

201 (炭素循環；大気輸送モデル；データ同化)

## 4. データ同化と大気輸送モデル

眞 木 貴 史\*

### 1. はじめに

地球温暖化の予測精度向上のためには、フィードバック過程も含んだ炭素循環過程の理解が必須であるため、生態系モデルを含んだ地球システムモデルの構築が不可欠である。しかしながら、現状では人為起源二酸化炭素放出量を固定したシナリオにおいてさえ、地球システムモデルによって予測された大気中の二酸化炭素濃度はモデルによって大きな違いがあり、このことが将来の気温上昇量予測のばらつきを生む大きな要因の一つとなっている。生態系モデルの精度向上のためには検証として用いる二酸化炭素収支データが必要である。現在、様々な機関が二酸化炭素収支の直接観測を行っているが、これらの観測データを現在の比較的粗い（数十～数百 km）生態系モデルの格子点値と直接比較することは難しい。

二酸化炭素は大気中で安定であり、大気に放出され

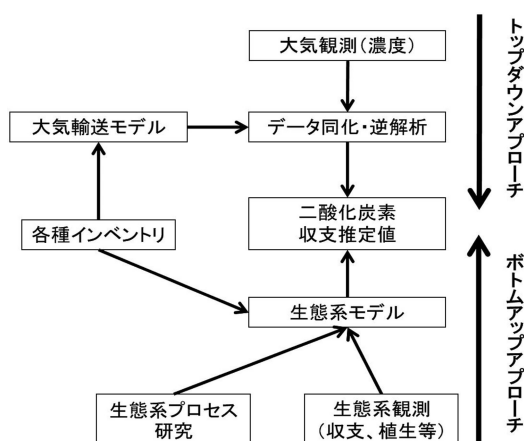
た後は大気と共に輸送されていく。このため、大気中における二酸化炭素濃度観測データ（結果）と大気による輸送過程をシミュレートする大気輸送モデル（過程）を用いることによって、原因である二酸化炭素収支を推測することが可能である。この方法は、まだ二酸化炭素収支に関する理解が二酸化炭素濃度や輸送に対する理解と比べて不十分という点からも合理的である。このようなアプローチはトップダウンアプローチと呼ばれており、炭素循環の分野でこの10年程度の間急速に進展してきた。逆にプロセス研究から生態系モデルを構築して二酸化炭素収支を解明しようとする方法をボトムアップアプローチと呼ぶ（第1図）。

トップダウンアプローチを用いた炭素収支の解析を高度化することによって各地域におけるより詳細な炭素収支を監視・解明し、先に挙げた生態系モデルの改良を通じた地球温暖化予測精度の向上や、今後生じる可能性がある生態系における炭素収支の急激な変動等の早期検出等に活用することができる。加えて、トップダウンアプローチによって離散的な観測データを空間的・時間的に一様かつ一定の品質の格子点データに

\* 気象研究所 環境・応用気象研究部。

tmaki@mri-jma.go.jp

© 2014 日本気象学会



第1図 トップダウンアプローチとボトムアップアプローチの概念図。

変換することも可能となる。このようにして得られた格子点データは社会への還元は勿論，気候研究，リモートセンシング観測データの評価やリトリバー処理等にも利用できる。本稿では，トップダウンアプローチで炭素収支を解析する際に必要な大気輸送モデルとデータ同化手法について経緯，現状と今後の展望について述べる。

## 2. 大気輸送モデル

1章で述べたように，二酸化炭素は安定で寿命が長く，大気による輸送のみを考慮すればよいため，大気輸送モデルとしては取り扱いやすい対象である。1990年代頃より二酸化炭素やラドン等の複雑な化学過程を含まない大気輸送モデルの開発が行われるようになり，いくつかのモデル相互比較実験が行われた(Law *et al.* 1996; Rasch *et al.* 2000)。当時は計算機資源の制約などもあり，大気輸送モデルの水平解像度は $2.5\sim 10^\circ$ で，多くのモデルが一定時間間隔の気象データを元に輸送計算を行うオフラインモデルであった。

最近の炭素収支逆解析の相互比較(Peylin *et al.* 2013)では，大気輸送モデルの水平解像度が $1\sim 5^\circ$ になり，大気モデルと結合したオンラインモデルも増加傾向にある。

大気輸送モデルの進歩は解像度の向上のみではなく，大気モデルと結合しつつ移流過程に関しても質量保存や高速演算が可能なスキームが実装されつつある。しかしながら，まだ大気輸送モデルが完成の域に

達しているというわけではない。その最大の未解明分野の一つが鉛直輸送過程である。特に，積雲対流による鉛直輸送や境界層高度が影響するとみられる接地境界層における混合は，昼夜の植生による光合成/呼吸活動による二酸化炭素収支コントラストも加わって大気輸送モデルの二酸化炭素濃度の鉛直勾配再現性にとって大きな問題となっている。航空機観測データを用いた比較研究が行われたりしているが(Stephens *et al.* 2007)今後の大きな課題の一つである。

## 3. データ同化手法

この章では，炭素収支解析でよく用いられるデータ同化手法として，ベイズ統合逆解析(逆解析)とアンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)について紹介する。

逆解析は先に述べた二酸化炭素の性質を利用し，大気中の濃度観測データと大気輸送モデルを用いて全球を数十～百程度に分割した領域毎の二酸化炭素収支を計算する方法である。この際，濃度観測データ( $\mathbf{y}$ )は領域毎の二酸化炭素収支( $\mathbf{x}$ )とある領域からのみ二酸化炭素を放出した際(タグ付き輸送実験)にその観測所に与える寄与( $\mathbf{A}$ )の線形結合で表現できるという前提を置く。

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (1)$$

式(1)はこの前提を行列式で表現したものである。式(1)が成り立つなら $\mathbf{x}$ は $\mathbf{A}$ の逆行列(行列の次元にもよるが)に $\mathbf{y}$ を掛けることによって得ることができる。しかしながら，このようにして得られた $\mathbf{x}$ は極端な値を取るなど不自然な振る舞いをすることが多い。その理由は大気輸送モデルの誤差や空間代表性(一般に二酸化炭素濃度観測値は極めて高精度である)誤差に起因すると考えられる。このため，先験情報として各領域の二酸化炭素収支に関する独立した情報 $\mathbf{x}_p$ を導入して次の評価関数 $S(\mathbf{x})$ を最も小さくする $\mathbf{x}$ を求める方法が考案された。

$$S(\mathbf{x}) = (\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x})^T \mathbf{C}_y^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x}) + (\mathbf{x}_p - \mathbf{x})^T \mathbf{C}_{x_p}^{-1} (\mathbf{x}_p - \mathbf{x}) \quad (2)$$

ここで， $\mathbf{C}_y$ は観測誤差を， $\mathbf{C}_{x_p}$ は先験情報の誤差を示す。式(2)の右辺第1項は観測データとモデルによって計算された濃度の差を示し，右辺第2項は先験情報と解析したフラックスの差を示す。この和が最小となるということは，観測データとも大きく離れずかつ先

験情報からも近い自然な解  $x$  を得ることができる (Tarantola 1987)。

逆解析の解析精度は、与える観測データの質・量と大気輸送モデルの精度に大きく依存する。そこで、観測データや領域の分割法を固定してモデルの違いによる炭素収支解析結果の差を評価することによって現時点での炭素収支解析精度を評価しようという試みがなされた。これが地球圏-生物圏国際協同研究計画 (IGBP) 等の主催で1993年より開始された大気トレーサ輸送モデル相互比較実験 (TransCom) である。

TransCom 1 と 2 では大気輸送モデルのシミュレーション結果の比較が行われた。TransCom 3 では世界から10以上のモデルの結果が集められ、Level 1 では年平均の二酸化炭素収支結果の評価が行われ (Gurney *et al.* 2002など)、Level 2 では月平均の評価 (Baker *et al.* 2006など) が行われた (第2図)。これらの実験条件、モデル結果や解析結果は Web で広く公開されており (<http://transcom.project.asu.edu/> 2014.7.17閲覧)、モデル結果を用いた様々な研究もなされている (Stephens *et al.* 2007など)。近年では、各機関による最新の大気輸送モデルと解析手法を用いて行った炭素収支解析結果の相互比較 (Peylin *et al.* 2013) も実施されており、炭素収支の不確実性低減への試みが続けられている。

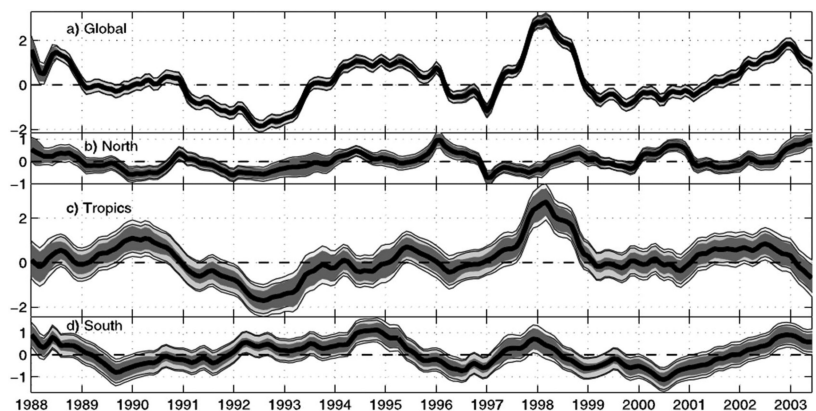
次に、近年研究の進展が著しいアンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) によるデータ同化について紹介する。

これまでに述べてきた逆解析は、現時点では亜大陸規模 (約数千 km) の月平均程度の炭素収支を解析することができる。これは入手できる観測データ (地点) 数にも依存しているが、計算機資源の制約も大きい。気象庁が毎年情報を提供している二酸化炭素分

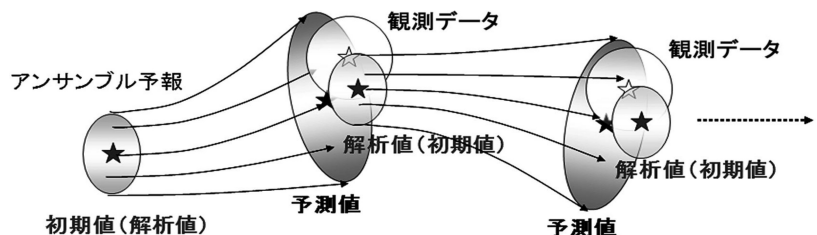
布情報 ([http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/info\\_kanshi.html](http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/info_kanshi.html) 2014.7.17閲覧, Maki *et al.* 2010; 全球22領域, 解析期間1985~2012年, 観測地点数約150地点) では、式(1)の行列次元数は概ね50,000×10,000であり、この次元数は観測地点数と領域分割数に比例し、解析期間の2乗に比例して大きくなる。このため、計算負荷を減らすための工夫 (例: 解析期間を区切る) などを行っている機関もある。

一方、EnKF では、初期値に対して微小な摂動を与えた初期値を一定数 (数十~数百) 用意し、各初期値から大気輸送モデルによるシミュレーションを行い、そのばらつきを得る。このばらつきを予報誤差と見なして観測データを導入 (同化) することによって新たな初期値とその摂動を得る。この繰り返しによって解析を進めていく (第3図)。

EnKF の大きなメリットとしてはまず計算機資源への負荷が挙げられる。先に述べた逆解析では、解析期間の2乗に比例して行列次元数が増大して計算機への負荷がかかる。これまでの研究結果によると、EnKF は気象解析のように自由度が極めて大きいと考えられ



第2図 全球、北半球、熱帯、南半球における二酸化炭素収支変動。太線は平均を、網掛けはモデル間のばらつきを示す (Baker *et al.* 2006)。



第3図 アンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) の概念図。

る系においても局所化（離れた場所の間の誤差相関を強制的に0とする）と大気力学系の性質（局所低次元性）により数十～数百程度のアンサンブル数で予報誤差の情報を効率的に表現できる（三好 2005）。このことは、領域分割数に比例して大気輸送モデルの計算量も増える逆解析と比較して大きなメリットといえる。また、逆解析では解析対象（今回は二酸化炭素収支）と観測データ（今回は二酸化炭素濃度）の間に大気輸送モデルを介した線形関係（式(1)）を仮定する必要があったが、EnKF では気象解析でよく用いられている4次元変分法（本稿ではこの手法の詳細には触れない）と同様に解析対象と観測データが非線形の関係にあってもデータ同化を行うことが可能である。このメリットは大きく、今後の炭素循環解析研究を展望するにあたって大きな利点となり得る。

また EnKF には、4次元変分法を用いる際には必須となる接線形モデルやアジョイントモデルが不要のため、データ同化システムの維持開発コストを大きく削減することができる。この利点は、特に大気化学種など複雑な化学反応過程を持つ物質に対しては大きな長所となり得る。

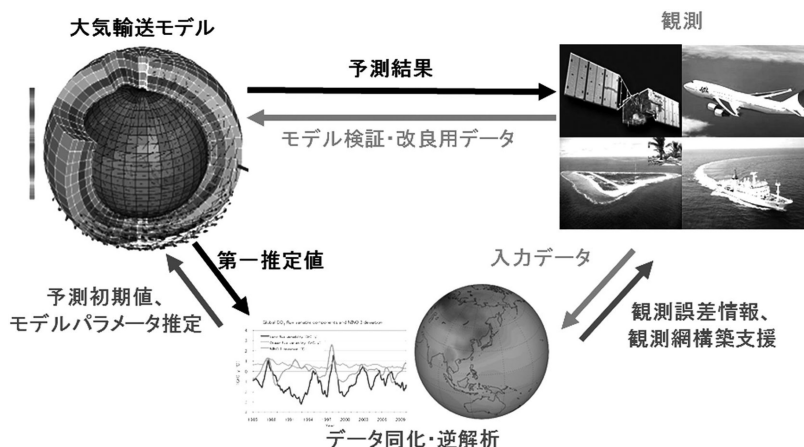
現時点での EnKF を用いた二酸化炭素データ同化研究は疑似観測データを用いたものや（Miyazaki *et al.* 2011；Kang *et al.* 2012など）、実観測データを用いた例としては米国地球システム研究所（ESRL）が毎年発表している Carbon Tracker（CT, Peters *et al.* 2007）が挙げられる。CT では地上、タワー、航空機観測データと大気輸送モデル（TM5）、EnKF を用いて週単位で全球約200程度の領域（陸域で細かい）における二酸化炭素収支等を公開している（<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/carbontracker/> 2014.7.17閲覧）。

今後の展望としては、観測データの質・量の充実に伴い、炭素収支解析の時間・空間解像度を高めていくことが考えられる。また、データ同化手法の長所である観測データと非線形の関係にある解析対象も解析可能であるという利点を生かしていくことが望まれ

る。具体例としては、大気輸送モデルに陸上や海洋の生態系モデルを組み合わせ、生態系モデルの鍵となるパラメータについて観測データを同化することによって動的に推定するといった研究が考えられる。これはトップダウンアプローチとボトムアップアプローチを融合するものでもあり、すでにこの研究に取り組み始めている研究機関もある。また、二酸化炭素と一定の相関関係を持つ化学種や気象要素を同時にデータ同化することによって、観測データの不足を補いつつ精度を向上できる可能性もある。

#### 4. おわりに

本稿では、地球温暖化予測における不確実性の大きな要因の一つである炭素収支研究について、主にトップダウンアプローチの観点からこれまでの経緯、現状、今後の展望について紹介した。今後予想されている二酸化炭素濃度増加に対して自然界がどのように反応するかはまだ明らかではない。炭素循環のプロセスを理解して将来予測をより確かなものとするのと同時に、将来起こる可能性がある自然界における炭素収支の急激な変化をいち早く検出できる体制を構築するためにも炭素収支監視システムの構築が急務である。今後は、前章で紹介したトップダウンアプローチとボトムアップアプローチの融合が大きな課題となると考えられる。このような融合型の炭素収支監視システムを構築するには、観測データの質・量の充実、生態系モデルも含めた大気輸送モデルの高精度化に加え、この両者の架け橋となるデータ同化手法を高度化することも重要である（第4図）。この研究の実現には多大な



第4図 観測、大気輸送モデル、データ同化・逆解析の関係図。



予算とマンパワーを必要とすることが容易に想像できるため、国を挙げた研究体制の整備が望まれる。

### 参 考 文 献

- Baker, D. F. *et al.*, 2006: TransCom 3 inversion inter-comparison: Impact of transport model errors on the interannual variability of regional CO<sub>2</sub> fluxes, 1988–2003. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **20**, GB1002, doi: 10.1029/2004GB002439.
- Gurney, K. R. *et al.*, 2002: Towards robust regional estimates of CO<sub>2</sub> sources and sinks using atmospheric transport models. *Nature*, **415**, 626–630.
- Kang, J. S., E. Kalnay, T. Miyoshi, J. Liu and I. Fung 2012: Estimation of surface carbon fluxes with an advanced data assimilation methodology. *J. Geophys. Res.*, **117**, D24101, doi:10.1029/2012JD018259.
- Law, R. *et al.*, 1996: Variations in modeled atmospheric transport of carbon dioxide and the consequences for CO<sub>2</sub> inversions. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **10**, 783–796.
- Maki, T. *et al.*, 2010: New technique to analyse global distributions of CO<sub>2</sub> concentrations and fluxes from non-processed observational data. *Tellus*, **62B**, 797–809.
- Miyazaki, K., T. Maki, P. Patra and T. Nakazawa 2011: Assessing the impact of satellite, aircraft, and surface observations on CO<sub>2</sub> flux estimation using an ensemble-based 4-D data assimilation system. *J. Geophys. Res.*, **116**, D16306, doi:10.1029/2010JD015366.
- 三好建正, 2005: アンサンブル・カルマンフィルタ. *天気*, **52**, 93–104.
- Peters, W. *et al.*, 2007: An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **104**, 18925–18930.
- Peylin, P. *et al.*, 2013: Global atmospheric carbon budget: results from an ensemble of atmospheric CO<sub>2</sub> inversions. *Biogeosciences*, **10**, 6699–6720.
- Rasch, P. J. *et al.*, 2000: A comparison of scavenging and deposition processes in global models: results from the WCRP Cambridge Workshop of 1995. *Tellus*, **52B**, 1025–1056.
- Stephens, B. B. *et al.*, 2007: Weak northern and strong tropical land carbon uptake from vertical profiles of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Science*, **316**, 1732–1735.
- Tarantola, A., 1987: *Inverse Problem Theory: Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation*. Elsevier, 613pp.