HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	軟X線デンシトメトリーによるヤチダモ天然木の年輪解析
Author(s)	船田, 良; 近藤, 健彦; 小林, 修; 安江, 恒; 深沢, 和三
Citation	北海道大学農学部 演習林研究報告, 52(1), 12-21
Issue Date	1995-03
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/21385
Type	bulletin (article)
File Information	52(1)_P12-21.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学農学部演習林研究報告 第52巻 第1号 12−21 (1995)

軟X線デンシトメトリーによる ヤチダモ天然木の年輪解析

船田 良*・近藤 健彦*・小林 修*
安江 恒*・深沢 和三*

Tree-Ring Analysis of Naturally Grown Yachidamo (*Fraxinus mandshurica* var. *japonica* Maxim.) Trees by Soft X-ray Densitometry

by
Ryo FUNADA*, Takehiko KONDO*, Osamu KOBAYASHI*,
Koh YASUE* and Kazumi FUKAZAWA*

要 旨

ヤチダモ天然木の年輪解析を軟X線デンシトメトリーで行った。測定条件を比較したところ，デンシトメーターのスリット高さ1000 μm，スリット幅20 μm，試料ステージの移動速度0.2 mm/秒により，狭い年輪幅領域を多く含む供試木においても年輪数や年輪幅の精度良い自動測定が可能であった。この条件の妥当性は，孔圏道管の直径や孔圏道管相互の間隔等ヤチダモの解剖学的特徴に起因することが確かめられた。

北海道大学農学部付属雨龍地方演習林に生育するヤチダモ天然木15本の年輪幅変動を自動測定した。測定した供試木の年輪数は169±59（平均値±標準偏差）で，年輪幅の多くは0.5−1.5 mmの狭い範囲で変動し，平均年輪幅は0.99±0.29 mmであった。

キーワード：年輪解析，軟X線デンシトメトリー，ヤチダモ天然木

1994年9月30日受理 Received September 30, 1994
*北海道大学農学部森林科学科木材生物学講座
Laboratory of Wood Biology, Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060

1. 緒　　言

樹木は，何十年，何百年も肥大成長を続け年輪を形成する。その樹木の成長状態は，樹木が生育している場所の気候条件など環境要因の変動に直接影響を受ける。従って，樹木年輪に蓄積された情報を統計学的手法を用い解析することにより，樹木が受けた長期間の環境変動を復元し，さらには将来の環境変動を予測するための生物指標を抽出できる可能性が高い[1-3]。

この樹木の年輪内に含まれる情報を有効に入手する方法に，軟X線デンシトメトリーがある[4-6]。この方法は，樹木の年輪情報を容積密度値の変動を基にして測定するため，年輪幅以外の情報も数多く同時に入手できる利点がある。また，得られたデータを直接コンピュータに入力するため，測定後の統計解析も容易である。しかしながら，年輪構成要素が複雑でその配列が不規則な樹種では，年輪境界の見極めが困難な場合が多く，従って本方法の広葉樹材への適用例は年輪構成要素が単純な針葉樹材に比べ少ない。また，著しく狭い年輪幅領域を測定すると，得られた測定値の信頼度が低い場合も認められる。

そこで本研究では，軟X線デンシトメトリーを広葉樹材の年輪解析に広く適用することを目的とした。その第一歩として，供試木にヤチダモ天然木を用い，測定方法の確立を検討した。また，その方法の妥当性を明らかにするために解剖学的検証も行った。

2. 実験方法

2. 1　供試木の概要

供試木として，北海道大学農学部付属雨龍地方演習林325，326，339林班ブトカマベツ川流域に生育しているヤチダモ（*Fraxinus mandshurica* var. *japonica* Maxim.）天然木30本を用いた。供試木の樹齢は約120年－300年で，胸高直径は41.9±10.0 cmであった。

伐採後，各供試木の地上高約3 mの部位より約10 cm厚の円板を1ないし2枚採取した。円板の直径は38.5±10.1 cm，心材率は82.2±9.1%であった。

2. 2.　軟X線デンシトメトリー

各円板を，髄を含む長片試料に加工後，特殊ツインソー（高千穂精機社製）で木口面が表面に出る様に幅7 mm，厚さ2 mmの長小片（ストリップ）に製材した。試料は絶乾状態に乾燥後，光学クサビとともに軟X線撮影装置（大日本ソフテックス社製IE型）を用い，撮影距離1.5 m，管電圧20 kV，管電流5 mA，露光時間120秒で撮影した。フィルムはフジフィルム社製X線フィルムFRを用い，自動現像機（サクラ社製KX－40型）により現像した。

軟X線フィルムの濃度は，マイクロ・デンシトメーター（コニカメディカル社製2111改型）により読み込み，年輪解析プログラム（野堀嘉裕：新年輪解析プログラム（Ver. 2. 1改），王子製紙林木育種研究所）により処理し，密度値に変換した。本デンシトメーターは，受光側に試料上での測定面積（高さと幅）を変える機構（スリット）が付いており，スリット高さ（木口

面試料における年輪接線方向の長さ）は0－2000 μm，スリット幅（放射方向の長さ）は0－50 μm，の範囲で連続的に変更可能である。また，試料ステージの移動速度も6段階に可変できるが，密度変動の波形がより明確で，狭い年輪幅領域でも年輪境界が容易に確認できた0.2 mm／秒を選択した。本研究で用いた年輪解析プログラムでは，0.1秒毎に1回フィルムの濃度を密度値に換算する。従ってこの移動速度では，試料上を0.02 mm（20 μm）単位で濃度を走査する計算になる。

3. 結果及び考察

3. 1 軟X線デンシトメトリーの条件設定

本研究で用いた試料には，年輪幅が非常に狭い領域（0.3 mm前後）が多く存在した。これらの領域において，年輪境界の正確な識別や年輪幅の精度良い自動測定を行うには，デンシトメーターにおける適切なスリット条件設定が重要である。そこで，供試木のうち1本（供試木No. 1）を測定条件決定用に選択し，同じ領域の年輪幅変動を以下の2方法で測定し統計的に比較した。測定領域としては，測定が比較的容易と思われる年輪幅の比較的広い領域（1870－

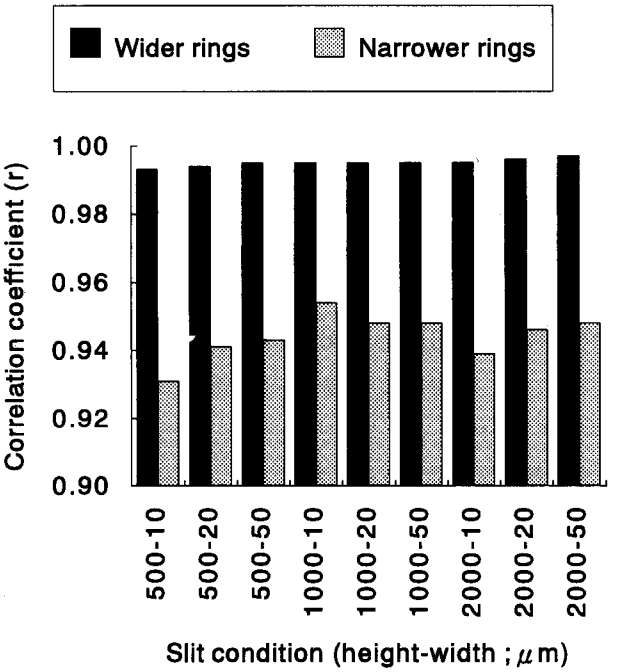

Fig. 1 Relationship between annual ring widths measured using a graphic-digitizer and those measured using a soft X-ray densitometer with different slit conditions (slit height-width) in regions of wider and narrower growth rings (sample No. 1)

1894年）と困難が予想される狭い領域（1940－1991年）の2領域を選んだ。

1）試験片木口面の実体顕微鏡連続写真を撮影し，その写真上でパーソナルコンピュータに接続したグラフィックデジタイザー（フォトロン社製）を用い年輪幅を連続的に測定した。また，年輪幅が極端に狭い領域では，光学顕微鏡用切片を作製して年輪境界，年輪幅等を確認した。これらの方法を用いて測定した値を，"正確な年輪幅"とした。

2）軟X線写真のネガフィルム上を，デンシトメーターのスリット条件（スリットの高さと幅）を変えて走査し，自動的に年輪幅を読み取った。スリット高さは500，1000，2000 μmの3条件，スリット幅は10，20，50 μmの3条件を選択し，それらを組み合わせた9条件を検討した。

以上1）2）の方法で求めた年輪幅間で相関関係を調べ，スリット条件を決定した。1）の方法で求めた正確な年輪幅値とデンシトメーターの各スリット条件別の測定により得られた年輪幅値との間の相関係数をFig. 1に示す。両者には高い相関関係が認められ，広い年輪幅領域では，いずれのスリット条件でも相関係数が0.99以上（年輪数25）であり，年輪境界の正確な識別と年輪幅の精度良い測定が行われたことを示している。一方狭い年輪幅領域でも，いずれのスリット条件においても0.93以上（年輪数52）という高い相関関係を示したが，その中でもスリット高さ1000 μmの場合が最も高い相関係数を示した。そこで，スリット高さを1000 μmに仮決定した。一方スリット幅は，スリット高さ1000 μmの場合，3条件（10，20，50 μm）であまり違いが認められなかった。そこで，本研究ではデンシトメーターの移動速度を

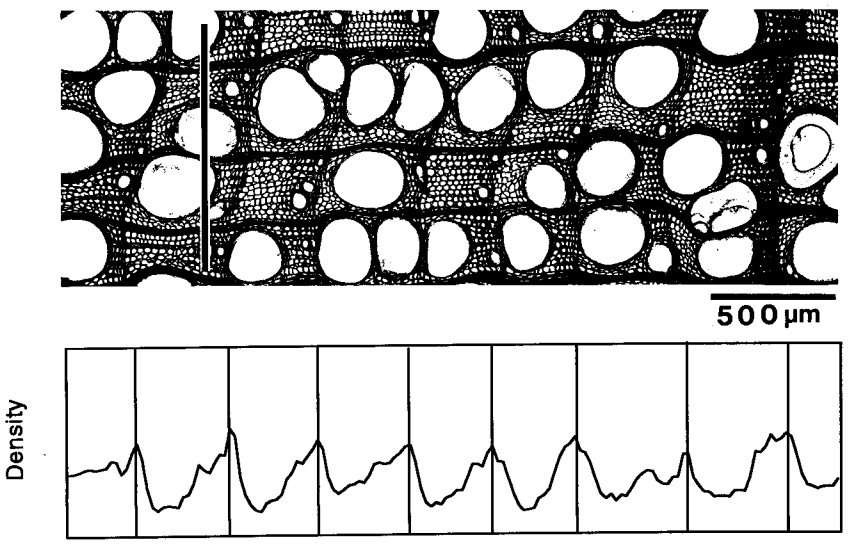

Fig. 2 Cross section and profiles of density measured by the soft X-ray densitometry of the same growth rings.
Note: black bar; slit height-width, 1000-20μm.

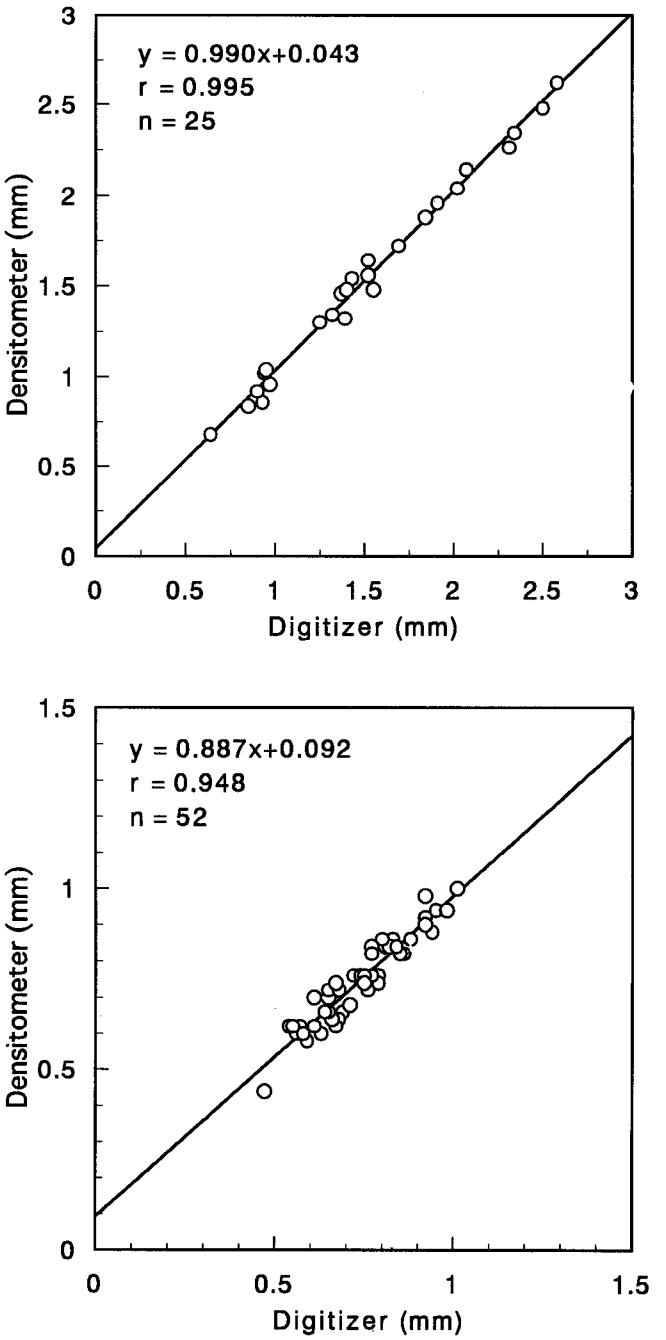

Fig. 3 Relationship between annual ring widths measured using a graphic-digitizer and those measured using a soft X-ray densitometer (slit height -width; 1000-20μm) in regions of wider and narrower growth rings (sample No. 1).
Notes: upper; wider growth rings: lower; narrower growth rings.

0.2 mm/秒と設定しており，その場合の測定単位が20 μmであることから，スリット幅は，試料を隙間無くまた重なり無く走査できる20 μmが妥当と判断した。以上の結果より，スリット条件をスリット高さ1000 μm，幅20 μmに仮決定した。同条件で測定した場合の年輪内密度変動曲線と測定領域の年輪構造（木口面の光学顕微鏡写真）をFig. 2に示す。また，1)の方法で求めた正確な年輪幅値との相関関係を年輪幅の広い領域と狭い領域に分けて示す（Fig. 3)。

次に，同条件（スリット高さ1000 μm，幅20 μm）の有効性を検証するために，他の供試木を4本（供試木No. 2—5）選び，軟X線デンシトメトリーにより自動的に年輪幅を測定し，1)と同様の方法で求めた正確な年輪幅値との相関関係を調べた（Fig. 4)。その結果，いずれの供試木でも高い相関関係が認められ，著しく狭い年輪幅領域の割合が高かった供試木No. 5でも相関係数0.96以上(年輪数96)を示した。従って，同条件を用いることにより，他の供試木でも年輪境界の見落としが無く，かつ年輪幅を精度良く自動測定できることが検証された。

本研究で決定したスリット高さ1000 μmは，これまで針葉樹材において用いられてきた30−100 μm[7,8]に比べて大きい。この違いは針葉樹材と広葉樹材，特に環孔材との組織構造の

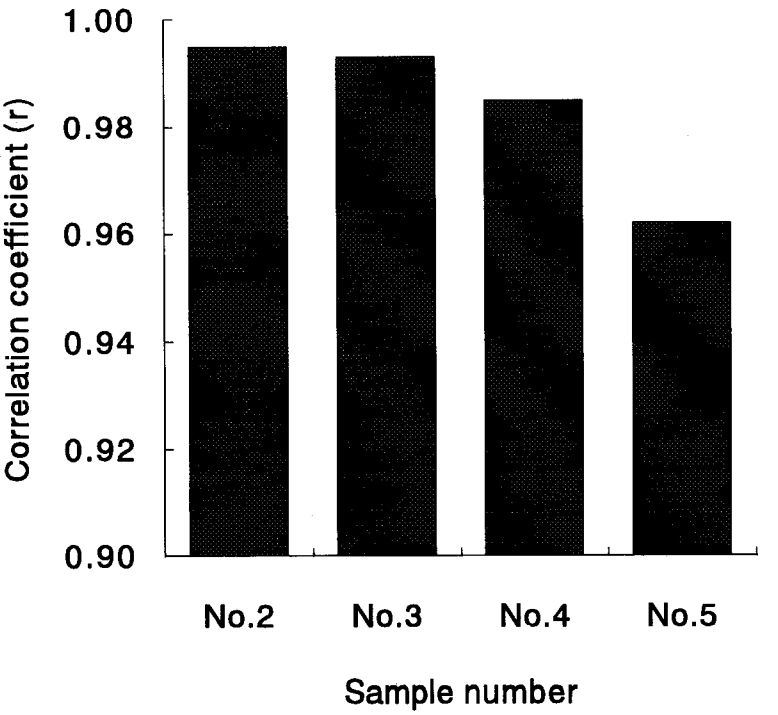

Fig. 4 Relationship between annual ring widths measured using a graphic-digitizer and those measured using a soft X-ray densitometer (slit height -width ; 1000-20 μm) of 4 investigated trees (sample No. 2-5).

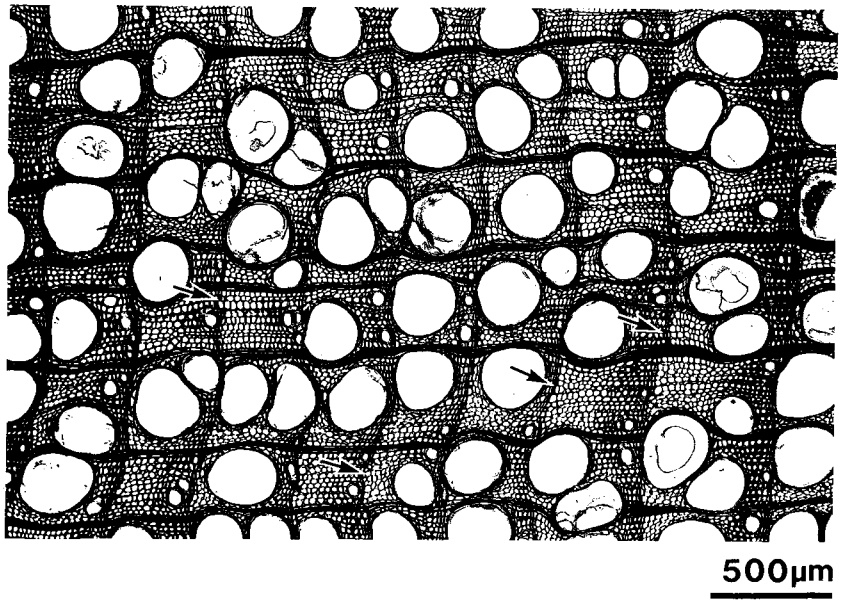

Fig. 5 Anatomical features of investigated tree with narrow growth rings. Note the presence of regions with the distance among vessels in earlywood (arrows).

違いに起因する。ヤチダモにおける年輪境界の見極めは，年輪後半部における密度の上昇とそれに続く孔圏道管の空隙に由来する密度の急激な落ち込みにより決定される。従って正確な測定には，スリット内に孔圏道管が少なくとも一つ以上入る必要がある。本研究で用いた供試木（No. 1）の解剖学的特徴を光学顕微鏡下で観察すると，孔圏道管96個の接線方向径は250±40 μm，最大値350 μm，最小値160 μmであり，また孔圏道管の間隔が部分的に広い場合（最大500 μm）もしばしば認められた（Fig. 5）。従ってスリット高さ500 μm以下では，スリット内に孔圏道管が完全には含まれず，密度の変化が小さくなり，年輪境界が不明瞭になる場合が考えられる。その結果，年輪幅の値に若干の誤差を生じさせたといえる。また，年輪構成要素が複雑な広葉樹材を小さいスリット高さを用いて走査すると，スリット内に含まれる細胞の種類により密度変動曲線が大きく変動する可能性が高いこと[9]も，針葉樹材に比べ大きなスリット高さを使用する必要性を示唆している。一方スリット高さ2000 μmでは，500 μmの場合の様な危険性は軽減出来るが，密度変動の波形がなだらかになる傾向が認められた。これは，Figs. 2や5に示した様に，各年輪の境界線は必ずしも平行ではなく，そのためスリット高さが大きすぎると年輪に対して傾いて走査し，年輪後半部の密度の上昇と孔圏道管に由来する密度の落ち込みが相殺される可能性が高いためといえる。以上の理由から，スリット内になるべく多くの孔圏道管を含み，かつ年輪境界部の凹凸の影響を最小限にすること，の両方の条件を満たすスリット高さ1000 μmが最適な結果を生んだものといえる。

一方スリット幅については，既に述べた様に試料ステージの移動速度との相互関係が重要

である。著しく狭い年輪幅領域（0.3 mm 前後）を測定する場合でも，一年輪内を出来るだけ多くの回数濃度走査して，より正確な密度変動が得られること，一方年輪数が非常に多い長片試料を走査する際に要する時間を出来るだけ短縮させること，等を考慮するとスリット幅 20 μm，移動速度 0.2 mm/秒が適切な条件であると考える。

3. 2　ヤチダモ天然木の年輪幅変動

各供試木の年輪幅変動を，設定した測定条件を用いて軟X線デンシトメトリーで自動測定した（Fig. 6）。供試木は，無作為に 15 本選定した。測定した 15 本の年輪数は 169±59 であったが，試料の髄付近は腐れや割れのため測定不能の場合が多く，従って実際の年輪数よりも若干少なくなっている。

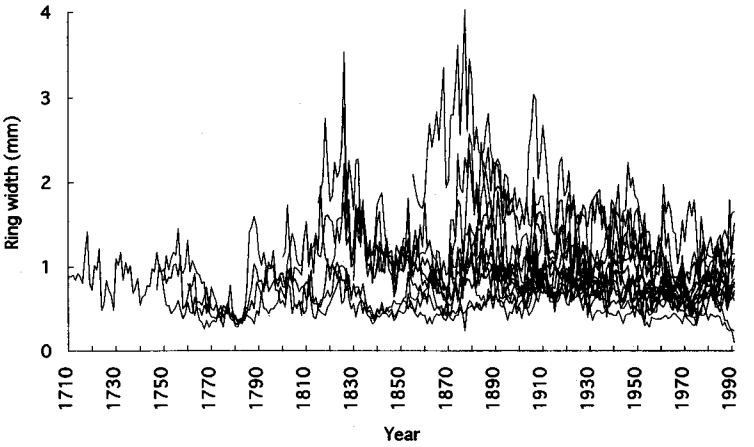

Fig. 6　Variations of annual ring widths of 15 investigated trees.

年輪幅はいずれも 4 mm 以下で，多くの年輪が 0.5−1.5 mm の非常に狭い範囲で変動しており，0.3 mm 前後の場合も認められる。平均年輪幅は 0.99±0.29 mm で，Figs. 2 と 5 に示した様に，年輪内に占める道管の割合が大きく空隙率の高い，いわゆる "ぬか目" の状態をしばしば形成していた。年輪幅を材質指標として見ると，年輪幅と容積密度数との関係が重要である。ヤチダモにおける両者の関係は，年輪幅 4 mm 前後に密度数の最大値（約 570 kg/m^3）を持つ放物曲線を示す[10]。本研究で測定した供試木の平均年輪幅を考慮すると，ヤチダモとしては容積密度数が若干低い部類に属すると推定できる。

一方，本研究で得られた天然木の年輪幅変動は，年輪年代学（dendrochronology）の分野にとっても貴重なデータである。現在この年輪幅変動のクロスデーティング（cross-dating）を行っており，林地の環境変動との関連性を各種統計的手法を用い解析する予定である。近年 TARDIF and BERGERON は，*Fraxinus nigra*（black ash）における年輪幅の変動性が気象条件の変動性と良く一致し，年輪年代学に適した樹種であることを報告している[11]。従って，本研究で用いたヤチダモにおいても同様の結果が得られることが期待できる。

謝 辞

本研究の試料採取に当たっては，農学部付属林木育種試験場長の門松昌彦助手をはじめ雨龍地方演習林職員の皆様の御協力を戴いた。また，木材生物学講座の大谷諄助教授，佐野雄三助手，雨龍地方演習林野田真人助手から多くの助言を得た。記して感謝の意を表します。本研究の一部は，財団法人藤原ナチュラルヒストリー学術研究助成金によったもので，ここに謝意を表する。

参 考 文 献

1) FRITTS, H. C. (1976) Tree rings and climate. 1-567. Academic Press Inc. (London).
2) SCHWEINGRUBER, F. H. (1988) Tree rings. 1-276. D. Reidel Publishing Company.
3) COOK, E. R. and L. A. Kairiukstis (1990) Methods of dendrochronology. 1-394. Kluwer Academic Publishers.
4) POLGE, H. (1966)Etablissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants. Ann. Sci. For. **23**: 1-206.
5) 太田貞明 (1970) 軟X線・デンシトメーターによる木材密度の測定. 木材工業. **25**: 131−133.
6) PARKER, M. L. and L. A. JOZSA (1973)X-ray scanning machine for tree-ring width and density analysis. Wood and Fiber **5**: 192-197.
7) 野堀嘉裕 (1994) 軟X線デンシトメトリーによる苫小牧地方アカエゾマツ造林木194個体における年輪情報と気象情報の関係解析. 日本林学会誌. **76**: 89−94.
8) 船田 良・堀田らん司・小林 修・安江 恒・深沢 和三 (1995) 樹冠活性の異なるヨーロッパトウヒの年輪構造及び年輪形成. 北海道大学農学部演習林研究報告. **52**(1): 1-11.
9) COWN, D. L. and M. L. PARKER (1978) Comparision of annual ring density profiles in hardwoods and softwoods by X-ray densitometry. Can. J. For. Res. **8**: 442-449.
10) 加納 孟 (1956) 木材材質の森林生物学的研究 (第11報) ― 北海道野幌地方における造林木の材質成長 ―. 林業試験場研究報告. **90**: 37−80.
11) TARDIF, J. and Y. BERGERON (1993) Radial growth of *Fraxinus nigra* in a Canadian boreal flood-plain in response to climatic and hydrological fluctuations. J. Veg. Sci. **4**: 751-758.

Summary

The growth ring of Yachidamo (*Fraxinus mandshurica* var. *japonica* Maxim.) trees was analysed by the soft X-ray densitometry. The absolute values of the annual ring width were measured using a graphic-digitizer and a light microscope. The values that measured using a densitometer with different slit sizes and film moving speed were statistically compared with the absolute values to determine the densitometric conditions. The correlation coefficients between two values indicated that the slit height of 1000 μm, the slit width of 20μm, and the film moving speed of 0.2mm/sec were the most suitable conditions for the accurate automeasurement of number and width of growth rings, even in regions where the growth rings were very narrow. These conditions are due to the anatomical features of Yachidamo trees such as the size of large earlywood vessels and the distance among vessels in earlywood zone.

Variations of annual ring widths were studied in 15 Yachidamo trees naturally grown in the Uryu Experimental Forest of Hokkaido University. The number of growth rings was 169±59 (average±standard deviation). The width of growth rings varied mainly in a narrow range from 0.5 to 1.5mm, occasionally in a very narrow range of less than 0.3mm. The average width of growth rings was 0.99±0.29mm.