

白鳳丸船上気球実験により観測された 赤道上空成層圏の微量成分と平均年代の推定

菅原敏¹, 青木周司², 本田秀之³, 稲飯洋一², 森本真司⁴, 豊田栄⁵, 石戸谷重之⁶,
中澤高清², 植松光夫⁷, 古谷浩志⁷, 飯嶋一征³, 荘司泰弘³,
松坂幸彦³, 井筒直樹³, 吉田哲也³

¹宮城教育大学, ²東北大学, ³宇宙科学研究所, ⁴国立極地研究所,
⁵東京工業大学, ⁶産業技術総合研究所, ⁷東京大学

1. はじめに

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集は、様々な大気成分の分析を通して、成層圏の輸送過程や化学過程の解明に貢献してきた。これまで、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いる。一方、赤道付近での直接大気採集による成層圏大気の観測は、本実験グループとしては初めての試みであり、また世界的にみても観測例は極めて少ない。2012年2月に実施された白鳳丸船上気球実験では、太平洋の西経105度から115度までの領域において、赤道上の上空20～30kmの4つの高度の成層圏大気の採集に成功した。採集された大気量は5～8L（常温1気圧）であり、様々な大気成分の濃度、および同位体の測定に十分なものであった。これらの大気試料は東北大学・国立極地研究所・産業技術総合研究所・東京工業大学に配分され、それぞれの機関が保有する最先端の分析機器を用いて各種分析が行われた。結果的に、採取された4つの大気サンプルは全てについて汚染等による異常などは見られず、良質のデータを取得することができた。本研究では、特に微量成分濃度の分析結果とそれに基づく大気平均年代の推定を中心に報告する。

2. 結果と考察

濃度分析が行われている成分は、二酸化炭素、六フッ化硫黄、メタン、一酸化二窒素である。それぞれの成分濃度の鉛直分布を図1に示す。どの成分濃度についても、高度20km以上において高度とともに濃度が減少してゆく様子が見られる。対流圏の地表における濃度と比較するために、NOAA/ESRLのモニタリングネットワークの中のマウナロア（MLO）とクリスマス島（CHR）にける二酸化炭素と六フッ化硫黄の濃度を参考にした。図2はそれぞれの濃度を比較したものである。気球実験を実施した赤道域に最も近いESRLのモニタリングサイトはクリスマス島であるが、その経度は西経157度であるので、東西方向に5000km程度の隔りがある。また、異なる研究機関の採用している観測の濃度スケールの差異にも注意が必要である。したがって、単純に両者の濃度差を議論することはできないが、両濃度ともに地表に比べて顕著に低いことが判る。最高高度のおよそ29km付近とクリスマス島の地表との濃度差は、二酸化炭素が7.2ppmv、六フ

ッ化硫黄が 0.9pptv 程度になる。なお、E S R L では太平洋上を航行する船舶でもモニタリングを実施しており、赤道付近ではクリスマス島に近い海域で行われている。その二酸化炭素濃度の観測データは、クリスマス島のものにほぼ一致しているため、島での汚染の影響は無視できると考えられる。成層圏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に対して、どのように応答するのか、あるいはどのような相互作用があるのかという問題は、現在の気象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、長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。その中でも有効な手法の一つは、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 (CO_2 や SF_6 など) 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、その長期的な変化や空間的な分布の変化を検出することである。この平均年代の長期変化は、成層圏における平均子午面循環の強さの変化に対応するものと考えられている。このような観点から、過去 30 年間に行われた成層圏の二酸化炭素と六フッ化硫黄の気球観測の結果をまとめて、北半球中緯度における成層圏大気平均年代の長期トレンドが報告された (Engel et al., 2009)。その結果では、平均年代の有意なトレンドは見られないが、やや平均年代が増加しつつあることが示された。赤道上の成層圏大気に関しては、現在のところ 10 年以上の長期にわたる観測結果は得られていないので、平均年代の長期変化については議論できない。近年、衛星による成層圏六フッ化硫黄濃度の観測が行われており、過去 8 年間の平均年代のトレンドも報告されている (Stiller et al., 2012)。その結果は非常に複雑な様相を示しており、特に熱帯上空では最下部の高度 12 ~ 15 km 付近では大きな正のトレンドを示すものの、15 ~ 22 km ではほとんど傾向は見られず、22 ~ 30 km では弱い正のトレンドを示している。本研究でも二酸化炭素と六フッ化硫黄の濃度データから平均年代を推定することが可能である。熱帯域は対流圏から成層圏への大気の流れに相当する領域であることから、赤道上空の成層圏における平均年代が中緯度に比べて若いことは容易に想像できる。成層圏ではメタンの酸化に伴う二酸化炭素生成が存在するため、本研究では同じ大気サンプルのガス分析から得られるメタン濃度をもとにその影響を推定した。また、比較すべき熱帯対流圏における濃度の変動として、ここでは E S R L によるクリスマス島の観測データを利用した。ただし、図 2 に示す通り、赤道とマウナロアの間でも系統的な濃度差があり、特に六フッ化硫黄では年々の濃度増加量に対して緯度方向の濃度勾配の大きさを比較した場合の相対的な割合が大きい。すなわち、このことは、平均年代決定の基準となる熱帯対流圏の濃度時系列をどのように定めるかが、平均年代の絶対値に大きく影響することを意味する。例えば、仮に熱帯対流圏の基準にマウナロアとクリスマス島のデータを採用した場合に推定される平均年代の差は、両サイトの平均的な濃度差が 0.2 ppt、平均の濃度増加率が 0.28 ppt/year であることから、およそ 0.7 年になる。なお、上記の議論ではマウナロアの観測地点の標高がおよそ 3400 m と高いことにも注意が必要である。対流圏における二酸化炭素濃度の変動は大きな季節変化や年々変動を含むため、比較の際には平滑化する必要がある。本研究では、

H a l l と P l u m b ら(1994)が示した1次元大気における理論的な年代スペクトルが、逆正規分布(W a l d分布)と等価であることから、様々な平均年代と分布幅を持つ逆正規分布を仮定して平滑化した。なお、六フッ化硫黄濃度を用いた平均年代の推定の方法も同様であるが、六フッ化硫黄ではこの高度帯における化学消滅の影響は小さいので、その補正は行わない。このような方法で推定された二酸化炭素濃度による平均年代は、観測の平均高度が低いものから順に、1.0、1.9、2.3、3.4年であった。一方、六フッ化硫黄を用いた推定では、同様に、0.9、1.1、1.7、3.0年であった。一方、StillerらによるMIPASの観測結果では、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。すなわち、我々の結果に比べておよそ1.5~2年程度大きい値となっている。ここで留意すべき点は、Stillerらが、従来の大気年代の定義とは異なり、熱帯対流圏界面での濃度を基準にせず、直接地表観測データを基準にして年代を計算している点である。これによって、便宜上年代が従来よりも大きめの値になるようなバイアスがあるとされている。本研究でも基準をNOAA/ESRLの地上観測にしている点は同じであるので、基準の取り方による差異は生じないはずである。現在のところ、なぜ両者の年代がこれほど大きく異なるのか、原因は定かではない。これに関連して、StillerらはMIPASの結果を高度20kmでの航空機観測の結果と比較しているが、特に赤道付近では明らかにMIPASによる年代が過大評価になっている。本研究の結果はむしろ航空機観測の結果と良く一致している。本研究では、さらにNCARによって開発された2次元中層大気モデルであるSOCRATESを用いて、成層圏大気の平均年代のシミュレーションを行った。モデルの対流圏最下層に現実的な二酸化炭素濃度の増加を境界条件として設定し、50年間の積分を実行した。また、年代は対流圏に与えた二酸化炭素濃度の赤道における値を基準として求めた。多くの数値モデルで見られるように、SOCRATESでも通常の計算では平均年代を大幅に過小評価する。そこで、日本での気球観測から明らかになっている中緯度上空の年代を、より現実的に再現するように、輸送場のチューニングを行った。北緯35~40度付近の高度30~35kmにおいて、平均年代が4.5~5.5年程度になるようにした。図3に計算された年代の年平均分布を示した。赤道付近では、高度20kmでおおよそ1.3年、高度30kmでおおよそ3.5年となり、概ね今回の気球実験の観測結果と整合している。今後は、衛星観測との違いの原因を明らかにする必要がある。また、成層圏大気輸送の新たな指標となるものと期待されている重力分離のデータを活用し、成層圏大気の平均年代との関係を解明するとともに、さらなる観測と数値実験の両面から研究を進める必要がある。

参考文献

Engel, A., Mobius, T., Bonisch, H., Schmidt, U., Heinz, R., Levin, I., Atlas, E., Aoki, S., Nakazawa, T., Sugawara, S., Moore, F., Hurst, D., Elkins, J., Schauffler, S., Andrews, A., and Boering, K.: Age of

stratospheric air unchanged within uncertainties over the past 30 yr, Nat. Geosci., 2, 28–31, doi:10.1038/geo388, 2009.

Stiller, G. P., T. von Clarmann, F. Haenel, B. Funke, N. Glatthor, U. Grabowski, S. Kellmann, M. Kiefer, A. Linden, S. Lossow, and M. Lopez-Puertas, Observed temporal evolution of global mean age of stratospheric air for the 2002 to 2010 period, Atmos. Chem. Phys., 12, doi:10.5194/acp-12-3311-2012, 2012.

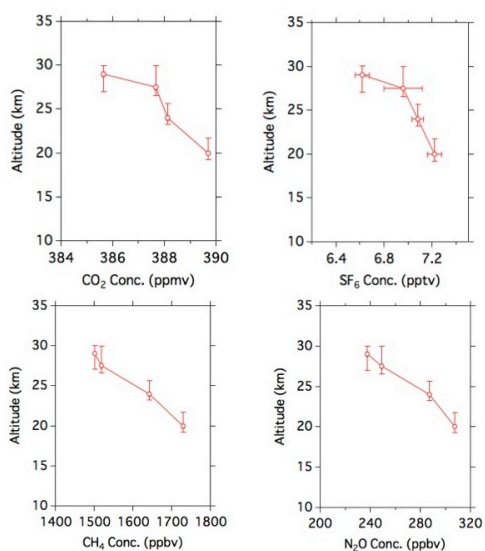


図1. 白鳳丸船上気球実験によって得られた各種成分濃度の鉛直分布。ただし、高度は空気採集における平均高度（暫定値）、縦のエラーバーは空気採集の高度幅を示す。

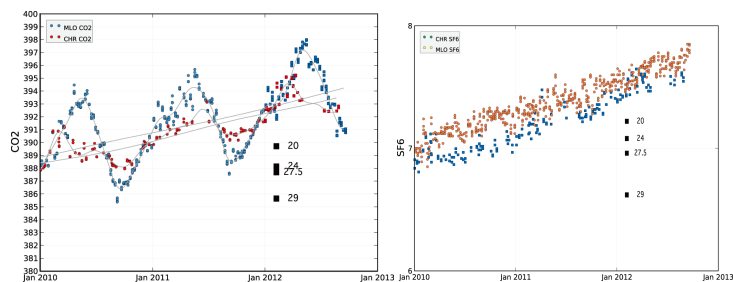


図2. 二酸化炭素（左図）と六フッ化硫黄（右図）のそれぞれの濃度について、本研究で得られた成層圏大気中の濃度（黒四角、数値は暫定平均採集高度）を、NOAA/ESRLによるマウナロアとクリスマス島における地表観測のデータと比較したもの。（NOAA/ESRL公開サイト <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/>より。なお、ESRLの2012年のデータは暫定値である。）

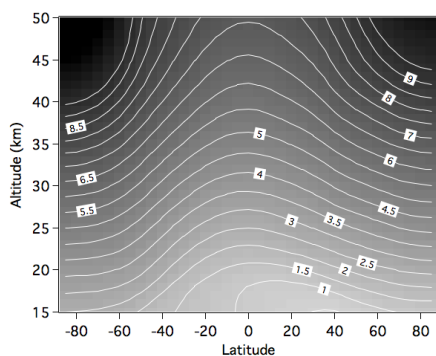


図3. 2次元中層大気モデル SOCRATES で計算された平均年代の年平均分布。ただし、SOCRATES では年代が著しく過小評価になるため、日本上空の気球実験で得られている北半球中緯度の年代を現実的に再現するように、輸送場を小さくしている。