

大気中の多様な渦・乱流現象等の普遍的理解を目指して

—2019年度藤原賞受賞記念講演—

新 野 宏*

1. はじめに

この度は、藤原賞をいただき、大変光栄に存じますと共に、私のように極めて個人的な興味で研究を行ってきた者に授賞いただいたことに深く感謝致しております。推薦並びに選考をいただいた皆様に、篤く御礼申し上げます。今回授賞いただいた業績は「大気中の渦・乱流等メソスケール気象に関する先駆的研究ならびに気象学・気象業務発展への貢献」ということですが、大学院に進学して以来、渦に惹かれて研究を行ってきた私にとって、渦の相互作用などの研究で著名な藤原咲平先生のお名前を冠したこの賞を「渦のデザインのメダル」と共にいただいたことは大きな喜びです。授賞の業績に挙げられている研究の多くは、大学院生と共同研究者の皆さんが中心に行ってきたものですので、この賞はこれら多くの皆さんと共にいただいたものと思っております。以下では、記念講演の際には時間の関係でお話しできなかった内容も含めて、私がこれまで行ってきた研究と活動について紹介させていただきたいと思っております。なお、より個人的な視点からの研究の回顧については新野(2019)にも述べていただいていたことを申し添えます。

2. 気象災害をきっかけに渦・地球流体力学の研究へ

私は高校を卒業するまで神戸で育ちましたが、この時期、どういふわけか、伊勢湾台風や第二室戸台風、

台風6523号などの強い台風が次々と来襲したほか、昭和36年梅雨前線豪雨、昭和42年7月豪雨による大きな被害も身近で起きました。そこで、何とか天気予報を良くして災害を防ぎたいと思うようになりました。高校では地学部に入り、ラジオ放送を聴いて天気図を描いたり、台風時に泊まり込みで観測をしたりしていましたが、ある日たまたま立ち寄った本屋で、「数値予報新講」(岸保 1968)という本を手にして、内容は十分にはわからぬものの、東京大学の地球物理学科に進んで気象の研究をしようと思うようになりました。

その後、東京大学理科一類、地球物理学科、同大学院地球物理学専攻修士課程に進み、松野太郎先生の指導を受けることになりました。ところが、この頃、偶然1964年に伊豆大島付近で起きた海上竜巻の幻想的な写真(宮内・宮内 2002)を目にして、当初の天気予報への想いほどこへやら、修士課程では竜巻の研究をやってみたいと思うようになりました。松野先生は、内心どう思われたかはわかりませんが、懐広く私の希望を受け入れて下さいました。当時、降水粒子にひきずられて生じた下降流が地表面に達すると、降水粒子が落ちてしまい、上昇流に転じて、竜巻を発生させるという仮説(Eskridge and Das 1976)が提案されました。そこで、回転する大気中で下向きにブルームが落ちてくるとどういふ振る舞いをするかを調べることにしました。

最初は、軸対称2次元の数値モデルを作り、ブルームについてはMorton *et al.*(1956)のようなブルームモデルで表現し、ブルームの外側は非粘性で密度一様の非圧縮流体として、両者を接続して解くことを目指しましたが、なかなか思うようには進みませんでした。修士2年の途中になって、松野先生から、このままで

* 東京大学大気海洋研究所。
niino@aori.u-tokyo.ac.jp

—2019年12月11日受領—
—2019年12月26日受理—

は修士論文をまとめるのは難しそうなので、同じ学内の海洋研究所に行って室内実験をしてみてもどうかと勧められました。そこで、木村龍治先生に相談にうかがったところ、技官の三澤信彦さんが実験装置を作って下さり、実験をすることになりました。実験の結果、意外なことに、回転系のブルームでは、先端部では発散する流れのために高圧部、根元ではエントレインメントに伴う収束のために低圧部ができ、この鉛直圧力傾度のためブルームが落ちなくなることがわかり、何とか修士論文を提出することができました。

博士課程では、修士の実験をもう少し続けて、投稿論文にまとめたかったので、岸保先生と松野先生のお許しも得て、木村先生に指導をお願いすることにしました。最終的には、修士でやった密度差があるブルームの実験は複雑なので、運動量のみを持った密度一様の噴流 (momentum jet) で実験をやり直して、線形理論と合わせて論文にまとめました (Niino 1978, 1980)。後になってみると、密度差のある場合のブルームの実験結果は、海洋の深層水の沈み込みの振る舞いにも応用可能と思われ、もう少し頑張って投稿論文にまとめていれば良かったと少し残念に思っています。

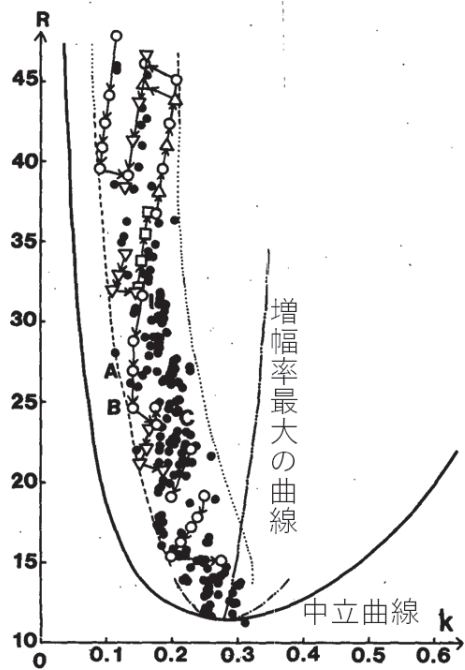
博士課程の1年が終わろうとする1978年2月28日に、川崎市から千葉県鎌ヶ谷市に至る41.2kmに被害を生じ、途中荒川鉄橋で地下鉄東西線の電車を転覆させた竜巻が起きました。この竜巻を調べるため、色々気象データも集めました。当時、我が国にはドップラーレーダーも無く、竜巻を博士課程での研究テーマにするのは難しそうだなと思いました。

当時は、木星の大赤斑にも興味を持っており、Charney and DeVore (1979) のブロッキングの研究など非線形現象に興味を持たれ始めていた時期でした。そこで博士論文では順圧不安定の非線形での振る舞いを弱非線形理論と室内実験で調べてみようと思いました。大赤斑は、帯状流の水平シアが強いところに存在しますが、どういうわけか、このように顕著な渦は経度方向にはこの場所にしか存在しません。順圧不安定がもし「亜臨界型不安定 (subcritical instability)」であれば、線形不安定のための臨界値以下のレイノルズ数でも、有限振幅の擾乱を与えるとそのまま生き残ることができるのではないかと考えて、弱非線形の安定性を調べました (Niino 1982)。しかしながら、期待に反して、順圧不安定は臨界値以下のレイノルズ数では擾乱が減衰する「超臨界型不安定 (supercritical instability)」であることがわかりました。大赤斑の説明には

つまずきましたが、気を取り直して順圧不安定の超臨界状態での非線形の振る舞いを調べるために三澤さんに実験装置を作っていただき、室内実験をすることにしました。

室内実験における水平シア流の形成には、水平方向の分子粘性と底面でのエクマン境界層によるスピンドウンの両方の効果が効くのですが、色々工夫してみると、擾乱の非線形の振る舞い (履歴現象や多重解) を含むこの水平シア流の安定性は、適切に定義されたレイノルズ数 R と無次元化された波数だけで記述できることがわかりました (第1図; Niino and Misawa 1984)。

地球流体力学の魅力は、その結果の普遍性・恒久性にあると思います。紙数の関係で割愛しますが、そのほかにも、海陸風やヒートアイランド循環などの水平



第1図 Stewartson の $E^{1/4}$ 層の不安定で生ずる擾乱の振る舞い。横軸は $E^{1/4}$ 層の厚さで無次元化した擾乱の波数、縦軸はレイノルズ数。太い実線は線形安定性理論による中立曲線、細い実線は増幅率最大の曲線、破線は有限振幅の擾乱が安定に存在する領域の境界、黒丸はあるレイノルズ数に対して実験で実現した波数、実線で結ばれた白丸はレイノルズ数を変化させたときの波数の変化を示す (Niino and Misawa 1984を改変)。

対流 (Niino 1987 ; Mori and Niino 2002 ; Niino *et al.* 2006), 二重拡散対流 (Niino 1986 ; Yoshida *et al.* 1989 ; Noguchi and Niino 2010a, b), バスタブ渦 (Yukimoto *et al.* 2010), 台風によって生ずる海洋の運動 (Suzuki *et al.* 2011) やプランクトンの増殖 (Shibano *et al.* 2011) などに関して, 魅力ある研究ができたこと個人的には思っています.

3. 大気境界層

1981年3月に博士課程を単位取得中退して, 気象庁に採用いただきました. この前年, 1980年に気象研究所は高円寺からつくばに移転し, 大型回転風洞装置を整備していました. 大学院で回転実験をやっていたこともあり, 入庁と同時にこの装置を管理していた気象研究所物理気象研究部第二研究室に配属されることになりました. この研究室では花房龍男さん, 藤谷徳之助さん, 加藤真規子さんによる大気境界層の観測的・実験的研究が行われていました. 大気境界層については東京大学ではほとんど勉強する機会が無かったのですが, 博士課程1年のとき, 1年間米国インディアナ州立パデュー大学に留学する機会を得て, Roger H. Shaw 先生 (その後, カリフォルニア大学サンディエゴ校) による大気境界層の非常に優れた講義を受け, その魅力を知っていたことから, 不思議な巡り合わせを感じました.

3.1 乱流クロージャーモデル

当時, 大気・海洋の数値モデルでは, 大気境界層のパラメタリゼーションとして Mellor-Yamada の乱流クロージャーモデル (以下 MY モデル ; Mellor and Yamada 1974, 1982) が広く使われていました. このモデルは, 乱流量の2次モーメントの支配方程式に基づく定式化がなされており, 非等方性の程度に応じた系統的な予報統計量の数の増減が可能であること, 中立成層の室内実験から求めた普遍定数を用いるだけで成層のある場合の境界層の特性を表現可能であること, 観測された接地境界層の相似則をよく再現するなど, 物理的に最も合理的なものであると思いました. ただし, 対流混合層の発達が十分でないこと, 安定成層で乱流が弱くなり過ぎるなどの課題も指摘されました. また, 私には, Mellor and Yamada (1982) で提案されている乱流の長さスケールの予報式は物理的根拠が明確でないように思えましたし, 接地境界層の長さスケールが観測事実と異なり, 安定度に依らず kz (z は地表面からの距離, k はカルマン定数) で与え

られているにもかかわらず, なぜ接地境界層の相似則を観測と良く合う形で再現できるのか疑問に思っていました. しかしながら, 気象研究所在任中には良い改善策には辿りつけませんでした.

1995年に東京大学海洋研究所の海洋気象部門に異動してしばらくして, 日本気象協会の中西幹郎さんが社会人大学院制度で博士課程に来られました. 中西さんは, 霧の予報を良くするには境界層の乱流スキームの改良が必要と考えていましたが, 私はそのためにはラージエディシミュレーション (LES) を使って様々な条件での境界層の乱流データベースを作り, それに基づいて MY モデルの改良をしてはどうかと提案しました. 中西さんは驚異的な速さで独自の LES モデルを作り, 乱流データベースを作成して MY モデルの改良を行いました (Nakanishi 2001 ; Nakanishi and Niino 2004, 2006, 2009).

詳しくは, 中西・新野 (2011) を参照いただきたいと思います. (1) MY モデルでは, モデルに現れる長さのスケールはすべて乱流の支配長さスケール (master lengthscale) l に比例すると仮定されており, l は

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{l_{sn}} + \frac{1}{l_E}$$

のように与えられていました. ここで, l_{sn} は中立な接地境界層の長さスケールで $l_{sn} = kz$, l_E は乱流エネルギー分布に基づく長さスケール

$$l_E = 0.1 \frac{\int_0^z qz dz}{\int_0^z q dz}$$

です. 中西さんは l の表式として, 乱流によって安定成層に逆らってかき混ぜることができる鉛直スケール l_B を加え,

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{l_s} + \frac{1}{l_E} + \frac{1}{l_B}$$

のように, 接地境界層の長さスケール l_s と乱流エネルギー分布に基づく長さスケール l_E 及び l_B の3つの長さスケールの幾何平均で与えられると仮定しました. ここで, LES による乱流データベースでは, l_s は観測で見られるように, 安定成層が強くなると共に減少する

結果になったため、これに整合する表現を採用することにしました。(2) 圧力-歪共分散項と圧力-温度勾配共分散項のパラメタリゼーションに中立成層の実験結果だけからは決まらない項も考慮し、モデルのすべての普遍定数を乱流データベースに基づき見直しました。

このようにして完成したモデルは Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino の頭文字をとり、英単語のスペルとしても不自然でない MYNN モデルと名付けました (Nakanishi and Niino 2009)。第 2 図は、オランダの Cabauw で観測された放射霧の事例 (Musson-Genon 1987) について MY モデルと MYNN モデルで再現した結果を、3次元の LES で再現した結果 (Nakanishi 2000) と比べたものです。日の出後の対流混合層の発達、MY モデルでは、LES モデルの結果に比べて不十分であるのに対し、MYNN モデルでは良く再現されていることがわかります。図は略しますが、LES モデルで見られた霧層上端で夜半に起きる Kelvin-Helmholtz 不安定による乱流エネルギーの増加も、MYNN モデルは再現することがわかりました (Nakanishi and Niino 2004)。

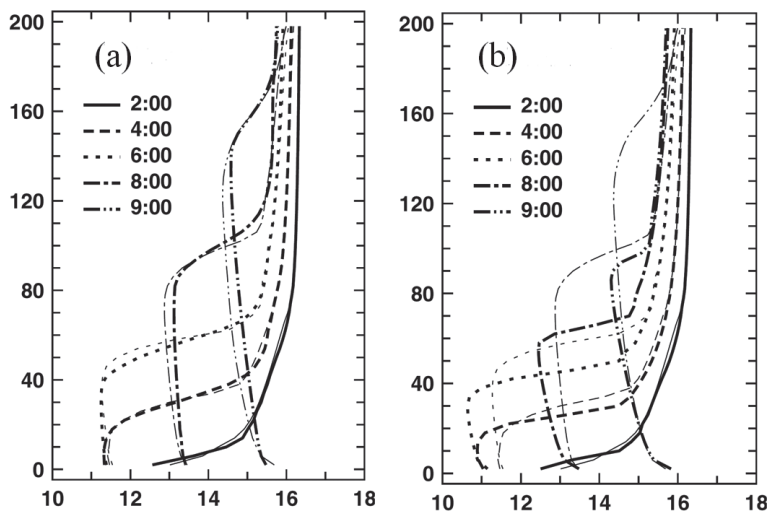
その後、MYNN モデルには、様々な改良が加えられて、気象庁の現業予報モデルであるメソモデル・局地モデル、米国 NOAA の現業同化予報サイクル (Rapid

Refresh)、大気・海洋結合気候モデル MIROC5、全球非静力学モデル NICAM、米国コミュニティモデル WRF、海洋非静力学モデル NHOES などで広く使われています。高校時代に天気予報を良くしたいと思って気象の道に入りながら、実際には基礎研究に明け暮れていた私にとって、少しは現業数値予報のお役に立てたことは大変嬉しく思いました。

3.2 台風境界層・塵旋風

大気境界層に関してはこれ以外にも、中西さんの LES モデルを使って、台風の境界層に生ずる水平ロール状渦の形成機構 (Nakanishi and Niino 2012) や晴れた日の日中の裸地や火星大気に生ずる塵旋風の形成機構 (Ito *et al.* 2013) を解明したほか、境界層乱流のグレーゾーン問題 (Wyngaard 2004) にも取り組みました (Ito *et al.* 2015)。以下では台風境界層の水平ロール状渦と塵旋風の研究について簡単に紹介します。

台風は直径約1000km の渦ですが、台風通過後の被害を調査すると数100m 単位の被害が散在している様子が見られることがあります。米国におけるハリケーンのドップラーレーダー観測 (Wurman and Winslow 1998) では、台風の気象境界層の中に、水平スケール数100m 程度の水平軸を持ったロール状渦が存在することが指摘されています。このような水平ロール渦が発生する機構を調べるために、台風中心から一定距離



第 2 図 放射霧の事例で日の出後の温度の鉛直分布の時間変化を 1 次元モデルで再現した結果：(a) MYNN モデルのレベル 3 と (b) MY モデルのレベル 3。細線は LES の結果。図の横軸は摂氏温度、縦軸は高度 (m)。

©Adapted by permission from Springer (Nakanishi and Niino, 2006: An improved Mellor-Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. Bound.-Layer Meteor.)

のところに計算領域を設定し、上空で傾度風平衡を仮定してLESモデルにより台風境界層の構造を再現しました。その結果、ドップラーレーダー観測と類似した水平ロール渦が再現されました(第3図)。この水平ロール渦の形成機構を解析したところ、台風境界層の平均動径風の変曲点に起因する鉛直シア不安定が重要な役割を果たしていることがわかりました(Nakanishi and Niino 2012)。観測から推定されていたように、この水平ロール渦の下降流域では、上空の大きい運動量の気塊が運ばれて風が強まり、上昇流域では風が弱まることもわかりました。もともと平均的な風が強い台風内で、水平ロール渦による鉛直運動量輸送の効果が加わると局所的な被害が散在して生ずる可能性があると考えられます。最近、伊藤純至さん(現在、東北大学)は、京コンピュータを使って、台風全体を水平解像度100mのLESで表現する数値シミュレーションを行い、中心からの半径に応じて台風境界層には3種類の水平ロール構造が存在することを示しています(Ito *et al.* 2017)。観測からは、台風の日を取り巻く壁雲付近で竜巻に似た渦も見つかっており(Wurman and Kosiba 2018)、台風にはまだまだ興味深い多様な微細構造が埋め込まれているようです。

一方、塵旋風に関しては、以前から、水平一様な地表面加熱で生ずる対流混合層の中に、果たして塵旋風のような強い渦が形成されるかLESモデルで調べてみたいと思っていましたが、残念ながら、Kanak *et*

al.(2000)が同じアイデアの数値計算の論文を出してしまいました。しかし、2001年に修士課程に進学した田中 亮さんがこの問題に興味を持ち、中西さんのLESモデルを使って、一般風のある場合と無い場合の塵旋風の特性の違いを調べ、修士論文にまとめました(田中 2005)。その後、当時博士課程の大学院生だった伊藤さんが、田中さんの研究を進展させると共に(Ito *et al.* 2010)、背景風が無い時の塵旋風の発生機構を理解するために、後方流跡線に沿った渦度と物質面に伴う循環の詳細な解析を行いました。その結果、塵旋風は、乱流状態の対流によって作られた対流混合層中層の鉛直軸周りの循環が下降流で地表面近くに運ばれて、上昇域に収束し、引き伸ばされることで発生することがわかってきました(Ito *et al.* 2013)。

4. 寒気内低気圧

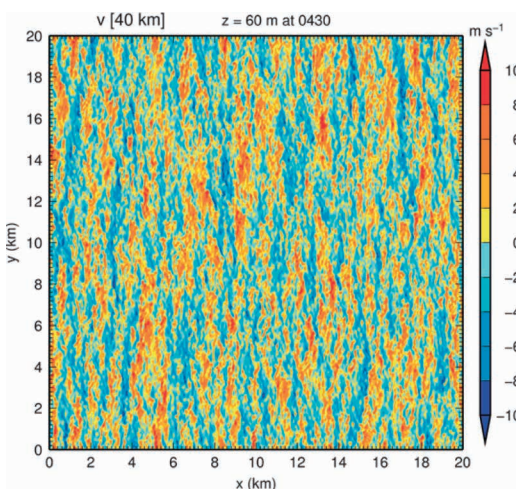
冬季の日本海では、しばしば寒気内メソ低気圧(Polar mesocyclone:以下PMC)というメソ低気圧が発生します。PMCのうち、水平スケールが200-1000kmで最大風速が17m/s(gale force wind)以上のもはポーラーロウ(Polar low:以下PL)と呼ばれます(Rasmussen and Turner 2003)。PMCはノルウェー海、南極海など世界の高緯度の海上で寒候期に発生しますが、活発な積雲対流を伴って短時間に急速に発達し、暴風や高波・大雪を伴うため漁船など海上交通にとって危険な大気擾乱です。

4.1 事例研究

日本海のPMCについては、観測的研究(例えばNinomiya 1989, 1991, 1994; Ninomiya and Hoshino 1990; Ninomiya *et al.* 1990, 1993)や静力学モデルによる事例研究(例えばNagata 1993; Tsuboki and Asai 2004)、準地衡風モデルを用いた理論的研究(Tsuboki and Wakahama 1992)などが行われてきました。しかし、PMCは積雲対流が重要な役割を演じ、数時間で発達する非地衡風効果が無視できない擾乱であるため、大学院生の傳 剛さん(現在、中国海洋大学)と柳瀬 亘さん(現在、気象研究所)、渡邊俊一さん(現在、気象研究所)が非静力学モデルを用いた事例研究を行い、構造と発達機構を調べました(Fu *et al.* 2004a, b; Yanase *et al.* 2004; Watanabe and Niino 2014)。

4.2 多様な形態と発達機構

PLには台風に似た目とスパイラルバンドを伴う比較的軸対称な雲を伴うものや温帯低気圧に似たコマ状の雲を伴うもの、その中間の複雑な雲分布を伴うも



第3図 LESで再現された台風境界層の高度60mにおける接線風の水平分布(Nakanishi and Niino 2012)。

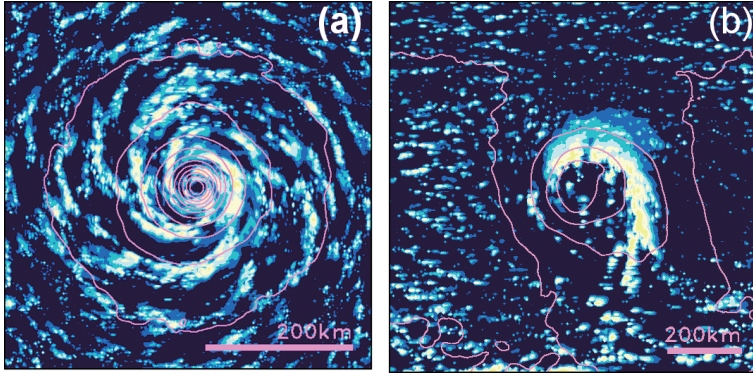
のなど様々な形態のものがあります。これまでPLの発達に関してはCISK (Rasmussen 1979)・WISHE (Emanuel and Rotunno 1989)や湿潤傾圧不安定 (Harrold and Browning 1969) など様々な機構が提案されてきており、統一的な理解が進んでいませんでした。そこで柳瀬さんは様々な形態の違いを生ずる要因と環境場・発達機構の関係の理解を深めるため、傾圧性の違いによる冬季海洋上での渦の発達と構造の違いを調

べる理想化実験を行い、傾圧性が小さいときには台風に似た低気圧、傾圧性が大きいときにはコマ状の雲を伴う低気圧が発達することを明らかにしました (第4図; Yanase and Niino 2005, 2007)。この研究は、湿潤過程を含む複雑なメソ現象に、地球流体力学的アプローチを適用した良い例になったと思います。

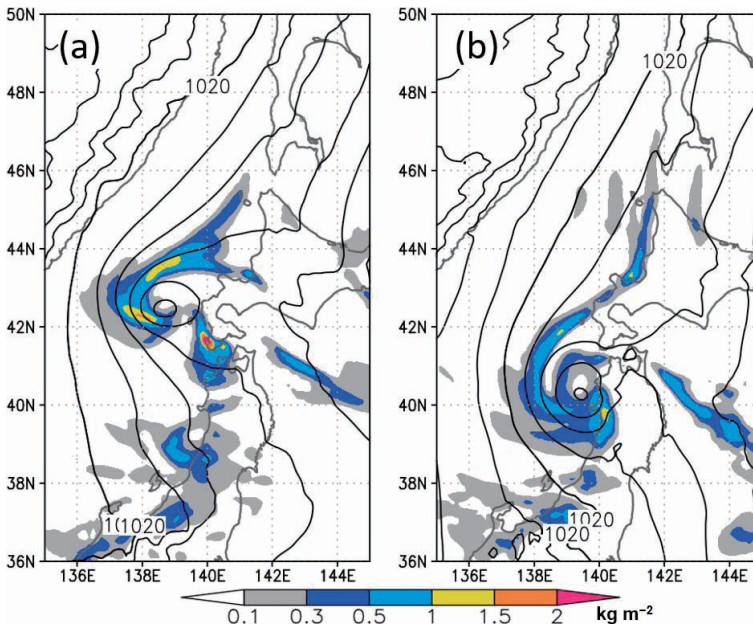
4.3 環境場と形成機構の普遍的理解

その後、現実場において、より普遍的かつ包括的な

PMCの環境場と形成機構についての理解を進めるため、柳瀬さんと渡邊さんは日本海のPMCのコンポジット解析を行いました。最初は、客観解析データJRA-55 (Kobayashi *et al.* 2015)に基づき、PLの客観的な検出と追跡を行い、PLの発生場所と移動方向の統計的解析を行いました (Yanase *et al.* 2016)。その結果、日本海のPLは主として、北海道の西海上で東進するものと南進するもの、中部日本海と西部日本海を東進するものの4つのタイプに分けられることがわかりました。そこで、これらの各タイプについてコンポジット解析を行い、各タイプのPLの発生・発達に関する環境場の変化を明らかにしました。渡邊さんはPLより水平スケールの小さいPMCにも注目するため、JRA-55よりも水平解像度が良い気象庁メソ解析を使って客観的にPMCを検出・追跡する手法を開発し (Watanabe *et al.* 2016)、PMCが主として、北海道の西で発生して南進するもの、東進するもの、朝鮮半島付け根で発生して南東進するもの、東進するもの、朝鮮半島南東沖で発生して東進するものの5つのタイプに分けら



第4図 理想化数値実験で得られたポーラーローウの降水分布と等圧線 (桃色線): (a) 傾圧性が無い場合, (b) 傾圧性がある場合 (柳瀬 亘氏提供)。



第5図 PMCが北緯43度に最も近い時刻を $t=0$ とした全球解析のコンポジットで得られた $t=-48\text{hr}$ の場を初期値、6時間毎のコンポジットの場を境界値として、水平解像度5 kmの気象庁非静力モデルで行った数値実験によるPMCに伴う凝結水物質の鉛直積分 (カラー) と等圧線 (実線: 2 hPa毎)。 (a) $t=6\text{hr}$, (b) $t=18\text{hr}$ (渡邊俊一氏提供)。

れることを示しました。そして、それぞれのタイプのPMCの発生・発達に関わる環境場の時間変化と構造に関するコンポジット解析を、全球客観解析とメソ解析の両方について行いました (Watanabe *et al.* 2017, 2018)。特に興味深かったのは、北海道の西海上で発生するPMCの環境場について、気象庁全球解析を使って48時間前から6時間毎のコンポジット解析を行い、その結果を初期値・境界値として気象庁非静力学モデルでPMCの再現実験を行ったところ、事例解析で見られるPMC (Fu *et al.* 2004a; Yanase *et al.* 2004) に極めてよく似たPMCが再現されることがわかったことです (第5図)。このことは、コンポジット解析で得られたPMCの環境場の時間変化が、普遍性の高い結果であることを示すものです。そこで、こうして再現されたPMCに対する地形や海面フラックス・凝結熱などの影響を調べる感度実験を行うことにより、北海道西岸で発生するPMCの発生・発達に本質的な要因を調べることができました。その結果、このPMCには、大陸東岸に沿って存在する山脈による寒気のブロッキング効果とその結果生ずる間宮海峡からの寒気の吹き出し、そしてこの吹き出しに対する海面からの顕熱・潜熱フラックスと凝結熱の解放が重要な役割を演ずることが明らかになりました。その他の4つのタイプのPMCについても、全球客観解析とメソ解析に基づく同様のコンポジット解析並びに再現実験により、普遍的な発生環境と発生・発達機構を明らかにすることができました。これら一連の研究により、日本海のPMCに対する普遍的・包括的理解は大きく進んだと思っています。渡邊さんは同様の手法をDSJRA-55 (Kayaba *et al.* 2016) に適用して、PMCの年々変動と大規模環境場の関係についても解明を進めつつあります。

5. 竜巻

5.1 現地調査・観測的研究と統計的研究

話は1980年代の気象研究所時代に戻ります。博士論文のテーマに竜巻を選ぶことはあきらめたのですが、その後も竜巻に関するジャーナル論文には目を通していました。そんな中、1990年になって、関東地方では複数の竜巻が起きる事例が2度発生しました。最初は、9月19日夜、紀伊半島に上陸した台風第19号の北東にあたる栃木県壬生町で藤田スケール (Fujita 1971) F2の強い竜巻が起きました。翌朝から、鈴木修さんほか気象研究所の同僚と一緒に詳細な現地調査

を行いました。この夜は、夕方からの6時間の間に、関東平野では気象研究所のドップラーレーダーで9個のスーパーセルが観測され、これに伴って3個の竜巻と2カ所で突風が起きていたことがわかりました。ここで、スーパーセル (Browning 1964) というのは、雲内にメソサイクロンと呼ばれる直径数kmの回転上昇気流を持つ特殊な積乱雲です。この夜、観測されたスーパーセルは、米国中西部の典型的なスーパーセルとは異なり、南北に細長い降水分布を持ち、鉛直スケールが4km程度と低い、小型のスーパーセル (mini supercell) であることがわかりました (Suzuki *et al.* 2000)。

同じ年の12月11日、今度は千葉県の房総半島で複数の竜巻が発生しました。中でも、茂原市の竜巻は日本で最強クラスのF3のものでした。この竜巻についても気象研究所の同僚と共に、詳細な現地調査を行いました。この竜巻の親雲では、竜巻発生の40分前から気象研究所のドップラーレーダーでメソサイクロンが探知されたほか、鴨川市で竜巻を起こした親雲も明瞭なスーパーセルの特徴を示しました。これらの竜巻とその親雲について解析した論文が、竜巻研究を志してから15年後に、竜巻の本場米国のMonthly Weather Reviewに掲載された (Niino *et al.* 1993) ことには感慨深いものがありました。

1990年の2つの竜巻事例により大きな被害が出たことをきっかけにして、気象研究所では所内共同研究という複数の研究部が協力して研究する枠組みが創設され、その最初の課題として「竜巻」が選ばれました。この所内共同研究により、関東地方で起きた多くの竜巻や突風の被害調査やドップラーレーダー解析を行いました。また、入手可能な文献のすべてに目を通して、1961年から1993年までの日本の竜巻のデータベースを作り、統計的研究も行いました (Niino *et al.* 1997)。

5.2 シミュレーション研究

5.2.1 竜巻の親雲 (スーパーセル)

1995年に東京大学海洋研究所に異動し、当時助手をしていた坪木和久さん (現在、名古屋大学宇宙地球環境研究所) の支援を得て、1990年の栃木県壬生町の竜巻の際、関東地方で多くのミニスーパーセルが観測された事例を、当日21時の館野の高層観測を水平一様に与えた水平格子間隔500mの数値シミュレーションで調べました。その結果、レーダーで観測されたミニスーパーセルに良く似た特徴を持つストームの再現に成功しました。メソサイクロンの鉛直渦度の成因につ

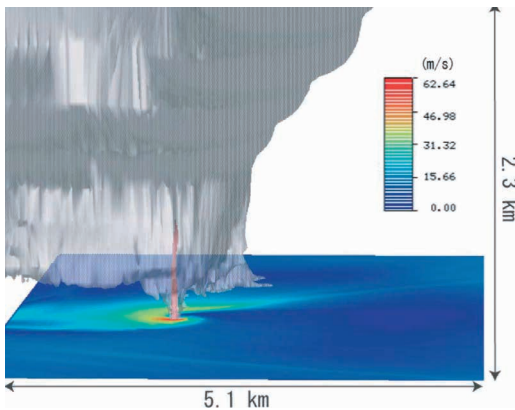
いて、後方流跡線を用いた渦度収支により、大学院生の野田 暁さん（現在、JAMSTEC）と共に調べたところ、環境場の鉛直シアに伴う水平渦度を立ち上げる効果が大いことがわかりました（Niino and Noda 2000）。

5.2.2 竜巻の理想化実験

その後、野田さんは米国オクラホマ州の Del City で竜巻が起きたときの高層観測を水平一様に与えて、格子間隔70mのシミュレーションを行い、スーパーセルに伴う竜巻の再現に成功しました（第6図；Noda and Niino 2005, 2010）。詳細は省きますが、このシミュレーションでは、竜巻はガストフロント上の渦を下層のメソサイクロンに伴う強い上昇流で引き伸ばして発生するように見えました。これらのシミュレーションから環境場が適切に与えられれば、スーパーセルとこれに伴う竜巻が再現できるという感触を得ることができました。なお、Noda and Niino (2010) は気象集誌論文賞を受賞しました。

5.2.3 現実の竜巻の再現実験

2006年9月に、台風13号が九州の西海上を北上中に、宮崎県延岡市でF2の竜巻が発生し、死者3名を含む大きな被害を生じました。この事例についても、宮崎地方気象台と共に、現地調査を行いました。これまでの経験から、この竜巻についてはモデルによる再現ができるのではないかと考えていたところ、益子涉さん（気象研究所）が、最内側の解像度を50mとした4重ネストの計算で、世界で初めて現実事例の竜巻の再現に成功した印刷論文^(後註)を発表しました

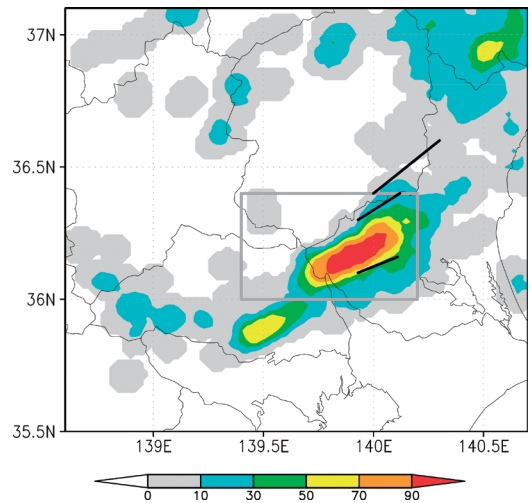


第6図 数値実験で得られたスーパーセルに伴う竜巻。地表面の色は風速、灰色と赤色は雲水の混合比 0.1g kg^{-1} と鉛直渦度 0.6s^{-1} の等値面（Noda and Niino 2010）。

（Mashiko *et al.* 2009）。再現された竜巻の中心付近に置いた空気塊の後方流跡線に基づく渦度と循環の収支解析を行ったところ、竜巻の回転源としては環境場の鉛直シアに伴う水平渦度が重要であることがわかりました。また、竜巻の発生には、降水粒子の荷重により生じた下降気流が、地表面に達して作り出した2次的なガストフロントの先端での収束が重要であることもわかりました。この論文の解析手法は、竜巻の発生機構を調べる上で模範的なものとして、以降の多くの論文で利用されています。

5.3 気象庁の竜巻関連業務の強化

2006年は11月7日にも北海道佐呂間町でF3の竜巻が発生し、工事用のプレハブ事務所内で会議をしていた9名が亡くなる大きな災害が起きました。また、この前年の2005年12月25日には、JR羽越線の特急「いなほ14号」が竜巻の被害域の延長線上で脱線転覆し、5名が亡くなる事故も起きていたことから、気象庁では突風関連業務を強化することになりました。具体的には、突風発生時の現地調査を徹底して、可能な限り現象の特定を図ること、海上竜巻など被害の無い竜巻に関しても目撃情報を報告することなどです。これに伴い、竜巻等突風データベースも1961年に遡って整備されましたが、この際、私が作成していた竜巻データベース（Niino *et al.* 1997に基づき2000年まで拡張したもの）も参考にいただきました。また、2005年度



第7図 水平解像度350mの実験において、地上0.8kmで 0.03s^{-1} を超える鉛直渦度を持つ下層のメソサイクロンが5 km以内を通過する確率(%)の分布。黒線は実際の竜巻の被害域を表す（Yokota *et al.* 2016）。

から始まった気象庁現業レーダーのドップラー化も加速し、2012年度までに全国20カ所のドップラー化が完了しました。さらに、2008年3月からは竜巻注意情報(瀧下 2009)、2010年5月からは竜巻発生確度ナウキャストの発表が開始されました(瀧下 2010)。

5.4 スーパーセルと竜巻のアンサンブル実験

2012年5月6日には茨城県と栃木県でほぼ同時に3つの竜巻が発生しました。このうち、つくば市を襲ったF3の竜巻は、多くの研究機関に近接する場所で起きたこともあり、これまでになく多くの研究がなされました。例えば、決定論的な竜巻の再現シミュレーションによる詳細な渦度源の解析(Mashiko 2016a, b)、下層のメソサイクロンのアンサンブルハインドキャスト(Seko *et al.* 2015; Yokota *et al.* 2016)、現実事例の竜巻の世界初のアンサンブルハインドキャスト(Yokota *et al.* 2018)、現実事例の多重渦構造を持った竜巻の世界初の再現実験(Mashiko and Niino 2017)、気象研究所二重偏波レーダーによるわが国初の竜巻渦に伴う飛散物の観測(Yamauchi *et al.* 2013)、動画の飛散物の動きの自動追跡(PIV解析)による竜巻渦の風速分布の研究、基礎から転覆した風工学的に珍しい家屋の研究などです。ここでは、下層のメソサイクロンと竜巻のアンサンブルハインドキャストの研究を紹介いたします。

つくば竜巻については、瀬古 弘さん(気象研究所)がnested LETKFというアンサンブル予報を用いたデータ同化手法で、水平解像度1.875kmの12メンバーのアンサンブル初期値を作り、これを水平解像度350mにダウンスケーリングして下層のメソサイクロンの予報を行いました。その結果、竜巻が観測された3カ所の近くを下層のメソサイクロンが通過するメンバーが得られ、観測同様、3カ所で竜巻が起きる可能性が示唆されるという大変興味深い結果が得られました(Seko *et al.* 2015)。横田 祥さん(現在、気象庁)は、瀬古さんと同様の手法を用いて、メンバー数を32に増やし、更に瀬古さんが使わなかった携帯電話基地局の地上観測や気象研究所の二重偏波レーダーなど多様な観測データを同化することにより、つくば竜巻を起こした下層メソサイクロンの予想位置が改善できることを示しました(Yokota *et al.* 2016)。第7図は、解像度350mのダウンスケール予報から求めた、下層のメソサイクロンが5km以内を通過する確率を示したものです。通過確率は竜巻の被害域(黒線)の周辺で大きくなっており、この図は将来の数値予報に基づく

竜巻予報(Warn-on-forecast; Stensrud *et al.* 2009)のイメージを与えるものになっていると思われます。

横田さんは更に、解像度350mのアンサンブルの結果に解像度50mのモデルをネストして、世界初の現実の竜巻のアンサンブルハインドキャストに成功しました(Yokota *et al.* 2018)。50m解像度の渦度は350m解像度の渦度より1桁大きくなり、多様な竜巻が発生するメンバーが得られましたが、竜巻の渦度源を調べるために、その中でも特に渦度が大きい7メンバーについて、竜巻渦の中心付近に粒子を置き、その後方流跡線から、循環の変化に寄与する要因について調べました。

ところで、現在のところ、竜巻は地上約1kmくらいに生ずる下層のメソサイクロンに伴う低圧により作られる強い上昇気流が、地上付近の水平渦度を立ち上げ、引き伸ばして発生すると考えられています。立ち上げられる水平渦度の成因としては、環境場の風の鉛直シアの水平渦度(Mashiko *et al.* 2009)、地表面の摩擦で作られる水平渦度(Schenkman *et al.* 2012, 2014)、冷たい下降流の縁辺で傾圧的に作られる水平渦度(Markowski *et al.* 2008; Mashiko 2016b)などが提案されていますが、いずれも事例研究に留まり、決着はついていません。

循環は傾圧項と摩擦項により変化しますが、アンサンブル実験で得られた循環の解析から、いずれのメンバーにおいても傾圧項は小さく、摩擦項が支配的であることがわかりました。ただし、摩擦項は常に生成に寄与するわけではなく、また粒子を置く位置や時刻によっては傾圧項が大きい場合もありました。

そこで各アンサンブルメンバーで、竜巻の最大渦度と相関の高い物理量を調べたところ、竜巻の渦度は3分前の高度1kmの下層メソサイクロンの渦度および地表付近の水蒸気混合比と高い相関を持つことがわかりました。このことは、水平渦度の成因は必ずしも重要では無く、下層のメソサイクロンによって生ずる上昇流が竜巻の発生に重要なことを示唆しています。下層のメソサイクロンは解像度350mでも再現可能であるため、この結果はアンサンブル予報を利用した将来の竜巻予報を期待させるものとなっています。

5.5 日本版改良藤田スケール

つくば竜巻の後、気象庁に設置された竜巻等突風予測情報改善検討会(座長:新野)による提言「竜巻等突風に関する情報の改善について」(2012年7月)を受けて、これまで突風の被害から風速を推定するのに利

用してきた藤田スケールに代わり、日本版改良藤田スケールを作るため、風工学や気象学の専門家からなる「竜巻等突風の強さの評定に関する検討会」(座長：田村幸雄東京工芸大学名誉教授)が2013年に設置されました。これは、オリジナルの藤田スケールが米国の構造物の被害から風速を推定するように設計されており、我が国で気象台の職員が被害調査を行うときに必ずしも使い易くないこと、また、最新の風工学の知識に照らすと藤田スケールで与えられている推定風速が、F3以上では過大評価になっており、最近米国でも改良藤田スケール(Enhanced Fujita scale: EFスケール; McDonald and Mehta 2006)が導入されたことを反映しています。EFスケールでは、28の被害指標(Damage Indicator: DI)とその被害程度(Degree of damage: DOD)に基づき、気象局等の職員が風速推定と対応するEFスケールの階級を決めやすくなっています。また、各階級に対応する推定風速は変わるものの、被害の状況に関しては、Fスケールの階級とEFスケールの階級は統計的には同じになるように工夫されており、過去のFスケールに基づく様々な統計は継続できるようになっています。

しかしながら、EFスケールのDIには米国で広く見られる構造物が選ばれており、我が国の代表的な構造物とは異なるため、我が国独自のDIに基づく改良藤田スケール(Japanese Enhanced Fujita scale: JEFスケール)の開発が望まれていました。「竜巻等突風の強さの評定に関する検討会」では、風工学研究者の皆さんの全面的な協力を得て、最新の研究成果を反映したJEFスケールに関するガイドラインを策定しました(気象庁 2015)。私もこの検討会に副座長として加えていただき、微力ながらその策定に貢献させていただき貴重な機会をいただきました。

5.6 竜巻を生ずる低気圧の構造と環境場

話が少しそれましたが、次に、竜巻を生ずる熱帯低気圧や温帯低気圧の構造と環境場に関する研究について触れさせていただきたいと思います。我が国で発生する竜巻の46%は温帯低気圧、20%は台風に伴って発生しています(Niino *et al.* 1997)。竜巻は直径100m程度の小規模な渦ですが、強い竜巻の多くを生み出すスーパーセルは水平スケール100km程度のメソスケールの環境場のもとで発生し、そのような環境場は温帯低気圧や熱帯低気圧が作り出します。竜巻を起こしやすい温帯低気圧や台風は、総観規模の環境場の影響で特有の構造をしていると思われることから、水平

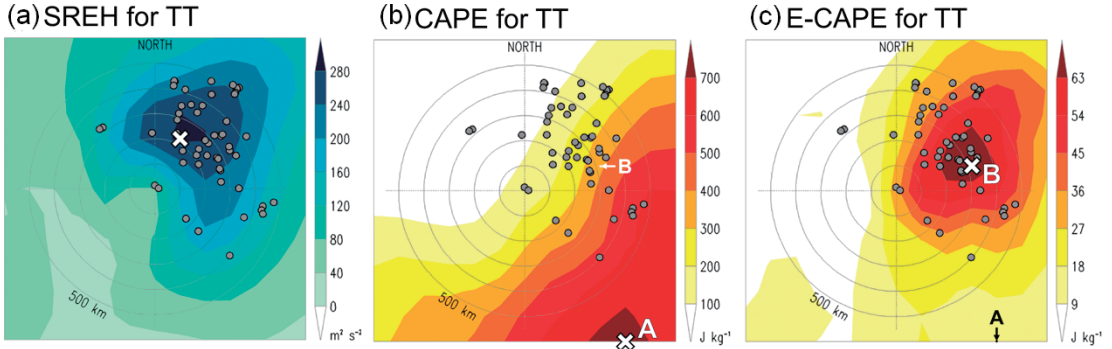
スケールにして数万倍異なる温帯低気圧・台風から竜巻に至るまでの階層構造が存在していると考えられます。

5.6.1 竜巻を生ずる熱帯低気圧

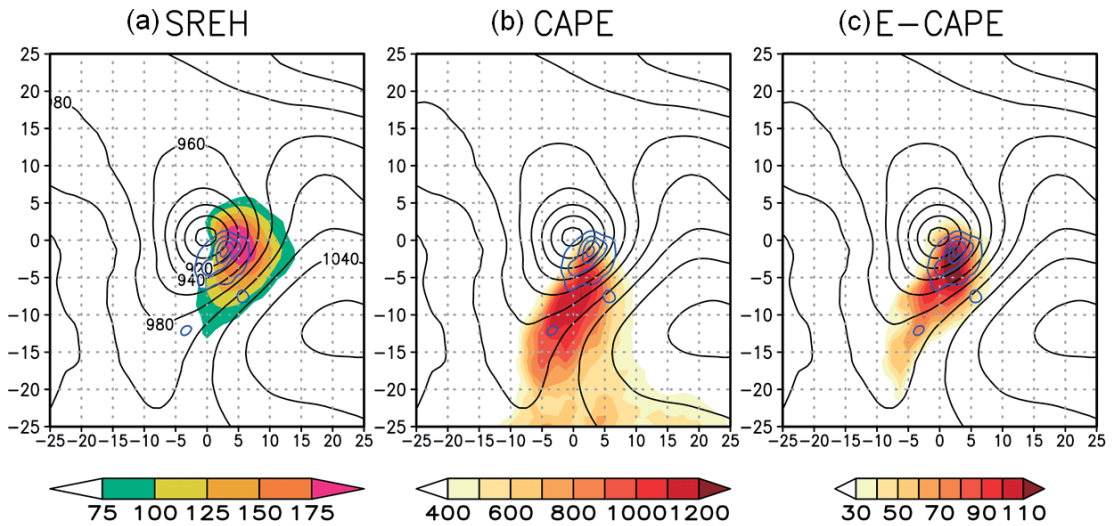
最初に、竜巻を伴う台風(Tornadic Typhoon: 以下、TT)と伴わない台風(Non-tornadic Typhoon: 以下、NT)の構造の違いを見てみましょう。これまで、熱帯低気圧に伴う竜巻が熱帯低気圧の北東象限あるいは進行方向右前方で発生しやすいこと(McCaul 1991)やTTではNTに比べて大気下層の鉛直シアが大きいこと(Novlan and Gray 1974)などは知られていました。しかし、TTとNTの3次元的な構造の違いは調べられていませんでした。末木健太さん(現在、理化学研究所計算科学研究センター)はJRA-55で表現された台風の中心を揃え、北を上にしてTTとNTについてそれぞれ重ね合わせて平均するコンポジットでSREHとCAPEの分布を調べました(Sueki and Niino 2016)。ここで、SREH(Storm-relative Environmental helicity: ストームに相対的な環境場のヘリシティ)は環境場の風の鉛直シアの持つ水平渦度を上昇流で立ち上げたときの鉛直渦度の作られやすさの目安を与えるパラメータで、 k を鉛直方向の単位ベクトル、 V を環境風の水平風速ベクトル、 C をストームの水平移動速度ベクトル、 z を鉛直座標として、数式では

$$\text{SREH} = -\int_0^{3\text{km}} k \cdot (V - C) \times \frac{\partial V}{\partial z} dz$$

で与えられます。また、CAPEは対流有効位置エネルギー(Convective Available Potential Energy)です。第8図はTTに対するSREHとCAPEの分布を示したもので、灰色の丸は竜巻の発生位置です。NTに対する図は省略しますが、SREHもCAPEもTTの方がNTよりも有意に大きくなっていることがわかりました。但し、SREHは台風中心の北東象限で大きく、竜巻の発生分布と良く対応していますが、CAPEは南東象限で大きく、対応が良くありません。そこで、末木さんはエントレインメントを考慮したCAPE(Entraining CAPE: E-CAPE; Romps and Kuang 2010; Molinari *et al.* 2012)を調べたところ、E-CAPEの大きい領域は竜巻の分布と非常に良く対応することを見付けました。これは主として、南東象限の中層は比較的乾燥しているが、北東象限の中層は南東象限に比べて湿潤であるためです。さらに、竜巻を生ずる台



第8図 竜巻を伴う台風のコモジットから求めた台風中心に相対的な (a) SREH, (b) CAPE 及び (c) E-CAPE の分布と竜巻の位置(灰色の丸)(Sueki and Niino 2016を改変). 白の×印は各指標の最大値の位置を示す.



第9図 竜巻大発生を伴う低気圧の周辺の (a) SREH, (b) CAPE 及び (c) E-CAPE の分布 (カラー). 黒線は 900hPa の等高度線, 青線は発生した竜巻の発生密度 (相対値) の等値線を示す (栃本英伍氏提供). カラースケールの単位は $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ ($=\text{J kg}^{-1}$).

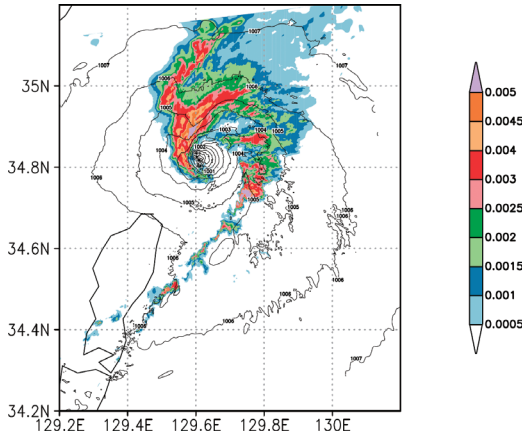
風は軸対称性が悪く、より温低化の過程にあるものが多いこともわかりました。

5.6.2 竜巻を生ずる温帯低気圧

次に、竜巻を起こす温帯低気圧 (Extratropical Cyclone: 以下, EC) について見てみましょう. 米国では時折, EC に伴って多数の竜巻が発生する竜巻大発生 (tornado outbreak) という現象が起きますが, 栃本英伍さん (現在, 防災科学研究所) は竜巻大発生を起こす EC (Outbreak EC: OEC) と起こさない EC (Non-outbreak EC: NEC) の構造と環境場の違いをコモジット解析で調べました (Tochimoto and Niino 2016). その結果, OEC は NEC に比べて南北に長い構造を持つことに加えて, その暖域で SREH や CAPE が

有意に大きく (図略), SREH の大きい領域は竜巻の発生域と良く対応することがわかりました (第9図a). 但し, CAPE の分布は低気圧中心のはるか南で大きく, 竜巻の発生分布とはあまり対応しません (第9図b). そこで, エントレインメントを考慮した E-CAPE をみてみたところ, ここでも, CAPE よりも竜巻の発生分布と良く対応することがわかりました (第9図c; Tochimoto *et al.* 2019a).

OEC と NEC の構造が違う原因ですが, OEC の環境場の偏西風ジェットは, NEC のそれに比べてジェット軸の南側で高気圧性の水平シアが強く, その変形場により OEC は南北に伸びた構造を持つと考えられる (例えば, Wernli *et al.* 1998) ことがわかりました. この



第10図 数値実験で再現されたメソβ渦に伴う高度30mの雨水混合比(色; g kg^{-1}). 黒線は等圧線(栃本英伍氏提供).

ため、OECでは暖域での南風が強く、SREHが大きくなると共に、暖湿な空気の移流によりCAPEも大きくなるというわけです。

栃本さんは、日本の竜巻を伴う低気圧についても類似の解析を行い(Tochimoto and Niino 2018)、気象集誌論文賞を受賞しました。この論文の中では、日本と米国のECに伴う竜巻の環境場の違いについても調べています。その結果によると、日本列島は、粗度が小さく、日射加熱の影響も出にくい海洋に囲まれているため、米国の内陸部に比べてSREHやCAPEが小さいことがわかりました。日本でF4以上の強い竜巻が起きにくいのは、このような環境場の違いによるのではないかと思います。

竜巻の構造や竜巻を生み出す環境場についてはまだまだ知られていないことが多くあります。そのような一例ですが、2015年9月1日午前3時過ぎ、東シナ海にあった弱い温帯低気圧の北東にあたる対馬の東海上で、5隻の漁船が突風により転覆し、5名が亡くなる災害が起きました。救助された船員は竜巻のような突風にあったと証言しています。

気象庁の福岡レーダーの観測によると、当時この領域には反射強度の弱い「目」のような領域とその周りを取り囲むスパイラル状の反射強度分布、ドップラー速度の正負の対を伴う直径30km程度の渦(メソβスケール渦: 以下、メソβ渦)が観測されていました。しかし、事故現場付近のレーダーの解像度は1km程度だったため、突風を起こした微小なスケールの擾乱は観測できませんでした。このメソβ渦を栃本さんが

水平解像度50m格子の数値モデルでシミュレーションしたところ(Tochimoto *et al.* 2019b)、レーダー観測と似たスパイラル状の降水分布を持つ渦が再現されました(第10図)。この渦の中心を通る鉛直断面の渦度と気圧偏差を見ると、渦の鉛直スケールは3km程度と低く、地表面近くで最も渦が強くなっているのがわかりました(図略)。これらの特徴は、これまで暖候期に見つかっている多様なメソスケールの渦(mesoscale convective vortices(例えばZhang 1992); line-end vortices(例えばFujita 1978); mesovortices(例えばSchenkman and Xue 2016))とは異なり、世界的に見ても報告の無い新しいタイプの渦であることがわかりました。さらに、この渦の中心の西側には、最大風速が50m/s以上で直径約1kmの竜巻状の渦が次々と発生する様子が再現されました。この竜巻状の渦が船舶の転覆事故の原因ではないかと思われます。類似のメソβ渦はこの事例以外にも2011年以降少なくとも3例見つかっており、うち一例は漁船の転覆と犠牲者1名を生じているため、これらの渦の発生環境や構造に関する一層の理解が求められています。

7. おわりに

これまで、地球流体力学と多様な大気境界層・メソスケール現象の普遍的理解を目指して、多くの大学院生・共同研究者の皆さんと研究を行ってきて、いくつかの課題についてはかなり普遍的な理解が進んだように思います。しかし、集中豪雨や竜巻など理解が遅れている現象や、対流・境界層乱流のグレーゾーン問題など解明すべき課題もまだ多く残っています。今後も、これらの複雑な現象を解明する上で、重要な素過程に注目して取り組む地球流体力学のアプローチは有用と思われ、私も微力ながらそれに貢献できればと思っております。この度はありがとうございました。

後註

現実事例の竜巻の数値シミュレーションには下瀬健一さん(当時、九州大学)も成功し、その内容は博士論文(Shimose 2009)に記載されています。

謝辞

大学院時代から今日まで、多くの方のお世話になってきました。博士課程の指導教員であり、研究室の上司でもあった木村龍治先生、修士課程の指導教員だった松野太郎先生には、地球流体力学のスピリットと、

自分の理解の世界を持つことの重要性を教えていただきました。小倉義光先生、岸保勘三郎先生、浅井富雄先生をはじめとする多くの先生方、木田秀次さん、花房龍男さん、藤谷徳之助さん、吉崎正憲さん、鈴木修さん、岩崎俊樹さん、斉藤和雄さん、瀬上哲秀さん、中西幹郎さん、森 厚さん、佐藤正樹さん、坪木和久さん、益子 渉さん、伊賀啓太さんなどの先輩・同僚・後輩の皆様、野田 暁さん、野口尚史さん、柳瀬亘さん、伊藤純至さん、雪本真治さん、栃本英伍さん、横田 祥さん、渡邊俊一さん、末木健太さんをはじめとする大学院生・博士研究員の皆様、平田理沙さん、中村満壽子さん、日比野英美さんをはじめとする秘書の皆さんには大変お世話になりました。また、日本気象学会理事会・諸委員会、東京大学大気海洋研究所、気象庁気象研究所、東京大学、気象庁の多くの皆様にも大変お世話になりました。スペースの関係で個別にお名前を挙げるできませんが、深く感謝申し上げます。最後になりましたが、本稿に対して貴重なコメントをいただいた、編集委員の城岡竜一さん(JAM-STECC)と査読者の方に感謝申し上げます。

付録：日本気象学会・気象業務との関わり

講演では述べませんでした。受賞業績の一部になった、気象学会・気象業務への関わりについて、付録として簡単に触れておきたいと思います。

気象学会には、大学院生時代から一会員として大変お世話になってきましたが、お世話をする側の立場としては、1985～2007年に機関誌「天気」編集委員会委員(うち1998～2007年まで委員長)を務めさせていただきました。毎月開かれる「天気」編集委員会では、気象庁や大学・研究機関からの多くの編集委員の皆さんと知り合いになるだけでなく、投稿原稿を通して多くの投稿者や査読者の皆様と知り合いになる機会をいただきました。遠藤昌子さん、棚橋公子さんをはじめとする編集書記の皆様には大変お世話になりました。

2004～2008年にかけては木田秀次さんのもと、田中博さん、里村雄彦さん、三上正男さんと共に、レター誌発行準備委員会に加えていただき、SOLAの立ち上げと創刊後のSOLA編集委員会(運営部会)に関わらせていただきました。このときの、木田さんの卓抜したリーダーシップには多くを学ばせていただきました。

1996～2016年には日本気象学会理事を務めさせていただきました。2006年6月に、これまで定款の改定のための文部科学省との大変な折衝やSOLAの立ち上

げなど、学会の大変な仕事を一手に担ってこられた木田さんが理事長になられたとき(木田 2006)、これから思う存分手腕を発揮されて学会を発展させていただけるものと期待していました。しかしながら、就任されて間もない11月に急逝されたことは、学会の発展にとって大きな痛手でした(新野 2007)。たまたま、理事長代理を務めさせていただいていたこともあって、2007年3月に理事長に選任されました。このような思いもかけぬ事態をきっかけとして、以降9年間に渡って非力ながら理事長を務めることになりました。

理事長の期間に行った主な仕事としては、学術委員会・気象災害委員会の設置、日中韓気象学会への対応、公益社団法人化、東日本大震災時の福島第一原子力発電所事故への対応などです。これらの仕事は副理事長をお願いした藤谷徳之助さんをはじめとする理事・監事の皆様、事務局の皆様のご尽力なしには実施できませんでした。深く感謝申し上げます。

学術委員会は岩崎俊樹さん(東北大学)に委員長をお願いし、多大なご尽力により、日本気象学会中長期ビジョン(日本気象学会 2010)及び日本の気象学の現状と展望(日本気象学会36～37期学術委員会および同委員会が依頼した執筆者グループ 2014)を作成いただきました。気象災害委員会は、藤谷さんに委員長をお願いし、大きな気象災害が起きた際に、大会に合わせてタイムリーに一般向けの報告会を開催するなど、気象災害に関する正しい知識の発信を推進いただきました。

日中韓気象学会は、住 明正さんが理事を務められていた2005年に開始され、当初は以後1年毎に開催されてきました。2巡目の第4回会議の日本での開催は2009年のつくばでの春季大会時の予定でしたが、5月初旬に国内で新型インフルエンザの感染が見つかったため、急遽、大会とは切り離して同年11月8～9日に延期して同じつくばで開催することにしました。林陽生大会委員長と国際学術交流委員会の田中 博さん、近藤 豊さんをはじめ、大会実行委員会・国際交流委員会・常任理事会新型インフルエンザ対策委員会の皆さんには多大なご負担をおかけしましたが、皆さんのご尽力によりこの不測の事態を大きな混乱無く切り抜けることができました。この日中韓気象学会時に行われた3学会の代表者会議では、AOGSが毎年開催されることも考慮し、これ以降の会議の開催を2年に1回とするなど詳細なprotocolを決め、合意文書を交わしました。

公益社団法人化は、2006年6月に公益法人制度改革関連3法が成立し、2008年12月1日に施行されたことに伴い、2013年11月30日までに、一般社団あるいは公益社団法人への移行が必要となったことへの対応です。学会では2007年5月から、総合計画担当の藤谷さんの下に公益法人移行検討ワーキンググループ(WG)を設置し、公益法人への移行の可否について検討を行い、さらに理事会において慎重に検討を進め、公益社団法人への移行を目指すという結論を得ました。そして、2012年5月の総会で公益社団法人への移行と新法人の定款案・細則案を承認いただき、同年8月7日に内閣府公益認定等委員会に公益認定の申請を行いました。同委員会の定款案・細則案に関する軽微な修正の指示、2012年12月の臨時総会での修正の承認を経て、2013年4月1日付での公益社団法人化が認められたものです。この間、5年以上にわたってご尽力いただいた藤谷さんをはじめとするWGの皆様、萩原武士・田沢秀隆両事務局長をはじめとする事務局の皆様、支部会計の統合にご協力いただいた支部の皆様に深く感謝申し上げる次第です。

2011年3月11日に発生した平成23年東北地方太平洋沖地震による津波では東京電力福島第一原子力発電所の電源が喪失し、1・3・4号機が爆発して放射性物質が拡散する事故が起きました。この事故では、緊急時に備えて開発・運用されていた放射性物質の拡散を予測する数値モデル(SPEEDI)の結果が政府機関から公開されなかったこと、2014年10月8日の原子力規制委員会の審議において、緊急時の防護措置の判断にあたってはSPEEDIの計算結果を使用しないこととされたことから、気象学会としては理事会のもとに「原子力関連施設の事故に伴う放射性物質拡散に関する作業部会」を設置し、岩崎さんに部会長をお引き受けいただき、提言の発出を含め様々な対応をとりました。この間の詳しい経緯については新野(2012)、日本気象学会(2015)、日本気象学会「原子力関連施設の事故に伴う放射性物質拡散に関する作業部会」(2015)、岩崎(2018)をご覧くださいと思います。

気象業務に関しては、2015年から国土交通審議会委員、同審議会気象分科会会長を務めさせていただき、提言「『新たなステージ』に対応した防災気象情報と観測・予測技術のあり方」(2015年7月)と「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」(2018年8月)をまとめさせていただきました。また、気象庁「数値予報モデル開発懇談会」の会長として「2030年に向けた

数値予報技術開発重点計画」の策定に関わらせていただいたほか、2012年の気象庁「竜巻突風予測情報改善検討会」で座長、2012~2013年の国土交通省水管理・国土保全局と気象庁による「防災気象情報の改善に関する検討会」(座長:田中 淳東京大学教授)で副座長、「竜巻等突風の強さの評定に関する検討会」(座長:田村幸雄東京工芸大学名誉教授)で会長代理などを務めさせていただきました。これらの活動が、少しでも社会のお役に立てたのであれば、嬉しく思う次第です。

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.
- Charney, J. G. and J. G. DeVore, 1979: Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking. *J. Atmos. Sci.*, **36**, 1205-1216.
- Emanuel, K. A. and R. Rotunno, 1989: Polar lows as arctic hurricanes. *Tellus*, **41A**, 1-17.
- Eskridge, R. E. and P. Das, 1976: Effects of a precipitation-driven downdraft on a rotating wind field: A possible trigger mechanism for tornadoes? *J. Atmos. Sci.*, **33**, 70-84.
- Fu, G., H. Niino, R. Kimura and T. Kato, 2004a: Multiple polar mesocyclones over the Japan sea on 11 February 1997. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 793-814.
- Fu, G., H. Niino, R. Kimura and T. Kato, 2004b: A polar low over the Japan Sea on 21 January 1997: Part I. Observational analysis. *Mon. Wea. Rev.* **132**, 1537-1551.
- Fujita, T. T., 1971: Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity. SMRP Report, 91, Dep. Geophys. Sci., Univ. Chicago, 42pp.
- Fujita, T. T., 1978: Manual of Downburst Identification for Project NIMROD. SMRP Report, 156, Dep. Geophys. Sci., Univ. Chicago, 104 pp.
- 岸保勘三郎, 1968: 数値予報新講. 地人書館, 180pp.
- Harrold, T. W. and K. A. Browning, 1969: The polar low as a baroclinic disturbance. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **95**, 710-723.
- Ito, J., R. Tanaka, H. Niino and M. Nakanishi, 2010: Large eddy simulation of dust devils in a diurnally-evolving convective mixed layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **88**, 63-77.
- Ito, J., H. Niino and M. Nakanishi, 2013: Formation mechanism of dust devil-like vortices in idealized convective mixed layers. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 1173-1186.

- Ito, J., H. Niino, M. Nakanishi and C.-H. Moeng, 2015: An extension of the Mellor-Yamada model to the terra incognita zone for dry convective mixed layers in the free convection regime. *Bound.-Layer Meteor.*, **157**, 23-43.
- Ito, J., T. Oizumi and H. Niino, 2017: Near-surface coherent structures explored by large eddy simulation of entire tropical cyclones. *Sci. Rep.*, **7**, 3798, doi:10.1038/s41598-017-03848-w.
- 岩崎俊樹, 2018: 福島第一原発事故時の放射性物質移流拡散問題—日本気象学会の事故後の活動と数値予報モデルの活用策について. *学術の動向*, **23** (3), 18-23.
- Kanak, K. M., D. K. Lilly and J. T. Snow, 2000: The formation of vertical vortices in the convective boundary layer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 2789-2810.
- Kayaba, N., T. Yamada, S. Hayashi, K. Onogi, S. Kobayashi, K. Yoshimoto, K. Kamiguchi and K. Yamashita, 2016: Dynamical regional downscaling using the JRA-55 Reanalysis (DSJRA-55). *SOLA*, **12**, 1-5.
- 木田秀次, 2006: 「村から国に, そして世界へ」—第34期理事長就任のご挨拶として—. *天気*, **53**, 535.
- 気象庁, 2015: 日本版改良藤田スケールに関するガイドライン. https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/kentoukai/kaigi/2015/1221_kentoukai/guideline.pdf (2019.11.10閲覧).
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebita, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48.
- Markowski, P., Y. Richardson, E. Rasmussen, J. Straka, R. Davies-Jones and R. J. Trapp, 2008: Vortex lines within low-level mesocyclones obtained from pseudo-dual-Doppler radar observations. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 3513-3535.
- Mashiko, W., 2016a: A numerical study of the 6 May 2012 Tsukuba City supercell tornado. Part I: Vorticity sources of low-level and midlevel mesocyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 1069-1092.
- Mashiko, W., 2016b: A numerical study of the 6 May 2012 Tsukuba City supercell tornado. Part II: Mechanisms of tornadogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 3077-3098.
- Mashiko, W. and H. Niino, 2017: Super high-resolution simulation of the 6 May 2012 Tsukuba Supercell Tornado: Near-surface structure and its dynamics. *SOLA*, **13**, 135-139.
- Mashiko, W., H. Niino and T. Kato, 2009: Numerical simulation of a tornadogenesis in a mini-supercell in an outer rainband of Typhoon Shanshan on 17 September 2006. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 4238-4260.
- McCaul, E. W., Jr., 1991: Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environments. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 1954-1978.
- McDonald, J. and K. C. Mehta, 2006: A Recommendation for an Enhanced Fujita Scale (EF-Scale), Revision 2. Wind Sci. Eng. Res. Center, Texas Tech Univ., Lubbock, TX, 111pp.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1974: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791-1806.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 851-875.
- 宮内紀雄, 宮内誠司, 2002: 天空の賛歌. 株式会社クライム, p.45.
- Molinari, J., D. M. Roms, D. Vollaro and L. Nguyen, 2012: CAPE in tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 2452-2463.
- Mori, A. and H. Niino, 2002: Time evolution of nonlinear horizontal convection: Its flow regimes and self-similar solutions. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 1841-1856.
- Morton, B. R., G. I. Taylor and J. S. Turner, 1956: Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Proc. Roy. Soc. A*, **234**, 1-23.
- Musson-Genon, L., 1987: Numerical simulation of a fog event with a one-dimensional boundary layer model. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 592-607.
- Nagata, M., 1993: Meso- β -scale vortices developing along the Japan-Sea Polar-Airmass Convergence Zone (JPCZ) cloud band: Numerical simulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **71**, 43-57.
- Nakanishi, M., 2000: Large-eddy simulation of radiation fog. *Bound.-Layer Meteor.*, **94**, 461-493.
- Nakanishi, M., 2001: Improvement of the Mellor-Yamada turbulence closure model based on large eddy simulation data. *Bound.-Layer Meteor.*, **99**, 349-378.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2004: An improved Mellor-Yamada level-3 model with condensation physics: Its design and verification. *Bound.-Layer Meteor.*, **112**, 1-31.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2006: An improved Mellor-Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. *Bound.-Layer Meteor.*, **119**, 397-407.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2009: Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 895-912.

- 中西幹郎, 新野 宏, 2011: ラージ・エディ・シミュレーションに基づく改良 Mellor-Yamada Level 3 乱流クロージャーモデル (MYNN モデル) の開発と大気境界層の研究—2009年度日本気象学会賞受賞記念講演—. 天気, 57, 877-888.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2012: Large-eddy simulation of roll vortices in a hurricane boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 69, 3558-3575.
- Niino, H., 1978: Turbulent jet in a rotating fluid. *J. Meteor. Soc. Japan*, 56, 527-547.
- Niino, H., 1980: Evolutions of a laminar jet in a homogeneous rotating fluid. *J. Meteor. Soc. Japan*, 58, 33-51.
- Niino, H., 1982: A weakly non-linear theory of barotropic instability. *J. Meteor. Soc. Japan*, 60, 1001-1023.
- Niino, H., 1986: A linear stability theory of double-diffusive horizontal intrusion. *J. Fluid Mech.*, 171, 71-100.
- Niino, H., 1987: The linear theory of land and sea breeze circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65, 901-921.
- 新野 宏, 2007: 木田秀次理事長のご逝去を悼む. 天気, 54, 81-82.
- 新野 宏, 2012: 「原子力関連施設の事故発生時の放射性物質拡散への対策に関する提言」を行うに当たって. 天気, 59, 469-474.
- 新野 宏, 2019: 大気・海洋の渦・対流・シア流とその相互作用の研究: 回顧と展望. 月刊海洋号外, 62, 169-190.
- Niino, H. and N. Misawa, 1984: An experimental and theoretical study of barotropic instability. *J. Atmos. Sci.*, 41, 1992-2011.
- Niino, H. and A. T. Noda, 2000: Numerical Simulation of a Mini-Supercell over Kanto Plain on 19 September 1990. 20th Conf. Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc., 11-16 Sept. 2000, Orlando, Florida.
- Niino, H., O. Suzuki, H. Nirasawa, T. Fujitani, H. Ohno, I. Takayabu, N. Kinoshita and Y. Ogura, 1993: Tornadoes in Chiba Prefecture on 11 December 1990. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 3001-3018.
- 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.
- Niino, H., A. Mori, T. Satomura and S. Akiba, 2006: Flow regimes of non-linear heat island circulation. *J. Atmos. Sci.*, 63, 1538-1547.
- 日本気象学会, 2010: 日本気象学会中長期ビジョン. 天気, 57, 29-32.
- 日本気象学会, 2015: 原子力関連施設の事故に伴う放射性物質の大気拡散監視・予測技術の強化に関する提言. 天気, 62, 111-112.
- 日本気象学会「原子力関連施設の事故に伴う放射性物質拡散に関する作業部会」, 2015: 原子力関連施設の事故に伴う放射性物質の大気拡散に関する数値予測情報の活用策について. 天気, 62, 113-123.
- 日本気象学会36-37期学術委員会および同委員会が依頼した執筆者グループ, 2014: 日本の気象学の現状と展望. 天気, 61, 159-195.
- Ninomiya, K., 1989: Polar/comma-cloud lows over the Japan Sea and the northwestern Pacific in winter. *J. Meteor. Soc. Japan*, 67, 83-97.
- Ninomiya, K., 1991: Polar low development over the east coast of the Asian Continent on 9-11 December 1985. *J. Meteor. Soc. Japan*, 69, 669-685.
- Ninomiya, K., 1994: A meso-scale low family formed over the northeastern Japan Sea in the northwestern part of parent polar low. *J. Meteor. Soc. Japan*, 72, 589-603.
- Ninomiya, K. and K. Hoshino, 1990: Evolution process and multi-scale structure of a polar low developed over the Japan Sea on 11-12 December 1985: Part II: Meso- β -scale low in meso- α -scale polar low. *J. Meteor. Soc. Japan*, 68, 307-318.
- Ninomiya, K., K. Hoshino and K. Kurihara, 1990: Evolution process and multi-scale structure of a polar low developed over the Japan Sea on 11-12 December, 1985: Part I: Evolution process and meso- α -scale structure. *J. Meteor. Soc. Japan*, 68, 293-306.
- Ninomiya, K., K. Wakahama and H. Ohkubo, 1993: Meso- α -scale low development over the northeastern Japan Sea under the influence of parent large-scale low and a cold vortex aloft. *J. Meteor. Soc. Japan*, 71, 73-91.
- 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.
- Noda, A. T. and H. Niino, 2010: A numerical investigation of a supercell tornado: Its genesis and vorticity budget. *J. Meteor. Soc. Japan*, 88, 135-159.
- Noguchi, T. and H. Niino, 2010a: Multi-layered diffusive convection. Part 1. Spontaneous layer formation. *J. Fluid Mech.*, 651, 443-464.
- Noguchi, T. and H. Niino, 2010b: Multi-layered diffusive convection. Part 2. Dynamics of layer evolution. *J. Fluid Mech.*, 651, 465-481.
- Novlan, D. J. and W. M. Gray, 1974: Hurricane-spawned tornadoes. *Mon. Wea. Rev.*, 102, 476-488.
- Rasmussen, E., 1979: The polar low as an extratropical CISK disturbance. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 105, 531-549.
- Rasmussen, E. A. and J. Turner, 2003: Polar Lows. Cambridge Univ. Press, 612pp.

- Romps, D. M. and Z. Kuang, 2010: Do undiluted convective plumes exist in the upper tropical troposphere? *J. Atmos. Sci.*, **67**, 468-484.
- Schenkman, A. and M. Xue, 2016: Bow-echo meso-vortices: A review. *Atmos. Res.*, **170**, 1-13.
- Schenkman, A. D., M. Xue and A. Shapiro, 2012: Tornadogenesis in a simulated mesovortex within a meso-scale convective system. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 3372-3390.
- Schenkman, A. D., M. Xue and M. Hue, 2014: Tornadogenesis in a high-resolution simulation of the 8 May 2003 Oklahoma City supercell. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 130-154.
- Seko, H., M. Kunii, S. Yokota, T. Tsuyuki and T. Miyoshi, 2015: Ensemble experiments using a nested LETKF system to reproduce intense vortices associated with tornadoes of 6 May 2012 in Japan. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **2**, 42, doi:10.1186/s40645-015-0072-3.
- Shibano, R., Y. Yamanaka, N. Okada, T. Chuda, S. Suzuki, H. Niino and M. Toratani, 2011: Response of marine ecosystem to typhoon passage in the western subtropical North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L18608, doi:10.1029/2011GL048717.
- Shimose, K., 2009: Numerical simulation of tornadogenesis in a realistic condition. Doctor Dissertation, Dep. Earth and Planet. Sci., Kyushu Univ., 139pp.
- Stensrud, D. J. *et al.*, 2009: Convective-scale warn-on-forecast system, a vision for 2020. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 1487-1499.
- 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.
- Suzuki, O., H. Niino, H. Ohno and H. Nirasawa, 2000: Tornado producing mini supercells associated with Typhoon 9019. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1868-1882.
- Suzuki, S., H. Niino and R. Kimura, 2011: The mechanism of upper-oceanic vertical motions forced by a moving typhoon. *Fluid Dyn. Res.*, **43**, 025504, doi:10.1088/0169-5983/43/2/025504.
- 瀧下洋一, 2009: 突風に関する防災気象情報の改善—竜巻注意情報の発表開始—. *天気*, **56**, 167-175.
- 瀧下洋一, 2010: 竜巻発生確度ナウキャストの提供開始. *天気*, **57**, 805-810.
- 田中 亮, 2005: Dust Devil の発生環境と構造に関する数値的研究. 東京大学理学系研究科地球物理学専攻修士論文, 51pp.
- Tochimoto, E. and H. Niino, 2016: Structural and environmental characteristics of extratropical cyclones that cause a tornado outbreak in the warm sector: A composite study. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 945-969.
- Tochimoto, E. and H. Niino, 2018: Structure and environment of tornado-spawning extratropical cyclones around Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96**, 355-380.
- Tochimoto, E., K. Sueki and H. Niino, 2019a: Entraining CAPE for better assessment of tornado outbreak potential in the warm sector of extratropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **147**, 913-930.
- Tochimoto, E., S. Yokota, H. Niino and W. Yanase, 2019b: A hierarchy of violent vortices in an extratropical cyclone: A potential risk to maritime traffic. *Mon. Wea. Rev.*, **147**, 1989-2007.
- Tsuboki, K. and T. Asai, 2004: The multi-scale structure and development mechanism of mesoscale cyclones over the Sea of Japan in winter. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 597-621.
- Tsuboki, K. and G. Wakahama, 1992: Mesoscale cyclogenesis in winter monsoon air streams: Quasi-geostrophic baroclinic instability as a mechanism of the cyclogenesis off the west coast of Hokkaido Island, Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 77-93.
- Watanabe, S. I. and H. Niino, 2014: Genesis and development mechanisms of a polar mesocyclone over the Japan Sea. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 2248-2270.
- Watanabe, S. I., H. Niino and W. Yanase, 2016: Climatology of polar mesocyclones over the Sea of Japan using a new objective tracking method. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 2503-2515.
- Watanabe, S. I., H. Niino and W. Yanase, 2017: Structure and environment of polar mesocyclones over the north-eastern part of the Sea of Japan. *Mon. Wea. Rev.*, **145**, 2217-2233.
- Watanabe, S. I., H. Niino and W. Yanase, 2018: Composite analysis of polar mesocyclones over the western part of the Sea of Japan. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 985-1004.
- Wernli, H., R. Fehlmann and D. Lüthi, 1998: The effect of barotropic shear on upper-level induced cyclogenesis: Semigeostrophic and primitive equation numerical simulations. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 2080-2094.
- Wurman, J. and K. Kosiba, 2018: The role of small-scale vortices in enhancing surface winds and damage in Hurricane Harvey (2017). *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 713-722.
- Wurman, J. and J. Winslow, 1998: Intense sub-kilometer-scale boundary layer rolls observed in Hurricane Fran. *Science*, **280**, 555-557.
- Wyngaard, J. C., 2004: Toward numerical modeling in the "terra incognita". *J. Atmos. Sci.*, **61**, 1816-1826.
- Yamauchi, H., H. Niino, O. Suzuki, Y. Shoji, E. Sato, A. Adachi and W. Mashiko, 2013: Vertical structure of the

- Tsukuba F3 Tornado on 6 May 2012 as revealed by a polarimetric radar. 36th Conf. Radar Meteor., Breckenridge, Colorado, Sep 16-20, 2013, Amer. Meteor. Soc., <https://ams.confex.com/ams/36Radar/webprogram/Paper228827.html> (2019.11.8閲覧).
- Yanase, W. and H. Niino, 2005: Effects of baroclinicity on the cloud pattern and structure of polar lows: A high-resolution numerical experiment. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L02806, doi:10.1029/2004GL020469.
- Yanase, W. and H. Niino, 2007: Dependence of the polar low development on baroclinicity and physical processes: An idealized high-resolution numerical experiment. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 3044-3067.
- Yanase, W., Fu, G., H. Niino and T. Kato, 2004: A polar low over the Japan Sea on 21 January 1997: Part II. Numerical simulation. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1552-1574.
- Yanase, W., H. Niino, S. I. Watanabe, K. Hodges, M. Zahn, T. Spengler and I. A. Gurchich, 2016: Climatology of polar lows over the Sea of Japan using the JRA-55 reanalysis. *J. Climate*, **29**, 419-437.
- Yokota, S., H. Seko, M. Kunii, H. Yamauchi and H. Niino, 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., H. Niino, H. Seko, M. Kunii and H. Yamauchi, 2018: 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.
- Yoshida, J., H. Nagashima and H. Niino, 1989: The behavior of double-diffusive intrusion in a rotating system. *J. Geophys. Res.*, **94**, 4923-4937.
- Yukimoto, S., H. Niino, T. Noguchi, R. Kimura and F. Moulin, 2010: Structure of a bathtub vortex: Importance of the bottom boundary layer. *Theor. Comput. Fluid Dyn.*, **24**, 323-327.
- Zhang, D.-L., 1992: The formation of a cooling-induced mesovortex in the trailing stratiform region of a mid-latitude squall line. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 2763-2785.

Toward Universal Understanding of Various Vortices and Turbulent Phenomena

Hiroshi NIINO*

* *Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Chiba 277-8564, Japan*
E-mail: niino@aori.u-tokyo.ac.jp

(Received 11 December 2019; Accepted 26 December 2019)
