

## スギ苗木の樹液流量と樹幹の膨潤・収縮挙動との関係

村本 健<sup>1)</sup>, 中井 毅尚<sup>2)</sup>, 安部 久<sup>3)</sup>, 中尾 哲也<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 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

<sup>2)</sup> 島根大学総合理工学部 材料プロセス工学科

<sup>3)</sup> 独立行政法人国際農林水産業研究センター林業部

### Relationship between sap flow rate and swelling and shrinkage of the stem in *Cryptomeria japonica* saplings

Takeshi MURAMOTO<sup>1)</sup>, Takahisa NAKAI<sup>2)</sup>, Hisashi ABE<sup>3)</sup>, and Tetsuya NAKAO<sup>2)</sup>

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

<sup>2)</sup> Department of Natural Resource Process Engineering, Faculty of Science and Engineering, Shimane University

<sup>3)</sup> Japan International Research Center for Agricultural Sciences

#### Abstract

Three-year-old cloned saplings of *Cryptomeria japonica* D. Don were grown in a growth cabinet that allowed automatic control of temperature, relative humidity, and light conditions, and were irrigated once daily. The lighting period in the growth cabinet was controlled, with 14 h of light and 10 h of darkness (lights on at 08:00 and lights off at 22:00). This study investigated the relationship between sap flow rates and swelling and shrinkage of the stems of the cloned saplings. The improved stem heat-balance method and a strain gauge were used to measure swelling and shrinkage.

The sap flow rate reacted to light and darkness immediately, increasing and decreasing just after lights-on and lights-off, respectively. The tangential strain on the surface of the inner bark exhibited a reaction that followed but opposed the reaction of the sap flow to lighting conditions.

Based on the diurnal changes, sap flow rate rates over 24 hours could be divided into four periods: Zone A<sub>1</sub> began with lights-on, when the sap flow rate increased, and lasted about 2 hours. In the following zone, A<sub>2</sub>, the sap flow rate remained almost constant at 1.3 g/min for about 10 hours, and then declined for about 2 hours as lights out approached. In Zone B, the first dark period, the sap flow declined, quickly at first and then more slowly, for about 4 hours, until the start of the second dark period, Zone C, when the the sap flow rate became almost constant at 0.05 g/min and remained so for about six hours.

As noted above, close correlations were observed between sap flow rates and tangential strain in all periods. The first derivative of each sap flow rate and the corresponding tangential strain were calculated, and the results indicated a negative correlation between the two variables in all periods.

In particular, the relationship between the first derivative values exhibited a highly negative correlation in Zones A<sub>1</sub> and B, expressed as a primary formula. Sap flow was found to continue for some time after lights-out, and this compensated for reduced evaporative effects, albeit at a slow rate, over 4 hours.

The total sap flow rates during both the light and dark periods were measured. The total sap flow rate in the dark was only about 10% of that in the light, disregarding transpiration in the dark for convenience. Thus, the total sap flow rate responsible for swelling of the stem was about 10% of that consumed in evaporation during the light period.

*Key words:* Three-year-old cloned sapling, growth cabinet, sap flow rate, improved stem heat-balance method, strain gauge method, tangential strain

## 1. 緒 言

熱を利用した非破壊的な樹液流測定法には、プローブのヒーター供給熱の収支を利用したもの(幹熱収支法)と、ヒーター供給熱の伝達状況を利用したもの(ヒートパルス法や Granier(1987)の手法)とがある。それぞれヒーターの熱量が一定のものとはそうでないものとさらに二分できる。

幹熱収支法には大きく分けて 3 種類あり、ヒーター一定温度差型の幹熱収支法(Cermak et al, 1973)と、ヒーター一定発熱量型の幹熱収支法(Sakuratani, 1981), さらにヒーター一定発熱量型幹熱収支法の改良法(Tanaka et al, 1993)とに分けられる。この幹熱収支法は、単木当たりの樹液流量がえられる利点があるが、プローブは複雑になりがちである。これに対して、ヒートパルス法(Swanson and Whitfield, 1981)や、Granier(1987)の手法(Granier et al, 1987)では、プローブは比較的簡単であるが、流速を流量に換算する場合に幹通水断面積が必要となる。

今回の研究では、幹を深く傷つけないことと、樹液流量の流れに強い非定常性が認められる木本植物(樹木)における樹液流量測定をより精密に行うことを第一の目的としたため、プローブの複雑さは避けられないが、ヒーター一定発熱量型幹熱収支法を改良した手法(Tanaka, 1994)で樹液流量の測定を行った。

樹幹の膨潤・収縮挙動を測定するためには、バンド式デンドロメータ法(Liming, 1957; Kozlowski, 1972; Palmer and Ogden, 1983)や、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)などがこれまで用いられてきた。前者は長期測定をする場合、非常に簡便に測定が行える反面、えられた測定データでは冬季における周囲長減少などが経験的に知られている。一方、後者は短期間の測定に対して、特に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が、長期測定に対してはひずみゲージ貼付部に形成される傷害組織の影響で、実測値が実際の変動(成長)量よりも小さく現れることが知られている。

今回の研究では、短期間における木部分化帯の変動をより精密に測定することを第一の目的としているため、ひずみゲージ法を用いた。

## 2. 実 験

### 2.1 供試木

供試木には 3 年生のスギ(*Cryptomeria japonica* D. Don.)クローン苗木 10 本を用い、これらの苗木をバーミキュライトと共にワグネルポットに植え付けた。苗木の試験開始時における高さは、平均で 80.3cm, また、地上高 12.5cm における樹幹直径は平均で 1.19cm であった。なお苗木は、栄養水(N 50.0 ppm, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 25.0 ppm, K<sub>2</sub>O 30.0 ppm, CaO<sub>2</sub> 20.0 ppm, MgO<sub>2</sub> 10.0

ppm, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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 日おきに 1 リットルずつ与えながら育成した。

### 2.2 環境条件

実験は環境制御可能な人工気象室(GC-2, 小糸工業(株)製)内で行い、温度・湿度設定は 20±1.0°C, 75±5.0%R.H., 日長は 14 時間(明運転)/10 時間(暗運転)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、光量は光源から 0.8 m の高さにおいて約 490.0±5.0 μmol·s<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>/μA(曇天時並)であった。

### 2.3 実験方法

#### 2.3.1 樹液流量

##### 2.3.1.1 測定理論

樹液流量の測定には、改良型幹熱収支法(田中隆文他, 1994)を適用した。測定原理は以下に示す通りである。

まず、幹の周囲に帯状ヒーターを巻き付け、断熱材で覆い、定電圧電源に接続し熱量  $QH$  を供給する。熱量の行方としては Fig.1 に示す通り次の 5 つ, すなわち,

$QF$ : 樹液を暖め、その樹液が移動することにより運ばれる熱量,

$QU$ : 幹を伝導して上方向に運ばれる熱量,

$QD$ : 幹を伝導して下方向に運ばれる熱量,

$QS$ : 断熱材を放射方向に通過し周囲に逃げる熱量,

$HC$ : 樹幹内部の貯熱量の増減に使われる熱量,

が考えられる。すなわち、次式の熱収支式

$$QH = QF + QU + QD + QS + HC \cdots (1)$$

が成立する。(1)式を変形すると次式

$$QF = QH - (QU + QD + QS + HC) \cdots (2)$$

がえられる。(2)式の各項は以下の手順, すなわち

$QH$ : ヒーターに供給する定電圧電源の電圧と電流から算出,

$QU$ : ヒーターにより発生する上側の幹表面の温度勾配に比例,

$QD$ : ヒーターにより発生する下側の幹表面の温度勾配に比例,

$QS$ : 断熱材放射方向の温度勾配に比例,

$HC$ : 無視(ゼロとみなす),

により求め、これらをもとに熱量  $QF$  が求められる。(2)式から求めた  $QF$  をもとに次式

$$F = \frac{QF}{\delta\theta \cdot cp} \cdots \cdots \cdots (3)$$

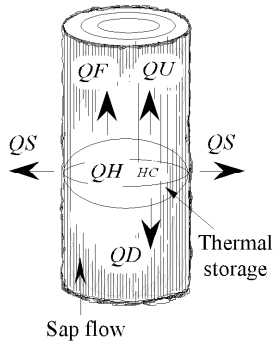


Fig. 1. Heat balance of the stem with the installed heater.  
 Legend:  $QH$ , Heat energy supplied by the heater.  $QF$ , Energy transported by sap flow from the heater.  $QU$ , Energy transferred up by thermal conduction along the stem.  $QD$ , Energy transferred down by thermal conduction along the stem.  $QS$ , Energy lost by convection from the surface of the heated stem into the surrounding air.  $HC$ , Energy saved by the energy change inside the stem.

より樹液流量  $F$  が算出できる。ここで、 $cp$  は水の比熱  $4.186 \text{ (J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ 、 $\delta \theta$  は樹液がヒーターを通過する前後の温度差である。この場合、樹液の流速が分からないため、ヒーター上下の温度を連続記録し、次式

$$T_{\text{Before}}(t) = T_{\text{Below}}(t - \frac{\sigma t}{2}) \dots\dots\dots (4)$$

$$T_{\text{After}}(t) = T_{\text{Above}}(t - \frac{\sigma t}{2}) \dots\dots\dots (5)$$

によって、ヒーターを通過するのに要する時間  $\sigma t$  を元に温度変化を計算した。ここで、 $T_{\text{Before}}(t)$ 、 $T_{\text{After}}(t)$  は、樹液がヒーター中心を通過する前後の時間  $t$  における樹液温度である。また、 $T_{\text{Below}}(t)$ 、 $T_{\text{Above}}(t)$  は、樹液がヒーターを通過する時間  $t$  におけるヒーター上下の樹液温度である。なお、 $\sigma t$  を考慮する理由は、木本植物が草本植物に比べ樹液流量の流れに非定常性が強いからである。(4)、(5)式を元に次式

$$F = \frac{60 \cdot QF}{(T_{\text{After}} - T_{\text{Before}}) \cdot a \cdot cp} \dots\dots\dots (6)$$

より、樹液流量  $F$  を求めた。なお、(6)式より算出した値をチェックするために次式

$$\frac{L}{F/S} = \sigma \theta \dots\dots\dots (7)$$

を用意し、この式が満足されなければ  $\sigma t$  の再計算を行い、改めて樹液流量を再計算した。ここで、 $L$  はヒーター直上・直下に設置された熱電対の距離 = 7cm、 $S$  は管内通水断面積である。

### 2. 3. 1. 2 測定方法

樹液流量の測定には樹液流量測定装置 (TUH-22, ハイドロ

テック(株)製)を用いた。設置方法は、まず外樹皮表面の凸凹をナイフにて取り除いて平らにし、その表面にサランラップを巻き、地表から約 15cm の高さに、Fig.2 に示すような幅 5cm のヒーターを樹幹に巻き付け、さらにヒーターの上下に Fig.2 に示すような計 8 個の熱電対を取り付けた。その上に断熱材を 3 重に巻きつけ、Fig.2 に示すように 1 重目および 2 重目表面に外部に逃げる温度を測定するための熱電対 1 個ずつ計 2 個を取り付けた。なお、樹液が対象木の幹内で偏流しているか否かを確認するために、熱電対をある一定角度おきに円周方向にずらしながら設置し、その都度繰り返し樹液流量を測定したところ、本実験では測定された樹液流量には大差はなくほぼ同等であった。

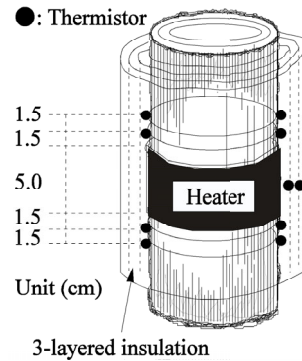


Fig. 2. Structure of the heater system used in this study.  
 Notes: Four thermocouples were located above the heater and four below. To measure the energy flow that escaped to the outside horizontally, two thermocouples were located inside the insulation: one in the inner inter-layer and two in the outer inter-layer.

### 2. 3. 2 樹幹表面の膨潤・収縮量の測定方法

樹幹表面の膨潤・収縮量の測定には、外樹皮を剥いだ内樹皮表面における接線方向ひずみを、ひずみゲージ(東京測器(株))を用いて 1 ゲージ 3 線法にて行った。なお、ひずみゲージの内樹皮表面への接着には、シアノアクリレート(CN-E, 東京測器(株))を用いた。

## 3. 結果と考察

### 3. 1 樹液流量と樹幹内樹皮表面の接線方向のひずみ量の日変動

周期的に明運転(14 時間)と暗運転(10 時間)とを切り替えた時の、樹液流量と接線方向ひずみとの関係を Fig.3 に例示した。その結果、測定期間中を通して樹液流量、および樹幹の内樹皮表面における接線方向のひずみ量は、いずれの測定日もほぼ同様な日変動を示した。なお、Day 3 の点灯運転

中の中頃から後半において、樹液流量および接線方向のひずみ量が共に他の測定日とは異なる変動を示しているが、これは給水の影響に因るものである。

樹液流量の日変動をもとに、一日を明運転時の2区間と暗運転時の2区間の計4区間に分類することができた。すなわち、点灯に伴い樹液流量が急激に上昇する区間 (Zone A<sub>1</sub>) と、樹液流量がほぼ一定値(約1.3g/min)から若干減少傾向を示す区間 (Zone A<sub>2</sub>)、また消灯に伴い樹液流量が急激に減少する区間 (Zone B) と、樹液流量がほぼ一定値(約0.05g/min)を示す区間 (Zone C) である。今回の苗木では、Zone A<sub>1</sub>: 約2時間、Zone A<sub>2</sub>: 樹液流量がほぼ一定値の区間: 約10時間、一定値から若干減少傾向を示す区間: 約2時間、Zone B: 約4時間、Zone C: 約6時間であった。ここで、日変動の様子をさらに詳しく調べると以下の通りであった。

まず樹液流量は、明運転開始とほぼ時期を同じくして上昇し始め、明運転開始約2時間後以降(約1.3g/min, Day 3は給水の影響で若干この値より低い)を示した。その後、暗運転開始2時間前に樹液流量が一定値から減少傾向に移行し (Day 3は給水の影響でこの減少傾向が現れずほぼ一定値を示した)、暗運転開始とほぼ時期を同じくして急激に漸減していった。さらに樹液流量は、暗運転開始約4時間後にほぼ底値に到達し、それ以降、ほぼ一定値(約0.05g/min)を示した。すなわち、暗運転開始から約4時間かけて、明運転時に消失した樹幹内の不足分の水分を補うために、樹液流は流れ続けたが、暗運転開始から約4時間後以降では水分の樹幹内における不足分もある程度補充され、その結果、樹幹内の水ポテンシャルの圧力勾配も僅かになり、土壌からの水分の吸い上げも僅かになった、と推測できた。

一方、樹幹内樹皮表面の接線方向のひずみ量は、明運転開始に伴う樹液流量の上昇に僅かに遅れて減少(幹の収縮)

していき、樹液流量が一定値を示した時期以降から幹の急激な収縮は終わり、その後、暗運転開始まで僅かに膨潤・収縮変動が認められた。先にも述べた通り、暗運転開始と共に樹液流量は急激に減少したが、接線方向のひずみ量はそれに引き続いて急激に増大(樹幹が膨潤)した。樹液流量が底値に達するまで、樹幹の急激な膨潤が認められたが、樹液流量が底値に達するのとほぼ時期を同じくして、接線方向におけるひずみ量の増大の傾きも緩やかになった。すなわち、接線方向のひずみ量の増減は、樹液流量の増減に非常に密接に関係していることが Fig.3 より明らかとなった。

### 3. 2 樹液流量と樹幹内樹皮表面の接線方向のひずみ量との相互関係

Fig. 3の結果をもとに、樹液流量と接線方向のひずみ量との対応関係をさらに詳しく調べるために、樹液流量の一次微分値 ( $dF/dt (=F')$ ) と、接線方向のひずみ量の一次微分値 ( $d\varepsilon/dt (= \varepsilon')$ ) との比較を行った (Fig. 4)。なお、各微分値は経過時間に対して、樹液流量と接線方向のひずみ量がどれだけ変化したかをみる指標である。Fig. 4には前項で分類した明運転時と暗運転時の計4区間それぞれに対する解析結果を併せて示した。

その結果、いずれの区間においても  $F'$  と  $\varepsilon'$  との間には負の相関関係が認められた。各区間別に詳しく観察すると、Zone A<sub>1</sub>:  $F'$  と  $\varepsilon'$  との間には良い負の直線関係が認められた。すなわちこの区間では、樹液流量の増加に対応して、接線方向のひずみ量は減少傾向を示すことが分かった。Zone A<sub>2</sub>:  $F'$  と  $\varepsilon'$  との間には弱い負の直線関係が認められた。Fig. 3 から明らかのように、この区間は、樹液流量がほぼ一定値を示した区間であったが、詳しく見ると、樹液流量の増加・減少に対して、接線

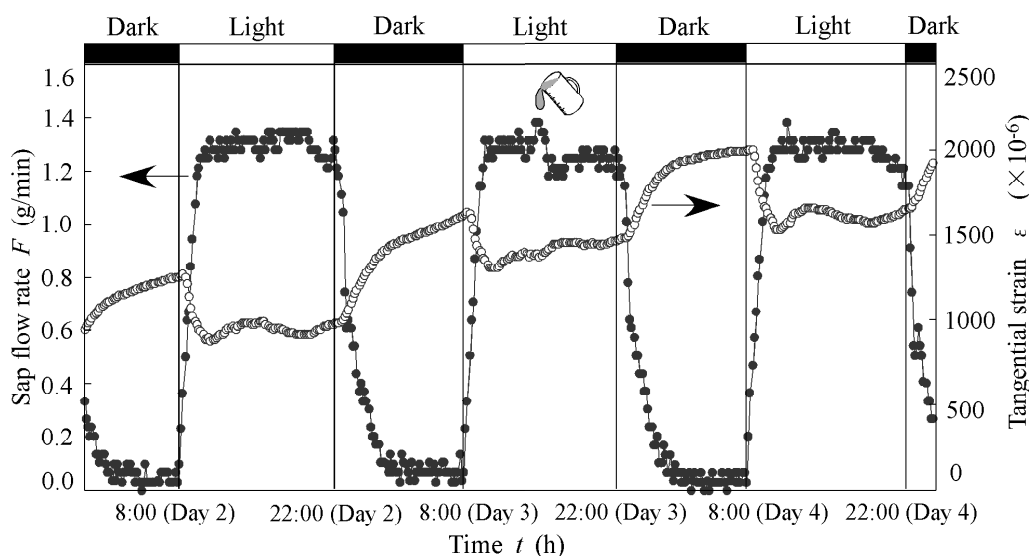


Fig. 3. Changes in sap flow rate (●) and tangential strain measured on the surface of the inner bark (○).  
Legends: Lighting period (white bars), 14 hours. Dark period (black bars), 10 hours.

方向のひずみ量は減少・増加傾向を示すことが分かった。Zone B:  $F'$ と $\varepsilon'$ の間には Zone A<sub>1</sub> 同様、良い負の直線関係が認められた。すなわちこの区間では、樹液流量の減少に対応して、接線方向のひずみ量は増加傾向を示すことが分かった。Zone C:  $F'$ と $\varepsilon'$ の間には非常に弱い負の直線関係が認められた。Fig.3 から明らかなように、この区間は、樹液流量が零に近いほぼ一定値を示した区間であったが、詳しく見ると、樹液流量の減少に対して、接線方向のひずみ量は増加傾向を示すことが分かった。

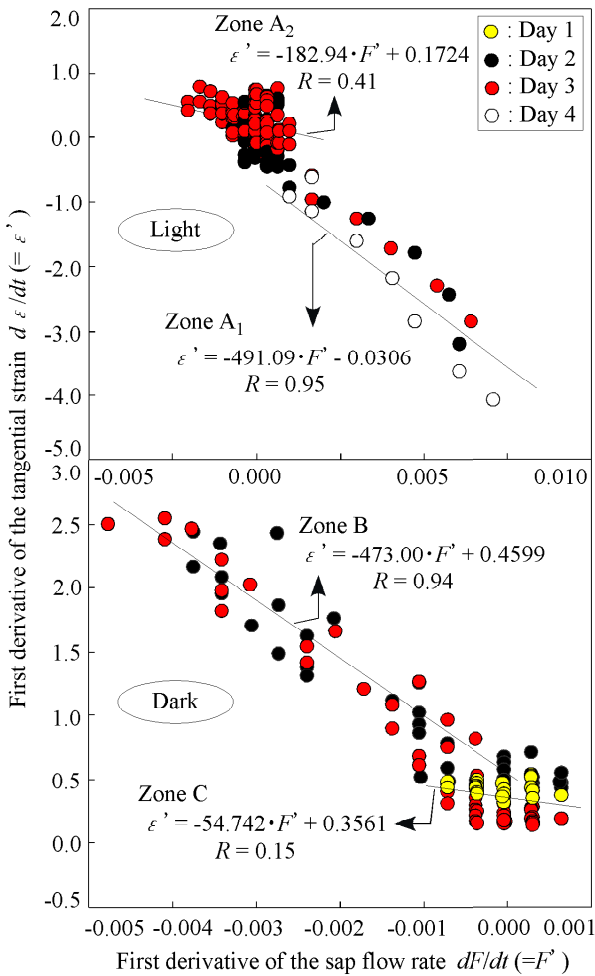


Fig. 4. Relationship between the first derivative of the tangential strain ( $d\varepsilon/dt (= \varepsilon')$ ) and that of the sap flow rate ( $dF/dt (= F')$ ).

Legend: Solid lines, Regression lines.

ここでさらに、それぞれの区間の対応関係を調べると、以下の通りである。前述の通り、Zone A<sub>1</sub>と Zone B は点灯・消灯直後からしばらくの反応区間であるが、両者の回帰直線の傾きは Zone B の傾きの方が Zone A<sub>1</sub>の傾きより若干低く現れた。この理由は Fig.3 から明らかなように、消灯後、樹液流量の減少割合が、接線方向のひずみ量が消灯に反応する前後で異なるためである。すなわち、消灯直後の樹液流量の減少割合は、

点灯直後の樹液流量の増加割合とほぼ同等な割合で変化するが、接線方向のひずみ量の反応が始まると、言い換えると樹幹の膨潤が始まると、樹液流量の減少割合はそれまでより小さくなり、その分 Fig.4 に示したような傾きの差として現れた。一方、樹液流量がほぼ一定値を示す Zone A<sub>2</sub>と Zone Cの領域では、明運転時の Zone A<sub>2</sub>の傾きの方が Zone Cの傾きよりも大きな値を示した。この理由も Fig.3 から明らかなように、点灯時の樹液流量および接線方向のひずみ量の変動が消灯時に比べて大きいためである。

### 3. 3 樹幹の膨潤に使われた樹液流量の推定

明運転時の2区間を一つの区間(14時間: Zone A), また暗運転時は前述同様、前半の約4時間の区間(Zone B)と、後半の約6時間の区間(Zone C)とし、これら各区間における樹液流量の総量を計算した。なお、樹液流量の総量の算出方法は、Fig.3 でえられた樹液流量の日変動のグラフを、それぞれの区間において積分することにより求めた。その結果、以下の

Zone A (8:00~22:00: 明運転) : 1000.6g,

Zone B (22:00~2:00: 暗運転) : 71.5g,

Zone C (2:00~8:00: 暗運転) : 20.2g,

がえられた。なお、上記の計算値は Day 2と Day 3の2日間の平均値である。各区間における樹液流量の総量の値を比較すると、暗運転時の樹液流量の総量は、明運転時の樹液流量の総量と比較してそれぞれ Zone B: 約7%, および Zone C: 約2%であった(暗運転全体: 約9%)。すなわち本研究において、消灯後、樹幹の膨潤に使用される樹液流量の総量は、明運転時のその僅か1割程度であり、逆に言えば、明運転時に樹幹内を流れ、蒸散で消費される樹液流量の総量は、暗運転時に樹幹の膨潤に使われるその約11倍と、かなり多いことが明らかとなった。ただし上記の計算では、便宜的に暗運転時には苗木は全く蒸散しないと仮定した場合であり、実際には暗運転時にも僅かに蒸散していると思われるので、今後さらに詳しく蒸散量の測定を試み、精密計算を行う予定である。

## 4. 結 論

日長を14時間(明運転)/10時間(暗運転)に設定した人工気象室内で、光量、温度、湿度、無機養分を制御しながら3年生のスギクロン苗木を生育し、それら苗木の樹液流量および樹幹の膨潤・収縮量(樹幹内樹皮表面の接線方向のひずみ量)を、それぞれヒーター定発熱量型幹熱収支法を改良した手法とひずみゲージ法で測定し、両者の対応関係を詳しく調べた。

その結果、点灯および消灯に対して、まず樹液流量が反応し、それに遅れて接線方向のひずみ量に変化することが分かった。また、樹液流量の日変動をもとに、一日を明運転時の2区間(Zone A<sub>1</sub>, Zone A<sub>2</sub>)と、暗運転時の2区間(Zone B, Zone C)の計4区間に分類することができた。それら各区間における樹液流量と接線方向のひずみ量との対応関係を調べたところ、

両者の間には非常に密接な関係があることが明らかとなった。すなわち、両者の間には、明運転・暗運転を切り替えた直後から樹液流量が一定値に達するまでの区間 (Zone A<sub>1</sub>, Zone B) において比較的良い負の直線関係が認められ、それ以外の区間 (Zone A<sub>2</sub>, Zone C) においても弱い負の直線関係が認められた。

一方、明運転時と暗運転時における樹液流量の総量を比較したところ、暗運転時に流れた樹液流量の総量、言い換えると樹幹の膨潤に使われた樹液流量の総量は、便宜的に暗運転時の蒸散量を無視すると、明運転時の蒸散に消費された樹液流量の総量の約1割であることが本研究より明らかとなった。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、有益なご助言を頂いた高知大学農学部大谷慶人助教授、および独立行政法人森林総合研究所東北支所中田了吾研究員に感謝の意を表します。

## 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.
- Kozlowski, T. T. (1972): Shrinking and swelling of plant tissue. In water deficit and plant growth, vol.3, Plant response and control of water balance. Kozlowski, 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.
- 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