

苗木樹幹の膨潤・収縮量測定に対する ひずみゲージ法の適用と留意点

村本 健¹⁾, 中井 毅尚²⁾, 安部 久³⁾, 中尾 哲也²⁾

¹⁾ 島根大学大学院総合理工学研究科 材料プロセス工学専攻

²⁾ 島根大学総合理工学部 材料プロセス工学科

³⁾ 独立行政法人国際農林水産業研究センター林業部

Application and Attention for Measurement of Swelling and Shrinkage of the Stem in *Cryptomeria japonica* Saplings

Takeshi MURAMOTO¹⁾, Takahisa NAKAI²⁾, Hisashi ABE³⁾, and Tetsuya NAKAO²⁾

¹⁾ Master Course of Natural Resource Process Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Shimane University

²⁾ Department of Natural Resource Process Engineering, Faculty of Science and Engineering, Shimane University

³⁾ Japan International Research Center for Agricultural Sciences

Abstract

The strain gauge method was applied for measurement of swelling and shrinkage of the stem or thickening growth increment measurement of three-year-old cloned saplings of *Cryptomeria japonica* D. Don grown in a phytotron with irrigation every day or every 3 days, and application range and attention of the method were investigated in detail. The strain gauge was affixed on the surface of inner bark after removing the outer bark. Simultaneously, the pin marking method was done for the measurement of thickening growth quantity of the mature xylem as an anatomical technique.

When tissue in the strain gauge pasting position after 1 week was observed, normal inner bark cell, which ranked with the tidy in the tangential direction, was only observed. The value of thickening growth quantity of the mature xylem obtained from the pin marking method and the strain gauge method was almost equivalent.

When tissue in the strain gauge pasting position after 1 month was observed, normal inner bark cell as mentioned above was observed. And more, on the outside of the cell, random cell, the cell that emits the private use fluorescence of being lignin, and traumatic tissue has newly formed in order. In comparison with the growth increment of the mature xylem obtained from the pin marking method and the strain gauge method, the latter was slightly half value for the former.

It was found that the effect of temperature and relative humidity on the strain gauge method appeared about 20% of the output value at largest. However, when temperature and relative humidity are fixed without changing during measurement period, the strain gauge method has been stabilized without receiving the effect of temperature and relative humidity.

It was clarified from the simulation with the finite element method that the constraint affects of adhesive and strain gauge happen when Young's modulus of the inner bark is small. Therefore, the selection of adhesive and strain gauge is very important for the strain gauge method.

From the above result, the strain gauge method is enough applicable for a grasp of swelling and shrinkage behavior in short period (about 1 week). However, in the case of the quantitative measurement, it is necessary to correct the output value by the combination of measurement position and Young's modulus of the adhesive and strain gauge.

Key words: Strain gauge method, three-year-old cloned sapling, phytotron, inner bark, pin marking method, mature xylem, traumatic tissue, constraint effects, adhesive

1. 緒 言

樹幹の膨潤・収縮挙動,あるいは成長量を簡易的に測定する方法として,バンド式デンドロメーター法(Liming, 1957:Kozlowski, 1972:Palmer and Ogden, 1983)が古くから用いられてきた。それに加え約10年前から,ひずみゲージ法(Okuyama Yoshida and Yamamoto, 1995:Nakai and Abe, 1997, 1998:Abe and Nakai, 1999, 2003:Yoshida et al, 1999, 2000:Hosoo, Y., Yoshida, M., Imai T., and Okuyama, T., 2002, 2003))が用いられるようになった。後者の方法は,ひずみゲージそれ自身の取り扱いも比較的簡便で,また様々な寸法のものが市販されており,かつ安価であるため,非常に有用な方法であるといえる。これまで,比較的短期間の測定に対して木部分化帯の変動挙動を非常に精度良く実測できることが報告されている。しかし,1)長期測定に対する適用は可能か否か,2)ひずみゲージ設置時に表面を平滑化する作業(非破壊測定ではなく対象物に傷をつけていることになる)が,その部位の組織に対してどのような影響を及ぼすのか,3)測定部位によっては,温度や湿度といった外部の物理的因子の影響を受ける(Lovdahl and Odin, 1992)ことが報告されているが,ひずみゲージ法ではその影響がどの程度であるのか,などの問題に対する報告は非常に僅かである(中井,安部,2000)。

そこで本研究では,環境制御可能な人工気象室内においてスギクローン若齢木を生育し,上記の3つの問題に対する解決を試みた。なお,1)の問題に関連しては,木部の肥大成長量を,組織解剖学的なピンマーキング法(例えば,Wolter, 1968:Kuroda, 1986)で実測した。

2. 実 験

2.1 供試ひずみゲージ

金属抵抗体を,絶縁膜を介して試料に接着して用いる接着型ゲージを用いた。用いたゲージは,ゲージ長:5mmの自己温度補償ゲージ(東京測器(株))で,抵抗素子はCu-Ni系合金,またベース材料はエポキシ樹脂であった。接着剤には主剤をシアノアクリレートとするものを用意した(CN,東京測器(株))。

2.2 供試木

供試木には3年生のスギ(*Cryptomeria japonica* D. Don.)クローン苗木15本を用意した。これら苗木はパーミキュライトを入れたワグネルポットに挿し木した後,約2年半の間,自然光の中で生育し,その後人工気象室内において約半年間生育させた。苗木の試験開始時における高さは,平均で84cm,また,地上高13cmにおける樹幹直径は平均で1.57cmであった。

2.3 人工気象室

実験は環境制御可能な人工気象室(GC-2,小糸工業(株)製)内で行った。供試苗木は,実験を開始するまで人工気象室内で約3ヶ月生育させた。この場合,日長は1日のうち13時間(光を当てている期間:明運転)/11時間(暗闇にしている期間:暗運転)とした。温度設定は,明運転(暗運転)時:23(20)±1.0°Cとし,湿度設定は,75±5.0%R.H.一定とした。室内の人工光源は,8灯の水銀ランプ(1kW:HRF-1000X,松下電器産業(株))と,12灯の陽光ランプ(400W:D-400,東芝(株))を組み合わせた混合光とした。なおこの場合の光量は,光源から0.8mの高さにおいて約490.0±5.0μmol・s⁻¹・m⁻²/μA(曇天時並)であった。また各々の苗木には,栄養水(N 50.0 ppm, P₂O₅ 25.0 ppm, K₂O 30.0 ppm, CaO₂ 20.0 ppm, MgO₂ 10.0 ppm, Fe₂O₃ 2.0 ppm, Cu 0.1 ppm, Mn 0.1 ppm, Zn 0.1 ppm, B 0.2 ppm, Mo 0.1 ppm, 初期 pH : 5.2)を1リットルずつ定期的に与えた。

2.4 実験方法

2.4.1 樹幹の膨潤・収縮量測定のためのひずみゲージ法とピンマーキング法

2.4.1.1 環境条件

2.3で述べた条件下で行った。

2.4.1.2 ひずみゲージ法

樹幹の外樹皮を,カミソリを用いて丁寧に剥皮し,現れた内樹皮表面の接線方向に,前述のひずみゲージを,接着剤を用いて貼付した。また,ひずみゲージを貼付した近傍の乾燥を防ぐために,その部位の表面にワセリンを塗布した。なお,リード線の温度変化に対する影響を抑えるために,ひずみゲージとリード線との結線方法は,1ゲージ3線法とした。連続測定は最長約1ヶ月行い,実測したひずみゲージ出力から,1週間後と1ヵ月後の樹幹の成長量を計算した。

2.4.1.3 ピンマーキング法

用意した針を樹幹の表面から刺し込み,木部に達した後抜き取った。1週間後および1ヵ月後に,刺針した部分を含む樹幹を切断し,3%グルタルアルデヒドに固定した。その試料をエタノールと酸化プロピレンに浸し,エポキシ樹脂によって包埋した。包埋した試料から,厚さ:3μmの横断面切片をガラスナイフによって作製した。作製した横断面切片は,光学顕微鏡および,波長:330~380nmと420nmのバンドパス・フィルタを透過させた蛍光顕微鏡(OPTIPHOT-POL;Nikon)で観察し,写真撮影を行った。えられた光学顕微鏡写真から,刺針によって形成された傷害組織を目印として,1週間後と1

ヵ月後の成長量を測定した。

2. 4. 2 ひずみゲージ法と温度・湿度変化

実験は人工気象室内の人工光をすべて消灯し、暗闇下で行った。温度および湿度の設定条件は、以下の

1. 温度 20℃一定, 湿度 60, 65, 70, 75, 80%R.H.
2. 温度 25℃一定, 湿度 60, 65, 70, 75, 80%R.H.
3. 温度 30℃一定, 湿度 60, 65, 70, 75, 80%R.H.
4. 湿度 75%R.H.一定, 温度 15, 20, 25, 30, 35℃

とした。各条件につき4~6時間、樹幹の膨潤・収縮量測定を繰り返し行った。なお、上記1~4の各実験の合計所要時間は3日以内であった。また、この実験期間中の苗木に対する栄養水の補給は行わなかった。

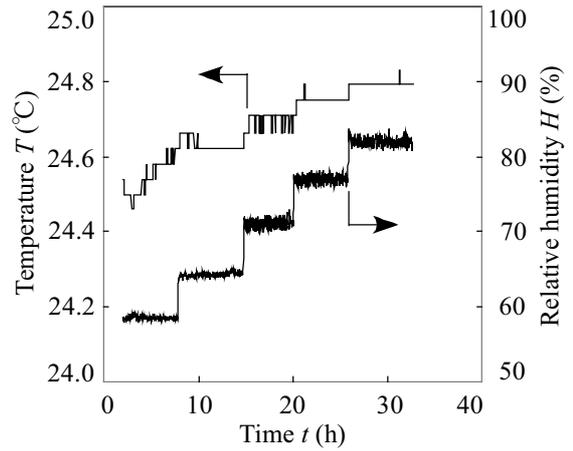
ここで、条件2および4の条件下における、苗木近傍の温度および湿度の変動を Fig. 1 の(a)および(b)に例示した。その結果、25℃の温度設定に対しては最大 25-0.5℃であった (Fig. 1.(a))。なお、20℃および30℃の温度設定に対しては、設定値に対して最大±0.5℃の出力差が認められた。また、75%R.H.の湿度設定に対しては概ね 75±5%R.H.の出力値であった (Fig. 1.(b))。図中に現れた温度上昇時における湿度の大幅な上昇は、温度上昇に伴う室内の乾燥を防止するために、一時的に湿気が放出されたためである(調整時間約1時間)。なお、35℃の温度設定の場合、温度、湿度共に安定していないが、これは人工気象室そのものの設定精度の問題である。

3. 結 果

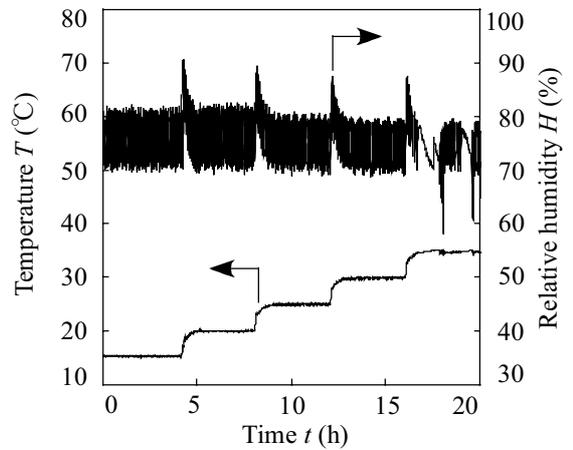
3. 1 ひずみゲージ法とピンマーキング法から算出した新生木部の成長量の比較

ひずみゲージ法、およびピンマーキング法から算出した新生木部の直径成長量(平均値)を例示した (Table 1)。なお、ひずみゲージ法では、樹幹を円とみなして近似計算を行い算出した。

表から明らかなように、毎日(3日おきに)給水した場合、1週間後の直径成長量は、ピンマーキング法に対してひずみゲージ法では、98.0(97.5)%の出力値であった。同様に、1ヵ月後の成長量は、45.7(44.6)%の出力値であった。



(a) 条件2.



(b) 条件4.

Fig. 1. 苗木近傍の温度および湿度の変動.

説明: 温度 25℃一定, 湿度可変(60~80%R.H.), 湿度 75%一定, 温度可変(15~35℃).

3. 2 ひずみゲージ貼付部分の顕微鏡観察

Fig. 2 にひずみゲージを貼付した部位(内樹皮)の、1週間後(a)、および1ヵ月後(b)における樹幹横断面組織の顕微鏡写真を示した。なお、ひずみゲージおよび接着層付近は、試料調整最中に剥がれ落ちたため残っていない。また、これらの写真はUV励起で撮影したものである。

その結果、1週間後(a)における内樹皮の細胞には明確な

Table 1. ひずみゲージ法およびピンマーキング法により算出した新生木部の直径成長量(平均値).

	Irrigated every day		Irrigated every 3 days	
	After 1 week	After 1 month	After 1 week	After 1 month
Strain gage method D_s (μm)	392.5	780.0	140.0	274.3
Pin marking method D_p (μm)	400.6	1706.6	143.6	615.4
Ratio D_s/D_p (%)	98.0	45.7	97.5	44.6

変化は認められず, 接線方向に整然と並んでいた(領域 I). 一方, 一ヵ月後(b)では, 細胞の並びに明確な変化が現れた. すなわち, 1 週間後同様の, 接線方向に整然と並んでいる細胞(領域 I)の外側に, 不規則に並ぶ細胞(領域 R), リグニン様の自家蛍光を示す細胞(領域 F), および傷害組織(領域 T)と思われる細胞が順に形成されていた.

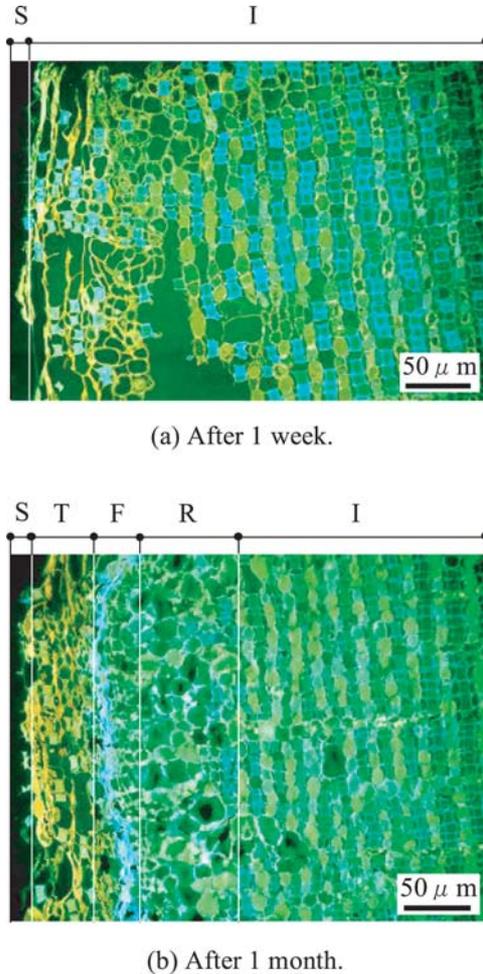


Fig. 2. ひずみゲージを貼付した部位の樹幹横断面組織の蛍光顕微鏡写真.

凡例: S:内樹皮表面, T:傷害組織, F:リグニン様の細胞, R:不規則に並ぶ内樹皮細胞, I:T 方向に整然と並ぶ内樹皮細胞.

3.3 ひずみゲージ法の出力値に及ぼす温度・湿度変化の影響

Fig. 3 に, 温度一定の環境下で湿度を変化させたとき(条件 1~3), および湿度一定の環境下で温度を変化させたとき(条件 4)における, 樹幹直径の日変動幅に対する各条件下で生じた変動の割合を示した.

その結果, 温度:20°C 一定(条件 1), 25°C 一定(条件 2), および 30°C 一定(条件 3)の環境下で湿度を 60~80%R.H.

に変化させた場合, 上記の割合は平均で

(条件 1):18.9% (最大値:20.2%, 最小値:16.7%),

(条件 2): 5.2% (最大値:6.2%, 最小値:4.0%),

(条件 3):11.4% (最大値:13.9%, 最小値:9.3%)

の割合であった.

一方, 湿度:75%R.H.一定(条件 4)の環境下で温度を 15~35°Cに変化させた場合, 平均で

(条件 4):16.6% (最大値:23.5%, 最小値:9.9%)

の割合であり, 条件 1~3 の温度一定環境下と比較すると, 標準偏差が 2.9~6.5 倍程度あり, 安定していなかった.

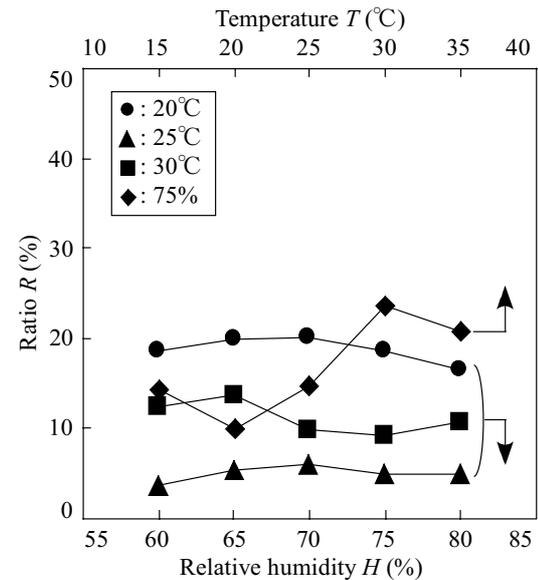


Fig. 3. 樹幹直径の日変動幅に対する各条件下で生じた変動の割合.

4. 考 察

4.1 ひずみゲージ法の適用限界

緒言で課題として挙げた, 1) 長期測定に対する適用は可能か否か, 及び 2) ひずみゲージ設置時に表面を平滑化する作業(非破壊測定ではなく対象物に傷をつけていることになる)が, その部位の組織に対してどのような影響を及ぼすのか, に対してまず述べる.

毎日(3日おきに)給水した場合, 1ヶ月後の直径成長量は, ピンマーキング法に対してひずみゲージ法では, 半分程度しか示さず(Table 1), また, ひずみゲージ貼付部位には, 通常の内樹皮組織とは異なる組織が新たに形成されていた(Fig. 2). これら新たに形成された組織の影響が原因で, ひずみゲージ法から求められた直径成長量が直接抑制されたのか否かは, 現段階では言及できないが, 少なくとも長期測定には不向きであり, またひずみゲージ貼付部位は, 測定期間が長期化すると貼付直後と大きく変化することが明らかとなった. しかし, 1週間後までにえられた直径成長量はピンマー

キング法と非常に対応しており (Table 1), かつ組織にも明確な変化が認められなかった (Fig. 2) ことから, 木部分化帯の変動挙動に対する短期測定には充分対応可能であることが明らかとなった. ただし, いくつか留意点は現れた. まず, ひずみゲージの拘束効果の影響である. 通常, ひずみゲージを用いる場合, 対象となる材料のヤング率に対して接着剤やひずみゲージを選定する. しかし, 今回のように非常にヤング率の小さい内樹皮に対して, それに適合する接着剤やひずみゲージを用意することは不可能ではないが難しい. 本研究で用いた主剤をシアノアクリレートとする接着剤のヤング率は, 約 0.98GPa であった. 接着剤とひずみゲージとの適合性には全く問題はないが, 内樹皮のヤング率が数十~数百 MPa であるため, 接着剤 (ひずみゲージ) と内樹皮の間には問題が生じる. これが前述の拘束効果である.

ここで Fig. 4 に例示した, 内樹皮, 接着剤, およびひずみゲージから成る簡単なモデルを想定してこの点を議論する. 解析には汎用有限要素法解析ソフト「ANSYS 8.0」(サイバネットシステム株式会社) を使用し, 解析をより簡単に行うために, 円筒モデルではなく, 平面モデルとした. 要素タイプは, 四辺形 8 節点とし, メッシュ形状は四角形とした. 境界条件は, 対称軸に対称境界条件を与え, すべての X 方向の境界面における Y 方向変位を拘束した. またモデルの左端のラインに 1MPa の圧力を負荷した. 内樹皮の組織構造は Fig. 2 (a) から明らかなように, 細胞は接線方向には整然と並んでいるが, 半径方向には整然と並んでいない. すなわち, 内樹皮のヤング率は (接線方向) \geq (半径方向) とおける. ここでは解析を簡単にするために, 両方向のヤング率を等しいと仮定し (等方性材料, ヤング率: 30MPa, ポアソン比: 0.3), また接着剤およびひずみゲージも等方性材料で, かつ材料定数はそれぞれ以下の,

- (解析 a) 接着剤 (ヤング率: 1GPa, ポアソン比: 0.3),
ひずみゲージ (ヤング率: 1GPa, ポアソン比: 0.3)

- (解析 b) 接着剤およびひずみゲージの材料定数
(ヤング率: 30MPa, ポアソン比: 0.3)

とした.

解析の結果, 引張後の O_1A の長さに対する O_3C の長さの比は, (解析 a): 22.2%, (解析 b): 81.6%, となった. 非常に粗い近似ではあるが, 解析 a は解析 b に対して 3 割程度の値しかえられないことが分かる. すなわち, ひずみゲージ法を用いて樹幹の膨潤・収縮挙動を測定する場合, とりあえず定性的な傾向を捉えるだけであるならば, 接着剤 (ひずみゲージ) の拘束効果を考慮に入れる必要はないが, 定量的な議論を進める場合には, 内樹皮および接着剤 (ひずみゲージ) の材料定数を考慮に入れてひずみゲージの出力値を補正する必要がある.

4.2 ひずみゲージ法と温度・湿度変化

緒言で課題として挙げた, 3) ひずみゲージ法に及ぼす温度・湿度変化の影響がどの程度であるのか, に対して述べる.

結線法として 1 ゲージ 3 線法を採用して温度変化に対する影響を押える努力は行ったが, 前述した通り, ひずみゲージ法に及ぼす温度の影響は大きいもので出力値の 2 割程度であった.

一方, ひずみゲージ貼付部表面にワセリンを塗布して外部の湿度変化を押える努力を行ったが, 前述した通り, ひずみゲージ法に及ぼす湿度の影響は大きいもので出力値の 2 割程度であり, また各出力値は, 温度変化時と比較して変動 (標準偏差) が大きくなった. すなわち, 樹幹の膨潤・収縮挙動をひずみゲージ法を用いて行う場合, 温度変化よりもむしろ湿度変化に注意する必要があると思われる. しかし, 単一の設定温度・湿度条件下におけるひずみ出力値は非常に安定しており, 測定中に温度および湿度の設定を

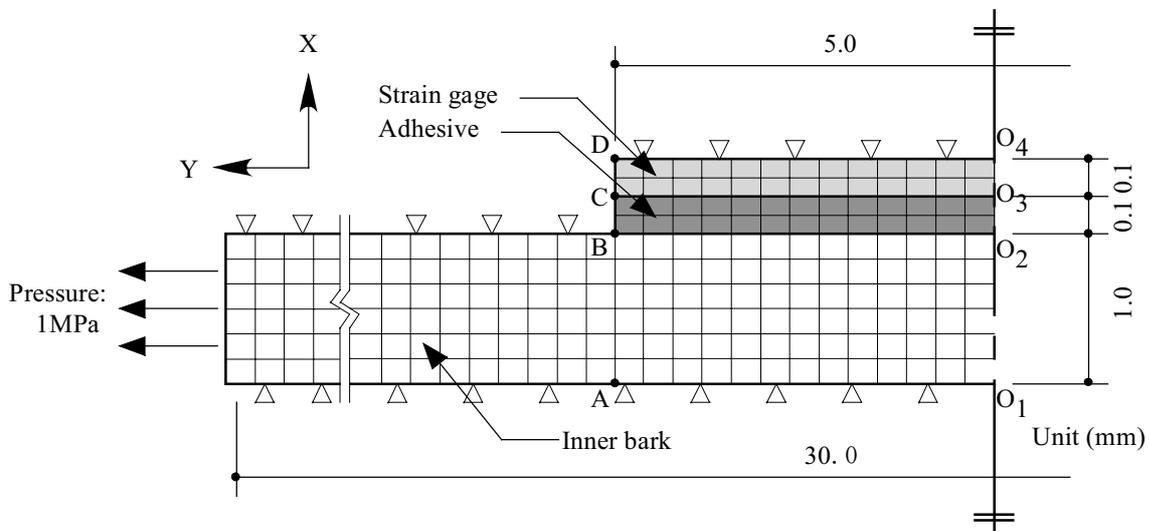


Fig. 4. 内樹皮, 接着剤, およびひずみゲージから成る有限要素モデル.

凡例: X 方向: 樹幹の半径方向, Y 方向: 樹幹の円周方向.

変更しなければ, 非常に精度良く樹幹の膨潤・収縮挙動をモニタリング可能であると考えられる。

4.3 ひずみゲージおよび接着剤の状況

一般に長期測定の場合, ひずみゲージそれ自身の疲労限界を議論する必要があるが, 前述した通り, ひずみゲージ法は樹幹の膨潤・収縮挙動の長期測定には不向きであるため, 考慮に入れる必要はない。

一方, 苗木の含水率の影響で, 接着剤が希釈されて粘度低下を生じ, 苗木の組織中へ浸透して欠膠を招き, 接着強度が低下する恐れが考えられる。この接着強度の低下は, 接着層の不良につながり, ゲージからの出力値の低下, あるいはゲージクリープの影響が現れる可能性もあるので, 接着剤の選定には充分注意する必要がある。今回用いたシアノアクリレートを主剤とする接着剤では, 上記の恐れはさほど問題ではないと現段階では考えているが, 実験後のその部位における顕微鏡観察を実際に行い, 確認する必要があると思われる。この点については追加課題としたい。

5. 結 論

樹幹の膨潤・収縮挙動, あるいは成長量の測定に対してひずみゲージ法を適用する場合の留意点を, 人工気象室内のスギクローン苗木を用いて詳しく調べた。

その結果, 1週間程度の樹幹の膨潤・収縮挙動の把握に対してその手法を適用することは充分可能であるが, 長期測定を行うと, 測定部位に通常と異なる新たな組織が形成され, 測定開始時に対象としていた細胞とは変わってくるため, 不向きであると考えられた。ただし, 前者で定量的な解析を行う場合には, 測定部位および接着剤(ひずみゲージ)のヤング率に充分留意しながら, 出力値の補正をする必要がある。

また, ひずみゲージ法に及ぼす温度, および湿度変化の影響は, 最大で出力値の2割程度であったが, 単一温度, および単一湿度の条件下における出力値は非常に安定しており, ほとんど温度, および湿度の影響は認められなかった。

参 考 文 献

Abe, H. and Nakai, T. (1999): Effect of the water status within a tree on tracheid morphogenesis in *Cryptomeria japonica* D. Don. *Trees*, **14**: 124-129.

Abe, H., Nakai, T., Utsumi, Y., and Kagawa, A. (2003): Temporal water deficit and wood formation in *Cryptomeria japonica* *Tree Physiology*, **23**: 859-863.

Hosoo, Y., Yoshida, M., Imai T., and Okuyama, T. (2002): Diurnal difference in the amount of immunogold-labeled glucomannans detected with field emission scanning electron microscopy at the innermost surface of developing secondary walls of differentiating

conifer tracheids. *Planta*, **215**: 1006-1012

Hosoo, Y., Yoshida, M., Imai T., and Okuyama, T. (2003): Diurnal difference in the innermost surface of the S2 layer in differentiating tracheids of *Cryptomeria japonica* corresponding to a light-dark cycle. *Holzforchung*, **57**: 567-573

Kozłowski, T. T. (1972): Shrinking and swelling of plant tissue. In water deficit and plant growth, vol.3, Plant response and control of water balance. Kozłowski, T. T. (Ed), 368pp, Academic Press, New York, San Francisco, London, 1-64.

Liming, F. G. (1957): Homemade dendrometers. *J. For.* **55**: 575-577.

Nakai, T., Abe, H. (1997): Measurements of the bioelectrical potential of a Japanese oak (*Quercus crispula* Blume) sapling *Mokuzai Gakkaishi*, **43**: 518-520.

Nakai, T., Abe, H. (1998): Measurements of the bioelectrical potential of a Japanese oak (*Quercus crispula* Blume) sapling: effect of the radial distribution of inorganic within a tree stem on the diurnal change in resting potential *J. Wood Sci.*, **44**: 249-254.

中井毅尚, 安部久 (2000): ひずみゲージ法は生立木樹幹寸法の変動測定において妥当か?, 第50回日本木材学会大会研究発表要旨集: 58

Okuyama, T., Yoshida, M. and Yamamoto, H. (1995): An estimation of the turgor pressure change as one of the factors of growth stress generation in cell walls. *Mokuzai Gakkaishi*, **41**(12): 1070-1078.

Palmer, J. and Ogden, J. (1983) A dendrometer band study of the seasonal pattern of radial increment in kauri (*Agathis australis*). *New Zealand J. Bot.* **21**: 121-125.

Tanaka, T., Uchida, E., Yokota, T., Hagiwara, A., Takeda, Y. (1994): Comparison between water absorption rate and sap-flow rate measured using the improved stem heat-balance method, *J. Jap. For. Soc.*, **76**(6), November.

Yoshida, M., Yamamoto, O., Tamai, Y., Sano, Y., Terazawa, M., Okuyama, T. (1999): Investigation of change in tangential strain on the inner bark of the stem and root of *Betula platyphylla* var. *japonica* and *Acer mono* during sap season *J. Wood Sci.*, **45**: 361-367

Yoshida, M., Hosoo, Y., and Okuyama, T. (2000): Periodicity as a factor in the generation of isotropic compressive growth stress between microfibrils in cell wall formation during a twenty-four hour period *Holzforchung*, **54**: 469-473