

軟X線写真による樹木の年輪解析* ——カラマツ人工林の年輪幅と容積密度——

野 堀 嘉 裕**

1. はじめに

X線写真による樹木の年輪解析は Polge⁴⁾ により始められ、その後 Parker³⁾ により現在の形式がほぼ完成された。その原理を簡単に説明すれば次のようになろう。すなわち、同じ厚さの被写体にX線を照射した場合、容積密度の高い部分ほどX線の透過量は少なくなるのでフィルムの露光量は少なくなる。その関係は、負の指数関数である。一方、年輪が形成されている木材は、早材部では細胞壁が薄く内腔が大きいので低容積密度であるが、晩材部では逆に、細胞壁が厚く内腔が小さいので容積密度が高いという性質を持っている。すなわち、フィルム上に木口面を一定の厚さに切った試料を乗せ、これにX線を垂直方向から照射すれば、フィルム上には濃淡と容積密度に一定の関係を持った縞模様ができることになる。これを濃度測定装置で解析すれば、試料片の容積密度を読み取ることができる。PolgeはこれをX線デンストメトリー法⁵⁾と表記している。この方法を利用すれば、年輪幅や材部別の容積密度などの情報を同時に得ることができるのである。

年輪年代学^{6,9)}ではこのうちの年輪幅の情報を利用することにより、考古学の精度を格段に高めることができた。また、妹尾⁸⁾は特定の樹種の重量生長を解析するためにX線写真を利用した。さらに、オーストラリアやニュージーランドではラジアータパインの材質育種¹⁾にこの方法を応用し、早材部の容積密度が高いクローンを育種することにより、過度の直径生長の欠点を克服した。これらは、X線デンストメトリー法による年輪解析の代表例といってよいであろう。

わが国で、年輪解析にX線デンストメトリー法を応用した例としては、前述の妹尾のほか、光谷²⁾による年輪年代学への応用、八幡ら¹⁰⁾によるスギの材質育種への応用などがあげられるが、その数は多いとはいえない。その原因としては、容積密度を扱う場合の精度の問題、また異常年輪などの処理が難しい点などによると思われる。

現在、当研究所ではカラマツをはじめとした数樹種について、良質材クローンの育種に取り組んでおり、超軟X線写真による容積密度解析システムをコニカメディカルと共同で開発中である。ここでも問題となる点は、やはり異常年輪や偽年輪、材中の結晶などの処理であるが、本システ

*Tree-ring analysis by X-ray densitometric system—Ring width and volume density of Japanese Larch stands—

**Yoshihiro NOBORI, Oji Institute for Forest Tree Improvement 王子製紙林木育種研究所

ムでは解析プログラム上でこの問題を解決している。ここでは、本システムを紹介するとともに、解析結果の一部を紹介し、皆様の御意見、御教授を得ようとするものである。

なお、本研究を進めるにあたって北海道大学教授深沢和三博士に御助言を賜ったほか、木材理学研究室の軟X線写真撮影装置を一時借用させていただいた。ここに、深謝の意を表す。また、未熟ともいえる本報告に発表の機会を与えていただいた林業統計研究会の関係各位に厚くお礼申し上げます。

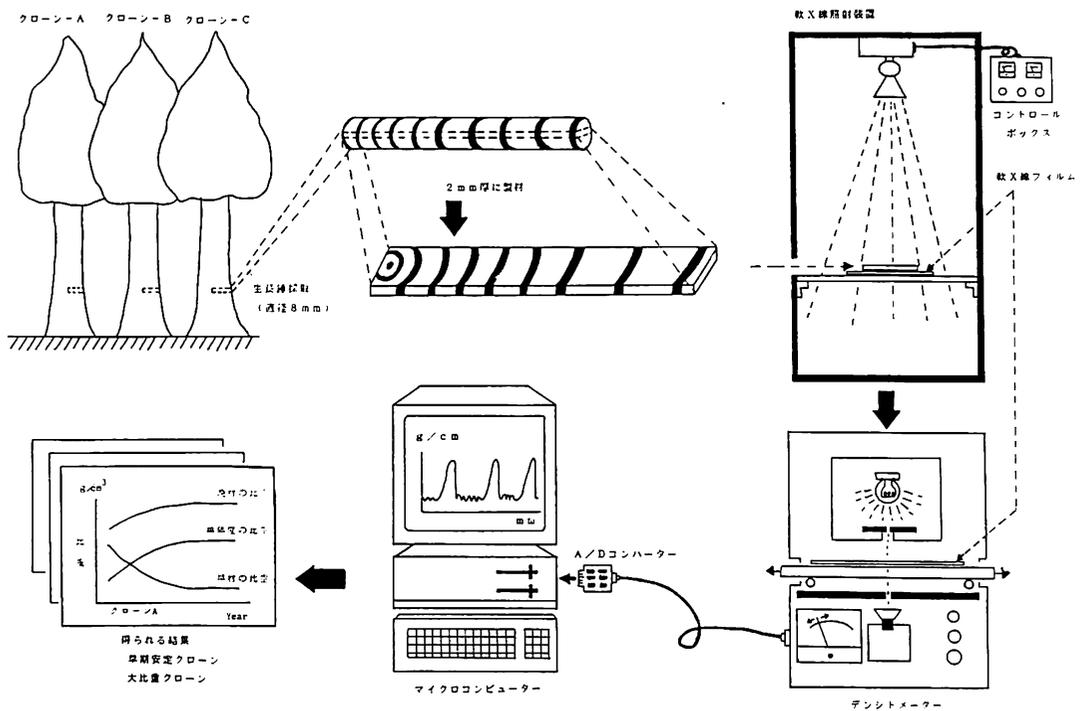


図-1 容積密度解析システムの概要

2. 材料と解析方法

初めにシステムの概要を示すが、これは図-1のようになる。

i 材料

本研究で用いた材料は、王子製紙栗山山林の21年生のカラマツ特殊形質検定林より採取した。採取したクローンの数は60であり、この60クローンより各3個体、計180個体をクローン間変異の解析対象とした。また、これら60クローンのなかの6クローンについてはクローン内変異を解析するために10個体を採取した。

ii 試料片作成

試料片には、立木の胸高位置(地上高1.3m)より採取した直径8mm生長錐片を、木口面が見

えるように2 mmの厚さに製材したものを作成した。これと同時に、厚さ1 mmのシナノキの単板(容積密度0.444 g/cm³)を8枚階段状に積み重ねたものを作成し、容積密度測定の基準となる光学クサビとした。

なお、わが国の木材にはしばしば偽年輪がみられ、肉眼ではこれを年輪と判断してしまう場合が多い。年輪解析にX線デンストメトリー法を用いると、晩材部と偽年輪ではその成因上容積密度のパターンが異なっているため比較的容易に区別することができる。ただし、試料片が厚い場合は繊維傾斜の影響を受け、晩材部のパターンが偽年輪のパターンに近似してしまうので、試料片はできるだけ薄いことが望ましい。しかし、試料片が極端に薄い場合は製材過程での凸凹の影響が問題となる。これらの問題を回避するために本報では試料片の厚さ2 mmを最適値とした。

iii 軟X線写真撮影装置

軟X線写真装置は、主にソフテックス社製Softex K2 特型および、一部Softex IE型を使用した。撮影条件としては、最適値である、距離1.5 m、電圧40 KV、電流5 mA、露光時間90秒とした。この装置はX線源、被写体ともに固定式である。

なお、X線写真は水分に敏感に反応する⁷⁾ことが知られており、年輪解析ではこれの対策が必要とされているが、本報の試料では予備試験の結果絶乾状態と気乾状態で統計的有意差が認められなかったため、含水率6%±2%の気乾状態で保存、撮影した。

iv 写真濃度解析システム

露光したフィルムは、現像後写真濃度解析システムで解析をおこなうが、解析の手順は以下のとおりである。

1. 光学クサビの濃度を測定

写真濃度測定装置(デンストメーター)の設定条件

スリット幅は10 μm

スリット長は30 μm

スリットの移動速度は1mm/sec

2. 換算用の回帰曲線を求める

3. 試料の濃度を測定

写真濃度測定装置(デンストメーター)の設定条件

カラマツの場合、光学クサビ測定条件と同じ

4. 容積密度に換算

10 μmごとの移動平均値とする

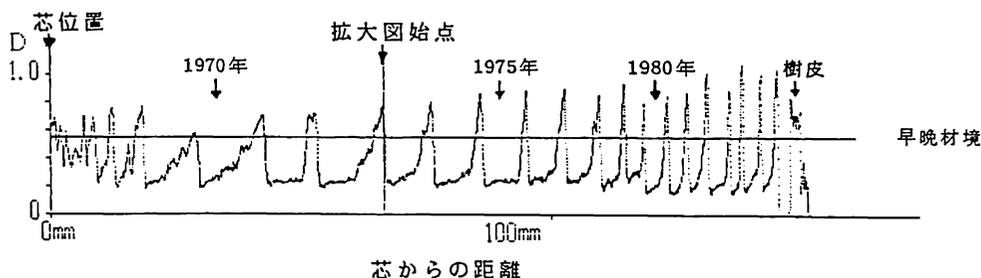
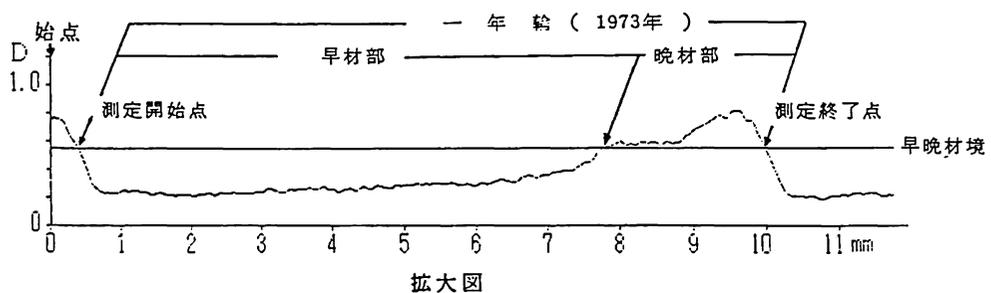
5. 1年輪ごとに項目別の解析結果を表示、記録

解析の項目については後に詳述する

記録はコンピューターの外部記憶装置への出力とする

解析結果は次の項目について表示，記録される。

- | | | | |
|--------------|--------|---------------|-------|
| 1. 解析対象年 | (YEAR) | 7. 早材部平均容積密度 | (ED) |
| 2. 芯からの距離 | (DFP) | 8. 晩材部平均容積密度 | (LD) |
| 3. 1年輪幅 | (RW) | 9. 年輪内最低容積密度 | (MND) |
| 4. 早材幅 | (EW) | 10. 年輪内最高容積密度 | (MXD) |
| 5. 晩材幅 | (LW) | 11. 早晩材境容積密度 | (LV) |
| 6. 1年輪平均容積密度 | (RD) | | |



YEAR	DFP	RW	EW	LW	RD	ED	LD	MND	MXD	LV
1973	67.16	9.58	7.40	2.18	0.37	0.29	0.65	0.21	0.96	0.56

図-2 解析の例

注：カラマツについては、モルクの定義（早晩材境：仮道管の半径方向の内腔径と隣接する2細胞の膜厚の比が2となる部分）による早晩材境を、あらかじめ顕微鏡写真から求めており、その値が容積密度測定の結果0.56 g/cm³を得たので、この値を用いた。

図-2に解析中のカラマツ試料の表示例を示す。本システムでは、初期値として晩早材の境のレベルより上の部分を晩材，下の部分を早材として扱っているが、異常年輪や偽年輪，材中の結晶など年輪判定の障害となるような部分はマニュアル操作により補正することができる。すなわち，早材部にある結晶や偽年輪で容積密度がレベルより高い場合，初期値ではこれを晩材部と判断し，ここまでの1年輪としてしまうが，マニュアル操作によりこのピークを早材の一部として処理することができる。また，晩材が形成されていてもそのピークがレベルより低い場合，初期値ではこれを早材の一部と判断し次の年の晩材部までを1年輪としてしまうが，これもマニュアル操作によりピークの一部を晩材として処理することができるようになっている。

v 集計システム

集計システムの概要は次のとおりである。

1. 各個体の解析結果より年ごとに以下の値を算出する

晩材率

早晩材容積密度差

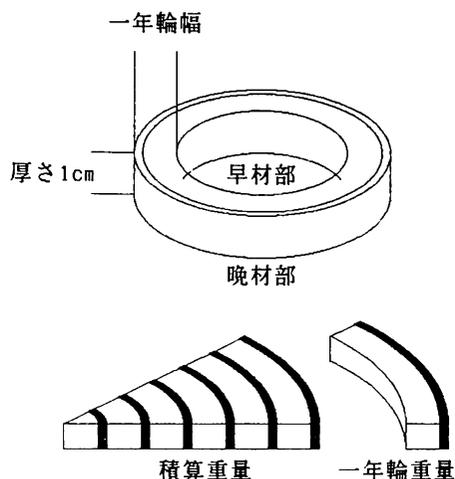


図-3 材部別重量の概念

注：厚さは1 cmである

2. 以下の材部ごとに厚さ1 cmのリングを想定し重量を算出する(図-3)

早材部重量

晩材部重量

1年輪重量

3. 年ごとに以下の積算値を求める

積算重量

積算平均容積密度

4. 同一クローンの個体について平均値, 標準偏差を求める

このような手順により, 容積密度の大きなクローンおよび, 容積密度が早期に安定するクローンを検出することができる。なお, 現在これらの集計結果をもとに, クローン間変異の統計的有意性を検討するためのシステムを作成中である。また, これらの集計結果は, 理学的分析を目的とした多変量解析などにも適用することができる。

なお, 本研究の試料を採取したカラマツは比較的通直で真円性が高かったので, 生長錐片採取は1方向としているが, 偏心生長が著しい立木の場合には複数方向から生長錐片を採取し, これをもとに計算値を求めるべきであろう。

3. 結果と考察

i クローン別集計結果の一例

ここで、クローン番号L7の集計結果の一部、平均値について表-1に示す。集計結果はこのような形式に統一される。

表-1 クローン番号L7の集計結果

年輪解析結果		試料 No.: L7 個体数: 10 平均値															
樹齡 (年)	芯から の距離 (mm)	年輪 幅 (mm)	早材 幅 (mm)	晩材 幅 (mm)	年輪 容積 密度 (g/cm ²)	早材 容積 密度 (g/cm ²)	晩材 容積 密度 (g/cm ²)	最低 容積 密度 (g/cm ²)	最高 容積 密度 (g/cm ²)	晩材 率 (%)	密度 差 (g/cm ²)	早材 重量 (g)	晩材 重量 (g)	年輪 重量 (g)	積算 重量 (g)	積算 容積 密度 g/cm ³	備考
1969																	
1970	9.85	4.55	3.60	0.95	0.35	0.27	0.67	0.13	0.78	21.00	0.40	0.74	0.61	1.35	1.81	0.28	
1971	14.39	6.19	5.32	0.87	0.31	0.24	0.71	0.14	0.81	14.24	0.46	1.39	0.80	2.19	4.00	0.30	
1972	20.58	8.01	7.06	0.95	0.29	0.23	0.72	0.12	0.81	11.90	0.49	2.69	1.29	3.97	7.97	0.30	
1973	28.59	7.77	6.75	1.02	0.30	0.22	0.73	0.11	0.84	14.12	0.51	3.06	1.72	4.77	12.75	0.30	
1974	36.36	7.24	6.36	0.88	0.29	0.22	0.71	0.10	0.81	12.94	0.49	3.62	1.68	5.30	18.04	0.29	
1975	43.60	6.08	5.21	0.87	0.29	0.23	0.74	0.11	0.89	13.78	0.52	3.29	2.05	5.34	23.38	0.29	
1976	49.68	5.66	5.00	0.66	0.29	0.22	0.75	0.12	0.87	11.37	0.53	3.68	1.72	5.40	28.78	0.29	
1977	55.33	4.50	3.75	0.74	0.33	0.24	0.77	0.13	0.91	16.35	0.54	3.15	2.18	5.33	34.12	0.30	
1978	59.83	3.74	3.07	0.67	0.32	0.21	0.77	0.10	0.94	18.46	0.55	2.47	2.03	4.50	38.61	0.30	
1979	63.56	2.96	2.38	0.58	0.35	0.24	0.79	0.13	0.93	21.95	0.54	2.16	2.03	4.19	42.80	0.30	
1980	66.52	2.81	2.13	0.68	0.37	0.23	0.80	0.10	0.97	25.49	0.57	1.99	2.31	4.31	47.11	0.30	
1981	69.33	2.21	1.69	0.51	0.35	0.21	0.78	0.09	0.93	23.14	0.57	1.46	1.77	3.23	50.33	0.31	
1982	71.53	1.84	1.45	0.40	0.35	0.22	0.77	0.10	0.89	21.93	0.55	1.40	1.53	2.93	53.26	0.31	
1983	73.38	1.63	1.19	0.44	0.38	0.22	0.77	0.12	0.94	27.56	0.55	1.23	1.62	2.85	56.11	0.31	
1984	75.01	1.39	0.98	0.41	0.39	0.23	0.78	0.11	0.92	29.58	0.55	1.03	1.53	2.56	58.67	0.31	
1985	76.40	1.64	1.12	0.52	0.43	0.27	0.77	0.13	0.95	31.60	0.51	1.49	1.99	3.48	62.15	0.32	
1986																	
最大値 (MAX)	8.01	7.06	1.02	0.43	0.27	0.80	0.14	0.97	31.60	0.57							
平均値 (AVE)	4.26	3.57	0.70	0.34	0.23	0.75	0.12	0.89	19.71	0.52							
標準偏差(SD)	2.24	2.06	0.20	0.04	0.02	0.03	0.01	0.06	6.34	0.04							
最小値 (MIN)	1.39	0.98	0.40	0.29	0.21	0.67	0.09	0.78	11.37	0.40							

ii 立体図による60クローンの年変動

各項目の平均値を1985年時点の大小で並べかえたものをもとにして、項目別の年変動をみてみよう。図-4に芯からの距離の年変動を示す。芯からの距離は胸高直径の約半分に相当するので、直径生長とほぼ同じ生長を示す。図をみると、1985年における芯からの距離が大きいクローンはおおむね1975年時点でもその値が大きいことがわかる。

次に1年輪幅の年変動をみてみよう(図-5)。年輪幅はどのクローンをみても減少傾向にあるが、その傾向が緩やかなものと急激なものがあることがわかる。すなわち、年輪幅が安定しているクローンが含まれているといえるであろう。

また、1984年の年輪幅をみるとほとんどのクローンについてその値が小さいことがわかる。これは、その年の気象の影響がでたものと考えられる。一般的に年輪年代学では成長特性の影響を

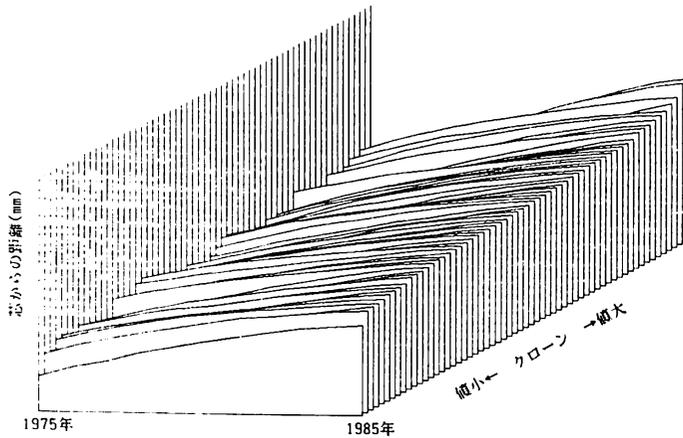


図-4 芯からの距離の年変動
注：図中データの最大値は 120.72 mm

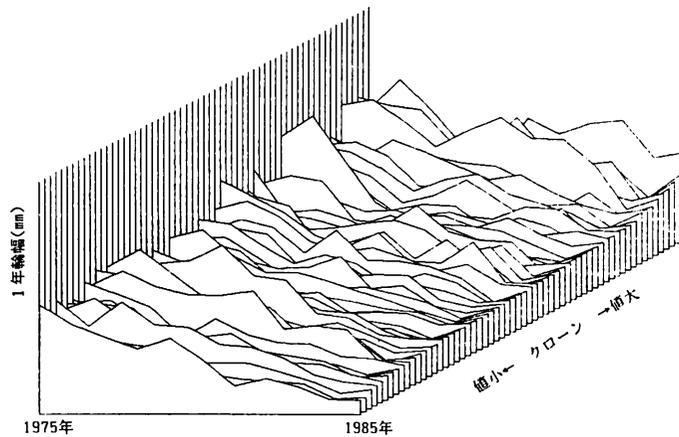


図-5 1年輪幅の年変動
注：図中データの最大値は 10.26 mm

受けない高齢の天然木を利用する機会が多いが、本報のように人工林でしかも樹齢の低いものあっても特徴的な年輪変動パターンが得られることは注目には値するといえよう。

次に、1年輪平均容積密度の年変動をみてみよう(図-6)。1年輪平均容積密度はどのクローンでも大きな年変動はみられないが、クローン間では大小の差がみられるようである。

次に、晩材部平均容積密度をみてみよう(図-7)。早材部平均容積密度についてはここでは示さないが、早材部、晩材部の平均容積密度を比較すると、その値が安定する時期は晩材のほうが早いようである。しかも、クローンによる差が非常に小さいことがわかる。

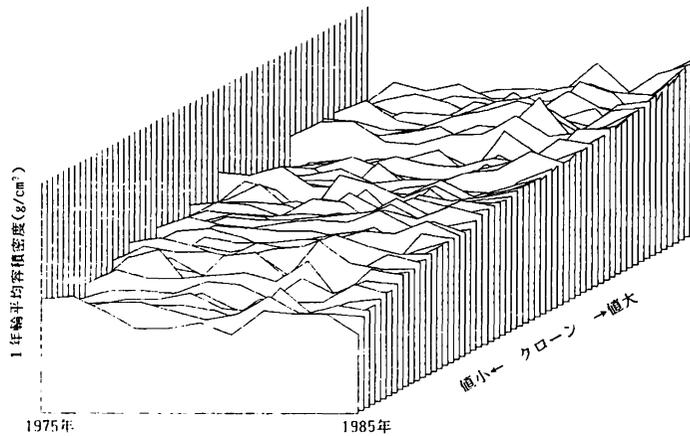


図-6 1年輪平均容積密度の年変動
注：図中データの最大値は 0.59 g/cm^3

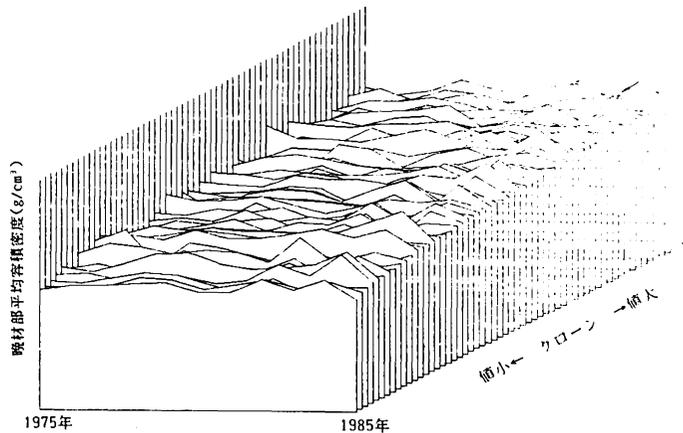


図-7 晩材部平均容積密度の年変動
注：図中データの最大値は 1.05 g/cm^3

なお、1984年の晩材平均容積密度を他の年のそれと比較した場合、多くのクローンについてその値が大きいことがわかる。この原因も前述した気象条件と思われるが、年輪幅などでみられるような年変動が少ないため、ピークが発見しやすいと思われる。すなわち、この項目については年輪年代学の基準測定項目となりうる可能性があるだろう。

最後に、図-8の積算平均容積密度をみると、クローン間にかかなりの差はあるが、年変動は非常に小さいことがわかる。すなわち、積算平均容積密度を尺度とすることにより比較的早期に育種の対象クローンを検出することができると考えられる。

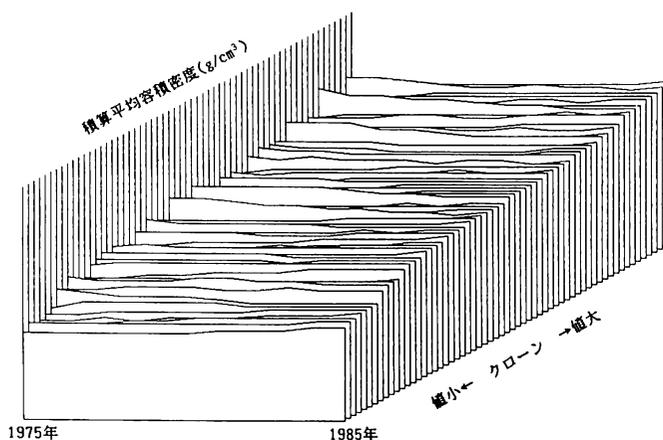


図-8 積算平均容積密度の年変動
注：図中データの最大値は 0.54 g/cm^3

4. おわりに

当研究所は、千葉 茂所長を中心として、林木の育種を中心に研究業務を遂行してきているが、一貫した研究方針は、多量のデータを基礎として根拠のある結論を導き出すことにある。このようにして得られた資料は実際の業務に十分対応可能となろう。

本報告では、育種学的立場からX線デンストメトリーの応用の可能性を再確認してきた。またこれと同時に、年輪年代学への応用に容積密度が尺度になる可能性があるという新たな示唆を与え得たと思われる。これが、今後の研究の一助になれば幸いである。

引用文献

- 1) Bamber R. K. & J. Burley: The wood properties of Radiata Pine. Commonwealth Agriculture Bureaux, 1983
- 2) 光谷拓実: わが国における年輪年代学の確立とその応用(第1報) 現生木のヒノキによる年輪変動パターンの特性検討. 木材学会誌 33(3): 165-174, 1987
- 3) Parker M. L., Bruce R. D. & Jozsa L. A.: Xray densitometry of wood at the W.F.P.L. Western forest products laboratory technical report No.10, 1980
- 4) Polge H.: A new method for determining the texture of wood. The densitometric analysis of radiographic films. Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forests de la Station de Recherches et Experiences XX (4): 533-581, 1963
- 5) Polge H.: The use of X-ray densitometric methods in dendrochronology. Tree-ring Bulletin Vol.30 (1-4), 1-10: 1978

- 6) Polge H.: The contribution of wood density to dendrochronology and dendroclimatology, Dendrochronology in Europe - Principles, interpretations and applications to archaeology and history., B.A. R. International series 51, July, 1978
- 7) 李 起泳・深沢和三・氏家雅雄： ヤマナラン, ウラジロハコヤナギ, ドロノキの水食材, 日本木材学会北海道支部講演集 17 : 45-48, 1985
- 8) 妹尾俊夫： アカマツ林の重量生長に関する基礎的研究(1), 京都府立大学学術報告(農学) 26 : 1-43, 1973
- 9) 末田達彦： 年輪年代学, 北海道の自然 26 : 40-46, 1986
- 10) 矢幡 久・宮島 寛・児玉 貴・汰木達郎・山本福寿・久保田茂・渡部 桂・野上寛五郎・黒木晴輝： 六演習林スギ品種試験地の精英樹クローンの樹幹形の変異, 九大演研報 57 : 127~147, 1987