3.1 台風ボーガス作成手法の改良¹

3.1.1 はじめに

解析に利用される観測データ数は年々増加している。 しかしながら、台風の存在する熱帯海洋上では依然と して解析における観測データの利用が十分でなく、台 風周辺で常に精度の良い解析値を得ることは難しいの が現状である(高坂 2015)。このため、気象庁の全球解 析及びメソ解析では、台風周辺における初期値精度向 上を図るため、予報課の台風予報作業担当者から提供 される台風情報に基づいて作成した典型的な台風構造 (台風ボーガス)を解析値に反映させてきた。台風ボー ガスについての詳細は、大野木 (1997)、小泉 (2003)、 新堀 (2005)等を参照いただきたい。

2014年9月に数値予報システムの計算安定性の確保 及び更なる初期値精度の向上を目指して、全球解析に おいて台風ボーガス作成手法の改良を現業化した。本 節では改良の概要と予測精度に及ぼす影響について説 明する。

3.1.2 2014年9月に行った改良の概要

(1) 台風ボーガス中心気圧の制限方法の変更及びグロ スエラーチェックの導入

台風ボーガスデータは他の観測データと異なり、デー タ作成後の品質管理が行われることなく、解析ですべ て使用されてきた。台風ボーガスデータの利用は、多 くの場合、台風周辺の初期値精度の向上に寄与する。し かしながら、D値(観測値と第一推定値の差)の絶対 値が極端に大きなデータが作成されることがあり、こ れが解析で利用されることにより非常に大きな解析イ ンクリメント(解析値と第一推定値の差)となり、稀 に数値予報システムの計算安定性が低下することが判 明した。これを防ぐため、D値の絶対値が極端に大き なデータが解析に使用されないようにする変更を行っ た。変更の概要は以下の通りである。

これまでは台風ボーガスデータ作成処理における中 心気圧の制限として、台風ボーガスの中心気圧と第一 推定値の中心気圧の差(図3.1.1のA)が一定の閾値 以上小さくならないという条件を設けていた。しかし、 この条件には以下のような問題点がある。

- 台風情報の台風中心位置と第一推定値の台風中心 位置にずれがある場合にD値の絶対値が大きくな りうる。
- ・ 台風ボーガスの中心気圧が第一推定値の中心気圧より高い場合には制限がなく、台風情報の中心気圧の方が第一推定値の中心気圧よりも高い場合等に正の大きな D 値となりうる。
- 台風中心以外の海面更正気圧データ、及び風のデー
- ¹ 髙坂 裕貴



図 3.1.1 台風ボーガスの中心気圧についての制限方法の模 式図。縦軸は海面更正気圧 [hPa]、横軸は台風情報の台風 中心位置と第一推定値の台風中心位置を通る座標軸 [km]。 青線は台風ボーガスの海面更正気圧、赤線は第一推定値の 海面更正気圧である。



図 3.1.2 中心気圧修正処理の変更による台風ボーガスプロ ファイルの変化例。縦軸は海面更正気圧 [hPa]、横軸は台 風情報の台風中心位置からの距離 [km]。黒線は台風情報 から推測される海面更正気圧のプロファイル、青線が変更 前の台風ボーガスプロファイル、赤線が変更後の台風ボー ガスプロファイル。

タに制限がないため、D 値の絶対値が大きくなり うる。

これらの問題を解決するため、上述の中心気圧につ いての制限を、台風情報の台風中心位置における海面 更正気圧データのD値の絶対値(図3.1.1のB)が一定 の閾値を超えないという条件に変更した。また、台風 ボーガスデータ作成後の品質管理としてグロスエラー チェック(佐藤 2012)を導入することにより、D値の絶 対値が極端に大きな台風ボーガスデータが解析に利用 されないようにした。

(2) 中心気圧修正処理の変更

現実大気の台風中心付近では気圧傾度が大きな(シ ャープな)構造となっていることから、多くの場合、全 球解析が想定する解析インクリメントの水平構造に対 して台風中心付近での D 値の空間変動スケールの方が 小さい。このような空間的に急激に変化する D 値に対 して低分解能のインナーモデルを用いて解析を行うと、 解像度が不足することによって初期値に大きな誤差が 生じる恐れがある(岡垣 2010)。これを防ぐため、台風 ボーガスプロファイルが過度にシャープな構造となら ないように調整している。具体的には、台風ボーガス が表現する気圧分布の変動スケール²がインナーモデ ルの水平格子間隔よりも小さくならないようにしてい る。この処理における気圧分布の変動スケールの下限 値を、約80kmから現在のインナーモデルの水平格子 間隔である約55 km に更新した。これにより、気圧分 布の変動スケールが大きい台風で、台風ボーガスプロ ファイルは変更前に比べて中心付近でよりシャープな 構造となった(図 3.1.2)。以下、この変更により台風 ボーガスプロファイルが変化した台風を「シャープな 台風」、変化しなかった台風を「それ以外の台風」と呼 ぶことにする。

3.1.3 改良によるインパクト

第 3.1.2 項の変更による影響を見るため、全球数値 予報システムによるサイクル実験を実施した。実験期 間は 2013 年 6 月 20 日から 2013 年 10 月 11 日であり、 この期間には台風第 4 号から台風第 26 号までの 23 個 の台風が発生している。以下、2014 年 4 月時点の現業 数値予報システムによる実験を CNTL、CNTL に台風 ボーガスの改良を加えた実験を TEST とする。

(1) 解析値への影響

図 3.1.3 は台風第 23 号と台風第 20 号の事例におけ る解析値での台風中心気圧の時系列である。初めに台 風第 23 号の事例について見ると、10 月 2 日 00UTC 以 降の期間で TEST の方が CNTL よりも中心気圧が低 く表現されていることが分かる。これは第 3.1.2 項(2) の処理における気圧分布の変動スケールの下限値の変 更により、TEST は CNTL よりもシャープな構造が台 風ボーガスとして与えられるようになったためである。

次に台風第20号の事例について見ると、台風第23 号の事例とは異なり CNTL と TEST で解析値での中 心気圧の値に差は見られない。この違いは両者の台風 構造の違いに起因している。図3.1.4 に示したように、 台風第20号は台風第23号よりも台風構造がシャープ ではなかったため、CNTL, TEST 共に第3.1.2項(2) の調整自体が行われなかった。すなわち、与えられた 台風ボーガスデータは CNTL と TEST で同一である。 このように、今回の変更は台風がシャープな構造で

² 高坂 (2009) の式 (3.3.1) の R₀ のことを指しており、R₀ が小さいほど中心付近の気圧傾度が大きい台風構造となる。



図 3.1.3 解析値での台風中心気圧の時系列。上が台風第 23 号の事例、下が台風第 20 号の事例。黒線がベストトラッ ク、青線が CNTL、赤線が TEST。期間は上が 2013 年 9 月 29 日から 10 月 7 日、下が 2013 年 9 月 19 日から 9 月 26 日。



図 3.1.4 台風情報から推測される海面更正気圧プロファイ ルの違い。縦軸は海面更正気圧 [hPa]、横軸は台風情報の 台風中心位置からの距離 [km]。赤線が 2013 年 10 月 5 日 12UTC の台風第 23 号の事例、青線が 2013 年 9 月 25 日 00UTC の台風第 20 号の事例。

ある場合に台風ボーガスデータに差が生じるものであ り、それ以外の場合には解析値の特性は同一である。 なお、第3.1.2項(1)における台風ボーガス中心気圧の 制限やグロスエラーチェックによるリジェクトが適用 された事例はほとんどなく、適用された事例において も、数値予報システムの計算安定性が低下していない こと、及び本変更が解析値に与えた影響が小さかった ことを確認している。

(2) 予測値への影響

図 3.1.5 は実験期間中に発生した台風を対象とした 台風進路予測誤差である。検証には事後解析による台 風経路確定値(気象庁ベストトラックデータ)を実況 値として用いた。また、第3.1.2 項(2)の変更による影 響を見るため、シャープな台風事例とそれ以外の台風 事例に分けて検証を行った。シャープな台風事例にお いて台風進路予測誤差が有意に改善しており、特に予 報後半にかけての誤差の拡大が軽減していることが分 かる。一方で、それ以外の台風事例では台風進路予測 誤差は中立となっている。

この違いを詳しく分析するために、梅津ほか(2013) と同様に、進路予測誤差をベストトラックの進行方向 に沿った成分 (Along Track Error, 以下 AT 成分)と 直交する成分(Cross Track Error、以下 CT 成分)に分 解して検証を行った。図 3.1.6 は AT 成分の平均進路予 測誤差である。シャープな台風事例に対する検証結果 では、CNTL, TEST 共に AT 成分の平均誤差が負、す なわち実況よりも台風の進行速度が遅い傾向(スロー バイアス)が見られるが、TEST は CNTL よりもこの 傾向が緩和していることが分かる。この結果は、最大 風速や最大風速半径が大きい構造の台風ほどベータ効 果による移動速度が速くなることを示した Chan and Williams (1987) と矛盾がなく、このスローバイアスの 改善が図 3.1.5 の台風進路予測誤差の改善をもたらし たと考えられる。一方で、それ以外の台風事例では AT 成分の平均進路予測誤差にほとんど差が見られず、変 更前後で予測特性に変化は見られない。これは、変更 前後で台風ボーガスプロファイルに変化がないことか ら妥当な結果と言える。なお、CT 成分の平均進路予 測誤差には、シャープな台風事例、それ以外の台風事 例共に差は見られなかった。

図 3.1.7 はシャープな台風事例における改善例であ る。台風の進行方向について見ると、CNTL, TEST 共 に実況と比べて目立った差は見られない。しかし、台 風の進行速度に着目すると、CNTL, TEST 共に実況 と比べて遅いが、TEST は CNTL に比べてこの傾向が 緩和されていることが分かる。

3.1.4 まとめ

2014年9月に全球解析において、台風ボーガス作成 処理の改良を現業化した。これは極端に大きなD値の 台風ボーガスデータを解析で利用しなくすることによ る数値予報システムの計算安定性の確保、及び中心気 圧修正処理の変更によるシャープな台風事例での予測 精度の向上を目的としている。実験の結果、数値予報 システムの計算安定性が低下する事例がないこと、及 びシャープな台風事例においてスローバイアスの軽減 に伴い台風進路予測誤差が改善することが確認された。



図 3.1.5 実験期間中に発生した台風を対象とした台風進路予 測誤差。上はシャープな台風事例を対象とした台風進路予測 誤差、下はそれ以外の台風事例を対象とした台風進路予測 誤差。それぞれの図で、横軸は予報時間 [h]、左縦軸は台風 進路予測誤差 [km]、右縦軸はサンプル数。青線が CNTL、 赤線が TEST、点はサンプル数である。エラーバーは誤差 の発生が正規分布に従うと仮定した場合の 95%信頼区間 で、グラフ上方の三角形のうち緑色のものは統計的に有意 であることを意味している(上の三角形がデータ系列の相 関を考慮した場合、下の三角形が相関を考慮しない場合)。





図 3.1.6 AT 成分の平均進路予測誤差。上はシャープな台風 事例を対象とした AT 成分の平均進路予測誤差、下はそれ 以外の台風事例を対象とした AT 成分の平均進路予測誤 差。横軸は予報時間 [h]、左縦軸は AT 成分の平均進路予 測誤差 [km]、右縦軸はサンプル数。青線が CNTL、赤線 が TEST、点はサンプル数を示している。



図 3.1.7 2013 年 10 月 6 日 00UTC 初期値の台風第 24 号の 台風進路予測結果。黒線がベストトラック、青線が CNTL、 赤線が TEST を示している。

参考文献

- 梅津浩典, 森安聡嗣, 2013: WGNE 熱帯低気圧検証. 数 値予報課報告・別冊第 59 号, 気象庁予報部, 98-111.
- 大野木和敏, 1997: 台風ボーガス. 数値予報課報告・別 冊第 43 号, 気象庁予報部, 52-61.
- 岡垣晶, 2010: 全球解析における台風ボーガスの改良. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 48-52.
- 小泉耕,2003: メソ・領域解析の台風ボーガス. 平成15 年度数値予報研修テキスト,気象庁予報部,13-16.
- 高坂裕貴,2009: 擬似観測型台風ボーガスの配置変更. 平成21年度数値予報研修テキスト,気象庁予報部, 57-60.
- 高坂裕貴, 2015: 台風ボーガスの改良. 数値予報課報告・ 別冊第 61 号, 気象庁予報部, 22-25.
- 佐藤芳昭, 2012: 観測データと品質管理. 平成 24 年度 数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 8-17.
- 新堀敏基, 2005: 全球 4 次元変分法の台風ボーガス. 数 値予報課報告・別冊第 51 号, 気象庁予報部, 106-110.
- Chan, J. C. L. and R. T. Williams, 1987: Analytical and Numerical Studies of the Beta-Effect in Tropical Cyclone Motion. Part I: Zero Mean Flow. J. Atmos. Sci., 44, 1257–1265.

3.2 マイクロ波水蒸気サウンダ SAPHIR 輝度温度
 データの利用開始¹

3.2.1 はじめに

マイクロ波水蒸気サウンダ SAPHIR²の輝度温度デー タを気象庁の全球解析で2015年6月25日から利用開 始した。本節では、SAPHIR 輝度温度データの同化に よる解析値、予測値への影響について解説し、日本付 近の気象予測に大きな違いが見られた事例を紹介する。

3.2.2 SAPHIR 輝度温度データ

SAPHIR は、フランス国立宇宙研究センターとイン ド宇宙機関が共同開発し、2011年10月に打ち上げた地 球観測衛星 Megha-Tropiques³ (以下、MT 衛星; Roca et al. 2015) に搭載されたマイクロ波水蒸気サウンダで ある。MT 衛星は、軌道傾斜角 (赤道面と衛星の軌道が 成す角度) 20 度で地球を周回し、緯度 30 度より低緯度 の熱帯域を観測する。MT 衛星に搭載された SAPHIR は、地球大気や地表面からのマイクロ波放射(輝度温度) を 183 GHz の水蒸気吸収線付近の 6 つのチャンネルで 観測する。観測輝度温度データからは、対流圏の雲のな い領域での水蒸気鉛直分布情報が得られる。全球解析 では、同種のマイクロ波水蒸気サウンダ MHS の輝度温 度データが既に同化されている (岡本 2007)。MHS は、 極軌道衛星 (米国の NOAA 衛星や欧州の Metop 衛星) に搭載され、同様にマイクロ波放射の183 GHzの水蒸 気吸収線を利用し水蒸気鉛直分布を観測する。MHS は 極軌道衛星、SAPHIR は熱帯域周回衛星に搭載されて いるため、互いに観測領域を補完する (図 3.2.1)。



図 3.2.1 2014 年 7 月 31 日 12UTC の解析に利用されたマ イクロ波水蒸気サウンダの輝度温度データの分布。水色は Megha-Tropiques 衛星の SAPHIR、桃色、青色、橙色、紫 色は、NOAA-18 衛星、NOAA-19 衛星、Metop-A 衛星、 Metop-B 衛星の MHS のデータをそれぞれ示す。図の下の 数字は、それぞれの利用データ数を表す。

表 3.2.1	SAPHIR	と MHS	のチャン	ノネル番号	と観測	周波数
(GHz)	の関係					

()								
SA	PHIR	MHS						
チャンネル	観測周波数	チャンネル	観測周波数					
留亏	(GHZ)	留亏	(GHz)					
		1	89.0					
		2	157.0					
1	183.31 ± 0.2							
2	183.31 ± 1.1	3	183.311 ± 1					
3	183.31 ± 2.8	4	183.311 ± 3					
4	183.31 ± 4.2							
5	183.31 ± 6.8	5	183.311 ± 7					
6	183.31 ± 11.0							

表 3.2.1 に SAPHIR と MHS のチャンネル番号と観 測周波数を示す。SAPHIR は、MHS のチャンネルに近 い周波数での観測チャンネルを持っている。更に MHS には無いチャンネルを持ち、より高いスペクトル分解 能で観測が可能である。SAPHIR の6つのチャンネル を用いることでより高い鉛直分解能で水蒸気の情報が 得られると期待できる。各チャンネルが、どの高度に 感度があるかを示す荷重関数については、計盛(2015) を参照願いたい。

3.2.3 データの品質管理

現在の全球解析での輝度温度データ同化では、晴天 域のみのデータが同化されており、雲・降水粒子の影 響を受けた輝度温度データの同化は行われていない。

輝度温度データ同化では、数値予報モデルが出力す る大気プロファイルを入力として放射伝達計算を行い 輝度温度を求める。現在の晴天域の輝度温度データ同 化では、雲や降水粒子が存在しないことを前提として いるため、気温、水蒸気プロファイルは放射計算に入 力するが、数値予報モデルの雲や降水粒子のプロファ イルは用いない。このため雲や降水粒子の影響を受け たデータが誤って同化されると、雲や降水粒子の影響 が、気温や水蒸気の影響として評価され、不自然な解 析インクリメントが生じ、解析精度にも悪影響を及ぼ す恐れがある。これを避けるため雲や降水粒子の影響 を受けた SAPHIR 輝度温度データを事前に除き、晴天 域データだけを同化する。

放射計算の入力データとして、高精度の地表面温度、 地表面射出率も与える必要があるが、現時点では、陸 域において大気の水蒸気、気温の情報を取り出すため に十分な精度の陸面温度、陸面射出率を求めることは 難しい。MHS では、チャンネル1,2の計算輝度温度 を観測輝度温度と比較することで入力した陸面温度、 陸面射出率の精度をある程度評価できるため、陸域の データも利用可能であるが、SAPHIR には、これらに 対応するチャンネルが無いため同じ手法は使えない。 このため陸域のデータは使用せず、海上データのみを 利用する。

¹ 計盛 正博

² Sondeur Atmosphérique du Profil d Humidité Intertropicale par Radiométrie (仏語)

³ Megha はサンスクリット語で雲、Tropiques は仏語で熱帯 を意味する。

3.2.4 データ同化実験

新規データを現業システムで利用する際には事前に データ同化による影響を十分調査しておくことが重要 である。SAPHIR 輝度温度データの全球解析での利用 を想定し2013年12月4日~2014年4月11日、2014 年6月10日~10月11日の期間(それぞれ北半球の冬、 夏を含む約4か月間。以下、冬実験、夏実験と称する。) を対象に同化実験を行った。実験には、2014年9月4 日時点での数値予報ルーチンと同等のシステムを用い、 基準となるコントロール実験(CNTL)は、現業システ ムと同じ観測データセットと数値予報解析システムを 用いたもの、テスト(TEST)は、CNTLにSAPHIR輝 度温度データを追加したものである。TEST と CNTL の比較から SAPHIR 輝度温度データを追加した場合の 影響がわかる。

(1) 解析値と第一推定値への影響

SAPHIR 輝度温度データは水蒸気に関する情報を持 つことから、データ同化により作成される解析値の水 蒸気場の分布を改善することが期待される。図 3.2.2 は、実験で得られた解析値の水蒸気量(比湿)の TEST と CNTL の差の帯状平均鉛直断面図である。冬実験、 夏実験ともに SAPHIR 輝度温度データが同化された TEST において熱帯域で解析値の水蒸気量が増加する ことがわかった。現在の全球解析値、予測値には、対 流圏中層で現実よりも乾燥しすぎる傾向がある (金浜 2014)。ラジオゾンデの観測(比湿)に対し、解析値、予 測値は、中層 700 hPa 付近を中心に 0.5~0.7 g/kg 程 度乾燥している。図 3.2.2 に示された水蒸気量の増加 は、この乾燥バイアスを軽減させる方向である。しか し、変化量は0.01~0.05 g/kg 程度であり、元々ある乾 燥バイアスの絶対量に比べると小さい。他の要素(気 温、高度、風)については、平均解析場ではほとんど差 は見られなかった。

解析値作成の基となる前の初期時刻の予測値である 第一推定値への影響は、既存の観測値と第一推定値の 差(FG departure)をTEST と CNTL で比較するこ とで知ることができる。ここでは衛星観測輝度温度と、 第一推定値の大気プロファイルから放射計算で求めた 計算輝度温度の差をFG departure とし、TEST のFG departure の標準偏差が CNTL の FG departure の標 準偏差に対してどう変化したかを見る。放射計算には 第一推定値の気温、水蒸気のプロファイルが入力され るので、FG departure の変化は、輝度温度データの各 チャンネルが感度をもつ高度・領域における気温、水 蒸気の第一推定値の変化を示していることになる。

図 3.2.3 に TEST, CNTL で共通に利用されている マイクロ波水蒸気サウンダ MHS、マイクロ波気温サウ ンダ AMSU-A、マイクロ波イメージャAMSR2, TMI, SSMIS について、図 3.2.4 に静止気象衛星の晴天放射 輝度温度、Metop 衛星搭載のハイパースペクトル赤外



図 3.2.2 比湿の平均解析場の TEST と CNTL の帯状平均差 (TEST-CNTL)。(a) 冬実験、(b) 夏実験。単位は g/kg。 横軸は緯度、縦軸は気圧レベル (hPa) を表す。

サウンダ IASI の輝度温度について、チャンネル別、領 域別に FG departure の標準偏差の変化を示した。図 3.2.5 には、熱帯域のラジオゾンデの相対湿度データに ついて結果を示した。一部悪化を示すチャンネルがある ものの熱帯を中心に対流圏の水蒸気に感度のあるチャン ネルや高度で TEST の FG departure が減少し、第一 推定値が改善していることがわかる。これは、SAPHIR 輝度温度データの同化による第一推定値の水蒸気場の 変化が、既存の様々な観測データと整合する方向であ ることを示している。更に、図3.2.3のマイクロ波気温 サウンダの AMSU-A の結果、及び図 3.2.4 のハイパー スペクトル赤外サウンダ IASI (気温に感度のあるチャ ンネルのみ同化中)の結果から熱帯の対流圏下層の気 温場の変化も整合していることがわかる。SAPHIR 輝 度温度データの同化により直接的に影響する物理量は、 水蒸気量であるが、サイクル解析や4次元変分法同化 による数値予報モデルの寄与により気温場も改善した と考えられる。

(2) 予測値への影響

全球解析に新規データを追加した場合、数値予報 の基本的な性能を示す指標となる北半球、南半球の 500 hPa 高度場の予測誤差や熱帯域の上層 250 hPa や 下層 850 hPa の風の場の予測誤差の変化を確認する必 要がある。これらの要素の予測値について初期値に対 する誤差を調べたところ、冬実験、夏実験ともに、平均



図 3.2.3 実験期間のマイクロ波輝度温度データの FG departure の標準偏差について TEST の CNTL に対する変化。 左列が、マイクロ波サウンダ MHS と AMSU-A、右列が、 マイクロ波イメージャSSMIS, AMSR2, TMI についての 結果。上段が北半球 (北緯 20 度以北)、中段が熱帯 (緯度 20 度未満)、下段が南半球 (南緯 20 度以南)を表す。横軸は 変化率(%)、縦軸がチャンネル番号を表す。ただし、右列 のマイクロ波イメージャについては縦軸に観測周波数と偏 波でチャンネルを示す。FG departure の変化が負である ことが改善を示す。誤差幅は差の有意判定で用いた 95%の 信頼区間、丸印は、統計的に有意な差であることを表す。

的には TEST, CNTL は同等の予測精度であることが 確認された (図略)。また、大気中の水蒸気は、熱帯低 気圧や台風の発生、発達の過程において重要な役割を 果たす。そこで、実験期間中に存在した台風の進路予 測結果を TEST と CNTL で比較した (図 3.2.6)。これ は、実験期間中に存在した台風 16 個についての 200 以 上の予測事例による統計結果である。この結果、解析値 (FT=0) での中心位置の解析精度、予報初期 (FT=6) での中心位置の予測精度が改善することがわかった。 また 2~3 日先の予測についても統計的に有意な差では ないものの、誤差が減少 (FT=72 で 5 km 程度) する 傾向が見られた。

3.2.5 日本付近での気象予測の改善事例

SAPHIR 輝度温度同化による台風進路予測への影響 は、すべての台風について改善が見られるものではな かったが、おおむね先に示したように進路予測誤差を 減少させる傾向であった。以下では、実験期間中の日 本付近の台風の予測について TEST と CNTL の差が 特に大きく、改善した事例を示す。2014 年の台風第 11



図 3.2.4 図 3.2.3 と同じ。ただし、赤外輝度温度データに ついての結果。左列は、静止気象衛星 (GOES, Meteosat, MTSAT)の晴天輝度温度、右列は、Metop 衛星 IASI の 輝度温度についての結果。誤差幅は細線で示す。IASI は、 チャンネル番号 230 ~ 360 付近が対流圏の上層 ~ 下層の気 温に感度があるものに対応する。IASI チャンネル番号と感 度のある気圧レベルの対応の詳細は岡本 (2011)の図 2.1.1 を参照。



図 3.2.5 実験期間のラジオゾンデの相対湿度データの FG departure の標準偏差について TEST の CNTL に対する 変化。熱帯 (緯度 20 度より低緯度)の結果。横軸は%、縦 軸は気圧レベル (hPa)を表す。負の値が改善を表す。誤差 幅は差の有意判定で用いた 95%の信頼区間を表す。丸印 は、統計的に有意な差であることを表す。

号は、7月29日09JSTにマリアナ諸島付近で発生し、 強い勢力で日本の南海上を北上し、暴風域を伴って8 月7日に大東島地方に接近した。その後、強い勢力を 維持したまま比較的ゆっくりとした速度で北上し、10 日06JST過ぎに高知県安芸市付近に上陸し、速度を速 めながら四国地方、近畿地方を通過した。その後、暴 風域を伴ったまま日本海を北上し、11日09JSTに日本 海北部で温帯低気圧に変わった。この期間、台風周辺 の風と高気圧縁辺の風の影響で、南からの暖湿気の流 入が継続し、8月5日から10日にかけ、前線が西日本



図 3.2.6 実験期間中に存在した台風 (夏実験期間中 12 個、冬 実験期間中 4 個)の中心位置予測誤差の比較。検証には気 象庁のベストトラックを用いた。上図は台風中心位置の予 測誤差(単位は km)。赤が変更後(SAPHIR 輝度温度デー タを利用)、青は変更前(SAPHIR 輝度温度データを利用 していない)。横軸は予報時間(単位は時間)。赤点はサン プル数(右軸)。下図は、対応する予報時間での中心位置の 予測誤差の差(赤 - 青)、(単位は km)。負の値が改善を示 す。グラフ上方の三角形は上段がデータ系列の相関を考慮 した場合、下段が相関を考慮しない場合の有意判定結果を 示し、緑は有意、黒は有意でないことを示す。

の日本海側から北日本にかけて停滞し大雨をもたらし た。この台風第11号について、TESTとCNTLの初 期値(2014年8月6日12UTC)での海面更正気圧とそ れらの差を図3.2.7に示す。TESTとCNTLの初期値 の比較から、解析された台風中心位置に差があり、中 心から離れた日本の南の太平洋高気圧の縁にあたる部 分にも差が認められる。

図 3.2.8 は、TEST と CNTL の 8 月 6 日 12UTC 初 期値からの進路予測の比較である。CNTL では、宮崎 県に上陸する予想であったものが、TEST では、高知 県に上陸する予測になり実況に近くなっている。また TEST では、北上速度もベストトラックに示される実 況に近い予測になっている。初期場で台風中心付近のみ ならず日本の南の太平洋高気圧の表現にも違いがあっ たことから、予測値での台風進路に大きく差が生じた と考えることができる。

次に台風に伴う降水、風、水蒸気量の予測事例として8月6日12UTC初期値からのFT=72の予測値に



図 3.2.7 TEST と CNTL の初期値 2014 年 8 月 6 日 12UTC での海面更正気圧 (等値線 TEST:黒、CNTL:緑) と TEST と CNTL の海面更正気圧の差 (色)。単位は hPa。



図 3.2.8 2014 年 8 月 6 日 12UTC を初期時刻とする 2014 年 台風第 11 号の進路予測結果。青線、赤線は、CNTL, TEST の結果をそれぞれ示す。黒線は、気象庁ベストトラックを 示す。図中の凡例で示される印は、台風の中心位置の日時 を示す。

ついて TEST と CNTL の結果を実況 (観測データ) と 比較した (図 3.2.9)。降水予測については解析雨量、地 上風予測についてはマイクロ波散乱計 ASCAT の風、 水蒸気量 (可降水量)予測についてはマイクロ波放射計 AMSR2 の可降水量と比較した結果である。台風に伴 う降水について、TEST の方が台風本体の北上速度が 実況に近いことから九州から四国の大雨がより適切に 予測できている。地上風の予測は、TEST では台風中 心付近の暴風域や、台風接近による日本海側での海上 風の強まり (12 m/s 以上)が適切に予測できている。ま た強雨をもたらす高い水蒸気量の流入は、領域・時刻と も TEST の方がより実況値に近い予測となっている。 SAPHIR 輝度温度のデータ同化により、台風中心位置 やその周辺の水蒸気や気温の解析値の精度が向上し、 上記の物理量の予測精度の改善につながった例である。



図 3.2.9 2014 年台風第 11 号について観測データ (OBS) と TEST と CNTL の予測値。対象時刻は、2014 年 8 月 9 日 12UTC。 上段: (a) 解析雨量による前 24 時間降水量、灰色は観測不可能な領域を示す。(b), (c) は、それぞれ TEST, CNTL の FT=72 での前 24 時間降水量予測と海面更正気圧予測値、色は降水量 (mm)、等値線は海面更正気圧 (hPa) を表す。中段: (d) マイ クロ波散乱計 ASCAT の海上風速データ (2014 年 8 月 9 日 11:40UTC 頃の観測)、(e), (f) は、それぞれ TEST, CNTL の FT=72 での地上風予測値と海面更正気圧予測値、色は風速 (m/s)、矢印は風ベクトル、等値線は海面更正気圧 (hPa) を表 す。下段: (g) マイクロ波放射計 AMSR2 の可降水量データ (2014 年 8 月 9 日 13:30UTC 頃の観測)、(h), (i) は、それぞれ TEST, CNTL の FT=72 での可降水量予測値と海面更正気圧予測値、色は可降水量 (mm)、等値線は海面更正気圧 (hPa) を 表す。

3.2.6 まとめ

この節では、マイクロ波水蒸気サウンダ SAPHIR の 輝度温度データ同化による解析値、予測値への影響に ついて述べた。現業利用に先立って行われた影響調査 の実験結果から、SAPHIR 輝度温度データの同化によ リ、解析値で熱帯域の水蒸気量が経度平均で0.01~0.05 g/kg 程度増加することがわかった。これは現在の全球 解析値や予測値にある中層の乾燥バイアスを軽減させ る方向であった。この結果、第一推定値の場が、水蒸 気量に感度のある既存の輝度温度データ(マイクロ波 と赤外の両方)や直接観測データ(ラジオゾンデによる 相対湿度観測)とも整合するようになり、解析値、第一 推定値の場が改善したと言える。また、台風の中心位 置の解析精度も向上し、台風進路予測精度の改善が得 られることもわかった。そして台風進路予測の改善に より台風に伴う降水、風、水蒸気の予測精度が改善す る事例を確認した。

今後は、解析値や予測値の更なる精度向上のために、 陸域や雲・降水域の輝度温度データの同化を目指す必 要がある。

参考文献

- 岡本幸三, 2007: サウンダ. 数値予報課報告・別冊第 53 号, 気象庁予報部, 57-70.
- 岡本幸三, 2011: ハイパースペクトル赤外サウンダ.数 値予報課報告・別冊第57号, 気象庁予報部, 25-36.
- 計盛正博,2015: 衛星観測輝度温度データを使った同化 サイクルにおける影響評価.数値予報課報告・別冊 第 61 号,気象庁予報部,82-85.
- 金浜貴史, 2014: 全球の検証. 平成 26 年度数値予報研 修テキスト, 気象庁予報部, 4-8.
- Roca, R., H. Brogniez, P. Chambon, O. Chomette,
 S. Cloché, M. E. Gosset, J.-F. Mahfouf,
 P. Raberanto, and N. Viltard, 2015: The
 Megha-Tropiques mission: a review after three
 years in orbit. Front. Earth Sci., 3.

3.3 メソ解析における GNSS 掩蔽観測データの利用¹

3.3.1 はじめに

GNSS (Global Navigation Satellite System) 掩蔽観 測は、電波受信機の位置に対し、測位衛星が地平線に 沈む(あるいは昇る)タイミングで測位衛星からの電 波を受信し、大気の影響で生じる電波の遅延を測定す ることにより、電波が通過する経路上の大気状態の情 報を導出する観測である (Kursinski et al. 1997)。受信 機は、低軌道衛星や航空機に搭載されたり山岳に設置 されたりするが、数値予報では通常、低軌道衛星に搭 載された受信機による観測データを利用する。GNSS 掩蔽観測は精密時計による測定のため、高精度かつ校 正が不要の観測とされている。このため数値予報では、 GNSS 掩蔽観測データ(以下、掩蔽データ)は他の観 測や予報モデルのバイアスを補正するための基準値と しての役割を果たしている²。掩蔽データは気象庁を 含む世界の主要な数値予報センターで利用され (Healy 2008; Rennie 2010; Cucurull et al. 2013)、今では数値 予報の初期値を作成するための重要な観測データの一 つとされている。

気象庁では 2007 年 3 月に、全球解析において CHAMP 衛星の掩蔽観測による屈折率データの利用 を開始し、その後新規衛星の追加や処理の改良を経て、 2014 年 3 月に、掩蔽データの中でも屈折率より変換誤 差の少ない屈折角の利用へ移行した。掩蔽データの利 用により、特に対流圏上部と成層圏の気温の第一推定 値の精度が改善した。全球解析での掩蔽データの利用 については、大和田 (2015) を参照されたい。

一方、メソ解析では、掩蔽データ利用の開発に着手 した当初はデータが非常に少なく、利用が検討される ことはなかった。しかし近年、観測データの取得が増 強されてデータの入電が早まったこと、COSMIC 衛星 や Metop 衛星といった新たな衛星の掩蔽データが追加 となったことで、メソ解析でもほぼ毎回の解析で掩蔽 データが利用できるようになった。図 3.3.1 はメソ解 析の各解析時刻で利用可能な掩蔽データの分布の例で ある。2014年7月時点では、ほぼ毎回の解析時刻で入 電があり、多いときには 20 プロファイル程度のデー タが利用可能である。2 機の Metop 衛星の観測がある 03UTC と 15UTC は、他の時刻と比較してデータ数が 多い傾向がある。

このように、利用可能なデータが増加している背景 から、メソ解析における掩蔽データ利用の効果を調査 した。その結果、掩蔽データの利用はラジオゾンデの 観測の利用と同様の効果があり、メソ解析においても 利用価値が高いことがわかった。本節では、メソ解析 における掩蔽データの利用の効果について報告する。 なお、掩蔽観測の原理については、Eyre (1994)と津田 (1998)による解説、またはこれらをまとめた小澤・佐 藤 (2007)に詳しいので、これらを参考にしていただき たい。

3.3.2 メソ解析での利用における留意点

掩蔽データの利用は、第一推定値を作成する予報モ デルのモデルトップの高度により制約を受ける可能性 がある。屈折率同化のための観測演算子は、入力とし て観測点の周囲の大気の情報のみ必要とするが、屈折 角のそれには、観測点より上空の大気の情報も入力と して与える必要がある。このため Healy (2008) は、モ デルトップが 10 hPa (約 30 km)より低い場合は、屈 折角ではなく屈折率データを利用するほうが妥当であ るとしている。メソモデルはモデルトップが約 22 km と低いため、全球解析と同じ屈折角データだけでなく 屈折率データの利用の効果も確認し、最終的にどちら を現業利用するのかを検討する必要がある。このため 屈折率と屈折角の両データを対象として調査を行った。

3.3.3 サイクル実験の設定とデータの品質

掩蔽データの利用の効果を確認するためのサイクル 実験は、2014年1月から2月のうちの36日間と、2014 年6月から8月のうちの40日間を同化対象期間(以下、 前者を冬実験、後者を夏実験)とし、どちらも同化期間 の6日目以降に予測計算を実施した。以降、掩蔽デー タを利用しない実験をCNTL、屈折角を利用した実験 をBANGLE、屈折率を利用した実験をREFRACと呼 ぶ。観測誤差の設定は、BANGLEは全球解析のものを 使用し、REFRACは、全球解析で屈折率を利用してい たときの値を元にメソ解析用に調整した値(全球解析 の値のほぼ半分)を使用した。BANGLEもREFRAC も掩蔽データの間引きは行わないこととした。

夏実験については、データ数を少しでも増やすこと を目的に、2014年7月に配信が開始されたTanDEM-X 衛星のデータも利用した。TanDEM-X 衛星は全球解析 では未利用であるが、事前に実施した第一推定値との 比較による品質調査の結果、品質に問題がないことを 確認したので利用した(図略)。TanDEM-X 衛星は他 の衛星と比較して入電数が少なく、夏実験で使用された 掩蔽データの総数に対する割合は5.5%程度であった。

観測データの品質調査として、第一推定値を真値とした評価を行った。図 3.3.2 は、BANGLE と REFRACの実験結果を使って行った、掩蔽観測に対する観測値と第一推定値の差(O-B: Observation-Background)を第一推定値で割って規格化した値を鉛直プロファイルで示した統計結果である。特定の衛星だけではなく、実験で使用された全てのデータを対象にした。屈折率のほうが屈折角より使用データ数が多いのは、グロス

¹ 大和田 浩美 (気象研究所)

² Healy (2008) は掩蔽データについて、他の観測や予報モデ ルのバイアスを補正するための錨 (アンカー)としての役割 を果たしている、と表現している。



図 3.3.1 メソ解析で利用可能な GNSS 掩蔽観測データの分布。2014 年 7 月 26 日の例。衛星ごとに色分けをしてプロットした。メソ解析の同化ウィンドウは解析時刻の 3 時間前から解析時刻までであるため、例えば 03UTC の解析でプロットされているデータは、00UTC から 03UTC の間に観測されたデータであることを意味する。



図 3.3.2 BANGLE と REFRAC のサイクル実験の結果を 使って行った、掩蔽観測に対する観測値と第一推定値の差 (O-B: Observation-Background)を第一推定値で割って 規格化した値を鉛直プロファイルで示した統計結果。左が 夏実験、右が冬実験である。特定の衛星だけではなく、実 験で使用された全てのデータを統計の対象とした。赤線 が屈折角、青線が屈折率を表し、太い実線と破線はそれぞ れ平均と標準偏差を、細い実線は統計に用いたデータ数を 示す。

エラーチェック(第一推定値と比較して行う観測デー タの品質管理)の違いに起因するものと思われる。高 度が低くなるにつれて標準偏差が大きくなるのは、屈 折角も屈折率も下層ほど観測誤差を大きく設定し、そ れに伴いグロスエラーチェックのしきい値を変えてい るためである。屈折角も屈折率も全層を通じて顕著な バイアスは見られず、サイクル実験では掩蔽データが 適切に利用されたと言える。

表 3.3.1 個々の観測データの利用による効果を確認するために実施した単発同化実験の設定。左列は実験名を、右4 別はデータ利用状況(。は利用、、は利用状で)を表す

例は7~2利用状ル(○は利用、×は利用ビタ)を衣す。							
	ラジオゾンデ	航空機	掩蔽	掩蔽			
	気温と水蒸気	気温	屈折角	屈折率			
同化なし	×	×	×	×			
ゾンデ追加	0	×	×	×			
航空機追加	×	0	×	×			
屈折角追加	×	×	0	×			
屈折率追加	×	×	×	0			

3.3.4 他の観測と比較した掩蔽データの特性調査

掩蔽データの利用が気温と相対湿度の解析にどのような影響を与えるのか、他の気温の観測と併せて調査 することにした。具体的には、ラジオゾンデ(気温と 水蒸気)、航空機(気温)、屈折角、屈折率をそれぞれ 個別に単発で同化し、これらの観測をすべて同化しな かった場合の解析場からの変化を確認した。表 3.3.1 に これらの実験の設定をまとめる。

事例として選んだ日時は2014年8月2日00UTCで、 この解析におけるデータ分布を図3.3.3 に、同時刻の 地上天気図を図3.3.4 に示す。この日時は掩蔽データ の入電が比較的多く、九州の西には台風第12号が存在 していた。国内のラジオゾンデは計14地点で観測があ り、これらのラジオゾンデ観測の各地点における解析 値の変化を確認した。

図 3.3.5 は、各観測を個別に同化した場合について、 観測をすべて同化しなかった場合(同化なし)からの



図 3.3.3 2014 年 8 月 2 日 00UTC のメソ解析における、ラ ジオゾンデ、航空機、GNSS 掩蔽の各観測のデータの分布。 赤丸がラジオゾンデ、青丸が航空機、緑丸が GNSS 掩蔽 データを表す。



図 3.3.4 2014 年 8 月 2 日 00UTC の地上天気図。

解析の差を、計14地点のラジオゾンデ観測の気圧の指 定面ごとに平均した結果である。掩蔽データの追加が 相対湿度の解析に与える影響は小さいが、気温の解析 への影響は700 hPaより上層で比較的大きい。そして、 掩蔽データ追加による気温の解析値の変化は、ラジオ ゾンデ追加によるそれと近いことがわかる。掩蔽デー タの利用を開始することは、ラジオゾンデの気温に似 た特性の観測を追加することと同等と期待できる。

3.3.5 検証

図 3.3.6 は初期値に対して行った、ラジオゾンデ観 測を真値としたときの高度場の検証結果である。掩蔽 データの利用により上層ほど改善しており、これは第 3.3.4 項の結果と整合的である。特に夏の改善が大きく、 改善の度合いは REFRAC のほうが BANGLE よりや や大きい。

第3.3.4 項で示したように、掩蔽データの利用は主に 700 hPaより上層の気温の解析に作用するため、地上の 気温や比湿への影響は小さいが、地上気圧に影響する。 海面更正気圧の予報対象時刻ごとの検証結果を確認し



図 3.3.5 航空機(気温)、ラジオゾンデ(気温と水蒸気)、 屈折角、屈折率をそれぞれ個別に同化した場合について、 これらの観測をすべて同化しなかった場合(同化なし)か らの解析値の差を、計14地点のラジオゾンデ観測におい て気圧の指定面ごとに平均して鉛直プロファイルで示した 図。左図に気温、右図に相対湿度を示す。



図 3.3.6 初期値に対して行った、ラジオゾンデ観測を真値 としたときの高度場の検証結果。上段が夏実験(2014 年 7-8 月)、下段が冬実験(2014 年 1-2 月)の結果であり、 左列に平均誤差、右列に平方根平均二乗誤差を示す。緑線 が CNTL、赤線が BANGLE、青線が REFRAC の実験結 果を表す。

たところ、掩蔽データの利用は海面更正気圧の予測の 誤差を減少させる効果があることがわかった(図略)。

図 3.3.7 は 3 時間降水量別のバイアススコア及びス レットスコア(20 km 格子における統計)である。BAN-GLE、REFRAC ともにほぼ中立である。降水の事例 については、個々の事例を確認したが、掩蔽データの 利用で降水の表現を大きく改善、または改悪した例は なかった。

図 3.3.8 は、対象時刻が 2014 年 7 月 7 日 03UTC の 3 時間降水量予測であり、期間中一番、降水の表現につい て実験間の違いが見られた事例である。この事例では、 BANGLE も REFRAC も CNTL よりやや過剰に降水 を表現しているが、降水帯の位置については、BANGLE も REFRAC も CNTL よりよく表現している。



図 3.3.7 39 時間予報までの全ての予報時刻を対象としたし きい値ごとの降水スコア。検証には 20 km 検証格子内の 解析雨量の 3 時間積算降水量の平均を使用。上段が夏実験 (2014年7-8月)、下段が冬実験(2014年1-2月)の結果 であり、左列にバイアススコア、右列にスレットスコアを 示す。エラーバーは 95%信頼区間を示し、緑線が CNTL、 赤線が BANGLE、青線が REFRAC の実験結果を表す。



図 3.3.8 個々の実験の3時間降水量予測 (CNTL, BANGLE, REFRAC) と同時刻における解析雨量の3時間積算値の 比較。2014年7月6日15UTC初期値の12時間予報(予 報対象時刻は2014年7月7日03UTC)について、海面 更正気圧、地上風とあわせて描画した。

3.3.6 まとめ

メソ解析は全球解析より解析の開始時刻が早いため、 データ入電待ち時間が短く、利用可能な観測が非常に 限られている。特に大気の鉛直プロファイルの情報を 与える観測として重要なラジオゾンデの観測は、通常 は1日2回しかなく、ラジオゾンデ観測のない解析時 刻のほうが多い。メソ解析で利用可能な掩蔽データは、 他の衛星観測と比較して数は少ないものの、ラジオゾ ンデと同様の効果がある観測として、その利用は非常 に重要であると思われる。第3.3.1項で述べたとおり、 掩蔽データの利用はラジオゾンデ観測のない時刻の解 析で特に、基準値としての効果が発揮されると期待さ れる。

今回行った各検証の結果からは、屈折角より屈折率を 利用したほうが、解析や予報の改善の度合いが大きいこ とが確認された。これは、第3.3.2項で紹介した Healy (2008)の見解と整合的で、モデルトップが約22 kmの 現在のメソモデルには屈折率の利用が適していると言 える。これらの結果をふまえ、現在、屈折率データを メソ解析で利用するための準備を進めている。将来的 にメソモデルの鉛直層数の増強が行われ、モデルトッ プが今より引き上げられる際には、改めて屈折角の利 用への移行を検討する必要がある。

参考文献

- 大和田浩美, 2015: GNSS 掩蔽観測. 数値予報課報告・ 別冊第 61 号, 気象庁予報部, 78-81.
- 小澤英司, 佐藤芳昭, 2007: GPS. 数値予報課報告・別 冊第 53 号, 気象庁予報部, 133-139.
- 津田敏隆, 1998: GPS を用いた成層圏温度プロファイ ルの観測. 気象研究ノート, 192, 159–178.
- Cucurull, L., J. C. Derber, and R. J. Purser, 2013: A bending angle forward operator for global positioning system radio occultation measurements. J. Geophys. Res., 118, 14–28.
- Eyre, J., 1994: Assimilation of radio occultation measurements into a numerical weather prediction system. ECMWF Tech. Memo., 199.
- Healy, S., 2008: Assimilation of GPS radio occultation measurements at ECMWF. Proceedings of GRAS SAF Workshop on Applications of GPS radio occultation measurements, ECMWF, June 16-18.
- Kursinski, E. R., G. A. Haji, J. T. Schofield, R. P. Linfield, and K. R. Hardy, 1997: Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System. J. Geophys. Res., 102, 23429–23465.
- Rennie, M. P., 2010: The impact of GPS radio occultation assimilation at the Met Office. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 136, 116–131.