

「竜巻シンポジウム—藤田哲也博士生誕100年を記念して—」の報告

新野 宏^{*1}・小林 文明^{*2}・栃本 英伍^{*3}・末木 健太^{*4}
 足立 透^{*5}・梅原 章仁^{*6}・田村 幸雄^{*7}・野田 稔^{*8}
 佐々 浩司^{*9}・加藤 輝之^{*10}・加茂 直幸^{*11}・中里 真久^{*12}
 益子 渉^{*13}・伊藤 純至^{*14}・横田 祥^{*15}・田村 哲郎^{*16}
 楠 研一^{*17}・石津 尚喜^{*18}

1. はじめに

2020年10月23日は、テイルクラウド (tail cloud), ウォールクラウド (wall cloud) などスーパーセルに伴う特殊な雲 (Fujita 1960の Fig. 48参照) の命名, 藤田スケールの考案 (Fujita 1971a), 多重渦竜巻を構成する吸い込み渦 (suction vortex) の命名 (Fujita 1971b) など, 竜巻に関する数多くの先駆的研究, ダウンバーストの発見 (Fujita 1976), ボウエコー (bow echo) の命名 (Fujita 1978) など, メソ気象学に多大な業績を残した故藤田哲也博士の生誕から100年に当たる。藤田博士は1953年にシカゴ大学のByers教授に招かれて渡米し, 世界をリードする竜巻・ダウンバーストなどの研究を行った。2000年1月の米国気象学会年會で行われた博士の追悼シンポジウムでご子息のKazuya FUJITAさんに贈られた記念の盾 (第1図) には, 「我らの時代の『偉大な気象の探偵』に敬意を表して。彼はメソ気象学という分野を確立し, 不断の仕

事を通して, 断片的で異質なデータからも多くを知ることができることを教えてくれた。彼の最も素晴らしい業績は, 彼の先駆的な研究により世界がシビア・ローカル・ストームの脅威に対してより安全になった, と多くの人が知るようになったことである。大気科学の世界は, 『Mr. Tornado』の名前を永遠に忘れない」と記されている。博士の業績は追悼記念シンポジウムの報告 (Wakimoto 2001) に続く数編の解説記事 (Forbes and Bluestein 2001など) に詳しい。

我が国でも近年, 「京」コンピュータやフェーズドアレイレーダーなど, 最新の電子計算機や観測機器を使って, 世界に肩を並べる竜巻の研究が行われるようになってきた。本研究集會は, 博士の生誕100年を記念して, 我が国におけるこれまでの竜巻研究を振り返ると共に, 気象学・風工学に関わる幅広い分野において様々な手法で竜巻研究を行っている研究者が最新の研究成果を持ち寄り, 今後の竜巻研究の方向性を議論す

*1 (連絡責任著者) Hiroshi NIINO, 東京大学大気海洋研究所.

niino@aori.u-tokyo.ac.jp

*2 Fumiaki KOBAYASHI, 防衛大学校.

*3 Eigo TOCHIMOTO, 防災科学技術研究所.

*4 Kenta SUEKI, 理化学研究所.

*5 Toru ADACHI, 気象研究所.

*6 Akihito UMEHARA, 気象研究所.

*7 Yukio TAMURA, 重慶大学/東京工芸大学.

*8 Minoru NODA, 高知大学.

*9 Koji SASSA, 高知大学.

*10 Teruyuki KATO, 気象大学校 (現: 気象研究所).

*11 Naoyuki KAMO, 気象庁.

*12 Masahisa NAKAZATO, 気象庁.

*13 Wataru MASHIKO, 気象研究所.

*14 Junshi ITO, 東北大学.

*15 Sho YOKOTA, 気象庁.

*16 Tetsuro TAMURA, 東京工業大学.

*17 Kenichi KUSUNOKI, 気象研究所.

*18 Naoki ISHITSU, 気象研究所.

© 2021 日本気象学会

ることを目的として、2020年9月23～24日に東京大学大気海洋研究所の共同利用研究会集として開催予定であったが、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）流行の影響で2021年3月11～12日に延期し、オンラインで開催した。以下に各講演の要旨を紹介する。

2. 講演概要

2.1 我が国における竜巻研究

新野 宏（東大）

我が国の竜巻研究の歴史を、米国を中心とした世界の竜巻研究と共に概観した。我が国の竜巻研究や竜巻関連業務は、米国に比べて10～15年ほど後れをとっていたが、1990年の千葉県茂原市と栃木県壬生町の竜巻を契機としてドップラーレーダーを用いた近代的な竜巻研究が始まった。2005年に羽越線特急が竜巻被害経路の延長線上で脱線転覆した事故や、2006年の宮崎県延岡市と北海道佐呂間町の竜巻による大きな被害を契機として、世界初の現実的な大気中での数値シミュレーションによる竜巻の再現が行われ、気象庁による竜巻注意情報の発表や竜巻被害調査の強化が行われるようになった。そして、2012年に茨城県つくば市で発生した竜巻に関しては、世界初の現実的な大気中でのアンサンブル数値シミュレーションによる竜巻のハインドキャスト（hindcast）や工学的な数値モデルによる竜巻被害のシミュレーションなど、多くの優れた研究が行われ、最近では二重偏波レーダーやフェーズドアレイレーダーなどによる世界最先端の研究も行われている。また、冬季に日本海側で発生する世界的に珍しい竜巻の研究も進んでいる。我が国、とりわけ関東平野は、米国の特別観測実験にも匹敵する高密度の地上観測網や多数の各種ドップラーレーダーを備えており、また「富岳」などスーパーコンピュータにも恵まれているため、今後世界をリードする竜巻研究が期待される。

2.2 日本における竜巻の観測的研究と課題

小林文明（防衛大）

我が国における竜巻の観測について、大学や研究所にドップラーレーダーが配備された1980年代、プロジェクト観測が全盛であった1990年代、レーダーネットワークが構築された2000年代をメソ気象観測の観点から振り返った。具体的な事例として、冬の竜巻（winter tornado）に関して、30年間の顕著な被害と研究アプローチを示し、ひと口に冬の現象といっても季節風卓越時、前線通過時（プレフロンタル）、ポーラーロウ

（Polar low）などさまざまなステージの発生環境があり、実際に竜巻の構造や被害スケールに違いがあることに言及した。また、海上で発生する竜巻の多様性を示し、発生実態の解明や観測の重要性を指摘した。

竜巻や積乱雲の微細構造を理解し短時間予測（nowcast）を行うための新しい観測手法として、高性能レーダーによる高時間空間分解能観測と地上稠密気象観測の重要性について言及した。具体的に、フェーズドアレイ気象レーダーを用いた竜巻やダウンバースト（ガストフロント）の地上付近（高度100m程度）の振る舞い、降雨域だけでなく雲（積乱雲）の輪郭まで再現できる“雲を掴む”研究、雲レーダー（ミリ波）を用いた積乱雲タレット（turret）、タフト（tuft）の解像など観測の最前線を紹介した。また、“1 km メッシュ”の地上稠密気象観測網による竜巻観測例を示した。

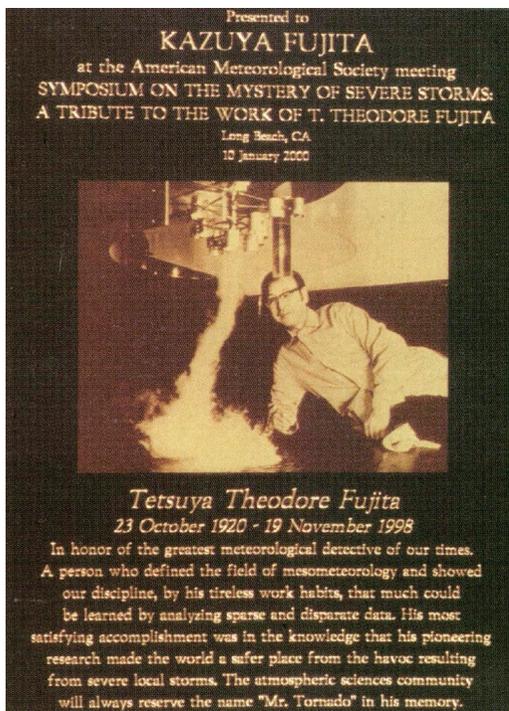
2.3 温帯低気圧に伴う竜巻の階層構造・環境場

栃本英伍（防災科研）、新野 宏（東大）、

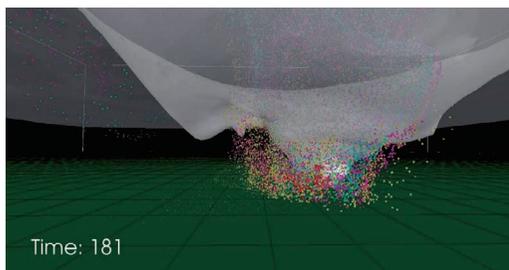
末木健太（理研）、横田 祥（気象庁）、

柳瀬 亘（気象研）

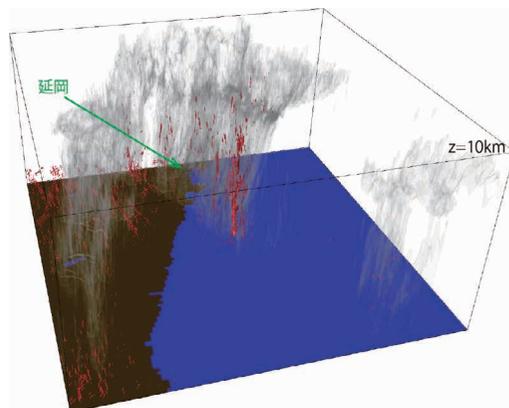
竜巻を生ずる温帯低気圧とその階層構造に関する研究成果を紹介した。米国で竜巻大発生（tornado outbreak）を生ずる温帯低気圧（OC: Outbreak cyclone）の暖域では、竜巻大発生を生じない低気圧（NOC: non-OC）と比較して、対流有効位置エネルギー（CAPE）やストームに相対的な環境場のヘリシティ（SREH: Storm-Relative Environmental Helicity（Davies-Jones *et al.* 1990）が、有意に大きく、その違いは低気圧の構造の違いに起因していた。OCは、より南北に延びた構造を持つため、東西の気圧傾度が大きく、下層の南風が強い。その結果、下層の鉛直シアが強く、SREHも大きい傾向がある。また、下層の南風が強いことで、南からの下層の水蒸気輸送が大きくなり、CAPEも大きくなりやすい。このようなOCとNOCの構造の違いは、環境場のジェット気流の構造の違いに起因することがわかった。続いて、日本と米国の温帯低気圧に伴う竜巻発生環境場の違いを調べた結果についても紹介した。米国の低気圧の暖域では日本に比べてCAPE、SREH共に大きい傾向にあり、より竜巻の発生に好ましい環境場となっていた。さらに、温帯低気圧に伴う竜巻の事例研究として、1992年12月8日の準線状の降水システム（QLCS: Quasi-Linear Convective System）の中央部のメソ渦（mesovortex）に伴って発生した竜巻と2015年9月1日に対馬海



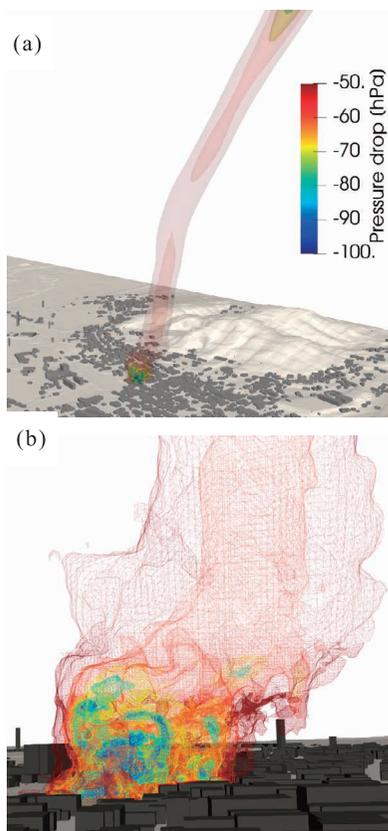
第1図 2000年1月10日、カルフォルニア州ロングビーチで行われたアメリカ気象学会年会の「Symposium on the Mystery of Severe Storms: A Tribute to the Work of T. Theodore Fujita」でアメリカ気象学会からご子息の Kazuya FUJITA 氏に贈呈された記念の盾 (Fig.4 in Wakimoto 2001; © American Meteorological Society. Used with permission).



第2図 漏斗雲と飛散物によって可視化された竜巻状渦に伴う流れ。漏斗雲は、断熱変化を仮定して求めた温度分布より決まる飽和水蒸気面（半透明で描画）である。飛散物の色は種類（立川数）の違いを表している。



第3図 竜巻の雨水混合比（灰色：1 g/kg 以上）と鉛直渦度（赤色： 0.05s^{-1} 以上）の等値面の3次元分布。地面の青（茶）は海（陸）を表す。



第4図 つくば市の住宅域の上空を移動する竜巻 (LES 解析結果) : (a) 全体図, (b) 地面近くの拡大図。十分遠方の気圧からの気圧偏差の3次元等値面を10hPa 毎 (-100 hPa から -50hPa まで) に色を変えて可視化している。

峡でメソβスケール渦に伴って発生した竜巻状渦の数値シミュレーションを行い、その発生機構を調べた結果について報告した。

2.4 竜巻を生ずる台風の構造・環境場について

末木健太 (理研), 新野 宏 (東大)

台風は竜巻の主要な発生環境の一つであるが、多数の竜巻を伴う台風 (Tornadic Typhoon: TT) がある一方、竜巻を伴わない台風 (Non-tornadic Typhoon: NT) も存在し、両者の違いは十分には理解されていない。本研究では、大気再解析データ JRA-55 (Kobayashi *et al.* 2015) を用いて、TT と NT の構造を比較した。積乱雲内部の低気圧性回転の強さの指標となる SREH を調べた結果、TT は NT に比べ SREH が有意に大きく、強い竜巻の親雲となる回転積乱雲「スーパーセル」の発生ポテンシャルがより高くなっていた。TT は NT に比べ強度の強い台風が多く、惑星境界層における鉛直シアが大きいこと、また、台風渦に重なる上層ジェットの影響により大気中層でも鉛直シアが大きいことにより、台風北東象限において、風向が時計回りに変化する鉛直シアが卓越し、SREH が大きくなったと考えられる。一方、大気の安定度に関して CAPE を調べた結果、TT と NT に差は見られなかったが、積乱雲の上昇流が環境場の空気を取り込むエントレインメント (Entrainment) の効果を加味した E-CAPE (Molinari *et al.* 2012) を比較したところ、TT は NT に比べ E-CAPE が有意に大きく、より不安定な成層を有していることが分かった (Sueki and Niino 2016)。竜巻の発生リスクを評価する際、エントレインメントを考慮した大気安定度を調べることの重要性が示された。まとめると、竜巻を伴う台風は SREH や E-CAPE が大きく、スーパーセルの発生により適した環境場を有していると考えられる。

2.5 フェーズドアレイレーダーを用いた竜巻研究

足立 透・益子 渉・梅原章仁 (気象研)

本講演では、次世代型気象レーダーであるフェーズドアレイレーダーを用いた竜巻研究について、台風に伴って発生した事例に着目しながら、これまでに得られた知見を紹介した。

2019年10月12日に千葉県市原市で発生した竜巻事例 (市原竜巻) では、近隣のフェーズドアレイレーダーによる観測データを解析することにより、竜巻発生過程の詳細な理解が得られた。積乱雲内のメソサイクロン

後方で下降気流が生じ、低い高度で渦のペアが形成されたこと、このうちの反時計回りの渦が上昇しながらメソサイクロンに接近し、回転速度が強化されたこと、この領域が下方に伝搬して地上付近に強い竜巻渦をもたらす原因となったことが明らかになった (Adachi and Mashiko 2020)。このような、メソサイクロンの下方における渦のペアの形成と上方伸展の様子は、2017年7月4日に埼玉県草加市で発生した突風事例でも認められた。

また市原竜巻の事例では、被害域の周辺で竜巻飛散物によると考えられる高反射強度の領域が観測された。この領域が立体的な渦に伴って上昇する様子が捉えられ、二重偏波レーダーによる竜巻飛散物のシグネチャーの検出位置と極めて良い対応関係にあることが確認された。

このように、フェーズドアレイレーダーを用いた観測を通して、竜巻の発生過程や飛散物の振舞いを高時空間分解能で明らかにすることが可能になった。今後、さらなる研究開発を通して、現象の理解の深化と監視・予測技術の高度化につながると期待される。

2.6 二重偏波レーダーによる竜巻観測

梅原章仁・足立 透・益子 渉 (気象研),
山内 洋 (気象庁)

本講演では、二重偏波レーダーを用いた竜巻飛散物の検出手法及び国内における観測事例を紹介した。

二重偏波レーダーは、水平・垂直、二つの偏波を用いた観測により、散乱体の形状や分布の特性を捉えることができる。このため、竜巻飛散物の様な、形状や分布がランダムな散乱体は、Tornadic Debris Signature (TDS) として、降水粒子と区別して抽出することが可能である (Ryzhkov *et al.* 2005)。

国内では、TDS の観測報告例は少なく、2012年5月6日に茨城県常総市〜つくば市にかけて被害をもたらした竜巻 (つくば竜巻)、2019年10月12日に千葉県市原市で発生した竜巻 (市原竜巻) で報告されたのみである。それぞれの TDS 最大到達高度は、藤田スケールで F3 のつくば竜巻で約 4 km (Yamauchi *et al.* 2013)、日本版改良藤田スケールで JEF 2 の市原竜巻で約 2 km であった。これら、竜巻の規模と TDS 最大到達高度との関係は、既往研究 (Bodine *et al.* 2013) で示された関係と良く整合していた。

市原竜巻については、フェーズドアレイレーダーによる竜巻渦の検出結果 (Adachi and Mashiko 2020) と

の比較により、現地調査による被害発生時刻から1分30秒程先行して、竜巻渦により飛散物が巻き上げられていた可能性を考察した。

このように、全国展開されつつある二重偏波レーダーを用いることで、竜巻被害発生の証拠であり、被害域や被害規模推定の資料となり得るTDSの検出が可能となった。今後、さらなる研究開発により、竜巻被害発生の実況監視や、即時的な被害域・被害規模の推定への活用が期待される。

2.7 風工学における竜巻研究の概観

田村幸雄（重慶大／東京工芸大）

先ず竜巻災害を振り返り、2005年12月の山形県庄内町での羽越本線特急列車脱線事故を受けて、翌4月に日本風工学会から国土交通大臣宛の提言がなされ、竜巻等の突風による被害軽減のため、事前に強風発生を予測し、情報を伝達するシステム構築の必要性を訴え、具体的にはドップラーレーダーの配備による観測網の充実、突風発生を予測するナウキャスト技術の開発、被害防止策に対する気象学と風工学の分野横断的な研究の必要性が強調された旨が紹介された。竜巻は一般建築物の設計対象にはなっていないが、2007年度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」では、都市防災・地域防災、鉄道網や送電線などライン状施設、原子力発電所など高重要度・高危険度施設等に対する竜巻対策の重要性、クレーン、工事足場など風速による管理を前提とする構造物の安全性や人命確保のための予測・予報の必要性が強調され、日本版改良藤田スケール等に繋がったことが紹介された。次いで、国際風工学会（IAWE：International Association for Wind Engineering）「竜巻ワーキンググループ」、米国土木学会（ASCE：American Society of Civil Engineers）「竜巻等の風速評価委員会」、テキサス工科大学、アイオワ州立大学、加国ウエスタン大学、伊国ジェノバ大学等での突風研究の現状が紹介され、更に竜巻シミュレータや非正常風洞、精度の高い被害指標（DI：Damage Indicator）、被害程度（DOD：Degree Of Damage）評価のための実大ストームシミュレータに関する国内外の動向が紹介された。

2.8 飛散物や漏斗雲による竜巻の可視化など

野田 稔（高知大）

本発表では、ラージ・エディ・シミュレーション（LES：Large Eddy Simulation）で生成した竜巻状流

れ場の圧力分布の情報に静圧分布を重ね合わせた圧力場において断熱変化を前提とした温度分布を求め、飽和水蒸気に換算することで相対湿度に応じた結露面を漏斗雲として可視化した結果について、相対湿度や最大風速の違いによって漏斗雲による竜巻の見え方を示し、漏斗雲の寸法から竜巻の強さや規模を推定する可能性について示した。また、同じ流れ場を用いて飛散物の運動解析を行い、デブリクラウドによる竜巻の見え方（第2図）についても示し、飛散物の種類が特定できれば、デブリクラウドの大きさから竜巻の規模を推定できる可能性を示した。

2.9 微細スケールの竜巻発生環境：調査・実験・観測

佐々浩司（高知大）

頻繁に竜巻被害が発生する高知県では、被害調査の機会も多い。被害調査において見出された流体力学的な疑問点を解決すべく始めた室内実験は、大気下層の渦度集中をもたらす冷氣外流出の再現により従来のようなチャンバーや案内羽根を用いることなく竜巻渦を再現することに成功し、これを用いてノンスーパーセル竜巻発生に適する気流環境や、竜巻生成過程の解明を継続している。また、メソサイクロンとストーム後方側面の下降流（RFD：Rear-Flank Downdraft）に伴うガストフロントの冷氣流入というスーパーセル下層の気流構造を再現した実験においては、メソサイクロンの影響高度や旋回強さによって、竜巻が形成されない条件が見出されただけでなく、互いに逆回転する一対の渦や多重渦竜巻が形成されやすくなる条件も見出された。

一方、頻繁に発生する竜巻の親雲を捕捉するため、小型Xバンド二重偏波レーダー6台によるレーダーネットワークを高知県内に構築し、低仰角のみ1分毎にボリュームスキャンする常時観測を行っている。これまでに高知地方気象台により報告された竜巻19事例のうち、ほとんどがレーダーネットワークによって捕捉された。これらにはスーパーセル2事例のほか、クラウドクラスターやスコールライン、波状雲によるものも認められた。最も多く観測された孤立積乱雲では、水平スケールが数km程度の親雲ながら竜巻渦そのものによる明瞭なフックエコーが見られた。このような観測と室内実験による知見を組み合わせることにより、竜巻予測技術の高度化を進めることができるものと期待している。

2.10 竜巻発生環境場の気候変化と将来予測

加藤輝之（気象大），村松貴有（気象庁）

日本と米国の竜巻発生数（正確には確認数）の推移をみると，近年増加傾向にあるように見える（村松ほか 2020）。これは，1990年代に米国ではドップラーレーダー観測網が整備されたり，2006年には北海道佐呂間町や宮崎県延岡市で強い竜巻が観測されたために一般の人の関心が増えたりすることで報告数が増加するなどの人的な要因が大きい。確認漏れがないと考えられる藤田スケールでF2（あるいは改良藤田スケールでEF2／日本版改良藤田スケールでJEF2）以上の竜巻事例だけをみると，強い竜巻は増えているようにはみえない。

そこでJRA-55再解析データを用いて，日本の竜巻発生環境場をCAPEとSREHで評価し，竜巻が発生しやすい大気状態の気候変化を調査した。南西諸島以外では，1988年以前の30年間に比べると，その後における竜巻の発生しやすい大気状態の出現頻度が10～30%増加していた。また，21世紀末CO₂約3倍増に基づく全球20km大気大循環モデルの結果から，竜巻発生環境場の将来予測を行った（Muramatsu *et al.* 2016）。日本域では，竜巻が今まで発生していない場所や季節でも発生する可能性が生じ，竜巻が発生しやすい大気状態の出現頻度が春季の3～5月では2～3倍，夏季の6～8月では2倍前後に増えることが予測された。

今後の課題としては，竜巻発生環境場を評価したCAPEやSREHの閾値を季節や領域により変更することや，上空の大気状態も考慮したE-CAPEを利用することが挙げられる。また，他の指数（例えば，対流抑制（CIN：Convective Inhibition））を追加した評価も試みる必要がある。

2.11 気象庁における竜巻関連観測業務

加茂直幸（気象庁）

竜巻は通常の気象観測網で捉えることが難しく，発生機構には未解明な部分が多い。その予測精度向上のためには，現象の実態把握が非常に重要である。

気象庁の観測機器の中でも気象レーダーは広範囲を立体的に観測することが可能で，かつ観測間隔も短いことから，竜巻をもたらす積乱雲のリアルタイム監視に適している。気象庁では全国20箇所にあるレーダーサイトの二重偏波気象ドップラーレーダー化を順次行っており，さらに，気象研究所ではフェーズドアレイレーダーを導入し，調査研究や技術開発を進めてい

る。今後，竜巻発生機構の解明が期待される。

竜巻等の突風発生を覚知した際，必要に応じ，気象庁機動調査班（JMA-MOT）を現地に派遣し，住民への聞き取りを行い，被害や痕跡の状況を調査する。現象の特定やその強さなどの評価結果は「竜巻等の突風データベース」として気象庁ホームページ上で公開している。リモートセンシングで竜巻そのものを検知することは簡単ではなく，現状では現地調査を行うことが現象特定のためのほぼ唯一の手段となっている。

現地調査の際，現象の強さの評価に用いられているのが「日本版改良藤田スケール」である。日本の建築物等の被害に対応していること，最新の風工学の知見をもとに精度の高い風速推定を可能としていることが大きな特徴である。被害指標等の改善を行うと共に，気象庁が出す他の防災情報への利活用を検討している。

2.12 気象庁における竜巻関連予報業務

中里真久（気象庁）

気象庁では，竜巻などの激しい突風（以下，竜巻）に関する気象情報を段階的に発表して注意を呼びかけている。

竜巻が予想される半日～1日前には，府県気象情報等の予告的気象情報に「竜巻」の危険性についても触れる形で発表する。数時間前には雷注意報を発表する。竜巻が今にも発生しそうな大気状況になると竜巻注意報を発表する。具体的には，竜巻発生確度ナウキャストで確度2が解析された場合や目撃情報が寄せられた場合である。

最近の改善点として，2018（平成30）年にシビアストーム監視班を組織し，竜巻注意報の発表を気象庁本庁で一元的に行っている。また，2021（令和3）年3月より竜巻発生確度ナウキャストに基づく発表は予報官を介さず自動で行うと共に，アメダスで瞬間風速30m/s以上が観測された時の発表を廃止した。竜巻発生確度ナウキャストは常時10分毎に解析を行い，1時間先まで移動予測する図情報であり，概ね2年毎に改善を行っている。直近では，2020（令和2）年12月に国土交通省Xバンドレーダーのデータを使ったメソサイクロン検出の手法を改善した。

予告的気象情報は，従来，各官署が作成した官署目安に従って発表していたが，2020（令和2）年7月からは，39時間先までの突風の可能性を予測する突風可能性ガイダンスも発表基準に用いている。今のところ，突風可能性ガイダンスよりも官署目安の方が予測

精度が高い地域では引き続き官署目安に従って発表しているが、今後の開発で精度改善が確認された地域では突風可能性ガイダンスを用いた発表に移行する計画である。

2.13 数値シミュレーションによるスーパーセル竜巻の発生機構に関する研究

益子 渉 (気象研)

本講演では、最初に、これまでのスーパーセル竜巻に関する研究についてレビューを行い、スーパーセルの構造や力学の理解は飛躍的に進んだものの、竜巻発生メカニズムについては未だ十分に理解されていないことを説明した。しかし、古くから多くの観測的・理論的研究において、ストーム後方側面の下降流(RFD)が竜巻発生に重要であると指摘されていることを紹介した。

次に、2012年5月6日に茨城県つくば市で発生した竜巻について、Mashiko (2016) による地表摩擦を考慮した数値シミュレーション結果を中心に紹介した。竜巻は、局地的に強化されたRFDからの外出流がトリガーとなって発生していたことが後方トラジェクトリ解析によって示された。また、RFD周辺の傾圧性が竜巻渦の主な起源であることを、竜巻渦を取り囲むリングに沿った循環を計算することによって明らかにした。そして、その傾圧性は、竜巻発生約10分前に、フック状の降水域の先端付近において降水コアが落下する際、雨滴の蒸発と水物質の融解による非断熱冷却によって生成されていた。降水コアの落下が竜巻発生の前兆現象となっている可能性を示す結果となっていた。

しかし、数値シミュレーションを用いた研究全般に言えることであるが、数値モデルには地表面過程などの物理過程や竜巻渦を表現するには不十分な解像度を用いているなどの問題があり、結果の妥当性について慎重に評価する必要がある。近年、スーパーセル竜巻について時空間的に詳細な観測が得られるようになってきており、今後は最新の観測的研究の知見も合わせて議論されることが期待される。

2.14 2019年台風第17号に伴う延岡竜巻のシミュレーション

伊藤純至 (東北大), 新野 宏 (東大)

2019年9月22日の8時過ぎに、東シナ海を北上する2019年台風第17号の中心の東約300kmのレインバンドに伴い、宮崎県延岡市で日本版改良藤田スケール

JEF2の竜巻が発生した。3重ネストした気象庁非静力学モデルにより、同日の気象庁メソ解析を初期値・境界値とした再現計算を行ったところ、宮崎沖のレインバンドとその中の背の低いミニスーパーセル、およびそれに伴う瞬間風速(時間ステップ0.2s毎に計算された風速) 80m s^{-1} に達する竜巻が再現された(第3図)。ミニスーパーセルに伴っては、世代交代しながら3個の竜巻が発生し、竜巻は降水コアが下層に降下した後に発生していた。

2.15 データ同化とアンサンブル予報を用いた竜巻発生要因の解析と予測可能性

横田 祥 (気象庁), 新野 宏 (東大),
瀬古 弘・佐藤英一 (気象研),
国井 勝・山内 洋 (気象庁)

2012年5月6日に茨城県つくば市に被害をもたらした竜巻を対象に、アンサンブルカルマンフィルターを用いて稠密なレーダー観測と地上観測をデータ同化することで、竜巻をもたらすスーパーセルの予測位置がより現実に近づくことを示した(Yokota *et al.* 2016)。また、ここで作成された初期値を用いて竜巻を解像する33メンバーのアンサンブル予報を行い、発生した竜巻渦の起源を調べるための循環解析を行ったところ、渦の起源はアンサンブルメンバー毎に異なり、竜巻の発生にとって本質的ではないことを示唆する結果が得られた。そこで、竜巻の発生にとってより重要な物理量を見出すために、竜巻の強さに対する様々な物理量のアンサンブル相関を計算したところ、地上約1kmのメソサイクロンの強さと地表付近の水蒸気量に対して特に相関が大きく、これらの予測が竜巻の発生にとって特に重要であることが示された(Yokota *et al.* 2018a)。さらに、本事例における降水観測のアンサンブル同化において、大気場と相関を持つレーダー反射強度の摂動を付加してから同化を行うことで、降水が全メンバーで予測されていない点において大気場がより適切に修正され、スーパーセルの予測精度がさらに向上する可能性を示した(Yokota *et al.* 2018b)。本研究の結果は、稠密観測を適切に同化し、下層メソサイクロンの強さを正確に予測することが出来れば、竜巻を解像するモデルを用いずとも竜巻を確率的に予測できる可能性を示唆するものである。

2.16 つくば竜巻下の建築物に作用する風力の気象モデル・工学 LES 融合解析

田村哲郎・川口真晴（東工大）

竜巻など極端気象時における社会の安全性を考える際、地表近傍の強風・突風を推定し、建物へのインパクトを評価することは重要である。竜巻の解析において地表近傍を対象とする場合、地形・建築物の影響を受け、より広範囲の時空間変動場の把握が求められる。

ここでは気象モデルに加えて、工学 LES 手法を接続した融合解析を実施した。結果として、極端気象下の気象擾乱構造を再現した上で地表近傍の人間の生活空間での乱流場が LES により取得される。解析例は、2012年5月6日に茨城県つくば市で発生した竜巻とし、気象モデル解（益子氏提供）を活用して市街地の中・低層建物群への竜巻インパクト下の建築物・竜巻の相互作用を LES により明らかにし、建物剥離域での竜巻渦の捕捉に基づく建物への作用荷重の時系列を見積もった。さらに、つくば市の住居を対象に実際の竜巻突風の風力を把握し（第4図）、設計用強度との対応から建物被害調査結果での建物破壊の発生要因を分析した。第4図bには、竜巻通過時に建物から剥離した流れの滞留により渦が強化され、より強い低圧が生じている様子が見られる。

2.17 冬季日本海側の竜巻等突風の観測と災害軽減に向けた研究開発

楠 研一・足立 透・猪上華子・鈴木 修・新井健一郎・石津尚喜（気象研）、藤原忠誠・鈴木博人（JR 東日本研究開発センター）

局所的な突風は、時として列車の脱線を引き起こす災害の原因となってきた。しかしながら突風は空間スケールが小さく予測が難しいため、予測に基づく鉄道の安全運行を実現することは容易ではなかった。気象研究所と JR 東日本はそれに対し冬季日本海側の突風をリアルタイムで捉え、その情報に基づいて列車運転規制するシステムの研究開発を進めてきた。研究開発では冬季日本海側の突風を捉えるための、ドップラーレーダーと地上気象観測装置で構成される高密度観測網を2007年度に構築し、高密度観測網を用いたデータ解析などを通じ、突風は主として日本海上で発生する降水システム内のマイソスケール渦に伴うことを明らかにした。突風に関するこれら得られた知見に基づいて、ドップラーレーダーで上空の渦を自動探知し追跡するという手法を立案し2017年に実用化された。さら

に深層学習を用いた探知手法の研究を進め、こちらは2020年に実用化された。本発表では主に気象学的な側面からの取り組みを紹介した。

2.18 深層学習を用いた竜巻探知システムの開発

石津尚喜・楠 研一・足立 透・猪上華子・新井健一郎（気象研）、藤原忠誠・鈴木博人（JR 東日本研究開発センター）

我々のグループでは、竜巻による突風被害を軽減するため、ドップラーレーダーを用いて上空の渦を探知し、地上に被害をもたらすような渦であれば警報を発するシステムの開発を山形県庄内平野で行ってきた。数理モデルにより渦を検出し、算出された渦パラメーターに制限をかけることで渦の探知を行ってきたが、誤探知や見逃しが多数生じるなどの問題があることがわかった。これらの改善を行うため、畳み込みニューラルネットワーク（CNN：Convolutional Neural Network）を利用した渦探知システムの開発を行った。CNN のような深層学習では多くの訓練データを必要とする。冬季日本海では、日本海で発達した積乱雲に多数の渦が発生することが観測により明らかにされている。気象研では JR 東日本との共同研究にて庄内平野に設置された JR 東日本ドップラーレーダーを用いて日本海で発生し上陸する渦を観測してきた。これらの観測された渦を訓練データとして、探知された渦候補が渦であるか渦でないかを判別する CNN モデルの構築を行った。性能評価の結果、日本海冬季での事例では高い精度が得られたが、一方で台風やスーパーセルに伴う夏季事例での竜巻探知に関しては誤探知が多いなど課題を残している。このため夏季のデータの収集や、さらに高度な CNN モデルを試行するなどこれらの課題に取り組んでいる。

3. まとめ

藤田博士が多くの人に惜しまれながら他界されてから23年が経過した。丁度その頃から我が国では近代的な竜巻研究が行われるようになってきた（2.1節参照）。一方、技術面では二重偏波ドップラーレーダーやフェーズドアレイレーダーなどの新しい観測機器の開発が進み、スーパーコンピュータの性能の大幅な向上があった。第1節で述べたように我が国はこれら最新の機器やコンピュータに加えて、高密度な地上観測網に恵まれ、最近では今回の数々の講演に見るように世界に肩を並べる竜巻研究が行えるようになってきた。

今回のシンポジウムをもし藤田博士にお聴きいただけたとしたら、どのようなコメントをいただいたであろうか。

本シンポジウムは「竜巻」という限定的なテーマであったにもかかわらず、藤田博士のお名前を冠し、オンライン開催としたことも手伝ってか、初日156名、2日目122名という多くの参加があった。2日間、最先端の多様な竜巻研究に触れ、活発な議論が行われる大変ユニークかつ有益な機会となった。また同時に、最新の観測機器や高密度な地上気象観測網、スーパーコンピュータに恵まれている我が国の竜巻研究が、今後も順調に発展することを期待させる内容であった。今回、気象学と風工学の連携による大変興味深い成果の報告も見られたが、今後両者の連携が一層深まることにより、気象学・風工学それぞれにおける竜巻研究や竜巻関連業務が発展すると共に、安全・安心な社会の構築に向けての貢献が期待される。

謝辞

本シンポジウムは東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会(受付番号003)として行われた。発表された成果の一部はJSPS科研費 JP18H01277, JP17K13007, JP19K23466, JP20K04071, JP24244074, JP16K17804, JP16H04054, JP15H02994, JP18H01682, 2020年度東京工芸大学風工学研究拠点(文科省補助事業:JPMXP0619217840), 「HPCI戦略プログラム 分野3 防災・減災に資する地球変動予測」, 「社会システム改革と研究開発の一体的推進 気候変動に伴う極端気象に強い都市創り」, 「ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題 重点課題④ 観測ビッグデータを活用した気象と地球環境予測の高度化」, 「運輸分野における基礎的研究推進制度」, 「官民研究開発投資拡大プログラム」, 総務省電波有効利用型研究 SCOPE (165009001) の助成を受けて実施された。

略語一覧

CAPE: Convective Available Potential Energy 対流有効位置エネルギー
 E-CAPE: Entraining CAPE エントレインメントを考慮した対流有効位置エネルギー
 LES: Large Eddy Simulation ラージ・エディ・シミュレーション
 RFD: Rear-Flank Downdraft ストーム後方側面の下降流
 SREH: Storm Relative Environmental Helicity ストーム

に相対的な環境場のヘリシティ

F: Fujita scale 竜巻の強さを表す藤田スケールの階級
 JEF: Japanese Enhanced Fujita scale 竜巻の強さを表す日本版改良藤田スケールの階級

参考文献

- Adachi, T. and W. Mashiko, 2020: High temporal-spatial resolution observation of tornadogenesis in a shallow supercell associated with typhoon Hagibis (2019) using phased array weather radar. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL089635, doi:10.1029/2020GL089635.
- Bodine, D. J. *et al.*, 2013: Tornado damage estimation using polarimetric radar. *Wea. Forecast.*, **28**, 139-158.
- 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*, 588-592.
- Fujita, T. T., 1960: A Detailed Analysis of the Fargo Tornadoes of June 20, 1957. U. S. Dep. of Commerce, *Wea. Bureau, Res. Pap.*, **42**, 75pp.
- Fujita, T. T., 1971a: Proposed Characterization of Tornadoes and Hurricanes by Area and Intensity. *SMRP Res. Pap.*, **91**, Univ. Chicago, 42pp.
- Fujita, T. T., 1971b: Proposed mechanism of suction spots accompanied by tornadoes. *Preprint 7th Conf. Severe Local Storms*, October, 1971, Kansas City, 208-213.
- Fujita, T. T., 1976: Spearhead Echo and Downburst Near the Approach End of a John F. Kennedy Airport Runway. *SMRP Res. Pap.*, **137**, Univ. Chicago, 51pp.
- Fujita, T. T., 1978: Manual of Downburst Identification for Project NIMROD. *SMRP Res. Pap.*, **156**, Univ. Chicago, 103pp.
- Forbes, G. S. and H. B. Bluestein, 2001: Tornadoes, tornadic thunderstorms, and photogrammetry: A review of the contributions by T. T. Fujita. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **92**, 73-96.
- Kawaguchi, M., T. Tamura and H. Kawai, 2019: Analysis of tornado and near-ground turbulence using a hybrid meteorological model/engineering LES method. *Int. J. Heat Fluid Flow*, **80**, 108464.
- Kawaguchi, M., T. Tamura and W. Mashiko, 2020: A numerical investigation of building damage during the 6 May 2012 Tsukuba tornado using hybrid meteorological model/engineering LES method. *J. Wind Eng. Indust. Aerodyn.*, **204**, 104254.
- Kobayashi, S. *et al.*, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48.
- Mashiko, W., 2016: A numerical study of the 6 May 2012 Tsukuba City supercell tornado. Part II: Mechanisms of

- tornadogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 3077-3098.
- Molinari, J. *et al.*, 2012: CAPE in tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 2452-2463.
- Muramatsu, T. *et al.*, 2016: Future change of tornadogenesis-favorable environmental conditions in Japan estimated by a 20-km-mesh atmospheric general circulation model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **94A**, 105-120.
- 村松貴有, 加藤輝之, 中里真久, 遠藤洋和, 鬼頭昭雄, 2020: 竜巻の将来予測. *気象研究ノート*, (243), 288-297.
- Ryzhkov, A. V. *et al.*, 2005: Polarimetric tornado detection. *J. Appl. Meteor.*, **44**, 557-570.
- Sueki, K. and H. Niino, 2016: Toward better assessment of tornado potential in typhoons: Significance of considering entrainment effects for CAPE. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 12597-12604.
- Wakimoto, R. M., 2001: Prologue. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **82**, 9-12.
- Yamauchi, H. *et al.*, 2013: Vertical structure of the Tsukuba F3 tornado on 6 May 2012 as revealed by a polarimetric radar. *Proc. 36th Conf. Radar Meteorol.*, 320.
- Yokota, S. *et al.*, 2016: The tornadic supercell on the Kanto Plain on 6 May 2012: Polarimetric radar and surface data assimilation with EnKF and ensemble-based sensitivity analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 3133-3157.
- Yokota, S. *et al.*, 2018a: Important factors for tornadogenesis as revealed by high-resolution ensemble forecasts of the Tsukuba supercell tornado of 6 May 2012 in Japan. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 1109-1132.
- Yokota, S. *et al.*, 2018b: Improving short-term rainfall forecasts by assimilating weather radar reflectivity using additive ensemble perturbations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**, 9047-9062.
-