

関東地方で発生した降ひょう・ダウンバーストを伴った スーパーセルの事例解析

森 真理子*・高 谷 美 正**

要旨

1996年から2001年にかけて、関東地方で降ひょうやダウンバーストによる被害が発生した。1996年7月15日、2000年5月24日および2001年5月11日の3事例について、空港気象ドップラーレーダーや気象レーダー、高層気象観測、地上の気象データおよび被害調査等から解析を行った結果、以下のことがわかった。

(1) いずれの事例も単一セル構造で、システムの中層にメソサイクロンと BWER (bounded weak-echo region)、その上層にヴォールトを有しており、孤立したスーパーセルの特徴を備えていた。各事例の時間・空間スケールや擾乱の激しさの度合いは、大気の不安定度、風の鉛直シア、大気下層の収束場と密接な関連があった。

(2) これらのシステムには、共通するライフサイクルがあった。始めに暖湿なS風と冷たく乾いたN風の収束領域で、南西端のエコーが発達してひょう域が生じ、それが一旦急減した後、システムは次第に発達してひょうコア（エコー強度60 dBZ以上の部分）やWERが出現した。やがてシステムはNE風の領域に入り、BWERが形成された（形成期）。その後システムは鉛直方向に急成長して発達期を迎える。その後に顕著なダウンバーストが発生した。続いて上空でひょう域が拡がり成熟期となって、降ひょう被害が継続し、やがて衰退期に入りダウンバーストが発生した。この変化とともに、約18~24分周期でひょうコアの降下や上昇の繰り返しがあった。

1.はじめに

関東地方では、古くから農作物に被害をもたらす降ひょうについて記録があり、また、小元（1984）や吉野・宮内（1987）によって、農業被害について詳細な調査がなされている。

気象レーダーが出現してから時間・空間的にきめ細かいデータが得られるようになり、1960年代から降ひょうをもたらすシステムの立体構造が次第に明らかになってきた（Burgess and Lemon, 1990）。Chisholm and Renic (1972) や Browning and Foote (1976) によってスーパーセルの立体構造が報告された。進行方向前方の中層にあるエコー強度が弱いWER (weak-echo region) では上昇流が強く、その上にかぶさるようにヴォールト（丸天井）が存在し、その前

方に垂れ下がったカーテンのような形状で、氷粒子が分布していることが特徴である。WERを取り巻くエコー領域がほとんど閉じたものをBWER (bounded WER) という。Lemon and Doswell (1979) によって上昇流域UD (updraft) を間に2つの下降流域、すなわち、FFD (forward-flank downdraft) とRFD (rear-flank downdraft) があることが示された。

また、Lemon and Doswell (1979) はスーパーセルのライフサイクルとして3つの過程をあげた。最初、マルチセルから始まり、後方右横側(right rear flank) が単一セルとして発達し、進行方向前方へ傾斜（オーバーハング）してWERが生じる。このオーバーハングしたエコーは、強い上昇流が継続して存在し、上昇流の頂点で強い発散があるために生じている。WERは次第に広がり、システムは鉛直シアに対して右寄りに進む。第二段階は、BWERやメソサイクロンが形成され上昇流が強まり、最も大きな降ひょうや漏斗雲は、この頃から第三段階の初めに発生する。第三段階は、衰退期となってBWERは消滅し、上昇流は弱まって

* 高層気象台。

** 気象研究所気象衛星・観測システム研究部。

—2003年3月17日受領—

—2004年6月24日受理—

© 2004 日本気象学会

第1表 環境場一覧。鉛直シアは事例①、②は300～1000 hPa間、事例③は500～1000 hPa間。SSI、CAPEおよび鉛直シアは、館野の高層気象観測データを用いた。

事例	上空の寒気	地上天気図	積乱雲の高度(km)	SSI	CAPE(J/kg)		鉛直シア		局地前線	
					09JST obs.	estimate	(m/s/km)	風向	走向	風・気温の差
①2000.5.24	寒冷渦と対流雲列	寒冷低気圧	15	0.1	882	2466	4.2	WNW(300°)	WNW	明瞭
②1996.7.15	東西流と弱いサーマルトラフ	太平洋高気圧縁辺	16	-0.5	2051	2921	2.8	W (275°)	NW	明瞭
③2001.5.11	強風帯とサーマルトラフ	低圧部	7	10.5	68	520	7.8	W (260°)	なし	明瞭でない

下降流が強まるとともに広がり、最も強い竜巻やダウンバーストが発生すると報告している。

小元(1984)は、1966年6月7日と1976年7月19日に関東平野で長さ100 kmを越える降ひょう帯があり、スーパーセル型ストームであったと報告しており、特に1966年6月7日の事例では幅10数kmで長さ約75 kmのベルト状の降ひょうの被害発生域の中に、幅約数kmの特に被害の強い領域が3本存在したことを示している(小元, 1970)。また、小元・清野(1978)は、積乱雲群の中で独立して移動した雲域について、エコーの移動速度と降ひょう分布から、降ひょうが約13分周期で変化したと報告している。Seko and Takeda(1987)は、豪雨を生じた積乱雲のXバンドレーダーのRHI観測から、準定常的な構造の中で約20分の周期性があり、スーパーセルの特徴があったと報告している。

本論文では、近年関東平野で発生した降ひょうやダウンバーストを伴うシステム3例-1996年7月15日(事例②)、2000年5月24日(事例①)、2001年5月11日(事例③)を扱う。事例の番号はシステムの大きさ順に付けた。事例②について河原・森(1997)、楠(1999)、中村・森(1999)、事例①について奥田・伊藤(2000)、中鉢ほか(2000)、高谷ほか(2002)、石部ほか(2003)が事例毎の報告を行っている。また、3例について比較検討したTakaya *et al.* (2003)による報告がある。

本論文では、これらの3例について環境場の特徴、スーパーセルに至る発達過程、システムの3次元構造とその時間推移や、降ひょうやダウンバーストをもたらすしくみ等について詳細な解析を行い、これらに共通する特徴について、アメリカ等で多数の事例解析を基に確立されているひょうを伴うシステムに関する知見との比較を行うと共に、相違点をもたらした原因についても考察する。なお、ダウンバーストの定義として、Fujita(1981, 1985)より、地上風の時空変換法に

よる風の発散のスケールが、4 kmを超えるものをマクロバースト、4 km以下をマイクロバーストとした。また、Wilson *et al.* (1984)により、ドップラーレーダーの地上付近の視線速度を用いてマイクロバーストを定義した。

以下、ダウンバーストをDB、ドップラーレーダーをDR、成田航空地方気象台と東京航空地方気象台の空港気象ドップラーレーダーを、成田DR、羽田DRと略記する。

2. 環境場

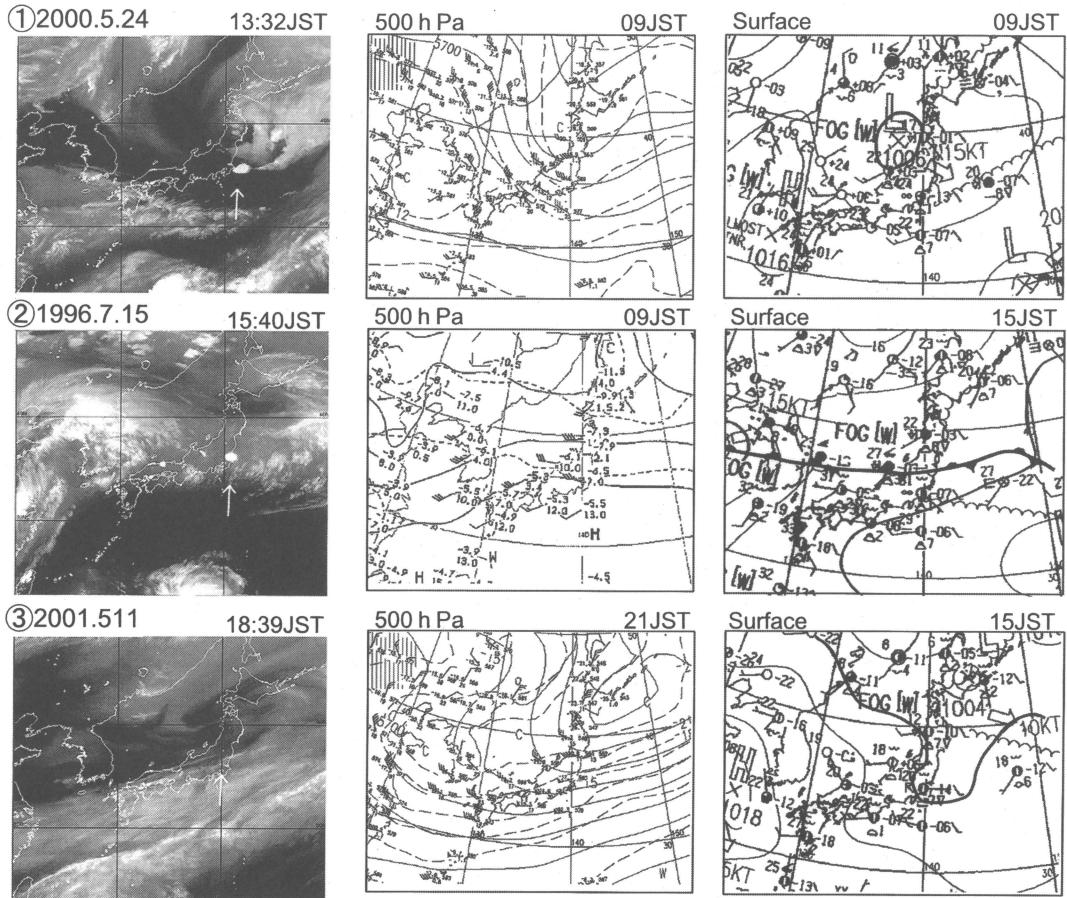
ここでは、総観スケールからメソ α スケールの環境場の解析、大気の鉛直構造、地上のメソ解析を行う。環境場一覧を第1表に示す。SSI、CAPEおよび鉛直シアは、館野(高層気象台)の高層気象観測データを用いた。

2.1 総観スケール

3例とも上空に寒気が入り、日照があり地上気温が高く大気が不安定な状態で発生した。第1図に総観スケールにおける衛星画像と天気図を示す。

第1図中央列に500 hPa高層天気図を示す。事例①では、日本海にある寒冷渦から深いサーマルトラフが伸び、関東付近はNW風の場であった。事例②では、9時に能登半島沖にあった弱いサーマルトラフが明瞭化して、21時に本州東岸に達していた(水戸地方気象台防災業務課, 1996)。関東付近はW風の場であった。事例③では、日本海から黄海にかけて、サーマルトラフが東西に伸び、関東付近にはWSW風の強風帯がかかっていた。

第1図右列に地上天気図を示す。事例①では、寒冷低気圧が日本海中部から三陸沖へと通過した。事例②では、北陸から東北南部にかけて梅雨前線が停滞し、関東地方は太平洋高気圧の縁辺に位置し、暖気が入っ



第1図 上から順に事例①～③。左図は衛星水蒸気画像、中図は500 hPa高層天気図、右図は地上天気図。図の右上に時刻を示す。左図中の「↑」は解析対象となっているシステムに伴う上・中層雲の拡がりを示す。

ていた。この日、関東地方は梅雨明けをした。事例③では、関東地方を気圧の谷が通過した。

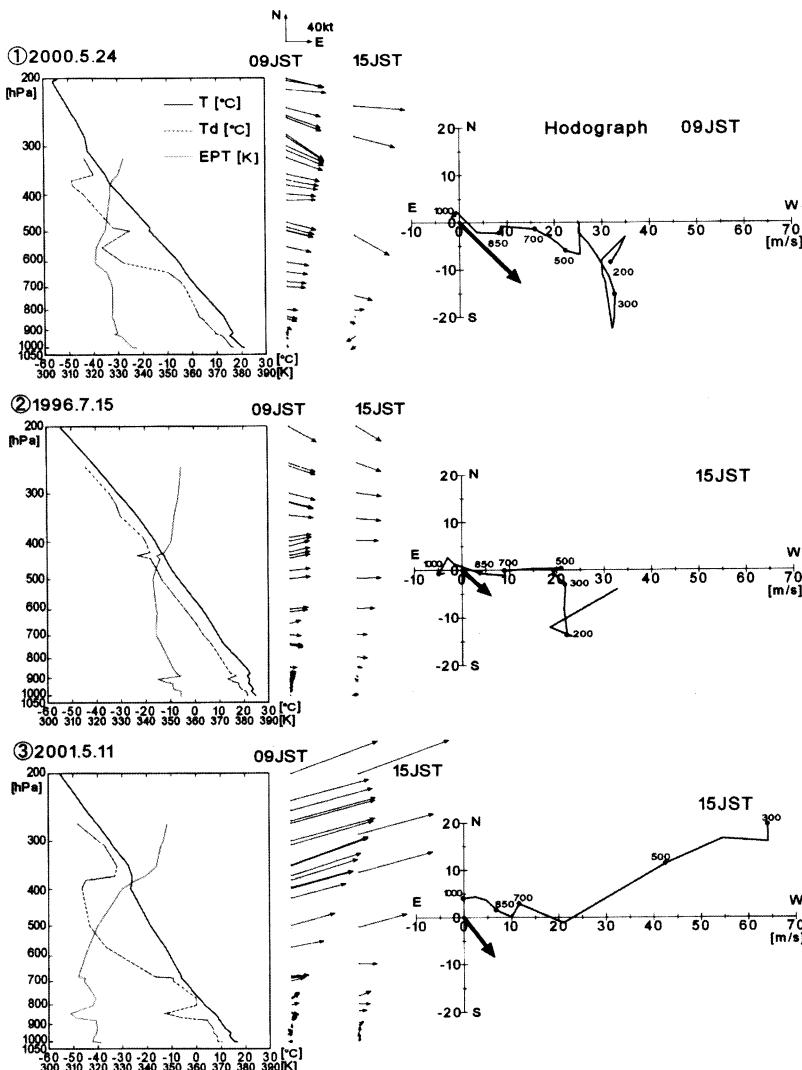
第1図左列に衛星水蒸気画像を示す。事例①では、24日03時には日本海中部から北陸・若狭湾付近に長さ約200 km の列状に伸びる対流雲域が3本あり、09時には東北・北陸地方に進み、15時には関東地方の東海上に南東進している。また、この雲域の後方には暗域が拡がり、乾燥した空気塊が入り込んでいる。この内大きな被害を及ぼした対流雲域は2本目で、高層気象台では11時頃と12時16分頃、気圧が1 hPaと2 hPaの上昇を示している(観測第一課、2000)。13時32分の衛星水蒸気画像では後方にもうひとつ対流雲域がある。事例②では、システムを表す明瞭な雲域の背後から、茨城県南部付近に弱いながら乾燥域が入っている。事例③では、茨城県南部付近に小さいが明瞭な雲域とその後方に乾燥域の流入を示す暗域がある。

2.2 状態曲線と大気の不安定度

館野の状態曲線とホドグラフを第2図に、SSI、CAPE及び鉛直シアを第1表に示す。積乱雲の高度は事例①、②では15~16 kmであったが事例③では7 kmであった。このため、鉛直シアは事例①、②では300~1000 hPa間(高度差約9~10 km)、事例③では500~1000 hPa間(高度差約5.6 km)とした。

事例①の9時、事例②の15時では900 hPa付近(高度約1 km)までSE風が入り、事例①では500 hPaより上空ではNW風70~75 kt、事例②ではW風40 ktで第1表のように鉛直シアは強い(上空のW風が弱くなる夏場としては鉛直シアが強い)。事例③の15時では下層は900 hPaまでS~SW風、その上空ではWSW風、500 hPaより上空では85~130 ktの強風帶があり、鉛直シアは3事例中最も強い。

大気の鉛直構造は、事例①では600 hPaまで対流不



第2図 状態曲線(エマグラム)とホドグラフ。館野の高層気象観測データを用いた。左図は事例①～③の09時のエマグラム(細い実線は気温、点線は露点、太いグレーの線は相当温位)と09時と15時の風、右図はホドグラフ(事例①は09時、事例②、③は15時、太い矢印はシステムの移動速度)。

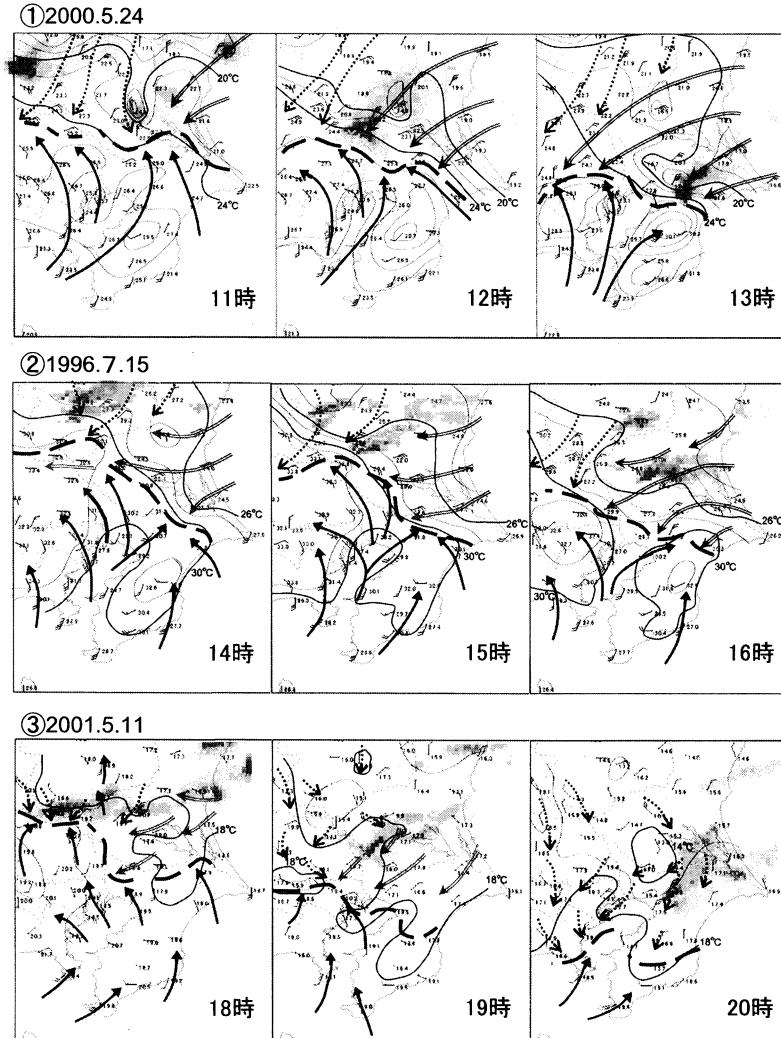
安定であり、その上空には300 hPaまで乾いた寒気が入っている。事例②では下層で相当温位352 Kと非常に高温多湿で、900 hPa付近に逆転層があるが、その上は500 hPaまで不安定となっている。事例③では下層で相当温位310 K未満と他の事例と比較して高くはなく、600～400 hPaにかけて非常に乾いた冷たい空気塊があり、安定層となっている。他の事例と比較して積乱雲の高度が低かったのは、この安定層に抑えられたためと考えられる。

第1表のように、当朝9時のデータから事例①、②ではCAPEはそれぞれおよそ900 J/kgと、2,000 J/kgであった。またSSIも0に近く不安定であった。事例③ではCAPEは0に近くSSIも不安定を示していない。しかしながら、現象発生時には東京湾からの暖かく湿ったS風の流入が、システムの発達に影響を及ぼしていると考えられる(第3図参照)。東京、千葉、館野の地上気象データから、それぞれの現象発生時刻に近い時刻における、風上側の相当温位を求めるとき、9時の館野の地上の相当温位に対して、事例①～③ではそれぞれ10 K、6 K、11 K高かった。これらの値を地上データとしてCAPEの計算を行うとき、事例①～③では2,466 J/kg、2,921 J/kg、520 J/kgとなり、現象発生時の不安定度は9時の観測よりも、かなり高かったと考えられる。

2.3 アメダスによる局地解析(メソβスケール)

アメダスや気象官署のデータから地上の風系や局地前線の解析を行った(第

3図)。孤立したシステムとなったエコーが、最初に発生した時刻は、事例①は9時以前からあり、事例②は13時22分、事例③は17時であった。共通する特徴として、3つの風系(東京湾からのS風、寒気によるN風、鹿島灘からのNE風)の収束があり、特に事例①、②では北西から南東に至る収束線が明瞭で、収束線付近で約4°Cの差があった。システムの移動した経路は3例ともNE風の領域で、事例①では収束線上であった。



第3図 アメダスによる局地解析図。等温線は2°C毎の気温、矢印の長い線は2m/s、短い線は1m/s。それぞれの時刻における気象レーダーのエコー強度を薄いハッチで示す。実線の矢印は南風系、点線は北風系、二重線は東風系の風、太い点線は収束線を示す。

3. 事例の概要

3.1 被害状況

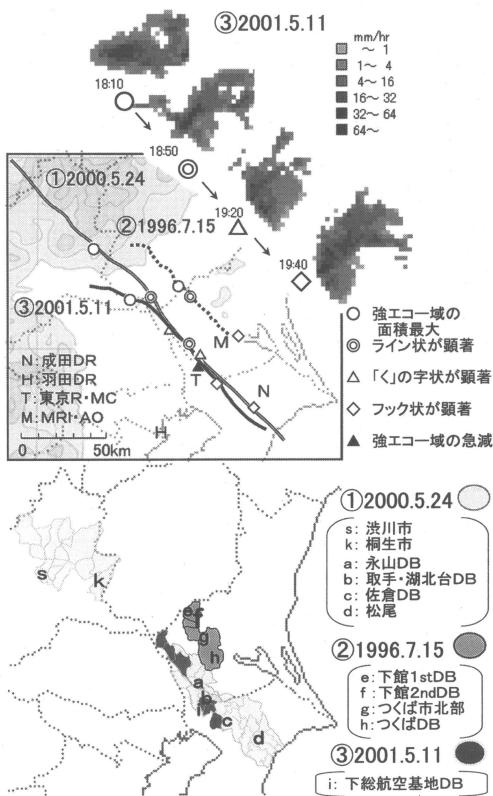
第4図上図に気象レーダーによる16 mm/h以上のエコー強度の領域（以下強エコー域と称す）の経路と形状変化、下図に降ひょうによる被害のあった市町村分布と降ひょうやDBが発生した地点を示す。第4図右上に、それぞれの記号で示す形状が顕著であった時刻の事例③のエコーを示す。被害のあった市町村は、強エコー域が通過した地域に相当していた。また、3.2で後述するように、強エコー域の形状変化が類似して

いると共に、この領域においてエコーが分裂・融合をすることなく、単一セル構造であった。第2表に被害状況とひょうの大きさ及び最大瞬間風速を示す。

事例①：2000年5月24日12～13時過ぎ頃、茨城県南部から千葉県北部にかけての33市町村で、突風を伴う降ひょうにより大きな被害が発生した（気象庁予報部予報課、2000）。取手市では、午後零時過ぎから黒い雲が上空を覆い、昼間から一転して夜間のような暗さになり、約10分間突風とひょうまじりの猛烈な降雨に見舞われ、直径3センチ程度のひょうは一部で10センチほど積もり、道路も雪が降ったように白一色になった（2000年5月25日付の茨城新聞）。DRによる風の発散や被害状況から、12時17分頃取手市永山付近（第4図下a）でマクロバースト（17分の羽田DRデータから発散風の領域は直径5.3 km・最大速度差19 m/s）、地上風データを用いた時空変換法による風の発散や被害状況から、12時23分頃取手市取手付近から我孫子市湖北台にかけてマクロバースト、その中でも我孫子市湖北台付近（第4図下b）でマイクロバースト（26分の成田DRデータから発散風の領域は直径3.3 km・最大速度差31 m/s）、地上風データを用いた時空変換法による風の発散や被害状況から、12時38～40分頃印旛村北西部から佐倉市臼井・宮前付近（第4図下c）にかけてマクロバースト（42分の羽田DRデータから発散風の領域は直径5.8 km・最大速度差21 m/s）が発生したと推測される。12時22分に取手消防署では最大瞬間風速31.2 m/s（NNE：風向）を記録した（茨城県・

第2表 被害状況とひょうの大きさ。建物以外の被害状況と事例①、③のひょうの大きさは「気象災害報告」(気象庁)より抜粋。事例①について、損害保険309億円(自動車32,825台(133億円)、家屋の被害25,543件(168億円))(日本損害保険協会、2000)。事例②について、建物被害及びひょうの大きさは以下による(茨城県、2003;茨城県農業総合センター・下館地域農業改良普及センター、1997)。

事例	死者	負傷者	農業被害			建物被害	ひょうの大きさ	最大瞬間風速
			農業被害総額	施設被害	被害面積			
①2000.5.24		162人	75億5,811万円		6,324ha	25,543件	ピンポン玉大(我孫子市)～ミカン大(佐倉市)	31.2m/s
②1996.7.15	1人	19人	34億8,231万円	3,428万円		2,061棟	ピンポン玉～鶏卵大(3～8cm)	47.5m/s
③2001.5.11			3億1,700万円		27ha		直径3～10mm	14.7m/s



第4図 気象レーダーの強エコー域の経路と形状変化(記号○, ○, △, ▲, ◇)。N, H, T, Mはそれぞれ成田DR, 羽田DR, 東京レーダー(気象大学校), 気象研究所・高層気象台の位置。右上図はそれぞれの形状変化が顕著であった時刻における事例③のエコー強度図(関東合成レーダー)。下図は降ひょうのあった市町村分布と降ひょうやDBの発生した地点(千葉県・銚子地方気象台, 2000; 茨城県・水戸地方気象台, 2000; 前橋地方気象台, 2000; 上毛新聞, 2000)。濃淡の薄い方から順に事例①～③。

水戸地方気象台, 2000)。

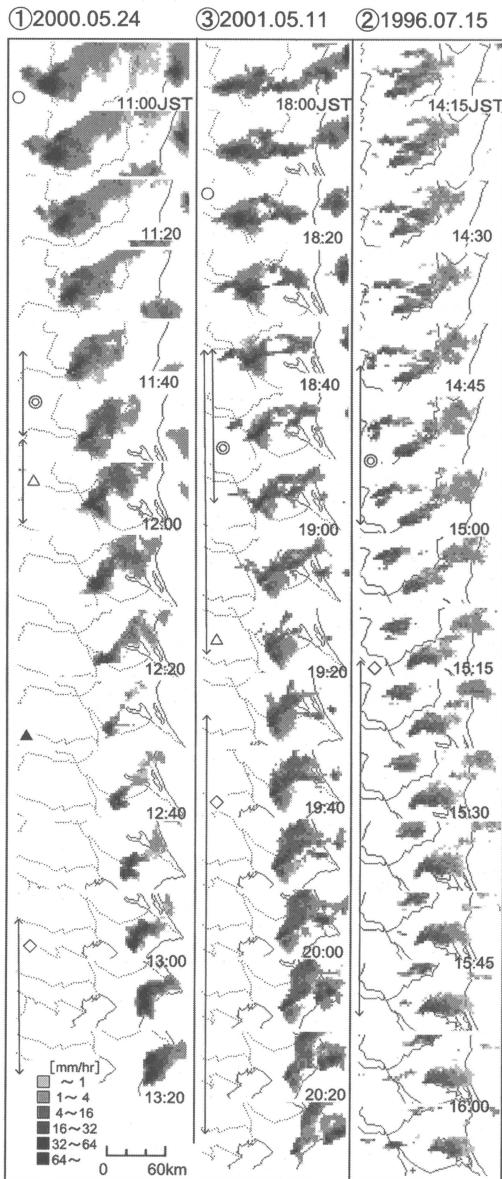
また、これより以前に、9時過ぎ及び10時20分過ぎ群馬県北西部の利根沼田地方で、11時頃板木県桐生市(第4図下k)で小豆大(直径5mm前後)～小梅大(同1cm前後), 渋川市(第4図下s)と桐生市では親指大の降ひょうがあった(上毛新聞, 2000; 前橋地方気象台, 2000)。

事例②: 1996年7月15日15～16時頃、茨城県南部の4市町村で突風を伴う降ひょうが発生した。中村・森(1999)によると、14時51分頃最初の下館DB(第4図下e)が発生し、日立化成下館工場の風向風速計では最大瞬間風速47.5m/s(N:風向)を記録し、14時59分頃2つめの下館DB(第4図下f)が発生した。15時30分頃つくば市北部で降ひょうによる被害があり、15時54分頃つくばDB(第4図下h)が発生したことが推定され、高層気象台では最大瞬間風速24.3m/s(NNW:風向)を観測した(風向風速計の高さは20.5m)。

事例③: 2001年5月11日19～20時頃、茨城県南西部から千葉県北部にかけての6市町村で、降ひょうによる農業被害が発生した。19時17分頃千葉県沼南町の海上自衛隊下総航空基地では、最大瞬間風速14.7m/s(NW:風向)、気温と露点がそれぞれ3.5°Cと6°C低下し、気圧が1hPa上昇を示し、DBが基地付近で発生したと推測される。

3.2 気象レーダーによる解析(メソβスケール)

気象レーダーの高度約2kmにおけるエコー強度の時間変化を第5図に示す。事例①、③は10分毎の関東合成レーダー、事例②は約7分30秒毎の東京レーダーで、事例①、③、②の順に示す。第3図のアメダスによる局地解析と比較すると、事例①、③について、初め関東平野に達した頃、強エコー域は地上のS風とN風の収束領域で、約20kmの大きさの団塊状を呈し、



第5図 気象レーダーのエコー強度図（事例①、
③は10分毎の関東合成レーダー、事例②は約7分30秒毎の東京レーダー）、数字は
時刻を示す。記号は第4図と同じ。

30~40分後地上のNE風領域に移動して、北東から南西に伸びる長さ約20km・幅約5kmのライン状に変形し、直後にライン状の強エコー域の南西端から、南東の進行方向に向かって、エコーが伸びるように拡がり、「く」の字のような形状に変化した。ライン状～「く」の字状の頃から、降ひょうによる被害が発生した。こ

のエコーが南に拡がると共に円弧状に丸みを帯びて、南北に伸びるフック状を呈した。事例②では、団塊状のエコーははっきり見られないが、14時52分頃に東西に伸びるライン状になり、ライン状の強エコー域の西端及び東端から、進行方向前方にエコーが伸びるように変形し、15時15分頃から東西に伸びるフック状に変形した。

第3図のように、事例①ではNE風とS風の収束線は、エコーの経路と一致しており、上空の強いWNW風と走向が同じであった。このため、継続して暖湿な空気塊がSE風の上昇流となってシステムに供給され発達したと考えられる。事例②ではエコーは収束帶付近からやや北東側のE~ENE風の領域であった。事例③では温度の不連続線は不明瞭で、茨城県南部では17時までS風であったが、エコーの通過によってNE風となった。事例①、②の海風による場合とは異なり、寒気の流入があってNE風となったと考えられる。

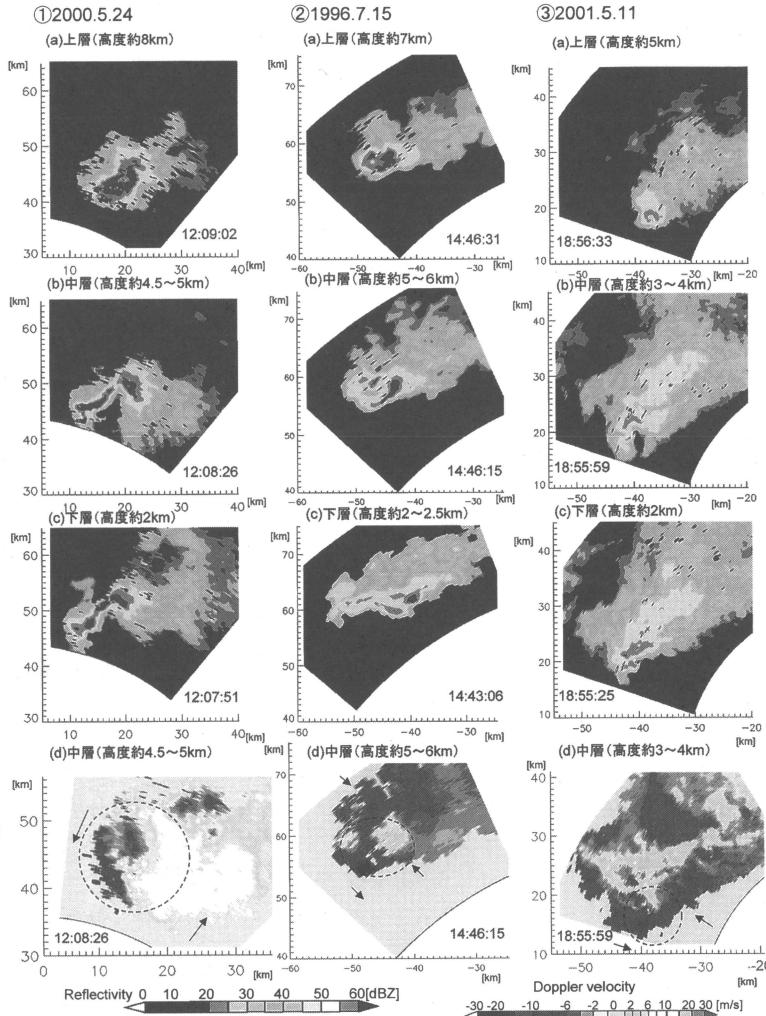
4. DRによる解析（メソγスケール）

成田DR、羽田DRからシステムのメソγスケールの解析を行った。第6図にエコー強度とドップラー速度のPPI図を示す。いずれもスーパーセルに特徴的なメソサイクロン、BWERやヴォールトが認められる。ヴォールトの上部を上層、WERが明らかな部分を中層、気象レーダーのエコー強度と同じ高度2km付近を下層とした。

4.1 下層（高度約2km）

事例①では、エコー強度55dBZ以上の領域は、11時18~51分北東から南西に伸びる長さ約15kmのライン状を呈し、その後、60dBZ以上の領域はLemon and Doswell (1979)によるFFDとRFDに対応すると推測される部分やその間に、2~3個の領域に分かれ(第6図左c)，変形しながら12時54分~13時31分北から南に伸びていた。エコー強度50dBZ以上の領域を見ると、ひとつのまとまったシステムと考えられるが、受信強度60dBZの領域はその中に2~3個見られる。このことは、Browning and Foote (1976)のスーパーセルでも見られる。

事例②では、55dBZ以上の領域は14時37分~15時12分、東西に伸びる長さ約15km・幅約5kmのライン状の形状を呈し、その中に約3km程度の大きさの60dBZ以上の領域が2~3個認められた(第6図中c)。エコーの南西端が前方に伸び、15時18~42分フック状



第6図 (a)～(c) はエコー強度の高度別PPI図(事例①は羽田DR、事例②、③は成田DR)。(d) は(b)と同じ高度の折返し補正を施したドップラーレ速度のPPI図。およその高度及び時刻を示す。X軸・Y軸はそれぞれのDRサイトからの距離(km)。矢印はドップラーレ速度の方向を示す。点線で囲んだ部分で、反時計回りの回転が見られる。事例②では、(b)の60 dBZ以上のエコー強度の領域の後方付近で、前方のSE風と後方のNW風の収束が見られた。

に変形した。15時30分から後方に別のエコーが発生し、15時47分エコーの南西端で、60 dBZ以上の領域の減少と共に、最下層で手のひら状のエコーが観測され、ドップラーレ速度の分布から、ひょうの降下地点を中心に降水物質が発散したものと推測される。16時5分には55 dBZ以上の領域は消滅した。

事例③では、55 dBZ以上の領域は、18時18分頃からライン状に変形し、18時29～53分(第6図右c)、北東から南西に約15 kmの長さのライン状に伸びていた。

18時59分～19時48分、同じ様な形状で長さ20 km以上に拡がっているが、60 dBZ以上の領域は、南西端の約5 kmのエリアでのみ増減が見られ、ダウンバーストが発生した19時17分から48分にかけて、ボウエコーからコンマエコーに変形した。このことは Fujita (1981) と同様であった。19時50分から前方に別のエコーが発生した。

4.2 中層(WERまたはBWER)

第6図bのように、強い上昇流域にできるWERが大きく広がり、エコー強度の強い領域が周りを取り巻き、中は穴が開いたようになっているBWER (Chisholm and Renic, 1972) が、事例①では11時55分～12時11分、事例②では14時32分～15時30分、事例③では18時53分及び19時11～17分にかけて存在した。この頃、第5図のように気象レーダーの強エコーエリアは、ライン状～「く」の字状を呈していた。

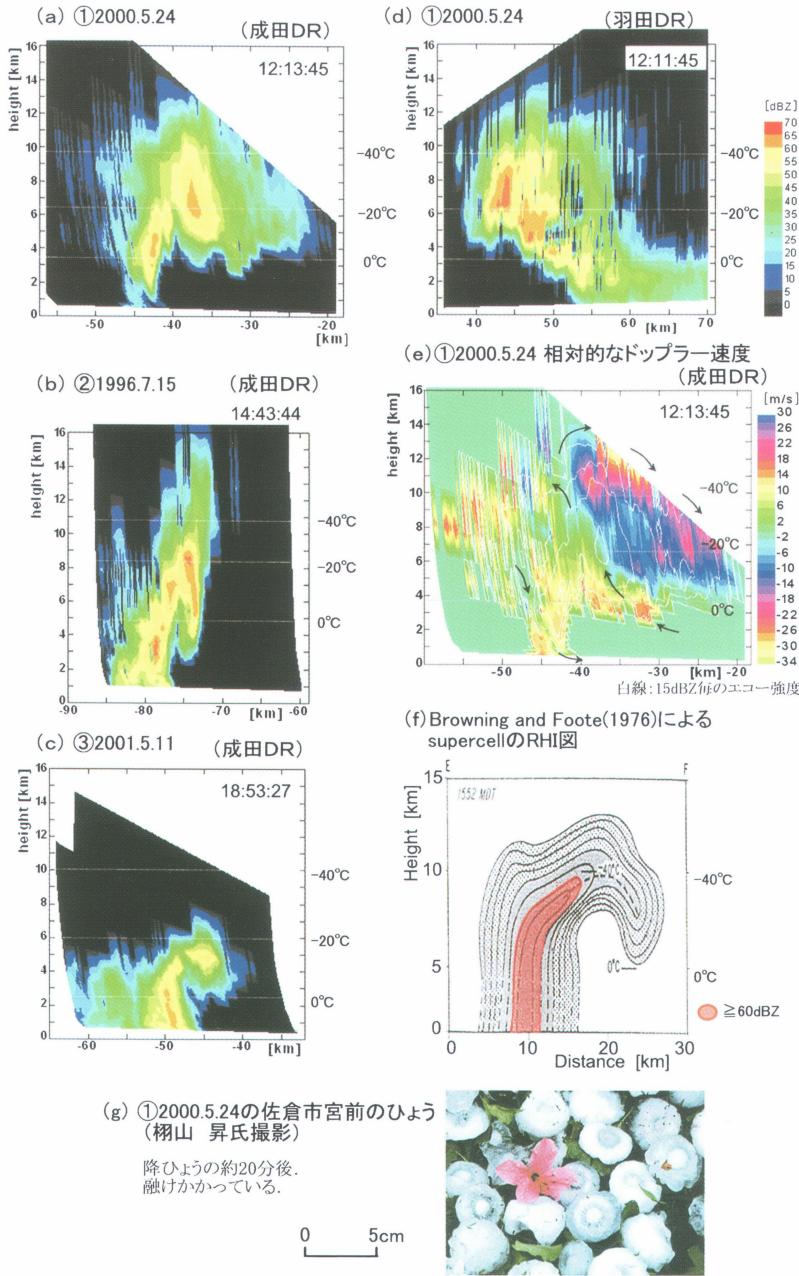
BWER付近のドップラーレ速度のPPI図を第6図dに示す。点線で囲んだ部分で反時計回りの回転が

見られた。大きさは異なるものの、全ての事例についてメソサイクロンが認められた。

また、事例②では、第6図中bの60 dBZ以上の領域の後方付近で、第6図中dのように前方のSE風と後方のNW風の収束が見られた。この付近で数分後に下館1stDBが発生した。

4.3 上層(ヴォールトの上)

第6図aのように、ヴォールトの高さは事例①、②で高く、事例③では低かった。ヴォールトの大きさを



第7図 ヴォールト付近の鉛直断面図(複数仰角PPIから作成)。(a), (b), (c)は事例①～③の進行方向のエコー強度断面図(成田DR)。(d)は事例①の進行方向に直交する方向のエコー強度断面図(羽田DR)。(e)は(a)と同じ断面のビーム毎のシステムに相対的なドップラーベースト(矢印は推測される風の向き、白線は15 dBZ毎のエコー強度)。(a)～(c), (e)は移動補正を施す。それぞれの時刻を右上に、09時の高層データより0°C, -20°C, -40°Cに対応する高度を白線で示す。(f)はBrowning and Foote(1976)によるスーパーセルのRHI図。センターは30 dBZ以上の領域、5 dBZ毎、赤い領域は60 dBZ以上の領域。X-Y軸のスケールを他の図と合わせて変倍した。(g)は事例①のひょうの写真。

エコー強度45 dBZ以上の領域の大きさとすると、事例①で進行方向に約9 kmと大きく、事例②, ③では約4 km、進行方向に直交する方向に事例①では約12 km、事例②では約8 km、事例③では約5 kmであった。

4.4 システムの鉛直構造

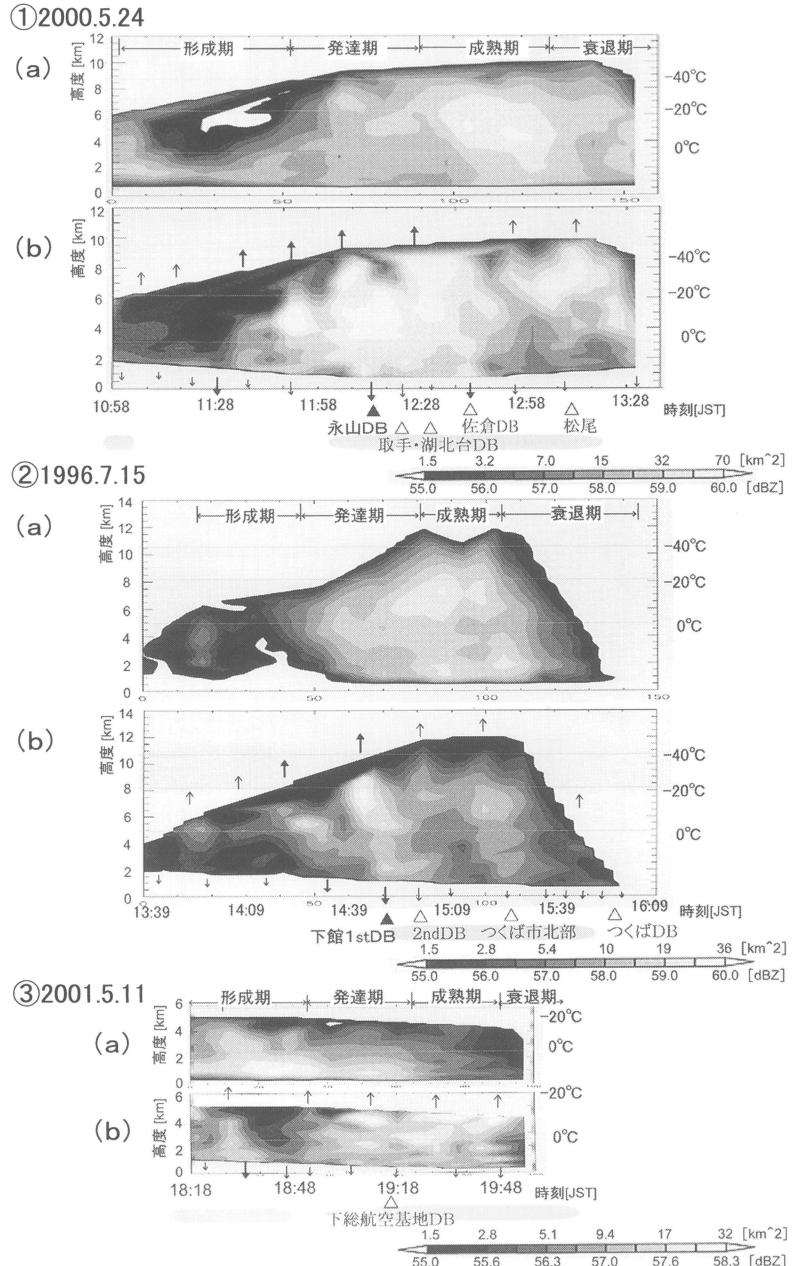
第7図にヴォールト付近の鉛直断面図を示す。WERが大きく明瞭な時刻の1ボリュームスキャン(約4分間を要する)の複数仰角PPIを基に作成した。ヴォールトの高さを、進行方向前方上空に拡がるエコー強度45 dBZ以上の領域の高度で表し、水平の広がりは、BWERをはさむ45 dBZ以上の領域の差し渡しとする。ヴォールトの高さは、(a)から事例①では高度11 kmと高く、広がりは約8 kmと3例中一番大きかった。(b)から事例②では高度10 kmと背が高いが、広がりは約5 kmと小さい。60 dBZ以上の領域は最も大きく、期間中の最大エコー強度は67.5 dBZであった。(c)から事例③では高度5 kmと他の事例に比較して低く、Suzuki *et al.*(2000)によるミニスーパーセルと類似している。広がりは約5 kmで事例②と変わらないが、60 dBZ以上の領域はなく45 dBZ以上の領域が小さいことから、他と比較してひょうの大きさが小さく量も少ない。

と考えられる。

ヴォールトの進行方向に垂直な方向の構造は、事例①の羽田DRのデータから(d)のように、60 dBZ以上の領域はWERの上にかぶさるようにあり、南西端で最も高く、高度6~9km(-20~-40°C)の上層にあり、ドップラー速度の解析から、この部分で上昇流が最も強いと考えられ、北東端に向かって、次第に高度が低くなっていた。この北東端の領域はFFD(forward-flank downdraft)に対応すると考えられる。

5. スーパーセルのライフサイクル

事例①における被害調査から、降ひょうによる被害地域は、下層のエコー強度55dBZ以上の領域と対応があり、これらの地域ではひょうの大きさは1cm以上であった。顕著な被害地域は、中層から下層において60dBZ以上の領域が急減した場所と対応があり、これらの場所ではピンポン玉~みかん大の大きなひょうが混じっていた。事例②においても同様な傾向が認められた。そこで、55dBZ以上の領域と60dBZ以上の領域の増減に着目し、システムのライフサイクルの中でどのようにして大きなひょうが形成され落下したのか、そのしくみを解明するために、DRから求まる3次元データの時間変化の解析を行った。



第8図 (a) 55 dBZ以上のエコー域面積の時間高度断面図及び (b) 55 dBZ以上の領域におけるエコー強度の平均値の時間高度断面図 (事例①は羽田DR、事例②、③は成田DR)。事例①と②の(b)図における白い領域の部分は、60 dBZ以上のひょうコアに対応する。縦軸・横軸のスケールは3事例で同じ。白い細線は第7図と同じ。スーパーセルのライフサイクルを形成期、発達期、成熟期、衰退期に分けた。ひょうコアの上昇や下降があったもしくはあったと推測される箇所に、それぞれ↑、↓を、DBや降ひょうがあった時刻を△で示す(↑や↓、▲はそれぞれが顕著な箇所)。降ひょうによる被害が発生した時間帯をグレーのバーで示す。

以下、前者をひょう域、後者をひょうコアと称す。

5.1 ひょう域、ひょうコアの時間高度断面

第8図に事例①～③について(a)エコー強度55 dBZ以上のエコー域面積の時間高度断面図及び(b)55 dBZ以上の領域におけるエコー強度の平均値の時間高度断面図を示す。事例①と②の(b)図における白い領域の部分は、60 dBZ以上のひょうコアに対応する。(a)におけるひょう域の拡がりや(b)のひょうコアの上下運動から、スーパーセルのライフサイクルを後述する4つの段階に分ける。I. 形成期(Formation Stage)：ひょう域の高度が次第に上がり0～-20°Cに達する、II. 発達期(Developing Stage)：ひょう域が急増する、III. 成熟期(Mature Stage)：ひょう域が最も拡がる、IV. 衰退期(Decaying Stage)：ひょう域が急減する。(b)から60 dBZ以上のひょうコアを示す白い領域(事例③では58 dBZ以上)が、「↑」のように約18～24分周期で、0°C付近の中層と-20°C以下の上層の間で上昇・下降が見られる。また、上・中層から地上付近の下層へ向けて、「↓」で示すひょうコアの下降は、ほぼ全期間を通してあったと推測される。(b)の下部に、DBや降ひょうがあった時刻を三角の記号、降ひょうによる被害があった時間帯をグレーのバーで示す(被害地域の分布とDRのエコーの通過時刻から推測)。

I. 形成期 (Formation Stage)

第5図の事例①、③において、気象レーダーの強エコー域が団塊状で面積も大きかった時刻は、第8図の左端にあたり、ひょう域の形成が見られる。その後、ひょう域が減少した後、約0°C以下の高度4～6 km付近に60 dBZ以上のひょうコアが初めて出現し、WERが形成された。その直後、①(b)の11時55分頃、②(b)の14時32分頃、③(b)の18時53分頃、WERが形成された。これらは第5図のライン状から「く」の字状に組織された頃に相当する。

II. 発達期 (Developing Stage)

①、②(b)では、WERが形成された直後にひょうコアは一旦降下し、再度、高度7～9 km付近まで上昇した。この時、WERは期間中において最も大きく明瞭であった。この頃から(a)のひょう域は急増し、システムは鉛直方向に急発達したと推測される。数cmに成長したひょうが降下することによって強い下降流が生じ、地上風と収束して強い上昇流が生じ、高度8 km付近まで上昇する際に、大きなひょうに急成長したと考えられる。

その直後、①(b)及びPPIのデータから、12時11分頃、高度5 km付近にあったひょうコアが、地上まで急降下したと考えられ、12時17分頃取手市永山付近で発生したDBに対応する。更にその直後に、取手・湖北台DBに対応するひょうコアの降下が見られる。また、②(b)及びPPIのデータから、14時46分頃に高度5.5 km付近にあったひょうコアが、同様に地上まで急降下しており、14時51分頃に発生した最初の下館DBに対応する。14時52分頃高度6.5 km付近に、事例②における最大エコー強度67.5 dBZのひょうコアがあった。その後、14時59分頃に発生した2つめの下館DBに対応するひょうコアの降下が、高度2 km付近に見られる。計算すると落下速度は平均約18 m/sとなるが、落下始めは約0 m/sであることから、地上付近での落下速度はさらに大きかったと推定される。

事例②、③では、発達期の後半にもWERが見られた。事例①、③においてWERが見られた時期は、第5図の「く」の字状のエコーに対応する。

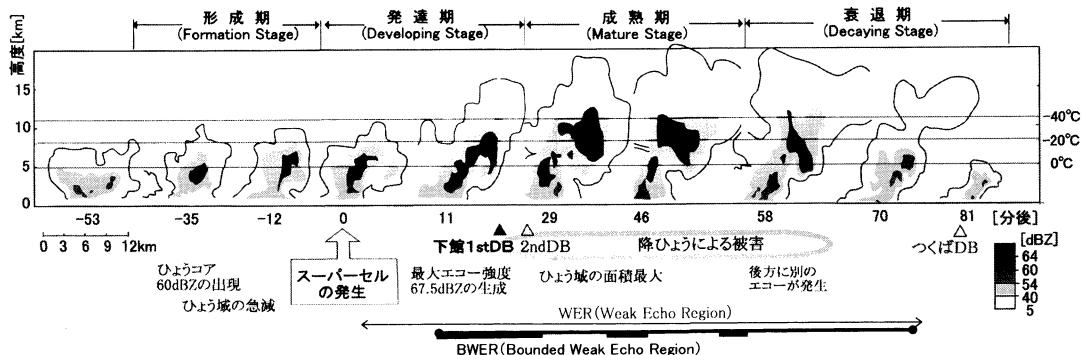
III. 成熟期 (Mature Stage)

永山DBや下館1stDBが発生した後、ひょうコアは再度上昇し、①、②(a)のひょう域が大きく拡がって、スーパーセルは成熟期を迎える。降ひょうの被害はこの間継続していた。第5図のフック状のエコーが現れた時期に相当する。①(b)の12時36～42分頃に、高度8 km付近に拡がったひょうコアが急降下し、ひょう域が急減しており、佐倉市臼井・宮前付近で発生したDBに対応する。この時のひょうの写真(柳山 昇氏撮影)を第7図gに示す。PPIのエコー強度の時間変化から、上空に拡がったひょう域が後方のノッチとともに急減していた。多量の降ひょうがあったと推測される。

IV. 衰退期 (Decaying Stage)

①(b)の13時4分にひょうコアの降下があり、(a)のひょう域が急減した。松尾町付近の降ひょう被害(第4図d)に対応する。②(b)の15時27～33分にひょうコアの降下があり、(a)のひょう域が急減した。つくば市北部での降ひょう被害(第4図g)に対応する。15時47～54分頃に、地上データからつくばDBが発生していた。

事例③について、③(a)から0°C以上の高度におけるひょう域の面積は小さく、変化は顕著ではないが、(b)のひょうコアの変化から、I～IVに分けた。③(a)、(b)の初めにあったひょう域が急減した後、③(b)の後半にエコー強度が強くなっていた。PPI図からみると、18時53分以降WERがみられるようになった。



第9図 事例②におけるシステムの進行方向に沿っての鉛直断面図の時間変化(約6分毎のボリュームスキャンのデータから、ヴォールトが最も高い方位のデータを抽出)。横軸は、スーパーセルの発生を0分とした時刻(分)。細い点線は第7図と同じ。図の下部に、DBや降ひょうによる被害があった時刻を示す。また、スーパーセルのライフサイクルにおける顕著な特徴と、WER、BWERの見られた期間を細線、太線で、BWERが大きかった期間を極太線で示す。

5.2 システムの鉛直断面の時間変化(事例②のみ)

第9図に事例②におけるシステムの進行方向に沿っての鉛直断面の時間変化を示す。13時39分～15時59分の6分毎にボリュームスキャンした成田DRデータの解析から、鉛直断面において顕著な構造がみられる時刻を抽出した。横軸の時刻は、セルがBWERを形成し始めた14時32分を起点とした時間(分)である。5.1に記したライフサイクルにおける4つの段階と、断面で見た構造の関連を説明する。なお、この図においてはエコー強度54 dBZ以上の領域をひょう域と称する。

初期には進行方向に対して前後2つのセルからなり、相互に発達や衰弱を繰り返し、次第に前方のセルが発達した。13時51分(-41分)には58 dBZ以上のエコー強度の領域が、高度5km付近に出現し、直後の13時57分(-35分)には60 dBZの領域(ひょうコア)が高度5km付近に形成され、ひょう域が拡がると共に、その東側では地上付近への降下が見られた。この高度の気温は館野の09時の高層データから約0°Cであった。ひょうが形成され、その一部が降下したと考えられる。

ひょう域が急減した後、14時02分(-30分)にはWERが形成された。エコーは強弱を繰り返しながら、ひょう域は次第に高度が増すと共に、進行方向に前傾した。14時20分(-12分)にはひょうコアが高度7km付近まで上昇し、進行方向前方上空にエコー強度の強い領域が拡がり前傾した、「タツノオトシゴ」の様な形状のプレ-ヴォールトとも言える形態が見られた。この高度の気温は館野の09時の高層データから約-13~-

10°Cである。この頃、前方のエコーが急発達し、14時32分(0分)には明瞭なBWERができ上がり、単一システムのスーパーセルとなった。

14時43分(+11分)には急成長して、エコー強度66.2 dBZが上空8.7km付近に出現した。この高度の気温は館野の09時の高層データから約-23°Cである。また、40 dBZ以上の領域は-40°Cの高度まで拡がった。雲粒は普通-20°C位の低温までは過冷却状態にあり、-40°C以下の温度では微少な粒も氷結する(メイソン, 1977)。-20°C以下の高度にシステムが達することは、スーパーセル形成に至る必要条件である可能性がある。直後の14時51分頃(+21分)下館1stDB, 59分頃(+27分)下館2ndDBが発生した。14時52分最大エコー強度67.5 dBZが6.3km付近に出現した。15時1分(+29分)にはひょう域は5~11kmまで急増し拡がり、約50分間降ひょう被害は継続した。やがて、15時30分(+58分)頃からひょう域は急減し、後方に別のエコーが発生した。前方の上昇流が弱まり、後方への下降流が強まったと考えられる。最後に15時54分(+82分)つくばDBが発生した。

6. 議論

アメリカ大陸におけるスーパーセルは、走行距離にして数100km、寿命は5~6時間に及ぶのに対して、解析したスーパーセルのそれらは数10km、1時間~1時間半と水平・時間スケールとも小さかった。しかしながら、局所的に大きな被害が発生した。

Chisholm and Renic (1972) のスーパーセルと比較すると、鉛直シアは事例①、②と同じ高度間で約3.9

m/s/km と、第1表のように事例①とほぼ同程度であった。

Browning and Foote (1976) によるスーパーセルのヴォールト（第7図f）と比較して、事例①、②は60~65 dBZ の非常に強いエコー強度が、高度 5~10 km に拡がり領域も大きい。逆に、ヴォールト後方の地上に接している領域は、進行方向に約 3 km と狭い範囲に限られていた。また、ヴォールトと後方の地上に達する部分との間に、くびれたようにエコー強度が弱い部分が、3つの事例について見られた。この部分では事例①の複数仰角 PPI から作成したシステムの移動に相対的なドップラー速度の解析（第7図e）から、上昇流が強くひょうが吹きとばされていると考えられる。事例①、②においてこの部分の高度 7 km 付近で、第2図右より 500 hPa より上空において、風が W 風から NW 風に急変していた。このためヴォールトが形成され、第7図 a~b のように、細く長い首の上に大きな頭部を持つ、「龍の頭部 (Dragon Head)」のような形状ができたと考えられる。

また、第7図eの下層で、後方から NW 風の下降流とその前方 3 km 付近で SE 風の上昇流がある。事例②のつくばにおけるウインドプロファイラの解析から（中村・森、1999），コールドフローの厚さは約 1 km と推測される。進行方向の前方上空でひょうが形成され、後方では降ひょうが発生するというシステムが、地上風との収束によって、効率よく繰り返されたと考えられる。

小元（1970, 1979）は降ひょうの被害状況の詳細な解析から、降ひょうに明瞭な強弱の変動があり、かなり規則的に起こることがあると報告している。本解析でも、ひょうコアの上昇や下降の盛衰が、約 18~24 分周期で発生から消滅までの全期間を通して見られた。

以下の点について、今後一層詳しい研究が必要である。

1) アメリカでは Lemon and Doswell (1979) によれば、成熟期から衰退期において最も顕著な被害が発生している。一方事例①、②においては、発達期に激しい DB が発生している。この違いはどこから来ているか。

2) エコーが団塊状からライン状、「く」の字状に組織化してからスーパーセルへの発達があった。この形成期における組織化のプロセスを明らかにすること。

3) 本論文では、3例ともヴォールトはひとつであるため、スーパーセルであると判断した。しかしながら、

発達期の BWER が鮮明であった段階では、上昇流域は一つとはっきりしていたが、次第に複雑化した。複数の対流セルが存在している可能性は残されている。

4) システムの進行方向と鉛直シア、地上収束線との関連。

5) ひょうコアが形成されて以降にみられた、約 18~24 分の周期性の原因。

7. まとめと結論

関東地方で発生した降ひょう・DB を伴う 3 例のシステムは、中層に明瞭なメソサイクロンと BWER、その上層にヴォールトを有しており、アメリカ等で確立した孤立スーパーセルの特徴を備えていた。

初めに、東京湾からの暖かく湿った S 風と乾燥した冷たい N 風の収束領域で、南西端のエコーが発達し団塊状のひょう域が形成され、そのひょう域が一旦急減した後、発達してひょうコアや WER が生じた。システムは NE 風の領域に入り、BWER が生じ单一セル構造に組織化されて、スーパーセルが形成された。その後システムは鉛直方向に急成長して発達期を迎え、その直後に顕著な DB が発生した。続いて上空でひょう域が拡がり成熟期となって、降ひょうによる被害が継続し、やがて衰退期に入り、DB が発生した。この変化とともに、約 18~24 分周期でひょうコアの降下や上昇の繰り返しがあった。

謝 辞

1996年7月15日の解析は、気象研究所の故中村 一氏、赤枝健治氏にご指導頂きました。成田航空地方気象台、東京航空地方気象台から、3事例に関して DR データを提供して頂きました。DR・気象レーダーデータに関して、気象研究所の高山 大氏、瀬古 弘氏、山内 洋氏にお世話になりました。資料について、建築研究所の奥田泰雄氏・伊藤 弘氏、つくば地域農業改良普及センターの藤井 啓氏、佐倉市の樋山 昇氏、NHK の土子正巳氏、千葉県総合教育センターの小玉 秀史氏、我孫子市の森岡 純氏、柏市の林 文氏、茨城県公害技術センターの菊池信生氏、千葉県大気汚染保全課、取手市立永山小学校、伊奈町立第三保育所、間宮林蔵記念館、結城・下館・岩井・水海道の各地域農業改良普及センター、2000年5月24日の事例で被害のあった各市町村の防災・農業担当者の方々、東葛飾支庁、印旛支庁、山武支庁、海上自衛隊下総航空基地、

水戸地方気象台の菊田晴之氏、東京管区気象台の竹内仁氏、気象大学校の小野木 茂氏、成田航空地方気象台、銚子地方気象台、前橋地方気象台、千葉測候所、宇都宮地方気象台、高層気象台の上野丈夫氏にお世話になりました。気象研究所の大野久雄氏、鈴木 修氏、楠 研一氏、高層気象台の杉村秀夫氏、木村利朗氏にはご助言を頂き、気象研究所の森 一正氏からは有益なご意見を頂きました。その他にも、DR レーダー解析ツール Draft を開発された気象研究所の田中恵信氏、鈴木 修氏、レーダーデータ表示プログラムを開発された東京管区気象台の宮城仁史氏、気象庁月報ビュアを開発された大阪管区気象台の上野幹雄氏、エマグラム上の物理量計算ソフトを開発された大阪管区気象台調査課、資料や文献を提供して下さった方々、解析する機会を下さった方々のご厚意に心から謝意を表します。また、本論文の改稿に貴重なご助言や懇切丁寧なコメントを下さった2名の査読者及び担当編集委員の方々に深く感謝いたします。なお、所属はお世話になった当時のものです。

参考文献

- Browning, K. A. and G. B. Foote, 1976 : Airflow and hail growth in supercell storms and implications for hail suppression, *Q. J. R. Meteor. Soc.*, **102**, 499-533.
- Burgess, D. W. and L. R. Lemon, 1990 : Severe thunderstorm detection by radar, *Radar in Meteorology*, American Meteorological Society, 619-647.
- 千葉県、銚子地方気象台, 2000 : 平成12年5月24日の降ひょうによる農業被害, 千葉県農業気象災害速報, 2, 11pp.
- Chisholm, A. J. and J. H. Renic, 1972 : The kinematics of multicell and supercell Alberta hailstorms. *Alberta Hail Studies*, Research Council of Alberta Hail Studies Rep. No. 72-2, 24-31.
- 中鉢幸悦、竹内 仁、田畑 明, 2000 : 2000年5月24日の降ひょうを伴ったシステムについて, 東管技術ニュース, **139**, 19-25.
- Fujita, T. T., 1981 : Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales, *J. Atmos. Sci.*, **38**, 1511-1534.
- Fujita, T. T., 1985 : The downburst. SMRP Research paper 210, Dept. of Geophysical Science, Univ. of Chicago, 122pp. [NTIS PB-148880]
- 茨城県、水戸地方気象台, 2000 : 平成12年5月24日のひょうによる農業被害, 茨城県農業気象災害速報, 1, 13 pp.
- 茨城県, 2003 : 茨城県の主な風水害, (オンライン), 入手先<<http://www.pref.ibaraki.jp/bukyoku/seikan/shobo/huuusigai.htm>>, (参照2004-4-18).
- 茨城県農業総合センター, 下館地域農業改良普及センター, 1997 : 平成8年7月15日ダウンバーストとともにナシの突風, 降ひょう被害と対策, 33pp.
- 石部 勝、三崎 保、田尻拓也, 2003 : 空港気象ドップラーレーダーで観測されたスーパーセル型システムの立体図, 天気, **50**, 703-704.
- 上毛新聞, 2000 : (オンライン), 入手先<<http://www.jomo-news.co.jp>>, (参照2000-5-25).
- 観測第一課, 2000 : 5月24日茨城県南西部で雹が発生した時の地上気象の変化, 高層気象台時報, **75**, 3.
- 河原恭一、森 真理子, 1997 : ウィンドプロファイラを用いた気象現象の解析, 高層気象台彙報, **57**, 1-6.
- 気象庁予報部予報課, 2000 : 各地でひょうの被害, 気象庁ニュース, **1472**, 1-2.
- 楠 研一, 1999 : 1996.7.15下館ダウンバーストの前兆現象, 気象研究ノート, (57), 125-127.
- Lemon, L. R. and C. A. Doswell, 1979 : Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis, *Mon. Wea. Rev.*, **107**, 1184-1197.
- 前橋地方気象台, 2000 : 群馬県の気象概況(平成12年5月), 13pp.
- メイソン, B. J., 1977 : 雲と雨の物理—雲の中のしくみと降水の人工制御一, 総合科学出版, 183pp.
- 水戸地方気象台防災業務課, 1996 : 1996年7月15日下館市で発生したダウンバースト, 気象庁研究時報, **48**, 111-118.
- 中村 一、森 真理子, 1999 : 1996年7月15日の下館・つくばダウンバースト, 気象研究ノート, (57), 111-123.
- 日本損害保険協会, 2000 : 2000年5月24日発生ひょう被害に係る支払い保険金(見込み含む), ニュースリリース, 888, (オンライン), 入手先<http://www.sonpo.or.jp/news/news_888.html>, (参照2000-6-29).
- 大野久雄, 2001 : 雷雨とメソ気象, 東京堂出版, 301pp.
- 奥田泰雄、伊藤 弘, 2000 : 平成12年5月24日関東北部で発生した降ひょう被害, 日本風工学会誌, **84**, 15-20.
- 小元敬男, 1970 : ひょう害分布と降ひょう系の活動, 農業気象, **26**, 151-153.
- 小元敬男、清野 豊, 1978 : 降ひょう特性と農産物の被害率の関係, 農業気象, **34**, 65-76.
- 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.
- 小元敬男, 1984 : ひょう害, 農業気象, **40**, 163-172.
- Seko, K. and T. Takeda, 1987 : Radar-echo structure of a quasi-steady heavy rain storm, *Natural Disas-*

- ter Sci., 9, 23-37.
- Suzuki, O., H. Niino, H. Ohno and H. Nirasawa, 2000 : Tornado-producing mini supercells associated with Typhoon 9019, Mon. Wea. Rev., 128, 1868-1882.
- 高谷美正, 東京管区気象台, 新東京航空地方気象台, 2002 : 空港気象ドップラーレーダー等による雷雲の微細構造の解明, 平成13年度研究報告書, 気象庁気象研究所, 282-286.
- Takaya, Y., M. Ishibe, M. Mori, T. Tajiri and T. Misaki, 2003 : Three hailstorms in the Kanto Plain, Japan, 31st Conference on Radar Meteorology, 607-609.
- Wilson, J. W., R. D. Roberts, C. Kessinger and J. McCarthy, 1984 : Microburst wind structure and evaluation of Doppler radar for airport wind shear detection, J. Climate and Appl. Meteor., 23, 898-915.
- 吉野正敏, 宮内誠司, 1987 : 関東甲信地方の降ひょう特性, 筑波の環境研究, 10, 113-123.

Three Supercells with Downbursts and Hail over the Kanto Plain

Mariko MORI* and Yoshimasa TAKAYA**

* Aerological Observatory, 1-2 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan.

** Meteorological Research Institute.

(Received 17 March 2003 ; Accepted 24 June 2004)

Abstract

Between 1996 and 2001, three hailstorms with downbursts occurred over the Kanto Plain, on 15 July 1996, 24 May 2000, and on 11 May 2001. These storms were analyzed with data from Doppler weather radars, conventional weather radars, radiosondes, surface observations, and damage investigations, revealing the following :

(1) The supercells were isolated with a single-cell structure, a BWER (bounded weak-echo region) and a mesocyclone at midlevels with an overhanging vault above. The stability of the atmospheric stratification, the vertical wind shear, and the structure of surface wind convergence strongly influenced the disturbance characteristics, including temporal and spatial scales and severity.

(2) The three storms had similar lifecycles. Initially, the southwestern part of a multicellular storm developed into a hailstorm, the radar echo of which had a clump pattern. This occurred when the storm was located in the convergence between warm moist southerly winds from Tokyo Bay and dry northerly winds from a colder air mass. After hail had fallen, the system gradually developed again and produced a hail core (a domain with radar reflectivity exceeding 60 dBZ) and a WER. This new system then developed a BWER as it moved into a region of northeasterly winds from Kashima Bay (the formation stage). The storm then entered the developing stage, growing upward rapidly and producing prominent downbursts. The mature stage was marked by expansion of the hail area in the upper part of the storm and continuous hail damage. The subsequent decaying stage was accompanied by downbursts. During these stages, the hail core moved up and down with a period of 18 to 24 minutes.