

竜巻 ～理論・実験・観測～

～日本気象学会関西支部第35回夏季大学テキスト～

2013年8月31日(土)

キャンパスプラザ京都

竜巻—その構造・発生機構の理解と予知の現状について

新野 宏(東京大学大気海洋研究所)

・・・・・・・・・・ 3～10

竜巻の発生環境を理解する室内実験

佐々 浩司(高知大学教育研究部自然科学系理学部門)

・・・・・・・・・・ 11～20

竜巻の観測 ～メカニズム解明を目指して～

小司 禎教(気象研究所 気象衛星・観測システム研究)

・・・・・・・・・・ 21～40

主催：日本気象学会関西支部

後援：大阪管区气象台、日本気象協会関西支社

講師プロフィール

新野 宏(東京大学大気海洋研究所所長/教授)



- 1981年 東京大学大学院理学系研究科地球物理学専攻博士課程単位取得退学
気象庁気象研究所研究員
- 1983年 理学博士(東京大学)
- 1987年 気象庁気象研究所主任研究員
英国ケンブリッジ大学理論応用数学教室客員研究員
- 1995年 東京大学海洋研究所准教授
- 2009年 東京大学海洋研究所(現大気海洋研究所)教授
- 2011年 東京大学大気海洋研究所所長

佐々 浩司(高知大学教育研究部自然科学系理学部門 教授)



- 1993年 高知大学理学部助手
豊橋技術科学大学大学院工学研究科にて博士(工学)の学位取得
- 2000年 高知大学理学部助教授
- 2007年 高知大学理学部准教授
- 2009年 高知大学教育研究部自然科学系理学部門教授

小司 禎教(気象研究所 気象衛星・観測システム研究部 第二研究室 室長)



- 1986年 気象大学校卒業
- 1997年 気象研究所予報研究部 研究官
- 2010年 京都大学にて博士(理学)の学位取得
- 2012年 気象衛星・観測システム研究部 第二研究室長

竜巻—その構造・発生機構の理解と予知の現状について

新野 宏 (東京大学大気海洋研究所)

要旨

竜巻は小規模で短寿命の大気中の渦であるが、数ある大気の渦の中で最も強い風を吹かせる渦であり、構造物や人に甚大な被害を与える。科学者の懸命の努力にもかかわらず、竜巻の構造や発生機構については未解明の点も多い。本講演では、最新の研究で竜巻について何がわかり、何がわかっていないのか、その予知や注意情報がどのような根拠と手法により提供されているのか、そして我々はそれらの予知・注意情報をどのように受け止め、防災に活かせば良いのかについて紹介する。

1. はじめに

竜巻は平均的には直径が 100m 程度、寿命が 10 分程度の小規模で短寿命の渦である(Niino *et al.*, 1997)。しかしながら、強いものでは秒速 100m/s を超える想像を絶する風を生ずる (Alexander and Wurman, 2005)。このような風が吹くと、ほとんどの構造物は壊滅的な被害を受け、犠牲者が出ることも少なくない。

2006 年 9 月 17 日宮崎県延岡市を襲った竜巻では 3 名の死者と 143 名の負傷者を生じ、同年 11 月 7 日の北海道佐呂間町の竜巻では 9 名の死者と 26 名の負傷者を生じた。我が国で大きな被害を生じた竜巻としては、1881 年 9 月 26 日に宮崎市で 16 名、1941 年 11 月 28 日愛知県豊橋市で 12 名、1903 年 9 月 23 日に東京都新宿区で 10 名の犠牲者が出た例が報告されている。

米国では、平均して 1 年に 50 名を超える方が竜巻で亡くなっており、ハリケーンを超える大きな気象災害の要因となっている。2011 年には、全米で 551 人が竜巻の犠牲になっており、5 月 22 日のミズーリ州ジョブリンの竜巻では 158 人の方が亡くなった。

このように大きな被害を与える竜巻について、科学者は長年懸命に研究を続けているが、その水平スケールが小さいこと、寿命が短いこと、そして頻度の低い現象であることなどから、まだまだ未解明の点も多い。

本講演では、現在、竜巻について何がわかり、何がわかっていないのか、そのような竜巻に対して私たちはどのように備えれば良いのかについてお話ししたい。

2. 竜巻の定義

竜巻は積雲または積乱雲から垂れ下がる柱状または漏斗状の雲を伴う激しい鉛直軸の渦である (気象庁, 1988)。第 1 図は 2008 年 5 月 23 日に米国カンサス州で起きた竜巻の写真であるが、上空の積乱雲の雲底から柱状の雲が地面近くまで垂れ下がっているのがわかる。地面近くでは、猛烈な風のために破壊されて飛散した物が舞い上がっている様子が見える。

竜巻に似た大気中の激しい渦としては、塵旋風、蒸気旋風、火災旋風などがあるが、竜巻は上空の積雲・積乱雲などの対流性の雲によって力学的に作り出される点で、他の渦と区別される。



第 1 図 2008 年 5 月 23 日米国カンサス州で NOAA/NSSL の Sean Waugh 氏が撮影。
©NOAA/ Dept. Commerce (<http://www.photolib.noaa.gov/htmls/nssl0232.htm>)

3. 竜巻の発生状況

第 2 図は 1961-2010 年に日本で発生した竜巻の地理分布を示したものである。竜巻は、我が国では、基本的にどこでも発生すると考えた方がよい。竜巻は 1 年当たり約 15 個発生しており、単位面積 (100km 四方) 当たりの発生率は 0.4 個/10⁴km²/年である。アメリカでは、年間約 1300 個発生しているが、面積が我が国の約 25 倍なので、発生率は 1.4 個/10⁴km²/年と我が国の約 3.5 倍となっている。

発生数の季節変化を見ると、暖候期に多く、特に 9 月、10 月、8 月の順に多くなっている。1 日の中では、13-14 時をピークとして午後に多くなっている。

過去 50 年間の年発生数を見てみると系統的な変化は見られない。竜巻の発生数の統計は、通信手段の発展、気象機関の発生把握の取り組みなどの影響を受けるため、日本に限らず世界的に見ても、緩やかな気候変化に伴う発生数の変化を検出することは難しい。

4. 竜巻渦の構造と特性

4.1 風速分布

竜巻の風速分布は、かつては 16mm 映画に写った飛散物を各コマ間で追って求めていた(例えば Hoecker, 1960)が、近年はトラックに搭載された可搬型のドップ



第2図 1961-2012年の日本の竜巻の発生分布(気象庁, 2013 ; <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/stats/bunpu/bunpuzu.html>).

ラーレーダーで竜巻から 2-3km に近づいて風速分布を求めることができるようになっている(Wurman *et al.*, 1996; Wakimoto *et al.*, 2011)。これらの観測から、100m/s を超える風速も測定されている(Alexander and Wurman, 2005)。

4.2 気圧分布

風速分布はドップラーレーダーなどの遠隔測定で求めることができるが、気圧は渦の通り道に気圧計を配置し、運良くその真上を竜巻が通り過ぎるのを待たなければ測定できない。2003年6月24日に、米国サウスダコダ州マンチェスターで起きた F4 の竜巻でそのような機会が得られ、10秒間に約 100hPa 気圧が降下する記録が得られた(Karstens *et al.*, 2010)。竜巻観測は危険と隣り合わせである。この貴重な観測を主導した Tim Saramas は大変残念なことに、2013年5月31日、オクラホマ州エル・レノでの観測中に、息子ともう1名の仲間と共に竜巻に巻き込まれて亡くなった。

4.3 漏斗雲の成因

大気中で雲ができるのは、空気が冷やされて湿度が100%を超えたときである。気圧は高度と共に低くなっているため、地表付近の空気塊が上空に持ち上げられると、膨張する。この際、周囲の空気を押しながらか仕事をするので、空気塊はその分、熱の形で持っている内部エネルギーを失って冷え、ある高度の気圧まで上昇すると湿度が100%を超えて、雲ができる。

ところが、竜巻のような強い渦では、中心付近の空気は遠心力のために遠方に飛び出そうとするため、中心付近の気圧は降下する。この降下は、気圧の水平勾配と遠心力が釣り合うまで続く(旋衡風平衡)。その結果、渦が無ければほぼ水平な等圧面は下に漏斗状に窪

むことになる。地面付近で竜巻の中心に吹き込んだ空気が上昇するとき、漏斗状の等圧面に達すると雲ができるので漏斗状の雲が生ずる。竜巻の一生を見ると、渦の弱いときは漏斗状の雲の垂れ下がり短い、最盛期には地面近くまで垂れ下がり、また渦が弱まると垂れ下がりが小さくなる様子が見られる。

4.4 多様な渦の形態

自然界の竜巻には様々な形態のものがある。細くて滑らかなロープ状の渦、太くて乱れた渦、らせん状の渦、親の渦の周りを複数の子供の渦(吸込渦と呼ばれる)が回転する渦(多重渦)などである。

これらの多様な渦は軸対称な円筒型の容器を用いた室内実験で再現することができる(Church *et al.*, 1979)。容器の上蓋にはファンがあり、一定の流量で空気を排出するようになっている。一方、底面近くの容器の側壁は網目状になっていて、鉛直軸周りに回転できるようになっており、網目を通して空気が容器に流入する際に、回転角速度 Ω を与えられるようになっている。

Ω が0のときには、空気は中心に向かって放射状に流入し、渦は生じないが、ゆっくりとした Ω を与えると、細くて滑らかなロープ状の渦が生ずる。その後、 Ω を大きくするにつれ、太くて乱れた渦、らせん状の渦、多重渦が現れる。多重渦の竜巻は、竜巻の強さを表すFスケール¹という指標(Fujita, 1971)でF4やF5に属する強い竜巻に生ずると言われており、室内実験の結果では、吸込渦の通過時には、平均風速の倍程度の風速が生ずることがわかっている(Leslie, 1977)。吸込渦は局所的に激しい被害を生ずる要因として恐れられている。

5. 竜巻の発生機構

4.4の室内実験から、竜巻に似た強い渦が発生するためには、上蓋のファンが作り出す上昇流(とこれに伴う地表面近くで中心に集まる流れ-収束流という)と、容器の側壁から流入する空気が回転角速度(正確には角運動量)を持っていることが必要がわかる。

現実の大気で、ファンの役割を演ずるのは積乱雲の中の上昇気流と考えられるが、容器の側壁で与えられる回転の源としては2通りの仕掛けがあると考えられている。

5.1 局地前線による竜巻

局地前線というのは、線状の領域を境にして水平方向に風速や温度などが大きく変化している場所である。例えば、第3図のように前線を挟んで風向きが大きく変わっている場合を考えよう。このように、ある狭い領域(前線)を挟んで前線に沿った風速が大きく変化しているときには、大気は前線に沿って自発的に直径数km間隔の渦を作る性質を持っている(第3図左)。

¹ 2007年1月からは、米国ではF(Fujita)スケールを改良したEF(Enhanced Fujita)スケールが使われている

一方、局地前線に直交する方向の風速は、前線に向かって集まる(収束する)傾向を持つことが多いため、局地前線では上昇流が起きやすく、積雲・積乱雲などの対流雲も発生しやすい(第3図中)。対流雲に伴う強い上昇気流の領域が、下層の渦の上空にやってくると室内実験で渦が出来たのと同じ2つの条件が整い、竜巻が発生する。

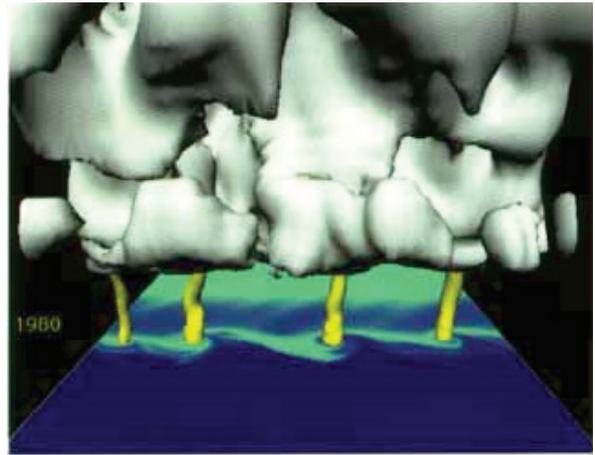
局地前線に発生する竜巻は数値シミュレーションでも再現されており(第4図)、第3図で示したプロセスが実際に大気中で起きることが確認されている。

5.2 スーパーセルに伴う竜巻

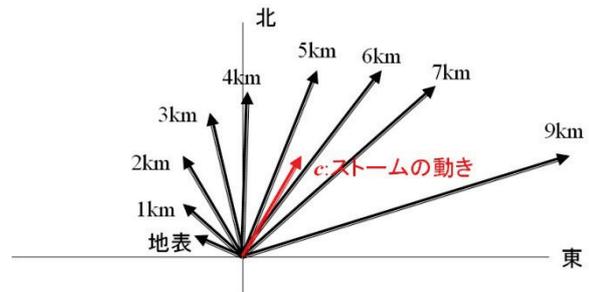
強い竜巻の多くは、スーパーセル(Browning, 1964)と呼ばれる特殊な積乱雲によって起きることが知られている。スーパーセルは自分自身で雲内にメソサイクロンと呼ばれる直径数 km の回転する上昇気流を作り出すことに特色がある。

スーパーセルが起きやすい環境は、(1)大気が不安定で強い対流が起きやすい状況にあり、(2)風速が上空に行くほど強くなり、また時計回りに変化していること(このような風の鉛直方向の変化を鉛直シアという)である(第5図)。(1)の条件が満たされるだけで、強い積乱雲は起きるが、通常1時間くらいで一生を終えてしまう。これは、積乱雲は水蒸気が凝結して雲粒(細かい水滴)になるときに放出する凝結熱で上昇気流を加速して発達するが、やがて上空に大量の雹や雨粒が蓄積し、その重さを上昇気流が支えきれなくなって、遂には落下を始め、上昇気流がつぶされてしまうからである。しかし、(2)の条件があると、上空に貯まった降水粒子は、上昇流と異なる場所で落下することが可能となり、強い上昇気流を長時間維持する準定常的な構造を持つことが可能となる。

更に風の鉛直シアはメソサイクロンの形成に重要な役割を果たしている。簡単のために、環境風が東西成分だけを持ち、上空に行くほど西風が強くなっている場合を考えよう(第6図)。このとき、環境場には南側から見たとき、局所的にはどこでも南北軸を持つ時計回りに回転する渦の管(渦管)がある状態になっている。このような場の中に、積乱雲が生じて上昇流が起きると、この南北方向に水平な渦管(図の手前の地面近くの線で示されている)は上昇流のところを持ち上げられて、上昇流の南側では反時計回りの、北側では

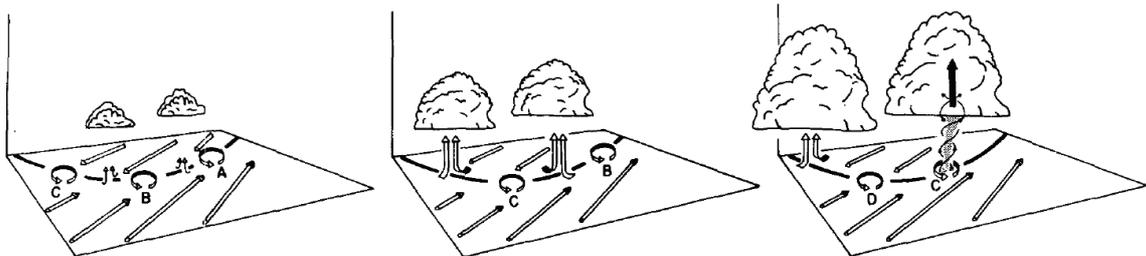


第4図 数値シミュレーションで得られた局地前線に伴う竜巻。黄色は鉛直軸周りの回転が0.05rad/s以上、灰色は雲(雲水の混合比が0.2g/kg以上)の領域。底面の青系統の色は温度で、濃い色ほど冷たい(Lee and Wilhelmson, 1997)。

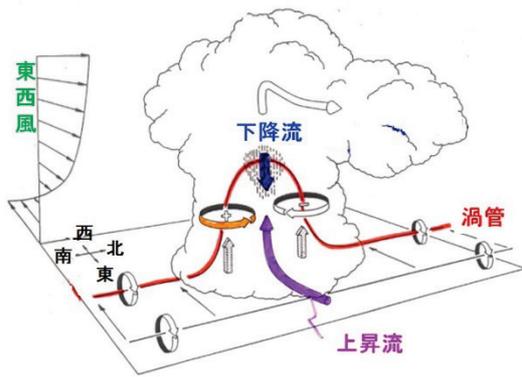


第5図 メソサイクロンを持つスーパーセルが発生しやすい環境場の風の高度分布。上空に行くほど風向が時計回りに変化し、かつ風速も大きくなっている。

時計回りの回転を持つようになる(図の中央の渦管と書かれた線)。これがメソサイクロンの成因である(Klemp and Wilhelmson, 1978; Rotunno, 1981)。第6図で見た東西成分だけを持つ環境風の場合には、南北に同じ強さの反時計回りと時計回りの渦ができるが、第5図のように高度と共に風向が時計回りに回転する環境風の場合には、南側のメソサイクロンが強化され、北側の時計回りの渦(メソアンチサイクロン)は弱められる仕掛けがあり、メソサイクロンのみを持つスーパー



第3図 局地前線による竜巻の発生過程の概念図(Wakimoto and Wilson, 1989)



第 6 図 スーパーセルにおけるメソサイクロンの生成機構(Klemp, 1987 をもとに作成)。

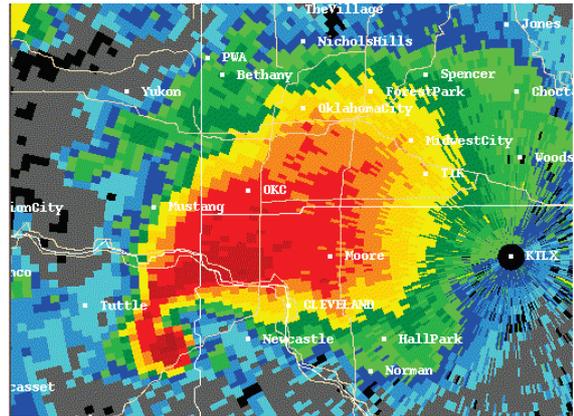
ーセルが発達する(Rotunno and Klemp, 1982)。

雲内の風速を観測できるドップラーレーダーでスーパーセルを観測すると、メソサイクロンに伴う特徴的な風速分布を検出することができる。一方、メソサイクロンが生ずると、その反時計回りの循環によって、降雨域の降水粒子が流されて、レーダーで見たときの降水粒子からの電波の反射強度の分布はフック状になる(第7図)。メソサイクロンやフックエコーが探知されると、竜巻発生の可能性が高いことから、米国では1990年代に全国を覆うドップラーレーダー網を整備し、竜巻警報の発令に利用している。我が国でも、気象庁は2008年3月からの竜巻注意情報の発令にドップラーレーダーを利用しており、2012年度には全国20カ所の現業気象レーダーのドップラーレーダー化を終えた。

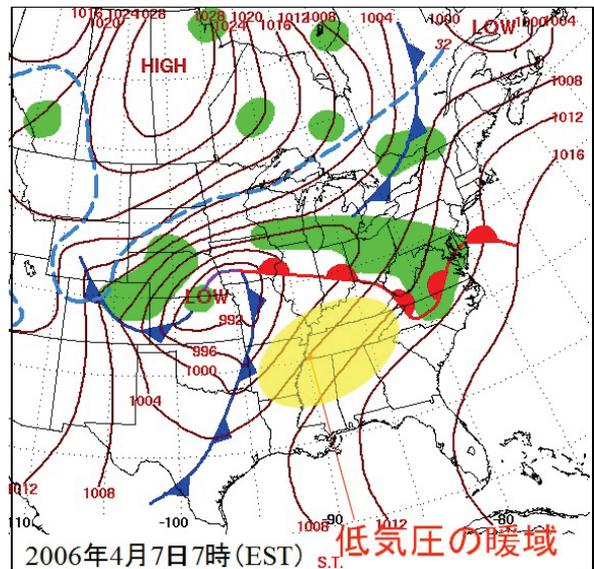
米国では、時として、1-2日のうちに多数の竜巻が発生し、大きな被害が出ることもあり、竜巻大発生(tornado outbreak)と呼ばれる。1974年4月3-4日には148個の竜巻が発生し315人の犠牲者、2006年4月7日には71個の竜巻が発生し、13人の犠牲者、2011年4月25-28日には336個の竜巻が発生し346人の犠牲者が生じている。

第8図は2006年4月7日の地上天気図を示したものである。竜巻大発生が起きる際の気圧配置は過去のいずれの例でも良く似ており、1000km四方にも及ぶ広い竜巻発生域の北側に温帯低気圧が存在し、竜巻発生域はその暖域(低気圧の南側の温暖前線と寒冷前線に挟まれた領域)に当たる。そこでは、大気下層では低気圧の中心に向かって暖湿な空気が南風として吹き込み、中層には西風のジェットが吹いていて、広い範囲で先に述べた(1)(2)の条件が共に満たされている。このため、そこで発生した積乱雲のいずれもがスーパーセルになり、その多くが竜巻を発生させるのである。

竜巻は台風に伴ってもしばしば発生する。第9図は米国のハリケーン(北西太平洋の台風当たる風速33m/s以上の強い熱帯低気圧)に伴って起きた竜巻のハリケーン中心に対する相対的な発生位置を、ハリケーン

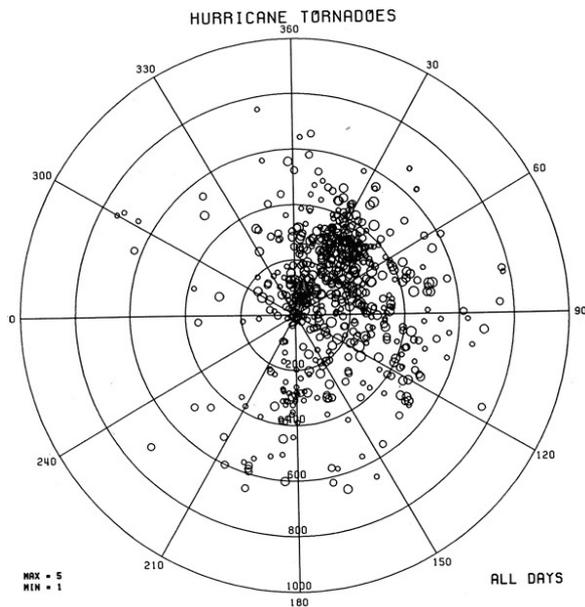


第7図 1999年5月3日、オクrohoma州ムーアを襲ったスーパーセルのレーダー反射強度の水平分布。赤系統の色ほど強度が強い。(http://www.srh.noaa.gov/images/oun/wxevents/19990503/radar/ar199905032356z.gif)



第8図 2006年4月7日の竜巻大発生時の地上天気図。竜巻の発生地域は、温帯低気圧の暖域と呼ばれる、低気圧中心の南側の領域に当たっていることがわかる(NOAAのウェブサイトの天気図をもとに作成)。

ンの移動方向を紙面上方向に揃えて示したものである。これを見ると、竜巻の発生は、ハリケーンの進行方向の右前方象限、かつ中心から400km以内で多いことがわかる。進行方向右前方、左前方、右後方、左後方の各象限における環境場を調べたところ、右前方象限においてスーパーセルが起きるための要件(1)(2)が最も良く満たされていることがわかっている(McCaul, 1991)。台風やハリケーンの中では、特に地表面から高度2kmくらいまでの風の鉛直シアが強いことが知られており、アメリカ中西部で起きる典型的なスーパーセルに比べて、鉛直・水平スケールの小さな「小型スー



第9図 ハリケーンの移動方向を0度(紙面上)の方向のとしたときの台風に伴う竜巻の発生分布(McCaul, 1991)。位置を示す○の大きさは、発生した竜巻の藤田スケール(F1-F5)に対応して変えてある。同心円は200km毎に描いてある。

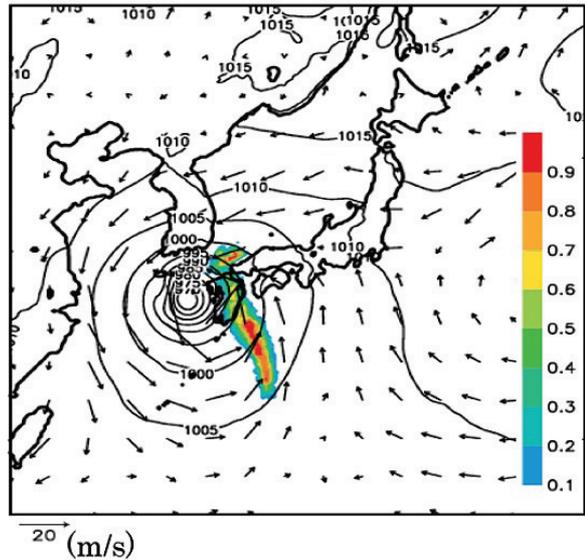
パーセル」が生ずることが多いことが知られている(例えば Suzuki *et al.*, 2000)。

6. 竜巻の予知の現状

以上見てきたように、強い竜巻はスーパーセルに伴って発生し、スーパーセルの発生のための条件は前節の2つの条件であることがわかっている。これらの条件を与える環境場のパラメータとして様々なものが提案されているが、その代表的なものとして、(1)の大気的不安定性に対しては対流有効位置エネルギー(CAPE)と呼ばれる量、(2)の高度による風向ベクトルの回転度合いに対してはストームの動きに相対的なヘリシティ(SReH)と呼ばれる量がある。更に、この両者を組み合わせたエネルギーヘリシティ指数(EHI; Hart and Korotky, 1991; Davies, 1993)²も良く使われている。

第10図は、2006年9月17日14時頃に台風13号に伴って宮崎県で3つの竜巻が発生し、そのうち延岡市に発生したF2の竜巻で3名の犠牲者を出した事例について、数値シミュレーションで前日21時から18時間予報を行ったときの同日15時の地上天気図である。このような予測から、EHIを求め、スーパーセルとこれに伴う竜巻のポテンシャルを知ることが可能である。但し、シミュレーションの初期値に観測誤差が含まれていると、大気の運動はそのカオス性によって、ある時間経つと予報結果がばらつくことが知られている。そこで観測誤差程度異なる10通りの初期値を使って

² $EHI = CAPE \times SReH / (1.6 \times 10^5)$



第10図 宮崎県延岡市で竜巻が発生した時刻に近い2006年9月17日15時の予想気圧配置(16日21時から18時間予報)。カラーは11メンバーのアンサンブル予報のうち、EHIが2.5を超えたメンバーがどれだけの割合あったかを示す(Seko *et al.*, 2009)。矢印は水平風速ベクトル。

追加のシミュレーションを行い、全部で11のシミュレーション結果の中で、EHIが2.5より大きくなったシミュレーションが、どれだけの割合を占めるかをカラーシェードで示してある。これを見ると、北東に移動する台風の進行方向前方右側象限に当たる、宮崎県から南東に延びる領域でスーパーセル発生のポテンシャルが高くなっていることがわかる。このようにスーパーセル発生のポテンシャルに関しては、数値予報により半日~1日程度前から知ることができるので、気象庁は気象情報等で注意の呼びかけが行っている。また、数時間前からはレーダーの情報も考慮して、雷注意報の中で、竜巻等の突風への注意を呼びかけている。

気象庁では更に、2008年3月からは、数値予報による環境場のスーパーセル発生のポテンシャルに関する情報に加えて、ドップラーレーダーによるメソサイクロンの検出情報や降水強度の情報を総合して、府県単位で竜巻注意情報を出している(詳しくは瀧下, 2009; 気象庁, 2010参照)。また、2010年5月からは竜巻が今にも発生する(または発生している)可能性の程度を2階級で推定し、10kmメッシュで竜巻発生確度ナウキャストとして防災機関や民間気象事業者、及び気象庁ウェブページに提供している。ここで、発生確度2は竜巻等が発生する可能性があり注意が必要な地域(予測的中率³は5-10%、捕捉率⁴は20-30%程度)、発生

³ 的中率: 「竜巻あり」と予測したときに、実際に竜巻等突風が発生する割合。

⁴ 捕捉率: 実際に竜巻等突風が発生した事例に対して、「竜巻あり」と予測した割合。

確度 1 は竜巻等が発生する可能性がある地域（予測的中率は 1-5%、捕捉率は 60-70%程度）である。2008-2012 年までの検証結果によれば、竜巻注意情報の適中率は 3.5%であり、捕捉率は 27.9%である。竜巻注意情報は、もともと 2006 年の宮崎県延岡市と北海道佐呂間町の竜巻により 12 名の犠牲者が出たことを受けて、プレハブや屋外イベントのテント、高所作業等、突風に対して脆弱な環境にある人の人的被害を防ぐことを目的に開始されたものである。竜巻注意情報は上述のように適中率の低い情報ではあるが、雷注意報に比べると竜巻等突風の生ずる確率は 30 倍以上高い「気象学的に根拠のある」情報なので、一般市民の方それぞれが置かれた状況で有効に利用して自らを守っていただければと願う次第である。

竜巻は積乱雲によって起きる現象であり、積乱雲が近づいたときにはあたりが暗くなり、雨が蒸発してできる冷たい風が吹き始めたり、雷鳴が聞こえ始めたりする。竜巻で最も危険なのは、風速 50m/s でも時速にすると 180km に達する速度で飛んでくる瓦や鉄板などの飛散物当たることや、自分自身が風で飛ばされることである。もし竜巻が近づくのに気がついたら、頑丈な建物の中に避難し、雨戸を占め、窓の無い場所や窓から離れた場所に隠れて、身を守ることが大切である。

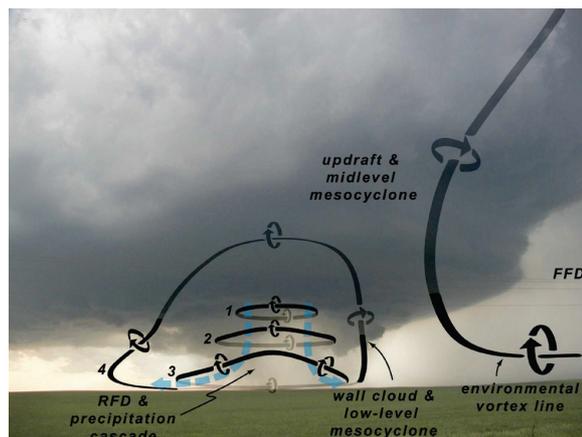
7. 竜巻の発生機構の解明に向けて

米国では、1990 年代から全国をドップラーレーダー網で覆って、メソサイクロンやフックエコーが探知されたときには竜巻警報を発令してきたことを 5.2 節で述べた。ところが観測データを蓄積していくうちに、メソサイクロンが見つかったとしても 26%しか竜巻が発生しない⁵(Trapp *et al.*, 2005)ことや、ドップラーレーダーではほとんど同じに見えるメソサイクロンでも竜巻を起こす場合と起こさない場合があることがわかってきた(Wakimoto and Cai, 2000)。これらのことは、竜巻の発生には上空のメソサイクロンの存在だけでは十分でなく、地表面近くで起きている過程が重要であることを示唆している。スーパーセルに伴う強い竜巻は、メソサイクロンと同じ回転方向のものが多いが、メソサイクロンは竜巻の発生にどう関係しているのか、また室内実験(4.4 節)の側壁で与える回転角速度に相当する地表面近くの「竜巻の回転の源」は何なのか、十分解明されておらず、更なる観測や数値シミュレーションによる詳細な研究が必要となっている。

7.1 観測的研究

すべてのスーパーセル（メソサイクロンを伴う積乱雲）が竜巻を起こすわけではないので、観測で竜巻に遭遇する確率は決して高くはない。そのような困難に

⁵ 中層(高度 1km 以上)のメソサイクロンに対しては 15%、下層(高度 1km 以下)のメソサイクロンに対しては 40%が竜巻を伴うとされる(Trapp *et al.*, 2005)。

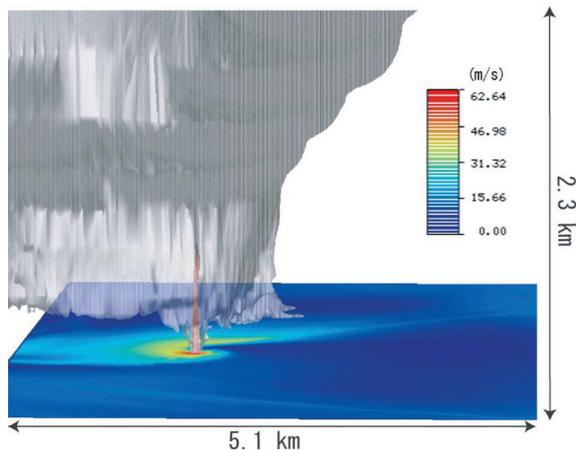


第 11 図 壁雲に対応する下層のメソサイクロンと中層のメソサイクロンの模式図。前者は、雨滴の重力や低温により、下向きの浮力を持った空気が下降しながら傾圧的に作り出す水平な渦管を、上昇流で引き延ばして生じ、後者は 5.2 節で見たように環境風に伴う水平渦度を立ち上げて生ずる(Markowski *et al.*, 2008)。

もかかわらず、米国では 1990 年代から、スーパーセルとこれに伴う竜巻周辺に複数のトラック搭載型のドップラーレーダー(DOW: Doppler on Wheels)や車載型の気象測器を展開して観測する大規模な観測プロジェクト VORTEX (Rasmussen *et al.*, 1994)、VORTEX2 (Wurman *et al.*, 2012)が 2 回にわたって行われ、多くの貴重なデータが取られてきた。

これらの観測から、竜巻の発生前に高度 1km 以下に発達する「下層のメソサイクロン」は、従来考えられていたように環境場の風の鉛直シアの持つ水平渦度やスーパーセルの進行方向前方に存在する「前方のガストフロント(FFGF: Forward-flank gust front)」における水平方向の密度差で作られた水平渦度(Rotunno and Klemp, 1985)だけで無く、フックエコー周辺の冷たい下降流の領域の周囲で水平方向の密度差が原因で作られる水平軸の渦管を上昇流で立ち上げることによって作られる(Markowski *et al.*, 2008; 第 11 図)とする考え方が提出されている。この考え方は、フックエコーの先端の両側で反時計回りの鉛直渦(メソサイクロン)と時計回りの鉛直渦が見られることと整合的である。

もともと地面近くに鉛直軸回りの回転を持つ局地前線などが無い状況で、地表面近くに竜巻の「回転の源」を作り出すことは、上昇流で水平な渦管の向きを変えるだけでは難しいので、以前から竜巻の発生には下降流が何らかの形で関与しているものと考えられてきた(例えば Davies-Jones, 1982)。最近では、スーパーセルの進行方向後方に存在する「後方ガストフロント」(RFGF: Rear-flank gust front)の寒気側で、下降流が強まったときに生ずる 2 次的なガストフロントが、竜巻の生成・維持に果たすが注目されている(例えば, Marquis *et al.*, 2008)。Marquis *et al.*(2012)は 1999-2004 年にかけて、



第 12 図 数値シミュレーションで計算開始後 4054 秒に得られた竜巻の 3 次元画像。灰色は雲（雲水の混合比が 0.1g/kg 以上の領域）、赤は竜巻（鉛直軸回りの回転の強さを表す「渦度」が 0.6s^{-1} 以上の領域）、下面のカラーシェードは地上 5m の風速を表す(Noda and Niino, 2010)。

DOW で観測された 4 つの竜巻のデータを解析し、竜巻の維持過程における中層の上昇流・RFGF・2 次的なガストフロントの関係を調べたが、これらの関係は各事例毎に異なっており、竜巻の生成・維持機構の多様性を示唆している。

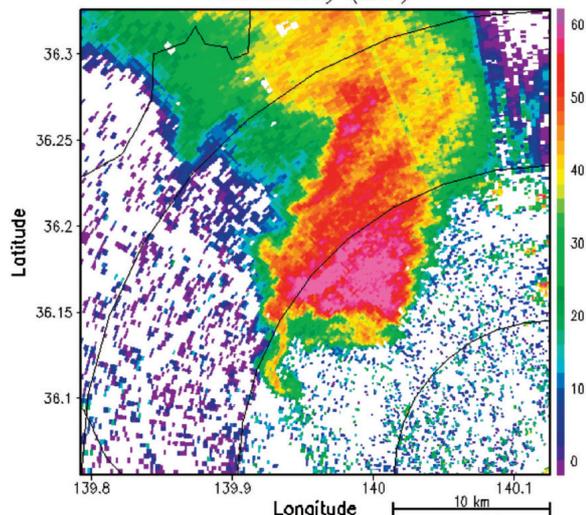
7.2 数値シミュレーション研究

発生頻度が低い竜巻を研究する上で、数値シミュレーションは有効な研究手法である。もし、シミュレーションに成功すれば、時間・空間的に解像度の高いデータを得ることができ、詳細な解析が可能となる。しかし、数 10km に及ぶ水平の広がりを持つスーパーセルと、直径が 100m 程度の竜巻の両方を解像したシミュレーションには膨大な計算量を要する。

数値シミュレーションによる竜巻の発生機構の研究は 1990 年代中頃から行われてきた(Wicker and Wilhelmson, 1995; Grasso and Cotton, 1995 など)。これらの研究により、下層のメソサイクロンの発達に伴って雲底付近の高度 1km 付近で 30m/s 近い上昇流が生じ、そこへ向かって地表面近くの空気が集まることが竜巻の発生に重要なこと、竜巻渦を構成する空気は、北東側の地表付近からと、北西側の上空から下降してきたもので構成されることがわかってきた。

Noda and Niino (2005, 2010)は 1977 年 5 月 20 日に米国オクラホマ州で起きた竜巻の環境場の風・温度・湿度の鉛直分布を水平一様に与えたときに生ずるスーパーセルとこれに伴う竜巻を数値シミュレーションで調べ、この事例では、下層のメソサイクロンに伴う強い上昇流と地表面付近の RFGF 上に生ずる渦のカップリングが竜巻の発生に寄与していることを示した。RFGF における鉛直渦度の成因も、元をたどれば下降流が地

MRI-C 2012 05/06 12:35:10JST PPI EL= 0.5 deg
Reflectivity (dBZ)



第 13 図 気象研究所二重偏波ドップラーレーダーが観測した「つくば竜巻」を生じたスーパーセルの反射強度の水平分布。2012 年 5 月 6 日 12 時 35 分の仰角 0.5 度の画像。竜巻は南に突き出したフックエコーの先端に発生した (山内)。

表付近に運んでくる上空の風にある。

Mashiko *et al.* (2009)は、2006 年 9 月 17 日に台風 13 号に伴って発生した宮崎県延岡市の竜巻を、台風を含む広域の気象場から竜巻渦のスケールまで、現実的に再現することに成功した。この竜巻は台風のアウターレインバンドを構成する小型スーパーセルに伴って発生したもので、RFGF の後面に生じた 2 次的なガストフロントが RFGF に追いつき収束が強化されたときに発生した。台風に伴う小型スーパーセルでは、大気下層が湿っているために降水による気温低下が少ない。このため、RFGF における水平な渦管の生成は弱いこと、環境場の下層風の鉛直シアが非常に大きいこと、更に RFGF 後方の空気が相対的に軽いため持ち上げ易い(例えば、Markowski and Richardson, 2009)ことなど、米国中西部のスーパーセルに無い特徴があり、両者の比較は竜巻の発生機構を理解する上で有用と思われる。

以上見てきたように、観測結果と同様、数値シミュレーションにおいても竜巻の発生過程は実に多様であり、統一的な理解を得るためには、更に多くの事例の解析を蓄積することが必要と思われる。

7.3 2012 年 5 月の茨城県・栃木県の竜巻

2012年5月6日12時35分頃、関東地方を東進した線状降水システムに伴い、茨城県から栃木県にかけて3個の竜巻がほぼ同時に発生し、死者1名、負傷者52名、住家の全壊89棟、半壊194棟の大きな被害を生じた。この竜巻に関する詳しい解説は本夏季大学の小司(2013)の講演に譲るが、これらの竜巻はいずれも15km以上の被害跡を伴った。このうち最も南に位置した竜巻は、気象

庁気象研究所の二重偏波ドップラーレーダーから15km以内という近距離で発生したため、これを生み出したスーパーセルに伴うメソサイクロンやフックエコー(第13図)と共に、竜巻渦自身に伴う風速の分布や、竜巻による飛散物の電波特性がなどの非常に貴重な観測データが得られた(山内ほか, 2013)。

また、このスーパーセルと竜巻は、高解像度の数値シミュレーションによっても良く再現されており(加藤ほか, 2013)、竜巻に流入する空気塊の解析(益子ほか, 2013)によれば、その一部はフックエコーに伴って下降する冷気流で占められている。詳細な解析に依れば、竜巻はMarkowski *et al.* (2008)が指摘するように、下降する冷気流の側面で水平密度差で作られる水平な渦管が、下層のメソサイクロンに伴う上層気流で立ち上げられることによって発生することを示している(益子, 2013私信)。更に、観測データに含まれる誤差を考慮して、観測値からごく僅か異なる複数の初期値から数値シミュレーションを行い、予測の不確定性を見るアンサンブル予報という手法を用いることにより、観測された3つの竜巻の発生を予期できる可能性があることが見つかっている(Seko *et al.*, 2012)。

そのほかにも、これまでになく多くの貴重な竜巻渦の写真・動画が撮られ、PIV解析と呼ばれる手法で竜巻渦の風速分布が得られていること(佐々・宮城, 2013)、基礎を上にした形で倒壊するという風工学的に珍しい形の被害を受けた家屋があったこと(喜々津, 2013)など、我が国の竜巻として前例を見ない多くの貴重な資料が得られており、今後の解析により竜巻の理解の進展が期待されている。

8. まとめ

比較的理解の進んだ対流圏の大気現象の中であって、竜巻は、時として大きな災害をもたらす激しい現象でありながら、小規模・短寿命・低頻度であることが障害となっており、今なお解明の遅れている現象の一つである。本稿では、そのような竜巻に関する研究と予知の現状と課題、そしてそれを踏まえた災害軽減のための対応について紹介した。現在のところ、適中率が3.5%程度に過ぎない竜巻注意情報ではあるが、気象学的に根拠のある情報なので、突風に関して脆弱なプレハブ・イベント用のテント・高所の作業場などにいる方はこの情報を有効に利用して人的被害の軽減に活かしていただきたい。

近年、米国では最新の観測機器による野外観測プロジェクトや高解像度の数値シミュレーションによる研究が進められている。我が国でも、2012年5月のつくばの竜巻で貴重な観測データが得られたほか、数値シミュレーションによる興味深い再現実験も得られており、今後の研究の進展とその成果を活かした予知技術の向上が期待される。

参考文献

- Alexander, C.R. and J. Wurman, 2005: *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 72-96.
Browning, K.A., 1964: *J. Atmos. Sci.*, **21**, 634-639.
Byers, H.R. and R.R. Braham, 1949: *The Thunderstorm*. U.S. Government Printing Office, 287pp.
Church, C.R. et al., 1979: *J. Atmos. Sci.*, **36**, 1755-1776.
Davies, 1993: Hourly helicity, instability, and EHI in forecasting supercell tornadoes. Preprints, 17th Conference on Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc., St. Louis, MO.
Davies-Jones, R.P., 1982: In "Intense Atmospheric Vortices" (Ed., L. Bengtsson and J. Lighthill, Springer-Verlag, 175-189).
Fujita, T.T., 1971: Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity. SMRP Res. Paper, Dept. Geophys. Sci., Univ. Chicago, No. 91, 42pp.
Grasso, L. D. and W. R. Cotton, 1995: *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1192-1203.
Hart, J.A. and W. Korotky, 1991: The SHARP workstation v1.50, A skew-t/hodograph analysis and research program for the IBM and compatible PC, user's manual. National Weather Service, NOAA, U.S. Dep. Commerce, 62 pp.
Hoecker, 1960: *Mon. Wea. Rev.*, **88**, 167-180.
Karstens, C.D. et al., 2012: *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 2570-2588.
加藤輝之ほか, 2013: *天気*, **60**, 51.
喜々津仁密, 2013: *天気*, **60**, 53.
気象庁, 2002: 地上気象観測指針, 154 pp.
気象庁, 2010: 竜巻などの激しい突風に関する気象情報の利活用について, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/ know/toppuu/toppuuinfo-rikatsuyou.pdf>
気象庁, 2013: <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/stats/bunpu/bunpuzu>.
Klemp, J. B., 1987: *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **19**, 369-402.
Lee, B. and R. Wilhelmson, 1997: *J. Atmos. Sci.*, **54**, 2387-2415.
Leslie, F.W., 1977: *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1022-1027.
Mashiko, W. et al., 2009: *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 4238-4260.
益子 涉, 2013: 日本気象学会春季大会予稿集, A152.
Markowski, P. et al., 2008: *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 3513-3535.
Markowski, P. and Y.P. Richardson, 2009: *Atmos. Res.*, **93**, 3-10.
McCaul E.W., Jr., 1991: *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 1954-1978.
Niino, H. et al., 1997: *J. Climate*, **10**, 1730-1752.
Noda, A.T. and H. Niino, 2005: *SOLA*, **1**, 5-8.
Noda, A.T. and H. Niino, 2010: *J. Meteor. Soc. Japan*, **88**, 135-159.
Rankine, W. J. M., 1882: *A manual of applied physics*, 10th ed., Charles Griffin and Company, 633pp.
Rasmussen, E.N. et al., 1994: *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **75**, 995-1006.
Rotunno, R., 1981: *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 171-180.
Rotunno, R. and J. B. Klemp, 1982: *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 136-151.
Rotunno, R. and J. B. Klemp, 1985: *J. Atmos. Sci.*, **42**, 271-292.
瀧下洋一, 2009: *天気*, **56**, 167-175.
佐々浩司, 宮城弘守, 2013: *天気*, **60**, 52-53.
Seko, H. et al., 2009: *SOLA*, **5**, 57-60.
Seko, H. et al., 2012: Extended Abstract of the Second International Workshop on Nonhydrostatic Numerical model, November 28-30, 2012, Sendai, 52-53.
小司禎教, 2013: 竜巻の観測-メカニズム解明を目指して-, 日本気象学会関西支部第35回夏季大学テキスト資料.
Trapp, R.J. et al., 2005: *Wea. Forecasting*, **20**, 680-687.
Wakimoto, R.M. and J. W. Wilson, 1989: *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1113-1140.
Wakimoto, R.M. et al., 2012: *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 2929-2958.
Wicker and Wilhelmson, 1995: *J. Atmos. Sci.*, **52**, 2675-2703.
Wilhelmson, R. and J.B. Klemp, 1978: *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1974-1986.
Wurman et al., 1996: *Science*, **272**, 1774-1777.
Wurman et al., 2012: *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 1147-1170.
山内洋ほか, 2013: *天気*, **60**, 48-49.

竜巻の発生環境を理解する 室内実験

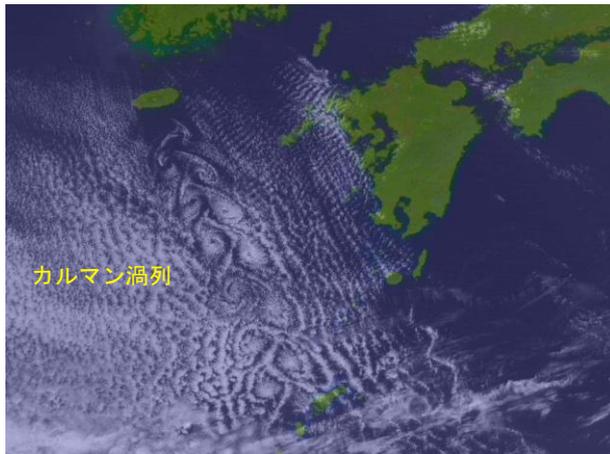
佐々浩司
高知大学 自然科学系理学部門

一般的な竜巻発生装置



米国NCAR
mesa lab.

渦はどうしてできる？



カルマン渦列

高知大学気象情報頁より

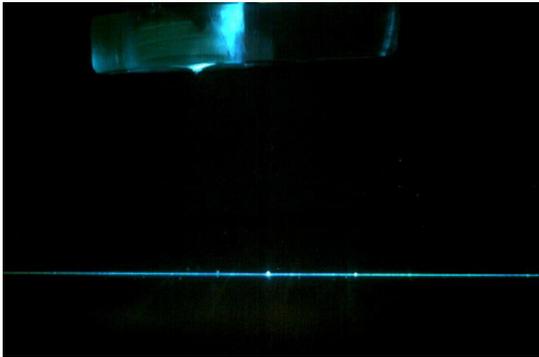
カルマン渦列の作り方



映像提供：桑原邦郎氏

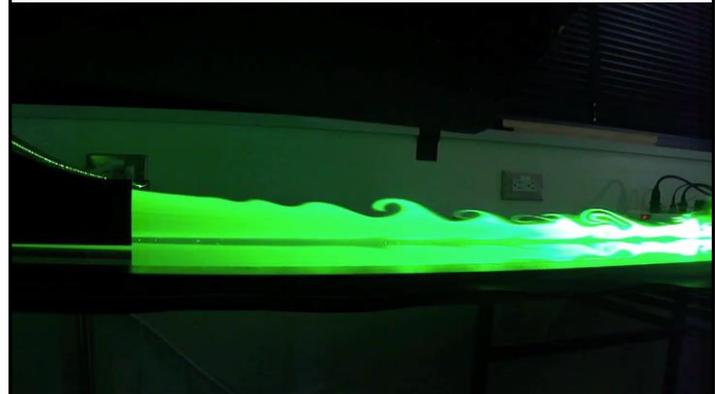
流体のもつ粘性により物体表面に速度勾配の大きいシア層ができ、それが不安定化して渦を巻く。

Kochi Univ. Storm Lab. ダウンバーストによるガストフロント



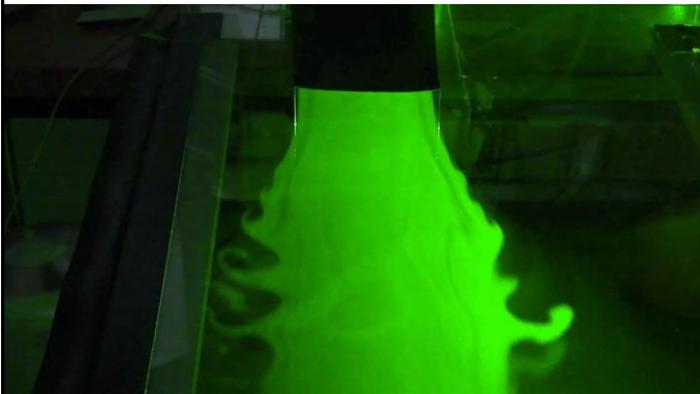
下降気流の周囲に渦輪ができ、それが地表にぶつかって水平方向に拡がっていく。

Kochi Univ. Storm Lab. ケルビン-ヘルムホルツ不安定波



弱い安定成層状態にある気流境界面のシア不安定により波動が発生し、渦へと変化していく

Kochi Univ. Storm Lab. 冷気外出流両端の水平シアー



K-H不安定と同様、シア不安定により波動が発生する。

Kochi Univ. Storm Lab. 川の中にできる渦



Kochi Univ. Storm Lab.

上昇流の役割

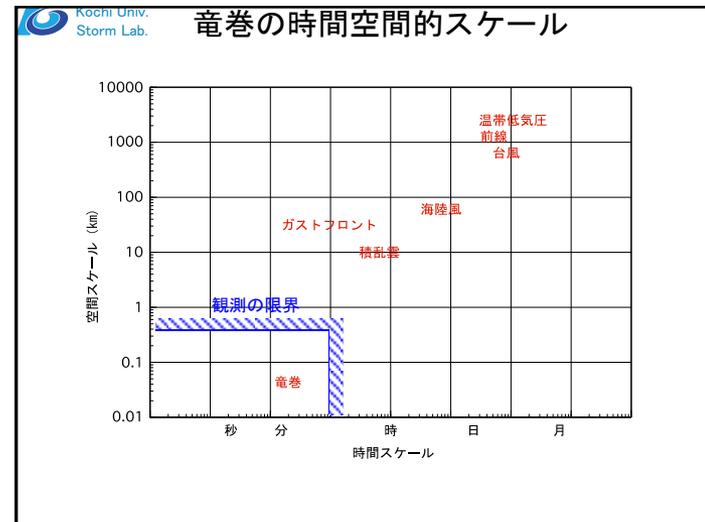


鳴門の渦潮

ヘルムホルツの渦定理：渦は必ず流れの境界から境界まで存在する。
角運動量保存：渦は引き延ばされて細くなると回転が強くなる。



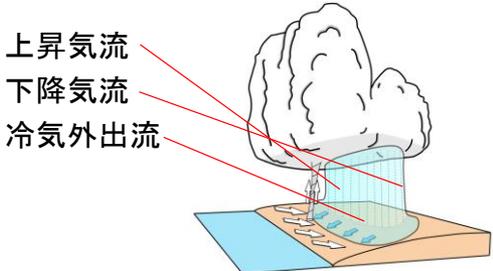
天地をひっくり返すと上昇流が渦を強める役割



Kochi Univ. Storm Lab.

竜巻の発生環境

- 竜巻をもたらす積乱雲の周辺の気流環境を発生環境と考える。

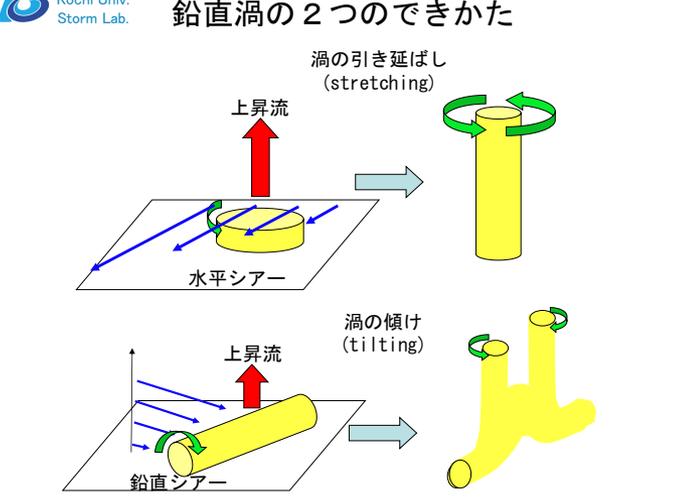


上昇気流
下降気流
冷氣外出流

濱口・佐々 2010

Kochi Univ. Storm Lab.

鉛直渦の2つのできかた



渦の引き延ばし (stretching)

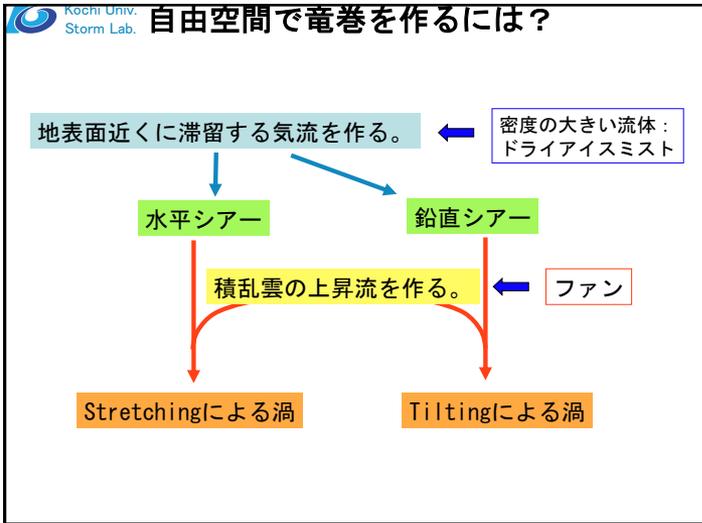
上昇流

水平シアー

渦の傾け (tilting)

鉛直シアー

上昇流



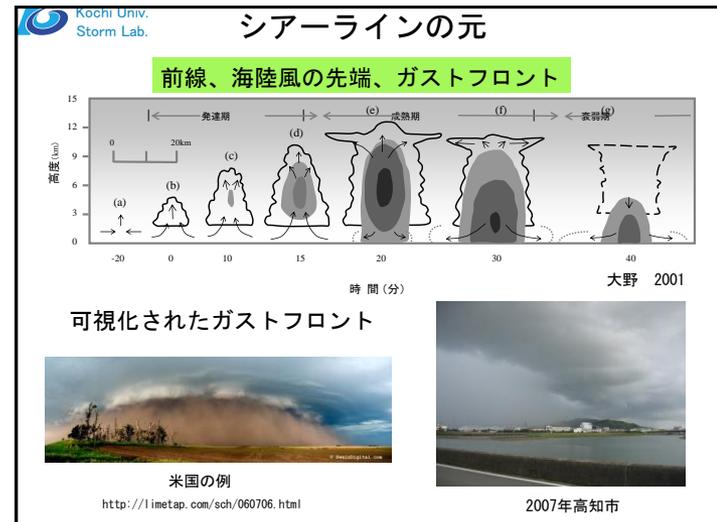
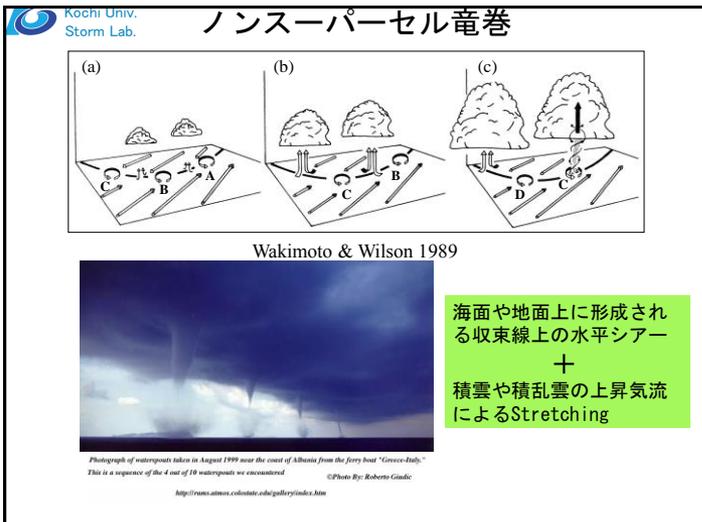
Kochi Univ. Storm Lab. **なぜ実験か？**

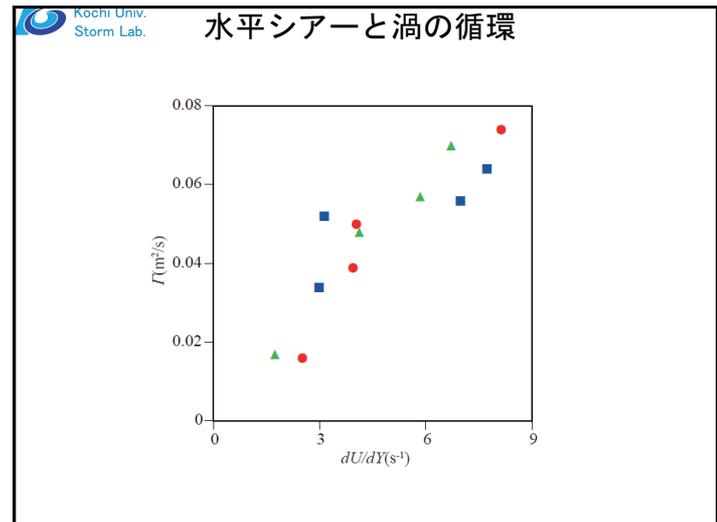
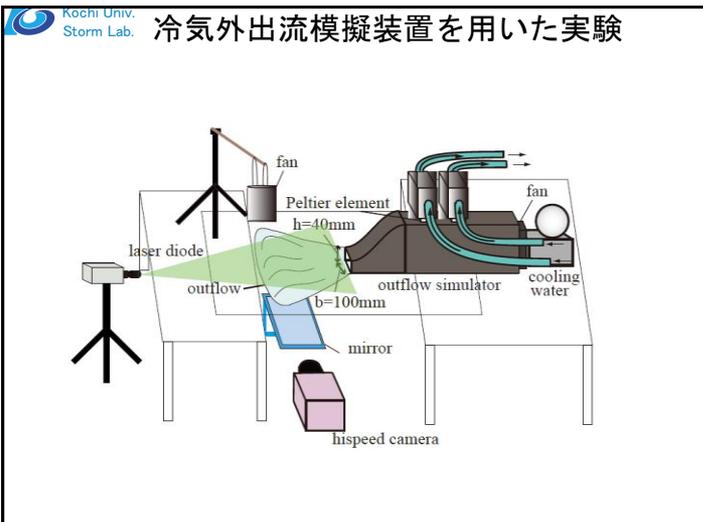
竜巻発生環境および、その生成メカニズムの理解

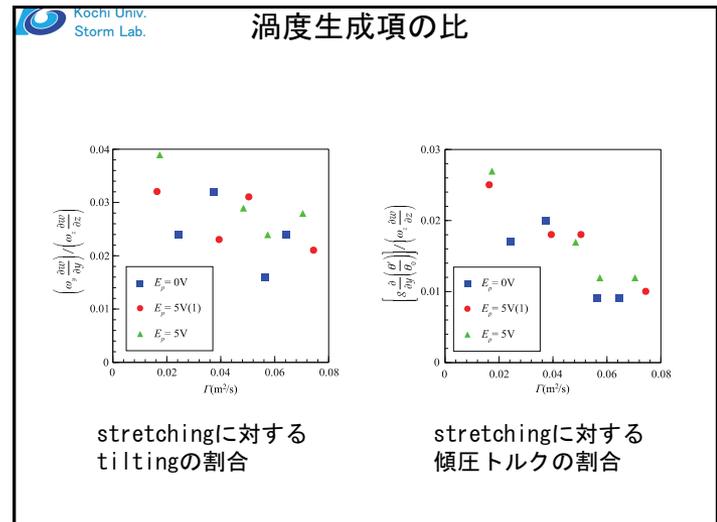
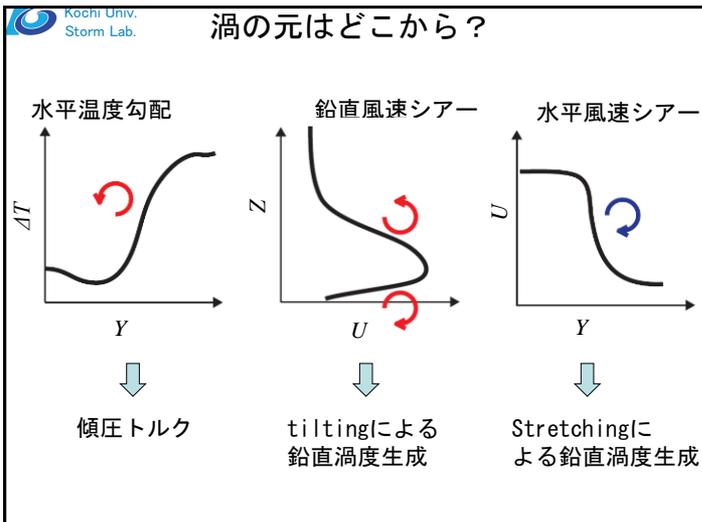
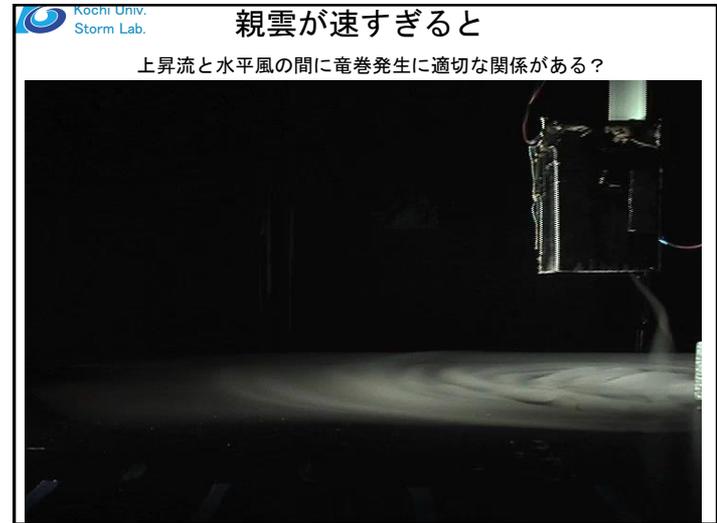
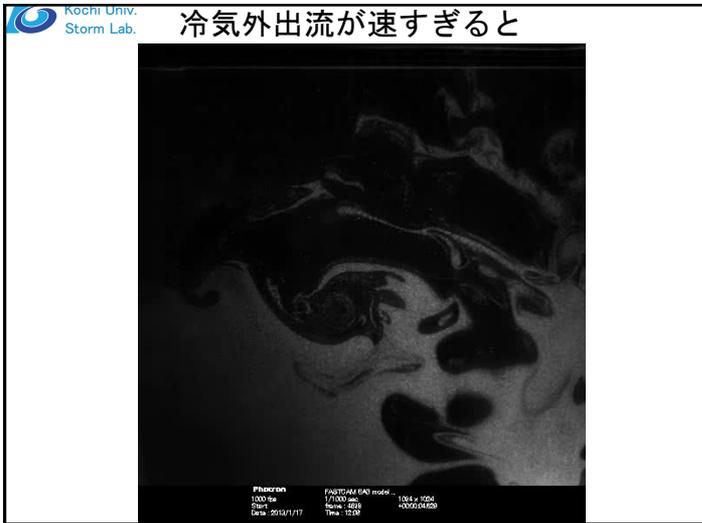
- ・ 実現象の観測、シミュレーションは重要。しかし、場が複雑すぎて竜巻にとって必要な要素はわからない。
- ・ 実験では、降水過程など全ての要素を忠実に再現できない。実現象より単純化した流れ場であるがゆえに、竜巻と似た渦が再現できれば、それが竜巻発生にとって必要な条件である。

実験は竜巻に必要な力学を理解するのに適したツール

箱庭気象学 (木村龍治)







Kochi Univ. Storm Lab. スーパーセル

つくば竜巻の親雲 (宮島氏撮影)

Lemon & Doswell 1979

スーパーセルそのものが、地面付近に竜巻の種となるガストフロントを作り出す。

Kochi Univ. Storm Lab. スーパーセルにおけるメソサイクロンの発達

大気境界層の鉛直シア + 積乱雲の上昇気流による Tilting

(Rotunno 1981)

Kochi Univ. Storm Lab. 水平渦の立ち上げ

Kochi Univ. Storm Lab. スーパーセルの再現

実験パラメータ

1. スワール比=回転流/上昇流
2. メソサイクロン底部の高さ

Lemon & Doswell 1979

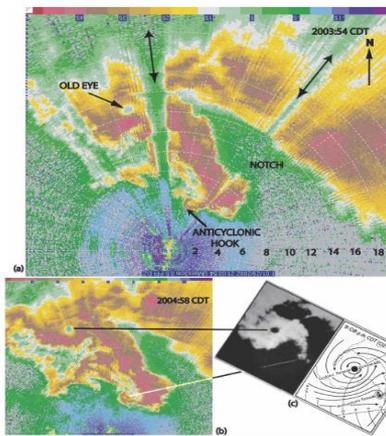
単一の竜巻渦



互いに逆回転する一対の渦



互いに逆回転する一対の竜巻観測例



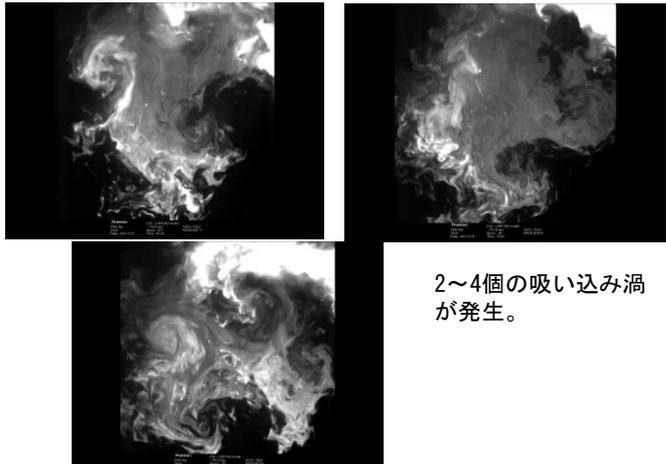
竜巻形成にはメソサイクロンの回転ではなく地表付近のガストフロントにおける水平シアーが寄与

Bluestein et al. 2007

多重渦の発生

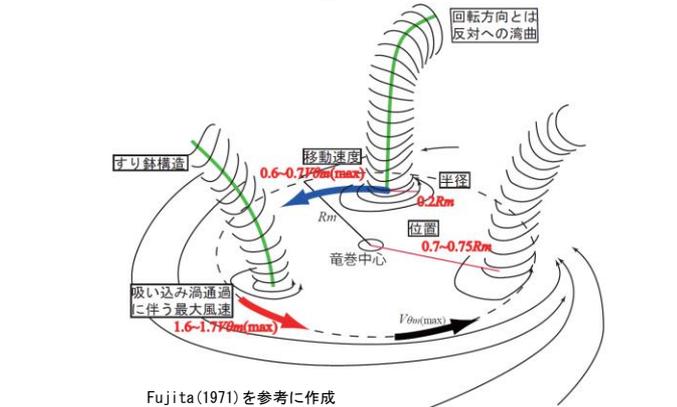


Kochi Univ. Storm Lab. **多重渦竜巻の水平断面の様子**



2~4個の吸い込み渦が発生。

Kochi Univ. Storm Lab. **多重渦竜巻のモデル図**



Fujita(1971)を参考に作成

回転の強さが上昇流に比べて相対的に強くなると、回転流の中のシア不安定により小さな渦（吸い込み渦）が発生する。

Kochi Univ. Storm Lab. **実際の多重渦竜巻**

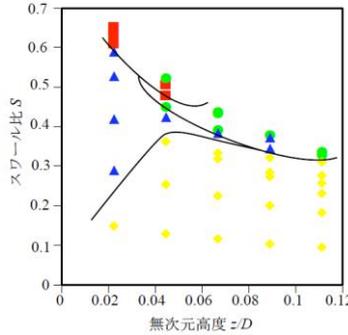


2011年8月21日 福岡竜巻



2012年5月6日 つくば竜巻

Kochi Univ. Storm Lab. **竜巻発生状況のパラメータ依存性**



① 竜巻が一つできる場合
② 互いに逆回転する一対の渦ができる場合
③ 多重渦ができる場合
④ 竜巻が発生しなかった場合

生成パターンは、メソサイクロンの地表面からの無次元高度 z/D とスワール比 S によって異なる

→ 竜巻をもたらすスーパーセルの検出精度向上

おわりに

雲そのものが再現できない大きな制約条件下にあっても、流体力学的な基本的流れ場を模擬すれば、竜巻の発生環境の調べることは可能。

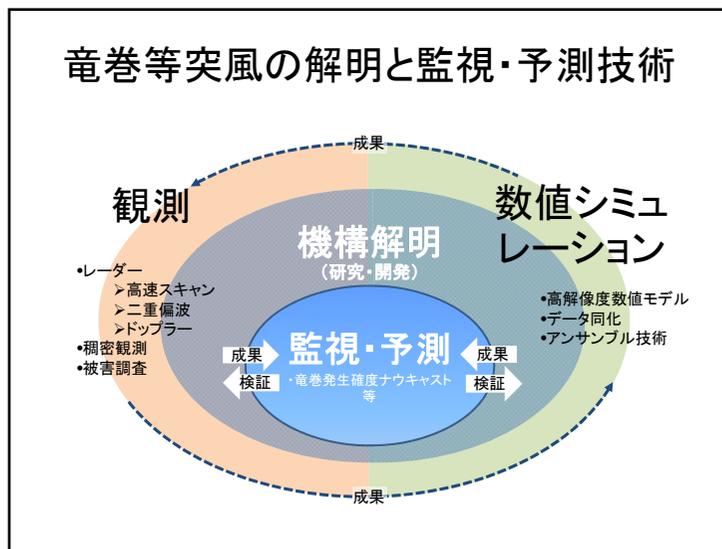
竜巻という現象を直感的に理解するのに竜巻の再現実験は有用。

パラメータワークが容易なため、観測結果の解釈などを利用した予測精度の向上が期待できるかも。



はじめに

- 竜巻等突風や局地豪雨から身を守るためには、相手を知ることが不可欠です。
- 竜巻等突風はどうして発生するのか、スーパーコンピュータによる発生シミュレーション、気象レーダー等最新のリモートセンシング測器を駆使した内部構造の観測等、発生機構解明に向けた研究が進展しています。同時に、既存の観測システムで捉える事の難しい竜巻等突風現象の解明には、専門家による被害の実態調査も不可欠です。
- 当講演のテーマは「竜巻の観測」ですが、「観測」と密接に関連する以下の内容を、2012年5月6日、茨城県つくば市に大きな被害をもたらした竜巻の事例等を通して紹介します。
 - ① 観測データを活用した実況監視と直前探知の現状
 - ② シミュレーション研究による竜巻発生機構解明の取り組み
 - ③ 観測で明らかとなってきた竜巻の発生過程や構造
 - ④ 現地被害調査による風速推定

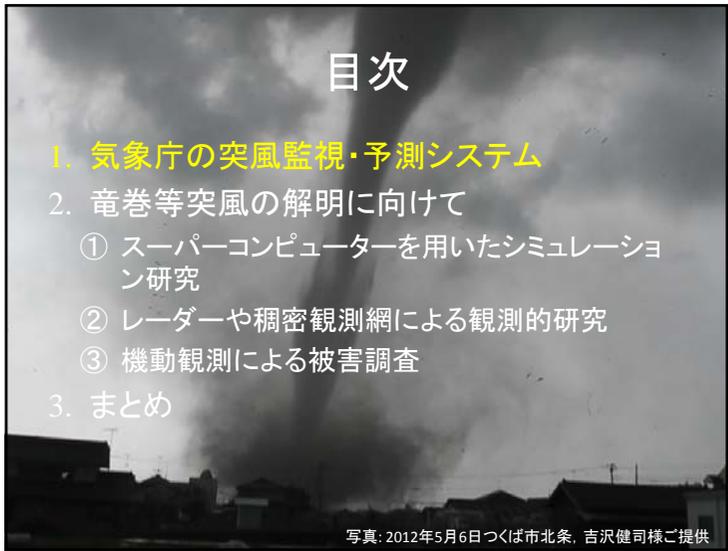


目次

1. 気象庁の突風監視・予測システム
2. 竜巻等突風の解明に向けて
 - ① スーパーコンピュータを用いたシミュレーション研究
 - ② レーダーや稠密観測網による観測的研究
 - ③ 機動観測による被害調査
3. まとめ

2012年5月6日につくば市周辺で発生した竜巻を中心に紹介します。

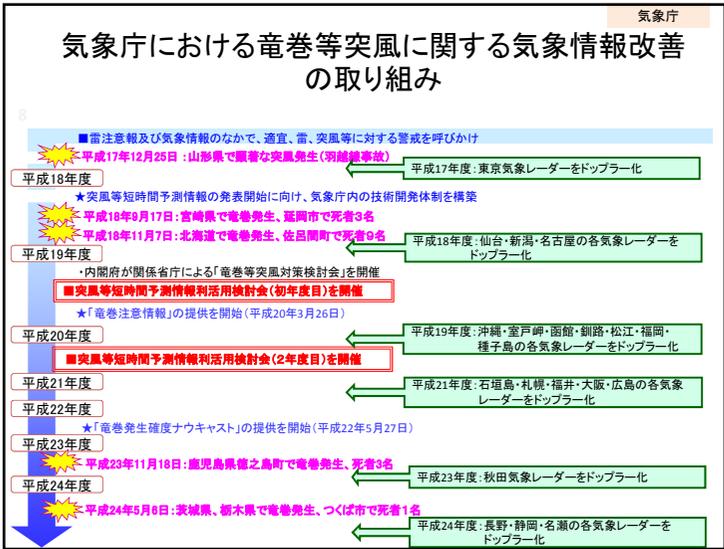
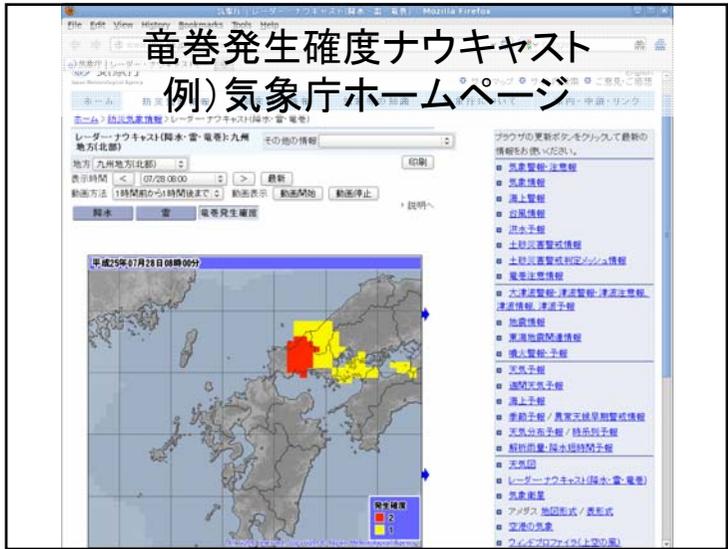
写真: 2012年5月6日つくば市北条, 吉沢健司様ご提供



気象庁

積乱雲に伴う激しい現象に関する気象情報

種類	提供開始時期	形式・頻度
預告的に発表する気象情報		文章形式の気象情報 必要時に随時発表
雷注意報		
竜巻注意情報	平成20年3月	
降水ナウキャスト	平成16年6月	分布図形式の予測情報 5分毎に常時提供 (平成23年3月～)
竜巻発生確度ナウキャスト	平成22年5月	分布図形式の予測情報
雷ナウキャスト	平成22年5月	10分毎に常時提供



気象庁

竜巻発生確度ナウキャストの発表形式

9

解析

解析時間 10分毎
格子間隔 10km

予測

予報時間 10分毎に
60分先まで
格子間隔 10km

「発生確度」という言葉を使い、ドップラーレーダー観測などのデータから推定した「竜巻などの突風が今にも発生する(または発生している)可能性の程度」を示す。

発生確度

発生確度 2	竜巻などの激しい突風が発生する可能性があり注意が必要である。 適中率: 5~10%程度 捕捉率: 20~30%程度 発生確度2となっている地方(県など)に竜巻注意情報が発表される。
発生確度 1	竜巻などの激しい突風が発生する可能性がある。 適中率: 1~5%程度 捕捉率: 60~70%程度 発生確度2の地域よりの中率は低いが見逃しが少ない。

気象庁

突風に関する気象情報が対象とする現象

10

発達した積乱雲に伴う激しい突風 竜巻、ダウンバースト、ガストフロント

情報ではわかりやすさのために「竜巻」に集約している

竜巻とその被害の様子

赤矢印: 空気の流れ
黒矢印: 樹木等の倒壊方向
白点線: 竜巻の経路

ダウンバーストとその被害の様子

赤矢印: ダウンバーストの空気の流れ
黒矢印: 樹木等の倒壊方向

ガストフロント

赤矢印: 周囲より冷たくて重い空気が周囲へ流出する流れ
黒矢印: 乱れた気流

気象庁

竜巻などの激しい突風の予測

11

- 竜巻・ダウンバースト・ガストフロントによる突風を対象とする。
- 現象の規模が小さいため、現象を直接観測したり、発生を直接予測することはできない。

↓

- 数値予報資料・レーダーの観測等から、「**現在竜巻等が発生しているかもしれない**」、「**今にも発生するかもしれない**」ことの**可能性(発生確度)**を推定する。

気象庁

竜巻発生確度ナウキャストの技術

12

メソサイクロン
ドップラーレーダーにより積乱雲中の回転(メソサイクロン)を検出

レーダーエコー指数
レーダー観測から積乱雲の発生場所・発達状況を解析

MSM突風関連指数
数値予報から竜巻が発生しやすい大気環境を解析

複合判定または単独判定 (TR型突風関連指数 DB型突風関連指数)

突風危険指数
激しい突風が発生する可能性を表す指数

解析

解析時間 10分毎
格子間隔 10km

2つの階級で竜巻などの激しい突風が発生する可能性を表す

- 発生確度2
- 発生確度1

予測

予報時間 10分毎に
60分先まで
格子間隔 10km

1時間先までの移動を予測

- 発生確度2
- 発生確度1

移動予測
降水ナウキャストの移動ベクトルを利用

気象庁

ドップラーレーダーによるメソサイクロンの自動検出

ドップラー速度で見た渦のパターン

- 竜巻は小規模の現象なので気象ドップラーレーダーで直接捉えることはできない。
- 竜巻の親雲となる積乱雲は、直径数km～十数km、寿命は数十分～1時間程度のメソサイクロンといわれる渦をもつ、スーパーセルであることが多い。
- 気象ドップラーレーダーでは、メソサイクロンを捉えることで竜巻監視を目指している。
- ただし、竜巻をもたらす積乱雲の中には、メソサイクロンを伴わないもの(非スーパーセル)もある。

気象庁Cバンド・ドップラーレーダー網

東京レーダー

http://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/radar/radar_haiti.gif

国土のほぼ全域をカバーするようにレーダーを配置
(上記以外に9空港に空港気象ドップラーレーダーを配置)

気象庁

メソサイクロン自動検出の有効性

竜巻事例(26事例)

気象ドップラーレーダーの速度分布図でメソサイクロンに相当する渦を確認(20事例)

自動検出プログラムで検出(18事例)

- 1996～2006年の空港気象ドップラーレーダーの探知範囲内で発生した26の竜巻事例を解析
- 20/26事例で竜巻に対応して、渦(積乱雲の中の回転)を気象ドップラーレーダーの速度分布図から専門家が確認 → スーパーセル竜巻
- 18/26事例をメソサイクロン自動検出プログラムが検出(約7割)

日本における竜巻監視として、ドップラーレーダーによるメソサイクロン自動検出が有効

気象庁

レーダーエコー指数

top: 頂高度(km)

zmax: 最大反射強度 (dBZ)

rain: 最下層の降水強度(mm/h)
(通常使われるレーダー強度)

基本的な高度2km

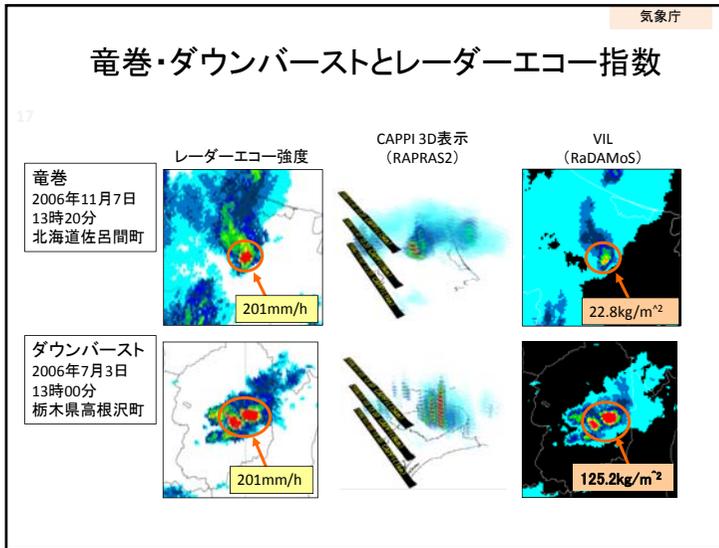
積算vil

反射強度Zから雨量Mに変換
 $M = 3.44 \times 10^{-4} Z^{1.47}$

om: 雨水の重心高度(km)
$$= \frac{\sum (M(h) \cdot h \cdot \Delta h)}{\sum (M(h) \cdot \Delta h)}$$

vil: 鉛直積算雨量(kg/m²) = $\sum (M(h) \cdot \Delta h)$

vild: 鉛直積算雨量密度(g/m³) = vil ÷ top



気象庁

突風関連指数

18

- 竜巻やダウンバーストなどの突風が発生しやすい環境場を表した指数。
- 成層の熱的な不安定性や鉛直シアーなどから算出した指数が多い。
 - 現在11個の指数(CAPE, SReH, EHI等)を監視に利用
- 数値予報GPVから計算し、指数の時系列・面的な把握ができると共に、予想としても利用できる。
 - GSMから計算した指数 → 予告的気象情報のための予測資料
 - MSMから計算した指数 → 実況監視の参考突風危険指数の計算

気象庁

突風危険指数の計算

19

竜巻が発生しやすい大気環境

14:00

レーダー観測

14:10

積乱雲の発達状況

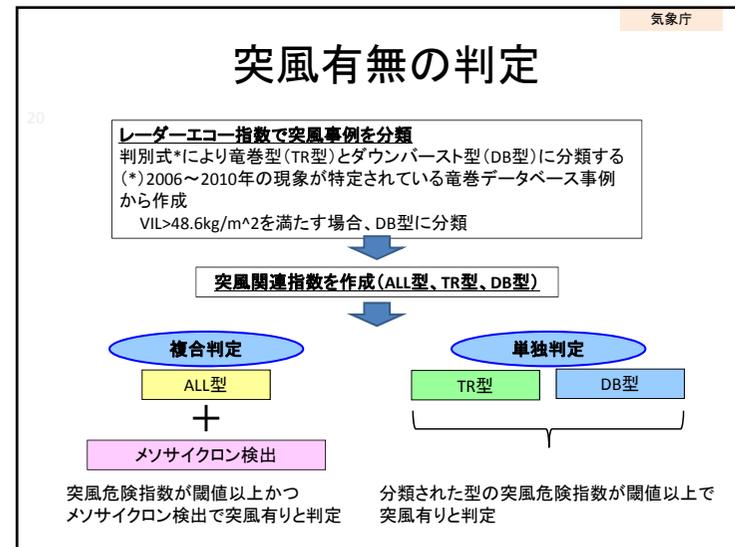
突風危険指数

14:10

数値予報による指数とレーダー観測を使って5分毎に計算する。

突風危険指数(0~100)が高いと竜巻が発生する(発生している)可能性がある。

- 統計モデル
 - ロジスティック回帰分析
- 統計期間
 - 2006年~2010年の5年間
- 目的変数
 - (ALL型) 気象庁突風DBIによる突風の有無
 - (TR型) 線形判別式により竜巻型に分類される突風の有無
 - (DB型) 線形判別式によりダウンバースト型に分類される突風の有無
- 説明変数候補
 - MSM突風関連指数
 - レーダーエコー指数
- 計算領域
 - 日本全国を分割した10km格子
 - 突風のあった格子のみを利用し、全国一律の予測式を作成する



気象庁

突風有無の複合判定手法

21

➢メソサイクロン(MC)とALL型突風危険指数のAND条件が有効である。
(それぞれ単独では的中率が非常に低くなる)
➢「MCの時刻・場所/ALL型突風危険指数の時刻・場所」の対応を厳密に点(10km格子単位)で考えるとAND条件が成立しない場合が多い。

■事前に発現した指標の周囲100km以内では1時間そのポテンシャルが続くと仮定する
(範囲・時間を広く考える)
■その範囲・時間内にもう一方の指標が発現したら、その地点・時刻でAND条件成立とする
(場所・時刻を点で見る)

気象庁

竜巻発生確度ナウキャスト解析手法

22

- 発生確度2背景の解析
 - メソサイクロンとALL型突風危険指数の複合判定

第一指標	AND	第二指標	⇒	発生確度2背景
MC検出		ALL型 ≥ 8		半径40km領域(判定成立後1時間継続)
ALL型 ≥ 10		MC検出		半径40km領域(判定成立後1時間継続)

- TR型/DB型突風危険指数の単独判定

条件	⇒	発生確度2背景
TR型 ≥ 31 OR DB型 ≥ 36		半径40km領域(判定成立後1時間継続)

- 発生確度1背景の解析

条件	⇒	発生確度1背景
ALL型 ≥ 8		半径100km領域(判定成立後1時間継続)
TR型 ≥ 31 OR DB型 ≥ 36		半径100km領域(判定成立後1時間継続)
MC検出		半径100km領域(判定成立後1時間継続)

気象庁

竜巻発生確度ナウキャスト解析手法

23

発生確度1背景
条件を満たした格子の周辺100km

発生確度2背景
①メソサイクロンとALL型複合判定
②TR型/DB型単独判定
いずれかを満たした格子の周辺40km

(a)発生確度1・2背景

判定を満たした格子

発生確度1、2の背景上で降水強度条件を満たす格子を抽出

【降水強度条件】

- 発生確度2
20mm/h以上かつ
半径20km以内に100mm/h以上が存在する1km格子を含む10km格子
- 発生確度1
20mm/h以上の1km格子を含む10km格子

(c)発生確度1・2格子の判定

(b)気象レーダー(降水強度)

気象庁

竜巻発生確度ナウキャスト予測手法

24

解析時刻

①発生確度1背景及び2背景は、そのままの位置で判定時刻から1時間先まで継続させる。
②降水ナウキャストの予報値による降水強度条件から発生確度1及び2の格子を決定する。

10分予測

20分予測

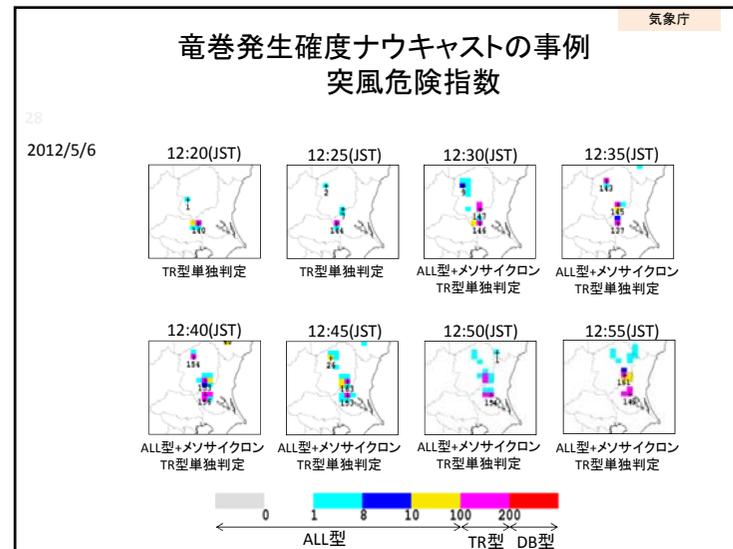
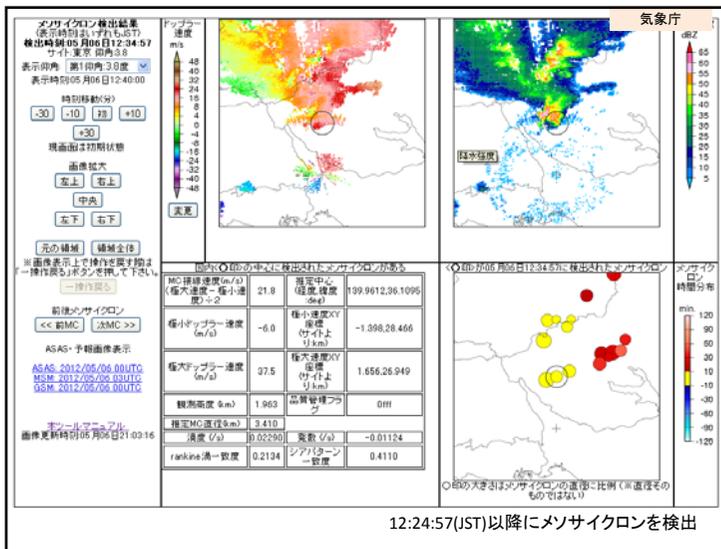
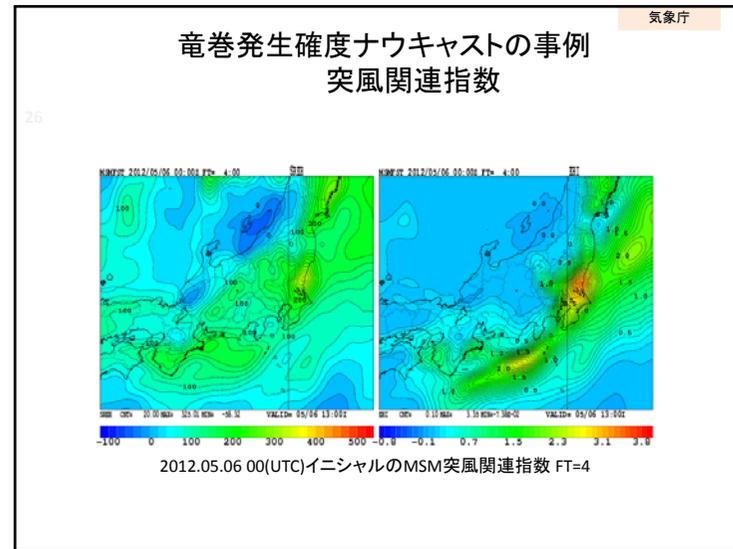
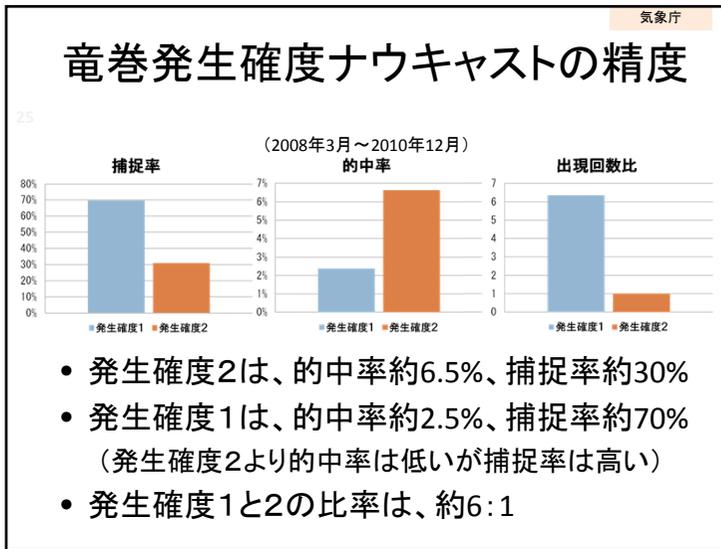
30分予測

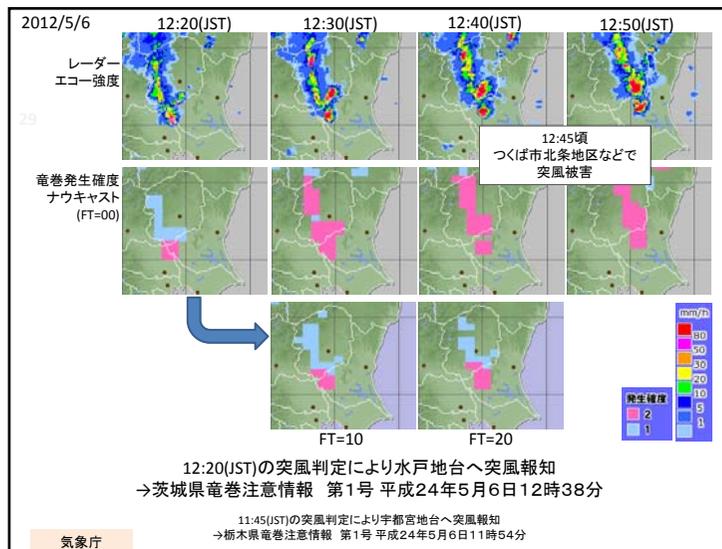
40分予測

50分予測

60分予測

40分予測で発生確度2が消えているのは、発生確度2背景の判定時刻から1時間が経過したため。





突風に関する気象情報の利用

気象庁

30

電巻発生確度ナウキャスト (常時10分毎)

気象情報 (随時) 前日や当日朝など

雷注意報 (数時間前)

電巻が今にも発生する (または発生している) 可能性がある

電巻注意情報

この段階では何も表示されない

- 事前に電巻の発生が予想される場合には、半日～1日前に予告的な気象情報が発表され「電巻などの激しい突風」への注意が呼びかけられる。
- 電巻が発生する可能性のある数時間前には雷注意報が発表される。
 - この時点で電巻発生確度ナウキャスト(*)の監視を強めるのが効果的。
- 電巻が発生しやすい気象状況になると電巻発生確度ナウキャストで発生確度1や発生確度2が現れる。
- 発生確度2が現れた地域(県など)には電巻注意情報が発表される。
 - 電巻注意情報が発表された場合には、電巻発生確度ナウキャスト(*)を併せて利用することにより、危険な地域や今後の予測を詳細に把握することができる。
 - 周囲の空の状況に注意し、空が急に暗くなるなど、積乱雲が近づく兆候を確認したら、頑丈な建物に入るといった身の安全を図る行動を取ることが大切。

(注意) 発生確度1の段階で電巻が発生することや発生確度1や2とならずに電巻が発生してしまうこともある。

(*) 気象庁HP、防災情報提供センター(携帯版)で利用可能

目次

1. 気象庁の突風監視・予測システム
2. 電巻等突風の解明に向けて
 - ① スーパーコンピューターを用いたシミュレーション研究
 - ② レーダーや稠密観測網による観測的研究
 - ③ 機動観測による被害調査
3. まとめ

写真: 2012年5月6日つくば市北条、吉沢健司様ご提供

2012年5月6日の大気環境

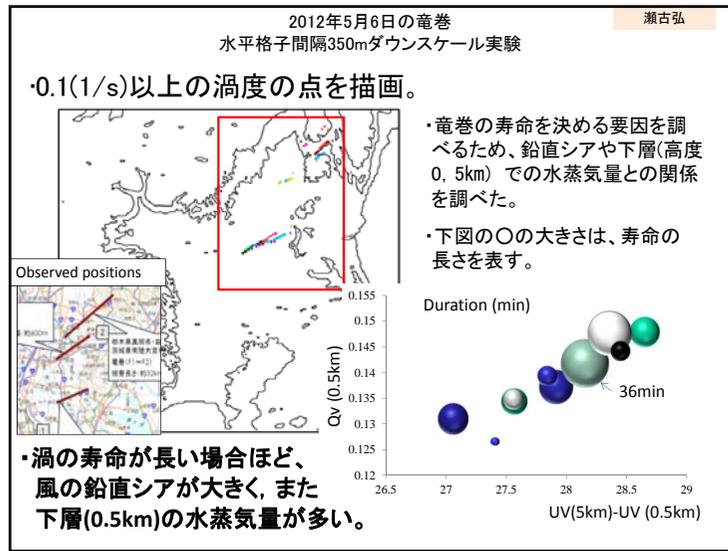
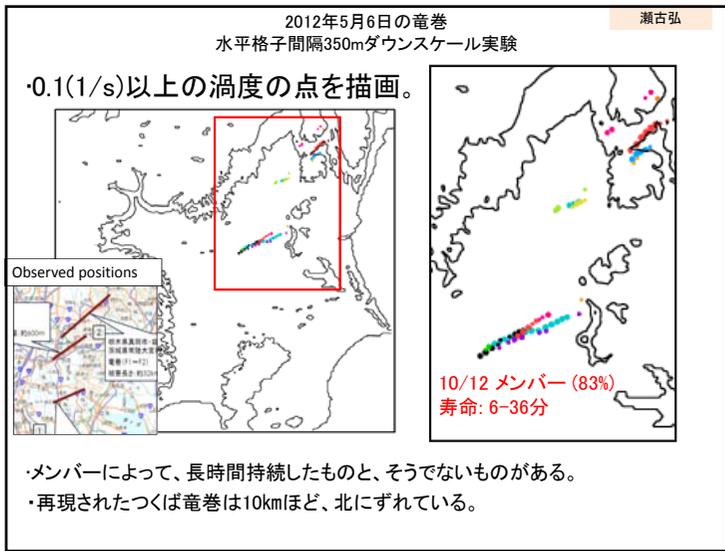
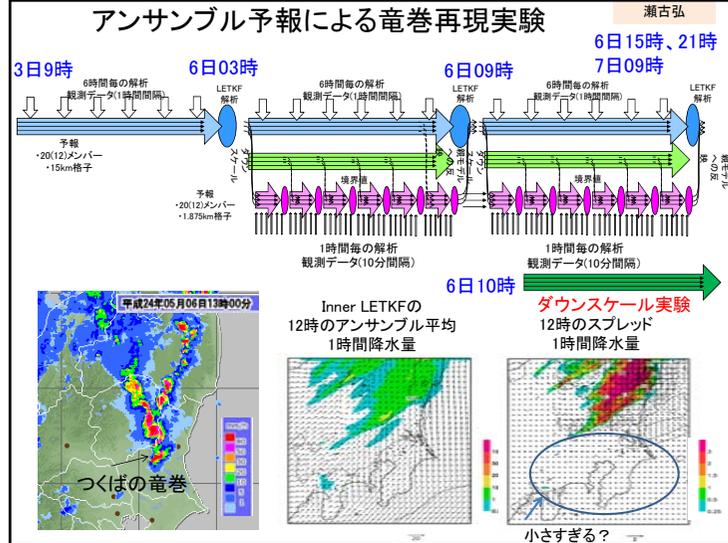
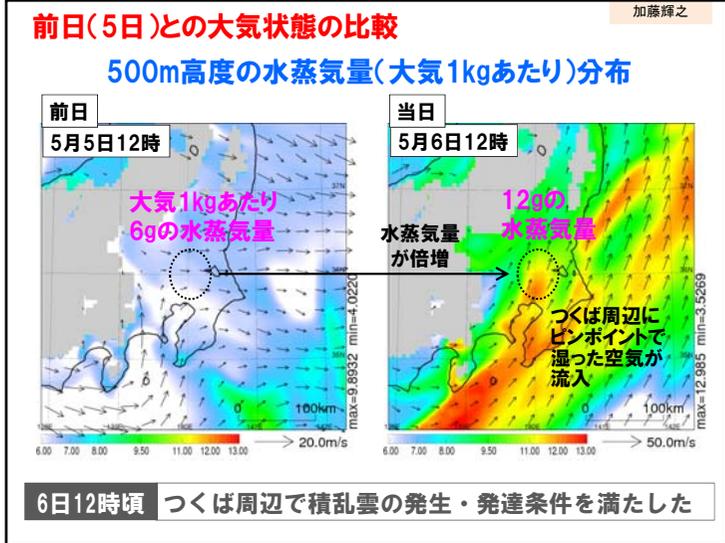
加藤輝之

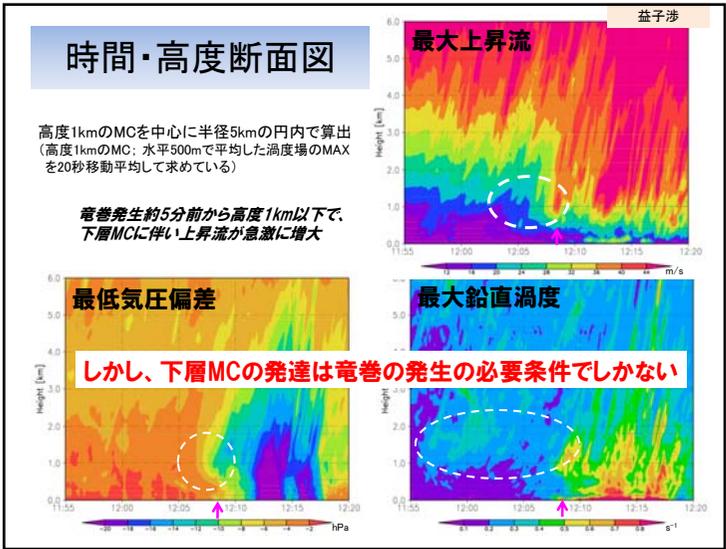
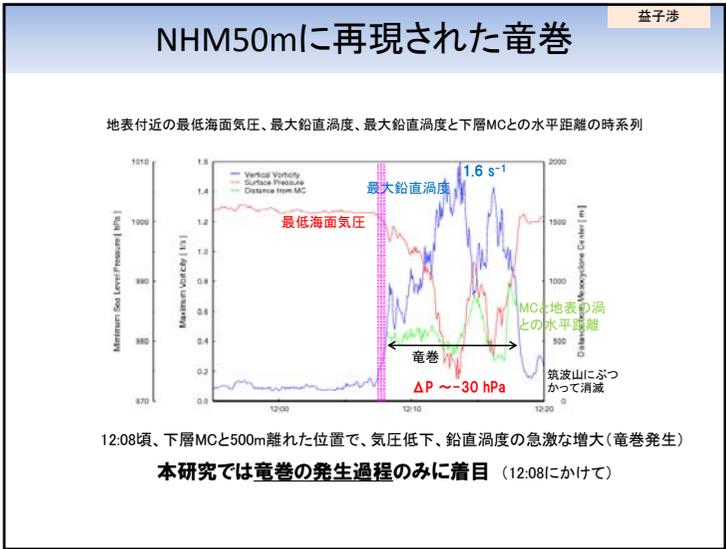
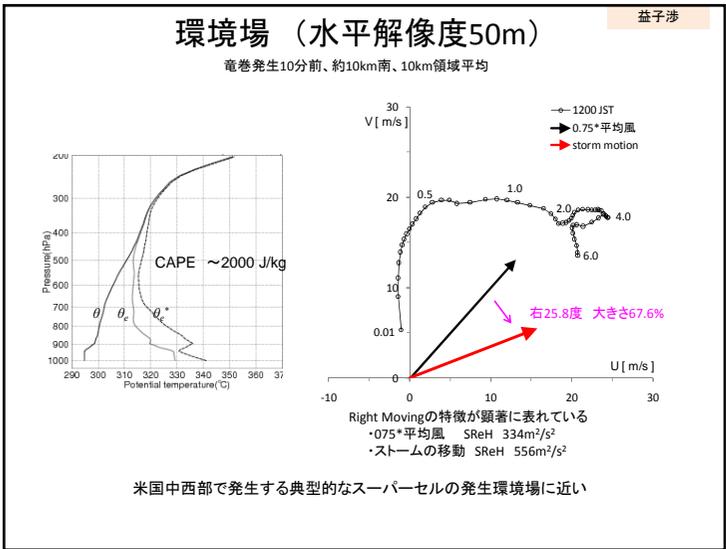
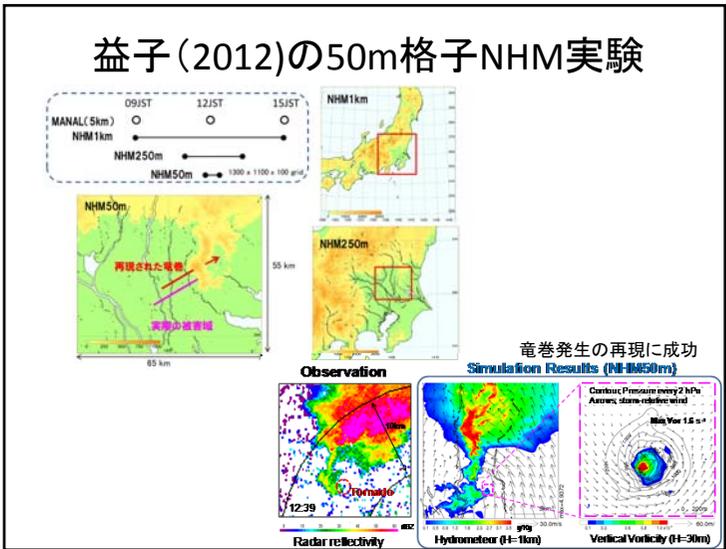
つくばでのアメダス観測と上空の大気状態(解析値)

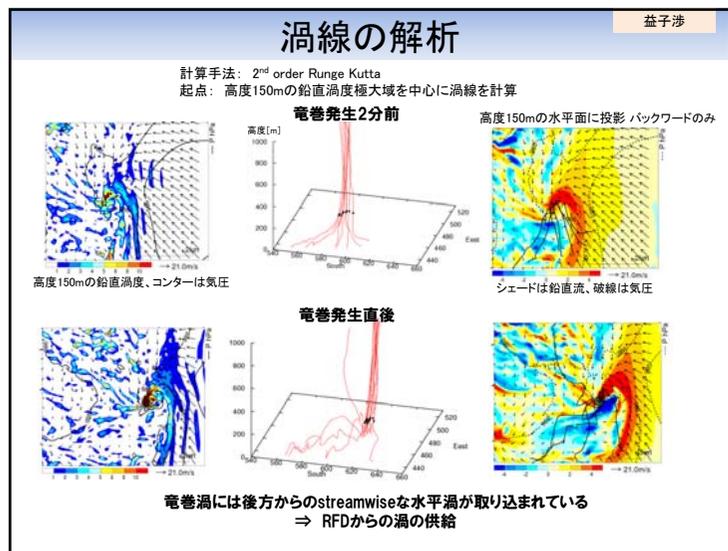
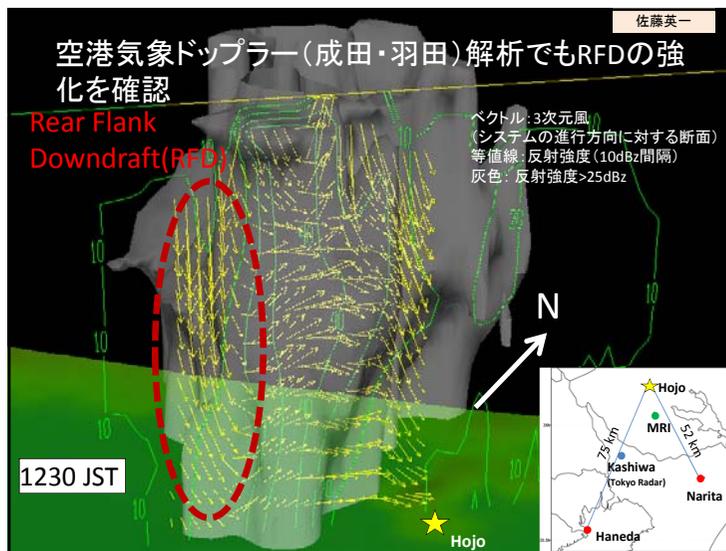
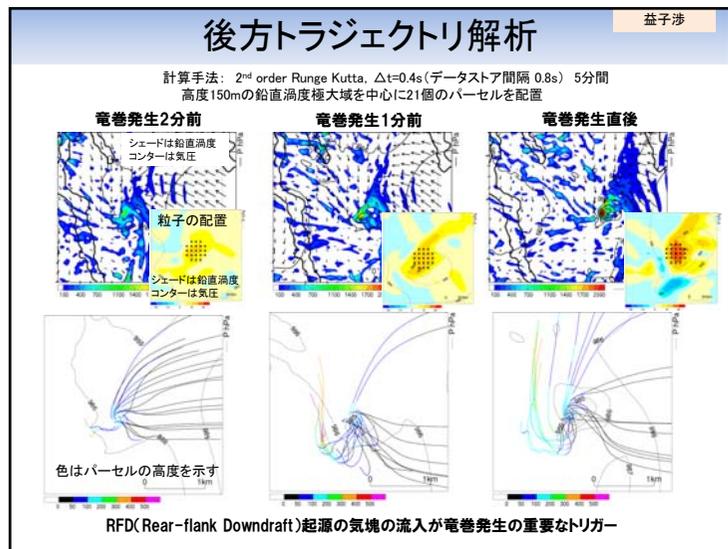
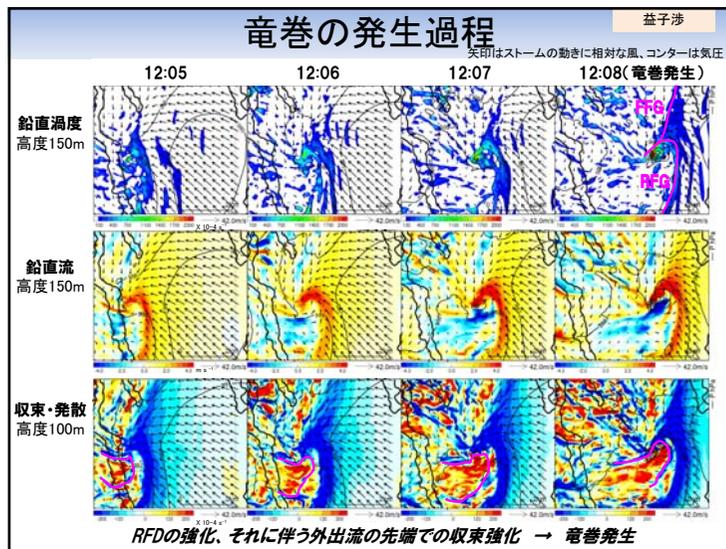
	5日12時	6日12時	差
上空(5600m)の気温	-17度	-18度	ほぼ一定
地上気温	25.9度	25.6度	ほぼ一定
地上と上空の気温差	42.9度	43.6度	ほぼ一定
高度500m水蒸気量 (大気1kgあたり)	6g	12g	↑6g
上空(5600m)の風向	西風(270度)	南西風(225度)	
地上付近の風向	西北西風(290度)	南風(180度)	
地上と上空の風向差	20度	45度	↑25度

維持 地上と上空の大きな気温差(40度以上)は変わらない

変化 下層の水蒸気量が倍増、風向きの差(渦の要因)が増大







益子 渉

まとめ

- つば竜巻は典型的なスーパーセル竜巻の発生過程を示していた
 - ✓ フック状の降水物質の分布の先端で発生
 - ✓ 下層MCの発達後に発生
 - ✓ RFG上で発生

＜スーパーセル竜巻の発生機構(竜巻発生のトリガー)について＞

- RFDの強化がみられ、それに伴う外出流の流入
 - ✓ streamwiseな水平渦の供給
 - ✓ 水平収束の強化(渦の鉛直方向のストレッチング)

目次

1. 気象庁の突風監視・予測システム
2. 竜巻等突風の解明に向けて
 - ① スーパーコンピューターを用いたシミュレーション研究
 - ② レーダーや稠密観測網による観測的研究
 - ③ 機動観測による被害調査
3. まとめ

写真: 2012年5月6日 つば市北条, 吉沢健司様ご提供

山内 洋

レーダーによる雨・風の観測

アンテナ

送信電波

反射電波

ドップラー速度

レーダービーム

雲

風

風とともに流れる散乱体(雨などの降水粒子、飛散物)

電波の強さ

周波数のずれ(ドップラー効果)

雨

風

渦

近づく

遠ざかる

ドップラー速度(風の近づく/遠ざかる成分)

山内 洋

二重偏波レーダー

垂直偏波

水平偏波

送信

受信

降水粒子

振幅の比 → 粒子の形【反射因子差Zdr】

位相の差 □ 降水強度(減衰の影響なし)
【偏波間位相差 Φ_{dp} 、変化率Kdp】

位相と振幅の差の変動 □ 粒子の一様性
【偏波間相関係数 ρ_{hv} 】

- 降水強度の推定精度を大幅に向上。
 - 高い測定精度が必要 → 多数の測定サンプル数が必要。
 - 従来の数倍の観測時間を要する。

山内洋

Cバンド固体素子二重偏波レーダー

- 平成19年、狭帯域化を目的に総務省が固体素子二重偏波気象レーダー*1を開発*2。
 - 狭帯域化に成功
 - 観測データにさまざまな虚像が混入
- 平成20年、気象研究所に管理換し、実用上の問題点の克服を目指す。
 - 深刻な問題点をすべて克服。
 - 高速・高精度の二重偏波観測を実現。

従来型レーダー

固体素子レーダー

*1: 現業利用可能な送信出力をもったCバンド固体素子気象レーダーとしては世界初。
 *2: 「クライストロン送信機デジタル波形成形技術及び固体素子等を用いたレーダー技術の研究開発」（平成17年～平成19年）

山内洋

構成

- 基本構成は、従来と同じ
- コンパクトな送信機（水平、垂直）
- 二重偏波に対応したアンテナ

アンテナ

送信機（水平偏波）
信号処理装置
送信機（垂直偏波）

山内洋

レーダーによる散乱体の判別

		散乱体の一様性	
		高い	低い
形	球状	小粒の雨	竜巻の飛散物
	扁平	大粒の雨	鳥や虫

ドップラー速度(m/s)

反射強度Z(dBZ)

散乱体の一様性

散乱体の形

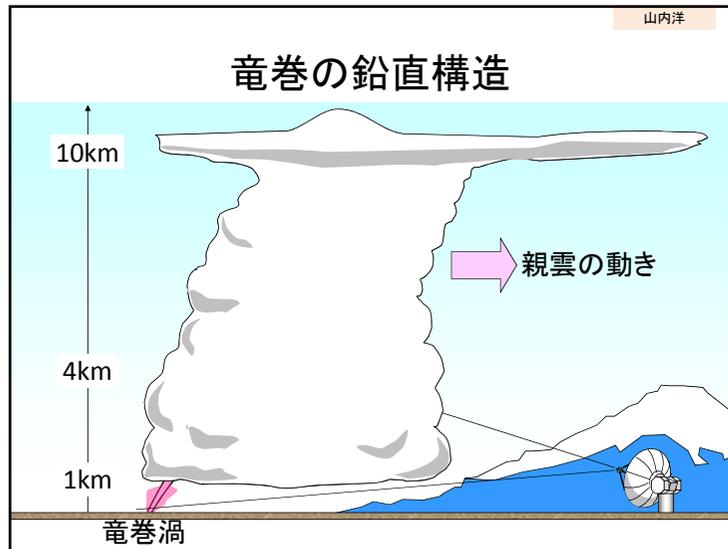
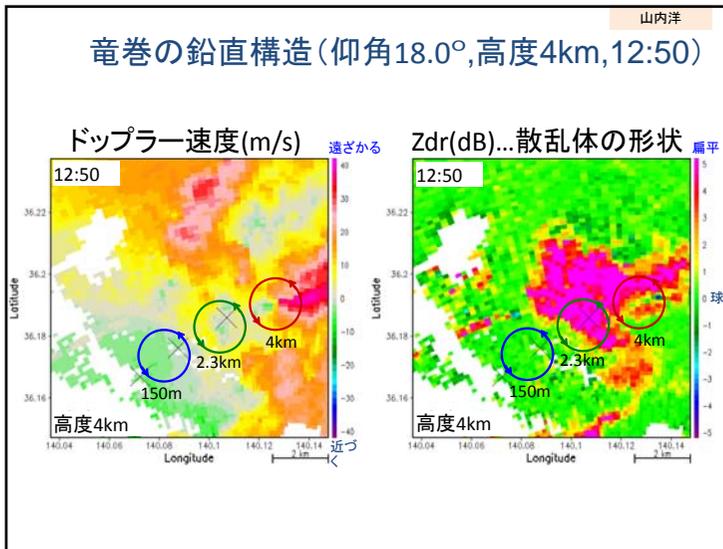
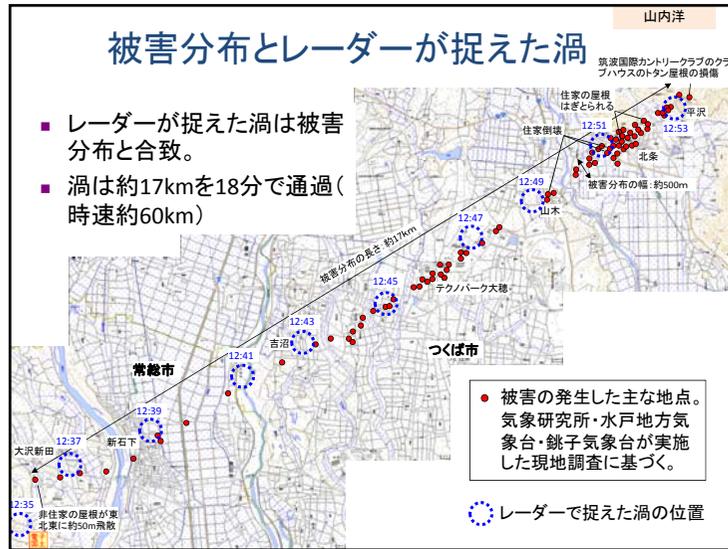
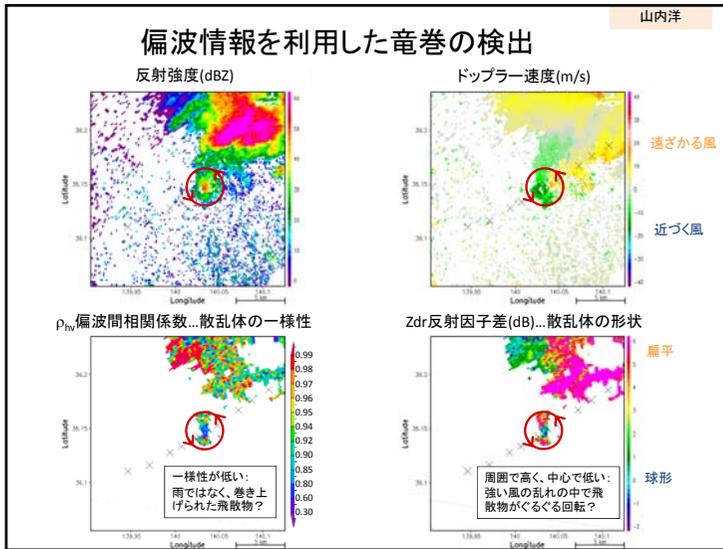
山内洋

気象研究所と被災地の位置関係

竜巻の被害域
距離15km

最新型 固体素子二重偏波レーダー

イメージ
積乱雲
竜巻
被害を受ける範囲
竜巻の経路
竜巻の移動方向
気象庁リーフレット「竜巻から身を守る」より



山内洋

気象研固体素子二重偏波レーダー観測 まとめ

- つくば竜巻を、最新型の二重偏波レーダーで捉えた。強い竜巻を近距離から詳細に観測したことは国内初。
- 竜巻の親雲は、スーパーセルであった。
- レーダーが捉えた渦の軌跡は、地上の被害分布と合致。
- 竜巻は、進行方向に傾きつつ、少なくとも上空4kmまで存在。
- 竜巻が巻き上げた飛散物は、少なくとも上空3kmまで到達。
- 今後、メカニズム解明と監視技術の向上に取り組む。
 - スーパーセルから竜巻が生じる引き金は何か。
 - 飛散物を利用した、竜巻の監視技術の開発。
 - スーパーセルの発生予測技術の開発。

楠研一

小型・高速スキャンレーダーの必要性

SバンドやCバンドの現業大型レーダーによる時空間スケールの小さい顕著現象探知の問題点

地球の丸み
レーダー分解能の低下
地形クラッタ
地面付近のレーダー電波の遮断

国土交通省
XRAINシンポジウム(2013/7/3)参考資料
http://www.mlit.go.jp/common/001000775.pdf

XRAIN

国土交通省によるX帯二重偏波レーダー網(試験運用中)

XRAINの整備状況(平成25年度一般配信予定含む)

【凡 例】

- 一般配信中 27基
- 平成25年度一般配信開始予定 8基
- 計35基

※円は半径60kmの定量観測範囲を示す。

国土交通省
XRAINシンポジウム(2013/7/3)参考資料
http://www.mlit.go.jp/common/001000775.pdf

XバンドMPレーダーの特徴

- 高分解能(Xバンドの特性)**
 - Xバンドレーダーは、Cバンドレーダーに比べ波長が短く、高分解能な観測が可能。(Xバンド: 8~12GHz, Cバンド: 4~8GHz)
- 高いリアルタイム性(MPLレーダーの特性)**
 - 2種類の偏波(水平・垂直)を送信することで、雨粒の形状等を把握し、雨滴の扁平度等から雨量を推定。
 - 地上雨量計による補正なく、高精度な雨量観測データをほぼリアルタイムで配信することが可能。
- 風観測が可能(ドップラー機能)**
 - ドップラー機能により、雨滴の移動速度を計測することで風の観測も可能。

XバンドMPレーダー全景(能美サイト)
レーダーアンテナ(埼玉サイト)

垂直偏波
水平偏波
2種類の波を送信

雨粒形状の変化を把握
3mm, 5mm, 8mm

受信電波
送信電波
 Z_r , 反射因子, V_r , ドップラー速度

国土交通省
XRAINシンポジウム(2013/7/3)参考資料
<http://www.mlit.go.jp/common/001000775.pdf>

XRAIN(XバンドMPレーダネットワーク)について

- 都市域等に**高頻度、高分解能なXバンドMPレーダ**を導入し、局地的な大雨(いわゆるゲリラ豪雨)や集中豪雨の被害低減に向けた実況観測を強化。
- 従来レーダ(Cバンドレーダ)に比べ、**高頻度(5倍)、高分解能(16倍)**での観測が可能。また、これまで**5~10分かかっていた配信に要する時間を1~2分に短縮**。

【既存レーダ(Cバンドレーダ)】
(最小観測面積:1kmメッシュ、配信周期:5分
観測から配信に要する時間 5~10分)

【XバンドMPレーダ】
(最小観測面積:250mメッシュ、配信周期:1分
観測から配信に要する時間 1~2分)

↑
高頻度(5倍)
↑
高分解能(16倍)

※Cバンドレーダ(定量観測半径120km)は広域的な降雨観測に適するのに対し、XバンドMPレーダ(定量観測半径60km)は観測可能エリアは小さいものの局地的な大雨についても詳細かつリアルタイムでの観測が可能。

X-NET

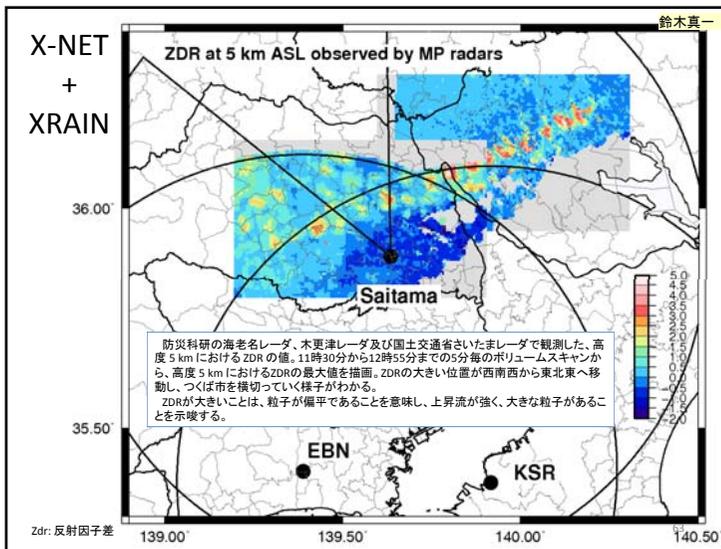
防災科学技術研究所が取りまとめる首都圏X帯レーダー網

レーダ観測データをリアルタイムで防災科研に集約し、風向・風速の計算や降雨強度の推定を行うことにより、豪雨・強風の監視に関する研究を行う。

所在	運用機関	種類	観測半径
神奈川県海老名市	防災科学技術研究所	MP	80 km
東京都文京区	中央大学	ドップラー	64 km
神奈川県横須賀市	防衛大学校	ドップラー	64 km
千葉県木更津市	防災科学技術研究所	MP	80 km
埼玉県羽生市	日本気象協会	ドップラー	64 km
山梨県甲府市	山梨大学	MP	64 km
千葉県我孫子市	電力中央研究所	MP	64 km

<http://mp-radar.bosai.go.jp/imgs/xnetarea.jpg>

X-NETレーダの位置と観測範囲。
赤影は風向・風速の導出が可能な範囲を示す。



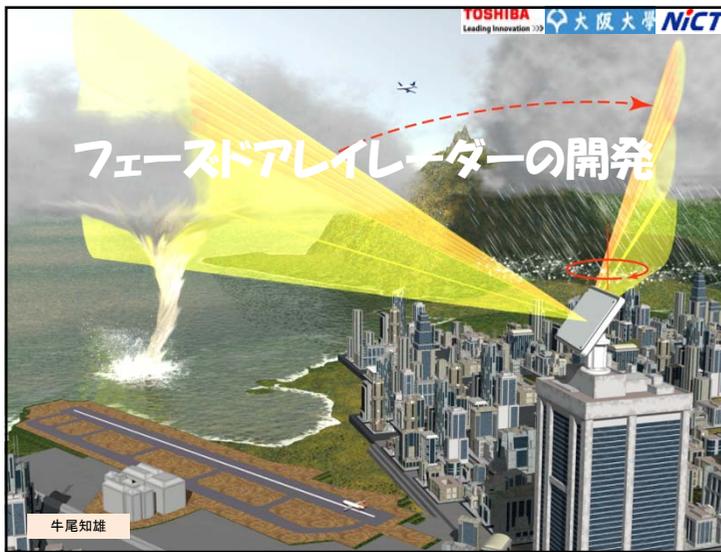
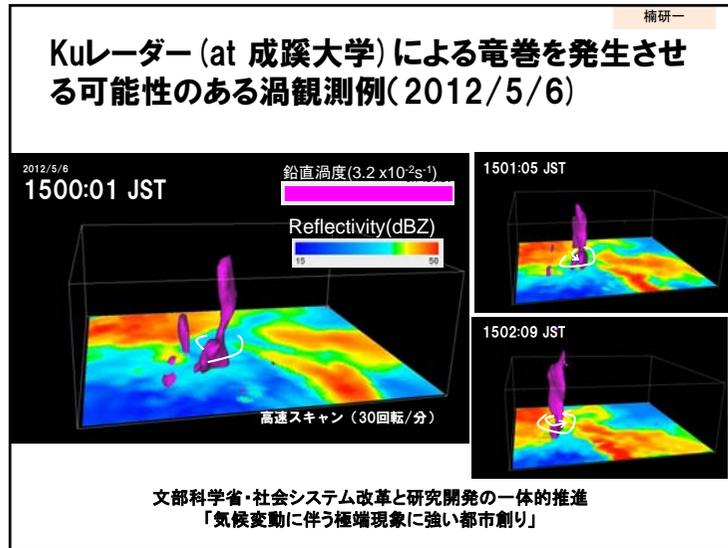
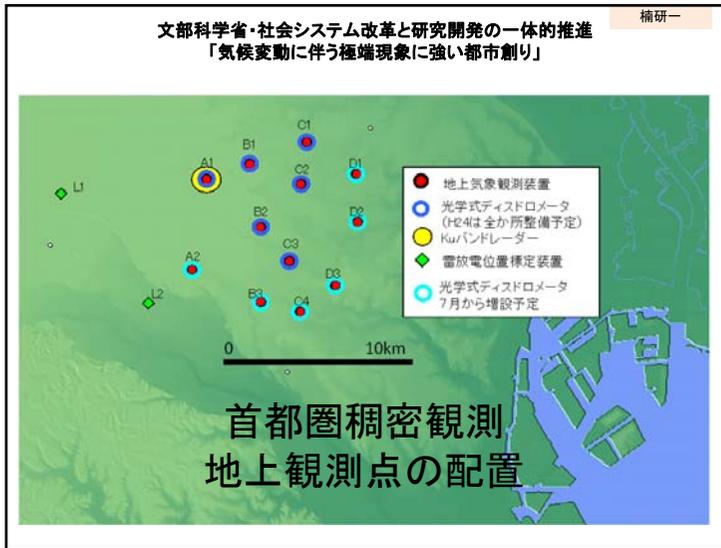
Ku バンドレーダー

2011/11/20の事例(藤原ほか)

波長: 2 cm
形成初期の降水を探知

大阪大学・住友電工が開発したKuバンド(2cm波)FM変調高速走査マルチパラメータレーダー。
水平360°、鉛直0~90°の全天走査を1~2分間隔、距離方向に10m分解能で行い、積雲から積乱雲への発達過程、内部の降水構造を微細に観測可能。

積乱雲の発達初期の構造を時間・空間的に高い分解能で観測する。



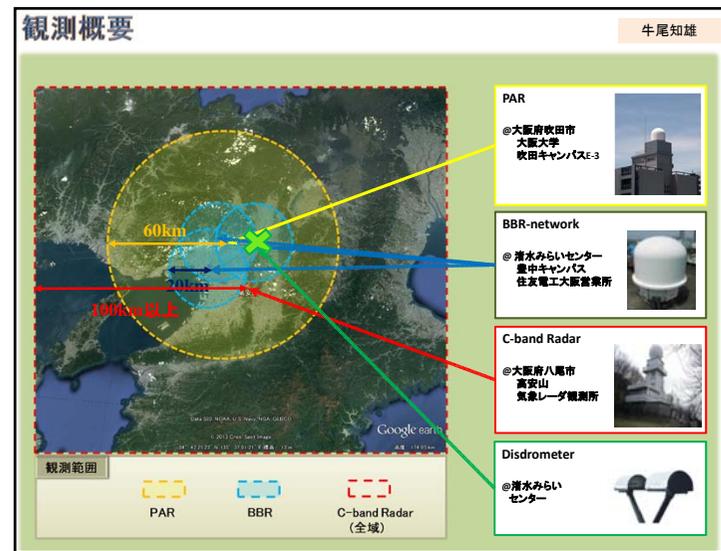
牛尾知雄

Phased Array Radar

- 激しい擾乱検知のため、10秒間隔のボリュームスキャンを可能とする
- 特に都市域での積乱雲発達を捉える

スキャンシステム	仰角方向: 電子スキャン 方位角方向: 機械式スキャン
観測範囲	3次元スキャン (90 仰角) / 10 秒 (- 1 min)
観測要素	Z_h, v_h, σ_{vh} (single-polarization)

68



目次

1. 気象庁の突風監視・予測システム
2. 竜巻等突風の解明に向けて
 - ① スーパーコンピューターを用いたシミュレーション研究
 - ② レーダーや稠密観測網による観測的研究
 - ③ 機動観測による被害調査
3. まとめ

写真: 2012年5月6日つくば市北条, 吉沢健司様ご提供

竜巻の実態解明にとって、データ蓄積は非常に重要

月別の発生確認数

月	件数	月	件数	月	件数
1月	10	4月	14	7月	32
2月	16	5月	18	10月	62
3月	9	6月	25	9月	70
		8月	70	12月	20

竜巻の月別発生確認数(1991~2012年)

竜巻分布図(対象:中国・四国:1961-2012年)

http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/stats/bunpu/image/bunpuzu_kinchusi.png



気象庁機動調査班

JMA Mobile Observation Team (JMA- MOT)

つくば市での調査

発足
平成20年10月17日

調査活動事象

- 竜巻等突風
- 地震・津波
- 火山
- 高潮
- 高波

竜巻等突風出動の基準

- 竜巻やダウンバースト等の突風の発生を示唆する情報を得た場合

活動内容

- 現象の詳細を調査するため、状況に応じ現地に赴いて被害の状況や当時の状況の聞き取り調査を行う。

藤田スケール

竜巻やダウンバーストなどの風速を、構造物などの被害調査から簡便に推定するために、シカゴ大学の藤田哲也により1971年に考案された風速のスケール。

F0	17~32m/s 自動車(高速道路)	煙突やテレビのアンテナが壊れる。小枝が折れ、また根の浅い木が傾くことがある。非住家が壊れるかもしれない。
F1	33~49m/s 特急電車	屋根瓦が飛び、ガラス窓は割れる。また、ビニールハウスの被害甚大。根の弱い木は倒れ、強い木の幹が折れたりする。走っている自動車が横風を受けると、道から吹き落とされる。
F2	50~69m/s 新幹線	住家の屋根がはざとられ、弱い非住家は倒壊する。大木が倒れたり、またねじ切られる。自動車が道から吹き飛ばされ、また汽車が脱線することがある。
F3	70~82m/s 最新新幹線	壁が押し倒され住家が倒壊する。非住家はバラバラになって飛散し、鉄骨づくりでもつぶれる。汽車は転覆し、自動車が持ち上げられて飛ばされる。森林の大木でも、大半は折れるか倒れるかし、また引き抜かれることもある。
F4	93~116m/s フォーミュラ1	住家がバラバラになってあたりに飛散し、弱い非住家は跡形なく吹き飛ばされてしまう。鉄骨づくりでもベンチヤンコ、列車が吹き飛ばされ、自動車は何メートルも空中飛行する。1トン以上もある物体が降ってきて、危険この上ない。
F5	117~142m/s リアモーターカー	住家は跡形もなく吹き飛ばされるし、立木の皮がはざとられてしまったりする。自動車、列車などが持ち上げられて飛行し、とんでもないところまで飛ばされる。数トンもある物体がどこからともなく降ってくるし、また被害地はミステリーにみちている。

藤田スケールについては、以下の点が指摘されてきた。

- 建築物の種類や強度の違いが考慮されていない。
- 対応表に記載されていない被害が発生した場合に評定が困難。
- 大きな階級ほど被害から推定される風速が実際の風速より大きくなるという傾向がある。

改良藤田スケール

気象庁

藤田スケール		改良藤田スケール	
日本、フランス、ドイツ、イタリア、オーストラリアなどが採用		アメリカ、カナダが採用	
藤田スケール	風速範囲 (m/s)	改良藤田スケール	風速範囲 (m/s) (3秒間の平均風速)
F0	17-32 (約15秒間の平均風速)	EF0	29-38
F1	33-49 (約10秒間の平均風速)	EF1	39-49
F2	50-69 (約7秒間の平均風速)	EF2	50-60
F3	70-92 (約5秒間の平均風速)	EF3	61-74
F4	93-116 (約4秒間の平均風速)	EF4	75-89
F5	117-141 (約3秒間の平均風速)	EF5	90以上

改良藤田スケールの特徴

- 被害に関する記述が被害指標と被害度に分けて整理され、より定量的な評定が可能となっている。
- 評定に使用する構造物の種類が他のスケールに比べて細かく考慮されている。
- 風速範囲と被害との対応が、より適切であると考えられている。

竜巻の強さを迅速・的確に評定するために

• 「竜巻等突風の強さの評定に関する検討会」

- 発足: 2013年7月3日
- 会長: 田村幸雄(東京工芸大学教授)
- 副会長: 新野宏(東京大学大気海洋研究所長)
- 任務
 - 国民の生命等に大きな被害をもたらすような竜巻等突風が発生した場合に必要なに応じて開催して、最新の科学的知見に基づき竜巻の強さを分析し、その結果を公表する。
 - 気象庁が策定する竜巻等突風の評定に関するガイドラインについて助言・評価。

謝辞

- 2012年5月6日の竜巻の写真は吉沢健司様、故飯田武夫様にご提供いただきました。
- 資料作成に当たり、下記の皆様にスライドの提供等、御協力いただきました。

牛尾知雄様、加藤輝之様、佐藤英一様、
鈴木修様、鈴木真一様、瀬古弘様、
田中恵信様、中里真久様、益子涉様、
山内洋様

(あいうえお順)

まとめ

1. 気象庁の突風監視・予測システム

- ① レーダー、数値予報、運動学的予測を駆使したシステム

2. 竜巻等突風の解明に向けて

最先端科学技術と、人力の被害調査両面から迫る必要

- ① 超高解像度数値モデルによるシミュレーション研究

➤ 2012年5月6日のつくば周辺竜巻では、環境場として下層水蒸気、鉛直シアが重要。また後面下降流(RFD)がトリガーとして示唆される。

- ② 二重偏波、高頻度観測レーダー、稠密観測網による発現機構解明

① 2012年5月6日のつくば周辺竜巻では、竜巻発生直前1時間程前から、強い上昇流を示唆する特徴を観測。竜巻発生直前にはRFDの強化を確認。飛散物は少なくとも上空3kmまで分布し、竜巻は傾きながら高度4kmまでは存在していたことが確認された。

- ③ 機動観測による被害調査

➤ 被害から風速推定を迅速・的確に行うためのガイドライン作成

写真: 2012年5月6日つくば市北条, 吉沢健司様ご提供

竜巻 ～理論・実験・観測～

日本気象学会関西支部第35回夏季大学テキスト

発行日 2013年8月26日

発行 日本気象学会関西支部
大阪市中央区大手前4-1-76
大阪合同庁舎第4号館 大阪管区气象台内
TEL 06-6949-6595
HP <http://www.msj-kansai.jp/>