



観測データのインパクト評価と誤差共分散行列の客観推定による全球大気解析の高精度化に関する研究

石橋, 俊之

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2021-03-06

(Date of Publication)

2022-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙第3398号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2003398>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



論文内容の要旨

氏名 石橋 俊之

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

「観測データのインパクト評価と誤差共分散行列の客観推定による全球大気解析の高精度化に関する研究」

大気はカオス性 (初期値鋭敏性) をもつため、地球全体 (全球) の大気状態 (風速、温度、水蒸気量、気圧分布等) を正確に解析することは難しい科学的課題である。正確な大気解析は、数値天気予報 (Numerical Weather Prediction: NWP) の初期値としても重要である。物理系の時間発展を予測できることはその系の理解の重要な要素であるため、NWP の高精度化は大気科学の目的でもあり、台風等の防災情報の高度化にも不可欠である。データ同化は、大気状態に関する観測や予測等の膨大な情報 ($O[10^8]$ ~) を確率密度関数によって無矛盾に統合することで、高精度な大気解析を可能にする。正確な大気解析のためには、各情報の不定性を表現する確率密度関数を十分な精度で推定する必要がある。ガウス近似では誤差共分散行列 (Error Covariance Matrix: ECM) の推定に帰着する。また、大気解析の主な情報源である観測データが、解析場に与える影響 (観測インパクト) を知ることも重要である。観測インパクトは ECM によって決まるため、観測インパクトの解析は ECM の解析でもある。ECM の推定と観測インパクト評価は 2 つの密接に関係した大気解析の研究課題である。

しかし、ECM の推定や観測インパクトの評価は、系の自由度が非常に大きいため難しい問題である。既存の観測インパクト評価手法にはインパクトの時空間構造の解析ができない等の限界があり、ECM の推定にも非自明な仮定が必要である。このため、現行の ECM は多くの経験的調整を経て構築されている。大気解析は膨大な数の経験的パラメータに依存し、解析場の妥当性や精度が強く制限されている。例えば、衛星輝度温度観測の ECM だけでも数千個の経験的パラメータで構成されている。経験的調整には数千回~のデータ同化計算を要する一方で、数 100% の誤差を含み理論的整合性もない。既存の観測インパクト評価では、予報場 ($O[10^3]$ の自由度) の特徴はスカラー関数 (自由度 1) で表現され、ECM の観測データへの作用を詳細に解析できない。ECM の近似精度が低いために利用可能な観測の数%未満しか同化できていない。大気解析の高精度化には上述の 2 つの課題の解決が不可欠である。

本研究の目的は、上述の関連した 2 つの課題 (観測インパクトの詳細な評価、ECM の高精度な推定) を解決し、高精度で妥当性の高い大気解析を可能にすることである。このために、本研究は以下を行う。1) 観測インパクトの時空間構造を解析できる新しい評価手法を構築し、詳細なインパクト評価を行うと共に ECM についての知見を得る。2) ECM 全体を複数の客観推定手法を用いて高精度に推定する。これを同化システムに導入して観測インパクトや予報精度の変化を解析し、妥当性が高く高精度な ECM 及び大気解析場が得られることを示す。これらは本研究がはじめて行うものである。本研究は 3 つの研究からなる。1) 新しい観測インパクト推定手法の構築 (第 3 章)、2) 新手法による既存評価手法 (随伴演算子によるインパクト評価) の検証 (第 4 章)、これら 2 つの研究では観測インパクトの詳細な解析も行う、3) ECM 全体の高精度推定とその導入による高精度な大気解析及び予報の構築 (第 5 章)。数値実験は、4 次元変分法データ同化を含む気象庁の全球 NWP システムで実施する。各研究の詳細は以下である。

第 3 章では、観測インパクトの時空間構造を解析できる新しい観測インパクト評価手法を構築する。この方法は観測演算子や予報モデルの接線型近似に基づくため「接線型 (インパクト) 評価」と呼ぶ。新手法では、各観測データセットのインパクトは、それらによって生成される部分解析インクリメント (Partial analysis Increment Vector: PIV) によって評価する。新手法は、カルマンゲインが観測情報をどのように解析インクリメントに変換するかを見ることを可能にする。

観測データは、衛星輝度温度観測とその他の従来型観測に区分し、後者はさらにラジオゾンデ等に区分した。実験結果は以下である。1) 新手法は現業全球 NWP の変分法同化システムにおける解析場や予報場への観測インパクトの時空間構造を評価できる。2) 時間発展した背景場の誤差ベクトルと主要な PIV の間には反平行性（負相関）がある。これは主要な PIV が背景場の誤差の成長モードの時空間構造を部分的に捕捉したことを直接的に示している。3) 観測インパクトの干渉は、新手法で定量的に評価できる。インパクトの類似性は輝度温度と従来型観測間では小さく、輝度温度の隣接チャンネル間では大きい。4) 輝度温度観測のインパクトは従来型観測のある領域で非常に小さい。輝度温度観測の ECM の経験的調整（観測誤差膨張）に起因すると考えられる。

第 4 章では、既存の観測インパクト評価手法である随伴演算子によるインパクト評価（以下では「随伴（インパクト）評価」と呼ぶ）を接線型評価（第 3 章）で検証した後、観測インパクトの詳細な評価を行う。本研究の目的は 2 つある。第 1 に、随伴評価が用いるカルマンゲインの随伴演算子の近似表現等の 4 つの近似の妥当性の検証である。第 2 に、観測インパクトについての新しい知見を得ることである。随伴評価の検証は、接線型評価との比較により行う。接線型評価は随伴評価と同じ量を随伴演算子なしで計算できる。これらの検証と観測インパクト評価の結果は以下である。はじめに、観測インパクトの随伴評価は接線型評価とよく一致し、相関係数は 0.97 以上であった。次に、得られた観測インパクトは、多くの面で先行研究の結果と整合的であったが、GPS 掩蔽観測や水蒸気に感度のある輝度温度観測のインパクトが小さい等、システムに依存した性質も見られた。これは ECM の経験的調整（観測誤差膨張）の違いが一因と考えられる。観測インパクトの新しい性質も明らかになった。1) 観測インパクトの確率密度関数は、観測と予報誤差標準偏差の比の実験値を与えたスカラー理論とよく整合する。つまり、観測インパクトの確率的挙動の基本的な性質は、ECM の時空間一様性を仮定して説明できる。2) データ同化窓の中で遅い時間の観測ほど大きな正のインパクトを持つ。これは予報誤差の主成分は初期値誤差の成長であるとしてモデル誤差を無視する強拘束の 4 次元変分法の仮定と整合的である。

第 5 章では、ECM の高精度推定とその導入による大気解析精度の改善に関する研究について述べる。NWP の精度改善には、ECM の正確な推定とデータ同化でのその利用が不可欠である。本研究の目的は、すべての観測と背景場の ECM を標本統計によって推定し、それらを使って全球 NWP の精度を改善することである。このような ECM 全体を更新する研究は、本研究がはじめて行うものである。すべての ECM の対角成分、及び輝度温度観測の非対角成分（チャンネル間相関）を更新した。ECM の推定結果は以下である。(1) 推定された誤差標準偏差は全体的に気象庁現業システム（CNTL）の設定値よりもかなり小さい。特に輝度温度観測で顕著であり、観測インパクトの解析結果（第 3 章、第 4 章）と整合的である。(2) 水蒸気に感度を持つ輝度温度観測のチャンネル間誤差相関は 0.2 よりかなり大きい。(3) AMSU-A（気温に感度を持つ輝度温度観測センサ）の観測誤差の水平相関距離はチャンネル 4 を除き 50km 程度である。これらの結果は、ECM の更新による高精度な大気解析の可能性を示唆する。次に、解析・予報サイクル実験の結果は以下である。(1) 診断された ECM は、付加的な調整なしでも CNTL に対して概ね予報精度を改善する。(2) 付加的な調整として、非衛星従来型観測と GPS 掩蔽観測の観測誤差標準偏差に 0.6 の観測誤差縮小係数を与えることで、予報誤差は統計的に有意に改善する。

(3) この値 0.6 は、推定された背景誤差標準偏差と CNTL の誤差標準偏差の比と等しく設定した。これらの結果は、ECM の客観推定を NWP システムに適用することで、従来の経験的調整による ECM よりも高精度な ECM が得られることを示している。また、付加的調整による精度改善は、輝度温度観測の変分法バイアス補正への各観測のインパクトが適切になるためと考えられる。(4) AMSU-A の高密度同化（CNTL の 10 倍）は CNTL よりも精度が良いが、5 倍の高密度同化を改善はしない。(5) 夏（Boreal summer）のデータで推定した ECM は、冬期間の実験でも予報精度を改善する。これは推定された ECM の堅牢性を示している。(6) ECM の更新によって、気温や水蒸気に感度のある輝度温度や GPS 掩蔽観測のインパクトが明瞭に増加した。これは観測インパクトの解析（第 3 章、第 4 章）で示唆された ECM の問題が改善され、より多くの情報が解析場に同化されたことを示している。(7) NWP システムの理論との整合性を変分法同化の評価関数のカイ 2 乗分布性で評価すると、CNTL が 32%程度であるのに対し、客観推定した ECM を用いた場合は 85%以上であり、理論整合性も明瞭に改善することが示された。

本研究全体の結論は以下である。本研究では、まず観測インパクトの時空間構造を解析できる新しい観測インパクト評価手法を構築し、観測インパクトの詳細な解析を可能にした。次に ECM 全体を複数の推定手法により高精度に推定し、同化システムに導入して観測インパクトや解析及び予報精度の変化を解析し、妥当性が高く高精度な ECM 及び大気解析場が得られることを示した。ECM に含まれる客観的推定によらないパラメータは、従来の数千個から 1 つだけとなった。残る 1 パラメータの値についても ECM の客観推定結果から決定された。AMSU-A の同化観測数は 5-10 倍に増加した。予報精度は全球的に 95%の統計的有意性をもって改善し、理論的整合性も 32%から 85%以上に向上した。本研究の成果は大気解析を経験的調整から概ね解放するため、今後の大気解析研究の加速が期待できる。妥当性が高く高精度な解析場や予報場は、大気現象の研究や防災情報の高度化にも資する。本研究の成果は、大自由度系の状態解析という普遍的な問題に対するものであり、大気以外の様々な物理系の研究にも資することが期待できる。

氏名	石橋 俊之		
論文題目	観測データのインパクト評価と誤差共分散行列の客観推定による全球大気解析の高精度化に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	准教授	川畑 拓矢
	副査	教授	林 祥介
	副査	教授	牧野 淳一郎
	副査	准教授	高橋 芳幸
	副査	理化学研究所 計算科学研究センター データ同化研究チーム チームリーダー	三好 建正

印

要旨

2021年2月2日(火)、博士学位論文発表会(審査公開聴会)と審査会を開催し、申請論文ならびに既に学会誌等で査読論文として公表されている英文論文を元に、そこで展開されている気象学ならびに手法として用いられているデータ科学に関する口頭試問を実施した。質問に対する申請者の応答は良好であり、これらの専門科目に関して学位授与にふさわしい十分な専門的知識を有していることを確認し、合格とした。

(申請論文概要)

現代の数値天気予報、さらには大気科学、防災科学の基礎となる大気解析には、自由度 10^8 程度におよぶ精緻なNWP(数値天気予報: Numerical Weather Prediction)モデルによる予測と数100万個の観測データとを無矛盾的に統合するデータ同化が用いられる。しかし現状では、データ同化理論で最も重要な量であり、観測や予測の不確実性を記述する誤差共分散行列(Error Covariance Matrix: ECM)が精度よく推定されていない。このために、大気解析の精度や妥当性(理論的整合性)が強く制限されている。また、大気解析に対する重要な情報である観測データが、解析にどのような影響(インパクト)を与えているかを詳細に解析する方法がない。これらの2つの問題は、高精度な大気解析を行う上で重大な課題となっている。これらに対して、申請論文では、(1)気象場の特徴をスカラー関数で表現する必要のある従来手法では不可能であった観測インパクトの時空間構造の解析を可能とする新しい手法を提案し、これを気象庁全球NWPに用いられている4次元変分法データ同化を含む複雑なNWPシステムに適用してインパクトの時空間構造を初めて解析した。(2)新手法を用いて既存手法の検証を行い、さらに両手法により詳細に観測インパクトを解析し、インパクトの確率的挙動の理論的説明や既存のECMの課題等を明らかにした。(3)ECM全体を同化理論に基づいた複数の推定手法により客観推定し、これをNWPシステムに導入することで、高精度で理論的整合性が大幅に向上した大気解析が得られることを示した。現実的なNWPシステムによるこのような成果は世界初であり、ECM推定手法の妥当性を支持している。本研究は、従来の特定の衛星観測のECMのみを対象とした研究とは異なり、多様な観測データや観測及び予報のECMの性質の理解やデータ処理、複数のECM推定手法を組み合わせることで、はじめて可能になったものである。以上の結果はすでに3つの査読論文誌に掲載されている。

第1章では、研究背景及び目的、第2章では、大気解析のためのデータ同化の基礎、3章と4章では観測インパクト研究、第5章ではECMの高精度推定研究、第6章では全体の結論が述べられている。

第3章では、4次元変分法同化における観測インパクトの時空間構造の解析が可能な新しい観測インパクト評価手法である接線型評価法を構築する。新手法では、各観測データのインパクトは、それらによって生成される部分解析インクリメント(Partial analysis Increment Vector: PIV)によって評価される。さらに新手法により、カルマンゲインが観測情報をどのように解析インクリメントに変換するか解析可能となった。用いた観測データは、衛星輝度温度観測とその他の従来型観測に区分し、後者はさらにラジオゾンデ等に区分した。実験結果は以下である。1)新手法により気象庁全球NWPの4次元変分法同化システムにおける解析や予報への観測インパクトの時空間構造を評価した。2)時間発展した背景場の誤差ベクトルと主要なPIVの間には反平行性(負相関)が見られ、これはPIVが背景場の誤差成長モードの時空間構造を部分的に捕捉したことを示している。3)従来手法で不可能であった観測インパクトの干渉の定量的な評価を行った。4)輝度温度観測のインパクトは従来型観測のある領域で非常に小さく、この理由は輝度温度観測のECMの経験的調整(観測誤差膨張)に起因すると考えられる。

第4章では、既存の観測インパクト評価手法である随伴演算子によるインパクト評価(随伴評価法)を接線型評価法(第3章)で検証した後、観測インパクトの詳細な評価を行う。本研究の目的は2つある。

氏名	石橋 俊之
----	-------

第1に随伴評価が用いるカルマンゲインの随伴演算子における近似等の4つの近似の妥当性の検証、第2に観測インパクトについての新しい知見を得ることである。接線型評価法は随伴評価法と同じ量を随伴演算子なしで直接計算できる。これらの検証と観測インパクト評価の結果は以下である。はじめに、観測インパクトの随伴評価は接線型評価とよく一致し、相関係数は0.97以上であった。次に、得られた観測インパクトは多くの面で先行研究の結果と整合的であったが、GNSS掩蔽観測や水蒸気に感度のある輝度温度観測のインパクトが小さい等、NWPシステムに依存した性質も見られ、ECMの経験的調整の違いが一因と考えられる。観測インパクトの新しい性質も明らかになった。1)観測インパクトの確率密度関数は、観測と予報誤差標準偏差の比の実験値を与えたスカラー理論とよく整合する。つまり、インパクトの確率的挙動はECMの時空間一様性を仮定して説明できる。2)データ同化窓の中で遅い時間の観測ほど大きな正のインパクトを持つ。これは予報誤差の主成分は初期値誤差の成長であるとする強拘束の4次元変分法の仮定と整合的である。

第5章では、ECMの高精度推定とその導入による大気解析精度の改善に関する研究について述べる。NWPの精度改善には、ECMの正確な推定とデータ同化でのその利用が不可欠である。本研究の目的は、すべての観測と背景場のECMを標本統計によって推定し、それらを使って全球NWPの精度を改善することである。このようなECM全体を更新する研究は、本研究がはじめて行うものである。すべてのECMの対角成分、及び輝度温度観測の非対角成分を推定し、その評価を行った。ECMの推定結果は以下である。(1)推定された誤差標準偏差は全体的に気象庁NWPシステム(CNTL)の設定値よりもかなり小さい。特に輝度温度観測で顕著であり、観測インパクトの解析結果(第3章、第4章)と整合的である。(2)水蒸気に感度を持つ輝度温度観測のチャンネル間誤差相関は0.2よりかなり大きい。(3)AMSU-A(気温に感度を持つ輝度温度観測)の観測誤差の水平相関距離はチャンネル4を除き50km程度で、これは気象庁NWPで間引きに用いられている距離の1/5程度である。これらの結果は、ECMの更新による高精度な大気解析の可能性を示唆する。次に、解析・予報サイクル実験の結果は以下である。(1)診断されたECMは、付加的な調整なしでもCNTLに対して概ね予報精度を改善する。(2)付加的な調整として、非衛星従来型観測とGNSS掩蔽観測の観測誤差標準偏差に0.6の縮小係数を与えることで、予報精度は統計的に有意に改善する。

(3)この値0.6は、背景誤差標準偏差の推定値とCNTLの比と等しく設定した。これらの結果は、ECMの客観推定をNWPシステムに適用することで、従来の経験的調整よりも高精度なECMが得られることを示している。また、付加的調整による精度改善は、輝度温度観測の変分法バイアス補正への各観測のインパクトが適切になるためと考えられる。(4)AMSU-Aの高密度同化(CNTLより10倍の観測数)はCNTLよりも精度が良いが、5倍の高密度同化を改善しない。(5)夏期間のデータで推定したECMは、冬期間の実験でも予報精度を改善する。これは推定されたECMの堅牢性を示している。(6)ECMの更新により気温や水蒸気に感度のある輝度温度やGNSS掩蔽観測のインパクトが明瞭に増加した。これは観測インパクトの解析(第3章、第4章)で示唆されたECMの問題が改善され、より多くの情報が同化されたことを示している。(7)NWPシステムの理論との整合性を変分法の評価関数のカイ2乗分布性で評価すると、CNTLの32%程度に対し、客観推定したECMを用いた場合は85%以上であり、明瞭に改善することが示された。

(評価と結論)

本研究は、従来不可能であった観測インパクトの時空間構造を解析可能とする新しい手法を提案し、これを気象庁全球NWPに用いられている複雑な実践システムに適用することで、インパクトの時空間構造を初めて解析した。さらに、新手法を用いて既存手法の検証を行い、両手法により観測インパクトを解析し、インパクトの確率的挙動の理論的説明や既存のECMの課題等を明らかにした。さらに、ECM全体を客観推定し、これをNWPシステムに導入することで、高精度な大気解析が得られ、理論的整合性も大幅に改善することを明らかにした。現実的なNWPシステムによるこのような成果は世界初であり、ECM推定手法の妥当性を支持している。これらの成果はすでに3つの査読論文誌に掲載されている。

以上によって本研究は、大気状態の解析における2つの大きな課題であったECMの高精度な客観推定、及び観測インパクトの時空間構造の解析をはじめ可能にした研究であり、データ同化による大気状態の解析について重要な知見を得たものと認める。本研究の成果は現業システムを用いて実践的に得られたものでもあり、現業NWPや気候再解析にただちに適用可能であるとともに、大気解析の経験的調整からの解放は、今後のデータ同化研究や現業システムの開発を飛躍的に効率化するものと期待できる。よって、学位申請者の石橋俊之は、博士(理学)を得る資格があると認める。

- ・特記事項
- ・特許登録件数 0件
- ・発表論文数 3件