1.1 はじめに¹

数値予報の精度は年々向上しており、気象予報業務 において欠かすことの出来ない情報となっている。こ の数値予報の精度を決める大きな要因の一つが初期値 である。初期値は、データ同化手法により時空間に局 在する観測データを用いて数値予報モデルの予測値を 修正し、大気の状態を再現することで得られる。初期 値の精度は、データ同化手法と観測データに係わる様々 な要因によって決まる。図 1.1.1 は、メソモデル(後 述)の前3時間積算降水量の過去数年の予測精度を示 している。地上 GNSS データ、レーダー反射強度、地 球観測衛星 GCOM-W のマイクロ波放射計 AMSR2の 利用を開始したタイミングで、予測精度が改善してい る。このように予測精度を改善するためには、品質管 理により質の良い観測データを選別し、数値予報シス テムの解像度に見合った密度で観測データを取り扱い、 予報モデルや観測データが持つバイアスの影響を取り 除くなど、利用する観測データ毎に様々な工夫を施す 必要がある。本書では、地上観測から衛星観測まで幅 広い観測データを対象に、数値予報での利用における 最新の知見をまとめた。

はじめに本書で対象としている気象庁の解析システム(データ同化システム)の概要を紹介する。気象庁数 値予報課では、半日から10日程度の予測期間を対象と して、全球、メソ、局地の3つの決定論的数値予報シス テムを運用している(表1.1.1)。いずれの数値予報シ ステムも、解析システムと予報モデルから構成される。 数値予報システムのより詳細な情報については、平成 26年度数値予報研修テキスト(気象庁予報部2014)付 録A等を参照頂きたい。また、気象庁では、より長い 時間スケールを対象とする結合モデルの初期値や気候 診断に用いられる気候データ同化システムも運用して いるが、本書では扱わないこととする。

本書では、従来型観測として直接観測(例えば、高 層観測や地上観測が該当する)の他、擬似観測である 台風ボーガスを含めることとし、観測データを、従来 型観測データ、地上リモートセンシングデータ、衛星 観測データの3つに大別して記述する。リモートセン シングは、地上設置型の観測(地上リモートセンシン グ)と人工衛星搭載型の観測(衛星観測)に分けて扱う。 これら観測の種別についてのより詳しい説明は、平成 24年度数値予報研修テキスト(気象庁予報部 2012)第 2章「観測データと品質管理」を参照願いたい。

第1章では、従来型観測データと衛星観測データそ れぞれについて、気象庁の解析システムでの利用状況 と今後の課題について概要を報告する。

第2章では、従来型観測データの利用に関する最近 の開発成果について報告する。GPS ゾンデが導入され 第3章では、地上リモートセンシングデータとして ドップラーレーダーの観測データの利用に関する最新の 開発成果について報告する。既に利用されているドッ プラー速度データや反射強度の更なる高度利用(第3.1 節及び第3.3節)や、ドップラー速度データから算出 されるドップラーレーダー設置場所における水平風の 鉛直プロファイル(VAD風)の新規利用に向けた開発 (第3.2節)について報告する。

第4章では、衛星観測データの利用について、2011年 に発刊された数値予報課報告・別冊第57号(気象庁予 報部2011)以降の開発成果を中心に報告を行う。2014 年に現業利用が開始されたハイパースペクトル赤外サ ウンダ(第4.1節)をはじめとして、マイクロ波サウン ダなど個々のセンサーから得られる観測データの開発 状況について第4.2節から第4.8節で報告する他、衛星 観測データを用いた数値予報システムの評価方法(第 4.9節)についても報告する。

最後の第5章では、話題提供として、2012年に開催 された世界気象機関(WMO)主催の「観測システムの 数値予報へのインパクトワークショップ」の概要(第 5.1節)及び、観測データが気象庁全球数値予報システ ムに与える影響を種別毎に客観的に評価した結果(第 5.2節)について報告する。

なお、データ同化で扱う観測データは種類も豊富で 略号も多いので、巻末に付録として略号表を付けてい る。適宜参照して頂きたい。



図 1.1.1 メソモデルの前3時間積算降水量の予測精度(閾 値10mm、検証格子20km、15時間予測までの3時間毎 の予測に対するスレットスコアの平均)の経年変化。

たことで高解像度の情報が得られるようになった高層 観測の高度利用の検討(第2.1節)や既存の観測ではあ るが十分利用されていない地上観測データに関する開 発(第2.2節)の他、台風ボーガスの改良(第2.3節) 及び非即時的な品質管理の成果(第2.4節)について 報告する。

¹ 本田 有機

	全球数値予報システム	メソ数値予報システム	局地数値予報システム
計算領域	全球	日本周辺	日本周辺
		東西 4080 km	東西 3160 km
		× 南北 3300 km	× 南北 2600 km
解析システム	全球解析	メソ解析	局地解析
データ同化手法	4 次元変分法	4次元变分法	3次元变分法
水平分解能	TL319	$15 \mathrm{km}$	$5 \mathrm{km}$
(4次元変分法はイン)	(格子間隔約 55 km)		
ナーモデルの分解能)			
鉛直層数(最上層)	100 層 (0.01hPa)	50 層 (約 22 km)	50 層 (約 22 km)
	+ 地上	+ 地上	+ 地上
解析(初期)時刻	00, 06, 12, 18UTC	00, 03, 06, 09,	毎正時
		$12, 15, 18, 21 \mathrm{UTC}$	
同化ウィンドウ	6 時間	3時間	3時間
	(解析時刻を中心とする	(解析時刻前3時間)	(解析時刻前3時間) ²
	前後3時間)		
解析時刻を基点とする観	速報解析:2時間20分	50 分	30分
測の待ち受け時間	サイクル解析:11時間50		
	分(00,12UTC 初期值)及		
	び7時間 50分(06,		
	18UTC 初期值)		
予報モデル	全 球モデル (GSM)	メソモデル (MSM)	局地モデル (LFM)
水平分解能	TL959	$5 \mathrm{km}$	2 km
	(格子間隔約 20 km)		
□ 鉛直層数(最上層) □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □	100 層 (0.01hPa)	50 層 (約 22 km)	60 層 (約 20 km)
予報時間	264 時間(12UTC 初期値)	39 時間	9時間
	84 時間(上記以外)		

表 1.1.1 気象庁数値予報課が運用する決定論的数値予報システム(2014年12月現在)

参考文献

- 気象庁予報部、2012:数値予報の基礎知識と最新の数 値予報システム. 平成24年度数値予報研修テキスト, **気象庁予報**部, 116pp.
- 気象庁予報部,2014:改良・高度化された全球数値予報 システムと週間・台風アンサンブル予報システムの 特性およびガイダンスの改良. 平成 26 年度数値予報 研修テキスト,気象庁予報部,172pp.

気象庁予報部,2011: データ同化の改善に向けて.数値 予報課報告・別冊第 57 号, 気象庁予報部, 189pp.

² 解析時刻の3時間前を、メソモデル予報値を第一推定値として3次元変分法により解析する。その後、その解析値から の1時間予報値を推定値として3次元変分法により解析す

1.2 従来型観測データの利用の現状と課題¹

1.2.1 はじめに

地上観測、船舶やブイによる海上観測、ラジオゾン デによる高層観測、航空機観測は、その場の自然状態 を直接測定する。それらのデータは地理的分布や測定 時間に偏りがあることが特徴である。また、古くから 存在し利用されてきたため、後に登場するリモートセ ンシング(遠隔観測)に対して、それらは従来型観測 と呼ばれている。

本節では、数値予報システムで利用する従来型観測 データの全般的な事項について述べるが、ウインドプ ロファイラは従来型観測データと同様の要素を持ち、 品質管理の多くを共通しているため、従来型観測と同 様に述べる。前半では、数値予報システムで使用する 従来型観測データの利用状況について、地上リモート センシングと合わせて述べる。後半では、従来型観測 データ全般に関する観測誤差の設定・観測の間引き・ 品質管理手法についての現状と課題、最後に新しい通 報式への対応を述べる。

1.2.2 観測データの利用状況

表 1.2.1 に気象庁における全球、メソ、局地数値予報 システムの初期値解析(全球解析、メソ解析、局地解 析)での、直接観測データの利用状況を、地上リモー トセンシングデータ、台風ボーガスデータと合わせて 示す。

従来から利用されてきた地上観測などの直接観測デー タは、どの解析システムにおいても利用されている。一 方、近年利用を開始した地上リモートセンシングデー タの多くは解析システム毎に利用状況が異なっている。 地上リモートセンシングデータは直接観測データと比 べて、高密度・高頻度であることが一般的な特徴であ る。特に日本国内での整備が充実し、入手しやすいた め、解像度が高く日本付近を対象とするメソ解析や局 地解析での利用がすすめられている。また、地上観測 のうち気圧を除く気温・風・湿度のデータは、地形によ る局地性が強いため、数値予報モデルの地形との違い による影響が大きく、これまで利用されていなかった が、高解像度の局地解析では利用できるようになった。

1.2.3 観測データの利用数の推移

最近10年ほどの期間について、全球サイクル解析で 利用した各観測種類のデータ数の推移を直接観測デー タと地上リモートセンシングデータに分けて図1.2.1に 示す。同様に、メソ解析で利用した観測データ数の推 移を、図1.2.2に示す。利用した観測データ数は、デー タ自体の通報・入手量²、新規利用や拡充、利用高度

¹ 太田 行哉







図 1.2.2 メソ解析での観測データ利用数。表示内容は全球 サイクル解析と同様。

² アメリカのウインドプロファイラが減少しているのは、アメリカ本土における航空機データなどの充実や財政事情により、ウインドプロファイラ観測網が2014年8月に廃止された(http://www.profiler.noaa.gov/npn/index.jsp)ためである。2014年12月現在、1地点のみが通報されている。

	種別	利用要素	
	地上観測	気圧 (GML) 気温・風・湿度 (L)	
直接観測	地上自動観測	気温・風・湿度 (L)	
	海上観測	気圧 (GML)	
	航空機観測	気温・風 (GML)	
	高層観測	気圧・気温・風・湿度 (GML)	
	ウインドプロファイラ	風 (GML)	
地上リモート	ドップラーレーダー	ドップラー速度・湿度 (ML)	
センシング	解析雨量	降水量 (M)	
	地上 GNSS	可降水量 (ML) 天頂遅延量 (G)	
疑似観測	台風ボーガス	気圧・風 (GM)	

表 1.2.1	観測デー	- タの利用状況	(2015年1	月現在)
---------	------	----------	---------	------

(G)全球解析に利用、(M)メソ解析に利用、(L)局地解析に利用。

化などの状況に応じて³ 増減するが、全体的に増加していることが分かる。これらの図から、利用数が増加した観測データについていくつか述べる。

航空機観測

直接観測データでは、航空機観測データの利用数が 大きく増加している。2002年8月から日本航空(JAL) のACARSから得られた航空機自動気象観測データ、 2003年9月に全日本空輸(ANA)の同データの利用を 開始し、特にメソ解析で日本周辺の航空機観測データ の利用が増加した。メソ解析では当初から航空機観測 の風データに加えて気温データを利用しているが、全 球解析では主にモデルバイアスが大きいことで利用に よって悪影響を及ぼすため、しばらく利用できなかっ た。その後、バイアス補正を施し、2009年11月から 全球解析にて航空機気温データの利用を開始した(酒 匂 2010)ため、航空機データの利用数が倍増している。 その後も、世界中で多くの航空会社の観測データが入 手可能になってきており、利用数は増加し続けている。

ドップラーレーダー

2005年3月からメソ解析において国内6空港のドッ プラーレーダーで測定したドップラー速度データの利 用を開始した(小泉2005)。それ以降、空港だけでな く、国内の20の気象レーダーが2013年3月にかけて ドップラーレーダーに更新され、順次追加利用を開始 したことから利用数が増加している。さらに、2011年 6月からメソ解析において国内気象レーダーから得ら れる3次元反射強度データから推定した相対湿度デー タの利用を開始した(幾田2011)。

地上 GNSS

2009 年 10 月からメソ解析において国土地理院の GNSS 観測網からの可降水量データの利用を開始し (石川 2010)、2014 年 3 月から全球解析において全世界 での GNSS 観測点からの天頂遅延量データの利用を開始した (吉本 2014)。

1.2.4 観測誤差の設定

データ同化において設定する観測誤差は、観測デー タが背景場へどの程度反映されるのかを決めるため、 その設定値は解析の精度を左右する。観測誤差は理論 上、背景誤差と独立しているが、それらの比が背景場 からの修正量の大きさを決めるため、背景誤差とのバ ランスを考慮してその値を設定する必要がある。

また、観測誤差は観測自体に起因する測定誤差以外 に、第一推定値の状態変数から観測値に変換する際の 変換誤差、及び、観測データの空間・時間代表性によ る誤差を含むために、数値予報システムの変更ととも に更新されてきた。現在、設定されている観測誤差に ついては、全球解析では、2010年1月と8月の実験結 果から得られた統計値に基づき、2011 年 10 月の変分 法のインナーモデルの高解像度化・背景誤差更新と同 時に更新し(門脇・吉本 2012)、メソ解析では、JNoVA 導入以降の 2009 年 4 月から 7 月までの統計値に基づ き、2010年9月に更新した(吉本 2010b)。今後も、数 値予報システムの変更に合わせてして観測誤差を更新 する必要がある。また、全球解析では全領域平均化し た統計値、メソ解析では特定の季節の統計値によって、 すべての季節や領域の観測誤差を設定している。今後 は十分な統計期間を用いて季節や領域による観測誤差 の依存性を調査し、細分化を検討する必要がある。

1.2.5 観測の間引き

現在の数値予報システムでは、変分法の観測誤差共 分散行列の非対角成分を省略、すなわち観測誤差相関 を考慮していない。観測誤差相関を考慮せずに近接し た観測データを利用すると、観測データの過大評価と なり、観測データに近すぎる解析値となる。このため、 観測データは観測誤差相関が無視できる距離まで間引 く必要がある。一方、間引く距離が大きすぎると、利 用できる観測データが減少してしまう。このことから、

³ 2009 年 4 月から 8 月の航空機観測データの急激な増加は、 JNoVA 導入時に観測データの空間間引き処理が想定通りに 行われていない不具合 (吉本 2010a) が原因である。

適切な間引き間隔の調整が必要となる。

坂本 (2009) には、観測誤差相関の推定手法と、当時 の全球解析での統計量から推定した水平・鉛直相関が 示されている。吉本 (2010b) においては、メソ解析で の水平間引き距離の調査を行い、航空機観測データで の間引き距離の変更による成果が述べられている。こ れに基づき 2010 年 9 月に航空機観測データでの水平 間引き距離を更新した。

従来型観測では観測データの空間密度が低いため間 引きは重要視されていなかった。しかし、航空機観測 においては、近年空間密度が増加している。ウインド プロファイラや GPS ゾンデ (第 2.1 節) のように、鉛 直方向に高密度な観測も登場している。それに対して、 多くの従来型観測データに対する水平間引き距離は、 解析手法として3次元最適内挿法が採用されていた時 代に設定された全球解析での 50 km または 100 km、 メソ解析での 27 km をそのまま利用している場合が多 い。ただし、先に述べたメソ解析での航空機観測デー タの間引き距離は除く。鉛直間引きも同様で、どの解 析システムでも共通してラジオゾンデの指定面を中心 とした層にひとつだけ採用する間引きが主となってい る。このため、空間密度が高い観測データを中心に、観 測誤差相関に応じた適切な間引き間隔の調整が必要と なっている。

地上リモートセンシングでは、時間方向にも密なデー タが取得できる。ウインドプロファイラは10分間隔 のデータが取得されているが、全球解析では解析時刻 のデータのみ、メソ解析では毎正時のデータのみを利 用している。4次元変分法における時間方向に密な観 測データには、時間方向の観測誤差相関を考慮し、有 効に利用するための検討が必要となる。

また、データの間引きには、データ選択の任意性が 生じる。高密度・高頻度のデータほど間引かれるデー タ数は多くなり、選ばれたデータが間引かれたデータ を代表するような選択をする必要がある。そのため、 現在のデータ選択の妥当性を検証し、必要に応じて間 引き手法見直しの検討が必要である。高密度・高頻度 のデータを有効活用するための観測誤差相関に関する 課題は、衛星観測データでも課題のひとつとなってい る (岡本 2011)。super-observation のような観測誤差 相関に応じた多数のデータの集約化や、観測誤差相関 自体を考慮した数値予報システムの構築の課題を従来 型観測データにおいても同様に検討する必要がある。

1.2.6 品質管理手法

観測データには時折異常データの混入があり、それを 用いてしまうと、初期値解析の精度を低下させるため、 品質管理による異常データの除去は重要である。品質 管理は観測の種類に応じて様々な手法で行われていて、 その概要は佐藤(2012)で述べられている。各種観測 データの品質管理において共通して用いられているの は、第一推定値との比較により異常データを判定する グロスエラーチェックである。グロスエラーチェック によって、観測データだけでは判断が難しい異常デー タを効果的に判定できる。ただし、第一推定値にも誤 差があるため、判定の際にはその誤差を考慮すること が重要である。以下、従来型観測および同様の要素を 持つウインドプロファイラなどで広く適用している品 質管理手法に着目する。

グロスエラーチェックにおける観測値と第一推定値の 差の閾値の設定には dynamic-QC (大野木 1997; Onogi 1998) が採用されている。dynamic-QC では、第一推 定値の誤差はそれ自身の時空間変化率と相関があるこ とを仮定し、その大きさに応じて閾値を動的に変動さ せている。dynamic-QC の設定値は長らく導入当時に 調査した水平格子間隔約 180 km である T63 の全球モ デルでの統計値を基にして使い続けていたが、水平格 子間隔約 55 km である TL319 のの適合ガウス格子の 全球モデルを用いて見直され、全球解析において、2008 年 11 月に更新された (坂本 2009)。

特定の現象での第一推定値の誤差が大きい場合を考 慮し、まずグロスエラーチェックで、観測データの採 用と排除の間に保留を設けて、保留と判定された観測 データは空間整合性チェックで再判定される。空間整 合性チェックでは、対象となるデータ以外の周辺の観 測データを用いて、単変量最適内挿法で解析した状態 で異常データを判定する。この手法は解析の前に簡易 的な解析をすることで、第一推定値の誤差を小さくす ることに相当する。なお、空間整合性チェックでの判 定にも dynamic-QC での閾値を用いている。

空間整合性チェックで用いている単変量最適内挿法 では、他の要素を持つ観測データを利用することはで きない。多変量化も検討したが、最適内挿法では衛星 輝度温度データを用いることができない。そのため、 解析で使用するすべての観測データを参照する変分法 QCの開発を行い、2010年9月からメソ解析において 変分法 QCが導入された。変分法 QCは観測値の確率 密度関数を正規分布から誤った観測データが混入する 可能性を考慮した関数に変えることで、解析値との差 が大きくなった観測値の影響を小さくする手法である (吉本 2010c)。変分法 QC においては、異常データを 含むすべての観測データを用いて、変分法 QC 適用前 の確率密度関数で最小値探査の前半の繰り返し計算を 行うため、空間整合性チェック同様、予備的な解析を することに相当する。

より多くのデータを参照する変分法 QC は、現在導入されている品質管理手法では最も高度な手法である と考えられる。メソ解析より多くの観測データを利用 しているが、未だに変分法 QC の導入がされていない 全球解析への効果が大きいと考えられるが、変分法 QC は観測誤差と背景誤差の設定値に強く依存し、それら が不適切であるとうまく機能しない。吉本(2010c)で も、観測誤差が実際より大きい場合は、異常データを 適切に除去できないことを述べている。このため、変 分法 QC が有効に機能するためには、観測誤差や背景 誤差が適切に設定されている必要がある。

1.2.7 新しい通報形式への対応

観測データのほとんどは、WMO で定められた形式⁴ で国際交換されている。古くから存在する観測データ の通報式は、SYNOP報、TEMP報など観測の種類ご とに定められている。これらの通報式は総称して伝統 的文字通報式 (TAC) と呼ばれているが、TAC は電報 で配信することを前提としているため、文字種類の制 限や文字数を減らすための省略や合成などの工夫がな されている。一方で、大量化・高度化・多様化している 近年の観測データの国際交換には、それぞれの種類毎 に形式の策定から施行に至る手続きには時間がかかり すぎることや、文字形式での配信には効率が悪いこと などから、より汎用的で拡張性に富み伝達効率のよい BUFR が策定され、地上リモートセンシングや航空機 観測の近年のデータなど、21世紀に開始された観測の ほとんどが既に BUFR で配信されている。BUFR が策 定される以前から配信されていた直接観測データにつ いても、観測の自動化や高度化が進み、TAC を拡張す るには制約上・手続上の限界があり、BUFR への移行 が進められている。地上観測と高層観測において 2015 年1月現在、大半の国で TAC と BUFR を並行配信し、 一部の国では TAC の配信を停止し BUFR へ完全移行 している。一方で、未だ BUFR 配信を配信を行ってい ない国もある。図 1.2.3 に 2015 年 1 月 1 日に気象庁に 入電した地上観測と高層観測の TAC と BUFR の分布 を示す。

数値予報システムでの利用において、BUFRの直接 の利点は、通報桁が多いことと、緯度経度などのメタ データが毎回配信されることである。通報桁について高 層観測の気温を例にすると、TAC では摂氏気温で通報 し、その符号は0.1°Cの桁が偶数か奇数かで示し、実質 0.2°C単位の刻みで通報される。それに対して BUFR では絶対温度の0.01 K単位で通報される。地点観測の メタデータについて、TAC では別途 WMO の地点番 号表を参照しているが、その移転情報等の反映が遅く、 その情報が更新されていない地点もある。BUFR では メタデータを観測データと同時に通報できるため、移 転情報などの変更を即時に反映することができる。

先に述べたように、BUFR へ完全移行している国も あるため、気象庁の数値予報システムにおいても移行 対応が必要となっている。BUFR は基本的に形式変換 をすれば、TAC と同等に利用できる。ところが、TAC 以上に BUFR の通報内容に誤りがあることが問題で ある。主な誤りの原因として単位変換が挙げられる。 BUFR では SI 単位系に統一されているものの、TAC では摂氏やノットなど SI 単位系の単位系には含まれ ていない単位が慣例的に用いられてきているという経 緯がある。このため、BUFR での緯度経度は度単位で 通報するべきだが、地点番号表の度分単位をそのまま BUFR で通報する国があり、最大 0.4° ずれていること もある。また、BUFR では南半球や西経域は負の値で 通報しなくてはならないが、経度の符号を失念して西 経域が東経域として通報される場合もある。

BUFR への移行には、観測したデータを測定精度を 維持したまま直接 BUFR 形式にして通報するのが本来 の姿だが、観測から通報までのシステム全体を BUFR に対応する必要があり、国によってはシステム全体の 改修が困難な状況にある。このため、TAC を解読して BUFR に変換して通報する国も多くあり、そのことが 誤った BUFR を通報する一因にもなっている。以下に 示すように、特に高層観測は複雑な状況になっている。 もともと TAC でも TEMP や PILOT の 2 種類の通報 形式があることや、指定面・特異点と100 hPa上下層 で4分割通報する規則のため、一連の観測が4から8 通に分割されて通報されている。それを分割したまま BUFR に変換して通報する国もあれば、合成してから 通報する国もある。一方、本来の BUFR の利点を活か し、元々の高精度の観測データを BUFR 形式で通報す る国もある。このように、通報内容が多様になっている が、BUFR という統一的な形式で通報されるため、どの ような過程で通報されているのかの区別が容易ではな い。データの内容から判別した TAC から BUFR に変 換して通報する地点を図 1.2.3 下段の水色の丸 (TAC-BUFR と表記)、観測データを直接 BUFR に変換して 通報する地点を同図の青色の丸で示している。

先に述べた誤りなどにより、BUFRの通報内容が疑わしく、TACよりも信頼性が低い場合も見られるため、現状ではTACとBUFRを並行配信している場合はTACを優先して利用し、TACの配信が停止した地点、もしくは、元からBUFRのみ配信している地点においてBUFRのデータからTACで通報されるべきデータだけを選別して、従来から変わらないように利用している。さらにSYNOPではBUFRで通報される緯度経度を採用せずに、従来の地点番号表の情報に置き換えて利用している。

このように、現在は BUFR で通報される観測データ を全面的に利用できる状況とはなっていないが、BUFR の利点を十分に活用するためには、国や地域ごとの配 信形態や通報内容などデータの特性を見定めて、有効 なデータを選択するなどより適切に対処しなくてはな らない。特に BUFR で通報される内容で有効活用でき る可能性があるのは、ラジオゾンデの位置情報である。 ラジオゾンデは放球から1時間以上かけて成層圏下部 まで上昇、観測するが、その間、風に流されて水平に数 100 km 移動することもある。TAC では放球場所と時 間 (hour) 単位の代表した観測時刻しか通報できないた め、上空ではモデル格子で数個以上ずれた状態で利用 していることもある。一方、BUFR では放球後の測定 レベル毎に位置と時刻を通報できることから、適切な 位置・時刻での観測データの利用ができる。現在、日本 やヨーロッパなどがラジオゾンデの位置情報を BUFR で通報している(図1.2.3下段の青色の丸)。そのため、 まずは国内のデータ利用から開発をすすめている (第 2.1節)。ラジオゾンデの位置情報の活用には、初期値

⁴ 通報形式の詳細は WMO Manual on Codes https://www. wmo.int/pages/prog/www/WMOCodes.html 参照。





図 1.2.3 2015 年 1 月 1 日に気象庁に入電した観測データ分布。上:地上観測、下:高層観測。赤色は TAC、青色または水色は BUFR で通報された地点。高層観測の水色は TAC を BUFR に変換したと推測される地点、青色はラジオゾンデの位置情報 を含めて BUFR で通報している地点。TAC と BUFR を並行配信している地点では、それぞれのマークで重ねて表示して いる。

解析の品質管理システムの対応だけでなく、ラジオゾ ンデの品質管理情報を利用しているモデルの検証シス テムについても対応が必要となる。現状のラジオゾン デの品質管理情報の収録単位では位置は単一であるこ とを前提にしているため、追加された情報をどのよう に保存し、その情報を活用するにはどのようにプログ ラムを改修すればよいのかが課題となる。

参考文献

- 幾田泰酵,2011: メソ解析におけるレーダー反射強度 データの同化. 平成23年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部、9-12.
- 石川宜広, 2010: 地上 GPS データのメソ解析での利用. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 54-60.
- 門脇隆志,吉本浩一,2012:全球解析の高解像度化.平成 24年度数値予報研修テキスト,気象庁予報部,87-91.
- 小泉耕,2005: データ同化システム. 平成17年度数値 予報研修テキスト,気象庁予報部,33.
- 岡本幸三,2011: 衛星データの高度利用に向けて. 数値 予報課報告・別冊第57号,気象庁予報部,18-24.
- 大野木和敏, 1997: データ品質管理と解析前処理. 数値 予報課報告・別冊第 43 号, 気象庁予報部, 17-61.
- Onogi, K., 1998: A Data Quality Control Method Using Forecasted Horizontal Gradient and Tendency in a NWP System: Dynamic QC. J. Meteor. Soc. Japan, 76, 497–516.
- 坂本雅巳,2009: 従来型観測の品質管理に関するその他 の開発.数値予報課報告・別冊第55号,気象庁予報 部,19-26.
- 酒匂啓司,2010: 航空機気温データの全球解析での利 用. 平成22年度数値予報研修テキスト,気象庁予報 部,33-37.
- 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.
- 吉本浩一,2014: 全球解析における地上 GNSS 大気遅 延量の同化利用. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部,44-48.
- 吉本浩一, 2010a: 航空機観測データの空間間引きにつ いて. 数値予報課報告・別冊第56号, 気象庁予報部, 35-36.
- 吉本浩一, 2010b: 観測データの適正な利用について. 数 値予報課報告・別冊第56号, 気象庁予報部, 38-43.
- 吉本浩一, 2010c: 変分法 QC. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 44-53.

1.3 衛星観測データの利用の現状と課題¹

1.3.1 はじめに

数値予報システムでの衛星観測データの用途には、 大きく分けて二種類ある。一つは、初期値作成(デー タ同化)のための用途、もう一つは、数値予報モデルの 出力結果の検証のための用途である。この節では、前 者のデータ同化における衛星観測データ利用の現状に ついて報告する。2011年当時の気象庁を含む主要数値 予報センターにおける衛星観測データの利用について、 岡本(2011a)にまとめられているので、以下では、こ れ以降に行われた各数値予報センターでの変更点を中 心に報告する。

表1.3.1 に気象庁、欧州中期予報センター (ECMWF)、 英国気象局 (UKMO)、米国環境予測センター (NCEP)、 カナダ気象局 (CMC)の数値予報現業データ同化システ ムにおける主な衛星データの利用状況をまとめた。岡 本 (2011a)からの変更点を赤字で示してある。最近の 予測精度向上に関わる大きな変更として、各数値予報 センターで米国の新規衛星 Suomi-NPP に搭載されて いるマイクロ波サウンダ ATMS、ハイパースペクトル 赤外サウンダ CrIS の利用が開始されたこと、ECMWF で雲・降水域の衛星輝度温度データの利用高度化が進 んだことがあげられる。

1.3.2 気象庁の数値予報システムにおける衛星デー タ同化

気象庁の全球解析とメソ解析では従来型の地上観測、 高層観測等のデータに加え、様々な衛星観測データを 同化している。以下、衛星データ利用の最近の変更に ついて述べる。

- 1. 2011 年 12 月、米国軍事気象衛星 DMSP 18 号搭載 SSMIS のイメージャチャンネルの輝度温度データ の同化 (全球、メソ)を開始した。既に利用中の同 種センサ DMSP 16 号、17 号の SSMIS に追加利 用することで、同化されるデータの時空間分布が 拡大した。これにより対流圏下層の水蒸気場の解 析・予測の精度が改善した。
- 2. 2012年1月、米国現業静止気象衛星 GOES-West の GOES 11 号から GOES 15 号への衛星切り替 えに伴い、GOES 15 号の晴天放射輝度 (CSR)、大 気追跡風 (AMV) データの利用を開始した。これ は、静止気象衛星から連続的に得られる観測デー タが現業数値予報システムの解析・予測の精度維 持に必要不可欠であることから、衛星の世代交代 時にデータを継続的に利用するための措置である。
- 3. 2012 年 11 月、衛星観測輝度温度データの同化に 用いられる放射伝達モデル RTTOV をバージョン 10 に更新した。同時にマイクロ波水蒸気サウンダ MHS の輝度温度データの陸域での利用も開始し た (Kazumori 2012)。これにより、陸上の水蒸気 場の解析精度が向上し全球モデルの予測精度が向

上した。

- 4. 2012年12月、GNSS-ROデータ(屈折率)の利用方 法の改良を行った (Owada and Yoshimoto 2013, 第4.8節を参照)。海外数値予報センターは、GNSS-RO データは高品質であることから当初よりバイ アス補正処理を適用しないで同化してきた。一方、 気象庁では、全球モデルの第一推定値の場から計 算される屈折率と観測値を比較するとバイアスが 見られていたため補正処理を行っていた。その後 の調査から、使用していた観測演算子に不具合が あることがわかり、これを修正することにより、 バイアスが大きく減少し、バイアス補正処理を適 用しないで同化することが可能になった。他の観 測データ(例えば、ラジオゾンデの気温や衛星輝 度温度データ)は、第一推定値に対するバイアス を補正して同化しているため、数値予報モデルの 平均的な場に相対的な変動成分の観測情報が同化 されていると言える。それに対して GNSS-RO の データは、バイアス補正なしに同化できることか ら、解析において基準とみなせるデータである。
- 2013年2月、欧州現業静止気象衛星の Meteosat-9から Meteosat-10への衛星切り替えに伴い、 Meteosat-10のCSR, AMV データの利用を開始 した。更に2013年7月、改良型高分解能放射計 (AVHRR)-AMV, LEOGEO-AMVの利用を開始 した(第4.7節参照)。前者は、MODIS 極域風と 同様、極軌道衛星 NOAA, Metop に搭載されてい る AVHRRの極域での連続画像から算出された風 データである。LEOGEO-AMV は、極軌道衛星と 静止気象衛星の合成画像から緯度60度付近で算 出された風データである。いずれも既存の風デー タの空白域を埋めるデータである。
- 6. 日本の GCOM-W 衛星に搭載されたマイクロ波イ メージャ AMSR2 が 2012 年 5 月に打ち上げられ、 同データの利用を 2013 年 9 月に開始した (Kazumori and Egawa 2014)。米国の Aqua 衛星搭載 のマイクロ波イメージャ AMSR-E による観測が 2011 年 10 月 4 日に停止し、これ以降、午後軌道 (地方時で 13:30, 1:30 の観測を行う極軌道) にはマ イクロ波イメージャによる観測データが存在しな かったが、AMSR2 のデータ利用開始により、利 用されるマイクロ波イメージャのデータ分布が時 空間的に拡大した。
- 2013年11月に欧州の極軌道現業気象衛星 Metop-B 搭載のセンサである、マイクロ波気温サウン ダ AMSU-A、マイクロ波水蒸気サウンダ MHS、 マイクロ波散乱計 ASCAT、GNSS-RO 掩蔽観測 GRAS, AVHRR-AMV データの利用を開始し(守 谷ほか 2014)、2014年3月にGNSS-RO データに ついて屈折率から屈折角での同化に変更した(第 4.8 節参照)。2014年9月には、ハイパースペクト ル赤外サウンダ AIRS, IASI データの利用を開始 した(第 4.1 節参照)。

このように気象庁の数値予報システムでの衛星デー タ利用では、新規データの導入、現業気象衛星の衛星 切り替えに伴う利用データの変更、既存データの利用 高度化、海外数値予報センターで確立された衛星デー タの利用手法の導入などを行っている。

1.3.3 外国数値予報センターの状況 (1) 欧州中期予報センター (ECMWF)

ECMWF は、2011 年 11 月に数値予報センターの 中でもっとも早く衛星輝度温度データ同化のための最 新の高速放射伝達モデル RTTOV-10 の利用を開始し た。2012年6月にMHSのチャンネル5の陸上データ と Meteosat-9 搭載のスピン走査式可視熱赤外イメー ジャ (SEVIRI) の全天候輝度温度データの同化を開始 した。これにより陸上対流圏下層、対流圏上層の水蒸気 場の改善が得られている。その後、RTTOV-10で用い られる海面射出率モデル FASTEM-5 の利用を開始し た (Bormann et al. 2012a)。2012 年 9 月には、Suomi-NPP 衛星のマイクロ波サウンダ ATMS の利用を開始 した (Bormann et al. 2012b)。 ECMWF は、輝度温度 データ同化の分野ではマイクロ波イメージャの全天候 同化を行っており (Bauer et al. 2010; Geer et al. 2010; Geer and Bauer 2011)、2013年11月には、SSMISの 183 GHz の水蒸気吸収線付近のチャンネルの輝度温度 データの全天候同化を開始し、雪によるマイクロ波放 射の散乱を考慮した改良版の放射伝達モデルの利用や、 AMSU-A, MHS の海氷上での利用、AMV について流 れに依存する観測誤差設定と QC の変更、GNSS-RO の屈折角について成層圏でのモデル層間の内挿の改良 などを行った (English et al. 2013)。更に、 輝度温度 の全天候同化の対象をマイクロ波水蒸気サウンダ MHS にも拡張している (Geer et al. 2014)。最近では、世 界に先駆けて 2014 年 9 月 24 日から中国の極軌道衛星 FY-3B のマイクロ波水蒸気サウンダ MWHS の輝度温 度データの同化を開始した。

(2) 英国気象局 (UKMO)

UKMOは、放射伝達モデルRTTOVのバージョン9 を2012年8月に導入し、対流圏下層気温に感度のある AMSU-A のチャンネル 4, 5、赤外サウンダ (HIRS) の チャンネル6,7の観測誤差を観測条件によって可変に する変更を 2013 年1月に行った。観測誤差は、測器の ノイズ、観測演算子 (RTTOV) の誤差、地表面射出や雲 によるスキャン角に依存する誤差を考慮して決められ ている。これにより南半球の予報(気温、湿度、風)誤 差が減少することが示された。また岡本 (2011a) の中 で UKMO の変更点として報告された雲域での AMSU-A チャンネル 1, 2 の同化は、南半球の海氷と海面の 境界で気温場に大きな解析インクリメントが見られた ため利用が中止されている。同じ2013年1月には、 Metop-B の改良型 TOVS(ATOVS) のデータ (HIRS, AMSU-A, MHS から構成される)を導入した。Metop-Bの ATOVS については、ほぼ同じ軌道で観測を行っ ている Metop-A と共通のデータ間引きを行っている。

また、大気追跡風 AMV データの間引きについて、解析 時刻の前後3時間を一つの解析同化窓とするデータ間 引きから、2時間毎を一つの解析同化窓とするデータ間 引きに変更している。Metop-B 衛星搭載の IASI の導 入は、2013 年 2 月に行われた。これにより IASI デー タの利用数が 23%程度増加した。その後、Suomi-NPP 衛星の ATMS のデータを、2013 年 5 月に導入し、対流 圏から成層圏に感度のある気温サウンダチャンネル6 から 15、水蒸気サウンダチャンネル 18 から 22 を同化 している。UKMOは、ATMS データの同化により南半 球の気圧、湿度、風の場の予報の改善を確認している。 更に赤外サウンダデータ利用の変更として Suomi-NPP 衛星搭載の CrIS の導入がある。前処理として 1D-Var で雲頂(気圧)、雲量を解析し、雲の影響を受けていな い上層のチャンネルを 4D-Var で同化している。利用 チャンネル数は、134 チャンネル (気温 76 チャンネル、 水蒸気 45 チャンネル、地表面 13 チャンネル) である。

(3) 米国環境予測センター (NCEP)

NCEP では、2012 年 5 月の更新で Hybrid 3D-Var の 導入と共に GNSS-RO データの同化を屈折率から屈折 角へ変更し、Suomi-NPP 衛星搭載の ATMS の輝度温 度データ、GOES(13 号、15 号) と Meteosat-10 の CSR の同化を開始した。2013 年 8 月の更新では、Metop-B 衛星搭載の AMSU-A, MHS, Suomi-NPP 衛星搭載の CrIS (84 チャンネル)の利用を開始した。更に Metop-B 衛星の IASI の 165 チャンネル、DMSP 衛星 17 号 SSMIS の気温サウンダチャンネル 1-3, 5-7, 24, 18 号 の 1-7, 24 の利用も開始した。放射伝達モデルとして CRTM(Weng et al. 2005) が用いられており、2014 年 1 月にリリースされた CRTM バージョン 2.1.3 を導入し て海面射出率モデル FASTEM-5 を利用している。今 後は、SSMIS の気温サウンダチャンネルのバイアス補 正の改良を予定している。

(4) カナダ気象局 (CMC)

CMCは、全球解析システムの 4D-Var のインナーモ デルの高解像度化 (T108 から T180 へ)を 2013 年 2 月 に実施した。同時に DMSP 衛星 17 号と 18 号の SSMIS の気温サウンダチャンネルの輝度温度データ、GOES(13 号、15 号)の CSR データ、RARS(Regional ATOVS Retransmission Service)のデータを導入した。2013 年 11 月、Meteosat-10の CSR と AMV の導入、Metop-Bの AMSU-A, MHS, GNSS-RO, AVHRR-AMV, ASCAT 海上風の利用開始を行った。2014 年 11 月には解析手 法として 4D-EnVar (Buehner et al. 2013)を導入した。

1.3.4 まとめと今後の課題

岡本 (2011a) 以降の各数値予報センターの衛星デー タ利用の変更点について報告した。各数値予報センター の現状をみると、既存の衛星データの世代交代による 切り替えや同種のセンサのデータの追加利用が滞りな く実施されたほか、輝度温度データの同化に必要な放 射伝達モデルの改良がシステムに組み込まれている。

気象庁の数値予報システムでの放射伝達モデルや新

表 1.3.1 気象庁、ECMWF, UKMO, NCEP, CMC の数値予報現業データ同化システムにおける主な衛星データの使用状況 (2014 年 11 月時点)。○ もしくは要素名が書かれたデータは同化されていることを表す。気象庁については、全球解析、メ ソ解析での同化をそれぞれ G, M で示す。他のセンターは主に全球同化システムについて記し、領域解析でしか同化されて いないものに R を付記する。岡本 (2011a) からの変更は赤色で示し運用終了した衛星については表から除き、新規衛星につ いては追加した。

衛星/センサ	JMA	ECMWF	UKMO	NCEP	CMC
大気追跡風 (AMV)					
MTSAT/IMAGER	○ (G,M)	0	0	0	0
GOES/IMAGER	\bigcirc (G)	Õ	Õ	l Õ	Õ
Meteosat/MVIRI.SEVIRI	\bigcirc (G)	Õ	Õ	Õ	Õ
Aqua.Terra/MODIS	\bigcirc (G)			Ŏ	Õ
NOAA.Metop/AVHRR	\bigcirc (G)	$\left \right $	$\left \right $	×	Ŏ
LEOGEO	\bigcirc (G)	×	×	×	×
Suomi-NPP/VIIRS	×	×	×	×	×
赤外サウンダ (輝度温度)					
NOAA.Metop/HIRS	×	0	0	0	×
Aqua/AIRS	\bigcirc (G)	Ő	Ő	Õ	\cap
Metop/IASI	$O(\mathbf{G})$	Õ	Õ	Õ	Õ
Suomi-NPP/CrIS	×	×	Ŏ	Ŏ	×
GOES/Sounder	×	×	×		×
マイクロ波サウンダ (輝度温度)					
NOAA,Metop/AMSU-A	\bigcirc (G,M)	0	0	0	0
NOAA,Metop/AMSU-B,MHS	\bigcirc (G,M)	Õ	Õ	Õ	Õ
Agua/AMSU-A	\bigcirc (G,M)	Õ	×	l Õ	Õ
DMSP/SSMIS(サウンダチャンネル)	×	×	×	Ŏ	Ŏ
Megha-Tropiques/SAPHIR	×	×	×	×	×
FY-3/MWHS	×	\cap	×	×	×
Suomi-NPP/ATMS	×	Ŏ	0	0	×
マイクロ波イメージャ					
DMSP/SSMI	×	×	×	×	輝度温度
TRMM/TMI	輝度温度 (G,M)	輝度温度	×	隆水	×
'	隆水 (M)				
GCOM-W/AMSR2	輝度温度 (G,M)	×	×	×	×
	降水 (M)				
DMSP/SSMIS(イメージャチャンネル)	輝度温度 (G,M)	輝度温度	×	×	輝度温度
	隆水 (M)				
Coriolis/WindSat	×	×	海上風	海上風	×
GPM/GMI	×	×	×	×	×
- マイクロ波散乱計 (海上風)					
Metop/ASCAT	\bigcirc (G)	0	0	0	0
マイクロ波高度計 (海上風速)	0(-)				Ŭ
Jason-2/Poseidon-3	×	0	×	×	×
静止衛星(晴天輝度温度)					
MTSAT/IMAGER	\bigcirc (G,M)	0	×	×	\bigcirc
GOES/IMAGER	\bigcirc (G)	Ő	×	0	Õ
Meteosat/MVIRI,SEVIRI	\bigcirc (G)	Ő	\cap	Ŏ	\tilde{O}
GNSS-RO					
GRACE/BlackJack	屈折角 (G)	屈折角		屈折角	
COSMIC/IGOR	屈折角 (G)	屈折角	屈折角	屈折角	屈折率
Metop/GRAS	屈折角 (G)	屈折角	屈折角	屈折角	屈折率
TerraSAR-X/IGOR	屈折角 (G)	×	屈折角	屈折角	屈折率
TanDem-X/IGOR	×	×	×	×	×
GNSS 地上観測					
	天頂遅延量 (G)	天頂遅延量	可降水量 (R)	可降水量 (R)	天頂遅延量
	可降水量 (M)				_
オゾン					
NOAA/SBUV	×	カラム量	×	プロファイル	×
Aura/OMI	×	カラム量	×	カラム量	×
Suomi-NPP/OMPS	×	×	×	×	×
全球データ同化手法	4D-Var	Hybrid 4D-Var	Hybrid 4D-Var	Hybrid 3D-Var	4D-EnVar
	4D-Var	×	4D-Var	3D-Var	4D-EnVar
	BTTOV-10	RTTOV-10	RTTOV-0	CRTM-213	BTTOV-10
	101 1 0 1 - 10	101107-10	101101-3	UT01101-2.1.0	101 1 0 1 - 10

規衛星データ利用に関して早急に対応すべき課題とし て以下の3点を挙げる。

- 輝度温度同化に用いる放射伝達モデルについて、 RTTOV-11 が EUMETSAT の NWP SAF から 2014年6月にリリースされており、鉛直内挿の高 度化やマイクロ波放射の改良版の海面射出率モデ ルFASTEM-6 (Kazumori and English 2014)が 含まれている。これらの機能は、気象庁の輝度温 度同化システムで用いており、早期にこれらの改 良版を導入する必要がある。
- 既に数値予報センターで利用が開始されている Suomi-NPP 衛星に搭載されたマイクロ波サウン ダ ATMS、赤外ハイパースペクトル赤外サウンダ CrIS のデータ利用を急がなければならない。これ らのデータは、米国の次世代現業極軌道衛星 JPSS シリーズに継続的に搭載が予定されており、今後 の数値予報での衛星データ同化において基盤とな る重要なデータである。
- 中国の極軌道衛星 FY-3 シリーズに搭載されるマ イクロ波水蒸気サウンダ MWHS、マイクロ波気 温サウンダ MWTS やそれらの後継機のデータに ついてもデータの入手と品質モニターを行い、利 用に向けた体制を整えておく必要がある。

中長期的な課題としては、雲・降水域での輝度温度同 化がある (本報告第 4.5 節や岡本 (2011b)、計盛 (2011) を参照)。現時点では、ECMWF 以外の数値予報セン ターでの輝度温度データの同化は、晴天域に限定され た利用である。全天候同化を行うためには、雲・降水域 の衛星観測との乖離が小さい予報モデル・同化システ ムが必要である。そのためには、数値予報モデルの予 測する水蒸気、雲水、降水のバイアスが予報初期で小さ くなければならない。更に、現在の気象庁の 4D-Var に よる解析システムでは、最適化処理の途中で背景場を 更新しないが、雲・降水域で輝度温度データを同化する ためには、ECMWFの解析システムで採用されている 非線形モデルを用いて背景場を更新しながら観測に場 を寄せていくアウターループの導入も検討する必要が ある。海外の数値予報センターでは、雲・降水域の衛星 データ同化のための開発を精力的に行っており (Bauer et al. 2010)、今後この分野の成果が数値予報精度に大 きく影響するようになると思われる。輝度温度データ 以外の衛星観測データの利用についても、ECMWF で は、AMV の同化に関して高度割り当ての誤差を見積 もり (Salonen et al. 2014)、観測誤差を場に応じて変 化させる手法を開発している。また GNSS-RO の同化 においては、2次元で電波の屈折を考慮する観測演算 子を用いて既存データからより効果的に情報を取り出 すような先進的な開発が行われている。

このような先進数値予報センターの開発動向に注意 しながら、気象庁の同化システムの問題点、数値予報 モデルの弱点を科学的な見地から分析し、我々のシス テムに何が不足しているのかを理解し、それを補うよ

うに新規観測データの利用や既存データの利用高度化 を進める必要がある。

参考文献

- Bauer, P., A. J. Geer, P. Lopez, and D. Salmod, 2010: Direct 4D-Var assimilation of all-sky radiances. Part I:Implementation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 1868–1885.
- Bormann, N., A. Geer, and S. English, 2012a: Evaluation of the microwave ocean surface emissivity model FASTEM-5 in the IFS. *ECMWF Tech. Memo.*, **667**.
- Bormann, N., A. Fouilloux, and W. Bell, 2012b: Evaluation and assimilation of ATMS data in the ECMWF system. *ECMWF Tech. Memo.*, **689**.
- Buehner, M., J. Morneau, and C. Charette, 2013: Four-dimensional ensemble-variational data assimilation for global deterministic weather prediction. *Nonlin. Processes Geophys.*, 20, 669–682.
- English, S., T. McNally, N. Bormann, K. Salonen, M. Matricardi, A. Horanyi, M. Rennie, M. Janisková, S. Di Michele, A. Geer, E. Di Tomaso, C. Cardinali, de P. Rosnay, J. Munõz Sabater, M. Bonavita, C. Albergel, R. Engelen, and J.-N. Thépaut, 2013: Impact of satellite data. *ECMWF Tech. Memo.*, **711**.
- Geer, A. J., F. Baordo, N. Bormann, and S. English, 2014: All-sky assimilation of microwave humidity sounders. *ECMWF Tech. Memo.*, **741**.
- Geer, A. J. and P. Bauer, 2011: Observation errors in all-sky data assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor.* Soc., 137, 2024–2037.
- Geer, A. J., P. Bauer, and P. Lopez, 2010: Direct 4D-Var assimilation of all-sky radiances. Part II:Assessment. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 136, 1886–1905.
- 計盛正博,2011: 雲、雨の影響を受けたマイクロ波輝 度温度データの同化.数値予報課報告・別冊第57号, 気象庁予報部,77-83.
- Kazumori, M., 2012: Assimilation experiments involving surface-sensitive microwave radiances in JMA's global data assimilation system. CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell., 42, 01–11.
- Kazumori, M. and T. Egawa, 2014: Assimilation of GCOM-W1/AMSR2 radiance data in JMA's NWP systems. CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell., 44, 1–07.
- Kazumori, M. and S. English, 2014: Use of the ocean surface wind direction signal in microwave radiance assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, in press.
- 守谷昌己,大和田浩美,山下浩史,江河拓夢,2014: Metop-B データの利用開始.平成26年度数値予報 研修テキスト,気象庁予報部,104-107.

- 岡本幸三, 2011a: 衛星データ同化に関する諸外国の状況. 数値予報課報告・別冊第 57 号, 気象庁予報部, 7-10.
- 岡本幸三, 2011b: 赤外雲域同化. 数値予報課報告・別 冊第 57 号, 気象庁予報部, 84-92.
- Owada, H. and K. Yoshimoto, 2013: Recent Updates on the Usage of GNSS RO Data in JMA's operational Global Data Assimilation System. CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell., 43, 1– 11.
- Salonen, K., J. Cotton, N. Bormann, and M. Forsythe, 2014: Characterising AMV Height-Assignment Error by Comparing Best-Fit pressure statistics from the Met Office and ECMWF data assimilation systems. J. Appl. Meteor. Climat., 54, 225–242.
- Weng, F., Y. Han, P. van Delst, Q. Liu, and B. Yan, 2005: JCSDA community radiative transfer model (CRTM). Technical Proceedings of International TOVS Working Group-XIV.