

成層圏大気重力分離と空気年齢の新たな応用 -海洋貯熱量変動評価における重要性-

石戸谷重之¹, 菅原敏², 青木周司³, 森本真司³, 本田秀之³, 豊田栄⁴,
遠嶋康德⁵, 後藤大輔⁶, 石島健太郎⁷, 長谷部文雄⁸, 丹羽洋介⁵, 青木伸行¹,
村山昌平¹, 飯島一征⁹, 吉田哲也⁹

¹産業技術総合研究所, ²宮城教育大学, ³東北大学, ⁴東京工業大学, ⁵国立環境研究所,

⁶国立極地研究所, ⁷気象研究所, ⁸北海道大学, ⁹宇宙科学研究所

1. はじめに

2050 年カーボンニュートラル宣言に象徴されるように、二酸化炭素 (CO₂) をはじめとした人為起源温室効果気体の削減は喫緊の課題と認識されている。その議論の前提として、大気の千倍の熱容量を有し、地球温暖化による熱の 9 割以上を蓄えている全球の海洋貯熱量 (Global Ocean Heat Content、以下 OHC) の変動を正しく評価することが不可欠である。OHC 変動は、全世界中層フロート観測網 (ARGO) による数千個のフロート観測から得られた水温データの集計として評価され、CO₂ 等削減目標の根拠である気候モデルの妥当性を判断する拠り所となっている (e.g. Cheng et al., 2020)。しかしながら、同観測では 2,000m 以深のデータが極めて不足していることなどの課題も残されており、独立した評価手法の確立が望まれる状況にある。この点で、化学的な発生/消滅源を持たず、海水温の変動による溶解度の変動のみによって大気中の濃度が変動する希ガスの濃度は、その長期変動を超高精度で観測することで、OHC 変動の評価に応用できると期待されており、古気候学分野では既に実績がある (Bereiter et al., 2018)。しかしながら、温暖化に伴う現在大気の希ガス濃度の経年変動は、例えばアルゴン (Ar) 濃度 (Ar/窒素 (N₂) 比: $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$) の場合に、10 年間で数 per meg (per meg は百万分率) 程度の極微小変動と予想され、その検出は容易ではない。この点で我々は、大気中の酸素 (O₂) /N₂ 比 ($\delta(\text{O}_2/\text{N}_2)$) 及び $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ と、N₂、O₂ 及び Ar の安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 及び $\delta^{40}\text{Ar}$) の per meg オーダーでの高精度測定法を開発し、大気球に搭載したクライオジェニックサンプラー (Honda et al., 1996; Morimoto et al., 2009) により得られた成層圏大気試料の分析に応用することで、成層圏大気の微小な重力分離を発見するとともに、2 次元モデルによるその再現にも取り組み、重力分離の時空間変動が大気の子午面循環の評価に応用できることを提唱してきた (e.g. Ishidoya et al., 2008, 2013; Sugawara et al., 2018)。本研究では、この高精度測定を地上大気の $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ の長期観測に応用することで、OHC 変動に伴う経年変動の検出を目指した。さらに、我々の成層圏重力分離に関するこれまでの知見から、温暖化に伴う大気全層の重力分離の長期変動が、地表 $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ の極微小の変動に影響を及ぼす可能性があるとして着想し、2 次元モデルの拡張によってその評価も行った。本発表では、これらの観測とモデリングから得られた最新の成果について報告するとともに (Ishidoya et al., 2021)、さらに 2020 年に行われた B20-04 成層圏大気サンプリング実験での観測結果も含めた成層圏重力分離の長期変動についても議論する。

2. 方法

地表大気の $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ の観測は、質量分析計を用いた測定システム (Ishidoya & Murayama, 2014) による連続観測もしくはフラスコサンプリングで得られた大気試料の分析により、茨城県つくば市、沖縄県波照間島、北海道落石岬、及び南極昭和基地において、それぞれ 2012 年、2012 年、2013 年、及び 2016 年に開始し現在も継続している。成層圏大気重力分離は、対流圏における変動が、重力分離による成層圏内の変動よりも十分に小さい $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 及び $\delta^{40}\text{Ar}$ の観測結果について、各成分の分子と分母の質量数差を 1 に規格化し平均した値を「 δ 」と呼称し指標として用いた。現在までに、成層圏大気サンプリング実験で得られた試料の分析から、日本上空における 1994、1999、2000、2001、2002、2004、2007、2010、2015 及び 2020 年の δ 値の取得に成功している。重力分離のモデリングについて、我々の過去の研究では、2 次元モデル SOCRATES を用いて、地表の δ 値を基準として固定した計算を行ってきたが、この仮定では、大気全層の重力分離の変動が地表 $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ の経年変動に及ぼす影響を評価することができない。そのため、地表ではなく大気中の Ar 及び N_2 それぞれの分子総量の比を基準とすることで、成層圏で重力分離が強化され $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ が経年減少すると、マスバランスにより地表での $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ が経年増加するという現象を評価できるように SOCRATES モデルを改良した。

3. 結果と考察

地表大気 $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ は、夏季に極大値が現れる季節変動を示した。このことは、Ar と N_2 の溶解度の水温依存性から予測される変動と整合的であり、表層水温の季節変動を反映した $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ の季節変動の検出に成功していることを示唆している。季節変動の検出は、過去に米国 Scripps 海洋研究所及び Princeton 大学が成功しており、前者は現在も高精度観測を維持している (e.g. Morgan et al., 2021)。経年的には、 $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ の年増加率と、海洋観測による OHC の年増加率は明瞭な正相関の変動を示し、全球平均の地表気温の年々変動とは負相関の関係にあった。換言すると、海洋の熱吸収が鈍化した時に地表気温の極大が現れており、気候変動における海洋の支配的影響を示している。また $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ は、2012–2019 年の観測期間平均で 0.75 ± 0.30 per meg yr^{-1} の経年増加を示し、一方で海洋観測による同期間の OHC 増加は 12×10^{21} J yr^{-1} であった。これらの結果から、本研究により、OHC 変動に対応した $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ の変動を初めて検出している可能性が高いと考えられる。ただし年増加率の年々変動の振幅は海洋観測 OHC から予測される変動より大きく、メカニズム解明のためのさらなる研究が必要である。大気全層の重力分離の経年変動が、上記の地表 $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ の経年増加に及ぼす影響を評価するため、中部成層圏における空気年齢の上限及び下限の経年変動として 0.02 及び -0.02 yr yr^{-1} の直線トレンドを文献値を参照して仮定し、その条件を再現するように SOCRATES モデルの子午面循環速度を調整することで、地表における重力分離の経年変動を評価した。その結果、成層圏で経年的に空気年齢が減少し重力分離が弱化する条件では、地表の $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ は重力分離の影響により -0.13 per meg yr^{-1} の経年減少を示し、逆の条件では 0.15 per meg yr^{-1} の経年増加を示すという計算結果が得られた。この変動量

は、観測された地表 $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ の $0.75 \text{ per meg yr}^{-1}$ の経年増加に対して無視できず、Ishidoya et al. (2021)時点での推定では、成層圏で重力分離が経年的に強化された場合の結果によって地表 $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ 経年増加を補正することで、海洋観測による OHC と最も整合的な推定結果が得られた (図 1)。しかしながら同論文後に地表 $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ 増加は停滞傾向を示しており、その年々変動の大きさに鑑みると、より正確な OHC 推定には長期観測の維持が不可欠である。また SOCRATES モデル計算による重力分離と空気年齢の経年変動は、観測による検証が不可欠であるが、中部成層圏の重力分離を捉えることに成功しているのは現在までわが国の大気球実験のみである。図 2 には、1994 年から現在までの成層圏大気サンプリング実験で得られた日本上空の δ 値の高度勾配と、中部成層圏の平均的な空気年齢の変動を示した。両成分は負相関関係にある年々変動を示しており、子午面循環の各要素の変動に対する感度の違いから (Ishidoya et al., 2013; Sugawara et al., 2018)、両成分を組み合わせた解析により子午面循環の盛衰を評価できると期待される。以上により、成層圏対流圏結合解析による OHC 評価という最新の研究課題において、成層圏大気サンプリング実験の長期継続と広域展開が強く望まれる。

4. 謝辞

本研究は環境省地球環境保全等試験研究費、JSPS 科研費 JP19H01975、JP19K03963、JP15H02814、JP15K05282、環境省地球環境保全等試験研究費 (METI1454、METI1953) 等により実施された。JAXA 宇宙科学研究所気球工学グループの皆様をはじめ、観測にご協力頂いた各機関の皆様に御礼申し上げます。

5. 参考文献

- Bereiter et al. (2018), Mean global ocean temperatures during the last glacial transition, *Nature*, 553, 39–44, <https://doi.org/10.1038/nature25152>.
- Cheng et al. (2020), Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019, *Adv. Atmos. Sci.*, 37(2), 137–142, <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>.
- Honda et al. (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, <https://doi.org/10.5636/jgg.48.1145>.
- Ishidoya et al. (2008), Gravitational separation of major atmospheric components of nitrogen and oxygen in the stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L03811, <https://doi.org/10.1029/2007GL030456>.
- Ishidoya et al. (2013), Gravitational separation in the stratosphere – a new indicator of atmospheric circulation, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 8787–8796, <https://doi.org/10.5194/acp-13-8787-201>.
- Ishidoya & Murayama (2014), Development of high precision continuous measuring system of the atmospheric O_2/N_2 and Ar/N_2 ratios and its application to the observation in Tsukuba, Japan, *Tellus* 66B, 22574, <https://doi.org/10.3402/tellusb.v66.22574>.
- Ishidoya et al. (2021), Secular change in atmospheric Ar/N_2 and its implications for ocean heat uptake

and Brewer–Dobson circulation, Atmos. Chem. Phys., 21, 1357–1373, <https://doi.org/10.5194/acp-21-1357-2021>.

Morimoto et al. (2009), A new compact cryogenic air sampler and its application in stratospheric greenhouse gas observation at Syowa station, Antarctica. J. Atmos. Ocean. Tech., 26, 2182–2191, <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1283.1>.

Morgan et al. (2021), An Atmospheric Constraint on the Seasonal Air-Sea Exchange of Oxygen and Heat in the Extratropics, J. Geophys. Res. Oceans, 126, e2021JC017510. <https://doi.org/10.1029/2021JC017510>.

Sugawara et al. (2018), Age and gravitational separation of the stratospheric air over Indonesia, Atmos. Chem. Phys., 18, 1819–1833, <https://doi.org/10.5194/acp-18-1819-2018>.

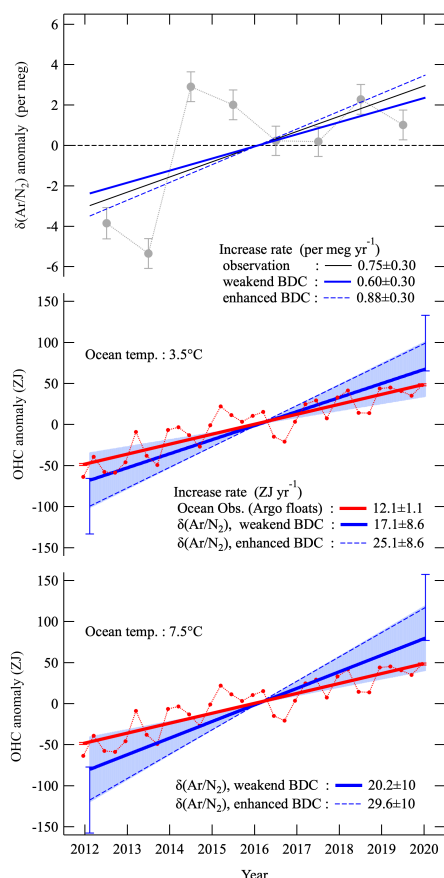


図1. (上) つくば市における地表 $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ の年平均値偏差(灰色丸)とその経年増加(黒実線)。SOCRATESモデルにより計算された、成層圏重力分離の強化及び弱化による地表 $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ 経年変動への影響を補正した地表 $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ の経年増加(weakened BDC及びenhanced BDC)を併せて示す。

(中) 0–2000mの海洋観測から評価された海洋貯熱量増加(赤)。全海洋を1 boxと見做し、その平均水温を文献値から 3.5°C と仮定することで、地表 $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ の経年増加から評価した海洋貯熱量増加を青色で示す。青実線はweakened BDC、破線はenhanced BDCの場合の重力分離影響補正を行なった結果である。(下) (中)と同様。ただし深海の影響が $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ 経年増加に反映していないことを想定し平均水温を 7.5°C と仮定した場合の結果である。Ishidoya et al. (2021)のFig. 7を一部改変して引用。

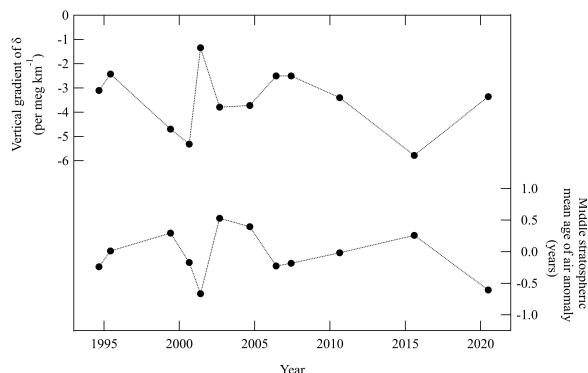


図2. 日本上空成層圏における重力分離(δ)の高度勾配と、中部成層圏の平均的な空気年齢の年々変動。空気年齢は CO_2 濃度もしくは六フッ化硫黄(SF_6)濃度の観測結果から推定した。