

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 9 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H05737

研究課題名(和文)南極成層圏の宇宙塵・極成層圏雲とエアロゾル循環

研究課題名(英文)Cosmic dust and clouds in the Antarctic stratosphere and aerosol budget

研究代表者

林 政彦 (Hayashi, Masahiko)

福岡大学・理学部・教授

研究者番号：50228590

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)： 気球浮揚無人航空機による南極境界層エアロゾル、成層圏エアロゾル観測、サンプリング、夏季の白夜のオーロラ撮像を実現するために、ロカロ翼航空機および固定翼航空機による気球浮揚滑空回収システム開発、国内・モンゴルテレルジ、アラスカでオーロラカメラおよび滑空カイトブレーンの設計・開発、およびその試験を行った。

第58次および、第60次南極地域観測隊に参加し、南極大陸上で長距離無人後期域オペレーションと気球浮揚カイトブレーンによるエアロゾル観測を成功させた。また第56次南極地域観測隊が気球浮揚無人航空機で取得したサンプルから、夏の南極成層圏に硝酸を含むエアロゾルが存在することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究においては、地球大気圏と宇宙空間を接続する一つの領域である南極成層圏のエアロゾルとオーロラの観測を実現するための無人航空機システムの開発と、その実証観測を南極大陸上において行うことを目的とした。地球大気と宇宙空間の関係については、多くの仮説が立てられている。それらの仮説を検証、解明し、理解してゆくためには、成層圏に観測装置を持ち込み、観測的な証拠を得ることが極めて重要である。本研究では、近年急速に発達する無人航空機を成層圏に持ち込んで、特にサンプリングを中心とした観測の実現することを目的とし、南極における無人航空機による成層圏観測の現実性を証明した。

研究成果の概要(英文)： In order to observe aerosol conditions in Antarctica, an UAV system using Unmanned Automated control Vehicle using balloon support lifting to stratosphere was developed with examinations in Alaska, Mongolia, Hokkaido and Kyushu area. The observations in Antarctica were carried out at Syowa Station and S17 base in Antarctica, supported by The 58th and 60th Japanese Antarctic Research Expedition (JARE).

Stratospheric Aerosol sample obtained by the JARE 56th were also analysed using SEM-EDX, suggesting existence of nitric acid containing aerosol in the summer Antarctic stratosphere.

研究分野：大気科学

キーワード：無人航空機 気球浮揚 オーロラ撮像 成層圏エアロゾル サンプリング 自動制御 パラシュート降下 滑空

1. 研究開始当初の背景

・宇宙塵と地球大気

地球は、星間物質の集積により約46億年前に誕生した。地球への星間物質の集積は、現在では極めて微量になっているが、継続されている。隕石の落下は極めて大きな星間物質の地球への集積であり、夜空を彩る流星もまた星間物質の集積過程の一部である。地球へ流入した粒子状の星間物質は宇宙塵と呼ばれ、中間圏から成層圏、対流圏を経て大陸、海洋、氷床へ沈着する。宇宙塵は、南極の氷床氷、海底コアなど地球表面の様々なところで見つけられる。南極氷床の氷からは多くの宇宙塵が発見される。

宇宙塵が大気に侵入してから地上に到達するまでの間で、雲・降水がなく大気が安定成層している成層圏での滞留時間が比較的長いと考えられる。一方、下部成層圏には地表面を起源とする硫黄化合物の酸化物である硫酸を主成分とするエアロゾル高濃度域(ユング層)が存在する。ユング層は、極の成層圏では、オゾンホール形成のキープロセスである冬季に生成する極成層圏雲の核となると考えられている。それらのプロセスにおいて、宇宙塵の存在は極成層圏雲の個体粒子の生成等に影響を与えている可能性がある。

このように、成層圏の宇宙塵は地球の起源や宇宙との関係、地球環境変動との関係でその重要性が認識されており、成層圏中の宇宙塵の分布とその種類、量などを把握することが、宇宙塵の流入量や宇宙塵の地球大気物質循環への寄与を理解するうえで不可欠である。

・成層圏エアロゾル中の不揮発性成分

大気中におけるその役割などを理解するためには、流入量や大気中での存在状態を明らかにする必要がある。成層圏エアロゾル層は高度約30kmまで分布している。研究代表者らは、20年以上にわたって気球搭載光散乱粒子計数装置(OPC)を用いた成層圏エアロゾルの観測を行い全球的な成層圏エアロゾルの分布と長期変動を明らかにしてきた。近年では、宇宙塵を含む成層圏の不揮発性成分の直接観測も行われるようになった[Baumgardner et al, 2004, Curtius et al., 2005]。研究代表者のグループでも、2台のOPCを連結して飛揚し、一方のOPCのサンプル空気を加熱することで不揮発性成分の割合を観測することに成功している。この観測は、熱帯域にあるインドネシア Biak、および、北極域にあるノルウェー領ニーオーレスンで実施した。Biakの観測では、300℃まで加熱した場合でも、成層圏エアロゾル層の上端まで、体積で1%未満ではあるが、不揮発成分が残ることを確認した。また、ニーオーレスンの観測では、成層圏の下層に対流圏起源と考えられる不揮発成分が存在することを確認した。しかし、この観測では、不揮発成分の組成や種類、個別粒子レベルでの存在状態の確認ができない。また、宇宙塵のような存在比率が小さいと予想される粒子の割合や存在の確認が困難である、という問題がある。これらの問題は、成層圏からエアロゾルを回収して、その成分を直接分析することで解決できる可能性がある。

・極域エアロゾル層の「宇宙の窓」

しかし、成層圏エアロゾル層より高い高度へ観測装置、試料採取装置を持ち上げ、回収することは容易ではない。極域の成層圏は、冬季には日射がなくなり寒冷化するとと

もに極渦が発達し、中緯度の成層圏大気から物質的に孤立させられることが知られている。南極では極渦が北極よりも安定的に存在する。昭和基地上空の成層圏がこの極渦の中に安定的に位置することは、申請代表者らによる長期の成層圏エアロゾル観測からも明らかになっている。この時期、孤立した極成層圏では大気が沈降し、夏季には高度 30km 付近にあった成層圏エアロゾル層の上端高度が高度 20km 付近にまで低下する。このため、冬季極成層圏では高度 20~30km に上部成層圏、中間圏にあった大気が沈降してきている。高度 20~30km の領域を全球的な視野から見たとき、冬季の南極極渦内は宇宙塵の流入などの影響を強く受けているとともに、地球表層からの物質的な影響（成層圏エアロゾルが存在しない）が弱い領域になっている。冬季極渦は人類にとって「宇宙の窓」ということができる。この時期、極渦内の成層圏エアロゾル層とその上部の「宇宙の窓」では、極成層圏雲が形成される。高度 20km 以上の領域のエアロゾルサンプリングは非常に限られており、その実態はいまだ理解されていない。以上により、極成層圏エアロゾル層と「宇宙の窓」の観測計画を検討した。

・BALGLIP による観測

研究代表者らは、このような成層圏エアロゾルの回収を視野に入れて、科学研究費補助金、南極観測事業、JAXA 飛翔体観測支援事業の支援を受けて気球によって無人航空機を成層圏エアロゾル層まで飛揚し、パラシュート降下、滑空飛行により放球点に帰還させる新しい観測プラットフォーム「気球浮揚滑空無人航空機システム（BALGLIP）」を開発してきた。2015 年 1 月には、BALGLIP による最初の本格的な成層圏エアロゾル採取を実施した。昭和基地近くの南極大陸上の観測拠点から無人航空機を放球し、気球破裂高度 23km からパラシュート降下、12km でパラシュートを分離し、自動操縦により放球地点まで滑空、帰還させ、成層圏エアロゾルサンプルの回収に成功した。この成功により、最高観測高度が気球の破裂高度に依存する観測システムを実用化したことになった

以上により、研究代表者らの開発する技術を用いることで惑星科学、地球環境科学が抱える宇宙塵の成層圏エアロゾル動態に対する影響という課題に取り組むことができる可能性が大きくなったと考え、本研究課題を実施した。

2. 研究の目的

本研究では、南極昭和基地上空成層圏の高度 10~30km のエアロゾルを気球浮揚滑空無人航空機システムにより回収する。特に冬季に開く「宇宙の窓」から、成層圏エアロゾル層の影響を受けていない宇宙塵の採取・回収を目標とする。同時に試験観測として行うモンゴル上空の成層圏エアロゾル層内外のエアロゾルの採取・回収も行い、極の状態との比較サンプルとする。また、越冬成層圏エアロゾル観測からは、極成層圏雲の形成前後の成層圏エアロゾルの存在状態の

変化についての知見も得られる。以上により、極および中緯度成層圏の高度 30km までの不揮発性粒子成分の鉛直分布と宇宙塵や対流圏起源物質の寄与を推定する。特に上部成層圏・中間圏からの大気

沈降を起こしている極域を含む全球的な成層圏の不揮発性物質の実態解明を可能とする。それは、宇宙起源物質の地球環境への寄与を理解することへつながる。

3. 研究の方法

気球飛揚ーパラシュート降下ー滑空の成層圏往還飛翔システム (BALGLIP) に微粒子採取装置を搭載し、モンゴル・ウランバートル郊外、テレルジ、および、昭和基地より飛揚し、高度 15km~30km の領域で成層圏エアロゾルを回収する。冬季の昭和基地での観測を実現するために、技術的な課題確認と、問題解消のために、下記に、昭和基地近傍の南極大陸上 S17 航空拠点から気球浮揚無人航空機による観測を実施する。昭和基地の観測は、極渦内の大気沈降が顕著になり、より上空起源のエアロゾル採取を望める越冬観測として実施する。同時に越冬観測として実施することで、極成層圏雲の発達とバックグラウンドエアロゾルの変質に関する直接的なサンプルを取得する。回収したサンプルの SEM-EDX 分析により、不揮発成分、不揮発性粒子の分布を評価し、熱帯域、極域等で得られた成層圏中の不揮発成分の粒径分布と比較し、全球的な成層圏エアロゾルの循環機構における不揮発成分の位置づけを検討する。

4. 研究成果

南極大陸上の夏季観測に参加し、小型無人滑空機による気球浮揚滑空期間の成功に加え、小型カイトプレーンによる高度 5km からの自律帰還観測に成功した。また、水平方向への往復 40km の観測にも成功し、遠距離の制御システムとしての運用能力を実証した。

地球科学的には、夏季の海洋境界層内において新粒子生成が起きていること示すとともに、その生成の鍵となる条件として、相対湿度が重要である可能性をしめした。

また、56 次の成層圏エアロゾルサンプルの分析、解析により、夏季の南極成層圏に硝酸を含むエアロゾルが存在していた可能性が高いことを示した。

これらの成果は、大気研究に取り組んできた理学を専門とする研究代表者とその研究協力者による大気科学的視点と手法、無人航空機研究に携わってきた工学を専門とする研究分担者とその協力者の工学的視点とその研究手法の協力による成果であり、両分野間の今後の研究協力のありかたの一つのモデルとなると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Lee Kwangyul, Chandra Indra, Seto Takafumi, Inomata Yayoi, Hayashi Masahiko, Takami Akinori, Yoshino Ayako, Otani Yoshio	4. 巻 19
2. 論文標題 Aerial Observation of Atmospheric Nanoparticles on Fukue Island, Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Aerosol and Air Quality Research	6. 最初と最後の頁 981 ~ 994
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.03.0077	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Hasebe F., Aoki S., Morimoto S., Inai Y., Nakazawa T., Sugawara S., Ikeda C., Honda H., Yamazaki H., Halimurrahman, Komala N., Putri F. A., Budiyo A., Soedjarwo M., Ishidoya S., Toyoda S., Shibata T., Hayashi M., Eguchi N., Nishi N., Fujiwara M., Ogino S.-Y., Shiotani M., Sugidachi T.	4. 巻 99
2. 論文標題 Coordinated Upper-Troposphere-to-Stratosphere Balloon Experiment in Biak	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Bulletin of the American Meteorological Society	6. 最初と最後の頁 1213 ~ 1230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0289.1	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 2件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 原口諒平, 林政彦, 原圭一郎, 平沢直彦, 中田浩毅, 尾塚馨一
2. 発表標題 口ガロ翌UAVを用いた東南極辺縁におけるエアロゾル観測
3. 学会等名 JpGU2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林政彦, 小野原智之, 原口諒平, 尾塚馨一, 岡部和夫
2. 発表標題 小型無人航空機を用いたin-situ情報による測風 - 風力三角形測風とホドグラフ測風 -
3. 学会等名 JpGU2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Haraguchi, M Hayashi, K. Hara, N. Hirasawa, K. Nakata, and K. Ozuka
2. 発表標題 Background and enhanced condensation nucleus observed by UAV around the edge of East Antarctica in summer
3. 学会等名 The 10th Symposium on Polar Research (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Hayashi, R. Haraguchi, K. Hara, N. Hirasawa and K. Nakata
2. 発表標題 Aerosol measurement around the rege of East Antarctica using Rogallo type UAV
3. 学会等名 The 9th Symposiumu on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 林政彦,岡部敦彦,石口元基,白石浩一
2. 発表標題 UAV搭載偏光OPCによる雲観測
3. 学会等名 第35回エアロゾル科学・技術研究討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堤雅貴,浜野惇,東野伸一郎,林政彦
2. 発表標題 高高度滑空型UAV (Strato Boomerang)の空力モデル推定法の評価
3. 学会等名 日本航空宇宙学会西部支部講演会(2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shin-Ichiro Higashino
2. 発表標題 The Aerosol Sample Return System in Antarctica Using a Balloon and an UAV
3. 学会等名 2018 KSAS GNC Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masahiko Hayashi, Naohiko Hirasawa, and Koki Nakada.
2. 発表標題 Aerosol measurements in Antarctica using "Kite Plane" in January 2017
3. 学会等名 5th Conference of the International Society for Atmospheric Research using Remotely-piloted Aircraft (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 林政彦、平沢尚彦、中田浩毅
2. 発表標題 第58次南極地域観測隊による南極氷床上S17における無人航空機観測
3. 学会等名 日本気象学会2017年度秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 東野伸一郎
2. 発表標題 自律無人航空機(UAS)の応用研究について - ドローンの未来 -
3. 学会等名 IoTとドローン活用技術研究会発表会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 東野伸一郎
2. 発表標題 無人機による極限環境における科学観測
3. 学会等名 平成29年度宇宙航行の力学シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 浜野惇，藤田拓己，東野伸一郎
2. 発表標題 高高度気球分離型自動帰還UAVの飛行実験による空力特性の推定に関する研究
3. 学会等名 日本航空宇宙学会西部支部講演会講演集(2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 林政彦，白石浩一，東野伸一郎，尾塚馨一
2. 発表標題 冬季極域成層圏から覗く宇宙 - 小型無人航空機の挑戦 -
3. 学会等名 第34回エアロゾル科学・技術研究討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 林政彦，平沢尚彦，小西啓之，中田浩毅
2. 発表標題 第58次南極地域観測隊による南極氷床上S17における無人航空機観測
3. 学会等名 第34回エアロゾル科学・技術研究討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Hayashi, N. Hirasawa, K. Nakata and S. Higashino
2. 発表標題 Aerosol measurements in Antarctica using "Kite Plane" in January 2017
3. 学会等名 ISARRA (International Society for Atmospheric Research using Remotely piloted Aircraft) 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 林政彦, 平沢尚彦, 小西啓之, 中田浩毅
2. 発表標題 無人航空機による南極大陸辺縁部のエアロゾル分布観測
3. 学会等名 第34回エアロゾル科学・技術討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 林政彦, 白石浩一
2. 発表標題 冬季極域成層圏から覗く宇宙 - 小型無人航空機の挑戦 -
3. 学会等名 第34回エアロゾル科学・技術討論会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>福岡大学「福岡から診る大気環境研究所」 http://www.se.fukuoka-u.ac.jp/wordpress/fiteh/ 九州大学大学院工学研究院航空宇宙工学部門飛行力学研究室 http://www.aero.kyushu-u.ac.jp/fdl/index-j.html 九州大学大学院工学研究院航空宇宙工学部門飛行力学研究室 http://www.aero.kyushu-u.ac.jp/fdl/index-j.html 福岡大学産学官連携研究機関 福岡から診る大気環境研究所 http://www.se.fukuoka-u.ac.jp/wordpress/fiteh/</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	白石 浩一 (Shiraishi Koichi) (80299536)	福岡大学・理学部・助教 (37111)	
研究分担者	東野 伸一郎 (Higashino Shin-Ichiro) (40243901)	九州大学・工学研究院・准教授 (17102)	