

インドネシアにおける成層圏大気サンプリング気球実験の結果

菅原敏¹, 青木周司², 森本真司², 中澤高清², 石戸谷重之³, 豊田栄⁴,
長谷部文雄⁵, 稲飯洋一⁵, 後藤大輔⁶, 本田秀之⁷, 池田忠作⁷,
飯嶋一征⁷, 田村誠⁷, 井筒直樹⁷, 吉田哲也⁷, Putri Fanny⁸

¹宮城教育大学, ²東北大学大学院理学研究科, ³産業技術総合研究所,
⁴東京工業大学大学院総合理工学研究科, ⁵北海道大学大学院地球環境科学研究院,
⁶国立極地研究所, ⁷宇宙科学研究所, ⁸インドネシア航空宇宙研究所

1. はじめに

成層圏大気の化学過程や輸送過程が、長期的な視点で、現在進行しつつある地球温暖化とどのように関係し、応答するのか、あるいはどのような相互作用があるのかという問題は、現在の大气科学の大きな課題の一つである。この問題を観測から明らかにするためには、数十年以上の期間にわたって、精度の良い観測を継続しなければならない。我々クライオサンプリング実験グループが継続してきた成層圏大気の直接採取は、様々な大気成分の分析を通して、成層圏の輸送過程と化学過程の長期変化の解明に貢献しようとしている。その主要な研究課題を大きく分けると、第一に、成層圏における化学過程にほとんど関与しない微量成分（CO₂やSF₆などの、いわゆるクロック・トレーサー）の濃度を計測することにより、成層圏大気の平均年代を推定し、その長期的な変化を検出することである。この平均年代の変動は、成層圏における平均子午面循環の強弱や、混合過程の変化に対応するものと考えられている（Engel et al., 2009）。近年、このようなクロック・トレーサーに加えて、大気主成分の質量分析の結果から成層圏大気重力分離を発見し、これを成層圏大気の輸送過程の解明に利用できることを示した。重力分離はこれまでに知られていなかった成層圏の力学的プロセスであるとともに、平均年代と重力分離を組み合わせることで、成層圏大気の循環を新たな視点で探る手段として期待されている。第二に、成層圏大気中の化学過程において中心的な役割を担っているCH₄やN₂Oなどの反応性の長寿命種について、その濃度や関与する化学過程の長期変化を明らかにすることも我々の重要課題である。そのため、単にそれらの濃度を計測するだけではなく、各種の同位体について高精度の分析を実施し、詳細な化学過程の解明を進めている。これらの目的のために、これまでに三陸および大樹町での国内実験をはじめ、スウェーデン・キルナや南極・昭和基地での気球実験を成功させてきた。一方、赤道上空での直接大気採集による成層圏大気の観測は、2012年2月に本実験グループによって実施された白鳳丸船上気球実験が初めてであり、世界的にみて他に観測例はない。この観測についても成功し、赤道上空成層圏の新たな知見が得られたが、4機の気球を用いた4高度での大気採取であったこと、また、東太平洋のみでの観測であったことなどから、熱帯対流圏界層（TTL）を含めたより高度分解能の高い新たな赤道上空での観測が必要であった。そこで、2015年2月に、TTL

の大気科学過程の解明を主眼とした研究プロジェクトの一環として、インドネシアにおける成層圏大気サンプリング実験を実施した。このプロジェクトは、熱帯大気の研究に長年の実績がある SOWER グループと、大気成分を専門とするクライオ実験グループとが共同し、熱帯大気の物理・化学過程の観測・解明をめざしたものである。ここでは、主に成層圏大気サンプリングを中心として、観測の最新の成果を報告する。

2. 大気採取とガス分析の概略

気球実験はインドネシア東部のパプア州ビアク島にあるインドネシア航空宇宙研究所の施設において実施された。大気の採集には、ジュールトムソンミニクーラーを内蔵した小型クライオジェニックサンプラーを用いた。4機のゴンドラのそれぞれに2個のサンプラーが搭載されており、2月22日から28日の間に行われた4回の気球実験によって、高度17 km から29 km までの合計8の異なる高度において採集を行った。それぞれのサンプリング容器のサンプル量と採取高度を図1に示す。サンプラーを国内に輸送した後に大気サンプルの量を調べた結果、7高度においてそれぞれ2.0~9.3L(STP)の空気が採集されており、各種の成分分析によりそれらに汚染・変質のないことが確認された。なお、最もサンプル量が少なかった容器については、回収後の内圧が大気圧であったことから、何らかの理由によりサンプリング後に空圧弁が開き、試料が失われたものと考えられる。このサンプルについては濃度分析の結果も異常値を示したため、結果からは除いた。大気サンプルは国内の研究機関に配分され、様々な化学成分の濃度や同位体の高精度分析に使用される(表1)。特に、CO₂やSF₆、さらに大気主成分の濃度や同位体比(O₂/N₂比、Ar/N₂比、N₂、O₂、Arの同位体比)は、大気中の化学過程には関与しないことから、力学過程の解明に役立つものと期待されている。

表1 主な研究対象・分析項目とその研究実施機関

主な研究対象	成分	主な研究実施機関
平均年代の推定、分布とトレンド、数値モデル	CO ₂ , SF ₆	東北大、宮教大、NOAA/ESRL
重力分離とその応用 分子拡散、数値モデル	O ₂ /N ₂ ratio, Ar/N ₂ ratio, δ ¹⁵ N of N ₂ , δ ¹⁸ O of O ₂ , δ ⁴⁰ Ar, δ ¹³ C of CO ₂	産総研、宮教大、東北大
成層圏メタンのトレンド・成層圏水素収支	CH ₄ , N ₂ O, H ₂ , δ D of CH ₄	東北大、宮教大、環境研
成層圏メタンの消滅過程	CH ₄ , δ ¹³ C, δ D of CH ₄	東北大、極地研、宮教大
成層圏 N ₂ O の消滅過程 数値モデル	N ₂ O, N ₂ O isotopocule ratio	東工大、JAMSTEC

3. 結果と考察

図2にCO₂、SF₆、CH₄、N₂Oのそれぞれの濃度の鉛直分布を示す。どの成分についても、高度とともに濃度が減少してゆく様子が見られる。高度に応じた鉛直構造の違いに着目すると、CO₂とSF₆には相関が見られ、高度24～25km付近においてやや急な濃度の低下が見られる。両成分に対する化学過程の影響は小さいことから、赤道上空成層圏の鉛直上昇速度や水平混合などの力学過程によってこれらの鉛直構造が形成されていると考えられる。この構造は、後述のように、大気の平均年代の鉛直構造を意味しており、高度24～25km以上で急に年代が古くなることを示している。一方のCH₄とN₂Oは同様の単調な濃度低下を示しており、TTLから成層圏中層までを上方に輸送されながら、それぞれの消滅反応が進行することによって、結果的に似た鉛直構造をもつものと考えられる。過去の研究においても、成層圏でのCH₄とN₂Oがそれぞれ独立の反応過程によって消滅するのにも関わらず、両者にはコンパクトな相関関係が見られることが多い。本研究の結果から、赤道上空でもCH₄とN₂Oの濃度の間には一定の相関関係が見られるが、日本上空のそれとは明らかに異なっており、赤道と中緯度での化学過程と混合などの力学過程の相違によるものと考えられる。今後、両者の同位体の解析結果とともに詳細な検討が必要である。

本研究と2012年に実施された白鳳丸実験によって明らかになった赤道上空成層圏のCO₂濃度を、高度23km以上について平均し、日本上空の成層圏の濃度と比較した結果、赤道上空の成層圏における濃度増加が明瞭に見られた。さらに、対流圏の地表における濃度とも比較するために、NOAA/ESRLのモニタリングネットワークの中のマウナロア(MLO)における濃度も参考にした。日本上空成層圏の観測は、過去30年間をカバーしており、概ね対流圏での増加に追従するように、成層圏でも濃度が増加していることが知られている。しかも、対流圏での非直線的な増加傾向や数年スケールの増加率変化が、一定の遅れを伴って成層圏に伝播していることがわかる。これに対して、赤道上空の濃度は両者のほぼ中間の濃度を保ちながら、同様な増加を示していることがわかった。このことは、熱帯において対流圏から流入した大気が、Brewer-Dobson循環によって極側に輸送されるために、赤道上空では年代が若く、中緯度側では年代が増加することを意味している。この関係を用いてCO₂濃度から平均年代を推定した。インドネシア上空では最も高い高度でも平均年代は3.5年程度であり、北極、南極、日本上空の結果と比較すると2～3年程度若いことがわかった。近年、衛星による成層圏SF₆濃度の観測が行われており、全球観測に基づく帯状平均の年代の分布が報告されている。その結果によると、年代自体に季節変化が若干あるものの、赤道上空の年代は、どの季節でも20km付近で2.5年程度、30km付近では5年程度となっている(Stiller et al., 2012)。本研究の結果と比較すると、Stillerらの平均年代は全体に大きい傾向にある。赤道上空成層圏中層での平均年代の直接観測は本研究が初めてであるので、衛星観測の検証データとなる。今後、この平均年代の差異の原因を明らかにする必要がある。一方、近年、客観解析データを用いた平均年代の

研究も行われており、赤道上空の高度 30 km 付近では QBO に伴う平均年代の変動が大きいことが示されている (Diallo et al., 2012)。したがって、本研究で得られた平均年代についても QBO のフェーズと観測のタイミングを考慮した比較・検討が必要であると示唆される。また、平均年代のより詳細な解析には、重力分離データ、客観解析データ、SOWER グループによる水蒸気観測データなどと併せた総合的な検討が必要となる。

参考文献

Diallo et al., Atmos. Chem. Phys., doi:10.5194/acp-12-12133-2012, 2012.

Engel et al., Nat. Geosci., 2, 28–31, doi:10.1038/ngeo388, 2009.

Stiller et al., 12, Atmos. Chem. Phys., doi:10.5194/acp-12-3311-2012, 2012.

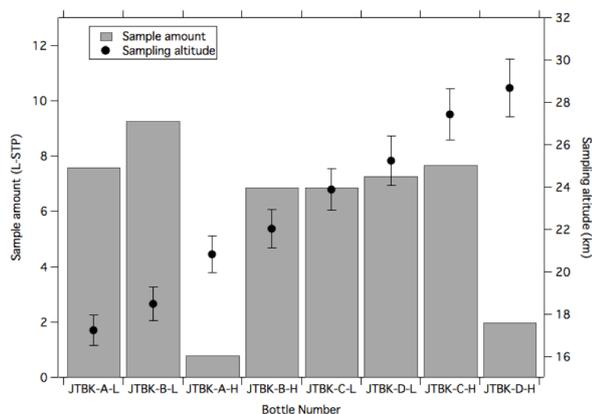


図 1. インドネシア気球実験によって採取された容器ごとの大気試料の量と採取中心高度。

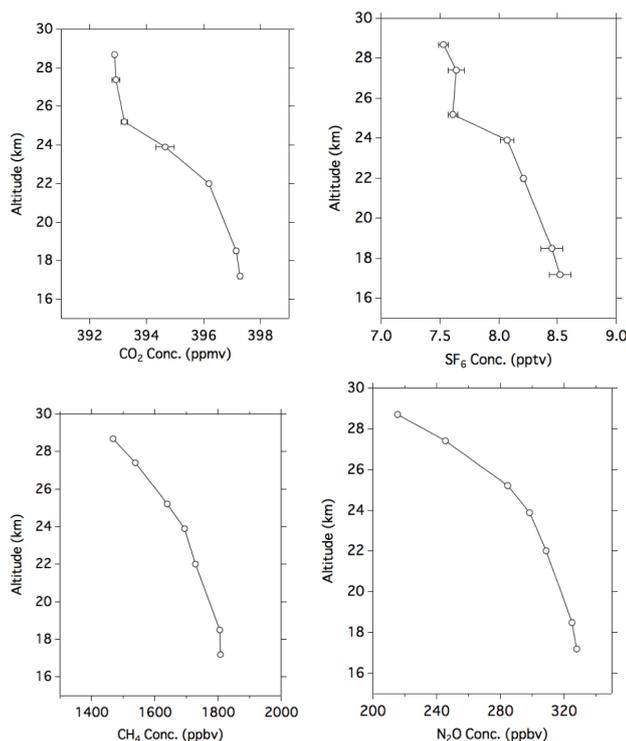


図 2. インドネシア気球実験によって得られた各種成分濃度の鉛直分布。