

角度測定法の応用について

西 沢 正 久

(1966年4月受付)

On the Application of the Angle Method

Masahisa NISHIZAWA

Since Winkelzählprobe (W.Z.P., angle count method) was proposed by Dr. W. Bitterlich in 1948, many articles have been reported about this method. In 1959, K. F. Stöhr proposed that the heterogeneous error in WZP pointed out by Dr. M. Prodan would be eliminated by determining each angle of trees from a sampling point instead of using a constant angle. In 1962, Dr. S. H. Spurr published "A measure of point density" and used this angle summation method in silvicultural and ecological research.

These methods may be classified as follows:

angle method $\left\{ \begin{array}{l} 1. \text{ angle count method (constant angle method)} \\ 2. \text{ angle summation method (limited angle method)} \end{array} \right.$

Theoretically, the angle count method is to estimate the mean overlapping number of the enlarged circles with the diameter pd_i (d_i is the diameter of the i -th tree, p is a constant and the center of a circle is a tree center). On the other hand, the angle summation method is to estimate the point density from a sampling point. Thus the former is used for the research of sampling of stand composition factors and the latter is used for the research of their distribution around a sampling point.

We usually use the relascope (an instrument) in the angle method. In the angle count method the constant angle (constant relascope unit) is used, on the other hand in the angle summation method the limited angle (variable relascope unit) is used.

The formulae of the estimation methods of the stand composition factors (mean d. b. h., mean height, basal area per hectare, volume per hectare etc.) and the application on the actual stand by the angle method together with the angle count method and the angle summation method are described in this paper. As the constant angle is used, the angle count method is much simpler than the angle summation method which uses the limited angle. But the angle summation method includes the angle count method and the circular plot method, because it needs the limited angle of each tree or the measurement of both the distance and the diameter. Furthermore, the angle summation method has an advantage in a point that the distribution

of the stand composition factors are obtained continuously. It is expected that this method is useful for the silvicultural and ecological research in future. It is added that we have a program of the angle summation method for the electronic computer NEAC 1210.

Government Forest Experiment Station

§1. ま え が き

1948年 W. Bitterlich⁽¹⁾ が Winkelzählprobe (WZP) を発表して以来、理論面や応用面に多くの研究が行われてきた。1959年、K. F. Stöhr⁽⁵⁾ が Prodan⁽²⁾ のいう Winkelzählprobe の不均質誤差を消去するためには一定視角でなく、各林木の視角を個々に定めて ha 当り断面積の分布を求める方法を提案し、1962年、S. H. Spurr⁽³⁾ が点密度の測定という論文でこれを造林学的、生態学的な研究に用いている。

このような角度通算法 (angle count method) と角度加算法 (angle summation method) をあわせて角度測定法 (angle method) と呼ぼう。前者は定角測定法 (constant angle method)、後者は限界角測定法 (limited angle method) ともいえる。これらはいずれも測定点を中心につけられた名前であるが、理論的には角度通算法は測定される木を中心に、角度加算法は標本点を中心を考えるべきで、前者はサンプリング的な研究に、各者は局所的な研究に用いられるべきであろう。

すなわち、角度通算法においては、各林木を中心にしてその木の胸高直径の一定定数倍の直径をもつ円を各林木がもって林内に立っているとすれば、各林木の円当りの胸高断面積すなわち ha 当り胸高断面積はどの木も同じ定数に関係した一定の値となり、われわれが標本点を林内にランダムにおとして、このような円の平均のかさなりを推定し、一定の値 (断面積定数) を乗ずれば林分の ha 当り胸高断面積の推定値となる。いいかえれば、拡大円が確定すれば、円のかさなりの分布が母集団で確定し、定角測定法を用いて標本のかさなりの分布から母集団の分布をサンプリングで推定すればよいことになる。この場合、林木の中に標本点がおちた場合と、林縁外に拡大円が出た場合が問題になるが、これらについての解決法はそれぞれ別個の研究がすすめられている。

これに対して、角度加算法は標本点を中心にして、林木の胸高直径と標本点から林木までの距離をもとにした限界断面積定数からそれぞれの木の限界の ha 当り断面積を加算的に求めてゆく方法で、木の生長と局所密度、天然更新と局所密度などの関係を林内の標本点ごとに解明していく手段としては、幹距法やプロット法と違って、林木の大きさと相対的な距離の両方を考慮にいれているという点ですぐれているといえよう。

角度通算法を用いた林分の ha 当り断面積、本数、材積などの推定に関するサンプリング的な立場については、すでに多くの研究が行われているので、ここでは角度加算法も含めた角度測定法の森林測定への応用ということについて考察を加えてみよう。

§2. 角度通算法の応用

§2.1 角度通算法による林分因子の推定

胸高直径の p 倍の拡大円を考えた場合、標本点を中心にしてレラスコープ又はシルバスコープを用いてレラスコープ単位 (RE) の大きさが $100/p$ よりも大きい林木の本数をカウントしてその本数を n 、カウント木の胸高直径を D_i (cm)、胸高断面積を $g_i \left(= \frac{\pi}{4} D_i^2 / 100^2 \right)$ (m²)、樹高を H_i (m)、胸高形数を F_i 、[形状高 (FH)] _{i} 、材積を V_i (m³)、ha 当り本数を N_i とすれば、次のようにして各林分因子が求められる。

(1) ha 当り胸高断面積

$$B = \left(\frac{100}{p}\right)^2 n = kn \quad (\text{m}^2/\text{ha}) \quad (1)$$

ここに $k = (100/p)^2 =$ 断面積定数

(2) ha 当り本数

$$N = \sum_{i=1}^n N_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{100}{p}\right)^2 / g_i = k \sum_{i=1}^n 1/g_i \quad (2)$$

ここに

$$N_i = k/g_i$$

(3) 平均直径

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i D_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i/g_i}{\sum_{i=1}^n 1/g_i} \quad (\text{cm}) \quad (3)$$

(4) 断面積平均木の直径

$$\left. \begin{aligned} \bar{D}_v &= \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{B}{N}} \times 100 \quad (\text{cm}) \\ &= \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{n}{\sum_{i=1}^n 1/g_i}} \times 100 \quad (\text{cm}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(5) 平均樹高

$$\bar{H} = \sum_{i=1}^n N_i H_i / N = \sum_{i=1}^n H_i / g_i / \sum_{i=1}^n 1/g_i \quad (\text{m}) \quad (5)$$

(6) ha 当り材積

$$\left. \begin{aligned} V &= \left(\frac{100}{p}\right)^2 \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{g_i} = k \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{g_i} \quad (\text{m}^3/\text{ha}) \\ &= \left(\frac{100}{p}\right)^2 \sum_{i=1}^n (FH)_i = k \sum_{i=1}^n (FH)_i \quad (\text{m}^3/\text{ha}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

(2) については断面積定数と直径に応じてすぐ ha 当り本数が求められる便利な本数表が出来ている。

また断面積定数に応ずる理論的な標本点から木までの水平距離（この距離以内にその直径をもつ木があればカウントされる）は次式で求められる。

$$\begin{aligned} R_i &= \frac{pD_i}{2 \times 100} = \frac{D_i}{2 \times \left(\frac{100}{p}\right)} \\ &= \frac{D_i}{2\sqrt{k}} \quad (\text{m}) \end{aligned} \quad (7)$$

このとき D_i は cm 単位である。

通常サンプリングの場合には $p=100, 50\sqrt{2}, 50$ すなわち、 $k=1, 2, 4$ が多く用いられている。

§2.2 地位と密度の分類への応用

調査対象地域が地位と密度ごとにどのような分布をしているかを知って、全体的な位置づけとの関連において詳細な研究を行なう場所を選定したいような場合が多い。普通のプロット法と比較して角度通算法は今日のような林業労働力が不足しているときには、少人数で非常に簡単に調査を行なうことができ、しかも前述のようにすべての林分因子が推定できるという点で

このような場合に利用して有効であろう。

長野営林局上田営林署管内和田国有林のカラマツの林分についてこれを試みた例を紹介しよう。上田事業区 133II~144 林班にわたるカラマツ人工林の約 600ha を令級ごと林小班ごとに森林調査簿を用いて面積を分類し、これをもとにして 92 ポイントを抽出した。前節の要領ですべての林分因子を推定したが、地位と密度は次のようにして分類した。すなわち、信州地方カラマツ林林分収獲表から地位および本数分類指針表を第1表、第2表のように作製した。

第1表 地位分類指針表

地位 林令	特 1	1	2	3	4
25年	17.9~20.1	15.6~17.8	13.3~15.5	11.0~13.2	8.9~10.9
30	20.2~22.8	17.7~20.1	15.0~17.6	12.4~14.9	9.9~12.3
35	22.2~25.0	19.3~22.1	16.5~19.2	13.6~16.4	10.9~13.5
40	23.9~26.9	20.9~23.8	17.8~20.8	14.7~17.6	11.8~14.6
45	25.5~28.7	22.2~25.4	19.1~22.1	15.8~19.0	12.5~15.7
50	26.5~29.9	23.2~26.4	19.9~23.1	16.5~19.8	13.2~16.4

第2表 本数密度分類指針表

地位 林令	特 1	1	2	3	4
25年	637~955	746~1,120	889~1,333	1,058~1,588	1,225~1,837
30	506~758	602~ 902	722~1,084	867~1,301	1,045~1,567
35	411~617	497~ 745	600~ 900	726~1,088	895~1,343
40	343~515	418~ 628	508~ 762	617~ 925	771~1,157
45	290~434	358~ 536	438~ 656	535~ 803	671~1,007
50	250~374	311~ 467	382~ 572	468~ 702	590~ 886

注) この範囲より多ければ密、小さければ疎、範囲内であれば中。

これをもとにして各ポイントを分類すると第3表のようになる。参考のために ha 当り材積および土壌型が括弧内にのせてあるが、これによると適潤型が生長がよく、乾燥型になるにしたがって生長がわるくなる傾向をうかがうことができる。

この分類はカラマツ総合調査のうちで、この調査が行われたあとでの造林部門の調査プロット選定の基礎となった。参考のためポイント No. 27 の例をあげておく。

ポイント No. 27 のカウント木の調査データ (k: 4)

No.	胸高直径 cm	樹 高 m	上下層別	直 径 階 別 本 数			形状高
				直径階	本 数	ha 当り本数	
1	12	12	下	12	1	(354)* 354	6.01
2	18	14	上	16	2	(199) 398	6.96
3	20	17	上	18	2	(157) 314	8.53
4	20	16	上	20	4	(127) 508	8.06
5	20	15	上				7.51
6	16	16	上				8.08
7	20	15	上				9.46
8	16	15	上				7.51
9	18	16	上				8.06
計		上のみ 124	上 8			1,574	68.18

注) * 括弧内の数字は直径階に応ずる ha 当り本数。

第3表の1 本数密度および地位別ポイント分類表 (和田峠)

地位	特 1	1	2	3	4	計
密 度 Dense	40年		⑤ (324.3 / B/Dm) 20	④ (350.0 / B/Dm) 20		2((0))
	50年	⑧ (342.4 / B/DE 崩積) 22		① (230.3 / B/D(d)) 14 ② (260.9 / BC) 14 ③ (225.0 / B/D 残積) 16	④ (52.1 / B/Dm) 6 ⑤ (114.9 / B/A) 10 ⑥ (207.4 / B/B) 12 ⑦ (169.6 / B/D(d)) 10 ⑧ (244.2 / B/Dm) 14 ⑨ (207.4 / B/D) 12	⑩ (186.2 / B/D(d)) 10 ⑪ (346.0 / B/D) 16 ⑫ (287.5 / B/D(d)) 12 ⑬ (54.0 / B/C) 4 ⑭ (168.7 / B/D(d)) 12 ⑮ (74.4 / B/DEM) 6
中 間 Medium	35年		① (239.2 / B/D) 20	② (250.9 / B/E) 20		2((2))
	50年		⑤ (322.0 / B/E 匍行) 22 ⑥ (292.9 / B/D 匍行) 22 ⑦ (319.5 / B/E) 22	⑧ (198.2 / B/D(d)) 18 ⑨ (258.8 / B/E 崩積・石礫) 20	⑩ (202.3 / B/D) 18 ⑪ (226.8 / B/Em) 16	⑫ (196.9 / B/Cm) 14 ⑬ (128.5 / B/Dm) 12 ⑭ (193.7 / B/CD) 14
疎 開 Open	25年				④ (74.0 / B/B) 10	1((1))
	40年	② (305.9 / B/DE 崩積) 28 ③ (305.5 / B/DE 崩積) 26				2((2))
	50年		① (164.8 / B/DE) 18 ② (172.5 / B/D 匍行) 20	③ (204.2 / B/D 崩積) 18 ④ (153.4 / B/D) 16	⑤ (78.0 / B/D(d)) 10 ⑥ (128.8 / B/DEM) 14 ⑦ (269.4 / B/E) 14	8((3)) 11((6))
計 Total	40年 2((2))	50年 4((2))	35年 2((2)) 40年 2((0)) 50年 5((1))	50年 7((2))	25年 1((1)) 50年 22((13))	25年 1((1)) 35年 2((2)) 40年 4((2)) 50年 38((18))

(注) (()) 内の数字は標準地がとれるポイント数で標準地をとる場合として適当なものの数である。

第3表の2 本数密度および地位別ポイント分類表(原峠)

密度	地位	特 1	1	2	3	4	計
Dense	40年	⑤ (502.4 / B/D 崩行) 26	⑦ (249.9 / B/D) 22	⑨ (378.5 / B/D(d)) 20			3((1))
	45年	②② (427.2 / B/E 崩積) 24	②⑦ (386.7 / B/D 崩積) 22 ②④ (436.8 / B/D E) 24 ④⑤ (335.3 / B/D 崩行) 22	②③ (442.3 / B/D 崩積) 18 ②⑥ (351.3 / B/D E) 18 ②⑧ (316.3 / B/D 崩積) 18	⑩ (268.5 / B/D 崩行) 16 ⑫ (284.1 / B/D) 16 ⑬ (274.9 / B/D) 16	③① (257.5 / B/D(d)-(E r)) 16 ③② (302.2 / B/D(d)) 16 ④④ (253.6 / B/D 崩行) 16 ④⑦ (404.2 / B/D 崩積) 18	④③ (306.8 / B/D) 14 ④⑥ (281.3 / B/D(d)) 14 ④⑧ (223.3 / B/D(d)) 12 ④⑨ (176.4 / B/D(d)) 14
Medium	40年	⑤ (358.6 / B/E) 26 ⑬ (420.4 / B/E) 28					2((1))
	45年	⑬ (313.5 / B/E) 24	⑩ (275.1 / B/D 崩積) 22 ②④ (373.6 / B/E) 22 ④⑨ (322.5 / B/E) 22 ⑤⑤ (338.3 / B/E) 24	⑬ (308.3 / B/E) 20 ③④ (305.2 / B/E) 20 ⑤⑤ (298.6 / B/D 崩積) 20	① (232.6 / B/D 崩行) 16 ③⑤ (256.0 / B/D 崩行) 18 ③⑧ (292.8 / B/D) 18 ③⑨ (283.5 / B/D(d)) 20	⑪ (160.6 / B/E) 12	15((9))
Open	40年	③ (312.0 / B/D) 26	④ (328.5 / B/E) 24 ⑨ (326.7 / B/D E 崩積) 24				3((2))
	45年	③ (306.4 / B/D E 崩積) 26 ④ (279.4 / B/D E) 24	⑬ (271.4 / B/D(d)) 22 ②⑥ (279.4 / B/D E) 24	③⑩ (246.1 / B/D 崩積・石礫) 20			4((2))
Total	40年	4((2)) 7((4))	3((1)) 12((5)) 9((4))	1((1)) 10((9)) 9((8))	0 11((7)) 11((7))	1((1)) 7((6)) 6((5))	9((5)) 47((31)) 38((26))

注) (() 内の数字は標準地のとれるポイント数で標準地をとる場所として適当なものの数である。

地位を分類する場合に上層木の平均樹高を用いたので樹高は上層木のみ合計してある。この同じポイントで 0.023 ha のプロット (36 本) を造林部門がとり調査したので、上の角度通算法による林分因子の推定と比較すると次のようであった。

角度通算法による推定	0.023 ha (36本) による推定
(1) ha 当り胸高断面積 (1) 式より $B=4 \times 9=36 \text{ m}^2/\text{ha}$	37.3 m ² /ha
(2) ha 当り本数 (2) 式より $N=1,574 \text{ 本}$	1,563 本
(3) 平均直径 (3) 式より $\bar{D} = \frac{12 \times 354 + 16 \times 398 + 18 \times 314 + 20 \times 508}{1,574} = 16.8 \text{ cm}$	17.3 cm
(4) 断面積平均直径 (4) 式より $\bar{D}_b = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{36}{1,574}} \times 100 = 17.1 \text{ cm}$	17.5 cm
(5) 上層木平均樹高 (5) 式より $\bar{H} = \frac{14 \times 157 + 17 \times 127 + \dots + 16 \times 157}{1,574 - 354} = 15.5 \text{ m}$ 単なる上層木の算術平均樹高を求めると $\bar{H} = 124/8 = 15.5 \text{ m}$	上下を含む 14.7 m
(6) ha 当り材積 (6) 式より $V=4 \times 68.18=272.7 \text{ m}^3/\text{ha}$	273.6 m ³ /ha

§ 2.3 林地土壌生産力調査への応用

林地土壌と林木の生長との関係を研究したい場合には、問題になっている土壌試孔点の周囲で林木を調査するプロットの広がりをもどの位にしたらよいかということが問題になる。今迄の土壌調査は 0.01 ha または 0.04 ha 位の方形または矩形のプロットかまたは円形のプロットがとられていた。しかし、角度通算法を用いると、大きな直径をもつ木は大きな拡大円をもち、小さな直径をもつ木は小さな拡大円をもつので、調査点からみて大きな直径をもつ木は遠くにあってもカウントされる率は高く、小さな木はその率は低い。一つのポイントでの土壌因子や環境因子の生長への関与率は大きい木は遠くにあっても高く、小さい木は低いであろうということが予想される。すなわち、角度通算法を用いると自然にそのような林木が調査されることになり、プロット法の場合のように場所ごとにその大きさを考える必要がないために非常に簡単でしかも有効であろう。

前述のカラマツの調査において、92ポイントの中で扉峠地区 26ポイント、和田峠地区 16ポイントで各1本ごと樹幹解析をした資料で、林令と樹高の関係を用いて作製した地位指数曲線(地位指数は40年での樹高を2m間隔で表わしてある)を利用して、すべて92ポイントの林令と上層木の平均樹高の関係から各ポイントの地位指数を求め、これを外的基準にして、土壌因子や環境因子から数量化の理論を用いて地位指数を推定した*が、重相関係数が0.96と非常に高い値を示したことをみても、この調査法の有効性がわかるであろう。

§ 3. 角度加算法の応用**

* 注) 西沢, 真下, 川端: 数量化による地位指数の推定法. 林試研報 No. 176, 1965, pp. 1~54 参照.
** 注) 西沢: 角度加算法に対する二三の考察. 1965年10月日林関東支部大会にて発表.

§3.1 角度加算法による林分因子の推定

K. F. Stöhr や S. H. Spurr の提案による角度加算法を用いた点密度の推定は、局所の断面積密度の推定ばかりでなく、次のような方法で局所の ha 当り本数, ha 当り材積, ha 当り断面積や材積の生長量の分布の推定が可能である。

(a) ha 当り断面積の推定

(a.1) 中心木を含まない場合

標本点から木までの距離を L_i (m), その木の胸高直径を D_i (cm) とすれば, その木の限界断面積定数 k_i は次式で求められる。

$$k_i = \left(\frac{D_i}{2L_i} \right)^2 \quad (8)$$

これはワイド目盛のレラスコープまたはシルバスコープのレラスコープ単位の数 RE を平方したもので, これらの器械を用いれば, 直径と距離の測定は不要である。標本点の周囲で最大の k_i を k_1 とすれば, その木はこの k_1 に応ずるレラスコープ単位, すなわち $\sqrt{k_1}$ の幅ですれすれに検視した場合 $1/2$ 本と数えられ, したがって, ha 当り断面積は $1/2k_1 = (1-1/2)k_1$ (m^2/ha) となる。2番目に大きい k_i を k_2 とすれば, $\sqrt{k_2}$ なる RE で検視した場合には, k_1 でカウントされた本は当然カウントされるので, カウント本数は $3/2$ 本で, ha 当り断面積は $(2-1/2)k_2$ (m^2/ha) となる。一般に k_i なる限界断面積定数で検視した場合の ha 当り断面積は $(i-1/2)k_i$ (m^2/ha) である。このようにして n 本を測定したとすれば, ha 当り断面積の推定値は

$$B_n = \frac{\sum_{i=1}^n \left(i - \frac{1}{2} \right) k_i}{n} \quad (9)$$

で与えられる。

(a.2) 中心木を含む場合

この場合には $\sqrt{k_1}$ で検視した場合には, カウント本数はすでに中央に1本あるので $(1+1/2)$ 本と考えられるから, ha 当り断面積は $(1+1/2)k_1$ (m^2/ha), $\sqrt{k_2}$ で検視した場合は $(2+1/2) \times k_2$ (m^2/ha), 一般に $\sqrt{k_i}$ で検視した場合は $(i+1/2)k_i$ (m^2/ha) の ha 当り断面積密度となる。したがって

$$B_n = \frac{\sum_{i=1}^n \left(i + \frac{1}{2} \right) k_i}{n} \quad (10)$$

(b) ha 当り本数の推定

(b.1) 中心木を含まない場合

最大の k_i , すなわち k_1 に応ずる木の胸高直径を D_1 (cm) とし, その木の胸高断面積を $g_1 = \frac{\pi}{4} \frac{D_1^2}{100^2}$ (m^2) とすれば, この木の ha 当り本数は $k_1/2g_1$, 2番目に大きい k_2 に応ずる木の胸高直径を D_2 (cm), 胸高断面積を $g_2 = \frac{\pi}{4} \frac{D_2^2}{100^2}$ (m^2) とすれば, $\sqrt{k_2}$ の RE で検視したときの ha 当り本数は $k_i \left(\frac{1}{g_1} + \frac{1}{2g_2} \right)$, したがって一般に $\sqrt{k_i}$ の RE で検視した場合の ha 当り本数は $k_i \left[\sum_{i=1}^{i-1} \frac{1}{g_i} + \frac{1}{2g_i} \right]$ ($i=1, 2, \dots, n$) となる。したがって, n 本測定した場合の ha 当り本数の推定値は

$$N_n = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \left[\sum_{i=1}^{i-1} \frac{1}{g_i} + \frac{1}{2g_i} \right]}{n} \quad (11)$$

(b.2) 中心木を含む場合

この場合、中心木の胸高直径を $D_0(\text{cm})$ 、胸高断面積を $g_0 = \frac{\pi}{4} \frac{D_0^2}{100^2} (\text{m}^2)$ とすれば、 $\sqrt{k_1}$ の RE で検視した場合の ha 当り本数は $k_1 \left(\frac{1}{g_0} + \frac{1}{2g_1} \right)$ 、2 番目に大きい $\sqrt{k_2}$ の RE で検視した場合の ha 当り本数は $k_2 \left(\frac{1}{g_0} + \frac{1}{g_1} + \frac{1}{2g_2} \right)$ となる。したがって一般には $k_i \left[\sum_{i=0}^{i-1} \frac{1}{g_i} + \frac{1}{2g_i} \right] (i=1, 2, \dots, n)$ である。したがって n 本測定した場合の ha 当り本数の推定値は

$$N_n = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \left[\sum_{i=0}^{i-1} \frac{1}{g_i} + \frac{1}{2g_i} \right]}{n} \quad (12)$$

(c) ha 当り材積の推定

(c.1) 中心木を含まない場合

$\sqrt{k_1}$ の RE に応ずる木の材積を $v_1(\text{m}^3)$ とすれば、 $\sqrt{k_1}$ の RE で検視したときの ha 当り材積は $k_1(v_1/2g_1) (\text{m}^3)$ 、 $\sqrt{k_2}$ の RE に応ずる木の材積を $v_2(\text{m}^3)$ とすれば、 $\sqrt{k_2}$ の RE で検視したときの ha 当り材積は $k_2 \left(\frac{v_1}{g_1} + \frac{v_2}{2g_2} \right) (\text{m}^3)$ となり、一般に $\sqrt{k_i}$ なる RE で検視したときの ha 当り材積は $k_i \left[\sum_{i=1}^{i-1} \frac{v_i}{g_i} + \frac{v_i}{2g_i} \right] (\text{m}^3) (i=1, 2, \dots, n)$ である。したがって n 本測定したときの ha 当り材積の推定値は

$$V_n = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \left[\sum_{i=1}^{i-1} \frac{v_i}{g_i} + \frac{v_i}{2g_i} \right]}{n} \quad (13)$$

または、形状高を $(fh)_i$ とすれば

$$V_n = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \left[\sum_{i=1}^{i-1} (fh)_i + \frac{(fh)_i}{2} \right]}{n} \quad (13')$$

で与えられる。

(c.2) 中心木を含む場合

中心木の材積を $v_0(\text{m}^3)$ とすれば、前と同様に

$$V_n = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \left[\sum_{i=0}^{i-1} \frac{v_i}{g_i} + \frac{v_i}{2g_i} \right]}{n} \quad (14)$$

または

$$V_n = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \left[\sum_{i=0}^{i-1} (fh)_i + \frac{(fh)_i}{2} \right]}{n} \quad (14')$$

(d) ha 当り断面積生長量および材積生長量の推定

生長錐を用いて検視木の過去 (5 年または 10 年) の皮内直径 (d_{i0}) および現在の皮内直径 (D_{i0}) を測定し、直径樹皮係数 $K = \sum D / \sum D_{i0}$ を計算して、 $d_{pi} = Kd_{i0}$ によって過去の皮付直径を求めると、距離 L_i が測定してあるので、過去の限界断面積定数 k_{pi} は次式で計算される。

$$k_{pi} = \left(\frac{d_{pi}}{2L_i} \right)^2 \quad (15)$$

(d. 1) 中心木を含まない場合の断面積生長量

k_{p_i} を用いて過去の ha 当り断面積は次式で求められる。

$$b_n = \frac{\sum_{i=1}^n k_{p_i} \left(i - \frac{1}{2} \right)}{n} \quad (16)$$

したがって、定期間の ha 当り断面積の生長量は (9) と (16) を用いて

$$I_{B_n} = B_n - b_n = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \left(i - \frac{1}{2} \right) - \sum_{i=1}^n k_{p_i} \left(i - \frac{1}{2} \right)}{n} \quad (17)$$

で求められる。

(d. 2) 中心木を含む場合の断面積生長量

(a. 2) を用いて

$$I_{B_n} = B_n - b_n = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \left(i + \frac{1}{2} \right) - \sum_{i=1}^n k_{p_i} \left(i + \frac{1}{2} \right)}{n} \quad (18)$$

で求められる。

(d. 3) 中心木を含まない場合の材積成長量

短期間で同じ樹高曲線を用いれば、 d_{p_i} と樹高から過去の材積 v_{p_i} が求められ、 ha 当り材積生長量は (13) より

$$I_{v_n} = V_n - v_n = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \left[\sum_{i=1}^{i-1} \frac{v_i}{g_i} + \frac{1}{2g_i} \right] - \sum_{i=1}^n k_{p_i} \left[\sum_{i=1}^{i-1} \frac{v_{p_i}}{g_{p_i}} + \frac{v_{p_i}}{2g_{p_i}} \right]}{n} \quad (19)$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n k_i \left[\sum_{i=1}^{i-1} (fh)_i + \frac{(fh)_i}{2} \right] - \sum_{i=1}^n k_{p_i} \left[\sum_{i=1}^{i-1} (fh)_{p_i} + \frac{(fh)_{p_i}}{2} \right]}{n} \quad (19')$$

ここに g_{p_i} は過去の胸高断面積、 $(fh)_{p_i}$ は過去の形状高である。

(d. 4) 中心木を含む場合の材積生長量

(13') を用いて

$$I_{v_n} = V_n - v_n = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \left[\sum_{i=0}^{i-1} \frac{v_i}{g_i} + \frac{v_i}{2g_i} \right] - \sum_{i=1}^n k_{p_i} \left[\sum_{i=0}^{i-1} \frac{v_{p_i}}{g_{p_i}} + \frac{v_{p_i}}{2g_{p_i}} \right]}{n} \quad (20)$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n k_i \left[\sum_{i=0}^{i-1} (fh)_i + \frac{(fh)_i}{2} \right] - \sum_{i=1}^n k_{p_i} \left[\sum_{i=0}^{i-1} (fh)_{p_i} + \frac{(fh)_{p_i}}{2} \right]}{n} \quad (20')$$

§ 3.2 測定本数による各推定値の変動

前節の方法で求めた B_n, N_n, V_n の各値が n によってどのような変動を示すかを実例でもって検討しよう。

資料は東京営林局、沼津営林署管内の桑木国有林、二子山国有林、富士国有林、愛鷲国有林で林地土壌生産力の研究のためにとられたスギ、ヒノキの林分で土壌調査をした 40 ポイントの内 16 ポイントについて角度加算法による調査を行なったが、その中のヒノキの 26 年生、45 年生、61 年生の林分でとられた 3 ポイントを例として用いよう。

各ポイントの林令、土壌型、海拔高および断面積定数 4 でカウントされた木をもとにして推定した ha 当り断面積 (B)、本数 (N)、材積 (V) は次の通りであった。

これらの各ポイントで、あらかじめ収穫表から作製しておいた地位指数曲線から求めた地位指数に応ずる樹高をもつ木を樹幹解析したが、その木の伐根を中心にして、周囲材木の距離

ポイント番号	林令 (年)	土 壌 型	海 抜 高 (m)	B (m^2/ha)	N (本/ha)	V (m^3/ha)
1116	26	BL_D	740	38	1,932	195.8
1120	45	BL_D	1,080	36	1,306	184.2
1111	61	B_B	790	46	1,700	271.1

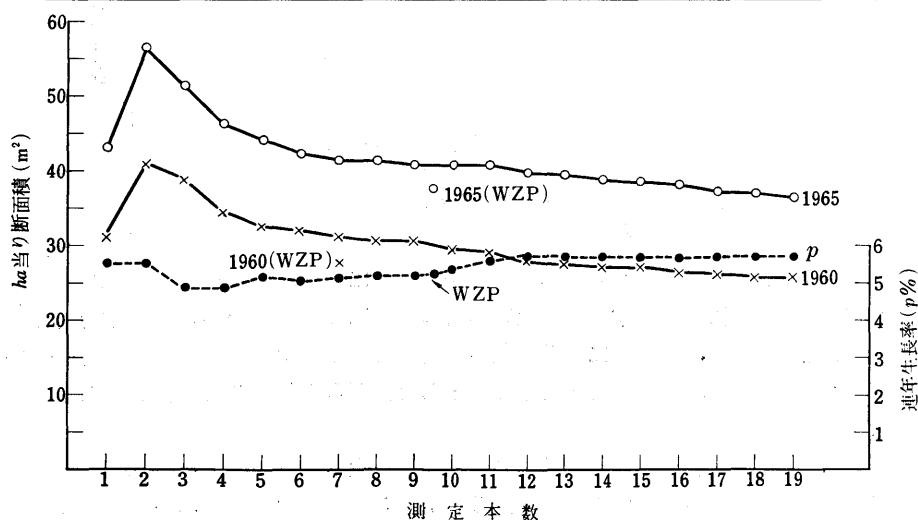
($L, 0.01 m$ 単位), 直径 ($D, 0.2 cm$ 単位), 樹高 ($H, 0.1 m$ 単位) および生長錐により現在の皮内直径, 5年前と 10 年前の皮内直径を測定した. 同時に三脚上にワイド目盛のレラスコープを置き, 各林木の RE の数を 1 RE の数, $1/4 RE$ の数, $1/4 RE$ の端数というようにわけて読みとった. これらの和の $RE = D/2L$ であるから, 直径と距離の測定なしにこの方法で $k = (RE)^2$ によって直ちに限界断面積定数を求めることができる.

(a) ha 当り断面積の変動

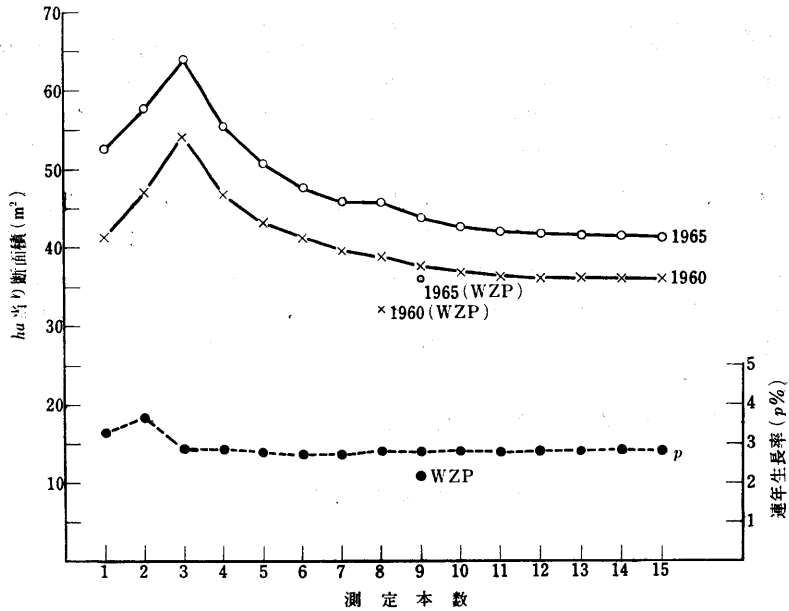
各林木について $k_i = (D_i/2L_i)^2$ を計算し, k_i の大きい方から並べて, (10) 式で B_n を求めた 1111 の例が第 4 表である.

第 4 表 ha 当り断面積の推定 (1111)

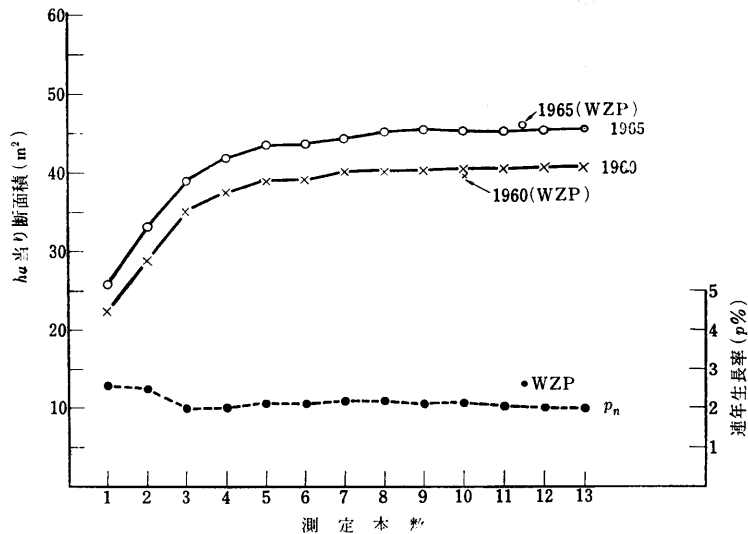
木番号	i	k_i	$k_i(i + \frac{1}{2})$	累 積 和	B_n	備 考
11	1	17.4222	26.13	26.13	26.13	$k_i=4$ の WZP では $B=4 \times 11.5=46$
10	2	16.3054	40.76	66.89	33.45	
2	3	14.4856	50.70	117.59	39.20	
7	4	11.2158	50.47	168.06	42.02	
1	5	9.2903	51.10	219.16	43.83	
3	6	6.7600	43.94	263.10	43.85	
12	7	6.5331	49.00	312.10	44.59	
13	8	5.8322	49.57	361.67	45.21	
6	9	4.8400	45.98	407.65	45.29	
4	10	4.3139	45.30	452.95	45.30	
5	11	4.0000	46.00	498.95	45.36	
8	12	3.5872	44.84	543.79	45.32	
9	13	3.1826	42.97	586.76	45.14	



第 1 図 1965, 1960 の ha 当り断面積および連年生長率の Angle Summation Method による推定値の変動 (1116)



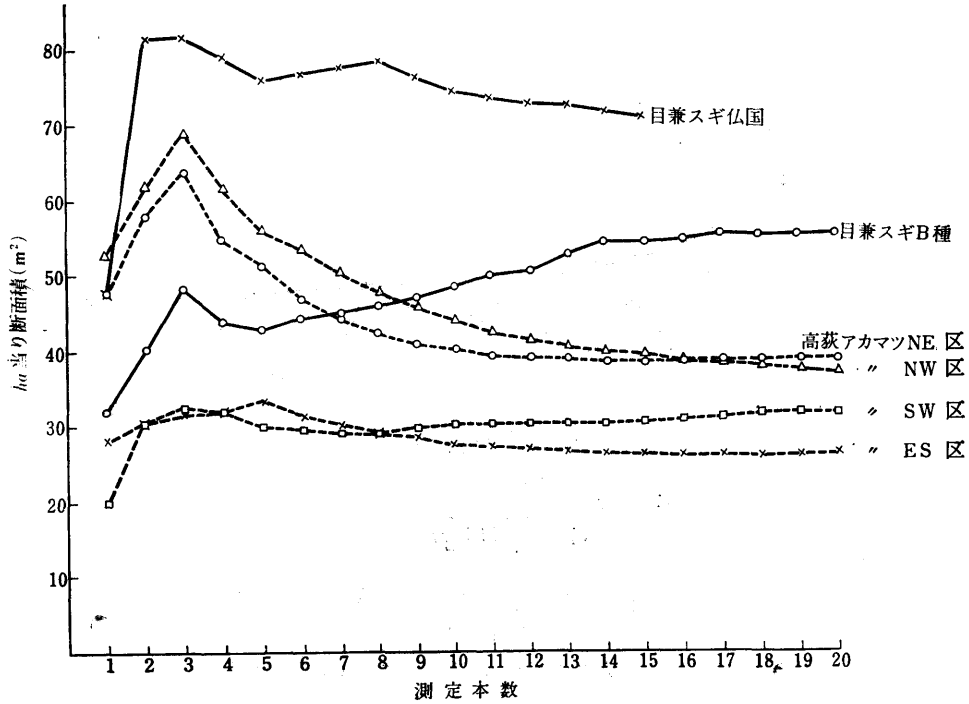
第2図 1965, 1960 の ha 当り断面積および連年生長率の A. S. M. による推定値の変動 (1120)



第3図 1965, 1960 の ha 当り断面積および連年生長率の A. S. M. による推定値の変動 (1111)

これらの3つのポイントの計算結果が第1図～第3図に1965の線でグラフ上に示してある。これによれば、いずれも測定本数が少ない場合は非常に変動が多いが、10本を越えると安定した断面積密度になり、WZPによる推定値は同じ測定本数では老令の1111を除きいずれも過小推定になっている。また老令ほど早く安定した値が得られることが傾向としてみられるであろう。

前橋営林局、勿来営林署管内目兼試験地のスギ66年生のB種間伐区、仏国式間伐区および林業試験場高萩試験地内のアカマツ37年生の4ポイントの例を第4図に示してある。これらはいずれもシルバスコープを用いて測定した(RE)をもとにして計算したものである。(大きいREについてはワイド目盛のレラスコープを用いた)。これによっても前のヒノキの例と同



第4図 スギ、アカマツの断面積密度の変動

のように 10~15 本で安定した断面積密度になっていることがわかる。

(b) ha 当り本数の変動

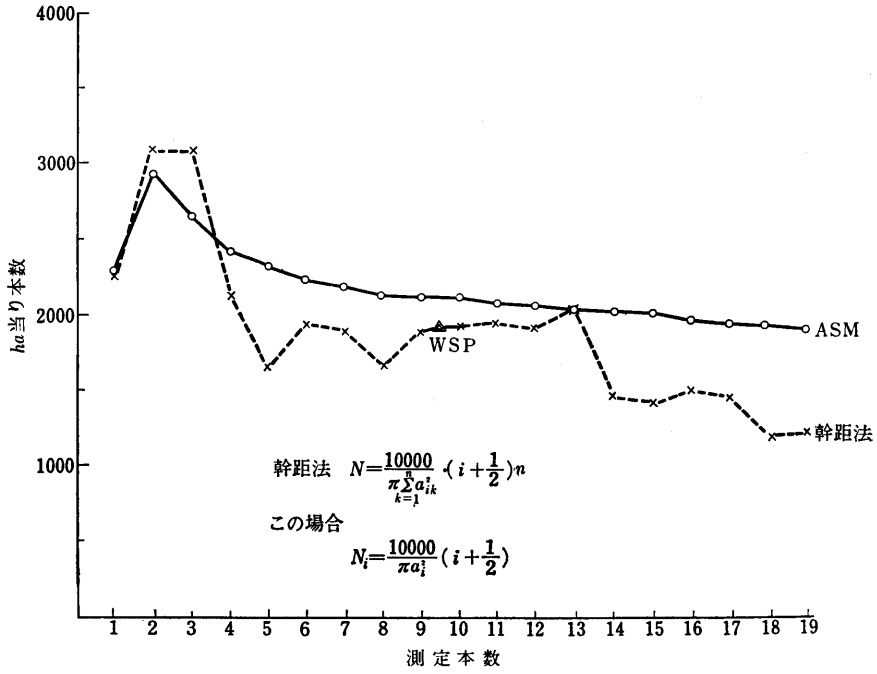
(12) 式を用いた ha 当り本数の計算方法の例が 1111 について第 5 表に示してある。

これを Stoeffels⁽⁴⁾ の幹距法と比較してグラフに表わしたものが第 5 図~第 7 図である。

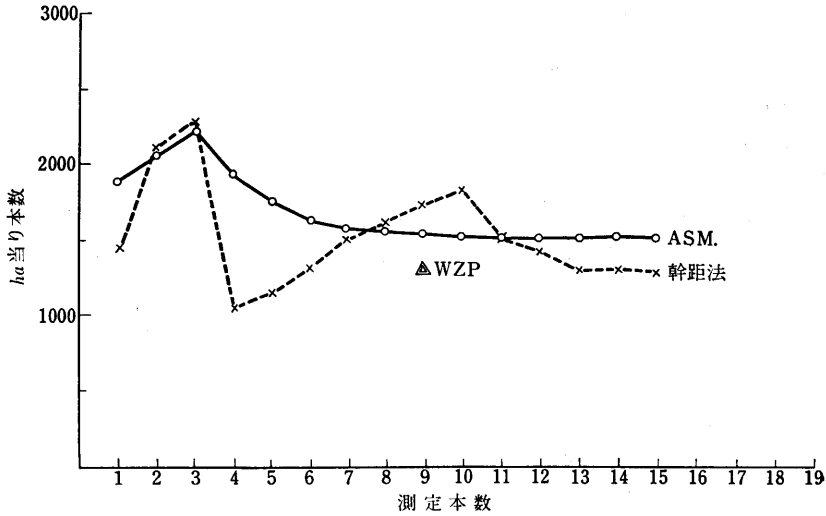
Stoeffels の幹距法は、標本点から最も近い木までの距離を $a_{1k}(m)$ ($k=1, 2, \dots, n$) とすると、面積 $\pi a_{1k}^2 (m^2)$ 上にはその木は半分立っていることになる。この方法をくりかえして n

第5表 ha 当り本数の推定 (1111)

木番号	i	k_i	$\frac{1}{g_i}$	$\frac{1}{2g_i}$	$\sum_{t=0}^{i-1} \frac{1}{g_t}$	$\sum_{t=0}^{i-1} \frac{1}{g_t} + \frac{1}{2g_i}$	$k_i \left[\sum_{t=0}^{i-1} \frac{1}{g_t} + \frac{1}{2g_i} \right]$	累積和	N_n	備考
0	0	—	39.7	—	—	—	—	—	—	$k=4$ の
11	1	17.4222	34.5	17.25	39.7	56.95	992.1	992.1	992.1	WZP によ
10	2	16.3054	28.9	14.45	74.2	88.65	1445.4	2437.5	1218.7	る $N=4$
2	3	14.4856	22.9	11.45	103.1	114.55	1659.3	4096.8	1365.6	$\times 424.96$
7	4	11.2158	61.4	30.70	126.0	156.70	1757.5	5854.3	1463.5	$=1699.8$
1	5	9.2903	34.5	17.25	187.4	204.65	1901.2	7755.5	1551.1	
3	6	6.7600	38.4	19.20	221.9	241.10	1629.8	9385.3	1564.2	
12	7	6.5331	37.6	18.80	260.3	279.10	1823.3	11208.6	1601.2	
13	8	5.8322	32.5	16.25	297.9	314.15	1832.1	13040.7	1630.0	
6	9	4.8400	41.1	20.55	330.4	350.95	1698.5	14739.2	1637.6	
4	10	4.3139	27.3	13.65	371.5	385.15	1661.4	16400.6	1640.0	
5	11	4.0000	52.3	26.15	398.8	424.96	1699.8	18100.2	1645.4	
8	12	3.5872	31.8	15.90	451.1	467.00	1675.2	19775.4	1647.9	
9	13	3.1826	32.5	16.25	482.9	499.15	1588.5	21363.9	1643.3	



第5図 A. S. M. と幹距法による ha 当り本数の推定値の比較 (1116)



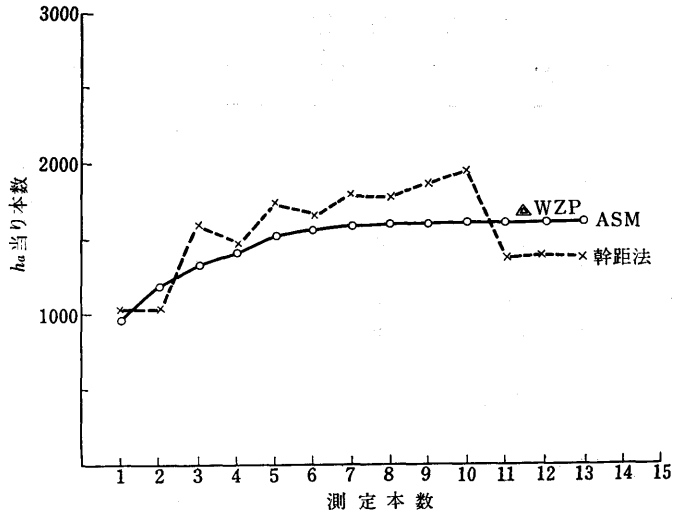
第6図 A. S. M. と幹距法による ha 当り本数の推定値の比較 (1120)

本の測定を行なうと ha 当り本数は

$$N = \frac{10000}{\pi \sum_{k=1}^n a_{1k}^2} \times \frac{n}{2}$$

角度加算法と同じ原理で、2番目に近い木までの距離を測定すると

$$N = \frac{10000}{\pi \sum_{k=1}^n a_{2k}^2} \times \frac{3}{2} n$$



第7図 A. S. M. と幹距法による ha 当り本数の推定値の比較 (1111)

一般に i 番目の木までの距離を測定すると

$$N = \frac{10000}{\pi \sum_{k=1}^n a_{ik}^2} \times \left(i - \frac{1}{2}\right) n \quad (21)$$

で ha 当り本数を求めることができる。

中心木を含む場合には

$$N = \frac{10000}{\pi \sum_{k=1}^n a_{ik}^2} \times \left(i + \frac{1}{2}\right) n \quad (22)$$

となる。

勿論、 i 番目の木までの距離の測定が多ければ良好な結果を得るであろうが、角度通算法による本数推定と比較するため、1つのポイントで i 番目に近い林木までの距離を a_i (m) とすると

$$N_i = \frac{10000}{\pi a_i^2} \left(i + \frac{1}{2}\right) \quad (23)$$

で求めた本数を第5図～第7図に角度加算法による推定値と比較して示してある。

同じ林木配置のもとで、ha 当り本数の分布をみる場合、距離だけをもとにした幹距法による推定値は変動が大きいのに比較して、直径と距離の両方を考慮にいたれた角度加算法による推定値は測定本数が多くなると安定した値が得られることは図から明らかであろう。WZP による ha 当り本数の推定値は同じ測定本数の場合には ha 当り断面積の場合と同様、老令林ではほぼ似た値が得られたが、他の2つはいずれも過小推定になっている。

(c) ha 当り材積の推定値の変動

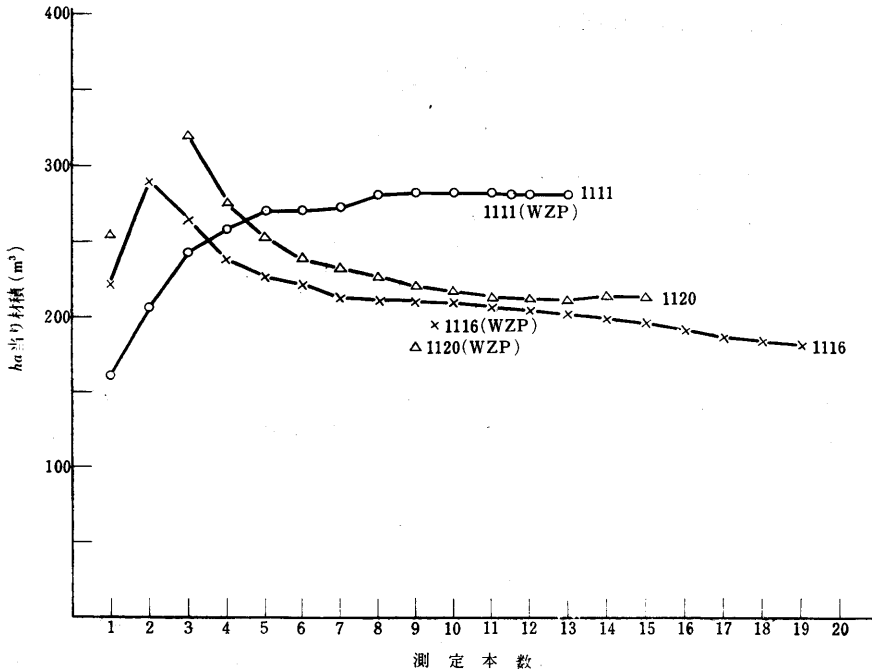
(14') 式を用いた材積の計算に 1111 について第6表に示してある。

$v_i/g_i = (fh)_i$ は直径と樹高から材積表材積 v_i を求め、それをその直径に應ずる g_i で割って求めたものである。これらの値の変動をグラフに表わしたものが第8図である。

WZP による推定値は ha 当り断面積、本数の場合と同じ傾向がみられ、いずれのポイントも 10 本～15 本で安定した ha 当り材積を示している。

第6表 ha 当り材積の推定 (1111)

木番号	i	k_i	$(fh)_i$	$\frac{(fh)_i}{2}$	$\sum_{i=1}^{i-1} (fh)_i$	$\sum_{i=1}^{i-1} (fh)_i + \frac{(fh)_i}{2}$	$k_i \left[\sum_{i=0}^{i-1} (fh)_i + \frac{(fh)_i}{2} \right]$	累積和	V_n	備考
0	0	—	6.12	—	—	—	—	—	—	$k=4$
11	1	17.4222	6.46	3.23	6.12	9.35	162.9	162.9	162.9	による
10	2	16.3054	6.24	3.12	12.58	15.70	256.0	418.9	209.5	WZP
2	3	14.4856	5.74	2.87	18.82	21.69	314.2	733.1	244.4	の
7	4	11.2158	5.34	2.67	24.56	27.23	305.4	1038.5	259.6	$V=4$
1	5	9.2903	6.46	3.23	29.90	33.13	290.8	1329.3	265.9	$\times 67.77$
3	6	6.7600	5.34	2.67	36.36	39.03	263.8	1593.1	265.5	$=271.1$
12	7	6.5331	6.32	3.16	41.70	44.86	293.1	1886.2	269.5	
13	8	5.8322	6.07	3.04	48.02	51.06	297.2	2184.0	273.0	
6	9	4.8400	5.71	2.86	54.09	56.95	275.6	2459.6	273.3	
4	10	4.3139	5.90	2.95	59.80	62.75	270.7	2730.3	273.0	
5	11	4.0000	4.13	2.07	65.70	67.77	271.1	3001.4	272.9	
8	12	3.5872	5.95	2.98	69.83	72.81	261.2	3262.6	271.9	
9	13	3.1826	5.52	2.76	75.78	78.54	250.0	3512.6	270.2	



第8図 A. S. M. による ha 当り材積の推定値の変動

§3.3 ha 当り断面積生長量の計算と連年断面積生長率の変動

生長錐で検視木の現在の皮内直径 D_{ib} と5年前と10年前の皮内直径 d_{ib} を測定したが、5年前の値を例にとろう。各ポイントでの直径樹皮係数 K は次の通りであった。

ポイント番号	ΣD	ΣD_{id}	$K = \Sigma D / \Sigma D_{ib}$
1116	298.2	282.5	1.055575
1120	279.2	263.6	1.059180
1111	248.4	235.4	1.055225

d_{ib} にこの K を乗じて、5年前の皮付直径 d_{pi} を求め、距離 L_i を用いて $R_{pi} = d_{pi} / L_i$ を計算し、 $k_{pi} = R_{pi}^2$ を計算したものが1111について第7表に例示してある。これを大きい方

第7表 5年前の断面積定数の計算 (1111)

No.	L	d_{ib}	d_{pt}	$R_{pt} = \frac{d_{pt}}{2L}$	$k_t = R_{pt}^2$	備 考
1	3.15	17.0	17.9	2.841	8.0713	$d_{pt} = Kd_{ib}$ において $K = 1.050180$
2	3.10	21.6	22.8	3.677	13.5203	
3	3.50	16.4	17.3	2.471	6.1058	
4	5.20	19.5	20.6	1.981	3.9244	
5	3.90	14.2	15.0	1.923	3.6979	
6	4.00	15.9	16.8	2.100	4.4100	
7	2.15	13.0	13.7	3.186	10.1506	
8	5.28	18.6	19.6	1.856	3.4447	
9	5.55	17.4	18.4	1.658	2.7490	
10	2.60	18.7	19.7	3.788	14.3489	
11	2.30	17.0	17.9	3.891	15.1399	
12	3.60	16.2	17.1	2.375	5.6406	
13	4.10	17.6	18.6	2.268	5.1438	

第8表 5年前の ha 当り断面積の推定と定期断面積生長量および連年生長率の計算 (1111)

本 番 号	i	k_{pt}	$k_{pt} \left(i + \frac{1}{2} \right)$	累積和	b_n	$IB_n = B_n - b_n$	$\frac{IB_n}{B_n}$	$\frac{1}{5} \frac{IB_n}{B_n} \times 100\%$	備 考
11	1	15.1399	22.7099	22.71	22.71	3.42	0.1309	2.6	$k = 4$ による WZP の過去 の $b = 4 \times 10 = 40$ 定期生長量 $= 46 - 40 = 6$ $\frac{IB}{B} = 0.1304$ $\frac{1}{5} \frac{IB}{B} \times 100$ $= 2.6\%$
10	2	14.3489	35.8723	58.58	29.29	4.16	0.1244	2.5	
2	3	13.5203	47.3211	105.90	35.30	3.90	0.0995	2.0	
7	4	10.1506	45.6777	151.58	37.90	4.12	0.0980	2.0	
1	5	8.0713	44.3922	195.97	39.19	4.64	0.1059	2.1	
3	6	6.1058	39.6877	235.66	39.28	4.57	0.1042	2.1	
12	7	5.6406	42.3045	277.96	39.71	4.88	0.1094	2.2	
13	8	5.1438	43.7223	321.68	40.21	4.93	0.1092	2.2	
6	9	4.4100	41.8950	363.58	40.40	4.83	0.1068	2.1	
4	10	3.9244	41.2062	404.79	40.48	4.76	0.1052	2.1	
5	11	3.6979	42.5259	447.32	40.67	4.64	0.1024	2.0	
8	12	3.4447	43.0588	490.38	40.87	4.40	0.0972	2.0	
9	13	2.7490	37.1115	527.49	40.58	4.51	0.1000	2.0	

から順に並べて過去の断面積密度を求め、(18)式で5年間の断面積生長量を求め、これをもとにして連年の断面積生長率を求める方法が第8表である。この結果の1960年のha当り断面積、連年断面積生長率の測定本数による変化を第1図～第3図(1960の線および連年生長率の線)に示してある。これによれば連年生長率は測定本数を10本程度にませば非常に安定した値が得られることがわかる。

§3.4 中心木の断面積生長量と周囲密度との関係*

前述のヒノ木の10ポイントで、中心木の樹幹解析から求めた断面積生長量と周囲林分の断面積密度の相関が測定本数を増すにつれてどのような変化を示すかを計算したら次のようになった。また角度通算法を用いた断面積密度との相関を示してある。この場合、カウント木は $k=4$ を用いてポイントごとに3~17本の変化があった。

注) * 生立本数と枝張りとの関係に戸田良吉が角度加算法を利用している。
日林誌, 46(4), 1964, pp. 127-132 参照。

角度加算法では中心木の現在, 5年前, 10年前の断面積は局所密度はランクが10本を越すとさほど相関に上昇はみられないが, 角度通算法よりも高い相関を示している. したがって中央木の現在または5年前, 10年前の断面積と10本程度の角度加算法による断面積密度の関係をを用いた推定は, 中央木のみ推定の分散の4割位小さくなるであろうことが期待され

$$(1-\rho^2=1-0.76^2=0.42)$$

角度通算法による断面積密度との関係を用いれば, 5割位小さくなり ($1-\rho^2=1-0.70^2=0.50$) 約1割位角度加算法がすぐれていることがわかる.

§4. ま と め

角度通算法と角度加算法をあわせた角度測定法の森林測定への応用を述べたが, 角度加算法は直径と距離の測定または各林木のREの測定が必要で, 一定REによる簡易な角度通算法よりも時間と労力が外業, 内業とも多くかかるが, その測定の中に角度通算法も含み, また距離によるプロット法との比較も同時に行えるということと, 林分因子の変化状態を連続的に把握できるという利点をもち, しかも造林的, 生態的な研究にも利用できるという点でこれから多くの研究を進めてゆく価値があろう. なお, REの測定値または直径と距離の測定値があればNEAC 1210でランクごとの林分因子の分布状態の計算をするプログラムが林業試験場でできていることを付言しておこう.

(林業試験場)

参 考 文 献

- [1] Betterlich, W.: Optische Zählmessung in der Bestandsaufnahme. Fahrbuch, Hochschule für Bodenkultur in Wien, 1948.
- [2] Prodan, M.: Genauigkeit der Winkelzählprobe nach Bitterlich. Allg. Forstz., 64 (7/8), 1953. Seite 96-100.
- [3] Spurr, S.H.: A measure of point density. Forest Sci. 8 (1), 1962, pp 85-96.
- [4] Stoffels, A.: Die Genauigkeit der Bestimmung die Stammzahl pro Hektar durch Messung von Stammabständen. Forstwis. Centralb. 74 (7/8), 1955, Seite 211-218.
- [5] Stöhr, D.F.: Ein Vorschlag zur Erreichung einer höheren Genauigkeit bei Probeflächenaufnahmen nach der Winkelzählprobe. Allg. Forst u. Jagdz. 130, 1959, Seite 23-29.

ランク	中 央 木		
	現在断面積	5年前断面積	10年前断面積
1	0.068	0.082	0.079
2	0.037	0.045	0.032
3	0.184	0.201	0.185
4	0.362	0.370	0.364
5	0.441	0.447	0.441
6	0.528	0.535	0.529
7	0.597	0.602	0.596
8	0.667	0.671	0.664
9	0.715	0.717	0.711
10	0.745	0.746	0.739
11	0.759	0.758	0.750
12	0.764	0.763	0.755
13	0.766	0.764	0.756
角度通算法	0.703	0.703	0.697