

台風9918号外縁部で発生した1999年9月24日の 東海地方の竜巻とメソサイクロン

坪 木 和 久*・耿

驃**・武 田 喬 男*

1. はじめに

1999年9月24日、山口県付近を通過していた台風9918号の最外縁部の雲帯が東海地方にあったとき、1100 JST (日本標準時) から約1時間半の間に、愛知県豊橋市、蒲郡市、豊川市で3個の竜巻が発生した。これらの竜巻のうち豊橋市で発生したものは特に規模が大きく強力で、50戸以上が全壊し、400人以上が負傷するなど大規模な被害が出た。

日本およびその周辺では、台風に伴ってしばしば竜巻が発生することが知られている(光田, 1983)。Saito (1992)は1980年に宮崎で発生した5個の竜巻が海上から上陸した長続きする積乱雲に伴って発生したこと、またその積乱雲が低気圧性渦を伴っていたことを示した。小元・文字(1983)は、1979年9月4日に台風7912号に伴って名古屋で発生した竜巻を調べ、それが反時計回りで、しかも激しい積乱雲に伴うものであったことを示した。

このような積乱雲は内部に大きな渦度を持ち、準定常に長時間維持されることがある。そのような積乱雲はスーパーセルとよばれ、しばしば竜巻の親雲になる。スーパーセルの内部にある低気圧性(反時計回り)の渦をメソサイクロンという。Kobayashi *et al.* (1996)は千歳付近で発生した竜巻についてドップラーレーダーを用いて詳細なライフサイクルを調べ、竜巻がメソサイクロンの内部に発生したものであることを示した。わが国ではスーパーセルとそれに伴う竜巻の観測例は少ない。典型的なスーパーセルとそれに伴う竜巻

として、Niino *et al.* (1993)が、千葉県茂原市で、温帯低気圧通過時に発生したものについてドップラーレーダー観測を含めて詳細に解析をしている。このとき観測されたメソサイクロンの渦度は $2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ に達していた。またSuzuki *et al.* (2000)は台風の北東象限で発生した9個のミニスーパーセルのうち3個が竜巻を伴っていた事例を解析し、背の低い小規模のスーパーセルが竜巻を発生させることを示した。

はじめに述べた東海地方の竜巻をもたらした積乱雲を名古屋大学大気水圏科学研究所の屋上に設置したドップラーレーダーが観測した。本研究では、これらの竜巻についての特徴をまとめ、それらをもたらした積乱雲について、主にドップラーレーダー観測からそのエコー構造と流れの場の特徴を調べた。さらに雲解像モデルを用いて、竜巻の親雲となる積乱雲の発生ポテンシャルを事前に検知することの可能性を検討した。

2. 竜巻の概要

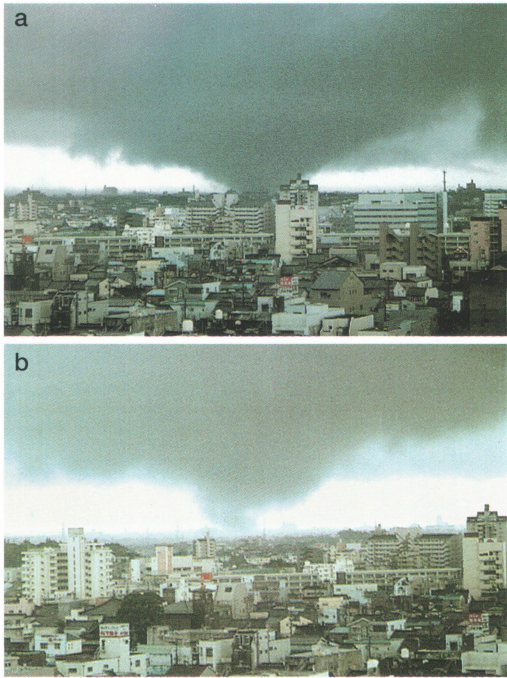
1999年9月24日、1100 JST から1230 JST の間に、東海地方で3個の竜巻が発生した。名古屋地方気象台の発表によると、豊橋の竜巻は9月24日1105 JST 頃豊橋市野依町付近で発生し、速度約 12.5 m s^{-1} で、ほぼ北に向かって約19 km 進み、1130 JST ごろ一宮町長山付近まで達して消滅した。この竜巻による被害域の最大幅は550 mにも達した。強風の強さを表すFスケールは、「F3」に相当すると発表された。この強さの竜巻はNiino *et al.* (1993)が調べた千葉県茂原市のもと同程度で、近年に発生したものとしては、茂原市の竜巻とならんで国内で最大級のものであった。この竜巻は昼間に都市部で発生したので、多くの目撃者があり、写真やビデオによる撮影など、竜巻そのものの映像が残されている。第1図は豊橋市内を縦断する竜巻の写

* 名古屋大学大気水圏科学研究所。

** 名古屋大学大気水圏科学研究所(現:地球観測フロントティア研究システム)。

—2000年6月7日受領—

—2000年9月4日受理—



第1図 1999年9月24日豊橋市の中心部を縦断する竜巻。市庁舎から1115 JST ごろ撮影されたもので、時間は (a) から (b) に進む (佐々木滋夫さん撮影, 読売新聞中部本社提供)。

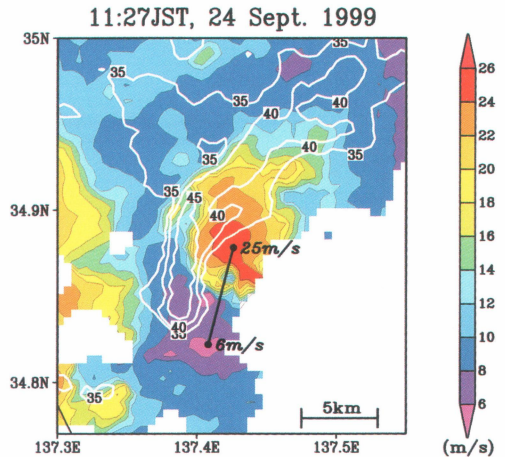
真である。竜巻は幅の広い漏斗状(第1図 a)であったり、下部が一方にのみ片寄った形状(第1図 b)にも見ることがあり、竜巻内部にもより細かい構造を持っていることが示唆される。この竜巻は都市部で発生したため、負傷者400人以上、住宅被害は約2500世帯など大規模な被害をもたらした。

同日1155 JST ごろ蒲郡市の沖で小規模の竜巻が発生し、10分程度持続し北上した。さらに1210 JST ごろ小坂井町と豊川市の境界付近で別の竜巻が発生し、豊川市を縦断して10 km ほど北上し、豊川市千両町の山間部で消滅した。この豊川の竜巻のスケールは「F2」と推定されている。このほかにも名古屋の西で弱い竜巻が発生したという報告がある。

豊橋と豊川の竜巻についてはビデオ画像データがあり、竜巻の様子を知ることができる。これより竜巻は直径が数100 m あり、これら2つの竜巻はともに反時計回りをしていることが明らかである。

3. 豊橋の竜巻をもたらした積乱雲

気象庁のレーダーでは、豊橋の竜巻の発生する前に、

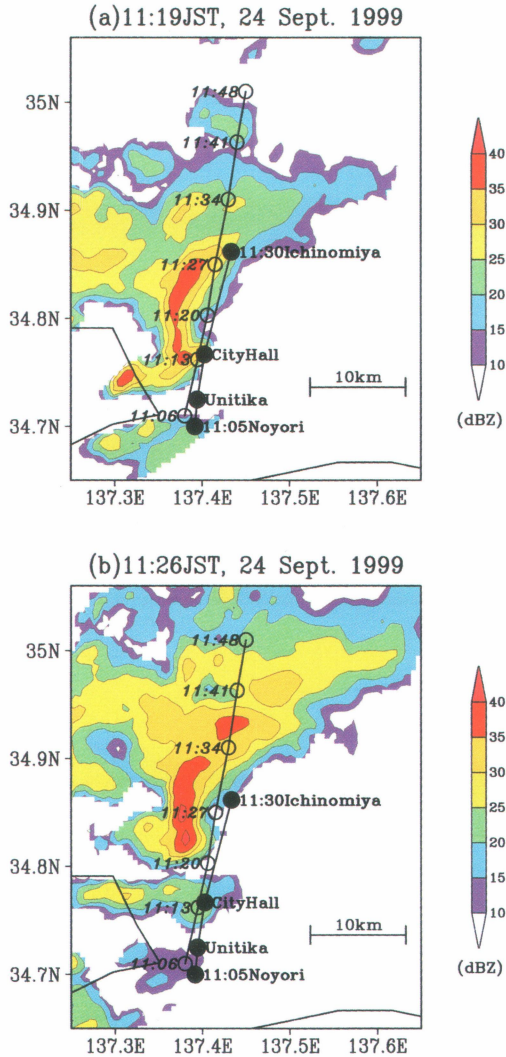


第2図 1999年9月24日1127 JST の降水システムのドップラー速度の仰角2.6度のPPI表示。カラスケールの単位は m s^{-1} 。メソサイクロンと推定されるドップラー速度の極大と極小を黒丸とそれらをつなぐ直線で示し、さらにそれぞれの極値を表示した。また白実線で同時刻のエコー強度の分布を示した。等値線は35, 40, 45 dBZ である。

豊橋付近で海上から海岸線を越えて発達する顕著な降水セルがみられた。この降水セルは海上で形成され、1時間以上の長い寿命を持っていた。名古屋大学気水圏科学研究所のドップラーレーダーの観測範囲は豊橋市の西にある渥美半島付近までであるので、この降水セルはその範囲の外で発生し、その後、観測範囲に入ってきた。ただし、竜巻の発生地点は観測範囲内であった。

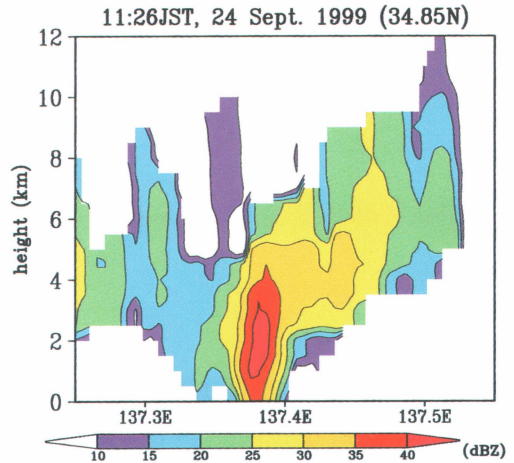
豊橋の竜巻を伴った積乱雲のドップラー速度のPPI (Plane Position Indicator) 表示をみると(第2図)、湾曲した最も強いエコー域の中心に、直径が約20 km の渦を表すドップラー速度の極大と極小がみられる。このドップラー速度のパターンはセル内にあるメソサイクロンと考えられる。極小と極大が、 6 m s^{-1} と 25 m s^{-1} で、その間の距離が6.5 km であるので、少なくとも過度は正で、 $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 以上はあるということがわかる。これは一般的にメソサイクロンとよばれるための過度 (10^{-2} s^{-1}) に近いものである。このようなドップラー速度のパターンはエコーセルがドップラーレーダーの観測領域内に入った1106 JST から1148 JST までみられた。

豊橋で竜巻が発生しているときの高度1 km のエコーのCAPPI (Constant Altitude Plane Position



第3図 豊橋の竜巻をもたらした降水システムについての高度1 kmにおける降水エコーのCAPPI表示(カラスケールの単位はdBZ)。(a) 1999年9月24日1119 JSTと(b)同日1126 JST。図中の白丸は第2図と同様のドップラー速度表示から推定したメソサイクロンの中心の移動を観測時刻(JST)とともに示してあり、黒丸は竜巻の移動を示す。Unitikaは被害を受けたユニチカ、CityHallは市役所のそばの地点。太い実線は海岸線である。

Indicator) 表示(第3図)には特徴的なエコーがみられる。図中には先に述べたメソサイクロンの中心の移動と竜巻の発生から消滅までの位置がプロットしてある。エコー強度の強いところには水平面でも顕著な



第4図 1999年9月24日1126 JSTのドップラーレーダーの3次元操作から作成した降水エコー強度(dBZ)の北緯34.85度に沿う東西鉛直断面。

フック状構造をしており、そこから北東に強いエコー域が伸びている。フック状エコーの中心付近にはメソサイクロンの中心がある。竜巻はメソサイクロンの移動に沿って、そのほぼ中心とともに移動している。竜巻を伴った時間帯(1106~1127 JST)のメソサイクロンの移動速度は 12.6 m s^{-1} で、竜巻の移動速度 12.5 m s^{-1} にほぼ一致している。

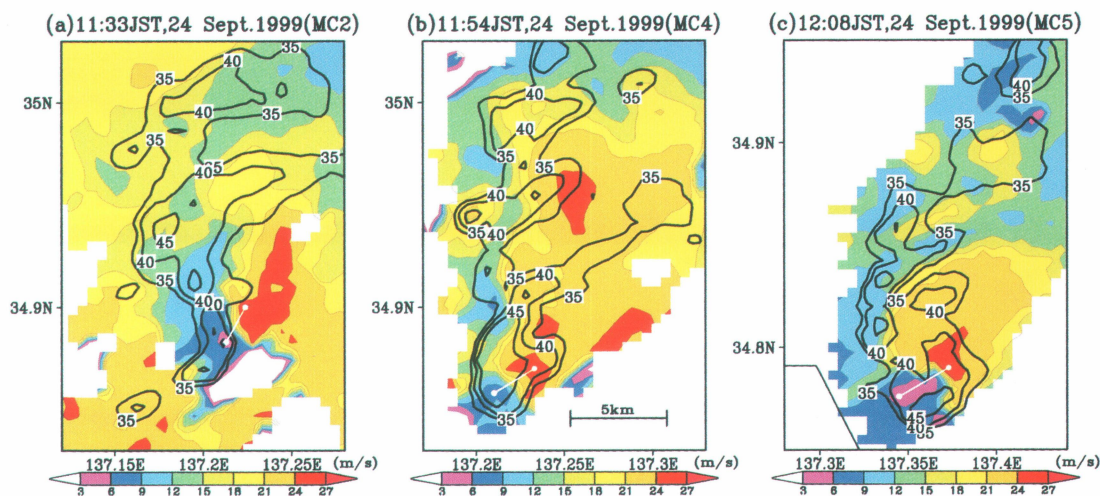
フックエコーのほぼ中心にあたる北緯34.85度付近のレーダーエコーの東西方向の鉛直断面(第4図)をみると、中心の強エコーセルから強いエコー域が東側に向かって張り出しており、その下側が削られたように上に向かってくぼんでいる様子がわかる。これはスーパーセルにみられるヴォルト(丸天井)構造である。このような構造は非常に強い上昇流により形成されるが、竜巻はこの下で形成されたと推定される。

4. メソサイクロン

前節で示したようにドップラーレーダーを用いると竜巻の親となるメソサイクロンを検出することができる。このようなメソサイクロンをドップラー速度のパターンから、豊橋、蒲郡、豊川の3つの竜巻発生時刻を含む1000~1300 JSTについて調べたところ、少なくとも5つの顕著なメソサイクロンが、1100 JSTから1230 JSTの間に、これらの領域を通過していたことが明らかになった。これらのメソサイクロン(MC1~MC5)について、観測されはじめた時刻、観測

第1表 名古屋大学のドップラーレーダーで観測されたメソサイクロンについてのまとめ。

メソサイクロン	最初の時刻 JST	最後の時刻 JST	移動速度 m s^{-1}	代表的渦度 s^{-1}	竜巻	Fスケール
MC1	10:58	11:12	20.0	—	確認無し	—
MC2	11:12	11:47	15.7	1×10^{-2}	確認無し	—
MC3	11:06	11:48	13.5	3×10^{-3}	豊橋	F3
MC4	11:40	12:15	16.7	6×10^{-3}	蒲郡	F1
MC5	11:54	12:29	16.6	7×10^{-3}	豊川	F2



第5図 メソサイクロン (a) MC2, (b) MC4, (c) MC5のドップラー速度の仰角1.1度のPPI表示. カラースケールの単位は m s^{-1} . メソサイクロンと推定されるドップラー速度の極大と極小を白丸とそれらをつなぐ白直線で示した. また黒実線で同時刻のエコー強度の分布を示した. 等値線は35, 40, 45 dBZである.

されなくなった時刻, 移動速度, ドップラー速度だけから見積もった代表的渦度, 目視または被害状況から竜巻が確認されたかどうか, およびFスケールを第1表にまとめた. MC3がこれまで述べてきた豊橋の竜巻を伴ったメソサイクロンである. 第5図に, MC2, MC4, MC5についてのドップラー速度のPPI表示の代表的なものを示した. これらについてはフック状エコーはMC3のものほど顕著ではないが, エコーの南端部にはメソサイクロンの特徴であるドップラー速度の極大と極小の対が顕著にみられる.

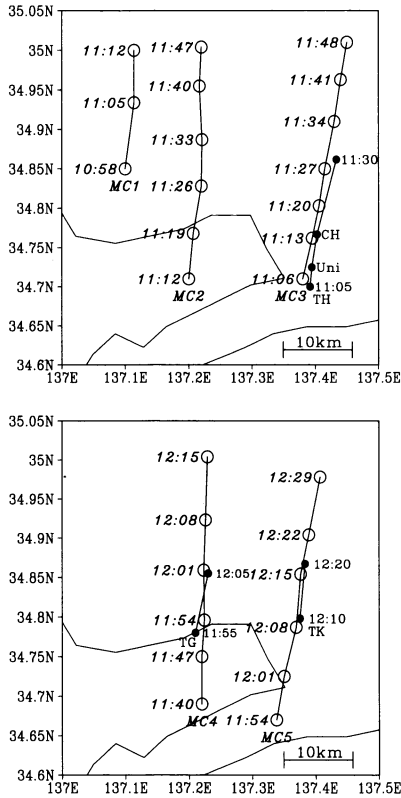
このようなドップラー速度の特徴からメソサイクロンの移動を追跡することができる. 第6図に5つのメソサイクロンの各時刻の位置を示した. またこの図に豊橋 (TH), 蒲郡 (TG), 豊川 (TK) の竜巻の発生地点と通過点, および消滅点を重ねた. この図より明らかに, 豊橋の竜巻はこれまでに示してきたようにメソ

サイクロン MC3に, 蒲郡の竜巻は MC4に, 豊川の竜巻は MC5に伴っていたものであることがわかる.

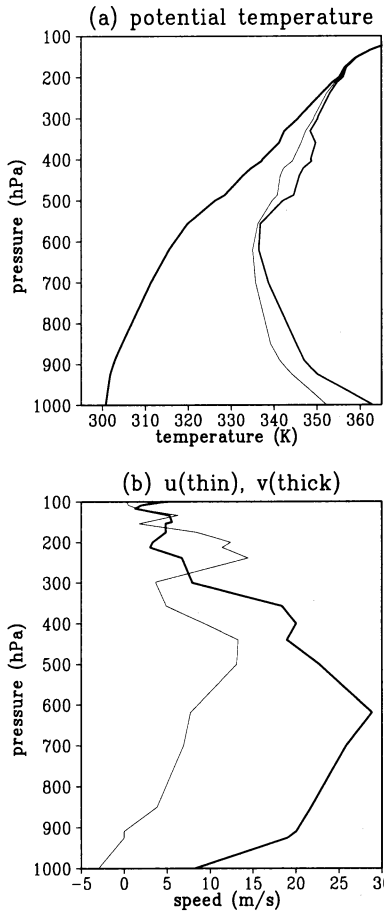
これら5つのメソサイクロンはほぼ一定の速度でほぼ北または北北東に進み, そのうちの少なくとも3つが観測された期間の一部に竜巻を伴っていた. また第1表より最も顕著な豊橋の竜巻を伴った MC3の渦度に比べて, 他のメソサイクロンは渦度が小さいということはなく, むしろそれより大きな渦度を持っていたことがわかる. このようなメソサイクロンはかなりの確率で竜巻を伴うといえる.

5. メソサイクロン発生のパテンシャルについて

竜巻が観測された期間にメソサイクロンが多数発生していたということは, 大気場がメソサイクロンを発生させるようなパテンシャルを持っていたことが示唆される. ここでは雲解像モデルを用いて, 大気場の



第6図 7分毎のドップラー速度から推定したメソサイクロンの中心の位置(白丸)の移動と、竜巻(黒丸)の発生および消滅の位置を時刻(JST)とともに示した。図中のTHは豊橋, TKは豊川, TGは蒲郡で発生した竜巻を示す。豊橋の竜巻のUniはユニチカ, CHは市役所そばを示す。図中の実線は海岸線である。



第7図 1999年9月24日0900 JSTの潮岬の高層観測。(a) 温位(太線), 相当温位(細線), 飽和相当温位(中太線)と(b) 風速の東西成分(細線)と南北成分(太線)。

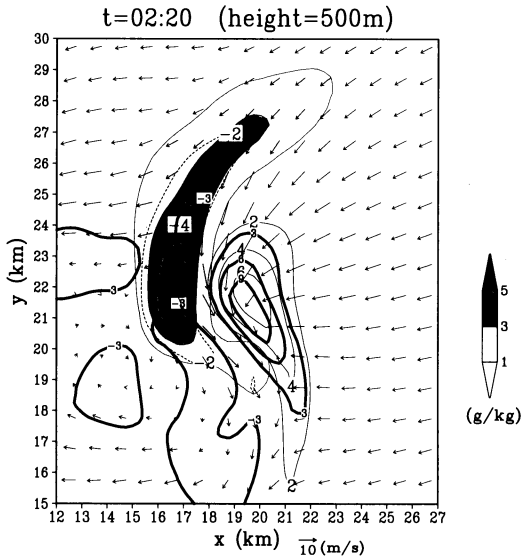
そのようなポテンシャルについて検討した。ここで用いた数値モデルは、米国オクラホマ大学のCAPS (Center for Analysis and Prediction of Storm) が開発したARPS (Advanced Regional Prediction System) Ver. 4.0である。

基本場は1999年9月24日0900 JSTの潮岬の高層観測(第7図)を与えた。600 hPaより下層は対流不安定で、特に900 hPa以下は不安定度が強い。550 hPa以下が非常に湿潤で、鉛直シアが東西成分、南北成分とも顕著である。特に南北成分には600 hPa付近に最大風速があり、それより下層でシアが顕著である。このプロファイルのCAPE (convective available potential energy, 対流有効位置エネルギー) は2140J kg⁻¹であった。また、バルクリチャードソン数 $Ri =$

$\frac{CAPE}{\frac{1}{2}|\Delta V|^2}$ は、 ΔV を地上と600 hPaの速度差とすると、 $Ri = 8$ になる。新野・坪木(1997)が栃木県壬生の竜巻を伴う盆栽スーパーセルのシミュレーションで用いた1990年9月19日の館野の高層観測のCAPEが1700J kg⁻¹であったので、これとほぼ同じ程度の不安定である。これらの大気場の特徴はスーパーセルの発生による条件であるといえる。

数値実験では地形を含まず、雲・降水過程には暖かい雨を用いた。水平解像度は500 m、鉛直解像度は50 m(最下層)から300 mとした。初期擾乱には+4Kのバブルを与えた。初期値から約1時間半後には、ほぼ準定常なスーパーセルが形成された。

第8図は初期値から2時間20分後の高度500 mにお



第8図 ARPSによるシミュレーションの初期値から2時間20分後の結果。雨水の混合比(グレースケールの単位は g kg^{-1})、鉛直速度(細線, m s^{-1})、渦度の鉛直成分 (10^{-3}s^{-1})、および水平速度(矢印)の高度500 mにおける水平分布。

ける鉛直速度、渦度、雨水混合比及び水平速度場である。降水分布にはフック状の構造があり、その中心部の東側に最大上昇流域がある。水平風は上昇流の中心に向かって収束している。降水は西側の下降流域に落下している。最大上昇流は高度4 km付近にあり、 24 m s^{-1} を越える大きなものである。その付近には 10^{-2} s^{-1} を越える大きな渦度がある。竜巻はこの非常に大きな渦度が鉛直流によって引き延ばされて形成されたということがこれより推測できる。これらの結果は、このときの大気の状態が、基本場としてスーパーセルを発生させるポテンシャルを持っていたことを示している。また、現在のところ竜巻の予測は困難であるが、数値モデルをこのように用いればその発生のポテンシャルがあるかどうかを検知できることが示唆された。

6. まとめ

1999年9月24日東海地方で台風の通過時に豊橋市、蒲郡市、豊川市で竜巻が発生した。そのうち豊橋市のもは非常に強い竜巻で、大きな被害が出た。ビデオ画像から豊橋と豊川の竜巻はともに反時計回りをしていたことがわかった。潮岬の高層観測は、このときの大気の状態はたいへん不安定で鉛直シアが強く下層

がよく湿っていたことを示した。名古屋大学大気水圏科学研究所のドップラーレーダーの観測から、豊橋の竜巻の親雲の積乱雲にはフック状エコーやヴォルト構造、強い渦度を持つメソサイクロンがみられ、スーパーセルの特徴を示していることがわかった。竜巻はこのエコーの下で発生し、メソサイクロンとともに移動した。

竜巻が観測された1100 JST から1230 JST の間に東海地方を少なくとも5つのメソサイクロンが通過し、そのうちの3つが竜巻を伴っていたことが確認された。このことはメソサイクロンを発生させるポテンシャルが大気場にあったことを示唆するが、雲解像モデルを用いた数値実験でそのことが裏付けられた。

本研究の事例では、ドップラーレーダー観測によりメソサイクロンが検出され、それらが竜巻を伴っていたこと、さらに大気場を与えて雲解像モデルを実行することでメソサイクロンを伴うスーパーセルがシミュレーションされたことが示された。これらの結果は、竜巻の親雲の構造を示しただけではなく、ドップラーレーダーでメソサイクロンを検出することにより、竜巻をもたらすような危険な積乱雲の接近を検知することができることを示し、さらに大気場を与えて雲解像モデルを実行することにより、竜巻発生のポテンシャルを予測できる可能性を示した。

謝辞

豊橋市災害対策本部ならびに消防本部からは、竜巻に関する貴重な情報をいただきました。読売新聞中部本社からは佐々木滋夫氏の撮影された竜巻の写真(第1図)を提供していただきました。またNHK名古屋放送局ならびにCBCテレビからは貴重な竜巻のビデオ映像をみせていただきました。ここに記して深くお礼申し上げます。

データの解析には名古屋大学大気水圏科学研究所の若月泰孝さん他の作成のプログラムを使用しました。

また、東京大学海洋研究所の木村龍治先生、新野 宏先生ならびにレフリーからは貴重なコメントをいただきました。ここにお礼申し上げます。

参考文献

- Kobayashi, F., K. Kikuchi and H. Uyeda, 1996: Life cycle of the Chitose tornado of September 22, 1988, *J. Meteor. Soc. Japan*, **74**, 125-140.
- 光田 寧, 1983: 竜巻など瞬発性気象災害の実態とその

- 対策に関する研究, 文部省科学研究費自然災害特別研究研究成果, 124pp.
- Niino, H., O. Suzuki, H. Nirasawa, T. Fujitani, H. Ohno, I. Takayabu, N. Kinoshita and Y. Ogura, 1993 : Tornado in Chiba prefecture on 11 December 1990, *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 3001-3018.
- 新野 宏, 坪木和久, 1997 : 盆栽スーパーセルの数値シミュレーション, 日本気象学会春期大会講演予稿集, 25.
- 小元敬男, 文字信貴, 1983 : 1979年9月4日, 北勢および名古屋市に発生した竜巻, 文部省科学研究費自然災害特別研究研究成果資料編, 2-15.
- Saito, A., 1992 : Mesoscale analysis of Typhoon-associated tornado outbreaks in Kyushu Island on 13 October 1980, *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 43-55.
- Suzuki, O., H. Niino, H. Ohno and H. Nirasawa, 2000 : Tornado-producing mini supercells associated with Typhoon 9019, *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1868-1882.

Severe Tornadoes and Their Parent Meso-Cyclones Formed in the Outermost Region of Typhoon 9918 in Tokai District on 24 September 1999.

Kazuhisa Tsuboki*, Geng Biao** and Takao Takeda***

* (*Corresponding author*) *Institute for Hydrospheric-Atmospheric Sciences, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601, Japan.*

** *Institute for Hydrospheric-Atmospheric Sciences, Nagoya University. (Present affiliation : Frontier Observational Research System for Global Change)*

*** *Institute for Hydrospheric-Atmospheric Sciences, Nagoya University.*

(Received 7 June 2000 ; Accepted 4 September 2000)

Abstract

Three severe tornadoes occurred in Tokai District, the central part of Japan, on 24 September 1999 when Typhoon 9918 moved northeastward over the westernmost part of Japan. Photograph and video images showed that their width was several hundred meters and their rotation was cyclonic. The Doppler radar of Nagoya University observed the parent mesoscale convective systems of the tornadoes. PPI display of Doppler velocity showed five meso-cyclones passed over the district during the period from 1100 to 1230 JST, 24 September 1999. Three meso-cyclones of the five were accompanied by the tornadoes. The Doppler radar observation found characteristics of supercell in the convective systems : a hook-shaped echo and a bounded weak-echo region. Vorticity of the meso-cyclones estimated from the Doppler velocity was an order of 10^{-2}s^{-1} . The sounding at 0900 JST, 24 September 1999 at Shionomisaki showed that the lower atmosphere was significantly unstable and the vertical shear was strong. CAPE of the profile was 2140 J kg^{-1} . This condition was favorable for formation of a supercell. In order to examine whether the profile had a potential to produce a supercell, we performed a numerical simulation experiment using a cloud-resolving model (ARPS). The result showed that a quasi-steady supercell was formed with a significant vorticity at the central part of the intense upward motion. The result suggests that the tornadoes were produced by intense stretching of the vorticity by the intense upward motion.