

未成熟材における圧縮成長応力発生へのマイクロフィブリル傾角の寄与

高山昇三・吉田正人・奥山 剛

スギ若齢木において、マイクロフィブリル傾角(MFA)と繊維方向成長応力の大きさを調べ、針葉樹未成熟材におけるMFAの圧縮成長応力発生への寄与を考察した。4年生クロンスギを様々な角度で人為的に傾斜させて生育させ、当年成長が停止した後に繊維方向の表面成長応力解放ひずみとひずみ測定部分のMFAを測定した。未成熟材であるためMFAは成熟材に比べ概して大きかったが、圧縮の成長応力が大きい部位ほどMFAは大きいという成熟材の場合と同様な結果が得られた。しかし、正常材から弱い圧縮あて材への過程で、成熟材では著しいMFAの増加が見られるが、未成熟材でのそれは僅かであった。未成熟材においても成長応力の発生は成熟材の場合と同様な機構で行われており、MFAは成長応力の大きさを制御する重要因子の一つであると考えられる。

キーワード：成長応力，成長応力解放ひずみ，マイクロフィブリル傾角，圧縮あて材

緒言

マイクロフィブリル傾角(MFA)は成長応力の大きさを制御する最重要因子の一つである(Yamamoto *et al.* 1992; Okuyama *et al.* 1994; Yamamoto 1998)。引張あて材では繊維方向に引張の成長応力が大きい部位ほどMFAは小さく(Okuyama *et al.* 1990)、非常に大きな引張の成長応力が発生している部位ではマイクロフィブリルが繊維軸に平行になったゼラチン層が分化している樹種もある。一方、圧縮あて材では圧縮の成長応力が大きい部位ほどMFAは大きく(Yamamoto *et al.* 1991)、大きな圧縮の成長応力が発生している部位では35°を超えるMFAも測定される。これらのMFAと成長応力の関係は、成熟材において明らかにされ、MFAが成長応力の発生に深く関わっていることが実測と力学解析によって証明されてきた(Yamamoto *et al.* 1992)。

未成熟のMFAは成熟材のそれより一般的に大きい(Hayfreen and Bowyer 1989; Bhat *et al.* 2001)。だが、未成熟材においても成長応力は状況に応じて様々な大きさで生じている。成長応力の大きさは樹木の姿勢回復のために変化する(Yoshida *et al.* 1999)。最適な姿勢を目指し、あて材が作られ、そこで特異な成長応力が発生する。そして発生した成長応力によって傾斜した樹幹は正しい位置に戻される。この姿勢を制御する機構は、若齢木も成熟木も同じであり、発生する成長応力をコントロールすることで行われている(Yoshida *et al.* 2000; Huang *et al.* 2001)。

これらのことから、成熟材より大きなMFAを持つ未成熟材においても、圧縮の成長応力の大きさとMFAとは対応関係があることが予想される。そこで本研究では、針葉樹の若齢木を人為的に傾斜させ、そこに発生した圧縮の成長応力とその部位でのMFAを測定し、未成熟材におけるMFAの成長応力発生への寄与を考察した。

方法

直径20 cmのポットに植えられている樹高約80 cm、樹齢4年のスギ(*Cryptomeria japonica* D. Don)クローンの脇に支柱を立て、幹が鉛直方向を保つように地際から高さ40 cm付近で幹と支柱とをワイヤで軽く結んだ。5月初旬に幹が鉛直から0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 40°, 60°の角度になるようにポットごと南側に傾斜させた(図-1 a)。1つの角度で5個体、計35個体を準備した。傾斜後は支柱によって幹基部からワイヤ固定位置までの姿勢回復は抑制されていた。7ヶ月後の12月に、成長応力解放ひずみ、組織観察、平均MFAを測定した。これらの測定時、ワイヤ固定部位より上の幹の姿勢回復は抑制されていなかったため、上向きに反った姿勢であった(図-1 b)。

表面成長応力解放ひずみ

試料は支柱とワイヤによって固定されており、成長応力の発生による姿勢の回復が抑えられていた。固定が外されると、試料は上向きに起きあがるスプリングバック現象が生じる。このスプリングバックは樹幹内部に蓄積されていた成長応力が作用したために生じるものである。従って、

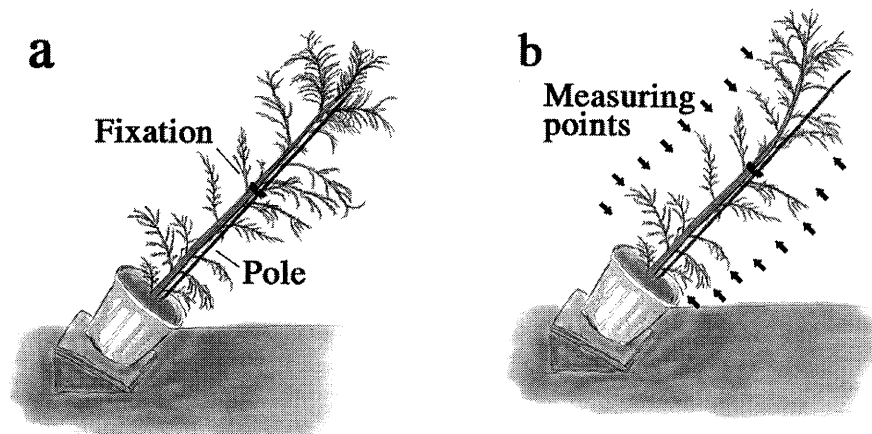


図-1. 人為傾斜によってスギ苗木幹の傾斜下側に圧縮成長応力を発生させる
(a) 傾斜直後の5月, (b) 当年成長が停止した12月, 成長応力測定時

成長応力解放ひずみ測定のための初期バランスは支柱に固定された状態をとった。

傾斜の上側と下側でそれぞれに8カ所測定した(図-1 b)。測定はYoshida and Okuyama (2002)の方法に従った。測定部位の樹皮および木部分化帯を剃刀で丁寧に除き、滑らかな木部最外表面を露出させた。ゲージ長3mmのひずみゲージ(KFG-3-120-C1-11, Kyowa)を接着剤(CC-33A, Kyowa)を用いて、繊維方向に貼り、ひずみ測定器(UCAM-1A, Kyowa)と3線結線で接続した。樹幹が支柱に固定された状態で初期バランスをとった後、幹を支柱から外した。ひずみゲージの繊維方向に隣接した両側部分に当年成長幅相当量(2-3mm)切り込みを剃刀で入れ、その時のひずみを測定した。このひずみを表面成長応力解放ひずみとした。

マイクロフィブリル傾角測定

測定した表面成長応力解放ひずみが広範囲で均等に分布するように、測定部位から17箇所を選びMFAの測定を行った。

測定はWang *et al.*の方法(2001)を改良して行った。表面成長応力解放ひずみ測定部から繊維方向長さ3cmのセグメントを取り、スライディングマイクロトームを用いて当年成長層のほぼ中央(木部最外層から約400 μ m付近)から厚さ20 μ mの板目切片を取った。この切片を塩化コバルト(CoCl_2)水溶液(5%, wt/vol)2mlが入ったバイアル瓶(容量4ml)に入れた。その後、バイアルを超音波槽(B2200, Branson)に入れて、約3分間、振動数47KHzで超音波処理した。処理した切片は、蒸留水ですすぎ、MFA測定を行うためにスライドガラスに載せグリセリンで封入しプレパラートを作成した。TVカメラ(OHD-200D, Olympus)を備えた光学顕微鏡(Axiophot2, Carl Zeiss)からPCへ画像を取り込み、画像解析ソフト(NHI-Image)を用いて繊維のMFAを測定した。各試験片について30カ所のMFAを測定し、平均MFAを算出した。

結果と考察

表面成長応力解放ひずみ

傾斜した試料において基部からワイヤ固定部の間では、傾斜した幹の下側では繊維方向に伸びの解放ひずみが測定され、そこでは圧縮あて材が形成され、圧縮の成長応力が発生していた。傾斜上側では小さな縮みの解放ひずみが測定され、この値は正常材に発生する成長応力であった(Yoshida *et al.* 1999)。一方、ワイヤ固定部から先端の間では、両側とも正常材に発生する小さな縮みの解放ひずみが測定された。この部分は姿勢回復が抑制されていなかったため、傾斜下側に圧縮あて材が形成され、そこに発生した圧縮の成長応力によって傾斜幹が上向きに持ち上げられた。姿勢が本来の鉛直に修正された後は、圧縮あて材による圧縮の成長応力は必要なくなり、正常材が作られるようになったのであろう。

概して傾斜角度が大きい試料ほど、傾斜下側で測定された伸びの成長応力解放ひずみが大きいという傾向があった。

マイクロフィブリル傾角

表面成長応力解放ひずみと平均MFAの測定結果を図-2に示す。解放ひずみが伸び(符号プラス)に大きくなるほど、大きな圧縮の成長応力が生じていた部位であり、強い圧縮あて材である。測定されたMFAは成熟材で測定されるものよりも全体にわたり、大きな値であった。

解放ひずみが -0.05% ~ 0.15% までは緩やかな増加の傾向であった。一方、 0.15% 以上の範囲では増加傾向は見られなかった。伸びの解放ひずみ領域での傾向は、31年生スギの成熟材で測定された結果(Okuyama *et al.* 1986; Yamamoto *et al.* 1995)と同様であった。しかし、縮みの解放ひずみ領域(符号マイナス)では、成熟材のスギで得られた結果では縮みの解放ひずみの増加に伴いMFAは減少しているのに対し、本研究での未成熟スギではMFAの減少

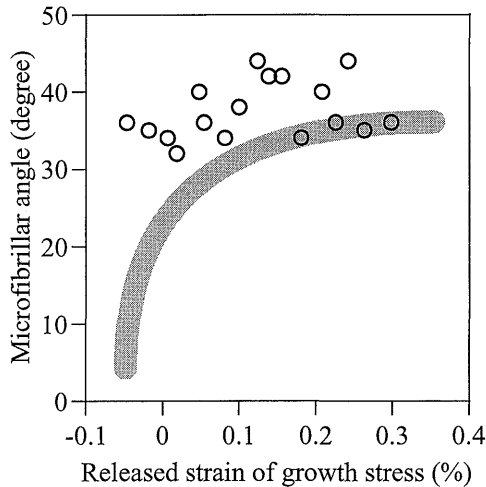


図-2. 繊維方向の表面成長応力解放ひずみと平均MFAの関係
○は4年生スギ, 太線部は31年生スギ(成熟材)

はほとんどみられなかった。

未成熟材では、正常材部で既にMFAは成熟材のそれより大きいため、圧縮の成長応力の増加に伴うMFAの増大は成熟材の場合ほどなかったが、伸びの解放ひずみが大きい部位ほどMFAも大きくなっていることが明らかになった。成熟材においての成長応力の発生機構はマイクロフィブリルがその軸方向に引張応力を発生させ、マイクロフィブリル間に堆積したマトリクスが圧縮応力を発生させる(Yamamoto *et al.* 1995; Yamamoto 1998)。従って繊維方向の圧縮成長応力はMFAが大きいほど大きくなる。未成熟材においても成長応力の発生はこれと同様な機構でおこなわれており、MFAは成長応力の大きさを制御する最重要因子の一つであると思われる。

引用文献

- Bhat K.M., Priya P.B. and Rugmini P. (2001) Characterisation of juvenile wood in teak. *Wood Science and Technology* 34: 517-532.
- Haygreen J.G. and Bowyer J.L. (1989) Forest products and wood science, an introduction. pp. 101-107. Iowa State University Press, Ames.
- Huang Y.S., Chen S.S., Lin T.P. and Chen Y.S. (2001) Growth stress distribution in leaning trunks of *Cryptomeria japonica*. *Tree Physiology* 21: 261-266.
- Okuyama T., Kawai A., Kikata Y. and Yamamoto H. (1986) The growth stress in reaction wood. In *Proc. XVIII IUFRO World Congress Ljubljana Yugoslavia September 7-21, 1986*. pp. 249-260. Yugoslav IUFRO world organizing committee, Ljubljana.
- Okuyama T., Yamamoto H., Iguchi M. and Yoshida M. (1990) Generation process of growth stresses in cell walls II, growth stresses in tension wood. *Mokuzai Gakkaishi* 36(10): 797-803.
- Okuyama T., Yamamoto H., Yoshida M., Hattori Y. and Archer R.R. (1994) Growth stresses in tension wood, role of microfibrils and lignification. *Ann. Sci. For.* 51: 69-83.
- Wang H.H., Drummond J.G., Reath S.M., Hunt K. and Watson P.A. (2001) An improved fibril angle measurement method for wood fibres. *Wood Science and Technology* 34: 493-503.
- Yamamoto H., Okuyama T., Yoshida M. and Sugiyama K. (1991) Generation process of growth stresses in cell walls III, growth stress in compression wood. *Mokuzai Gakkaishi* 37(2): 94-100.
- Yamamoto H., Okuyama T., Sugiyama K. and Yoshida M. (1992) Generation process of growth stresses in cell walls IV, action of the cellulose microfibril upon the generation of the tensile stresses. *Mokuzai Gakkaishi* 38(2): 107-113.
- Yamamoto H., Okuyama T. and Yoshida M. (1995) Generation process of growth stresses in cell walls VI, analysis of growth stress generation by using a cell model having three layers (S1, S2, and I+P). *Mokuzai Gakkaishi* 41(1): 1-8.
- Yamamoto H. (1998) Generation mechanism of growth stresses in wood cell walls, roles of lignin deposition and cellulose microfibril during cell wall maturation. *Wood Science and Technology* 32: 171-182.
- Yoshida M., Nakamura T., Yamamoto H. and Okuyama T. (1999) Negative gravitropism and growth stress in GA₃-treated branches of *Prunus spachiana* Kitamura f. *spachiana* cv. *Plenarosea*. *J. Wood Sci.* 45: 368-372.
- Yoshida M., Okuda T. and Okuyama T. (2000) Tension wood and growth stress induced by artificial inclination in *Liriodendron tulipifera* Linn. and *Prunus spachiana* Kitamura f. *ascendens* Kitamura. *Ann. For. Sci.* 17: 739-746.
- Yoshida M. and Okuyama T. (2002) Techniques for measuring growth stress on the xylem surface using strain and dial gauges. *Holzforschung*: in press

Role of microfibrillar angle on compressive growth stress in juvenile *Cryptomeria japonica*

Shozo TAKAYAMA, Masato YOSHIDA and Takashi OKUYAMA

In young stem of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) microfibrillar angle (MFA) and surface growth stress release strain in longitudinal direction were investigated, and the contribution of MFA to compressive growth stress generation was discussed. Inclined artificially at variable angle, four year-old sugi was grown, and after annual growth stopped, surface growth stress release strain and MFA were measured. Since they were juvenile wood, MFAs were large generally compared with mature wood. Like the case of mature wood, MFAs became large as compressive growth strain became

large. Although the remarkable increase in MFA was seen in mature wood during the process from normal wood to the weak compression wood, the MFA increase in juvenile wood was slight. In juvenile wood, generation of growth stress is generated by the same mechanism as the case of mature wood. MFA in juvenile wood seems

to be one of the important factors which control growth stress as well as MFA in mature wood.

Keywords: growth stress, released strain, growth strain, microfibrillar angle, compression wood