

1991年6月27日岡山市東部で発生した陣風災害について

光田 寧・林 泰一

WIND DISASTERS CAUSED BY JINPU IN THE EASTERN OKAYAMA CITY ON JUNE 27, 1991

By *Yasushi* MITSUTA and *Taichi* HAYASHI

Synopsis

Around noon of June 27, 1991, strong gust (Jinpu) accompanied by down draft in the thunderstorm was observed in the eastern part of Okayama City. 18 successive electric poles were blown down.

This gust was observed systematically in the southern part of Okayama Prefecture. And the peak gust speed of this Jinpu was estimated to be about 50 m/s. The electric pole failure may be explained by this wind speed when we consider non-stationary effect of the gust.

1. はじめに

1991年6月27日昼過ぎ、岡山市東部で短時間しか続かなかったが激しい雨を伴う強風が吹いた。特に国府市場付近では雹が降り特に風が強く、700 mほどの南北に走る道路に沿って連続した18本の電柱がほぼ同時に同方向に倒れるという事故が生じた。この事故の生じた付近では家屋の倒壊は見られなかったものの屋根の被害が数多く生じ、ビニールハウスや作業小屋の全壊も見られた。

被害地に近い岡山地方気象台では13時27分に26 m/sの最大瞬間風速が観測され(数分で強風は終わっている)、同時にわか雨と気温の急降下、気圧の上昇が見られた。このような気象状況の変化の様子および現地での被害の様子、すなわち広い範囲で同時に同じ向きの風が吹いたこと、ろうと雲を見た人がいないことなどからしてこの強風は積乱雲内にダウンバーストに伴う陣風であると判断された。

6月27日梅雨前線が山陰地方からゆっくり南下して来たが、これに向かって広島、岡山県下の瀬戸内海沿岸では午前中から暖かい南西の海風が強く吹き、広島県下で昼前に積乱雲が発達を始め東に移動した。これが岡山県下に入ってふたつに分かれ、先行したものは少し北寄りを進み正午前に岡山北部を通過した。これに伴って岡山空港付近ではダウンバーストを生じ陣風が岡山空港で観察されたが、岡山市中央部では全く見られなかった。後続の積乱雲群は少し南を東進し13時過ぎに岡山空港から児島湖付近までの広い範囲にダウンバーストに伴う陣風を発生させた。中でも特に中心部の岡山市東部国府市場では烈しく、雹の被害も見られた。雹の被害の生じた部分の少し風下で特に強い陣風が発生したと考えられる。この幅は1 km以下の狭い範囲で、その他の部分では強い陣風ではあったが被害はほとんどなかった。

ダウンバーストと呼ばれる現象は、1974年米国において広範囲にわたる多数の竜巻の被害が生じた時、その調査中にシカゴ大学藤田博士が竜巻の回転によるとは考えられない被害のあるのを見出し、積乱雲中に下降気流が存在しそれが地表面に当たって周囲に拡がった結果生じたものであるのではないかと考えを示した。その翌年同教授は、1975年6月24日ニューヨークケネディ空港での航空機墜落事故の調査において、や

はり航空機が積乱雲からの下降気流と遭遇したのではないかとの仮定の基に原因を考え、ダウンバーストという名前を用いた。その後ドップラーレーダーや多くの自動観測装置を用いて、ダウンバーストの検出のための研究(NIMROD)が、同じく藤田教授によって行われ、積乱雲中の下降気流とそれが地面に衝突して地上で強風が生じることが実測により確認された。このような下降流は雲中の雨または雹が落下中に蒸発によって周囲の空気を冷やすことと、落下時に周囲の空気を摩擦により下向きに引っ張ることで生じると考えられ、その範囲は数km以下で積乱雲のスケールに相当する。NIMRODでは約2ヶ月間に27個の大小のダウンバーストが検出されている。

日本においてダウンバーストに伴う陣風の解析結果が報告されたのは、1970年9月15日、彦根において発生した陣風で建設中のホテルの屋根が道路を隔てた反対側に飛ばされ、また少し離れた所では墓石が倒れるという事故が発生した時である。これが積乱雲からの下降気流によるものとして解析されている¹⁾。その後日本各地でこの種の強風の被害が少しずつ報告されるようになった。

今回の岡山での陣風の最大風速がどれくらいであったかについては被害域の中に瞬間風速を測定していた測定値がないため測定による値は不明である。しかし、他の観測点での値から外挿すると50 m/s ぐらいと推定され、また経路の被害から別の方法で推定すると径間全体に同時にかかる風速は43 m/s ぐらい以上ではなかったかと推定される。

2. 被害の概要

今回の陣風による被害は全体としては小さなものであり、岡山県下の警察および公共機関の調査によると被害の総額は次のTable 1に示すとおりである。

この表からも明らかのように自然災害としてはそれほど大きなものではない。そして、これらの被害の大部分は岡山市東部の狭い範囲に集中している。また農作物の被害には強風によるものの他に雹によるものも含まれている。

岡山地方気象台の調査によれば、今回の雹はパチンコ玉程度のものであったとのことで、ビニール板に穴が空いているところがあった。雹による被害の見られたのは岡山地方気象台の調査によれば、Fig. 1に示したような範囲においてであって、次に述べる風による被害の範囲とほぼ一致しているが、降雹の範囲の方が風上側の西北西に少し広がっていることが注目する事実である。

風による被害では家屋の全壊は見られないが、屋根の被害の他にプレハブ小屋など地面との固定の良くないものが風に飛ばされたり、ビニールハウスの被害が多く見られた。岡山地方気象台の調査にその後の調査の結果を加えて作った被害分布はFig. 1に示すような範囲に分布している。被害の著しい範囲は国府市場付近の1×2 km ぐらいの範囲であり、その中で南北に延びる道路に沿って並んでいた連続直線共架柱線路の18本の電柱が同一方向東向きに折損(16本は地上10 cm 以内で折損)したという事故が最も著しいものであった。この線路は水田の中を南北に走る直線道路の西側に沿っており電力線と電話線が共架されている。折損した18本の間には枝分れ線や支線支柱など横方向に支えるものはなかった。そして両端は東西方向の道路と交差しているところで被害は止まっている。この径間にはPhoto 1にも見られるように住宅が1戸と作業小屋が数棟あるが、いずれも屋根に被害を受けているが構造は被害を受けていない。また途中にある道路標識は無事残っていた。この径間の全長は737 mであった。

この電柱列は北側の1本が最初に倒れその後すぐわずかの間に残りが続いて倒れたという報告もあるが、

Table 1. Disasters caused by Jinpu in Okayama on June 27, 1991

1.	Disasters of houses Totally damaged; Half or partially damaged;	None 34
2.	Disasters of farm products	¥3,236,000
3.	Disasters of communications	12 cables
4.	Delay in transportation	6 trains
5.	Failure of electric power supply	4,800 families

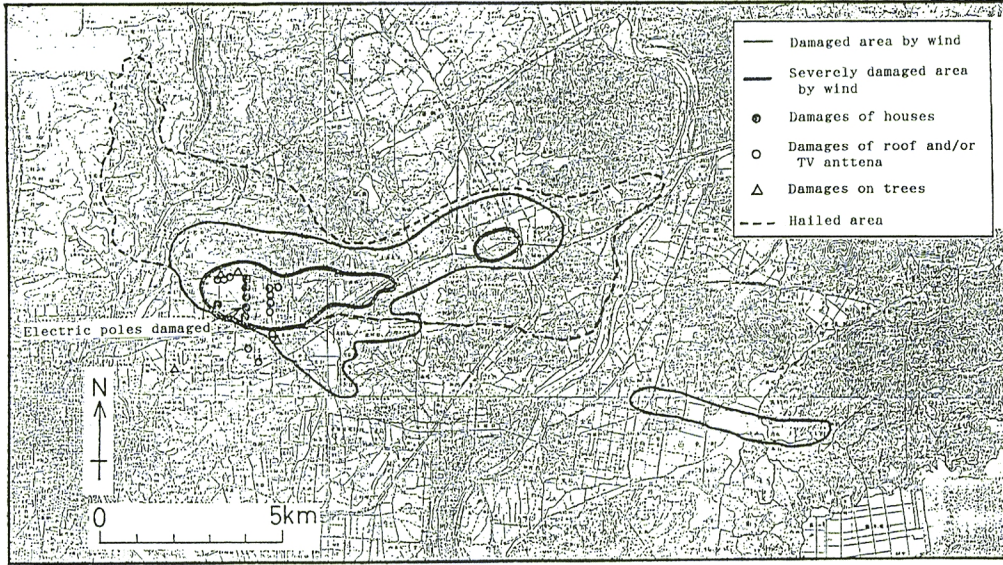


Fig. 1. Areas of wind and hail damages.

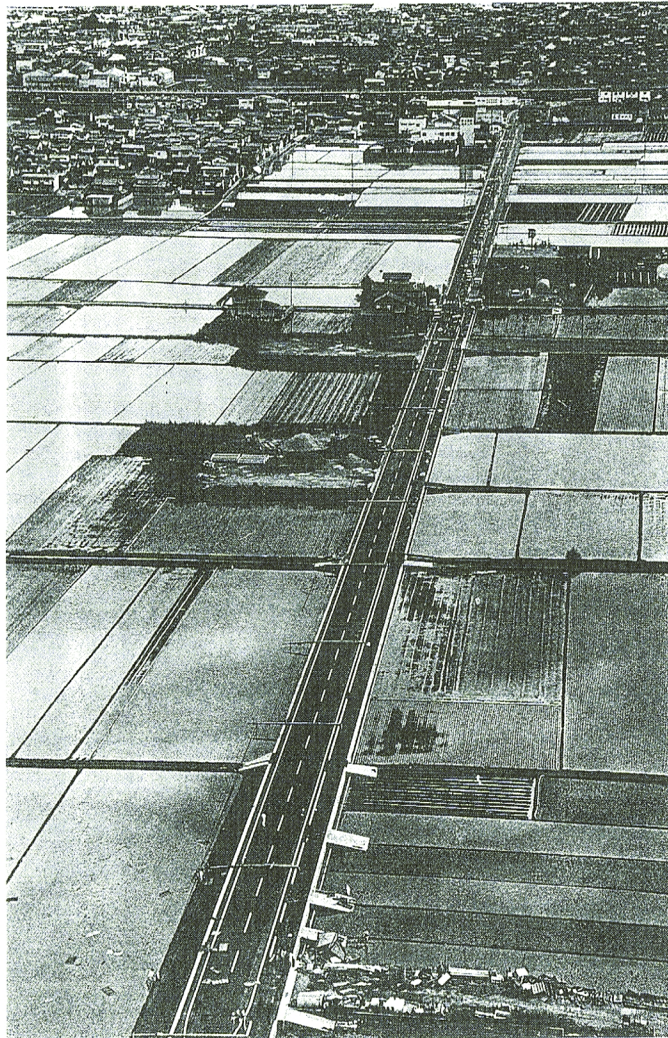


Photo. 1. Over view of Jinpu damaged area (by the courtesy of Sanyo Press).

雨がひどく近くに人がいなかった（そのため人的被害は全くなかった）こともあって倒れた時の様子ははっきりしているとは言い難い。

しかしこのように多くの電柱が一時に倒れるということは重大なことであり、2次的な影響が大きい上

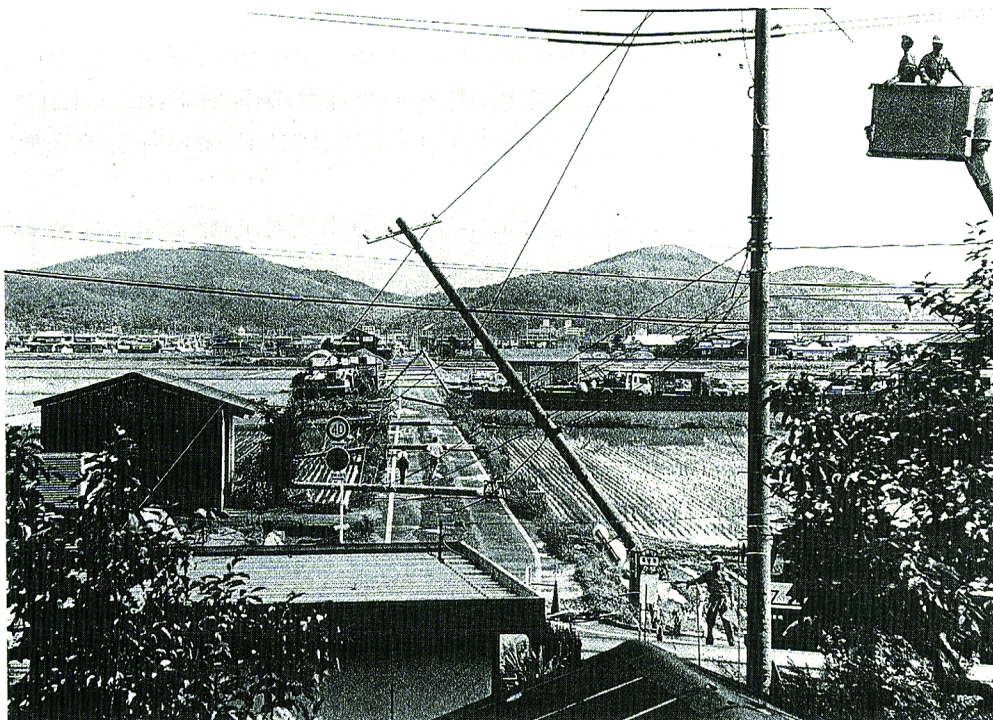


Photo. 2. Damaged Electric Poles (by the courtesy of Sanyo Press).

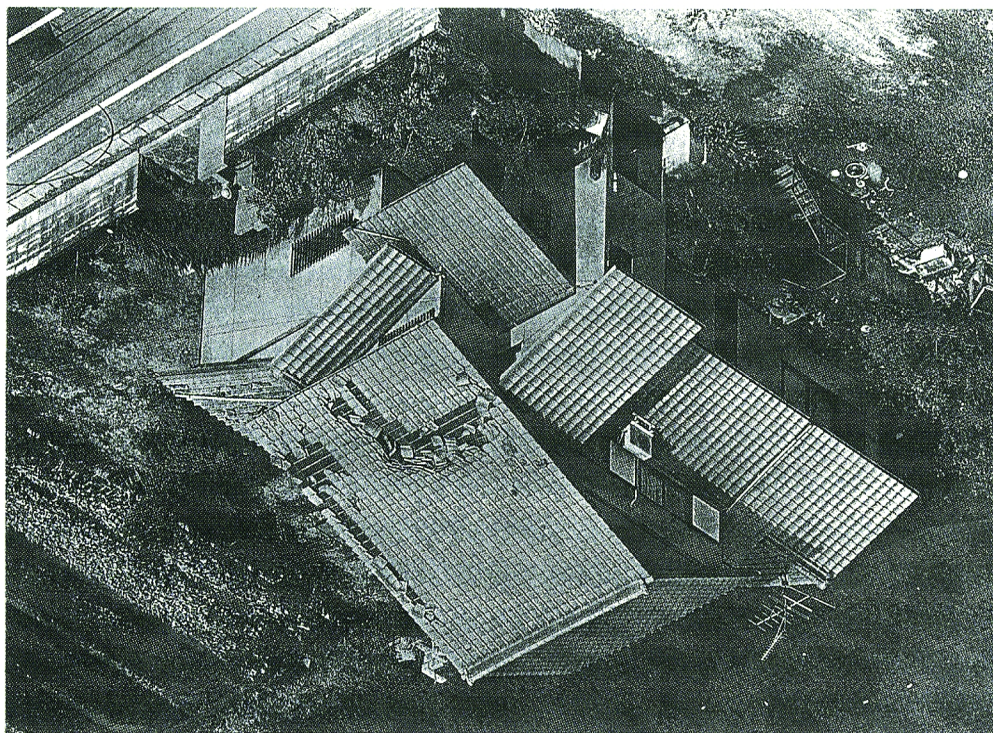


Photo. 3. Roof damage (by the courtesy of Sanyo Press).

に、もし車や人が路上にいたとしたら大事故となった可能性もあるところからこの調査が行われることになったのである。残念ながら近くに気象観測点はなく、公害関係で一番近くにある東岡山測定所（南東約1.5 km）における風の記録も停電のため風速の記録が一時停止してしまって、風の記録は充分得られていない。

ここで一つ注意すべき事は **Photo 1** の上の方に写っている住宅の屋根瓦が **Photo 3** に示すようにごく一部分だけがはがれていることである。屋根の中央部でありそこだけ特に弱かったことは考えられないので、風の方がこの極めて狭い範囲だけ強かったと考えざるを得ない。藤田教授の提案したマイクロバースト、マイクロバーストというスケール分類以下の微細構造があることを提示している。

3. 気象状況の変化

1991年6月27日午前9時の気象庁による高層天気図によれば、日本海南部日本列島沿いに jet 気流が存在し、朝鮮半島付近に trough が、 140° 付近に ridge が存在していた。同時刻の地表天気図 (**Fig. 2**) を見ると対馬海峡から山陰沖に梅雨前線が存在していた。午前9時、前線の南側にあった松江での Showalter stability index は +1 で積乱雲が発達し易い条件にあったと言える。6時間後の15時の地上天気図 (**Fig. 3**) では梅雨前線は南下し瀬戸内海北岸を東西に走っている。すなわちこの間と岡山を通過して南に移動したことになる。6月27日午前中は広島、岡山の瀬戸内海沿岸ではよく晴れていて気温は 30°C 以上にまで上昇し、南西の海風が非常に発達した。梅雨前線付近の広島県と岡山県の県境付近に発生し東に進むレーダーエコーが、山陰沿岸に東西に走る前線のエコーの南側に11時頃から見られた (**Fig. 4** 参照)。このため岡山地方気象台では11時30分に雷注意報を発表していた。岡山地方気象台では11時41分にこの日の最高気温 33.4°C を観測している。この前後には岡山南部では SW, 5 m/s 前後の風が吹いていたが、不安定なため乱れの多い風であった。13時にはレーダーエコーは2つに分かれ、前のものは岡山市北部を通過し13時30分には兵庫

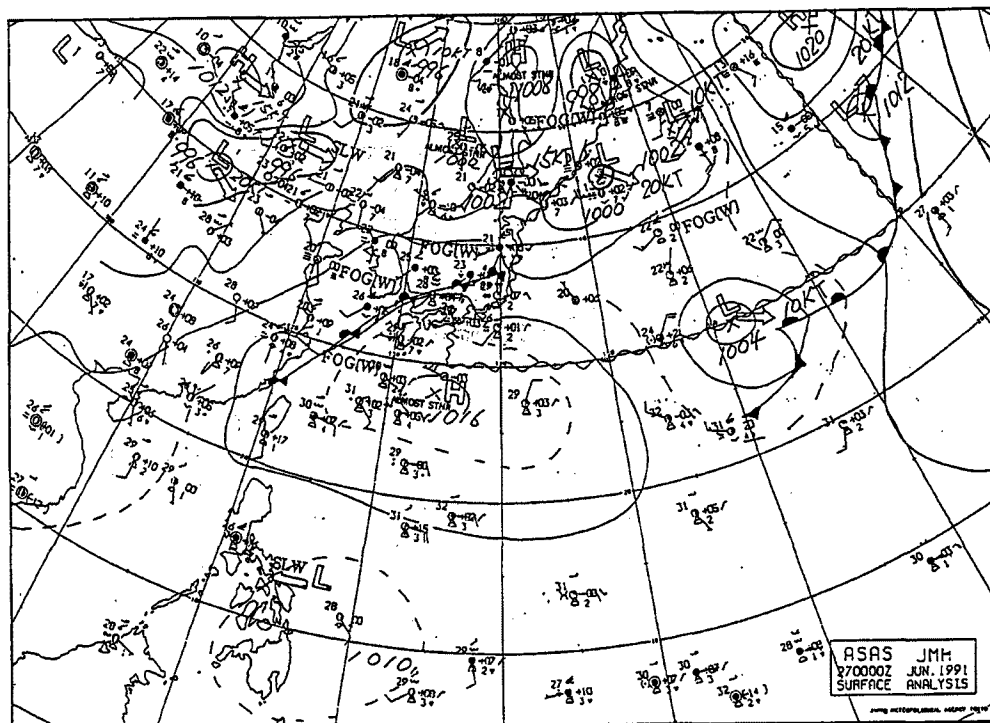


Fig. 2. Surface weather map for 00Z(0900JST) June 27, 1991.

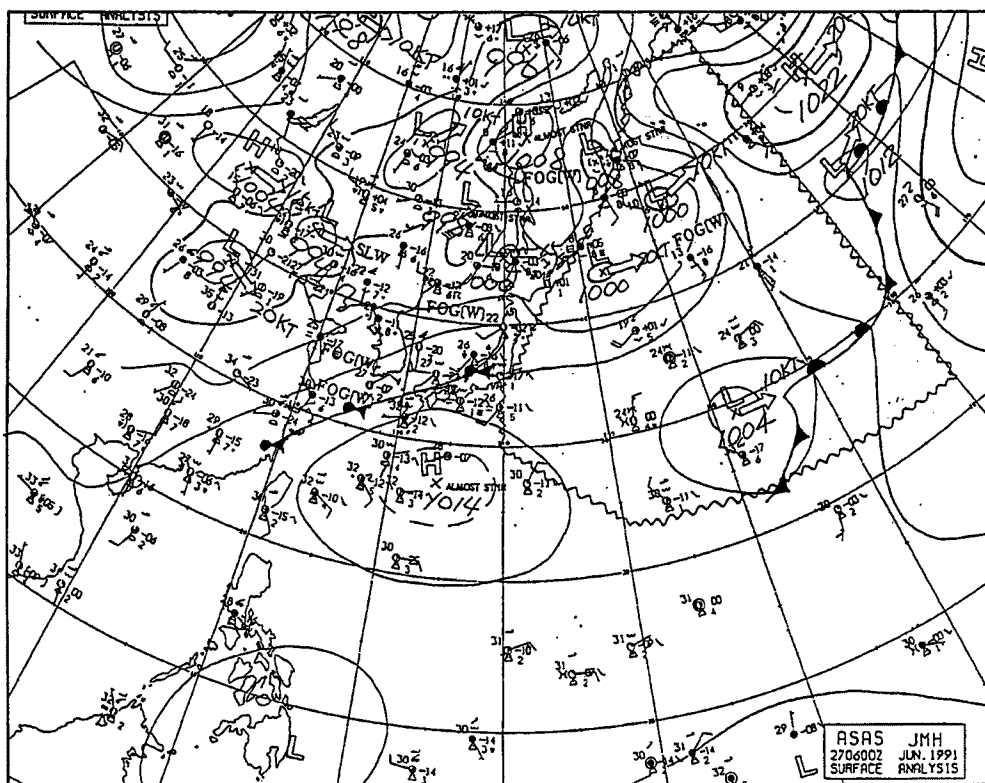


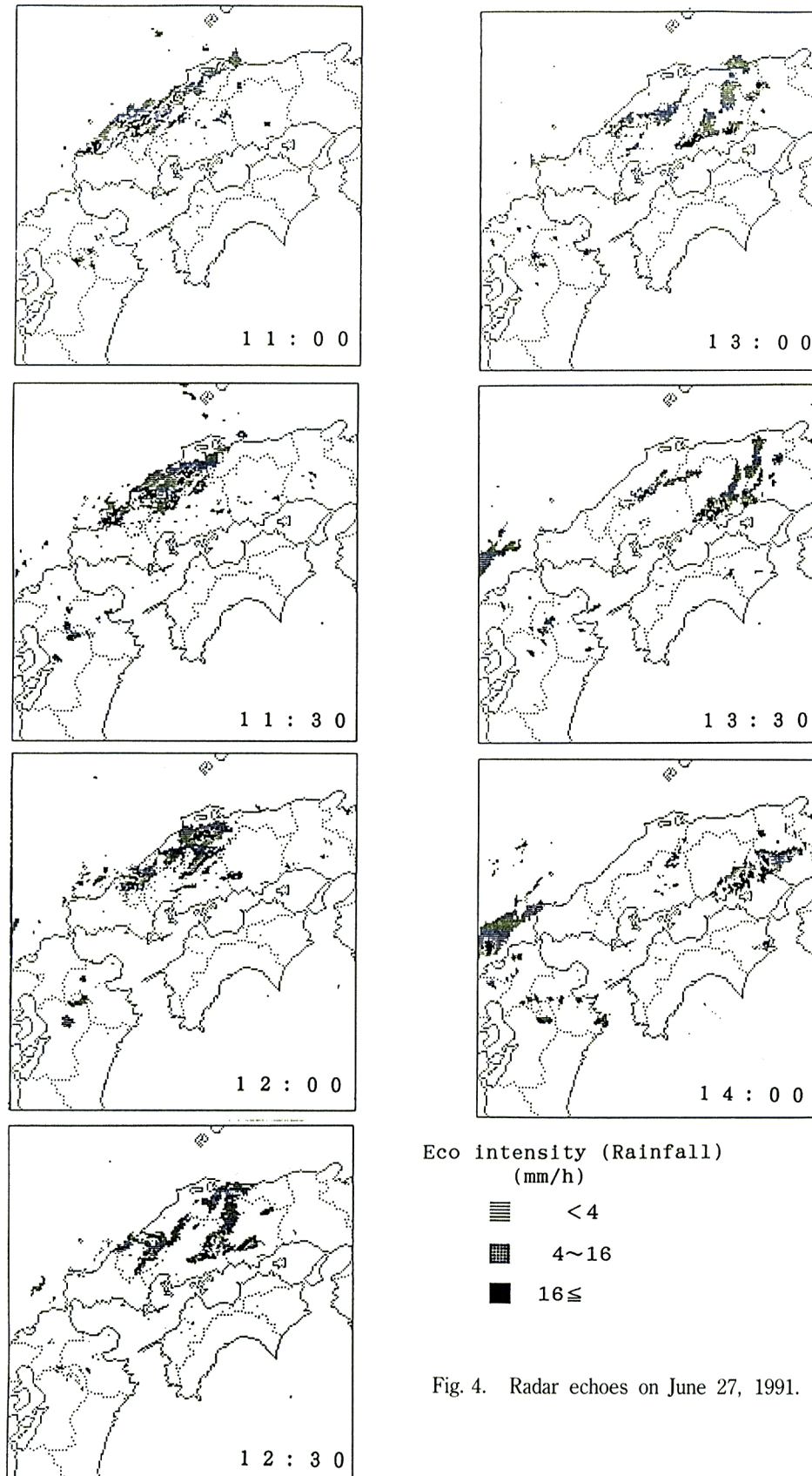
Fig. 3. Surface weather map for 06Z(1500JST) June 27, 1991.

県に入った。後のものは発達しながら少し南側を東進、13時30分頃に岡山市の中心部を通過、東に進んだ。これらのエコーは14時過ぎには兵庫県下で再び一つにまとまり東に進んだ。今回の岡山市内の陣風はこの後の方のエコーで示される積乱雲群に伴って生じたものと思われる。後の方のエコーは13時頃には時速約70 km (20 m/s) で東北進していた。6月27日12時から14時までの間の毎時の岡山県下のアメダスとレーダーエコーを合成した局地天気図を Fig. 5 に示す。

4. 局地気象変化

岡山県南部で連続的に気象要素の観測を行っているのは岡山地方気象台と同岡山空港分室及び岡南空港の3地点だけである。これらの地点での気象要素の変化を示したものが Fig. 6~8 である。これらの図からも明らかなようにいずれの地点でも短時間で終る突風が記録されている。

岡山地方気象台では Fig. 6 に示したように13時5分頃に気温が33°Cから27°Cまで急降下し、風向がSWからNWに急変している。この時に寒気が侵入し大気成層が安定となったためか風は5 m/s くらいの乱れの大きい状態から急に3 m/s ぐらいに弱くなり乱れも少なくなっている。この時に梅雨前線が通過したと考えることが出来る。そしてその30分後13時30分頃1分間も続くかどうかははっきりしない短い突風が発生し、気温がさらに22°Cまで急降下して露点も2度ほど下がり、気圧は約2 mb 急上昇している。この時、風向はほとんど変化せずNNWであった。この時の最大瞬間風速は26 m/s が記録されている。なお平均風速の最大は13時40分、10 m/s であるが突風の時間が短いためこの突風を反映しておらずほとんど意味はない。それ以後、風は弱く気温は少しずつ回復している。13時以前は日照があったが13時から14時10分頃まで曇っていた。この間13時30分から13時35分の間、激しい雨が降り雨量はこの間に約5 mm であった。



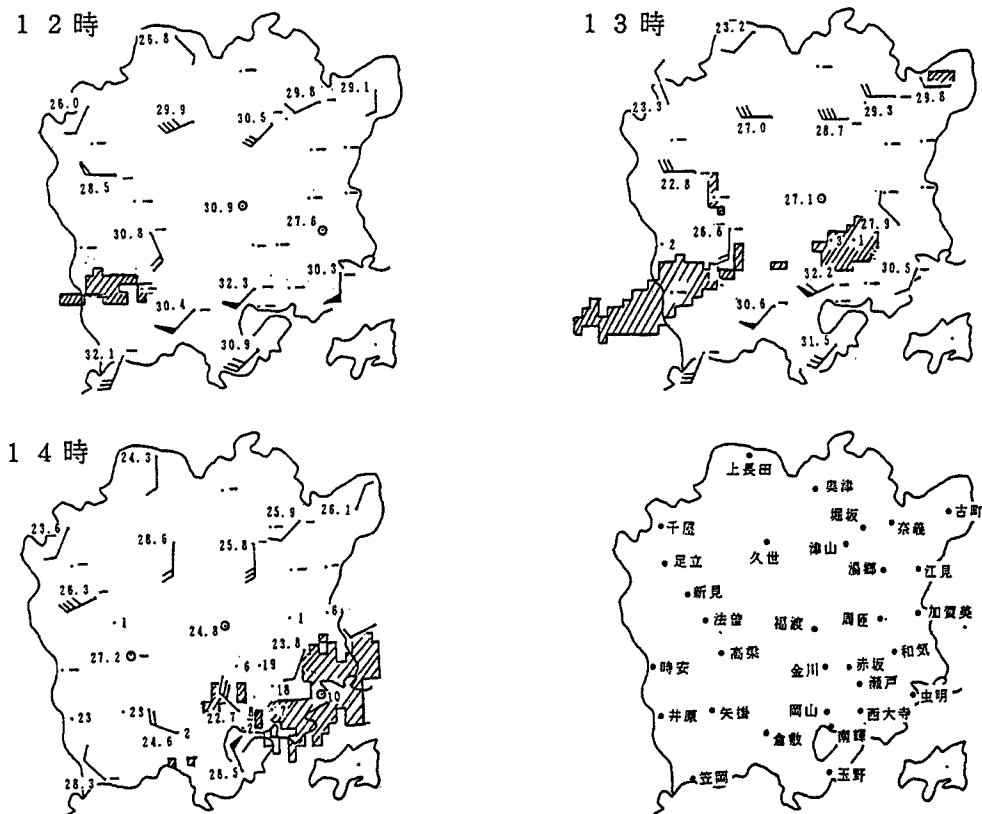


Fig. 5. Local maps of Okayama area on June 27, 1991.

その後は雨が少し続いたがこの日の総雨量は9mmしかなく、雨が集中して降ったことが窺える。岡山地方気象台の日原簿では12時56分から13時25分まで並の雷が観測されている。

岡山地方気象台から南方に7kmぐらい離れた岡南空港での変化の様子 (Fig. 8) はこれと少し異なっており、ここでは前面の気温の降下は見られず、13時38分頃、気温が31°Cから24°Cまで急降下して風向がSWからNWに急変し、約8m/sぐらい吹いていた風が急に17m/sに増加しすぐ数m/sに弱くなっていった。陣風の風速はNNW 17m/sといえる。そしてここでは前線通過と陣風の発生が同時であったといえるのではないと思われる。

一方、岡山地方気象台の北北西12kmにある岡山空港ではまた少し異なった変化をしている。ここではFig. 7に示すように12時40分と13時20分の2回陣風の発生が見られる。前者の最大瞬間風速は14m/s、後者は15m/sでいずれも継続時間は1分間以下であった。これらの陣風の発生前は数m/sのSWの風が吹いていたが、陣風の時及び後もこの風向は変わっていない。先にも述べたとおりこれら2つの陣風は、2つに分かれて通過した2つのレーダエコーに対応していると考えられる。そして最初の陣風の時に気温が28°Cから23°Cまで急降下した。このように13時過ぎに岡山市を通過した、後のレーダエコーとして見られる積乱雲群の東進に伴って、今回の被害を生じた陣風が発生したと考えられる。岡山地方気象台では、この陣風の前に風向急変と気温低下を伴う前線通過を示す変化が通過しており、陣風の時には気温低下が見られるが風向の変化は大きくなかった。しかし、南の岡南空港ではこれらの現象が同時に生じており、北の岡山空港では前の気温低下の時にも陣風を伴っていた。

岡山県南部には大気環境監視網が展開されており大気質の監視以外に風向風速の測定も連続的に行われている。しかし、記録装置が気象台のものと異なっており停電すると記録不能となる場合がある。また風速は

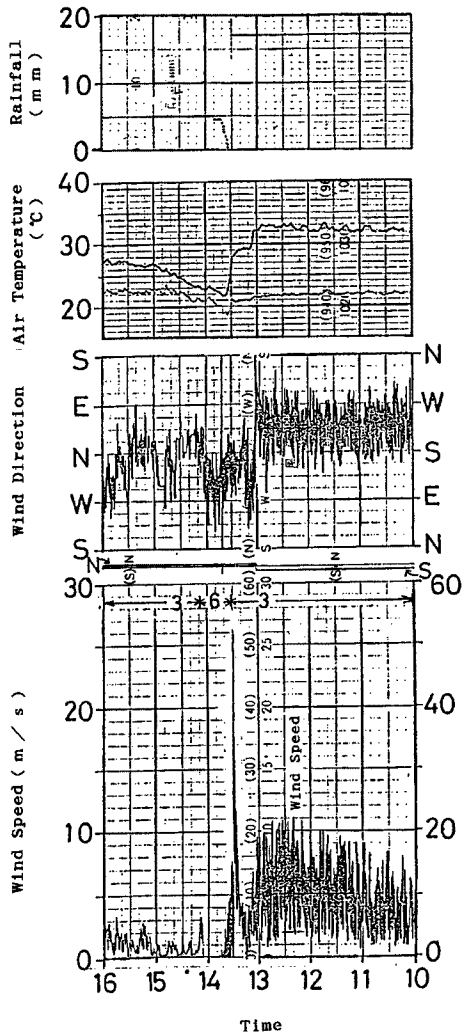


Fig. 6. Weather changes at Okayama Local Weather Station for June 27, 1991

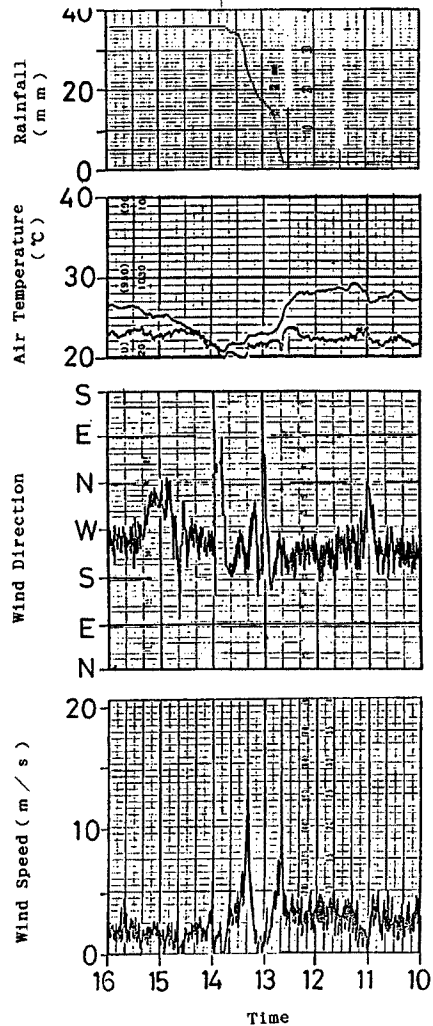


Fig. 7. Weather changes at Okayama Airport for June 27, 1991.

10分間の平均値を積分回路で作り出して記録している。そのため、今回のように短時間に終了する現象ではその変化は忠実に記録されない。この装置では平均風速の立ち上がり部分が陣風の発生を示す時刻に相当すると考えられ、その前の寒気の吹き出しは風向の北寄りへの急変として検出出来る。また自記紙の時刻合わせには気象台より誤差が大きいと考えざるを得ない。

この監視網において陣風の前に現れる寒気吹き出しに対応する風向の変化及び気温観測点での気温の最初の急降下の時刻の分布を Fig. 9 に示す。この図からも明らかなおり等時線は WSW から ENE に走っていて、南進している。これが梅雨前線の南への移動を示すものと考えて良いであろう。

一方、陣風の発生時とその時の風向を示したものが Fig. 10 である。この図には気象台関係の値も併せて記入してあり、陣風の見られなかった所は横線が引いてある。陣風は帯状に発生し、瀬戸内海沿岸ではほとんど見られず、その等時線は WSW から ENE の方向に進んでいる。これは前線より少し遅れて発生しており、海岸から少し入った所を非常に高速度（陣風発生後約 20 m/s）で進んでいる。発生時の風向はほぼ等時線の走向に直角になっている。この等時線の凸部をつなぐ線が down draft の中心線の移動経路であったと見ることが出来る。

先に述べたとおり岡山地方気象台では陣風が発生した時に激しい雨が降り始めしばらくして弱くなっている。岡山県南部で雨の自記記録の得られたのは気象台以外にアメダスによる10分間毎の雨量、建設省による自記及び30分間毎の雨がある。これらの雨量のうち1時間毎のものは Fig. 5 の局地天気図に記入してあるが、雨はほとんどが13~14時の間に降り、Fig. 10 に示した陣風の中心軸にそって1時間 20 mm ぐらいの強雨帯が生じている。そして自記記録から見ると、どこでも陣風の発生から降り始めて10分ぐらいしか豪雨は続いていないようである。備前市に入ると豪雨は13時40分頃に始まっており down draft の中心の経路の延長上にあるが、陣風は見られない。降雹は岡山市東部で13時28分頃に生じたものと推定出来る。

5. 陣風の風速の気象学的推定

これまでの解析の結果、梅雨前線と down draft の動きは Fig. 11 に示すような結果になる。13時40分には点線の位置に降雨域は進むが、もはや雨が降るだけで陣風は見られない。陣風は最後の13時20~30分において最も強かったようである。この時の様子は Browning et al.²⁾ が作った雹を伴う積乱雲のモデル図 (Fig. 12 参照) とほぼ似た状況にあったものと思われる。今回の例では前線から前 10 km 程のところまで雹が降り、その前面で陣風が生じているが、Browning のモデルにおいても 8~10 km のところで生じており類似性は高い。積乱雲が移動していなければ鉛直に下降した気流が地面に当たって四方に拡がっていくことになるであろうが、積乱雲がこの場合 20 m/s ぐらいの速度で移動しているため下降気流そのものが

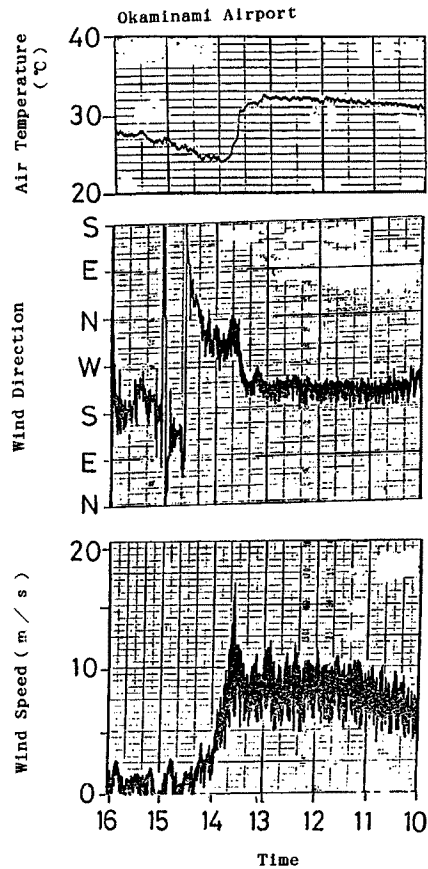


Fig. 8. Weather changes at Okaminami Airport for June 27, 1991.

が

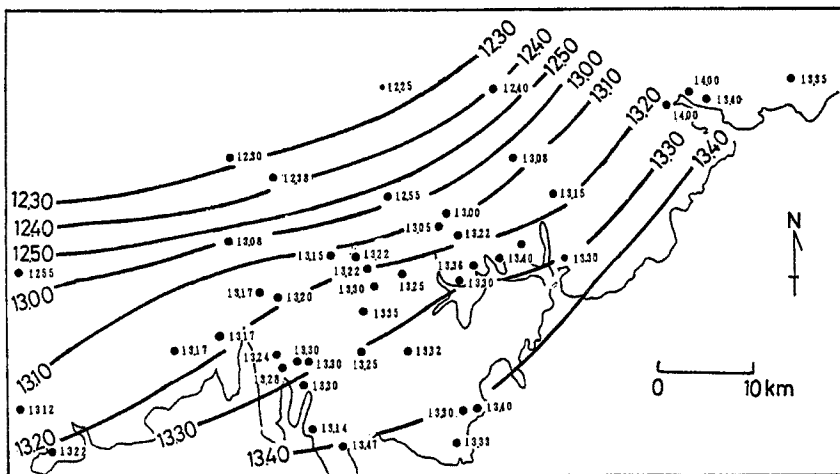


Fig. 9. Isochrone of sudden wind direction change and temperature drop by frontal passage.

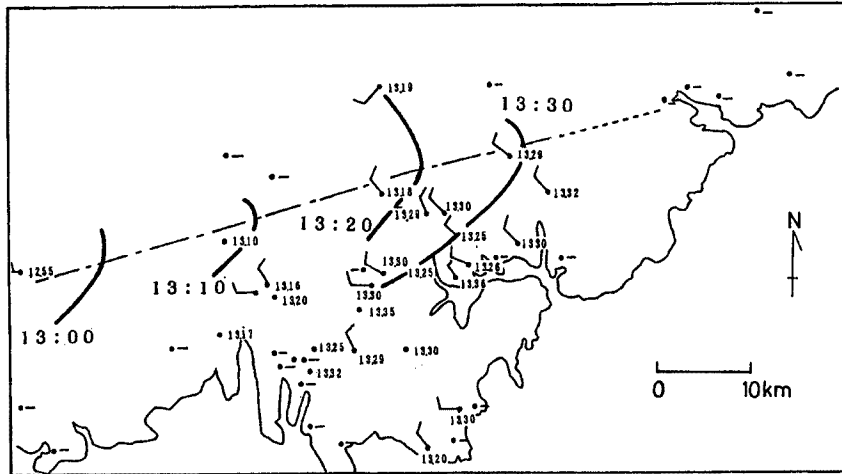


Fig. 10. Isochrone of gust (Jinpu) occurrence and its wind direction. A bar indicates no sign of gust.

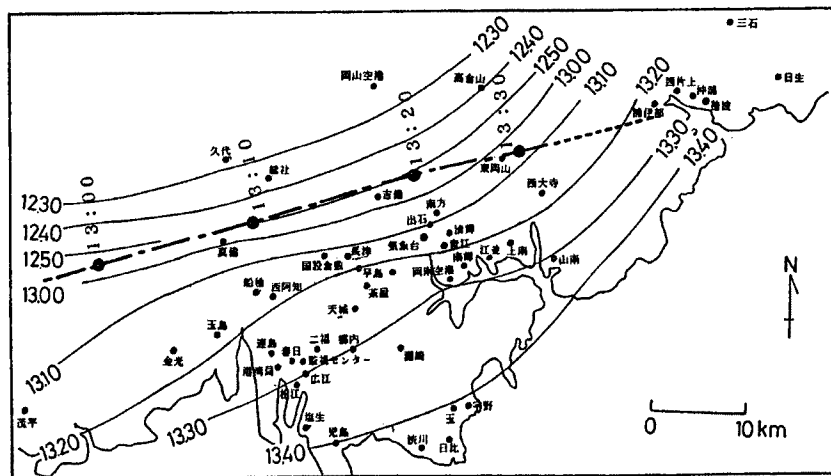


Fig. 11. Transition of the center of down burst and frontal movement.

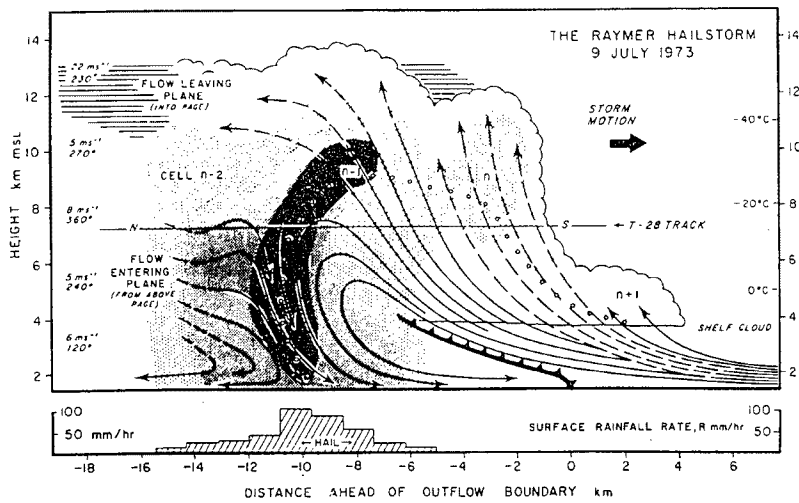


Fig. 12. A model of thunderstorm with hail by Browning et al.

前進の運動量を持っており、地面に衝突しても流れは前の方に進む。もしこの広がる風速がシステムの移動速度より速い時は地面の摩擦の影響もあり、前側では流れは洪水流の先端のようになり、突風前線をなし急速に風速が増大し、前面に吹き出した風は上昇流となって巻き上がる。その様子は前述の down draft の観測においてドップラーレーダを用いて藤田博士が解析した Fig. 13 のようになっているものと思われる。この図は雲の進行方向の鉛直断面の風速分布を示したもので、雲は 14 m/s の速度で右に進んでいる。高さ 600~900 m では 20 m/s ぐらいの下降気流が存在し、それが地面に当たって水平に向きを転じ地上 50 m で 32 m/s の前向きき最大風速が生じている。そして突風前線を形成し、その付近では上昇流が生じている。

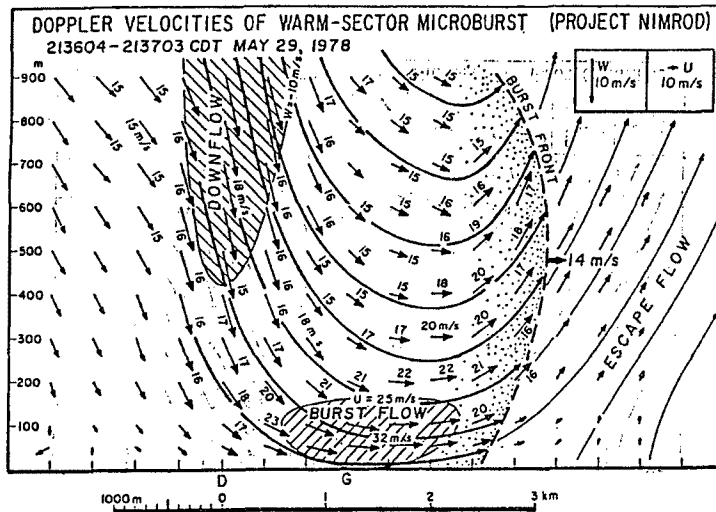


Fig. 13. Doppler velocities of warm-sector microburst (Project NIMROD) by Prof. Fujita.

一方、陣風の分布を水平面で見ると、Fig. 10 に示すとおり高速で進行する down draft の前面から陣風前線とも呼べる突風前線が衝撃波のように、あるいは船の船首のところに見られる波のような形で斜め後方に広がっている。この広がった部分で風向は陣風前線に直角になっており、風速の実測は3点しかないが中心軸から離れるほど風速は小さくなっているようである。その様子は Fig. 14 に示したようになっている。ここで距離は各観測点の down draft の中心の経路からの距離である。

各地点での風速は発散する風と雲の移動の影響を合成した結果であると考えられる。この雲の移動の影響について定量的に論じるのは困難であるので、これら3点の風速の距離による変化の様子を単純に外挿して中心軸のところまで延長する約 50 m/s という中心軸での最大風速が考えられる。無論この曲線がどのような形になるかについては議論の分かれるところであるが、この陣風風速の分布についての理論が確立されていない現時点においては、最も単純な曲線で客観的にこのように延長してみたというだけである。この推定値は雲の移動も考えに入れたもので、最大瞬間風速に相当するものであると考えられる。

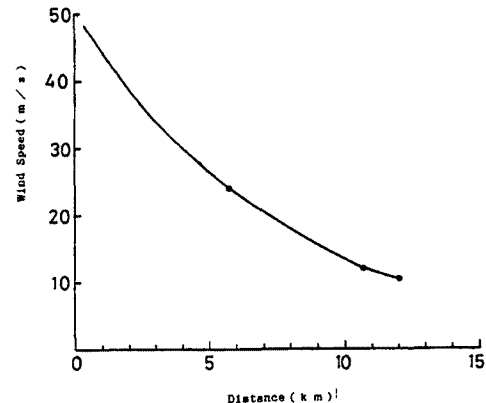


Fig. 14. Junpu wind speed with distance from the down burst center.

6. 考 察

電線路に作用する風速を考える時には少なくとも1本の電柱とその両側の径間に同時に作用する風の力を考えるのが相当であると考えられる。しかし、ある拡がりを持った空間の平均の風速については現在のところ我々は十分な知識を持っていない。Fig. 15 は台風時に地上 15 m で1点で測定された最大瞬間風速と空間平均の最大風速との比を風速の評価時間（平均化時間）をパラメータとして求めたものである⁴⁾。これから推定すると1 sec の評価時間ならば今回の代表的な径間 45 m の2倍約 100 m の空間にかかる空間平均最大風速は1点での最大瞬間風速の85%ぐらいの値であるということになる。従って、もし陣風の場合にもこの関係が用いられるとすると径間にかかる最大風速は 43 m/s であるということになる。

一方、ここで用いられたコンクリート電柱は柱頭荷重 500 kg の設計荷重のものであり、安全率 2 が考えられている。しかし、実際に用いられたものと同種のものとの載荷試験では柱頭荷重 1200 kg ぐらいで破壊している。電柱および電線の受風面積から計算すると、風速は 43 m/s ぐらいでこの破壊点を越えることになる。すなわち、この場合単純な風圧の計算では最大風速は破壊風速とほぼ同じで、確実に破壊が生じるとは必ずしも言えない状態である。

しかし、風速の記録からも明らかなように、陣風の風速の立ち上がりは非常に急速である。静止していた電線に急に風が作用すると電線は振動して動的な荷重がかかることが考えられる。この場合、電線の無風状態での固有振期は 1.5 sec 前後であるが、もし風速が 1 sec の間に静止から最大値まで立ち上がったとすると、電線はその風速に対する平衡点を越えて大きく振れる。この量を、京都大学土木工学教室の松本、白土両先生に計算してもらったところ⁵⁾、非定常空気力の最大は定常状態の1.3倍ぐらいにもなることが分かった。そうすれば、この場合間違いなく破壊してもよい状態にあったとすることができる。この周囲で水田の中の障害物のない部分を通っている電線はこの部分だけであるから、他の部分では周囲の家などの障害物によって風速が減じて配電線は無事であったと考えられる。

一方、電気工作物規定では一般地と市街地では風圧において2倍の差を考えることにしているが、この被害のあった部分は周囲が水田で障害物の全くない場所にもかかわらず市街地という条件で設計がなされていたとのことである。従って、この事故はそのような判断の誤りにも起因しているところがあると思われる。もし、一般地の設計になっていれば平均風速 40 m/s の風にも安全なはずであり、今回のような突風でも充分安全であったと考えられる。

このような陣風は日本中どこでも発生する可能性が考えられるのであり、注意する必要がある。

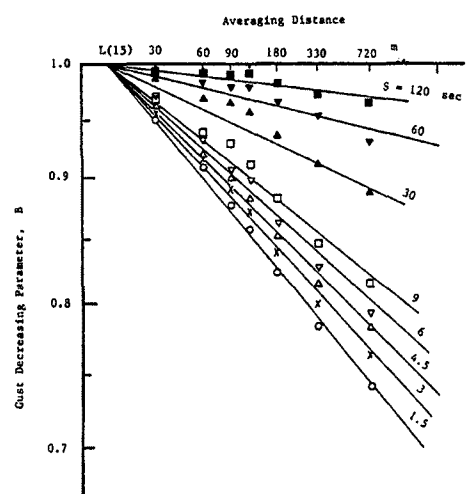


Fig. 15. Gust factor with averaging distance of gust.

参 考 文 献

- 1) 石崎澁雄・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，pp. 469-480，1971
- 2) Browning, K. A., J. C. Fankhauser, J. P. Chalon, P. J. Eccles, R. C. Strauch, F. H. Merrem, D. J. Musil, E. L. May and W. R. Sand: Structure of an Evolving Hailstorm, Part V, Mon. Wea. Rev., Vol. 104, pp. 603-610, 1976

- 3) Fujita, T. T. and H. R. Byers: Speahead Echo and Downburst and the Crush of Airliner, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 105, pp. 1511-1534, 1977
- 4) Mitsuta, Y. and O. Tsukamoto: Studies on Spatial Structure of Wind Gust, *Jour. App. Meteor.*, Vol. 28, pp. 1155-1160, 1989
- 5) 防災研究協会：1991年6月27日岡山市東部で発生した陣風災害について, *Severe Storm Research Note*, No. 4, p. 60, 1991