

2005年5月15日東京都八王子市に 降雹と突風をもたらした積乱雲の特徴について

山下 浩 史*

要 旨

2005年5月15日夕方、東京都八王子市などでは降雹や突風による風害が発生した。そこで、この現象をもたらした積乱雲の特徴について調査を行った。その結果、この積乱雲は、15時頃から15時30分前まで、スーパーセルに発達していたことが分かった。その発達の要因として、以下の①～③が考えられる。①500 hPaで約 -27°C の寒気を伴った低気圧が東北地方を通過し、それに伴い、中層(高度600~700 hPa付近)のトラフが埼玉県熊谷付近を通過していたこと、②①のトラフの通過による対流不安定の強化の可能性と、海風による水蒸気量の増加と日照による昇温効果が加わったことにより、時間的・局地的に安定度が悪くなったと思われること、③積乱雲からの降水粒子の荷重と蒸発とで形成された冷気外流出と地上の南東風との間で起きた収束により上昇流が存在したと考えられること、である。このスーパーセルの最大の特徴は、メソサイクロンの出現時に、高度2000 mより下層で鉛直渦度が顕著に強まっていること、スーパーセルの内部での雷が少ないことであった。また、スーパーセル発生時のバルク・リチャードソン数とストーム・リラティブ・ヘリシティは、それぞれ8.5、 $-5\text{ m}^2/\text{s}^2$ となっていて、米国のスーパーセル発生指標の下限値を下回っていた。突風の被害地域はメソサイクロンの進路にほぼ一致し、被害は鉛直渦度の極大域が地上付近に達した時に発生していた。

1. はじめに

2005年5月15日夕方、東京都八王子市・あきる野市・日の出町で、降雹により野菜などに被害が発生した。また、東京都八王子市・町田市、神奈川県相模原市では降雹とともに突風による風害が発生した。発生した時間は、八王子市では15時過ぎ、町田市や相模原市では15時30分前後~15時50分だった。突風の原因については、現地災害調査結果で、「被害が帯状の分布をしており、面的な分布は持っていないこと」、「飛散方向に一様性が見られないこと」から、ダウンバーストの可能性は低いとしながらも、「昼間でありながらたつ巻の目撃情報が得られなかった」ことなどの理由で、突風の原因は特定できなかったと報告している(東京管区气象台ほか、2005)。また、鈴木・山内(2005)は、今回対象とする積乱雲の解析を行い、『ストームの進行方向は右偏し、メソサイクロン(以下

MCとする)とエコーの弱い領域(以下WERとする)の存在から、スーパーセルの特徴を有していた。そして、MCは被害発生地点の上空を通過し、被害発生時頃に顕著であった。しかし、当日の大気の安定度やスーパーセル発生に関する指数を館野・輪島・仙台・秋田・浜松の高層観測データ、熊谷の局地的気象監視システム(以下WINDASとする)から評価したが、それほど大きな値は見られなかった』としている。

降雹やそれに伴う突風は、住民や住宅、農作物に対する被害だけでなく、航空機の安全運行にも大きな影響を及ぼす。そのため、これらの影響を少しでも軽減することと、今後、数値予報モデルの開発を進めていく上でも、個々の現象について解析し、特徴を把握していくことは重要である。

今回は、ドップラーレーダーや雷監視システム(以下LIDENとする)による観測をはじめ種々の観測結果をもとに解析を行い、鈴木・山内(2005)を踏まえて、八王子市に降雹と突風をもたらした積乱雲の特徴について、発生環境や発達過程なども含めて調査を行ったので、その結果を報告する。

* 気象庁予報部数値予報課。

kobo.yamashita@met.kishou.go.jp

—2005年11月24日受領—

—2007年6月18日受理—

2. 降雹の観測

降雹の様子について第1図に示す。また、八王子とその周辺に関する位置関係について第2図に示す。筆者自身は、東京都八王子市で、15時10分（1510 JST、以下すべて日本時間）すぎから約10分間、降雹を観測した。最初の5分間は、直径2～2.5 cm くらいの雹のみで突風を伴い一時強めに降ったが、その後は雨混じりとなり、雹の大きさも小さくなった。また、降雹のあった時間は一時地面付近に雹が融けずに残っていたため、地面付近では気温が急激に下がったことにより、霧が発生していた。そして、雹に比べて雨の割合が少なく、積乱雲の直下であったにもかかわらず、雷が遠くで鳴っている印象が強かった。なお、八王子天気相談所の観測では、1510 JST から直径2～2.5 cm の雹および1512 JST に北風17.8 m/s の突風を観測していた。また、東京管区気象台ほか（2005）の現地調査から東京都町田市や神奈川県相模原市でも降雹があった。

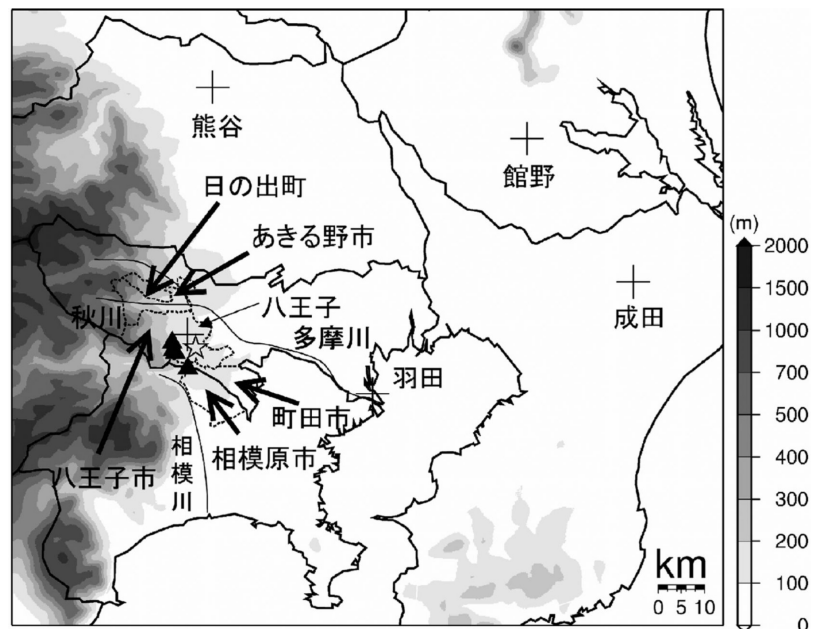
3. 総観場の特徴

第3図に2005年5月15日の300 hPa、500 hPa、850 hPa の高層天気図および地上天気図を示す。

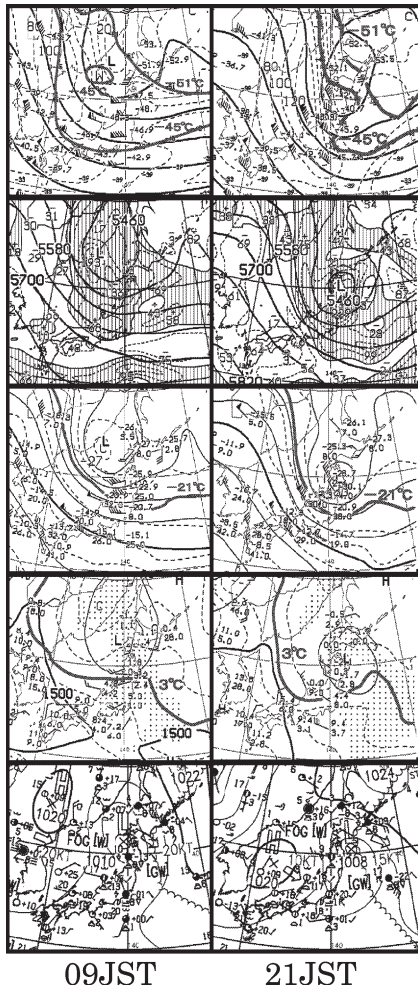
300 hPa でウォームコアを持ち、500 hPa で約 -27°C の寒気を伴った地上低気圧が、沿海州から日本海北部を通して、東北地方を通過した。この低気圧の通過に伴い、500 hPa では、正の鉛直渦度が、低気圧の



第1図 八王子での降雹の様子。上段は、1512 JST 頃、筆者が第2図や第14図に示した☆の点から観測した西側の空と降雹の様子、下段は実際に降った雹と降雹直後の地面付近が白くなっている様子を示している。



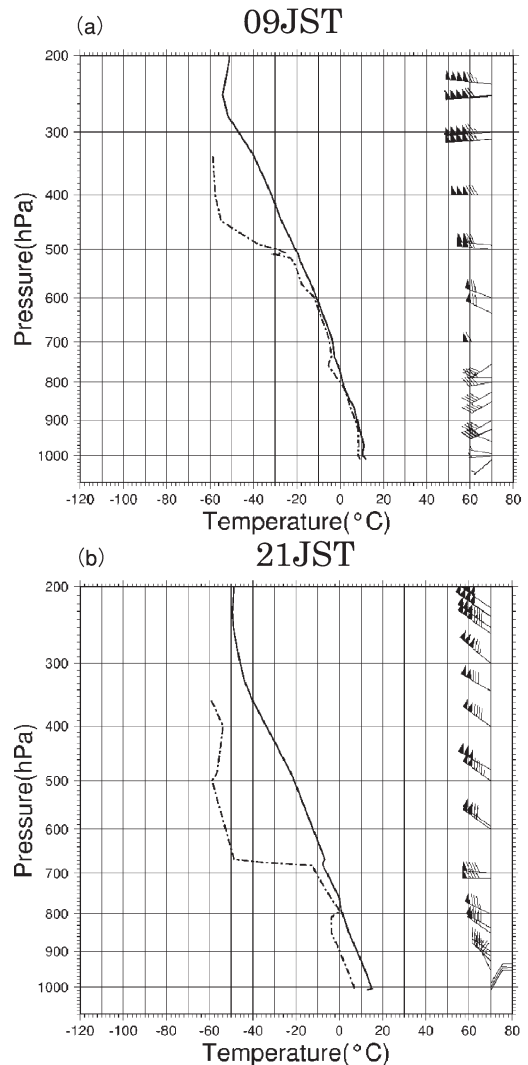
第2図 八王子市を中心とする地理的關係。八王子はアメダス設置地点。熊谷はWINDAS 設置地点。羽田・成田は、それぞれドップラーレーダー設置地点に対応している。館野はレーウィンゾンデの観測地点に対応している。▲は、現地災害調査結果（東京管区気象台ほか、2005）からプロットした突風の被害地域、☆は筆者が観測した地点を示す。なお、地形図はUSGS のGTOPO30を使用している。



第3図 高層・地上天気図 (2005年5月15日)。1段目が300 hPa, 2・3段目が500 hPa, 4段目が850 hPa, 5段目が地上である。1～4段目の実線はそれぞれの気圧面における等高線 (60 m おき) を示している。また、3段目、4段目の点線は、等温線 (3°C おき) を示し、特定等温線を実線で示している。4段目のハッチ域は、気温-露点温度値が3°C以下の領域を示している。2段目を除くすべてで、風向風速は矢羽根で示す (ペナントは50 kt, 長矢羽根は10 kt, 短矢羽根は5 kt)。矢羽根付近の数字は、それぞれ上段が気温 (°C), 下段が気温-露点温度値 (°C) を示している。なお、2段目は数値予報資料の初期値 (RSM: 領域モデル) の500 hPaの高度場 (m)・渦度場 (/s: 斜線部分が正渦度域, 白色領域が負渦度域) である。

中心付近と帯状となった形で日本海中部～本州にかけて見られた。また、850 hPaの温度線と風向風速からは、地上低気圧に向かって暖かく湿った空気が東日本を中心に流れ込んでいたことがわかる。そのため、東日本では、曇りや雨となった。

第4図に館野のレーウィンゾンデで観測した気温・露点温度・風向風速の鉛直プロファイルを示す。09 JSTの館野での気温は、500 hPaで-20.7°C, 850 hPaで5.0°C, 風の鉛直プロファイルは、700 hPaよ



第4図 館野のエマグラム。(a) 09 JST, (b) 21 JST である。風向風速は矢羽根で示す (ペナントは、10 m/s, 長矢羽根は2 m/s, 短矢羽根は1 m/s)。また、実線は気温 (°C), 一点鎖線は露点温度 (°C) を示している。

り下層で南成分を持った風となっていて、第3図と照らし合わせると暖気移流の場となっていた。しかし、ショワルターの安定指数（以下SSIとする）は1.7、対流有効位置エネルギー（以下CAPEとする）は地上から算出した場合0 J/kg、850 hPaから算出した場合でも12 J/kgとなっていて、安定度は悪くなかった。また、雷雨が発生した場合に、積乱雲がスーパーセルに組織化するか否かの指標となるストーム・リライティブ・ヘリシティ（以下SRHとする）は $27.4 \text{ m}^2/\text{s}^2$ と米国でスーパーセルが発達するための下限値 $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ を大きく下回っていた。しかし、負の値が大きいほど対流活動が抑制される指標となる対流抑止エネルギー（以下CINとする）は0 J/kg、850 hPaから算出した場合では -0.4 J/kg となっていて、対流活動が起こりえない場ではなかった。また、500 hPa付近から上層では空気が乾燥していた。21 JSTには、SSIは7.0、CAPEは0 J/kg、SRHは $-213.4 \text{ m}^2/\text{s}^2$ で、寒気移流の場となり、700 hPa付近から上層では空気が乾燥していた。

第5図に熊谷のWINDASの鉛直プロファイル時系列図（13~16 JSTまでの10分間隔）と羽田空港付近（北緯 $35.4^\circ \sim 36^\circ$ 、東経 $139.5^\circ \sim 140^\circ$ ）を同一地点とみなした航空機観測データ通信システムで得られた航空機観測データ（以下ACARSデータとする）による鉛直プロファイル時系列図（13~16 JST）を示す。

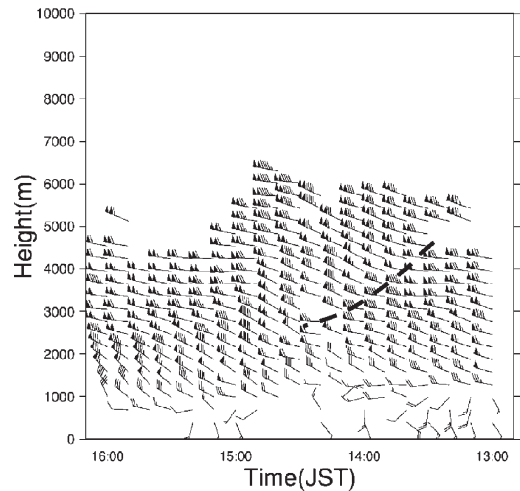
まず、熊谷のWINDASによる鉛直プロファイルでは、西風から西北西風に変わる風向シアが、1320 JSTには高度4000 m（600 hPa付近に相当）に見られ、その後、時間とともに高度が低下し、1420 JSTには、高度3000 m（700 hPa付近に相当）に見られた（第5図熊谷WINDASの太点線）。これは、上空のトラフの通過を示唆していると思われる。また、高度1000~1500 m付近（850~900 hPa付近に相当）から下層では、南成分の風が静穏の状態となっていた。

それに対して、羽田付近のACARSデータによる下層の鉛直プロファイルでは、高度1500 m付近まで西南西~南西風 $10 \sim 15 \text{ m/s}$ の状態が続いていた。それよりも上層では西風の弱い場に変った後、西北西~北西風となり、高度の上昇とともに、風速が増す場となっていた。WINDASで見られた風向シアの通過は確認できなかった。

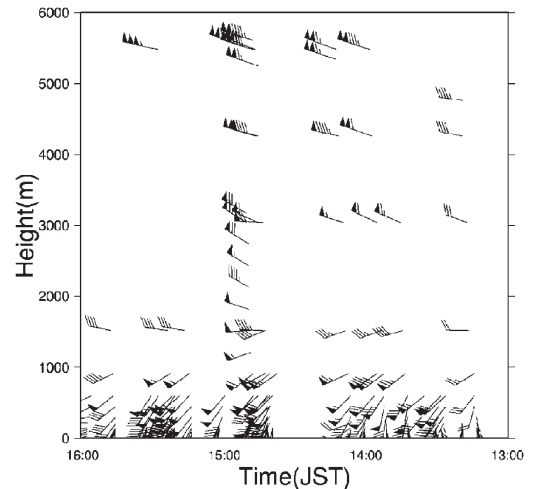
4. 局地解析

第6図に地上気象観測データ（SYNOP, METAR）による局地天気図を示す。09 JSTの観測では、関東地方および甲信越地方は雨となっていた。しかし、局地解析では関東地方では高気圧となっていて、降水により局地性高気圧が発生したと考えられ

WP_47626_Timeseries(2005/05/15)

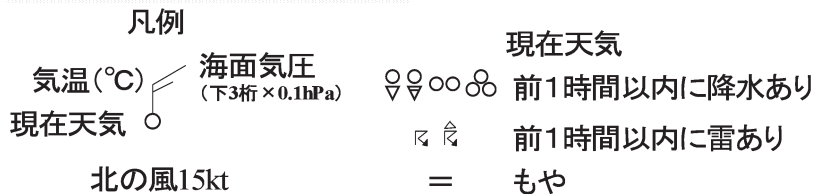
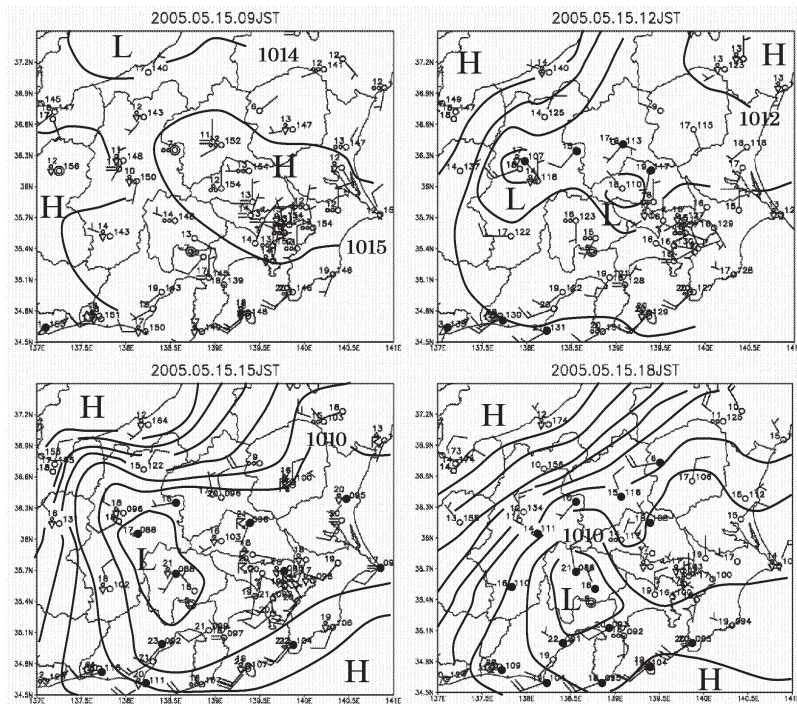


AVIATION_Timeseries(2005/05/15)



第5図 熊谷WINDASの時系列図および羽田空港付近の鉛直プロファイル時系列図。上段が熊谷WINDASの13~16 JSTまでの10分間隔の時系列図を示す。点線は、風向シアを示している。下段は、羽田空港付近（北緯 $35.4^\circ \sim 36^\circ$ 、東経 $139.5^\circ \sim 140^\circ$ ）のACARSデータを用いた鉛直プロファイル時系列図（13~16 JST）である。いずれも風向風速は矢羽根で示す（ペナントは 10 m/s 、長矢羽根は 2 m/s 、短矢羽根は 1 m/s ）。

る。12 JST以降は北関東から天気が回復したが、埼玉県や長野県で局地性低気圧が発生した。その影響が15 JSTには南関東にも低圧場の拡大として現れた。この局地性低気圧は、日照による気温の上昇が原因で発生した熱的低気圧と思われる。このことは、局地性



第6図 局地天気図。Hは高気圧又は周りに比べて気圧の高い所、Lは低気圧又は周りに比べて気圧の低い所をさす。また、風向風速は矢羽根で示す(長矢羽根は10 kt, 短矢羽根は5 kt)。プロットの左側上部が気温(°C)、左側下部が現在天気、右側が海面気圧(×0.1 hPa: 下3桁を表示)、等圧線は1 hPa 毎である。なお、前3時間で1.5時間以上の日照があった場合は、黒丸でプロットしている。

低気圧付近の観測地点で日照時間が多く、気温が上昇していること(第6図)、その日照時間と気温の関係がアメダス八王子(以下八王子とする)の時系列図(第7図)でも確認できることから推察される。降雹後にあたる18 JSTには、関東地方にあった局地性低気圧を含む一連の低圧場は、関東地方の沿岸部まで南下した。

第8図は気象庁の地域気象観測システム(アメダス)と東京都、埼玉県、神奈川県、千葉県の大気汚染常時測定局の風向・風速のデータ(速報値)について、降雹の直前の15 JSTと直後の16 JSTについてプロットしたものである。

降雹の直前の15 JSTでは、横浜市と川崎市、東京都町田市あたりまで、速度収束によるシアは見られた

が、八王子市付近ではそれを確認することができなかった。しかし、第6図に見られる局地性低気圧に向かって、沿岸部では、南西風が吹きやすい状態となっていた。また、相模川沿いでは、地形の影響(第2図)を受けて南寄りの風となっており、八王子市内に向けて北上する形となっていた。降雹後の16 JSTでは、東京都中央部から外向きに発散するような風系に変わっていた。また、神奈川県相模原市付近に低気圧性の循環が見られ、川崎市～東京都と神奈川県境付近にもシアが見られた。なお、図には示さないが、対象とする積乱雲が通過した東京都あきる野市・日の出町・八王子市・町田市、神奈川県相模原市にある雨量観測所(アメダス観測所や東京都・神奈川県の雨量観測所)による総降水量は、多い所で10 mmであった。

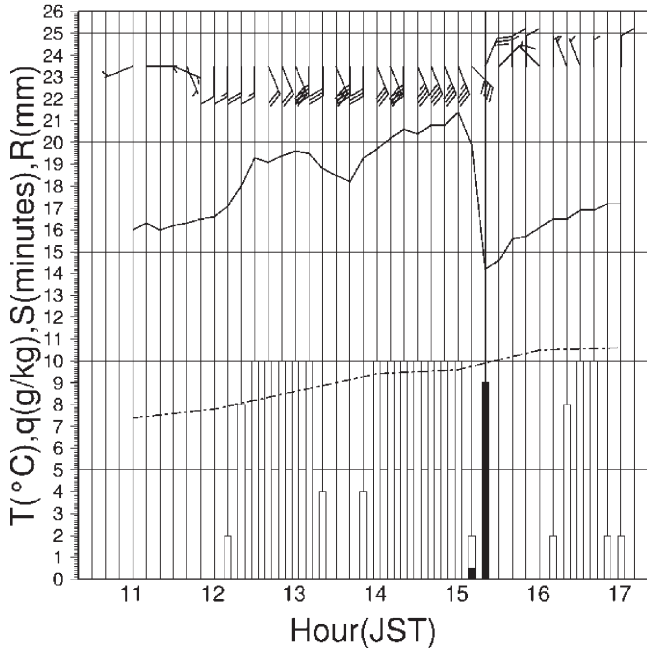
第7図は八王子の風向・風速・気温・日照時間・降水量および比湿の時系列図である。これによると降雹の前3時間は日照があり、南よりの風で約6 m/s、直

前で南東の風8 m/sと強まり、比湿も増加していた。降水量は1500~1520 JSTの間に9.5 mmを観測していた。この時間帯は2節に示したように、降雹を観測していた。気温は1510~1520 JSTの間に5.7°C下降していた。これは他の地点と比べても大きな気温の下降量であった。

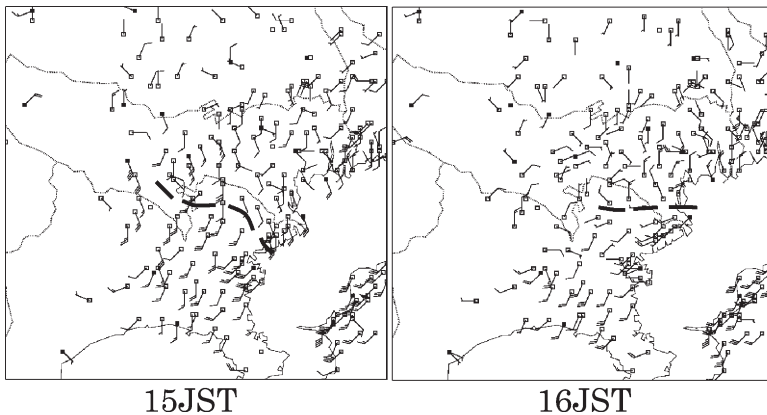
5. ドップラーレーダーによる解析

対象とする積乱雲について東京(以下羽田とする)および成田の各航空地方気象台の空港気象ドップラーレーダー(以下それぞれ羽田のドップラーレーダー、成田のドップラーレーダーとする)を用いて解析を行った。5.1節では、主に成田のドップラーレーダーデータを、5.2節では、羽田のドップラーレーダー

Hachioji_TimeSeries(2005/05/15)



第7図 アメダス八王子の各種時系列図。比湿を除くデータは、10分毎、比湿は1時間毎である。比湿は八王子天気相談所でインターネットで公開している1時間毎の湿度を利用して求めた。上段は風向・風速を矢羽根で表している。表現内容については、第4図と同じ。また、黒実線は気温 (T:°C)、一点鎖線は比湿 (q:g/kg)、白ヒストグラムは前10分内の日照時間 (S:minutes)、黒ヒストグラムは降水量 (R:mm) である。



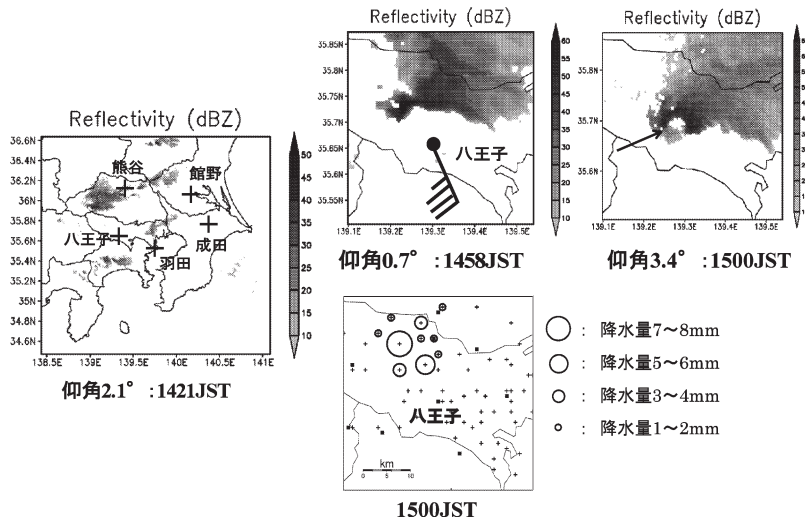
第8図 アメダスと各都県の大気汚染常時測定局の風向・風速 (速報値)。図中の■はアメダス観測点、□は各都県の大気汚染常時測定局。風向風速は矢羽根で示す (長矢羽根は2m/s, 短矢羽根は1m/s)。なお、太い破線は、対象の積乱雲に関する風向・風速のシアラインを示している。

データを用いている。なお、これらのレーダーの距離方向分解能は150 m, 方位方向の分解能は 0.7° である。また、それぞれのレーダーサイトからの八王子市までの距離は、羽田からは約45 km, 成田からは約100 kmである。そのため、羽田のドップラーレーダーを用いて、八王子市付近を解析した場合、レーダービームに直角な方向の水平分解能と鉛直分解能は、約470 m, 仰角 $0.7\sim 8.6^\circ$ を用いるため、八王子市の対応する高度は約670~5300 mになる。また、成田のドップラーレーダーを用いた場合のレーダービームに直角な方向の水平分解能と鉛直分解能は約1000 mとなり、仰角 0.7° では、八王子市の対応する高度は約1700 mとなる。

今回被害をもたらした積乱雲に対応するエコーは、全国20気象官署のレーダーエコー合成図によると12 JST頃に長野県・富山県境付近に発生したものが、南東に進んできたものであった。第9図左図は、そのエコーが、東京都内に入る直前の様子を示したものである。対象とするエコーは、熊谷の南西側のエコー領域に対応していた。

5.1 エコー強度による解析

1444~1532 JST について、八王子市を中心とする約40 km 四方の領域における、成田のドップラーレーダーによるエコー強度のPPI (仰角を固定してレーダーのアンテナを方位方向に回転させ、観測する走査



第9図 羽田のドップラーレーダーによるエコー強度とアメダスおよび東京都・埼玉県・神奈川県降水量分布図。左側および上段が各仰角におけるエコー強度分布図。エコー強度は、値が大きいほど黒い、左上には、各観測地点を示す。成田、羽田はそれぞれドップラーレーダー設置地点に対応している。右上の矢印はエコーの弱い仕切られた領域 (BWER) を示している。中央下段がアメダスと東京都・埼玉県・神奈川県の15 JSTの前10分間降水量を示す。■はアメダス観測点を示し、+が各都県の雨量観測所を示している。中央上段の図には、八王子地点と1500 JSTの地上風向・風速を示している (長矢羽根は2 m/s, 短矢羽根は1 m/s)。

方法) データから複数の等高面データを内挿により作成し、それをを用いて解析を行った。第10図は、55 dBZ以上のエコー領域についての等高面図と南側および西側から見た鉛直断面図である。また、第11図は第10図の領域内における等高面画像中の55 dBZ以上のエコーピクセル数 (1ピクセルあたりの大きさは約500 m 四方) の鉛直分布時系列図 (1444~1532 JSTまでの6分間隔) を示す。ただし、この領域内におけるエコーの最小の高さは、約1700 mとなっているため下端は1500 mとしている。さらに、高度1500 mの場合は、高度0~1500 mの間にピクセル数を割り当てている。なお、雹域は、経験的に上空のエコー強度が55 dBZ (降水強度に換算して100 mm/h以上) の領域に対応するといわれている (大野, 2001)。以下に特徴を示す。

1444-1450 JST: 今回対象とする積乱雲が、1430 JSTに東京都内へ入ってきた (エコー分布図は省略)。エコー領域は、線状で小さく、その55 dBZ以上のエコー上端の高度も1444 JSTで約4000 mに留まっていた、急激な発達にはなかった。その後、1450 JSTにかけて南東へ移動し、東京都あきる野市や日の出町付近の山地 (第2図でやや濃い黒色領域と定義) と平野部 (やや薄い黒色領域と定義) の境界に達した時点

から55 dBZ以上の領域が上方に拡大した。このことは、雹域が上層へ拡大したことを示している。

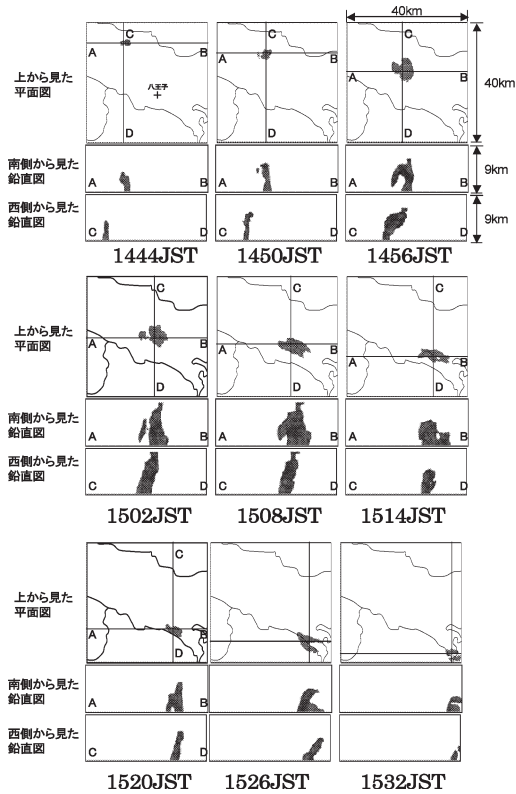
1456-1508 JST: 対象とする積乱雲は、東京都あきる野市や日の出町付近から八王子市内に移動した。この期間は、55 dBZ以上のエコー領域が一気に水平・鉛直方向に拡大し、南東側に傾いている様子が見られた。1456 JSTにはエコーの弱い仕切られた領域 (以下BWERとする) に対応するものが見られた。また、1500 JST観測の羽田のドップラーレーダーによる仰角3.4° (八王子市で高度約2200 mに相当) のエコー (第9図右上図) から形状がフック状であることも確認できた。これらは、スーパーセルによく見られる特徴である。また、

1502~1508 JSTには、55 dBZ以上のエコー上端の高度が約8000 mと最大になった。そして、上層から下層までの合計エコーピクセル数も1508 JSTで最大となった。しかし、1502 JST以降エコー領域の拡大は鈍っていた。その中で、エコーピクセル数が1456 JSTと1508 JSTの時に高度4000~5000 m付近で集中 (第4図の館野のレーウィンゾンデ観測では、約-20°Cに対応する) し、1502 JSTの時には、エコーピクセル数が上下に分散しているように見えた。

1514 JST以降: 東京都八王子市内を対象とする積乱雲が南東進し、町田市を通り神奈川県相模原市へ抜けた。1514 JSTにはエコー上端の高度が約5000 mに下がり、エコーピクセル数も急激に減少していた。

5.2 ドップラー速度による解析

第12図は1510 JST観測の羽田のドップラーレーダーによる仰角0.7° (エコーの存在する高度は約800 mに相当) のドップラー速度およびエコー強度分布図である。ドップラー速度をみると極大値と極小値のペアをもつエコーが見られた。極大値と極小値を結んだ線は、レーダービーム方向に直交していた。この間の距離 (dL) は2230 mであり、ピーク間の速度差 (dV) は約22 m/sとなった。これらからランキン渦を仮定して鉛直渦度

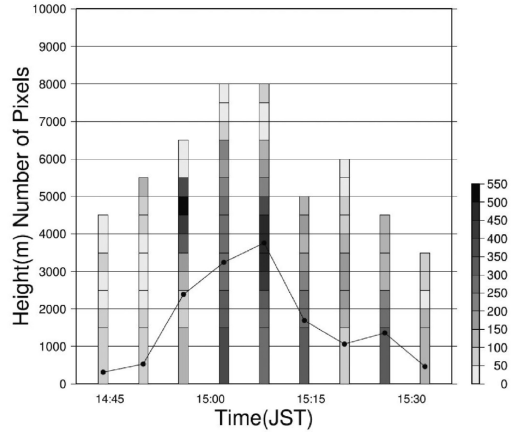


第10図 成田のドップラーレーダーにより観測されたエコー強度55 dBZ以上の領域の平面図および鉛直断面図。1444~1532 JSTについて八王子市を中心とする約40 km四方の領域におけるエコー強度55 dBZ以上の領域の平面図と南側および西側から見た鉛直断面図。エコーの位置関係を分かりやすくするために、A~Dの記号と直線を付加している。1526 JSTと1532 JSTのみ直線だけとしている。ハッチ域はエコー強度55 dBZ以上の領域を示している。

$$\zeta = 2 \cdot \left(\frac{dV}{dL} \right) \tag{1}$$

を計算すると約 $2.0 \times 10^{-2}/s$ となった。なお、同様にしてその上の仰角 1.0° や 1.3° でも(第13図を参照) $1.0 \times 10^{-2}/s$ 以上の鉛直渦度が計算された。これは、Donaldson (1970), Suzuki *et al.* (2000) や大久保ほか (2003) の示すMCの条件 ①ドップラー速度分布で極大値と極小値のペアがある, ②極大値と極小値を結ぶ線に直交する線とビーム方向とのなす角が45度未満, ③鉛直渦度が $1.0 \times 10^{-2}/s$ 以上, ④①のドップラー速度の極大値と極小値のペアが少なくとも

Reflectivity_Timeseries(2005/05/15)

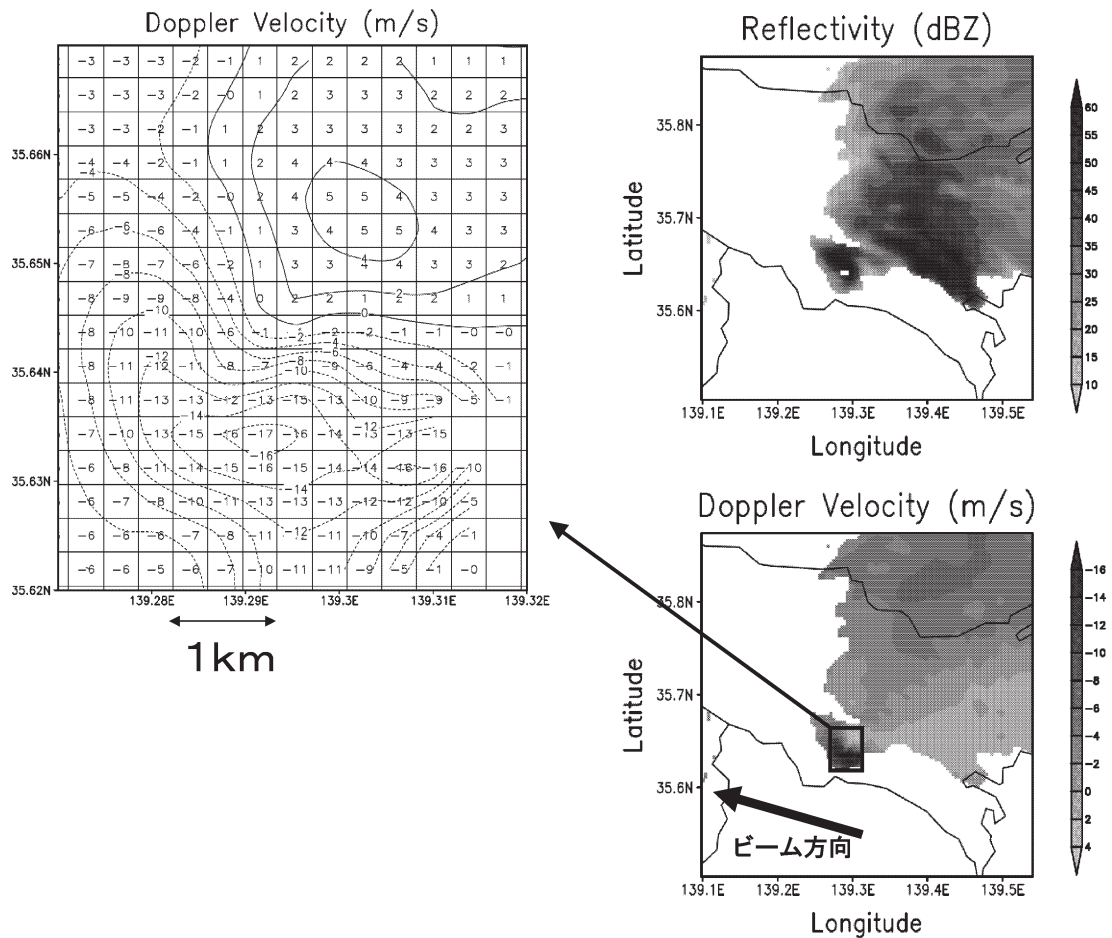


第11図 成田のドップラーレーダーにより観測されたエコー強度55 dBZ以上のエコーピクセル数の鉛直高度分布時系列図。第10図で示した時間・領域についての等高面画像中のエコーピクセル数の鉛直高度分布時系列図(1444~1532 JSTまでの6分間隔)である。棒グラフの高さがエコー強度55 dBZ以上のピクセルが存在する最大の高度を表している。また、ピクセル数については棒グラフ部分で層別(500 m毎)に割り当てて示している。例えば高度2000 mの場合は、高度1500~2000 mの間にピクセル数を割り当てている。なお高度1500 mの場合は高度0~1500 mの間にピクセル数を割り当てている。また、凡例に示すようにピクセル数は、黒色の濃淡によって表現されている。折れ線グラフは、領域内すべてのピクセル数総数の変化を示している。

上下の隣り合う2つの仰角及び連続する2回のスキャンにおいて検出される)を満たしている。

一般に上昇流の領域に $1.0 \times 10^{-2}/s$ 以上の渦度を持つ回転流(すなわちMCを持つ)を伴う積乱雲をスーパーセルの定義としている(例えば気象庁, 1993)。5.1節でのBWERやフック状のエコーの特徴からその場所では上昇流が強いことが推定でき、ドップラー速度から算出した鉛直渦度が $1.0 \times 10^{-2}/s$ 以上であることから、今回対象としている積乱雲は、スーパーセルにまで発達したと考えられる。

そこで、MCの鉛直渦度(以下MCの渦度とする)の時間変化や高度変化をみるために、第13図を作成した。この図は、羽田のドップラーレーダーによるドップラー速度からMCの渦度を求める方法を利用して1445~1529 JSTの鉛直渦度の時間-高度断面図を作成したものである。なお、ここでは鉛直渦度の値が

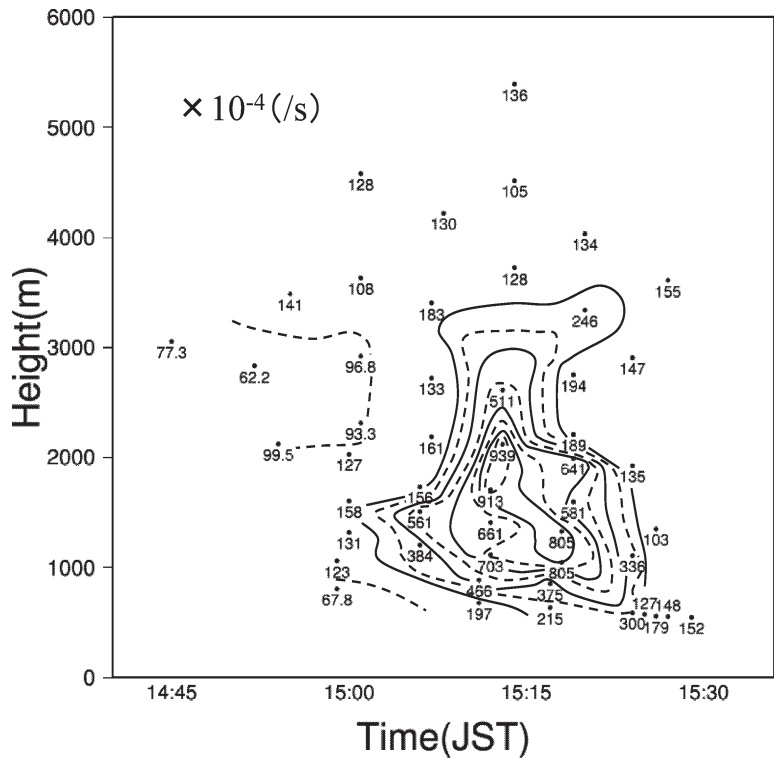


第12図 羽田のドップラーレーダーのエコー強度とドップラー速度分布図（仰角0.7°，1510 JST 観測）。エコー強度は、値が大きいほど黒い。ドップラー速度については正の値は、ビーム方向のドップラー速度（値が大きいほど白い）、負の値は、ビーム方向とは逆向き（レーダーサイトの方向）のドップラー速度（値が小さいほど黒い）となっている。

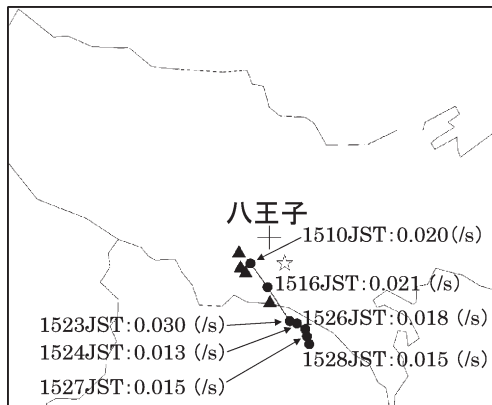
MC の定義に満たないものも、構造を把握するために、解析を行った。まず、1445 JST 頃から高度3000 m でドップラー速度の極大値と極小値のペアが解析できた。その後、そのペアは、1500 JST にかけて高度1000 m 付近から高度約5000 m まで解析できるようになり、鉛直渦度の値は MC の渦度の値 ($1.0 \times 10^{-2}/s$ 以上) を示すようになった。この時間帯から高度1000~1500 m 付近で、急激に MC の渦度の値が大きくなり、 $1.0 \times 10^{-2}/s$ 以上の領域が1510 JST にかけて最下層まで降りてきている様子が見られた。また、その領域が最下層へ降りてくるタイミングとは少し遅れて、上空へ向けても（高度3000 m 付近まで）急激に MC の渦度の値が大きくなり、1513 JST には、高度2000 m 付近で約 $9.4 \times 10^{-2}/s$ と最大値を示していた。

その後、1524 JST にかけて、MC の渦度の極大高度は地上付近まで下降していき、最下層での MC の渦度の極大値は $3.0 \times 10^{-2}/s$ となった。そのとき、高度3000 m 付近でも MC の渦度の極大高度が上昇する傾向が見られた。また、今回対象とする積乱雲は、スーパーセルの定義より1500 JST 頃から1530 JST 前までスーパーセルとして存在していた。

第14図は、羽田のドップラーレーダーの仰角0.7°の観測によるドップラー速度を用いて最下層の MC を解析し、解析できた時間帯の鉛直渦度および位置を追跡したものである。この MC の直径は約1~3 km、移動速度は、南東へ約45 km/h であった。また、この MC は、1510~1528 JST までの間、確認することができた。この図には現地災害調査結果（東京管区気



第13図 鉛直渦度の時間-高度断面図。ドップラー-速度分布図から大小の極大値と極小値のペアを見つけ出し、ランキン渦を仮定して鉛直渦度を求め、1445~1529 JSTまで時系列図化した。点線は渦度 $1.0 \times 10^{-2}/s$ から $2.0 \times 10^{-2}/s$ おき、実線は $2.0 \times 10^{-2}/s$ から $2.0 \times 10^{-2}/s$ おきの等値線で示している。



第14図 地上付近のメソサイクロンの鉛直渦度および追跡図。●はメソサイクロンの位置、それぞれ観測時刻と鉛直渦度の値を示している。なお▲は、現地災害調査結果(東京管区気象台ほか, 2005)からプロットした突風の被害地域、☆は筆者が観測した地点を示す。

象台ほか, 2005) から突風の被害地域が▲印で示されており、突風の被害地域はMCの進路に沿ったものになっていた。

6. 雷監視システム (LIDEN) による観測

雷には、雷雲と大地との間で起こる「対地放電」と雷雲の中や2つの雷雲の間、雷雲とその周辺の空間との間で起こる「雲放電」に大別される。一般に、雲の中の放電(雲放電)が最初に起こり、次に対地放電が発生する。気象庁では、雷に関して精度の良い航空気象情報を即時的に提供するため、2000年3月にLIDENが整備された。第15図は、LIDENで観測された「対地放電」と「雲放電」についてプロットしたものである。1450 JST以降、対地放電および雲放電の観測数が極端に少なくなっていた。その後、1510

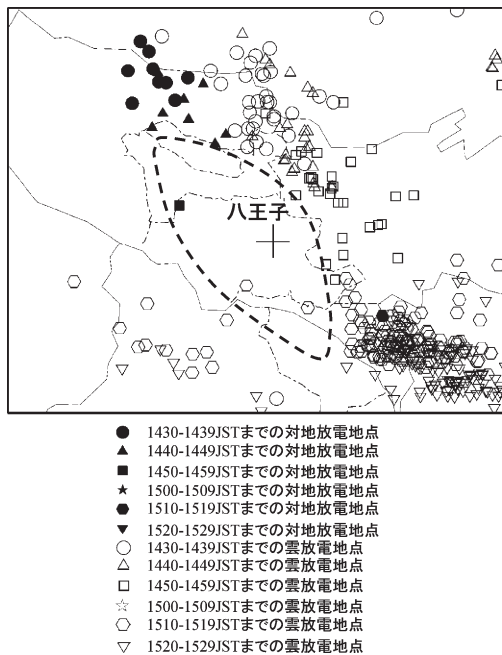
JST頃から東京都町田市付近から雲放電の観測数が増えていたが、点線の領域では、観測数が極端に少ないという特徴が見られた。この点線内は、5節に示したように積乱雲がスーパーセルにまで発達し、雹域に対応するエコー強度55 dBZ以上の領域が急激に拡大した地域に対応していた。

7. 考察

7.1 スーパーセルの発生環境について

5節で示したように、今回対象にした積乱雲は、スーパーセルにまで発達した。この節では、今回の観測と解析結果からスーパーセルの発生環境について考察する。

総観スケールでのスーパーセルの発生環境の特徴は、3節で示したように、500 hPaで約 $-27^{\circ}C$ の寒気を伴った地上低気圧が、沿海州から日本海北部を通過して東北地方を通過したことである。その環境下で、3節の熊谷 WINDAS の鉛直プロファイル時系列図より、1320 JSTから1420 JSTにかけ、高度4000 m付



第15図 LIDEN による「対地放電」「雲放電」の時系列図。一点鎖線は第2図に示した市町のエリアを示している。

近から順に高度3000 m 付近まで、トラフの通過が認められた。これは、500 hPa 面の高層天気図で、日本海中部から本州にかけて見られた帯状の正の鉛直渦度域内のショートトラフに対応するものと思われる。このトラフは、上層が先に通過していることから、下層に比べて相対的に寒気が先に入っていた可能性もある。仮にそうだとすると、対流不安定を促進させていたと思われる。これらのトラフの特徴は、総観スケールでのスーパーセルの発生環境に付随する特徴と思われる。しかし、3節で示したように館野では09 JST も21 JST も大気の安定度は悪くなかった。この点については鈴木・山内 (2005) の報告と一致している。しかし、高層観測データは、スーパーセルの発生時および発生域の大気環境を代表していない可能性がある。そこで、実際にスーパーセルの発生域であった八王子市付近の15 JST の高層実況推定を行った。

八王子市には、高層観測地点がないため、風と気温の基本となる鉛直プロファイルとして館野の高層レーウィンゾンデ観測 (第4図) を採用した。また、観測時刻は、対象とする積乱雲が八王子市を南東へ進み、その後、東へ進んだことから、対象とする積乱雲の位置に近い21 JST とした。この基本プロファイルに以下の3点を考慮した。

1点目は、4節に示したように関東平野に局地性低

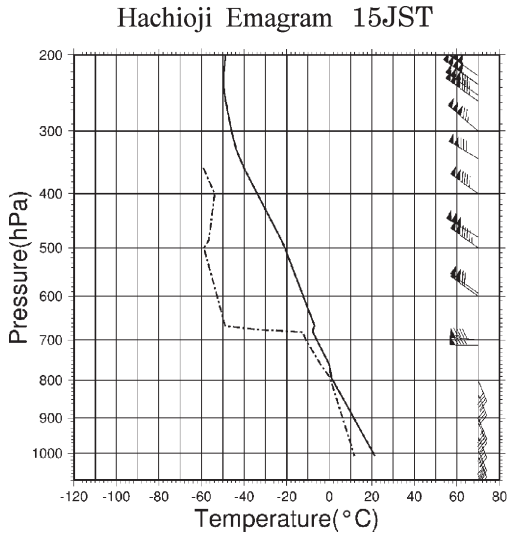
気圧が発生したことによる相模湾からの海風の影響である。実際に、相模湾からの海風の鉛直分布は、観測データがないため推察になってしまうが、第5図の羽田付近の ACARS データによる鉛直プロファイルでは、高度1500 m 付近まで、西南西～南西の風が10 m/s 前後の状態が続いていたことや熊谷の WINDAS の高度1500 m より下層の状況から、少なくとも高度1500 m 付近までは海風の影響があったと推定されるので、これらの点を考慮した。

2点目は下層の対流混合層の存在である。第7図から12 JST より八王子市では南成分の風が入り始め、少なくとも15 JST 過ぎまでの比較的長い間、風が吹いていることと日射の影響で対流混合されていたと考えた。

3点目は、上空の風の鉛直プロファイルは熊谷の WINDAS による観測値に近いという仮定である。今回のスーパーセルに相当するエコーを含む一連のエコー (第9図左図: 仰角2.1°で熊谷付近では高度3104 m に相当) と熊谷の WINDAS がとらえたトラフの通過とほぼ合っていることから、スーパーセルの発生環境に近いと考えた。

その結果、風の鉛直プロファイルについては、15 JST 時点での八王子の地上風向・風速を高度1000 m 付近まで割り当て、その上層部分は、風向変化・弱風域を考慮するとともに、熊谷 WINDAS の風の鉛直プロファイルを風の存在する高度まで割り当てた。割り当てた時刻は、一番最下層のトラフが通過している時刻の1420 JST である。また、地上気温と露点温度については、八王子で観測された実況値を使用し、それぞれ乾燥断熱減率線、等混合比線に沿って気温と露点温度を割り当て、実況のプロファイルと交わるところまで適用した。

このような手順で作成した八王子市付近の15 JST での高層の鉛直プロファイルは、第16図のようになり、大気の安定度の指標は、SSIは0.4、CAPEは1258 J/kg、CINが0.0 J/kg であり、対流が起きた時にその気塊の浮力が0となる高度は307 hPa (約9000 m) となった。この結果から4節で述べた海風による水蒸気量の増加と日照による昇温の効果が大気不安定度を時間的・局地的に強めたものと思われる。なお、対流が起きた時にその気塊の浮力が0となる高度は、第10図や第11図で示したエコーの図から、55 dBZ 以上のエコー頂とほぼ一致していた。また、気温と露点温度がほぼ交わる高度は、風の鉛直プロファイルの弱風域高度とほぼ一致し、対流混合層の上端高度の様子を再現できていると思われる。以上から、八王子市付近を仮定した鉛直プロファイルの割り当て方については妥当と考えている。



第16図 推定した八王子市のエマグラム。八王子での観測および熊谷 WINDAS、館野のレーウィンゾンデデータから推定した15 JSTの八王子付近のエマグラムである。凡例については第4図を参照のこと。

また、上記プロファイルを利用してバルク・リチャードソン数（以下 BRN とする）

$$\text{BRN} = \frac{\text{CAPE}}{\frac{1}{2} \cdot [(U_6 - U_{0.5})^2 + (V_6 - V_{0.5})^2]} \quad (2)$$

を高度0.5 km（地上）～6 kmの間の水平風の風速差として計算したところ、8.5であった。Weisman and Klemp (1982) は数値実験と観測結果から BRN が約10～50では、スーパーセルが発生しやすいと報告しているが、その範囲外の値を示している。Weisman and Klemp によると10より小さい値の場合は、鉛直シアが強すぎてスーパーセルが発生しにくいと指摘されている。作成された鉛直プロファイルが、現実の状態を表現できているかどうかの問題はあるとしても、この BRN の値は小さい。また、柴田 (2006) の台風を対象とする事例でも、BRN は9.4と下限値より下回っている。Weisman and Klemp のスーパーセルの発生指標は、大規模なスーパーセルが発生しやすい米国で適用した場合の評価である。この指標を日本において適用した場合は、BRN が8.5であってもスーパーセルが発生しやすいとなる可能性がある。今後、日本でのスーパーセルの事例を蓄積した上で、その時の高層観測結果から BRN の取りうる値の範囲について調査する必要がある。

また、SRH は $-5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ で米国においてスーパーセルが発達するための下限値 $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ を大きく下回る結果となった。下層でのシアが小さかったことが原因であるが、SRH についても BRN と同様に、日本でのスーパーセルが発達する下限値は、米国のものとは違う可能性もあるので、BRN と同様に調査をする必要がある。

これらの八王子市付近の高層の鉛直プロファイルから得られた特徴は、前述のとおり時間的には短く、局的であると考えられることから、メソスケールでのスーパーセルの発生環境の特徴と思われる。

7.2 スーパーセルの発生に至る引き金について

5節で示したようにスーパーセルとなった積乱雲は、長野県・富山県境付近に発生し、南東に進んできたものであった。この積乱雲が発達し、スーパーセルとなった場所は、ドップラーレーダーの観測から、1450 JST 頃東京都あきる野市や日の出町（第2図参照、八王子から北西に10 km くらいの地点）の山地と平野部の境界付近であると考えられる。この節では、今回の観測と解析結果からスーパーセルが発生した引き金について考察する。

この引き金となる要因は、2つのことが考えられる。

1つ目は、地形の影響による上昇流である。スーパーセルが発生した場所には、多摩川の支流である秋川が流れている。そのため、V字型の地形となっている。また、この川の上流へ向けて高度が上がっていく地形となっている。そのため、風が川の上流部に向かって吹いた場合には、強制的に気塊が上昇しやすくなる。15 JST の八王子の風は、海風の影響を受けて南南東7 m/s となっていた。あきる野市や日の出町付近にこの風が達した時には、地形の影響で南東～東南東風に風向が変わり、風が吹くことによる強制的な気塊の上昇が起こる可能性がある。

2つ目は、積乱雲からの降水粒子の荷重と蒸発とで形成された冷氣外流出と地上の南東風との収束で起きた上昇流である。スーパーセルが発生した場所のドップラーレーダーの観測（第9図上図中央）では、強いエコーが見られていたが、その後面ではエコーが弱いか存在しない領域となっていた。しかし、1500 JST の降水量分布図（第9図下図中央）では、その領域で前10分間に7～8 mm の強い降水を観測していた。これらのことからドップラーレーダーで観測していた前面の強いエコーが、その後ろ側の降水に相当するエコー強度を減衰させたと思われる。また、3節の館野のレーウィンゾンデ観測結果より700 hPa より上層で乾燥していたことから、この地域の上空では、乾燥気塊の流入による降水粒子の蒸発効果が起きていた可能

性もある。これらのことから、この地域では強い降水と降水粒子の蒸発による空気塊の冷却により、降水近傍の空気塊を引きずり下ろす強い下降流が起き、冷気外出流が発生した可能性が高い。実際、この時間帯のアメダスによる気温分布（図略）をみると周囲より低温になっている。そして、このエコーは南東へ約45 km/hで進んでいたことから、冷気外出流が南東側へ氾濫していたことも考えられる。一方、前述したように、地上の風向は、南東～東南東であった。これらのことから、あきる野市や日の出町付近で、南東～東南東の風が、降水粒子の荷重と蒸発とで形成された冷気外出流との間で収束し、それによって上昇流が起きていたと思われる。

スーパーセルとなった引き金は、7.1節で示したように大気環境の不安定度が時間的・局地的に大きくなっていったところに、これらの2つの上昇流を発生させるメカニズムが働いたことと考えられる。前者の地形の影響による上昇流は、八王子（高度123 m）からスーパーセルとなった場所（高度約1000 m）までの勾配が一定である斜面を仮定し、15 JSTの八王子の風速7 m/sの風が、摩擦の影響を受けずにこの斜面を吹いたとすると、約0.6 m/sと見積もられる。この事例でのスーパーセル積乱雲内の上昇流は、少なくとも20 m/s（詳細は7.3節）と見積もられるため、地形の影響による上昇流の効果は、小さいと考えられる。一方、後者的上昇流の場合は、地上風速に冷気外出流に伴う速度分を加えた上昇流を期待することができることから、スーパーセルとなった引き金は、後者的上昇流の影響が大きかったものと思われる。

7.3 スーパーセルのライフサイクルについて

今回対象にしたスーパーセルについてこれまでの各節で述べてきたことを基にして以下の4つのライフサイクルとしてまとめた。

（発生期）1444 JST～1450 JST

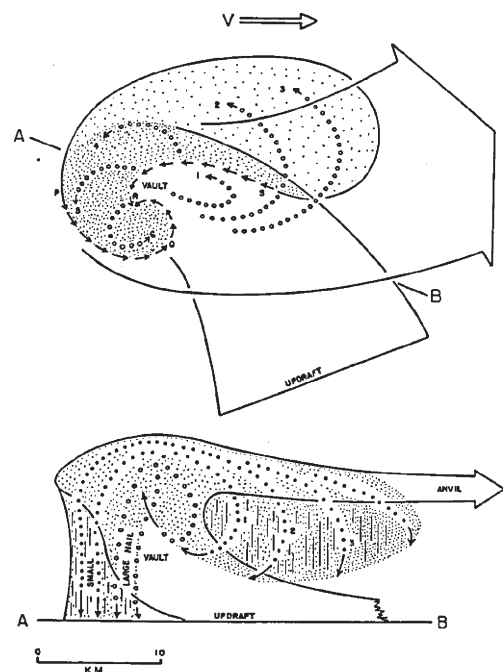
第10図のエコー強度の解析から発達初期の頃は、鉛直に伸びるような形での孤立した積乱雲の発達であった。

（発達期）1450 JST～1500 JST 頃

1500 JST頃までに積乱雲は一気に発達し、雹域を高度4000～5000 mの高さを主体に形成し始めた。これは、5節や7.2節で示したように中層付近のトラフの通過、海風による水蒸気量の増加、日照による昇温の効果により、時間的・局地的に対流不安定が促進されたことと、積乱雲からの降水粒子の荷重と蒸発とで形成された冷気外出流の前面で地上の南よりの風との間で収束がおき、上昇流が強化されたことによると考えられる。高度4000～5000 mは、館野のレーウィンゾンデから、温度が約 -20°C となっていて、雹域を形

成するには十分な高度であった。この積乱雲では、八王子市で直径約2 cmの降雹をもたらした。直径約2 cmの雹の落下速度は約20 m/s（水野，2000）であるので、上空で雹域を形成していることから上昇流の速度としては少なくとも約20 m/sはあったものと思われる。また、第10図のエコー領域の鉛直分布で、南東方向へ傾いている特徴が見られた。これは、第17図にBrowning（1964）が示したような雹域に着目したスーパーセルの構造に似ている。この構造になっていたことが、雹域を維持する役割を果たしたものと思われる。なお、6節で示したようにLIDENによる観測から対地放電、雲放電の観測数が極端に減少していた。これは、雷が少なくなっていたことを示している。

第13図の鉛直渦度の時間—高度断面図から1445 JSTに高度3000 m付近でドップラー速度を見ると、極大値と極小値のペアが解析できた。その後、1500 JST頃には高度3000 mより上層と高度2000 mより下



第17図 スーパーセルの構造の平面図とABを含む鉛直断面図。降雨域と降雹域をそれぞれ薄く影をつけた領域と濃く影をつけた領域で示す。縦線の影をつけた領域は下降域で、鉛直断面図の右側では紙面に入る方向、左側の下降域では紙面から出る方向の流れを伴っている。1～6は降水粒子の軌跡で、このうち1～3は鉛直断面図の軌跡に対応している（Browning, 1964；気象庁，1993より引用）。

層で鉛直渦度の値が大きくなっていた。これは、第16図の八王子市の鉛直プロファイルに見られるように高度3000 mより上層と1000~1500 m付近の鉛直シアが大きく、上昇流による立ち上がりの効果が現れたものと思われる。特に、鉛直シアが顕著な下層では、鉛直渦度が顕著に強まっていた。

雹域の形成およびMCの渦度の強まりから、この時間帯を発達期とした。

(最盛期) 1500 JST 頃~1510 JST 頃

1500 JST 頃には、第9図からスーパーセルの特徴の1つであるBWERが見られ、MCが検出されていることから、スーパーセルになったものと思われる。また、第11図のとおり、55 dBZのエコー頂高度は約8000 mとなっていて、この時間がエコー頂高度のピークである。エコー強度55 dBZ以上のピクセル数の鉛直分布時系列図において、上層から下層までの合計ピクセル数が多い時間帯にもなっていた。またエコーピクセル数の極大高度の変化を見ると、1456 JSTでは、高度4000~5000 m付近に極大があったのが、1502 JSTでは最下層、1508 JSTでは、3000~5000 m付近が極大となっていて、それぞれの高度が異なっていたことから、解像度の問題もあり断定はできないものの、雹域の上昇下降に対応していると思われる。また、1502 JSTでは、エコーが東京都あきる野市や日の出町に位置し、エコー強度55 dBZ以上のエコーピクセル数が最下層まで増加していた。これらのことから、1502 JST頃から東京都あきる野市や日の出町で、降雹が始まったと考えられる。なお、LIDENによる観測から対地放電、雲放電の観測数は少ない状態が続いていた。

また、第13図から下層のMCの渦度領域が拡大しながら1506~1510 JST頃にかけて地上付近に降りてきている傾向が見られる。これは、ちょうど東京都八王子市での突風被害のタイミングに一致している。

スーパーセルに成長したこととエコー強度分布から発達期のピークとなっていたため、この時間帯を最盛期とした。

(衰弱期) 1510 JST 頃~1530 JST 前

第11図から1508 JST以降は、エコー強度55 dBZ以上のピクセル数が激減していた。また、2節の観測結果から、東京都八王子市、町田市および神奈川県相模原市に降雹をもたらしたものと思われる。なお、LIDENによる観測では、スーパーセルの南東側(進行方向の前面)にあたる町田市付近で雲放電の観測数が増えているが、対地放電の数は少なく、落雷が少ない状態が続いていた。

また、1513 JSTにMCの渦度が高度2000 m付近でピークを迎えた。MCの渦度の極大高度は、1530

JSTにかけ地上付近に再び下降している様子が見られた。これは、東京都町田市や神奈川県相模原市での突風の被害のタイミングに一致している。また、高度3000 mより上層へもMCの渦度の極大高度の上昇が見られた。似たような現象は、柴田(2006)でも見られているが、突風被害との関係は不明としている。

その後、スーパーセル自体が、第14図のMCの動きに見られるように、南東へ移動したことで、4節で示した相模川沿いを八王子市へ向けて吹いていた海風の流入経路から外れて、水蒸気を多く含んだ気塊の流入が絶たれたことや、第10、11図でエコー強度55 dBZ以上の上端高度の降下やピクセル数の急激な減少に見られる降雹効果により、積乱雲の発達の抑制が働き、スーパーセルは1530 JST前には維持できなくなったと推定される。

1530 JST前には、積乱雲がスーパーセルとして維持できなくなったことから、この時間帯を衰弱期とした。

ただ、3節で示したように横浜市と川崎市、東京都町田市あたりにかけ速度収束によるシアによる影響で積乱雲の世代交代は、維持し続けた。

なお、このスーパーセルのライフサイクルを通して、スーパーセルとその周辺では雷の発生が少ないという特徴が見られるが、この原因とスーパーセルの構造との関係は、本論文の解析の範囲では明らかにならなかった。

7.4 スーパーセルの通過と被害地域との関係

5節で示したように突風の被害地域はMCの進路に沿ったものになっていて、7.3節で述べたようにMCの渦度の極大域ないしは強い部分が地上付近へ降りてくるタイミングと被害地域が一致していた。同じようなMCの特徴と被害地域の関係がある例として、柴田(2006)によるものがある。柴田(2006)では、2001年8月22日埼玉県羽生市で発生した竜巻について、竜巻発生前にMCの渦度のピークが次第に高度を下げる様子が認められたと報告している。今回の被害地域で起きた現象は特定されてはいないが、MCの渦度の極大域ないしは強い部分が地上付近に降りてくるタイミングで突風が発生したという点で共通していた。

8. まとめ

今回、降雹と突風をもたらした積乱雲の特徴についてドップラーレーダーや雷監視システムによる観測をはじめ種々の観測結果をもとに解析を行った。結果は以下のとおりである。

(1) ドップラーレーダーの観測から、今回対象にした積乱雲は、東京都あきる野市や日の出町付近で1500

- JST頃、MCを持つに至り、スーパーセルに発達した。その後、八王子市を45 km/hで南東へ移動し、町田市に達した1530 JST前までスーパーセルとして維持し続けた。
- (2) スーパーセルに発達した要因は、以下の①～③のように考えられる。① 500 hPaで約 -27°C の寒気を伴った低気圧が、東北地方を通過し、それに伴い、中層(高度600~700 hPa付近)のトラフが八王子市に近い熊谷付近を通過していたこと、② ①のトラフに伴って、上空には寒気が入り、さらに海風による水蒸気量の増加と日照による昇温の効果が加わり、時間的・局地的に安定度が悪くなった可能性があること、③ 積乱雲からの降水粒子の荷重と蒸発とで形成された冷気外流出と地上の南東風との間の収束による上昇流が存在したと思われること、である。
- (3) スーパーセルのライフサイクルについては以下の4つに分類して特徴を明らかにした。最大の特徴は、MCの出現時に、高度2000 mより下層で、鉛直渦度が顕著に強まりはじめていること、スーパーセルが存在している間、積乱雲内部では雷が少ないことであった。
- (発生期：1444 JST~1450 JST)
孤立した積乱雲の発達。
- (発達期：1450 JST~1500 JST頃)
大気中層付近に雹域を形成し、下層でMCの渦度が増大。対地放電、雲放電の観測数の激減。
- (最盛期：1500 JST頃~1510 JST頃)
雹域の上昇下降と降雹(東京都あきる野市、日の出町)、下層MCの渦度の極大高度の地上付近への降下。対地放電、雲放電の観測数少。
- (衰弱期：1510 JST頃~1530 JST前)
広範囲の降雹(東京都八王子市、町田市、神奈川県相模原市)とMCの渦度の中層付近での極大高度の上昇と地上付近への降下。水蒸気を多く含んだ気塊の流入経路の途絶と降雹による積乱雲の発達の抑制。進行方向前面での雲放電の観測数の増加。
- (4) スーパーセル発生時のBRNとSRHは、それぞれ 8.5 、 $-5\text{ m}^2/\text{s}^2$ となっていて、米国のスーパーセル発生指標の下限値を下回っていた。
- (5) 突風の被害地域は、MCの進路に沿ったものになっていた。そして、被害発生は、スーパーセルの最盛期と衰弱期において、MCの渦度の極大域ないしは強い部分が、地上付近へ降下するタイミングであった。

謝 辞

本論文を作成するにあたり、ドップラーレーダーデータを気象庁観測部観測課木俣昌久氏から提供を受けました。そして、有益な助言も頂きました。また、ドップラーレーダーを解析するにあたり、気象研究所で開発された「Draft」(田中・鈴木, 2000)を利用して頂きました。そして、大気汚染常時測定局の風向・風速値や雨量観測所の降水量値などは、東京都・埼玉県・神奈川県・千葉県各都県から、アメダス八王子の湿度値および最大瞬間風速値などは、八王子市天気相談所から、LIDENデータは、気象庁観測部からそれぞれ提供して頂きました。最後に、2人のレフリーの方および担当編集委員には、丁寧に査読をして頂き、有益なコメントも頂きました。ここに感謝致します。

略語一覧

ACARS: Aircraft Communications Addressing and Reporting System 航空機空地データ通信システム
BRN: Bulk Richardson Number バルク・リチャードソン数
BWER: Bounded Weak Echo Region エコーの弱い仕切られた領域
CAPE: Convective Available Potential Energy 対流有効位置エネルギー
CIN: Convective INhibition 対流抑制
LIDEN: LIghtning DEtection Network system 雷監視システム
MC: MesoCyclone メソサイクロン
METAR: METeoroological Aerodrome Report 定時飛行場実況気象通報式
PPI: Plan Position Indicator 仰角を固定してレーダーのアンテナを方位方向に回転させ、観測する走査方法
SRH: Storm Relative Helicity ストーム・リラティブ・ヘリシティ
SSI: Showalter's Stability Index ショワルターの安定指数
SYNOP: surface SYNOptic observations 地上実況気象通報式
WER: Weak Echo Region エコーの弱い領域
WINDAS: WInd profiler Network and Data Acquisition System 局地的気象監視システム

参 考 文 献

- Donaldson, R. J. Jr., 1970: Vortex signature recognition by a doppler radar, *J. Appl. Meteor.*, **9**, 661-670.
気象庁, 1993: 平成2(1990)年12月11日千葉県内で発生した竜巻等調査報告, 気象庁技術報告, (113), 105-143.
水野 量, 2000: 応用気象学シリーズ 3. 雲と雨の気象学, 朝倉書店, 196pp.
大野久雄, 2001: 雷雨とメソ気象, 東京堂出版, 309pp.

- 大久保 篤, 柴田のり子, 川上正志, 小泉友延, 本田耕平, 2003: ドップラーレーダーがとらえたメソ低気圧の盛衰と竜巻発生との関係—2002年7月10日に群馬・埼玉県境付近で発生した竜巻—, 気象庁研究時報, **55**, 153-160.
- 柴田のり子, 2006: 台風に伴うスーパーセル竜巻の予測可能性について—2001年8月22日埼玉県羽生市で発生した竜巻の発生環境と親雲の特徴から—, 天気, **53**, 197-205.
- Suzuki, O., H. Niino, H. Ohno and H. Nirasawa, 2000: Tornado-producing mini supercells associated with Typhoon 9019, *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1868-1882.
- 鈴木 修, 山内 洋, 2005: 2005年5月15日に東京都西部～神奈川県北部に突風と降雹をもたらしたスーパーセルストームの解析, 日本気象学会2005年度秋季大会講演予稿集, (88), 475.
- 田中恵信, 鈴木 修, 2000: レーダー解析ソフト“Draft”の開発, 日本気象学会2000年度春季大会講演予稿集, (77), 303.
- 東京管区気象台, 横浜地方気象台, 2005: 平成17年5月15日に東京都八王子市, 町田市と神奈川県相模原市で発生した突風による風害について, 東京管区気象台ホームページ内「突風や大雨, 台風等の気象資料」, (http://www.tokyo-jma.go.jp/sub_index/bosai/disaster/20050516/20050516.html)
- Weisman, M. L. and J. B. Klemp, 1982: The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy, *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 504-520.

The Characteristics of the Convective System that Brought Hail and Gusts to Hachioji City, Tokyo on May 15, 2005

Koji YAMASHITA*

* *Japan Meteorological Agency, 1-3-4 Ote-machi, Chiyoda-Ku, Tokyo 100-8122 Japan.*

(Received 24 November 2005 ; Accepted 18 June 2007)
