

森林樹冠上における運動量,顕熱,水蒸気の乱流輸送特性

誌名	日本林學會誌 = Journal of the Japanese Forestry Society
ISSN	0021485X
著者名	大谷,義一 山野井,克己
発行元	日本林學會
巻/号	74巻3号
巻号補足	
掲載ページ	p. 213-220
発行年月	1992年5月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



論 文

森林樹冠上における運動量、顕熱、水蒸気の乱流輸送特性*

大谷 義一**・山野井克己**

大谷義一・山野井克己：森林樹冠上における運動量、顕熱、水蒸気の乱流輸送特性 日林誌 74：213~220, 1992 森林群落上の乱流輸送特性を明らかにする目的で、ヒノキ林内にタワーを設置し、超音波風速温度計と赤外線湿度変動計を使用して気温、比湿、風速の変動を観測した。観測結果に基づき、運動量、顕熱、水蒸気の乱流輸送特性を、大気の安定度と関連づけて解析した。不安定時に観測された気温、比湿変動の時系列の特徴から、森林樹冠上でのブリュームによる顕熱、水蒸気輸送の存在が示唆された。さらに、スペクトル解析を行ったところ、顕熱、水蒸気輸送のコスペクトルには、運動量輸送のコスペクトルにはない第2のピークが存在することから、顕熱や水蒸気がブリュームによっても間欠的に鉛直輸送されることが明らかとなった。顕熱の輸送に寄与する周波数は、無次元周波数で0.001から10、運動量、水蒸気では0.001から5の間にあった。これより、森林群落上の輸送量測定においても、測定高と平均風速が極端な値をとらない限り、サンプリングの速さを10 Hz、平均時間を10分とする今回の方法で、概ね問題のないことがわかった。

OHTANI, Yoshikazu and YAMANOI, Katsumi: Turbulent transport characteristics of momentum, sensible heat, and water vapor above a forest canopy J. Jpn. For. Soc. 74: 213~220, 1992 This paper describes the measurements of turbulent transport characteristics above a forest canopy in relation to the calculated eddy correlation fluxes. An observation tower was placed in the center of a 17.5 a hinoki (*Chamaecyparis obtusa* (SIEB. et ZUCC.) ENDL.) stand with an average height of 8.5 m. An ultrasonic anemometer-thermometer and an infrared humidity fluctuation meter were used to detect wind velocity, temperature, and humidity fluctuations, respectively, at a height of 13.5 m. The turbulent transport characteristics of momentum, sensible heat, and water vapor were analyzed for three different atmospheric stabilities. For unstable conditions, both temperature and humidity initially increased slowly and then declined rapidly, approximating a triangular pattern. This suggests the existence of vertical transport by convective plumes. During upward transport of sensible heat and water vapor from the forest canopy, cospectra of sensible heat and water vapor have secondary peaks which are not seen in the momentum cospectra. This also provides evidence of vertical transport by convective plumes. The non-dimensional frequency which contributes to the transport ranges from 0.001 to 10 for sensible heat and from 0.001 to 5 for momentum and water vapor. Thus, a sampling speed of 10 Hz and an averaging time of 10 min give reliable fluxes from unstable through stable air conditions.

I. はじめに

森林から大気への顕熱や水蒸気輸送量を求めることは、水収支の面からは蒸発散による損失量を求めること、また熱収支の観点からは森林をとりまく気候を決定するパラメータを求めることに相当し、すでにそれぞれの分野で多くの研究がなされている。測定や推定についてもいくつかの方法があり、国内では服部(1985)、井上(1988)などにより整理されているが、その一つに乱流変動法がある。

乱流変動法は、大気境界層での乱渦による熱、水蒸気、炭酸ガスなどの物理量と風速の微変動を、応答の早い測器によって測定し、それらから直接的に輸送量を求める方法である。そのため乱流変動法は、渦相関法あるいは直接測定法とも呼ばれる。このことは、風速の対数分布と濃度勾配に比例した輸送に基礎を置く他の境界層の輸送量推定法が、その導出に多くの仮定を用い、ときに気層の温度勾配の影響を補正する必要があるのとは対照的である。

森林群落上の気温、比湿、風速などの物理量は、一

* 本研究の一部は、第100回日本林学会大会および農業気象学会1989年度大会において口頭発表した。

** 森林総合研究所 For. and Forest Prod. Res. Inst., Ibaraki 305

般に0.1秒から10分程度の時間スケールで、大気乱流によって変動している。乱流変動法では、物理量の共分散の微変動を測定し、それを時間積分して輸送量を求める。そのため、観測法を確立する段階では、輸送に寄与する周波数を見積もり、観測法に反映させる必要がある。さらに、乱流による輸送過程それ自体、微気象研究上興味深い問題である。

SWINBANK(1951)によって初めて試みられた乱流変動法は、その後接地層の運動量や顕熱輸送研究に応用された(たとえばBUSINGERら, 1967)。近年さらに、ガスによる赤外線線の吸収を測定原理とする開光路を持った赤外線湿度変動計が開発され(塚本・光田, 1979)、接地境界層内の水蒸気輸送量測定に利用されるようになった(塚本・光田, 1982, 1983)。森林を対象とした乱流変動法による輸送量測定は、SHUTTLEWORTHら(1984), BALDOCCI and MEYERS(1988)などにより行われているが、国内の森林における報告、とりわけ乱流輸送特性に関する研究は少なく、那須野ら(1989), 村上ら(1990)など数例にすぎない。

本研究では、乱流変動法による輸送量測定の基礎となる、乱流輸送過程の解明を目的として、森林群落上で物理量の変動を観測した。その結果に基づき、運動量、顕熱、水蒸気の乱流輸送特性を、大気の安定度と関連づけて解析した。

II. 試験地、測定と解析方法の概要

1. 試験地の位置と測定の概要

測定を行った森林群落は、森林総合研究所(FFPRI)構内(140°08'E, 36°00'N)の面積約17.5 aのヒノキ人工林で、樹齢は17年である。毎木調査による樹高、枝下高、胸高直径の平均値はそれぞれ、8.5 m, 3.6 m, 10 cmで、葉面積指数は代表木の層別刈り取り法により8.0と推定された。群落周辺の地被状況は、草地、裸地、道路、建物等が混在している。

図-1に測器の配置、設置高度をそれぞれ示す。乱流変動法による輸送量測定のための、超音波風速温度計(海上電機製SAT-300)、赤外線湿度変動計(海上電機製AH-100)は、13.5 mの高さで使用し、パーソナルコンピュータ(日本電気製PC 98-XA)に搭載したA/D変換ボード(カノーブス製Analog-Pro I)を介して、データを10 Hzの周波数で採取した。また、高度13 mに設置した純放射計、地中2 cmの深さに埋設した熱流板、通風乾湿計などの、応答の比較的遅い測器群からのデータは、パーソナルコンピュータ(日本電気製

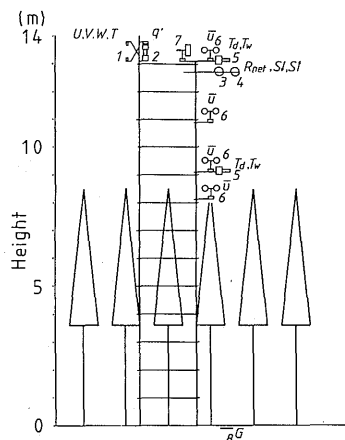


図-1. 測器の配置

Instrument set-up for experiment

1, 超音波風速温度計; 2, 赤外線湿度変動計; 3, 純放射計; 4, 短波放射計; 5, 通風乾湿計; 6, 風杯式風速計; 7, 熱流板。

1, Ultrasonic anemometer-thermometer; 2, Infrared humidity fluctuation meter; 3, Net radiometer; 4, Short wave radiometer; 5, Ventilated psychrometer; 6, Cup anemometer; 7, heat flux plate.

PC-100)に接続されたスキャナ付きのデジタルマルチメータ(アドバンテスト製TR-2114 H)を使用して、2分に1回収録した。

観測を実施したのは、1988年11月7日から12日の6日間である。その中から、晴天日で欠測がない11月11日のデータを解析に用いた。観測当日は1日を通して樹冠は乾いており、日射量、純放射量の最大値はそれぞれ、約600 Wm⁻², 420 Wm⁻²であった。

さらに乱流変動の解析は、大気の安定度別に3回の観測期間を選んで行った。それぞれ、RUN-1(不安定, 12:30~12:40), RUN-2(中立, 15:30~15:40), RUN-3(安定, 18:00~18:10)と呼ぶことにする。

2. 乱流輸送の解析法の概要

乱流による輸送を解析するために、観測値を平均部分と変動部分に分割することが行われる。主風方向、それに直角方向、鉛直方向風速観測値(ms⁻¹)をそれぞれ U , V , W とし、それらの平均値を $\overline{U}$, $\overline{V}$, $\overline{W}$, 変動値を u' , v' , w' とする。ただし、 U は流れに沿う方向を、 W は上向きを正とする。また、気温、比湿の測定値をそれぞれ T , q とし、風速と同様の約束に従い平均値を $\overline{T}$, $\overline{q}$, 変動値を T' , q' と表すことにする。

境界層における運動量輸送量 τ は、大気の密度を ρ とすると次式で表される。

$$\tau = -\rho \overline{w'u'} \quad (1a)$$

同様に顕熱輸送量 H , 水蒸気輸送量 E は,

$$H = Cp\rho \overline{w'T'} \quad (1b)$$

$$E = \rho \overline{w'q'} \quad (1c)$$

で表される。

乱流変動法では, (1a), (1b), (1c)式がそれぞれ運動量, 顕熱, 水蒸気の輸送量を求める基本式となる。

運動量輸送の(1a)式を周波数領域で書き換えると, 次式のように表される。

$$-\tau/\rho = \int_{n_L}^{n_U} C_{wu}(n)dn \quad (2a)$$

同様に, 顕熱輸送, 水蒸気輸送については,

$$H/(Cp \cdot \rho) = \int_{n_L}^{n_U} C_{wT}(n)dn \quad (2b)$$

$$E/\rho = \int_{n_L}^{n_U} C_{wq}(n)dn \quad (2c)$$

のように表される。ここに, $C_{wu}(n)$, $C_{wT}(n)$, $C_{wq}(n)$ は, それぞれ w と u , w と T , w と q のコスペクトル密度を表す。周波数 n (Hz)におけるコスペクトル密度は, 輸送量全体に対する各周波数からの寄与の程度を意味する。 n_U , n_L は輸送に寄与する周波数の上限, 下限値をそれぞれ表す。

物理量の変動値を分離するための平均時間は, 接地境界層の観測では通常 10~20 分が用いられる。本研究では, 比湿観測に使用した赤外線湿度変動計が, 時定数 10 分のローパスフィルタを内蔵しているため, それにあわせて平均時間を 10 分とした。しかし本来的には, 平均時間は輸送に寄与する周波数の上限, 下限値をスペクトル解析によって定めることが必要であり, その検討を行った。

(1a)から(1c)式, (2a)から(2c)式の中で, $Cp = 1.01 \text{ Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$ で定数扱いとし, ρ は観測期間ごとに通風乾湿計の値から計算した。また, パワースペクトル, コスペクトルは FFT 法により求め, 計算には日野(1977)のプログラムを一部書き換えて使用した。

III. 結果と考察

竹内・近藤(1981)によれば, 本研究の風速計の設置高度は, 森林の群落境界層内の遷移層に位置する。したがって, 観測された乱流変動は, 厳密な意味では, 風上側の境界層の特徴を残しながら, 森林群落に対応して新たに形成されつつある, 森林を含む大気境界層の特徴を示していると考えられる。

以下に, まず風速, 気温, 比湿それぞれの変動から得られる情報について検討し, つづいて輸送に関係す

るコスペクトルを示し, 周波数の場からみた乱流輸送特性について考察を加える。

1. 風速, 気温, 比湿の変動

1988 年 11 月 11 日に観測された, 風速, 気温, 比湿それぞれの変動の時系列と, $w'u'$, $w'T'$, $w'q'$ で表される変動の積の項 (これを積分したものが, 運動量, 顕熱, 水蒸気それぞれの輸送量となる) の時系列について, 大気の安定度別に考察を加える。

大気の安定度を表す指標として, 次式で表される L を用いる。

$$L = (|\overline{u'w'}|^{3/2} T) / (\kappa g \overline{w'T'}) \quad (3)$$

L は, モニン・オブコフの長さと呼ばれる量で, 安定成層のとき $L > 0$, 中立のとき $L = \infty$, 不安定成層のとき $L < 0$ となる。 κ はカルマン常数, g は重力加速度をそれぞれ表す。

1) RUN-1 (不安定成層時) における変動

図-2(a)に, RUN-1の期間内に観測された微気象要素の変動を示す。このとき $L = -21 \text{ m}$, $\overline{U} = 3.0 \text{ ms}^{-1}$, $H = 103 \text{ Wm}^{-2}$, $LE = 42 \text{ Wm}^{-2}$ であった。

まず, 気温, 比湿の変動に注目すると, T' , q' がほぼ同じ位相で変化していることがわかる。また T' , q' とも細かい変動をとめないながら, 徐々に値が上昇してから急激に下降するといった変化を示している。

T' と q' の関係について, 塚本・光田(1983)は対流が活発な不安定時には, 同一位相かつ高い相関で動くことを報告している。KAIMAL and BUSINGER(1970)によれば, 熱的な対流によるプリュームが風で流されるとき, 風上側のエッジ付近では比較的良好に混合が起こり, プリューム内で緩やかな温度勾配を持つのに対し, 風下側のエッジ付近では, プリューム内を上昇する暖気とプリューム背後の下降冷気とが, マイクロフロントと呼ばれる境界をつくるとされる。図-2(a)の T' にみられる鋸の波状の構造を持った系統的な変化は organized structure と呼ばれ, プリュームの通過に対応する現象と考えられている。また, q' についても T' と同じように変化することから, 水蒸気も顕熱と同様の機構により輸送されていることが推察される。これについては, コスペクトルの解析結果とともに, 後ほど再び検討する。

つぎに, 風速の鉛直成分の変動と気温, 比湿変動の積の項に注目すると, $w'T'$, $w'q'$ とも同じ位相で変化しており, 輸送は同じ上向きに, しかも間欠的に生じていることがわかる。接地境界層における質量, 運動量, 顕熱等の間欠輸送については, SCHOLS(1984)など

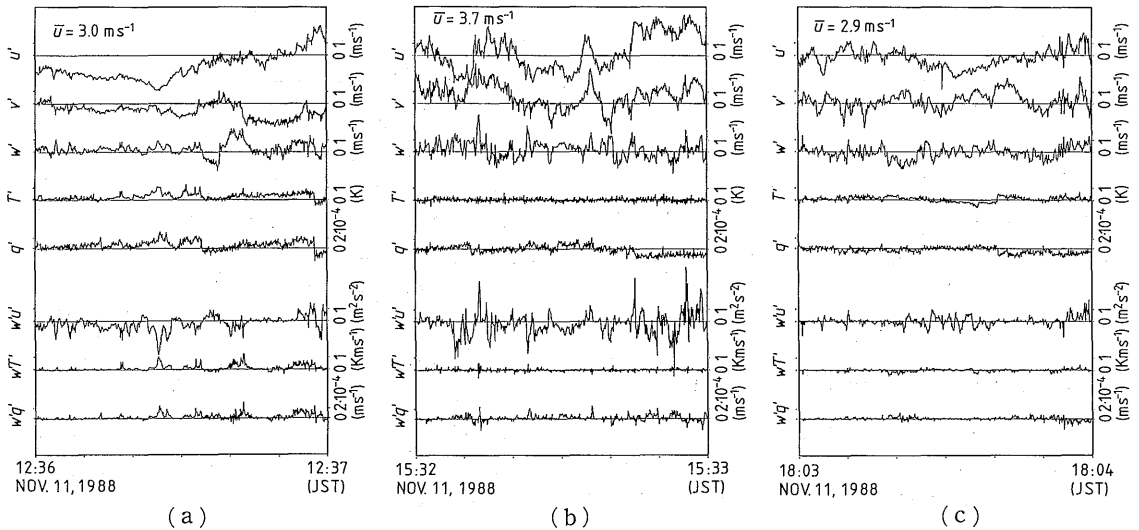


図-2. 微気象要素変動の時系列

Time domain traces of the fluctuations of micro meteorological factors

(a), RUN-1, 不安定成層; (b), RUN-2, 中立成層; (c), RUN-3, 安定成層。

(a), RUN-1, Unstable condition; (b), RUN-2, Neutral condition; (c), RUN-3, Stable condition.

も指摘しているように一般的な現象のようである。

2) RUN-2 (中立成層時) における変動

図-2(b)に, RUN-2の期間内に観測された微気象要素の変動を示す。このとき, $L=1.6 \times 10^4$ m, $\bar{U}=3.7$ ms $^{-1}$, $H=-1$ Wm $^{-2}$, $IE=50$ Wm $^{-2}$ であった。

T' には細かい変動だけで系統的な変化はみられないが, q' には不安定時と同様の变化傾向がわずかながら認められる。 $w'T'$ の変動は 0 を中心に不規則かつ間欠的に起こるだけである。これに対して $w'q'$ では, 値は小さいながら上向きの変動が優勢である。

3) RUN-3 (安定成層時) における変動

図-2(c)に, RUN-3の期間内に観測された微気象要素の変動を示す。このとき, $L=75$ m, $\bar{U}=2.9$ ms $^{-1}$, $H=-42$ Wm $^{-2}$, $IE=18$ Wm $^{-2}$ であった。

T' は, 小さい不規則な変動をともしないながら, 不安定成層時とは反対に, 緩やかに下降してから急激に立ち上がるように変化する。 q' では T' にみられるような系統的な変動は不明瞭であるが, 一部に T' の立ち上がりで逆に q' が下降するように逆位相で変化する箇所も見受けられる。安定時でも水蒸気輸送が上向きの場合, T' と q' とが逆位相で変動するという報告(塚本・光田, 1983)もあるが, 輸送のメカニズムについては明らかにされていない。

$w'T'$ では, 小さい値の下向きの変動が間欠的に維持されている。 $w'q'$ では, 上向きで間欠的な変動が維持されているようにもみえるが, 値は小さく明瞭ではない。

2. 輸送量のコスペクトル

運動量, 顕熱, 水蒸気の輸送は乱流にともなって生じる。樹冠上の乱流の生成要因としては, まず風速の鉛直シアーによるものが重要である。一般に, 風速シアーに起因して生じる乱流はある卓越周波数を中心にランダムに分布する。また, 前節でみたように, とくに大気不安定なときには加熱された大気がプルームとなって上昇する。そのときの気温や比湿変動には, ランダムな変動に加えて系統的な変動がみられる。それにとまって, 顕熱, 水蒸気の輸送は間欠的に生じる。このように大気の安定度により, 輸送現象のメカニズムは変化するので, 輸送量を評価するためにはそれぞれの現象に対応した輸送の時間スケールを明らかにする必要がある。そのためにコスペクトルによる解析を行った。

風速の異なる観測間でコスペクトルの形を比較するために, 次式で表される無次元周波数 f を用いる。

$$f = n(z-d)/\bar{U} \quad (4)$$

ここに, d は地面修正量(m)で, 服部(1985)が既往の報告の平均値として求めた $d=0.78h$ を使用した。

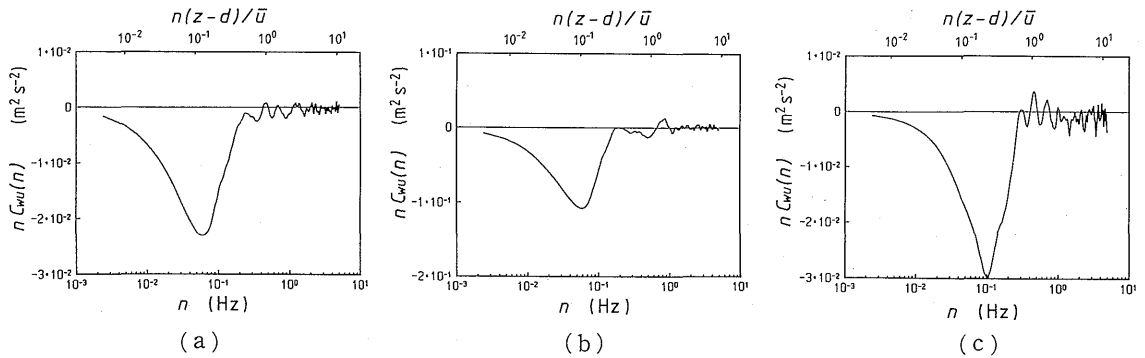


図-3. 運動量輸送のコスペクトル
Cospectrum of momentum flux
(a), RUN-1; (b), RUN-2; (c), RUN-3.

h は樹高(m)を表す。また、輸送に寄与する無次元周波数の上限、下限値をそれぞれ f_u , f_l と表す。

1) 運動量輸送

RUN-1, 2, 3に対応した運動量輸送量のコスペクトルを、それぞれ図-3(a), (b), (c)に示す。図は運動量輸送に対する各周波数成分からの寄与の程度を表す。図では縦軸を $nC_{wu}(n)$ としてプロットしたため、下向きの輸送を正にとったときの運動量輸送のピークは、下向きの極大として表現されている。

RUN-1, RUN-2の運動量輸送のピークは、 $f=0.1$ 付近にある。これに対して安定時は $f=0.2$ 付近にピークがあり、安定時にはピークの位置が高周波側へシフトしている。これは、カンザスでの観測結果からKAIMALら(1972)が指摘した傾向と一致する。

輸送に寄与する周波数は、高周波側で $f_u=1$ となっている。低周波側は観測時間を10分に設定したため、最も低周波側でも値は0となっていないが、コスペクトル全体の形から判断して、輸送量の計算に支障ない領域まで、データがとれていると考えても差し支えないであろう。

運動量輸送のコスペクトルは、マイナス側に現れる。このことは、運動量が上空から下向きに輸送されていることを意味する。また、コスペクトルは一つのピークを持つ比較的単純な形をしており、乱流運動エネルギーの生成には風速の鉛直シアーの影響が大きいことを示している。

2) 顕熱輸送

RUN-1, 2, 3に対応した顕熱輸送のコスペクトルを、それぞれ図-4(a), (b), (c)に示す。

RUN-1の顕熱輸送のコスペクトルは、 $f=0.1$ から

0.2付近と、 $f=1$ 付近の二つのピークを持つ。コスペクトルはほとんど全周波数帯域で正の値をとり、顕熱は上向きに輸送されていることがわかる。

不安定時の顕熱輸送のコスペクトルには、① 風速シアーによる乱流の卓越周波数、② プリウムにともなう間欠輸送の間隔に対応した周波数、③ 間欠輸送の継続時間に対応した周波数が現れる(BERGSTRÖM and HÖGSTRÖM, 1989)。図-4(a)にみられる二つのピークのうち、 $f=0.1$ 付近のピークは①, ②に、また $f=1$ のピークは③にそれぞれ対応すると考えることができる。

f_u は運動量輸送の場合よりも高周波側に延び、 $f_u=5$ 程度までの周波数帯が輸送に寄与している。MIYAKE and McBEAN(1970)は草地での観測から、輸送に寄与する上限・下限の周波数を示した。それによれば、上限周波数 f_u は、顕熱輸送に対して5、運動量、水蒸気輸送に対して0.5であり、下限の周波数 f_l は0.001である。上限周波数の値や、顕熱輸送では運動量輸送に比べ f_u が高周波側へシフトする点など、本観測の結果と概ね一致している。

RUN-2では $w'T' \approx 0$ となっている。すなわち図-4(b)に示された周波数帯で $nC_{wT}(n)$ を積分した値はほとんど0である。各周波数に対応するコスペクトルの絶対値はRUN-1に比べて小さいが、それでも全周波数域で一様に0に近づくのではなく、いくつかのピークがみられる。 $f=0.1$ にピークを持つ領域では、コスペクトルは正の値を持ち、顕熱は上向きに輸送されている。これに対して、 $f=0.4$ から0.5にピークを持つ周波数域では、顕熱は下向きに輸送されている。それ以上の周波数では、 T' の変動値が小さいことに原

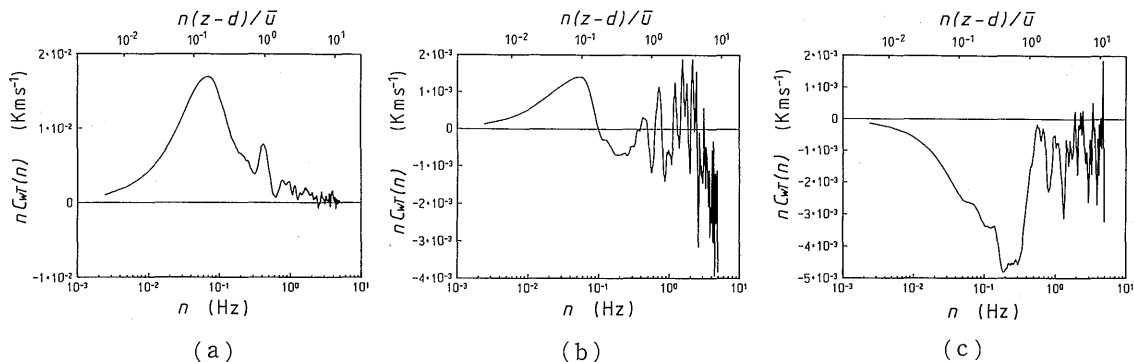


図-4. 顕熱輸送のコスペクトル
Cospectrum of sensible heat flux
(a), RUN-1; (b), RUN-2; (c), RUN-3.

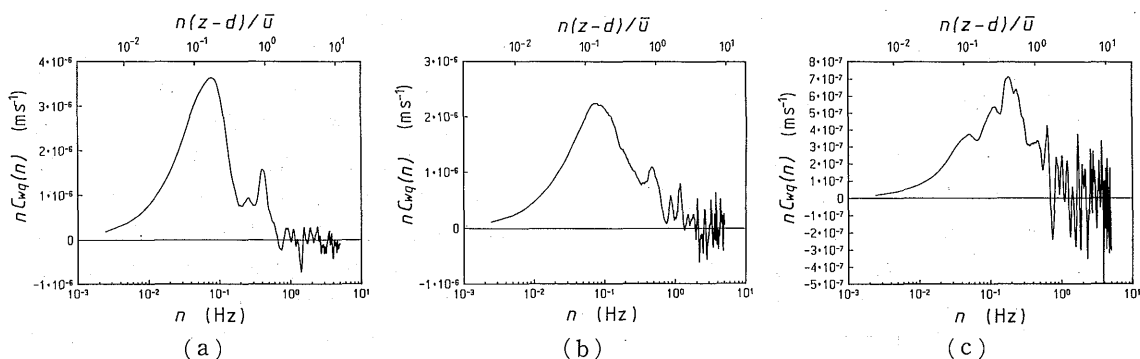


図-5. 水蒸気輸送のコスペクトル
Cospectrum of latent heat flux
(a), RUN-1; (b), RUN-2; (c), RUN-3.

因して、コスペクトルの絶対値が高周波側に現れるノイズと比較して有意な大きさはならないため議論はむずかしい。中立の場合でも、周波数帯を限って見たときに部分的に顕熱が上向き、下向きに輸送されるような傾向がみられることは、乱流の構造と輸送の観点から興味深い。

RUN-3ではコスペクトルは $f=0.5$ 付近にピークを持ち、全周波数帯で負の値をとる。すなわち、顕熱は下向きに輸送されている。最も輸送に寄与する周波数は、向きは反対であるが RUN-1 よりも高周波側の $f=0.5$ 付近に現れる。

3) 水蒸気輸送

RUN-1,2,3に対応した水蒸気輸送のコスペクトルを、それぞれ図-5(a), (b), (c)に示す。

RUN-1のコスペクトルは、図-4(a)と同様の二つのピークを持ち、その位置もほとんど同じであることか

ら、水蒸気輸送のメカニズムについても顕熱と同様のものが考えられる。

塚本・光田(1982)は、水蒸気輸送のコスペクトルのピーク位置が、 $f=0.01$ から $f=0.1$ の間にあることを報告している。図-5(a)の低周波側のピーク位置は、概ねそれと一致している。

RAUPACH(1978)が行った、湖面上に形成された境界層の高さ 10 m における観測では、不安定時の水蒸気輸送のコスペクトルにおいて、 $f=0.2$ 付近に運動量輸送のコスペクトルにはないピークの存在が示された。それによって、プリュームによる水蒸気の輸送が示唆された。OHTAKI(1984)の水田上の観測でも、不安定時の顕熱、水蒸気輸送のコスペクトルには、 $f=0.4$ 付近に第2のピークがみられる。

このように、不安定時に顕熱、水蒸気輸送のコスペクトルに共通してみられる第2のピークは、顕熱と水

蒸気とで位置も同じであることから、顕熱と同様に水蒸気もブリュームによって間欠的に輸送されていることを示す証拠と考えられる。

図-5(b)に示された RUN-2 のコスペクトルは、絶対値は減少するものの、図-5(a)すなわち RUN-1 の水蒸気輸送のコスペクトルに類似し、二つのピークを持つ。このうち $f=0.1$ から 0.2 のピークは、運動量、顕熱にも共通の風速シアーに原因を求めることができる。中立の条件でも、相変わらず $f=1$ 付近のピークが現れているが、不安定成層時の水蒸気輸送とは異なり、ブリュームによるとは考えにくい。ここでは推察にとどめるが、空間的な不均一性を反映した可能性や、水蒸気自らがつくりだす密度不安定による間欠的な輸送現象を反映した可能性などが考えられる。

RUN-3 のコスペクトルでは、絶対値は RUN-1、RUN-2 に比べて小さいものの正の値を維持しながらいくつかのピークを持つ。その中で最大のピークの位置は $f=0.4$ 付近にあり、運動量、顕熱同様、RUN-1、RUN-2 より高周波側に移動している。それ以外のピークは、それぞれ $f=0.1$ 、 $f=0.3$ 、 $f=1$ 付近に現れている。安定条件での水蒸気輸送は、不安定、中立の場合に比べて複雑な機構で行われていることが示唆される。

IV. お わ り に

大気安定度別に、運動量、顕熱、水蒸気の輸送特性を検討した結果、顕熱・水蒸気輸送には運動量輸送のメカニズムでは目立たないブリュームによる間欠輸送現象が関与することが示された。

また、それぞれの気象安定度について、森林群落上の輸送に寄与する乱流現象の代表的な時間スケールが明らかとなった。

輸送に寄与する上限の周波数については、本研究でも MIYAKE and McBEAN(1970)の草地上の観測を概ね支持する結果が得られた。つまり、森林群落を対照とした観測でも、輸送に寄与する無次元周波数の上限値 f_u は、顕熱について $f_u=5$ 、運動量と水蒸気については $f_u=0.5$ が適用できると考えられる。

下限の周波数については、MIYAKE and McBEAN(1970)は $f_L=0.001$ としている。これに対して、中島・古藤田(1988)は草地上の水蒸気輸送の解析から、 $f_L=0.0011$ では輸送に寄与する乱流変動を分離するための平均時間としては長すぎる場合のあることを示している。本観測では、比湿観測に使用した測器の性質上、

$f_L=0.0017$ より遅い変動は測定できなかったが、その平均時間でも輸送量の計算に差し支えないことが、コスペクトルの解析から示された。

無次元周波数は、風速計の相対的設置高度($z-d$)と風速($\bar{U}$)の影響を除去してあるので、実際の観測での観測時間とサンプリングの周波数を決めるためには、観測時の $z-d$ と $\bar{U}$ を考慮しなければならない。森林群落を対象とした場合では、 $(z-d)/\bar{U}$ の値は、概ね 0.5 から 2 程度に入ることが予想されるので、無次元周波数をそのまま Hz に読み変えても大差ないであろう。

したがって、森林群落からの輸送量を乱流変動法により測定する場合、サンプリング速度 10 Hz、および測定時間 10 分という、本観測で用いた値を採用しても概ね問題ないと考えられる。

森林群落を対象にした乱流輸送過程に関する研究はなお不足しており、今後群落上面と大気間だけでなく、森林群落内も含めて直接測定を中心とした研究を蓄積していく必要がある。

本研究は、科学技術庁重点基礎研究費の一部を使用して行った。また、観測を進めるにあたっては、森林総合研究所生産技術部の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

引用文献

- BALDOCCHI, D. D. and MEYERS, T. P.(1988) Turbulence structure in an deciduous forest. *Boundary-Layer Meteorol.* **43** : 345~364.
- BERGSTRÖM, H. and HÖGSTRÖM, U.(1989) Turbulent exchange above a pine forest. II. Organized structures. *Boundary-Layer Meteorol.* **49** : 231~263.
- BUSINGER, J. A., MIYAKE, M., DYER, A. J., and BRADLEY, E. F. (1967) On the direct determination of the turbulent heat flux near the ground. *J. Appl. Meteorol.* **6** : 1025~1032.
- 服部重昭 (1985) 蒸発散量推定式の誘導過程の解説と林分への適用における問題点. 林試研報 **332** : 139~165.
- 日野幹雄 (1977) スペクトル解析. 300 pp, 朝倉書店, 東京.
- 井上君夫 (1988) 農業気象の測器と測定法. 11 熱収支. 171~199, 農業技術協会, 東京.
- KAIMAL, J. C. and BUSINGER, J. A.(1970) Case studies of convective plume and dust devil. *J. Appl. Meteorol.* **9** : 612~620.
- KAIMAL, J. C., WYNGAARD, J. C., IZUMI, Y., and COTE, O. R.(1972) Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **98** : 563~589.
- MIYAKE, M. and McBEAN, G.(1970) On the measurement

- of vertical humidity transport over land. *Boundary-Layer Meteorol.* **1**: 88~101.
- 村上智美・原菌芳信・川村隆一・西沢利栄 (1990) 気流変化と水稻およびアカマツ群落との相互作用. 2. 植物の揺らぎと群落上の乱流輸送特性への影響. 筑波大水理実験センター報 **14**: 15~29.
- 中島 誠・古藤田一雄 (1988) 赤外線ガス分析計を用いた水蒸気輸送量の直接測定. 筑波大水理実験センター報 **12**: 11~20.
- 那須野正明・林 陽生・原菌芳信・西沢利栄 (1989) 群落外環境の変化に対する赤松群落の動的応答. 3. 赤松群落内外の乱流輸送について. 筑波大水理実験センター報 **13**: 113~121.
- OHTAKI, E. (1984) Application of an infrared carbon dioxide and humidity instrument to studies of turbulent transport. *Boundary-Layer Meteorol.* **29**: 85~107.
- RAUPACH, M. R. (1978) Infrared fluctuation hygrometry in the atmospheric surface layer. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **104**: 309~322.
- SCHOLS, J. L. J. (1984) The detection and measurement of turbulent structures in the atmospheric surfacelayer. *Boundary-Layer Meteorol.* **29**: 39~58.
- SHUTTLEWORTH, W. J., GASH, J. H. C., LLOYD, C. R., MOORE, C. J., and ROBERTS, J. (1984) Eddy correlation measurements of energy partition for Amazonian forest. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **110**: 1143~1162.
- SWINBANK, W. C. (1951) The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. *J. Meteorol.* **8**: 135~145.
- 竹内清秀・近藤純正 (1981) 地表に近い大気. 226 pp, 東京大学出版会, 東京.
- 塚本 修・光田 寧 (1979) 赤外線湿度計と熱電対乾湿計の比較観測について. 京大防災研年報 **22**(B-1): 429~436.
- 塚本 修・光田 寧 (1982) 種々の湿度計を用いた水蒸気輸送量の直接測定. 京大防災研年報 **25**(B-1): 283~295.
- 塚本 修・光田 寧 (1983) 大気境界層における水蒸気変動の乱流特性. 京大防災研年報 **26**(B-1): 385~392.

(1991年10月7日受理)