

マイクロバースト/ダウンバースト*

大野久雄**

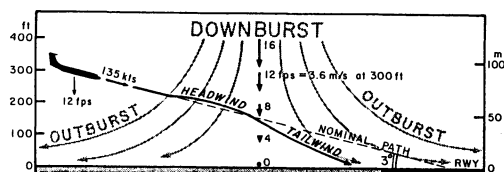
1. はじめに

甚大な風災害や航空機墜落事故の原因となる気象現象に、マイクロバースト (Microburst) とかダウンバースト (Downburst) とかと呼ばれるものがある (第1図)。米国ではこれにより1974~85年の間に少なくとも11件の民間航空機事故があり、500人以上の死傷者をだした。このことから米国では同現象に関する特別観測計画を重ね、その成果を踏まえ、マイクロバーストの探知に力点をおく形で、主要空港ヘドップラーレーダー (降水強度のみならず、風の挙動も測定するレーダー) を導入しはじめている。

最近わが国でもマイクロバースト、ダウンバーストに関する報告例が増し、社会的関心が高まっている折り、この現象について説明を試みたい。

2. どのような現象か

Fujita (1985) はダウンバーストを『地上付近で破壊的な風の吹き出し (外出流) を起こす強い下降気流』と定義し、次のように説明している。『地上付近で風は、直線または曲線状に吹き、強く発散する。ダウンバーストのサイズは、1 km 以下から数十 km にいたるまで様々である。風の吹き出しが水平方向に 4 km 以下の小型のダウンバーストをマイクロバーストと呼ぶ。小型でありながら強風は、75 m/s に達することがある。風の吹き出しが水平方向に 4 km 以上に広がる大型のダウンバーストをマクロバーストと呼ぶ。強風は5分から30分間続き、60 m/s に達することがある』。マイクロバースト、マクロバーストという用語は現象の大きさを便宜上分けるためのもので、現象自身に本質的な差はない。



第1図 航空機事故を呼ぶダウンバースト。図の左から予定進路に沿って着陸しようとする航空機は、まず向かい風を受けて揚力が高まり、機首が上がる。パイロットは推力を落として機首を下げ正常な進入路に戻ろうとする。次に下降気流を受けて機体が落下する。さらに、追い風になって揚力が落ち、機体が地面に接触してしまう恐れがある。(図は、Fujita and Caracena 1977)

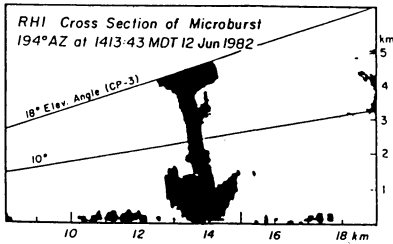
「高度 91 m (300フィート) で 3.6 m/s (毎秒12フィート) 以上の下降気流」をマイクロバーストの目安とすることもある。これは航空機の降下速度とほぼ同じで、The Thunderstorm Project (米国) で得られた同高度での平均的な下降気流速度の10倍に達する値である。

3. 特別観測計画の実施

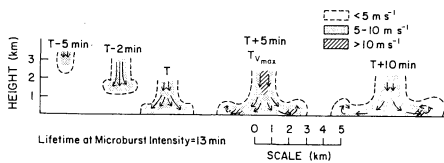
イースタン航空66便が1975年6月、ニューヨークのケネディー空港で墜落したのを契機に、マイクロバーストに重点を置いたダウンバーストの特別観測計画が米国各地で実施された。NIMROD (1978年)、JAWS (1982年)、CLAWS (1984年)、MIST (1986年)、FLOWS (1986年)、CINDE (1987年) などの各計画で、複数のドップラーレーダー、移動式自動気象観測網 (例えば 2 km 間隔)、航空機等を用いている。計画の実施に際しては、Fujita の定義を若干ゆるめるとともに定量的に扱えるよう「極大風速地点と極小風速地点との間隔が 4 km 以下で、風速差が 10 m/s」をマイクロバーストの認定基準とした。

* Microburst/Downburst.

** Hisao Ohno, 気象研究所.



第2図 レーダー（反射強度）がとらえたマイクロバーストの鉛直断面（Fujita and Wakimoto 1983）。



第4図 マイクロバーストの一生（Hjelmfelt 1988）。

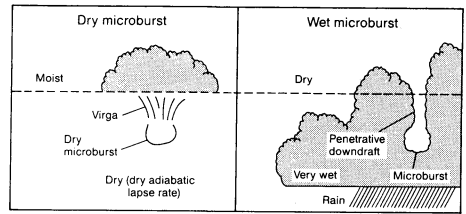
これらの特別観測で得られたデータセットを使って気流構造や統計的性質の解析，数値シミュレーションが行われ，マイクロバースト現象の解明が進んだ。

4. 下降気流を強化する要素と気象条件

対流活動で上昇気流が生じ，雨滴ができ，成長してやがて落下する。雨滴は落下する際，摩擦で空気を引きずり降ろし，下降気流をつくる（雨滴の落下速度は直径1 mmで4 m/s，直径3 mmで8 m/sと速い）。雨滴は，落下途中に乾燥層を通ると蒸発し，空気から気化熱を奪う。その結果，空気は冷えて周囲より重くなり，下降気流が強まる。下降気流の中で，蒸発が進めばさらに重くなり，下降気流の速度はさらに増大する。雨のみならず雹や霰がある場合，空気は蒸発熱に加えて昇華蒸発熱や融解熱を奪われるので一層冷えて重くなり，下降気流はより強くなる。

これらの要素が合わさって，強い下降気流が維持され，地上付近にまで達し，強い外出流になる。これがマイクロバーストである。第2図にJAWS計画でレーダーが捕らえたマイクロバーストを示す。この例では，水平サイズは2 kmで，滑走路の長さの約1/2である。各要素がどの程度マイクロバーストの発生に貢献するかは，数値シミュレーションによる研究で詳しく議論されている。

マイクロバーストは2つの対照的な気象条件の下で



第3図 マイクロバーストを起こす気象条件（Caracena 他 1990）。

実現する（第3図）。左図は大気下層が乾燥，その上が湿潤な場合で，米国中西部の半乾燥地帯でよく見られる。この場合，雨滴は地上に達する前に蒸発してしまい，降水はほとんど記録されない（ドライ・マイクロバースト）。右図は大気下層が湿潤，その上が乾燥している場合である。活発な積乱雲の下で豪雨とともに生じる場合で，米国南部ではこれが多い（ウェット・マイクロバースト）。日本で発生する場合は，気候区分から見て，後者が多いと思われる。

5. マイクロバーストの平均像

NIMROD計画とJAWS計画の観測結果からマイクロバーストの平均像がわかる。第4図がJAWSデータでみたマイクロバーストの平均的な一生である。上空に強い下降気流が発生し，地上に達するまでに平均5分，着地してから最盛期までが5分，その5分後には弱まる。地上に達してから10分程度が寿命である。

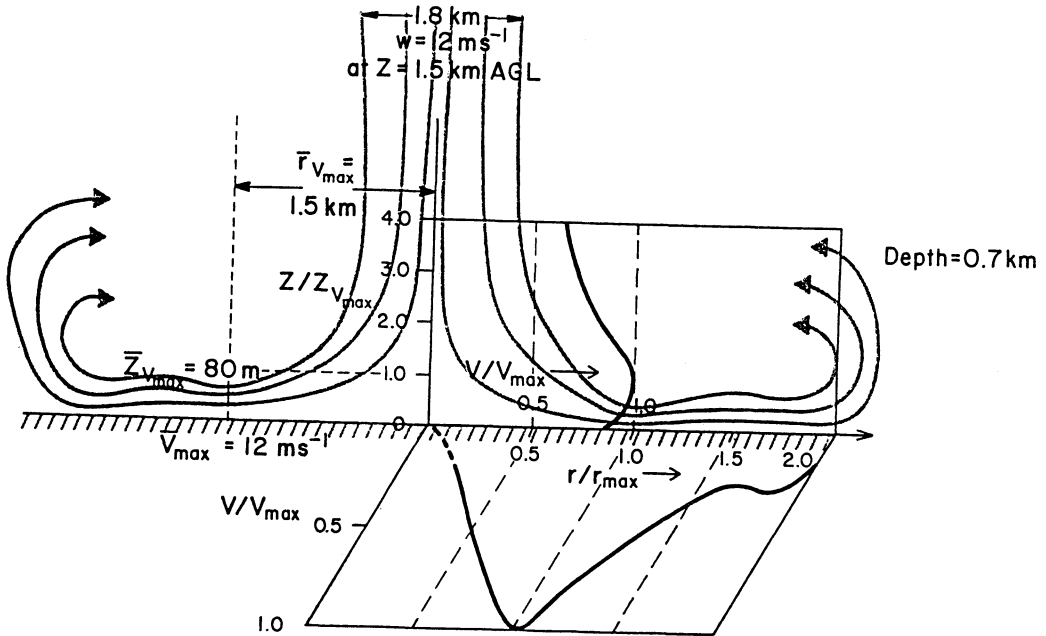
第5図は最盛期の平均的な構造である。下降気流の範囲は直径1.8 km，下降気流の強さは高度1.5 kmで12 m/s，外出流の厚さは700 mである。外出流の最大風速は12 m/sで，下降気流の中心から1.5 km離れた地点の高さ80 mのところに見れる。中心から測って0.5 km～1.5 kmまでが強風域となる。

第6図はマイクロバーストがもたらす最大風速の頻度分布である。10数 m/sが大半で，30 m/sに達するものは少ないことがわかる。

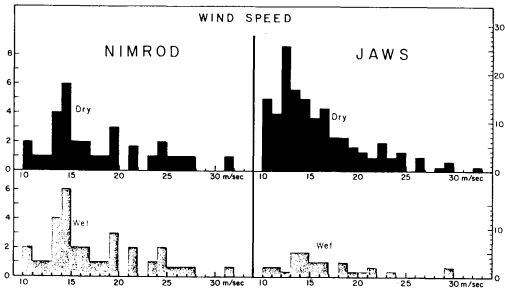
6. 外出流の挙動

外出流の挙動を見るには数値シミュレーションが効果的である。一例を第7図に示す。これは1985年8月2日，米国グラス空港でデルタ191便を墜落させたマイクロバーストをシミュレートしたもので，格子間隔を20 mとし，領域として鉛直に4 km，水平に8 kmを設定した2次元軸対称モデルが用いられた。

実験では，領域内の直径2.5 kmの範囲に，最大で



第5図 マイクロバーストの平均的な構造 (Hjelmfelt 1988).



第6図 マイクロバーストがもたらす最大風の頻度分布 (Fujita 1985).

3.8 g/m³ に達する雹を、4 km の高さから十数分間降らせた。降り始めから11~14分後の外出流の様子がよくわかる。タバコの煙を机の上に吹きかける時にできるようなリング状の構造が紙面を左から右へ伝搬していく。その速度は 8.5 m/s である。第5図で見たように、最大風速はリングの下に現れて、この場合の高度は 100 m~200 m である。最大風速値は 26 m/s で、伝搬速度より3倍程度速い。高度 100 m 以下では地面摩擦のため外出流の風速は弱い。

7. 発生のかた

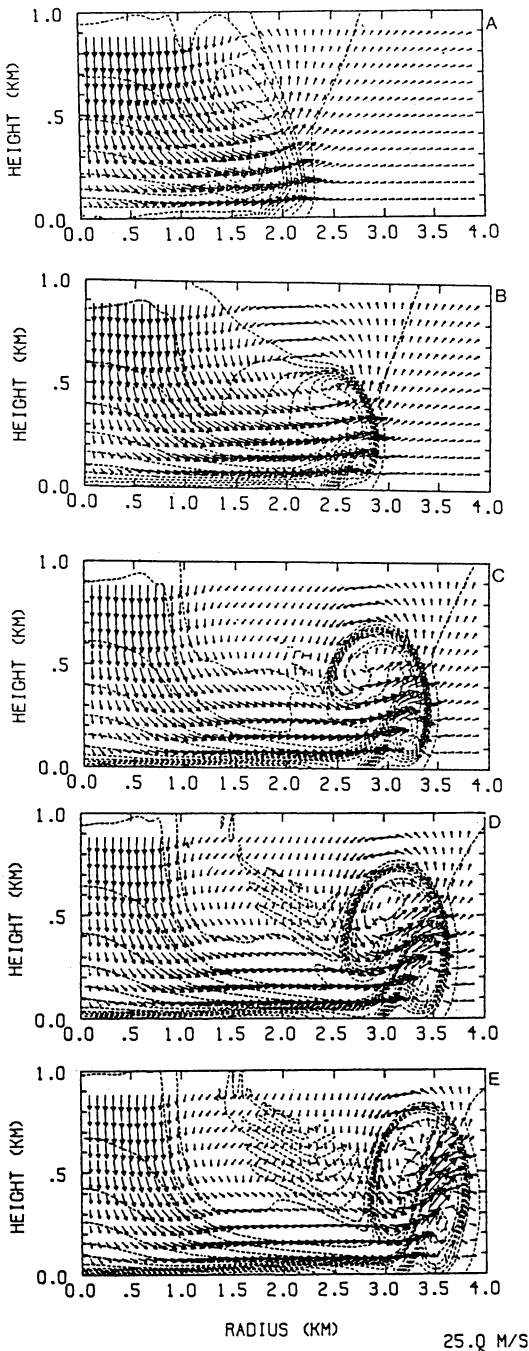
マイクロバーストは、発生する日には多発する傾向がある。例えば MIST 計画(1986年6~7月、於アラ

バマ州) では、30 km×30 km の監視域の中で2カ月間に64個のマイクロバーストを観測したが、うち4日間は1日5個以上、最も活発な日には1日で25個を記録したとの報告がある。また、単独で発生するばかりでなく、複数が並んで発生することもある。これはマイクロバースト・ラインと呼ばれ、単体のマイクロバーストに比べ寿命が平均58分と長い。JAWS, CLAWS 両計画を通じて全体の1/8にあたる20事例がマイクロバースト・ラインであった。さらに、1つのマイクロバーストに多数のマイクロバーストが、また1つのマイクロバーストに多数の小さい強風域が埋め込まれているという微細構造もある。

8. わが国の場合

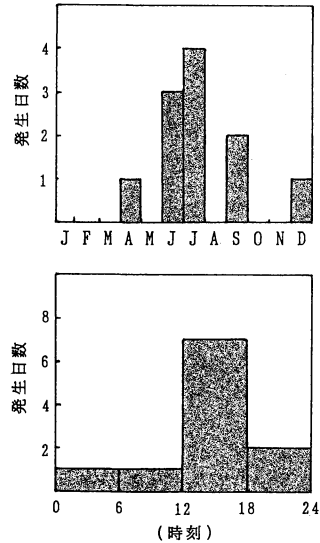
日本では気象条件の違いからマイクロバースト/ダウンバーストの発生は希とされてきた。それらが原因となった航空機墜落事故も幸いなことにまだ起こっていない。結果として米国で実施されたようなマイクロバーストの特別観測の計画はなく、特異現象の事後解析を通してマイクロバースト/ダウンバーストの実態を垣間みているのがわが国の現状である。

過去10年間に報告のあった主なものは、筆者の知り得た範囲内で、筑紫平野(81年6月29日)、富山空港(83年7月27日)、那覇空港(84年4月19日)、北海道北村



第7図 数値実験でみる外流出の挙動 (Proctor 1988).

(86年9月23日), 羽田空港(87年7月25日), 東京都内(87年7月31日), 鹿児島空港(88年6月10日), 千歳空港付近(88年9月22日), 埼玉県妻沼町や茨城県霞ヶ浦(90年7月19日)等の事例がある。またマイクロバースト



第8図 わが国のマイクロバースト/ダウンバーストの月別・時間帯別発生日数(1981~91までの合計).

トと現在見られているものに羽田空港(90年12月10日), 岡山市(91年6月27日, 単独では51 m/sの風に耐えられるコンクリート製電柱18本が倒壊), などの事例がある。発生場所は北海道から沖縄まで広く分布している。

月別・時間帯別の頻度にしたのが第8図である。これを見るかぎりわが国では6~7月の午後に危険度が高いと言える。しかし, どの程度強いマイクロバーストがどのくらいの頻度で日本に発生しているのかはまだわからない。

9. おわりに

マイクロバースト/ダウンバーストに関する研究は, 現象が多発し, 社会的に大きな問題となった米国を中心に進んできた。わが国でも最近, ドップラーレーダーによる観測研究や数値予報モデルを用いたポテンシャル予測可能性の研究, 積雲対流モデルによる発生シミュレーションなどが行われている。国内でおきるマイクロバーストの全貌が, 徐々にではあるが, 明らかになっていくようだ。

文 献

小倉(1991a, b)には, 豊富な内容が非常にわかりや

- すく書かれている。Caracena 他にはマイクロバーストの写真が多数ある。米国気象学会等が定期的に主催する「INTERNATIONAL CONFERENCE ON RADAR METEOROLOGY」, 「INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE AVIATION WEATHER SYSTEMS」, 「CONFERENCE ON SEVERE LOCAL STORMS」の Preprints にはマイクロバースト関連論文が極めて多い。
- Caracena, F., R.L. Holl and C. A. Doswell III, 1990 : Microbursts A Handbook for Visual Identification. US Government Printing Office, pp 9.
- Fujita, T.T., 1985 : THE DOWNBURST, SMPR 210, The University of Chicago, pp 9, and pp 61.
- , and F. Caracena, 1977 : An analysis of three weather-related aircraft accidents. SMPR 145, The University of Chicago, pp 11.
- , and R.M. Wakimoto, 1983 : JAWS microbursts revealed by tripple-Doppler radar, aircraft, and PAM data. Preprints, 13th Conf. on Severe Local Storms, Tulsa, Amer. Meteor. Soc., 97-100.
- Hjelmfelt, M.R., 1988 : Structure and life cycle of microbursts outflows observed in Colorado. J. Appl. Meteor., 27, 900-927.
- 小倉義光, 1991 a : ダウンバーストと低層ウインド・シャー, 気象, 35, 9, 30-32.
- , 1991b : マイクロバーストと特別気象観測. 気象, 35, 11, 34-36.
- Proctor, F.H., 1988 : Numerical simulation of an isolated microburst. Part I : Dynamics and structure. J. Atmos. Sci., 45, 3137-3160.



Predictability and nonlinear modelling in natural sciences and economics (自然科学と経済における予測可能性と非線型モデリング)

標記テーマについての国際会議が、オランダのワゲニンゲン農業国際大学の第75回記念会議として開催される。非線型モデルの数値理論と自然（地球物理、農業、環境、生態系）・経済の各分野でのモデルを使用した解析に基づいて、非線型システムの力学過程を明らかにし、モデルによる将来予測の改善に寄与することを目的としている。日程等は下記の通りである。

日 程：1993年4月5～7日

場 所：オランダ、ワゲニンゲン市国際農業センター

連絡先：ワゲニンゲン農業大学会議事務局
J. L. Meulenbroek, Congress Office
Wageningen Agricultural University
PO BOX 9101 6700HB Wageningen
The Netherlands