

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03669

研究課題名（和文）集中豪雨の発達機構を解明する水物質同化手法の研究

研究課題名（英文）Research on hydrometeors assimilation methods to elucidate the mechanisms of torrential rain development

研究代表者

幾田 泰醇（Ikuta, Yasutaka）

気象庁気象研究所・気象観測研究部・主任研究官

研究者番号：80878249

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、様々な気象場に応じた背景誤差を深層学習で推定し、データ同化に利用して豪雨発達機構を解明することである。従来の統計的な背景誤差推定手法では、雲降水過程の多様性により高精度な推定が困難であった。そこで、深層学習の一種である条件付き敵対的生成ネットワークを用いて背景誤差共分散行列を生成する手法を開発した。この手法で生成した背景誤差を用いて雨と雪の混合比の同化インパクトを調査し、従来手法よりも優れた解析精度が得られることを示した。また、雲降水予測の誤差要因を解明するため、新たな雨滴粒径分布と非球形の雪粒子を数値モデルに導入した。その結果、降水系内部の水物質の予測精度の向上が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究課題の成果は、気象レーダーや地球観測衛星データ同化技術の進展をもたらし、数値天気予報モデルによる集中豪雨の内部構造の精密な再現を可能とする。この数値モデルの現象再現性の向上は、顕著現象の原因となる積乱雲の発生や発達機構の高精度な分析を可能とする。豪雨の発達機構に関する理解の深化は、気象学の更なる進歩に必要な不可欠である。また、数値天気予報モデルの初期値の精度向上は、日々の数値天気予報の精度も向上させる。特に、モデルの水物質の再現性能の向上は、水害や土砂災害の原因となる集中豪雨の予測精度向上に直結し、防災情報の高度化に寄与する。

研究成果の概要（英文）：This study aims to estimate background errors according to various meteorological conditions using deep learning and utilize them in data assimilation to elucidate the mechanism of torrential rain development. Conventional methods for estimating background errors have been challenging difficulties in achieving high accuracy due to the diversity of cloud precipitation processes. Therefore, we developed a method to generate background error using a type of deep learning called conditional generative adversarial networks. By using the generated background errors to investigate the assimilation impact of rain and snow mixing ratios, we demonstrated superior analytical accuracy compared to conventional methods. Furthermore, to elucidate the reasons for errors in forecasts, we introduced new raindrop size distributions and non-spherical snow particles into the numerical model. As a result, an improvement in the predictive accuracy of hydrometeors within precipitation systems was achieved.

研究分野：気象学

キーワード：データ同化 集中豪雨 深層学習 数値天気予報

1. 研究開始当初の背景

数値天気予報の精度向上には、数値予報モデルの高度化に加え、その初期値の精度向上が重要である。特に、集中豪雨の発生タイミングや位置の精度向上のためには、雲や雨などの大気中の水物質の初期状態を正確に再現することが必要である。近年、レーダーや衛星といったリモートセンシング技術の進展に伴い水物質に関する多くの観測がデータ同化を通じて初期値作成に利用できるようになってきた。しかし、世界の現業データ同化システムでは、風・気圧・気温や水蒸気は解析変数とされているが、水物質は前回の予報のままであり現実の大気の情報も反映されていない。そのため水物質と他の要素が整合していないという問題が生じている。この問題を解決するには水物質を解析変数として扱う必要があるが、そのために水物質の背景誤差共分散行列（以下 B）を事前に推定しておく必要がある。しかし、一般に推定された B は計算資源の問題から大幅な簡略化が施されており真の値から大きく乖離している。特に水物質の B の構造は、雲降水過程の強非線形性から従来のパラメトリックな推定手法では精度よく推定することは困難であった。近年進展が目覚ましい機械学習は、まさにこのような非線形な関係をモデル化する能力に優れている点で注目を集めている。数値天気予報やデータ同化分野では、機械学習の利用が進みつつあるが、水物質の背景誤差推定手法への機械学習の応用は行われていない。

2. 研究の目的

本研究では、大気中の水物質の解析変数化に必要な水物質の背景誤差特性の解明と機械学習を用いた B の新たな推定手法を確立する。その新たな B の推定手法を数値天気予報モデルの初期値を作成するデータ同化システムへ適用し数値天気予報の精度向上を図る。予測精度の向上した数値天気予報モデルを用いて豪雨の発達機構の解明を進める。

3. 研究の方法

(1) アンサンブル予測

気象庁メソモデルを用いた 100 メンバーのアンサンブル予測を基に深層学習の教師データを作成する。積乱雲周辺の格子周辺の 100 カラムを用いてリサンプリングし 10,000 メンバーのデータセットを作成する。そのデータセットから B を画像化し教師データセットを作成する。

(2) 深層学習

画像生成に関する深層学習手法の一つである条件付き敵対生成ネットワーク（CGAN）を用いて、3. (1) で作成した教師データセットで学習を行う。夏と冬の典型事例を対象に数値予報の結果から抽出した物理量の分布を行列化し条件画像として CGAN に与えて B の画像データを生成する。

(3) シミュレーションと分析

CGAN で生成した B の画像データから数値データに復号しデータ同化システムへ入力する。水物質に関するレーダー・衛星観測を同化し集中豪雨事例のシミュレーションを実施する。従来手法と本手法の結果を様々な観測と比較し、本研究の成果によって大気中の水物質の再現精度が改善することを実証する。また、シミュレートされた降水系内部の水物質を追跡し潜熱の収支解析を行う。その解析結果を基に集中豪雨の内部エネルギーの変動に注目し、水物質の分布が集中豪雨の発達過程に与える影響を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 深層学習による背景誤差共分散行列の生成

気象庁メソ解析とメソモデルを用いて 100 メンバーのアンサンブル予測の計算を実行した。夏と冬の典型的な降水事例を対象として計算を行った。アンサンブル予測は、アンサンブルデータ同化（EDA）手法を用いて作成した。アンサンブル摂動は、観測摂動法により作成した。図 1 は、100 メンバーの予測値から計算したモデルの湿潤全エネルギーの時間変化を示している。アンサンブル予測のデータから B の画像を生成し学習用のデータセットを準備した。この学習用の画像データセットを利用して、深層学習の一つである条件付き敵対生成ネットワーク（CGAN）に、B の正解画像と条件画像のペアを学習させた。CGAN に入力する条件データは、第一推定値における水物質のプロファイルから作成した。具体的には、雲氷、雪、霰、雲水、雨の組み合わせに応じて、ラベリングして行列を構成し、条件画像を作成した。図 2 は、条件画像、正解画像と CGAN が生成した背景誤差相関行列の画像を示している。CGAN は、成果画像とよく似た背景誤差相関行列の画像の生成に成功していることがわかる。背景誤差分散も CGAN を用いて推定した。生成された B を用いて理想化された条件で雨と雪の混合比の同化インパクトを調査した。図 3a は従

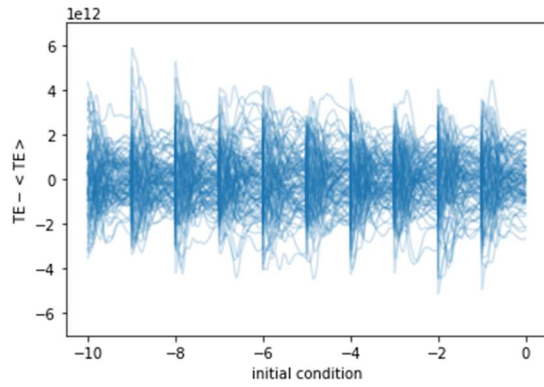


図1 100メンバーのEDAから計算した湿潤トータルエネルギーのアンサンブル平均からのずれ。

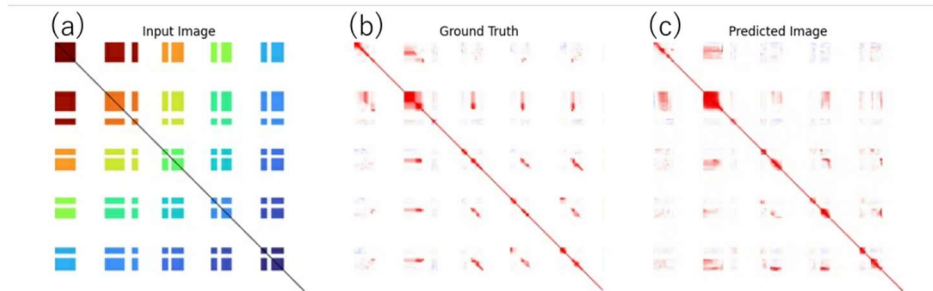


図2 (a) 第一推定値の水物質を基に作成した条件画像、(b) B の正解画像と (c) CGAN によって生成された B の推定画像。

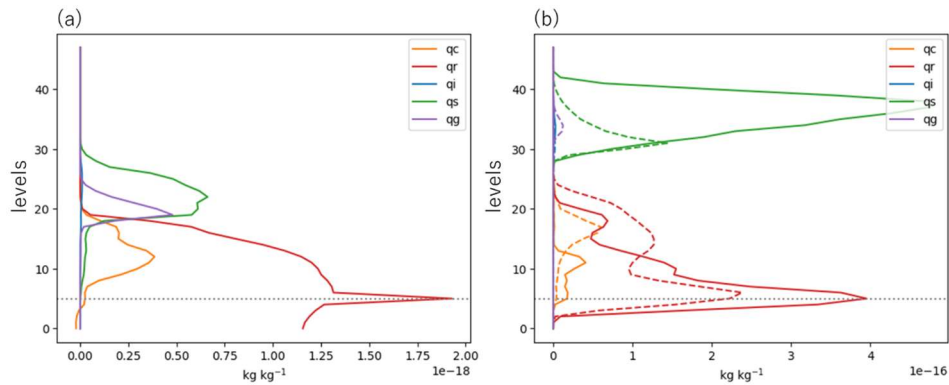


図3 (a) 気候学的 B を用いた解析インクリメント、(b) 実線は CGAN の破線は EDA の B を用いた解析インクリメント。

来の気候学的 B を用いた解析インクリメントであり、気象場の流れに依らずあらゆる場所で同じ修正量が計算される。図 3b は EDA と CGAN の B を用いた解析インクリメントを示している。CGAN の B を用いることで膨大な計算資源を必要とする EDA を使用せずに流れに依存する修正量が再現出ている。以上の結果は、CGAN を用いることで流れに依存した B を瞬時に生成しデータ同化で利用できる可能性を示している。一方で、CGAN に入力する条件ベクトルが特定の構造を持つ場合に、非現実的な B が生成されるという問題も確認されており、その解決に向けて研究を進めている。

(2) 数値天気予報モデルにおける雲微物理スキームの改良

雲降水過程の誤差特性を解明するため、水物質の予測と二重偏波レーダーを比較し予測誤差特性を調査した。雨滴の粒径と雪の形状の仮定が予測誤差の要因であることが分かった。雲微物理スキームに、新たに開発した雨滴粒径分布と非球形の雪粒子を導入した結果、予測誤差の縮小に成功した。粒子形状に感度のある二重偏波レーダーの偏波間位相差変化率 KDP に注目すると、改

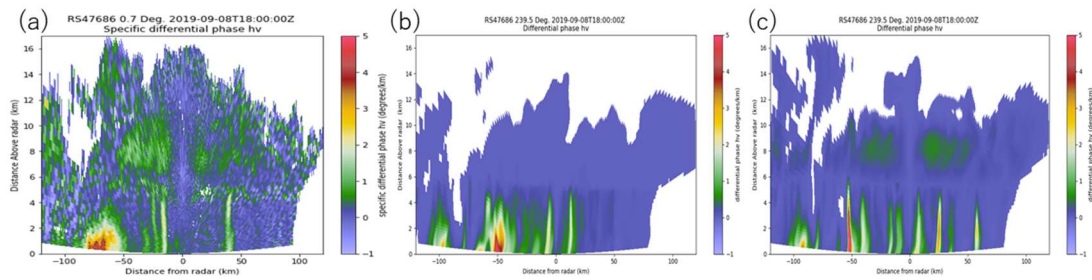


図4 (a)観測された K_{DP} 、(b)球形粒子を用いたモデルの K_{DP} 、(c)非球形粒子を用いたモデルの K_{DP} 。

良前のスキームの K_{DP} は高度 5km 以上で約 0 deg/km であるが、改良後のスキームの K_{DP} は約 1 deg/km であり観測に近づいた (図4)。本研究で開発したような粒子形状を組み込んだ雲微物理スキームは、世界的に見て希少である。このような先進的なスキームの利用は、数値天気予報モデルの予測精度向上をもたらし、降水系のより精緻な再現を可能とする。モデルで精緻に再現された降水系の分析は、豪雨発達機構の理解の進展をもたらすと期待される。

(3) 今後の展望

従来手法と本手法の結果を様々な観測と比較し、本研究の成果によって大気中の水物質の再現精度が改善することを実証する。また、シミュレートされた降水系内部の水物質を追跡し潜熱の収支解析を行う。その解析結果を基に集中豪雨の内部エネルギーの変動に注目し、水物質空間分布と集中豪雨の発達過程の関係を調査し、豪雨の発生発達機構の解明に貢献したい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ikuta Yasutaka, Shimada Udai	4. 巻 152
2. 論文標題 Impact of Assimilation of the Tropical Cyclone Strong Winds Observed by Synthetic Aperture Radar on Analyses and Forecasts	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Monthly Weather Review	6. 最初と最後の頁 1007 ~ 1025
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1175/MWR-D-23-0103.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ikuta Yasutaka, Sawada Masahiro, Satoh Masaki	4. 巻 80
2. 論文標題 Determining the Impact of Boundary Layer Schemes on the Secondary Circulation of Typhoon Faxai Using Radar Observations in the Gray Zone	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Atmospheric Sciences	6. 最初と最後の頁 961 ~ 981
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1175/JAS-D-22-0169.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ikuta Yasutaka, Seko Hiromu, Shoji Yoshinori	4. 巻 148
2. 論文標題 Assimilation of shipborne precipitable water vapour by Global Navigation Satellite Systems for extreme precipitation events	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society	6. 最初と最後の頁 57 ~ 75
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/qj.4192	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件/うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Yasutaka Ikuta
2. 発表標題 Generating background error covariances for hydrometeors with conditional generative adversarial networks
3. 学会等名 9th International Symposium on Data Assimilation（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasutaka Ikuta
2. 発表標題 Evaluation of cloud microphysics scheme using ground-based micro-rain radar in senjo-kousuitai event
3. 学会等名 JpGU meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasutaka Ikuta, Masaki Satoh, Woosub Roh, Shuhei Matsugishi, Naomi Kuba, Tatsuya Seiki, Akihito Umehara, Hisaki Eitoa
2. 発表標題 Effects of introducing three types of snow particle shapes and bimodal raindrops size distribution into cloud microphysics scheme
3. 学会等名 6th International Workshop on Nonhydrostatic Model (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 幾田泰醇、瀬古弘、川畑拓矢、石元裕史、荒木健太郎、田尻拓也、吉本浩一、鈴木健司、中山和正、酒匂啓司
2. 発表標題 チャンネル間・時間相関を含む観測誤差共分散行列を用いた気象庁地上設置型マイクロ波放射計の輝度温度高頻度同化
3. 学会等名 気象学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 瀬古弘、山内洋、梅原章仁、佐藤英一、酒井哲、足立アホロ
2. 発表標題 レーダー屈折率時間変化量の推定時のパラメータと観測高度
3. 学会等名 日本気象学会2023年度春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 瀬古弘, 幾田泰醇, 川畑拓矢, 佐藤芳昭, 笹川悠, 大森志郎
2. 発表標題 メソNAPEXを用いたPOTEKAの同化実験
3. 学会等名 日本気象学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 瀬古弘, 幾田泰醇, 川畑拓矢, 石元裕史, 荒木健太郎, 田尻拓也, 吉本浩一, 古賀禎, 瀬之口敦, 吉原貴之
2. 発表標題 メソNAPEXを用いた 地上マイクロ波放射計観測網の可降水量と 航空機動態情報 (MODE-Sデータ) の 同化実験
3. 学会等名 日本気象学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Daisuke Hotta
2. 発表標題 Gaussian Assimilation of non-Gaussian Image Data via Pre-Processing by Variational Auto-Encoder (VAE)
3. 学会等名 10th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Daisuke Hotta, Bun-Kim San, Loik Berre, and Vincent Chabot
2. 発表標題 VAE as a Stochastic Multidimensional Extension to Gaussian Anamorphosis
3. 学会等名 9th International Symposium on Data Assimilation (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Daisuke Hotta, Milan Klower, and Sam Hatfield
2. 発表標題 OctaHEALPix grid: a new, equal-area quadrilateral grid on a sphere which admits spherical harmonics transform
3. 学会等名 6th International Workshop on Nonhydrostatic Model (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 幾田泰醇
2. 発表標題 地上設置型マイクロ波放射計の4次元同化
3. 学会等名 気象学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 幾田泰醇
2. 発表標題 二重偏波レーダーを参照値とした雲微物理スキームの精緻化
3. 学会等名 第24回 非静力学モデルに関するワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasutaka Ikuta
2. 発表標題 Evaluation and improvement of cloud microphysics scheme using ground-based polarimetric radar and disdrometer observations
3. 学会等名 ICCP-GSRA Workshop 2023, jointly with The 2nd EarthCARE Modeling Workshop (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasutaka Ikuta
2. 発表標題 New Variational Data Assimilation System for Regional Model at JMA
3. 学会等名 WCRP-WWRP Symposium on Data Assimilation and Reanalysis (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasutaka Ikuta
2. 発表標題 Assimilation of GPM DPR Spectral Latent Heating using Situation Dependent Observation Error Covariance with Spatial Correlation in Kalman Gain
3. 学会等名 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀬古弘
2. 発表標題 1km格子 asuca を用いた豪雨をもたらした降水系の流跡線解析
3. 学会等名 第23回非静力学モデルに関するワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀬古弘
2. 発表標題 メソアンサンプル予報を用いた豪雨の相関解析
3. 学会等名 日本気象学会2021年度春季大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	澤田 謙 (Sawada Ken) (10847205)	気象庁気象研究所・気象観測研究部・主任研究官 (82109)	
研究分担者	堀田 大介 (Hotta Daisuke) (60805365)	気象庁気象研究所・気象観測研究部・主任研究官 (82109)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	瀬古 弘 (Seko Hiromu) (60354445)	気象庁気象研究所・気象観測研究部・研究官 (82109)	
研究協力者	川畑 拓矢 (Kawabata Takuya) (80354447)	気象庁気象研究所・気象観測研究部・室長 (82109)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------