

大気境界層における水蒸気輸送過程の研究

塚 本 修・光 田 寧

AN EXPERIMENTAL STUDY OF WATER VAPOR TRANSFER IN THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

By Osamu TSUKAMOTO and Yasushi MITSUTA

Synopsis

Turbulence measurements were carried out on the 213 m meteorological tower in Tsukuba. Water vapor fluctuations were measured together with temperature and three components of wind speed at 200, 150, 100, 50, 25 and 10 m level of the tower, and water vapor fluxes were evaluated by eddy correlation method.

Diurnal variation of water vapor fluxes were appeared as well as sensible heat fluxes in relation to growth and decay of mixed layer. Latent heat flux was almost constant up to 200 m height in spite of gradual decrease in sensible heat flux. Dominant length scale of water vapor transfer is appeared to be proportional to height of observation according to cospectral analysis of water vapor fluxes. Flux-gradient relationship was also analysed for water vapor transfer.

1. は し が き

大気境界層における水蒸気変動の乱流特性について、昨年¹⁾の報告では高さ 100m 以下の気層について昼間の約 6 時間分のデータを基に述べてきた。今回は昨年と同じ筑波研究学園都市の高さ 213m の観測塔を用いて、高さ 200m までの気層での水蒸気輸送過程の研究に主眼をおいた観測結果について述べる。特に今回は、ほぼ 24 時間連続した観測を行うことができたので、高さ 200m 以下の大気境界層の日変化についても検討を行うことができた。

水蒸気による地面から大気へのエネルギー輸送は海洋上のみならず、陸上においてもエネルギー輸送のかりの部分を占めており、大気と地表面とのエネルギー交換の実態を解明してゆくためには水蒸気輸送過程の研究は不可欠である。なお、この観測は大気境界層の乱流の観測的研究の一部として行われたものであり、研究全体の概要は研究成果報告書²⁾に示されている。

2. 観 測 の 概 要

観測は 1983 年 10 月 30 日 18 時より 31 日 17 時までの 23 時間にわたって、気象研究所構内にある高さ 213m の気象観測鉄塔を用いて行われた。30 日には前日からの西高東低の気圧配置が続き、観測を開始した 18 時ごろには 200m 高度では北東寄りの 8m/s 程度のやや強い風が吹いていたが、31 日には冬型の気圧配置はしだいにゆるみ風は弱くなっていった。31 日未明には各地で 10 月に入ってからの最低気温を記録するという厳しい冷えこみとなったが、日中は穏やかな晴天であった。

高さ 213m の観測塔の 10, 25, 50, 100, 150, 200m の各高度には、三次元超音波風速温度計（海上電機、DAT-300）が設置されている。本観測においては水蒸気輸送量の直接測定のために、この外にこれら 6 高度に熱電対乾湿計（海上電機、PY-100）を、下層の 100m, 50m, 25m の各高度には Lyman- α 湿度計

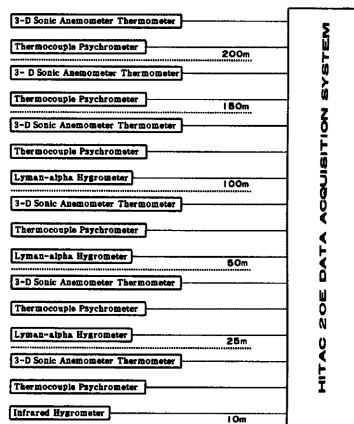


Fig. 1 Block diagram of turbulence measurement

都合上 0.4 秒毎のデータ 4096 個分、つまり約 27 分とすることを原則とした。これら観測システムのブロックダイアグラムを Fig. 1 に示す。

3. 解析結果

3.1 大気境界層の日変化の概要

今回観測した 6 高度のうち、上層の 200 m と下層の 25 m についての風速、温位、比湿の平均値の 1 日のうちでの変化の様子を Fig. 2 に示す。下層での風速は 2~3 m/s とあまり変化していない。一方、上層では観測開始当初から吹いていた強い風がいったん弱まるが、夜半から 3 時頃にかけて再び強くなっている。これは夜間、安定層が発達して地表面摩擦が小さくなったため生じる下層ジェットではないかと考えられる。また、この 1 日のうちでの風向の変化を見てみると、はじめは北東~東北東の風が卓越しているが、夜半すぎからやや北寄りの風向となり、明け方は下層では北北西~北西の風となった。しかし、10 時ごろから全層東寄りの風となり観測終了の 17 時まで続いた。

温位の変化について見ると、200 m では 1 日を通じてあまり大きな変化はないが、25 m 高度では 7 時に最低となり、この時の 20 m 高度との温位差は 6.4°C にもなっている。日中には対流混合が発達するため、ほぼ全層一様な温位となる。Fig. 3 に温位分布の時間-高度断面図を示す。これを見ると夜間は下層に非常に冷たい領域が存在するが、日が昇り下層から順次暖まってゆくにつれて混合層が発達してゆく様子がわかる。そして、この混合層の発達の様子は先に報告²⁾した 1983 年 12 月 7 日の場合と同様に顕熱の輸送が上向きに転じてしばらくしてから温位勾配が安定から中立に転じてゆくという過程をたどる。

一方、比湿の時間変化は Fig. 2 に見られるように上層、下層共ほぼ類似した変化をしており、31 日朝から夕方にかけて全層増加傾向にある。この時間-高度断面図を Fig. 4 に示す。比湿の鉛直分布は最下層の 10 m と 25 m とでは下層の方が比湿が大きくなっている。上の層では逆に上層の方が大きな値を示している場合もいくつか見られるが、概して上層では比湿分布は一様に近い場合が多い。これを相対湿度に換算したものが Fig. 5 である。全体的にはほぼ 60% 前後で変化しているが、31 日明け方の冷えこみの時には下層で増加し、10 m 高度では 90% 近くまでなっている。そして昼間の気温上昇に伴って下層の相対湿度は減少している。

(Electromagnetic Research Corp. Model BLR), 10 m 高度には赤外線湿度計 (海上電機, AH-100) を新たに設置した。これらのうち、全高度に設置した熱電対乾湿計によれば、温度、湿度の絶対値と変動量を得ることができるが、下層で用いた場合、その応答速度が遅いことから、直接法による水蒸気輸送量の算定において誤差を含む場合がある³⁾。そのために 100 m 以下の各高度には応答速度の速い Lyman- α 湿度計あるいは赤外線湿度計を併せて設置して変動測定用としたものである。そしてこれら変動測定用測器の校正には熱電対乾湿計を用いた。超音波風速温度計のデータについては 23 時間ほぼ連続したデータが得られているが、他の測器については零点のシフトやアンプゲインの調整等のため記録が断続している。しかし、できるだけ 30 分程度は連続した記録がとれるようにした。

これら各測器の信号はミニ・コンピュータ (HITAC-20E) を用いて 10 Hz で AD 変換して磁気テープに収録した。解析に際しては元のデータを 4 ケずつ平均して 0.4 秒毎のデータとした。そして 1 回の観測時間はデータ処理の

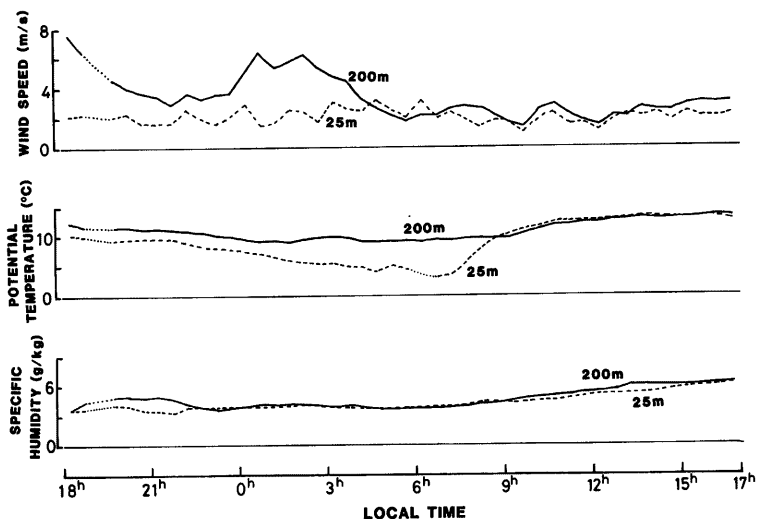


Fig. 2 Diurnal variations of mean wind speed, potential temperature and specific humidity at 200 m and 25 m heights

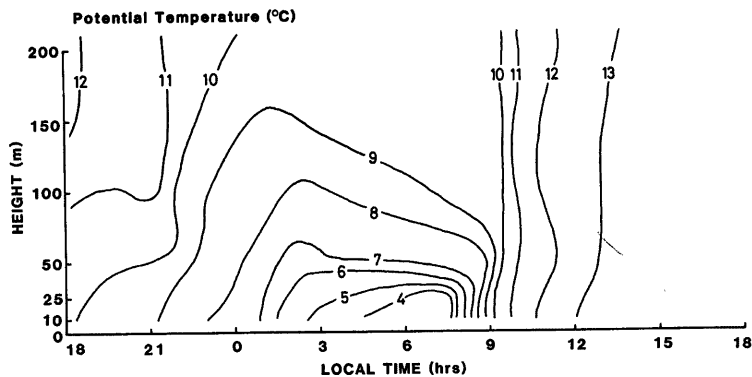


Fig. 3 Time-height cross section of potential temperature

3.2 乱流変動量および乱流輸送量について

Fig. 6 には Fig. 2 と同様、200m と 25m の 2 高度における風速鉛直成分、気温、比湿の乱流変動の標準偏差の値 (σ_w , σ_T , σ_q) を各々示してある。 σ_w については風速のシアの大きい夜間には相対的に上層の値が小さく、下層ほど大きな値をとるが、上層の風が弱まった日中では逆に上層の方の値が大きくなっている。そして、その値は夜間は 0.2m/s 程度と小さいが、日中、対流混合が盛んになると値は下層から大きくなり、200m 高度では 1m/s 以上の値をとることもある。一方、 σ_T , σ_q については σ_w に見られるような顕著な日変化は見られない。上下での変動の振幅は、 σ_T については下層の方が大きい、 σ_q についてはあま

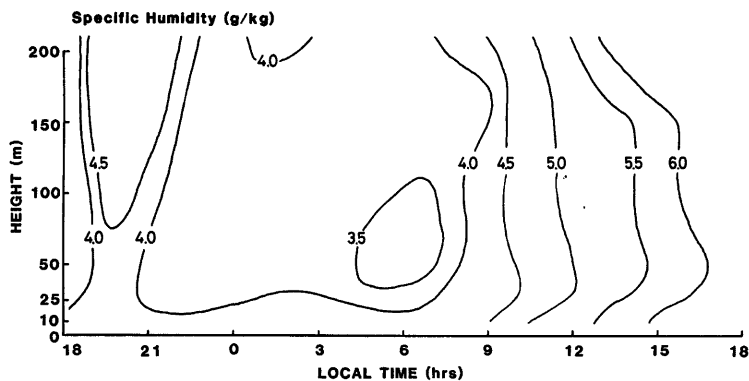


Fig. 4 Time-height cross section of specific humidity

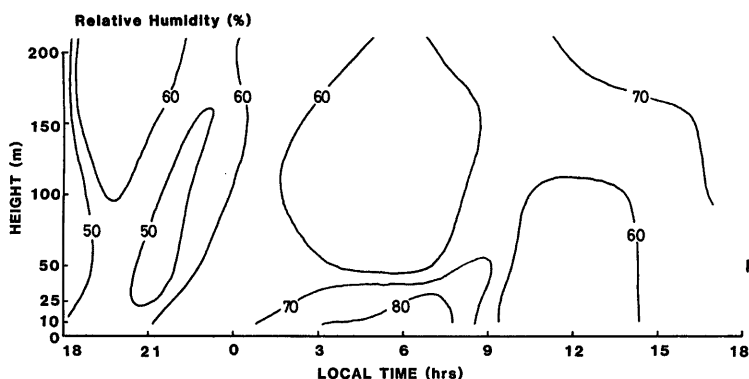


Fig. 5 Time-height cross section of relative humidity

り差は見られない。

顕熱および水蒸気の乱流輸送量と関係した $\overline{w'T'}$ 及び $\overline{w'q'}$ の 25m と 200m での時間変化を Fig. 7 に、全層での時間—高度断面図を Fig. 8 に示す。両者とも夜間はほとんど $\text{flux}=0$ であるが、明け方混合層が発達するところから少しずつ上向きの輸送が始まってきて、日射の最も強くなる正午前に極大に達し、夕方再び $\text{flux}=0$ に戻るという日変化をしていることがわかる。Fig. 9 にはこの乱流輸送量について、輸送量が上向きでピークの値の1/10以上の値を保っている時間帯を高度別に示す。最下層の 10m 高度では7時半すぎから上向きの輸送が始まり、約2時間後になってやっと 200m 高度で上向きの輸送になる。そして午後には14時すぎから 200m 高度では $\text{flux}=0$ に戻り、約1時間半後には最下層でも $\text{flux}=0$ となっている。顕熱輸送量については、日射の弱まる15時すぎにほとんど零になるが、水蒸気輸送量についてはもう少し遅くまで上向きの輸送が続いている。

この顕熱と水蒸気の輸送量について調和解析を行ってみた。結果のうち1日周期の成分のみに注目し、その振幅と位相（値が極大値をとる時刻）を各高度別に Fig. 10 に示す。これを見ると $\overline{w'T'}$ については下層ほど日変化の振幅が大きく、しかも極大の現れる時刻が早くなることがわかる。最下層の極大は11時頃に現

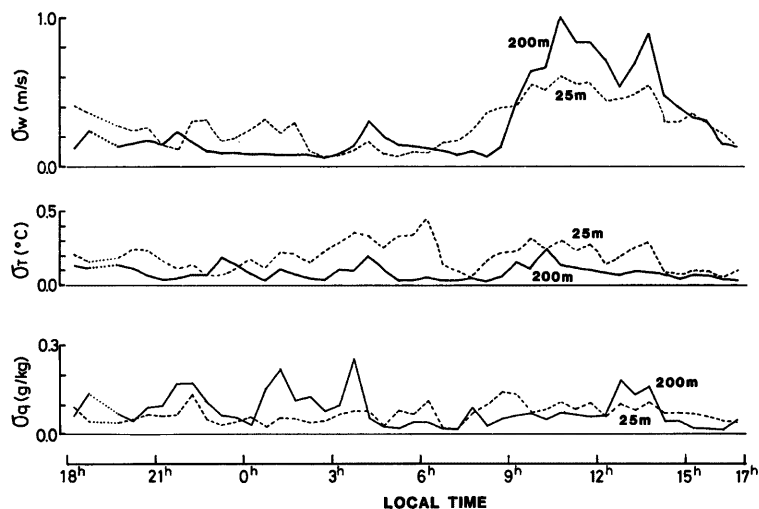


Fig. 6 Diurnal variations of standard deviations of vertical velocity, temperature and specific humidity at 200 m and 25 m heights

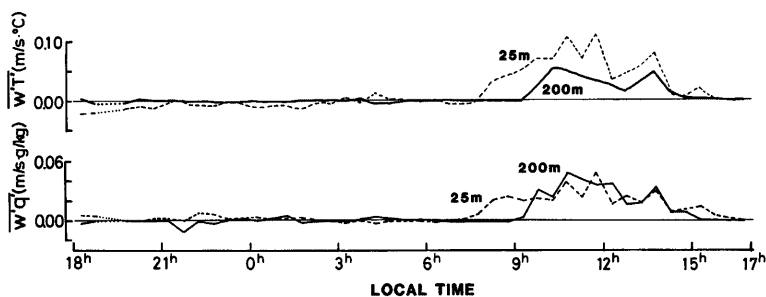


Fig. 7 Diurnal variations of sensible heat flux and water vapor flux at 200 m and 25 m heights

れているが、これは日射が最大となる時刻とほぼ一致している。そして上下の位相のずれは境界層内の気温が下層から徐々に上昇してゆくことを示しており、日変化の項の振幅の減少はそのために消費された熱量の分布を示していることになる。一方、 $w'q'$ については、上層と下層とで振幅、位相とも顕著な差は見られないようである。このことは後でも述べるように境界層内において消費される水蒸気量は極めて少ないものであることを示しており、輸送においても上下の位相差が小さくなるようである。

このように $w'T'$ 及び $w'q'$ といった輸送量については、日中大きな値をとるが、これらの輸送を引きおこすものは w の変動と T あるいは q の変動である。Fig. 6 において σ_w , σ_T , σ_q の時間変化を示したが、 σ_w については夜間はかなり値は小さく、日中大きな値を示すけれども σ_T あるいは σ_q については特に日中大きな値を示すというわけではなかった。そこでここでは w と T 、及び w と q の各変動の相関係数について調べてみた。夜間の輸送量がほとんど零の場合の相関係数についてはあまり意味がないので、Fig. 11 には 5時から17時の間のみについて、各相対関係数の時間—高度断面図を示す。これを見ると、混合層が発達す

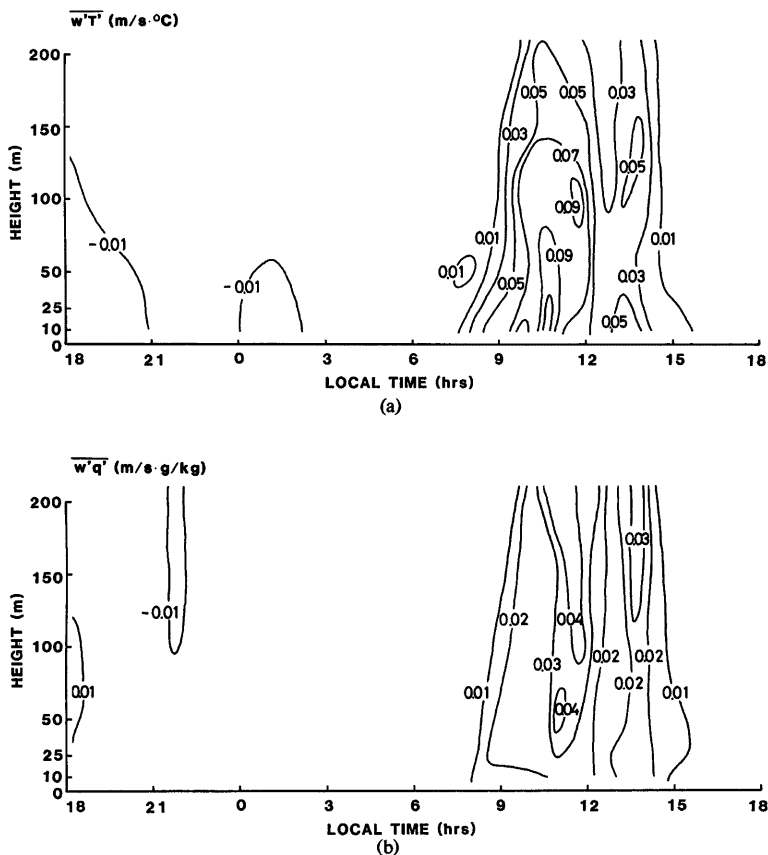


Fig. 8 Time-height cross section of a) sensible heat flux and b) water vapor flux

るにつれて各相関係数は徐々に大きくなり、調和解析の結果、輸送量が極大となる11時前後には0.6~0.7という大きな相関係数を持つ場合も見られた。そして夕方にはまた相関係数は減少してゆく傾向が見られる。つまり、 $\overline{w'T'}$ や $\overline{w'q'}$ に見られるような日中の大きな上向きの輸送量は主に σ_w の増大と相関係数の増大によってもたらされているといえる。

Fig. 12 は乱流輸送量 $\overline{w'T'}$ 及び $\overline{w'q'}$ が上向きとなっている8時~17時の9時間分について、各輸送量を3時間毎に平均し、顕熱・潜熱の輸送量に換算したものの高度分布を示す。午前中については下層から徐々に混合層が発達してゆくため、上層ほど減少する形となっているが、正午前後のデータではほぼ全層一様に近い分布となっている。そして図の右端に示した1日の平均値で見ると、潜熱輸送量については全層ほぼ一定で約 52 W/m^2 の値をとっているのに対し、顕熱輸送量はこれまでの研究（例えば Caughey and Palmer⁴⁾）にも見られるように下層での 60 W/m^2 から上層での 25 W/m^2 まで徐々に減少する分布となっている。この潜熱輸送量の値は日蒸発量に換算すると約 1.9 mm/day となる。

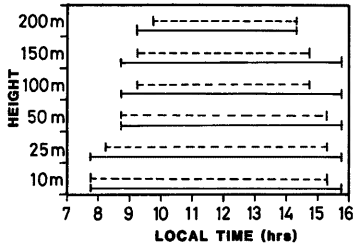


Fig. 9 Durations of upward flux. Solid lines are the cases of water vapor flux and dashed lines are those of sensible heat flux.

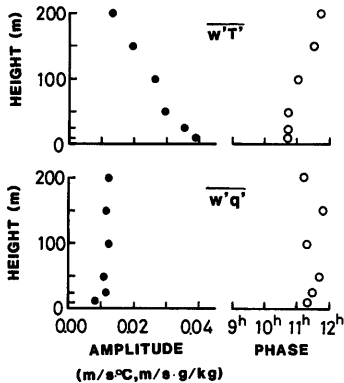


Fig. 10 Vertical profiles of amplitude and phase of diurnal variations of sensible heat flux and water vapor flux

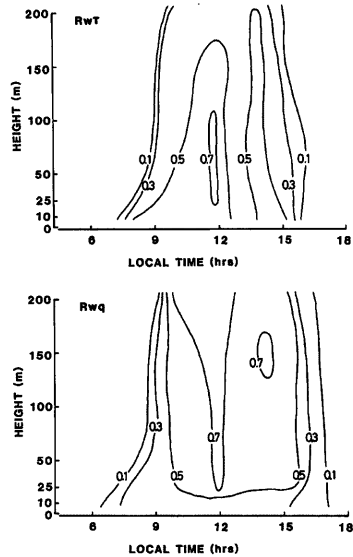


Fig. 11 Time-height cross sections of correlation coefficients of a) $w'T'$ and b) $w'q'$

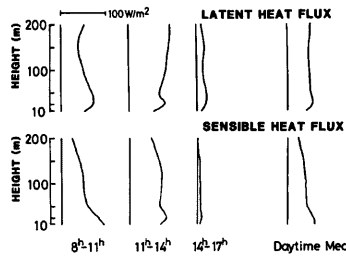


Fig. 12 Time variations of vertical profiles of sensible heat flux and latent heat flux averaged over 3 hours in the daytime

3.3 水蒸気輸送のスペクトル特性

次に水蒸気輸送に寄与する変動のスケールが高度によってどのように変わってゆくかを見るために、 $\overline{w'q'}$ のコスペクトルについて調べた。Fig. 13 には各高度別に $\overline{w'q'}$ のコスペクトルに周波数を掛けて $\overline{w'q'}$ の値で規格化したものの平均的な形を示してある。これを見ると、上層へ行くにつれて輸送に寄与する周波数は低周波側に移ってゆき、高周波側の寄与は徐々に小さくなっていることがわかる。Donelan and Miyake⁸⁾ は熱帯海洋上での航空機観測により、水蒸気輸送に寄与する波数が上層ほど低波数側に移ってゆくことを示しており、ここで得られている結果とほぼ一致する。

このコスペクトルのピークの周波数の高度分布を示したのが Fig. 14 で、これは高度 z に対して $z^{-0.7}$ で

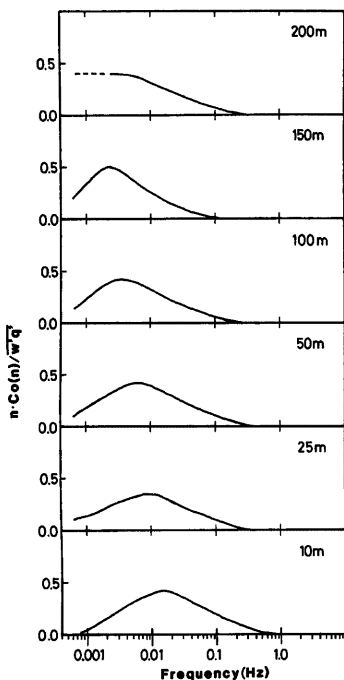


Fig. 13 The variations of normalized cospectra of $w'q'$ with height

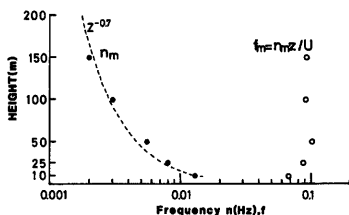


Fig. 14 The variations of peak frequency (●) and normalized peak frequency (○) for the $w'q'$ cospectra with height. The dashed line represents the regression line of $z^{-0.7}$.

減少してゆく傾向を示している。ただ、200m 高度ではピークの周波数はばらつきが大きく、ここでは値を示していない。また、この図の右側には周波数を測定高度とそこでの平均風速で無次元化した周波数の高度分布を示してあるが、これで表わすとほぼ全層 0.09 前後の一定値に近い値をとる。

3.4 水蒸気輸送量と比湿の鉛直分布の関係

一般に物理量の輸送はその物理量の平均勾配に比例して起こるとされており、鉛直方向の水蒸気輸送についても次のように表わすことができる。

$$\overline{w'q'} = -K_E \frac{\partial Q}{\partial z} \quad (1)$$

ここで $\partial Q / \partial z$ は比湿の鉛直勾配、 K_E は水蒸気の鉛直輸送に関する拡散係数である。比湿の鉛直勾配

は Fig. 4 に見られたように最下層を除いて大きな値にはなっていないが、日中の大きな上向きの輸送が起こっている場合に比湿の鉛直勾配と水蒸気輸送量がどのような関係にあるかを調べてみることにした。Fig. 15 はその結果で、測定した 6 高度のデータをすべて用いて、各測定高度間 5 層について、横軸に高さ 10m 当りの平均比湿の差、縦軸には二高度での水蒸気輸送量の算術平均値をプロットしてある。もし、(1) 式が完全に満足されていれば、原点を通り、傾きが、 K_E の右上がりの直線上にデータは分布するはずであるが、ここに示したものは、日中の大きな輸送量のデータだけについて見ても必ずしもそうはならない。25m～10m の最下層ではほぼその傾向は見られるものの、上層へ行くにつれてこの傾向から外れてくる場合が生じ、200m～150m の最上層では両者はほぼ負の相関をしているように見える。このように最下層のみが (1) 式で示した Fick 型の拡散方程式に従い、上層ではそれからずれてきて、むしろ勾配に反して輸送が進行している場合があることは注目に値する。すなわち、最下層で生じた水蒸気輸送はそのまま混合層内で慣性的に進行しているということになってしまいそうである。この点において顕熱と水蒸気の輸送の機構には差があるようであり、更に検討を必要とする。

3.5 比湿の時間変化と水蒸気輸送量の鉛直勾配

前節では比湿の鉛直勾配から生じる水蒸気輸送量について調べたが、本節では更にその水蒸気輸送量の鉛直勾配が引き起こす比湿の時間変化について調べてみた。つまり、考えている層で水蒸気輸送量の収束があればそこでの比湿は増加し、逆に発散があれば比湿は減少するはずである。この関係を式で表わすと次のよ

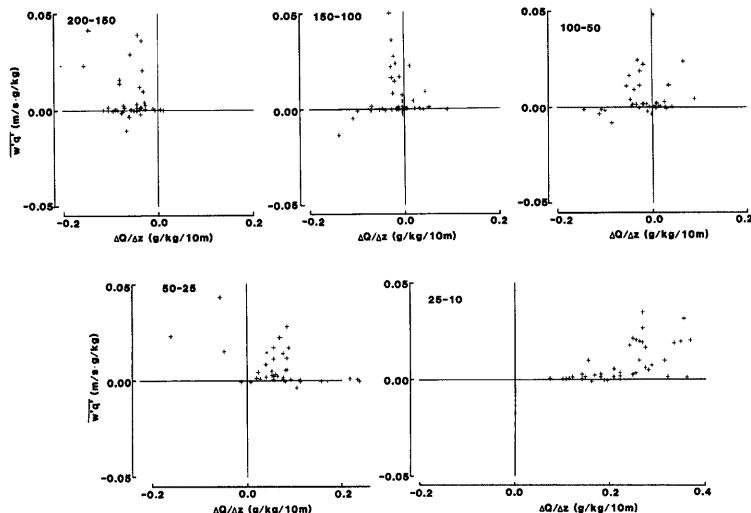


Fig. 15 The relationship between water vapor flux and specific humidity gradient for 5 layers

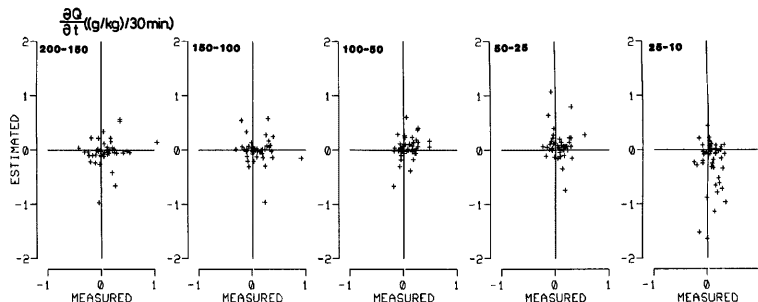


Fig. 16 Intercomparison of specific humidity time change during 30 minutes between estimated values from divergence of water vapor fluxes and measured values in 30 minutes

うになる。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = - \frac{\overline{\partial w'q'}}{\partial z} \dots \dots \dots (2)$$

厳密にはこの式の右辺には水平方向の非一様性に起因する項も入ってくるが、ここでは考えないこととする。Fig. 16 には前節と同じ 5 層について、横軸には 1 Run 約 27 分間のうちの比湿の時間変化（時間に対して比湿の変化を一次式で近似したものの傾き）、縦軸には右辺の水蒸気輸送量の勾配から推定した比湿の時間変化をいずれも 30 分間での変化率に換算して示してある。(2) 式が成立すれば原点を通り傾き 45° の右上りの直線上に分布するはずであるが、データはかなりばらついており、しかも実測値よりも推定値の方が大きく現れている。この図は観測したすべてのデータについて示したものであるが、そのうち、Fig. 12 に示した日中の大きな輸送量を示す 9 時間分についてのみ選び、3 時間平均の水蒸気輸送量の高度分布から推定した比湿の時間変化と実測値とを比較したのが Fig. 17 である。最下層と最上層を除けば、ほぼ正の相関

をしていると見ることができるが、ばらつきはやはり大きいようである。

4. 結 語

高さ 213m の気象観測用鉄塔を用い、200 m, 150 m, 100 m, 50 m, 25 m, 10 m の 6 高度で風速三成分と温度、湿度の乱流変動の測定を約24時間連続で行い、主として水蒸気輸送過程に関する解析を行った。その結果次のようなことが明らかとなった。

① 顕熱輸送量と同様に水蒸気輸送量についても夜間はほとんど $\text{flux}=0$ であるが、日中は混合層の発達と共に大きな上向きの値を示す。上向きの輸送が始まる時刻は、最上層 (200m) では最下層 (10m) より 2 時間ほど遅れるが、午後には最上層から $\text{flux}=0$ に戻り、約 1 時間半ほど遅れて最下層に達する。そして顕熱輸送量に比べて水蒸気輸送量の方がやや遅くまで上向きの輸送を保っている。

② 1 日全体の輸送量で見ると、顕熱輸送量の方は下層で大きく上層で徐々に減少する分布形をしているのに対し、潜熱輸送量は 200m 程度まではほぼ一様な分布をしている。

③ 水蒸気輸送のコスケクトルのピークの周波数は、高さ z に対し $z^{-0.7}$ で減少し、これは測定高度と風速の鉛直分布を考慮すると、輸送に寄与する長さのスケールがほぼ測定高度に比例するという結果になる。

④ 比湿の鉛直勾配と水蒸気輸送量の関係は、下層では正の相関が見られるが、上層へ行くにつれて負の相関が多くなるようである。

⑤ 比湿の時間変化と水蒸気輸送量の鉛直勾配との関係については、データのばらつきは多いが、鉛直勾配から推定した比湿の時間変化の方が大きな値をとるようである。

鉄塔を用いた大気境界層の水蒸気輸送の連続観測はこれまでにほとんど例がなく、ここに得られたデータは貴重なものである。今後更に詳細な解析を進めてゆくことはもちろんであるが、それと共に比湿の測定と水蒸気輸送量の測定の精度を向上させ、より信頼のおける観測データを種々の気象条件の下で得ることも必要である。

最後に本観測にあたりお世話になった気象研究所応用気象研究部の村山信彦部長、物理気象研究部の花房龍男室長、藤谷徳之助主任研究官に厚く謝意を表す。また、本研究の一部は文部省科学研究費補助金、特定研究(I) (No. 58101004, 研究代表者 山元龍三郎) によって行われた。

参 考 文 献

- 1) 塚本 修・光田 寧：大気境界層における水蒸気変動の乱流特性，京都大学防災研究所年報，第26号 B-1, 1983, pp. 385-392.
- 2) 山元龍三郎・光田 寧・文字信貴・塚本 修・林 泰一：大気境界層の乱流の観測的研究，特定研究(I)「大気圏・水圏における乱流」研究成果報告書，1984, pp. 45-52.
- 3) 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.
- 4) Caughey, S. J. and S. G. Palmer: Some Aspects of Turbulence Structure through the Depth of the Convective Boundary Layer, Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 105, 1979, pp. 811-827.
- 5) Donelan, M. and M. Miyake: Spectra and Fluxes in the Boundary Layer of the Trade-wind Zone, J. Atmos. Sci., Vol. 30, 1973, pp. 444-464.

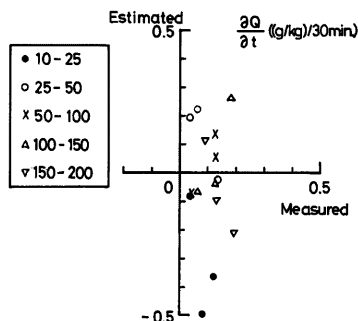


Fig. 17 Intercomparison of specific humidity time change during 30 minutes between estimated values from divergence of 3 hour averaged water vapor flux and measured values in 3 hours.