

第29回メソ気象研究会報告

竜巻—その実態の理解はどこまで進んだのか—

1. はじめに

コンピーナー：坪木和久（名古屋大学
地球水循環研究センター）

2006年に延岡、佐呂間とたてつづけて起こった竜巻で、竜巻に対する関心が高まり、竜巻予測に対する社会の要請は非常に強いものとなった。それに対応して気象庁でドップラーレーダーが多数導入されることになり、また科学技術振興調整費「竜巻等の実態および発生予測と対策」（研究代表者：田村幸雄東京工芸大学教授）が開始された。しかしながら、予測実現への期待があまりに性急であり、わが国における竜巻の実態についてどの程度理解が進んだのかが十分議論されないまま、予測へ向けた動きが始まりつつある。そこで今回、2007年10月13日に札幌で行われたメソ気象研究会では、2006年に甚大な被害をもたらした佐呂間と延岡で発生した竜巻に重点を置き、わが国の竜巻についてこれまで得られた知見をまとめる目的で、「竜巻—その実態の理解はどこまで進んだのか」と題して講演会を行った。会場は北海道大学学術交流会館講堂で、100名を越える多くの聴衆が集まった。気象庁では2008年3月から竜巻注意情報を出すなど、竜巻についての関心が高いことがわかる。本研究会は、新野宏氏（東大海洋研）の総括的な話題からはじまり、竜巻についての観測・解析的内容や数値シミュレーションさらには現地調査の報告などがなされた。竜巻は気象学の問題だけではなく、災害科学の面からも重要な問題であるので、風工学と防災の立場から河井宏允氏（京大防災研）にご講演いただいた。また、最後に気象研究所の鈴木修氏により予測についての取り組みをお話しいただいた。

2. 竜巻の理解の現状について

新野 宏（東京大学海洋研究所）
竜巻の理解の現状について新野（2007）にもとづい

て紹介した。日本の竜巻の統計（Niino *et al.* 1997）によると陸上の竜巻は1年当たり約20個発生する。単位面積当たりの発生率は沖縄・関東平野・東海地方・高知・九州南部・石川で大きい。竜巻の遭遇確率は一番大きな東京都でも4000年に1回程度である。日本の竜巻の半数は低気圧に伴うもので、20%は台風に伴うものである。

竜巻の速度構造は、可搬型ドップラーレーダーで観測できるようになってきた（Wurman *et al.* 1996）。多重渦構造の竜巻に伴う速度分布も測られつつある（Wurman 2002）。中心気圧も、10秒間で100 hPaの降下が最近測られた（Lee *et al.* 2004）。

竜巻の発生機構には局地前線に伴うものとスーパーセルという特殊な積乱雲に伴うものがある。前者では、局地前線に伴う水平シア流の不安定で生じた渦の上で対流雲が発生し、その上昇流で渦管が引き伸ばされて竜巻が発生する（Wakimoto and Wilson 1989 ; Lee and Wilhelmson 1997）。

スーパーセル（Browning 1964）は強い鉛直シアのある環境で発生する積乱雲である。鉛直シアがあると、降水が上昇域から外れた領域で落下でき、強く長続きする対流が可能となる。また、鉛直シアに伴う水平な渦管の立ち上げで、雲内に直径数 km の鉛直軸周りの循環を形成する（Klemp and Wilhelmson 1978）。水平風のベクトルが上空にいくほど時計回りに回転する環境場では、反時計回りの循環（メソサイクロン）が形成されやすい（Rotunno and Klemp 1982）。竜巻はメソサイクロンに伴って発生するが、高解像度のモデルでスーパーセルと竜巻が再現できても（Noda and Niino 2005 ; 坪木 2007 ; 益子 2007）、その詳細な発生機構の理解は不十分である。開発中のフェーズド・アレイ・ドップラーレーダーによる観測でモデルの竜巻発生過程が検証されることが待たれる。

スーパーセルによる竜巻のポテンシャル予測が環境場の鉛直シアと不安定性から試みられている。台風に伴う竜巻が進行方向右前方に多いのは、そこがスー

パーセルの発生に適した環境場になっているためである (McCaul 1991)。アンサンブル予報によるポテンシャル予測の試み (瀬古ほか 2008) もなされている。竜巻の予知はドップラーレーダーによるメソサイクロンの検出によるしかないが、我が国でその検出時にどれくらいの確率で竜巻が発生するかの統計データが待たれている。

3. 「延岡竜巻」と「佐呂間竜巻」—竜巻の多発と多様性

小林文明 (防衛大学校地球海洋学科)

佐呂間町で竜巻が発生して1年後の札幌における研究会ということで、まず北海道における竜巻発生特性を述べた。1961年から2006年までに北海道で発生した竜巻は筆者の把握したもので82個あり、年間発生頻度の変動は大きかった。発生場所はほとんどの支庁で発生しており、特に渡島半島から日高地方の海岸線と石狩平野の頻度が高い (第1図)。月別頻度では10月をピークに9月から11月に集中していた。竜巻発生時の総観場を分類すると、温帯低気圧 (70%)、気圧の谷 (16%)、冬型 (11%)、熱雷 (3%) となり、本州における原因 (Niino *et al.* 1997; 小林・菅原2007) と異なった。

次に、2005年12月から1年間に続けて発生した顕著な突風被害について研究上の課題を指摘した。酒田市の突風災害 (2005年12月25日) は、発達した低気圧から延びた寒冷前線のプレフロント領域で発生したが、翌日冬型季節風時にも秋田で竜巻が発生しており、冬



第1図 北海道における竜巻発生分布。

季寒気移流場の様々なステージで竜巻が発生することが示唆された。冬季は積乱雲の移動速度が速く、被害がより局所的、直線的になり、また痕跡も少なく、被害調査は難しい。また、過去の被害調査の蓄積もきわめて少ない。F1スケールの風速で高速走行中の列車が横転しうる点も、比較的弱い竜巻に一般風が加味されることにより被害が増大することを意味しており、“冬の竜巻”も無視できない。実際、北陸における長期観測から竜巻の多発する可能性を示した。

2006年9月17日から18日にかけて、台風13号 (T0613) の接近、通過に伴い、宮崎県、大分県、鹿児島県、高知県で、少なくとも10個の竜巻や竜巻と推定される突風災害が相次いだ。延岡市で竜巻が発生する3時間前に九州南部で竜巻が発生しており、リアルタイムで把握していれば貴重な情報になったであろう。このようなひとつの擾乱に伴い同時多発的に発生する竜巻の把握も課題である。

佐呂間町で発生した竜巻は詳細な地上調査から、主な被害経路の東側にも別の痕跡が認められ、竜巻が多重 (複合) 渦的な構造を有していたことが推測された。しかしながら、写真数枚と目撃情報しかなく、竜巻渦の構造、挙動に不明な点が多い。

最後にドップラーレーダーを用いた竜巻観測の現状、課題について言及した。わが国における竜巻は関東平野など一部の平野を除くと海岸線に集中する。しかしながらその発生原因は、台風、寒冷前線から局地的要因まで多岐にわたり、構造もスーパーセルタイプや waterspout など複雑である。わが国で発生する竜巻の階層構造や代表的なスケールについても議論できる観測データが少ない。竜巻の大部分を占める F1スケール以下の竜巻はいわゆるノンスーパーセル型である場合が多く、このような竜巻の親渦をレーダーで捉えるには、少なくとも10 km 以内の近距離で、高度方向の変化も含めて観測する必要がある。同時に、雲底下の竜巻渦 (漏斗雲) の観測、被害調査が求められる。大都市では相対的に弱い竜巻やガスフロントでも人的被害が発生する可能性が高いことも考えなければならぬ。わが国の竜巻の発生実態を理解するためにも、ドップラーレーダー等を用いた観測事例の蓄積が重要であるとともに、詳細な地上調査の蓄積が必要である。

4. 竜巻とその親雲の理解と予測のための雲解像モデルの利用

坪木和久（名古屋大学地球水循環研究センター）

甚大な被害をもたらす竜巻が続いたため、竜巻の予測についての関心が高まっている。人的被害の軽減には発生予測が不可欠である。竜巻は台風のように遠方からやってくるものではない。佐呂間町の竜巻もそうであったように、忽然とそこに現れるのである。地球の大気にはそのように竜巻を発生させるメカニズムが備わっている。これまでの研究で強力な竜巻はある種の発達した積乱雲によって生みだされることがわかっている。竜巻の予測には、その親となる積乱雲を予測するような間接的方法が考えられる。それには、どのようなタイプの積乱雲がどのように竜巻を発生させるのかなど、竜巻とその親雲の両方の理解が不可欠である。

高解像度シミュレーションのために開発をしている雲解像モデル CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) を用いて台風、スーパーセル、さらに竜巻のシミュレーションを行った。ここでは雲解像モデルを用いた竜巻のシミュレーションとして、台風に伴う竜巻と冬季の前線に伴う竜巻の例を示し、竜巻とその親雲の理解さらにそれらの予測に雲解像モデルが有効であることを示した。結果は次のようにまとめられる。1999年の豊橋の竜巻と2006年の延岡の竜巻は、ともに台風の東側の外域帯で発生したものである。前者の実験では、スーパーセルとその南端部で次々と発生する竜巻がシミュレーションされた。後者については、レインバンドがスーパーセルの列で構成され、それらの積乱雲の一つが延岡の竜巻をもたらした親雲（メソサイクロンを含む）となっていることを示した。さらに水平解像度75 mのシミュレーションでは、レインバンドを構成するスーパーセルの一つに顕著なフック構造がみられ、その付近に竜巻がシミュレーションされた。その直径は300~400 m、渦度は 0.9 s^{-1} 、気圧偏差は24 hPa 以上であった。前線に伴う竜巻の例として、2005年12月25日の山形県庄内平野を通過した寒冷前線について水平解像度40 m で予報実験を行った。前線に沿って降雪帯が形成され、その雲列に渦度 $0.3\sim 0.4 \text{ s}^{-1}$ の小規模な渦が再現された。これにより冬季の日本海側で寒気が吹き出すとき、その先端部にあたる前線では竜巻が発生することが示唆された。

これまでの研究からある強さ以上の渦を持つ積乱雲は、竜巻と関係あることがわかっている。しかしなが

ら未知の積乱雲は多数あり、また積乱雲の竜巻を発生させるメカニズムについても未解明な点が多い。竜巻予測には積乱雲を研究し、積乱雲と竜巻の関係を明らかにすることが不可欠である。そのうえで竜巻を発生させる危険な積乱雲を予測する方法を確立し、間接的に竜巻の発生を予測することが、実現可能でかつ有効な方法である。

5. 竜巻をもたらす環境場と佐呂間町の竜巻をもたらした積乱雲のシミュレーション

加藤輝之（気象研究所予報研究部）

竜巻が発生した事例の大気状態（環境場）については多くの報告がなされ、また1961年以降の竜巻については気象庁ホームページ (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>) に掲載されている。しかし、そのような環境場が出現する頻度については全く分かっていない。そこで、スーパーセルが発生しやすいとされる指数については、日本周辺を対象に2001~2006年度の気象庁領域客観解析データ（時間・空間分解能：6時間・20 km）を用いて統計的に調べた。また、具体例として2006年11月7日13時25分頃北海道佐呂間町での竜巻のケースを取り上げた。その竜巻をもたらしたスーパーセルおよび竜巻の発生時の大気状態などについて、気象レーダーで観測されたスーパーセルの発生位置・移動や形状を見事に再現できた水平分解能1 km と250 m の雲解像モデル (Saito *et al.* 2006) の結果を用いて調査した。

竜巻の発生環境場を議論する際には、鉛直シアによって生成される水平渦度を見積もり、それがストーム内に取り込まれる程度を示す指数である SREH (Storm Relative Environmental Helicity) や SREH と対流有効エネルギー (CAPE: Convective Available Potential Energy) との積である EHI (Energy Helicity Index) がよく用いられる。EHI $>1.0 \text{ Jkg}^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ の出現頻度分布を見ると、夏期(6-8月)には関東平野から西側の太平洋側平野部に2%以上の領域が見られる。ただ、大きなCAPEの影響を受けて沖縄諸島から東シナ海上で10%を超える高頻度域が見られ、このことはEHIのみでスーパーセル発生の指数とできないことを示唆している。また、SREH $>500 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ の出現頻度分布のみだけでは実際の竜巻の発生位置の分布を見出すことはできない。そこで、SREHの条件と潜在不安定であるという条件(CAPE >0)を組み合わせてみると、関東平野で春

期(3-5月)に出現頻度の高い領域が見られ、夏期にはほとんど現れないなど竜巻発生との相関が高そうな結果がえられた。さらに、秋期(9-11月)には九州の東海岸や東海地方平野部など台風の影響を受けて竜巻が発生する頻度との相関が高そうなことが見えてきた。ただ、これらは速報的な解析結果なので、今後他の指数との組み合わせを調べる予定である。

佐呂間町で竜巻をもたらしたスーパーセルは、寒冷前線の東側の暖域内(日高山脈の東山麓)で発生し、その暖域内を北北東に移動した。実際のスーパーセルの動きからSREHを計算すると、発生位置で $500\text{ m}^2\text{ s}^{-2}$ 以上になった。スーパーセルが移動中も、その北側下層で気圧が低下して東風が生成・強化されていた。これによりその位置に常に大きなSREHが維持されていた。また、対流活動に不可欠な下層の高相当温位気塊はスーパーセルの移動に先行して北海道の内陸部に進入していて、スーパーセル北側の東風でより内陸部まで進入することができていた。以上から、スーパーセル自身が最適な環境場を作り出していたことになる。

佐呂間町の竜巻が発生した原因として、次の三つの要因が考えられる。まず、スーパーセルにともなう上昇流のピークが13時頃までは高度3~6 kmにあったが、それ以降では高度1~2 kmに移動したことがあげられる。このことは、スーパーセルにともなうガストフロント上に再現された鉛直渦が容易に上空に引き伸ばされる可能性を示唆している。二つ目としては、竜巻の発生時における大気状態が考えられる。佐呂間町付近では、南よりの風によるフェーン現象の影響で、高度約1 km以下で高温・乾燥化していた。このことは、雨滴の蒸発により下降流が強められてガストが強化され、ガストフロント上の鉛直渦度が大きくなること示唆している。最後としては、竜巻が発生した場所の地形的な要因が考えられる。その場所は二つの谷が合流する位置にあたり、ガスト等の流入により鉛直渦度を形成しやすいと考えられる(佐々・山下2007)。

6. 2006年台風第13号に伴う竜巻のシミュレーション—環境場・竜巻をもたらしたスーパーセル・竜巻の数値解析

益子 涉(気象研究所台風研究部)

2006年台風第13号の接近に伴い、宮崎県各地(延岡市、日向市、日南市)で竜巻が発生し、甚大な被害が

もたらされた。竜巻が発生した環境場、竜巻をもたらした積乱雲を明らかにするために、気象庁非静力学モデルを用いて再現実験を行った。さらに、水平解像度を50 mにした実験を行い、竜巻そのものを再現することを試みた。

竜巻は、台風中心から約300 km離れた台風進行方向右前方におけるレインバンド上で発生していたことが観測から明らかになっている。シミュレーション結果から、そのレインバンド付近では、風が鉛直方向に時計回りに変化しており、特に高度2 km以下で顕著であった。レインバンドは複数の団塊状の降水セルによって構成され、そのいくつかは降水物質の分布がフック状のパターンを示していた。延岡付近を通過する降水セルに着目して解析すると、鉛直渦度が 0.07 s^{-1} に達するメソサイクロンを伴い、 30 ms^{-1} を超える強い上昇流によってヴォールト構造をもっており、典型的なスーパーセルの特徴を示していた。しかし、水平・鉛直スケールは約5 kmと米国中西部のものに比べて小さく、また地表付近の温度傾度も弱いなど、ミニスーパーセルの特徴をもっていた。そのミニスーパーセルは延岡に近づくにつれて、下層1 km付近で渦度、上昇流を強めていった。そして延岡沿岸に達した時、メソサイクロンの南東側において、地表付近の渦度が最大約 1.0 s^{-1} 、直径が約500 mの竜巻が発生した。竜巻はスーパーセルに伴うガストフロント上で発生し、それに沿って移動しており、下層の渦度の強化が竜巻発生において重要であることが示された。トラジェクトリー解析に沿った渦度方程式の収支解析から、竜巻の発生には地表付近のプロセスが重要であることが示唆された。今後詳細な解析が必要である。

ミニスーパーセルに伴う下層のメソサイクロンの形成機構、そして、そのメソサイクロンに伴う竜巻の発生機構の解明は今後の重要な研究課題として挙げられる。

7. 風工学から見た竜巻等への防災対策の課題—竜巻時の物体の飛散と構造物に作用する風力について—

河井宏允(京都大学防災研究所)

竜巻等の突風に対する構造物の被害を低減するためには、竜巻等の突風時に構造物にどのような風力が作用するかを明らかにする必要がある。その為には、竜巻等の突風時の地上付近の風の特異性、即ち風速、風向、圧力の変化を知らなければならない。近年、竜巻

の発生予測に関する環境場や発生メカニズムなどについては研究が大きく進展したが、地上付近の竜巻の風の特性について必ずしも明らかになってきたとはいえない。

本報告では、2006年11月に佐呂間町を襲った竜巻を例にとり、その被害分布と飛散物体の方向から、地上付近の竜巻モデルの検討を行ったものである。その結果、被害状況等から、地上付近の風の状況は従来から言われているようにランキン渦によってある程度模擬することができるとともに、被害状況から風速分布、風向分布についても予測できるという結果を得た。

また、ランキン渦を多数の渦糸によってモデル化した離散化渦糸法による数値計算の結果、竜巻接近時には、台風あるいはダウンバースト等の強風とは異なり、構造物には正圧はほとんど生じることはなく、全ての部分で大きな負圧が生じ、それが構造物の破壊につながるということが明らかになった。この負圧の大きさは、竜巻の強さと、構造物の大きさと竜巻の大きさの比に関係するが、竜巻の最大風速を基準とした風圧係数は、台風等の強風によるものを若干上まわる程度であることが分かった。したがって、竜巻時の構造物の耐風安全性は、地上付近の風速が 60 ms^{-1} 程度、即ちF2程度の竜巻であればほぼ確保されているといえる。

8. 竜巻の予測に向けた取り組みについて

鈴木 修 (気象研究所)

2006年には、9月の台風13号に伴う延岡市等での竜巻、11月の北海道佐呂間町の竜巻など、突風災害による大きな被害が連続して発生した。これらを契機として、気象庁及び気象研究所では、将来の予測にもつながる取り組みとして、竜巻等突風の発生環境の調査と竜巻親雲の特徴についての調査・解析などを実施した。調査・解析においては、わが国の竜巻の発生状況、メカニズム、大気環境の特徴などを把握すべく、①竜巻等突風に関するデータベースの整備、②ドップラーレーダーの過去データを用いての竜巻等突風とメソサイクロンとの関係を主な対象とした。この発表では、2006年度(平成18年度)に内閣府および気象庁が災害対策総合推進調整費により緊急に実施した「竜巻等による突風災害対策に関する調査」の成果から、統計的な成果に関する部分を紹介する。また、平成19年度以降の気象庁及び気象研の取り組みと、竜巻等突風の予測の宿命である的中率が低い予測について若干の考察を述べる。

①竜巻突風のデータベースの整備

予測や監視手法開発では、均質で精度が高く、かつ使いやすい竜巻等のデータベースが必要である。過去の研究成果(例えば、Niino *et al.* 1997)や気象庁における被害をもたらした竜巻等突風に関するものなどのデータベースはあったものの、年や地域により現象の捕捉率が不均一であったり、被害があるものが中心であり、藤田スケール等の要素が不足しているものも多い。

そのため、気象庁の被害をもたらした竜巻等突風のデータベースを主体とし、さらに藤田(1973)や光田編(1983)、Niino *et al.* (1997)などの文献資料、各官署の現地調査資料や報告書、新聞報道などを収集し、データベースの作成を行った。作成期間が限られていたことから、1991~2006年は全事例を扱い、1961~1990年についてはF2以上の可能性がある事例のみを対象とした調査を実施した。

対象となったのは1961~2006年の約740事例であり、それらに対して位置等の計測、基本情報の読み取りと必要に応じて現象の再判定、データのデジタル化が行われた。また、今後の調査・研究に資するため、竜巻等突風発生前後の気象状況の情報として、天気図、レーダーデータ、近傍の高層データや高層データから算出可能な各種指数(大気安定度、風の鉛直シア、その他複合パラメータなど)も併せてデータベースに登録した。

得られた統計的な知見の多くは、全てが対象となっている1991~2006年でみると、例えば、年平均17個で、竜巻発生数は9月が最も大きく、3月が最小であるなど、従来の統計的知見とは大きくは変わっていない。

これらのデータは気象業務を含む国の防災対策の基礎資料となるとともに、基本的な情報が整理されて気象庁のWebページの「竜巻等の突風データベース」として2007年5月末より後述の②の結果とともに、一般にも公開された。

今回の調査の副産物として、庁内で詳細な共通の判定マニュアルが作成されたこと、発生頻度が少ないこれら現象についての調査や判断上のスキル向上があったことなど、データベースの今後の品質にプラスな側面があったことも特記される。

②ドップラーレーダーの過去データを用いての竜巻等突風とメソサイクロンとの関係の調査

近年発生した顕著竜巻の事例解析などから、親雲中

にメソサイクロンが検出されるなどスーパーセル竜巻の例が相当数あることが判っている。このことは、ドップラーレーダーによるメソサイクロンの監視が竜巻の予測に有効であることを期待させる。そこで、これを確認するため、わが国の竜巻発生時のメソサイクロンの発生状況とを、24時間運用の空港気象ドップラーレーダーのデータを利用して調査した。対象となった現象は、空港気象ドップラーレーダーの半径120 kmの範囲内で発生した竜巻またはその可能性がある26例である。

メソサイクロンの有無を客観的な手法で網羅的にチェックするため、気象研が開発したメソ渦パターンを自動検出するアルゴリズムを用いた。予備的な解析を行い、このアルゴリズムが、特に人間による判断が難しい場合やシアライン付近などでの検出結果の違いや誤検出を除き、概ね人間による主観的な解析と矛盾しないことが確認されている。

調査の結果、検出アルゴリズムの閾値にも依存するものの、26例のうち、竜巻の親雲に検出されたものが11例（約4割）、周囲数10 km以内で検出された事例も含めると18例（約7割）であった。約3割の事例では、メソサイクロンは検出できなかった。これらの結果は、メソサイクロンの監視が竜巻発生の予測に有効である可能性を示唆するものである。しかし、我が国における竜巻等を伴うメソサイクロンの割合やスーパーセル竜巻と非スーパーセル竜巻の発生比率、地域的な偏り、検出アルゴリズム上の問題など、今後の調査・研究が必要であることも認識された。

現在、気象庁は一般レーダーのドップラー化を進めており、2008年3月までに、全国の一般気象レーダーの過半数11箇所がドップラーレーダー化される。また、平成22年度に突風や雷等を対象とした『突風等短時間予測情報〔仮称〕』の提供を目ざした技術開発を進めており、平成20年度末にも、竜巻等突風に関する予測情報の発表が計画されている。現時点では、上記の成果を活かし、数値予報モデルの出力による安定度や風の鉛直シアの指標とドップラーレーダーによるメソサイクロン等の検出結果を組み合わせた総合判定方式が計画されている。

最後に、竜巻等の突風予測の有用性について、シンプルなコスト・ロスモデルにより検討を行った。竜巻等の突風予測は、現象の発生頻度自体が低いこともあり、空振り率の高い予測になる可能性があり、狼少年的な予報となることが心配されている。一般に、予測

の有用性はユーザー毎に異なり、ユーザー毎のコストとロスの比が最も重要である。例えば屋外作業者にとって、命に関わる大きなロスが想定され、周囲の気象の変化に注意しながら積乱雲等が近づいたら安全な屋内に避難することが比較的成本が低い場合などでは、予測は有効であると考えられる。一方、公共交通網の運休や公衆の避難等を伴うようなコストが高い対策を必要とするユーザーにとっては、空振り率が大きい予測の利用は難しく、有効性は限定的となる。このことは、予測の精度向上が重要であることと同時に、竜巻等突風についての比較的低コストな対策の知識の普及が大切であることを意味している。

謝 辞

今回のメソ気象研究会を実施するにあたり、会場の準備ならびに運営をしていただいた北海道大学のみなさまに感謝いたします。

参 考 文 献

- Browning, K. A., 1964 : Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. *J. Atmos. Sci.*, **21**, 634-639.
- 藤田哲也, 1973 : たつまき一渦の脅威—(上)—. 共立出版, 228 pp.
- Klemp, J. B. and R. B. Wilhelmson, 1978 : Simulations of right- and left-moving storms produced through storm splitting. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1097-1110.
- 小林文明, 菅原祐也, 2007 : 最近10年間のわが国における竜巻の統計的特徴. 日本気象学会2007年度春季大会講演予稿集, P243.
- Lee, B. D. and R. B. Wilhelmson, 1997 : The numerical simulation of nonsupercell tornadogenesis. Part II : Evolution of a family of tornadoes along a weak outflow boundary. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 2387-2415.
- Lee, J. J., T. M. Samaras and C. R. Young, 2004 : Pressure measurements at the ground in an F-4 tornado. p 15.3, Extended Abstract of 22nd Conf. on Severe Local Storms, Hyannis, MA, 4-8 October 2004, Amer. Meteor. Soc.
- 益子 涉, 2007 : 雲解像モデルによる T0613号に伴う竜巻の再現実験. 日本気象学会2007年度春季大会講演予稿集, B201.
- McCaul, E. W. Jr., 1991 : Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environments. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 1954-1978.
- 光田 寧編, 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. 文部省科学研究費補助金研究成果報告書, 124 pp.
- 新野 宏, 2007: 竜巻. 天気, **54**, 933-936
- Niino, H., T. Fujitani and N. Watanabe, 1997: A statistical study of tornadoes and waterspouts in Japan from 1961 to 1993. *J. Climate*, **10**, 1730-1752.
- Noda, A.T. and H. Niino, 2005: Genesis and structure of a major tornado in a numerically-simulated supercell storm: Importance of vertical vorticity in a gust front. *SOLA*, **1**, 5-8.
- Rotunno, R. and J. B. Klemp, 1982: The influence of the shear-induced pressure gradient on thunderstorm motion. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 136-151.
- Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito and Y. Yamazaki, 2006: The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266-1297.
- 佐々浩司, 山下賢介, 2007: 佐呂間竜巻の地形効果に関する模擬実験. 日本気象学会2007年度秋季大会講演予稿集, C253.
- 瀬古 弘, 斉藤和雄, 國井 勝, 山口宗彦, 2008: 竜巻の発生パラメータのアンサンブル予報実験. 日本気象学会2008年度春季大会講演予稿集, P137.
- 坪木和久, 2007: 台風0613号の外域降雨帯に発生したスーパーセルに伴う竜巻のシミュレーション. 日本気象学会2007年度春季大会講演予稿集, B202.
- Wakimoto, R. M. and J. W. Wilson, 1989: Non-supercell tornadoes. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1113-1140.
- Wurman, J., 2002: The multiple-vortex structure of a tornado. *Wea. Forecasting*, **17**, 473-505.
- Wurman, J., J. M. Straka and E. N. Rasmussen., 1996: Fine-scale Doppler radar observations of tornadoes. *Science*, **272**, 1774-1777.
-