

台風外縁部雲帯内で発生した1999年9月24日の 東海地方の竜巻とその親雲

坪木和久* · 武田喬男† · 耿 驍‡ · 榊原篤志§

名古屋大学 大気水圏科学研究所

神谷信彦¶

愛知学泉大学 コミュニティー政策学部

要旨

1999年9月24日愛知県豊橋市で非常に強い竜巻が発生し、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分かった。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、竜巻の親雲の積乱雲にはフック状エコーやヴォールト構造、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分かった。竜巻はこのエコーの下で発生したと考えられる。大気場にスーパーセルを発生させる条件が整っているかどうかを調べるために、潮岬の高層観測を基本場として与えて、数値実験を行った。その結果1時間半後には準定常なスーパーセルが形成された。フック状構造を持つ部分には非常に強い上昇流があり、これがヴォールト構造を形成していた。この上昇流と同じ場所には強い正の渦度があった。積乱雲やその組織化したメソ対流系の高精度シミュレーションを並列計算機を用いて行なうために積乱雲を解像するモデルを開発し、竜巻のシミュレーションを行った。この計算では水平解像度を100mにして実行したが、これにより水平スケールの異なるスーパーセルと竜巻が同時にシミュレートされた。以上のことより、台風外縁部で不安定でシアの大きな場の中にスーパーセルが形成され、その中心部の下で非常に強い鉛直流により竜巻が発生したことが推測された。キーワード：竜巻、スーパーセル、メソサイクロン、雲解像モデル。

1 はじめに

日本およびその周辺において、台風に伴って竜巻が多く発生することが知られている。光田

*名古屋大学 大気水圏科学研究所、〒464-8601 名古屋市千種区不老町、E-Mail: tsuboki@ihas.nagoya-u.ac.jp

†名古屋大学 大気水圏科学研究所、〒464-8601 名古屋市千種区不老町、E-Mail: tsuboki@ihas.nagoya-u.ac.jp

‡現所属：地球観測フロンティア研究システム、105-0013 東京都港区浜松町1-18-16、住友浜松町ビル4階、E-mail: bgeng@frontier.est.o.or.jp

§(財)高度情報科学技術研究機構、〒464-8601 名古屋市千種区不老町、E-Mail: atsusi@ihas.nagoya-u.ac.jp

¶愛知学泉大学 コミュニティー政策学部、〒471-8532 豊田市大池町汐取1、E-Mail: nkamiya@gakusen.ac.jp

(1983)は1961年から1982年の22年間に日本付近で発生した竜巻のうち台風に伴ったものは全体の28%を占め、この期間に日本に接近または上陸した台風の42%に伴って竜巻が発生したことを示した。1999年9月24日、台風18号が山口県北西部を北東に進んでいるとき、その外縁部雲帯にあたる愛知県内で相次いで竜巻が発生した。最初の竜巻は11JST頃豊橋市で発生し、2個めは1155JST頃蒲郡市で、3個めは1210JST頃豊川市で発生した。これ以外にも名古屋港付近で発生したという情報もある。

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、300人以上が負傷した。こ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。またこの竜巻は昼間に人口の多い陸上で発生したために、目撃者が多く、特に豊橋と豊川の竜巻についてはビデオ映像が得られている。ここでは気象庁のデータと合わせて、竜巻とそれをもたらした積乱雲の特徴を気象学的な立場から調べたのでその結果をまとめる。

我が国の竜巻について、光田(1983)は1961年から1982年の22年間の調査から、陸上の竜巻は年平均で18個発生していることを示した。発生数は年によるばらつきが大きい。また発生地域にも偏りがあり、比較的発生数の多いところは、東北地方の日本海沿岸、関東平野、静岡県から愛知県の太平洋岸、九州地方、及び南西諸島である。この統計からは今回発生した豊橋付近は比較的竜巻の発生数の多いところであることが分かる。

しかしながら、竜巻は非常に強い風を伴うがその規模が小さく発生は突発的であるため、これまでその実態を詳細に観測した例はわが国では少ない。台風に伴う竜巻については、Siato(1992)が1980年に宮崎で発生した5個の竜巻について事例解析を行なっている。これらの竜巻は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、その積乱雲にメソサイクロンが伴っていたことが示された。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、それが反時計回りをするものであったこと、激しい積乱雲に伴うものであったことを示した。菊地他(1989)、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。

このように竜巻は積乱雲とその中のメソサイクロンによって発生することがあり、そのような竜巻はしばしば大きな被害をもたらす。竜巻の発生原理は渦度の集中ということで説明される。詳細は小倉(1994)に説明がある。激しい渦の生成のためには非常に強い上昇流が必要である。このためには積乱雲が顕著に発達することが必要で、その様な積乱雲のうち単一のセルが準定常的に長時間維持されるものはスーパーセルとよぶ。これは竜巻を産み出す親となるものである。スーパーセルの中心付近には水平でみるとフック状のエコーがあり、鉛直でみるとヴォールト(丸天井)構造があることが特徴である。スーパーセルの中層には低気圧性(反時計回り)に回転する渦巻きが発達する。これをメソサイクロンという。このような渦が上記の引き延ばしによって強化されることで竜巻が発生する。

スーパーセルとそれに伴う竜巻は、米国ではオクラホマを中心としてしばしば発生し大きな被害をもたらす。スーパーセル型雷雲の発生には、大気的不安定度が大きいことと風速風向ともに強い鉛直シアが必要であるが、オクラホマなど米国中西部に比べてその発生数は少なく、わが国ではスーパーセル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。

本研究では、はじめに述べた東海地方の竜巻のうち豊橋で発生したものについて、主にドップラーレーダー観測からその親雲のエコーと流れの場の構造の特徴を調べ、さらに大気の基本場が、そのような親雲とさらに竜巻そのものが形成されるポテンシャルを持つものであるのかどうかを調べるために、現在開発中の雲解像モ

デルを用いて竜巻とその親雲のシミュレーションを行った。

2 豊橋の竜巻について

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1105JST頃豊橋市野依町付近で発生し、時速約45kmで、約19kmほぼ北に向かって進み、一宮町長山付近まで達して消滅した。強風の強さを表すFスケールで「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のと同程度で、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ることが示された。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のが研究には有利な点である。

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100m以上ある太い円筒状で、これら二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。豊橋の竜巻についてはその発生時の目撃があり、それによると「真っ黒な雲から、はじめ幅広く下に向かって100mほど雲が落下。さらにそこから竜巻が伸びた。ごうごうと大きな音がして、目で見えるほどの大粒の雨が降った。」ということである。しかしながら雹は顕著にはみられなかった。

3 竜巻発生時の大規模場の特徴

先に述べたように豊橋の竜巻が発生したとき台風18号は山口県北西部を北東に進んでいた。GMSの赤外雲画像(図は省略)から、台風を中心付近の最も活発なリング状の雲域が中国地方にあることがわかる。豊橋付近は台風の最も外

縁部の雲帯がかかっている。この時刻には台風中心付近ほどではないが、比較的強い積乱雲状の雲が豊橋付近にあった。

台風の親雲となるスーパーセルが発生するのは、成層状態が不安定で、下層が湿っており、鉛直シアが強い場合である。こうした大気の状態を潮岬の高層観測を用いて調べた。図1はその鉛直プロファイルである。温位の分布から600hPaより下層が強い対流不安定になっていることが分かる。特に900hPa以下は不安定度が強い。湿度をみると550hPa以下が非常に湿潤である。風の鉛直プロファイルを見ると、鉛直シアが東西成分、南北成分とも顕著であることが分かる。特に南北成分は600hPa付近に最大風速をもつプロファイルをしており、それより下層のシアが顕著である。これらの大気場の特徴はスーパーセルの発生によい条件であるといえる。

気象庁のレーダーは広域の降水分布をみることが出来る。1999年9月24日1110JSTから10分おきの3枚の連続した画像(図2)をみると、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る。この降水セルを形成した積乱雲が竜巻の形成に関係していると考えられる。このセルそのものは海上で形成され、1時間以上の長い寿命を持っていた。次の章ではこの降水セルについて、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の観測データを示すが、ドップラーレーダーの観測範囲が豊橋市の西にある渥美半島までであるので、この降水セルはその範囲の外で形成し、観測範囲内に入ってきたことになる。ただし、竜巻の発生場所はかろうじて観測範囲の中に入っていた。

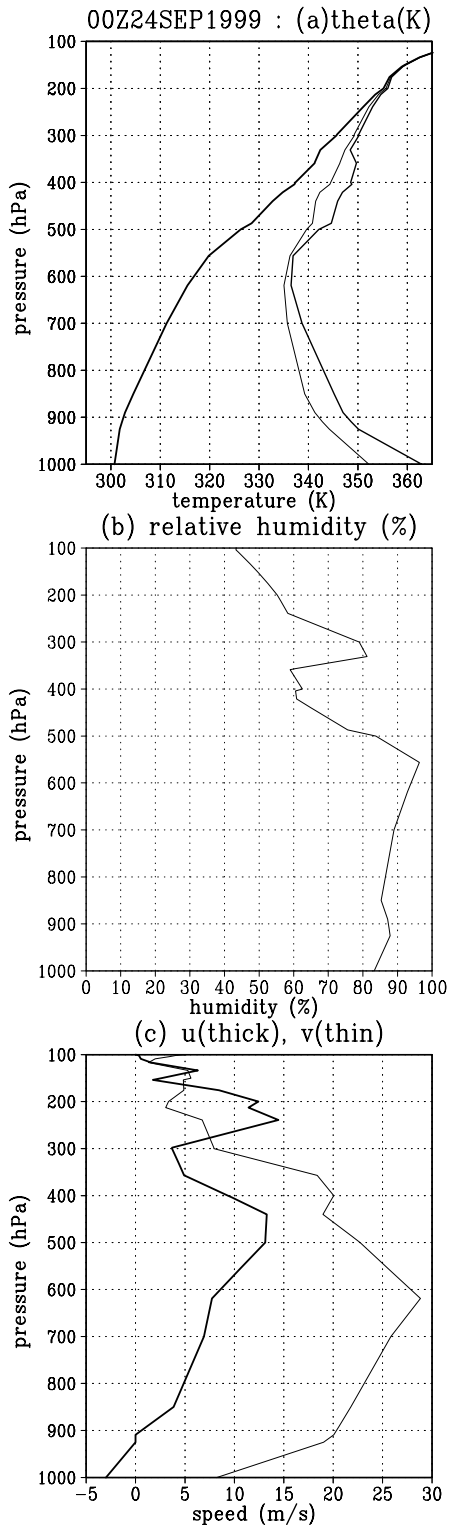


図 1: 1999 年 9 月 24 日 09JST の潮岬の高層観測の鉛直プロファイル。(a) 温位 (太線)、相当温位 (細線)、飽和相当温位 (中太線)、(b) 相対湿度 (線) と南北成分 (細線)。

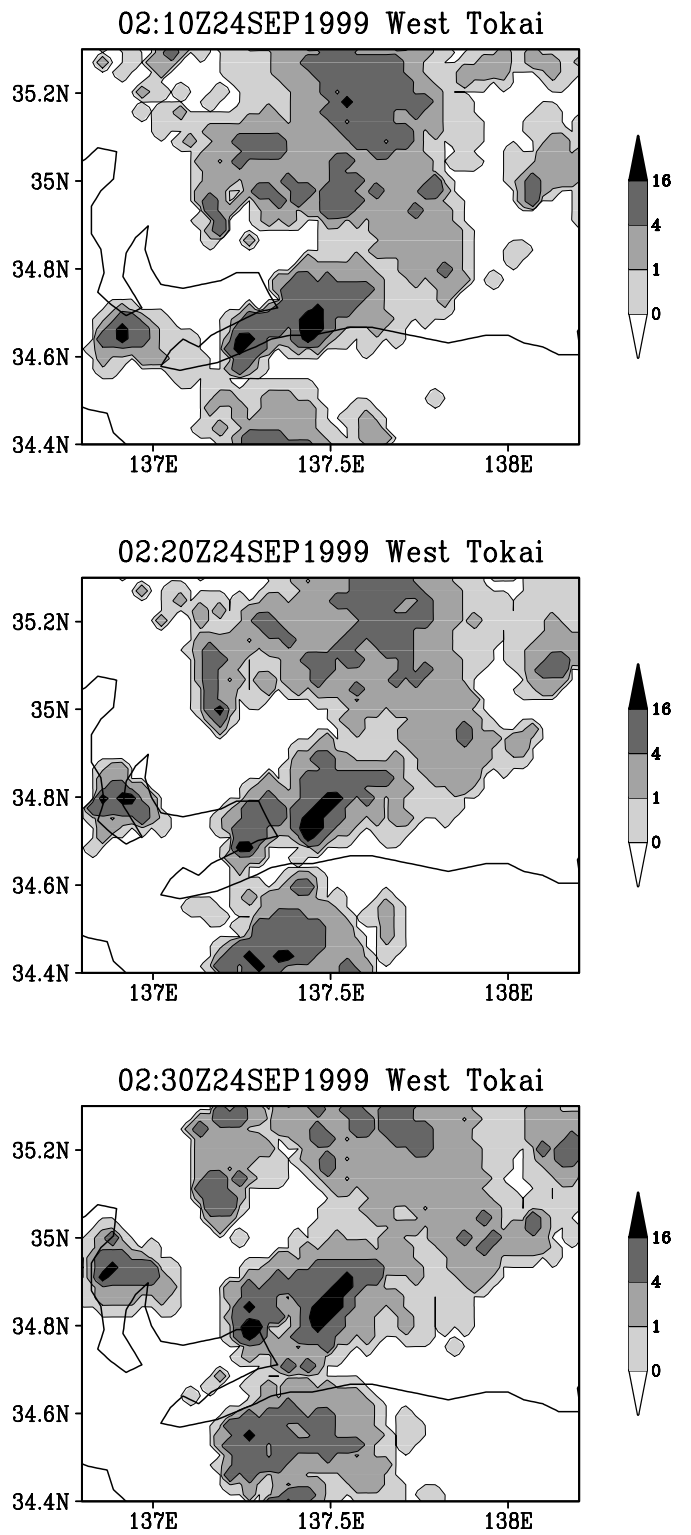


図 2: 1999 年 9 月 24 日 1110JST から 10 分おきの気象庁レーダーの画像。

4 ドップラーレーダー観測

名古屋大学大気水圏科学研究所のドップラーレーダーは、9GHzのXバンドを使用しており、降水粒子の分布の他にドップラー速度を観測できる。このとき1台は名古屋大学に、もう1台は岐阜大学に設置されていた。通常は2台の同時観測を行うが、豊橋付近は名古屋大学に設置したレーダーからしか観測範囲に入らないので、ここでは1台の解析のみを行った。

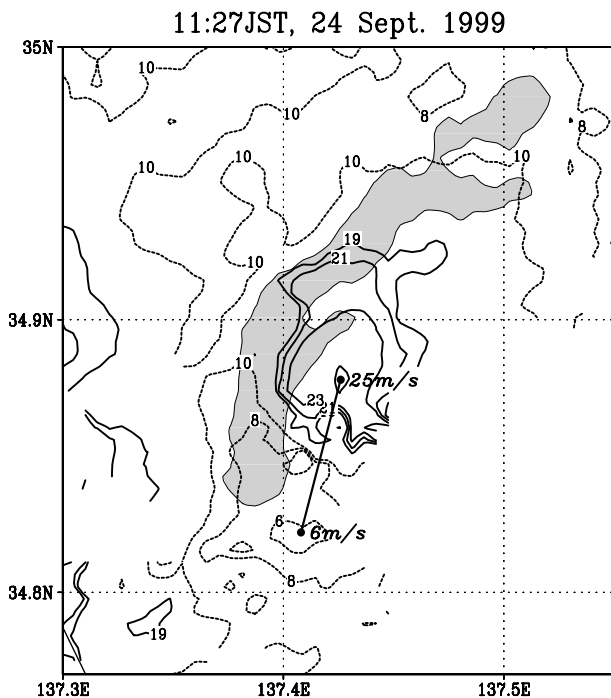


図3: 1999年9月24日1127JSTの仰角2.6度のドップラー速度のPPI表示。豊橋付近は2~3kmの高度に相当する。点線は6,8,10 m s⁻¹の、実線は19, 21, 23, 25 m s⁻¹のドップラー速度の等値線である。メソサイクロンに伴うドップラー速度の極小と極大を実線で結んである。また陰影は40dBZ以上のエコーである。

豊橋の竜巻は1999年9月24日1105JSTごろ発生し、同日1130JSTごろ消滅した。その期間に観測されたドップラー速度のPPI表示をみると(図3)、湾曲した最も強いエコー域の中心に、直径が約10km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。極大と極小が、6 m s⁻¹と25 m s⁻¹で、その間の距離が6.5kmであるので、少なくとも渦度は正で、3×10⁻³ s⁻¹以上はあるということが分かる。これはこの積乱雲のエコーが、スーパーセルとよべるだけの渦度を持っていることを示している。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1106JSTから1148JSTまでみられた。先に述べたようにこのセルは観測域の外で既に発生していたので、その全ライフタイムは分からないが、少なくとも1時間程度の寿命は持っていたことが分かる。

豊橋で竜巻が発生しているときの高度1kmのエコーのCAPPI表示(図4)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みて顕著な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ことが分かる。竜巻の移動速度が約時速45 km hr⁻¹であったが、メソサイクロンのこの時間帯の移動速度が45.5 km hr⁻¹で、竜巻のそれに一致している。

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(図5)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ようすが分かる。これはスーパーセル独特のヴォールト(丸天井)構造を示しているといえる。ヴォールトは非常に強い上昇流により降水粒子が十分大きくなる前に上昇流で持ち上げられてしまうことによって形成されるが、竜巻はこの強い上昇流のあるヴォールトの下で形成していたことがわかる。

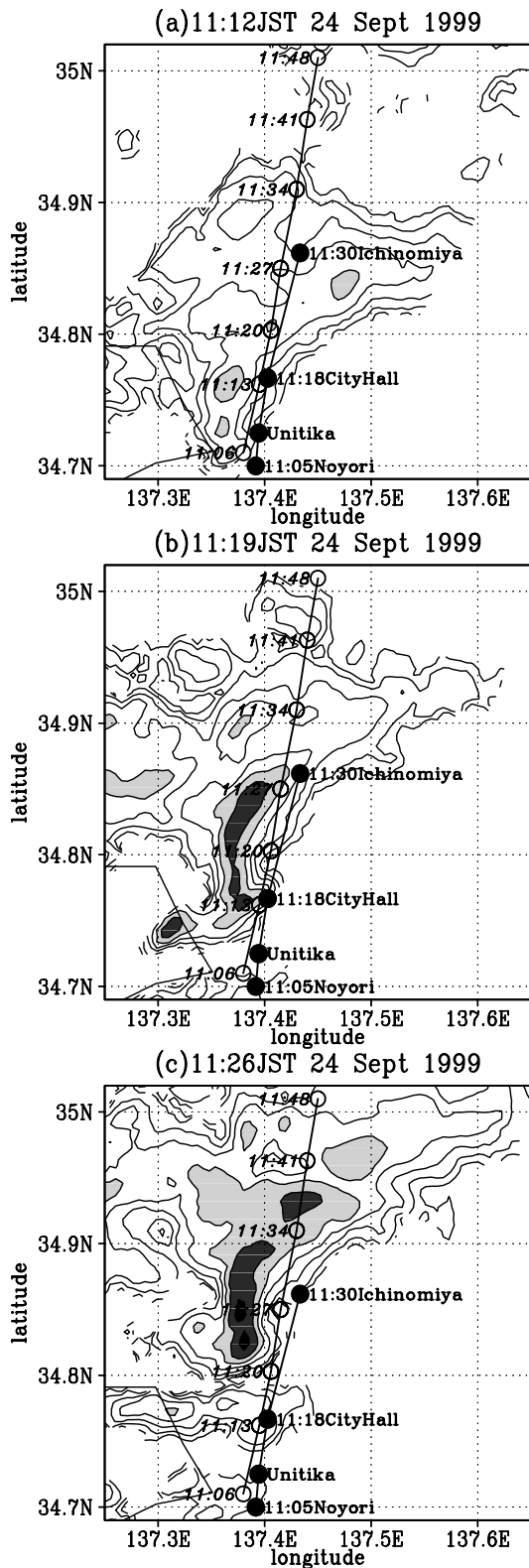


図 4: 竜巻を発生させた親雲の高度 1km における名古屋大学ドップラーレーダーのエコー強度の CAPPI 表示。(a) 1999 年 9 月 24 日 1112JST, (b) 1119JST, (c) 1126JST。開円は図 3 のようなドップラー速度の PPI 表示に現れる対の極大極小から推定したメソサイクロンの中心位置の移動。閉円は竜巻の発生から消滅までの経路を示す。

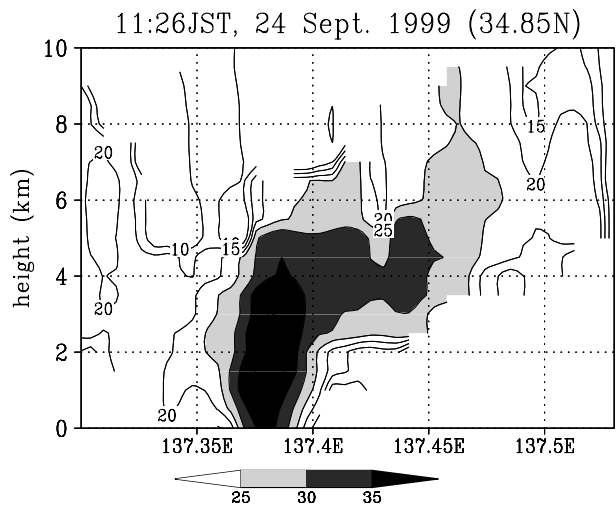


図 5: 1999 年 9 月 24 日 1126JST に名古屋大学ドップラーレーダーで観測された、竜巻を発生させた親雲の北緯 34.85 度に沿うのエコー強度 (dBZ) の東西方向の鉛直断面表示。

これらの結果より、竜巻の親雲となった積乱雲は長寿命を持つスーパーセル状の構造を持ち、その中には大きな渦度を持つメソサイクロンが存在した。竜巻はその中心付近で発生し、メソサイクロンの移動とともに竜巻も移動したことが示された。

5 スーパーセルの数値実験

観測データの解析における推測を裏付けるため、また観測された大気場がスーパーセルを発生させ得るものであることを示すため、図 1 で示した潮岬の高層観測データを用いてスーパーセルの数値実験を行った。本研究の数値実験に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。ARPS は、メソスケール、ストームスケールの現象をシミュレートまたは予報するために作られた 3 次元非静水圧縮モデルであり、運動量、温位、気圧、水物質に関する方程式とサブグリッドス

ケールの乱流運動エネルギーの方程式から成り立っている。

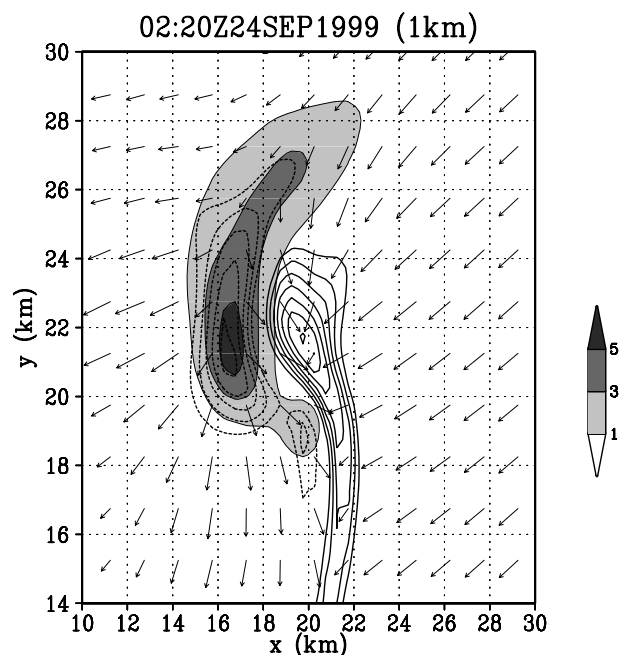


図 6: スーパーセルの APRS を用いたシミュレーションの結果。初期値から 2 時間 20 分後の高度 1km における鉛直流 (等値線、m/s)、雨水混合比 (陰影、g/kg) と水平速度場 (矢印)。

ここでは地形は含めず、降水過程には氷相の過程を含めない暖かい雨を用いた。水平解像度 $500\text{m} \times 500\text{m}$ 、鉛直解像度 300m で、初期値から 4 時間の積分を行った。基本場は 1999 年 9 月 24 日 09JST の潮岬の高層観測 (図 1) を与え、初期擾乱には $+4\text{K}$ のバブルを与えた。初期値から約 1 時間半後には初期擾乱の影響がなくなり、ほぼ準定常なスーパーセルが形成された。

図 6 は初期値から 2 時間 20 分後の高度 1km における鉛直速度、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、その中心部に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。鉛直断面 (図 7) には雨水混合比に明らかなヴォールト構造がみられる。そこでは鉛直流が最大になり降水が支えられているようすが分かる。生成された降水は西側の下降流域に落下している。

最大上昇流は 24m/s を越える大きなものである。渦度の鉛直断面をみると、最大上昇流に対応して、 10^{-2}m 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それと同じ場所にある強い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。

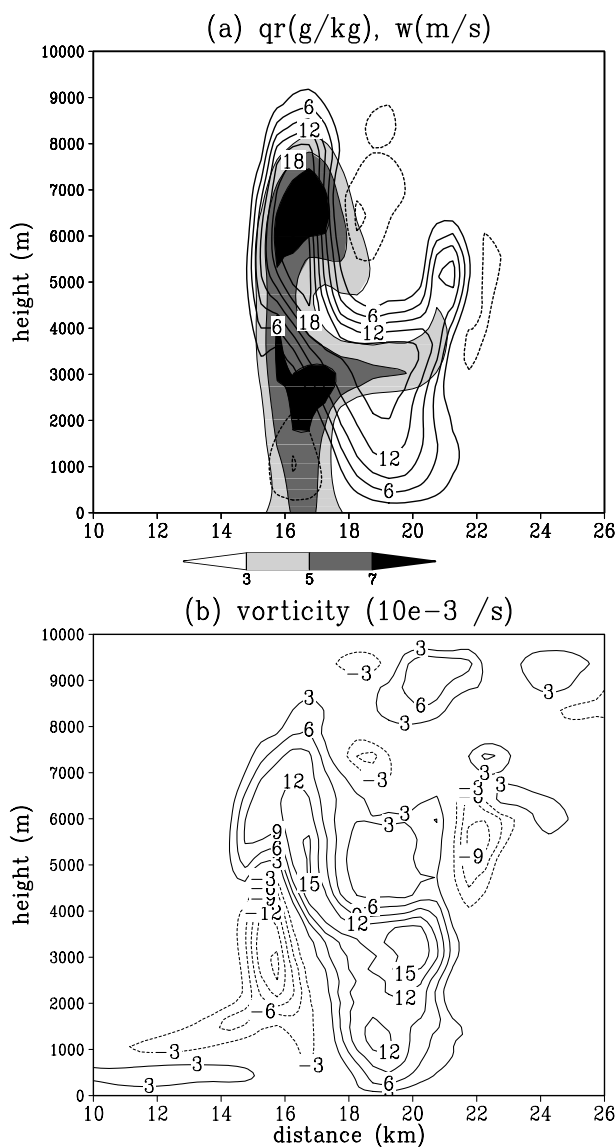


図 7: スーパーセルの APRS を用いたシミュレーションの結果。図 6 と同じ時刻の鉛直流の最大の部分を通る東西鉛直断面。(a) 雨水混合比 (陰影、g/kg) と鉛直流 (等値線、m/s)、(b) 渦度 (10^{-3}m s^{-1})。

6 竜巻のシミュレーション

6.1 雲解像モデルについて

この章では前章で用いた ARPS ではなく、現在、雲・降水とメソスケールのストームの研究用に開発している雲解像モデルを用いて、竜巻そのもののシミュレーションを行った結果についてまとめる。

地上のものを激しく破壊するような強力な竜巻の多くは、スーパーセルなどの大きな渦度を持つ積乱雲に伴って発生する。このような竜巻のシミュレーションを困難にしていたのは、スーパーセルが数 10km のスケールで、竜巻が数 100m のスケールというように、スケールのオーダーそのものが大きく異なることに起因している。このようにスケールが異ると、計算領域は大きなほうにあわせて 100km × 100km のオーダーが必要で、一方、水平解像度は小さいスケールにあわせて 100m 程度が要求される。しかも雲の発達が深く関与しているので、雲そのものを十分表現しなければならない。さらに細かい空間解像度に対応して積分の時間間隔も小さくなる。この場合計算のメモリーが非常に大規模になり、しかも高速の計算速度を持つ CPU が要求される。このような計算は大規模な並列計算機でなければ実行できないものである。

スーパーセルの雲モデルを用いたシミュレーション実験は水平解像度数キロメートルのものがこれまで行われてきた (Wilhelmson and Klemp, 1978; Weisman and Klemp, 1982, 1984)。Klemp and Rotunno (1983) は水平解像度をあげてメソサイクロンの詳細な構造を調べたが、トルネードそのものを解像できるものではなかった。

しばらく前の竜巻のシミュレーションでは軸対称のモデルが用いられてきた。しかしながら

その親の積乱雲のスーパーセルは著しい 3 次元構造をしている。最近になって、解像度の低いモデルでスーパーセルをシミュレーションし、その中に細かい構造が現れたときだけ高解像度モデルをネスティングするテクニックで竜巻のシミュレーションが行なわれている。Wicker and Wilhelmson (1995) は、この様な方法、adaptive grid method を用いて高解像度では 120m の水平格子でトルネードの発生のシミュレーションに成功している。Grasso and Cotton (1995) は RAMS を用いて two-way nesting でトルネードの渦のシミュレーションを行った。しかしながら、この様な方法では、細かい構造の判定についての任意性や、ネスティングにおける境界での荒いモデルと細かいモデルの間の不整合等が起る可能性があり、どのような場合でも同じようにモデルを実行できるかどうかの保証はない。ここで開発しているモデルではすべての領域で同じ解像度で計算を行うのでその様な問題はおこらない。ここで行なった実験はその様なネスティングをせずに、すべての領域を均等な解像度の 100m という細かい格子で、3 次元構造を持つスーパーセルとスケールの異なる竜巻を同時にシミュレーションしたことに意義がある。

6.2 モデルの特徴と並列効率

この節では現在開発している雲解像モデルの特徴について述べる。

現在、開発している雲解像メソスケールモデルの主要な特徴は次の通りである。力学過程の基礎方程式系は非静力学・圧縮系、計算は 3 次元領域で地形を含むもの、力学過程の従属変数は、流れの 3 成分、温位偏差、気圧偏差、乱流運動エネルギーである。現在のところ雲物理学過程として、「暖かい雨」のみを導入しており、雲物理学過程の従属変数は、水蒸気、雲水、及び雨水の混合比である。空間微分は差分法を用い、

鉛直水平とも陽解法または水平陽解法・鉛直陰解法を用いることができる。時間積分は時間分割で音波以外の積分には leap-frog 法を Asselin の時間フィルターを併用して用いている。乱流は Smagorinsky の 1 次のクロージャまたは乱流運動エネルギーを用いた 1.5 次のクロージャによるパラメタリゼーションを導入している。移流の計算は 4 次の精度のものを用いている。

初期条件には高層観測などから 1 次元プロファイルを水平一様に与えるか、広領域モデルにネスティングする場合は、その出力値を内挿した 3 次元の非均一データを与える。境界条件には、固定壁または鏡像条件、周期境界条件、傾き零の条件の他に放射境界条件を用いることができるようにした。また上部にスポンジ層を用いることができるようにした。

並列計算には MPI (Message Passing Interface) を用い、領域分割は矩形領域の 2 次元分割を用いている。ここで開発している雲解像モデルは、積雲、積乱雲を詳細に解像するモデルを目標にしているため、計算領域としてはメソスケール程度を考えている。このため地図投影は現在は取り入れておらず、矩形領域での計算のみである。また雲の放射は考慮していない。

ここで開発する雲解像モデルは並列計算機で実行するものである。計算領域は全球モデルなどに比べるとはるかに小さいが、解像度が 1km 以下と高く、雲物理学過程を考慮するとき、雲物理学過程の計算は非常に大きなものになり、並列計算機でなければ計算を実行できないものになるからである。本モデルの並列化効率を $67 \times 67 \times 35$ の格子数で 50 ステップ実行する実験で調べた。ここで用いた計算機は日立 SR2201 を用いた。その結果、本モデルの並列化が効率よく行なわれていることが示された。並列化効率は 16 個の PE までほぼ 0.9 以上と高い並列化効率を示している。32PE になると 0.8 を

やや下回るが、これは水平の計算格子数が、 67×67 と小さいため、PE がある程度大きくなると、計算全体に占める通信の量が大きくなるためである。

6.3 スーパーセルと竜巻のシミュレーション

竜巻の親雲となるスーパーセルが発生するのは、成層状態が不安定で、下層が湿っており、鉛直シアが強い場合である。竜巻とスーパーセルの数値実験では図 1 に示された潮岬の高層観測を基本場として与えた。モデルの水平解像度は 100m で、計算を約 $50\text{km} \times 50\text{km}$ の領域で行った。雲物理学過程は「暖かい雨」のみで、初期擾乱には ARPS で行なったのと同様に温位のバブルを与えた。

その結果、竜巻の親となるスーパーセルが計算開始後約 1 時間 30 分後には準定常状態になり、さらにその中心付近にできたフック状降水の中の最大上昇流付近に竜巻に相当するスケールの渦が形成された (図 8)。図 9 は地表面近くの渦の拡大図である。渦の直径は約 500m ほどあり、実際に観測されたものと同じ程度の大きさを示している。流れは気圧と旋衡風バランスをしており、中心付近には 0.1 s^{-1} 程度の非常に強い渦度が形成されている。

渦の鉛直断面を図 10 に示す。直径約 500m の渦度最大の軸が、気圧偏差の示す低圧部と対応して、高度約 1.5km 付近まで斜めにのびている様子が明瞭にシミュレートされている。この渦の中心で雲水の混合比が垂れ下がっているようすもみられた。これは実際の竜巻の中心で黒い雲がロート状に垂れ下がるのに対応するものである。これらの結果よりこのモデルがスーパーセルとその中で形成される竜巻を同時にシミュレーションできることが示された。

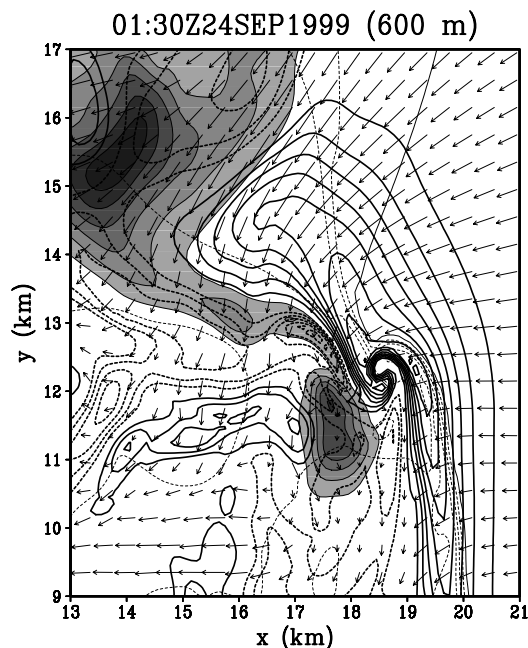


図 8: シミュレーションで得られたスーパーセルの中心付近の高度 600m の水平断面。グレースケールは雨水の混合比、太線は鉛直流、ベクトルはシステムに相対的な水平風。細線は地上の温位。

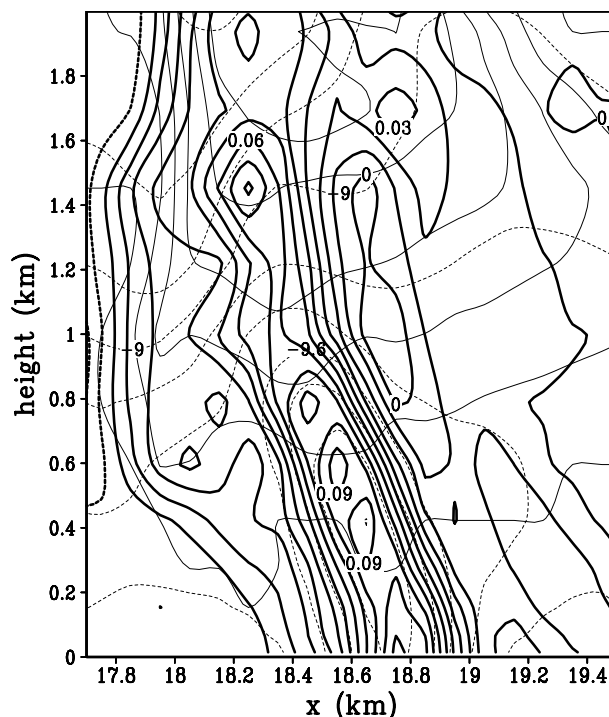


図 10: シミュレーションで得られた竜巻に相当する渦の中心付近の鉛直断面。太実線は渦度 (s^{-1})、細実線は雲水の混合比、破線は気圧偏差 (hPa)。

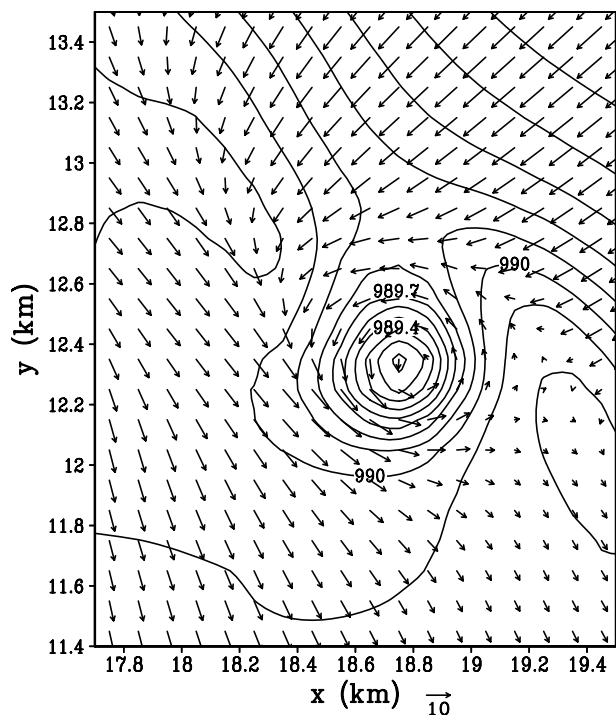


図 9: シミュレーションで得られた竜巻に相当する渦の地上付近の気圧分布 (hPa) とシステムに相対的な流れのベクトル。

7 まとめ

1999年9月24日愛知県豊橋市で非常に強い竜巻が発生し、大きな被害が出た。竜巻は台風の外縁部雲帯に発生した。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分かった。気象庁レーダーから竜巻発生時には太平洋から上陸した降水セルが豊橋市付近で急速に発達するようすがみられた。潮岬の高層観測から、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が示された。これらの条件は竜巻の親となるスーパーセルの発生の条件によくあっていた。

名古屋大学大気水圏科学研究所のドップラーレーダーはこの積乱雲を観測した。その結果、この積乱雲はフック状エコーやヴォールト構造、その付近での非常に強い水平シアがあることが分かった。これらはスーパーセルの特徴を示

している。竜巻はこのエコーの下で発生したと考えられる。

大気場にスーパーセルを発生させる条件が整っているかどうかを調べるために、潮岬の高層観測を基本場として与えて、数値実験を行った。その結果1時間半後には準定常なスーパーセルが形成された。フック状構造を持つ部分には非常に強い上昇流があり、これがヴォールト構造を形成していた。この上昇流と同じ場所には強い正の渦度があった。

以上のことより、台風外縁部で不安定でシアの大きな場の中にスーパーセルが形成され、その中心部の下で非常に強い鉛直流により渦度の引き延ばしによって竜巻が発生したことが推測された。

積乱雲やその組織化したメソ対流系の高精度シミュレーションを並列計算機を用いて行なうために積乱雲を解像するモデルを開発し、現時点でその第1段階が完了した。具体的には、モデルの力学過程の計算、地形の導入、乱流過程、様々な境界条件、移流項の高精度化、暖かい雨の雲物理学過程、鉛直陰解法、あらい格子のモデルへのネスティングなどが完了し、基本的にシミュレーションを実行できるようにまで至った。

このモデルを用いて、1999年9月24日に愛知県豊橋市で、台風18号に伴ってスーパーセル中に発生した竜巻のシミュレーションを行った。この計算では水平解像度を100mにして実行したが、これにより水平スケールの異なるスーパーセルと竜巻が同時にシミュレートされた。

謝辞

本研究の一部は高度情報科学技術研究機構によって支援されています。その研究助成につきまして深く感謝申し上げます。本研究の計算は

東京大学情報基盤センターの計算機、HITACHI SR8000を用いて行ないました。

Some parts of simulation experiments was made using ARPS developed by CAPS, University of Oklahoma. CAPS is supported by the National Science Foundation and the Federal Aviation Administration through combined grant ATM92-20009.

References

- Kikuchi, K., H. Uyeda, K. Iwanami, R. Shirooka, N. Takahashi, K. Matsuura, and N. Kanemura, 1989: On the hailstorm and tornado in Sapporo and its vicinity. *Tenki*, **36**, 215–217. (in Japanese)
- Klemp, J. B., and R. Rotunno, 1983: A study of the tornadic region within a supercell thunderstorm. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 359–377.
- Kobayashi, K., K. Kikuchi, and H. Uyeda, 1996: Life cycle of the Chitose tornado of September 22, 1988. *J. Meteor. Soc. Japan*, **74**, 125–140.
- Grasso, L. D., and W. R. Cotton, 1995: Numerical simulation of a tornado vortex. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1192–1203.
- 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.
- 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.

Weisman, M. L., and J. B. Klemp, 1984: The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 2478–2498.

Wicker, L. J., and R. B. Wilhelmson, 1995: Simulation and analysis of tornado development and decay within a three-dimensional supercell thunderstorm. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 2675–2703.

Wilhelmson, R. B., and J. B. Klemp, 1978: A numerical study of storm splitting that leads to long-lived storms. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1974–1986.

Saito, A., 1992: Mesoscale analysis of Typhoon-associated tornado outbreaks in Kyushu Island on 13 October 1980. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 43–55.

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。

小倉義光, 1994: お天気科学—気象災害から身を守るために—、森北出版株式会社、226pp。

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 号。

小林文明・千葉修・松村哲, 1997: 1994 年 10 月 4 日土佐湾海上で発生した竜巻群の形態と構造, 「天気」, 44, 19–34.