

雲微物理衛星データ同化手法における 海面水温・海上風速及び雲頂高度情報の影響

SENSITIVITY ANALYSIS FOR AMSR-E SEA SURFACE PRODUCTS AND CLOUD TOP HEIGHT IN CLOUD MICROPHYSICS DATA ASSIMILATION

谷口健司¹・荒木 裕²・Cyrus Raza MIRZA³・小池俊雄⁴
Kenji TANIGUCHI, Yutaka ARAKI, Cyrus Raza MIRZA and Toshio KOIKE

¹正会員 工博 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 特任助教 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

²非会員 東京大学大学院 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)

³正会員 工博 東京大学大学院 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)

⁴正会員 工博 東京大学大学院 工学系研究科 教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)

Cloud Microphysics Data Assimilation System (CMDAS) was developed to improve water vapor and cloud liquid water content in atmosphere by assimilating the brightness temperature data observed by the Advanced Microwave Scanning Radiometer – Earth Observing System (AMSR-E). In CMDAS, a radiative transfer model (RTM) for atmosphere is used as an observation operator. Sea surface temperature (SST) and sea surface wind (SSW) data is necessary for RTM. In the original CMDAS, a numerical weather prediction output is used for SST and a constant value for SSW (25 m/s). However, SST and SSW can be estimated by AMSR-E observation and they can be appropriate information for CMDAS at optimum timing. In this study, sensitivity analysis is implemented for CMDAS using AMSR-E SST and SSW products. At the same time, cloud top height (CTH) information is important in CMDAS but a constant value is given in whole target domain. The effect of CTH is also examined in this study.

Key Words : data assimilation, satellite observation, water vapor, cloud liquid water content, sea surface temperature, sea surface wind, cloud top height

1. 研究の背景

近年の局地的集中豪雨による被害の頻発により、洪水被害軽減の意識が一層高まっている。2009年8月に国土交通省が発表した「重点政策2009」ではゲリラ豪雨への対策を「100^{mm}/h安心プラン（仮称）」としてまとめ、高精度な降雨情報の提供を含むハード・ソフト両面からの対策の推進を掲げている。局地的豪雨の予測には2009年度整備予定のXバンドMPレーダ等による観測情報や気象モデルによる数値予測が活用される。数値モデルによる気象予測では衛星観測による水蒸気の分布情報等が有効である。2002年に打ち上げられた観測衛星Aquaに搭載されたマイクロ波放射計（Advanced Microwave Scanning Radiometer – Earth Observing System: AMSR-E）は水蒸気及び雲水量の吸収帯の周波数での輝度温度を観測し、積算水蒸気量や積算雲水量の推定に使われている。Mirzaら（2005年）は数値気象モデルによる降水予測精

度向上のため、AMSR-Eによる観測輝度温度を同化し、数値気象モデルによる第一推定値の水蒸気及び雲水量の情報を改善する雲微物理データ同化システム（Cloud Microphysics Data Assimilation System: CMDAS）を開発した¹⁾。CMDASでは観測演算子として放射伝達方程式を採用している。海洋上の放射伝達方程式を解く際には境界条件に海面水温が必要であり、下向き輝度温度の反射率については海上風速の影響を受ける。従来のCMDASでは海面水温には気象モデル出力を、海上風速は全グリッドに25m/sという定数を与えている。一方、AMSR-E観測から海面水温と海上風速の推定が可能である。本研究ではAMSR-E観測から推定される海面水温及び海上風速情報をCMDASに活用し、より正確に放射伝達方程式を解き、同化結果とそれを用いた降水予測への効果を調べる。また、CMDASは、積算水蒸気量及び積算雲水量を配分して鉛直分布を与えるが、そこで必要な雲頂高度及び雲底高度は定数を与えている。本研究では、雲頂高度を変更した同化実験を行い、その影響についても調べる。

2. データ同化システムの概要及び使用データ

(1) 雲微物理データ同化システム (CMDAS)

a) システムの概要

図-1にCMDASの概要を示す。CMDASでは第一推定値を得るための気象モデルとしてオクラホマ大学で開発された非静力学モデルであるAdvanced Regional Prediction System (ARPS)²⁾を用いる。雲微物理スキームにはLin Ice Scheme³⁾を用いる。CMDASのモデル演算子である雲微物理スキームも同様のものを用いている。

第一推定値を求めた後数値計算を中断し、データ同化を行う。CMDASでは、アリゾナ大学が開発したShuffled Complex Evolution法 (SCE-UA法)⁴⁾による最適値探索手法をとる。まず、積算水蒸気量と積算雲水量の候補値をランダムに作成し、両者の組み合わせを適当に作り、数値実験を中断した時刻から同化時刻まで雲微物理スキームを実行する。得られた結果より放射伝達方程式を解き、得られた輝度温度と観測値との誤差の最小値を探索する。求めた最小値が閾値より大きい場合には新たな組み合わせで同様の誤差評価を行う。誤差が収束したら、得られた水蒸気量及び雲水量を用いて数値予測を再開する。また、大気に関する放射伝達方程式を陸域上で精度よく解くことが困難なため、CMDASの適用範囲は海洋上のみであり、陸域の輝度温度データは使用していない。

b) 誤差評価関数

データ同化においては誤差評価関数を最小化するような状態変数ベクトル \mathbf{x} を定める。誤差評価関数 J は背景誤差 J_B と観測誤差 J_O より以下のように表現される。

$$J = J_B + J_O \quad (1)$$

背景誤差を求めるには動的な推定方法と統計的な誤差共分散行列を用いる方法があり、自由度の高い大気モデルでは動的な誤差推定手法はうまく動作しない。また、積算水蒸気量や積算雲水量に関しては、統計的な誤差共分散行列の作成に必要な適切な解析情報を得ることが困難である。そこで本研究では、モデルを完全と仮定して背景誤差を考慮しないこととした。求めるべき誤差は観測誤差のみとなり、次式で表現される。

$$J_O = \frac{1}{2} (H[\mathbf{x}] - \mathbf{y}_O)^T \mathbf{R}^{-1} (H[\mathbf{x}] - \mathbf{y}_O) \quad (2)$$

ここで、 H は放射伝達方程式、 \mathbf{y}_O は観測輝度温度、 \mathbf{R} は誤差共分散行列である。なお、本研究では校正済みの衛星観測輝度温度を用いるため補正の必要はないと考え、観測誤差共分散行列には単位行列を与えている。

c) 放射伝達方程式における下端境界条件

CMDASではARPS及び雲微物理スキームから得られる物理量を用いて放射伝達方程式を解き輝度温度を求める。放射伝達方程式を解くには大気上端及び下端での境界条件が必要である。大気上端の境界条件には宇宙空間からの背景放射として3Kを与えている。大気下端の境

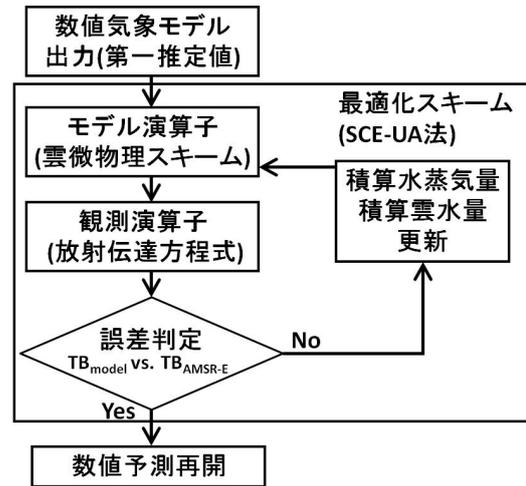


図-1 雲微物理データ同化システムの概要

界条件は、地表面からの放射と反射される下向き放射の和であることから⁵⁾、以下の式が導かれる。

$$T_{BUP} = r \cdot T_{BDN} + (1 - r) \cdot T_{surf} \quad (3)$$

ここで、 T_{BUP} 、 T_{BDN} 、 T_{surf} 、 r はそれぞれ上向き放射輝度温度、下向き放射輝度温度、地表面温度、反射率である。海面における反射率は海上風速の関数として以下のように表現される⁶⁾。

$$r = r_r(u)(1 - f(u)) + r_f(u) \quad (4)$$

r_r は粗い海水面における反射率、 r_f は泡で覆われた海水面における反射率、 $f(u)$ は泡でおおわれた海水面の割合である。数式(3)及び(4)より、大気下端の境界条件は海面水温及び海上風の影響を受けることがわかる。

(2) AMSR-E観測データ及びプロダクト

a) 輝度温度

本研究では宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が開発したマイクロ波放射計AMSR-Eによって観測された輝度温度を利用する。AMSR-Eは米国航空宇宙局により打ち上げられた地球観測衛星Aquaに搭載されており、1日2回の観測を行っている。AMSR-Eは6.925、10.65、18.7、23.8、36.5、89.0GHz帯の垂直及び水平偏波を観測する⁷⁾。本研究では大気中の水蒸気量及び雲水量を改善するため、主に積算水蒸気量に感度を持つ23.8GHz及び主に積算雲水量に感度を持つ89.0GHzの輝度温度⁸⁾を用いる。

b) 海面水温プロダクト

本研究では、AMSR-Eによる観測輝度温度から推定された海面水温情報を放射伝達方程式に与え、適時性の高いデータを用いて放射伝達方程式を解く。海面水温プロダクトは6.925、10.65GHzの垂直/水平偏波及び23.6、36.5GHzの垂直偏波を用いて推定されるJAXA標準プロダクトを用いる。JAXA標準プロダクトでは、降雨域においては精度が劣化するため海面水温の算出は行われな

表-1 各同化実験の概要. 時刻はUTC.

	対象日 (年月日)	数値実験 中断時刻	AMSR-E 観測時刻	代替海面水温・ 海上風観測時刻
CASE-1	20080902	16:30	16:56	20080901 04:12
CASE-2	20081117	17:00	17:22	20081117 03:43
CASE-3	20070704	04:00	04:17	20070703 17:13

2K以上の場合にも海面水温の算出は行われ⁷⁾.

c) 海上風速プロダクト

海面水温と併せて、海上風速についてもAMSR-E観測から推定された適時性の高い情報を用いたデータ同化を行う。JAXA標準プロダクトでは10.65, 36.5GHzの垂直/水平偏波と6.925GHzを用いて海上風速が推定される。降雨時には36.5GHz帯の輝度温度は飽和することから、海上風速の算出は無降雨の条件下のみに制限される。

3. 実験概要

(1) 対象イベント及び同化スケジュールの概要

同化実験対象として、JAXA標準プロダクトでの海面水温及び海上風速の欠損値が比較的少なく、AMSR-E観測時刻の数時間後から降水が生じ、降水が連続する期間における最大時間降水量が10mm/hを超える降水イベントを3ケース選定した（実験領域は図-2を参照）。

実験対象として選定した降水イベントをCASE-1~3とし、その同化概要を表-1に示す。表-1の実験中断時刻はARPSによる数値実験を一時中断し、第一推定値を得る時刻である。第一推定値を得た時刻からAMSR-E観測時刻までCMDASを実行し同化を行う。実験領域には複数のアメダス観測地点が含まれており、各地点で降水予測の検証が可能であるが、その中でもイベント選定時にアメダスデータの確認に用いた金沢（CASE-1, 2）と輪島（CASE-3）を主たる検証地点とした。

(2) 海面水温及び海上風速データの準備

2. (2)b) 及び2. (2)c) で述べた通り、海面水温プロダクト及び海上風速プロダクトには欠損値が含まれる。本実験では降水イベントを対象としており、同化時刻周辺では実験領域内で雲や降水が存在し、ケースによっては広範な欠損がみられる。放射伝達方程式を解くには海面水温及び海上風速の情報は不可欠であることから、同化時刻近傍のAMSR-E観測から推定された海面水温及び海上風速を用いて、欠損値の処理を以下のように行う。

- 同化時刻における海面水温及び海上風速が推定されている場合はその値を用いる。
- 同化時刻には欠損値であるが、同化時刻近傍での推定値がある場合、その値を用いて補完する。
- 同化時刻及びその近傍で欠損の場合、海面水温に

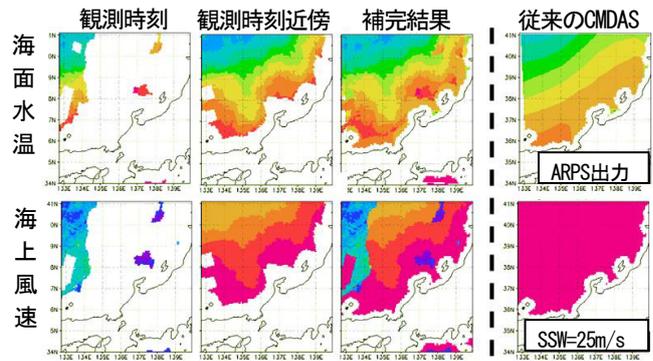


図-2 海面水温(上)及び海上風速(下)の分布(CASE-1). 左側は同化時刻, 同化時刻近傍, 及びそれらを用いた補完結果, 右端は従来のCMDASで用いていた値。

はARPSの出力を、海上風速には25m/sを与える。

AMSR-E観測による海上風速情報が無い場合に25m/sを与える点については従来のCMDASで積算雲水量分布が改善されており、同化効果が期待できるため採用した。表-1にそれぞれのケースで補完に用いた同化時刻近傍の代替データ観測時刻を示す。また、欠損値処理の例として図-2にCASE-1の海面水温及び海上風速分布を示す。

(3) 放射伝達方程式における雲頂高度の取り扱い

CMDASでは積算水蒸気量及び積算雲水量の最適値を求めているが、Lin Ice Schemeと放射伝達方程式ではそれらの鉛直分布が必要である。水蒸気は雲層内で相対湿度が100%となるよう値を与え、残りを第一推定値の水蒸気分布に従って配分する。雲水量に関しては雲層内で配分する。従来のCMDASでは雲頂高度は定数として全グリッドに与えているが、雲頂高度が高い積雲などに関しては十分な条件ではない。本研究では、デフォルト値として8000mを与えている雲頂高度を、4000m, 12000mに変更して同化実験を行い、その影響を検討する。

4. データ同化結果の比較

CASE-1~3については、従来のCMDASによる同化実験、海面水温プロダクトのみ用いた実験、海面水温プロダクト及び海上風速を用いた実験、雲頂高度を変化させた実験を行った。以下、CASE-1-CTL, CASE-1-SST, CASE-1-SSTW, CASE-1-HC（雲頂高度12000m）、CASE-1-LC（雲頂高度4000m）のように表記する。

(1) CASE-1

図-3にCASE-1の各同化実験より得た23GHz及び89GHz水平偏波とAMSR-E観測による輝度温度の差を示す。また、各ケースの全領域での平均誤差と標準偏差も示した。CASE-1-CTLとCASE-1-SSTでは、二つの周波数帯での結果の差は小さく、平均誤差と標準偏差もほぼ変わらず、改善効果は小さい。これは、同化対象である

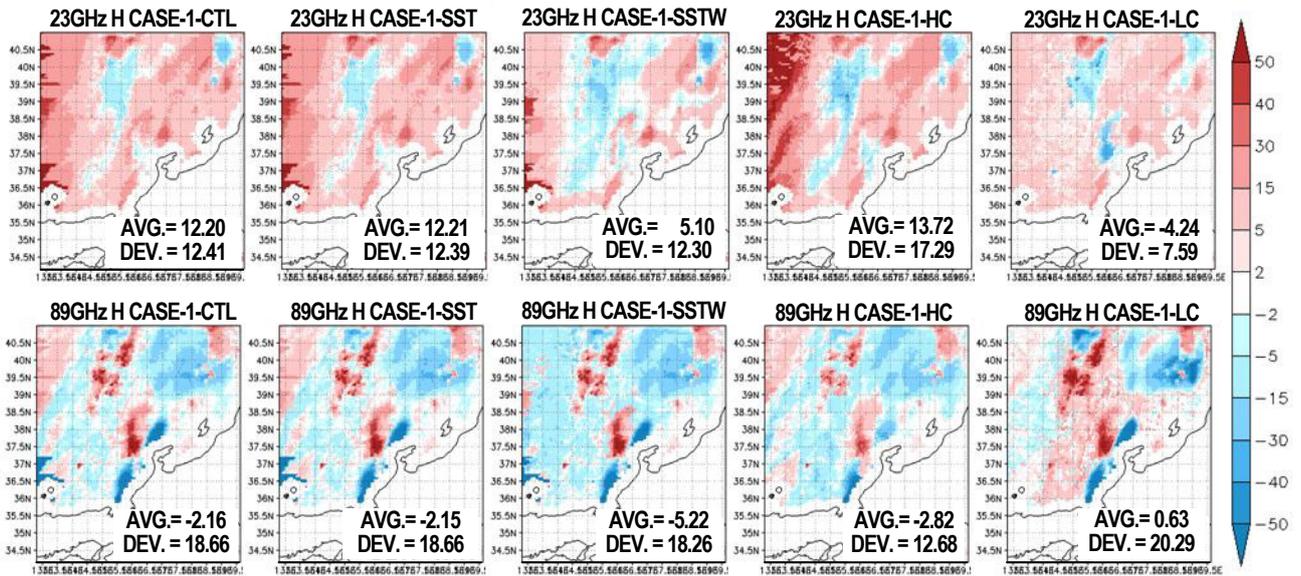


図-3 CASE-1での各同化実験より得た輝度温度とAMSR-Eによる観測輝度温度の差。上段は23GHz、下段は89GHzの結果（いずれも水平偏波）。各図右下のAVG. は実験領域全体での平均誤差、DEV. は標準偏差を示す。

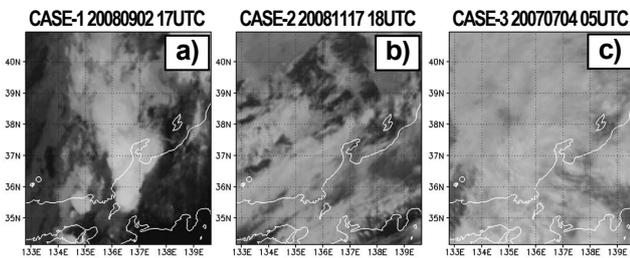


図-4 各実験の同化時刻付近のMTSAT IR1輝度温度。輝度温度が低いほど明るい色で示してある。

23GHz及び89GHzの周波数帯では地表面からの放射の影響が小さいためと考えられる⁸⁾。CASE-1-SSTWでは23GHzで顕著な影響がみられ、平均誤差から、同化結果が改善されたことがわかる。一方、89GHzでは平均誤差がやや増大している。CASE-1-HCは23GHzでは全体的に誤差が大きい。89GHzについても誤差は増大しているが、CASE-1-CTLなどで誤差が大きかった領域で改善が認められる。一方、CASE-1-LCでは23GHzで全体的に誤差が小さくなっているが、89GHzではCASE-1-CTLで誤差が大きい領域の周辺域で誤差が増大しており、標準偏差が大きくなっている原因と考えられる。

図-4aはAMSR-E観測に最も近い時刻でのMTSAT IR1の輝度温度分布である。IR1では高層雲の輝度温度が低く観測される。図-4aより同化時刻付近で実験領域の中央部に高い雲の存在がわかる。IR1輝度温度のみによる雲頂高度の推定はできないが、CASE-1-HCで89GHzでの改善がみられた領域が雲域と一致することから、雲頂高度の上限を大きくすることで背の高い雲域での同化結果が改善されたことがわかる。一方、背の高い雲の東西に雲が無いあるいは薄雲の領域があり、特に西側の領域はCASE-1-LCにおいて誤差が縮小した領域と一致する。

(2) CASE-2

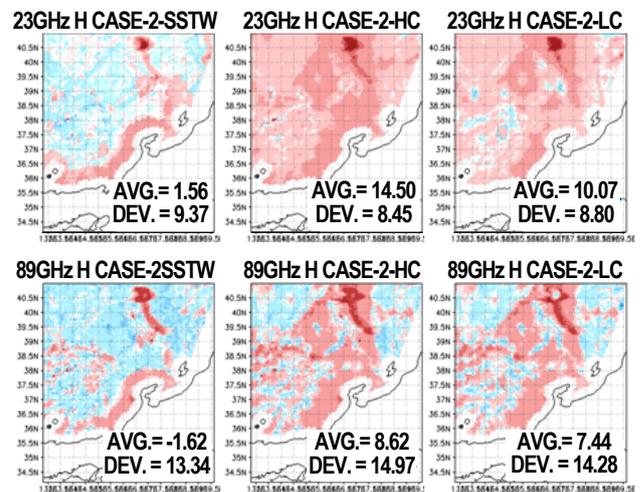


図-5 CASE-2での雲微物理データ同化実験の結果。カラーバーは図-3に同じ。

表-2 CASE-2同化結果の領域平均誤差と標準偏差

	23GHz水平偏波		89GHz水平偏波	
	CTL	SST	CTL	SST
平均誤差	14.00	14.07	8.51	8.75
標準偏差	8.56	8.50	14.96	14.89

図-5にCASE-2の同化実験より得た23GHz及び89GHz水平偏波とAMSR-E観測による輝度温度の差を示す。CASE-2-CTL及びCASE-2-SSTは平均誤差と標準偏差のみ表-2にまとめた。CASE-1の同化実験と同様、海面水温の影響は小さいが、海上風速に関しては顕著な影響がみられる。一方、HC及びLCのいずれも顕著な変化は見られない。同図に示した平均誤差と標準偏差からも、海上風速を用いた実験以外では、顕著な変化は見られない。

図-4bはCASE-2の同化時刻付近でのMTSAT IR1の輝度温度分布である。全体的に雲が広がっているが、高く発達した雲はないと推定される。CASE-2においてはデ

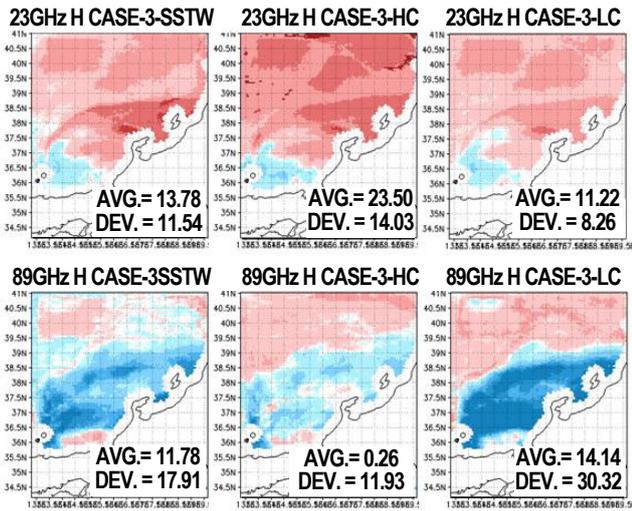


図-6 CASE-3での雲微物理データ同化実験の結果。カラーバーは図-3に同じ。

表-3 CASE-3同化結果の領域平均誤差と標準偏差

	23GHz水平偏波		89GHz水平偏波	
	CTL	SST	CTL	SST
平均誤差	21.77	21.77	-8.23	-8.23
標準偏差	12.27	12.27	20.64	20.64

フォルト値と同程度の雲頂高度の雲が広く存在していたがために影響が小さかったと考えられる。

(3) CASE-3

図-6にCASE-3より得た23GHz及び89GHz水平偏波とAMSR-E観測による輝度温度の差を示す。CASE-3-CTL及びCASE-3-SSTは平均誤差と標準偏差のみ表-3にまとめた。海面水温の影響はほぼみられない。SSTWに関しては23GHzで改善効果がみられるが、89GHzでは誤差がやや増大している。HCに関しては23GHzでやや誤差が増大しているが89GHzでは陸域に近い範囲で誤差が縮小している。LCでは23GHzで誤差が縮小しているが、89GHzでは全体的に誤差が増大している。CASE-3各実験での平均誤差と標準偏差の傾向は、SST、SSTWともCASE-1、CASE-2と同様である。HCでは89GHzでは誤差、標準偏差ともに縮小しており、良好な同化結果が得られているが、23GHzでは誤差、標準偏差が増大している。一方、CASE-3-LCでは23GHzで同化結果が改善されているが、89GHzにおいて誤差、標準偏差ともに拡大している。図-4cに示したMTSAT IRI輝度温度分布をみると、実験領域全体に雲がかかり、図-4bと比較すると雲頂高度の高い雲であることが推定される。実験領域全体に比較的雲頂高度の高い雲が広がっていたことがCASE-3-HCで良好な同化結果を得た原因であると考えられる。

5. 降水予測結果の比較

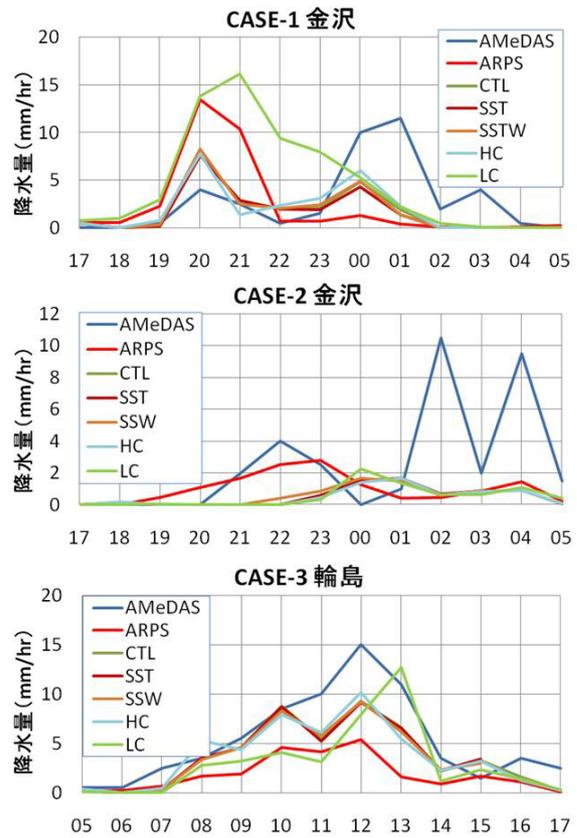


図-7 同化結果を用いた降水予測結果。横軸は時刻(UTC)。

表-4 同化結果を用いた降水予測結果の平均二乗誤差

	ARPS	CTL	SST	S3STW	HC	LC
CASE-1	4.99	3.22	3.38	3.38	3.09	5.99
CASE-2	3.42	3.66	3.66	3.64	3.67	3.67
CASE-3	4.26	2.51	2.56	2.53	2.51	3.16

図-7はCASE-1～3の各同化結果を用いたARPSでの数値実験から得た、各実験の主たる検証地点での降水量とアメダス観測データである。データ同化を行わない場合の数値実験結果(ARPS)についても示してある。

CASE-1では観測結果は二つの降水ピークを示しているが、同化を行わない場合はピークが一つであり、降水量も過大であるのに対し、LC以外の同化のケースでは二つのピークが再現され、一つめの過大なピーク降水量についても改善されている。各同化実験間では、CASE-1-HCでは二番目のピーク降水量が他の同化実験より大きく、観測結果にやや近い値となっている。CASE-1-LCでは最初のピーク降水量が非常に過大となっている。

CASE-2では同化なしの結果より同化した場合の結果の方がピーク時刻、ピーク降水量とも誤差が大きい。各同化実験の結果ではCASE-2-S3STWでやや降水の開始が早い、それ以外は顕著な違いはみられない。図-6でみたように、同化結果に大差ないことが原因と考えられる。

CASE-3では同化なしの場合は降水量が観測結果に比べて過小であるが、同化によって降水イベントの前半に

関して定量的にも良好な再現結果を得ている。各同化実験の影響はCASE-3-HCで最も降水量が多い時刻で他の結果よりピークがやや大きい。CASE-3-LCでは降水前半への影響は小さく、後半で観測値に近づいている。

表-4は図-7で示した降水量の平均二乗誤差である。CASE-1ではHCでの改善がやや大きくLCでは誤差が大きい。両者の間では雲水量に感度を持つ89GHzでの同化結果に差がみられた(図-3)ことから、雲水量の改善が降水量予測の改善につながったと考えられる。CASE-3ではLCの降水予測結果が他に比べ誤差が大きい。CASE-3-LCの同化では89GHzの誤差と標準偏差が他に比べて大きく、同化による雲水量の値が降水予測に悪影響を与えていると考えられる。CASE-2は各実験間で同化結果に大差がないために降水予測の違いも小さいと考えられる。一方、CASE1~3のいずれもLCで23GHzの同化結果が改善しているが、降水予測結果は改善されておらず、降水予測には89GHzの同化結果改善の効果が高いとみられる。

降水予測結果は、同化結果に顕著な差があったでも目立った変化が生じないことを示している。このことは同化結果における誤差が依然として無視できないことや、領域によっては数十Kの誤差があり、同化が不十分であるためと考えられる。また、CMDASが現状においては海洋上の大気のみ適用可能であり、陸域あるいは陸域付近の大気場が改善されていないことも一因と考えられる。

6. まとめ

本研究ではこれまで開発されてきた雲微物理衛星データ同化手法(CMDAS)において、その観測演算子である放射伝達方程式をより正確に解くために、適時性の高い海面水温及び海上風速情報としてAMSR-E観測より推定されたJAXA標準プロダクトを用いた同化実験を行うとともに、CMDASにおける水蒸気及び雲水量を鉛直方向に再分配する際に重要な雲頂高度について、従来の固定値を変化させてその影響を検討した。

海面水温プロダクトを用いた同化実験では、対象とした3ケースいずれも顕著な変化はみられなかった。これは、同化対象である23GHz及び89GHzの周波数帯においては地表面からの放射の影響が小さいことに起因していると考えられる。海上風速を用いた同化実験においては、23GHzでは良好な同化結果を得ることができたが、89GHzに関してはケースによって異なる影響がみられた。

雲頂高度に関しては、その影響が顕著であり、各地点の実際の雲頂高度に対応するように適切な値を与えることがデータ同化結果の改善につながることが示唆された。本研究では一様な値を与えているが、MTSATの複数チャンネルの観測データから推定するなどして各グリッドに適切な雲頂高度情報を与えることで対象領域の広範にわたって同化結果を改善することが可能と考えられる。

本研究では海面水温及び海上風速プロダクトの欠損値処理を他の観測時刻のデータを用いて補完したが、特に海上風速は時間変動が大きく、必ずしも最適な方法ではない。海上風速については標準プロダクトと異なるアルゴリズムで推定された全天候プロダクトが作成されており⁷⁾、その活用も有効と考えられる。また、ARPSより得られる大気最下層の風速から海上風速を推定することも、25m/sという特定の値を用いるより同化結果を改善する可能性があり、その検討と適用も課題である。

同化結果を用いた降水予測実験には大きな影響がみられなかった。今後、さらに同化手法を精緻化するとともに陸域への適用にも取り組むことによって、降水予測精度向上につながるものと考えられる。

本研究では評価関数では背景誤差を考慮していないが、CMDASのような時間的发展を導入した同化手法においては背景誤差の考慮による改善には大きな効果があると期待される。その検討と導入も今後の課題である。

謝辞：本研究では宇宙航空研究開発機構から提供されたAMSR-E観測輝度温度及び海面水温、海上風速プロダクトおよび高知大学より公開されているMTSATデータを利用した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Mirza, C. R., Koike, T., Yang, K. and Graf, T.: Development of 1-D Cloud Microphysics Data Assimilation System (CMDAS) by using AMSR-E Data, 水工学論文集, Vol.49, pp.289-294, 2005.
- 2) Xue, M., Drogemeier, K. K. and Wang, V.: The Advanced Regional Prediction System (ARPS) –A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model. Part I: Model dynamics and verification, Meteorol. Atmos. Phys., Vol.75 pp.161-193, 2000.
- 3) Lin, Y-L., Farley R. D. and Orville, H. D.: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model, J. Climate Appl. Meteor., Vol.22, pp.1065-1092, 1983.
- 4) Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V.: Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, Water Resources Res., Vol.28, pp.1015-1031, 1992.
- 5) Sharkov, E. A.: Passive Microwave Remote Sensing of the Earth, Springer, 2003.
- 6) Schlusssel, P. and Luthardt, H.: Surface wind speed over the North Sea from Special Sensor Microwave/Imager observation, J. Geophys. Res., Vol.96, pp.4845-4853, 1991.
- 7) 宇宙航空研究開発機構：地球観測データ利用ハンドブック-AMSR-E編-, 2006.
- 8) 早坂忠弘編：地球環境のマイクロ波リモートセンシング, 日本気象学会, 1996.

(2009. 9. 30受付)