

大気と地表面間におけるエネルギー交換過程の観測 (2)

光田 寧・池淵 周一・文字 信貴
小尻 利治・玉川 一郎

AN OBSERVATIONAL STUDY OF THE ENERGY EXCHANGE PROCESS AT THE AIR-GROUND INTERFACE (2)

By Yasushi MITSUTA, Shuichi IKEBUCHI, Nobutaka MONJI,
Toshiharu KOJIRI, and Ichirou TAMAGAWA

Synopsis

Results from the intensive observations of the energy exchange process near the surface at the air-surface interaction observing facility are discussed. A roving mast was developed to measure the profiles of wind velocity, temperature and humidity near the ground surface. The value of the turbulent fluxes of momentum, sensible heat and latent heat obtained from the roving mast are compared with those obtained from the eddy correlation method. The profile model developed by Paulson is found to be applicable to the present field for momentum and latent heat flux. However, for sensible heat flux, the profile model underestimates the flux value considerably. The cause of this discrepancy has not been cleared out.

From the shape of the profiles, the layer below the height of 1.5m, where most of the observations are carried out is found to be reasonably inside of the internal boundary layer developed over the surface for the present study.

1. はじめに

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、さらに長期的に見れば気候変動と関連している。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る。従って、蒸発、降水などに伴う熱の移動、土壌水分による蒸発の支配、大気乱流による熱及び水蒸気の輸送、さらに、それらの活動の根源となる太陽放射など、水収支及び熱収支に関連する諸量の測定を全てにわたって長期間行う事によって始めて地表面でのエネルギー交換のメカニズムを明らかとする事ができる。

長期間にわたって観測を継続する事の目的は、多様な気象条件のほとんどを網羅し、あらゆる条件下におけるエネルギー交換過程を研究する事である。しかしながら、現実には内容によっては測定手段の確立されていないもの、連続した測定には維持管理が容易でないものがあるなど、未解決な問題も残されている。長期間、あまり人手をかけずに連続してデータを収録するためには、観測手段が単純で堅牢なものが要求される。例えば、乱流輸送量を測定するためには、最も直接的で精度が高い方法は渦相関法であると考えられているが、渦相関法を適用するための観測を何ヶ月も連続して行う事は現実には難しい。輸送量の観測法の中で最も、単純な方法はバルク法であろう。バルク法は海上など表面の温度や湿度が比較的測定し易い場所で

は適用が可能であるが、陸上などでは表面の値、特に地表面湿度の測定が困難であるためその適用が難かしい。従って、陸上では地上数点の高さにおける平均値の分布から輸送量を求める方法が多く用いられる。

京都大学防災研究所の地空相互作用実験設備においては、地上の2高度における平均値から輸送量を求める方法を昨年度から適用して、連続したデータの収録を行っている。そして、乱流観測を中心とした特別に詳細な観測を適当な気象条件を選んで行い、簡易法を修正することを行って来た。その結果の一部のデータおよび、渦相関法との比較によって求められる様々な係数については前回^{1), 2)}に述べた。ただし、2高度のみの測定では、輸送量の決定のための適当なプロファイルが得られているかどうか、選んだ2高度が適当な高度であるかどうかなど、不明な点が残るので、今回は測定点をさらに増やして平均値の高度分布の測定を試みた。そのための特別観測を1986年12月から1987年1月にかけて12日間実施した。測定によって得られた風速、温度、湿度のプロファイルの性質、それから求められる乱流輸送量の算定結果を、同時に測定した渦相関法による観測結果とあわせて述べる。

2. 観測方法

2.1 観測設備の概要

地空間相互作用実験設備は、京都大学防災研究所の暴風雨災害部門、水質源研究センター、内水災害部門が協力して開発を行っているものである。設備は昭和60年度にほぼ完成した後、熱収支と水収支を中心に連続して観測を行っている。観測の対象としている露場は東西に約70 m、南北に約50 mの広さを持つ平坦な土地である。設備の展開されている周辺の地形及び測器の配置、観測の概要については前報^{1), 2)}において述べた。観測露場の表面は、観測開始当初は裸地であったが、昭和61年の夏頃からは雑草がまばらに生えはじめている。草丈は草刈りを行う事によって数 cm 程度に押えている。現在は前報で解説した観測設備に加えて、計測器を上下に移動させて鉛直分布を測定するロービングマスト、熱伝導率を測定して地中の水分を測定する土壌水分計、及び直径120 cmのライシメータを設置して観測を行っているほか、新たに赤外線を利用して地表面の湿度を測定する方法を開発中である。Fig.

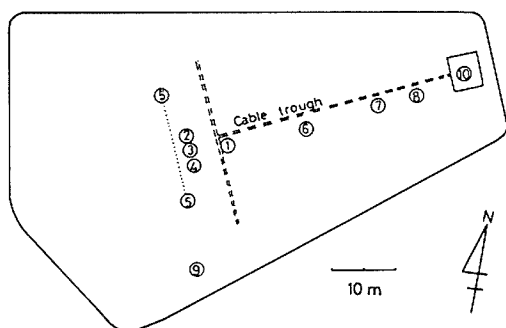
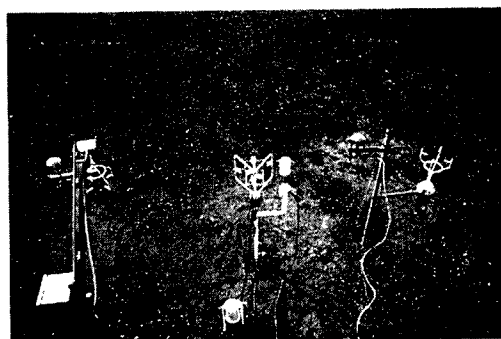


Fig. 1. Location of the instruments at the air-ground interaction observing facility. ① is the 6 m tower, ② the 1.5 m mast, ③ the turbulence mast ④ the roving mast ⑤ laser refractometer, ⑥ raingauges, ⑦ radiometers, soil thermometers and soil flux meters, ⑧ soil moisture meters, ⑨ lysimeter, ⑩ observation hut. For more details see the table in last report¹⁾.

1にはそれらの設置位置を示した。また、Photo. 1はロービングマスト、乱流計測器の配置状況を示した。

この観測設備の露場で周辺の地形の影響を受けない状態の観測を行おうとする場合は、計測器は地表面近くに設置し、また、風向も西寄りの時(南西から北西の範囲の風向)を選ばなければならない。

Photo. 1. The alignment of the flux measuring instruments. The roving mast (left), turbulence instruments (middle) and the stationary probes (right).



2.2 ロービングマストによる観測

(1) 観測方法

前報¹⁾においては、2 高度、1.5 及び 0.1 m に超音波風速計、水晶温度計、水晶露点計を設置して風速、気温、露点温度の鉛直ム配を測定し、乱流輸送量との関係を求めた。ただし、2 高度の測定のみでは対象としている気層がどのような鉛直構造をしているか、その層に傾度法による輸送量算定法を適用する事が可能かどうかの確認が得られない。そこで今回は、地表面近く of 2 点以上において平均値を観測し、接地気層のより詳細な構造を調べる事を試みる事にした。地表面近くの何点かで測定を行う場合には、各測定高度にそれぞれ測器を配置する方法と、1 組の測器を移動させる方法とがある。前者の方法では、各高度に設置した測器の間に器差が生じない様に全て正しい検定値に保つ必要があるが、当設備における観測の様に非常に小さな鉛直距離の間の差を問題にする観測では、それが困難である。従って、後者の移動測定法を採用する事にし、ロービングマストを開発した。

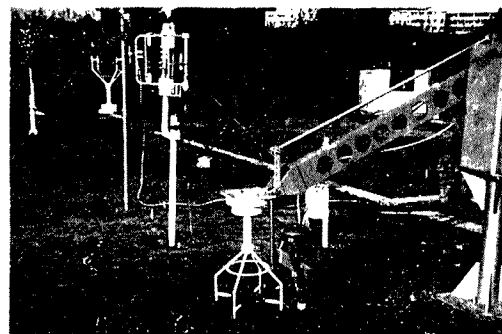
ロービングマストの装置は 2.1 m のアームが支持台の支点によって支えられており、支点から 1.6 m の位置にある台座が地表面と平行な方向を保ちながら上下する構造になっている。測定点は、1.5 m と 0.05 m の間で任意の位置に任意の数だけ選ぶ事ができる。移動速度は、最高部から最低部まで約 10 秒を要する。1 高度での測定時間は自由に選べるが、アームが移動して与えられた高さの精度内に落ち着くまでの時間によって決まる限界がある。この高さの精度は今回の観測では ± 1 cm としたが、プログラムを変更する事によって変える事ができる。今回行った観測では、測定高度を 1.50、0.70、0.30 及び 0.12 m の 4 点に選び、上から順に降下し最下の位置に来ると次は最上の位置へ戻りそれを繰り返すという様に設定した。また、アームの移動の時間間隔、即ち、1 つの移動を開始してある高度に停止し次に移動を開始するまでの時間を、水晶温度計の時定数が約 35 秒であること、さらに、露点計の空気の取り入れ口から感部まで空気が到達するまで約 50 秒を要する事を考慮して 120 秒に選んだ。この場合、アームが動いている時間は最大約 10 秒で、1 高度に停止している時間はほぼ 110 秒である。

ロービングマスト法は、同じ測器を移動させるため器差の心配がないという特長を持っている一方、移動周期より短い変動を各高度で捕えられないという欠点がある。この事によって生じる誤差を補正するために、どこかの固定高度に同じ測器を設置して連続した記録を取る必要がある。今回ロービングマストに設置した測器は、2 次元超音波風速計、水晶温度計及び水晶露点計に導く空気の取り入れ口である。これらは、前報¹⁾で述べた、2 高度における平均値の測定器の内の高さ 0.10 m の 1 組をそのまま用いる事になる。もう 1 組は高さ 1.5 m の位置にそのまま残して固定点での連続観測値を得るのに用いた。観測の様子は **Photo. 2** に示した。これらの測器からの出力はカセットデータレコーダ (TEAC DR100) を用いてデジタル収録した。収録間隔は 1 秒とした。1 秒よりも速い変動を捕える超音波風速計の出力には 10 秒のローパスフィルターを通してから収録した。

(2) データ解析方法

収録したデータは 1 高度について 120 秒であるが、前節で述べたように、そのうち前半の数十秒はデータとして使用する事ができない。この観測では 120 秒の内、後ろの 60 秒のみを有効なデータとして扱った。従って、ある高度では長さ 60 秒のデータが 8 分間に 1 度得られる事になる。つまり、その他の時間帯については、固定点のデータを用いて補正をしなければならない。補正は、ある一定の長さを持つ観測時間毎に行うが、今回の観測では乱流観測との関係を考慮して収録時間を 1 回 42 分とした。補正の方法は次の式に従って行っ

Photo. 2. The probes on the roving mast.



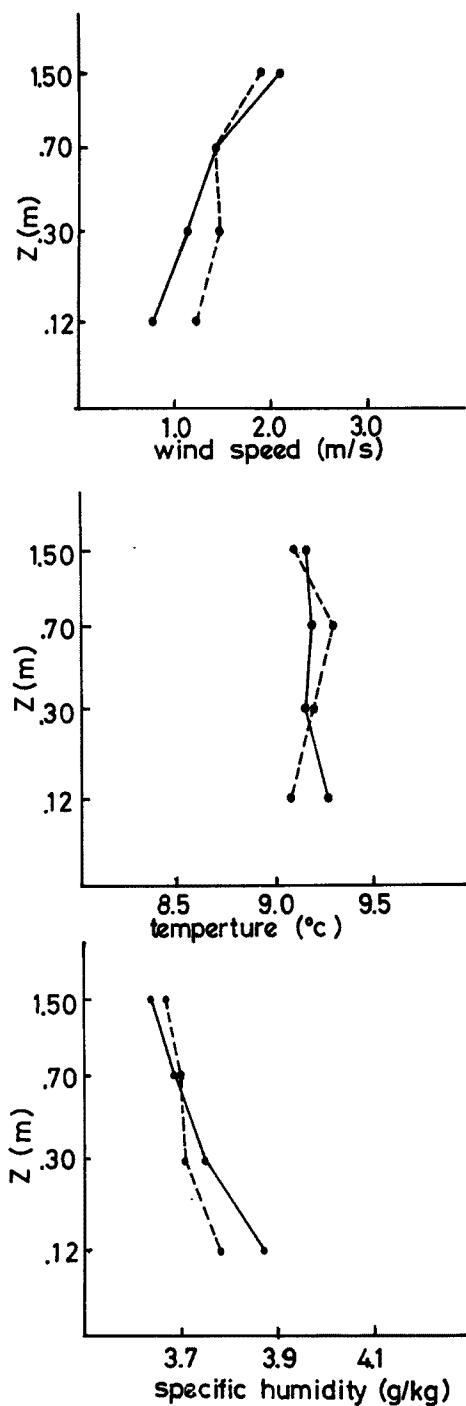


Fig. 2. Example of the profiles measured by the roving mast. The dashed and the solid lines are before and after the correction respectively.

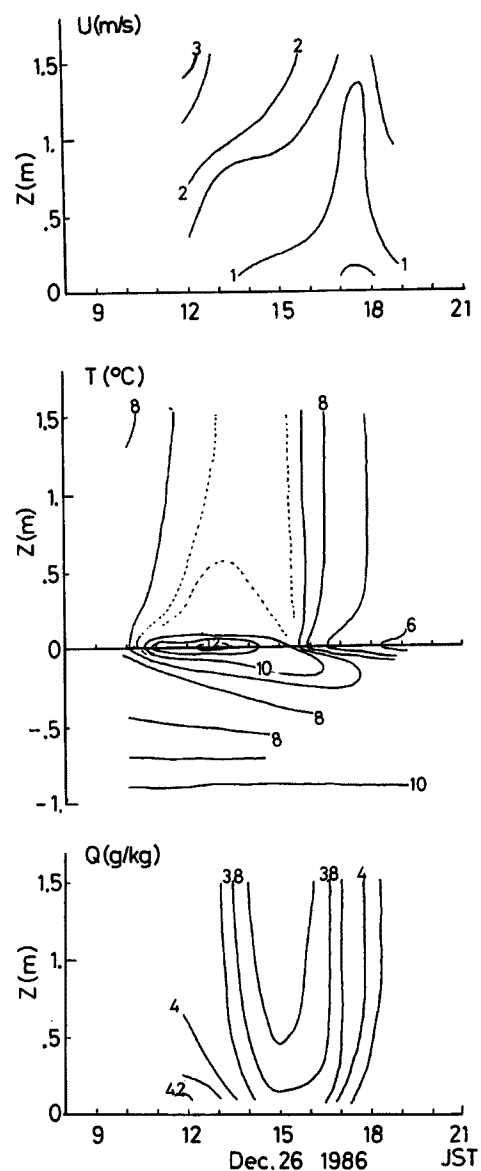


Fig. 3. Time height cross-section of wind speed, temperature and humidity obtained on Dec. 26, 1986.

た。

$$U = U_m - \frac{\sigma_u}{\sigma_{u_s}} (U_s - U_{sm})$$

ここで、 U は、ある高さの補正後の平均風速、 U_m は同じ高さにおいて、移動測定によって測定された風速の平均値、 σ_u はその高さの測定値の標準偏差、 σ_{u_s} は固定測点において同時に測定された風速の標準偏差、 U_s は固定測点において同時に測定された平均風速、 U_{sm} は固定測定点の収録時間（ここでは42分）内の平均風速である。標準偏差の求め方は、風速計用フィルターの遮断周波数 0.1 Hz を考慮して、10秒間の平均値を1つのサンプルデータとして取り扱い、その集合の標準偏差を計算した。ここでは平均風速について書いたが、平均気温や平均露点温度についても同じ様を書く事ができる。この補正法を用いて補正した、風速、気温、及び露点温度のプロフィルの例を、補正前のものと比較して **Fig. 2** に示す。この図から明らかな様に、このサンプリング補正は場合によってはかなり重要であり、例えば、気温については、補正後の鉛直勾配の向きが逆になる事もある。

2.3 乱流輸送量の観測

渦相関法を用いて乱流輸送量を測定するための乱流観測を、ロービングマストから水平に 1.8 m 北に離れた位置、すなわち、ロービングマストと 1.5 m 高の定常観測マストのはぼ中央に設置したポールにおいて行った。測定高度は 1.5 m とした。風速3成分及び気温の変動は超音波風速温度計、湿度変動は赤外線湿度計をそれぞれ用いて観測し、赤外線湿度計の検定を行うために、同時に熱電対乾湿計を設置した。これは、前報¹⁾で述べたものとほぼ同様の観測である。ただし、赤外線湿度計については、より安定した働きをする様に改良を加えたものを使用した。それらの計測器からの信号、合計8成分は 10 Hz の割合でデジタルカセットデータレコーダを用いて収録した。収録時間は、今回の収録条件では可能な最長時間である42分間とした。

3. 風速、温度、湿度の鉛直分布の観測例

実施した特別観測の期間中のある1日、1986年12月26日の日中の風速、温度、湿度の変化例を **Fig. 3** に示した。この日の気圧配置は冬型であり、観測地点では昼間は主に西風が吹き、一日中晴天であった。**Fig. 3** に示した分布はロービングマストによって得られた補正後の値である。ただし温度については、地表面の値を放射温度計で測定したもの、及び、地中温度は地中4つの深さに埋設した白金抵抗温度計によって得られた値が同時に示してある。日中は地表面が温度が最も高く、夜間は最も低くなる様子が明確に現われている。比湿の分布の変化については、地表近くが比湿が大きく、上に行くほど減少しているが、日中には各層とも湿度の減少が認められる。すなわち、日中には地表面から補給される以上の水蒸気が上層に輸送されるものと考えられる。

4. 輸送量の算定

4.1 プロフィル法による輸送量の計算

ロービングマストなどを用いて測定したプロフィルから乱流輸送量を算定する方法については、様々な研究者が独自の観測に基づいた無次元プロフィルのモデルを提案しているが、それぞれの間には非常に大きな相違はない。ここでは、輸送量の求め方としてはこれまでの多数の観測に裏づけされている Paulson が提案した方法³⁾を適用する事にする。

Paulson は、無次元プロフィルとして、接地層が不安定な場合は Businger-Dyer の表示式⁴⁾を用い、安定な時は、log-linear⁵⁾の表示式を採用している。すなわち、プロフィルは不安定時には、風速 U 、温度 T 、比湿 Q 、に対してそれぞれ、

$$U = \frac{u_*}{k} \left[\ln \frac{z}{z_0} - \Psi_U \right]$$

$$T - T_s = \frac{T_*}{\alpha_H k} \left[\ln \frac{z}{z_0} - \psi_T \right]$$

$$Q - Q_s = \frac{Q_*}{\alpha_E k} \left[\ln \frac{z}{z_0} - \psi_Q \right]$$

$$\text{ここで } \psi_U = 2 \ln \left[\frac{X+1}{2} \right] + \ln \left[\frac{X^2+1}{2} \right] - 2 \tan^{-1}(X) + \frac{\pi}{2}$$

$$\psi_T = 2 \ln \left[\frac{1+Y}{2} \right]$$

$$\psi_Q = 2 \ln \left[\frac{1+Y'}{2} \right]$$

$$X = \left(1 + a_U \frac{z}{L} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$Y = \left(1 + a_T \frac{z}{L} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$Y' = \left(1 + a_Q \frac{z}{L} \right)^{\frac{1}{2}}$$

を用いる。ここに、 L は Monin-Obukhov の長さ $L = Tu_*^2/gkT_*$ であり、不安定時には、 z/L は Richardson 数、 Ri と等しいとする。これらの式の中で、 $u_* = \sqrt{-\overline{u'w'}}$ は摩擦速度、また、 T_* 及び Q_* はそれぞれ $T_* = -\overline{T'w'}/u_*$ 、 $Q_* = -\overline{Q'w'}/u_*$ で定義される量である。また、 g は重力の加速度、 T は平均温度 (K)、 T_s と Q_s はそれぞれ粗度長 z_0 における温度、比湿である。さらに、カルマン定数 $k = 0.40$ 、係数 $\alpha_H = \alpha_E = 1.14$ 、 $a_U = a_T = a_Q = 16$ とする。

一方、安定時には、

$$\psi_U = -b_U \frac{z}{L}$$

$$\psi_T = -b_T \frac{z}{L}$$

$$\psi_Q = -b_Q \frac{z}{L}$$

と置く。この場合には Ri は

$$\frac{z}{L} = \frac{Ri}{1 - b_U Ri}$$

の関係を用いる。係数は $b_U = b_T = b_Q = 7$ とする。

乱流輸送量を求めるためには、まず、最大高度と最小高度における風速と温度の値から Ri を計算し、その値から z/L を求め、 ψ_U 、 ψ_T 、及び ψ_Q を得る。そして、 U 、 T 及び Q を $\ln z - \psi$ に対してプロットする事によって、その傾きから u_* 、 T_* 及び Q_* をそれぞれ求める。次に、得られた u_* と T_* とから新しい z/L を計算する。これを繰り返して収束した値を用い最終的な地表面摩擦 $\tau = \rho u_*^2$ 、顕熱輸送量 $H = \rho C_p u_* T_*$ 、潜熱輸送量 $E = \rho L_E u_* Q_*$ の値を求める。ここで、 ρ は空気の密度、 L_E は蒸発の潜熱、 C_p は空気の定圧比熱である。プロファイルの形によっては収束しない場合があり、その場合は輸送量は求められない。

Fig. 4 には、 U 、 T 及び Q の $\ln z - \psi$ に対する関係の 1 例を示した。このプロットは、理想的に定常で一樣な場では直線となるべきものである。この例に示す様におおむね直線であるが、最も高い層のみ多少折れ曲がった状態となっている場合がある。この層は条件によっては内部境界層の外側に出ている可能性も考えられ、検討の余地がある。

4.2 渦相関法とロービングマスト法との比較

観測を行った 1986 年 12 月 25 日から 1987 年 1 月 13 日の間で風向がほぼ西寄りとなっていたのは、4 日間である。その中から 12 月 26 日に得られた乱流輸送量の時間変化の状態を、渦相関法とロービングマスト法の両者を比較して **Fig. 5** に示す。両者はほとんど同じ傾向の変化を示している。ところが、輸送量の大きさにつ

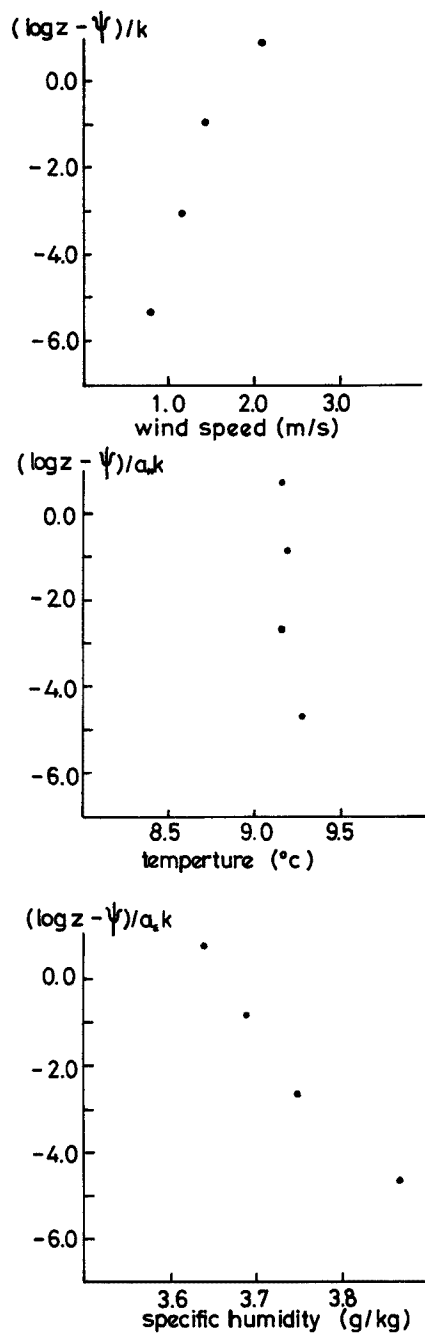


Fig. 4 Examples of the profiles plotted including the effect of stability in the vertical axis.

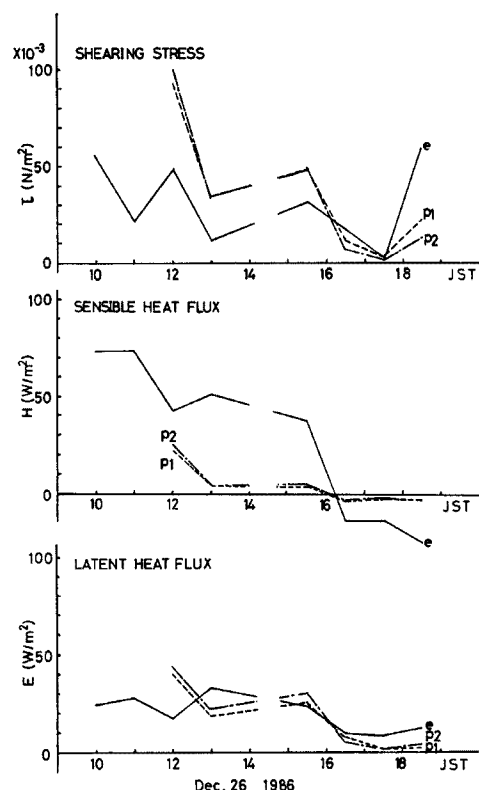


Fig. 5. Time variations of the fluxes. The flux values from the eddy correlation method are indicated by the solid lines. The dashed lines and the dash-dotted lines are the fluxes from the profile data when the last 60 seconds and 40 seconds, respectively, of measurements for each height are used as one sample of the data.

いては、顕熱の輸送量に隔たりが認められる。この差が、サンプリングの方法が原因で起っているものかどうか、即ち、温度計の応答特性が不十分なために温度勾配が過小評価されていないかどうかを調べるために、プローブが各測定高度に達してからサンプリングを始めるまでの時間を変えたものも同時に示してある。しかし、これから分かる様に、サンプリング時間を遅らせてもその影響はほとんど認められない。この大きな

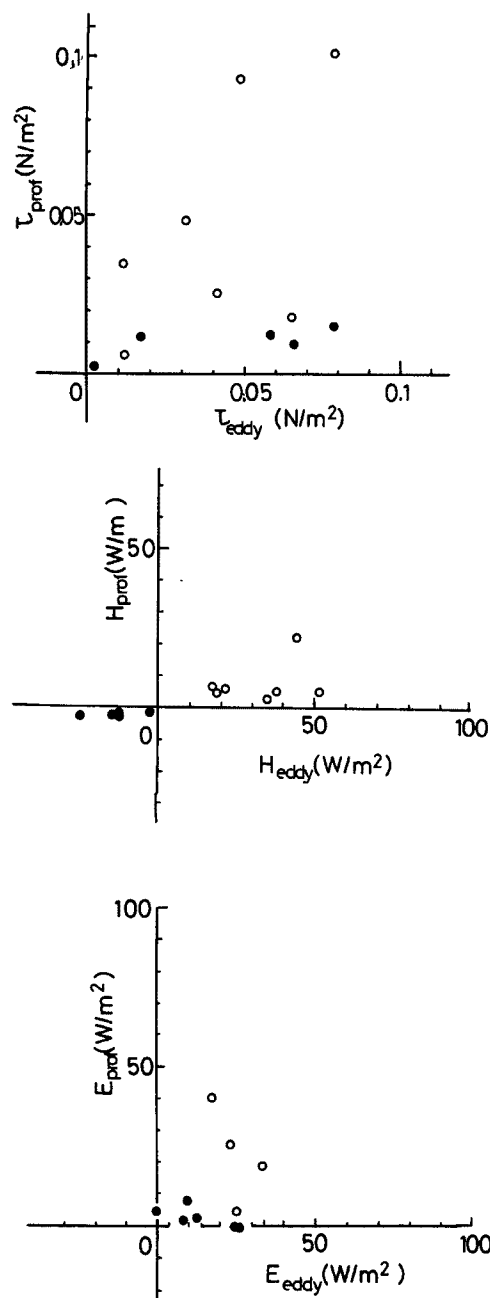


Fig. 6. Comparison of the turbulent fluxes obtained from the profile and the eddy correlation method.

差は潜熱輸送量には認められないので、用いたプロファイルのモデルが顕熱輸送にそのままでは適応できないのではないかとこの可能性がある。すなわち、乱流輸送の効率とも考えられるものが顕熱に対しての方がより大きい、言い換えれば、顕熱の拡散係数が、水蒸気のそれよりも大きい（前報¹⁾参照）可能性がある。ただし、それに関しても明確な説明ができず、現段階ではなぜこのような差が生じるのか理由が不明である。

Fig. 6 には観測期間中の解析可能な全データについて、2つの方法の比較を示した。運動量輸送量及び潜熱輸送量については、ばらつきは少なくないものの両者の間に系統的な差はないが、顕熱輸送量については、両者の差が大きい。

5. 熱収支の観測例

前節の Fig. 3 及び Fig. 5 に示したと同じ時間帯の熱収支の各項、すなわち、Funk 型の放射計で計った放射収支量、渦相関法で求めた顕熱輸送量と潜熱輸送量、及び地中 10 cm と 30 cm の深さに設置してある熱流板で測定した地中への熱輸送量の変化を Fig. 7 に示す。

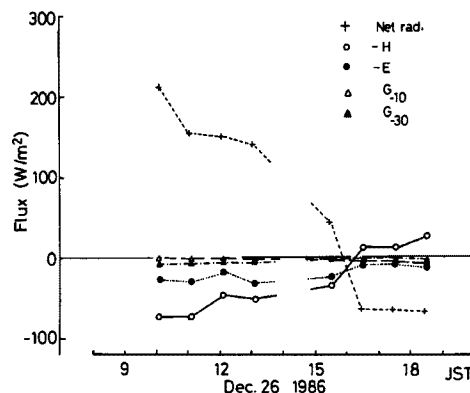


Fig. 7. Time variation of the terms in the heat balance equation. The fluxes are positive when they are toward the surface, and negative when off the surface.

ここに示した例は、冬の晴天日の午前から日没後にかけてである。今回の特別観測期間中は連続してはほぼ良好な風向が得られた時間帯はこの例に限られていた。日中は地表面が受けた正味放射は顕熱と潜熱の輸送の形で使用されるが、午後4時には既に放射収支量は負、即ち、地表面から出ていく向きに転じ、それと時をほぼ同じくして、地表面温度が気温よりも低くなり、同時に顕熱輸送も下向きに符号を変える。ただし、潜熱輸送はそのまま上向きとなっている。熱収支を計算すると、不安定時の10時から15時30分までの間の放

射収支量の平均値は 140 W/m^2 であるのに対し、表面から出ていく顕熱輸送量は 56 W/m^2 、潜熱輸送量は 25 W/m^2 、地中へは僅かに $1\sim 3 \text{ W/m}^2$ 程度である。このような短い時間帯では熱収支はバランスしておらず、地表面直下などに熱が一時的に蓄えられている可能性を示している。

6. 結 び

地表面と大気間のエネルギー交換過程を長期間観測するための設備を用いて、ある一定期間特別観測を実施した結果について述べた。前報が地上 2 高度の測定点を用いて乱流輸送量を算定したのに対して、今回は地上 1.5 m 以下で任意の高さに任意の時間だけ停止して計測するロービングマストを開発して観測を行った。ロービングマストによって得られたプロファイルからの乱流輸送量の算定には Paulson が海上での輸送量の算定のために開発した方法を用いた。乱流観測に基づく渦相関法の結果と比較したところ、運動量輸送量と潜熱輸送量については両者は比較的良好な対応を示し、Paulson の方法が今回測定したような陸上のしかも非常に地表面に近くの気層にも適用できる事がわかった。ところが、顕熱輸送量については、プロファイル法による結果は渦相関法との間に大きな差が生じ、Paulson のモデルがそのまま適用できない事がわかった。ただし、その原因すなわち、顕熱輸送と潜熱輸送になぜ差が生じるかと言うことについては明確な原因が分からず今後に残す結果となった。

観測したプロファイルの形状を検討した結果、大部分の測定例が風向が西寄りの場合には 1.5 m の高さが観測露場の内部境界層内に入っている事を示しており、この観測場所において、一様性を仮定して乱流輸送量の測定を行う妥当性については、1.5 m の高さ以下であればほとんど問題がない事がわかった。しかしながら、測定によっては最上層が滑らかに繋がらない場合がある事は 1.5 m 程度の高さがその限界である可能性を示唆している。

今回の観測においては、温度センサーとして信頼性の高い水晶温度計を用いたが、ロービングマストを用いる場合は各高度での待機時間を短くし、より有効なサンプリングを行うためにさらに応答の速い測器の採用も検討すべきであろう。

今後この実験露場では現在設置して試験運転中のライシメータや、地表面の水分計などを合わせてエネルギー交換過程の観測をより充実させていく計画である。

参 考 文 献

- 1) 光田 寧, 池淵周一, 田中正昭, 文字信貴, 小尻利治: 大気と地表面間におけるエネルギー交換過程の観測(1), 京都大学防災研究所年報, 第29号 B-1, 1986, pp. 271-281.
- 2) 里田弘志, 文字信貴, 光田 寧: 裸地面におけるエネルギー輸送の研究, 京都大学防災研究所年報, 第28号 B-1, 1985, pp. 415-426.
- 3) Paulson, C. A.: Profiles of wind speed, temperature and humidity over the sea, Ph. D. Thesis, Univ. of Washington, 1967, 128pp.
- 4) Paulson, C. A.: Mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer, J. Appl. Meteor., Vol. 9, 1970, pp. 857-861.
- 5) Liu, W. T., K. B. Katsaros and J. A. Businger: Bulk parameterization of air-sea exchanges of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface, J. Atmos. Sci., Vol. 36, 1979, pp. 1722-1735.