

## 積乱雲からの下降流に伴う突風の観測 (1)

文 字 信 貴・光 田 寧

### OBSERVATIONAL STUDY OF THE GUST CAUSED BY THUNDERSTORM DOWNDRAFT (1)

By Nobutaka MONJI and Yasushi MITSUTA

#### Synopsis

Characteristics of the gust caused by thunderstorm downdraft are studied observationally. Anemometers and rain gauges were installed to make an observational network in the suburbs of Maebashi City, Gunma Prefecture. Six thunderstorm gusts were recorded in the summer of 1985. Although each gust shows different characteristics, there seems to be a relation between the maximum wind speed and the temperature drop. Spectrum analysis of the wind reveals the thunderstorm gusts contain large energy around the eddy size of about 100 m.

The most appropriate sampling to express the thunderstorm gust is searched. It is found that the best averaging time lies between several seconds and a few tens of second.

#### 1. は じ め に

発達した積乱雲からの降雨に伴って強い下降流が発生する事がある。その下降流は地面に当たって水平に向きを変え突風を発生させる。この現象の特に強いものはダウンバースト、そのスケールの小さなものはマイクロバーストとも呼ばれる。これらは、地上の構造物、農作物に被害を与えるほか、航空機が離着陸時にこの現象に遭遇すると墜落の危険さもある。過去に国内で発生したダウンバーストで詳しく調査されたものとしては1970年9月15日の滋賀県彦根市で発生したものがある<sup>1)</sup>。このときの被害は2 km×2 kmの範囲で家屋全半壊14戸、水稻倒伏69 ha、ビニールハウス倒壊30棟などに及んだ。観測された最大瞬間風速は45 m/sであったが墓石の移動から70 m/s前後の風速も推定されている。また1976年埼玉県の間部町、深谷市ではダウンバーストにより全壊した家の下敷で1名死亡、他に7名負傷という被害が出たものがあり<sup>2)</sup>、1981年6月29日九州北部に発生したダウンバーストでは被害幅は東西20 km、南北約8 kmの広い範囲でビニールハウス、学校の体育館、家屋などに被害が及んだものが詳しく調査されている<sup>3)</sup>。

ダウンバーストは航空機の離着陸時には大きな脅威であり、しばしば大事故の原因となっている。すでに過去15年間で米国を中心に400人以上の人命が失われているが、死者のでないものも含めると米国内では1年に数回発生しており大きな問題として取り上げられている<sup>4)</sup>。日本では、負傷者はでなかったものの、1984年4月19日の那覇空港における日本アジア航空のDC-8機が着陸復行時に進入灯にエンジンが当たった事故があり、事故調査報告書<sup>5)</sup>はダウンバーストが事故の原因であったとしている。また、同じく那覇空港で1970年7月27日フライングタイガーDC-8輸送機が強い雨中を着陸中誘導灯に激突し、機首部10 mほどが折れ飛び4名が死亡した事故もダウンバーストが原因であると考えられている<sup>6)</sup>。さらに、事故は発生しなかったが、富山空港でダウンバーストが発生しその解析例もある<sup>7)</sup>。

被害や事故に至らなくとも雷雨に伴って突風が吹く事は一般に良く知られている現象であり、日常経験す

ることである。これは積雲や積乱雲が発達し、降雨が始まると、雨滴の落下運動の摩擦や蒸発による冷却等で下降流が生じ、それが地表面に当たると水平に向きを変え突風となる現象である。その突風の最前線はガストフロント(突風前線)と呼ばれ風向風速の急激な変化、気圧の上昇、気温の降下を伴っている。大きな平原等では積乱雲の下を砂やほこりを舞上げながら進行するガストフロントを観察する事もできる。Fujita and Byers<sup>8)</sup>は下降流の特に強いものをダウンバーストと称したが、Fujita and Caracena<sup>9)</sup>は地上 91 m における鉛直風速が 3.6 m/s 以上、水平方向には直径 800 m 以上の広がりを持つものをダウンバーストと更に定義つけた。ダウンバーストの風速は積乱雲からの吹き出しの平均的な値の10倍程度の大きさを持ったものである。Fujita<sup>4)</sup>はダウンバーストのなかで水平スケールが 4 km を越えるものをマクロバースト、そのマクロバースト領域のなかに含まれるか又は独立した突風でスケールが 4 km 以下のものをマイクロバーストと呼んでいる。

航空機のダウンバースト被害の相つぐ米国ではその研究は盛んに行われ、これまで2つの大型プロジェクト NIMROD<sup>4)10)</sup> (Northern Illinois Meteorological Research on Downburst) 及び JAWS<sup>4)11)</sup> (Joint Airport Weather Studies) が実行された。これらの研究では観測に複数のドップラーレーダーが用いられて風の3次元の分布など、ダウンバーストの地上付近での構造解明は大きく前進した。即ち、積乱雲からの下降流が地表面近くで水平に向きを変え、突風が生じる際の風速分布等が捕えられた幾つかの観測例によってある程度明らかとされた。

しかしながら、どの様な積乱雲がダウンバーストを生じさせるのか、また発生した突風の微細な構造と積乱雲との関係はどの様になっているのかなど未解明な部分が多く残されたままである。この研究では特に積乱雲からの下降流に伴う突風の微細な構造の解明に重点を置いて行った観測結果について述べる。観測は比較的夏に雷雨が多いとされている群馬県で実施中であるが、今回ここに述べるのはその初年度の結果である。

## 2. 観測網と観測方法

観測は群馬県前橋市東部の郊外にある群馬県農業総合試験場で行った。観測に用いたのは5台の風向風速計と5台の雨量計、1台の乾湿球温度計と1台の気圧計であり、それらの設置位置を Fig. 1 に示す。Fig. 1 には等高線と主な建物の配置も示した。観測地は 10 m 程度の高低差があり、建物が点在しているため一様性は充分に満足されているとは言えない。従って、風向風速計は最も強い突風が期待される西寄りの風向に対して全地点の建物や地形の影響が少ない様に配した。そのため、図中の地点2は東〜南東の風に対して、地点4は北〜北東の風に対して建物の後流に入る可能性がある。

用いた風向風速計はプロベラ型で5台とも地上 6.4 m の高さに設置した。雨量計は 0.1 mm/パルスのもので、風向風速計のポールから数mの範囲内に設置した。また、地点1の近くには自動給水型通風乾湿計(感部直径 6 mm)を高さ 1 m の小型の百葉箱内に設置した。気圧計は室内に置いた。各センサーからの信号はケーブルで構内西北端にある観測室内の変換器、記録計へ導いた。尚、各センサー部と変換器部には落雷の影響を少なくするためアレスターを取り付けた。

信号はディジタルデータレコーダを用いて磁気テープに記録した。サンプリングの周波数は 4 Hz で、6 時間の連続記録が可能である。記録の開始と終了は観測網の南西 22 km の藤岡市に設置された名古屋大学空電研究所のレーダーサイトからの積乱雲の動きの通報にもとづいて行った。

## 3. 突風観測例

1985年は7月と8月に約40日間の観測を行ったが、積乱雲が近くを通過しそれからの下降流によるものと考えられる突風は6例記録する事ができた。現象が積乱雲に伴うものであったと判断した基準は、レーダー又は目視によって積乱雲が確認されており、さらに明らかな気温の降下を伴っている場合とした。この基準

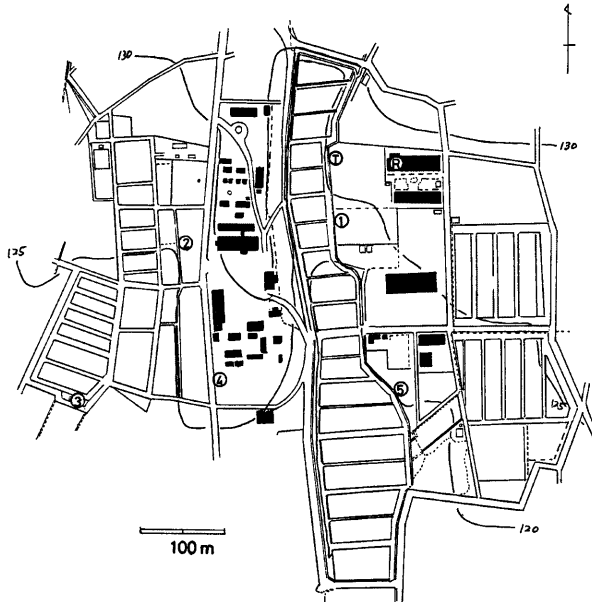


Fig. 1 Outline of the observational field. ① through ⑤ are positions of the anemometers and the rain gauges, P the psychrometer and R the data recorder. Dark areas indicate the major buildings.

Table 1 List of the thunderstorm gust observed in the summer of 1985.

| RUN # | Date | Time  |       | Time of gust | Peak gust (m/s) | Wind direction | Rain-fall (mm) | Temperature drop (°C) |
|-------|------|-------|-------|--------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------------|
|       |      | start | end   |              |                 |                |                |                       |
| 1     | 7/19 | 13:16 | 15:17 | 13:24        | 8.8( 9.7)       | NW             | 2.0            | 5.5                   |
| 2     | 7/20 | 15:53 | 18:19 | 16:59        | 12.7(13.9)      | S              | 11.6           | 3.8                   |
| 5     | 8/10 | 14:14 | 17:45 | 14:21        | 14.4(16.0)      | SE             | 0.3            | 5.9                   |
| 6     | 8/11 | 12:00 | 14:32 | 12:39        | 9.2(10.6)       | ESE            | 5.8            | 2.0                   |
| 7     | 8/12 | 17:15 | 18:45 | 17:45        | 5.4( 5.9)       | S              | 0.0            | 1.2                   |
| 8     | 8/13 | 15:37 | 18:20 | 17:17        | 10.2(10.9)      | ESE            | 0.1            | 2.6                   |

Wind directions are those around the maximum wind. Peak gusts mean the maximum instantaneous values within 20 minutes after the first gust. Five locations are averaged. ( ) is the maximum of the five locations. Rainfall is for the period of 20 min. following the first gust. Temperature drop is the value during the 20 min. after the gust.

に合う観測事例の概要を Table 1 に要約する。この表からも判るように、各ケース間にはそれぞれ大きな差がある。突風の大きさは RUN #5 が 14.4 m/s と最大であるが、雨量は 0.3 mm と少ない。一方、RUN #2 の様に突風の風速も比較的大きく雨量が10分間で 12 mm と大きい場合もあり、また、RUN #1 の様に風速が 5 m/s 程度しかなかった例もある。

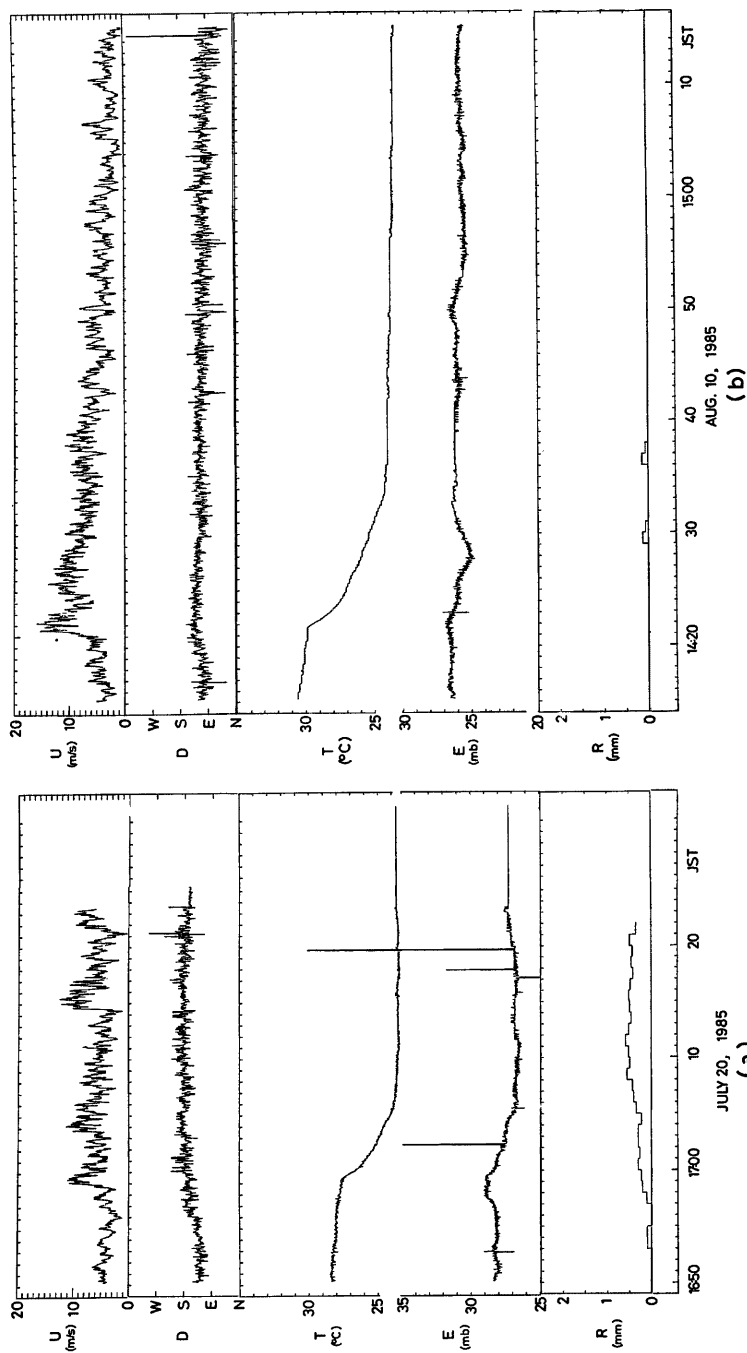


Fig. 2 Examples of the variation of wind speed, wind direction, temperature, water vapor pressure and rainfall during the passage of gusts. (a) Example of July 20, 1985, (b) August 10, 1985.

Fig. 2(a) (b), にそれぞれ RUN #2 および RUN #5 の風速, 風向, 気温, 水蒸気圧, 雨量の変化例を示す。RUN #2 は1985年7月20日の夕方の激しい雷雨の中の突風であり, 16時59分の突風時にはすでに雨は降っていた。この時に気温の降下が始まったが, 2回目の突風時, 17時4分には急激な気温の降下は無く, さらに強い突風の観測された17時15分にも気温の降下は認められない。この RUN では激しい雷雨のため電源がしばしば瞬断されノイズが多く, 17時25分頃にはデータレコーダも作動しなくなっている。一方, Fig. 2(b) に示した RUN #5 の方は雨量は少ないが, 気温の降下量は $6^{\circ}\text{C}$ と大きかった。風速は14時21分に最大値に達した後, 徐々に減少して行った。突風時に風向の大きな変化は認められていない。水蒸気圧は気温と共に減少したが, 降雨と同時にまた増加する傾向を示した。この RUN #5 のケースについては5節で詳述する。図示はしていないが, 相対湿度については, 何れの場合も突風前は70%程度であったのが, 気温降下と共に増大し, 90%前後に達している。

#### 4. 気温降下量と突風との関係

積乱雲からの下降流の成因の一つは気塊が雨滴の蒸発による冷却のため密度が増大する事であると考えられる。雨滴と共存する気塊は飽和に近いが, 気塊が下降する場合の気温の変化は湿潤断熱的であり, 周囲が乾燥断熱的温度分布に近い場合は地面近くでは下降気塊と周囲の気塊の温度差は大きなものとなる。Fig. 3 に Table 1 に示した突風時の温度降下量と突風の最大瞬間風速の関係を示す。突風の最大瞬間風速については測定点5点の最大値の平均を用いた。Fig. 3 の気温降下量は気温が急に下がりはじめた時点から20分間にどれだけ下がったかを示したものである。20分間を選んだ理由は, 突風現象に伴う温度降下は終了し, しかも日変化等による変化の影響が小さい範囲と考えられるためであるが, これが最適かどうかは検討が必要である。また, 風速についても, ここでは最大瞬間風速を用いているが, 一般場の風やさらには積乱雲の移動の効果をどのように扱うかということが問題として残る。

Fig. 3 には米国における観測結果が破線で示してある。これは気象官署における中程度ないし強い雷雨直前直後の気温差と, 最大瞬間風速との関係を示したもので, 62ケースの平均値である。これらの値は今回の観測値と比較すると同じ温度降下量に対して大きな風速になる事を示している。この相違は下降流の始点が異なる事など積乱雲の構造の地域による相違が原因である可能性も考えられる。然しながら, 今回のデータ数は少ないので適切な解釈には今後の観測の積み重ねが必要である。

#### 5. 突風の微細特性

積乱雲からの下降流は地面に当たって水平に向きを変え広がるが, 突風前線や突風前線通過後の強風域の微細構造については不明な所が多い。それらは, 各ケースによって大きく互いに異なる可能性があるが, 一般的にそれらを統一して論ずる事は現時点では困難であるので, ここでは1985年夏の観測で最も大きな瞬間風速を記録したケース(#5)を例にとって詳しくみてみる。

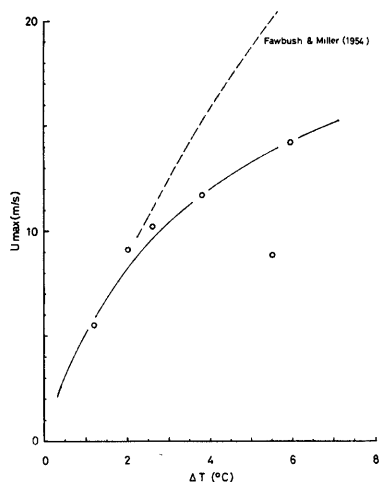


Fig. 3 Relation between the maximum wind speed and the temperature drop. Dashed curve indicates the data obtained in North America<sup>12)</sup>.

RUN #5 を測定した 8 月 10 日は、関東地方は太平洋高気圧に覆われていたが、上空に寒気が入っており大気は不安定（館野、0900JST の Showalter Index = +2.0）であった。突風は 14 時 21 分ごろに発生したが、この突風をもたらした現象を東京レーダーで見ると、Fig. 4 に示す様に、東西に伸びるセルが北上し、その西端が観測地点に達する少し前に突風が観測された事が判る。突風が観測された頃セルの西端は突出した形となっている。このセルの移動速度は北北西に約 40 km/h であり次第に減衰しながら北へ去った。

Fig. 6 に測定点 5 点における雨量の時間変化を示す。セルの強い部分は観測網の東側をそれて通ったため雨量は少なかった。5 地点とも様子の異なる記録となっており、数百 m 離れただけでも雨の降りかたが異なる事を示している。雨量の変化からは降雨域の移動は正確には求められないものの、セルの移動にある程度対応した記録となっている。各地点の風の変化を Fig. 7 に示す。突風が観測されたのは降雨の約 10 分前、14 時 21 分ごろである。各地点で突風の様子はかなり異なっており、最大瞬間風速の発生時刻から突風前線の移動が単純には解明できない。また、最大瞬間風速観測後の各地点の風速の変化も互いに異なっている。これらの相違が Fig. 5 に示したような複雑な形状を持つ積乱雲からの下降流の性質に関係があるのかどうか、あ

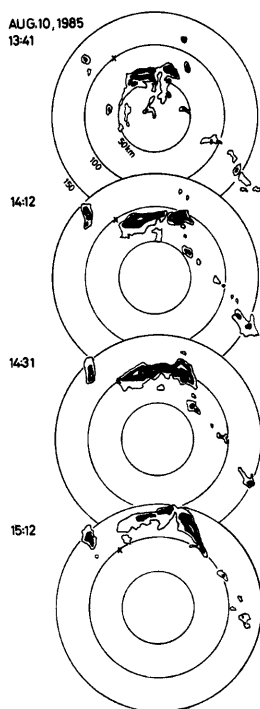


Fig. 4 The movement of the cell which produced the gust of August 10, 1985, observed by Tokyo radar.

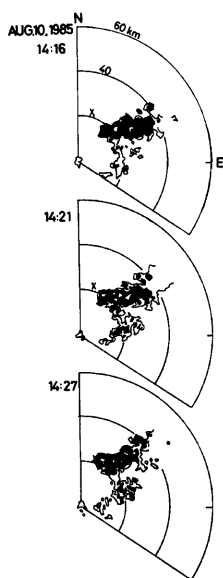


Fig. 5 Same cell as Fig. 4 observed by Nagoya University radar installed 22 km south of the wind observing site.

るとすれば積乱雲のどのような性質がこの相違をもたらすかという点についてはさらに研究を進める必要がある。

**Fig. 7** の各地点の変化の様子に共通している事は突風はいくつかのピークを有している事、さらに、減衰するに従って突風時に見られる高周波成分が減少していく様に見える事である。これを詳しく調べるた

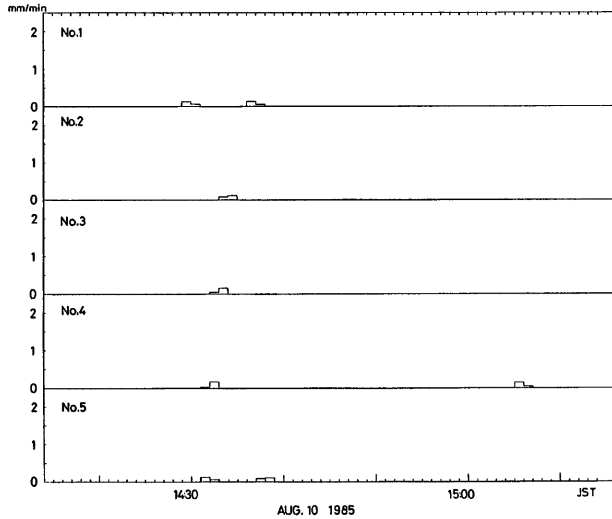


Fig. 6 Variation of the rainfall at the observing site, in August 10, 1985.

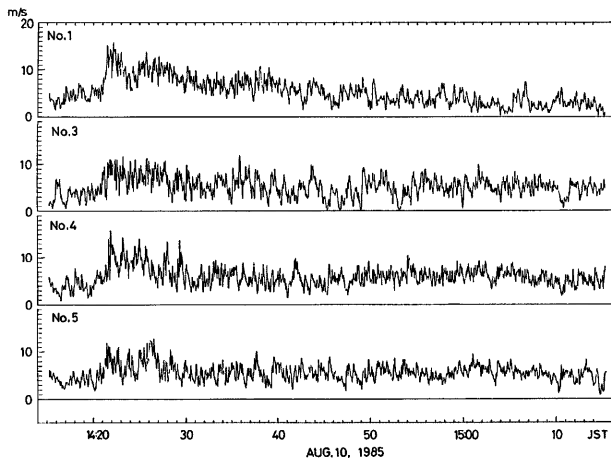


Fig. 7 The variation of the wind speed at the observing site, in August 10, 1985.

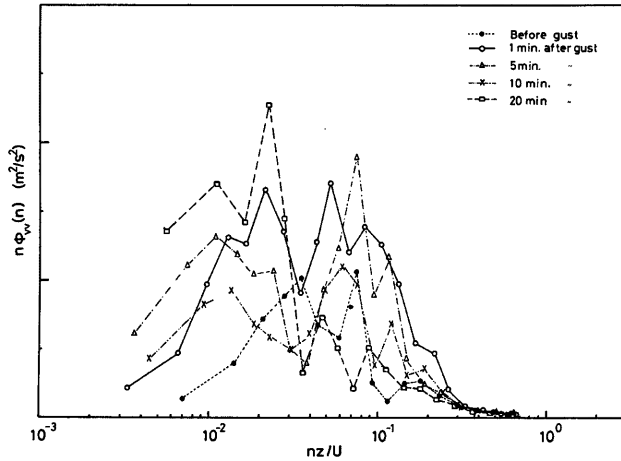


Fig. 8 Power spectra of the wind speed at various stage of the gust passage observed at location 3 in August 10, 1985.

めにスペクトル解析を行った。現象が非定常であるため長時間のサンプリングは不可能であるが、ここでは突風直前、直後、5分後、10分後、20分後、30分後のそれぞれ256秒間の記録のFFTによる解析を行って比較した。突風直前のものはサンプリングが最大瞬間風速直前に終わる様に、直後のものはサンプリング開始が最大瞬間風速の直後とした。Fig. 7からも予想されるように各地点のスペクトルは互いに形状が異なっているが共通した傾向としては、最大瞬間風速直後のスペクトルは、時間がたった時のものと比較して中間の周波数の変動が卓越している事である。また、突風直前のものと突風後充分に時間がたった後のものとは明確な差が認められなかった。Fig. 8に、5地点の中では周囲が最も平坦な位置に設置してある風速計 No. 3 による風速スペクトルの計算例を示す。高周波側と低周波側とでほぼ同じ値を示す各時刻のスペクトルは  $f=nz/U=5\times 10^{-2}\sim 10^{-1}$  の周波数帯で大きな相違が現れている。即ち、風速計の高さは6.4 m であるので見かけの波長  $n^{-1}U$  が60 m $\sim$ 120 m の変動が突風の最大瞬間風速観測直後の強風時には卓越する事を示す結果となっている。

突風の空間的・時間的変化を見るために風速のベクトル表示を行った。この場合にどのような評価時間で表示するのが最も良く突風の性質を示すかを見るために、平均時間を変えて幾つかの計算を行ったが、そのうち Fig. 9(a) に1秒平均、(b) に10秒平均、(c) に1分平均のものを示す。各図中に○印を付したものが平均開始時刻が同時刻(14:21)である事を示す。1秒平均では乱流の影響が大きすぎて突風を表現する事は難しく、一方、1分平均では、時間的にはある程度変化を追えるものの空間的な変化は隠されてしまっており適当とは言えない。この間にある10秒平均の場合はある程度時間変化と空間シアを表現することができるのが判る。即ち、10秒平均の図で見れば最初は一樣に弱い風が吹いていたが、○印の時刻前後には各地点間で風向や風速にばらつきが認められ、その後の各時刻には風速に多少の差異があるもののほとんど一樣な風向を持つ風が吹いている事が判る。但し、この図からも突風前線の移動を認める事は困難である。参考のために Fig. 10 に10分間平均の風速分布を示した。

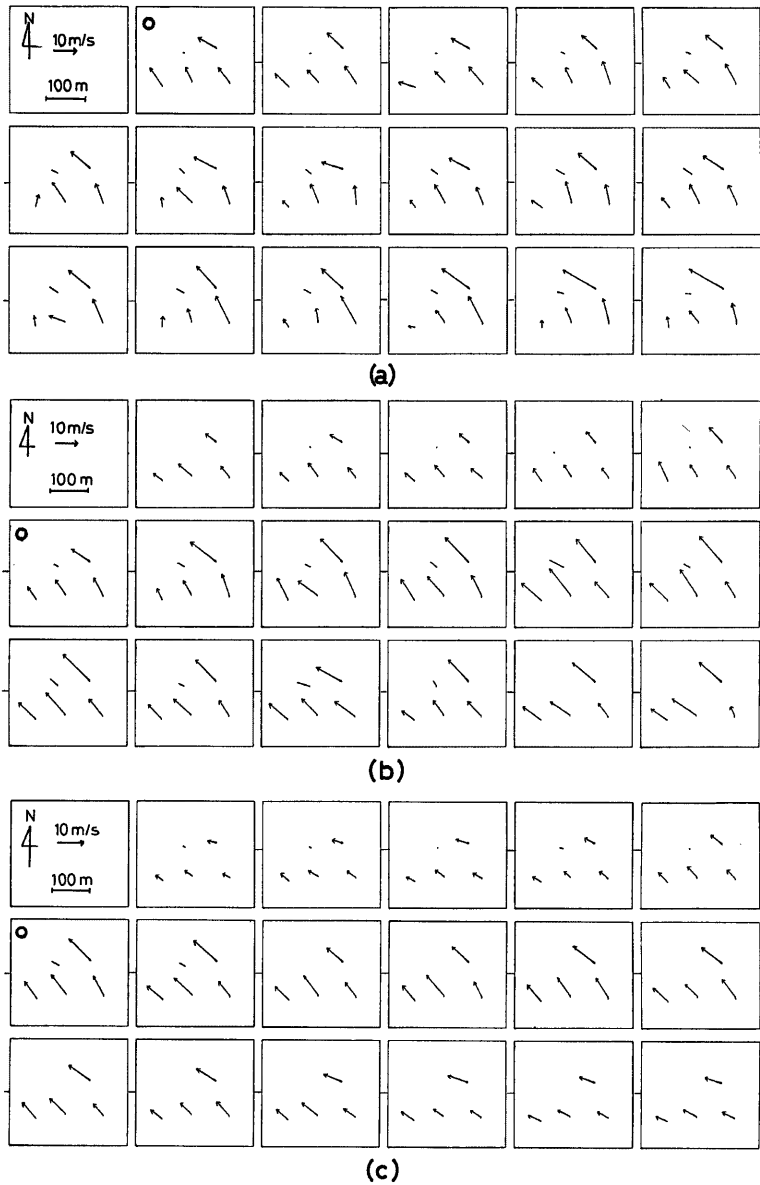


Fig. 9 Variations of the wind vector distributions for various averaging time; (a) 1 sec. average, (b) 10 sec. average and (c) 1 min. average. Time progresses rightward. Each boxes are continuous in time.  $\circ$  indicates the time of the gust, 14:21.

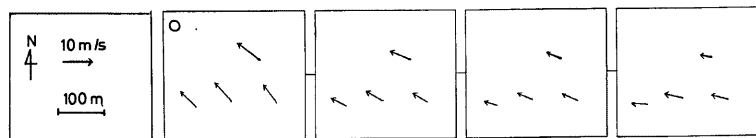


Fig. 10 Vector distribution of 10 minute mean.

## 6. 結 び

これまでに示した結果は1985年の夏に観測された6例の突風記録にもとづく予備的な結果である。これらは全て関東地方が太平洋高気圧に覆われていた時で、あまり激しい雷雨とはならなかった。しかも風が南寄り、雷雲も南から移動して来る場合が多く観測網の配置上十分に満足できる記録が得られたとは言えない。積乱雲の下降流に伴う突風の性質の研究をさらに進めるためには次年度以降さらに良質のデータを加える必要がある。また同時に、どのようなデータ解析の方法が最も良く突風の微細な構造を解明しその性質を理解し易い形に表現し得るかという研究を進める必要がある。

この研究は文部省科学研究費補助金自然災害特別研究「降ひょうと下降流突風（ダウンバースト）による災害に関する研究」（課題番号 60020042, 研究代表者・小元敬男）によった。観測の遂行に当たり、研究グループの方々、また、群馬県農業総合試験場の御協力を得た事を感謝します。

## 参 考 文 献

- 1) 石崎澄雄・光田 寧・室田達郎・成 仁煥・吉川祐三：1970年9月15日彦根付近を襲った強風とそれによる被害について、京大防災研年報，第14号 A，1971，pp. 469-480.
- 2) 文字信貴，小元敬男：ダウンバーストとその被害，日本風工学会誌，第23号，1985，pp. 37-51.
- 3) 小元敬男・文字信貴・林 泰一・谷池義人・白土博通：1981年6月29日九州における突風とそれによる被害について，光田 寧編，文部省科学研究費成果報告書，竜巻など瞬発性気象災害の実態とその対策に関する研究，資料編，1983，pp. 37-60.
- 4) Fujita, T.T.: The downburst, SMRP Research Paper #210, University of Chicago, 1985, 122 pp.
- 5) 航空事故調査委員会：航空事故調査報告書，日本アジア航空株式会社所属ダグラス DC-8-62 型 JA 8031，那覇空港，昭和59年4月19日，1985，42 pp.
- 6) Torosian, A.: ウインドシアアーパイロットの視点，国際航空安全セミナーテキスト，1984，21 pp.
- 7) 中山 章・伊関次男：1983年7月27日に富山空港で発生した microburst，天気，Vo. 32，1985，pp. 329-332.
- 8) Fujita, T.T. and H.R. Byers: Spearhead echo and downburst in the crash of an airliner, Month. Weath. Rev., Vol. 105, 1977, pp. 129-146.
- 9) Fujita, T.T. and F. Caracena: An analysis of three weather-related aircraft accidents, Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol. 58, 1977, pp. 1164-1181.
- 10) Wakimoto, R.M.: The life cycle of thunderstorm gust front as viewed with Doppler radar and rainwinsonde data, Month. Weath. Rev., Vol. 110, 1982, pp. 1060-1082.
- 11) McCarthy, J. and R. Serafin: Microburst, Weatherwise, Vol. 37, 1984, pp. 120-127.
- 12) Fawbush, E.R. and R.C. Miller: A basis for forecasting peak wind gust in non-frontal thunderstorms, Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol. 35, 1954, pp. 14-19.