

台風予測精度向上に資する大気海洋相互作用とデータ同化の研究

—2022年度正野賞受賞記念講演—

伊 藤 耕 介*

1. はじめに

このたびは、正野賞という荣誉ある賞をいただき、身に余る光栄です。これまで10年以上にわたって、多くの皆様の支えのもと、台風の予報を主なテーマとして研究を行ってきました。台風の予報と一口に言っても、観測・データ同化・予報モデル・モデルで用いる海面水温などの各種データ・ガイダンス・現業予報官の方の補正といったように、関連する項目は多岐にわたるわけですが、他の方のセミナーを聞いたことで生じたひらめきや台風予報の実情にまつわる様々なことをきっかけとして、手法にこだわらず臨機応変に課題に取り組んできました。本稿では、私のこれまでの研究者としての歩みについて、簡単ながらご紹介させていただければと思います。なお、紹介させていただく皆様の所属は当時のものです。

私は、秋田県能代市に生まれ、自然豊かな環境で伸び伸びと育てられました。幼いころから数字が大好きで、人の命を救えるような職業に就きたいと考えていました。京都大学に入ってから、総合人間学部の酒井 敏先生に地球流体力学の面白さを教えていただき、台風などの極端大気現象を数学的に扱えば、人の命を救うことにもつながるのではないかと感じるようになりました（加えて、不純な動機ではありますが、当時、気になっていた女の子に台風の質問をされて真剣に調べたことも一因だったかもしれません）。

成績優秀な同級生達がみな人気のある気象学研究室

を希望していたのに対し、お世辞にも真面目とは言えず、メインストリームの苦手な私は、失礼なことに「1年ぐらい海洋のことを学ぶのもよかろう」と偉そうに考えて海洋物理学研究室に所属し、根田正典先生の指導のもと、研究させていただきました。データ同化やエルニーニョの研究などが盛んに行われていた研究室でしたが、卒業研究は、台風と海洋の関係を調べたいという私の希望を通していただき、「Argo 観測データを用いた西部太平洋における台風通過に伴う海洋の温度構造の変化についての研究」というものになりました。これは、蓄積され始めていた海洋 Argo データを用いて、台風通過時に進行方向右側を中心に海洋混合層が深くなり、海面水温が低下することを多数事例の平均として示したものです。その後、私は修士課程への進学で気象学研究室に移ることになったため、台風と海洋の相互作用に関する研究は中断することになるのですが、今思うと、厚かましい私の希望テーマを広い心で受け入れていただいた経験が、回りまわって私の研究者人生を決定づける大きなきっかけのひとつとなりました。

気象学研究室に移った際、指導教員の余田成男先生は「まずは、地球流体力学の基礎を身につけるというのはどうでしょう？」とおっしゃって、修士課程では成層圏赤道準2年周期振動(QBO)と太陽活動11年周期変動が成層圏突然昇温現象(SSW)に及ぼす影響を調べることになりました。当時は、研究も自己流で好き勝手にやっていたのですが、余田先生には、基礎法則を十分に理解し、丁寧な論理展開をすることで、議論に説得力を持たせることの重要性を教えていただきました。修士論文では、大気大循環モデル(AGCM)を用いて北半球の永続的な冬を想定し、QBOの東風・西風フェーズと太陽活動極大・極小期の組み合わせが

* 琉球大学理学部（現：京都大学防災研究所）。
ito.kosuke.2i@kyoto-u.ac.jp

—2023年2月8日受領—
—2023年5月3日受理—

SSW の発生頻度にどのように影響するかを調査しました。

私は地球流体力学に関する研究に興味深く行っていました。2つのプレゼンテーションを聞き、再び台風研究の世界に舞い戻ることになりました。そのうちの1つは修士論文の中間発表会で耳にした同級生の宮本佳明さんの研究で、台風強度が摩擦係数や水蒸気交換係数といった海面交換係数に鋭敏であることを確認するものでした。もう1つは、海洋研究開発機構の杉浦望実さんによるセミナーで、データ同化手法を用いて海面交換係数を推定し、海洋長期変動の再現や予測に成功したというものでした。私の中で、学部生時代の経験にこれらのセミナーの内容が見事に組み合わせ、[「不確実性の高い台風状況下の海面交換係数をデータ同化で推定すれば、防災に貢献できるのではないか」との発想に至りました。そして、再度、海洋物理学研究室に舞い戻り、データ同化の先端的な研究を行っていた淡路敏之先生と石川洋一先生のもとで博士課程を過ごすことになりました。成層圏に関する研究に関しては、気象学研究室を離れた後も余田先生にご指導いただき、無事に論文を出版することができました (Ito *et al.* 2009)。2つのテーマを同時並行して進めることはなかなか大変でしたが、おかげで視野を広げられたようにも感じています。

2. 台風の予報

博士課程以降に実施した研究内容を説明する前に、台風の予報について概説しておきたいと思います。いうまでもありませんが、台風は、暴風・豪雨・高潮・高波など、様々な災害を広範な領域にもたらしうる顕著な大気現象です。そして、数日先の台風予報は、人的・経済的損失を最小限にするための基礎的な情報となるため、その精度を向上させることは重要です。気象庁では、アジア太平洋気象防災センターが地区特別気象センター (RSMC) として北西太平洋周辺の各国に情報を提供するという重責を担っており、気象庁の台風情報は日本国内に留まらず、多くの国々の防災・減災に役立てられています。

台風に限りませんが、気象予報は、(1) 観測データを入手する、(2) 観測データをデータ同化システムに取り込みもっともらしい大気の状態を解析する、(3) 固定パラメータと (2) で作成した初期値を物理モデルに与えシミュレーションを行う、(4) シミュレーション結果が実態に合うようにガイダンスと呼ばれる統計

的補正を施す、(5) 予報官が様々な情報を総合的に勘案し予報を発表する、といった過程を経て一般に届けられます。

例えば、台風の最大風速の予報を改善したいのだとすると、台風の強度の基礎的な理解を深め、予報システムの各過程がそのような影響を適切に表現できるのかどうかを検討し、改善できる箇所が無いかを考えることが重要です。特に、最大風速に大きな影響を与え、かつ、誤差が大きいと考えられるパラメータの表現に注力することが効果的でしょう。そのためには、マサチューセッツ工科大学の Kerry Emanuel 博士が1986年に提案した最大到達可能強度 (MPI) と呼ばれる理論値が参考になります (Emanuel 1986)。これは、傾度風平衡、静水圧平衡、内部コア領域における傾斜湿潤対流に対する中立、海面水温が一定という理想的な条件のもとでの定常軸対称渦の最大風速 V の理論値に関するものであり、以下の式で表されます。

$$V^2 = (T_s - T_o) \frac{C_k}{C_d} C_p (\ln \theta_{es}^* - \ln \theta_{eh}) \quad (1)$$

ここで、 T_s は海面水温、 T_o は対流圏界面付近の外出流の気温、 C_k は海面エンタルピー交換係数、 C_d は海面摩擦係数、 C_p は定圧比熱、 θ_{es}^* は気温を T_s とした場合の飽和相当温位、 θ_{eh} は境界層において外部から中心に向かって流入してくる気塊の相当温位であることを表します。つまり、海面が暖かく、上空が冷たく、水蒸気がたくさん大気側に供給され、海面摩擦が小さく、台風中心に吹き込んでくる気塊の相当温位が低い場合に台風の最大風速は強くなると考えられます。MPI は現実の台風強度の上限値によく対応していることが知られており、現代の台風基礎理論の根幹をなすものと言えます。式 (1) から分かるのは、台風強度が海面付近で定義されるパラメータに深く関係しているということです。しかし、台風状況下の海面付近で観測を行うことは困難であるため、現実の海面交換係数などには大きな不確実性があります (Powell *et al.* 2003; Takagaki *et al.* 2012)。以上のことを踏まえると、海面交換係数の最適値推定は台風の強度解析・予報の品質を改善するうえで重要と言えるでしょう。

3. 海面交換係数に関する研究

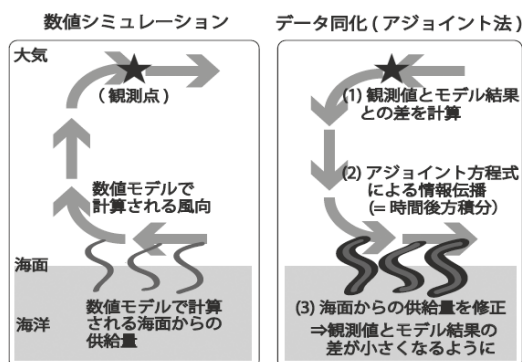
データ同化は、観測値とモデル結果から統計的な最適値、特に数値予報に用いる初期値を生成する手法と

して一般に理解されていますが、観測値と整合する固定パラメータの最適値の推定にも用いることができます。台風状況下の海面交換係数を最適化したい場合、たとえ、海面での直接観測が入手できないとしても、海面交換係数に影響を受けた物理量の観測値を入手できれば、そこから4次元変分法で用いられるアジョイントモデルを用いて時間的にさかのぼり、最適値を探索することができます(第1図)。具体的には、データ同化システムの制御変数を拡張し、初期値だけでなく海面交換係数にも誤差が入りうると仮定してデータ同化システムを組むことになります。博士課程では、Kerry Emanuel博士にご提供いただいたRotunno and Emanuel(1987)の軸対称台風モデルに対応するアジョイントモデルを含んだデータ同化システムを構築し、理想化実験を行いました。この中では、ある初期値と海面交換係数を用いて得られる台風の強度や構造を真の状態とみなし、あえて誤った初期値および海面交換係数から実験を開始します。そして、航空機プロジェクトを模した観測値からそれらの「真の状態」が復元できるか調査しました。結果として、一般的なデータ同化システムで採用されているように初期値だけを制御変数とした場合には、海面交換係数に起因する誤差を初期値の誤差に押し付けてしまい、台風強度や最大風速半径を適切に復元できませんでした。一方、初期値と海面交換係数を制御変数に入れた場合には、いずれも適切に復元できることが分かりました(Ito *et al.* 2010)。この結果は、台風の強度や構造が海面過程に鋭敏であり、応答が短時間であるために、海面交換係数の誤差を初期値だけに押し付けることはできないということを表しています。

現実大気においては、初期値や海面交換係数以外に

も誤差を生む要因が存在し、モデルの不完全性もあるため、海面交換係数の最適値を真の値とみなすことには慎重であるべきです。しかし、少なくとも、誤りを初期値だけに押し付けるのに比べれば、海面交換係数を制御変数に加えることは数値予報システムの改善に貢献すると考えられます。Ito *et al.*(2010)の応用として、海面交換係数の最適化の効果を、より現実的なシステムで確認すべく、当時、気象庁予報部数値予報課で数値モデル開発推進官をされていた加藤輝之さんを通じて、気象庁の非静力学メソ4次元変分法(JNoVA)を使わせていただくことになりました。JNoVAは複雑なシステムでしたので、移植に苦労しましたが、気象庁の数値予報課や気象研究所の皆さんの協力を得て実装にこぎつけ、現実の台風事例においても、海面交換係数の最適化が台風進路・強度の推定や予測の精度向上をもたらすということを確認できました(Ito *et al.* 2013)。

Ito *et al.*(2010)を書き上げたころ、淡路先生は「予報に関連するテーマで論文を1本書いたのだから、もう1本の論文は現象の理解に関することで書きなさい」とおっしゃいました。応用科学だけでなく、基礎科学についてもきちんと議論のできる研究者になりなさい、というご配慮だったと思います。そこで、博士課程の後半では、成熟期の台風において、海面からの水蒸気供給などの影響がどのような過程を通じて最大風速変化に至るのかを明らかにするための基礎研究を行いました。当初は、水蒸気供給が壁雲領域での非断熱加熱を促し、暖気核が強化されて、それに伴って生じた気圧分布に調節されるように風速が強化されると考えましたが、調節過程を考えてみるとそれは少しおかしい話です。渦を考慮したロスビーの変形半径を計算してみると、気圧変化が風速変化を起こすには空間スケールとしては小さすぎるのです。そこで、丹念に方程式を追いかけていくと、以下のようなプロセスが存在することが分かりました。まず、水蒸気が最大風速半径の少し内側に供給されると、そこで対流活動が活発になります。すると、最大風速半径よりも内側に向かう吹込みが強くなります。ところが、渦を考慮した慣性振動の時間スケール(概ね絶対渦度の逆数の時間スケール)が非常に短いため、吹込みの強化は最大風速半径領域での接線風速の強化に転化される、というものです(Ito *et al.* 2011)。強い台風ですと対流活動にかかる時間と慣性振動の時間の和は1時間以下になりますので、水蒸気供給は暖気核や気圧分布の変化を



第1図 データ同化を用いた海面交換係数最適化の概念図。

経ずとも、ごく短時間で最大風速を変化させることができるのです。

4. 海面水温に関する研究

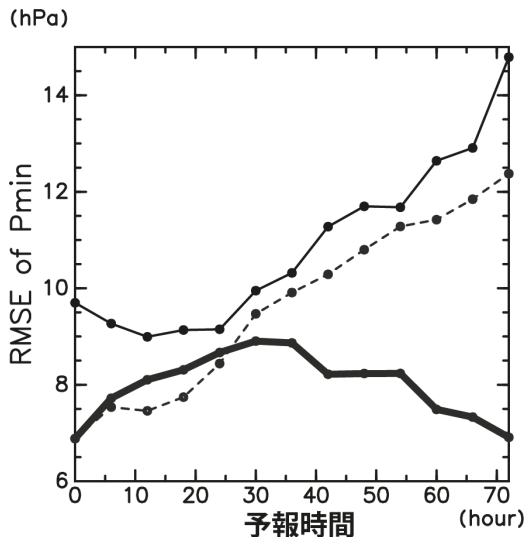
式 (1) で示される MPI の T_s は海面水温、 θ_{es}^* は海面水温の関数たる飽和相当温位です。多くの人がご存じのことではありますが、ここに現れているように、海面水温が高いほど、海面を通じた大気側への水蒸気供給は盛んになり、台風が利用することのできるエネルギーも豊富になるため、台風は強くなります。

一方、台風状況下では非常に強い風が吹くため、海洋内部で混合と湧昇を引き起こし、海面水温が下がることも古くから知られてきました (Leipper 1967; Price 1981; Wada 2005)。基本的には進行方向右側で海洋混合層底部における冷たい海水の取り込み (鉛直 1 次元過程) の効果が卓越しますが、移動速度が著しく遅い場合 (3 m/s 未満) にはエクマン輸送を介した中心付近での湧昇 (3 次元過程) の効果が卓越します (Yablonsky and Ginis 2009)。海面水温の低下幅は台風の移動速度・強度、海洋表層の成層などに依りて変化しますが (Lin *et al.* 2008)、台風が引き起こす海面水温の低下は台風自身を弱体化させるフィードバック機構として機能します。例えば、Schade and Emanuel (1999) は、大気海洋相互作用の結果として、大気モデルと大気海洋結合モデルでは、台風の中心気圧が 30hPa 近くも異なる場合があることを理想化実験で示しています。

国立台湾大学で台風中心位置をメトリックとする感度解析手法を開発したあと (Ito and Wu 2013)、海洋研究開発機構で極端大気現象予測プロジェクトに関わるポストドク研究員となっていた私は、プロジェクトリーダーである気象研究所の斉藤和雄さんと相談し、高解像度大気海洋結合モデルを開発して、日本付近を通過する台風強度の予測精度向上を目指す研究に着手しました。気象研究所の和田章義さんの勧めもあり、日本域を通過する台風であれば、移動速度も速いものが多く、鉛直 1 次元過程だけでそれなりの近似ができるだろうと考え、Price *et al.* (1986) の鉛直 1 次元海洋混合層モデルをメソ気象モデル NHM の下端境界に結合することになりました。それまでは、計算機資源の獲得に四苦八苦していましたが、「京」コンピュータの高い計算能力で、281事例の高解像度シミュレーションがわずか 1 日で終わったのには感動しました。この大気海洋結合モデル ($\Delta x = 5$ km) の予測結果を、

大気単体の NHM ($\Delta x = 5$ km) や全球モデル GSM ($\Delta x \sim 20$ km) の予測結果と比較したところ、48時間予報に関して中心気圧は 21-27%、最大風速は 13-20% の誤差低減が見込まれることが分かりました (Ito *et al.* 2015; 第 2 図)。これは、事例を日本付近に限ったものとはいえ、かなりの改善でした。さらに、結合モデルによって出力された海面水温は Argo フロートで観測された値と整合的であったのに対し、大気単体モデルで固定されたままの海面水温には明らかな正バイアスがあることも確認でき、高解像度大気海洋結合モデルが台風強度予報に有効であることを明確に示すことができました。海洋混合層モデルの計算量はシステム全体のわずか 1% 程度と軽く、実装も容易でしたので、気象庁数値予報課の方にも興味を持っていただき、現業 MSM にも実装されることになりました (2022年 3 月に現業化)。

Ito *et al.* (2015) では対象を気象庁 MSM の領域における台風に限定していましたが、計算領域を北西太平洋全体に拡張し、2012年から2014年にかけての 420 事例についての数値実験を行ったのが伊藤ほか (2018) です。この中でも、Ito *et al.* (2015) と同様に、全球モデル、大気単体の NHM、大気海洋結合版の NHM の 3 種類の比較を行いました。海洋結合は基本的に台風を弱める方向に働くため、結合モデルには非常に強い



第 2 図 中心気圧の予報誤差の比較：全球大気モデル (細実線)、高解像度大気モデル (細破線)、高解像度大気海洋結合モデル (太実線)。Ito *et al.* (2015) に加筆。©American Meteorological Society

台風の強度が再現しにくいという弱点がありましたが、変化傾向の相関係数に関しては最も良い性能を示すことが分かりました。また、この実験で、鉛直シアが強い場合には、全球モデルに比べて高解像度モデルの進路予報成績が良いことも分かりました。この結果は、第8節で述べる台風進路の研究にもつながっていきます。

近年は、非常にゆっくり移動する台風の下で起こる著しい海面水温低下を表現するために、NHMと3次元海洋モデルMRICOMを結合したモデルも開発し、研究に利用しています。非常にゆっくりと移動した2018年台風第24号の事例では、大気モデルと大気海洋結合モデルで、中心気圧が50hPa近くも異なっていました(Hirano *et al.* 2022)。

台風通過時の海面水温に関しては、海洋結合・非結合の違いもさることながら、そもそも初期値として用いられている海面水温解析の不確実性が大きいという問題もあります。というのも、台風直下の海面水温は衛星マイクロ波でも得ることができないからです。将来的にはデータ同化プロダクトに置き換えられていくのかもしれませんが、現在、気象庁の全球モデルで下端境界として用いられているMGDSSTと呼ばれる日別海面水温解析の速報値は、その時点までに得られている衛星観測に基づき、長周期成分を現場観測で補正するという処理によって作成されています。しかも、MGDSSTは27日周期以下の海面水温変動をノイズとみなして落とすような処理を施しているため、短時間で起こる急激な変動は取り込まれにくくなっています。そのため、台風通過前後のMGDSSTは、現実の海面水温よりも高く解析されていると考えられます(Ito 2022)。これは、台風自身の強度、あるいは、台風通過後に起こる別の台風や集中豪雨といった現象の再現性にも影響している可能性があることから、解析手法の高度化を通じて、より尤もらしい海面水温データの構築を進めていくことが重要だろうと考えています。

5. データ同化手法に関する研究

博士課程では、データ同化に基づく海面交換係数の最適化の研究をしていましたが、データ同化に関する理解が深まるにつれ、4次元変分法(4DVar)やアンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)といった主要な4次元データ同化手法の弱点もおぼろげながら見えるようになってきました。データ同化システムは、端的にいうと、観測点で定義されるイノベーション(観測

値から第一推定値を引いたもの)と物理量同士の相関の情報を組み合わせ、解析格子点上で定義されるインクリメント(解析値から第一推定値を引いたもの)に変換するシステムだと言えます。そして、手法の違いは、単純には、物理量同士の相関をどのようにして計算するかという違いに帰着させることができます。確認のため、確率分布のガウス性とシステムの線形性を仮定し、データ同化に用いる相関の計算を背景誤差共分散の構成とその時間発展という2つに分けて考えると、4DVarとEnKFにはそれぞれに一長一短があることが分かります。4DVarには背景誤差共分散の時間発展を厳密に解けるという利点があるものの、典型的な運用では過去の予報値の気候値的な統計量に基づいて背景誤差共分散を構成するため、台風や集中豪雨といった極端事例に適した相関が用いられません。一方のEnKFでは、時々刻々の状況に対応した背景誤差共分散をアンサンブル近似で構成することができますが、共分散の時間発展にもアンサンブル近似を適用するため厳密な計算を行うことができません。

そこで、近年は、4DVarの背景誤差共分散の設定にアンサンブル情報を利用するという手法の研究が進んできました(Miyoshi and Kadowaki 2008; Buehner *et al.* 2010)。しかし、私が海洋研究開発機構でポスドク研究員を務めていた当時は、台風や集中豪雨といった極端大気現象のメソデータ同化に、このような手法がどれだけ有効なのかを多数事例に基づいて実証したという研究はありませんでした。

そこで、気象研究所の國井 勝さんにEnKFの結果をご提供いただき、複数の台風事例と集中豪雨事例の同化・予測実験を行いました。例えば、台風の中心気圧の観測値を同化した場合にどのような温度のインクリメントが生じるかという1点観測実験を行うと、気候値に基づいて背景誤差共分散を構成した4DVarでは、典型的な温帯低気圧に見られるように海面気圧と対流圏下層の気温に高い負の相関があるとして下層の気温を大きく変化させるのに対し、EnKFから背景誤差共分散を構成した4DVarでは台風の暖気核の存在をメソデータ同化システムが適切に認識し、直上の対流圏上層の気温を大きく変化させました(第3図)。これは、期待通りの挙動であり、極端大気現象を扱う際にアンサンブル手法に基づいて背景誤差共分散を構成することが重要であることを意味しています。続けて行った62回の台風予測実験では、4DVarの予測性能が進路・強度ともに10%程度高められており、EnKFと

比較しても強度予測の性能が高いことが分かりました (Ito *et al.* 2016). また, 集中豪雨の予測についても統計的に有意な改善が認められました.

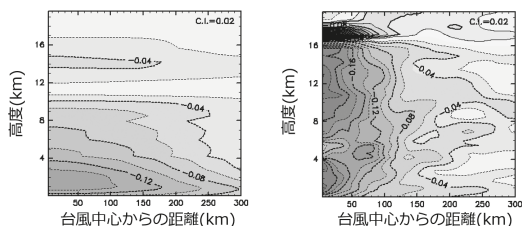
極端大気現象予測に関してもデータ同化手法の精緻化が重要であるということを示すことができたのは非常に良かったのですが, データ同化で出てくる結果をきちんと学び直して解釈したいという気持ちもありました. 長年, 青森県むつ市で開催されている「データ同化夏の学校」に参加させていただき, 多くの皆さんと基礎的な問題に関する議論をさせていただいていますが, そのときの議論をもとに, 数理的な側面を整理した解説論文を出版する機会を得ました (伊藤・藤井 2020). この解説論文では, イノベーションがインクリメントに及ぼす影響を明確にしました. 線形・ガウス性の成り立つ理想化された世界での話ではありますが, 過去の知見を整理すると, データ同化システムが

正規化された可観測行列 (正規化・摂動の時間発展・モデル変数から観測変数へのマッピングの作用をまとめた行列) の特異値が少なくとも 1 程度のモードを選択的に修正する仕組みであることを理解することができます. この解説論文の執筆を通じて, データ同化システムにできることとできないことを, 事前に頭の中でイメージできるようになったと感じています.

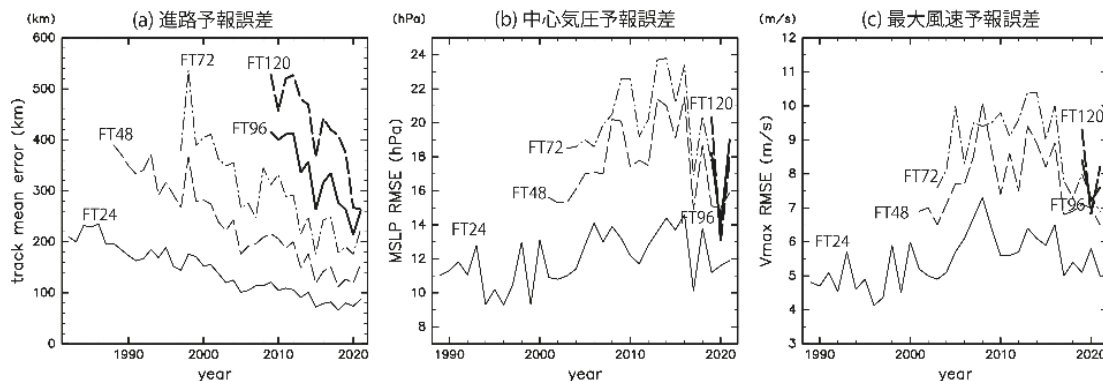
6. 気象庁の台風予報誤差のデータベース

ある学会で, 台風予測の研究をしていた私に「ところで, 気象庁の台風予報の成績はどうなっているの?」と質問した方がいました. 台風予測の研究に従事しながら, 気象庁の台風予報誤差についてきちんと調べたことがなかったので, 琉球大学に異動したのち最初に取り組んだのが, RSMC Tokyo が発表している台風予報誤差のデータベース化でした. 古いものは RSMC Tokyo の紙媒体の年報しか無く, 資料を揃えるのにも一苦労でしたが, RSMC Tokyo や沖縄気象台をはじめとする皆様に情報を提供していただき, 解析を進められるようになりました. 台風予報誤差のデータベースは HP で公開していますので, 興味のある方はご覧ください (<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.22673164>, 2023.5.8閲覧).

台風予報誤差のグラフを作成して大変驚いたのは, 進路予報誤差が長期的に見て低下し続けているのに対して, 2000年代中盤を境に台風の強度予報誤差が増加していたということでした (Ito 2016; 第4図). しかし, その原因を探るうち, 1989~2000年代前半に比べて, 2000年代中盤以降の台風急発達イベントの発生率



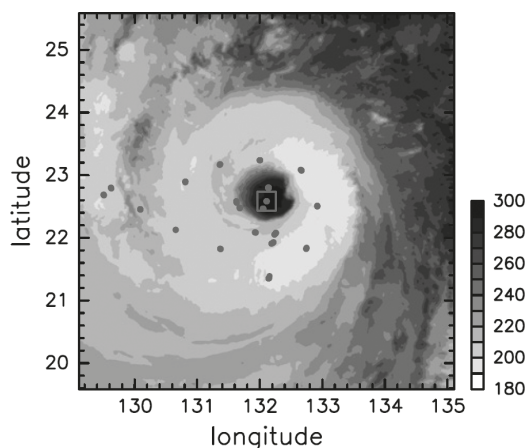
第3図 台風中心の海面気圧のみを同化した際に現れる温度のインクリメント. 4DVarの背景誤差共分散の構成に (左) 気候値を用いた場合 (右) アンサンブルを用いた場合. Ito *et al.* (2016) に加筆. ©American Meteorological Society



第4図 RSMC Tokyo による台風予報誤差の経年変化: (左) 進路予報, (中央) 中心気圧予報, (右) 最大風速予報. 図中の FT は予報時間を表し, 細実線は FT24, 細鎖線は FT48, 細一点鎖線は FT72, 太実線は FT96, 太鎖線は FT120 に対応する. Ito (2016) の図を2021年まで延長して加筆.

が2倍程度になっていることに気づき、さらに驚かされることになりました。急発達とは予測が難しい現象ですから、誤差が大きくなることに深い関連があります。急発達の発生率増加の原因としては、気候学的な影響だけでなく、時代ごとに台風強度解析や予測の手法が変化し続けていることも影響している可能性があります。Shimada *et al.* (2020) はドボラック法に基づくCI数（衛星画像や制約条件により決まる指数）と急発達イベントの発生数が2000年代中盤以降に整合的である一方、それ以前だと整合的でないことを指摘しています。すなわち、基準となる気象庁ベストトラックの品質は長期的に見て変化しており、2000年代初頭以前には台風の急発達イベントを適切に捉えていなかった可能性があるということになります。第7節でも議論しますが、いまもって台風強度を正しく推定することは難しく、台風強度予測を真に改善するためには台風強度を正しく推定することも重要な要素のひとつだと考えています。

Ito (2016) では、1992年以降の全ての6時間おきの予報誤差をデータベース化したため、環境場の変数の値に応じて、どのようなときに予報誤差が大きくなるのかということを調べることもできました。その結果、海洋内部の水温が高い場合や対流有効位置エネルギー（CAPE）が高い場合などには台風強度を過小評価し、水平風の鉛直シアが強い場合や海面水温が低い場合には過大評価する傾向にあることが分かりまし



第5図 2017年台風第21号の航空機観測において投下されたドロップゾンデの着水地点を衛星赤外画像（10/21 06:52:30UTC）に重ね描きしたもの。Ito *et al.* (2018) より引用。

た。逆にいうと、このような知識が、数値モデルの結果を補正するガイダンスに組み込まれるか、予報官の方に認知されれば、一般に伝えられる発表予報を改善できると言えます。試しに、CAPE、水平風の鉛直シア、MPI、中心気圧を説明変数とする線形回帰を施したところ、3日予報の誤差を15%以上低下させられるということが分かりました。当時、気象庁・気象研究所においても、台風強度予測の精度向上を目指そうとする動きがあり、何度か議論や情報共有をさせていただく機会もありました。気象庁・気象研究所の取り組みは、北西太平洋版 SHIPS（重要な変数を用いた線形回帰式で台風強度を予測するシステム）である TIFS に代表されるような様々なプロダクトとして結実し、2017年以降の強度予報の改善に貢献しています（Yamaguchi *et al.* 2018；山口ほか 2019；第4図）。

7. T-PARCII プロジェクト

琉球大学着任後には、名古屋大学の坪木和久先生に声をかけていただき、台風の航空機観測を含む T-PARCII プロジェクトに参画させていただくことができました。観測経験のほとんどない私でしたが、日本人研究者として初となる2017年の台風第21号の航空機観測に際しては、わがまを言って参加させていただきました。そして、この観測の際には、山田広幸先生の機転により、突如として計画に無かった台風の壁雲の貫通飛行が実現してしまいました。詳細な経緯については、筆保ほか（2018）などに書かれていますので割愛しますが、台風の壁雲と眼の領域を間近に見られた感動を一生忘れることは無いでしょう。私も他の皆さんとともに機内からドロップゾンデを投下し続けていましたが、送られてきたデータにはとても愛着が湧きました（第5図、第6図）。



第6図 2017年の台風第21号の貫通飛行を終え、鹿児島空港に着陸した直後のメンバー一同。著者は左手前。

航空機観測からの帰宅後、テンションの上がった私は、休む間もなくすぐにJNoVAを用いたデータ同化・予測実験を開始し、共著者に「少しは落ち着け」と言われながら、5か月ほどで実験の結果を論文の草稿にまとめました(Ito *et al.* 2018). この中で示したことのひとつは、航空機観測を実施するとその後の台風の進路や降水の予測の改善に貢献するという点です. もうひとつの結果は、ドボラック法に基づいた中心気圧とドロップゾンデで観測した中心気圧に10~15hPa程度の差異が生じていたという点です. ただし、この事例で台風強度の解析誤差が特別に大きいというわけではありません. ドボラック法の基準となるKoba *et al.*(1990)をもとに計算すると、CI数と中心気圧の航空機観測の回帰曲線からの残差は平均で約13hPaもあると考えられます. つまり、洋上にある場合の台風強度を推定する手法としてドボラック法は大変便利なのですが、不確実性を含んだ情報であることを認識する必要があります. 災害情報や予測精度を適切に評価する観点からも、台風強度解析の改善を図っていくことが望ましいと考えています.

2度目に参加させていただいた2018年の台風第24号の観測では、通常下層雲しかないはずの台風の眼の領域に非常に深い対流雲がそびえたっている様子を目撃してしまいました. この謎を解明してくれたのは、琉球大学の平野創一朗さんです. ちょうどこのとき、台風の移動が停滞し、急激な弱体化と最大風速半径の増加が進んでいました. これに伴って、壁雲域の上昇流の補償下降流として現れる中心付近の下降気流も弱くなっており、もともと対流不安定な状況にあった眼の中で高度9 kmに達する短寿命な対流雲が現れたのです(Hirano *et al.* 2022). これは、おそらく世界初の眼の中における深い対流雲に関する報告であるというだけでなく、対流圏中〜下層の暖気核の消失にもつながる重要な発見かもしれないと想像しているところです.

8. 台風進路の研究

学生時代から、台風研究の中でも強度の研究を行うことが多かったのですが、近年は台風の進路に関する基礎研究や予測研究も積極的に行っています. というのも、台風の進路予測が外れると、暴風・豪雨・高潮・高波といった諸現象が誤った位置に誤った強度で予測されるからです. ちょうど台風進路に関する研究を始めたタイミングで、第9回熱帯低気圧に関する国際

ワークショップ(IWTC-9)という会議で、台風進路に関する基礎研究の近年の成果をとりまとめるように依頼がありました. 海外の多くの研究者の皆さんと情報交換をするうちに、台風進路には様々な要素が複雑に作用していることを理解しました(Ito *et al.* 2020). 多くの文献には台風の進路は概ね指向流に流されて決まり β ジャイアによる修正を受けると書いてあるのですが、詳しく解析を進めてみると、実際には地形や非断熱加熱の偏りなど、より複雑な作用の結果として決まることが分かります. 台風進路の研究は1990年代までは盛んに行われてきましたが、近年はあまり研究者人口が多くないように見受けられます. しかし、2000年代以降に精緻化が進んできた非断熱加熱を含む高解像度データを使うからこそみえる、台風進路研究の新展開もきっとあるに違いないと私は考えています.

その一例として、偏西風帯に接近する台風が強ければ強いほど、早く偏西風に乗って移動するということを示したのがIto and Ichikawa (2021)です. これは偏西風帯に近づいた際に、鉛直シアベクトルの左側にあたる台風の北側で対流活動が活発になり、そちらに動いていく成分が現れるためです. また、2つの台風が北半球において接近した際に、お互いを反時計回りに回転させ、近づいていくという「藤原効果」が知られていますが、近年の我々の研究では、2つの台風からなるシステムが大規模場の鉛直シアを自らの外流出によって生み出し、それに伴って、反時計回りの回転に抗い、お互いを引き離そうとするという3次元的なメカニズムがあることが分かってきました(Ito *et al.* 2023; Lee *et al.* 2023). どうやら、台風が1000km以内に近づいている場合には古典的な2次元の藤原効果が卓越しているのに対し、1000~2000km離れた台風については2次元の藤原効果と3次元の藤原効果がともに重要な役割を果たしているようです.

9. まとめに代えて

本稿では、これまでの研究についてとりとめもなく書きましたが、振り返ってみて、自分が台風の予報を主なテーマとしながらも、色々なことをしてきたのだなと感じます. それは、私がこれまでに個性豊かな台風たちやそのときどきのきまぐれな思い付きに突き動かされてきたこと、そして、多くの人々に様々な研究の機会をいただきつつ、純粋科学としての気象学と応用科学としての数値天気予報の両方を行ったり来たりしながら、楽しく研究を実施してきたことの証である

ようにも思います。また、台風予報は言うまでもなく防災の基礎をなす重要な情報です。私の台風研究に対する情熱が少しなりとも社会に役立つのであれば、これに勝る喜びはありません。

まだまだ、やりたいことは山のようにあります。多くの皆様の支えがあって今日に至っていることに感謝しつつ、また、台風を含めた日々の予報に対し気象庁が大きな責任を負っておられることに対して敬意を払いつつ、これからも研鑽を積んでいきたいと思っています。

参考文献

- Buehner, M., P. L. Houtekamer, C. Charette, H. L. Mitchell and B. He, 2010: Intercomparison of variational data assimilation and the ensemble Kalman filter for global deterministic NWP. Part I: Description and single-observation experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1550–1566.
- Emanuel, K. A., 1986: An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady-state maintenance. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 585–605.
- 筆保弘徳, 山田広幸, 宮本佳明, 伊藤耕介, 山口宗彦, 金田幸恵, 2018: 台風についてわかっていることないこと. ベレ出版, 244pp.
- Hirano, S., K. Ito, H. Yamada, S. Tsujino, K. Tsuboki and C.-C. Wu, 2022: Deep eye clouds in Tropical Cyclone Trami (2018) during T-PARCI dropsonde observations. *J. Atmos. Sci.*, **79**, 683–703.
- Ito, K., 2016: Errors in tropical cyclone intensity forecast by RSMC Tokyo and statistical correction using environmental parameters. *SOLA*, **12**, 247–252.
- Ito, K., 2022: Bias in near-real-time global sea surface temperature analysis of Japan Meteorological Agency associated with tropical cyclone passages in western North Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, **100**, 321–341.
- 伊藤耕介, 藤井陽介, 2020: 逆問題としての4次元データ同化. *ながれ*, **39**, 167–179.
- Ito, K. and H. Ichikawa, 2021: Warm ocean accelerating Tropical Cyclone Hagibis (2019) through interaction with a mid-latitude westerly jet. *SOLA*, **17A**, 1–6.
- Ito, K. and C.-C. Wu, 2013: Typhoon-position-oriented sensitivity analysis. Part I: Theory and verification. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 2525–2546.
- Ito, K., Y. Naito and S. Yoden, 2009: Combined effects of QBO and 11-year solar cycle on the winter hemisphere in a stratosphere-troposphere coupled system. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, doi:10.1029/2008GL037117.
- Ito, K., Y. Ishikawa and T. Awaji, 2010: Specifying air-sea exchange coefficients in the high-wind regime of a mature tropical cyclone by an adjoint data assimilation method. *SOLA*, **6**, 13–16.
- Ito, K., Y. Ishikawa, Y. Miyamoto and T. Awaji, 2011: Short-time-scale processes in a mature hurricane as a response to sea surface fluctuations. *J. Atmos. Sci.*, **68**, 2250–2272.
- Ito, K., T. Kawabata, T. Kato, Y. Honda, Y. Ishikawa and T. Awaji, 2013: Simultaneous optimization of air-sea exchange coefficients and initial conditions near a tropical cyclone using JNoVA. *J. Meteor. Soc. Japan*, **91**, 337–353.
- Ito, K., T. Kuroda, K. Saito and A. Wada, 2015: Forecasting a large number of tropical cyclone intensities around Japan using a high-resolution atmosphere-ocean coupled model. *Wea. Forecast.*, **30**, 793–808.
- Ito, K., M. Kunii, T. Kawabata, K. Saito, K. Aonashi and L. Duc, 2016: Mesoscale hybrid data assimilation system based on JMA nonhydrostatic model. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 3417–3439.
- 伊藤耕介, 沢田雅洋, 山口宗彦, 2018: 高解像度大気モデル及び大気海洋結合モデルを用いた北西太平洋全域台風予測実験. 気象研究所研究報告, **67**, 15–34.
- Ito, K., H. Yamada, M. Yamaguchi, T. Nakazawa, N. Nagahama, K. Shimizu, T. Ohigashi, T. Shinoda and K. Tsuboki, 2018: Analysis and forecast using dropsonde data from the inner-core region of Tropical Cyclone Lan (2017) obtained during the first aircraft missions of T-PARCI. *SOLA*, **14**, 105–110.
- Ito, K., C.-C. Wu, K. T. Chan, R. Toumi and C. Davis, 2020: Recent progress in the fundamental understanding of tropical cyclone motion. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 5–17.
- Ito, K., S. Hirano, J.-D. Lee, and J. C. L. Chan, 2023: Three-dimensional Fujiwhara effect for binary tropical cyclones in the western North Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, **151**, 1779–1795, doi:10.1175/MWR-D-22-0239.1.
- Koba, H., T. Hagiwara, S. Osano and S. Akashi, 1990: Relationships between CI Number from Dvorak's technique and minimum sea level pressure or maximum speed of tropical cyclone. *J. Meteor. Res.*, **42**, 59–67.
- Lee, J.-D., K. Ito and J. C. L. Chan, 2023: Importance of self-induced vertical wind shear and diabatic heating on the Fujiwhara effect. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **149**, 1197–1212, doi:10.1002/qj.4448.
- Leipper, D. F., 1967: Observed ocean conditions and Hurricane Hilda, 1964. *J. Atmos. Sci.*, **24**, 182–186.
- Lin, I., C.-C. Wu, I.-F. Pun and D.-S. Ko, 2008: Upper-ocean thermal structure and the western North Pacific category 5 typhoons. Part I: Ocean features and the

- category 5 typhoons' intensification. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 3288–3306.
- Miyoshi, T. and T. Kadowaki, 2008: Accounting for flow-dependence in the background error variance within the JMA global four-dimensional variational data assimilation system. *SOLA*, **4**, 37–40.
- Powell, M. D., P. J. Vickery and T. A. Reinhold, 2003: Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones. *Nature*, **422**, 279–283.
- Price, J. F., 1981: Upper ocean response to a hurricane. *J. Phys. Oceanogr.*, **11**, 153–175.
- Price, J. F., R. A. Weller and R. Pinkel, 1986: Diurnal cycling: Observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling, and wind mixing. *J. Geophys. Res. Oceans*, **91**, 8411–8427.
- Rotunno, R. and K. A. Emanuel, 1987: An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part II: Evolutionary study using a nonhydrostatic axisymmetric numerical model. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 542–561.
- Schade, L. R. and K. A. Emanuel, 1999: The ocean's effect on the intensity of tropical cyclones: Results from a simple coupled atmosphere-ocean model. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 642–651.
- Shimada, U., M. Yamaguchi and S. Nishimura, 2020: Is the number of tropical cyclone rapid intensification events in the western North Pacific increasing? *SOLA*, **16**, 1–5.
- Takagaki, N., S. Komori, N. Suzuki, K. Iwano, T. Kuramoto, S. Shimada and K. Takahashi, 2012: Strong correlation between the drag coefficient and the shape of the wind sea spectrum over a broad range of wind speeds. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, doi:10.1029/2012GL053988.
- Wada, A., 2005: Numerical simulations of sea surface cooling by a mixed layer model during the passage of Typhoon Rex. *J. Oceanogr.*, **61**, 41–57.
- Yablonsky, R. M. and I. Ginis, 2009: Limitation of one-dimensional ocean models for coupled hurricane-ocean model forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 4410–4419.
- Yamaguchi, M., H. Owada, U. Shimada, M. Sawada, T. Iri-guchi, K. D. Musgrave and M. DeMaria, 2018: Tropical cyclone intensity prediction in the western North Pacific basin using SHIPS and JMA/GSM. *SOLA*, **14**, 138–143.
- 山口宗彦, 嶋田宇大, 沢田雅洋, 入口武史, 大和田浩美, 2019: 台風予報・解析技術高度化プロジェクトチームによる5日先台風強度予報ガイダンスの開発. 気象研究所技術報告, **82**, 1–60.

Studies on Atmosphere-ocean Interaction and Data Assimilation Contributing to the Improvement of Tropical Cyclone Forecasts

Kosuke ITO*

* *Faculty of Science, University of the Ryukyus (Current affiliation: Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University).*

E-mail: ito.kosuke.2i@kyoto-u.ac.jp

(Received 8 February 2023 ; Accepted 3 May 2023)
