

## パラボラ樹冠形モデルによるスギ林の構造解析

竹下, 敬司

<https://doi.org/10.15017/10812>

---

出版情報 : 九州大学農学部演習林報告. 55, pp.55-104, 1985-06-25. 九州大学農学部附属演習林  
バージョン :  
権利関係 :

# パラボラ樹冠形モデルによるスギ林の構造解析

竹 下 敬 司

Construction Analysis of Sugi Forest (*Cryptomeria japonica*  
D. Don) by Parabolic Modeling of Crown Form

Keiji TAKESHITA

## 要 約

林木は樹冠の同化作用によって生産され、他方、林木が立つ土壤への有機物（落葉枝）の供給や林床の下草の生産も林冠の構成に左右されるなど、樹冠の集団としての林冠構造が森林の生産性と保全性との両面を支配する共通要因となっていると考えられる。そこで林冠の構成単位としての樹冠をモデル化し、さらにそれらの集団としての林冠をもモデルとしてとらえて、林木の生長と森林の構成要素との関係を求めることを意図した。モデルの検証資料として低密度施業としての飼肥スギ林、中庸施業としての熊本地方スギ林、や高密度の天城地方スギ林等、3地方の収穫表を用いて、樹冠（林冠）と林分材積、主林木の平均幹形との関係、全同化と純同化の関係、林冠量の林齢（樹高）と密度変化に伴う推移と落葉量、林冠被覆率等との関係を検討したところ、非常に明確な好結果を得たので報告する。

### (1) パラボラ樹冠形

スギの樹冠形を写真計測や測量によって調査検討したところ、樹冠の外形は梢頭の尖鋭部を除くとパラボラに近似していることが見出された。樹冠頂を原点として頂点からの長さを  $x$ 、樹冠半径を  $y$  として樹冠の縦断形を示すと次式で示される。

$$y = \alpha x^{0.5}. \quad (1.2)$$

ここで  $\alpha$ : 樹冠拡長係数。

樹冠を構成する葉片は、陽光をうけて同化作用を行っているわけであるが、陽光  $I$  の入射方向と樹冠の主軸  $x$  とが一致するものとする、樹冠表面が受ける光度  $I_0$  は次式によって与えられる。

$$I_0 = I \sin\{\tan^{-1}(0.5 \alpha x^{-0.5})\}. \quad (1.3)$$

一方、ある期間に生長したパラボラ樹冠の生長量は、冠頂部での伸びを  $h'$  とすると、現在のパラボラから、生長前のパラボラを  $h'$  だけずらした間の体積となるはずである。このパラボラとパラボラとの半径方向の厚さは、

$$Th = \sqrt{x+h'} - \sqrt{x},$$

で示されることになるが、この樹冠厚  $Th$  と受光光度  $I_0$  との間には密接な比例関係が存在していることが見出された。この結果、パラボラモデルでは、樹冠各部の側方生長は受光量に比例していること、樹冠頂で深さ ( $h$ : m) に相当するパラボラ面の透過光量は、

同値であることが推察され、このモデルが、光に関する物理的条件を一応満足していることが認められた。

### (2) 樹冠長の推定

林木では樹冠が閉鎖して、林内の受光量が不足するようになると下枝が枯れ上がり、生葉で構成された樹冠頂は樹高よりも短くなる。この場合の生葉樹冠長を  $Cl$ 、生葉樹冠の底部半径を  $Cr$  とすると、 $Cr$  は次式によって示される。

$$Cr = \alpha \cdot Cl^{0.5}$$

ここで、樹冠長  $Cl$  がどのような森林構成下で、どのように変化しているかを把握する目的で、樹高 ( $H$ : m) と密度指標値としての相対幹距 ( $Sr$ ) が幅広く変化している無間伐林や、間伐・枝打ち後に再閉鎖して下枝枯れが見える林分を対象に選んで、生葉樹冠長 ( $Cl$ : m) を調査実測した。なお相対幹距は次式によって規定される。

$$Sr = 10^3 / \sqrt{N \cdot H^2}.$$

ここで  $N$ : 立木密度。

結果は、図2-1の  $H-Cl$  関係図に示すとおりであるが、グラフ上の各測点を  $Sr$  値で区分し、それに対応する  $Sr$  階ごとの規則的な曲線によって分級表示した曲線群グラフとなっている。この間の解析を行うにあたっては、若干の試行錯誤を行いながら、次の条件下で関係が成立していることを見出し、グラフ上での規則性を求めることにした。

- $Sr = 0.375$  における孤立木環境となり  $Cl = H$
- $Sr = 0$  で  $Cl = 0$
- $0 > Sr > 0.375$  で  $Cl > H$  のべき指数関係が成立
- べき指数関係は  $0 < H < 1$  の間で  $Cl > H$  となるので  $H+1$  と調整
- 指数値と係数値とは共に  $Sr$  の関数である。

結果として次の関係式が求められた。

$$Cl = (2.125 - 3Sr) \left\{ (H+1) \left( \frac{Sr}{0.375} \right)^{0.7} - 1 \right\} \quad (2.3)$$

### (3) 樹冠拡張係数 $\alpha$ の算定

樹冠の長さが同一であっても、立木密度が高い林分では樹冠径が小さく、逆に低密度となると拡張する。スギの同齢林の場合は、単木樹冠の占有面積の合計が、林冠の占有面積と一致するとみてよいので、林冠の被覆面積率  $C_c$  を規定すると、立木密度  $N$  との対応で、単木の樹冠面積が定まり、さらには樹冠拡張係数  $\alpha$  を算定することが出来る。

$$\alpha = \sqrt{(C_c \times 10^4) / (N \cdot \pi \cdot Cl)} = \sqrt{(C_c \cdot Sr \cdot H^2) / (\pi \cdot Cl)} \quad (2.7)$$

通常のスギ林分の林冠被覆面積率  $C_c$  は、樹高(林齢)の変化に伴って、次のように変化するものとして、上式の  $\alpha$  の算定を行った。

- 林冠閉鎖前の幼齢林:

$$H \leq 5.5 \text{ の場合 } C_c = 0.8 (H + 5.5)^2,$$

$$5.5 \leq H \leq 7.5, \quad C_c = 0.8 + (H - 5.5) + 10.$$

- 完全閉鎖林:

$$7.5 \leq H \leq 12.5, \quad C_c = 1.0.$$

- 有間隙ウツ閉林(高木林):

12.  $5 \leq H$ , 風揺れによる隣接樹冠との摩擦を回避するためか, 空隙が増加し, 樹冠被覆率は樹高と共に漸減する.

$$C_c = 1 - (H - 12.5) \times 10^{-2} .$$

○ 3等地 (地位指数  $\leq 13$  m):

地下部での根系による水分競争が, 樹冠の光競争に優先するためか, 林冠閉鎖率  $C'_c$  が低い  $C'_c = 0.9 C_c$ .

○ 風速が強い林分でも 3 等地の傾向がある.

上記の条件下で算出された樹冠拡張係数  $\alpha$  と樹高・相対幹距との関係は, 図 2-4 に示すとおりである.

(4) 材積生産に關与する樹冠体積

樹冠の見掛け上の体積  $Cv_i'$  は  $x$  軸を中心としたパラボラ ( $y = \alpha x^{0.5}$ ) の回転体として与えられる.

$$Cv_i' = 0.5 \pi \alpha^2 Cl^2 \tag{2.10}$$

このうち, 物質生産に關与する陽樹冠は, 樹冠の表層部を構成するものとし, 同化への寄与率の低い内部樹冠を差し引けば, 表層部樹冠の体積が算出される. 内部樹冠の形状も陽樹冠の外形と同じパラボラであると考えられるので, 表層樹冠の体積  $Cv$  は, 外形のパラボラ体積から, 頂部で  $h'$  だけ下にズラした内部冠体積を差引いたものとみてよい.

$$Cv = 0.5 \pi \alpha^2 \{Cl^2 - (Cl - h')^2\} . \tag{2.11}$$

$i$  年生林分の材積の連年生長量を  $v_i$ , 立木密度を  $N_i$ , 標準木の樹冠体積, 樹冠長, 樹冠拡張係数をそれぞれ  $Cv_i, Cl_i, \alpha_i$  とすると,  $j$  年生の林分材積  $V_j$  は次式によって示されることになる.

$$V_j = \sum_{i=0}^{j-1} v_i = K \sum_{i=0}^{j-1} N_i \cdot Cv_i = 0.5 K \pi \sum_{i=0}^{j-1} N_i \alpha_i^2 \{Cl_i^2 - (Cl_i - h')^2\} . \tag{3.0}$$

ここで,  $K$  は材積変換係数.

(5) 収穫表による林分材積の検証

低密度施業で知られる飢肥地方, 中庸密度施業の熊本地方, やや高密度施業の天城地方の各スギ林の収穫表を用いて, 疎密施業 (地方) 別, 地位別の林分材積の齡級変化を (3.0) 式によって検討することにした.

a)  $h' = 1.0$  m の場合

光の樹冠透過は, 地位や林齡にかかわらず一定条件の深さにまで達するものと考え (3.0) 式において,  $h' = 1$  m に相当する表層樹冠体積が物質生産に比例する量と考えた.

$$Cv_i = 0.5 \pi \alpha_i^2 \{Cl_i^2 - (Cl_i - 1)^2\} .$$

上式によって求められた  $Cv_i$  をもとに, 林冠体積の  $j$  年間の積算値  $\sum N_i \cdot Cv_i$  を求め, これと  $j$  年生林分の主林木材積  $V_j$  との対比を行った. 結果は図 3-2 に示ように, 林冠量の増大と共に材積も増加するが, 漸次頭打ちの様相を呈する曲線関係となり, しかも施業差と地位差とによってそれぞれ独立した曲線関係となることが見出された. 即ち (3.0) 式において, 材積変換係数  $K$  が, 地位, 施業, 林齡 (樹高) によって大幅に変動する結

果となっている。

b)  $h' = \Delta h$  ( $\Delta h$ : 樹高の年生長量) の場合

材積に関する物質生産が新葉樹冠体積に比例するものと考え、 $h'$  のかわりに樹高の年生長量に相当する  $\Delta h$  を用いて新葉樹冠層を求めることにした。

$$Cv_i = 0.5 \pi \alpha_i^2 \{Cl_i^2 - (Cl_i - \Delta h_i)^2\}.$$

上式で規定された  $Cv_i$  を用いて、林冠の  $j$  年間の積算値  $\sum N_j Cv_j$  を算出し、これと  $j$  年生の主林木材積  $V_j$  との対比を行った。結果は、図 3-3 に示すとおりである。グラフから明らかなように、 $h' = 1.0$  の場合と異なり、施業差、地位差、林齢差とは無関係に一本の直線式で示される結果となった。(m単位)

$$V_j = 4.29 \sum_0^j N_j Cv_j \times 10^{-3} + 8.32. \quad (3.8)$$

$$(R = 0.995 \quad Se = 18.6 \text{ m}^3)$$

この関係は、近似的に原点を通る直線式と考えられ、

$$V_j = 4.2 \sum_0^j N_j Cv_j \times 10^{-3}. \quad (3.9)$$

材積変換係数  $K$  は  $4.2 \times 10^{-3}$  の定数として求められたことになる。

この結果は、材積が専ら新葉樹冠体積に比例する着葉量によって生産され、新葉量は、樹高生長量  $\Delta h$  (即ち地位) と樹冠長  $Cl$ 、ついで樹冠拡張係数  $\alpha$  によって規制されていることを示唆している。同時にこの樹冠モデルの適性を裏付けた結果となっている。

#### (6) 樹冠形 (胸高直径) の検証

樹冠頂から  $x$  の点における厚さ  $dx$  の樹冠量 (かりに見掛け上の体積で示す) で生産される材積物質を  $K \cdot \pi \cdot \alpha^2 \cdot x \cdot dx$  とすると、この物質が  $x$  よりも下の材幹長  $(H-x)$  に平等に配分されることが、パイプモデルによって説かれている。いま、樹冠長が樹高等しい場合を仮定して、梢頭から  $x$  の位置の材幹の年断面積生長量  $g$  を求めると、

$$g = K' \pi \alpha^2 \int x(H-x)^{-1} dx \quad (4.1)$$

$$= K' \pi \alpha^2 \{H \ln H - x - H \ln(H-x)\}. \quad (4.2)$$

しかしながら先述のように材積生産は、樹冠長  $Cl$  の樹冠において垂直厚  $\Delta h$  の新葉樹冠体積に比例するので、上式は修正されて

$$g = K \pi \alpha^2 \{H \ln H - (H - \Delta h) \ln(H - \Delta h) - \Delta h - \Delta h \ln(H - x)\}. \quad (4.3)$$

ただし、 $x > Cl$  の場合は、 $x = Cl$

上式を、 $g = K \pi \alpha^2 C(x)$  とおく

ここで、変換係数  $K$  を材積変換係数から  $K = 42$  とし、 $j$  年生木の  $x$  の位置における断面積  $G_j$  と直径  $D_j$  (cm) を求めると

$$G_j = \sum_0^j g_i = 42 \pi \sum_0^j \alpha_i^2 C(x)_i, \quad D_j = 2\sqrt{G_j/\pi}. \quad (4.5)$$

上記の (4.5) 式の右辺を、収穫表の数値をもとに算出し、胸高直径を推定したとこ

る、いずれの地方、地位、林齢においても、推定値が実測値を下回る結果となって、高い相関性が得られなかった。

しかしながら、 $\alpha$  を目標年の  $\alpha_j$  に固定し

$$G_j = K \pi \alpha_j^2 \sum_0^j C(x)_i,$$

として、胸高直径を推定したところ

$$D_{1,2} = 0.981 \hat{D}_{1,2} - 0.153 \\ (R=0.995 \quad Se=1.24 \text{ cm})$$

の高い直線相関が得られた。このことは  $j$  年生の標準木は、それ以前の林齢では優勢木であり、早くから  $\alpha_j$  の樹冠拡張係数を有していたことに意味している。つまり密度の影響が小さかったことを示唆している。(あるいは  $(\alpha_j/\alpha_i)^{0.5}$  倍相当、CI が長かった)

なお、解析上の仮定条件を検討したところ、林木の生長は、生物的な素質の影響が大きい  $\alpha_j$  と密度の影響が大きい  $\alpha_i$  の両方によって規定され、 $j$  年生の標準木がたどる  $n$  年間の断面積経過は次式によって示されるものと考えられた。

$$G_n = K \pi \sum_0^j (a \alpha_i + b \alpha_j)^2 \cdot C(x)_i + K \pi \sum_{i=j}^{i=n} \alpha_i^2 \cdot C(x)_i. \quad (4.9)$$

ここで  $a+b=1, a < b, j < n, K \doteq 46 > 42$

上記の式によって、樹高生長曲線さえ与えられておれば、任意の密度管理、林齢での樹幹形の推定が可能となるはずである。

#### (7) 呼吸消費と純同化、同化能率

冠頂部で 1 m 垂直厚に相当する樹冠体積が全同化量に比例し、また、冠頂部で樹高生長量  $\Delta h$  に相当する新葉樹冠体積が純同化に比例するものと仮定して検討を加えたところ、呼吸消費量が樹高(生体体積)の増加に伴って増加し、また、同化能率が、地位の上下に対応して変化することが想定された。

#### (8) 林冠体積の林齢推移と落葉枝及び下草の生育環境

5年分の着葉林冠量を基準にして林冠体積の林齢(樹高)に伴う推移を検討したところ、閉鎖初期に極大値を示し、その後は一定ないし漸減する状況が認められ、従来の研究例と一致した。

また、ある年に生育された新葉林冠は、環境に応じて7~3年(5年)で枯死するものとして、落葉量を推定したところ、閉鎖前と高齢時にその量が少ないことが問題視された。また、間伐・枝打ちによる樹冠拡張制御と樹冠長制御を念頭において、その施業方向と林冠被覆率との関係を求め、林分材積の生長に及ぼす影響と、下草生育に及ぼす影響とを検討した。

#### (9) 密度管理と相対幹距

密度管理を異にする飭肥・熊本・天城地方について樹高生長に伴う相対幹距の推移を検討したところ、樹高が 10 m 以上になると各地とも相対幹距値が夫々一定値で維持されている傾向が認められた。この点密度管上の簡易指針として相対幹距の利用が考えられる。

列状間伐等に見られるように樹冠空間が方向的に制約されるとき、広い空間方向への拡張が抑止されて林分閉鎖が遅れる傾向が見出された(下草陽光のためには好都合)。こ

のような場合は単なる相対幹距だけでは林木空間が表示しえず、林冠モデル上の問題点と考えられる。

## 目 次

要約	5. 呼吸消費と樹冠構成
1. 考え方	6. 林分樹冠量の推移と水土保全
2. 森林の構成状況と樹冠長・樹冠径	7. 結論
3. 収穫表の林分材積によるモデルの検証	謝辞
4. パラボラ樹冠形モデルによる樹幹形と くに胸高直径の推定	引用文献

## 1. 考 え 方

森林施業の目標は、従来、経済林の育成を主体にして推移してきたのであるが、最近はこれに加えて、水源かん養等の公益性機能の発揮を目標としたものが、強く要請されるようになってきている。そして、この場合、問題になるのは、経済林施業と公益林施業とのどの点が共通し、どの点が相違するかであり、それに伴う経費と金銭的効用の差違をも明確にすることが必要となってきている。

このような評価を行うためには、何か共通的な要因で、それぞれを定量的に捉えて判断することが便利と考えられたのであるが、この施業上の共通要因として樹冠をとりあげることが出来そうである。

水源かん養のためには「落葉被覆による雨滴緩衝」「落葉枝を生活の糧とする生物活動による土壌孔隙の造成・維持」「下草による落葉の均等化」「根系による土層保持」が必要であり、林床における落葉と下草・根系が要因としてとりあげられる。しかしながら、落葉量は樹冠量に、下草は樹冠群の被覆率に、根系は樹冠の発達度合に関連して、いずれも森林の樹冠構成と強い結びつきを有している。

一方、樹冠は、樹体を形成するのに必要な炭酸同化作用が行われる器官の集団であり、樹冠の構成の如何によって経済資源としての林木の生長が左右されている。

つまり、水土保全のためにあるべき森林構成と、経済性のための森林構成の接点は、樹冠と、それらの集団としての林冠であり、林冠構成によって、森林の持つ多面的機能発揮の適否が、定量的に判断されるものと考えられそうである。

そこで、本報告では、林冠を樹冠を単位とする集団と考え、単位樹冠形を定量的にモデル化することによって、林冠構成を定量化することにした。まず、林冠（樹冠）量と材積生長との関係を求め、他方で林冠（樹冠）と落葉量、あるいは下草生育との関係を求めておけば、林冠構成を媒介として、木材生産と公益的機能とを同一土俵上で検討出来るようになるものと考えたからである。

対象樹種としては、樹冠形が最も明瞭で、しかも、わが国の人工林としては最も重要なスギを選び、調査検討を進めることにした。

1.1. 樹冠形のモデル化

スギの樹冠形については、最近若干の検討例があり、たとえば、樹冠の上～中部は、途中が外側にふくらんだ円錐状をなす陽樹冠であり、下部（隣接樹冠との接触部）は円筒状の陰樹冠となって、異なる2つの部分で構成されていること（梶原, 1983 a）（橋本ら, 1983）等が考えられている。

筆者はさきに清水ら（1984）と共に側方写真とトランシット測量によって樹冠を測定し、形状表示にあたっては陰・陽の不連続区分を避けて、連続的かつ単純な数式モデルを念頭において検討したのであるが、梢頭の尖形部分（円錐印象を与えている）を無視すると、概括的には、図1-1に示すようなパラボラ状の形態をとることが見出された。即ち樹冠の縦断形は大略次式によって示される。

$$y = \alpha x^\beta \tag{1.1}$$

ここで、 $y$ : 樹冠半径,  
 $x$ : 樹冠頂からの距離

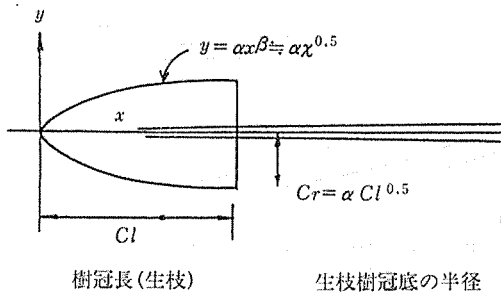


Fig. 1-1 Schematic profile of crown  
 図1-1 樹冠形の縦断形模式図

清水ら（1984）との報告では、樹冠形を出来るだけ忠実に表現することを第一に考え、中庸から、やや密生傾向の林分の樹冠を調査して、係数  $\alpha$  と指数  $\beta$  について検討したのであるが、その結果、 $\alpha$  と  $\beta$  とは共に立木密度と林齢との影響を受けていることが見出された。しかしながら、今回引続き、低密度の林分等を調査して検討したところ、係数  $\alpha$  の立木密度と樹高（林齢）による変化が、 $\beta$  にくらべて、はるかに大きいことが見出され、

一方、 $\beta$  は大略0.5前後の数値をとることが認められた。

即ち、 $\alpha$  の変動域が大きいものに対して、 $\beta$  の変化は極めて小さく、しかも、大略  $\beta \approx 0.5$  が成立するので、数式の演算上の便宜さをも考慮して、この報告では  $\beta$  の値を0.5に固定して、式を表現することにした。

$$y = \alpha x^{0.5} \tag{1.2}$$

ここで、 $\alpha$  は、樹高と立木密度とによって変化する樹冠拡張係数と考えることにする。

1.2. パラボラ樹冠の内部構成と光条件

樹木は樹冠を構成する葉身に光を受けて炭酸同化を行い、物質生産を行っている。そして、一本の樹木個体の生産量は、その樹木が持つ着葉量に比例するものと考えられている。この意味で、樹幹の生長と樹冠との対応を検討するためには、実質的な着葉量を把握しておくことが必要であるが、ここでは、樹冠の各部位での着葉密度が不明なため、樹冠



の見掛け上の体積にのみ着目して検討を進めることにした。つまり、この報告のモデルでは着葉密度が樹冠内での部位、林齢、地位等の変化にかかわらず一定値を示し、着葉量が樹冠の体積に比例するものと仮定して検討を加えることにした。

樹冠の上部・下部あるいは表層部・内部等、各部位における葉身の活力は、そこに供給される平均的光量に比例し、光環境が同一であれば活力も同一であると考えことにする。具体的には、各部位の葉の同化能力と葉の生産量は、その部位の環境要因としての光の量に比例し、また逆に、樹冠内部での葉の枯死現象は、そこに到達する光量が一定限界値以下になる部位で発現する等のことが考えられる。この仮定が正しいものとする、樹冠の任意の点に到達する光量が、幾何学的に決定されれば、その点の同化能力、その点の生長量、あるいは逆の枯死限界等も幾何学的に決定されることになるはずである。

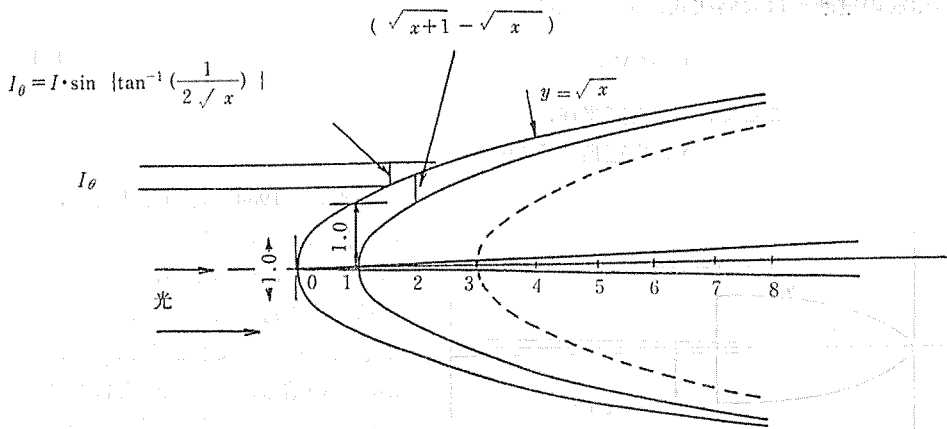


Fig. 1-2 Luminous intensity  $I_0$  on parabolic crown surface and horizontal thickness  $Th$  of parabolic crown layer  $Th \propto I_0$

図 1-2 樹冠表面の単位面積当りの受光、光束量と頂部で 1 m 厚の表層樹冠層の水平断面での厚さ

ところで、前記のようにスギの樹冠形をパラボラで表現するものとする、樹冠の生長量は、新たなパラボラ面から元のパラボラ面を差引いた量になるはずであり、側方生長量（新生樹冠の厚さ）等は、計算によって求めることが出来る。一方、光の入射方向を決定すれば、パラボラ面上の任意の点における光量も計算出来るはずであり、このように計算で、求められた同一の点での樹冠厚と受光量とが比例関係にあれば、パラボラ樹冠モデルが、物理的にも矛盾のないものであることが、保証されるはずである。以下検討を進めたい。

いま、問題を単純化するために図 1-2 に示すように、光度  $I$  の光束が樹冠の直上部から入射するものとし、これの受光条件を樹冠の 2 次元縦断面で検討することにした。

樹冠の表面は入射光に対して、パラボラの曲線形に対応して傾斜しているが、この  $x$  軸（光の入射方向）に対する角度を  $\theta$  とすると、その部分の樹冠上の単位面積あたりの受光量は、光度  $I$  より小さいものとなり、次式によって示されることになる。

$$I_0 = I \sin \theta \quad (I: \text{入射光度})$$

樹冠形が  $y = x^{0.5}$  で示されるものとする、この樹冠面の傾斜  $\theta$  は

$$\theta = \tan^{-1}(dy/dx) = \tan^{-1}(0.5x^{-0.5}),$$

$$\therefore I_0 = I \sin \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{1}{2\sqrt{x}} \right) \right\}. \tag{1.3}$$

ところで、上記の関係とは別に  $y = x^{0.5}$  の樹冠を考え、この樹冠が樹冠長で  $\Delta x$  だけ伸長したものとすると、新生樹冠  $y'$  は同形のパラボラとなり、

$$y' = (x + \Delta x)^{0.5}.$$

新樹冠面  $y'$  と、旧樹冠面  $y$  との  $y$  軸方向における差（樹冠の水平断面での厚さ）を  $Th$  とすると

$$Th = y' - y = (x + \Delta x)^{0.5} - x^{0.5} \tag{1.4}$$

ここで、 $y$  面に達する乱反射光を含む光量  $I_0'$  が、(1.3) 式で規定した  $I_0$  に比例するものと考えられるので、 $Th$  と  $I_0'$  との間には比例関係が見出されることが期待される。

ここで (1.4) 式をさらに単純化して、 $\Delta x = 1$  の場合（新樹冠と旧樹冠との樹冠長差が 1 m）の新樹冠厚  $Th_1$  を求めると

$$Th_1 = \sqrt{x+1} - \sqrt{x}. \tag{1.5}$$

樹冠厚（樹冠径方向）と光量との関係を検討する意味で、(1.3) 式と (1.5) 式に、同一数値を代入して得られる数値を列記してみると、表 1-1 のような結果が得られる。

表 1-1 は、厳密な入射光、透過光と樹冠厚の関係を対比したものではないが、同一位相における光量と樹冠厚とが極めて類似した数値を示しており、両者の関係が非常に高精度で、比例関係にあることを裏付けている。

このような密接な関係は、新葉樹冠の上方あるいは側方への生長は、樹冠表面の受光量に比例していることがうかがわれ、また、逆に、樹冠内部に層状に分布する元のパラボラ樹冠面上の受光量は部位の上下にかかわらず同値であると考えられる。パラボラ樹冠形では現在の樹冠形と過去の樹冠形との差、これによって規定される樹冠層が光環境的に同一条件であると考えられるわけである。

表 1-1 樹冠形を  $y = x^{0.5}$  とした場合の、樹冠の単位表面積あたりの受光量比  $\sin \{ \tan^{-1} (1/2\sqrt{x}) \}$  と、樹冠頂部で 1 m 厚に相当する表層樹冠の厚さとの関係、密接な比例関係が認められる。

Table 1-1 Specific luminous intensity on parabolic crown surface [ $I_0 = I \sin \{ \tan^{-1} (1/2\sqrt{x}) \}$ ] and horizontal thickness of crown layer whose vertical depth ( $Th$ ) is 1.0 m ( $\sqrt{x+1} - \sqrt{x}$ )  $I_0 \propto Th$

$x$	0	1	2	3	4	5	6	7
$\sin \{ \tan^{-1} (1/2\sqrt{x}) \}$	1.000	0.447	0.333	0.277	0.242	0.218	0.200	0.186
$(\sqrt{x+1} - \sqrt{x})$	1.000	0.414	0.318	0.268	0.236	0.213	0.196	0.182
$x$	8	9	10	11	13	15	20	25
$\sin \{ \tan^{-1} (1/2\sqrt{x}) \}$	0.174	0.164	0.156	0.149	0.137	0.128	0.111	0.099
$(\sqrt{x+1} - \sqrt{x})$	0.172	0.162	0.154	0.147	0.136	0.127	0.110	0.099

$x$ : distance from crown top       $x$ : 樹冠頂からの長さ

さらには、現在の樹冠形から一定長、たとえば 1 m だけずらした樹冠形との間に存在する樹冠層は、たとえ異なる林分であっても光環境的に同一条件下にあって同化を行っていることが考えられ、その樹冠層の体積によって同化量を指標することも可能になる。また、現在の樹冠形から、ある年数、たとえば一年分の樹高生長分だけずらした樹冠形とみなして容易に計量化することも可能である。

このようにパラボラ樹冠形モデルでは、外側と内側のパラボラ面に境された樹冠層——これをパラボラ樹冠層と呼ぶことにする——によって、光環境を同一にした樹冠量、樹冠の生長量等を把握することが容易になると考えられる。

## 2. 森林の構成状況と樹冠長・樹冠径

生葉で構成された樹冠は、立木密度が小さくて、隣接木との間隔が充分に大きいと、樹冠長が大となり、とくに孤立木的な環境下では樹冠長は最大となって樹幹長と一致する。他方、高密度となって隣接木の樹冠が触れ合うようになると、樹冠は光量不足のために下部から枯れはじめて、生葉樹冠長は短くなる。逆に、間伐によって密度が低下すると、既に枯れた部分が再び生葉樹冠に復帰することは殆どないが、既存の生葉樹冠は相対的に拡張して空間を閉鎖しようとする（拡張係数  $\alpha$  の増大）。また、当然のことながら、樹高が伸長すれば、樹冠長も伸長する。

このように考えてみると、生葉樹冠の大きさは樹高と密度との関数関係にあり、細部的には樹冠長と樹高、密度との関係と、樹冠拡張と樹高、密度との関係とに分けて考えることが出来る。厳密な検討をさらに必要とする問題であるが、樹冠長の方が、樹冠の拡張よりも樹高と密度に優先的に反応する要因であり、変動の幅も大きいと判断されるので、ここでは、まず、樹冠長について検討することにしたい。

なお、後に述べるように、本報告では、樹冠長が、現実調査によって実測した唯一の要因であり、他要因は経験的な仮定条件から推算したものが殆どである。この点、樹幹長と密度、樹高との関係が、本報告の中核課題となっているものとみてよい。

### 2.1. 樹冠長と森林構成

前記のように生葉樹冠長は樹高と密度との関数によって表現されるものと考え、現実の林分について調査を行った。

なお、今回は、現実林分自体の各種データ相互間の解析は行っていないので、調査値の表示は省略する。

調査対象の林分としては、第一に無間伐林、第二には過去に枝打ちや、除・間伐を受けても、現在は再び閉鎖の傾向を示して、枯枝部分を有する林分を選び、しかも、このような状況の林分を出来るだけ幅広い立木密度の変化の中から選択することにした。

#### 2.1.1. 測定方法と整理方法

樹冠長、樹高、立木密度等の測定方法と整理方法とは次のとおりである。

##### (1) 生葉樹冠長

斜面の場合、斜面上方の生葉樹冠長は短かく、斜面下方側の樹冠長が長いので、両者の

平均値を生葉樹冠長とした。また、同一林分でも密度が一様でない場合は、高密度側では樹冠長が短かく、疎密度側で長いので、この場合も平均長を用いることにした。なお、林縁木は調査対象とせず、調査区内にはこれが入らないようにした。

調査区の代表値としては、劣勢木を除く平均樹冠長を以て表示することにした。

(2) 樹高

劣勢木を除く主林木平均樹高で表示する。当初、林齢をも解析要素として考慮したが、林齢要素の意味は樹高で指標される面が大きいと見え、とりあげないことにした。

(3) 密度

立木密度を絶対値のまま用いると、高木林では相対的に高密度の林分でも、絶対本数がそれほど多くないので、一般的には疎な範囲の数値となり、逆に低木林では、実質的には疎な構成を見せる密度でも、絶対値が高いため、密な印象を与える数値となることが多い。そこで、密度条件を単に立木密度で示すだけでなく、樹高と密度との組合せで、密度条件を表示することが必要と考えられた。このような意味からは、立木の平均幹間距離を樹高で割った値、すなわち相対幹距  $Sr$  が有利であると考え、この数値で密度環境を表示することにした。相対幹距は次式によって与えられる。

$$Sr = \sqrt{10^4 / N} \div H \quad (2.1)$$

ここで、 $Sr$ : 相対幹距 (密度指標),  
 $N$ : ha 当りの主副林木の立木本数,  
 $H$ : 主林木の林分平均樹高 (m).

2.1.2. 解析方法と解析結果

前項で測定された生葉樹冠長 ( $Cl$ ) と樹高 ( $H$ ), 相対幹距 ( $Sr$ ) との関係をも、次のような条件下で解析し、関係式を求めることにした。

(1) 孤立木環境

孤立木環境では、陽光が十分に林床にまで入るため、下枝の枯上り現象が発生しない。従って、このような条件下では、生葉樹冠長 ( $Cl$ ) は、樹高 ( $H$ ) と同じ長さになるはずであり、

$$Cl = H,$$

の直線関係にあることになる。このような孤立木環境を生じる最大密度を、現実の林分観察と収集データの推移状況から、試行錯誤的に求め、相対幹距が 0.375 で、 $Cl = H$  が成立するものとした。

(2) 密度が無量大の場合

密度が無量大となると、相対幹距 ( $Sr$ ) は 0 となる。このような条件下では、生葉樹冠長は 0 となり

$$Cl = 0,$$

の直線関係となる。

(3) 通常の林分密度の場合

通常、林分と考えられるものは、相対幹距が「 $0.375 \geq Sr > 0$ 」の範囲内にあるとみてよ

い。ここで、同一相対幹距下にある林分を対象にして、 $Cl$  と  $H$  との関係を求めたところ、両者の関係がベキ指数曲線の関係下にあることが認められた。

(4) 解析結果

林分の生葉樹冠長が樹高と相対幹距との関数によって表されるとした場合、相対幹距 ( $Sr$ ) が 0.375 で  $Cl=H$ ,  $Sr$  が 0 で  $Cl=0$  となり、その間ではベキ指数関係下にあると判断された。この間の関係をグラフ上の図形によって解析したところ、次のような傾向が認められた。

相対幹距の変化に判う曲線形の変化を検討したところ、指数値と係数値が共に相対幹距  $Sr$  の関数となり、0 から 1 までの間の変化を示すものと推察された。なお、ベキ指数関係  $y=x^n$  ( $n \leq 1$ ) は  $0 < x < 1$  の範囲内で  $y > x$  となって矛盾を生じるのでこれを調整することが必要である。

この結果、生葉樹冠長 ( $Cl$ ) と樹高 ( $H$ ) との関係は、次式のような形をとるものと想定される。

$$Cl = f(Sr)(H+1)^{g(Sr)} - 1 \quad (2.2)$$

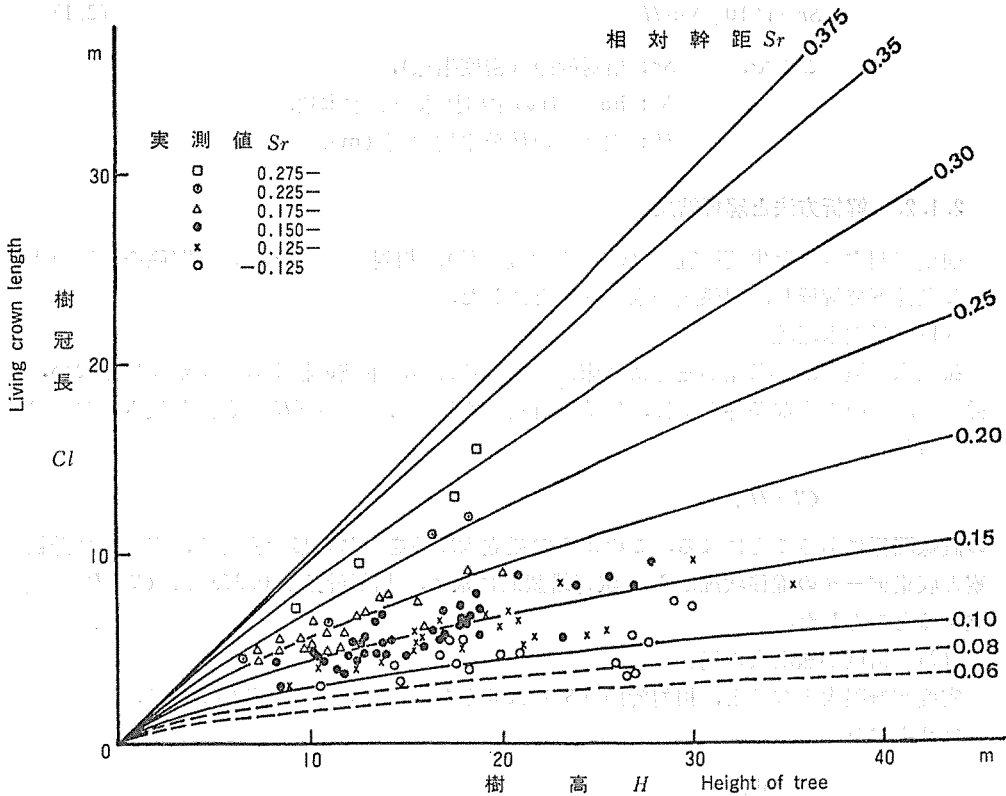


Fig. 2-1 Relations between length of living crown and both height of tree  $H$  and relative density of forest  $Sr$ , while  $Sr=10^2(N \cdot H)^{-0.5}$

$$Cl = (2.125 - 3Sr) \left\{ (H+1)^{\left(\frac{Sr}{0.375}\right)^{0.7}} - 1 \right\}$$

図 2-1 樹高及び相対幹距と樹冠長との関係

ここで,  $f(Sr)$  と  $g(Sr)$  は共に  $Sr$  の関数.

但し  $0 \leq Sr \leq 0.375$ .

このような規則的な条件下でグラフ解析を進めたところ, 図 2-1 に示すような  $Sr$  階別の規則的な曲線関係が得られた. これらの曲線群は, 次の多次元式によって表示される結果となった.

$$Cl = (2.125 - 3Sr) \left\{ (H+1) \left( \frac{Sr}{0.375} \right)^{0.7} - 1 \right\} \quad (2.3)$$

## 2.2. 樹冠拡張係数 ( $\alpha$ ) と森林構成

樹冠の集合体としての林冠は, 立木密度環境が,  $0 < Sr < 0.375$  の範囲内であれば, それぞれの樹冠長と相対幹距に応じてウツ閉するので, その条件下での密度と林冠の被覆面積率が判明しておれば, その単木樹冠の平均被覆面積 (樹冠下部の冠径最大部の水平断面積) を算出することが出来る. 一方, パラボラ樹冠において樹冠長が既知であれば, 拡張係数が 1 の場合の樹冠水平断面積は計算によって求められ, この値を, 前記の単木樹冠の被覆面積と対比すれば, その環境下での樹冠拡張係数を算出することが可能となる. そこで, まず樹高 (林齢) に対応する林冠被覆面積率の変化を推定し, その仮定 (推定) 条件下での樹冠拡張係数を算出することにした.

### (1) 樹高変化に伴う林冠被覆率の変化

林冠は幼齡林時代には樹冠の発達が低いため閉鎖せず, やがて樹冠の生長と共に 100% の被覆状態となる. しかし, 樹高が更に伸長すると劣勢木の衰退や間伐の影響が加わって完全閉鎖が破られる機会が多くなり, 更には, 樹高が大となると風などによる揺れ幅が大となり, 隣接樹冠相互の摩擦が著しくなって, 側葉の伸長が阻害される. この結果, 林冠被覆率は若干低下する. 図 2-2 は調査林分の被覆率を示したものであるが, その傾向を認めることが出来る.

この報告では, 樹高 7.5 m から 12.5 m の範囲内で, 林冠の完全閉鎖が発現するものとし, それ以前の幼齡林時代, その後の壯齡林時代の林冠被覆率 ( $C_c$ ) を次のように設定することにした.

幼齡木未閉鎖林

$$H \leq 5.5 \text{ m}, \quad C_c = 0.8 (H + 5.5)^2, \quad (2.4.1)$$

$$5.5 \text{ m} \leq H \leq 7.5 \text{ m}, \quad C_c = 0.8 + (H - 5.5) \times 10^{-1}, \quad (2.4.2)$$

完全閉鎖林

$$7.5 \text{ m} \leq H \leq 12.5 \text{ m} \quad C_c = 1.0, \quad (2.4.3)$$

間隙閉鎖林 (壯齡~老齡林)

$$12.5 \text{ m} \leq H \quad C_c = 1 - (H - 12.5) \cdot 10^{-2}. \quad (2.4.4)$$

ここで  $C_c$  は林冠被覆面積率.

### (2) 地位に伴う林冠被覆率の修正

地位を, 1 等地から 3 等地の 3 段階に区分した場合, 1 等地, 2 等地の林冠被覆率は,

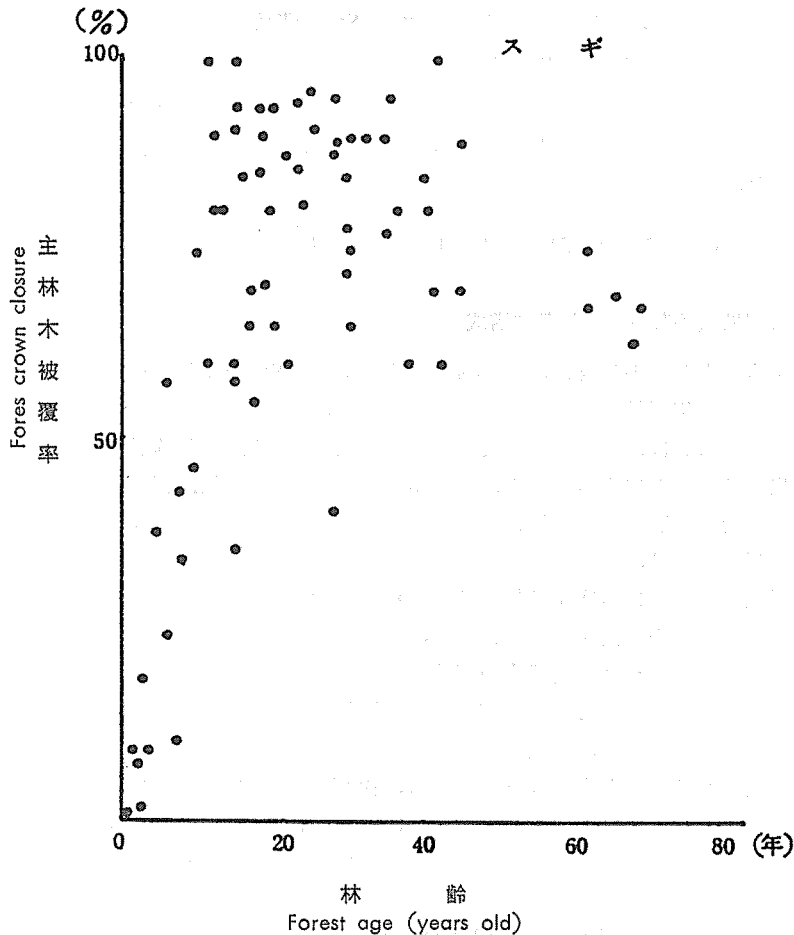


Fig. 2-2 Relation between degree of coverness of forest crown and forest age

図 2-2 主林木被覆率と林齢との関係

上記の (2.4) 式によって表示されるものと考えてよいが、3等地 (40年地位指数が13m以下) になると、地上の陽光に対する林木間の競争よりも、地中における水分競争が優先するためか、林冠が最も最大閉鎖期でも100%に達しない。ここでは、地位3等地の林冠被覆率  $C'_c$  が、上・中各地の同樹高林の  $C_c$  の90%であると仮定した。

$$C'_c = 0.9 C_c \quad (2.5)$$

なお、風が強い環境に対しても、同様な修正を行うことにした。

### (3) 樹冠拡張係数 ( $\alpha$ ) の算定

樹冠長  $Cl$  の樹冠底部の樹冠半径  $C_r$  は (1, 2) 式により

$$C_r = \alpha Cl^{0.5} \quad (2.6)$$

従って単木樹冠の被覆面積は

$$\pi C_r^2 = \pi \alpha^2 Cl.$$

$C_r$ ,  $Cl$  を林分の平均木の樹冠半径, 樹冠長とし, 立木密度  $N$  の林分の ha 当りの林

冠被覆面積  $C_s$  を求めると

$$C_s = \pi N C_c^2 = \pi N \alpha^2 C l .$$

一方、前項の (2, 4) 式で規定した林冠被覆面積率  $C_c$  を考えると、ha 当りの林冠被覆面積  $C_s$  は

$$C_s = C_c \times 10^4 ,$$

$$\therefore \pi N \alpha^2 C l = C_c \times 10^4 ,$$

$$\therefore \alpha = \sqrt{(C_c \cdot 10^4) \div (\pi N C l)} = \sqrt{(C_c \cdot S r^2 \cdot H^2) \div (\pi \cdot C l)} . \quad (2.7)$$

ただし、3 等地では

$$\alpha = \sqrt{C'_c \cdot S r^2 \cdot H / \pi \cdot C l} . \quad (2.8)$$

(2.7) 式の関係を図で表示すると、図 2-3 に示すとおりであり、樹冠拡張係数  $\alpha$  と樹高  $H$  との関係が、相対幹距  $Sr$  ごとの曲線によって示されている。樹高が高く、相対幹距が大となるほど樹冠半径が大きく広がる傾向にあることを示している。

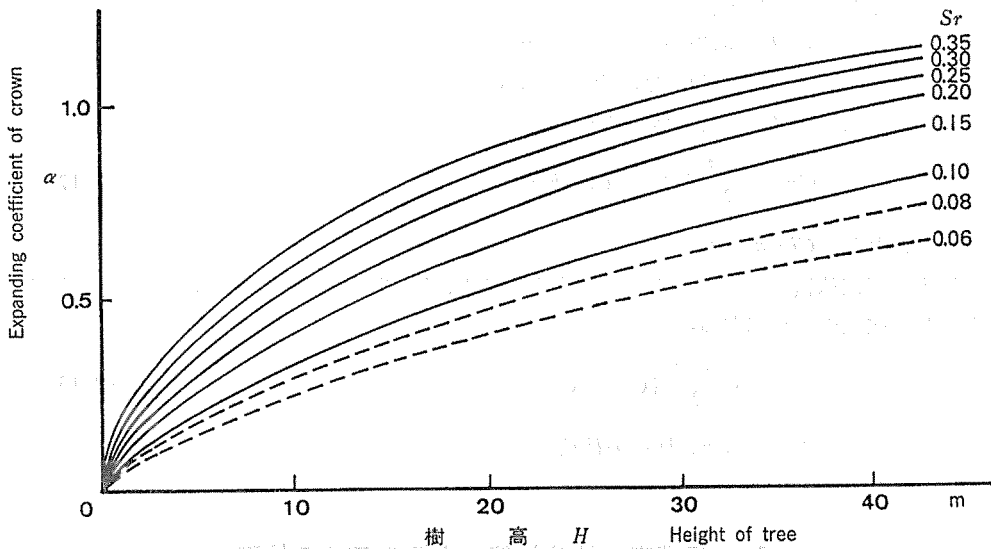


Fig. 2-3 Relations between expanding coefficient of crown ( $\alpha$ ) and both height of tree ( $H$ ) and relative density of tree ( $Sr$ )

図 2-3 樹高  $H$  と  $\alpha$  の関係

### 2.3. 樹冠体積

樹冠形は (1.2) 式によって示されるので、その見掛け上の樹冠体積は、 $x$  軸を中心とした回転体の体積として与えられる。

樹冠形  $y = \alpha x^{0.5}$

樹冠の外形体積 ( $Cv'$ )



$$Cv_x' = \int \pi y^2 dx = \pi \alpha^2 \int x dx = \frac{\pi \alpha^2}{2} x^2, \quad (2.9)$$

樹冠長  $Cl$  の生葉樹冠体積は

$$Cv' = \int_0^{Cl} \pi y^2 dx = \frac{\pi \alpha^2}{2} Cl^2. \quad (2.10)$$

しかしながら現実の樹冠は、古い葉が枯死して中空の状態となっている。ここで、かつて、同一年次に発生した生葉は、4年程度生育した後に、同一年次に枯死するものと考えるとき（さきに述べたように、同一年に生成された樹冠は、同一受光量の環境下にある確率が高いので、光量不足で枯死する確率も同一と考えられる）、現在の樹冠形から、たとえば4年前の樹冠形を差し引けば、それが現在の実質的な樹冠体積となるはずである。

近似的に、生葉が着生している年間の樹冠の伸長量（樹高伸長量）を  $h'$  とし、また、簡単のために、現在の樹冠拡張係数と4～5年前の係数とは同値に近いものとする、実質体積は次式で表わされる。

$$Cv_x = \frac{\pi \alpha^2}{2} (x^2 - (x-h')^2). \quad (2.11)$$

ただし  $x-h' \geq 0$ ,

$x < h'$  の場合は  $x-h' = 0$ .

ここで、 $Cv_x$  は、樹冠長  $x$  の実質体積。

また、全樹冠長  $Cl$  の実質体積  $Cv$  は

$$Cv = \frac{\pi \alpha^2}{2} \{Cl^2 - (Cl-h')^2\}. \quad (2.12)$$

ただし  $Cl-h' \geq 0$ .

樹木の樹冠体積が、上式のように規定されると、ha 当りの樹冠体積は、立木密度  $N$  を考慮して次式のようになる。

$$Cv = N \cdot \frac{\pi \alpha^2}{2} \{Cl^2 - (Cl-h')^2\}. \quad (2.13)$$

ここで  $Cv$ : 林冠の体積

### 3. 収穫表の林分材積によるモデルの検証

樹木は樹冠は構成する葉身によって炭酸同化を行い生長物質を生産している。そして物質の生産量は着葉量に比例すると考えられている。従って、これまで述べてきた樹冠モデルによって、林分の樹冠量が推定され、この樹冠量と林分材積との間に密接な関係が求められれば、モデルの正当性が保障されたことになるはずである。

#### 3.1. 検証に利用した収穫表

検証は、地域、地位、施業内容を異にする種々の条件下で行い、しかも、共通の傾向が得られれば、好成績と考えることが出来る。そこで、一応同一精度で調整されたと考えら

れる各地域の国有林の収穫表を検討し、次の3地域のものを選択した。

○ 飯肥地方スギ林収穫表

飯肥スギは、わが国では最も疎植、低密度の施業下で生育し、大径材のスギ林業地として知られている。スギ人工林としては、わが国では最南部の暖帯に位置している。

○ 熊本地方スギ林収穫表

通常の植栽本数、立木密度下での施業が行われるスギ林である。1・2等地の樹高・材積等がやや低値に偏しているという批判があるが、一応九州地方での標準的収穫表と考えられている。

○ 天城地方スギ林収穫表

高密度の植栽地として、当初吉野地方の収穫表を検討したのであるが、調整年代が古く、精度的に疑義がもたれたので、これにかわって幼齡時に比較的密度の高い天城地方(伊豆)のスギ林収穫表を利用することにした。

各収穫表は、まず地位をⅠ・Ⅱ・Ⅲの3地位に区分し、各地位ごとに林齡(5年毎)と主林木・副林木別に樹高、胸高直径、ヘクタール当りの立木本数、幹材積等が表示してある。本報告では、3地方での各3地位、都合9例の収穫表林分について、林齡、主林木樹高、主林木胸高直径、主副林木の合計立木密度、主林木材積を用いて解析を行うことにした。なお、林分幹材積については、当初、主副林木合計材積を考えたのであるが、幼齡林時代の副木は主林木とは必ずしも競争関係下になく、その後の林分の生育経過とは無関係な傾向が見出されたので、今回は主林木のみを対象にして検討をすすめることにした。

表3-1に収穫表の関連数値を表示する。

3.2. 透過光量が等しいと思われる一定の厚さの樹冠量と林分材積生長

同化作用は光がある一定量値以上に供給される樹冠内で行われるものと考えられる。一方、さきに検討したように、樹冠頂からある深さの樹冠と、それと同年時に形成された側方樹冠とは、同一の光環境下にある確率が高いと考えられるので、樹冠頂部である一定の深さで、これと同期間に生育した樹冠によって、同化作用が行われているものとみてよい。

そこで、この報告では、樹冠頂から1mの厚さの樹冠とそれと同期間に主成された側方樹冠を考え、これによって同化が行われているものと考えた。

垂直方向で1m厚に相当する樹冠の体積は(2.14)式によって

$$Cv = \frac{\pi \alpha^2}{2} \{Cl^2 - (Cl-1)^2\}.$$

林分の立木密度をNとすると、ha当りの1m厚相当の林冠量は

$$Cv = N \cdot \frac{\pi \alpha^2}{2} \{Cl^2 - (Cl-1)^2\}.$$

この量を以て、同化に関与する樹冠量と考えることにした。(図3-1参照)

上式は一般式であるが、この中でのN, α, Clは林齡と共に変化し、これに対応してCvも定まるので、林齡iのときの各変量を、それぞれCv<sub>i</sub>, N<sub>i</sub>, α<sub>i</sub>, Cl<sub>i</sub>とすると

表 3-1(1) 飯肥地方すぎ林林分収穫表  
Table 3-1(1) Yield and related data of Sugi forest in Obi district

地位 1 等	<i>A</i>	<i>H</i>	<i>N+N'</i>	<i>Sr</i>	<i>Cl</i>	$\alpha$	<i>CV</i>	<i>V</i>	<i>D</i>
	10	8.0	1909	0.286	6.5	0.505	26844	113.6	13.8
	15	11.0	1459	0.238	7.2	0.551	49218	200.1	19.3
	20	14.0	1003	0.226	8.2	0.617	68972	287.4	25.3
	25	16.7	718	0.223	9.3	0.676	88124	369.8	31.2
	30	19.1	551	0.223	10.3	0.725	106334	443.9	36.4
	35	21.2	457	0.221	11.0	0.762	123184	511.6	41.1
	40	23.2	396	0.217	11.4	0.792	138832	574.2	45.4
	45	25.0	352	0.213	11.8	0.817	153391	632.9	49.4
	50	26.5	318	0.212	12.2	0.839	166046	688.6	53.1
	55	27.8	291	0.211	12.6	0.857	176807	741.7	56.5
	60	29.0	270	0.210	12.9	0.873	186417	792.9	59.7
地位 2 等	<i>A</i>	<i>H</i>	<i>N+N'</i>	<i>Sr</i>	<i>Cl</i>	$\alpha$	<i>CV</i>	<i>V</i>	<i>D</i>
	10	6.7	3048	0.270	5.3	0.442	17435	73.7	10.9
	15	9.2	2015	0.242	6.3	0.499	35137	139.0	15.3
	20	11.7	1403	0.228	7.2	0.560	51663	211.2	19.8
	25	13.9	1026	0.225	8.1	0.614	68151	280.0	24.2
	30	15.9	798	0.223	8.9	0.657	83645	343.0	28.4
	35	17.7	650	0.222	9.6	0.695	98135	401.2	32.3
	40	19.3	552	0.221	10.2	0.726	111403	455.4	35.9
	45	20.8	481	0.219	10.7	0.753	123658	506.5	39.3
	50	22.1	429	0.218	11.2	0.775	134811	555.1	42.5
	55	23.2	388	0.219	11.6	0.795	144435	601.8	45.5
	60	24.2	357	0.219	12.0	0.812	152905	646.6	48.3
地位 3 等	<i>A</i>	<i>H</i>	<i>N+N'</i>	<i>Sr</i>	<i>Cl</i>	$\alpha$	<i>CV</i>	<i>V</i>	<i>D</i>
	10	5.4	3449	0.315	4.9	0.433	12541	54.4	8.9
	15	7.4	2499	0.270	5.8	0.468	25987	96.3	12.7
	20	9.4	1672	0.260	6.9	0.525	37817	144.7	16.6
	25	11.1	1227	0.257	7.8	0.576	49812	195.9	20.3
	30	12.7	968	0.253	8.6	0.618	61346	245.0	23.7
	35	14.2	804	0.248	9.2	0.649	72602	289.9	26.7
	40	15.4	692	0.247	9.8	0.676	82644	332.1	29.4
	45	16.6	611	0.244	10.2	0.699	91720	372.2	31.9
	50	17.7	551	0.241	10.6	0.719	100484	410.8	34.2
	55	18.6	504	0.239	11.0	0.736	108146	447.6	36.4
	60	19.4	466	0.239	11.3	0.751	114681	483.1	38.5

*A*: forest age      *H*: height of tree (m)

*N+N'*: density of forest tree(/ha)

*Sr*: relative density; distance among surround stem per height of tree

*Cl*: length of living crown       $\alpha$ : expanding coeff. of crown

*D*: DBH (cm)

*CV*: Accumulated volume of annual growth of crown (m<sup>3</sup>)

表3-1(2) 熊本地方すぎ林林分収穫表  
Table 3-1(2) Yield and related data of Sugi forest in Kumamoto district

地位 1 等	A	H	N+N'	Sr	Cl	α	CV	V	D
	10	6.2	3750	0.263	4.9	0.416	20056	88.4	9.2
	15	8.6	3086	0.209	5.2	0.444	39293	167.5	13.1
	20	10.8	2292	0.193	5.8	0.491	54959	244.4	16.6
	25	12.9	1361	0.188	6.3	0.541	70311	317.9	19.8
	30	14.9	1361	0.182	6.8	0.580	85731	386.7	22.7
	35	16.7	1132	0.178	7.2	0.613	100380	450.9	25.4
	40	18.4	969	0.175	7.5	0.642	114064	510.6	27.9
	45	20.1	847	0.171	7.8	0.669	127405	566.3	30.3
	50	21.5	752	0.170	8.0	0.693	139591	617.7	32.6
	55	22.9	675	0.168	8.3	0.714	150604	665.4	34.8
	60	24.3	612	0.166	8.5	0.735	161552	709.9	36.9

地位 2 等	A	H	N+N'	Sr	Cl	α	CV	V	D
	10	5.2	5863	0.251	4.1	0.365	10576	45.5	7.4
	15	7.2	3906	0.222	4.8	0.411	24377	99.6	11.1
	20	9.0	2661	0.215	5.6	0.463	36840	156.4	14.4
	25	10.8	1965	0.209	6.2	0.511	49805	212.4	17.4
	30	12.4	1564	0.204	6.7	0.550	62916	267.3	20.2
	35	13.9	1306	0.199	7.1	0.581	75369	320.7	22.8
	40	15.3	1123	0.195	7.5	0.607	87193	372.1	25.2
	45	16.7	983	0.191	7.8	0.632	98666	420.7	27.4
	50	17.9	873	0.189	8.1	0.654	109346	466.5	29.5
	55	19.1	783	0.187	8.3	0.675	119206	509.6	31.3
	60	20.2	708	0.186	8.6	0.695	128627	550.2	33.1

地位 3 等	A	H	N+N'	Sr	Cl	α	CV	V	D
	10	4.2	5611	0.318	3.9	0.381	6682	29.3	5.7
	15	5.8	4444	0.259	4.6	0.396	18387	68.0	8.9
	20	7.2	3334	0.241	5.2	0.430	28074	110.0	11.8
	25	8.6	2610	0.228	5.7	0.464	37522	152.5	14.4
	30	9.9	2085	0.221	6.2	0.498	46928	194.3	16.8
	35	11.1	1720	0.217	6.6	0.529	55970	234.9	19.0
	40	12.2	1461	0.214	7.0	0.558	64571	273.5	21.0
	45	13.3	1274	0.211	7.3	0.581	72980	309.1	22.9
	50	14.3	1131	0.208	7.6	0.602	81082	342.9	24.7
	55	15.2	1018	0.206	7.9	0.620	88458	375.0	26.4
	60	16.1	926	0.204	8.2	0.638	95496	405.6	28.0

$$Cv_j = N_j \frac{\pi \alpha_j^2}{2} (Cl_j^2 - (Cl_j - 1)^2), \tag{3.1}$$

j年間の総材積に対応するj年間の積算林冠量 CV<sub>j</sub> は

表 3-1(3) 天城地方すぎ林林分収穫表  
 Table 3-1(3) Yield and related data of Sugi forest in Amagi district

地位 1 等	<i>A</i>	<i>H</i>	<i>N+N'</i>	<i>Sr</i>	<i>Cl</i>	$\alpha$	<i>CV</i>	<i>V</i>	<i>D</i>
	10	5.0	5462	0.271	4.2	0.375	6747	30.7	7.2
	15	8.3	2793	0.228	5.5	0.455	24959	104.1	11.3
	20	11.2	2421	0.181	5.5	0.487	47357	182.9	15.0
	25	13.5	1829	0.173	6.0	0.535	65539	253.5	18.2
	30	15.3	1457	0.171	6.5	0.573	80719	313.5	21.2
	35	16.8	1200	0.172	6.9	0.606	93371	368.0	23.9
	40	18.0	1022	0.174	7.3	0.633	101059	419.5	26.3
	45	19.1	902	0.174	7.7	0.656	113380	469.5	28.7
	50	20.0	810	0.176	8.0	0.675	121578	517.0	31.0
	55	20.7	740	0.178	8.3	0.691	128189	563.0	33.4
	60	21.4	678	0.179	8.6	0.707	133951	607.0	35.7

地位 2 等	<i>A</i>	<i>H</i>	<i>N+N'</i>	<i>Sr</i>	<i>Cl</i>	$\alpha$	<i>CV</i>	<i>V</i>	<i>D</i>
	10	3.4	6659	0.360	3.4	0.377	4734	18.8	6.0
	15	6.5	3750	0.251	4.9	0.416	20649	74.0	9.3
	20	9.0	3215	0.196	5.1	0.441	40886	137.8	12.4
	25	11.0	2460	0.183	5.5	0.484	56865	195.8	15.0
	30	12.6	1950	0.180	6.0	0.523	70442	244.0	17.3
	35	13.8	1605	0.181	6.4	0.553	81603	287.3	19.5
	40	14.8	1390	0.181	6.7	0.577	90733	328.0	21.5
	45	15.7	1230	0.182	7.0	0.597	98741	366.0	23.5
	50	16.4	1105	0.183	7.3	0.615	105495	397.5	25.4
	55	17.0	985	0.187	7.7	0.633	110984	324.6	27.3
	60	17.5	890	0.192	8.0	0.650	115680	450.0	29.1

地位 3 等	<i>A</i>	<i>H</i>	<i>N+N'</i>	<i>Sr</i>	<i>Cl</i>	$\alpha$	<i>CV</i>	<i>V</i>	<i>D</i>
	15	4.7	4764	0.308	4.3	0.395	11137	45.1	7.8
	20	6.8	3758	0.240	4.9	0.415	25968	96.6	10.4
	25	8.5	3221	0.207	5.1	0.438	39004	139.6	12.7
	30	9.9	2538	0.201	5.6	0.474	49531	178.0	14.7
	35	10.9	2077	0.201	6.0	0.504	58098	214.1	16.6
	40	11.6	1752	0.206	6.5	0.530	64458	245.6	18.3
	45	12.3	1529	0.208	6.8	0.553	69908	270.0	19.7
	50	12.8	1368	0.211	7.1	0.570	74689	290.0	20.9
	55	13.2	1250	0.214	7.4	0.584	78348	303.5	22.0
	60	13.5	1158	0.218	7.7	0.595	81234	313.0	23.1

$$CV_j = \sum_{i=0}^{i=j} C v_i = \frac{\pi}{2} \sum_{i=0}^{i=j} N_i \alpha_i^2 (Cl_i^2 - (Cl_i - 1)^2), \quad (3.2)$$

$j$ 年間の林分の総材積  $V_j$  は

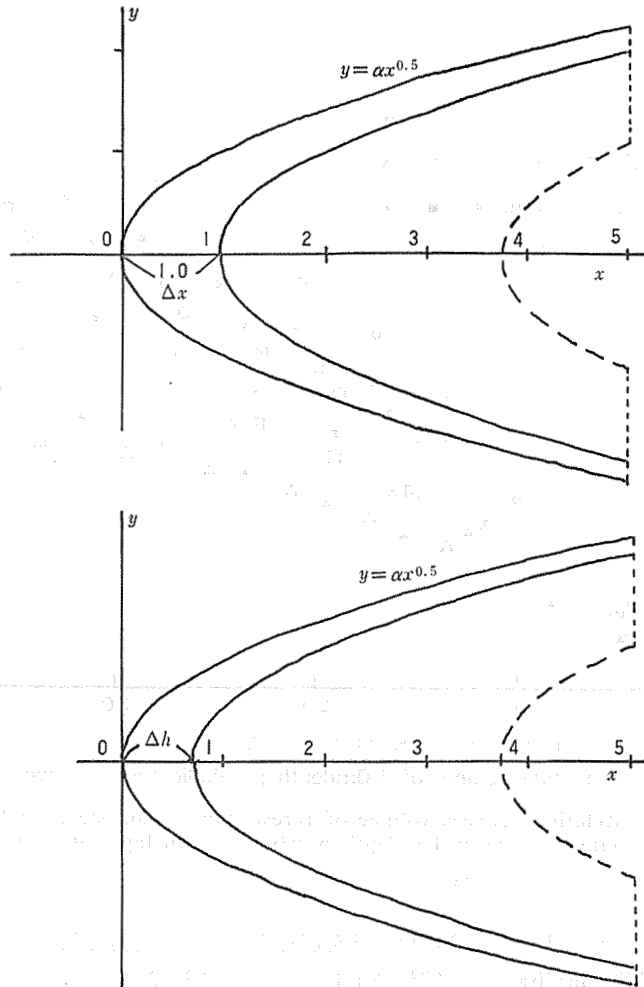


Fig. 3-1 Schematic explanation of parabolic crown layer; lower is  $\Delta h$  depth layer and upper is 1.0 m depth layer. where  $\Delta h$  annual increment of tree height

図 3-1 1 年間に生長する樹冠層と垂直深で 1.0 m の樹冠層

$$V_j = KCV_j = K \sum_{i=0}^{j-1} Cv_i = \frac{K\pi}{2} \sum_{i=0}^{j-1} N_i \cdot \alpha_i^2 \{Cl_i^2 - (Cl_i - 1)^2\}. \quad (3.3)$$

ここで  $K$  は材積変換係数.

収積表には、林齢別に主副林木の立木本数と材積、主林木の樹高等が記載されているが、樹高と主副林木立木本数から、まず、相対幹距を求め、ついで (2.3) 式から  $Cl_i$  を、(2.7) 式から  $\alpha_i$  を算出する。ここで (2.13) 式の  $N_i$ 、 $\alpha_i$ 、 $Cl_i$  が求められたので、各齢級ごとの樹冠量が計算されることになり、さらに齢級毎の樹冠量を林齢分だけ積算すると (3.2) 式の林冠量積算値が得られる。

この林冠量積算値を、各々の林分収穫表によって計算し、これを、各々の主林木材積と対比すれば、林冠の同化能と林分の幹材積生長との関係で検討することが可能となる。

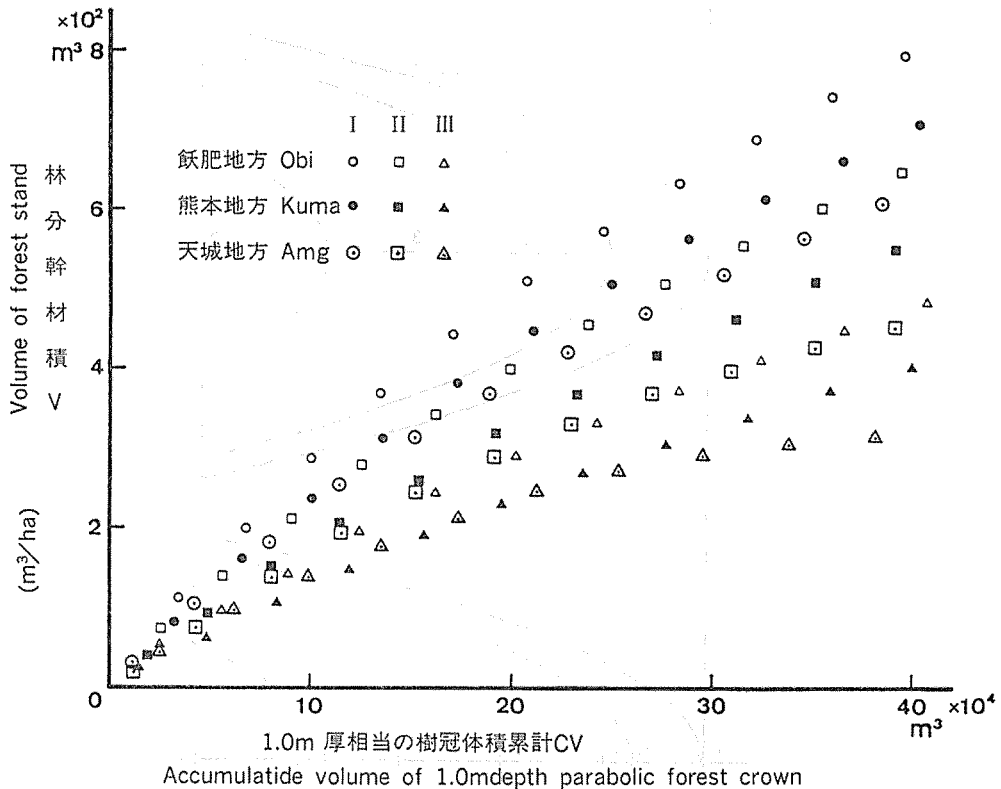


Fig. 3-2 Relation between volume of forest stand (main stem) and accumulated volume of 1.0 depth parabolic crown layer of forest

図3-2 林冠量(1m深相当)の積算体積と林分材積(主林木)との関係

飢肥, 熊本, 天城の3地方×3地位の林分収穫表について林冠体積積算値を算出し, これと主林木幹材積 (m<sup>3</sup>/ha) との関係を示したものが図3-2である。

図の測点の配列から明らかなように, 林齢が増加し, 林冠の積算体積が増大するにつれて, 林分の材積値が増大しているが, 年間の材積生長量は漸減するという曲線関係が認められ, しかも, 地位差と, 地方差によって, 大きく曲線が分れていること(地位が低い方が曲線値が低い)などが示されている。

この林冠量は, 大略, 受光条件が同等とみられる厚さを想定して算出したものであるもので, このように曲線が頭打ち状態を示すことは, 着葉の純同化能率が, 樹高(林齢)を増すにつれて低下し, また, 地位によって曲線が分れることは, 地位の低下につれて純同化能率が低下することを意味している。これらの原因としては, 樹高(材積)が大となるほど呼吸消費量が増して, 同化物質が材積生長に寄与する割合が減ることが考えられ, また, 低地位の林分では, 単位樹冠当りの通発量が減り, 全同化能率が低下していること等が考えられる。

### 3.3. 同年次に生成された新葉樹冠量と林分材積との関係

前節の検討では, 樹冠長で1mの厚さの樹冠量に着目して解析を行ったのであるが,

このような樹冠の中味を調べてみると、樹高生長の大きい林木では、これを構成する樹冠の年次が、1~2年生の若い新葉で占められるのに対して、樹高生長の小さな林木では、1~2年生のもの他に、3~5年生といった古い葉までが構成員として加わっていることが認められる。ここで、いま、新しい葉は古い葉にくらべて、同化能率が高いものと仮定すると、前節の曲線の頭打ちや、低地位での曲線値の低いことが説明される。

一方、林木全体の生長を調べてみると、材積の生長量と枝葉の生長は比例関係にあるのではないかと考えられており、これらのことから、1~2年生の新葉樹冠量に着目して、材積生長との関係を求めれば、材積成分の同化能率は、前節の場合よりも、地位、林齢の影響を受けない結果が得られるのではないかと想定される。

そこで、樹冠長において、一年間の樹高生長量  $\Delta h$  を相当する新葉樹冠量、すなわち (2.12) (2.13) 式において  $h' = \Delta h$  の場合の樹冠量ないし林冠量を算出し、前節と同様な解析を試みることにした。

広葉樹の場合は、ほぼ1年間で旧葉が更新されて、翌年に新生する樹冠体積は、樹高~側枝の生長に伴う樹冠体積よりも、大きいのが普通であるが、スギの場合は、葉の着生期間が4~5年と長いために、単純に、旧樹冠の上に新樹冠が着生すると考えて、材積との関係を検討することにした。(図3-1 下図参照)

以上の考えをもとに、 $i$ 年生の林木の新葉樹冠体積を求めると

$$Cv_i = \frac{\pi \alpha_i^2}{2} \{Cl_i^2 - (Cl_i - \Delta h_i)^2\}, \quad (3.4)$$

林分の新葉樹冠体積は

$$Cv_i = N_i \cdot Cv_i = N_i \frac{\pi \alpha_i^2}{2} \{Cl_i^2 - (Cl_i - \Delta h_i)^2\}, \quad (3.5)$$

$j$ 年間の積算林冠量は

$$CV_j = \sum_{i=0}^{j-1} Cv_i = \frac{\pi}{2} \sum_{i=0}^{j-1} N_i \cdot \alpha_i^2 \{Cl_i^2 - (Cl_i - \Delta h_i)^2\}, \quad (3.6)$$

$j$ 年生の林分材積は

$$V_j = K \cdot CV_j = \frac{K\pi}{2} \sum_{i=0}^{j-1} N_i \cdot \alpha_i^2 \{Cl_i^2 - (Cl_i - \Delta h_i)^2\}, \quad (3.7)$$

で示されることになる

(3.7) 式の  $K$  (材積変換係数) を求めるためには、(3.6) 式により、毎年形成される新林冠量の  $j$ 年分の積算値を求め、これを  $j$ 年生の林分材積と対比すればよいわけである。(3.6) 式を算出するのに必要な、毎年の樹冠拡張係数  $\alpha_i$ 、樹冠長  $Cl_i$ 、立木密度  $N_i$ 、樹高生長量  $\Delta h_i$  は、各収穫表から算出した。(表3-1 参照)

図3-3は新葉林冠体積(一年生分)の積算体積と林分材積との関係を、餌肥スギ林、熊本地方スギ林、天城地方スギ林の各1, 2, 3等地について求めたものであるが、前記の図3-2の場合と異なり、地方差(疎密施業差)、地位差の如何にかかわらず、一本の直線関係にあることが見出され、単純な関係にあることが認められた。

各地方別及び全地方の関係を数式化すると次のとおりである。



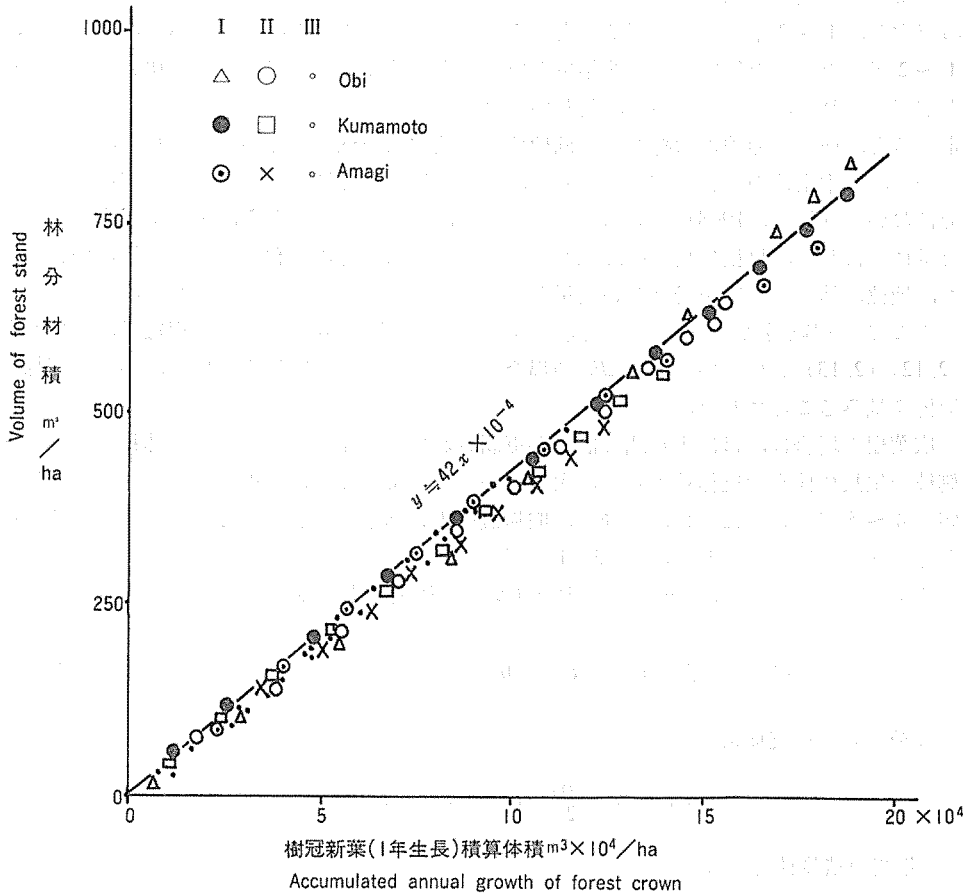


Fig. 3-3 Relation between volume of forest stand (main stem) and accumulative volume of annual growth of forest crown

図3-3 1年間に生長した林冠の積算体積と林分材積(主林木)との関係

飼肥スギ林 1, 2, 3 等地の場合

$$V = 0.0042 CV - 5.08$$

相関係数  $R = 1.00$  標準誤差  $Se = 0$

熊本地方スギ林 1, 2, 3 等地の場合

$$V = 0.004 CV - 4.29$$

$R = 0.0999$   $Se = 8.31 \text{ m}^3/\text{ha}$

天城地方スギ林 1, 2, 3 等地の場合

$$V = 0.0042 CV - 16.26$$

$R = 0.99$   $Se = 21.93 \text{ m}^3/\text{ha}$

全地方スギ林 1, 2, 3 等地の場合

$$V = 0.00429 CV - 8.32$$

(3.8)

$$R=0.995 \quad Se=18.58 \text{ m}^3/\text{ha}$$

上式を検討すると各地方とも、非常に似通った係数を示しており、(3.8)式に示すような、一つの直線式にまとめられそうである。また、ここで用いた収穫表の材積の平均値は  $350 \text{ m}^3/\text{ha}$  を上回ることを考えると、(3.8)式の定数項の 8.32 は幼齡林の林冠閉鎖前の状況を若干修正すれば、0 となる可能性が高く、おそらく近似的には次のような、原点を通る直線式で表示されるものと考えられる。(m<sup>3</sup>/ha)

$$V=0.0042 \quad CV=0.0042 \pi \sum_{i=0}^{i-1} N_i \cdot \alpha_i^2 \{Cl_i - (Cl_i - Ah_i)^2\}. \quad (3.9)$$

このように、密度管理、地位さらには地方を異にする林分の収穫量が、一つの単純な式で表示されるということは、この樹冠モデル(パラボラモデル)の正当性を裏書きしており、材幹等の林木個体の生産が、新葉部分の同化に比例して行われていると解釈してよさそうである。

ただし、この解析では、1年分の新葉量に着目して検討したのであるが、2年分、3年分の樹冠量も、これに比例するはずであるので、2年分あるいは3年分の樹冠量を用いても、ほぼ同じ結果が導かれたものと考えられる。従って、現実に何年分の樹冠量が純生産に関与しているかを、結論づけられないままの結果に終わっている。

#### 4. パラボラ樹冠形モデルによる樹幹形とくに胸高直径の推定

##### 4.1. パイプモデルによる樹幹断面積生長量の表示

樹冠のある部分で生産された物質は、その樹冠部よりも下部にある幹材の各部に平等に分配され、等量の断面積生長に関与していることが、パイプモデル(篠崎ら, 1964)によって提案され、また、梶原(1983a)等によって実測によって肯定されている。ここで、パイプモデルによって1年分の材積生長を検討すると、任意の高さの樹幹断面積の1年間の生長量は、その位置より上に着生する葉量に比例し、その着葉部より下の幹長(枝下高)に反比例すると考えられるわけで、前節の結果を用いると、その部位より上にある1年分の新葉樹冠量に比例することが考えられる。この間の状況を模式的に表すと図4-1に示すとおりである。

まず、簡単のために、樹冠がパラボラの回転体として表現される場合を考える。

$$\begin{aligned} \text{樹冠の縦断形} & \quad y = \alpha x^{0.5}, \\ \text{樹冠の水平断面積} & \quad \pi y^2 = \pi \alpha^2 x, \end{aligned}$$

任意の  $x$  点(冠頂から  $x$  の距離の点)における厚さ(高さ)  $dx$  の樹冠体積は

$$\pi y^2 dx = \pi \alpha^2 x dx,$$

この樹冠で生産される材積  $dv$  は

$$dv = K \pi y^2 dx = K \pi \alpha^2 x dx.$$

$K$ : 材積変換係数

ここで、樹高を  $H$  とすると、着葉部位  $x$  より下の部分(生長物質が配分される部分)の長さは、 $H-x$ 。この部分に配分された物質による断面積生長量を  $dg'$  とすると

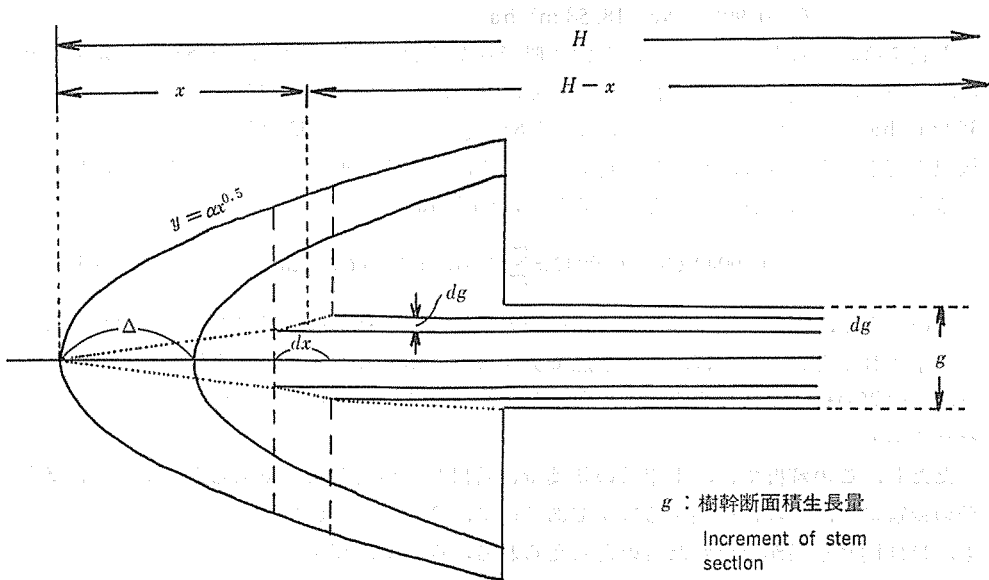


Fig. 4-1 Schematic explanation of relation between growth of stem by pipe model and tree crown. Relation between appearance crown volume and increment of stem section is shown in following equation;  
 $dg(H-x) = K \pi \alpha^2 x dx$

図 4-1 樹冠構成と樹幹生長との間のパイプモデル

$$dv = dg'(H-x),$$

$$\therefore dg'(H-x) = K \pi \alpha^2 x dx,$$

$$dg' = K \pi \alpha^2 \frac{x}{H-x} dx.$$

樹幹 ( $H-x$ ) の部分は、さらに  $x$  より上部の樹冠の同化物質の配分を受けるので、それら全同化による断面積生長量を  $g'$  とすると

$$g' = K' \pi \alpha^2 \int_0^x \frac{x}{H-x} dx \quad (4.1)$$

$$= K' \pi \alpha^2 \{H \ln H-x - H \ln(H-x)\}. \quad (4.2)$$

ここで  $x$ : 冠頂からの距離

$g'$ :  $x$  点より上の回転体樹冠により生産される断面積生長量

上記の式は、回転体としてのパラボラ樹冠の体積が、材積生長に関係するものと仮定した場合の関係式であるが、現実には、樹冠の表層部を構成する1年分の新葉樹冠層しか材積生長には関与しないことが、前節の結果として得られているので、1年分の新葉樹冠層のみが生長に関係するものとして(2.24)式を修正する。新葉樹冠層(1年分)は、現在の樹冠形と、これを  $dh$  (1年分の樹冠生長高)だけ下にずらした樹冠形との差で表現されることになるので、樹幹断面積の連年生長量  $g$  は次式によって示されることになる、

なお次式は  $i$  年生木について表示する.

$x \leq Cl$  (樹幹が樹冠内にある場合)

$$g_i = K \pi \alpha_i^2 \{H_i \ln H_i - (H_i - \Delta h_i) \ln (H_i - \Delta h_i) - \Delta h_i - \Delta h_i \ln (H_i - x)\}, \quad (4.3)$$

$x > Cl$  (樹幹が樹冠下にある場合)

$$g_i = K \pi \alpha_i^2 \{H_i \ln H_i - (H_i - \Delta h_i) \ln (H_i - \Delta h_i) - \Delta h_i - \Delta h_i \ln (H_i - Cl_i)\}. \quad (4.4)$$

ここで、樹冠断面積を  $\text{cm}^2$  単位を表すことにすると

$$K = 42.0 \quad (\text{前記 (3.9) 式による})$$

上記の式の意味する内容についてみると、樹幹が冠頂内にある場合は、冠頂に近い部位であるほど同化生産物を供給する樹冠量が少ないので断面積生長量は小さいが、冠頂から遠ざかるにつれて(幹の下の部分ほど)、同化生産物を供給する樹冠量が増加するため断面積生長量も大きくなることを物語っている。しかしながら、生葉樹冠の無い枝下部分では、同化を行う着葉が周囲になく、樹冠量は増加しないので、断面積生長量は幹の上下にかかわらず一定となる。

パラボラ形の樹冠モデルを用いると、積分演算が容易に行える利点があり、これまで述べてきたように、モデルの展開が極めて容易で、結果としての数式の解釈も容易となっている。連続曲線のモデルから出発しているため、当然のことながら、結果の変化も連続的であり、任意の部位の推定が可能となっていることが長所としてとりあげられる。

#### 4.2. 収穫表直径によるパイプモデルの検証

前節での検討は、 $i$  年生林木の一年間の樹幹断面積生長量を示したものであるので、過去の年輪(過去の断面積生長量)を含む、 $i$  年生時の樹幹断面積は、(4.3)、(4.4) 式の 0 年から  $i$  年生までの積算値として示されるはずである。

樹冠断面積生長量

$$g_i = K \pi \alpha_i^2 \{H_i \ln H_i - (H_i - \Delta h_i) \ln (H_i - \Delta h_i) - \Delta h_i - \Delta h_i \ln (H_i - x)\},$$

ただし  $x > Cl$  の場合は  $x = Cl$  .

ここで

$$C(x)_i = \{H_i \ln H_i - (H_i - \Delta h_i) \ln (H_i - \Delta h_i) - \Delta h_i - \Delta h_i \ln (H_i - x)\}. \quad (4.5)$$

ただし  $x > Cl$  の場合は  $x = Cl$  とおくと

$$g_i = K \pi \alpha_i^2 C(x)_i. \quad (4.5)$$

毎年の断面積生長量  $g_i$  の  $j$  年間の積算値、すなわち  $j$  年生樹冠の断面積  $G_j$  は

$$G_j = \sum_{i=0}^{j-1} g_i = K \pi \sum_{i=0}^{j-1} \alpha_i^2 C(x)_i, \quad (4.6)$$

直径  $D_j$  は

$$D_j = 2\sqrt{G_j/\pi}. \quad (4.7)$$

これらの関係式を用いて、任意の高さの樹冠直径を推定することが可能となる。

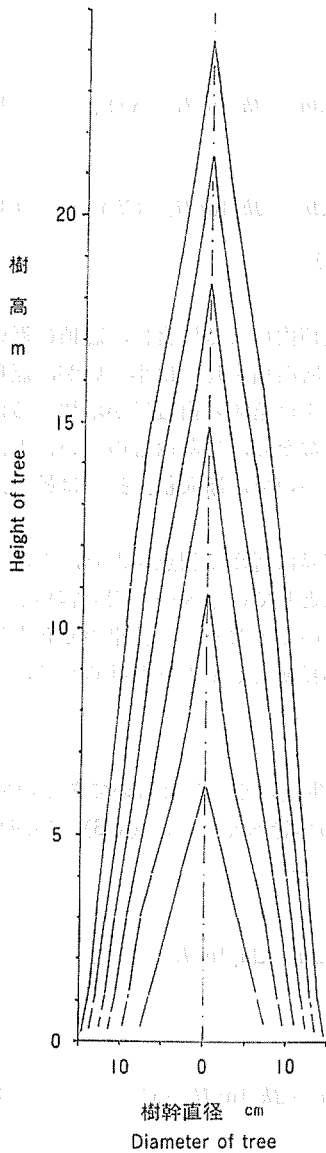


Fig. 4-2 Calculated stem profile every ten years by following equation;

$$D_j = 2 \left\{ 42 \sum_{i=0}^j \alpha_i^2 C(x)_i \right\}^{0.5}$$

$$C(x)_i = \{ H_i \ln H_i - (H_i - \Delta h_i) \ln (H_i - \Delta h_i) - \Delta h_i - \Delta h_i \ln (H - x) \},$$

$x = Cl$  in case of  $x > Cl$

図4-2 10年生時の標準木(主林木)が辿ると予想される推定樹幹解析図(10年単位)60年生時の胸高直径は収穫表では37cmであるのに対して、同一の密度施業下であるにもかかわらず、計算値では27cmにしか達していない。

そこで、収穫表の林齢ごとの直径によってこの間の検証を試みることにした。

収穫表に表示してある立木密度と樹高生長によって、樹冠長( $Cl_i$ )、樹冠拡張係数( $\alpha_i$ )と樹高生長量( $\Delta h_i$ )とを求めれば、(4.6)式と(4.7)式によって直径が計算され、樹幹解析図の推定も可能である。図4-2は、林分林積の推定で得られた $K=42$ を用いて計算した熊本地方1等地のスギ樹幹解析図である。

図4-2の樹幹形は一見、非常に現実木に類似した形状を呈し、推定の適正さを感じさせるのであるが、この樹幹解析図の直径値を検討してみると、下記のように収穫表に掲上されている直径値よりも小さく、林齢を増すにつれてその差が大きくなっていることが見出される。

林齢(年)		10	20	30	40	50	60
直径 cm	収穫表	9.2	16.5	22.7	27.9	32.6	36.9
	推定値	9.1	15.3	19.3	22.4	24.8	26.9

ところが、推定方法をかえて、次式によって、各地方・各地位の収穫表の直径値を推定したところ(4.6)式の場合と異なり、非常に近似した数値が得られた。

$$G_j = K \pi \alpha_j^2 \sum_{i=0}^{j-1} C(x)_i \quad (4.8)$$

上式が(4.6)式と異なる点は、次の点である。

○ 樹幹拡張係数 $\alpha$ を(4.6)式の場合は各林齢の密度と樹高に対応して変化する変数 $\alpha_i$ として式の構成を計ったのであるが、(4.8)式では、推定目的的林齢 $j$ の樹高と密度に対応した $\alpha_j$ に固定し、定数として式を構成した。

○ (4.8)式の場合、 $j$ 年生時以前の段階では、当然樹高が低く、密度が高く、そのため平均の $\alpha_i$ の値は、 $\alpha_j$ よりも低かつたはずと考えられるのであるが、その当時

(幼齡木時代)も、林分の平均的な  $\alpha_i$  よりも高値の  $\alpha_j$  を有していたと考えられる。あるいは  $\alpha_i$  は同じでも樹冠長  $Cl$  が長かった ( $(\alpha_j/\alpha_i)^{0.5}Cl$  に近似) と考えられる。

○ (4.8) 式で断面積を算出して胸高直径を推定した場合、飢肥スギについては、 $K=42$ 、熊本地方スギと天城地方スギについては  $K=40$  を用いないと好結果が得られず、とくに3等地については、飢肥スギで  $K=40$ 、天城地方で  $K=38$  を用いる必要があった。飢肥スギについては、林分材積値の推定の場合と同一値の  $K$  を用いたが、その他では、それよりも低値の  $K$  を用いる必要性が生じたことになる。

上記のように材積変換係数  $K$  について若干の修正を加えながら、(4.8) 式によって樹幹断面積を求めて、さらに胸高直径を推算した結果は図4-3に示すとおりであった。この図は胸高直径の推定値  $\hat{D}_{1,2}$  と実測値  $D_{1,2}$  との相関性を示したものであるが、下記のように高い相関性が得られた。

飢肥スギ林 1, 2, 3 等地

$$D_{1,2} = 1.001\hat{D}_{1,2} - 2.35 \quad (\text{cm})$$

相関係数  $R=0.993$ , 標準誤差  $Se=1.61$  (cm)

熊本地方スギ林 1, 2, 3 等地,

$$D_{1,2} = 1.007\hat{D}_{1,2} - 0.26 \quad (\text{cm})$$

$R=0.998$ ,  $Se=0.536$  (cm)

全地方スギ林 1, 2, 3 等地,

$$D_{1,2} = 1.004\hat{D}_{1,2} - 0.15 \quad (\text{cm})$$

$R=0.995$ ,  $Se=1.24$  (cm)

このように、同一の換算係数 ( $K=4.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ) あるいは、それに近い係数を用いて、材積の推定と胸高直径の推定が、共に、1本の直線で示し得たことは、この樹冠の生長モデルが、生物学的理論の上でも、また統計的にも極めて高度の適性を有していることを保証しており、このモデルによって、スギ林分とそれを構成する林木の生長量と形状とが、施業(密度管理, 樹冠長管理)別に高精度に推定しうることを示唆している。

#### 4.3. 樹幹形推定方式からみた林木生長

前節で、樹幹断面積の推定式として、次の2つの式を考え、現実の胸高直径には後者の(4.8)式の適合性が高いと判断した。

$$G_j = \pi K \sum_{i=0}^j \alpha_i C(x)_i, \quad (4.6)$$

$$G_j = \pi K \alpha_j \sum_{i=0}^j C(x)_i. \quad (4.8)$$

前者は、そのときどきの立木密度と樹高に応じて、樹冠の拡張係数が変化し、いわゆる密度管理が幹材の生長に端的に影響することを示した式であるが、後者の(4.8)式は、40年から60年までも生き残る主林木は、幼齡林時代から、あまり周辺木との競争といった密度の影響に受けず、当初から大きな樹冠拡張係数を持つ優勢木として生長しつづけてきた樹木であることを示している。

よく考えると、たとえば、ha 当りの密度が2,500本の幼齡林の平均木は、順位が1000番以下の林木であるので、そのまま生長をつづけても、密度が1,000本以下の壮齡林を代

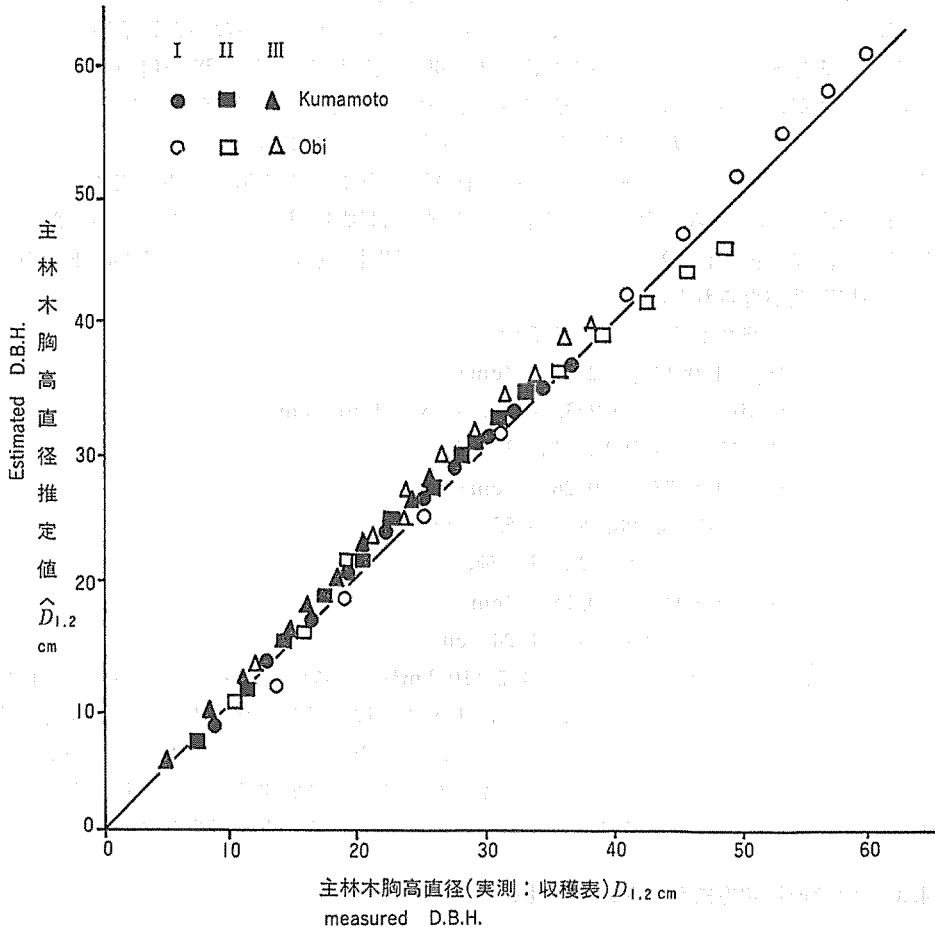


Fig. 4-3 Correlation between measured D. B. H. of standard tree in yield and estimated D. B. H by following equation;

$$D_j = 2(42 \alpha_j^2 \sum_{i=0}^j C(x)_i / \pi)^{0.5}$$

図 4-3 樹冠拡張係数を推定目標年の値 ( $\alpha_j$ ) に固定して推定した胸高直径と実測胸直径との関係

表する平均木にはなり得ないはずであり、もし壮齢時代まで残っているとしたら劣勢木となっている確率が高い。幼齢林時代にも大きい方から、1,000本の林木を選び、1,000本中の標準木を定めれば、それが40年時の標準木となる確率が高いのであるが、ある林齢時の標準木が、その後も、ひきつづき標準木として生長しつづけることは、まず、ありえないと考えることが出来る。つまり、収穫表にはそれぞれの齢階の標準木が記載してあるが、その標準木の直径値・材積値をそのまま辿って生長する木は無いものとみてよく、全く別の生長経過を辿った林木が、各齢階の標準木となっていることを物語っている。

このように考えると、50年から60年といった高齢林の林木は、幼齡林時代は、当時の標準木よりも、はるかに大きな林木であった確率が高く、(4.8)式の方が、直径推定に有利であったことが肯定できる。

高田ら(1983)は、幹の生長量に対して最も有効な因子は、競争木との距離ではなく、対象木自身の直径の大きさである……要するに大きな木ほど大きくなることを述べ、また、梶原(1983b)が、ある程度の生長段階に達すると密度管理が異なる場合でも相対的幹形はほぼ同じになることを説いているのも、(4.8)式のような生長経過のあらわれとも考えられる。

上記の検討では、 $j$ 年生の標準木が、それよりも若い時代も、 $j$ 年時の $\alpha_j$ に近い樹冠拡張係数をもって生長してきたことを述べたのであるが、 $j$ 年生の標準木が、その後 $n$ 年生までは、どのような断面積生長を辿るかについては、やはり(4.6)式の生長経過を辿るものと考えられる。

$$G_n = \pi K \alpha_j^2 \sum_{i=0}^{j-1} C(x)_i + \pi K \sum_{i=j+1}^{n-1} \alpha_i^2 C(x)_i \quad (4.9)$$

たとえば、30年生の標準木は、(4.8)式による生長をつづけてきたことになるが、その後は、(4.6)式のような生長に移行するものと考えられる。

図4-4は熊本地方スギ林(地位指数 18.5 m)と飢肥スギ林(地位指数 20 m)について、それぞれ、10年生時、40年生時、60年生時の標準木が辿り、あるいは辿ってきた林齡別の直径を(4.9)式によって計算したものであるが、40年、60年の標準木が、幼齡林時は、標準木よりも、はるかに大きい大径木であったこと、40年生の標準木も、60年生では標準以下の小径木となること、20年生時の標準木は、その後は、たとえ間伐処理を受けても、小径のまま推移すること等が読みとられる。図中の白丸は、収穫表表示の直径であるが、現実にはこのような生長経過を辿る林木は存在しないことも了解されよう。

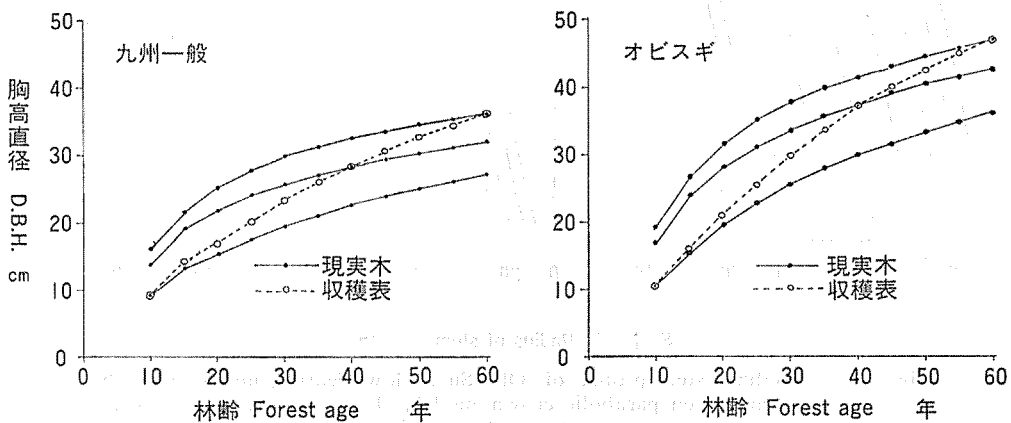


Fig. 4-4 D. B. H. growth curve of standard tree at different age class (in yield table) such as; 10 years old, 40 years old and 60 years old. and appearance curve showed by yield table

図4-4 10年生、40年生、60年生の各年齢の主林木が辿る胸高値の生長経過と収穫表に示されている見掛け上の直径生長経過



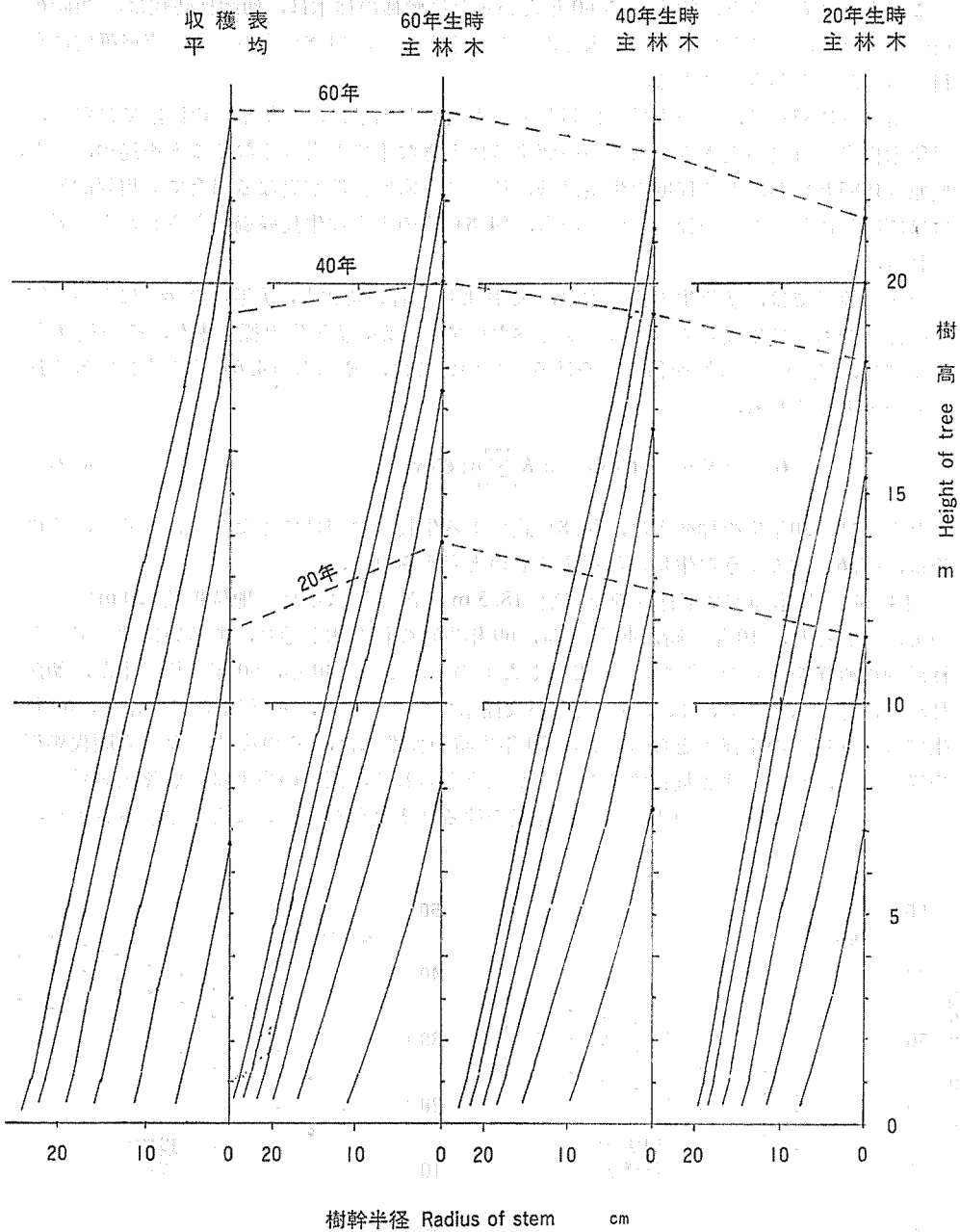


Fig. 4-5 Analyzed stem profile of Obi Sugi (low density, middle site) by estimated on parabolic crown model; (1) appearance profile every ten years, equation (4.6), (2) tree rings profile every ten years of standard tree at 60 years old, (3) at 40 years old and (4) at 20 years old. Case of (2) (3) (4) are estimated by equation (4.9)

図4-5 パラボラ樹冠モデルによって推定したオビスギ(中等地)の樹幹解析図(10年毎の年輪で示す)

また、図4-5はオビスギ林2等地において、収穫表の各齢階時の樹幹形を、そのまま樹幹解析図にしたものと、60年生時、40年生時、20年生時の標準木の樹幹解析図（いずれも、(4.9)式により計算したもの）を掲げているが、収穫表の各齢階の標準木形をそのまま年輪に持つような林木は実在せず、図中で外形は同じ60年生木でも、現実の林木は、幼齢時の年輪幅が極端に大きく、外側の年輪幅の狭い林木であることが読みとれそうである。また、40年生時、20年生時に標準木であった林木は、60年生の標準木にくらべて、各部の直径、年輪幅が小さくなっていることが読みとれる。飢肥スギ林は我国で最も疎植、低密度管理の林業として知られ、樹幹は大径ではあるが円錐形を示すのが特色である。その中にある、小径の20年時の標準木は、完満に近い幹形を示していることが認められる。

以上の論議は、樹冠拡張係数の大小は、樹木の素質によるところが大きく、立木密度の影響が、かなり小さいことを容認した内容のものとなっているが、更に仔細に検討してみると、密度に伴う林木間の競争の影響はやはり無視出来ないものがあるようである。

まず、マクロな面で検討してみよう。

図4-6は、飢肥スギ林、熊本地方スギ林、天城地方スギ林の収穫表から、地位指数が相互に似通った地位の数値をもとにして計算した各齢階の樹幹形を示したものである。これらの地方は密度管理方式を異にし、飢肥が疎、熊本が中庸、天城がやや密と判断されるのであるが、この施業差によって、直径と縦断形状がかなり異なっていることが見出される。

前記の論議では50年～60年生林といった高齡林を構成する林木は、若齡林時代を他から制約をうけない優勢木として過し、密度の影響を受けない自由な樹冠拡張を行ってきたため、施業の如何にかかわらず、比較的似通った直径値や幹形を示すことが期待される。しかしながら、図で明らかのようにそれぞれ異った幹形を示し、60年生時の樹冠拡張係数 $\alpha_{60}$ は、飢肥で0.812、熊本0.735、天城0.707と高密度施業下の林木ほど、その係数値が小さくなっている。また、樹幹の縦断形も密度が高い地方ほど完満な形態を示し、この点、やはり密度の影響を受けながら育ってきたことを示唆している。

次に、それまで述べてきた推定方式そのものの問題点から検討を加えてみよう。

さきに行った林分材積と林冠量との対応において、主林木材積を目的変量として検討し、その結果として材積変換係数( $42 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ )を得たのであるが、主林木だけではなく副林木をも加えて検討することになると、当然林分材積が大きくなるため、係数は10%ほど大きくなり、 $K = 4.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 程度の数値をとることが考えられる。

このように $K$ の値が大となると(4.6)式

$$G_j = \pi K \sum \alpha_i C(x)_i,$$

で推定した $G_j$ は大きくなって、それをもとに算出される胸高直径も4%ほど大きくなって収穫表値にやや近づく。これに対して(4.8)式

$$G_j = \pi K \alpha_j \sum C(x)_i,$$

で推定した $G_j$ は、 $K$ が大きくなると過大となって、直径も、収穫表値を大幅に上回ることになる(これまでの検討例でも $K = 4.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ をそのまま使うと飢肥スギ以外は推

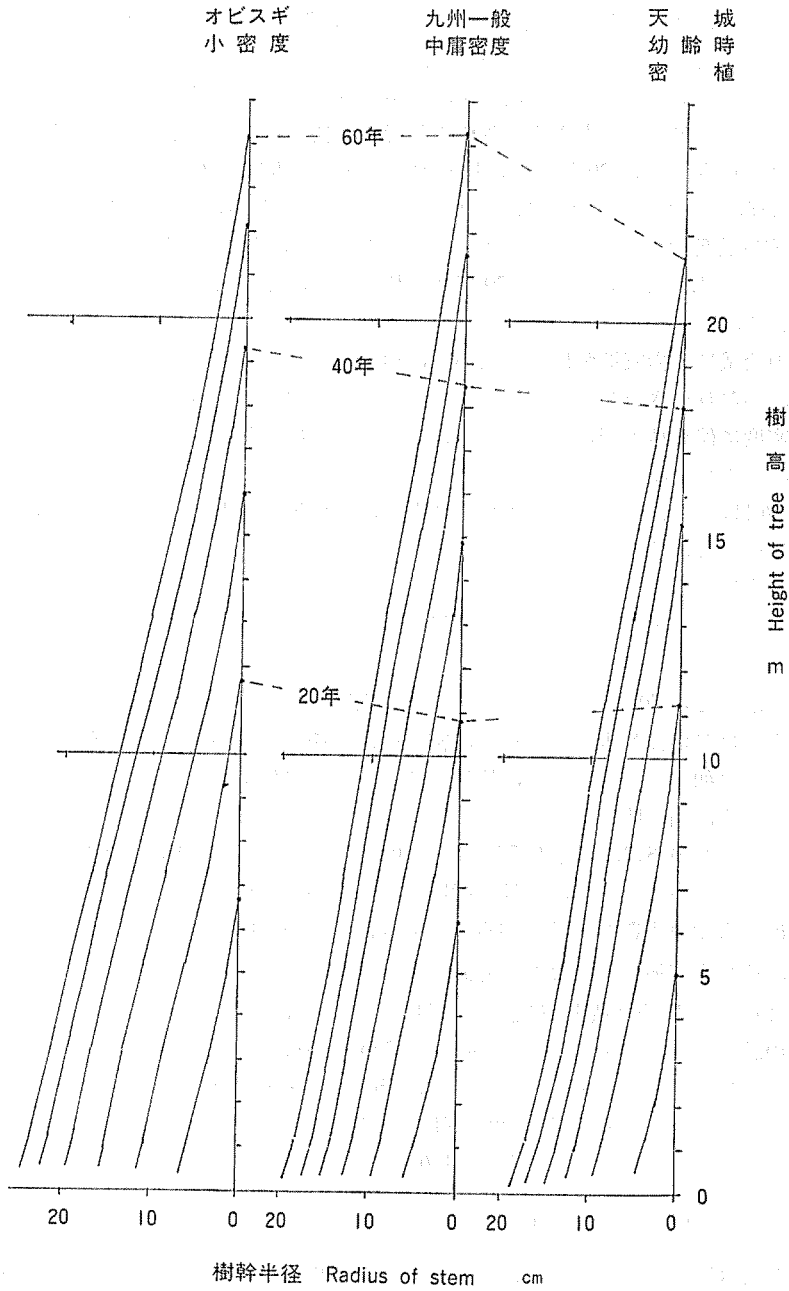


Fig. 4-6 Appearance stem profile estimated by equation (4.8) Each curve show profile of standard tree in class of every ten years

図 4-6 パラボラ樹冠モデルから推算した収穫表の見掛け上の樹幹解析図

定値が過大となっていた).  $K$  をさきの推定の場合よりも高値にして, しかも直径推定値を実測値と合致させるためには, 密度効果の大きい (4.6) 式と, 密度よりも素質効果の大きい (4.8) 式とを複合させて推定を行うことが必要と考えられる.

さらに明らかなことは,  $j$  年林の標準木は, さきに述べたように, それよりも若い林齢の時代には優勢木であったので, 当然, 樹冠長  $C_l$  も平均値よりも長かったことに由来する事柄である. 樹冠長が長ければ樹冠量も大きく, それに伴って樹幹の断面積生長量も大となるはずである. これまでの論議では樹冠長を平均値のままにおいて, 断面積生長量が大きな事由を専ら樹冠拡張係数  $\alpha$  に求めて検討を行ってきたのであるが, 樹冠長によって樹冠量の増大が説明されれば, とくに  $\alpha$  だけを, その林齢の平均  $\alpha_i$  よりも大きくする必要はないわけである. この点, 樹冠長の比率を (4.6) 式の補正係数として盛り込めば,  $\alpha_j$  を固定した (4.8) 式の必要性は小さくなるものと考えられる. 便宜的に樹冠長比率の調整値が  $\alpha_j$  の中に含まれているものとして計算を行うにしても,  $\alpha_i$  を可変とした (4.6) 式が基本であるので, 断面積生長量は次式のように (4.6) 式と (4.8) 式との組合せで推定するのが妥当と考えられる.

$$G_j = \pi K \left\{ a \sum_0^j \alpha_i C(x)_i + b \alpha_j \sum_0^j C(x)_i \right\} \quad (4.10)$$

$$= \pi K \sum_0^j (a \alpha_i + b \alpha_j) C(x)_i. \quad (4.11)$$

$$\text{ここで } 0 < a < 1, \quad 0 < b < 1, \\ a + b = 1, \quad b > a.$$

すなわち,  $j$  年生の高齢林の主林木は若齢時から相対的に大きな樹冠を有しながら生長してきたのであるが, 決して自由な樹冠拡張を行ってきたわけではなく, かなりの密度競争効果を受けながら生育を行ってきたものと考えられる.

実は, 今回の直径推定では高齢木の推定値が低くなる傾向をみせていたのであるが, その傾向も (4.10), (4.11) 式によって修正されることが期待される.

結局, 主林木の平均値より大きな林木は (4.10) なり (4.11) 式を, 主林木平均以下の林木は, より密度効果の大きい (4.6) 式の生長経過を辿るものと考えられる.

#### 4.4. 密度管理施業の林分生長に関する考察

前項により,  $j$  年生時に平均的な主林木であった林木の,  $j$  年前の生長と  $j$  年から  $n$  年までの断面積生長は次式で示されることになる.

$$G_n = \pi K \left\{ \sum_{i=0}^{j-1} (a \alpha_i^2 + b \alpha_i^2) C(x)_i + \sum_{i=j+1}^{i=n} \alpha_i^2 C(x)_i \right\}. \quad (4.12)$$

$$\text{ただし } a + b = 1, \quad a < b.$$

つまり, 優勢木であった  $j$  年生までは, 主林木の素質的なものに応じて大きく生長し, 密度の影響は比較的小さかったものと思われるが,  $j$  年より後は密度の影響を強く受けてこれまでよりは相対的に小さな生長量に移行するものと考えられる. このことから, 同一樹高(同一地位)の林分に同一の本数管理を行ったとしても, 間伐方式の相違によって林分材積の生長量にかなり大幅な差を生ずることを示唆している.

- 劣勢木間伐 = この報告でとりあつた収穫表は, 全部が劣勢木間伐の施業下にあ

った林分を対象にしたものと考えてよい。優勢木は密度管理の影響が小さく、相対的に大きな生長量を維持しているため、林分材積は最も大きいと考えられる。ただ、林木が密度効果を受ける割合が小さいため、年輪幅の調整は困難な場合が多いとみられる。この意味での優良木は、主林木より小さなものに見出される確率が高い。

○ 全層間伐＝間伐対象木を優勢木、劣勢木にかかわらず同等に行う場合は全層間伐と呼ばれている。この場合(4.12)式は、平均以下の林木が間伐後それなりの樹冠拡張を行うが、優勢木には転じないことを意味しており、結局、林分材積は劣勢木間伐より小さくなる。

○ 優勢木間伐＝中庸木・劣勢木は、間伐後、それなりの樹冠拡張を行って生長をつづけるが、これまでの優勢木にとってかわるほどの生長増は期待されない。従って、林分材積は、最も少なくなるはずである。

○ 同勢木の間伐＝優劣生長のあるウツ閉林では、単純平均で求めた単木空間面積よりも優勢木は40%程度も広い空間を占有し、逆に劣勢木は40%程度も狭い空間しか占めないことが見出される。同勢木は、このような差がないわけであるので、間伐後も優勢木と平均以下の林木との中間の生長経過を辿るものと思われるが、劣勢木間伐の場合よりは林分材積は少ないことが考えられる。

○ 複層林の間伐＝本来優勢木となりうる素質をもった林木が、下層木として被圧されていた場合は、上層木の間伐によって飛躍的に生長を増すことが期待されるが、その素質がない木は、それほど生長増は期待されないものと考えられる。総じて、間伐をすれば、確かに残存木の樹冠が拡大し、直径生長の増大が見られるのであるが、急に強度の間伐をしても、すべての林木が、飛躍的な生長増をすることは、ありえないものと考えられそうである。

## 5. 呼吸消費と樹冠構成

葉面での同化作用による生産物質は、すべてが、樹幹等の固体物質の生産に回るわけではなく、生命維持のために呼吸消費として無形的に失われているものが多いとされている。とくに樹幹が大形化すると、その大きな生命体を維持するために、生長と共に(林齢と共に)呼吸消費を増すことが知られている。

本研究のこれまでの解析では、有形物質の生産モデル、即ち純同化モデルとしては、かなり十分な適合性が得られたのであるが、この同化物の無形消費については説明がなされていない。この無形消費についても適切な解析が行い得ないと、モデルとしては不完全なので、この間の事象について若干の検討を試みてみたい。

さきに、樹冠長から同長の部分に相当する樹冠層(同年時生成層)は、受光条件(直接照射光と透過光を含む)が同一であり、その層の樹冠量が林木の全同化量に比例するものと考えた。そして、その指標値として冠頂部で1m深に相当する樹冠層を計量したのであるが、この樹冠量と林分材積との関係は、地位、施業差で大きく分かれた曲線関係となったことが認められた。一方、1年間の新葉樹冠量(この樹冠の頂部厚は樹高生長によって大きく異なる)にのみ着目すると、林分材積との関係は地位、施業にかかわらず、同一の直線関係となっていることが認められた。

冠頂で 1 m 深に相当する樹冠層は、たとえ地位、施業差を異にしても、受光状況が物理的に同一と見られるので、この樹冠体積が純同化と呼吸消費等の無形同化とを合せた総同化量に比例するものと考えてよい。一方、1 年間の新葉樹冠量が純同化に比例する量と考えると、冠頂部で 1 m 深に相当する樹冠層の体積と新葉樹冠層の体積との差が無形同化量に比例する量と考えることが出来る。そこで収穫表をもとに各林齢の林分における 1 m 層厚の表層樹冠体積和と樹冠の連年生長量に相当する新葉樹冠体積和とを求め、その差について検討をすすめることにした。

表 5-1 に 飢肥地方、熊本地方、天城地方のスギ林収穫表から計算した冠頂で 1 m 深に相当する表層林冠体積 ( $Cv_{1.0}$ : 全同化林冠体積)、1 年生の新葉林冠体積 ( $Cv_{1n}$ : 材幹同化林冠体積) を林齢別にかかけ、図 5-1 と図 5-3 に 飢肥と熊本一般における 1 m 相当厚の林冠体積  $Cv_{1.0}$  と 1 年生新葉林冠  $Cv_{1n}$  との樹高生長に伴う推移を、また図 5-2 と図 5-4 に 飢肥と熊本一般における 1 m 厚林冠と 1 年生新葉林冠との体積差 ( $Cv_{1.0} - Cv_{1n}$ ) を示している。

図から読みとれるように、1 m 深の林冠体積は樹高が 10 m 以下では急増し、その後 20 m 近くまでは漸増、それからは横ばいの傾向を示しているのに対して、1 年生新葉林冠 (純同化比例) は樹高 10 m 前後まで急増した後は、これをピークにして、その後は漸減する傾向をみせている。結局、呼吸消費量を指標すると思われる「1 m 深林冠と 1 年生新葉林冠との差」は、図 5-2、図 5-4 に見られるように樹高と共に増加する傾向をみせることになり、当初の仮定が正しいものとするれば、呼吸消費等の無形同化量は、樹高が高くなるにつれて増加していることが裏付けられたことになる。

また、1 m 深の林冠体積 (全同化指標) は地位が低いほど多量の値を示すのに対して 1 年生の新葉林冠体積 (純同化指標) は、逆に低地位ほど少量となり、結局その差 (呼吸消費指標) は、地位が低い林分ほど大きくなっている。低地位の立地は、土壤水分の pF が高く、そのため単位葉量当りの通発量が少なくなると、水量不足から葉の同化率が低下したものと考えられる。しかしその理由は明らかでない。

純同化を指標する新葉林冠量と林分材積生長量との関係は、地位の上下にかかわらず、一定の変換係数を示したことは、さきに述べたとおりであり、この点、純同化に関しては単位葉の同化能率は差がなく、前記の全同化が地位によって葉の能率を異にするとした論議と矛盾する。呼吸消費にからんで定量した樹冠量の差が、同化能率に起因して同化物質の生産量の多少を指標しているのか、それとも同化能率は同じあるが、生産された物質の消費の大小を反映しているのかは明らかでない。以下、この間の事情について若干の検討を加えてみよう。

○ 1 年間に生産される純同化物質の配分が、着葉量と樹幹の量との間に一定の比率を保ちながら行われるものとする、1 年生新葉樹冠と材積生長との関係は、前者の生理的同化によって後者が産み出されるのではなく、要するに全同化の結果として両者の間に見掛上の比例関係が保持されているに過ぎないことになる。つまり、1 m 層厚の樹冠量と新葉樹冠量との差は、厳密な呼吸消費の指標値となっているわけではなく、その差が地位が低いほど大きいことは、土壤の水に対する pF 増に伴って、樹木の通発量が低下する確率が高く、構成葉の同化能率が低下していることを指標しているものと考えられる。

○ 1 年生葉樹冠量に比例する量が直接純同化を行っているものとする、この量と材

表 5-1 各収穫表から計算した 1.0 m 深相当 (パラボラ樹冠層) の林冠体積と、林冠の年生長体積及び両者の差

Table 5-1 Calculated volume of 1.0 m depth parabolic crown layer of forest and annual growth of crown layer on different yield table where, (1) site classification, (2) forest age, (3)  $H$ : height of standard tree, (4)  $Cv_{1.0}$ : forest crown volume of 1.0 m depth parabolic layer, (5) forest crown volume of annual growing layer and (6) difference between  $Cv_{1.0}-Cv_{\Delta h}$

地林	飯 肥 地 方 Obi district				熊 本 地 方 Kumamoto district				天 城 地 方 Amagi district				
	位 齡 (1)(2)	$H$ (3)	$Cv_{1.0}$ (4)	$Cv_{\Delta h}$ (5)	差 (6)	$H$ (3)	$Cv_{1.0}$ (4)	$Cv_{\Delta h}$ (5)	差 (6)	$H$ (3)	$Cv_{1.0}$ (4)	$Cv_{\Delta h}$ (5)	差 (6)
上	10	8.0	5,646	4,295	1,351	6.2	5,321	3,209	2,112	5.0	2,699	1,349	1,350
	15	11.0	6,727	4,575	2,152	8.6	7,054	3,848	3,206	8.3	6,190	3,643	2,547
	20	14.0	6,509	3,851	2,658	10.8	6,761	3,133	3,628	11.2	7,377	4,480	2,897
	25	16.7	6,789	3,830	2,959	12.9	7,057	3,070	3,987	13.5	7,052	3,637	3,415
	30	19.1	7,163	3,642	3,521	14.9	7,415	3,084	4,331	15.3	7,309	3,036	4,273
	35	21.2	7,460	3,370	4,090	16.7	7,574	2,930	4,644	16.8	7,474	2,531	4,943
	40	23.2	7,571	3,130	4,441	18.4	7,652	2,737	4,915	18.0	7,667	2,138	5,529
	45	25.0	7,581	2,912	4,669	20.1	7,675	2,668	5,007	19.1	7,806	1,864	5,942
	50	26.5	7,660	2,531	5,129	21.5	7,667	6,437	5,230	20.0	7,881	1,640	6,241
	55	27.8	7,548	2,152	5,396	22.9	7,646	2,203	5,443	20.7	7,912	1,322	5,939
60	29.0	7,522	1,922	5,600	24.3	7,608	2,190	5,418	21.4	7,913	1,152	5,685	
中	10	6.7	5,394	3,487	1,907	5.2	4,091	2,115	1,976	3.4	2,637	946	1,691
	15	9.2	6,203	3,541	2,662	7.2	5,794	2,760	3,034	6.5	6,248	3,183	3,065
	20	11.7	6,610	3,305	3,305	9.0	6,413	2,493	3,920	9.0	7,301	4,048	3,253
	25	13.9	7,002	3,298	3,704	10.8	7,020	2,593	4,433	11.0	7,055	3,196	3,859
	30	15.9	7,312	3,099	4,213	12.4	7,524	2,622	4,902	12.6	7,371	2,716	4,655
	35	17.7	7,530	2,898	4,632	13.9	7,806	2,491	5,315	13.8	7,706	2,232	5,474
	40	19.3	7,678	2,654	5,024	15.3	7,911	2,365	5,546	14.8	7,941	1,826	6,115
	45	20.8	7,760	2,451	5,309	16.7	7,960	2,295	5,665	15.7	8,040	1,601	6,422
	50	22.1	7,803	2,231	5,572	17.9	7,958	2,136	5,822	16.4	8,029	1,351	6,041
	55	23.2	7,836	1,925	5,911	19.1	7,938	1,972	5,966	17.0	8,025	1,098	5,660
60	24.2	7,865	1,694	6,171	20.2	7,907	1,884	6,023	17.5	8,114	939	5,466	
下	10	4.2	5,208	2,786	2,422	4.2	3,454	1,485	1,969				
	15	5.8	6,313	2,988	3,325	5.8	6,795	2,601	4,194	4.7	5,224	2,475	2,749
	20	7.2	6,461	2,629	3,832	7.2	6,875	2,153	4,722	6.8	7,332	3,296	4,036
	25	8.6	7,096	2,666	4,429	8.6	7,176	2,100	5,076	8.5	7,406	2,897	4,509
	30	9.9	7,596	2,560	5,036	9.9	7,431	2,090	5,341	9.9	7,283	2,339	4,944
	35	11.1	7,905	2,505	5,400	11.1	7,715	2,009	5,706	10.9	7,594	1,904	5,690
	40	12.2	8,069	2,231	5,838	12.2	7,974	1,911	6,063	11.6	7,894	1,413	(6,066)
	45	13.3	8,180	2,017	6,163	13.3	8,152	1,869	6,256	12.3	8,172	1,211	(5,903)
	50	14.3	8,244	1,948	6,196	14.3	8,233	1,800	6,433	12.8	8,382	1,063	(5,786)
	55	15.2	8,274	1,703	6,571	15.2	8,275	1,639	(6,596)	13.2	8,526	813	(5,483)
60	16.1	8,274	1,452	(6,315)	16.1	8,294	1,556	(6,481)	13.5	8,646	641	(5,284)	

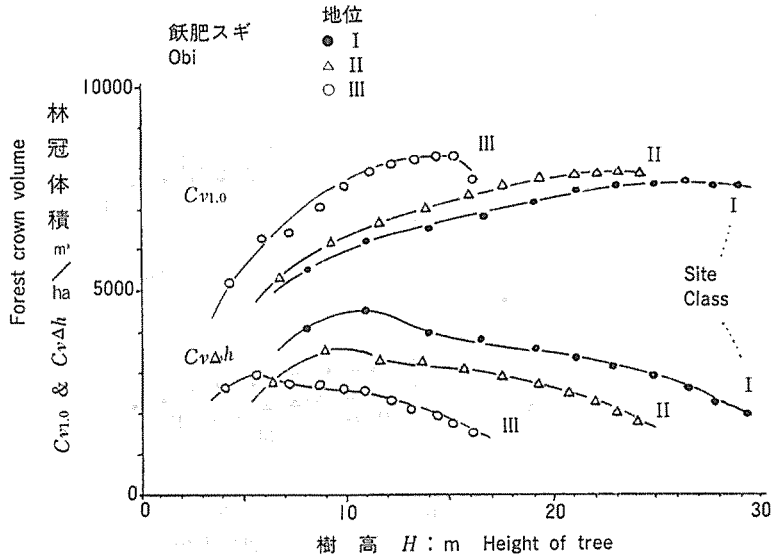


Fig. 5-1 Relations between height of tree and both of forest crown volume of 1.0 m depth parabolic layer (indicate total assimilatory value) and annual growth of layer (indicate net assimilatory value) on Obi Sugi (low density)

図 5-1 垂直厚で 1 m に相当する樹冠層の林冠体積と年生長量に相当する新葉林冠体積と樹高生長に伴う変化 (飢肥スギ)

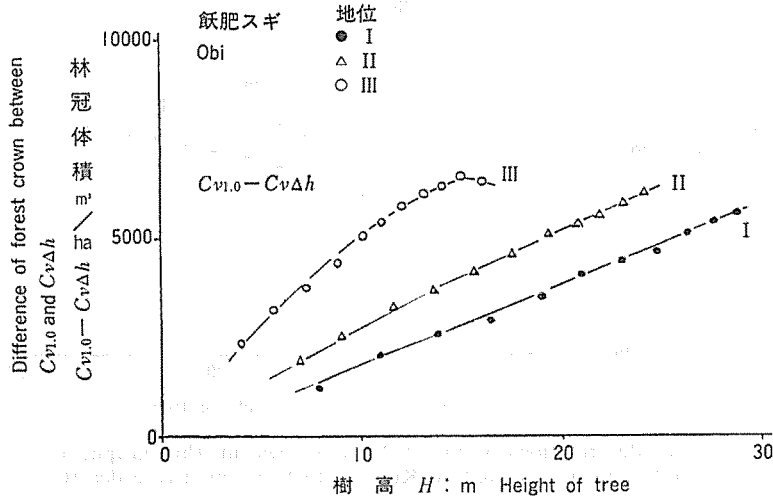


Fig. 5-2 Relations between height of tree and difference of both forest crown volume of annual growth of layer and 1.0 m depth parabolic layer On Obi sugi (low density)

These difference indicate respiration value in assimilatory

図 5-2 垂直厚で 1 m に相当する樹冠層の林冠体積と年生長林冠体積との差 (飢肥スギ)



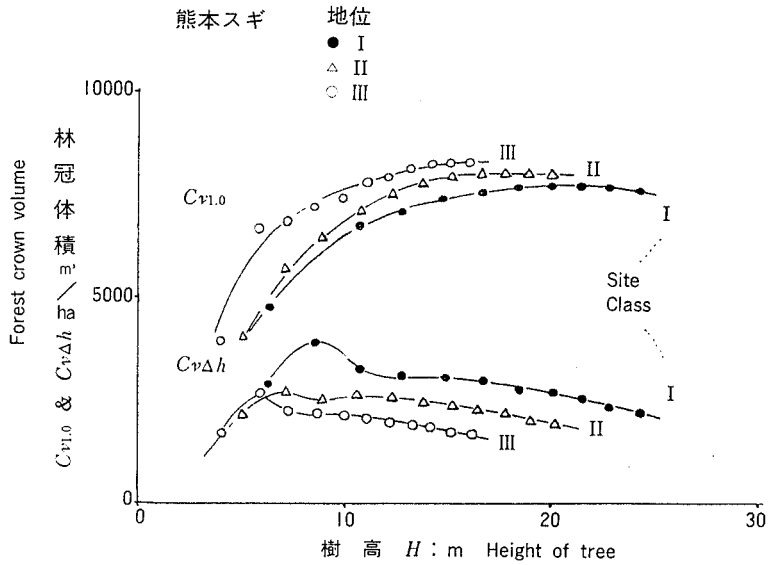


Fig. 5-3 Showing relations are same to Fig. 5-1, but they are indicated on Kumamoto Sugi (moderate density)

図 5-3 垂直厚で 1 m に相当する相冠厚の林冠体積及び、年生長量に相当する新林冠体積との樹高生長に伴う変化 (熊本一般)

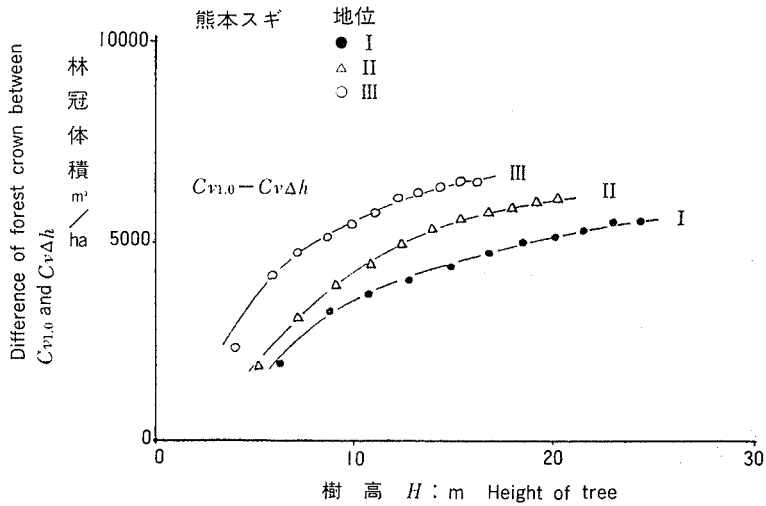


Fig. 5-4 Similar relations of Fig. 5-2 are shown in this graph, but these relations are dicated on Kumamoto Sugi (moderate density)

図 5-4 垂直厚で 1 m に相当する樹冠層の林冠体積と年生長林冠体積との差 (熊本一般)

積生長量との比は地位，樹高とは無関係に一定であったことは，既にのべたとおりである。このように考えると 1 m 層厚の樹冠の同化能も，地位等にかかわらず同値でなければな

らず、樹冠量が同じであれば同化量も同じでなければならないことになる。この場合、1 m 厚層樹冠量と同じでありながら、新葉樹冠量に差があることは、同化物質の無形消費量が地位によって異なり、純同化に配分される物質量が違ってくるためとも考えることが出来よう。さきに述べたように低地位では土壌水分の pF 値が高く吸水が困難なので、物理的には水を樹体内に吸収し、さらに、上部にそれを運搬するために多量のエネルギーを消費することが考えられるのであるが明らかでない。植物の水分吸収機構では、機械的な揚水ポンプとしてエネルギーを使っているとは考えられない面があり、不都合さが感じられる。

○ 樹高が高くなるほど、生命体としての幹材積や枝葉部分の量が増え、その生命を維持するために呼吸消費が増大する。この結果高齢林になると純同化に配分される同化量が減少し、樹幹の生長量が低下するものと考えられている。しかし、前記で同様に水分問題を取上げると、樹木が高くなるほど、水を吸上げるためのエネルギーが増加することが考えられるのであるが明らかでない。

○ スギの着葉は4～5年とされているか、林齢が高齢化したり、あるいは低地位の林分では、樹高の連年生長量が0.2 m に達せず、5年分の林冠厚も1 m 未満となる。このような状況下になると、全同化に必要な林冠体積が、樹高や林齢の増加と共に減少するようになり、樹幹生長量の低下は勿論、呼吸消費の方も頭打ちとなって、樹木は衰弱気味となって行く。このパラボラ樹冠モデルでは、このような傾向が地位と密度とによって変化し、低地位あるいは高密度施業で同化の頭打ちが早く現われることが推察された。

以上の論議は、非常に仮定の多い論議であるが、樹高（生体総量）の増大によって呼吸消費が増し、地位の低下と共に同化能が低下することが、この樹冠モデルによって類推されたことになる。

## 6. 林分樹冠量の推移と水土保持

### 6.1. 林冠量の林齢に伴う推移

スギの葉は、生育に伴って着葉後4～5年間は生葉として樹冠を構成しているものと考えられている。高地位では樹高生長量が年で1年に0.8 m も伸長することも珍らしくないが、この場合の樹冠厚は  $0.8 \times 5 = 4.0$  m となり非常に大きなものとなる。このような場合は5年間も着生せず、3～4年で枯れ始めることも考えられるのであるが、逆に低地位では、5年分の樹冠厚が1 m にも達しない場合が生じ、この場合は6～7年間も着葉していることも考えられる。しかしながら、ここでは全般的な傾向を見る目的で、地位・林齢にかかわらず、一律に5年間は着生するものとして、検討を進めることにしたい。

図6-1は飢肥スギ林（疎）と熊本地方スギ林（中庸）との林齢と5年分の林冠体積との関係を示したものであるが、林木の生長と共に林冠量を増し、15年前後で閉鎖してピークに達し、その直後に急減して、一時横ばい、30年以降は漸減する傾向が認められる。従来の調査報告でも、15年生内外の幼齢閉鎖林分で、林冠量は最大となり、その後やや急減するが、あとは横ばい状態（一定樹冠量を維持）をなすことがよく知られている（KIRA *et. al.*, 1967）等。このパラボラ樹冠モデルの計算によっても、このピークが良くあらわ

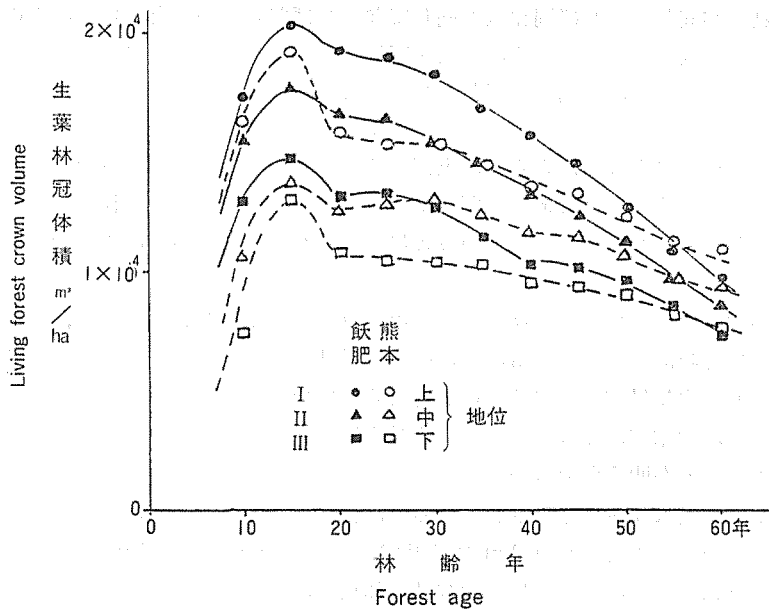


Fig. 6-1 Relation between forest age and volume of living forest crown which is estimated by parabolic layer model, where living crown  $5 \times$  annual growth of crown

図6-1 林齢と生葉林冠体積との関係

れている。ただ、従来は、ピーク時は除くと、林齢が増えても林冠量は、閉鎖林として一定値をとる傾向が強いとされていたのであるが、このモデルでは、30年以降で漸減しており、とくに飢肥スギの場合は、林齢と共に急減している点が異なっている。

現地での観察によると、高齢林では、樹冠間隙が増えて、林内が明るくなっていることがよく見受けられ、林冠体積の減少が感じられる。その状態には、むしろ、このモデルの傾向の方が正しいのではないかと判断された。

しかしながら、さきにも述べたように、生葉樹冠量があまりに少なくなると、老齡林の生長が説明されない面があり、現実には老齡林でも計算値よりも多量の林冠量が存在している可能性が強い。たとえば、これまでの論議は1m層厚を基準にして判断してきたのであるが、5年分の樹冠厚が計算上は60cm内外にとどまることも珍しくなく、このような場合には樹冠密度が疎で、樹冠内が明るく、着葉期間が7~8年以上の長期にわたって葉が着生するか、あるいは新葉の発生が、樹冠表面だけでなく、やや内側においてもなされている等のことが考えられる。

逆に、計算上の樹冠厚が2~3mと厚くなると着葉期間が短くなる可能性もあり、以上のことを勘案すると、現実林では、図6-1よりも林齢による樹冠量の変動が小さいのではないかと推論される。

## 6.2. 落葉量の林冠構成

落葉層は土壤表層部へ有機物を供給して、多孔隙のA層、B層を形成し、また直接的には地表を被覆して土壤表面の孔隙構造ひいては浸透能を雨滴の破壊から保護している。林

木は、この落葉の最大の供給者として知られているが、その供給量と森林構成との関係はあまりはっきりとは分っていない。

前節で述べたように、スギ林においては、樹冠を構成する葉の寿命は4~5年と考えられている。葉の枯死は、樹冠表面からの透過光量が不足するため、樹冠の下部あるいは内部から発生するものと考えられるが、当初に検討したように樹冠表面部の受光量は、現樹冠から一定年数前の樹冠形を差引いた部分の厚さ（中空樹冠の水平方向の厚さ）と比例するので、確率的には、同一年に生成された樹冠葉は、4~5年後に再び一斉に枯死するものとみてよいことになる。

そこで、いま葉の寿命を5年と仮定すると、 $i$ 年生林の枯死葉量は5年前の新生着葉量とほぼ等しいものと考えられる。

単木の枯死樹冠葉体積  $l_i$  は

$$l_i = 0.5 \pi \alpha_{i-5} (Cl_{i-5}^2 - (Cl_{i-5} - \Delta h_{i-5})^2)$$

$i$ 年生林分の年間の枯死樹冠体積  $L_i$  は

$$L_i = 0.5 N \pi \alpha_{i-5}^2 (Cl_{i-5}^2 - (Cl_{i-5} - \Delta h_{i-5})^2)$$

$Cl_i$ :  $i$ 年生の樹冠長

$\Delta h_i$ :  $i$ 年生の樹高連年生長量

上記の式で求められた年間の枯死林冠体積と林齢との関係は、図6-2に示すように、図6-1の曲線群（縦軸の単位は異なる）を5年間だけ右へ水平移動させたものとなっている。現実の閉鎖は10~15年で発現するが、年間枯死のピークはそれよりも5年遅れた20年生時に、その後一旦は目立った減少をみせてからは横ばいないし漸減、60年をす

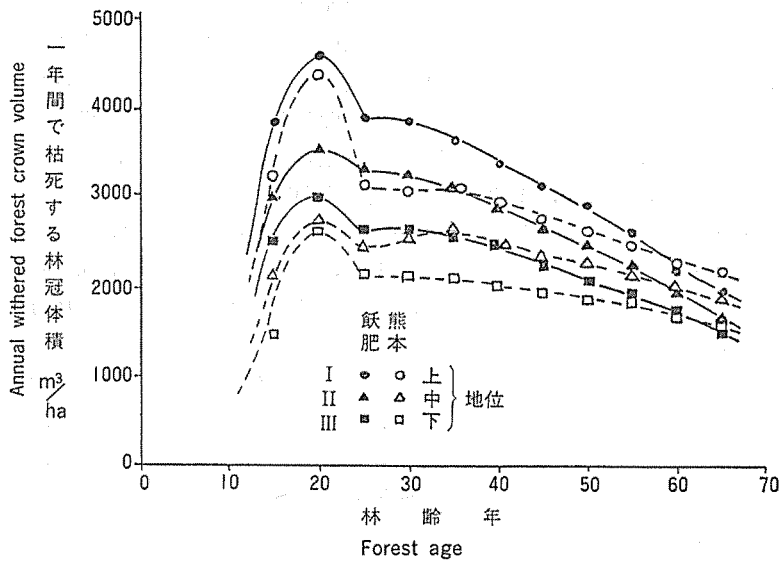


Fig. 6-2 Relation between forest age and volume of annual withered crown layer

図6-2 林齢と年間の枯死林冠体積との関係

ぎると、かなり少量となる。

さきに述べたように、樹冠厚が大きな15～20年生時代は、生葉としての着生期間が5年よりも短かく3年前後になることが考えられるため、枯死量は、図示の例よりは多量となる可能性が高く、逆に、樹冠厚が薄い高齢林では着生期間が6～7年と長くなることも考えられるので、枯死量は図示の場合よりも少なくなる可能性が高い。すなわち、着葉量の林齢変化は図6-1の場合より変動が少なくなる可能性が強かったのに対して、枯死量の林齢変化は図6-2の場合よりも、逆に変動幅が大きくなる可能性が強いと判断される。

一方、スギの枯死枝条は、無風状況下では自然に落下する傾向が極めて小さく、いつまでも樹冠内に留まっている傾向が強い。このため、樹冠の枯死量が、そのまま落葉量に比例するとは限らず、この間の関係は不規則なものとなっている。枯死枝葉が樹幹に付着している確率は幼齢林ないし早壮齢林時代に高く、樹高の高い壮齢～老齢林になると、幹揺れによる樹冠の接触が多くなるためか自然落枝が安定化している。

落葉量は、土壌の水源かん養機能の發揮や地力維持機構において、中枢的な役割を果しているものと考えられ、極めて重要であるが、閉鎖前の幼齢林では枯死量が少ないこと、幼齢～早壮齢林時代には枯死量が多いが、自然落枝が少ないこと、50～60年を過ぎる高齢木になると落葉はスムーズに行われるようになるが、樹冠の枯死量そのものが減少することが問題視される。また伐採行為は、伐採後に更新が行われても、その後の25年間と60年後の過熟林分とが落葉不足の状況をうみ出す可能性が高く、デメリットの多いことが肯定されよう。

### 6.3. 林内陽光導入のための密度管理

いま、例として樹高15m、枝下高5m以上のスギ林分を考えると、95%以上の林冠被覆率をもたらす立木密度としては、最低900本/ha程度から、最多で3,600本/ha程度の幅広い密度値をとりあげることが出来る。常識的には密度1,000本と3,000本とを比較した場合、当然前者の方が疎であり、林内も明るいのではないかと考えられるのであるが、低密度林分が明るいのは、これまで高頻度に間伐が行われてきた結果であるとみてよく、もし、当初から1,000本の林が無間伐のまま生育してきたならば、林内は決して明るくないと想像される。つまり、1,400本の密度を1,000本に低下させるといったことが、5年以内に行われた場合は別として、間伐後の経過年数が長い時には、1,000本も3,000本も同じ被覆率を示すことを語っている。もしも、初期の植栽本数が、6,000本であり、10年生以降に5年ごとに間伐を繰返して、現在が3,000本となっている林分であれば、却って林内は明るい場合もありうるわけである。

林内を明るくして林床に下草を生育させることは、落葉の被覆率を高度に安定させ、また下草自身の地表保護作用が期待されるので、土壌の水源かん養機能の維持、地力保全上重要であるが、スギ林の場合は、ともすると林冠が閉鎖して、林床を暗くし、下草を消滅させているので問題である。とくに10年～30年の幼～早壮齢林分は、閉鎖度合が強く、林冠も厚いので、その弊害が著しい。

年輪幅が小さい優良林を生産し、単位面積当りの材積の向上を目標とする経済林では、高密度で、しかも林冠の閉鎖を出来るだけ破らぬように密度を管理することが望まれ、間伐後に一旦疎開した林冠が出来るだけ早い期間に再閉鎖することが必要と考えられている。

これに対して、水土保全のためには、林床受光を計るため林冠被覆率を85~90%以下に維持するための間伐が必要であり、経済林の密度管理とは若干意味を異にしている。

林冠被覆面積率  $C_c$  は前記のとおり

$$C_c \times 10^4 = N \cdot \pi \cdot \alpha^2 \cdot Cl,$$

$$C_c = \frac{N}{10^4} \cdot \pi \cdot \alpha^2 \cdot Cl = \frac{NH^2}{10^4} \cdot \frac{\pi \alpha^2 Cl}{H^2} = \frac{\pi \alpha^2 Cl}{Sr^2 \cdot H^2}.$$

従って、林冠被覆率は立木密度  $N$  (樹高と密度とのかねあい定まる相対幹距  $Sr$ )、樹冠長  $Cl$ 、樹冠拡張係数  $\alpha$  によって定まるわけであるが、立木密度  $N$  は自然間引きを別にするとも間伐処理によって、樹冠長  $Cl$  と樹冠拡張係数とは樹高と密度管理 (間伐量と間伐の時間間隔) もしくは相対幹距  $Sr$  によって、とくに  $Cl$  は人為的には枝打ちによって数値が与えられるので、人為的な間伐・枝打ちを含めて、環境としては樹高と相対幹距とによって林冠被覆率が規定されることになる。

これまで利用してきた餌肥スギ林、熊本地方スギ林、天城地方スギ林の収穫表を利用して、相対幹距の樹高に伴う推移を検討すると、幼齢林時代には相対幹距が0.25~0.3の値から出発した林分も樹高10m以上になると、以後は地方の施業上の疎密特性と地位とに応じて、ほぼ一定の相対幹距を呈するようになっていくことが認められる。各収穫表によって樹高10m以上の相対幹距の変化を整理してみると、おおよそ下記のとおりであり、グラフ上に示すと図6-3のとおりである。

餌肥スギ林	( ) 内は樹高		
1等地	0.23 (10 m)	0.22 (16 m)	0.21 (30 m)
2等地	0.24 (10 m)	0.225 (16 m)	0.215 (22 m)
3等地	0.25 (10 m)	0.24 (16 m)	
熊本地方スギ林			
1等地	0.195 (10 m)	0.18 (16 m)	0.17 (30 m)
2等地	0.205 (10 m)	0.195 (16 m)	0.19 (22 m)
3等地	0.22 (10 m)	0.205 (16 m)	
天城地方スギ林			
1等地	0.185 (10 m)	0.17 (16 m)	0.18 (30 m)
2等地	0.19 (10 m)	0.185 (16 m)	0.19 (22 m)
3等地	0.20 (10 m)	0.205 (16 m)	

上記の結果を検討すると、低密度施業で知られる餌肥スギ林では、相対幹距が0.22程度、普通施業の熊本地方スギ林で0.195、やや高密度施業の天城地方スギ林では0.185程度となっていることが認められる。一般的な傾向として同一地方であれば、1等地、2等地、3等地の順で低地位の方が、それぞれ相対幹距が0.015ほど高値を示し、また樹高が20m、30mと高くなると相対幹距が低くなる傾向をみせている。但し、天城地方では逆に高くなり一様でない。結局、樹高10m以上では樹高による変化は一応無視することもできるので、それぞれの地域・地方での密度管理目標に従って、10mの場合の相対幹距 ( $Sr$ ) を選択し、その後は、樹高値と決定した  $Sr$  によって対応する密度を計算し、密度管理、さらには樹冠長管理 (枝打ち) を行えば良いのではないかと考えられる。たとえば、中庸の施業を行おうとするならば、相対幹距を0.15から0.2の間の数値に定め、一度設定した相対幹距値が、伐期までの間に、0.015以上は変化しないように5年ごと (長

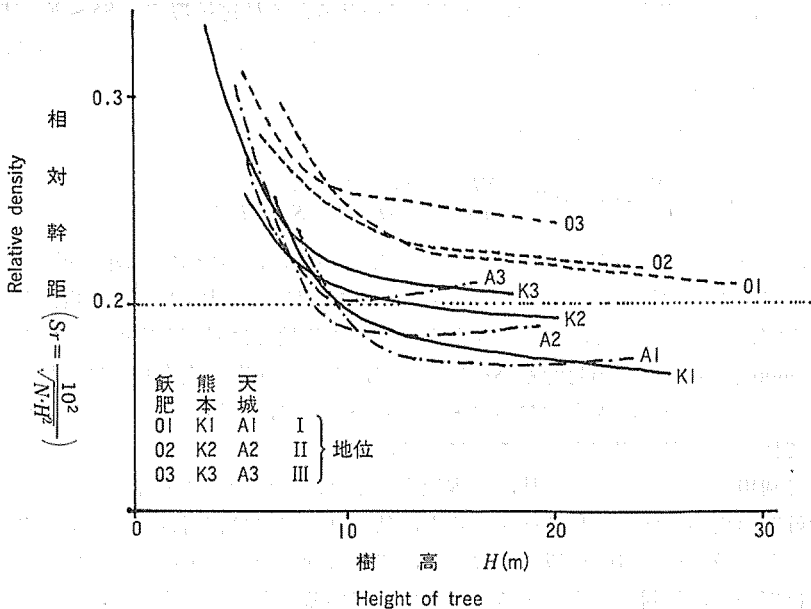
Fig. 6-3 Relation between height of tree ( $H$ ) and relative density ( $Sr$ )

図 6-3 樹高に伴う相対幹距の推移

くとも 10 年ごと) に間伐を行い, その中間に枝打ちを行うような施業を実施して行けばよいのではないかと考えられる。

林床受光を考慮した場合, たとえ間伐率が低率でも, 5 年毎に間伐を実施するような集約施業を行えば, かなり高密度の林分でも下草の生育が期待されるのであるが(さらに間伐の間に枝打ちを行えば 6 年ごとでもよい), 間伐のインターバルを 10 年におくと, 少々低密度で, 強度の間伐を行っても, 6~8 年後には林内が暗くなってしまうことが多いようである。

現存林分の材積最大を望みながら, 健全木の生育を望むのであれば, 林冠閉鎖後(林床暗い) 2~3 年もしてから間伐を行えば良く, これに対して, 水土保全のためには, 林冠が閉鎖する前に間伐を実施しつづけることが, 根本的な施業上の差となっている。この場合, 後者の林分材積が前者に劣り, しかも後者の年輪形質が不良な場合が多いのであるが, 前者の施業の間に枝打ちを併用して行けば, 総材積, 形質, 林床受光の 3 要求を達成することも無理でないように考えられる。

つぎに, 観察事項をまじえて間伐の幾何学的方式について検討を加えてみよう。本来, スギの樹冠は円形をとろうとするため, 隣接木との間隔が前後の 2 方向では狭く, 左右の 2 方向では長いとしても, 空間的に余裕のある左右方向にのみ枝を伸長させるとは限らず, 前後の間隔が制約要因となって, せいぜい楕円形をとる程度で止まることが多い。

従って, ある閉鎖林分を均等に疎開させれば, 樹冠の拡張は円形を保ちながら, 比較的自由に行われて, やがては再び閉鎖するのであるが, これを列状に間伐した場合は, 必ずしも閉鎖がスムーズには行われない。即ち列状に疎開させた場合は, 行間の林木間隔は当初のまま狭く維持されているので, その小間隔が制約要因となって, 列状空間への樹冠の

張り出しが充分には行われにくいためである。

このような現象は、これまで、林木一本当りの空間を単純に立木密度だけで算出したのとは異なるわけで、この報告でのモデルでの例外事象としてとり上げておくことが必要である。

このような林木の樹冠発達上の幾何学的制限は、列状間伐だけではなく、巢植えや群状間伐のように、樹間距離がある特定の方向で長短異なっている場合も同様ではないかと考えられる。樹冠の長半径が短半径とのバランスから抑止されるため、樹冠の閉鎖が完全には行われず、従って、林分材積生長の最大は望めないが、間伐後も林床を長く明るくすること（下草生育維持）と、樹幹の年輪幅調整等に利点が見出されそうである。

間伐を短い時間間隔で高頻度で行うことが最も望ましいのであるが、その実施が無理な場合も多いので、このような列状間伐を行うことが、作業能率と効果維持の面からも有利と考えられそうである。

## 7. 結 論

スギの樹冠形がパラボラで表現され、その変形が樹高生長に伴う上方への平行移動と、密度減に伴う拡張によって行われるものと仮定すると、一定年時間に発現する樹冠の側方伸長量は、物理的な受光量と比例関係にあることが認められた。またその応用的な面では樹高生長曲線と立木密度の年次変化が与えられれば、このモデルによって、林分材積が地位、施業にかかわらず、一定の関係式で、しかも高精度に推定され、さらに樹幹生長のパイプモデルを用いることによって、単木材積、単木樹形をも高精度に推定することが検証された。

このモデルによって計算した林冠量の年次変化が、これまでの森林構造解析で得られている知見と合致し、林冠で行われる同化作用についても、純同化と呼吸消費とが、林木の生育と地位によって変化することが把握され、林冠の枯死量、ひいては落葉枝量の推定をも行うことが可能となった。

施業面については、相対幹距を媒介にしてその目標に応じて、密度管理指針を容易に算出することが可能と考えられた。

以上の検討によって、パラボラ樹冠形モデルが、スギ林の生長、構造解析上極めて有効であることの結論を得た。

## 謝 辞

本研究は調査費の一部として文部省科学研究費一般研究B（代表者西沢正久教授）、最適用伐計画法に関する研究（1981～1983）を利用した。調査に御協力頂いた西沢正久教授（現在九州産業大学教授）、長 正道教官、増谷利博教官、清水 晃氏（現在林業試験場北海道支場）、青柳高嘉氏（現在福岡県）に深甚の謝意を表します。また、樹冠構成と密度管理、その生態的意義については、西沢正久教授、清水 晃氏、矢幡 久教官、中尾登志雄教官に御討議を頂き、統計計算については丸谷知己教官に労をお掛けしました。深く感謝申し上げます。



## 引用文献

- 橋本良二・順崎民雄 (1983): スギ人工林の光合成生産機構に関する研究 (IV) 立木の光合成. 日林誌 65: 408~416
- 梶原幹弘 (1983a): 相対幹形とその幹材積推定への利用に関する研究 (I) 相対幹形変化のメカニズムと動向. 日林誌 65: 82~88
- 梶原幹弘 (1983b): 相対幹形とその幹材積推定への利用に関する研究 (III) 同齢林のスギでの相対幹形といくつかの正形数の変化. 日林誌 65: 382~387
- KIRA, T. and SHIDEI, T. (1967): Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystem of the Western Pacific. Jap. J. Ecol. 17: 70~87
- 清水 晃・竹下敬司・西沢正久 (1984): 森林の水土保全機能に関する森林構造学的研究. 九大演報 54: 1~84
- SHINOZAKI, K., YODA, K., HOZUMI, K. and KIRA, T. (1964): A quantitative analysis of plane form—the pipe model theory. I. Basic analysis. Jap. J. Ecol. 14: 97~105
- 只木良也 (1968): 森林の生産構造に関する研究 (XIV) コジイ幼齢林の一次生産についての第3回報告. 日林誌 50: 60~65
- 高田和彦・小林正吾 (1983): 最終回の間伐以後のスギ林分における直径および断面積生産量と競争因子の関係. 日林誌 85: 113~118

## Summary

As a result of surveying to crown form of Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) in forest it is considered that the appearance of crown form is expressed by the parabolic shape.

$$y = \alpha \cdot x^{0.5},$$

where  $y$ : radius of crown (m).

$x$ : distance from crown top (m).

$\alpha$ : expanding coefficient of crown radius, which is increased accompany with decrease of tree density.

$$Cr = \alpha \cdot Cl^{0.5},$$

$Cr$ : maximum radius of crown bottom.

$Cl$ : length of living crown.

Horizontal thickness of parabolic layer between surface parabola and inner parabola which is surface of former crown is in proportion to luminous intensity on the same phase of parabolic surface, so it seemed that the parabolic crown model is physically reasonable under light condition.

As a result of measurement to forest stand, it is recognized that length of living crown ( $Cl$ ) is regulated by both density of forest stand and height of tree.

Their relation is expressed by following equation (Fig. 2-1).

$$Cl = (2.125 - 3 \cdot Sr) \left\{ (H+1) \left( \frac{Sr}{0.375} \right)^{0.7} - 1 \right\}.$$

$$Sr = 10^2 / \sqrt{N \cdot H^2}$$

where  $H$ : height of stander forest tree (m).

$N$ : tree density of forest stand (number, of stem/ha).

$Sr$ : relative density (ratio between average distance from surrounding tree and height of tree).

As for expanding coefficient of crown, it is shown in following equation.

$$\alpha = \sqrt{(Cc \cdot Sr^2 \cdot H^2) / (\pi \cdot Cl)}$$

After crown closed, degree of crown closure ( $Cc$ ) is regulated following relations (Fig. 2-4).

$$Cc = 1.0, \quad \text{when } 7.5(\text{m}) \leq H \leq 12.5(\text{m}),$$

$$Cc = 1 - (H - 12.5) \cdot 10^{-2}, \quad \text{when } 12.5(\text{m}) \leq H,$$

in the low site class (height of tree at 40 years old < 13 m).

$$Cc' = 0.9 \cdot Cc.$$

In this study, following two relation are investigated. The one is relation between volume of forest stand and accumulative volume of forest crown which is calculated with parabolic crown model. The other is relation between stem form (mainly D. B. H.) and volume of parabolic crown layer.

(1) Volume of forest stand

Accumulative growth of forest during  $j$  years is recognized as volume of forest stand at  $j$  age ( $V_j$ ), and accumulative volume of annual growth of crown layer during  $j$  years ( $CV_j$ ) is shown in following.

$$CV_j = 0.5 \cdot \pi \cdot \sum_{i=0}^{j-1} N_i \cdot \alpha_i^2 \cdot \{Cl_i^2 - (Cl_i - \Delta h_i)^2\},$$

where  $\Delta h_i$ : annual increment of height of tree at  $i$  age.

In this report,  $V_j$  and  $CV_j$  are aquired or calculated by following published some yield tables which are classified in three rank of site, and individually characterized by typical density; Obi district is low density, Kumamoto district is moderate density and Amagi district is slightly high density.

Investigation of relation between  $V_j$  and  $CV_j$  brought as following equation: this equation is shown in simple linear relation regardless of difference of age, density and site class (Fig. 3-3).

$$V_j = 4.29 \cdot CV_j \cdot 10^{-3} - 8.32$$

$$\approx 4.2 \cdot \sum_{i=0}^{j-1} N_i \cdot 0.5 \cdot \pi \cdot \alpha_i^2 \cdot \{Cl_i^2 - (Cl_i - \Delta h_i)^2\} \cdot 10^{-3} (\text{m}^3),$$

coefficient or correlation  $R = 0.995$

standard error  $Se = 18.6 (\text{m}^3)$

As a result, it is expected that increment of stem volume is in proportion to increment of crown volume.

(2) Stem form

It is well known as a pipe model produced matter by assimilatory of some crown is equally supplied to stem surface below the crown. Therefore, annual

increment of stem section is proportioned to annual increment of crown.

When parabolic crown model applied to this pipe growth model, diameter ( $D_j$ ) of stem at  $x$  (arbitrary point on stem) is expressed by following equation.

$$D_j = 2 \cdot \left\{ K \cdot \sum_{i=0}^{j-1} \alpha_i^2 \cdot C(x)_i \right\}^{0.5},$$

$$C(x)_i = \{ H_i \cdot l_n(H_i) - (H_i - \Delta h_i) \cdot l_n(H_i - \Delta h_i) - \Delta h_i - \Delta h_i \cdot l_n(H_i - x) \},$$

but case of  $x > Cl$ ;  $x = Cl$ .

$C(x)_i$  value are calculated by data in the yield tables above mentioned.

Diameter at 1.2 m height (D. B. H.) is estimated by both different equation.

$$\hat{D}_{1.2i} = 2 \cdot \left\{ 42 \cdot \sum_{i=0}^{j-1} \alpha_i^2 \cdot C(x)_i \right\}^{0.5},$$

$$\hat{D}_{1.2j} = 2 \cdot \left\{ 42 \cdot \alpha_j^2 \cdot \sum_{i=0}^{j-1} C(x)_i \right\}^{0.5}.$$

On the comparison between both estimated value and measured value of D. B. H. following results are recognized.

$$\hat{D}_{1.2i} < D_{1.2} \leq D_{1.2j} \quad (\text{Fig. 4-4})$$

$$D_{1.2} = 1.004 \cdot \hat{D}_{1.2j} - 0.153(\text{cm}). \quad (\text{Fig. 4-3})$$

$$R = 0.995,$$

$$Se = 1.24,$$

but  $K = 40 \sim 42$ .

These results suggest that standard tree on  $j$  years old forest given by the yield table has been dominant tree before  $j$  age, and he has kept larger expanding coefficient, and he has been keeping to produce larger growth matter, and then his D. B. H. has kept larger value than average value on younger forest (before  $j$  age).

Based on above mentioned results, we will be able to describe stem form and ring form under the voluntary conditions such as different density control, if we have taken height growing curve (Fig. 4-2, Fig. 4-5, Fig. 4-6).

### (3) Respiration value

It is considered that constant depth of parabolic layers on different tree crown have similar function of assimilatory over certain level. Therefore, volume of 1.0 m depth parabolic crown layer is in proportion to total assimilatory value. The other hand, we have already known that net produced value is in proportion to volume of annual growth of crown layer.

We will be able to estimate respiration value as difference value between total assimilatory indicated by 1.0 m depth parabolic crown layer and net produced value indicated by annual growth of crown layer. As a result, it is recognized that respiration value is more larger in higher tree and in lower site class (Fig. 5-1~5-4).