九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

茎熱収支法によるヒノキ成木の樹液流量の測定と樹体における通水抵抗

作田, 耕太郎
九州大学農学部林学科

玉泉, 幸一郎
九州大学農学部林学科

矢幡, 久
九州大学農学部林学科

https://doi.org/10.15017/10864

出版情報：九州大学農学部演習林報告. 65, pp.89-106, 1992-01-31. 九州大学農学部附属演習林
バージョン：
権利関係：

茎熱収支法によるヒノキ成木の樹液流量の測定と樹体における通水抵抗

作田 耕太郎*・玉泉 幸一郎*・矢幡 久*

(1991年8月9日 受理)

Sap Flow Rate Measured with Heat Balance Method and Water Flow Resistance in Hinoki (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) Tree

Kotaro SAKUTA*, Koichiro GYOKUSEN* and Hisashi YAHATA*

(*Received August 9, 1991*)

抄 録

茎熱収支法の樹木への適用を目的とし，市販のダイナゲージ（DYNAMAX SGA100）を使用して18年生のヒノキの樹液流量を測定した．ダイナゲージによる測定精度は，測定された樹液流量と供試木の切断面からの吸水量とを比較することで検討した．

茎熱収支法による樹液流量の日変動パターンは，切断面からの吸水量の日変動パターンとよく対応した．しかし，絶対量では吸水量の小さい場合には過大に評価し，逆に吸水量の大きい場合には過小に評価した．この傾向は日積算値で比較した場合にも同様であり，茎熱収支法の長所とされている絶対量の直接測定に改善すべき点が認められた．そこで従来の計算式に若干の改良を加えた結果，吸水量と樹液流量との間に良好な関係が得られ，樹液流量の推定が可能となった．

茎熱収支法で測定された樹液流量と切断面からの吸水量，および葉の木部圧ポテンシャルの日変化から樹体の樹冠部，幹部，根系部について，それぞれの通水抵抗を算出した．その結果，樹体全体の通水抵抗に占める各部の割合は，樹冠部が42.3～47.6％，幹部が0.0～6.6％，根系部が51.1～52.4％と推定された．

1. はじめに

植物茎内の樹液流の測定に幅広く用いられている方法に，熱を利用したヒートパルス法（HUBER, 1932）と茎熱収支法（SAKURATANI, 1981）がある．ヒートパルス法は茎内に挿入した小さなヒーターに瞬間的に電流を流し，そこで発生した熱の移動速度を温度計で検出し，その速度から樹液流量を算出するものである．この方法は取り扱いが簡単で樹液流の変化に対する応答は速いが，幹横断面全体の測定ではないため実量と対応させるためには検定を必要とする．

これに対して茎熱収支法は，測定植物への影響が少なく比較的長時間にわたる連続測定

* 九州大学農学部林学科
Department of Forestry, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812

が可能であり，さらに流量を絶対値として得られる利点を持っている．しかし，茎熱収支法は草本測定用に開発されたものであるために，樹木への適用例は少なく（BAKER *et al.*, 1987）（SAKURATANI, 1981）（桜谷，1988），その有効性については不明な点が多い．

そこで本報告では針葉樹のヒノキ成木について，茎熱収支法による測定値と供試木の切断面からの吸水量との比較を行ない，茎熱収支法の有効性と問題点を検討した．さらに茎熱収支法で得られた樹液流量を使用して，樹体の樹冠部，幹部，根系部の各部の通水抵抗を算出し，樹木の通水抵抗の分布について議論した．

2. 茎熱収支法による樹液流量の測定原理

茎熱収支法の測定原理は，桜谷（1988）が以下のように報告している．

植物茎の一部に，組織に影響を与えない程度の熱量を周囲から加えたとき，この部位に加えられた熱量 Q(W)は，植物の蓄熱量の変化を無視すると，次の 3 つに分かれる（図 1，図 2）．

樹液流によって上方に輸送される熱量　q_f(W)

茎を伝導して上下方向に移動する熱量　q_d，q_u(W)

加熱部から周囲の空気へ失われる熱量　q_r(W)

以上の熱収支を式で表すと次のようになる．

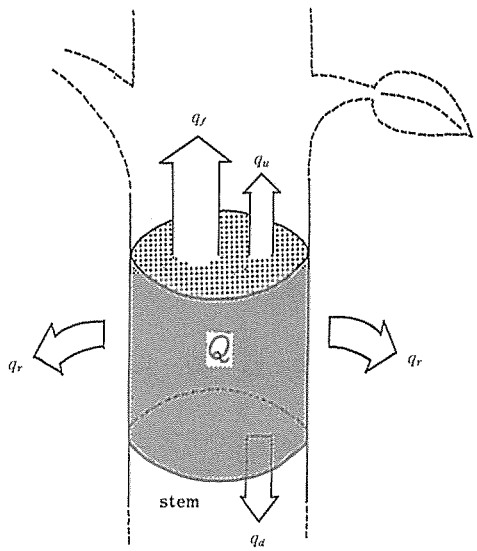

Fig. 1　A schema of heat transfer in a plant stem.
Q ; total quantity of heat given by a heater
q_f ; heat quantity carried by mass flow
q_d and q_u ; heat quantity carried by conduction up and down directions
q_r ; heat quantity lost from the surface of heater

図 1　茎を加熱したときの熱量（Q）移動の模式図

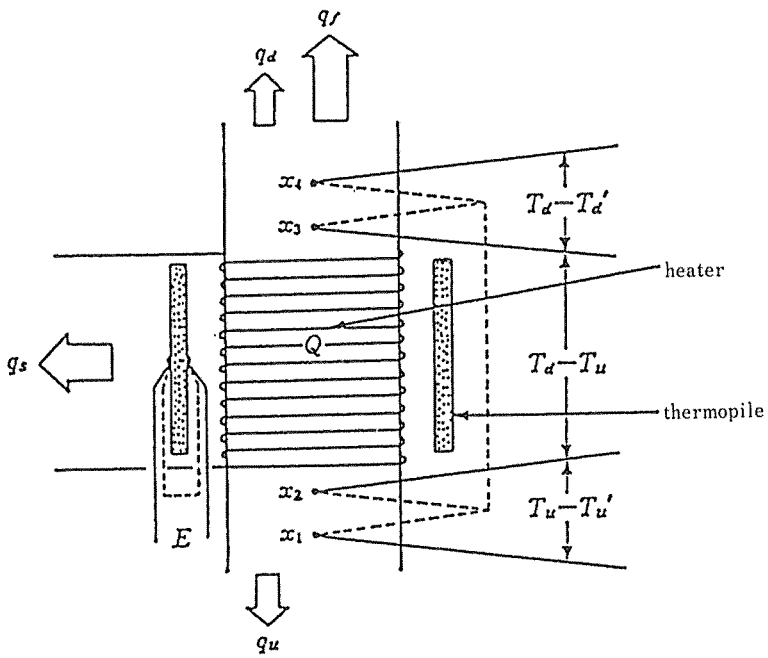

Fig. 2　Apparatus for measuring water flux in plant stem (Sakuratani, 1988)
Q and q_f ; same as in Fig.1
q_d ; same as q_u in Fig.1
q_u ; same as q_d in Fig.1
q_s ; same as q_r in Fig.1
T_u and T_d ; stem temperatures measured at up-and downstream respective points of heated segment
T_u' and T_d' ; stem temperatures at Δx down-and upward from the measuring points of T_u and T_d
E ; electromotive force of heat flow sensing element attached to the heated part
図2　茎熱収支法による樹液流量の測定方法（桜谷，1988）.

$$Q=q_f+q_d+q_u+q_r, \tag{1}$$

ここで,q_fは茎内を上昇する水の量（F，g/s）と加熱部上下の温度差（T_d-T_u,°C）の関数として以下のように表される.

$$q_f=c_wF\ (T_d-T_u), \tag{2}$$

ただし，T_d，加熱部直上の点x_3での茎温：T_u，加熱部直下の点x_2での茎温：c_w，水の比熱（4.18J/g・°C）である.

q_dとq_uは，一次元の定常熱伝導を仮定することができることから，次式でそれぞれ表される.

$$q_d=\lambda A\ (T_d-T_d')\ /\ \Delta x, \tag{3}$$

$$q_u=\lambda A\ (T_u-T_u')\ /\ \Delta x, \tag{4}$$

ここで，λ，茎の熱伝導率(≒0.54W/m・°C)：A，茎の横断面積(m²)：T_d'，x_3からΔx (m)離れた点x_4での茎温：T_u'，x_2からΔx (m)離れた点x_1での茎温である.

q_rはヒーター表面に装着された円筒上の熱流素子の起電力をE(V)とすると，

$$q_r = kE, \tag{5}$$

となる．ここでkはセンサー係数と呼ばれる，実験的に求められる定数（W/V）である．

以上の(2)～(5)式を(1)式に代入すると，樹液流量Fを次式から得られる．

$$F = [Q - \lambda A \{(T_d - T_d') + (T_u - T_u')\} / \Delta x - kE] / \{4.18 (T_d - T_u)\}, \tag{6}$$

すなわちFは，茎部に熱量Qを与えておいて，その部位の上下各2点で茎温を測定することにより評価できる．

センサー係数kは，$F=0$のときの各温度差とEの測定値から次式より求められる．

$$k = [Q - \lambda A \{(T_d - T_d') + (T_u - T_u')\} / \Delta x] / E, \tag{7}$$

$F=0$の条件は，測定後に測定部位の上下で茎を切断することによって得られるが，夜間，特に日の出直前を$F=0$と見なすこともできる．

以上が茎熱収支法の原理であるが，今回使用した測定センサーはこの原理にBakerら（1987）が若干の改良を加えて，DYNAMAX社（U.S.A.）によって製品化されたものである（図3）．このセンサーは，上述の原理ではヒーターに近い上下の熱電対（図2の$x_1 - x_2$と$x_3 - x_4$)で温度差を測定しているのに対し，ヒーターをはさむ，2組の熱電対（図3の$A - Ha$と$B - Hb$）で測定した温度差の平均値を温度差としている．したがって，上述の原理よりもそれぞれの熱電対間の距離が長くなるため，測定される温度差は信頼性を増すと考えられるが樹液流量の変動への応答性は低下する可能性がある．

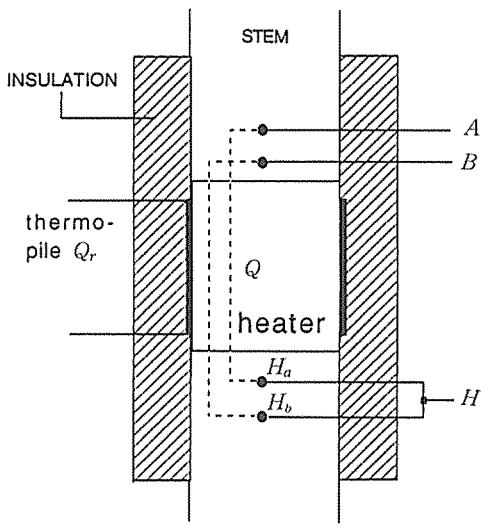

Fig. 3　Apparatus for measuring water flux in plant stem (DYNAMAX Inc., 1989).
Q ; same as in Fig.1
(A-H) and (B-H) ; measured the differences in temperature (A-Ha) and (B-Hb), respectively
Qr ; same as E in Fig.2

図3　茎熱収支法による樹液流量の測定方法（DYNAMAX Inc., 1989）

3．ダイナゲージの精度の検定

3.1．材料と方法

供試木には，九州大学農学部構内に生育する18年生のヒノキ（*Chamaecyparis obtusa Endl*．樹高8.1m，胸高直径10cm）を用いた．

ダイナゲージの使用においては，ヒーターおよび測温用の熱電対を供試木と密着させる必要があるので，供試木の地上部1.2mの部位の外樹皮を剝離し，さらに表面をサンドペーパーで平滑に磨いたのち装着した．ダイナゲージの周りは遮光シートで覆い，また雨水の侵入防止のため，遮光シート上部と樹幹との隙間にシリコンを注入した．ダイナゲージには電源装置（NIPPON STABILIZER INDUSTRY MSA18-1）から規格の電圧（DC 9V）をかけ，出力データはデジタル記録計（NIPPON DENSHI KAGAKU H-512）で5分間隔で収録した．同時に測定木周囲の気象条件として，測定木より約9m離れた開放地で光量子束密度をフォトダイオードを使い，また乾湿球温度を熱電対を使用して10分間隔でデジタル記録計に収録した．大気飽差は乾湿球温度から(8)，(9)，(10)式を用いて算出した．

$$D=E_s(T)-E_a, \tag{8}$$

ここで，D，大気飽差；$E_s(T)$，飽和蒸気圧；E_a，蒸気圧である．$E_s(T)$，E_aについては次の式から求めた．

$$E_s(T)=0.61078_{exp}\,[17.269T\ /\ (T+237.3)], \tag{9}$$

$$E_a=E_s(T_w)-\gamma(T-T_w), \tag{10}$$

ただし，T，乾球温度；T_w，湿球温度であり，$\gamma=0.066$（kP_a／°C）である．

ダイナゲージの設定と同時に供試木の周囲にやぐらを組んで，供試木を地際で切断した後も生立木と同じ姿勢を保持するように固定した．1990年9月22日の午前3時に地際で切断し，さらに樹体内の水が途切れないように地上部50cmで再び切断した後，切り口を直ちに容量20lの容器中の水につけた．吸水量の測定は容器中の水の減少量を測定することにより行なった(奥村ら，1987)．すなわち容器の下に台秤を置き，測定開始時刻の台秤の読みを基準の値として，単位時間に減少した水量を容器に加えて基準の値まで戻し，そのとき加えた水量を供試木の吸水量とした．

樹液流量，吸水量および各気象因子の測定は9月22日から10月2日まで11日間行った．測定期間の天候および測定項目は表1に示す．9月22日と9月27日は，1時間毎に吸水量の測定を行ない，その他の測定日は樹液流量の比較的多い時間帯（9:00－15:00の6時間）と少ない時間帯（15:00－9:00の18時間）に分けて，それぞれの時間帯における全吸水量を測定した．センサー係数kの値は，桜谷（1988）は，測定終了後に幹をヒーター装着部位の上下で切断すること，または夜明け前の樹液流量を0と見なすことから，(6)式に$F=0$を代入して求めているが，ここでは供試木の切断面からの吸水量が最低となる夜明け前の値を下値とし，その時間帯のダイナゲージの測定データの平均を(6)式に代入することによって求め，得られた値$k=0.11$を使用した．

表1　測定期間の天候と測定項目
Table 1　Weather conditions and measured items.

days	weather	measured items
Sept.22,1990	fine	cutting tree hourly water absorption rate (4:00-24:00)
23,	clear	daily water absorption (at 9:00 and 15:00)
24,	rainy	daily water absorption (at 9:00 and 15:00)
25,	cloudy	daily water absorption (at 9:00 and 15:00)
26,	cloudy, later fine	daily water absorption (at 9:00 and 15:00)
27,	fine	hourly water absorption rate (10:00-24:00)
28,	rainy	hourly water absorption rate (0:00-6:00)
29,	cloudy	daily water absorption (at 9:00 and 15:00)
30,	clear, sometimes cloudy	daily water absorption (at 9:00 and 15:00)
Oct. 1,	clousy, later fine	daily water absorption (at 9:00 and 15:00)

3.2. 結果と考察

3.2.1. 樹液流量と吸水量の日変化

9月22日と9月27日に測定されたダイナゲージによる樹液流量と切断面からの吸水量，光量子束密度および大気飽差の日変化を図4に示す．樹液流量と吸水量は，日の出後すぐに増加を始め日中に最大値に達し，その後夕方にかけて低下するという同様の変動を示した．しかし，早朝の樹液流量は吸水量に対して立ち上がりに遅れが見られた．この遅れについては，センサー反応の遅れによる可能性がある．すなわち，植物の茎の熱容量は水とほぼ等しいが，茎が太いほど熱容量は大きくなり，樹液流量の急激な変化に対して熱収支が平衡状態に達するまでの時間が長くなる．このため，樹液流量が急激に変化した場合，センサーによる計測値が正しい値を示すには数分から数十分程度かかることになる（桜谷，1988）．また樹液流速に急激な変化があった場合，ゲージがその変化を出力するまでの時間は，0.88Wの熱を与えた場合，流速が大きいときで約20分，流速が0の場合76分（草本植物で5〜20分）かかるという報告もある（Baker *et al.* 1987）（Steinberg *et al.* 1989）．本実験の場合も以上のようなことを反映して，遅れを生じたものと推測され，現段階ではダイナゲージの測定値から樹液流上昇の開始時点を細かく判断するには支障があると考えられる．さらに9月22日の測定において，両者のピークにずれが見られた．ダイナゲージは遮光シートで覆われ，装置そのものには直接日射は当たらなかったが，シートに直接光があたり，このシートとほとんど密着した状態であった装置の温度も上昇したと考えられる．つまり，装置へ外からの熱の移流があったため，正当な測定がされなかったものと推察される．9月27日の測定では，ビニールシートを装置からおよそ50cm離れた地点に日除けとして設け，熱の移流を防いだため過大評価は解消され，ダイナゲージによる測定値は吸水量の変動のパターンとよく対応した．

このように，相対的な変化では樹液流量と吸水量は類似していた．しかし，日没から夜明けまでの時間帯では樹液流量は若干高めに測定され，吸水量が増大するにしたがって過小に評価される傾向にあった．特に，吸水量が最大となる時間帯の値は約2分の1しか計測されず，樹液流量の絶対値が得られるという茎熱収支法の長所が発揮されていなかった．

広葉樹種の *Ficus* にダイナゲージを適用し，簡易重量法によって測定した蒸散量と樹液流量とを比較した例（STEINBERG, 1988）では良好な結果が得られていることを考慮すると，本実験で生じたこのような誤差は装置の問題よりも材料とした針葉樹種のヒノキに起因する可能性がある．

3.2.2. 単位時間当りの樹液流量と吸水量との比較

9月22日と9月27日に測定された1時間毎の樹液流量と吸水量との関係を示す(図5)．午前と午後の樹液流量を比較すると午前に低く午後に高く評価され，このため，樹液流量と吸水量は直線的な関係とはならず，8の字の曲線を描いた．桜谷(1988)は，樹液流量の

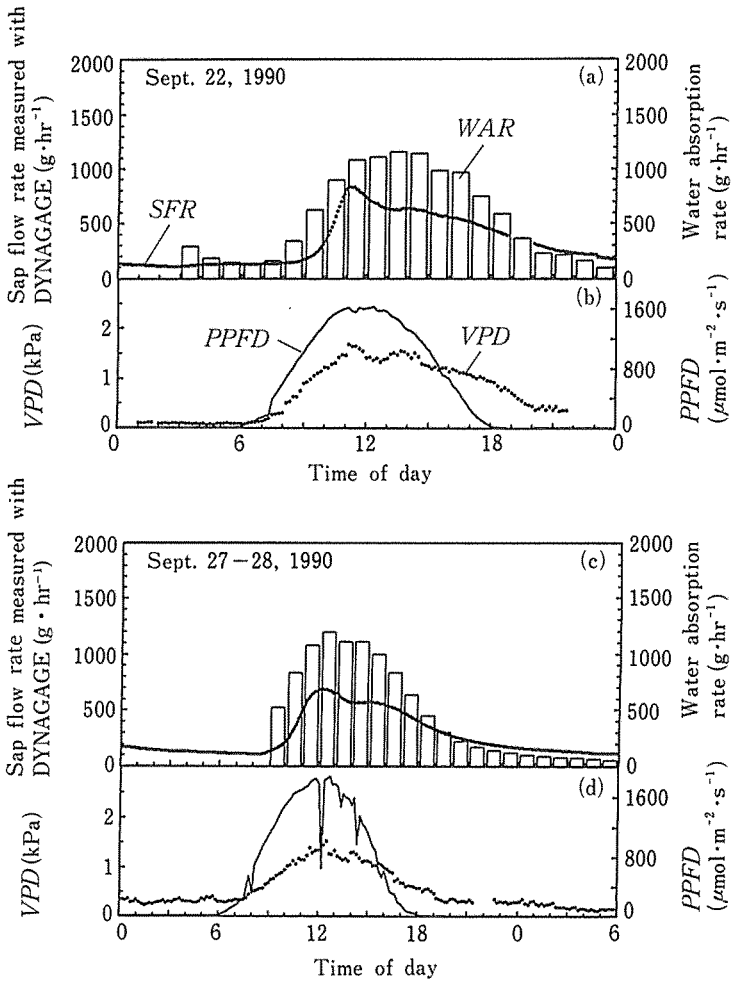

Fig. 4　Diurnal changes of sap flow rate (*SFR*), water absorption rate (*WAR*), air vapour pressure deficit (*VPD*) and photosynthetic photon flux density (*PPFD*).
The symbols in (c) and (d) are same as in (a) and (b).
図4　樹液流量と吸水量および大気飽差と光量子束密度の日変化

低いときにはダイナゲージの測定値が高く評価される傾向を報告しているが，ここでの結果は樹液流量の低いときに高く評価されるだけではなく，さらに，樹液流量が上昇から減少に転じた直後の数時間にも，低く評価されることを示している．

3.2.3. 一日当りの樹液流量と吸水量との比較

測定期間中の樹液流量と吸水量の積算値の関係を示す（図6）．図6(a)は9時から15時までの測定値と15時から9時までの測定値に分けて示してあり，図6(b)はこれらを1日当りで示してある．図6(a)ではそれぞれの時間帯について2本の異なる直線で回帰される関係が得られ，時間帯によって異なった関係にあった．しかし，それぞれの直線は（吸水量）：(樹液流量)＝1：1の直線と大きくかけ離れていた．図6(b)の1日当りの値で比較すると，1本の直線で回帰される関係となり，この場合一つの換算式が適用できるようであるが，吸水量との対応は悪かった．また，図6の2つの図から吸水量が多いときには樹液流量は低く，逆に吸水量が少ないときには高く評価された．これは日変動で見られた，吸水量の高いときには過大に評価し，吸水量が低いときには過小評価するという傾向が測定期間を通して発生した結果と推察される．

3.2.4. 熱収支式の補正

茎熱収支法で得られる樹液流量は日変動には吸水量との対応が見られたものの，絶対量では，日中の吸水量が多い時間帯には吸水量の約2分の1程度しか示さず，逆に，夜間の吸水量が少ない時間帯には若干高い値を示すことが明らかとなった．また，積算量でも精度の高い測定結果は得られておらず，長時間での使用にも問題があった．

絶対量が得られ，測定後の検定の必要がないという茎熱収支法の長所が発揮されなかった原因としては装置，測定方法，および測定樹種の3つの問題点があげられる．しかし，前述したように広葉樹を材料とした場合には良好な結果が報告されていることや，また本研究において樹液流量と吸水量の日変動パターンはうまく対応していたことから，装置と測定方法に問題点があるとは考えにくい．従って，ここでは用いた樹種に問題があると考えるべきであろう．

そこで，2.の茎熱収支方法の測定原理で述べた熱収支式を供試樹種の特徴から検討してみる．式(1)，(3)，(4)，および(5)はすべての植物に対して適用できると思われる．式(2)については，以下の理由により，若干の検討を要するものと考えられる．ここで q_f は茎内を上昇する水の量（F）と加温部上下の温度差（$T_d - T_u$）の関数として表されるが，これは茎横断面全体に熱が均等に伝導していることを前提としている．ところが，本実験のように草本と比較して径が格段に大きい樹木を測定する場合には，幹の周囲から与えられる熱量は，幹の中心と表面との間に勾配を形成すると考えられる．この熱勾配の状態は樹液流量によっても大きく影響され，樹液流量の多いときには熱勾配も大きくなり，樹液流量の少ないときには熱勾配も小さくなると予想される．これに加えて，適用する樹木の通水部の幅も影響すると考えられる．つまり良好な結果が得られていた *Ficus* は環孔材を形成する種であるために，通水部の幅は極めて狭い．そのため，通水部における熱勾配は，さほど大きくならないと考えられる．ところが，針葉樹のヒノキの通水部は *Ficus* に比べるとかなり広く，通水部において生じる熱勾配も大きいものと考えられる．以上のような理

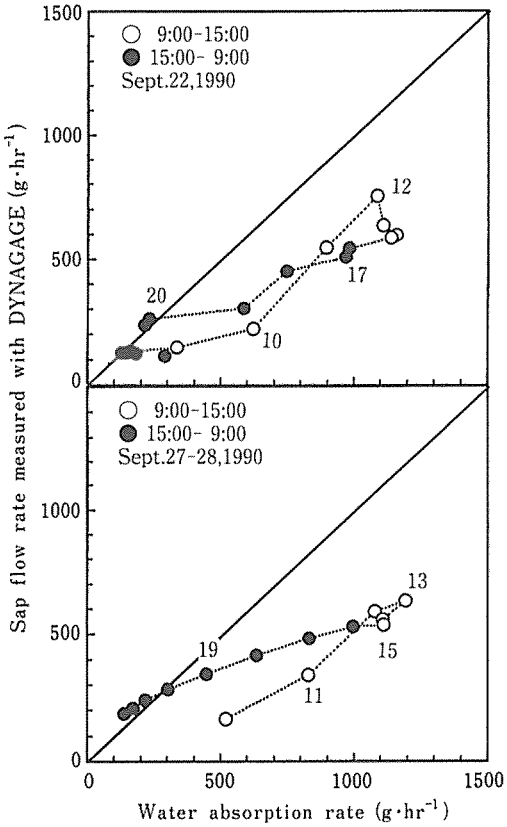

Fig. 5　Comparison of sap flow rate with water absorption rate.
SFR and *WAR* were calculated hourly. Solid lines indicate the relation in which *SFR* absolutely corresponds to *WAR*. Numbers indicate measured time of day.

図5　樹液流量と吸水量の比較

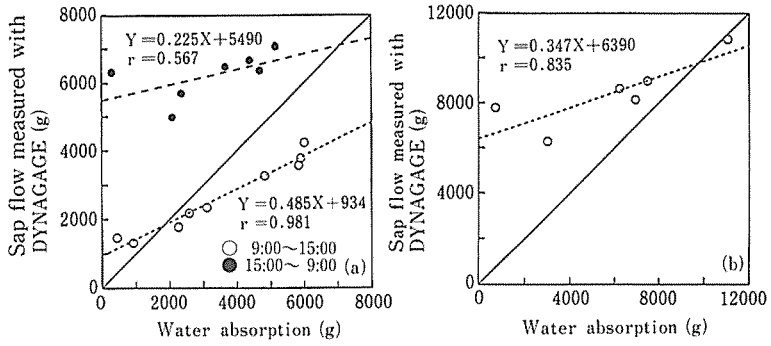

Fig. 6　Comparison of cumulated sap flow with cumulated water absorption.
(a) Open and closed circles indicate the cumulated mass flow from 9:00 to 15:00 and from 15:00 to 9:00, respectively.
(b) Each value indicates daily cumulated mass flow.

図6　吸水量と樹液流量の比較

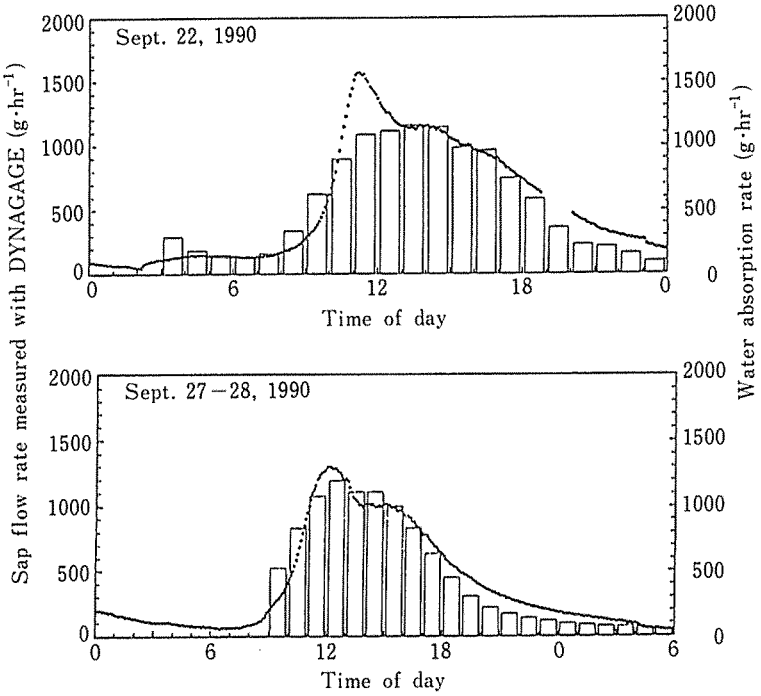

Fig. 7　Diurnal changes of sap flow rate and water absorption rate. Sap flow rate was calculated by eq.(6′). Symbols are same as in Fig.4.
図7　茎熱収支式を補正した場合の樹液流量と吸水量の日変化

由から，幹表面で測定される熱移動は実際に生じている熱移動よりも過大な評価をすると考えられる．

この熱勾配の大きさを知るには，実際に樹幹内の熱の分布状態を正確に測定する必要があるが，ここでは幹断面の通水部には均等に熱が伝導し，非通水部（心材部および辺材から心材への移行帯）には熱が全く伝導していないものと仮定して，以下の式(2′)を提案する．

$$q_f = c_w F\ (T_d - T_u)\ (A_w / A), \tag{2′}$$

ここで，A，測定部位横断面積；A_w，測定部位通水部横断面積である．このように測定部位における全横断面積に対する通水部の断面積の割合を式(2)の$(T_d - T_u)$に乗じることによって，幹表面で測定された熱移動は実際には幹内部に伝導するに従って逓減しているということを表すことができる．この式(2′)を式(2)の代わりに使用すると熱収支式は式(6′)のようになる．

$$F = [Q - \lambda A\ \{(T_d - T_d') + (T_u - T_u')\} / \Delta x - kE] \\ / \{4.18\ (T_d - T_u)\ (A_w / A)\}, \tag{6′}$$

この式(6′)を用いて 3.3.1.　3.3.2.　3.3.3.と同様の方法で図を作成したものを図7，図8，図9に示し，それぞれについて比較した．その結果，図7においては，(a)(b)ともに吸水量の少ない時間帯で，やや過大評価されていた樹液流量は，若干の改善しかみられなかったが，吸水量の多い時間帯の過小評価されていた樹液流量は著しく改善され，吸水量と樹液流量

の一日の変化のパターンは良く対応した．さらに図8においては，(a)(b)ともに午前中に低く午後に高く評価する傾向は変わらなかったものの，測定値は1：1の直線の周囲で変動した．また図9(a)においては，9:00－15:00と15:00－9:00の2つの時間帯で，それぞれ異なる直線で近似される点は変わらなかったものの，2つの直線の傾きの差は小さくなり，その値も9:00－15:00が1.055，15:00－9:00が1.212と1に近づき，それぞれの相関も高かった．さらにこれらを1日当りで積算した値(b)は，傾き1.10の直線で近似され，その相関も高かった．これらの結果から今回の場合，式(6′)を使用することは適当であると判断された．

以上のように，通水部横断面積を考慮した補正係数を導入することによって樹木への茎熱収支法の適用は可能となった．しかし，今報告で用いた補正方法は全ての樹木に適用できるとは考えられない．既に述べたように，熱収支式は測定部位横断面全体に熱が均一に伝わっていることが前提として成立している．今後，加える熱量や樹種を変え，さらに供試する樹木の生育段階を変えての測定を行ない，樹幹内の熱収支を更に詳細に検討し，測定センサー，あるいは茎熱収支式そのものを改善することが必要であると思われる．

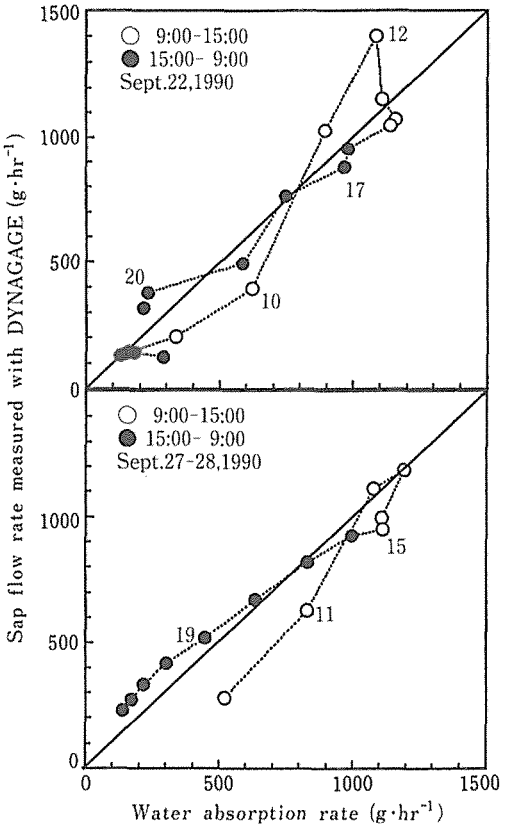

Fig. 8　Comparison of sap flow rate with water absorption rate in Hinoki. *SFR* and *WAR* were calculated hourly. *SFR* was calculated by eq.(6′). Solid lines indicate the relation in which *SFR* absolutely corresponds to *WAR*. Numbers indicate measured time of day.

図8　茎熱収支式を補正した場合の樹液流量と吸水量の比較

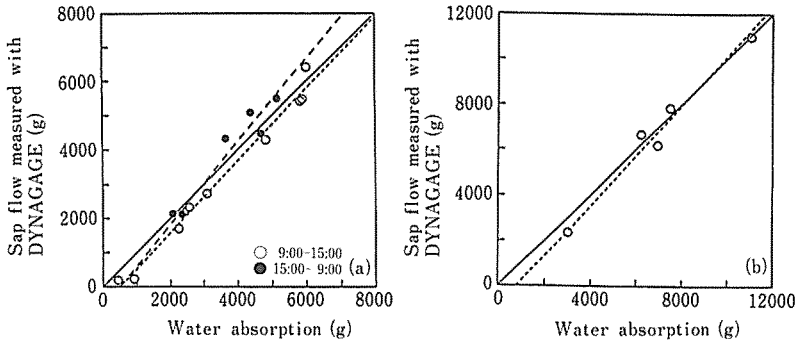

Fig. 9 Comparison of cumulated sap flow with cumulated water absorption. Sap flow was calculated by eq.(6′).
(a) Open and closed circles indicate the cumulated mass flow from 9:00 to 15:00 and from 15:00 to 9:00, respectively.
(b) Each value indicates daily cumulated mass flow.
図 9 茎熱収支式を補正した場合の樹液流量と吸水量の比較

4. 樹体における通水抵抗

4.1. 目　　的

通水抵抗を測定することは植物体内での水分動態を予測する上で不可欠なものであるが，樹液流測定の困難さや測定する植物体の大きさなどから，樹木の通水抵抗を測定した例は少ない．そこで本報告では，針葉樹のヒノキを供試木として，樹体の 3 つの部分（樹冠部，幹部，根系部）についてそれぞれの通水抵抗を算出した．

4.2. 材 料 と 方 法

通水抵抗は，植物体内の水分移動の推進力となる土壌と葉の水ポテンシャル落差（$\Psi_s - \Psi_l$）と樹液流速（F）および通水抵抗（R）に，オームの法則のアナロジーを適用することにより，次式の関係で表される．

$$R = (\Psi_s - \Psi_\ell) \,/\, F, \tag{11}$$

葉の水ポテンシャルと木部圧ポテンシャル（XPP）が等しいと仮定すると式(11)は，次式に書き直すことができる．

$$XPP = \Psi_s - FR, \tag{11′}$$

すなわち R は X 軸に F，Y 軸に XPP をとってプロットした直線の傾きとして得ることができる．

今回は，以下の方法により通水抵抗の算出を行なった．まず茎熱収支法によって測定した樹液流速と樹冠の先端部分の葉の木部圧ポテンシャルの関係から，樹体の全通水抵抗を算出した．次に供試木を地際で切断し，切断面からの吸水速度と木部圧ポテンシャルから地上部の通水抵抗を求めた．さらに幹を枝下で切断し，その上部（樹冠部）の通水抵抗を同様に求めた．その概要は図 10に示すが,直接測定できなかった根系部と幹部の通水抵抗は,

(根系部抵抗)＝(全樹体抵抗)－(地上部抵抗),(幹部抵抗)＝(地上部抵抗)－(樹冠部抵抗)で算出した.なお,樹液流速は 3.の補正用の茎熱収支式(6′)によって算出した結果を用いた．

供試木には九州大学農学部構内に生育するヒノキ（ナンゴウヒ）の 18 年生成木 2 本を用いた．供試木 A はダイナゲージの検定に使用した材料で，さらに供試木 B はその隣に生育する同じ樹齢の成木（樹高 9.3m，胸高直径 10cm）である．供試木には，測定を開始する前日まで十分な潅水を行ない，乾燥ストレスを受けないように留意した．樹液流速と吸水速度の測定は 3.2.の方法に従い，木部圧ポテンシャルはプレッシャーチャンバー法を用いて測定した．測定時には気象因子として乾湿球温度と光量子束密度を 3.2.の方法で測定した．各測定は供試木 A については 1990 年 9 月 21 日に全樹体について，同 22 日に地上部について，10 月 2 日に樹冠部について行ない，供試木 B については 10 月 16 日に全樹体について，同 17 日，同 20 日に地上部について，同 23 日に樹冠部について行なった．また木部圧ポテンシャルについては 1 時間毎の吸水速度の測定直後に測定を行なった．すべての測定が終わったあと，供試木の全葉を 85°C で 24 時間乾燥させ，乾燥葉重を求め，この値を用いて単位葉量当りの通水抵抗を算出した．またダイナゲージの装着部位を測定終了後切断し，切断面の通水部横断面積を算出し，単位通水面積当りの通水抵抗を算出した．供試木の概要については表 2 に示す．

4.3. 結 果 と 考 察

4.3.1. 樹液流速と吸水速度および木部圧ポテンシャルの日変化

供試木 A の木部圧ポテンシャル，樹液流速（9 月 21 日），吸水速度（9 月 22 日，10 月 2 日），および光量子束密度と大気飽差の日変化を示す（図 11）．

木部圧ポテンシャルは，9 月 22 日は明け方の-0.2MPa から日中の-1.5MPa まで低下し，夜間には-0.4MPa まで回復した．供試木切断後の 22 日間は明け方最高の-0.1MPa から日中に-0.6MPa までしか低下せず，夜間には 0MPa 近くまで回復した．樹冠部測定の 10 月

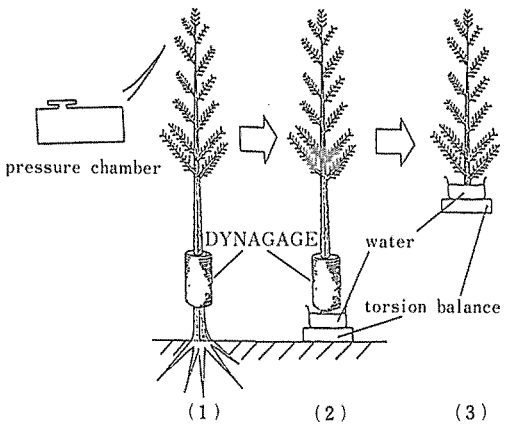

Fig. 10　Outline of measuring water flow resistance in each part of Hinoki tree. (1) Total water resistance of a tree, (2) water resistance of canopy and trunk, (3) water flow resistance of canopy.
図10　樹体各部の通水抵抗の測定方法

表2　供試木の概要
Table 2　The outlines of Hinoki trees.

Hinoki	age (years)	height (m)	DBH (cm)	water conductive area at breast height (cm^2)	leaf dry weight (g)
A	18	8.1	10	38.04	4618.5
B	18	9.3	10	45.33	5310.5

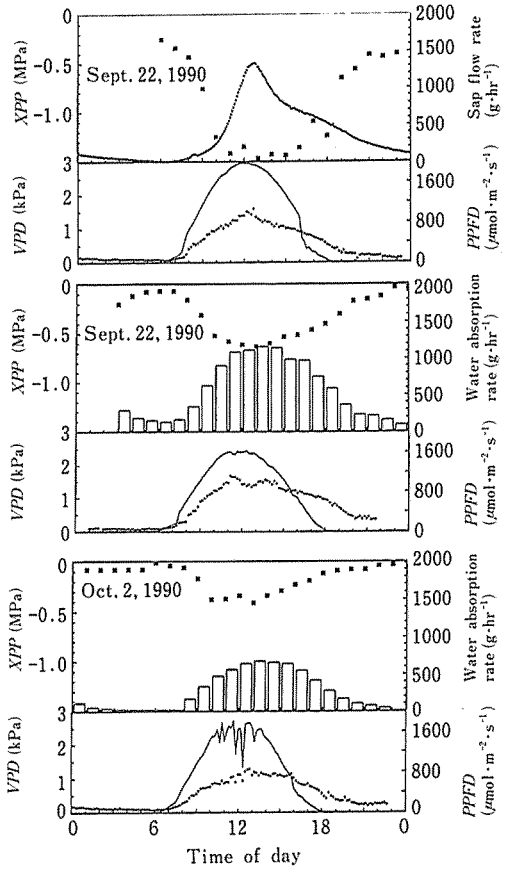

Fig. 11　Diurnal changes of sap flow rate, water absorption rate, xylem pressure potential (*XPP*), air vapour pressure deficit and photosynthetic photon flux density.
Closed squares indicate *XPP*, and the other symbols are same as in Fig.4.

図11　樹液流量と吸水量と木部圧ポテンシャルおよび大気飽差と光量子束密度の日変化

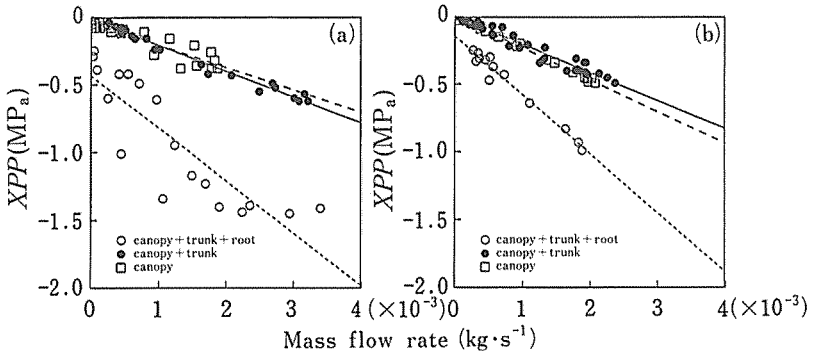

Fig. 12　Relationship between mass flow rate and xylem pressure potential (*XPP*). Lines show the linea regressions.
(a) Hinoki A ; Dotted, solid and dashed lines indicate Y=-3888.0X-0.4332, Y=-1898.6X-0.0231 and Y=-1641.3X-0.9171, respectively.
(b) Hinoki B ; Dotted, solid and dashed lines indicate Y=-4354.6X-0.1446, Y=-2072.7X-0.0231 and Y=-2345.7X-0.0001, respectively.
図12　樹液流速および吸水速度と木部圧ポテンシャルの関係

2日は明け方の0MPa近くから日中に-0.4MPaまで低下し，夜間には再び0MPa近くまで回復した．

大気飽差は，夜間にはどの測定日も極めて小さい値であったが，日射量の増大とともに大きくなった．最高値は，9月21日が1.6kPa，同22日が1.7kPa，10月2日が1.3kPaであった．

光量子束密度の最高値は9月21日が1980μmol・m^{-2}・s^{-1}，同22日が1620μmol・m^{-2}・s^{-1}，10月2日が1810μmol・m^{-2}・$^{-1}$sであった．

樹液流速，吸水速度は日の出の後すぐに上昇を始め日中13時から15時の間に最大値に達し，その後減少していったが日没後も0となることはなかった．9月21日の樹液流速の最大値は1300g・hr^{-1}，22日，10月2日の吸水速度の最大値は1157g・hr^{-1}，700g・hr^{-1}であった．これらの変動は光量子束密度よりもむしろ大気飽差の変動と密接に対応していた．その一方，木部圧ポテンシャルは樹液流速，吸水速度とは反対に日の出とともに低下し始め，日中13時から14時に最低の値をとりその後上昇，樹液流速あるいは吸水速度と同様に光量子束密度よりも大気飽差の変動と密接に対応していた．このような樹液流速，吸水速度および木部圧ポテンシャルの日変化は供試木Bの測定においても同様であった．

4.3.2.　通水抵抗の分布

木部圧ポテンシャルと樹液流速および吸水速度との関係を示す(図12)．(11′)式で示されたように，Y軸に樹高による位置エネルギーを差し引いた木部圧ポテンシャル，X軸に樹液流速または吸水速度をとり，プロットされるそれぞれの点を直線回帰すると，通水抵抗は直線の傾きの絶対値として得られる．ここで木部圧ポテンシャルは，樹液流速あるいは吸水速度が1時間毎の積算値を用いたので，樹液流速あるいは吸水速度を測定した時刻のΨ_lの測定値と，その1時間前の木部圧ポテンシャルの測定値との平均値を用いた．その結

果，供試木Aの全樹体抵抗は3880MPa・s・kg^{-1}，地上部抵抗は1889MPa・s・kg^{-1}，樹冠部抵抗は1641MPa・s・kg^{-1}となった．供試木Bの全樹体抵抗は4355MPa・s・kg^{-1}，地上部抵抗は2072MPa・s・kg^{-1}，樹冠部抵抗は2346MPa・s・kg^{-1}であった．また，(全樹体抵抗)－(地上部抵抗)で算出される根系部抵抗はそれぞれ，1981.4MPa・s・kg^{-1}，2281.9MPa・s・kg^{-1}で，(地上部抵抗)－(樹冠部抵抗)で算出される幹部抵抗はそれぞれ，257.3MPa・s・kg^{-1}，0MPa・s・kg^{-1}であった．このように供試木A，Bともに，根系部と樹冠部の抵抗の大きさが顕著であった．また，供試木A，Bともに地上部抵抗と樹冠部抵抗の値は極めて近く，供試木Bの幹部抵抗が0であったのはBの地上部抵抗よりも樹冠部抵抗が大きい値となってしまったためである．供試木Aの測定では雨水の侵入を防ぐために装置全体を覆うビニールシートを施していたが，供試木Bの樹冠部の測定期間中には雨天日はほとんどなく，シートを取り外した状態が長かった．そのために，雨水の侵入は無かったものの，大気中の粉塵などが容器中の水中に入り込み，この粉塵が供試木の切断面および仮道管内の目詰まりを引き起こし，その結果として樹冠部の通水抵抗が過大になったと推察される．しかしながら，地上部抵抗と樹冠部抵抗の差は小さく，また供試木Aの場合でも地上部の通水抵抗のほとんどが樹冠部にあり，幹部の抵抗はかなり小さいと判断されるため，ここでは便宜上，供試木Bの幹部抵抗は0として扱い，地上部抵抗の値を樹冠部抵抗の値として使用した．

以上の結果から算出された，各部の抵抗を図13(a，b，c，d)に示す．全樹体抵抗(図13a)は供試木Aが3880MPa・s・kg^{-1}，供試木Bが4365MPa・s・kg^{-1}となり，Bの値

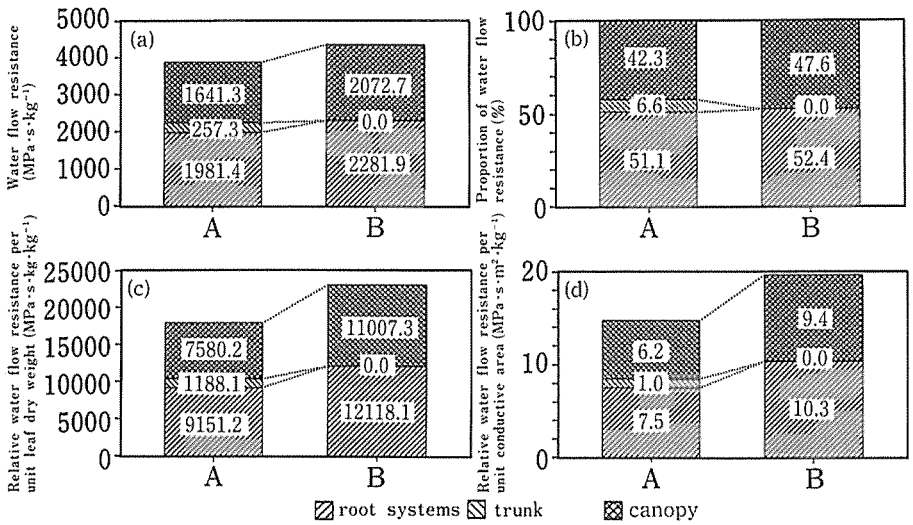

Fig.13 Proportion of water flow resistance in three parts of Hinoki trees.
A ; Hinoki A B ; Hinoki B
(a) ; absolute values of resistance
(b) ; proportional values of resistance
(c) ; relative values of resistance per unit leaf dry weight
(d) ; relative values of resistance per unit water conductive area

図13 樹体各部の通水抵抗の値

はAの値のおよそ1.1倍であった．次に，単位葉重および単位通水横断面積当りの通水抵抗を算出すると(図13c，d)，供試木Bは供試木Aの，単位葉重当りでおよそ1.3倍，単位通水断面積当りでもおよそ1.3倍となり，常に供試木Bの通水抵抗が供試木Aの通水抵抗を上回った．同種，同齢で同環境に生育しながら，葉量が多く，樹高成長も良い供試木Bの通水性が供試木Aの通水性よりも低くなったことには，個体差よりもむしろ測定時期の違いに原因があったと考えられる．つまり，供試木Aの測定期間が9月下旬，供試木Bの測定期間が10月中旬であったため，平均最高気温でおよそ4.28°C，平均最低気温でおよそ4.41°Cの差があり，気温の低下に伴う根系部の吸水能の低下や水の粘性の増加が原因したと考えられる．しかしいずれの個体においても，樹体の3つの部分の通水抵抗が全体の通水抵抗に占める割合は類似し，その大きさはともに根系部＞樹冠部≧幹部であった．

各部分の算出値の全樹体抵抗に対する割合は供試木Aと供試木Bはともに根系部が50％強，樹冠部が45％前後を占め，枝下の幹部の割合が極めて小さいという結果であった(図13b)．このように，根系部と樹冠部の通水抵抗が全樹体抵抗のほとんどを占めており，樹体内の水分動態に影響を及ぼす根系部と樹冠部の存在の大きさが明らかである．また，2本のヒノキにおける通水抵抗の分布状況は著しく似ており，同一地で生育する個体間での類似性が指摘できる．しかし，通水抵抗は環境や樹体内部の要因などによって大きく変化するものであり，ここでの結果をヒノキの樹種特性として捉えることは難しい．さらに，14年生のスギ根系部の通水抵抗では全樹体抵抗の19.68％との報告（YAHATA1989）もあり，今回のヒノキでの値とは大きく異なる．このような差異が生じた要因としては，種特性の他に，生育段階や生育環境の違いなどが考えられるが，これらの要因については，さらなる検討を必要とする．また広葉樹との比較を考えた場合，通水器官の違い(道管と仮道管)の他に，針葉樹種のスギやヒノキには存在しない葉柄の通水抵抗（ITO *et al.* 1990）が大きく作用して，樹冠部抵抗の全樹体抵抗に対する割合は大きくなるものと考えられ，樹体内における通水抵抗の分布状態も変化するものと考えられる．

5. 結　　論

樹木への適用例の少ない茎熱収支法について，今回は針葉樹のヒノキを供試木として測定精度と有効性を検討したが，茎熱収支法による測定値と吸水量として得られた絶対値間に差が認められた．測定値と絶対値に差が生じた原因として，供試した樹種に起因する熱収支式の不成立が考えられた．そこで，特に熱収支式に着目し測定部における通水部と非通水部を考慮した補正式を考案し，良好な結果を得た．しかし，今回使用した補正式は，幹径の大きさとともに針葉樹の仮道管，広葉樹の道管など通水器官の違い，あるいは散孔材，環孔材といった道管の配列などによって異なってくる可能性もある．今後，茎熱収支法を樹木に対して汎用的に適用できるようにするためには，材料とする樹種や生育段階を変えて，樹体内部の熱収支を詳細に検討する必要がある．

茎熱収支法による樹液流速を利用して算出した樹体の通水抵抗の分布から，ヒノキ成木の通水抵抗のうち幹の占める割合は非常に小さく，樹体の通水抵抗のほとんどが樹冠部と根系部に存在することが明らかとなった．樹体における通水抵抗の分布や大きさは，樹体成長に大きく影響すると考えられ，今回，通水抵抗の割合の大きかった樹冠部と根系部，

特に全樹体の通水抵抗の5割以上を占めていた根系部の通水抵抗の機構を明らかにすることで，樹体成長と通水抵抗の関係が解明されると考える．

最後に，本研究を遂行するにあたり適切な助言を頂いた九州大学農学部附属演習林文部教官の伊藤　哲氏に厚く謝意を表する．

引　用　文　献

Baker J.M. and van Bavel C.H.M. (1987) : Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. Plant, Cell and Environment **10** : 777-782

Dynamax, Inc. (1990) : DGSF-DYNAGAGE LOGGING AND ANALYSIS UTILITIES

Huber B. (1932) : Beobachtung and Messung pflanzicher Saftstrome. Ber. Deutsch. Bot. Ges. **50** : 89-109

Ito S. and Suzaki T. (1990) : Morphology and water relations of leaves of *Eucalyptus grobulus* sprouts. Bull. of Kyusyu Univ. For. **63** : 37-53

奥村武信，田中一夫，森石　学 (1987)：元口浸漬法によるコナラ，クヌギ単木の蒸散量測定．広葉樹研究 **4**：119-128

Sakuratani T. (1981) : A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. J.Agr.Met. **40**(3) : 273-277

Sakuratani T. (1984) : Improvement of the prove for measuring water flow rate in intact plants with the stem heat balance method. J.Agr.Met. **40**(3) : 273-277

桜谷哲夫 (1988)：新しい茎流量センサーの原理と応用．農業および園芸 **63**(11)：1284-1288

Steinberg S. (1988) : DYNAMAX trunk-flow gauge test. Technical application report 2

Steinberg S., van Bavel C.H.M. and McFarland M.J. (1989) : A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of woody plants. J.Amer.Soc.Hort.Sci. **114**(3) : 466-472

Yahata H. (1989) : Water movement and its resistance in young trees of *Criptomeria japonica*. Ann.Sci.For. **46** : 361-365

Summary

For the application of heat balance method (HBM) to woody plants, sap flow rates in eighteen years old Hinoki trees were measured with DYNAGAGE (DYNAMAX SGA100). The reliability of HBM was tested by comparing sap flow rates measured with HBM and water absorption rates at the cut stem.

The diurnal changes of sap flow rates with HBM were synclonised well with that of water absorption rates. However, compared with the absolute values of water absorption rates, sap flow rates measured with HBM tended to be overestimated when the water abosorption rates were low and visa versa. Such a tendency was also observed when the daily amounts of sap flow was compared. These results mean that the advantage of the HBM in absolute quantity measurement was not realized. However, sap flow rates fitted well with water absorption rates by using the modified heat balance equation (2').

Resistances to water flow of three parts of Hinoki (canopy, trunk and root systems) were calculated using diurnal changes of sap flow rates, water absoption rates, and xylem pressure potentials. The proportion of each resistance was 42.3～47.6% for canopy, 0.0～6.6% for trunk and 51.1～52.4% for root systems.