

# 信州産高樹齡カラマツ造林木の成長と材質

朱 建 軍

秋田県立大学木材高度加工研究所流動研究員

## 目 次

和文要約	61	3.3.3 肥大成長速度と年輪構造指標の関係	
第1章 緒言		3.4 まとめ	81
1.1 はじめに	63	第4章 カラマツ造林木の強度性能	
1.2 既往の研究	63	4.1 はじめに	81
1.2.1 施業と材質の関係に関する研究		4.2 材料と方法	82
1.2.2 らせん木理に関する研究		4.2.1 実験材料	
1.2.3 年輪構造に関する研究		4.2.2 基礎材質指標の測定	
1.2.4 未成熟材と成熟材に関する研究		4.2.3 ヤング係数と引張り強さの測定	
1.2.5 強度特性に関する研究		4.3 結果および考察	82
1.2.6 用材品質および品等区分に関する研究		4.3.1 板材の基礎材質指標	
1.3 本論文の構成	68	4.3.2 無欠点小試験体の基礎材質指標	
第2章 カラマツ造林木における年輪構造解析		4.3.3 板材と無欠点小試験体の強度特性の 関係	
2.1 はじめに	68	4.3.4 板材の引張り強さに及ぼす節の影響	
2.2 材料および方法	68	4.4 まとめ	86
2.2.1 供試材料		第5章 カラマツ造林木の用材品質	
2.2.2 実験方法		5.1 はじめに	86
2.3 結果および考察	70	5.2 材料と方法	86
2.3.1 年輪幅と年輪密度の樹幹内半径方向 の変動		5.2.1 供試材料	
2.3.2 年輪幅および年輪密度に及ぼす間伐 の影響		5.2.2 測定方法	
2.3.3 早材・晩材の樹幹内半径方向の変動		5.3 結果および考察	87
2.3.4 成長・樹齡・産地による年輪構造の 相違		5.3.1 節などの欠点による品等区分	
2.4 まとめ	75	5.3.2 狂いの発生	
第3章 カラマツ造林木の未成熟材と成熟材の特徴		5.3.3 採材位置と供試木による強度的性質	
3.1 はじめに	76	5.4 まとめ	89
3.2 材料と方法	76	第6章 総括	89
3.3 結果および考察	76	6.1 材質指標の樹幹内変動	
3.3.1 仮道管長による未成熟材と成熟材の 区分		6.2 肥大成長と材質指標との関係	
3.3.2 年輪密度による未成熟材と成熟材の 区分		6.3 ひき板材の強度性能	
		6.4 正角材の用材品質	
		6.5 まとめ	
		謝 辞	91
		文 献	92
		Summary	98

## 和 文 要 約

カラマツ (*Larix kaempferi*, Carriete) は、長野県において重要な造林樹種であるが、その人工林のほとんどが短伐期施業を目標として植林された。現在は、若齢木の材質的な問題および材の需要構造の変化などにより、長伐期施業への移行が望まれるようになってきた。しかし、長伐期施業で育成した高樹齡カラマツの材質研究は、これまで行われていない。

本論文は、岐阜大学大学院連合農学研究科審査学位論文である。

そこで、本研究では、106年生カラマツを中心に、年輪構造解析を行い、未成熟材と成熟材の特徴を明らかにし、両材部における年輪指標に及ぼす肥大成長の影響が異なることを確認した。そのうえで、実大材の引張り強度および用材品質を検討し、成長と材質の特徴を明らかにした。

### 1. 材質指標の樹幹内変動

佐久、藪原、手良産材を対象にし、特に106年生カラマツ造林木を中心に、軟X線デンシトメトリを用いて、年輪構造解析を行った。得られた結果を以下に示す。

年輪幅は、髄付近で広く、外側に向かって急速に狭くなり、15~20年輪前後からはほぼ安定する。早材幅の樹幹内半径方向の変動は年輪幅の変動と一致した。

年輪密度は、髄付近では低く、外側に向かって上昇し、約15~20年輪以降は安定した。しかし、一番外側、すなわち辺材部では低下する傾向が認められた。また、晩材密度と年輪密度の樹幹内変動パターンは良い一致を示した。

以上のことから、異なる樹齢、産地、成長状況の供試木の間、年輪指標の樹幹内変動の共通点として、髄付近で変動が大きく、それ以降は安定することが挙げられる。したがって、この両材部を区別して材質指標を取り扱うべきである。

### 2. 肥大成長と材質指標との関係

髄付近の材部とその外側の材部を区分するため、仮道管長を基準とする区分方法と年輪密度を基準とする区分方法によって、未成熟材と成熟材を区分した。

仮道管長を区分基準とした方法では、佐久および藪原人工林において、いずれも18年が未成熟材と成熟材の境界と判定された。

年輪密度を区分基準とする未成熟材と成熟材の境界は、セグメント回帰法による解析から、佐久産は15年、藪原産は21年と判定された。

年輪密度を区分基準とする未成熟材と成熟材の境界の判定結果を用い、成長速度と年輪密度の関係を検討した結果、未成熟材部では高い成長速度が材の密度低下をもたらすのに対して、成熟材部では、成長速度の増加に伴って晩材幅も増加し、結果として密度と晩材率は低下しないことが明らかになった。

### 3. ひき板材の強度性能

年輪構造レベルでの未成熟材と成熟材の区分、あるいは両者の材質に関して得られた結論が実大材である板材の強度特性に当てはまるかどうかを検証し、以下に示す結論を得た。

節の存在と分布が板材の引張り強さに強く影響した結果、板材の引張り強さは無欠点小試験体で得られる値より小さかった。また、節の影響により、引張り強さは樹幹内半径方向での変動が大きかった。そして、安定状態に達するまでには、年輪レベルで得られた年数、15~21年より長い、約30年が必要であることが明らかになった。

### 4. 正角材の用材品質

高樹齢カラマツ造林木を実用的な観点から評価するため、建築用材としての心去り正角材について、生材状態の品質と天然乾燥後の割れやねじれ、曲げヤング係数などについて検討した。

その結果、成長の速い供試木では成長の遅い供試木に比べ、得られた正角材の数が多く、節の少ないまたは無節の正角材が多く採材できた。また、正角材の80%に曲がりまたはねじれが生じたが、これらの狂い量は若齢木の心持ち正角材に比べて非常に小さく、モルダーによって補正すると、所定の寸法に仕上げることができる。また、強度的にも、高樹齢木から得られた材は若齢木より優れていた。

### 5. まとめ

106年生供試木を中心に、高樹齢カラマツ造林木の成長と材質を検討し、その結果を要約すると、以下の5点にまとめられる。

- 1) 仮道管長および年輪密度に基づいて区分した未成熟材と成熟材の境界は15~21年の範囲であった。
- 2) 辺材部では、年輪密度が低下する傾向が見られた。
- 3) 成熟材部ではこれまでの研究と同様に材質が安定し、肥大成長が大きくなっても材質は低下しない。
- 4) 実用的な視点から見ると、安定的な品質の材を得るには30年以上が必要である。
- 5) 高樹齢大径木のカラマツからは、品質の優れた優良用材が大量に得られる。

従って、かつて短伐期施業を目的としたカラマツ人工林は、材質の安定化を図り、これによって、木材市場の需要を開拓していくためには、長伐期・高樹齢・大径材を育林目標として目指すべきだと考えられる。

キーワード：年輪構造；未成熟材；成熟材；引張り強度，正角材

## 第1章 緒 言

### 1.1 はじめに

世界的にみると、木材は産業用材であるとともに生活必需品として大量に消費されている。特に、第二次世界大戦以降の経済成長は、木材消費に拍車をかけている。日本においても、木材の生産力増強が社会的な課題であり、短伐期林業、早生品種による育成林業、林地肥培による肥培林業など短伐期施業が数多く試みられた。また、戦後から高度成長期にかけて、全国規模でいわゆる拡大造林が行われた(林野庁, 2000)。

ニホンカラマツ (*Larix kaempferi* Carriefe) はこのような社会的背景の下で、バイオニア樹種として注目された。カラマツは、立地の土壌の要求が低く、成長が速やかで針葉樹のなかでは密度が大きく、寒冷地においてよく生育する性質を有することから、短伐期施業・拡大造林の旗手として、第二次世界大戦後、中部地方から東北地方、北海道にかけて広い範囲に造林された(橋詰ら, 1993)。その結果、カラマツは、全国的にもスギ、ヒノキ、マツ類に次ぐ主要な造林樹種となり、長野県ではカラマツ人工林面積は24.4万haで、人工林総面積の約55%を占め、長野県における最も主要な造林樹種となった(武井, 1989)。

戦後50年を経て、ほとんどのカラマツ人工林が当時に設定された標準伐期に到達したが、短伐期林業で生産された木材を材質的な観点からみると、若齢で小径材であることから、ねじれ、狂い、割れなどが生じやすく、ヤニが多いなどの問題が生じている(菅原, 1983)。

また、カラマツ材の用途からみると、かつて足場丸太、坑木、杭丸太、電柱など、丸太のまま利用されるものが大半を占めていたが(半沢ら, 1969)、近年になって、コンクリート、鉄材、輸入材などで代替されるようになり、需要構造が大きく変化してきた。このような状況の中で、構造材としてカラマツ材の利用開発を望む声が大きくなり、それに対応するため、大径材の生産を目標とした長伐期施業の選択が有効であると考えられるようになった(倉田, 1979)。

さらに、カラマツ造林木における材質上の特徴の一つとして、密度、仮道管長、マイクロフィブリル傾角、繊維傾斜が髓から樹皮側に向かって著しく変動することが挙げられる。特に髓からおよそ15年輪までとされるいわゆる未成熟材部は、容積密度が小さ

く、仮道管長が短く、らせん木理が大きいほか、マイクロフィブリル傾角が大きいことが知られている。このため、未成熟材部では乾燥に伴うねじれが大きく、強度が小さい(重松, 1990b)。

これまで、カラマツ材について数多くの研究が行われてきたが、そのほとんどは若齢木を対象としてきた。そのため上述の未成熟材の性質によって、カラマツ材に対する評価が低い。しかし、高樹齡大径木になるにつれて、樹幹内に含まれる成熟材の割合の増加によって、仮道管長の増大、らせん木理の減少、密度や強度の増加など、性質の優れた材をより多く得られると予想される。このため、カラマツ人工林を長伐期施業に移行させることが提唱されている(菅原, 1990)。

しかし、高樹齡のカラマツ造林木の材質についてはまだ明らかでないところが多く、データの蓄積も不十分である。

以上の背景から、カラマツの高樹齡大径材に対する研究はカラマツ材の有効利用にきわめて重要であると考えられる。そこで、本研究は、信州産高樹齡カラマツ造林木を対象として、成長や樹齡と年輪構造との関係、未成熟材と成熟材の特徴、小試験体および実大材の強度性能、用材品質などを検討することにより、高樹齡カラマツの材質を明らかにすることを目的とした。

### 1.2 既往の研究

#### 1.2.1 施業と材質に関する研究

カラマツは、スギ、ヒノキに比べて、造林の歴史が浅く、森林の取り扱い方と材質の関係が必ずしも明らかでない。そのため、カラマツ林業家の中には、暗中摸索しながら育林していく例が見られる。寺崎博士は、1903年から50年にわたって、浅間山麓の国有林に設定したカラマツ間伐試験地において間伐実験を行った(寺崎, 1963)。この実験では、間伐の繰返し年は、A種間伐：約3年；B種間伐：約5年；C種間伐：約8年と設定された。その後、島崎(1986)は、高密度植栽カラマツ林の間伐について一連の研究を行い、それぞれの植栽密度に応じる間伐方法を提案した。これらの間伐が材質に及ぼす影響について、重松(1984; 1987a)は、間伐により偏心成長およびアテ材が生じないこと、密度、晩材率が変化しないことを明らかにした。Koga et al.(1996)は、間伐処理によって肥大成長および材積

成長は促進され、晩材率、容積密度数への間伐の影響は認められなかったと指摘した。一方、強度間伐により胸高部位の晩材仮道管長は処理後数年間短くなったが、弱度の間伐による晩材仮道管への影響は認められなかった (Koga et al., 1997)。さらに、間伐や枝打ちなどの施業技術により、樹幹の連年成長量や心材材積率の管理ができることが指摘されている (武井, 1997)。

カラマツ以外の樹種においても、間伐が材質に及ぼす研究が行われた。Norway spruce (*Picea abies*) について、Herman et al. (1998) によると、強度の間伐による成長率の促進は年輪幅の大きな、不規則な変動をもたらしたが、顕著な材質の低下がなく、林分の生産率を促進させた。以上の研究結果から、間伐は林木の肥大成長を促進することができるが、材質に対する影響が小さいと考えられる。

1970年代に入って、カラマツ材の需要構造が変化したことから、小径材の需要が減少し、中径級以上の材生産がより有利となり、長伐期施業についての研究が始まった。武井 (1977) は、長野県に現存する大径材を調査し、地位指数の高いところでは、カラマツの樹種特性を生かして、大径材生産を目指す長伐期を指向することが望ましいとし、50~60年へと伐期を延長する施業指針を作成した。また、武井ら (1986) は、カラマツの立地条件と成長について検討した結果、長伐期施業には立地条件と保育管理の必要性を指摘した。菅原 (1990) は、高齢のカラマツ人工林の調査を行った結果として、林齢が50年をこえても良好な材積成長を保つことを確認した。更に、森ら (1991) は秋田地方における高齢級カラマツ林の成長について研究し、大径材生産のための伐期は88年以上が適当であると報告している。このような一連の報告は、カラマツ人工林の樹齢を50~80年まで伸ばしても、成長が低下しないことを示している。

### 1.2.2 らせん木理に関する研究

1950年代からカラマツ造林木のらせん木理とねじれについて研究が行われるようになった。大倉 (1955) は、樹木の回旋性について、SとZ二つの型に分けて、カラマツは前者であることを明らかにした。さらに、大倉ら (1961; 1962) はカラマツのらせん木理と材のねじれ・狂いとの関係を検討し、若齢時での回旋方向と成熟時の回旋方向とは異なることや、柱角材や板材ではねじれ・狂い方向と回旋方向とが一致することを明らかにした。

加納ら (1964; 1965) は立地条件の著しく異なっているカラマツ林を調査し、立地条件とらせん木理傾角の関係を検討した。その結果、林地の傾斜と林分密度によってらせん木理傾角は異なり、一般に平坦地植栽されたものは、急斜地に比べ材面割れ、ねじれ、そりなどの欠点が少なく、林分密度の高い林分からの材は角材面での節は小さく、節まわりの繊維の回旋が小さくなり、材のねじれ量を減少させていることを明らかにした。小沢 (1971) は、カラマツにおける木理の回旋性がスギ、ヒノキと比較し、カラマツの方が大きいことを明らかにした。また、小沢 (1972; 1973) は、カラマツのねじれ返しが31±4年輪で、最大らせん木理傾角が2~9年輪で現れること、さらに、平均らせん木理傾角は未成熟材の方が大きく、成熟材部より未成熟材部で年輪幅とらせん木理傾角との間に高い正の相関が認められたと報告している。重松ら (1973c; 1974c) も、樹心部のらせん木理傾角が大きく、若い年輪ほどらせん木理傾角と年輪幅には相関が高いという結果を報告している。

これらの報告を踏まえ、小沢 (1984a) は、らせん木理傾角は一般に未成熟材部において大きく、直径を増すにしたがい減少する傾向が見られることから、カラマツについては特に大径材の生産が望まれることを指摘している。また、育種の角度から、織田ら (1986) は、林齢30年生以下で、繊維傾斜度、ねじれ、そりを指標にねじれの小さいカラマツ優良木を選抜することができることを報告した。

肥大成長との関連性について、らせん木理傾角と肥大成長との間には、有意な相関は認められないとする報告があるが (三上ら, 1972; 久保ら, 1994)、小沢 (1971)、重松 (1984)、武井 (1991) などの研究によると、成長初期に限り、肥大成長の良いものほど、らせん木理傾角が大きい傾向が認められた。

### 1.2.3 年輪構造に関する研究

カラマツの年輪構造についての研究が60年代から行われるようになった。塩倉ら (1968) は、仮道管長の樹幹内変動について、髓から外側に向かって約15年輪ぐらいまで仮道管長は急速に長くなり、およそ最初の3~4倍となることを報告している。その後約20年輪ぐらいまでは長くなる傾向があるが、その伸び率は急に減じ、20年輪を過ぎるとほぼ安定する。重松 (1982) も、カラマツの仮道管長の樹幹内変動を調べているが、得られた仮道管長の樹幹内変動の結果は塩倉と同様であった。これらの変動傾

向は、スギ、ヒノキなどのほかの針葉樹と同様であることが明らかになった(太田, 1971)。さらに、塩倉(1968)は、カラマツの仮道管の二次壁S2層におけるマイクロフィブリル傾角(以下、マイクロフィブリル傾角)の変動について、髄付近では早材、晩材ともに最大の角度を示し、外側に向かって次第にマイクロフィブリル傾角は小さくなるが、早材部ではゆるやかに、晩材部では速やかに小さくなり、約15年輪ぐらいからはほぼ安定すると報告している。

カラマツの仮道管長とマイクロフィブリル傾角の関係について、塩倉(1981b)は、両者の間には負の相関が認められるが、晩材部では相関係数 $r = -0.83$ の高い相関が示されたものの、早材部での相関係数は $r = -0.38$ と低い値であると報告している。しかし、重松ら(1988)は、カラマツの仮道管長とマイクロフィブリル傾角の間には、早材、晩材とも相関係数が0.9に近く、きわめて高い負の相関であることを指摘した。一方、スギについて、平川ら(1995)は、マイクロフィブリル傾角が仮道管長とは無関係に独自に変動していることを報告している。以上のように、仮道管長、マイクロフィブリル傾角の樹幹内変動傾向が明らかにされてきたが、両者の関係についてはさらに検討する必要がある。

カラマツの繊維、半径、接線方向の全収縮率の樹幹内分布について、重松ら(1970a)は、半径、接線方向の収縮率が樹心から外側に向かって漸次増加する傾向を示し、この傾向は地上高が低いほど顕著であるが、繊維方向の収縮率では半径、接線方向とは異なり、樹心部から外側に向かって減少すると報告した。塩倉(1975)は、収縮率の樹幹内分布について、重松らと同様な結果を得ている。さらに、塩倉(1975)は、収縮異方度は樹幹横断面において髄に近い部位で大きく、外周部で小さく、また、樹幹の地上高に伴って、樹幹下部で大きく樹幹上部に近づくにしたがい小さくなることを指摘した。

カラマツにおける密度の樹幹内変動について、重松(1977)は、肥大成長の速い34年生と遅い53年生の供試木を対象に、軟X線デンストメトリーを用いて、密度の樹幹内半径方向の変動を調べた。それによると、密度は樹心部より外方に向かって増加し、外周部の辺材において若干減少しており、この半径方向の変動は肥大成長の良い方がより大きい。塩倉(1981a)は、同様な方法でカラマツの年輪密度の樹幹内変動を調べ、年輪全体の密度は髄付近で高く、外側に向かって次第に低くなり、およそ5~8年輪で最低値を示し、以後再び上昇して12~16年輪以降

はほぼ安定すると報告している。宮島(1985)は、北海道産カラマツについて、平均年輪幅と容積密度数との関係を調べ、年輪幅2~4mmの範囲で、年輪幅と密度が負の相関にあることを明らかにした。

カラマツ以外の樹種については、長尾ら(1985)は、スギについて、成長速度の速いものと遅いもので成長開始期と休止期が異なり、これが木部形成に影響すると報告した。小田ら(1988)は、スギ品種ごとに年輪幅、晩材率、晩材仮道管長、容積密度数、仮道管の放射径、接線径、接線壁厚、細胞壁率、縦圧縮試験などを行った。その結果によると、品種間の年輪構造指標に差異が認められ、それは遺伝的な要因に起因することを示した。さらに、藤澤ら(1993; 1995)は、軟X線デンストメトリーを用いて、スギの年輪構造におけるクローン間、検定林間および植栽密度による変異を検討し、植栽密度を高くすることによって年輪幅は減少し、逆に1年輪毎の平均密度は増大し、晩材幅および晩材密度は植栽密度を変えても顕著に変化しなかったことを指摘した。

Lindstrom(1996)は、Norway spruceについて、密度は年輪幅と負の相関関係があるが、樹高、胸高直径、樹冠の成長に影響されるため、年輪幅および密度は樹冠の生育に依存することを明らかにした。一方、Zhang et al.(1996)は、black spruce (*Picea mariana*)について、密度と年輪幅の関係は、負の相関を持っている家系がある一方、相関が弱いあるいは無相関の家系もあるため、成長が速くても密度も高い家系が得られる可能性を示した。更にZhang(1998)は、black spruceについて、年輪密度(一年輪の平均密度)は年輪幅および早材幅と負の相関を示したが、晩材幅と早材密度と正の相関を示すことを報告している。そして、樹齢の増加に伴い、年輪密度と年輪幅および早材幅の相関が弱くなり、高樹齢になると、年輪幅が広くても密度に悪い影響があまりないと報告した。

#### 1.2.4 未成熟材と成熟材に関する研究

未成熟材の樹幹内の位置について、渡辺ら(1963)は、スギ樹幹内の密度、仮道管長、マイクロフィブリル傾角などの樹幹内変動傾向を考察し、髄から10~15年輪まで、すなわち形成層齢10~15年までの始原細胞から形成された木部では、材質に影響する基本因子が著しく変化していて、材質がまだ安定しないため、未成熟材とみなすことができると指摘した。また、深沢(1967)は、スギ樹幹内の垂直変動を検討し、同一年次の材部のうち、上方部の材

が不安定で、下方部では生理的に安定する木部が形成されるため、同一年次に形成された上方部の材は未成熟材であることを報告した。太田ら(1968)は、ヒノキについて、仮道管長、マイクロフィブリル傾角、密度、比動的ヤング係数の半径方向の変動を検討し、10~13年輪の範囲を未成熟材とし、未成熟材と成熟材を同一母集団として取り扱うことはできないと主張した。

カラマツについて、塩倉ら(1968;1972a)は、仮道管の長さ、マイクロフィブリル傾角、らせん木理傾角の幹軸および幹径方向の変動から、髄から15年輪までの木部を未成熟材とみなすことができると指摘した。さらに、塩倉ら(1981a)は、信州カラマツの仮道管径と壁厚および密度を取り上げ、各年輪内の早、晩材部の差異、樹幹内の平均密度の変動から、未成熟材と成熟材の区分などを検討した結果、未成熟材の範囲を髄から15年輪、距離で5~8cmであると主張した。また、小泉ら(1987b)は、北海道産カラマツ間伐木による研究結果から、未成熟材は髄から15年輪、距離で8cmが妥当とした。

未成熟材の範囲がどこで終わり、成熟材部がどこから始まるかについて、通常は材質指標の髄からの半径方向における変動傾向を検定する方法で求めている(Bendsten et al., 1986; Clark et al., 1989)。スギについて、深沢(1967)は、年輪幅、晩材率、容積密度数、容積収縮率、仮道管長などの指標を用い、同一年次における垂直変動から、未成熟材領域と成熟材領域を分けたが、指標によって、未成熟材の範囲が異なるため、結果としては髄からの年輪数は14~30年であった。

近年になって、未成熟材部と成熟材部を区分するにあたり、数学的な方法が利用されるようになった。その一例として、塩倉(1982)は、針葉樹材について、樹幹内半径方向における仮道管長の変動パターンを対数式にあてはめ、求められた回帰曲線から年輪毎の伸長率を算出し、伸長率1%の個所で未成熟材と成熟材を区分した。また、Shepard et al. (1992)は、密度、曲げ強さ、曲げヤング係数の樹齢による変化を調べ、セグメント回帰法により、未成熟材と成熟材を区分したが、区分指標および林分によって、未成熟材と成熟材の境界が異なっていた。Abdel-Gadir et al. (1993)は、Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*)について、セグメント直線回帰モデルを用い、年輪密度を指標にして未成熟材と成熟材を区分した。

さらに、Sauter (1999)は、晩材の樹幹内変動を

調べ、統計的な方法で未成熟材と成熟材の境界を求め、セグメント回帰モデルは有効な方法であることを示した。Evans et al. (2000)は、小試験体の曲げ試験で強度指標の樹幹内変動を連続的に測定し、MOEが未成熟材と成熟材の区分指標として適切であることを指摘したが、前述の結果からみると、年輪密度と仮道管長が未成熟材と成熟材の区分指標としてよく使われている。しかし、平川ら(1995)は、仮道管長は肥大成長量の影響を受けるため、未成熟材判定の指標とする場合には、肥大成長量を考慮する必要があると指摘している。

未成熟材の材質について、渡辺ら(1963)は、スギ材の材質に影響する密度、仮道管長およびS2層のマイクロフィブリル傾角の3基本因子について実験を行った結果、未成熟材は髄から10~15年の間に存在し、未成熟材の特性は圧縮アテ材の特性と類似していることを指摘した。また、深沢(1967)は、未成熟材の材質が施業条件、環境条件および遺伝的条件などにより特徴的な材質を示すが、成熟材では個体間の変動がより少ないことを明らかにした。太田ら(1968)は、未成熟材の力学的特性について研究を行い、ヒノキ樹幹における材質判定因子の変動と力学的性質によって、10~13年輪の範囲を未成熟材とし、未成熟材と成熟材を同一に取り扱うことはできないと報告した。さらに、力学的な立場から材質を評価し、圧縮強度、圧縮ヤング係数と密度の間に、成熟材部では高い相関があるが、未成熟材部では相関が低く、時に負の相関さえ認められると指摘した。

カラマツについて、塩倉ら(1968)は、仮道管長、マイクロフィブリル傾角、らせん木理傾角を測定し、未成熟材部より成熟材部の方がフィブリル傾角、らせん木理傾角ともに小さく、仮道管長が長く、節などの欠点を含んだ小試験片の曲げ強度値も、未成熟材の影響により、樹幹内での変動が大きいと指摘した。このことを踏まえ、塩倉ら(1971)は、強度の樹幹内分布について、未成熟材部が成熟材部より強度的に劣り、樹幹基部の未成熟材部が最も劣るとした。また、未成熟材におけるカラマツのらせん木理について、小沢(1973)、重松ら(1973c)、織田(1994)は、未成熟材部では成熟材部より繊維傾斜度が大きいと指摘した上で、長伐期施業で枝下部に繊維傾斜度の低い材部を増加させることにより、材質の向上を促進できると指摘した。

また、小泉ら(1990a)は、北海道カラマツ精英樹のつぎ木クロウンの肥大成長(胸高直径、年輪幅)と材質(容積密度数、樹幹ヤング係数)につい

て調べた結果、成熟材部の平均年輪幅と容積密度数のクローン平均間に相関が認められないため、肥大成長と材質は比較的独立していると指摘した。逆に、高田ら(1992b)は、平均年輪幅と容積密度数、平均年輪幅と晩材率の間に、未成熟材と成熟材のいずれにおいても、カラマツの一般的な傾向である負の相関が認められたと報告した。このように肥大成長と材質関係について課題が残されている。

#### 1.2.5 強度特性に関する研究

カラマツの強度特性について、重松は、静的曲げ強度、縦圧縮強度および剪断強度の樹幹内分布を調べた(重松, 1970b)。また、産地別、樹種別および小径木の強度的性質についても強度試験を行った(重松, 1971a; 1976a; 1976b)。その結果によると、カラマツの静的曲げ強度、縦圧縮強度および剪断強度の樹幹内分布は産地によって大きな差異が認められないが、肥大成長による強度指標の変動は、アカマツ、ヒノキに比べてカラマツのほうが顕著であった。間伐材の小径木の場合では、各種強度指標の変動が大きく、規則的な関係が認められなかったが、年輪幅が非常に広く、強度は既往の値に比べて小さいと報告している。

宮島ら(1978)は、交雑カラマツ造林木の材質試験を行い、無節材と有節材の曲げ強さ、曲げ強さに対する節の影響などを検討した結果、無節材の力学的性質はいずれも大きな値を示し、曲げ強さに対する節の影響が非常に大きいことを明らかにした。飯島(1983)は、シベリア産カラマツ材の強度性能に関する研究を行い、シベリア産カラマツ材はニホンカラマツ材より強度性能が高いことを明らかにした。小泉ら(1986a; 1986b; 1987a; 1987c)は体重負荷方式の立木非破壊試験による材質評価方法を開発し、カラマツ精英樹林分において樹幹曲げヤング係数の比較を行なった(小泉ら, 1990a; 1990b)。

スギ材の強度性能について、小泉ら(1997a; 1997b)は、丸太のヤング率とひき板の強度の関係を検討し、ヤング率は林分間、さらに個体間で高度な有意差が認められ、これらのロットで区分することでばらつきを著しく減少できたと報告した。林ら(1997)は、スギラミナの引張試験を行い、引張強度における寸法効果を調べた。板垣ら(1999)は、スギラミナの引張破壊特性に及ぼす節の影響を検討し、破壊に及ぼす節の影響は、節の断面欠損率のみならず、節の材縁からの距離が破壊に関わる重要な指標であることを明らかにした。

集成材用のカラマツラミナ材の曲げおよび引張強度特性について、橋爪ら(1998a; 1998b)は、等級区分したラミナの曲げおよび引張り強さを、構造用集成材の日本農林規格が要求している基準強度との関係で検討し、ラミナ等級と曲げおよび引張り強さの変動係数、また、曲げ強さに対する引張り強さの比との関係を明らかにした。武田らは、カラマツラミナ内のヤング係数変動(1999a)、引張強度における長さ効果(Takeda et al., 1999b)、引張強度に及ぼす節の影響(Takeda et al., 1999c)についての一連の研究を行い、ヤング係数に基づく等級区分は、単にヤング係数の高いものと低いものを区分するという機能に加えて、節や密度などほかの強度に関係する因子も含めた選別方法であると指摘した(武田, 2000)。

#### 1.2.6 用材品質および品等区分に関する研究

加納ら(1964)は、カラマツ材の利用にあたり、用材および製材品としての実態を明らかにするため、長野県内の40年生と56年生2林分の3番玉までの丸太663本から、径級にあわせて心持ち正角材、二方桁角、四方桁角を得て、用材品質を調べた。その結果によると、心持ち角は乾燥に際して、著しいねじれを生ずるものが多いため、角材寸法の小さいものを木取することは避けるべきであり、一辺長120mm以上のものであれば、そのねじれは小さくなると指摘した。さらに、用材品質に及ぼす立地条件の影響について、加納ら(1965)は、長野県の36~57年生の3林分と青森県の47年生および45年生の2林分を対象に検討を行ない、カラマツ材の品質が立地条件によって著しく異なり、平坦地に植栽されたものは急斜地のものに比べて、材面割れ、ねじれ、そりなどの欠点による品質低下が小さいと報告した。

重松(1982b; 1983; 1985a; 1987b; 1987c; 1989a; 1990a; 1991)は、長野県内の40~75年生の7林分から、数多くの正角材を得て、目視による等級区分を行った。それによると、カラマツ造林木においては、高樹齢の大径材になるに従って製材品の品等が顕著に向上することを明らかにした。さらに、大径材でも比較的若齢のものは品等が低く、たとえ高樹齢であっても比較的小径材の場合には品等の向上が認められなかったことを報告した。重松と同様な供試材料を用いて、徳本ら(1997)は、実大材の強度試験を行ない、角材の曲げ、縦圧縮、縦引張り強度性能を検討し、曲げ強さは樹齢が高くなるほど強くなる傾向がやや認められたと報告した。

小泉ら(1987b)は、北海道産間伐材を用い、10.5cm心持正角材の曲げ、振り、縦圧縮性能を調べた。結果として、正角材の8割に顕著な割れが乾燥によって生じたが、割れのあるものはないものより振り剛性が10%程度小さかった。また、節による縦圧縮強さの低減は10%以下と指摘し、曲げヤング係数についてはほとんどのものが基準値を下回った。橋爪ら(1998b)は、信州産カラマツの強度特性に関して、正角材の曲げ強度特性に及ぼす木取り、荷重方向の影響を検討した。さらに、武田ら(2000)は、信州産カラマツ正角材の強度分布特性について、曲げ、圧縮、引張強度の特性値推定のために用いる分布関数による差異の検討を行った。

以上のようにカラマツ人工造林木の成長と材質について、すでに多くの研究がなされているが、若齢木を対象したものが多く、結果が異なるところもしばしば見られた。また、100年生以上の高樹齢木の基本的な材質を明らかにした研究は見当たらない。

### 1.3 本論文の構成

本論文では、高樹齢カラマツの年輪構造解析を行い、未成熟材と成熟材の特徴を求め、両材部における年輪指標に及ぼす成長の影響が異なることを検討する。そのうえで、実大材の引張強度性能および用

材品質を検討し、高樹齢カラマツの材質を明らかにする。

第2章では、106年生高樹齢カラマツ造林木を中心に、軟X線デンストメトリを用いて年輪構造解析を行うことにより、年輪構造指標の樹幹内変動、成長・樹齢・産地・施業が年輪構造に及ぼす影響を検討した。

第3章では、未成熟材部と成熟材部の年輪構造指標が成長によって異なるかどうかを検証するため、仮道管長を基準とする区分方法および年輪密度を基準とする区分方法を用い、未成熟材と成熟材を区分し、年輪構造指標と肥大成長速度を示す年輪幅との関係を調べた。

第4章では、年輪レベルでの結果が実大材に適切かどうかについて検討するため、丸太から連続的に挽いた板材の引張試験を行った。板材の半径方向における強度特性の変動を明らかにするとともに、同一材より得た無欠点小試験体での強度との比較も行った。

第5章では、実用的な観点から、長伐期施業によって育林された高樹齢カラマツ心去り正角材の用材品質を検証する。そのため、生材状態と天然乾燥後の形質的な変化、節・寸法などによる品等区分、強度性能などについて検討した。

## 第2章 カラマツ造林木における年輪構造解析

### 2.1 はじめに

カラマツ造林木は、古くから樹幹内および個体間の材質の変動が大きいことが知られている(半沢ら, 1969)。初期成長が良いことから樹幹に占める未成熟材の比率が非常に高く、多くの材質指標(例えば、密度、仮道管長など)は樹齢によって著しく変化し、また肥大成長の良否によってその変動に差異が生じる(重松, 1990b)。その他、年輪密度(重松, 1974a)、仮道管長、マイクロフィブリル傾角(塩倉, 1972a)および曲げ強度(宮島, 1985)など、様々な角度から研究されてきた。

本章では106年生高樹齢カラマツ造林木を中心に、産地、成長状況の異なる供試木を対象とし、軟X線デンストメトリを用いた年輪構造解析により、樹幹内半径方向の年輪構造指標の変動、肥大成長速度と年輪構造指標との関係、年輪構造指標に及ぼす樹齢の影響を検討する。

### 2.2 材料および方法

#### 2.2.1 供試材料

供試材料は長野県内の北信、東信、南信、木曾の4地域から採取した。供試木を得た林分の地域をFig.2.1に示した。各地域から、6本の供試木を伐採した。供試木を示す記号は、佐久がS、藪原がY、手良がT、戸隠がTOである。各供試木の概要をTable 2.1に示した。各産地の供試木のうち、胸高直径を基準にして、肥大成長の速いものと遅いものを3本ずつ選んだ。

供試木のうち、佐久産106年生カラマツ造林木は、佐久森林管理センターの資料によると、日本国内に現存するカラマツ造林木のなかでは2番目に古く、しかも施業履歴が明らかなものである。この林分では、カラマツが1892年に植栽され、寺崎式B種間伐を繰り返して、1924年ヒノキが下層に植栽され、現在はヒノキとの二段林になっている。カラマツの直径階本数分布はFig.2.2のとおりである。そのうち、肥大成長の速い3本と遅い3本を伐採した。

本研究において、第2章、第3章では、供試材料として、佐久、藪原、手良演習林から得た供試木を用いた。第4章では、戸隠産材、また第5章では、





Fig. 2.1 The distribution of sample trees.

- : Sampled plantations
- : Major cities

Table 2.1 Basic information for sample trees

Sample tree No	Tree age (years)	Height (m)	DBH (cm)	Clear length (m)
S1	106	31.0	70.0	14.8
S2	106	30.4	66.0	16.8
S3	106	32.5	72.0	14.3
S4	106	30.6	46.0	13.7
S5	106	30.8	48.0	16.9
S6	106	30.3	44.0	19.0
Y1	73	27.2	54.0	11.6
Y2	73	31.7	46.0	13.7
Y3	73	28.2	44.0	11.0
Y4	73	24.0	38.0	15.5
Y5	73	31.2	36.0	16.4
Y6	73	23.1	34.0	13.1
T1	70	24.8	43.0	14.0
T2	70	24.8	24.0	13.9
T3	45	32.8	40.0	12.7
T4	45	29.0	40.0	13.9
T5	45	29.0	28.0	19.6
T6	45	29.4	24.0	24.1
TO1	87	—	32	—
TO2	87	—	43	—
TO3	87	—	36	—
TO4	87	—	32	—
TO5	87	—	41	—
TO6	87	—	34	—

S, sample trees from Saku; Y, sample trees from Yabuhara; T, sample trees from Tera; TO, sample trees from Togakushi; DBH, diameter at breast height.

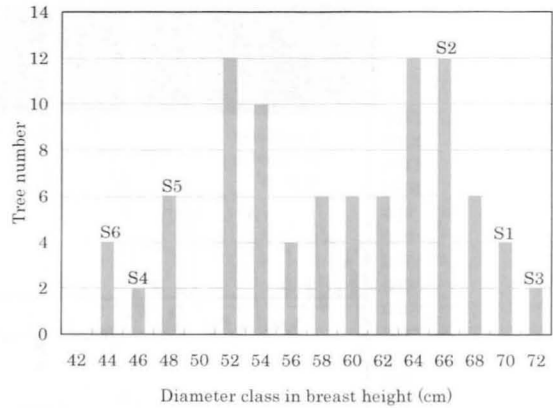


Fig. 2.2 The distribution of diameter class in breast height for 106-year-old Japanese larch planted trees.

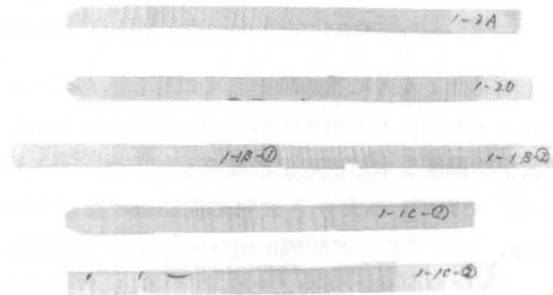


Photo 2.1 The test pieces for X-ray densitometry.

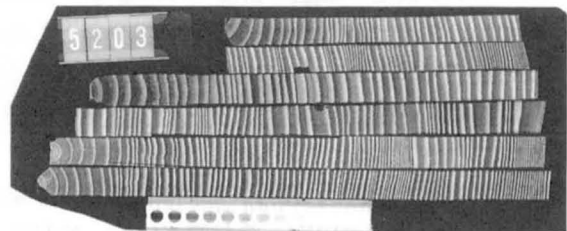


Photo 2.2 An example of soft x-ray photo.

佐久産材をそれぞれ用いた。

### 2.2.2 実験方法

全ての供試木において、地上高1.2mから、佐久産材では4mおきに、藪原、手良産材では3mおきに、厚さ約10cmの円盤を採材した。供試木の年輪構造は、軟X線デンストメトリ(太田, 1970; Schweingruber et al., 1978)によって調べた。調湿した試験片(Photo2.1)を供試し、恒温恒湿室に設置した軟X線撮影装置でX線透過像を撮影した(Photo2.2)。軟X線写真の撮影条件は、使用フィルム:コダック XTL (両面乳剤型)、照射距離:2.5 m、全波整流17kV、13mA、照射時間4分30秒である。現像後のX線フィルムは光学的濃度変化をマイクロデンストメータ(Joice Loebler type III CS)で測定

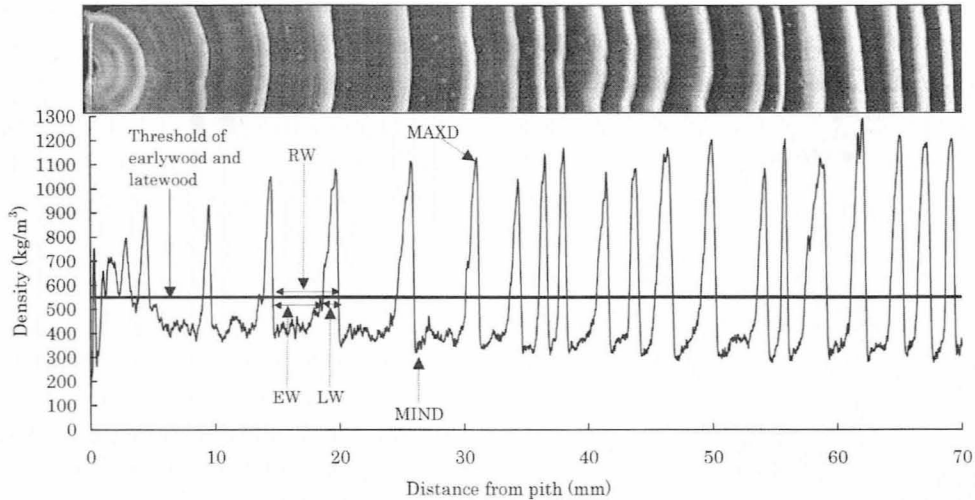


Fig. 2.3 Annual ring structure measured by X-ray densitometry.

EW, earlywood width; LW, latewood width; RW, annual ring width; MAXD, maximum density; MIND: minimum density.

し、同じフィルムに試験片とともに写し込んだセルロースアセテート製標準吸収体の撮影像を基準にして光学的濃度を木材密度値に換算した。フィルム濃度は、スリットの大きさ放射方向 $50\mu\text{m}$ ×接線方向 $500\mu\text{m}$ 、サンプリング間隔 $0.0156\text{mm/point}$ で測定した。なお、早晩材の区分について、Morkの定義による早・晩材境界部の細胞壁率(約50%) (佐伯, 1988) および仮定の細胞壁密度( $1100\text{kg/m}^3$ )に基づいて算出された $550\text{kg/m}^3$ を早晩材の境界値とした。

軟X線デントメトリでは年輪構造に関する多くの材質指標値が各年輪に同時に得られる。その一例として、Fig. 2.3に示すように、X線フィルムをデントメータで測定し、得られた材質指標値は年輪幅(RW)、早材幅(EW)、晩材幅(LW)、晩材率(PLW)、年輪密度(RD)、最大密度(MAXD)および最小密度(MIND)、早材密度(ED)、晩材密度(LD)である。なお、本論文では、一年輪の平均密度を算定し、これを年輪密度と定義する。

## 2.3 結果および考察

### 2.3.1 年輪幅と年輪密度の樹幹内半径方向の変動

Fig. 2.4に佐久産106年生供試木の胸高部位の年輪幅(a)、年輪密度(b)の経年変化を示す。年輪幅は髓付近で広く、外方に向かっておよそ15~20年輪まで急に狭くなり、それ以降はやや大きな起伏を示しながら、次第に安定する傾向を示した。肥大成長の速い供試木(S1, S2, S3)ほど樹幹内のばらつきが大きく見られた。

一方、年輪密度は、年輪幅と逆に、髓付近では低く、外方に向かって急に上昇し、15~20年輪後は小

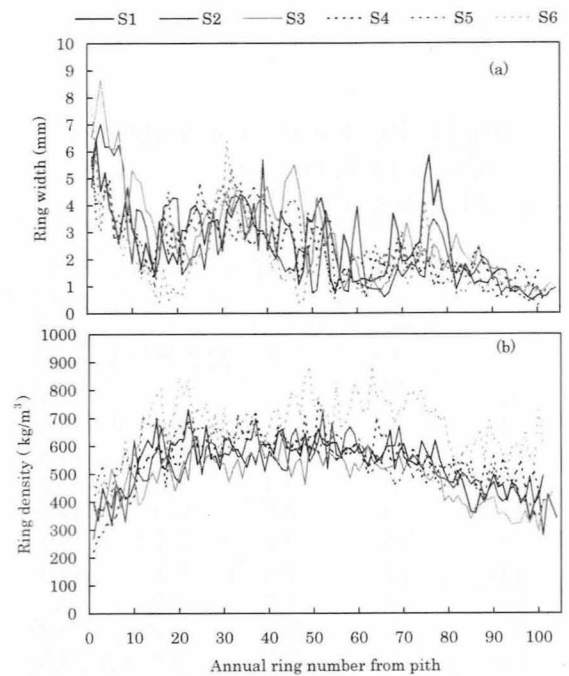


Fig. 2.4 Variation of annual ring width (a) and ring density (b) in the radial direction for sample trees of Saku.

さなばらつきがあるものの、次第に安定しており、一番外側では明らかに低下した。

Fig. 2.5に藪原産73年生供試木の年輪幅(a)、年輪密度(b)の経年変化を示す。年輪幅と年輪密度のいずれも、佐久産材と同じような傾向を示したが、年輪幅の起伏が相対的に小さく、密度のばらつきも小さかった。手良産70年生と45年生の供試木 (Fig. 2.6) においても、年輪幅(a)、密度(b)の変動は佐久、藪原産材と同様であったが、肥大成長の速い供試木が年輪数に伴う年輪幅の著しいばらつきを示した。

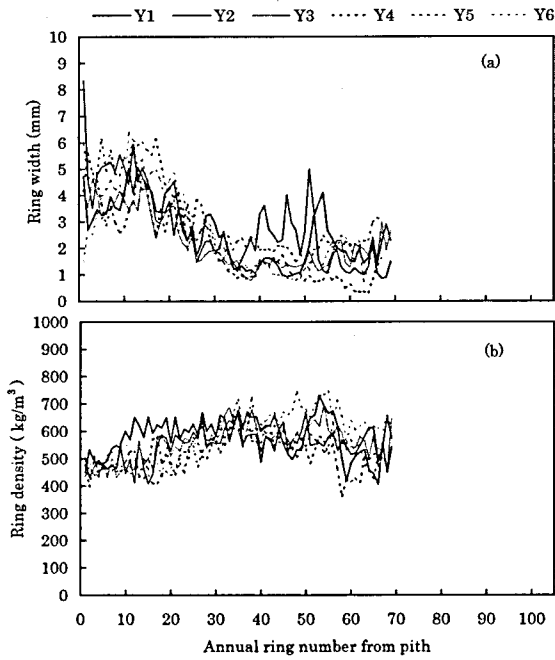


Fig. 2.5 Variation of annual ring width (a) and ring density (b) in the radial direction for sample trees of Yabuhara.

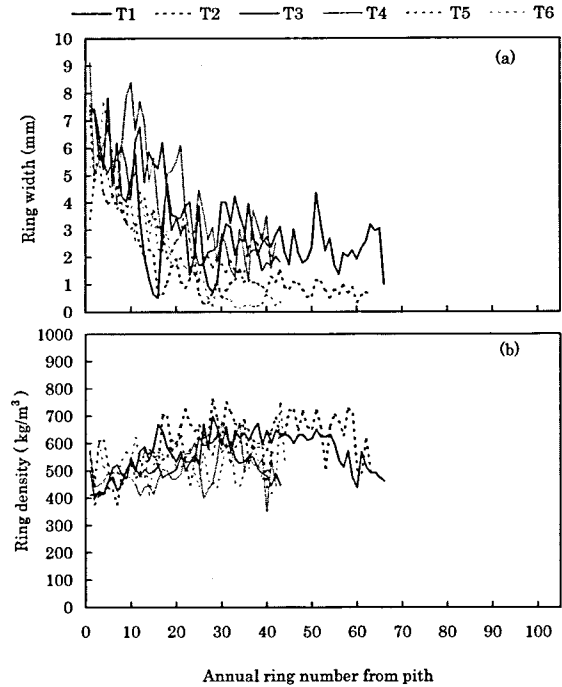


Fig. 2.6 Variation of annual ring width (a) and ring density (b) in the radial direction for sample trees of Tera.

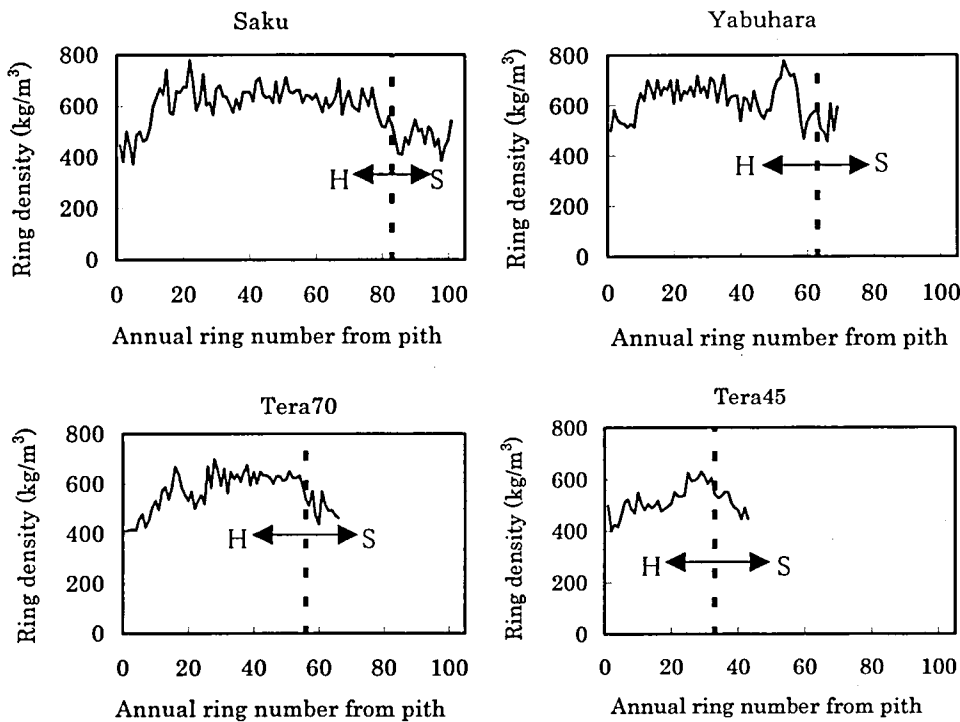


Fig. 2.7 Illustration of the boundary between heartwood and sapwood. H, heartwood; S, sapwood.

また、年輪密度が樹幹内の一番外側、おそらく辺材にあたると思われる部分で低下することが明らかとなったので、肉眼で該当部分と辺材部との対応を検討した。辺材と心材の境目を確認し、年輪密度の低下がはじまる点と辺材から心材に移行する点が一致するかどうかを検討した結果、Fig. 2.7に示すよ

うに、各産地の供試木において、材色が変わるところと密度が低下しはじめるところがほぼ一致した。

Table 2.2に各供試木の辺材部に含まれる年輪数を示し、さらに、Fig. 2.8に樹齢および肥大成長別の供試木に含まれた年輪数を示した。Table 2.2およびFig. 2.8に示したように、肥大成長の速い供試

Table 2.2. Ring numbers in sapwood for each sample trees

Source of sample tree	DBH of sample tree	Sample trees	Ring number in sapwood
Saku	Large	S 1	14
		S 2	14
		S 3	20
	Small	S 4	25
		S 5	32
		S 6	27
Yabuhara	Large	Y 1	9
		Y 2	14
		Y 3	10
	Small	Y 4	16
		Y 5	15
		Y 6	16
Tera 70	Large	T 1	12
	Small	T 2	15
Tera 45	Large	T 3	10
		T 4	9
	Small	T 5	16
		T 6	14

Large, sample trees with large DBH; Small, sample trees with small DBH; Tera 70, 70 years old sample trees from Tera; Tera 45, 45 years old sample trees from Tera.

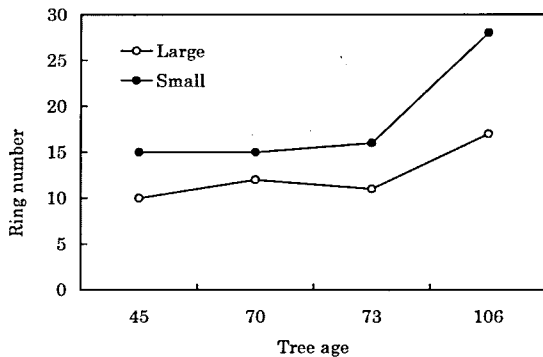


Fig. 2.8 Ring numbers contained in sapwood for various tree ages. Large, sample trees with large DBH; small, sample trees with small DBH.

木は遅い供試木と比べて、辺材に含まれる年輪数が少なく、心材化するのが遅いことがわかる。また、樹齢が高いほど辺材部に含まれる年輪が多いこともわかった。

以上の結果から、産地や樹齢の異なるカラマツ造林木は年輪幅、年輪密度の樹幹内変動パターンがほぼ同一であり、成長の良否による樹木間の年輪幅、年輪密度の差異は存在するものの、これらの差異は、年輪数の増加による年輪幅や年輪密度の変動に比べるとはるかに少ない。

例えば、葦原産73年生材のその後の成長を予測するうえで、佐久産材の80年以降の成長状況が何らかの示唆を与えらると思われる。このような視点で、106年生造林木における80年生以降の成長の推移を

見ると、明らかな成長の低下する傾向が現れなかったが、年輪密度が低下する傾向を示した。このような低下は辺材に該当することは先に述べたとおりである。

ここで得られた樹幹の横断面における半径方向の年輪幅と密度の変動パターンは既往の研究報告(塩倉ら, 1968; 重松, 1971a; 1977; 塩倉, 1981b)と同様な傾向であった。短い周期で年輪幅がやや大きくばらつく傾向を示したことに関連して、施業(例えば、間伐)による影響に加えて、年ごとの気象条件の違いによるものが考えられる。

また、生育地、樹齢が異なるすべての供試木において、辺材部付近で密度が低下していることと関連して、重松(1990)は、カラマツ樹幹内の辺材部における強度低下を報告しており、本論文の結果との関連性を示唆している。このような辺材部における密度の低下に対し、単なる軟X線デンストメトリによる年輪密度の測定方法(Schweingruber et al., 1978)によるものだけでは説明できない、何か別の原因を考えざるを得ない。この問題は改めて検討を加える必要があろう。

### 2.3.2 年輪幅および年輪密度に及ぼす間伐の影響

年輪指標の樹幹内変動は、環境、遺伝および施業によるところが大きいとされている(Zobel et al., 1989)。従って、樹齢、産地の異なる人工林から供試した試験木間の比較は、年輪指標の影響要因が大きく異なるのであるから、軽々しく論じることのできないことはいうまでもない。

しかしながら、ほかの産地と比べて、佐久産供試木にとくに顕著に認められる特徴は、年輪幅が数年周期で上下に大きく振れていることである。この原因として、施業記録に記された間伐の影響が考えられる。

佐久産カラマツ人工林は植栽されてから、寺崎式B種間伐が1903, 1912, 1918, 1924, 1928, 1949年に合計6回繰り返して実施された(寺崎, 1963)。この間伐の影響を検討するために、Fig. 2.9に年輪幅、密度の樹幹内半径方向の変動に間伐履歴を書き加えて示した。同図から、間伐の影響は年輪幅のばらつきを大きくするけれども、密度は年輪幅の広いところで必ずしも落ちていない。したがって、間伐は密度に顕著な影響を与えないように見える。

Herman et al. (1998)によると、間伐による成長率の促進は年輪幅の大きな、不規則な変動をもたらすと同時に、木材密度、平均仮道管長を少し低下

させる。したがって、間伐によって、顕著な材質の低下がなく、林分の成長速度が促進された。また、間伐処理によって肥大成長および材積成長は促進されたが、晩材率、容積密度数への間伐の影響は認められないとする報告もある (Koga et al., 1996)。本研究の結果はこれら既往の結果と一致していると考えられる。

### 2.3.3 早材・晩材の樹幹内半径方向の変動

早・晩材幅の樹幹内半径方向の変動パターンを Fig. 2.10 に示す。早材幅は年輪幅の樹幹内変動パターンと一致し、数年の周期で上下に振れる傾向を示した。一方、晩材幅は、早材ほど大きく上下に振れることが見られないが、年輪幅の変動に連動し、小幅の変動を示した。成長の速い S1 における早材

部は S4 に比較しかなり広い。また、成長の遅い S4 の場合、髓に接した三年輪に晩材形成が認められなかった。

早・晩材密度の樹幹内変動を Fig. 2.11 に示す。早材密度は幹径方向の変動が少なく、全体をとおしてほぼ一定になっている。これに対して晩材密度は低い値を示す髓部分から外方に向けて急激に増大した。その後 15~20 年輪からほぼ一定で推移した後、一番外側で低下する傾向を示した。

これらの図から、年輪幅と早材幅、年輪密度と晩材密度はそれぞれほぼ類似の変動パターンを示すことがわかる。Table 2.3 はすべての供試木に対して、年輪幅と早・晩材幅の間および年輪密度と早・晩材密度の間の相関分析を行った結果を示す。年輪幅と早材幅の間および年輪密度と晩材密度の間には高い相関が認められた。また、年輪幅と晩材幅の間にも比較的に高い相関が認められた。

スギとコウヨウザンについて、年輪幅と早材幅、年輪密度と早材密度は同様の変動パターンを示す報告 (Fujisawa et al., 1993; 劉ら, 1998) があり、本研究の年輪密度と晩材密度の変動が一致するという結果と異なった。これはスギおよびコウヨウザンとカラマツとの年輪構造が異なることによるものといえよう。

### 2.3.4 成長・樹齢・産地による年輪構造の相違

遺伝と環境によって林木個体の成長は異なる。そのため、木部の形成も違ってくる (加納, 1973)。

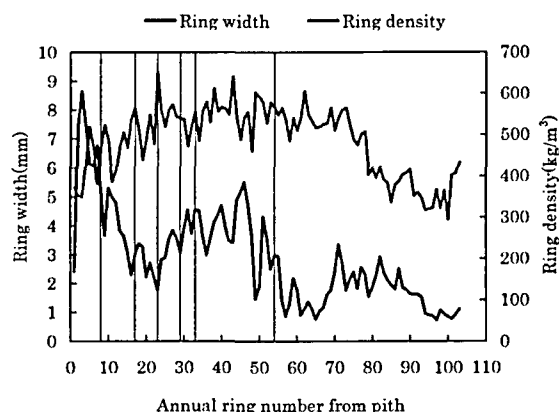


Fig. 2.9 Thinning treatment for S3. Vertical solid lines: the thinning time.

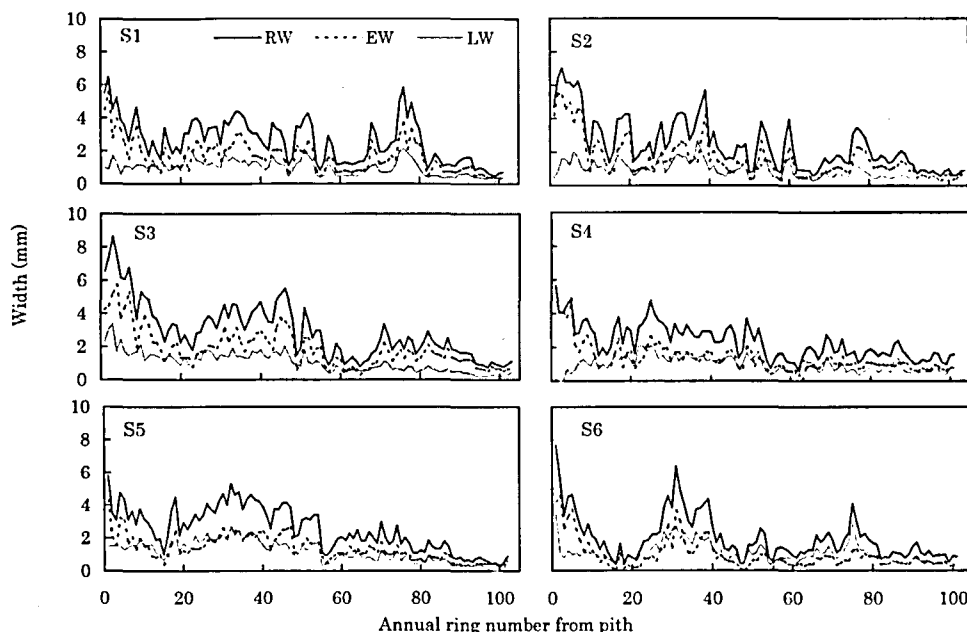


Fig. 2.10 Variation of earlywood and latewood width in the radial direction for sample trees of Saku. RW, ring width; EW, earlywood width; LW, latewood width.

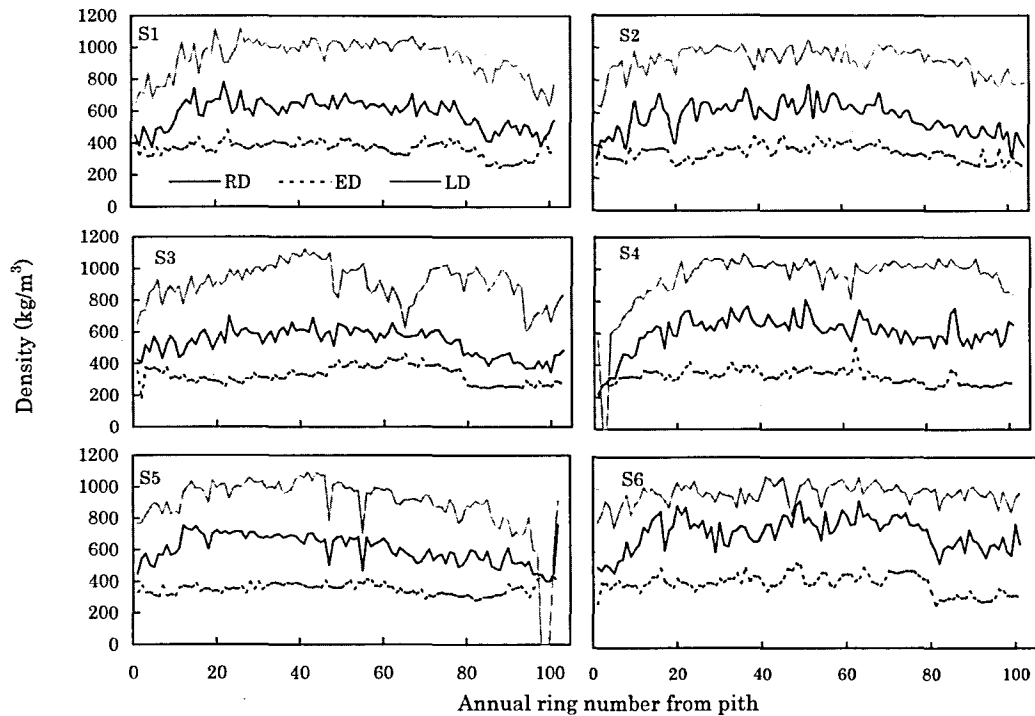


Fig. 2.11 Variation of earlywood and latewood density in the radial direction for sample trees of Saku. RD, ring density; ED, earlywood density; LD, latewood density.

Table 2.3 Correlation coefficients among annual ring indices

Sample trees	RW-EW	RW-LW	RD-ED	RD-LD
S 1	0.96**	0.81**	0.60**	0.71**
S 2	0.96**	0.78**	0.64**	0.68**
S 3	0.97**	0.90**	0.53**	0.63**
S 4	0.89**	0.51**	0.68**	0.73**
S 5	0.95**	0.93**	0.25*	0.75**
S 6	0.93**	0.93**	0.93**	0.93**
Y 1	0.82**	0.74**	0.05	0.86**
Y 2	0.95**	0.88**	0.07	0.70**
Y 3	0.96**	0.81**	0.43**	0.68**
Y 4	0.98**	0.86**	0.20	0.56**
Y 5	0.99**	0.89**	0.07	0.77**
Y 6	0.99**	0.90**	0.30*	0.71**
T 1	0.94**	0.34**	0.49**	0.53**
T 2	0.93**	0.72**	0.58**	0.67**
T 3	0.96**	0.73**	0.07	0.69**
T 4	0.95**	0.69**	0.15	0.79**
T 5	0.87**	0.74**	0.02	0.56**
T 6	0.97**	0.90**	0.34*	0.44**

\*Significant at 5% level; \*\*significant at 1% level. RW, annual ring width; EW, earlywood width; LW, latewood width; RD, ring density; ED, earlywood density; LD, latewood density.

ここでは遺伝と環境に影響された結果、すなわち肥大成長の違いによる年輪構造の差異を調べる。

Table 2.4には各供試木の年輪構造を示す指標の平均値を示した。各産地において成長の速い供試木(1, 2, 3)と遅い供試木(4, 5, 6)を分けて示した。年輪幅は、Fig. 2.12に示したように、当然のことながら成長の速い供試木のほうが広い。しかし、年輪密度については、Fig. 2.13に示されたように、必ずしも成長の遅い供試木のほうが大きいとは言いきれず、大きいものもあれば、低いものもある。

成長の速い供試木と遅い供試木の両グループを比較すると、年輪密度、晩材率あるいは早・晩材密度は顕著な差異を示さなかった。ただし、成長の速い供試木は局部的に年輪幅の変動が大きく、その部分で密度が低下することがあり、材質的には不均一であると考えられる。

Fig. 2.14は樹齢の異なる供試木の年輪構造指標の変動を示す。産地・樹齢の異なる供試木であっても、年輪幅、年輪密度の樹幹内半径方向の変動パターンは、多少の相違を示すけれどもほぼ一致している。

以上のように供試木の樹齢、産地が異なるにも関わらず、年輪幅、年輪密度などの年輪構造指標が樹幹内で同様の変動パターンを示した。また、同一樹齢の供試木において、肥大成長の速い供試木と遅い

Table 2.4 Average ring components for each sample trees

Sample tree No	Ring width (mm)	Ring density (kg/m <sup>3</sup> )	Percentage of latewood(%)	Earlywood width(mm)	Latewood width(mm)	Earlywood density (kg/m <sup>3</sup> )	Latewood density (kg/m <sup>3</sup> )
S1	2.61	524	37.1	1.66	0.95	357	882
S2	2.37	558	39.5	1.49	0.88	383	903
S3	2.75	496	34.6	1.78	0.97	340	875
S4	1.87	535	37.5	1.18	0.69	369	888
S5	2.05	514	41.1	1.18	0.86	320	842
S6	1.90	600	46.1	1.07	0.82	406	887
Y1	3.00	530	30.7	1.88	1.11	363	909
Y2	2.78	502	34.2	1.97	0.81	329	923
Y3	2.76	515	37.6	1.77	1.00	344	886
Y4	2.68	517	38.6	1.71	0.98	282	915
Y5	2.54	521	36.2	1.68	0.87	356	903
Y6	2.43	566	40.7	1.52	0.91	384	894
T1	2.72	547	37.1	1.74	0.93	380	830
T2	1.67	566	42.4	1.03	0.63	388	826
T3	4.01	510	32.9	2.77	1.25	335	848
T4	4.13	503	32.9	2.92	1.21	338	837
T5	3.21	496	33.0	2.25	0.95	317	858
T6	2.48	551	40.1	1.57	0.93	385	835

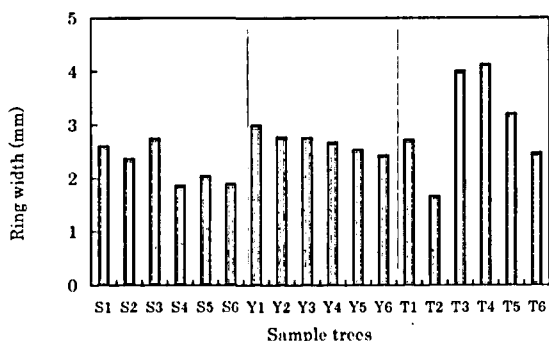


Fig. 2.12 Average ring width of all sample trees.

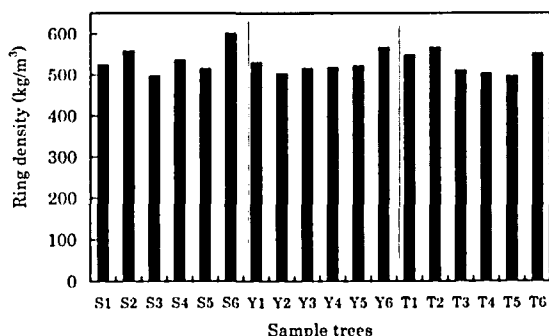


Fig. 2.13 Average ring density of all sample trees.

供試木の間、平均年輪幅の差異がはっきりと認められたが、年輪密度については一定の傾向が認められなかった。

Zhang (1998) は、black spruce (*Picea mariana*) について、樹齢の増加に伴って、年輪密度と

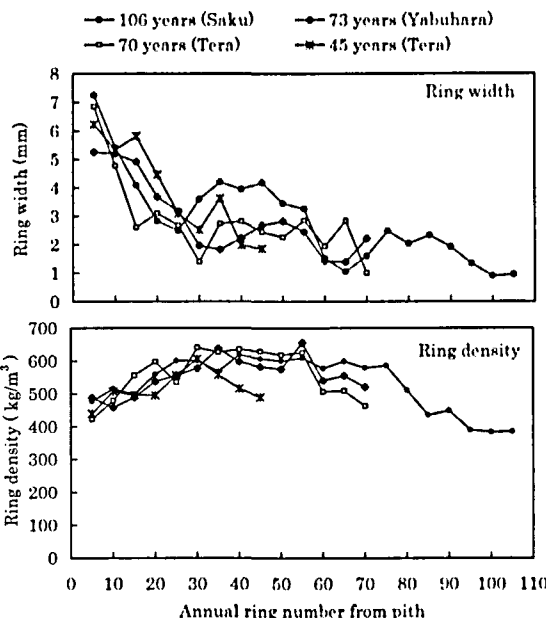


Fig. 2.14 Variation of ring width and density in radial direction for various tree ages.

ほかの材質指標の相関が小さくなると報告した。このことは、樹齢が高くなると、成長がよくても密度に悪い影響が現れないことを示している。本研究の結果は、Zhangの結果を裏付けるものである。

#### 2.4 まとめ

カラマツ造林木の年輪構造について、得られた知見は以下のとおりである。

1. 年輪幅は、髓付近で広く、外側に向かって狭くなり、15~20年輪以降はほぼ安定する。年毎の年輪幅のばらつきが大きく、肥大成長の速い供試木ほどその傾向が強く現れる。
2. 年輪密度は、髓付近では低く、外側に向かって上昇し、15~20年輪後は安定する。しかし、辺材部では明らかに低下した。
3. 辺材部に含まれる年輪数は、成長の速い供試木ほど少なく、高樹齢木になるほど多い。
4. 年輪幅に及ぼす間伐の影響は大きかったが、年輪密度に対しての影響は顕著でなかった。
5. 早材幅の樹幹内半径方向の変動は年輪幅の変動と一致し、一方、晩材密度と年輪密度の樹幹内変動パターンは良い一致を示した。
6. 異なる樹齢、産地の供試木において、年輪幅および年輪密度が樹幹内で同様の変動パターンを示したことから、106年生カラマツ造林木でも成長後期に明らかな成長低下が認められなかった。以上の結果は、カラマツ人工林施業として、肥大成長を促進しながら、長伐期に移行する方向性を示唆している。

### 第3章 カラマツ造林木の未成熟材と成熟材の特徴

#### 3.1 はじめに

前章において、異なる樹齢、産地の供試木の間、年輪幅および年輪密度が樹幹内で同様の変動パターンを示すことが認められた。年輪幅および年輪密度は髓付近の材部で大きく変動し、15~20年以降安定する傾向を示した。これらの結果から、変動の大きい髓周辺部と安定した材質を示す外周部を区分して、考察すべきであると考えた。

このことについて、Zobel et al. (1998) は、樹幹材の材質を論ずるに当たって、樹幹内の材質指標の変動から、髓周辺の材部と外側の材部との二つの領域に分けて取り扱うべきだと指摘している。すなわち、樹幹内の組織構造や物理的性質および化学的性質などの幹径方向の変動パターンと樹齢との関連を重視して、これらの性質が樹齢の増加に伴って大きく変動する髓周辺の木部を未成熟材、その外周部に形成されたやや安定した木部を成熟材と定義し区別している(深沢, 1967; 太田, 1968)。未成熟材と成熟材の特徴の詳細を明らかにすることは、森林施業によって材質の安定化を図るうえで、重要になってきている(Zobel et al., 1989)。

これまで、未成熟材と成熟材の差異および未成熟材の材質に関して多くの研究がなされてきており(Shepard et al., 1992; 塩倉, 1981b; Wang et al., 1992)、多くの結論が導き出されている。しかし、年輪構造指標と成長速度の関係を未成熟材と成熟材を区分することによって扱った研究は少ない。

また、成熟材部における年輪幅と密度の関係について論争を呼んでいる。古賀ら(1992)は、スギとカラマツについて、成熟材部で容積密度と年輪幅の関係に相関はみられないと指摘しているが、小泉ら(1987b)と高田ら(1992b)は、樹幹の外周部では、年輪幅の増加に伴って樹心部と同様に密度が減

少すると報告している。しかしながら、これらの研究に用いられたカラマツ供試木は、若齢木であり、特に間伐木が多かったため、検討対象である成熟材部が少なく、出された結論の信頼性には疑問がある。

そこで、本章では、高樹齢のカラマツ造林木を供試木として、未成熟材と成熟材の区分方法を検討するとともに、未成熟材と成熟材における年輪構造指標の差異を調べる。

#### 3.2 材料と方法

供試材料は前章で述べた佐久産106年生と蕨原産73年生のカラマツ造林木である。年輪構造のデータは前章の結果をそのまま用いた。

仮道管長の測定は、高さ別に、髓から樹皮まで偶数年輪について測定した。年輪サンプルは、シュルツェ氏液に2~3日浸漬して解繊し、木材構成要素の解離プレバートを作成し、万能投影機を用いて、晩材仮道管の長さを測定した。1年輪当たり約60本を測定し、平均値を以下の解析に用いた。

未成熟材と成熟材を区分するにあたり、様々な方法が使われているが(深沢, 1967; Bendsten et al., 1986; Shepard et al., 1992; Evans et al., 2000)、本研究では、仮道管長および年輪密度による未成熟材と成熟材の区分を試みた。仮道管長を区分基準とする方法(塩倉, 1982)について、仮道管長の半径方向の変動を対数式で近似し、それに基づいて仮道管長の年増加率を計算した。そして、仮道管長の年増加率が減少して1%に達した点を未成熟材と成熟材の境界と定義した。

#### 3.3 結果および考察

##### 3.3.1 仮道管長による未成熟材と成熟材の区分

Figs. 3.1, 3.2に佐久および蕨原産材の胸高部位



の仮道管長データを用いて、供試木ごとの樹幹内半径方向の分布を示した。すべての供試木において、仮道管長は髓付近で短く、その後急速に増加し、15~20年輪前後から、増加率が徐々に減少し、次第に安定する傾向を示す。これは塩倉 (1982), Seth (1981), Kucera (1994) らの報告による未成熟材の主な特徴と同様であった。

また、Figs. 3.1, 3.2に示されるように、産地内の6本の供試木は一致した分布パターンを示し、年輪幅の広い3個体と狭い3個体の間に、仮道管長の違いは認められなかったことから、各産地における供試木6本の仮道管長の平均値を用いた。そして、塩倉 (1982) と同様に仮道管長を基準とする方法で、未成熟材と成熟材を区分した。

Figs. 3.3, 3.4に、各産地の仮道管長の樹齢に伴う変動を示した。そして、対数式を用いて仮道管長の変動を近似すると、高い相関関係を示したことから、対数方程式を利用して仮道管長の年増加率の変動曲線を求めた。この増加率の樹幹内分布によると、両方の人工林から得られた供試木は、樹齢18年で仮道管長の年増加率が1%に達している。したがって、この18年輪が、仮道管長で区分する場合の未成熟材

と成熟材の境界と考えられる。

### 3.3.2 年輪密度による未成熟材と成熟材の区分

はじめに、未成熟材と成熟材の境界年を推定するため、年輪密度に対して適用したセグメント回帰法 (Tasissa et al., 1998) について簡単に述べる。セグメント回帰法においては、まず、仮に成熟期と未成熟期をセグメントに分けて、成熟期セグメントの回帰直線の傾きが0から有意に異ならず、かつ、未成熟期のセグメントをフィットさせて、この傾きが0から有意に異なるようなセグメント区分を拾い出した。次に、未成熟材データと成熟材データを再度組み合わせ、両者の回帰残差の和を最小にする区分のものを選んだ。そして、この2つのセグメントの交点を未成熟材と成熟材の境界年の推定値として採用した。

さて、第2章で佐久および葦原の各供試木における年輪密度の樹幹内変動を詳細に検討した。その結果、各産地内の供試木は半径方向において、年輪密度が髓付近で低く、外側に向かって急に増加し、

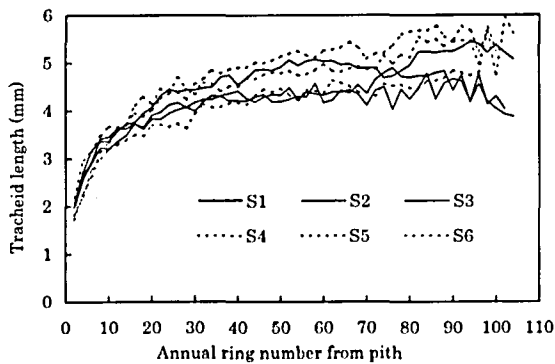


Fig. 3.1 Variation of tracheid length in the radial direction for each sample tree of Saku.

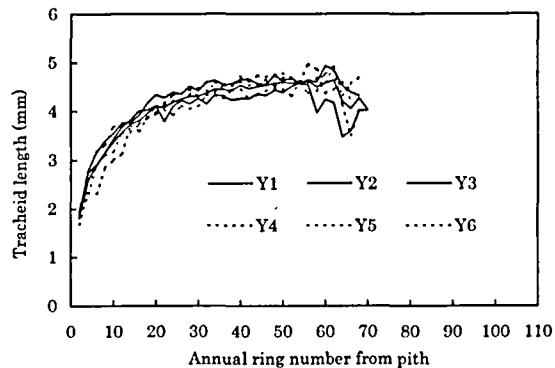


Fig. 3.2 Variation of tracheid length in the radial direction for each sample tree of Yabuhara.

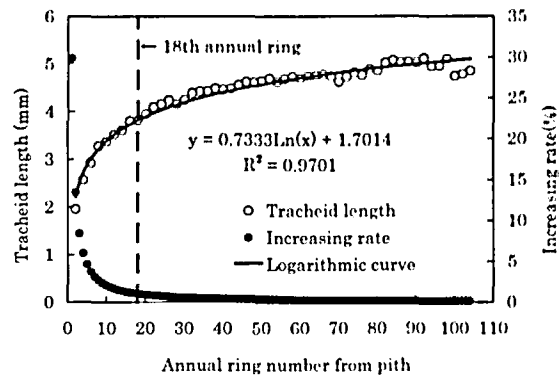


Fig. 3.3 Variation of tracheid length and its increasing rate in radial direction for Saku plantation (mean value of six sample trees).

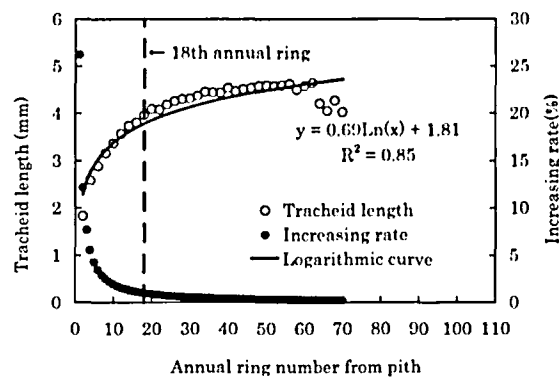


Fig. 3.4 Variation of tracheid length and its increasing rate in radial direction for Yabuhara plantation (mean value of six sample trees).

15~20年輪後ではほぼ安定する共通の傾向を示した。そこで、それぞれ6本の供試木の平均値を算出し、各生育地における年輪密度の樹幹内半径方向分布の代表値とした。

Fig. 3.5に示すように、佐久産供試木では、平均年輪密度は15年まで急激に増加して、その後安定し、70年まで年数の増加に対してほとんど変化せず、そのあと低下した。このような辺材部の密度の低下は、未成熟材と成熟材を区分する際、誤差を生じるので、そのデータを成熟期セグメントから取り除いた。また、密度を基準とする区分において、通常、未成熟材と成熟材の境界年は年輪密度が一定になり始める年と考えられている (Tasissa et al., 1998)。

以上のことに基づいて、セグメント回帰法を用いて、未成熟材と成熟材の区分を試みた。その結果、未成熟材と成熟材の境界は15年となった。この結果はこれまでのほとんどの報告と一致している (重松, 1990b; 塩倉, 1972a)。

蕨原産供試木は、平均年輪密度は佐久産供試木と同様の変動傾向を示したが (Fig. 3.6)、セグメント回帰直線が21年で交差しており、佐久産供試木と比較して成熟期が6年遅くなった。この遅延の理由は明白ではないが、Shepard et al. (1992) は、Red pine (*Pinus resinosa*) について、林分別で12年の成熟期の差異がみられることから、林分或いは産地によって、未成熟材と成熟材の境が異なるとしている。このような報告結果を考え合わせると、本研究の結果も産地の違いによるものと考えられる。

未成熟材の範囲を推定する場合、区分基準として採用する材質指標の違いによって差異がみられることはこれまででも指摘されてきた (Seth, 1981; Zobel et al., 1998)。ここでの結果も同様であり、仮道管長を区分基準として得られた境界年の推定値は、年輪密度を区分基準として得られたものと異なった

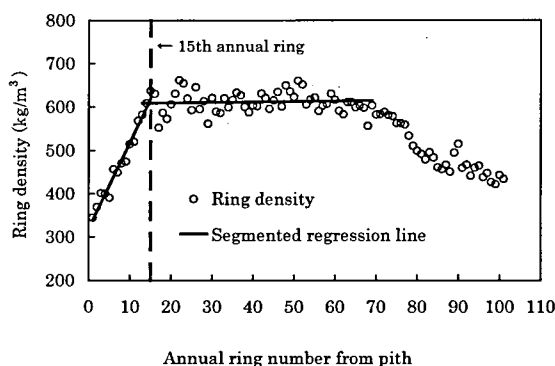


Fig. 3.5 Variation of ring density in radial direction for Saku plantation (mean value of six sample trees).

(佐久産で-3年、蕨原産で+3年)。

年輪密度は木材の強度と高い相関を持っていること (中戸, 1985) により、実用的には年輪密度に基づく未成熟材の推定はより妥当だと思われることから、本研究では、佐久産供試木については15年、蕨原産供試木については21年を未成熟材と成熟材の境界として用いることにした。

このように得られた区分樹齢を用いて、明確に未成熟材と成熟材を区分した。以下で、この区分結果を利用し、肥大成長速度 (年輪幅で表わす) とほかの年輪構造指標との関係を、両材部に分けて検討する。

### 3.3.3 肥大成長速度と年輪構造指標の関係

針葉樹の未成熟材と成熟材についての報告によると、両材部の間では年輪幅、密度、晩材率、軸方向の収縮率などの差異が顕著である (加納, 1973; Zobel, 1998) が、ここでは主に両材部における肥大成長速度 (年輪幅で表わす) と年輪指標間の関係を検討する。

佐久産供試木の年輪幅と早材幅、晩材幅の相関関係を Fig. 3.7に示す。未成熟材部では、年輪幅と早材幅との間に高い相関関係 ( $r=0.98$ ) が見られたが、年輪幅と晩材幅との相関はやや低い ( $r=0.64$ )。

一方、成熟材部では年輪幅と早材幅、晩材幅ともに高い相関関係を示した。このことについて、Fig. 3.8に示すように、未成熟材部では、年輪幅の増加に伴って、早材幅が大きく増加するが、晩材幅の増加は顕著ではない。成熟材部では、年輪幅の増加に伴って早材幅と晩材幅ともに増加する。

佐久産供試木の未成熟材と成熟材における年輪幅と年輪密度の関係を Fig. 3.9に示す。未成熟材部では年輪幅と密度との間に負の相関が認められたが、

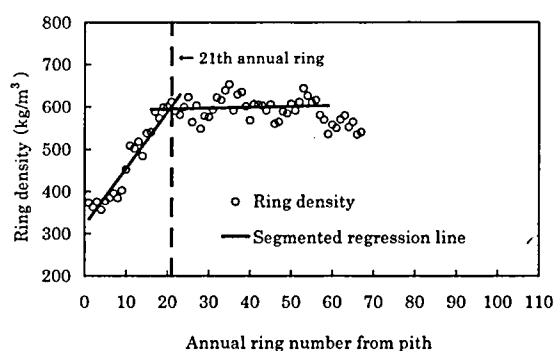


Fig. 3.6 Variation of ring density in radial direction for Yabuhara plantation (mean value of six sample trees).

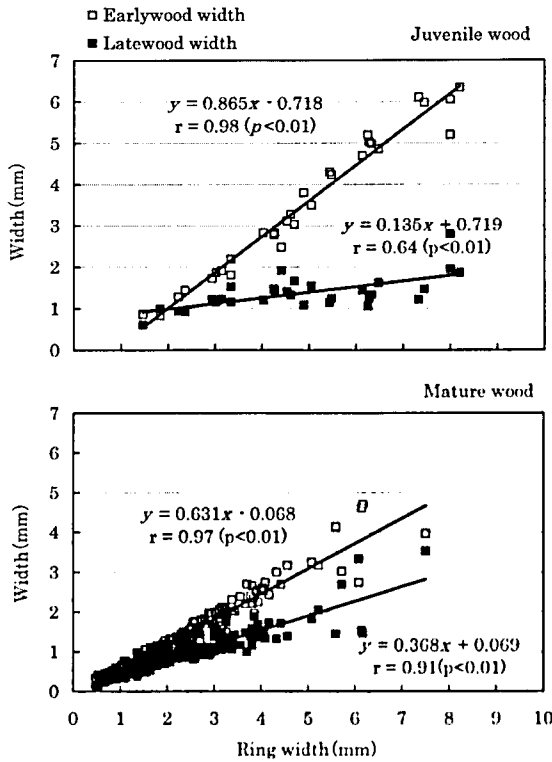


Fig. 3.7 Correlation between ring width and earlywood width, latewood width both in juvenile and mature wood. Sample tree number is S2.

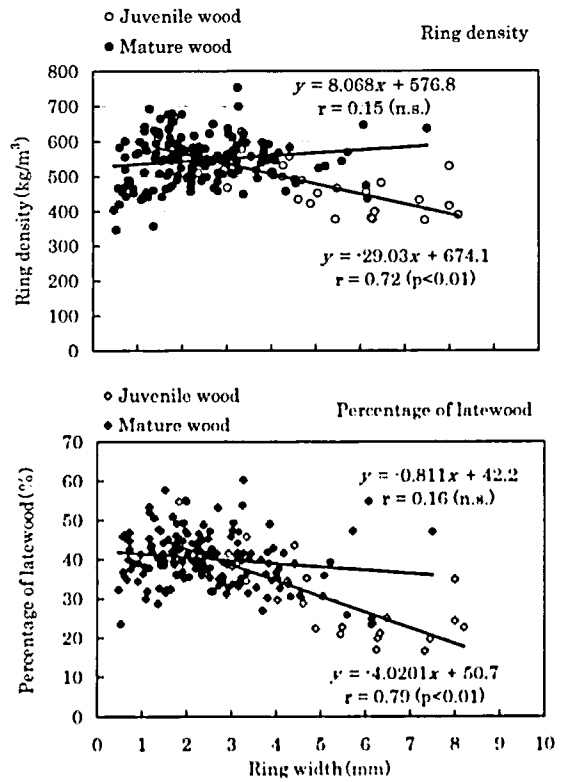


Fig. 3.9 Correlation between ring width and ring density, percentage of latewood. Sample tree number is S2.

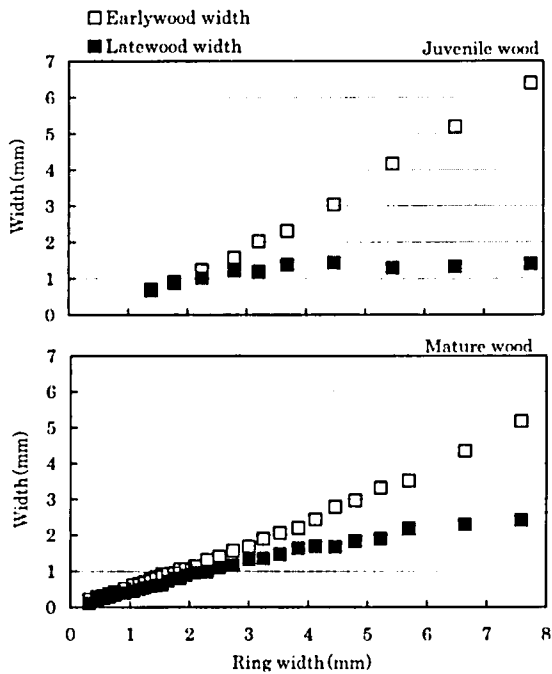


Fig. 3.8 Relation between ring width and earlywood width, latewood width both in juvenile and mature wood for Saku plantation.

成熟材部では、両者の相関は認められなかった。同図には、佐久産供試木の年輪幅と晩材率の関係も示している。同様に、未成熟材部では年輪幅と晩材率

は負の相関を示したが、成熟材部では無相関であった。

このような相関関係について、Fig. 3.10に示したように、未成熟材部では年輪幅の増加に伴って、年輪密度および晩材率は減少する。成熟材部では年輪幅が1~1.5mm以下の場合、年輪密度および晩材率が年輪幅の増加に伴い増加するが、それ以上では、年輪幅に関わらず年輪密度および晩材率がほぼ一定であることを示している。

このような年輪密度、晩材率と成長速度の関係は、未成熟材と成熟材における年輪幅と早・晩材幅の関係 (Fig. 3.7, Fig. 3.8) の違いに起因していると結論づけられる。

数原産の73年生供試木においても、Fig. 3.11および Fig. 3.12に示したように、未成熟材部と成熟材部における年輪幅と早・晩材幅の関係が異なった。これに基づいて、年輪幅と年輪密度および晩材率の関係 (Fig. 3.13, Fig. 3.14) も未成熟材部と成熟材部によって異なることが分かった。

古賀ら (1992) は同様に、スギ、カラマツの若齢木について、成熟材部では年輪幅と容積密度数、晩材率、仮道管長との有意な相関関係は認められないと報告している。また、北海道においてカラマツ精

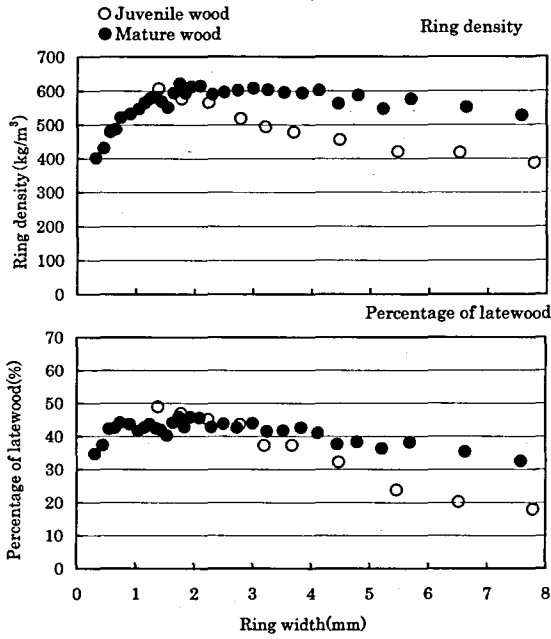


Fig. 3.10 Relation between ring width and ring density, percentage of latewood for Saku plantation.

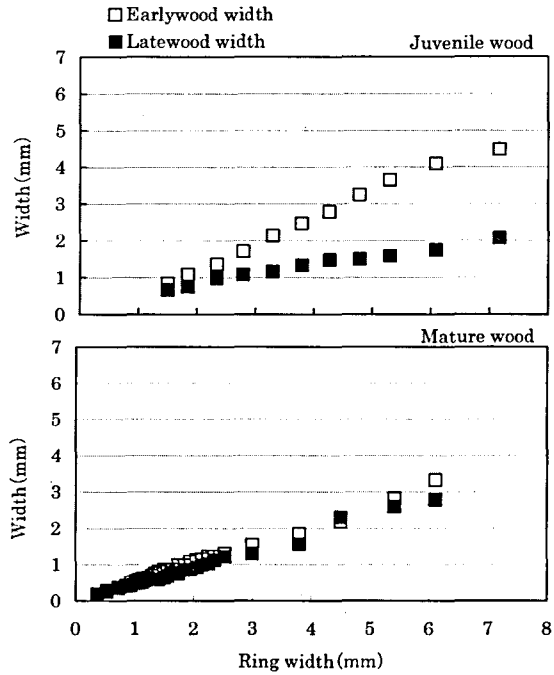


Fig. 3.12 Relation between ring width and earlywood width, latewood width both in juvenile (a) and mature wood (b) for Yabuhara plantation.

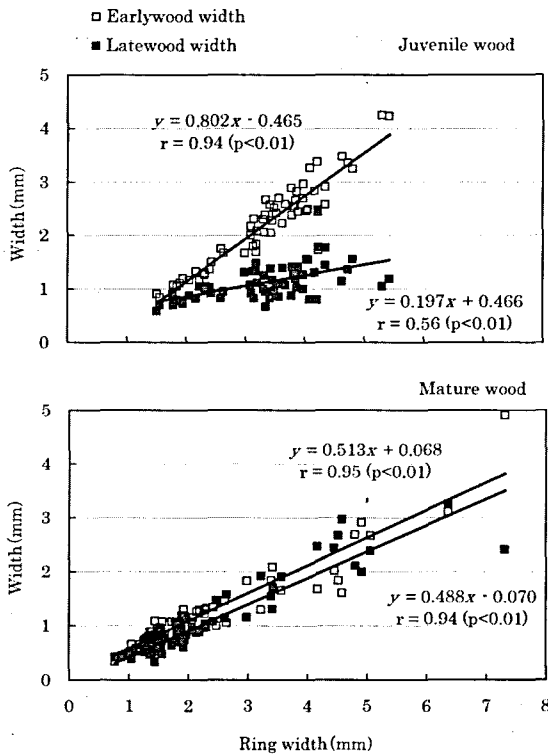


Fig. 3.11 Correlation between ring width and earlywood width, latewood width both in juvenile and mature wood. Sample tree number is Y3.

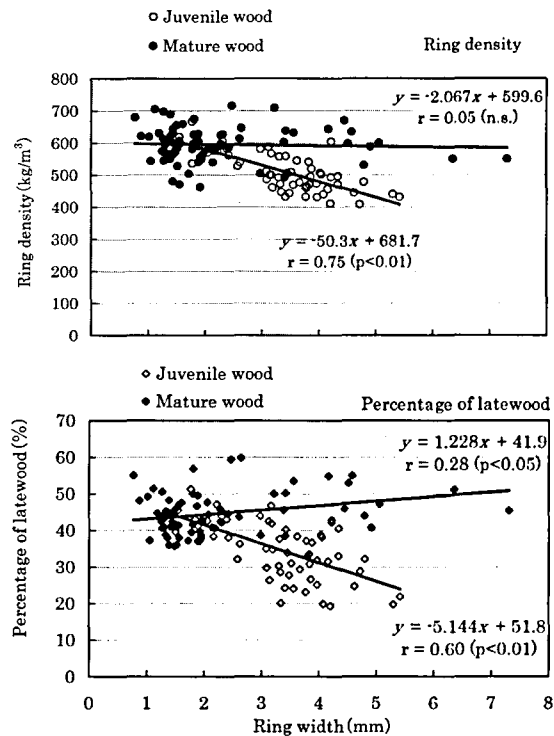


Fig. 3.13 Correlation between ring width and ring density, percentage of latewood. Sample tree number is Y3.

英樹のつぎ木クロウンの肥大成長と材質の関係を調べた報告では(小泉ら, 1990a), 成熟材部の平均年輪幅と容積密度数のクロウ平均間に相関が認められない。

既往の報告を踏まえ, 本研究の結果から, カラマツ材の密度に及ぼす成長速度の影響は未成熟材部と成熟材部で異なり, 未成熟材部で年輪幅が広がると, 密度が低下するが, 成熟材部では年輪幅が広く

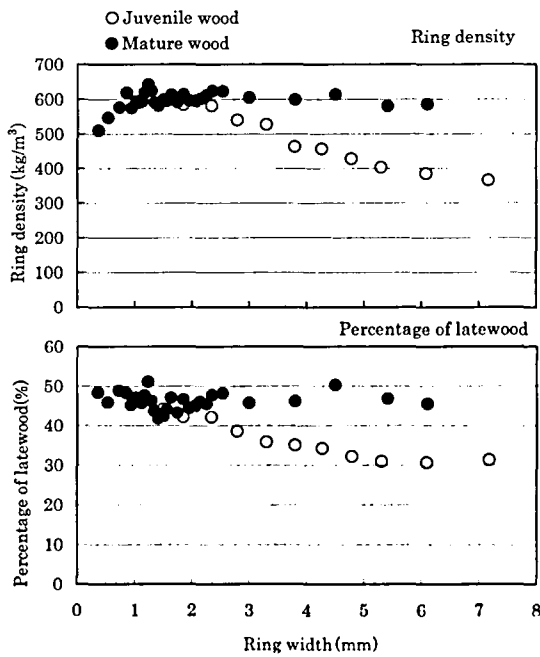


Fig. 3.14 Relation between ring width and a: ring density, b: percentage of latewood for Yabuhara plantation.

ても、密度が落ちない。逆に年輪幅が極端に狭くなると、密度が低下する。したがって、未成熟期に旺盛な肥大成長で低密度材を形成するが、成熟期での速い成長は密度を低下させないと結論付けられる。

以上のことから、成長と材質の関係を検討する場合に未成熟材と成熟材を区別することが必要であることが明らかになった。また、成熟樹齢に達し、さらに、高樹齢木においても、速い肥大成長で材の密度が低下しないことが確認されたことは、今後のカラマツ施業を考える上で、きわめて重要な意味を持つと考える。

### 第4章 カラマツ造林木の強度性能

#### 4.1 はじめに

現在、長野県を中心としてカラマツ材の利用が促進されつつある。

集成材ラミナとしてのひき板をはじめとして、壁板や床板への利用が進められている。とくに大断面集成材のラミナとしてのひき板の場合、あらかじめグレーディングマシンで等級区分されて、適材適所に配置されている。

このようなひき板レベルの寸法を持った実大材への実際的な利用を考える時、第2、3章で検討した年輪構造レベルでの未成熟材と成熟材の区分、あるいは両者の材質に関して得られた結論がどの程度有効なのかは明らかではない。

#### 3.4 まとめ

高樹齢カラマツ供試木について、未成熟材と成熟材を区分し、年輪構造指標と肥大成長の関係を考察した。得られた結果は以下のとおりである。

1. 樹齢の増加に伴う仮道管長の半径方向の変動が対数式で表せることが確認された。また、仮道管長を区分基準とした方法を用いて、未成熟材と成熟材を区分すると、佐久および蕨原人工林においては、いずれも18年が未成熟材と成熟材の境界と判定された。
2. 年輪密度を区分基準とする未成熟材と成熟材の境界は、セグメント回帰法による解析から、佐久産は15年、蕨原産は21年と判定された。未成熟材と成熟材の判定に当たり、仮道管長と年輪密度に差異があることが明らかになった。また、同じ区分基準に基づいても、未成熟材から成熟材へ移行する樹齢は、産地によって異なる可能性が示された。
3. 年輪密度を区分基準として、未成熟材と成熟材の境界を判定し、成長速度と年輪密度の関係を検討した結果、未成熟材部では高い成長速度が材の密度低下をもたらすのに対して、成熟材部では、成長速度の増加に伴って晩材幅も増加し、結果として密度と晩材率は低下しないことが明らかとなった。

以上のことから、成熟齢に達したカラマツ人工林に対し、間伐などの施業によって、肥大成長を促進しても、材質的な低下が起きないことが示された。したがって、成熟齢以後の育林においては、積極的に肥大成長を図るべきだと考える。

年輪構造レベルで見ると、15~21年輪から成熟材の形成が始まることを示されたが、だら挽きしたひき板内には未成熟材部と成熟材部が共存する。ひき板に含まれる両材部の比率は、産地、さらには個体によって異なり、節や繊維傾斜の影響を強くうけるであろう。

第4章では、ひき板の寸法レベルに視点を移して、カラマツ造林木の強度性能を検討し、ひき板の強度が安定するために必要な年数を推定することを目的とする。そのために、丸太から連続的に挽いた板材の引張試験を行い、カラマツ造林木板材の半径方向における強度特性の変動を明らかにするとともに、試験終了後の板材の無欠点部から得た小試験体の強

度との比較を行った。

## 4.2 材料と方法

### 4.2.1 実験材料

87年生カラマツ造林木を長野県北部の戸隠山から6本を採取した。供試木の概要は第2章のTable 2.1に示している。供試木ごとに、地上高2.2mから材長2mの丸太1本を玉切りし、Fig. 4.1に示すように、この丸太をだら挽きして板材を連続的に採取した。この板材の寸法は、厚さ約2.5cm、幅約15cm、長さ約200cmであった。

### 4.2.2 基礎材質指標の測定

まず、板材を挽いた順に元の形にそろえて、Fig. 4.2に示すように、木口で板材の髄から中心までの年輪数と距離を測定した。供試木の樹齢は87年生であったが、地上高4.2mの位置における供試木の木口面で数えられた年輪数は60年以下であった。

次いで、橋爪ら(1997)が提案した方法を用いて、平均年輪幅(Fig. 4.2)と密度を求めた。また、引張試験で想定されるスパン内にある板材各面について直径5mm以上の節の個数、位置、大きさを測定した。これらの測定値から最大集中節径比、最大単独節径比、最大材縁節径比を求めた(林ら、1997)。

### 4.2.3 ヤング係数と引張り強さの測定

板材の動的ヤング係数を縦振動法(Sobue, 1986; 有馬ら, 1990)により測定した。引張試験は、構造用集成材の日本農林規格(農林水産省, 1996)に準じて、実大ひき板用引張試験機(飯田工業(株)製NET-501E)を用いて行った。試験スパンは100cm

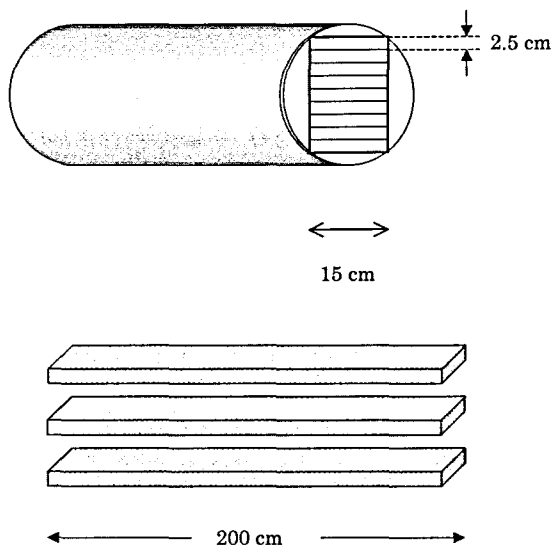


Fig. 4.1 Sawing method of the lumbers.

で、破壊時間は約3~5分である。破壊後、破壊部位の近傍で小サンプルを採取し、全乾法により含水率を測定したが、その平均値は13.8%であった。

引張試験後、各試験体の非破壊部からランダムに無欠点小試験体を3体ずつ採取した。無欠点小試験体の髄からの年輪数は板材のもの一致すると仮定して、無欠点小試験体が板材の無欠点部を代表するものとした。各無欠点小試験体の動的ヤング係数を縦振動法により測定した。そして、JIS規格Z2112(日本規格協会, 1994)に従って縦引張強度試験体を作製した。Fig. 4.3に示すように、各試験体は、長さ390mm、幅23mm、グリップ部での厚さ15mm、中心部での厚さ5mmである。このように作成した試験片を供試し、万能試験機を用いて引張試験を行った。

## 4.3 結果および考察

### 4.3.1 板材の基礎材質指標

年輪幅(RW)、密度(D)、動的ヤング係数( $E_r$ )と引張り強さ(TS)の樹幹内分布をFig. 4.4に示す。全ての供試木において、髄から樹皮側に向けて、密度、ヤング係数、および引張り強さは増加傾向を示し、年輪幅は減少傾向を示した。全ての材質指標について樹幹内の分布が著しく変動して

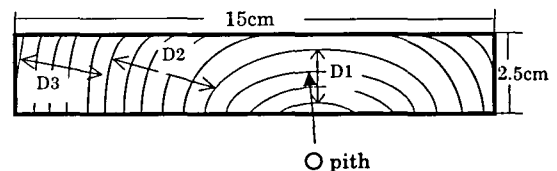


Fig. 4.2 Measuring method of ring width, and the ring numbers from pith. The ring numbers from pith of the lumbers were represented by ring numbers from pith to the ring located in the center of lumber. Mean ring width =  $(D1 + D2 + D3) / (\text{ring numbers contained in } D1, D2, \text{ and } D3)$ .

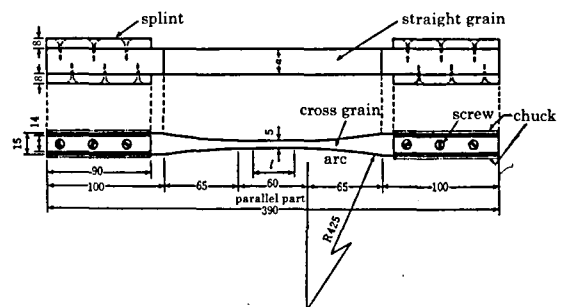


Fig. 4.3 Diagrams of small clear specimen based on JIS Z2112.  
unit: mm

いた。ヤング係数と引張り強さの樹幹内の分布傾向はよく似ているが、ヤング係数の方が引張り強さより樹幹内のばらつきが小さい。

Table 4.1に供試木別の板材の年輪幅、密度、ヤング係数、引張り強さの平均値を示す。各供試木におけるヤング係数と引張り強さの樹幹内半径方向の分布は同じ傾向 (Fig. 4.4) を示したが、供試木の間に変動が認められた。そこで、供試木間の相違を

検討するために、分散分析を行った (Table 4.1)。その結果、供試木間の平均年輪幅、密度、ヤング係数に顕著な差異が認められたが、引張り強さにおいては供試木間の差異が認められなかった。このような結果から実大板材の引張り強さはほかの材質指標より、個体間の変動が小さいと言える。

材質指標の樹幹内の変動について、Zobel et al. (1989) は、未成熟材と成熟材の特徴などのシステムの要因および節などのランダム的要因によるものと指摘した。また、ヤング係数は引張り強さより樹幹内の変動が小さいことから、ヤング係数に及ぼす節の影響が小さいと考えられる (有馬ら, 1990)。本研究で得られた動的ヤング係数と引張り強さの平均値が、門脇ら (1998) の市販材を対象とした結果と比較して高くなっていることは、本研究で使われた供試木が高樹齢のものであり、樹幹内に含まれた成熟材の量が多いことによるものと考えられる。

以上のことから、樹幹内における板材の平均年輪幅は髄から樹皮に向かって低下する傾向を示したが、密度、ヤング係数、引張り強さは増加する傾向を示した。未成熟材と成熟材および節などの影響によって、材質指標の樹幹内変動が大きい。一方、供試木間に共通して、各材質指標が同様な樹幹内分布を示すことがわかった。

4.3.2 無欠点小試験体の基礎材質指標

板材試験体の非破壊部から採取した無欠点小試験体の引張試験結果を Table 4.2に示す。供試木間で、平均年輪幅、密度、動的ヤング係数、および引張り強さに有意差はみられなかった。引張り強さの最低値は一般的に知られている値 (国立林業試験場, 1973) の83.3MPaと比較して高かった。

各供試木の動的ヤング係数と引張り強さの樹幹内分布を Fig. 4.5に示す。個体間に測定値の差はあるものの、樹齢の増加に伴う動的ヤング係数と引張り

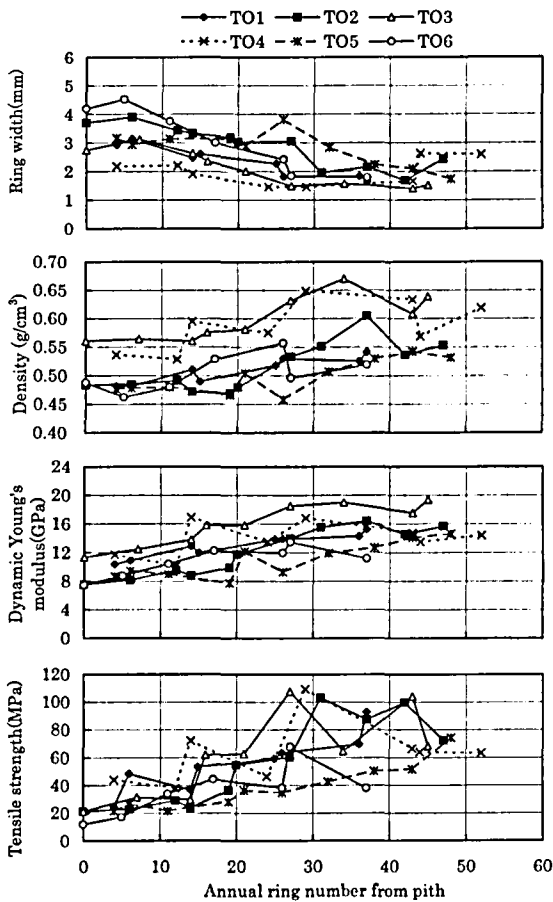


Fig. 4.4 Variation of ring width, density, dynamic Young's modulus and tensile strength of the lumbers with annual ring number from pith for six sample trees.

Table 4.1 Mean values of physical and mechanical properties of lumber for each sample tree and results of variance analyses

Variables	Sample trees						F. values
	TO.1	TO.2	TO.3	TO.4	TO.5	TO.6	
RW (mm)	2.34	2.98	2.20	2.03	2.83	3.28	4.71**
D (g/cm³)	0.51	0.51	0.60	0.58	0.50	0.50	14.59**
E <sub>r</sub> (GPa)	12.9	11.7	15.6	13.7	10.9	10.7	5.30**
TS (MPa)	56.1	52.9	58.3	60.8	37.7	34.7	2.19

RW, ring width; D, density; E<sub>r</sub>, dynamic Young's modulus; TS, tensile strength; \*\* significant at 1% level.

Table 4.2 Mean values of physical and mechanical properties of small clear specimens for each sample tree

Variables	Sample trees					
	NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5	NO.6
RW(mm)	2.47	2.7	2.16	1.68	2.93	3.08
D (g/cm <sup>3</sup> )	0.51	0.52	0.59	0.59	0.48	0.50
E <sub>r</sub> (GPa)	13.5	12.7	16.4	15.5	10.8	12.1
TS (MPa)	114.9	93.5	122.9	137.4	99.2	88.0

RW, ring width; D, density; E<sub>r</sub>, dynamic Young's modulus; TS, tensile strength.

強さの樹幹内半径方向の分布は、樹心から外側へ向かって増加する傾向を示した。

無欠点小試験体のヤング係数と引張り強さの樹幹内分布は板材と同様であり、すべての供試木において同様な傾向を示した。

#### 4.3.3 板材と無欠点小試験体の強度特性の関係

Fig. 4.4および Fig. 4.5に示したように、全ての供試木において樹幹内半径方向の動的ヤング係数と引張り強さの変動パターンが同様であることが確認されたので、6本の供試木の平均値を用いて、板材と無欠点小試験体の樹幹内同一部位での動的ヤング係数と引張り強さを比較した。Fig. 4.6に示すように、無欠点小試験体の動的ヤング係数は常に板材より高い。しかしながら、無欠点小試験体の平均値は13.4GPa、板材は12.5GPaで7%低いのみであり、両者間に著しい差はなかった。

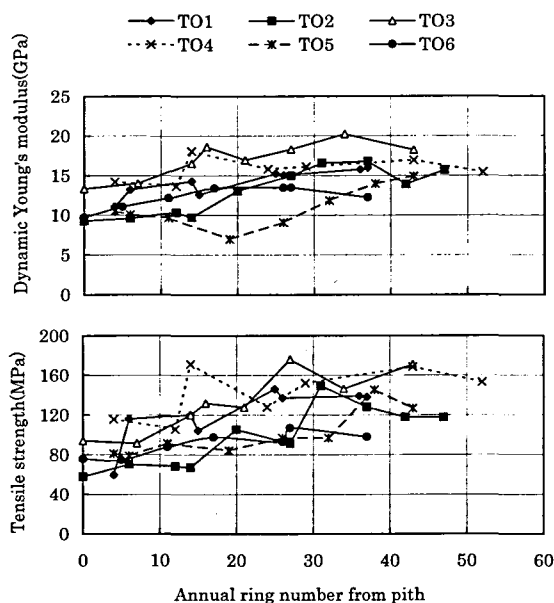


Fig. 4.5 Variation of dynamic Young's modulus and tensile strength of small clear specimens with annual ring number from pith to bark for six sample trees.

一方、引張り強さにおいては、無欠点小試験体と板材との間で大きな差が認められた。無欠点小試験体の平均値は108.9MPa、板材は47.7MPaで、56%低くなっている。樹幹内半径方向の分布においては、ヤング係数と引張り強さの両者に共通して、髄から外側に向けて急激に増加した後、30年輪ぐらいからはわずかに増加する傾向が認められた。

そこで、動的ヤング係数と引張り強さについて、髄からの年輪数ごとに板材と無欠点小試験体の比を検討した。Fig. 4.7に示したように、板材と無欠点小試験体のヤング係数比は半径方向の変動が小さいのに対して、引張り強さにおけるこの比は、約30年までは増加傾向を示し、それ以降はほぼ一定になる傾向を示した。

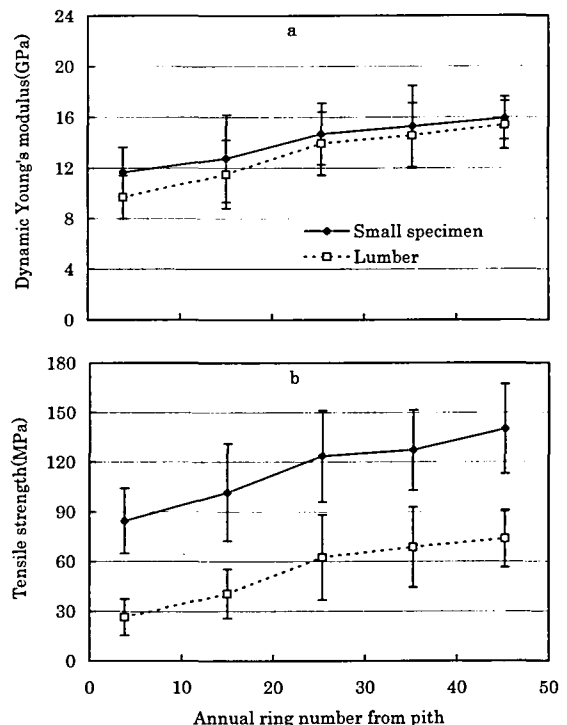


Fig. 4.6 The variation of dynamic Young's modulus (a) and tensile strength (b) for small clear specimens and lumber in radial direction. Error bars, standard deviation.



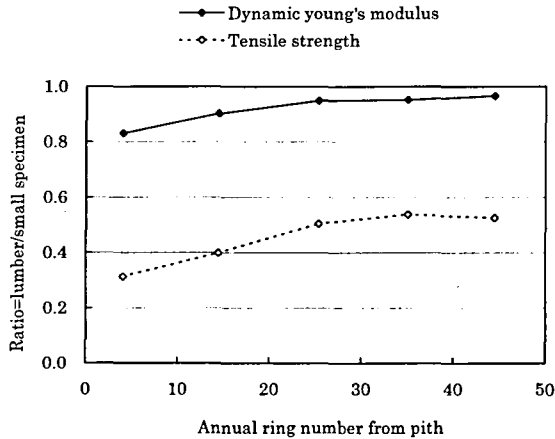


Fig. 4.7 Variation of dynamic Young's modulus and tensile strength described by the ratio of lumber and small clear specimens.

Fig. 4.6および Fig. 4.7から、樹齢の増加に伴って無欠点小試験体と板材の引張り強さの差異は小さくなり、30年以降はほぼ一定になることがわかる。すなわち、樹幹内半径方向において、引張り強さが安定するまで30年が必要であることを示唆している。

第3章に検討した樹幹内半径方向の材質指標の変動に関する年輪レベルでの結果によると、カラマツ造林木は15~21年から成熟期に入り、それ以後材質指標が安定する。したがって、樹幹内半径方向における板材と年輪レベルでの材質指標の分布が異なることが認められた。このような差異は、節の現れ方、板材に含まれる未成熟材と成熟材の割合の変化、繊維傾斜などが原因となって生じるものと考えられる。また、ヤング係数における板材と無欠点小試験体の比は半径方向でほとんど変化しないことから、動的ヤング係数に対する節などの欠点の影響が少ないことを窺わせる。

4.3.4 板材の引張り強さに及ぼす節の影響

板材と小試験体の引張り強さの差異が生じる原因を明らかにするため、強度特性と節の関係および節指標の樹幹内半径方向における分布について検討した。Fig. 4.8に示すように、引張試験で板材の61%は節のある箇所まで破壊した。この結果は、節が引張り強さに対して顕著な影響を及ぼすとする Takeda et al. (1999c) と板垣ら (1999) の報告と一致した。さらに、動的ヤング係数、引張り強さと節の個数 (Kn)、集中節径比 (Kg)、最大単独節径比 (Km)、縁節径比 (Ke) の相関関係をそれぞれ求めたところ、ヤング係数、引張り強さと、節の個数、最大単独節径比との相関係数が高かった (Table 4.3)。

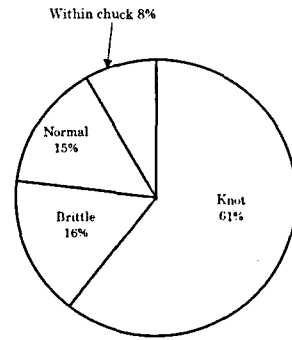


Fig. 4.8 Fracture types of tensile test for lumbars.

Table 4.3 correlation coefficients for  $E_t$  and TS versus knot properties

	Kn	Kg	Km	Ke
$E_t$	-0.65**	-0.48*	-0.51**	-0.34*
TS	-0.66**	-0.60**	-0.71**	-0.54*

\*\*Significant at 1% level; \* significant at 5% level; Kn: knot number; Kg: knot area ratio of grouped knots; Km: knot area ratio of single maximum knot; Ke: knot area ratio of edge knots  $E_t$ , dynamic Young's modulus; TS, tensile strength.

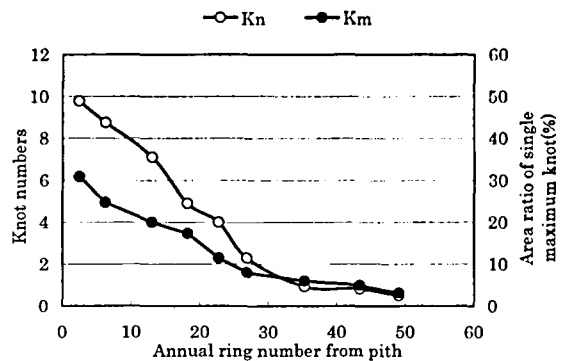


Fig. 4.9 Distribution of knot numbers (Kn) as well as knot area ratio of single maximum knot (Km) in radial direction.

また、板材の破壊位置を考慮に入れると、節指標のうち引張り強さに最も影響の大きい因子は、節の個数と最大単独節径比であることが示された。

そこで、樹幹内半径方向の節個数と最大単独節径比の樹幹内変動を検討した結果を Fig. 4.9に示す。同図から明らかなことは、髄から樹皮に向けて、節の個数と最大単独節径比は樹心部から急激に減少し、約30年輪ではほぼ一定になることである。これは、引張り強さの樹幹内半径方向の変動パターンと対応している。

このような節の樹幹内変動パターンによって、板材と無欠点小試験体の比の樹幹内分布を考察すると、30年以内の樹心部では、節の数およびサイズが大きい

く、引張り強さを低下させることによって、板材と無欠点小試験体との差が大きくなっている。一方、30年後では節の影響が弱まり、板材と小試験体との差が小さくなった。

以上のことから、樹幹内において、節などの影響により、板材の強度特性が安定状態に達するまでに要する時間は、これまで予想されていたより長い時間が必要であると結論づけられる。

#### 4.4 まとめ

高樹齢カラマツ造林木の樹幹内における強度分布についての報告が少ないことを考慮し、板材を用いて樹幹内半径方向における強度特性の変動を検討した。この目的は、年輪構造レベルでの未成熟材と成熟材の区分を、実大材に当てはめることができるのかどうかを検討することであった。また、節と引張り強さの関係を究明することももう一つの目的であった。

以上の目的でカラマツ板材の引張試験を行い、以下の結果が得られた。

1. 樹幹内半径方向における板材のヤング係数、引張り強さは髓から樹皮に向かって増加する傾向を示したが、未成熟材と成熟材および節などの影響

によって、材質指標の樹幹内ばらつきが大きい。また、全ての供試木において材質指標が樹幹内で同様の変動傾向を示した。

2. 板材の非破壊部から得た無欠点小試験体のヤング係数、引張り強さの樹幹内分布は板材と同様であった。また、動的ヤング係数において板材と無欠点小試験体の間に顕著な差異はなかったが、引張り強さにおいては、板材が無欠点小試験体より低くなっている。
3. 節の存在と分布が実大材の引張り強さに強く影響することが確認された。節指標の中で、節個数と最大単節径比が最も大きく引張り強さに影響しており、半径方向の節個数と最大単節径比の分布は半径方向の引張り強さの変動とよく対応するものであった。
4. 半径方向における板材と無欠点小試験体の引張り強さの変動パターンを検討した結果、引張り強さが相対的に安定状態に達するまでには、年輪レベルで得られた年数、15~21年より長い、約30年が必要であることが明らかになった。この結果により、カラマツ材から安定した材質の板材を得るためには長伐期施業への転換が必要と考えられる。

## 第5章 カラマツ造林木の用材品質

### 5.1 はじめに

木材の主要な用途は建築用材であることから、カラマツ材の柱材への利用を促進することはきわめて重要である。これまでに、カラマツ正角材について、用材品質(加納ら, 1964; 1965)、品等区分(重松, 1991)、強度性能(徳本ら, 1997)などに関する研究が行われてきたが、これらの供試木は若齢のものが多く、主として心持ち正角材を対象にしてきた。その結果は未成熟材の性質から予想されるように、正角材はねじれ、割れが大きく、強度的に劣ることが明らかになっている。

一方、本研究で明らかにされたように、成熟材部では、年輪密度、晩材率が高く、仮道管長が長く、材質的に安定している。したがって、高樹齢木より、心去り正角材を採材する場合には、心持ち正角材に見られるような各種欠点の少ない、品質の高い正角材が多く得られると考えられる。

そこで、本章では、日本国内に現存するカラマツ人工林のなかで、2番目に高樹齢とされ、しかも施業履歴の明らかな林分としては、最古とされる106年生供試木を対象とし、高樹齢カラマツ造林木の用

材品質を検討した。

### 5.2 材料と方法

#### 5.2.1 供試材料

106年生カラマツ人工林から、採集した6本の造林木を供試木とした。供試木の概要は第2章で述べた。各供試木の地上高1.2mから樹梢部に向かって材長4mの丸太を順次玉切りした。さらに、これらの丸太の元口側から材長1mの丸太を玉切りし、基礎材質試験に供した。また、3mの丸太から13cm正角をできるだけ製材し、13cm正角が取れないものは11.5cm正角を製材した(Fig. 5.1)。これらの正角材は屋外に棧積みし、一年間天然乾燥させた。その後、

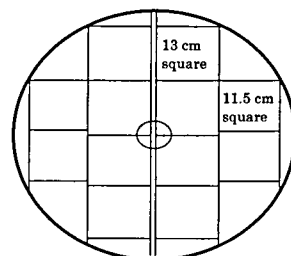


Fig. 5.1 Sawing method of the square timbers.

Table5.1 The number of square timbers graded by sample trees, size and knots

Division of sample trees	Position of long	NO knot in 4 faces		NO knot in 3 faces		NO knot in 2 faces		NO knot in 1 faces		Standard timber for columns		Timbers for sills		Total	
		13 cm	11.5 cm	13 cm	11.5 cm	13 cm	11.5 cm	13 cm	11.5 cm	13 cm	11.5 cm	13 cm	11.5 cm	13 cm	11.5 cm
		Trees with large DBH	I	4	5	3	3	2	3	3	1	1	1	5	12
	II			3	1	5	1	3	2	2	2		13	9	
	III					2		2		7	3	1	12	5	
	IV											13		13	
	Subtotal	4	5	6	4	9	4	8	3	9	9	1	15	37	40
Trees with small DBH	I			3	2	1	3	2	1					6	6
	II						5		4		1				10
	III								1		7				8
	IV												7		7
	Subtotal	—	—	3	2	1	8	2	6	—	8	—	7	6	31
Total	I	4	5	6	5	3	6	5	2		1			18	19
	II			3	1	5	6	3	6	2	6			13	19
	III					2		2	1	7	10	1	2	12	13
	IV												20		20
	Subtotal	4	5	9	6	10	12	10	9	9	17	1	22	43	71

蒸煮によるヤニ抜きを行い、モルダーにより12cm, 10.5cmにそれぞれ最終仕上げした。

### 5.2.2 測定方法

正角材について、製材直後に節などの欠点による品等区分を行うとともに、平均年輪幅、縦振動法によるヤング係数 ( $E_t$ ) を測定した (Sobue, 1986)。また、1年間天然乾燥後に曲がり、ねじれおよび含水率を測定した。曲がりとは発生している材面の最大矢高を、ねじれは平面上で3点を固定し、ほかの1点の浮き上がり量を測定した。含水率は4材面の中央部を含水率計で測定し、平均値を求めた。最終寸法に仕上げた正角材について、スパン270cm, 3等分点4点荷重方式により曲げヤング係数を測定した。

## 5.3 結果および考察

### 5.3.1 節などの欠点による品等区分

各供試木から採材できた番玉別、製材寸法別正角材の本数と品等別の本数は Table 5.1のとおりである。これによると、3本の大径木からは13cm正角が37本、11.5cm正角が40本、また3本の小径木からはそれぞれ6本および31本製材できた。両製材サイズとも得られた正角材の本数は当然のことながら大径木の方が圧倒的に多い。供試木の地上高13mをこえると、柱材の製材は難しく、柱にできない土台材のほとんどが大きな節が存在している4番玉から得られた。また4面無節などの役物が製材できるのは1番玉および2番玉に限定される。このうち4面無節が製材できるのは成長の速い供試木からのみで、成長の遅い供試木からは製材できなかった。無節の材部は丸太の外周部にあるが、胸高直径44~48cmの成

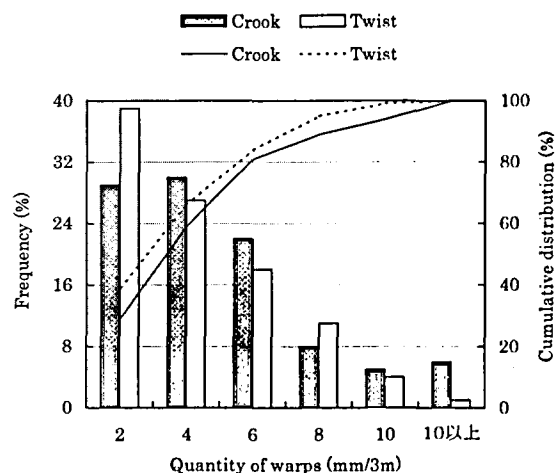


Fig. 5.2 Frequency and cumulative distribution of the timbers graded by quantity of warps.

長の遅い供試木では、この無節の材部の厚さが11.5cmに満たないことが推察される。このように径級の大い供試木ほど13cmの正角の採材本数が多く、品質も上位等級のものが得られることが明らかとなった。

### 5.3.2 狂いの発生

約1年間天然乾燥した後の正角材の含水率は19%以下で、針葉樹の構造用日本農林規格における乾燥材の基準を満たしていた (農林水産省, 1997)。このような乾燥状態における正角材の乾燥に伴う狂いの発生状況を調べた。正角材全数において、曲がりの発生率は55%、ねじれの発生率は65%、また、曲がりまたはねじれのいずれかの狂いが発生した率は80%であった。また、13cm正角と11.5cm正角で狂いの発生率を比較したところ両者でほぼ等しかった

(13cm正角：82%，11.5cm正角：79%)。したがって、狂いは両サイズの正角を合わせて検討することとした。

Fig. 5.2に狂い量の頻度と累積分布を示す。狂い量は、曲がり、ねじれの両者とも全数の80%強が6mm/3m以下であった。平均値で見ると曲がりか2.43mm/3m、ねじれが2.47mm/3mであった。この結果を若齢木の心持ち正角を対象としたこれまでの試験結果、すなわち曲がりか10.5mm/3m、ねじれか13.0mm/3m(加納ら, 1964)と比較すると、きわめて小さいことがわかる。このためほとんどの正角材は乾燥後の狂いをモルダーで補正し、所定の寸法に仕上げることができた。

Fig. 5.3に採材番玉別の狂いの発生量を示す。採材位置が樹幹上部である4番玉では曲がり、ねじれがかなり大きくなる傾向が認められた。この原因として、4番玉では大きな節が多く出現すること、未成熟材部の割合が高くなること、アテ材の出現が多いこと、繊維傾斜度が大きいことなどによるものと考えられる。

Table 5.2に供試木別の狂いの発生量を示す。狂いの発生量は個体によって大きく異なる。特にS1の供試木で大きい値が認められた。このうち、ねじれについては、繊維傾斜度との相関が高いことが明

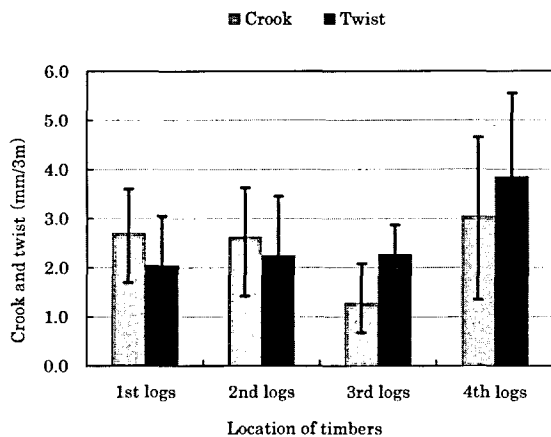


Fig. 5.3 Crook and twist of the timbers at various location of in the trees.

Table 5.2 Quantity of warps for different sample trees

Sample tree NO.	Crook (mm/3m)	Twist (mm/3m)
S 1	2.67	6.00
S 2	0.09	0.74
S 3	3.91	2.64
S 4	1.42	1.50
S 5	3.15	1.42
S 6	0.92	0.42

らかにされており(大倉ら, 1961;1962), また繊維傾斜度は遺伝的要因が強いことから(織田ら, 1986;小沢, 1984a), ほかの供試木に比べ遺伝的に繊維傾斜度が大きい個体であったためと考えられる。

5.3.3 採材位置と供試木による強度的性質

正角材の縦振動ヤング係数 ( $E_f$ ) について、採材番玉別に乾燥前後の値を求め、Fig. 5.4に示す。これによると縦振動ヤング係数は、採材位置が高くなるほど低下していく傾向が見られる。採材位置が高くなることにより、節が多くなり、未成熟材の含まれる割合が高くなることによるものと考えられる。また、乾燥前後の  $E_f$  の平均値はそれぞれ121tonf/cm<sup>2</sup>, 122tonf/cm<sup>2</sup>であり、乾燥に伴うヤング係数の増加はわずかであった。さらに、正角材の  $E_f$  について、供試木別に乾燥前後の値が Table 5.3に示されているが、成長の速い供試木は成長の遅い供試木より若干低かった。

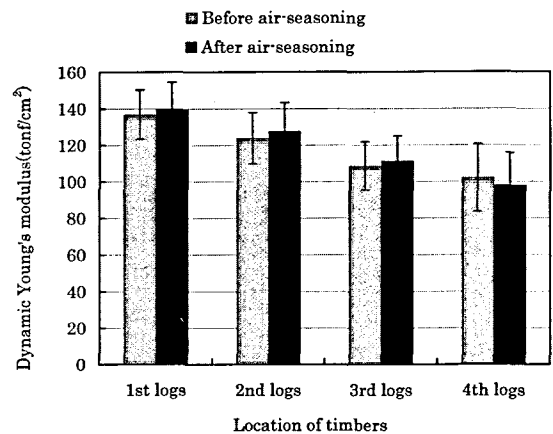


Fig. 5.4 The variation of  $E_f$  at various location of timbers before and after air-seasoning.

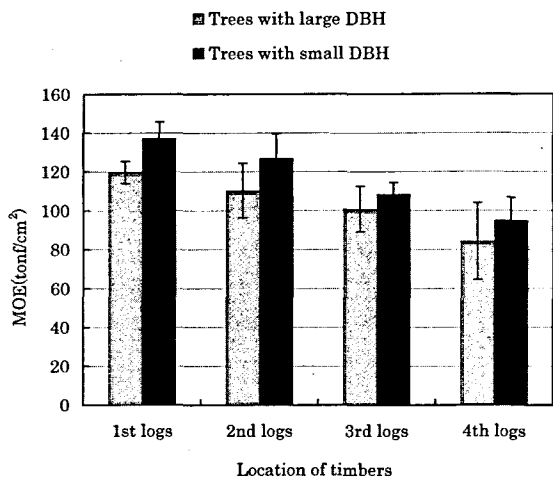


Fig.5.5 MOE for the square timbers from the trees with large or small DBH.

Table 5.3 The  $E_r$  and its CV before and after air-seasoning for different sample trees

Sample tree No.	before air-seasoning		after air-seasoning	
	mean	CV	mean	CV
S 1	112	9.04	111	14.9
S 2	127	7.78	129	7.86
S 3	109	13.7	112	15.4
S 4	128	16.6	134	18.2
S 5	127	18.2	135	17.9
S 6	134	16.8	137	17.3

$E_r$ : dynamic Young's modulus (tonf/cm<sup>2</sup>); CV, coefficient of variation (%).

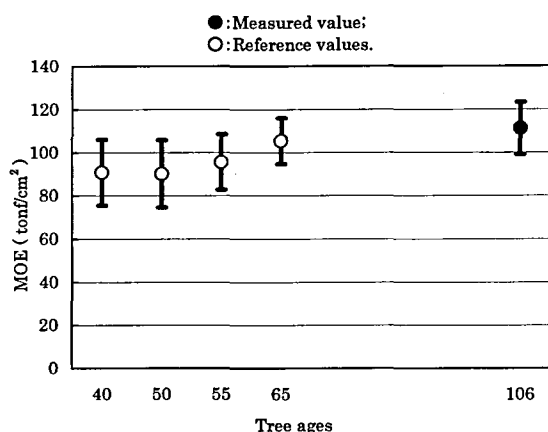


Fig. 5.6 The comparison of MOE among trees with different ages.

また、静的曲げヤング係数 (MOE) を径級別、番玉別に Fig. 5.5 に示す。これによると、MOE は採材位置が高くなるほど低下する傾向が認められ、この傾向は  $E_r$  における傾向と一致している。

さらに、正角材の MOE と樹齡との関係を探るため、今までに行われた信州産カラマツ正角材の強度性能データ (徳本ら, 1997) と本研究のデータを比較し、Fig. 5.6 に示した。これによると、樹齡が高いものほどカラマツ材の MOE は高くなる傾向を示した。

また、日本建築学会の木質構造計算基準・同解説 (日本建築学会, 1995) では、カラマツは針葉樹Ⅲ類に属し、上級構造材、普通構造材のヤング係数は

それぞれ 90tonf/cm<sup>2</sup>、80tonf/cm<sup>2</sup> となっていることから、この 106 年生カラマツ材は上級構造材の値を十分満たしていることになる。

### 5.4 まとめ

本研究では、長野県において現存するカラマツ人工林の中で高樹齡とされる佐久産 106 年生カラマツ材から心去り正角材を製材し、製材品の用材品質を調べるとともに、約 1 年間の天然乾燥後の形質を調べ、得られた結果を以下のようにまとめた。

1. 肥大成長の速い供試木では遅い供試木に比べ、正角材が数多く製材できることのほか、節のない正角材が多く採材できた。樹幹内の採材位置別では、4 番玉では節が大きくほとんどが土台用材になった。
2. 正角材の 80% に曲がりまたはねじれが生じたが、これらの狂い量は、若齡木の心持ち正角を対象としたこれまでの試験結果と比べると、きわめて小さかった。しかし、これらの狂いを樹幹内の採材位置別に見ると 4 番玉で特に大きかった。
3. MOE は肥大成長の遅い供試木の正角材が肥大成長の速い供試木のものより若干大きく、また、採材位置別では地上高が高くなるほど低くなる傾向を示した。しかし、これらの値は、従来から求められていた、より若齡木における正角材のいずれの値より大きく、針葉樹Ⅲ類の上級構造材の値を十分満たしていた。

以上のことから、カラマツ造林木は高樹齡になると心去り材の採材が可能となり、節の少ない正角材が採材できること、得られる材は乾燥による狂いが少なく、高い強度で品質も安定するなどの優良材であることが明らかとなった。また肥大成長の速い供試木は遅い供試木に比べ曲げヤング係数は若干低くなるものの、実用上は全く支障なく、節の少ない正角材が採材できる。さらに、よい付加価値の高い化粧材としての利用が考えられる。

## 第 6 章 総 括

カラマツは、長野県において人工林面積の 6 割を占める重要な造林樹種であるが、そのほとんどが短伐期施業を目標として植林された。その後、若齡木の材質的な問題およびカラマツ材の需要構造の変化などにより、現在は、長伐期施業への移行が望まれ

るようになってきた。しかし、長伐期施業で育成した高樹齡カラマツの材質研究は、これまでほとんど行われていない。

そこで、本研究では、106 年生カラマツを中心に、高樹齡カラマツの年輪構造解析を行い、未成熟材と

成熟材の特徴を明らかにし、両材部における年輪指標に及ぼす肥大成長の影響が異なることを確認した。そのうえで、実大材の引張り強度性能および用材品質を検討し、高樹齢カラマツの成長と材質の特徴を明らかにした。

### 6.1 材質指標の樹幹内変動

佐久、藪原、手良産材を対象にし、特に106年生カラマツ造林木を中心に、軟X線デントメトリを用いて、年輪構造解析を行った。得られた結果を以下に示す。

年輪幅は、髓付近で広く、外側に向かって急速に狭くなり、15~20年輪前後からは安定する。早材幅の樹幹内半径方向の変動は年輪幅の変動と一致した。

年輪密度は、髓付近では低く、外側に向かって上昇し、約15~20年輪以降は安定した。しかし、一番外側、すなわち辺材部では低下する傾向が認められ、この辺材部に含まれた年輪数は供試木によって異なることが分かった。また、晩材密度と年輪密度の樹幹内変動パターンは良い一致を示した。

106年生カラマツ造林木における年輪指標の樹幹内変動パターンは、産地、樹齢の異なる供試木においても共通していた。また、成長の速い供試木と遅い供試木の間、年輪密度に顕著な差異は認められなかった。

以上のことから、異なる樹齢、産地、成長状況の供試木の間認められる、年輪指標の樹幹内変動の共通点として、髓付近で変動が大きく、それ以降は安定することが挙げられる。したがって、この両材部を区別して材質指標を取り扱うべきである。

### 6.2 肥大成長と材質指標との関係

髓付近の材部とその外側の材部を区分するため、仮道管長を基準とする区分方法と年輪密度を基準とする区分方法によって、未成熟材と成熟材を区分した。この区分結果を用いて、未成熟材部と成熟材部における成長速度と年輪指標の関係を求めた。得られた結果を以下に示す。

仮道管長が髓付近で低く、外側に向かって急に増加し、その樹齢の増加に伴う半径方向の変動は対数式で表せる。それに基づいて、仮道管長を区分基準とした方法を用い、未成熟材と成熟材を区分すると、佐久および藪原人工林においては、いずれも18年が未成熟材と成熟材の境界と判定された。

年輪密度を区分基準とする未成熟材と成熟材の境

界は、セグメント回帰法による解析から、佐久産は15年、藪原産は21年と判定された。未成熟材と成熟材の判定に当たり、仮道管長と年輪密度のいずれを区分基準とするかによって差異があることが明らかになった。また、同じ区分基準に基づいても、未成熟材から成熟材へ移行する樹齢は、産地によって異なる可能性が示された。

年輪密度を区分基準とする未成熟材と成熟材の境界の判定結果を用い、成長速度と年輪密度の関係を検討した結果、未成熟材部では高い成長速度が材の密度低下をもたらすのに対して、成熟材部では、成長速度の増加に伴って晩材幅も増加し、結果として密度と晩材率は低下しないことが明らかになった。

### 6.3 ひき板材の強度性能

年輪構造レベルでの未成熟材と成熟材の区分、あるいは両者の材質に関して得られた結論が実大材である板材の強度特性に当てはまるかどうかを検証し、以下に示す結論を得た。

樹幹内半径方向における板材のヤング係数、引張り強さは髓から樹皮に向かって増加する傾向を示したが、未成熟材と成熟材および節などの影響によって、材質指標の樹幹内におけるばらつきが大きい。

板材の非破壊部から得た無欠点小試験体のヤング係数および引張り強さの樹幹内分布は板材と同様であった。また、動的ヤング係数では板材と無欠点小試験体の間に顕著な差異はなかったが、板材は無欠点小試験体より引張り強さが低くなった。

節の存在と分布が実大材の引張り強さに強く影響し、節指標の中で、節個数と最大単独節径比が最も大きく引張り強さに影響しており、半径方向の節個数と最大単独節径比の分布は、半径方向の引張り強さの変動とよく対応するものであった。

半径方向における板材の引張り強さが相対的に安定状態に達するまでには、年輪レベルで得られた年数、15~21年より長い、約30年が必要であることが明らかになった。

### 6.4 正角材の用材品質

高樹齢カラマツ造林木を実用的な観点から評価するため、建築用材としての心去り正角材について、生材状態の品質と天然乾燥後の割れやねじれ、曲げヤング係数などについて検討した。

その結果、肥大成長の速い供試木では成長の遅い供試木に比べ、得られた正角材の数が多く、節の少ないまたは無節の正角材が多く採材できた。また、

正角材の80%に曲がりまたはねじれが生じたが、これらの狂い量は若齢木の心持ち正角材に比べて非常に小さく、モルダーによって補正すると、所定の寸法に上げることができる。

MOEは、肥大成長の遅い供試木の正角材が肥大成長の速い供試木のものより若干大きく、また、採材位置別では地上高が高くなるほど低くなる傾向を示した。しかし、これらの値は、従来から求められていたより若齢木における正角材のいずれの値より大きく、針葉樹Ⅲ類の上級構造材の値を十分満たしていた。

6.5 まとめ

Fig. 6.1に示すように、本研究の手順として、まず年輪レベルで軟X線デントメトリーを用い、年輪指標の樹幹内変動を明らかにした。そのうえで、年輪密度および仮道管長の両指標により、未成熟材と成熟材を区分し、両材部における成長と材質の関係を検討した。さらに、板材レベルの材質指標の樹幹内変動を調べ、年輪レベルでの結果と比較した。また、高樹齢木からの建築用材としての正角材の品質を調査し、これまでの結果を裏付けるものとした。

以上の結果を要約すると、以下の5点にまとめられる (Fig. 6.2)。

- 1) 年輪密度および仮道管長に基づいて区分した未成熟材と成熟材の境界は15~21年であった。
- 2) 辺材部では、年輪密度が低下する傾向が見られた。
- 3) 成熟材部では材質が安定し、肥大成長が大きくなっても材質は低下しない。
- 4) 実用的な視点から見ると、安定的な品質の材を得るには30年以上が必要である。
- 5) 高樹齢大径木のカラマツからは、品質の優れた優良用材が大量に得られる。

従って、かつて短伐期施業を目指したカラマツ人工林は、材質の安定化を図り、これによって、木材市場の需要を開拓していくためには、長伐期・高樹齢・大径材を育林目標として目指すべきだと考えられる。

謝辞

本研究の遂行および本論文のまとめるにあたり、多大なるご指導を賜りました信州大学農学部教授、徳本守彦先生に心からお礼を申し上げます。また、本論文の作成にあたり貴重なご意見とご激励をいただきました静岡大学農学部教授、祖父江信夫先生、

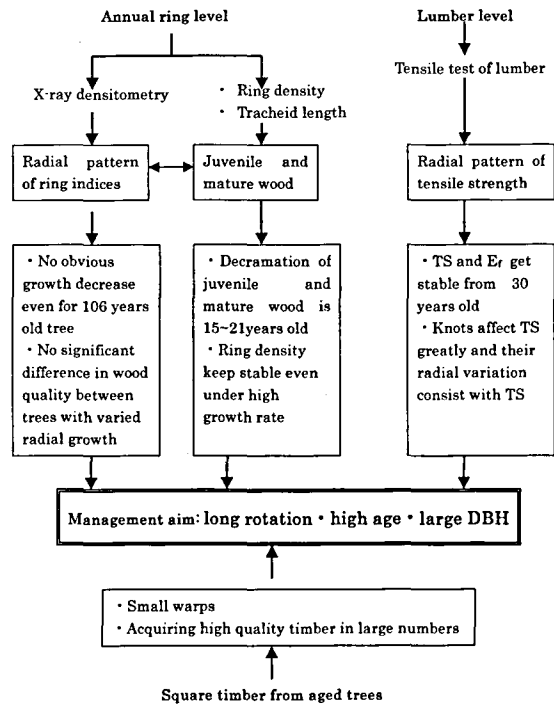


Fig. 6.1 Flow chart of the research.

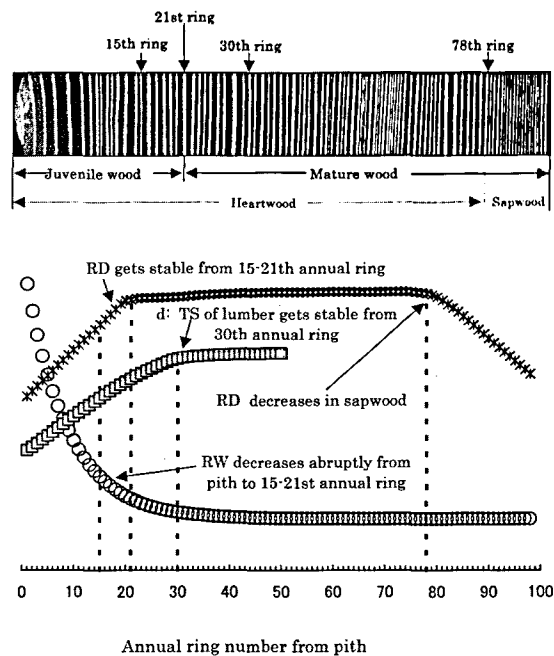


Fig. 6.2 A variation model of some indices in radial direction of tree trunk. RW, ring width; RD, ring density; TS, tensile strength.

信州大学農学部教授、大政正武先生に感謝の意を表します。さらに、修士課程から今日まで一貫してご教示、ご助言をいただきました信州大学農学部助教授、武田孝志先生に感謝致します。

信州大学に来てから、学問から生活までご指導、ご鞭撻を賜りました前信州大学農学部教授、中野達夫先生に深く感謝を申し上げます。本論文の作成に

あたり、貴重なご意見とご助言を下さいました信州大学農学部助手、安江 恒先生に感謝致します。

本研究の遂行にあたり、農林水産省森林総合研究所材質研究室の平川泰彦室長から温かいご指導、ご協力を頂きました。また、材質研究室の皆様には実験実施にあたり、ご協力をいただきました。ここに深くお礼申し上げます。

本論文にかかわる実験を進めるにあたり、長野県林業総合センターの木材部長、橋爪丈夫博士、吉田孝久研究員には常にご協力をいただいたことを深く感謝致します。また、本研究を行うにあたり、中部森林管理局および同佐久森林管理センター、木曾森

林管理署藪原事務所のご好意により供試木の斡旋をいただきました。これらの関係各位に厚くお礼申し上げます。

また、経済的な援助をいただきました米山奨学会および駒ヶ根ロータリークラブの皆様には感謝致します。実験の遂行に際しご協力をいただきました木材利用研究室の大学院生、卒業生および専攻生の皆さん並び支えてくださいました信州大学農学部森林科学科事務職員、西村泰子さんに感謝致します。

最後に、長い留学生生活を支えてくれた妻と娘に心から感謝します。

## 文 献

1. Abdel-Gadir, A.Y., Krahmer, R.L. (1993). Estimating the age of demarcation of juvenile and mature wood in Douglas-fir. *Wood and Fiber Sci.* 25, 242~249.
2. 安久津久, 佐藤真由美, 高橋政治, 滝沢忠昭, 森泉 周 (1993). カラマツ類品種の材質 (第4報). 林産試験報 7, 6~15.
3. 有馬孝礼, 早村俊二, 丸山則義, 宮沢俊輔, 古沢 信 (1990). 木材の打撃音分析によるヤング係数と水分変動の評価 (木質材料小特集). 材料 39, 1228~1234.
4. Bendtsen, B.A., Senft, J. (1986). mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown eastern cottonwood and loblolly pine. *Wood and Fiber Sci.* 18, 23~38.
5. Choong, E.T., Fogg, P.J. (1989). Differences in moisture content and shrinkage between innerwood and outerwood of two shortleaf pine trees. *Forest Prod. J.* 39, 13~18.
6. Clark III, A., Saucier, J.R. (1989). Influence of initial planting density, geographic location, and species on juvenile wood formation in southern pine. *Forest Prod. J.* 39, 42~48.
7. Evans, J.W., Senft, J.F., Green, D.W. (2000). Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones. *Forest Prod. J.* 50, 75~87.
8. Fujisawa, Y., Ohta, S., Tajima, M. (1993). Wood characteristics and genetic variations in Sugi (*Cryptomeria japonica*) II. Variation in growth ring components among plus-trees clones and test stands. *mokuzai Gakkaishi* 39, 875~882.
9. 藤沢義武, 太田貞明, 明石孝輝 (1995). スギの材質と遺伝 (第4報) 年輪構造のクローンと植栽密度による変異. 木材学会誌 41, 631~639.
10. 藤原新二 (1995). スギおよびヒノキ材の年輪幅による細胞寸法と年輪構造の変動. 木材学会誌 41, 774~779.
11. 深沢和三 (1967). スギ樹幹内の材質変動に関する研究 一産地を異にする林木樹幹の未成熟材などの区分とその材質特徴. 岐阜大農研報 25, 47~127.
12. Funada, R., Kubo, T., Fushitani, M. (1989). Vertical distribution of annual ring characteristics in relation to the crown profile in Akamatsu (*Pinus densiflora*). *mokuzai Gakkaishi* 35, 944~947.
13. 半沢道郎, 沢田 稔 (1969). カラマツ材の性質と利用, pp. 17~47. 北方林業会, 札幌.
14. Hapla, F., Oliver-Villanueva, J.V., Gonzalez-molina, J.m. (2000). Effect of silvicultural management on wood quality and timber utilization of *Cedrus atlantica* in the European mediterranean area. *Holz als Roh-und Werkstoff.* 58, 1~8.
15. 橋詰隼人 (1993). 図説実用樹木学, pp.14. 朝倉書店, 東京.
16. 橋爪丈夫, 吉田孝久, 石原茂久 (1997). カラマツラミナの性質と集成材の強度性能 (第1報) 丸太 MOE と木取り位置によるラミナの区分. 木材学会誌 43, 647~654.
17. 橋爪丈夫, 吉田孝久, 武田孝志, 石原茂久 (1998a). カラマツラミナの性質と集成材の強度性能 (第4報) ラミナの曲げ・引張強度特性. 木材学会誌 44, 49~58.
18. 橋爪丈夫 (1998b). 長野県産カラマツ構造材の強度特性に関する研究, 京都大学学位論文.



19. 林 弘也, 松本 昂, 甲斐和男 (1976). 軟X線による木材の密度測定. 九大演集報 26, 127~139.
20. 林 知行, 宮武 敦, 宮原久光 (1997). スギラミナの引張強度における寸法効果. 木材工業 52, 15~19.
21. 林 知行, 宮武 敦 (1998). 工場生産された FJ ラミナの引張強度. 木材工業 53, 460~465.
22. Herman, M., Dutilleul, P., Avella-Shaw, T. (1998). Growth rate effects on temporal trajectories of ring width, wood density, and mean tracheid length in Norway spruce (*Picea abies* (L) karst.). Wood and Fiber Sci. 30, 6~17.
23. 平川泰彦, 藤沢義武 (1995). 精英樹スギクローンにおける晩材仮道管 S2層のマイクロフィブリル傾角と仮道管長との関係. 木材学会誌 41, 123~131.
24. 飯島泰男 (1983). シベリヤカラマツ材の強度性能に関する研究. 富木試研報 1, 1~39.
25. 板垣直行, 三橋博三, 二宮佐知子, 吉田暢子, 江刺拓司 (1999). スギラミナの引張破壊特性に及ぼす節の影響. 木材学会誌 45, 367~374.
26. 門脇太郎, 武田孝志, 橋爪丈夫, 吉田孝久 (1998). カラマツラミナの引張強度における寸法効果. 第48回日本木材学会研究発表要旨集, pp110.
27. 柿原道喜 (1967). 九州地方におけるカラマツ林の施業上の特性に関する研究. 九大演報 2, 1~96.
28. 加納 孟 (1963). カラマツ材の材質の特徴とその利用上の問題点. 林業技術 63, 1~4.
29. 加納 孟, 中川伸策, 斉藤久夫, 小田正一 (1964). カラマツの用材品質について 第1報 用材品質に及ぼす立木素材及び角材の条件. 林試研報 162, 1~44.
30. 加納 孟, 中川伸策, 斉藤久夫, 小田正一, 重松頼生 (1965). カラマツの用材品質について 第2報 用材品質に及ぼす立地条件の影響. 林試研報 182, 113~147.
31. 加納 孟 (1973). 林木の材質, pp39~59. 日本林業技術協会, 東京.
32. 北原龍士, 境田 剛, 春山勝昭 (2000). 林木の肥大成長の速さと成長ひずみ. 材料 49, 379~383.
33. 古賀信也, 小田一幸, 堤 壽一, 古賀英明 (1992). ヒノキおよびカラマツ人工造林木の木材性質のバラッキ—林分内のバラッキ—. 九大演報 66, 55~68.
34. 古賀信也, 堤 壽一, 小田一幸 (1995). カラマツ造林木から得られた丸太の未成熟材率. 九大演報 72, 217~227.
35. Koga, S., Tsutsumi, J., Oda, K., Fujimoto, T. (1996). Effects of thinning on Basic Density and Tracheid Length of Karamatsu (*Larix leptolepis*). *mokuzai Gakkaishi*. 42, 605~611.
36. Koga, S., Oda, K., Tsutsumi, J., Fujimoto, T. (1997). Effects of thinning on the wood structure in annual growth rings of Japanese larch (*Larix leptolepis*). *Iawa Journal*. 18, 281~290.
37. Koga, S., Fujimoto, T., Oda, K. (2000). Effects of thinning on wood formation of *Larix kaempferi*. *New Horizons in Wood Anatomy*. 128~131.
38. 小泉章夫, 上田恒司 (1986a). 立木の曲げ試験による材質評価 (第1報). 木材学会誌 32, 669~676.
39. 小泉章夫, 上田恒司 (1986b). 立木の曲げ試験による材質評価 (第2報). 木材学会誌 32, 860~867.
40. 小泉章夫, 上田恒司 (1987a). 立木の曲げ試験による材質評価 (第3報). 木材学会誌 33, 450~456.
41. 小泉章夫, 上田恒司, 片寄 隼 (1987b). カラマツ間伐材の力学的性質. 北大演報 44, 327~354.
42. 小泉章夫 (1987c). 生立木の非破壊試験による材質評価に関する研究. 北大演報 44, 1329~1415.
43. 小泉章夫 (1988). 生立木の非破壊材質試験. 北方林業 40, 2~6.
44. 小泉章夫, 高田克彦, 上田恒司 (1989). 松山地方演習林の造林木の樹幹ヤング係数. 北大演報 46, 441~450.
45. 小泉章夫, 高田克彦, 上田恒司, 片寄 隼 (1990a). カラマツ精英樹の肥大成長と材質 (第1報) つぎ木クローンの肥大成長, 容積密度数および樹幹ヤング係数. 木材学会誌 36, 98~102.
46. 小泉章夫, 高田克彦, 上田恒司 (1990b). カラマツ精英樹の肥大成長と材質 (第2報) 18年生の子供家系の胸高直径と樹幹ヤング係数. 木材学会誌 36, 704~708.
47. 小泉章夫, 飯島泰男, 佐々木貴信, 川井安生, 岡崎泰男, 中谷 浩 (1997a). 秋田県産スギ材の強度性能 (第1報) 丸太のヤング率. 木材学会誌 43, 46~51.
48. 小泉章夫, 飯島泰男, 佐々木貴信, 岡崎泰男 (1997b). 秋田県産スギ材の強度性能 (第2報) 挽板の強度. 木材学会誌 43, 210~214.
49. 小泉章夫 (1998). 針葉樹造林木のヤング率の変異. 木材工業 53, 206~211.
50. 久保隆文, 森田 司, 伏谷賢美 (1994). カラマツにおけるらせん木理の出現性: 林地及び肥大成長との関連性. 農工大演報 32, 31~38.
51. Kucera, B. (1994). A hypothesis relating current annual height increment to juvenile wood formation in Norway spruce. *Wood and Fiber Sci*. 26, 152~167.

52. 倉田久敬 (1979). 長野県におけるカラマツ材利用の現況を見て カラマツ先進県調査報告. 林産試月報 5, 13~16.
53. 倉田久敬 (1985). 欠点を克服したカラマツ間伐材の利用. 林業技術 523, 11~16.
54. Lindstrom, H. (1996). Basic density in Norway spruce. Part III. Development from pith outwards. Wood and Fiber Sci. 28, 391~405.
55. 劉 元, 中山義雄, 平川泰彦 (1998). コウヨウザン植栽木の年輪構造に及ぼす地位及び成長率の影響. 木材学会誌 44, 153~161.
56. 三上 進, 渡辺 操, 太田 昇 (1972). カラマツ材の繊維傾斜度におけるクローン間変動. 日林誌 54, 215~216.
57. 見尾貞治, 松本 昂, 堤 壽一 (1985). スギ品種の木材性質について 九州産在来スギ6品種による予備実験. 九大演報 55, 187~199.
58. 見尾貞治, 長尾博文, 堤 壽一 (1985). スギ造林木の材質特性 クモトオンとヤブクグリについて. 九大演報 55, 213~221.
59. 宮島 寛, 長谷川賢司 (1978). 交雑カラマツ造林木の材質実験. 北大演報 35, 139~156.
60. 宮島 寛 (1985). 苫小牧地方演習林産造林木3樹種の基礎材質. 北大演報 42, 1089~1115.
61. 森麻須夫, 大住克博 (1991). 秋田地方における高齢級カラマツ林の成長. 森林総研研報 361, 1~15.
62. 長尾博文, 見尾貞治, 堤 壽一 (1985). スギ造林木の木部形成パターンと年輪構造 クモトオンとヤブクグリについて. 九大演報 55, 201~211.
63. 中戸莞二 (1985). 新編木材工学, pp223. 養賢堂, 東京.
64. 中野達夫, 朱 建軍, 徳本守彦, 武田孝志 (1999). カラマツの成長と材質 一手良沢山演習林産材の年輪構造, 収縮率, 曲げ強度一. 信大演報 35, 101~110.
65. 中野達夫 (2000). カラマツの成長と材質. 木材工業 55, 396~399.
66. 日本木材学会編 (1989). 木材科学実験書 I 物理・工学編, pp58~59. 中外産業調査会, 東京.
67. 日本規格協会 (1994). 木材の試験方法: JIS Z2101.
68. 日本建築学会 (1995). 木質構造計算基準・同解説, pp155~169. 丸善株式会社, 東京.
69. 野堀嘉裕, 永田義明, 千葉 茂 (1988). カラマツ属の育種に関する研究 (X I) 一軟X線写真によるカラマツの年輪幅, 容積密度数のクローン間差異の検定一. 日林北支論 36, 105~107.
70. 農林水産省 (1996). 構造用集成材の日本農林規格, pp3~4. 日本合板検査会, 東京.
71. 農林水産省 (1997). 針葉樹の構造用製材の日本農林規格並びに解説, pp4. 全国木材協同組合連合会, 東京.
72. 小田一幸, 古賀信也, 堤 壽一 (1988). 材質育種にむけてのスギ品種の年輪構造. 九大演報 58, 109~122.
73. 小田一幸, 犬塚 良, 堤 壽一 (1992). 林木育種にむけての材質指標因子としてのスギ仮道管長. 九大農学芸誌 47, 51~55.
74. Ohbayashi, H., Shiokura, T. (1990). Wood anatomical characteristics and specific gravity of fast-growing tropical tree species in relation to growth rates. mokuzai Gakkaishi. 36, 889~893.
75. 小野広治, 山口和道, 今村祐嗣 (1979). 奈良県産カラマツの材質と強度性能. 奈良林試研報 8, 45~48.
76. 太田貞明, 渡辺治人, 松本 昂, 堤 壽一 (1968). 未成熟材の力学的特性に関する研究 (第2報) ヒノキ樹幹における材質判定因子の変動と力学的性質について. 木材学会誌 14, 261~268.
77. 太田貞明 (1970). 軟X線・デントメーターによる木材密度の測定. 木材工業 25, 131~133.
78. 太田貞明 (1971). スギ・ヒノキ樹幹内における未成熟材の力学特性に関する基礎的研究. 九大演報 45, 1~80.
79. 太田貞明 (1978). ソフトX線による樹木の年輪構造解析 (第1報) 汚染大気下で生育した樹木の年輪構造. 木材学会誌 24, 429~434.
80. 大倉精二 (1955). 樹木回旋性について. 第64回日本林学会大会講演集 298~301.
81. 大倉精二 (1960). 回旋生長の原因について. 信大演報 2, 1~65.
82. 大倉精二, 小沢勝治, 高島恵浩, 竹入勝美 (1961). 木材のねじれ狂い. 木材学会誌 7, 205~207.
83. 大倉精二, 小沢勝治 (1962). 木材のねじれ狂い (第2報). 木材学会誌 8, 105~108.
84. 大倉精二, 小沢勝治, 高垣宣裕 (1963). 木材のねじれ狂い (第4報). 木材学会誌 9, 121~124.
85. 織田春紀, 片寄 藤 (1986). 北海道育種基本区におけるカラマツ材質優良木の選抜. 林育研報 4, 29~46.
86. 織田春紀 (1994). 高齢カラマツ材における樹幹内の繊維傾斜度の分布パターンについて. 林育研報 12, 27~55.
87. 小沢勝治 (1971). 針葉樹の回旋性について. 日林誌 53, 368~371.
88. 小沢勝治 (1972). カラマツ一林分 (東北地方) における回旋木理の現われ方. 日林誌 54, 269~274.
89. 小沢勝治 (1973). カラマツ一林分 (中部地方) における回旋木理の現われ方. 日林誌 55, 221~226.

90. 小沢勝治 (1983). 丸太の乾燥ねじれに関する理論的研究. 木材学会誌 29, 744~749.
91. 小沢勝治 (1984a). 針葉樹の旋回木理と乾燥ねじれ. 京大農学位論文.
92. 小沢勝治 (1984b). カラマツ板材の乾燥ねじれ. 木材工業 40, 165~169.
93. 林業試験場 (1973). 木材工業ハンドブック, pp234. 丸善株式会社, 東京.
94. 林野庁 (2000). 平成11年度林業白書, pp1~8. 日本林業協会, 東京.
95. 佐伯 浩 (1963a). 針葉樹材の年輪構造に関する研究 (第2報) 早材・晩材の区分(1). 木材学会誌 9, 231~236.
96. 佐伯 浩 (1963b). 針葉樹材の年輪構造に関する研究 (第3報) 早材・晩材の区分(2). 木材学会誌 9, 237~243.
97. 佐伯 浩 (1988). 木材の構造と性質. 島地 謙, 佐伯 浩, 原田 浩, 塩倉高義, 石田茂雄, 重松頼生, 須藤彰司 共著. 木材の科学・1. 木材の構造, pp180~188. 文永堂出版, 東京.
98. Sauter, U.H. (1999). Determining juvenile-mature wood transition in Scots pine using latewood density. Wood and Fiber Sci. 31, 416~425.
99. Schweingruber, F.H., Fritts, H.G., Braker, O.U., Drew, L.G., Schar, E. (1978). The X-ray technique as applied to dendroclimatology. Tree-ring bulletin. 38, 61~80.
100. Seth, M.K. (1981). Variation in tracheid length in blue pine. Part 2 Radial pattern of variation in tracheid length in the first-formed earlywood from pith to bark. Wood Sci. Technol. 15, 275~286.
101. Shepard, R.K., Shottafer, J.E. (1992). Specific gravity and mechanical property-age relationships in red pine. Forest Prod. J. 42, 60~66.
102. Shupe, T.F., Hse, C.Y., Choong, E.T., Groom, L.H. (1997). Differences in some chemical properties of innerwood and outerwood from five silviculturally different loblolly pine stands. Wood and Fiber Sci. 29, 91~97.
103. 重松頼生, 安本善次 (1970a). カラマツの材質試験 I 回旋木理と収縮率の樹幹内分布. 19回日林中支講 92~94.
104. 重松頼生 (1970b). カラマツの材質試験II 容積重と強度の樹幹内分布. 19回日林中支講 95~96.
105. 重松頼生, 安本善次 (1971a). カラマツの材質試験III 産地別人工林カラマツの材質比較. 20回日林中支講 245~251.
106. 重松頼生 (1971b). カラマツの材質試験IV 天然カラマツと人工林カラマツの材質比較. 20回日林中支講 259~263.
107. 重松頼生, 中屋秀樹 (1973a). カラマツの材質試験V 未成熟材における回旋木理の現れ方. 21回日林中支講 56~60.
108. 重松頼生, 徳本守彦 (1973b). カラマツの材質試験VI 生材含水率の四季的変動. 21回日林中支講 61~66.
109. 重松頼生 (1973c). カラマツの材質試験VII 回旋木理と年輪幅の関係. 22回日林中支講 7~10.
110. 重松頼生 (1974a). カラマツの材質試験IX 容積密度数と仮導管長の関係. 23回日林中支講 21~24.
111. 重松頼生, 原 一 (1974b). カラマツの材質試験X 仮導管の細胞形状の年輪内変動. 23回日林中支講 197~201.
112. 重松頼生 (1974c). カラマツの材質試験X I らせん木理の変動について. 23回日林中支講 202~207.
113. 重松頼生 (1974d). カラマツの材質試験X II 強度的性質の樹幹内変動. 23回日林中支講 208~213.
114. 重松頼生 (1976a). カラマツの材質試験X III カラマツ, アカマツおよびヒノキ材の強度比較. 24回日林中支講 43~48.
115. 重松頼生 (1976b). カラマツの材質試験X IV 小径木の強度的性質. 24回日林中支講 49~54.
116. 重松頼生 (1977). カラマツの材質試験X VI 早材及び晩材の比重について. 25回日林中支講 41~47.
117. 重松頼生 (1982a). 高齢カラマツ造林木の材質. 林業技術 480, 11~15.
118. 重松頼生 (1982b). カラマツの材質試験X X I 用材の品等区分(1). 30回日林中支講 193~198.
119. 重松頼生 (1983). カラマツの材質試験X X II 用材の品等区分(2). 31回日林中支講 241~246.
120. 重松頼生 (1984). カラマツ造林木の植栽密度による成長と材質の影響. 昭和57, 58年科研費補助金 (一般研究 C) 研究成果報告書 1~23.
121. 重松頼生 (1985a). カラマツの材質試験X X III 用材の品等区分(3). 33回日林中支講 101~104.
122. 重松頼生, 松林 寛 (1985b). カラマツの材質試験X X IV 植栽密度と仮導管長の関係. 33回日林中支講 105~107.
123. 重松頼生 (1987a). 育林技術と材質形成, とくにカラマツ造林木の間伐による成長と材質の変動. 昭和61年科研費補助金 (一般研究 C) 研究成果報告書 1~72.
124. 重松頼生, 石原祥生 (1987b). カラマツの材質試験X X VIII 用材の品等区分(6). 35回日林中支講 147~150.

125. 重松頼生 (1987c). カラマツの材質試験 X X IX 用材の品等区分(7). 35回日林中支講 151~154.
126. 重松頼生, 秋津裕司, 稲垣利樹, 今西 洋 (1988). カラマツの材質試験 X X X 仮導管長とマイクロフィブリル傾角の変動. 36回日林中支講 123~126.
127. 重松頼生 (1989a). カラマツの材質試験 X X X I 用材の品等区分(8). 37回日林中支講 135~138.
128. 重松頼生 (1989b). カラマツの材質試験 X X X II 用材の品等区分(9). 37回日林中支講 139~142.
129. 重松頼生 (1990a). カラマツの材質試験 X X X III 用材の品等区分(10). 38回日林中支講 193~196.
130. 重松頼生 (1990b). カラマツ造林木の材質, とくに生長と関連して(I)カラマツ造林木の材質形成. 木材工業 45, 445~451.
131. 重松頼生 (1991). カラマツ造林木の材質, とくに生長と関連して(II)カラマツ造林木の用材品等. 木材工業 46, 9~16.
132. 島崎洋路 (1986). 高密度カラマツ林の間伐に関する研究. 信大演報 23, 1~117.
133. 島崎洋路 (1993). 高密度カラマツ林の間伐に関する研究 (追録). 信大演報 23, 101~116.
134. 塩倉高義, 渡辺治人 (1968). カラマツ材の品質に関する基礎的研究 (第1報) 材質指標因子の樹幹内分布に関する予備実験. 農学集報 13, 99~104.
135. 塩倉高義, 渡辺治人 (1971). カラマツ材の品質に関する基礎的研究 (第2報) 樹幹内のカラマツ材の曲げ特性について. 農学集報 16, 91~98.
136. 塩倉高義, 渡辺治人 (1972a). カラマツ材の品質に関する基礎的研究 (第3報) 樹幹内における仮導管長の長さおよびフィブリル傾角の変動. 農学集報 17, 81~86.
137. 塩倉高義, 渡辺治人 (1972b). カラマツ材の品質に関する基礎的研究 (第4報) 幹径方向の平均仮導管長の変動と成長度との関係について. 農学集報 17, 87~94.
138. 塩倉高義 (1975). カラマツ材の品質に関する基礎的研究 (第5報) 乾縮率の樹幹内変動について. 農学集報 20, 1~8.
139. 塩倉高義 (1981a). カラマツ材の品質に関する基礎的研究 (第6報) 樹幹内の密度と仮導管径の大きさの変動について. 農学集報 26, 59~67.
140. 塩倉高義 (1981b). 針葉樹の未成熟材に関する知見補遺ならびにカラマツ樹幹内における材質の変動に関する研究. 東京農業大学木材工学研究会 pp1~71.
141. 塩倉高義 (1982). 針葉樹材における未成熟材の区分とその範囲. 木材学会誌 28, 85~90.
142. Sobue, N. (1986). measurement of Young's modulus by the transient longitudinal vibration of wooden beams using a fast Fourier transformation spectrum analyzer. mokuzai Gakkaishi. 32, 744~747.
143. 菅原 聡 (1983). カラマツ材の建築構造用材としての利用. (浅田節夫, 菅原 聡) 信州のカラマツ, pp307~318. リンケイ新聞出版局, 長野市.
144. 菅原 聡 (1990). 高齢のカラマツ人工林. 信大演報 27, 1~15.
145. 高田克彦, 小泉章夫, 上田恒司 (1992a). カラマツ産地試験林における樹幹ヤング係数の地理的変異. 木材学会誌 38, 222~227.
146. 高田克彦, 小泉章夫, 上田恒司 (1992b). カラマツにおける肥大成長と材質の種子産地間差. 木材学会誌 38, 1082~1088.
147. 武田孝志, 門脇太郎 (1998). スプルー斯拉ミナの曲げ強度と引張強度. 木材工業 53, 120~124.
148. 武田孝志, 橋爪丈夫 (1999a). カラマツラミナの局所ヤング係数の変動パターン. 木材学会誌 45, 1~8.
149. Takeda, T., Hashizume, T. (1999b). Differences of tensile strength distribution between mechanically high grade and low grade Japanese larch lumber 1: Effect of length on the strength of lumber. J wood Sci. 45, 200~206.
150. Takeda, T., Hashizume, T. (1999c). Differences of tensile strength distribution between mechanically high grade and low grade Japanese larch lumber 2: Effect of knots on tensile strength distribution. J wood Sci. 45, 207~212.
151. 武田孝志 (2000). 信州産カラマツ実大材の強度評価の寸法効果と機械等級区分. 信大演報 36, 21~81.
152. 武井富喜雄 (1977). カラマツ大径林の調査結果—カラマツ施業指針作製資料—. 長野林指業報 51, 165~177.
153. 武井富喜雄, 片倉正行 (1986). カラマツ構造材生産の施業技術に関する研究—カラマツの立地条件と生長について—. 長野林総セ研報 2, 12~20.
154. 武井富喜雄 (1989). 長野県におけるカラマツ林の現状と施業について. 木材強度・木質構造研究会シンポジウム pp1~12.

155. 武井富喜雄 (1991). カラマツ樹幹における肥大成長とらせん木理との関係について. 日林中支論 39, 187~189.
156. 武井富喜雄 (1997). カラマツの材質向上のための施業技術に関する研究. 三重大学学位論文.
157. Tasissa, G., Burkhart, H.E. (1998). Juvenile-mature wood demarcation in loblolly pine trees. *Wood and Fiber Sci.* 30, 119~127.
158. 寺崎 渡 (1963). カラマツの間伐試験(Ⅲ) カラマツ植栽林における間伐に関する研究. 林試研報 148, 51~71.
159. 徳本守彦, 武田孝志, 中野達夫, 橋爪丈夫, 吉田孝久, 武井富喜雄, 長尾博文, 田中俊成, 中井 孝 (1997). 長野県産カラマツ造林木の実大強度性能. 信大演報 33, 75~145.
160. Wang, S.Y., Chen, K.N. (1992). Effects of plantation spacings on tracheid lengths, annual-ring widths, and percentages of latewood and heartwood of Taiwan-grown Japanese cedar. *mokuzai Gakkaishi.* 38, 645~656.
161. 渡辺治人, 堤 寿一, 小島敬吾 (1963). 未成熟材に関する研究 (第1報) スギ樹幹についての実験. 木材学会誌 9, 225~230.
162. 矢幡 久, 宮島 寛, 西林寺隆, 古家宏俊, 児玉 貴, 汰木達郎, 山本福寿, 久保田 茂, 渡辺 桂, 野上寛五郎, 黒木晴輝 (1987). 六演習林スギ品種試験地のスギ在来品種および精英樹クローン間の材質変動. 九大演報 57, 149~173.
163. 吉田孝久, 橋爪丈夫, 中嶋 康, 武田孝志 (1999). カラマツ心持ち正角材の強度特性に及ぼす高温乾燥の影響 (I) 曲げ強度特性. 木材工業 54, 122~125.
164. Zhang, S.Y. (1995). Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories. *Wood Sci. Technol.* 29, 451~465.
165. Zhang, S.Y., Simpson, D., Morgenstern, E.K. (1996). Variation in the relationship of wood density with growth in 40 black spruce (*Picea mariana*) families growth in New Brunswick. *Wood and Fiber Sci.* 28, 91~99.
166. Zhang, S.Y. (1998). Effect of age on the variation, correlations and inheritance of selected wood characteristics in black spruce (*Picea mariana*). *Wood Sci. Technol.* 32, 197~204.
167. Zobel, B.J. and Buijtenen, J.P. (1989). *Wood variation: Its causes and control.* pp. 72~125. Springer-Verlag, Berlin.
168. Zobel, B.J. and Sprague, J.R. (1998). *Juvenile wood in forest trees.* pp. 1~139. Springer-Verlag, Berlin.

## The Growth and Wood Quality of Aged Japanese Larch Trees Produced in Shinshu

Jianjun Zhu

### Summary

Japanese larch (*Larix kaempferi* Carriefe) is one of the most important timber species in Nagano prefecture, and most of them were planted under the plans for short rotation managements. Now, longer rotation managements are required because of wood quality problems in young trees and changes of timber demand. But there are few studies on wood qualities related to long rotation management.

In the research, sample trees from 106-year-old Japanese larch plantation were set as main study subject. By analyzing their annual ring structures, characteristics of juvenile and mature wood were clarified, and juvenile and mature wood were compared at effects of radial growth on annual ring indices. Furthermore, lumbers and square-sawn timbers from aged forests were investigated for practical use.

#### 1. The radial variation of ring indices

By means of X-ray densitometry, I examined the annual ring structure of sample trees from Saku, as well as Yabuhara and Tera. Results showed that ring width was large near the pith, decreased abruptly with increments of ring numbers and got stable from 15~20 annual rings. The variation patterns of earlywood width in radial direction were agreed with those of ring width.

Ring density was low near the pith, and increased with ring numbers, and then got stable from 15~20 annual rings. But in sapwood, ring density tended to decrease. The radial variation of latewood density was similar to ring density.

These observations suggested that all of annual ring indices changed greatly near pith and got constant after 15~20th annual rings. Therefore, it should be necessary to distinguish the inner part near pith from outside part when dealing with wood quality.

#### 2. Relation between ring indices and radial growth

To examine the differences between juvenile and mature wood, sample trees from Saku and Yabuhara were used. Radial development of tracheid length and ring density was observed. And the relation of the radial growth rate (ring width) with some indices of ring structure was investigated.

The results proved that radial variations of tracheid length with ring number could be described by a logarithmic formula, and both plantations reached the demarcation of juvenile and mature wood at age 18. By using the segmented regression method, radial variations of ring density were analyzed. It was found that the demarcation of juvenile and mature wood was at age 15 for Saku and at age 21 for Yabuhara.

The obtained demarcation ages differed between tracheid length and ring density criteria. In practical use, ring density related closely with strength properties, so the results of demarcation based on ring density criteria were used to divide juvenile and mature wood. It was found that higher growth rate resulted in producing lower density wood in juvenile period, but the wood density in mature period did not decrease even with higher radial growth rate. The basic reason for this phenomenon was that latewood width increased with the growth rate increasing.

#### 3. Tensile strength for lumber

In order to testify whether the results obtained from annual ring level might be adapted for lumber level or not, tensile tests of lumber were conducted.

Results showed that mechanical properties of lumber varied greatly in radial direction within trees,

but all sample trees showed similar trend.

There were little differences in dynamic Young's modulus between lumber and small clear specimens, which were cut from non-destructed parts of lumber. On the other hand, there were great differences in tensile strength (TS), and the differences decreased with the increase of ring number, and got constant at about 30 years.

The presence and distribution of knots affected greatly on TS. Among knot indices, knot number (Kn) and knot area ratio of maximum single knot (Km) were proved to be effective indices for explaining the effect of knots. The distributions of Kn and Km in radial direction agreed with the variation of TS.

These results led that the mechanical properties of both them need about 30 years to reach a constant stage. The period was longer than 15~21 years, the results from annual ring level.

#### 4. Square timber qualities

In order to evaluate Japanese larch timbers from aged forest for practical use, I investigated the wood qualities of pithless square timbers, which are usually used as building materials. The knots, warps and Young's modulus were measured after air seasoning.

Much more square timbers were obtained from fast-growth trees compared to slow-growth trees. Also, there were much more timbers with less or without knots obtained from fast-growth trees than from slow-growth trees. It was also found that 80% of square timbers crooked and twisted after air seasoning, but the quantity of crook and twist was extremely less compared with boxed heart square timbers sawn from young trees. Young's modulus of timbers from aged trees was higher than from young trees.

Therefore, it may be suggested that aged trees have potential to obtain more square timbers with small warps and high Young's modulus compared to younger trees.

#### 5. Conclusions

The research steps were as follows. First, by using X-ray densitometry, radial variation of annual ring indices was brought out in annual ring level. Then, juvenile wood and mature wood were divided with tracheid length and ring density, and the relation between growth and wood quality was investigated by distinguishing juvenile and mature wood. Furthermore, the variation of tensile strength in lumber level was examined, and the results were compared with the demarcation ages from annual ring structures. Finally, the quality of square timbers from aged trees was investigated for practical use.

The results were summarized as follows:

- 1) The demarcation of juvenile and mature wood ranged from 15th to 21st annual rings that were estimated by tracheid length and ring density.
- 2) In mature wood, indices of wood quality kept stable, and fast radial growth did not result in lowering wood quality.
- 3) Ring density tended to decrease in sapwood.
- 4) It was necessary for more than 30 years to acquire wood with stable quality from the point of practical use.
- 5) many quality timbers could be obtained from large and aged trees.

Based on the conclusions, it was suggested that forest management should be aimed for long rotation, old age, and large diameter for Japanese larch plantations.

**Key word:** annual ring structure ; juvenile wood ; mature wood ; tensile strength ; square timber