

## 大気接地層中の運動量の乱流輸送量の 鉛直輸送過程について

林 泰 一

### TURBULENT TRANSFER PROCESS OF VERTICAL MOMENTUM FLUX IN THE ATMOSPHERIC SURFACE LAYER

*Taiichi HAYASHI*

#### Synopsis

The turbulent transfer process of the vertical momentum flux in the atmospheric surface layer is investigated. The transfer process of large vertical momentum flux is associated with the phenomena which are not considered as the random fluctuation. The quadrant analysis of wind velocity fluctuation shows that the contribution of vertical momentum flux from the fourth quadrant ( $u > 0, w < 0$ ) is larger than that from the second quadrant ( $u < 0, w > 0$ ). The intermittent transfer is evaluated by the conditional sampling method. The vertical momentum flux is transferred efficiently in the case of the maxima of the streamwise wind velocity fluctuation.

#### 1. はじめに

大気接地層中の運動量の鉛直輸送は、平均的に行なわれているわけではなく、間欠的に大きな輸送がある。

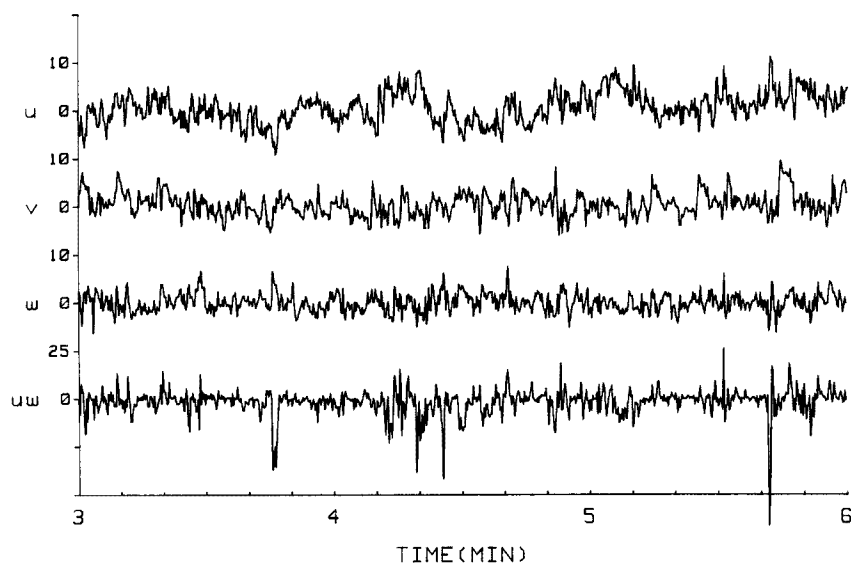


Fig. 1. Sample traces of three components ( $u, v, w$ ) of wind velocity fluctuation and vertical momentum flux ( $uw$ ). Units are  $m/s$  for wind velocity and  $(m/s)^2$  for momentum flux.

たとえば、Fig. 1には、風速変動の3成分  $u$ ,  $v$ ,  $w$  及び運動量の鉛直輸送量  $uw$  の3分間のトレースを示すが、 $uw$  のトレースには、ときどきスパイク状の変動が見られる。実験室内の風洞実験や水槽実験では、可視化実験や条件付採集法を用いた解析によって、バーストなどの境界層中の組織運動の解明が進んでいる<sup>1)~3)</sup>のに対し、大気接地層中では、観測場所や計測器の配置などの観測上の問題のために、運動量の鉛直輸送の間欠性についての報告例は数例にすぎない<sup>4)~6)</sup>。

ここでは、京都大学潮岬風力実験所において得られた風速変動の記録をもとにして、条件付採集法を用いて解析した結果について報告する。用いた資料は、これまでに、著者らによる、突風前線の解析や、風速変動の時空間相関やスペクトルなどの報告<sup>7)~11)</sup>に用いたものと同時に収集した3次元超音波風速計によって得られた風速変動の記録である。

## 2. 観測および解析の概要

観測は、京都大学防災研究所の野外実験場で、1980年12月から翌年1月の冬季季節風の吹き出し時に行なった。このときの、平均風向は、北西ないし、西北西である。この方向の風上は、約2 kmにわたって、ほぼ平坦であり、高さ2 m程度の雑木が繁っている。野外実験場は、この雑木を切り払い、高さ10~20 cmの雑草で覆われている。風速変動の3成分は、高度12 cmに取り付けられた3次元超音波風速計（海上電気PAT 311-1）によって測定した。観測時間は、1回30分とし、風速変動の信号は、0.25秒毎に数値化して、磁気テープに収録した。この資料をもとにして、渦相関法によって運動量の輸送を計算した。

## 3. 風速変動の統計量

解析した12の観測例の風速変動の3成分  $u$ ,  $v$ ,  $w$  の平均値、標準偏差、Skewness、Flatnessの値をTable 1に示す。平均風速は、いずれの観測例でも6 m/s以上で比較的強風時のデータである。この観測では、気温の測定は行なっていないため、大気の熱的な安定度の評価はできないが、風速が比較的大きいことから、ほぼ中立状態であったと考えられる。

$u$  と  $w$  の2次元確率密度分布を作ってみたのが、Fig. 2 a) である。この例は、Run 1 についてのものである。図中の数字は、確率密度を100倍したものを示している。数字0が書かれているのは、実際には、観

Table 1. The statistics of three components ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ) of wind velocity fluctuation

RUN	MEAN	RMS			SKEWNESS			FLATNESS		
		$\sigma_u$	$\sigma_v$	$\sigma_w$	$S_u$	$S_v$	$S_w$	$F_u$	$F_v$	$F_w$
	$U$ m/s	m/s	m/s	m/s						
1	14.03	3.38	2.68	2.03	0.14	0.14	0.11	2.82	3.55	3.20
2	13.62	3.50	2.41	1.89	0.28	-0.02	0.09	2.90	3.19	3.15
3	12.21	2.88	2.42	1.72	0.11	-0.35	0.09	2.90	3.33	3.10
4	11.21	3.63	2.49	1.85	0.50	0.12	0.02	3.22	3.11	3.26
5	9.12	2.70	1.92	1.45	0.30	0.12	0.08	2.89	3.69	3.26
6	7.54	2.31	1.92	1.29	0.23	-0.06	0.12	3.16	3.25	3.09
7	8.20	2.27	2.03	1.32	0.17	-0.08	0.24	2.75	3.02	3.26
8	10.20	2.56	2.13	1.61	0.10	-0.08	0.09	2.80	3.41	3.54
9	9.71	2.54	2.15	1.53	0.00	-0.15	0.17	2.61	3.09	3.35
10	10.76	3.19	2.44	1.74	0.25	-0.20	0.15	2.92	3.17	3.09
11	7.53	2.29	1.77	1.22	0.43	-0.28	0.19	3.48	3.36	3.43
12	6.90	1.95	1.66	1.23	-0.04	-0.21	0.04	2.82	3.22	3.13

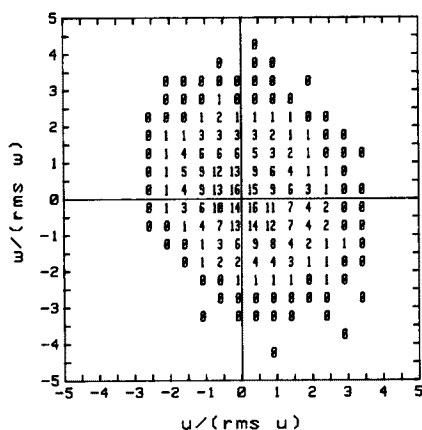


Fig. 2a. Joint probability density distribution of  $u$  and  $w$  for Run 1. The probability density is shown as 100 times of its original value.

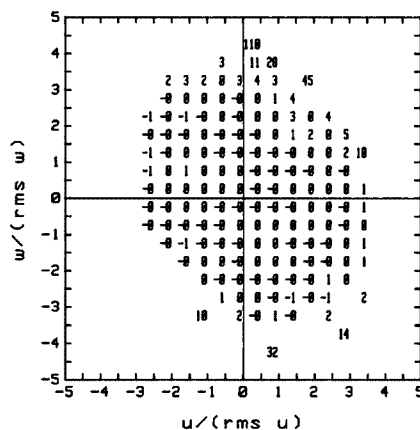


Fig. 2b. Difference distribution of the joint probability density between the observed one (Fig. 2a) and the Gaussian. The figures show the relative differences of the observed probability density for the Gaussian as percent.

測値は存在するけれども、その値が小さく、1以下の場合である。空白部は観測値がなく完全に0の場合である。確率密度の広がり、 $u$ については、その標準偏差 $\sigma_u$ の-2.5倍から3倍、 $w$ については、 $\sigma_w$ の-4.5倍から4.5倍の範囲に広がっている。第2象限( $u < 0, w \geq 0$ )と第4象限( $u \geq 0, w < 0$ )における確率密度の広がりを比べてみると、第4象限の方がやや大きい。この分布と2次元正規確率密度分布とを比較してみた。2次元正規確率密度は $u_n = u/\sigma_u, w_n = w/\sigma_w$ とすると

$$P(u_n, w_n) = \frac{1}{2\pi(1-r^2)^{1/2}} \exp\left\{-\frac{u_n^2 - 2ru_nw_n + w_n^2}{2(1-r^2)}\right\} \dots\dots\dots (1)$$

である。ここで $r = \overline{uw}/\sigma_u\sigma_w$ で、このRun 1では、 $\overline{uw} = 2.15$  m/s,  $\sigma_u = 3.38$  m/s,  $\sigma_w = 2.03$  m/sである。Fig. 2a)に示した $u$ と $w$ の2次元確率密度の観測値と $P(u_n, w_n)$ との差を $P(u_n, w_n)$ に対する百分比で示したものがFig. 2b)である。観測値は、原点から離れたところでは、多少正規分布との間に差があるが、全体としては、2次元正規確率密度分布で、 $u$ と $w$ の2次元確率密度は表現しうる。

#### 4. 運動量の鉛直輸送量の統計量

すべての観測例に対して、下向きの運動量輸送量についても統計量を求め、Table 2に示す。Skewnessは、すべての観測例で負で平均は-1.35であり、Flatnessは平均11.35で正規分布の場合の3より大きい。上向きと下向きの運動量の輸送量の最大値を比較すると、Run 9を除いて、下向きの場合の方が大きい。 $uw$ の確率密度の例(Run 1)をFig. 3に示すが、実線で示される正規分布とは異なった分布を示している。 $uw/\sigma_{uw} < -2, uw/\sigma_{uw} > 3$ では、観測された確率密度は、正規分布で期待されるものよりも大きい。このことは、 $uw$ の変動がランダムではなく、 $uw$ の大きな輸送が何かランダムとは考えられない変動の存在を示唆している。先きに述べたように、風速変動 $uw$ の確率密度は正規分布で表現できるのに対し、それらの積 $uw$ の確率密度が異なった分布を示すのは興味深い。

Table 2. The statistics of vertical momentum flux ( $-uw$ )

RUN	MEAN	RMS	SKEWNESS	FLATNESS	UPWARD MAXIMUM	DOWNWARD MAXIMUM
	$-\overline{uw}$ (m/s) <sup>2</sup>	$\sigma_{uw}$ (m/s) <sup>2</sup>	$S_{uw}$	$F_{uw}$	(m/s) <sup>2</sup>	(m/s) <sup>2</sup>
1	2.15	6.95	-1.43	11.20	-34.75	72.79
2	2.32	6.70	-1.16	8.87	-41.43	51.15
3	1.75	4.97	-1.37	10.26	-27.02	49.06
4	2.26	6.74	-1.65	15.46	-38.01	88.50
5	1.41	3.78	-0.97	9.31	-33.04	36.12
6	0.95	3.23	-1.33	10.87	-27.96	33.01
7	1.03	3.09	-1.36	8.79	-15.36	23.03
8	1.20	4.18	-1.05	9.14	-24.79	32.45
9	1.39	3.87	-0.83	9.43	-39.10	27.44
10	2.23	5.60	-1.58	12.26	-43.51	66.53
11	0.98	3.05	-2.09	22.01	-28.85	43.05
12	0.86	2.40	-1.32	9.58	-10.96	22.05

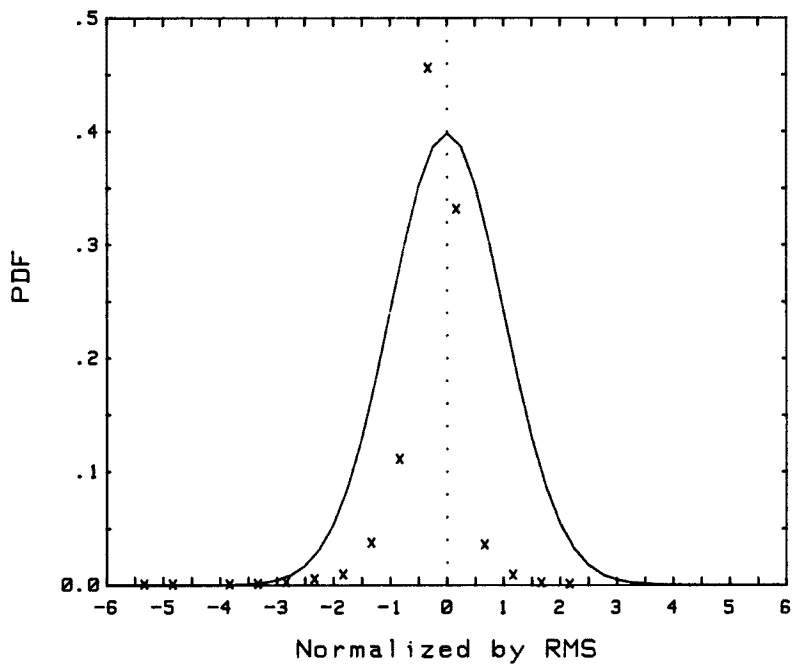


Fig. 3. Probability density distribution of vertical momentum flux ( $uw$ ) for Run 1. Solid line shows the Gaussian.

### 5. 運動量の輸送過程の分類

運動量の輸送の形態を, Willmarth と Lu に従って<sup>12)</sup>,  $u$  と  $w$  の符号によって次のように4つの事象に分類する。

- i)  $u \geq 0, w \geq 0$  outward interaction

- ii)  $u < 0, w \geq 0$  ejection
- iii)  $u < 0, w < 0$  inward interaction
- iv)  $u \geq 0, w < 0$  sweep

さらに  $|uw| > H|\overline{uw}|$  ( $H$  は hole size と言われる定数) という条件を加えて、瞬間瞬間の  $uw$  について区分けをして、発生頻度と平均輸送量  $\overline{uw}$  に対する寄与を  $H$  の関数として求めてみた。

Run 1 について、発生頻度分布を Fig. 4, 輸送量の寄与の分布を Fig. 5 に示す。Fig. 4 の発生頻度の分布は、3. で述べた  $u$  と  $w$  の 2 次元確率密度分布の各象限で  $|uw| > H|\overline{uw}|$  の条件を満たすような双曲線の外側の部分について、確率密度を積分したものと同一のものであり、累積頻度 (分布) である。  $H=0$  のときには、30 分間の運動量の平均輸送量に対する各象限からの寄与を示す。その割合は、  $u \geq 0, w < 0$  のときが

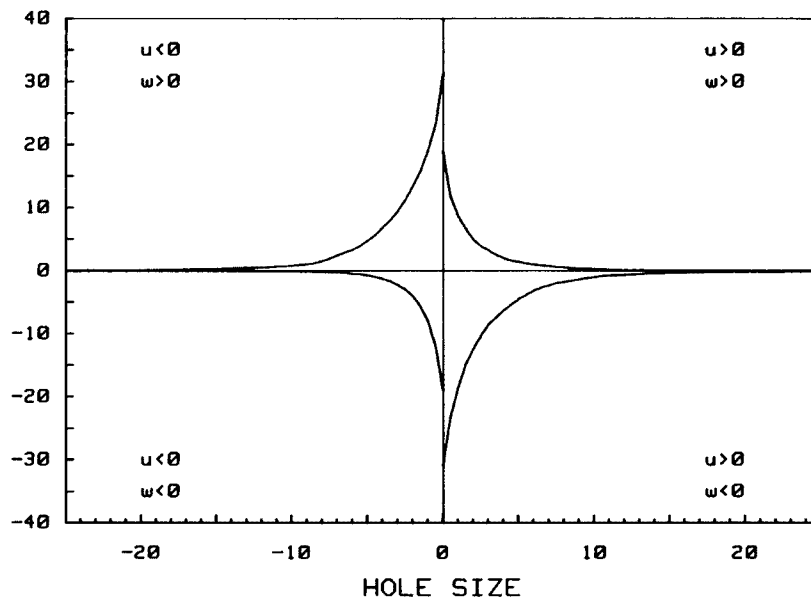


Fig. 4. Quadrant distribution of frequency of vertical momentum flux.

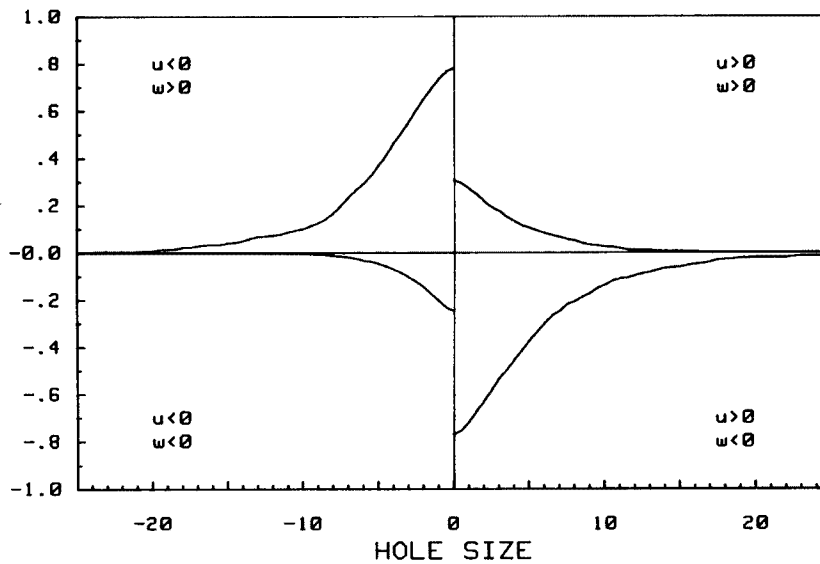


Fig. 5. Quadrant distribution of contribution of vertical momentum flux.

31%,  $u < 0, w \geq 0$  のときが78%,  $u < 0, w < 0$  のときが25%,  $u \geq 0, w < 0$  のときが77%であった。 $uw > 0$  となる第1, 3の象限からの寄与は, 第2, 4象限に比べると, すべての  $H$  に対して小さく,  $H=15$  を越えると数%になる。これに対し,  $uw < 0$  の場合には,  $H=10$  でも第2象限からは10%, 第4象限からは14%の寄与があることがわかる。第2象限と第4象限からの寄与の割合を比べると,  $H=5$  程度までは, ほぼ等しいか, やや第2象限の寄与の方が大きい, それ以上の  $H$  では, 第4象限の寄与の方が大きくなる。同様な結果が, 他の観測例についても得られた。以上の結果は, 風洞中の壁, 壁面上での実験や<sup>13)</sup>, とうもろこし畑上での実験結果<sup>14)</sup> とよく一致している。また, 気象研究所の213 mの気象観測用鉄塔で, 高度10, 25, 50, 100 mの4点で得られた結果では, すべての  $H$  について10 m高度では第4象限の寄与がやや大きく, 高度の増加とともに第2象限の寄与が大きくなるという結果が得られている<sup>5)</sup>。このときの高度10 mでは, すべての  $H$  について第4象限の寄与が大きく, 今回の結果とは  $H < 5$  において食い違う結果となった。

### 6. 風速変動の極大極小の場合の運動量の鉛直輸送

4で述べたように, 運動量の鉛直輸送量の  $uw$  の確率密度分布が正規分布とは異なった分布の形をしており,  $|uw|$  の値が大きいところでは, ランダムとは考えられないような変動の存在が示唆された。ここでは, 風速変動  $u$  の極大や極小のときの  $uw$  の変動について調べてみた。

$u$  の極大値がその標準偏差  $\sigma_u$  の3倍よりも大きいという条件に合う場合をサンプルし,  $u, v, w, uw$  の平均的なトレースを作ってみた。Run 1の例を Fig. 6に示す。この例では, 条件に合うような  $u$  の極大の検出数は11個であった。 $u$  の極大の時が丁度時間の原点となるようにして, その前5秒, 後10秒について

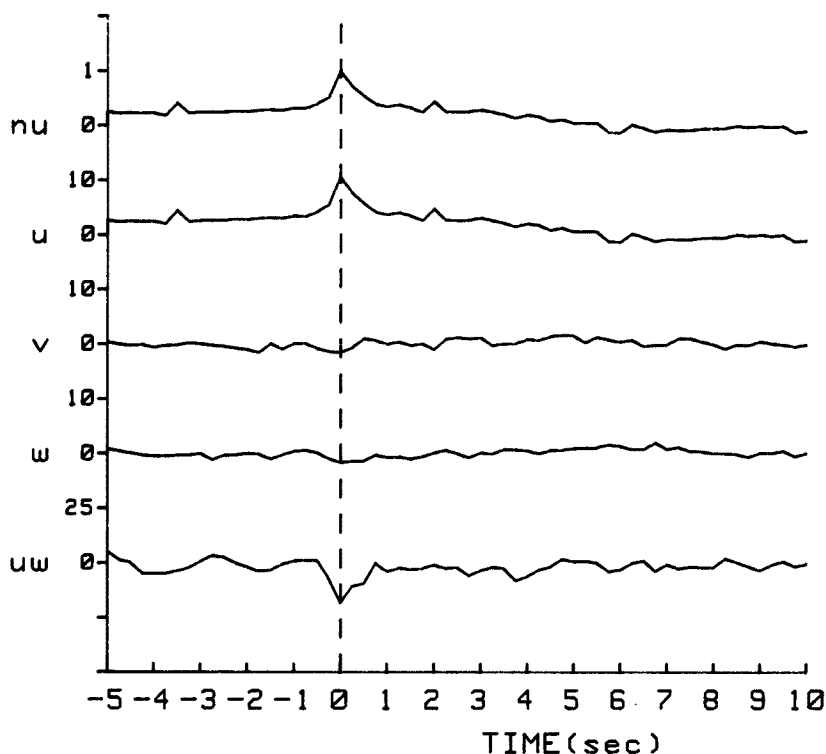


Fig. 6. Conditional average traces of three components ( $u, v, w$ ) of wind velocity fluctuation and vertical momentum flux ( $uw$ ) when the maxima of  $u$  are more than the three times of  $\sigma_u$ .  $nu$  show the average trace of normalized  $u$  by maximum of  $u$ .

のトレースを重ね合わせて平均したものである。 $u$ の極大の時には、平均的には、 $w$ は負で、 $uw$ は下向きである。 $u$ の極大の前後0.5秒ずつ計1秒間の $uw$ の平均値は、 $-8.96 \text{ (m/s)}^2$ で、この値は30分間の $uw$ の平均値 $-2.15 \text{ (m/s)}^2$ で、4.17倍である。ここで検出された11個の極大を中心とする1秒間というのは、時間の割合としては、全観測時間30分のわずか0.6%にすぎないが、この間の運動量の輸送に対する寄与は、30分間の総輸送量の2.5%を占める。他の解析例についての解析結果もTable 3に示す。検出例は、観測連

Table 3. Conditional statistics of vertical momentum flux when the maxima of the streamwise wind velocity fluctuation are more than three times of rms of  $u$  ( $\sigma_u$ ).  $-\overline{uw}$  is the 30 minutes average of  $-uw$  and  $-\widetilde{uw}_c$  is the 1 second average of  $-uw$

RUN	DETECTED NUMBER	TOTAL AVERAGE	CONDITIONAL AVERAGE	RATIO	TIME FRACTION	FLUX CONTRIBUTION
		$-\overline{uw}$ (m/s) <sup>2</sup>	$-\widetilde{uw}_c$ (m/s) <sup>2</sup>	$-\widetilde{uw}_c/(-\overline{uw})$	%	%
1	11	2.15	8.96	4.17	0.61	2.55
2	11	2.32	13.92	6.00	0.61	3.67
3	10	1.75	10.03	5.73	0.56	3.08
4	25	2.26	11.85	5.24	1.39	7.28
5	15	1.41	5.54	3.93	0.83	3.27
6	16	0.95	6.18	6.50	0.89	5.78
7	8	1.03	6.31	6.12	0.44	2.72
8	4	1.20	6.31	5.26	0.22	1.17
9	3	1.39	3.21	2.31	0.17	0.39
10	12	2.23	11.78	5.28	0.67	3.52
11	22	0.98	9.95	10.15	1.22	12.41
12	5	0.86	8.19	9.52	0.28	2.64

Table 4. Same as Table 3 except for when the minima of the streamwise wind velocity fluctuation are less than three times of  $-\sigma_u$

RUN	DETECTED NUMBER	TOTAL AVERAGE	CONDITIONAL AVERAGE	RATIO	TIME FRACTION	FLUX CONTRIBUTION
		$-\overline{uw}$ (m/s) <sup>2</sup>	$-uw_c$ (m/s) <sup>2</sup>	$-\widetilde{uw}_c/(-\overline{uw})$	%	%
1	—	2.15	—	—	—	—
2	—	2.32	—	—	—	—
3	1	1.75	16.19	9.25	0.06	0.51
4	—	2.26	—	—	—	—
5	—	1.41	—	—	—	—
6	1	0.95	16.67	17.55	0.06	0.98
7	—	1.03	—	—	—	—
8	6	1.20	9.01	7.51	0.33	2.50
9	4	1.39	6.64	4.78	0.22	1.06
10	—	2.23	—	—	—	—
11	—	0.98	—	—	—	—
12	2	0.86	5.95	6.92	0.11	0.77

によってばらつきがあり、多い場合には25個も検出されるが、少ない場合はわずか3個にすぎない。検出された  $u$  の極大を中心とする1秒間の運動量の平均輸送量は、30分間の平均輸送量の2~10倍である。観測時間30分に対する時間の割合は、0.2~1.5%であるが、その間の輸送量の寄与は、0.4~12.4%で、いずれの例も、輸送の効率が良いことを示している。

$u$  の極小が  $-3\sigma_u$  よりも小さいという条件の場合についても調べてみた。Table 4 に示すように、12の解析例のうちで、条件に合うような検出例があるのは、6例であり、そのうちの4例は、検出個数が1個ないし2個である。残りの2例では、Run 8 で6個、Run 9 で4個である。この2例は  $u$  の極小の場合の検出個数が  $u$  の極大の場合よりも多く、他の観測例とは状況が異なる。この2例を除けば、いずれも、 $u$  の極大の場合の方が検出個数は多い。

## 7. 結 語

大気接地層中の運動量の鉛直輸送過程について、条件付採集法を用いて解析した。風向方向と鉛直方向の風速変動  $u$ ,  $w$  の2次元確率密度分布は、正規分布によって表現しうが、運動量の鉛直輸送量  $uw$  の分布は正規分布とは異なっていて、大きな輸送は、ランダムとは考えられないような変動によることがわかった。さらに、運動量が下向きの場合 ( $uw < 0$ ) でも、 $u > 0$ ,  $w < 0$  のときと  $u < 0$ ,  $w > 0$  のときでは、 $|uw|$  が大きいときには、必ずしも同じような寄与をしておらず、 $u > 0$ ,  $w < 0$  の場合の寄与が大きい。

$u$  の極大が  $3\sigma_u$  より大きい場合は、 $u$  の極小が  $-3\sigma_u$  よりも小さい場合よりも存在する確率は大きく、そのときには、運動量の鉛直輸送の効率がよい。

今後は、多数の3杯風速計を用いて、同時に観測を行なった風速の空間分布の資料を利用して、運動量の輸送の大きい場合の現象について調べていきたい。

## 参 考 文 献

- 1) Kline, S. J, W. C. Reynolds, F. A. Schraub and p. w. Runstadher: The Structure of Turbulent Boundary Layer, J. Fluid Mech Vol. 30, 1967, pp. 741-773.
- 2) Grass, A. J.: Strutral Features of Turbulent Flow over Smooth and Rough Boundaries, J. Fluid Mech, Vol. 50, 1971, pp. 233-255.
- 3) Kim, H. T., S. J. Kline and W. C. Reynolds: The Prediction of Turbulente near asmooth wall in a Turbulent Boundary Layer, J. Fluid Mech, Vol. 50, 1971, pp. 133-160.
- 4) Finnigan, J. J.: Turbulence in Waving Wheat, II Structure of Momentum Transfer, Boudary Layer-Meteorol. 16, 1979, pp. 213-236.
- 5) 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。大気圏，水圏における乱流研究成果報告書，1984，pp. 45-52.
- 6) Scholds, J. L. J: The Detection and Measurement of Turbulent Structures in the Atmosphiric Surface Layer, Boundary Layer Meteorol. 29, 1984, pp. 39-58
- 7) 石崎潑雄・光田寧・林泰一：潮岬における突風前線の観測について(1)，京都大学防災研究所年報，第23号，B-1，1980，pp. 257-270.
- 8) 石崎潑雄・光田寧・林泰一：突風前線の観測について(その2)，京都大学防災研究所年報，第24号，B-1，1981，pp. 319-329.
- 9) 石崎潑雄・光田寧・林泰一：突風前線の観測について(その3)，京都大学防災研究所年報，第25号，B-1，1982，pp. 247-253.
- 10) 石崎潑雄・光田寧・林泰一：強風時の風速変動の時空間相関について，京都大学防災研究所年報，第28号，B-1，1985，pp. 407-414.
- 11) 林泰一：強風時の風速変動のコヒーレンスの水平分布，京都大学防災研究所年報，第29号，B-1，1986，pp. 171-176.



- 12) Willmarth W. W. and S. S. Lu: Structure of the Reynolds Stress near the Wall, *J. Fluid Mech*, vol. 55, 1972, pp. 65-92.
- 13) Raupach, M. R.: Conditional Statistics of Reynolds Stress in Rough-wall and Smooth-wall Turbulent Layers. *J. Fluid Mech.*, vol. 108, 1981, pp. 363-382.
- 14) Shaw, R. H. J. Tavangar and D. P. Ward: Structure of the Reynolds Stress in a Canopy Layers, *J. Climate Appl. Meteorol*, vol. 22, 1983, pp. 1922-1931.