

地球表層の炭素の動きを探る

気象庁気象研究所地球化学研究部 研究官 丹羽 洋介

1. はじめに

地球温暖化は、気温の上昇や雪氷の融解、海面水位の上昇といった観測事実より、もはや疑う余地のない現在進行中の現象である。また、この温暖化現象は、人間活動によって温室効果ガスが大量に大気中に排出されていることによって引き起こされている可能性が非常に高い(IPCC 第4次評価報告書¹⁾)。

温室効果ガスの中でも、化石燃料を消費することで排出される二酸化炭素(CO₂)が温暖化の要因として大きなウェイトを占めているが、現在、この化石燃料消費によって排出されたCO₂の半分ほどを地球表層の海洋や陸域生態系が吸収し、温暖化の影響を緩和している。このような自然界によるCO₂吸収(場所によっては放出)が、気候変化に対してどのように応答しているかはまだよくわかっておらず、大気中のCO₂が、どこで、どのくらい放出・吸収されているかを定量的に見積もる必要がある。そのため、インバージョン解析(逆解析)とよばれる手法を用いた研究が行われているが、そのインバージョン解析について、本稿で簡単に紹介してみたい。さらに、インバージョン解析の精度向上に大きく貢献している日本の旅客航空機を用いた観測プロジェクト・CONTRAIL(Comprehensive Observation Network for TRace gases by AirLiner)についても紹介したい。

2. 気候-炭素循環フィードバックとCO₂濃度の自然変動

将来、温暖化が進行した環境下においては、気候-炭素循環フィードバックにより、温暖化が促進されると考えられている。気候-炭素循環フィードバックとは、気候が変化したことによって、海洋や陸域生態系の放出・吸収量が変化し、それがまた気候に影響を及ぼすことをいう。海水温が上昇すると、海洋に溶け込むCO₂量が減少するため、温暖化に正のフィードバックを与える。また陸域生態系では、主に、CO₂濃度増加による光合成量(CO₂吸収)の増加(施肥効果)と気温上昇による呼吸・有機物分解

(CO₂放出)の増加の、負、正の2つのフィードバックが存在する。温暖化によって気温が大幅に上昇すると、後者の正のフィードバックが前者の負のフィードバックを上回り、温暖化を加速させると予測されている。しかし、その予測の不確定性は大きく、IPCC 第4次評価報告書では、この気候-炭素循環フィードバックによって2100年までに追加的に増加するCO₂量は、20ppmから224ppmであると予測されている(IPCC SRES A2シナリオを用いた場合)。現在の平均的な大気CO₂濃度がおよそ390ppmで毎年1.5~2ppmずつ増加していることを考えると、この予測幅は非常に大きいことがわかるだろう。

ここで、現在までに大気中のCO₂がどのように変動しているかを見てみよう。図1は岩手県大船渡市綾里に設置されている気象庁大気環境観測所に

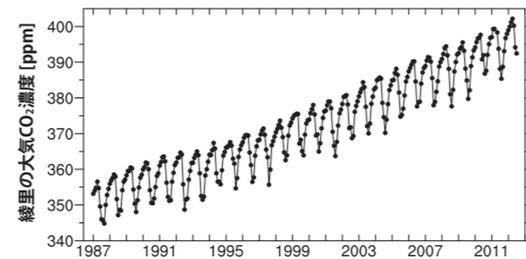


図1 岩手県大船渡市綾里の気象庁大気環境観測所において観測された大気CO₂濃度の月平均値の時系列。濃度データは世界気象機関(WMO)温室効果ガス世界資料センター(WDCGG: http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/jp/wdcgg_j.html)より取得。

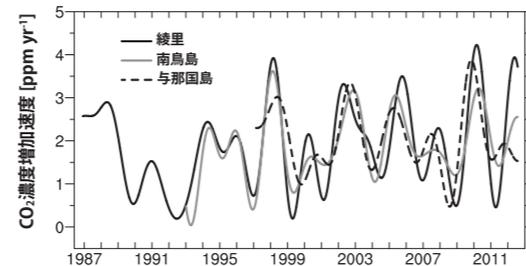
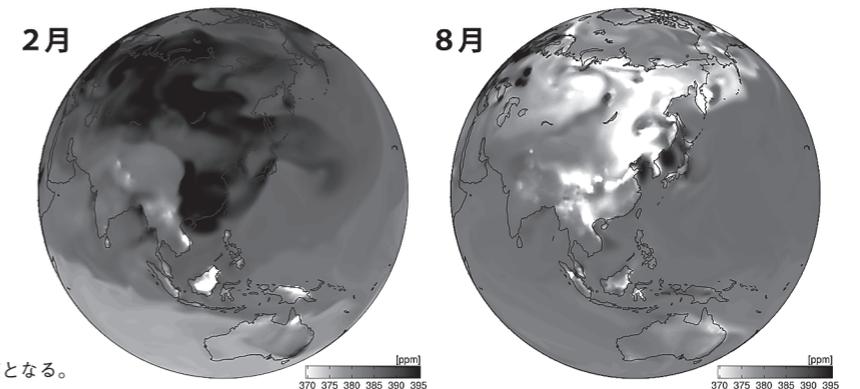


図2 綾里、南鳥島、与那国島の気象庁観測所において観測された大気CO₂濃度の増加速度。濃度データは世界気象機関(WMO)温室効果ガス世界資料センター(WDCGG: [http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg_j.html](http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/jp/wdcgg_j.html))より取得。

おける大気CO₂濃度の観測値である。これを見ると、観測開始時から現在に至るまで明らかな濃度増加が見られるが、これは化石燃料消費によるものである。一方、その増加トレンドに1年周期の濃度増減のサイクルが重なっているが、これは、主に陸域生態系が生み出した季節変動で、夏季の濃度低下は植物による光合成量が生態系の呼吸量を上回ったために起こったものである。大気中のCO₂濃度は、一見すると、これらの要因によって規則的に増加しているように見えるが、大気中に追加されていくCO₂の量(濃度増加速度)を見てみると、年によっては大きくて4ppm/yrもの大きな変動が見られる(図2)。人間活動による化石燃料起源CO₂の放出量は、例えば世界経済が急激に悪化したとしても(リーマン・ショックなど)、これほどのCO₂濃度の変動幅を引き起こすことはない。したがって、年々の濃度増加速度の変動は自然界のCO₂吸収量の変化によるものであるとわかる。これは、エルニーニョ現象や大規模な火山噴火によって引き起こされた気候変化に応答して、陸域生態系や海洋の吸収・放出量が変化した結果だと考えられている。しかし、これらCO₂吸収・放出の変化がどの地域でどの程度起こったかについては、よくわかっていない。

図2には綾里の他に与那国島、南鳥島の気象庁の観測所におけるCO₂濃度増加速度もプロットされている。これらをよく見ると、3地点におけるCO₂濃度増加速度の大まかな傾向は一致しているものの、変動の強度や位相に若干の差異が生じていることがわかる。これらの差異は、それぞれの観測所が、異なる地域のCO₂吸収・放出変動のシグナルを捉えているためである。インバージョン解析では、この大気CO₂濃度の差異から、放出・吸収源と各観測所間の大気の流れを考慮することによって、地域別のCO₂吸収・放出変動の情報を抽出している。

図3 大気輸送モデルNICAM-TMによってシミュレーションされた2月と8月の地上大気CO₂濃度の分布。色が濃いほど濃度が高いことを示す。北半球中高緯度では、冬に化石燃料消費や陸域生態系の呼吸によって高濃度となり、夏に植物の光合成によって低濃度となる。



3. インバージョン解析

実際のインバージョン解析では、天気予報で用いられているような大気モデルと呼ばれる数値モデルを使って大気の流れを計算している。以下にインバージョン解析について具体的に説明しよう。

天気予報の場合、ある大気の初期状態から物理法則にのっとって大気モデルは駆動されるが、インバージョン解析の場合は過去に起きた現象の解析を行うため、さらに実際の風向・風速などのデータも大気モデルに入力して、現実起きた大気の流れを再現し、物質の大気輸送計算を行う。ここではCO₂輸送の計算のために、化石燃料消費量に関する各国の統計データや衛星観測による植生活性度に関するデータ、船舶による海中のCO₂観測などをもとにして作成されたCO₂の放出・吸収量データ(初期CO₂放出・吸収量データ)を数値モデルにインプットする。すると、図3のような3次元のCO₂濃度分布とその時間変化が得られる。これを見ると大気中のCO₂濃度には、CO₂吸収・放出の時空間的な不均一性や大気の流れによって、大きな濃度勾配が生み出されていることがわかる。この大気モデルによるシミュレーションを実際に観測された大気CO₂濃度データと比較すると、ある程度の変動パターンは再現されているものの、季節変動の振幅や年々の増加速度といった値が正確に再現されていない場合がある。その最大の原因は、初期CO₂放出・吸収量データが現実を表すには不完全なものであることにある。実はこれらのデータは、観測の欠測を補うために長期のデータから算出された平均的なものであったり、そもそも観測が行われていない地域の放出・吸収量を、他の地域で観測された値を使って内挿して補ったものであったりする。

そこでインバージョン解析では、初期 CO₂ 放出・吸収量データを修正し、シミュレーション値が実際に観測された大気 CO₂ 濃度と整合的になるような CO₂ 放出・吸収量を地域毎、時間毎に求める。実際には、

$$J = \sum_{i=1}^N \frac{(O_i - S_i)^2}{r_i} + \sum_{j=1}^M \frac{(F_j - F_j^0)^2}{b_j}$$

で定義されるような J の値が最小となる CO₂ 放出・吸収量 F を数学的手法を使って解くことになる。ここで、 O は大気 CO₂ 濃度の観測値、 S は F から大気モデルを使って求められた O に対応する大気 CO₂ 濃度のシミュレーション値を表す。 r は各観測の重みである。 N は観測データの数である。一方、 F^0 、 b はそれぞれ初期 CO₂ 放出・吸収量データとその重みを表し、 M は求める CO₂ 放出・吸収量の数(地域数×時間数)である。右辺の第一項は観測とシミュレーション値の差の重み付き2乗和となっており、この値を小さくすることで、シミュレーションと観測の整合性が高められる。第二項は CO₂ 放出・吸収量の解析値 F と初期データ F^0 の差の重み付き2乗和となっており、この項を小さくすることで、解析値が初期データからかけ離れないようにしている。以上により求められる F には、大気 CO₂ 濃度の情報と初期データに含まれる情報が含まれることになる。

インバージョン解析で用いられる観測データは、時空間的にできるだけ均一になっていることが望ましい。しかし、現状では十分な情報が得られるほどの観測ネットワークは築かれていない。大気 CO₂ 濃度の測定は、高精度を求められるため、頻繁に人の手によるメンテナンスや校正作業が必要となっている。一方で、より広域の情報が含まれている代表性の高いデータを得るためには、都市部のような高 CO₂ 排出源が存在する地域を避けて、人があまり住んでいない地域(例えば離島や山岳地域など)で観

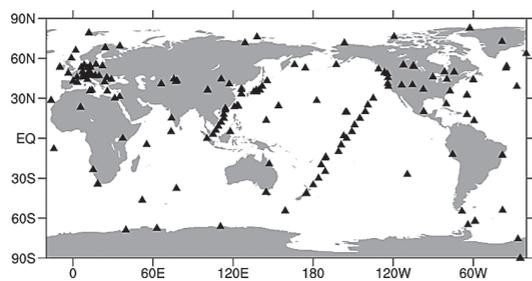


図4 大気 CO₂ 濃度観測の地上ネットワーク(位置データは WDCGG より取得)

測することが望ましい。そのため、観測所の設置・維持に非常にコストがかかり、図4に示すように観測ネットワークはまばらで、多くの観測空白域が存在している。このような地域の CO₂ 放出・吸収量は、インバージョン解析を行っても、十分な精度の解析値を得ることはできない。

4. 航空機観測プロジェクト CONTRAIL

前述のように地上に展開できる観測ネットワークは限られているため、航空機を用いた上空における CO₂ 濃度観測が行われている。一般的な航空機による大気観測は専用のチャーター機を使って行われるが、CO₂ 観測の場合、長期にわたって定期的に観測を実施する必要があり、多大なコストが生じる。そこで、定期旅客機を使った観測も行われている。

気象研究所と日本航空(JAL)、日航財団は、JALの日本-オーストラリア間の定期旅客便を使った西太平洋上空の CO₂ 濃度観測を1993年に開始し、現在も継続した観測が行われている²⁾。20年以上にわたって蓄積されているこの観測データは、エルニーニョに伴って生じた CO₂ 放出増加のシグナル



図5 (上)CONTRAILプロジェクトのロゴが塗装されたJALのボーイング777機。(下)ボーイング777機の前方貨物室の壁の中にCO₂高頻度観測装置が設置されている(CONTRAILホームページ <http://www.cger.nies.go.jp/contrail/> より)。

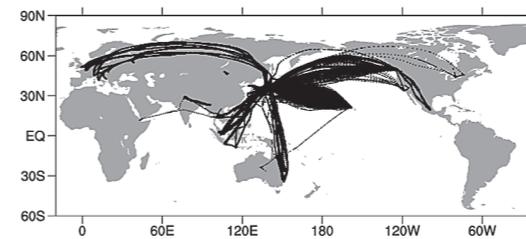


図6 CONTRAILプロジェクトにおいて2011年までに行われた大気 CO₂ 観測の観測航路

を捉えているなど、貴重な情報を有しており、長年、世界の研究機関で利用されてきた。

このJAL機による観測プロジェクトは、2005年に国立環境研究所、気象研究所、JAL、株式会社ジャムコ、日航財団が参加する共同研究プロジェクトCONTRAIL (<http://www.cger.nies.go.jp/contrail/>)として生まれ変わり、高頻度観測装置の搭載と観測航路の拡大によって(図5)、世界でも類を見ない広範な観測網が構築されている³⁾。この観測プロジェクトにより、2011年10月までに、のべ約6,000フライトにおいて、世界55空港での11,500件以上もの大気鉛直分布を含むCO₂濃度データが取得されている(図6)。このように空港が位置する様々な地域の上空でCO₂濃度の鉛直分布が得られているため、地上観測ネットワークでは捉えられなかった地球規模の大気CO₂輸送の動態が3次的に捉えられるようになってきた⁴⁾。さらに、このCONTRAIL観測データを使ってインバージョン解析を行うことにより、南アジアや東南アジアにおけるCO₂放出・吸収量の不確定性値が地上データのみを用いた時よりも30~60%程度軽減され、解析値 F の精度が画期的に向上するなど⁵⁾、CONTRAILプロジェクトは地球表層の炭素循環研究に大きなインパクトを与えている。

5. 今後の展望

今後のインバージョン解析は、2012年に完成したスーパーコンピューター「京」に象徴されるような飛躍的な計算機能力の発展によって、精度向上が期待されている。大気モデルの空間解像度は、計算機の能力が高ければ高いほど、高解像度にすることが可能となり、シミュレーション精度の向上が期待できる。さらに、 J 値の最小値探索においても、より計算コストがかかる高度なアルゴリズムを取り入れ

ることも可能となる。

一方、観測分野においても、新たな展開が始まっている。CONTRAILは2011年よりプロジェクトの第Ⅱ期が始まり、継続した観測が行われている。これにより、地上観測ネットワークでは捉えられていなかった自然界の放出・吸収量の気候変動に対する長期的な応答を捉えられると期待されている。また、日本では、CONTRAILプロジェクトの他に、2009年1月に打ち上げられた温室効果ガス観測技術衛星GOSAT(Greenhouse gases Observing SATellite, 愛称:いぶき)を使った大気CO₂濃度の観測も開始されており、時空間的に密なデータが得られ始めている。このように、日本の観測プロジェクトによる多大な貢献によってCO₂観測網は急速に拡大しつつあり、地球表層の炭素循環解明のさらなる進展に大きな期待が膨らんでいる。

参考文献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change (2007), In: *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- 2) Matsueda, H., H. Yoshikawa-Inoue, and M. Ishii (2002), Aircraft observation of carbon dioxide at 8–13 km altitude over the western pacific from 1993 to 1999, *Tellus, Ser. B*, 54, 1–21, doi:10.1034/j.1600-0889.2002.00304.x.
- 3) Machida, T., H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Nakagawa, K. Hirofumi, N. Kondo, K. Goto, T. Nakazawa, K. Ishikawa, and T. Ogawa (2008), Worldwide measurements of atmospheric CO₂ and other trace gas species using commercial airlines, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 25, 1744–1754, doi:10.1175/2008JTECHA1082.1.
- 4) Sawa, Y., T. Machida, and H. Matsueda (2012), Aircraft observation of the seasonal variation in the transport of CO₂ in the upper atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 117, D05305, doi:10.1029/2011JD016933.
- 5) Niwa, Y., T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, T. J. Schuck, C. A. M. Brenninkmeijer, R. Imasu, and M. Satoh (2012), Imposing strong constraints on tropical terrestrial CO₂ fluxes using passenger aircraft based measurements, *J. Geophys. Res.*, 117, D11303, doi:10.1029/2012JD017474.