

第2図 雪に遭遇した層積雲(雪雲)内の氷晶・雪片の2Dイメージ

あった。雲の内部構造の特長は、第2図に示すように1000個/lにも達する非常に高濃度の氷晶・雪片を含んでいたことである。雲頂温度 -14°C の層積雲内に、なぜこのような高濃度の氷晶が発生したかは不明であるが、氷晶・雪片間の衝突による電荷分離が雷発生の原因と考えられる。これまで何度も、アラレを含む降雪雲中を観測飛行したが、一度も雷に遭遇していない。Michimoto (1993) の雷発生条件の分類では、弱い雷活動あるいは雷活動なしの条件に該当したためである。しかし1994年12月14日の例は、雷活動なしと分類されるにもかかわらず、雷が発生している。アラレのライミング成長が主要な電荷発生機構であることは間違いないと思うが、その他にも雷発生につながるメカニズムがありそうである。

参考文献

Jayaratne, E. R., Saunders, C. P. R. and Hallett, J., 1983: Laboratory studies of the charging of soft hail during ice crystal interactions, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **109**, 609-630.
 Michimoto, K., 1993: A study of radar echoes and their relation to lightning discharges of thunderclouds in Hokuriku District. Part II: Observation and analysis of "single-flash" thunderclouds in mid-winter, *J. Meteor. Soc. Japan*, **71**, 195-204.
 Takahashi, T., 1978: Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1536-1548.
 Takahashi, T., 1984: Thunderstorm electrification-a numerical study. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 2541-2558.

105:105:203:5012 (ダウンバースト; 積乱雲; 雷雲; ドップラーレーダー)

5. ダウンバースト*

上田 博**

1. はじめに

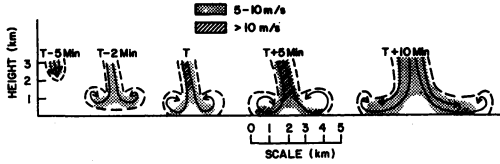
積乱雲から生じる強い下降気流が「ダウンバースト」という名で紹介され、世間の関心を得てから約10年になる。ダウンバーストが航空機の安全運行にとって大きな脅威となることから、その検出・予測方法の開発

が続けられている。具体的対策の1つとして、関西国際空港、成田国際空港に気象ドップラーレーダーが設置され、気象庁の本格的現業観測が期待されている。気象観測に新しい時代を迎えた今、ダウンバーストと「雷雲」との関係新たなとらえなおすことは、ダウンバーストの検出・予測方法の発展のために重要であり、雷雲の理解のためにも必要である。

* Downburst.

** Hiroshi Uyeda, 北海道大学大学院理学研究科.

© 1996 日本気象学会



第1図 マイクロバーストの鉛直断面図。Tは地上で最初に発散流を観測した時刻 (Wilson *et al.* (1984) より)。

2. ダウンバーストの定義

ダウンバースト (downburst) の日本語訳には「下降噴流」とか「下降流突風」という言葉が用いられる。前者は下降流の噴流的振る舞いに注目したものであり、後者は下降流が地表に到達した後強い水平風をもたらすことに注目したものである。しかし、最近では「ダウンバースト」とそのままカタカナで表記されており、「ダウンバースト」で意味が理解されるまでになった。

ダウンバーストという名は、Fujita and Byers (1977) が1975年6月24日アメリカ合衆国ニューヨークのケネディ空港で発生した飛行機の着陸時の事故の解析からこの事故が積乱雲から生ずる下降気流によって発生したことをつきとめ、この現象をダウンバーストと名付けたことに始まる。

ダウンバーストは、積雲または積乱雲の下で地上付近に破壊的な吹き出しを起こす強い下降気流である。この吹き出しの風速は 70 m/s に達することがある (Fujita, 1981)。Fujita (1985) はダウンバーストをその水平スケールによって、初期の広がりか 4 km 以下のものをマイクロバースト (microburst)、4 km を越えるものをマクロバースト (macroburst) と区分した。

Wilson *et al.* (1984) は、ドップラーレーダー観測によりマイクロバーストを定量的に取り扱うため、Fujita (1981) の定義をゆめめ、次のように定義した。「レーダービームの方向に見て発散場があるとき、その発散場をはさんで、近づくドップラー速度が最大になる地点と、遠ざかるドップラー速度が最大になる地点の間隔が 4 km 以下で、2つの最大値の差が 10 m/s 以上をマイクロバーストとする」。米国を中心にマイクロバーストについてはこの定義が広く用いられている。

マイクロバーストのみを対象としドップラーレーダー観測が前提となる Wilson *et al.* (1984) の定義では各地に起こる多くのダウンバーストを認定すること

は困難であるが、大野ほか (1996) は以下の (1) または (2) を満たすものをダウンバーストとして認定している。(1)「積雲又は積乱雲下で、地面または地面付近に風の吹き出しがあり、吹き出しによる突風の最大風速が 10 m/s を越え、最大風速時の吹き出しの水平スケールが 15 km 以内であること」が被害調査結果や自記記録の中に認められたとき。(2)積雲又は積乱雲下の風の吹き出しをドップラーレーダーで見たとき、発散場をはさんで「近づくドップラー速度」が最大になる地点と「遠ざかるドップラー速度」が最大になる地点の間隔が 15 km 以下で、2つの最大値の差が 10 m/s 以上のとき。

積雲または積乱雲の下で起きていることがなんらかの方法で確認できる場合には、大野ほか (1996) の調査方法は最も現実的であると考えられる。ダウンバーストの理解のためには世界各地に発生するダウンバーストの定量的な比較を行なう必要性がでてきた。

以下では、特に現象がマイクロバーストであることを強調する場合をのぞいて「ダウンバースト」という言葉を用いることにする。

3. ダウンバーストの特徴

3.1 アメリカ合衆国

ダウンバーストの研究は被害の最も多い米国で推進されている。ドップラーレーダーを用いたダウンバーストの特別観測がいくつも行なわれており、NIMROD (Northern Illinois Meteorological Research on Downburst), JAWS (Joint Airport Weather Studies), CLAWS (Classify, Locate and Avoid Wind Shear), MIST (Microburst and Severe Thunderstorm), FLOWS (FAA/Lincoln Laboratory Operational Weather Studies), CINDE (Convection Initiation and Downburst Experiment) 等で膨大なデータが得られている。

2台のドップラーレーダー観測による詳細な3次元気流が得られた JAWS (1992年5～8月、於コロラド) の観測結果から Wilson *et al.* (1984) は第1図のようなマイクロバーストの発達過程の概念図を得ている。地上での最初の発散風の観測から5分前にはマイクロバーストは地上 2 km 付近にあり、地上到達時には下降流の速度が 10 m/s に達し、その5分後には吹き出しが水平に広がり、反対方向を向く2つのピーク速度の差が 3.1 km の間で 24 m/s に達する。さらにその5分後には吹き出しが弱まり消滅に向かう。Wa-

kimoto and Bringi (1988) は MIST (1986年春と夏, 於アラバマ) の偏波レーダー観測から, マイクロバーストの発生域と狭い電領域の下降との関係を明らかにしている. その他ダウンバーストの特徴が多くの観測から明らかになっている.

3.2 日本

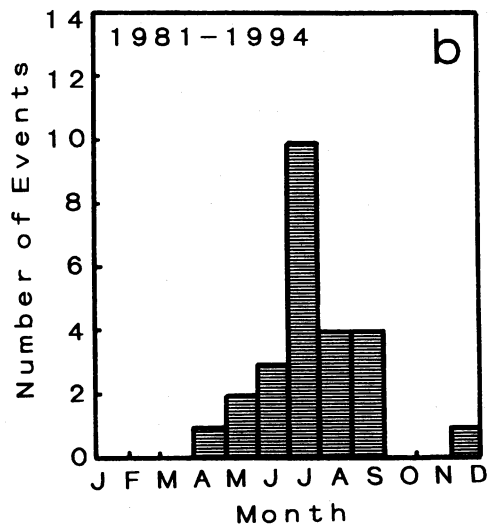
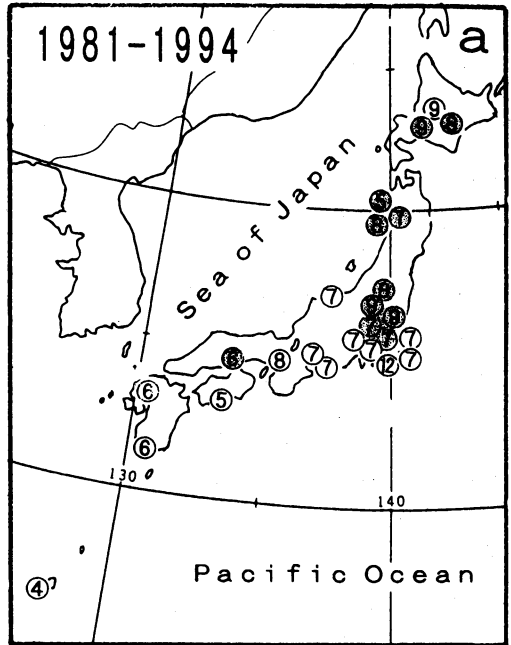
日本ではダウンバーストを対象とした大掛かりな観測プロジェクトは組まれていないが, これまでいくつかの例が報告されている (Kobayashi and Kikuchi, 1989; Tabata *et al.*, 1992 など). 最近, 大野ほか (1996) は1981年6月から1994年9月までの13年間に日本全国で発生した25件75個のダウンバーストについての調査結果を報告している. 第2図に示されるように, ダウンバーストは北海道から沖縄までの日本全国各地で観測されている. 発生場所は関東地方が一番多く, 7月に多い. 月とともに北上する傾向があり, 関東地方以北のダウンバーストは降雷をともなうことが多いことが述べられている. 確認された25件75個のダウンバースト全てが, 降水と共に発生するウェット・ダウンバーストであったという結果は, 大気下層が湿っている日本の特徴を示すものとして注目される. また, 降雷を伴ったダウンバーストがもたらす突風は激しく, 水平スケールが小さいという結果も興味深い.

日本でもダウンバーストの発生頻度が意外に高いことが明らかになったので, 最近ダウンバーストの観測・解析の報告が増えている (渡辺, 1995; 岩下, 1995). 渡辺 (1995) は1992年8月7日の福島県館岩村前沢の降雷を伴うダウンバーストについて, 岩下 (1995) は1988年8月24日の伊丹付近で発生した2つの降雷を伴わないダウンバーストについて報告している. ダウンバーストについて, ドップラーレーダー等を用いた本格的な観測を行えば, 日本でも, それほど強いダウンバーストでなければ多数観測されるに違いない.

3.3 ダウンバーストに関係する現象

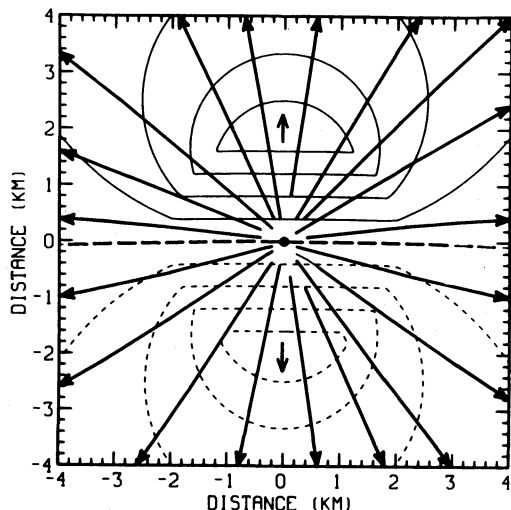
ダウンバーストは夏の積乱雲に伴って発生することが知られている. 一方, 雪雲からもダウンバーストに匹敵する強い下降流が発生していることが Shirooka and Uyeda (1990) によって報告されており, 霰のローディングが下降流の発生に重要な役割をはたしていることが推定されている. 北陸沿岸の冬季雷でも霰の急成長と急激な落下が発雷に関係しており (Uyeda *et al.*, 1996), 霰の成長と下降流発生タイミングの関係の解明が重要な課題になっている.

冬季にも発達した積乱雲からの強い下降流の存在が



第2図 ダウンバースト事例 (25件) の, a) 地理的分布と, b) 月別発生数分布. 丸印内の数字は発生した月を示し, 影をつけた丸は降雷を伴った事例を示す (大野ほか (1995) より).

明かになりつつあるが, ダウンバーストの発生は夏に陸上で観測されている. 一方, 海洋上でのダウンバーストの発生については, 海上での積雲の観測例が非常に少ないのでまだ不明である. しかし, TOGA-COARE 期間の西太平洋赤道域での約3か月のドップ



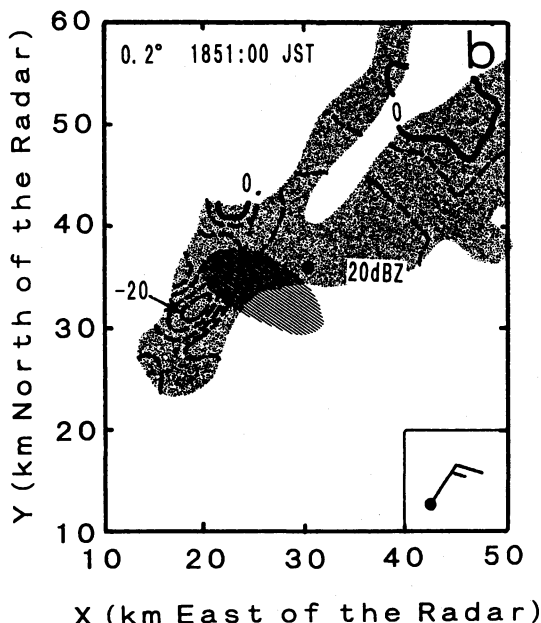
第3図 発散風の場合のドップラー速度分布。破線はレーダーに近づく成分、実線は遠ざかる成分を示す。レーダーの位置は図の下方 (Wood and Brown (1983) より)。

レーダー観測 (Uyeda *et al.*, 1995) ではダウンバーストに相当する地上付近の強い発散は観測されなかった。これは、強い雨はウォームレイン(暖かい雨)プロセスで形成され、電を作る条件にはなかったためと考えられた。

積乱雲を作る場と積乱雲の中の降水粒子の分布形状の総合的な理解がダウンバーストの発生機構の理解には必要であると考えられる。

4. 検出・予測の可能性

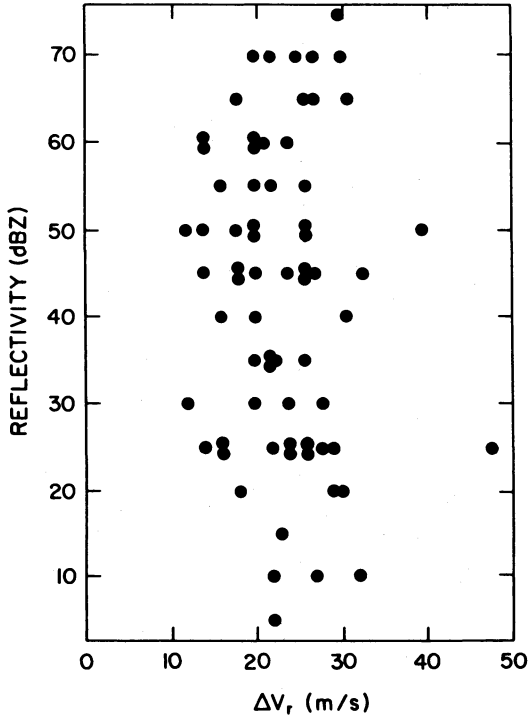
ダウンバーストの発生の検出は Wilson *et al.* (1984) に示されるように、ドップラーレーダーを用いて発散流の検出を行えばよい。1台のドップラーレーダーによる観測でも、発散場は第3図のように、ドップラーレーダーの視線方向に存在する近づく風の成分と遠ざかる風の成分のピークの組によって示されることから検出は容易である。発生時のダウンバーストの鉛直構造の詳細を見ようとすると、Shirooka and Uyeda (1991) のようにドップラーレーダーによるマイクロバーストの芯を切る RHI スキャンによる観測が必要であるが、実用的にはドップラーレーダーの数仰角の PPI スキャンで十分である。例えば、1992年9月4日水戸市に発生したダウンバーストの特徴は、気象研究所のドップラーレーダーの速度分布 (Ohno, 1995) に顕著に示されている (第4図)。



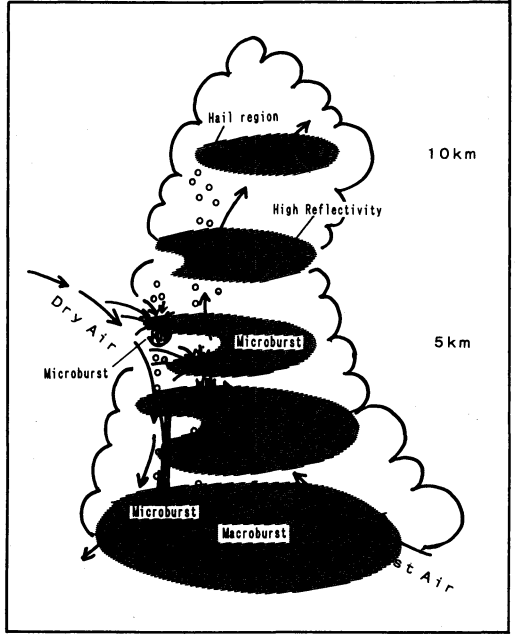
第4図 ダウンバースト発生時のドップラー速度分布。破線はレーダーに近づく成分を示す。20 dBZ 以上を陰影で示し、降雹域を斜線の影で示した (Ohno (1995) より)。

ダウンバースト発生前の直前予測のためには、強いダウンバーストの多くには降雹が伴うという観測結果から、上空での雹の発生を検出することが有効であろう。特に Wilson *et al.* (1984) が示したように、マイクロバーストをもたらした積雲のレーダー反射強度と吹き出しの強さに直接の関係が見られない (第5図) ことから、降水粒子の識別が必要であると考えられる。Ohno (1995) によって示された電を伴うダウンバーストの概念図 (第6図) にみられるように、乾燥空気の流入を示すレーダー反射強度の切込み (ノッチ) と上空 2~3 km での発散流および雹の存在域の検出が自動的にできればダウンバースト発生の直前予測も可能になると考えられる。これらの要素の検出には偏波機能やドップラー機能等種々の機能をそなえるマルチパラメータレーダーが有効であると考えられる。将来のシステムとして検討しておく必要がある。

また、Hoffert and Pearce (1996) のように、LDAR (Lightning Detection and Ranging) システムによる雲内放電の3次元構造とドップラーレーダー観測から、「雲内放電の活動の最盛期の直後に電領域の下降とマイクロバーストの発生が起きている」という報告も興味深い。対流雲の発達、電粒子の形成、雲内放電の



第5図 マイクロバースト発生時の地上 500 m の反射強度と最大速度差 (ΔV_r) (Wilson *et al.* (1984) より).



第6図 降電を伴うダウンバーストの概念図 (Ohno (1995) より).

活発化, 電領域の降下, 雲内放電領域の降下, マイクロバーストの発生という一連の変化が観測的に解明されようとしている。

ドップラーレーダー観測と Proctor (1988) によってなされているようなマイクロバーストの構造と力学の数値実験を組み合わせることにより, 日本におけるダウンバーストの理解を深め, 検出・予測システムを構築することが可能な時代になったと考えられる。

5. まとめ

日本のダウンバーストを中心に研究のレビューを行ない, 災害防除の観点から検出・予測方法について議論し, 現時点でもダウンバーストの検出予測システム作りは十分可能であることを述べた。ダウンバースト監視・予測のための観測機器及びシステムの一層の充実が望まれる。

災害防除の観点から推進された研究により深まったダウンバーストの特徴についての理解は, ダウンバーストと雷雲の発達段階との関係を明かにしつつある。積乱雲の急速な発達による電粒子の形成, 雲内放電の

活発化, 最盛期直後の狭い領域での電と冷気の急激な下降等の特徴はかなり明かになった。研究の進展につれてダウンバーストは必ずしも「まれな現象」であるとは言えなくなった。また, ダウンバーストという範疇に入らなくても, 積乱雲内での「強い下降流」の発生頻度は非常に高いと考えられる。このような現象は, 通常の積乱雲に予測されるより, 急激な水とエネルギーの鉛直混合に寄与している。このような現象の発生頻度と強さの程度を地球全体にわたって評価することは, 水とエネルギーの循環を理解し気候問題との関係を解明する上でも重要であると考えられる。ダウンバーストを含めた雷雲の研究の充実が求められる。

参考文献

岩下晴彦, 1995: 1988年8月24日伊丹付近で発生した2つのダウンバースト, 天気, 42, 833-842.
 Fujita, T. T., and H. R. Byers, 1977: Spearhead echo and downbursts in the crash of an airliner, Mon. Wea. Rev., 105, 129-146.
 Fujita, T. T., 1981: Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales, J. Atmos. Sci., 38, 1511-1534.
 Fujita, T. T., 1985: The downburst, SMRP, 210, Univ. of Chicago, 112 pp.

- Hoffert, S. G. and M. L. Pearce, 1996 : The 29 July 1994 Merritt Island, FL microburst ; A case study intercomparing Kennedy Space Center three-dimensional lightning data (LDAR) WSR-88D radar data, 18 th Conf. on Severe Local Storms, San Francisco, 424-427.
- Kobayashi, F. and K. Kikuchi, 1989 : A microburst phenomenon in Kita Village, Hokkaido on September 23, 1986, *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 925-936.
- 大野久雄, 鈴木 修, 楠 研一, 1996 : 日本におけるダウンバーストの発生の実態, *天気*, **43**, 101-112.
- Ohno, H., 1995 : Studies on microscale phenomena responsible for low-altitude wind shear, Doctoral Dissertation, Hokkaido Univ., 174 pp.
- Proctor, F. H., 1988 : Numerical simulations of an isolated microburst. Part I : Dynamics and structure, *J. Atmos. Sci.*, **45**, 3137-3160.
- Shirooka, R. and H. Uyeda, 1990 : Morphological structure of snowburst in the winter monsoon surges, *J. Meteor. Soc. Japan*, **68**, 677-686.
- Shirooka, R. and H. Uyeda, 1991 : Doppler radar observation of tornado and microburst around Chitose airport, 25 th Inter. Conf. on Radar Meteor., Paris, J73-J76.
- Tabata, A., K. Akaeda, M. Ishihara and H. Sakakibara, 1992 : Structure of downbursts associated with heavy rainfall observed in Tokyo, 25 th Inter. Conf. on Radar Meteor., Paris, J77-J80.
- Uyeda, H., T. Otsu, H. Kagaya, Y. Asuma, K. Kikuchi, Z-I. Kawasaki. and Y. Sono, 1996 : Characteristics of winter thunderclouds observed by a dual-polarization Doppler radar around Wakasa bay, west coast of Japan, 10 th Inter. Conf. on Atmos. Electricity, Osaka, 568-571.
- Uyeda, H., Y. Asuma, N. Takahashi, S. Shimizu, O. Kikuchi, A. Kinoshita, S. Matsuoka, M. Katsumata, K. Takeuchi, T. Endoh, M. Ohi, S. Satoh, Y. Tachibana, T. Ushiyama, Y. Fujiyoshi, R. Shirooka, N. Nishi, T. Tomita, H. Ueda, T. Sueda and A. Sumi, 1995 : Doppler radar observations on the structure and characteristics of tropical clouds during the TOGA-COARE IOP in Manus, Papua New Guinea : Outline of the observation, *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 415-426.
- Wakimoto, R. M. and V. N. Bringi, 1988 : Dual-polarization observations of microbursts associated with intense convection : The 20 July storm during the MIST project, *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 1521-1539.
- 渡辺 明, 1995 : 雹痕から求めたダウンバーストの風速, *天気*, **42**, 627-632.
- Wilson, J. W., R. D. Roberts, C. Kessinger and J. McCarthy, 1984 : Microburst wind structure and evaluation of Doppler radar for airport wind shear detection, *J. Appl. Meteor.*, **23**, 898-915.
- Wood, V. T. and R. A. Brown 1983 : Single Doppler velocity signatures : An atlas of patterns in clear air/windspeed precipitation and convective storms, NOAA Tech. Memo. ERL NSSL-95, 71 pp.

105 : 407 (ダウンバースト ; ガスト)

6. 「ダウンバースト」に対するコメント*

中 村 晃 三**

1. はじめに

ダウンバーストは、最近、航空機事故との関係で特に注目を集めているが、それが地表で曲げられてできる強い水平風(ガスト)は、多くの交通災害、海難事故などの原因として古くから注目されていた。この水平風は、下降流が地表で曲げられるために起こるもの

なので、その強さは、下降流の強さに応じて強くなると考えられる。また、下降流は、雨粒などの重さとその蒸発に伴う冷却によって作られるので、その強さは、下降流が冷たくなればなるほど、強くなると考えられる。そこで、ガストの強さはガストに伴う温度降下が大きければ大きいほど、強くなると考えられる。実際、第1図は、1954年に Fawbush と Miller が作ったもので、横軸にガストに伴う温度降下量、縦軸にガストの風速をとって、観測結果をプロットしたものであるが、温度降下量が大きければ大きいほどガストも大き

* Comments on "Downburst".

** Kozo Nakamura, 東京大学海洋研究所.

© 1996 日本気象学会