

201 (温室効果気体；物質循環)

1. 大気観測に基づく地球規模炭素循環の研究

森本真司^{*1}・町田敏暢^{*2}・澤庸介^{*3}
石戸谷重之^{*4}・遠嶋康徳^{*2}・青木周司^{*5}

1. はじめに

人為起源の温室効果気体として最も重要な二酸化炭素 (CO₂) は、人間活動に伴う化石燃料消費・セメント製造と土地改変によって大量に大気中に放出されている。その結果、大気中の CO₂ 濃度は産業革命後の

約200年間で40%近く増加しており、温室効果の強化による気候変化が懸念されている。将来の気候変化による地球表層での炭素循環の変化に関する知見を得るために、まず現在の CO₂ 収支とその変動についての理解が不可欠である。

^{*1} (連絡責任著者) 東北大学大学院理学研究科大気海洋変動観測研究センター. mon@m.tohoku.ac.jp

^{*2} 国立環境研究所.

^{*3} 気象研究所.

^{*4} 産業技術総合研究所.

^{*5} 東北大学大学院理学研究科大気海洋変動観測研究センター.

© 2014 日本気象学会

地球表層での数十～数百年スケールの炭素循環を考えた場合、CO₂（炭素）リザーバーは大気と陸上生物圏と海洋である。人為起源 CO₂の放出量は統計値から、大気への残留量は大気 CO₂濃度観測から、それぞれ推定可能であるが、陸上生物圏および海洋による CO₂放出・吸収量とその分布・変動の推定は一筋縄ではいかず、これまで様々な観測・研究が行われてきた。しかし、未だ観測データが十分ではなく、不確実性を減少させるために更に広域にわたる観測データの蓄積が求められている。

本稿では、大気中の CO₂濃度の全球分布と変動を明らかにするために拡充されつつある大気観測の現状について、更に、大気中の CO₂濃度と関連大気成分の高精度観測を組み合わせる陸上生物圏と海洋による CO₂放出・吸収量を推定する研究について紹介する。

2. 大気中の CO₂観測の拡充

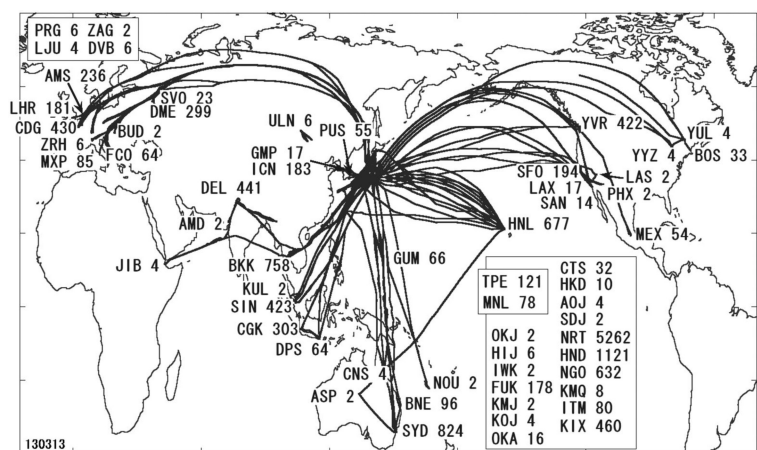
大気中の CO₂濃度の 3 次元の全球分布と経時変化を明らかにし、その放出源・吸収源に関する知見を得ることを目的として、系統的な CO₂濃度の時系列観測が各国の大学・研究機関によって維持されている。本稿では、船舶と航空機を用いた CO₂観測を紹介する。

日本-オーストラリア間、日本-北米間を定期的に往復する民間コンテナ船の協力により、大気採取法（容器に大気試料を採取し研究室に持ち帰って分析）による系統的な CO₂濃度観測が始まったのは1982年である。この観測は現在も継続されており、西部及び北部太平洋域における CO₂濃度の分布と変動について貴重な情報を提供している（Nakazawa *et al.* 1997）。観測結果から、CO₂濃度の増加は全球で一様ではないこと、また ENSO イベントに同期して CO₂濃度が急増していることが明らかになっている。現在では、日米英の研究機関が太平洋、大西洋域で民間商船を使用した大気採取を実施し、CO₂濃度および関連気

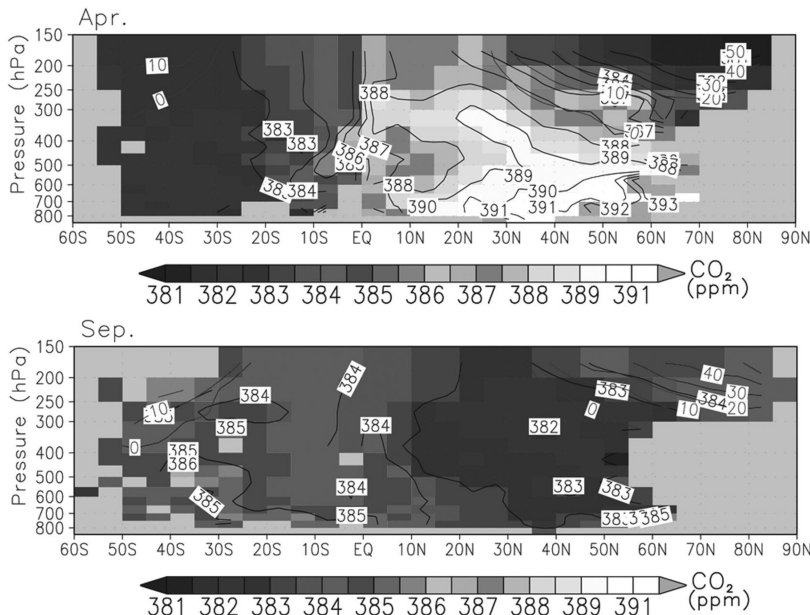
体成分の観測を行っている。更に国立環境研のグループは、2003年からオセアニア航路の民間商船に各種大気成分の観測装置を搭載し、CO₂濃度を含む温室効果気体の連続観測を実施している（Yamagishi *et al.* 2012）。

地上の CO₂放出・吸収の影響を直接受けない、ある程度混合された空間代表性の高い大気を観測する目的で実施されたのが、航空機を用いた大気採取法による CO₂観測である。世界で最も長期間継続している航空機観測は、1979年に開始され現在も継続している仙台沖の太平洋上空でのセスナ機及び仙台-福岡・札幌間での JAL（当時は東亜国内航空）機による観測であり（Nakazawa *et al.* 1993）、同様の航空機観測は、現在では北米上空、シベリア上空でも実施されている（町田ほか 2010: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/aircraft/> 2014.1.1閲覧）。

近年、対流圏の CO₂観測にブレイクスルーをもたらしたのは、2005年に環境研・気象研グループによって開始された CONTRAIL（Comprehensive Observation Network for Trace gases by Air-liner）プロジェクトである。これは、JAL 国際線旅客機に自動大気採取装置および CO₂濃度連続測定装置を搭載し、離着陸時および水平飛行中に CO₂濃度の連続観測と大気採取を行うものであり、現在 8 機のボーイング 777機に連続観測装置が、うち 4 機には大気採取装置も搭載されている。第 1 図に2005年から2013年3月の

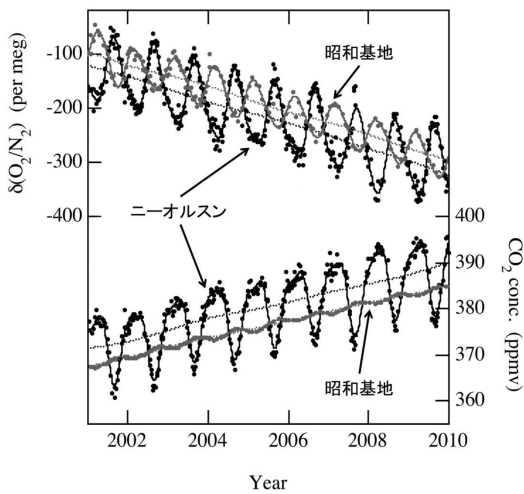


第 1 図 CONTRAIL プロジェクトでの観測ルートと離着陸空港・離着陸数（2013年3月現在）。



第2図 CONTRAIL プロジェクトで観測されたCO₂濃度の緯度・高度断面。上図が4月，下図は9月 (Sawa *et al.* 2012)。

半球対流圏下部の高CO₂濃度気塊が対流圏上部を通過して南半球に輸送されている様子や、北半球のCO₂濃度の季節変化が南半球に伝搬している様子が、まるでモデル計算値のように見事にとらえられている (Sawa *et al.* 2012)。CONTRAILによるCO₂濃度観測データと大気輸送モデルを用いた逆計算解析によって、アジア熱帯域におけるCO₂放出・吸収量の推定誤差が64%改善することが示されており (Niwa *et al.* 2012)、CO₂観測データの空白域を埋める重要な観測として注目されている。



第3図 ニーオロスンと昭和基地における $\delta(O_2/N_2)$ (上) とCO₂濃度 (下) の変動 (Ishidoya *et al.* 2012)。

3. 新たな炭素循環解析手法としての大気中酸素濃度及びCO₂同位体比の観測

CO₂濃度を使った逆計算解析による陸域・海洋のCO₂吸収量推定とは独立に、CO₂濃度と大気中の酸素(O₂)濃度あるいはCO₂の安定同位体比の同時解析から推定する試みがなされている。

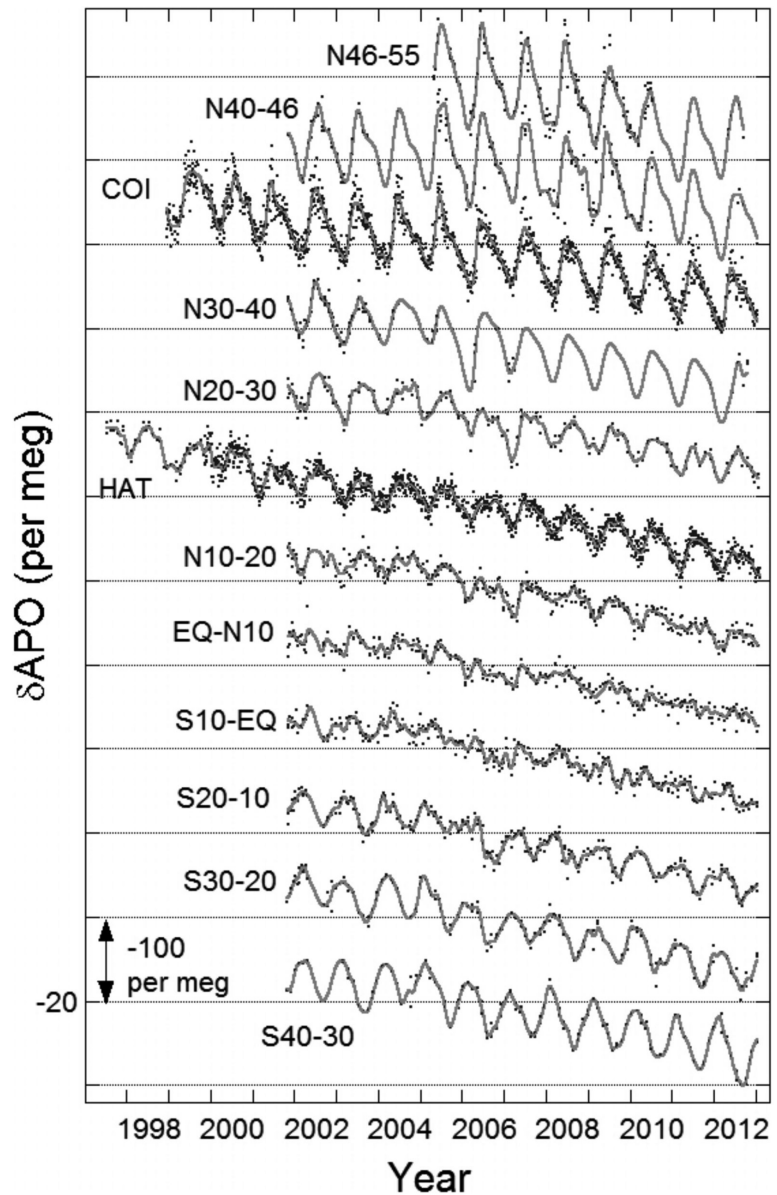
大気中のO₂濃度の変動はCO₂と密接に関連しており、化石燃料燃焼と陸上生物圏の呼吸・有機物分解によって大気中のO₂が消費されてCO₂が生成され、陸上生物圏が光合成を行うと逆にCO₂が消費されてO₂が生成される。一方、大気中のCO₂の一部は海洋に吸収されるが、この過程にはO₂は関与しない。これらのことを考慮して大気中のCO₂とO₂の収支を考えると、海洋と陸上生物圏による人為起源CO₂の吸収量を推定することが可能である。

第3図に、スバル諸島ニーオロスン (79°N, 12°E) と南極昭和基地 (69°S, 40°E) で観測された大気中の酸素/窒素比 (O₂濃度を窒素との比 $\delta(O_2/N_2)$ で表記する) とCO₂濃度の変動を示す (Ishidoya *et al.* 2012)。ニーオロスンと昭和基地での結果を平均し、全球平均とみなしてO₂とCO₂の収支式を解くと、陸上生物圏と海洋によるCO₂吸収量はそれぞれ $1.5 \pm 0.9, 2.8 \pm 0.8 \text{ GtC yr}^{-1}$ (1 GtC = 1 PgC : 炭素

観測ルートと離着陸空港を示す。2013年3月までに7500フライトでCO₂濃度観測が行われ、14000のCO₂鉛直分布が得られている。観測結果の一例として、東経100度から160度の観測データを用いたCO₂濃度の緯度高度断面の季節変化を示す (第2図)。4月に北

換算で $1 \times 10^{15} \text{g}$) となった (ENSO の発生していない2004-2009年の平均値)。これらの推定値は、海洋生物化学モデルを基にした結果 (2002-2011年平均; Le Quéré *et al.* 2013) と概ね整合的である。海洋からの O_2 放出量の変動を推定・補正することにより、 CO_2 濃度と $\delta(\text{O}_2/\text{N}_2)$ 観測値から CO_2 放出源の年々変動を推定する手法が新しく提案された (Ishidoya *et al.* 2012)。ニールスンと昭和基地で観測された CO_2 濃度と $\delta(\text{O}_2/\text{N}_2)$ にこの手法を適用することにより、全球的な CO_2 濃度の急増が観測された2002-2003年には陸上生物圏が正味の CO_2 放出源になっていたこと、海洋による CO_2 吸収量の年々変動は小さいことが明らかにされた。

大気中の CO_2 と O_2 が陸上生物圏の光合成・呼吸によって密接に結びついていることは先に述べたが、逆に両者の差分を取ることで陸上生物圏の影響を取り除き、大気-海洋間の CO_2 、 O_2 交換に関する情報を得ることができる。このように定義されたのが APO (Atmospheric Potential Oxygen: $\text{APO} = [\text{O}_2] - 1.1 \times [\text{CO}_2]$) である。西部・北部太平洋域で観測された緯度帯毎の APO の変動を第4図に示す (Tohjima *et al.* 2012)。この図から、APO の季節変動が緯度によって大きく異なり、赤道を中心とした対称関係にはないことが分かる。大気輸送モデルに大気-海洋間の CO_2 、 O_2 交換量の気候値を入力して計算された APO と、観測を詳細に比較



第4図 西部・北部太平洋域及び落石岬、波照間島観測所で観測された δAPO の変動 (Tohjima *et al.* 2012)。

することによって、観測された APO への CO_2 と O_2 の寄与が推定されるとともに、北半球高緯度域で観測された大きな APO の季節振幅の原因が明らかになった。更に、気候値には表現されていない O_2 (あるいは CO_2) の吸収域が北半球中緯度に存在する可能性が示唆されている。

CO_2 の炭素同位体比 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比: $\delta^{13}\text{C}$ と表記す

る)もCO₂循環の解明に重要な知見をもたらす。CO₂が大気-陸上生物圏間および大気-海洋間で交換される際には固有の同位体分別を受けるので、大気中のCO₂の $\delta^{13}\text{C}$ への影響はそれぞれ異なる。このことを利用して、CO₂ (¹²CO₂+¹³CO₂)と¹³CO₂の収支式を解くことによって、陸上生物圏と海洋による人為起源CO₂の吸収量を求めることができる。実際、我々が北緯55度から南緯40度の北部・西部太平洋域で観測したCO₂濃度及び $\delta^{13}\text{C}$ データを解析したところ、陸上生物圏と海洋によるCO₂吸収量はそれぞれ 0.8 ± 0.7 と 2.2 ± 0.7 GtC yr⁻¹であることが示された(2001-2006年の平均値)。これらの値は、 $\delta(\text{O}_2/\text{N}_2)$ を基にしてほぼ同じ期間について推定された結果(Manning and Keeling 2006; Tohjima *et al.* 2008)と整合的である。

4. まとめ

人間活動によって大気に放出されたCO₂は陸上生物圏と海洋にどのような割合で吸収されているか、今後起こりうる気候変化にCO₂循環がどう応答するのか、陸上生物圏や海洋は現在以上にCO₂を吸収するのか、といった重要な問いに答えるためにまず必要になるのは、長期にわたる精度の高いCO₂濃度の3次元分布観測データである。近年の地球温暖化への関心の高まりによってCO₂観測点の数は増えてきたが、未だ地上観測が中心であり、かつ地域的に偏在しており、また主たる測定対象が濃度であるというのが現状である。今後、CO₂のみならず関連する気体の濃度や同位体比の観測網を整備拡充し、長期にわたる維持を図って全球的な時間空間変動を明らかにすると共に、新たな観測法やより簡便な高精度計測技術の開発が必要である。

参考文献

- Ishidoya, S., S. Morimoto, S. Aoki, S. Taguchi, D. Goto, S. Murayama and T. Nakazawa, 2012: Oceanic and terrestrial biospheric CO₂ uptake estimated from atmospheric potential oxygen observed at Ny-Ålesund, Svalbard, and Syowa, Antarctica. *Tellus*, **64B**, 18924, doi:10.3402/tellusb.v64i0.18924.
- Le Quéré, C. *et al.*, 2013: The global carbon budget 1959-2011. *Earth Syst. Sci. Data*, **5**, 165-185.
- 町田敏暢, 笹川基樹, 下山 宏, M. Arshinov, D. Davydov, A. Fofonov, O. Krasnov, N. Fedoseev, S. Mitin, 須藤洋志, 勝又啓一, 津田憲次, 中澤高浩, S. Maksyutov, 2010: シベリアにおける温室効果ガスの時空間分布. *低温科学*, **68**, 9-19.
- Manning, A. C. and R. F. Keeling, 2006: Global oceanic and land biotic carbon sinks from the Scripps atmospheric oxygen flask sampling network. *Tellus*, **58B**, 95-116.
- Nakazawa, T., S. Morimoto, S. Aoki and M. Tanaka, 1993: Time and space variations of the carbon isotopic ratio of tropospheric carbon dioxide over Japan. *Tellus*, **45B**, 258-274.
- Nakazawa, T., S. Morimoto, S. Aoki and M. Tanaka, 1997: Temporal and spatial variations of the carbon isotopic ratio of atmospheric carbon dioxide in the western Pacific region. *J. Geophys. Res.*, **102**, 1271-1285.
- 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.
- 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.
- Tohjima, Y., H. Mukai, Y. Nojiri, H. Yamagishi and T. Machida, 2008: Atmospheric O₂/N₂ measurements at two Japanese sites: estimation of global oceanic and land biotic carbon sinks and analysis of the variations in atmospheric potential oxygen (APO). *Tellus*, **60B**, 213-225.
- Tohjima, Y., C. Minejima, H. Mukai, T. Machida, H. Yamagishi and Y. Nojiri, 2012: Analysis of seasonality and annual mean distribution of atmospheric potential oxygen (APO) in the Pacific region. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **26**, GB4008, doi:10.1029/2011GB004110.
- Yamagishi, H., Y. Tohjima, H. Mukai, Y. Nojiri, C. Miyazaki and K. Katsumata, 2012: Observation of atmospheric oxygen/nitrogen ratio aboard a cargo ship using gas chromatography/thermal conductivity detector. *J. Geophys. Res.*, **117**, D04309, doi:10.1029/2011JD016939.