

雹痕から求めたダウンバーストの風速*

渡辺 明**

1. はじめに

1992年8月7日14時30分頃、第1図に示す福島県南会津郡館岩村前沢で福島県指定の天然記念物、根周り11m、高さ30mの「前沢の大杉」が降雹を伴う突風によって根元から折れ、その南東約10mの民家に倒れ、その家が全壊し、家の中にいた3人が梁等の下敷きになって死傷する災害が発生した。新聞報道によれば「すさまじい風と音で家が倒れる音も聞こえなかった。」「竜巻のように白い壁が杉に近づいたのを見た。」「ものすごい突風と一緒に直径5cmぐらいの雹が横殴りに降った。」などと付近の住民はこの災害について語っている。

現地調査では、この3人の死傷者以外に、屋根の崩壊が3件、樹木の倒壊が6か所、その他ビニールハウスの倒壊、窓ガラスの破損、降雹による自動車の損傷などがあったことがわかった。しかし、その範囲は、館岩川の谷地形に沿ったおおよそ2km以内の地域に限られている。また、樹木の倒壊は、第1図中の矢印で示した様に、佐倉山(標高1156.8m)の斜面のみ、ほぼ斜面の谷に沿う方向に倒れているが、その他はおおよそS30°Eの一樣方向に根こそぎ倒れていた。しかもそれぞれの地点では、同樹種の山林にも関わらず、その中の2~3本だけが倒壊しているといった特徴を有している。

ここでは現地調査で得られた資料をもとに、この現象の実態について、とりわけ、「前沢の大杉」に隣接された曲屋資料館の土壁に残された雹痕から求められた風向・風速について報告する。

2. 総観場の特徴

第2図に示した8月7日9時の地上天気図をみる

* Wind velocity of a downburst determined from the diameter of hail marks.

** Akira Watanabe, 福島大学教育学部.

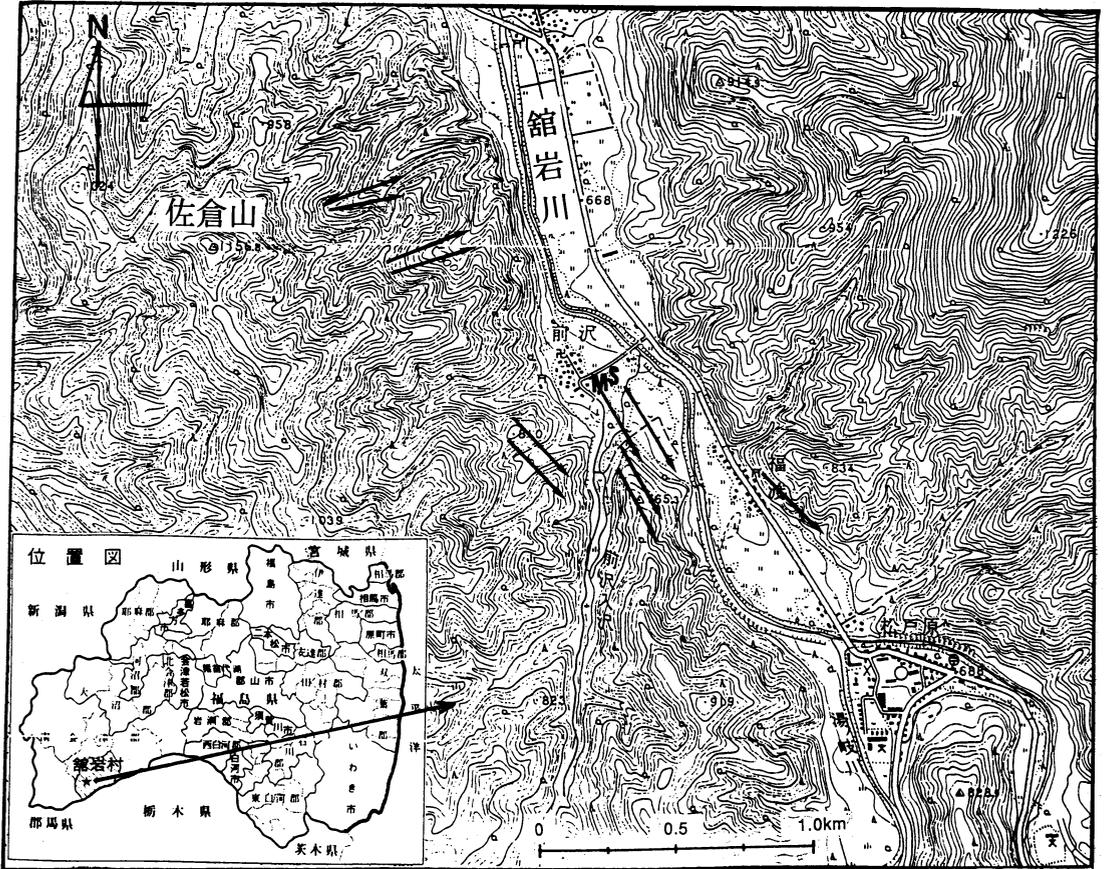
—1993年4月5日受領—

—1995年4月18日受理—

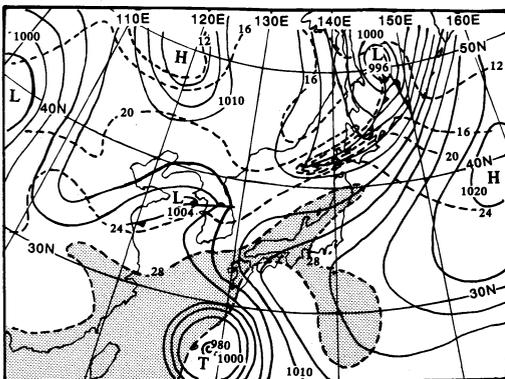
と、50°N, 148°Eに低気圧があり、これから伸びる寒冷前線が北海道にかかっており、東北地方北部をかすめそうになっている。しかし、等温線は黄海付近の低気圧まで相対的に密になっており、二つの低気圧の前線は連続して存在している可能性を示している。さらに、この時点で東シナ海から伸びる暖域と連なって、東北の日本海側は30°C以上の高温域になっている。仙台で観測された災害発生地点を通過する16mm/h以上の降水強度を有するレーダーエコーは、第3図に示すように、ほぼ50km/hで組織的に東進しており、前線などの不連続線の通過に伴って発生しているものと考えられる。

現地調査の結果、前沢で降雹と突風が発生したのは、おおよそ14時20分から14時30分の間である。第4図は14時30分の仙台のレーダーエコーの分布図であるが、エコーの最も発達した領域は、この時刻でもまだ進行方向風上(前沢の西側)2~3km付近に存在し、このエコー前面には64mm/h以上の降水強度をもつ発達したエコー領域が存在し、15時00分の観測では、このエコー頂が14km以上の高度まで発達している。第5図は地上天気図と同じ時刻の9時の仙台上層の温位と相当温位の鉛直分布を示したものである。地上より500hPa面高度まで対流不安定になっており、また、その付近の高度で鉛直風速shearも相対的に大きくなっている。発達した積乱雲の詳細な構造を示したBrowning *et al.* (1976)は、最も発達した積乱雲の中心より進行方向10km付近にgust frontが存在し、それに伴う風速の極大値は進行方向前面6km付近と2km付近に出現すること、さらに降雹は積乱雲の中心付近で最も強い事を指摘している。また、Hjelmfelt (1988)もマイクロバーストの平均的な構造を示し、最大風速が下降流の中心から約1.5km付近に存在することを示しており、これらと比較すると、エコーとの位置関係はダウンバーストの発現可能な状況になっていた。

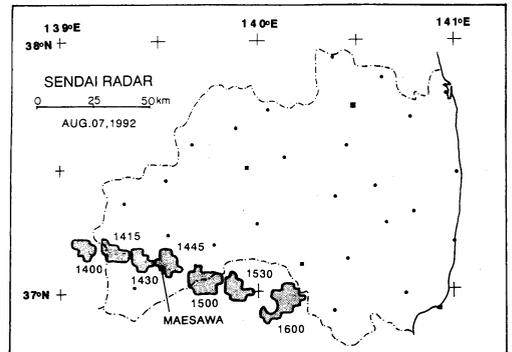
第6図は15時のアメダスデータを用いて客観解析をした気温(0.6°C/100mで一律に高度補正をおこなった)と、風向・風速、流線の分布を示したものである。



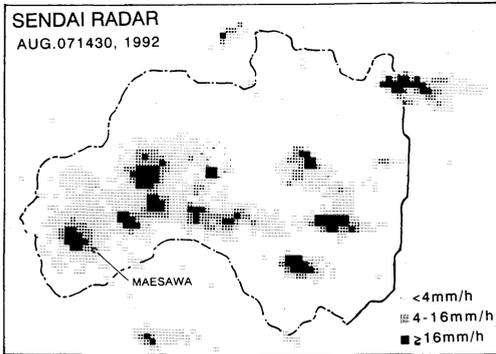
第1図 福島県南会津郡館岩村前沢周辺の地形。矢印は樹木の倒壊場所、及びその方向を示す。Mは前沢の大杉、Sは曲屋資料館の位置を示す。



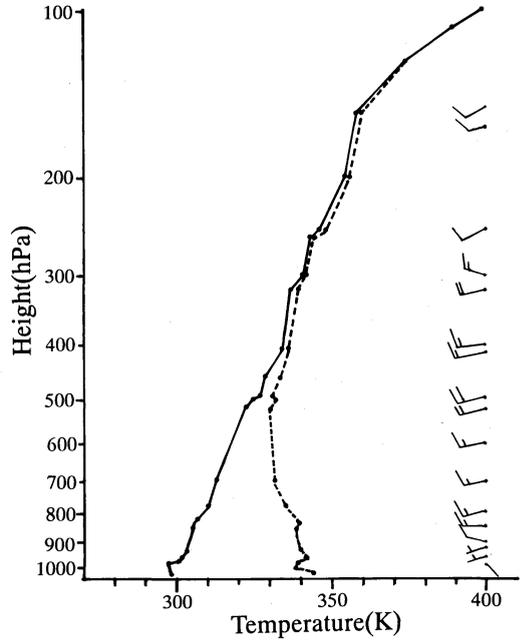
第2図 1992年8月7日9時の地上天気図。実線は等圧線 (hPa)、破線は等温線 (°C) を表す。陰影部は 28°C より高温域を示す。



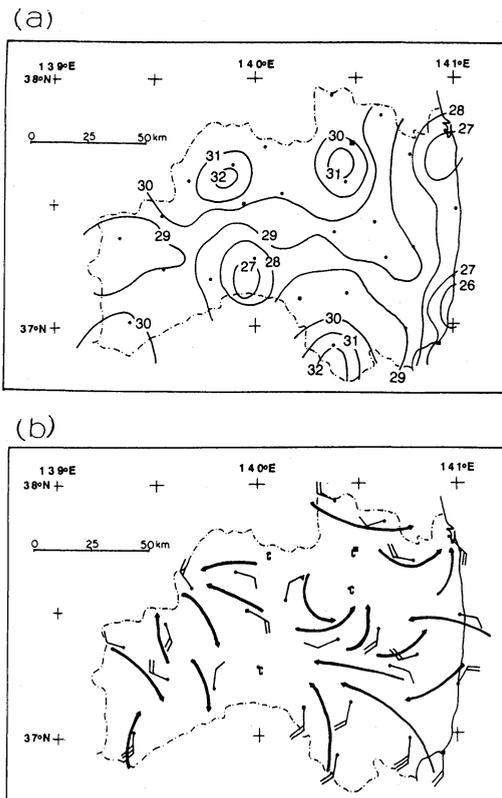
第3図 災害地を通過した仙台レーダーエコーの時間変化。エコー強度 16 mm/h 以上の領域のみを示す。その他の点はアメダス観測地点を示す。



第4図 8月7日14時30分の仙台レーダーエコーの分布.



第5図 8月7日9時の仙台の温位(実線)と相当温位(破線)の鉛直分布.

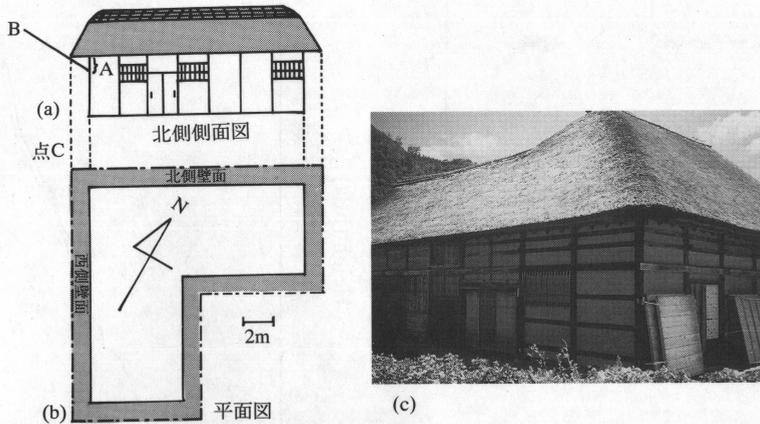


第6図 8月7日15時のアメダス観測値の客観解析図。(a)気温、(b)風向・風速(c; 静穏、矢羽根1本は1m/sを示す)と主な流線.

風向・風速分布でもエコー発達領域は、流線が収束する領域にほぼ対応している。これはエコーがほぼ地上の収束域に対応して発達していることを示すものと考えられる。枝川(1990)は気温低下域を解析し、それが発散場になっていることから、冷氣の下降流域に形成される高気圧に対応していることを示しているが、ここでの気温の低下は、雲による放射量の減少などが大きく影響していて、必ずしもこの解析スケールでダウンバーストの特徴である寒気流出が解析されているわけではないと思われる。しかし、滋賀県で発生したダウンバーストを解析した枝川(1990)や、秋田で発生したマイクロバーストを解析した梶川他(1992, 1993)等の解析結果と比較すると、気圧配置や相当温位の鉛直分布など総観場は比較的類似している。

以上、今回の突風は、1) 突風と降雹が同時に出現していること。2) 突風、降雹出現時に発達したエコーが進行方向2~3 km 風上に位置していること。3) 相当温位の不安定高度が500hPa 面高度まで達しており、過去にはそれ以下の不安定高度でもダウンバーストが発生していること。4) 小元(1990)、梶川(1992, 1993)等の災害発生状況と類似して、樹木の倒壊位置が飛び飛びに出現していることなどから考え、この降雹を伴った突風は、発達した積乱雲の中心付近で発生

これを見ると、ほぼ発達したレーダーエコーに対応して低温域が出現している。特に発達したエコー直下では、その周辺より約3°Cも低温になっている。また、



第7図 曲屋資料館の見取り図。(a)北側側面図, Aは軒下の距離, Bは電の飛跡例, (b)平面図, 点Cは写真(c)の視点を示す。陰影部は軒を示す。(c)点Cからみた曲屋の写真。

したダウンバーストであると推定される。なお、佐倉山斜面で谷方向に倒壊した樹木は、館岩川の谷に沿った地点の樹木の倒壊方向と90°以上も異なっているが、海拔高度が200 m以上も異なり、上空から寒気が落下したとき発生したものと推定されるが、その原因は分からない。

3. 突風の風速推定

現地では気象観測が一切されていない。気象庁(1990)によれば窓ガラスの破損位置から降電時の風速などを推定する方法が指摘されている。ここでは第7図に示した曲屋資料館の北側と西側の土壁に明瞭な電痕が残されている。それぞれの土壁に電痕ができるためには電の軌跡が第7図のBの矢印のようになることが必要で、電が1.2 mの軒を水平方向に移動したのは、壁に直角な風速成分の速度(V)によるものと考えられる。軒下の距離(A)、電の落下速度(V_h)とすると、落下時間(t)から(V)は

$$V = 1.2/t, \quad t = A/V_h$$

で原理的に求められる。

なお、電の落下速度(V_h)はMatson and Huggins(1980)が示した最終速度

$$V_h = (4g\rho_h r/3 C_d \rho_a)^{0.5} D^{0.5}$$

で求めた。ここで g は重力加速度、 D は電の直径、 ρ_h は電の密度で、Matson and Huggins(1980)に従い 0.89 g/cm^3 とした。また、 ρ_a は空気密度で、現象発

生時の客観解析でもとめた気象条件から $1.15 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ を、 C_d は抵抗係数でMatson and Huggins(1980)に従い、現地で確認した電の形態から、電の表面がラフな場合の係数として示されている0.60を用いた。また、こうして求められた北側の壁面に直角な風速成分の速度 V_n と西側の壁面に直角な風速成分の速度 V_w から、この突風の風速 V_t と風向(W_d)は

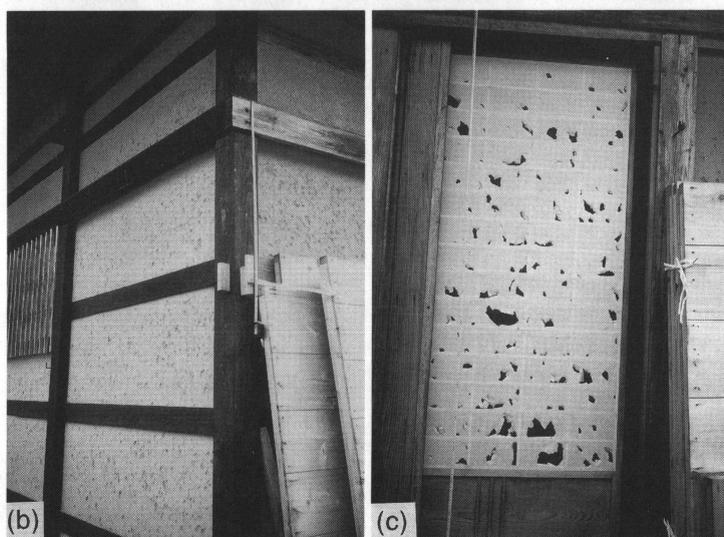
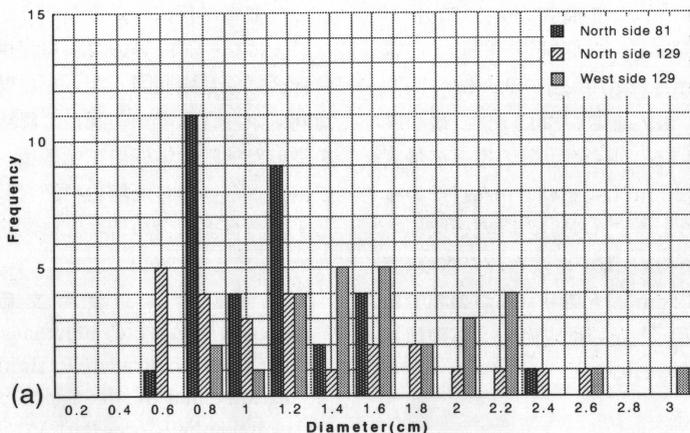
$$V_t = (V_n^2 + V_w^2)^{0.5}$$

$$W_d = \arctan(V_n/V_w)$$

で求められる。ただし、求めた W_d は土壁の向きを考慮して磁気方位に補正した。

ここで電の直径(D)は、第8図のように電痕が顕著に残されており、これを直接計測して用いた。壁面の最も上位に位置する電痕の粒度分布として、北側壁面、軒下81 cmの粒度分布を、また、壁面上位に位置し、北側と西側が同時に計測可能な軒下129 cmの粒度分布を第8a図に示す。ここに計測された粒度分布は梶川(1984)などの観測した電の空間粒度分布とも比較的類似している。風向・風速を計算する場合、北側壁面と西側壁面の電痕形成が同時であることを仮定しなければならないため、同図より軒下平均129 cmの電痕の直径の中央値(北側1.6 cm, 西側1.9 cm)を用いて風向・風速を計算すると、北側風速15.3 m/s, 西側風速16.6 m/sとなり、風向283°, 風速22.7 m/sとなる。

土壁に形成された電痕の直径は、少なくともこれ以



第8図 電痕の粒度分布(a)と土壁にできた電痕(b)、障子の電痕(c)を示す。North side 81は北側壁面軒下 81 cm の、North side 129は北側壁面軒下 129 cm の、West side 129は西側壁面軒下 129 cm の電痕の粒度分布をそれぞれ示す。

上の大きな電が降ったことを示す [下限値] であり、ここで求めた風速も、両壁面の電痕形成の同時性を仮定した風速の [下限値] (少なくともこれ以上の風速である) を示しているものと考えられる。求めた風向は、樹木の倒壊方向と約47°程ずれているが、電痕形成の同時性の仮定を考慮すれば、比較的良く一致している。さらに、電痕形成の同時性がより不確かと思われる、軒下距離 (A) が最も短く、顕著に残された電痕を使用すると、北側軒下 46 cm の所で直径 1.1 cm、西側軒下 49 cm の所で直径 0.8 cm となっている。これから

求めた風速は北側 35.5 m/s、西側 28.4 m/s となり、風向292°、風速 45.5 m/s となる。風向は中央値を用いて求めたものより樹木の倒壊方向にやや近づき、38°のずれを有している。なお、梶川 (1993) などによれば、必ずしもダウンバーストの流出方向と樹木の倒壊方向は一致しているものばかりではない。このことを考えると、ダウンバーストによる突風の風向はおおよそ西北西 (290°) であったと考えられる。

なお、第8a図に示した同じ軒下距離に位置する、電痕から求められるそれぞれの壁面に対する風の水平

成分は、北側軒下 81 cm の雹痕で、最大風速が 29.8 m/s、最小風速が 14.9 m/s、北側軒下 129 cm の雹痕で、最大風速が 19.5 m/s、最小風速が 9.3 m/s、西側軒下 129 cm の雹痕で、最大風速が 20.9 m/s、最小風速が 10.8 m/s となっている。また、土壁の雹痕の最大直径は軒下 201 cm で 3.1 cm (風速 13.6 m/s) であったが、第 8 図に示されるように、突然の降雹と突風で雨戸が閉められなかったため、障子に残された雹痕(障子の破れ)は最大直径 12 cm 程もあり(1つの雹であけられたかどうかは不明)上記の推定値も「下限値」を示しているものと考えられる。

4. まとめ

1992年8月7日福島県南会津郡館岩村前沢で発生した降雹を伴う突風災害について調査、解析した結果、この突風は発達した積乱雲の通過に伴ったダウンバーストであると考えられ、その平均風向・風速は雹痕の粒径の中央値から計算した結果や倒木状況から、およそ西北西、25 m/s 程度と考えられる。また、瞬間的には 45 m/s 以上の風速が出現していた可能性がある。

今回のダウンバーストは Fujita (1984) の区分で言えば、そのスケールからマイクロバーストに相当している。しかし、樹木の倒壊の実態からいえば、単なる重力流的な gust front の構造を想定する事は困難である。同様な樹種(杉)がたくさん同様な地形にあるのに、一地点で2~3本しか倒壊していないこと、しかも、谷に沿う領域では、倒壊方向がほぼ一様であるが、飛び飛びに倒壊位置が点在していること、また、曲屋資料館の西側土壁の雹痕は、北側壁面から約4m南方になると、雹痕の軒下距離が急速に長くなり、さらに約6m南方になると軒下102cmまでの所に雹痕がなくなることなどを考えると、今回のマイクロバーストは、平均25m/s以上の強風が、水平scale10m程度で飛び飛びに出現している構造であったと推定される。しかし、水平スケールがたかだか10m程度でこ

うした強風が存在し得るかどうか疑問が残る。

最後にレーダー等の資料を提供して下さいました仙台管区気象台観測課、ならびに助言ご指導を頂きました同気象台青木孝予報課長、降雹速度等で適切な助言を頂いた秋田大学梶川正弘教授、さらに、現地調査にご協力下さいました館岩村教育長管家七郎氏をはじめとする教育委員会の皆さんに謝意を表します。

参考文献

- 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, 1976: Structure of an evolving hailstorm Part V: Synthesis and implications for hail growth and hail suppression, *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 603-610.
- 枝川尚資, 1990: 突風を伴う雷雨時の気圧変動, 降ひょうと下降流突風による災害に関する研究, 144-149.
- Fujita, T. T., 1981: Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales, *J. Atmos. Sci.*, **38**, 129-146.
- Hjelmfelt, M. R., 1988: Structure and life cycle of microbursts outflows observed in Colorado, *J. Appl. Meteor.*, **27**, 900-927.
- 梶川正弘, 1984: 雹の空間粒度分布の観測, 東北地方における降雹の実態と雹害防止に関する基礎的研究, 69-72.
- 梶川正弘, 薄木征三 1992: 1987年7月9日秋田県仙北町のマイクロバーストによる災害, 東北地域災害科学研究, **28**, 55-58.
- 梶川正弘, 薄木征三, 武藤哲男, 1993: 1989年5月15日秋田県協和町のマイクロバーストによる災害, 秋田大学教育学部研究紀要自然科学, **44**, 45-51.
- 気象庁, 1990: ひょう害の現地調査, 異常気象・気象災害調査指針, 73-74.
- 小元敬男, 1990: 降雹とダウンバーストの実態, 降ひょうと下降流突風による災害に関する研究, 15-37.
- Matson, R. J. and, A. Huggins, 1980: The direct measurement of the sizes, shapes and kinematics of falling hailstones, *J. Atmos. Sci.*, **37**, 1107-1125.