トドマツ人工林の林分閉鎖と密度管理に関する研究

増田憲二郎*

The study of the stand closure and the stand density control of planted forests of *Abies sachalinensis* MAST.

Kenjirō MASUDA*

目　　次

はじめに…… 31
材料と方法…… 31
定　　義…… 33
適用と結果…… 35
1. クローネ曲線式の適用…… 35
2. 枝張り生長曲線式の適用…… 36
3. 未閉鎖林分における交点枝張り…… 36
交点枝張り図…… 37
1. 樹高と交点枝張り…… 37
2. 本数密度別の交点枝張り…… 37
3. 林分閉鎖比…… 38
4. 枯れ上り枝張りの林分閉鎖比…… 38
5. 基準林分の交点枝張り…… 38
6. 林齢線と直径線…… 39
7. 交点枝張り図の構成…… 40
交点枝張り図の利用…… 40
1. 林分の閉鎖区分…… 40
2. 年輪密度管理図…… 41
3. 交点の高さの読み取り…… 42
4. 交点枝張りと枝打ちの許容高…… 43
5. 林分閉鎖の診断と予測…… 44

* 北海道立林業試験場　Hokkaido Forest Experiment Station, Bibai, Hokkaido 079－01

〔北海道林業試験場報告　第21号　昭和58年12月　Bulletin of the Hokkaido Forest Experiment Station, No. 21 December, 1983〕

考　　察…… 47
摘　　要…… 48
文　　献…… 49
Summary…… 49
付　録　1．クローネ曲線の求め方……51
　〃　　2. 林分の閉鎖と生長の解析……53
　〃　　3. トドマツ年輪密度管理図……54
　〃　　4. 林分閉鎖早見図のつくり方……58

図　表　目　次

図－１　クローネの閉鎖模式図…… 34
〃－２　樹高に対するクローネ曲線…… 35
〃－３　樹高に対する係数Ｃの分布…… 35
〃－４　立木本数密度差と係数Ｃの変量との相関…… 35
〃－５　枝張り生長曲線…… 36
〃－６　幼樹の樹高と枝張りとの相関…… 36
〃－７　樹高と係数Ｃおよび交点枝張りとの関係…… 37
〃－８　基準林分の交点枝張り線…… 39
〃－９　基準林分の林齢線と直径線…… 39
〃－10　交点枝張り模式図…… 41
〃－11　基準林分の過閉鎖度…… 41
〃－12　年輪密度管理模式図（等年輪幅線を基準にした本数管理例）…… 42
〃－13　交点の高さとクローネの枯れ上り高…… 43
図版　Ⅰ　トドマツ交点枝張り図…… 45
図版　Ⅱ　林分閉鎖早見図…… 46
　〃　Ⅲ　年輪密度管理図（トドマツⅠ等地）……55
　〃　Ⅳ　　〃　　（　〃　Ⅱ〃）……56
　〃　Ⅴ　　〃　　（　〃　Ⅲ〃）……57
表－１　供試木一覧表……32
〃－２　枝枯れまでの所要時間……43
付図－１　遡り年のクローネ曲線の描き方……51
　〃　－2　樹幹・年枝生長の半縦断面図…… 51
　〃　－3　クローネ曲線の係数および定数の読み取り方…… 52
　〃　－4　年輪幅直径生長…… 53
　〃　－5　林分閉鎖早見図のつくり方…… 58
付表－１　枝傾斜角交会点の座標値……51

は じ め に

クローネの形と大きさは，林木の生長を判断する最良の指標と考えられている。しかしながら，クローネの形状に基づいて林分管理を行なうという手法は，現在までのところ開発されていない。

この研究は，トドマツ人工林の樹高生長を基準において，クローネの形状と林分閉鎖との関係を明らかにし，これをもとに，立木本数密度，林齢，年輪幅の相互関係にまで考察を及ぼし，年輪幅に目標を置いた林分管理の指針を得ようとしたものである。

この研究においてわたくしは，枝張りの競合に基づくクローネ形状の変化に着目した。そこで本来のクローネ形状を，梢頭部から下方に向うクローネ半径の外縁を表わす放物線状の曲線（クローネ曲線）と，林齢の経過によって上昇拡大する最大枝張りの生長経過を表わす曲線（枝張り生長曲線）との合成によるものとして理解した。これを表わす方法として，それぞれの曲線に適合する曲線式を導いて，両式で描かれる曲線の交点を幹軸からの距離で表わし，これを交点枝張りとして用いた。

この過程においてわたくしは，クローネ曲線が，林分生長に伴って生長することを，また同一樹高ならば，立木本数密度の影響をうけて変化することを見いだした。したがって，交点枝張りもまた樹高生長とともに生長し，立木本数密度の影響をうけて変化する。言い換えれば，交点枝張りを仲立ちとすることによって，樹高と本数密度との間にある諸関係を知ることができるし，それをもとに，林分の混み合い方についての情報をも得ることができるわけである。この関係を，樹高と交点枝張りとの関係で表わす交点枝張り図として図示した。

また，基準となるような林分の交点枝張りを仲立ちとして，同図に直径および林齢を導入し，これら相互の関係を把握することを試みた。

また，これらの試みによって得られた成果に基づいて年輪密度管理図を作成することにより，任意の年輪幅に目標を置いた最適植栽密度の選定にはじまる密度管理の指針を見いだした。

さらにまた，密度管理に伴って現われる枝打ち許容高の求め方のほか，林分閉鎖に関して，閉鎖現況の診断や，閉鎖の推移を予測する方法を見いだした。

本研究に用いた資料を得るための調査に際し，多大の協力を賜わった鈴木　巖氏，ならびに本稿の編集にあたり，とくに貴重な助言を賜わった道立林業試験場の菊沢喜八郎博士，東浦康友氏，ならびに，英文の校閲に協力を賜わった Mr. ＋Mrs. ― Saul&Mary Kay Stensvaag 両氏の各位に対し，心より謝意を表する。

材 料 と 方 法

本研究は，主として昭和 35 年から同 36 年に，道有林池田経営区川上・久保の両地域において，表－１に掲げた林分を対象に実施したものである。

調査の方法は，それぞれの林分ごとに設けた標準地内の胸高直径６cm 上の立木を対象にして，胸高直径の頻度分布のモードの中から枝張りの整った木を選んで供試木とし，これにそれぞれの地域名と標準地番号を付して表わし，つぎの調査を行った。

年枝の生長調査：川上地域の４本の供試木に対して，樹高および枝階ごとの節間長を測定した。さらに枝階ごとに，着生しているすべての枝について枝の年伸長量を 5mm 括約で計測し，これを枝階ごとの

平均年枝長で表わした。これをもとに，付録１の方法により，５年づゝ遡った年次ごとの枝長を連らねて，年枝生長の半縦断面図（付図－２参照）として表わした。また年枝数の減少経過をみるため，枝階ごとの年枝数を生・枯別に区分して扱い，また着生枝の 1/2 枝数未満となる年枝端をマークして，これを枝張り生長の限界として扱った。

枝長調査：久保地域（2－52 林小班）の供試木５本に対しては，樹高と枝階ごとの節間長とを測定し，さらに枝階ごとに，着生しているすべての枝について枝長を樹上で測定し，これを枝階ごとの平均枝長で表わした。これをもとに，上と同様の方法により，現在における枝長生長の半縦断面図に表わした。

閉鎖前の年枝長調査：上と同様の方法により，両地域の供試木各４本（久保地域は枯れ枝が残っている 2－56 林小班）の残存枯れ枝を対象に，閉鎖前における年枝長を測定し，これを年枝生長の半縦断面図に表わした。

樹幹解析調査：川上地域の供試木（胸高直径の頻度分布のモード）４本を樹幹解析し，クローネ生長との関連性を見やすくするため，樹幹生長の半縦断面図（付図－２参照）を前図に並べて表わした。

年輪幅生長の調査：過閉鎖の影響で単木の生長が衰えはじめた時期を知るため，両地域のモードとその周囲木を含めて，尾根方向（久保地域については直行する４方向）の高さ 1.3mにおける生長錐片を採取し，樹心に近い部分を除外して年輪幅を測定した。

枝張り生長の調査:函館市桔梗町道立林業試験場道南支場構内に一列植栽された 12 年生トドマツ 108 本を対象に，周囲からの枝圧をうけない幼樹の樹高と枝張りとを測定した（昭和 56 年９月）。

表－1　供試木一覧表

Table 1.　Sample trees table

林小班 Division (Location)	樹齢 Tree age (year)	標準地面積 Area of Sample plot (m^2)	植栽本数 Planting density (No./ha)	現存本数 Number of trees per hectare (No./ha)	供試木の表示 Mark of sample tree 地域名 Location	(No.)	胸高直径 Diameter at breast height (cm)	樹高 Tree hight (m)
(Ikeda) 114－52	34	504	3, 809	2, 718	Kawakami	12	16.38	14.94
	〃	960	2, 875	2, 375	〃	1	13.35	13.01
	〃	1, 000	1, 840	1, 650	〃	3	16.31	13.57
	〃	1, 000	1, 460	1, 310	〃	11	18.96	14.15
平均 Average			2, 496	2, 013			16.25	13.92
(Ikeda) 2－52	36	400	4, 449	2, 544	Kubo	1	14.40	12.80
	〃	400	〃	3, 380	〃	2	14.40	13.20
	〃	400	〃	2, 988	〃	3	14.40	12.59
	〃	400	〃	3, 305	〃	4	11.00	11.77
	〃	2, 000	〃	3, 802	〃	523	14.60	15.05
平均 Average			4, 449	3, 204			13.76	13.08
(Ikeda) 2－52	36	―――	4, 449	3, 802	Kubo	92	26.00	16.66
					〃	709	22.00	15.63
					〃	283	18.00	16.23
					〃	367	14.00	15.50
					〃	278	10.00	12.51
(Ikeda)2－56	26	―――	―――	3, 134	Kubo	5	14.00	――
					〃	6	13.00	――
					〃	7	14.00	――
					〃	8	12.50	――
(Kikyō) 道南支場構内	12	―――	(1 列 植 栽)		―――	――	―――	2.36

定　　義

この論文で使用する概念をつぎのように定義する。

クローネ曲線：クローネの半縦断面図のうち，被圧をうけないクローネ部分について，梢頭より下方へ枝の先端を連らねた放物線状の曲線を〝クローネ曲線〟と定義する（図－１参照)。

クローネ曲線は，疎開木，林内木を問わず，付録１で誘導した次の２次曲線で近似できる。すなわち，座標原点から下向きに表わした縦軸に v，横軸に y_0 をとり，$y_0=a$，$v=b$ をそれぞれ梢頭の座標値とし，梢頭からの幹軸の長さを x，幹軸からのへだたりを y とすると，

$$\left.\begin{aligned} y &= \mathrm{C}\left(\sqrt{v}-\frac{v}{k}\right)-a \\ v &= b+x \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots (1)\ \text{式}^{*}$$

ただし，a，k はともに定数，C は媒介変数（以下これを係数 C とする）である。

枝張り生長曲線：最長の枝長が所在する枝階は，樹齢が増すにつれて上位枝階に移っていく。林齢の経過とともに上昇していく最長枝階の枝長端を根元樹心部から上方に連らねて得られる経路は，林分の閉鎖以前における最大枝張りの生長経過を表わしている。この経路をしめす放物線状の曲線を〝枝張り生長曲線〟と定義する（図－１参照)。

枝張り生長曲線は，クローネ曲線と同様な次の２次曲線によって近似できる。すなわち，座標原点から上向きにとった縦軸に v'，横軸に y_0 をとり，$y_0=a'$，$v'=b'$ をそれぞれ樹幹根元の座標値とし，根元からの幹軸上の長さを h，幹軸からのへだたりを y とすると，

$$\left.\begin{aligned} y &= C'\left(\sqrt{v'}-\frac{v'}{k'}\right)-a' \\ v' &= b'+h \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots (2)\ \text{式}$$

ただし，a'，k' はともに定数，C′は媒介変数である。

交点枝張り：クローネ曲線と枝張り生長曲線との交点によって，幹軸からの距離で表わされる枝張り半径（図－１参照）を〝交点枝張り〟と定義する。

交点枝張りは，林分の閉鎖前は，クローネの半径に一致する。また交点枝張りにおいては，樹高をHとするとH＝h＋xとなる。

閉鎖枝張り：林分内における単木の平均占有面積をＳとする。今，面積Ｓに等しい円の半径をｒとすると，$r=\pi^{-\frac{1}{2}}\mathrm{S}^{\frac{1}{2}}$ で表わされる。交点枝張り y が，ちょうどこの円の半径に等しくなったとき，この交点枝張り（図－１参照）を〝閉鎖枝張り〟と定義する。閉鎖枝張りを y_r で表わすと $y_r=\pi^{-\frac{1}{2}}\mathrm{S}^{-\frac{1}{2}}$ である。

樹間距離枝張り：交点枝張り y が，ちょうど平均樹間距離に等しくなったとき，この交点枝張り（図－１参照）を〝樹間距離枝張り〟と定義する。今，平均樹間距離をＩで表わすと，$\mathrm{I}=\mathrm{S}^{\frac{1}{2}}$ であるから，樹間距離枝張り y_1 は，

$$y_1=\mathrm{S}^{\frac{1}{2}} \cdots\cdots\cdots\cdots （３）式$$

である。したがって，y_r と y_1 との間には，次の関係が成り立つ。

$$y_r=\pi^{-\frac{1}{2}}y_1=0.564y_1 \cdots\cdots\cdots\cdots （４）式$$

＊　曲線式の誘導は付録１を参照

枯れ上り枝張り：クローネ曲線と枝張り生長曲線との交点できまる交点枝張りは，林齢の増加に伴って，隣接木との競合に関係なく，しだいに上方へ移動拡大していく。これに対して，実際の枝張りは，隣接木との競合による制限をうけ，枝長生長は，ある限界に達する。交点枝張りが，このような枝長生長の限界に到達した場合に，この交点枝張り（図－１参照）を〝枯れ上り枝張り〟と定義する。枯れ上り枝張りは，y_Lで表わし，そのときの過閉鎖度はf_Lで表わすことにする。

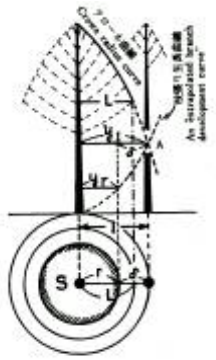


図-1　クローネの閉鎖模式図

Fig. 1. A model picture of crown closure

S：１本当りの占有面積，r：Sの半径
l：平均樹間距離，L：枝長生長の限界線までの枝張り半径
δ：l－r
S: The area per tree(i.e. $\frac{\text{total area}}{\text{no. of trees}}$) in a stand
r: The radius of a circle S
l: The average distance between trees
L: The distance from the center of the trunk to the terminal line of (horizontal) branch growth
δ: l−r
y: Branch expansion radius intersection (i.e.a theoretical crown radius derived from the intersection of a crown radius curve and an extrapolated branch development curve).
y_r = the value of y where y = r
y_L = the value of y where y = L
y_l = the value of y where y = l

過閉鎖度：林分の交点枝張りが，ちょうど閉鎖枝張りy_rに達したとき，この林分は閉鎖したと定義する。閉鎖したのち，さらにクローネが伸長，拡大した林分を〝過閉鎖林分〟と呼ぶ。これに対し，閉鎖以前の林分を〝未閉鎖林分〟と呼ぶ。

過閉鎖林分の交点枝張りは，y_1-y_r（図－１のδ）を基準において，

$$y=f(y_1-y_r)+y_r \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{（５）式}$$

で表わすことができる。このときの係数fを〝過閉鎖度〟と定義する。

過閉鎖度fは，交点枝張りyが，閉鎖枝張りy_rに達したときを0，樹間距離枝張りy_1に達したときを１とし，0以下または１以上になることもあり得るとする。fが負の場合は，未閉鎖林分を表わしている。

４式の定数を用いると，５式は次のように書き替えることができる。

$$y=(0.436f+0.564)y_1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{（6）式}$$

６式より過閉鎖度fは，

$$f=2.2936\left(\frac{y}{y_1}-0.564\right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{（7）式}$$

として求められる。

林分閉鎖比：樹間距離枝張りy_1に対する交点枝張りyの比は，林分の閉鎖度合いの指標となるので，y/y_1を〝林分閉鎖比〟と定義する。林分閉鎖比は，6式を書き替えることにより，次のように与えられる。

$$\frac{y}{y_1}=0.436f+0.564 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(8) 式}$$

立木本数密度がわかれば，林分閉鎖比に樹間距離枝張りy_1を乗じて交点枝張りyが得られる。

林分疎開比：林分閉鎖比の逆比y_1/yを〝林分疎開比〟と定義する。樹高がわかれば，林分疎開比に交点枝張りyを乗ずることによって該当する立木本数密度が得られる。

適 用 と 結 果

１．クローネ曲線式の適用

クローネの半縦断面図の形状は，梢頭から下方に向う放物線状のクローネ曲線と，幹軸根元から上方に向う放物線状の枝張り生長曲線との合成によって規定できるが，隣接木との競合がはじまるあたりからこの形がくずれ，やがては枝枯れを起こしてクローネの一部が消失しはじめる。

年枝長の測定結果に基づいて描いた，供試木のクローネを表わした付図－２の年枝生長の半縦断面図に対し，付録１の方法により，被圧をうけないクローネ部分がちょうど一致する放物線状の曲線（図－２）を描き，この曲線について１式を適用することとし，図－２の曲線ごとに，１式の定数 a，k および C を求めた。定数 a は $\frac{\text{平均}1.013\text{m}}{0.974\sim1.08\text{m}}$ で，樹高に関係なくほぼ一定の値となり，近似的に，定数 $a=1$ mの適合を認めた。また定数 k は $\frac{\text{平均}20.046}{19.539\sim20.638}$ で，ほぼ一定の値をとるのでそれらの平均値により，近似的に $k=20$ の適合を認めた。

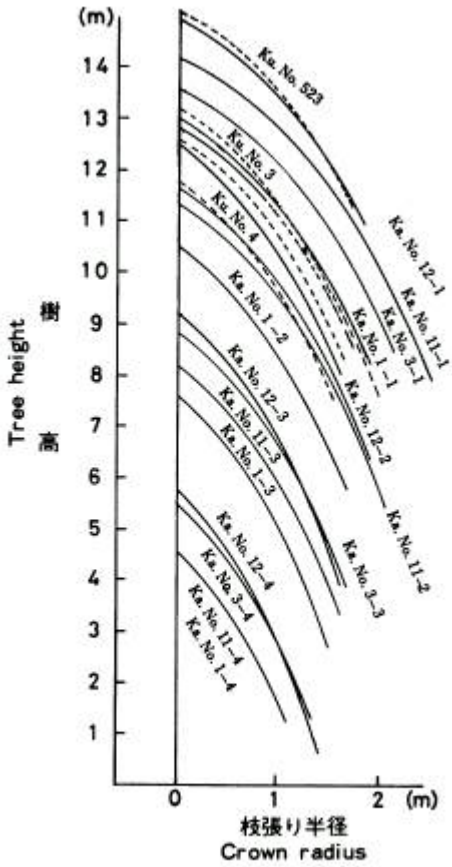


図-2　樹高に対するクローネ曲線

Fig. 2. Crown radius curves at various heights

以上の実験結果に基づく定数 a および定数 k を用いると，隣接木の被圧をうけないトドマツ人工林の林内木のクローネに対しては，どの例においても比較的良好な適合が得られ，クローネ曲線としての１式は，十分に良い近似を与えるものと考えられた。

とくに，クローネの拡張度合いに関係をもつ１式の係数 C の値は，林分間において若干の違いが認められた。この違いは，林分の平均樹高の違い（図－３参照）に依存しているほか，林分の本数密度の違い（図－４参照）にも依存していることがわかる。すなわち図－４には，樹高 13.5m における平均値に対する各林分ごとの係数Cの差を縦軸にとり，立木本数密度を横軸にとって両者の関係を表したが，両

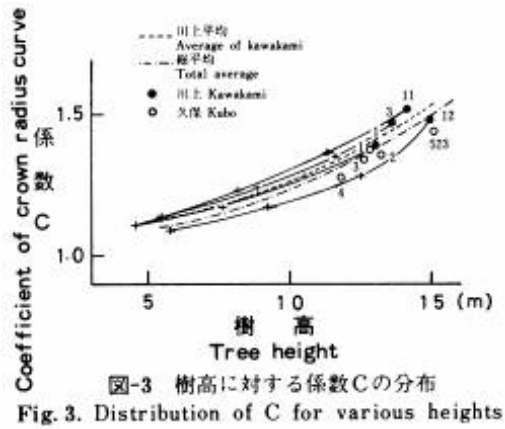


図-3　樹高に対する係数Cの分布

Fig. 3. Distribution of C for various heights

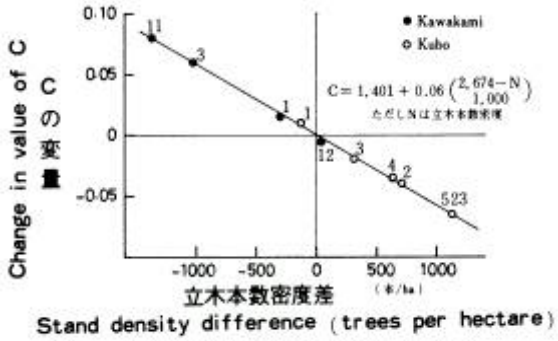


図-4　立木本数密度差とCの変量との相関

Fig. 4. Correlation of change in value of C to stand density difference

者の間には，ｒ＝0.9984 の高い相関がみられた。

以上のことから，クローネ曲線式の係数Ｃは，樹高生長と立木本数密度とによって変化するパラメーターであることが結論される。

２．枝張り生長曲線式の適用

図－５は，２式による枝張り生長曲線式の適用例である。すなわち，両地域における供試木各４本の資料から，それぞれの年枝長を表わした枝張りの半縦断面図を描き，これを用いて，林分閉鎖に至るまでの最長枝階の枝長端（年枝長は，当該年ごとの残存年枝の平均で表わし，残存年枝数が枝数の 1／２に満たないものおよび枝張り 1.5m以上は除く）の通過経路を打点したものである。

最長枝階の枝長端の通過経路は，周囲からの被圧の影響を大きくうけるが，林分単位でみれば，保育の程度が同じであれば平均的にはほぼ同一の経過をたどることが予想されるので，同図の打点のばらつきに対する平均分布線に対し，次のようにさきの２式を適用した結果，定数 a' ＝１m，定数 k' ＝20，係数 C´＝1.5 によって十分適合できることを認めた。

$$y = 1.5\left(\sqrt{v'} - \frac{v'}{20}\right) - 1 \Big]$$
$$v' = b' + \mathrm{h}$$

枝張り生長曲線の係数C'は，1.2～1.8 の間に分布したが，樹高，本数密度のちがいに基づく林分間の差は認められず，これらの分布は，平均的にただ一つの曲線で近似できるようである。

３．未閉鎖林分における交点枝張り

上で述べたように，枝張り生長曲線は，樹高，本数密度に関係なく，唯一の生長曲線の適用が可能である。これに対しクローネ曲線は，樹高および本数密度の影響をうけることが確認できた。たゞし未閉鎖林分においては，本数密度の影響は無視されるので，クローネ曲線は樹高のみによって決定されることになる。したがって両曲線の交点も，樹高のみの関数として表わすことが可能と考えられる。

図－６には，函館市桔梗町道立林業試験場道南支場構内に１列植栽された周囲からの被圧をうけない 108 本の 12 年生トドマツを対象として，樹高と交点枝張り半径とをしめしたが，これによると両者の関係は，次の式で表わす直線で近似することができた。

$$\left.\begin{array}{l} \mathrm{H} = 5.73y - 1.07 \\ (r = 0.7006) \end{array}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(9) 式}$$

ただし，Hは樹高，yは交点枝張りである。

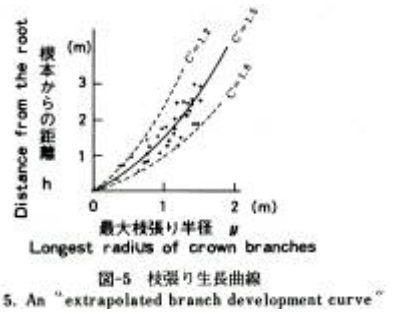


図-5 枝張り生長曲線
Fig. 5. An "extrapolated branch development curve"

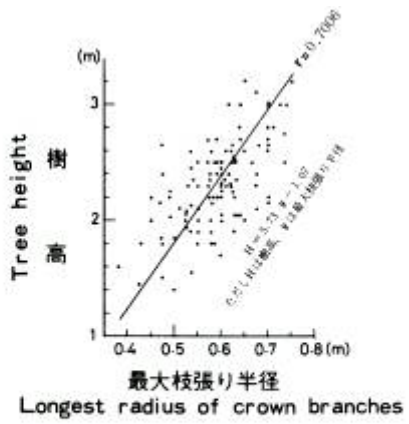


図-6 幼樹の樹高と枝張りとの相関
Fig. 6. Correlation map between height and longest radius of crown branches of young trees

交点枝張り図

１．樹高と交点枝張り

クローネ曲線と枝張り生長曲線とが決定されゝば，この両者の交点は容易に求めることができる。この場合，枝張り生長曲線は，林齢，本数密度にかゝわりなく一つの曲線で近似できた。一方クローネ曲線は，樹高と係数Ｃの値とによって，位置および形状を変化させた。したがって，樹高と係数Ｃの値とを与えれば交点枝張りが求められる。

図－７は，縦軸に樹高を，横軸に交点枝張りをとり，クローネ曲線の係数Ｃの値に応じて，樹高ごとに両曲線を突き合わせて，両者の関係をしめしたものである。係数Ｃの値が一定のまゝ推移する場合には，交点枝張りは樹高の伸長とともに曲線状に単調増加する。

２．本数密度別の交点枝張り

クローネ曲線の係数Ｃの値は，樹高が一定であれば，本数密度にのみ依存して変化する（図－４参照）。そこで，図－４の相関結果に基づいて，樹高 13.5ｍでの本数密度に対する係数Ｃの値を計算し，これを同樹高に対応する本数密度区分点として図－７にしめした。

一方，未閉鎖林分における交点枝張りは，それぞれの樹高階における交点枝張りの上限値をしめすものである。この上限値として，表－１に掲げた 12 年生の被圧をうけない植栽木で求めた９式の値を用いて，図－７に直線を描いた。

この線を外挿すると，係数Ｃによって本数密度を区分した樹高 13.5ｍは，493 本の閉鎖枝張り 2.54 と交わり本数密度区分点と良好に一致するので，この線の妥当性が裏付けられたものと考える。この線を〝疎開木の交点枝張り線〟と呼ぶ。

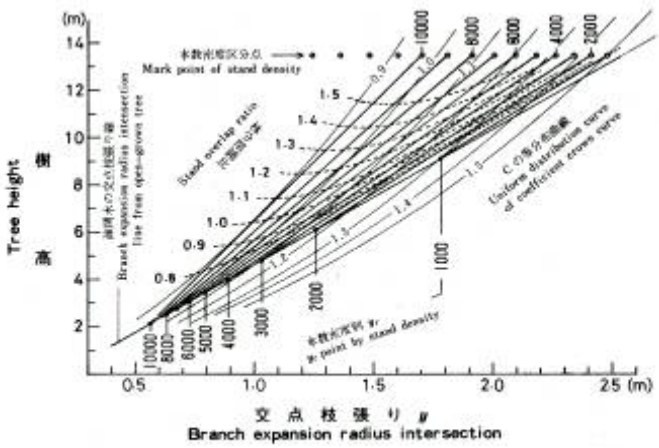


図-7　樹高と係数Ｃおよび交点枝張りとの関係
Fig. 7. The relation ship between Height, coefficient C and y

現実林分においては，それぞれの本数密度に応じて，ある段階において林分は閉鎖する。これは交点枝張りと，それぞれの本数密度とによって一意的に定まる４式の閉鎖枝張り y_r とが一致する点である。したがって，疎開木の交点枝張り線上に，それぞれの本数密度できまる y_r を押えることができるから，これがすなわち本数密度別の閉鎖枝張りとなる。

閉鎖開始時点における本数密度別の区分点をしめすこれらの点と，さきに述べた樹高 13.5m における本数密度区分点のそれぞれ同じ密度の点とを直線で結び，これを〝本数密度別の交点枝張り線〟と呼ぶことにする。

本数密度別交点枝張り線は，それぞれの立木本数密度で林分が生長していく場合の樹高に対応した交点枝張りの生長経路を表わしている。したがってこれは，樹高生長に伴うクローネ曲線の係数Ｃの変化過程をしめしているものと理解されよう。

以上のことから，それぞれの本数密度を有する林分における樹高に対する交点枝張りの経路を，次のようにまとめることができる。すなわち，未閉鎖段階においては，疎開木の交点枝張り線上を左下から右上方向へ直線的に推移する。そして，それぞれの本数密度別の閉鎖枝張りに到達した後は，この点を境に折れ曲がり，本数密度別交点枝張り線上を右上方向に推移する。この図を用いると，任意の樹高と本数密度とに対応する交点枝張りを知ることができる。

３．林分閉鎖比

本数密度で一意的に定まる樹間距離枝張り y_r と，交点枝張り y との比が林分閉鎖比であった（８式）。したがって，本数密度が一定のまま，樹高の増大に伴って交点枝張りが増大していく場合，林分閉鎖比は単調に増加する。

本数密度が一定であれば，８式より，林分閉鎖比は交点枝張りのみによって容易に計算できる。この計算結果を図－７の本数密度別の交点枝張り線上に打点して表わした。同図にしめしたように，本数密度別の交点枝張り線上のそれぞれ等しい林分閉鎖比をしめす点を結んだものが〝等林分閉鎖比線〟である。

林分閉鎖比を用いると，林分の相対的な閉鎖度合いの判断が可能となる。またこれを７式に適用すれば，林分閉鎖比から過閉鎖度 f が容易に求められる。

４．枯れ上り枝張りの林分閉鎖比

年枝生長の半縦断面図から，供試木ごとの枯れ上り枝張り y_L を読み取って，８式を適用して求めた結果によると，枯れ上り枝張りの林分閉鎖比は $\frac{\text{平均}0.797}{0.610\sim0.933}$ となった。各供試木ごとの y_L は，周囲木との関係位置による影響の現われと言えるので，林分の平均樹間距離に対するものとは，多少異なる値で現われている。したがって，これらの平均値を用いることとし，枯れ上り枝張りの林分閉鎖比を 0.8 と決定した。（図－７の等林分閉鎖比 0.8 の線は，枯れ上り枝張りに達する樹高を本数密度別にしめしていることになる。）これを７式に適用すると，枯れ上り枝張りの過閉頻度は 0.54 となる。

５．基準林分の交点枝張り

交点枝張りと樹高との関係を表わす図上に，全道トドマツ人工林収穫予想表の主林木によって，地位別にそれぞれの本数に対応する樹高を打点して各点を結んで図－８にしめした。これを〝基準林分の交点枝張り線〟と呼ぶ。

図－８によると，各地位ともほぼ１本の直線上に配列し，地位による差は，同図上では区別できない

ことが確められた。収穫予想表による地位の差は，すべて樹高に還元されることから考えて，これは当然の結果ともいえるが，地位に関係なく交点枝張りが求められることは，実用上は好都合なことといえる。基準林分の交点枝張り線を使用すれば，樹高に対応する交点枝張りを，または交点枝張りから一般的な樹高を求めることができる。

６．林齢線と直径線

さきに用いた収穫予想表により，地位別に，林齢と樹高および樹高と直径の関係曲線を得た。この曲線を組み込むために，林齢および直径を同一目盛で横軸にとり，縦軸に崎高をとって，それぞれの関係曲線を描いた（図－９）。

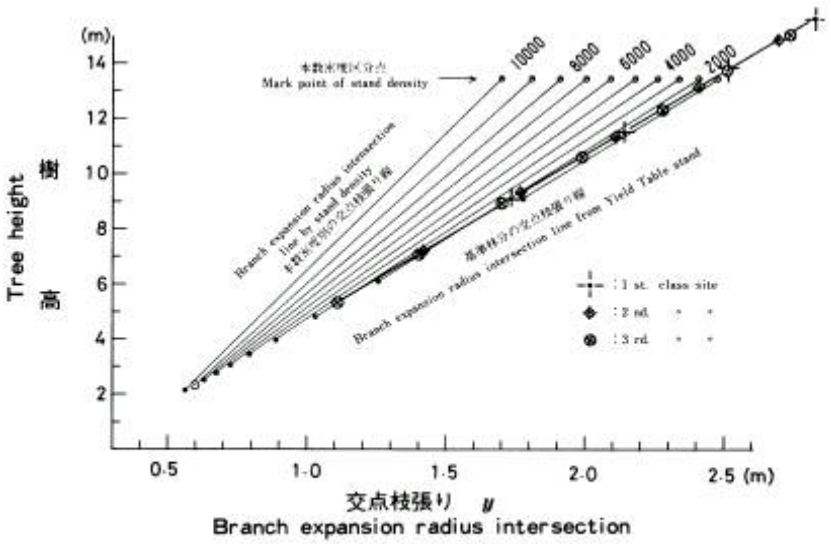


図-8　基準林分の交点枝張り線
Fig. 8. Branch expansion radius intersection line from Yield Table stand

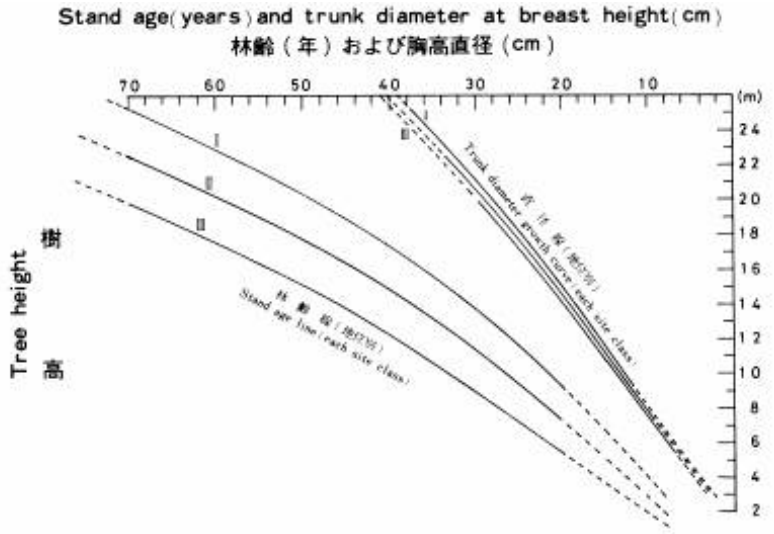


図-9　基準林分の林齢線と直径線
Fig. 9. Stand age line and trunk diameter growth curve from Yield Table stand

７．交点枝張り図の構成

以上の諸関係曲線を組み合わせることにより，交点枝張り図（図版Ⅰ参照）を構成した。交点枝張り図は，横軸に交点枝張りを，縦軸に樹高をとって，樹高生長に伴う交点枝張りの生長経過を本数密度別にしめす図であり，さらにこの図の樹高 26mの横軸に直径および林齢をとって，樹高と，直径または林齢との関係をしめす曲線を組み合わせたものである。これにより，樹高を媒介にして，３者間の相互関係をしめすとともに，交点枝張りを媒介にして本数密度との関係をもしめしている。本数密度が一定の林分においては，交点枝張りと樹高との関係をしめす線は，はじめは疎開木の交点枝張り線上を推移し，本数密度により決まるそれぞれの閉鎖開始点を境にして折れ曲がり，その後は本数密度別交点枝張り線上を推移する。本数密度が一定のもとでは，樹高および交点枝張りの増加に伴い林分閉鎖比は増大し，過閉鎖度も増してゆく。一般の林分においては，本数が一定のままで保たれることはないので，上でのべたように推移することはない。たとえば，収穫予想表のように，樹高生長に伴い本数が変化していく場合には，基準林分の交点枝張り線でしめしたように推移する。この場合は，交点枝張りは樹高生に伴って本数密度別交点枝張り線よりもさらに右傾してあらわれ，ほぼ直線的に増大していく。

またこれと同様の推移により，任意林分の樹高を同図の本数密度別交点枝張り線上に表わすことにより，任意の林分または地域の生長特性に応じた交点枝張り線を容易に描くこともできる。

交点枝張り図の利用

１．林分の閉鎖区分

林分の上層木（主林木）平均樹高と立木本数密度とがわかれば，８式の林分閉鎖比を求めることにより，その林分の本数密度に対する相対的な閉鎖度合いがわかるので，林齢差や地位差に関係なく，林分の閉鎖度合いの比較判断が可能となる。

また，樹高と本数とが与えられれば，交点枝張り図上に一点が定まるので，等林分閉鎖比線を用いて，当該林分の閉鎖の程度を知ることもできる。

付録２によれば，林分の過閉鎖が始まると年輪幅生長に停滞が現われ始めるが，その影響が顕著に現われるのは枯れ上り枝張りに達した後であると言える。さらに樹間距離枝張り y_1 以降となると，その影響は一層促進され，単木の生長に著るしい抑制が現われるようになる。これらのことから，年輪幅のコントロールに重きを置く場合の密度管理においては，交点枝張りが y_L から y_1 までを立木本数密度の中と密の閉鎖区分の一般的な範囲として扱うのが妥当であると判断できる。そこで８式の林分閉鎖比を小数点２位以下を切り捨てて表わし，これを上の判断に従って次のように使用することによって，林分の混み合い度合いを相対的な閉鎖度合いに準拠して表わす好適な仕立て区分の目安が得られる。

林分閉鎖比	1.0 以上	過密
〃	0.9～1.0	密
〃	0.8～0.9	中
〃	0.7～0.8	疎
〃	0.7 未満	過疎

２．年輪密度管理図

交点枝張り図を用いると，直径および林齢に対応したそれぞれの交点枝張りが求められるので，これにより所定の年輪幅を保つための本数管理の指針が得られる。この過程を図－10 の模式図で説明しよう。

図－10 において林齢Aの林分が終始同じ年輪幅 d で生長したものと仮定し，この林分の平均直径をDとすると，この想定林分の直径Dは次の式でしめされる。

$$2d\ A\ =\ D \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (10)\ 式$$

まず，上方の横軸に林齢Aをとり，これより垂線をおろして林齢線との交点 a に達する。a は，林齢Aに対応する基準林分の樹高（地位別）をしめしている。これを横にたどれば，基準林分の交点枝張り線bに達する。これを下にたどれば，基準林分の交点枝張り y が得られる。y は，基準林分が林齢Aで到達する交点枝張りをしめしている。

次に，任意の年輪幅 d を想定して，これに対応する 10 式の直径Dを求める。さらに直径Dと直径線との交点でしめす樹高（地位別）により，上と同様の順序に従って，基準林分の交点枝張り線によって y' を求める。y' は，基準林分が直径Dに達するときの交点枝張りをしめしている。

基準林分にあっては，林齢に対応する交点枝張りと，直径に対応する交点枝張りとは常に一致するが，10 式で想定した直径Dなる林分の交点枝張り y' は，林齢Aで到達する基準林分の交点枝張り y に必ずしも一致しない。これは，直径Dなる想定林分の本数密度が基準林分のそれと異なることに原因がある。したがって，基準林分と異なる想定林分の本数密度を求めることができるならば，この想定林分の本数密度を表わす y_1 と，林齢Aで到達する基準林分の交点枝張り y との関係によって，10 式の想定林分の過閉鎖度 f を，７式を適用することによって求めることができる。

すなわち，直径Dなる想定林分の本数密度は，基準林分の林齢Aにおける過閉鎖度 f' （f' は，図－10 の a におけるものであり，図－11 から読み取る。）を用いて，直径Dで到達する交点枝張り y' に対して６式で得られる y_1 によって求められる。

また，直径Dなる想定林分の過閉鎖度 f は，上で求めた y_1 と，林齢Aで到達する基準林分の交点枝張り y とによる林分閉鎖比を７式に適用することによって求めることができる。

すなわち上では，基準林分において，直径Dに対応して得られる樹間距離枝張り y_1 と林齢Aに対応して得られる交点枝張り y とから，10 式の想定林分における過閉鎖度 f が得られたわけである（図版Ⅱ参照）。樹間距離枝張り y_1 は，容易に本数密度に換えられる（３式）から，本数密度と過閉鎖度との関係を，年輪幅 d と林齢Aとのさまざまな組み合わせによる直径Dごとに表わすことが可能となる。

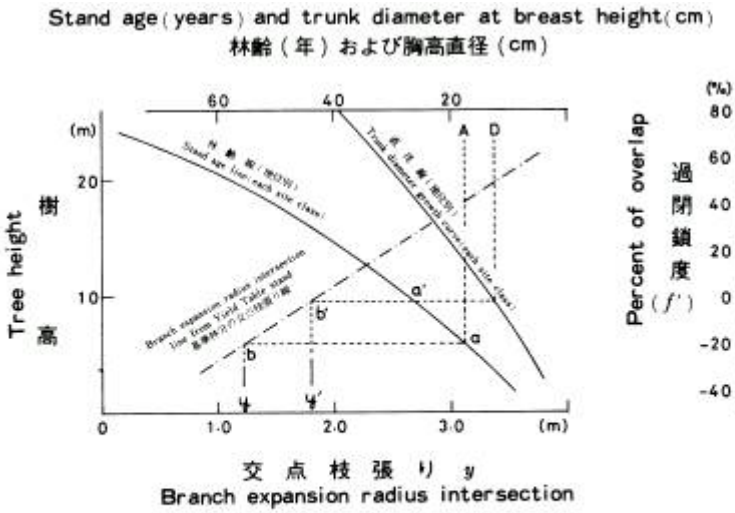


図-10 交点枝張り模式図
Fig. 10. A model picture of branch expansion radius intersection

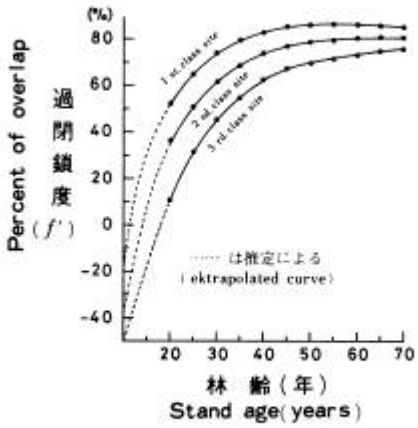


図-11 基準林分の過閉鎖度
Fig. 11. Percent of overlap for Yield Table stand

この方法によれば，交点枝張り図を用いることによって，本数密度と過閉鎖度との関係が地位別に求められるので，これを年輪幅 d と林齢Ａとのさまざまな組み合わせごとに表わすことができる。

また，過閉鎖度は，本数密度と樹高との関係で決まるから，過閉鎖度がわかれば，年輪幅を本数密度と樹高との関係においてとらえることができる。図版Ⅲ～Ⅴ（付録３参照）は，それらの結果を用いて，地位別に２年輪幅線で表わした年輪密度管理図である。図－12 は，それの模式図をしめしている。

年輪密度管理図を用いると，立木本数密度と過閉鎖度とに対応した経過林齢と，経過林齢時ごとの２年輪幅とを知ることができる。また，この図版に表わされた林齢によって，過閉鎖度を指針として，目標とする年輪幅に導びくための林分密度の設計管理が可能となる。その１例を図－12 にしめした。さらに，年輪密度管理図を使用すれば，目標とする年輪幅の林分に導くための最適の植栽密度を立木本数密度で読みとることができる。したがってこの方法により，植栽密度の選択に始まる林分の一貫した密度管理の設計が可能となる。

３．交点の高さの読み取り

交点枝張り図の $y/2$ に対応する樹高によって，交点の高さが読み取れる係数Ｃの経路を表わす曲線を〝枝下Ｃ線〟と呼ぶ。

図－７によると，係数Ｃがきまることによって，交点枝張りと樹高との関係がわかるので，この関係を利用すれば，同図から交点枝張りの高さを次のようにして読みとることができる。図－５の枝張り生長曲線の地上高ｈを交点枝張り図の樹高にとり，これと $y/2$ とによる交点がしめす係数Ｃの経路（図版Ⅰ参照）をあらかじめ描いておけば，この曲線で読み取る樹高は，交点枝張り y の高さを表わしている。

交点枝張りが枯れ上り枝張りを超えると，クローネの枯れ上りが始まるが，枝下Ｃ線を使用すればクローネの枯れ上りの高さ（図－13 の点Ｐの高さ）を，次のようにして近似的に求めることができる。すなわち，枝の枯れ上りが現われるのは，$y \geqq y_L$ が条件となるので，この条件のもとで，交点枝張り図（図版Ⅰ）に $y_L/2$ をとり，これを真上に延長して，林齢または直径の目盛線上に押さえる。　次に，１目盛をそれぞれ 0.1m，0.2m として，$y-y_L$ を両点より右方へそれぞれ加えた位置に移動し，上下移動点を直

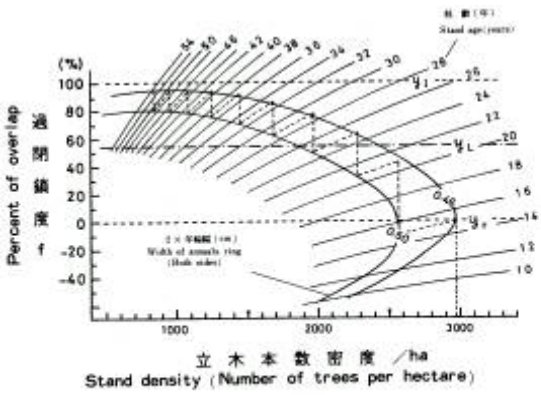


図-12　年輪密度管理模式図（等年輪幅線を基準にした本数管理例）
Fig. 12. A model picture of the annual ring density control diagram (Used example of curve of fixed annual ring width)

線で結び，この直線で切られる枝下C線の樹高を読み取ると，これがクローネの枯れ上り点Pのおおよその地上高となる。ただし，y_Lが 1.5m 未満に対しては，さらに $y-y_L$を加えた樹高とする。この方法による読み取り誤差は，５%以下のものが大部分（全体の 85%）で，最大でも 12.8%の誤差しかなく，実用上十分な精度である。

枝下C線で読み取る交点の高さとクローネの枯れ上り高とは，何れもつぎに述べるように，枝打ちの許容高としての意味をもっている。交点枝張り図上で枝打ちの許容高がわかるということは，本研究の目的である良質材の生産をねらいとした密度管理手段としての交点枝張り図の合目的な存在価値を一層高める意味あいをもつものと言える。

４．交点枝張りと枝打ちの許容高

クローネの枯れ上り以前においては，力枝以下の枝打ちが一般的であるので，これを行うためには，交点枝張り以下の枝を打つことを原則と考えればよい。この場合の高さは，$y/2$ に対応する枝下C線の樹高で読みとれる。

しかし，図－13 でしめすように交点枝張りが枯れ上り枝張りを超えた林分では，クローネの枯れ上りが始まることにより，交点枝張りの高さ以上に枝が枯れ上り，そのため枝打ちの許容高も高くなってゆく。クローネの枯れ上り点Pは，クローネ曲線と枯れ上り枝張りとが交わる点である。したがって，一定の本数密度のもとでも，樹高の伸びに伴って生長拡大するクローネ曲線との関係で，その高さが上昇する。また，除間伐が行われるたびに，立木本数密度が低下して y_1 が大きくなり，それに伴って y_L も増大するので，その影響をうけてP点は低くなる。また間伐後のP点以下に残る枝は，隣接木との競合によってやがて生長を停止し枯れ枝化してゆくので，もはや保残の必要性がなくなる。

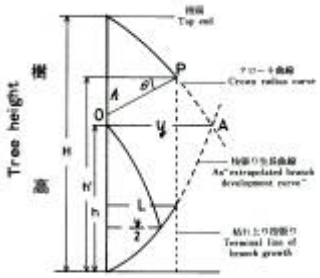


図-13 高点の高さとクローネの枯れ上り高
（θ：枝の傾斜角）
Fig. 13. Height of intersection and height at which growth begin to die off
(θ: Inclination angle of branches)

スギにおいては，枝の生長停止から枯死までの期間の枝は，幹の生長に対する貢献度がゼロであることが藤森（1975）によって報告されている。このことは，トドマツにおいては未だ試験例を見ないが，表－２によると，枝階の一部の枝に年枝の生長停止が現われてのち，枝階の全枝が枯死するまでの所要期間は$\frac{\text{平均6.8年}}{\text{5〜12年}}$ となっている。これを 1/2 以上の枝数に年枝の生長停止が現われてからのちでみれば，その所要期間は$\frac{\text{平均4年}}{\text{2〜7年}}$ となってい

表－2　枝枯れまでの所要期間
Table 2.　Years needed until dieback occurs branch stage

供試木 Sample tree		年枝に生長停止が現われてから枝階の全枝枯れまで Time from first halt in annual shoot growth until all branches at that stage die (years)	$\frac{1}{2}$以上の枝数に年枝の生長停止が現われてから枝階の全枝枯れまで Time from first halt in annual shoot growth on over $\frac{1}{2}$ of branches until all branches at that stage die (years)	年枝に生長停止が現われてから枝枯れが現われはじめるまで Time from appearance of halt in annual shoot growth until branch death occurs (years)
	(No.)			
Kawakami	12	5	2	2
〃	1	5	2	0
〃	3	12	7	5
〃	11	5	5	0
合　計	Total	27	16	7
平　均	Average	6.8	4	1.8

る。また，年枝の生長停止の現われ始めから，枝枯れが現われるまでの所要期間は$\frac{\text{平均1.8年}}{\text{0〜5年}}$となっている。

以上の枝枯れ傾向より推察すれば，スギにおけるさきの報告は，トドマツに対してもほぼあてはまると考えてよいと思われる。また，枝打ちによる傷口をできるだけ早く巻き込ませることや，作業能率を向上することなどを考慮するならば，年枝に生長停止が現われた枝は，できるだけ早期に枝打ちするのが理想的であると言えよう。したがってこれらの諸条件を考慮すれば，目標過閉鎖度で管理された場合の間伐後のＰ点の高さは，枝打ち許容高の基準としての好適な条件を備えていると推察できる。

図－13 にしめすとおり，Ｐ点が所在する枝の着生部位は，枝の傾斜角の影響分だけ，さらに低い位置にある。すなわち図－13 において，水平面となす枝の傾斜角を θ，枝の着生点 O と枝の枯れ上り点Ｐとの高低差を h とすれば，$h=\tan\theta \cdot y_L$ となり，Ｐ 点が所在する枝の着生点 O は，Ｐ点よりも $\tan\theta \cdot y_L$ だけ低い。このことは，Ｐ点の現われる以前の交点枝張りにおいてもあてはまる。

５．林分閉鎖の診断と予測

図版Ⅱは，過閉鎖度を仲立ちとして，y と y_1 との相互関係を付録４の方法で図化し，これに本数密度との関係を組み入れた林分閉鎖早見図である。同図版は，任意の過閉鎖度に対して，y から y_1 を，y_1 から y を，また y と y_1 とから過閉鎖度を，それぞれ計算によることなしに図上において，直線定規を用いて読みとることを可能にしたものである。

図版Ⅰが樹高と交点枝張りとの間における諸関係を表わしたものであるのに対し，図版Ⅱは，交点枝張りと本数密度との関係を表わしたものである。従って両図を併用することにより，樹高と立木本数密度との間にある林分閉鎖の諸関係が，簡単な操作で読み取れるので，林分密度の設計管理上はなはだ便利であるばかりでなく，林分の閉鎖現況の診断や閉鎖推移の予測が極めて容易となる。

これまでに述べてきた閉鎖関係について，両図を使用して行える主なる閉鎖診断の項目を整理するとつぎのようになる。

交点枝張り：樹高をもとに，交点枝張り図から，または本数密度と過閉鎖度とをもとに６式または林分閉鎖早見図から求める。

樹間距離枝張り：本数密度をもとに３式，閉鎖枝張りをもとに４式から，または交点枝張りと過閉鎖度とをもとに６式によりまたは林分閉鎖早見図により求める。

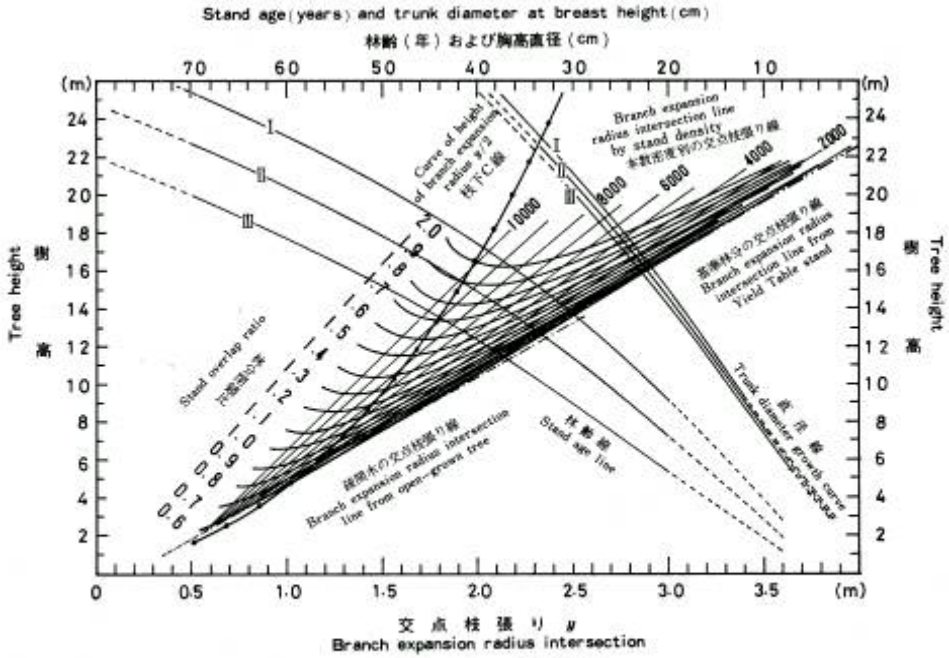
閉鎖枝張り：本数密度をもとに４式からまたは林分閉鎖早見図から求める。

枯れ上り枝張り：本数密度をもとに，枯れ上り枝張りの過閉鎖度 0.54 により 8 式からまたは林分閉鎖早見図から求める。

過閉鎖度：交点枝張りと本数密度とをもとに７式からまたは林分閉鎖早見図から求める。

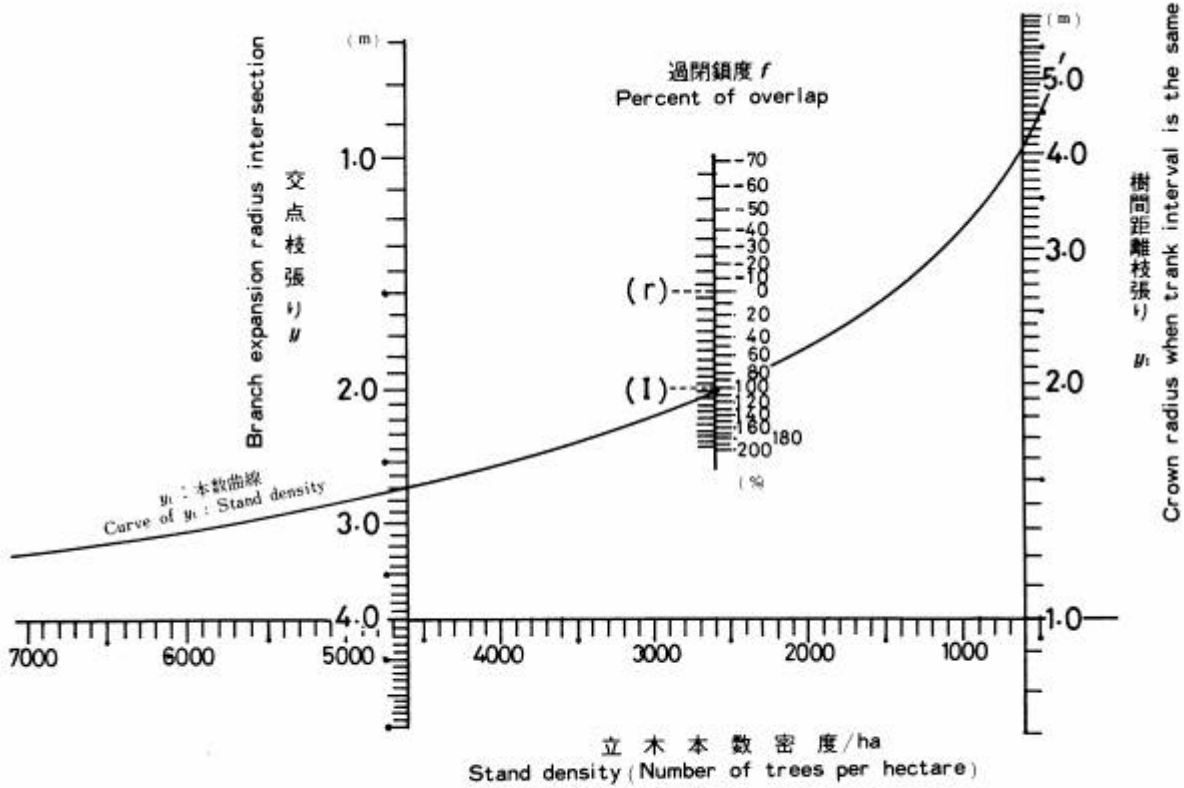
林分閉鎖比：本数密度と樹高とをもとに８式からまたは交点枝張り図から求める。

目標過閉鎖度到達林齢（または直径）：交点枝張りをもとに，交点枝張り線の樹高により林齢線（または直径線）を読み取る。



図版Ⅰ　トドマツ交点枝張り図

Plate Ⅰ. A diagram of branch expansion radius intensection of *Abies sachalinensis* Mast. (from intersection of a crown radius curve and an "extrapolated branch development curve")



図版Ⅱ　林分閉鎖早見図

Plate Ⅱ. Stand overlap ratio chart

考　　察

林木の生長をつかさどるのは，光合成を行う器官すなわち葉である。枝は葉を直接的に支える器官である。したがって，葉と枝の配列をしめすクローネの形状こそは，林木の生長を判定する最も重要な指標であると考えられる。

ところが，従来の林学においては，林木を表示する指標として，専ら胸高直径が用いられてきた。このことは，胸高直径が最も測定し易い部位であるとともに，林木の直接の対象である樹幹部の大きさをしめす直接の指標であるという，これまた当然の理由に基づいている。だが，胸高直径は，クローネにおいて有機物が合成され，それが蓄積された〝結果〟にすぎないことを認識する必要があるだろう。その〝結果〟の由って来たる因を求めようとするならば，生産の場たるクローネに着目せざるを得ないのである。しかしながら，クローネの形状を胸高直径と同様に手軽に，毎木的に調査することは，極めて困難である。またわれわれは，クローネの形状以外にも，生産の直接の対象物である幹の形状についても知る必要があり，出来得るならば，クローネを調節することを通じて，幹の形状のコントロールにまで結び付けたいのである。その意味で，われわれが今求められているのは，ただ単にクローネの形状を知るだけではなく，それを仲立ちとして，最終的には，幹の形状にまで結び付ける筋道に関する知識なのである。

本研究においては，まずクローネの形状を決定した。次いでこれを基にして交点枝張りを求めた。さらに交点枝張りと樹高との関係を本数密度を媒介変数として求めた。また，本数密度と交点枝張りとから，林分閉鎖比を得た。また，交点の高さが読み取れる係数Ｃの経路を用いて，密度管理に付随して起こるクローネの枯れ上り高の読み取りを可能にした。さらに，基準林分の交点枝張り線を導入することにより，それを仲立ちにして，胸高直径ならびに林齢との関係を明らかにし得た。すなわち本研究は，クローネの形状さらには交点枝張りを仲立ちにして，本数密度，樹高，直径，林齢，交点の高さ，クローネの枯れ上りの高さなどの相互関係を明らかにし得たものであると言える。

林分の相互関係をしめした既存の研究には，安藤（1968）による「林分密度管理図」がある。本研究で導入した林分閉鎖比は，「林分密度管理図」における収量比数R_yとほぼ同じ性格のものであり，これをトドマツに適用した例（真辺　昭，1974）に対比してみると，林分閉鎖比 2.0 は最多密度曲線に，林分閉鎖比 1.5 はR_y0.9 に，林分閉鎖比 0.9 はR_y 0.7 に，林分閉鎖比 0.6 はR_y0.5 に，それぞれほぼ相当している。このような意味において本研究は，立木本数，樹高，直径などの関係に対して，クローネの形状にまで及ぶ実体的意義を与えたものであると言える。

本研究ではさらに，交点枝張り図を基にして年輪密度管理図を導びくことに成功した。これによって，従来はあまり手つかずであった年輪幅を調節するための指針を与えることができたほか，密度管理に付随する最適植栽密度の基準をも与えることができた。

また，交点枝張り図に枝下Ｃ線を組み入れて，交点の高さや，枝打ち許容高の目安となるクローネの枯れ上り高を求めることを可能にしたことにより，枝打ち度合いの目標をも明らかにすることができた。すなわち，林分の密度管理に不離一体の関係にある最適植栽密度および枝打ち許容高の在り方をも明らかに成し得たものであると言える。

本研究はあくまでも，林分の平均値レベルでの法則性を引き出すことにとどまっている点においては，既存の「林分密度管理図」と同じレベルのものと言ってよい。しかしながら林分内には，大小さまざまな

個体が存在し，それらによってクローネの形状も個々に異なり，庇蔭の程度にも差異があるので，今後は個体の分布関数と結びつくことによって，これらの点の分析を行う必要がある。また，クローネを形態的な把握から，さらに光合成に関与する量的な把握にまで進める必要がある。その際にも，ここでしめしたクローネの形状を基とする方法は，極めて有効な分析の手だてとなるものと確信する。

摘　　要

１．トドマツ人工林のクローネ曲線と枝張り生長曲線とを，ともにC$\sqrt{v}$（vは原点からのX軸の距離。係数Cは曲線の拡張度合いを表わす媒介変数。）の放物線の座標軸を傾けて得られる曲線の一部によって表わした。また，両曲線の合成で得られる交点枝張りを用いて，無被圧状態（疎開木）におけるクローネ半径を表わすことができた。

２．交点枝張りを用いることにより，クローネの生長と立木本数密度との関係を明らかにし，経年的な経過による林分の閉鎖を理論的に解明した。

３．クローネ曲線に伴う係数Cは，樹高と立木本数密度との影響をうけて変化する。

４．樹高，係数C，交点枝張り相互の関係は，交点枝張り図上の樹高に対応する係数Cの経路によってしめされる。

５．クローネ曲線の係数Cの交点枝張り図上における経路は，疎開木の交点枝張り線上を推移し，閉鎖枝張り点で折れ曲がり，その後は本数密度別交点枝張り線上を推移する。

６．立木本数密度と交点枝張りとから求められる林分閉鎖比は，同一本数の下では，樹高生長のみによって増大する。

７．林分閉鎖比を用いれば，林齢や地位に関係なく，林分の相対的な閉鎖度合いを立木本数密度と樹高とを基にして表わすことができる。また，小数点２位以下を切り捨てて表わした林分閉鎖比の数値で，林分の閉鎖度合いに準拠した仕立て区分の有効な基準が得られる。

８．トドマツ人工林における枯れ上り枝張りの林分閉鎖比の実験値は 0.8 であった。

9. 交点枝張り図に，交点枝張りの 1/2 を用いて，枝張り生長曲線の高さに一致する係数Cの経路を描くと，この曲線によって，交点枝張りの高さおよびクローネの枯れ上りの高さを，交点枝張り図上で求めることができる。また，枯れ上り以前の交点枝張りおよび間伐後のクローネの枯れ上りのそれぞれの高さは，ともに枝打ち許容高の基準として使用できる。

10. 立木本数密度と過閉鎖度と交点枝張りとの関係を早見図に表わすことにより，林分閉鎖の現況や推移を図上で容易に知ることができる。

11. 基準となる林分の林齢線と直径線とを組み入れた交点枝張り図を使用することにより，任意の２年輪幅と林齢とを基にして，立木本数密度と林齢と過閉鎖度と年輪幅との相互関係を表わす地位別の年輪密度管理図が描ける。

12. 年輪密度管理図を使用すれば，植栽密度の選択をはじめ，年輪幅を任意に選択または調節して行う林分の密度管理が容易である。

13. 閉鎖枝張り，枯れ上り枝張り，樹間距離枝張りは，それぞれ施業上の目安として効果的である。

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 210：153P
藤森隆郎　1975　枝打ちの技術体形に関する研究．林試研報 273：74P
小林正吾　1978　カラマツ人工林の林分生長モデルに関する研究．北林試報　15 号別刊：164P
眞辺　昭　1974　トドマツ密度管理図．北方林業叢書　53：69P
増田憲二郎　1980　トドマツ人工林における林分の閉鎖と年輪密度の管理について．日林北支講.29.3P
大野喜久夫　1960　北海道の主要樹種林分収穫表．森林計画研究会北海道林務部支部．80P
坂口勝美　1961　間伐の本質に関する研究．林試報　131：95P
千広俊幸　1961　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（北海道林務部編）５月号：12P

Summary

１．The crown curve and the branch growth development curve of planted forests of *Abies sachalinensis* MAST. can both be shown by using a section of the curve formed by tilting the axis of coordinates of the parabola of $C\sqrt{v}$ （v=the distance from the origin to the X axis.

Coefficient C＝the variable which shows the degree of sharpness of the crown.）

And by using the branch expansion radius intersection which results from the combination of these ２ curves, the crown radius with which there will be no hindrance to growth can be shown.

２．By using the branch expansion radius intersection, the relationship between crown development and stand density can be clearly shown, and the stand closure which develops with the passage of year can be logically illustrated.

３．Coefficient C which goes with the crown curve is influenced and changed by tree height and stand density.

４．The interrelationship of tree height, coefficient C, and the branch expansion radius intersection can be shown by the course of coefficient C, which corresponds to tree height on the branch expansion radius intersection table.

５．On the branch expansion radius intersection table, the course of coefficient C of the crown curve runs along the branch expansion curve for a condition of open-grown tree（i. e. no other trees）and turns at the point where branch overlap begins, and then runs along the branch expansion radius intersection line for its corresponding density class.

６．The overlap ratio, derived from stand density and branch expansion radius intersection increases only in relation to vertical growth, if the number of trees remains constant.

７．By using the stand overlap ratio, without relation to tree age or site class, the relative degree of closure of a stand can be shown in terms of stand density and tree height.

By

ignoring all numbers to the right of the first decimal place in stand overlap ratio values, an effective standard for dividing the degrees of stand closure is obtained.

8. The empirical value for the overlap ratio of crown radius when it equals the growth limit crown radius in a Todo fir artificial forest is 0.8.

9. By taking the coefficient C which equals the height of the branch growth curve using 1/2 the value of branch expansion radius intersection on the branch expansion radius intersection table, and by plotting the course of C, from the resulting curve, the height of branch expansion radius intersection and the heights where crown growth die-off begins can be shown on the branch expansion radius intersection curve.

And, the height of branch expansion radius intersection before reaching the growth die-off limit, and the crown die-off height after thinning can both be used as standards for deciding allowable pruning height.

10. By showing the relationship between stand density, percent of overlap, and branch expansion radius intersection on a graph, the present condition of and the change in stand closure can easily be known.

11. By using the branch expansion radius intersection table which incorporates the stand age curve and trunk diameter growth curve from a standard stand, using any annual ring width (Both sides) and stand age as a base, an annual ring density control table by site class can be drawn which shows the relationship between stand density, stand age, percent of overlap, and annual ring width.

12. By using the annual ring density control table, stand density control through selection of planting density and free selection or adjustment of annual ring width becomes easy.

13. Branch expansion radius at point where closure begins, branch expansion radius at point of limit of growth, and branch expansion radius where crown radius equals average distance between trees, are all effective as standards for management.

付録 1. クローネ曲線の求め方

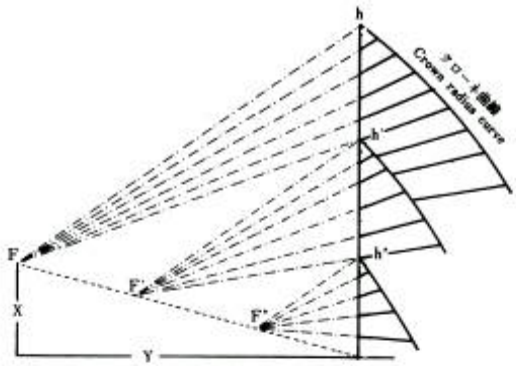
トドマツのクローネ外縁の形成点を枝階ごとに見ると，各枝階の枝傾斜角（枝の先端部と枝の幹への付着部とを結ぶ線が水平面となす角）を下方へ延長した樹幹の外周に，枝傾斜角のおおよその交会点が一般に存在することが観察できた。供試木川上 No. 12 に対して実測した結果では，付表－１のとおりで，樹高 h に対し横座標 0.75h，縦座標 0.125h が得られたので，できるだけ正確なクローネ曲線を得るため，これを閉鎖後の林分における枝傾斜角の交会点の座標値として使用し，これを用いて表－１の供試木について，各枝階の枝長を幹軸に対して傾斜を与えて表わし，付図－１の模式図のようにして，クローネ曲線を現在および５年ごと遡って描き，年枝生長の半縦断面図に表わした。付図－２はその１例である。

付図－２によると，クローネの外縁線は必ずしも整一でないので，同図の被圧をうけない部分のクローネ半径の外縁部に対し，付１式による曲線の座標軸を傾けて，ちょうど一致する放物線状の曲線を描き，これをクローネ曲線とした。

次に，座標原点から垂直方向に v（クローネと関連づけるため便宜上（－）方向にとるが，正数で扱う。），水平方向に y_0 をとり，媒介変数をＣとして付１式の放物線を描き，この放物線を基本にして，クローネ曲線を代表できる曲線式を次のように誘導した。

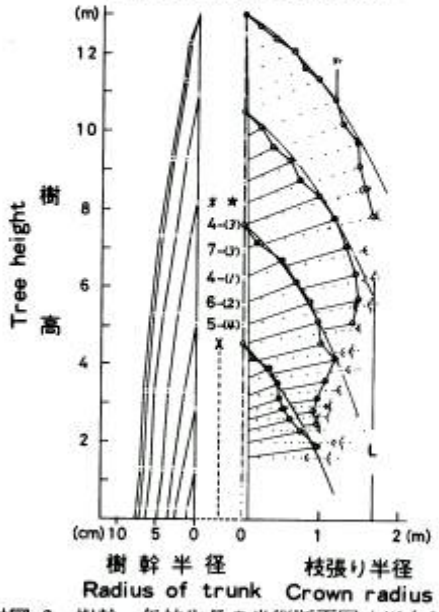
$$y_0 = \pm C\sqrt{v} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{（付１）式}$$

付１式が表わす曲線は，クローネ曲線の基本となるので，まずその性質を明確にしておく。付１式の曲線は，符号を（＋）にとればＸ軸の右側に，（－）にとれば左側にそれぞれ現われ，クローネ様の形が描かれるが，説明の繁雑化を避けるため，以下はＸ軸の右側に描くクローネの半



付図-1　遡り年のクローネ曲線の描き方
h：遡った時点での樹高

Sub-fig. 1. Way of drawing crown radius curve for past years
h：Tree height of past years



付図-2　樹幹・年枝生長の半縦断面図（川上 No. 1）

Sub-fig. 2. Radial longitudinal section of trunk and annual shoots (kawakami No. 1)

：年枝数の減少　Stage where somebranches fail to produce annual shoots

：半枝数以下になる年枝端　Stage where more than 1/2 of branches fail to produce annual shoots

：全枝が枯死した枝階　Stage where no new shoots appear (all branches die)

：着生枝数　No. of branches

：枯枝数　No. of dead branches

付表－1　枝傾斜角交会点の座標値

Sub－table 1. Co－ordinate value of intersect point of branch inclination angle

供試木 Sample tree (No.)	樹高 Tree height (m)	枝階の高さ Height of branch stage (m)	枝の傾斜角 Inclination angle of branches (Branch number) (1)	(2)	(3)	(4)	(5)	計 Total	平均 Average	枝傾斜角交会点の座標値 Co-ordinate value of the point F X	Y
Kawakami 12	14.94	12.5	42°	46℃	42°	46°	42°	218	43.6°	0.125^{*}_{h}	0.75^{*}_{h}
		9.2	30°	35℃	34°	33°	—	132	33.0°		
		5.8	15°	20℃	20°	20°	20°	95	19.0°		

* h：枝階の高さ　Height of the branch stage

縦断面図を表わす曲線について論及する。

付１式の曲線を $y_0=a$ で切り捨てることとし，a で切られた点の v を b で表わし，$x=v-b$ とし，$x=0$ の点を梢頭，x を梢頭からの幹軸上のへだたりとすれば，残った曲線 y_1 は次の形になる。

$$\left.\begin{aligned} y1 &= C\sqrt{b+x}-a \\ x &= v-b \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\text{(付2) 式}$$

また梢頭では，$x=0$，$y_1=0$ であるから，付２式は

$$C\sqrt{b}-a=0$$

$$a=C\sqrt{b} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\text{(付3) 式}$$

となる。付２式の y_1 は，付１式の曲線のうちの使用可能範囲であり，付３式の a は使用できない範囲を表わす定数である。またＣは，付１式で表わされる曲線の拡張度合いに関係する媒介変数で，以下これを係数Ｃとする。

付図－３にしめすように，任意のクローネ曲線に対して，付１式の y_0 曲線を傾けて重ね合わせ完全に一致したとき，傾ける前の y_0 曲線の座標でこの曲線を捕えて y_2 曲線とする。y_2 曲線は，y_0 曲線を傾けた分だけ y_0 曲線よりも内側にせばめられている。今，y_0 曲線よりも内側にせばめられた度合いをｅで表わすと，ｅは両曲線の開差（それぞれ原点から同一へだたりにおける）となり，$y_2=y_0-e$ となる。y_0 と y_2 との開差ｅは，座標軸を傾けて生じた曲線の移動量であるから，y_0 曲線の原点からの距離 v に正比例する。

今，v に対する比例定数をＣ/k で与えると，任意の v における両曲線の開差ｅは，

$$e? \ C\,v/k \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\text{（付 4）式}$$

であるので，y_2 は次の形に書き替えられる。

$$y_2=y_0-Cv/k$$

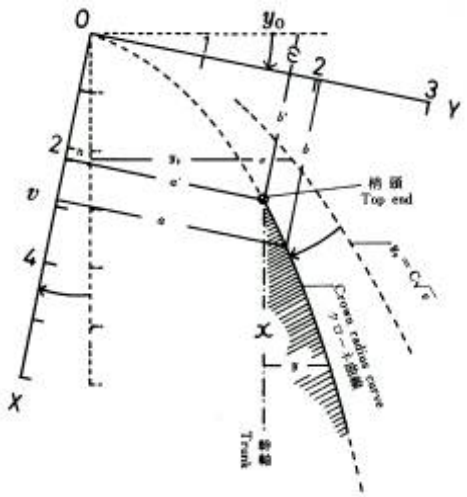
$$=C\left(\sqrt{v}-v/k\right) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\text{（付 5）式}$$

付５式の y_2 には，使用できない曲線範囲 a が含まれているので，付３式の a をこれより除外することにより，クローネ曲線の y を求める次の式が導びかれる。

$$\left.\begin{aligned} y &= C\left(\sqrt{v}-v/k\right)-a \\ v &= b+x \end{aligned}\right\} \ldots\text{(付6) 式}$$

次に，付６式の係数および定数の求め方について考える。今，付図－３において，両曲線の係数Ｃが同じ値の場合には，付４式にしめしたとおりｅは v に対して正比例し，y_0 曲線を傾けることによって，クローネ曲線はすべての部分で完全に y_0 曲線に一致できる。

これに対し，両曲線の係数Ｃが異なり，Ｃ≠Ｃ´である場合は，$e=C\sqrt{v}-C'\sqrt{v}+C'v/k$ となり，ｅは v に対して比例定数が得られないので，両曲線はすべての部分で完全に一致する



付図-3　クローネ曲線の係数および定数のよみとり方

Sub-fig. 3. Way of selecting the values of C, a, k of crown radius curve

ことができない。したがって両曲線の完全一致を条件とすることによって，座標原点の不明なクローネ曲線の係数Cを，y_0曲線を用いて付1式により求めることができる。

また同図において，y_0曲線を傾けたときの座標軸の移動量をnで表わすと，両曲線の開差eとの間に次の関係が成り立つ。(e，n，ε の符号はx軸の傾きが右にふれる時－とする。)

$$e=\mathrm{C}.\ \mathrm{n} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(付7)式}$$

付7式と付4式とから

$$\mathrm{C}.\ \mathrm{n}=\mathrm{C}v/k$$

$$\mathrm{n}=v/k \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(付8)式}$$

となる。nを読みとれば，付8式から定数kが求められる。

さらに付8式を付6式に入れると，係数Cを求める次の付9式が得られる。

$$y=\mathrm{C}\left(\sqrt{v}-\mathrm{n}\right)-a$$

$$\mathrm{C}\left(\sqrt{v}-\mathrm{n}\right)=y+a$$

$$\mathrm{C}=\frac{y+a}{\sqrt{\mathrm{v}}-\mathrm{n}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(付9)式}$$

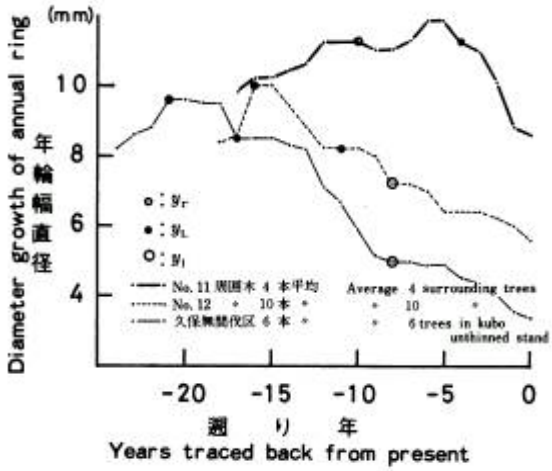
付図－3 では，クローネ曲線を y_0 曲線の座標軸を傾けて捕えたことにより，梢頭がしめす a'，b' はそれぞれ見かけの座標値となっている。クローネ曲線の梢頭の見かけの座標値 a'，b' に対する真の座標値をそれぞれ a，b とすると，y_0 曲線の傾きをいったん元へ戻したときに現われるε を読み取れば，$b=b'+\varepsilon$ により真の座標値 b が得られ，次いで，b を用いて付3式を適用すると真の座標値 a が求められる。決定した a を（付9）式に入れると正しいCが求められる。

付録2．林分の閉鎖と生長の解析

供試木の年枝長（付図－2）および年輪幅直径生長（付図－4）の解析結果について，とくに林分閉鎖と生長との関係を考察した。その結果，両者の間におおよそ次のような傾向が認められた。

年輪幅直径生長：付図－4によると年輪幅直径生長は，交点枝張りが y_r に達すると緩慢となりはじめ，y_r を超えると一部に低下するものが見られるようになり，y_L に達すると一様に下降が始まる。さらに y_L を超えると下降が顕著となり，y_l 以降になると下降は一層促進されていく。

材積生長：材積生長率は樹齢の増加につれて低下するが，低下の度合いは，本数密度の高い林分ほど大である。これは，閉鎖が進むほど材積生長率の低下度合いが大きいことをしめすものである。これに対して林分材積生長量は，単木の材積生長率の低下を本数密度によって補う関係で，本数密度の高い林分ほど高く現われている。



付図-4 年輪幅直径生長

Sub–fig. 4. Diameter growth of annual ring width

付録３．トドマツ年輪密度管理図

図版Ⅲ～Ⅴは，交点枝張り図（図版Ⅰ）を使用し，交点枝張りを仲立ちに，２×年輪幅と林齢とを基にして，樹高と本数密度との間にある関係を２×年輪幅と林齢ごとに表わし，地位別に作制した年輪密度管理図である。

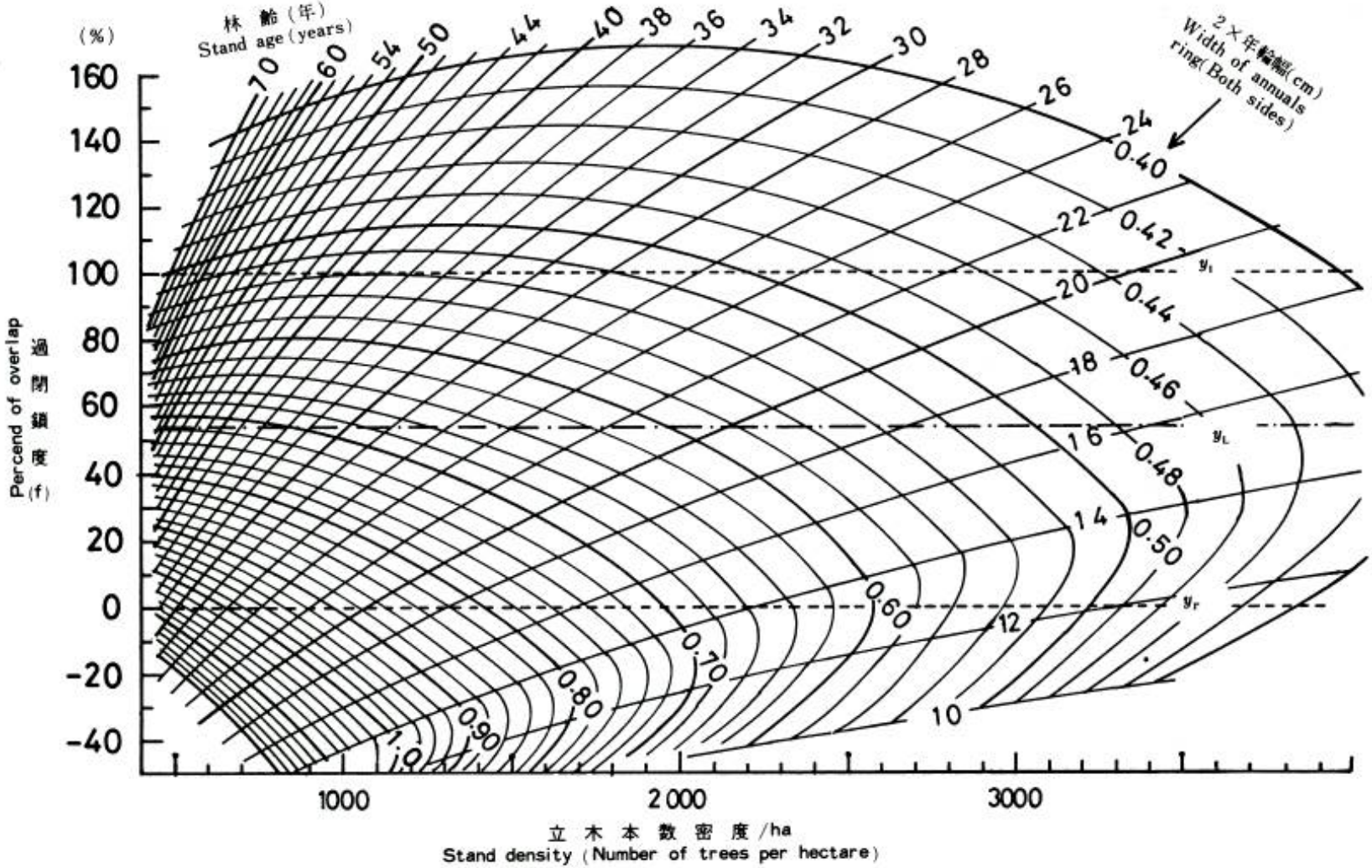
この図によって，樹高と本数密度との間にある過閉鎖度を仲立ちにして，本数密度と経過林齢と経過林齢時における年輪幅との関係がそれぞれしめされているので，この図を交点枝張り図および林分閉鎖早見図（図版Ⅱ）とともに使用することにより，過閉鎖度を指針として所定の年輪幅の林分に導びくための最適の植栽密度の読み取りをはじめ，年輪幅に合わした林分密度管理の設計ができる。すなわち，

１．目標の等年輪幅線をきめる。

２．等年輪幅線の最右端（曲線の折り返えし点）において立木本数密度を読み取ると，所定の年輪幅に導びくための最適の植栽密度が読みとれる。

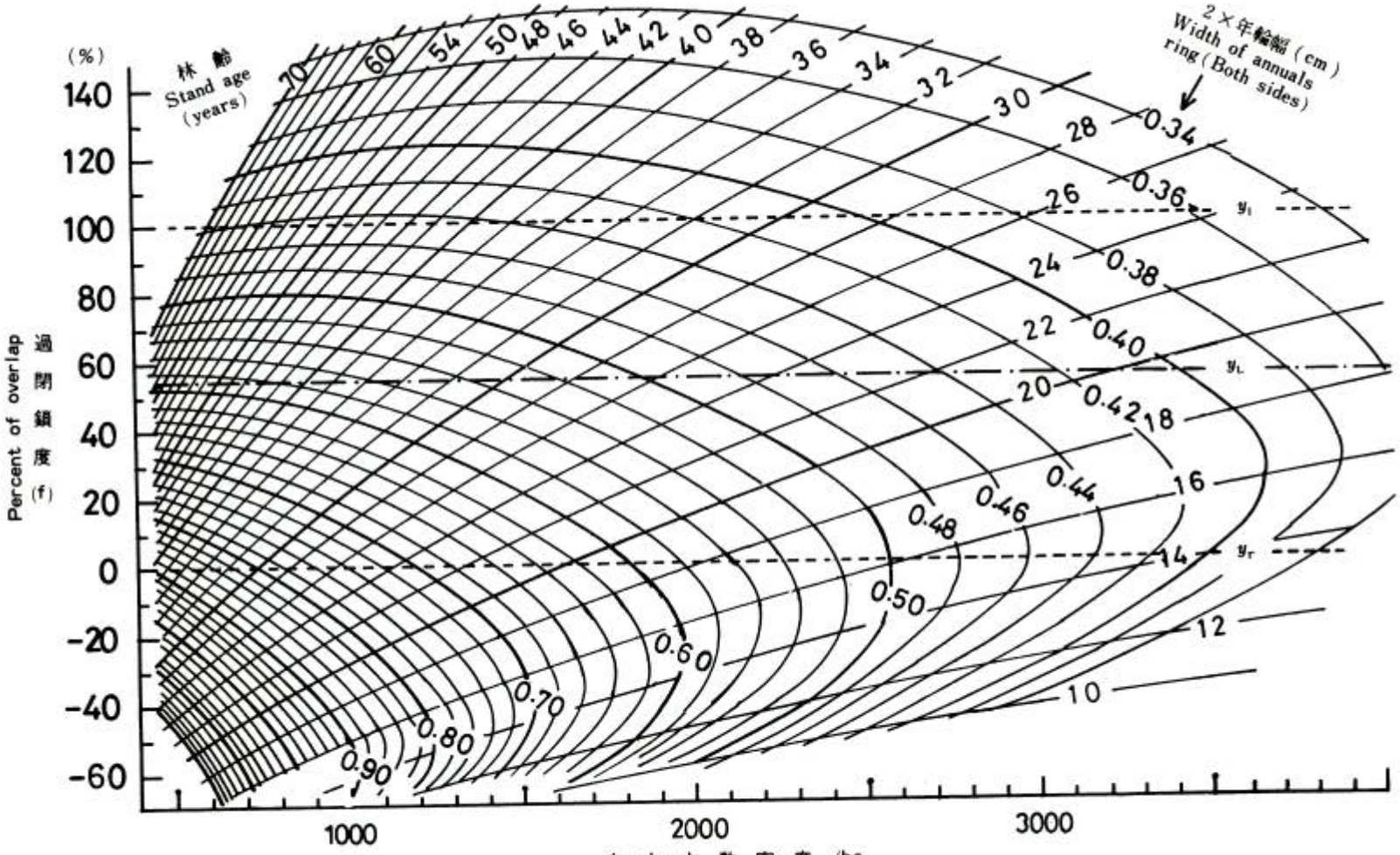
３．等年輪幅線の各点は，立木本数密度と経過林齢と過閉鎖度とをそれぞれしめしているので，この曲線に沿って除伐および間伐を繰り返えし設計し（主として同図にしめす y_r～y_1 線の範囲内で行うのが一般的である。）これに応じてそれぞれの時点における立木本数密度と経過林齢と過閉鎖度とを読み取ることができる。

４．立木本数密度と過閉鎖度とが読み取れたならば，林分閉鎖早見図を用いて（または関係式により）交点枝張りが求められるので，これを仲立ちにして，交点枝張り図により樹高，林齢，直径などとの関係が読み取れる。また，これらの順序を逆にたどれば，交点枝張り，次いで過閉鎖度を仲立ちに，任意の到達樹高時における立木本数密度，林齢，年輪幅などの関係が年輪密度管理図上で読み取れる。



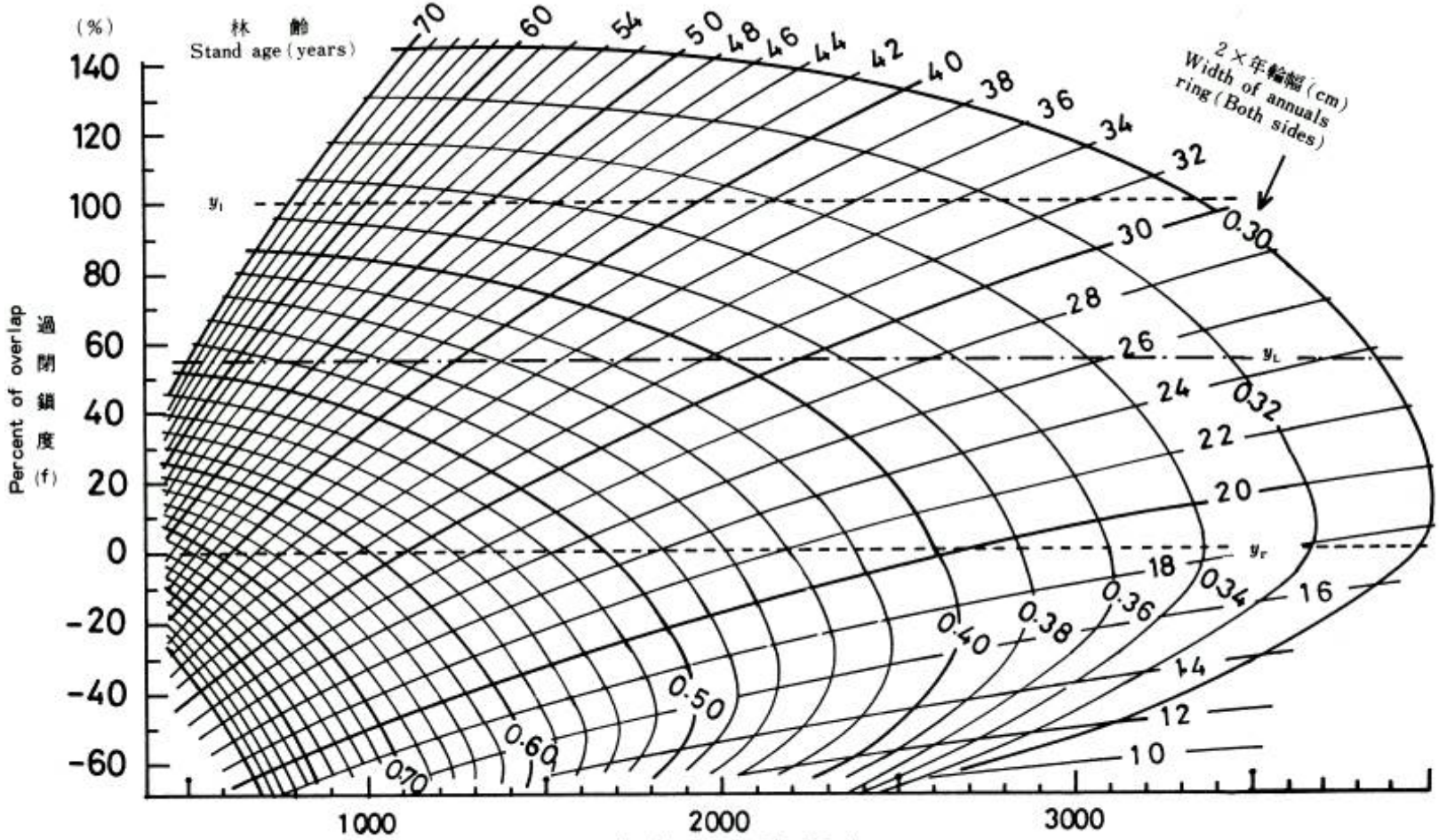
図版Ⅲ　年輪密度管理図（トドマツⅠ等地）

Plate Ⅲ. Annual ring density control diagram
(1st . class site of *Abies sachalinensis* forests)



図版Ⅳ　年輪密度管理図（トドマツⅡ等地）

Plate Ⅳ. Annual ring density control diagram
(2 nd. class site of *Abies sachalinensis* forests)



図版V　年輪密度管理図（トドマツ III 等地）

Plate V. Annual ring density control diagram
(3 rb. class site of *Abies sachalinensis* forests)

付録４．林分閉鎖早見図のつくり方

１．ＨＥＭＭＩ計算尺のＣ尺目盛によって，付図－５中央の林分疎開比を目盛りする。

２．同目盛の１ｍを基準に，左右にそれぞれ 10 cm 離して，左に y 目盛の２ｍ，右に y_1 目盛の２ｍを設定する。

３．林分疎開比の目盛を基準にして，それぞれ左右に次の目盛を設定する。

y 目盛	y_1/y 目盛	y_1 目盛
1	4	4
4	0.25	1

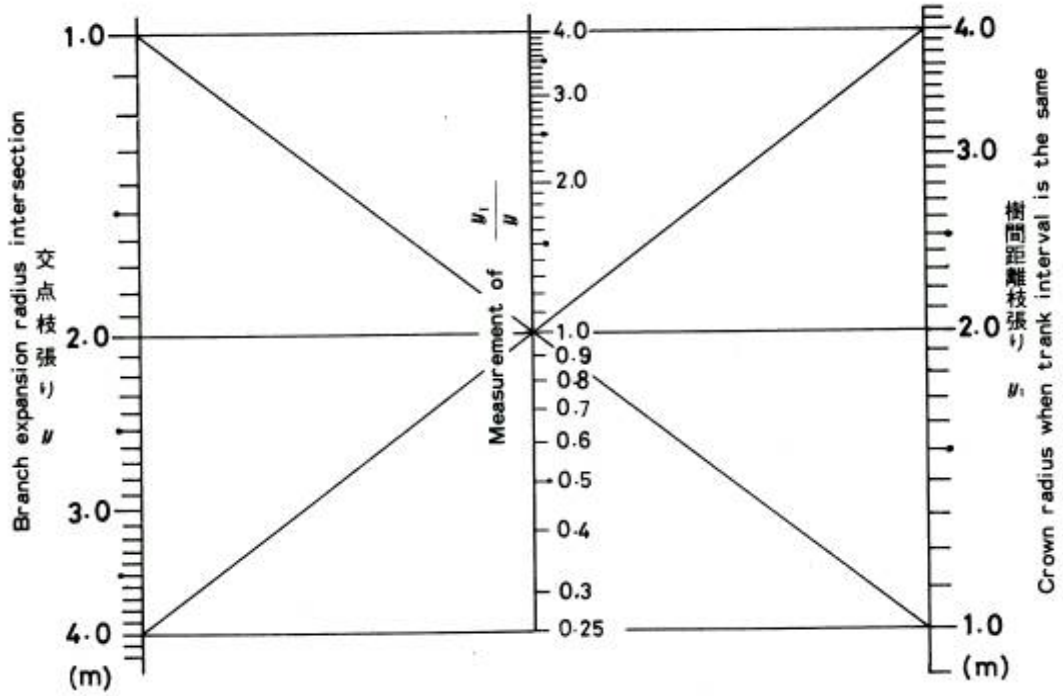
４．y 目盛の１ｍを基準にして，y_1/y 目盛を見通して，次の計算によって y_1 目盛を補完する。

$y \times y_1/y = y_1$

5. y_1 目盛を y に移して，y 目盛を補完する。

6. y_1/y 目盛を，８式に従って過閉鎖度 f の目盛に取り替える（図版Ⅱ参照）。

７．図版Ⅱにしめしたように，y_1 目盛を直接本数に読み替えるために，同図の下方横軸に本数をとり，４式によって y_1：本数曲線を組み入れる。



付図-5　林分閉鎖早見図のつくり方

Sub–fig. 5. How to make an overlap ratio chart