

突風前線の観測について (その3)

石崎 潑雄・光田 寧・林 泰一

ON THE OBSERVATION OF GUST FRONT (3)

Hatsuo ISHIZAKI, Yasushi MITSUTA and Taiichi HAYASHI

Synopsis

The intermittent features of the turbulent velocity field in the atmospheric surface layer were investigated by the conditional sampling technique. Quadrant representation of momentum flux indicates that the sweep is responsible for 79% of mean momentum flux and the ejection is for 71%. In the atmospheric surface layer, the sweep does not necessarily appear after the ejection. It is surmised that the mechanism of gust front is not exactly same as that of the burst in the turbulent boundary layer of the wind tunnel or water channel experiment.

1. はじめに

第一報¹⁾では、3杯風速計を平面的にならべた観測網などの観測の詳細及び予備的な解析結果について述べた。そこでは、風速が急に増加する領域が、風上から風下へと1つの面をなして進んでいくことを示した。第2報²⁾では、観測網の一点に3次元超音波風速計を取付け、風速3成分の変動が測定できるようにし、突風前線の規模は、20~30 m程度の幅をもっていて、平均風速が約13 m/sのときに、空間的に0.36 (m/s)/m、時間的に5.8 (m/s)/sに達する風速の変化率があることがわかった。

風洞実験や水槽実験において、最近、乱流境界層中の組織乱流の発生現象である burst 現象が問題になっている^{3)~5)}。これは、流れの可視化法や、後述する条件付採集法によって乱流と非乱流の境目での突起 (bulge) に関係した組織だった乱流発生の機構として研究されている。低速の流れが、滑らかな壁のごく近くに縞状に現われて、下流に向かってゆっくり移動しながら上昇し、激しく振動したあとで、突然乱流状態に変わる現象である。このときには、壁近くに、低速の流体が現われて、そのすぐ後に速度の大きな流体が上方から吹き降りるように侵入してきて、低速の流体を押し上げるように見える状態が形成される。はじめの状態を放出過程 (ejection) といい、このあとで、高速流体が壁近くまで降下して、低速流体を押し出していく状態を掃引過程 (sweep) という。これで一連の burst 現象は終了する。

放出過程では、 $u' < 0$, $w' > 0$ (u' は主流方向, w' は鉛直方向の乱れの成分) で、運動量の下向きの輸送があり、掃引過程では、 $u' > 0$, $w' < 0$ であり、同様の輸送があることになる。これまでの研究例⁶⁾では、下向きの平均運動量輸送量のうち、放出過程で77%, 掃引過程で55%が輸送されることが報告されている。このうちの32%の余りの部分は、上昇した流体の逆戻りや、吹き降りた高速流体が壁面ではねかえされたりする現象 (outward interaction, inward interaction) によって生じる上向きの運動量輸送によって相殺される。

大気接地境界層中で、上述のような方法で運動量輸送の形態を調べたのはオーストラリアにおいて、Finnigan が小麦畑の上で、熱線風速計を用いた観測があるだけである⁷⁾。

突風前線は、大気接地境界層中での現象であるが、急に風速が増加する現象であり、間欠的に発生することから、現象として burst 現象と類似していると思われる点が多い。そこで、burst 現象を解析するのに利用されている条件付採集法により、いままでに得られた観測資料を解析してみることにした。

2. 解析方法

条件付採集法というのは, Kovasznay et al. によって最初に採用された方法であり⁸⁾, 注目しているある顕著な現象が間欠的に発生するときに, 一連の変動の記録の中からその現象のみを取出すための方法である。Willmarth と Lu は, この方法を運動量の輸送形態に応用して, 4つの事象に分類し, その各事象が担っている運動量の輸送量を評価した⁹⁾。瞬間瞬間の $u'w'$ を, (u', w') 平面において, 次の4つの象限に分類する。 i は象限を示す。

$i=1$ $u'>0$ $w'>0$ outward interaction (外部との相互作用)

$i=2$ $u'<0$ $w'>0$ ejection (放出過程)

$i=3$ $u'<0$ $w'<0$ inward interaction (内部との相互作用)

$i=4$ $u'>0$ $w'<0$ sweep (掃引過程)

さらに $|u'w'| = H|\overline{u'w'}|$ (H は定数で hole size と言う)。であるような曲線で区切られるような原点を中心とする領域を hole とする。これらの関係は Fig. 1 に示すとおりである。

定常な流れで, 条件付に採集された運動量輸送量の平均値 $\langle u'w' \rangle_{i,H}$ は, 第 i 象限からの寄与を示し,

$$\langle u'w' \rangle_{i,H} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u'(t) w'(t) I_{i,H}(u', w') dt \quad \dots\dots\dots(1)$$

のように表わされる。

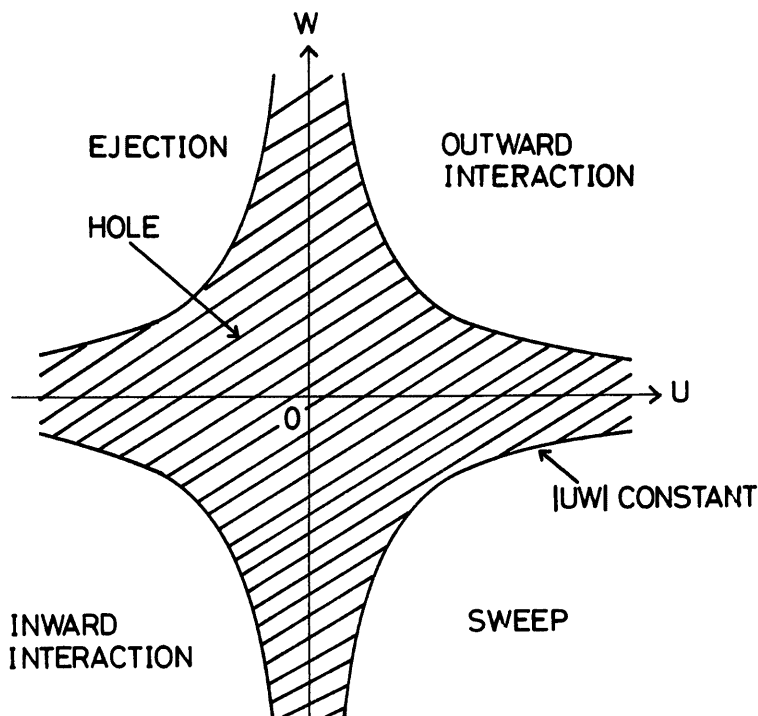


Fig. 1. Schematic drawing of five regions of the quadrant and hole representation.

$I_{i,H}$ は指標関数 (indicator function) といわれ、次のように示される。

$$I_{i,H}(u', w') = \begin{cases} 1 & |u'w'| > H | \overline{u'w'} | \text{ かつ } (u', w') \text{ が第 } i \text{ 象限にある。} \\ 0 & \text{その他のとき} \end{cases}$$

(1)で定義された、各象限からの寄与を平均輸送量で正規化すると

$$S_{i,H} = \langle u'w' \rangle_{i,H} / \overline{u'w'} \quad \dots\dots\dots(2)$$

となる。

また象限毎の時間的な寄与は、

$$T_{i,H} = \overline{I_{i,H}(u', w')} \quad \dots\dots\dots(3)$$

と表わされる。

$H=0$ のときには当然

$$\sum_{i=1}^4 S_{i,0} = 1$$

である。

3. 解析結果

潮岬風力実験所で行なった突風前線の観測のうち、超音波風速計によって測定した風速変動を上述べた方法で解析した。超音波風速計は、野外実験場のほぼ中央の 16 m の鉄塔の、地上高 12 m に設置した。(観測の詳細は第二報²⁾ を参照)。ここに示す解析例は、1980年12月24日18時からの季節風の吹き出し時の記録である。サンプリングは、0.25秒毎、観測時間は30分である。

Fig. 2 には、風速 3 成分の平均からの変動成分及び、水平方向と鉛直方向の運動量輸送量のトレースを示す。大きな運動量の輸送は、間欠的に発生しているのがわかる。

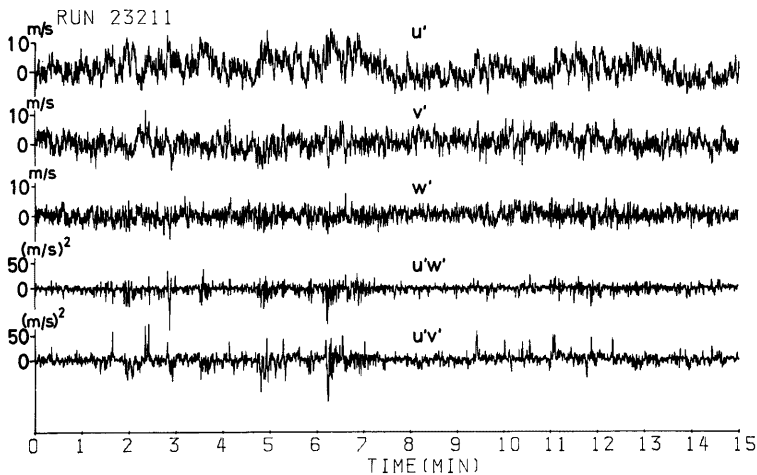


Fig. 2. Traces of the three components of wind velocity and the vertical and the horizontal components of momentum flux measured by a sonic anemometer.

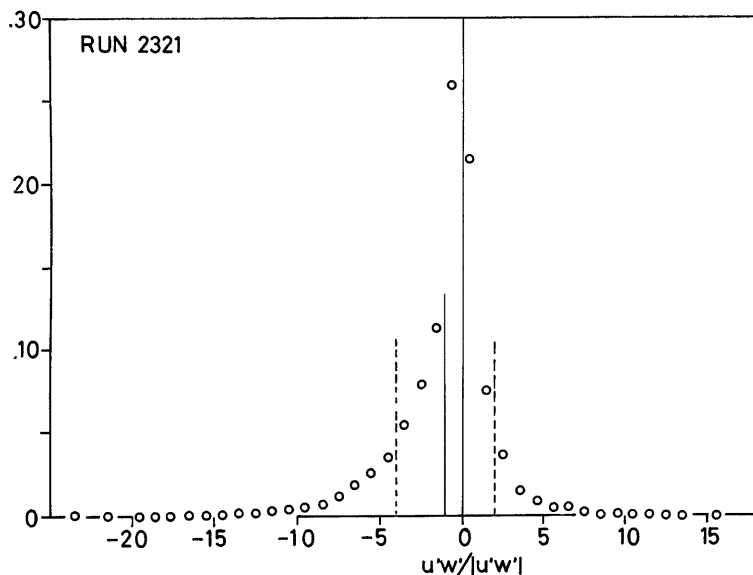


Fig. 3. Frequency distribution of the momentum flux. Dashed line means r.m.s. values.

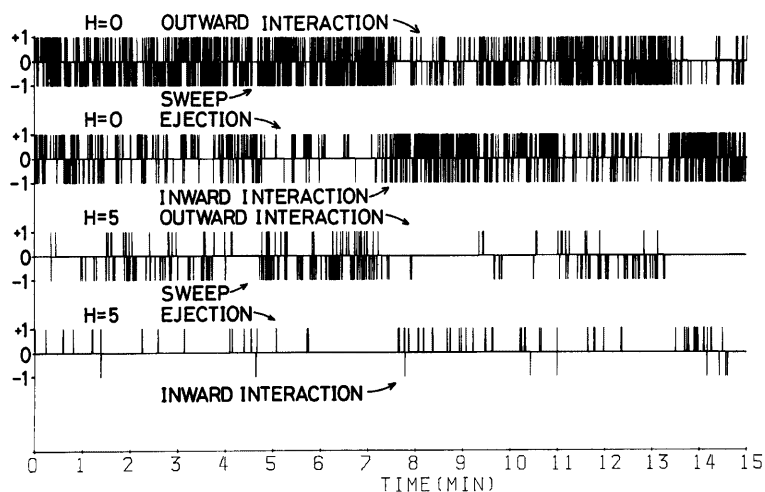
Fig. 3 には、瞬間の運動量輸送量の大きさの頻度分布を示す。横軸の運動量輸送量は、平均輸送量で正規化した。この分布は、 $M=u'w'/|u'w'|$ とすると、 $M=0$ 付近に鋭いピークをもち、正の側にも、負の側にも、大きい値まで広がっている。標準偏差は、3.0 であるが、観測値は、その約 8 倍に相当する程度まで広がっている。発生総数の 48% にあたるものが、 $|M| < 1$ の範囲に含まれている。また、 $|M| > 10$ であるような大きな運動量輸送を担っている場合は全体の 1.8% ある。

Fig. 4 a) b) には、運動量輸送が前に述べた 4 つの事象のうち、どの事象によって発生しているかを示したものである。hole size は 0 から 25 まで、5 きざみでとることとした。 $H=0, 5$ のときには、4 つの事象をすべて示し、 $H=10$ 以上のときには、 $u' > 0$ の場合である outward interaction と sweep についてのみ示した。当然 H を大きくしていくと、どの事象の発生頻度も少なくなる。

Fig. 5 には、平均運動量輸送量 $\overline{u'w'}$ に対して、4 つの事象が、どの程度寄与しているかを示す。この図中で、O, I, E, S, はそれぞれ、4 つの事象からの寄与の割合を示している。 H は hole の中の輸送量を示す。4 つの事象による寄与率は、hole size H を大きくしていくに従って単調に減少していく。それに対応して、当然ながら、hole 内の割合は増加する。寄与の割合はすべての hole size わたって sweep によるものが最も大きい。hole size が 17 以上では、sweep のみが存在する。 $H=0$ のときの各事象によって担われている割合は、上向きに輸送量では、outward interaction, inward interaction が共に 25%、下向きに輸送量は ejection が 70%、sweep が 79% を占めている。この割合は、風洞中での Lu and Willmarth の実験結果である⁹⁾ 上向きに 32%、下向きに ejection 77%、sweep 55% とは、その配分が異なる。特に sweep の割合が増加している。hole size $H=10$ のときには、上向きに outward interaction 2%、inward interaction 1%、下向きに ejection 3%、sweep 17% となり、sweep による割合が断然大きくなる。残りの 73% は Hole 内の事象である。

この 15 分間に相当する 3 杯風速計によって測定した風速変動のトレースを **Fig. 6** に示す。超音波風速計が設置されているのは、高度 12 m であり、同じ鉄塔の高さ 8.25 m の No. 22 と高さ 16 m の No. 29 の

RUN 23211

Fig. 4. a) Traces of the indicator functions depending on hole size H .

RUN 23211

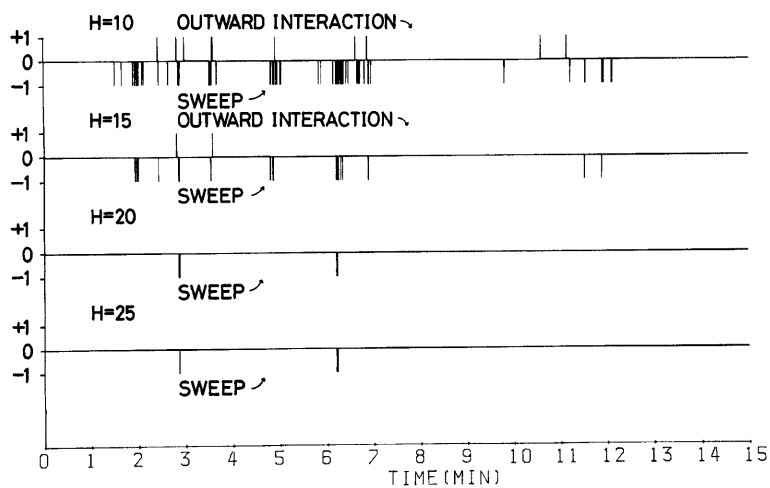


Fig. 4. b) Same as Fig. 4 a).

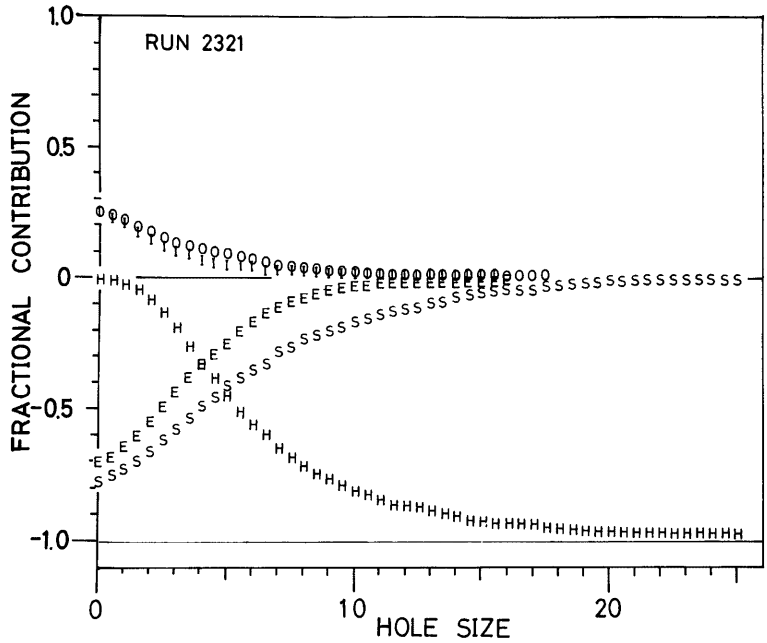


Fig. 5. Measurements of the contribution to $\overline{u'w'}$ from different events.

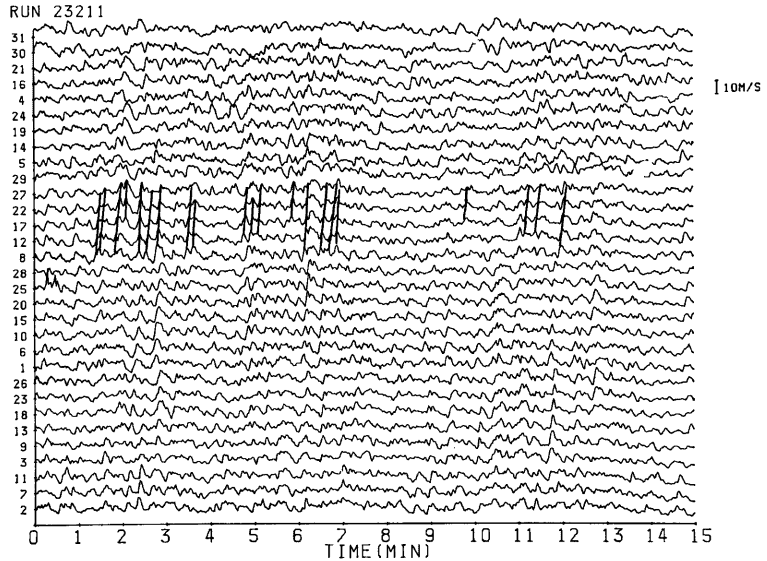


Fig. 6. Traces of wind speeds measured by three cup anemometers.

三杯風速計のほぼ中間である。また風向方向に地上高 8.25 m に三杯風速計が No. 8, 12, 17, 22, 27 の順に並んでいる。Fig. 4 b) で $H=10$ のとき、即ち平均運動量輸送率の10倍以上で下向きに sweep によって運動量が輸送される場合に対応するものを実線で結んだ。突風前線は、大きな sweep の際に生じていると言えそうである。

風洞中での観測のように、ejection が生じ、その後、sweep が生じるという burst 現象のようなものは、自然風中では、必ずしも生じているとはいえないようであり、単に上から高速気流が降下することによって強風域が形成される場合もあると考えられる。

4. む す び

超音波風速計によって測定した風速3成分の変動をもとにして、大気境地境界層中の運動量輸送の構造を調べてみた。解析方法は、風洞や水槽実験で利用されている条件付採集法によった。

接地境界層中での運動量輸送を輸送形態によって、4つに分類すると、平均運動量輸送量のうち、上向きに outward interaction, inward interaction によって、ともに25%、下向きには、ejection によって71%、sweep によって79%を担われている。輸送の効率については、sweep による場合に、平均輸送率の25倍にも達する場合がある。

風洞内の burst 現象と大気境界層中の突風前線とは、必ずしも同じものではなく、多少異なっている点があると思われる。今後さらに詳しく調べていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 石崎澄雄, 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.
- 2) 石崎澄雄, 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.
- 3) Willmarth, W. W.: Structure of Turbulence in Boundary Layers, in Yih, C. S. (ed), Adv. Appl. Mech., 15 Academic Press, New York, pp. 159-254.
- 4) Raupach, M. R.: Conditional Statistics of Reynolds Stress in Rough-wall and Smooth-Wall Turbulent Boundary Layers., J. Fluid Mech. 108, 1981, pp. 363-382.
- 5) Nakagawa, H. and I. Nezu.: Prediction of the Contribution to the Reynolds Stress from Bursting Events in Open-Channel Flows., J. Fluid Mech., 80, 1977, pp. 99-128.
- 6) Lu, S. S. and W. W. Willmarth: Measurement of the Structure of the Reynolds Stress in a Turbulent Boundary Layer, J. Fluid Mech., 60, 1973 pp. 481-511.
- 7) Finnigan, J. J.: Turbulence in Waving Wheat, II. Structure of Momentum Transfer. Boundary-Layer Meteorol. 16, 1979, pp. 213-236.
- 8) Kovasznay, L. S. G., V. Kibens and R. F. Blackwelder: Large-Scale Motion in the Intermittent Region of a Turbulent Boundary Layer, J. Fluid Mech., 41, 1970, pp. 283-325.
- 9) Willmarth, W. W. and S. S. Lu.: Structure of the Reynolds Stress Near the Wall, J. Fluid Mech., 55, 1972, pp. 65-92.