

2003年10月13日に関東地方を通過した亜熱帯低気圧 によって生じた突風現象の観測的研究

高 谷 美 正*・山 内 洋**

要 旨

2003年10月13日に、直径約150 km で複数のスパイラルバンドを伴った亜熱帯低気圧が関東付近に達し、各地に大雨と突風被害をもたらした。この亜熱帯低気圧と突風被害とについて、羽田と成田の空港気象ドップラーレーダーのデータを利用したデュアル解析等を実施した。亜熱帯低気圧の中心付近には、主として中層（地上2～4 km）に平均直径約17 km のメソ β スケールの渦が解析された。このメソ β スケールの渦内部に直径2～3 km、背の高さ2～6 km のメソサイクロンを有するスーパーセルが約1時間にわたって解析された。

千葉県成田市での2地点の突風被害はスーパーセルの通過時に発生していた。レーダーデータと地上被害との細密な解析を行い、被害の原因はダウンバーストではなく、メソサイクロンの近傍で発生したダウンバーストに伴って形成された複数のマイソサイクロンであるとの結論に達した。解析された高度約100 m での風と現地被害の状況との比較では、1地点では風向風速ともほぼ整合的であり、もう1地点では風速は解析結果が被害からの推定（藤田スケールでF1）をやや上回っていたが、風向はほぼ一致した。

1. はじめに

2003年10月8日に沖縄付近で発生した低気圧は、北上して九州南部から四国地方、近畿地方、東海地方および関東地方の太平洋沿岸を通過し、1時間に50～80 mm の非常に激しい雨や突風を各地にもたらした。これに伴い大雨による床上・床下浸水や強風による家屋の損壊、交通障害、農業施設の損壊等の被害が発生した（大久保ほか 2004 ; Ogura *et al.* 2005 ; 鈴木ほか 2005）。中でも関東地方では、10月13日に茨城県神栖市で大型クレーンが倒壊・破損し、死者2名を出したほか、千葉県成田市宗吾および赤荻の2カ所でそれぞれ藤田スケールF1に相当する突風被害をもたらされた（東京管区気象台ほか 2003）。この低気圧は、スパイラルバンドを伴って軸対称性を示し、また発生緯度

が熱帯低気圧に比べて高いことから、藤田ほか（1995）にある亜熱帯低気圧と呼ぶうるものである。このためOgura *et al.* (2005) は、「台風によく似た亜熱帯低気圧」と呼んでいる。

成田市の2カ所で発生した突風被害の原因については、過去の研究においていまだ意見は一致していない。突風発生の翌日には著者の1人も参加した気象庁の現地被害調査が実施された。東京管区気象台ほか（2003）および大久保ほか（2004）は、被害状況から突風原因はダウンバースト（以後DBと表記）と推定している。気象庁の竜巻等の突風データベース（気象庁 2007）においても突風原因はDBとしている。石部（2004）は、レーダーデータの3次元解析を行い、宗吾においてDBを示唆する強エコー域の降下を見出した。同時に、宗吾の南西において下層渦が発生するものの、被害地到達前に消滅したことを指摘している。坂梨・柳野（2005）は、DBによって上空の運動量の大きい空気塊が地表面に達して突風をもたらしたとしているが、それだけでは被害をもたらす風速には達しないとも述べている。また鈴木ほか（2005）は、

* 気象研究所。yoshimasa.t@jcom.home.ne.jp

** 気象研究所（現：気象庁観測部）。

—2015年2月9日受領—

—2016年9月5日受理—

レーダーデータで解析される数 km 程度の低気圧性回転を持つ擾乱が2カ所の突風被害地の近くをそれぞれ通過していることから、これらの回転性擾乱が突風原因であることを示唆している。これらの報告・論文が書かれてから10年以上が経過し、レーダーデータの解析技術も進歩したので、改めてレーダーデータを詳細に解析し直して、この突風原因について調査するとともに、突風被害地の一部については、再度の現地調査を実施した。

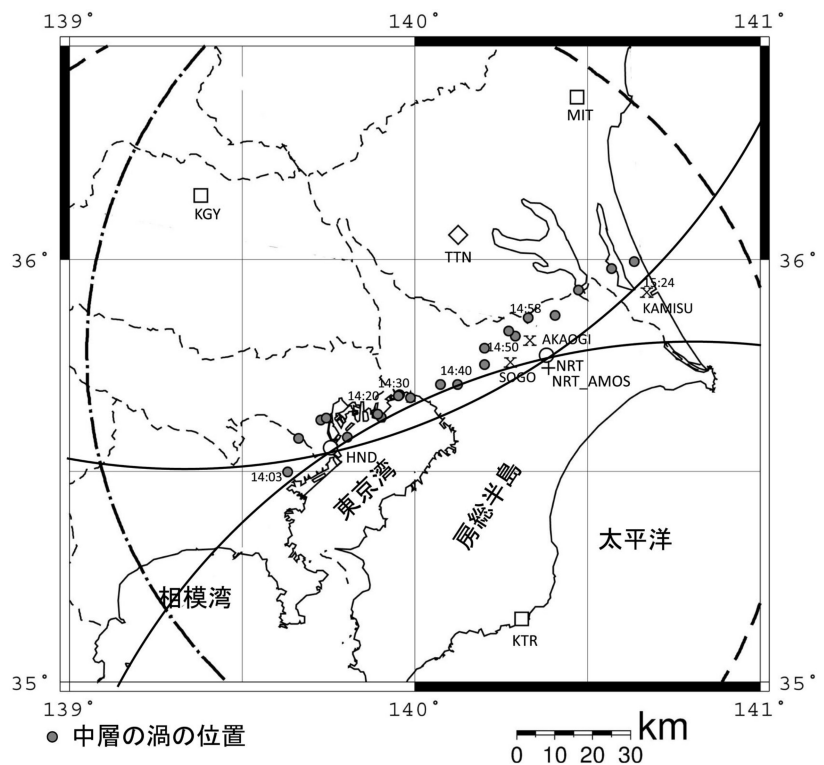
2. データと解析手法

解析に用いたデータは、すべて気象庁によるもので、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) を主として用いた。DRAW の探知範囲は約120 km である。他にアメダス等地上気象データも適宜用いた。これらの配置を第1図に示す。

DRAW の基本的なデータである PPI データ (Plan Position Indicator: 一定仰角による方位角 $0 \sim 360^\circ$ の逆円錐面上のデータ) は、距離方向に150 m 毎、方位角方向に約 0.7° (正確には 360° を512分割) 毎にデータがある。

今回用いた DRAW データの地理情報は、日本測地系であったため、地図との位置合わせの都合上、世界測地系に直した。レーダーデータの解析は、気象研究所で開発された Draft (田中・鈴木 2000) を用いた。Draft はこの後も改良が重ねられ、複数の機能の追加や、描画性能の向上が図られた。Draft にはデュアル解析機能があり、連続の式

を利用して、3次元の速度ベクトル場を得ることができる。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除外した (第1図の黒色の実線で囲まれた領域)。しかし解析対象の主要部分がこの除外された領域に存在することが多かったため、その場合は単一ドップラーデータの情報から風系を推察した。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水平・鉛直ともに2 km に取った。このためデュアル解析はメソ β スケール ($20 \sim 200$ km) 以上の現象の表現に使い、マイソサイクロン等の細かい現象の解析には PPI データを用い



第1図 ドップラーレーダーで探知された亜熱帯低気圧の中心にある中層の渦 (MV) の移動経路。MV の位置 (灰色の丸) と時刻 (14時03分～15時24分) を示す。破線の円弧は羽田 DRAW の、一点鎖線の円弧は成田 DRAW の探知範囲 (ともに約120 km)。実線の円弧は、デュアル解析する領域としない領域との境目を示す。白色の丸は成田 DRAW (NRT) と羽田 DRAW (HND)。四角は熊谷 (KGY)、水戸 (MIT)、勝浦 (KTR) のウィンドプロファイラー、ダイヤは館野 (TTN) の高層気象台、+マークは成田の地上観測点 (NRT-AMOS)、×マークは、突風被害地点の赤荻 (AKAOGI)、神栖 (KAMISU)、宗吾 (SOGO)。

た。格子点数はデフォルトの 512×512 を用いたので、 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ のデータでは格子間隔は約 200 m となる。

CAPPI データを高さ方向に積み上げて 3 次元の直交座標系の格子点データを作成して用いるが、これを「体積データ」と呼ぶことにする。CAPPI データは、地表面から高度 500 m 毎に作成した。デュアル解析では、成田と羽田の両サイトの体積データを一対で用いる。最初の PPI データのスキャン開始時刻の両サイト間の差は最大で 91 秒 であった。この間のシステムの移動距離は約 2 km である。CAPPI 作成時の影響半径は 2 km であるから、両サイトの体積データ間の位置のずれは大きく影響しないものと考えた。Draft の通常の設定では、デュアル解析はレーダーから 5 km 以上遠方の範囲に限られるが、藤原忠誠氏の調整によりレーダーから 500 m の範囲まで解析できるようにした。ドップラー速度の動径方向の収束・発散を求めるツールは、猪上華子氏より提供いただいた。また、ドップラー速度の折り返し補正には Yamauchi *et al.* (2006) による hybrid multi-PRI method を用いたが、必要に応じて更に手作業で折り返し補正をした。

解析の期間中、成田と羽田の両 DRAW は約 3 分毎に仰角の増減を繰り返す「飛行場モード」(石原ほか 2001) による観測を行っていたため、体積データは 13 時 31 分から 15 時 24 分まで約 3 分毎に合計 33 個得られた。「飛行場モード」では、時間分解能は高くなるが、各体積データに含まれる仰角数が 7 つと比較的少ないために、鉛直の解像度は約 2 km と粗くなった。しかし CAPPI 作成時の影響半径も 2 km なので、解析結果において鉛直方向に不連続が発生することはほとんどなかった。また「飛行場モード」では約 1 分毎に仰角 0.7° の PPI データが得られるために、下層の変化を時間的に細かく見ることが出来る。

本論文で、UTC (Coordinated Universal Time, 協定世界時, 日本時間 - 9 時間) のついていない時間は日本時間を表す。

第 1 図には、レーダーの解析範囲、突風被害地点、亜熱帯低気圧の中心付近において見られた中層の渦 (Mesovortex: 以下 MV と呼ぶ: 第 5 節で詳述) の位置を示してある。この MV の平均的な移動速度は、東向き成分が 19 ms^{-1} 、北向き成分が 11 ms^{-1} (水平速度 22 ms^{-1}) であった。亜熱帯低気圧の形状は複雑に変化するが MV は存在し続けたので、この MV の移動速度を亜熱帯低気圧の移動速度とした。これによ

り、システム相対風を算出するとともに、体積データの作成時に、時刻差に起因する CAPPI データの位置ずれの補正を行った。

デュアル解析データのタイムスタンプは、最下層の PPI データのスキャン開始時刻の秒の単位を切り捨てることとし、切り捨てた秒数が少なくなる方のサイトの時刻を用いて決めた。

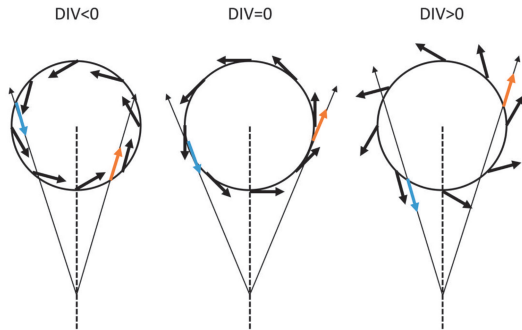
解析対象がレーダーサイトに近い場合には、高い高度のデータは得られない。Draft ではデュアル解析の際に反射強度やドップラー速度は 2 つのレーダーサイトの内で、第 1 サイトに指定したものが表示される。このため、解析対象に近い方のレーダーサイトを第 2 サイトに選択して、反射強度やドップラー速度が高高度まで見えるようにした。しかし速度ベクトル、水平発散、鉛直渦度は両サイトのデータを用いるため、高高度のデータが削りとられる。

デュアル解析で鉛直速度を求める際には、質量保存則を用いて下層から上層に向けて積分して求めるが、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; 石原ほか 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。

3 次元の画像を得るためには、フリーソフトの Vis5D を用いた。CAPPI データから Vis5D データへの変換は、Draft のツールを用いた。

メソサイクロンやマイソサイクロン等の渦は、PPI のドップラーデータから、ほぼ同じ距離レンジ (以下、レンジ) において、方位方向に並んだドップラー速度の極大と極小を検出することで解析した。このようなドップラー速度の特徴を以下では渦シグナルと呼ぶ。渦の直径は近似的には極大・極小の位置間の距離でよいが、ここではより厳密な計算式を用いた。ランキン渦の最大風速は、ドップラー速度の極大値と極小値との差を 2 等分して求めた。極大と極小のレンジが異なる場合には、渦を表すドップラー速度の 2 つの極値の内、極小値の位置のレンジが極大値の位置のレンジよりも大きい (小さい) 場合は、収束性 (発散性) の渦である (概念図を第 2 図に示す)。

空間スケールの小さい渦の移動を精度良く追跡するために、渦シグナルを電波ビームが走査した時刻を求めて解析した。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。この方法に伴う誤差の大きさは、マイソサイクロンの位置におけるレーダービームの幅と本数に



第2図 レーダーデータから、渦に伴う収束・発散を計算する際の概念図。円は最大風速半径の円、黒色の矢印は渦に伴う風ベクトル。細い矢印はドップラー速度がレンジ方向に極値を取った場合のレーダービーム。オレンジ色と水色の矢印はドップラー速度がそれぞれ極大値と極小値を取った時の風ベクトル。破線はレーダーと渦中心を結ぶ直線。

よって変わる (Wood and Brown 1997, 2000)。マイソサイクロン等の渦を解析する際の、レーダービームの幅や高度については必要に応じて説明する。

成田 DRAW の仰角 0.7° の PPI データは、複数の方位角においてビームカットがある。その影響は今回のデュアル解析において見られなかった。解析した領域におけるビームカット幅、仰角 0.7° の PPI と、それより上の仰角の PPI との高度差、CAPPI 作成時の影響半径が 2 km であること、などのためにビームカットの影響は現れなかったものと思われる。

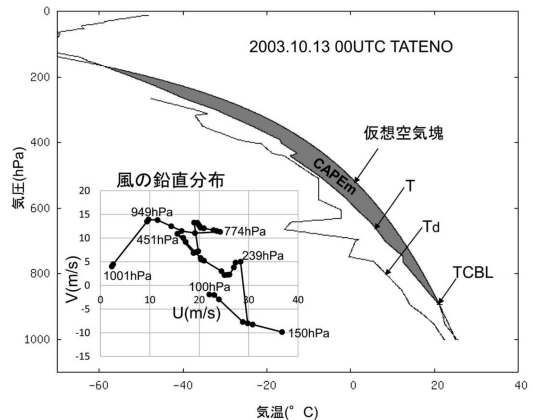
アメダス地上気象データの面的な解析には、東京管区気象台が開発した「かさねる 3D」を用いた。

3. 環境場

関東における突風や大雨の激しい現象発生約 6 時間前である 10 月 13 日 00 UTC の総観スケールの環境場については、鈴木ほか (2005) に詳しいのでここでは簡単に述べる。

地上天気図では亜熱帯低気圧が紀伊半島付近にあった。本州中央から四国付近にかけて秋雨前線があり、本州全体が気圧の谷の中にあった。850 hPa 天気図では本州に沿って気温の勾配が大きい傾圧場が存在し、地上では前線として解析されている (鈴木ほか 2005)。

第 3 図は、同じく 00 UTC における館野 (つくば市) のゾンデデータである。450 hPa より下層は条件



第3図 2003年10月13日00UTCの館野(つくば市)のゾンデデータによる気温と風の鉛直分布と仮想空気塊の温度変化のプロット。熱力学的量の鉛直分布は大枠のグラフ(縦軸は気圧、横軸は気温)。風の分布は埋め込み(縦軸は南北風速、横軸は東西風速)で地表(1001 hPa, 31 m)から100 hPa (16,560 m)までを表示。大枠の3つの曲線は、右から、対流混合層上端(TCBL)から飽和空気塊が断熱的に上昇した場合の温度変化、観測された気温と露点温度。グレーに塗りつぶした領域の面積はCAPEm(本文参照)。

付不安定である。しかし対流混合層上端(図中 TCBL: Top of the Convective Boundary Layer)の 949~925 hPa (502~725 m) の気温減率は $0.18^\circ/100\text{ m}$ で飽和断熱減率(約 $0.4^\circ/100\text{ m}$)より小さく飽和空気塊に対しては安定な成層となっている。このために、地表面からの対流は立ちにくい。650 hPa 付近には乾燥した層がある。風向の鉛直分布を見ると、下層では南西風で、上空に行くに従って時計回りに変化(veering)している。上空150 hPa 付近では 36 ms^{-1} の西北西風が吹いていた。ストーム・リラティブ・ヘリシティ(storm relative helicity: 地上-3 km の速度情報を用い、ストームの移動速度は館野のゾンデデータの 850 hPa の速度を採用した: 以後 SReH)を計算すると $110\text{ m}^2\text{s}^{-2}$ である。この値は、ストームがスーパーセルになるための SReH のおおよその下限値として提案されている $150\text{ m}^2\text{s}^{-2}$ (Davies-Jones *et al.* 1990) より小さい。しかし、Bunkers (2002) は、調査した 479 個のスーパーセルの内 81 個 (17%) は SReH が $100\text{ m}^2\text{s}^{-2}$ に満たなかったと報告している。バルク・リチャードソン数 (bulk Richardson num-

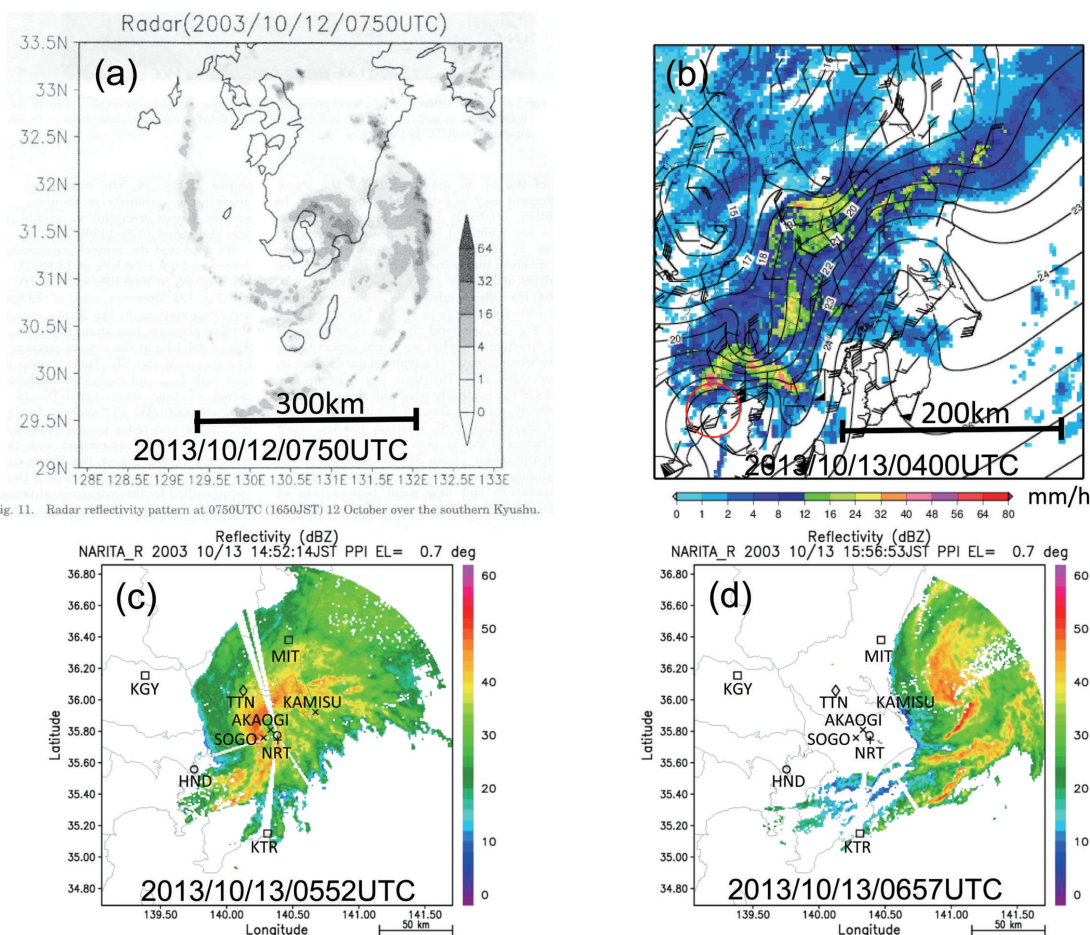


Fig. 11. Radar reflectivity pattern at 0750UTC (1650JST) 12 October over the southern Kyushu.

第4図 メソ α スケールでの亜熱帯低気圧の変化。(a): 10月12日16時50分, 気象庁レーダーで見た鹿児島県付近での低気圧 (Ogura *et al.* (2005) の Fig.11に手を加えたもの)。グレースケードはレーダーの反射強度。(b): 10月13日13時のアメダスデータと気象庁レーダーの反射強度を「かさねる3D」で解析したもの。等値線は気温。図中の赤色で描いた丸は、同一時刻の「かさねる3D」の気圧を解析した図において、低気圧に対応する999 hPaの等圧線。(c), (d): 成田DRAWの14時52分と15時57分における仰角0.7°のフルレンジ (半径約120 km) の反射強度 PPI。図中の記号は第1図と同じ。

ber: 6000 mまでの大気密度の重み付き平均速度と500 mまでの同様の平均速度の差から計算する: 以後BRN: Weisman and Klemp 1982) は13.1, CAPEは722 J/kgである。

第3図にあるCAPEmは, 対流混合層上端の状況は変わらず, かつ混合層内において気温上昇や湿度上昇等の理由で気塊が飽和して対流混合層上端を乗り越えた場合に獲得するであろう運動エネルギーである。その値は約3000 J/kgとなり, BRNは53.6となる。実際に発生したスーパーセルのBRNは10~50の範囲にあるとされている (Weisman and Klemp 1982) の

で, 通常のCAPEでもCAPEmでもほぼその範囲に入っている。結局館野の状態は, スーパーセルが発生する可能性のある環境場であった。

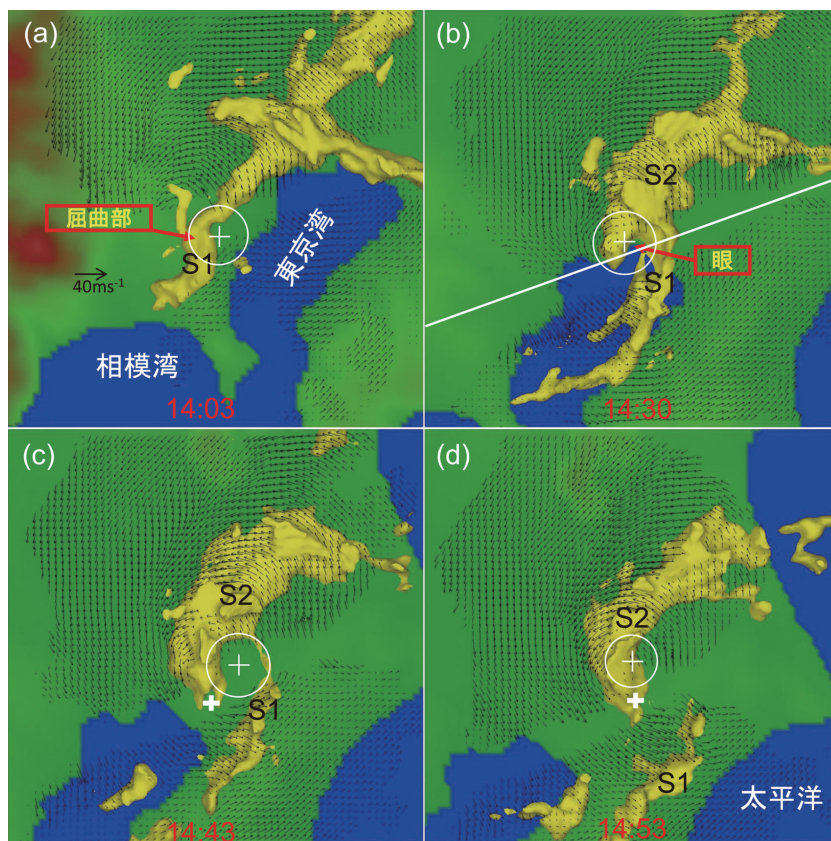
4. 亜熱帯低気圧 (メソ α スケール) の変化

第4図で, メソ α スケールでの亜熱帯低気圧の構造の時間変化を示す。本研究の対象となる亜熱帯低気圧は, 10月8日に沖縄付近で発生し, ゆっくりと北上しながら次第に軸対称性やスパイラルバンドを持つ直径300 kmの台風に似た形状になり, 10月12日0750 UTCには九州付近に達した (第4図 a, Ogura *et al.*

2005).

その後、この低気圧は速さを増しながら東北東に向きを変えて移動し、13日0000UTCには紀伊半島付近に達した。エコー強度は強いもののスパイラル構造は見られなくなった。13日0400UTCには静岡県付近にそれまで存在していた局地前線に沿って温帯低気圧の特徴を強めて発達していった(鈴木ほか 2005)(第4図b)。この低気圧は、後に述べるように関東地方に達した0500UTC頃から、その中心付近で中層に渦(MV)を有するようになり、それに伴って反射強度場に再び台風のスパイラル構造に似た構造が見られる

ようになった。第4図cは、成田の地上観測点(成田航空地方気象台:図中のNRT(+記号))で、気圧が極小値を示した時刻(0552UTC)の反射強度の分布である。水平スケールで約150 kmのスパイラル構造が解析されており、成田の西約10 kmの場所に渦の中心がある。成田の地上データの時系列には水平スケール90~100 km(ほぼメソ α スケール)の亜熱帯低気圧の低圧部による気圧低下があり、その中にスパイラル構造に対応する水平スケール約20 km(メソ β スケール)の顕著な気圧低下(約2 hPa)が見られたことが報告されている(大久保ほか 2004)。



第5図 亜熱帯低気圧の中心部におけるメソ β スケールの構造の時間変化。解析領域は100 km $\times$ 100 km $\times$ 12 kmでシステムと共に移動している。解析時刻は(a)14時03分、(b)14時30分、(c)14時43分、(d)14時53分。地形とともに反射強度の等値面(黄色、40 dBZ)と、高度3.4 kmのシステム相対風を示す。(c)、(d)の太い白色の+マークは、それぞれ佐倉MCのランキン渦のドップラー速度極小の場所と宗吾で突風被害のあった場所。(b)の白色の斜めの直線は第6図の鉛直断面図の位置。それぞれの時刻における中層で解析された亜熱帯低気圧の中心の渦(MV)の中心位置を細い十字で、渦の最大風速半径の円を白色の円で示した。

亜熱帯低気圧はそのスパイラル構造を維持したまま、神栖市の被害地点を通過したが、太平洋に抜けた0657UTCでもなお明瞭なスパイラル構造を維持していた(第4図d)。

5. メソ β スケールでの亜熱帯低気圧の構造

ここでは亜熱帯低気圧の中心付近にあって活発な対流を伴うメソ β スケールの構造について述べる。

5.1 構造の時間変化

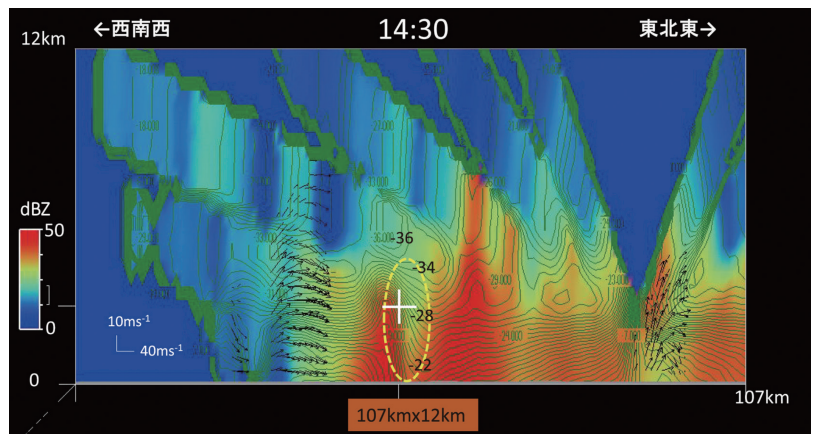
第5図で、メソ β スケールでの亜熱帯低気圧の構造の時間変化を示す。亜熱帯低気圧に伴って第4図bで示したように、13時頃には、局地前線に沿ってレインバンドが組織化され始めた(鈴木ほか 2005)。それから約1時間後の14時03分(第5図a)には、南西に伸びたレインバンドの中ほどに屈曲部(横浜市:矢印で示す)ができ(鈴木ほか 2005)、そこを中心として中層で渦状の風系が見られる(渦の南半分は、デュアル解析の領域外で表現できていない)。屈曲部の南側でレインバンドが湾曲してスパイラル構造になっている。このスパイラル構造を持ったレインバンドを、スパイラルバンドS1と呼ぶ。27分後の14時30分(第5図b)にはMVの中心(図中の白色の細い+マーク)の南西に台風のような構造(矢印で示す)が見える。MVの北側にもスパイラルバンドS2が形成されている。13分後の14時43分(第5図c)には2つのスパイラルバンドは分離し、その間にMVがある。スパイラルバンドS2は更に発達する一方でスパイラルバンドS1は衰退した。スパイラルバンドS2の南西端でDBが発生して佐倉MC(後述)を強化した(図中の太い+マーク)。14時53分(第5図d)にはスパイラルバンドS1は更に衰退した。この時刻にスパイラルバンドS2の南西端で突風被害が発生した(成田市宗吾、図中の白色の太い+マーク)。

14時30分における、台風のような構造の中心付

近を通る鉛直断面(第6図:位置は第5図bの白線)では、眼のような構造の周辺ではレーダーのデータはすべてのレンジで上空約6kmまで存在しているので、エコーの強い領域がすり鉢状をした台風の眼の壁雲のような構造があることが確認できる。この断面は成田DRAWからのレーダービームに沿っているもので、眼の壁雲で囲まれドップラー速度が水平方向に急激に増加して動径発散が卓越している領域(黄色の破線で囲んだ)では、台風の眼における風系と類似して下降流が存在しているものと推察される。台風のような構造は14時27分~14時43分にわたって解析されたが14時47分には消失した。この間、眼の壁雲で囲まれた領域では継続して動径発散が見られた。

5.2 中層のメソスケール渦(MV)

14時03分から亜熱帯低気圧が太平洋に抜けた15時24分までの約80分間、成田と羽田両DRAWによる21対の体積データの基となるPPIデータにおいて、亜熱帯低気圧の中心付近で中層にメソ β スケールの渦(MV)が解析された。MVの諸元抽出や追跡に当たっては、これらのPPIデータの内で高度が2~4kmの範囲内で渦シグナルが精度良く解析されたものを用いた。MVの諸元の平均値は、直径17km、接線速度 24 ms^{-1} 、鉛直渦度は 0.006 s^{-1} であった。MVの中心の軌跡を第1図に一連のグレー色の円で示した。



第6図 14時30分に成田DRAWから見た、亜熱帯低気圧の中心付近を通る鉛直断面図。断面は、ほぼ西南西から東北東を向いている。反射強度はカラーシェードで、ドップラー速度は濃い緑色の実線で 1 ms^{-1} 毎に示す。黄色の破線で囲んだ領域は、ドップラー速度の動径発散が卓越している場所。白色の+マークは、解析されたMVの中心位置を示す。黒色の数字はドップラー速度(単位 ms^{-1})。黒色の矢印はデュアル解析した鉛直面内の地上相対風の風ベクトル。風ベクトルは鉛直方向に約4倍誇張されている(白色のスケールを参照)。

また MV をビームが照射した時刻を用いて MV を追跡し、第 2 節で示した MV の平均移動速度を求めた。

5.3 スーパーセルの存在

デュアル解析によって鉛直渦度の大きさが 0.01 s^{-1} 以上の領域 (MC) が、14時12分から15時15分まで約 1 時間にわたって解析された。位置は、最初はスパイラルバンド S1 と S2 の結合点にあったが、S1 と S2 が分離してからは S2 の南西端に位置した。この領域の大きさは、デュアル解析可能領域による制限を受けるために定量的な議論は出来ないものの、概ね直径は 2～3 km、高さは 2～6 km であった (図略)。

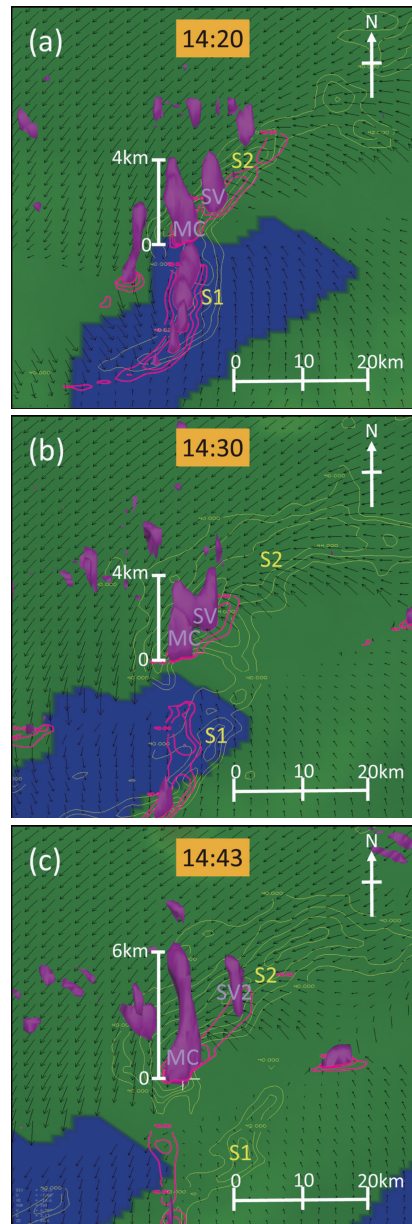
スーパーセルの定義は様々あるが、Thompson *et al.* (2003) は、① MC の鉛直渦度が 0.004 s^{-1} 以上、②その継続時間が30分以上、③エコーの形状としてフックエコーや乾燥空気の流入によるノッチの存在、を挙げている。また Moller *et al.* (1994) は、④ MC の鉛直スケールがシステム全体のその1/3以上であることを挙げている。本事例では、①、②、④は満たされているが、③は満たされていない。また通常のスーパセルにレーダー観測で見られる丸天井構造 (vault) や BWER (Bounded Weak Echo Region: 中層で強いエコーに囲まれた弱いエコー領域) も解析されなかった。アメリカ気象学会の用語集 (<http://glossary.ametsoc.org/wiki/Mesocyclone> 2016.2.18閲覧) によれば、スーパーセルに伴う MC は鉛直渦度が 0.01 s^{-1} 以上となっており、この条件は満たされていた。このように典型的なスーパーセルとは形状がかなり異なるが、本論文ではこの MC を伴ったストームをスーパーセルとして扱う。MC と MV の関係については次節で述べる。

6. 成田市において発生した突風の発生機構

本節では、成田市宗吾と赤荻で発生した突風の発生過程について時間を追って述べる。

6.1 佐倉 MC の発生

第 7 図において、14時20分 (a)、14時30分 (b)、14時43分 (c) における高鉛直渦度領域 (鉛直渦度が $8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 以上の領域) の時間変化を示す。14時20分 (第 7 図 a) に、2つのスパイラルバンド S1 と S2 (黄色の実線で表示) の間にあって東京付近に位置している高鉛直渦度領域 (高さ 4 km) は、5.3節で示した14時12分から15時15分まで約 1 時間にわたって解析された MC に対応する。北側のスパイラルバンド S2 に沿うシアライン上に別な高鉛直渦度領域 (高



第 7 図 高鉛直渦度領域の時間変化。(a)14時20分、(b)14時30分、(c)14時43分におけるデュアル解析結果の南側からの鳥瞰図。マゼンタ色の曲面は、鉛直渦度が $8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ の等値面、黄色とマゼンタ色の実線はそれぞれ高度 0.5 km における 40 dBZ 以上の反射強度の等値線 (2 dBZ 毎) と、鉛直渦度の等値線 ($4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 以上を $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 毎)。黒色の矢印は高度 0.5 km におけるシステム相対風。S1 と S2 は第 5 図で示した 2 つのスパイラルバンドを指す。水平距離、高度のスケールと方位を白色で示す。(c)において、MC の下に部分的に見えている白色の+マークは、佐倉 MC の下層での中心位置。

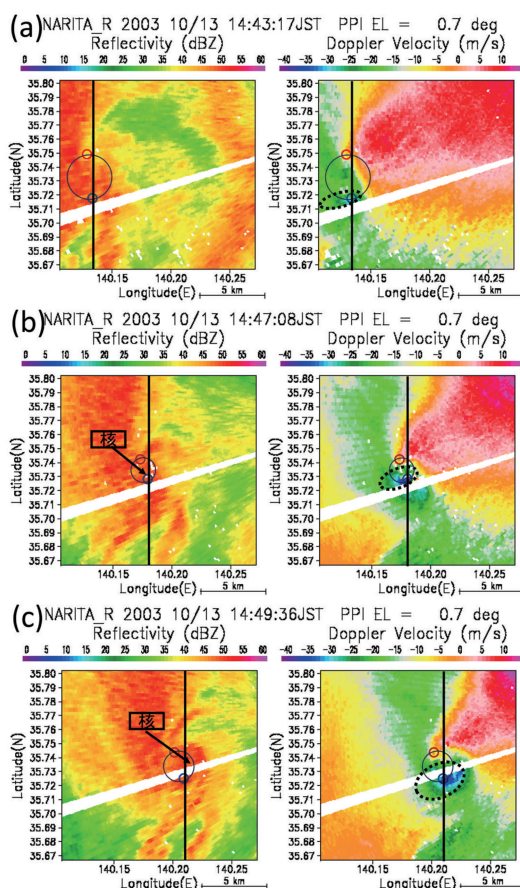
さ 3 km, SV と名付ける) がある。南側のスパイラルバンド S1 に沿ってもシアライン上に高鉛直渦度領域が列をなしている。

14時30分 (第7図b) になると, SV は MC に接近して, 上部でつながってアーチ形をなしている。シアライン上の鉛直渦度が $4 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 以上の領域 (マゼンタ色の実線で示した) は MC に向かって縮小している。反射強度で見ると, S2 は水平に広がり, S1 は狭まっている。

14時43分 (第7図c) になると, SV は見えなくなり MC (高さ 6 km に増大) だけとなる。鉛直渦度が $4 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 以上の領域は再度北東に伸び, シアライン上には新しい高鉛直渦度領域 (SV2 と名付ける) が発生した。この時 MC は千葉県佐倉市に位置していたため, 以下で特に佐倉 MC と呼ぶことにする。この佐倉 MC の下層部分は鈴木ほか (2005) が回転擾乱 1 と名付けたものである。

第8図aで, 14時43分における佐倉 MC の下層における詳しい構造を見る。ここでのレーダービームの高さと半値幅は共に約300 m である。ランキン渦を仮定すると渦の直径は約3.4 km, 鉛直渦度は $1.6 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ である。右図の破線の楕円で囲んだ領域は DB による動径発散が顕著な領域である。数値化した PPI データでは, 動径方向のドップラー速度差は約 26ms^{-1} で, 極大と極小の距離は約1.35 km (150 m 毎のレンジデータ9個分) となり, この動径発散域はマイクロバーストの条件を満たしている (Wilson *et al.* 1984)。動径発散は約 $1.9 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ である。この DB が発生した場所はメソ β スケールで見ると第5図cに白色の+マークで示すようにスパイラルバンド S2 の南西端に位置している。

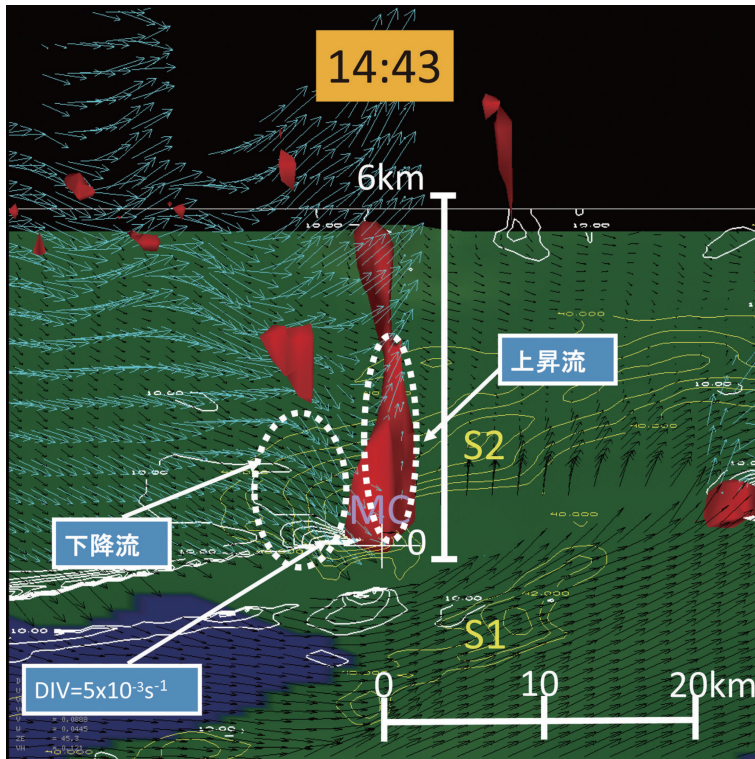
この時刻の佐倉 MC 周辺の3次元の構造を第9図に示す。スーパーセルの条件を満たす佐倉 MC は, 高さが約6 km, 直径は下層で約3 km, 中層以上で約2~3 km, スパイラルバンド S2 の南西端に位置する。この西側には中層からの強い下降流がある (左側の白い破線域)。その直下の地上0.5 km では強い水平発散 $5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ と, 約 30ms^{-1} の北西の風が解析される。下降流のすぐ東側には MC を通る上昇流がある (右側の白い破線域)。第8図aで示した DB が発生した場所は, デュアル解析の領域から外れている (図中白色の+マーク) ため, 第9図の下降流は DB に伴うものではない。



第8図 佐倉 MC の生成・発達を示す平面図。
(a) 14時43分, (b) 14時47分, (c) 14時49分における成田 DRAW による仰角0.7°の PPI 図から15 km×15 km の領域を切り出したもの。左側は反射強度分布, 右側はドップラー速度分布を示す。赤色と青色で描いた小さな円はランキン渦を仮定した場合のドップラー速度の極大・極小の位置を, 濃い青色の円は佐倉 MC の最大風速半径の円を表す。黒色の鎖線の楕円は DB が起きている場所を示す。(a), (b), (c) の黒色の実線は, 第10図で示す鉛直断面の位置。(b) と (c) に反射強度の「核」の位置を指し示した。

6.2 佐倉 MC の発達

第8図b, cに14時47分と14時49分における佐倉 MC の下層の構造を示す。ドップラー速度分布では14時43分 (第8図a) から継続して明瞭な渦シグナルが見られる。左側の反射強度分布では反射強度の大きい部分 (核) があり, 周囲にメソ γ スケールのスパイラルバンドを伴っている。この間 DB (破線) は継続



第9図 佐倉MCが形成された時刻14時43分の風の分布と鉛直渦度分布の立体図。黄色の実線は、高度0.5 kmにおける反射強度の等値線（40dBZ以上を2dBZ毎）。赤色の曲面は鉛直渦度が 10^{-2}s^{-1} の等値面。黒色の矢印は高度0.5 kmにおける地上相対風。第8図aの小さい青丸で示したランキン渦のドップラー速度が極小の場所をここでは白色の+マークで示す。佐倉MCの中心を通る鉛直断面図における地上相対風の風ベクトルを水色で示した。白色の破線で囲った2つの領域は、左側は下降流が卓越している場所で右側は上昇流が卓越している場所。白色の実線は地上0.5 kmの水平発散の等値線で、 $1 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ 以上を $1 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ 毎に示した。白色で水平、垂直の空間スケールを示した。

している。14時47分と14時49分における渦の直径はそれぞれ1.9 kmと2.5 kmであり、鉛直渦度は $4.0 \times 10^{-2}\text{s}^{-1}$ と $2.8 \times 10^{-2}\text{s}^{-1}$ である。

佐倉MCが発達する過程を3次元的に理解するために、鉛直断面において議論する（第10図）。下層の渦の位置がデュアル解析領域から外れるので、ここでは変数は成田DRAWから見た反射強度とドップラー速度のみである。断面の位置は、佐倉MCの2つの極値を通る断面ではなく、佐倉MCの下層におけるランキン渦のドップラー速度の極小点を通り鉛直構造が分かりやすい南北断面とした（第8図a, b, cの黒色の直線）。MCに合わせた断面であるため、MVに伴う循環は明瞭ではない（MVの中心を通る断面では、下層までMVの循環が見える（図略））。丸で

囲った×マークによれば、MVとMCの切片の長さは、14時43分では約15 kmと7 km、14時47分と14時49分では約20 kmと5 kmとなっている。MCによる切片の大きさは、第8図で見たPPIデータの結果より大きくなっている。これはデュアル解析をしたことによって、データがスムージングを受けた結果と考えられる。

14時47分と14時49分に下層のMCの間からドップラー速度が方位方向に大きく変化し、鉛直渦度が大きい領域（鉛直渦度は約 0.01s^{-1} 、直径約1.5～2.0 km）が立ち上がっている（マゼンタ色の破線）。この領域はMCの主要部分で、この断面図では北に向かって傾いている。MCは14時47分よりは14時49分の方が、高度が高くなり発達している。MCのドップラー速度の極小値を取る場所はこれらの時間ほぼ鉛直に中層まで続いていることがわ

かる。第10図は、中層ではっきりと認識できるMVの内部にMCが埋め込まれて、渦が2重構造になっていることを示している。同様な方法で、この2重構造は後の時刻に赤荻（6.4節で説明）でも解析された（図略）。またドップラーデータの数値的解析によってもこの2重構造を、確かめることができた（図略）。

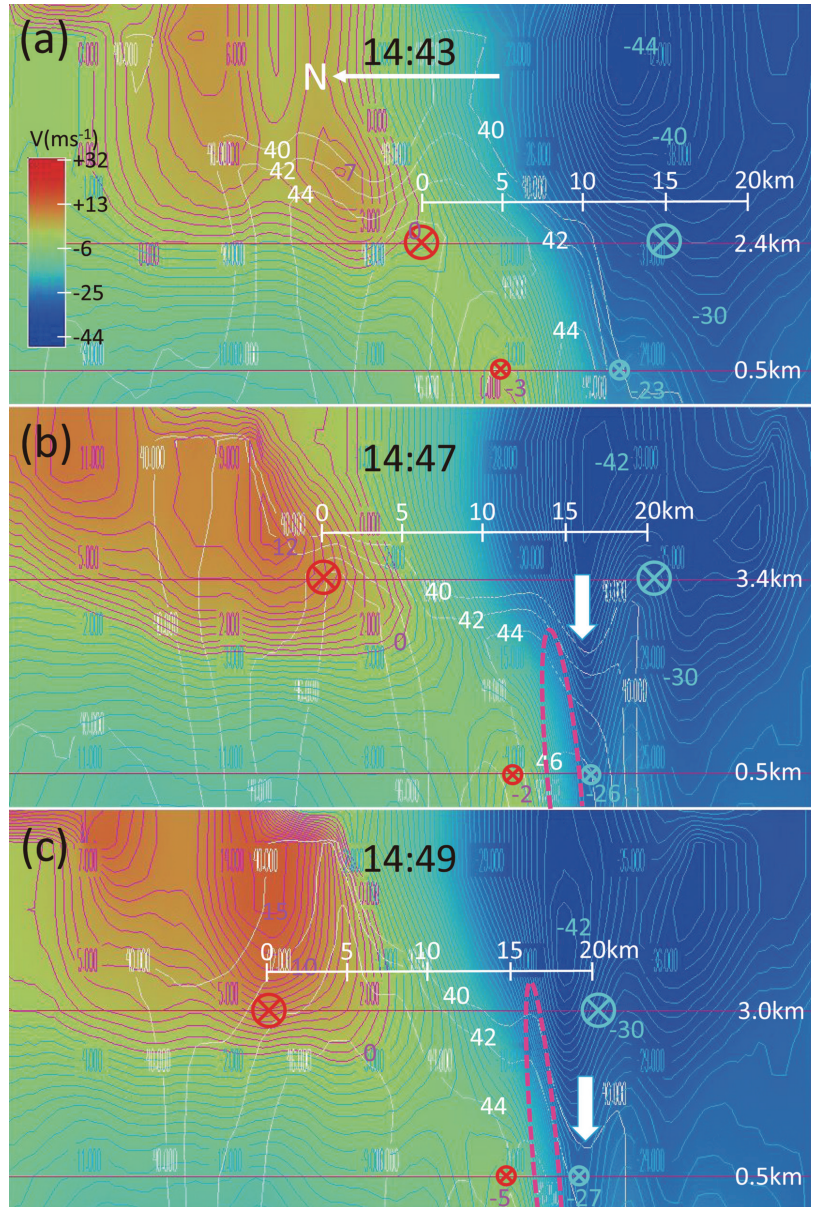
反射強度40 dBZの等値線（白色の実線）は14時47分（第10図c）には、ドップラー速度の極小値を示している場所で地上約3 kmまで凹んでいる（白色の矢印）。14時49分（第10図b）にはこの凹みは更に地上約1 kmまで下がっている。佐倉MCのドップラー速度が負の極値を取りDBが発生している場所の上空で降水コアの落下があったことを示している。このDBが、下層で渦の回転と同じ方向の風速を強めると同時

に、収束を強めて上昇流を強め、渦の延伸効果によって佐倉 MC を強化したと考えられる。

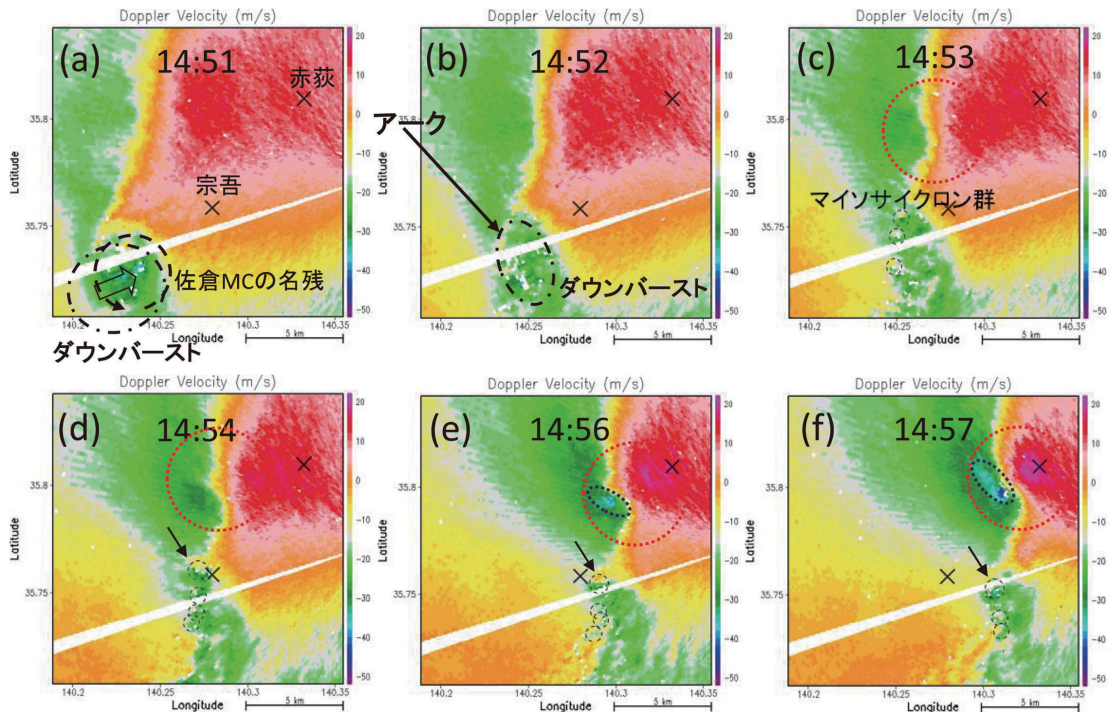
6.3 佐倉 MC の下層部分の消滅とマイソサイクロン群の発生

佐倉 MC の下層部分はその後 2 分ほどで消滅して、マイソサイクロン群が発生した。

第11図で成田 DRAW の位置は白く見えているビームカット域の右側の延長線上約 3 km にある。図の領域ではレーダービームの高さと半値幅は共に約 100 m である。14時51分（第11図 a）には佐倉 MC（黒色の破線の円）は不明瞭となり 14時52分（第11図 b）には、全く渦の構造は見えない。第11図 a, b の黒色の一点鎖線の楕円内では、明瞭な動径発散が連続した複数のビームで見られ、DB が起きていると解釈される。DB の内部にはドップラー速度の複雑な構造が見える。14時52分（第11図 b）における DB の西側境界の黄色のアーカ状の部分（矢印で指し示した）でドップラー速度が 10 ms^{-1} ほどジャンプしており、DB が地上に達して大気が水平に広がって出来るガストフロントと解釈できる。14時53分（第11図 c）には、このガストフロントがあった場所で直径 100 m のオーダーのマイソサイクロンが 3 個形成された（黒色



第10図 佐倉 MC の発達を示す鉛直断面図。(a) 14時43分、(b) 14時47分、(c) 14時49分。断面の位置は第 8 図 a, b, c に示した。水平 50 km、高さ 6 km。図は、手前が西で、成田 DRAW からレーダービームがほぼ垂直に紙面後方から手前を通る。成田 DRAW で見た反射強度は白色の実線で 40 dBZ 以上を 2 dBZ 毎に示す。反射強度が凹んでいる位置を白色の矢印で示す。成田 DRAW から見たドップラー速度はカラーシェードと赤色（ドップラー速度がゼロまたは正）と空色（ドップラー速度が負）の実線で 1 ms^{-1} 毎に示す。×字を内部に持つ大きい円と小さい円は、それぞれ MV を検出した高度での MV の最大風速半径の円と断面との交点と、地上 0.5 km における MC の最大風速半径の円と断面との交点を表す。(b) と (c) におけるマゼンタ色の破線は鉛直渦度の大きい領域を主観的に囲ったもの。赤色の実線は各時刻に MV を検出した高さと地上 0.5 km、水平のスケールを白色で与えてある。



第11図 佐倉 MC の消滅とマイソサイクロン群の生成、及び赤荻マイソサイクロンの生成の様子。14時51分から約1分毎に、成田 DRAW の仰角 0.7° のドップラー速度の PPI データから、 $15\text{ km} \times 15\text{ km}$ の領域を切り出したもの。×マークは、宗吾と赤荻における突風被害のあった地点。(a)において黒色の太い破線の円は佐倉 MC の名残、(a)、(b)において黒色の一点鎖線の楕円は佐倉市付近での DB。(c)～(f)において黒色の細い破線の円はマイソサイクロン、赤色の破線の円は赤荻マイソサイクロンが形成されてゆく領域。(e)、(f)において濃い青色の破線の楕円は赤荻マイソサイクロン付近での DB。(b)において、DB に伴うガストフロントと解釈されるアーク状の部分に矢印で指し示した。(d)～(f)において黒色の矢印で指したマイソサイクロンは、宗吾に被害をもたらしたものの。

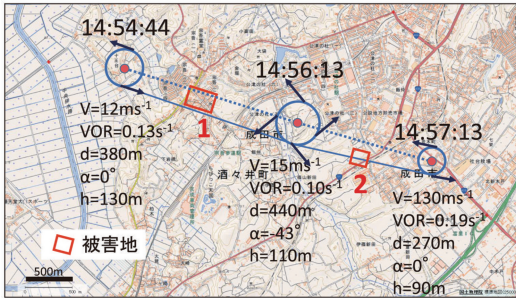
の鎖線の丸で囲んだ部分)。14時54分(第11図 d)になると黒色の矢印で指し示した新しいマイソサイクロンが宗吾(図の中央付近の×印)の北西部に現れた。14時56分(第11図 e)にはこのマイソサイクロンが東南東へ移動し宗吾付近を通過し、14時57分(第11図 f)には更に東南東へ進んだ。ここで解析された数百 m の直径を持つマイソサイクロンは、詳細な折り返し補正を実施した本解析において初めて確認された渦である。尚、羽田 DRAW データの解析からは、 0.7° の PPI データで14時51分に見えていた佐倉 MC が14時53分には消滅したことが分かった(図略)。

第12図で、地図上でのマイソサイクロンの移動と突風被害地との関係を見る。このマイソサイクロンは東南東へ約 22 ms^{-1} で移動した。図の2箇所の被害地(赤色で描いた四角)はいずれも渦とその移動速度が

互いに風速を強め合う中心経路の進行右側に位置しており、宗吾での突風原因は、ここで解析されたマイソサイクロンによるものと考えられる。渦による風ベクトルは14時54分44秒には、接線方向を向いており、14時56分13秒には接線から 43° 外側に向いていた。このことから、被害地1の宗吾では、線形内挿によって風向が西北西から北西で風速 34 ms^{-1} の風が計算される。被害地2でも同程度の風が計算される。この風速と被害の実態との関連は次の節で述べる。宗吾における被害地点は、メソ β スケールで見ると、第5図 d に白色の+マークで示すようにスパイラルバンド S2 の南西端に位置している。

6.4 赤荻マイソサイクロンの形成

第11図 c～f において、赤色の破線の円は、赤荻に突風をもたらしたマイソサイクロン(以下赤荻マイソサイクロン)が形成されてゆく領域を示す。第11図



第12図 宗吾を通過したマイソサイクロンの移動の様子。地図に、成田DRAWの仰角 0.7° PPIデータから求めたマイソサイクロンの最大風速半径の円（青色の円）を重ねてある。地図上で薄い橙色の領域は住宅を表す。青色の円の上の時刻は、渦をレーダービームが通過した時刻。円の下に数字の V は最大風速半径の円上での風速、 VOR は鉛直渦度、 d は最大風速半径の2倍、 α は渦に伴う風ベクトルと円の接線とのなす角度で+は内向き、-は外向きを表す。 h は渦の場所でのレーダービームの高さ。濃紺の矢印は渦による風ベクトル。赤色で描いた四角は被害地を表す。被害地1は宗吾、被害地2はそこから東南東に約1.8 km離れたゴルフ練習場。

c, dにおいて次第に動径収束が強まっていき、第11図e, fにおいては、この収束域が渦を形成していく（大久保ほか 2004；鈴木ほか 2005）。対応する反射強度を見ると、メソ β スケールのスパイラルバンドの南西端にメソ γ スケールのスパイラル構造が明瞭になっていく（図略）。この収束域の西側には動径発散が見られ、特に14時56分（第11図e）と14時57分（第11図f）には明瞭なDBのシグナル（濃い青色の破線で描いた楕円）が見えている。この場所はメソ β スケールで見るとスパイラルバンドS2の南西端であった（図略）。赤荻マイソサイクロンの生成にも、第10図に示した佐倉MCの場合と同様な降水コアの落下（図略）とこれに伴うDBが関与していた。

第13図で、地図上でマイソサイクロンの移動と突風被害地との関係を見る。14時58分46秒におけるマイソサイクロンが赤荻の被害地に最も近い。宗吾の場合と同じく、マイソサイクロンの最大風速半径の円の進行右側が被害地を通過しているため、赤荻の突風原因はこのマイソサイクロンによるものと考えられる。マイソサイクロンの最大風速半径の円上での風速は 42 ms^{-1} であり、接線から 18° 内側を向いている。マイソ

サイクロンの直径は970 m、鉛直渦度は 0.16 s^{-1} である。移動速度は平均して約 21 ms^{-1} （東向き成分が 18 ms^{-1} 、北向き成分が 10 ms^{-1} ）である。この移動速度と渦による風をベクトル合成すれば約 60 ms^{-1} の南西風（方位 220° ）が解析される。

6.5 下層の渦（MCまたはマイソサイクロン）と中層の渦（MV）との位置関係と渦の構造

成田市において突風をもたらした時間帯におけるMVと下層の渦（MCまたはマイソサイクロン）との位置関係を第14図に示す。下層の渦の解析は、空間的に細かく見える成田DRAWの仰角 0.7° のPPIを用いた。中層の渦の解析は5.2節で示したとおりである。次に、低仰角のビームの通過時刻と高仰角のビームの通過時刻の差の分だけ、MVの位置を移動させて、下層の渦の時刻と同じ時刻のMVの位置を計算する。MVの移動速度は、5つの時刻毎に移動平均を取ったものを用いる。第14図では14時43分から14時58分までの、下層の渦（橙色の円）と中層のMV（青色の円）の位置を最大風速半径の円で示した。14時43分～14時49分の3つの時刻の下層の渦は、佐倉MCを表している。この間下層の渦は東進し、他方でMVは東北東進している。このため、MCのMVに対する相対位置は西の縁付近から次第に南西端に移動していった。その後14時51分～14時52分にかけてDBが発生して（第11図a, b）下層で佐倉MCが消滅し、複数のマイソサイクロンが現れた（第11図c）ので、下層の渦は表示していない。14時58分は赤荻マイソサイクロンが被害地を通過した時刻に当たり、下層の渦（赤荻マイソサイクロン）はMVのほぼ南端に位置している。

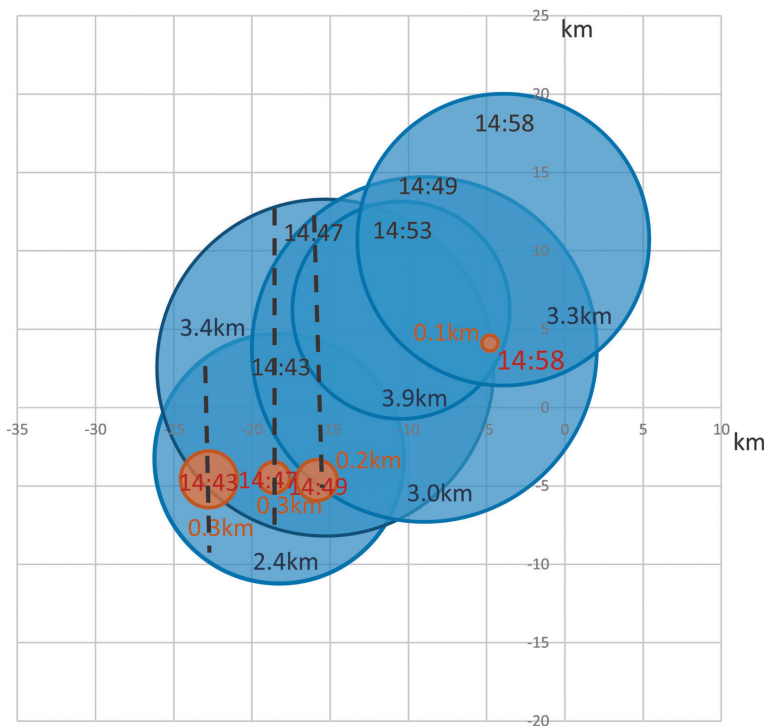
7. 解析結果と現地災害調査結果の比較

7.1 宗吾における突風被害

第15図aは、宗吾の災害調査結果（大久保ほか 2004）に手を加えたものである。レーダーから推定した風向と風速（白抜きの矢印）は、 315° と 34 ms^{-1} であり、現地調査による瓦などの飛散方向（黒色の矢印）および藤田スケール（F1: $33 \sim 40 \text{ ms}^{-1}$ ）と整合している。この現地調査では、市営住宅（周囲の家に比べて突出して築年数長い）の屋根がはがれて轟音と共に吹き飛んだという証言がある（東京管区気象台ほか 2003）。また、大きな木の幹が根元付近から折れる、飛んできた木片が壁に突き刺さるなどの写真があり、赤荻よりも風が強かったことを示唆している。



第13図 赤荻を通過したマイソサイクロンの移動の様子。記号は第12図と同じ。但しマイソサイクロンによる風ベクトルは14時58分46秒のみ表示してある。



第14図 下層の渦（橙色）と、対応する時刻の中層の渦（MV、青色）の位置と大きさ。横軸と縦軸は成田 DRAW を原点とした東西・南北の座標軸で目盛りは km 単位。コロンで区切られた数字は時刻 (hh:mm) を、km 単位の数字は渦の高さをそれぞれ表す。黒色の破線は、第10図の断面の位置を示す。

2013年4月22日、著者達は宗吾において再調査を行った。新たに得られた目撃証言としては、①「こたつにあたっていたら、畳が持ち上がって必死に押さえた」、②「空中を瓦が渦を巻きながら飛んでいた」、③「隣家の住宅の屋根が舞い上げられて、自分の家の屋根の棟を削り取って飛んでいった」、④「ゴルフ練習場でネットを支えているポールが曲がる被害があった」などがあった。証言①は、被害地上空に低圧部があったか、あるいは建物の基礎部分から風が吹き込んだことを示している。証言①～③はいずれも被害が竜巻によるものであった可能性を示唆している。証言④のゴルフ練習場は第12図で示した被害地2である。被害域は断続的ではあるが直線状に並んでいたことがわかる。第16図は再調査で得られた被害地1における被害の実態を地図に重ねたものである。周囲に比較して突出して築年数の長い市営住宅地では、被害の程度が大きく、また飛散物の発生源ともなり、被害を拡散した。物体の飛散した方向は概ね東から南東方向であり、レーダーデータの解析結果と概ね整合している。

7.2 赤荻における突風被害

第15図bは、赤荻の災害調査結果（大久保ほか2004）に手を加えたものである。レーダーで推定した

風ベクトル（風速 60 ms^{-1} ，風向 220° ）の内，風向については飛散方向と整合している．しかし，風速については，被害（物置の転倒，屋根瓦の飛散，木の枝が折れた等）から推定されるF1に対し，レーダーの推定値はF2の範疇であり整合しない．レーダーの推定値は，高度約80 mの上空の風であるために，地表付近の風速より強めとなった可能性がある．

8. 議論

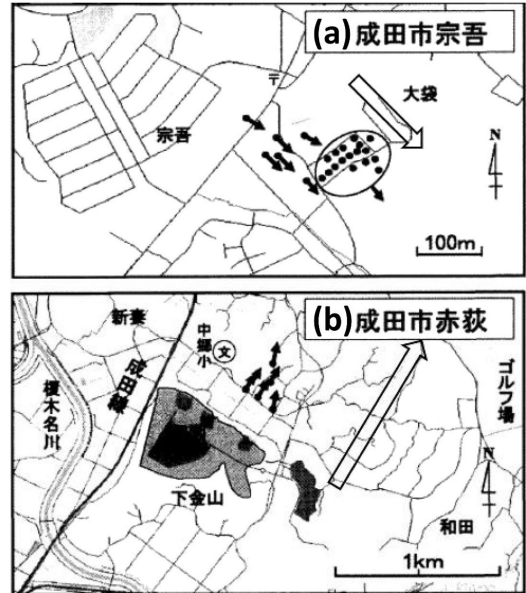
8.1 竜巻が存在した可能性

宗吾の被害については第7節の目撃証言から竜巻によるものであった可能性がある．つまり，地上に突風をもたらしたのは，6.3節で示した数百 m スケールのマイソサイクロンそのものではなく，その中に埋め込まれていた竜巻であったのかも知れない．しかし，付近ではレーダービームの幅が約100 mあり，より小さなスケールの竜巻を確認することは出来なかった．

赤荻のマイソサイクロンは宗吾のものに比べて大きくかつ強いので，より広い領域に被害を及ぼし得るはずだが，実際の被害域はかなり限定されている．このため，宗吾同様に，マイソサイクロン中に竜巻が短時間発生して被害をもたらした可能性がある．しかし，赤荻マイソサイクロン付近のドップラー速度場にはデータの欠落が多い．これは二次エコー除去を目的とした品質管理により，渦周辺のドップラー速度の変動幅の大きいデータが除去されたためである．除去された領域に，宗吾に発生したような数百 m スケールの渦や竜巻が発生していた可能性は否定できない．

8.2 突風の原因についての先行研究との比較

先行研究や調査報告（大久保ほか 2004；東京管区気象台ほか 2003）では，「①竜巻の目撃証言がないこと，②被害地点が帯状でないこと，③飛散物体の飛



第15図 解析した突風被害地での風ベクトルを，現地調査の結果と比較したもの．原図は大久保ほか（2004）による．(a)，(b)はそれぞれ宗吾，赤荻の被害調査の結果で，黒色の丸は突風被害のあった場所，黒色の矢印は物が飛散した方向を示す．白抜ききの矢印は，今回解析した風ベクトルを表す．



第16図 宗吾の被害地1の被害再調査をまとめたもの．薄い橙色の多角形は住宅．青色の点は被害のあった場所，青色の実線の矢印は被害状況からの推定による物の飛散した方向．青色の破線の矢印は目撃証言から推定した飛散物の軌跡．市営住宅地を赤色の四角で囲った．

散方向が一方向であったこと、④強い雨が降っていたこと」の4点から、「被害をもたらした突風は竜巻によるものとは考えにくい」としている。

①については、第5図からわかるように本事例が継続的な非常に強い降水の中で発生していることから、竜巻があったとしても確認することが困難であった可能性がある。また、直径の大きなマイソサイクロンそのものが突風原因であるならば、その大きさゆえに目視で渦と認識することは困難であったと思われる。

②については、竜巻の寿命（接地している時間）が短時間であれば、矛盾がない。また第12図、第13図において、最大風速半径の円の進行右側の軌跡をたどれば被害地以外は耕作地、森林、ゴルフ場等であり、被害を確認し易いものが分布していないことによって帯状の被害が見えていない可能性がある。

③については、宗吾の被害分布を精査すると、第16図に示すとおり、推定された風向や飛散方向が必ずしも一方向ではなく、竜巻の可能性は否定できない。

④についても、高降水型スーパーセル（High Precipitation (HP) supercell）の下など、降水の強い環境下でも竜巻は発生しうるので、必ずしも竜巻の存在を否定する理由にはならないと考えられる。

本研究は観測的研究なので、力学的な考察は十分行えなかった。また突風をもたらした部分が両 DRAW の基線に近いことが多かったためにデュアル解析が困難な時間帯が多かった。被害をもたらす突風が何故スパイラルバンドの南西端でのみ発生したか、MV の南西端に MC が移動した後に DB が発生して MC が不明瞭になった理由、紀伊半島付近で一度失われたスパイラル構造が傾圧帯通過後に何故回復したか等の謎が残る。今後数値モデル等を用いて更に研究が進展することを期待する。

謝 辞

本研究を進めるにあたって、下記の方々に技術的な援助をいただいた。気象研究所の猪上華子氏、佐藤英一氏、藤原忠誠氏（現 JR 東日本研究開発センター）、気象庁観測部の入江和紀氏である。また京都大学の石原正仁氏、気象環境教育センターの山岸米二郎氏には有益な議論をしていただいた。先行研究の著者でもあった田畑 明氏には資料の提供と貴重なコメントをいただいた。気象研究所の鈴木 修氏には技術的な援助ならびに有益な議論をしていただいた。担当編集委員の柳瀬 亘氏及び2名の匿名の査読者の方々には、

辛抱強く原稿を読んでいただき、懇切丁寧なご指導をいただいた。上記の方々にこの場を借りて篤く御礼申し上げる。国土地理院には複数の地図を使用させていただいた。

この論文を、本事例の被害現地調査に携わるとともにメカニズム解明に向けた解析を開始したものの、病に倒れて志を果たすことなく亡くなった元 気象研究所研究官の石部 勝氏に捧げる。

参 考 文 献

- Bunkers, M. J., 2002: Vertical wind shear associated with left-moving supercells. *Wea. Forecasting*, 17, 845-855.
- Davies-Jones, R. P., D. W. Burgess and M. Foster, 1990: Test of helicity as a tornado forecast parameter. *Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms*, Kananaskis Park, AB, Canada, Amer. Meteor. Soc., 588-592.
- 藤田由紀夫, 菊地 正, 中鉢幸悦, 上野忠良, 長谷川洋平, 田口晴夫, 1995: 北西太平洋の亜熱帯低気圧とその強度推定について. 気象衛星センター技術報告, (30), 1-31.
- 石部 勝, 2004: 2003年10月13日, 千葉・茨城県で突風災害をもたらしたストームの3次元構造の推移. *天気*, 51, 480.
- 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), 59-61.
- 石原正仁, 赤枝健治, 鈴木 修, 2001: 空港気象ドップラーレーダー. 気象研究ノート, (200), 197-216.
- 気象庁, 2007: 2003/10/13 15:00 千葉県成田市で発生したダウンバースト. 竜巻等の突風データベース, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/2003101302/list.html> (2015.07.15閲覧).
- Moller, A. R., C. A. Doswell III, M. P. Foster and G. R. Woodall, 1994: The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures. *Wea. Forecasting*, 9, 327-347.
- Ogura, Y., H. Niino, R. Kumabe and S. Nisimura, 2005: Evolution of a typhoon-like subtropical low causing severe weather over the Kanto area on 13 October 2003. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, 531-550.
- 大久保 篤, 柴田のり子, 根口光太郎, 辻本嘉大, 橘田重延, 大石喜仁, 武井康郎, 水野康隆, 宮原寿夫, 仲居史志, 2004: 2003年10月13日に千葉県, 茨城県で発生したダウンバーストについて. *天気*, 51, 363-369.
- 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.
- 坂梨貴将, 柳野 健, 2005: 2003年10月13日, 成田・鹿島に突風被害をもたらした低気圧ドップラーレーダーによるメソ低気圧の解析ー. 気象庁研究時報, 57, 109-124.
- 鈴木和史, 金田昌樹, 田畑 明, 2005: 突風をもたらした低気圧の特徴と突風発生予兆の把握について. 気象庁研究時報, 57, 63-80.
- 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.
- Thompson, R. L., R. Edwards, J. A. Hart, K. L. Elmore and P. Markowski, 2003: Close proximity soundings within supercell environments obtained from the rapid update cycle. *Wea. Forecasting*, 18, 1243-1261.
- 東京管区气象台, 水戸地方气象台, 銚子地方气象台, 2003: 平成15年10月13日に茨城県神栖町及び千葉県成田市で発生した突風による風害について. 現地災害調査速報.
- 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.
- 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 Appl. Meteor.*, 23, 898-915.
- 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. Ocean. 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.

An Observational Study of Severe Wind Phenomena Associated with a Subtropical Cyclone Passing over the Kanto Plain on 13 October 2003

Yoshimasa TAKAYA* and Hiroshi YAMAUCHI**

* (Corresponding author) *Meteorological Research Institute, 1-1, Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan.*

Email: yoshimasa.t@jcom.home.ne.jp

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

(Received 9 February 2015; Accepted 5 September 2016)
