

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：82109

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2022

課題番号：19K23468

研究課題名（和文）スピンドアウン問題解決に向けた変分法同化スキームへの水蒸気バランス機構の導入

研究課題名（英文）Introduction of water vapor balance method into variational assimilation scheme to solve the spin-down problem.

研究代表者

澤田 謙（Sawada, Ken）

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：10847205

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：この研究では、従来のデータ同化システムで時折引き起こされる予測初期における降水表現が実際よりも過剰（スピンドアウン）もしくは過少（スピニアップ）となる問題の解決に向けて、モデル変数間の水蒸気量バランスを保つ仕組みを導入することで、観測データや予測モデルとの整合性がより良い高品質の初期値を作成することを試みた。新手法では従来法に比べ、大気中下層で平均的には水蒸気量が減り気温が上がることで観測データに近づきつつも、降水現象のトリガーとなりうる領域では局所的な高相当温位域を解析し、降水を形成する対流の円滑な生成を促し、結果として予報初期の降水再現性が向上することが確かめられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究で開発した手法は上下限がある相対湿度を変分法同化システムで同化する際に、簡便な制約条件付きの最適化問題の解法を応用したものであり、複雑な多自由度系での同化システムにおいて比較的簡便な方法でバランスの取れた品質の良い初期値が得られることが確かめられたことは学術的に有意義である。また、この手法により深刻な豪雨事例の予測が改善されることは防災・減災に直接的に関連するため、大きな社会的意義を持っている。

研究成果の概要（英文）：This study attempts to solve the problem of over- (spin-down) or under- (spin-up) precipitation representation in the early stages of forecast, which is sometimes caused by conventional data assimilation systems, by introducing a mechanism to maintain water vapor balance among model variables, thereby producing high-quality initial data that are more consistent with observed data and forecast models. Compared to the conventional method, the new method, while approaching the observed data by decreasing the amount of water vapor and increasing the temperature on average in the lower and middle atmosphere, analyzes localized higher equivalent potential temperature regions in areas that may trigger precipitation events, and promotes smooth generation of convection that forms precipitation, thus improving the reproducibility of precipitation in the early forecast period.

研究分野：メソデータ同化

キーワード：変分法データ同化 制約付き最適化 降水再現性

## 1. 研究開始当初の背景

気象現象のシミュレーションによる予測は本質的に初期値境界値問題であり、予測精度向上のためには高品質な初期値が不可欠である。そのため変分法やアンサンブルカルマンフィルター法に基づく高度なデータ同化手法が利用されている。しかしながら、データ同化を行うことでモデル変数間の水蒸気量に関連するバランスが崩れ、予測初期に降水が過剰(スピンドウン)もしくは過小(スピナップ)となる場合があり、このような数値予測モデルによる降水再現性の改善が課題とされていた。また、実際と異なる大気状態を推定してしまうことから降水メカニズムの解明を困難にするなどの課題があった。

## 2. 研究の目的

上記の課題は、現在の大規模変分法同化システムにおいては、現実には起こりえない負の水蒸気量や過飽和状態に対応する水蒸気量を持つ初期値の作成を適切に抑制する仕組みがなく、水蒸気インバランスを引き起こしてしまっているためと考えられた。そのためモデル変数間の水蒸気バランスを保つ同化システムを開発し、観測値や予測モデルに整合的な初期値を作成することで予測における降水再現性を向上させることを目的とした。また、大気状態(水蒸気分布や上昇流形成)を精度よく推定することで集中豪雨などの降水メカニズム解明に寄与することを目指した。

## 3. 研究の方法

本研究では、現実に即してスピンドウン問題などの予測初期における降水再現性問題を改善するために、高品質な初期値を与えるデータ同化システムとして十分実績のある気象庁非静力学メソ4次元変分法(JNoVA)に基づいて水蒸気バランス機構の導入を試みた。最尤法に基づく変分法では、統計的な誤差情報を持つ観測値と第一推定値から評価関数を作成し、その値が最小になる状態を探索することで、最適な初期値を求める。その際、JNoVAのような大規模・現実的システムでは正確な誤差分布の推定や利用は計算機資源上困難であることから誤差分布が単純化されており、これが物理的に不適切な水蒸気量を初期値に生じさせる原因となっていた。そこで本研究では、制約条件つき最適化問題の解法を応用し、各点の相対湿度が0~100%内にあることを制約条件とし、制約条件からの外れ具合に依存するペナルティ関数を評価関数に加えることで直接的に水蒸気量が適切な範囲にある初期値を求める方法をとった。この方法ではペナルティ関数に掛けられるパラメータには任意性があり、本研究を通じて最適な値を調査した。また、この手法では相対湿度のみに制約を課したが、最小値探索過程を通して他の変数にも影響が及ぶため、バランスがとれた初期値が作成されたと考えられる。

## 4. 研究成果

### 4.1 同化システムへの影響

まず、JNoVAにペナルティ関数法を応用した水蒸気バランス機構を実装し、その際の挙動を詳細に確認した。図1は変分法同化システムにおいて反復法を用いて最小化されるべき評価関数の振る舞いを示したものであり、今回導入した水蒸気バランス機構の幅広いパラメータ値の範囲内で最小値探索が破壊されることなく、首尾よく最小値に近づいて行くことが確認できた。理論的には外点ペナルティ法を応用しているため、その値は大きいほど良いが、大きすぎる(今回の実験では~10000)と最小値探索が不安定化してしまうため、おおよその上限として=1000とした。また、評価関数におけるペナルティ項の大きさは、背景項や観測項にくらべて2桁程度小さいものの、最初値探索の初めの段階で効く(相対的に大きくなる)ことが多く、探索方向の決定に重要な役割を果たしていることが示唆された。

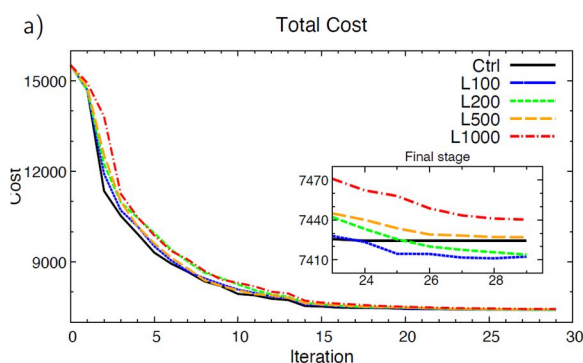


図1 評価関数値の振る舞い。横軸は最小値探索の繰り返し数。Ctrlは従来手法での実験、L100~L1000は湿度制約を考慮した実験で数字はパラメータの値を示す。

#### 4.2 初期値への影響

湿度制約の導入により、現実には起こりえない負の水蒸気量や過飽和状態に対応する水蒸気量を持つ初期値の作成を抑制することができた(図2)。とくに大気下層においては従来法では(多い場合には)5%程度の格子点で過飽和状態となっていたが、湿度制約の導入により0.1%程度に抑えられることが分かった。一方で大気上層付近では制約の効果があまりないが、これは湿度制約を実装する際に比湿に変換して導入したことによる。比湿が取りうる値は気温に大きく依存し、大気下層で大きな値を、大気上層で小さな値を取りやすいためである。相対湿度の分布については、図3にみられるように、従来手法での過飽和領域を大きく縮小することが出来た。この効果はパラメータ値が大きくなるほど強く現れることも確認できた。

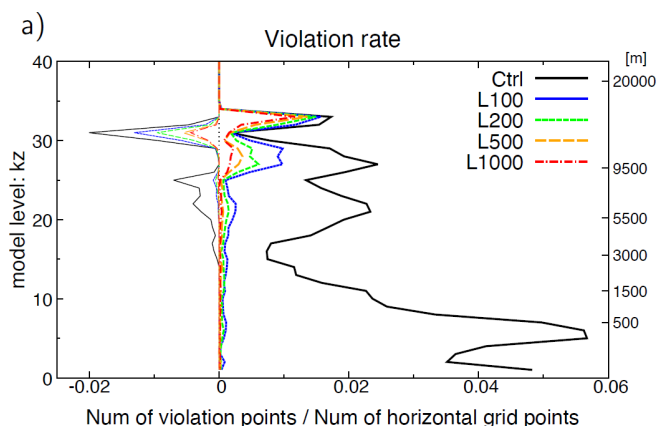


図2 水蒸気量が負もしくは過飽和状態と解析された格子点の割合の鉛直プロファイル。横軸が正の領域は過飽和状態、負の領域は負の水蒸気量状態に対応する。

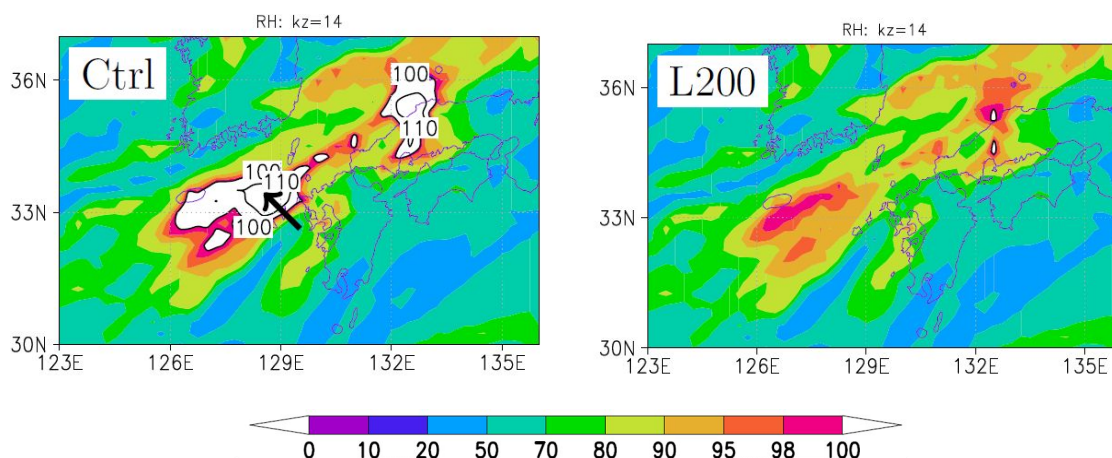


図3 相対湿度分布の比較。過飽和領域が白色で示されている。高度約2500m。

#### 4.3 予測値への影響

湿度制約を導入した場合、従来手法に比べ、(過飽和が起こりやすい領域の周辺で)平均的には気温が高めで水蒸気量が少なめとなる初期値を作成する。ただし、気温が高くなることから局所的にはより多くの水蒸気量を含む領域(高相当温位域)を解析することができ、そのような領域は降水のトリガーとしての役割を担う場合がある。実際に、図3の事例においては、850hPa高度において九州西海上で水蒸気量が従来手法よりも多くなり、図4にみられるように降水再現性が大きく向上した。この事例では、気温や比湿のインクリメント(第一推定値と解析値)の時間発展を詳細に解析することにより、湿度制約を導入することでそれらのインクリメントの短時間での消散が抑えられ大気の流れに沿って初期インクリメントの影響が下流に自然に流されること、すなわち、データ同化に起因する初期ショックが軽減されることが明らかになった。このことは予測モデルに整合的な初期値が作成できたことを意味している。そのような初期値から予測される大気状態を仔細に調査することで、注目している高相当温位域で円滑な対流形成が生じ降水へと結びついていく様子が確認された。

さらに10日間程度の解析予測サイクル実験を実施し、降水予測についてFSS(Fractions Skill Score)検証を行ったところ、パラメータの値によらず、初期時刻から概ね6時間程度の期間の降水スコアが改善される(また、6時間以後のスコアには大差がない)ことを確認した。このことは、パラメータ値が大きいほど図2にみられるように湿度制約が厳密に守られるものの、その違いの降水に対する影響は、解析予測サイクルを繰り返すうちに他の不確定要素による変動に埋もれてしまうことを示唆しており、図らずしてパラメータ値に対する堅牢性を確認することが出来た。

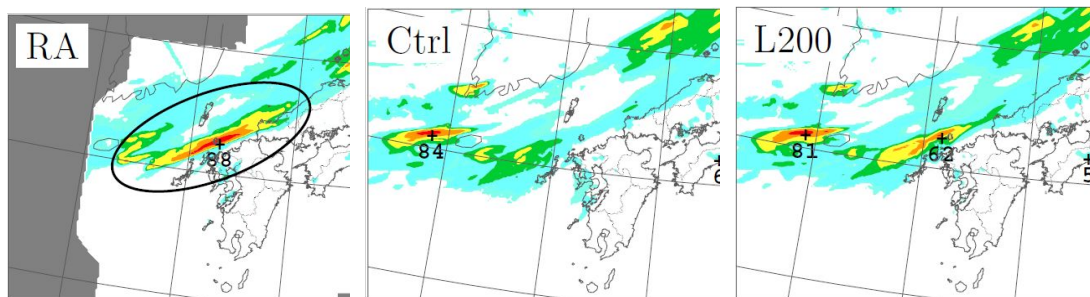


図4 初期値から三時間後の予測降水分布比較（前3時間降水量）。RAは気象庁解析雨量。

#### 4.4 観測値との比較

予測された温度と相対湿度についての対ゾンデ検証（バイアスとRMSE）からは、湿度制約の導入により、従来手法では過飽和状態となってしまった領域の周辺域や下流域を中心に概ねスコアが改善し、予測値と観測値との整合性がより良くなったことを確認できた。例外的に地表付近（950hPa以下）で従来手法に比べ気温が高温化してスコアが若干悪化した。この悪化の程度は大きなものではないが、局所的な降水をもたらす上昇流形成は地表付近の温度場や水蒸気場の違いに敏感に反応するため、さらなる降水再現性の向上のためには注視すべき問題である。現段階でこの原因は厳密には突き止められていないが、誤差分布の非正規性（正規分布からの歪み）や相関距離の設定に起因する可能性があると考えており、今後の課題としたい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Sawada Ken, Seino Naoko, Kawabata Takuya, Seko Hiromu	4. 巻 19B
2. 論文標題 Impacts of an Urban Canopy Scheme and Surface Observation Data on a Heavy Rain Event through Data Assimilation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 SOLA(Scientific Online Letters on the Atmosphere)	6. 最初と最後の頁 1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2151/sola.19B-001	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 SAWADA Ken, SEINO Naoko, KAWABATA Takuya, and SEKO Hiromu	4. 巻 52
2. 論文標題 Effects of an Urban Canopy Scheme and Surface Observation Data on a Heavy Rain Event through Data Assimilation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 WGNE Research Activities in Earth System Modelling	6. 最初と最後の頁 115~116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Sawada Ken, Honda Yuki	4. 巻 149
2. 論文標題 A Constraint Method for Supersaturation in a Variational Data Assimilation System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Weather Review	6. 最初と最後の頁 3707~3724
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/MWR-D-20-0357.1	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 Sawada, K., Y. Honda	4. 巻 51
2. 論文標題 Effect of supersaturation constraint in a variational data assimilation system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 WGNE Research Activities in Earth System Modelling	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 澤田謙
2. 発表標題 変分法メソ解析システムにおける過飽和制約の効果
3. 学会等名 日本気象学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ken Sawada, Yuki Honda
2. 発表標題 Effects of suppressing supersaturation in a variational data assimilation system
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 澤田謙
2. 発表標題 変分法同化システムにおける過飽和制約の導入
3. 学会等名 日本気象学会2020年度春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤田謙
2. 発表標題 変分法同化システムにおける過飽和制約の導入
3. 学会等名 第一回先端的データ同化と巨大アンサンブル手法に関する研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤田 謙
2. 発表標題 変分法同化システムへの過飽和制約の導入
3. 学会等名 第22回非静力学モデルに関するワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤田 謙
2. 発表標題 スピンドウンと過飽和抑制
3. 学会等名 日本気象学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤田 謙
2. 発表標題 スピンドウン問題と過飽和制約について
3. 学会等名 ポスト京重点課題4サブ課題A 2019年度第1回研究連絡会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤田 謙
2. 発表標題 スピンドウン問題と過飽和制約について
3. 学会等名 2019年度第1回高解像度豪雨予測とアンサンブル同化摂動手法に関する研究会(第7回アンサンブルデータ同化摂動に関する研究会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤田 謙
2. 発表標題 スピンドウンと過飽和抑制
3. 学会等名 第21回非静力学モデルに関するワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤田 謙
2. 発表標題 スピンドウンと過飽和抑制
3. 学会等名 2019年度第2回高解像度豪雨予測とアンサンブル同化摂動手法に関する研究会(第8回アンサンブルデータ同化摂動に関する研究会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤田 謙
2. 発表標題 過飽和制約の影響調査について
3. 学会等名 ポスト京重点課題4サブ課題A 2019年度第3回研究連絡会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤田 謙
2. 発表標題 変分法同化システムにおける過飽和制約の導入
3. 学会等名 日本気象学会2020年度春季大会
4. 発表年 2020年



〔図書〕 計1件

1. 著者名 越塚登（監修），清野直子，澤田謙，川端康弘，瀬古弘ほか	4. 発行年 2022年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 252
3. 書名 気象データ分析の高度化とビジネス利用	

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------