

林木の肥大成長の速さと成長ひずみ[†]

北原 龍士* 境田 剛** 春山 勝昭**

Effect of Growth Rate on the Growth Strain in *Cryptomeria japonica*

by

Ryushi KITAHARA*, Tsuyoshi SAKAIDA** and Katsuaki HARUYAMA**

Growth stresses occur in the stem of living trees. They frequently cause considerable degradation of timber based on end-splittings and warps of logs and boards after felling or during machining. This paper examined the influence of rate of growth in stem diameter on peripheral longitudinal and internal longitudinal growth strains in 22, 25 and 30 years old plantation grown trees of *Cryptomeria japonica*. The relationship between peripheral longitudinal growth strain and wood properties was also investigated. Strain due to growth stress relief was measured by using electronic strain gauges glued to the outer xylem and within stem xylem. In addition to, set recovery (that is, dimensional change) due to growth stress relief within logs was measured by using a length comparator after heat treatment.

A negative correlation was found between level of growth strain and rate of growth in diameter in silviculturally treated trees. Lower average levels of growth strain occurred in trees with higher growth rate. The internal longitudinal strain gradient, along a radius from pith to outer xylem, was reduced in trees with a faster rate of growth. As such, less splitting and warp during conversion would occur in faster grown trees. Moreover, the fact that peripheral growth strain was lower in trees with higher wood density, longer tracheid length and smaller mean microfibril angle suggested that splitting and warp due to growth stress relief would be decreased by using silvicultural treatments.

Key words: Growth strain, Rate of growth, *Cryptomeria japonica*, Growth strain gradient, Set recovery, Wood properties

1 ま え が き

林木の肥大成長にともなう樹幹内に生じる成長応力は、林木が立木の状態で安全に生育するために、極めて有効な働きを行っている。しかし、木材利用の立場からみると、成長応力はさまざまな障害と密接にかかわっている。すなわち、立木の伐採、丸太の玉切り、製材そして乾燥の過程で、成長応力はその解放にともなう、心裂けや心割れ、縦そりなど、木材利用に不都合な現象をひき起こす原因となる。

これまで、林木の成長応力に関連して、その発生機構の解明、あるいは成長応力の解放が原因で起こる障害やその除去法などについて、さまざまな研究が行われてきた。これらのことは、Dinwoodie,¹⁾ 奥山,^{2)~4)} Wilkins,⁵⁾ Kubler^{6), 7)} などの総説や Timell⁸⁾ や Archer⁹⁾ などの著書に詳しい。しかし、林木の成長の仕方あるいは育林技術とのかわりか論議された例は数少ない。とりわけ、肥大成長の速さと成長応力との関係は、不明な点が多い^{6), 7)} さらに、林木の肥大成長の速さと関連して、成長応力と、木材の組織・構造的な材質指標とがどのようなかわりをもつのか、詳細な点のはっきりしない。

そこで、この研究では、同一林分内で、林木の個体間の競争によってもたらされる肥大成長の速さが、成長ひ

ずみの大きさに与える影響を明らかにする。さらに、林木の肥大成長の速さと関連づけて、成長ひずみと木材材質指標との結びつきについても究明したい。なお、この論文では、「肥大成長の速さ」の意味を、つぎのように用いている。つまり、林分を構成する各林木の間で、同じ生育期間(時間)内に、放射方向の積算成長量(距離)、すなわち樹幹木部の直径の差として現れる結果を、いわゆる「肥大成長の速さ」の違いとして取り扱っている。

2 実 験

宮崎大学農学部附属演習林内で、スギの22、25、30年生の3つの試験林を使って実験を行った。このうち25年生のものは、保育作業を施していない林分であり、残りは除伐と間伐を実施した林分である。また、それぞれの試験林を構成するスギ人工造林木は、各林分内で、同一植栽日(樹齢)、同一品種(タノアカ)、同一環境条件のもとで生育したものである。なお、林木の肥大成長速さの区分には、胸高部位での直径の値(樹皮部分を除く)を用いた。各試験林ごとに、林分内の毎木調査を行って、それぞれの林分の平均胸高直径を割り出し、それに該当する標準木を設定して、それより成長の速いものと成長の遅いものとに区分した。各試験林ごとの試験木数は、22年生林分が計18本、25年生林分が計12本、30年生

† 原稿受理 平成11年7月12日 Received July 12, 1999

* 正会員 宮崎大学農学部森林資源学講座 〒889-2192 宮崎市学園木花台西, Forest Resources Div., Faculty of Agriculture, Miyazaki Univ., Gakuen Kibanadai Nishi, Miyazaki, 889-2192

** 宮崎大学農学部農林生産学学科 〒889-2192 宮崎市学園木花台西, Dept. of Agriculture and Forest Sciences, Faculty of Agriculture, Miyazaki Univ., Gakuen Kibanadai Nishi, Miyazaki, 889-2192

林分が計9本, 合計39本であった。

これらの試験木について, 胸高部位の木部表面で, 立木時の軸方向の成長ひずみ量を, ひずみゲージ(共和電業製, KFG型, ゲージ長: 20mm)を用いて測定した。成長ひずみ量の測定のために, 立木の胸高部位で, 林地斜面の上側と下側にあたる樹幹表面の樹皮をはぎ取った。現れた木部表面, すなわち木部の最外層で, ひずみゲージを軸方向に, シアノアクリレート系の接着剤(共和電業製, CC-33A)を用いてはりつけた。接着剤の硬化後, 成長応力の解放前のひずみ量を, 静ひずみ測定器(共和電業製, UCAM-1A)を用いて測定した。その後, ひずみゲージの貼付位置の上下に, ドリルを使って穴をあけ, 成長応力を解放した後, 再びひずみ量を測定して, その変化量をもとめた。なお, 22年生林分の試験木のうち3本については, 実験中, ひずみゲージ・リード線の断線によって, 測定不能になった。また, 上述の成長ひずみ量の測定時期は, すべて11月中であった。

樹幹内部の軸方向成長応力の分布とその大きさを推定するために, 立木(22年生)の伐採を経て, そのうち9本の樹幹丸太の胸高部位付近から, 髓持ちの厚板(厚さ(T方向)約3cm×幅(R方向)約8~23cm×長さ(L方向)約30cm)を切り出した。その髓持ち厚板を木材小試片へ切り離し, 成長応力を解放することによって, 瞬間ひずみ回復量をひずみゲージ(ゲージ長: 10mm)を使ってもとめた。さらに, 上述の切り離した試片から, 寸法約1cm(R)×1cm(T)×15cm(L)の生材角棒を取り出し, 熱処理(マイクロ波加熱)を施すことによって, 軸方向成長応力の解放にもとづくセット回復量を調べた。その際, 寸法変化(標点距離: 10cm)を, コンパレータ(2軸測長器, 0.001mm精度)を用いて測定した。このように, 成長応力の束縛から完全に解放されるまでの過程のなかで, 木材内の残留ひずみの回復現象を明らかにした。なお, 以上の測定法は, さきの報告¹⁰⁾と同様であった。

前述の30年生林分において, 合計9本の試験木を伐採して, 成長ひずみ量を測定した箇所(木部最外層)付近から試料を取り出し, 仮道管の長さ, 細胞壁率, そして平均マイクロフィブリル傾角など, 各種の木材材質指標を測定した。容積密度数は, 細胞壁率の値から, 佐伯の式¹¹⁾を使ってもとめた。また, 平均マイクロフィブリル傾角は, Cousins¹²⁾の方法を用いて測定した。すなわち, 上述の試料から, 厚さ約50 μ mの板目切片を取り出し, それを氷酢酸と過酸化水素水との混合液で処理したあと, single wallを作成し, 偏光顕微鏡を使って平均マイクロフィブリル傾角を測った。

3 実験結果と考察

3.1 木部表面の成長ひずみ量と胸高直径

同一環境条件のもとで生育し, 同一樹齢(25年生)の林木で構成される保育作業を施していない林分では, Fig. 1に示すように, 林木の胸高部位での直径, とりもなおさず肥大成長の速さが増大すると, 軸方向の成長ひずみ量がやや減少する傾向を示した。しかし, その相関

は極めて低かった。

その一方で, 除伐や間伐などの保育作業を実施した2つの林分では, Fig. 2とFig. 3に示すように, 胸高部位での直径が増大すると, 明らかに成長ひずみ量は減少した。

これまでの研究をみると, 林木の生育環境と成長応力

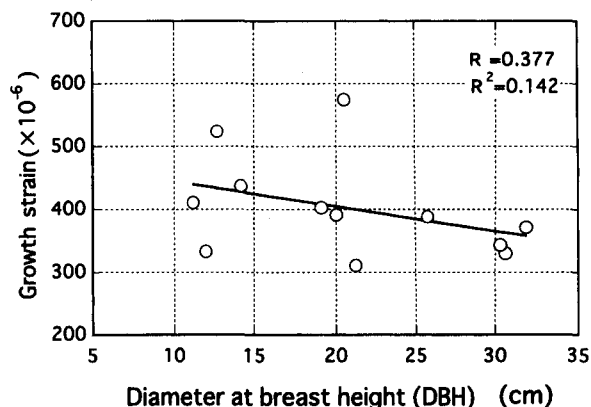


Fig. 1. Relationship between peripheral longitudinal growth strain and stem diameter at breast height (DBH) in 25-year-old *Cryptomeria japonica* (silvicultural treatment: untreated).

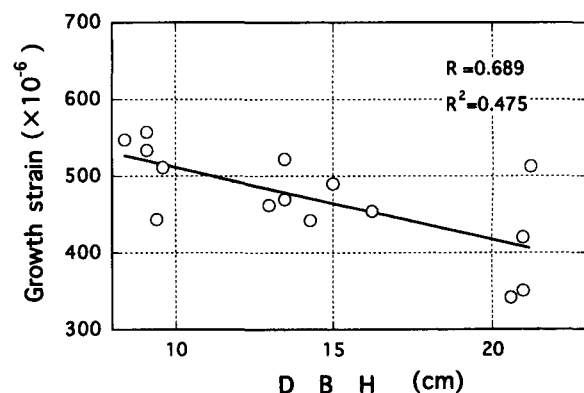


Fig. 2. Relationship between peripheral longitudinal growth strain and stem diameter at breast height (DBH) in 22-year-old *Cryptomeria japonica* (silvicultural treatment: thinned).

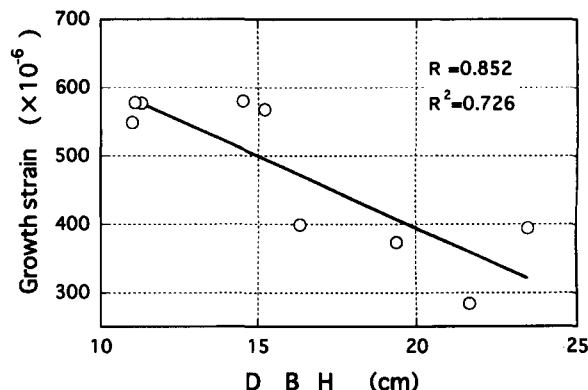


Fig. 3. Relationship between peripheral longitudinal growth strain and stem diameter at breast height (DBH) in 30-year-old *Cryptomeria japonica* (silvicultural treatment: thinned).

との関連性^{7), 13), 14)}を論議したものが多く中で、成長速さと成長応力の大きさとの間には、有意な関係が認められていなかった。^{15)~17)}このような中で、Chafe¹⁸⁾とMalan¹⁹⁾は、成長応力の大きさと成長速さとの間に、弱い正の相関関係を見いだした。その一方で、Ferrand^{20), 21)}は、林木の樹冠成長あるいは樹高成長の速さと成長応力の大きさとの間に、負の相関関係を認めた。このことから、保育作業と林木個体間の競争が、成長応力の大きさに影響を与えることを示唆した。このように、林木の成長速さと成長応力の大きさとの関係は、Kublerの成長応力についての総説^{6), 7)}にもみられるように、いろいろな説が入り乱れて、はっきりしなかった。このような状況のもとで、Wilkins²²⁾は、さまざまな保育作業（たとえば、間伐、施肥、除草、林地の耕作、害虫の駆除など）を、単独もしくはそれらを組み合わせてユーカリ林分に施すことによって、肥大成長の速さが成長ひずみの大きさに与える影響を調べた。その結果、各種の保育作業を施すことによって肥大成長を促進した林分では、成長ひずみ量が明らかに減少を示した。その一方で、保育作業を全く施していない林分では、林木の個体間の競争によって生じた肥大成長速さと成長ひずみ量との間に、ごくわずかながら負の相関関係が見られた。しかし、バラツキが大きく、明確な傾向をとらえることができなかった。

さて、林木の成長応力の存在意義^{5), 23)}をふまえて、この研究から得られた結果を考察すると、つぎのようなことが推察できる。林木の幹が細いときには、風などの外力を受けると、幹は大きいたわみ、風下側の形成層や辺材部に圧縮破壊が起こりやすくなる。それゆえ、幹が細いときには、幹の周辺部の軸方向に、成長応力として大きな引張り応力があらかじめ存在すれば、風下側の圧縮応力を弱め、その被害を最小限に食い止めることができる。他方、林木の幹が太くなるにともなって、幹は次第に剛性と強度を増して外力に抵抗できるようになる。このために、幹周辺部の軸方向に存在する成長応力、すなわち引張り応力も小さくてすむ。要するに、林木は、自らが安全に生立するために、自らの生育環境に対応した成長応力を発生しているのではなからうか。

ところで、この研究では、前述のように、スギの同一林分内で、林木の個体間競争によってもたらされた肥大成長の速さの違いが、木部表面の軸方向成長ひずみ量の大きさに影響を与えることを明らかにした。近年、ひずみゲージや接着剤、そして静ひずみ測定器などの性能向上が飛躍的に進み、従前に比べて、はるかに少ない試験木数で大略的な傾向をとらえることが可能になった。しかし、今回の実験結果は、限られた範囲の林分や試験木数で得られたものである。今後、さらに林分環境、林齢、樹種、保育作業などの影響について、詳細な検討を深めていく必要がある。

3・2 樹幹内部の成長ひずみ量と胸高直径

前述の保育作業を実施した林分のひとつ（22年生）を使って、肥大成長速さが樹幹内部の成長応力に、どんな影響を与えているかを調べた。まず、樹幹内部の軸方向

成長応力の分布とその大きさを推定するために、『2章 実験』で述べたように、髓持ちの厚板から木材小試片を切り離すことによって、成長応力の束縛から解放したときの瞬間ひずみ回復量をもとめた。その結果を、胸高直径の異なる代表的な4本の林木について、Fig. 4に示す。同一樹齢の林木では、胸高直径が大きくなると、樹幹内の髓から木部の最外層に至る放射方向各部位での、軸方向成長ひずみ量の分布、すなわち成長ひずみの傾斜がゆるやかになることが明らかになった。

ところで、林木に長期間にわたって成長応力が存在すると、樹幹内に永久変形、いわゆるセットが生じる。このセットは、蒸煮など熱処理を加えることによって初めて解ける。そこで、上述の髓持ちの厚板のうち3個（丸太番号：1, 2, 3）から切り離した木材小試験片から、さらに生材角棒を取り出し、熱処理（マイクロ波加熱）を行って成長応力を解放した。この生材角棒の軸方向長さ変化の代表的な例を、Fig. 5に示す。このセット回復のパターンは、Fig. 4に示した瞬間ひずみ回復の様子と極めて類似している。すなわち、胸高部位での直径が増

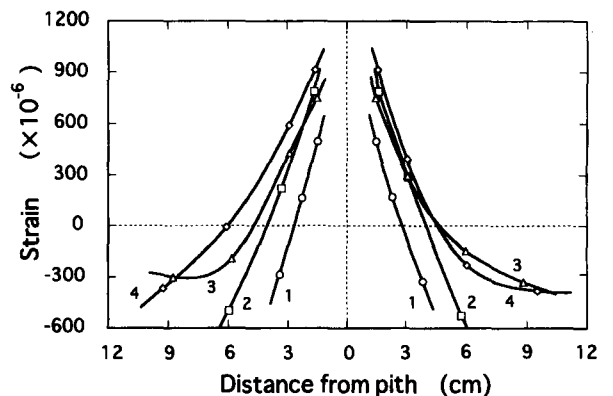


Fig. 4. Slope of internal longitudinal strain gradient along a radius from pith to outer xylem within logs of 22-year-old *Cryptomeria japonica*. The recovered strain due to growth stress relief was measured. Logs are labelled 1-4 in order of increasing diameter.

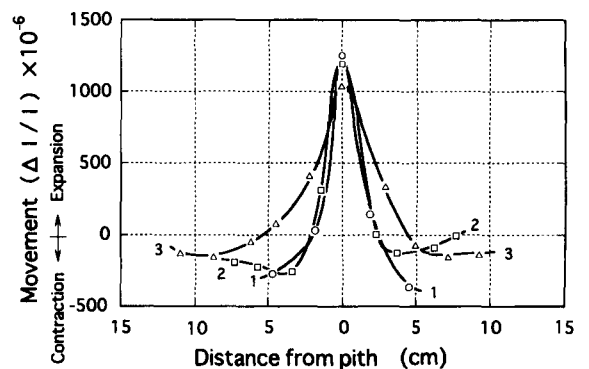


Fig. 5. Longitudinal set recovery due to growth stress relief after heating for green wood specimens taken from several positions from pith to outer xylem within logs of 22-year-old *Cryptomeria japonica*. Logs are labelled 1-3 in order of increasing diameter. l = length, Δl : displacement.

大すると、樹幹内の軸方向成長ひずみの傾斜がゆるやかになることが判明した。つまり、軸方向成長応力の傾斜の低減は、成長応力の解放にもとづく裂けや割れ、そしてそりなどの障害の発生が減少する²⁴⁾ことを意味している。

3・3 木部表面の成長ひずみ量と材質指標

さて、前述の結果で判明したように、林木の胸高部位での直径が増大すると、明らかに成長ひずみ量は減少した。そこで、『2章 実験』で述べたように、30年生の林分を使い、林木の肥大成長の速さと関連づけて、Fig. 3で得られた成長ひずみ量と、各種の材質指標との関係を調べた。その結果、Fig. 6とFig. 7にそれぞれ示すように、成長ひずみ量と、早材および晩材部の、容積密度数、そして仮道管の長さとの間には負の相関が認められた。また、Fig. 8からもわかるように、成長ひずみ量と平均マイクロフィブリル傾角との関係は、正の相関を示した。晩材部と早材部との間に、相関の程度の著しい差異は認められなかった。なお、上述の成長ひずみ量と各種材質指標との関係は、各30年生林木の木部最外層付近での実験結果から得られたものである。したがって、各林木の成長ひずみ量と各種材質指標値は、両者ともに品質のほぼ安定した成熟材部での測定値である。

従来の研究^{19), 22), 25)}の中では、ユーカリ造林木の肥大成長の速さと関連づけて、成長ひずみ量といくつかの材質指標との間に、負²²⁾あるいは正^{19), 25)}の相関関係が認められた。すなわち、容積密度数、繊維長、道管径が大きくなると、成長ひずみ量は減少²²⁾あるいは増大^{19), 25)}する傾向を示した。要するに、それらの両者の関係は、まだはっきりしていない。

ところで、われわれは別種の研究²⁶⁾で、林木の肥大成長の速さが木材材質指標に与える影響を詳細に調べた。その結果、成長の速い林木では、成長の遅い林木に比べ

て、成熟材部の容積密度数や仮道管の長さが増大し、しかも平均マイクロフィブリル傾角は減少を示した。つまり、成熟材部の材質性能に関連する材質指標値が、明らかに向上を示した。

以上のことから、林木の肥大成長速さと成長ひずみ量の大きさ、そして各種材質指標との関係は、前述(3・1節)の肥大成長速さもしくは樹幹直径と成長応力の大きさとのかわり方に考察を加えたことがらを踏まえて、つぎのように考えることはできないだろうか。すなわち、肥大成長が速い林木では、遅い林木に比べて、より速く、しかもより多く、安定した材質の成熟材部が木部に形成される。太い幹に加えて、各種の優れた材質指標値をもつ林木は、高い剛性と強度を備えることによって、風などの外力にも、容易に抵抗できる。したがって、そのような林木であれば、さほど大きな成長応力の存在も必要

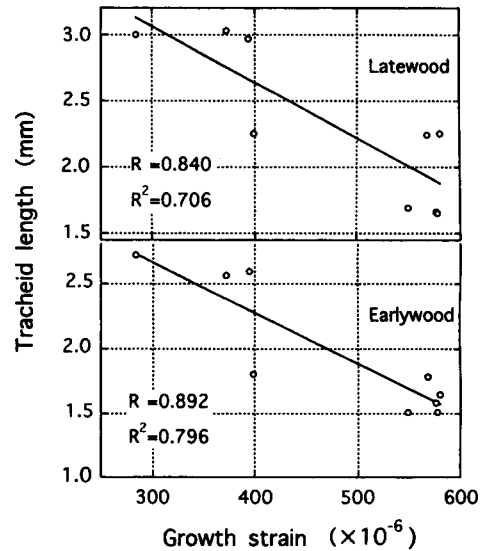


Fig. 7. Tracheid length and peripheral longitudinal growth strain in 30-year-old *Cryptomeria japonica*.

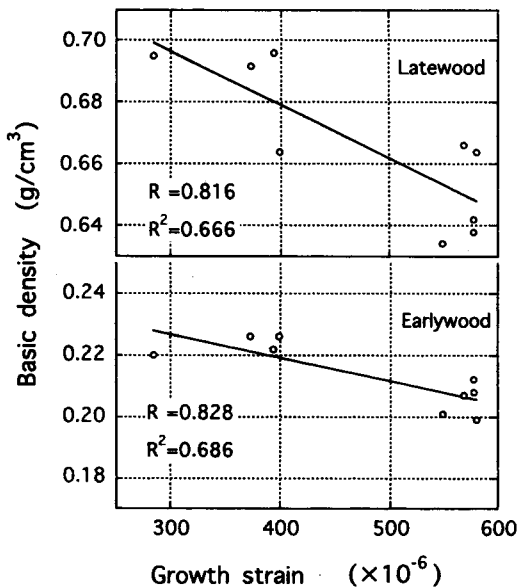


Fig. 6. Basic density and peripheral longitudinal growth strain in 30-year-old *Cryptomeria japonica*.

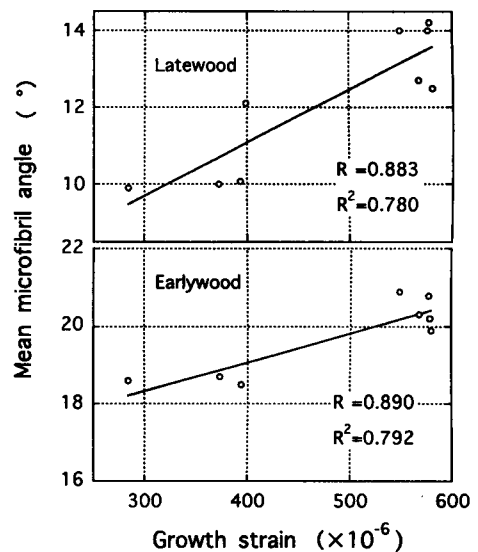


Fig. 8. Mean microfibril angle and peripheral longitudinal growth strain in 30-year-old *Cryptomeria japonica*.

なくなる。これらのこととも考え合わせ、林木の肥大成長速さとの関連において、成長ひずみ量の大きさと各種材質指標との関係は、さらに詳細な検討が必要だろう。

この研究をとおして得られたことがらを勘案すると、育林技術を使って林木の肥大成長速さを調節し、ひいては樹幹内の成長応力の大きさとその傾斜を制御できる可能性が示唆された。

4 結 論

林木の肥大成長の速さが、成長ひずみ量の大きさに与える影響を明らかにした。保育作業を施していない林分では、林木の樹幹直径、すなわち肥大成長の速さが増大すると、木部表面の軸方向成長ひずみ量が減少する傾向を示した。しかし、その相関は極めて低かった。その一方で、保育作業を施した林分では、林木の肥大成長の速さが増大すると、明らかに成長ひずみ量は減少した。また、肥大成長が速い林木ほど、樹幹内の髄から木部の最外層に至る放射方向各部位での、軸方向成長ひずみ量の分布、すなわち成長ひずみの傾斜がゆるやかになった。さらに、林木の肥大成長速さとの関連において、成長ひずみ量と、早・晩材部の容積密度数、そして仮道管の長さとの間には負の相関が、また平均マイクロフィブリル傾角との間には正の相関が認められた。なお、晩材部と早材部との間に、相関の程度の著しい差異は認められなかった。

以上のことがらを勘案すると、育林技術を使って林木の肥大成長の速さを調節することによって、樹幹内の成長応力の大きさとその傾斜を制御できる可能性が示唆された。

参 考 文 献

- 1) J. M. Dinwoodie, *Forestry*, **39**, 162 (1966).
- 2) 奥山 剛, *木材工業*, **39**, 467 (1984).
- 3) 奥山 剛, *木材学会誌*, **39**, 747 (1993).

- 4) 奥山 剛, *木材工業*, **49**, 446 (1994).
- 5) A. P. Wilkins, *Aust. For.*, **49**, 56 (1986).
- 6) H. Kubler, *Forestry Abstracts*, **48**, 131(1987).
- 7) H. Kubler, *Can. J. For. Res.*, **18**, 1215 (1988).
- 8) T. E. Timell, "Compression Wood in Gymnosperms 3", Chap.17 (1986) Springer-Verlag.
- 9) R. R. Archer, "Growth Stresses and Strains in Trees", (1987) Springer-Verlag.
- 10) 北原龍士, 堤 壽一, 松尾 毅, 宇都宮大学農学部演習林報告, No.22, 49 (1986).
- 11) 佐伯 浩, *木材学会誌*, **8**, 19 (1962).
- 12) W. J. Cousins, *Wood Sci. Techn.*, **6**, 58 (1972).
- 13) J. Saurat and P. Gurneau, *Wood Sci. Techn.*, **10**, 111 (1976).
- 14) B. F. Wilson, "Xylem Cell Development (ed. J. R. Barnett)", 275 (1981) Castle House Publ., Kent.
- 15) J. E. Nicholson, *For. Sci.*, **19**, 169 (1973).
- 16) S. C. Chafe, *Aust. For. Res.*, **9**, 203 (1979).
- 17) J. D. Boyd, *Aust. For. Res.*, **10**, 337 (1980).
- 18) S. C. Chafe, *Aust. For. Res.*, **15**, 51 (1985).
- 19) F. S. Malan, *South African For. J.*, No.144, 43 (1988).
- 20) J. C. Ferrand, *Ann. Sci. For.*, **39**, 187 (1982).
- 21) J. C. Ferrand, *Ann. Sci. For.*, **39**, 355 (1982).
- 22) A. P. Wilkins, "Effect of silvicultural treatment on the growth and wood properties of *Eucalyptus grandis*", Chap. 7(1991) PhD Thesis, Macquarie Univ., Sydney, Australia.
- 23) 渡辺治人, "木材理学総論", p.37 (1978) 農林出版.
- 24) 渡辺治人, "生長輪, 一生きていた木材-", p.63 (1974) 東京農業大学木材工学研究会.
- 25) J. E. Nicholson, G. S. Campbell and D.E.Bland, *Wood Sci.*, **5**, 109 (1972).
- 26) 白井真紀, 北原龍士, 第46回日本木材学会大会研究発表要旨集, p.80 (1996).