

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24403001

研究課題名(和文)南極大陸辺縁部における夏季エアロゾル相の上下混合過程の飛翔体観測

研究課題名(英文)Air-borne in-situ observation for vertical mixing process of aerosols over coastal region of Antarctic continent

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) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：第54次および第56次日本南極地域観測隊により、2013年および2015年1月に、気球浮揚無人航空機による昭和基地近傍の成層圏・対流圏エアロゾルの粒径分布の観測とエアロゾルサンプルの採取を行った。2013年1月は最高高度10kmまで、2015年1月は最高高度23kmまでのデータ、サンプルを取得した。

56次観測隊では、しらせ船上からのエアロゾル-オゾン連結ゾンデの観測を実施し、昭和基地における観測と合わせて、緯度方向の分布の違いを観測することに成功した。

同時に、昭和基地におけるエアロゾルゾンデ観測データ解析により、2000年以降の成層圏エアロゾル量の増加等の減少を見出している。

研究成果の概要(英文)：In order to understand stratosphere troposphere exchange of aerosols over polar and subpolar region, aerosol observations by Balloon assisted Gliding UAV were performed at Syowa Station, Antarctica in January 2013 and 2015. Vertical profiles of aerosol size distribution and aerosol samples, up to 10km in 2013 and 23km in 2015, were obtained. Balloon soundings from Ice breaker, Shirase, for observation of aerosol and ozone concentrations also performed in 2014/15 austral summer in order to obtain meridional variation of aerosol and ozone profiles.

Based on the analyses of dataset of balloon borne aerosol sounding at Syowa Station from 1997, It was found that stratospheric aerosol over Antarctica has been increasing from 2000.

研究分野：大気科学

キーワード：エアロゾル 南極圏界面層 無人航空機観測 気球観測 成層圏対流圏交換 オゾン 長期変動 物質循環

1. 研究開始当初の背景

昭和基地における地上エアロゾルの組成分析によれば、粗大粒子においては冬季のエアロゾルは海塩などの一次粒子が卓越するのに対し、微小粒子は、硫酸および硫酸塩が卓越する。この硫酸塩は、冬季は中和の進んだ比較的大きな硫酸塩が卓越する。一方で、夏季には、冬季に比べて中和の進んでいない小さな粒子が卓越する。夏季の硫酸エアロゾルの卓越は生物起源のジメチルスルフォイド (DMS) の大気中酸化により生成した硫酸イオンが粒子化するためであると考えられている。一方、冬季には日射がないためにガス状硫黄化合物が少なく、かつ、光化学反応が進行しないために原料供給がなく、成層圏から沈降してきたエアロゾルが地表付近にまで達して、量的に卓越するためと考えられている。一方、水蒸気同位体分析によれば夏季は冬季に比べてトリチウムの比率が高くなり、成層圏の影響が地表付近にまで及んでいることが示唆されている。このトリチウムの振舞いは、硫酸エアロゾルが主に対流圏起源物質であるという結果とは矛盾している。気象場的な視点から見れば、夏季には南極大陸上にも積乱雲が頻りに立ち、気温の鉛直分布における温度減率が大きいなど、対流圏における対流活動が対流圏全層に及んでいることが示唆される。このような対流活動は冬季に成層圏から対流圏に沈降してきたエアロゾルを対流圏上層から下層に輸送するシステムとなっている。昭和基地上空の夏季のエアロゾルサンプリングによれば、全球の成層圏にその影響が及んだエルチヨン火山の噴火の後に、火山灰と考えられる粒子が対流圏上層から検出されており、成層圏起源の粒子が夏季に対流圏に拡散していることが示唆されている。

このように、夏季に極域では成層圏の影響が対流圏に及び、対流圏では対流活動による鉛直混合が活発に行われていることが示唆されるにもかかわらず、成層圏エアロゾルの影響はあまり地表面近傍では見られない。夏季に成層圏エアロゾルの対流圏における輸送機構は未だによく理解されていない。

最近、代表者を中心とする研究により、小型のエアロゾルゾンデの開発と気球分離式無人航空機の開発が進められてきた。これらの開発研究により、昭和基地における高度 10km までのエアロゾル鉛直分布の繰り返し観測、サンプル回収、しらせ船上からの気球によるエアロゾルゾンデ観測、エアロゾル-オゾンの連結同時観測が行えるようになった。また、昭和基地におけるエアロゾルゾンデ観測は、代表者らが南極地域観測隊員として越冬観測を行った 1997 年を起点として、毎年夏季の対流圏・成層圏エアロゾル鉛直分布観測を続け 14 年間のデータを蓄積してきた。

これらの成果により、1)~3)の3つの観測・解析を総合的に進めることで、定点(昭

和基地)長期変動、定点(昭和基地)上空の粒径分布と組成の鉛直分布の実像の把握、分布の夏季の対流圏エアロゾルに対する成層圏の影響について検討を進めること、さらには、無人航空機システムの可能性についての実証的な検討をが可能になった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、主に次の3つの科学的目標と1つの技術開発的目標からなる。

(1) 昭和基地における無人航空機観測により、地上から高度 10km までのエアロゾルの組成、特に硫酸および硫酸塩エアロゾルの内部・外部混合状態の分布とその変動、不揮発性粒子濃度などの揮発特性分布を、さらに、対流圏エアロゾルにおける成層圏物質と対流圏物質の寄与を明らかにする。

(2) 船上からのエアロゾル・オゾン連結ゾンデの観測により、中緯度から昭和基地にいたるエアロゾルの粒径別の子午面断面分布、粒径分布の子午面分布をオゾン分布とともに明らかにする

(3) 過去 15 年のエアロゾルゾンデ観測データの解析により、特に長期的な夏季の対流圏エアロゾルの変動とその変動要因について明らかにする。

以上を総合的に検討し、特に、夏季に極域成層圏エアロゾルが対流圏エアロゾルの分布と組成、特性に与える影響について明らかにする。

(4) さらに、これらの研究を通じて、これからの観測手法としての気球分離式無人航空機システムの課題と可能性と実用性について明らかにしてゆく。

3. 研究の方法

①昭和基地における気球分離式無人航空機を用いた夏季エアロゾルの粒径分布観測とサンプル回収(平成 24 年度)、回収サンプルの分析(H25 年度)による粒径分布とエアロゾル組成、混合状態の鉛直構造直接観測、②しらせ船上からの気球によるエアロゾル粒径分布の直接観測によるエアロゾル粒径分布の子午面断面像の把握(H25 年度)、③1998 年からのエアロゾルゾンデ観測データ解析による対流圏及び成層圏エアロゾル粒径分布の 17 年間の変動の解析(H24-26 年度)。以上を通じて、南極域エアロゾルの長期変動の実態と対流圏-成層圏エアロゾル交換と極域対流圏エアロゾル変動に対する影響を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 気球浮揚自律帰還滑空型 UAV 開発

第 54 次南極地域観測隊に、研究分担者である東野伸一郎が観測隊員として、また、研究代表者の指導学生である大学院生が観測隊同行者として参加して、2012 年 12 月~2013 年 2 月に昭和基地において、観測を実施した。

分離高度を 5km から少しずつあげて、5 階の観測を行い、最終的には、分離高度 10km での分離、自動帰還に成功した。図 1 は、54 次隊による昭和基地における観測の様子である。



図 1 無人機放球の瞬間
(第 54 次南極地域観測隊)

第 54 次では、高度 10km で気球を分離した直後に滑空状態に入れた。しかし、より高高度では、大気密度が極端に小さくなり、航空機の飛行特性が大きく変わる。そこで、成層圏エアロゾルの観測を実現するために、気球分離後はパラシュート降下を行い、飛行制御可能な高度（高度 12km）まで降下した時点でパラシュートを切り離し、自律制御滑空を行うシステムを開発した。このシステムは、54 次観測隊の 2 年後に 56 次南極地域観測隊に分担者である東野伸一郎が再び観測隊員として参加して、昭和基地および南極大陸上の S17 観測拠点において観測を実施し、23km までの観測に成功した。図 2, 3 は 56 次隊による観測の様子である。



図 2 S17 観測拠点における気球浮揚滑空 UAV の放球準備 8 第 56 次南極地域観測隊)

UAV には、市販のスポーツカメラを搭載しており、観測に撮像テストを兼ねた。図 4 は高度 23km で撮影された動画から切り出した画像である。南極大陸の明るい白に対して、対気の薄い成層圏大気の暗さが際立っている。このような撮像の成功は、科学的な利用の可能性を示唆するものでもある。

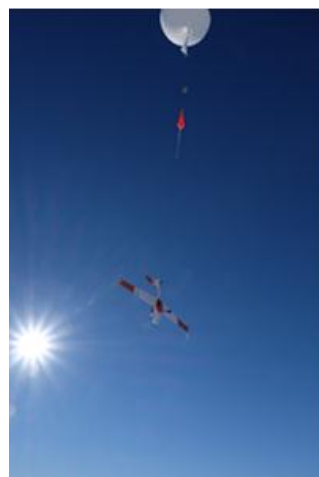


図 3 3kg ゴム気球で放球された自律滑空 UAV

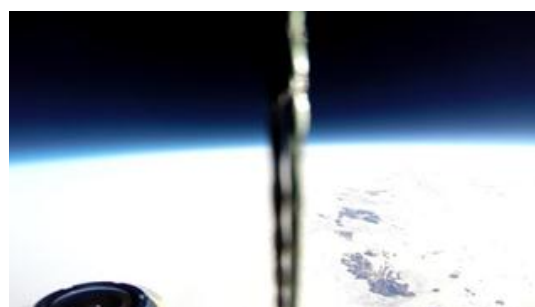


図 4 高度 23km で撮影された成層圏の空と南極大陸

(2) 船上エアロゾル・オゾン連結ゾンデ観測

南半球高緯度の海洋では緯度方向の大気要素の観測プラットフォームに限られる。しらせを利用してインド洋海域上空のエアロゾル・オゾン鉛直分布の同時観測を行った。備え付けの気球放球設備のないしらせからの放球であるため、圏界面付近の観測に狙いを絞り、小型の 800g 気球で 20km までの観測を成功させることとした。図 5 はしらせ乗員の協力を得て、しらせ甲板からエアロゾル・オゾン連結ゾンデが放球される瞬間である。なお、ガスの充填・放球に際しては、気球を安定させるために放球袋を使用した。



図 5 エアロゾル・オゾン連結ゾンデの 800g 気球によるしらせ飛行甲板からの放球

この観測は、3回の放球を行い、放球そのものは、3回とも成功した。船上観測の可能性を広げるとともに、放球袋の利用の有効性や、エアロゾル・オゾン同時観測の可能性を示すものでもある。

(3) 観測結果

a. 2013年1月の対流圏エアロゾル

観測結果の解析、サンプルの分析は現在、行っている途中である。ここでは、一例として、高度6kmで分離した1/18の光散乱粒子計数装置による観測結果(図6)とサンプルの電子顕微鏡画像(図7)を示す。

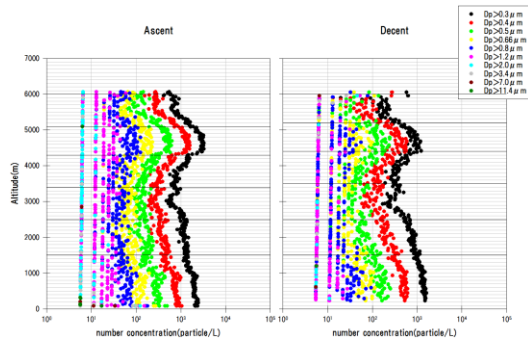


図6 2013年1月18日の昭和基地上空の積算エアロゾル濃度の鉛直分布

左：気球により上昇中の観測結果
右：グライダーとして滑空中の観測結果

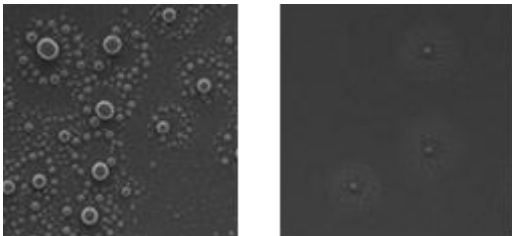


図7 2013年1月18日に採取されたエアロゾルの走査電子顕微鏡画像

左：高度4.3~5.1km
右：高度3.5~4.3km

気球による上昇中の観測データとグライダーとしての滑空(下降)中の観測データを比較すると、上昇中の方が濃度が高い。滑空速度は25m/sec程度、上昇速度は5m/sec程度である。採取筒を流線に対して直交するように突き出しているため、高速で飛行しているときは、エアロゾルの吸引ロスが起きているためと考えられる。

また、共通して、高度4.3~5km付近に高濃度のピークがみられる。この高濃度ピークのあたりで典型的に見られたエアロゾルの形態(図7左)とその下層の低濃度領域で見られたエアロゾルの形態(図7右)では、大きな違いがみられた。

5日間の後方流線解析では、高濃度層はやや緯度が低い海域の境界層高度に達した。海洋境界層起源の可能性が高いが、組成とし

ては海塩粒子のようなものが見られないことから、より詳細な解析が必要であると考えられる。

b. エアロゾル・オゾン子午面分布

船上エアロゾルーオゾン連結ゾンデの観測結果を図8、9に、昭和基地におけるエアロゾルーオゾン連結ゾンデの観測結果を図10に示す。南半球夏期の12月、1月初旬の南緯55度、60度、68度の鉛直分布である。圏界面高度は、8-10kmで、オゾン混合比は圏界面で急激変化している。オゾン混合比が低い圏界面から高度14kmの間に2層のエアロゾル層が認められ、圏界面より下では降水による除去作用の結果とみられる極端にエアロゾル濃度が低い領域が見られる。

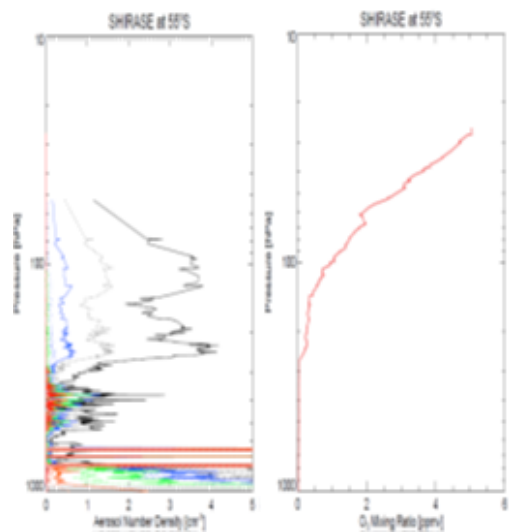


図8 2014年12月5日の南緯55度のエアロゾル数濃度(左)、オゾン混合比(右)の鉛直分布

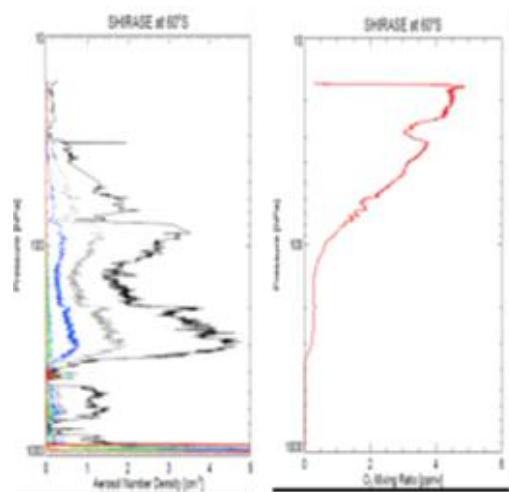


図9 2014年12月12日の南緯60度のエアロゾル数濃度(左)、オゾン混合比(右)の鉛直分布

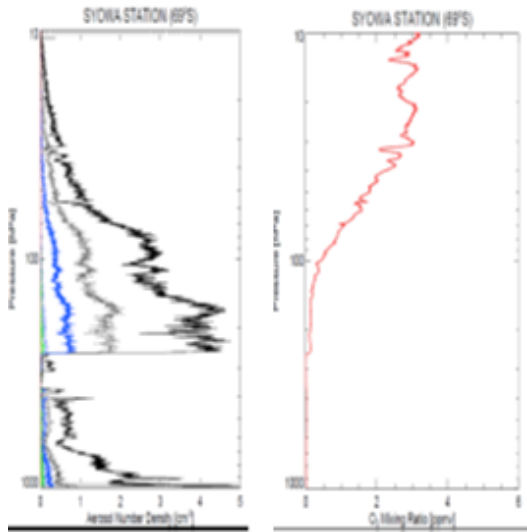


図 10 2015 年 1 月 4 日の昭和基地上空のエアロゾル数濃度 (左), オゾン混合比 (右) の鉛直分布

c. 2015 年 1 月の昭和基地, S17 上空のエアロゾル分布

気球浮揚無人航空機観測によって、2015 年 1 月 5, 24, 29 日に、エアロゾルの粒径分布とサンプル採取を行った。1 月 24 日には、航空機によるエアロゾル採取としては世界的に見て最高高度である 22km からの採取に成功した。採取したサンプルの分析は、今後進める。

光散乱粒子計数装置により観測されたエアロゾル鉛直分布を図 11 に示す。船上および昭和基地における鉛直分布と同様に、高度 10~14km に 2 層のエアロゾル層が見られる。これらのエアロゾル層は、この期間を通じて安定的に存在していたとみられる。ただし、その数濃度の違いは大きく、空間的に不均一な層であったと考えられる。

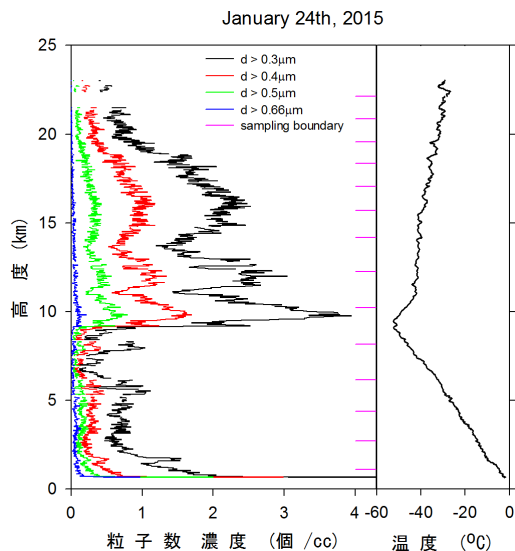


図 11 2015 年 1 月 24 日に S17 上空で観測されたエアロゾル数濃度の鉛直分布

図 12 には、2015 年 1 月 4 日に昭和基地で、1 月 24 日、29 日に S17 で得られたエアロゾルの鉛直分布を重ね書きして示した。3 回の観測で、高度 15km より上空と比べて、下層の成層圏エアロゾル層の方が変動が大きいことが分かる。上空のエアロゾル層は、いわゆるユング層であり、成層圏の主たるエアロゾル層である。高度 14km より下層の 2 つのエアロゾル層は時間的にも変動が大きい層であったと考えられる。また、1 月 29 日の観測では、圏界面より低い領域にエアロゾル濃度が若干隙空き領域があり、他の観測では、非常にシャープな境界が明瞭に存在するのに対して、高度とともに濃度が漸減している。この結果は圏界面より下層のエアロゾルがかなり広い領域で降水活動によって除去されていることを示すものである。

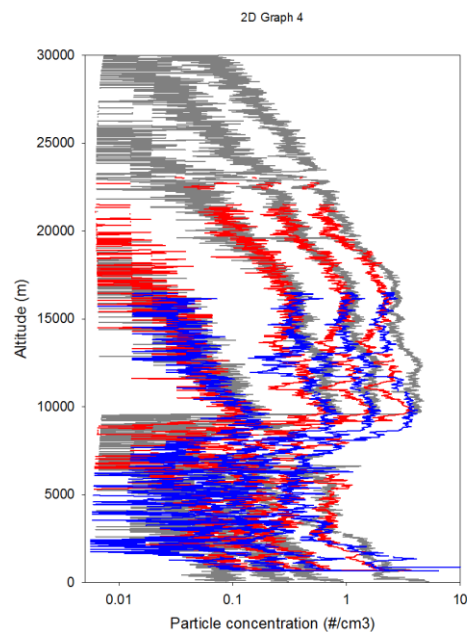


図 12 2015 年 1 月に昭和基地及び S17 で観測されたエアロゾルの鉛直分布

直径 0.3, 0.4, 0.5, 0.66 μm より大きい粒子の数濃度を示す。

灰: 1/4, 昭和基地, 気球観測

赤: 1/24, S17 気球浮揚 UAV 観測

青: 1/29, S17 気球浮揚 UAV 観測

d. エアロゾルの長期変動と特徴

昭和基地における 18 年間のエアロゾルゾンデ観測の結果から、成層圏エアロゾルの長期変動と夏季の対流圏エアロゾルの鉛直分布の特徴を検討した。

成層圏エアロゾル濃度は、ピナツボ火山の噴火の影響が残る 1998 年から 2000 年にかけて減少していたが、2000 年からは増加傾向に転じている。この変化は全球的にライダー観測などに基づいて報告されている傾向と同じである。現在、粒径分布の特徴の変化なども検討を進めている。

夏季の対流圏エアロゾルの濃度は、高度約 5km で極小をとり、高度 8~10km では濃度が

高くなるとともに濃度のばらつきも大きくなっている。これは、圏界面高度の変化により、成層圏のエアロゾル層の影響が異なるために現れている現象である。同時に、58次南国地域観測隊で観測され、先に述べたように、圏界面直下は、降水活動によるエアロゾル除去の有無によっても大きく濃度が変動することも反映しているとみられる。

本補助金によって得られた成果は、南極のエアロゾル循環に関する知見だけではなく、無人航空機による観測の可能性、船上観測の可能性の広がりを示すものでもある。

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 3件)

- ① Shin-Ichiro HIGASHINO, Masahiko HAYASHI, Shuji NIAGASAKI, Shiina UEMOTO, and Motoki NISHIMURA, A Balloon-Assisted Gliding UAV for Aerosol Observation in Antarctica, Transactions of JSASS Aerospace Technology Japan, Vol.12, No. APISAT-2013, pp. a35-a41, 2014. (査読有)
- ② 尾塚馨一, 林政彦, 岡部和夫, 東野伸一郎, 無人航空機によるリアルタイム in-situ 測風, 福岡大学理学集報, 44 巻, pp45-52, 2014. (査読なし)
- ③ Shin-Ichiro HIGASHINO, Masahiko HAYASHI, Shuji NIAGASAKI, Shiina UEMOTO, and Motoki NISHIMURA, A Balloon-Assisted Gliding UAV for Aerosol Observation in Antarctica Proceedings of The 2013 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT-2013), Takamatsu, Japan, 2013. (査読有)

[学会発表] (計 6件)

- ① Masahiko Hayashi, Shin-Ichiro Higashino, Shuji Nagasawa, Shiina Uemoto, Motoki Nishimura, Keiichiro Hara, Transport of maritime sulfate aerosol to free troposphere in East Antarctica in January 2013, observed by balloon assisted UAV, 2015 Asian Aerosol Conference (AAC2015) Jun. 24 - Jun. 26, 2015, Kanazawa, Japan
- ② 岡田拓也, 東野伸一郎, 林政彦, 長崎秀司, 尾塚馨一, 吉永悠ほか, 気球分離型自律帰還滑空 UAV を用いた南極における高高度エアロゾル観測システム, 第 52 回飛行機シンポジウム講演集(CD-ROM), 2014 年 10 月 8 ~10 日, 長崎ブリックホール (長崎) .
- ③ 林政彦, 梅本紫衣奈, 尾塚馨一, 執行いずみ, 原圭一郎, 東野伸一郎, 長崎秀司, 西村太貴, 海洋起源エアロゾルの南極自由対流圏への輸送-2013 年 1 月の無人航空機

観測-, 第 31 回エアロゾル科学・技術研究討議会, 2014 年 8 月 6~8 日, 筑波大学 (つくば)

- ④ 林政彦, 平沢尚彦, 東野伸一郎, 南極観測における無人航空機観測の展開, 第 4 回極域科学シンポジウム, 2013 年 11 月 12~15 日, 国立極地研究所 (立川)
- ⑤ 林政彦, 梅本紫衣奈, 原圭一郎, 東野伸一郎, 夏季南極昭和基地上空の対流圏, 成層圏下部のエアロゾル濃度鉛直分布, 第 33 回極域気水圏シンポジウム, 2012 年 11 月 26~30 日, 国立極地研究所 (立川)
- ⑥ 西村太貴, 長崎秀司, 梅本紫衣奈, 林政彦, 東野伸一郎, 気球分離型エアロゾル観測用無人航空機に関する研究, 日本航空宇宙学会西部支部講演会(2012), 2012 年 11 月 1, 2 日, 九州大学 (福岡)

[図書] (計 1件)

- ① Higashino, S., Funaki, M., Hirasawa, N., Hayashi, M., and Nagasaki, S., Development and Operational Experiences of UAVs for Scientific Research in Antarctica, in Autonomous Control Systems and Vehicles - International Series on Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering, ISBN 978-4-431-54275-9, Vol. 65, pp. 159-173, Springer, 2013

[その他]

ホームページ等

九州大学飛行力学研究室

http://www.aero.kyushu-u.ac.jp/fdl/la_testreports.html

国立極地研究所プレスリリース(2件)

<http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20130305.html>

<http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20150313.html>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

東野 伸一郎 (HIGASHINO, Shin-ichiro)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号: 40243901

原圭一郎 (HARA, Kei-ichiro)

福岡大学・理学部・助教

研究者番号: 10390593

白石浩一 (SHIRAISHI, Kouichi)

福岡大学・理学部・助教

研究者番号: 80299536