

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*

岩下晴彦**

要旨

1988年8月24日14時20分頃大阪国際空港(伊丹)付近で発生した突風を解析した結果、この突風は2つのダウンバーストによるものであり、約1時間半前に芦屋市付近で発生して東北東へ進んだエコーと北北西から南下したエコーが合体して成長し活発になった時に発生したことがわかった。ダウンバーストに伴う最大瞬間風速は、空港の滑走路南端寄りの風速計で14.6 m/sと18.2 m/sでその間隔は8分間であった。

空港では強風の発生する約30分前から降水域に入って明瞭な気温降下と約1 hPaの気圧上昇があった。2番目のダウンバーストの終了時には一時的で急激な湿度降下(humidity dip)と約1 hPaの気圧降下が見られた。

地上で降雹は報告されていない。

1. はじめに

Fujita (1976) は1975年6月24日アメリカ・ニューヨークのケネディ空港で発生したイースタン航空66便の着陸時の事故を詳しく解析して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(downburst)と名付けた。

最初はある高度における下降気流の速さとして数値的に定義されたが、現在では複雑な発生状況にも対応できるよう包括的に「地表付近で破壊的な風の吹き出しを起こす強い下降気流」と定義されている。

その後、Fujita (1985) はダウンバーストをその水平スケールによって区分し、初期の広がり4 km以下のものをマイクロバースト(microburst)、4 kmを超えるものをマクロバースト(macrobust)と呼んだ。

Wilson *et al.* (1984) はドップラーレーダーによるマイクロバースト検出の基準として「水平発散の両側に現れる速度の2つのピークについて、その間の距離が4 km以内で、風速差が10 m/s以上」を提案し、現在では広く用いられている。

マイクロバーストは短い距離の間で風向風速が変化

するので航空機への危険度が高いとされるが、マクロバーストも油断はできない、特に複数個が発生すると風向風速の変化が複雑なので危険である。

航空機の離着陸に重大な影響を与える対流現象の発生状況を把握するため、米国では1978年のNIMROD(Northern Illinois Meteorological Research on Downbursts)、1982年のJAWS(Joint Airport Weather Studies)、1986年のMIST(Microbursts and Severe Storms)など数多くの野外観測が行われ、その特性が調べられてきた。その結果、例えば湿潤な地域では大規模な積乱雲活動に伴って降雨とともに発生するウェットなダウンバーストがある一方、乾燥した地域では比較的小規模の対流雲に関連し地上ではほとんど降雨のないドライなダウンバーストもあることがわかり、発生頻度や構造も調べられている。またProctor (1988, 1989)以降、マイクロバーストのライフサイクルに関する数値シミュレーションも試みられている。

わが国でも1980年代後半になってから、地上風の変化とレーダー記録や被害等の記録を用いてダウンバーストの研究がなされるようになってきた。

中山・伊関(1985)は1983年7月に富山空港で発生した強風について気温変化や降水との対応を調べてダウンバーストであると推定している。小元(1987)は1981年6月の筑紫平野の強風についてその地域差や被害の分布・気圧変化などからダウンバースト域でマイクロバーストが集団的に発生したと推定している。

* The downbursts at the Osaka International Airport (Itami) on 24 August 1988.

** Haruhiko Iwashita, 日本航空航空安全推進委員会事務局(現在、〒214 川崎市多摩区宿原5-29-17)。

—1993年8月20日受領—

—1995年9月22日受理—

Kobayashi and Kikuchi (1989) は1986年9月に札幌郊外で発生した強風について被害調査や種々の解析からマイクロバーストであったと推定するとともに、強風は顕著な bow echo の場所に対応していたことを報告している。加藤 (1991) は1987年7月25日に東京都大田区羽田で発生した強風について被害を詳しく調査して風の変化からダウンバーストであった可能性を指摘している。同じダウンバーストについて、岩下(1992)は部分的に風の時空変換を援用して発生位置を推定している。下山・此田 (1991) は1987年7月31日に羽田の北方で発生した強風について被害と風の変化からダウンバーストであったと推定している。Ohno and Suzuki (1991) は1990年7月に関東平野北部の妻沼で発生した強風について被害物件の倒壊状況などからダウンバーストであったと推定している。また Fujita (1992) は、1990年12月に羽田で発生した地上強風について風の時空変換を用いてダウンバーストであったと推定している。中山・青山 (1990) は、1988年6月に鹿児島空港で航空機が離陸の際に遭遇した風の急変の報告に際して、航空機記録データの分析と風の記録等を用いてダウンバーストであったと推定している。

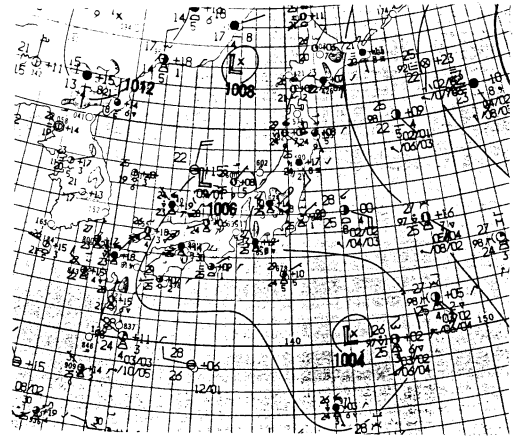
Ohno *et al.* (1994) は1991年6月27日に岡山で発生した強風について地上物件の倒壊や雲の写真とレーダーエコー及び風の記録とその時空変換などによりダウンバーストとガストフロントの活動によるものであったと推定している。

ドップラーレーダー観測を用いた報告としては次の報告がある。Tabata *et al.* (1991) は1987年7月31日に羽田の北方で発生した強風について雷雲の下層に発散を示す大きな速度場が観測されたことを報告している。Ohno *et al.* (1993) は1992年の水戸の事例について倒木の状況とドップラー観測とその他の気象データにより複数のダウンバーストが発生したと推定している。

本研究では1988年8月24日14時30分頃、伊丹付近で発生したダウンバーストを空港の滑走路両端の風向・風速計の自記記録・気温・露点温度の自記記録、及び空港気象レーダーと大阪管区気象台レーダーのデータにより解析した結果について報告する。急激に発達した2つの対流セルが合体し活発になった頃にダウンバーストが2つ発生したことを特記したい。

2. 気象概況

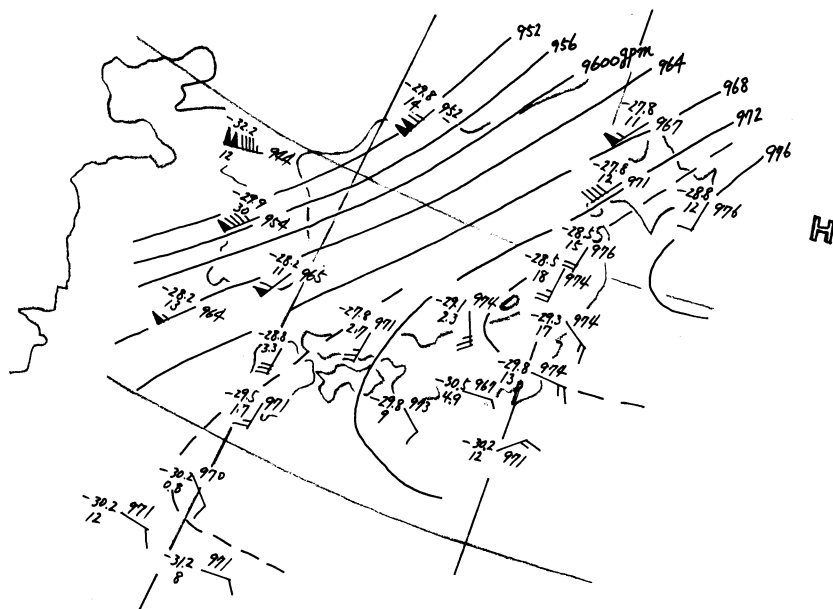
当日 (24日) 9時の地上天気図 (第1図) によると、



第1図 1988年8月24日0900時の地上天気図 (気象庁, 1988).

日本のはるか南東の海上から近畿地方にかけては低圧部となっていて若狭湾沖には弱い低気圧があった。同時刻の300 hPa 高層天気図 (第2図) によると日本の東方海上に高気圧があり、この周辺をめぐる風が東海道沖から近畿を通り日本海へと吹いていた。気温の水平方向の変化は比較的小さかった。

同時刻の潮岬の高層観測 (第3図) によると持ち上げ凝結高度は930 hPaであり、真性潜在不安定で自由対流高度は830 hPaであった。また相当温位は486 hPaで最低となり、地上付近の最高値との差は31Kであった。Atkins and Wakimoto (1991) は「ウェットダウンバースト発生時には地上と中層との相当温位の差が20Kを越えている」という基準を提唱しており、この基準によれば当日はダウンバーストの起こりやすい状況にあったと思われる。ここでは示されない米子の高層観測結果もやはり真性潜在不安定を示しており、持ち上げ凝結高度は980 hPa、自由対流高度は960 hPaである。その「相当温位差」は14Kであり前記基準値に達していない。同測候所によると米子では当日6時00分から16時40分までの間に6回も驟雨が観測記録され、地上気温は概ね25°C前後で最高でも27°Cであり降雨のないところより5°C以上低くなっていた。即ちこの地域では早朝から不安定が各所で顕在化して対流が発生しており、そこでは不安定が解消されていたことになるが全体としては大気の潜在不安定の程度が大きかったことがわかる。この場合、前記基準で判定しようとするのは適当でないと考えられる。同空港観測点で地上風は全般的には弱かったが6時18分に西



第2図 1988年8月24日0900時の300 hPa 天気図。

7.2 m/s の瞬間値を記録している。

3. ダウンバーストを生じたエコーの特性

本節では伊丹空港の空港気象レーダーと大阪管区気象台レーダー（以下、大阪レーダー）の記録を用いてダウンバーストを生じたエコーの特性を調べた結果について報告する。空港気象レーダーのアンテナは空港測候所観測室付近にあり、アンテナの仰角は当時2.0度であった。

大阪レーダーのアンテナは空港の南東約 30 km の高安山（海拔高度 498 m）にある。今回の解析ではアンテナ仰角1.2度のデータを使用した。空港の海拔高度は 12 m にあるので同レーダーが探査するのは、空港付近では地上約 1110 m である。このレーダーの降水強度データは 2.5 km×2.5 km のメッシュ値として提供される。また、レーダーの走査は低仰角から高仰角への順で行われ、最高仰角の走査が終了した時刻が観測時刻として記録される。1.2度のアンテナ仰角は最高仰角であり、空港付近の走査は中でも最後の時間帯なので観測時刻と記録された時刻に差はない。

第4図は13時00分から14時45分までの間の空港気象レーダーの記録により作成したエコーの変化である。

13時00分には空港周辺にはエコーはなかったが、空港の南西約 16 km に小さなエコー（セルA）が発生した。

13時45分にはエコー域は拡大して移動し、空港の西南西約 13 km に達し、それに加えて空港の北北西約 10 km にセルBが現れた。また、空港の東南東約 23 km にはセルCが現れて北西進を始めた。

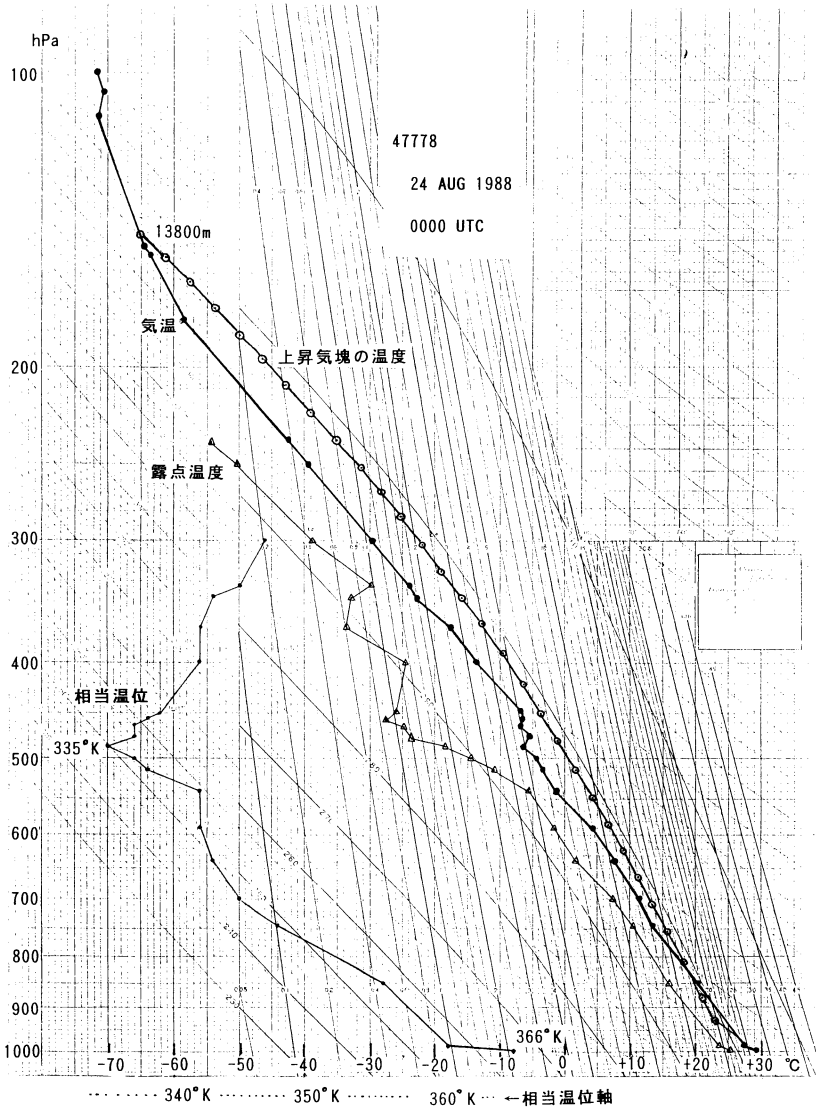
14時00分にはセルAは強まり空港の南西約 5 km に達した。セルCは北西進を続け空港の東約 19 km に達した。14時15分になるとセルAとセルBは空港の上に達して合体を始めた。セルCは更に発達して空港の東 15 km に達した。

伊丹空港でダウンバーストが発生した時刻にあたる14時30分頃には空港付近でセルAとセルBの合体の結果としてエコーが活発化し降水強度 100 mm/h 以上の降水域が広がった。新しく生じた降水域をストームDと呼ぶことにする。

14時45分頃にはストームDはセルCと合体し更に広い強雨域をもつストームとなっていた。

7.5分毎のデータがある大阪レーダー記録を CRT 画面上で時刻順に映してみると、セルが合体した頃には次々と強いエコーが発生しては消える様子が見られ、時間変化が大きく激しい対流現象があったことが伺える。全体として強いエコーの範囲は狭い。

積乱雲が他の積乱雲と合体する時に降雨強度が増加することは、これまでにも多くの研究で指摘されている（例えば Woodley *et al.* (1972), Scofield (1987)）。



第3図 1988年8月24日0900時潮岬における状態曲線。・は気温、△は露点温度、○は上昇気塊の温度、細い実線は相当温位、その温度目盛りは最下段に設定。

第4図bから第4図dの30分間にセルAは約10 km 進んでいるので平均の速さは約20 km/hであり、北東へ移動している。

4. 地上気象観測とダウンバーストの特徴

4.1 伊丹空港における気象観測施設

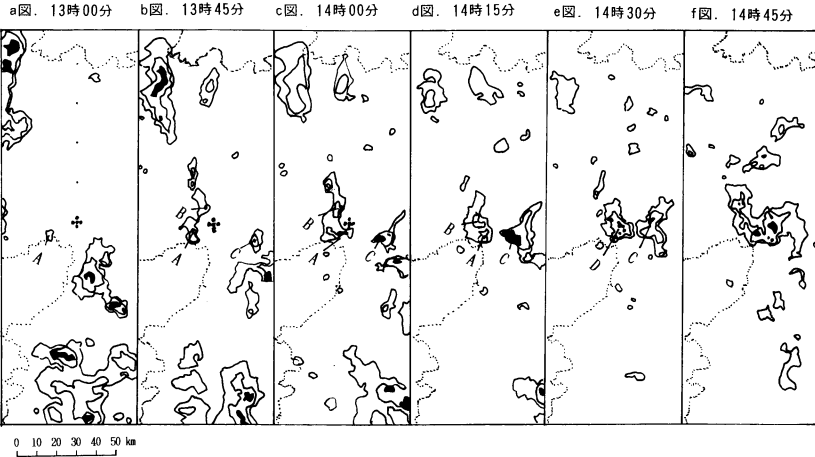
伊丹空港周辺の地形配置を第5図に示す。空港には北西から南東へ延びる2本の平行滑走路がある。滑走路の北西側のN点では風の観測、左側滑走路南東端から約700 mのS点では風、気温、湿度および雨量の観測、空港ビル内の観測室O点では雲と気圧の観測が行

われている。空港気象レーダーのアンテナもO点付近にある。N-S間の距離は2.2 km、S-O間は1.7 kmである。

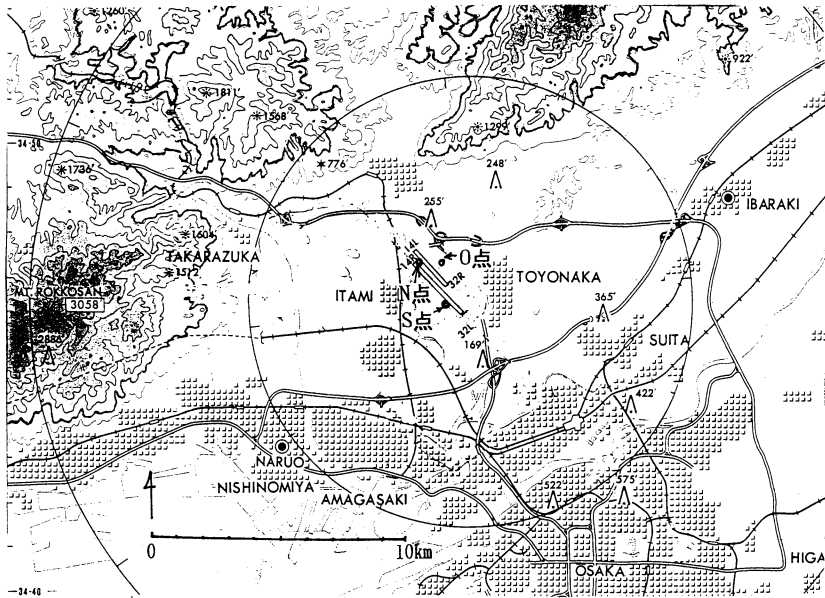
4.2 ダウンバーストの特徴

a) 地上風の変化

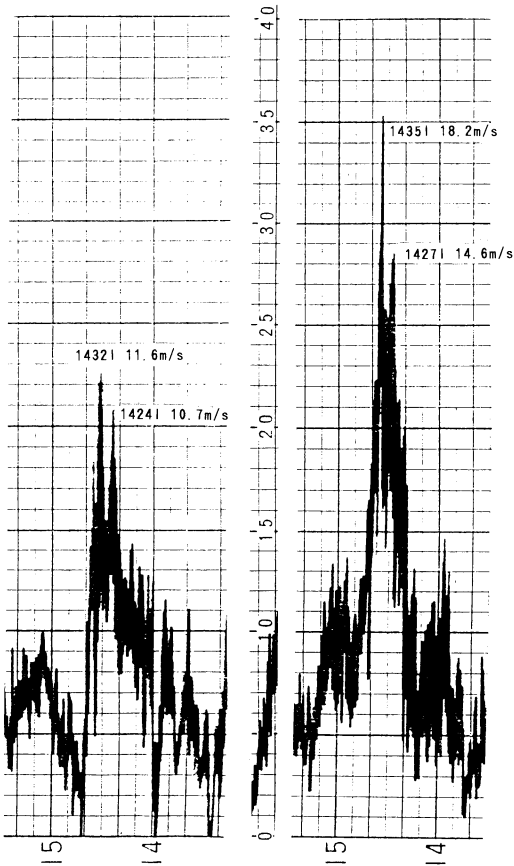
N点、S点における風速と風向の記録を第6図aと第6図bに示す。N点では14時24分に10.7 m/s、14時32分に11.6 m/sの風速極大値を記録しており、S点では14時27分に14.6 m/s、14時35分に18.2 m/sを記録している。即ち、N点、S点ともに強風のピークは2度あり、最初のピークの後に風速は一旦弱まり、その8



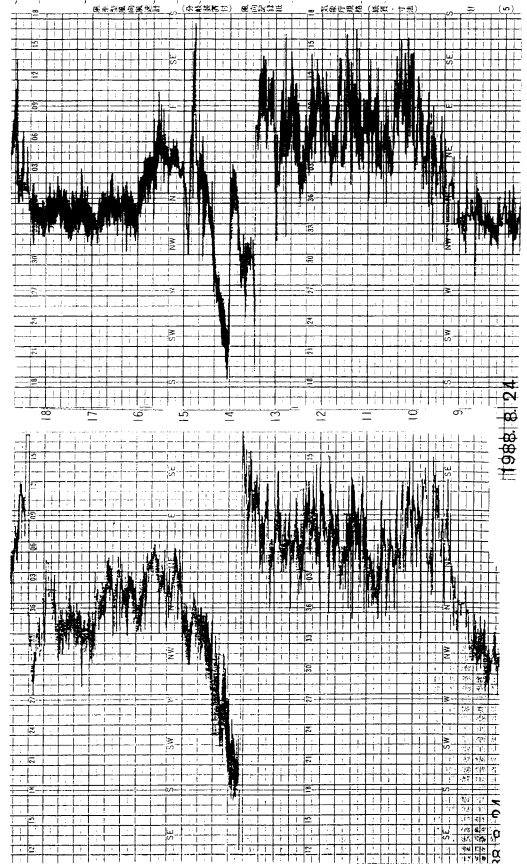
第4図 1988年8月24日13時00分から14時45分の伊丹空港の気象レーダーによるエコーの変化。等値線は外側から、弱いエコー (1~4 mm/h)、並のエコー (4~16 mm/h) であり、塗りつぶしてあるのは強以上のエコー (16 mm/h~)。●印は空港気象レーダーのアンテナの位置。a図で空港の北方に並ぶ小丸印の間隔は20 km 毎。



第5図 伊丹空港周辺の地形図。N点では風、S点では風、気温、露点温度、雨量強度、O点では気圧、雲の観測が行われ、空港気象レーダーのアンテナもこの付近にある。濃い実線は300 mの等高線を示す。標高はフィート単位 (10 フィート = 3 m) で示されている。



第6図(a) 伊丹空港内N点(左側)及びS点(右側)における地上風速の自記記録。



第6図(b) 伊丹空港内N点(上側)及びS点(下側)における地上風向の自記記録。

分後に再び一層強い風が吹いた。S点では14時少し前から降雨があり(第7図a), 気温が急降下し(第7図b), その頃から風向が変化している。

本事例ではエコーの変化が大きく, 時空変換法(Fujita, 1963)を用いるには厳しい状況であるが, 数少ない観測データから強風の空間構造を求めめるためにその限界を念頭に置いた上で同法を適用してみる。

まず対流系の移動速度としては前節で求めたセルAの移動速度, 北東へ20 km/h, を採用することにする。合体後ストームDとして活発化して移動速度も変化した可能性はあるが, 幸いなことに移動速度の見積りに誤差があっても気流発散の有無の情報は得られることが報告されている(岩下, 1994)。

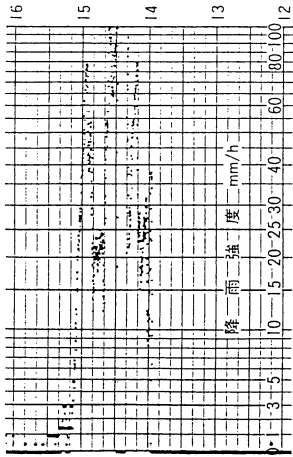
第8図はそのようにして得られた風速ベクトルの空間分布である。第8図aは14時27分の図で, この時刻はS点で最初の風のピークが現れた時刻である。強風

が現れる以前の流線は破線で表現してある。14時24分にはN点でも10.7 m/sのピークが記録されている。

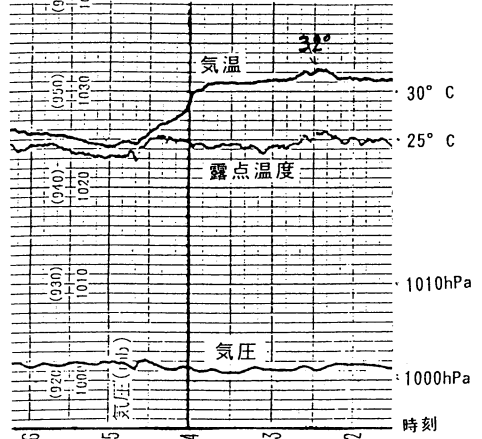
風が発散しているのはByers and Braham (1949)が示したように下降気流の結果とみられる。

発散中心の直下では鉛直流から水平流へ変化しようとするので気流の水平風速はほぼゼロになっていると考えられる。14時24分前後のデータに注目すると発散中心からN点までの距離は図からほぼ2 km弱と推定され, その間で約10 m/sの風速差があったことになる。

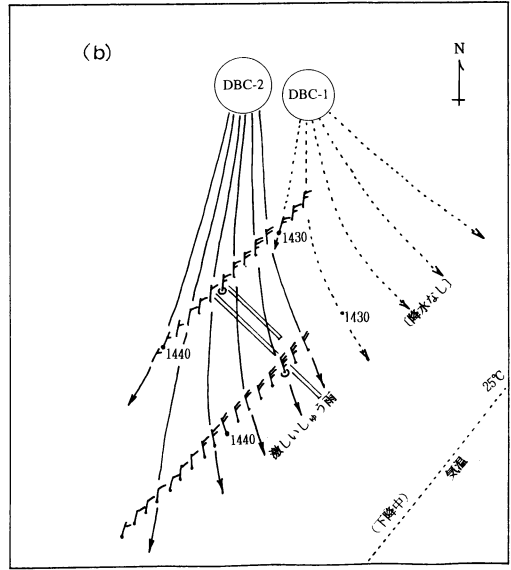
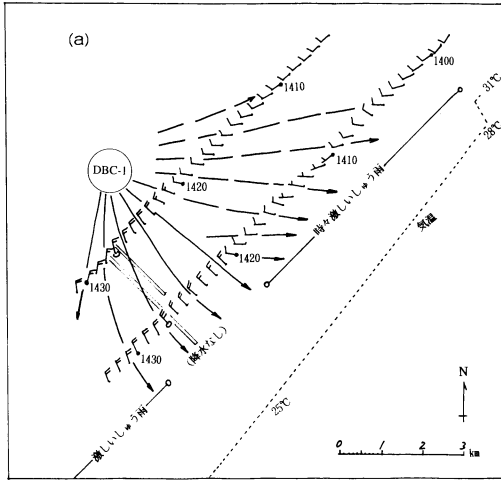
即ち発散の片側だけで第1節で紹介したWilson *et al.*のマイクロバーストに関する「風速差」条件(1984)を満たしている。2 km弱で10 m/sの風速変動と下降気流の変化も存在する大気中で航空機が離着陸するのは困難な場合が予想されるので, Fujita (1985)の包括的な定義も参照してこの強風はダウンバーストと判定



第7図(a) 伊丹空港内S点における降水強度記録。線が太いのは降水がない時間帯。



第7図(b) 伊丹空港内S点における気温・露点温度とO点における気圧の自記録。



第8図 時空変換により得られたダウンバーストの構造。数字は時刻を表し、 — は2.5 m/s、 --- は5 m/s。実線と破線は流線を表し、破線は弱い発散風。(a)1988年8月24日14時27分、(b)14時35分を中心とする図。

してよいと考えられる。

最初の風速のピークに対応するダウンバーストをダウンバースト1と呼ぶことにし、その発散中心に DBC 1 と表記する。

第8図bは14時35分の図で、ダウンバースト1に加えて新しい発散風の存在が認められる。

S点では同時刻に当日の最強風 18.2 m/s を記録した後約10分間で弱まり、N点では14時32分に 11.6 m/s の極大風を記録して約6分後には風が弱まっている。即ち、NとSの観測点で風速記録に2つの極大値があつて双方とも8分の間隔で発生しており、時空変換によると発散があつて、その中心位置がずれている。

以上から第2の風速のピークは別のダウンバーストによるものと推定される。これをダウンバースト2と呼ぶことにし、図の発散風中心にDBC2と表記する。

第7図aの14時20分以後の風速記録から、ダウンバーストはおよそ14時20分頃に始まり、弱まり始めた14時31分にダウンバースト2が始まって全体として20分間程度継続している。もしダウンバーストが14時20分に始まったとすると、この時刻以前のN点、S点の記録はダウンバーストの影響を受けていない筈である。しかしながら、この時刻以前の風ベクトルに基づいて流線を描いてみると第7図aで破線で示されているように弱い発散風がみられる。このことはダウンバースト発生以前にセルA、Bから降水を伴って吹き出す弱い下降気流があったことを示唆している。同様な事例が米国大気研究所(NCAR)と同航空局(FAA)が作成したビデオフィルム(1989)の中に収録されている。それは米国コロラド州デンバーで1988年7月に発生したダウンバーストの状況であり、先ず降水が緩やかな気流降下を示して数分間続いた後で突然激しい下降気流に変わり短時間で終了する。

b) 風と他の気象要素の変化

既に第7図aと第7図bにS点における降水強度、及びS点における気温・露点温度とO点における気圧を示してある。

航空気象実況通報も合わせてみると、降水は14時0分から14時19分まで強かった。そして14時19分から14時29分までは一時的に停止しているが積乱雲の雲量は8分の7と報告されており、空港関係者によると空港の西側では豪雨が降っていた。このことは14時20分以前に弱い発散風がみられたことを支持する。14時29分頃から15時過ぎまで激しいしゅう雨が降っている。これはエコーが合体して非常に活発になった時と一致する。

雷は空港測候所気象観測表によると13時36分に空港の南西10kmに現れ、13時57分から14時57分まで頭上で観測され、15時15分には東10kmと報告されている。

S点での風と気温の記録によると、降雨が強まった14時頃から2分間で気温は急に 2°C 降下しており、その後もゆるやかに降下して15時02分に当日の最低値 24.2°C を記録している。N点では14時頃から風向が北西成分を持ち発散気流域に入ったことを示しているのに対し、S点で風向は14時頃に約8分間南西に変化しており14時20分になって北西成分が入り降雨は止んで

いる。このことは降水を伴う下降発散気流が発生初期にはS点までは達していなかったことを示唆している。14時29分頃からはS点も降水域に入り、降水が最も強くなった14時37分の少し前、14時35分にS点における最大風速 18.2 m/s を記録している。

積乱雲通過の際の気温降下、気圧上昇降下、風と降雨強度の時系列変化についてはSuckstorff(1935)により概要が報告されている。Byers and Braham(1949)は積乱雲の発散下降風に対応して、気温降下の他に露点温度の短時間の急降に続く急昇(humidity dip)や気圧の一時的な上昇と降下が発生することが多いと報告し、気圧上昇は上空で冷氣塊が生成蓄積されるためで気圧降下はそれが下降発散する結果であり、humidity dipは強い下降気流がほぼ乾燥断熱的に運動量を保存しながら地面に衝突することによる断熱圧縮のためと推測している。

本ケースでもダウンバーストの強風がおさまりかけた14時41分頃に露点温度が3~4分間に 1°C 余り下がってすぐ元へ戻るhumidity dipと、気圧がそれ以前に数分間上昇した後で約 1 hPa 急に下がる現象が見られた。

気圧については、14時20分から14時30分にかけて約 1 hPa 上昇し、14時38分まで高くとどまった。これはダウンバースト発生前は上空で冷氣塊が形成されつつあり、またダウンバースト発生時は下降する冷氣が地表面に衝突することにより高気圧を維持していたためと考えられる。連続して発生した第2のダウンバーストがおさまりかけた14時38分以降に気圧の降下があつたことは、Byers and Braham(1949)の解釈を支持しているように思える。

Proctor(1988)は数値シミュレーションを通じて雨粒の蒸発と雹の融解がダウンバースト生成に大いに寄与することを示しており、以来ダウンバーストがあると降雹の有無に関心がもたれる。本邦でも、例えば第1節で挙げた研究の中ではKobayashi and Kikuchi(1989)、加藤(1991)、岩下(1992)、Ohno and Suzuki(1991)、Ohno *et al.*(1993)はいずれもダウンバーストが強い降雹を伴ったことを報告している。Ohno(1995)は、わが国で14年間に発生したダウンバーストについて風速(詳しくはFujita Scale)別に地上で降雹があつたか否かを示す統計を報告している。同統計によるとダウンバーストが雹を伴う割合は最大瞬間風速が強いと大きい傾向があり、 17 m/s 未満では0%であり、 17 m/s から 33 m/s の間では20%に増え、 33 m/s

を越えると80%を越える。本事例では空港で雹は観測されておらず、新聞による雹に関する記事もなかった。本事例の最大瞬間風速はそれぞれ 14.6 m/s と 18.2 m/s なので、上記統計からみて降雹を伴わなかったのは、わが国のダウンバーストの特徴に合っていることになる。

本事例は、ダウンバーストとしては激しい方ではないが航空機の離着陸という観点では軽視できない強さであり、2つ連続的に発生したので風場が複雑で危険度が増している。雹を伴わないダウンバーストでも航空としては油断できないことを示している。

5. まとめ

1988年8月24日14時30分頃伊丹空港で発生した2つのダウンバーストの特性を、空港滑走路上の2か所の風向・風速と1か所の気圧・気温・露点温度の自記記録および空港気象レーダー、大阪レーダーのデータにもとづいて解析した。

最初のダウンバーストは、空港の南西約15 kmで発生したセルと空港の北北西約10 kmで発生したセルが空港付近で合体した頃に発生した。

滑走路南端付近の観測点において、最初のダウンバーストによる14.6 m/sの風が記録され、その風がまだ残っているうちに次のダウンバーストが発生し、同地点で18.2 m/sが記録された。2つのダウンバーストの継続時間は全体として約20分であり、2番目のダウンバーストの終了時に数分間にわたる気圧の上昇降下と humidity dip が観測された。

当日の周辺の高層気象観測データによれば、中層と地表面近くの相当温位の差は最大31Kで、Atkins and Wakimoto (1991) によるアメリカにおけるウェットマイクロバースト発生基準を満たしていた。

最初のダウンバーストは観測点で降水を伴わず、2番目のダウンバーストは100 mm/h以上の強い降水を伴っていた。伊丹空港や周辺で雹は降らなかった模様である。

本事例で風速そのものは地上物件に被害をもたらすほど激しくはなかったが、航空機の安全運航にとっては注意すべき状況であった。

謝辞

本論文は「航空気象ノート」掲載の報告を一部手直したものである。

伊丹空港測候所には気象自記記録や空港気象レー

ダーのデータを、大阪管区気象台にはレーダー観測記録を提供して頂き、同台の坂中主任技術専門官及び気象庁観測部の飯田係長にはレーダーの仕様に関して詳しい情報を頂いた。名古屋航空測候所と米子測候所にも観測記録の提供を頂いた。

気象研究所の大野久雄博士には有益なコメントを頂いた。気象庁航空気象管理課の方々および日本航空社内の先輩同僚からも励ましを受けた。レフリーの方々には大変お世話になった。ここに記して感謝の意を表したい。

参考文献

- Atkins, N. T. and R. M. Wakimoto, 1991: Wet microburst activity over the southern United States: Implications for forecasting, *Wea. Forecast.*, **6**, 470-482.
- Byers, H. R. and R. R. Braham, 1949: The thunderstorm weather near the surface, Chapter 3, *The Thunderstorm*, US Government Printing Office.
- Fujita, T. T., 1963: Analytical mesometeorology: a review, *Meteor. Monogr.*, **5** (27), 77-125.
- Fujita, T. T., 1976: Spearhead echo and downburst near the approach end of a John F. Kennedy Airport runway, New York City, SMRP, **137**, Univ. of Chicago, 51 pp.
- Fujita, T. T., 1985: The Downburst, SMRP, **210**, Univ. of Chicago, 122 pp.
- Fujita, T. T., 1992: Mystery of Severe Storms, 126-127.
- 岩下晴彦, 1992: 羽田で発生したダウンバースト, *天気*, **39**, 279-290.
- 岩下晴彦, 1994: 風の時空変換解析に関する一考察, 1994年度日本気象学会春季学会予稿集D161, 246.
- 加藤敏彦, 1991: 1987年7月25日雷雨に伴う雷雨とレーダエコー, 昭和62年度東京航空地方気象台編「熱雷に関する地域調査」, 130-139.
- 気象庁, 1988: 印刷天気図.
- Kobayashi, F. and K. Kikuchi, 1989: A microburst phenomenon in Kita Village, Hokkaido on September 23, 1986., *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 925-936.
- 中山章, 伊関次男, 1985: 1983年7月27日に富山空港で発生した microburst, *天気*, **32**, 329-332.
- 中山章, 青山雅典, 1990: 離陸滑走中に遭遇したマイクロバーストの解析, *天気*, **37**, 421-429.
- National Center for Atmospheric Research (NCAR), Federal Aviation Administration (FAA), 1989: The Day All The Hell Broke Loose. (ビデオ)

オ資料)

- Ohno, H. and O. Suzuki, 1991: Microburst? hazardous divergent wind in Kantoh Plain summer afternoon 1990, Preprints, Fourth Inter. Conf. on Aviation Wea. Systems, June 1991, 281.
- Ohno, H., O. Suzuki, K. Kusunoki and K. Nakai, 1993: A severe downburst in Mito City on 4 September 1992. Preprints, 26th Inter. Conf. on Radar Meteor., May 1993, 221-222.
- Ohno, H., O. Suzuki, H. Nirasawa, M. Yoshizaki, N. Hasegawa, Y. Tanaka, Y. Muramatu, and Y. Ogura, 1994: Okayama downburst on 27 June 1991: downburst identifications and environmental conditions, *J. Meteor. Soc. Japan*, **72**, 197-222.
- Ohno, H., 1995: Studies on microscale phenomena responsible for low-altitude wind shear, Doctoral Dissertation, Hokkaido Univ., 174 pp.
- Proctor, F. H., 1988: Numerical simulation of an isolated microburst, Part 1: Dynamics and structure, *J. Atmos. Sci.*, **45**, 3137-3160.
- Proctor, F. H., 1989: Numerical simulation of an isolated microburst, Part 2: Sensitivity experiment, *J. Atmos. Sci.*, **46**, 2143-2165.
- 小元敬男, 1987: 強風災害をもたらした下降流突風の事例解析, *天気*, **34**, 633-642.
- Scofield, R. A., 1987: The NESDIS operational convective prediction estimation technique., *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1773-1792.
- Suckstorff, G. A., 1935: Die Strömungsvorgänge in Instabilitätsschauern, *Meteor. Zeitschrift*, **52**, 449-452.
- 下山紀夫, 此田進, 1991: 1987年7月31日雷雨の解析, 昭和62年東京航空気象台編「熱雷に関する地域特性調査」, 140-155.
- Tabata, A., K. Akaeda, M. Ishihara and H. Sakakibara, 1991: Structure of downburst associated with heavy rainfall observed in Tokyo, Preprints, 25th Inter. Conf. on Radar Meteor., June 1991, J77-J80.
- Wilson, J. W., R. D. Roberts, C. Kessinger and J. Macarthy, 1984: Microburst wind structure and evaluation of Doppler radar for airport wind shear detection, *J. Climate Appl. Meteor.*, **23**, 898-915.
- Woodley, W. L., B. Sancho and A. H. Miller, 1972: Rainfall estimation from satellite cloud photographs, NOAA Tech. Memo., ERL OD-11, 43 pp.