

解 説

二酸化炭素分布情報について

地球環境・海洋部 環境気象管理官 *
・気象研究所 **・神戸海洋気象台 ***

要 旨

気象庁は、地球温暖化の主要な原因物質である二酸化炭素の分布状況を監視するために平成 21 年 2 月より二酸化炭素分布情報の提供を開始した。本情報は、世界中の二酸化炭素濃度観測データを基に、国際的な相互比較プロジェクトで開発された逆解析手法と当庁が開発した二酸化炭素輸送モデルを用いて過去 20 年以上の二酸化炭素の月平均収支を解析して作成した、月平均の濃度情報である。本情報の作成に当たっては、従来同様な情報の作成の際に用いられてきたスムージングがかかった観測データではなく、WMO 温室効果ガス世界資料センターに報告されているのと同じ実観測値を用いていることやこれに付随した観測データの品質管理手法などに工夫がなされている。本稿は二酸化炭素分布情報の解析手法を述べるとともに、その精度評価などを記述している。本情報は南半球や海洋でおおむね 0.5 ～ 1.0ppm 程度の精度を有しているが内陸では若干精度が落ちる。今後は航空機観測データや衛星観測データの取り込み、解析手法の高度化を通じて本情報の高精度化を図る予定である。

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第 4 次評価報告書でも指摘されているように、二酸化炭素の収支（特に陸域吸収源）や炭素循環の正のフィードバック（気温の上昇に伴い、海洋や陸域の吸収能力が下がり、濃度がさらに上がる効果）についての理解が依然として不十分であり、この点が地球温暖化予測に大きな不確定性をもたらす要因の一つとなっている。また、国連気候変動枠組条約では、締約国による気候系の組織的観測を促進するとされており、我が国の「京都議定書目標達成計画」では、温室効果ガス、気候変動及び

その影響等を把握するための大気・陸域・海洋の総合的な観測・監視体制の強化に取り組むこととされている。

このような情勢を受けて、気象庁では平成 20 年度より二酸化炭素分布情報の提供を開始した。二酸化炭素分布情報とは、世界各地の二酸化炭素濃度観測データを元に、二酸化炭素の放出吸収量を解析する逆解析手法（以下、逆解析という。）と、当庁が開発した輸送モデルを用いて炭素循環の解析を行い、二酸化炭素濃度の格子点値を求めたもので、一般には毎月の濃度の地理的な分布図や任意の格子点の時間経過図などの形で提供して

* 池上 雅明・藤田 建・平原 隆寿・竹内 綾子・須田 一人

** 眞木 貴史

*** 森 一正

いる。本情報は、年に1回内容を追加・更新する。

炭素循環の解析においては、これまでに先駆的な研究が多数なされている。ただ、これまでの研究ではモデルへの入力値として米国海洋大気庁 (NOAA) の解析プロダクト GLOBALVIEW (NOAA, 2009) を用いる例が多い。GLOBALVIEW は、観測データの外挿・内挿処理等により観測期間がそろっており、データの品質管理もなされているため、そのままモデル解析に利用することができるが、その反面観測データの季節変動成分を低次の関数で近似しているため、関数では近似できない観測データの情報を解析に生かさない。そこで、本解析では二酸化炭素濃度観測データそのものを逆解析を用いて品質管理を行いつつ解析した。

本稿ではこの解析手法の概要と解析精度を確認するために行ったいくつかの実験手法・結果を示した後に、二酸化炭素分布情報の利用法について紹介する。

2. 解析手法

2.1 逆解析

ある領域での温室効果ガスの濃度は、その領域でのガスの排出及び吸収¹だけでなく、濃度の高い領域から気体が運ばれてくれば濃度が高くなるなど周辺からの輸送の効果もあわせて決まる。二酸化炭素分布情報は、観測された濃度が各領域からのフラックスと輸送による寄与の線形結合で表現できるという仮定を用いて解析する。ベイズ統合逆解析 (Enting, 2002) という手法を用いて求めた。この手法では、モデルシミュレーションに対する観測データの偏差と先験情報²との差で構成される評価関数が最も小さくなる各領域のフラックスとその共分散を推定する。つまり、観測データとのズレを小さくしつつ、これまでに得られた知見からも大きく外れない二酸化炭素フラックスを求めることになる。基本的な方程式系を以下に示す。

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{m1} & \cdot & \cdot & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

式 (1) において、 y_i ($i=1, \dots, m$) は解析に利用した全期間・地点の観測データ (月平均値) を示す。 x_i ($i=1, \dots, n$) は解析期間 (今回は 1985 ~ 2007 年) における各月・各領域の二酸化炭素フラックス (以下「領域フラックス」と呼ぶ。) である。 a_{ij} ($i=1, \dots, m, j=1, \dots, n$) はある月にある領域から放出された単位量の二酸化炭素フラックスが観測値に与える寄与の程度を示している。

この式から単に観測データとの差が最も小さくなるような x_i を求めると、観測データの代表性、領域フラックスの妥当性、輸送モデルの誤差等によっては非現実的な解が求まることがあるため、各領域フラックス x_i について、第一推定値とその不確かさという情報を与えた上で、以下に定める評価関数 $S(\mathbf{x})$ を最も小さくする各領域フラックス x_i を解として求める。

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

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_p + (\mathbf{A}^T \mathbf{C}_y^{-1} \mathbf{A} + \mathbf{C}_x^{-1})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{C}_y^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{Ax}_p) \quad (3)$$

これらの式における各変数の意味は以下の通りである。 $\mathbf{C}_x$ はフラックス第一推定値の誤差 (GtC/y), $\mathbf{C}_y$ は観測データの誤差 (ppm), $\mathbf{x}_p$ はフラックス第一推定値 (GtC/y), $\mathbf{y}$ は月平均二酸化炭素濃度観測値を示す。この式において、(2) 式の右辺第1項は観測値と解析値のずれを示し、第2項は各領域フラックスの第一推定値からのずれを示している。(3) 式は求める解 $\mathbf{x}$ を示している。この手法の長所としては、個々の観測データの持つ特色を最大限に引き出しつつ、全体としてより現実的な二酸化炭素フラックスが得られるという点

¹ 排出と吸収をまとめてフラックスと呼ぶ。大気への排出を正、吸収を負とする。

² 逆解析を行う際に、解が非現実的にならないようにあらかじめ与える情報。ここでは、各領域のフラックス推定値とその不確かさを与えている。

である。ただし、領域フラックスの推定値やその不確かさをあらかじめ適切に設定しておく必要がある。

この手法はデータを解析する際に4次元変分法などのようにアジョイントモデルを作成する代わりに各領域・月からの放出に対応した多数の輸送モデル計算を実施すればよいという手軽さから近年の多くの解析で採用されている (Baker *et al.*, 2006)。解析にあたっての基本的な設定は Baker *et al.* (2006) を用い、輸送モデルの実験に関しては TransCom 3 (Gurney *et al.*, 2000) を用いた。以下に、利用した観測データ、フラックス第一推定値、輸送モデルの概要を示す。

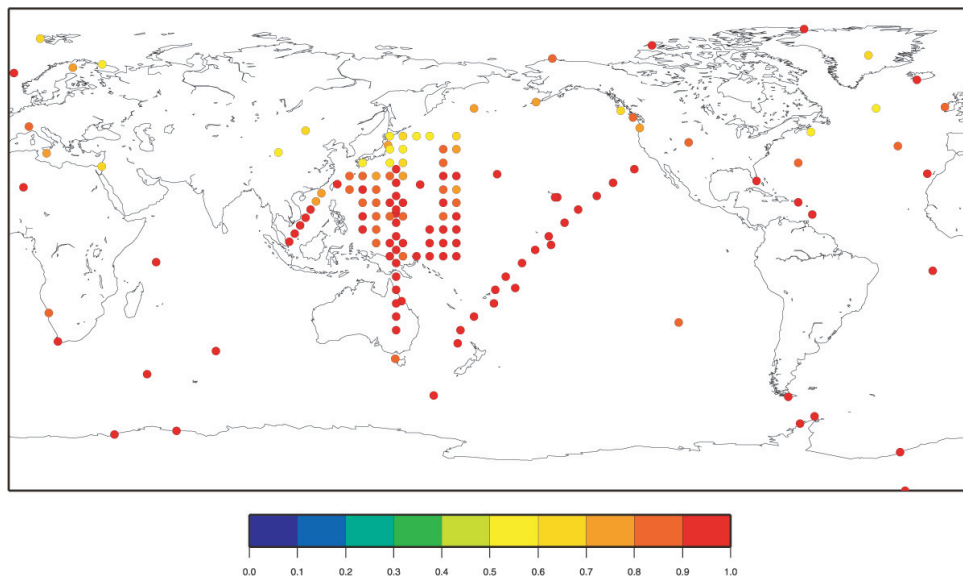
2.2 観測データ

データの利用許諾が得られた15機関による二酸化炭素濃度月平均値を解析の対象とした。船舶等の移動体による観測データは緯度経度5°間隔の月平均格子点データに集計し、地上の観測点と合わせて世界153か所のデータを用いた。移動体の観測データを格子点値にする際、実観測データのみから計算された月平均値を利用し、欠測など

で月平均値が計算できない場合に関しては、後述する観測データ不確かさを大きくすることによって実質的に解析から除外した。今後の観測地点数拡張にあたっては、世界気象機関 (WMO) の参照標準ガスとトレーサビリティの取れた³観測データのみを利用する。

観測データの不確かさは WDCGG が採用しているフィッティングカーブ (WDCGG, 2000) と観測データの差によって見積もる。このフィッティングカーブは、観測所ごとにトレンドと季節変動成分を求め、この両者を合わせたものである。フィッティングカーブを算出するだけの十分な連続観測期間のない観測所 (主に移動体観測) については、実測値とモデルの差などからあらかじめ観測データの不確かさを定めた。例えば西太平洋における気象庁の観測船には後述のとおり 0.6ppm を与えた。

船舶観測データ (第1図における日本付近の等間隔に並んだ観測点) については、上記のほかにも、以下のとおり特別な取扱いを行った。オリジナル観測データがイベント観測データ (観測時刻における瞬間値) であり、観測が行われた場所が



第1図 観測データ選別率

³ 大気中の微量成分の濃度を図る際には、精密に対象ガスの濃度が調整された標準ガスを用いる。標準ガスの濃度は精密に調整されているが、調整者や調整方法により、微妙に異なっているのが実状である。このため、標準ガス同士を比較し、相互の濃度の関係式が明確になっているものを「トレーサビリティが取れている」という言い方をする。

時刻によって変動しているため、経度・緯度 5° ごとの矩形領域を考えてまずはこの領域の観測データを単純平均して格子点の月平均値を求めた。不確かさについては、上述のフィッティングカーブを用いた手法を用いて求めることができないため、他機関の観測データの値などを参考に不確かさを一定値 (0.6ppm) とした。計算機負荷を考慮して、周囲に観測地点がないかつ観測期間 (1992 ~ 2007 年) の間に年に 1 個以上の観測データがある地点のみを今回は解析で用いることとした。

このようにして算出した観測データの不確かさは (2) 式の C_y に相当し、観測所の重みの逆数になる。つまり、不確かさが小さい観測所ほど解析に大きな影響を与えることになる。

観測データは、観測所別に利用するかしないかの判断を行っている。観測所のセレクションは二段階の手順から成る。まず、観測所ごとに、逆解析と実測値の差が基準を超える観測データを除外する処理を (Maki *et al.*, 2005), 除外される観測データがなくなるまで繰り返して、データが残っている割合をデータ選別率とする (第 1 図)。次に、データ選別率が 50% を超えている観測所のみを抽出する。こうして抽出された観測所における観測データで本解析を行う。観測データの選別率はおおむね海洋で良好であり、陸域で悪い傾向があ

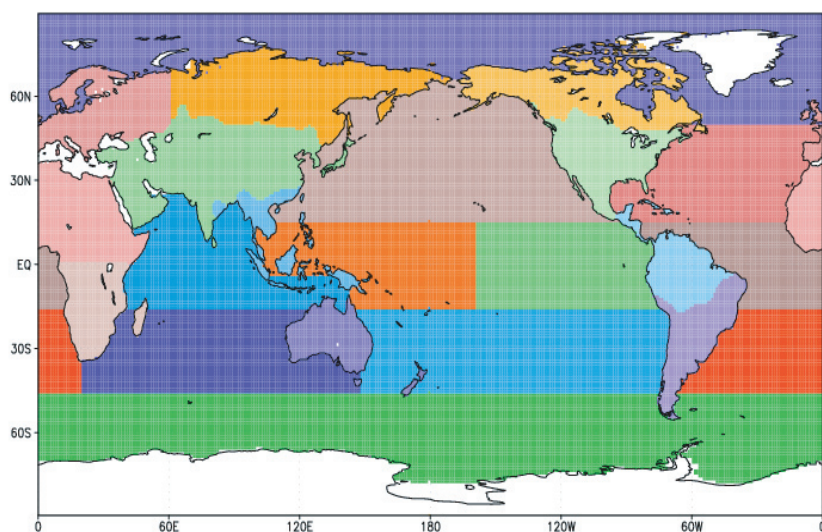
るが、これは後者でフラックスの変動が大きいことが原因と考えられる。

現在、航空機観測や衛星観測の観測データの取得が可能となりつつある。今後はこれらの観測データへの対応を進めていく必要がある。

2.3 逆解析手法

逆解析は Baker *et al.* (2006) の手法で行った。領域は当面 TransCom 3 (Gurney *et al.*, 2000) で採用された 22 領域 (第 2 図) に分割し、将来的に 64 領域などへの拡張を目指す。既知のフラックスとして、TransCom 3 で採用された化石燃料燃焼による放出 (1990 年, 1995 年) (Brenkert, 1998), 海洋フラックス (Takahashi *et al.*, 1999), 陸上生態系フラックス (CASA モデル, Randerson *et al.*, 1997) を採用する。これらの既知フラックスで表現できない年々の変動を各領域のフラックスとして割り当てる。化石燃料燃焼放出量に関しては、エネルギー利用の統計値等に基づいた年ごとの全球放出量 (Marland *et al.*, 2004) を使い、地理的分布は 1990 年以前は 1990 年のデータ, 1995 年以降は 1995 年のデータ, その間是一次内挿した値を用いる。以上のような既知フラックスで表現できない濃度変動を、各領域のフラックスとして割り当てていくこととなる。

あらかじめ求めておく領域フラックスの第一推



第 2 図 領域分割図 (TransCom に準拠)

定値は基本的にゼロとし、第一推定値の不確かさ（誤差幅）は TransCom のデータを用いた。また、既知フラックスの不確かさをゼロとしたことから、統計値では表現しきれない人為起源の化石燃料放出量の年々の変化も各領域のフラックスの変動として解析される。

将来は、本庁海洋気象課で開発中の海洋フラックス解析値や気象研究所で開発中の地球システムモデルの海洋・陸域炭素循環モデルの二酸化炭素フラックスなどの知見の導入を検討する。

2.4 輸送モデル

輸送モデルとして、気象庁が開発した二酸化炭素輸送モデル（CDTM, Sasaki *et al.*, 2003）を用いる。水平解像度は 2.5° 、鉛直層数は 32 で移流、拡散過程を備えたオフラインモデルである。CDTM は、TransCom に参加した 12 の輸送モデルのうち、航空機観測データから得られた二酸化炭素濃度の年平均鉛直プロファイルとの差が少ない 3 つのモデルのうちの一つとされている (Stephens *et al.*, 2007)。

気象データとしては、気象庁・電力中央研究所による 6 時間ごとの再解析値 (JRA-25, Onogi *et al.*, 2007) と、同じ手法で継続されている解析値 (JCDAS) を用いる。TransCom では、各参加機関が独自に選択した特定年の気象データを毎年繰り返し用いて輸送計算を行っていたが、本解析では、実際の年の再解析データを用いて輸送計算を実施した。輸送モデルに関しては、より詳細な輸送過程をシミュレートするため、現在 CDTM の気象研究所・気象庁全球モデル (MRI-JMA98) への統合作業を進めている。これによって、MRI-JMA98 で計算するあらゆる要素を時間・空間内挿をすることなく輸送モデルで利用できるため、精度の向上が期待できる。将来はこのモデルへの移行を図る予定である。

3. インパクト実験

3.1 実験目的と方法

前節で述べたように、二酸化炭素分布情報は、濃度の観測値として WDCGG に報告されているのと同じ実観測値を使ったこと、気象データとして気候値ではなく長期再解析による実際の年月のデータを使ったことに特色がある。これらの効果を確認するため、ある地点の観測データの有無と年々変化する気象データの導入に対する二つの感度実験をそれぞれ行った。ここで、前項で示した手法を用いた解析を CNTL と呼ぶ。

まず、年々変化する気象データの導入が解析に与える影響を評価するために、解析全期間にわたって前項で作成した気候値 (1985 ~ 2004 年の 20 年平均値) を用いた実験を行った (CLMT)。また、特定年 (1997 年, 1998 年, 1999 年, 2000 年, 2001 年) の気象データを繰り返し用いた解析も併せて行った (Y1997 ~ Y2001)。この気象データに関する実験に関しては、気象データの差異が観測データ選別に与える影響を除くために、いずれの実験においても観測データとして 2.2 節の観測データを用い、前に述べた観測所選別は行っていない。

次に、ある地点の観測データの有無が解析に与える影響を評価するための実験を実施した。ここでは、CNTL から、代表的な 5 か所 (綾里, 南鳥島, 与那国島, アイスランド, イースター島) の観測データを抜いた実験と、船舶観測データを抜いた実験をそれぞれ実施した。

3.2 実験結果

気象データの違いが解析結果に与える影響を図る指標として、全期間、全地点における解析値と観測値の差の標準偏差を用いた。各実験における差の標準偏差は第 1 表のとおりとなった。

第 1 表を見ると、解析値と観測値の差は、気候値 (CLMT) を用いた場合に最も小さく、再解析

第 1 表 気象データの違いによる解析値と観測値の差

気象データ	CNTL	CLMT	Y1997	Y1998	Y1999	Y2000	Y2001
差の標準偏差 (ppm)	0.55	0.54	0.61	0.66	0.65	0.61	0.61

データを用いた場合 (CNTL) は CLMT よりも少し大きい。特定年の気象データを用いた場合は特定年の選択によって大きく異なるが、平均値は 0.63ppm であり CNTL や CLMT よりも大きくなる。よって、特定年の気象データを使うよりは今回のやり方又は気候値を使う方が、解析値と観測値が近くなる。気候値を使った方がこの差がより小さくなることに関しては、以下の原因が考えられる。現在の輸送モデルでは、鉛直輸送の誤差が水平輸送の誤差と比較して大きいといわれている。今回、気候値による輸送結果を用いることによって、輸送モデルの鉛直輸送が平均化されたため、個々の年の気象場を用いた場合よりも相対的に現実との差が小さくなった可能性が考えられる。

次に、ある地点の観測データを除外した実験の結果について第 2 表に示す。

第 2 表を見ると、海洋や南半球では、観測所の除外にかかわらず解析値と観測値との差がおおむね 0.5 ～ 1.0ppm であることが分かる。また、観測所を除外するとどの地点においても差のばらつきが増大するが、周囲に観測所が比較的多い地点 (綾里、南鳥島) では差のばらつきの変化が小さ

く、周囲に観測所の少ない地点 (アイスランド、イースター島) では差のばらつきが大きく変化することが分かる。与那国島に関しては、周囲に観測所が比較的多いものの、陸上フラックスの影響を受けやすいことから、観測所の除外がフラックス推定に影響を与え、差のばらつきが比較的大きくなったと考えられる。

また、船舶観測データを除外した場合、解析値と観測値の差の標準偏差にほとんど差が見られなかったため、解析されたフラックスの標準偏差を比較した。これは、解析されたフラックスのばらつきを示し、この増減によって船舶観測データが解析値に与える影響を知ることができる。船舶観測を追加することによって熱帯インド洋でわずかに (0.2%) ばらつきが大きくなった以外はすべての領域でばらつきが小さくなった。全 22 領域のうち、船舶観測を追加することによってフラックス標準偏差が顕著に小さくなった領域を第 3 表に示す。

フラックス解析結果のばらつきは、船舶観測の追加により、近傍の陸域 (北米北部、東南アジア、温帯アジア) や観測データの少ない領域 (南米北部、ユーラシア北部) で顕著に減少した。

第 2 表 観測所を除外した場合のその観測所における解析値と観測値の差

除外観測所	綾里	南鳥島	与那国島	アイスランド	イースター島
除外しない場合 (差の標準偏差 : ppm)	0.673	0.336	0.531	0.568	0.499
除外した場合 (差の標準偏差 : ppm)	0.775	0.362	0.758	0.782	0.620

第 3 表 船舶観測を追加した場合のフラックス解析に与える影響

領域	北米北部	東南アジア	ユーラシア北部	温帯アジア	熱帯西太平洋	欧州
船舶観測による ばらつきの縮小率 (%)	5.7	4.9	4.7	4.7	3.8	3.3

4. プロダクトの利用

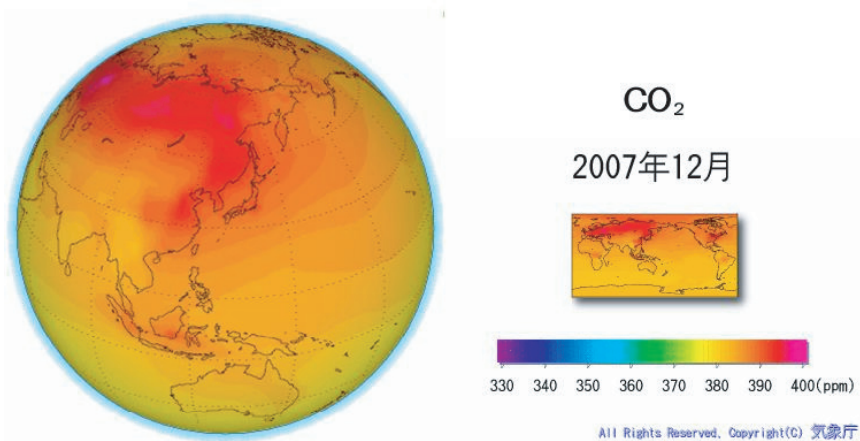
4.1 二酸化炭素濃度

二酸化炭素フラックスの解析結果と、逆解析を計算する際に使った輸送モデルの計算結果を組み合わせてることによって、二酸化炭素濃度の全球三次元分布を求めることが可能である（第3図）。これにより、これまで分からなかった二酸化炭素濃度の経度方向の差異を明らかにすることができ、炭素循環の解明に資するとともに、二酸化炭素の振る舞いに関する教育啓発資料として利用することができる。また、水平・鉛直方向に空間的に正しく全球平均した濃度を算出することが可能となる。二酸化炭素の全球平均濃度の推移は、地球温暖化対策策定や放射強制力算出のための基礎

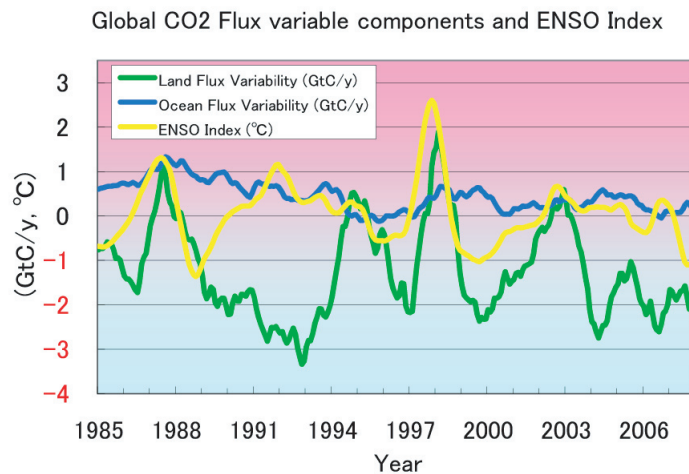
資料となりうる。なお、一般の啓発用として、第3図のような濃度分布図や濃度増加量分布図などを、2009年2月から気象庁ホームページで公開している。

4.2 炭素収支

逆解析からは、各領域の月平均二酸化炭素収支が算出できる。第4図は、二酸化炭素収支のうち、既知の放出・吸収（化石燃料燃焼、陸上生態系、海洋）を除いたものを示している。この結果は、炭素循環プロセスの解明、海洋・生態系の炭素吸収能力の監視・把握に貢献できると考えられる。第4図を見ると、特に陸域のフラックスとエルニーニョ監視指数との間に正の相関関係が見ら



第3図 二酸化炭素濃度図（2007年12月）



第4図 月平均の陸域、海洋二酸化炭素フラックスとエルニーニョ監視指数との関係
フラックスについては、既知のフラックスを除いた変動成分を示している。

れる。1990年代前半でこの関係が見られない理由としては、ピナツボ火山噴火の影響による気候変動が原因と考えられる。(気象庁, 2009)

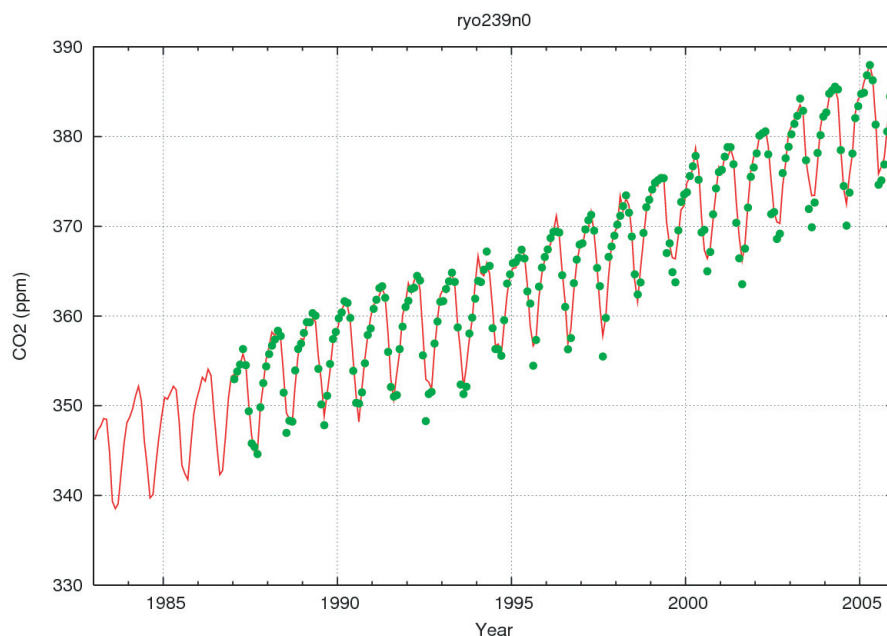
4.3 観測データ品質管理

世界の観測データを解析などに利用するためには、観測データや観測所の立地条件などの評価が必要となる。このように客観的な手法を用いて作成した温室効果ガス濃度解析値と実際の観測値を比較することによって、観測データの品質に問題がある可能性がある観測データ又は観測所の抽出に利用できる可能性がある(第5図)。また、同一の観測所についても、長期間のモデルによる解析結果と比較できることから、観測所周辺環境など観測にかかわる様々な条件の変化をとらえることができる可能性がある。

5. まとめと今後の予定

気象庁では、平成20年度に二酸化炭素分布情報の提供を開始した。この情報を作成するに当たって用いた手法は、世界的に広く使われているものを利用しているが、いくつかの点で当庁独自の拡張を試みている。主な拡張点は、長期再解析の気象データ利用、独自に開発した輸送モデルの利用、実観測データに対して独自の品質管理を施した上での利用、格子点化した船舶観測データの導入である。解析精度は、フラックスの変動が比較的小さい南半球や海洋においておおむね0.5～1.0ppm程度であり、フラックスの変動が大きな陸域ではこれよりも悪いと推定される。

環境気象管理官では、現在も観測データの取扱い、解析手法、輸送モデルなどに関する改良を進めており、良好な結果が得られた手法に関しては業務への導入を進めていく予定である。また、解析手法のうち独自に開発した部分については、別途科学的な審査を経た論文として発表することとしたい。



第5図 綾里における観測値(緑)と解析値(赤)の比較例

参 考 文 献

- Baker, D. F., R. M. Law, K. R. Gurney, P. Rayner, P. Peylin, A. S. Denning, P. Bousquet, L. Bruhwiler, Y. -H. Chen, P. Ciais, I. Y. Fung, M. Heimann, J. John, T. Maki, S. Maksyutov, K. Masarie, M. Prather, B. Pak, S. Taguchi, and Z. Zhu. (2006) : TransCom 3 inversion intercomparison: Impact of transport model errors on the interannual variability of regional CO₂ fluxes, 1988-2003, *Global Biogeochemical Cycles*, 20, GB1002, doi:10.1029/2004GB002439. (<http://www.agu.org/journals/gb/gb0601/2004GB002439/>, 2009 年 11 月 12 日参照)
- Brenkert, A. L. (1998) : Carbon dioxide emission estimates from fossil-fuel burning, hydraulic cement production, and gas flaring for 1995 on a one degree grid cell basis. (<http://cdiac.esd.ornl.gov/ndps/ndp058a.html>, 2009 年 11 月 12 日参照) .
- IPCC (2007) : Climate Change 2007. The Physical Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Forth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp.
- Gurney, K., R. Law, P. Rayner, and A.S. Denning (2000) : TransCom 3 Experimental Protocol. Department of Atmospheric Science, Colorado State University, USA, Paper No. 707.
- 気象庁 (2009) : 大気・海洋環境観測報告第 9 号 (2007 年 観 測 成 果). (<http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/cdrom/report2007k.html>. 2009 年 12 月 25 日参照.)
- Maki, T., K. Kamide and Y. Tsutsumi (2005) : Observational Data Screening Technique Using Atmospheric Transport Model and Inverse Model in Estimating CO₂ Flux History. Abstracts of Seventh International Carbon Dioxide Conference. (<http://icdc7.cmdl.noaa.gov/proceedings/abstracts/makiFF199.pdf>, 2009 年 11 月 25 日参照)
- Marland, G., T.A. Boden and R.J. Andres (2004) : Global, regional, and national CO₂ emissions, in Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA. (http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/em_cont.html, 2009 年 11 月 12 日参照)
- NOAA (2009) : GLOBALVIEW-CO₂, Cooperative Atmospheric Data Integration Project - Carbon Dioxide. NOAA ESRL, Boulder, Colorado. (http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/globalview/co2/co2_intro.html, 2009 年 11 月 25 日参照)
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira. (2007) : The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 369-432.
- Randerson J. T., M. V. Thompson, T. J. Conway, I. Y. Fung, and C. B. Field. (1997) : The contribution of terrestrial sources and sinks to trends in the seasonal cycle of atmospheric carbon dioxide. *Global Biogeochem. Cycles*, 11, 535-560.
- Sasaki, T. T. Maki, S. Oohashi and K. Akagi (2003) : Optimal sampling network and availability of data acquired at inland sites. *GLOBAL ATMOSPHERIC WATCH Report series*, 148, 77-79.
- Takahashi, T., R. H. Wanninkhof, R. A. Feely, R. F. Weiss, D. W. Chipman, N. Bates, J. Olafsson, C. Sabine and S. C. Sutherland (1999) : Net sea-air CO₂ flux over the global oceans: An improved estimate based on the sea-air pCO₂ difference. *Proceedings of the 2nd International Symposium CO₂ in the Oceans*, 9-15.
- WDCGG (2000) : WMO WDCGG DATA SUMMARY No.22, 気象庁, 東京, 84pp.