

B-1 気候・物質循環モデルによる気候変動の定量的評価に関する研究

(6) 森林生態系・大気間のエネルギー交換のモデル化に関する研究

研究代表者 森林総合研究所森林環境部気象研究室 渡辺 力

農林水産省林野庁森林総合研究所

森林環境部 気象研究室 大谷義一・谷 誠・溝口康子
森林災害研究室 岡野通明

平成9～11年度合計予算額 12,688千円
(平成9年度予算額 4,222千円)

[要旨]

本サブテーマは、森林生態系・大気間の熱・水蒸気交換過程を観測に基づいてパラメータ化し、大気モデルに対し森林の影響を正しく反映させる手法を開発することを目的としている。

埼玉県川越市の落葉広葉樹林に試験地を設定し、森林の熱収支や森林内微気象などの観測を継続的に実施した。観測にあたっては、測定機器類の精度維持を入念に行うとともに、複数の測定手法を併用することにより、長期間にわたり高品質なデータが得られるよう考慮した。この観測の結果から、落葉樹林では葉面積が大きく季節変化するため、それにとまってアルベードや熱収支の形態が変化することが明らかとなった。特に、春季には樹木の展葉が一斉に起こるため、森林が大気に及ぼす影響は短期間のうちに劇的に変化する。これらのことから、落葉樹林においては、展葉や落葉の時期を正確に推定することが必要であることが明らかとなった。

また、観測データに基づいて森林群落の蒸発効率を評価し、その季節変化や気象条件等との対応を調べた。その結果、蒸発効率の値は森林の活動期に大きくなる明瞭な季節変化を示すことが明らかになった。また、各季節内においては、蒸発効率の気象条件への依存性を、日射量と蒸発要求度を用いてパラメータ化することができる。日射量に対する依存性は増加飽和型の関数形で、蒸発要求度に対する依存性については漸減型の関数形でそれぞれ表現することにより、蒸発効率の日変化が再現される。季節別に異なるパラメータセットを用いることにより、蒸発効率の季節変化をも表現することができる。その方法を用いて熱収支の再現計算を行ったところ、おおむね良好な結果が得られた。

[キーワード] 陸面過程, 森林, 熱収支, 通年観測, パラメタリゼーション

1. 序

森林は群落上大気との熱や水蒸気の交換を通して、大気に加熱量分布に影響を及ぼし、それが大気中の流れ場を左右することにより地域規模・地球規模の気候に影響している。しかも、森林は主体が生物であることから、環境や気候に敏感に反応し、その結果として大気に及ぼす影響を

変化させている。現在の気候モデル等においては、このような過程（生物過程）が考慮されておらず、現実的な気候予測を行うには不十分である。このような過程を、大気大循環モデルや局地循環モデル等へ導入し、予測精度を向上させるためには、森林-大気間の熱・水蒸気交換を適切にパラメータ化し、森林の効果を正しく反映させる手法を確立する必要がある。

また、現在、全世界の各種生態系において、熱収支や炭酸ガスフラックス等を長期的に連続観測するプロジェクト FLUXNET が行われている (Baldocchi et al., 1996)。この観測によるデータは将来的に統合化され、上記のような植生モデルを各地の植生タイプに対して検証するなどの目的には、非常に好都合なデータとなるものである。従来、FLUXNET は欧米を中心とした研究グループによって推進されてきたが、全球をカバーする有効なデータベースとするため、さらに多くの研究グループの参加が求められている。そのような要請に応える目的で、日本および東アジア地域のフラックス観測をネットワーク化する AsiaFlux が設立され、多くの研究グループの参加を呼びかけている (福嶋, 2000)。

2. 研究目的

森林における熱および水蒸気の交換過程を適切にパラメータ化し、大気大循環モデルや局地循環モデルなどの大気モデルに対して森林の熱的な影響を反映させる手法を高度化することを目的とする。そのために、まず、森林におけるこれら交換過程の実態を観測によって明らかにし、これまでの手法における問題点を抽出しておかなければならない。しかも、森林は季節や環境条件の変化にともなって応答を変化させ、それにともなって大気に対する影響も変化するため、交換過程における季節変化や年々変動をとらえるに十分なほど長期的に連続するデータを取得し解析する必要がある。このようにして得られるデータに基づき、最終的には、実際の森林が大気に及ぼす影響を季節等によらず正しく表現できるアルゴリズムの開発を目指し、研究を継続して実施する必要がある。本課題では、各季節内における、環境要因への依存性に関するパラメータ化の検討を行う。

3. 研究方法

3. 1 現地観測

埼玉県川越市郊外の落葉広葉樹林に設定した森林気象試験地において、森林-大気間の熱・水蒸気交換、森林内微気象、森林葉面積、土壌水分などの観測を通年で継続しておこなう。熱・水蒸気交換（フラックス）の観測には、現地に設置されている高さ25mの観測タワーを利用し、ボーエン比法と渦相関法の独立した2つの手法を併用する。ただし、水蒸気フラックスに対しては、測器の特性上の問題から通常の渦相関法を長期的に適用することはできないので、汎用の測器を利用するバンドパス・渦相関法 (Horst and Oncley, 1995) を改良して用いる。森林内微気象としては、風速、気温、湿度、地温の高度・深度分布、および群落上下における日射と光合成有効放射、群落上における下向き長波放射などを測定する。森林葉面積の測定には、落葉を回収する方法と樹冠部における光の吸収を利用する手法を併用する。土壌水分の測定には TDR 法を利用するが、精度を維持するために土壌サンプリングによる方法も併用する。各種測器類の精度維持のために事前校正とデータの吟味を十分に行うとともに、上記のように複数の手法を併用し比較することにより、長期的なデータの精度を保つように努力する。

この観測によって得られるデータを利用し、熱収支の各項目やアルベードなどパラメータ化の対象となる物理量と、森林の生物学的な指標（葉面積など）や気象条件などとの関連性を調べ、従来のパラメータ化における問題点の抽出を行う。

3. 2 パラメータ化

森林における熱収支を簡単にモデル化する場合、群落の蒸発効率とよばれるパラメータをいかに現実的に与えることができるかが、結果を大きく支配する。しかし、森林の蒸発効率を実際にどの程度の値を持ち、また群落状態や気象条件などに対してどのような依存性を示すかについての知見が不足しており、適切なモデル化に支障をきたしている。そこで、群落を1層で表現するキャノピーモデル（Watanabe, 1994）を上記の熱収支観測データに適用し、当該森林における群落の蒸発効率を評価する。得られた蒸発効率と気象条件との対応を調べ、植物による生理応答の性質を考慮に入れながら、現実を最もよく表現できるようなパラメータ化の方向を探る。解析に用いるモデルの具体的な内容と蒸発効率の評価手法は次の通りである。

①地面の熱収支

$$m_s S_n + m_L L^* + (1 - m_L) \sigma T_c^4 = \sigma T_g^4 + c_p \rho C_{Hg} u (T_g - T) + l \rho \beta_g C_{Hg} u [q^*(T_g) - q] + G$$

②群落の熱収支

$$(1 - m_s) S_n + (1 - m_L) (L^* + \sigma T_g^4) = 2(1 - m_L) \sigma T_c^4 + c_p \rho C_{Hc} u (T_c - T) + l \rho \beta_c C_{Hc} u [q^*(T_c) - q]$$

③群落上の顕熱フラックス

$$H = c_p \rho C_{Hg} u (T_g - T) + c_p \rho C_{Hc} u (T_c - T)$$

これらの式において、日射と長波放射に対する群落の透過率（ m_s と m_L ）および地面と群落の顕熱バルク係数（ C_{Hg} と C_{Hc} ）は樹高や葉面積などから求められる。地面は十分に湿っているものとし、地面の蒸発効率は $\beta_g = 1$ と仮定する。さらに、群落上の気象条件（ S_n 、 L^* 、 u 、 T 、 q ）と貯熱率 G および群落上の顕熱フラックス H の実測値を与えることにより、上3式を地面温度 T_g 、群落温度 T_c および群落の蒸発効率 β_c の3つを未知数として解き、結果についての解析を行う。

4. 結果・考察

4. 1 水蒸気フラックスの測定手法

水蒸気フラックスを高精度でかつ長期連続的に測定するために、改良型バンドパス・渦相関法を開発した（Watanabe et al., 2000）。

一般に、水蒸気フラックスを求める最良の方法は、高速な応答性を有する湿度計（オープンパス型赤外線湿度計など）を用いて大気中の湿度変動を高速（10Hz程度）にサンプリングし、超音波風速計などで同時に測定される鉛直風速との相関を求める方法（渦相関法）である。しかし、高速な応答性を有する湿度計は、一般に長期的な安定性やキャリブレーション方法の面で問題があり、長期連続的な使用には向いていない。そこで、長期観測や無人観測を念頭においた、汎用

の湿度計を用いるフラックス測定の手法が開発されている。この方法では、通常の渦相関法と同様に、湿度変動を汎用の湿度センサーを用いて高速サンプリングし、同時に測定される鉛直風速の変動との相関をとることによってフラックスを求める。そのままでは、湿度変動の高周波成分に対する汎用センサーの追随性が不十分なため、求められるフラックスに欠損が生じてしまう。この欠損分を補うため、接地境界層において各種のスペクトルが互いに相似形になるという仮説に基づき、同時に測定される顕熱フラックスのコスペクトル形を参照しながら、補正を施す。これが Horst and Oncley (1995) によるバンドパス・渦相関法である。しかし、この方法では、フラックスの補正分が大きな割合を占めるため、補正時に参照される顕熱フラックスの大きさが小さくなるような場所や時間帯には、原理的に大きな誤差を含む可能性がある。

そこで、本研究では、バンドパス・渦相関法をさらに改良し、その適用範囲をさらに広げた手法を開発して観測に用いることにした。この方法では、まず、長期観測に使用する汎用の湿度計を、観測現地において追随性の良い高性能な湿度計と一定期間比較することにより、汎用センサーの周波数応答特性を求めておく。次に、実際の観測時には、汎用センサーによって測定される水蒸気フラックスのコスペクトルについて、センサーの応答特性によるフィルターがかけられて変形されているデータを、あらかじめ求められた周波数応答特性を用いて、フィルターがかけられる前の状態に復元する。このような補正を行うことで、汎用センサーが実際の湿度変動を検出することのできる周波数帯が広くなり、水蒸気フラックスの大部分を直接的に測定できるようになる。さらに、このような補正を施してもなお、センサーが追随できないより高周波の成分に対しては、従来のバンドパス・渦相関と同様の推定を行う。こうして得られる全周波数帯からの寄与分を合算することにより水蒸気フラックスを計算する。

実際に、当観測で用いられている静電容量型相対湿度計 (HMP-35D Vaisala) の周波数応答特性を求めた例が図1である。上図が振幅特性、下図が位相特性であるが、いずれの図も周波数が増加するとともに測定値と実際の値とのずれが大きくなることを示している。この図から判断すると、この湿度計で実際の湿度変動が正確に測定できるのは、高々 0.02Hz 程度より低周波の領域だけに限られる。一方、森林上においては、水蒸気フラックスの主成分はおよそ 0.1Hz 程度までの範囲に分布しているのが一般的である。そのため、同じセンサーを用いて従来のバンドパス・渦相関法を適用しようとする、水蒸気フラックスの大半部分をスペクトルの相似性に基づいて顕熱フラックスから推定しなければならないことになる。それを避けるために、新手法では図1の結果に基づいた信号復元を行うことにより、フラックスを直接測定できる周波数帯を拡張し、これだけでは対応しきれないさらに高周波の成分についてのみ、相似性に基づく推定を行う。実際に、この方法を森林上の観測に適用し、得られた潜熱（水蒸気）フラックスの日変化を通常の方法による潜熱フラックスと比較した例が図2である。渦相関法による顕熱フラックスの日変化も同図に示してある。この図から分かるとおり、新しい測定手法によれば、従来のバンドパス・渦相関法では測定が難しかった、顕熱フラックスが小さくなるような条件の時（図では15時付近）でも、通常の方法とほぼ同等の結果を得ることが可能である。この手法は、従来のバンドパス・渦相関法と同様に、長期的安定性の優れた汎用測器を用いることができるので、長期連続観測に適する手法である。

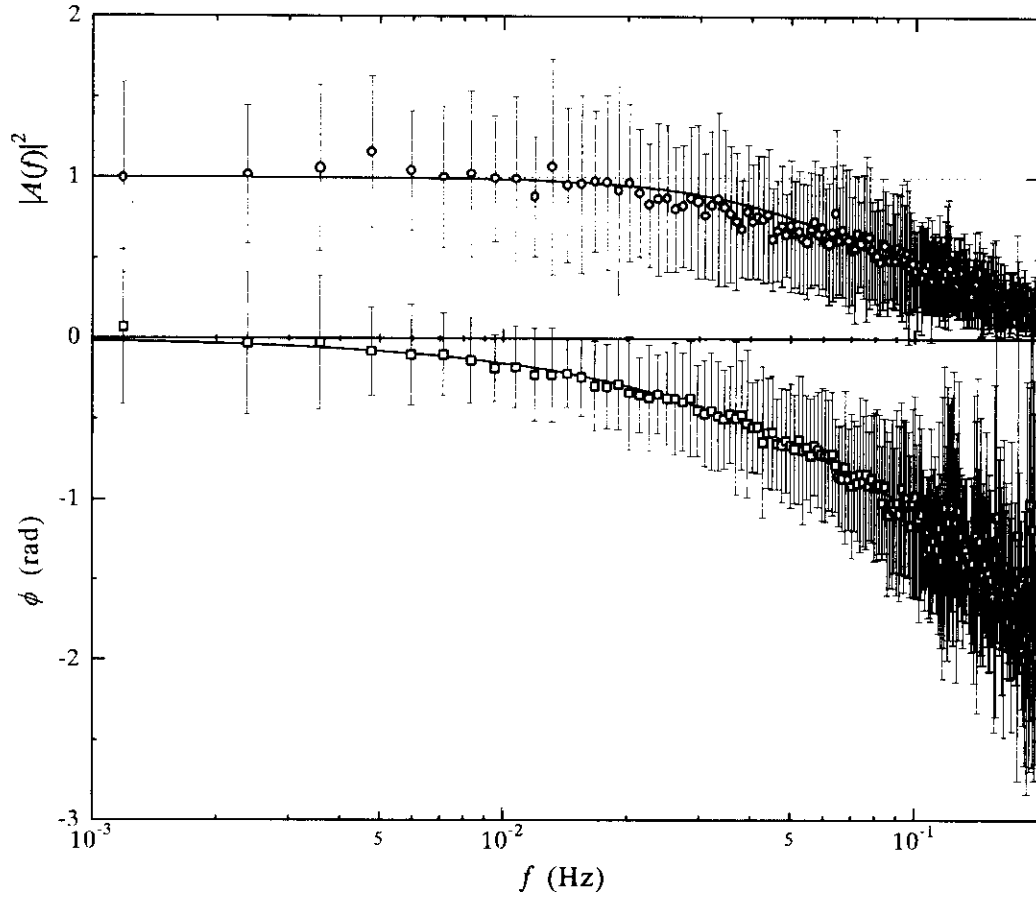


図1. 静電容量型相対湿度計の周波数応答特性（上図：振幅特性，下図：位相特性）
 プロットが測定値を示し，曲線はあてはめられた近似曲線を表す。

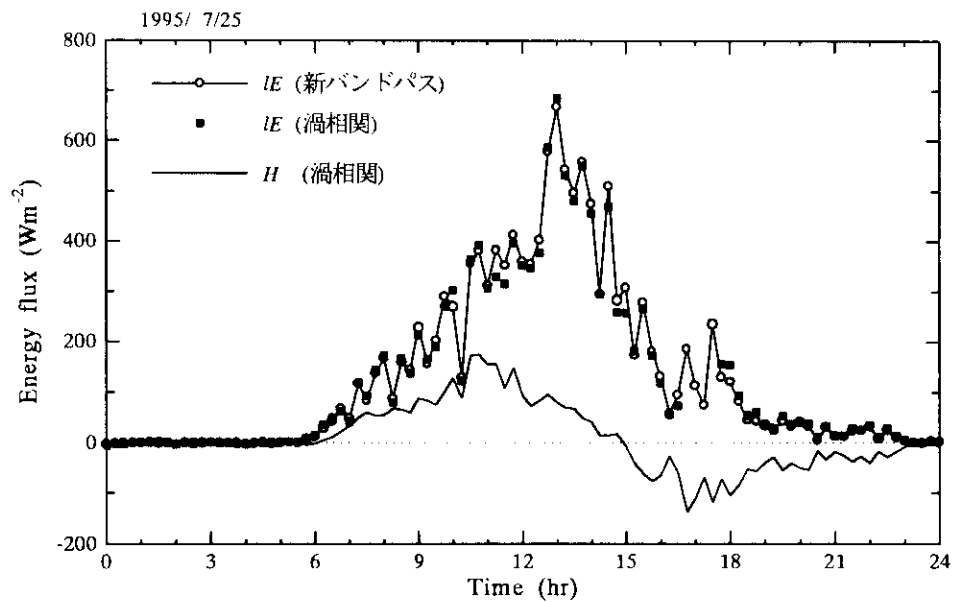


図2. 潜熱（水蒸気）フラックスの測定における改良型バンドパス渦相関法と
 通常の渦相関法との比較

4. 2 観測値の季節変化

落葉樹林では、展葉・落葉に代表されるような生物季節が明瞭であり、葉面積や光合成活動の季節変化が大きく、その影響によって森林が大気に及ぼす作用が大きく変化する。観測を実施した森林では、葉面積指数（単位土地面積上の鉛直カラム内に存在する葉の片面積を積算したもの）は、図3に示すような季節変化を示した（1997年の例）。まず、1～3月の間は葉がない状態であるが、4月の中旬頃に展葉が起り、急激に葉面積指数が増加する。その後、6月の初めには葉面積指数が5余りで最大となり、以降次第に減少する。11月に入ると一斉に落葉が起り、12月の中旬にはほぼすべての葉が落ちたことが分かる。

観測を行った森林では葉面積指数が上記のような季節変化を示したわけであるが、このような季節変化のタイミングは、本来、森林を構成する樹種や年ごとの気候条件および緯度・標高などによって異なるはずのものである。したがって、気候モデル等において森林の影響を考慮する際には、各グリッドにおける森林の活動状態に関するパラメタリゼーションを取り入れる必要がある。それに向けての試みの1つとして、展葉の時期を積算温度の情報から推定する方法を検討した。ここで、積算温度とは、日平均気温から植物の成長に関係しない低温（ここでは10℃とする）を引いた温度の正值のみを、毎年1月1日を基準に加算した値で、単位は「℃・日」である。これを現地で観測された気温を基に毎年計算し、各年における展葉日（図3のようなグラフから判定）の時点での積算温度を求めたところ、その値は 63 ± 2 ℃・日となり、ほぼ一定値となった。つまり、展葉時期については気温の情報からかなりよく推定できることが分かる。今後、展葉時期や落葉時期に対する同様な関係を、他の森林観測サイトのデータや衛星画像データなどを活用しながら、地域・全球スケールで評価する研究が必要である。

図4は、1997年におけるアルベードの年変化である。アルベードの値は年間通しておおよそ0.1前後の値をとる。季節的な変化に着目すると、春季におこる群落の一斉開葉（図3参照）と同時にアルベードの値が急上昇し、その後の日数が経過するにつれて次第に値が下降することが分かる。この間は、葉面積指数に大きな変化がないにも関わらずアルベードが変化しているため、この変化は個葉の光学特性の変化によるものと考えられる。つまり、展葉直後のいわゆる新緑の状態では太陽光のエネルギーを多く反射するが、葉が成熟するにつれて太陽光エネルギーの吸収率が大きくなっていく。また、10月から11月にかけてアルベードの値が少し上昇するが、これはいわゆる紅葉の影響と思われる。さらに、12月から翌年の3月に至る落葉期には、群落の状態に変化はないものの太陽高度が次第に大きくなる影響で、群落のアルベードの値は下降する。アルベードのこのような季節変化をモデル化するためには、展葉・落葉時期の他、葉の光学的特性の季節変化をも表現できるパラメタリゼーションが必要となる。

図5は、当森林における熱収支の各項目の季節変化である。季節変化を際立たせるために、日中（ここでは日射量が 10Wm^{-2} 以上の時間帯とした）のみのフラックスを日別に積算し、さらに10日間平均したものを図示してある。ここで、森林の熱収支とは次のようなことを意味している。森林上には、太陽光や大気からの赤外線による熱エネルギーが入射する。そのエネルギーのうち太陽光によるものはその10%程度が反射されるが（図4参照）、それ以外は森林によって吸収される。また、森林自体も赤外線を放出しエネルギーを発散するので、結局それらの差し引き分が森林に残る。それを正味放射量という。そのエネルギーは、一部が樹木や土壌を暖めるのに使われる（貯熱）ほかは、ほとんどの部分が水分の蒸発や森林に接する大気を暖めたりするの

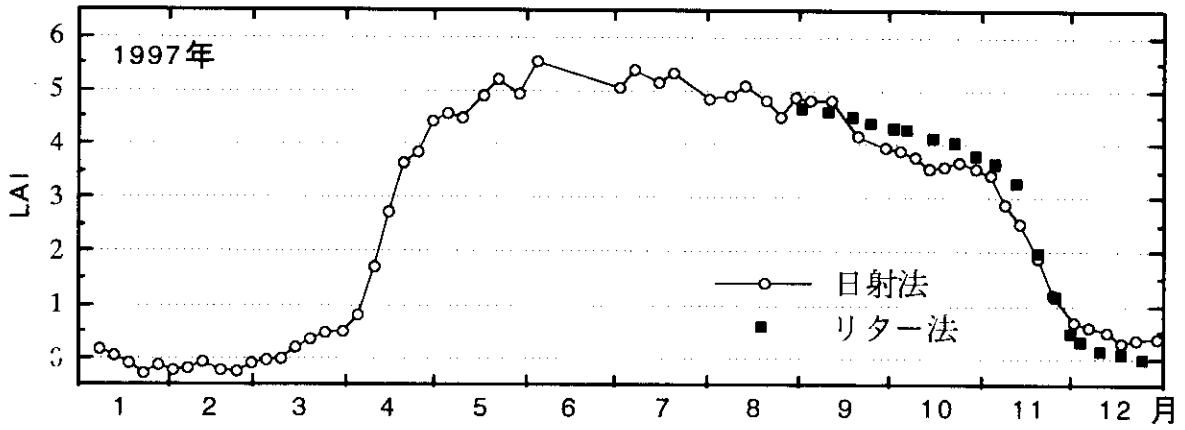


図3. 葉面積指数の季節変化。
群落上下での日射比と落葉（リター）量計測による推定。

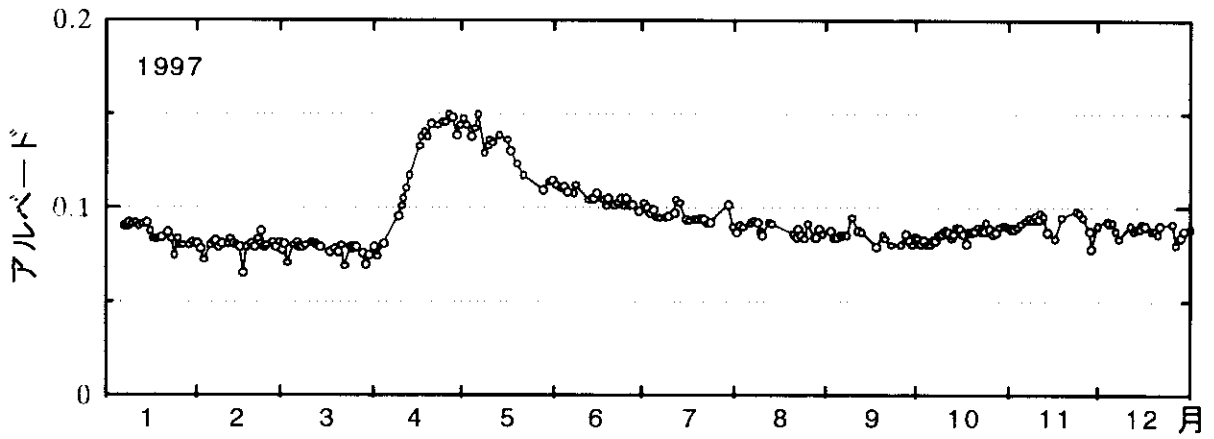


図4. アルベードの季節変化。
10:00-14:00の平均値。日射量が少ない日は除いてある。

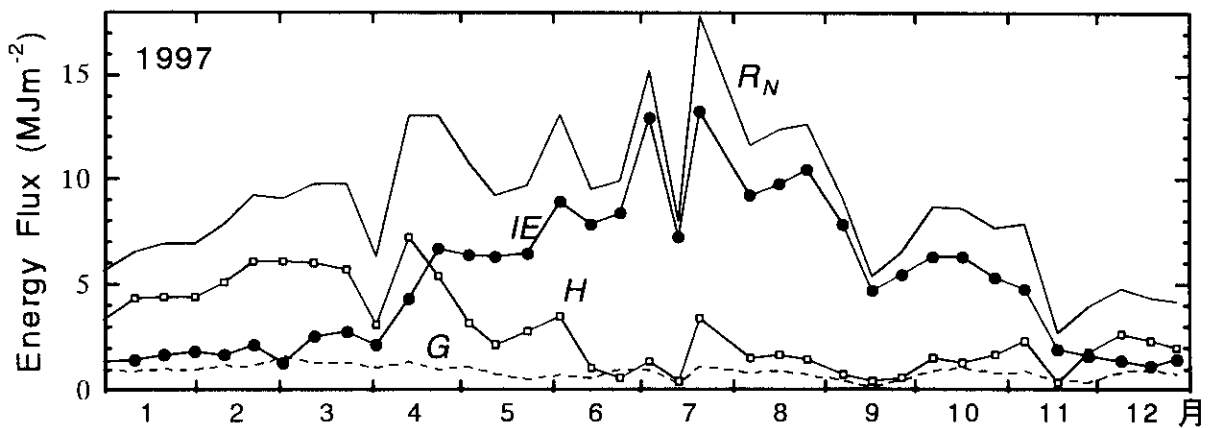


図5. 日中の熱収支（10日間移動平均）。

R_N : 正味放射量, G : 貯熱量, H : 顕熱, IE : 潜熱

に使われ、熱（顕熱）や水蒸気（潜熱）の形となって最終的に大気へ放出される。

さて、図5によれば、当森林に入力される正味放射量は、太陽高度の季節変化と天候を反映した季節変化を示す。すなわち、正味放射量は本来、夏至の頃に大きく冬至の頃に小さくなる季節変化を示すが、夏至の頃は日本ではちょうど梅雨の時期にあたり天候が不順なことが多いため、その最大値のピークは梅雨の前後の時期に観測されることが多い。また、正味放射量のエネルギー配分先のうち、日中の貯熱項は年間を通してほぼ一定と見なせるが、顕熱や潜熱は顕著に季節変化する。まず、落葉期（1～3月）には、潜熱が小さく、正味放射のエネルギーの多くが顕熱に配分されているため、森林が大気を暖める効果が強いことがわかる。しかし、4月の一斉展葉とともに潜熱の割合が急上昇し、顕熱へのエネルギー配分が小さくなる。夏期には、正味放射量のエネルギーのほとんどが潜熱に配分され、顕熱は非常に小さくなる。つまり、着葉期（特に夏期）には、森林に入力する熱エネルギーは落葉期よりも大きいのだが、気温が高いことと葉からの蒸散が可能になることがあいまって、大気を加熱する作用は落葉期よりも弱められ、森林が付近の気候を冷涼に保つ作用を発揮する。この傾向は、11月末の落葉半ば頃まで継続し、すべて落葉してしまう頃に再び最初の状態に戻る。以上のように、森林における生物季節の推移とともに、森林が大気へ及ぼす熱的影響が大きく季節変化することが明らかとなった。したがって、森林生態系－大気間のエネルギー交換をその季節変化も含めて適切にパラメータ化するためには生物季節を考慮に入れることが必要であり、少なくとも展葉・落葉の時期が推定できるような手法を取り入れる必要があることがわかる。

4. 3 蒸発効率のパラメータ化

3. 2節で述べたモデルを、当森林で得られた1996年のデータに適用し、実際の蒸発効率を評価した。蒸発効率の値は観測期間中のほぼ毎日各30分毎に評価されたが、ばらつきを減らして季節変化を見やすくするために、それらの値を日射量の大きさ別に分類した上でそれぞれの日射区分ごとに3日間の平均値を求めた。その結果を、葉面積の季節変化とともに図示すると図6のようになる。図において、日射量が十分大きい場合の蒸発効率に注目すると、その値は4月下旬に起こる一斉展葉とともに急増し、落葉直前まで徐々に上昇を続け、11月中の落葉とともに急減する季節変化を示すことがわかる。また、年間を通しての蒸発効率の最大値は0.25程度である。このように、落葉樹林における蒸発効率の大きさや、植物が葉をつけている活動期に蒸発効率の値が大きくなるような季節変化を示すことなどが、フラックスの観測データによって明らかにされた。一方、いずれの季節においても日射量が多いほど蒸発効率の値が大きいことが分かる。これは、日射量が大きくなると、植物が光合成を行うために葉の気孔を開くため、蒸散が活発になるという一般的な応答の現れである。また、図には示されていないが、季節内の細かな変動は、気象条件の変動による蒸発要求度（ポテンシャル蒸発量：気象条件によって定まる最大可能な蒸発量）の変動にほぼ対応し、蒸発要求度が高いときに蒸発効率が減少する傾向がある。たとえば、図において、7月の中旬に蒸発効率が一時的に低下している期間があるが、この期間は乾燥した晴天日が続く、蒸発要求度が高かった。このような傾向は、過度な蒸散を防ぐための植物による防御反応の現れと考えることができる。

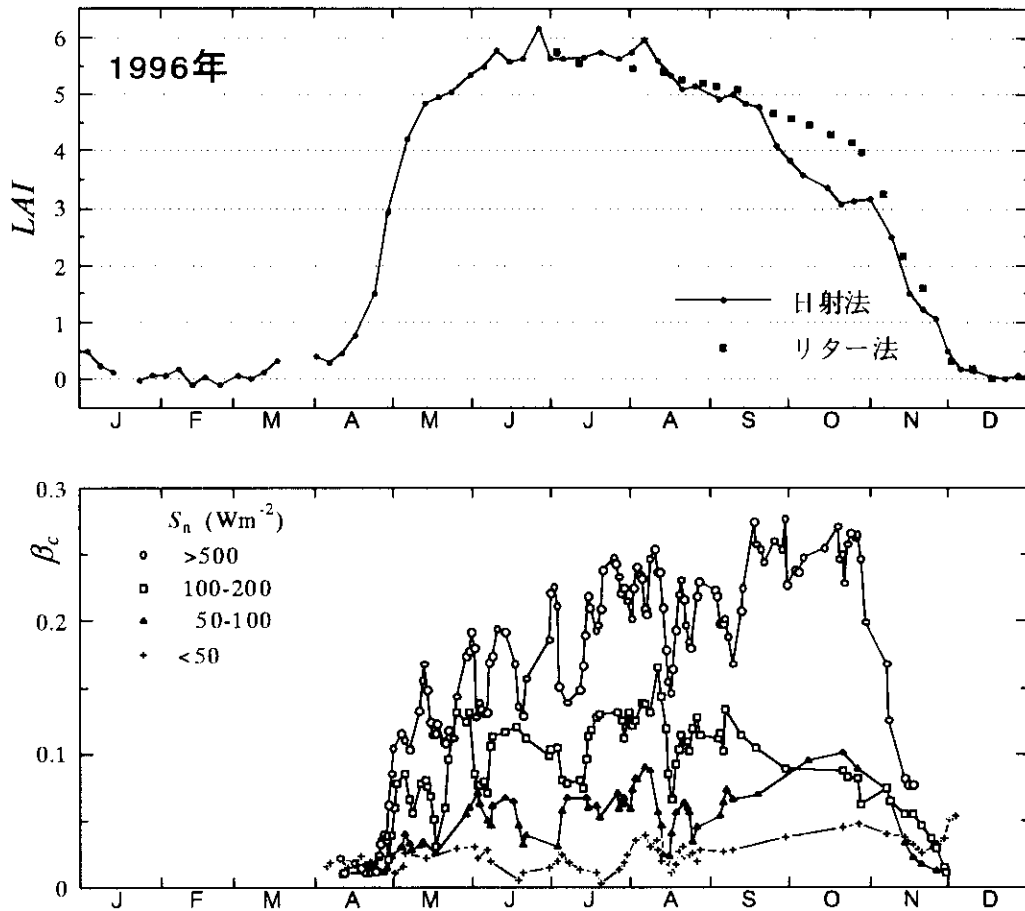


図6. 1996年における葉面積指数（上図）と蒸発効率（下図）の季節変化。
蒸発効率の値は日射量の大きさ別に3日間平均してある。

ところで、群落全体の蒸発効率の日変化・季節変化等は、個々の植物による気孔の開閉過程を通じた蒸発制御過程によって支配されている。通常、植物の気孔開閉のパラメタリゼーションでは、日射、気温、飽差、葉の水分ポテンシャルなど数多くの要素に対する依存性をそれぞれ独立した関数で表現する方式を用いる（例えば Jarvis, 1976）。しかし、そのような方式をとると、対象とする植生地ごとに個別に決めるべきパラメータの数が非常に多くなる。ここでは応用面を重視し、植物の気孔開度は、土壤の乾燥による極端な水分ストレスが無い限り、日射量と葉面表層の水分状態のみによって支配されるとの考えから、蒸発効率を日射量と蒸発要求度（ポテンシャル蒸発量）のみの関数で表現することを試みた。具体的には、

$$\beta_c = \beta_{\max} F_S(S_n) F_E(E_p)$$

β_{\max} : 最大蒸発効率

F_S, F_E : 正味日射と蒸発要求度の関数（0～1の値をとる）

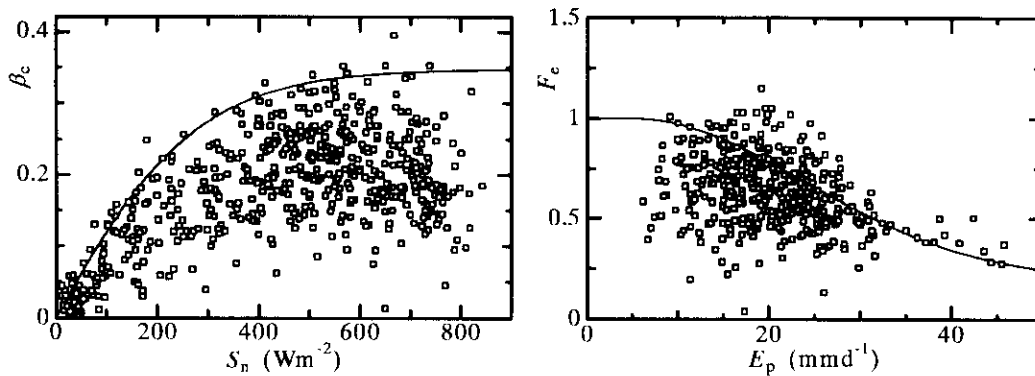


図7. 蒸発効率の日射（左図）とポテンシャル蒸発（右図）に対する依存性
（点：観測値；実線：あてはめた関数形）。

のように表現し、 β_{\max} の値と F_S および F_E の関数形を蒸発効率の評価値と合うように次のようにして決定した。

まず、図7の左図は、夏期において評価された蒸発効率を、群落上の正味日射量に対してプロットしたものである。一般に、過度な乾燥や低温・高温など、日射以外の制限要因がない場合には、植物の気孔開度は日射量とともに増加してある一定値に漸近することが知られている。ところが、図中のプロットはばらつきが大きく、日射量に対して常に1対1の関係にあるわけではないことが分かる。現実のフィールド条件では、日射量だけでなくいろいろな要因が重ね合わされた結果として植物の気孔開度が決められているためである。しかし、各日射量におけるデータの最大値を結ぶ線（包絡線）を引いてみると、その線は日射量とともに増加し一定値に近づくような飽和型の曲線を描くことが分かる。つまり、この曲線が、他の制限要因がなく日射量のみによって決まるいわば最大可能な蒸発効率を示し、その曲線よりも下方にプロットされている点は、日射量以外の制限要因によって蒸散が制限されている状況に対応していると考えられる。以上の考察より、 F_S の関数形は増加飽和型となるような形を与え、 $\beta_{\max} F(S_n)$ の曲線がグラフ上にプロットされたデータ群の上限部分を包絡するように（図示）、 β_{\max} の値と F_S のパラメータを設定した。

また、図7の右図は、蒸発効率の評価値をここで決めた $\beta_{\max} F(S_n)$ で割り算したものを、蒸発要求度に対してプロットしたものである。これによって、日射以外の要因による蒸発の制限具合を知ることができる。図によれば、プロットのばらつきがやや大きいものの、蒸発要求度が非常に大きいときに制限度が大きくなる（プロットされた値が小さくなる）ことが分かる。これは、蒸発が非常に起こりやすい環境条件の時、植物自身が過剰な蒸散を防ぎ体内の水分を保持するための反応として気孔を閉じることの現れである（フィードフォワード反応）。通常のパラメタリゼーションでは、植物のこのような反応は、大気中の飽差（飽和水蒸気圧と実際の水蒸気圧の差）が増加すると制限度が上昇するような関数で表現される。しかし、この反応には葉の表皮細胞の水分状態が関与しているとされ（Willmer and Fricker, 1996）、そのような状況を表現するには、大気飽差よりも細胞中の水分増減に直接寄与する蒸発速度に関連する量を用いる方が適

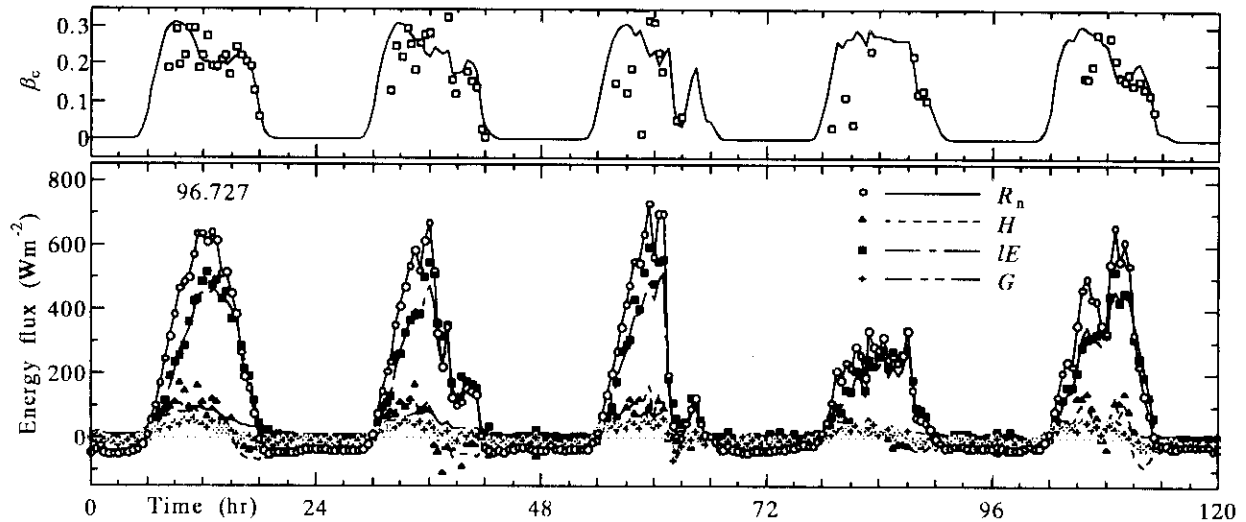


図8. 蒸発効率（上図）と熱収支（下図）における，観測値（点）と計算値（線）の比較。1996年7月27日から連続する5日間。

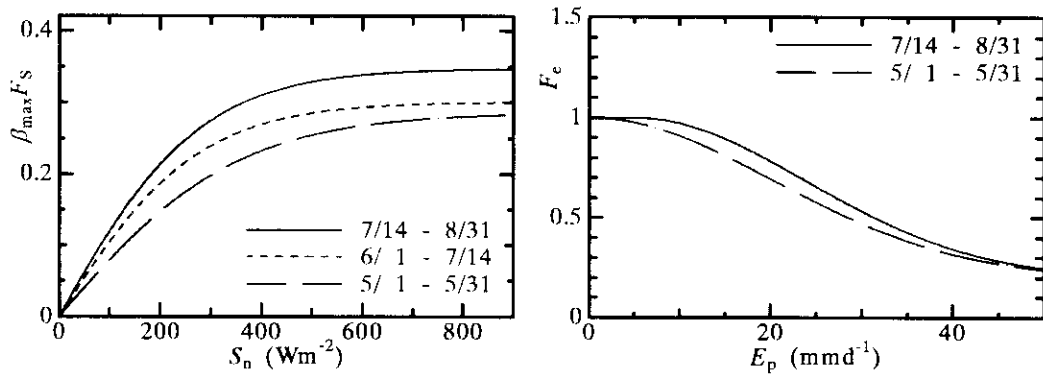


図9. 蒸発効率の日射依存性と蒸発要求度に対する依存性
季節別のパラメタリゼーション

切である。このような理由から、 F_e は図7右図の曲線で示したようにポテンシャル蒸発量に対して漸減する関数形で与えることにした。

このようにして得られた関係式を前述のキャノピーモデルに代入し、熱収支のシミュレーションを行った。図8は、夏期について、現地で観測された気象条件をモデルに入力して得られた蒸発効率と熱収支の計算結果を、観測値と比較したものである。蒸発効率が午前中に高く午後に低下する傾向や、熱収支の日変化など、観測値との比較はおおむね良好である。

また、上と同様にして、蒸発効率の日射依存性と蒸発要求度に対する依存性を表す2つの関数を季節別に求めた結果が図9である。日射と蒸発要求度に対する依存性はともに、いずれの季節においてもそれぞれ同一の関数形で表現できるが、関数に含まれるパラメータの値が季節によ

て異なる。これによると、蒸発要求度に対する依存性には季節による違いがあまり見られないが、日射に対する依存性を示す曲線は季節進行とともに上方へ移動することが分かる。後者は図6に示された季節変化を別な断面から見たものである。ここで示したように、季節毎に異なるパラメータを用いることで、このような季節変化を表現することができる。

今後、このような季節変化がいかなるメカニズムによって引き起こされ、どのような要因によって変動しうるのかという点について、植物生理的な知見を踏まえた検討が必要である。その上で、季節変化を適切に表現できるパラメータ化の手法を確立することが残された課題である。また、展葉・落葉の時期の推定など生物季節のパラメータ化については、研究期間内にその一部を着手した程度であり、今後に多くが残された。さらに、細部の説明は省略するが、観測との比較計算を通して、現在用いているモデルでは森林群落内における乱流輸送過程のパラメタリゼーションが不十分であることが判明した。これについても、現地での観測や Large Eddy Simulation 等による数値実験（渡辺，1999）などを相補的に行いながら改良していく必要がある。

5. 本研究により得られた成果

埼玉県川越市の落葉樹林において通年の連続観測を実施し、森林-大気間の相互作用を研究する上で今後必要とされる貴重なデータが得られた。

このデータにより、落葉樹林では、葉面積の季節変化に伴ってアルベードや森林熱収支の構造が大きく変化すること、特に春季には樹木の展葉が一斉に起こるため、森林が大気に及ぼす影響が短期間に劇的に変化することが明らかとなった。したがって、展葉や落葉の時期を正確に推定することが、広域における森林影響を考慮する際に重要となることが示唆された。

また、森林の蒸発効率は、森林の活動期に大きくなる明瞭な季節変化を示すことが明らかになった。また、各季節内においては、蒸発効率の気象条件への依存性を、日射量と蒸発要求度を用いてパラメータ化することができ、その方法によって熱収支の時間変化がおおむね良好に再現されることが分かった。

6. 参考文献

- Baldocchi, D., R. Valentini, S. Running, W. Oechel and R. Dahlman, 1996: Strategies for measuring and modelling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems. *Global Change Biol.*, **2**, 159-168.
- 福嶋義宏, 2000: AsiaFlux構築の意義と課題. 日本気象学会大会講演予稿集, **77**, 108.
- Jarvis, P. G., 1976: The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.*, **273**, 593-610.
- Watanabe, T., 1994: Bulk parameterization for a vegetated surface and its application to a simulation of nocturnal drainage flow. *Boundary-Layer Meteor.*, **70**, 13-35.
- Willmer, C. and M. Fricker, 1996: *Stomata*, second edition. Chapman & Hall, London, 375pp.

[国際共同研究等の状況]

当観測サイトはFLUXNETおよびAsiaFluxに参加している。

[研究成果の発表状況]

(1) 口頭発表

- 渡辺 力・大谷義一・山野井克己・安田幸生・岡野通明・溝口康子・谷 誠, 1997: 落葉広葉樹林における微気候の長期観測. 第 108 回日本林学会大会講演要旨集, P-106.
- 山野井克己・渡辺 力・安田幸生・大谷義一・岡野通明・谷 誠, 1997: バンドパス渦相関法を用いた熱収支の長期観測. 第 108 回日本林学会大会講演要旨集, P-107.
- 溝口康子・渡辺 力・大谷義一・山野井克己・岡野通明・安田幸生・谷 誠, 1997: 地温形成に及ぼす落葉層の影響. 第 108 回日本林学会大会講演要旨集, P-108.
- 大谷義一・渡辺 力・山野井克己・溝口康子・岡野通明・谷 誠, 1997: 落葉広葉樹林における群落貯熱量の季節変化. 第 108 回日本林学会大会講演要旨集, P-109.
- 渡辺 力・大谷義一・山野井克己・安田幸生・水谷完治・岡野通明・溝口康子・野口正二・谷 誠, 1997: 落葉広葉樹林における熱収支の長期連続観測. 日本気象学会予稿集, 71, D321.
- 渡辺 力・大谷義一・安田幸生・谷 誠, 1998: 落葉広葉樹林における蒸発効率の算定. 日本気象学会予稿集, 73, P137.
- 渡辺 力, 1999: 群落内外における大気乱流のラージ・エディ・シミュレーション. 第 110 回日本林学会大会学術講演集, 2, 1046-1047.

(2) 論文発表

- Yasuda, Y., T. Watanabe, K. Yamanoi, Y. Ohtani and M. Okano, 1997: Measurement of scalar flux from a forest using the bandpass covariance method. *J. Agric. Meteor.*, 52, 493-496.
- 渡辺 力・大谷義一, 1998: 樹幹熱伝導の計算手法に関する考察. *農業気象*, 54, 47-54.
- Watanabe, T., K. Yamanoi and Y. Yasuda, 2000: Testing of the bandpass eddy covariance method for a long-term measurement of water vapor flux over a forest. *Boundary-Layer Meteor.*, (in press).
- 渡辺 力, 2000: 落葉広葉樹林への適用例. 気象研究ノート (投稿中).

(3) 出願特許, 受賞等

なし