

2007年4月28日に東京湾岸地帯に突風をもたらしたボウエコー

高 谷 美 正*・鈴木 修**・山 内 洋**
中 里 真 久***・猪 上 華 子**

要 旨

2007年4月28日午後、関東地方は雷雨・突風・降電を伴う大荒れの天気となり、各地で被害が相次いだ。この事例について、ドップラーレーダー、高層気象観測、ウィンドプロファイラー、地上気象観測の各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) 被害をもたらした降水システムは、ボウエコー（弓形のエコー）の特徴を備えていた。
- (2) レーダーのデュアル解析により、このボウエコーの先端部分に鉛直渦度と水平収束の大きい領域が解析された。この領域の形状と振る舞いは先行研究のサイクロニックなメソサイクロンと良く似た特徴を持っていた。この領域は当初中空（地上2～4 km）に浮いていたが、その後その南西端が地上付近に垂れ下がるような形状となった。この時にその足付近で、低層のPPIデータにマイソサイクロンが2つ検出され、これらは鉛直渦度と水平収束の大きい領域とともに東南東に移動した。
- (3) 2つのマイソサイクロンの内、より南側を通過したマイソサイクロンが、東京湾岸地帯の約18 kmにわたる直線上の複数の場所に突風被害をもたらした。低層のPPIデータによる見積りでは、被害場所は、渦の風と渦の移動速度が線形の重ね合わせによって強め合う場所で起きており、風速は最大 40 ms^{-1} ほどに達したと見積もられる。
- (4) サイクロニックなメソサイクロンの発生機構として、先行研究の数値実験において、「下降域内を下降する空気塊が、ガストフロントをまたぐ傾圧帯において傾圧効果により水平渦を獲得する。その水平渦がガストフロントに沿って存在する上昇流によって上方に傾けられて鉛直渦度を獲得し、更に延伸することにより鉛直渦度が強められる」というものが挙げられている。この発生機構が実際に働いていることを示唆する解析結果が得られた。
- (5) 被害が最初に起きた時刻の約10分前に、仰角の高いドップラーデータで見ると、ボウエコーの先端部分において動径風の収束が強まっていた。これはマイソサイクロンの前兆現象として突風の直前予報に役立つと思われる。

1. はじめに

2007年4月28日、連休初日の関東地方は、午前中は

* 気象研究所, yoshimasa.t@jcom.home.ne.jp

** 気象研究所,

*** 気象研究所 (現 気象庁観測部),

—2011年3月15日受領—

—2011年10月2日受理—

好天だったが午後から一転して雷雨・突風・降電の大荒れの天気となり、各地で被害が相次いだ。アメダスによればこの激しい嵐が通過する前後で、気温は各地で 10°C ほど低下し、風向も南寄りから北寄りに急変した。ウィンドプロファイラー（以後 WP）のデータによれば鉛直風は、寒気側では下降流、暖気側では弱い上昇流であった。本論文では、とりわけ被害が大きかった東京湾岸地帯で発生した突風について詳しく述

べる。ここでの被害は15時20分から30分ごろまでの約10分間の間に発生した。被害場所は都営新宿線船堀駅付近、千葉県浦安市の魚市場北側の商店会、及び検見川浜沖の3箇所で、18 km にわたる直線上に並んでいた。

ところで竜巻やダウンバーストのような激しい突風をもたらすメソスケール降水システムとしては、スーパーセルが先ず頭に浮かぶが、いわゆるボウ（弓形）エコー（以後ボウエコー）もダウンバーストや竜巻を発生させるメソスケール降水システムとして、アメリカでは盛んに研究されてきた。しかしわが国ではボウエコーの調査はあまりなされていない（大野ほか 1996；小林ほか 2007）。

ボウエコーは、長い直線状の突風被害域（wind damage swath, swath：鎌で刈り取った跡の意味）を発生させ、またしばしば竜巻やダウンバーストを伴う激しい対流活動として知られている。ボウエコーによる被害調査によって、被害を受けた領域の長さが時には 200 km に及ぶこともあり、藤田スケール（以後 F）で F0～F2 の被害が発生することが分かっている（例えば、Fujita 1978, 1981；Fujita and Wakimoto 1981；Wakimoto 1983；Forbes and Wakimoto 1983；Wakimoto and Wilson 1989；Wakimoto *et al.* 2006a；Weisman and Davis 1998；Weisman 1992, 1993；Atkins *et al.* 2005；Wheatley *et al.* 2006 など）。しかし時には F3～F4 の被害が発生したこともあった（Trapp *et al.* 2005）。

ボウエコーはレーダーの反射強度の水平分布でわかる形態的な特徴だが、それに伴う突風被害の原因については長く議論がなされてきた。最初に藤田（Fujita 1978）によって主張されたことだが「ボウエコーによる突風被害は、後面から流入したジェット気流（Rear Inflow Jet, 以後 RIJ）が地表面近くに降下してくることによってもたらされる」と長いこと思われてきた。RIJ はメソスケール対流システムにおいて一般的に見られるものであり、中層における浮力の水平勾配によって生起する。この浮力勾配はシア上流側に傾いた上昇流が、冷氣塊の上を後方に上昇することで生ずる（Lafore and Moncrieff 1989；Weisman 1992）。ドップラーレーダーによる研究で RIJ はボウエコー先端（一番突出した部分）の背後に存在することが分かっている（例えば Forbes and Wakimoto 1983；Schmidt and Cotton 1989；Burgess and Smull 1990；Jorgensen and Smull 1993；Przybylinski

1995；Funk *et al.* 1999；Atkins *et al.* 2004 など）。Wheatley *et al.* (2006) は、被害調査とレーダーデータを突き合わせて、ボウエコーによる突風被害は降下してくる RIJ による可能性があることを示した。

しかし、最近の数値実験と観測による研究では、ボウエコーのガストフロント内に形成された下層のメソスケールの渦（以下メソ渦）もまた被害を生み出していることが分かってきた。ボウエコーに伴うメソ渦による突風の発生に関する最初の詳細な研究は Trapp and Weisman (2003) による。彼らの数値実験によれば、地表面付近の突風域はボウエコー先端の北側で発生し、メソ渦に伴う低圧部による気圧傾度力が関与していた。その後、米国では、ボウエコーとメソ渦を調査するプロジェクト BAMEX (Bow Echo and Mesoscale Convective Vortex, Davis *et al.* 2004) が 2003 年に立ち上げられて、様々の成果が出ている。Atkins *et al.* (2005) は、2003 年 6 月 10 日に発生したボウエコーについて、ドップラーレーダーのデータと被害調査の結果を重ね合わせる解析を行い、ボウエコー先端の北側にあるメソ渦が東西 80 km にわたる直線状の突風被害域を作り出したこと、最も強い風が吹いた場所はこのメソ渦の南側の縁にあることを見出した。Wakimoto *et al.* (2006b) は、2003 年 7 月 5 日のボウエコー事例について航空機搭載レーダーのデータ等を解析して、F1 の被害をもたらした風は下降してくる RIJ の北側に位置したメソ渦の南の縁に位置していたことを示した。デュアルドップラー解析の結果、被害をもたらした風は、東向きに下降してくる RIJ とメソ渦本来の風の線形的な重ね合わせによって発生したことを示唆しており、Trapp and Weisman (2003) による数値実験の結果とは異なっているが、Atkins *et al.* (2005) の結果とは整合している。

本研究では、2007 年 4 月 28 日に発生したボウエコーについて、主として気象ドップラーレーダーを用いて解析を行い、ボウエコーの構造を詳細に調べて、米国での研究結果と比較する。又この日関東各地で発生した強風の中でも取り分け被害の規模が大きかった 15 時 20 分頃から 15 時 30 分頃にかけての東京湾岸地帯で発生した突風と、このボウエコーとの関係についても調べる。

2. データと解析手法

用いたレーダーデータは、羽田と成田の両国際空港に設置された空港気象ドップラーレーダー (Doppler

Radar for Airport Weather, 以後 DRAW; レンジ 120 km), 気象研究所ドップラーレーダー (レンジ 160 km) の各データである (配置は第1図参照). その他, つくば市にある高層気象台のゾンデデータ, 関連各地のアメダスによる地上データ, 気象庁の WP のデータを用いた.

ドップラーデータの信頼性に最も深く関与する, いわゆる折り返しの補正法については, いずれのデータも Yamauchi *et al.* (2006) による「hybrid multi-PRI method」を用いた.

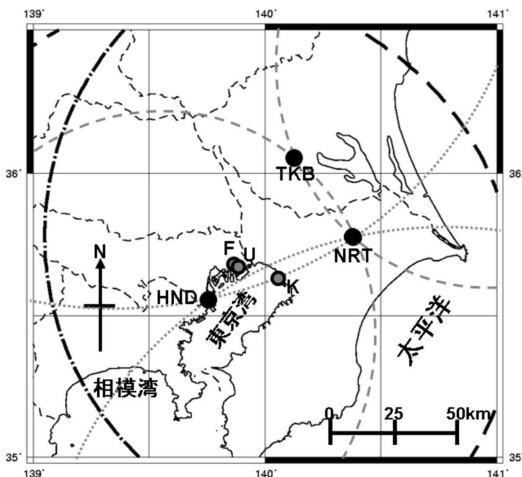
第6章で述べるマイソサイクロン (直径40~4000 m, Fujita (1981)) の検出は, 羽田 DRAW の仰角 0.7度の PPI (Plan Position Indicator のことで, 一定仰角でスキャンされたデータ. レーダーデータの最も基本的なもの) データから, マイソサイクロンを含む扇型の領域を切り出し, ランキン渦を仮定してドッ

プラー速度の極大・極小を数値的に探して行った. 前後の時間のデータとの連続性も考慮した. マイソサイクロンが解析された場所は, レーダーから17~24 km の距離にある. 羽田 DRAW のビームの広がり度は0.7度であるから, ビーム幅は200~300 m である. またビーム高度は仰角 0.7度であるから 200 ± 100 m ~ 300 ± 150 m である. 検出されたマイソサイクロンの直径は約800~2700 m あった. 実際の解析にあたってドップラー速度の極大・極小間のビーム数は最も少ない場合で4本であった. この方法は, マイソサイクロンと有限幅のレーダービームとの出会いの偶然性によって多少の誤差を生じる (Wood and Brown 1997, 2000).

第6章では, 被害のあった場所付近で複数回検知されたマイソサイクロンの解析により, 被害場所付近の風を見積る. 検知された時刻の間のマイソサイクロンの位置及び諸元は線形内挿する. また, 観測された PPI のデータは現地では上空約200 m のデータであることを考慮する. 一般に竜巻の場合には, 流入層の厚さは数十メートルとされている (Lewellen *et al.* 2000; Fiedler and Rotunno 1986; Bluestein *et al.* 2004; Kosiba and Wurman 2010). ここで竜巻とマイソサイクロンで流入層の厚さはあまり変わらないと仮定する. 被害を受けた船堀駅前のトキビルのゴンドラの高度は90 m と見積もられ, 他はそれ以下であるから, 被害を受けた場所はいずれも流入層内にあったことになる. ここでは, 流入層の上はランキン渦であると仮定し, 更に流入層内の風速はランキン渦で求めたものと同じで, かつ風向は接線方向から45度内側に向いている場合と接線風の場合の二通り検討した.

レーダーデータの解析は, 気象研究所で開発された

第1図 解析に用いたレーダーの配置 (黒丸). サイト名は, HND: 羽田 DRAW; NRT: 成田 DRAW; TKB: 気象研究所ドップラーレーダー. 成田 DRAW, 羽田 DRAW のレンジ (120 km) を黒い一点鎖線と破線で示した. 気象研究所ドップラーレーダーのレンジは160 km で, この図の全領域をカバーしている. デュアル解析の領域境界を, 羽田 DRAW と成田 DRAW の場合に対してグレーの点線で, 成田 DRAW と気象研究所ドップラーレーダーの場合に対してグレーの破線で示した. また被害のあった地点をグレーで塗った黒丸で示した. F: 都営新宿線船堀駅; U: 浦安魚市場北口商店会; K: 検見川の浜にある稲毛ヨットハーバー.

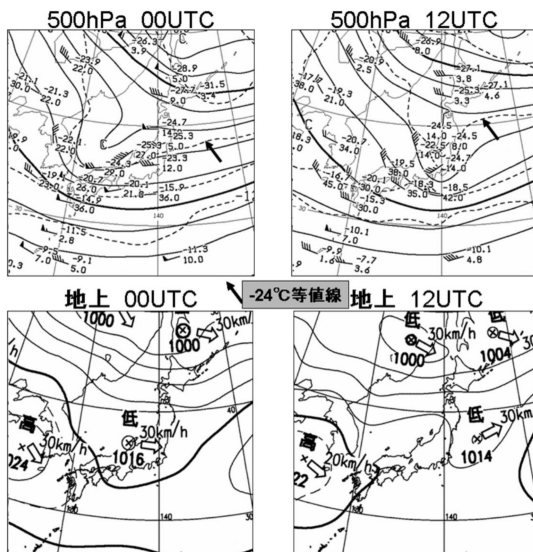


第1表 デュアル解析に際して用いたレーダーデータの一覧.

デュアル解析データ一覧					
時刻スタンプ	サイト1	サイト2	サイト1のスキャン 開始時刻	サイト2のスキャン 開始時刻	時刻差 (秒)
14:46	NRT	HND	14:46:38	14:45:49	49
14:51	NRT	HND	14:51:47	14:51:06	41
14:56	NRT	HND	14:56:55	14:56:23	32
15:02	NRT	HND	15:02:09	15:03:12	63
15:07	NRT	TKB	15:07:20	15:06:35	45
15:12	NRT	TKB	15:12:27	15:12:14	13
15:17	NRT	TKB	15:17:35	15:17:11	24
15:23	NRT	TKB	15:22:44	15:23:32	48
15:26	NRT	HND	15:26:16	15:26:13	3
15:29	NRT	TKB	15:28:44	15:29:10	26
15:34	NRT	TKB	15:34:48	15:34:49	1
15:40	NRT	TKB	15:40:16	15:40:28	12
15:51	NRT	TKB	15:51:15	15:51:45	30

NRT: 成田空港; HND: 羽田空港; TKB: 気象研究所

Draft (田中・鈴木 2000) を用いた。このツールにはデュアル解析をする機能があり3次元の速度ベクトル場を得る。デュアル解析にあたって、両レーダーサイトへの見込み角が、 $0 \sim 20^\circ$ 、及び $160 \sim 180^\circ$ の領域は誤差が大きくなるので解析から排除した(第1図のグレーのカーブ参照)。デュアル解析に用いたレーダーデータの組み合わせは、第1表に示してある。3つのサイトから2つを選ぶに際して、次の3つの点に留意した。①現象が起きている場所で見込み角が上記の解析精度の悪い範囲に入らないこと、②2つのサイトの体積スキャン開始時刻の差が大きくなならないこと、③反射強度データは、サイト間でデータにバラつきがあるため単一のサイト(本研究では成田 DRAW)のみを用いること、である。ここでは体積スキャンの開始時刻の差は最も大きくて63秒である。システムの移動速度が約 20 ms^{-1} であったから、この間の位置のずれは最大で1.2 km である。デュアル解析の基本となるCAPPI (Constant Altitude PPI, PPI データから作った高度一定のデータ)を作る際の影響半径は2 km に取ってあるので、このずれによる誤差は小さいものと考えられる。一方この影響半径により、デュアル解析はマイソサイクロン等の現象を表現には適さず、システム全体の表現に適していることになる。



第2図 2007年4月28日00UTCと12UTCの500 hPa 高層天気図と地上天気図。高層天気図の -24°C 等値線を矢印で指し示した。

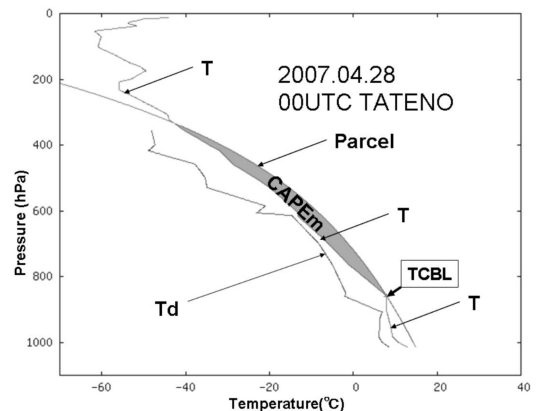
システム相対風を求めるための、システムの移動速度は、後に述べるマイソサイクロン1の移動速度をあてた。その理由は、反射強度などは複雑に変化してシステムの移動を追跡することが困難だが、システムのノッチの位置とマイソサイクロンの相対位置に変化が少ないことによる。採用した移動速度は $(U_s, V_s) = (18, -8) \text{ ms}^{-1}$ である。

デュアル解析で鉛直速度を求める際に、下層から上層に向けて積分して鉛直速度を求めると上層で大きな誤差が出る場合があることが知られている(例えば Ray *et al.* 1980; 石原 1986, 2001)。本研究では、定量的に上昇流の大きさを問題とすることはないので、特に補正を行わなかった。因みに、レーダーのデュアル解析については、石原 (1986, 2001) に詳しい解説がある。

また3次元の画像を得るために、フリーソフトのVis5Dと、ParaViewを用いた。ParaViewは3次元の流線を表現することが出来る。

3. 環境場

本研究の対象である東京湾岸地帯に突風被害もたらした降水システムを取り巻く環境場について述べる。



第3図 2007年4月28日00UTCの館野(つくば市)で得られた大気鉛直構造。横軸は気温、縦軸は気圧。2つのギザギザの線は気温(右側, T)、左側は露点温度(左側, Td)を表す。滑らかなカーブは、地表面付近の大気が断熱的に上昇したときの空気塊(parcel)の状態。TCBLは対流混合層のトップ。グレーに塗りつぶした領域はCAPEm(本文参照)。

3.1 総観スケール

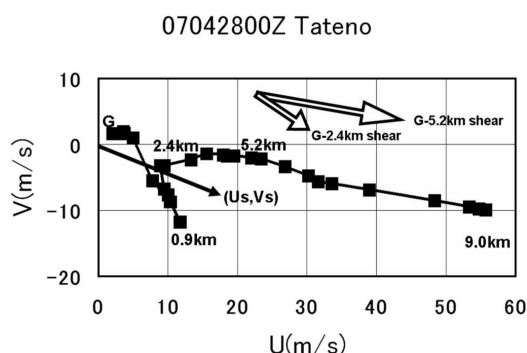
第2図に当日の00UTC (UTC ; Universal Time, Coordinated, 協定世界時) と12UTC の500 hPa 高層天気図と地上天気図を示す。00UTC に日本海上空にあった -24°C 以下のサーマルトラフ (等値線が矢印で示してある) と低気圧が、その後東進して日本上空を通過した。対応して地上天気図では、00UTC に日本海にあった低気圧がやはり東進して12UTC には太平洋に抜けている。

3.2 館野における大気鉛直構造

第3図に館野00UTC の大気の状態曲線を、第4図に風のホドグラフを与える。この時刻は事象発生約6時間前である。気温の鉛直プロファイルは、下層に逆転層 (トップは図中の TCBL) があるが、その上850 hPa より上層は条件付不安定な成層となっている。露点温度の鉛直プロファイルによれば600 hPa から上空が乾燥している。

下層の逆転層が強いためこの時刻でのCAPE (Convective Available Potential Energy, 対流有効位置エネルギー) は0となっている。しかし、日中に地表面付近の気温が上がり、サーマルが飽和しつつこの逆転層を打ち破った場合に予想されるCAPE (以後CAPEmと呼ぶ) は 1080 Jkg^{-1} くらいになる (図中のシェードした部分)。日中の地表面付近の気温は、例えば大手町では14時に 22.4°C に達していて、逆転層を打ち破るには十分であった。

風の鉛直プロファイルは、最下層で南西であるもの

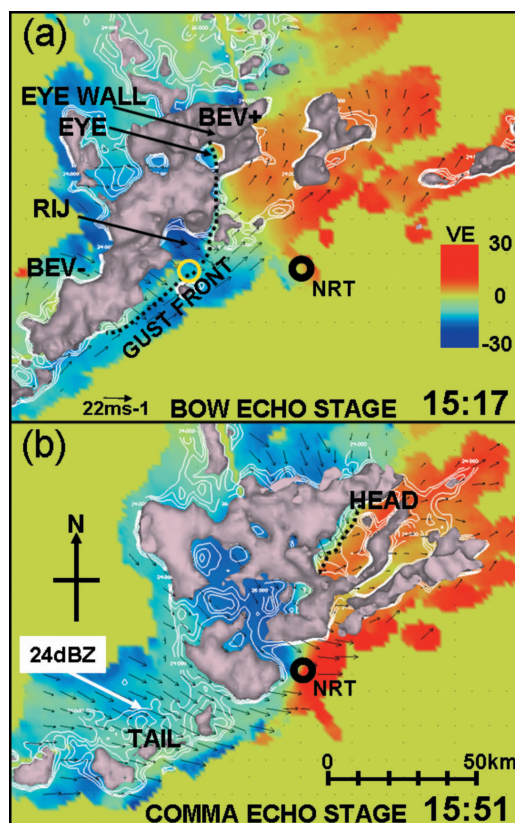


第4図 2007年4月28日00UTCの館野上空の風のホドグラフ。横軸は東西成分、縦軸は南北成分。加えて、地上 (31 m) -2.4 km 、地上 -5.2 km のシアベクトル、更に被害があった東京湾岸地帯における降水システムの移動速度ベクトルが書き加えてある。

の、風向はおおむね西北西から西風である。風の鉛直シアは、地上から高度 2.4 km までの速度差は約 10 ms^{-1} 、地上から 5.2 km までは約 20 ms^{-1} であった。なお第4図のシステムの移動速度は、被害があった東京湾岸地帯における降水システムの移動速度である。

4. システム全体の構造

第5図は、デュアル解析による15時17分 (a) と、



第5図 15時17分 (a) と15時51分 (b) のデュアル解析図。領域は $160\text{ km} \times 127\text{ km} \times 12\text{ km}$ で真上から見た図。グレーの面は反射強度 30 dBZ の等値面。矢印は地上 1 km の地表相対風。白い等値線は地上 1 km の反射強度 (24 dBZ 以上を 2 dBZ おき)。全体の色付けは、地上 400 m の成田DRAW (黒丸) からみたドップラー速度。目の壁雲 (EYE WALL), RIJ, bookend vortex (BEV+, BEV-), コンマエコーの頭 (HEAD), 尻尾 (TAIL) の位置が示されている。黒い点線はガストフロント。 (a) の黄色い丸は地上 1 km における鉛直過度の大きい位置を示す。

15時51分 (b) の結果である。解析領域は $160\text{ km} \times 127\text{ km} \times 12\text{ km}$ で、3次元の画像を真上から見たものである。反射強度が 30 dBZ の等値面が灰色で描かれている。白い等値線は高度 1 km における反射強度(24 dBZ 以上について 2 dBZ 毎)、画面全体の色付けは成田DRAW(位置を黒丸で表示)から見た高度 0.4 km のドップラー風速、矢印は高度 1 km における地表に相対的な速度ベクトルである。

第6図a, bは、15時24分14秒および15時27分25秒における羽田DRAW仰角 0.7° PPIデータから $150\text{ km} \times 150\text{ km}$ の領域を切り出した反射強度分布、第6図cは同一条件の15時27分25秒におけるドップラー速度分布。東京湾奥の四角い領域は $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ で、その拡大図を第6図dで与える。

4.1 弓型に反ったライン状のシステム

強いエコー領域は長さ約 150 km 、北東から南西にかけてほぼライン状の連なりの中に複雑な形状を示しているが(第5図a, b; 第6図a, b), 第6図a, b

の青い破線で示したように東京湾岸近くでは弓形に湾曲している。

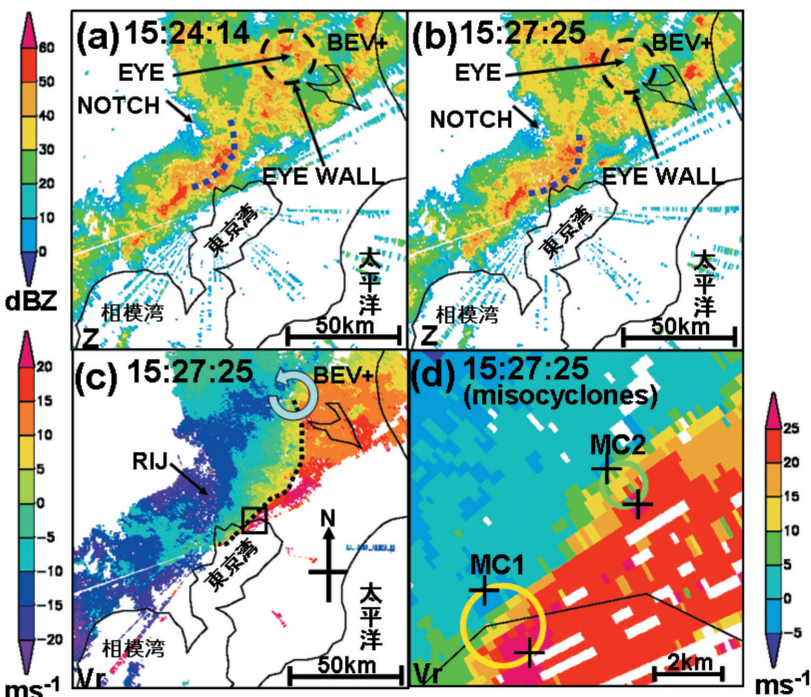
4.2 ガストフロント

東京大手町の地上気象観測では15時12分頃に、風速が 10 ms^{-1} から 25 ms^{-1} に、風向は南西から北西に、気温は 22°C から 14°C に、露点温度は 6°C から 10°C にそれぞれ変化、気圧は 3 hPa ほど上昇したので、ガストフロントの通過があったと解釈できる(図省略)。

第5図a, 第6図cにおいて、黒い点線でドップラー速度やデュアル解析風の風向が急変している部分を示したが、これはガストフロントと解釈される(第5図の風ベクトルは高度 1 km のものであるが、高度 500 m と比較して風の急変する位置の変化は認められなかった)。このガストフロントも反射強度と同様な湾曲を示している(第5図a, 第6図c)。ガストフロントの後方は北西風が、前方は南西風が卓越している(第6図a)。

4.3 Bookend vortex (BEV)

システムの北の端に台風の眼の壁雲状のエコーが見られる(第5図a, 第6図a, bのEYE WALLとEYE)。ドップラー速度の分布とデュアル解析風は、そこにサイクロニックな渦(第5図a, 第6図cのBEV+)の存在を示している。竜巻の中心に現れる反射強度の弱い部分は、これまで観測されている(例えばFujita 1981, Bluestein *et al.* 2007; Kosiba and Wurman 2010)。またシステムの南端ではアンチサイクロニックな渦が見える(第5図aのBEV-)。これらのメソ β スケールの渦は、ボウエコーに伴ってよく見られるbookend vortex (Weisman 1993)と解釈される。これらのbookend vortexは、解析時刻15時07分には明瞭に現れており、引き続き15時12



第6図 (a), (b) は、15時24分14秒および15時27分25秒における羽田DRAW仰角 0.7° PPIデータから $150\text{ km} \times 150\text{ km}$ の領域を切り出した反射強度、(c) は同一条件の15時27分25秒におけるドップラー速度の図。東京湾奥の四角い領域は $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ で、その拡大図を (d) で与える。ドップラー速度の極大・極小(+印)から解析された2つのマイソサイクロンMC1とMC2を示す。

分から17分まで見えていた。サイクロニックな渦の方はその後15時34分まで継続したが、アンチサイクロニックな渦の方は15時26分には不明瞭になった。この差はコリオリ力が効いている可能性がある (Skamarock *et al.* 1994; Trapp and Weisman 2003; Atkins *et al.* 2009b)。

4.4 ノッチ

弓形に反ったライン状エコーの先端部の背後にえぐられたようにエコーの弱い領域があるが (第6図a, bのNOTCH), これはノッチ (Burgess and Smull 1990; Przybylinski 1995) で、後方中層からの強い下降流によって降水が蒸発した部分である。第5図では反射強度の等値面の下にあって見えない。

4.5 RIJ

ノッチの前方, bookend vortex にはさまれてガストフロントに向かって風の強い領域がある (第5図a, 第6図cのRIJ)。これはRIJと解釈される。

4.6 マイソサイクロン

第6図dにおいて, RIJの前方ガストフロント上に, ドップラー速度の極大・極小が検出され (+印), 2つのマイソサイクロン (第5図dのMC1とMC2) が存在することがわかる。一方, デュアル解析でも, RIJの前方ガストフロント上に鉛直渦度の極大域 (第6図aの黄色丸, 第9図も参照) が存在する。これらをFujita (1979) の概念図の竜巻に対応させれば, 4.1~4.6の特徴からこのシステムはボウエコーと判断できる。

4.7 コンマステージ

15時51分は, comma stage (Fujita 1979) と考えられる状態に移行している (第5図b)。24 dBZの等値線では, 全体として南東に向かって直径約100 kmの半円形をしている。北東部はhead, 南西部はtailと解釈される。Headの部分はFujita (1979) と異なり, 単純な渦ではなく, 複雑な形状をしている。15時17分における北側のbookend vortexの名残と思われる循環と, 流入している寒気との間にガストフロントが形成されている (図の黒い破線)。南西部の部分ではガストフロントは明瞭でなく寒気側の流れに支配されている。

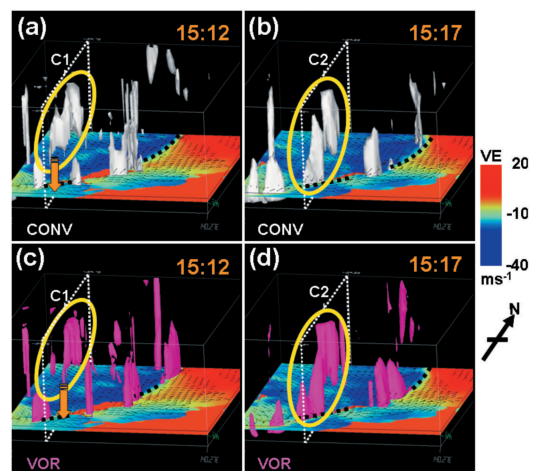
差し当たり, 現業のドップラーレーダーでボウエコーを認識するためには, 下層のPPIデータで①進行方向にカーブした弓形で反射強度が20~30 dBZの線状降水帯であること, ②弓形の線状降水帯の先端の後方にはエコーのくびれ (ノッチ) があること, ③

ノッチの前方に, 降水帯の向きと直交する向きにRIJがあることの定性的な特徴が役立つと思われる。

5. 高鉛直渦度・高水平収束領域とマイソサイクロン

5.1 高鉛直渦度・高水平収束領域

第7図は, 領域が60 km×60 km×4 km, 南南東からの鳥瞰図で, 解析時刻は15時12分と15時17分である。矢印は2 km毎の地上600 mの地表相対風, 地表付近の色付けは成田DRAWから見た地上400 mのドップラー速度である。成田DRAWの位置は, 領域の中心から東に40 km, 南に9 kmの地点にあたり, 領域の外, 東側にある。風向の急変や, ドップラー速度の変化から, 北東から南西に伸びるガストフロントが見て取れる (黒い破線)。第7図aとbの白い等値面は, 水平収束が $5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ の面である。また, 第7図cとdのマゼンタ色の等値面は, 鉛直渦度が



第7図 高鉛直渦度・高水平収束領域を示す図。南南東からの鳥瞰図で, 領域は60 km×60 km×4 km。タイムスタンプは15時12分と15時17分。成田DRAWから見た地上400 mのドップラー速度と, 地上600 mの地表相対風が下層に示してある。ガストフロントの位置が黒い破線で示してある。(a), (b)の白い面は, 水平収束が $5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ の等値面。(c), (d)のマゼンタ色の面は, 鉛直渦度が $5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ の等値面。黄色い楕円で囲んだ領域は注目している高鉛直渦度・高水平収束領域。(a), (c)画面左下の橙色の矢印は, これから垂れ下がろうとしている部分。白い点線の四角(C1, C2)は第8図の鉛直断面の位置。

$5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ の面である。これらの等値面の内で、地表面から立ち上がっている領域はガストフロント上にある。鉛直渦度と水平収束が共に $5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 以上である領域を高鉛直渦度・高水平収束領域と呼ぶことにする。第7図でaとc, bとdをそれぞれ比較すると、黄色の楕円で囲った領域が、主要な高鉛直渦度・高水平収束領域であることがわかる。この高鉛直渦度・高水平収束領域は、15時12分に地上2~4 kmの中空に浮いているが、15時17分にはその南西端（橙色の矢印で表示）が垂れ下がる形で地表面に達した。後に述べる東京湾岸地帯のマイソサイクロン1は、この時この足の近傍で発生した。更に15時26分には、中層に浮いた部分が縮小し地表面付近の部分と分離する（図省略）。

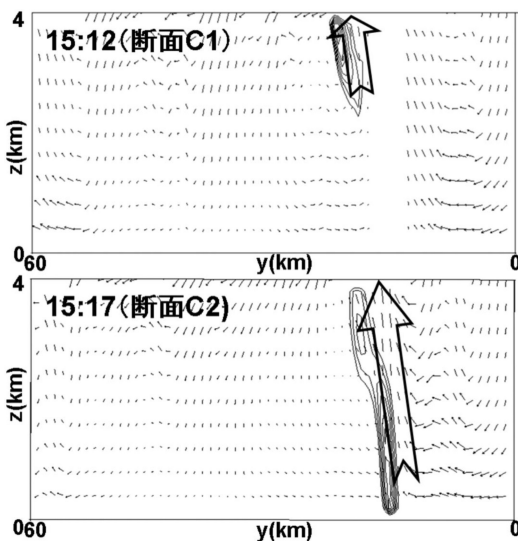
第8図は、第7図における断面C1（15時12分）とC2（15時17分）に沿って西側から見た鉛直断面図である。高さは4 km、南北60 kmの領域である。鉛直に約7.5倍誇張されている（風ベクトルも同様）。面内の鉛直渦度の分布とシステム相対速度が示されている。断面の位置と向きは、高鉛直渦度・高水平収束領域の主要部分を含み、寒気側下層のシステム相対風

（ほぼ北風）と平行になるように取った。等値線は鉛直渦度の値が、 $5.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 以上について、 $1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ おきに引いてある。小さい矢印は、システム相対風の風ベクトルであり、太い矢印はメインの上昇流の場所を表す。

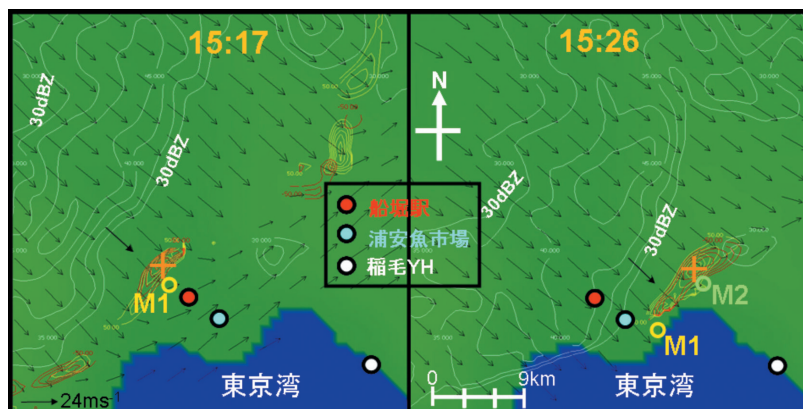
15時12分には高度3 kmを中心に強い鉛直渦度域がありその南側にメインの上昇流がある。全体として北側（上流側）に傾いている。鉛直渦度の最大値は $1.2 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ あった。この中空の強い鉛直渦度域は、これ以前の15時07分にも存在していた。15時17分になると様相は一変して、鉛直渦度の大きい領域は地表から高度4 kmまでに及び、上昇流も下層から立ち上がっている。鉛直渦度の最大値は最下層にあり、 $1.1 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。この領域は北側に傾いており、特に解析高度中ほどから上で傾きが大きい。メインの上昇流も北側に傾いており、その角度は実スケールでは約40度である。鉛直渦度の大きい領域とメインの上昇流の位置がずれている（Weisman and Trapp 2003; Atkins and Laurent 2009a）が、このことがスーパーセルとボウエコーを区別する要因と言われている（Weisman and Trapp 2003）。この図をWeisman and Trapp (2003)の数値実験の結果（彼らの第16図）と比較すると、本研究の高鉛直渦度・高水平収束領域を彼らのサイクロニックなメソサイクロンに対応させれば、時間経過も含めて非常に良く似ている。

5.2 高鉛直渦度・高水平収束領域とマイソサイクロン

ここで、デュアル解析によって示された高鉛直渦度・高水平収束領域と、羽田DRAW仰角0.7度PPIで見たマイソサイクロンの位置関係を述べる。東京湾岸地帯において検知されたマイソサイクロンは2個あったが、デュアル解析の時刻と近い時刻の位置を比較するといずれもこの高鉛直渦度・高水平収束領域の近傍に位置していた。第9図は、東京湾岸地帯を拡大して示したもので、矢印は地上500 mの地表相対風で3 km毎に与えてある。領域内の最大風速 (24ms^{-1})を有した速度ベクトルをやや太く表示した。白、黄、赤の等値線は、それぞれ、地上500 mの反射強度 (30 dBZ以上, 5 dBおき)、鉛直渦度 ($5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 以上で 10^{-3}s^{-1} おき)、水平収束 ($5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 以上で 10^{-3}s^{-1} おき)である。鉛直渦度と水平収束の大きい場所はほぼ一致している。橙色の十字は鉛直渦度が極大の場所、黄色と黄緑色の丸印はPPIで検出されたマイソ



第8図 高鉛直渦度領域の鉛直断面図。領域は南北60 km、鉛直4 km。鉛直方向に7.5倍誇張されている。断面の位置は第7図のC1とC2。西側から見ており左側が北。等値線は鉛直渦度で $5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 以上を 10^{-3}s^{-1} おきに線を引いてある。小さい矢印はシステム相対風、大きな矢印は主要な上昇流域。



第9図 高鉛直渦度・高水平収束領域とPPIで検知されたマイソサイクロンとの位置関係。領域は約40 km×40 km。タイムスタンプは15時17分と15時26分。描かれている諸量は地上500 mのもの。矢印は地表相対風（3 km 毎）、白、赤、黄色の等値線はそれぞれ反射強度（30 dBZ 以上を5 dBZ おき）、水平収束と鉛直渦度（ $5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 以上を 10^{-3}s^{-1} おき）、橙色の十字は、鉛直渦度の極大の場所、黄色と黄緑色の丸は羽田 DRAW で検知したマイソサイクロン1と2の位置。赤、水色、白で塗った黒丸は被害のあった3地点。領域内の最大風（ 24ms^{-1} ）のベクトルをやや太く表示した。

サイクロンの位置である。更に被害のあった3地点をマークしている。15時17分、15時26分共に、鉛直渦度が $5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 以上の領域とマイソサイクロンは近い位置にあった。これらのマイソサイクロンは、更に高仰角のPPIで見ると、地上2～3 km まで追跡することができた。従って、デュアル解析で解析された高鉛直渦度・高水平収束領域はマイソサイクロンと密接に関連していることがわかる。位置のずれの原因は、①デュアル解析で用いたデータが影響半径2 km で平滑化されている、②デュアル解析に用いた2つ



第10図 東京湾岸地帯のGoogle Map 地図に、羽田 DRAW 仰角0.7度のPPIで検知した2つのマイソサイクロン（黄色はマイソサイクロン1、黄緑はマイソサイクロン2）の位置、時刻、最大風速円、それと3箇所の被害場所、羽田 DRAW の位置を書き加えた。

のレーダーのデータに観測時刻差があるという2つの理由のために、直径が1 km ほどのマイソサイクロンの位置を決めるほど空間精度が高くないためだと思われる。またデュアル解析で得られた鉛直渦度の値は、PPIで見積りされた値の数分の1であるが、これはデュアル解析を行う際のデータの平滑化によるものであると考えられる。

6. 東京湾岸地帯に吹いた突風

気象庁「竜巻等の突風データベース (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/2007042801/list.html>)」によれば、この日の東京湾岸地帯での突風の原因はガストフロントによるもの報告されている。一方、約1分おきに得られた羽田DRAW 仰角0.7度のPPIデータの解析によりボウエコーの先端部のガストフロント上に2つのマイソサイクロンが解析された。これらのマイソサイクロンの内で、より南側を通過したマイソサイクロンが突風被害をもたらした。被害は15時20分から30分ごろまで、約10分間に発生し、ほぼ直線状に並んだ18 kmの地域の所々に被害をもたらした(第10図; 背景図はGoogle Map)。

6.1 マイソサイクロン

第10図に東京湾岸地帯のGoogle Map上に解析したマイソサイクロンの位置とランキン渦を仮定した最大風速円を与える。羽田DRAWの位置も記入してあ

る。マイソサイクロン1は時刻15時17分14秒から15時31分25秒まで13回検出された。マイソサイクロン2は15時24分14秒から15時34分48秒まで8回検出された。但し15時34分48秒における位置はこの図の範囲外であったために描かれていない。従ってマイソサイクロン1は14分ほど、マイソサイクロン2は10分半ほどの寿命を持ったことになる。マイソサイクロン1は平均して約 19 ms^{-1} で、マイソサイクロン2は 18 ms^{-1} でどちらも東南東進した。マイソサイクロンの諸性質を第2表に与える。東京湾岸地帯に被害をもたらしたのはマイソサイクロン1である。ここで、それぞれの時刻はPPIの開始時刻であり、マイソサイクロンの位置をレーダービームが通過した時刻ではないが、動きの速いマイソサイクロンの確認時刻が分単位では不十分と考えて秒単位まで入れた。誤差は数秒以内と見積もられる。

6.2 都営新宿線船堀駅付近の突風被害

同データベースによれば、15時20分ごろ、船堀駅の

第2表 東京湾岸地帯で検出されたマイソサイクロンの諸元。羽田DRAWの仰角0.7度のPPIデータから抽出した。ビーム高度は0.7度のビーム幅を考慮すると、 $200 \pm 100 \text{ m} \sim 300 \pm 150 \text{ m}$ と見積もられる。一番左の列は、各PPIデータのスキャン開始時刻を表し、時分、秒を表す。

マイソサイクロン諸元						
	MC1			MC2		
	移動速度(ms^{-1})	$U_x(\text{ms}^{-1})$	$V(\text{ms}^{-1})$	移動速度(ms^{-1})	$U_x(\text{ms}^{-1})$	$V(\text{ms}^{-1})$
hhmmss	19.2	17.5	-8.0	18.3	16.7	-7.5
	直径(m)	$\Delta V(\text{ms}^{-1})$	渦度(s^{-1})	直径(m)	$\Delta V(\text{ms}^{-1})$	渦度(s^{-1})
151714	1050.3	28.7	0.055			
151827	840.4	40.4	0.096			
151952	873.5	30.6	0.070			
152027	869.8	35.7	0.082			
152139	888.2	29.9	0.067			
152301	1342.9	41.5	0.062			
152414	1617.8	37.4	0.046	1503.8	22.1	0.015
152538	1188.3	36.8	0.062	1664.0	33.7	0.020
152613	1197.5	35.5	0.059	1306.1	30.0	0.023
152725	2335.1	35.3	0.030	1286.0	39.6	0.031
152848	2393.0	32.4	0.027	1681.0	26.4	0.016
153001	1946.1	29.0	0.030	1428.6	38.5	0.027
153125	2699.1	30.1	0.022	2441.3	36.9	0.015
153448				863.4	19.6	0.023



第11図 被害写真。(a) 都営新宿線船堀駅の南にあるトキビル南面。工事用のゴンドラが飛ばされている(中谷浩司氏撮影)。(b) トキビルの北にある広場で、飛ばされたtent等が広場東縁に吹き寄せられた様子(フジテレビニュースより)。(c) 同駅近くの民家の屋根が剥がれて飛ばされている(中谷浩司氏撮影)。(d) 浦安魚市場北口商店会の壊れたアーケードの屋根。商店会アーケードの東南東端から西北西を見ている。屋根は南側が落下、梁の北端が落下して右側の店に突き刺さっている。屋根のトタンが剥がれたり北側にめくられたりしている(芳賀富美江氏撮影)。

南側にあるトキビル北面下の広場でイベントが行われていたが、突風によりイベント用テント11張が飛ばされて21名の負傷者が出た（第11図b；原図はフジテレビニュース）。散乱物が主として広場の東側に吹き寄せられている。イベント会場に居合わせた消防士の証言によれば「15時過ぎに空が真っ暗になり、ゴーッと音と共に突風が吹いて、テントや遊具が広場の東南東側に移動し、広場の縁にあるフェンスに吹き寄せられたが、雨や雷鳴はなかった。」ということであった。

更にトキビル南面の上部に吊り下げられていた工事中用ゴンドラが突風により東側に吹き寄せられたり、舞い上がって屋上に落下したりした。幸い人は乗っておらず人的な被害はなかった。（第11図a；中谷幸司氏撮影）

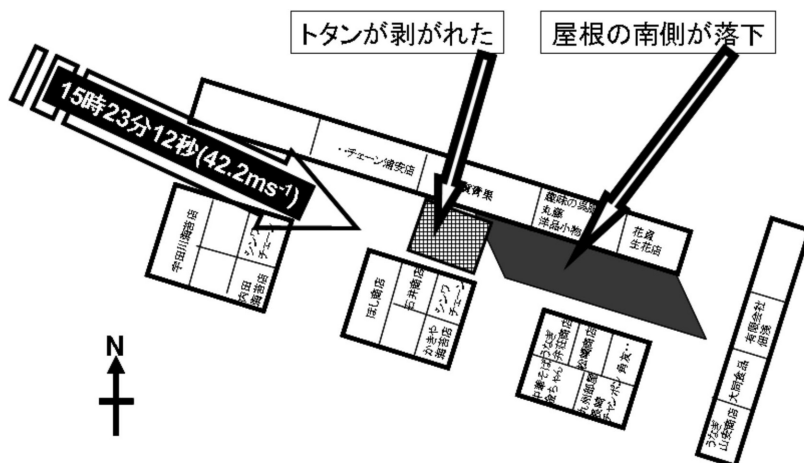
それより少し前の時刻と思われるが、船堀駅西側約200 m離れた民家の屋根が吹き飛ばされた（第11図c；中谷幸司氏撮影）。地図との照合により、屋根の飛んだ方向は東北東であり、飛ばされたのは西側に向かって傾斜していた屋根である。その民家は実際に見ると建築からかなり年数を経たものと思われた。

船堀駅周辺の被害全体を第12図に与える（背景図はGoogle Map）。第10図を見ると、都営新宿線船堀駅付近は、マイソサイクロンの進行右側が通過したが、最大風速円の外側に位置していた。時刻15時18分27秒と15時19分52秒に解析され

たマイソサイクロン1を用いて風の見積りをすると、15時20分近くにマイソサイクロンによる風とマイソサイクロンの進行方向がほぼ一致して最大風となり風速 $34\sim36\text{ ms}^{-1}$ 、風向はほぼ西寄りから西北西の風が吹いたという結果になった。被害を受けた物体の飛散方



第12図 船堀駅周辺の Google Map 地図に重ねて、ドップラーデータより見積りしたこの付近の最大風（太い矢印）と、被害物の推定の飛散方向（白矢印）。



第13図 浦安魚市場北口商店会の平面図に重ねて、ドップラーデータより見積りしたこの付近の最大風（太い矢印）と被害の概略。

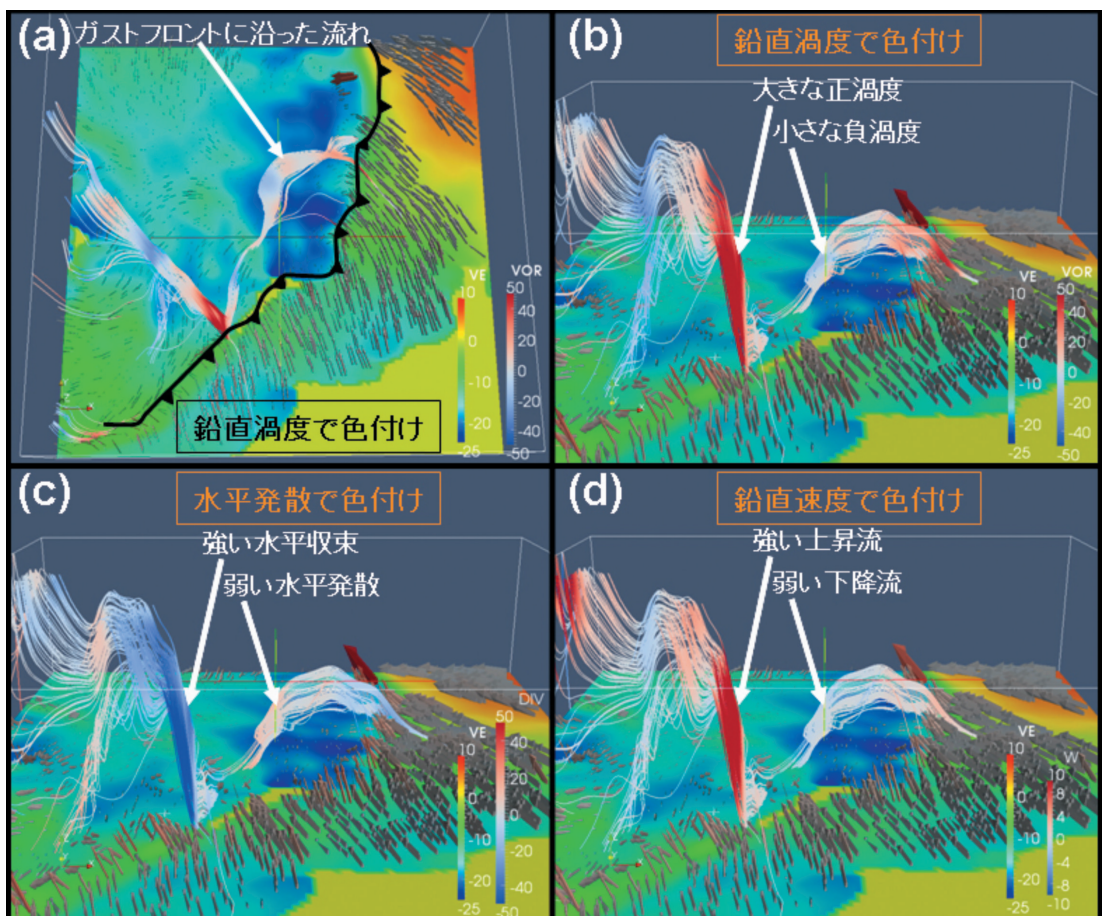
向と多少ばらつきはあるものの、全体として見積もり風とほぼ一致している（第12図）。

6.3 浦安魚市場北口商店会の突風被害

テレビ報道やブログの情報、および商店会の人たちの証言によれば、東京メトロ東西線浦安駅の北北東約300 mにある浦安魚市場北口商店会のアーケードの屋根が風で浮き上がった後に落下するという被害があった。商店会の人々が被害の翌日撮影した写真の中から1枚を示す（第11図d；芳賀富美江氏撮影）。商店会のアーケードは西北西から東南東に延びており、写真はそのアーケードの東南東側から西北西側を見ている。

屋根の南側が落下し、南に面した屋根のトタンの一部が剥がれたり北側にまくれ上がったっている。1本の梁の北端が落下して、右側の店に突き刺さっている。商店会の人々の証言によれば「屋根はふわりと浮いて北側にずれて、その結果南側は支えを失って落下した。」ということであった。被害を受けた店は、この日の午前中に閉めていたので、幸い人的な被害はなかった。

第10図を見ると、浦安魚市場北口商店会では、マイソサイクロンの進行右側が通過したが、最大風速円が通過した時刻があった。15時21分39秒から15時24分14



第14図 高鉛直渦度、高水平収束領域発生メカニズムを示唆する図。15時17分におけるデュアル解析に基づく。領域は60 km×60 km×4 km。方位は水平領域の上側が北。鉛直に5倍誇張している。地表面付近の色は、成田DRAWの高度400 mにおけるドップラー速度。風はシステム相対風を採用し、高度600 mの速度ベクトルを立体的な矢印で、またメインの上昇流に関する3次元の流線を(a), (b)は鉛直渦度で、(c)は水平発散で、(d)は鉛直速度でそれぞれ色付けしてある。(a)はほぼ真上から見た図で、寒冷前線と同じ記号はガストフロントを表す。(b), (c), (d)は(a)より視点を低くしてある。

秒に解析されたマイソサイクロン1による風の推定では、15時23分頃にマイソサイクロンによる風とマイソサイクロンの進行方向がほぼ一致して最大風となり風速 $39\sim 42\text{ ms}^{-1}$ に達し、風向は北西から西北西であった。風向は奇しくも、商店会のアーケードの向きとほぼ一致している（第13図）。このことから突風が商店会の西北西の入り口から侵入して、アーケードの屋根の表裏の風速差による動体浮力と、T字型をした通路のところで行き止まって上に吹き上げたことの2つの原因によって、屋根が飛ばされたものと思われる。

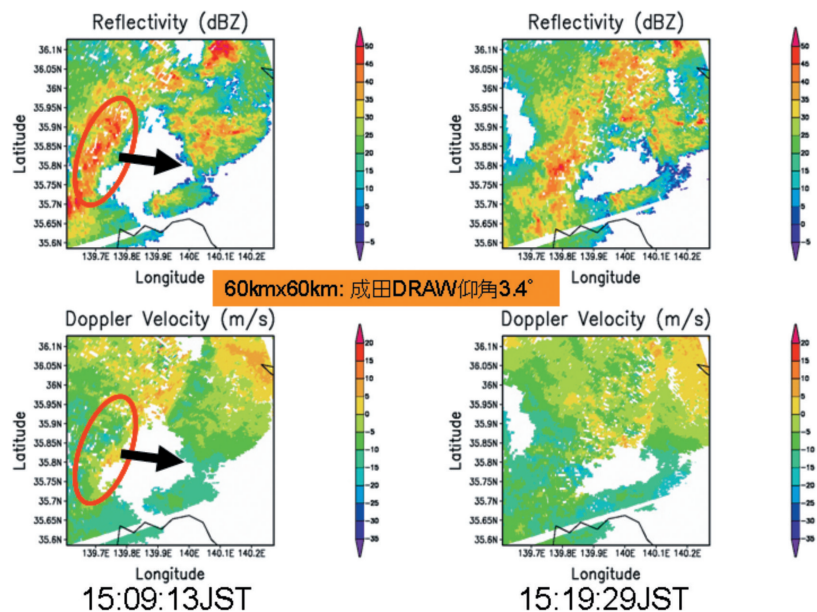
6.4 検見川浜沖でのヨット転覆

ブログの情報であるが、15時30分ごろ検見川浜沖でヨットが転覆、乗っていた人が救助されたとのことであった。転覆場所は検見川浜沖としかわかっていないので、第10図ではヨットの係留場所である稲毛ヨットハーバーの位置を示してある。マイソサイクロン1は15時27分25秒から15時31分25秒まで、直径を2.3 kmから2.7 kmに増大させつつ東京湾を横断して検見川浜沖に達した。また羽田DRAW 仰角 0.7° PPI データで 30 ms^{-1} 以上のドップラー風域が15時30分01秒から東京湾を東南東進して15時34分25秒に稲毛ヨットハーバー近傍を通過している（図略）。ヨット転覆事故は、このマイソサイクロン1の影響下で起きた可能性がある。

7. マイソサイクロンの発生機構

第14図は第7図と同じ領域における15時17分のデュアル解析の結果をフリーソフト ParaView で描画したものである。方位は水平領域の上側が北である。鉛直に5倍誇張している。地表面付近の色は、成田DRAWの高度400 mにおけるドップラー速度である。風はシステム相対風を採用し、高度600 mの速度ベクトルを立体的な矢印で、またメインの上昇流に関する3次元の流線を第14図a, bは鉛直渦度で、c

は水平発散で、dは鉛直速度でそれぞれ色付けして引いている。第14図aは、ほぼ真上から見下ろした図で、寒冷前線と同じ記号で描かれたガストフロントを境に暖域側では主として南南東風が、寒気側では北東風が吹いている。高度約2 kmにあってガストフロントにはほぼ平行な流れが、一旦下降流に転じた後にガストフロント上でメインの上昇流に入り込んでいる。b, c, dは、視点をaより低くして描いた図である。流線が上昇や下降するのに応じて、正や負の鉛直渦度を帯びていることは、この流線に沿って寒気側の先端部分に存在する水平渦が傾き鉛直渦度を発生させていることを強く示唆している。dで示した弱い下降流部分は、同時に弱い水平発散(c)と小さい負の鉛直渦度(b)を有する。同様にdで見られる強い上昇流部分は、渦の延伸を示す強い水平収束(c)と正の大きな鉛直渦度(b)を有する。先行する数値実験におけるサイクロニックなメソサイクロンだけが発生する(正負の渦のペアでなく)メカニズムは「(システムスケールの)下降域内を下降する空気塊が、ガストフロントをまたぐ傾圧帯において傾圧効果により水平渦を獲得する。その水平渦がガストフロントに沿って存在する上昇流によって上方に傾けられて鉛直渦度を獲得



第15図 成田 DRAW 仰角 3.4° PPI で解析された、中層での動径収束の出現と消滅を表す図。領域は $60\text{ km}\times 60\text{ km}$ 。時刻は、左列が15時09分13秒、右列は同19分29秒。上は反射強度、下はドップラー速度。黒い矢印はレーダーの方向。

し、更に延伸することにより鉛直渦度が強められる」というものが挙げられている（例えば Atkins and Laurent 2009b; Atkins *et al.* 2005）。第14図は、空気塊の移動ではなく流線ではあるが、この発生機構の概念を示した Atkins and Laurent (2009b) の第15図と酷似しており、本研究によってマイソサイクロンの発生機構を示唆する結果が、初めて実データの解析によって示されたことになる。

8. マイソサイクロン発生の前兆現象

第8図で示したように、被害のあったマイソサイクロン発生に先立って、それ以前の時刻15時07~12分に中層（本事例では地上2~4 km）に高鉛直渦度・高水平収束領域が存在した。この段階でレーダーによって何らかの情報が取れれば、マイソサイクロンの前兆現象として予報に役立つことと考えられる（Schmocker *et al.* 1996; Davis *et al.* 2004）。このことについて調べたのが第15図（成田 DRAW の仰角3.4度のPPI画像）である。高度は3~4 kmで、黒い矢印はレーダーの方向である。時刻15時09分13秒のデータでは、南北に伸びる強いエコー域前方にレーダーから遠ざかる速度と近づく速度のペアが見える。この動径方向の収束は、この付近での高鉛直渦度・高水平収束領域を反映しているものと思われる。この収束パターンは、中層の高鉛直渦度・高水平収束領域が消滅したと思われる15時19分29秒のデータでは消えている。この事例では、船堀駅付近で被害をもたらした突風が吹いたのは15時20分頃であるから、この収束をマイソサイクロン発生の前兆と考え、約10分のリードタイムがある。レーダーのエコーパターンからボウエコーということを認識して、更にボウエコーの先端付近の上空3~4 kmにドップラーデータで動径収束領域の発生を認めたら、それから10分ほどで、マイソサイクロンに伴う突風被害が発生する可能性がある。

9. まとめと議論

2007年4月28日、関東に広く雷雨・突風・降雹をもたらした降水システムについて、主としてドップラーレーダーのデータを用いて解析した結果、Fujita (1978) がアイデアを出していたボウエコーであったことが明らかとなった。その長さは約150 km にわたり、両端に bookend vortex というサイクロニックな渦とアンチサイクロニックな渦を伴っていた。両渦に

はさまれて、ボウエコーの先端にあたる場所の背後にはノッチと呼ばれる反射強度の低い領域があり、その前方には RIJ という強風帯があった。先行研究では、この RIJ の前方にしばしば被害をもたらすメソ渦が発生すると言われている。本研究のデュアル解析では、先行研究におけるメソ渦とよく似た振る舞いをする高鉛直渦度・高水平収束域が解析され、その近傍に存在したマイソサイクロンが被害をもたらした。解析ではマイソサイクロン本体の風と移動速度とが重なり合っただけで被害が起きており、流入層での速度の減衰を仮定しないと、最大風速は40 ms⁻¹ほどと見積もられ、突風の強さは改良藤田スケール（Enhanced Fujita Scale, 以後 EF）で1に達しているが、この見積りは過大である可能性がある。また、被害は古い民家の屋根の剝がれや落下、ビルの屋上から懸架した工事用ゴンドラ、テント、遊具等が飛ばされた、そして海上に浮かぶヨットの転覆など、仮設構造物や古い木造住宅だけで起きていたので EF で0 (29~38 ms⁻¹) だったと推定する（気象庁「竜巻等の突風データベース」では不明となっている）。

被害を及ぼした時間・空間スケールが10分と18 km と小さかった。ボウエコー発生の際の環境場を見ると、CAPE（本論文は CAPEm）の値や、鉛直シアの強さが、アメリカでの先行研究の数値実験よりも小さい或いは弱い（例えば Weisman and Trapp 2003; Funk *et al.* 1999; Weisman and Davis 1998）。そのため、先端の上昇流が十分発達せずシア上流側に傾いてしまう結果 RIJ を強めシステム全体としての崩壊を早めた（Rotunno *et al.* 1988; Weisman and Trapp 2003; Atkins and Laurent 2009a）と考えられる。また、こうした環境場のためか、構造的に Fujita (1979) の概念図とは異なる点があった。

サイクロニックなマイソサイクロンの発生機構について、メインの上昇流に関する3次元の流線解析により、先行研究（例えば Atkins and Laurent 2009b, Atkins *et al.* 2005）の発生機構を示唆する解析の結果が得られた。

マイソサイクロンの発生に先立つこと約10分、ドップラーレーダーの仰角の高いPPI画像を見ると、ボウエコー先端の中層（2~4 km）に動径方向の収束が現れていた。これはマイソサイクロンの前兆現象として利用できる可能性がある。

最近冬季日本海側の雪雲の中で発生したマイソサイクロンについての詳しい報告がなされた（Inoue *et*

al. 2011) が、竜巻より一回りスケールの大きいマイソサイクロンによる突風被害についても今後注目していく必要がある。

謝 辞

東京湾岸地帯で起きた突風被害については、①被害当日トキビル直下のイベントに参加していた東京消防庁葛西消防署の消防士の方から貴重な証言をいただいた、②中谷浩司氏は船堀駅周辺の被害についての写真を提供して下さった、③浦安魚市場北口商店会の皆様には、貴重な証言をいただいた。特に芳賀富美江氏は、商店会の被害についての写真を提供下さった。高谷周平氏は、Vis5D のデータを 3D 流線解析ツール ParaView のデータに変換するツールと逆転層を乗り越えた大気塊の CAPE である CAPEm の計算・作図ツールを開発・提供して下さった。この事例の解析を最初に手がけた入江和紀氏（現東京管区气象台）には、多くの資料やデータの提供をいただいた。現高層气象台長の石原正仁氏には有益なコメントをいただいた。更に担当編集委員の川島正行氏、及び 2 名の査読者は、丁寧に論文を読み、貴重なコメントを多数下さった。以上の方々には、心から御礼申し上げる。突風発生に関するフジテレビの報道ビデオから静止画を引用した。Google Map には多数の画像を使用させていただいた。フリーソフト Vis5D と ParaView はレーダーデータの可視化に際して大きな力になった。

参 考 文 献

- Atkins, N. T., J. M. Arnott, R. W. Przybylinski, R. A. Wolf and B. D. Ketcham, 2004 : Vortex structure and evolution within bow echoes. Part I : Single-Doppler and damage analysis of the 29 June 1998 derecho. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 2224–2242.
- Atkins, N. T., C. S. Bouchard, R. W. Przybylinski, R. J. Trapp and G. Schmocker, 2005 : Damaging surface wind mechanisms within the 10 June 2003 Saint Louis bow echo during BAMEX. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 2275–2296.
- Atkins, N. T. and M. St. Laurent, 2009a : Bow echo mesovortices. Part I : Processes that influence their damaging potential. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 1497–1513.
- Atkins, N. T. and M. St. Laurent, 2009b : Bow echo mesovortices. Part II : Their genesis. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 1514–1532.
- Bluestein, H. B., C. C. Weiss and A. L. Pazmany, 2004 : The vertical structure of a tornado near Happy, Texas, on 5 May 2002 : High-resolution, mobile, W-band, Doppler radar observations. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 2325–2337.
- Bluestein, H. B., M. M. French, R. L. Tanamachi, S. Frasier, K. Hardwick, F. Junyent and A. L. Pazmany, 2007 : Close-range observations of tornadoes in supercells made with a dual-polarization, X-band, mobile Doppler radar. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 1522–1543.
- Burgess, D. W. and B. F. Smull, 1990 : Doppler radar observations of a bow echo associated with a long-track severe windstorm. Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, Alberta, Canada, Amer. Meteor. Soc., 203–208.
- Davis, C., N. Atkins, D. Bartels, L. Bosart, M. Coniglio, G. Bryan, W. Cotton, D. Dowell, B. Jewett, R. Johns, D. Jorgensen, J. Knivel, K. Knupp, W.-C. Lee, G. Mcfarquhar, J. Moore, R. Przybylinski, R. Rauber, B. Smull, R. Trapp, S. Trier, R. Wakimoto, M. Weisman and C. Ziegler, 2004 : The Bow Echo and MCV Experiment : Observations and opportunities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **85**, 1075–1093.
- Fiedler, B. H. and R. Rotunno, 1986 : A theory for the maximum windspeeds in tornado-like vortices. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 2328–2340.
- Forbes, G. S. and R. M. Wakimoto, 1983 : A concentrated outbreak of tornadoes, downbursts and microbursts, and implications regarding vortex classification. *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 220–235.
- Fujita, T. T., 1978 : Manual of downburst identification for Project NIMROD. Satellite and Mesometeorology Research Paper, (156), Dept. of Geophysical Sciences, University of Chicago, 104pp.
- Fujita, T. T., 1979 : Objectives, operation, and results of Project NIMROD. Preprints, 11th Conf. on Severe Local Storms, Kansas City, MO, Amer. Meteor. Soc., 259–266.
- Fujita, T. T., 1981 : Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. *J. Atmos. Sci.*, **38**, 1511–1534.
- Fujita, T. T. and R. M. Wakimoto, 1981 : Five scales of airflow associated with a series of downbursts on 16 July 1980. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 1438–1456.
- Funk, T. W., K. E. Darmofal, J. D. Kirkpatrick, V. L. DeWald, R. W. Przybylinski, G. K. Schmocker and Y.-J. Lin, 1999 : Storm reflectivity and mesocyclone evolution associated with the 15 April 1994 squall line over Kentucky and southern Indiana. *Wea. Forecast-*

- ing, 14, 976-993.
- Inoue, H., K. Kusunoki, W. Kato, H. Suzuki, T. Imai, T. Takemi, K. Bessho, M. Nakazato, S. Hoshino, W. Mashiko, S. Hayashi, T. Fukuhara, T. Shibata, H. Yamauchi and O. Suzuki, 2011: Finescale Doppler radar observation of a tornado and low-level mesocyclones within a winter storm in the Japan Sea coastal region. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 351-369.
- 石原正仁, 1986: 2 台のドップラーレーダを用いた観測と解析. 気象研究所技術報告, (19), 59-69.
- 石原正仁, 2001: ドップラー気象レーダーの応用. 気象研究ノート, (200), 39-73.
- Jorgensen, D. P. and B. F. Smull, 1993: Mesovortex circulations seen by airborne Doppler radar within a bow-echo mesoscale convective system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 2146-2157.
- 小林文明, 鈴木菊男, 菅原広史, 前田直樹, 中藤誠二, 2007: ガストフロントの突風構造. 日本風工学会論文集, **32**, 21-28.
- Kosiba, K. and J. Wurman, 2010: The three-dimensional axisymmetric wind field structure of the Spencer, South Dakota, 1998 tornado. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 3074-3083.
- Lafore, J.-P. and M. W. Moncrieff, 1989: A numerical investigation of the organization and interaction of the convective and stratiform regions of tropical squall lines. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 521-544.
- Lewellen, D. C., W. S. Lewellen and J. Xia, 2000: The influence of a local swirl ratio on tornado intensification near the surface. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 527-544.
- 大野久雄, 楠 研一, 鈴木 修, 1996: 1995年8月10日に関東平野で発生した雷雨に伴うボウエコー, ガストフロントおよびダウンバースト. *天気*, **43**, 167-170.
- Przybylinski, R. W., 1995: The bow echo: Observations, numerical simulations, and severe weather detection methods. *Wea. Forecasting*, **10**, 203-218.
- Ray, P. S., C. L. Ziegler, W. Bumgarner and R. J. Serafin, 1980: Single- and multiple-Doppler radar observations of tornadic storms. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 1607-1625.
- Rotunno, R., J. B. Klemp and M. L. Weisman, 1988: A theory for strong, long-lived squall lines. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 463-485.
- Schmidt, J. M. and W. R. Cotton, 1989: A high plains squall line associated with severe surface winds. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 281-302.
- Schmocker, G. K., R. W. Przybylinski and Y.-J. Lin, 1996: Forecasting the initial onset of damaging downburst winds associated with a mesoscale convective system (MCS) using the mid-altitude radial convergence (MARC) signature. Preprints, 15th Conf. on Weather Analysis and Forecasting, Norfolk, VA, Amer. Meteor. Soc., 306-311.
- Skamarock, W. C., M. L. Weisman and J. B. Klemp, 1994: Three-dimensional evolution of simulated long-lived squall lines. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 2563-2584.
- 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年度春季大会予稿集, 303.
- Trapp, R. J. and M. L. Weisman, 2003: Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part II: Their genesis and implications. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 2804-2823.
- Trapp, R. J., S. A. Tessendorf, E. S. Godfrey and H. E. Brooks, 2005: Tornadoes from squall lines and bow echoes. Part I: Climatological distribution. *Wea. Forecasting*, **20**, 23-34.
- Wakimoto, R. M., 1983: The West Bend, Wisconsin storm of 4 April 1981: A problem in operational meteorology. *J. Climate Appl. Meteor.*, **22**, 181-189.
- Wakimoto, R. M. and J. W. Wilson, 1989: Non-supercell tornadoes. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1113-1140.
- Wakimoto, R. M., H. V. Murphey, A. Nester, D. P. Jorgensen and N. T. Atkins, 2006a: High winds generated by bow echoes. Part I: Overview of the Omaha bow echo 5 July 2003 storm during BAMEX. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2793-2812.
- Wakimoto, R. M., H. V. Murphey, C. A. Davis and N. T. Atkins, 2006b: High winds generated by bow echoes. Part II: The relationship between the mesovortices and damaging straight-line winds. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2813-2829.
- Weisman, M. L., 1992: The role of convectively generated rear-inflow jets in the evolution of long-lived mesoconvective systems. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 1826-1847.
- Weisman, M. L., 1993: The genesis of severe, long-lived bow echoes. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 645-670.
- Weisman, M. L. and C. A. Davis, 1998: Mechanisms for the generation of mesoscale vortices within quasi-linear convective systems. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 2603-2622.
- Weisman, M. L. and R. J. Trapp, 2003: Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part I: Overview and dependence on environmental shear. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 2779-2803.
- Wheatley, D. M., R. J. Trapp and N. T. Atkins, 2006: Radar and damage analysis of severe bow echoes observed during BAMEX. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 791-806.

- Wood, V. T. and R. A. Brown, 1997 : Effects of radar sampling on single-Doppler velocity signatures of mesocyclones and tornadoes. *Wea. Forecasting*, 12, 928–938.
- Wood, V. T. and R. A. Brown, 2000 : Oscillations in mesocyclone signatures with range owing to azimuthal radar sampling. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 17, 90–95.
- Yamauchi, H., O. Suzuki and K. Akaeda, 2006 : A hybrid multi-PRI method to dealias Doppler velocities. *SOLA*, 2, 92–95.

The Bow Echo that Spawned the Gust in the Tokyo Bay Area on 28 April 2007

Yoshimasa TAKAYA*, Osamu SUZUKI**, Hiroshi YAMAUCHI**,
Masahisa NAKAZATO*** and Hanako INOUE**

* (Corresponding author) *Meteorological Research Institute, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan. E-mail : yoshimasa.t@jcom.home.ne.jp*

** *Meteorological Research Institute.*

*** *Meteorological Research Institute (Present affiliation : Observations Department, Japan Meteorological Agency).*

(Received 15 March 2011 ; Accepted 2 October 2011)

Abstract

In the afternoon of 28 April 2007, the Kanto District in Japan was struck by a severe storm accompanied by thunder, wind gusts, and hail. Analyzing this event using Doppler radar data, sounding data, wind profiler data, surface observation data, and a damage survey, we obtained the following results :

- (1) The mesoscale convective system that caused the damage was a bow echo.
- (2) The dual-Doppler analysis showed a region with strong vertical vorticity and strong horizontal convergence at the apex of the bow echo. The form and behavior of this region were very similar to those of mesocyclones in past studies. The region first stayed aloft in the midlevel (2–4 km AGL), but later, its southwestern part reached to the ground. At that point, two misocyclones were detected at its base by low-level plan-position indicator (PPI) data. They moved with the region toward the east-southeast.
- (3) One misocyclone that passed over the southern part of the Tokyo Bay area resulted in wind damage at several locations in the area. Analyses using low-level PPI data showed that the damage occurred at places where the misocyclone wind and its movement were linearly superposed to produce strong wind. The maximum wind speed at this point is estimated to have reached 40 m s^{-1} . The length of the wind-damage swath was about 18 km.
- (4) Previous numerical studies on the genesis of mesovortices have suggested that cyclonic mesovortices form from the tilting of horizontal vorticity acquired by downdraft parcels entering the mesovortex. The horizontal vorticity is solenoidally generated by the baroclinic zone across the gust front. Our analysis using Doppler radar data indicates that this mechanism was realized in nature in this case.
- (5) About 10 minutes before the first damage occurred, PPI data of the higher elevation angle showed

strong radial convergence at the apex of the bow echo. The convergence aloft can be regarded as a precursor to the outbreak of the mesocyclone and will provide useful information for severe wind nowcasting.
