落葉広葉樹二次林における蒸発散量の季節変化

Seasonal course of evapotranspiration in a deciduous broad-leaved secondary forest

玉井幸治* (森林総合研究所関西支所)

Koji TAMAI *Kansai Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute*

服部重昭** (名古屋大学農学部)

Sigeaki HATTORI *Faculty of Agriculture, Nagoya University*

後藤義明* (森林総合研究所関西支所)

Yosiaki GOTO *Kansai Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute*

The evapotranspiration rate was calculated by Thornthwaite-Holzman model from the data obtained in a deciduous broad-leaved secondary forest in Yamashiro Town, Sohraku Country, Kyoto Prefecture. The parameters showing the effectiveness of sensible heat exchange in this model were estimated to be 0.12 in a foliated season and 0.077 in a defoliated season, i.e. the former is 1.5 times as high as the latter. The maximum daily rate of evapotranspiration was stable and estimated to be about 12MJ/(m²·day) in a foliated season. On the other hand, those calculated in a defoliated season varied widely from about 2MJ/(m²·day) in January to 6-7MJ/(m²·day) in November and April.

In comparison of the result calculated by Thornthwaite-Holzman model with that introduced by Bowen ratio method, it was revealed that Thornthwaite-Holzman model is able to estimate more accurately in a defoliated season, and give no less accurate estimate in a foliated season than Bowen ratio method does.

The ratios of evapotranspiration against effective radiation were estimated to be about 40% from January to April and about 60% from June to November. The increase of this ratio delayed about one month from a leafing time. Moreover, these ratios were almost equal to those in a Japanese Hinoki forest and a Swedish pine forest, although there were differences in a seasonal variations.

Key words : Thornthwaite-Holzman model, Water balance, Heat balance, Foliated season, Defoliated season

京都府相楽郡山城町に位置する山城森林水文試験地北谷流域において、落葉広葉樹二次林からの蒸発散量を、Thornthwaite-Holzmanモデルにより推定した。モデル定数である顕熱の交換効率を示す数値は、着葉期で0.12、落葉期で0.077と、着葉期の値は落葉期の1.5倍に計算された。日蒸発散量の上限値は、着葉期には約12MJ/m²·dayで安定していた。それに対し落葉期における上限値は、11月の約6MJ/m²·dayから1月の約2MJ/m²·dayへと減少し、4月の約7MJ/m²·dayへと増加する凹型の季節変化を示した。樹種構成や、林床面蒸発量、遮断蒸発量を考慮した結果、Thornthwaite-Holzmanモデルによる日蒸発散量の推定精度は、着葉期においてはボーエン比法と同程度、落葉期においてはボーエン比法よりも高いと判断された。蒸発散量が有効放射量に占める割合は、1～4月は約40%、5～11月は約60%であった。この変化は着葉期、落葉期の変化とは約1ヶ月の遅れがあった。日本のヒノキ林、スウェーデンのマツ林の季節変化と比較すると、数値的には同程度であったが、季節変化には違いがみられた。

キーワード : Thornthwaite-Holzmanモデル, 水収支, 熱収支, 着葉期, 落葉期

*森林総合研究所関西支所 〒612 京都市伏見区桃山町永井久太郎官有地

Kansai Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Momoyama, Fushimi, Kyoto, 612, Japan.

**名古屋大学農学部 〒464-01 名古屋市中千種区不老町

Faculty of Agriculture, Nagoya University, Furo-cho, Chigusa-ku, Nagoya, 464-01, Japan.

I. はじめに

関西地域に存在する約60万haの落葉広葉樹林は、落葉樹を中心とした高木層の下に、常緑樹を中心とした低木層が存在するという特徴を持つ。そして土砂流出防備、里山生態系の保全、都市気候の緩和など、環境保全に重要な役割を果たしているといわれている。この環境保全機能を評価するためには、水文特性を解明することは不可欠である。

関西地域の落葉広葉樹林を対象とした水文特性としては、林床面蒸発量(玉井ら, 1993)、蒸散量(林床面蒸発量を含む)と遮断量の月量(Hattoriら, 1994)、3～8月における蒸発散量と群落コンダクタンス(Tamaiら, 1994)が報告されている。しかし、日単位以下の時間スケールによる蒸発散量を通年にわたって報告した例はない。

環境保全機能の重要な項目である都市気候の緩和機能や里山生態系の特性を評価するためには、森林群落と大気間の相互作用や森林群落の蒸散にともなう生理反応など、より時間スケールの短い現象を多様な条件下で明らかにする必要がある。これらの研究を行うためには、より短い時間スケールでの蒸発散量の通年データは欠かさない。

より短い時間スケールでの蒸発散量の評価には従来から微気象学的な手法が用いられ、多くの報告がなされている。落葉広葉樹林についても池淵ら(1985)、Kelliherら(1992)、Ogink-Hendriks(1995)などが報告を行っている。しかしこれらはいずれも着葉期についてのみであり、落葉期を含めて報告した例は極めて稀である。それは、水蒸気などのスカラー量のフラックスを長期間に渡って測定する場合には保守管理上観測が困難な場合(渡辺ら, 1995)や、濃度差を高い精度で測定する必要がある(渡辺ら, 1995)ので、本論文で報告する落葉期での落葉広葉樹林のように、蒸発散量が小さい条件下では推定精度がよくない場合があるためである。

そこで本論文では、落葉期を含めた期間における広葉樹林からの日蒸発散量の季節変化を推定することを第一の目的とした。特に冬期における広葉樹林の蒸発散データは不十分なので、年間水収支を解明する上で有意義である。

方法としては、水蒸気濃度差を精度良く測定する困難さ为了避免のため、まず顕熱フラックスを推定し、熱収支式、短期水収支法と組み合わせることにより、

日蒸発散量を推定した。顕熱フラックスを推定する方法には乱流変動法が挙げられる。しかしこの方法を商用電源のない森林流域に長期間に渡って適用することは困難である。またバルク法は、顕熱フラックスの推定に表面温度データを必要とする。しかし林冠表面のような起伏に富んだ表面での代表性のある表面温度測定は難しい。それに対し傾度法は2高度間の温度差を用いるので、代表性のある値の測定が容易である。そこで傾度法に基づいたThornthwaite-Holtzmanモデル(Thornthwaiteら, 1939, 以下T-Hモデルと称する)によって顕熱フラックスを予測した。

推定された日蒸発散量の信頼性を検討するために、ボーエン比法による推定結果や、林床面蒸発量、遮断蒸発量との比較を行った。また、落葉期を含めた熱収支特性も併せて検討した。

II. 理 論

1. 蒸発散量の推定

森林群落の表面における熱収支式は、式(1)のように表される。

$$R_n - G = H + \lambda E \quad (1)$$

ここで、 R_n は純放射量、 G は地中熱流量、 H は顕熱輸送量、 E は蒸発散量、 λ は蒸発潜熱である。ここでは、森林内の気層および樹体の貯熱変化量は服部(1985)の試算より無視している。

一方、Thornthwaiteら(1939)は、大気が中立状態の場合には式(2)が成り立つとした。

$$H = \rho C_p (u_2 - u_1) (TD_1 - TD_2) (\kappa/B)^2 \quad (2)$$

$$B = \ln(z_2 - d)/(z_1 - d) \quad (3)$$

ここで、 u は風速、 TD は気温(乾球温度)、 z は高度、 d は地面修正高、 κ はカルマン定数、添え字1, 2は観測高度、 ρ は大気密度、 C_p は定圧比熱を示す。

式(2)は次のように変形することができる。

$$H = \rho C_p A u_2 (TD_1 - TD_2) \quad (4)$$

$$A = (1 - u_1/u_2) (\kappa/B)^2 \quad (5)$$

リチャードソン数の絶対値が十分に小さい場合には、風速は式(6)の対数分布になる。

$$u_i = u_* \kappa^{-1} \ln\{(z_i - d)/z_0\} \quad (6)$$

ここで、 u_* は摩擦速度、 z_0 は粗度長、 d は地面修正高、添え字 i は観測高度を示し、本論文では1または2である。式(6)を式(5)に代入すると、 A は d 、 z_0 、 z_1 、 z_2 、 κ で表される。ここで d 、 z_0 が一定ならば、 A を定数とみなすことができる。したがって λE は式(4)

を式(1)に代入することにより式(7)で算出される。

$$\lambda E = R_n - G - \rho C_p A u_2 (TD_1 - TD_2) \quad (7)$$

A 値の算定には、式(7)を変形した式(8)と、Suzuki (1980)の提案した短期水収支法によってHattoriら (1994)が推定した本流域における月別蒸発散量の推定値(E_{sb})を用いた。

$$A = (R_n - G - \lambda E_{sb}) / \rho C_p u_2 (TD_1 - TD_2) \quad (8)$$

ここで用いた方法は、短期水収支法で得られた蒸発散量を熱収支法に取り込むことより、短期水収支法による長期間にわたる平均の蒸発散量を、短期間の蒸発散量に再配分する試みであり、流域内の地形や林分条件の不均一性の影響を小さくすることができると思われる。

2. ボーエン比法と短期水収支法

式(7)による蒸発散量を、ボーエン比法と短期水収支法による推定値と比較した。

ボーエン比法は、式(9)、(10)、(11)で表される。

$$\lambda E_0 = (R_n - G) / (1 + \beta) \quad (9)$$

$$\beta = \gamma (TD_1 - TD_2) / C \quad (10)$$

$$C = (\delta + \gamma) (TW_1 - TW_2) - \gamma (TD_1 - TD_2) \quad (11)$$

ここで、 λE_0 は、ボーエン比法による λE の計算値、 $(TW_1 - TW_2)$ は湿球温度差、 δ は水蒸気圧曲線の勾配、 γ は乾湿計定数である。

流域における水収支式は、式(12)のように表される。

$$E = P - D \pm \Delta S \quad (12)$$

ここで、 P は降水量、 D は流出量、 ΔS は土壤貯留量の増減量である。Suzuki(1980)は、ハイドログラフから ΔS が0である期間を設定することにより、その期間中の E を推定する短期水収支法を提案している。本論文における E の計算は、このSuzuki(1980)の方法に準拠した。

III. 試験流域及び測定方法

1. 流域の概要

観測を行った森林流域は、京都府相楽郡山城町に位置する山城森林水文試験地北谷流域(北緯34°47'東経135°51')で(図-1)、流域面積は約1.6haである。コナラ、ネジキなどの落葉広葉樹が優先しているが、ソヨゴ、ヒサカキなどの常緑樹も混在している。胸高断面積合計は落葉広葉樹13.3m²/ha、常緑樹6.3m²/haと、落葉広葉樹が約3分の2を占めている。そのため、着葉期と落葉期とは、キャノピーの構造が大きく異なる。落葉広葉樹は、4月下旬から5月上旬にかけて開葉し、10月下旬から11月上旬にかけ

図-1 山城森林水文試験地北谷流域の地形図と観測施設の配置

—：量水堰 +：森林微気象観測鉄塔
×：雨量計

て落葉する。林冠の開空度は、林床から魚眼レンズでキャノピーの写真を撮影して求めた結果、着葉期で約15%、落葉期で約50%であった。流域の地質は風化花こう岩で、土壌は砂質で未熟土的であり、土層は全般的に薄い。

2. 観測、解析方法

図-1に示した尾根上に観測鉄塔を設置し、森林微気象の観測を行った。観測鉄塔周辺の平均樹木高は6mであった。測器と測定高は、日射計(英弘精機製 MS-42)が12m、放射収支計(英弘精機製 CN-11)が10m、通風筒付乾湿球温度計(英弘精機製 MH-020)が8、10m、3杯式風速計(中浅測器製 A701)が8、10mであった。乾球温度差($TD_1 - TD_2$)、湿球温度差($TW_1 - TW_2$)は、高さ10mと8mの間の温度差を測定した。地中熱流板(英弘精機製 CN-81)を0.05mの深さに埋設した。すべての測定項目は30秒間隔でスキャンし、($TD_1 - TD_2$)、($TW_1 - TW_2$)と TD 、 TW は30分おきに5分間のみの測定値を、他の項目は全ての測定値を、それぞれ30分間隔で平均してデータロガー(英弘精機製 MP-090、NEC製PC-98 LT)に記録した。

降水量は、露場に設置した転倒マス式雨量計(池田計器製 SKI-1)で、流出量は90°ノッチを用いた量水堰堤の水位をフロート式水位計(池田計器製 ADR-105WP)によって測定した。

式(7)、(8)、(9)の計算に用いたデータは、1992年1～12月の日中の値である。降雨中のデータも含めて計算を行った。式(7)、(9)の計算は30分間隔で行い、算出された値を日量に積算した。また、夜間の蒸発

散量は極めて少ないと予想されるので、日中についてのみ計算した。リチャードソン数の絶対値が0.05を越えた場合の λE , $u_2(TD_1 - TD_2)$ は、前後の時間帯での平均値を代入した。なお、着葉期は4～10月、落葉期は11～3月とした。

IV. 結果と考察

リチャードソン数の絶対値が0.05を越えた時間は多くなく、解析への影響はないものと思われた。

1. Aの同定

式(8)による計算結果を図-2に示す。A値は、ばらつきがあるものの着葉期の方が落葉期より大きい。A値は顕熱の交換効率に関する定数であることから、葉量への依存性が高く、そのため着葉期と落葉期で傾向が異なるものと思われる。バルク係数は、葉面積密度が中程度で最大となり、非常に粗な場合と非常に密な場合には交換効率が悪くなる(渡辺, 1994)など、森林群落における交換効率と葉量の間には密接な関係がある。

北谷流域の主要構成樹種であるコナラは、隅田(1993)によれば着葉期間の初期から終期まで葉を保持し続け、最後に一斉に葉を落とすと報告している。また、主要構成樹種のひとつであるリョウブのリターフォールの季節変化パターンもコナラと同様、終期に集中している(隅田, 1993)。このことや、林内相対日射率が着葉期間は約15%、落葉期は約40%と安定している(玉井ら, 1994)ことから、本流域の森林では着葉期、落葉期における葉量はそれぞれの期間においてほぼ一定に推移しているものと思われる。したがって、 λE を算出するに際して、A値は着葉期と落葉期のそれぞれにおける平均値を用いることとした。Aの平均値は着葉期で0.12、落葉期で0.077と計算され、着葉期における値は落葉期の1.5倍となった。

図-2 A値(Eq. (8))の季節変化
(1992年の場合)

*: 着葉期 □: 落葉期

なお、玉井ら(1995)は、本流域を対象に基準高度 z_0 に対しての顕熱バルク係数を、遮断蒸発時の空気力学的抵抗と風速の関係から0.077と報告している。顕熱バルク係数は大気中の1高度と蒸発面の間における顕熱の交換効率を表すのに対し、A値は接地気層中の2高度間における顕熱の交換効率を表す。Aはこの年間を通してのバルク係数値の、着葉期で約1.5倍、落葉期で同程度であった。

2. 蒸発散量の季節変化

着葉期、落葉期におけるAの値をそれぞれ0.12, 0.077として、式(7)から蒸発散量を計算した結果を図-3に示す。着葉期の蒸発散量の上限値は12MJ/m²・day程度で安定している。それに対し落葉期における蒸発散量の上限値は、11月の約6 MJ/m²・dayから1月の約2 MJ/m²・dayへと減少し、4月の約7 MJ/m²・dayへと増加する凹型の季節変化を示した。

λE が負値となる日が2日認められる。これらの日

図-3 日蒸発散量計算値の季節変化
(1992年の場合)

*: 着葉期 □: 落葉期

図-4 蒸発散量計算値の比較(1992年の場合)

*: T-H法(λE), Eq. (7)

▲: ボーエン比法(λE_b), Eq. (9)

□: 短期水収支法(E), Eq. (12)

(Hattoriら(1994)から引用)

は、いずれも終日に渡って純放射量の値が小さく、蒸発散が活発でなかった。また負値の絶対値は小さいので、期間全体にわたっての影響は小さいと考える。したがって今後の考察は、これらの値も含めて行う。

図-4に式(7)、(9)による λE 、 λE_0 の計算値と短期水収支法による推定値(E)の月別値を示す。まず、 λE と λE_0 について比較する。1992年1~3月、11~12月の落葉期における計算値は、 λE が60~120 MJ/m²・月、 λE_0 が20~60 MJ/m²・月と、 λE_0 の方がかなり小さな値となった。 λE_0 は92年の気象観測値に基づいた計算値であるのに対し、 λE はAの同定に短期水収支法による蒸発散量の計算値を用いた。この値は複数年に渡っての平均値であり、根拠となる観測期間が異なるため、両者の違いは年変動に起因するとも考えられる。しかし1992年の冬期は、気温は平年値よりも高めであるが、降水量と日照時間はほぼ平年なみであった。さらに観測年は異なるが、玉井ら(1994)は落葉期における北谷流域の林床面蒸発量を約0.4~0.6 mm/day(約30~40 MJ/m²・月)と見積もっている。北谷流域には、胸高断面積合計にして約6.3 m²/haの常緑樹が低木を中心に存在している。これは総断面積合計の約3分の1を占める。そのため、北谷流域では落葉期でもある程度の蒸散量が見込まれる。また、Hattoriら(1994)は、北谷流域の落葉期においても約10 mm/月程度の遮断蒸発量を報告している。これらの点を考慮すると、 λE_0 の値はかなり小さい。したがって落葉期における蒸発散量の推定値としては、T-H法による値の方が妥当であり、 λE_0 が過少評価されていると判断される。その原因としては、湿球温度差の測定誤差が考えられる。着葉期の7月には0.4°C/2 mの温度差を日中に示すのに対し、落葉期では0.1°C/2 mを上回るのは稀であった。このため、落葉期における測定値に占める測定誤差の割合は高くなり、落葉期における λE_0 が過少に計算されるものと考えられる。

4~10月の着葉期には、 λE は約210 MJ/m²・月、 λE_0 は230 MJ/m²・月と同程度の値を示しており、 λE 、 λE_0 ともに妥当な季節変化を示しているものと判断される。ちなみにSuzuki(1980)は、桐生試験地における7、8月の蒸発散量を約96 mm/月(約230 MJ/m²・月)と報告している。

以上より、式(7)による計算精度は着葉期においては式(9)と同程度、落葉期においては式(9)よりも高いと判断された。

3. 日量の比較

λE と λE_0 の日量を着葉期について比較すると(図-5)、両者の間には正の相関が認められる。 λE の値が6 MJ/m²・day以上の場合と以下の場合に分けると、6 MJ/m²・day以下の場合の方が、 λE_0 の値が過少である傾向がある。これは前項でも検討したように、蒸発散量が少ない場合には λE_0 は過少評価になる傾向にあることを反映しているためと思われる。着葉期間中の λE と λE_0 の相対誤差は28%であった。また、両者の直線回帰式は、回帰定数を0と固定すると回帰係数は0.98(標準誤差0.02)で、相関係数は0.69であった。このことから、着葉期における日蒸発散量に関して、式(7)は式(9)と同程度の精度であると判断された。落葉期(図-5)については、前項での検討からもわかるように、ほとんどすべての日について、 λE に比べて λE_0 は小さな値を示す。

落葉期における λE の日量を直接検証することはできない。しかし、着葉期においてはT-H法とボーエン比法とは同程度の精度であること、落葉期でも約10 mm/月程度の遮断蒸発があること、樹種構成、落葉期における林床面蒸発量の推定値(玉井ら, 1994)などから、落葉期におけるT-H法による λE の日量も

図-5 日蒸発散量計算値の比較(1992年の場合)

着葉期と同様に妥当な値であると考えられる。この点については、乱流変動法による顕熱フラックスの測定を行うなどの検証が必要であろう。

4. 流域の熱収支特性

図-6 に有効放射量($R_n - G$)の観測値と λE の計算値、 λE が($R_n - G$)に占める割合を月別に示した。 λE が($R_n - G$)に占める割合は、およそその傾向として1~4月は約40%、6~11月の平均で約60%であった。この変化は着葉期、落葉期の期間とは約1ヶ月の遅れがあった。図-6によると($R_n - G$)は3月から4月に急増したのに対し、 λE はそれに追隨して増加しない。これは、4月における落葉樹は開葉の途中であるため、蒸発散がそれほど盛んではないためと思われる。1992年の一年間では、 λE が($R_n - G$)の55%を占めた。Hattori(1987)によると、ヒノキ林における4~10月の純放射量に占める地中貯熱量は2.4%とごくわずかである一方、蒸発散量の占める割合は40~50%であった。またLindroth(1985)は、スウェーデンのマツ林を対象に5~10月の熱収支を月

別に報告している。それらの数値から有効放射量に占める蒸発散量の占める割合を計算すると約42~67%となった(図-6)。数値の範囲としては、同程度であるが、季節変化には若干の違いがみられた。つまり、約40%の数値を示す期間が、北谷流域では1~4月であるのに対し、Hattori(1987)の場合は4、6~8月であった。またLindroth(1985)が報告した春から夏にかけての変化は、北谷流域に比べると1ヶ月遅れであった。これは日本とスウェーデンの気候の違いによると推定される。

V. おわりに

Thornswaite-Holzmanモデルにより顕熱量を推定し、短期水収支法、熱収支式と組み合わせることにより、落葉広葉樹林からの蒸発散量を算出した。交換効率を表す変数 A は、葉量に依存し、着葉期で0.12、落葉期で0.077であった。この値は、年平均での顕熱バルク係数の1.0~1.5倍であった。

ボーエン比法による推定値や林床面蒸発量、遮断蒸発量と比較、検証を行った。その結果、ボーエン比法による推定値は落葉期に過少に推定されるのに対し、T-H法による計算値は着葉期・落葉期を通じて妥当な季節変化が得られた。着葉期におけるT-H法による日蒸発散量計算値を、ボーエン比法による推定値と比較した結果、相対誤差28%、相関係数0.69と良好な結果が得られた。このことからT-H法は、着葉期における日蒸発散量の推定に関しては、ボーエン比法と同程度の精度をもつものと判断された。落葉期の日蒸発散量についても、T-H法による推定精度は高いと推測されるが、今後の検証を必要とする。

T-H法による日蒸発散量推定値は、ばらつきは大きいものの着葉期の方が大きな値を示す傾向があった。落葉期で6 MJ/m²・day程度、着葉期で12 MJ/m²・day程度を最大値とした。有効放射量と比較した場合、年間で有効放射量の約55%が蒸発散に消費された。月別では、1~4月が約40%、6~11月が約60%であった。この変化は、着葉期、落葉期の期間とは約1ヶ月の遅れが認められた。

謝辞：森林総合研究所関西支所造林研究室長の清野嘉之博士には、有益なご助言をいただきました。ここに謝意を表します。

(a) 有効放射量、蒸発散量の季節変化
* : 有効放射量($R_n - G$)
○ : 蒸発散量(λE)

(b) 蒸発散量が有効放射量に占める割合
($\lambda E / (R_n - G)$)の季節変化
* : 山城水文試験地
○ : Jadsraas

(Lindroth (1985) から引用した数値から算出)

図-6 熱収支の季節変化

引用文献

- 服部重昭(1985) : 蒸発散量推定式の誘導過程の解説と林分の適用における問題点, 林試研報, **332**, pp. 139-165
- Hattori, S. (1987) : Seasonal variation of radiation and energy balances in a hinoki stand, In: Proceedings of the Vancouver Symposium: IAHS-AISH publ. no. 167, pp. 349-355
- Hattori, S. and Tamai, K. (1994) : Characteristics of water balance in a deciduous secondary forest, In: Proceedings of the International Symposium on Forest Hydrology. pp. 577-584
- 池淵周一, 沢井 康(1985) : 林地蒸発散量の長期間にわたる時系列推定, 京都大学防災研究所年報, **28B-2**, pp. 157-177
- Kelliher, F.M., Köstner, B.M.M., Schulze, E. D., Hollinger, D.Y., Byers, J.N., Hunt, J. E., McSeveny, T.M., Meserth, R. and Weir, P.L. (1992) : Evaporation, xylem sap flow, and tree transpiration in a New Zealand broad-leaved forest, Agric. For. Meteorol., **62**, pp. 53-73
- Lindroth, A. (1985) : Seasonal and diurnal variation of energy budget components in coniferous forests, J. Hydrol., **82**, pp. 1-15
- Ogink-Hendriks, M.J. (1995) : Modelling surface conductance and transpiration of an oak forest in The Netherlands, Agric. and For. Meteorol., **74**, pp. 99-118
- 隅田明洋(1993) : 二次林における階層構造の解析, 名古屋大学演習林報告, **12**, pp. 31-145
- Suzuki, M. (1980) : Evapotranspiration from a small catchment in hilly mountains (I). Seasonal variations in evapotranspiration, rainfall interception and transpiration, J. Japan For. Soc., **62**, pp. 46-53
- 玉井幸治, 服部重昭(1994) : 落葉広葉樹林における林床面蒸発のモデル化と流域への適用, 日林誌, **76**, pp. 233-241
- Tamai, K. and Hattori, S. (1994) : Characteristic of canopy conductance of a deciduous broad-leaved forest, In: Proceedings of the International Symposium on Forest Hydrology. pp. 147-154
- 玉井幸治, 服部重昭(1995) : 落葉広葉樹林における「蒸発効率」の特性, 水学会1995年研究発表会要旨集, pp. 28-29
- Thornthwaite, C.W., and Holtzman, B. (1939) : The determination of evaporation from land and water surface, Mon. Weather Rev., **67**, pp. 4-11
- 渡辺 力(1994) : 植物と大気, (近藤純正編著 : 水環境の気象学, pp348, 朝倉書店, 東京), pp. 208-234
- 渡辺 力(1995) : バンドパス・渦相関法による森林上のスカラーフラックス. 日本気象学会1995年度秋季大会講演予稿集, pp. 48

(1996年2月8日受付, 1996年5月10日受理)