

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：11302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05282

研究課題名(和文) 重力分離を応用した成層圏大気循環の研究

研究課題名(英文) A study on the stratospheric circulation by applying gravitational separation

研究代表者

菅原 敏 (Sugawara, Satoshi)

宮城教育大学・教育学部・教授

研究者番号：80282151

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：大気球を用いた成層圏大気観測と数値モデルを用いた理論的研究の成果をまとめ、重力分離と大気年代を用いた成層圏大気循環の研究を前進させた。赤道上空において大型気球を用いて採取された成層圏大気サンプルを分析することで、CO₂およびSF₆の濃度、大気主成分の同位体比を分析し、高度に依存する大気年代および重力分離を明らかにした。二次元の大気輸送モデルを用いたシミュレーションから、熱帯の鉛直輸送が強化されるにつれて、重力分離効果が減少することがわかった。本研究の結果は、成層圏大気の輸送プロセスの変動を把握するために、大気年代と重力分離の組み合わせが有効であることを強く示唆することができた。

研究成果の概要(英文)：The gravitational separation of major atmospheric components, in addition to the age of air, would provide additional useful information about the stratospheric circulation. Air samples were collected over Biak, Indonesia in February 2015 using four large plastic balloons. Air samples from seven different altitudes were analyzed for CO₂ and SF₆ mole fractions, 15N of N₂, 18O of O₂, and (Ar/N₂), to examine vertically dependent age and gravitational separation of air in the Tropical Tropopause Layer (TTL) and the equatorial stratosphere. The average values of all show small but distinct upward decrease due to the gravitational separation effect. Simulations with a two-dimensional atmospheric transport model indicate that the gravitational separation effect decreases as tropical upwelling is enhanced. The results of this study strongly suggest that the gravitational separation, combined with the age of air, can be used to diagnose air transport processes in the stratosphere.

研究分野：大気物理学

キーワード：成層圏 大気年代 重力分離

1. 研究開始当初の背景

人類の活動に伴って大気中に排出されている二酸化炭素をはじめとする温室効果気体の増加は、地球温暖化を急激に進行させている。この地球温暖化が気候システムに与える影響は多岐にわたり、海水面の上昇や、雪氷の減少など、人類にとって極めて深刻な問題となっている。危惧されている様々な気候変動の中でも、その実態がほとんど解明されていない未解決課題の一つが、温暖化に伴う成層圏の変化である。特に、成層圏における物質輸送を支配している大規模な子午面循環である Brewer-Dobson 循環が、温暖化に対してどのように応答するのかという問題が、極めて重要と考えられている。なぜなら、成層圏における物質循環が、地球温暖化と将来のオゾン層回復プロセスの両者に対して大きな影響を持つためである。温室効果気体として重要なメタンや一酸化二窒素は、対流圏から成層圏に流入し、成層圏内の大気の運動によって輸送されながら光化学反応によって消滅することが知られている。したがって、成層圏の子午面循環の盛衰が、これらの温室効果気体を大気中から除去する速度を決めている。また、これまでに破壊が進んだ成層圏オゾンが将来回復する時期は、成層圏の子午面循環の盛衰によって大きく変化すると考えられている (Butchart and Scaife, 2001, Nature)。このように、地球温暖化とオゾン層破壊が成層圏の大気循環の変化を通じて密接に関わっており、両者の将来予測のためには、成層圏における子午面循環の変化を解明することが必要となる。成層圏の子午面循環の強さの経年的な変化を直接観測で検出することは困難である。そこで間接的な方法として、空気平均年代(空気が熱帯域において対流圏から成層圏へ流入した時点の起点とした経過時間)を推定する方法が用いられてきた。この平均年代は、二酸化炭素(CO₂)や六フッ化硫黄(SF₆)などの微量成分の濃度から推定することができる (Waugh and Hall, 2002, Rev. Geophys.)。この原理を基にして、我々の研究を含む日本・ドイツ・アメリカの気球観測データから、成層圏大気平均年代が長期的に変化していないことが報告された (Engel et al., 2009, Nature Geosci.)。この結果は、近年の気候モデルを用いた理論的研究の結果と食い違っており (Austin and Li, 2006, GRL) 論争となっている。ごく最近発表された IPCC 第 5 次報告書でも、成層圏の循環の長期変化に関する研究成果がまとめられているが、現時点では Brewer-Dobson 循環の長期変動に関する研究結果の信頼度は低いことが指摘されている。このような困難な研究の現状を打開し得る可能性を持つものが、ごく最近になって我々の研究により発見された大気重力分離である (Ishidoya et al., 2013, ACP)。

2. 研究の目的

大気気体成分がその分子の質量の違いに応じて分離する、いわゆる重力分離という現象は、分子拡散が卓越する高度 120 km 以上の大気においてのみ起こるものであり、成層圏や対流圏では化学過程に関与しない大気成分は十分に均一であると考えられてきた。しかし、我々が長年継続してきた気球実験による極めて質の高い成層圏大気試料を、高精度の大気主成分同位体分析の技術を用いて分析することにより、高度 35 km 以下の成層圏においても重力分離が起こっているという事実を発見した。中間圏以下の大気では、活発な大気の輸送過程によって大気はよく混合しており、質量の異なる気体分子が分子拡散によって分離する効果は極めて小さい。しかし、大気主成分である酸素、窒素、アルゴンの同位体比を超高精度で分析することによって、そのごく僅かな分離を検出することが可能となった。この重力分離の大きさは、大気成分を均一化しようとする大気輸送の働きと、重力下の分子拡散によって大気成分を分離しようとする働きの、両者のバランスによって決まっている。したがって、Brewer-Dobson 循環をはじめとする大気輸送過程が変化すると、大気中における重力分離の大きさの変化として、観測により検出できることを意味している。仮に Brewer-Dobson 循環が強められた場合には、大気分子をその質量の違いに関係なく均一化しようとする働きが強まるため、重力分離は小さくなると予想される。つまり、重力分離は、これまでになかった全く新しい大気循環のプロキシとなり得る物理量であり、本研究ではこの原理に基づいて成層圏大気循環と重力分離との関係を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、これまでに実施されてきた日本、北極、南極、熱帯赤道域での成層圏気球実験によって得られている大気試料を用いて、重力分離のグローバルな描像を明らかにした。また、宇宙科学研究所や北海道大学などとの研究協力により、2015年には赤道域と日本で新たな気球観測が実施され、過去の大気の解析と最新の観測結果とを比較することで、重力分離の長期的な時間変化傾向を調べることができた。さらに、全球 2 次元の分子拡散による重力分離を再現する数値モデルを用いて、シミュレーションを行い、観測から得られた重力分離の分布や変動を束縛条件として、成層圏大気循環が重力分離に与える影響を明らかにした。

本研究の方法は、大きく観測と数値モデルの 2 つに分けられる。はじめに観測方法について述べる。2015年には、新たに西太平洋赤道域および国内において気球実験が実施され、これによって得られた大気試料を用いて、最新の成層圏大気における重力分離デ

ータを取得した。この観測システムは、研究協力者である JAXA・宇宙科学研究所・本田と東北大・森本らが開発したものであり、これまでに長期にわたって国内外において成層圏大気採取の実績がある。気球搭載型クライオジェニックサンプラーを大型気球によって放球し、気球の上昇中に大気採取を実施した。実験は、JAXA・宇宙科学研究所本部大気球実験グループと協力し、北海道大樹町にある大樹航空宇宙実験場において実施された。試料空気の採取は、対流圏界面直上のおよそ 14 km から最高到達高度 35 km 付近までを、概ね高度幅 2 km ごとに区切り、合計 11 の高度において実施した。試料採取後は、クライオジェニックサンプラーと気球を切り離し、観測器をパラシュートで海上に降下させ、回収した。採取された大気試料は、連携研究者である産業技術総合研究所・石戸谷に送られ、大気主成分の酸素、窒素、アルゴンの各同位体比と、O₂/N₂ 比、Ar/N₂ 比を、超高精度質量分析計を用いて計測された。その後、試料は宮城教育大学、東北大学、東京工業大学に分配され、平均年代を推定するために必要な CO₂ 濃度と SF₆ 濃度、さらに温室効果気体である CH₄、N₂O の濃度や同位体比なども計測された。

次に、数値モデルによる研究の方法について述べる。成層圏大気における重力分離は発見されたばかりの現象であり、観測の拡充と同時に、それを裏付ける理論的な考察が不可欠である。そのために、2次元大気化学輸送モデルを用いて、まず観測されたような重力分離を数値的に再現することができるかを検討した。これまでの大気科学の常識では、重力分離は中間圏以上でのみ考慮されており、下層の大気で重力分離に着目した例はない。したがって、本研究では、既存の数値モデルを修正し、現在の数値モデルでは考慮されていない下層大気における分子拡散を新たに組み込み、成層圏や対流圏での重力分離の再現を試みた。分子拡散のメカニズムとして、重力、濃度勾配、温度勾配のそれぞれに起因する拡散フラックスを組み込んだ。また、分子拡散係数や温度拡散係数は、先行するフィルム空気の研究結果を利用することができた。数値モデルの計算結果を、観測で得られる重力分離の鉛直構造や緯度分布と比較し、既存の分子拡散の理論で重力分離が再現できることを定量的に明らかにした。

4. 研究成果

2015年に新規に実施された日本上空とインドネシア・ピアクにおける赤道上の実験によって、両地点における成層圏大気重力分離が明らかになった。これらの結果から、成層圏大気重力分離に緯度方向の不均一があり、ブリューワ・ドブソン循環にともなう大気輸送過程と関係があることが示唆された。本研究の成果は大きく分けて、日本上空と赤道上空の2つの研究成果に分けられるが、特に、赤道域における重力分離の存在

は本研究によって初めて明らかにされたものであり、ここでは主に赤道上空の観測による研究成果について述べる。2015年にインドネシアのピアクで大型気球を用いて採取された成層圏大気サンプルを分析することで、高度幅 2km よりも高い鉛直分解能で、7つの異なる高度における二酸化炭素および六フッ化硫黄濃度、N₂ の 15N、O₂ の 18O、および (Ar / N₂) について分析し、高度に依存する大気年代および重力分離を明らかにした。熱帯対流圏界層 (TTL) と赤道の成層圏の大気を分析し、TTL から高度 22km までに二酸化炭素と六フッ化硫黄の年代が徐々に増加し、そのより上層の 29km までさらに急速に増加することがわかった (図 1)。

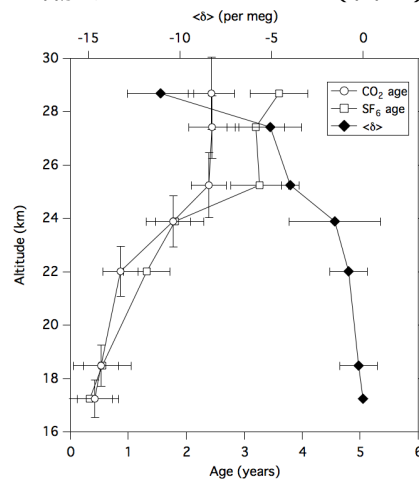


図 1 赤道上空で観測された大気年代と重力分離の鉛直分布 (Sugawara et al., ACP, 2018)

二酸化炭素と六フッ化硫黄の年代は、TTL と下部成層圏ではよく一致しているが、24km 以上では明らかな差が見られた。N₂ の 15N、O₂ の 18O、および (Ar / N₂) の平均値はすべて、重力分離効果のために、わずかではあるが明瞭な高度に伴う減少を示すことがわかった。二次元の大気輸送モデルを用いたシミュレーションから、熱帯の鉛直輸送が強化されるにつれて、重力分離効果が減少することがわかった (図 2)。

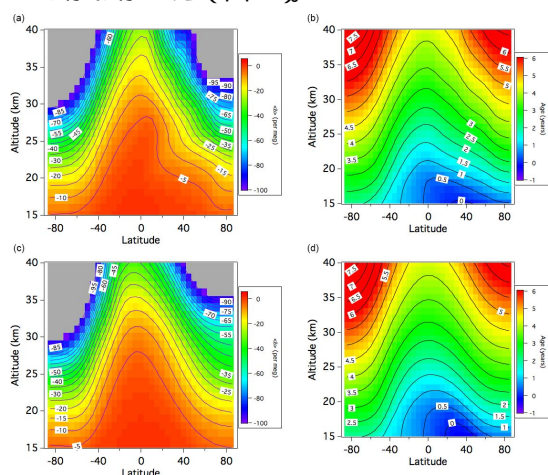


図 2 2次元大気モデルで再現された重力分離の南北高度分布 (Sugawara et al., ACP, 2018)

本研究の結果は、成層圏大気の輸送プロセス

の変動を把握するために、大気年代と重力分離の組み合わせが有効であることを強く示唆することができた。大気球を用いた成層圏大気観測と数値モデルを用いた理論的研究の成果をまとめ、重力分離と大気年代を用いた成層圏大気循環の研究を前進させた。これらの研究成果は複数の国際科学雑誌に論文として発表された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

1. 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, 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>, 2018. (査読あり)

2. Toyoda, S., N. Yoshida, S. Morimoto, S. Aoki, T. Nakazawa, S. Sugawara, S. Ishidoya, M. Uematsu, Y. Inai, F. Hasebe, C. Ikeda, H. Honda and K. Ishijima, Vertical distributions of N₂O isotopocules in the equatorial stratosphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 1-12, <https://doi.org/10.5194/acp-18-1-2018>, 2018. (査読あり)

3. Goto, D., S. Morimoto, S. Aoki, S. Sugawara, S. Ishidoya, Y. Inai, S. Toyoda, H. Honda, G. Hashida, T. Yamanouchi and T. Nakazawa, Vertical profiles and temporal variations of greenhouse gases in the stratosphere over Syowa Station, Antarctica, *SOLA* 13, 224-229, doi:10.2151/sola.2017-041, 2017. (査読あり)

4. 池田 忠作, 青木 周司, 森本 真司, 菅原 敏, 本田 秀之, 豊田 栄, 石戸谷 重之, 中澤 高次, 長谷部 文雄, 稲飯 洋一, 林 政彦, 柴田 隆, 後藤 大輔, Halimurrahman Mukri, Moedji Soedjarwo, Ninong Komala, Fanny A. Putri, Thohirin Chodijah, Agus Hidayat, Afif Budiyo, Thomas Djamaluddin, 飯嶋 一征, 田村 誠, 井筒 直樹, 吉田 哲也、インドネシア・ピアク島におけるクライオジェニックサンプラー回収気球実験、宇宙航空研究開発機構研究開発報告、JAXA-RR-16-008、33-48、10.20637/JAXA-RR-16-008/0002、2017。(査読あり)

5. Miyazaki, K., Iwasaki, T., Kawatani, Y., Kobayashi, C., Sugawara, S., and Hegglin, M. I.: Inter-comparison of stratospheric mean-meridional circulation and eddy mixing among six reanalysis data sets, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 6131-6152, <https://doi.org/10.5194/acp-16-6131-2016>, 2016. (査読あり)

[学会発表](計 14 件)

1. 菅原敏, 青木周司, 森本真司, 中澤高次, 稲飯洋一, 豊田栄, 石戸谷重之, 後藤大輔, 梅澤拓, 長谷部文雄, 石島健太郎、マルチクロックトレーサーによる大気年代の推定、宇宙科学研究所大気球シンポジウム、2017年11月9-10日、相模原。

2. 豊田栄, 吉田尚弘, 森本真司, 稲飯洋一, 青木周司, 中澤高次, 菅原敏, 石戸谷重之, 後藤大輔, 本田秀之, 池田忠作, 石島健太郎、日本および南極上空における成層圏 N₂O isotopocule の高度分布とその変動、大気化学討論会、高松、10/2-4、2017。

3. Sugawara, S., Ishidoya, S., Morimoto, S., Aoki, S., Nakazawa, T., Umezawa, T., Toyoda, S., Honda, H., Twenty-three year record of the mid-stratospheric 13C₂O over Japan, 10th International Carbon Dioxide Conference 2017, Interlaken, Switzerland, 21-25 Aug., 2017.

4. Inai, Y., S. Sugawara, S. Aoki, S. Morimoto, and T. Nakazawa, Variation in the mixing fraction of tropospheric and stratospheric air masses sharing the tropical lower stratosphere, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張、千葉, 5/20-5/25、2017.

5. 石戸谷重之, 菅原敏, 青木周司, 森本真司, 中澤高次, 豊田栄, 本田秀之, Latitudinal distributions of gravitational separation and mean age of the stratospheric air observed using a balloon-borne cryogenic air sampler, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市), 2017年5月24日

6. 石戸谷重之, 菅原敏, 稲飯洋一, 森本真司, 本田秀之, 池田忠作, 富川喜弘, 豊田栄, 青木周司, 中澤高次, 南極上空成層圏において観測された大気重力分離と周辺域の気象場との関係、日本気象学会 2017年度春季大会、国立オリンピック記念青少年総合センター(東京都渋谷区), 2017年5月26日

7. Satoshi SUGAWARA, S. ISHIDOYA, S. AOKI, S. MORIMOTO, T. NAKAZAWA, S. TOYODA, Y. INAI, F. HASEBE, C. IKEDA, H. HONDA, D. GOTO, and F. PUTRI, Age of air and gravitational separation in the stratosphere over Indonesia, 2016 AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, Dec. 12, 2016.

8. 豊田 栄, 吉田 尚弘, 森本 真司, 青木 周司, 中澤 高清, 菅原 敏, 石戸谷 重之, 植松 光夫, 稲飯 洋一, 長谷部 文雄, 池田 忠作, 本田 秀之, 石島 健太郎, 赤道上空成層圏における N20 同位体比の鉛直分布、平成 28 年度大気球シンポジウム、宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)、2016 年 11 月 01 日

9. 長谷部 文雄, 青木 周司, 菅原 敏, 稲飯 洋一, 石戸谷 重之, クライオサンプリングチーム, SOWER チーム, 第 22 回大気化学討論会、北海道大学(北海道札幌市)、2016 年 10 月 12 日

10. 菅原 敏, 石戸谷 重之, 大気の重力分離の時定数、第 22 回大気化学討論会、北海道大学(北海道札幌市)、2016 年 10 月 12 日

11. Sakae TOYODA, Naohiro YOSHIDA, Shinji MORIMOTO, Shuji AOKI, Takakiyo NAKAZAWA, Satoshi SUGAWARA, Shigeyuki ISHIDOYA, Mitsuo UEMATSU, Yoichi INAI, Fumio HASEBE, Chusaku IKEDA, Hideyuki HONDA, and Kentaro ISHIJIMA, Vertical distributions of N20 isotopocules in the equatorial stratosphere, The 8th International Symposium on Isotopomers, Nantes, France, Oct. 4, 2016.

12. 菅原敏, 青木周司, 森本真司, 中澤 高清, 石戸谷重之, 豊田栄, 長谷部文 雄, 稲飯洋一, 後藤大輔, 本田秀之, 池田忠作, 飯嶋一征, 田村誠, 井筒直 樹, 吉田哲也, Fanny A. Putri, 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、宇宙科学研究所大気球シンポジウム、宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)、2015 年 11 月 05 日

13. 菅原敏, 青木周司, 森本真司, 中澤 高清, 石戸谷重之, 豊田栄, 本田秀之, 池田忠作, 井筒直樹, 吉田哲也, 平成 27 年度成層圏大気クライオサンプリング実験(結果速報)、宇宙科学研究所大気球シンポジウム、宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)、2015 年 11 月 05 日

14. 菅原敏, 石戸谷重之, 青木周司, 森本真司, 中澤 高清, 豊田栄, 池田忠作, 本田秀之, 稲飯洋一, 長谷部文雄, Fanny A. Putri, 後藤大輔, インドネシア上空成層圏の

温室効果気体と重力分離の観測、日本気象学会、京都テルサ(京都)、2015 年 10 月 28 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅原 敏 (SUGAWARA, Satoshi)
宮城教育大学・教育学部・教授
研究者番号：80282151

(2) 研究分担者

()

(3) 連携研究者

石戸谷 重之 (Ishidoya, Shigeyuki)
産業技術総合研究所・研究グループ付
研究者番号：70374907

青木 周司 (AOKI, Shuji)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：00183129

森本 真司 (MORIMOTO, Shinji)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：30270424

(4) 研究協力者

本田 秀之 (Honda, Hideyuki)
宇宙科学研究所・科学衛星運用・データ利用ユニット・囑託