

大気境界層における水蒸気変動の乱流特性

塚本 修・光田 寧

TURBULENCE CHARACTERISTICS OF WATER VAPOR FLUCTUATION IN THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

By *Osamu* TSUKAMOTO and *Yasushi* MITSUTA

Synopsis

Turbulence measurements were carried out on the 213m meteorological tower in Tsukuba Science City. Water vapor fluctuations were measured together with temperature and three dimensional wind speed components at 25, 50 and 100m level of the tower. Vertical coherence of water vapor fluctuations show the form of exponential curve and the decay constant was evaluated as $k=5$. Power spectra of humidity fluctuations and cospectrum of water vapor and vertical wind component were obtained. The peak frequency decreases with increasing the height of measurement. The variances and covariances of water vapor and vertical wind component also decrease in the upper level. The similarity between humidity and temperature was very good in convective condition for each level.

1. は し が き

水蒸気変動の乱流特性を扱ったものは、これまでもいくつか見られ、著者らも水蒸気輸送量の直接測定に関連して調査し、赤外線湿度計あるいは紫外線を用いた Lyman- α 湿度計を用いれば、かなり精度の高い測定ができることを述べた¹⁾。しかし、これらは主に地表面にごく近い接地気層における研究であり、これよりももう少し上層のいわゆる大気境界層における水蒸気変動の研究は少なく、米国を中心にした航空機による海洋上での観測例がある程度で、陸上における塔を用いた固定点における水蒸気変動の研究は、これまでに報告されていない。

そこで著者らは、高さ 100m までの気層において水蒸気変動の乱流特性、および水蒸気輸送のメカニズムを調べるために観測塔を用いて観測的研究を行った。

2. 観 測 の 概 要

観測は1982年9月27日に筑波研究学園都市の気象研究所にある、高さ 213m の気象観測鉄塔を用いて行われた。この日は台風19号が日本海に抜け、南よりの4~5m/s の風が吹いており、ほぼ晴天であった。観測時刻は午後1時ごろより午後8時ごろまでである。なお、本観測は光田他²⁾の観測と並行して行われたものである。

高さ213mの観測塔の25m, 50m, 100mの三高度で風速三成分、温度、湿度の各変動量の測定を行った。用いた測器は三次元超音波風速温度計（海上電機、DAT-300）、熱電対乾湿計（海上電機、PY-100）を三高度に、水蒸気変動の測定のためには50m 高度には赤外線湿度計（海上電機、AH-100）を、25m, 100m 高度には Lyman- α 湿度計（Electromagnetic Research Corp. Model BLR）を設置し利用した。ここで熱電対乾湿計は水蒸気変動の振巾の校正及び湿度の絶対値の鉛直分布を見るために設置したものであるが、残念

ながら欠測が多く全時間記録が得られたものは50m高度のもののみであった。Ly- α 湿度計の振幅の校正は各高度での熱電対乾湿計の低周波側のスペクトルに Ly- α 湿度計のスペクトルを合わせる方法で行い、乾湿計のデータのない部分においてはその観測の前後のデータから内挿又は外挿した。Photo. 1 には超音波風速温度計に組み合わされた熱電対乾湿計と Lyman- α 湿度計の様子を示している。各測器の詳細については既報¹⁾に詳しく述べられているので、ここでは省略する。

これら各測器の信号は 20Hz で AD 変換して磁気テープに収録したが、解析に際しては元のデータを5ヶずつブロック平均して0.25秒毎のデータとして用いた。観測時間については、花房・藤谷²⁾によれば安定度が中立で高さが200m 程度までは、風速変動の標準偏差 σ_u とか σ_w については10分間をとれば全体の90%以上の値が得られるということになっているが、ここではやや不

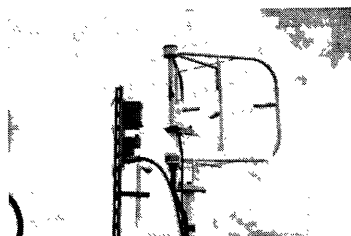


Photo. 1 Mounting of instruments; thermocouple psychrometer in the sonic anemometer antenna and Lyman-alpha humidimeter.

Table 1 Results of observation

Run NO.		8201-1	8201-2	8202-1	8202-2	8204-1	8204-2
Start Time (27th. Sep. 1982)		13:10	13:50	14:47	15:27	18:16	18:56
Duration (min.)		35	35	35	35	35	35
100m	WD(deg)	193	192	191	192	192	192
	U(m/s)	5.9	5.7	4.7	5.6	6.8	6.7
	σ_u (m/s)	0.77	0.70	0.73	0.65	0.58	0.54
	σ_w (m/s)	0.71	0.61	0.59	0.45	0.39	0.37
	$\sigma_T(^{\circ}\text{C})$	0.198	0.170	0.147	0.114	—	—
	$\sigma_q(\text{g/kg})$	0.207	0.157	0.188	0.129	0.258	0.239
	$\overline{u'w'}((\text{m/s})^2)$	-0.128	-0.0295	-0.127	0.0388	-0.0040	-0.0308
	$\overline{w'T'}(\text{m/s}^{\circ}\text{C})$	0.0684	0.0468	0.0363	-0.0088	-0.0225	-0.0160
	$\overline{w'q'}(\text{m/sg/kg})$	0.0768	0.0486	0.0605	0.0112	0.0151	0.0059
50m	σ_u (m/s)	0.96	0.77	0.89	0.77	0.74	0.63
	σ_w (m/s)	0.66	0.61	0.52	0.50	0.45	0.40
	$\sigma_T(^{\circ}\text{C})$	0.241	0.203	0.166	0.115	0.145	0.155
	$\sigma_q(\text{g/kg})$	0.165	0.140	0.118	0.116	0.088	0.099
	$\overline{u'w'}((\text{m/s})^2)$	-0.229	-0.121	-0.183	-0.0737	-0.0742	-0.0586
	$\overline{w'T'}(\text{m/s}^{\circ}\text{C})$	0.0799	0.0598	0.0431	0.0063	-0.0208	-0.0164
	$\overline{w'q'}(\text{m/sg/kg})$	0.0446	0.0326	0.0085	0.0196	0.0145	0.0119
25m	σ_u (m/s)	1.34	1.16	1.24	1.00	0.79	0.67
	σ_w (m/s)	0.75	0.75	0.59	0.62	0.44	0.44
	$\sigma_T(^{\circ}\text{C})$	0.327	0.253	0.184	0.141	0.189	0.207
	$\sigma_q(\text{g/kg})$	0.430	0.329	0.436	0.260	0.359	0.327
	$\overline{u'w'}((\text{m/s})^2)$	-0.401	-0.311	-0.308	-0.211	-0.0831	-0.0960
	$\overline{w'T'}(\text{m/s}^{\circ}\text{C})$	0.111	0.0752	0.0494	0.0136	-0.0271	-0.0279
	$\overline{w'q'}(\text{m/sg/kg})$	0.147	0.0941	0.124	0.0599	0.0369	0.0170

安定という条件もあるので、少し長くして1回の Run は約35分とした。つまり0.25秒毎のデータにして8192個のデータを取り扱っている。

3. 観測結果

ここで解析した6つの Run についての主な気象要素の統計量を各高度別に表したものが Table 1 である。6つの Run を通じて平均風向はほぼ南で、風速は 5m/s 程度とほぼ一定しているが、乱れについてみると、夕方から夜になるに従って変動の標準偏差の値及び乱流輸送量は小さくなり、 $\overline{w'T'}$ については18時ごろから向きが逆転している。しかし、水蒸気輸送量に関する $\overline{w'q'}$ については値は小さくなっているが、向きが逆転するところまではしていない。なお、ここに示した各要素のうち、温度変動 T' については超音波風速温度計によるもので、比湿変動 q' については赤外線湿度計あるいは Lyman- α 湿度計によるものである。

ここに示したデータのうち、不安定時の代表的な例として Run-8201-2 についての σ_w , σ_q , σ_T , σ_q 及び $-\overline{w'w'}$, $\overline{w'T'}$, $\overline{w'q'}$ の鉛直分布を図に示したのが Fig.1 である。各量とも上層にゆくにつれて値は減少してゆく傾向を示し、地表面付近ほど乱れは大きくそれに伴う各輸送量についても大きな値を示してはる。特に 50m 高度と 100m 高度との差はあまり大きくないが、25m と 50m との差はかなりのきりしている場合が多いようである。なお、ここに示した場合の最下層の顕熱輸送量は約 200W/m²、潜熱輸送量は約 430W/m² で Bowen 比は 0.47 程度となる。また水蒸気輸送量は蒸発量に換算すると約 0.4mm/hour となる。この値は蒸発量としてはやや大きいが、台風の影響で前日降雨があり地表面がかなりぬれていたことによるものと思われる。また、ここで 50m 高度での水蒸気輸送量 ($\overline{w'q'}$) と水蒸気変動の標準偏差 (σ_q) の値が 100m 高度のものよりもやや小さくなっているが、これはこの高度で用いた赤外線湿度計が、時定数 300 秒の high pass filter を用いているために、低周波部分の寄与がカットされたことによると考えられる。この高度に併せて設置した熱電対乾湿計のデータを図に黒丸で示したが、これによれば 100m 高度のものとはほぼ同程度の値となっている。

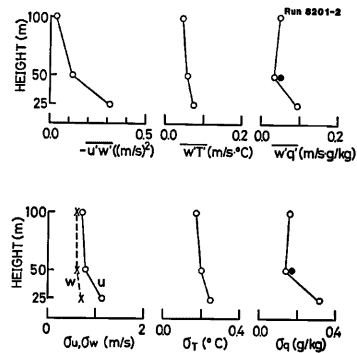


Fig. 1 Vertical profiles of covariances and standard deviations. Closed circles in $\overline{w'q'}$ and σ_q show the data of thermocouple psychrometer at 50m level. Run 8201-2 (13:50-14:25)

Fig.2 に示したものは各高度における風速の鉛直成分 (w')、比湿 (q') 及びその積 ($w'q'$) の時系列を約35分間にわたって示したものである。これは先に述べた不安定時の一例であるが、各高度とも比湿変動には対流性のブルームの存在を示すような鋸歯状の変動が卓越しており、ここには示さなかったが、温度変動についても比湿変動とほぼ同じ形の変動が見られる。Fig.1 に見られたように、 w 成分については高度による変動の大きさの差はあまり大きくないが、比湿変動については 25m 高度のものが変動の振幅が大きく、また短周期の変動が卓越している。各高度の最上段に示した $w'q'$ を時間的に積分したものが水蒸気輸送量を示すものになるが、 w が上向きで q も増加する時に $w'q'$ は大きくなる所が多く見受けられる。

次にこれらの各変動をスペクトル解析した例について示す。Fig.3 には各高度における比湿変動及び温度変動のパワースペクトルの一例を示す。 q のパワースペクトルについては、Fig.1 の σ_q の鉛直分布に見られたように 25m 高度のものが他の高度に比べてかなり大きくなっており、また 0.01Hz 以上では 50m 高度のものが 100m 高度のものを上まわっている。50m 高度の低周波側については、Fig.1 の説明でも述べたように、赤外線湿度計の H. P. F. のために急激に減衰している。昨年度の報告¹⁾のような地上 2 m 程度の低い

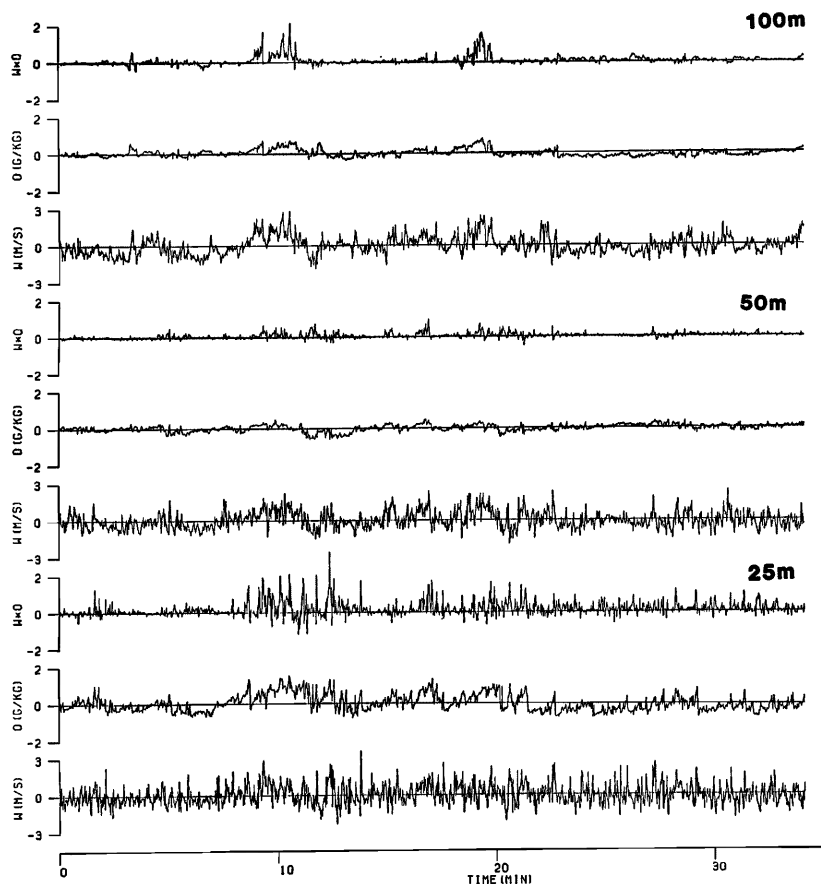


Fig. 2 An example of time histories of the cross product of vertical wind component and specific humidity fluctuation, and the fluctuations of both components for each level from the top to the bottom.

高度での測定では、このような H. P. F. を用いることによる低周波側の loss はほとんど問題にならない。しかし、地上数十m程度の高度では、この図に示すように振幅が小さくなるばかりでなく、変動の主たる周波数が低周波側によってくるので、このことが大きく影響してくる場合がある。50m高度での熱電対乾湿計による低周波側のパワースペクトルを併せて示したが、これを他の2高度のものとを比較するとピークの移動の様子ははっきりとわかる。接地気層においては、温度変動のパワースペクトルの形は Monin-Obukhov の相似則によって、一般的に表わせることが Kaimal et al¹⁰⁾ によって示された。

$$\frac{n \cdot S_T(n)}{T_*^2} = \begin{cases} 53.4f/(1+24f)^{5/3} & ; f \leq 0.15 \\ 24.4f/(1+12.5f)^{5/3} & ; f \geq 0.15 \end{cases}$$

$$T_* = -\frac{\overline{w'T'}}{u_*}, \quad f = nz/L$$

ここではこれをそのまま比湿変動にも適用できるものと考えて、25m高度のものについてあてはめてみてその結果を図中に細い実線で示してある。結果は実測値とかなり良く一致しており、接地気層についての水蒸気変動のパワースペクトルの一般形は、温度変動のパワースペクトルと同じもので表わせると考えてもよさそうである。しかし、接地気層より上の50m、100m高度でのパワースペクトルの形は、constant flux の仮定を用いて接地層内での flux で規格化する Monin-Obukhov の相似則を用いると値は小さくなりすぎてしまい、単なるこれの延長では表現できなくなる。これは上層では flux が減少してゆくためと考えられ、今後検討してゆかねばならない問題である。

次に水蒸気輸送量のコスペクトルについて Fig.4 に示す。25m高度での flux の値が上の2高度に比べてかなり大きいことはこれからわかるが、それと共に輸送に主として寄与する周波数の目安となるコスペクトルのピークの周波数が25mでは0.01~0.1Hzにあるのに対し、50mでは0.01Hz 付近、100mでは0.001~0.01Hz 付近となっている。また、50m高度では図中に乾湿計によるデータを白丸で示したが、これに比べて H. P. F. による低周波側の loss は幾分見られるようである。また、高周波側については、乾湿計のデータと赤外線温度計のデータとはほぼ一致しており、前年の報告¹⁾に見られたような乾湿計による flux の損失はほとんど見られない。これは測定高度が高いために flux に寄与する周波数範囲が、低周波側数に移動したことによるものと考えられ、測定高度が高ければ乾湿計による応答の遅れは水蒸気輸送量の直接測定についてはあまり問題にならないと言える。また、このコスペクトルの形は顕熱輸送量のコスペクトルの形とほぼ相似形をしている。

次に水蒸気変動と温度変動との相似性について考えてみる。Fig.5 に示したものは各高度における水蒸気変動と温度変動とのコヒーレンスと位相のずれである。コヒーレンスについては0.1Hz よりも低周波側では、ほとんど0.8以上の値を示しており、特に下層ほど良い相関を示している。また位相のずれについて H. P. F. の影響が現れている50m高度の低周波側を除いて、ほとんど 0° 付近である。これは午後の不安定な場合の例であるが、このような場合には温度変動と水蒸気変動がほとんど同じ変動をしていることを示すもので、対流ブルームのメカニズムを考える上で非常に興味深い。

一方、夕方から夜にかけては顕熱輸送は下向きとなるのに対し、水蒸気輸送は小さいながらもまだ上向きを保っていることは Table 1 に見られたとおりである。このような条件下での水蒸気変動と温度変動とのコヒーレンスと位相のずれを Fig.6 に示す。ここに示したのは25m高度のもののみであるが、0.01~1.0Hz 程度の範囲ではコヒーレンスはやはり1に近いが、位相のずれを見るとほぼ 180° となっており、このような場合には温度と比湿の主な変動は全く逆位相で動いていることになる。

最後に比湿変動と温度変動の鉛直方向のコヒーレンスについて調べてみた。一般に水平風速 u についての鉛直方向2点間のコヒーレンスは

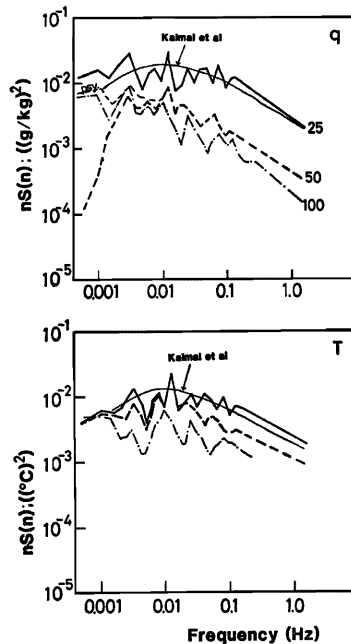


Fig. 3 Typical power spectra of specific humidity and temperature for each level. Fine solid line are drawn from the universal psectrum of temperature by Kaimal et al⁴⁾. Fine dashed line in the q-spectra is the data of psychrometer.

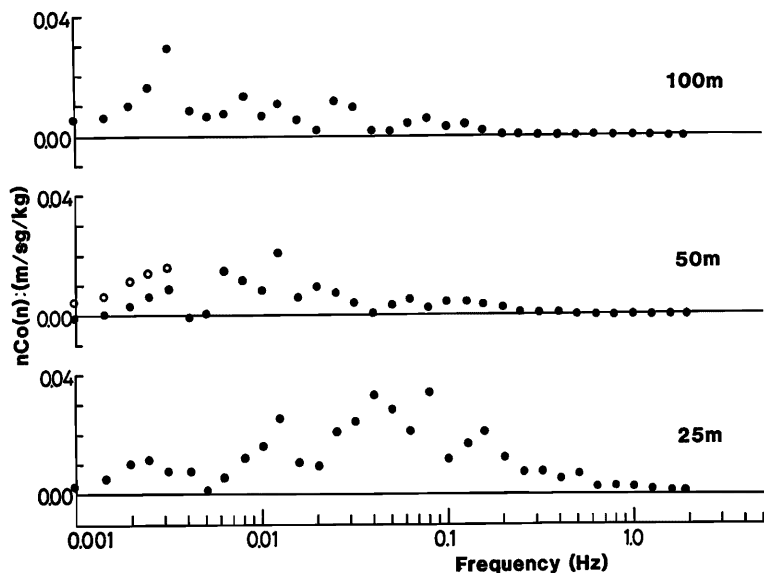


Fig. 4 Typical cospectrum of vertical velocity and specific humidity for each level. Open circles at 50m level show the data of psychrometer.

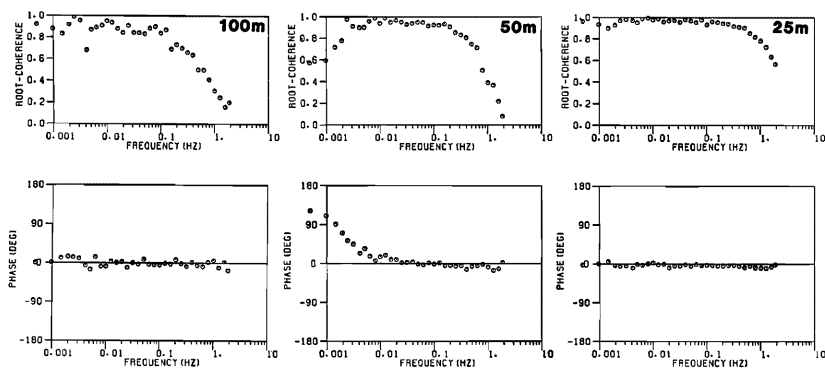


Fig. 5 Root-coherence and phase lag between temperature and specific humidity at each level for unstable condition.

$$\sqrt{Co_h} = \exp(-k \cdot n \Delta z / U)$$

の形で表わることがよく知られている。ここで n は周波数、 Δz は2点間の高度差、 U は平均風速を表わし k は減衰定数として定義されるもので $k=5 \sim 8$ 程度の値が多く得られている³⁾。Fig.7 には風速変動の w , u 成分と温度、比湿の各変動について 25m と 50m 及び 25m と 100m の各高度の二点間のコヒーレン

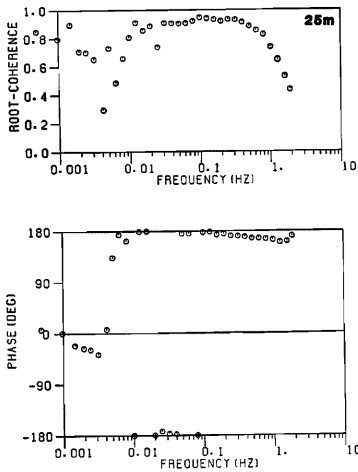


Fig. 6 Root-coherence and phase lag between temperature and specific humidity at 25m level for stable condition.

スの値を示した。これによると風速の u 成分についてはほぼ $k=8$ 程度の曲線で近似できる形となっている。一方、鉛直成分 w については岩谷・塩谷⁶⁾によると $k=3\sim5$ 程度の値が得られているが、ここに示した結果では u 成分と同程度の値をとるようである。また温度変動及び比湿変動については、これまでに k の値は得られていないが、ここに示すデータでは $k=5$ 程度の曲線で近似できるようである。

4. 結 語

高さ213mの気象観測用鉄塔を用いて25m, 50m, 100mの各高度で風速及び温度変動の測定と併せて水蒸気変動の測定を行った。その結果、今回の観測時についての大気境界層における水蒸気変動の特性として、次のようなことがわかった。

- ① 接地気層よりも上の境界層においては、運動量あるいは顕熱輸送量に見られるように、水蒸気輸送においても輸送に寄与する周波数帯は低周波側に移ってゆくことが示され、その輸送量は上層にゆくにつれて減少する。それに伴い、熱電対乾湿計の高周波側での応答の遅れは、輸送量の評価にはあまり問題にならないようである。
- ② 温度変動と水蒸気変動については、対流の活発な不安定時にほぼ同一の位相で高い相関をもって変化しており、また安定時でしかも水蒸気輸送が上向きの時には、全く逆位相で動いていることがわかった。
- ③ 鉛直方向二点間での温度及び比湿変動のコヒーレンスは減衰定数 $k=5$ 程度の指数関数の形で近似できる

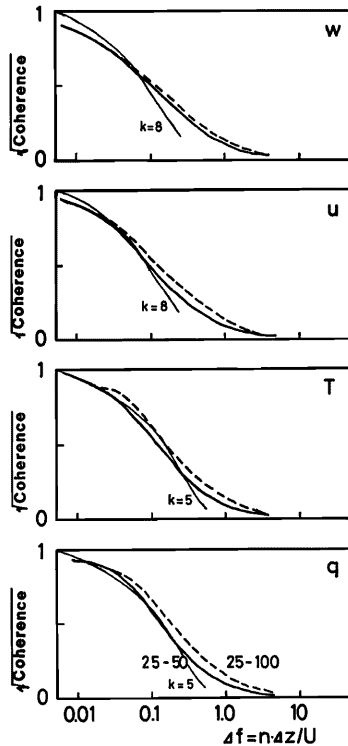


Fig. 7 Root-coherence of turbulence between two levels as functions of normalised frequency. Fine solid lines are drawn from the exponential curves with $k=8$ for w and u , and $k=5$ for T and q .

ことがわかった。

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，主任研究官・藤谷徳之助氏に厚く謝意を表します。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. 57109008；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：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.
- 2) 光田 寧，塚本 修・片岡 毅：大気境界層における乱流エネルギー収支の研究，京都大学防災研究所年報，第26号 B-1, 1983, pp. 375-383.
- 3) 花房龍男・藤谷徳之助：強風時の境界層の構造について，第7回風工学シンポジウム論文集，1982, pp. 15-22.
- 4) Kaimal, J. C., J. C. Wyngaard, Y. Izumi and O. R. Cote : Spectral characteristics of surface layer turbulence, Quart. Journ. Roy. Met. Soc., Vol. 98, 1972, pp. 563-589.
- 5) 塩谷正雄：強風の性質，開発社，1978, 193p.
- 6) 岩谷祥美・塩谷正雄：風速鉛直成分の鉛直相関，日本気象学会秋季大会講演予稿集，1982, pp. 97.