

# 昭和51年5月17日の降ひょうを伴った線状雷雨 の構造とレーダー反射強度

八木 鶴平\*

国立防災科学技術センター

## Radar-Echo Structure and Reflectivity of a Hailstorm of 17 May 1976

By

Tsuruhei Yagi

*National Research Center for Disaster Prevention, Japan*

### Abstract

Serious hail damage to crops and property occurred on 17 May 1976 in the northern Kanto district. In the present paper, a band-like hailstorm is described in order to focus attention on the relation of the storm structure to the hail area on the ground as revealed from the radar and hailpad network analysis.

Late in the morning, before the passage of the cold front, convective echoes appeared at Mt. Haruna and the Ashio Highlands. Shell-shaped echoes at the Highlands were relatively strong and well organized, so evidently manifested the atmospheric instability on this day. Around 1330 JST, other intensive convective echoes appeared over the western mountainous regions in Gunma Prefecture. The echoes migrated eastward and formed an array together with the newly developed echoes at the northern edge. The echo band consisted at the most of ten storm cells. Among the storm cells, hailfalls accompanied the relatively intensive cells at the northern part of the band. The majority of individual cells survived longer than 60 min and some lasted over 2 hr till after 1700 and then decayed in Tochigi Prefecture. After the passage of the band-like hailstorm, convective activities were no longer observed in Gunma Prefecture.

Hailfalls were detected in Gunma town, Niisato village and Ohta city according to the hailpad network, and the occurrence times were reportedly around 1425, 1445 and 1515, respectively. The diameters of the hailstones were estimated to be about 1 to 2 cm based on the sizes of dents produced in the aluminum foils of the hailpads.

The hailfall in Gunma town was evidently brought on by the northernmost storm cell with the maximum radar reflectivity of 57 dBz as seen in the PPI

---

\* 第1研究部異常気候防災研究室

echo structure, and the hail area on the ground laid under the hail shaft with the maximum reflectivity of 57 dBz as seen in the vertical section of the cell. The hailfall which struck Niisato village was brought on by the storm cell newly developed further north adjacent to the former cell only 15 min before the hail event. The hail area on the ground experienced the direct overhead passage of this cell of 52 dBz at maximum. The high reflectivity shaft in the vertical storm structure was noticed over the hail area. Ohta city had the third hailfall on this day. The hail area in the city was coincident with the position of the third storm cell at the hail time having a 57 dBz radar reflectivity at maximum, and lay under the remarkable hail shaft of the intensity of 57 dBz at maximum. This section was almost parallel to the direction of movement of the hailstorm and the shaft apparently inclined to the front. This vertical structure is very similar to the model of Browning et al. (1976).

These observational facts, which have been documented for the first time in Japan in addition to the preliminary analysis of a hailstorm of 9 June 1975 (Omoto, Yagi and Seino, 1976), would be significant basic data for the watch and short-time forecast against the damaging hailstorms and, possibly, for a future performance of the hail suppression experiments in Japan.

## 1. ま え が き

Hailstorm (あるいは降ひょうを伴った severe storm) の構造は、主として気象レーダーによる膨大な観測資料をもとに、米国(Atlas, 1963; Newton, 1967)や、カナダ(Hitschfeld, 1971), ソ連(Sulakvelidze *et al.*, 1967)等の国で詳細な解析が行なわれてきた。これらの研究での重要な関心の一つは積乱雲あるいは積乱雲群におけるひょうの存在領域の同定であった。近年の観測・解析研究によると、severe storm の型によらず、地上の降ひょうは、一般に、最大レーダー反射強度の軸、あるいは hail shaft と呼ばれる雲中の領域の直下に生起している。たとえば、Browning and Foote (1976)によれば、米国コロラド州で観測された supercell storm (単一超細胞ストーム)の平均流入気流方向で切った垂直断面構造において、hail cascade\* が weak echo vault\*\* に隣接した反射強度の高い領域に存在することが報告されている。また、Browning *et al.* (1976)による、同じくコロラド州の multicell storm (多細胞ストーム)の概念模型図では、地上の降ひょう域は 50dBz の最大反射強度の軸の直下に位置することが示されている。

わが国においては、hailstorm の詳細なレーダー気象学的研究がほとんど実施されていなかったが、国立防災科学技術センターにおいて、初めて、レーダーによる観測研究が昭和46年度に開始された。観測対象地域は群馬県を主とする北関東で、Omoto (1967)によれば北関東は日本における暖候期の降ひょう頻度の最も高い地域である。また、このレーダー観測

\* ひょうが滝のように落ちる領域の意

\*\* 丸天井状を呈したレーダー反射強度の弱い領域の意

は、降ひょう記録計網による降ひょう分布観測と連携して行なわれた。その結果、詳細なレーダー資料と地上の降ひょう域の資料を比較対照させることが可能になった。昭和50年6月9日の hailstorm の予備的解析では、降ひょう記録計網で検出された地上の降ひょう域をレーダーでみた垂直断面構造における hails haft が通過したことが明らかにされた（小元・八木・清野，1976）。この時の上空の最大レーダー反射強度は 57 dBz に達した。

本研究は、地上の降ひょう域の頭上を通過する hailstorm のレーダーエコー構造と反射強度を昭和51年5月17日の事例解析について明らかにする。この日は、北関東一円に農作物や施設に対するひょう害が発生した。国立防災科学技術センターのレーダーおよび降ひょう記録計網は群馬県の降ひょうを成功裏に観測・記録した。群馬県によると同県のひょう害の被害額は1億3千万円であった。

## 2. 観測方法

### 2.1 レーダー観測

観測に使用した車載式レーダーの設置点は、群馬県藤岡市の小高い丘の上で、図1に示すように群馬県と栃木県および埼玉県北部を主たる観測範囲としている。レーダーの尖頭出力は40 kw、波長3.2 cm、ビーム幅は2度である。距離60 kmまで等エコー演算回路を通して

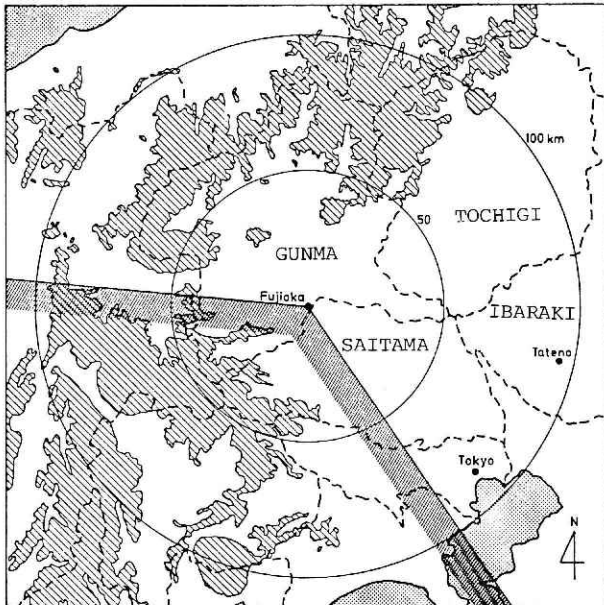


図1 レーダー観測点および地形図  
 Fig. 1 Radar site and topography in radar coverage; mountainous regions over 1000 m above mean sea level are hatched. Sector in SE to W is dead angle from radar.

レーダー反射強度を測定できる。自動パルスカメラによる撮影で20秒あるいは30秒に1回の PPI 通常エコーを記録し、原則として10分ごとに等エコー測定を行なった。また必要に応じ、特定エコーの垂直構造も観測した。

図1の斜線を施した部分は標高1,000 m以上の山岳地帯である。南東から西にかけての扇形の領域は、レーダー近傍の微地形による死角である。国立防災科学技術センターの設置した藤岡レーダーは、関東平野北西部の山岳地帯で発生し、通常東から南東にかけて進む hailstorm ある

いは雷雨(八木・清野・小元, 1976b; 八木, 1979)を比較的近い距離から観測することができる(たとえば, 八木・清野・小元(1976a)).

## 2.2 降ひょう記録計網

降ひょうは非常に局地的な現象であるため, 観測点は可能な限り密に展開する必要がある。国立防災科学技術センターの降ひょう記録計網は, 昭和46年に群馬県内に設置された時は約1,600 km<sup>2</sup>に100台であったが, 昭和49年に埼玉県北部にも設置し, 昭和51年には総数260台に達した。図11は昭和51年の配置図である。観測点は一様に展開せず, 伊勢崎市から埼玉県北部にかけて特に密度を高めてある。この地域の観測点の展開密度は平均2 km<sup>2</sup>に1個所である。その他の地域は5から8 km<sup>2</sup>に1個所である。前者では降ひょう強度の分布がかなり良くわかり, 後者では降ひょう範囲をほぼ正確に決めることができる(小元・八木・清野・米谷, 1978)。

この観測には非常に多くの記録計が必要であるため, 安価で取扱いの容易なものであることが望しい。観測は主に農家に依頼された。使用した降ひょう記録計は, 発泡スチロール板の上に置かれた露出面積500 cm<sup>2</sup>, 厚さ0.12 mmのアルミ箔とこれらを固定する金属枠および地面に立てるための約1 mの支柱よりなる。ひょうが降るとアルミ箔に多数の凹みが出る。この凹みの大きさからひょうの粒径が, あらかじめ実験的に決めた検定曲線により求められる(清野, 1978)。

## 3. 気象状況

昭和51年5月17日, 09時および21時の地上天気図を図2と図3に示す。09時に日本海北部

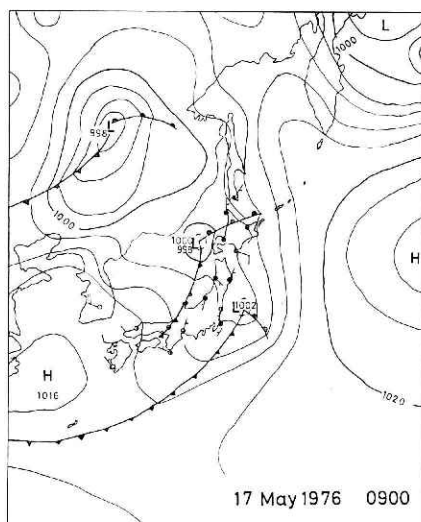


図2 昭和51年5月17日午前9時の地上天気図

Fig. 2 Surface map, 0900 JST, 17 May 1976.

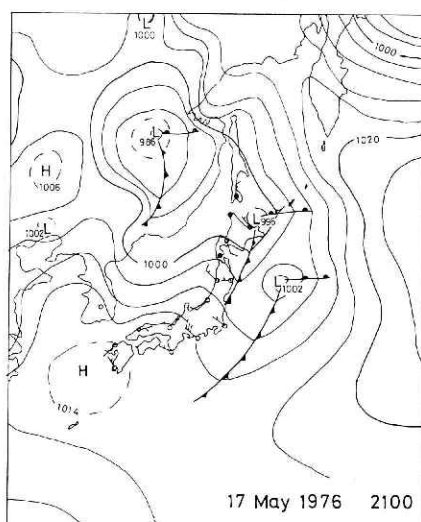


図3 昭和51年5月17日午後9時の地上天気図

Fig. 3 Surface map, 2100 JST, 17 May 1976.

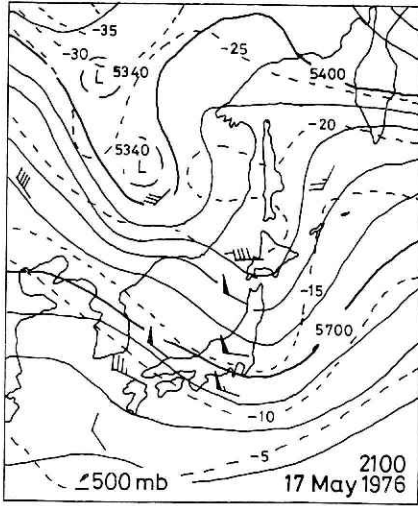


図4 昭和51年5月17日午後9時の500mb高層天気図  
 Fig. 4 500mb map, 2100 JST, 17 May 1976.

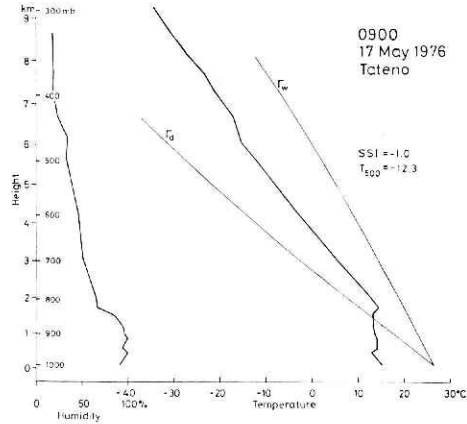


図5 昭和51年5月17日午前9時の館野の温度と湿度のプロファイル  
 Fig. 5 Temperature and humidity soundings at Tateno, 0900 JST, 17 May 1976.  $\Gamma_d$  and  $\Gamma_w$  are dry- and wet-adiabats for 300°K, respectively. SSI is the Showalter stability index and  $T_{500}$  is temperature at 500 mb.

にあった低気圧から日本列島西岸沖を南南西に伸びた寒冷前線は、日中低気圧の移動に伴って列島を横断し、21時には太平洋岸に達した。図4は21時の500mb高層天気図で、実線は等高度線、破線は等温線である。関東以北が寒冷な気圧の谷の影響下にあることを示している。図5は館野の気温と相対湿度の09時の高層観測値である。 $\Gamma_d$ と $\Gamma_w$ は、それぞれ気温の乾燥断熱減率および湿潤断熱減率の曲線(300°K)を示す。850mb層の気塊を断熱的に500mbまで上昇させて得た気温を、500mb層の気温から引いた数値であるショワルター安定指数(SSI)は-1.0、また、500mb層の気温( $T_{500}$ )は-12.3°Cであった。したがって大気はこの日午前中すでに不安定であった。また館野の午前9時の高層観測におけるSSIおよび $T_{500}$ にもとづいた小元・米谷(1976)の降ひょう予報法によると、この日は関東地方に降ひょうを伴う雷雨が発生する可能性の大きいことが予想されたことになる。

#### 4. 対流活動

##### 4.1 日変化の概要

昭和51年5月17日、午前中遅くから、前線通過に先立って、榛名山と足尾山地に根を持つ対流性エコーが連続して発生した。足尾山地のいくつかのエコーはそれぞれ、西側に新しいセルが発生し全体としてほとんど移動しない貝殻状エコーであった。榛名山の弱い対流性エコーは13時過ぎまで、また足尾山地の貝殻状エコーは15時過ぎまで活動した。それぞれ熱雷であると考えられる。一方、13時30分頃、西部山岳地帯で発生したいくつかの強い対流性エ

コーは、東進し平野部に至るにしたがって、おおむね南北に並んだ約80 kmの長さに及ぶ顕著な線状エコーに編成された。これは寒冷前線の通過による熱的界雷であると考えられる。この線状エコーは栃木県に至り17時過ぎまで持続した。その後、線状エコーの後方には対流活動はなかった。

#### 4.2 榛名山の対流性エコー

当日のレーダー観測は午前9時より始めた。11時10分に一時運転を休止するまで125 kmの最大レンジ内にエコーは無かった。11時52分に再開した時、榛名山のランドエコーと赤城山のランドエコーの間に対流性エコーがあった。図6の左図の(1)と(2)である。この図は、11時55分から13時10分までの5分間隔のPPIエコーパターンのうち榛名山東麓の対流性エコーについてのみ、図面の上方から下方へ時間を追って等間隔にづらせて描いたものである。横

棒は各時刻のエコーに対する右上図に示した基準点の位置を表わし、11時55分と13時10分だけ添え字で示してある。各エコーセルは発生順に括弧書きの番号で示し、また発生順に点彩と白抜きで交互に区別すると共に実線で結んで同一エコーセルの5分ごとの時間変化であることを明らかにした。11時52分の観測再開後、7つの対流性エコーが榛名山東麓で次々と発生し、それぞれほぼ赤城山の方へ向って移動し赤城山で消滅した。エコーの大きさは、図6の右下の表に示したように、大体10 km前後で、寿命は20分から30分代であった。不安定な

May 17, 1976

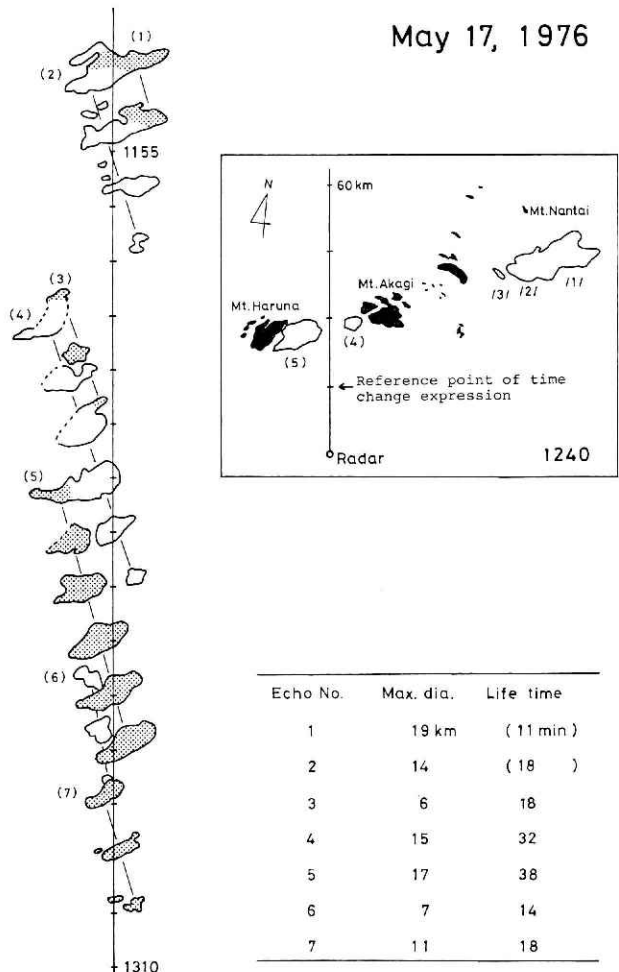


図6 榛名山の対流性エコーの5分毎の時間変化(左図)と12時40分のレーダーエコー分布(右上図、男体山の南のかきの貝殻状あるいは扇形のエコーは足尾山地の対流性エコー)および榛名山の対流性エコーの最大直径と寿命の表(左下)

Fig. 6 5 min interval time change of convective echoes at Mt. Haruna, with a table of their maximum diameter and life time.

大気成層で起る典型的な対流性のエコーである。榛名山塊が対流活動の引金としての役を果たしたと思われるが、個々の対流が組織化して持続することなく、通常の積雲対流の平均的な寿命で終わっている。図6の右上の図は12時40分のエコーパターンである。この時刻では、対流性エコー(5)が発生して10数分後で、おおむね東進し榛名山から数kmの位置にある、エコー(4)が発生後30分ぐらいで赤城山の西麓に達し、消滅しつつある。また日光男体山の南の足尾山地にはやや大きい別の対流性エコーがある。斜線の間の数字は、やはり発生順に付したセルの番号である。次の節でこの対流性エコーについて述べる。

#### 4.3 足尾山地の対流性エコー

図7は当日足尾山地に出現した対流性エコーの履歴である。図の表現は図6の左図と同じく基準点の位置を上方から下方に等間隔にずらせて描いてあり、個々の対流セルは実線で結んである。時刻は榛名山の対流性エコーより遅く、12時25分から15時05分であった。

足尾山地の対流性エコーの特徴は、図7に明らかなように、いくつかの対流セルが一つのストーム系を構成していたことである。すなわち、セル/1/から/6/は一つの牡蠣(かき)の貝殻状あるいは扇形のストーム系のそれぞれ一部分のセルであった。最初セル/1/が12時25分に現われ、次にその西側に接するようにセル/2/が出現した。セル/3/が現われた後、数分で最初に現われた古いセル/1/は東北東進しつつ消滅した。セル/4/が現われた時、このスト-

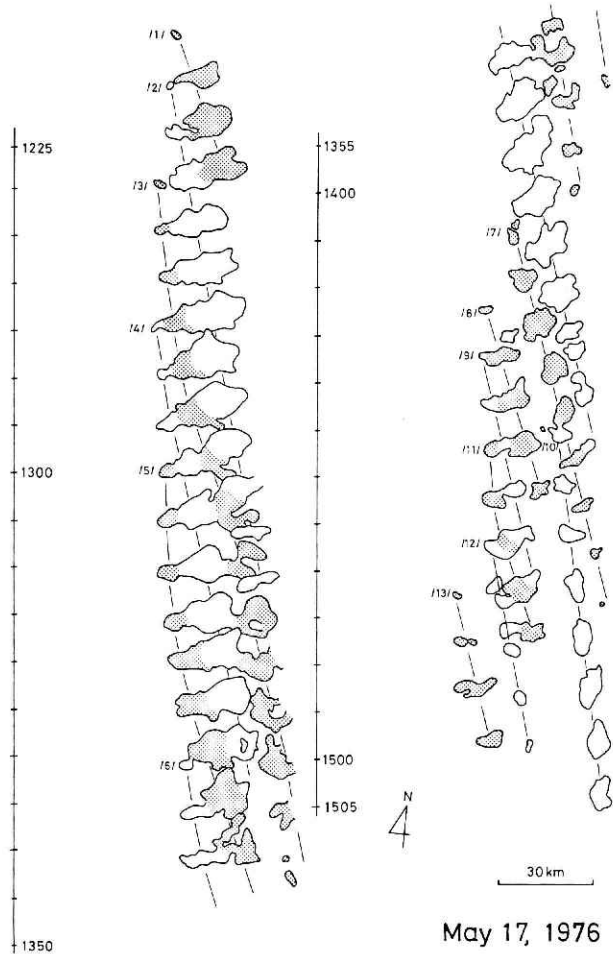


図7 足尾山地の対流性エコー(ストーム系)の5分毎の時間変化

Fig. 7 5 min interval time change of convective echoes over the Ashio Highlands including two shell-shaped storm system (one consisting of individual cells from /1/ to /6/ and the other consisting of cells /8/, /9/, /11/ and /12/).

ム系を構成するセルは西側から /4/と/3/, /2/ の三つで、同じくセル/5/が出現した時は、/5/と/4/, /3/, /2/ の四つであった。このように新しいセルは常に貝殻状をしたストーム系の要の部分あるいは最も西側の部分を構成し、古いセルは東北東へ移動しながら消滅するという過程を繰返した。最後のセル /6/ が消滅したのは、すなわちこのストーム系全体が消滅したのは14時35分で、ストーム系としての寿命は2時間10分に及んだ。

また個々のセルは東に移動しているが、新しいセルが西側に現われるためストーム系としては最後のセル /6/ が出現するまでほとんど移動していない。このストーム系を第1のストーム系とすると、セル/8/と/9/, /11/, /12/で構成する第2のストーム系が14時15分から15時00分まで、すなわち45分間持続した。足尾山地の対流セルは全部で13個であったが、第1および第2のストーム系を構成したセル以外のセル /7/と/10/, /13/ は榛名山の対流性エコーと同じく、それぞれ組織的でない単一の対流性エコーであった。

このことは図8の左図に示したそれぞれのセルの最初のエコーの出現地点の分布でも明らかである。第1のストーム系および第2のストーム系はそれぞれ別個に出現地点が数km以内に集中しているが、セル/7/と/10/と/13/の出現地点はそれぞれいずれにも属していない。

図8の右表に個々の対流セルの大きさと寿命を示した。第1のストーム系は系として2時間10分の寿命を保ったが、構成する個々のセルの寿命は1時間に達していない。また系としての最盛規模は長径で30kmを越したが、個々のセルでは10数kmであった。第2のストーム系は系としても個々のセルとしても、大きさと寿命において小さく、あるいはストーム系と呼称するに値しないかも知れない。

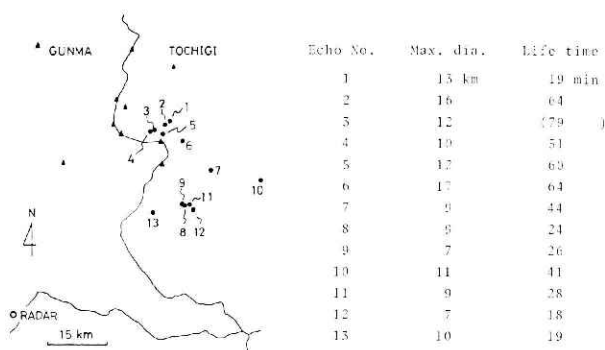


図8 足尾山地の対流性エコー（対流セル）の発現地点の分布（左図）と最大長径および寿命の表（右）

Fig. 8 Distribution of generating points of Ashio convective echoes, with a table of maximum diameter and life time (points of a shell-shaped storm system making a group together).

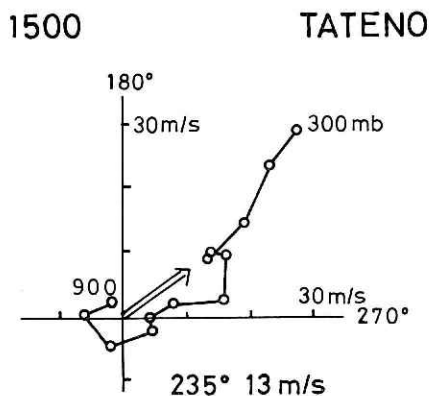


図9 昭和51年5月17日午後3時の館野の高層風 hodograph と平均風ベクトル  
Fig. 9 Upper winds and mean wind at Tateno, 1500 JST, 17 May 1976.



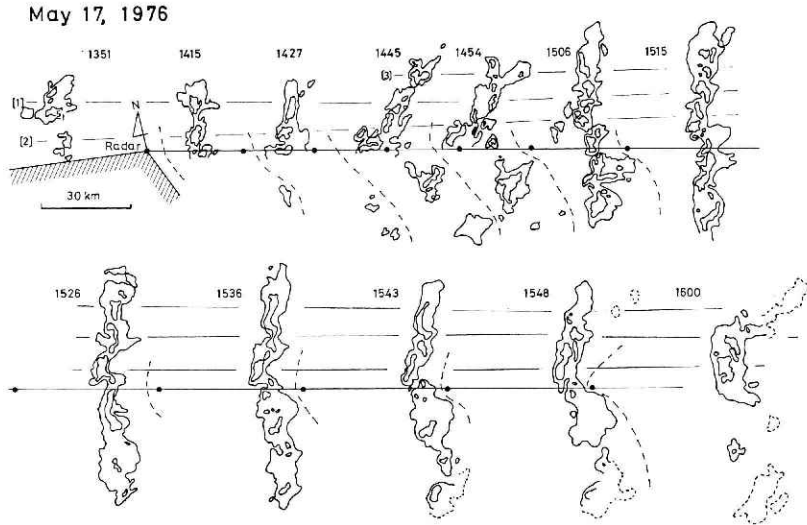
通常の積雲対流の規模と寿命を越える、貝殻状あるいは扇形をした組織的なストーム系は経験的にしばしば足尾山地に現われるが、群馬県北部の山間部にも観測される(小元・八木・清野, 1976)。地形的に現われ易い条件があるかどうかは、この型のストーム系の発生機構と関係する問題として興味を持たれる。図9は館野の15時の高層風観測によるホドグラフである。丸印は900 mb から300 mb までの50 mb ごとの各高度の風である。これらをベクトル平均したものが矢印で対流層の平均風を表わし、13 m/s で235°からの風であった。したがって、第1のストーム系において新しい対流セルが形成された貝殻状あるいは扇形の要の部分はこの平均風に関して風上側に位置し、かつ系を構成した個々の対流セルはおおむね平均風により移流したことになる。ただし、前述のように、系としては風上で新しい対流セルが生れ、風下で減衰し消滅したため見かけ上ほとんど移動していない。

最後に、榛名山および足尾山地での対流性エコーは同一気団内での大気成層の不安定による、いわゆる熱雷に相当する。前章で述べたように、当日は午前9時の館野の高層観測資料では大気は非常に不安定であった。このため午前中にすでに榛名山で対流活動が始まり、午後早くには足尾山地で組織的な雷雨が発生した。このような大気の状態において、寒冷前線が関東地方を通過し、より活発な対流始動が起った。降ひょうを伴った熱的界雷である。次節でこの hailstorm について述べる。

#### 4.4 降ひょうを伴った線状雷雨エコー

13時30分頃、群馬県と長野県の県境の山岳地帯にいくつかの対流性エコーが発生した。これらのエコーは東に移動し、新しく発生した対流性エコーと共にほぼ南北に列をなした線状エコーを形成した。幅十数 km、長さ八十数 km の規模であった。図10にそのレーダーで見た構造の時間変化を示す。最初期および減衰期は含んでいない。図の表現法は基本的には榛名山エコーの図6と足尾山地エコーの図7と同じであるが、黒丸印で表わしたレーダーの位置をほぼ東西(104°の方向)にづらせて描いてある。この方向は線状に列をなしたエコーの走向と直角をなす。それぞれのエコー構造図に付した数字は時刻である。上段の最も左の13時51分の図に、代表して、レーダーの死角、スケールおよび北の方向を示した。エコー構造はレーダー反射強度で23 dBz (等エコーレベル1)と42 dBz (同5)の等値線のみで図示した。15時43分以降のエコー構造において点線で示した輪郭は、反射強度の測定がレーダーの性能上60 km 以内に制限されるため、距離補正のない通常エコーで補足したものである。

線状エコーを構成した対流セルは、詳細な解析によると、10個に及んだ。このうち、ほとんどの対流セルは60分を越える寿命を保ち、中には2時間以上のものもあった。系としては、17時00分過ぎに栃木県に至って消滅するまで約3時間半の長寿を保持した。比較的長く持続したのは線状をなした系の北の部分に在った対流セルで、またこれらは南のものより激しい対流活動を行ない、降ひょうを作った。図10で細い実線で結び、発生順に番号を付した対流セル〔1〕と〔2〕と〔3〕である。セル〔1〕とセル〔2〕は13時30分に発生し、系の消



**図10** 降ひょうを伴った線状雷雨エコーの時間変化  
**Fig.10** Configurations of band-like hailstorm. Attenuation levels corresponding to contours are 23 dBz and 42 dBz. Storm cell [1] bombed Gunma town hail area around 1425 JST, storm cell [3] did Niisato village hail area around 1445 and storm cell [2] did Ohta city hail area around 1515, respectively.

滅まで生残った。セル [3] は14時25分に初期エコーが現われ、16時過ぎまで持続した。最も短命であったのは、14時23分頃発生し15時03分に消滅した、系の最南部にあった対流セルである。

線状エコーの移動方向を系の走向と直角にとると、 $283^\circ$ で、移動速度は36 km/h(10 m/s)であった。この移動方向は図9に示した対流層の平均風より南に偏り、速度は平均風より遅い。

この降ひょうを伴った線状雷雨エコーが通過した後、その後方にあたる群馬県内には対流活動はもはや認められなかった。

### 5. 降ひょう記録計網により観測された降ひょう域

国立防災科学技術センターの降ひょう記録計網で観測された当日の降ひょう域は、群馬県群馬町、新里村および太田市である。図11で丸印をほどこした観測点において降ひょうの痕跡が認められた。痕跡からひょうの大きさは約1 cm から2 cmと推定された。降ひょう時刻は群馬町において14時25分頃、新里村において14時45分頃、太田市では15時15分頃と報告された。降ひょう継続時間は数分から5分前後の報告が多かった。粒径に関する報告の表現は小豆大、大豆大、そら豆大あるいは梅干大が多く、いずれの観測点も強い雨と一諸に降ったとある。図で明らかなように、3個所の降ひょう域のうち、新里村と太田市は降ひょう記録

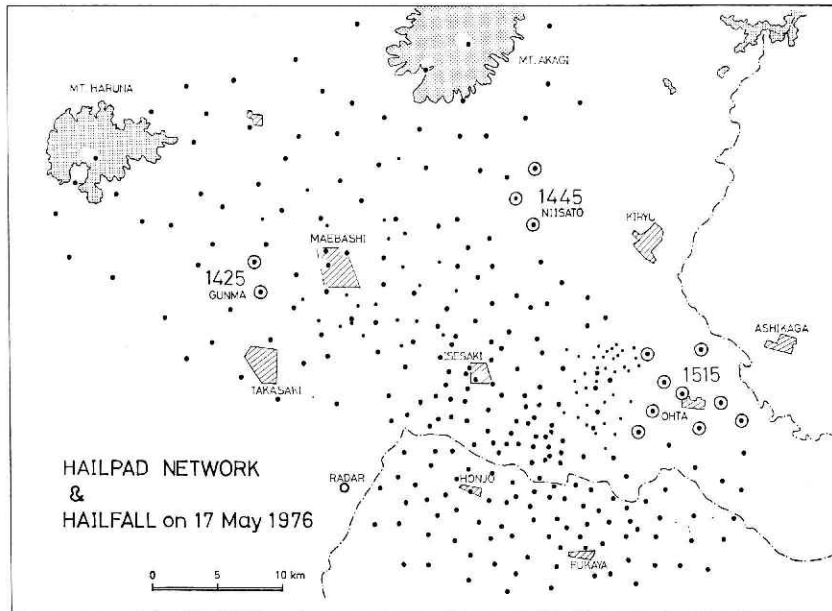


図11 降ひょう記録計網と昭和51年5月17日の降ひょう域（丸で囲った観測点で降ひょうを検出）

Fig.11 Observation points which detected hail (encircled).

計網の東端にかかり、降ひょう域の東側の境界は決められないが、前述のひょうの大きさおよび継続時間の情報から察してそれほど東へ降ひょう域が伸長していたとは思われない。したがって次章のレーダーエコーとの対比においては、図11の降ひょうを記録した観測点を囲む領域を降ひょう域として取扱った。

## 6. レーダーエコー構造と降ひょう域

### 6.1 群馬町の降ひょう

図12は群馬町に降ひょうのあった時刻のレーダーエコー構造を示す。左図がPPIエコーで、図中レーダーから英字bの方向の垂直断面が右図である。いずれにも降ひょう記録計網による地上の降ひょう域を点彩で示した。エコーの時刻はそれぞれ図の上部に示した。垂直断面図の等値線に付した等エコーレベル1, 3, 5, 7, 8はレーダー反射強度で、それぞれ23, 33, 42, 52, 57dBzに相当する。左図のPPIエコーの等値線には等エコーレベルの数字は付していないが、レベルの階級は右図と同じである。群馬町の降ひょうは14時25分前後と報告されたが、この時刻にちょうど線状雷雨エコーの対流セル[1]が降ひょう域と重なる位置にある。この対流セルの中心の最大反射強度は57dBzである。レーダー観測の実施中はレーダー情報だけでは現在ひょうが地上で降っているかどうかは分らない。しかし過去の降ひょう事例の解析の結果、等エコーレベルで7(42 dBz)以上、時には5(33 dBz)でも降ひょう

うの可能性があることが経験的にわかっているので、降ひょうのあることが不安定な大気成層から予想される日には、反射強度の大きい対流性エコーの最大反射強度の部分を含む垂直断面を測定するようにしてきた。そうすることにより、結果的に数少ない降ひょう時のレーダーエコー構造を観測する機会に恵まれる。本論文の事例はこのような観測の成果である。図12の

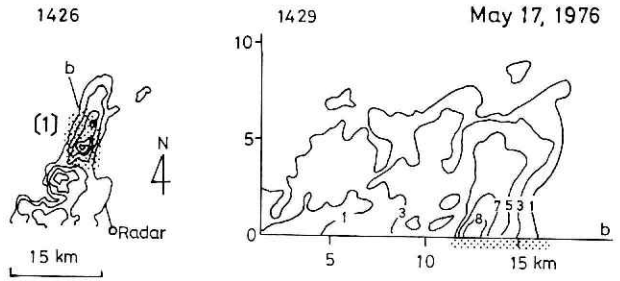


図12 群馬町の降ひょう時のレーダーエコー構造  
 Fig.12 Radar-echo structure and hail area on the ground at Gunma town on 17 May 1976. Iso-level 7 and 8 correspond to 52 dBz and 57 dBz, respectively. A specified storm cell passed over hail area on the ground as seen in PPI pattern (left) and a remarkable high radar reflectivity shaft existed over the area as seen in vertical section (right).

垂直構造では、エコー頂高度が約 9 km に達し、地上の降ひょう域の上空には顕著な hail shaft が存在した。地上付近に最大反射強度 57 dBz の領域が見られた。この垂直構造は降ひょうを伴った対流セル [1] の進行方向とほぼ直角の断面である。

## 6.2 新里村の降ひょう

群馬町に降ひょうがあつて約20分後、その降ひょう域の東北東約 20km に別の降ひょうがあつたことが降ひょう記録計網より検出された。図13に降ひょう時刻のレーダーエコー構造を示す。左図でエコーの西側（エコーの後方）の点彩領域は群馬町の降ひょう域、エコーの最北端の対流セルと重複した点彩領域が新里村の降ひょう域である。図10に示した線状雷雨エコーの時間変化で明らかなように、この対流セル [3] は群馬町の降ひょう時刻にはまだレーダーに現われていない。初期エコーが群馬町に降ひょうをもたらした対流セル [1] の北側に接して現われたのは、新里村の降ひょう時刻のわずか約15分前にすぎない。その初期エコーが急速に発達して新里村に降ひょうをもたらした。English (1966, 1973) はかなりの大

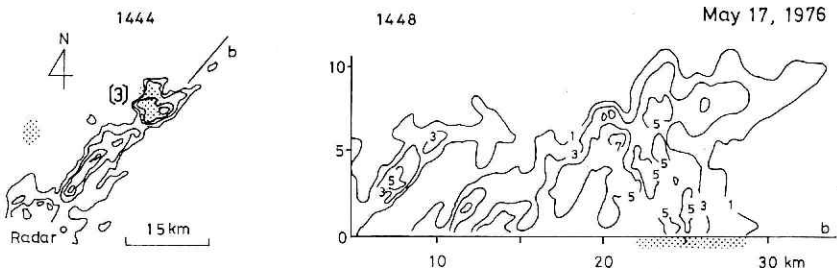


図13 新里村の降ひょう時のレーダーエコー構造  
 Fig.13 Same as Fig. 12, but for Niisato village hail event.

きさのひょうがおよそ10から20分の一回の上昇下降運動により成長しうることを数値実験で示した。したがってレーダーに最初の対流セルが出現してから地上で最初の降ひょうが報告されるまでの時間のずれは15分ないし25分より短いことが時には有りうるとしている。新里村の降ひょうはこのことを裏づけるものであろう。

対流セル [3] の降ひょう時刻の最大反射強度は 52 dBz であることが左図の PPI エコー構造からわかる。この後この対流セルは反射強度はやや弱く (33~42 dBz) になったが長寿を保った。PPI 図の英字 b の方向の垂直断面が右図である。エコー頂高度は 11 km 強に及んでいた。地上の降ひょう域の上空にやや複雑ではあるがレーダー反射強度の高い領域が連なっていた。高度5から6 km に最大反射強度 52 dBz が存在した。

### 6.3 太田市の降ひょう

さらに30分後、太田市に第3の降ひょうがあった。新里村の降ひょう域の南東約20 km である。図14にこの降ひょう時刻のレーダーエコー構造を示す。エコー後方の2つの点彩領域が西から群馬町と新里村の降ひょう域である。第3の降ひょう域と重複した対流セルは、図10で示したセル [2] である。線状エコーの北から3番目の対流セルになる。PPI エコー構造では 57 dBz の最大反射強度の領域が測定された。この領域を含む英字 b の方向の断面が右図である。この方向はおおむね進行方向に当る。エコー頂高度は10 km に達し、進行方向に傾斜した非常に顕著な hail shaft が地上の降ひょう域と一致して観測された。52 dBz の領域が地上から5 km の高度に分布し、57 dBz の最大反射強度の領域が2から3 km の高度に測定された。このような hailstorm の進行方向に傾いたレーダーエコー構造は、Sulakvelidze *et al.* (1967) や Browning *et al.* (1976) の報告による hailstorm と酷似している。

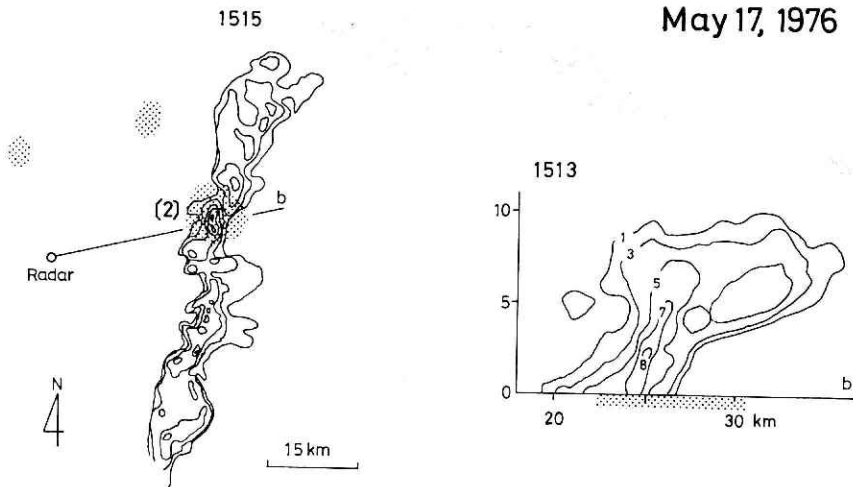


図14 太田市の降ひょう時のレーダーエコー構造  
 Fig. 14 Same as Fig. 12, but for Ohta city hail event. Vertical section in this case was almost parallel to hailstorm movement and hail shaft leaned ahead.

## 7. 考 察

わが国における3大農業気象災害は風水害、冷害、および干害である。小沢(1974)によれば、昭和40年から昭和45年の6年間の年平均被害額はそれぞれ464億円、320億円、および198億円である。これらに対して、第4位のひょう害は30億円で、全農業気象災害被害額に対する割合は約3%である。しかしひょう害の顕著な特徴は年々の変動が大きいことで、時に年平均の5倍から10倍の被害をもたらすこともある。たとえば小元・八木・清野(1976)によれば、昭和50年5月下旬から6月中旬にかけてひょう害が発生した日数は14日あり、北は青森県から南は高知・宮崎両県まで2府30県で合わせて250億円に上る被害が出た。このような激しい降ひょうがたびたび発生したのは、この時期としては例年になく頻繁に日本列島上空に寒気が南下したためである。中でも最大のひょう害は6月9日のものであり、東北から山陰まで1府11県にひょうが降り、被害総額は126億円に達した。この額は小沢(1974)による年平均額を1日で優に凌いだことになる。

このように深刻な農業気象災害であるひょう害に対する防災対策として人為的に降ひょうを抑制する実験あるいは業務的活動が世界的にみて約20カ国で実施されている(小沢・小元・八木・米谷, 1978; 小元, 1979)。なかでも科学的な野外実験研究に対して意欲的な米国のナショナルプロジェクトはその実験規模と研究成果において最大のものであろう。当然のことながら、このナショナルプロジェクトは降ひょう抑制実験そのものだけでなく、hailstormの構造やひょうの形成・成長に関する基礎的な観測研究が大きなウェイトを占めてきた。第1章で引用したBrowning and Foote(1976)とBrowning *et al.*(1976)のhailstormの構造に関する知見もこのプロジェクトの成果である。

わが国における降ひょうを伴う雷雨あるいはhailstormに関する観測研究の歴史は浅く、また野外観測の規模が非常に弱小であることを考えると、日本のひょう害とそのひょう害をもたらす大気現象の解明およびひょう害に対する防災対策手法の開発において、たとえば米国のナショナルプロジェクトの有用な成果・知見は十分に導入・活用されなければならないであろう。そしてその成果の適用において彼我のhailstormの比較研究が重要な意義を持つであろう。特に大陸東岸にあって列島をなし、複雑な地形を有するわが国でのhailstormが規模・構造・行動様式においてどのような実態であるかを明らかにすることが重要であり、比較研究の基礎資料となるものである。国立防災科学技術センターの実施してきたレーダー及び降ひょう記録計網による一連の観測研究はこの意味でも重要な役割を担ってきたと思われる。

本論文で観測・解析した昭和51年5月17日の降ひょう時のレーダーエコー構造の三つの事例は、昭和50年6月9日の事例と共に、わが国のhailstormに関して初めての観測資料である。図15に6月9日のhailstormのレーダーエコー構造図を示す。このhailstormは小元・

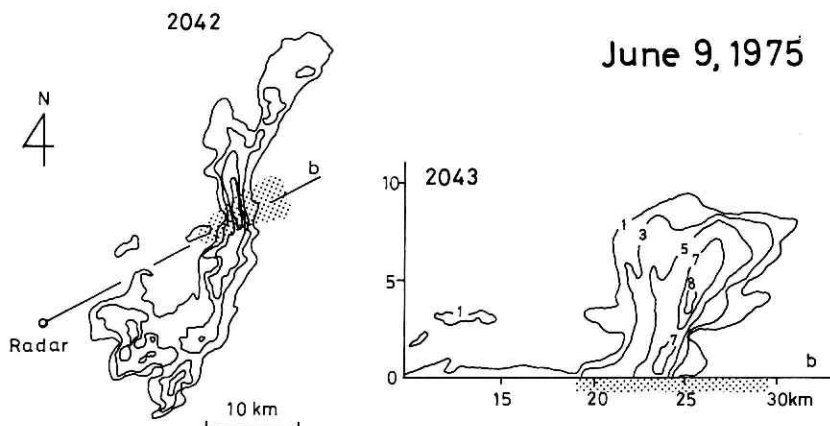


図15 昭和50年6月9日の hailstorm の降ひょう時のレーダーエコー構造  
 Fig.15 Radar-echo structure and hail area on the ground of a hailstorm of 9 June 1975. An almost similar vertical structure was noticed as hailstorm of 17 May 1976 on Ohta city hail event.

八木・清野 (1976) の解析で III<sub>r</sub> と呼称したものである。左図の PPI エコー構造ではレーダー反射強度 52 dBz の領域が降ひょう記録計網で検出された降ひょう域と重畳していた。英字 b の方位の垂直断面が右図である。この方位はほぼ hailstorm の進行方向を指す。顕著な hail shaft が降ひょう域の上空に存在し、進行方向に傾斜しているのがわかる。また最大反射強度の領域は約 4 km の高度に存在し、57 dBz に達した。エコー頂は高度 10 km を越えていた。この垂直断面構造は本論文で解析した太田市の降ひょう時の垂直断面構造(図14)と非常に良く似ている。太田市の場合もほぼ hailstorm の進向方向の断面である。これらはまた、やはり進行方向の断面をとった Sulakvelidze *et al.* (1967) や Browning *et al.* (1976) の hailstorm 概念模型図に酷似していた。前者はソ連邦、後者は米国の hailstorm である。このような構造上の類似性は、たとえば米国大平原の hailstorm で得られた有用な知見を比較的地形の複雑なわが国の hailstorm の監視・予測あるいは将来本格的になされるかも知れない降ひょう抑制実験に際し適用することの妥当性を示唆していると思われる。

## 8. ま と め

昭和51年5月17日の北関東の対流活動を国立防災科学技術センターが群馬県藤岡市に設置したレーダーの観測資料および群馬県と埼玉県に展開した降ひょう記録計網の資料をもとに事例解析した。対流活動には顕著な日変化が認められた。午前9時の館野の高層気象観測資料では大気はすでに不安定でこの日関東地方に降ひょうのあることが予想された。正午前榛名山東麓にいくつかの対流性エコーが発生した。大体10 km 前後の長径で、通常の積雲対流の寿命である数十分間持続した。これらの対流性エコーよりやや遅く、足尾山地に組織化さ

れた貝殻状あるいは扇形の対流性エコーが発生した。この対流性エコーは扇の要あるいは風上側に新しいセルが次々に発生し風下に移動するが全体としてはほとんど移動しない一つの系として持続した。系としての長径は最盛期で約30 kmで、寿命は2時間を越えた。足尾山地にはこの他、通常の積雲対流の寿命を持つ単一の対流性エコーも発生し、対流活動は15時過ぎまでレーダーで観測された。榛名山および足尾山地の対流性エコーは同一気団内での大気成層の不安定による熱雷に相当すると考えられる。一方、13時30分頃、群馬県西部山岳地帯で発生したいくつかの強い対流性エコーは、東進し平野部に至るにしたがって、おおむね南北に並んだ約80 kmの長さに及ぶ顕著な線状エコーに編成された。これは寒冷前線の通過による熱的界雷であると考えられる。この線状エコーは降ひょうを伴い、栃木県に至り17時過ぎまで持続した。その後線状エコーの後方には対流活動はなかった。

降ひょう記録計網で検出された降ひょう域は群馬県郡馬町、新里村および太田市である。ひょうの大きさはアルミ箔に残された凹みから約1~2 cmと推定された。降ひょう時刻はそれぞれ、14時25分頃、14時45分頃および15時15分頃と報告された。降ひょう持続時間は数分から5分前後の報告が多かった。

降ひょうを伴った線状雷雨 (hailstorm) の詳細なレーダーエコー解析の結果、次のような特徴が明らかになった。

- (1) 線状エコーを構成した対流セルは最大10個に及んだ。ほとんどの対流セルは60分以上の寿命を保ち、2時間を越えるものもあった。系としては約3時間半持続した。
- (2) 比較的長く持続したのは北部に在った対流セルで南のものより激しい対流活動を行ない、降ひょうを伴った。
- (3) 地上の降ひょう域を特定の対流セルが降ひょう時刻に通過し、その対流セルの最大レーダー反射強度は52ないし57 dBzであった。
- (4) 降ひょう時刻に降ひょう域上空の垂直断面構造が得られ、反射強度の大きい顕著な軸 (hail shaft) が存在することがわかった。最大強度は52ないし57 dBzであった。
- (5) 特に hailstorm の進行方向とほぼ平行な断面構造は米国中西部の hailstorm の垂直構造と酷似していた。
- (6) この類似性は、わが国より歴史の深いまた規模の大きい観測研究を実施してきた米国やカナダの研究成果を、比較的地形の複雑なわが国の hailstorm の監視・予測等防災対策手法の開発研究に適用し得ることを示唆していると思われる。

## 謝 辞

レーダー観測にあたり施設と便宜の提供を受けた群馬県藤岡農業改良普及所ならびに藤岡市水道部に記して謝意を表わします。降ひょう記録計網による観測は群馬県農業共済組合連合会および埼玉県農業共済組合連合会に委託された。



この研究は特別研究「積雲対流がもたらす災害の発生機構に関する研究」および経常研究「中小規模擾乱による雷雨性豪雨災害の研究」の一環として行なったものである。

#### 参 考 文 献

- 1) Atlas, D. (1963): Radar analysis of severe storms. *Meteor. Mono.*, **5**, 177-220.
- 2) Browning, K. A., *et al.* (1976): Structure of an evolving hailstorm, Part V: Synthesis and implications for hail growth and hail suppression. *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 603-610.
- 3) Browning, K. A. and G. B. Foote (1976): Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **102**, 499-533.
- 4) English, M. (1966): A new program for the calculation of hail growth. Sci. Rep. MW-47. Stormy Weather Group. McGill Univ., 29-50.
- 5) English, M. (1973): The growth of large hail, Studies derived from Alberta and Montreal hailstorms. Sci. Rep. MW-78. Stormy Weather Group. McGill Univ., 1-70.
- 6) Hitschfeld, W. (Ed.) (1971): Hail research at McGill. 1956-1971. Sci. Rep. MW-68. Stormy Weather Group. McGill Univ. 1-68.
- 7) Newton, C. W. (1967): Severe convective storms. *Advances Geoph.*, **12**, 257-308.
- 8) Omoto, Y. (1967): Characteristics of hailstorms in Japan. *J. Agric. Meteor. Tokyo*, **23**, 115-121.
- 9) 小元敬男 (1979): 降ひょう抑制とひょう研究の現状. 天気, **26**, 2-18.
- 10) 小元敬男・八木鶴平・清野 裕 (1976): 昭和50年6月9日の群馬県の降ひょう (序報). 国立防災科学技術センター研究速報, 第22号, 1-31.
- 11) 小元敬男・八木鶴平・清野 裕・米谷恒春 (1978): 群馬県における降ひょう観測 (1971~1975). 農業気象, **34**, 17-21.
- 12) 小元敬男・米谷恒春 (1976): 関東地方の雷雨 (その1) 一雷雨日の大気鉛直構造の数値解析一. 国立防災科学技術センター研究報告, 第14号, 65-78.
- 13) 小沢行雄 (1974): 日本における農業気象災害. 新編農業気象ハンドブック, 養賢堂, 503-510.
- 14) 小沢行雄・小元敬男・八木鶴平・米谷恒春 (1978): 気象調節に関する研究—総合報告一. 防災科学技術資料, 第34号, 1-60.
- 15) 清野 裕 (1978): 簡単な降ひょう記録計によるひょう粒の大きさの推定. 国立防災科学技術センター研究報告, 第20号, 31-38.
- 16) Sulakvelidze, G. K., N. Sh. Bibilashvili and V. F. Lapcheva (1967): Formation of precipitation and modification of hail processes. IPST, 124-134.
- 17) 八木鶴平 (1979): 雷雨の等エコー構造と移動方向の関係について, II. 国立防災科学技術センター研究報告, 第22号, 39-47.
- 18) 八木鶴平・清野 裕・小元敬男 (1976a): 北関東に豪雨及びひょう害をもたらした昭和47年8月2日の雷雨群のレーダーエコー解析. 国立防災科学技術センター研究報告, 第14号, 37-52.
- 19) 八木鶴平・清野 裕・小元敬男 (1976b): 雷雨の等エコー構造と移動方向の関係について. 国立防災科学技術センター研究報告, 第15号, 1-8.

(1980年6月26日原稿受理)