

九州大学福岡演習林におけるヒノキ高齡林の間伐に関する研究：間伐による林内光環境の変化と予測

下元, 経寛
徳島県庁

吉田, 茂二郎
九州大学農学部

光田, 靖
九州大学農学部

西園, 朋広
九州大学農学部

他

<https://doi.org/10.15017/14824>

出版情報：九州大学農学部演習林報告. 81, pp.31-50, 2000-03-30. 九州大学農学部附属演習林
バージョン：
権利関係：

九州大学福岡演習林におけるヒノキ高齢林の 間伐に関する研究

間伐による林内光環境の変化と予測

下 元 経 寛**・吉 田 茂二郎***・光 田 靖***
西 園 朋 広***・溝 上 展 也***・今 田 盛 生***

抄 録

ヒノキ高齢人工林において間伐試験が行われている。間伐の強度は相対幹距比によって決められており、コントロール（無間伐）、弱度、中度および強度の4種類で、それぞれ15%、17%、20%そして23%に設定されている。間伐の前後で林内相対照度の測定が行われており、間伐に伴う林内相対照度、林分構造および樹冠構造の変化が明らかにされている。特に、haあたりの樹冠量合計（林冠表面積）と林内相対照度との関係が明らかにされ、さらに樹幹解析によって得られた資料をもとに樹冠モデルを利用して間伐後の樹冠量の推移を予測し、あわせて林内相対照度の推移も予測している。この研究結果から、樹冠量が林内相対照度をコントロールする一要因であることが明らかにされている。

キーワード：ヒノキ人工林、高齢人工林、間伐、相対幹距比、林内相対照度

1. はじめに

近年、日本林業を取り巻く状況には林業労働者の減少、高齢化、人件費の高騰、安価な外材の大量輸入など非常に深刻なものがある。このような中で、労働投入量をできるだけ節約でき（熊崎，1985）、高付加価値大径材を生産することが可能な長伐期施業が注目を集めている。そして、実際に短伐期施業から長伐期施業へと方針を変える林家が増えている（林，1990）。

このような状況から、九州大学農学部附属福岡演習林（以下、福岡演習林と記す）ではスギ・ヒノキの人工林に対して150年伐期が採用されている。しかし、現在100年を越す高齢林の施業に関する資料が不足しているため、その目標林分および育林プロセス（今田，1998）は確立されていない。長伐期施業を実施する際、一般には林木間の競争を緩和し、

* SHIMOMOTO, M., YOSHIDA, S., MITSUDA, Y., NISHIZONO, T., MIZOUE, N. and IMADA, M. : Studies on the thinning experiment for the old *Chamaecyparis obtusa* plantation forest in the Kyushu University Forests in Sasaguri, Fukuoka prefecture

** 徳島県庁 : Dep. of Agriculture, Forestry and Fishery of Tokushima prefecture, Tokushima 770-8570

*** 九州大学農学部 : Dep. of Forestry, Faculty of Agriculture, Kyushu Univ., Fukuoka 812-8581

諸害に対して抵抗力のある健全な森林を育成し、かつ主伐期までに収入を得るために実行する間伐が重要になり、その間伐方法の選択は目標林分および育林プロセス決定の中で問題とされるところである。間伐方法は対象林分に森林のどのような機能を重視するかにより異なる。もし、その機能の中の木材生産機能を重視するならば、間伐・主伐本数、収益などの問題に重点を置いて、目標林分、育林プロセスが決定される。また、水土保持機能を重視するならば、林床植生または複層林の下層木が生育可能な林内相対照度を保つことに重点を置いて、目標林分、育林プロセスが決定される。

例えば、水土保持機能が高いと言われる複層林についてみると、スギやヒノキの下層木の健全な成育のため10%以上の林内相対照度を維持することが必要である(川名ら, 1992)。この時、林分構造と林内相対照度の変化の関係、間伐後の林分構造の推移が明らかであれば、林内相対照度が10%を下回らないような間伐方法を適用できる。

そこで本研究では、目標林分および育林プロセスの指針を示す基礎資料の収集を目的として、福岡演習林にヒノキ高齢林の間伐試験地を設定した。その試験地において、間伐による林分構造と林内光環境の変化を明らかにし、さらにその結果と現在までの林分の成長過程から、間伐に伴う林分構造と林内光環境の推移の予測を行った。

2. 研究対象林分と間伐試験地

2.1. 研究対象林分の概況

研究対象地の福岡演習林は福岡市の東部に位置し、福岡県粕屋郡篠栗町と久山町にまたがって散在する。福岡演習林の標高は30~553 m, 年平均気温16度, 暖かさの指数134, 年降水量1,790 mmである(九州大学農学部附属演習林, 1998)。

研究対象林分は福岡演習林の19林班ろ小班, 19林班に小班, 8林班い小班的ヒノキ人工林である。1998年時点での林齢は、それぞれ86年, 83年, 59年である。

1998年に19林班ろ小班を3区画に分け各間伐区内に1個, 計3個(0.09 ha, 0.12 ha, 0.12 ha)および19林班に小班内に1個(0.102 ha)の間伐試験地を設定した(以下, それぞれを無間伐プロット, 弱度間伐プロット, 中度間伐プロット, 強度間伐プロットと記す)。19林班に設定された間伐試験地の詳細を図1に示す。この林分は非常に老齢であり、演習林が定める間伐対象林分の対象外となっていたため近年間伐が行われておらず、完全に樹冠がうっぺいしている状態ではあったが、下層には4~5mの広葉樹が進入しており、それにより地表近くの林内相対照度は低く、下層植生はほとんど見られなかった。

この試験地に加え、1997年に8林班い小班内に設定済みの2個の試験地、すなわち0.12 haの方形試験地(以下, 無間伐Aプロットと記す)と0.0625 haの台形試験地(同, 無間伐Bプロット)を利用した。この林分も完全に樹冠がうっぺいしており、前述の林分より林齢が若いために、過うっぺい状態となり林内には広葉樹もほとんど認められなかった。

2.2. 間伐試験地の設定

1998年に19林班ろ小班において、間伐試験プロットの設定に先立ち同小班を4つの区画に分割し、各区画ごとに予備調査を行った。胸高直径は輪尺を用い、2 cm 括約で全林

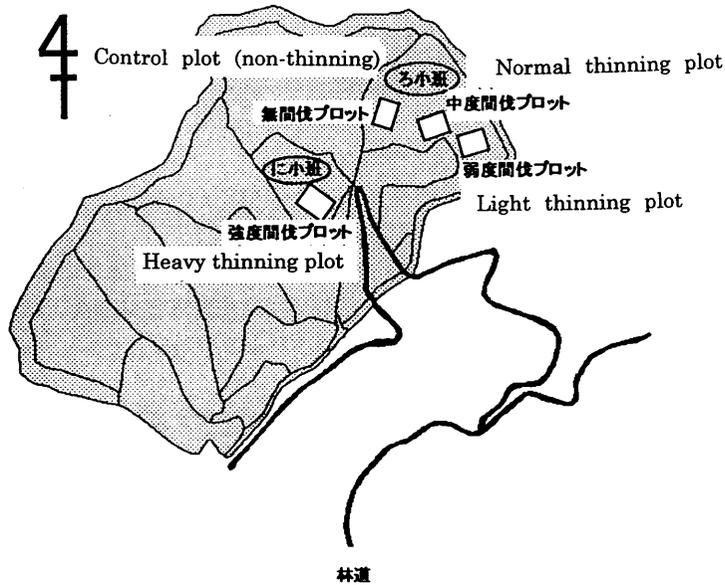


Fig. 1 Location of the experimental plots.

図1 間伐試験プロット位置図

木を測定した。ただし、広葉樹については、樹冠が林冠に達している樹木（胸高直径がおよそ 20 cm 以上のもの）を測定した。ヒノキの樹高はブルーメイス測高器を用いて、0.1 m 括約で各胸高直径階ごとに 2 本ずつ測定し、樹高曲線を作成し胸高直径から推定した。

その結果をもとに、相対幹距比（西沢，1972）を式（1）より求め、各区画ごとに目標とする相対幹距比をそれぞれ 15.0%，17.0%，20.0%とした。なお、上層木平均樹高としては、10 m×10 m に 1 本の割合で樹高の高い順に選定された立木の平均樹高を用いた。さらに、各区画内に方形プロットを設定し、各区画内の目標とする相対幹距比に基づいて式（2）により目標間伐本数を求め、各プロットの間伐木を選定した。なお間伐は原則として下層間伐とし、さらに間伐木が偏ることがないように立木配置に注意をしながら行った。

$$Sr = \frac{\sqrt{10000/N}}{H_i} \times 100 \quad (1)$$

$$N' = \left(\frac{10000}{Sr' \cdot H_i} \right)^2 \quad (2)$$

ただし、
 Sr : 相対幹距比 (%) N : ha 当たり本数 (本/ha)
 H_i : 上層木平均樹高 (m) Sr' , N' : 間伐後の目標値

3. 調査の方法

設定した各プロット（19林班ろ小班；無間伐プロット，弱度間伐プロット，中度間伐プロット，19林班に小班；強度間伐プロット，8林班い小班；無間伐Aプロット，無間伐Bプロット）において，以下の方法で調査を行った。

各プロット内の全立木の胸高直径を直径テープを用いて0.1 cm 括約で測定した。ヒノキの樹高と枝下高はブルーメライズ測高器を用い，0.1 m 括約で各胸高直径階ごとに2本ずつ測定した。ただし，広葉樹の樹高と枝下高は19林班ろ小班全体でおよそ10本測定した。樹冠長は樹高と枝下高の差として求めた。そして，樹冠直径は樹高と枝下高を測定した樹木について，斜面斜め上の各個体の樹冠全体が見える方向からシュピーゲルレラスコープを用いて0.1 m 括約で測定した。

強度間伐プロットでは，プロットを設定する1年前にすでに間伐が行われていたので，間伐前の胸高直径を推定するため間伐木20本について，根元直径の2方向を輪尺を用いて測定し，それらを平均して0.1 cm 括約で根元直径を求めた。さらに，残存木の根元直径と胸高直径の関係を求め，間伐木の根元直径から胸高直径を推定した。

さらに，成長解析のために19林班ろ小班において4本のヒノキ資料木を伐倒し樹幹解析を行った。資料木1，2は地上高0.2 m，1.2 m，それ以上の高さについては2 m ごとに円盤を採取した。また，資料木3，4は地上高0.2 m，1.2 m，それ以上の高さについては同様に1 m ごとに円盤を採取した。

林内相対照度はミノルタデジタル照度計 T-1H を用い，曇天下において測定した。林外照度は演習林近くの開けた場所で測定し，林内照度はプロット全体を移動しながら，数 m おきに約20カ所で地上高約1.8 m において測定した。弱度間伐プロット，中度間伐プロットではヒノキの間伐前で下層広葉樹除伐の前後と間伐後の計3回測定した。無間伐プロットでは下層広葉樹除伐の前後に測定した。また，無間伐Aプロット，無間伐Bプロットでは下層広葉樹除伐後に測定し，強度間伐プロットでは間伐後に測定した。

林内照度の測定とともに，全天空写真の撮影も行った。写真はプロットの中央で約5 m の間隔を置き，9カ所で2枚ずつ撮影した。レンズの光軸を正確に鉛直上向きにするため，三脚と水準器を使い，カメラを水平に固定し，レンズ高は地上高1.2 m で撮影した。また，晴天時の撮影では葉先・枝先の映像が飛ぶ場合があり，このハレーションを防ぐため曇天下で撮影した（玉井ら，1972；安藤，1983a；早稲田，1983）。絞りとシャッター速度は自動制御で行った。使用したカメラはデジタルカードカメラ FUJIX DS-505/515，魚眼レンズはニコン社製 Fisheye Nikkor(8mm F=2.8)である。このカメラでは，撮影した画像はメモリーカード（HG-15）に記録される。この魚眼レンズは等距離射影方式であり，画角は180°である。また，レンズに内蔵されている L1BC のフィルタを用いて撮影した。

4. 解析方法

4.1. 樹高の推定

間伐による胸高直径階分布および樹高階分布の変化を明らかにした。なお，弱度間伐プロット内には数本のスギが含まれていたが，本数が極端に少ないことと成育に大きな差が

認められないと判断されたので、以降はすべてヒノキとして分析することにした。樹高に関しては、ヒノキはプロットごとに、広葉樹については全体で、測定した標本木の資料を利用して樹高曲線を作成し、非測定木の樹高を推定した。

福岡演習林のヒノキ人工林では、樹高曲線式の中でネスルンド式（式（3））による推定が他式と比較して精度がよい（大原，1978）ため、ネスルンド式を用いた。曲線のあてはめには Levenberg-Marquardt 法（Marquardt, 1963）を用いた。

$$h=1.2+\left(\frac{d}{a+bd}\right)^2 \quad (3)$$

ただし、 h ：樹高（m） d ：胸高直径（cm） a, b ：定数

4.2. 樹冠表面積の推定

林内光環境に大きく影響すると思われる林冠表面積の変化について明らかにした。樹冠表面積はパラボラ樹冠形モデル（竹下，1985）を用いて求めた。ヒノキの樹冠形状はパラボラ状に近似できる（林ら，1997）ことから、樹冠頂を原点として頂点からの長さ（樹冠長）を Cl （m）、樹冠半径を Cr （m）とすると、樹冠形状は式（4）で示される。

$$Cr=\alpha\sqrt{Cl} \quad (4)$$

ただし、 α ：樹冠拡張係数

各プロットで測定した樹冠長および樹冠半径を式（4）に代入して、樹冠拡張係数を求めた。これらの樹冠拡張係数を各プロットごとに平均した値を用い、ヒノキの樹冠表面積 Cs （ m^2 ）を式（5）より求めた。広葉樹についても樹冠形をパラボラと仮定した。

$$\begin{aligned} Cs &= 2\pi \int_0^{Cl} \alpha\sqrt{x} \sqrt{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \\ &= \frac{4}{3}\pi\alpha \left\{ \left(cl + \frac{\alpha^2}{4} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{\alpha^2}{4} \right)^{\frac{3}{2}} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

式（5）により求めた樹冠表面積を用いて、ヒノキの胸高直径と樹冠表面積を直線で回帰した。また、広葉樹についても胸高直径と樹冠表面積を直線で回帰した。

林冠表面積に関しては、各プロットごとのヒノキの平均胸高直径、広葉樹の平均胸高直径を、それぞれ回帰して求めた直線式に代入して平均樹冠表面積を求めた。求めた値を式（6）に代入して ha あたりの樹冠表面積合計（以下、林冠表面積と記す）を求めた。ただし、 N にはヒノキと広葉樹に対してそれぞれ ha あたり本数を用いた。そして、ヒノキの林冠表面積と広葉樹の林冠表面積を合計したものをプロットの林冠表面積とした。

$$\sum Cs = NCs \quad (6)$$

ただし、 $\sum Cs$ ：林冠表面積（ m^2/ha ） \overline{Cs} ：平均樹冠表面積（ m^2 ）

4.3. 林内相対照度と天空率

間伐による林内相対照度および天空率の変化を明らかにした。各プロットの林内相対照度は、各プロット内の全測定値を平均して求めた。

一方、全天空写真より求められる林内光環境の指標として天空率（日本建築学会、

1982) があり, 天空率は林内相対照度と一致するという報告 (Inoue *et al.*, 1996) に基づいて, 大津の判別分析法 (大津, 1980), 岡村ら (1995) および Inoue ら (1996) の方法を参考にして, 天空率を求めた.

使用した魚眼レンズの画角は 180° であるため, 傾斜のある林分で光軸を鉛直上向きで撮影すると写真内に斜面が写ってしまう. よって, 林冠表面積が同じであっても傾斜の異なる林分ならば, 天空率に影響を及ぼすと考えられる. そこで, 写真画像内に入る斜面の影響を除去する方法 (岡村, 1994) を用いて, 写真画像内の斜面を除去して, 天空率を求めた. なお, 画像の二値化と天空率の算出は, NIH image のマクロプログラムにより行った.

5. 結果および考察

5.1. 間伐による林分構造の変化

図2に強度間伐プロットヒノキ残存木の根元直径と胸高直径との関係を示す. この関係を直線で回帰した結果, $r^2=0.908$ ($p<0.01$) で有意な正の相関が認められた. よって, 図2に示す回帰式を用いて間伐木の胸高直径を求め, 強度間伐プロットの間伐前の胸高直径分布を推定した. 各プロットの間伐前後におけるヒノキの胸高直径階別本数を図3に示す. 各プロットの直径分布をみると, 無間伐Aプロットと無間伐Bプロットは, 他のプ

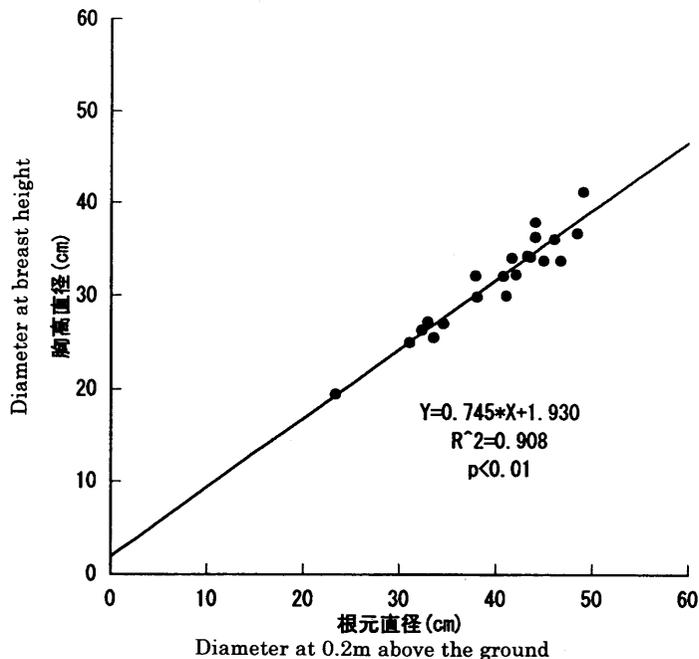


Fig. 2 Relation between the diameter at 0.2m above the ground and the diameter at breast height.

図2 根元直径と胸高直径の関係

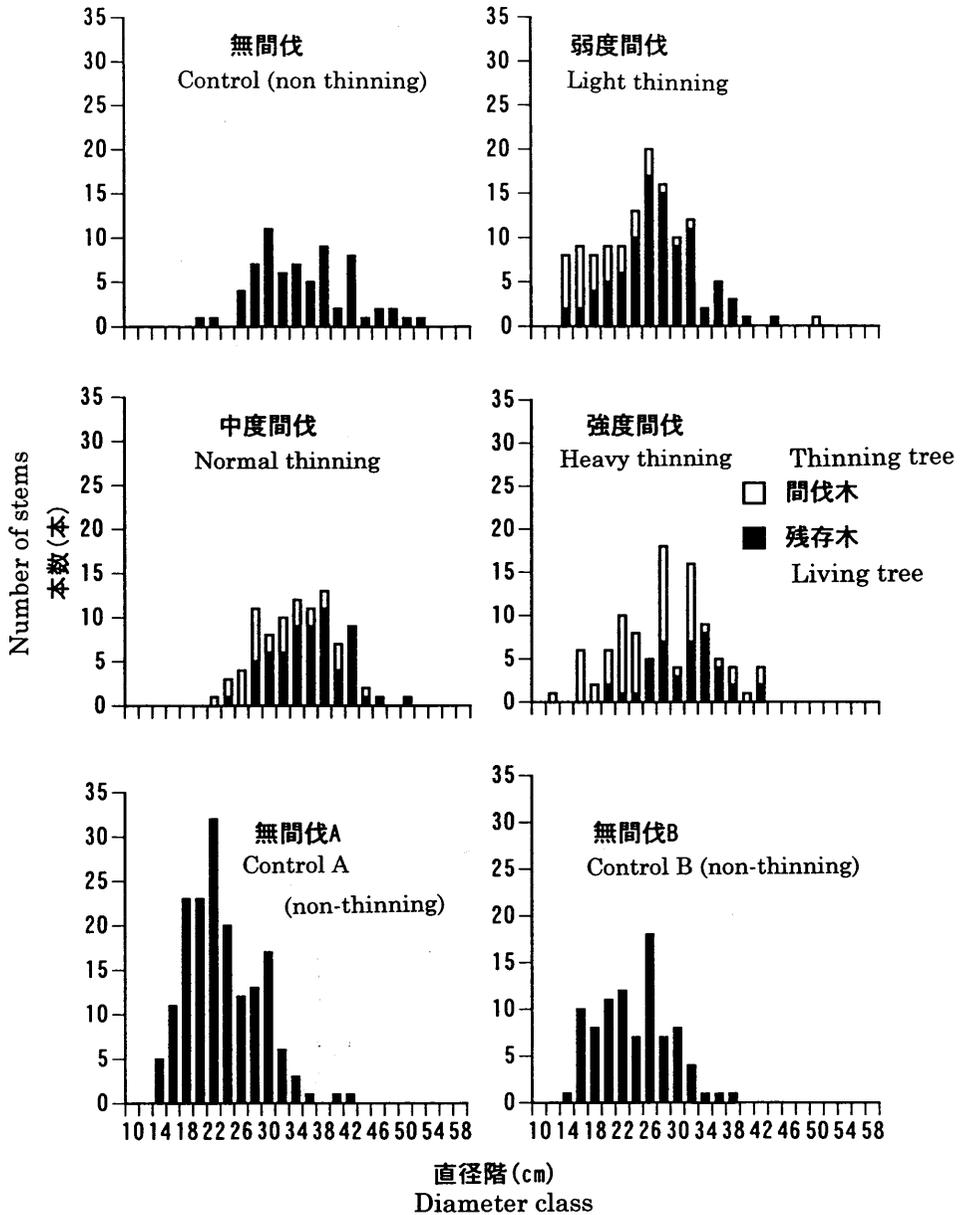


Fig. 3 Diameter distributions on each plot

図3 各プロットごとの胸高直径分布

ロットと比べて小さい方にモードがみられた。さらに間伐は、比較的胸高直径の小さい樹木を対象としている下層間伐が実施されたことがわかった。

各プロットの間伐前後におけるヒノキの樹高階別本数を図4に示す。各プロットの樹高分布をみると、胸高直径の場合と同様の傾向であったが胸高直径に比べると、大きい方の

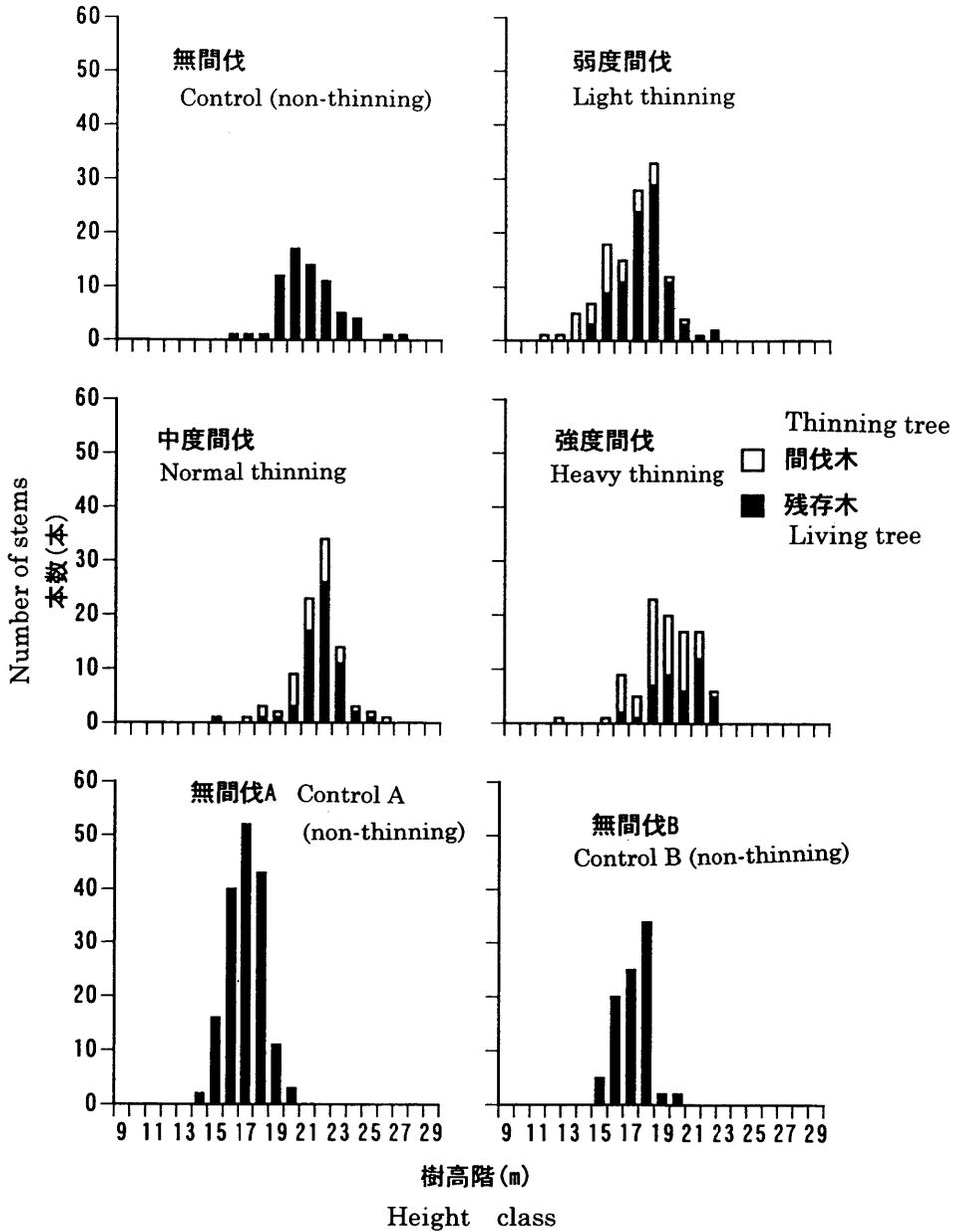


Fig. 4 Tree height distributions on each plot

図4 各プロットごとの樹高分布

クラスに属する樹木も間伐の対象とされていたことがわかった。

なお、無間伐Aプロットおよび無間伐Bプロットと他の間伐プロットとの立木の大きさの相違は、場所とともに林齢の違いによるものと思われた。

林冠表面積を求めるに際して、樹冠拡張係数(α)の各プロットの平均値は、無間伐プロッ

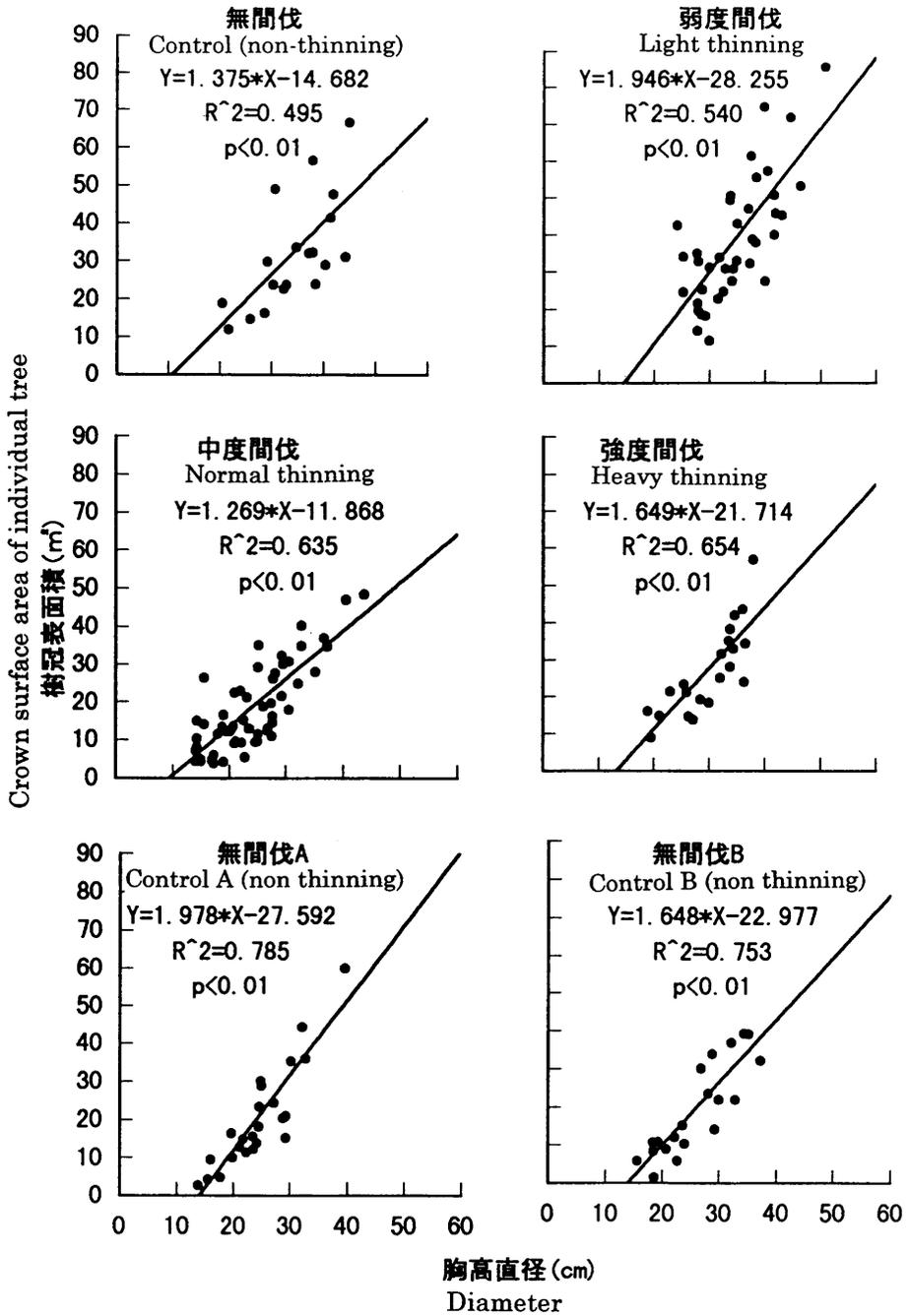


Fig. 5 Relation between the diameter and the crown surface area of individual tree on each plot.

図5 各プロットごとの胸高直径と樹冠表面積の関係

表1 プロットの詳細
Table 1 Detail of the experimental plots

Plot	Thinning	Number of stems (No/ha)				Mean height of Chamaecy- paris (m)	Sr (%)	Relative yield	Average diameter(cm)				Basal area (m ² /ha)	Volume (m ³ /ha)	Total crown surface area (m ² /ha)
		Chamaecy- paris	Broad- leaves	Crypto- meria	All trees				Chamaecy- paris	Broad- leaves	Crypto- meria	All trees			
Control		756	0	0	756	20.8	15.1	0.90	34.9	—	—	34.9	75	727	25117
Light- thinning	before	907	329	71	1307	16.8	14.0	0.92	25.4	20.6	26.9	25.5	72	575	26229
	after	664	193	43	900	17.3	17.0	0.80	27.2	27.1	26.5	25.9	55	452	20299
Normal- thinning	before	664	136	0	800	21.5	15.0	0.91	34.6	—	28.6	33.5	73	708	28979
	after	450	50	0	500	21.6	20.4	0.72	36.1	—	35.3	35.3	50	493	20016
Heavy- thinning	before	971	29		1000	18.9	14.7	0.90	28.2	—	32.4	28.3	66	612	24775
	after	412			412	17.2	23.0	0.56	30.9	—	—	30.9	32	298	12047
ControlA		1392	0	0	1392	16.9	14.1	0.92	23.2	—	—	23.2	62	527	25458
ControlB		1424	0	0	1424	17.1	13.9	0.93	23.7	—	—	23.7	66	561	22899

トで0.8, 弱度間伐プロットで0.8, 中度間伐プロットで0.9, 強度間伐プロットで0.9, 無間伐Aプロットで0.7, そして無間伐Bプロットで0.8となった。

図5にヒノキの胸高直径と樹冠表面積との関係を各プロットごとに示す。胸高直径と樹冠表面積を直線で回帰した結果, すべてのプロットにおいて有意な正の相関が認められた。さらに, 広葉樹においても胸高直径と樹冠表面積を直線で回帰した結果, $r=0.839$ ($p<0.01$) となり有意な正の相関が認められた。よって, この回帰式を用いて胸高直径から樹冠表面積を求め, プロット内の ha あたり林冠表面積合計 (以下, 単に林冠表面積と記す) を求めた。

表1に各プロットごとの間伐前後におけるヒノキ, スギ, 広葉樹および全立木について, ha あたり本数, 平均胸高直径, および各プロットの, 相対幹距比, ha あたりの胸高断面面積合計, ha あたり材積, 収量比数および林冠表面積をそれぞれ示した。なお, 材積は立木幹材積表 (林野庁計画課, 1970) から, 収量比数は安藤 (安藤, 1968) のヒノキ一般林分密度管理図から求めた。

表1に示すように各プロットの間伐前後のヒノキと広葉樹を込みにした林冠表面積は, 弱度間伐プロット, 中度間伐プロット, 強度間伐プロットにおいて, それぞれ $26,229\text{m}^2/\text{ha}$ から $20,299\text{m}^2/\text{ha}$ へ, $28,979\text{m}^2/\text{ha}$ から $20,016\text{m}^2/\text{ha}$ へ, $24,775\text{m}^2/\text{ha}$ から $12,047\text{m}^2/\text{ha}$ へと変化した。間伐を実施しなかった無間伐プロット, 無間伐Aプロット, 無間伐Bプロットの ha 当たり林冠表面積は, それぞれ $25,117\text{m}^2/\text{ha}$, $25,458\text{m}^2/\text{ha}$, $22,899\text{m}^2/\text{ha}$ であった。

林分密度の指標としている相対幹距比についてみると, 間伐が行われた弱度間伐プロット, 中度間伐プロットおよび強度間伐プロットにおいて, 相対幹距比はそれぞれ 14.0% から 17.0%, 15.0% から 20.4%, 14.7% から 23.0% に変化し, 間伐により相対幹距比は上昇した。間伐後の全プロットの相対幹距比は, 無間伐Bプロット, 無間伐Aプロット, 無間伐プロット, 弱度間伐プロット, 中度間伐プロット, 強度間伐プロットの順にそれぞれ 13.9%, 14.1%, 15.1%, 17.0%, 20.4%, 23.0% を示し, 間伐強度が大きくなるにつれて, 相対幹距比も大きくなった。

同様に, 林分密度の指標である収量比数の変化をみてみると, 弱度間伐プロット, 中度間伐プロット, 強度間伐プロットの間伐前後の収量比数はそれぞれ 0.92 から 0.80 へ, 0.91 から 0.72 へ, 0.90 から 0.56 へと変化した。間伐後の全プロットの収量比数は, 無間伐Bプロット, 無間伐Aプロット, 無間伐プロット, 弱度間伐プロット, 中度間伐プロット, 強度間伐プロットの順にそれぞれ 0.93, 0.92, 0.90, 0.80, 0.72, 0.56 を示し, 間伐強度が大きくなるにつれて, 収量比数も小さくなった。

相対幹距比と収量比数は, 異なった林分密度の指標であるが, 基本的には上層木平均樹高と本数密度の関係を利用した指標であり, 本研究では両指標が示す林分密度の傾向は非常に似通っていた。

5.2. 間伐による林内光環境の変化

各プロットにおける林内相対照度と天空率を表2に示す。下層の広葉樹除伐前の林内相対照度 (下木あり) は, 無間伐プロット, 弱度間伐プロット, 中度間伐プロットにおいてそれぞれ 0.4%, 0.8%, 0.5% を示し, すべて 1% 未満の非常に低い値を示した。広葉樹除

表2 間伐による光環境の変化
Table 2 Change of the light condition by the thinning on each plot.

Plot	Thinning	Relative light intensity(%)		Rate of the space(%)		
		Under stories		Correction		
		with	without	no	30°	45°
Control	—	0.4	2.0	21.4	24.7	26.8
Light	before	0.8	2.4	18.1	21.0	25.4
	after		19.7	23.7	25.9	27.8
Normal	before	0.5	2.1	24.9	29.3	33.6
	after		22.2	23.8	27.2	28.3
Heavy	after		34.0	28.8	34.4	39.0
ControlA	—		3.5	25.9	29.3	31.3
ControlB	—		3.8	26.8	29.5	30.6

伐後、下木なしかつ間伐前の林内相対照度は、無間伐プロット、弱度間伐プロット、中度間伐プロットにおいてそれぞれ2.0%、2.4%、2.1%を示し、低い値ながらも除伐前よりも上昇した。これらの値が、2.0%~2.4%の間で、ほぼ同じ値を示したのに対して、無間伐Aプロット、無間伐Bプロットにおける下木の広葉樹除伐後の林内相対照度は、それぞれ3.5%、3.8%を示し、前者3プロットの値よりも高い値を示した。この違いはおそらく林齢による違いであると思われるが、ともに5%以下であり林内が非常に暗い状態であったことを示していた。

次に、間伐前後の林内相対照度の変化をみると、弱度間伐プロットの林内相対照度は2.4%から19.7%へ、中度間伐プロットの林内相対照度は2.1%から22.2%へと変化し、間伐による林内光環境の大幅な改善がみられた。

最終的に、間伐後の間伐試験地の林内相対照度は、無間伐プロット、無間伐Aプロット、無間伐Bプロット、弱度間伐プロット、中度間伐プロット、強度間伐プロットにおいてそれぞれ2.0%、3.5%、3.8%、19.7%、22.2%、34.0%となり、間伐強度が高くなるにつれて間伐後の林内相対照度が上昇していることが分かる。

間伐前後の天空率は、弱度間伐プロットにおいて18.1%から23.7%へ、中度間伐プロットにおいて24.9%から23.8%へと変化した。最終的に、間伐後の全プロットの天空率は、無間伐プロット、中度間伐プロット、弱度間伐プロット、無間伐Aプロット、無間伐Bプロット、強度間伐プロットの順に21.4%、23.7%、23.8%、25.9%、26.8%、28.8%を示し、林内相対照度に関する結果とは大きく異なるものであった。図6に天空率と林内相対照度の関係を示す。間伐を実施したプロットにおいては、天空率と林内相対照度はほぼ一致していたが、無間伐のプロットでは、林内相対照度に比べて天空率がかなり高くなっていた。この結果は、天空率と林内相対照度がよく一致するという既存の研究結果(Inoue *et al.*, 1996)と矛盾するものである。この原因が、地形の影響によるものだと仮定して地形補正を行ったが、天空率と林内相対照度の関係には、ほとんど変化がみられなかった。しかし、画像の二値化に用いた大津の方法には、2クラス分布の割合が極端に異なる場合にしきい値が大きい方のクラス側に偏るといった性質がある(高木ら, 1993)。このため、開空部分が非常に少ない、すなわち林内相対照度が低い間伐前の林分では、開空部分を過

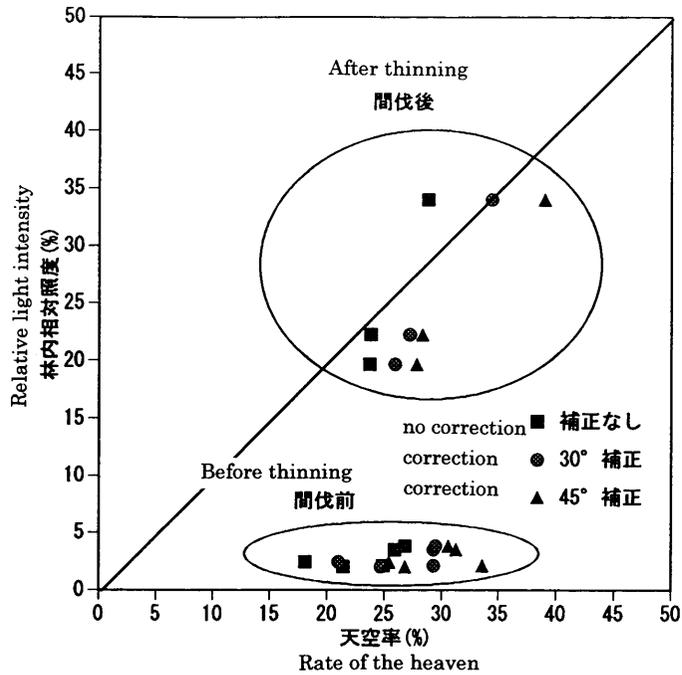


Fig. 6 Relation between the rate of the heaven and the relative light intensity.

図6 天空率と林内相対照度の関係

大に抽出してしまい、天空率が高くなったと考えられた。

したがって、今回の解析では天空率に関して正しい値が得られたとは考えられないので、以後の解析には林内相対照度の値を用いた。

5.3. 林冠動態に基づく林内光環境の予測

前章で求めた林冠表面積と林内相対照度の関係を明らかにした。ただし、スギ、広葉樹の樹冠表面積はヒノキの胸高直径と樹冠表面積との回帰式を用いて求め、各プロットのhaあたり林冠表面積を求めた。本研究では林冠表面積が0の時、林内相対照度が100となるような式(7)を用い、Levenberg-Marquardt法(Marquardt, 1963)によりあてはめた。その結果を図7に示した。今回はデータ数が少ないので暫定的な関係であるが、スギでも同様の関係が得られており、データ数を増やすことでより確かな関係が明らかになると考えられる。

$$y = 100 \exp(-fx^g) \tag{7}$$

ただし、 f, g : 定数

次に、樹幹解析によって得られた樹高成長の時系列データに式(8)のリチャーズ成長関数(Richards, 1959)を当てはめパラメータを求めて今後の樹高成長を予測し、パラボラ樹冠形モデルを用いて間伐後から林冠が閉鎖するまでの林冠動態の推定を行った。

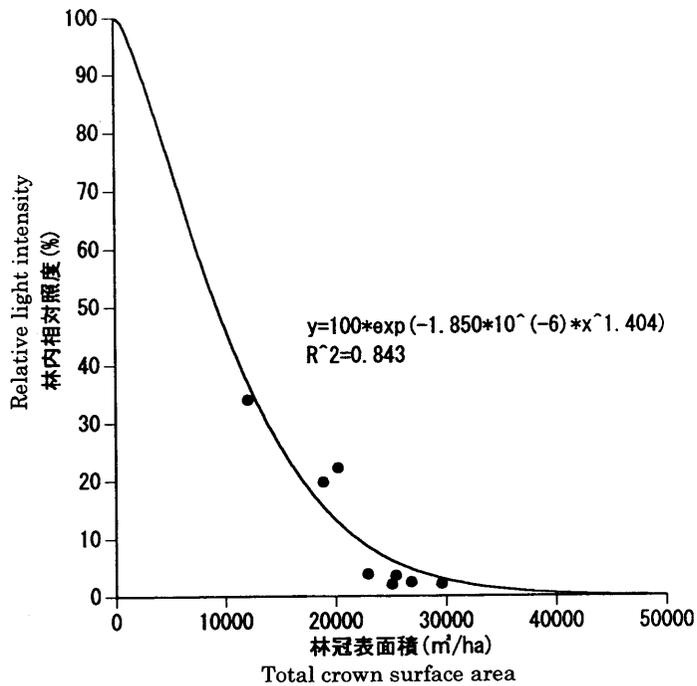


Fig. 7 Relation between the total crown surface area and the relative light intensity.

図7 林冠表面積と林内相対照度の関係

$$h_t = A \{1 - b \exp(-kt)\}^{\frac{1}{1-m}} \quad (8)$$

ただし、 h_t : 樹齢 t における樹高 (m)

A : 樹高の最終到達量を示すパラメータ (m)

b : 樹高の初期値に関するパラメータ

k : 成長速度に関するパラメータ

m : 成長曲線の型を示すパラメータ

t : 樹齢 (年)

間伐後の樹冠の動態の推定は、以下の仮定にしたがって行った。

- 間伐後、林冠が閉鎖するまでの樹高成長量は、式 (8) より求める
- 間伐前後の樹冠拡張係数の値は一定である
- 間伐後、残存木の樹冠直径の平均値が平均樹幹距離に達すると林冠が閉鎖する
- 林冠閉鎖後の樹冠直径は一定で、樹高成長量分だけ樹冠が枯れ上がり、林冠表面積は一定である
- 間伐プロットでの自然枯死による本数密度の減少はないものとする

以上から、林冠表面積の動態予測に基づいて、先に求めた林冠表面積と林内相対照度の関係を用いて、間伐後の林内光環境の動態を予測した。

5.4. 林内光環境の予測結果

間伐後30年の各プロットにおける上層木平均樹高と相対幹距比の変化をそれぞれ図8と図9に示す。無間伐Aプロット、無間伐Bプロットにおいて相対幹距比の落ち込みが早いのは両プロットの林齢が59年であり、他のプロットと比べて若齢であるため、上層木平均樹高の変化が大きかったためである。

さらに間伐後30年の各プロットの林冠表面積の推移を図10に、それに対応する林内相対照度の推移を図11に示す。林冠表面積は経過年数とともに増加し、中度・弱度間伐プロットでは約15年で一定に達しているが、強度間伐プロットでは30年を経過しても閉鎖していないことがわかる。よって中度・弱度間伐プロットでは林内相対照度が約7%程度になったのに対して、強度間伐プロットでは樹冠が閉鎖していないために、間伐後30年を経過しても10%以上の林内相対照度を保っていることが予測された。

5.3の予測方法によって求めた林冠閉鎖時の予測結果を表3に示す。間伐後の林冠が閉鎖するまでの樹高成長量は、弱度間伐プロット、中度間伐プロット、強度間伐プロットにおいて、それぞれ0.9 m, 1.1 m, 2.8 mであり、林冠が閉鎖するまでに要する年数は、それぞれ16年, 15年, 95年と推定された。さらに、弱度間伐プロット、中度間伐プロット、強度間伐プロットの林冠閉鎖時の林冠表面積は、それぞれ26,494m²/ha, 27,117m²/ha, 27,431m²/haであり、そして林冠閉鎖時の林内相対照度は、それぞれ6.3%, 7.8%, 3.9%であった。これらの値は、当試験プロットにおける間伐前の値、すなわち2~4%と比較すると多少高い値であったが、今回の暫定的な関係式を考えると概ね良い予測であったと思われる。

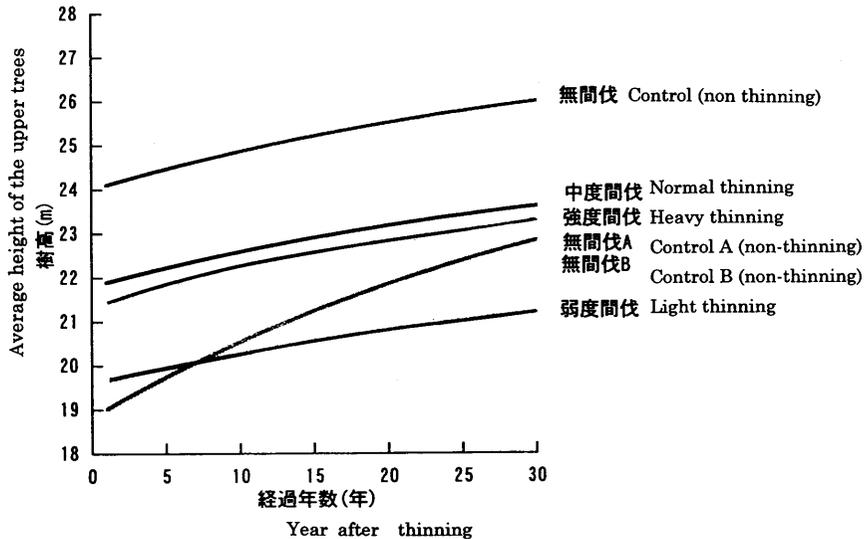


Fig. 8 Predictions of the average height of the upper trees after thinning.

図8 間伐後の上層木平均樹高の予測

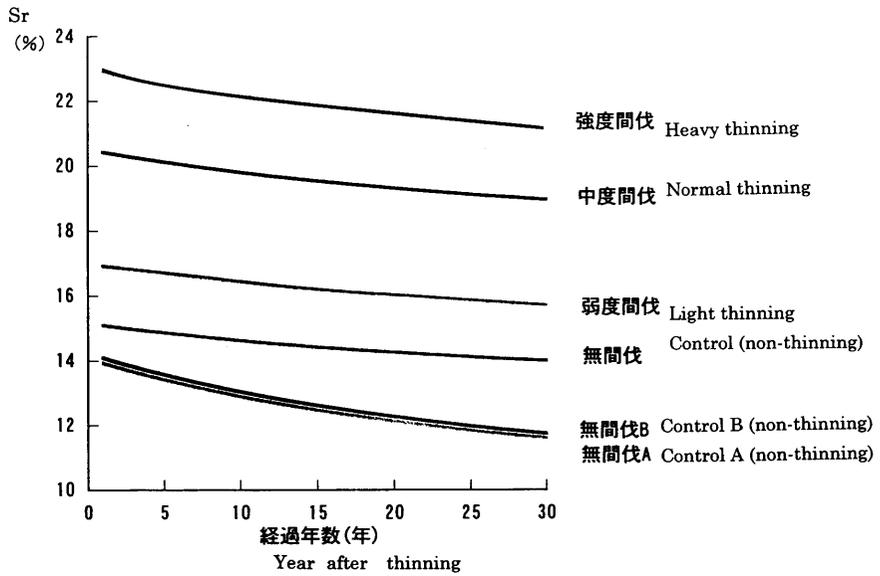


Fig. 9 Predictions of the relative rate of the average distance between stems to average height of upper trees after thinning.

図9 間伐後の相対幹距比の予測

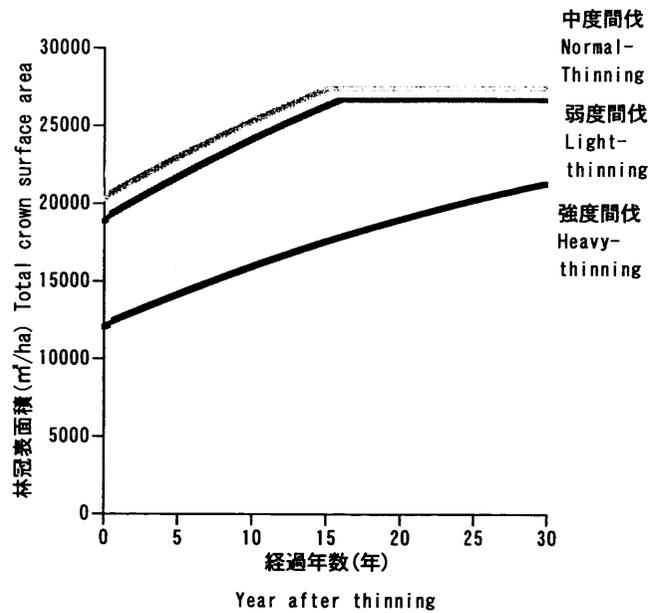


Fig. 10 Predictions of the total surface area after thinning.

図10 間伐後の林冠表面積の経年変化予測

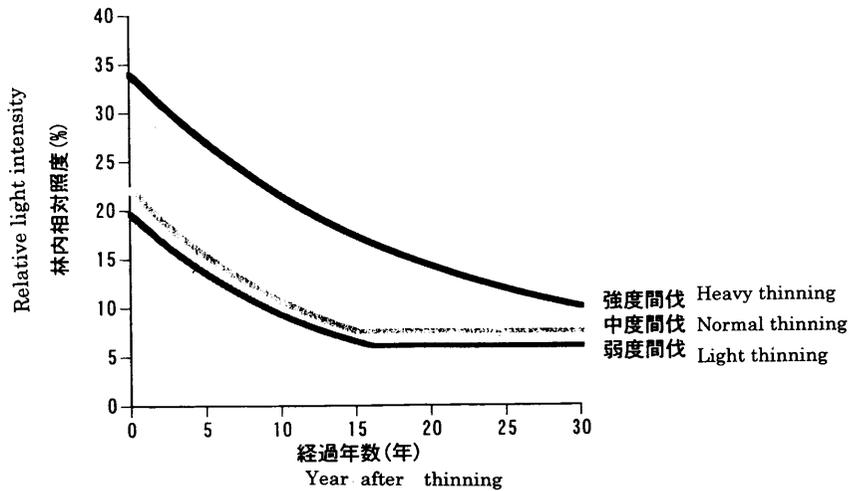


Fig. 11 Predictions of the relative light intensity after thinning.

図 11 間伐後の林内相対照度の予測

表 3 予測結果

Table 3 Results of the prediction.

Plot	Years needed to full density	Height growth to full density(m)	Total crown surface area (m ²)	The relative light intensity (%)
Light	16	0.9	26,494	6.3
Normal	15	1.1	27,117	7.8
Heavy	95	2.8	27,431	3.9
Control			25,117	2.0
ControlA			25,458	3.5
ControlB			22,899	3.8

6. おわりに

本研究では、長伐期施業を目指した目標林分および育林プロセスを示すための基礎資料を収集するために間伐試験地を設定し、間伐前後における林分構造の変化と林内光環境の変化を解析した。

スギの高齢林では、胸高直径と樹冠表面積との間にはほぼ直線の関係が認められることが報告されており（吉田ら，1993）、ヒノキの高齢林においても同様に、胸高直径と樹冠表面積との間に正の相関が認められた。さらに林内相対照度と林冠表面積との間に指数関数的な関係が認められたことから、林内照度は樹冠量の指標である林冠表面積に基づきコントロール可能であることが示唆された。

したがって間伐を実施する際の胸高直径と樹冠表面積の関係が分かれば、間伐木の胸高直径の合計、および林冠表面積と林内相対照度の関係から、林内相対照度を推定すること

が可能であると考えられる。この胸高直径からの林内相対照度の推定は、胸高直径と樹冠表面積の間に一次の相関が常に成り立っていることから、以下の手順により調査労力をあまり必要とせず、簡単に行うことができる。つまり、1) 対象プロットにおいて全林木の胸高直径を測定し、haあたり本数を求める。2) 対象プロット内で小、中、大各レベルの胸高直径と樹冠表面積を数本について測定し、胸高直径と樹冠表面積の回帰を導き出す。3) プロット内における全林木の胸高直径の合計から樹冠表面積の合計、すなわち林冠表面積を求める。4) 間伐を実施する場合、間伐木の胸高直径の合計から林冠表面積の減少量を求め、間伐前後の林冠表面積を求めることによって、林冠表面積と林内相対照度の関係から間伐後の林内相対照度を推定する。また、これとは逆に、目標の林内相対照度にするために必要な間伐木の胸高直径の合計を求めることもできる。したがって、複層林施業のような林内光環境を重視するような施業においては、この胸高直径から林内相対照度を推定する方法を用いることによって、間伐の指針を得ることができると考えられる。

本研究では、林冠表面積から林内光環境を予測できることを示した。井上ら(1996)は、スギとヒノキの二段林において、上木と下木のhaあたり樹冠投影面積の合計から、林床の光環境を予測できることを報告している。これらのような樹冠量を考慮した林内光環境の予測方法では、平均胸高直径と平均樹高、及び本数密度から予測する方法(飯盛ら, 1983)や収量比数から予測する方法(上中ら, 1983; 安藤, 1983b)、及び樹高成長量から予測する方法(河原, 1990)とは異なり、間伐による林内光環境の変化だけでなく、枝打ちによる林内光環境も予測できると考えられる。さらに、樹冠量と直径成長量との間に正の相関があることが知られており(吉田, 1991; 三枝ら, 1996)、樹冠量によって林内光環境と林分の成長の両方を統一的に説明できる可能性を示唆している。

本研究では、間伐の前後で樹冠拡張係数は変化せず、一定に推移すると仮定したが、高齢林では間伐後ギャップが生じることで、樹高の成長量より樹冠直径の成長量の方が勝り、樹冠拡張係数は間伐前に比べて大きくなると思われる。そこで、間伐後の樹冠拡張係数の推移、また林冠表面積と林内相対照度との関係も、より詳細な検討が必要である。しかし、これらに関するデータの蓄積は少ない。特に、今回の対象地のような高齢のヒノキ林に対するデータは、本研究以外では皆無といってよい。今後は、長伐期施業確立のために、本試験地において継続的に調査を行うとともに、他の林分でも情報収集を行う必要があると考えている。

謝 辞

本研究は、九州大学農学部附属演習林における事業の一貫として行ったものであり、現地の踏査、試験地全体の基礎調査ならびに試験地の設定には演習林の教官ならびに職員の方々から有益な援助を頂いた。特に、事務部の矢山哲也専門職員、中井武司掛長、椎葉康喜技官、井上一信技官、壁村勇二技官には踏査の段階から終始この研究に直接関わっていただいた。さらに九州大学農学部林学科第一教室の職員ならびに学生諸君にも多大な援助をいただき、論文のとりまとめの段階で鳥取大学の井上昭夫氏にも有意義なコメントを頂いたことをここに記し、ここから感謝申し上げる。

引用文献

- 安藤 貴 (1968) : 同齢単純林の密度管理に関する生態学的研究. 林試研報 210 : 1-153
- 安藤 貴 (1983a) : 全天空写真による林冠開空度の測定. 林試研報 323 : 4-8
- 安藤 貴 (1983b) : スギ林間伐後の林内の相対照度. 林試研報 323 : 58-59
- 川名 明・片岡寛純 (1992) : 造林学. pp. 200 朝倉書店, 東京
- 九州大学農学部附属演習林 (1998) : 九州大学演習林. pp. 24
- 林 拙郎・高橋洋子 (1997) : 樹形のモデル化について - スギ・ヒノキの場合 -. 日林誌 79 : 222-228
- 林 進 (1990) : 長伐期大径材生産の成立する要件. 林業技術 576 : 16-19
- 今田盛生 (1998) : 「育林プロセス」という概念の明確化. 森林計画学会誌 31 : 85-89
- 飯盛 功・竹下慶子・尾方信夫・上中作次郎 (1983) : 林分構成因子からの林内陽光量推定方法の検討. 林試研報 323 : 81-84
- 井上昭夫・溝上展也・今田盛生 (1996) : 針葉樹二段林における天空率の推定. 日林論 107 : 95-96
- Inoue, A., Okamura, A., Mizoue, N., Teraoka, Y. and Imada, M., (1996) : Estimation of Relative Illuminance in Forests using Hemispherical Photographs. J. For. Plann. 2 : 125-129
- 河原輝彦 (1990) : 複層林を仕立てるための林内照度の管理. 林業技術 584 : 17-20
- 熊崎 実 (1985) : 転換期の林業経営. pp. 79 林業技術科学振興所, 東京
- Marquardt, D. W. (1963) : An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameter., J. of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 2 : 431-441
- 日本建築学会 (1982) : 建築環境工学実験用教材 I. pp. 149 丸善, 東京
- 西沢正久 (1972) : 森林測定. pp. 348 農林出版, 東京
- 岡村篤憲 (1994) : 開空度と林分構造の関係解析. pp. 61 九大卒論
- 岡村篤憲・増谷利博・今田盛生 (1995) : 間伐による林内光環境の変化. 九大演報 72 : 151-158
- 大津展之 (1980) : 判別および最小 2 乗基準に基づく自動しきい値選定法. 電子通信学会論文誌 Vol. J 63-D No.4 : 349-356
- 大原寛信 (1978) : 樹高曲線に関する研究. pp. 164 九大卒論
- Richards, F.J. (1959) : A flexible growth function for empirical use. J. Exp. Bot. 10 : 290-300
- 林野庁計画課 (1970) : 立木幹材積表. pp. 319. 日本林業調査会, 東京
- 三枝康弘・國崎貴嗣・溝上展也・寺岡行雄・今田盛生 (1996) : 森林情報システムの整備 - 樹冠動態を考慮したスギ・ヒノキ人工林の成長モデル -. 日林論 107 : 99-100
- 高木幹雄・下田陽久 (1993) : 画像解析ハンドブック. pp. 775 東京大学出版会, 東京
- 竹下敬司 (1985) : パラボラ樹冠形モデル化によるスギ林の構造解析. 九大演報 55, 55-104
- 玉井重信・四手井綱英 (1972) : 林内の照度 (II). 京大演報 44 : 100-109
- 上中作次郎・尾方信夫・安藤 貴 (1983) : ヒノキ林間伐後の林内の相対照度. 林試研報 323 : 55-57
- 吉田茂二郎 (1991) : 樹冠によるスギ単純同齢林の定期直径成長量の推定. 日林誌 73 : 29-33
- 吉田茂二郎・石井 弘 (1993) : スギ高齢林の樹冠構造について (II). 鹿大農学部学術報告 43 : 87-95
- 早稲田収 (1983) : 開空度の測定とその光環境指標としての応用. 林試研報 323 : 9-13

(1999年11月4日受付; 2000年2月18日受理)

Summary

A thinning experiment is being conducted in the old *Chamaecyparis obtusa* plantation forest. The thinning intensity is based on Sr, which is the percentage of the average distance between stems to the average height of upper trees. The experimental plots established are control (non-thinning; Sr 15%), light (Sr 17%), normal (Sr 20%) and heavy (Sr 23%) thinning. The relative light intensity are measured in each plot before and after thinning, and the changes of relative light intensity, stand structures and crown structures were recorded. In particular, we analyzed the relation between the total crown surface area per ha and the relative light intensity. Furthermore, we predicted the total crown surface area and the relative light intensity after thinning based on the tree height growth data by stem analysis and the crown model. This study revealed that the total crown surface area is the one factor that controls the relative light intensity in the stand.

Key words : *Chamaecyparis obtusa*, old plantation forest, relative light intensity, thinning