

赤外線ガス分析計を用いた水蒸気輸送量の直接測定

Direct Measurement of Water Vapor Flux with Infrared Gas Analyzer

中島 誠*・古藤田一雄**

Makoto NAKASHIMA and Kazuo KOTODA

I はじめに

地表面から大気への水蒸気輸送量、すなわち蒸発散量の測定には種々の方法がある。そのなかで最も精度の高いものは、直接測定法（渦相関法）と呼ばれる方法で、風速の鉛直成分と比湿の各乱流変動から直接求めることができる。風速の鉛直成分の測定には超音波風速計が多く用いられており、これは十分な精度と応答速度をもっている。一方、比湿変動の測定のためには、従来は熱電対乾湿計を用いることが多かったが、応答速度が遅く、輸送量の測定には必ずしも十分ではない。そこで、これに代わるものとして、赤外線あるいは紫外線の水蒸気による吸収を感知するという方法が用いられるようになり、世界的にも種々の計測器が開発されつつある。

例えば、赤外線による水蒸気変動計としては、Elagina (1962) の試作以来、Chen and Mitsuta (1967) や Hyson and Hicks (1975) 等によって試作されたが、ドリフトの大きい欠点を克服できなかった。このような状況の下で Ohtaki and Seo (1976) による炭酸ガス変動計は、水稻群落上での炭酸ガスフラックスが渦相関法で直接測定できることを示した。また、この変動計の干渉フィルターを交換することによって、水蒸気変動計に変更可能であることが実証された (Seo and Ohtaki, 1976)。この特性を用い、光学系を簡単にし、電気系にデジタル回路を採用した小型で軽量の炭酸ガス・水蒸気変動計が試作され

た (Ohtaki and Matsui, 1982)。この変動計は、Ohtaki (1984)、大滝ほか (1985) などに用いられ、渦相関法に十分適用できる性能を有していると報告されている。そして、さらに改良された炭酸ガス・水蒸気変動計が試作された (大滝ほか, 1987)。

そこで本研究では、この改良された計測器を水蒸気変動計として野外観測に使用し、乱流計測に適当であるかどうか考察した。

II 赤外線ガス分析計

1) 渦相関法

渦相関法において、水蒸気輸送量は次のような式で示される。

$$E = \rho \overline{w'q'} = \int_{n_L}^{n_H} \rho C_{wq}(n) dn$$

ここで、 E は水蒸気輸送量（蒸発散量）($g/m^2/s$) を示し、 ρ は空気の密度 (g/m^3)、 W は風速の鉛直成分 (m/s)、 q は比湿 (g/kg) を示している。 $\overline{w'q'}$ は w と q の共分散であり、 $C_{wq}(n)$ はコスペクトル密度である。また、 n_H と n_L は共分散に寄与している上・下限の周波数のことである。Miyake and McBean (1970) は接地気層内の水蒸気フラックスの場合 $n_L = 0.001 Hz$ 、 $n_H = 0.5 Hz$ 程度であることを示した。

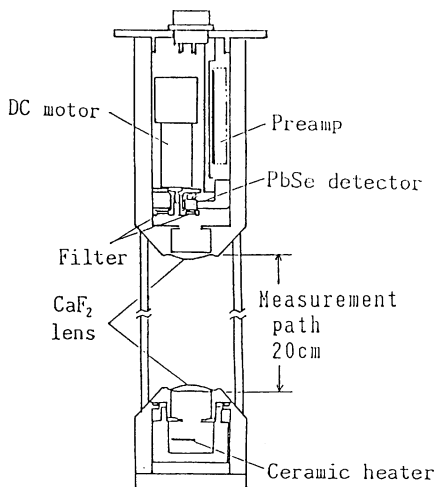
このような渦相関法は、測定高度以下の気層が水平方向に一様であること以外何らの仮定も必要とし

*筑波大学自然科学類 (現・アジア航測株式会社) **筑波大学地球科学系

ないという点で他の方法より優れており、原理的には接地気層内の1高度における測定で水蒸気輸送量を求めることができる。

2) 赤外線ガス分析計の概要

今回の研究では、水蒸気変動計として赤外線ガス分析計（アドバンスシステム社製、E009型）を用いた。この計測器は、炭酸ガス濃度変動と水蒸気濃度変動の同時観測が可能なるものである。赤外線ガス分析計の測定原理・応答特性については、Ohtaki and Matsui (1982)、大滝ほか (1987) に述べられている。ここでは、光学系の概要について述べる。光学系は第1図に示すとおりである。セラミックヒーターを光源とし放射された赤外光束は、 CaF_2 レンズによって平行光束にされ20 cmの開光路に射出されている。光路長が20 cmになっているのは、開光路部の空間平均の影響を小さくするため、標準型の超音波風速系のスパン長と同じにされているためである。光路中に存在する炭酸ガスと水蒸気によって吸収された赤外光束は、もう一方の CaF_2 によってPbSe検知器上に集光されている。この検知器は電子冷却により -15°C に保たれている。検知器の直前に30 Hzで回転している円板が置かれており、この円板の上に、炭酸ガスと水蒸気の固有吸収帯の赤外線を分光する赤外干渉フィルターと、参照用の光束を分光する干渉フィルターが固定されてい



第1図 赤外線ガス分析計のセンサー部のブロック図

る。炭酸ガスと水蒸気の測定波長として $4.3\ \mu\text{m}$ 、 $2.6\ \mu\text{m}$ がそれぞれ使用されている。また、参照波長として $2.3\ \mu\text{m}$ 、 $3.9\ \mu\text{m}$ が使用されている。ここで、 $2.3\ \mu\text{m}$ 、 $3.9\ \mu\text{m}$ の2つの参照信号 $V_{2.3}$ 、 $V_{3.9}$ において、 $V_{2.3}/V_{3.9}$ の値が一定になるようにセラミックヒーターの電流が制御されている。

また、電気処理系には大幅にデジタル演算方式が採用されている。主な性能については、第1表に示すとおりである。

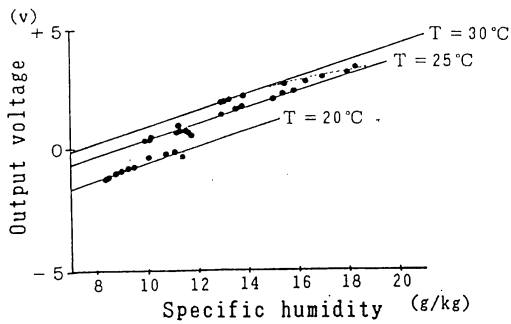
3) 赤外線ガス分析計の検定

赤外線ガス分析計について、国立公害研究所ファイトロンの人工光ガスキャビネット (Aiga *et al.*, 1984) を恒温恒湿装置として使用し、検定を行なった。更正用には、アスマン通風乾湿計 (吉野計器社製、SY-10型) を使用した。

比湿 q と出力電圧 V の関係を 20°C 、 25°C 、 30°C の各温度 T についてプロットし、検定曲線を引くと第2図のようになる。 $T=30^\circ\text{C}$ で多湿の場合におい

第1表 赤外線ガス分析計の概要

測定方式	赤外線吸収方式
光路長	20cm
検知器	PbSe (-15°C)
光源	セラミック
冷却方法	空冷
フィルター 波長	$2.6\ \mu\text{m}$ (H_2O) $4.3\ \mu\text{m}$ (CO_2) $3.9\ \mu\text{m}$ (ref.) $2.3\ \mu\text{m}$ (ref.)
測定回数	30Hz
電気演算	デジタル
出力電圧	$\pm 5\ \text{V}$
測定範囲	$\pm 20\ \text{g/kg}$ (H_2O) $\pm 200\ \text{ppm}$ (CO_2)
雑音	$\pm 0.02\ \text{g/kg}$ (H_2O) $\pm 0.5\ \text{ppm}$ (CO_2)



第2図 水蒸気変動計としての検定結果

て、プロットした点を結ぶと点線のようになるが、これはキャビネット内の温度が多少低下してしまったためであり、実線のように補正できると考えた。

第2図の検定曲線の勾配から求めた測定感度は0.33 V/(g/kg)であった。本研究では、この測定感度を用いて出力電圧の変動幅を比湿変動幅に換算した。

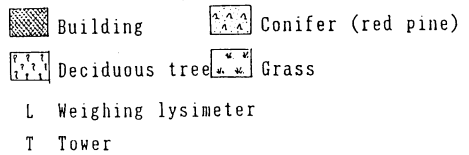
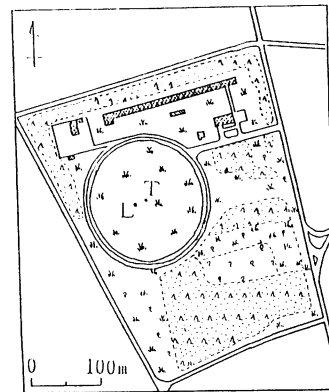
Ⅲ 観測

1) 観測地点

今回、野外観測は筑波大学水理実験センター（北緯36°06'35"、東経140°06'00"、標高27m）の実験圃場（古藤田ほか、1978）にて行った。周辺の植生や建物の配置は第3図に示すとおりである。圃場は、直径160mの円形をなしており、その中央に高さ30mの気象観測塔（第3図T地点）がある。また、そのすぐ近くにウエイングライシメータ（第3図L地点）が設置されている。

圃場内の土壌・地質は、表層30~50cmが有機質を含んだ表土層であるが、場所により土壌層が若干乱されている。その下部は層厚3~4mの粘土層となっている。地下水は、関東ローム層内と粘土層の下部に横たわる細砂層に存在するが、圃場の植生が消費する水のほとんどがローム層内の水に限られている（古藤田、1984）。なお、観測期間中の地下水位は、1.98mで一定であった。

圃場の植生は、多年生のライグラスを主とする牧草で、このほかにヒメジョオン、ススキなどが混入している。観測時の植生の平均の高さは、ライグラ



第3図 観測地点とその周辺の概況

スが50cm、ヒメジョオン、ススキが80cmであった。

2) 観測項目

観測項目は、比湿変動、風速の鉛直成分の変動、気温、露点温度、風向、風速の水平成分、全短波放射量、正味放射量および実蒸発散量である。この9項目のうち比湿変動と風速の鉛直成分の変動の2項目以外については、筑波大学水理実験センター熱収支・水収支観測システム（古藤田ほか、1978、1983）によるデータを使用した。これらのデータについては、気象日報作成装置による1時間平均値を使用した。実蒸発散量については、口径2m、深さ2mのウエイングライシメータ（島津製作所製、特注）によって測定されたライシメータ蒸発散量を用いている。

比湿変動の測定には赤外線ガス分析計を、風速の鉛直成分の変動の測定には超音波風速温度計（海上電機社製、DAT-100型）をそれぞれ気象観測塔の0.8mアームに、測定高度が1.1mになるよう設置し使用した。

3) 観測方法

野外観測は、1987年10月20日に行なった。観測は、13時00分から21時15分にわたって、15分間のRUNを5回くりかえした。5回のRUNについて、13時

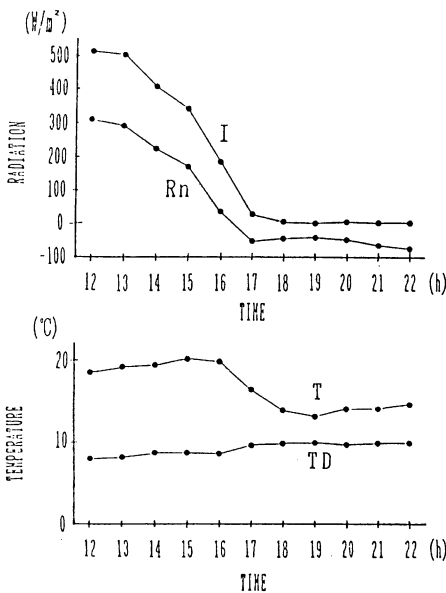
00分から15分間をRUN-1、15時00分から15分間をRUN-2、17時00分から15分間をRUN-3、19時00分から15分間をRUN-4、21時00分から15分間をRUN-5とする。赤外線ガス分析計と超音波風速温度計の出力信号は、7チャンネルのアナログデータレコーダー（TEAC社製、R-71型）に集録した。

4) 解析方法

アナログデータは観測終了後、実験室で10 Hzの割合にてA/D変換した。本研究では、A/D変換用ボード（カノープス電子社製、ADX-98E）をパソコンに装着して使用し、BASIC言語で書かれたプログラムによりA/D変換を行っている。

水蒸気フラックスの計算には、1回のRUNのデジタルデータ9000個を用いた。なお、評価時間として、900秒、450秒、300秒、180秒、60秒を用いた5つの場合について、それぞれフラックスを計算し、水蒸気輸送量を算出した。

スペクトルの計算方法については、日野（1986）を参考にした。



第4図 観測中の気温 (T)・露点温度 (TD)・全短波放射量 (I)・正味放射量 (Rn) の変化 (1987.10.20)

IV 結果と考察

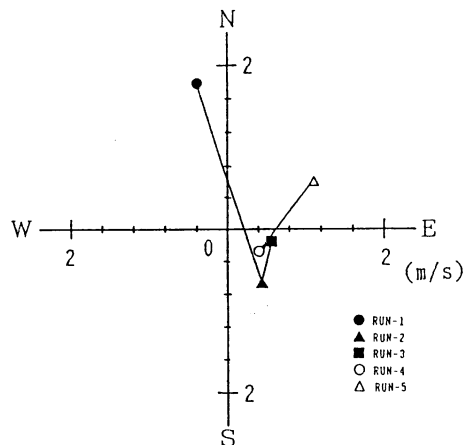
1) 観測期間中の主な気象状態

観測期間中の主な気象変化について第4図、第5図に示す。観測中は、雲量6~7程度の曇天で、16時40分頃に日没した。気温は16時00分から18時00分にかけて低下した。露点温度はほぼ一定であり、比湿の絶対値はあまり変化しなかったと考えられる。主風向は、13時30分頃に北寄りから南寄りにほぼ180°変化した。また、15時40分頃からは接地逆転層となっていた。以後、昼間、日没頃、夜間の例として、主風向のあまり変わらないRUN-2、RUN-3、RUN-5をそれぞれ用いる。

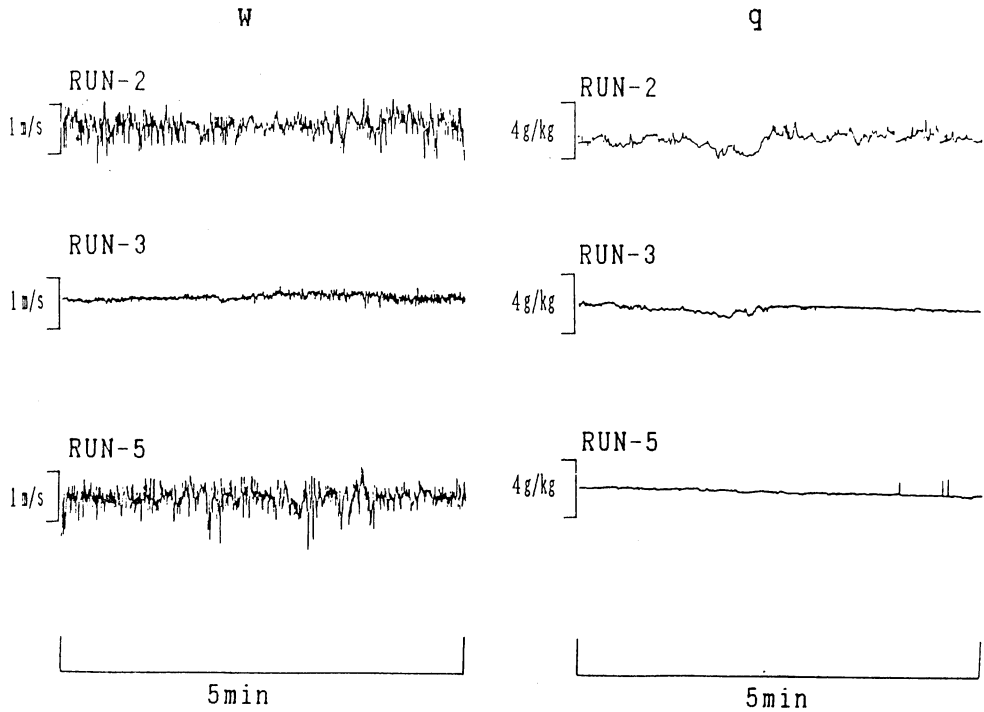
2) 風速の鉛直成分の変動と比湿の変動の関係

昼間、日没頃、夜間の3つの場合について、風速の鉛直成分 w と比湿 q の変動のモニター記録を第6図に示す。図を見ると明らかのように、 w の変動幅は、昼間と夜間において大きく日没頃は小さかった。また q については、昼間、日没頃、夜間と小さくなった。

変動の様子について見てみると、昼間の不安定な状態では q は w の正負によって非対称な変化をしているのがわかる。 $w > 0$ のときは q は急速に高濃度に変化するが、 $w < 0$ のときには、 q は低濃度に臨界のレベルがあるような変化をしている。このことは、 q の変動成分の確率分布が植物群落上の不安



第5図 観測中の平均風向・風速の変化 (1987.10.20)



第6図 風速の鉛直成分 w 、比湿 q の変動の記録 (1987. 10. 20)

定気層では、正に歪んでいることを意味している。

第6図に示したモニター記録から、赤外線ガス分析計が水蒸気変動計としてうまく作動していることがわかった。

3) スペクトル曲線

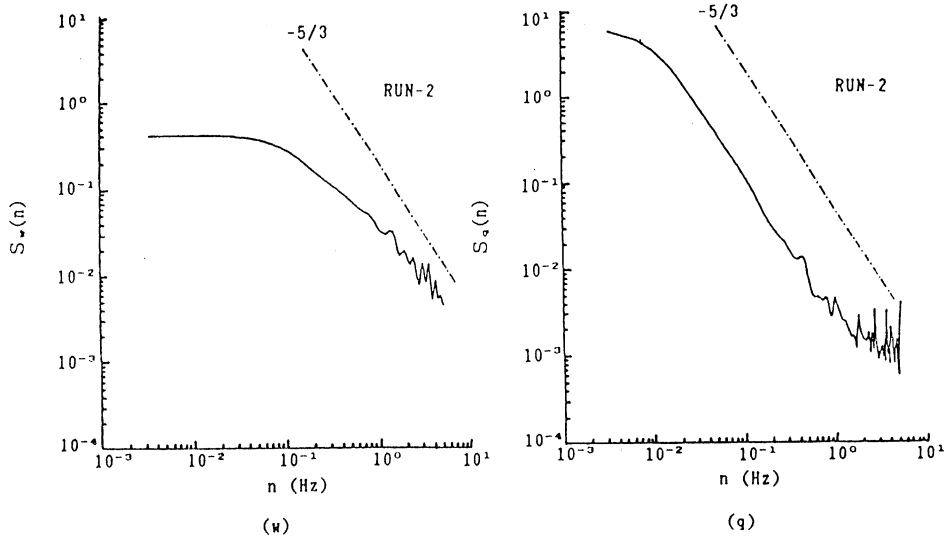
乱流理論における慣性小領域 (すなわちスペクトルの高周波数側) では、風速の鉛直成分のパワースペクトル密度は $-5/3$ 乗則に従うことが知られている。また、比湿変動のパワースペクトル密度は、風速の鉛直成分のスペクトルに類似していると言われているが、計測器の開発が遅れているためにスペクトル解析の報告はまだ少ない。

RUN-2 についてのパワースペクトルの解析例を第7図に示す。図中の一点破線は $-5/3$ の傾きを持つ。この図からわかるように、風速の鉛直成分、比湿ともに慣性小領域においてパワースペクトル密度が $-5/3$ 乗則で近似できることが確認された。よって、赤外線ガス分析計は、少なくとも 3 Hz 程度の比湿変動にまで追従していると考えられる。

つぎに、昼間、日没頃、夜間についてそれぞれエネルギースペクトルを求めた結果が第8図である。

風速の鉛直成分のエネルギースペクトルのピークは、RUN-2では0.75 Hz、RUN-3では0.02 Hz、RUN-5では0.075 Hzにあらわれた。また、比湿のエネルギースペクトルにおいては、RUN-2では0.01 Hz、RUN-3では2 Hz、RUN-5では2 Hzにピークがあらわれた。この両者を比較すると、昼から夜になるにつれて、風速の鉛直成分のエネルギースペクトルのピークは高周波数領域から低周波数側に移動し、比湿のエネルギースペクトルのピークは低周波数領域から高周波数側に移動している。また、それぞれのRUNについて、風速の鉛直成分と比湿のエネルギースペクトル曲線の形を比較すると、一方はもう一方を左右逆にした形にはよなっている。

第9図は、風速の鉛直成分と比湿のコスペクトル曲線の変化を示している。図から明らかのように、フラックスに寄与している臨界周波数は $n_L =$



第7図 風速の鉛直成分 w 、比湿 q のパワースペクトル密度 (1987. 10. 20)

0.005 Hz, $n_H = 3$ Hz 程度である。そして、フラックスに最も寄与している周波数は約 0.15 Hz であり、1 Hz 以下の周波数成分がフラックスの95%以上を占めていることが明らかである。

このようなスペクトル解析結果は、赤外線ガス分析計を超音波風速計と組み合わせて使用すれば、水蒸気フラックスが渦相関法で十分正確に測定できることを意味している。

4) 評価時間による水蒸気輸送量(蒸発散量)の誤差

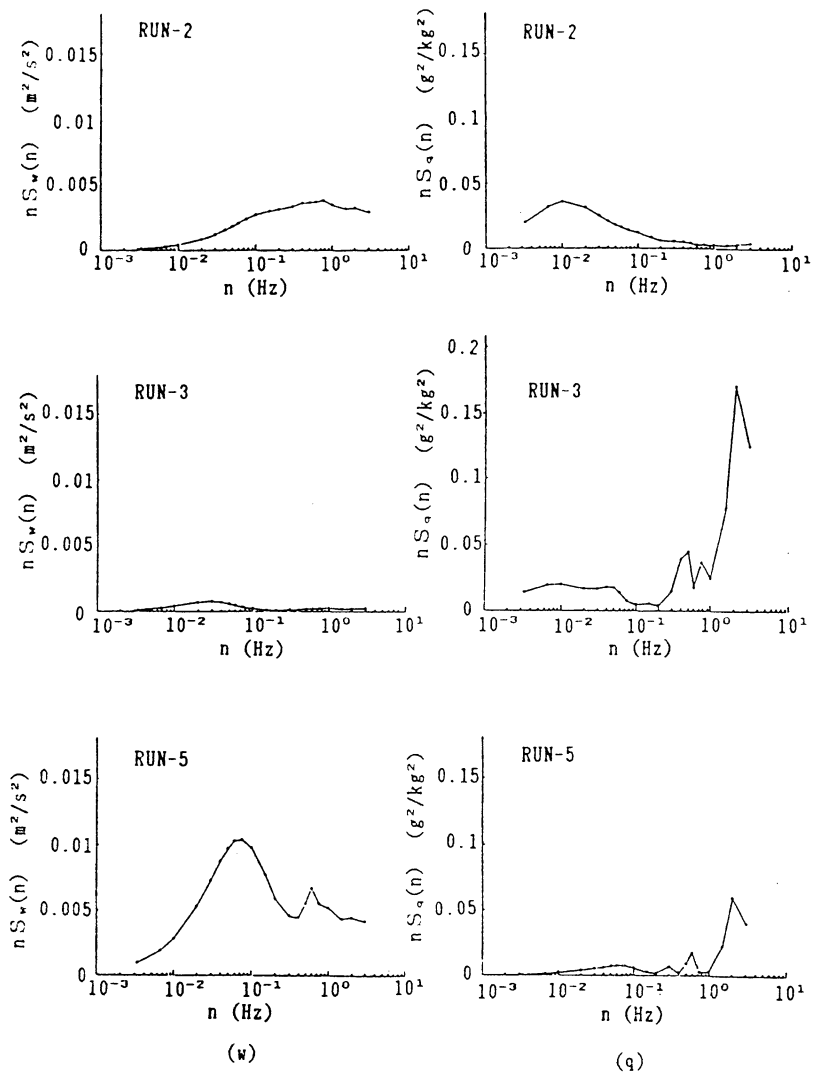
渦相関法によりフラックスを求めるとき、最も問題になるのは、観測時間 (sampling duration) と評価時間 (averaging time) をどうするかという点である。観測時間について竹内 (1976) は、接地気層については“気象変化の少ない日中で10~30分”としており、このことから考えると、今回の研究における1つのRUNの長さ15分は妥当な長さであったと言える。一方、評価時間については、それぞれの現象の解析上の要請から決定される一方、現象を計測する測定器の特性に起因する固有の値を有しており、一概にその長さを決定することはできない。

そこで今回は、評価時間として900秒、450秒、300秒、180秒、60秒の5通りの長さを用いて、水蒸

気輸送量(蒸発散量)を計算した。その結果を示したのが第10図である。図から明らかなように、蒸発散量の変化は評価時間が900秒の場合を除き類似しており、評価時間による蒸発散量の誤差は昼に最大で時間がたつにつれ小さくなっている。このような蒸発散量の誤差を生じる原因として、2.6 μm 吸収帯の温度依存性があげられる。第2図をみると、赤外線ガス分析計の出力電圧が温度によって変化することがわかる。これは比湿変動の測定に用いている2.6 μm 吸収帯が温度の影響を受けるため、気温変動による出力電圧の変動を比湿の変動として含んでしまう危険性がある。

5) 渦相関法による蒸発散量とライシメータ蒸発散量の比較

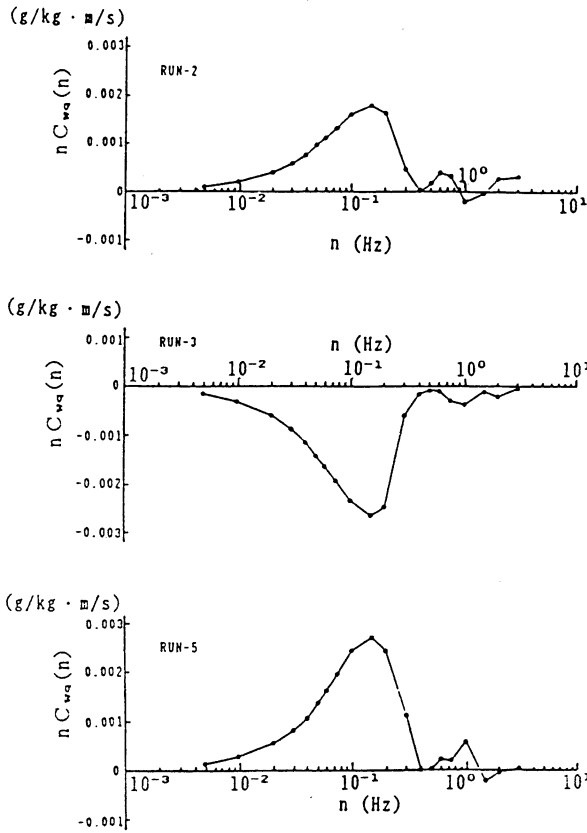
第10図において、ライシメータ蒸発散量の変化を示し、渦相関法による蒸発散量と比較している。ライシメータ蒸発散量は1時間平均値であり、15分間のデータから求めた渦相関法による蒸発散量とは観測時間が異なる。また、得られたライシメータ蒸発散量が測定精度の0.16mmよりも小さな変化しかしていないことから、両者を厳密に比較することはできない。しかし、おおよその傾向は知ることができる。



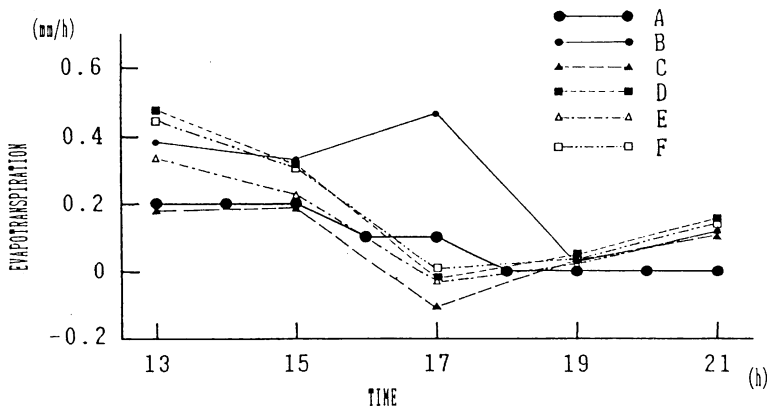
第8図 風速の鉛直成分 w 、比湿 q のエネルギースペクトルの変化 (1987. 10. 20)

渦相関法において、蒸発散量の変化の様子が他の場合とあまりにも違うことから、評価時間を900秒とした場合を除くと、RUN-3における蒸発散量は、評価時間を60秒とした場合は正の値をとり、他の評価時間の場合は負の値をとっている。また、ライシメータ蒸発散量が0.1mm/hであることから、水蒸気は上向きに輸送されていたという結果が得られる。すでに述べた風速の鉛直成分と比湿のコスペ

クトルでは、RUN-3において水蒸気は下向きに輸送されていたという結果が出ている。このような結果が生じた原因として、渦相関法とライシメータ法の観測時間の違いが考えられる。17時00分頃は気温の変化が激しく、また17時00分頃を境に放射量の低下が止まりほとんど0に等しくなっている。すなわち、17時00分から18時00分の間の蒸発散は一様ではなかったと考えられる。よってRUN-3におい



第9図 風速の鉛直成分と比湿のコスペクトルの変化 (1987.10.20)



第10図 渦相関法による蒸発散量とライシメータ蒸発散量の変化(1987.10.20)

A : ウエイングライシメータ

B ~ F : 渦相関法

評価時間 B : 900秒

C : 450秒 D : 300秒

E : 180秒 F : 60秒

て15分間のデータである渦相関法からの蒸発散量と60分間のデータからのライシメータ蒸発散量を直接比較するには無理がある。

第5図と第10図を見ると、水平成分の風速が大きいとき、すなわちRUN-1とRUN-5において、ライシメータ蒸発散量と渦相関法による蒸発散量の差が大きいことがわかる。これは、水平成分の風が気温の急激な変動をもたらし、前述したような2.6 μm 吸収帯の温度依存性という理由から、渦相関法による蒸発散量を実蒸発散量に対し過大評価させているからだと考えられる。

次に、各評価時間ごとにライシメータ蒸発散量と比較する。前述した理由からRUN-3を除いて考えると、渦相関法による蒸発散量 (E_{vdd}) とライシメータ蒸発散量 (E_{lys}) について、評価時間が180秒の場合に両者の関係において、

$$E_{lys} = 1.05E_{vdd} + 0.07$$

が得られた。この係数1.05は、5通りの評価時間について求められた係数の中で最も1に近かった。よって、ライシメータ蒸発散量が実蒸発散量に等しいと考えるならば、今回の野外観測においては、評価時間として180秒を用いるのが適当であると考えられる。

V おわりに

水蒸気輸送量の直接測定のために赤外線ガス分析計を超音波風速計と組み合わせて野外観測を行った結果、次のようなことがわかった。

- 1) 赤外線ガス分析計は、少なくとも3 Hz程度の比湿変動にまで追従している。
- 2) 渦相関法による蒸発散量における評価時間の違いによる誤差、実蒸発散量(ライシメータ蒸発散量)との差などの原因のひとつとして、2.6 μm 吸収帯の温度依存性の影響が考えられる。
- 3) 水蒸気フラックスに寄与している周波数は0.005 Hz ~ 3 Hz程度であり、1 Hz以下の周波数成分がフラックスの95%以上を占めている。
- 4) 渦相関法において、評価時間を180秒とした場合の蒸発散量が、最も実蒸発散量に近い変化を示

した。

このような結果から、赤外線ガス分析計が渦相関法に十分通用できる性能を有していることがわかった。しかし、2.6 μm 吸収帯の温度依存性など解明すべき事項が残っており、今後このような基本的な問題の追求はもちろん、いろいろな気象状態、地表面の状態での水蒸気輸送量の測定などの実用面についてや、観測時間や評価時間などの解析上の問題についても力を注ぐ必要がある。

謝 辞

本研究は著者の一人である中島 誠の筑波大学第一学群自然科学類の昭和62年度卒業研究として行われたものである。筑波大学地球科学系の水文学分野の諸先生方に有益なご助言を頂いた。赤外線ガス分析計の検定のおりに、人工光ガスキャビネットの使用を快くお許し下さった国立公害研究所の大政謙次氏に感謝します。観測および解析を進めるにあたっては、水理実験センターの鳥谷 均技官、地球科学研究科の那須野正明氏のご助力を得た。ここに記して、皆様にお礼申し上げます。

文 献

- 大滝英治・松井哲司・瀬尾琢郎 (1985) : 炭酸ガス変動計の試作とその乱流輸送研究への応用。農業気象, **41**, 1-7.
- 大滝英治・瀬尾琢郎・松井哲司 (1987) : 二酸化炭素変動計の開発。天気, **34**, 293-304.
- 古藤田一雄 (1984) : 草地の熱収支と蒸発散。地理評, **57**, 611-627.
- 古藤田一雄・甲斐憲次・中川慎治 (1983) : 気象日報作成装置について。筑波大学水理実験センター報告, **7**, 75-85.
- 古藤田一雄・佐倉保夫・林 陽生・甲斐憲次 (1978) : 水理実験センターにおける熱収支・水収支観測システムとデータ収録・処理について。筑波大学水理実験センター報告, **2**, 65-89.
- 竹内清秀 (1976) : 大気乱流。気象研究ノート, **128**, 91-101.
- 日野幹雄 (1986) : 『スペクトル解析』朝倉書店, 300p.
- Aiga, I., Omasa, K. and Matsumoto, S. (1984) : Phyto-

- Studies. *Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud.*, **66**, 133-154.
- Chen, H.S. and Mitsuta, Y. (1967) : An infrared absorption hygrometer and its application to the study of water vapor flux near the ground. *Special Contributions, Geophys. Inst., Kyoto Univ.*, **7**, 83-94.
- Elegina, L.G. (1962) : Optical device for measuring the turbulent pulsations of humidity. *Izvestiya, Geophys. Ser.*, 1100-1107.
- Hyson, P. and Hicks, B.B. (1975) : A single-beam infrared hygrometer for evaporation measurement. *J. Appl. Met.*, **14**, 301-307.
- Miyake, M. and McBean, G. (1970) : On the measurement of vertical humidity transport over land. *Boundary-Layer Meteorol.*, **1**, 88-101.
- Ohtaki, E. (1984) : Application of an infrared carbon dioxide and humidity instrument to studies of turbulent transport. *Boundary-Layer Meteorol.*, **29**, 85-107.
- Ohtaki, E. and Seo, T. (1976) : Infrared device for measurement of carbon dioxide fluctuations under field conditions. II. Double beam system. *Ber. Ohara Inst. landw. Biol. Okayama Univ.*, **16**, 183-190.
- Ohtaki, E. and Matsui, T. (1982) : Infrared device for simultaneous measurement of fluctuations of atmospheric carbon dioxide and water vapor. *Boundary-Layer Meteorol.*, **24**, 109-119.
- Seo, T. and Ohtaki, E. (1976) : Infrared device for measurement of carbon dioxide fluctuations under field conditions. III. Adaptation to infrared hygrometry. *Ber. Ohara Inst. landaw. Biol. Okayama Univ.*, **16**, 191-198.