

# スギクローン苗木における樹体内水分量の精密測定に基づく SPAC モデルの提示

吉田 彩希<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

## Presentation of SPAC model based on accurate measurement of water amount inside tree body for *Cryptomeria japonica* cloned sapling

Saki YOSHIDA<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

To grasp the water balance inside tree body for *Cryptomeria japonica* cloned sapling, the presentation of the SPAC (soil–plant–atmosphere–continuum) model in consideration of the capacitance was tried. The SPAC model considers the water flow inside tree body as the electric current in an electric circuit and can be represented by applying the Ohm's law. The water conduction process in SPAC has conceptually been modeled by potential gradient, water conductive resistance and water storage. As expressed the tree by the R-C circuit, it becomes possible to treat the water status inside tree body that timely and spatially changes. In this study, the transfer function method was used for analysis method. Step function, Pulse function, Ramp function and half-sinusoidal function were prepared as an input function. At first, the transfer function was deduced from the R-C model in consideration of the conductive resistance and storage of water. And then, the output function,  $F_{out}$ , was calculated with inverse Laplace transform of the product between the transfer function and the input function,  $F_{in}$ , of sap flow.

**Key words:** water balance, SPAC model, Ohm's law, transfer function method, Laplace transform

## 1. 緒 言

樹木における水分の移動は、葉からの蒸散に始まり、樹体内の通水および根からの吸水に伝わる。この過程は、土壌–植物–大気連続体(soil–plant–atmosphere–continuum: SPAC)として従来扱われてきた。一般に、この系の中で考えられるモデルは SPAC モデルと呼ばれ、樹体内における水分バランスを把握するうえで、現在広く使われている。

SPAC 内の水分移動は、通水路の抵抗に強く影響されることから、これまで、SPAC 内の水の流れに対する抵抗の分布モデルについて多く議論されてきた。その中で、このモデルを、樹体内の水の流れを電気回路における電流に見立て、オームの法則を適用することによって表す試みがなされてきた。最も簡単なモデルとして、例えば、根、幹、葉

の各抵抗によって構成され、これは、直列抵抗回路として表されている。しかし、樹木は、複雑な水分貯蔵の働きをすることが知られており、樹体内に吸収された水分は日中や季節で激減したり再び満たされたりするため、このような樹体内の貯留を、伝導システムにおけるコンデンサーとして電気回路に組み込んだモデルでの研究もなされてきた。

これらのことから、SPAC モデルは、吸収した水分を樹体内に貯留するキャパシタンスを考慮したモデルと考慮しないモデルに大別することができる。キャパシタンスを考慮しないモデルでは、樹液流量をそのまま蒸散量としてみなすことができるが、これまでの研究結果より、蒸散量と樹液流量との間には差が認められることから、本研究では、キャパシタンスを有する SPAC モデルの提示を行う。

これまで当研究室では、屋外、および人工気象室内に

において、生立木と苗木を用いて樹体内の水分(通導)量の精密測定を行ってきた。その結果、樹液流量の年間累積量を押さえることにより、樹木の年成長量を推測することができた。仮に対象域が一斉林であるならば、先の結果をもとに、その流域からの水の損失量が計算可能となる。また、樹種、あるいは樹齢による樹液流量の年間累積量の差が明らかになれば、リモートセンシング技術の応用による水源涵養機能評価などにも適用可能となる。以上の点も考慮に入れ、樹体内の水分バランスを把握するための SPAC モデルの提示を、実験データに基づいて試みることにした。

## 2. 従来の研究

植物の水分関係を考えるうえで重要視されるべき点は、葉から大気への蒸散に始まる植物体の通水、および根からの吸収、という水分移動についてである。この考えは、一般に、土壌-植物-大気連続体(soil - plant - atmosphere - continuums: SPAC)と呼ばれ(Philip, 1966)、植物の水分バランスを研究する際に水分関係を多方面から考慮するのに有効である。

これまで樹木の蒸散量は重量法やポロメーター法により測定され、葉の水ポテンシャルはプレッシャーチャンパー法などで測定されてきた。しかし、樹幹の各部を流れる樹液流量や水ポテンシャルの測定についてはまだまだ研究段階である。近年、樹液流量についてはヒートパルス法や幹熱収支法などの手法を用いて測定が可能になってきているが、水ポテンシャルについては幹部の測定は測定器具の問題などから未だ測定は困難であるとされている。

そこで、前述した SPAC モデルの概念から樹木をモデル化し、測定が困難な様々な要素を解明しようと、これまで多くの研究がなされてきた。中でも、SPAC モデルを、電気回路で表した研究が多くなされてきた。これは、オームの法則を使って説明することができ、次式、

$$\text{流れ} = \frac{\text{水ポテンシャル}(\Psi_w) \text{の差}}{\text{抵抗}(r)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

と表される。また、この概念は植物を通る定常状態の流れに当てはめることができ、次式、

$$\begin{aligned} \text{流れ} &= \frac{\Psi_{\text{土壌}} - \Psi_{\text{根の表面}}}{r_{\text{土壌} \rightarrow \text{根}}} = \frac{\Psi_{\text{根の表面}} - \Psi_{\text{木部}}}{r_{\text{根}}} \\ &= \frac{\Psi_{\text{木部}} - \Psi_{\text{葉の細胞}}}{r_{\text{木部} \rightarrow \text{葉の細胞}}} = \frac{C_{\text{葉}} - C_{\text{大気}}}{r_{\text{葉}} + r_{\text{大気}}} \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

とかける。ここで  $C$  は、水蒸気圧に相当する。この連続体概念は、各部における圧力勾配と抵抗で表される。

この連続体概念とその適応は Richter (1973a)、Jarvis (1975)、Weatherley (1976)、Hinckley (1978a)、Boyer (1985)、Kaufmann と Fiscus (1985)、Pallardy (1989)、そして Pallardy

(1991) らによってこれまで研究されてきた。

現在、最も簡単なモデルでは、根、幹、葉の各抵抗を、単一の抵抗要素あるいは、少ない数で分けた抵抗要素で体系化されている。しかし、樹木は複雑な水分貯蔵の働きをし、日中や季節で激減したり再び満たされたりする。この水分貯蔵は、電気学上のコンデンサーとして表すことができ、モデルに組み込むことができる。これらを組み合わせ、分岐した流れの通路と植物組織のキャパシタンスを組み入れたモデルは、水ポテンシャル  $\Psi_w$  と流れの力学をうまくシミュレーションできる(Tyree (1988)、Calkin (1986)、Edwards (1986)、Hunt と Nobel (1987)、Milne (1989))。

しかし、Whitehead と Hinckley (1991) はこれらの試みに対してもっと考慮するべきであると忠告した。なぜなら、木本植物での通水路の複雑性に対して知識が不十分であることと、植物組織の決定的な水ポテンシャル  $\Psi_w$  値を得ることは技術上困難であるとの批判(Whitehead, Hinckley (1991))もあり、現在も、吸収、輸送、SPAC 構造範囲内の水分の損失について討論されている(Boyer (1985)、Passioura (1988b))。

この連続体概念は、樹木における水分移動のモデリングを容易にし、それらのモデルを使うことで、測定が困難とされているパラメーターの値を明確にすることが可能である。そして、植物における様々な生態の予測が容易になることが予想される。しかし、これらを可能にするためには、更に多くの情報が必要であり、未解明な部分が多い。

さらに近年、樹体内の水分状態を把握するためのモデル製作に伴い、抵抗とキャパシタンスから構成される RC 回路を伝達関数に置き換え、ラプラス変換を用いた解析が行われている(Phillips, 1997, 2004)。これらの解析には、入力関数  $F_{in}(s)$  に、様々な関数を導入し、これより出力関数  $F_{out}(s)$  を算出している。

## 3. SPACモデルの構築

### 3.1 樹液流の通導抵抗および貯留を考慮したモデル

樹幹内の樹液の移動を、電流のオームの法則にあてはめて解析した。すなわち、樹液の流れを電流で置き換え、仮道管内の通導抵抗はそのまま抵抗で、また通導組織が水だめとなって樹液の上昇に時間的な遅れが生じる場合を想定して、その水だめをコンデンサーで置き換えた RC モデルを提案した。実際の樹幹内では、樹液の上昇に時間的な遅れが生じる部位と、生じない部位とが複雑に配されていると考えられるため、ここでは第一段階として、抵抗のみと、抵抗とコンデンサーを直列に配置した回路を、それぞれ並列に配置した回路によって、樹幹を簡単に表現することとした。

RC モデル(図. 1)では、キルヒホッフの法則より次式、

$$E = E_{Rc} + E_C \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$E = R_C I_C + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t I_C(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (4)$$

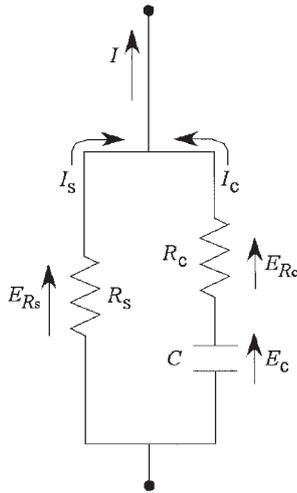


図.1 本研究で使用した RC モデル。  
 凡例：  $R_s$ : 抵抗、  $R_c$ : キャパシタンスに結びつけた抵抗、  $C$ : コンデンサー、  $I_s$  および  $I_c$ : 各々の経路を通る電流、  $E_{R_s}$ 、  $E_{R_c}$ 、 および  $E_c$ : 各々の部位を通る起電力。

が成り立つ。両辺をラプラス変換すると、次式、

$$\frac{E}{s} = R_C \mathcal{L}[I_C](s) + \frac{1}{C} \left( \frac{1}{s} \int_{-\infty}^0 I_C(\tau) d\tau + \frac{1}{s} \mathcal{L}[I_C](s) \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

がえられる。ここで、

$$\frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 I_C(\tau) d\tau = v_0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

とおくと、上式は次式、

$$\frac{E}{s} = R_C \mathcal{L}[I_C](s) + \frac{v_0}{s} + \frac{1}{Cs} \mathcal{L}[I_C](s) \quad \dots\dots\dots (7)$$

と書き換えられる。上式を整理すると次式、

$$\mathcal{L}[I_C](s) = \frac{E - v_0}{s} \cdot \frac{Cs}{R_C Cs + 1} = (E - v_0) \frac{1}{s + \frac{1}{R_C C}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

がえられる。ここで  $v_0 = 0$  とすると、上式は次式、

$$\mathcal{L}[I_C](s) = \frac{E}{R_C} \frac{1}{s + \frac{1}{R_C C}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。一方、次式、

$$E = E_{R_s} = R_s I_s \quad \dots\dots\dots (10)$$

の関係が成り立っているため、この両辺をラプラス変換すると、次式、

$$\frac{E}{s} = R_s \mathcal{L}[I_s](s)$$

$$\therefore \mathcal{L}[I_s](s) = \frac{E}{s R_s} \quad \dots\dots\dots (11)$$

がえられる。

以上の関係より次式、

$$\left( s + \frac{1}{R_C C} \right) R_C \mathcal{L}[I_C](s) = R_s s \mathcal{L}[I_s](s)$$

$$\therefore \mathcal{L}[I_C](s) = \frac{R_s s \mathcal{L}[I_s](s)}{R_C \left( s + \frac{1}{R_C C} \right)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

なる関係がえられる。

ここで、全体に流れる流量を  $I$  とすると、次式、

$$I = I_s + I_C \quad \dots\dots\dots (13)$$

の関係が成り立っているため、この両辺をラプラス変換すると、次式、

$$\begin{aligned} \mathcal{L}[I](s) &= \mathcal{L}[I_s](s) + \frac{R_s s \mathcal{L}[I_s](s)}{R_C \left( s + \frac{1}{R_C C} \right)} \\ &= \left( 1 + \frac{R_s s}{R_C s + \frac{1}{C}} \right) \mathcal{L}[I_s](s) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (14)$$

が導かれる。

### 3.2 伝達関数法

伝達関数法とは、複素関数論(ラプラス変換など)を用いた制御系の解析法であり、今日の制御理論において基礎となる重要な理論である。伝達関数は、すべての初期値を零とおいたときの、制御系の出力と入力とのラプラス変換の比で表される。すなわち、出力信号のラプラス変換を  $Y(s)$ 、入力信号のラプラス変換を  $U(s)$  とすれば、伝達関数  $G(s)$  は次式、

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad \dots\dots\dots (15)$$

と表される。この伝達関数法では、時間領域の関数を、ラプラス変換によって周波数領域に変換することにより、系の特性や安定性を解析するのに用いる。ただし、対象となる系が 1 入力 1 出力(線形関数)に限られているため、複雑な系(多入力多出力、非線形)の解析には状態空間法を用いる。

本研究では、水分の通導抵抗および貯留を考慮したモデル、すなわち先の RC モデルから次式、

$$G(s) = \frac{I_s}{I} \quad \dots\dots\dots (16)$$

の伝達関数をまず導き、続いて、後述する種々の関数で表した樹液流量の入力関数  $F_{in}(s)$  を導き、次式、

$$G(s) = \frac{F_{out}(s)}{F_{in}(s)} \dots\dots\dots (17)$$

を用いて、樹液流量の出力関数  $F_{out}(s)$  を算出した。

**3.2.1 RCモデルによる伝達関数の導入**

まず始めに、上述の RC モデルから伝達関数を導入した手順を以下に紹介する。

$$G = \frac{I_S}{I} = \frac{\mathcal{L}[I_S](s)}{\left(1 + \frac{R_S s}{R_C s + \frac{1}{C}}\right) \mathcal{L}[I_S](s)}$$

$$= \frac{1}{\frac{R_C + R_S}{R_C}} \cdot \frac{s + \frac{1}{R_C C}}{s + \frac{1}{R_C + R_S} \cdot \frac{1}{R_C C}}$$

\dots\dots\dots (18)

ここで、 $\beta = \frac{R_C + R_S}{R_C}$  ,  $T = R_C C$  と置くと、

$$G(s) = \frac{1}{\beta} \cdot \left\{ \frac{s + \left(\frac{1}{T}\right)}{s + \left(\frac{1}{\beta T}\right)} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

が導かれる。

**3.2.2 入出力関数**

前述した樹液流の入力関数  $F_{in}(s)$  として、Step 関数、Pulse 関数、Ramp 関数、半波整流関数、および Step 関数と Ramp 関数の複合関数を用意し、これらを用いて先に示した次式、

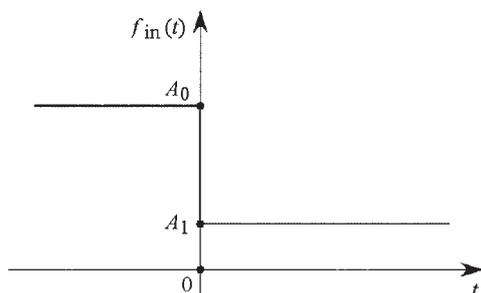
$$F_{out}(s) = G(s) \cdot F_{in}(s) = \frac{1}{\beta} \cdot \left\{ \frac{s + \left(\frac{1}{T}\right)}{s + \left(\frac{1}{\beta T}\right)} \right\} \cdot F_{in}(s)$$

\dots\dots\dots (20)

より、樹液流量の出力関数  $F_{out}(s)$  を算出した。

以下に、上記の関数の導入方法を順に紹介する。

**3.2.2.1 Step 関数**



$$f_{in}(t) = A_0 \quad (t < 0)$$

$$f_{in}(t) = A_1 \quad (t > 0)$$

ただし、 $t$  は時間、 $f_{in}(t)$  は樹幹中のある部位における樹液流量、 $A_0$  と  $A_1$  は一定の樹液流量である。

まず、 $t < 0$  における  $f_{in}(t)$  のラプラス変換は次式、

$$F_{in}(s) = \int_{-\infty}^0 f_{in}(t) \cdot e^{-st} dt = \int_{-\infty}^0 (A_0) \cdot e^{-st} dt$$

$$= -\frac{A_0}{s}$$

\dots\dots\dots (21)

となる。一方、 $t > 0$  における  $f_{in}(t)$  のラプラス変換は次式、

$$F_{in}(s) = \int_0^{\infty} f_{in}(t) \cdot e^{-st} dt = \int_0^{\infty} (A_1) \cdot e^{-st} dt$$

$$= \frac{A_1}{s}$$

\dots\dots\dots (22)

となる。2 式の関係式より、 $t$  の全範囲における  $F_{in}(s)$  は次式、

$$F_{in}(s) = -\frac{A_0}{s} + \frac{A_1}{s} = \frac{1}{s} \cdot (A_1 - A_0) \dots\dots\dots (23)$$

となる。この関係式より、樹液流の出力関数  $F_{out}(t)$  は次式、

$$F_{out}(s) = F_{in}(s) \cdot G(s) = \frac{A_1 - A_0}{\beta} \cdot \frac{s + \frac{1}{T}}{s \cdot \left(s + \frac{1}{\beta T}\right)}$$

\dots\dots\dots (24)

と表される。この場合、上式は  $s = 0$ 、 $-\frac{1}{\beta T}$  で単極をもつ。

それぞれの点における留数を計算すると以下の通りである。

$$\text{Res}(0) = \left[ \frac{A_1 - A_0}{\beta} \cdot \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{\beta T}} \cdot e^{st} \right]_{s=0} = A_1 - A_0$$

\dots\dots\dots (25)

$$\text{Res}\left(-\frac{1}{\beta T}\right) = \left[ \frac{A_1 - A_0}{\beta} \cdot \frac{s + \frac{1}{T}}{s} \cdot e^{st} \right]_{s=-\frac{1}{\beta T}}$$

$$= \frac{1 - \beta}{\beta} \cdot (A_1 - A_0) \cdot e^{-\frac{t}{\beta T}}$$

\dots\dots\dots (26)

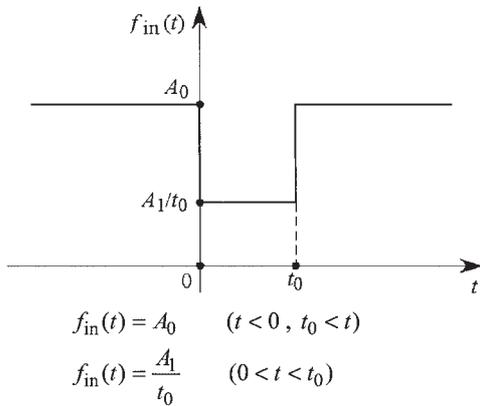
すなわち、樹液流の出力関数  $F_{out}(t)$  の逆ラプラス変換は、次式、

$$\mathcal{L}^{-1}(s) = \text{Res}(0) + \text{Res}\left(-\frac{1}{\beta T}\right) = (A_1 - A_0) \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{1}{\beta} - 1\right) \cdot e^{-\frac{t}{\beta T}} \right\}$$

\dots\dots\dots (27)

となる。

3.2.2.2 Pulse 関数



ただし、 $t$  は時間、 $f_{in}(t)$  は樹幹中のある部位における樹液流、 $A_0$  と  $A_1/t_0$  は一定の樹液流である。

まず、 $t < 0$  における  $f_{in}(t)$  のラプラス変換は次式、

$$F_{in}(s) = \int_{-\infty}^0 f_{in}(t) \cdot e^{-st} dt = \int_{-\infty}^0 (A_0) \cdot e^{-st} dt = -\frac{A_0}{s} \quad \dots\dots\dots (28)$$

となる。一方、 $0 < t < t_0$  における  $f_{in}(t)$  のラプラス変換は次式、

$$F_{in}(s) = \int_0^{t_0} f_{in}(t) \cdot e^{-st} dt = \int_0^{t_0} \left(\frac{A_1}{t_0}\right) \cdot e^{-st} dt = \frac{A_1}{t_0 \cdot s} (1 - e^{-st_0}) \quad \dots\dots\dots (29)$$

となる。さらに、 $t_0 < t$  における  $f_{in}(t)$  のラプラス変換は次式、

$$F_{in}(s) = \int_{t_0}^{\infty} f_{in}(t) \cdot e^{-st} dt = \int_{t_0}^{\infty} (A_0) \cdot e^{-st} dt = \frac{A_0}{s} e^{-st_0} \quad \dots\dots\dots (30)$$

となる。3 式の関係式より、 $t$  の全範囲における  $F_{in}(s)$  は次式、

$$F_{in}(s) = \left(-\frac{A_0}{s}\right) + \frac{A_1}{t_0 s} (1 - e^{-st_0}) + \frac{A_0}{s} e^{-st_0} = \left(\frac{A_1}{t_0 s} - \frac{A_0}{s}\right) (1 - e^{-st_0}) \quad \dots\dots\dots (31)$$

となる。この関係式より、樹液流の出力関数  $F_{out}(t)$  は次式、

$$F_{out}(s) = F_{in}(s) \cdot G(s) = \frac{(A_1 - A_0 \cdot t_0)}{\beta} (1 - e^{-st_0}) \cdot \frac{\left(s + \frac{1}{T}\right)}{t_0 s \left(s + \frac{1}{\beta T}\right)} \quad \dots\dots\dots (32)$$

と表される。この場合、上式は  $s = 0, -\frac{1}{\beta T}$  で単極をもつ。それぞれの点における留数を計算すると以下の通りである。

$$\text{Res}(0) = \left[ \frac{(A_1 - A_0 \cdot t_0)}{\beta} (1 - e^{-st_0}) \cdot \frac{\left(s + \frac{1}{T}\right)}{t_0 \left(s + \frac{1}{\beta T}\right)} e^{st} \right]_{s=0} = 0 \quad \dots\dots\dots (33)$$

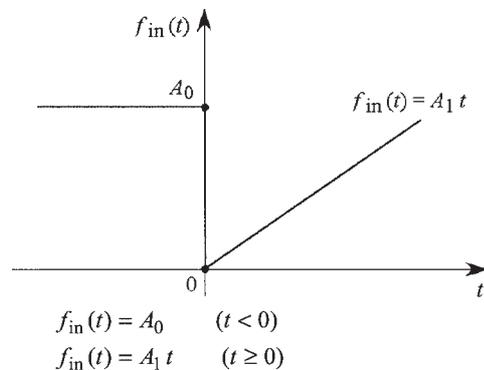
$$\text{Res}\left(-\frac{1}{\beta T}\right) = (A_1 - A_0 \cdot t_0) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_0}{\beta T}}\right) \cdot \frac{(1 - \beta)}{\beta \cdot t_0} \cdot e^{-\frac{t}{\beta T}} \quad \dots\dots\dots (34)$$

すなわち、樹液流の出力関数  $F_{out}(t)$  の逆ラプラス変換は、次式

$$\mathcal{L}^{-1}(s) = (A_1 - A_0 t_0) \left( \frac{1}{t_0} \frac{e^{-\frac{t}{\beta T}}}{t_0} + \frac{e^{-\frac{t}{\beta T}} - 1}{\beta t_0} \right) \quad \dots\dots\dots (35)$$

となる。

3.2.2.3 Ramp 関数



ただし、 $t$  は時間、 $f_{in}(t)$  は樹幹中のある部位における樹液流、 $A_0$  と  $A_1 t$  は一定の樹液流、および一定速度の樹液流である。

まず、 $t < 0$  における  $f_{in}(t)$  のラプラス変換は次式、

$$F_{in}(s) = \int_{-\infty}^0 f_{in}(t) \cdot e^{-st} dt = \int_{-\infty}^0 (A_0) \cdot e^{-st} dt = -\frac{A_0}{s} \quad \dots\dots\dots (36)$$

となる。一方、 $t \geq 0$  における  $f_{in}(t)$  のラプラス変換は次式、

$$F_{in}(s) = \int_0^{\infty} f_{in}(t) \cdot e^{-st} dt = \int_0^{\infty} (A_1 \cdot t) \cdot e^{-st} dt = \frac{A_1}{s^2} \quad \dots\dots\dots (37)$$

となる。2 式の関係式より、 $t$  の全範囲における  $F_{in}(s)$  は次式、

$$F_{in}(s) = -\frac{A_0}{s} + \frac{A_1}{s^2} \dots\dots\dots (38)$$

となる。この関係式より、樹液流の出力関数  $F_{out}(t)$  は次式、

$$F_{out}(s) = F_{in}(s) \cdot G(s) = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{(A_1 - A_0 s) \cdot \left\{ s + \left( \frac{1}{T} \right) \right\}}{s^2 \cdot \left( s + \frac{1}{\beta T} \right)} \dots\dots\dots (39)$$

と表される。上式を部分分数展開すると、次式

$$F(s) = \frac{(A_1 - A_0 s) \left( s + \frac{1}{T} \right)}{s^2 \left( s + \frac{1}{\beta T} \right)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s^2} + \frac{C}{s + \frac{1}{\beta T}} \dots\dots\dots (40)$$

$$\therefore F(s) = \frac{(A+C)s^2 + \left( A \frac{1}{\beta T} + B \right) s + B \frac{1}{\beta T}}{s^2 \left( s + \frac{1}{\beta T} \right)} \dots\dots\dots (41)$$

とかける。(39)式および(41)式より、

$$A+C = -A_0 \frac{1}{\beta}, \quad A \frac{1}{\beta T} + B = \left( A_1 - A_0 \frac{1}{T} \right) \frac{1}{\beta}, \quad B \frac{1}{\beta T} = A_1 \frac{1}{\beta T} \dots\dots\dots (42)$$

なる関係がえられるため、これを解くと、 $A, B, C$  は以下の

$$A = A_1 T (1 - \beta) - A_0, \quad B = A_1, \quad C = A_0 \left( 1 - \frac{1}{\beta} \right) - T A_1 (1 - \beta) \dots\dots\dots (43)$$

となる。一方、(40)式は、次式

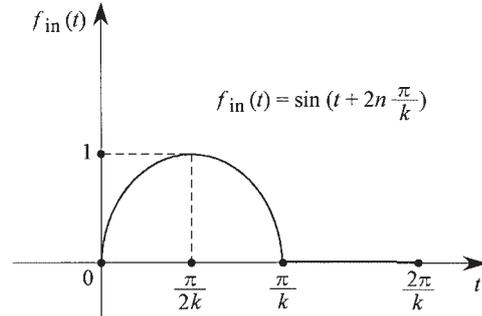
$$F(s) = \frac{(A_1 - A_0 s) \left( s + \frac{1}{T} \right)}{s^2 \left( s + \frac{1}{\beta T} \right)} = A \cdot \frac{1}{s} + B \cdot \frac{1}{s^2} + C \cdot \frac{1}{s + \frac{1}{\beta T}} \dots\dots\dots (44)$$

とかけるため、これを逆ラプラス変換すると、次式

$$\begin{aligned} \mathcal{L}^{-1}F(s) &= f(t) = A \cdot 1 + B \cdot t + C \cdot e^{-\frac{t}{\beta T}} \\ &= A_1 T (1 - \beta) - A_0 + A_1 t + A_0 \left( 1 - \frac{1}{\beta} \right) - T A_1 (1 - \beta) e^{-\frac{t}{\beta T}} \\ &= A_1 T (1 - \beta) \left( 1 - e^{-\frac{t}{\beta T}} \right) + A_0 \left( 1 - \frac{1}{\beta} \right) - A_0 + A_1 t \end{aligned} \dots\dots\dots (45)$$

となる。

### 3.2.2.4 半波整流関数



$$\begin{aligned} f_{in}(t) &= \sin kt & (0 < t < \frac{\pi}{k}) \\ f_{in}(t) &= 0 & (\frac{\pi}{k} < t < \frac{2\pi}{k}) \\ f_{in}(t) &= f_{in}(t + 2n \frac{\pi}{k}) \end{aligned}$$

ただし、 $t$  は時間、 $f_{in}(t)$  は樹幹中のある部位における樹液流である。

まず、 $t < 0$  における  $f_{in}(t)$  のラプラス変換は次式、

$$\begin{aligned} F_{in}(s) &= \mathcal{L}[f_{in}(s)] = \int_0^{\frac{\pi}{k}} f_{in}(t) \cdot e^{-st} dt = \int_0^{\frac{\pi}{k}} (\sin kt) \cdot e^{-st} dt \\ &= \frac{k}{s^2} \left\{ e^{-\frac{\pi}{k}s} + 1 \right\} - \frac{k^2}{s^2} \cdot \mathcal{L}[f_{in}(s)] \\ \therefore \mathcal{L}[f_{in}(s)] &= \frac{k}{s^2 + k^2} \cdot \left\{ e^{-\frac{\pi}{k}s} + 1 \right\} \dots\dots\dots (46) \end{aligned}$$

となる。この関係式より、樹液流の出力関数  $F_{out}(t)$  は次式、

$$\begin{aligned} F_{out}(s) &= F_{in}(s) \cdot G(s) \\ &= \frac{k}{\beta} \cdot \left\{ \frac{s + \left( \frac{1}{T} \right)}{\left( s^2 + k^2 \right) \left( s + \frac{1}{\beta T} \right)} \right\} \cdot \left( e^{-\frac{\pi s}{k}} + 1 \right) \dots\dots\dots (47) \end{aligned}$$

と表される。ここで、

$$F(s) = \frac{k}{\beta} \cdot \left\{ \frac{s + \left( \frac{1}{T} \right)}{\left( s^2 + k^2 \right) \left( s + \frac{1}{\beta T} \right)} \right\} \dots\dots\dots (48)$$

とおく。上式を部分分数展開すると、次式、

$$F(s) = \frac{As + B}{s^2 + k^2} + \frac{C}{s + \frac{1}{\beta T}}$$

$$= \frac{(As+B) \cdot \left(s + \frac{1}{\beta T}\right) + C \cdot (s^2 + k^2)}{(s^2 + k^2) \cdot \left(s + \frac{1}{\beta T}\right)} \quad \dots\dots\dots (49)$$

$$\therefore F(s) = \frac{(A+C) \cdot s^2 + \left(\frac{A}{\beta T} + B\right) \cdot s + \left(\frac{B}{\beta T} + Ck^2\right)}{(s^2 + k^2) \cdot \left(s + \frac{1}{\beta T}\right)} \quad \dots\dots\dots (50)$$

とかけ、(48)式および(50)式より、

$$A+C=0, \quad \frac{A}{\beta T} + B = \frac{k}{\beta}, \quad \frac{B}{\beta T} + Ck^2 = \frac{k}{\beta T} \quad \dots\dots\dots (51)$$

なる関係がえられるため、これを解くと、A、B、Cは以下の

$$A = \frac{1}{\left(\frac{1}{\beta T}\right)^2 + k^2} \cdot \frac{k(1-\beta)}{\beta^2 T}, \quad B = \frac{1}{\left(\frac{1}{\beta T}\right)^2 + k^2} \cdot \frac{k(k^2 \beta T^2 + 1)}{\beta^2 T^2},$$

$$C = -\frac{1}{\left(\frac{1}{\beta T}\right)^2 + k^2} \cdot \frac{k(1-\beta)}{\beta^2 T} \quad \dots\dots\dots (52)$$

となる。一方、(49)式は、次式

$$F(s) = \frac{As+B}{s^2+k^2} + \frac{C}{s+\frac{1}{\beta T}} = A \cdot \frac{s}{s^2+k^2} + \frac{B}{k} \cdot \frac{k}{s^2+k^2} + \frac{C}{s+\frac{1}{\beta T}} \quad \dots\dots\dots (53)$$

とかけ、これを逆ラプラス変換すると次式

$$\mathcal{L}^{-1}F(s) = f(t) = A \cdot \cos kt + \frac{B}{k} \cdot \sin kt + C \cdot e^{-\frac{t}{\beta T}}$$

$$= \frac{\beta^2 T^2}{1+k^2 \beta^2 T^2} \cdot \left[ \left\{ \frac{k \cdot (1-\beta)}{\beta^2 T} \right\} \cdot \cos kt \right.$$

$$\left. + \frac{k^2 \beta T^2 + 1}{\beta^2 T^2} \cdot \sin kt - \frac{k \cdot (1-\beta)}{\beta^2 T} \cdot e^{-\frac{t}{\beta T}} \right]$$

$$\therefore f(t) = \frac{1}{1+k^2 \beta^2 T^2} \cdot \left\{ kT \cdot (1-\beta) \cdot \cos k \right.$$

$$\left. + (k^2 \beta T^2 + 1) \cdot \sin kt - kT \cdot (1-\beta) \cdot e^{-\frac{t}{\beta T}} \right\} \quad \dots\dots\dots (54)$$

が導かれる。また、(47)式より、次式、

$$F_{out}(s) = F_{in}(s) \cdot G(s)$$

$$= \frac{k}{\beta} \cdot \left\{ \frac{s + \left(\frac{1}{T}\right)}{\left(s^2 + k^2\right) \left(s + \frac{1}{\beta T}\right)} \right\} \cdot \left( e^{-\frac{\pi s}{k}} + 1 \right)$$

$$= F(s) \cdot e^{0 \cdot \left(-\frac{\pi s}{k}\right)} + F(s) \cdot e^{1 \cdot \left(-\frac{\pi s}{k}\right)} \quad \dots\dots\dots (55)$$

がえられる。これを逆ラプラス変換すると、次式、

$$\mathcal{L}^{-1}(s) = f(t) + U\left(t - \frac{\pi}{k}\right) \cdot f\left(t - \frac{\pi}{k}\right) \quad \dots\dots\dots (56)$$

がえられる。上式に(54)式を代入すると、次式、

$$\mathcal{L}^{-1}(s) = \frac{1}{1+k^2 \beta^2 T^2} \cdot \left[ kT \cdot (1-\beta) \cdot \cos kt + (k^2 \beta T^2 + 1) \cdot \sin kt \right.$$

$$\left. - kT \cdot (1-\beta) \cdot e^{-\frac{t}{\beta T}} + kT \cdot (1-\beta) \cdot (-\cos kt) \cdot U\left(t - \frac{\pi}{k}\right) \right.$$

$$\left. + (k^2 \beta T^2 + 1) \cdot (-\sin kt) \cdot U\left(t - \frac{\pi}{k}\right) \right.$$

$$\left. - kT \cdot (1-\beta) \cdot \left\{ 1 + e^{-\frac{\pi}{\beta T k}} \cdot U\left(t - \frac{\pi}{k}\right) \right\} \cdot e^{-\frac{t}{\beta T}} \right] \quad \dots\dots\dots (57)$$

がえられる。

一方、 $f_{in}(t)$  が周期  $\frac{2\pi}{k}$  の周期関数のとき、 $f_{in}(t)$  のラプラス変換は次式、

$$F_{in}(s) = \frac{1}{1 - e^{-s\left(\frac{2\pi}{k}\right)}} \cdot \mathcal{L}[f_{in}(s)] \quad \dots\dots\dots (58)$$

と表される。すなわち上式は

$$F_{in}(s) = \frac{1}{1 - e^{-s\left(\frac{2\pi}{k}\right)}} \cdot \frac{k}{s^2 + k^2} \cdot \left\{ e^{-\frac{\pi s}{k}} + 1 \right\} \quad \dots\dots\dots (59)$$

とかけ、これを整理すると、次式

$$F_{in}(s) = \frac{1}{1 - e^{-\frac{\pi s}{k}}} \cdot \frac{k}{s^2 + k^2} \quad \dots\dots\dots (60)$$

がえられる。この関係式より、樹液流の出力関数  $F_{out}(t)$  は、次式、

$$F_{\text{out}}(s) = F_{\text{in}}(s) \cdot G(s) = \frac{k}{\beta} \cdot \left\{ \frac{s + \left(\frac{1}{T}\right)}{\left(s^2 + k^2\right) \cdot \left(s + \frac{1}{\beta T}\right)} \right\} \cdot \frac{1}{1 - e^{-\frac{\pi s}{k}}} \dots\dots\dots (61)$$

と表される。また、(48)式を用いて上式は、次式、

$$F_{\text{out}}(s) = F(s) \cdot \frac{1}{1 - e^{-\frac{\pi s}{k}}} = F(s) \cdot \left( 1 + e^{-\frac{\pi s}{k}} + e^{-\frac{2\pi s}{k}} + \dots + e^{-\frac{n\pi s}{k}} + \dots \right) \dots\dots\dots (62)$$

と書き換えられる。すなわち、樹液流の出力関数  $F_{\text{out}}(t)$  の逆ラプラス変換は、

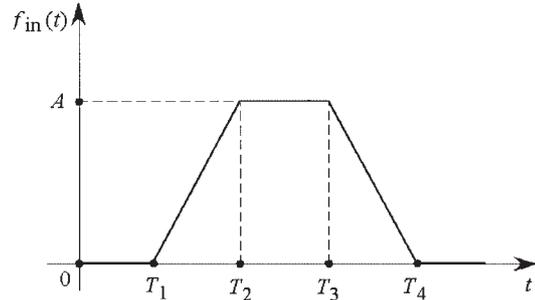
$$\mathcal{L}^{-1}(s) = f(t) + U\left(t - \frac{\pi}{k}\right) f\left(t - \frac{\pi}{k}\right) + U\left(t - \frac{2\pi}{k}\right) f\left(t - \frac{2\pi}{k}\right) + \dots + U\left(t - \frac{n\pi}{k}\right) f\left(t - \frac{n\pi}{k}\right) + \dots \dots\dots (63)$$

とかける。さらに上式へ(54)式を代入すると、

$$\mathcal{L}^{-1}(s) = \frac{1}{1 + k^2 \beta^2 T^2} \left\{ kT(1 - \beta) \cos kt + (k^2 \beta T^2 + 1) \sin kt - kT(1 - \beta) e^{-\frac{t}{\beta T}} \right\} + U\left(t - \frac{\pi}{k}\right) f\left(t - \frac{\pi}{k}\right) + U\left(t - \frac{2\pi}{k}\right) f\left(t - \frac{2\pi}{k}\right) + \dots + U\left(t - \frac{n\pi}{k}\right) f\left(t - \frac{n\pi}{k}\right) + \dots \dots\dots (64)$$

がえられる。

### 3. 2. 2. 5 Step 関数と Ramp 関数の複合関数



$$\begin{aligned} f_{\text{in}}(t) &= 0 & (0 < t < T_1) \\ f_{\text{in}}(t) &= \frac{A}{T_2 - T_1} \cdot t - \frac{A \cdot T_1}{T_2 - T_1} & (T_1 < t < T_2) \\ f_{\text{in}}(t) &= A & (T_2 < t < T_3) \\ f_{\text{in}}(t) &= \frac{A}{T_3 - T_4} \cdot t - \frac{A \cdot T_4}{T_3 - T_4} & (T_3 < t < T_4) \\ f_{\text{in}}(t) &= 0 & (t > T_4) \end{aligned}$$

ただし、 $t$  は時間、 $f_{\text{in}}(t)$  は樹幹中のある部位における樹液流、 $A$  は一定の樹液流である。

まず、 $T_1 < t < T_2$  における  $f_{\text{in}}(t)$  のラプラス変換は次式、

$$\begin{aligned} F_{\text{in}}(s) &= \int_{T_1}^{T_2} f_{\text{in}}(t) \cdot e^{-st} dt \\ &= \int_{T_1}^{T_2} \left( \frac{A}{T_2 - T_1} \cdot t - \frac{A \cdot T_1}{T_2 - T_1} \right) \cdot e^{-st} dt \\ &= \left( -\frac{1}{s} \right) \cdot A \cdot e^{-s \cdot T_2} - \frac{1}{s^2} \left( \frac{A}{T_2 - T_1} \right) \left( e^{-s \cdot T_2} - e^{-s \cdot T_1} \right) \dots\dots\dots (65) \end{aligned}$$

となる。また、 $T_2 < t < T_3$  における  $f_{\text{in}}(t)$  のラプラス変換は次式、

$$\begin{aligned} F_{\text{in}}(s) &= \int_{T_2}^{T_3} f_{\text{in}}(t) \cdot e^{-st} dt = \int_{T_2}^{T_3} A \cdot e^{-st} dt \\ &= -\frac{A}{s} \cdot e^{-s \cdot T_3} + \frac{A}{s} \cdot e^{-s \cdot T_2} \dots\dots\dots (66) \end{aligned}$$

となる。また、 $T_3 < t < T_4$  における  $f_{\text{in}}(t)$  のラプラス変換は次式、

$$\begin{aligned} F_{\text{in}}(s) &= \int_{T_3}^{T_4} f_{\text{in}}(t) \cdot e^{-st} dt \\ &= \int_{T_3}^{T_4} \left( \frac{A}{T_3 - T_4} \cdot t - \frac{A \cdot T_4}{T_3 - T_4} \right) \cdot e^{-st} dt \\ &= \frac{1}{s} \cdot A \cdot e^{-s \cdot T_3} + \frac{1}{s^2} \left( \frac{A}{T_3 - T_4} \right) \left( e^{-s \cdot T_3} - e^{-s \cdot T_4} \right) \dots\dots\dots (67) \end{aligned}$$

となる。

以上の結果から、 $t$  の全範囲における  $F_{\text{in}}(s)$  は次式、

$$F_{in}(s) = \frac{A}{s^2} \left( \frac{e^{-s \cdot T_4} - e^{-s \cdot T_3}}{T_4 - T_3} - \frac{e^{-s \cdot T_2} - e^{-s \cdot T_1}}{T_2 - T_1} \right) \dots\dots\dots (68)$$

となる。この関係式より、樹液流の出力関数  $F_{out}(t)$  は次式、

$$F_{out}(s) = F_{in}(s) \cdot G(s) = \frac{A}{\beta} \left( \frac{e^{-s \cdot T_4} - e^{-s \cdot T_3}}{T_4 - T_3} - \frac{e^{-s \cdot T_2} - e^{-s \cdot T_1}}{T_2 - T_1} \right) \cdot \frac{s + \left(\frac{1}{T}\right)}{s^2 \left\{ s + \left(\frac{1}{\beta T}\right) \right\}} \dots\dots\dots (69)$$

と表される。この場合、上式は  $s = 0$ 、 $-\frac{1}{\beta T}$  で単極をもつ。それぞれの点における留数を計算すると以下の通りである。

$$Res(0) = \left[ \frac{A}{\beta} \cdot \left( \frac{e^{-s \cdot T_4} - e^{-s \cdot T_3}}{T_4 - T_3} - \frac{e^{-s \cdot T_2} - e^{-s \cdot T_1}}{T_2 - T_1} \right) \cdot \left( \frac{s + \frac{1}{T}}{\frac{1}{\beta T}} \right) \right]_{s=0} = 0 \dots\dots\dots (70)$$

$$Res\left(-\frac{1}{\beta T}\right) = \left[ \frac{A}{\beta} \cdot \left( \frac{e^{-s \cdot T_4} - e^{-s \cdot T_3}}{T_4 - T_3} - \frac{e^{-s \cdot T_2} - e^{-s \cdot T_1}}{T_2 - T_1} \right) \cdot \frac{s + \left(\frac{1}{T}\right)}{s^2} \right]_{s=-\frac{1}{\beta T}} = A \cdot T \cdot (\beta - 1) \left( \frac{\frac{T_4}{e^{\beta T}} - \frac{T_3}{e^{\beta T}}}{T_4 - T_3} - \frac{\frac{T_2}{e^{\beta T}} - \frac{T_1}{e^{\beta T}}}{T_2 - T_1} \right) \dots\dots\dots (71)$$

すなわち、樹液流の出力関数  $F_{out}(t)$  の逆ラプラス変換は、次式

$$\mathcal{L}^{-1}(s) = Res(0) + Res\left(-\frac{1}{\beta T}\right) = A \cdot T \cdot (\beta - 1) \left( \frac{\frac{T_4}{e^{\beta T}} - \frac{T_3}{e^{\beta T}}}{T_4 - T_3} - \frac{\frac{T_2}{e^{\beta T}} - \frac{T_1}{e^{\beta T}}}{T_2 - T_1} \right) \dots\dots\dots (72)$$

となる。

#### 4. 結果および今後の展開

導いた入力関数、および出力関数を列記すると以下の通りである。

(入力関数)  
(Step 関数)  
 $F_{in}(s) = -\frac{A_0}{s} + \frac{A_1}{s} = \frac{1}{s} \cdot (A_1 - A_0)$

(Pulse 関数)  
 $F_{in}(s) = \left( \frac{A_1}{t_0 s} - \frac{A_0}{s} \right) (1 - e^{-st_0})$

(Ramp 関数)  
 $F_{in}(s) = -\frac{A_0}{s} + \frac{A_1}{s^2}$

(半波整流関数)  
 $F_{in}(s) = \frac{1}{1 - e^{-s\left(\frac{2\pi}{k}\right)}} \cdot \frac{k}{s^2 + k^2} \cdot \left\{ e^{\frac{\pi}{k}s} + 1 \right\}$

(Step 関数と Ramp 関数の複合関数)  
 $F_{in}(s) = \frac{A}{s^2} \left( \frac{e^{-s \cdot T_4} - e^{-s \cdot T_3}}{T_4 - T_3} - \frac{e^{-s \cdot T_2} - e^{-s \cdot T_1}}{T_2 - T_1} \right)$

(出力関数)  
(Step 関数)  
 $F_{out}(t) = (A_1 - A_0) \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{1}{\beta} - 1\right) \cdot e^{-\frac{t}{\beta T}} \right\}$

(Pulse 関数)  
 $F_{out}(t) = (A_1 - A_0 t_0) \left( \frac{1}{t_0} - \frac{e^{-\frac{t}{\beta T}}}{t_0} + \frac{e^{-\frac{t}{\beta T}} - 1}{\beta t_0} \right)$

(Ramp 関数)  
 $F_{out}(t) = A_1 T (1 - \beta) \left( 1 - e^{-\frac{t}{\beta T}} \right) + A_0 \left( 1 - \frac{1}{\beta} \right) - A_0 + A_1 t$

(半波整流関数(周期関数ではないとき))

$$F_{\text{out}}(t) = \frac{1}{1+k^2\beta^2T^2} \cdot [kT \cdot (1-\beta) \cdot \cos kt + (k^2\beta T^2 + 1) \cdot \sin kt - kT \cdot (1-\beta) \cdot e^{-\frac{t}{\beta T}} + kT \cdot (1-\beta) \cdot (-\cos kt) \cdot U\left(t - \frac{\pi}{k}\right) + (k^2\beta T^2 + 1) \cdot (-\sin kt) \cdot U\left(t - \frac{\pi}{k}\right) - kT \cdot (1-\beta) \cdot \left\{1 + e^{-\frac{\pi}{\beta T k}} \cdot U\left(t - \frac{\pi}{k}\right)\right\} \cdot e^{-\frac{t}{\beta T}}]$$

(半波整流関数(周期関数のとき))

$$F_{\text{out}}(t) = \frac{1}{1+k^2\beta^2T^2} \left\{ kT(1-\beta)\cos kt + (k^2\beta T^2 + 1)\sin kt - kT(1-\beta)e^{-\frac{t}{\beta T}} \right\} + U\left(t - \frac{\pi}{k}\right) f\left(t - \frac{\pi}{k}\right) + U\left(t - \frac{2\pi}{k}\right) f\left(t - \frac{2\pi}{k}\right) + \dots + U\left(t - \frac{n\pi}{k}\right) f\left(t - \frac{n\pi}{k}\right) + \dots$$

(Step 関数と Ramp 関数の複合関数)

$$F_{\text{out}}(t) = A \cdot T \cdot (\beta - 1) \left( \frac{\frac{T_4}{e^{\beta T}} - \frac{T_3}{e^{-\beta T}}}{T_4 - T_3} - \frac{\frac{T_2}{e^{\beta T}} - \frac{T_1}{e^{-\beta T}}}{T_2 - T_1} \right)$$

今後はこれら入出力関数を用いて、樹液流量の日変動の実測値を表現する予定である。

## 参考文献

- Boyer, J.S.(1985).Water transport. *Ann..Rev. Plant Physiol.* **36**:473-516.
- Calkin,H.W.,Gibson,A.C.,and Nobel, P.S.(1986).Biophysical model of xylem conductance in tracheids of the fern *Pteris vittata*.*J.Exp.Bot.***37**,1054-1064
- Edwards, W.R.N., P.G. Jarvis, J.J.Landsberg and H.Talbot. (1986). A dynamic model for studying flow of water in single trees. *Tree Physiol.* **1**:309-324
- Hinckley,T.M.,Lassoie,J.P.,andRunning, S.W.(1978a).Temporal and spatial variations in the water status of forest trees. *For.Sci.Monogr.***20**,72 p
- Hunt, R.E.,Jr., and Nobel, P.S.(1987). Non-steady-state water flow for three desert perennials with different capacitances. *Aust. J.Plant Physiol.* **14**,363-375.
- Jarvis,P.G.(1975). Water transfer in plants. *In* "Heat and Mass Transfer in the Plant Environment"(D.A.Devries and N.G.Afgan,eds.),Part 1,pp.369-394.Scripta, Washington,D.C.
- Kaufmann,M.R.,and Fiscus,EL.(1985).Water transport through plants-Internal integration of edaphic and atmospheric effects. *Acta Hortic.***171**,83-93.
- Milne, R.(1989).Diurnal water storage in the stems of *Picea sitchensis* (Bong.) Carr. *Plant Cell Environ.* **12**,63-72
- NATHAN G. PHILLIPS, RAM OREN, JULIAN LICATA and SUNE LINDER (2004) *Heron Publishing - Victoria, Canada* Time series diagnosis of tree hydraulic characteristics *Tree Physiology* **24**, 879-890
- Pallardy,S.G.(1989).Hydraulic architecture and conductivity :An overview. *In* "Structural and Functional Responses to Environmental Stresses: Water Shortage" (K.H.Kreeb,H.Richter, and T.M.Hinckley, end.), pp.3-19.SPB, The Hague.
- Pallardy,S.G.,Pereira,,J.S.,and Parker, W.C.(1991).Measuring the state of water in tree systems. *In* "Techniques and Approaches in Forest Tree Ecophysiology" (J.P.Lassoie and T.M.Hinckley, eds.),pp.28-76. CRC Press, Boca Raton,Florida.
- Passioura, J.B.(1988b).Water transport in and to roots. *Annu.Rev. Plant Physiol.Plant Mol. Biol.* **39**, 245-265
- Philip,J.R.(1966).Plant water relations:Some physical aspects. *Annu.Rev Plant Physiol.***17**,245-268
- Phillips.N.,A.Nagchaudhuri,R.Oren and G. Katul.(1997)Time constant for water transport in loblolly pine trees estimated from time series of evaporative demand and stem sapflow *Trees* **11**:412-419.
- Richter,H. (1973a).Frictional potential losses and total water potential in plants: A reevaluation. *J. Exp.Bot.* **23**, 983-994.
- Tyree,M.T.and J.S.Sperry.(1988).Do woody plants operate near the point of catastrophic xylem dynamic water stress? Answers from a model. *Plant Physiol.* (in press).
- Weatherley,P.E.(1976).Introduction:Water movement through plants.*Philos.Trans.R.Soc.London* **B273**, 435-444.
- Whitehead, D.R., and Hinckley, T.M. (1991). Models of water flux through forest stands. Critical leaf and stand parameters. *Tree Physiol.* **9**, 35-57.