ダウンバーストとその被害 Recent studies on downbursts

文字信貴^{*1} 小元敬男^{*2}
Nobutaka MONJI Yukio OMOTO

SUMMARY

Downbursts can be a significant hazard to aviation safety as well as to agricultural activities, structures and buildings on the ground. Major damages on the surface, airline incidents in the past, works on the mechanism of the downburst occurrence and recent efforts to detect the downburst are reviewed.

1. はじめに

1981年6月29日、福岡県柳川市など筑紫平野南部を中心として九州北部の各地で突風被害が発生した。柳川市の被害について新聞やテレビは「竜巻、教室を直撃、児童ら29人負傷」と全国に報じた。著者らは直ちに現地へ赴き被害調査を開始した。風被害の著しい所を追って、筑後川河口付近から東へ順に被害状況を調査して行くうち、被害幅が急に大きくなり、南北約8km、東西約20kmにも達している事がわかった。そして、被害を受けたビニールハウスや建物の倒壊方向が全て東である事もわかった。すなわち、この被害は竜巻による被害の性質を有しておらず、積乱雲からの下降流に伴って発生する突風（ダウンバースト）によるものと推定された。この様に、竜巻と報ぜられる被害でも竜巻ではなく、ダウンバーストに伴うものである事が少なからずある事はすでに指

摘されている。一方、このような突風は竜巻を伴う事もあり、両者が同一の擾乱によって発生する場合がある事も知られている。

ダウンバーストは地上の構造物や農作物に大きな被害を与えるだけでなく、航空機の離着陸時にも大きな脅威であり、しばしば大事故の原因となっている。最近の例では、1982年7月9日、ニューオルリンズのMoisant国際空港でパンアメリカン航空ボーイング727が離陸直後に高度を失い、20秒後に墜落、乗っていた145人と地上の8人が死亡する事故があった。この事故は調査の結果、墜落の原因はダウンバーストによって生じた強いウインドシアであると結論づけられた。このような事故は死亡者が出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上げられている。日本の航空関係者の間でも最近、ダウンバーストの問題が重視されはじめ

*1 京都大学防災研究所、助教授

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Associate Professor

*2 大阪府立大学農学部、教授

College of Agriculture, University of Osaka Prefecture, Professor

(本稿受理：昭和60年1月19日)

ている。

被害や事故を伴うに到らなくても、雷雨に伴って突風が吹く事は一般によく知られている現象であり、日常経験する事である。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、蒸発による冷却などで下降流(down-draft)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gust front(突風前線)とも呼ばれ、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。大きな平原などでは積乱雲の下を砂やほこりを舞い上げながら進行するgust frontを観察する事もできる。Fujita & Byers¹⁾はdowndraftの特に強いものをdownburstと称したが、後に

Fujita & Caracena²⁾は地上9.1 mにおける鉛直速度が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downburstと更に定義づけた。downburst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。³⁾この値は航空機の離着陸時の安全性から決められたものである。

Fujita & Wakimoto³⁾はdownburstの構造を検討し、downburst域の中にも被害程度にむらを生じる微細構造がある事を見出し、4 km以下の直径の強風域をmicroburst、さらに微細な強風構造をburst swathと呼んだ(Fig.1)。これらの言葉には日本語の訳語として適当なものが見出されていないので、ここではそのままの言葉を仮名書きして使用する事にする。

Fig. 1 ダウンバースト関連現象のスケールによる分類³⁾

(Five scales of downburst damage patterns by Fujita & Wakimoto)

2. ダウンバーストによる被害

2.1 地上の被害

ダウンバーストが地上の構造物や、農作物などに及ぼす被害の特徴は竜巻による被害と比較して、(1)被害幅が広く、数百m～数kmに及ぶ、(2)倒壊物の被害の方向がほぼ一方を向いている、又は少し末広りの形をしている、事である。ただし、ダウンバースト被害の中にも幅の狭いものもあり、逆に竜巻被害の中にも明確な旋回風系の痕跡を示さないものもあるため判別の困難な場合がある。また、両者が一擾乱の中で同時に発生する事もある。⁴⁾

Fig.2に1981年6月29日、九州北部に発生したダウンバーストの被害分布を示す。この被害幅は東西が約20 km、南北最大約8 kmに及んでいる。また、詳細に見ると、Fig.3に示す様に被害分布は微細な構造を有しており、幅が約100 m、長さが1～2 km程度の範囲で突風が特に強かった領域(マイクロバースト)が点在する事がわかる。Fig.4にFig.2中の地点Aにおけるビニールハウスの被害、及び地点Bにおける小学校の体

Fig. 2 1981年6月29日九州北部に発生したダウンバースト被害分布⁵⁾
(Distribution of damage caused by downbursts in northern Kyushu, on June 29, 1981.)

Fig. 3 1981年6月29日、瀬高町 (Fig. 2参照) におけるマイクロバースト被害分布⁵⁾
(Microburst damage in the downburst area in Fig. 2)

(a)

(b)

Fig. 4 (a) 1981年6月29日九州北部のダウンバーストによるビニールハウス被害
(b) 同じく、小学校の体育館被害
(Damage of agricultural facilities and a school building by a downburst.)

Fig. 5 1970年9月15日, 彦根市のダウンバースト被害分布⁶⁾
(Distribution of downburst damage near Lake Biwa on September 15, 1970.)

Fig. 6 彦根市のダウンバーストによって移動転倒した墓石⁶⁾
(Slided tomb stone in Fig. 5 area.)

育館の被害の様子を示す。被害は全てほぼ西風によるものであり、被害から推定される最大瞬間風速は $30 \sim 40 \text{ m/s}$ であった。しかし、柳川消防署 (Fig. 2中, C) の最大風速は 18.6 m/s に過ぎず、被害を発生させた強風域の幅は極めて狭かった事を示唆している。

次に、1970年9月15日に滋賀県彦根市に発生したダウンバースト被害の分布をFig. 5に示す。この被害は広さが $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ の範囲で彦根市の北東部琵琶湖岸から広がっている。Fig. 6はこの時の突風で上段が倒れ、下2段が移動した墓石の写真である。この墓石を動かすには少なくとも 75 m/s の風速が必要であると考えられている。なお、Fig. 5の地点Pにある水上警察では最大瞬間風速 45 m/s が観測された。

1976年7月19日に埼玉県北部の岡部町と

Fig. 7 1976年7月19日のダウンバーストによる岡部町の倒壊家屋 (サンケイ新聞より)
(A destroyed house by a downburst in 1976)

Fig. 8 1976年7月19日、深谷市及び岡部町周辺におけるダウンバーストによる倒木の方向（矢印）と降雹分布（太実線内）
(Damage pattern of fallen trees by a downburst in 1976)

深谷市で激しい降雹を伴って発生したダウンバーストは、全壊した家（Fig. 7）の下敷になって1名死亡、7名負傷という被害を出した。Fig. 8に、この時生じた倒木被害の方向を矢印で示す。この図の最西端、つまり、最初のダウンバースト域では下降流が激しく地面に当たり、強烈な風が四方に発散する様に吹いた事が明瞭であるのに対して、同図内の東方ではほとんどが西ないし西北西の強風が吹いた事がわかる。

これまでに日本に発生したダウンバースト被害の中で最も激しかったと思われるのは、1963年5月22日に埼玉県北部から群馬県南部にかけて発生したものである。広い範囲の地域に激しい降雹を伴った突風が吹き、Table 1に示す様に死者9人を含む並はずれた規模の被害を出した。Tableに示した以外にも埼玉県では校舎被害24校、畜舎倒壊490棟、群馬県で畜舎倒壊526棟、ビニールハウス被害89棟など空前のダウン

Table 1 1963年5月22日のダウンバースト被害（気象要覧⁷⁾より編集）
(Damage by downbursts in Kanto area on May 22, 1963)

	死者 (人)	負傷者 (人)	住 家 (戸)			非住家 (棟)	
			全 壊	半 壊	一部破損	全 壊	半 壊
埼玉県	4	60	99	266		356	1,232
群馬県	5	266 (重傷 8)	27	419	3,975	1,113	

バースト被害となった。しかしながら、竜巻の発生した形跡は認められなかった。

その他、1972年8月14日に京都市内で新築中の木造2階建家屋10戸が全壊した例⁸⁾や、1980年7月25日宮城県岩沼市に家屋27棟、ビニールハウス22棟に被害を出した突風⁹⁾、また1982年8月24日に岐阜県各務原市で降雹と共に鶏舎3棟全半壊などの被害を出した突風¹⁰⁾などは被害調査の結果ダウンバーストによる突風

Fig. 9 1977年7月4日、ウイソコンシン州に発生したマイクロバーストによる倒木の方向³⁾

(Distribution of uprooted trees in a microburst in Wisconsin by Fujita & Wakimoto)

であると考えられる。詳細な調査は行われず、竜巻と記録された被害にもかなりの割合でダウンバースト被害が含まれている可能性もある。

国外のダウンバースト被害については、特に米国において調査が詳しく行われており、空からダウンバースト特有の狭い扇形に広がる何百本もの樹木の倒壊が多くの写真におさめられている。Fig. 9に1977年7月4日にウイソコンシン州に発生したダウンバースト被害分布を示す。図中の太い矢印は松の木の倒れた方向を示している。幅が500m程度のマイクロバースト被害の中にさらに幅が200mくらいの被害（バーストスオース）が明確に現れている事がわかる。扇形に広がってさらに反対方向に回転しているものも認められる。

Fujita & Wakimoto³⁾が142個のダウンバーストを調査した結果によれば、被害から推測されたダウンバーストの最大風速は強いもので71～92m/s程度であり、最大級の竜巻の150m/s近

Fig. 10 1982年7月9日にニューオルリンズでパンアメリカン機がダウンバーストに遭遇墜落した時の状況¹¹⁾

(Situation similar to that during the takeoff of Pan Am in New Orleans in July 1982)

い値と比較するとかなり弱い。しかしながら、ある場所がダウンバーストに襲われる確率は、竜巻に襲われる確率よりも大きいと考えられている。

2.2 航空機被害

最近、航空機は機内及び地上の設備の充実や空港の過密な離着陸スケジュールも加って、以前に比較してかなり悪い気象状態の中でも運航される様になって来ている。その結果、米国では離着陸時の悪い気象状態が原因の事故が毎年数回発生している。その大部分は地表付近での大きな風速の勾配（ウィンドシア）が原因と考えられている。その中には多数の死者を伴う事故も幾つか含まれ、航空界では重大な問題と見做されている。ウィンドシア形成の原因としては前線、海陸風、地形なども指摘されているが、最も強いものは発達した積乱雲からのダウンバーストである。

最も大きな事故となったのは、1982年7月9日、ルイジアナ州ニューオルリンズで153人の死者を出した事故である。状況を模式的に示すとFig.10の様であったと考えられている。ボーイング727機が離陸した時は強い向い風と遭遇した（図中1）。この状況下で飛行機は正常より大きな揚力を受けるためパイロットは機首を下げ

Fig. 11 1975年6月24日ニューヨークケネディ国際空港で発生した墜落事故当時の3つのダウンバーストセル(DBC)の動き。¹⁾図は横軸(左上から右下)が時間スケール, 縦軸が滑走路方向の距離である。

(Analysis of three downburst cells on a time-space coordinate at J.F. Kennedy Airport, June 24, 1975, by Fujita & Byers)

気味にするが、その後急に向い風が減少し(2)、下降流を受け(3)、次に強い追い風を受け(4)、上昇のため機首を上げようとするが時すでに遅く墜落(5)、という経過をたどった。

ダウンバーストがスケジュールの過密な空港で発生した詳細な解析例として、Fujita & Byers¹⁾が1975年6月24日にニューヨークのケネディ国際空港で発生した墜落事故に関して行ったものがある。この事故は、ニューオルリンズから飛来したボーイング727機がダウンバーストに襲われ滑走路の730m手前に墜落し、113人が死亡したものである。ダウンバーストに遭遇したのは墜落した航空機だけではない。事故とはならなかったが、それ以前に8機がダウンバーストやダウンドラフトの影響を受け、中でも事故の7分前に着陸しようとしたL-1011機は滑走路手前

で18mまで高度を失った後、危く高度を取戻し、着陸を諦めたというものもあった。Fujita & Byers¹⁾は事故以前に着陸した航空機の受けた力を分析してFig.11に示す様にダウンバーストのセルが3つあったものと考えた。

この事故の約6週間後にデンバーの空港でもダウンバーストによって墜落、15人が負傷し、119人は無傷で脱出するという事故があった。その翌年1976年6月23日、雷雨のフィラデルフィア国際空港ではDC-9機が着陸復行中に滑走路に墜ちるという事故があった。

1964年以後1984年までにダウンバーストが原因と見做された民間航空機事故は27件あり、491人が死亡、206人が負傷している。¹¹⁾ Table 2に1970年から1984年の間の死者を出したダウンバースト事故を示す。

Table 2 最近の死者を伴ったウィンドシア事故 (Torosianによる, ウィンドシア — パイロットの視点¹²⁾の付表から死亡事故のみ選んだもの)
(Recent major airline wind shear accidents)

年 月 日	場 所	機 種	死者数	記 事
1970. 7. 27	沖 縄	DC-8	4	進入中強雨と遭遇
1973. 7. 23	セントルイス	FH-227-B	38	強雨中2マイルのショートランディング
1973. 1. 30	バグバグ	B-707	91	強雨, ウィンドシア, 空港手前ショートランディング
1975. 7. 24	ニューヨーク	B-727	112	強雨, ウィンドシア, 空港手前クラッシュ
1976. 4. 27	セントトマス	B-727	37	地形性シアと遭遇, 長い高速のタッチダウン
1982. 7. 9	ニューオーリンズ	B-727	153	離陸後強雨とウィンドシアに遭遇クラッシュ

3. ダウンバーストの構造

3.1 気象要素の変化

以上に述べた様な被害や事故が発生する様な時, 付近の観測点の気象要素には著しい変化が現れる。Fig.12に1981年6月29日のダウンバースト被害発生時(2.1節参照)の熊本地方気象台における風向, 風速, 気圧, 気温の変化を示す。この日16時頃熊本市郊外でダウンバーストにより大きな倉庫が倒壊した。Fig.13は1970年9月15日の彦根市のダウンバースト被害時の彦根地方気象台における気象要素の変化である。両者に共通している特徴は, 気圧の数mbの一時的な上昇, 気温の降下, 瞬間的な風速の増加であるが, これらはほぼ同時に起っている。

これらの変化は竜巻の通過時, 又はメソ低気圧

の通過に伴う変化と比較して著しい相異がある。

メソ低気圧の通過時には気圧は逆に数mb低下する。そして風向が回転風系のもをを表わして大きく変化するのが認められる。もちろん, ダウンバーストの外縁部やガストフロントの通過の際にも風向の急変が観測されるため, 一地点の風向記録だけでは突風の原因を判断する事は危険である。

ダウンバーストは, 気塊が雨滴の蒸発による冷却のため密度が増大する事, 及び雨滴の落下による摩擦のために下方に引き降される事によって発生するものである。雨滴と共存する気塊は飽和に近く, 降下に伴う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大きな温度差を持つ事になる。Fawbush & Miller¹³⁾はこの下降流が地面に衝突して水平に

Fig.12 1981年6月29日に熊本市郊外にダウンバーストが発生した前後の熊本地方気象台における(a) 風向, (b) 風速, (c) 気圧, (d) 気温の変化⁵⁾

(Variations of wind, pressure and temperature recorded at Kumamoto Meteorological Observatory at the downburst in northern Kyushu on June 29, 1981)

Fig. 13 1970年9月15日の彦根市のダウンバースト時の彦根地方気象台における
気象要素 (Fig. 12 と同順) の変化⁶⁾

(Variations of wind, pressure and temperature recorded at Hikone
Meteorological Observatory at the downburst near Lake Biwa on
September 15, 1970)

Fig. 14 下降流に伴う突風と気温降下の関係¹³⁾
(Relation between the down rush
and temperature drop obtained by
Fawbush & Miller)

広がる最大風速は下降流と周囲の気温の差によ
って決定されるものと考えて観測結果から Fig. 14
の様な関係を見出した。

この図によると、温度差が10℃であれば、下降
流に伴う突風の風速が30 m/sに達する事がわか
る。彦根市に発生したダウンバースト時の彦根地
方気象台における気温の降下量は5.2℃であるが、
最大瞬間風速の測定値は33.2m/s であるので瞬
間的にはこの図から予測される風速よりも強い突
風が吹く事、被害から推定される最大風速は場所
によってさらに大きい事などから、ダウンバース
トは局地的な温度差だけでは説明できない機構に
より発生していると考えられる。

3.2 積乱雲の構造

ダウンバーストは一般に発達した積乱雲に伴う。
Fig. 15 に竜巻などを発生させる巨大な積乱雲、
スーパーセルをドプラーレーダーの観測に基づい
てモデル化したものを示す。積乱雲の下降流領域
は主に2つある。下降流が地面に当たって水平に拡
がる前面、ガストフロントは図中には前線の記号
で表わされている。ガストフロントの通過は(1)気

Fig. 15 積乱雲の3次元モデル¹⁴⁾
(Schematic three-dimensional depiction of a supercell storm by Lemon & Doswell)

Fig. 16 槍先型エコーの発達, 1975年6月24日ニューヨークケネディ空港(図中の白丸)における事故当時の様子¹⁾
(Formation and advance of a spearhead echo at JFK airport on June 24, 1975, analyzed by Fujita & Byers)

圧上昇, (2)風向変化, (3)風速増加, (4)気温の低下, (5)降水, がこの順で起る事が知られている。¹⁵⁾ ダウンバーストはこの下降流領域の中に特に強い下降流が発生し, 強烈な突風が部分的に発生する現象であると考えられる。

Fujita & Byers¹⁾ の解析によれば, ダウンバースト

Fig. 17 1976年7月19日の埼玉県岡部町のダウンバースト時 (Fig. 8 参照) の東京レーダーに現れた槍先型エコー
(Spearhead echo of the downburst cell which caused damage in Kan-to area on July 19, 1976)

Fig. 18 槍先型エコーの形成モデル¹⁾
(A model of a spearhead echo formation proposed by Fujita & Byers)

ーストを発生させる積乱雲のレーダーエコーは槍先型をしていて (Fig. 16), その槍先の部分は槍先の方向にエコーの他の部分よりも速く動く。又, 弓型をしている場合もあり, その中央付近に弓に直角に槍先型のエコーを伴い, 強風域が出現する事も指摘されている⁴⁾。前述した1976年7月19日, 埼玉県北部のダウンバースト (2.1節参照) も東京レーダーに南西に槍先を向けたエコーが捕えられており, 被害はその先端付近で発生している (Fig. 17)。この様な槍先型エコーが形成されるモデルとしては Fig. 18 に示す様な積乱雲内の流れが提案されている。

なお、1981年6月29日の九州北部のダウンバーストは孤立した積乱雲ではなく、南北に100 km以上も伸びる積乱雲の列、スコールライン、からの下降流であった。そのため、突風の吹いた範囲は南北に100 km近くに及んだ。ガストフロントはスコールラインの発達移動に伴って南に伸びながら時速80 kmで東進した。⁵⁾

ダウンバーストが発生する源については、Fujita & Caracena²⁾は、積乱雲のかたと雲の上にオーバースhootした雲頂部が下へ向って崩壊する時とダウンバーストの発生する時が一致する事や、さらに積乱雲のドブラーレーダー観測も、雲頂付近から下層までつながる流線が描ける様な例がある事から、Fig.18に示した様なモデルを提唱している。一方では、積乱雲の中層に入って来る乾燥した空気が下降流の源であるとの考えもあり、明確な結論は出されていない。

3.3 ダウンバーストの地表付近の構造

積乱雲の中で発生した下降流は地表面に当たって水平方向に発散する。Fig.19に1982年7月に米国で観測されたダウンバーストの表面近くの風の分布を示す。水平面内の風は顕著な発散の場を、鉛直面内の場合はFig.10にモデル的に描かれたジェット状の下降流が地面に衝突して拡がる流れの様子、さらに水平に軸を持つ回転の存在を明確に現している。

対流システムが移動している場合には、地表付近の風向はある一方向を示す。Fig.20はその様な場合の観測例である。積乱雲は移動している場合がほとんどであり、2.1節に示した被害分布でも、被害の方向はほとんど一方向を向いており、移動速度が被害の大きさに強い影響を持つ事が推測される。例えば、1981年6月29日柳川市を中心とした九州北部のダウンバーストの場合は80 km/hr (=22 m/s)という速い移動速度であった。

周囲より温度の低い下降流が地面に当たった後水

Fig.19 複数のドブラーレーダーによって観測されたダウンバースト（マイクロバースト）の例¹¹⁾
(Windfield of a microburst observed by multiple Doppler radar)

Fig.20 移動しているダウンバーストのドブラーレーダー観測例⁴⁾
(Doppler velocities of a travelling microburst)

Fig. 21 ガストフロントの構造モデル¹⁶⁾
(A model of a gust front proposed by Charba)

平に広がる流れは密度流であると考えられる。被害が発生する風速に達しなくても積乱雲の下降流に伴う突風は常に発生しており、その先頭部、ガストフロントの観測例は多く得られている。Fig. 21にCharba¹⁶⁾が鉄塔の観測などをもとに作成したガストフロントのモデルを示す。ダウンバースト先端部のミクロな解析例は得られていないが、概念的にはこの図に示されている構造に近いものであると推定される。

ガストフロントの移動速度(V)についてはGoff¹⁷⁾は多数の観測結果から、最大風速 U との間に $V = 0.67U$ という関係を得ている。また、密度流の考え方を適用すれば、

$$V = k \sqrt{gd \frac{\rho_c - \rho_w}{\rho_w}}$$

の形に表わす事ができる。ここに d と ρ_c は密度流の深さと密度、 ρ_w は周囲の密度、 g は重力の加速度である。 k は比例定数であり、Wakimoto¹⁵⁾の観測によれば0.77である。

平均的には密度流の考え方はフロントの動きを

表わすものと考えられるが、ダウンバーストやマイクロバーストの様に、その領域の一部が突出して強烈な突風になるメカニズムは説明できていない。

4. ダウンバーストの対策

ダウンバーストは地上の構造物、農作物、森林などに被害を与えるばかりでなく、航空機の発着時の安全にとって大きな脅威となって来ている。ダウンバーストが原因で発生する墜落事故によってTable 2に示した様な多数の死者を出している米国ではダウンバーストに対する関心は高く、2つの大型研究プロジェクトが実施された。その1つはNIMROD (Northern Illinois Meteorological Research on Downburst) と呼ばれ1978年シカゴ近辺でシカゴ大学Fujita教授の指揮のもとで行われたものである。このプロジェクトにはドプラーレーダー3台、移動自動メソ気象観測網(PAM)27地点のほか多数の雨量観測点の設置、さらに、積乱雲接近時には30分

毎にゾンデ観測を行うという大規模なものであった。¹⁵⁾その研究成果の一例としてはダウンバーストのドブラーレーダー観測例をFig.20に示したとおりである。

もう一つのプロジェクトはJAWS (Joint Airport Weather Studies) と呼ばれるもので、国立大気研究所 (NCAR) のMcCarthy とWilson の指揮のもとに1982年の夏に行われたが、特に航空機の安全性に重点が置かれた計画であった。JAWS期間中にドブラーレーダーで捕えられたマイクロバーストをまとめれば、¹¹⁾

水平スケール： 1 ~ 3 km

寿命： 5 ~ 15 分 (最も強い期間 2 ~ 4 分)

平均風速差 (向い風と追い風の差)：

25 m/s (最大 48 m/s)

発生頻度：デンバー付近で1600 km² 当り 1

日 1 回 (又は 1 日に 1 km² 当り

0.0007 個)

なお、JAWS の後、更に大がかりなダウンバースト観測プロジェクトがアラバマ州ハンツビルを中心に行われる事になっているとのことである。

パイロット達は、離着陸時に上記の性質を持つダウンバーストにまともに遭遇した場合は現在の技術では墜落は避けられないとしている。安全確保のためにはパイロットに対する現象の危険性に関する知識の普及、ダウンバーストに突込んだ時に備えて、シミュレーター等による訓練、ダウンバーストを事前に発見する技術の向上が不可欠であると指摘されている^{11), 12)}。

ダウンバースト発生の発見法として現在2つの方法が考えられている。1つは空港で地上から監視する方法であり、もう1つは機上で監視しながら飛ぶ方法である。前者で実用化されているのはFAA (Federal Aviation Administration) のLLWSAS (Low Level Wind Shear Alert System) で、すでに59の空港に設置され、1984年中に米国内120の空港がこれを装備

する予定とされている。これは6台の風向風速計を各空港の周辺に配置して、急激な風の変化を検出すればただちに管制塔を通じてパイロットに伝達されるものである。しかし、このやり方はマイクロバーストの検出には不十分であるとの意見もある。¹¹⁾またワシントンDCのダレス空港では音波・マイクロ波レーダーによる監視¹⁹⁾あるいは125個の気圧急上昇 (pressure jump) 検知器による監視¹⁹⁾なども行われている。最も確実なのはドブラーレーダーによる監視である。米国政府は全ての気象レーダーをドブラーレーダーに取り替えるNEXTRADというプログラムを1988年までに開始させる予定であるが、FAAも1992年までに100の空港にドブラーレーダーを配置する計画を持っている。

機上からのダウンバーストの検出には現在のところ満足なものはないが、マイクロ波のドブラーレーダーやドブラーレーザを搭載して数km前方の現象を捕えるシステムをNASAがNCARやNOAAの協力で開発中であり、1990年代の実用化を目指している¹¹⁾。

Fig.18の様に積乱雲のオーバーシュート部分の崩壊とダウンバーストの発生が密接な関係があるとすれば静止衛星を使って積乱雲の状態を監視する事によって予測が可能となるかも知れない。³⁾ただし、どのような積乱雲がダウンバーストを発生させるのか、そして、ダウンバーストを発生させる様な積乱雲はどのような状況下で形成されるのかなど、よくわかっていない点が多い。

日本においてもダウンバーストの発生は地上被害の発生頻度から考えて航空機事故の危険をはらんでいる事は確かであるが、まだ大事故が発生していない事もあって重大さは充分認識されているとは言えない。しかし、1984年9月には東京と大阪で国際航空安全セミナーがダウンバーストをテーマに開催されるなど関心は高まりつつはある。とはいえ、日本におけるダウンバーストの実

態はほとんど分っていない。1985年からは電とダウンバーストの観測プロジェクトが文部省科学研究費補助金を得て3年間、群馬県前橋付近を中心に展開される。この計画には著者ら気象関係者をはじめ、農学、土木工学の研究者が参加するので我が国におけるダウンバーストの実態とこれによる災害の解明に著しい貢献が期待される。

参考文献

- 1) Fujita, T.T. and H.R. Byers ; Spear-head echo and downburst in the crash of an airliner, *Month. Weath. Rev.*, 105, 1977, 129-146.
- 2) Fujita, T.T. and F. Caracena ; An analysis of three weather-related aircraft accidents, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 58, 1977, 1164-1181.
- 3) Fujita, T.T. and R.M. Wakimoto ; Five scales of airflow associated with a series of downbursts on 16 July 1980, *Month. Weath. Rev.*, 109, 1981, 1438-1456.
- 4) Fujita, T.T. ; Tornadoes and downburst in the context of generalized planetary scales, *J. Atmos. Sci.*, 38, 1981, 1511-1534.
- 5) 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, 文部省科研費研究成果報告書, 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, 37-60.
- 6) 石崎潑雄, 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, 京都大学防災研究所年報, 第14号A, 1971, 469-480.
- 7) 気象庁 ; 5月22日関東地方の雷雨, 降ひょう, 気象要覧, 1963, 21-25
- 8) 石崎潑雄, 成 仁煥, 吉川祐三, 藤谷徳之助 ; 1972年夏に起った SEVERE LOCAL STORM による被害について, 京都大学防災研究所年報, 第16号B, 1973, 273-284
- 9) 石川裕彦 ; 1980年7月25日宮城県岩沼市付近の突風, 光田 寧編, 文部省科学研究成果報告書, 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, 24-25
- 10) 文字信貴 ; 1982年8月24日, 岐阜県各務原市の突風について, 同上, 60-62
- 11) McCarthy, J. and R. Serafin ; Microburst, *Weatherwise*, 37, 1984, 120-127.
- 12) Torosian, A ; ウィンドシア—パイロットの視点, 国際航空安全セミナーテキスト, 1984, 21pp.
- 13) Fawbush, E.R. and R.C. Miller ; A basis for forecasting peak wind gust in non-frontal thunderstorms, *Bull. Amer. Soc.*, 35, 1954, 14-19.
- 14) Lemon, L.R. and C.A. Doswell III ; Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related tornadogenesis, *Month. Weath. Rev.*, 107, 1979, 1184-1197.
- 15) Wakimoto, R.M. ; The life cycle of thunderstorm gust front as viewed with Doppler radar and rawinsonde data, *Month. Weath. Rev.*, 110, 1982, 1060-1082.
- 16) Charba, J. ; Application of gravity current model to analysis of squall-line gust front, *Month. Weath. Rev.*, 102, 1974, 140-156.
- 17) Goff, R.C. ; Vertical structure of thunderstorm outflows, *Month. Weath. Rev.*, 104, 1976, 1429-1440.
- 18) Hardesty, R.M., P.A. Mandics, D.W. Bean and R.G. Strauch ; The Dulles airport

acoustic-microwave radar wind shear measuring system, Bull. Amer. Meteor. Soc., 58, 1977, 910-919.

- 19) Bedard, A.J., W.H. Hooker and D.W. Bean ; The Dulles airport pressure jump detector array for gust front detection, Bull. Amer. Meteor. Soc., 58, 1977, 920-926.