

3. 航空機や大気球による観測

— 温室効果気体から大気の流れを知る —

青 木 周 司*

1. はじめに

我々東北大学のグループは、地上基地をはじめ、航空機や船舶、大気球などの機動力を利用して、地球規模での温室効果気体の分布と変動の観測を長年にわたり続けてきた。その主たる目的は、地球温暖化の原因物質である各種温室効果気体の放出源や吸収源の情報を得ることである。一方、温室効果気体のうち二酸化炭素 (CO₂) や六フッ化硫黄 (SF₆) は地表付近を除けば対流圏や成層圏では放出源を持たず、分解もされない安定した微量気体であるため、大気のトレーサーとしても重要な意味を持っている。本シンポジウムでは、航空機と大気球による観測に絞り、日本の研究グループが主導して実施してきた主要な観測の概要を紹介するとともに、CO₂やSF₆観測データから明らかになった大気の流れやその長期変化について報告する。

2. 航空機観測

2.1 東北大学の観測

東北大学では、航空機を利用した温室効果気体の観測を1979年に開始し、現在でも月1回の頻度で継続的に実施している。この観測は高度約3 km 以下については単発プロペラ機 (セスナ式172型) をチャーターして我々が航空機に搭乗し、金属製およびガラス製の容器 (フラスコ) に大気を加圧充填するサンプリング法によって実施し、得られた大気試料を研究室に持ち帰り、様々な装置を用いて大気成分の濃度や同位体比の分析を行っている。サンプルの吸引および圧縮には電動ダイアフラムポンプを使用している。一方、高度3 km から約11km までの観測には民間のジェット旅

客機 (DC9, MD90, CR-J200, ER-J190など) を利用し、やはり我々が航空機に搭乗してサンプリングを実施している。民間旅客機を利用することから電源の使用が制限されるので、手動の加圧ポンプを使用し、機体のエアコンダクトから新鮮な外気を吸引することによって汚染のないサンプルを得ている。この観測は当時の東亜国内航空、日本エアシステム、日本航空の協力を得て、仙台—福岡、仙台—新千歳、仙台—伊丹などの路線で実施してきた。

これらの観測で得られた日本上空における高度別CO₂濃度の変動を第1図に示す (Tanaka *et al.* 1987 Fig. 1を改訂)。観測値には汚染空気の影響がほとんどなく、いずれの高度においてもCO₂濃度の経年増加や季節変化が明確に捉えられている。図を詳細に見ると、季節変化の振幅が上層になるにつれて縮小し、最下層に比べて最上層の振幅が約1/2になっていることや、季節変化の位相が上層ほど遅れ、最下層と最上層の間には約1ヶ月のずれが生じていることが分かる。一方、経年変化成分はどの高度領域でもほぼ同じになっており、1992-93年にはいわゆるピナトゥポアノマリーと呼ばれる濃度増加の停滞が全層で見られ、さらにエルニーニョ現象に同期した濃度増加の一時的な強まりもどの高度でも見られる。航空機を利用した観測はこのように地上付近にある放出源・吸収源の影響を広域で平均化した情報を持つため、全球的な炭素循環の評価に広く利用されている (例えば、Stephens *et al.* 2007)。なお、この観測結果は、対流圏全層のCO₂濃度の観測データとしては世界最長の記録となっている。

さらに、東北大学では南北両半球にわたる上空のCO₂濃度を観測するために、日本航空の協力を得て1984年から翌年にかけて成田—シドニーおよび成田—アンカレッジ間での大気採取を実施した (Nakazawa

* 東北大学大学院理学研究科、

shuji.aoki.a3@tohoku.ac.jp

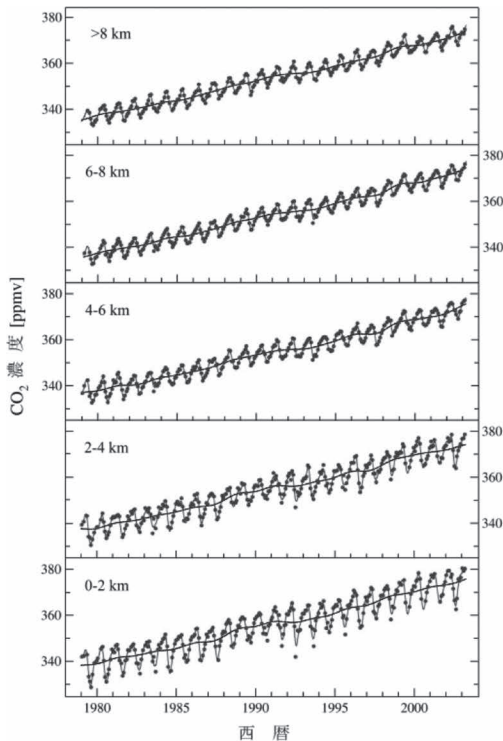
© 2020 日本気象学会

et al. 1991). この観測プロジェクトはわずか2年の期間で終了したが, CO₂濃度の上部対流圏における緯度分布と変動および下部成層圏の変動を初めて明らかにした研究として今でもたびたび引用されている. この研究で得られた年平均CO₂濃度の分布を第2図に示す. 上部対流圏における年平均CO₂濃度は赤道域が最も高く, 両半球とも極に向かって次第に低下している. 一方, 地表付近の濃度は北半球中・高緯度が最も高く, 15°Sまでは南下するに従って低下し, それ以南ではほぼ一様になっている. その結果, 赤道域では鉛直方向に同濃度となっており, 北半球と南半球では鉛直濃度勾配が逆転している. 次に, 各緯度帯におけるCO₂濃度の季節変化成分を第3図に示す. 上部対流圏における季節変化の振幅は, 北半球高緯度が最も大きく, 赤道域までは南下するにしたがって小さくなり, 位相も次第に遅れる傾向が見られる. 南半球でも明瞭な季節変化が観測されるが, 北半球とは逆に高高度ほど振幅が大きくなっている. さらに濃度の最大値が赤道域とほぼ同じ6月~7月頃に現れ, その後9月まで

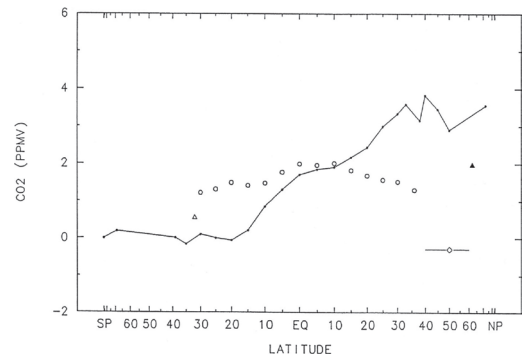
濃度低下が起り, そこから11月に向かって少し増加した後, 12月~4月までは低い値が継続するようなやや複雑な変化をしている. これらの観測事実から, 12月~4月までは赤道域の収束帯によって南北の移流が制限されるが, 5月になるとモンスーン循環によって北半球のCO₂高濃度の大气が赤道域上部を通して南半球上層に流入することが示唆される. さらに, この観測からは北半球高緯度の下部成層圏におけるCO₂濃度の季節変化の位相がその直下の上部対流圏と大きく異なっていることも示され, 上部対流圏と下部成層圏の大气輸送に関する重要な知見も得られている. この点に関し, 位相の大幅なずれから考えて, 北半球高緯度域対流圏上部の変動が下部成層圏に直接伝播していないことは明らかである. そうだとすると, 赤道域対流圏上部の変動が活発な湧昇によって下部成層圏に達し, それがそのまま圏界面に沿って高緯度に移流していると考えれば, 位相の遅れは説明が可能である. しかし, その場合でも北半球高緯度域下部成層圏におけるCO₂濃度の季節変化振幅のダンピングが赤道域に比べてかなり小さいので, 何らかの増幅メカニズムの存在が示唆される結果となっている.

2.2 気象研究所および国立環境研究所の観測

東北大学による国際定期便を利用した観測が1985年で終了したことを受けて, 気象研究所は日本航空, 日



第1図 航空機によって観測された日本上空における0-2, 2-4, 4-6, 6-8, >8 kmの5高度CO₂濃度の変化.



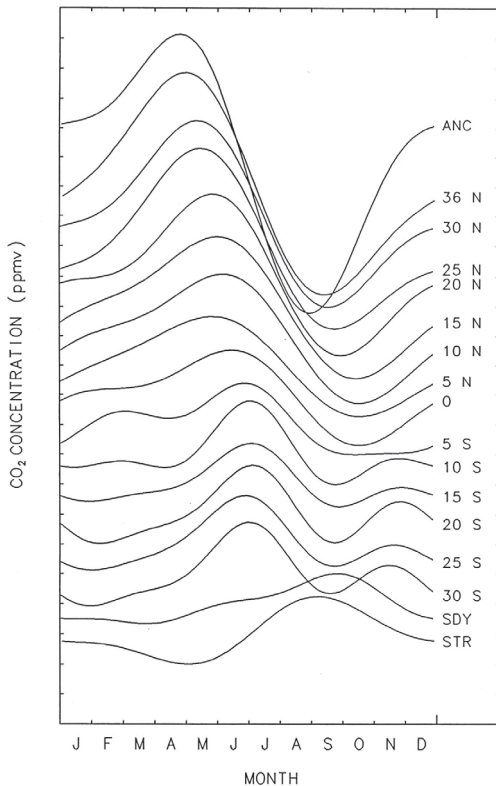
第2図 航空機によって観測された対流圏上部(高度10-12km)の年平均CO₂濃度の緯度分布(○). アンカレッジ(▲)およびシドニー(△)上空の7.2kmで得られた年平均CO₂濃度. 北半球高緯度における下部成層圏の年平均CO₂濃度(—◇—)も示す. さらに船舶や地上基地で得られた地表付近の年平均CO₂濃度(●)も示されている. なお, 各平均濃度は南極点の値を基準にして, そこからの差で表されている.

航財団と協力して自動大気サンプリング装置 (ASE) を開発し、1993年に成田とオーストラリアのケアンズ間で定期的な温室効果気体の観測を再開した (Matsueda *et al.* 2002). 当時「JAL 観測」と称したこの観測は翌年より成田—シドニー間での観測として継続された。2000年代に入り JAL 観測を実施していた航空機が退役するにあたり、国立環境研究所と航空機部品製造会社であるジャムコ社がプロジェクトに加わり、民間航空機に搭載するための CO₂連続測定装置 (CME) を開発した。2005年より旧 JAL 観測を発展的に継承して、日本航空が運航する航空機に改良型 ASE と CME を搭載した CONTRAIL プロジェクトによる観測が開始された (Machida *et al.* 2008). CME は離陸から着陸まで連続して CO₂濃度を観測できるため、航空機の

離着陸時に CO₂濃度の鉛直分布を、水平飛行時に上部対流圏または下部成層圏における CO₂濃度の水平分布を得ることができる。CME 観測によって世界の上空における CO₂濃度のデータはこれまでに比べて著しく増えることになった。

これらの観測プロジェクトは、予算規模が大きく、さらに民間の企業による献身的な貢献や大学との連携が不可欠であるため、産官学による研究推進体制として「航空機による地球環境観測推進委員会」を立ち上げて観測を支援する活動も継続している。さらに、「航空機による大気観測データ利用小委員会」も作られ、国内外の研究者に対する広報と得られたデータの利用促進を進めている。これまでに得られた観測結果は、上空の北半球から南半球までの緯度帯をカバーする CO₂濃度データとしては世界最長の記録であり、炭素循環の解明に貢献しているほか、近年では人工衛星を利用した CO₂濃度観測のための貴重な検証データとしても広く利用されている。

CONTRAIL プロジェクトによって得られた非常に多くのデータを利用して描かれた CO₂濃度の子午面分布を第4図に示す (Sawa *et al.* 2012). CO₂濃度は地表にある放出源および吸収源により変動するが、それが大気輸送によって鉛直方向および緯度方向に伝播する様子が見事に捉えられている。ここで示す CO₂濃度の季節変化は主に陸上植物による光合成と呼吸によって引き起こされるため、北半球中・高緯度の下層で最も大きな振幅で変動し、最高濃度が4月、最低濃度が8—9月に出現する。低緯度になるにしたがってその振幅は小さくなり、位相も1—2ヶ月遅れる。一方、南半球では季節が北半球と半年ずれていることや、海洋が大きな面積を占めているため、CO₂濃度の季節変化も位相がほぼ半年ずれており、振幅は極めて小さくなっている。これらのことを背景にして第4図を見ると、大気輸送に関する情報が読み取れる。すなわち、3月から4月にかけての緯度高度断面は、北半球では地上の高濃度が上層に伝播しているが、南半球では全層がほぼ一様になっており、赤道から10°Sにかけて輸送の障壁がきれいに現れている。この図には100°E—160°Eの経度領域で得られたデータを使用しており、障壁は南太平洋収束帯 (SPCZ) に対応している。5月から6月にかけて、この障壁が崩れて北半球の高濃度気塊が対流圏上層を経て南半球に流入している様子もきれいに捉えられている。この時期にはモンスーン循環がはじまり、SPCZが解消されることと整合的であ

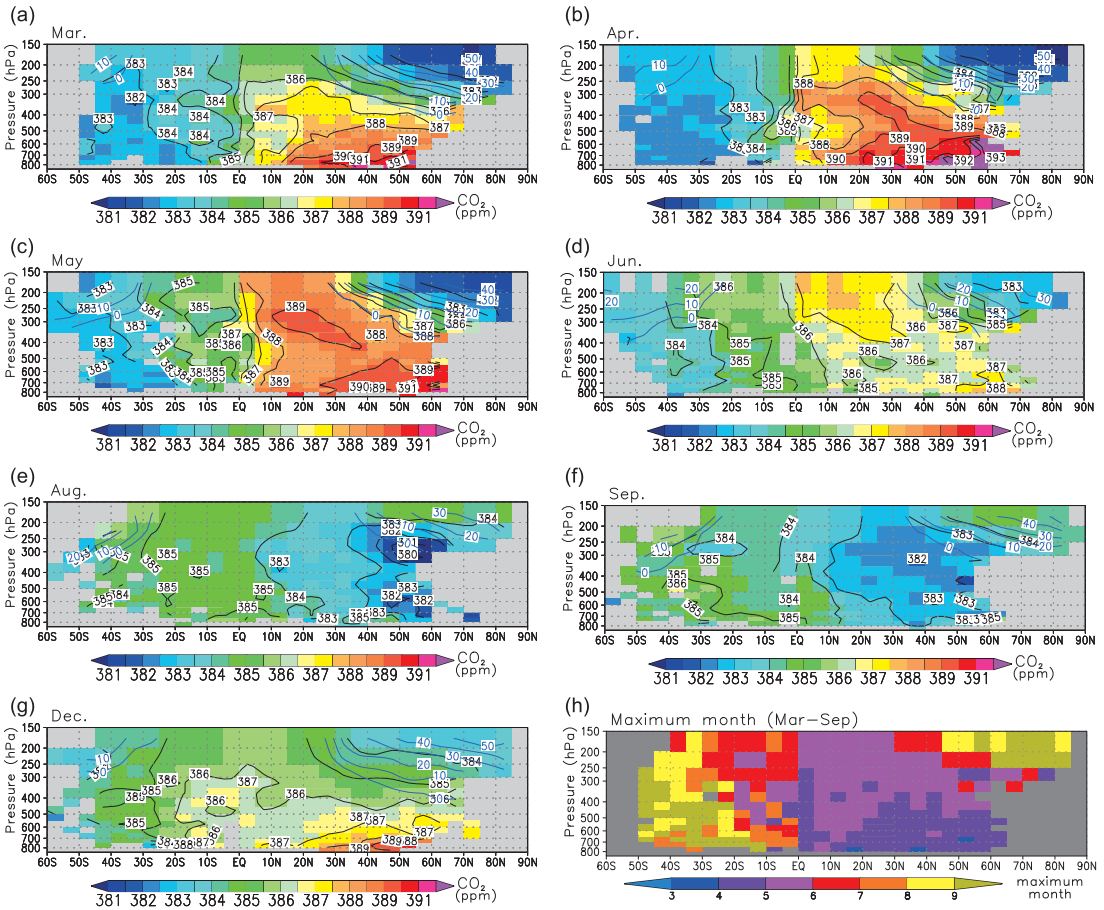


第3図 航空機によって観測された上部対流圏と下部成層圏における緯度別の CO₂濃度の平均的な季節変化。見やすいようにそれぞれの変化は縦方向にずらして描かれており、縦軸の1目盛りは1 ppmに相当している (Nakazawa *et al.* 1991). ANC (アンカレッジ), SDY (シドニー), STR (成層圏)。

る。8月から9月にかけては北半球の地表付近の最低濃度の気塊が上層に運ばれ、それが南半球に流入することにより、南半球全層にも次第に低濃度の気塊が広がっていくことも明瞭に見られる。これらの描像は、1980年代半ばに東北大学で行われた航空機観測から得られた知見と極めて整合的である。

次に、CONTRAIL プロジェクトによって得られた北半球中・高緯度の大气上層におけるCO₂濃度の緯度-温位分布を第5図に示す (Sawa *et al.* 2008)。図によれば、冬季から春季の5月までは圏界面が強い障壁となつて対流圏上部と下部成層圏の大气交換が制限されていることが分かる。6月以降ではその障壁が消えて、対流圏上部の高濃度気塊が等温位面に沿って下

部成層圏に流入していることも明らかである。7月になると対流圏下部の大气のCO₂濃度が光合成の活発化によって急減するが、その一部も下部成層圏に入り込むものの、温位340Kより高高度のCO₂濃度が高いため、成層圏全体のCO₂濃度は9月まで上昇し続ける。一方、9月になると圏界面の障壁が復活し、それ以降は極渦が発達し、成層圏の中・上部からCO₂濃度が低い気塊が沈降してくるため、下部成層圏のCO₂濃度は徐々に低くなる。このようなメカニズムによって、中・高緯度域の対流圏上部と成層圏下部ではCO₂濃度の季節変化の位相が大きく異なるのである。

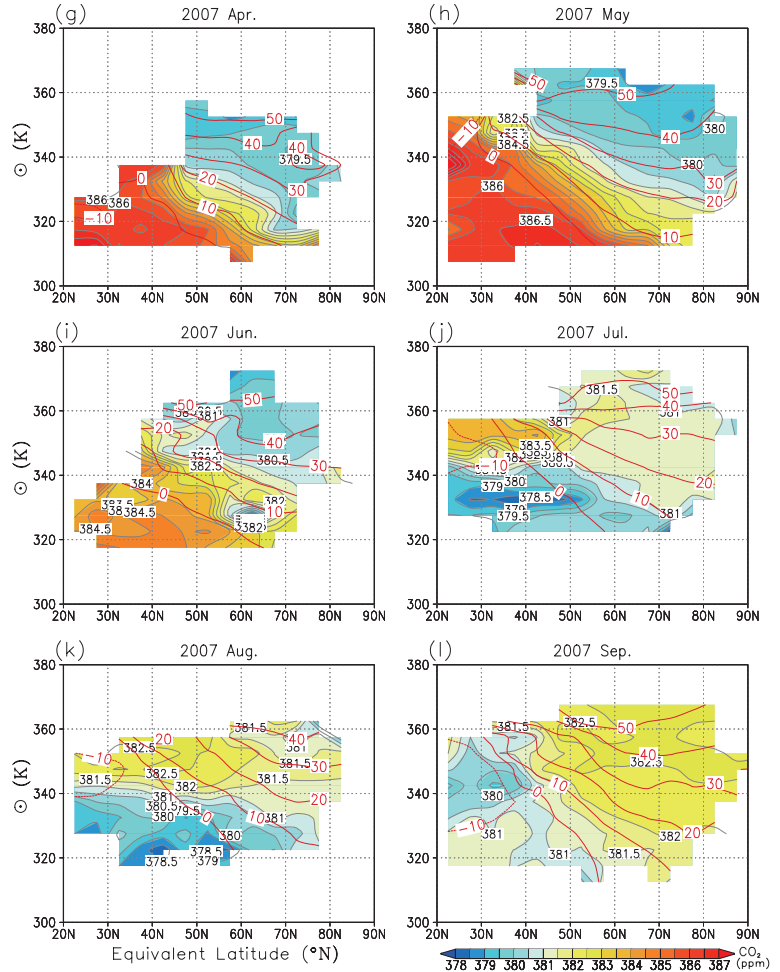


第4図 CONTRAIL プロジェクトによって得られたCO₂濃度の子午面断面の分布。観測データは経度域100°E-160°Eのものが用いられており、等価緯度と気圧で描かれている。(a)は3月、(b)は4月、(c)は5月、(d)は6月、(e)は8月、(f)は9月、(g)は12月の分布であり、(h)は各小領域に現れる季節的な最高濃度の出現時期を示す。各濃度データから経年増加を差し引くことにより、それぞれは2008年の値に換算されている。

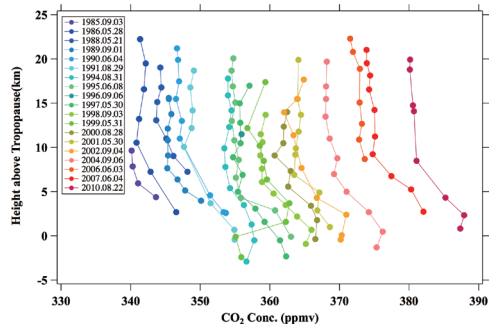
3. 大気球観測

3.1 クライオジェニックサン
プラーによる観測

成層圏における大気成分の分布や変動を正確に求めるための最も有効な手法は、現場大気を十分な量採取して実験室に持ち帰り、最適な分析装置を用いて可能な限り高い精度で分析することである。成層圏の大気を直接採取する手段として、これまでに航空機、大気球およびロケットが用いられてきたが、航空機はU-2などよほど特殊なものを除けば最高到達高度はせいぜい12km程度であり成層圏の最下層にしか到達できない。一方、ロケットは成層圏を突き抜けて遙かに高高度まで到達できるが、成層圏での滞空時間が極めて短く、搭載できるペイロードの重量や大きさにかかなり厳しい制限がある上、多大なコストがかかるという難点がある。それらに比べて大気球は一般的なものでも35km程度まで到達でき、ペイロードの重量や大きさの制限はかなり緩く、コスト的にもロケットに比べればはるかに低く抑えることができるため、最も多く利用されてきた。日本では、大気球に搭載することを目的とし、液体ヘリウムによるクライオジェニックサンプリング方式を採用した試料採取装置の開発が1983年に宇宙科学研究所の研究者によって開始された。1987年には大気採取装置のさらなる大型化と改良が行われ、試料容器を12本とし、採取試料量を標準状態（0℃、1000hPa）で20Lとした実用型が完成した（Honda *et al.* 1996）。その間、東北大学、東京工業大学、国立環境研究所、国立極地研究所をはじめ多くの研究者が加わり、クライオグループと称する研究観測実施体制が整備され、日本上空での系統的な成層圏大気採取を継続的に実施するとともに、スウェーデンのキルナや南極昭和基地での大気採取も行ってきた（Nakazawa *et al.* 1995；Aoki *et al.* 2003）。



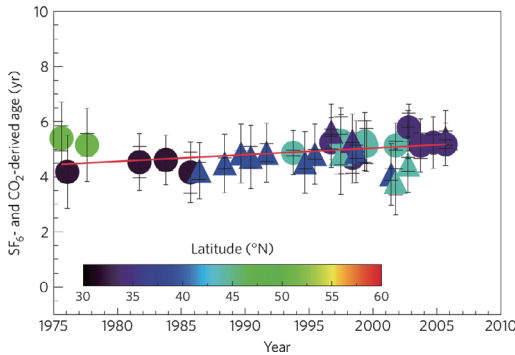
第5図 CONTRAILプロジェクトによって得られた北半球中・高緯度上空の子午面（等価緯度-温度）断面のCO₂濃度分布。図には対流圏界面を基準とした温度差（ $\Delta\theta$ ）が赤線のコンターで描かれている。



第6図 大気球観測によって得られた日本上空の成層圏におけるCO₂濃度の分布とその経年変化。縦軸は、対流圏界面を基準とした高度である。

1985年以来、大気球により飛揚されたクライオジェニックサンプラーで得られた日本上空の成層圏におけるCO₂濃度の高度分布の変遷を第6図に示す。図によれば、成層圏のCO₂濃度は対流圏界面を基準とした場合、そこから約10kmまでは高度とともに低下し、それ以上の高度ではほぼ一定になること、さらにそのプロファイルが全体的に年々高高度方向にシフトしていることが分かる。成層圏におけるこのような濃度増加は対流圏の濃度増加が大気の移流拡散によって伝搬したものである。したがって、対流圏最上部の平均的なCO₂濃度と成層圏中層のCO₂濃度の差を対流圏の濃度増加率で割った値は、空気塊が対流圏から成層圏に注入されてから成層圏中層に達するまでの平均経過時間、すなわち平均年代を示すことになる。数値モデル

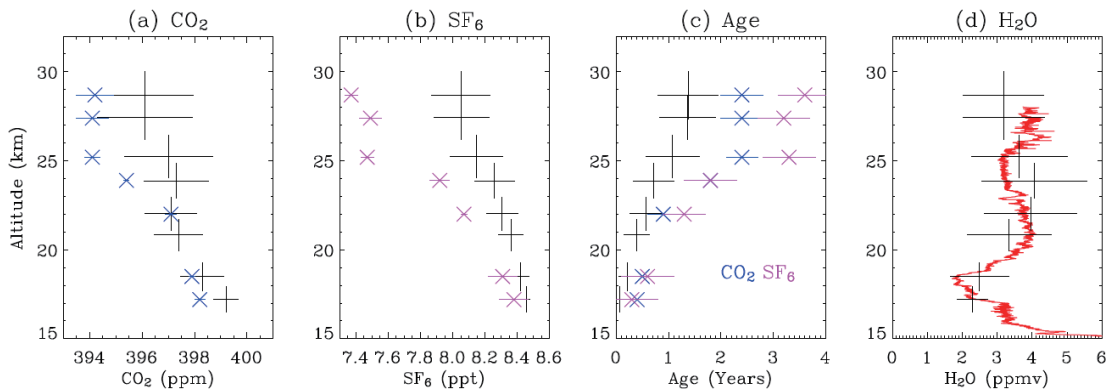
を用いた研究では、地球温暖化に伴って対流圏から成層圏に移流する空気量が増大し、成層圏のブリューワー・ドブソン循環が活性化することにより、この年代が短くなるという予測がいくつか発表され話題となった(例えば Austin and Li 2006)。我々クライオグループはドイツや米国の研究者と共同研究を進め、観測面からこの予測の正否を検した。第7図はこの研究によって初めて明らかにされた北半球中緯度から高緯度にかけての成層圏大気の平均年代の1975年から2005年までの30年間の変化を示す(Engel *et al.* 2008)。なお、この研究では年代を求めるために、CO₂とSF₆が用いられている。図によれば、北半球成層圏中層の過去30年間における空気の平均年代は4.9(±0.5)年であり、平均変化率は10年当たり+0.24(±0.22)年であった。変化率が正であることは平均年代が増加していることを意味しているが、慎重な誤差評価をもとに統計的に検定した結果、その有意性は確実とまでは断定できず、むしろこの30年間に平均年代は変化していないという結論に至った。このため、地球温暖化に伴って成層圏の平均年代は短くなるという数値モデルを用いた研究による予測は、我々の観測に基づいた研究によって95%の確からしきで否定できることが判明した。この結果を受けて、衛星観測データの新たな解析から大気球観測データを支持するような研究や、これらの観測事実を説明できるような大気大循環モデルの見直しが様々な研究者によって進められている。



第7図 北半球中緯度の成層圏における高度24–35kmの間で平均した空気年代の推移。○と△は、それぞれSF₆濃度およびCO₂濃度を用いて求めた年代を表す。

3.2 J-T サンプラーによる観測

前節で説明したクライオジェニックサンプラーは重量が350kgもあり、大気球実験で使用されるペイロー



第8図 インドネシアのピーク島で2015年2月22–28日に得られた熱帯対流圏界面層から下部成層圏にかけての (a) CO₂濃度, (b) SF₆濃度, (c) 空気年代, (d) 水蒸気濃度の分布。各図に示された黒十字はこの気球実験で得られた試料に対応する流跡線解析の結果を示す。

ドの中でも比較的大型であるため、液体ヘリウムの供給が必要条件となっている。このため、サンプラーが飛揚できる場所は専用の設備が整っていることや、大気球放球の経験者が揃っている必要があり、世界的に見ても極めて限られている。一方、成層圏での物質循環や大気化学反応過程の研究をさらに進めるためには、さまざまな地域での大気採取が望まれていた。そこで、東北大学および国立極地研究所のグループは液体ヘリウムを使わない革新的小型サンプラーの開発を目指して1996年に基礎実験を開始し、2006年にはプロトタイプの製作に進み、2008年1月には新型サンプラーによる南極成層圏大気採取に初めて成功した(Morimoto *et al.* 2009)。この革新的なサンプラーの基本原理は、高圧ネオンガスを断熱膨張させる際にジュール・トムソン効果によって発生する寒冷を利用して液体ネオンを作り出し、それによって希薄大気を効率よく固化・液化させることであり、J-T サンプラーと命名され、日本や昭和基地での何回かの採取実験を行い、当初の目的通りの性能が確認できた。

クライオグループにとって、対流圏から成層圏への大気の流入口である赤道域での成層圏大気採取が近年の最重要課題となっていた。我々はこの課題に挑戦するために、東大気海洋研の植松教授が主導した2012年の白鳳丸観測航海(EqPOS: Equatorial Pacific Ocean and Stratospheric/Tropospheric Atmosphere Study)に参加し、同年2月に東太平洋赤道域にて船上からJ-T サンプラーを4機飛揚し、4高度の成層圏大気採取に成功した(Fuke *et al.* 2014)。それに続き、熱帯域成層圏のオゾンや水蒸気、エアロゾルなどを長年にわたって観測してきた北大の長谷部教授らのSOWERグループと共同で2015年2月にインドネシアのピアク島での総合気球観測(CUBE/Biak)を実施した。その観測でクライオグループは2連のJ-T サンプラーを4機飛揚し、8高度の成層圏大気採取に成功した(Hasebe *et al.* 2018; Sugawara *et al.* 2018)。この観測で得られた結果の一部を第8図に示す。CO₂やSF₆濃度から得られた空気年代は高度22kmで約1年、25km以上で約2年になっており、北半球中・高緯度の中部成層圏の空気年代である4-5年に比べてかなり若いことが明らかになった。さらに、水蒸気分布に見られるいわゆるテープレコーダーシグナルにもほぼ同様な記録が得られていることも明らかになった。このような観測成果は世界初のものであり、大きな成果が得られたが、CO₂やSF₆濃度から評価した空気年代

の意味とテープレコーダーシグナルが持つ年代の意味の違いや、CO₂空気年代とSF₆空気年代の違いが生じる要因などさらなる研究が必要な問題も残されている。

4. おわりに

本稿は、これまでの航空機観測や大気球観測で得られた成果のうち、CO₂などの大気微量成分をトレーサーとして見た場合に得られる大気の流れに関する成果を概観したものである。一方、航空機や大気球を用いた観測では、温室効果気体の地球規模循環に関する研究や成層圏における大気化学過程の研究などでも大きな成果を上げてきた。世界を見まわした場合、これらのプラットフォームを用いた研究観測で日本はトップランナーの位置にある。現在、観測専用の航空機を日本気象学会が主導して導入する計画が進められており、さらに航空機と気球観測を組み合わせた研究計画も進められている。今後、若い世代の方々もこのような観測に興味を持ち積極的に参加してくれることにより、これまで築き上げてきたノウハウを継承して、航空機や大気球を用いた研究観測が大いに盛り上がってくれることを期待している。

参考文献

- Aoki, S., T. Nakazawa, T. Machida, S. Sugawara, S. Morimoto, G. Hashida, T. Yamanouchi, K. Kawamura and H. Honda, 2003: Carbon dioxide variations in the stratosphere over Japan, Scandinavia and Antarctic. *Tellus B*, **55**, 178-186.
- Austin, J. and F. Li, 2006: On the relationship between the strength of the Brewer-Dobson circulation and the age of stratospheric air. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L17807, doi: 10.1029/2006GRL026867.
- Engel, A., T. Mobius, H. Bonisch, U. Schmidt, R. Heinz, I. Levin, E. Atlas, S. Aoki, T. Nakazawa, S. Sugawara, F. Moore, D. Hurst, J. Elkins, S. Schauffler, A. Andrews and K. Boering, 2009: Age of stratospheric air unchanged within uncertainties over the past 30 years. *Nature Geosci.*, **2**, 28-31.
- Fuke, H., I. Issei, N. Izutsu, Y. Matsuzaka, Y. Kato, Y. Kakehashi, Y. Shoji, T. Yoshida, H. Honda, S. Aoki, Y. Inai and S. Morimoto, 2014: Balloon launch and flight operation from the research vessel Hakuho Maru for stratospheric air sampling over eastern Pacific equator. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **31**, 1540-1548.
- Hasebe, F., S. Aoki, S. Morimoto, Y. Inai, T. Nakazawa, S. Sugawara, C. Ikeda, H. Honda, H. Yamazaki, Halimur-

- rahman, N. Komala, F. A. Putri, A. Budiyo, M. Soedjarwo, S. Ishidoya, S. Toyoda, T. Shibata, M. Hayashi, N. Eguchi, N. Nishi, M. Fujiwara, S.-Y. Ogino, M. Shiotani and T. Sugidachi, 2018: Coordinated upper-troposphere-to-stratosphere balloon experiment in Biak. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **99**, 1213-1230.
- Honda, H., S. Aoki, T. Nakazawa, S. Morimoto and N. Yajima, 1996: Cryogenic air sampling system for measurements of the concentrations of stratospheric trace gases and their isotopic ratios over Antarctica. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **48**, 1145-1155.
- Machida, T., H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Nakagawa, K. Hiro-tani, 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.
- Matsueda, H., H. Y. Inoue and M. Ishii, 2002: Aircraft observation of carbon dioxide at 8-13km altitude over the western Pacific from 1993 to 1999. *Tellus B*, **54**, 1-21.
- Morimoto, S., T. Yamanouchi, H. Honda, S. Aoki, T. Nakazawa, S. Sugawara, S. Ishidoya, I. Iijima and T. Yoshida, 2009: A new compact cryogenic air sampler and its application in stratospheric greenhouse gas observation at Syowa Station, Antarctica. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26**, 2182-2191.
- Nakazawa, T., K. Miyashita, S. Aoki and M. Tanaka, 1991: Temporal and spatial variations of upper tropospheric and lower stratospheric carbon dioxide. *Tellus B*, **43**, 106-117.
- Nakazawa, T., H. Honda, T. Machida, S. Sugawara, S. Murayama, G. Hashida, S. Morimoto and T. Itoh, 1995: Measurements of the stratospheric carbon dioxide concentration over Japan using a balloon-borne cryogenic sampler. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1229-1232.
- Sawa, Y., T. Machida and H. Matsueda, 2008: Seasonal variations of CO₂ near the tropopause observed by commercial aircraft. *J. Geophys. Res.*, **113**, D23301, doi:10.1029/2008JD010568.
- 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.
- Stephens, B. B., K. R. Gurney, P. P. Tans, C. Sweeney, W. Peters, L. Bruhwiler, P. Ciais, M. Ramonet, P. Bousquet, T. Nakazawa, S. Aoki, T. Machida, G. Inoue, N. Vinnichenko, J. Lloyd, A. Jordan, M. Heimann, O. Shibistova, R. L. Langenfelds, L. P. Steele, R. J. Francey and A. S. Denning, 2007: Weak northern and strong tropical land carbon uptake from vertical profiles of atmospheric CO₂. *Science*, **316**, 1732-1735.
- Sugawara S., S. Ishidoya, S. Aoki, S. Morimoto, T. Nakazawa, S. Toyoda, Y. Inai, F. Hasebe, C. Ikeda, H. Honda, D. Goto and F. A. Putri, 2018: Age and gravitational separation of the stratospheric air over Indonesia. *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 1819-1833.
- Tanaka, M., T. Nakazawa and S. Aoki, 1987: Time and space variations of tropospheric carbon dioxide over Japan. *Tellus B*, **39**, 3-12.