

裸地面におけるエネルギー輸送の研究

里田 弘志・文字 信貴・光 田 寧

ENERGY TRANSFER AT THE AIR-GROUND INTERFACE

By Hiroshi SATODA, Nobutaka MONJI and Yasushi MITSUTA

Synopsis

An air-ground interaction observing facility is developed for the long term observation of the energy and water exchange between the atmosphere and the earth. To search for simple and reliable method to measure the turbulent energy flux near the ground, an intensive observation was carried out including the turbulent fluctuations and mean quantities near the ground. The obtained results are as follows: 1) The effect of humidity fluctuations is found to be important in measuring the sensible heat flux accurately. 2) The layer very close to the surface is too unsteady most of the time to apply the similarity law. 3) The estimation of the surface temperature through the bulk method is in agreement with the measurement with the radiation thermometer within 2 degrees. The estimated surface relative humidity and the measured relative humidity at 5 cm height is in good agreement, suggesting the usefulness of the relative humidity in the investigation of the humidity field near the surface.

1. 序

地表面における熱収支および水収支は局所的な気候を左右して生活環境や農業などの生産活動に影響を与え、さらには気候変動を支配する。地表面付近の熱の移動と水の移動は互いに深い関連があり、蒸発、降水などによる熱の移動、土中水分による蒸発の支配、又逆に地面付近の大気乱流による蒸発の支配、またこれらの活動の根源となる太陽放射など、関連量の測定を総て行う事によって始めて地表面でのエネルギー交換過程を明らかにする事ができる。特に、その交換過程は長期間にわたって連続観測を行う事によってのみ明らかとすることができる。その様な地表面におけるエネルギーや水の移動の機構を調べる事を目的として、京都大学防災研究所の近くに地空相互作用実験設備を設け観測を開始した。

地表面におけるエネルギー輸送を種々の地域で長期間観測する事が気候変動などの研究にとっては重要であるが、そのためには簡易かつ安定した出力が得られる方法によって顕熱潜熱の輸送量が測定される必要がある。そのような方法としては充分なものがまだ開発されておらず、特に陸上での測定については種々の問題が解決されていない。

従来、直接測定を含めた接地気層内の乱流輸送の研究はいくつか行われて来ており、最も良くまとまったものとしては、米国の空軍の研究グループのカンサスの平原における大規模な観測的研究¹⁾²⁾がある。運動量、顕熱の輸送に関しては風速や温度分布との関係を確立した点においては優れた研究であったが、湿度に関する測定を欠いているため、エネルギー輸送の観点からは不十分なものと言わざるを得ない。

熱収支に重点を置いた研究としては Mitsuta 他³⁾⁴⁾や Hanafusa⁵⁾が潮岬において熱電対乾湿計を用いて湿度変動を測って行った一連の観測がある。その結果、熱収支は一日平均で考えると成立しているが、2時間程度の平均時間では不平衡が大きく残り、その原因は地表面近くの極く薄い層内に極端な勾配ができる事によるものであろうと推定された。最近でも潜熱輸送の直接測定を含めたエネルギー輸送の研究は極めて少

なく、例えばオーストラリアの乾燥地帯における Leuning 他⁶⁾の Lyman- α 温度計を用いたものや、熱帯雨林のキャノピー上における Shuttleworth 他⁷⁾による赤外線湿度計を用いた研究があるが、エネルギー輸送のモデル化を行えるためには今後様々な条件下のデータの蓄積が必要である。

この研究の目的は、地面の極く近傍において、渦相関法によって乱流輸送量を直接精度良く求める事を試み、同時に地表面付近の温度湿度分布、更には放射収支の測定を行って、それらの量の間の関係を求め、輸送量のパラメタリゼーションにつながる基礎資料を得る事である。

2. 地空相互作用観測設備

太陽からの放射、地表から大気への顕熱潜熱の輸送などのエネルギー収支、更に降雨、蒸発、地中への浸透などの水収支とを同時に長期間観測するための設備を京都大学防災研究所の水資源研究センター、内水災害研究部門及び暴風雨災害部門の協力の下に開発中であり、その一部が既に完成し、測定が開始されている。Fig. 1 には、その設備の展開されている宇治市の京大グラウンド南側用地付近の地形図を示す。また Table 1 及び Fig. 2 には、観測地内の測器の種類と配置状況を示してある。観測の対象としている露地は東西に約 70 m、南北に約 50 m の広さを持つ平坦な土地であり、現在は表面の凸凹が数 cm 程度の裸地である。Fig. 2 に示すように敷地のほぼ中央に高さ 6 m の測風塔がある。測風塔の頂部には 2 次元の超音波風速計とプロペラ型風向風速計及び水晶温度計を設置し、常時平均風向風速、平均気温の測定を行っている。

その西約 4 m の位置に、乱流輸送量測定用の高さ 1.5 m のポールを建てている。そのポール上には、大気乱流測定用計測器、即ち、3 次元超音波風速温度計、赤外線湿度計、熱電対乾湿度計などを観測時に設置するように設計されている。乱流計測用のポールは現在 2 基あり、南北 20 m 間を 5 m 毎に移動して観測できるようにポールの基礎の設置と配線が行われている。乱流観測には特に地表面の均一性が要求されるため、ポールの西側の整地には特に配慮が必要である。なお、敷地の西端は高度差約 3 m の崖となって落ち込んでいるが、西端から乱流測定ポールまでは 30 m 以上の距離があるため、北西から南東にかけての風向の範囲内を選べば高さの低い乱流計測器は敷地端から発達する内部境界層の中にあると考える事ができる。なお、他の風向については地形の影響が現れる事が予想されるため、乱流観測にはあまり適さない。しかし、特殊地形における状況の把握も研究の目的の一部である。今回、昭和59年12月から60年1月にかけて行った実験時には、西風の場合を選んで、乱流観測ポール近くに地表面温度計や地表近くの温湿度測定用の感部も合わせて設置して記録をとった(第4章参照)。

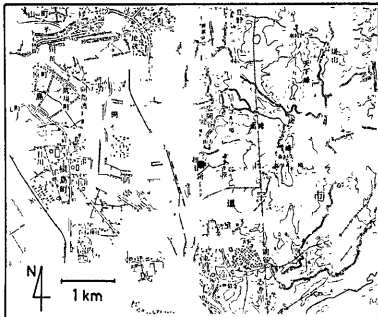


Fig. 1 Location of the observation facility (dot), and the surrounding topography

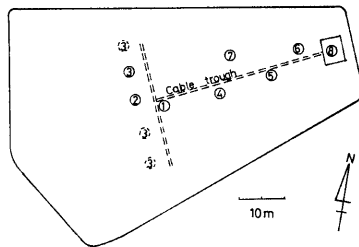


Fig. 2 Outline of the air-ground interaction observing facility. The numbers correspond to the numbers in Table 1. ① is the 6 m tower, ⑧ the observation hut. The turbulent measurement mast ③ is movable.

Table 1 Instruments and their locations at the air-ground interaction observing facility

Instrument	Manufacturer	Model	Position in Fig. 2	Height (m)	Remarks
3-D sonic anemometer thermometer (A)	Kaijo Denki	DAT-300	2	1.5	
Infrared hygrometer (A)	Kaijo Denki	AH-100	2	1.5	wave length 2.605 μ m
Thermocouple psychrometer (A)	Kaijo Denki	PY-100	2	1.5	50 μ m copper-constantan
3-D sonic anemometer thermometer (B)	Kaijo Denki	DAT-300	3	1.5	
Infrared hygrometer (B)	Kaijo Denki	AH-100	3	1.5	
Thermocouple psychrometer (B)	Kaijo Denki	PY-100	3	1.5	
2-D sonic anemometer	Kaijo Denki	SA-200	1	6	
Propeller anemometer	Ogasawara		1	6	
Quarz thermometer	Ogasawara	TR-800	1	6	
Evaporation pan	Ikeda	APG-100	4	0	class A pan (ϕ 120 cm)
Net radiometer	Eko	CN-1	5	1.5	Funk type
Pyranometer (A)	Eko	MS-43F	5	1.5	
Pyranometer (B)	Eko	MS-43F	5	1.5	
Radiation thermometer	Chino	pyloscope L	5	1.5	surface temperature measurement
Rain gauge	Ogasawara	RE-30E	4	0	tipping bucket 0.5 mm
Rainfall intensity recorder	Ogasawara	RE-30E	4		
Heat flow transducer	Eko	CN-81	5	-0.1, -0.3	
Soil thermometer	M-system Giken	MC-160	5	-0.05, -0.1 -0.3, -1.0	platinum
Tentiometer	Kyowa Dengyo	BPT-1KBS	6	-0.1, -0.2	pressure transducer
Platinum resistance thermometer	M-system Giken	MC-160	8		room temperature

中央の測風塔から東へ約14m離れた位置に、転倒マス型雨量計、降雨強度計及び大型蒸発計が設置してある。またそこから18m東の位置には、テンシヨメータを付けた土壌水分計を2台を地下10cmと20cmの所に埋設した。

測風塔から東へ約26m離れた位置に放射関係の測器が配置してある。即ち、フンク型の放射収支計、日射計、及び地表面に向けた赤外線放射温度計である。日射計は2台あり、上下方向に設置してアルベードの測定が可能である。

放射計のほぼ真下の土中には、深さ5, 10, 30, 100cmに白金線抵抗温度計を埋設して土中の温度プロフィールを、更にその近くで深さ10及び30cmに熱電堆型熱流板を埋設して地中の熱の移動の測定を行っている。

総ての感部からの信号は、敷地ほぼ中央を通る信号用の溝を通して東端に設けた観測室に導き、室内で磁気テープ及び打点記録計、その他の自記記録計に記録する。室内にはアネロイド自記気圧計が設置されている。観測は連続して行い、記録は中断することなく収録されるが、乱流観測については、特定の重点観測期間1～2週間を数ヶ月毎に設けて測定を行うことにしている。その第1回目の観測については第4章に詳しく述べた。その他の計測器も随時観測目的に合わせて設置可能である。

なお今後の計画として、測風塔上に風速温度湿度のプロフィール測定用の測器の設置、地表面付近の熱構造を詳しく調べるためのレーザー屈折計などの設置を行い、地表面における熱収支、水収支の長期間にわたる測定を行う予定である。

3. 陸上におけるバルク法の問題点

この研究の最終的な目標は、地表面上でのエネルギー輸送を容易に入手可能な気象データから簡単な方法により求める手法を開発し、気候学的な研究に利用可能なようにする事である。現在最も簡単な輸送量計算法はバルク法と呼ばれ、風速、温度、湿度の一高度における値と地表面（又は水面）における値を用いる方法である。即ち運動量輸送量（ τ ）、顕熱輸送量（ Q_H ）、潜熱輸送量（ Q_E ）はそれぞれ

$$\tau = \rho C_D U^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$Q_H = C_p \rho C_T U (T_0 - T) \dots\dots\dots (2)$$

$$Q_E = L \rho C_q U (q_0 - q) \dots\dots\dots (3)$$

で表わされる。ここに U は風速、 T は温度、 q は比湿、 ρ は空気密度、 C_p は空気の比熱、 L は蒸発の潜熱である。 T_0 、 q_0 はそれぞれ地表面（水面）での温度、比湿を表わす。 C_D 、 C_H 、 C_q はそれぞれバルク輸送係数と呼ばれるが、特に C_D は抵抗係数と名付けられている。これらの値は実験的に予め求めておくべき係数である。

バルク法は最も簡便な方法であるが、いくつかの問題点を含んでいる。まず、 C_D 、 C_T 、 C_q などの係数が常数ではなく、地表面の粗度、風速、大気の安定度などによって変化する事である。海上の値については種々のデータが集められ、モデル化も行われてきている⁸⁾⁹⁾ が、その陸地表面上のように複雑な条件においては問題が多い。海面上などにおいては、水面の粗度も風速の関数としてある程度表わすことができるため、 C_D などは比較モデル化しやすい。上式中の T_0 、 q_0 などは、精度について厳しい条件を課さなければ、水面温度の測定、更に水面直上の大気が水蒸気で飽和しているとの仮定から、水面比湿の決定がある程度可能である。それに対して陸上における場合は一般に条件が複雑で、その応用が困難である。まず、抵抗係数 C_D は地表面の粗度が大きくなるに従って大きくなるが、ある地表面が与えられた場合、 C_D がどんな値をとるかにについては十分な実験結果が整っているとは言えない。 C_T や C_q については更に不明な点が多い。仮にこれらの係数の値が与えられた場合でも、地表面における温度、湿度が観測されている必要がある。表面そのものの温度は測定が困難である事は水上でも陸上でも同じであるが、陸上で、特に表面が複雑

であったり植物が繁っている場合などは、地表面温度の定義さえ難しい事がある。このような場合には、赤外線放射温度計などを用いた遠隔測定以外に適当な方法が見当らない。

地表面の湿度に関しては更に測定は困難である。現在のところ、表面湿度を精度良く測定できる計測器は存在しない。従って(3)式のバルク法は、そのままの形で陸上では使用できないことになる。何らかの手段、しかも簡単な方法で q_0 が推定できる方法が見出される必要があるが、そのためには、土中の水分の性質も含め、地表面付近での水蒸気の振る舞いについての詳細な研究が進められなければならない。次章で行った観測もその目的を達成するための一環である。

4. エネルギー輸送量の観測

4.1 観測方法

第2章で述べた地空相互作用観測設備露場で、1984年12月26, 27, 28日, 及び1985年1月5, 9日の計5

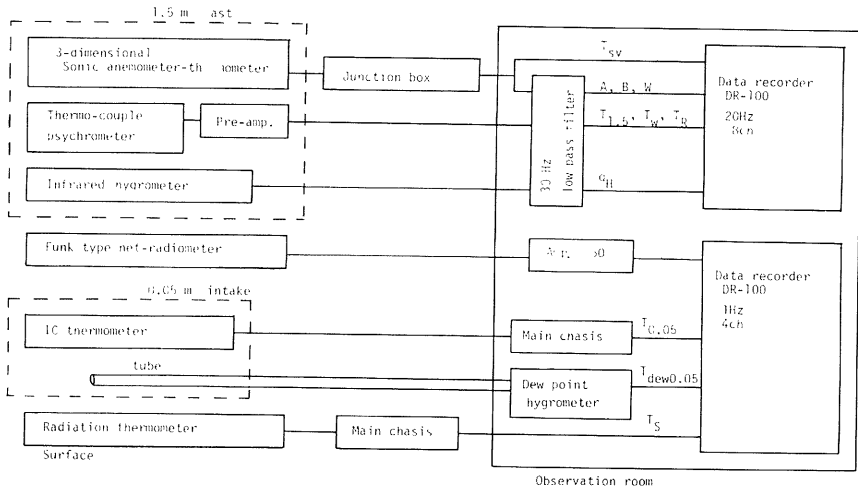


Fig. 3 Blockdiagram for the observation of energy flux

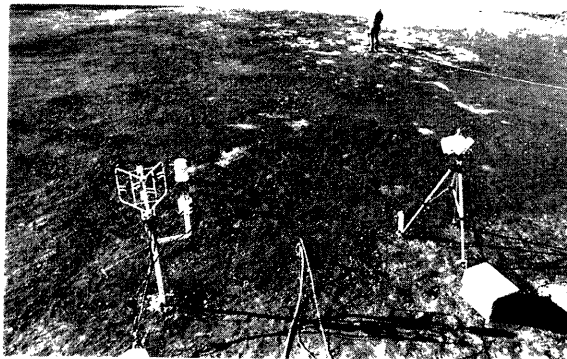


Photo. 1 The sensors of the turbulent transports (left), temperature and humidity sensor at $z=5$ cm (middle), and radiation thermometer (right)

口同、乱流輸送量の測定を含めた強化観測を行った。この場合、乱流輸送の測定は中央の一点のみで行った。その時の観測のブロックダイアグラムは Fig. 3に、また観測の様子を Photo 1, 2 に示す。

風速の変動及び平均値の測定は、高さ 1.5 m に 3 次元超音波風速計（海上電機、DAT-300）を設置して行った。温度の変動は直径 50 μm の銅・コンスタンタン線の熱電対湿度計を用いた。温度の変動の測定には 2 種類の湿度計を用いた。一つは熱電対乾湿計であり、これは安定した検定値を示すが、0.1 Hz より高周波数の変動には十分に追従しない⁽¹⁰⁾。もう一つは赤外線湿度計（海上電機、AH-100）である。2.605 μm の波長を用い、光路長 20 cm を有している測器であり、高周波数の変動には良い追従を示すが、その感度を長期間安定に保つ事ができない。また時定数 300 sec のハイパスフィルターによって変動成分のみを測定する測器である。湿度の変動の測定はこの両者を組合わせて行う方法（次節）を用いた。これらの輸送量測定測器の配置は、Photo 2 に示したように、熱電対乾湿計は超音波風速計の感部の支柱に、赤外線湿度計は 35 cm 横に離れたところに設置した。

平均温度の測定は、上述した 1.5 m の高さの熱電対乾湿計の乾球の平均値 ($T_{1.5}$) と、地上 5 cm の高さにおける IC 湿度計 ($T_{0.05}$) を用いた。後者は測温 IC (アナログデバイス社、AD590J) を用いて自作した温度計で、感部には放射の影響を避けるため金属の 2 重円筒を用いて通風を行った。

平均湿度の測定は上述した熱電対乾湿計の平均値 ($q_{1.5}$) と、地上 5 cm の高さに吸気口を設置した露点湿度計 (EG & G 社、Model 660) ($q_{0.05}$) を用いた。吸気口は温度計の吸気口と同一であり、分岐して防塵フィルターを通した後、テフロン管を用いて観測室内の感部に空気を導いて測定した。

地表面温度 (T_s) は赤外線放射温度計 (Barns 社、PRT-5) を用いて測定した。乱流変動観測装置の取り付け支柱の北側 3.5 m の場所に、高さが 1.5 m、入射光が俯角 40° で入射するように設置した。感部の視界は 2° であり、地表の主軸の径がそれぞれ 12 cm、8 cm の長円形の領域の平均地表面温度が測定される事になる。

記録は観測室内で 2 台のカセットデータレコーダ (TEAC DR-100) を用いて行った。一台には乱流変動量を 30 Hz のローパスフィルターを通じて 20 Hz でサンプリングして収録した。20 分間毎にデータ収録を開始し、13分間収録、7 分間中断準備の繰り返しを連続して行った。地表面の状態は裸地で晴天が続いた後である。1月5日の午後は13時頃から約30分間測器の風上側約 30 m にわたって、地表面条件の急変に対する接地気圧の応答を調べるために散水を行った。

4.2 解析方法

観測したデータのうち、サンプリング周波数 20 Hz で収録した乱流変動データは、解析の前処理として 15 個ずつ平均して評価時間 0.75 sec のデータに変換した。これは高周波のノイズの除去とスペクトル計算に最も多くのサンプルを用いるため、有効な形にするための平均である。変換したデータを基にして、乱流輸送量、スペクトル解析、変動の標準偏差を計算した。計算にはミニコンピュータ (日本ミニコン社、NOVA

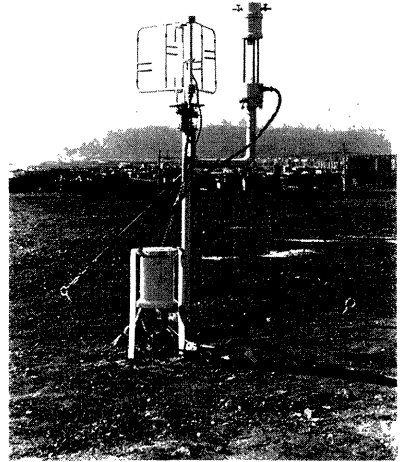


Photo. 2 Turbulence sensors. Sonic anemometer-thermometer (left), thermocouple psychrometer (in the sonic) and infrared hygrometer (right)

01)を用いた。

前述のように、1984年12月26, 27, 28日及び1985年1月5, 9日の5日間の観測で、1 Run 13分のを合計94例収録することができた。このうち風向が超音波風速計の正面から $\pm 70^\circ$ の範囲に入っていること、及び主な測器に欠測が無い条件のものは43例であり、それらについて解析を行った。

湿度の変動を求めるには赤外線湿度計の出力を用いたが、その感度は熱電対乾湿計の出力との比較によって求めなければならない。そのためには、乾湿計による比湿と赤外線湿度計の電圧出力パワースペクトルをFFTを用いて計算し、両者の周波数応答特性に問題のない周波数範囲0.01~0.1 Hzのパワースペクトルの比を求め、その平均値の平方根をもって赤外線湿度計の比湿-電圧変換係数とすることとした。スペクトル解析の結果は次節で述べる。

4.3 顕熱・潜熱輸送量に及ぼす湿度変動の影響

顕熱・潜熱の乱流輸送量は、それぞれ次式に基づいて計算を行った。

$$Q_H = (\rho w) \overline{(C_p T')} \dots\dots\dots (4)$$

$$Q_N = L (\rho w) \overline{q'} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 ρ は湿潤空気密度を表わし、次の状態方程式を満たす。

$$P = \rho R_d (1 + C_q) T \dots\dots\dots (6)$$

但し、 R_d は乾燥空気の気体定数、 $C = 0.622$ である。湿潤空気の場合は、 ρ 、 C_p などが比湿によって変化するから、(6)式の各項と平均値とそれからのずれに分けて展開し、更に ρ' についてその最大項に比べて 10^{-2} 未満の量を無視すると

$$\bar{\rho} = \frac{\bar{P}}{R_d (1 + C_q) \bar{T}} \dots\dots\dots (7)$$

$$\rho' = \bar{\rho} \left(-\frac{T'}{\bar{T}} - \frac{q'}{1 + C_q} + \frac{T'^2}{\bar{T}^2} - \frac{T'^2}{\bar{T}^2} \right) \dots\dots\dots (8)$$

のように書ける。また、湿潤空気の定圧比熱 C_p は、比湿の関数として次の式で表わされる。

$$C_p = C_{pd} + (C_{pv} - C_{pd}) q \dots\dots\dots (9)$$

C_{pd} は乾燥空気の定圧比熱、 C_{pv} は水蒸気の定圧比熱である。 C_{pv} の値は常温常圧では温度気圧に依らず一定 (1006 J/kg/K) である。 C_{pv} は 1859 (0℃, 0 mb)~1910 (40℃, 飽和) J/kg/K の間で変化するが、1 Run の間の変化は無視できるとして Run 毎に一定値を与える。(7), (8), (9)を用い、測定誤差に埋れる微小項を無視すると(4)式は

$$\begin{aligned} Q_H = & \underbrace{\bar{\rho} C_{pd} \overline{w' T'}}_{\textcircled{1}} + \underbrace{\bar{\rho} (C_{pv} - C_{pd}) \bar{T} \overline{w' q'}}_{\textcircled{2}} + \underbrace{\bar{\rho} (C_{pv} - C_{pd}) \bar{q} \overline{w' T'}}_{\textcircled{3}} \\ & + \underbrace{\rho C_{pd} \overline{w' T'^2}}_{\textcircled{4}} - \underbrace{\rho C_{pd} \bar{W} \overline{T'^2}}_{\textcircled{5}} \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

と書ける¹¹⁾。 Q_H を1%の精度で求めるためには、①, ②項は常に計算すべき項である。③項は $|q| \geq 10^{-2.5}$ kg/kg の場合に計算すべきであり、④項は $|T'| \geq 1^\circ\text{C}$ の時、⑤項は $|T'| \geq 1^\circ\text{C}$ で $|\bar{W}| \sim |w'|$ と見なさなくてはならない時に計算すべき項である。

Q_N についても同様に次のように書ける。

$$Q_N = \underbrace{\bar{\rho} L \overline{w' q'}}_{\textcircled{1}} + \underbrace{\bar{\rho} L \overline{w' q' T'}}_{\textcircled{2}} \dots\dots\dots (11)$$

このうち②項は $|T'| \geq 1^\circ\text{C}$ の場合に計算すべき項である。 L についてはRun 毎に平均気温に対応する定数を与えた。

4.4 観測結果

観測や解析が現象の変動周波数範囲を充分にとらえているかどうかを調べるために、スペクトル解析を

行った。特に湿度については、周波数特性の異なる2種類の測器を使っているため、全データについて調べた。その中で不安定時の湿度と風速成分のパワースペクトル及び両者の間のコスペクトルを Fig. 4 に示す。なお、赤外線湿度計の値は、前節で述べた方法で較正した値で示されている。パワースペクトルの図から明らかに、熱電対乾湿計の出力は赤外線湿度に比べて高周波数側で低下している。しかも、水蒸気輸送のコスペクトルは、熱電対乾湿計を用いた場合は 0.08 Hz ぐらいより高い周波数側では符号が逆転している事がわかる。これは塚本・光田⁹⁾が指摘しているように、乾湿計の出力が振幅のみでなく位相にも遅れが生じるために現れた結果である。これらの結果を考慮し、この高度では熱電対乾湿球温度計には限界があるものと考え、今回の解析には比湿の変動としては赤外線湿度計の出力を使用する事にした。但し、出力の検定には前述の方法で熱電対乾湿計を用いた。

次に 4.3 節に示した顕熱・潜熱の補正の大きさについて考察する。(10) 及び (11) 式に示した項のうち、 Q_H の最後の項 ⑤ を除いた総ての項の計算を行ってみた。その結果、 Q_H については補正值は総ての場合に無視できる程度であったが、 Q_H については補正項は第1項程度の大きさとなる事がある、という事がわ

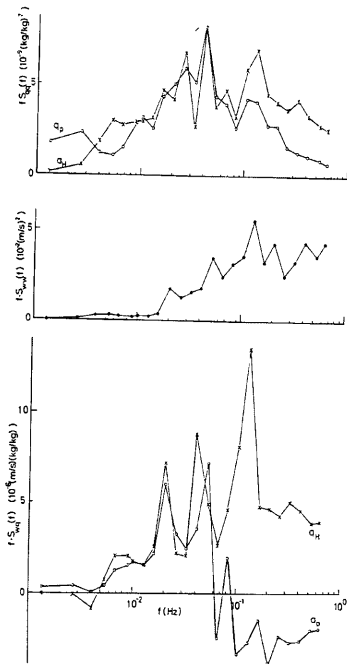


Fig. 4 Examples of the spectra. The humidity power spectra by the psychrometer (q_P) and the infrared hygrometer (q_H) (top), the vertical velocity power spectra (middle) and the cospectra between specific humidity and vertical velocity (bottom).

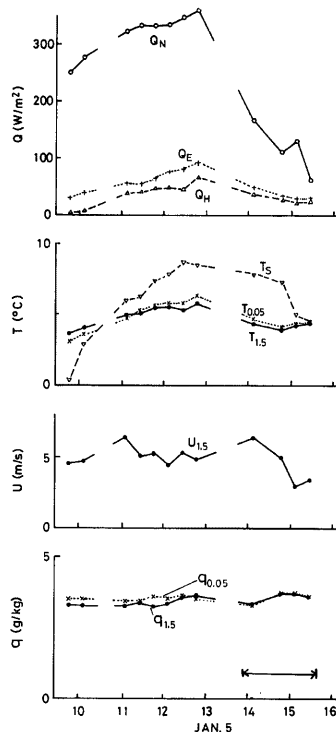


Fig. 5 Time variations of fluxes and mean quantities. See text for the notation.

かった。補正項の中の大小については②項が大きく、③は存在しても1%以下、④についてはほとんど零に近かった。特に②項についてはほとんどの場合10%程度以上の値となり、輸送量を10%以上の精度で求めようとする場合は、少なくとも②項まで補正する必要がある事がわかった。

観測期間中に得られた各観測量の時間変化のうち、Fig. 5 に1月5日のものを示した。冬期であるためあって純放射量は比較的小さく、晴天の日中の最大でも 380 W/m^2 程度である。それに伴って、地表面付近での温度成層が不安定になるのは昼間の正午付近数時間と限られており、最も天気の良い1月5日においても、11時から15時くらいまでの間だけが不安定である。今回は乾湿球を用いている事もあって、湿球が零度付近になる時間帯には観測を行っていない。

顕熱の輸送を見ると、温度が不安定な成層をしている時以外でも上向きの輸送を示している場合がある。この点については接地層の放射に対する応答を調べる上で詳細な検討が必要である。なお潜熱輸送はほとんどの時間について上向きの輸送を示した。

また1月5日の午後に地面に水をまいて湿らせてみたが、その結果は散水量が少なかったためか図からわかるように顕著な変化が現れなかった。この点についても接地層の湿度変化に対する応答の問題として検討を必要とする。

5. 地表面近くの温湿度

第3章で述べたように、地表面における熱交換を簡便な方法で求める方法としてバルク法が用いられる。但し、海面上の測定と異なり、陸上では種々の問題が生じる。まず抵抗係数が場所によって異なり、単純な形で与える事ができない事である。ここでは超音波風速計から求めた摩擦応力 τ と平均風速 U から計算した C_D を風速の関係として Fig. 6 に示した。 C_D は風速の弱い場合には大きくなるが、平均的には 4.7×10^{-3} の値をとる。一方、顕熱の輸送係数 C_H については、超音波風速計と熱電対乾湿計によって

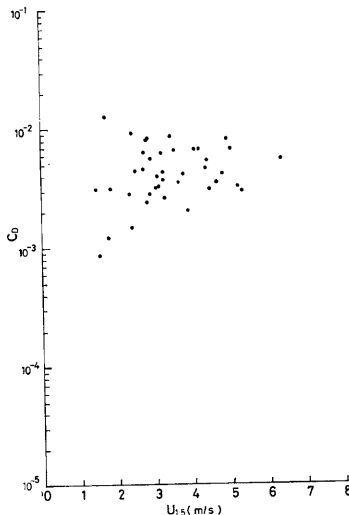


Fig. 6 Drag coefficient as a function of mean wind speed

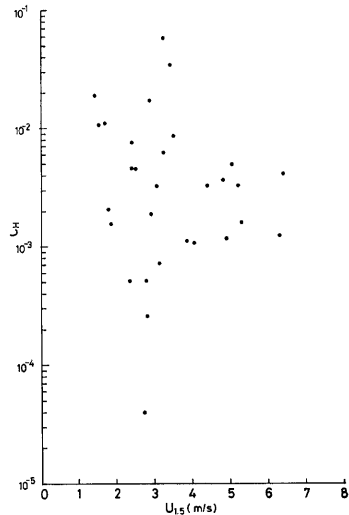


Fig. 7 Bulk transfer coefficient for sensible heat flux as a function of mean wind speed

求めた Q_H , U , T 及び放射温度計から求めた T_s を T_0 として用いて計算した値は非常にばらつきが多い (Fig. 7). Q_H と $T_s - T$ の符号が逆の場合もあって C_H が負の値をとる事もあるが, Fig. 7 には正の値のみ示してある。なお全部の値の平均値は 2.9×10^{-3} であり, C_D と同程度の大きさを持つ。 C_q については, 地表面での値 q_s を求める事が現状ではできないので計算は行っていない。

次に, C_H や C_q に関して, それらが C_D と等しいという仮定を設ける事によって逆に地表面での温湿度の値を求める事を試み, 測定値と比較してみた。(1), (2), (3) 式を書き直せば,

$$T_0 = T + \frac{U}{u_*^2} \frac{Q_H}{\rho C_p} \dots\dots\dots (12)$$

$$q_0 = q + \frac{U}{u_*^2} \frac{Q_H}{\rho L} \dots\dots\dots (13)$$

となる。(12) 式によって推定される T_0 と放射温度計によって測定された地表面温度 T_s の比較を Fig. 8 に示す。両者はおよそ ± 2 度までの誤差が認められるが, 特に著しい系統的な誤差は認められない。

(13) 式を用いて地表面における湿度の推定を試みた。しかしながら, 地表面における q の実測値は得られていないので, 上式の q_s との厳密な比較を行える値がない。そのかわりに地表 5 cm に吸引口を持つ露点温度計の測定結果との比較を行った結果を Fig. 9 に示す。両者の間には何らかの関係があるようにみえる。但し, 大きな例外があり, $q_{0.05}$ が 4.3 g/kg であるのに比べて q_0 は 13.2 g/kg にも達している。これらの関係は, 地表面極く近傍の湿度の分布特性が明らかとなれば更に理解が進むものと考えられる。

次に (12), (13) の q_s , T_s から求めた地表面の相対湿度と $z = 5 \text{ cm}$ における相対湿度の観測結果の比較を Fig. 10 に示す。地面近くの空気の相対湿度は, かなり地表面の相対湿度に近い事もわかる。この例の

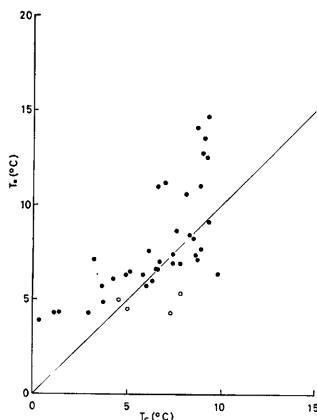


Fig. 8 Comparison between the surface temperature computed by the bulk method and that measured by the radiation thermometer. The open circles indicate the data after the sprinkling of water.

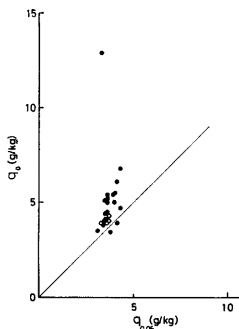


Fig. 9 Comparison between the surface specific humidity computed by the bulk method and that measured by the dew point hygrometer at 5 cm above the ground

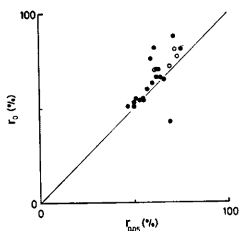


Fig. 10 Comparison between the surface relative humidity computed by the bulk method and that measured at 5 cm above the ground

条件では飽和はしていないが、これよりも更に広い条件も含めると、例えば、夜間は結露して地表は飽和すると思われるので、上記の関係をそのまま一般化する事はできない。なお、今後更に土中の水分量に関する観測も含めた研究を進める事によって、地表面の湿度の性質を明らかにする手がかりを得られる可能性がある。

6. 結 語

大気と地中の相互作用を調べるために設けられた地空相互作用実験設備は、地表面極く近傍におけるエネルギーの交換、水の収支の機構を長期間の観測によって明らかにするための設備である。長期間安定した出力が得られ、しかも単純な平均量からエネルギー交換量を知るためには輸送量のパラメタリゼーションが必要となる。今回の実験では、その第一歩として陸上でのバルク法の適用につながる地表付近の風速、温度、湿度の平均と渦相関法で求めた乱流輸送量との比較を行って次の結果を得た。

- 1) 渦相関法を用いて、顕熱の乱流輸送量を10%以上の精度で求めるためには比湿が輸送量に及ぼす影響を考慮しなければならない。
- 2) 地表面の極く近傍では、日射の変化に伴う気層の変化が激しく、定常状態が得にくいため接地層内の相似則 (Monin-Obukhov 相似則) は成立しにくい可能性がある。
- 3) バルク法の手法を用いて地表面の温度及び湿度の推定を行った。その結果、温度については地表面の温度を $\pm 2^\circ\text{C}$ の精度で推定できる事がわかったが、一部誤差が大きくなる場合も認められた。
- 4) 日中バルク法で逆に求めた地表面付近の相対湿度と $z = 5\text{ cm}$ の相対湿度の間には良い対応関係が認められ、相対湿度については更に研究を進める価値がある事が示唆された。

今後は更に幅広い安定度についてのデータの蓄積が必要であると考えられる。また早朝や夕方などの非定常な場合における接地層の構造とエネルギー輸送機構について更に研究する必要がある。なお、地空相互作用観測設備の充実により、次には水の移動に伴うエネルギー移動も含めたエネルギー交換の研究を進める予定である。

参 考 文 献

- 1) Haugen, D.A., J.C. Kaimal and E.F. Bradley: An experimental study of Reynolds stress and heat flux in the atmospheric surface layer, *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, Vol. 97, 1971, pp. 168-180.
- 2) Businger, J.A., J.C. Wyngaard, Y. Izumi and E.F. Bradley: Flux-profile relationship in the atmospheric surface layer, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 28, 1971, pp. 181-189.
- 3) Mitsuta, Y., T. Hanafusa and T. Maitani: Experimental studies of turbulent transfer processes in the boundary layer over bare soil, *Bull. Disast. Prev. Res. Inst.*, Vol. 19, 1970, pp. 45-58.
- 4) Mitsuta, Y., T. Hanafusa, O. Tsukamoto and H. Kawanishi: A study of energy budget at the air-ground interface, *Bull. Disast. Prev. Res. Inst.*, Vol. 22, 1973, pp. 249-257.
- 5) Hanafusa, T.: Some aspects of turbulent fluxes near the ground, *Contributions, Geophys. Inst., Kyoto Univ.*, Vol. 11, 1971, pp. 57-70.
- 6) Leuning, R., O.T. Denmead, A.R. Lang and E. Ohtaki: Effects of heat and water vapor transport on eddy covariance measurement of CO_2 flux, *Boundary Layer Meteor.*, Vol. 23, 1982, pp. 209-222.
- 7) Shuttleworth, W.J., J.H.C. Gash, C.R. Lloyd, C.J. Moore, J. Roberts, A.O. Marques Filho, G. Fisch, V.P. Silva Filho, M.N.G. Ribeiro, L.C.B. Molion, L.A. De Sá, J.C.A. Nobre, O.M.R.

- Cabral, S.R. Patel, and J.C. De Moraes: Eddy correlation measurements of energy partition for Amazonian forest, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 110, 1984, pp. 1143-1162.
- 8) Kondo, J.: Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, *Boundary Layer Meteor.*, Vol. 9, 1975, pp. 91-112.
- 9) Liu, W.T., K.B. Katsuros and J.A. Businger: Bulk parameterization of air-sea exchanges of heat and water vapor including the molecular constants at the interface, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 36, 1979, pp. 1722-1735.
- 10) 塚本 修・光田 寧: 種々の湿度計を用いた水蒸気輸送量の直接測定, 京都大学防災研究所年報, 第25号 B-1, 1982, pp. 283-295.
- 11) 里田弘志: 接地層におけるエネルギーフラックスの観測, 京都大学理学研究科修士論文, 1985, 57pp.