077	2.2318	2.7816	0.018980
飛 騨 Hida	1.3558	-1.1403	0.022073	3.1969	3.9954	0.007854
木 曾 Kiso	1.1464	-1.2872	0.005194	2.9597	3.4522	0.009886
大井・天竜 Ooi-Tenryu	1.2925	-1.2322	0.011166	3.4709	4.1367	0.025103
愛知・岐阜 Aichi-Gifu	0.5664	-2.0976	0.000955	3.7565	4.6448	0.011213
天 城 Amagi	1.2375	-1.3455	0.001618	4.0948	4.6342	0.020723
富士・箱根 Fuji-Hakone	1.1903	-1.3073	0.024433	3.6905	4.2413	0.063138
北 関 東 Kita-Kanto	1.4495	-1.2041	0.004688	3.3535	4.1990	0.043134
全 国 平 均 Average of all districts	1.2162			3.2893		

Table 20. 各地のヒノキの胸高断面面積等平均樹高線を示す密度効果式の常数と樹高との関係

Relations between average height and constant A_2 or B_2 in the reciprocal equation used as the equivalent height curve of basal area of *Chamaecyparis obtusa* in each district.

See the equations of explanation in Table 18. This table was calculated by the values in Table 10. Corrected values of $\log a_2$ and $\log a_2'$ by correction factor are shown in Table 31.

地 方 District	A_2			B_2		
	b_2	$\log a_2$	対数による 残差分散 Variance of logarithmic value	b_2'	$\log a_2'$	対数による 残差分散 Variance of logarithmic value
九 州 Kyushu	0.2199	-1.5325	0.002023	2.3115	3.6432	0.016365
土 佐 Tosa	0.8132	-0.8971	0.009408	2.2080	3.5132	0.024106
紀 州 Kishu	0.2647	-1.5846	0.003031	1.9366	3.4045	0.005601

Table 20. (つづき) (Continued).

地 方 District	A_2			B_2		
	b_2	$\log a_2$	対数による 残差分散 Variance of logarithmic value	b_2'	$\log a_2'$	対数による 残差分散 Variance of logarithmic value
飛 騨 Hida	0.7791	-0.9444	0.009256	2.0372	3.5515	0.021723
木 曽 Kiso	0.6077	-1.0857	0.005766	1.7746	3.0727	0.016145
大 井・天 竜 Ooi-Tenryu	1.1627	-0.5067	0.000928	1.2851	2.4359	0.002460
愛 知・岐 阜 Aichi-Gifu	0.3117	-1.5272	0.001194	2.2122	3.7370	0.005267
天 城 Amagi	0.2040	-1.6456	0.000893	3.4691	4.5841	0.010840
富 士・箱 根 Fuji-Hakone	0.7019	-1.1045	0.007628	1.4531	2.7797	0.068072
北 関 東 Kita-Kanto	0.9741	-0.7151	0.026751	2.0619	3.5619	0.016532
全 国 平 均 Average of all districts	0.6039			2.0749		

Table 21. 各地のアカマツの幹材積等平均樹高線を示す密度効果式の常数と樹高との関係

Relations between average height and constant A_1 or B_1 in the reciprocal equation used as the equivalent height curve of stem volume of *Pinus densiflora* in each district.

See the equations of explanation in Table 17. This table was calculated by the values in Table 11. Corrected values of $\log a_1$ and $\log a_1'$ by correction factor are shown in Table 32.

地 方 District	A_1			B_1		
	b_1	$\log a_1$	対数による 残差分散 Variance of logarithmic value	b_1'	$\log a_1'$	対数による 残差分散 Variance of logarithmic value
北 九 州 Kita-Kyushu	1.1637	-1.1996	0.009811	3.2889	3.7273	0.074484
土 佐 西 部 Tosa-Seibu	1.0884	-1.4856	0.003896	4.1074	5.0708	0.008384
四 国 内 海 Shikoku-Naikai	1.5052	-0.8091	0.005639	2.9771	3.6157	0.009569
中 国 内 海 Chugoku-Naikai	1.3017	-0.9426	0.007750	3.2214	3.9660	0.042246
近 畿 Kinki	0.9838	-1.4612	0.009518	3.9666	4.9493	0.035507
磐 城 Iwaki	1.0689	-1.3821	0.009656	3.4891	4.1636	0.034417
岩 手 Iwate	1.5225	-0.6994	0.004159	2.9507	3.2989	0.094720
全 国 平 均 Average of all district	1.2335			3.4287		

Table 22. 各地のアカマツの胸高断面積等平均樹高線を示す密度効果式の常数と樹高との関係
Relations between average height and constant A_2 or B_2 in the reciprocal equation used as the equivalent height curve of basal area of *Pinus densiflora* in each district.

See the equations of explanation in Table 18. This table was calculated by the values in Table 12. Corrected values of $\log a_2$ and $\log a_2'$ by correction factor are shown in Table 33.

地 方 District	A_2			B_2		
	b_2	$\log a_2$	対数による 残差分散 Variance of logarithmic value	b_2'	$\log a_2'$	対数による 残差分散 Variance of logarithmic value
北 九 州 Kita-Kyushu	0.4973	-1.0968	0.007420	2.6510	3.8294	0.111207
土 佐 西 部 Tosa-Seibu	0.2760	-1.5892	0.015785	2.7314	4.3672	0.012152
四 国 内 海 Shikoku-Naikai	0.9544	-0.5715	0.005352	1.6891	3.0183	0.010846
中 国 内 海 Chugoku-Naikai	0.6342	-0.8841	0.004471	1.9665	3.4690	0.015957
近 畿 Kinki	0.6890	-0.8629	0.004296	2.7154	4.1879	0.037651
磐 城 Iwaki	0.3059	-1.3774	0.009151	2.6918	4.0373	0.047902
岩 手 Iwate	0.4111	-1.1582	0.002569	3.1262	4.4255	0.107513
全 国 平 均 Average of all districts	0.5383			2.5102		

Table 23. 各地のカラマツの幹材積等平均樹高線を示す密度効果式の常数と樹高との関係
Relations between average height and constant A_1 or B_1 in the reciprocal equation used as the equivalent height curve of stem volume of *Larix leptolepis* in each district.

See the equations of explanation in Table 17. This table was calculated by the values in Table 13. Corrected values of $\log a_1$ and $\log a_1'$ by correction factor are shown in Table 34.

地 方 District	A_1			B_1		
	b_1	$\log a_1$	対数による 残差分散 Variance of logarithmic value	b_1'	$\log a_1'$	対数による 残差分散 Variance of logarithmic value
信 州 Shinshu	1.2348	-1.1635	0.012892	2.4169	3.1679	0.016380
岩 手 Iwate	1.3037	-1.0455	0.017092	2.4004	3.1806	0.015712
全 国 平 均 Average of all districts	1.2693			2.4087		

Table 24. 各地のカラマツの胸高断面積等平均樹高線を示す密度効果式の常数と樹高との関係
Relations between average height and constant A_2 or B_2 in the reciprocal equation used as the equivalent height curve of basal area of *Larix leptolepis* in each district.

See the equations of explanation in Table 18. This table was calculated by the values in Table 14. Corrected values of $\log a_2$ and $\log a_2'$ by correction factor are shown in Table 35.

地 方 District	A_2			B_2		
	b_2	$\log a_2$	対数による 残差分散 Variance of logarithmic value	b_2'	$\log a_2'$	対数による 残差分散 Variance of logarithmic value
信 州 Shinshu	0.4488	-1.1175	0.004680	1.4185	2.7748	0.012230
岩 手 Iwate	0.3059	-1.3815	0.011617	2.3403	4.0241	0.028709
全 国 平 均 Average of all districts	0.3774			1.8794		

ような解析をすることは困難である。これに対し、樹高 H との関係は、Fig. 4~5 に示したように、等平均樹高線は林齢・地位に無関係であるから、この関係も林齢、地位に無関係になりたつ。したがって、地位がちがう場合の林齢に応じた等平均樹高線は、その地位で林齢と樹高の関係が求められれば容易に描くことができ、この値は収穫表の地位・林齢に応じた樹高、あるいは地位指数曲線を参考にすれば求められる⁹⁰⁾。したがって、密度管理の基礎として生育段階に応じ、密度効果線または等平均樹高線を知るには、樹高との関係 (35) (37) (38) (40) (41) 式が求められていればつづがよい。

只木¹⁴⁴⁾は樹高階別の材積等平均樹高線を示す逆数式の常数を C—D 効果の逆数式の Base point (曲線の傾きが $-1/2$ になる点) を各樹高階について暫定的に決め、この点の座標を樹高と両対数軸上で直線関係を示すものとして修正し、この修正された座標から求めたが、この求め方は本質的には (37)(38) 式から求めるのと同じである。

筆者が (37) (38) 式の形をとったのは、この関係によって密度効果の逆数式と最多密度曲線を、後述するように結びつけるのにつづがよいためである。

樹高と逆数式の常数の関係が成立することは、生物学的に次のように説明できる²⁸⁾。例を

$$1/v = A_1\rho + B_1 \quad \dots\dots\dots(22)$$

$$A_1 = a_1H^{-b_1} \quad \dots\dots\dots(37)$$

$$B_1 = a_1'H^{-b_1'} \quad \dots\dots\dots(38)$$

にとって、論議を進めるつづから (38) 式の関係から先に述べよう。

B_1 と H との関係

林分の平均樹高 H と平均幹材積 v の間には相対成長関係があり、その時間方向の関係は、密度ごとに次式で示されるものとする。

$$v = KH^h \quad \dots\dots\dots(43)$$

K, h は密度によって決まる常数

(22) 式 $1/v = A_1\rho + B_1$ において, $\rho \rightarrow 0$ の場合を考えるとそのときの平均幹材積 v^* は

$$v^* = 1/B_1 \quad \dots\dots\dots(44)$$

(43) 式で $\rho \rightarrow 0$ のとき

$$v^* = K^* H^{h^*} \quad \dots\dots\dots(45)$$

とすると (44) (45) 式から

$$B_1 = \frac{1}{K^*} H^{-h^*} \quad \dots\dots\dots(46)$$

(46) 式は (38) 式と同形である。したがって, (38) 式は $\rho \rightarrow 0$ のときの平均樹高と平均幹材積の相対成長関係を示す。このような関係が存在することは密度試験によって導かれる。すなわち, 密度試験において Fig. 20~21, Table 25~26 に示すように, それぞれの密度における平均樹高と平均幹材積の関係は両対数軸上で直線関係を示すことから (45) 式のなりたつことがわかる。また, 等平均樹高線の場合にも密度階ごとに平均樹高と平均幹材積, または平均断面積の間に (43) 式が成立する。これらの関係のスギについて Fig. 22~23 (秋田地方), Table 27 (秋田, 北関東・阿武隈, 天城地方) に例示する。

Table 25. アカマツ天然生除伐試験林における密度階ごとの平均樹高と平均幹材積または平均胸高断面積の相対成長関係

Allometric relation between average height and average stem volume or average basal area in each density class of the stand density experiment plot of *Pinus densiflora*. Allometric relations are shown by following equations;

$$\log v = h \log H + K, \quad \log g = h' \log H + K'$$

v : Average stem volume, g : Average basal area, H : Average height, h, h', K, K' : Constants.

密度階 Density class (No./ha)	h	K	h'	K'
4.700~4.900	2.8129	-3.8878	2.6330	-4.2600
9.000~10.000	2.5303	-3.8048	2.2201	-4.1604
20.000~30.000	2.1654	-3.8376	1.8221	-4.1388

Table 26. スギ植栽密度試験における植栽密度ごとの平均樹高と平均幹材積または平均胸高断面積の相対成長関係 (周ら¹²⁹⁾ の資料より計算した)

Allometric relation between average height and average stem volume or average basal area in each initial planting density of the stand density experiment plot of *Cryptomeria japonica* (Calculated from CHOW *et al.*¹²⁹⁾).

See the equations in Table 25.

植栽密度 Planting density (No./ha)	h	K	h'	K'
1024	2.8580	-3.8933	2.0636	-3.7988
1934	2.7142	-3.8735	1.7196	-3.5333
2648	2.6566	-3.8068	1.8053	-3.6931
3520	2.6984	-3.9833	1.7524	-3.7226
4554	2.6567	-3.9457	1.6836	-3.6678

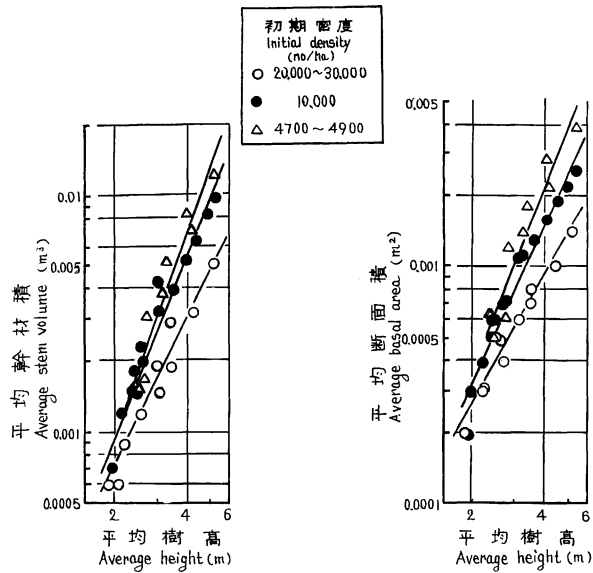


Fig. 20 平均樹高と平均幹材積または平均断面積との初期密度別相対成長関係 (アカマツ天然生除伐試験林)
Allometric relation in each initial density of stand density experiment plots of *Pinus densiflora* between average height and average stem volume or average basal area.

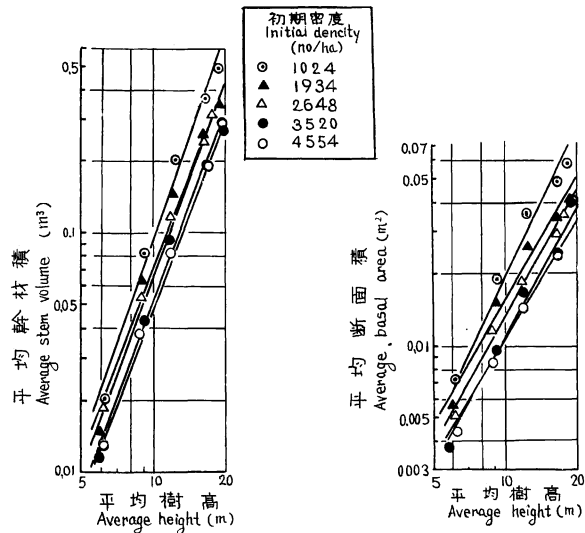


Fig. 21 平均樹高と平均幹材積または平均断面積との初期密度別相対成長関係 (周ら¹²⁹⁾ のスギの植栽密度試験)
Allometric relation in each initial density of stand density experiment plots of *Cryptomeria japonica* between average height and average stem volume or average basal area (After CHOW *et al.*¹²⁹⁾).

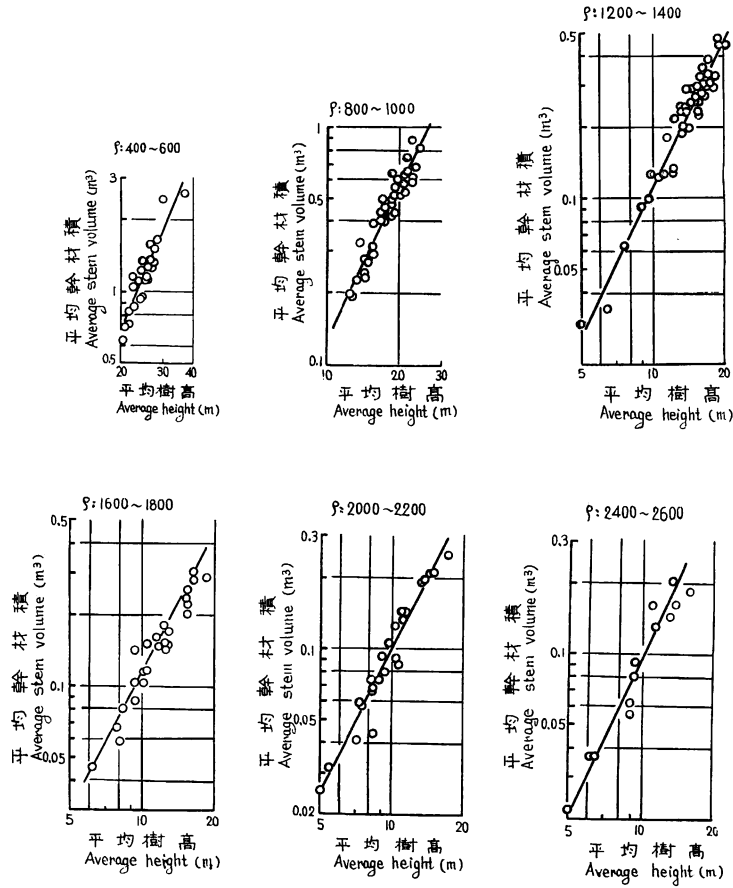


Fig. 22 秋田地方の密度別の平均樹高と平均幹材積の相対成長関係
Allometric relation in each density class of *Cryptomeria japonica*
in Akita district between average height and average stem volume.

Table 27. 各地のスギの密度階ごとの平均樹高と平均幹材積または平均胸高断面積の相対成長関係
Allometric relation between average height and average stem volume or
average basal area in each density class of *Cryptomeria japonica* in each
district by the data of preparation of yield table⁹⁷⁾ and others⁹⁸⁾⁹⁶⁾.
See the equation in Table 25.

密度階 Den- sity class (No. /ha)	秋 田 Akita				北 関 東・阿 武 隈 Kitakanto-Abukuma				天 城 Amagi			
	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>h'</i>	<i>K'</i>	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>h'</i>	<i>K'</i>	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>h'</i>	<i>K'</i>
400 ~ 600	2.3816	-3.2587	1.5550	-3.1656	2.4138	-3.2808	1.5225	-3.1191	2.9804	-3.8926	1.9924	-3.5904
600 ~ 800	2.0850	-2.9024	1.2717	-2.8217	2.1737	-3.0151	1.1988	-2.7385	1.6410	-2.2095	0.6269	-1.8780
800 ~ 1000	2.1037	-2.9911	1.2096	-2.8085	2.2059	-3.1271	1.3641	-3.0241	1.5491	-2.1972	0.6290	-2.0021
1000 ~ 1200	2.1298	-3.0634	1.3584	-3.0324	2.0332	-2.9675	1.1479	-2.8145	1.4098	-2.1099	0.4751	-1.8747

Table 27. (つづき) (Continued).

密度階 Den- sity class (No. /ha)	秋 田 Akita				北 関 東・阿 武 隈 Kitakanto-Abukuma				天 城 Amagi			
	h	K	h'	K'	h	K	h'	K'	h	K	h'	K'
1200 ~1400	2.0657	-3.0230	1.3277	-3.0319	2.1781	-3.2061	1.3603	-3.1111	1.8406	-2.6777	0.8663	-2.4024
1400 ~1600	1.9775	-2.9401	1.3342	-3.0498	2.0396	-3.0445	1.1202	-2.8392	1.9392	-2.8829	1.0145	-2.6680
1600 ~1800	1.7995	-2.7583	1.0765	-2.7760	2.0179	-3.0090	1.2574	-3.0070	2.2856	-3.2827	0.8386	-2.4565
1800 ~2000	2.0090	-2.9917	1.2263	-2.9349	1.3661	-2.3662	0.9293	-2.7411	1.6145	-2.5538	0.7993	-2.4609
2000 ~2200	2.0408	-3.0474	1.3428	-3.1183	2.2731	-3.3869	1.4321	-3.2805	1.7823	-2.8337	0.7833	-2.5424
2200 ~2400	1.9224	-2.9489	1.1513	-2.9077	2.4339	-3.5627	1.4119	-3.2782	1.0834	-2.0640	0.2795	-1.9533
2400 ~2600	2.1285	-3.1606	1.2120	-2.9951	2.1257	-3.2781	1.1694	-3.0458	2.5456	-3.6707	1.5360	-3.3665
2600 ~2800	2.2810	-3.2873	1.5446	-2.2842	2.0705	-3.2796	1.2091	-3.1382	2.2524	-3.4131	1.2825	-3.1525
2800 ~3000	1.7947	-2.8983	1.3724	-3.2035								

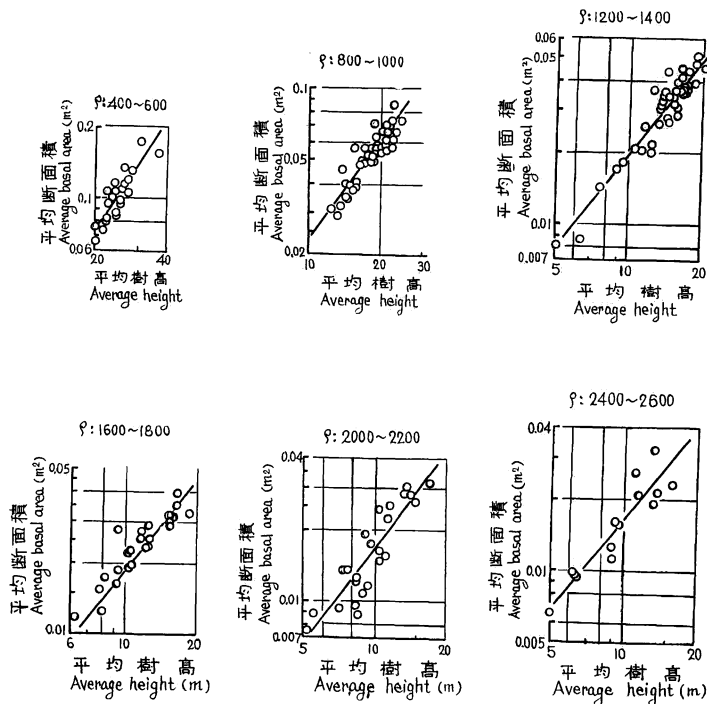


Fig. 23 秋田地方の密度別の平均樹高と平均断面積の相対成長関係
Allometric relation in each density class of *Cryptomeria japonica* in Akita district between average height and average basal area.

(43) 式の h の値は Table 25~27 に示されるように密度が低くなると大きくなる傾向があり、3 に近くなる。Table 17, 19, 21, 23 に示した (38) 式の b_1' も 3 に近いが、このことは林木が大まかに相似形で成長することから、

$$v \propto H^3$$

を仮定すれば説明のつくことである。

密度効果式を断面積にあてはめたときの常数が、(40) (41) 式で示されることはすでに述べたとおりであるが、この関係も Fig. 21~23, Table 25~27 から全く同様に説明できる。このばあい、(41) 式の b_2' の値は幹材積の場合より小さく 2 に近い。この理由は、

$$g \propto H^2$$

が仮定できることから説明される。

A_1 と H との関係

ある樹高で、ある平均幹材積 v_{Rc} をもつ林分の競争の強さを示す尺度として、競争比数 Rc を次のように定義する。

$$Rc = v_{Rc}/v^* \quad \dots\dots\dots(47)$$

ここで v^* は (44) 式で与えられる密度効果線上の $\rho \rightarrow 0$ の平均幹材積である。したがって、(44) (47) 式から、

$$Rc = v_{Rc}/v^* = v_{Rc}B_1 \quad \dots\dots\dots(48)$$

(46) (48) 式から、

$$v_{Rc} = \frac{K^*}{Rc} H^{h^*} \quad \dots\dots\dots(49)$$

すなわち、同じ競争比数をもつ林分の平均幹材積と平均樹高は両対数軸上で直線関係にあり、その傾きは Rc に無関係に一定であることになる。ここで次のことを仮定する。

а) いろいろな生育段階を示す密度効果線上で、同じ競争比数をもつ林分の平均幹材積 v_{Rc} と密度 ρ_{Rc} の間には、

$$v_{Rc} = \alpha \rho_{Rc}^{-\beta} \quad \dots\dots\dots(50)$$

の関係がある。ただし、 α は Rc により決まる常数で β は Rc に無関係に一定である。

б) 十分な密度の状態になった林分は競争比数が一定の値 R_f をとり、この値は樹種により決まる。

これらの仮定は Fig. 24 に示すように、いろいろな生育段階を示す密度効果線上で、同じ競争比数をもつ点々が、両対数軸上で平行的な直線関係を示すことから導かれる。

(49) (50) 式から、 R_f の競争比数をもつ林分では

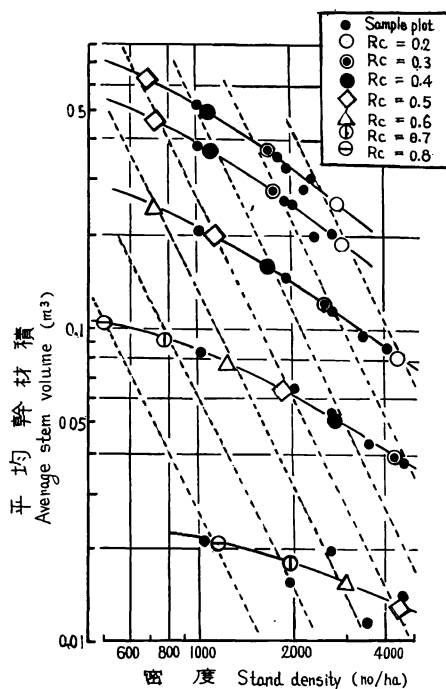


Fig. 24 スギの競争密度効果曲線と等競争比数曲線 (周ら¹²⁹⁾ のスギの植栽密度試験)

Competition-Density effect curve and equivalent competition index curve in *Cryptomeria japonica* (After CHOW *et al.*¹²⁹⁾).

$$\rho_{R_f} = \left(\frac{K^*}{R_f \alpha^*} \right)^{-\frac{1}{\beta}} H^{-\frac{h^*}{\beta}} \dots\dots\dots (51)$$

ただし α^* は R_f により決まる (50) 式の α

また (49) 式より

$$v_{R_f} = \frac{K^*}{R_f} H^{h^*} \dots\dots\dots (52)$$

となり, (22) (46) (51) (52) の関係が同時になりたつから, (22) 式に (46) (51) (52) の関係を入れて整理すると

$$A_1 = \frac{(R_f - 1) (\alpha^* R_f)^{-\frac{1}{\beta}}}{K^* \left(1 - \frac{1}{\beta} \right)} H^{-\left(h^* - \frac{h^*}{\beta} \right)} \dots\dots\dots (53)$$

となり, この関係は (37) 式と同形である。

等平均樹高線の場合も全く同様にして A_1 と H の関係を求めることができ, 断面積についても同様のことがいえる。

6. 修正係数

前節で示した

$$\begin{cases} A_1 = a_1 H^{-b_1} & \dots\dots\dots (37) \\ B_1 = a_1' H^{-b_1'} & \dots\dots\dots (38) \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_2 = a_2 H^{-b_2} & \dots\dots\dots (40) \\ B_2 = a_2' H^{-b_2'} & \dots\dots\dots (41) \end{cases}$$

の関係を等樹高曲線について求め Table 17~24 に示したが, これらの関係から樹高に応じた等平均樹高線を計算するときに, 次のことに注意しなければならない。

すなわち, (37) (38) (40) (41) 式は両対数軸上で直線関係にあるが, 対数変換して求めた値の平均は, 実際の値の算術平均ではなく, 幾何平均が求められたことになる。したがって, これを真数にもどした値は常に算術平均より小さい。このことはすでに知られていることで, 材積表の調製に際し, MEYER⁷⁷⁾ はその修正方法を示している。MEYER の修正係数は分布が正規分布をするとの仮定の下で導かれたが, ОНТОМО⁹²⁾ は, いかなる分布の場合にも適用できる修正係数を導いた。

すなわち, 修正係数を f とすれば,

$$f = 10^{\frac{n-1}{n} \cdot \frac{1}{2} \ln 10 \sigma^2} = 10^{1.1513 \frac{n-1}{n} \sigma^2} \dots\dots\dots (54)$$

ただし, σ^2 は対数による残差分散である。

したがって, (37) (38) (40) (41) 式で求めた A_1, B_1, A_2, B_2 に修正係数を乗ずれば, 修正された値を求めることができる。ということは, たとえば (37) 式を対数化して

$$\log A_1 = -b_1 \log H + \log a_1 \dots\dots\dots (37)'$$

とし, これに修正係数 f の対数を加えておけばよい。すなわち,

$$\log A_1 = -b_1 \log H + \log a_1 + \log f \dots\dots\dots (37)''$$

修正した (37) (38) (40) (41) 式の関係を表 Table 28~35 に示す。残差分散が小さいときには修正係数の値も小さくほとんど問題とならないが, 大きいときには修正係数もかなり大きな値となる。修正前の

Table 28. Table 17 の $\log a_1$, $\log a_1'$ を修正係数で修正した値Corrected $\log a_1$ and $\log a_1'$ in Table 17 by correction factor.Correction factor is calculated from following equation⁹²⁾;

$$f = 10^{1.1513 \frac{n-1}{n} \sigma^2} \quad f: \text{Correction factor}, \quad \sigma^2: \text{Variance of logarithmic value.}$$

地	District	方	修正された $\log a_1$ Corrected $\log a_1$	修正された $\log a_1'$ Corrected $\log a_1'$
飫	肥	Obi	-1.0275	3.1101
熊	本	Kumamoto	-0.9193	2.1002
土	佐	Tosa	-1.2466	4.1562
愛知・岐	阜	Aichi-Gifu	-0.6661	3.0142
紀	州	Kishu	-1.4607	2.6515
天	城	Amagi	-1.1143	2.5114
茨	城	Ibaragi	-1.2582	3.5613
北関東・阿武隈		Kitakanto-Abukuma	-1.0252	3.3856
越後・会	津	Echigo-Aizu	-1.5346	3.3869
山	形	Yamagata	-1.2592	3.7557
秋	田	Akita	-1.5850	3.5277
青	森	Aomori	-1.7196	3.6462
全 国 平 均	Average of all districts		-1.2270	3.2542

Table 29. Table 18 の $\log a_2$, $\log a_2'$ を修正係数で修正した値Corrected $\log a_2$ and $\log a_2'$ in Table 18 by correction factor.

See the explanation in Table 28.

地	District	方	修正された $\log a_2$ Corrected $\log a_2$	修正された $\log a_2'$ Corrected $\log a_2'$
飫	肥	Obi	-0.9060	2.6099
熊	本	Kumamoto	-1.0777	1.9365
土	佐	Tosa	-1.2753	3.9476
愛知・岐	阜	Aichi-Gifu	-0.5816	3.0080
紀	州	Kishu	-1.2996	2.8008
天	城	Amagi	-0.9950	2.5172
茨	城	Ibaragi	-1.4093	3.9249
北関東・阿武隈		Kitakanto-Abukuma	-0.9322	3.5406
越後・会	津	Echigo-Aizu	-1.5344	3.6611
山	形	Yamagata	-0.8839	3.4900
秋	田	Akita	-1.5467	3.5463
青	森	Aomori	-2.2826	4.0677
全 国 平 均	Average of all districts		-1.2347	3.2339

Table 30. Table 19 の $\log a_1$, $\log a_1'$ を修正係数で修正した値Corrected $\log a_1$ and $\log a_1'$ in Table 19 by correction factor.

See the explanation in Table 28.

地	District	方	修正された $\log a_1$ Corrected $\log a_1$	修正された $\log a_1'$ Corrected $\log a_1'$
九	州	Kyushu	-1.0056	3.0780
土	佐	Tosa	-1.6993	4.3019
紀	州	Kishu	-0.8617	2.7998
飛	驒	Hida	-1.1185	4.0032
木	曾	Kiso	-1.2822	3.4617
大井・天	竜	Ooi-Tenryu	-1.2215	4.1608
愛知・岐	阜	Aichi-Gifu	-2.0967	4.6556
天	城	Amagi	-1.3440	4.6533
富士・箱	根	Fuji-Hakone	-1.2848	4.2995
北	関	Kitakanto	-1.0194	4.2425
全 国 平 均	Average of all district		-1.2934	3.9656

Table 31. Table 20 の $\log a_2$, $\log a_2'$ を修正係数で修正した値Corrected $\log a_2$ and $\log a_2'$ in Table 20 by correction factor.

See the explanation in Table 28.

地	District	方	修正された $\log a_2$ Corrected $\log a_2$	修正された $\log a_2'$ Corrected $\log a_2'$
九	州	Kyushu	-1.5305	3.6597
土	佐	Tosa	-0.8881	3.5363
紀	州	Kishu	-1.5817	3.4099
飛	驒	Hida	-0.9353	3.5729
木	曾	Kiso	-1.0802	3.0882
大井・天	竜	Ooi-Tenryu	-0.5058	2.4383
愛知・岐	阜	Aichi-Gifu	-1.5261	3.7421
天	城	Amagi	-1.6448	4.5941
富士・箱	根	Fuji-Hakone	-1.0975	2.8424
北	関	Kitakanto	-0.6882	3.5786
全 国 平 均	Average of all districts		-1.1478	3.4463

Table 32. Table 21 の $\log a_1$, $\log a_1'$ を修正係数で修正した値Corrected $\log a_1$ and $\log a_1'$ in Table 21 by correction factor.

See the explanation in Table 28.

地	District	方	修正された $\log a_1$ Corrected $\log a_1$	修正された $\log a_1'$ Corrected $\log a_1'$
北 九 州	Kitakyushu		-1.1899	3.8008
土 佐 西 部	Tosa-Seibu		-1.4819	5.0788
四 国 内 海	Shikoku-Naikai		-0.8037	3.6249
中 国 内 海	Chugoku-Naikai		-0.9355	4.0049

Table 32. (つづき) (Continued).

地 方 District	修正された $\log a_1$ Corrected $\log a_1$	修正された $\log a_1'$ Corrected $\log a_1'$
近畿 Kinki	-1.4521	4.9834
磐城 Iwaki	-1.3726	4.1976
岩手 Iwate	-0.6952	3.3943
全 国 平 均 Average of all districts	-1.1330	4.1550

Table 33. Table 22 の $\log a_2$, $\log a_2'$ を修正係数で修正した値
Corrected $\log a_2$ and $\log a_2'$ in Table 22 by correction factor.
See the explanation in Table 28.

地 方 District	修正された $\log a_1$ Corrected $\log a_1$	修正された $\log a_1'$ Corrected $\log a_1'$
北九州 Kitakyushu	-1.0895	3.9391
土佐西部 Tosa-Seibu	-1.5741	4.3789
四国内海 Shikoku-Naikai	-0.5664	3.0287
中国内海 Chugoku-Naikai	-0.8800	3.4837
近畿 Kinki	-0.8588	4.2240
磐城 Iwaki	-1.3684	4.0846
岩手 Iwate	-1.1556	4.5338
全 国 平 均 Average of all districts	-1.0704	3.9533

Table 34. Table 23 の $\log a_1$, $\log a_1'$ を修正係数で修正した値
Corrected $\log a_1$ and $\log a_1'$ in Table 23 by correction factor.
See the explanation in Table 28.

地 方 District	修正された $\log a_1$ Corrected $\log a_1$	修正された $\log a_1'$ Corrected $\log a_1'$
信州 Shinshu	-1.1500	3.1850
岩手 Iwate	-1.0283	3.1964
全 国 平 均 Average of all district	-1.0891	3.1907

Table 35. Table 24 の $\log a_2$, $\log a_2'$ を修正係数で修正した値
Corrected $\log a_2$ and $\log a_2'$ in Table 24 by correction factor.
See the explanation in Table 28.

地 方 District	修正された $\log a_1$ Corrected $\log a_1$	修正された $\log a_1'$ Corrected $\log a_1'$
信州 Shinshu	-1.1126	2.7876
岩手 Iwate	-1.3698	4.0530
全 国 平 均 Average of all districts	-1.2412	3.4203

Table 36. 修正係数による修正前と修正後の幹材積等平均樹高線の平均値, 偏差合計, 平均偏差, 平均偏差率

Average, sum of deviation, average deviation and average deviation rate in equivalent height curve of stem volume before and after correction by correction factor.

樹高階 Height class	秋田地方スギ <i>Cryptomeria japonica</i> in Akita district								
	修正前 Before correction					修正後 After correction			
	<i>n</i>	平均 Average	偏差合計 Sum of deviation	平均偏差 Average deviation	平均偏差率 Average deviation rate	平均 Average	偏差合計 Sum of deviation	平均偏差 Average deviation	平均偏差率 Average deviation rate
6	17	0.032	+0.007	+0.0004	+0.013	0.031	-0.003	-0.0002	-0.006
8	33	0.061	+0.139	+0.0042	+0.069	0.061	+0.118	+0.0036	+0.059
10	54	0.101	+0.010	+0.0002	+0.002	0.101	0	0	0
12	53	0.153	+0.222	+0.0042	+0.027	0.152	+0.173	+0.0033	+0.022
14	59	0.222	+0.498	+0.0084	+0.037	0.220	+0.354	+0.0060	+0.027
16	56	0.323	+0.954	+0.0170	+0.053	0.320	+0.835	+0.0149	+0.047
18	53	0.412	+0.696	+0.0131	+0.032	0.407	+0.560	+0.0106	+0.026
20	45	0.556	+0.439	+0.0098	+0.018	0.552	+0.205	+0.0046	+0.008
22	33	0.745	+1.017	+0.0308	+0.041	0.740	+0.750	+0.0227	+0.031
24	23	0.968	-0.054	-0.0024	-0.002	0.961	-0.246	-0.0107	-0.011
26	14	1.149	-0.376	-0.0268	-0.023	1.143	-0.491	-0.0351	-0.030
計	440	0.357	+3.552	+0.0081	+0.023	0.354	+2.258	+0.0051	+0.014

樹高階 Height class	信州地方カラマツ <i>Larix leptolepis</i> in Shinshu district								
	修正前 Before correction					修正後 After correction			
	<i>n</i>	平均 Average	偏差合計 Sum of deviation	平均偏差 Average deviation	平均偏差率 Average deviation rate	平均 Average	偏差合計 Sum of deviation	平均偏差 Average deviation	平均偏差率 Average deviation rate
6	13	0.027	+0.047	+0.0036	+0.135	0.026	+0.034	+0.0026	+0.101
8	27	0.061	+0.024	+0.0009	+0.015	0.059	-0.040	-0.0015	-0.025
10	15	0.086	+0.203	+0.0135	+0.157	0.083	+0.159	+0.0106	+0.127
12	21	0.129	+0.129	+0.0061	+0.047	0.119	+0.045	+0.0021	+0.018
14	27	0.179	+0.639	+0.0237	+0.132	0.173	+0.462	+0.0171	+0.099
16	27	0.256	+0.498	+0.0184	+0.072	0.250	+0.340	+0.0126	+0.050
18	21	0.345	+0.180	+0.0086	+0.025	0.336	-0.011	-0.0005	-0.001
20	19	0.467	+0.400	+0.0211	+0.045	0.452	+0.117	+0.0062	+0.014
22	20	0.590	+0.063	+0.0032	+0.005	0.570	-0.336	-0.0168	-0.030
24	14	0.834	+0.420	+0.0300	+0.036	0.810	-0.069	-0.0049	-0.006
26	8	1.012	+0.134	+0.0168	+0.017	0.989	-0.120	-0.0150	-0.015
計	212	0.309	+2.737	+0.0129	+0.042	0.299	+0.581	+0.0027	+0.009

Table 37. 修正係数による修正前と修正後の胸高断面積等平均樹高線の平均値,
偏差合計, 平均偏差, 平均偏差率Average, sum of deviation, average deviation, and average deviation rate in equivalent
height curve of basal area before and after correction by correction factor.

	樹 高 階 Height class	修 正 前 Before correction					修 正 後 After correction				
		<i>n</i>	平 均 Average	偏差合計 Sum of devia- tion	平均偏差 Average deviation	平 均 偏差率 Average devia- tion rate	平 均 Average	偏差合計 Sum of devia- tion	平均偏差 Average deviation	平 均 偏差率 Average devia- tion rate	
秋 田 地 方 ス ス ギ <i>Cryptomeria japonica</i> in Akita district	6	17	0.0082	-0.001	-0.00006	-0.007	0.0082	-0.002	-0.00012	-0.015	
	8	33	0.0130	+0.024	+0.00071	+0.055	0.0130	+0.022	+0.00067	+0.052	
	10	54	0.0182	-0.022	-0.00041	-0.023	0.0181	-0.036	-0.00067	-0.037	
	12	53	0.0245	+0.016	+0.00030	+0.012	0.0239	+0.002	+0.00004	+0.002	
	14	59	0.0316	+0.034	+0.00058	+0.018	0.0313	+0.013	+0.00022	+0.007	
	16	56	0.0407	+0.063	+0.00112	+0.028	0.0404	+0.056	+0.00100	+0.025	
	18	53	0.0477	+0.079	+0.00149	+0.031	0.0473	+0.056	+0.00106	+0.022	
	20	45	0.0595	+0.074	+0.00164	+0.028	0.0591	+0.051	+0.00113	+0.019	
	22	33	0.0740	+0.099	+0.00300	+0.041	0.0738	+0.075	+0.00227	+0.031	
	24	23	0.0898	+0.022	+0.00094	+0.010	0.0896	+0.017	+0.00074	+0.008	
	26	14	0.1023	-0.003	-0.00022	-0.002	0.1018	-0.008	-0.00057	-0.006	
	計	440	0.0412	+0.378	+0.00086	+0.021	0.0409	+0.237	+0.00054	+0.013	
信 州 地 方 カ ラ マ ツ <i>Larix leptolepis</i> in Shinshu district	6	13	0.0080	+0.004	+0.00030	+0.038	0.0079	+0.002	+0.00015	+0.019	
	8	27	0.0144	-0.007	-0.00026	-0.018	0.0141	-0.013	-0.00048	-0.034	
	10	15	0.0160	+0.016	+0.00103	+0.065	0.0157	+0.009	+0.00060	+0.038	
	12	21	0.0202	-0.005	-0.00024	-0.012	0.0198	-0.012	-0.00057	-0.029	
	14	27	0.0242	+0.059	+0.00218	+0.090	0.0238	+0.049	+0.00181	+0.076	
	16	27	0.0312	+0.049	+0.00181	+0.057	0.0306	+0.032	+0.00118	+0.039	
	18	21	0.0387	+0.010	+0.00048	+0.012	0.0376	-0.006	-0.00024	-0.008	
	20	19	0.0474	+0.033	+0.00174	+0.037	0.0466	+0.016	+0.00084	+0.018	
	22	20	0.0554	+0.009	+0.00045	+0.008	0.0544	-0.006	-0.00030	-0.006	
	24	14	0.0738	+0.062	+0.00442	+0.060	0.0724	+0.042	+0.00300	+0.041	
	26	8	0.0834	+0.021	+0.00263	+0.031	0.0818	+0.007	+0.00088	+0.011	
	計	212	0.0338	+0.251	+0.00118	+0.035	0.035	+0.120	+0.00057	+0.017	

逆数式の常数は過小に評価されるため, 求められた等平均樹高線は過大な値を示すことになる。

修正前と修正後の幹材積と断面積の等平均樹高線による推定値を, 秋田地方のスギと信州地方のカラマツについて比較し Table 36~37 に示す。樹高階における偏差合計や平均偏差率は修正前にはほとんどの樹高階で正の値を示していたが, 修正後は正負相半ばし, 改善されたことがわかる。

7. 密度効果線または等平均樹高線上の特性値

i) 競争比数と最多密度曲線

幹材積の密度効果式

$$1/v = A_1\rho + B_1 \dots\dots\dots(22)$$

においてすでに述べたように競争比数 Rc を

$$Rc = v_{Rc}/v^* = v_{Rc}B_1 \quad \dots\dots\dots(48)$$

と定義した。この収量比数は次のような性質をもっている。

一般に密度効果を取り扱うとき、密度の範囲が最小の密度の十数倍から数十倍になる。このため、 $v \sim \rho$ 関係を 1 枚の普通目盛の方眼紙上にプロットすると、楽に収めることができる。したがって、密度効果の逆数式の一般的な性質なども、両対数軸上で論じられることが多い。両対数軸上での競争密度効果曲線の傾きは、 $\rho \rightarrow 0$ ならば 0、 $\rho \rightarrow \infty$ ならば -1 となる。いま (22) 式を両対数軸上で微分して導函数を求めると

$$d \log \rho / d \log v = B_1 v - 1 \quad \dots\dots\dots(55)$$

となる。この v を競争比数 Rc で示すと (48) 式から

$$v_{Rc} = Rc/B_1 \quad \dots\dots\dots(56)$$

となり、(55) 式は

$$d \log \rho / d \log v = Rc - 1 \quad \dots\dots\dots(57)$$

となる。すなわち、 Rc から 1 を減じた値によって競争比数 Rc のときの両対数軸上の曲線の傾きを知ることができる。

(22) 式の A_1 、 B_1 はまた

$$A_1 = a_1 H^{-b_1} \quad \dots\dots\dots(37)$$

$$B_1 = a_1' H^{-b_1'} \quad \dots\dots\dots(38)$$

で示されたが、(22) (37) (38) (48) 式の関係から、前節とは逆にいろいろな生育段階にある密度効果線上である一定の競争比数をもつ幹材積と密度の関係が導ける。

密度効果線上で競争比数 Rc のときの平均幹材積を v_{Rc} 、そのときの密度を ρ_{Rc} とすると (22)、(56) 式から

$$\rho_{Rc} = \frac{B_1}{A_1} \left(\frac{1}{Rc} - 1 \right) \quad \dots\dots\dots(58)$$

(58) 式の A_1 、 B_1 に (37) (38) 式の関係を入れると

$$\rho_{Rc} = \frac{(1 - Rc)}{Rc} \frac{a_1'}{a_1} H^{(b_1 - b_1')} \quad \dots\dots\dots(59)$$

この関係は競争比数が Rc のときの樹高と密度の関係を示す。四手井¹²⁰⁾ は等樹高階の密度と幹材積の関係を両対数軸上で解析し、低密度で競争のおこっていない部分を横軸に水平な直線で、競争のおきている部分を傾きをもたせた直線で示し、2つの直線の交点を競争開始点とし、そのときの樹高 h と密度 n の関係が両対数軸上で直線関係を示すことから、競争開始時の $h-n$ 線として次式を示した。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{スギ} & n = 73000 \times h^{-\frac{3}{2}} \\ \text{ヒノキ} & n = 87000 \times h^{-\frac{3}{2}} \\ \text{アカマツ} & n = 35000 \times h^{-\frac{3}{2}} \\ \text{カラマツ} & n = 41000 \times h^{-\frac{3}{2}} \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots(60)$$

この四手井の $h-n$ 線の基礎は先に示した吉良らの密度効果の冪乗式 (14) 式であるが、この関係を逆数式から導き、一般化したのが (59) 式で、 $h-n$ 線に対応させるためには Rc を特殊化すればよい。

(38) (48) (59) 式から、

$$\left. \begin{aligned} v_{Rc} &= K_2 \rho_{Rc} K_1 \\ K_1 &= \frac{b_1'}{b_1 - b_1'} \\ K_2 &= \frac{Rc}{a_1'} \left(\frac{Rc}{1 - Rc} \cdot \frac{a_1}{a_1'} \right)^{\frac{b_1'}{b_1 - b_1'}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(61)$$

が導ける。すなわち (61) 式によって競争比数に応じた幹材積と密度の関係が与えられる。筆者はこの関係を等競争比数曲線 (equivalent competition index curve) と名づけた。

Rc は競争の強さに応じて理論的には 1 から 0 まで変化できる。しかし、前に述べたように同種植物の個体群は、現実には自然間引を起こし、どこまでも込ませることはできない。この上限の密度に達したときの競争比数は樹高によってかわらないと考え、このときの競争比数を R_f とすることにより、上限の密度 ρ_{R_f} とその時の幹材積 v_{R_f} の関係を (61) 式から

$$\left. \begin{aligned} v_{R_f} &= K_2' \rho_{R_f} K_1 \\ K_1 &= \frac{b_1'}{b_1 - b_1'} \\ K_2' &= \frac{R_f}{a_1} \left(\frac{R_f}{1 - R_f} \cdot \frac{a_1}{a_1'} \right)^{\frac{b_1'}{b_1 - b_1'}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(62)$$

と導ける。(62) 式は先に示した (33) 式, $v = K\rho^{-a}$ と同形で、この式によって最多密度曲線を密度効果曲線との関連において導くことができる。(61) (62) 式の関係は等平均樹高線についても全く同様なことがいえる。

したがって、最多密度曲線を地域ごとに、または全国的な値として求めようとするならば、Table 17～24, および Table 28～35 に示した値から (62) 式の K_1 を計算し、またそれぞれの地方あるいは全国的な R_f を求めておいて K_2' を計算すればよい。このとき、全国的な値を求めるためには地方ごとの a_1 , b_1 , a_1' , b_1' の平均を用いる（この理由については86ページ参照）。

Fig. 25～32 にスギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツの4樹種についてそれぞれ秋田、木曽、磐城、信州の各地方の例を、また Fig. 33～40 に同じ樹種の全国的な等平均樹高線と最多密度曲線 (Table 38～39, Table 44～47) を示した。 R_f を決めるためには異なった2つの樹高階の等平均樹高線上で、 Rc をいろいろかえて Rc/B の値をプロットし、同じ Rc について結んだ直線が、プロットされた現実の点に対して最も外側にあるような Rc の値を求め、これを R_f とすればそのときの直線が最多密度曲線となる。Fig. 25～40 に示した地方または全国の R_f と幹材積および断面積の最多密度曲線は Table 38～39 のとおりである。

このような求め方で最多密度曲線を求めると、プロットされた点に対し最多密度曲線の適合のよくない場合もある。たとえば、筆者はかつて、カラマツの信州地方収穫表調製資料のみについて計算したことがある。このとき

$$\log A_1 = -1.3067 \log H - 0.9528$$

$$\log B_1 = -2.4916 \log H + 3.1673$$

という関係がえられ、これから (62) 式の K_1 の値は 2.1028 と計算されたが、この傾きは現実の点に対して著しく急な値を示した。そこで、最多密度曲線として上限の2点を結んで、 $\log v = -1.4963 \log \rho + 4.0202$ を求め、この式は加藤⁵¹⁾により引用された。ところが、長野営林局計画課の調査資料やカラマ

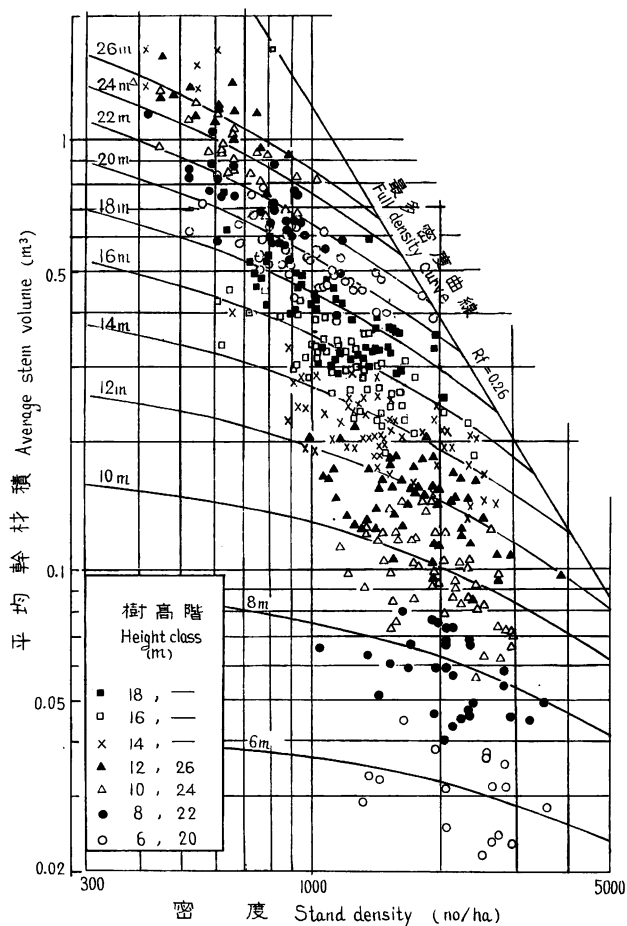


Fig. 25 秋田地方スギの幹材積の等平均樹高線と最密度曲線
Equivalent height curves and full density curve of stem
volume in Akita district of *Cryptomeria japonica*.

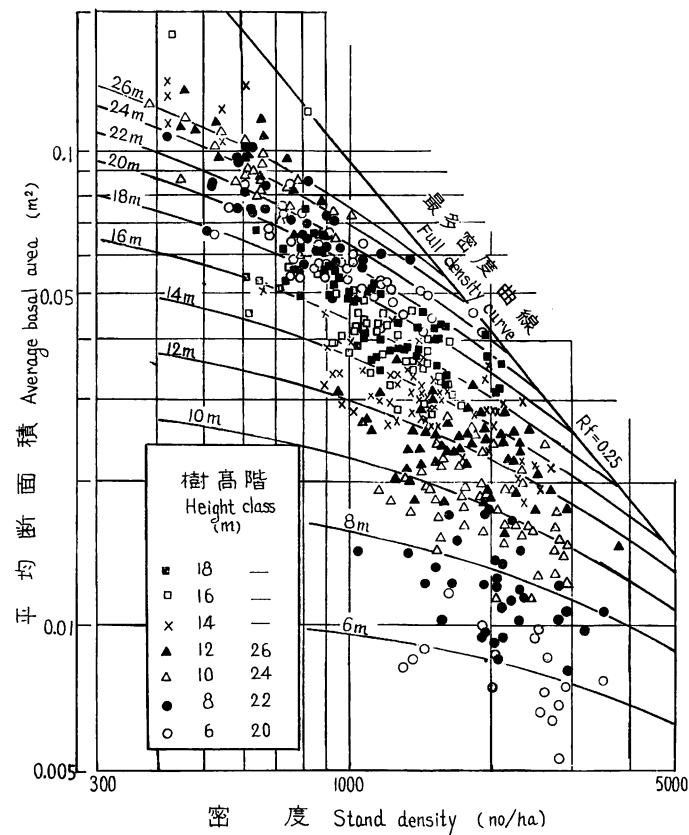


Fig. 26 秋田地方スギの断面積の等平均樹高線と最密度曲線
Equivalent height curves and full density curve of basal
area in Akita district of *Cryptomeria japonica*.

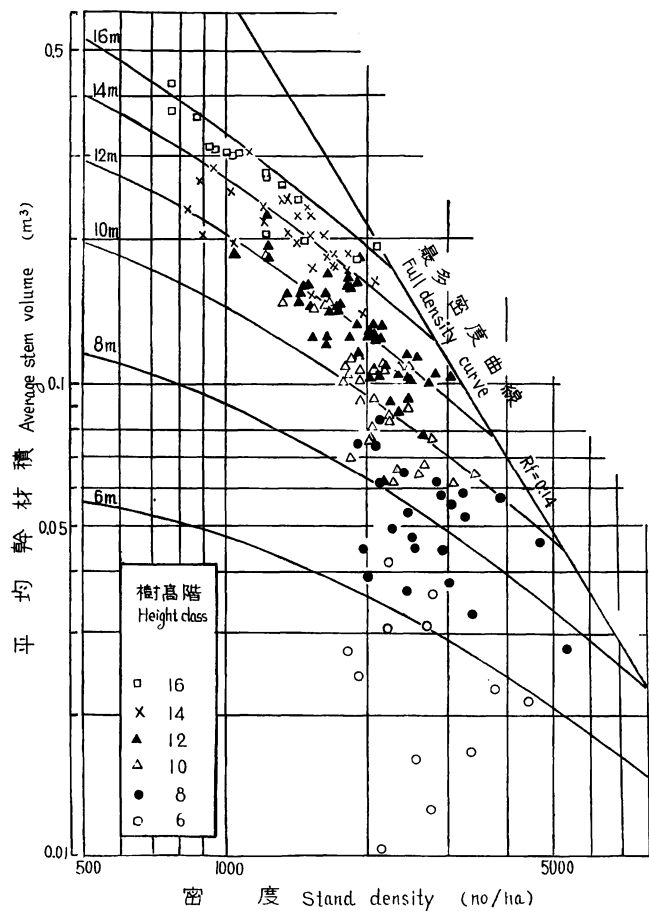


Fig. 27 木曽地方ヒノキの幹材積の等平均樹高線と最多密度曲線
Equivalent height curves and full density curve of stem volume in Kiso district of *Chamaecyparis obtusa*.

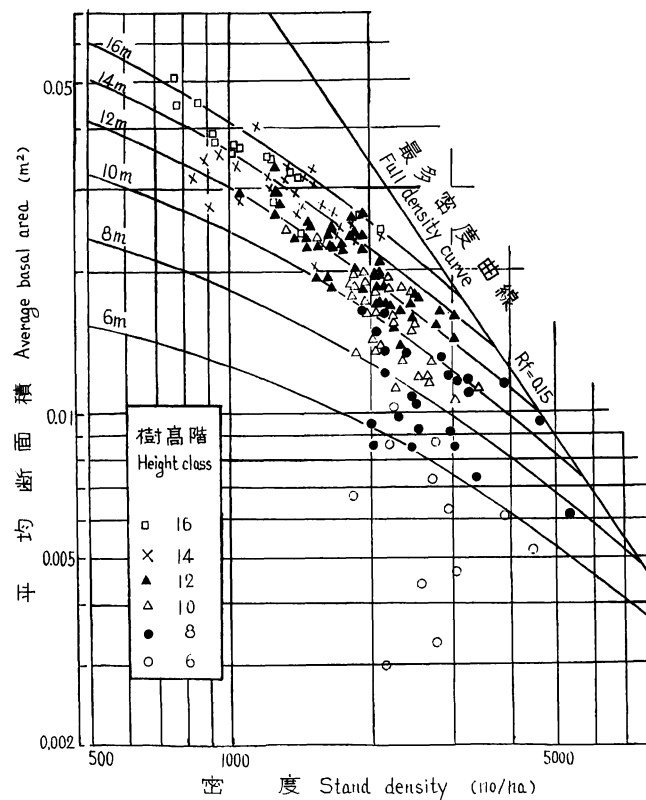


Fig. 28 木曽地方ヒノキの断面積の等平均樹高線と最多密度曲線
Equivalent height curves and full density curve of basal area in Kiso district of *Chamaecyparis obtusa*.

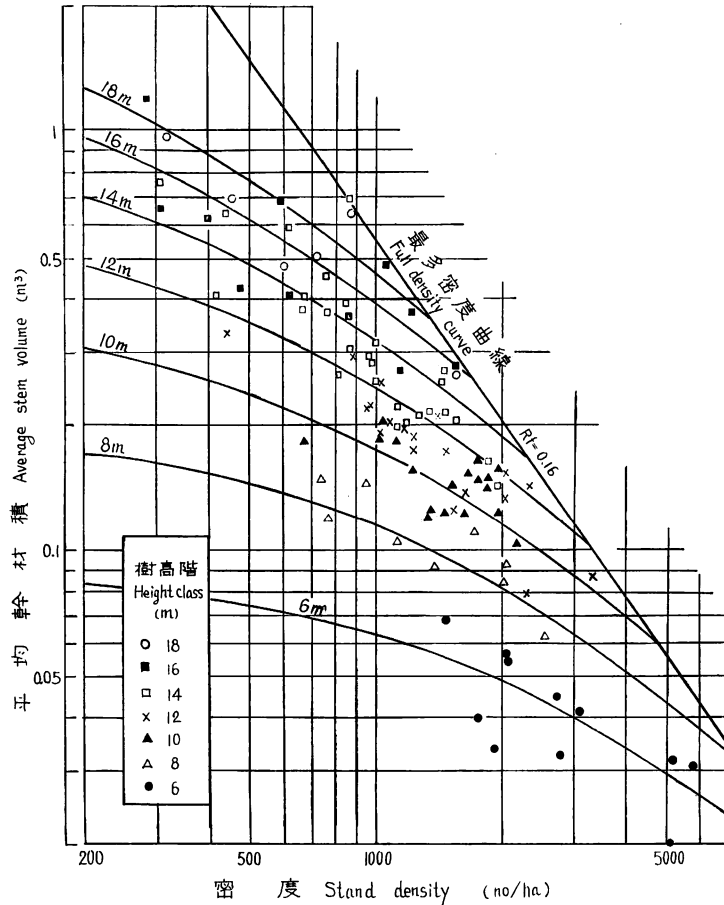


Fig. 29 磐城地方アカマツの幹材積の等平均樹高線と最多密度曲線
Equivalent height curves and full density curve of stem
volume in Iwaki district of *Pinus densiflora*.

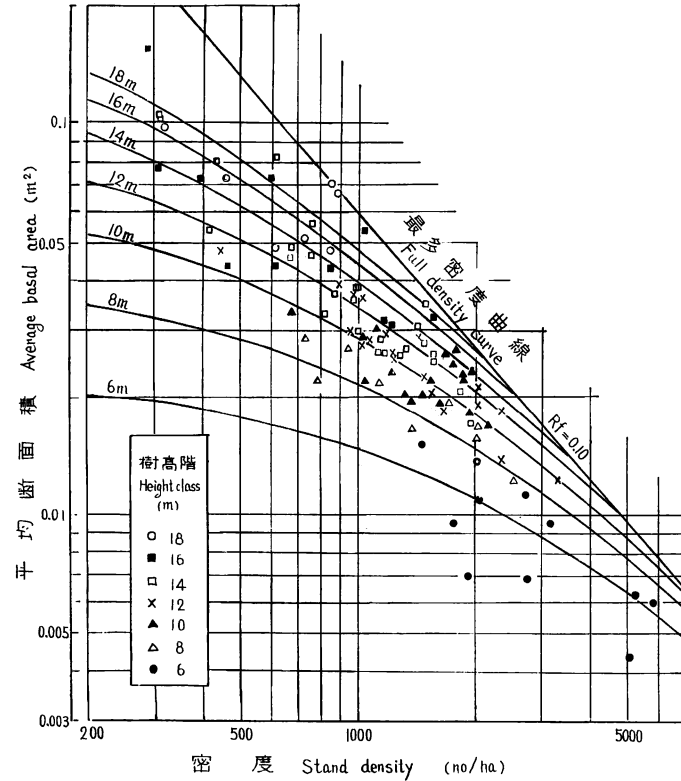


Fig. 30 磐城地方アカマツの断面積の等平均樹高線と最多密度曲線
Equivalent height curves and full density curve of basal
area in Iwaki district of *Pinus densiflora*.

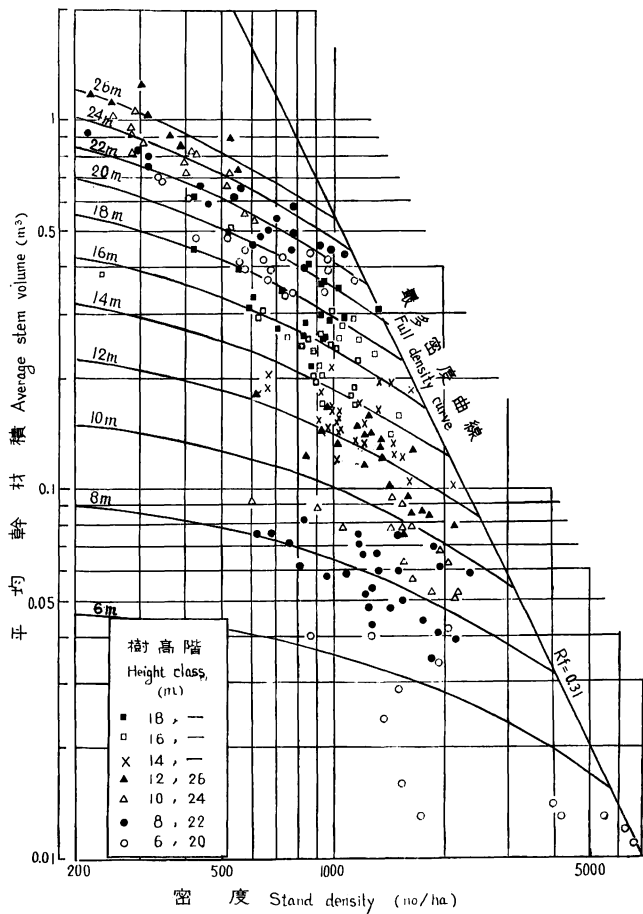


Fig. 31 信州地方カラマツの幹材積の等平均樹高線と最多密度曲線
Equivalent height curves and full density curve of stem
volume in Shinshu district of *Larix leptolepis*.

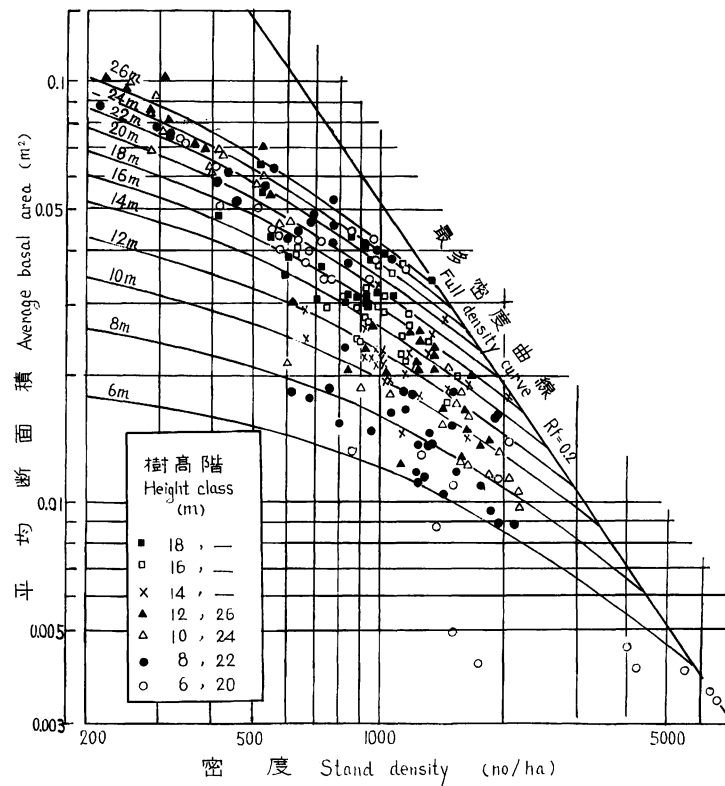


Fig. 32 信州地方カラマツの断面面積の等平均樹高線と最多密度曲線
Equivalent height curves and full density curve of basal
area in Shinshu district of *Larix leptolepis*.

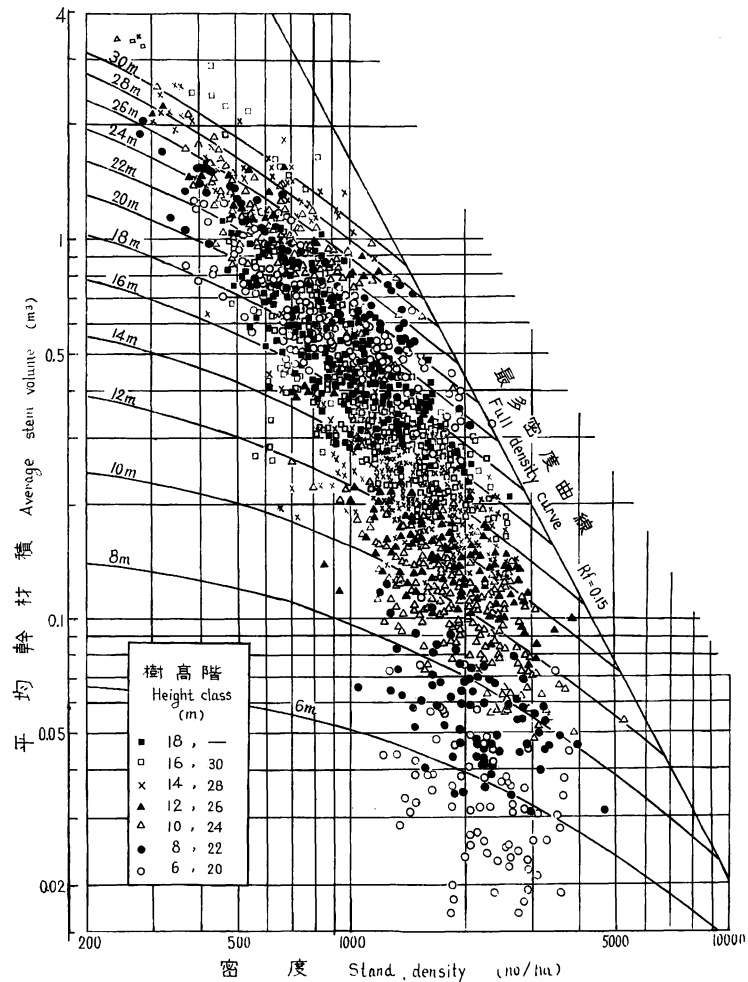


Fig. 33 全国スギの幹材積の等平均樹高線と最多密度曲線
Equivalent height curves and full density curve of
stem volume in all districts of *Cryptomeria japonica*.

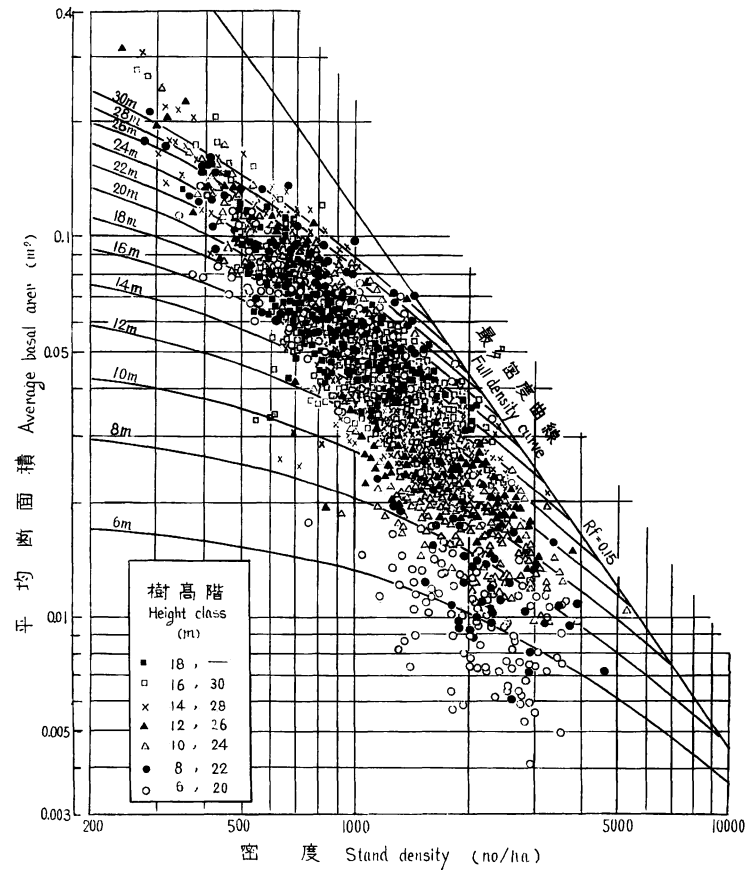


Fig. 34 全国スギの断面積の等平均樹高線と最多密度曲線
Equivalent height curves and full density curve of basal
area in all districts of *Cryptomeria japonica*.

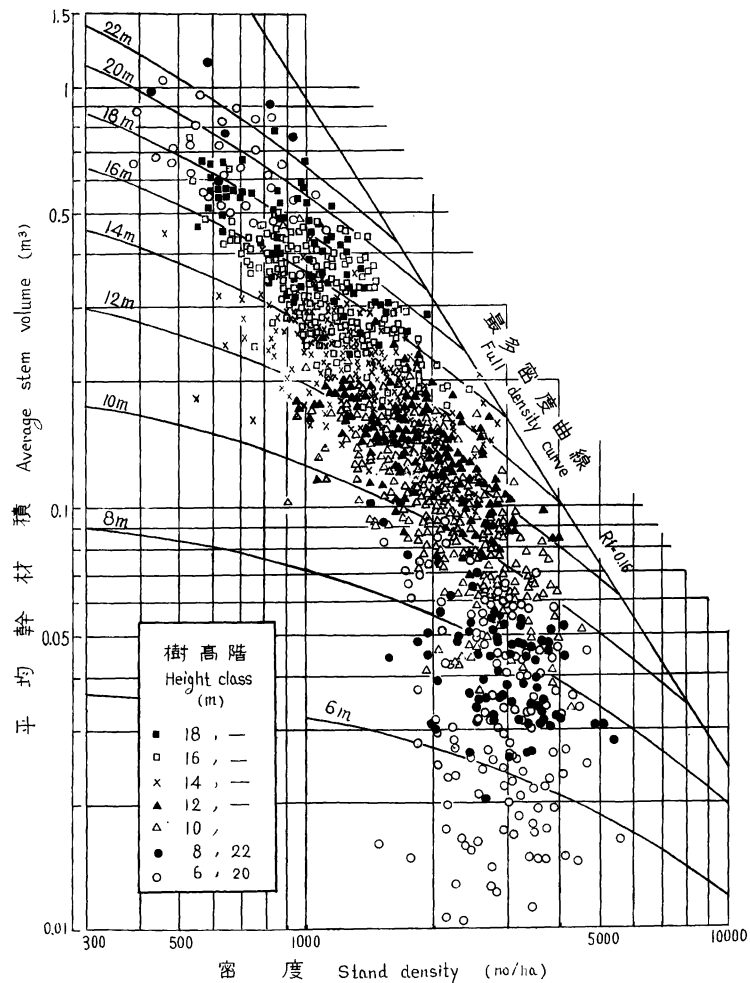


Fig. 35 全国ヒノキの幹材積の等平均樹高線と最多密度曲線
Equivalent height curves and full density curve of stem
volume in all districts of *Chamaecyparis obtusa*.

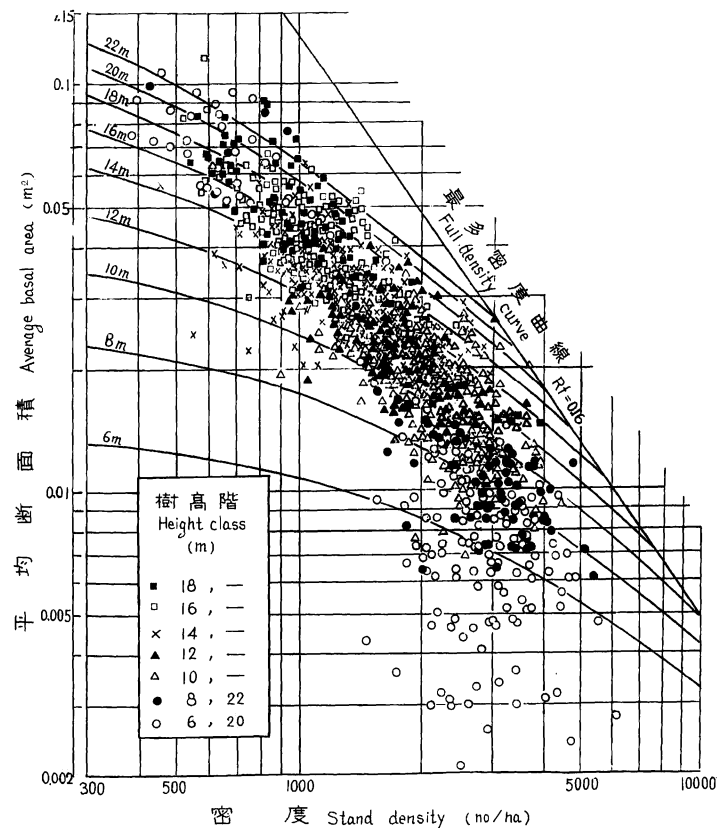


Fig. 36 全国ヒノキの断面積の等平均樹高線と最多密度曲線
Equivalent height curves and full density curve of
basal area in all districts of *Chamaecyparis obtusa*.

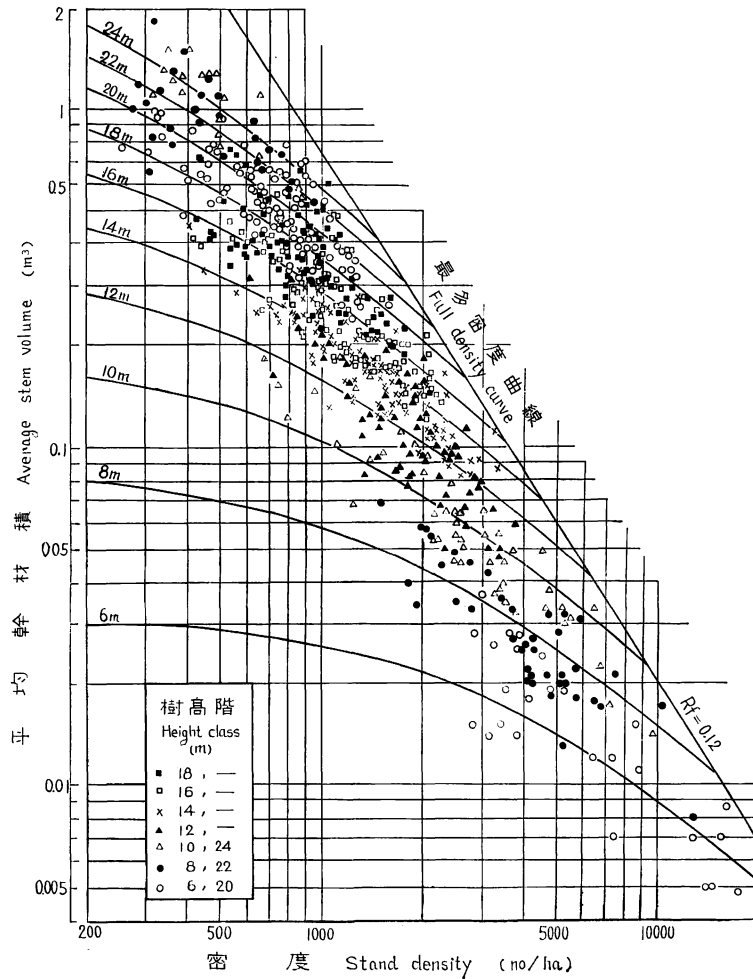


Fig. 37 全国アカマツの幹材積の等平均樹高線と最多密度曲線
Equivalent height curves and full density curve of stem volume in all districts of *Pinus densiflora*.

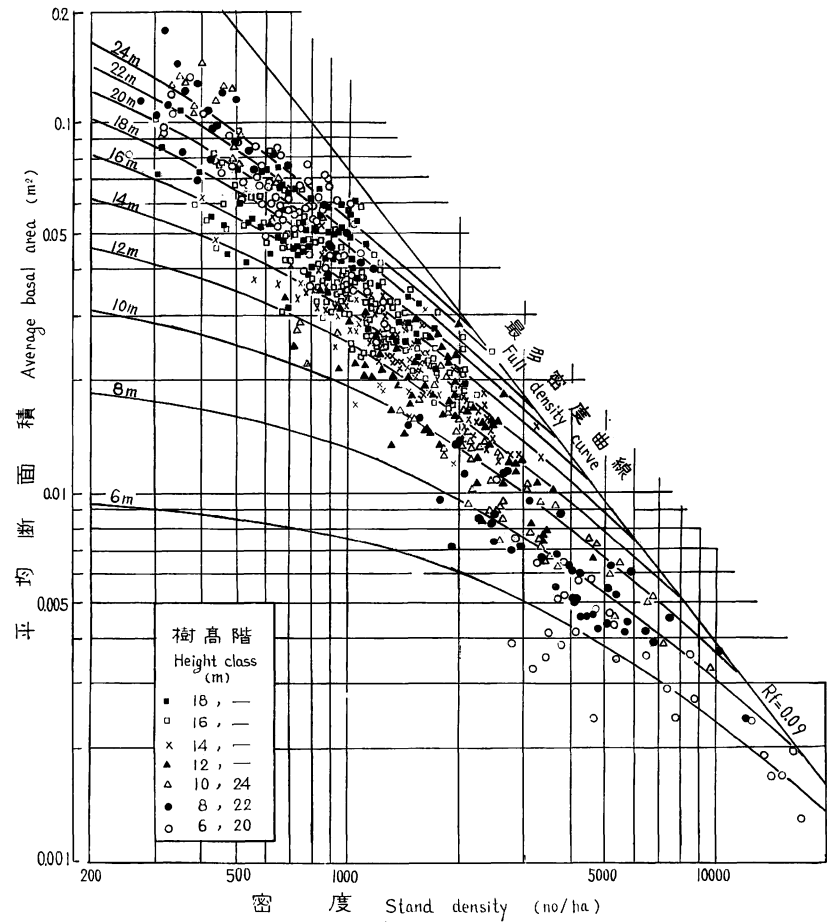


Fig. 38 全国アカマツの断面積の等平均樹高線と最多密度曲線
Equivalent height curves and full density curve of basal area in all districts of *Pinus densiflora*.

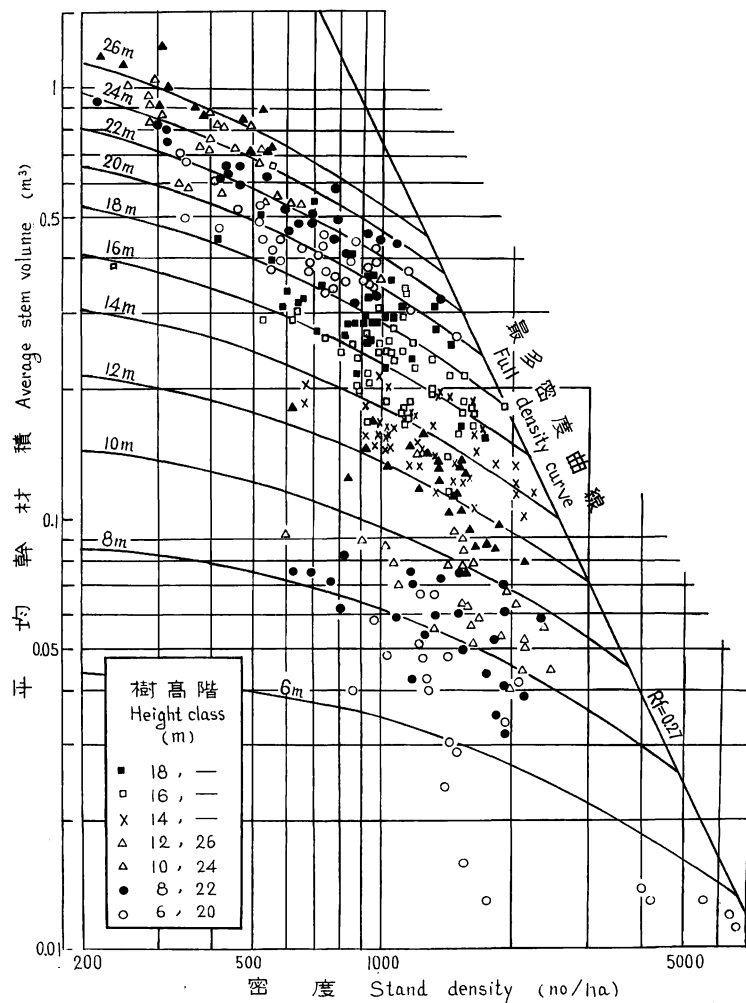


Fig. 39 全国カラマツの幹材積の等平均樹高線と最多密度曲線
Equivalent height curves and full density curve of stem
volume in all districts of *Larix leptolepis*.

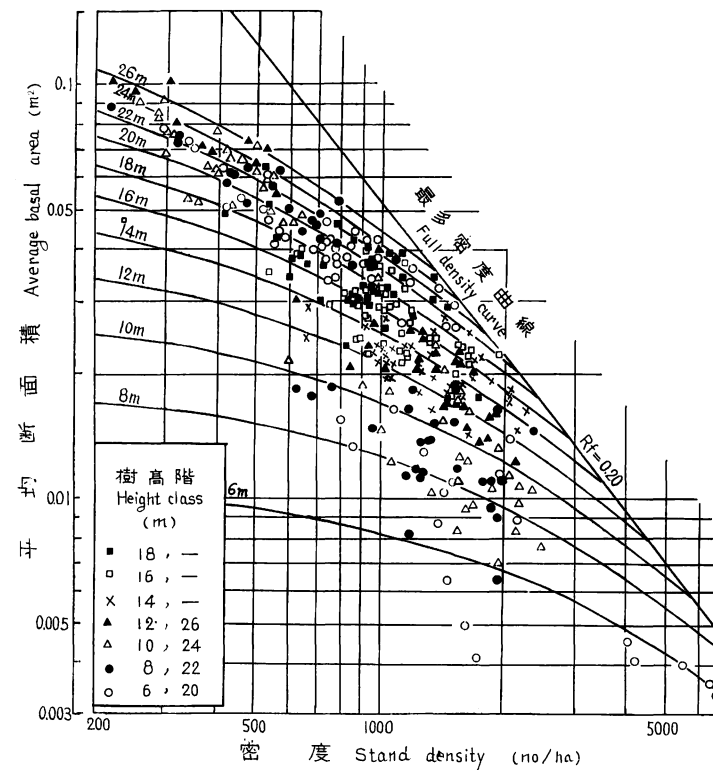


Fig. 40 全国カラマツの断面積の等平均樹高線と最多密度曲線
Equivalent height curves and full density curve of
basal area in all districts of *Larix leptolepis*.

Table 38. 樹種別の幹材積最多密度曲線と R_f Full density curve of stem volume and R_f in each species.

Full density curve of stem volume is shown by following equation;

$$v_{R_f} = K_2' \rho_{R_f}^{K_1} \quad K_1 = \frac{b_1'}{b_1 - b_1'} \quad K_2' = \frac{R_f}{a_1} \left(\frac{R_f}{1 - R_f} \frac{a_1}{a_1'} \right)^{\frac{b_1'}{b_1 - b_1'}}$$

 v_{R_f} : Average stem volume (m³), ρ_{R_f} : Full density (No./ha). a_1 and a_1' are given in Table 28, Table 30, Table 32 and Table 34. b_1 and b_1' are given in Table 17, Table 19, Table 21 and Table 23.

樹種 Species	地方 District	R_f	最多密度曲線 Full density curve
スギ <i>Cryptomeria japonica</i>	秋田地方 Akita district	0.26	$\log v_{R_f} = -1.6517 \log \rho_{R_f} + 5.0310$
	全 国 All district	0.15	$\log v_{R_f} = -1.9184 \log \rho_{R_f} + 5.9637$
ヒノキ <i>Chamaecyparis obtusa</i>	木曽地方 Kiso district	0.14	$\log v_{R_f} = -1.6322 \log \rho_{R_f} + 4.7142$
	全 国 All district	0.16	$\log v_{R_f} = -1.5867 \log \rho_{R_f} + 4.7257$
アカマツ <i>Pinus densiflora</i>	磐城地方 Iwaki district	0.16	$\log v_{R_f} = -1.4417 \log \rho_{R_f} + 4.0754$
	全 国 All district	0.12	$\log v_{R_f} = -1.5619 \log \rho_{R_f} + 4.5350$
カラマツ <i>Larix leptolepis</i>	信州地方 Shinshu district	0.31	$\log v_{R_f} = -2.0446 \log \rho_{R_f} + 5.8800$
	全 国 All district	0.27	$\log v_{R_f} = -2.1140 \log \rho_{R_f} + 6.2012$

Table 39. 樹種別の胸高断面積最多密度曲線と R_f Full density curve of basal area and R_f in each species.

Full density curve of basal area is shown by following equation;

$$g_{R_f} = K_2' \rho_{R_f}^{K_1} \quad K_1 = \frac{b_2'}{b_2 - b_2'} \quad K_2' = \frac{R_f}{a_2} \left(\frac{R_f}{1 - R_f} \frac{a_2}{a_2'} \right)^{\frac{b_2'}{b_2 - b_2'}}$$

 g_{R_f} : Average basal area (m²), ρ_{R_f} : Full density (No./ha). a_2 and a_2' are given in Table 29, Table 31, Table 33 and Table 35. b_2 and b_2' are given in Table 18, Table 20, Table 22 and Table 24.

樹種 Species	地方 District	R_f	最多密度曲線 Full density curve
スギ <i>Cryptomeria japonica</i>	秋田地方 Akita district	0.25	$\log g_{R_f} = -1.2028 \log \rho_{R_f} + 2.5985$
	全 国 All district	0.15	$\log g_{R_f} = -1.4005 \log \rho_{R_f} + 3.2555$
ヒノキ <i>Chamaecyparis obtusa</i>	木曽地方 Kiso district	0.15	$\log g_{R_f} = -1.5208 \log \rho_{R_f} + 3.5728$
	全 国 All district	0.16	$\log g_{R_f} = -1.4105 \log \rho_{R_f} + 3.3334$

樹種 Species	地方 District	R_f	最多密度曲線 Full density curve
アカマツ <i>Pinus densiflora</i>	磐城地方 Iwaki district	0.10	$\log g_{R_f} = -1.1282 \log \rho_{R_f} + 2.1440$
	全 国 All district	0.09	$\log g_{R_f} = -1.2730 \log \rho_{R_f} + 2.6752$
カラマツ <i>Larix leptolepis</i>	信州地方 Shinshu district	0.20	$\log g_{R_f} = -1.4628 \log \rho_{R_f} + 3.0994$
	全 国 All district	0.20	$\log g_{R_f} = -1.2513 \log \rho_{R_f} + 2.4670$

Table 40. 樹高と最多密度との関係（幹材積基準）
Relation between height and full density (Stem volume base).
The relation is shown by following equation:

$$\rho_{R_f} = \frac{(1-R_f)}{R_f} \frac{a_1'}{a_1} H^{(b_1-b_1')}$$

H : Height (m), ρ_{R_f} : Full density (No./ha),

R_f : Minimum competition index which was given in Table 38.

a_1 and a_1' are given in Table 28, Table 30, Table 32 and Table 34.

b_1 and b_1' are given in Table 17, Table 19, Table 21 and Table 23.

樹種 Species	地方 District	関係式 Equation
スギ <i>Cryptomeria japonica</i>	秋田地方 Akita district	$\log \rho_{R_f} = -1.6936 \log H + 5.5472$
	全 国 All district	$\log \rho_{R_f} = -1.4171 \log H + 5.2345$
ヒノキ <i>Chamaecyparis obtusa</i>	木曽地方 Kiso district	$\log \rho_{R_f} = -1.8133 \log H + 5.5323$
	全 国 All district	$\log \rho_{R_f} = -2.0731 \log H + 5.9792$
アカマツ <i>Pinus densiflora</i>	磐城地方 Iwaki district	$\log \rho_{R_f} = -2.4202 \log H + 6.2904$
	全 国 All district	$\log \rho_{R_f} = -2.1952 \log H + 6.1533$
カラマツ <i>Larix leptolepis</i>	信州地方 Shinshu district	$\log \rho_{R_f} = -1.1821 \log H + 4.6824$
	全 国 All district	$\log \rho_{R_f} = -1.1394 \log H + 4.7117$

Table 41. 樹高と最多密度との関係(胸高断面積基準)
Relation between height and full density (Basal area base).

$$\rho_{R_f} = \frac{(1-R_f)}{R_f} \frac{a_2'}{a_2} H^{(b_2-b_2')}$$

H : Height (m), ρ_{R_f} : Full density (No./ha),

R_f : Minimum competition index which was given in Table 39.

a_2 and a_2' are given in Table 29, Table 31, Table 33 and Table 35.

b_2 and b_2' are given in Table 18, Table 20, Table 22 and Table 24.

樹種 Species	地方 District	関係式 Equation
スギ <i>Cryptomeria japonica</i>	秋田地方 Akita district	$\log \rho_{R_f} = -1.6809 \log H + 5.5924$
	全 国 All district	$\log \rho_{R_f} = -1.3773 \log H + 5.2219$
ヒノキ <i>Chamaecyparis obtusa</i>	木曽地方 Kiso district	$\log \rho_{R_f} = -1.1669 \log H + 4.9217$
	全 国 All district	$\log \rho_{R_f} = -1.4710 \log H + 5.4954$
アカマツ <i>Pinus densiflora</i>	磐城地方 Iwaki district	$\log \rho_{R_f} = -2.3859 \log H + 6.4072$
	全 国 All district	$\log \rho_{R_f} = -1.9719 \log H + 6.6285$
カラマツ <i>Larix leptolepis</i>	信州地方 Shinshu district	$\log \rho_{R_f} = -0.9687 \log H + 4.5023$
	全 国 All district	$\log \rho_{R_f} = -1.5020 \log H + 5.2636$

Table 42. 樹高と最多密度および幹材積
Height, full density and stem volume of each species.
These are calculated from the equation of all districts in Table 38 and Table 40.

樹高 Height (m)	スギ <i>Cryptomeria japonica</i>		ヒノキ <i>Chamaecyparis obtusa</i>		アカマツ <i>Pinus densiflora</i>		カラマツ <i>Larix leptolepis</i>	
	最多密度 Full density (No./ha)	幹材積 Stem volume (m ³ /ha)	最多密度 Full density (No./ha)	幹材積 Stem volume (m ³ /ha)	最多密度 Full density (No./ha)	幹材積 Stem volume (m ³ /ha)	最多密度 Full density (No./ha)	幹材積 Stem volume (m ³ /ha)
6	13,543	147.6	23,223	146.0	27,862	109.0	6,684	87.1
8	9,010	214.7	12,794	207.1	14,819	155.4	4,816	125.5
10	6,568	287.0	8,056	271.6	9,081	204.6	3,735	166.6
12	5,072	363.8	5,511	339.4	6,084	256.3	3,035	209.9
14	4,078	444.5	4,011	409.0	4,339	309.8	2,546	255.3
16	3,375	530.0	3,041	481.1	3,237	365.3	2,186	302.6
18	2,855	616.7	2,381	555.4	2,499	422.5	1,912	351.2
20	2,460	707.2	1,915	631.0	1,983	481.3	1,696	401.4
22	2,149	800.5	1,572	708.0	1,609	541.0	1,521	453.2
24	1,899	896.6	—	—	1,329	602.4	1,378	505.8
26	1,696	995.1	—	—	—	—	1,257	560.5
28	1,527	1096.0	—	—	—	—	—	—
30	1,385	1199.2	—	—	—	—	—	—

ツ実態調査の資料をも加えた今回の計算でも、Table 38 に示したように $K_1 = -2.0446$ とさきに示した値とはほぼ同じ値がえられた。この傾きは現実の点に対してもよく適合した傾きで、さきに計算した資料には、十分な密度をもった林分の調査資料がほとんど含まれていなかったことがわかった。

したがって、このような方法でえられた最多密度曲線の傾きは、(37) (38) 式の関係が十分によくえられているときには、現実の点の傾きと違っていても、むしろよく最多密度曲線の傾きを示しているものと判断される。Table 38 に示した全国の最多密度曲線は只木・四手井、只木の最多密度曲線に比べるとスギ、アカマツでは幹材積が同じならば密度はいくぶん低い値を示す。この理由は、調査法や材積推定法を考えた上で等質と考えられる資料のみに限ったこと、また等平均樹高線を算定するとき、同じ樹高階にありながらその樹高階の一般的な傾向と著しく違うプロット、および胸高断面積と幹材積の関係が著しく異状なプロットを有意的にあらかじめ除外しておいたことによる。

(59) 式で競争比数が R_c のときの樹高と密度の関係を示したが、この式の R_c を R_f とおきかえることにより樹高に応じた最多密度を求めることができる。すなわち、

$$\rho_{R_f} = \frac{(1 - R_f)}{R_f} \cdot \frac{a_1'}{a_1} H^{(b_1 - b_1')} \dots\dots\dots (59)'$$

この関係を幹材積と断面積について導き、Table 40~41 に示す。この関係は本来、幹材積または断面積のいずれから導いても同じになるべきはずのものであるが、Table 40~41 からわかるように、(59)' 式の常数には若干のずれが認められ、したがって、同一樹高における最多密度にも違いが生ずる。これは幹材積または断面積の等平均樹高線を示す密度効果の逆数式の常数 A_1 , B_1 , あるいは A_2 , B_2 と樹高 H との関係をそれぞれ独立に求めたことによるもので、いまの段階でこの矛盾を解決することはできない。断面積は測定が容易なため基準として都合がよいが、本報では林業の主要収穫対象部分である幹材積を直接示しているのので、幹材積の最多密度曲線を基準として取り扱うことにする。(59)' 式と (62) 式から求められた樹高と最多密度および幹材積の関係を Table 42 に示す。

ii) 収量比数と収量比数曲線

競争比数は競争密度効果における競争の強さを示す尺度であった。したがって、等競争比数曲線は $V = v \cdot \rho$ の関係から収量密度効果においては、

$$\left. \begin{aligned} V_{Re} &= v_{Re} \cdot \rho_{Re} = K_2 \rho_{Re}^{K_1+1} = K_2 \rho_{Re}^{K_1'} \\ K_1 &= \frac{b_1'}{b_1 - b_1'} + 1 = \frac{b_1}{b_1 - b_1'} \\ K_2 &= \frac{R_c}{a_1} \left(\frac{R_c}{1 - R_c} \cdot \frac{a_1}{a_1'} \right)^{\frac{b_1'}{b_1 - b_1'}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (61)'$$

で与えられる。したがって、(61)' 式の R_c を R_f におきかえると、収量密度効果における最多密度曲線がえられる。

収量密度効果線上での最多密度曲線は、生育段階に応じた最大の単位面積あたり幹材積を示す。したがって、常に最多密度曲線上にあるように林分を保てば、常に生育段階に応じた最大の幹材積生産量がえられる。しかし、最多密度曲線上での平均幹材積は同一生育段階においては最小である。したがって、利用径級に達するためにはより多くの時間を必要とすることになる。このため、現実林の密度管理という立場にたつと、平均幹材積の大きさにも考慮を払わなければならないため、最多密度曲線より、かなり低い密

度で管理されるのが普通である。また最多密度曲線にごく近く管理すると、風雪害や病害なども発生しやすい。

このような現実的な林分の密度管理の問題を検討するため、只木・四手井¹⁴²⁾、只木^{143) 144)} は同一等平均樹高曲線上の最多密度に対する本数比率、すなわち、相対密度* をもちいた。相対密度は最多密度曲線からのへだたりを示すには 1 つの良い尺度であるが、次に示す 最多密度曲線上の 幹材積に対する材積比率、すなわち、収量比数 (yield index) も同様に最多密度曲線からのへだたりを示すことができ、また幹材積と直接結びつきをもっているの、収穫量などを検討するときにはよりつごうがよいと考える。

いま、ある生育段階の収量密度効果を示す線上で、現実値としてえられる最多の材積、すなわち、最多密度曲線で示される幹材積を V_{R_f} とする。いまこの密度効果線上である競争比数 R_c をもつ幹材積 V_{R_c} は V_{R_f} に対し V_{R_c}/V_{R_f} の割合をもつ。この割合を収量比数 R_y と呼ぶ。

すなわち、収量比数 R_y は

$$R_y = V_{R_c}/V_{R_f} \quad \dots\dots\dots(63)$$

で示される。 R_y と R_c の一般的な関係は、

$$R_y = \frac{1 - R_c}{1 - R_f} \quad \dots\dots\dots(64)$$

$$\text{または } R_c = 1 - (1 - R_f) R_y \quad \dots\dots\dots(65)$$

と導ける。したがって、(61) 式に (65) 式を入れると、

$$\left. \begin{aligned} V_{R_y} &= K_3 \rho_{R_y} K_1' \\ K_1' &= \frac{b_1}{b_1 - b_1'} \\ K_3 &= \frac{1 - (1 - R_f) R_y}{a_1'} \left[\frac{a_1}{a_1'} \frac{1 - (1 - R_f) R_y}{(1 - R_f) R_y} \right]^{\frac{b_1'}{b_1 - b_1'}} \\ &= \frac{(1 - R_f) R_y}{a_1} \left[\frac{a_1}{a_1'} \frac{1 - (1 - R_f) R_y}{(1 - R_f) R_y} \right]^{\frac{b_1}{b_1 - b_1'}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(66)$$

によって同じ収量比数のときの密度と単位面積あたり幹材積の関係を示すことができ、この関係を等収量比数曲線 (equivalent yield index curve) と呼ぶ。

またこのときの密度 ρ_{R_y} と平均樹高 H との関係は (59) 式から

* SPURR¹³¹⁾ は密度を示すのに絶対的な term と相対的な term のあることについて次のように述べている。

“Density may be expressed in absolute or relative terms. Absolute measures of density may be obtained directly from any given stand without reference to any other stand. Thus, basal area per acre is an absolute measure which expresses the density of trees on an area basis. Relative density is based on an agreed-upon or standard density. Thus, a stand which has 80 percent of the basal area of a similar stand which is recognized as fully stocked, is said to be 80 percent stocked on a basal area basis. The problem of what constitutes full or normal stocking is the essence of relative density systems.”

只木・四手井¹⁴²⁾、只木^{143) 144)} は相対密度の英訳としても relative density をもちいているが、内容は SPURR の relative density と違うので、この両者は混乱を生ずるおそれがある。本報においては、只木・四手井、只木の相対密度はそのままちい、SPURR の relative density を相対的な密度として用いる。

Table 43. 等収量比数曲線

Equivalent yield index curve of each species.

Equivalent yield index curves are shown by following equation:

$$V_{Ry} = K_3 \rho_{Ry}^{K_1'}, \quad K_1' = \frac{b_1}{b_1 - b_1'}, \quad K_3 = \frac{(1-R_f)R_y}{a_1} \left[\frac{a_1}{a_1'} \frac{1 - (1-R_f)R_y}{(1-R_f)R_y} \right]^{\frac{b_1}{b_1 - b_1'}}$$

 V_{Ry} : Stem volume (m³/ha), ρ_{Ry} : Density (No./ha), R_f is given in Table 38. a_1 and a_1' are given in Table 28, Table 30, Table 32 and Table 34. b_1 and b_1' are given in Table 17, Table 19, Table 21 and Table 23.

ギ ス <i>Cryptomeria japonica</i>	R_y	全 国 All districts	秋 田 地 方 Akita district
	0.9	$\log V_{0.9} = -0.9184 \log \rho + 5.6969$	$\log V_{0.9} = -0.6517 \log \rho + 4.8846$
	0.8	$\log V_{0.8} = -0.9184 \log \rho + 5.4756$	$\log V_{0.8} = -0.6517 \log \rho + 4.7434$
	0.7	$\log V_{0.7} = -0.9184 \log \rho + 5.2704$	$\log V_{0.7} = -0.6517 \log \rho + 4.6004$
	0.6	$\log V_{0.6} = -0.9184 \log \rho + 5.0661$	$\log V_{0.6} = -0.6517 \log \rho + 4.4495$
	0.5	$\log V_{0.5} = -0.9184 \log \rho + 4.8503$	$\log V_{0.5} = -0.6517 \log \rho + 4.2834$
キ ノ ヒ <i>Chamaecyparis obtusa</i>	R_y	全 国 All districts	木 曽 地 方 Kiso district
	0.9	$\log V_{0.9} = -0.5876 \log \rho + 4.5455$	$\log V_{0.9} = -0.6322 \log \rho + 4.5080$
	0.8	$\log V_{0.8} = -0.5876 \log \rho + 4.3890$	$\log V_{0.8} = -0.6322 \log \rho + 4.3360$
	0.7	$\log V_{0.7} = -0.5876 \log \rho + 4.2389$	$\log V_{0.7} = -0.6322 \log \rho + 4.1745$
	0.6	$\log V_{0.6} = -0.5876 \log \rho + 4.0854$	$\log V_{0.6} = -0.6322 \log \rho + 4.0115$
	0.5	$\log V_{0.5} = -0.5876 \log \rho + 3.9200$	$\log V_{0.5} = -0.6322 \log \rho + 3.8374$
マ ツ カ ナ <i>Pinus densiflora</i>	R_y	全 国 All districts	磐 城 地 方 Iwaki district
	0.9	$\log V_{0.9} = -0.5619 \log \rho + 4.3293$	$\log V_{0.9} = -0.4417 \log \rho + 3.9284$
	0.8	$\log V_{0.8} = -0.5619 \log \rho + 4.1634$	$\log V_{0.8} = -0.4417 \log \rho + 3.7979$
	0.7	$\log V_{0.7} = -0.5619 \log \rho + 4.0093$	$\log V_{0.7} = -0.4417 \log \rho + 3.6706$
	0.6	$\log V_{0.6} = -0.5619 \log \rho + 3.8543$	$\log V_{0.6} = -0.4417 \log \rho + 3.5384$
	0.5	$\log V_{0.5} = -0.5619 \log \rho + 3.6890$	$\log V_{0.5} = -0.4417 \log \rho + 3.3810$
マ ツ カ ラ <i>Larix leptolepis</i>	R_y	全 国 All districts	信 州 地 方 Shinshu district
	0.9	$\log V_{0.9} = -1.1140 \log \rho + 5.9889$	$\log V_{0.9} = -1.0446 \log \rho + 5.6955$
	0.8	$\log V_{0.8} = -1.1140 \log \rho + 5.7873$	$\log V_{0.8} = -1.0446 \log \rho + 5.5149$
	0.7	$\log V_{0.7} = -1.1140 \log \rho + 5.5865$	$\log V_{0.7} = -1.0446 \log \rho + 5.3315$
	0.6	$\log V_{0.6} = -1.1140 \log \rho + 5.3778$	$\log V_{0.6} = -1.0446 \log \rho + 5.1377$
	0.5	$\log V_{0.5} = -1.1140 \log \rho + 5.1712$	$\log V_{0.5} = -1.0446 \log \rho + 4.9253$

$$\rho_{Ry} = \frac{(1 - R_f) R_y}{1 - (1 - R_f) R_y} \frac{a_1'}{a_1} H(b_1 - b_1') \dots\dots\dots (67)$$

と導かれる。さきに示した Fig. 25~40 の例について等収量比数曲線を Table 43 に示す (Fig. 41~Fig. 48 の林分密度管理図参照)。

競争比数と収量比数の一般的な関係は (64) 式により示されたが、只木・四手井¹⁴²⁾、只木^{143) 144)} の相対密度 (relative density) も競争比数、あるいは収量比数と一般的な関係を求めることができる。

ある生育段階における密度効果線上の最多密度を ρ_{R_f} 、相対密度 ρ_r % の密度を ρ_i とすると、

$$\rho_r = (\rho_i / \rho_{R_f}) \times 100 \dots\dots\dots (68)$$

により相対密度 ρ_r は定義される。この相対密度と競争比数 R_c との一般的な関係は

$$\rho_r = \frac{R_f(1 - R_c)}{R_c(1 - R_f)} \dots\dots\dots (69)$$

また収量比数 R_y との一般的な関係は

$$\rho_r = \frac{R_f \cdot R_y}{1 - (1 - R_f) R_y} \dots\dots\dots (70)$$

と導ける。

8. 考 察

本章において、樹高を生物的な時間の尺度と考え、密度と成長の関係を樹高を基準に論じたが、その基礎として、樹高がうける密度の影響は無視してもさしつかえないということが前提になっている。このような見地から、これまでに公表されている多くの植栽密度試験や間伐試験の結果を、密度と樹高の関係を主にして総括してみた。その結果は SPURR¹⁸¹⁾、BRAATHE¹⁷⁾、KRAMER⁶⁶⁾、嶺⁷⁸⁾、坂口¹¹¹⁾などによって述べられているように、一般に樹高成長は密度の影響が少なく、育林的な立場からみれば、その変異を無視してもさしつかえないというこれまでの主張の支持されることがわかった。

これまでも、密度と幹材積成長の関係を定量的に予測するため多くの研究がおこなわれてきたが、これまでもおこなわれた重回帰による研究から、密度と成長の問題を統一的に説明することは困難であった。これに対し、植物生態学の研究分野で草本植物の実験から導かれた吉良らの密度効果の逆数式は、密度と成長の関係を統一的に記述説明でき、林木における実験値にもよくあてはまることから、造林学においても高く評価されてきた。

密度効果の逆数式の常数 A 、 B は、生育段階によってかわり、内容としては Table 1 の λN 型にみられるような複雑なかたちをとるが、実用的には樹高と両対数軸上で直線関係を示すことによって近似的に求められることが知られていた。逆数式の常数 A 、 B と時間の関係は SHINOZAKI and KIRA¹²⁸⁾ が 1 年生作物について示したように、 A は時間の経過と共に短期間に急激に増加し、頂点に達した後は指数函数的に減少し、 B は時間の経過と共に指数函数的に減少する。 A 、 B が両対数軸上で樹高と直線関係を示すものとして近似されたことは、この指数函数的に減少する部分を、樹高を生物的な時間の尺度とすることにより近似できたものと考えられる。したがって、このような近似から、厳密に全生育過程における A 、 B の値を予測できるとは考えられない。しかし、現象的に知られている他の生物学的な関係から上記の関係が導かれ、この関係の基礎が明らかにされたことは、実用的には、これらの関係をもちいて、密度と成長の関係を予測してもさしつかえない一つのうらづけが与えられたものと考えてよからう。

密度効果線と共に、密度と幹材積の関係をあらわすもう一つの重要な関係として、最多密度曲線が知ら

れている。この両者の間には何らかの関係があることが考えられていたが、只木・四手井¹⁴²⁾、只木¹⁴³⁾¹⁴⁴⁾によって示されてきたようにそれぞれ独立に求められていた。筆者は競争比数を定義することによって、一般に同じ競争比数をもつ林分の密度と幹材積の間に、最多密度曲線式として知られている関係と同様の関係のあることを示し、現実にとりうる最小の競争比数によって最多密度曲線を示した。このことは主観的にしか決められなかった最多密度曲線式の傾きを、計算によって決める基礎を与えたものとする。

さらに収量比数を定義することによって、収量比数曲線が示された。競争比数、収量比数あるいは只木・四手井¹⁴²⁾の相対密度はいずれも密度効果線上で示され、相対的な密度の尺度としてもちいることができる。同齡單純林における相対的な密度の尺度としては REINEKE⁹⁴⁾の立木密度指数 (S. D. I) や坂口¹¹¹⁾の立木密度比数 (S. D. R) があり、断面積に基準をおいた MARTIN* の相対的幹距数は ASSMANN* の支持をえ、CHAISMAN and SCHUMACHER* の tree-area-ratio は STAHELIN* により用いられた。また樹高を基準としたものとしては KÖHLER*, HART*, WILSON* 等によって示された上層高と密度の関係があり、また1953年ローマの IUFO の第11回会議で提案された HUMMEL⁴²⁾の方法は、平均樹高の20%の樹間距離を標準樹間距離として、この倍数を立木蓄積指数 (stock index) と呼んだ。この指数が0.5のときはE度、0.75のときはD度、1.0はC/D度、1.5はC度、2.5はB度、4.0はA度と間伐度合と対応し、伐期を通じてこの対応関係が大きくかわらないことが BRAATHE¹⁷⁾などにより支持される大きな理由となっている。これらの密度の尺度は、それぞれ特徴があり、見る立場によってはつごうのよい面をもっている。しかしながら、今日もっとも支持されている HUMMEL⁴²⁾の方法にしても、BRAATHE¹⁷⁾により間伐指針としては非常に簡単で使いよい指数であるが、断面積や幹材積と直接結びつかない点を指摘されている。

筆者が示した収量比数は樹高を媒介として導かれたが、その結果は密度と単位面積あたりの幹材積の関係によって示され、直接幹材積と結びついている。この点から、相対的な密度の尺度として一つのすぐれた面を持っているといえよう。

9. 摘 要

1. 内外の密度と林木の成長に関する報告から、その一般的な傾向を示し、この傾向を数式化して成長を予測しようとするこれまでの研究を総括した。

2. 林木の密度と成長の関係を示すには、吉良らによって導かれた密度効果式によるとつごうがよい。この式は密度を ρ 、平均個体重を w 、単位面積あたりの収量を y とすると、

$$1/w = A\rho + B \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$1/y = A + B/\rho \quad \dots\dots\dots(13)$$

により与えられる。 A , B は生育段階により決まる常数である。

3. 密度効果式は幹材積または胸高断面積と密度との関係もよく近似する。平均幹材積を v 、単位面積あたり幹材積を V 、平均断面積を g 、単位面積あたり断面積を G とすると、

$$1/v = A_1\rho + B_1 \quad \dots\dots\dots(22)$$

$$1/V = A_1 + B_1/\rho \quad \dots\dots\dots(23)$$

$$1/g = A_2\rho + B_2 \quad \dots\dots\dots(24)$$

$$1/G = A_2 + B_2/\rho \quad \dots\dots\dots(25)$$

* 坂口¹¹¹⁾による。

これらの関係は同じ平均樹高階にある密度と幹材積または断面積の関係を地位、林齢に無関係に近似する。このときに示される曲線は等平均樹高線と呼ばれる。

4. (22) (23) (24) (25) 式の A_1, B_1, A_2, B_2 は樹高を H とすると

$$A_1 = a_1 H^{-b_1} \dots\dots\dots (37)$$

$$B_1 = a_1' H^{-b_1'} \dots\dots\dots (38)$$

$$A_2 = a_2 H^{-b_2} \dots\dots\dots (40)$$

$$B_2 = a_2' H^{-b_2'} \dots\dots\dots (41)$$

の関係が認められる。

5. 競争比数 Rc を $Rc = v/v^*$ (ある林分の平均幹材積を v , v と同一密度効果線または等平均樹高線上の $\rho \rightarrow 0$ のときの平均幹材積を v^* とする) で定義すると

$$\left. \begin{aligned} v_{Rc} &= K_2 \rho_{Rc}^{K_1} \\ K_1 &= \frac{b_1'}{b_1 - b_1'} \\ K_2 &= \frac{Rc}{a_1'} \left(\frac{Rc}{1 - Rc} \cdot \frac{a_1}{a_1'} \right)^{\frac{b_1'}{b_1 - b_1'}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (61)$$

が導かれる。この式は収量比数が同じときの幹材積と密度の関係を示す。いま現実にとりうる最小の競争比数を R_f とすると (61) 式は

$$\left. \begin{aligned} v_{R_f} &= K_2' \rho_{R_f}^{K_1} \\ K_1 &= \frac{b_1'}{b_1 - b_1'} \\ K_2' &= \frac{R_f}{a_1} \left(\frac{R_f}{1 - R_f} \cdot \frac{a_1}{a_1'} \right)^{\frac{b_1'}{b_1 - b_1'}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (62)$$

と書きかえられる。この式によって密度効果線または等平均樹高線との関連において最多密度曲線が示される。

6. (61) (62) 式を単位面積あたり幹材積を V_{Rc}, V_{R_f} として変換すると

$$V_{Rc} = K_2 \rho_{Rc}^{K_1+1} = K_2' \rho_{Rc}^{K_1'} \dots\dots\dots (61)'$$

$$V_{R_f} = K_2' \rho_{R_f}^{K_1+1} = K_2' \rho_{Rc}^{K_1'} \dots\dots\dots (62)'$$

が導ける。いま収量比数を $R_y = V_{Rc}/V_{R_f}$ で定義すると

$$Rc = 1 - (1 - R_f) R_y \dots\dots\dots (65)$$

が導ける。したがって、(61)' 式の Rc を (65) 式によっておきかえると

$$\left. \begin{aligned} V_{R_y} &= K_3 \rho_{R_y}^{K_1'} \\ K_1' &= \frac{b_1}{b_1 - b_1'} \\ K_3 &= \frac{(1 - R_f) R_y}{a_1} \left[\frac{a_1}{a_1'} \frac{1 - (1 - R_f) R_y}{(1 - R_f) R_y} \right]^{\frac{b_1}{b_1 - b_1'}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (66)$$

が導ける。この式は収量比数が R_y のときの単位面積あたり幹材積と密度との関係を示し、この式によって示される曲線を等収量比数曲線と呼ぶ。

7. 以上の関係を多くの測定資料にあてはめ、それぞれの常数を求めた。

8. 収量比数は相対的な密度の尺度としてもちいることができる。

II 林分密度管理図ならびに密度管理のモデルとその収穫量

1. 林分密度管理図

i) 林分密度管理図の構成

国有林の収穫表調製資料など質の同じ林分調査資料を、地位林齢に関係なく主林木樹高によって樹高階にわけると、樹高階ごとに林分の密度 ρ と ha あたり幹材積 V , 平均幹材積 v , および ha あたり胸高断面面積 G , 平均胸高断面面積 g の関係を示す等平均樹高線を密度効果の逆数式で示すことができることはすでに述べたとおりである。

すなわち,

$$\begin{cases} 1/v = A_1\rho + B_1 & \dots\dots\dots(22) \\ 1/V = A_1 + B_1/\rho & \dots\dots\dots(23) \end{cases}$$

$$\begin{cases} 1/G = A_2\rho + B_2 & \dots\dots\dots(24) \end{cases}$$

$$\begin{cases} 1/g = A_2 + B_2/\rho & \dots\dots\dots(25) \end{cases}$$

また逆数式の常数 A_1 , B_1 , あるいは A_2 , B_2 と樹高 H との関係は

$$\begin{cases} A_1 = a_1 H^{-b_1} & \dots\dots\dots(37) \\ B_1 = a_1' H^{-b_1'} & \dots\dots\dots(38) \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_2 = a_2 H^{-b_2} & \dots\dots\dots(40) \end{cases}$$

$$\begin{cases} B_2 = a_2' H^{-b_2'} & \dots\dots\dots(41) \end{cases}$$

で示される。スギ, ヒノキ, アカマツ, カラマツの各地方についてこれらの関係は求められ, すでに Table 17~24 および Table 28~35 に示した。

また, 最多密度曲線は,

$$v_{R_f} = K_2' \rho_{R_f}^{K_1} \dots\dots\dots(62)$$

$$V_{R_f} = K_2' \rho_{R_f}^{K_1'} \dots\dots\dots(62)'$$

で示され, スギの秋田地方, ヒノキの木曽地方, アカマツの磐城地方, カラマツの信州地方とこれらの樹種の全国について (62) 式の関係を求め Table 38~39 に示したこともすでに述べた。

以上の関係を 1 つの図式にまとめると, Fig. 41~48 に示す林分密度管理図ができる。

これらの図の樹高 6 m, 8 m……として示された曲線 (実線) は (37), (38) 式の関係から, それぞれの樹高に応じて A_1 , B_1 の値を求め, (22) 式によって求めた幹材積の等平均樹高線である。また, 胸高直径 6 cm, 8 cm……として示された曲線 (点線) は, (40), (41) 式の関係からそれぞれの樹高に応じて A_2 , B_2 の値を求め, 各樹高階について (25) 式の関係から平均胸高断面面積直径 6 cm, 8 cm……の胸高断面面積から密度を逆推定により算出し, 幹材積の等平均樹高線上に樹高に応じ, それぞれの胸高直径に対応する密度をプロットし, 同じ胸高直径について結んだものである。したがって, 密度管理図に示されている胸高直径は, 胸高断面面積直径である。Fig. 41~48 を描くために求めた A_1 , B_1 , A_2 , B_2 の値を Table 44~47 に示す。

また最多密度曲線として示したものは, Table 38 の (62) 式の関係をも (62)' 式の関係に変換したものである。さらに, 最多密度曲線に平行に $R_f=0.9, 0.8, 0.7$ ……として示した線は, それぞれの収量比数 R_f に応じた収量比数曲線

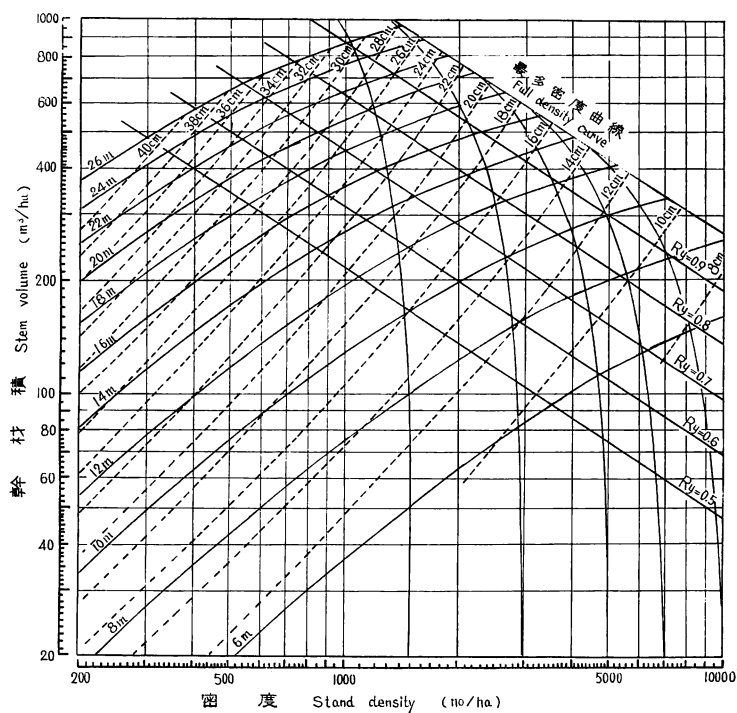


Fig. 41 秋田地方スギ林分密度管理図
Local stand density control diagram in
Akita district of *Cryptomeria japonica*.

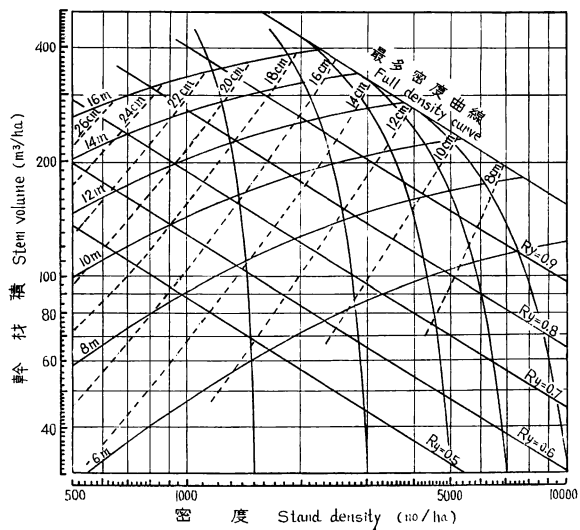


Fig. 42 木曽地方ヒノキ林分密度管理図
Local stand density control diagram in
Kiso district of *Chamaecyparis obtusa*.

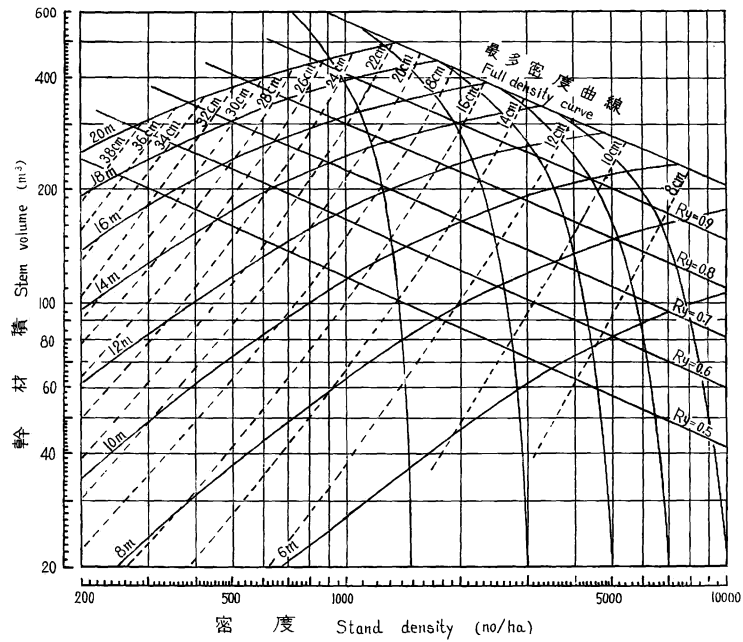


Fig. 43 磐城地方アカマツ林分密度管理図

Local stand density control diagram in
Iwaki district of *Pinus densiflora*.

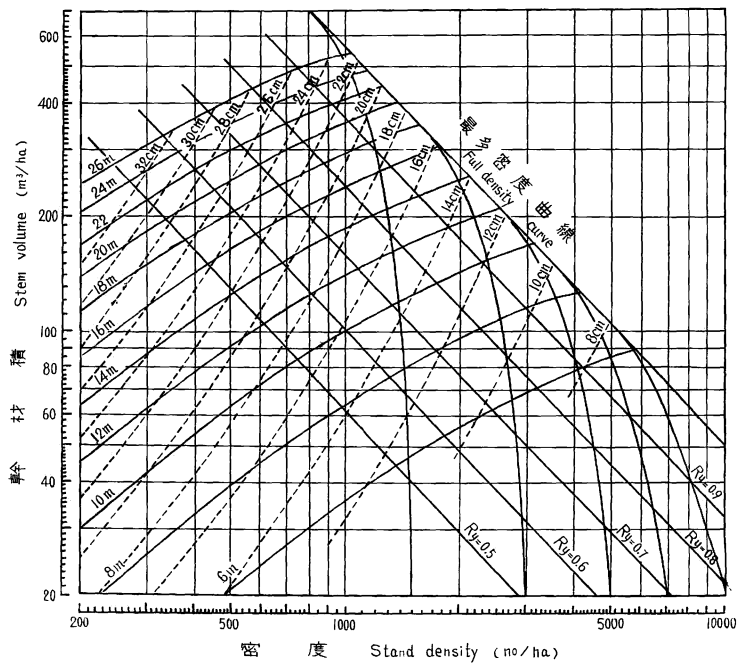


Fig. 44 信州地方カラマツ林分密度管理図

Local stand density control diagram in
Shinshu district of *Larix leptolepis*.

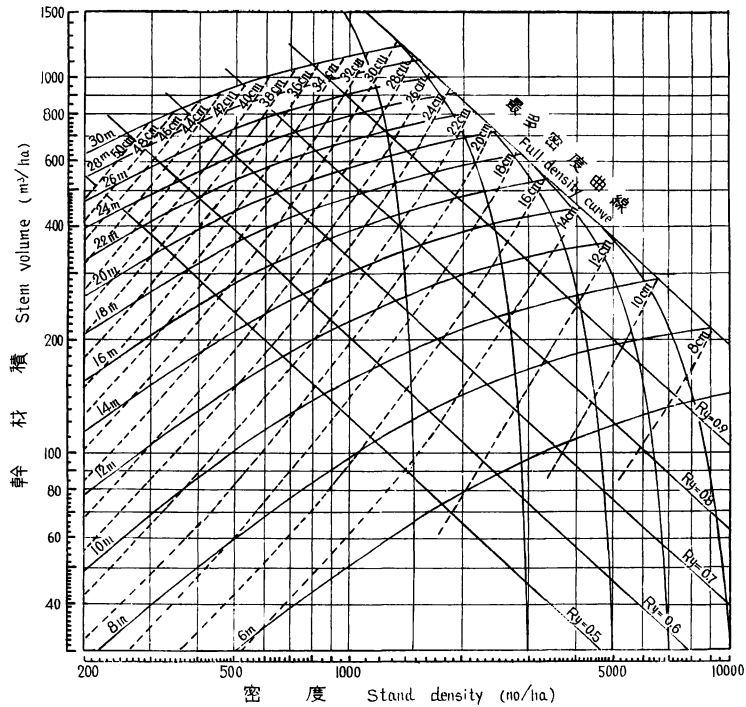


Fig. 45 スギ一般林分密度管理図

General stand density control diagram of *Cryptomeria japonica*.

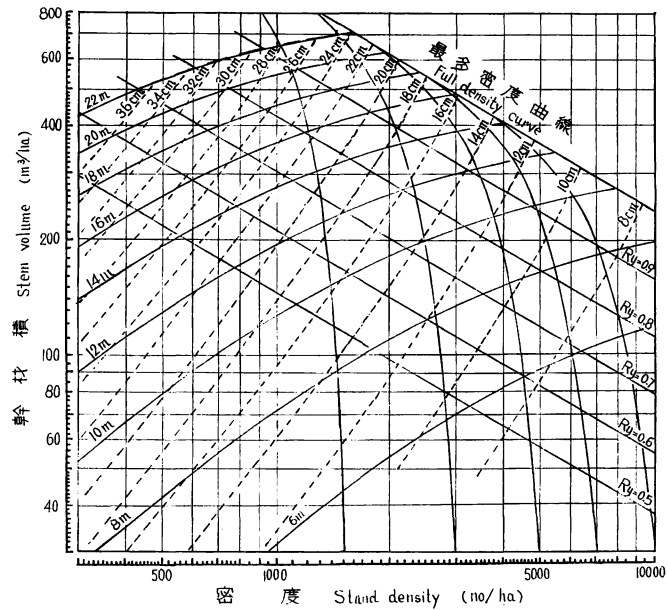


Fig. 46 ヒノキ一般林分密度管理図

General stand density control diagram of *Chamaecyparis obtusa*.

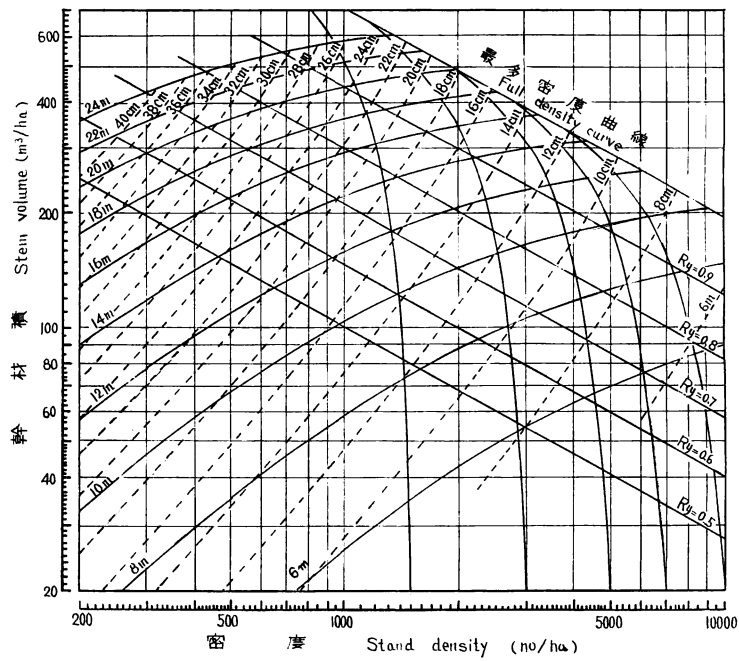


Fig. 47 アカマツ一般林分密度管理図

General stand density control diagram of *Pinus densiflora*.

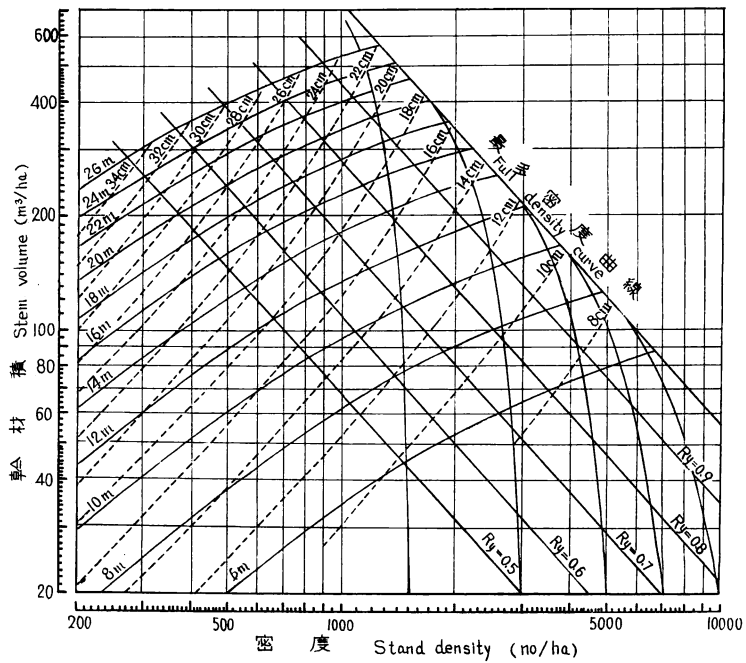


Fig. 48 カラマツ一般林分密度管理図

General stand density control diagram of *Larix leptolepis*.

Table 44. スギの等平均樹高線に関する逆数式の常数の補正值

Corrected constant A_1 , B_1 and A_2 , B_2 in the reciprocal equations of *Cryptomeria japonica*.

The values of Akita district are calculated from following equations:

$$\begin{cases} \log A_1 = -1.1037 \log H - 1.5850 \\ \log B_1 = -2.7973 \log H + 3.5277 \end{cases} \quad \begin{cases} \log A_2 = -0.3409 \log H - 1.5467 \\ \log B_2 = -2.0218 \log H + 3.5463 \end{cases}$$

and the values of average of all districts are calculated from following equations:

$$\begin{cases} \log A_1 = -1.3014 \log H - 1.2270 \\ \log B_1 = -2.7185 \log H + 3.2542 \end{cases} \quad \begin{cases} \log A_2 = -0.5516 \log H - 1.2347 \\ \log B_2 = -1.9289 \log H + 3.2339 \end{cases}$$

樹高階 Height class (m)	秋田地方 Akita district				全国平均 Average of all district			
	A_1	B_1	A_2	B_2	A_1	B_1	A_2	B_2
6	0.003930	23.410	0.01412	90.012	0.005758	13.763	0.02168	54.051
8	0.002861	10.472	0.01280	50.327	0.003960	6.297	0.01850	30.039
10	0.002236	5.609	0.01186	32.056	0.002962	3.433	0.01636	20.184
12	0.001829	3.369	0.01115	22.172	0.002336	2.091	0.01479	14.198
14	0.001543	2.189	0.01058	16.237	0.001912	1.376	0.01359	10.549
16	0.001331	1.507	0.01011	12.397	0.001607	0.9570	0.01262	8.153
18	0.001169	1.084	0.00971	9.766	0.001379	0.6946	0.01183	6.495
20	0.001041	0.8072	0.00937	7.895	0.001202	0.5215	0.01116	5.302
22	0.000937	0.6183	0.00907	6.511	0.001062	0.4026	0.01059	4.411
24	0.000851	0.4823	0.00880	5.461	0.000948	0.3178	0.01009	3.729
26	0.000779	0.3874	0.00856	4.644	0.000854	0.2556	0.00966	3.195
28	—	—	—	—	0.000776	0.2089	0.00927	2.770
30	—	—	—	—	0.000709	0.1733	0.00892	2.425

Table 45. ヒノキの等平均樹高線に関する逆数式の常数の補正值

Corrected constant A_1 , B_1 and A_2 , B_2 in the reciprocal equations of *Chamaecyparis obtusa*.

The values of Kiso district are calculated from following equations:

$$\begin{cases} \log A_1 = -1.1464 \log H - 1.2822 \\ \log B_1 = -2.9597 \log H + 3.4617 \end{cases} \quad \begin{cases} \log A_2 = -0.6077 \log H - 1.0802 \\ \log B_2 = -1.7746 \log H + 3.0882 \end{cases}$$

and the values of average of all districts are calculated from following equations:

$$\begin{cases} \log A_1 = -1.2162 \log H - 1.2934 \\ \log B_1 = -3.2893 \log H + 3.9656 \end{cases} \quad \begin{cases} \log A_2 = -0.6039 \log H - 1.1478 \\ \log B_2 = -2.0749 \log H + 3.4463 \end{cases}$$

樹高階 Height class (m)	木曽地方 Kiso district				全国平均 Average of all districts			
	A_1	B_1	A_2	B_2	A_1	B_1	A_2	B_2
6	0.006694	14.405	0.02798	50.957	0.005757	25.463	0.02411	67.858
8	0.004814	6.149	0.02350	30.592	0.004057	9.886	0.02027	37.369
10	0.003727	3.177	0.02052	20.588	0.003093	4.746	0.01772	23.518
12	0.003024	1.852	0.01837	14.898	0.002478	2.605	0.01587	16.111
14	0.002535	1.174	0.01672	11.332	0.002055	1.569	0.01446	11.704
16	0.002175	0.7905	0.01542	8.942	0.001747	1.012	0.01334	8.870
18	0.001900	0.5577	0.01436	7.253	0.001513	0.6863	0.01242	6.946
20	0.001684	0.4084	0.01347	6.017	0.001331	0.4855	0.01166	5.584
22	—	—	—	—	0.001186	0.3548	0.01100	4.582

Table 46. アカマツの等平均樹高線に関する逆数式の常数の補正值

Corrected constant A_1 , B_1 and A_2 , B_2 in the reciprocal equation of *Pinus densiflora*.

The values of Iwaki district are calculated from following equations:

$$\begin{cases} \log A_1 = -1.0689 \log H - 1.3726 \\ \log B_1 = -3.4891 \log H + 4.1976 \end{cases} \quad \begin{cases} \log A_2 = -0.3059 \log H - 1.3684 \\ \log B_2 = -2.6918 \log H + 4.0846 \end{cases}$$

and the values of average of all districts are calculated from following equations:

$$\begin{cases} \log A_1 = -1.2335 \log H - 1.1330 \\ \log B_1 = -3.4287 \log H + 4.1550 \end{cases} \quad \begin{cases} \log A_2 = -0.5383 \log H - 1.0704 \\ \log B_2 = -2.5102 \log H + 3.9533 \end{cases}$$

樹高階 Height class (m)	磐城地方 Iwaki district				全国平均 Average of all districts			
	A_1	B_1	A_2	B_2	A_1	B_1	A_2	B_2
6	0.006246	30.367	0.02475	97.679	0.008074	30.677	0.03241	99.977
8	0.004293	11.133	0.02266	45.041	0.005662	11.442	0.02777	48.563
10	0.003618	5.110	0.02117	24.706	0.004300	5.325	0.02462	27.740
12	0.002977	2.705	0.02002	15.087	0.003434	2.849	0.02232	17.551
14	0.002525	1.580	0.01910	9.989	0.002840	1.680	0.02055	11.924
16	0.002189	0.9918	0.01834	6.973	0.002408	1.063	0.01912	8.527
18	0.001930	0.6572	0.01768	5.077	0.002083	0.7208	0.01794	6.342
20	0.001725	0.4553	0.01712	3.825	0.001829	0.4947	0.01696	4.870
22	—	—	—	—	0.001626	0.3567	0.01611	3.834
24	—	—	—	—	0.001461	0.2647	0.01537	3.081

Table 47. カラマツの等平均樹高線に関する逆数式の常数の補正值

Corrected constant A_1 , B_1 and A_2 , B_2 in the reciprocal equation of *Larix leptolepis*.

The values of Shinshu district are calculated from following equations:

$$\begin{cases} \log A_1 = -1.2348 \log H - 1.1500 \\ \log B_1 = -2.4169 \log H + 3.1850 \end{cases} \quad \begin{cases} \log A_2 = -0.4488 \log H - 1.1126 \\ \log B_2 = -1.4185 \log H + 2.7876 \end{cases}$$

and the values of average of all districts are calculated from following equations:

$$\begin{cases} \log A_1 = -1.2693 \log H - 1.0891 \\ \log B_1 = -2.4087 \log H + 3.1907 \end{cases} \quad \begin{cases} \log A_2 = -0.3774 \log H - 1.2412 \\ \log B_2 = -1.8794 \log H + 3.4203 \end{cases}$$

樹高階 Height class (m)	信州地方 Shinshu district				全国平均 Average of all districts			
	A	B	A'	B'	A	B	A'	B'
6	0.007743	20.147	0.03452	48.273	0.008378	20.711	0.02918	90.741
8	0.005431	10.052	0.03035	32.108	0.005816	10.361	0.02618	52.845
10	0.004123	5.863	0.02745	23.394	0.004381	6.054	0.02407	34.746
12	0.003292	3.773	0.02530	18.064	0.003476	3.901	0.02247	24.667
14	0.002721	2.600	0.02360	14.518	0.002829	2.692	0.02120	18.463
16	0.002255	1.883	0.02223	12.012	0.002413	1.952	0.02016	14.365
18	0.001995	1.416	0.02109	10.163	0.002077	1.469	0.01928	11.641
20	0.001752	1.098	0.02012	8.752	0.001818	1.140	0.01851	9.445
22	0.001557	0.8722	0.01927	7.645	0.001611	0.9064	0.01787	7.896
24	0.001398	0.7067	0.01854	6.758	0.001442	0.7349	0.01730	6.706
26	0.001267	0.5787	0.01788	6.031	0.001303	0.6059	0.01678	5.766

$$V_{Ry} = K_g \rho_{Ry}^{K_1'} \quad \dots\dots\dots (66)$$

である。 R_y に応じて収量比数曲線は Table 43 のように示されている。

また、初期密度 1,500, 3,000, 5,000, 7,000, 10,000 から上に伸び最多密度曲線に収斂している曲線は、これらの密度で植栽し、無間伐で生育したときの自然間引の経過を示すものである。自然間引を起こしながら生育していくとき、密度 ρ と平均幹材積 v の関係が

$$1/\rho = Av + B \quad \dots\dots\dots (28)$$

で示されることはすでに述べた。(28) 式の常数 A , B は最多密度曲線や初期密度によって決まり、その導き方は只木¹⁴⁴⁾ により示されている。

Fig. 41~48 に示した林分密度管理図は後述するように、いろいろな密度管理における収穫量を予測することができ、密度管理に関する諸問題を考察するための基本となるものである。

林分密度管理図で Fig. 41~44 に示したある樹種の、ある限定された地域を対象としたものを地域林分密度管理図と呼び、また Fig. 45~48 に示した広い地域を対象としたものを、一般林分密度管理図と呼ぶことにする。

ii) 林分密度管理図の地域性

Fig. 41~48 にスギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツについて 1 例ずつ地域林分密度管理図を、また同樹種について一般林分密度管理図を示したが、管理図に地域性を考慮する必要があるか否かについて検討を加えておこう。

密度管理図を作製するための基本的な関係は、等平均樹高線を示す密度効果式(22), (23), (24), (25) 式であるが、この式の常数の値は同一樹高階においても地域により違い、したがって (37), (38), (40), (41) 式の関係が地域により違ってくることは Table 17~24 に示したとおりである。そこで、このような地域による違いが、統計的に有意なものであるかどうかについて検討を加えてみた。地域間に有意な差がなければ、樹種ごとに 1 つの管理図を作っておけばよいが、地域間に有意な差が認められれば、地域ごとに管理図を作ることが必要になるろう。

スギの各地域間で (37), (38), (40), (41) 式の回帰係数と修正平均値について共分散分析をおこなった結果を Table 48~51 に示す。この表から明らかなように、地域間の回帰係数に有意な差が認められるものは比較的少ないが、修正平均値の間にはかなり多くの地域間で有意性が認められる。

密度と幹材積の関係を、両対数軸上にプロットするとつごうよいことはすでに述べたが、この両対数軸上の密度——平均幹材積曲線の形は A , B の値がいかに変化しても不変で、 A の値が増加すると曲線の位置が水平に左に向かって移動し、 B の値が減少すると斜めの漸近線に沿って上方に移動する¹²³⁾。したがって、同じ樹高階でも地域によって A , B の値が変化すると曲線の位置がかわり、おなじ密度の範囲に対して曲線の違った部分が対応して現実の等平均樹高線が示される。

したがって、たとえば熊本地方と紀州地方の間に、 A_1 と H との関係に有意差が認められないが、 B_1 と H の関係の修正平均に有意差が認められるような場合にも、樹高階における等平均樹高線は Fig. 49 に示すような違いとなる。また、山形地方と青森地方の間に A_1 と H , B_1 と H のいずれの関係でも有意差が認められるものについては Fig. 50 の違いとなる。

いま、これまで述べてきた地域間の有意な差が何に起因するかを明らかにすることはできないが、多少の論議を加えておこう。嶺⁷⁸⁾は地域収穫表調製のための地域区分で、最も重要なものは気候区分であると

Table 48. スギの $\log A_1 = -b_1 \log H + \log a_1$ 関係の地域間の分散分析
 Analysis of variance between districts on the relation of
 $\log A_1 = -b_1 \log H + \log a_1$ of *Cryptomeria japonica*.

	既肥 Obi	熊本 Kumamoto	土佐 Tosa	愛知・岐阜 Aichi-Gifu	紀州 Kishu	天城 Amagi	茨城 Ibaragi	北関東・阿武隈 Kitakanto-Abukuma	越後・会津 Echigo-Aizu	山形 Yamagata	秋田 Akita	青森 Aomori
	$b_1 \log a_1$	$b_1 \log a_1$	$b_1 \log a_1$	$b_1 \log a_1$	$b_1 \log a_1$	$b_1 \log a_1$	$b_1 \log a_1$	$b_1 \log a_1$	$b_1 \log a_1$	$b_1 \log a_1$	$b_1 \log a_1$	$b_1 \log a_1$
既肥 Obi		○ *	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○
熊本 Kumamoto			○ **	○ *	○ ○	○ **	○ ○	○ ○	○ ○	○ **	○ ○	○ *
土佐 Tosa				○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ *	○ ○	○ **	○ **
愛知・岐阜 Aichi-Gifu					○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ *	○ **
紀州 Kishu						○ **	○ ○	○ ○	○ ○	○ *	○ *	○ **
天城 Amagi							○ *	○ **	○ *	○ ○	○ **	○ **
茨城 Ibaragi								○ ○	○ ○	○ ○	○ *	○ **
北関東・阿武隈 Kitakanto-Abukuma									○ ○	○ *	○ ○	○ **
越後・会津 Echigo-Aizu										○ **	○ **	○ **
山形 Yamagata											○ **	○ **
秋田 Akita												○ **
青森 Aomori												

○ : Non-significant
 * : Significant, 5% level
 ** : Significant, 1% level

Table 49. スギの $\log B_1 = -b_1' \log H + \log a_1'$ 関係の地域間の分散分析
 Analysis of variance between districts on the relation of
 $\log B_1 = -b_1' \log H + \log a_1'$ of *Cryptomeria japonica*.

	既肥 Obi	熊本 Kumamoto	土佐 Tosa	愛知・岐阜 Aichi-Gifu	紀州 Kishu	天城 Amagi	茨城 Ibaragi	北関東・阿武隈 Kitakanto-Abukuma	越後・会津 Echigo-Aizu	山形 Yamagata	秋田 Akita	青森 Aomori
	$b_1' \log a_1'$	$b_1' \log a_1'$	$b_1' \log a_1'$	$b_1' \log a_1'$	$b_1' \log a_1'$	$b_1' \log a_1'$	$b_1' \log a_1'$	$b_1' \log a_1'$	$b_1' \log a_1'$	$b_1' \log a_1'$	$b_1' \log a_1'$	$b_1' \log a_1'$
既肥 Obi		○ ○	○ *	○ **	○ **	○ ○	○ *	○ **	○ **	○ ○	○ **	○ **
熊本 Kumamoto			* ○	○ ○	○ **	○ **	○ **	○ *	○ ○	○ ○	○ **	○ **
土佐 Tosa				○ ○	○ **	○ **	○ ○	○ *	○ ○	○ ○	○ **	○ **
愛知・岐阜 Aichi-Gifu					○ ○	○ **	○ ○	○ ○	○ ○	○ *	○ ○	○ ○
紀州 Kishu						○ **	○ ○	○ ○	○ ○	○ **	○ ○	○ ○
天城 Amagi							○ **	○ **	○ **	○ *	○ **	○ **
茨城 Ibaragi								○ ○	○ ○	○ ○	○ *	○ ○
北関東・阿武隈 Kitakanto-Abukuma									○ ○	○ *	○ ○	○ ○
越後・会津 Echigo-Aizu										○ *	○ ○	○ *
山形 Yamagata											○ **	○ **
秋田 Akita												○ ○
青森 Aomori												

○ Non-significant
 * Significant, 5% level
 ** Significant, 1% level

Table 50. スギの $\log A_2 = -b_2 \log H + \log a_2$ 関係の地域間の分散分析
Analysis of variance between districts on the relation of
 $\log A_2 = -b_2 \log H + \log a_2$ of *Cryptomeria japonica*.

	飯 肥 Obi	熊本 Kumamoto	土 佐 Tosa	愛知・岐阜 Aichi - Gifu	紀 州 Kishu	天 城 Amagi	茨 城 Ibaragi	北関東・阿武隈 Kitakanto - Abukuma	越後・会津 Echigo - Aizu	山 形 Yamagata	秋 田 Akita	青 森 Aomori
	$b_2 \log a_2$	$b_2 \log a_2$	$b_2 \log a_2$	$b_2 \log a_2$	$b_2 \log a_2$	$b_2 \log a_2$	$b_2 \log a_2$	$b_2 \log a_2$	$b_2 \log a_2$	$b_2 \log a_2$	$b_2 \log a_2$	$b_2 \log a_2$
飯 肥 Obi		○ *	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○
熊 本 Kumamoto			○ **	○ ○	○ ○	○ **	○ *	○ ○	○ ○	○ *	○ **	○ **
土 佐 Tosa				○ *	○ *	○ ○	○ ○	○ *	○ ○	○ ○	○ **	○ **
愛知・岐阜 Aichi - Gifu					○ ○	○ **	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ **	○ **
紀 州 Kishu						○ **	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ *	○ **
天 城 Amagi							○ **	○ *	○ ○	○ ○	○ **	○ **
茨 城 Ibaragi								○ ○	○ *	○ ○	○ **	○ **
北関東・阿武隈 Kitakanto - Abukuma									○ ○	○ ○	○ ○	○ **
越後・会津 Echigo - Aizu										○ *	○ ○	○ ○
山 形 Yamagata											○ **	○ **
秋 田 Akita												○ **
青 森 Aomori												

○ : Non-significant
* : Significant, 5% level
** : Significant, 1% level

Table 51. スギの $\log B_2 = -b_2' \log H + \log a_2'$ 関係の地域間の分散分析
Analysis of variance between districts on the relation of
 $\log B_2 = -b_2' \log H + \log a_2'$ of *Cryptomeria japonica*.

	飯 肥 Obi	熊本 Kumamoto	土 佐 Tosa	愛知・岐阜 Aichi - Gifu	紀 州 Kishu	天 城 Amagi	茨 城 Ibaragi	北関東・阿武隈 Kitakanto - Abukuma	越後・会津 Echigo - Aizu	山 形 Yamagata	秋 田 Akita	青 森 Aomori
	$b_2' \log a_2'$	$b_2' \log a_2'$	$b_2' \log a_2'$	$b_2' \log a_2'$	$b_2' \log a_2'$	$b_2' \log a_2'$	$b_2' \log a_2'$	$b_2' \log a_2'$	$b_2' \log a_2'$	$b_2' \log a_2'$	$b_2' \log a_2'$	$b_2' \log a_2'$
飯 肥 Obi		○ **	○ *	○ **	○ **	○ *	○ **	○ **	○ **	○ **	○ **	○ **
熊 本 Kumamoto			○ ○	○ **	○ **	○ **	○ *	○ **	○ ○	○ ○	○ **	○ **
土 佐 Tosa				○ *	○ *	○ **	○ ○	○ *	○ ○	○ ○	○ **	○ **
愛知・岐阜 Aichi - Gifu					○ ○	○ **	○ ○	○ ○	○ ○	○ *	○ ○	○ ○
紀 州 Kishu						○ **	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ *	○ *
天 城 Amagi							○ **	○ **	○ *	○ **	○ **	○ **
茨 城 Ibaragi								○ ○	○ ○	○ ○	○ *	○ ○
北関東・阿武隈 Kitakanto - Abukuma									○ ○	○ *	○ ○	○ ○
越後・会津 Echigo - Aizu										○ ○	○ ○	○ ○
山 形 Yamagata											○ **	○ *
秋 田 Akita												○ ○
青 森 Aomori												

○ : Non-significant
* : Significant, 5% level
** : Significant, 1% level

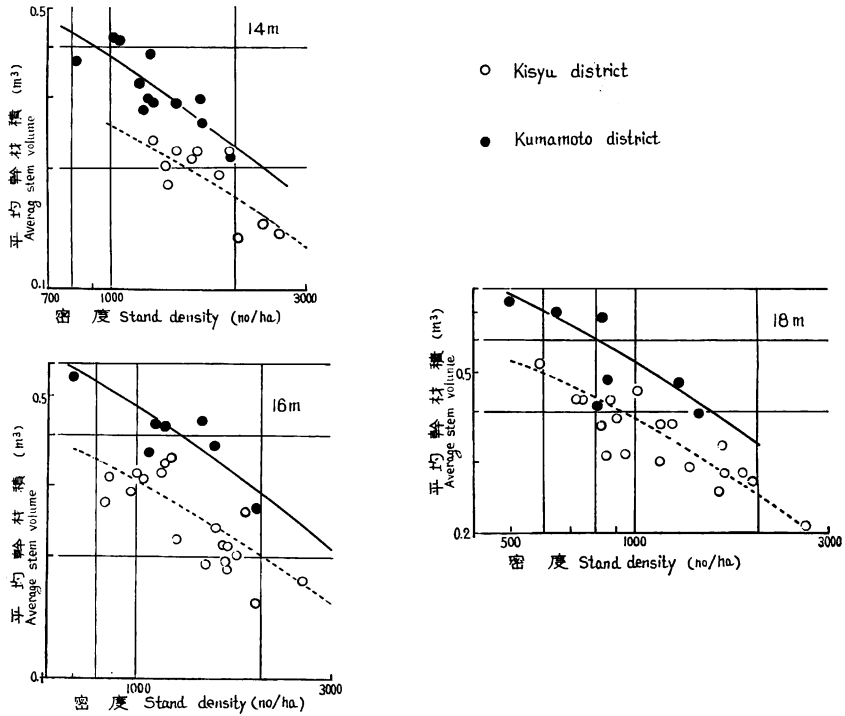


Fig. 49 紀州地方と熊本地方のスギの幹材積等平均樹高線のちがい
Difference of equivalent height curves of stem volume in Kishu district and Kumamoto district of *Cryptomeria japonica*.

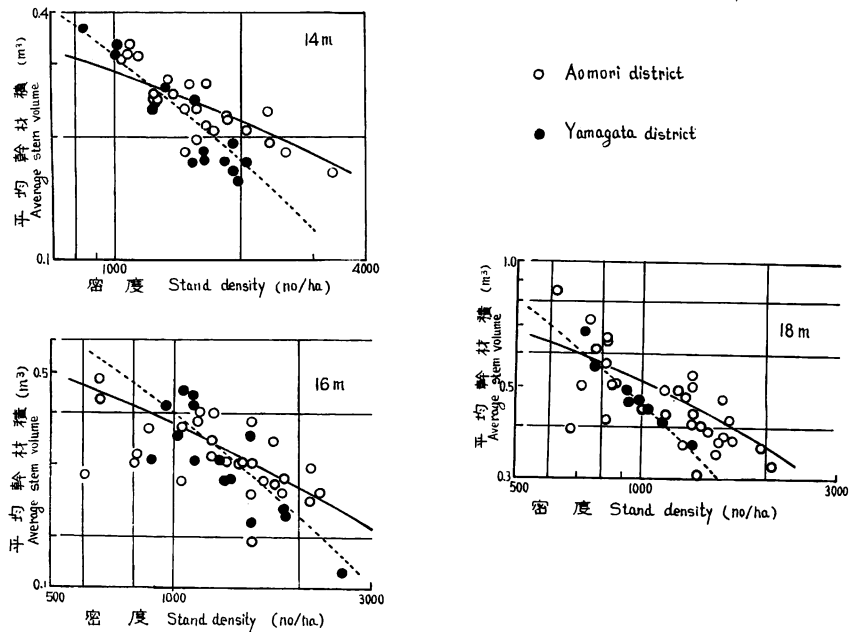


Fig. 50 青森地方と山形地方のスギの幹材積等平均樹高線のちがい
Difference of equivalent height curves of stem volume in Aomori district and Yamagata district of *Cryptomeria japonica*.

述べているが、また現在の収穫表の地域区分は、担当者のつごうや資料測定の難易もあって、科学的な根拠からだけで定められたものではないとも述べている。Table 48~51 に示した分散分析の有意性のあらわれ方には、あまり明確に気候区分がつけられない。しいて述べるならば、秋田・青森の奥羽北部が他の地域間とかなり違いのあることを示しているが、これもいわゆる裏日本系の同一気候区にはいると考えられる越後会津、山形を考慮すると、うまく説明できない。また、表日本での違いは全く説明しようがない。

地域ごとの気候条件以外の立地条件の差が原因と考えると、同一地域内の立地差は Fig. 4 に示したように、差としては示されないことから考えて矛盾を生ずる。地質や土壌型が原因となるならば、同一地域内の地位差から考えると、当然 Fig. 4 の地位間にも大きな違いが出てよいはずである。

幹材積での A_1 と H 、 B_1 と H の地域差は地域ごとにそれぞれの地域の材積表を使用しているため、地域材積表の違いが問題になる。そこで、胸高断面積での A_2 と H 、 B_2 と H の関係についても検討を加えたが (Table 50~51)、これらの関係での有意性のおこり方は多少のずれはあっても、ほとんど幹材積のばあいと一致する。したがって、材積表が原因と考えることもできない。

また、それぞれの地域におけるいわゆる地域品種についても考える必要があろう。これも只木¹⁴⁹⁾が九州地方の11品種について検討した結果では、密度と幹材積の関係について品種間に差は認められていない。

以上のように、Table 48~51 に示した地域差は何によっておこるかを現在明らかにすることはできない。おそらく、さきに述べたいくつかの要因が互いに交絡して、有意な差となってあらわれたものであろう。したがって現段階で、ある地域での密度管理の問題を林分密度管理図から論じようとするときには、その地域の林分密度管理図を基礎とすることが必要であろう。

しかしながら、林分密度管理図からある樹種の密度と成長についての一般的な特性を知り、また後に述べるようないろいろな密度管理の収穫量の比較を一般的な問題として取り扱うためには平均的な密度管理図による方が都合よい。これが一般林分密度管理図として全国平均の管理図を作った理由である。

一般林分密度管理図の諸数値は次のようにして求めた。同一樹種について全国の平均となるような等平均樹高線を求める場合に、地域に関係なく全資料をもちいて A 、 B を求めると、それぞれの地域の平均的な傾向とはかなり違った傾向線として示される。このことは Fig. 49 に示した紀州地方と熊本地方を一諸にした等平均樹高線を求めると、それぞれの地域の傾向より急な傾きをもった曲線がえられることから理解できる。したがって、同一樹種における全国平均の等平均樹高線を求めるためには、(37)、(38)、(40)、(41)式の関係を示す地域ごとの常数を、平均した関係から求めることによって全地域の平均として妥当な値がえられる。

iii) 林分密度管理図の精度

林分密度管理図をもちいて密度管理の収穫量の予測をする前に、等平均樹高線の推定精度に検討を加えておこう。

林分密度管理図に示されている等平均樹高線は、(37)、(38)、(40)、(41)式によって求めた常数により各樹高階ごとに逆数式により計算されるので、普通の回帰式とは性格が異なる。そこで、等平均樹高線をそれぞれの樹高階ごとに1つの自由曲線とみなし、木梨⁸⁷⁾の自由曲線による推定誤差によって変動係数を求めた。すなわち、各樹高階における幹材積の計算値 $\hat{v}_i$ と実測値 v_i とから、幹材積の平均値 $\bar{v}$ を $\bar{v} = \Sigma$

$\hat{v}_i/n$ とし、 $\sigma^2 = [\sum (\hat{v}_i - v_i)^2]/n$ から σ を求め、これを等樹高曲線に対する標本の標準誤差とし、変動係数 $(\sigma/\bar{v}) \times 100$ を求めた。

このようにして求めた平均値、標準誤差および変動係数をスギ秋田地方、ヒノキ木曽地方、アカマツ磐城地方、カラマツ信州地方について Table 52~55 に示す。

一般的な傾向として、樹高階の低いところで変動係数が大きい。このことは樹高階の低いところで標本数が一般に少ないこと、樹高階を2mごとに機械的に区切ったため、低樹高階では樹高階の幅が相対的に大きくなっていることが理由と考えられる。2mごとに樹高階を区切ったときの変動係数がこれらの表の程度であれば、たとえば10mの樹高階は9mから11mまでの平均樹高を含むから、平均樹高が $\pm 10\%$ 変動することにより起こる材積の変動も、含まれていることを考えあわせると、等平均樹高線の推定精度はそう悪くはないと考えてよからう。

iv) 林分密度管理図の使い方

Fig. 41~48 に示した林分密度管理図を林分の成長予測図としてもちいるとき、次のような事項を知ることができる。

a) 林分の密度、幹材積、胸高直径（平均胸高断面直径：以下林分密度管理図についての直径とは平均断面直径を示す）の関係を林分の生育段階、すなわち平均樹高に応じて読みとることができる。

たとえば、密度2,000本/ha、平均樹高14mの林分では全国平均でスギは385m³/haの幹材積をもち、したがって平均幹材積は0.197m³、胸高直径18.3cm、収量比数0.87くらいになっているが、ヒノキでは350m³/ha、0.145m³、17.8cm、0.86、アカマツでは270m³/ha、0.135m³、15.5cm、0.87、カラマツでは240m³/ha、0.120m³、14.5cm、0.93になっていることがわかる。したがって、普通のばあい、スギ、ヒノキ、アカマツでは間伐をいそがなければならないし、またカラマツではこの段階では、間伐手おくれの状態になってしまっていると判断を下すことができる（収量比数と間伐の関係については122ページ参照）。

Table 52. 秋田地方スギの等平均樹高線の残差の標準誤差
Standard error of estimate on the equivalent height curve
in Akita district of *Cryptomeria japonica*.

樹高階 Height class (m)	n	幹材積 Stem volume			胸高断面直径 Basal area		
		平均 Means (m ³)	残差の 標準誤差 Standard error of estimate	変動係数 Coefficient of variation	平均 Means (m ³)	残差の 標準誤差 Standard error of estimate	変動係数 Coefficient of variation
6	17	0.031	0.0059	19.0	0.0082	0.0015	18.3
8	33	0.061	0.0122	20.0	0.0130	0.0025	19.2
10	54	0.101	0.0201	19.9	0.0181	0.0037	20.4
12	53	0.152	0.0260	17.1	0.0239	0.0043	18.0
14	59	0.224	0.0349	15.6	0.0313	0.0046	14.7
16	56	0.320	0.0467	14.6	0.0404	0.0049	12.1
18	53	0.407	0.0529	13.0	0.0473	0.0059	12.5
20	45	0.552	0.0688	12.5	0.0591	0.0069	11.7
22	33	0.740	0.0914	12.4	0.0738	0.0086	11.7
24	23	0.964	0.1031	10.7	0.0896	0.0088	9.8
26	14	1.163	0.1242	10.7	0.1018	0.0096	9.4

Table 53. 木曽地方ヒノキの等平均樹高線の残差の標準誤差
Standard error of estimate on the equivalent height curve
in Kiso district of *Chamaecyparis obtusa*.

樹高階 Height class (m)	n	幹材積 Stem volume			胸高断面積 Basal area		
		平均 Means (m³)	残差の 標準誤差 Standard error of estimate	変動係数 Coefficient of variation	平均 Means (m³)	残差の 標準誤差 Standard error of estimate	変動係数 Coefficient of variation
6	12	0.031	0.0113	36.5	0.0079	0.0028	35.4
8	24	0.052	0.0121	23.3	0.0107	0.0023	21.5
10	30	0.090	0.0159	17.7	0.0156	0.0024	15.4
12	54	0.133	0.0173	13.0	0.0203	0.0024	11.8
14	28	0.213	0.0322	15.1	0.0293	0.0039	13.3
16	16	0.308	0.0324	10.5	0.0378	0.0040	10.6

Table 54. 磐城地方アカマツの等平均樹高線と残差の標準誤差
Standard error of estimate on the equivalent height curve
in Iwaki district of *Pinus densiflora*.

樹高階 Height class (m)	n	幹材積 Stem volume			胸高断面積 Basal area		
		平均 Means (m³)	残差の 標準誤差 Standard error of estimate	変動係数 Coefficient of variation	平均 Means (m³)	残差の 標準誤差 Standard error of estimate	変動係数 Coefficient of variation
8	12	0.040	0.0087	21.8	0.0089	0.0020	0.225
10	9	0.100	0.0159	15.9	0.0188	0.0026	0.138
12	18	0.142	0.0233	16.4	0.0228	0.0036	0.158
14	19	0.205	0.0313	15.3	0.0287	0.0035	0.122
16	26	0.332	0.0704	21.2	0.0424	0.0097	0.229
18	11	0.529	0.1558	29.5	0.0619	0.0221	0.357
20	7	0.628	0.1245	19.8	0.0665	0.0140	0.211

Table 55. 信州地方カラマツの等平均樹高線の残差の標準誤差
Standard error of estimate on the equivalent height curve
in Shinshu district of *Larix leptolepis*.

樹高階 Height class (m)	n	幹材積 Stem volume			胸高断面積 Basal area		
		平均 Means (m³)	残差の 標準誤差 Standard error of estimate	変動係数 Coefficient of variation	平均 Means (m³)	残差の 標準誤差 Standard error of estimate	変動係数 Coefficient of variation
6	13	0.026	0.0087	33.6	0.0079	0.0028	35.4
8	27	0.059	0.0104	17.8	0.0141	0.0031	22.0
10	15	0.083	0.0150	18.4	0.0157	0.0024	15.3
12	21	0.119	0.0190	16.0	0.0198	0.0031	15.7
14	27	0.173	0.0307	17.8	0.0238	0.0041	18.5
16	27	0.250	0.0399	16.0	0.0306	0.0049	16.0
18	21	0.336	0.0600	17.9	0.0376	0.0067	17.8
20	19	0.452	0.0622	13.8	0.0466	0.0059	12.7
22	20	0.570	0.0717	12.6	0.0544	0.0049	9.0
24	14	0.810	0.0741	9.1	0.0724	0.0070	9.7
26	8	0.989	0.0962	9.7	0.0818	0.0075	9.2

b) ある平均樹高で、ある平均胸高直径を期待するとき、その密度を読みとることができる。

たとえば、平均樹高 8 m のとき平均胸高直径が 10 cm になるには密度をどの程度に保てばよいか、またその時の幹材積はどのくらいになっているかを知りたいならば、全国平均でスギは 5,250 本/ha, 193m³/ha, ヒノキは 4,450 本/ha, 157m³/ha, アカマツ 2,830 本/ha, 103m³/ha, カラマツ 2,830 本/ha, 105m³/ha と読みとることができる。このような使い方は、後述する植栽密度の決定に役だつ(121 ページ参照)。

c) ある密度管理における収穫量の予測にもちいることができる。

たとえば ha あたり 3,000 本の植栽をおこない、平均樹高が 10 m に達してから間伐をはじめ、樹高が 2 m 成長するごとに、間伐率 30% で 3 回間伐して樹高 16 m で主伐にするという 1 つの密度管理を考える。この例をスギの全国平均について求めてみよう。樹高が 10 m になるまでに、自然間引などによって 300 本/ha くらい本数が減少していることを自然間引線から読みとることができる。10 m の等平均樹高線上に密度 2,700 本/ha の点を求めると、そのときの幹材積は 236m³/ha となる。ここで間伐率 30% で間伐すると残存密度は 1,890 本となる。このばあい間伐は原則として林分の小個体から順に伐ることとする。そうすると密度の減少にともなって、幹材積はそのときの等平均樹高線に沿って変化することが認められる (Fig. 51~52)。この場合平均樹高は主林木樹高をもちいているので、間伐後も変化しないものと考えられる。そこで 10 m の等平均樹高線に沿って 1,890 本のところから間伐後の材積 210m³/ha を読みとることができる。したがって、間伐材積は $236\text{m}^3 - 210\text{m}^3 = 26\text{m}^3$ と求められる。次に間伐後は自然間引は起こらないものとして無視すると、平均樹高 12 m に達したときには、1,890 本/ha の点を 12 m の等平均樹高線上におとす。以下全く同様にして図上から間伐後の材積を読みとることによって、収穫量を予想することができる。すなわち、間伐収穫として第 1 回 26m³, 第 2 回 37m³, 第 3 回 45m³ で合計 108m³ が見込まれ、主伐本数は 920 本で 378m³, したがって総収穫量は 486m³, 主伐時の平均幹材積は 0.410m³, その直径は 25 cm 強とおおよその見当がつけられる。

以上のように、林分密度管理図を利用することによって密度と林分の成長について諸数値を求めることができるが、特に c) で示した密度管理に応じ収穫量や形質（直径）について予測をおこない、その特色を相互に比較できることがこの管理図のもっとも特徴的なことといえよう。

これらの林分密度管理図は、林分の林齢や地位を考慮に入れずに作られたが、これはさきにも述べたように主林木樹高を生物的な時間の尺度として、これに地位と林齢があわせ含まれていると考えたからである。したがって、別途に林齢と平均樹高の関係が求められれば、この図の平均樹高を林齢におきかえることは容易である。このためには、地域林分密度管理図については収穫表の地位ごとの林齢と樹高の関係を参考にすればよいし、また一般林分密度管理図については、資料として用いた収穫表の地位ごとの樹高を平均したものを参考にすればよいであろう。また最近、西沢ら⁹⁰⁾によって数量化による地位指数の推定法が研究されているが、この結果を利用してもよいと考える。

密度管理の収穫予測に際し、間伐後の密度と幹材積の関係は、原則として林分の中で幹材積の小さい個体から順に伐ることになると、密度の減少にともなって材積はその等平均樹高線にそって変化することが認められると述べたが、このことについて少し述べておこう。

小個体から順に取り除いた場合に、密度と幹材積の関係が等平均樹高線上を動くということはすでに経験的に只木・四手井¹⁴²⁾、只木¹⁴³⁾によって示されており、また穂積ら⁴⁰⁾によって、植物群落の個体重の度数分布が十分に時間を経ると L 型化することから、理論的にも導かれている。

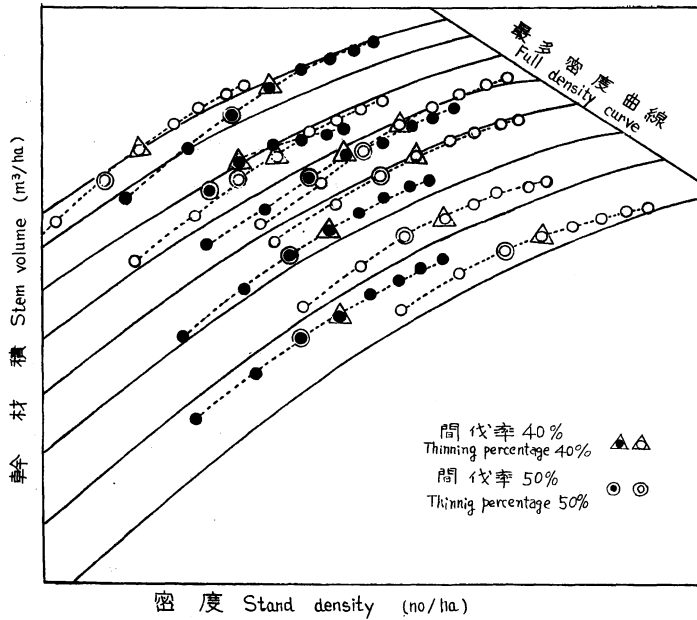


Fig. 51 スギの秋田地方の幹材積等平均樹高線と小個体から順に除去した場合の残存密度と幹材積の関係

The changes of the relation between stand density (ρ) and stem volume (V) of remained trees in the case of removing in order of smaller individual in Akita district of *Cryptomeria japonica*. The $\rho \sim V$ relations vary on the same equivalent height curve till about 40% of thinning percentage.

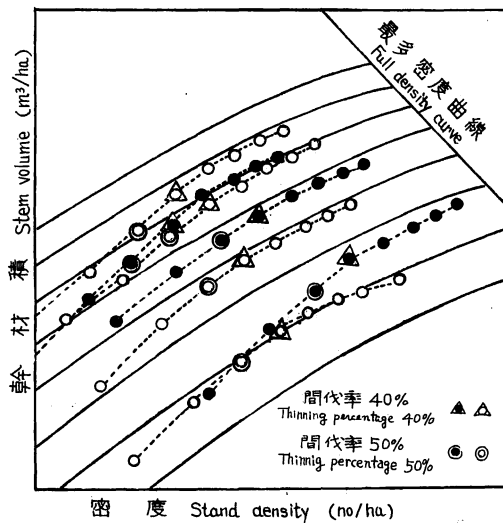


Fig. 52 カラマツの信州地方の幹材積等平均樹高線と小個体から順に除去した場合の残存密度と幹材積の関係

The changes of the relation between stand density (ρ) and stem volume (V) of remained trees in the case of removing in order of smaller individual in Shinshu district of *Larix leptolepis*. The $\rho \sim V$ relations vary on the same equivalent height curve till about 40% of thinning percentage.

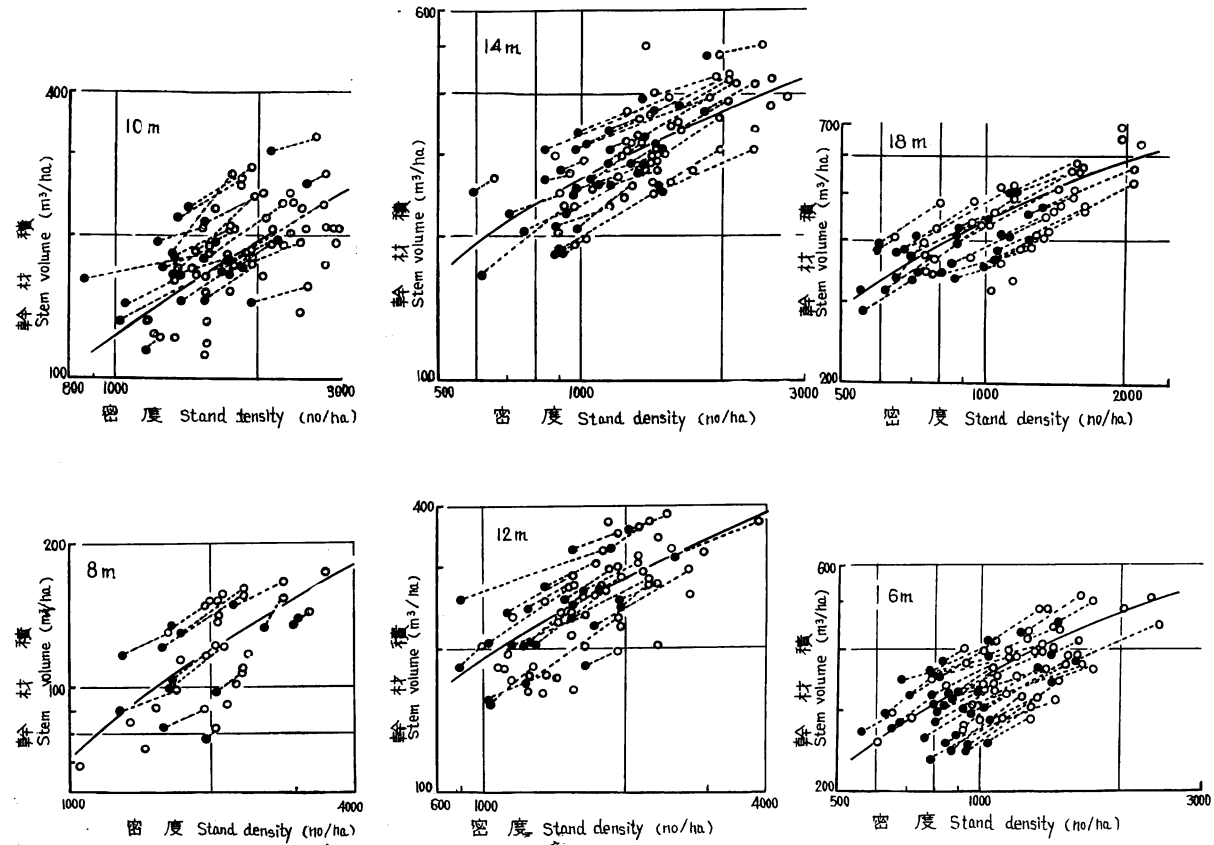


Fig. 53 スギの秋田地方の幹材積等平均樹高線と収穫試験地の間伐前と間伐後の密度と幹材積の関係
Equivalent height curve of stem volume and the relation between stand density (ρ) and stem volume (V) before thinning and after thinning on the permanent plots in Akita district of *Cryptomeria japonica*. These permanent plots were thinned by low thinning. It is considered that the change of $\rho \sim V$ relation from before thinning to after thinning vary on almost the same equivalent height curve in the case of low thinning.

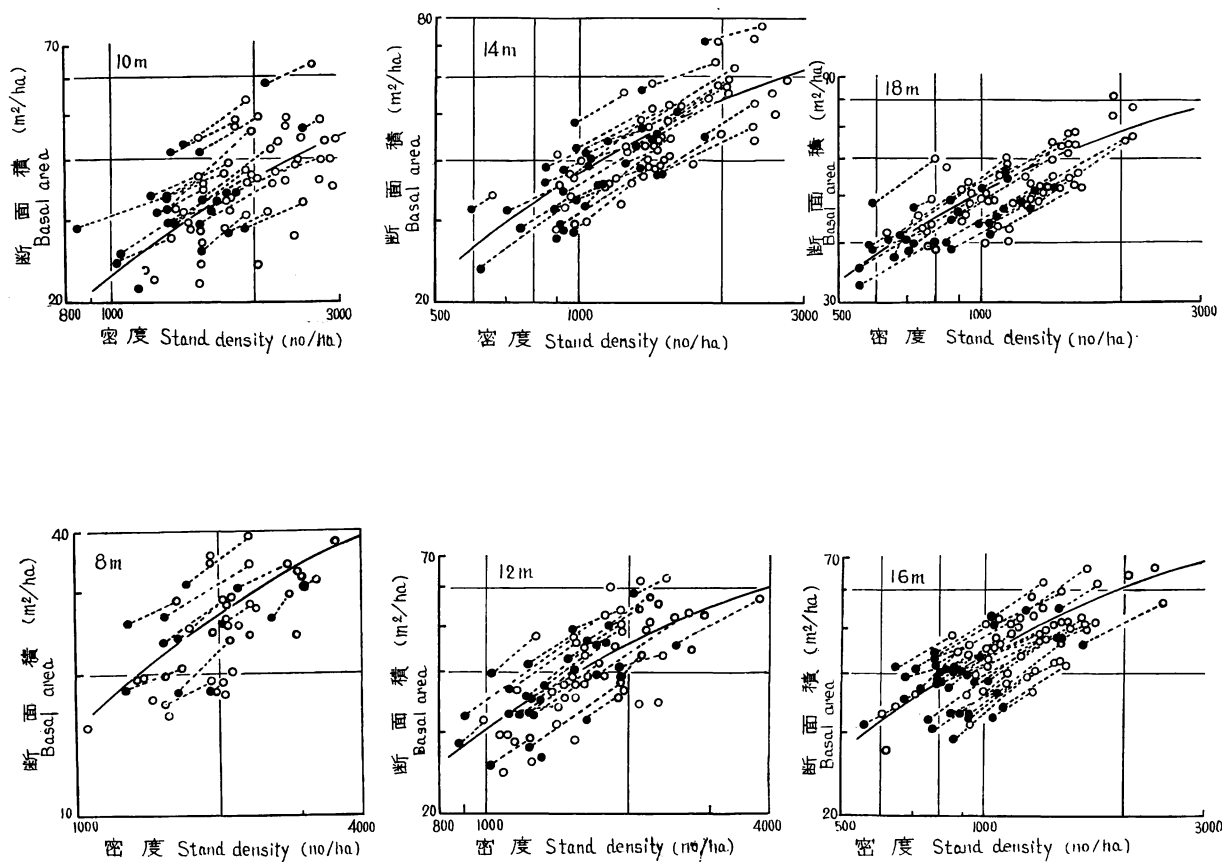


Fig. 54 スギの秋田地方の断面積等平均樹高線と収穫試験地の間伐前と間伐後の密度と断面積の関係
Equivalent height curve of basal area and relation between stand density (ρ) and basal area (G) before
thinning and after thinning on the permanent plots in Akita district of *Cryptomeria japonica*.
The change of $\rho \sim G$ relations from before thinning to after thinning are the same as the $\rho \sim V$ relation in
Fig. 53.

小個体から順に10%, 20%, 30%……と10%ごとに本数間伐率を増したとき、残存密度と幹材積の関係を等平均樹高線に対してプロットした例を、秋田地方のスギと信州地方のカラマツについて Fig. 51 と 52 に示す。図中に△で示したものは40%の、○で示したものは50%の間伐率を示すが、いずれのばあいも40%までは等平均樹高線とはほぼ平行的に動くが、50%になると多少等平均樹高線の傾きよりも急になることがある。この傾向はカラマツの例において著しく、カラマツの生立木の幹材積の分布は、L型化しにくいという耐陰性についての樹種の特性を示すものと考えられる。したがって、40%までの本数間伐率では、間伐本数だけ等平均樹高線上をずらすことによって残存材積を求め、間伐前の材積との差によって間伐材積の推定ができるが、それ以上の間伐率になると多少間伐材積は過少に見積もられることになる。

また、小個体から順に伐るという間伐でなくとも、下層間伐であれば、平均的には等平均樹高線上を動くものとして、間伐材積を推定しても実用上はさしつかえない。この例として、秋田地方の収穫試験地と、収穫表調製資料の間伐前と間伐後の密度と幹材積と、等平均樹高線との関係を Fig. 53 に示す。また同様のことは Fig. 54 の胸高断面積についてもいえる。したがって、間伐後の直径も管理図から求めてさしつかえない。

さらに、機械的な間伐がおこなわれるときには、間伐後も平均幹材積はかわらないと考えることができるから、45°の傾きで密度の減少分だけ動くことになり、間伐材積を求めることができる。また大きな個体から順に伐るような択伐式間伐では、45°よりも強い傾きで動くので、この動きを知れば間伐材積を求めることができる。しかしながら、密度管理図は等平均樹高線に対して Fig. 53~54 に示したような間伐のおこなわれた資料をもとに調製されているので、機械的あるいは択伐式間伐をおこなったあとと生育して、ふたたび等平均樹高線にのるという保証はない。したがって、林分密度管理図によって密度管理の収穫量を予想するばあい、その間伐は小個体から順に間伐されることが前提となるが、実用的な意味では、普通におこなわれているような下層間伐であってもかまわないといえることができる。

2. 密度管理と収穫量

i) 密度管理のモデル

前章で林分密度管理図について述べ、これをもとに植栽密度と間伐形式の組合せである密度管理について収穫量を予測し、その得失を比較できると述べた。

そこで本章では、いろいろな密度管理をモデル的に組み立て、それぞれについて収穫量を求め検討を加えよう。このような試みはすでに只木・四手井¹⁴²⁾、只木¹⁴⁴⁾、蜂屋・安藤³⁰⁾によっておこなわれている。本報においては、これまでの報告でモデルとして取り扱われなかった密度管理についても検討を加え、またその方法にも若干の改善を加えた。検討のためにとりあげた、密度管理のモデルを Table 56 に示す。またこれらの密度管理のモデルを組み立て、また収穫量の検討に必要な記号を Table 57 に示す。

モデルとした密度管理は Table 56 に示すように、間伐形式の決め方によってA, B, Cの3シリーズに大きく分けられる。それぞれの密度管理シリーズの特徴を示せば次のとおりである。

Aシリーズ 収量比数曲線を間伐形式の管理基準線 MR_y として間伐後の残存密度基準とするものである。したがって、このシリーズは常に管理基準となる収量比数 R_y の値よりも高い R_y を保つように管理され、間伐後の R_y の値はどの間伐期にも一定であるが、間伐前の R_y の値は植栽密度 ρ_0 、間伐開始期 h_T 、間伐繰返し期間 I によりかわり、また伐期密度 ρ_T や伐期の収量比数は同じ密度管理基準でも間伐の繰返し期間 I によってかわる。

Table 56. 密度管理のモデル

Models of stand density control. See the notations of Table 57.

A-series : In this series, thinning schedules were designed to practice along M_{R_y} which is determined for the standard of after thinning.

植 栽 密 度 Initial planting density	間 伐 形 式 Thinning schedule		
ρ_0 (No./ha)	M_{R_y}	h_f (m)	I (m)
1,500	0.5		
3,000	0.6	6	2
5,000	0.7	10	4
7,000	0.8	14	8 ($h_f=6, 14$)
10,000	0.9		
	無間伐 Un-thinned		

B-series : In this series, thinning schedules were designed to practice along M_{R_y} which is determined for the standard of before thinning.

植 栽 密 度 Initial planting density	間 伐 形 式 Thinning schedule		
ρ_0 (No./ha)	M_{R_y}	h_f (m)	I (m)
	0.5		
3,000	0.6	6	2
	0.7	10	4
10,000	0.8	14	8 ($h_f=6, 14$)
	0.9		
	無間伐 Un-thinned		

C-series : In this series, P_t was fixed in each model regardless of ρ_0

植 栽 密 度 Initial planting density	間 伐 形 式 Thinning schedule		
ρ_0 (No./ha)	P_t (%)	h_f (m)	I (m)
	10		
3,000	20	6	2
	30	10	4
10,000	40	14	8
	50		

Note : —

- 1) Thinning schedule is designed to practice at intervals of a certain meter height growth in stead of years, i. e. to practice every 2m-, 4m-, 8m-height growth etc.
- 2) Trees to be thinned are selected in order of small individual.
- 3) Stem volume before or after thinning are obtained on the same equivalent height curve.
- 4) Trees die only on the natural thinning curve and the full-density curve.
- 5) The final cutting is fixed at the time of 30m average height.

Table 57. 記号一覧表
The notations.

項 目 Items	記 号 Notations	単 位 Unit
植 栽 密 度 Initial planting density	ρ_0	No./ha
伐 期 密 度 Density of final cutting period.	ρ_f	No./ha
管 理 基 準 線 Management line ¹⁾	M_{R_y}	—
間 伐 率 Thinning ratio	F_t	%
間伐開始樹高 Mean height at the first thinning	h_f	m
間伐繰返し期間 Interval of thinning ²⁾	I	m
間伐幹材積合計 Total stem volume yield in thinning	V_t	m ³ /ha
主伐幹材積 Stem volume of final cutting period	V_f	m ³ /ha
総収穫幹材積 Gross stem yield	$V_t + V_f$	m ³ /ha
平均収量比数 Average yield index ³⁾	$\bar{R}_y$	—

1) Equivalent yield index curves are used for the management line.

2) Thinnings are replicated by every certain meter height growth.

3) Average yield index which is calculated from the yield index before and after thinning at every thinning, and of final cutting period. $\bar{R}_y$ show the average distance of the model of stand density control from full-density curve.

Bシリーズ 収量比数曲線を間伐形式の管理基準線とすることはAシリーズと同じであるが、基準とする M_{R_y} に達したならば間伐がおこなわれ、間伐本数は次回間伐の樹高と M_{R_y} によって決まる。したがって、常に管理基準となる R_y より低い値に保たれ、間伐前の R_y は常に一定であるが、間伐後の R_y は間伐繰返し期間によってかわる。また伐期密度や伐期の収量比数は、管理基準となった R_y により決まる。

Cシリーズ 管理基準によらず一定の本数間伐率 P_t で間伐する間伐形式のばあいである。間伐後の R_y は P_t で違うが、 F_t が低いと樹高の増加と共に R_y が高くなり、あるところからは低くなるが、 P_t が高いと R_y は樹高の増加と共に低くなる。

Aシリーズ、Bシリーズのように管理基準を収量比数曲線にとった理由は、四手井¹²⁰⁾が寺崎¹⁴⁷⁾・150)・177)、河田^{54)~56)}の間伐試験経過が $h-n$ 線に平行になることを示し、また吉良ら⁶³⁾は現実の密度管理について、密度と幹材積の平均的な関係を示す平均管理曲線が、特性曲線（最多密度曲線）に対し平行的な関係にあることを指摘し、さらに筆者ら⁹⁾がおこなった各地のスギの保育形式の密度管理が、最多密度曲線にほぼ平行的に示される（Fig. 85）など、これまでの密度管理の経験的な値が、最多密度曲線に平行的におこなわれていることによる。

A、Bシリーズの間伐前または後の点をそれぞれ結んだものは、最多密度曲線に平行またはある一定の

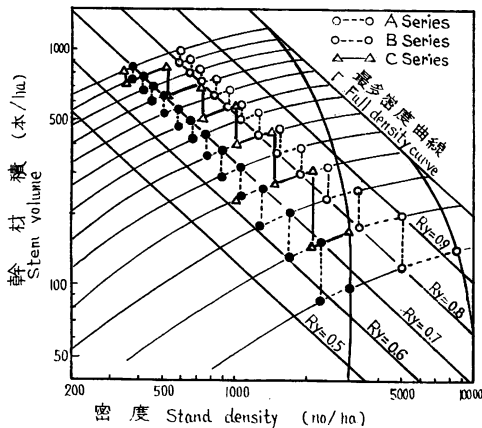


Fig. 55 密度管理のモデルの例
Examples of the series of stand density control.

になったとき主伐をおこなうものとして、収穫量を計算した。その結果を Table 58~60 に示す。この計算で、自然間引による枯損は植栽時から第1回間伐までの枯損と、最多密度曲線上での枯損を見込んだが、間伐後最多密度曲線に達しないときには見込まなかった。只木・四手井¹⁴²⁾のスギの計算では、自然枯死を最多密度曲線上のみでおこるとし、只木¹⁴⁴⁾のアカマツの計算では、間伐後最多密度曲線に達しない

角度で直線的な関係にあるが、Cシリーズは曲線的にかわる。

Aシリーズは Table 56 に示すように、植栽密度 ρ_0 を 1,500, 3,000, 5,000, 7,000, 10,000 本/ha の5段階にとったが、B, CシリーズはAシリーズとの違いが明らかになればよいと考え、 ρ_0 を 3,000, 10,000 のみに限った。各シリーズにつき1例ずつのモデルを Fig. 55 に示す。B, Cシリーズについてはこれまでも検討が加えられてきたが、Aシリーズについてははじめてである。

ii) 収穫量の検討

前節で示した各シリーズのモデルについて、スギの一般林分密度管理図から、平均樹高30m

Table 58. Aシリーズにおける密度管理モデル幹材積収穫量計算結果の若干例—Table 57 の記号参照
Some examples of calculated stem volume yield on each model of stand density control in A-series. See the notation of Table 57.

h_f	I	ρ_0	3,000					10,000				
		M_{Ry}	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
6	2	$V_f + V_t$	981	1090	—	—	—	1019	1129	1215	1282	1331
		V_t	348	336	—	—	—	386	375	343	293	227
		$\bar{R}_y$	0.542	0.618	—	—	—	0.608	0.684	0.760	0.824	0.910
	4	$V_f + V_t$	1005	1105	—	—	—	1054	1144	1230	1289	1339
		V_t	340	325	—	—	—	389	364	320	269	219
		$\bar{R}_y$	0.549	0.623	—	—	—	0.615	0.687	0.766	0.839	0.914
	8	$V_f + V_t$	1058	1158	—	—	—	1097	1197	1271	1305	1306
		V_t	310	288	—	—	—	349	327	288	225	126
		$\bar{R}_y$	0.566	0.642	—	—	—	0.632	0.708	0.781	0.852	0.922
10	2	$V_f + V_t$	1000	1097	1171	1230	—	1047	1144	1218	1278	1321
		V_t	367	343	299	242	—	414	390	346	289	218
		$\bar{R}_y$	0.587	0.663	0.739	0.812	—	0.628	0.704	0.779	0.853	0.912
	4	$V_f + V_t$	1026	1105	1183	1244	—	1073	1152	1230	1291	1340
		V_t	361	325	273	224	—	408	372	320	271	214
		$\bar{R}_y$	0.594	0.668	0.745	0.813	—	0.635	0.712	0.786	0.859	0.919

h_f	I	ρ_0	3,000					10,000				
		M_{R_y}	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
14	2	$V_f + V_t$	1034	1113	1176	1227	1261	1075	1154	1217	1268	1303
		V_t	401	359	304	238	158	442	400	345	279	200
		$\bar{R}_y$	0.609	0.684	0.765	0.833	0.907	0.632	0.707	0.784	0.856	0.930
	4	$V_f + V_t$	1056	1120	1185	1234	1283	1097	1161	1226	1275	1324
		V_t	391	340	275	214	153	432	381	316	253	194
		$\bar{R}_y$	0.616	0.690	0.767	0.839	0.912	0.636	0.713	0.790	0.863	0.935
	8	$V_f + V_t$	1080	1147	1206	1248	1264	1121	1188	1247	1289	1305
		V_t	332	227	223	180	84	375	318	264	209	125
		$\bar{R}_y$	0.633	0.708	0.782	0.852	0.924	0.656	0.732	0.805	0.875	0.946

Table 59. Bシリーズにおける密度管理モデル幹材積収稈量計算結果の若干例 Table 57 の記号参照
Some examples of calculated stem volume yield on each model of stand density control
in B-series. See the notation of Table 57.

h_f	I	ρ_0	3,000			10,000		
		M_{R_y}	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9
6	2	$V_f + V_t$	933	1045	1146	1185	1267	1318
		V_t	333	325	307	346	308	239
		$\bar{R}_y$	0.499	0.572	0.648	0.714	0.792	0.871
	4	$V_f + V_t$	892	1017	1115	1154	1238	1307
		V_t	292	297	276	315	279	228
		$\bar{R}_y$	0.469	0.545	0.620	0.685	0.761	0.844
	8	$V_f + V_t$	835	961	1060	1099	1201	1287
		V_t	235	241	221	260	242	208
		$\bar{R}_y$	0.435	0.497	0.567	0.633	0.711	0.794
10	2	$V_f + V_t$	968	1066	1153	1200	1269	1312
		V_t	368	346	314	361	310	233
		$\bar{R}_y$	0.555	0.627	0.705	0.746	0.821	0.901
	4	$V_f + V_t$	929	1038	1121	1174	1244	1305
		V_t	329	318	282	335	285	226
		$\bar{R}_y$	0.534	0.605	0.681	0.722	0.802	0.881
14	2	$V_f + V_t$	1014	1095	1164	1206	1264	1297
		V_t	414	375	325	367	305	218
		$\bar{R}_y$	0.580	0.655	0.731	0.753	0.830	0.909
	4	$V_f + V_t$	988	1076	1144	1185	1243	1282
		V_t	388	356	305	346	284	213
		$\bar{R}_y$	0.563	0.635	0.711	0.734	0.812	0.892
	8	$V_f + V_t$	945	1045	1121	1152	1226	1284
		V_t	354	325	282	313	267	205
		$\bar{R}_y$	0.529	0.597	0.672	0.700	0.773	0.856

Table 60. Cシリーズにおける密度管理モデル幹材積収稈量計算結果の若干例—Table 57 の記号参照
Some examples of calculated stem volume yield on each model of stand density control
in C-series. See the notation of Table 57.

h_f	I	ρ_0	3,000					10,000			
		P_t (%)	10	20	30	40	50	20	30	40	50
6	2	$V_f + V_t$	1258	1100	—	—	—	1341	1134	—	—
		V_t	168	465	—	—	—	361	684	—	—
		$\bar{R}_y$	0.785	0.601	—	—	—	0.876	0.647	—	—
	4	$V_f + V_t$	—	1246	1142	988	—	—	1339	1268	1113
		V_t	—	176	327	478	—	—	209	418	625
		$\bar{R}_y$	—	0.777	0.649	0.507	—	—	0.927	0.796	0.636
	6	$V_f + V_t$	—	1273	1229	1145	1009	—	—	1342	1329
		V_t	—	103	189	290	406	—	—	192	334
		$\bar{R}_y$	—	0.821	0.747	0.651	0.532	—	—	0.911	0.821
10	2	$V_f + V_t$	1291	1178	—	—	—	1345	1198	—	—
		V_t	166	420	—	—	—	315	613	—	—
		$\bar{R}_y$	0.883	0.724	—	—	—	0.922	0.736	—	—
	4	$V_f + V_t$	—	1277	1221	1108	—	—	1331	1299	1197
		V_t	—	168	261	458	—	—	181	369	578
		$\bar{R}_y$	—	0.832	0.791	0.634	—	—	0.958	0.866	0.734
14	2	$V_f + V_t$	1262	1228	—	—	—	1315	1231	—	—
		V_t	112	342	—	—	—	275	546	—	—
		$\bar{R}_y$	0.932	0.811	—	—	—	0.929	0.777	—	—
	4	$V_f + V_t$	—	1281	1249	1172	—	—	1315	1301	1220
		V_t	—	136	249	387	—	—	175	326	507
		$\bar{R}_y$	—	0.914	0.840	0.741	—	—	0.953	0.874	0.755

くとも自然枯死がおこるものとして、それを見込んだ。しかし、いずれの計算でも植栽密度や間伐による収稈量の影響はほぼ同じ傾向が示されている。また、自然間引線と等平均樹高線の間に数学的な結びつきが求められていないので、間伐後最多密度曲線に達しないときに、その枯損量を見込んでよい結果をうることは困難と考え、この場合は無視することにした。

収稈量の検討に際しては平均収量比数 $\bar{R}_y$ を用いた。密度管理図上で、間伐開始期が早いか遅いか、あるいは間伐の繰返し期間が短いか長いかは、最多密度曲線にどのくらいまで近づけられ、また間伐によってどのくらいまで離されるかということに換言できる。このような最多密度曲線からのへだたりを示す尺度として只木・四手井¹⁴²⁾、只木¹⁴⁴⁾は相対密度 ρ_r をもちい、1つのモデルの中で間伐が繰り返されるなかで、もっとも最多密度曲線から離れた ρ_r を、そのモデルを代表する ρ_r とした。 R_y は70ページに示したように ρ_r と互換の性質があるから、 R_y で検討を加えても同様なことがなされたといえる。そこで、繰り返される間伐後の R_y のうち最小のものを $R_{y\min}$ としてこれをモデルの収量比数の代表値とし、 M_{R_y} 、 h_f 、 I 、 P_t などに無関係に $\rho_0 = 10,000$ の場合の総収稈量 $V_f + V_t$ との関係を Fig. 56 に示す。図からわかるようにB、Cシリーズは $R_{y\min}$ と $V_f + V_t$ の関係が重なるが、Aシリーズはこれらに対し同

じ $R_{y \min}$ ならば若干低い $V_f + V_t$ の値を示す。只木・四手井¹⁴²⁾ はスギの計算例で ρ_r が 20~30% 以上に管理されているとき、また只木¹⁴⁴⁾ のアカマツの例では ρ_r が 10~15% 以上に管理されているときは、植栽密度が一定ならば間伐の取扱いが違っても、収穫量の差は非常に小さく事実上一定と考えられると述べている。Fig. 56 でも B, C シリーズは $R_{y \min}$ で 0.7 (参考のために図の下に ρ_r を示した。 $R_{y \min}$ 0.7 では ρ_r は 25.9% になる) 以上に保たれ

ば、間伐の取扱いがかわっても総収穫量に大きな違いはないといえるが、A シリーズは $R_{y \min}$ が低いと $V_f + V_t$ も低くなる傾向がある。これは B, C シリーズにおいて $R_{y \min}$ をとるのは 1 回のみであるが、A シリーズにおいては間伐のたびに $R_{y \min}$ がとられ、したがって同じ $R_{y \min}$ のときでも、ある密度管理における平均的な最多密度曲線からのへだたりは B, C シリーズよりも A シリーズの方が大きいと考えられる。

そこでさきに述べたように、最多密度曲線からの平均的なへだたりを示すものとして、平均収量比数を求めて検討を加えた。平均収量比数 $\bar{R}_y$ は、密度管理における間伐前と間伐後の収量比数を各間伐期について求め、平均したものである。しかし、すべての間伐期で収量比数を求めるのはわずらわしいので、略算として次のようにして求めた。A, B シリーズの間伐前または間伐後の点をそれぞれ結ぶと管理図上で直線関係を示すから、第 1 回間伐前、間伐後と最終回間伐の間伐後、それに伐期の R_y を平均したものを $\bar{R}_y$ とし、また C シリーズの間伐前または間伐後の点を結んだものは曲線になるので、A, B 両シリーズの $\bar{R}_y$ を計算するのに用いた 4 つの R_y に、第 1 回から最終回までの間伐の中間の間伐期における間伐前と後の R_y を加え平均したものを密度管理を代表する $\bar{R}_y$ とした。

Fig. 56 の計算資料について $\bar{R}_y$ を求め $V_f + V_t$ との関係を図 57 に示す。この図からわかるように、 $\bar{R}_y$ と $V_f + V_t$ の関係では A, B, C シリーズの違いは全くなくなる。したがって、平均収量比数 $\bar{R}_y$ はいろいろな密度管理について収穫量を検討するためには ρ_r または $R_{y \min}$ よりもすぐれた尺度といえよう。以下 $\bar{R}_y$ を主たる基礎として密度管理を組み立てる要因、植栽密度 ρ_0 や間伐開始期 h_f 、間伐繰返し期間 I 、間伐率 P_t 、管理基準 M_{R_y} と収

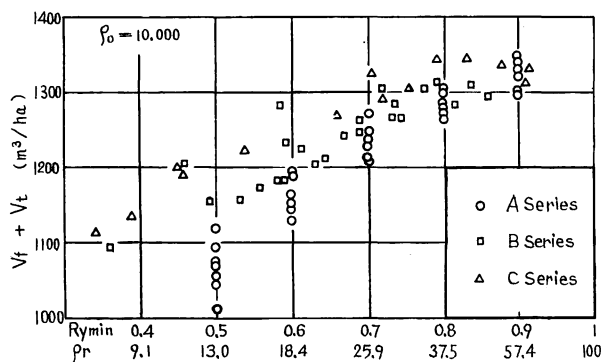


Fig. 56 密度管理のモデルの最小の収量比数 ($R_{y \min}$) と総収穫量の関係

The relations between $R_{y \min}$ and total stem volume yield ($V_f + V_t$) in the models of stand density control.

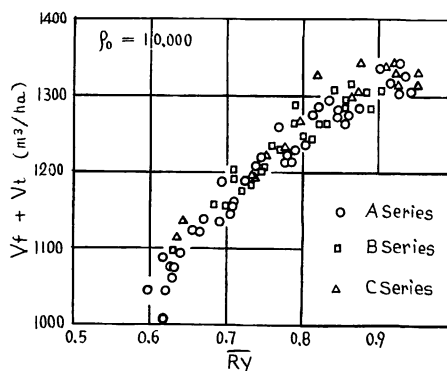


Fig. 57 密度管理のモデルの平均収量比数 ($\bar{R}_y$) と総収穫量の関係

The relations between $\bar{R}_y$ and total stem volume yield ($V_f + V_t$) in the models of stand density control.

稈量 $V_f + V_t$ の関係をみよう。

収稈量にはいうまでもなく主伐収稈量 V_f 、間伐収稈量 V_t と総収稈量 $V_f + V_t$ とがあるのでこれらについて述べる。

主伐収稈量 主伐収稈量 V_f は密度管理図をみれば明らかなように、樹高30mを主伐の時期とすると、30mの等平均樹高線上の比較となる。したがって、伐期密度をかえる要因によって決まる。すなわち、Aシリーズでは ρ_0 とは直接的な関係はなく、他の条件が同じならば M_{Ry} が大であるほど伐期密度は大となり、 h_f には無関係で、同じ M_{Ry} ならば間伐繰返し期間 I が長いほど伐期密度は大となり、したがって、主伐収稈量 V_f も大となる。Bシリーズでは M_{Ry} によってのみ V_f が決まり、他の ρ_0 、 h_f 、 I とは無関係である。またCシリーズにおいては ρ_0 、 h_f 、 I が一定ならば間伐率 P_t が低いほど V_f は大となり、 ρ_0 、 P_t 、 I が一定ならば h_f がおそいほど、 ρ_0 、 P_t 、 h_f が一定ならば一般に I が長いほど、 P_t 、 h_f 、 I が一定ならば ρ_0 が大なるほど V_f は大となる。また伐期密度が大であるほど平均胸高直径は小さい。

間伐収稈量 間伐収稈量 V_t は ρ_0 、 h_f 、 I 、 M_{Ry} 、 P_t によって複雑に変化する。A、Bシリーズ (Fig. 58~59) では ρ_0 、 h_f 、 I が同じならば M_{Ry} が小さいほど、すなわち $\bar{R}_y$ が小さいほど V_t は大となり、 h_f のみがかわり他の条件が一定ならば h_f がおそいほど、 I のみがかわる時には I が小さいほど V_t は大となる。Cシリーズでは (Fig. 60) ρ_0 、 h_f 、 I が一定ならば P_t が大なるほど V_t は大であるが、 h_f のみがかわり他の条件が一定ならば h_f の早いほど、 I のみがかわる時は I が小さいほど、 ρ_0 の

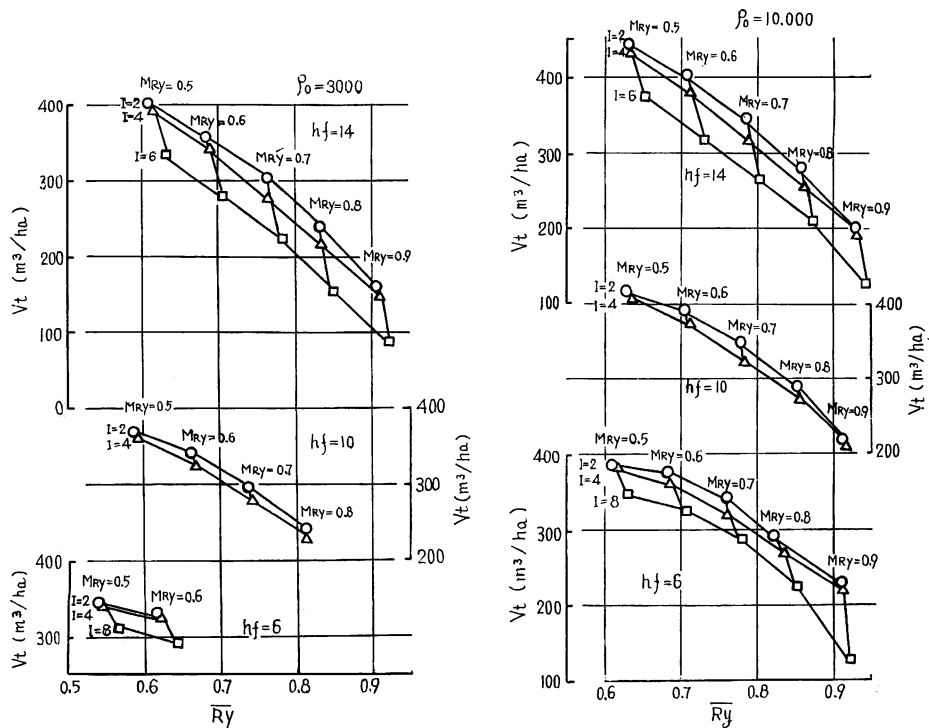


Fig. 58 密度管理Aシリーズの ρ_0 、 h_f を一定にしたときの M_{Ry} 、 I と V_t の関係

In the examples of A series, V_t concerning with M_{Ry} and I , in which ρ_0 and h_f were fixed. See the notation of Table 57.

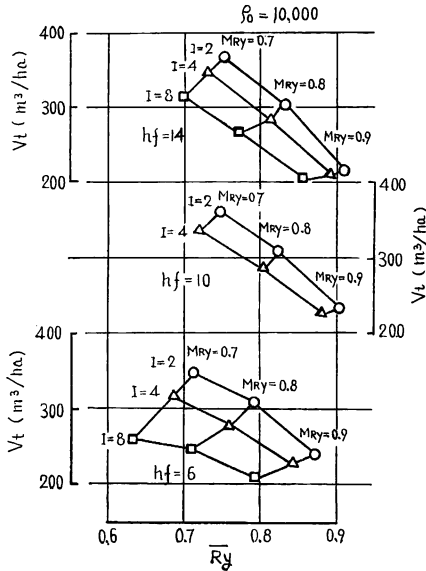


Fig. 59 密度管理Bシリーズの ρ_0 , h_f を一定にしたときの M_{Ry} , I と V_t の関係

In the examples of B series, V_t concerning with M_{Ry} and I , in which ρ_0 and h_f were fixed. See the notations of Table 57.

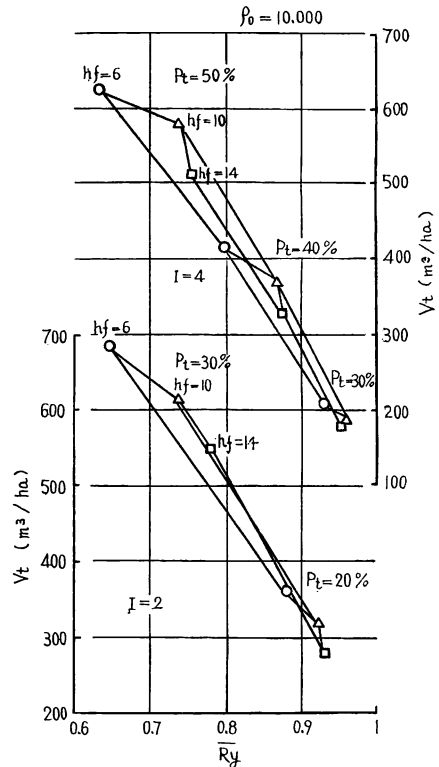


Fig. 60 密度管理Cシリーズの ρ_0 , I を一定にしたときの P_t , h_f と V_t の関係

In the examples of C series, V_t concerning with P_t and h_f , in which ρ_0 and I were fixed. See the notations of Table 57.

みがかわるときは ρ_0 が大きくなほど V_t は大となる。

総収穫量 総収穫量 $V_f + V_t$ に関連してまず主伐材積 V_f と間伐材積 V_t の関係をみてみよう。一般に Fig. 61 に示すように、 V_f が大であれば V_t は小、 V_f が小であれば V_t は大である。Cシリーズは ρ_0 ごとにこの関係が明らかであるが、Bシリーズでは V_f はとられた M_{Ry} により決まるが V_t は ρ_0 , h_f , I などによってかわり、またAシリーズは M_{Ry} と I によって V_f が決まり、 V_t は ρ_0 , h_f , I によりかわるので、その傾向はCシリーズほどはっきりしない。

$V_f + V_t$ はさきに述べたように $\bar{R}_y$ と密接な関係がある。この関係を Fig. 62 に示す。図からわかるように、同じ $\bar{R}_y$ ならば ρ_0 が低いほど $V_f + V_t$ も低くなるが、その違いはそれほど大きなものではない。また ρ_0 が同じならば $\bar{R}_y$ が大なるほど $V_f + V_t$ も高くなる。したがって、 $\bar{R}_y$ と $V_f + V_t$ の関係は飽和曲線形を示し、 $\bar{R}_y$ が 0.8~0.85 以上になると $V_f + V_t$ は一定化する。この傾向はA, B, Cシリーズに共通である。

つぎに ρ_0 , h_f , I , M_{Ry} , P_t と $V_f + V_t$ の関係をもう少し詳細にみてみよう。

ρ_0 と $V_f + V_t$ ρ_0 と $V_f + V_t$ の関係は上述のとおりであるが、もう少し詳しく検討すると次のようになる。Fig. 62 は $\bar{R}_y$ をベースに 30m の樹高 (h) を伐期として収穫量を算定したものであった。こ

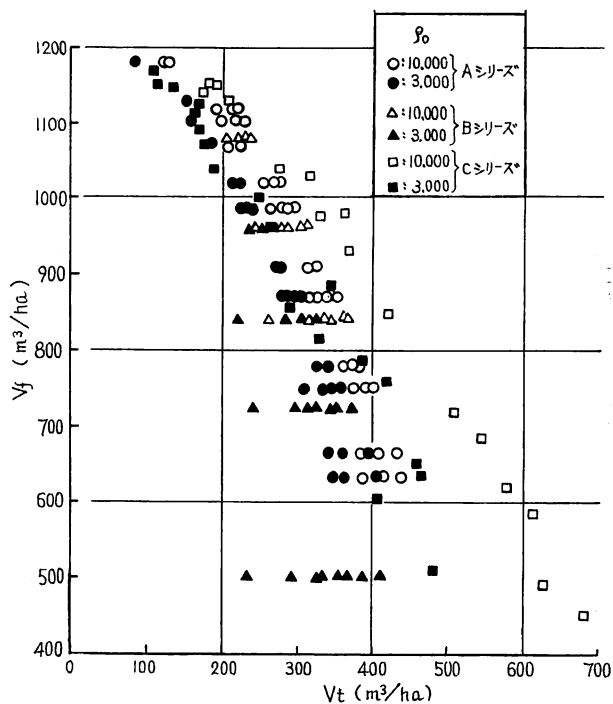


Fig. 61 間伐材積 (V_t) と伐期材積 (V_f) との関係
Relations between V_f and V_t . See the notations of Table 57.

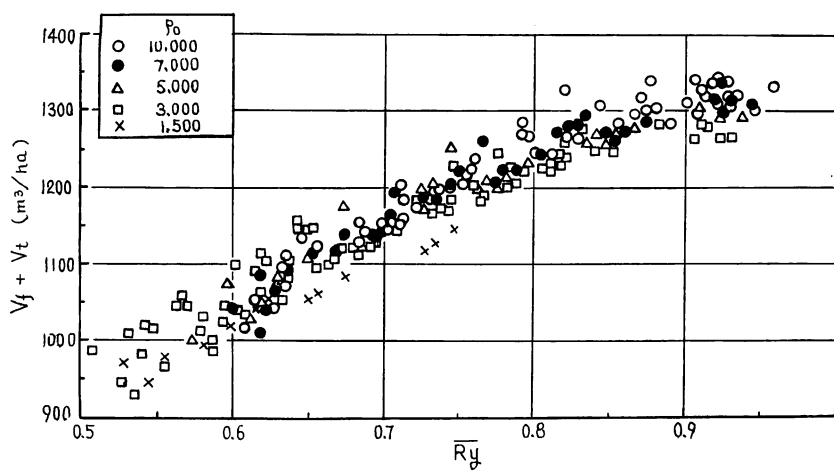


Fig. 62 平均収量比数 ($\bar{R}_y$) と総収穫幹材積 ($V_f + V_t$) の関係
Relations between $\bar{R}_y$ and $V_f + V_t$. See the notations of Table 57.

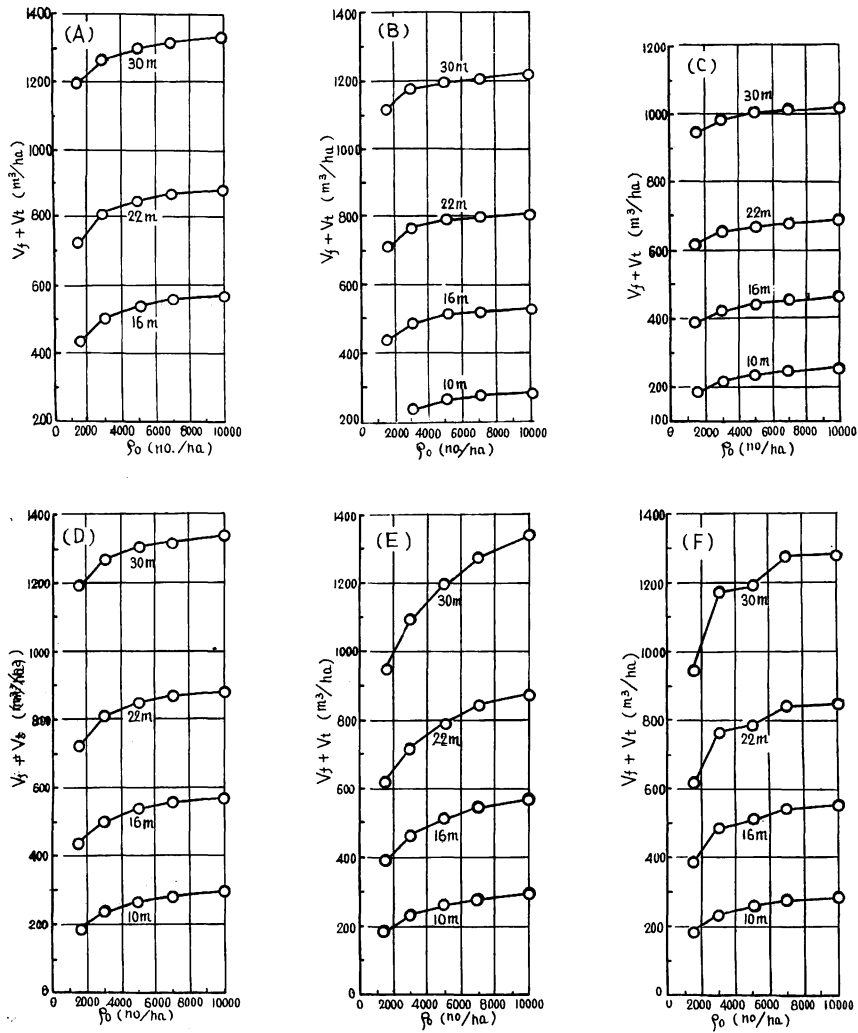


Fig. 63 植栽密度 (ρ_0) と総収穫材積 ($V_f + V_t$) の関係

Relation between ρ_0 and $V_f + V_t$.

A : M_{Ry} were fixed to 0.9.

B : M_{Ry} were fixed to 0.7.

C : M_{Ry} were fixed to 0.5.

C : The largest $V_f + V_t$ under each ρ_0 regardless of M_{Ry} .

E : ρ_0 and M_{Ry} were combined as follows;

ρ_0	M_{Ry}
1,500	0.5
3,000	0.6
5,000	0.7
7,000	0.8
10,000	0.9

F : ρ_0 and M_{Ry} were combined in consideration of actual stand density control as follows;

ρ_0	M_{Ry}
1,500	0.5
3,000	0.7
5,000	
7,000	0.8
10,000	

The h_f vary according to ρ_0 , and I was fixed 2 m in all calculations.

ここでは伐期をかえたとき、すなわち $h=10\text{m}$, 16m , 22m , 30m を伐期としたときの ρ_0 と $V_f + V_t$ の関係を A シリーズについて求めてみよう。このような比較をするため、次の密度管理に検討を加えた。

1) ρ_0 がかわっても同じ MR_y を管理基準としてとったとき (Fig. 63, A : $MR_y=0.9$, B : $MR_y=0.7$, C : $MR_y=0.5$ とし, MR_y をこえる樹高階に達したときに間伐をはじめ, $I=2\text{m}$ とした)。

2) ある ρ_0 で計算した範囲内で最大の $V_f + V_t$ がえられたとき (Fig. 63, D)。

3) ρ_0 が大であるほど高い MR_y を管理基準とするとき (Fig. 63, E : ρ_0 5 段階, MR_y 5 段階を図の説明のように組み合わせた)。

4) ρ_0 と MR_y を現実的な密度管理から考えて組み合わせたとき (Fig. 63, F : 組み合わせは図の説明のとおり)。

Fig. 63 からわかるように, ρ_0 がかわると $V_f + V_t$ の絶対値の差は伐期とした h が大になるほど増すが, h が増してもそれほど大とはならない。

Fig. 64 に 63 をスギの もっとも一般的な植栽密度と考えられる $\rho_0=3,000$ の $V_f + V_t$ を基準に他をその百分率として図示したが, この図から ρ_0 を増すと $V_f + V_t$ も増すが, その増加の割合は伐期が早

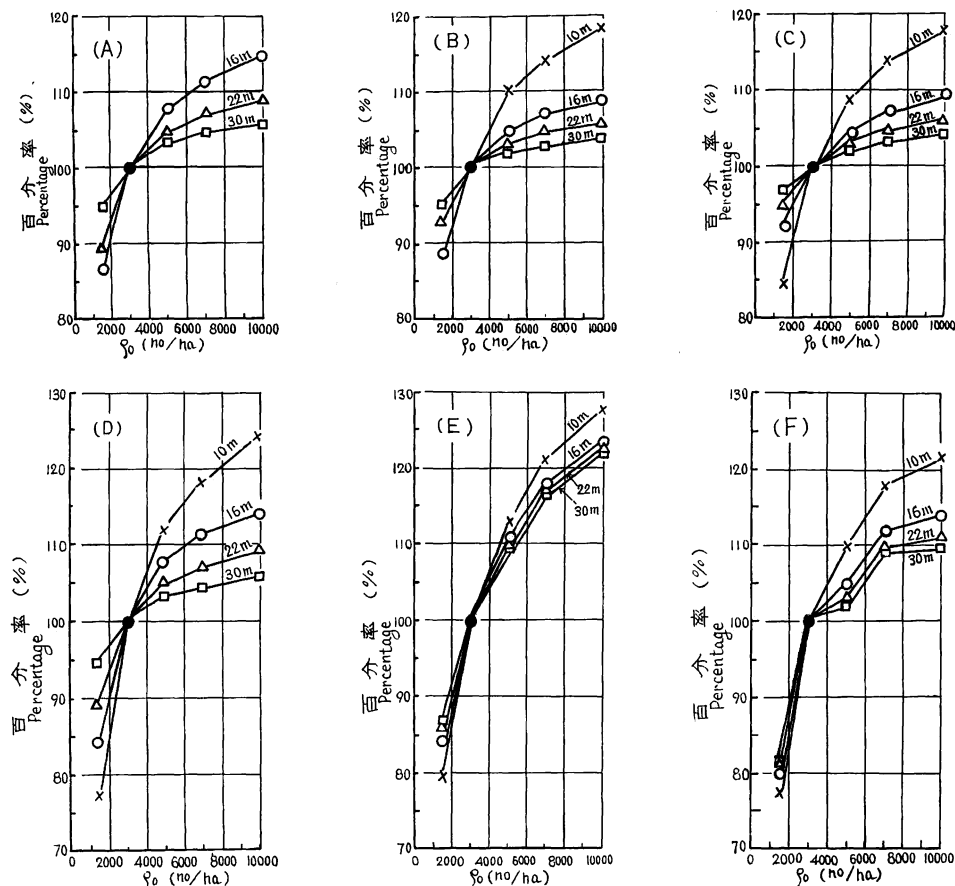


Fig. 64 Fig. 63 の $\rho_0=3,000$ の $V_f + V_t$ に対する他の ρ_0 の $V_f + V_t$ の百分率 (Fig. 63 参照)

Percentage of $V_f + V_t$ in each ρ_0 to that in $\rho_0=3,000$ which is the most popular initial planting density in Japan (See Fig. 63).

いほど（伐期とした h が小さいほど）大となり、伐期がおそいほど（伐期とした h が大きいほど）小さいことがわかる。たとえば、それぞれの ρ_0 で最大の $V_f + V_t$ の比較をした D では、 $\rho_0=3,000$ に対し $\rho_0=10,000$ と植栽密度が3.3倍にしても主伐の時期 $h=10m, 16m, 22m, 30m$ についてそれぞれ 124%, 114%, 109%, 105% 程度しか増加しない。また Fig. 64 からわかるように、 ρ_0 の増加にともなう $V_f + V_t$ の増加の割合は、植栽密度が高いときには高密度管理をおこなう時に高く、植栽密度が高くとも低密度管理をおこなうときには低くなり、伐期がおそくなると $V_f + V_t$ の差は非常に小さくなる。たとえば $\rho_0=10,000$ は $\rho_0=3,000$ に比し $h=16m$ では A の $MR_y = 0.9$ のときは 115% 多く、C の $MR_y = 0.5$ のときは 109% 多く、その差は 6% あったが、 $h=30m$ ではそれぞれ 105.5% と 104% でその差はわずかに 1.5% であった。

以上のことから、植栽密度を増して総収量を増加させる効率は、伐期が低いほど大であり、また植栽密度を増したときには高密度管理にしないと、総収量を増加させる効率は低くなるといえる。

I と $V_f + V_t$ 他の条件がすべて等しく間伐の繰返し期間 I のみがかわるとき、A シリーズでは Fig. 65~66 に示したように、一般には I が長いほど $V_f + V_t$ が大となるといえるが、管理基準となる MR_y の高いところでは I が長くなると $V_f + V_t$ が小になることがある。これは MR_y が高く、 I が長いと

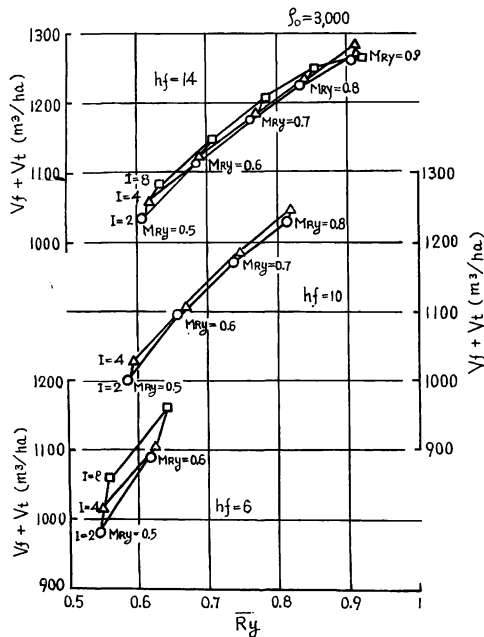


Fig. 65 密度管理Aシリーズの ρ_0 , h_f を一定にしたときの MR_y , I と $V_f + V_t$ の関係 ($\rho_0 = 3,000$)

In the examples of A series, $V_f + V_t$ concerning with MR_y and I , in which $\rho_0=3,000$ and h_f were fixed. See the notations of Table 57.

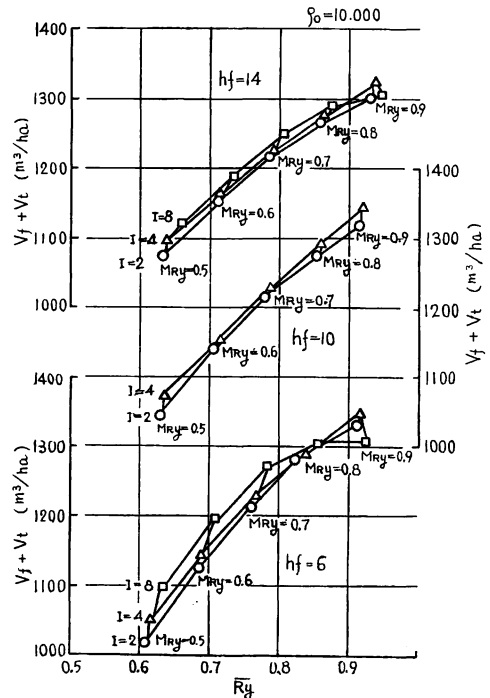


Fig. 66 密度管理Aシリーズの ρ_0 , h_f を一定にしたときの MR_y , I と $V_f + V_t$ の関係 ($\rho_0 = 10,000$)

In the examples of A series, $V_f + V_t$ concerning with MR_y and I , in which $\rho_0=10,000$ and h_f were fixed. See the notations of Table 57.

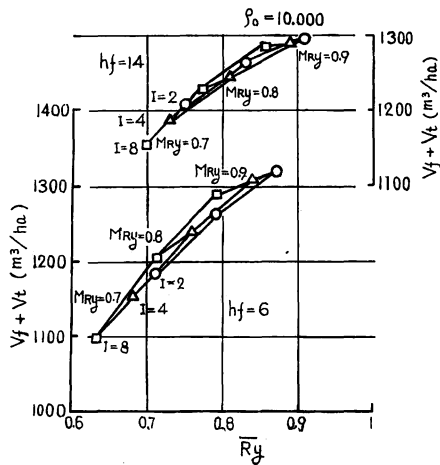


Fig. 67 密度管理Bシリーズの ρ_0 , h_f を一定にしたときの M_{R_y} , I と $V_f + V_t$ の関係
In the examples of B series, $V_f + V_t$ concerning with M_{R_y} and I , in which ρ_0 and h_f were fixed.
See the notations of Table 57.

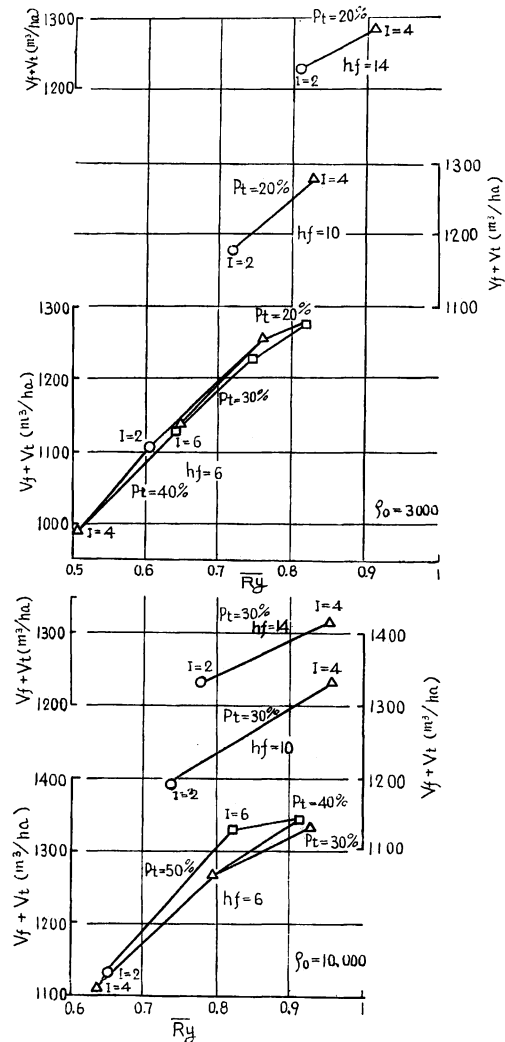


Fig. 68 密度管理Cシリーズの ρ_0 , h_f を一定にしたときの P_t , I と $V_f + V_t$ の関係
In the examples of C series, $V_f + V_t$ concerning with P_t and I , in which ρ_0 and h_f were fixed.
See the notations of Table 57.

最多密度曲線に達するため、自然間引による損失がおこるためである。すでに述べたように、この計算で自然間引は最多密度曲線上のみでおこるものとしたが、最多密度曲線に達する前にも自然間引はおこるから、このような現象はもっと低い M_{R_y} でもおこる可能性がある。Bシリーズ (Fig. 67) では I が長くなると $V_f + V_t$ が小となる傾向を示したが、Cシリーズ (Fig. 68) では間伐率が低いときには I が長くなると $V_f + V_t$ が大となるが、間伐開始期が早く、間伐率の高いときには複雑な動きとなる。

h_f と $V_f + V_t$ 他の条件がすべて等しく間伐開始期 h_f のみが変わるとき A シリーズ (Fig. 69), B

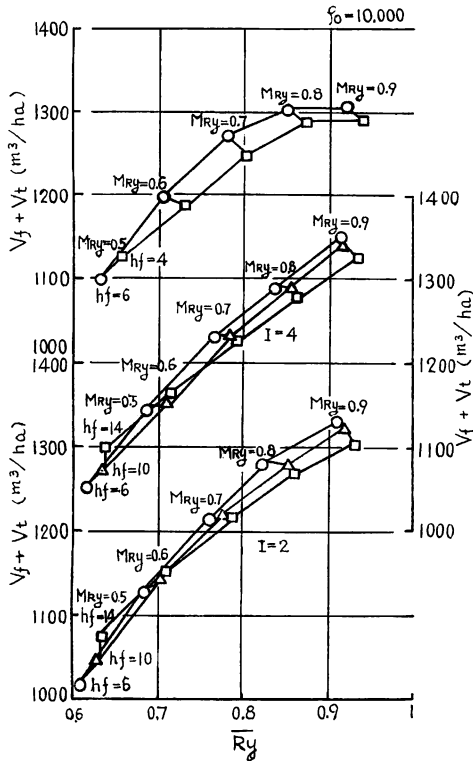


Fig. 69 密度管理Aシリーズの ρ_0 , I を一定にしたときの M_{Ry} , h_f と $V_f + V_t$ の関係

In the examples of A series, $V_f + V_t$ concerning with M_{Ry} and h_f , in which ρ_0 and I were fixed. See the notations of Table 57.

シリーズ (Fig. 70), Cシリーズ (Fig. 71) 共に低密度に管理されるばあいには間伐開始期がおそくなるほど $V_f + V_t$ は大となるが, 高密度に管理されるばあいには間伐開始期がおそくなると $V_f + V_t$ が小となる。これは間伐開始までの自然間引による損失が低密度管理のばあいには少ないが, 高密度管理のばあいには多くなることによる。

iii) 平均成長量最多の時期

伐期齡を決めるために, 平均成長量最多の時期は古くからひとつの意味を持たされてきた。したがって, 密度管理がかわると平均成長量最多の時期が, どのようにかわるかを覚えておく必要がある。

前節で示したいろいろな密度管理の伐期は, 樹

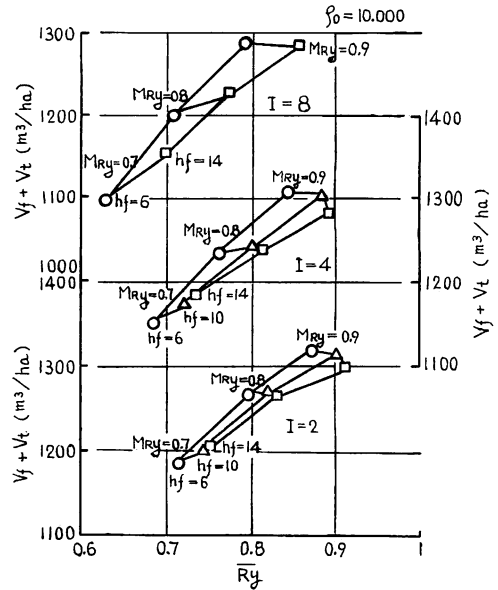


Fig. 70 密度管理Bシリーズの ρ_0 , I を一定にしたときの M_{Ry} , h_f と $V_f + V_t$ の関係
In the examples of B series, $V_f + V_t$ concerning with M_{Ry} and h_f , in which ρ_0 and I were fixed. See the notations of Table 57.

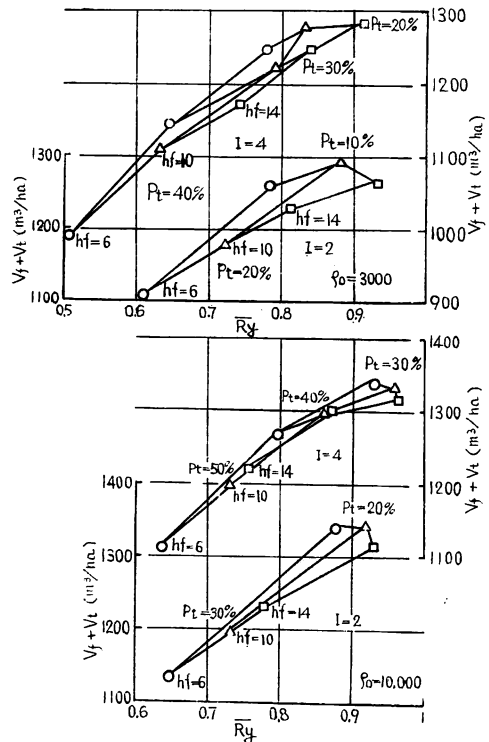


Fig. 71 密度管理Cシリーズの ρ_0 , I を一定にしたときの P_t , h_f と $V_f + V_t$ の関係
In the examples of C series, $V_f + V_t$ concerning with P_t and h_f , in which ρ_0 and I were fixed. See the notations of Table 57.

高によって決めたが、平均成長量を問題にするには樹高を時間に変換することが必要である。この変換は地位別の林齢と、樹高の関係からおこなうことができる。全国平均の一般林分密度管理図を作製するための数値は、1 地方を 1 単位としてもちいているので、全国平均の地位別の主林木樹高を平均して、全国平均の林齢と樹高の関係とみなすことにする。これらの関係は Table 61 に示す。

平均成長量最大の時期が、ある密度管理でいつになるかを管理図をもとに考えると、次のようになる。

Table 61. 全国平均の地位別樹高
Average height of all districts in each site class.

樹種 Species	地位 Site class	10 (yrs)	15 (yrs)	20 (yrs)	25 (yrs)	30 (yrs)	35 (yrs)	40 (yrs)	45 (yrs)	50 (yrs)	55 (yrs)	60 (yrs)
スギ <i>Cryptomeria japonica</i>	I	5.5	9.0	12.0	14.7	17.1	19.2	21.1	22.8	24.4	25.8	27.0
	II	4.4	7.3	9.8	12.1	14.1	15.8	17.4	18.8	20.1	21.3	22.3
	III	3.3	5.7	7.7	9.6	11.2	12.6	13.8	14.9	15.9	17.0	17.7
ヒノキ <i>Chamaecyparis obtusa</i>	I	4.4	6.8	9.0	10.9	12.6	14.2	15.6	16.9	18.1	19.2	20.3
	II	3.6	5.6	7.4	9.0	10.4	11.7	12.9	14.0	14.9	15.8	16.7
	III	2.8	4.4	5.8	7.1	8.3	9.3	10.2	11.0	11.8	12.5	13.2
アカマツ <i>Pinus densiflora</i>	I	5.1	8.2	11.3	14.0	16.2	18.1	19.6	21.0	22.1	23.1	23.9
	II	4.1	6.6	9.2	11.5	13.3	14.9	16.2	17.3	18.3	19.1	19.8
	III	3.1	5.1	7.1	9.0	10.5	11.8	12.9	13.8	14.6	15.2	15.8
カラマツ <i>Larix leptolepis</i>	I	7.2	11.3	14.6	17.1	19.3	21.1	22.7	24.1	25.2	26.1	26.9
	II	5.9	9.2	12.1	14.4	16.3	18.0	19.4	20.7	21.6	22.5	23.8
	III	4.3	7.2	9.7	11.6	13.4	14.8	16.0	17.2	18.1	18.9	19.6

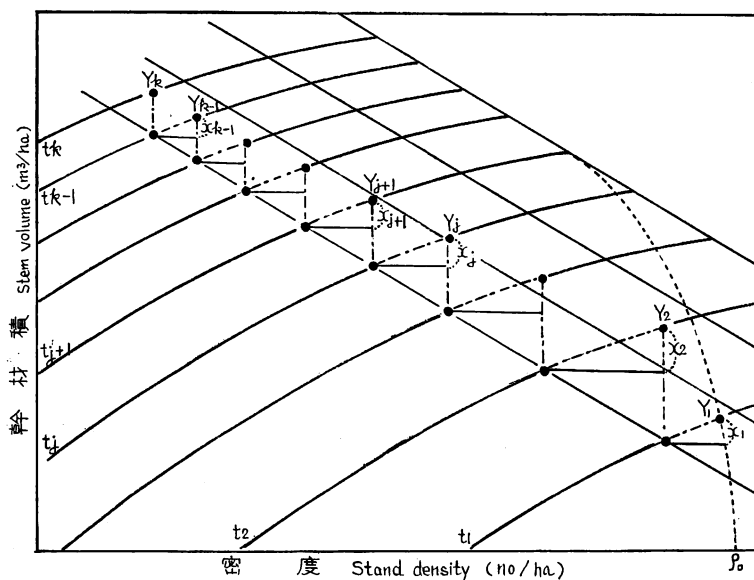


Fig. 72 時間を基準とした林分密度管理図上での間伐経過

(t_i : 時間, Y_i : 間伐前の幹材積, x_i : 間伐材積)

Thinning model on the stand density control diagram based on time
(t_i : Time, Y_i : Stem volume before thinning, x_i : Stem volume of removed trees).

Fig. 72 は樹高を林齢にかきなおした管理図である。植栽密度 ρ_0 で植栽され、時間 t_1 のときに第 1 回の間伐がおこなわれ、その後 $t_2, \dots, t_{k-1}$ で間伐して、 t_k で主伐する。そのときの間伐前の材積 Y_i と間伐量 X_i は次のように示される。

時 間	$t_1, \quad t_2, \quad \dots, \quad k-1$	k
間伐前の材積 (Y_i)	$Y_1, \quad Y_2, \quad \dots, \quad Y_{k-1}$	Y_k
間伐材積 (X_i)	$X_1, \quad X_2, \quad \dots, \quad X_{k-1}$	
総収穫材積	$Y_1, \quad Y_2 + X_1, \quad \dots, \quad Y_{k-1} + \sum_{i=1}^{k-1} X_i$	$Y_k + \sum_{i=1}^{k-1} X_i$

したがって、 t_k の平均成長量は

$$\frac{1}{t_k} \left[Y_k + \sum_{i=1}^{k-1} X_i \right] \dots\dots\dots (71)$$

また t_{k-1} の平均成長量は、

$$\frac{1}{t_{k-1}} \left[Y_{k-1} + \sum_{i=1}^{k-2} X_i \right] \dots\dots\dots (72)$$

であらわされる。 t_{k-1} と t_k における平均成長量の差を Δ とすると

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{1}{t_k} \left[Y_k + \sum_{i=1}^{k-1} X_i \right] - \frac{1}{t_{k-1}} \left[Y_{k-1} + \sum_{i=1}^{k-2} X_i \right] \\ &= \frac{1}{t_k \cdot t_{k-1}} \left[t_k (Y_k - Y_{k-1} + X_{k-1}) - (t_k - t_{k-1}) \left(Y_k + \sum_{i=1}^{k-1} X_i \right) \right] \dots\dots\dots (73) \end{aligned}$$

ここで $(Y_k - Y_{k-1} + X_{k-1})$ は t_{k-1} から t_k までの定期成長量を示し、 $\left(Y_k + \sum_{i=1}^{k-1} X_i \right)$ は t_k における総収穫量を示す。いま、平均成長量が t_{k-1} より t_k で増加するならば $\Delta > 0$ 、平均成長量が変わらないならば $\Delta = 0$ 、平均成長量が減少するならば、 $\Delta < 0$ となる。したがって、

$$t_k (Y_k - Y_{k-1} + X_{k-1}) - (t_k - t_{k-1}) \left(Y_k + \sum_{i=1}^{k-1} X_i \right) \leq 0 \dots\dots\dots (74)$$

の関係がわかれば、 t_{k-1} から t_k に移ったときの平均成長量の動きを知ることができる。このためには、

$$\frac{Y_k - Y_{k-1} + X_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} \leq \frac{Y_k + \sum_{i=1}^{k-1} X_i}{t_k} \dots\dots\dots (75)$$

の関係をみればよい。

ここで、 $(Y_k - Y_{k-1} + X_{k-1}) / (t_k - t_{k-1})$ は連年成長量を示し、また $\left(Y_k + \sum_{i=1}^{k-1} X_i \right) / t_k$ は平均成長量を示す。すなわち、平均成長量が増大するか、減少するかを知るには連年成長量と平均成長量を比べればよいことになる。このことは、これまでよく知られている連年成長量と平均成長量の関係、すなわち、はじめ連年成長量は平均成長量より大であるが、平均成長量の極大点で両者は一致し、それ以後は連年成長量は平均成長量より小となるということと一致している。しかしながら、(75) 式は平均成長量と連年成長量を求めなければならないから、実際のな式とはいえない。むしろ実際的な問題としては林齢と平均成長量の直接的な関係をみた方が早い。

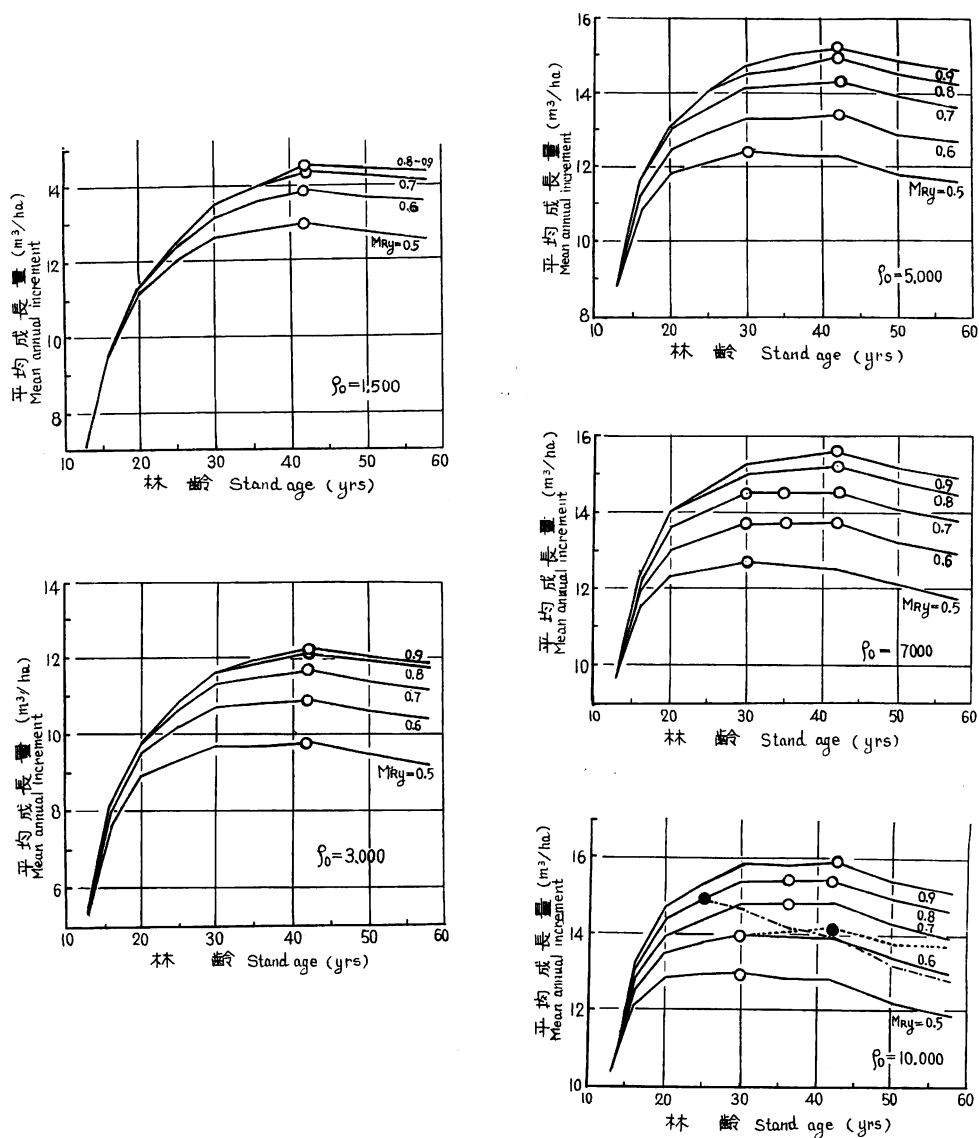


Fig. 73 ρ_0 を一定にしたときの MR_y と平均成長量の関係 (○ : 平均成長量最多の時期)

Relation between MR_y and mean growth in which ρ_0 were fixed

(○ : Maximum value of mean growth).

$\rho_0 = 10,000$ で $MR_y = 0.8$ の 25 年から —・—・— で示したものは 20 年までは MR_y を 0.8 としたが、その後の間伐では MR_y を 0.5 にかえたもの。また MR_y 0.6 の 30 年から で示したものは 30 年までは MR_y 0.6 であったが、その後は間伐をしないとき。

—・—・— in $\rho_0 = 10,000$ shows the change of mean growth which thinnings were practiced along $MR_y = 0.8$ till 20 years but after that thinnings practiced along $MR_y = 0.5$, and shows the change of mean growth which thinnings were practiced along $MR_y = 0.8$ till 30 years but after that thinnings were not practiced.

前節のAシリーズについて、植栽密度 ρ_0 ごとに密度管理基準 M_{Ry} をかえて、平均成長量最多の時期を求め Fig. 73 に示した。樹高を林齢に換算するには Table 61 のⅡ等地をもちいた。

Fig. 73 からわかるように、 ρ_0 がかわっても高密度に間伐管理がおこなわれるときには平均成長量最多の時期はかわらないが、 ρ_0 が大で M_{Ry} が小、すなわち植栽密度を増して、その後の間伐管理が低密度におこなわれると、低密度管理されるほど平均成長量最多の時期は早くなる。一定の密度管理基準によったときには、上述のことがいえるが、間伐基準を途中でかえることによって、平均成長量最多の時期を早くすることも、おそくすることもできる。たとえば、Fig. 73 の ρ_0 10,000 で M_{Ry} 0.8 の25年から――で示したものは、20年までは M_{Ry} を0.8としたが、その後の間伐では M_{Ry} を0.5にかえたもので、 M_{Ry} 0.8で管理されたときには42年に平均成長量最多の時期がきたが、このばあいには25年と著しく早くなった。また M_{Ry} 0.6の30年から……で示したものは、30年までは M_{Ry} 0.6であったがその後は間伐をせずに放置したばあいで、このときは平均成長最多の時期は42年になった。これは M_{Ry} が0.6のときの30年に比べると著しくおくらしている。

3. 考 察

林分密度管理図から、密度管理に応じて収穫量や形質（直径）の予測ができた。他方、収穫量の予測をおこなうためには今日まで収穫表が主に用いられてきた。そこで、林分密度管理図の性格を収穫表と比べて考察しておこう。

嶺⁷⁸⁾は収穫表を「成長条件が近似している地方において、その樹種が同一の取扱法で施業されたばあいに、単位面積より生産される材積ならびにこれに関連する諸要素の基準値を、主林木と副林木にわけ、年齢または特定の要素の函数として地位ごとに示した表または図である」と定義している。したがって、“同一の取扱法での施業”を1つの密度管理とすると、その収穫量などを“特定の要素”である“樹高”に対して与えた管理図は、収穫表としての性格を持っているといえる。

さらに嶺は normal yield を収穫量にとるか、または actual yield を収穫量にとるかによって基準収穫表と現実収穫表に大きく区分することができ、基準収穫表は現実林とのズレが大きいので、現実によくあうものとして現実収穫表が考えられるようになってきたと述べている。しかしながら、嶺⁷⁸⁾はさらに、森林の状況は変化するので、現実収穫表を恒久的なものとして作ることは困難で、現実的な値が欲しいときには基準収穫表を基準として、それを現実の立木密度の数値を求めて、収穫表の値を補正して、成長量や収穫量を推定するのが効果的であると述べている。このような考え方から、大友⁹⁸⁾は収穫表の構成値を離れた林分について補正する方法を示し、寺崎ら¹⁴⁸⁾は林分生産係数での補正を示した。さらに嶺⁷⁸⁾は土地状態や施業方法に変動の大きい地域では、variable-density yield table の形をとるのが実用上便利であると思うと述べているが、林分密度管理図は基準収穫表としてもまた現実収穫表としての性格も兼ねそなえた、variable-density yield table と考えることができる。

林分密度管理図はスギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツの4樹種についてそれぞれ秋田、木曽、磐城、信州の各地方の地域林分密度管理図と全国平均の一般林分密度管理図を示した。これらは、収穫表に一般収穫表と地域収穫表があるが、一般林分密度管理図は前者に、地域林分密度管理図は後者に相当するものと考えてよからう。嶺⁷⁸⁾は収穫表は最初一般収穫表として全国あるいは広い地域に対して作られたが、各地方で成長状態にちがいがあることが認識されて、地域収穫表の調製に努力が払われていると述べている。このことや、82ページに示した逆数式の常数と樹高の関係に、若干の地域間で統計的に有意な差が認めら

れたことと考えあわせると、将来は地域林分密度管理図についての要求が高くなるものと考えられる。しかしながら、地域における等平均樹高線と一般林分密度管理図にズレがあっても、そのズレの生じ方には一定の傾向があるので、この傾向を知っておけば地域林分密度管理図を特に作らなくとも、ある地域での密度管理について収穫量を予測することは可能であると考ええる。

また、収穫表と林分密度管理図の違いとして考えられることに、その調製方法の基盤の違いがある。これまでの収穫表調製の基盤は、数理統計学といってよいであろう。嶺⁷⁸⁾は収穫表の調製に際して取り扱われた多くの成長曲線式を示し、寺崎ら¹⁴⁸⁾はこれまでの本邦の国有林における収穫表の調製に際し、とりあげられた成長曲線式を総括しているが、その式のとりあげ方は、数理統計的にどのような形の数式がとり扱う資料に対してもっともよく適合するか、ということにおかれたと考えてよいであろう。I—2 に示した密度と成長の関係を数式化したこれまでの研究も、全く同じ基礎に立つと考えられる。これに対して、筆者がさきに示した林分密度管理図は植物生態学を基礎として、まず理論的にも実験的にも、普遍性のある密度と成長の一般的な関係を求めておいて、これに測定値をあてはめていった。同種個体群の種内競争という植物生態学における基礎研究をもとに、同齢単純林の密度管理という応用的な問題の基礎となる林分密度管理図が導かれたが、このことは基礎的な問題として導かれた結果を、応用的な問題へと発展させた一例ということができよう。

林分密度管理図によって、モデル的に組み立てた密度管理の収穫量に検討を加えたが、検討に際してはそれぞれの密度管理で平均収量比数 $\bar{R}_y$ を求め、 $\bar{R}_y$ を基礎とした。 $\bar{R}_y$ は密度管理が最多密度曲線に近くおこなわれると大となり、遠くおこなわれると小となって、密度管理のおこなわれ方を示す指標となった。

幹材積総収穫量は $\bar{R}_y$ が 0.80~0.85 以上の密度管理ではほぼ一定となり、 $\bar{R}_y$ がそれ以下になると $\bar{R}_y$ の減少にともなって総収穫量も減少する。このことは坂口¹¹¹⁾ が「同一地位では、間伐の割合によって間伐材積をふくむ全生産期間の材積収穫の総量には、有意な差がない」と述べたことと一致している。また、すでに述べたように、このような傾向は只木・四手井¹⁴²⁾、只木¹⁴⁴⁾ の求めた傾向とも一致している。

植栽密度を増すと総収穫量も増加するが、植栽密度を増した割合には総収穫量は増加せず、植栽密度を 3,000 本/ha から 10,000 本/ha と 3.3 倍にし、それぞれの植栽密度で最も多く材積収穫量がえられるように密度管理をしても、樹高が 10m, 16m, 22m, 30m のときに主伐するとそれぞれ 24%, 14%, 9%, 5% 程度しか収穫量の増加は望めない。このような傾向は只木・四手井¹⁴²⁾、只木¹⁴⁴⁾ のスギ、アカマツについての結果や、松井⁷⁶⁾ がトドマツで計算した結果でもほぼ同様であった。林野庁¹⁰¹⁾ では植栽密度を 3,500 本/ha から 4,500 本/ha にふやすことにより現在の総収穫量の 17% 収穫増になることを期待しているが、これは過大な期待と思われる。また渡辺・森¹⁶¹⁾ は現実林の調査結果から 30 年で伐採したとき 3,000 本/ha 植に比し 6,000 本/ha では 33%, 5,000 本/ha では 39%, 4,000 本/ha で 29% 主間伐合計材積が多くなると述べている。この値はさきに示した値に比べると著しく高い。これは 3,000 本/ha 植栽の林分の平均樹高が、他に比べ約 2 m 樹高の低いことが大きく影響しているものと考えられる。ANDERSON³⁾ の計算した植栽密度別の収穫表も求め方は違いますが、植栽密度を増しても主間伐収穫量はさきに示した程度しか増加していない。また植栽密度を増したときの増収効果は短伐期であるほどあがるが、植栽密度を多くすれば早く間伐することが必要となり、間伐材の径級はより細くなる。したがって、小径材の利用が不可能なところで植栽密度を増しても、実際には増収にならないばあいもあることに留意する必要があるだろう。

4. 摘 要

1. 幹材積等平均樹高線式、胸高断面積等平均樹高線式、最多密度曲線式、等収量比数曲線式から、樹高の増加にともなう密度と ha あたり幹材積や胸高断面積直径、収量比数曲線の関係をひとつの成長予測図——林分密度管理図としてとりまとめた。

2. 林分密度管理図はスギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツの4樹種について全国平均を示す一般林分密度管理図と、秋田地方のスギ、木曽地方のヒノキ、磐城地方のアカマツ、信州地方のカラマツについて地域林分密度管理図を作った。

3. スギの等平均樹高線の樹高と密度効果式の常数の関係について、若干の地域間に統計的に有意な差が認められた。

4. 秋田地方のスギ、木曽地方のヒノキ、磐城地方のアカマツ、信州地方のカラマツについて等平均樹高線の精度を求めた。幹材積の等平均樹高線に対する標本の変動係数は約10~20%であった。

5. 林分密度管理図によって植栽密度、間伐開始期、間伐繰返し期間、密度管理基準または本数間伐率をかえて、モデル的に組み立てた密度管理についてその収穫量を求め、その得失に検討を加えた。この検討には密度管理ごとに平均収量比数を求め、これを基礎としておこなった。その結果は次のとおりである。

a. 主伐材積は主伐時の密度が高いほど多いが、平均胸高直径は小さくなる。

b. 平均収量比数が大なるほど、すなわち、最多密度曲線に近づけて密度管理されるほど総収穫材積は大となる傾向があるが、平均収量比数が0.8~0.85以上になると、総収穫量は一定化する傾向がある。

c. 一般に、それぞれ他の条件を一定にしたときには、管理基準線を最多密度曲線に近づけるほど、間伐開始期がおそいほど、間伐の繰返し期間が短いほど総収穫量は大きくなるが、植栽密度が高いときには間伐開始期をあまりおそくすると総収穫量は減少する。

d. 一般に他の条件が一定ならば植栽密度が高いほど総収穫量は多くなるが、植栽密度の増加の割合には総収穫量の増加の割合は小さい。

e. 植栽密度を高くして増収をはかるときには伐期が短いほどその効果は大きい。

f. 間伐量は一般に植栽密度が高いほど、間伐後の収量比数が低くなるほど、間伐開始期がおそくなるほど、間伐の繰返し期間が短いほど多くなる。

g. 植栽密度がかわっても、その後の密度管理で高密度に維持されるならば平均成長量最多の時期は、ほとんどかわらない。植栽密度が高く、その後の密度管理で低密度に管理されると、低密度管理されるほど平均成長量最多の時期は早くなる。植栽密度の低いときには、低密度に間伐管理されても高密度に管理されても、平均成長量最多の時期はかわらない。

III 収量比数と現実林の諸量との関係

さきに述べたように、収量比数は最多密度曲線に対し密度管理がいかにおこなわれたかを示す指標となった。筆者ら⁹⁾は、さきにスギの有名林業地の調査をおこない、その林分構成要因や生産材の形質について解析し報告したが、収量比数をもとに林分構成要因や生産材の形質を整理すると、林分の込み方とこれらの関係を統一的に理解することが容易となる。以下収量比数と林分構成要因や、生産材の形質との関係について述べよう。

1. 収量比数と林分構成要因

i) 収量比数と葉量

単位面積あたりの葉量が十分に閉鎖した林分では、一定化するというをさきに述べたが、生育段階

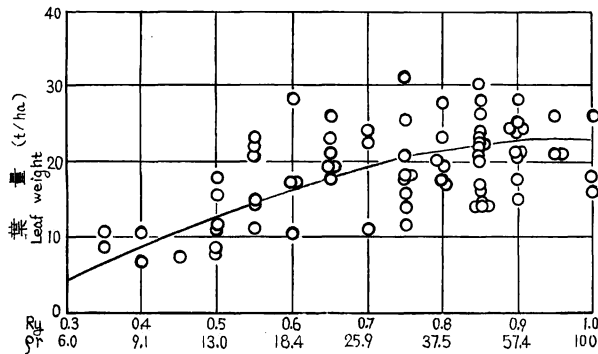


Fig. 74 スギの収量比数と葉量の関係

Relation between yield index and amount of leaves in *Cryptomeria japonica*.

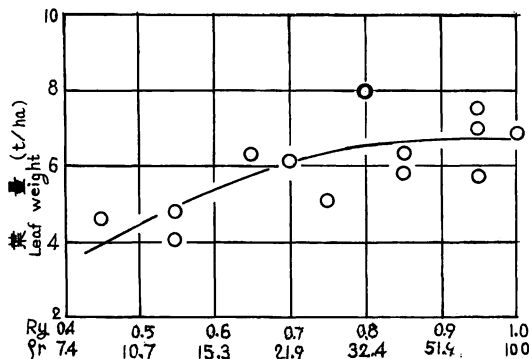


Fig. 75 アカマツの収量比数と葉量の関係

Relation between yield index and amount of leaves in *Pinus densiflora*.

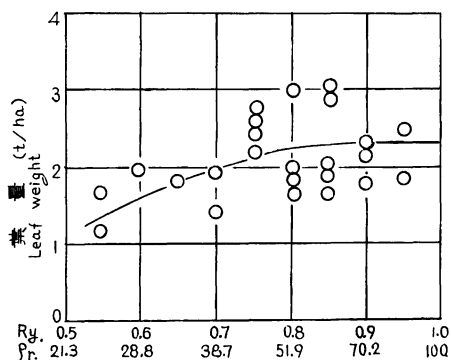


Fig. 76 カラマツの収量比数と葉量の関係
Relation between yield index and amount of leaves in *Larix leptolepis*.

によって葉量が一定化する密度はかわるから、密度のみによって林の込み方と葉量の問題を、統一的に理解することは困難である。そこで、林分の相対的な密度の尺度である収量比数 R_y と葉量の関係を求めて Fig. 74~76 に示した。Fig. 74 のスギの収量比数と葉量の関係は、安藤⁹⁾ のスギの保育形式の調査資料、蜂屋・安藤の新潟県の三保植栽密度比較試験地資料²⁹⁾ と、未発表³³⁾ の秋田営林局管内の調査資料、および林野庁¹⁰³⁾¹⁰⁴⁾ の連絡試験による宮城県、福島県、群馬県、埼玉県、鳥取県、愛媛県、高知県、長崎県、鹿児島県、栃木県、新潟県、福井県、岐阜県、奈良県、和歌山県、徳島県、福岡県、佐賀県の18県における調査資料で、調査はいずれも成長休止期におこなわれ、調査法、推定法はほぼ同じで、間伐後5年以上を経た林分の資料のみを選んだ。Fig. 75 のアカマツは安藤⁶⁾、佐藤¹¹³⁾、蜂屋³²⁾ の資料により、また Fig. 76 のカラマツは筆者も参画した林業試験場におけるカラマツ実態調査の長野営林局上田地区³¹⁾、青森営林局姫神地区⁴³⁾ の資料によった。これらの図はいずれも林齢を無視して描いたが、林齢が若く葉量の少ない林分は R_y も低く、ここで扱った資料の範囲では林齢を無視してもさしつかえなさそうである。

これらの図からわかるように、 R_y

と共に葉量は増加するが、増加のしかたは飽和曲線形を示し、 R_y が 0.8~0.85 以上になると R_y が増加しても葉量は一定化してくる。葉量が一定化してくるといっても、葉量のバラツキはかなり大きく、特に Fig. 74 のスギでは R_y 0.8 以上についてみても 14~30 ton/ha と約 2 倍の幅がある。その平均は 23 ton/ha くらいになる。また Fig. 75 のアカマツで 5.5~8 ton/ha くらいの幅があり、平均は 6.5 ton/ha、Fig. 76 のカラマツでは 1.5~3 ton/ha の幅で平均は 2.4 ton/ha くらいである。

Fig. 74~76 の R_y の下に相対密度を示した。只木・四手井¹⁴²⁾ はスギで 20~30%，只木¹⁴⁴⁾ はアカマツで 10~15% 以上の相対密度で葉量が一定になると考えた。只木・四手井、只木の示したスギとアカマツの最多密度曲線は、筆者が求めたものと若干ちがうので、スギの 20~30%，アカマツの 10~15% という p_r を Fig. 74~76 に示した p_r と直接比較することはできない。只木・四手井¹⁴²⁾、只木¹⁴⁴⁾ の最多密度曲線は筆者の最多密度曲線より若干外側に引かれており、只木・四手井のスギの最多密度曲線に対する相対密度 30% とは筆者の収量比数で 0.8 に近く、また 20% は 0.7 に近い。また只木のアカマツの p_r 15% は R_y で 0.65 に近く、また 10% は 0.55 に近い。したがって、葉量が一定になると考えられる相対密度は只木・四手井、只木の示した値より少し高くなりそうである。

同一樹高階で収量比数が同じでも、樹種によって密度は大きくちがうにもかかわらず、単位面積あたりの葉量が一定化する収量比数が、樹種によってかわらず、いずれも 0.8~0.85 くらいであることは幹材積成長と葉量の関係を考えて興味深い。

いま R_y が 0.8 以上の林分葉量の平均を閉鎖鎖が十分な林分の葉量と考え、この葉量に対して百分率で示した葉量を葉量比数と仮称しよう。Fig. 74~76 の葉量を葉量比数によって示し、収量比数との関係を同一図上にプロットして Fig. 77 に示す。スギはプロット数が多いので、秋田地方の調査資料のみを入れてある。この図から、収量比数と葉量比数の関係は樹種に無関係に、同一曲線で示されることがわかる。収量比数と葉量比数の関係が樹種に無関係に、一定の関係で示されると、樹種や生育段階によって大きくかわる密度と葉量の関係を、収量比数と葉量比数によって統一的に理解でき都合がよい。

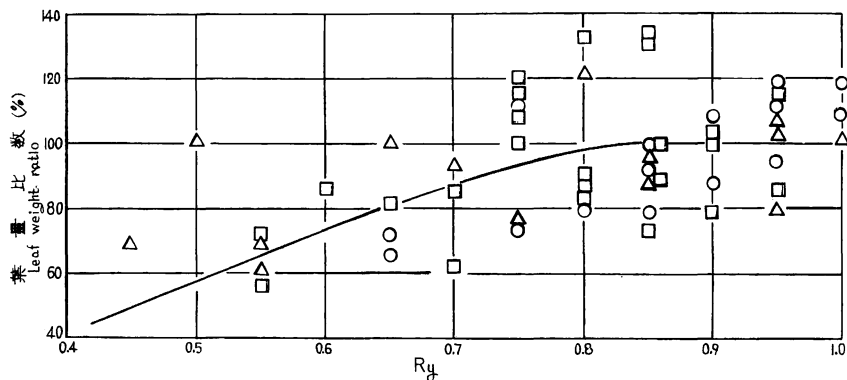


Fig. 77 収量比数と葉量比数の関係

Relation between yield index and leaf weight ratio.

○ : *Cryptomeria japonica* in Akita district, △ : *Pinus densiflora*, □ : *Larix leptolepis*. Leaf weight ratio was shown by the percentage of leaf weight of each stand to the average leaf weight in the stands which the yield index is larger than 0.8. These relations have not differences among species.

ii) 収量比数と部分重の百分率

幹、枝および葉などの部分重の地上部重に対する百分率が、密度や生育段階によってかわることはこれまでも知られていることである。スギの有名林業地の調査資料⁹⁾ から齢階ごとに収量比数と各部分重の百分率の関係を Fig. 78 に示す。この図から幹、枝、葉の百分率の生育にともなう変化と、同一生育段階における林の込み方のちがいによる変化を、統一的に理解することができる。すなわち、同一生育段階では収量比数が増加するほど幹の占める比率が増し、葉と枝の割合は減少する。しかし幹の比率は、収量比数が大きくなると一定化するような飽和曲線形を示す。また同一収量比数では生育にともない幹の割合は増加し、葉の割合は減少し、枝の割合はあまりかわらない。このことは、幹は全生育期間の生産量がそのまま蓄積されているが、枝や葉は落枝や落葉によって失われ、その量は枝よりも葉が多いことによる。

Fig. 79 にアカマツの天然生除伐試験林⁶⁾ と蜂屋ら³²⁾ の岩手県における壮齢林の資料によって同様の関

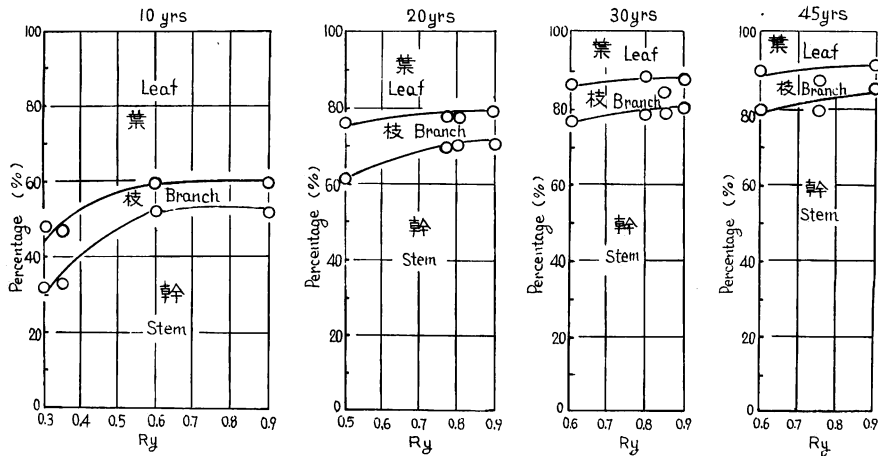


Fig. 78 スギの収量比数と地上部各部分の百分率

Relation between yield index and the percentage of each organ to above-ground part of *Cryptomeria japonica*.

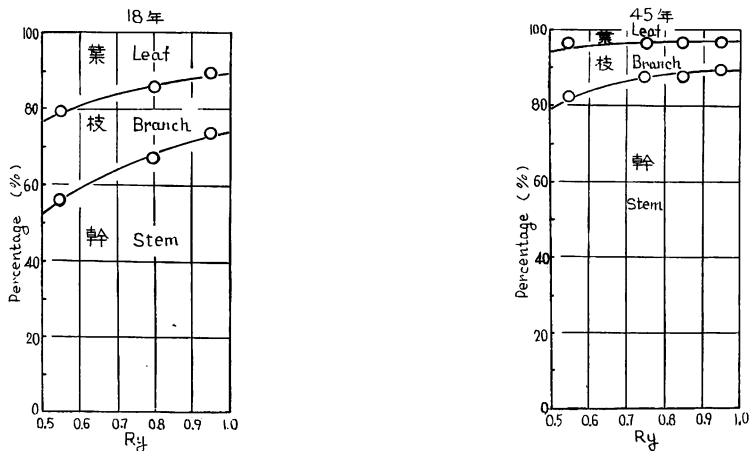


Fig. 79 アカマツの収量比数と地上部各部分の百分率

Relation between yield index and the percentage of each organ to above-ground part of *Pinus densiflora*.

係を示すが、これもスギと同じ傾向を示す。アカマツの葉の着生年数は壮齡林では2年くらい、スギは5年くらいと考えられるが、そのためアカマツの葉の百分率は同一生育段階、同一収量比数ならばスギに比べ著しく低い。

iii) 収量比数と枝下率

枝下率が密度によりかわることもこれまでによく知られている。枝下率は林分構成要因として葉や枝の垂直的な配分をかえるのみでなく、次章で述べる形質にも影響を与え、収穫される丸太の節の大小や多少にも影響する。

Fig. 80~82 にスギ、アカマツ、カラマツの収量比数と枝下率の関係を示す。Fig. 80 のスギはさきに述べたスギの保育形式の調査資料⁹⁾、蜂屋・安藤³⁸⁾の秋田営林局管内での調査資料、および林野庁の連絡試験による調査資料¹⁰³⁾¹⁰⁴⁾により、Fig. 81 のアカマツは岩手地方アカマツ林分収穫表調製資料⁹⁹⁾により、また Fig. 82 のカラマツはカラマツ実態調査資料³¹⁾⁴⁸⁾によった。これらの図には(100 - 枝下率) = クローネ率 となるのでクローネ率も同時に示した。

収量比数と枝下率、またはクローネ率の関係は地域や林齢の影響はあまりうけない。収量比数 R_y と枝下率 CL との関係は次式で示される。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{スギ} & CL = 127.87 \log R_y + 61.94 \\ \text{アカマツ} & CL = 64.67 \log R_y + 69.61 \\ \text{カラマツ} & CL = 61.42 \log R_y + 70.69 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (76)$$

これらの関係から最多密度曲線上ではスギの枝下率は61.94%、アカマツ69.61%、カラマツ70.69%がえられるが、この枝下率の樹種による違いはこれまでいわれているスギ、アカマツ、カラマツの耐陰性の順序と一致している。またスギのばあい収量比数が0.35付近で枝下率が0となり、これ以下の収量比数の林分では無競争状態になるものと考えられる。アカマツでは(76)式で示すと図の実線のようになるが、 R_y が0.3~0.5でも枝下率が0となる点があるので、本来は点線のようになるものと思われ、 R_y の0.3~0.5の範囲で50%近い枝下率を示す点は、一度かなり収量比数が高くなった林分が間伐などにより収量比数が低められたか、あるいは広葉樹との競合があったものと考えてよからう。カラマツについては資料が壮齡林のみで、また高密度な林分が多いため枝下率が0となる収量比数を示す資料がない。

このような関係がわかると林分密度管理図にさらに枝下率の知識を加えることができる。また枝下率から収量比数を逆推定によって推定できることになると、密度や材積がかわらなくとも収量比数が求められ、密度管理の実行しきわめてつづがよいことといえる。

2. 収量比数と生産材の形質

i) 収量比数と胸高形数

密度がかわると幹の形がかわり、高密度になるほどカンマンになり、低密度になるほどウラゴケになることが知られている。幹の形を示すひとつの尺度である胸高形数と収量比数の関係を、スギについて Fig. 83 に示す。この資料は、スギの収量比数と枝下率について示したものと同じである。

胸高形数は収量比数と同じでも樹高によってかわり、同じ収量比数ならば樹高が高くなるほど低くなる。また、同一樹高階にあっては収量比数が高くなるほど胸高形数也大となるが、収量比数の高いところでは一定化する傾向がある。また収量比数の低い無競争の状態になると、胸高形数は収量比数に無関係に、それぞれの樹高に応じて一定になるはずである。したがって、スギの場合、さきに述べたように枝下

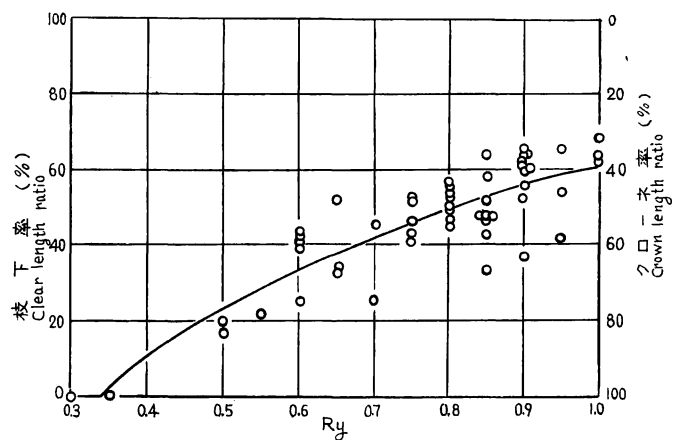


Fig. 80 スギの収量比数と枝下率, クローネ率の関係
Relation between yield index and clear length ratio or crown length ratio of *Cryptomeria japonica*.

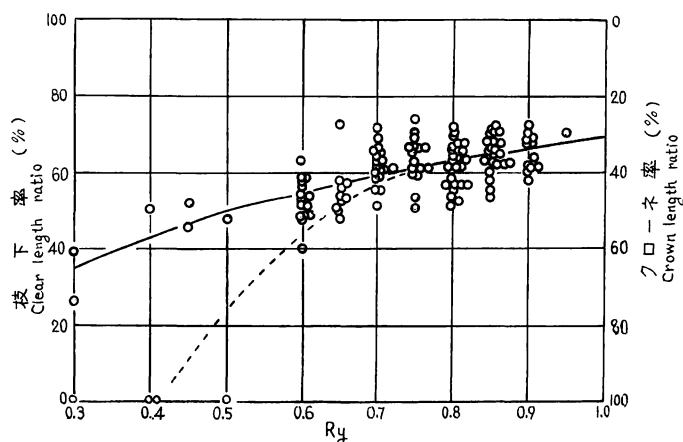


Fig. 81 アカマツの収量比数と枝下率, クローネ率の関係
Relation between yield index and clear length ratio or crown length ratio of *Pinus densiflora*.

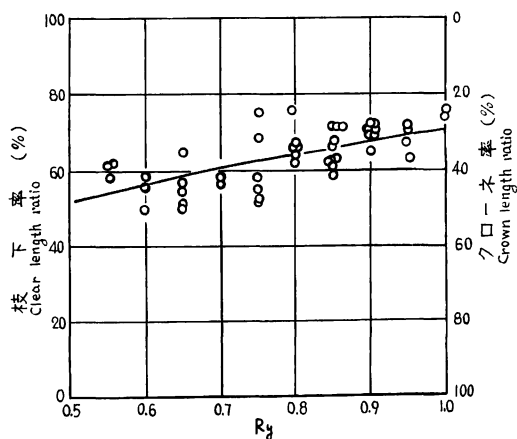


Fig. 82 カラマツの収量比数と枝下率, クローネ率の関係
Relation between yield index and clear length ratio or crown length ratio of *Larix leptolepis*.

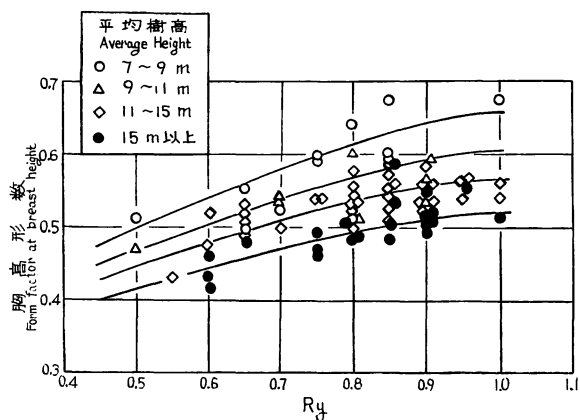


Fig. 83 スギの収量比数と胸高形数の関係
Relation between yield index and breast height form-factor of *Cryptomeria japonica*.

率が R_y の 0.35 付近で 0 となったことから、これ以下で無競争状態になるものとする、同一樹高階における胸高形数の変化は R_y が 0.35 までは横軸に平行で、それ以上になると収量比数の増加と共に増加し、収量比数の高いところでふたたび横軸に平行的になるものと考えられる。

ii) 収量比数と年輪密度

年輪密度が密度の増加とともに増加することも、これまで知られている。林分密度管理図には平均断面積直径が示されているから、樹高を時間におきかえることにより年輪密度の変化を求められるが、ここではスギの保育形式の調査資料⁹⁾により、直接収量比数との関係を求め Fig. 84 に示す。ここで示した平

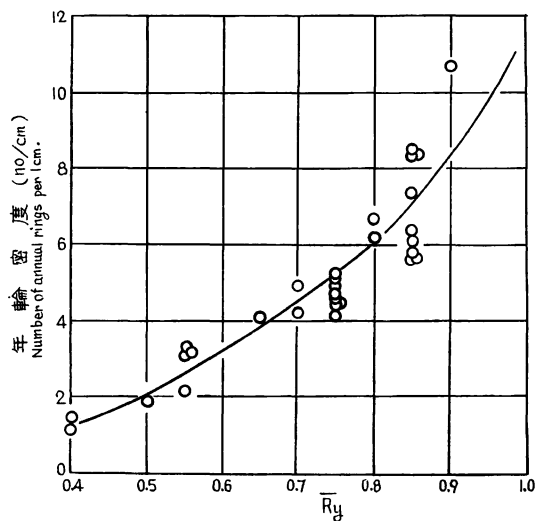


Fig. 84 スギの平均収量比数と年輪密度の関係
Relation between average yield index and number of annual rings per 1 cm at breast height of *Cryptomeria japonica*.

均収量比数と年輪密度は、5 年前と現在の値から求めたものである。

この図からわかるように、収量比数が増加すると急激に年輪密度も増すことがわかる。また、安藤ら⁹⁾がスギの保育形式調査の報告で述べているように、この調査資料は樹高からみてほぼ同一の地位にあると考えられる資料である。したがって、この地位より悪いところでは同じ収量比数でも、年輪密度はもっと高くなり、地位のよいところでは低くなる。

3. 考 察

林分密度管理図に示されている収量比数は、密度管理と幹材積収穫量の関係を検討する上で重要な役割を果たしたが、この収量比数と林分における諸量との関係は本章で示したような密接な関係にあり、これらの関係によって、林分密度管理図には示されていない林分構造や、生産される丸太の形質について知ることができる。

このことは非常につごうのよいことで、将来本章に示したような資料が蓄積されると、林分密度管理図上で林分構造要因や生産材の形質を統一的に知ることができるようになる。

前章で平均収量比数が 0.8~0.85 になる密度管理では、幹材積総収穫量がほぼ一定化することを示した。このことは、葉で生産される物質と幹に分配される割合によって説明されるものであるが、大まかには収量比数が 0.8~0.85 以上になると葉量が一定化し、また幹の占める割合も一定化してくるということで説明できよう。

また枝下率と収量比数の関係から、幹材積を求めなくとも収量比数を求めうることは、密度管理上きわめてつごうのよいことといえるが、収量比数の高い林分を間伐したあとは十分に時間を経ないと、現実の収量比数よりも過大に収量比数を評価する危険もあるので、注意しなければならない。

4. 摘 要

1. 収量比数と葉量の関係は、収量比数が増加すると葉量も増加する。しかし、収量比数が 0.8~0.85 以上になると、葉量は一定化する傾向がある。収量比数 0.8 以上の林分の、平均葉量に対する百分率により示される葉量を葉量比数と仮称すると、収量比数と葉量比数との関係は樹種に無関係に一定の関係で示される。

2. 収量比数と地上部重に対する部分重の割合との関係は、林齢と共にかわる。同一生育段階では収量比数の増加と共に幹の割合は増すが、収量比数が高くなると一定化する傾向がある。葉と枝の割合は収量比数の増加とともに減少する。

3. 収量比数と枝下率またはクローネ率の関係は生育段階に無関係で、収量比数と共に枝下率は増加し、クローネ率は減少する。

4. 収量比数と胸高形数の関係は樹高階によってかわるが、同一樹高階では収量比数の増加と共に大となる。

5. 収量比数と年輪密度の関係は生育段階に無関係で、収量比数の増加と共に急激に増加する。

IV 密 度 管 理 の 指 針

林分密度管理図は図上でいろいろな密度管理に検討が加えられることから、それ自身を密度管理の基礎として用いることができるが、本研究を林業経営に直接役に立たせるため密度管理の指針を導いて示そう。

同齡單純林の密度管理は森林を造成する際に植栽密度をどのように決め、間伐を何時から始め、間伐時にはどのくらいの残存密度を保たせ、どのくらいの間隔で間伐を繰り返し、どのような間伐の方法（選木の方法）によって間伐を実行し、どのくらいの伐期まで森林を育成するかによって決まる。このような密度管理は坂口¹⁴¹⁾が述べているように経営目標、すなわち伐期に収穫を期待する丸太の量や形質によってかわってくるが、また林業経営はさまざまな立地条件のもとで、それぞれのちがった経済的な背景によっておこなわれるから、これらの条件を経営目標のみによって画一的に決めることは困難である。そこで森林の造成に際し、まず決めておかなければならない植栽密度の指針と、残存密度基準を主にした間伐形式別の間伐指針について示そう。

1. 植栽密度決定の指針

植栽密度を決定するために考慮しなければならないこととして樹種特性、自然的立地条件、経済的立地条件、労働条件、生産目標などがあげられている。植栽密度について、中村⁸⁷⁾、四手井¹²¹⁾、倉田⁶⁷⁾、坂口¹⁴¹⁾などによってそれぞれの立場から論じているが、具体的な植栽密度の決定という立場からみるときわめて抽象的である。また具体的な植栽密度を示したものは、過去の国有林や民有林の経験にもとづくものが多く、ある樹種のある場所に植栽するにあたって、どのようにして、あるいはどのように考えて決めればよいかについては述べられていない。

植栽密度試験についてはIに示したように多くの報告があるが、いずれも植栽密度と林分または林木の成長を取り扱ったものが多く、密度試験の結果から植栽密度を決定するための具体的な方策を示したものは少ない。その中で、植栽密度の決定について言及しているものに植栽密度と閉鎖の関係がある。

徳永・渡辺¹⁵¹⁾は富士山国有林のヒノキの3等地で、枝張りから植栽密度と閉鎖までの年数を求め、東京営林局¹⁵³⁾では植栽密度と下刈年数の関係を求めるために枝張りから閉鎖度を求め、現行（1961年当時）の3,000本植栽で6年まで下刈をおこなっているの、これと同じ閉鎖度になる年数は4,500本/haで5年、6,000本/haで4年であるとした。また千広²⁰⁾もトドマツとカラマツの植栽密度と林分閉鎖までの年数を同様に求めている。

さらに、植栽密度試験地についてみると、BRAATHE¹⁶⁾はNorway spruceの植栽密度と閉鎖までの年数を報告し、本邦ではスギ、アカマツ、カラマツについて初期成長と閉鎖度を青森営林局技術分担研究報告会記録に多くの調査者によって報告されているが（設定場所・試験設計等については文献102にとりまとめられている）、最近報告の途絶えたことは残念である。

林分閉鎖の時期を考慮して植栽密度を決めることも、林地保護や下刈期間とあわせて考えて1つの意味をもつ。しかしながら、たとえば極端な疎植をおこなったとき、造林木による林分閉鎖には多くの年数を要するが、閉鎖が完了するまで下刈をつづけてもあまり意味はない。そのようなときには、下草の1.5～2倍に造林木が達すれば一般に下刈は不必要と考えられる。植栽密度を増して林分閉鎖の時期を早くし、下刈期間が短縮できるとしても、たとえば先に示した東京営林局¹⁵³⁾での計算例のように、植栽密度を1.5倍にして1年、2倍にして2年程度しか短縮できないとすると、苗木代、植栽費等の造林費と労働力を考えると、このために植栽密度を増すことが果たして経済的に有利で、労働力も節約できると考えてよいであろうか。林地保護のため早期閉鎖を望むならば、渡辺¹⁶²⁾の唱えるテイネイ植と合理的な施肥を組み合わせたほうが、実効はあがりそうに思われる。

さきにも述べたように、植栽密度は常に伐期までの一連の密度管理の中で考える必要があり、植栽密度

のみをとりだしてその多少を論じて意味のうすいことは明らかである。すなわち、いま間伐後の残存密度基準が相対的に低密度である間伐形式を疎仕立、高密度である間伐形式を密仕立と呼ぶことにすると、坂口¹¹⁾も述べているように、現実の経験的な密度管理をみると、植栽密度が疎なときには間伐形式も疎仕立がとられ、また密なときには密仕立がとられている。

しかしながら、密植密仕立、または疎植疎仕立の密度管理においても、やみくもに密植または疎植してよいわけではない。植栽密度を増せば、さきに述べたように総収稈量は多くなるが植栽密度の増加の割に総収稈量の増加は小さいし、その効果は長伐期はどうすくなる。さらに林分密度管理図からわかるように、植栽密度を増せば間伐材の径級は小さくなるので、実際に利用できる材の増加は必ずしも多くはなく、植栽密度を増して生産材積が多少増加しても、第1回の間伐材が有利に処分できないならば、植栽密度を増すことによって、経済的には逆にマイナスになるばあいも起こりうる。また極端に疎植すれば林分の閉鎖がおくれ、したがって単位面積あたりの生産量の犠牲が大きくなり、また林地保護の面からも好ましくない。そこで、疎植疎仕立は単位面積あたりの収稈量を犠牲にしても単木の成長に重点をおこうとするときにとられるが、その場合でも許される範囲で植栽密度を増し、時に応じて間伐し総収稈量なるべく多くすることが有利であろう。

植栽密度は間伐管理をどのようにおこなうか、また林分閉鎖の時期がいつになるか等に注意を払って決めなければならないことはもちろんであるが、経営の立場を考慮に入れると、筆者⁴⁾がすべて述べているように、第1回の間伐材を有利に処分するには、間伐材の径級がどのくらいあればよいかをまず考える必要がある。本邦における林業地の密度管理をみても、密植をおこなっている地方は間伐材、とくに小径の間伐材が有利に処分できるところに多い。小径材の径級がどのくらいあれば有利に処分できるかは、それぞれの地方によって違うので、第1回の間伐材を有利に処分できる径級や、材長に見とおしをつけることが必要である。

このような見とおしがたてられると植栽密度は林分密度管理図を利用し、次のようにして決めることができる。いまスギのばあいを考えると、第1回の間伐材の有利に処分できる平均的な大きさを胸高直径 8 cm、樹高 6 cm とする。間伐木の平均の大きさは普通の間伐では間伐前の全林木の直径や樹高より約 20 % くらい小さいから、平均 8 cm、6 m の間伐木をうるには間伐前で林分の平均が 10 cm、8 m くらいになっていることが必要である。そこで、Fig. 45 のスギの管理図で樹高 8 m、直径 10 cm のところをみると 5,200 本/ha という値がえられる。また樹高が 8 m に達するまでの自然枯損を自然間引線の傾向から約 700 本/ha と見込まれるので、これを加えると 5,900 本/ha 程度植栽する必要のあることがわかる。

このように、初回の間伐木の大きさを考慮に入れて植栽密度を決定するために、管理図から樹高、直径、密度の関係を読みとった植栽密度決定の指針表を Table 62 に示す。

ここに示した植栽密度の決定方法は、森林の密度と成長に関する植物生態学の研究結果を基礎とした数値と、初回の間伐材の利用という林業経営の問題を組み合わせたもので、一つの合理的な決定方法であるとする。

2. 間伐の指針

密度管理のひとつの要因である植栽密度の決め方について述べたが、もう一つの大きな要因である間伐の指針について述べよう。

収量比数は直接単位面積あたりの最大現存幹材積に対する割合を示し、密度管理とその総収稈量の関係

Table 62. 植栽密度決定の指針 (全国平均)
Guide for the determination of initial planting density (Average of all districts).

樹種 Speciese	胸高直径 Diameter at breast height (m)	平均樹高 Mean height (m)				
		6	8	10	12	14
スギ <i>Cryptomeria japonica</i>	8	6678	—	—	—	—
	9	4760	6875	—	—	—
	10	3383	5262	—	—	—
	11	2362	4066	5200	—	—
	12	1585	3155	4170	—	—
	13	—	2449	3372	4135	—
	14	—	1888	2738	3433	—
	15	—	1435	2219	2866	3388
	16	—	—	1806	2402	2883
	17	—	—	—	2018	2465
	18	—	—	—	1697	2115
ヒノキ <i>Chamaecyparis obtusa</i>	6	11842	—	—	—	—
	7	7959	—	—	—	—
	8	5432	7964	—	—	—
	9	3707	5913	—	—	—
	10	2469	4441	5861	—	—
	11	—	3349	4613	—	—
	12	—	2518	3662	4556	—
	13	—	1874	2925	3733	4402
	14	—	—	2340	3079	3684
	15	—	—	1866	2551	3105
	16	—	—	—	2118	2630
アカマツ <i>Pinus densiflora</i>	6	7817	—	—	—	—
	7	4929	—	—	—	—
	8	3049	5410	—	—	—
	9	1767	3914	5260	—	—
	10	—	2839	4047	—	—
	11	—	2042	3149	3940	—
	12	—	—	2465	3175	—
	13	—	—	1934	2590	3087
	14	—	—	—	2125	2582
	15	—	—	—	—	2174
	16	—	—	—	—	1840
カラマツ <i>Larix leptolepis</i>	8	3703	—	—	—	—
	9	2278	3987	—	—	—
	10	1256	2847	—	—	—
	11	—	2002	2930	—	—
	12	—	1359	2230	—	—
	13	—	—	1687	2256	—
	14	—	—	1256	1794	2216
	15	—	—	—	1421	1799
	16	—	—	—	—	1475

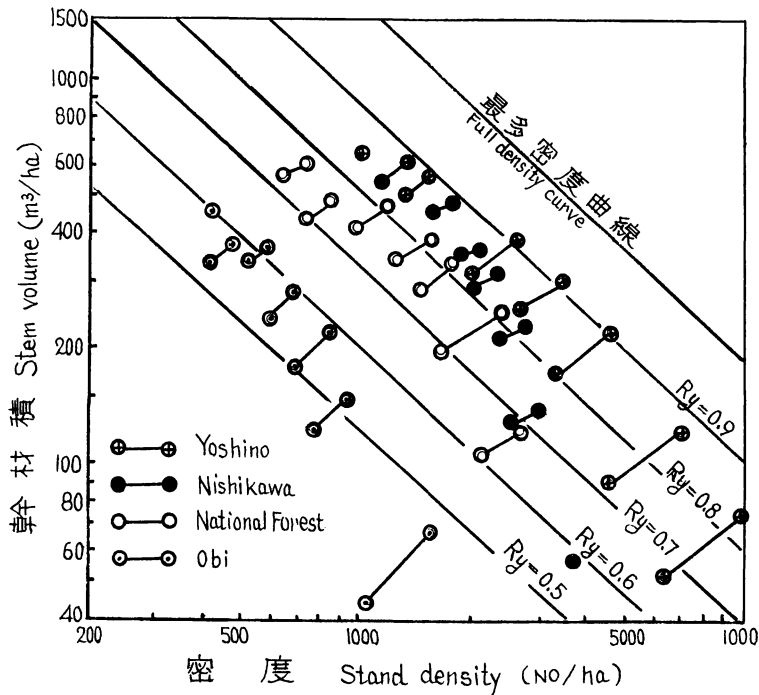


Fig. 85 スギの収量比数曲線と保育形式の調査の間伐経過
Yield index curves and the examples of thinning in each district of *Cryptomeria japonica*.

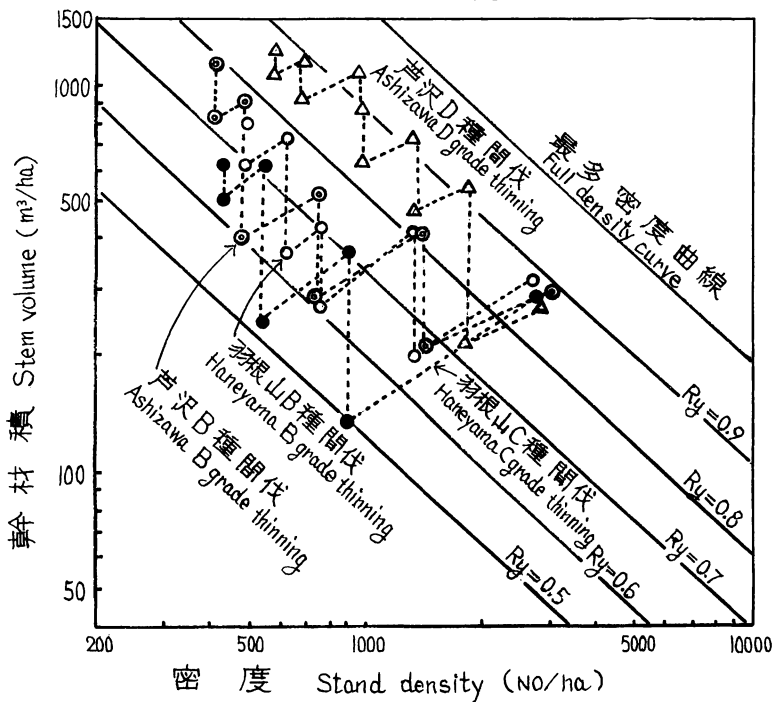


Fig. 86 スギの収量比数曲線と間伐試験¹⁴⁷⁾での間伐経過
Yield index curves and thinning courses in thinning experiment stands of *Cryptomeria japonica*.

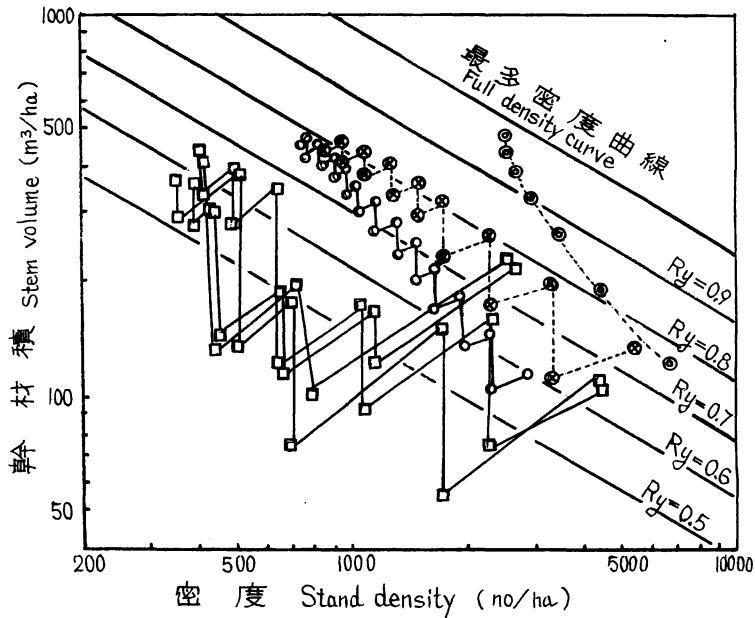


Fig. 87 ヒノキの収量比数曲線と間伐経過

Yield index curves and thinning courses of *Chamaecyparis obtusa*.

-○: Yield table in Owase district (HONDA et al.³⁵⁾)
- ⊗.....⊗: Yield table in Owase district (MINE and MINAMI⁷⁹⁾)
-○: Yield table in Kiso district
-□: Thinning experiment plots¹⁷⁷⁾

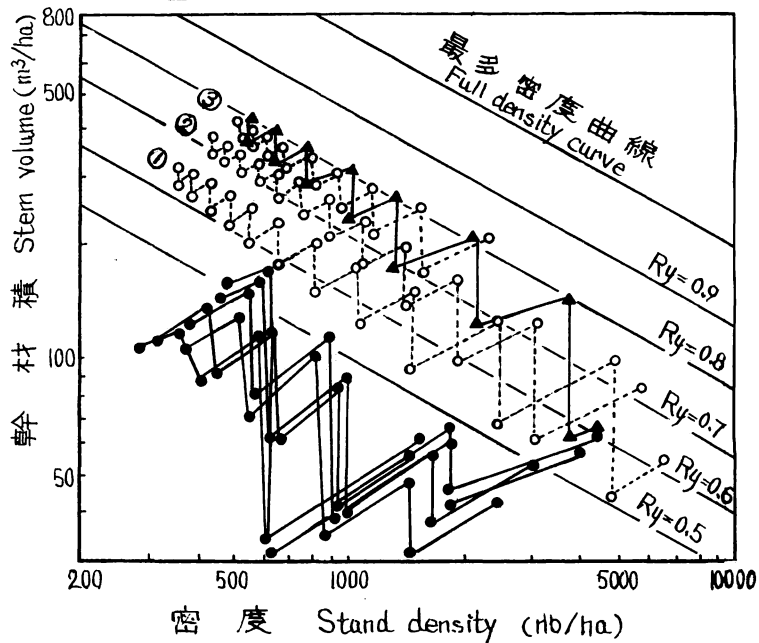


Fig. 88 アカマツの収量比数曲線と間伐経過

Yield index curves and thinning courses of *Pinus densiflora*.

-○①: Yield table in Iwate district
-○②: Yield table in Iwaki district
-○③: Yield table in Kinki district
- ▲.....▲: Yield table in Ashikita district¹²⁸⁾
-●: Thinning experiment plots⁵⁶⁾

を検討する上で重要な役割を果たし、また林分構造要因との関係も密接であったから、これによって間伐指針を示す。

密度管理と収穫量の関係に収穫量を最大にするような密度管理が認められれば、材積収穫量のみを考えたときの間伐指針を示すことは容易になるが、Ⅲで述べたように、収穫量は高密度管理をするほど大になるが、平均収量比数が 0.8~0.85 以上になると一定化する傾向がみられた。また坂口¹¹¹⁾ が述べているように、密度管理は経営目標に応じておこなわれるべきであるから、間伐指針も経営目標に応じて示すことが必要である。そこでまず、本邦でおこなわれている密度管理が林分密度管理図上でどのように示されるかをみて、それから間伐指針を決めることにする。

Fig. 85~89 にスギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツの収量比数と代表的な保育形式における密度管理、および間伐試験の密度と幹材積の関係を示した。

Fig. 85 のスギは筆者ら⁹⁾ がおこなったスギの保育形式の調査結果を入れたもので、密植密仕立長伐期の代表的な吉野地方は 0.8~0.9 の間を動き、密植密仕立短伐期の西川地方は自然間引線に沿って、自然間引をおこす量だけあらかじめ間伐するような動きを示している。また中庸植中庸仕立長伐期の国有林は

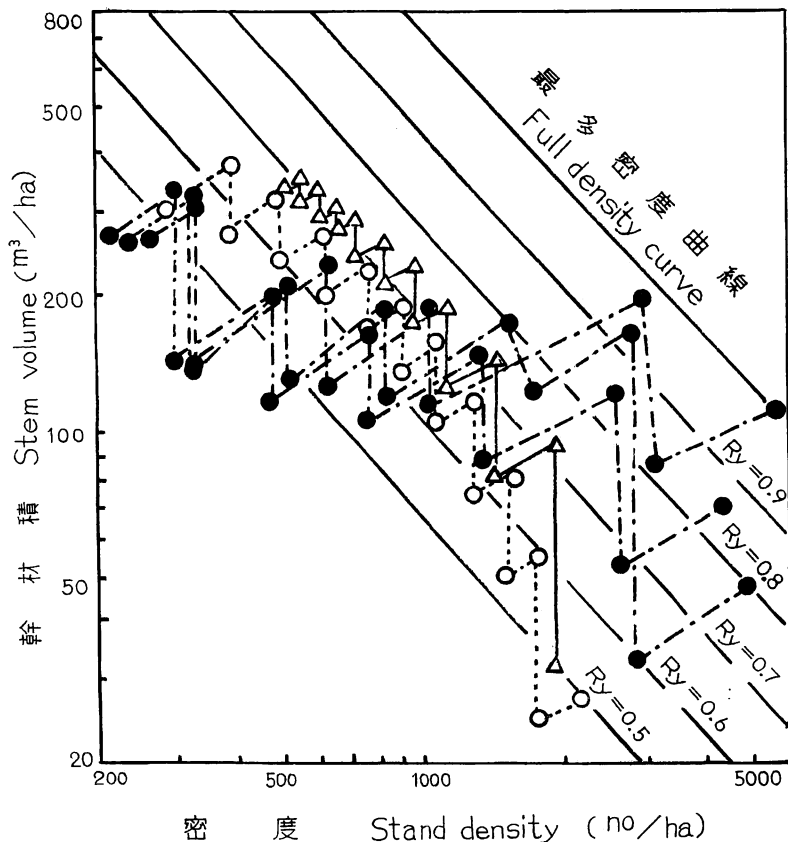


Fig. 89 カラマツの収量比数曲線と間伐経過

Yield index curves and thinning courses of *Larix leptolepis*.

- : Yield table in Shinshu district
- △—△ : Yield table in Iwate district
- : Thinning experiment plots¹⁵⁰⁾.

0.7～0.8の間を、疎植疎仕立長伐期の収肥は0.5～0.6の間を動いている。中庸植中庸仕立の国有林が0.7～0.8の間を動くことはスギだけでなくヒノキ (Fig. 87), アカマツ (Fig. 88) についてもいえる。また Fig. 86 の寺崎¹⁴⁷⁾の間伐試験結果で、B種間伐は0.6～0.8の間を、C種間伐は0.5～0.7の間を、D種間伐は0.8～0.9の間を動いている。Fig. 87 のヒノキについてみると、密植密仕立の尾鷲林業は、本多³⁸⁾が1904年に示した収穫表によるとスギの西川林業と同じような動きをしていると考えられるが、嶺・南⁷⁹⁾が1956年に調製した収穫表では0.8の前後を動いている。また寺崎¹⁷⁷⁾の間伐試験の結果はB種間伐で0.4～0.6、C種間伐で0.3～0.5くらいの範囲を動いている。Fig. 88 のアカマツの密植密仕立とされている芦北林業¹²⁸⁾では0.75～0.8くらいをとっており、また河田⁵⁴⁾⁵⁶⁾¹⁰⁶⁾の間伐経過は0.3～0.5くらいと著しく低密度に保たれている。また Fig. 89 のカラマツで、中庸植中庸仕立の国有林をみると、嶺⁷⁸⁾の調製した信州地方収穫表は、現実の信州地方カラマツ林は疎林が多いので多少密に収穫表を調製したと述べられているが、それでも0.6～0.7の範囲にあり、また岩手地方では0.7を前後している。寺崎¹⁵⁰⁾の間伐試験は幼齢時には0.9を越える密な状態であったが、老齢期には0.4まで間伐をおこなっている。

以上の結果から収量比数との関連において間伐形式を求めると、密仕立として0.8、中庸仕立として0.7、疎仕立として0.6、極疎仕立として0.5を残存密度基準としても無理はないと考える。そこでこれらの間伐形式別に、樹高2 m ほどの値を求めて間伐指針表—1として Table 63～66 に示す。

密仕立の基準を0.8にとったことは、単に密植密仕立として吉野地方に範をとったほかに、もう1つの意味がある。密度管理の平均収量比数が増すと総収穫量も増すが、0.8～0.85以上になると事実上一定になると述べたが、このような平均収量比数をうするためには、なるべく早く収量比数を0.8以上に保つことが必要である。また一般に、収穫量が同じ範囲ならば、平均収量比数の低い方が径級は大となる。したがって、収量比数0.8を残存密度基準とする間伐形式は最大の収穫量がえられると共に、同一最大収穫量のなかでは収穫木の直径が最大となるような間伐形式であるともいえる。

Table 63～66 に示した間伐指針表—1 は樹高が2 m 成長するごとに間伐するように示してあるが、このようにすると間伐前の収量比数は徐々に低くなる。したがって、間伐後の残存密度基準と同時に、間伐前の密度基準も収量比数によって決めて、常に一定の収量比数の間で間伐をおこなう方が、より生態学的に意味を持った間伐形式といえることができる。このような考え方から、密仕立の間伐前の収量比数を0.9、間伐後の収量比数を0.8とし、中庸仕立では同じく0.8と0.7、疎仕立では同じく0.7と0.6、極疎仕立では同じく0.6と0.5としたとき、間伐開始期の樹高を6 mとして求めたときの間伐指針表を間伐指針表—2として Table 67～70 に示す。

Table 63～70 は平均樹高6 m から記してあるが、幼齢林からこのとおりに管理するというのではなく、先に示した植栽密度決定の指針によって、植栽密度を決めるときにもちいた樹高に達しても目的とする間伐形式に達しないときには、間伐は自然間引線を参考に次期までに枯死する量を林分密度管理図上から予測して、その量を間伐する程度にとどめ、徐々に望む間伐形式に達せしめるようにすべきである。

3. 考 察

林分密度管理図を基礎に、今日までの密度管理の経験も考慮して、密度管理に必要な指針を示した。

かえりみると、戦後の木材需要構造の変化は、大材需要の大勢として一般用材の比率を減少させ、原料材の比率を増大させた。このような需要構造の変化から、戦前に一応の完成をみた一般用材の造成、保

Table 63. スギの間伐指針表(全国平均)—1
Thinning schedules of *Cryptomeria japonica* (Average of all districts)—1.

区 分 Kinds	平均樹高 Average height (m)	間 伐 後 After thinning				間 伐 木 Thinning tree			間 伐 前 Before thinning				
		平 均 Average		ha あたり Per ha		平 均 Average	ha あたり Per ha		平 均 Average			ha あたり Per ha	
		胸高直径 Diameter at breast height (cm)	幹 材 積 Stem volume (m³)	木 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)	幹 材 積 Stem volume (m³)	木 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)	胸高直径 Diameter at breast height (cm)	枝下高 Clear length (m)	幹 材 積 Stem volume (m³)	木 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)
密 立 仕 度 Dense schedule	6	8.8	0.023	5,080	118	—	—	—	—	—	—	—	—
	8	11.7	0.051	3,384	172	0.012	1,696	20	10.1	4.4	0.038	5,080	192
	10	14.5	0.093	2,464	230	0.024	920	22	13.0	5.5	0.074	3,384	252
	12	17.3	0.153	1,900	291	0.041	564	23	15.8	6.4	0.127	2,464	314
	14	20.1	0.233	1,528	355	0.064	372	24	18.7	7.4	0.200	1,900	379
	16	22.9	0.332	1,273	423	0.097	255	25	21.5	8.5	0.293	1,528	448
	18	25.8	0.460	1,072	494	0.130	201	26	24.3	9.4	0.408	1,273	520
	20	28.6	0.614	922	566	0.177	150	27	27.1	10.4	0.553	1,072	593
	22	31.4	0.795	806	640	0.231	116	27	30.0	11.4	0.724	922	667
	24	34.1	1.007	712	717	0.295	94	28	32.8	12.4	0.924	806	745
	26	37.0	1.252	636	796	0.372	76	28	35.6	13.4	1.159	712	824
	28	39.7	1.530	573	877	0.459	63	29	38.3	14.4	1.424	636	906
	30	42.5	1.845	520	959	0.551	53	29	41.1	15.3	1.725	573	988
中 庸 立 仕 度 Medium schedule	6	9.9	0.029	3,509	103	—	—	—	—	—	—	—	—
	8	13.2	0.064	2,338	150	0.020	1,171	24	11.6	4.0	0.050	3,509	174
	10	16.3	0.118	1,703	201	0.039	635	25	14.8	4.9	0.097	2,338	226
	12	19.5	0.194	1,315	255	0.067	388	26	18.0	5.7	0.165	1,703	281
	14	22.6	0.294	1,057	311	0.104	258	27	21.2	6.5	0.257	1,315	338
	16	25.7	0.422	879	371	0.152	178	27	24.3	7.4	0.377	1,057	398
	18	28.9	0.583	741	432	0.198	148	29	27.5	8.3	0.525	879	461
	20	32.0	0.777	637	495	0.286	104	30	30.6	9.0	0.708	741	525
	22	35.1	1.006	557	560	0.374	80	30	33.8	9.9	0.927	637	590

	24	38.3	1.276	492	628	0.460	65	30	36.9	10.7	1.182	557	658
	26	41.4	1.583	440	697	0.603	52	31	40.0	11.5	1.480	492	728
	28	44.5	1.937	396	767	0.739	44	33	43.1	12.4	1.818	440	800
	30	47.5	2.338	359	839	0.881	37	33	46.2	13.3	2.202	396	872
疎 仕 立 Sparse schedule	6	10.8	0.036	2,489	89	—	—	—	—	—	—	—	—
	8	14.5	0.078	1,655	129	0.030	834	25	12.9	3.8	0.062	2,489	154
	10	17.9	0.143	1,207	172	0.059	448	26	16.4	4.2	0.120	1,655	198
	12	21.3	0.234	932	218	0.100	275	28	19.9	4.9	0.204	1,207	246
	14	24.8	0.356	749	267	0.156	183	28	23.4	5.4	0.317	932	295
	16	28.2	0.511	622	318	0.226	127	29	26.9	6.1	0.463	749	347
	18	31.7	0.705	525	370	0.317	97	31	30.3	6.8	0.644	622	401
	20	35.1	0.939	452	424	0.427	73	31	33.8	7.4	0.868	525	455
	22	38.5	1.216	395	480	0.558	57	32	37.2	8.2	1.133	452	512
	24	41.9	1.542	349	538	0.709	46	33	40.6	8.9	1.445	395	571
	26	45.3	1.920	311	597	0.874	38	33	44.1	9.4	1.806	349	630
	28	48.7	2.340	281	658	1.110	30	33	47.4	10.1	2.222	311	691
	30	52.0	2.822	255	720	1.331	26	34	50.8	10.9	2.684	281	754
極 疎 仕 立 Extremely sparse schedule	6	11.7	0.042	1,766	74	—	—	—	—	—	—	—	—
	8	15.7	0.091	1,177	107	0.043	589	26	14.2	2.8	0.075	1,766	133
	10	19.3	0.167	857	143	0.083	320	27	18.0	3.3	0.145	1,177	170
	12	23.1	0.275	661	182	0.140	196	27	21.8	3.7	0.244	857	209
	14	26.8	0.418	532	222	0.218	129	28	25.5	4.2	0.379	661	250
	16	30.5	0.600	442	265	0.318	90	29	29.3	4.6	0.552	532	294
	18	34.2	0.827	373	308	0.442	69	31	33.0	5.2	0.767	442	339
	20	37.9	1.102	321	354	0.596	52	31	36.5	5.5	1.031	373	385
	22	41.6	1.430	280	400	0.766	41	31	40.4	6.1	1.345	321	431
	24	45.2	1.808	248	448	0.994	32	32	44.1	6.6	1.715	280	480
	26	48.9	2.252	221	498	1.185	27	32	47.7	6.9	2.099	248	530
	28	52.5	2.754	199	548	1.505	22	33	51.4	7.5	2.629	221	581
	30	56.1	3.313	181	600	1.856	18	33	55.1	8.0	3.181	199	633

Table 64. ヒノキの間伐指針表 (全国平均)—1
 Thinning schedules of *Chamaecyparis obtusa* (Average of all districts)—1.

区 分 Kinds	平均樹高 Averge height (m)	間 伐 後 After thinning				間 伐 木 Thinning tree			間 伐 前 Before thinning			
		平 均 Average		ha あたり Per ha		平 均 Average	ha あたり Per ha		平 均 Average		ha あたり Per ha	
		胸高直径 Diameter at breast height (cm)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)	胸高直径 Diameter at breast height (cm)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)
立 仕 密 Dense schedule	6	6.7	0.013	9,079	117	—	—	—	—	—	—	—
	8	9.6	0.016	4,998	166	0.007	4,081	28	7.6	0.021	9,079	194
	10	12.7	0.069	3,145	217	0.016	1,853	30	10.7	0.050	4,998	247
	12	15.9	0.126	2,161	272	0.031	984	31	13.9	0.096	3,145	303
	14	19.3	0.209	1,567	327	0.056	584	32	17.2	0.166	2,161	359
	16	22.7	0.324	1,189	385	0.087	378	33	20.7	0.267	1,567	418
	18	26.2	0.478	930	444	0.128	259	33	24.2	0.402	1,189	477
	20	29.8	0.676	747	505	0.196	183	36	27.8	0.581	930	541
	22	33.5	0.926	612	566	0.269	134	36	31.5	0.806	747	602
立 仕 中 Medium schedule	6	7.6	0.016	6,322	102	—	—	—	—	—	—	—
	8	10.8	0.042	3,482	145	0.012	2,840	33	8.8	0.028	6,322	178
	10	14.3	0.087	2,190	190	0.027	1,292	34	12.2	0.064	3,482	224
	12	17.8	0.158	1,505	238	0.051	685	35	15.8	0.125	2,190	273
	14	21.5	0.262	1,091	286	0.089	414	37	19.5	0.215	1,505	323
	16	25.3	0.407	828	337	0.140	263	37	23.3	0.342	1,091	374
	18	29.1	0.600	648	389	0.211	180	38	27.2	0.516	828	427

	20	33.1	0.849	520	442	0.299	128	38	31.1	0.741	648	480
	22	37.0	1.161	427	496	0.432	93	40	35.2	1.031	520	536
疎 仕 立 Sparse schedule	6	8.5	0.020	4,500	88	—	—	—	—	—	—	—
	8	12.1	0.050	2,479	124	0.018	2,021	35	10.0	0.036	4,500	159
	10	15.8	0.105	1,560	163	0.040	919	37	13.7	0.081	2,479	200
	12	19.6	0.190	1,070	204	0.077	490	38	17.7	0.155	1,560	242
	14	23.5	0.316	777	245	0.128	300	38	21.6	0.265	1,070	283
	16	27.6	0.490	589	289	0.208	188	39	25.7	0.422	777	328
	18	31.7	0.723	461	333	0.309	128	40	29.9	0.633	589	373
	20	35.9	1.021	371	379	0.450	90	41	34.1	0.909	461	420
	22	40.1	1.398	304	425	0.666	67	45	38.3	1.266	371	470
極 疎 仕 立 Extremely sparse schedule	6	9.4	0.023	3,206	73	—	—	—	—	—	—	—
	8	13.2	0.059	1,767	104	0.025	1,439	36	11.2	0.044	3,206	140
	10	17.2	0.122	1,111	136	0.057	656	37	15.2	0.098	1,767	173
	12	21.2	0.222	763	170	0.108	348	38	19.4	0.187	1,111	208
	14	25.4	0.370	553	205	0.183	210	39	23.7	0.319	763	244
	16	29.7	0.573	420	241	0.291	133	39	28.0	0.505	553	280
	18	34.0	0.844	329	278	0.445	91	40	32.4	0.758	420	318
	20	38.3	1.195	264	316	0.648	65	42	36.8	1.087	329	358
	22	42.7	1.639	216	354	1.042	48	50	41.2	1.492	264	394

Table 65. アカマツ間伐指針表 (全国平均)—1
 Thinning schedules of *Pinus densiflora* (Average of all districts)—1.

区 分 Kinds	平均樹高 Average height (m)	間 伐 後 After thinning				間 伐 木 Thinning tree			間 伐 前 Before thinning					
		平 均 Average		ha あたり Per ha		平 均 Average	ha あたり Per ha		平 均 Average			ha あたり Per ha		
		胸高直径 Diameter at breast height (cm)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)	胸高直径 Diameter at breast height (cm)	枝 下 高 Clear length (m)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)	
密 仕 立 Dense schedule	6	5.7	0.010	9,039	87	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	8	8.4	0.026	4,801	124	0.005	4,238	20	6.5	5.4	0.016	9,039	144	
	10	11.3	0.056	2,944	164	0.011	1,857	21	9.3	6.7	0.039	4,801	185	
	12	14.4	0.104	1,973	205	0.023	971	22	12.4	7.9	0.077	2,944	227	
	14	18.0	0.176	1,406	248	0.041	567	23	15.6	9.2	0.137	1,973	271	
	16	21.1	0.279	1,048	292	0.066	358	24	19.0	10.6	0.225	1,406	316	
	18	24.5	0.411	823	338	0.106	225	24	22.5	11.7	0.345	1,048	362	
	20	28.4	0.598	644	385	0.148	179	26	26.0	13.0	0.500	823	411	
	22	32.3	0.831	521	433	0.221	123	27	29.9	14.3	0.714	644	460	
24	36.3	1.118	431	482	0.266	90	24	33.9	15.6	0.971	521	506		
中 庸 仕 立 Medium schedule	6	6.5	0.013	6,096	76	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	8	9.6	0.034	3,242	109	0.008	2,854	24	7.6	5.2	0.022	6,096	133	
	10	12.9	0.072	1,984	143	0.020	1,258	25	10.9	6.4	0.052	3,242	168	
	12	16.4	0.135	1,331	179	0.040	653	26	14.3	7.6	0.104	1,984	205	
	14	20.1	0.229	949	217	0.070	382	27	18.0	8.8	0.183	1,331	244	
	16	24.0	0.362	707	256	0.114	242	28	21.8	10.1	0.299	949	284	
	18	28.0	0.533	555	296	0.182	152	28	25.9	11.2	0.457	707	324	
	20	32.3	0.776	434	337	0.253	121	31	29.9	12.4	0.662	555	368	
	22	36.6	1.076	352	379	0.374	82	31	34.3	13.6	0.943	434	410	
	24	41.1	1.449	291	422	0.485	61	30	38.7	14.9	1.282	352	452	

疎 仕 立 Sparse schedule	6	7.3	0.015	4,251	65	—	—	—	—	—	—	—	—
	8	10.7	0.041	2,258	93	0.013	1,993	26	8.7	5.0	0.028	4,251	119
	10	14.3	0.089	1,385	123	0.031	873	27	12.4	6.1	0.067	2,258	150
	12	18.2	0.166	929	154	0.062	456	28	16.2	7.2	0.131	1,385	182
	14	22.3	0.281	662	186	0.109	267	29	20.3	8.3	0.231	929	215
	16	26.6	0.445	493	219	0.176	169	30	24.5	9.4	0.376	662	249
	18	31.0	0.655	387	254	0.280	106	30	29.0	10.4	0.574	493	284
	20	35.7	0.953	303	289	0.377	84	32	33.4	11.6	0.828	387	321
	22	40.5	1.325	245	325	0.550	58	32	38.2	12.8	1.177	303	357
	24	45.3	1.780	203	361	0.805	42	34	43.1	13.9	1.613	245	395
極 疎 仕 立 Extremely sparse schedule	6	8.0	0.018	2,986	55	—	—	—	—	—	—	—	—
	8	11.7	0.049	1,587	78	0.020	1,399	27	9.8	4.7	0.035	2,986	105
	10	15.7	0.105	973	102	0.046	614	28	13.8	5.7	0.082	1,587	130
	12	19.9	0.196	653	128	0.091	320	29	18.0	6.7	0.162	973	157
	14	24.3	0.333	465	155	0.160	188	30	22.4	7.7	0.283	653	185
	16	29.0	0.527	347	183	0.259	118	31	27.0	8.8	0.459	465	214
	18	33.7	0.777	272	211	0.409	75	31	31.8	9.7	0.697	347	242
	20	38.7	1.130	213	241	0.559	59	33	36.6	10.8	1.006	272	274
	22	43.9	1.573	172	271	0.824	41	34	41.9	11.7	1.429	213	305
	24	49.2	2.121	142	301	0.987	30	30	47.2	12.7	1.923	172	331

Table 66. カラマツ間伐指針表 (全国平均)—1
 Thinning schedules of *Larix leptolepis* (Average of all districts)—1.

区 分 Kinds	平均樹高 Average height (m)	間 伐 後 After thinning				間 伐 木 Thinning tree			間 伐 前 Before thinning				
		平 均 Average		ha あたり Per ha		平 均 Average	ha あたり Per ha		平 均 Average			ha あたり Per ha	
		胸高直径 Diameter at breast height (cm)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)	胸高直径 Diameter at breast height (cm)	枝 下 高 Clear length (m)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)
密 仕 立 Dense schedule	6	8.1	0.020	3,470	70	—	—	—	—	—	—	—	—
	8	10.4	0.040	2,500	100	0.014	970	13	9.4	5.5	0.033	3,470	113
	10	12.5	0.069	1,940	133	0.024	560	14	11.6	6.7	0.059	2,500	147
	12	14.6	0.107	1,573	168	0.039	367	14	13.7	8.0	0.094	1,940	182
	14	16.6	0.157	1,302	204	0.056	271	15	15.7	9.4	0.139	1,573	219
	16	18.5	0.213	1,137	242	0.092	165	15	17.7	10.6	0.198	1,302	257
	18	20.3	0.284	991	281	0.109	146	16	19.5	11.9	0.261	1,137	297
	20	22.3	0.365	879	321	0.143	112	16	21.4	13.2	0.340	991	337
	22	24.1	0.459	790	363	0.183	89	16	23.2	14.5	0.431	879	379
	24	25.8	0.567	714	405	0.222	76	17	25.0	15.8	0.534	790	422
	26	27.6	0.686	654	448	0.283	60	17	26.8	17.2	0.652	714	465
中 庸 仕 立 Medium schedule	6	8.8	0.024	2,584	61	—	—	—	—	—	—	—	—
	8	11.2	0.047	1,863	88	0.019	721	14	10.3	5.2	0.039	2,584	102
	10	13.5	0.081	1,443	117	0.034	420	14	12.6	6.4	0.070	1,863	131
	12	15.8	0.125	1,171	147	0.055	272	15	14.9	7.7	0.112	1,443	162
	14	18.0	0.184	973	179	0.078	198	16	17.1	8.8	0.166	1,171	195
	16	20.1	0.250	846	212	0.122	127	16	19.4	10.1	0.234	973	228
	18	22.2	0.333	738	246	0.149	108	16	21.3	11.3	0.310	846	262
	20	24.3	0.429	655	281	0.200	83	17	23.5	12.6	0.403	738	298
	22	26.3	0.539	588	317	0.254	67	17	25.5	13.9	0.510	655	334
	24	28.3	0.666	532	354	0.314	56	18	27.5	15.1	0.632	588	372
	26	30.2	0.806	487	392	0.393	45	18	29.4	16.1	0.771	532	410

疎 疎 仕 立 Sparse schedule	6	9.3	0.027	1,928	52	—	—	—	—	—	—	—	—
	8	11.9	0.054	1,388	75	0.026	540	14	11.1	5.0	0.046	1,928	89
	10	14.5	0.093	1,077	100	0.046	311	14	13.7	6.0	0.082	1,388	114
	12	17.0	0.144	873	126	0.074	204	15	16.1	7.2	0.131	1,077	141
	14	19.4	0.210	728	153	0.110	145	16	18.6	8.4	0.194	873	169
	16	21.7	0.288	631	182	0.165	97	16	20.9	9.4	0.271	728	198
	18	23.9	0.383	550	211	0.201	81	16	23.1	10.6	0.360	631	227
	20	26.2	0.493	488	241	0.265	62	16	25.5	11.8	0.468	550	257
	22	28.4	0.619	439	272	0.345	49	17	27.7	13.0	0.592	488	289
	24	30.6	0.764	397	304	0.402	42	17	29.8	13.9	0.730	439	321
	26	32.8	0.926	363	336	0.535	34	18	32.0	15.1	0.893	397	354
極 疎 仕 立 Extremely sparse schedule	6	9.8	0.031	1,423	44	—	—	—	—	—	—	—	—
	8	12.6	0.061	1,025	63	0.034	393	13	11.9	4.6	0.054	1,423	76
	10	15.4	0.105	794	83	0.060	231	14	14.6	5.6	0.095	1,025	97
	12	18.0	0.163	645	105	0.095	149	14	17.3	6.7	0.150	794	119
	14	20.6	0.237	538	128	0.140	107	15	19.9	7.7	0.221	645	143
	16	22.7	0.325	465	151	0.207	73	15	22.5	8.8	0.309	538	166
	18	25.6	0.433	406	176	0.268	59	16	24.9	9.9	0.411	465	192
	20	28.1	0.558	360	201	0.343	46	16	27.4	10.8	0.534	406	217
	22	30.5	0.702	323	227	0.430	37	16	29.8	11.9	0.674	360	243
	24	32.9	0.863	293	253	0.543	30	16	32.2	13.0	0.833	323	269
	26	35.2	1.046	268	280	0.652	25	16	34.5	14.0	1.012	293	296

Table 67. スギの間伐指針表(全国平均)—2
Thinning schedules of *Cryptomeria japonica* (Average of all districts)—2.

区 分 Kinds	樹 高 Height (m)	間 伐 後 After thinning				間 伐 木 Thinning tree				間 伐 前 Before thinning			
		平 均 Average		ha あたり Par ha		平 均 Average		ha あたり Per ha		平 均 Average		ha あたり Per ha	
		胸高直径 Diameter at breast height (cm)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)	胸高直径 Diameter at breast height (cm)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)	
密 立 Dense schedule	6.0	8.8	0.023	5,080	118	—	—	—	—	—	—	—	
	8.1	11.8	0.053	3,315	175	0.012	1,765	22	10.2	0.039	5,080	197	
	11.0	15.9	0.119	2,165	259	0.028	1,150	32	13.6	0.088	3,315	291	
	14.8	21.3	0.271	1,413	382	0.064	752	48	18.3	0.198	2,165	430	
	20.0	28.6	0.614	922	566	0.145	491	71	24.6	0.450	1,413	637	
	27.0	38.4	1.391	602	837	0.328	320	105	33.0	1.021	922	942	
中 庸 立 Medium schedule	6.0	9.9	0.029	3,509	103	—	—	—	—	—	—	—	
	7.8	12.7	0.059	2,425	143	0.018	1,084	20	11.4	0.047	3,509	163	
	10.1	16.5	0.122	1,676	204	0.039	749	29	14.6	0.096	2,425	233	
	13.1	21.2	0.247	1,158	286	0.079	518	41	18.9	0.195	1,676	327	
	17.0	27.4	0.502	801	402	0.160	357	57	24.3	0.396	1,158	459	
	22.1	35.2	1.019	553	564	0.323	248	80	31.4	0.805	801	644	
	28.7	45.5	2.067	383	792	0.659	170	112	40.6	1.635	553	904	
疎 立 Sparse schedule	6.0	10.8	0.036	2,489	89	—	—	—	—	—	—	—	
	7.7	13.8	0.069	1,764	121	0.029	725	21	12.6	0.057	2,489	142	
	9.8	17.4	0.133	1,250	167	0.051	514	26	15.9	0.110	1,764	193	
	12.4	22.1	0.258	886	229	0.104	364	38	20.1	0.213	1,250	267	
	15.9	28.0	0.499	628	314	0.202	258	52	25.5	0.413	886	366	
	20.2	35.5	0.971	444	431	0.391	184	72	32.4	0.801	628	503	
	25.8	45.0	1.884	314	592	0.969	130	126	41.1	1.555	444	691	
極 疎 立 Extremely sparse schedule	6.0	11.7	0.042	1,766	74	—	—	—	—	—	—	—	
	7.6	14.9	0.081	1,254	101	0.039	512	20	13.8	0.069	1,766	121	
	9.8	18.8	0.158	890	140	0.077	364	28	17.4	0.134	1,254	168	
	12.4	23.8	0.300	632	190	0.147	258	38	22.0	0.256	890	228	
	15.8	30.1	0.574	449	258	0.284	183	52	27.8	0.490	632	310	
	20.1	38.0	1.117	319	356	0.546	130	71	35.3	0.952	449	427	
	25.6	48.2	2.158	226	488	1.054	93	98	44.6	1.837	319	586	

Table 68. ヒノキの間伐指針表 (全国平均)—2
Thinning schedules of *Chamaecyparis obtusa* (Average of all districts)—2.

区 分 Kinds	樹 高 Height (m)	間 伐 後 After thinning				間 伐 木 Thinning tree				間 伐 前 Before thinning			
		平 均 Average		ha あたり Par ha		平 均 Average		ha あたり Per ha		平 均 Average		ha あたり Per ha	
		胸高直径 Diameter at breast height (cm)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)	胸高直径 Diameter at breast height (cm)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)	
密 立 Dense schedule	6.0	6.7	0.013	9,079	117	—	—	—	—	—	—	—	
	7.4	8.6	0.025	6,005	150	0.006	3,074	19	7.3	0.019	9,079	169	
	8.9	11.0	0.048	3,972	189	0.012	2,033	24	9.4	0.036	6,005	213	
	10.9	14.1	0.092	2,629	241	0.022	1,343	30	12.1	0.068	3,972	271	
	13.3	18.1	0.177	1,739	307	0.044	890	39	15.6	0.132	2,629	346	
	16.3	23.2	0.341	1,150	392	0.084	589	49	20.1	0.254	1,739	441	
	19.8	29.5	0.656	761	499	0.162	389	63	25.8	0.488	1,150	562	
中 立 Medium schedule	6.0	7.6	0.016	6,322	102	—	—	—	—	—	—	—	
	7.1	9.4	0.028	4,409	125	0.009	1,913	18	8.3	0.023	6,322	143	
	8.5	11.7	0.051	3,073	156	0.016	1,336	22	10.3	0.040	4,409	178	
	10.1	14.5	0.090	2,142	193	0.029	931	27	12.8	0.072	3,073	220	
	12.0	17.9	0.159	1,493	238	0.052	649	34	16.0	0.127	2,142	272	
	14.3	22.1	0.283	1,041	294	0.093	452	42	19.8	0.225	1,493	336	
	17.0	27.3	0.501	726	364	0.162	315	51	24.5	0.399	1,041	415	
	20.3	33.6	0.888	506	449	0.291	220	64	30.3	0.707	726	513	
疎 立 Sparse schedule	6.0	8.5	0.020	4,500	88	—	—	—	—	—	—	—	
	7.1	10.6	0.033	3,205	107	0.014	1,295	18	9.4	0.028	4,500	125	
	8.3	12.6	0.057	2,283	130	0.024	922	22	11.4	0.047	3,205	152	
	9.8	15.4	0.098	1,626	159	0.041	657	27	13.9	0.081	2,283	186	
	11.6	18.7	0.168	1,158	194	0.068	468	32	17.0	0.139	1,626	226	
	13.6	22.8	0.287	825	237	0.117	333	39	20.8	0.239	1,158	276	
	16.0	27.6	0.492	587	289	0.202	238	48	25.4	0.409	825	337	
	18.9	33.5	0.843	418	352	0.349	169	59	30.8	0.700	587	411	
極 疎 立 Extremely sparse schedule	6.0	9.4	0.023	3,206	73	—	—	—	—	—	—	—	
	7.1	11.4	0.039	2,287	89	0.020	919	18	10.4	0.033	3,206	107	
	8.3	13.8	0.067	1,631	108	0.034	656	22	12.7	0.057	2,287	130	
	9.8	16.7	0.114	1,163	132	0.058	468	27	15.4	0.097	1,631	159	
	11.5	20.3	0.195	828	161	0.096	335	32	18.7	0.166	1,163	193	
	13.6	24.5	0.333	591	197	0.165	237	39	22.7	0.285	828	236	
	16.0	29.6	0.569	421	240	0.282	170	48	27.6	0.487	591	288	
	18.8	35.7	0.973	300	292	0.479	121	58	33.3	0.833	421	350	

Table 69. アカマツの間伐指針表 (全国平均)—2
Thinning schedules of *Pinus densiflora* (Average of all districts)—2.

区 分 Kinds	樹 高 Height (m)	間 伐 後 After thinning				間 伐 木 Thinning tree			間 伐 前 Before thinning			
		平 均 Average		ha あたり Par ha		平 均 Average	ha あたり Per ha		平 均 Average		ha あたり Per ha	
		胸高直径 Diameter at breast height (cm)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)	胸高直径 Diameter at breast height (cm)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)
立 密 Dense schedule	6.0	5.7	0.010	9,039	87	—	—	—	—	—	—	—
	7.4	7.6	0.020	5,647	114	0.004	3,392	14	6.3	0.014	9,039	128
	9.2	10.1	0.042	3,528	148	0.008	2,119	18	8.4	0.029	5,647	166
	11.4	13.4	0.087	2,205	193	0.018	1,323	24	11.3	0.061	3,528	217
	14.1	17.9	0.182	1,378	251	0.037	827	31	15.0	0.128	2,205	282
	17.5	23.8	0.379	861	327	0.079	517	41	20.0	0.267	1,378	368
	21.7	31.7	0.791	538	426	0.164	323	53	26.4	0.556	861	479
立 中 Medium schedule	6.0	6.5	0.013	6,096	76	—	—	—	—	—	—	—
	7.2	8.3	0.023	4,113	95	0.007	1,983	14	7.3	0.018	6,096	109
	8.6	10.5	0.043	2,776	119	0.013	1,337	17	9.2	0.033	4,113	136
	10.3	13.4	0.079	1,873	148	0.023	903	21	11.7	0.061	2,776	169
	12.3	16.9	0.146	1,264	185	0.043	609	26	14.8	0.126	1,873	211
	14.7	21.5	0.270	854	231	0.078	410	32	18.8	0.208	1,264	263
	17.6	27.2	0.499	576	287	0.0147	278	41	23.9	0.385	854	328
	21.0	34.5	0.922	389	359	0.0273	187	51	30.4	0.711	576	410
立 疎 Sparse schedule	6.0	7.3	0.015	4,251	65	—	—	—	—	—	—	—
	7.1	9.1	0.027	2,966	80	0.010	1,285	13	8.1	0.022	4,251	93
	8.3	11.3	0.047	2,068	98	0.018	898	16	10.1	0.039	2,966	114
	9.8	14.0	0.083	1,443	120	0.032	625	20	12.6	0.068	2,068	140
	11.6	17.4	0.146	1,007	147	0.055	436	24	15.6	0.119	1,443	171
	13.6	21.5	0.256	703	180	0.099	304	30	19.4	0.208	1,007	210
	16.1	26.8	0.449	490	220	0.174	213	37	24.1	0.365	703	257
立 極疎 Extremely sparse schedule	18.9	33.2	0.788	342	269	0.304	148	45	30.0	0.641	490	314
	22.3	41.1	1.381	239	330	0.534	103	55	37.2	1.125	342	385
	6.0	8.0	0.018	2,986	55	—	—	—	—	—	—	—
	7.1	10.1	0.032	2,098	66	0.016	888	14	9.1	0.027	2,986	80
	8.3	12.2	0.055	1,474	81	0.026	624	16	11.2	0.046	2,098	97
	9.7	15.1	0.095	1,036	99	0.046	438	20	13.8	0.080	1,474	119
	11.4	18.7	0.165	728	120	0.081	308	25	17.1	0.139	1,036	145
立 極疎 Extremely sparse schedule	13.4	23.0	0.287	512	147	0.134	216	29	21.1	0.242	728	176
	15.8	28.4	0.498	359	179	0.235	153	36	26.1	0.420	512	215
	18.5	35.0	0.864	253	219	0.406	106	43	32.2	0.729	359	262
	21.7	43.1	1.498	178	267	0.707	75	53	39.7	1.263	253	320

Table 70. カラマツの間伐指針表 (全国平均)—2
Thinning schedules of *Larix leptolepis* (Average of all districts)—2.

区 分 Kinds	樹 高 Height (m)	間 伐 後 After thinning				間 伐 木 Thinning tree			間 伐 前 Before thinning			
		平 均 Average		ha あたり Par ha		平 均 Average	ha あたり Per ha		平 均 Average		ha あたり Per ha	
		胸高直径 Diameter at breast height (cm)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)	胸高直径 Diameter at breast height (cm)	幹 材 積 Stem volume (m³)	本 数 Number of trees (No.)	幹 材 積 Stem volume (m³)
立 密 Dense schedule	6.0	8.1	0.020	3,470	70	—	—	—	—	—	—	—
	7.9	10.2	0.039	2,544	99	0.013	926	12	9.3	0.032	3,470	111
	10.3	12.9	0.075	1,864	140	0.025	680	17	11.7	0.062	2,544	157
	13.6	16.1	0.144	1,368	197	0.048	496	24	14.6	0.119	1,864	221
	17.8	20.2	0.277	1,003	278	0.095	365	35	18.3	0.229	1,368	313
	23.5	25.4	0.534	735	393	0.183	268	49	22.8	0.441	1,003	442
中 庸 Medium schedule	6.0	8.8	0.024	2,584	61	—	—	—	—	—	—	—
	7.8	10.9	0.044	1,925	85	0.018	659	12	10.1	0.037	2,584	97
	10.1	13.6	0.082	1,434	118	0.033	491	16	12.6	0.070	1,925	134
	13.0	17.0	0.153	1,068	163	0.066	366	24	15.6	0.130	1,434	187
	16.9	21.0	0.285	795	227	0.117	273	32	19.3	0.243	1,068	259
	21.9	26.1	0.531	592	315	0.222	203	45	23.9	0.452	795	360
立 疎 Sparse schedule	6.0	9.3	0.027	1,928	52	—	—	—	—	—	—	—
	7.8	11.7	0.050	1,439	72	0.025	489	12	10.9	0.044	1,928	84
	10.0	14.5	0.094	1,074	101	0.044	365	16	13.6	0.082	1,439	117
	13.0	18.1	0.173	801	139	0.084	273	23	16.9	0.151	1,074	162
	16.8	22.6	0.322	598	193	0.158	203	32	20.9	0.281	801	225
	21.7	28.1	0.598	446	267	0.289	152	44	26.0	0.520	598	311
極 疎 Extremely sparse schedule	6.0	9.8	0.031	1,423	44	—	—	—	—	—	—	—
	7.8	12.4	0.058	1,050	61	0.032	373	12	11.7	0.052	1,423	73
	10.2	15.6	0.111	775	86	0.062	275	17	14.8	0.098	1,050	103
	13.4	19.8	0.207	571	118	0.118	204	24	18.6	0.184	775	142
	17.4	24.9	0.401	421	169	0.220	150	33	23.4	0.355	571	202
	22.8	31.4	0.762	311	237	0.427	110	47	29.3	0.675	421	284

育技術に対し、原料材林の造成・保育技術の確立を要求する声が高くなった。また、一般用材林においても、戦前は末口 15cm 未満の丸太の需要に乏しく、15cm 未満の間伐材は捨て伐りされることが多かった。しかしながら、この数年やや衰えたとはいうものの、戦後の一時期小径材に対する要求が高まり、小径材の量産技術についての要求も多くだされた。また近年は、労働の不足から省力による森林の造成・保育技術に対する要求が著しく強くなっている。

このように社会情勢によって森林に対して要求される育林技術もちがってくるので、生産に長期間を要する森林の経営を目標とする生産材に対して決められた密度管理を、予定されたとおりに実行することが困難なばあいも起こりうると考える。このようなばあいに対しても、林分密度管理図や密度管理の指針は十分に役だつものであると考える。

しかしながら、ここで述べた間伐指針表にも、まだ残された問題がないわけではない。その一つは選木法をどのようにするかということである。これらの間伐指針表にしたがって間伐を実行するとき、小個体から順に間伐をすることが原則であるが、普通に実行されているような下層間伐であってもさしつかえない、と述べたが、本報においては事業実行上の具体的な選木方法をどのようにするかについてはふれていない。したがって、今後に残された問題として、選木の問題を解決することが必要であろう。

4. 摘 要

1. 事業実行上の指針として林分密度管理図を基礎に、植栽密度決定のための指針表と間伐指針表を示した。

2. 植栽密度決定のための指針表は、第 1 回間伐時の間伐材の大きさを基準に決めるものである。

3. 間伐指針表は密仕立、中庸仕立、疎仕立、極疎仕立の 4 間伐形式別に、それぞれ 0.8、0.7、0.6、0.5 の収量比数曲線を残存基準とし樹高が 2 m 成長するごとに間伐するように示した指針表と樹高が 6 m になったときに間伐をはじめ、それぞれ 0.9、0.8、0.7、0.6 の収量比数に達したときに間伐を繰り返すように示した指針表を掲げた。密仕立の間伐指針は最大の幹材積収稈量がえられると共に、同一最大収稈量のえられる間伐管理の中では胸高直径が最大となるような間伐形式でもある。

総 括

本研究は同齢単純林の密度管理に関し、植物生態学における同種個体群の種内競争に関する研究から明らかにされたことを基礎として、次の項目を解析し明らかにした。

I. 密度と成長に関する一般的な関係

II. I の結果によって林分密度管理図を作製し、モデル的に組み立てた密度管理に応じた幹材積収稈量の検討

III. 収量比数と林分構造要因ならびに生産材の形質の関係

IV. 密度管理の指針

以上の事項について研究の要点を総括的に記述すれば、次のとおりである。

I においては、まず内外における多くの植栽密度試験や間伐試験の結果について、密度と林木の成長の一般的な傾向について検討が加えられた。密度と樹高の関係は育林的な立場に立てば、密度の違いによる樹高成長の変異は無視してもさしつかえないことが明らかにされた。このことは樹高を生育段階を示す生物的な時間の尺度としてもちいることのできることを示し、本報の展開に大きな意味をもつ。さらに密度

と幹材積の成長予測について回帰分析にもとづく多くの研究のあることを示したが、これらの研究で示された関係式は報告によってすべて違うので、密度と幹材積成長の関係を統一的に記述することができない。これに対し「高等植物の同種同体群の種内競争」という植物生態学上の基礎的な研究から導かれた吉良らの密度効果の逆数式は、密度と平均個体または単位面積あたりの現存量の関係を統一的に記述説明でき、また林業における主たる収穫対象部分である幹材や、また胸高断面積にもよくあてはまる。すなわち、例を幹材積について示すと

$$1/v = A_1\rho + B_1 \quad \dots\dots\dots(22)$$

$$1/V = A_1 + \rho/B_1 \quad \dots\dots\dots(23)$$

ただし、 v ：平均幹材積

V ：単位面積あたり幹材積

ρ ：密度（単位面積あたり立木本数）

A_1, B_1 ：生育段階により決まる常数

(22) (23) 式の常数 A, B は本来ロジスティック曲線から導かれた複雑な内容をもつが、近似的には樹高を H とすると次式で示される。

$$A_1 = a_1 H^{-b_1} \quad \dots\dots\dots(37)$$

$$B_1 = a_1' H^{-b_1'} \quad \dots\dots\dots(38)$$

ただし、 a_1, b_1, a_1', b_1' ：常数

(37) (38) 式の関係がなりたつことは密度別に樹高と幹材積の間に相対成長関係がなり立つことや、その他 2, 3 の仮定から生物学的な意味づけが可能である。(22) (23) 式の関係は密度試験はもちろん、同じ樹高階にある密度と幹材積または断面積の関係を地位、林齢に無関係に近似し、このときに示される曲線は等平均樹高線と呼ばれ、このばあいにも (37) (38) 式の関係がよく成り立つ。

密度と幹材積の関係を知らなくても 1 つの重要な関係を示す 最多密度曲線 は (22) (23) 式と独立に求められてきていた。筆者は競争比数 Rc を $Rc = v/v^*$ （ある林分の平均幹材積を v 、 v と同一密度効果線または等平均樹高線上の $\rho \rightarrow 0$ のときの平均幹材積を v^* とする）で定義することにより、(22) (23) (37) (38) 式の関係から等競争比数曲線式として

$$\left. \begin{aligned} v_{Rc} &= K_2 \rho_{Rc}^{K_1} \\ K_1 &= \frac{b_1'}{b_1 - b_1'} \\ K_2 &= \frac{Rc}{a_1'} \left(\frac{Rc}{1 - Rc} \cdot \frac{a_1}{a_1'} \right)^{\frac{b_1'}{b_1 - b_1'}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(61)$$

を導き、現実にとりうる最小の競争比数を R_f とし、(61) 式を

$$\left. \begin{aligned} v_{R_f} &= K_2' \rho_{R_f}^{K'} \\ K_1 &= \frac{b_1'}{b_1 - b_1'} \\ K_2' &= \frac{R_f}{a_1} \left(\frac{R_f}{1 - R_f} \cdot \frac{a_1}{a_1'} \right)^{\frac{b_1'}{b_1 - b_1'}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(62)$$

と書きかえ、この式によって密度効果線または等平均樹高線との関連において、最多密度曲線を示した。

密度効果線または等平均樹高線上の最多密度曲線は、その生育段階の実現値として最大の単位面積あた

り幹材積を示すが、この幹材積に対し同一生育段階の、ある一定の割合を収量比数 (R_y) と名づけた。いろいろな生育段階で同一収量比数の密度と幹材積の点を結ぶと両対数軸上で最多密度曲線に平行な直線として示され、この曲線を収量比数曲線と呼んで次式を導いた。

$$\left. \begin{aligned} V_{R_y} &= K_3 \rho_{R_y} K_1' \\ K_1' &= \frac{b_1}{b_1 - b_1'} \\ K_3 &= \frac{(1 - R_f) R_y}{a_1} \left\{ \frac{a_1}{a_1'} \cdot \frac{1 - (1 - R_f) R_y}{(1 - R_f) R_y} \right\}^{\frac{b_1}{b_1 - b_1'}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (66)$$

収量比数は単位面積あたりの幹材積と直接結びつくので、相対的な密度の尺度としてすぐれている。

本邦の主要樹種であるスギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツの収穫表調製資料およびこれと質的に等しいと考えられる資料について、これらの関係を求めた。

Ⅱにおいては、Ⅰで求めた関係から単位面積あたり幹材積および胸高直径（平均断面直径と密度との関係）を樹高階別に成長予測図としてまとめ、これを林分密度管理図と名づけた。林分密度管理図はスギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツについてそれぞれ秋田、木曽、磐城、信州の地域林分密度管理図と各樹種について全国平均を示す一般林分密度図を作製した。スギの (37) (38) 式の関係に地域間に差があるか否かを統計的に検討したところ、若干の地域間で有意な差が認められた。したがって、ある特定地域の成長予測には地域林分密度管理図によるのがよいと考えられるが、また樹種の特性を比較するには一般林分密度管理図がつごうよいと思われる。

林分密度管理図にもとづき、植栽密度、間伐開始期、間伐繰り返し期間、密度管理基準線としての収量比数、間伐率などをかえて、その組合せによりモデル的に密度管理を組み立て、その収穫量を予測し、密度管理と収穫量の関係を明らかにした。この検討には密度管理によって決まる平均収量比数によっておこない、その結果はおおむね次のとおりであった。

- a. 主伐材積は主伐時の密度が高いほど多いが、平均単木材積や平均胸高直径は小さくなる。
- b. 平均収量比数が大なるほど、すなわち最多密度曲線に近づけて密度管理されるほど総収量材積は大となる傾向にあるが、平均収量比数が 0.8~0.85 以上になると、総収量は一定化する傾向がある。
- c. 一般にそれぞれ他の条件が一定ならば、密度管理基準を最多密度曲線に近づけるほど、間伐開始期がおそいほど、間伐の繰り返し期間が短いほど総収量は大きくなるが、植栽密度が高いときには間伐開始期をあまりおそくすると総収量は減少する。
- d. 一般に他の条件が一定ならば植栽密度が高いほど総収量は多くなるが、植栽密度の増加の割合には総収量の増加の割合は小さい。
- e. 植栽密度を高くして増収をはかるときには伐期が短いほどその効果は大きい。
- f. 間伐量は一般に植栽密度が高いほど、間伐後の収量比数が低くなるほど、間伐開始期がおそくなるほど、間伐の繰り返し期間が短いほど多くなる。
- g. 植栽密度がかわっても、その後の密度管理で高密度に維持されるならば平均成長量最多の時期はほとんどかわらない。植栽密度が高く、その後の密度管理で低密度に管理されると、低密度管理されるほど平均成長量最多の時期は早くなる。植栽密度の低いときには低密度に間伐管理されても、高密度に管理されても平均成長量最多の時期はかわらない。

このように、林分密度管理図はいろいろな密度管理についてその収穫量を予測し、相互にその得失を比較できることが特色である。

Ⅲにおいては、次のことが明らかにされた。収量比数は密度管理と収穫量の関係を示す上で大きな役割を果たしたが、また現実林の林齢構造要因や生産材との間にも密接な関係が認められる。すなわち、収量比数と単位面積あたり葉量との関係は、収量比数の増加と共に葉量も増加するが、収量比数が0.8~0.85以上になると葉量は一定化してくる。収量比数と部分重の関係においても、幹の割合は生育段階が同じならば収量比数と共に増加するが、収量比数が高くなると一定化してくる。すでに述べた平均収量比数0.8~0.85以上の密度管理では、総収穫量が一定化するということは、これらのことから説明がつけられる。収量比数はまた枝下率、胸高形数、年輪密度などとも密接な関係が認められた。

Ⅳにおいては林業経営上の指針として役だつよう植栽密度決定のための指針と間伐指針表を示した。植栽密度は第1回間伐時の間伐材の大きさから決めようとするもので、間伐指針表は密仕立、中庸仕立、疎仕立、極疎仕立の4段階とし、 R_y が0.8, 0.7, 0.6, 0.5の収量比数曲線をそれぞれの残存密度基準とした。密仕立の指針は最多の幹材積収穫量がえられ、同一最多収穫量のえられる密度管理のなかで平均幹材積や胸高直径が最大となるような指針でもある。

以上によって本研究は、同齡單純林の造成ならびに保育に生態学を基礎とした理論根拠が与えられ、応用的には密度管理の指針が示され、造林学ならびに造林事業の発展に寄与したものと考える。

本研究の途上においてすでに公表し、あるいは引用された筆者の林分密度管理図、植栽密度決定の指針表、間伐指針表は本報のとおり訂正したい。

文 献

- 1) ADAMS, W. R. : Effect of spacing in a jack pine plantation. *Vt. Agr. Exp. Sta. Bull.*, 282, (1928)
- 2) ALEXANDER, R. R. : Thinning lodgepole pine in the Central Rocky Mountains. *J. For.*, 58, pp. 99~104, (1960)
- 3) ANDERSON, S. O. : Produktionstabeller för norrländska tallplanteringar (English summary : Yield tables for plantations of scots pine in Northern Sweden), *Medd. Skogs-forskn. Inst.*, Stockh. 51, pp. 1~337, (1963)
- 4) 安藤 貴 : 植栽本数の多少とその効果—植栽本数の決め方—, *山林*, 938, pp. 1~8, (1962)
- 5) ———・坂口勝美・成田忠範・佐藤昭敏 : アカマツ天然生除伐試験林の解析 第1報, 生育経過と相対成長, *林試研報*, 144, pp. 1~30, (1962)
- 6) ——— : 同上 第2報, 本数密度を中心とした解析, 同上, 147, pp. 45~77, (1962)
- 7) ———・成田忠範・佐藤昭敏 : 野辺山カラマツ林の地上部の構造に関する調査, カラマツ造林地の実態調査報告, ハツ岳山麓野辺山国有林の調査, 中間報告, *林試*, pp. 36~52, (1962)
- 8) ANDO, T. : Estimation of dry-matter and growth analysis of the young stand of Japanese black pine (*Pinus Thunbergii*). *Advancing Frontiers of Plant Science*, 10, pp. 1~10, (1965)
- 9) 安藤 貴・蜂屋欣二・土井恭次・片岡寛純・加藤善忠・坂口勝美 : スギの保育形式に関する研究, *林試研報*, 209, pp. 1~76 (1967)
- 10) 浅田節夫 : 林木保育, 造林学, 朝倉書店, pp. 159~190, (1965)
- 11) 麻生 誠 : 疎植と密植とのひのき林に就て生長の比較調査, *林試集報*, 20, pp. 41~96, (1926)
- 12) ASSMANN, E. : *Waldetragskunde. Organische Produktion, Strukture, Zuwachs und Ertrag*

- von Waldbeständen. BLV., pp. 490, (1961)
- 13) BALDWIN, H. I. : Growth of red pine at different spacings. Second report, Fox. For. Note, 70, (1959)
- 14) BENNETT, F. A. : Spacing and early growth of planted slash pine. J. For., 58. pp. 966~967, (1960)
- 15) BORNEBUSH, C. M. : Et udhugningsforsøg i Rødgran (Referat : Ein Durchforstungsversuch in Fichte). Beret. f. Det forstlige Forsøgsvaesen i Danmark, XIII, pp. 117~214, (1933)
- 16) BRAATHE, P. : Planteavstandens virkning pa bestansutvikling og masseproduksjon i granskog (Summary : The effect of different spacing upon stand development and yield in forests of Norway spruce). Medd. f. Det. norske Skogforsöksovensen, XI, pp. 429~469, (1952)
- 17) ——— : Thinning in even-aged stands. A summary of european literature. Faculty of For. Univ. of New Brunswick, pp. 92, (1957)
- 18) BRAMBLE, W. C., H. N. COPE and H. H. CHISMAN : Influence of spacing on growth of red pine in plantations. J. For., 47, pp. 726~732, (1960)
- 19) BYRNES, W. R. and W. C. BRAMBLE : Growth and yield of plantation grown red pine at various spacings. J. For., 53, pp. 562~565, (1955)
- 20) 千広俊幸 : 樹冠伸長量を基礎とするトドマツ, カラマツの植栽本数, 林, 5/1961, pp. 1~12, (1961)
- 21) CLUTTER, J. L. : Compatible growth and yield models for loblolly pine. For. Sci., 9, pp. 354~371, (1963)
- 22) COOPER, C. F. : Equations for the description of past growth in even-aged stands of ponderosa pine. Ibid., 7, pp. 72~80, (1961)
- 23) EIDE, E. and A. LANGSAETER : Produksjonsundersøkeiser i granskog (Referat : Produktion-untersuchungen von Fichtenwald). Medd. f. Det norske Skogforsökswesen, VII, pp. 356~500, (1941)
- 24) EVERSOLE, K. R. : Spacing tests in a douglas-fir plantation. For. Sci., 1, pp. 14~18, (1955)
- 25) 藤島信太郎 : 更新論的造林学, pp. 546, (1943)
- 26) 後藤 亮 : アカマツ林林分収穫表調製の研究 II, 広島県林試報, pp. 164~166, (1960)
- 27) ——— : 同上, III生産目標に応じた施業線の決定, 同上, pp. 113~117, (1961)
- 28) 蜂屋欣二・安藤 貴 : 林分の平均樹高と競争密度効果との関係について, 73回日林講集, pp. 164~168, (1962)
- 29) ———・——— : スギ人工林の密度と生長(三俣植栽密度比較試験地の解析), 75回日林講集, pp. 340~342, (1964)
- 30) ———・——— : 植栽本数と間伐, 保育形式の決め方, 日林協, pp. 52, (1964)
- 31) ———・———・成田忠範・榊秋一延 : 和田国有林ならびに野辺山国有林のカラマツ林の構造と生長, カラマツ造林地の実態調査報告(4), pp. 45~57, (1964)
- 32) ———・土井恭次・小林令爾 : アカマツ林の林分成長の解析, 林試研報, 176, pp. 75~88, (1965)
- 33) ———・安藤 貴 : スギ林の密度と生長, (未発表)
- 34) ———・——— : 苗畑における密度試験, (未発表)
- 35) 早尾丑磨(編) : 日本主要樹種林分収穫表, 林業経済研究所, pp. 494, (1961)
- 36) HENRIKSEN, H. A. : Et Udhugningsforsøgi ung Bøg (Referat : Durchforstungsversuch in jungen Buchen-Bestand). Beret. f. forstlige Forsøgsvaesen i Danmrk, XX, pp. 387~401, (1951)
- 37) ——— : A thinning experiment with sitka spruce in Nystrup Dune Forest. Ibid., XXVII, pp. 175~232, (1961)
- 38) HILEY, W. E. and R. LEHTPERE : Thinning grades based on the thickness of annual rings. Forestry, 28, pp. 17~32, (1955)

- 39) 穂積和夫・篠崎吉郎：植物生長のロジスチック理論，生態学大系 2 上，植物生態学[2]，古今書院，pp. 272~304，(1960)
- 40) ————・—————・只木良也：樹木の個体重の瀬度分布，10回日本生態学会講演，(1963)
- 41) HUMMEL, F. C.: The Bowmont norway spruce sample plots (1930~45). Forestry, 21, pp. 30~42, (1947)
- 42) ————: Definition of thinning treatments. Proceedings 11 ieme Congres, Rome, 1953, pp. 582~588, (1954)
- 43) 育林第 2・第 4 研究室・経営第 1，第 2 研究室：カラマツ造林地の実態調査，林試東北支場年報，3, pp. 5~14, (1963)
- 44) IKUSHIMA, I., K. SHINOZAKI and T. KIRA: Intraspecific competition among higher plants III. Growth of duckweed, with a theoretical consideration on the C-D effect. J. Inst. Polytech. Osaka City Univ. D, 6, pp. 107~119, (1955)
- 45) 生嶋 功・吉良竜夫・篠崎吉郎：マツバボタンの生長曲線の解析，生理生態，7, pp. 98~112, (1957)
- 46) 荻住 昇：本数密度と根の成長，山林，946, pp. 10~21, (1963)
- 47) ————：育苗育林技術の基礎としての林木の根の働きと生長，わかりやすい林業研究解説シリーズ，3, pp. 56, (1963)
- 48) 加藤亮助：植付様式をかえればあいのカラマツ苗木の本数密度と生産量，林試北海道支場1958年年報，pp. 17~29, (1959)
- 49) ————：カラマツ幼令林における密度効果の一例，北方林業，125, pp. 27~30, (1959)
- 50) ————・森麻須夫・佐藤昭敏：東北地方におけるアカマツ林の保育に関する研究（第 1 報），一ノ関アカマツ幼令林間伐試験地の経過と現況，林試東北支場年報，6, pp. 77~84, (1965)
- 51) 加藤善忠：カラマツの造林，73回日林講集，pp. 15~26, (1962)
- 52) ————・蜂屋欣二：除伐・間伐，造林ハンドブック，朝倉書店，pp. 255~270, (1965)
- 53) ————：間伐，同上，pp. 701~720, (1965)
- 54) 河田 杰：あかまつ及びからまつの植栽の疎密が成林に及ぼす影響 1, 2, 林試研報，25, 27, pp. 1~30, pp. 1~28, (1925) (1927)
- 55) ————：スギ林間伐試験の成績・第 1 回報告，第 2 回報告，同上，pp. 1~89, (1944), pp. 81~148, (1954)
- 56) ————・金谷与十郎：あかまつ及びからまつ植栽の疎密が成林に及ぼす影響（終結報告），同上，41, pp. 29~62, (1949)
- 57) 木梨謙吉：推計学を基とした測樹学，朝倉書店，pp. 318, (1954)
- 58) ————：福岡スギ林分現実材積並成長予測表の調製とその検討，林野庁，(1956)
- 59) 吉良竜夫・穂積和夫・小川房人・上野善和：植栽密度の生態学的考察，園芸学研究集録 (6)，pp. 69~81, (1953)
- 60) KIRA, T., H. OGAWA and N. SAKAZAKI: Intraspecific competition among higher plants. I Competition-density-yield interrelationship in regularly dispersed population. J. Inst. Polytech. Osaka City Univ., D4, pp. 1~16, (1953)
- 61) ————・————— and K. HOZUMI: Ditto., II Further discussion on Mitscherlich's Law. Ibid., D5, pp. 1~17, (1954)
- 62) ————・—————・H. KOYAMA and K. YODA: Ditto., V Supplementary notes on the C-D effects. Ibid., D7, pp. 1~14, (1956)
- 63) 吉良竜夫(編)：密度・競争・生産，みやま，8, pp. 13~24, 9, pp. 9~18-11.12, pp. 34~45, (1957)
- 64) ————：相対生長，植物生態学 [2]，生態学大系，古今書院，pp. 265~272, (1960)
- 65) KÖSTLER, J.: Waldbau. Berlin, pp. 418, (1950)
- 66) KRAMER, H.: Kulturverbandversuche. Forst- u. Holzw. 15, pp. 496~500, 512~518, (1960)

- 67) 倉田益二郎：植栽本数論—主として民有林におけるスギ・マツを対象として，林業技術，218，pp. 1~5, (1960)
- 68) LEMMIEN, W. A. and V. J. RUDOLPH : Growth and yield of red pine in the three spacings. Quart. Bull. Mich. Agric. Exp. Sta., 42, pp. 421~427, (1959)
- 69) LEMMON, P. E. and F. X. SCHUMACHER : Volume and diameter growth of ponderosa pine trees as influenced by site index, density, age and size. For. Sci., 8, pp. 236~249, (1962)
- 70) ———— : Theoretical growth and yield of hypothetical ponderosa pine stands different thinning regimes. Ibid., 9, pp. 33~34, (1963)
- 71) LÖNNROTH, E. : Untersuchungen über die inneren Strukturen und Entwicklung gleichaltiger natur-normaler Kiefernbestände. Acta forestalia Fennica. 30, pp. 304, (1926)
- 72) LÖVENGREEN, J. A. : Udhugning i bøg i Danmark siden 1900, sttistisk belyst og teoretisk bedömt(Summary : Thinnings of beech in Denmark since 1900, illustrated statistically and assessed theoretically). Beret. f. Det forstlige Forsögsvaesen i Danmark, XX, pp. 271~354, (1951)
- 73) MACKENZIE, A. M. : Spacing experiment in conifers. Report on Forest Research 1949/50. Forestry Commission, pp. 59~61, (1951)
- 74) ———— and L. E. CHAIKEN : Volume, yield and growth of loblolly pine in Mid-Atlantic Costal Region (Progress report on pulpwood stands) U. S. F. S. Sotheast. For. Exp. sta. Tech., Note No. 33, (1949)
- 75) 真辺 昭：収穫予想表の基礎的研究，1962年度林試北海道支場年報，pp. 47~71, (1963)
- 76) 松井善喜：トドマツ人工林の収穫予想表と密植による増収効果について，北方林業，15, 9, pp. 13~18, (1963)
- 77) MEYER, H. A. : A correction for a systematic error occuring in the application of the logarithmic volume equation. Penn. State For. School Res. Pap., 7, (1944)
- 78) 嶺 一三：収穫表に関する基礎的研究と信州地方カラマツ林収穫表の調製，収穫表調製業務研究資料，12, pp. 201, (1955)
- 79) ———— : オワセの林業，林業解説シリーズ，121, pp. 42, (1929)
- 80) MITCHELL, H. C. : Regulation of farm woodlands by rule of thumb. J. For., 41, pp. 243~248, (1943)
- 81) MITSCHERLICH, G. : Der Einfluss der Bestandesdichte auf den Zuwachs der Rotbuche in Nord und Westdeutschland. Forst wiss. Zbl., 73, pp. 193~211, (1954)
- 82) MÖLLER, C. M. : The influence of thinning on volume increment. Thinning problems and practices in Denmark (compiled by S. O. Heiberg). Tech. Publ. N. Y. st. Coll. For., 76, pp. 5~44, (1954)
- 83) ———— : Grundflächenzuwachs und Massenzuwachs mit verschiedenen Definitionen. Forstwiss. Zbl., 73, pp. 350~354, (1954)
- 84) MYERS, C. A. : Thinning improves development of young stands of ponderosa pine in Black Hills. J. For., 56, pp. 656~659, (1958)
- 85) 南雲秀次郎・佐藤 健：Mitscherlich 式による森林の生長予測，東大演報，61, pp. 37~102, (1965)
- 86) 中村賢太郎：造林学入門（植林の手引），日林協，pp. 18~33, (1953)
- 87) ———— : 育林学，金原出版，pp. 342, (1956)
- 88) NELSON, T. C. : Current research in the South. 4th Conf. South. Indus. Forest Mangt. Proc., pp. 52~60, (1960)
- 89) 西沢正久：森林測定法，地球出版，pp. 299, (1959)
- 90) ———— ・真下育久・川端幸蔵：数量化による地位指数の推定法，林試研報，176, pp. 1~54, (1965)
- 91) NYSSNÖNEN, A. : Hallauksilla kösiteltyjen männiköiden rakenteesta jakehityksestä (Sum-

- mary : On the structure and development of Finnish pine stands treated with different cutting). Acta forestalia Fennica, 60, pp. 194, (1954)
- 92) OHOTOMO, E. : A study on preparation of volume table (1). J. Jap. For. Soci., 38, pp. 165~177, (1956)
- 93) 大友栄松 : 収穫表の使用法について, 山林, 872, pp. 29~34, (1957)
- 94) REINEKE, L. H. : Perfecting a stand-density index for even-age forests. J. Agric. Res., 46, pp. 627~638, (1933)
- 95) 林業試験場 : 秋田営林局管内収穫試験地中間報告, 収穫試験地調査報告, 2, pp. 386, (1958)
- 96) ——— : 同上, 第2次中間報告, 同上, 10, pp. 381, (1963)
- 97) 林野庁 (林業試験場) : 収穫表調製業務研究資料 (スギ) 4(1953), 7(1953), 11(1955), 13(1955), 13(1955), 14(1955), 17(1956), 20(1959), 22(1960), 23(1959), 24(1958), 28(1962)
- 98) ——— : 同上 (ヒノキ), 3(1953), 5(1953), 6(1953), 8(1955), 9(1955), 10(1955), 18(1957), 19(1957), 26(1960), 27(1961), 30(1963)
- 99) ——— : 同上 (アカマツ), 1(1952), 2(1952), 15(1956), 16(1956), 21(1959), 25(1960), 31(1964)
- 100) ——— : 同上 (カラマツ), 29(1961)
- 101) 林 野 庁 : 国有林における木材増産計画, pp. 139, (1961)
- 102) ——— : 植栽本数と保育形式に関する史的変遷とその技術的および経済的基盤についての調査, pp. 72, (1962)
- 103) ——— : 短期育成林業立木密度調査補助金, 都道府県林業試験指導機関試験費補助金実施要領, (1962) (1963)
- 104) ——— : 短期育成林業立木密度調査, 昭和38年度林業試験研究報告, pp. 3~14, (1965)
- 105) ROBERT, D. W. : Growth and yield of a thinned shortleaf pine plantation. Cent. St. For. Exp. Sta., T. Pap., 169, pp. 12, (1959)
- 106) 佐田一至・大城川次郎・小池益夫 : あかまつ及びからまつ植栽の疎密が成林状態に及ぼす影響 3, 林試研報, 37, pp. 37~120, (1941)
- 107) 佐伯敏郎 : 植物の生長解析, 植物学雑誌, 78, pp. 111~119, (1965)
- 108) 坂口勝美・土井恭次・安藤 貴 : 立木密度からみたアカマツ幼令林の生産構造, アカマツ研究論集 pp. 312~327, (1954)
- 109) ——— : 間伐一特に定量的間伐への発展, 育林学新説, 朝倉書店, pp. 164~194, (1955)
- 110) ———・土井恭次・安藤 貴・福田英比古 : 本数密度からみたアカマツ天然生幼令林分の解析, 林試研報, 93, pp. 1~21, (1957)
- 111) ——— : 間伐の木質に関する研究, 林試研報, 131, pp. 1~95, (1961)
- 112) 佐藤大七郎 : 間伐と生長, 山林 832, pp. 115~122, (1953)
- 113) 佐藤大七郎・中村賢太郎・扇田正二 : 林分生長論資料 1, 立木密度のちがう若いアカマツ林, 東大演報, 48, pp. 65~90, (1955)
- 114) SCHANTZ-HANSEN, T. : Twenty-five year summary of red pine thinning plots, J. For., 54, pp. 512~514, (1956)
- 115) SCHÖBER, R. : Die japanische Lärche, Frankfurt, p. 212, (1953)
- 116) 扇田正二・中村賢太郎・高原末基・佐藤大七郎 : 林分の生産構造の研究 (予報), アカマツ植栽疎密試験地における若干の解析, 東大演報, 43, pp. 49~57, (1952)
- 117) ———・佐藤大七郎 : 林分生長論資料 2, いろいろなツヨサの間伐をした北海道のストロープマツ林, 同上, 52, pp. 15~31, (1956)
- 118) 柴田信男 : 植栽密度試験について—6年生クロマツ林に見られた密度の影響を中心として, 林業技術, 228, pp. 4~8, (1961)

- 119) ———— : 植栽本数, 造林ハンドブック, 養賢堂, pp. 619~627, (1965)
- 120) 四手井綱英 : 林分密度の問題, 林業解説シリーズ, 86, p. 38, (1965)
- 121) ———— : 林分密度の問題などについて, 林業技術, 223, pp. 5~8, (1960)
- 122) ———— (編) : アカマツ林の造成—基礎と実際—, 地球出版, pp. 326, (1963)
- 123) SHINOZAKI, K. and T. KIRA : Intraspecific competition among higher plants VII, The logistic theory of the C-D effect. J. Inst. Polytech. Osaka City Univ., D7, pp. 35~72, (1956)
- 124) 篠崎吉郎・吉良竜夫 : 生長曲線論, 発生と増殖, 現代生物学講座, 6, 共立出版, pp. 1~24, (1958)
- 125) ———— : 自然間引, 植物生態学 [1], 生態学大系 I, 古今書院, pp. 178~180, (1959)
- 126) SHINOZAKI, K. and T. KIRA : Intraspecific competition among higher plant, X. The C-D rule, it theory and practical uses. J. Biology, Osaka City Univ., 12, pp. 69~82, (1961)
- 127) 篠崎吉郎・穂積和夫 : 逆数式の係数 A の近似, 生理生態, 11, pp. 78~83, (1962)
- 128) 塩谷 勉・田中純一 : 芦北地方の松の短伐期林業—熊本県芦北郡湯浦町調査報告—, pp. 122, (1959)
- 129) 周 楨・楊 榮 啓・焦 国 模 : 柳杉栽植距離と生長之関係, 国立台湾大学研報, 10, pp. 67, (1957)
- 130) SNEDECOR, G. W. : Statistical methods, Applied to experiments in agriculture and biology, pp. 534, (1957)
- 131) SPURR, S. H. : Forest Inventory, pp. 476, (1952)
- 132) STAEBLER, G. R. : Evidence of shock following thinning of young douglas-fir, J. For., 54, pp. 339~ (1956)
- 133) STAGE, A. R. : Growth of thinned ponderosa pine in Western Montana, Ibid., 56, pp. 757~760, (1958)
- 134) STAHELIN, R. : Thinning even-aged loblolly and slash pine stands to specified densities, Ibid., 47, pp. 538~540, (1949)
- 135) STEELE, R. W. : Growth after precommercial thinning in two stands of douglasfir, U.S.F. S. Pacific Northwest Forest and Range Exp. Sta. Res., Note 117, pp. 6, (1955)
- 136) STEVENSON, D. D. and R. A. BRATOO : The effect of spacing on the growth of Norway pine plantations—a progress report, J. For., 37, pp. 313~319, (1939)
- 137) 鈴木太七 : 林木の成長法則, 林地肥培効果の評価に関する研究, pp. 86~109, (1962)
- 138) 只木良也・四手井綱英 : 林木の競争に関する研究 II, スギで仕立てた模型林分での間伐試験, 日林誌, 41, pp. 341~349, (1959)
- 139) ————・———・酒瀬川武五郎・荻野和彦 : 森林の生産構造に関する研究 II, シラカンバ幼令林における現存量の推定と生産力についての若干の解析, 同上, 43, pp. 19~26, (1961)
- 140) ————・——— : 林木の競争に関する研究 (III), アカマツ幼樹を用いた小型林分での機械的な間伐試験, 同上, 44, pp. 129~139, (1962)
- 141) ————・尾方信夫・高木哲夫 : 同上, III, コジイ林における現存量の推定と生産力についての若干の解析, 同上, 44, pp. 350~359, (1962)
- 142) ————・四手井綱英 : 数量的間伐に関する生態学的研究, 京大演報, 34, pp. 1~31, (1963)
- 143) ———— : 競争密度効果を基にした幹材積収穫予測, 林試研報, 154, pp. 1~19, (1963)
- 144) ———— : 競争密度効果式を用いて検討した間伐と幹材積収穫との関係—アカマツの場合—, 同上 166, pp. 1~22, (1964)
- 145) 高田和彦・豊島重造 : スギ苗畑における密度試験 第 1 報, 予備実験の結果, 新潟農林研究, 16, pp. 51~57, (1964)
- 146) TEEGUARDEN, D. E. and D. T. GORDON : Thinning increase growth of stagnated ponderosa and jeffrey pine sapling stands, J. For., 62, p. 114, (1964)
- 147) 寺崎康正・金豊太郎 : スギ間伐試験経過について, 一羽根山・芦沢間伐試験地—, 日林東北支部 13 回講集, pp. 65~71, (1962)

- 148) ———・小坂淳一・金豊太郎：林分の構造と生長，収穫に関する研究，第1報，秋田地方スギ人工林の成長と収穫，林試研報，168，pp. 1~306，(1964)
- 149) 寺崎 渡：すぎ林，生長及収穫，同上，11，pp. 95~201，(1914)
- 150) ———：カラマツの間伐試験(Ⅲ)，カラマツ植栽林における間伐に関する研究，林試研報，148，pp. 51~71，(1963)
- 151) 徳永茂俊・渡部正夫：富士山国有林におけるヒノキ造林地のウツ閉時期と適正本数について，東京営林局技術研究，8，pp. 258~291，(1957)
- 152) 東京営林局：林業試験の概要，東京営林局計画課，p. 81，(1959)
- 153) ———：植栽本数の検討，東京営林局造林推進協議会資料，(1961)
- 154) VANSELOW, K. : Die Kulturversuche der Badischen forstlichen Versuchsanstalt auf dem Köcherhof, Allg. Forst- und Jagd. 113, pp. 33~51, 88~97, 114~128, 148~159, (1937)
- 155) ——— : Einfluss des Pflanzenverbandes auf die Entwicklung reiner Fichtenbestände, Forstwiss. Clb., 64, pp. 23~47, (1942)
- 156) ——— : Ditto. II, Ibid. 69, pp. 497~527, (1950)
- 157) ——— : Ditto. III, Ibid. 75, pp. 193~207, (1956)
- 158) WAHLENBERG, W. G. : Six thinning in a 56-year-old pure white pine plantation at Belmore, J. For., 53, pp. 331~339, (1955)
- 159) WARE, L. M. and R. STAHELIN : Growth of southern pine plantations at various spacing, Ibid. 46, pp. 267~274, (1948)
- 160) WARRACK, G. C. : Forecast of yield in relation to thinning regime in douglasfir, Tech. Publ. B. C. For. Serv., No. T. 51, pp. 56, (1959)
- 161) 渡辺秀彦・森 善信：立木密度と林分生産性に関する調査，愛媛県林試報，pp. 93~112，(1965)
- 162) 渡辺資仲：造林技術の再検討，日林協，p. 52，(1961)
- 163) WENGER, K. F., T. C. EVANS, L. LOTTI, R. W. COOPER and E. V. BRENDER : The relation of growth to stand density in natural loblolly pine stands, U. S. F. S. Southeast. Forest Exp. Sta. Pap., 97, p. 10, (1958)
- 164) WIEDEMANN, E. : Die Rotbuche 1931, Hannover, (1932)
- 165) ——— : Die Fichte 1936, Hannover, (1937)
- 166) ——— : Die Kiefer 1948, Hannover, p. 337, (1948)
- 167) ——— : Ertragskundliche und Waldbauliche Grundlagen der Forstwirtschaft, I, p. 128, (1950)
- 168) WILSON, F. G. : Numerical expression of stocking in terms of height, J. For., 44, pp. 758~761, (1946)
- 169) ——— : Evaluation of three thinning at Star Lake, For. Sci. 1, pp. 227~231, (1955)
- 170) WIMMENAUER, K. : Wachstum und Ertrag der Rotbuche in Ober-Hessen, (1993)
- 171) WORTHINGTON, N. P. and G. R. STAEBLER : Commercial thinning of douglas-fir in the Pacific Northwest, U. S. Dep. Agric. Forest Ser. T. Bull. No. 1230, p. 124, (1961)
- 172) ——— : Some observations on yield and early thinning in a douglas-fir plantation, J. For., 59, pp. 331~334, (1961)
- 173) 山本和蔵：疎植と密植とのひのき林に就ての比較調査，林試集報，5，pp. 1~16，(1921)
- 174) 四大学（北大，東大，京大，大阪市大）および信大合同調査班：森林の生産力に関する研究 第Ⅱ報，信州産カラマツ林について，日林協，p. 60，(1964)
- 175) ———：同上 第Ⅲ報，スギ人工林の物質生産について，日林協，p. 63，(1966)
- 176) ZAHNER, R. and F. W. WHITMORE : Early growth of radically thinned loblolly pine, J. For., 58, pp. 628~634, (1960)
- 177) 造林研究室：ヒノキ林の間伐試験，林試研報，166，pp. 23~84，(1964)

Ecological Studies on the Stand Density Control in Even-Aged Pure Stand

Takashi ANDO

(Résumé)

The determination of planting density and the practice of thinning are very important techniques in silviculture, and the quality and the size of produced timber are greatly affected by the suitability of them.

The planting density and the thinning in stands, in other words, are the problem of stand density control, for the stand density (the number of trees per unit area) is determined by them.

In this report, the problems of stand density control under the ecological bases are described.

The reciprocal equations of competition-density effect and yield-density effect were found by KIRA *et al.* with herbaceous plants, and the possibilities of application of these equations to woody plants have been recognized.

When the growth factors other than the stand density are equally supplied after a certain period of growth, the relations between average stem volume (v) or stem volume per ha (V) and stand density (ρ) are given by the following equations :

$$1/v = A_1\rho + B_1 \quad \dots\dots\dots(22)$$

$$1/V = A_1 + B_1/\rho \quad \dots\dots\dots(23)$$

where A_1 and B_1 are constants determined by growth stage.

These equations were drawn from the total amount of plant materials, and also the applications to the partial amount of plant materials, i. e. stems, branches, leaves and basal area etc. have been recognized. The examples of these relations are shown in Fig. 1~3 and Table 4~6.

Furthermore, assuming that the average height of stand expresses the growth stage or site condition of stand, and that the stands having similar average height are at the same growth stage as each other, the various equivalent height curve on the $\rho \sim v$, $\rho \sim V$, $\rho \sim g$ (g : average basal area) and $\rho \sim G$ (G : basal area per ha) can be expressed with the reciprocal equation (See Fig. 4~5, Table 7~14), because the average height is little influenced by the stand density.

The A and B in the reciprocal equation have the complicated contents as shown in Table 1, but the variation of A or B which was caused by the variation of average height is approximated to the following equations :

$$A_1 = a_1 H^{-b_1} \quad \dots\dots\dots(37)$$

$$B_1 = a_1' H^{-b_1'} \quad \dots\dots\dots(38)$$

where H is the average height of stand, and a_1 , a_1' , b_1 and b_1' are constants. These relations are shown in Fig. 10~19 and Table 15~24, 28~35.

Further, we have known about the full-density curve, which shows the upper limit of stand density with regard to arbitrary average stem volume or stem volume per ha. And these relations were shown in the following equations independent of reciprocal equations :

$$v = K\rho^{-a} \quad \dots\dots\dots(33)$$

$$V = K\rho^{(1-a)} \quad \dots\dots\dots(34)$$

where K and a are constants.

In 1962, the author showed that the full-density curve was given from the relations of the equation (22), (37) and (38) by means of using $v \cdot B_1$ as the competition index (R_c) and R_f as the minimum competition index in the present stand.

That is,

$$\left. \begin{aligned} v_{R_f} &= K_2' \rho^{-k_1} \\ k_1 &= b_1' / (b_1 - b_1') \\ K_2' &= \frac{R_f}{a_1} \left\{ \frac{R_f}{1 - R_f} \cdot \frac{a_1}{a_1'} \right\}^{\frac{b_1'}{b_1 - b_1'}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (62)$$

By the equation (62), the full-density curve could be related to the reciprocal equation mathematically. These relations are shown in Table 38.

Furthermore, according to the yield index (R_y) which was shown by the ratio of a certain stem volume on the same equivalent height curve to the maximum stem volume per ha which was given by the intersecting point of full-density curve and a certain equivalent height curve, the equivalent yield index curves are given by the following equations :

$$\left. \begin{aligned} V_{R_y} &= k_3 \rho_{R_y}^{k_1'} \\ k_1' &= b_1 / (b_1 - b_1') \\ k_3 &= \frac{(1 - R_f)}{a_1} \left\{ \frac{a_1}{a_1'} \cdot \frac{1 - (1 - R_f) R_y}{(1 - R_f) R_y} \right\}^{\frac{b_1}{b_1 - b_1'}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (66)$$

These relations were given in Table 43.

The course of $\rho - v$ relation in natural thinning can be expressed with the Type IV of C ~D curve. That is

$$1/\rho = A_\rho + B \dots\dots\dots (28)$$

where A and B are constants determined with the full-density curve and initial planting density.

From the above-mentioned relations, combining the full-density curve, the equivalent height curve of stem per ha, the equivalent yield index curve, the diameter at breast height calculated from the reciprocal equation of basal area and the course of natural thinning, the diagrams of *Cryptomeria japonica*, *Chamaecyparis obtusa*, *Pinus densiflora* and *Larix leptolepis* related to stand density were figured. The author made it a rule to call this diagram the stand density control diagram. The local stand density control diagram (Fig. 44~47) is applied to a limited area, and the general stand density control diagram (Fig. 45~48) is applied to the whole area. And using this diagram, the stem volume, the diameter at breast height and the yield index of a stand having arbitrary average height and stand density was assumed.

As it is considered that the relation between stand density and stem volume per ha after the thinning in the case of removing in order of smaller individual first of all varies on the same equivalent height curve, stem volume after thinning can be read in the cases of removing arbitrary tree number of smaller stem volume (See Fig. 51~54).

Supposing that a stand is thinned at h meter height, the constants of reciprocal equation of stem volume at h meter height are A_1 and B_1 , and the stem volume per ha and the tree number per ha causes the decrease of $V_1 \rightarrow V_2$ and $\rho_1 \rightarrow \rho_2$ by thinning, V_1 , V_2 and V_t (yield by thinning per ha) are calculated by the following :

$$\begin{aligned} V_1 &= \rho_1 / (A_1 \rho_1 + B_1) \\ V_2 &= \rho_2 / (A_1 \rho_2 + B_1) \\ V_t &= V_1 - V_2 \end{aligned}$$

Using the general stand density control diagram, the author computed the total yield of the supposed models on stand density control in the case of changing the grade, the interval and the beginning time of thinning, and the initial planting density in *Cryptomeria japonica* into the various grades, and compared them with each other (See Table 56, 57). And the following results were obtained, (See Table 58~60, Fig. 58~73) :

a) The yield volume in final cutting increased with higher final stand density, but average stem volume and diameter at breast height decreased with higher final stand density.

b) The total yield volume (the sum of final and thinning yield) increased with the higher average yield index in the models of stand density control; in other words, with the nearer controlled models to the full-density curve. But this tendency is remarkable on the models in which the average yield index is lower than 0.8~0.85. And in the models higher than 0.8~0.85, it seems the total yield volume is particularly different.

c) On the models of stand density control which were maintained in the same on the other conditions, total yield of these has a tendency to increase with higher initial planting density, with nearer management base line of thinning to the full-density curve, with later beginning time of thinning, with shorter interval of thinning, but to decrease with too late beginning time of thinning in the case of higher initial planting density.

d) In general, it could be seen that the total yield of models increased with higher initial planting density, but rate of increase in total yield is too small to be compared with rate of increase of initial planting density.

e) The efficiency to obtain higher total yield by higher initial planting density is larger in shorter rotation period than in the longer.

f) In general, if the other conditions were equal, the thinning yield volume increased with higher initial planting density, with lower yield index after thinning, with later beginning time of thinning and with shorter interval of thinning.

g) The maximum period of mean growth is affected little by initial planting density, as the stand after thinning was kept to higher stand density. But in the case of higher initial planting density, the more the stand is thinned to lower stand density, the faster the maximum period of mean growth becomes.

The yield index which shows the relative measure of stand density was used for the management line in the models of stand density control, and the mean yield index of the model of stand density control was useful to analyze the relation between the model of stand density control and this total yield.

Also, the yield index in actual stands related closely with the structure elements of stands and the qualities of produced timber. The amount of leaves per ha increased with the increase of yield index; however, in the case of yield index larger than 0.8~0.85, the amount of leaves is nearly constant (See Fig. 74~76). Also, it seems that the relation between the yield index and the leaf weight ratio (The percentage of leaf weight per ha in each stand to mean leaf weight per ha in stands which yield index is larger than 0.8) dose not differ among species (See Fig. 77). The percentage of each part weight to above-ground part weight are related to the yield index according to growth stage (See Fig. 78~79). The clear length ratio increased with the increase of yield index (See Fig. 80~82). The breast height form-factor increased with the increase of yield index according to height classes (See Fig. 83). And the average annual ring number per 1 cm at breast height of stand in the same site class increased with the increase of yield index (See Fig. 84).

Finally, although the stand density control diagram may be used for the guide of stand density control, simplifying the practice of stand density control in present stands, guide for the determination of initial planting density (Table 62) and the thinning schedule (Table 63~70) of *Cryptomeria japonica*, *Chamaecyparis obtusa*, *Pinus densiflora* and *Larix leptolepis* were prepared according to the calculation of general stand density control diagrams.