

## [共同研究成果]

# 全球化学輸送モデルを用いた二酸化炭素のデータ同化実験

横尾好朗、岩崎俊樹  
東北大学理学研究科

気候変動の視点から二酸化炭素の収支や濃度分布を知ることは大変重要である。これまで、濃度の観測は主に地表面における連続観測やフラスコサンプリングといったものが主流であった。さらに、近年のリモートセンシング技術の発達によって、衛星を用いた観測も盛んに行なわれており、これらの様々な観測データによって徐々に二酸化炭素の収支や濃度分布が明らかになってきている。しかし、それらの観測範囲は限定的なため、全球的な分布を知るのは難しい。一方、数値モデルの分野では、データ同化手法が近年急速に進歩している。データ同化は、数値モデルによる予測結果に観測データ情報を取り込み、実況値を推定する技術である。これにより、観測のない範囲にも観測情報が反映され、広い範囲において現実的な二酸化炭素濃度分布を推定できるようになる。本稿では、数値モデルに衛星観測データを同化させた時の影響を調べた。その結果、温室効果ガス観測衛星「GOSAT」により得られた観測データを用いた場合、地上観測データを同化させた場合に比べ広範囲を修正した。また、その修正範囲は地上観測の存在しない地域にも及んでいたことから、データ同化における GOSAT 観測データの有意性を確認できた。

## 1 はじめに

私たちは、様々な環境問題に直面している。特に地球温暖化問題については、気候変動や気象現象などに与える影響が大きいことから、近年大きく注目されるようになり、温暖化の原因となる二酸化炭素やメタンなどの温室効果ガスの収支が盛んに研究されるようになった[1]。

二酸化炭素収支の研究は従来、地表面における連続観測やフラスコサンプリングを用いたものが主流であり、人為的な排出量と生物由来の排出・吸収量、海洋由来の排出・吸収量の積算により二酸化炭素収支を決定していた。これらは高精度の観測が可能であるが、地上観測は一部の地域に限定され、空間代表性などの問題があった。そこで、2009年1月23日に温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT)が打ち上げられた。GOSAT 観測は精度こそ従来の観測に少し劣るものの、代表性の良い観測が広い範囲で可能であり、新たな二酸化炭素観測手法として注目されている。

一方、大気大循環モデルや化学輸送モデルなどに代表される各種数値モデルを用いた研究も盛んに行なわれ、数値モデルの精度も向上している。このような中で、数値モデルの計算に観測情報を付加し、より現実的なシミュレーションを可能にするデータ同化技術が注目されている。データ同化実験では、予測された濃度分布が観測データと一致するように地表面フラックスを修正する。この手続きを繰り返すことによって、観測データのない地域の濃度や地表面フラックスを精度よく推定し、全球的な二酸化炭素収支を解明する。

本研究では、データ同化手法として LETKF( Local Ensemble Transform Kalman Filter )を用いる[2]。GOSAT 観測データを数値モデルに同化させ、二酸化炭素濃度分布の再現実験を行う。データ同化実験では、使用する観測データの精度や量が同化結果に如実に現れる[3]。また、先行研究によれば、各種観測データは単体で同化させるよりも各プラットフォームの観測データを組み合わせて使用することにより、空間的に情報を補い、観測データの影響をより効果的に反映させることができることが確認された[4]。これらを受け、本研究では、各観測データ、特に GOSAT 観測データが同化結果に与える影響について検証し、GOSAT 観測データの品質評価を行なう。また、それらの結果を基に、使用した LETKF のシステムについても評価を行なっていく。データ同化の過程で、メンバー数 24 のアンサンブル計算を行なう必要がある。この計算に約 50GByte の物理メモリを要するた

め、研究室のワークステーションでは計算できない。このため、サイバーサイエンスセンターの並列コンピューターを用い、一つのアンサンブル計算に対して 1cpu を割り当て計算させた。

## 2 実験の概要

### 2.1 数値モデルについて

本研究で用いる数値モデルは気象研究所で開発された大気大循環-化学輸送結合モデル MJ98-CDTM である[3]。このモデルは大気の循環場と二酸化炭素の拡散を分離して計算しており、大気大循環モデルである MJ98 で循環場を、化学輸送モデルである CDTM で拡散を表している。より現実的な大気場を再現するため、下記の気象の三次元分布に対する再解析データである JRA25 の水平風をナッジングした[5]。解像度は鉛直 30 層 ( $\sigma=1\sim 0.1$ )、水平  $2.8^\circ \times 2.8^\circ$  である。二酸化炭素濃度の初期値として気象庁による二酸化炭素解析情報を使用していた。また、二酸化炭素の地表面フラックスの第一推定値には、気象研究所で使用されている二酸化炭素地表面フラックスの気候値を使用し、輸送モデルの下部境界条件とした。

### 2.2 使用したデータ同化手法

データ同化手法の一つである Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF)[4]を使用した。LETKF は Ensemble Kalman Filter (EnKF)をもとに開発されたデータ同化技術である。EnKF は予報・カルマンゲインの計算・解析の3つのプロセスの繰り返しで行なわれる。詳細な説明は省略するが、主要なプロセスは以下に示す通りである。

まず、線形モデル  $M$ を用い、現在の状態  $x_i^f$ を一つ前の時刻の状態  $x_{i-1}^a$ で表す。

$$x_i^f = Mx_{i-1}^a \quad (1)$$

$a$ は解析、 $f$ は予報と言う意味である。予報および解析には誤差が含まれると仮定すると、誤差共分散行列  $P$ は

$$P \equiv x(x^T) \quad (2)$$

と表すことができる。(1)を利用すれば、

$$P_i^f = MP_{i-1}^a M^T + Q \quad (3)$$

と表すことができる。ここで  $M^T$ はアジョイントモデルと呼ばれるものであり、 $Q$ はモデル誤差の共分散行列である。

解析プロセスでは、予報を観測値  $y^0$ で修正する。

$$x_i^a = x_i^f + K_i(y_i^0 - Hx_i^f) \quad (4)$$

ここで、 $K$ は観測値をどの程度解析値に反映させるかを決定する線形変換であり、カルマンゲイン行列と呼ばれる。 $H$ は観測演算子と呼ばれ、観測データのモデル変数への線形写像である。解析値の推定誤差は観測値との比較によって小さくなり、

$$P_i^a = [I - K_i H] P_i^f \quad (5)$$

となる。 $I$ は単位行列である。観測がモデルの全格子点上の全変数について得られることは通常あり得ないため、観測データの次元は、モデル変数の次元と一致しない。カルマンゲイン  $K$ は

$$K_i = P_i^f H^T [H P_i^f H^T + R]^{-1} \quad (6)$$

で表される。ここで  $R$  は観測誤差共分散行列である。原理的にはこれで計算可能であるが、現実的には (3) で共分散を求める際にアジョイントを計算するのは大変である。そこで、誤差共分散はアンサンブル予報を用いて次の様に表す。

$$P \approx \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \delta x^{(k)} (\delta x^{(k)})^T \quad (7)$$

$n$  はサンプル数、 $k$  はメンバーのサンプルナンバーであり、 $\delta x^{(k)}$  は各メンバーにおける誤差ベクトルである。ここで誤差共分散行列  $P$  は非負の実対象行列であるので、実行列の平方根  $E$  を持つ。

$$P = E(E)^T \quad (8)$$

つまり、 $E$  は、

$$E = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \left[ \delta x^{(1)} \dots \delta x^{(n)} \right] \quad (9)$$

となる。あらゆる誤差を独立に表現するためには、変数の数だけメンバー数  $n$  が必要である。この時、 $E$  は一辺  $n$  の正方行列となる。しかし、実際の数値モデルにおいて、 $n$  は 100 万を優に超えるので、この計算は実際には不可能である。一般に予報誤差は成長モードに支配される。 $P$  を固有値分解

$$P = SDS^T \quad (10)$$

を行なうと、多くの固有値が 0 に十分近くなるため無視することができる。 $D$  は固有値を各成分に持つ対角行列であり、 $S$  は各固有値に対する固有ベクトルからなる直行列である。このため、少ないアンサンブルメンバー数でも  $P$  をよく表すことが可能になる。本実験ではアンサンブルメンバー数を 24 とした。また、LETKF では、観測データの局所化の距離を設定することが可能である。この距離とは、一つの観測データの影響をどの範囲まで有効にするかを決定するものである。本実験では局所化の距離を 1000km としている。

### 2.3 データ同化に使用する観測データについて

本実験で使用する観測データは、連続観測やフラスコサンプリングに代表される地上観測と観測衛星 GOSAT による衛星観測の 2 種類を用いている [2]。それぞれの観測範囲については図 1 に示す。図 1 を見ると、地上観測は特に日本やヨーロッパなどに集中しており、とても限定的である。一方 GOSAT 観測では、全球的に観測点が存在し、地上観測では観測されていないアフリカや南アメリカにも観測点が存在することがわかる。

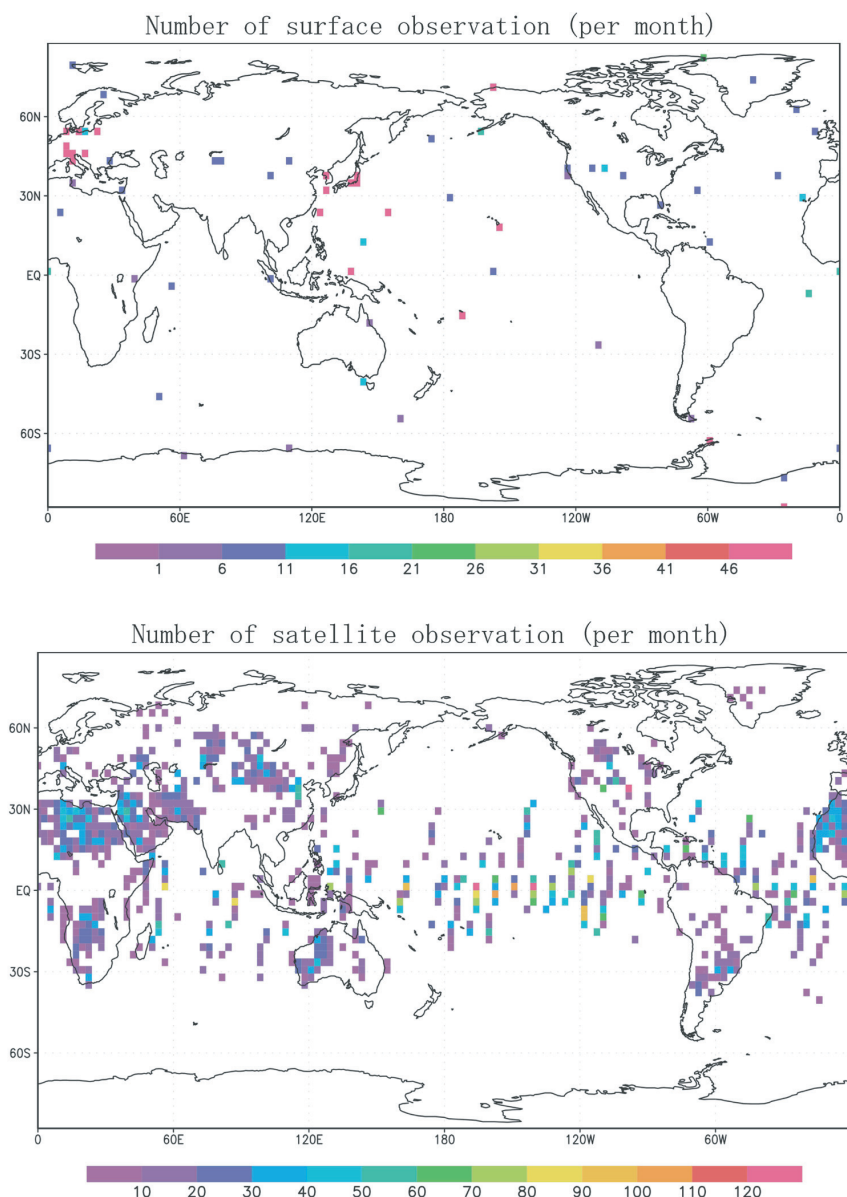


図 1 : 各観測データの観測位置と観測個数。上部は地上観測、下部は GOSAT 観測。

### 3 実験結果

#### 3.1 各観測データが同化結果に与える影響

データ同化の結果を見る前に同化前のモデルの計算結果について説明する。図 2 はデータ同化を行っていない数値モデルの 7 月の計算結果である。北半球は夏期であり、植物活動が活発なため、北半球の中高緯度地域では周囲に比べて二酸化炭素濃度が低くなっているが、人間活動の活発な地域（日本・アメリカ・ヨーロッパの工業地帯）では人間活動の影響により周囲よりも高くなっているのが特徴である。

図 3 は地上観測データのみを同化させた時に得られた二酸化炭素濃度の地表面分布と同化前と比較した時の変化量である。これらを見ると、観測データが存在するヨーロッパ周辺と北アメリカ大陸、日本周辺で大きな修正が加えられたことがわかる。特にカナダとアメリカではその効果が大きく、20ppm 以上の変化が確認できた。しかし、修正範囲としては観測地点周辺に限られ、広範囲の修正は期待できない。

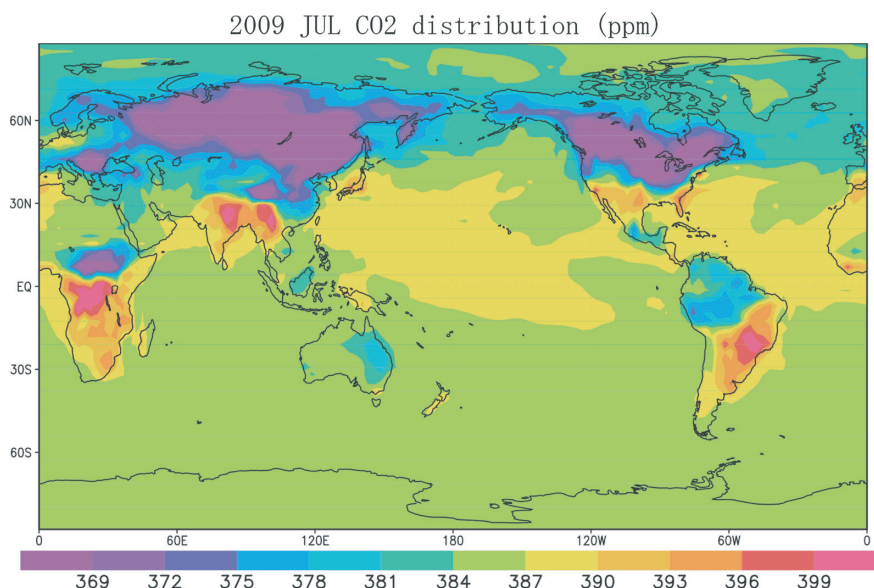


図 2 : 2009 年 7 月におけるデータ同化前の二酸化炭素濃度の分布図。

図 4 は GOSAT 観測データのみを同化させた時に得られた二酸化炭素濃度の地表面分布とその変化量である。主に北半球の中高緯度で大きく修正されていることがわかる。また、地上観測の存在しないアフリカでも同化の効果が確認できる。修正量についても図 3 の地上観測データを同化させた場合とおおむね一致する。

地上観測データを用いた同化実験と衛星観測データを用いた同化実験を比較すると、修正範囲に大きな差が見られる。これはそれぞれの観測範囲を大きく反映するためである。地上観測では連続性の高いデータが得られるため、大きな修正が期待できるが、観測範囲が限定的であるため、広い範囲での修正は期待できない。一方、衛星観測は一度に広範囲での観測が可能のため、広い範囲での修正が期待できる。この二つを併用して同化させた結果を図 5 に示す。異なるプラットフォームの観測データを組み合わせて同化させることによって、空間的に補完し合い、単独で使用する場合よりも強く修正されることが期待される。図 5 では、図 3・4 に比べ全球的に大きく修正されているのがわかる。特にユーラシア大陸と北アメリカ大陸ではその影響は大きい。データ同化の影響を詳細に分析するため、

$$A = \frac{\sum \sqrt{(Flux_{(original)} - Flux_{(D.A)})^2}}{Num} \tag{11}$$

という値を導入する。この値 A はデータ同化により、使用した二酸化炭素フラックスがどの程度修正されたかを表すものである。つまり、データ同化の影響が強ければ値は大きくなる。表 1 に地上観測データのみ同化・衛星観測データのみ同化・両方を同化させた場合それぞれの A の値を示す。

表 1 : 地上観測データと衛星観測データを同化した際の A の値

	JUL	OCT
Surface + GOSAT	2.74	2.10
Only surface	1.90	1.17
Only GOSAT	1.34	1.72

表 1 を見ると、7月・10月どちらにおいても観測データを組み合わせて使用した結果の方が大きくなっている。これらより、異なるプラットフォームを使用することの重要性が確認できる。また、地上観測データに衛星観測データを組み合わせることで、修正量と範囲が大きく変化した。ここからデータ同化実験における衛星観測データの有意性が認められる。従来では観測することが難しかった地域において、衛星観測の果たす役割は非常に重要である。

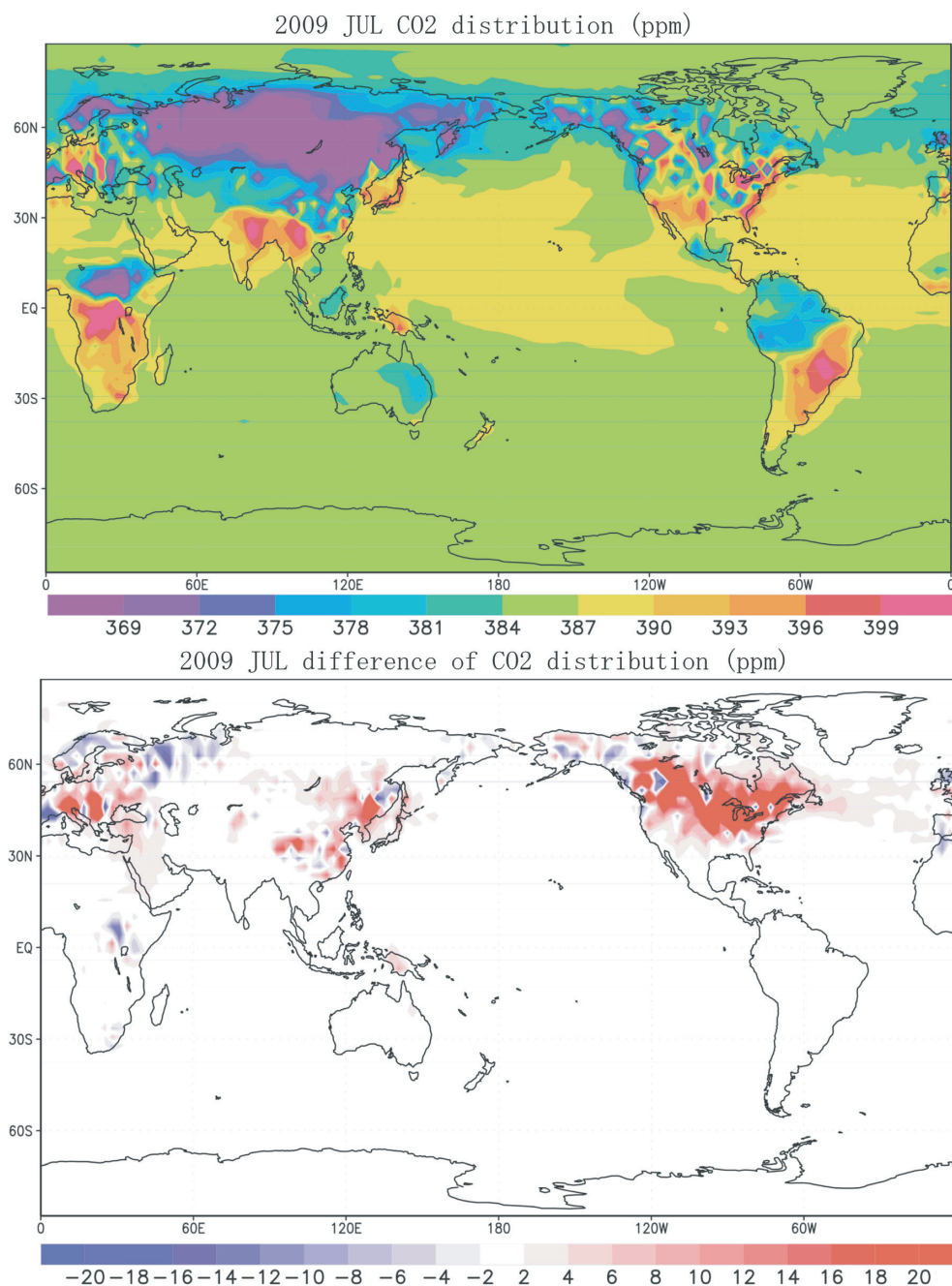


図 3 : (上部) 2009年7月における地上観測データのみを同化した場合の二酸化炭素濃度の分布図。(下部) データ同化後の二酸化炭素濃度分布と同化前の二酸化炭素濃度分布の差を取ったもの。

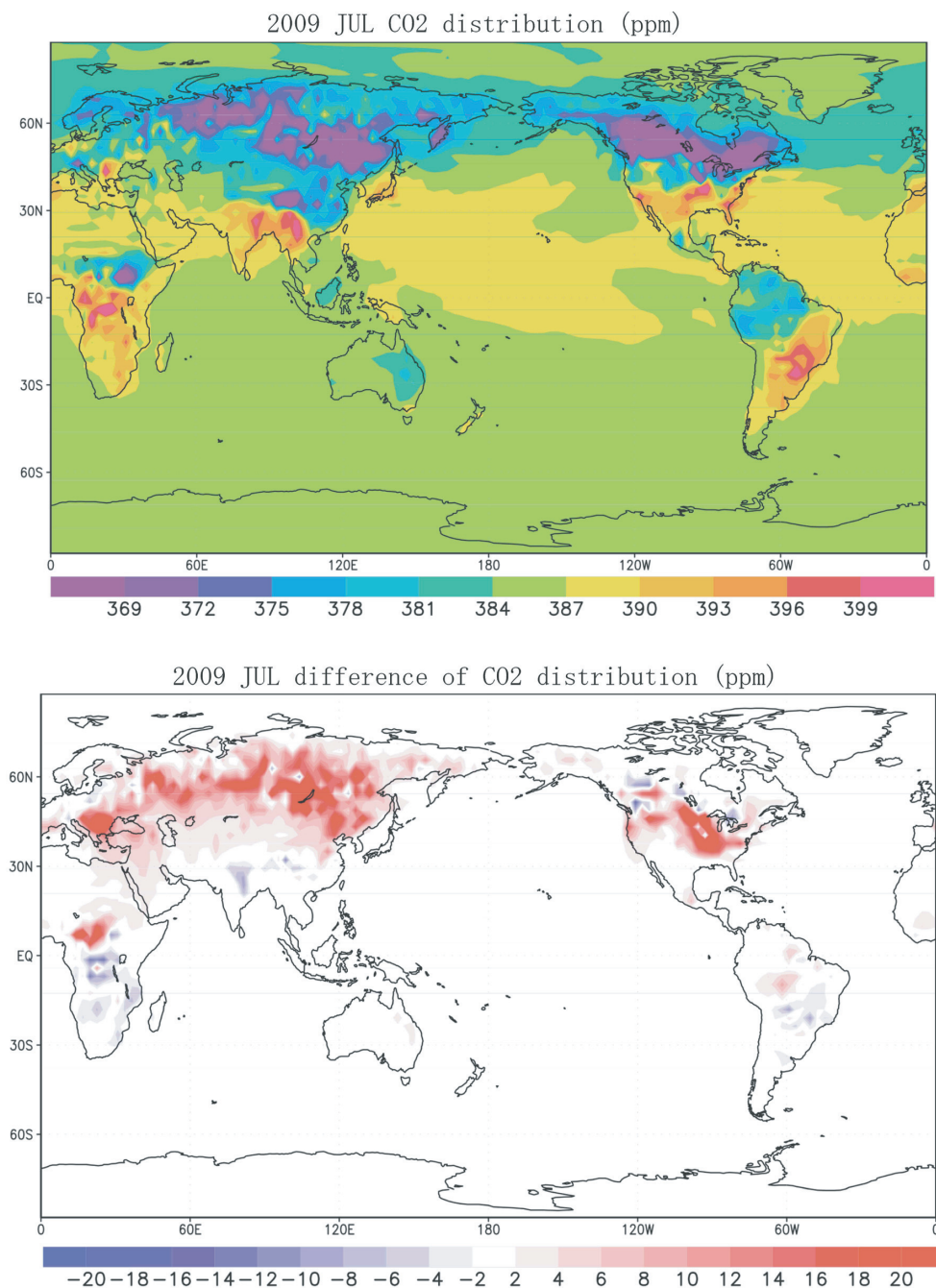


図4：（上部）2009年7月における衛星観測データのみを同化した場合の二酸化炭素濃度の分布図。（下部）データ同化後の二酸化炭素濃度分布と同化前の二酸化炭素濃度分布の差を取ったもの。

### 3.2 データ同化システムの二酸化炭素フラックス依存性

十分な観測データが存在する同化実験（理想的な同化実験）では、第一推定値がどのような値であっても観測データによって修正され、ある一定の値に収束するため、使用しているフラックスの気候値に依存しないはずである。そこで本項では、2種類の二酸化炭素フラックスを使用し、データ同化実験におけるフラックス依存性を検証した。2種類のフラ

ックスのうち、一つは気象研究所で使用されているフラックスであり、もう一つは海洋開発研究機構で使用されているフラックスである。本実験では前者をフラックス A、後者をフラックス B とし、図 5 に示す。

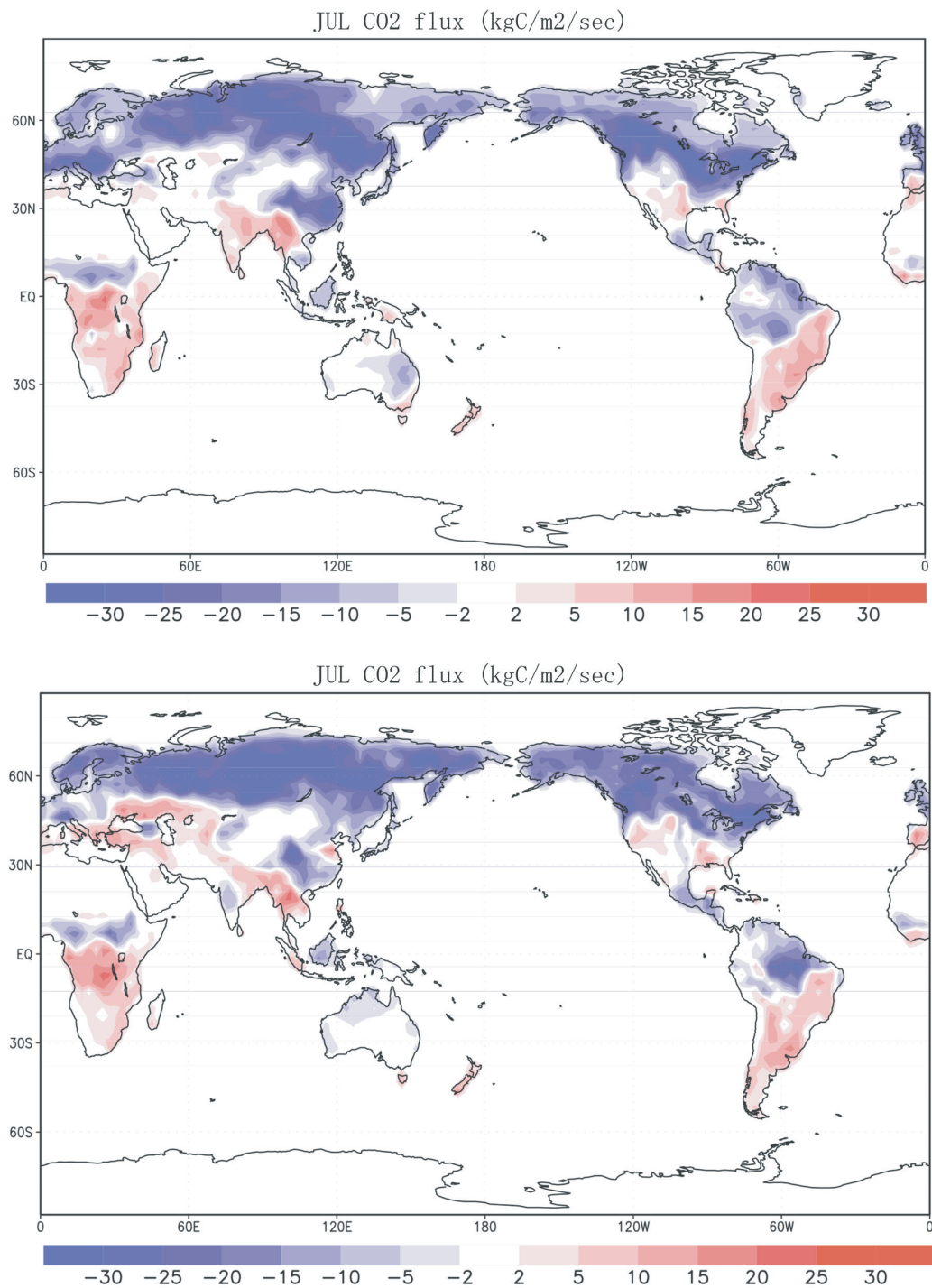


図 5：本実験で使用する二酸化炭素表面フラックス 7 月の気候値。上部は気象研究所で使用されているフラックス（フラックス A）であり、下部は JAMSTEC で使用されているフラックス（フラックス B）である。



図6は上記のフラックスを用いて、GOSAT 観測データのみを同化した時の地表面の二酸化炭素分布であり、図7はデータ同化により修正された後の二酸化炭素フラックスである。

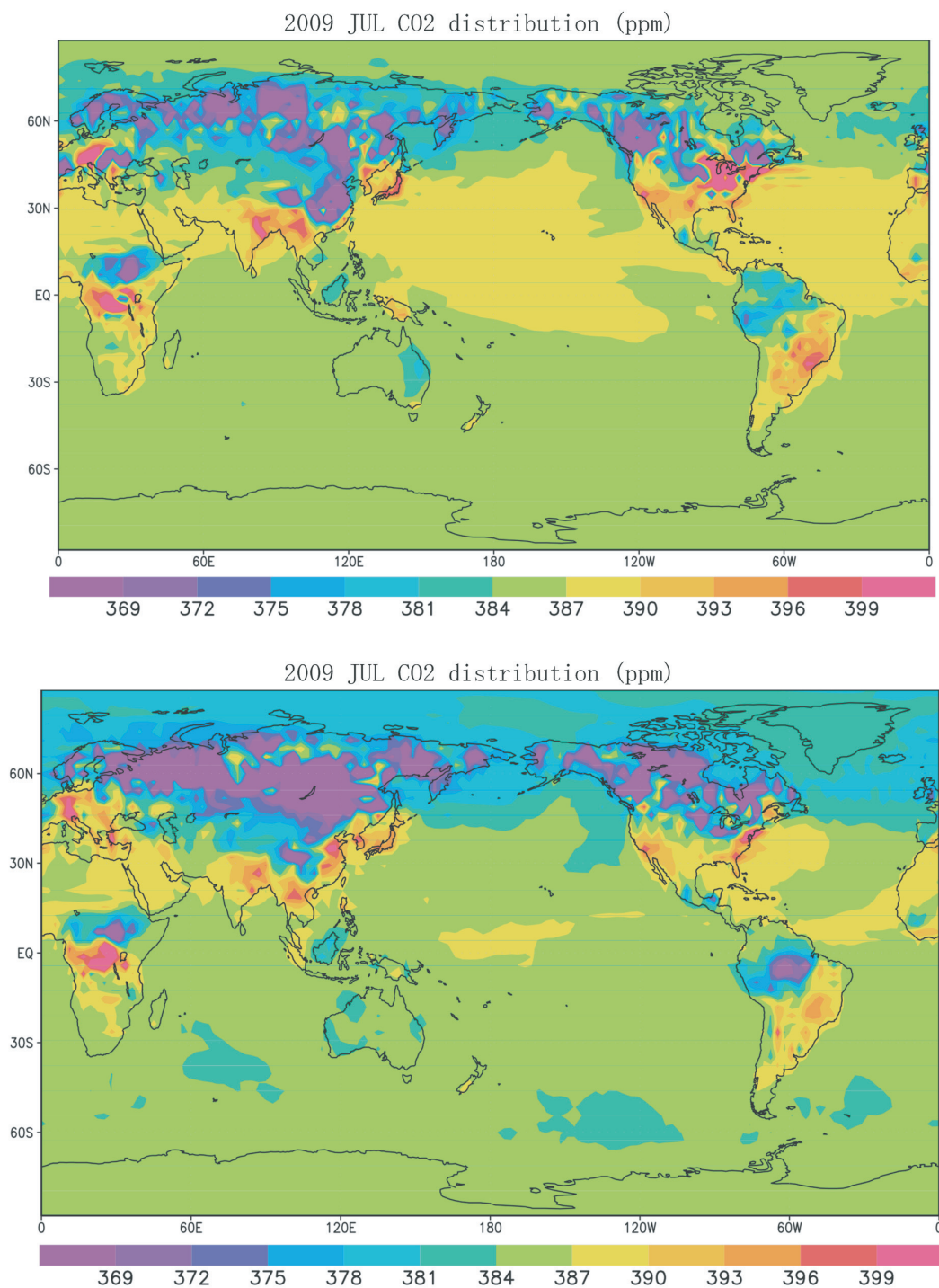


図6：フラックス A、フラックス B を用いて衛星観測データのみを同化した際に得られた二酸化炭素濃度分布の図。上部はフラックス A を使用したものであり、下部はフラックス B を使用したものである。

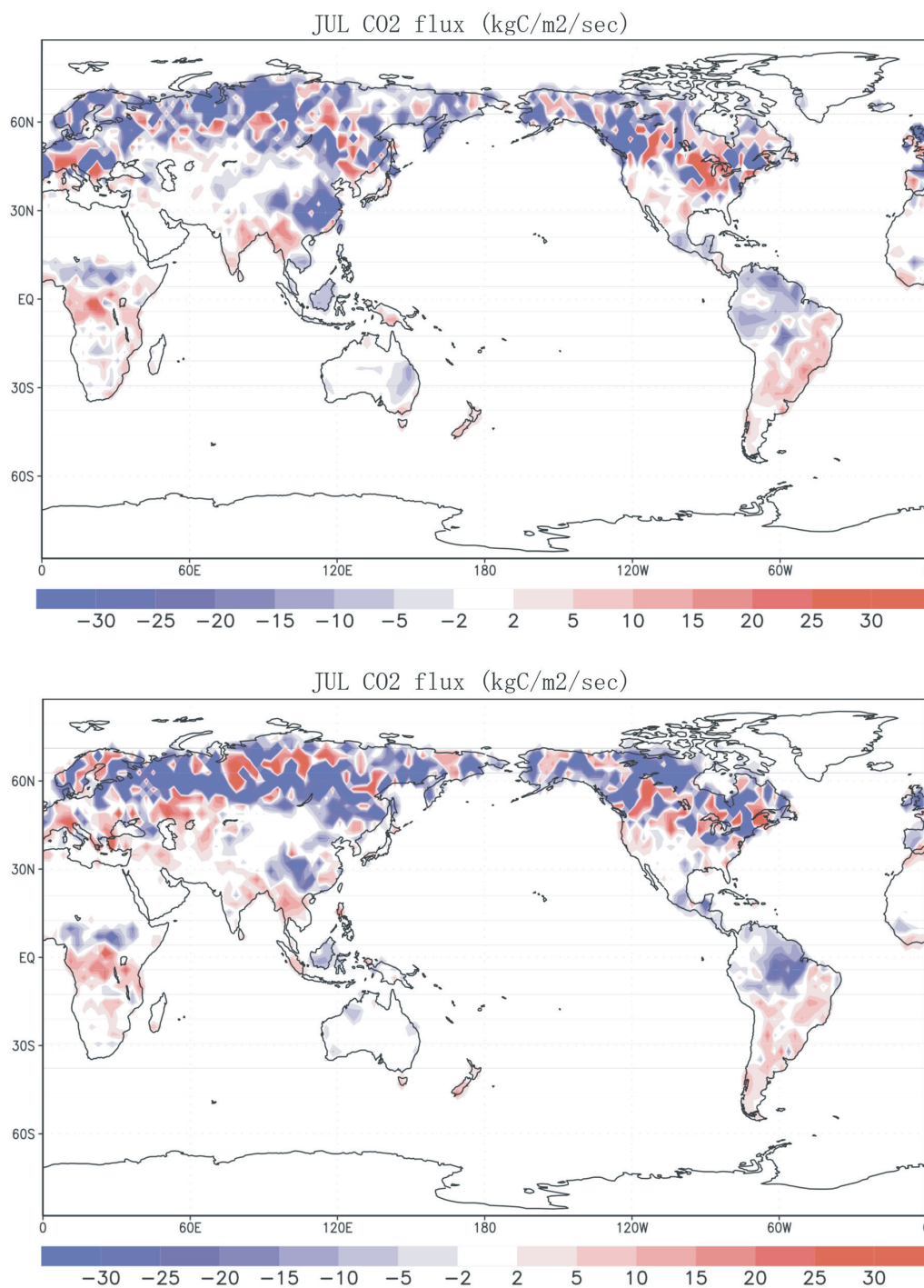


図 7 : データ同化後に修正された二酸化炭素地表面フラックス7月の気候値。上部は修正後のフラックスA、下部は修正後のフラックスBである。

図 5 を見る限り、二つのフラックスに大きな差はないが、中東などの一部の地域では差が見られる。これらの違いが影響するため、図 6 の二酸化炭素分布にも差が見られる。また、同化後に得られるフラックスも大きく異なっており、本システムでは、使用するフラックスに大きく依存しているように思われる。さらに詳しく依存性を検証するために、

$$B = \frac{\sum \sqrt{(Flux_{(MRI)} - Flux_{(JAMSTEC)})^2}}{Num} \tag{12}$$

という値を導入する。この値は二つのフラックスがどれだけ似ているかを表す値となっている。同化前と同化後のフラックスにおいてこの値を計算し比較する。理想的な同化実験であれば、同化前の値に比べて同化後の値の方が小さくなる。表2に7月と10月におけるBの値を示す。どちらの月も同化後の値が同化前に比べ2倍以上になっているのがわかる。これより、本同化システムは使用するフラックスに大きく依存していることが明らかになった。詳しい理由はまだわからないが、何らかの非線形の効果働いている可能性が高い。今後、その原因を解明するとともに、より安定したデータ同化システムの構築を目指していきたい。

表2：データ同化前と後における7月と10月のBの値

	JUL	OCT
Before D.A	1.59	1.27
After D.A	3.72	2.82

#### 4 まとめ

地上観測、衛星観測により得られた二酸化炭素濃度データを用いてデータ同化実験を行った。地上および衛星観測データを用いた同化実験では、地表面の二酸化炭素濃度分布をより現実的な値に修正することができた。特に衛星観測データを使用した場合は、広範囲にわたり大きく修正することが可能である。また、異なるプラットフォームの観測データを組み合わせることで、より効果的に二酸化炭素濃度と地表面フラックスを修正できることが確認できた。これらより、現在使用可能なGOSATデータはデータ同化実験において大変有意義なものであることがわかる。しかし、その詳細な影響については詳しく理解されていないことから、更なる検証が必要である。現在のデータ同化システムでは、使用する地表面フラックスに大きく依存していることもわかった。リモートセンシング技術の発展により観測範囲や観測数は増加したものの、理想的なデータ同化実験を行なうにはまだ不十分である。次世代の衛星観測技術に期待すると共に、観測情報を活かせる様な同化システム構築し、二酸化炭素のフラックス推定や実況監視に貢献していきたい。

#### 5 謝辞

本研究を進めるにあたり、眞木貴史氏（気象研究所）と宮崎和幸氏（海洋研究開発機構、オランダ王立気象局）に有益なご指導とご協力を頂いた。ここに謝意を表す。また東北大学サイバーサイエンスセンターの並列コンピューターを利用することにより実現することができた。

#### 6 参考文献

[1] IPCC, 2007, Climate Change 2007; The Physical Science Basis.  
 [2] Miyoshi et al, 2007, Local ensemble transform Kalman filtering with AGCM at T159/L48 resolution : Mon. Wea. Rev., vol 135, 3841-3861.  
 [3] Maki et al, 2010, New technique to analysis global distributions of CO2 concentrations and fluxes from non-processed observational data : Tellus B, 62B, 797-809  
 [4] Miyazaki et al, 2011, CO2 fluxes estimated with satellite, aircraft, and surface observations an ensemble-based 4D data assimilation system : JOURNAL OF

GEOPHYSICAL RESEARCH

[5] Ogi et al, 2007, The JRA-25 Reanalysis : J. Meteor. Soc. Japan, 85, 369-432.