森林蒸発散フラックス計測大流行の産物

What has been Clarified by Numerous Forest Evapotranspiration Studies
Based on Flux Measurements?

小松 光¹⁾²⁾ 堀田紀文³⁾

Hikaru KOMATSU Norifumi HOTTA

1) 東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

2) 学術振興会特別研究員

Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science

3) 東京大学大学院農学生命科学研究科

Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

森林蒸発散フラックスの計測は世界各地で数多く行われてきており、1990年代以降あたかも大流行の感があるが、このようなフラックス計測の大流行による産物は明示されてこなかった。本稿は、森林蒸発散フラックス計測の大流行の産物を解説するものである。森林蒸発散研究は、蒸発散量を気象条件とパラメータによって定式化することと、パラメータを森林特性（広葉樹／針葉樹、葉面積指数、樹高など）と関連づけることを目指している。このうち、前者はフラックス計測の大流行を待たずしてほぼ完了していた。一方、後者はフラックス計測の大流行によってはじめて可能となった。後者を行うためには、さまざまな特性を持った森林におけるデータの蓄積が必要だったからである。

キーワード：蒸発散，森林，パラメータ，フラックス計測，モデル

Numerous studies have been performed to examine forest evapotranspiration based on flux measurements since 1990s. However, no paper has clarified what was obtained by these studies. This paper answered the question. The authors assumed that the ultimate purpose of forest evapotranspiration research was to predict evapotranspiration rates from any forests. For this purpose, we firstly need to formulate evapotranspiration rates as functions of meteorological factors and model parameters, and secondarily need to relate the model parameters to forest properties (e. g., broad-leaved/coniferous, leaf area index, canopy height, etc.). The first step had been already accomplished before 1990s. The second step became possible by the presence of the studies with flux measurements, because the second step required accumulation of evapotranspiration data from various forests with different properties.

Key words: Evapotranspiration, Forest, Parameter, Flux measurements, Model

．はじめに

森林水文学の目的の1つに、降水・蒸発散・流出など森林水循環の各要素を定量的に把握することがある。森林水循環の要素のうち、蒸発散は量的に重要な要素である（例えば、Shuttleworth, 1988; Van Wijk *et al.*, 2001; Wilson *et al.*, 2001）。このため、森林蒸発散を計測する試みは古くから行われてきた（例えば、Swank and Miner, 1968; Denmead, 1969;

Hornbeck *et al.*, 1970）。

森林からの蒸発散量を計測する方法の1つとして、微気象学的方法（例えば、近藤, 1994, 2000; 文字, 1997; 塚本・文字, 2001）がある。微気象学的方法の代表的なものとしては、渦相關法・ボーエン比法・傾度法などがある。微気象学的方法とは、森林上での微気象計測によって蒸発散量を算定するものである。森林の蒸発散は森林上の微気象環境に影響を与えるため、森林上の微気象環境を計測することに

1) 〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1 Tokyo, 153-8505, Japan

3) 〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1 Tokyo, 113-8657, Japan

よって、蒸発散に関する情報を得ることができるわけである。

微気象学的方法に基づく森林蒸発散計測（以下、簡単のためフラックス計測と呼ぶ）は、1990年代から現在にかけて大流行の感がある。森林でのフラックス計測は1970年前後に始まった（例えば、Droppo *et al.*, 1973; McNaughton and Black, 1973; Stewart and Thom, 1973）。1980年代になると、フラックス計測に基づく論文が多く書かれるようになったが、依然としてフラックス計測は少数の試験地（例えば、Lindroth, 1985; Verma *et al.*, 1986; Stewart, 1988）において行われているにすぎなかった。しかし、1990年代以降、様相が変わる。1990年代以降になると、新たな試験地が数多く設定され、森林フラックス計測が盛んに行われるようになった。1980年代まで、あまりフラックス計測が行われてこなかった欧米以外の地域にも、試験地（例えば、Kelliher *et al.*, 1997, 1998; Tanaka *et al.*, 2003, 2004; Kumagai *et al.*, 2004a, 2005）が設定されるようになった。日本国内においても、1990年代以降、大学・国立研究所によってフラックス計測が行われるようになってきている（例えば、田中ら, 1996, 1998; 小栗・檜山, 2002; Saigusa *et al.*, 2002）。また、すでにフラックス計測が行われていた欧米でも、さらに多くの試験地（例えば、Williams *et al.*, 1996; Granier *et al.*, 2000; Lai *et al.*, 2000a）が新たに設置されることとなった。

このように1990年代以降、フラックス計測は大流行の感があるが、大流行による産物は明示されてこなかった。少なくとも著者らは、フラックス計測大流行の産物を明示した文章を読んだことがない。そこで、本解説は、フラックス計測大流行の産物を明示することを目的とする。そうすることによって、森林蒸発散研究の現在の到達点を明らかにし、今後の研究を展開していく一助としたい。本解説で、フラックス計測大流行の産物は、「蒸発散モデルのパラメータを森林特性（広葉樹／針葉樹、葉面積指数、樹高など）と関連づけることができるようになったこと」であることを説明する（ ）。その説明の準備として、まず、森林蒸発散研究はそもそも何を目標としているのか（ ）、また、さまざまある蒸発散計測法の中で、なぜフラックス計測がよく用いられるのか（ ）の2点を明らかにする。

・蒸発散研究の目標

著者らの考えによれば、森林蒸発散研究の目標は、

「蒸発散量 E を気象条件とパラメータによって定式化し、パラメータを森林特性（広葉樹／針葉樹、葉面積指数、樹高など）と関連づけること」である。ここで、定式化とは「蒸発散を Penman-Monteith 式や Priestley-Taylor 式のような形で表現をすること」を指す。これらの式は蒸発散量を気象条件とパラメータの関数として表現している（ 1 で詳述）。また、パラメータの関連づけとは、「Penman-Monteith 式や Priestley-Taylor 式に含まれるパラメータについて、広葉樹林と針葉樹林で違いがあるのか、などを調べること」に相当する（ 2 で詳述）。

純粋科学的な面から言うと、蒸発散量の定式化・パラメータの関連づけは、蒸発散現象を理解することにほかならない。このことは、物理学の例を考えるとわかりやすい。例えば、自由落下運動を理解する際にも、わたしたちは定式化・パラメータの関連づけを行っている。自由落下運動を理解する際、まず現象を運動方程式 $m \cdot dv/dt = mg - cv$ によって定式化する。ここで、 m は落下する物体の質量、 v は速度、 t は時間、 g は重力加速度、 c は抵抗係数である。 v は鉛直下向きを正とした。この式を v について解くと、 $v = mg/c \{1 - \exp(-ct/m)\}$ が得られる。ここでは初期条件として、 $t=0$ において $v=0$ 、を与えた。この v についての式は、物体の落下速度が物体の特性を表現するパラメータ m/c に依存することを意味している。運動方程式による定式化の次にわたしたちは、さまざまな物体と m/c の値を関連づける（例えば、鉄球とピンポン玉であれば鉄球の方が m/c の値が大きい、を調べることなどが関連づけに相当する）。定式化とパラメータの関連づけができたときに、わたしたちは現象を理解したと感じる。なぜなら、定式化とパラメータの関連づけができれば、実験をしなくても現象の結果（例えば、鉄球とピンポン玉であれば鉄球の方が高速で落下する、など）を予測できるからである。

応用科学的な面から言うと、蒸発散量の定式化・パラメータの関連づけが森林蒸発散研究の目標であるのは、社会から求められている問題に対して情報を提供するためである。蒸発散量の定式化・パラメータの関連づけが行われれば、気象条件と森林特性から蒸発散量を推定することができる。その結果、例えば、ある地域の気象条件下におけるスギ林・ブナ林の蒸発散量の情報を提供することにより、その地域においてスギ林とブナ林のどちらが水資源的に好ましいかを考えることができる（小松ら, 2005b）。

・フラックス計測が用いられる理由

さまざまな蒸発散計測法のうち、フラックス計測がよく用いられるのは、フラックス計測で得られるデータが蒸発散のモデル化(定式化、および、パラメータの関連づけ)にとくに有効だからである。その有効性は、フラックス計測が対象とする空間スケール、得られるデータの時間解像度に基づいている。フラックス計測は群落スケールの空間を対象とし、得られるデータの時間解像度は1時間以下と高い(図-1)。こうした空間スケール・時間解像度についての特徴が、モデル化に有効な理由を以下で説明する。

1. 空間スケール

群落スケールを対象とすることがなぜ有効かといえば、森林蒸発散研究の目標が、単葉・単木スケールではなく、空間的広がりをもった森林スケールでの蒸発散量をモデル化することだからである。

この点において、ポロメータ計測(例えば, Harley and Baldocchi, 1995; Herbst, 1995; Loustau *et al.*, 1996), 樹液流計測(例えば, Smith and Allen, 1996; 梶谷ら, 2005; Komatsu *et al.*, 2005c,d)などは、フラックス計測と異なる(図-1)。ポロメータ計測は単葉スケールの蒸発散を、樹液流計測は単木スケールの蒸発散を評価するものである。もちろん、単葉や単木から群落へのスケールアップする方法は提案されているが(例えば, Whitehead *et al.*, 1984; Granier *et al.*, 1990; Kostner *et al.*, 1998), これらの方法はフラックス計測に比べて多くの仮定を要するし、

図-1 各蒸発散計測法の対象とする空間スケール、得られるデータの時間解像度。

Fig. 1 Spatial scales and time resolution of data for each measurement methods.

得られた群落蒸発散量はかならずしも正確でない。単葉の場合、葉ごとのガス交換速度のばらつきが大きく(例えば, Leverenz *et al.*, 1982; Milne *et al.*, 1985), 単木の場合、蒸散速度の計測精度がかならずしも高くないからである(例えば, Clearwater *et al.*, 1999; Wilson *et al.*, 2001)。ただし、針葉樹においては単木における蒸散速度の計測精度は高く、樹液流計測に基づく針葉樹林の蒸発散データはフラックス計測に基づくデータと同等に扱うことができるとされている(例えば, Bernhofer *et al.*, 1996; Hogg *et al.*, 1997; Saugier *et al.*, 1997)。(このため、で紹介する Komatsu (2005)の研究においては、樹液流計測に基づく針葉樹林の蒸発散データをフラックス計測に基づく蒸発散データと区別せず解析している。)

流域水収支計測(例えば, Langford, 1976; Bosch and Hewlett, 1982; Wilson *et al.*, 2001)も森林蒸発散を空間的広がりをもって評価できる点からすると、フラックス計測と同様、有効な方法である。しかし、流域水収支計測は得られるデータの時間解像度は、フラックス計測に比べて低い。

2. 時間解像度

高時間解像度のデータが有効なのは、蒸発散プロセスに迫ることができるからである。

例えば、高時間解像度のデータは蒸散(林床面蒸発を含む)・遮断蒸発を分離して評価することができる。森林蒸発散を構成する蒸散・遮断蒸発は、まったく異なったプロセスに基づく(例えば, 塚本, 1998; 小松・橋本, 2002)ため、蒸散・遮断蒸発を分離して評価することが正確なモデル化のために必要である(例えば, Shuttleworth and Calder, 1979; Kumagai *et al.*, 2004b, c; 小松ら, 2005b)。高時間解像度の蒸発散データはこの分離を可能にする。例えば、蒸散だけを評価したいのであれば、降水中・降水直後のデータを除けばよいわけである。

蒸散・遮断蒸発を分離できることに加えて、高時間解像度のデータは、データが時間的に平均化されていないため、より広い気象条件のもとにおいて、より多くのデータサンプルによって、気象条件と蒸発散量の対応を調べることを可能にする。このことも、蒸発散の正確なモデル化をもたらす。

時間解像度の点において、流域水収支計測はフラックス計測と異なる(図-1)。流域水収支計測は蒸発散を1月単位以上程度の低時間解像度で評価す

るため、流域水収支計測のみでは、蒸散・遮断蒸発を分離して評価することは難しい。また、流域水収支計測によるデータは時間的に平均化されているため、高時間解像度のデータに比べて、気象条件と蒸発散量の対応を調べることも困難である。

・フラックス計測大流行の産物

フラックス計測大流行の産物は、「蒸発散モデルのパラメータを森林特性と関連づけることができるようになったこと」である。先に述べたように、森林蒸発散研究においては、蒸発散量を気象条件・パラメータによって定式化すること、パラメータを森林特性と関連づけること、の2つが必要とされる。このうち前者は、フラックス計測大流行前にほぼ完了していた。しかし後者については、フラックス計測大流行後はじめて可能となった。

以下、蒸発散量の定式化がフラックス計測大流行前に完了していたこと、また、パラメータの関連づけがフラックス計測大流行後はじめて可能になったことを説明する。

1. 蒸発散量の定式化

蒸発散量の定式化はフラックス計測大流行前にほぼ完了していた。現在、森林蒸発散を扱うのによく使われるモデルとして、Penman-Monteith 式 (Monteith and Unsworth, 1990; キャンベル・ノーマン, 2003; Komatsu *et al.*, 2005a) と Priestley-Taylor 式 (Priestley and Taylor, 1972; Raupach, 2001; Arain *et al.*, 2003) がある。これらの式が森林蒸発散をよく表現することは、フラックス計測大流行前にほぼわかっていて、

Penman-Monteith 式は次のように与えられる。

$$E = \frac{(R_n - G) + c_p G_a D}{(1 + G_a/G_s)} \quad (1)$$

ここで、 λ は水の蒸発の潜熱、 E は蒸発散速度、 λ は飽和水蒸気圧曲線の傾き、 R_n は純放射量、 G は地中熱流量、 ρ_a は空気密度、 c_p は空気の比熱、 G_a は空気力学的コンダクタンス、 D は大気飽差、 γ は乾湿計定数、 G_s は表面コンダクタンスである。式(1)は、フィックの法則に基づいて顕熱・潜熱を表現し、それらを熱収支式に代入することによって得られる (例えば、Monteith and Unsworth, 1990; Jones, 1992; 塚本, 1992)。すなわち、 $H = c_p G_a (T_s - T)$ 、

$E = G_s [e(T_s) - e]$ を $R_n - G = H + E$ に代入することによって得られる。ここで、 H は顕熱、 T_s は表面

温度、 T は気温、 $G_t = (G_a^{-1} + G_s^{-1})^{-1}$ 、 $e(T_s)$ は温度 T_s における飽和水蒸気圧、 e は大気水蒸気圧である。

Penman-Monteith 式は蒸発散量を気象条件とパラメータ G_a 、 G_s によって定式化したものである。 G_a 、 G_s はそれぞれ蒸発散の空気力学的、生理学的な制限を表現しており、値が小さいほど制限が強いことを意味する。森林においては、蒸発散量に大きく影響するのは G_a 、 G_s のうち G_s であるため (例えば、Jarvis and McNaughton, 1986; Kelliher *et al.*, 1993; 小松, 2003a)、 G_s の検討が重要となる。この点において、森林は農地などと異なる。農地などにおいては G_a の検討も G_s の検討と同等に重要である (例えば、Jarvis and McNaughton, 1986; Jones, 1992; 小松, 2003a)。 G_s は、Penman-Monteith 式を単葉スケールに適用したときの気孔コンダクタンスにあたるパラメータである。したがって、 G_s は気孔の開き具合を群落スケールにおいて概念的に表現していると考えられる。

Priestley-Taylor 式は次のように与えられる。

$$E = E_{eq} = \frac{R_n - G}{\lambda} \quad (2)$$

ここで、 λ は Priestley-Taylor 定数、 E_{eq} は平衡蒸発量である。平衡蒸発量は、無限に広がる完全湿面からの蒸発量を意味し、

$$E_{eq} = \frac{R_n - G}{\lambda} \quad (3)$$

で与えられる (例えば、Monteith and Unsworth, 1990; Jones, 1992; Raupach, 2000, 2001)。 E_{eq} は、Penman-Monteith 式において $G_a \ll G_s$ を仮定することで得られる (例えば、Jarvis and McNaughton, 1986; Baldocchi *et al.*, 2000; Raupach, 2001)。

Priestley-Taylor 式は蒸発散量を気象条件とパラメータによって定式化したものである。 λ は蒸発散の制限を表現しており、値が小さいほど制限が強いことを意味する。大気境界層モデルによる計算によれば、 λ は Penman-Monteith 式における G_s とよく対応するとされている (図 - 2) (例えば、De Bruin, 1983; McNaughton and Jarvis, 1991; Raupach, 1998)。

Penman-Monteith 式と Priestley-Taylor 式が森林蒸発散をよく表現することは、単葉スケールで定義される気孔コンダクタンス g_s 、Penman-Monteith 式から得られる G_s 、Priestley-Taylor 式から得られる λ の3者がよい対応を見せることから理解される。 g_s 、 G_s 、 λ がよい対応を見せることについて、

図 - 2 G_s と α の関係. De Bruin (1983) の図 - 5 を改変. この関係は, Penman-Monteith 式を含む大気境界層モデルによる計算によって得られたものである.

Fig. 2 The relationship between G_s and α . This figure is altered from Fig. 5 of De Bruin (1983). The relationship was obtained from calculations using an atmospheric boundary-layer model which includes the Penman-Monteith equation.

Tan and Black (1976) による研究結果を使って示す. Tan and Black (1976) はカナダの針葉樹林において, g_s , G_s , α を計測して比較している. (Tan and Black (1976) の原論文では, α のかわりに E/R_n について検討がなされているが, 本解説では E/R_n を α に変換して議論を進める. この変換に際して, 気温 20°C , $G = 0$ を仮定した. α と E/R_n はほぼ比例するので, α と E/R_n のどちらを用いても議論の内容は変わらない. g_s はポロメータ計測によって得られている. G_s は, Penman-Monteith 式における G_s 以外の変数を計測して, Penman-Monteith 式に代入することによって得られている. α は, Priestley-Taylor 式における α 以外の変数を計測して, Priestley-Taylor 式に代入することによって得られている. なお, 計測は夏季の1ヶ月ほどの間に行われた.

図 - 3 は g_s , G_s , α の土壌水分への応答を示している. g_s , G_s , α はともに土壌水分に対して同様の応答を示している. いずれも土壌水分ポテンシャルの減少とともに, 値が小さくなっている. このような g_s , G_s , α の対応は, Penman-Monteith 式, Priestley-Taylor 式の理論に整合している. 理論からすると, g_s と G_s は対応し, G_s と α が対応するはず

図 - 3 (a) g_s , (b) G_s , (c) α の土壌水分への応答. Tan and Black (1976) の図 - 2, 図 - 7, 図 - 8 を改変. g_s と土壌水分, G_s と土壌水分の関係は飽差の値によってシフトするため, 飽差が同じような条件のデータのみを示している. g_s については, 飽差が $1.0 \sim 1.3$ kPa のときのデータを示している. G_s については, 飽差が $1.6 \sim 2.0$ kPa のときのデータを示している.

Fig. 3 Relationships of (a) g_s , (b) G_s , and (c) α with soil water potential. These figures are altered from Figs. 2, 7, and 8 of Tan and Black (1976). Relationships of g_s and G_s with soil water potential depend on vapor pressure deficit (VPD). Therefore, Figs. 3a and 3b show relationships under specific VPD conditions. Figs. 3a shows the relationship of g_s with soil water potential when $VPD = 1.0 \sim 1.3$ kPa. Fig. 3b shows the relationship of G_s with soil water potential when $VPD = 1.6 \sim 2.0$ kPa.

だったからである。したがって、Penman-Monteith 式、Priestley-Taylor 式はともに、森林蒸発散をよく表現すると考えられる。なお、ここに示した Tan and Black (1976) による Penman-Monteith 式、Priestley-Taylor 式についての検討は、すでに行われていた農地などにおける検討例（例えば、Szeicz and Long, 1969; Black *et al.*, 1970; Priestley and Taylor, 1972）を参考に行われた。

本節で、蒸発散の定式化はフラックス計測大流行前にほぼ完了していたと述べたが、フラックス計測大流行が定式化についてなんら貢献がなかったというわけではない。フラックス計測大流行は、定式化の妥当性に対する確信を強めるという点において貢献があった。1990年代以降も、多くの研究が g_s , G_s 、

の対応について調べてきた（例えば、Lu *et al.*, 1995; Baldocchi *et al.*, 1997, 2000; Wilson and Baldocchi, 2000）。そうした研究は、Tan and Black (1976) と同様、 g_s , G_s 、のよい対応を報告している。このことによって、Tan and Black (1976) で得られた結果の一般性が確かめられることとなった。すなわち、定式化の妥当性を確かめることはフラックス計測大流行前にすでに行われており、そのときに得られた知見はフラックス計測大流行後も大きく変更されることはなかった。

2. パラメータの関連づけ

パラメータの関連づけは、フラックス計測大流行によってはじめて可能となった。ここでは、パラメータの関連づけがフラックス計測大流行によって可能となった理由を説明したのちに、パラメータの関連づけについての具体的な成果を紹介する。

1) パラメータの関連づけが可能となった理由

フラックス計測の大流行によってパラメータの関連づけが可能となったのは、フラックス計測の大流行によってさまざまな特性を持った森林について多くの計測結果が得られるようになったからである。

フラックス計測大流行前には、パラメータと森林特性の関連を調べるための十分な計測結果が得られていなかった。例えば、Shuttleworth (1989) および Nakagawa (1984) は、それぞれ暖候期の G_s および g_s のデータを既存の文献から収集しているが、両者ともにわずか 4 サンプルを得たにすぎない。このようなデータ収集が行われたことは、 G_s や g_s の関連づけを行おうとする考えが、当時すでにあったことを示唆している。しかし、サンプル数が少なかった

ため、 G_s および g_s の値について、試験地間に大きな違いがあることが確認されたものの、その違いがどのような森林特性と関連しているのかを考察することはできなかった。

いっぽう、フラックス計測大流行後には、パラメータと森林特性の関連を調べるための十分な計測結果が得られるようになった。例えば、Komatsu (2003b, 2005) は、暖候期の G_s および g_s のデータを既存の文献から収集しているが、それぞれ 52 サンプルおよび 67 サンプルを得ている。フラックス計測の大流行が、このように多くのサンプル数を供給することとなり、その結果として G_s および g_s について森林特性との関連を調べるのが可能となってきた。

なお、 G_s および g_s の意味するところについての理解が進んだことも、 G_s および g_s と森林特性の関連を調べるための重要な条件だったと著者らは考えている。

G_s はともに概念的なパラメータであるため、その意味するところは必ずしも明確でなかった（例えば、Raupach and Finnigan, 1988; Monteith and Unsworth, 1990; Baldocchi *et al.*, 1991）。 G_s は植物生理学的過程を表現するために導入されたパラメータであるにも関わらず、空気力学的過程に影響されるという点で、その意味するところが明確でなかった（例えば、Raupach and Finnigan, 1988; Baldocchi *et al.*, 1991; Raupach, 1995）。については、Priestley-Taylor 式が蒸発散量を放射量からモデル化（式(2)）していることの意味が明確でなかった。フラックス計測の結果は、森林の蒸発散量が放射量よりも飽差に依存することを示してきたからである（例えば、McNaughton and Black, 1973; Stewart and Thom, 1973）。

しかし、多層モデルを使った理論研究によって（例えば、Kelliher *et al.*, 1995; Raupach, 1995; Lai *et al.*, 2000b）、 G_s は g_s とよく対応し、近似的に植物生理学的パラメータと考えられることが示された。また、大気境界層モデルを使った理論研究によって（例えば、McNaughton and Jarvis, 1991; Kim and Entekhabi, 1997, 1998; Raupach, 1998）、地表面への放射の入力が地表面付近の飽差を作り出し、蒸発散に影響するという一連のプロセスが理解され、Priestley-Taylor 式が蒸発散量を放射量からモデル化していることの妥当性が示された。同時に、 G_s は蒸発散の植物生理学的な制御を意味し、Penman-Monteith 式の G_s に対応するものであることも示さ

れた。さらに、計測研究から、 G_s が g_s とよく対応すること（例えば、Herbst, 1995; Lu *et al.*, 1995; Bernhofer *et al.*, 1996）、 G_s が g_s とよく対応すること（例えば、Baldocchi *et al.*, 1997, 2000; Blanken *et al.*, 1997; Wilson and Baldocchi, 2000）が確認され、理論研究の結果の正しさが裏付けられた。以上のような経緯を通じて、パラメータの意味が明らかになってきたことも、 G_s および g_s について森林特性との関連を調べるための重要な動機づけとなった。なぜなら、パラメータの意味が明らかになれば、 G_s および g_s と森林特性の関係を調べて得られた結果を、背後にあるプロセスを含めて理解することが可能となるからである。

2) 具体的な成果

パラメータの関連づけについて、例えば次のような成果が得られている：(1)広葉樹林と針葉樹林の間に明らかなの違いがある、(2)の試験地ごとのばらつきは、広葉樹林では小さいが、針葉樹林では大きい、(3)針葉樹林のばらつきは樹高によって整理できる。

以下に、これら3つの成果を紹介する。パラメータの関連づけを行っている研究として Wilson *et al.* (2002, 2003), Komatsu (2003b, 2004, 2005)がある。両者の研究は一部重複しているが、Wilson *et al.* (2002, 2003)と比較すると、Komatsu (2003b, 2004, 2005)の方がより多くの計測結果に基づいているため、ここでは Komatsu (2003b, 2004, 2005)の研究成果を紹介する。

第一の成果は、広葉樹林と針葉樹林の間に明らかなの違いがあることである。図-4 a・bは、それぞれ広葉樹林・針葉樹林のサンプルの α に対する頻度分布を示したものである。この図より、広葉樹林のサンプルが針葉樹林のサンプルよりも右に分布する傾向が見てとれる。例えば、 α の中央値についてみると、広葉樹林において0.86($n=22$)であるのに対して、針葉樹林において0.59($n=45$)となっており、 α は広葉樹林において針葉樹林より大きいという傾向が明らかとなった (Komatsu, 2005)。なお、気候帯間の違い、あるいは、常緑・落葉間の違いは、広葉樹林・針葉樹林間の違いより小さかった (Komatsu, 2005)。

第二の成果は、 α の試験地ごとのばらつきは、広葉樹林では小さいが、針葉樹林では大きいことである。図-4 a・bにおいて、広葉樹林のデータに比べて針葉樹林のデータが幅広く分布していることが

樹高による

図-4 (a)広葉樹林、(b)針葉樹林のサンプルの α に対する頻度分布。それぞれサンプル数は、広葉樹林で22、針葉樹林で45である。Komatsu (2005)の図-2を改変。

Fig.4 Histograms of data frequency for (a) broad-leaved and (b) coniferous forests according to α value class. Sample sizes are 22 and 45 for broad-leaved and coniferous forests, respectively. These figures are altered from Fig. 2 of Komatsu (2005).

見てとれる。例えば、得られたデータの最小値、最大値は、広葉樹林で0.58, 1.08, 針葉樹林で0.24, 1.12である。

第三の成果は、針葉樹林のばらつきが樹高によって整理されることである。図-5は針葉樹林における樹高と α の関係を示したものである。この図より、樹高が大きいほど α が小さいという傾向が見てとれる。例えば、図-5の回帰曲線によると、樹高10 mのときに $\alpha=0.69$ 、25 mのときに $\alpha=0.44$ となっている。なお、従来の水循環モデルなどで蒸発散をモデル化する際、樹高ではなく葉面積指数

(LAI) がしばしば考慮されてきた (例えば, Running and Coughlan, 1988; McMurtrie *et al.*, 1990, 1992; Running and Gower, 1991; Band, 1993; Band *et al.*, 1993; Sellers *et al.*, 1997; Mauser and Schadlich, 1998). こうしたモデルでは, 表面コンダクタンス G_s (あるいは, 群落コンダクタンス) が気孔コンダクタンス g_s と LAI から $G_s = \int_0^{LAI} g_s dL$ のように表現されている. ここで L は鉛直方向の積算葉面積である. このような表現の背景には, LAI によって試験地ごとの蒸散特性の違いが生じているという考えがある. しかし, LAI と α の間, LAI と G_s の間には明確な関係は認められなかった (Komatsu, 2003b, 2005). このことは, 針葉樹林の蒸発散パラメータをモデル化する場合に, LAI ではなく樹高を考慮するのがよいことを示している.

以上, パラメータの関連づけについての具体的成果を紹介してきたが, ここで注意すべき点は, 図 - 4 や図 - 5 のような解析は, フラックス計測流行前の 1980 年代には不可能だったということである. 例えば, Nakagawa (1984) が得た α のデータは 4 サンプルであったが, 4 サンプルでは図 - 4 や図 - 5 を描くことはできなかったはずである.

なお, α が広葉樹林で針葉樹林より大きい, また, 針葉樹林において α が樹高とともに小さくなる, という解析結果を示したが, その原因は気孔コンダクタンスにあると思われる. つまり, α が広葉樹林で針葉樹林より大きいことは, 気孔コンダクタンスが広葉樹林において針葉樹林より大きいためと思われる. また, 針葉樹林において α が樹高とともに小さくなるのは, 針葉樹において気孔コンダクタンスが樹高とともに小さくなるためと思われる. このように, α の違いが気孔コンダクタンスの違いによると考えるのは, α の解析と同じ結果が G_s の解析においても得られているため (Komatsu, 2003b, 2005), また, G_s と気孔コンダクタンスがほぼ線形に対応するため (Kelliher *et al.*, 1995; Baldocchi and Meyers, 1998) である. また, 単葉スケールの研究でも以上の考察を支持する結果 (例えば, Grulke and Miller, 1994; Yoder *et al.*, 1994; Ryan *et al.*, 2000; Irvine *et al.*, 2004) が得られている (Komatsu, 2003b, 2005). 本解説では, 図 - 4, 5 の考察は以上にとどめるが, 図 - 4, 5 の考察の詳細は Komatsu (2003b, 2004, 2005) および小松ら (2005b) に記されているので, 興味をお持ちのかたはこれらの文献を参照いただきたい.

図 - 5 針葉樹林における樹高 h と α の関係. サンプル数は 45. 回帰曲線の式形は, $\alpha = -0.269 \ln h + 1.31$ である. Komatsu (2005) の図 - 3 a を改変.

Fig. 5 The relationship between canopy height h and α for coniferous forests. The sample size is 45. The regression line is written as $\alpha = -0.269 \ln h + 1.31$. This figure is altered from Figure 3a of Komatsu (2005)

・おわりに

本解説では, 1990 年代以降の森林蒸発散フラックス計測の大流行は, 1970・80 年代に得られた知見をより多くの試験地において確認するというにとどまらず, 固有の産物をもたらしたことを説明した. その産物とは, さまざまな計測地のデータが蓄積されることによって, 蒸発散モデルのパラメータを森林特性 (広葉樹 / 針葉樹, 葉面積指数, 樹高など) と関連づけることができるようになったことである. このことを, 暖候期の蒸発散量についての Komatsu (2003b, 2005) による解析を例にとって説明した.

ただし, 森林特性と蒸発散モデルのパラメータの関係については, まだわからないことも多い. フラックス計測データの蓄積を十分に活用して, 森林特性とパラメータの関係を調べる研究は最近行われるようになってきたばかりだからである (Wilson *et al.*, 2002, 2003; Komatsu, 2003b, 2004, 2005). 例えば, 「広葉樹林と針葉樹林で, 冬季のパラメータの値に違いがあるかどうか」, あるいは, 「広葉樹林と針葉

樹林で、パラメータの値の季節変化の形状は異なるかどうか、といったことがまだわからない。これらの問題についても、フラックス計測データの蓄積を十分に活用することで答えを出していくことができると思う。そのような営みを通じて、任意の気象条件下にある任意の特性を持った森林からの蒸発散量を推定するモデルができると考えている。もちろん、そのようなモデルはすでに存在する(例えば、Sellers *et al.*, 1997; Landsberg and Gower, 1997; Waring and Running, 1998)。しかし、こうしたモデルには森林特性とパラメータの関係がまだ十分にとりこまれていない。例えば、本稿の図-5で示した樹高と蒸発散量の関係は、これらのモデルに取り込まれていない。本解説が、現存するフラックス研究の成果を十分に使って、パラメータを森林特性と密接に関連づけたモデルを構築する一助となれば幸いである。

謝辞: 本稿を作成するにあたって、以下の方々にお世話になりました。お世話になった方々に感謝の意を表します。久米朋宣さん(東京大学大学院・農学生命科学研究科)・久米篤助教授(富山大学・理学部)には、本研究の内容についてコメントをいただきました。熊谷朝臣助手(九州大学大学院・農学研究院)には、樹液流計測の可能性と限界について教えていただきました。担当編集委員の大槻恭一教授(九州大学大学院・農学研究院)、また、二人の査読者の先生方には、本稿に対して本質的で建設的なコメントをいただきました。鼎信次郎助教授、瀧野佳洋子さん(総合地球環境学研究所)には、著者らが他の研究者と議論するにあたって、ご助力いただきました。

この研究は、総合地球環境学研究所平成16年度プロジェクト「地球規模の水循環変動ならびに世界の水問題の実態と将来展望」(代表: 鼎信次郎)、および、学術振興会特別研究員奨励費(16・6152)の援助のもとに行われた。

引用文献

Arain, M. A., Black, T. A., Barr, A. G., Griffis, T. J., Morgenstern, K., and Nesic Z. (2003): Year-round observations of the energy and water vapor fluxes above a boreal black spruce forest, *Hydrol. Process.*, **17**, pp.3581-3600.

Baldocchi, D. D. and Meyers, T. P. (1998): On us-

ing eco-physiological, micrometeorological and biogeochemical theory to evaluate carbon dioxide, water vapor and trace gases fluxes over vegetation: a perspective, *Agric. For. Meteorol.*, **90**, pp. 1-25.

Baldocchi, D. D., Luxmoore, R. J., and Hatfield, J. L. (1991): Discerning the forest from the trees: an essay on scaling canopy stomatal conductance, *Agric. For. Meteorol.*, **54**, pp. 197-226.

Baldocchi, D. D., Vogel, C. A., and Hall, B. (1997): Seasonal variation of energy and water vapor exchange rates above and below a boreal jack pine forest canopy, *J. Geophys. Res.*, **102**, pp. 28939-28951.

Baldocchi, D., Kelliher, F. M., Black, T. A., and Jarvis, P. (2000): Climate and vegetation controls on boreal zone energy exchange, *Global Change Biol.*, **6**, pp. 69-83.

Band, L. E. (1993): Effect of land surface representation on forest water and carbon budgets, *J. Hydrol.*, **150**, pp. 749-772.

Band, L. E., Patterson, P., Nemani, R., and Running, S. W. (1993): Forest ecosystem processes at the watershed scale: incorporating hillslope hydrology, *Agric. For. Meteorol.*, **63**, pp. 93-126.

Bernhofer, Ch., Blanford, J. H., Siegwolf, R., and Wedler, M. (1996): Applying single and two layer canopy models to derive conductances of a Scots pine plantation from micrometeorological measurements, *Theor. Appl. Clim.*, **53**, pp.95-104.

Black, T. A., Tanner, C. B., and Gardner, W.R. (1970): Evapotranspiration from a snap bean crop, *Agron. J.*, **62**, pp. 66-69.

Bosch, J. M. and Hewlett, J. D. (1982): A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration, *J. Hydrol.*, **55**, pp. 3-23.

キャンベル, G. S.・ノーマン, J. M. (2003): 生物環境物理学の基礎 第2版(久米篤・大槻恭一・熊谷朝臣・小川滋監訳), pp. 315, 森北出版, 東京。

Clearwater, M. J., Meinzer, F. C., Andrade, J. L., Goldstein, G., and Holbrook, N. M. (1999): Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. *Tree Physiol.*

- 19, pp. 681-687.
- De Bruin, H. A. R. (1983): A model for the Priestley-Taylor parameter, *J. Clim. Appl. Meteorol.*, **22**, pp.572-578.
- Denmead, O. T. (1969): Comparative micrometeorology of a wheat field and a forest of *Pinus radiata*, *Agric. Meteorol.*, **6**, pp. 357-371.
- Droppo Jr, J. G., Harry, L., and Hamilton Jr, H. L. (1973): Experimental variability in the determination of the energy balance in a deciduous forest, *J. Appl. Meteorol.*, **12**, pp.780-791.
- Granier, A., Bobay, V., Gash, J. H. C., Gelpe, J., Saugier, B., and Shuttleworth, W. J. (1990): Vapour flux density and transpiration rate comparisons in a stand of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Les Landes forest, *Agric. For. Meteorol.*, **51**, pp. 309-319.
- Granier, A., Biron, P., and Lemoine, D. (2000): Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands, *Agric. For. Meteorol.*, **100**, pp. 291-308.
- Grulke, N. E. and Miller, P. R. (1994): Changes in gas exchange characteristics during the life span of giant sequoia: implications for response to current and future concentrations of atmospheric ozone, *Tree Physiol.*, **14**, pp. 659-668.
- Harley, P. C. and Baldocchi, D. D. (1995): Scaling carbon dioxide and water vapour exchange from leaf to canopy in a deciduous forest. I. Leaf model parameterization, *Plant Cell & Environ.*, **18**, pp. 1146-1156.
- Herbst, M. (1995): Stomatal behaviour in a beech canopy: an analysis of Bowen ratio measurements compared with porometer data, *Plant Cell & Environ.*, **18**, pp. 1010-1018.
- Hogg, E. H., Black, T. A., den Hartog, G., Neumann, H. H., Zimmermann, R., Hurdle, P. A., Blanken, P. D., Nesic, Z., Yang, P. C., Staebler, R. M., McDonald, K. C., and Oren, R. (1997): A comparison of sap flow and eddy fluxes of water vapor from a boreal deciduous forest, *J. Geophys. Res.*, **102**, pp. 28929-28937.
- Hornbeck, J. W., Pierce, R. S., and Federer, C. A. (1970): Steamflow changes after forest clearing in New England, *Water Resour. Res.*, **6**, pp. 1124-1132.
- Irvine, J., Law, B. E., Kurpius, M. R., Anthoni, P. M., Moore, D., and Schwarz, P. A. (2004): Age-related changes in ecosystem structure and function and effects on water and carbon exchange in ponderosa pine, *Tree Physiol.*, **24**, pp. 753-763.
- Jarvis, P. G. and McNaughton, K. G. (1986): Stomatal control of transpiration: Scaling up from leaf to region, *Adv. Ecol. Res.*, **15**, pp. 1-49.
- Jones, H. G. (1992): Plants and Microclimate (second edition) pp. 428, Cambridge University Press, Cambridge.
- 梶谷宜弘・堀田紀文・小松光・久米朋宣・鈴木雅一 (2005): 斜面上部・下部に生育するスギ樹木の蒸散日変化パターンの差異, *日本森林学会誌* **87**, pp. 63-72.
- Kelliher, F. M., Leuning, R., and Schulze, E.D. (1993): Evaporation and canopy characteristics of coniferous forests and grasslands, *Oecologia*, **95**, pp. 153-163.
- Kelliher, F. M., Leuning, R., Raupach, M. R., and Schulze, E. D. (1995): Maximum conductances for evaporation from global vegetation types. *Agric. For. Meteorol.*, **73**, pp. 1-16.
- Kelliher, F. M., Hollinger, D. Y., Schulze, E. D., Vyodskaya, N. N., Byers, J. N., Hunt, J. E., McSeveny, T. M., Milukova, I., Sogatchev, A., Varlargin, A., Ziegler, W., Arneth, A., and Bauer, G. (1997): Evaporation from an eastern Siberian larch forest, *Agric. For. Meteorol.*, **85**, pp. 135-147.
- Kelliher, F. M., Lloyd, J., Arneth, A., Byers, J. N., McSeveny, T. M., Milukova, I., Grigoriev, S., Panfyorov, M., Sogatchev, A., Varlargin, A., Ziegler, W., Bauer, G., and Schulze, E. D. (1998): Evaporation from a central Siberian pine forest, *J. Hydrol.*, **205**, pp.279-296.
- Kim, C. P. and Entekhabi, D. (1997): Examination of two methods for estimating regional evaporation using a coupled mixed layer and land surface model, *Water Resour. Res.*, **33**, pp. 2109-2116.
- Kim, C. P. and Entekhabi, D. (1998): Feedbacks in the land-surface and mixed-layer energy budgets, *Boundary-Layer Meteorol.*, **88**, pp. 1-21.
- 小松光 (2003a): 森林群落で計測される乖離率 (decoupling factor) の値, *水文・水資源学会誌* **16**,

- pp. 427-442 .
- Komatsu, H. (2003b): Relationship between canopy height and the reference value of surface conductance for closed coniferous stands, *Hydrol. Process.*, **17**, pp. 2503-2512.
- Komatsu, H. (2004): A general method of parameterizing the big-leaf model to predict the dry-canopy evaporation rate of individual coniferous forest stands, *Hydrol. Process.*, **18**, pp. 3019-3036.
- Komatsu, H. (2005): Forest categorization according to dry-canopy evaporation rates in a growing season: Comparison of the Priestley-Taylor coefficient values from various observation sites, *Hydrol. Process.*, **19**, in press.
- 小松光・橋本昌司(2002): 森林生態系における水・炭素・窒素循環の研究に役立つ Process-Based Model, 日本林学会誌 **84**, pp. 54-62 .
- Komatsu, H., Kumagai, T., and Hotta, N. (2005a): Is surface conductance theoretically independent of reference height?, *Hydrol. Process.*, **19**, pp. 339-347.
- 小松光・澤野真治・久米朋宣・橋本昌司(2005b): 森林の特性と蒸発散量の関係, 日本森林学会誌, **87**, pp. 170-185 .
- Komatsu, H., Kang, Y., Kume, T., Yoshifuji, N., and Hotta, N. (2005c): Transpiration from a *Cryptomeria japonica* forest (I) Aerodynamic control of transpiration, *Hydrol. Process.*, accepted.
- Komatsu, H., Kang, Y., Kume, T., Yoshifuji, N., and Hotta, N. (2005d): Transpiration from a *Cryptomeria japonica* forest (II) Responses of canopy conductance to meteorological factors, *Hydrol. Process.*, accepted.
- 近藤純正(1994): 水環境の気象学 . pp. 350 , 朝倉書店 , 東京 .
- 近藤純正(2000): 地表面に近い大気の科学 理解と応用 . pp. 324 , 東京大学出版会 , 東京 .
- Kostner, B., Granier, A., and Cermak, J. (1998): Sapflow measurements in forest stands: methods and uncertainties, *Ann. Sci. For.*, **55**, 13-27.
- Kumagai, T., Saitoh, T. M., Sato, Y., Morooka, T., Manfroi, O. J., Kuraji, K., and Suzuki, M. (2004a): Transpiration, canopy conductance and the decoupling coefficient of a lowland mixed dipterocarp forest in Sarawak, Borneo: dry spell effects, *J. Hydrol.*, **287**, pp. 238-252.
- Kumagai, T., Katul, G. G., Saitoh, T. M., Sato, Y., Manfroi, O. J., Morooka, T., Ichie, T., Kuraji, K., Suzuki, M., and Porporato, A. (2004b): Water cycling in a Bornean tropical rain forest under current and projected precipitation scenarios, *Water Resour. Res.*, **40**, pp. W01104.
- Kumagai, T., Katul, G. G., Porporato, A., Saitoh, T. M., Ohashi, M., Ichie, T. and Suzuki, M. (2004c): Carbon and water cycling in a Bornean tropical rainforest under current and future climate scenarios, *Adv. Water Resour.*, **27**, pp. 1135-1150.
- Kumagai, T., Saitoh, T. M., Sato, Y., Takahashi, H., Manfroi, O. J., Morooka, T., Kuraji, K., Suzuki, M., Yasunari, T., and Komatsu, H. (2005): Annual water balance and seasonality of evapotranspiration from a Bornean tropical rainforest, *Agric. For. Meteorol.*, **128**, pp. 81-92.
- Lai, C., Katul, G., Ellsworth, D., and Oren, R. (2000a): Modelling vegetation-atmosphere CO₂ exchange by a coupled Eulerian-Lagrangian approach, *Boundary-Layer Meteorol.*, **95**, pp. 91-122.
- Lai, C. T., Katul, G. G., Oren, R., Ellsworth, D., and Schafer, K. (2000b): Modeling CO₂ and water vapor turbulent flux distributions within a forest canopy, *J. Geophys. Res.*, **102**, pp. 26333-26351.
- Landsberg, J. J. and Gower, S. T. (1997): Applications of Physiological Ecology to Forest Management, pp. 354, Academic Press, San Diego.
- Langford, K. J. (1976): Change in yield of water following a bushfire in a forest of Eucalyptus regnans, *J. Hydrol.*, **29**, pp. 87-114.
- Leverenz, J. W., Deans, J. D., Ford, E. D., Jarvis, P. G., Milne, R., and Whitehead, D. (1982): Systematic spatial variation of stomatal conductance in a Sitka spruce plantation, *J. Appl. Ecol.*, **19**, pp. 835-851.
- Lindroth, A. (1985): Canopy conductance of coniferous forests related to climate, *Water Resource Res.*, **21**, pp. 297-304.
- Loustau, D., Berbigier, P., Roumagnac, P., Arruda-Pacheco, C., David, J. S., Ferreira, M. I., Pereira, J. S., and Tavares, R. (1996): Transpiration of a 64-year-old maritime pine stand in Portugal. 1. Seasonal course of water flux through maritime

- pine, *Oecologia*, **107**, pp. 33-42.
- Lu, P., Biron, P., Breda, N., and Granier, A. (1995): Water relations of adult Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) under soil drought in the Vosges mountains: water potential, stomatal conductance and transpiration, *Ann. Sci. For.*, **52**, pp. 117-129.
- Mausser, W. and Schädlich, S. (1998): Modelling the spatial distribution of evapotranspiration on different scales using remote sensing data, *J. Hydrol.*, **212-213**, pp. 250-267.
- McMurtrie, R. E., Rook, D. A., and Kelliher, F. M. (1990): Modelling the yield of *Pinus radiata* on a site limited by water and nutrition, *For. Ecol. Manage.*, **30**, pp. 381-413.
- McMurtrie, R. E., Leuning, R., Thompson, W. A., and Wheeler, A. M. (1992): A model of canopy photosynthesis and water use incorporating a mechanistic formulation of leaf CO₂ exchange, *For. Ecol. Manage.*, **52**, pp. 261-278.
- McNaughton, K. G. and Black, T. A. (1973): A study of evapotranspiration from a douglas fir forest using the energy balance approach, *Water Resour. Res.*, **9**, pp. 1579-1590.
- McNaughton, K. G. and Jarvis, P. G. (1991): Effects of spatial scale on stomatal control of transpiration, *Agric. For. Meteorol.*, **54**, pp. 279-301.
- Milne, R., Deans, J. D., Ford, E. D., Jarvis, P. D., Leverenz, J., and Whitehead, D. (1985): A comparison of two methods of estimating transpiration rates from a Sitka spruce plantation, *Boundary-Layer Meteorol.*, **32**, pp. 155-175.
- 文字信貴・平野高司・高見晋一・堀江武・桜谷哲夫 (1997): 農学・生態学のための気象環境学. pp. 199, 丸善, 東京.
- Monteith, J. L. and Unsworth, M. (1990): Principles of Environmental Physics, pp. 291, Arnold, London.
- Nakagawa, S. (1984): Study on evapotranspiration from pasture, *Environ. Res. Center Pap.*, **4**, pp. 1-87.
- 小栗秀之・檜山哲哉 (2002): 都市二次林における CO₂・熱フラックスの季節変化, 水文・水資源学会誌, **15**, pp. 264-278.
- Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J. (1972): On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters, *Month. Weath. Rev.*, **100**, pp. 81-92.
- Raupach, M. R. (1995): Vegetation-atmosphere interaction and surface conductance at leaf, canopy and regional scales, *Agric. For. Meteorol.*, **73**, pp. 151-179.
- Raupach, M. R. (1998): Influences of local feedbacks on land-air exchanges of energy and carbon, *Global Change Biol.*, **4**, pp. 477-494.
- Raupach, M. R. (2000): Equilibrium evaporation and the convective boundary layer, *Boundary-Layer Meteorol.*, **96**, pp. 107-141.
- Raupach, M. R. (2001): Combination theory and equilibrium evaporation, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **127**, pp. 1149-1181.
- Raupach, M. R. and Finnigan, J. J. (1988): 'Single-layer models of evaporation from plant canopies are incorrect but useful, whereas multilayer models are correct but useless': discuss, *Aust. J. Plant Physiol.*, **15**, pp. 705-716.
- Running, S. W. and Coughlan, J. C. (1988): A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes, *Ecol. Model.*, **42**, pp. 125-154.
- Running, S. W. and Gower, S. T. (1991): FOREST-BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications. II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets, *Tree Physiol.*, **9**, pp. 147-160.
- Ryan, M. G., Bond, B. J., Law, B. E., Hubbard, R. M., Woodruff, D., Cienciala, E., and Kucera, J. (2000): Transpiration and whole-tree conductance in ponderosa pine trees of different heights, *Oecologia*, **124**, pp. 553-560.
- Saigusa, N., Yamamoto, S., Murayama, S., Kondo, H., and Nishimura, N. (2002): Gross primary production and net ecosystem exchange of a cool-temperate deciduous forest estimated by the eddy covariance method, *Agric. For. Meteorol.*, **112**, pp. 203-215.
- Saugier, B., Granier, A., Pontailleur, J. Y., Dufrene, E., and Baldocchi, D. D. (1997): Transpiration of a boreal pine forest measured by branch bag, sap flow and micrometeorological methods, *Tree*

- Physiol.*, **17**, pp. 511-519.
- Sellers, P. J., Dickinson, R. E., Randall, D. A., Betts, A. K., Hall, F. G., Berry, J. A., Collatz, G. J., Denning, A. S., Mooney, H. A., Nobre, C. A., Sato, N., Field, C. B., and Henderson-Sellers, A. (1997): Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere, *Science*, **275**, pp. 502-509.
- Shuttleworth, W. J. (1988): Evaporation from Amazonian rainforest, *Proc. R. Soc. Lond. B*, **233**, pp. 321-346.
- Shuttleworth, W. J. (1989): Micrometeorology of temperate and tropical forest, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, **324**, pp. 299-334.
- Shuttleworth, W. J. and Calder, I. R. (1979): Has the Priestley-Taylor equation any relevance to forest evaporation?, *J. Appl. Meteorol.*, **18**, pp. 639-644.
- Smith, D. M. and Allen, S. J. (1996): Measurement of sap flow in plant stems, *J. Exp. Bot.*, **47**, pp. 1833-1844.
- Stewart, J. B. (1988): Modeling surface conductance of pine forest, *Agric. For. Meteorol.*, **43**, pp. 19-35.
- Stewart, J. B. and Thom, A. S. (1973): Energy budgets in pine forest, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **99**, pp. 154-170.
- Swank, W. T. and Miner, N. H. (1968): Conversion of hardwood-covered watersheds to pine reduces water yield, *Water Resour. Res.*, **4**, pp. 947-954.
- Szeics, G. and Long, I. F. (1969): Surface resistance of crop canopies, *Water Resour. Res.*, **5**, pp. 622-633.
- Tan, C. S. and Black, T. A. (1976): Factors affecting the canopy resistance of a douglas-fir forest, *Boundary-Layer Meteorol.*, **10**, pp. 475-488.
- 田中克典・田中広樹・中村彰宏・大手信人・小橋澄治 (1996): ヒノキ林における群落レベルのコンダクタンスと CO₂ 交換特性. 日本林学会誌, **78**, pp. 266-272.
- 田中克典・小杉緑子・大手信人・小橋澄治・中村彰宏 (1998): 植物群落 大気間の CO₂ フラックスモデルと人工樹林上の CO₂ フラックスのシミュレーション, 日本生態学会誌, **48**, pp. 265-286.
- Tanaka, K., Takizawa, H., Tanaka, N., Kosaka, I., Yoshifuji, N., Tantasirin, C., Piman, S., Suzuki, M., and Tangtham, N. (2003): Transpiration peak over a hill evergreen forest in northern Thailand in the late dry season: Assessing the seasonal changes in evapotranspiration using a multilayer model, *J. Geophys. Res.*, **108**, pp. 4533.
- Tanaka, K., Takizawa, H., Kume, T., Xu, J., Tantasirin, C., and Suzuki, M. (2004): The impact of rooting depth and soil hydraulic properties on the transpiration peak of an evergreen forest in northern Thailand in the late dry season, *J. Geophys. Res.*, **109**, D23107.
- 塚本修・文字信貴 (2001): 地表面フラックス測定法. 気象研究ノート, **199**, 1-242.
- 塚本良則 (1992): 森林水文学, pp. 319, 文英堂出版, 東京.
- 塚本良則 (1998): 森・水・土の保全, pp. 138, 朝倉書店, 東京.
- Van Wijk, M. T., Dekker, S. C., Bouten, W., Kohsiek, W., and Mohren, G. M. J. (2001): Simulation of carbon and water budgets of a Douglas-fir forest, *For. Ecol. Manage.*, **145**, pp. 229-241.
- Verma, S. B., Baldocchi, D. D., Anderson, D. E., Matt, D. R., and Clement, R. J. (1986): Eddy fluxes of CO₂, water vapor, and sensible heat over a deciduous forest, *Boundary-Layer Meteorol.*, **36**, pp. 71-91.
- Waring, R. H. and Running, S. W. (1998): Forest Ecosystems, pp. 370, Academic Press, San Diego.
- Whitehead, D., Jarvis, P. G., and Waring, R. H. (1984): Stomatal conductance, transpiration, and resistance to water uptake in a *Pinus sylvestris* spacing experiment, *Can. J. For. Res.*, **14**, pp. 692-700.
- Williams, M., Rastetter, E. B., Fernandes, D. N., Goulden, M. L., Wofsy, S. C., Shaver, G. R., Mellilo, J. M., Munger, J. W., Fan, S.-M., and Nadelhoffer, K. J. (1996): Modelling the soil-plant-atmosphere continuum in a Quercus-Acer stand at Harvard Forest: the regulation of stomatal conductance by light, nitrogen and soil/plant hydraulic properties, *Plant Cell & Environ.*, **19**, pp. 911-927.
- Wilson, K. B. and Baldocchi, D. D. (2000): Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in

- North America, *Agric. For. Meteorol.*, **100**, pp. 1-18.
- Wilson, K. B., Hanson, P. J., Mulholland, P. J., Baldocchi, D. D., and Wullschleger, S. D. (2001): A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance, *Agric. For. Meteorol.*, **106**, pp. 153-168.
- Wilson, K. B., Baldocchi, D. D., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, Ch., Doloman, H., Falge, E., Field, C., Goldstein, A., Granier, A., Grelle, A., Hall-dor, T., Hollinger, D., Katul, G., Law, B. E., Lindroth, A., Meyers, T., Moncrieff, J., Monson, R., Oechel, W., Tenhunen, J., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., and Wofsy, S. (2002): Energy partitioning between latent and sensible heat flux during the warm season at FLUXNET sites, *Water Resour. Res.*, **38**, pp. 1294.
- Wilson, K. B., Baldocchi, D. D., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, Ch., Doloman, H., Falge, E., Field, C., Goldstein, A., Granier, A., Grelle, A., Hall-dor, T., Hollinger, D., Katul, G., Law, B. E., Lindroth, A., Meyers, T., Moncrieff, J., Monson, R., Oechel, W., Tenhunen, J., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., and Wofsy, S. (2003): Diurnal centroid of ecosystem energy and carbon fluxes at FLUXNET sites, *J. Geophys. Res.*, **108**, pp. 4664.
- Yoder, B. J., Ryan, M. G., Waring, R. H., Schoettle, A. W., and Kaufmann, M. R. (1994): Evidence of reduced photosynthetic rates in old trees, *For. Sci.*, **40**, pp. 513-527.
- (受付 : 2004年12月28日 , 受理 : 2005年 6 月23日)