



第2章 応用編

2.1 全球解析の改良

雲・降水域のマイクロ波輝度温度データの利用開始
4次元変分法へのアウトーループとハイブリッド同化の導入

概要

- 2019年12月11日、全球解析において、雲・降水域のマイクロ波輝度温度データの利用を開始し、4次元変分法にアウトーループとハイブリッド同化を導入
 - これまで未使用だった雲・降水域の観測データを利用し、アウトーループを利用することで、雲・降水域の大気的情報を効果的に初期値に反映
 - 流れ依存する予測誤差を考慮した4次元変分法同化により、観測データをより有効に利用
- 変更の効果
 - 対流圏の気温、水蒸気、風の初期値の精度が向上
 - 台風進路予測、降水分布予測、ジオポテンシャル高度の予測精度が改善
 - 全球予報の後続のメソ予報や全球ガイダンスでも予測誤差減少

本節では、2019年12月11日の全球解析での雲・降水域のマイクロ波輝度温度データ利用開始と、4次元変分法へのアウトーループとハイブリッド同化導入について述べる。これらの改良の目的は、晴天域に加えて雲・降水域の観測データを利用し、アウトーループを導入することで、雲・降水域の大気的情報を効果的に初期値に反映することと、4次元変分法同化において流れ依存する予測誤差を考慮することで、観測データをより有効に利用し、初期値の精度を向上させることである。実験では、これらの変更により対流圏の気温、水蒸気、風の初期値の精度が向上し、台風進路予測、降水分布予測、ジオポテンシャル高度の予測精度が改善した。また、全球予報の後続のメソ予報や全球ガイダンスでも予測誤差が減少した。以下では、各変更項目の概要と、実験結果から改良の効果について、台風進路予測の改善および顕著事例(平成30年台風第21号、平成30年7月豪雨)の予測事例を示す。

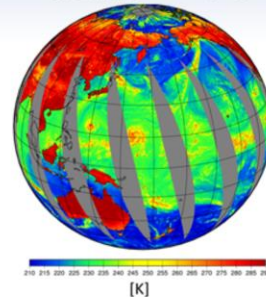
雲・降水域のマイクロ波輝度温度データの 利用開始

◎衛星搭載マイクロ波放射計とは
昼夜を問わず、**雲降水域においても大気中の水蒸気
の情報が得られる**センサー

◎これまでの利用方法
晴天域の輝度温度データを同化している

◎変更後の利用方法
雲・降水域におけるデータも同化する
→**台風付近のデータも同化**されるようになる

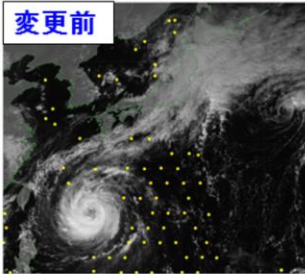
GCOM-W/AMSR2輝度温度観測データ
(37GHz:鉛直偏波) 2015年8月18日



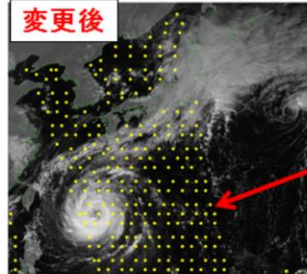
黄色の点は同化利用される観測データの分布

変更後では、
台風周辺等の雲域の
データも同化利用される

変更前



変更後



2018年09月27日06UTCの解析で同化利用される
マイクロ波輝度温度(AMSR2)データの分布と可視画像

マイクロ波放射計は、地表面や大気はその温度と物質特性に応じて射出する熱放射(輝度温度)を、マイクロ波領域(周波数3~300GHz)の様々な周波数で観測する受動型リモートセンシングの測器である。観測される輝度温度には、地表面の状態に依存した放射、水蒸気・雲水・雨水からの放射、氷粒子による散乱などの様々な情報が含まれる(佐藤・江河 2007)。全球解析では、人工衛星搭載のマイクロ波放射計による観測データのうち、これまで雲や降水の影響を受けていない晴天域のデータを利用して(計盛・岡本 2004; 佐藤・江河 2007)。今回の改良では、GCOM-W衛星搭載のAMSR2、米国のGPM衛星搭載のGMI、DMSF衛星搭載のSSMIS、NOAA衛星搭載のMHS、欧州のMetop衛星搭載のMHSの雲・降水域の輝度温度データの利用を開始する。また、米国のCoriolis衛星搭載のWindSat、中国のFY-3C衛星搭載のMWRIの輝度温度データも、晴天域と雲・降水域すべてで新たに利用を開始する。また、観測データの間引き処理の変更(高密度化)により、データ同化に利用するマイクロ波放射計のデータが増加する。

GCOM-W: Global Change Observation Mission for Water

AMSR2: Advanced Microwave Scanning Radiometer-2

GPM: Global Precipitation Measurement

GMI: GPM Microwave Imager

DMSF: Defense Meteorological Satellite Program

SSMIS: Special Sensor Microwave - Imager/Sounder

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

MHS: Microwave Humidity Sounder

FY: Feng-Yun

MWRI: Micro-Wave Radiation Imager

全球解析4次元変分法の変更 アウトーループの導入

- 全球解析では4次元変分法を使用

- 関数の最小値問題 $J(x) = \frac{1}{2}(x-x_b)^T B^{-1}(x-x_b) + \frac{1}{2}(H(x)-y)^T R^{-1}(H(x)-y) + J_c$
 - 実際は、第一推定値^(*)の周りで線形化して解く
- 雲・降水に関する現象は非線形性が強い
 - 暫定的な解析からの予報を実行、それによる情報更新
 - 再線形化: 非線形性を考慮し、雲・降水域の観測データがもつ情報をより効果的に利用
 - 再QC: より真値に近い(であろう)観測データを利用

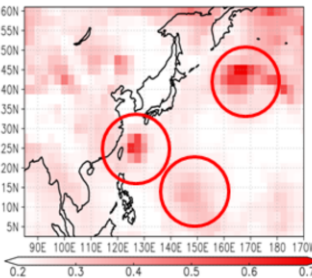
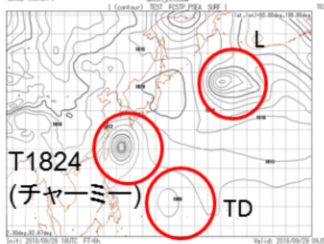


全球解析では4次元変分法を用いており(門脇 2005)、前初期値からの非線形モデルの短時間予報の結果を第一推定値とし、これを観測値で修正することによって解析値を作成する。第一推定値と観測値の両方を勘案した数値予報モデルによる時間発展の結果をもって最適な解析値とする。最適であるかどうかの指標には評価関数を用いる。評価関数は、解析対象としている値(解析変数)が第一推定値や観測値からどのくらい離れているかを、背景誤差(第一推定値の誤差)と観測誤差に応じて重み付けしたものと定義され、評価関数の極小値が最適な値とみなされる。全球解析では、最小値探索問題の性質を良くするため、第一推定値の周りで線形化した評価関数を扱う。一方、雲・降水に関する現象は非線形性が強いため、雲・降水域の観測データが持つ情報をより効果的に利用するためには、データ同化システムで非線形性を適切に考慮することが必要となる(石橋 2011)。今回の改良では、解析処理の途中で暫定的に作成した解析値から非線形モデルを再度実行し、第一推定値(基本場)を更新する処理(アウトーループの複数回実行)を追加する。これにより、雲・降水域のマイクロ波輝度温度データ等をより効果的に利用するとともに、更新した第一推定値を利用したQCを実施することで、より真値に近いであろう観測データを選別することが可能となる。

全球解析4次元変分法の変更 ハイブリッド同化の導入

- 全球解析では4次元変分法を使用
 - 第一推定値と観測データを**誤差**を考慮して混ぜる
 - 前者の誤差(のたつき台・初期値)が**気候値**という**制約**
 - 全球EPSから**LETKF**^(*)を移植、その情報を利用することで**制約を軽減**
(*)局所アンサンブル変換カルマンフィルタ

第一推定値の地上気圧(FT=6h) LETKFによる地上気圧のばらつき(FT=6h)



擾乱周辺でばらつき大
(流れに依存する誤差)
=>
この情報を4次元変分法
の中で利用

データ同化では、観測値を単純に解析値とするのではなく、観測値と第一推定値の双方に重みをつけて内挿して解析値を求めることになる。解析値が観測値側に寄るかそれとも第一推定値側に寄るかは、データ同化を実行する際にそれぞれの値の持つ誤差の統計的性質として与えられる「観測誤差」と「背景誤差」(第一推定値の誤差)の設定によって決まることになる。観測誤差が背景誤差より小さい場合は解析値は観測データ側に寄り、逆に観測誤差が大きい場合は解析値は第一推定値側に寄ることになる。基本的な変分法データ同化システムでは、背景誤差に過去の一定期間のデータから統計的に計算した予測誤差(「気候学的背景誤差」)を用いているため、日々の気象条件に応じた不確実性の違いを適切に表現することができない。今回の改良では、4次元変分法で用いる背景誤差について、これまで用いている気候学的に事前に見積った値と併せて、図に示すように、全球アンサンブル予報システム(全球EPS)の局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(LETKF)(太田・堀田 2016)による予報摂動を利用することで、実際の大気の状態に応じた誤差情報も考慮した手法(ハイブリッド同化)へ高度化する。これにより、観測データの情報をより適切に初期値に反映させることが可能となる。

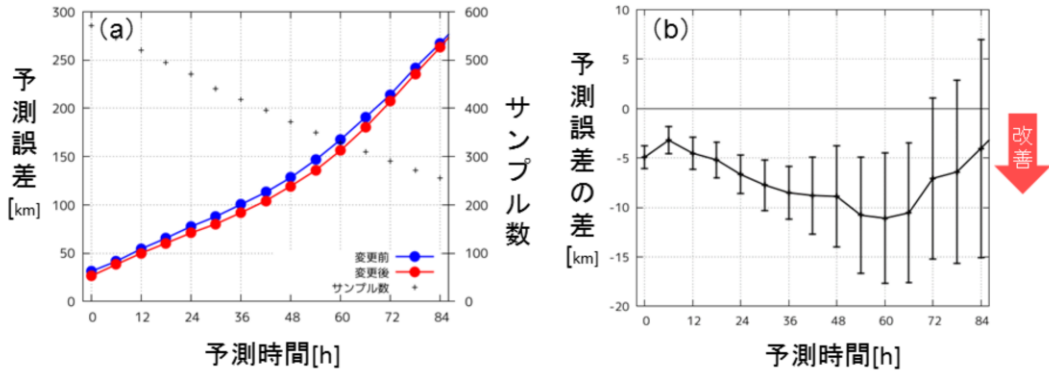
改良の効果

GSMによる台風中心位置 予測誤差の比較

実験設定

変更前(CNTL)：2019年5月時点のルーチン相当の設定

変更後(TEST)：CNTL + 雲・降水域の輝度温度データ利用 + 4次元変分法の変更
実験期間：2018年6月～10月、2017年11月～2018年3月



3日予報までの台風中心位置の予測誤差が減少

全球解析における、雲・降水域のマイクロ波輝度温度データの利用、4次元変分法へのアウトグループとハイブリッド同化導入の効果を確認するため、2019年5月時点の現業全球数値予報システムと同等の実験(CNTL)と、CNTLに変更を加えた実験(TEST)を行った。実験期間は2018年6月～10月、2017年11月～2018年3月を対象とした。以下では、特に変更の影響が大きく現れた台風や前線による豪雨の予測の比較を示す。図a, bは、実験期間中の全ての台風(平成29年台風第26号～第27号、平成30年台風第1号～第2号、平成30年台風第6号～台風第25号の合計24個)を対象としたGSMの進路予測結果を示す。対象事例の平均において3日予報までの台風中心位置の予測誤差が減少している。

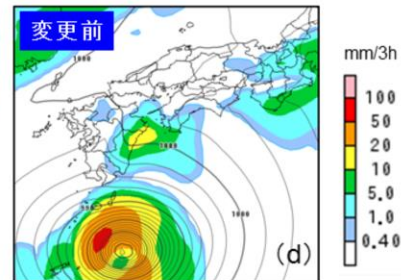
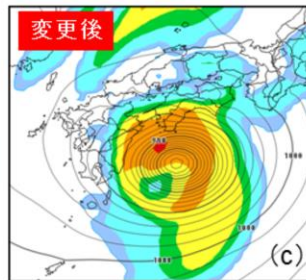
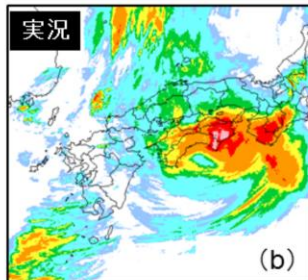
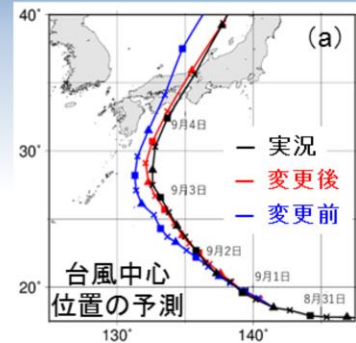
図a: GSMによる台風中心位置予測誤差(単位はkm)の比較。実験期間中に存在した台風に関する平均を示す。検証には気象庁のベストトラックを用いた。青は変更前、赤は変更後。横軸は予測時間(単位は時間)。灰色点はサンプル数(右軸)。

図b: 変更後と変更前の台風中心位置の予測誤差の差。エラーバーは95%信頼区間を表す。負の値は、変更後で予測誤差が減少していることを示す。

改良の効果

平成30年台風第21号の GSMによる進路予測と 降水分布予測

2018年8月31日21時(日本時間)初期値の87時間後
(対象:9月4日12時)の前3時間降水量予測



変更後の方がより実況に近い進路予測
四国付近の降水量予測が改善

台風の進路予測と降水分布予測の具体例として、平成30年台風第21号の変更前、変更後の比較を示す。図aの台風進路予測の比較から、変更後の方がより実況に近い進路予測となっていた。3日前からの予測では、どちらの予測も徳島県南部への台風の上陸が遅れていたものの、降水分布予測の比較(図b, c, d)から、変更後は、台風中心位置の予測が実況に近く、四国地方に3時間約40mmの大雨の予測をしていた。

図a-d: 平成30年台風第21号の2018年8月31日21時(日本時間)初期値からのGSMの予測の比較

図a: 台風中心位置の予測、赤は変更後、青は変更前、黒は実況(ベストトラック)

図b: 2018年9月4日9時から12時(日本時間)までの3時間降水量の実況値(解析雨量、単位は mm/3時間)

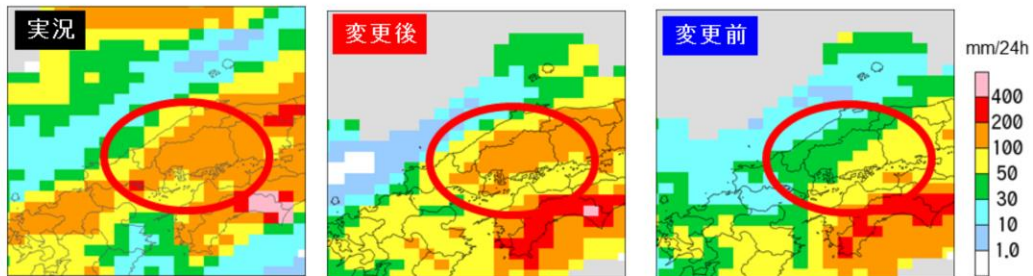
図c: 変更後のGSMによる2018年9月4日12時を対象とした海面更正気圧(等値線、単位はhPa)の予測と前3時間降水量(mm/3時間)の予測。87時間後の予測

図d: 図cと同じ。ただし変更前のGSMによる予測

改良の効果

平成30年7月豪雨の予測

2018年7月3日21時(日本時間)初期値の
51時間後(対象:7月6日0時)を対象とした
GSM24時間最大降水量ガイダンスの降水予測の比較



九州北部から中国地方にかけての降水量予測をみると、
変更後の方がより実況値に近い大雨を予測

今回の変更では、全球数値予報システムの結果を用いる全球アンサンブル予報システム、メソ・局地数値予報システムやガイダンスに対する影響を確認し、いずれも中立から改善の結果が得られた。ここではガイダンスによる豪雨の予測事例として、平成30年7月豪雨について、変更後と変更前のGSMの24時間最大降水量ガイダンスによる降水分布予測と実況値の比較を示す。九州北部から中国地方にかけての降水量予測では、変更後の方がより実況値に近い大雨を予測している。

これらの結果を受け、2019年12月11日より、全球解析での雲・降水域のマイクロ波輝度温度データ利用と、4次元変分法へのアウトグループとハイブリッド同化の導入を開始した。

図: 2018年7月3日21時(日本時間)初期値の7月6日0時(日本時間)を対象としたGSMの24時間最大降水量ガイダンスの降水予測の比較。51時間後の予測。(左)24時間最大降水量の実況値(解析雨量)、(中)変更後、(右)変更前。ともに単位はmm/24時間

。

参考文献

- 石橋俊之, 2011: データ同化システムの課題. 数値予報課報告・別冊第57号, 気象庁予報部, 93-129.
- 太田洋一郎, 堀田大介, 2016: 週間アンサンブル予報システムにおけるLETKFの開発. 数値予報課報告・別冊第62号, 気象庁予報部, 66-76
- 計盛正博, 岡本幸三, 2004: ATOVS輝度温度の直接同化. 数値予報課報告・別冊第50号, 気象庁予報部, 93-104.
- 門脇隆志, 2005: 全球4次元変分法. 数値予報課報告・別冊第51号, 気象庁予報部, 100-105.
- 佐藤芳昭, 江河拓夢, 2007: マイクロ波放射計. 数値予報課報告・別冊第53号, 気象庁予報部, 91-105.