

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02814

研究課題名(和文) 大気中アルゴン濃度の超高精度観測に基づく気候システム温暖化のモニタリング

研究課題名(英文) Evaluation of global warming based on a precise observation of the atmospheric Ar/N2 ratio

研究代表者

石戸谷 重之 (Ishidoya, Shigeyuki)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・環境管理研究部門・研究グループ付

研究者番号：70374907

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：大気中アルゴン濃度は海水温変動に起因してごく僅かに変動するため、高精度観測から広域平均の海洋貯熱量変動の情報が得られると期待される。本研究では開発した大気中アルゴン、酸素および二酸化炭素濃度等の高精度同時観測装置を用いて、つくば市における連続観測と、落石岬、高山市、波照間島、南鳥島および昭和基地において保存容器に採取した試料の分析により大気中アルゴン濃度の広域観測を行なった。各サイトで観測されたアルゴン濃度は夏季に極大値を示す明瞭な季節変動を示し、比較的長期の観測結果が得られているつくば市および波照間島のアルゴン濃度には、海洋観測に基づく全球の海洋貯熱量の変動と関連した年々変動が見られた。

研究成果の概要(英文)：Variations in the atmospheric Ar/N2 ratio at the surface are driven principally by air-sea Ar and N2 fluxes due to changes in solubility, and the Ar/N2 ratio is expected to be a unique tracer for spatiotemporally-integrated air-sea heat flux. We have conducted observations of the Ar/N2 ratio at Tsukuba, Hateruma Island, Cape Ochi-ishi, Takayama, Minamitorishima Island, Japan and at Syowa, Antarctica. The measurement system employing a mass spectrometer was used not only for the continuous observations at Tsukuba but also for the analyses of the air samples collected in flasks at other sites. We found clear seasonal Ar/N2 cycles with summertime maxima at all sites and year-to-year variations in the Ar/N2 ratio, derived from 5-years data at Tsukuba and Hateruma, generally in phase with the variations in the global ocean heat content reported by NOAA/NODC. These facts suggest that the Ar/N2 ratio observed in this study reflected wide-area ocean temperature changes.

研究分野：大気科学

キーワード：大気中アルゴン濃度 海洋貯熱量 地球温暖化

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化についての最近のトピックとして、2000年以降に全球平均気温の上昇が停止し、一方で海洋の貯熱量は増加を続けており、特に海洋深層で急激に増加していることが注目されている。全球気温上昇の停滞は温暖化の「ハイエイタス」現象と呼ばれ、その解明のための研究が活発に実施されている。ハイエイタス現象は、近年の大気中二酸化炭素(CO₂)濃度増加等に起因した放射強制力を解消するための地球表層大気の温度上昇に相当する熱量が、大気から海洋中に蓄積されていることが原因として有力視されている。現状では、海洋の深層における貯熱量の増加がより顕著であるため、今回のハイエイタス期間において地球表層から海洋中に熱量を運び去っているプロセスは、大気と海洋とを合わせた気候システム内部の自然変動と密接に関連している。そのため、今後の気候システムのさらなる変動によって、海洋深層の蓄熱が解放されて地球表層に放出された場合には、増加を続けている大気中CO₂による放射強制力の強化と相まって、大気において急激な温暖化と気候変動が生じることも懸念される。従って、海洋全層の貯熱量の時空間変動の長期モニタリングは、今後の気候システム温暖化の予測の上で極めて重要な課題である。

この課題の解決には、従来の海洋観測だけではなく、大気中のアルゴン(Ar)濃度の超高精度の観測によって海洋貯熱量の変化を捉える新たな方法が有用であると考えられる。Ar濃度(Ar/N₂比)は、Arと窒素(N₂)が極めて安定であり、気候システム内の総量がほぼ完全に保存される成分であるため、海洋貯熱量(海水温)変動による溶解度の変動がArとN₂とで異なることにのみ起因して大気中濃度が変動する。従って、Ar濃度の長期変動は、全球の海洋全層平均の貯熱量変動を直接に反映する指標になると期待される(Ritz et al., 2011)。またAr濃度の経年および季節変動を用いて、同じく超高精度で観測された大気中酸素(O₂)濃度の変動に対する海洋貯熱量変動の影響を評価し、O₂濃度に基づく大気・海洋・陸上生物圏間のCO₂循環の解析を高精度化することも期待できる。しかしながら大気中Ar濃度の超高精度観測は極めて困難であり、現在までその長期トレンドにおける増加・減少傾向を検出した例はなく、季節変動についても論文報告例は、我々のグループを含めて世界で3例に限られる(Keeling et al., 2004; Cassar et al., 2008; Ishidoya and Murayama, 2014)。そのため、Ar濃度の観測網を拡充し、長期的なモニタリングを展開することが強く望まれる。

2. 研究の目的

本研究では、観測例が極めて限られている大気中Ar濃度の高精度観測手法を確立し、広域観測を展開する。得られた観測結果について、主に季節変動と経年変動に着目し、観測

サイト周辺の表層海水温の変動、全球の海洋貯熱量の変動、および大気中Ar濃度についての大気輸送モデル計算結果との比較を行うことで、現在まで報告されている海洋貯熱量データを検証する。

3. 研究の方法

我々は、質量分析計を検出器として用い、独自の試料導入システムを開発することで、つくば市におけるAr濃度とO₂濃度の超高精度での連続観測に成功している(Ishidoya and Murayama, 2014)。本連続観測を継続するとともに、Ar濃度観測の広域展開のため、保存容器に採取された大気試料のAr濃度の分析手法を確立する。確立した保存試料の分析手法を用いて、Ar濃度観測網を拡充する。国内においては、北海道落石岬、岐阜県高山市(乗鞍岳中腹)、沖縄県波照間島および東京都南鳥島(小笠原諸島)において採取した大気試料のAr濃度およびO₂濃度を分析することで、オホーツク海、日本海、南シナ海および西部太平洋における貯熱量変動の情報を網羅した観測ネットワークを形成する。また、南極観測隊の1年4ヶ月の越冬期間において、Ar濃度が変質せずに保存できる最適な保存容器を検討・製造し、南極昭和基地でのAr濃度観測を実現する。観測と並行して、大気海洋間の熱フラックスのアノマリーデータに基づく大気海洋間ArおよびN₂フラックスを用いた大気中Ar濃度の気候輸送モデル計算や、海洋観測により報告されている海洋貯熱量データを用いた解析を行い、観測されたAr濃度変動の定量的解釈を進める。

4. 研究成果

分析システムについては、システムの最適化と標準ガスの相互検定を定期的に行い、標準ガス分析値の過去5年間の安定性として評価したAr濃度およびO₂濃度の精度(再現性)はそれぞれ約±5および±4 per meg(年平均値では±2および±2 per meg)であり、10~20 per meg程度の振幅が予測される大気中Ar濃度の季節変動や、10年程度で数per megの増加が予測される大気中Ar濃度の経年変動を捉え得る超高精度を長期に亘って維持することに成功した。また、昭和基地での観測を実現するため、試料を長期に保存してもAr濃度とO₂濃度が変質しにくい保存容器を、内面シリカコーティング処理と容器両端へのメタルシールバルブの二連続続により実現し、実際の観測に応用した。なおAr(O₂)濃度は標準試料のAr/N₂(O₂/N₂)比に対する測定試料の当該比の偏差を表す $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ ($\delta(\text{O}_2/\text{N}_2)$)で表記され、 $\delta(\text{Ar}/\text{N}_2)$ の107 per meg($\delta(\text{O}_2/\text{N}_2)$ の4.8 per meg)の変化はAr(O₂)濃度の1 ppmに変化にほぼ相当する。

図1に、北から南の緯度順に、落石岬(43°N)、つくば市(36°N)、高山市(36°N)、波照間島(24°N)、南鳥島(24°N)および昭和基地(69°S)において本研究で観測された、大気

中 Ar 濃度と大気ポテンシャル酸素 (APO) の変動を示す。ここで APO は O_2 濃度と CO_2 濃度を用いて $APO = O_2 + 1.1 \times CO_2$ として表され、 O_2 濃度の変動から陸上生物活動の影響を取り除き、 O_2 濃度変動に対する大気海洋間 O_2 交換の寄与を表すために用いられる指標である (ただし APO の長期トレンドには化石燃料消費による O_2 減少と海洋の CO_2 吸収も強く寄与する)。

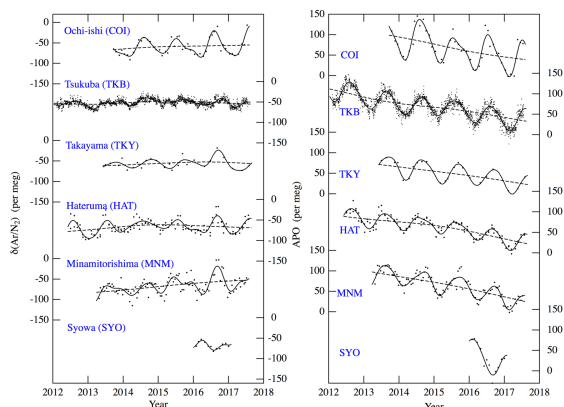


図 1 : 落石岬 (COI)、つくば市 (TKB)、高山市 (TKY)、波照間島 (HAT)、南鳥島 (MNM) および昭和基地 (SYO) で観測された大気中 Ar 濃度 ($\delta(Ar/N_2)$, 左図) および APO (右図) の変動。つくば市の APO は、局所的な化石燃料消費の影響を受けたデータを除外してある。実線は観測値に対するベストフィットカーブ (Nakazawa et al., 1997)、破線はその経年変動成分を示し、本研究では変動周期 3 年以上の長周期変動を経年変動成分と見なした。

Ar 濃度はいずれの観測サイトでも夏季から秋季にかけて極大値を示す明瞭な季節変動を示した。背景で述べたように大気中の Ar 濃度は海水温変動に伴って変動するが、溶解度の温度依存性は Ar のほうが N_2 より大きく、夏季に水温が上昇すると Ar が優先的に海から大気に放出されることになる。図 1 に見られる季節変動の位相はこの事実と整合的である。また APO も夏季に極大値を示す季節変動を示しているが、Ar 濃度の季節変動と組み合わせることで、大気海洋間 O_2 交換に占める溶解度変動の寄与と海洋生物活動の寄与を分離して評価できると期待される。

図 2 には、Ar 濃度の季節変動と、Ar と O_2 濃度の溶解度の比から予測される係数 (Blaine, 2005) から APO 季節変動に占める溶解度変動の寄与による変動を推定し、残差としての海洋生物活動の寄与による季節変動と併せて図示した結果を示す。ただし海洋生物活動の寄与には、海洋表層の生物活動と、生物活動により O_2 が消費された深層水と表層水の混合による寄与の両者が含まれている。

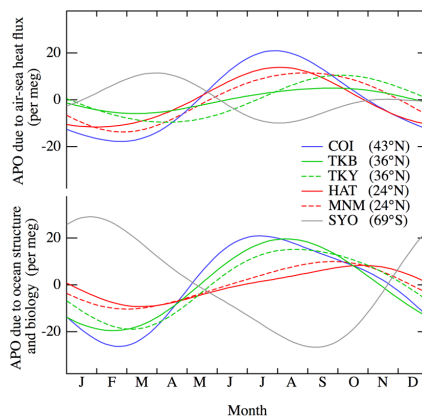


図 2 : 各観測サイトで得られた APO の平均的な季節変動について、Ar 濃度の季節変動に基づき推定した溶解度変動由来の APO の季節変動 (上) と、観測された APO 季節変動と溶解度由来 APO の残差として求めた海洋生物活動由来の APO 季節変動 (下)。

図から、APO 季節変動に対する溶解度変動と海洋生物活動の寄与はおおまかに同位相であり、APO 季節変動に対する寄与率は、振幅比で見ただけでは両者がほぼ同等か、溶解度変動による寄与のほうがやや小さいことが見て取れる。このような APO の変動要因評価は Ar 濃度の重要な応用例の一つとして期待されるが、以下のように本研究では、解決しなければならない実験上の課題が見出された。すなわち、波照間島で行ったガラス容器とシリカコーティング金属容器との比較実験から、後者の分析結果に基づく Ar 濃度季節変動の振幅が、ガラス容器の場合に比して半分以下になることが明らかになった。なお本報告書で示している波照間の観測結果はガラス容器の場合の結果である。本研究では落石岬と南鳥島においてもガラス容器で観測を行っているが、後述のようにこれらの観測サイトでは季節変動について観測とモデル計算結果の乖離が大きく、ガラス容器の場合の結果に問題がある可能性がやや高い。今後、メカニズムを解明し、これまでの結果を補正する手法の検討が必要である。

図 3 に Ar 濃度と APO の観測結果と、大気輸送モデル (NICAM-TM) (e.g. Niwa et al., 2012) を用いた計算結果を示す。モデルには国際的な大気輸送モデル比較プロジェクト (TransCom) で採用されている大気海洋間 O_2 および N_2 フラックスを与え (N_2 フラックスの導出は、ヨーロッパ中期予報センター ECMWF の大気海洋間熱フラックスに基づいている) (Keeling and Garcia, 2001)、計算された N_2 濃度を Ar と N_2 の溶解度比を考慮して Ar 濃度に換算した。

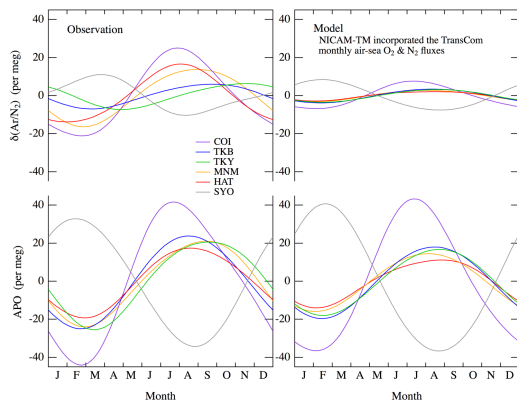


図3：Ar濃度とAPOの観測結果（左図）と大気輸送モデルによる計算結果（右図）。

図から、モデル計算によるAr濃度とAPOの季節変動は、その位相については観測された変動の位相を概ね再現しているものの、Ar濃度の振幅を大幅に過小評価していることが見て取れる。前述のようにガラス容器を用いている落石岬、波照間島および南鳥島の観測結果では観測された季節変動が過大評価である可能性があるが、それ以外の観測サイトでも、モデルは明らかにAr濃度の季節変動を過小評価している。この傾向は、異なる大気輸送モデル (STAG) (e.g. Taguchi et al., 2011) を用いた場合でも共通であったことから、モデルに与えたAr、N₂フラックスの季節変動、さらにはその導出元となる大気海洋間の季節的な熱交換が過小評価である可能性が示唆される。

ここまでに述べた季節変動に加えて、図1に示したAr濃度の経年変動成分には、不規則な年々変動が見られている。この年々変動と広域の海洋貯熱量変動との対応を調べるため、長期の観測結果が得られているつくば市と波照間島について、観測されたAr濃度の経年変動成分の年増加率と、アメリカ海洋大気庁 (NOAA) により報告されている0-2000 m深の海洋観測に基づく全球海洋貯熱量 (Levitus et al., 2012) の年増加率を比較した結果を図4に示す。

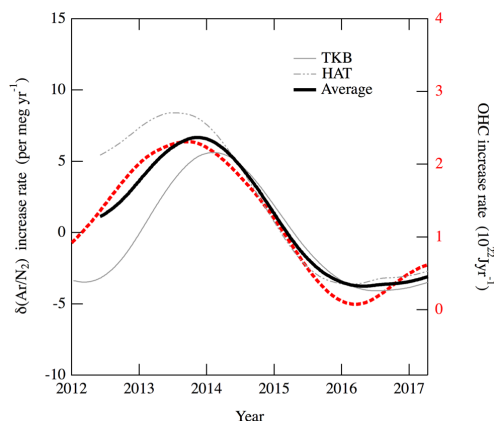


図4：つくば市と波照間で観測されたAr濃度の経年変動成分の年増加率（両観測サイトの平均値を黒実線で示す）と、アメリカ海洋大気庁 (NOAA) による0-2000 m深の全球海洋貯熱量の年増加率（赤破線）。

図から、Ar濃度と海洋貯熱量の年増加率の変動は高い正相関の関係にあり、大気中Ar濃度の長期変動が海洋貯熱量の変動を反映していることが示唆される。しかしながら、過去6年間で観測されたアルゴン濃度の年々変動量は、大気と海洋をそれぞれ1 boxと仮定した場合に海洋貯熱量の変動から予測される変動量よりも数倍大きい。これらのことから、大気中Ar濃度は広域平均の海水温変動を反映していると考えられるものの、数年程度の短期間の変動を、そのまま全海洋全層の貯熱量の変動と結び付けるのは早計であり、海洋のどの程度の領域・深度の水温変動が、どの程度の期間の大気中Ar濃度変動に反映するのかについて、今後、大気海洋結合モデルを用いた評価が必要である。

以上から、本研究で観測された大気中Ar濃度は、季節変動および経年変動の両者について、周辺海域およびより広域の海水温変動を反映した変動を示していることが強く示唆され、今後の長期・広域に亘る観測の展開によって、地球温暖化の実態解明に資する海洋貯熱量変動の把握の上で有用な情報が得られる可能性が示された。

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2件)

- (1) Sugawara, S., S. Ishidoya, S. Aoki, S. Morimoto, T. Nakazawa, S. Toyoda, Y. Inai, F. Hasebe, C. Ikeda, H. Honda, D. Goto, F. A. Putri, Age and gravitational separation of the stratospheric air over Indonesia, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18, 1819-1833, DOI: 10.5194/acp-18-1819-2018, 査読有。
- (2) Ishidoya S., K. Tsuboi, S. Murayama, H. Matsueda, N. Aoki, T. Shimosaka, H. Kondo, K. Saito, Development of a continuous measurement system for atmospheric O₂/N₂ ratio using a paramagnetic analyzer and its application in Minamitorishima Island, Japan, *SOLA*, 2017, 13, 230-234, DOI: 10.2151/sola.2017-042, 査読有。

[学会発表] (計26件)

- (1) 遠嶋康徳、保科優、向井人史、町田敏暢、中岡慎一郎、勝又啓一、石澤みさ、白井知

- 子、Shamil Maksyutov、北太平洋における大気中ポテンシャル酸素(APO)の分布について、第23回大気化学討論会、2017年。
- (2) 後藤大輔、森本真司、青木周司、中澤高清、石戸谷重之、村山昌平、橋田元、山内恭、Japanese observation programs of atmospheric greenhouse gases in polar regions、19th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases, and Related Measurement Techniques(国際学会)、2017年。
- (3) 遠嶋康徳、向井人史、町田敏暢、保科優、中岡慎一郎、Atmospheric O₂/N₂ and CO₂ observation in the Pacific region and its application to the global carbon budget estimation、10th International Carbon Dioxide Conference (ICDC10)(国際学会)、2017年。
- (4) 石戸谷重之、遠嶋康徳、坪井一寛、後藤大輔、村山昌平、森本真司、丹羽洋介、松枝秀和、Seasonal and interannual variations in the atmospheric Ar/N₂ ratio observed by air monitoring networks of Japanese research institutes、10th International Carbon Dioxide Conference (ICDC10)(国際学会)、2017年。
- (5) 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、中澤高清、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、気象学会2017年度春季大会、2017年。
- (6) 石戸谷重之、菅原敏、青木周司、森本真司、中澤高清、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(国際学会)、2017年。
- (7) 石戸谷重之、遠嶋康徳、坪井一寛、村山昌平、丹羽洋介、松枝秀和、国内5箇所の地上観測サイトにおける大気中アルゴン濃度の季節および年々変動、JpGU-AGU Joint Meeting 2017(国際学会)、2017年。
- (8) 石戸谷重之、村山昌平、近藤裕昭、青木伸行、下坂琢哉、大気中の酸素濃度およびアルゴン濃度の観測とその標準ガス開発における課題、標準ガスクラブ・温室効果ガス観測データ標準化ワーキンググループ合同講演会、2017年。
- (9) 後藤大輔、森本真司、青木周司、石戸谷重之、橋田元、中澤高清、山内恭、Monitoring of the atmospheric greenhouse gases at Syowa Station, Antarctica、第7回極域科学シンポジウム、2016年。
- (10) 石戸谷重之、遠嶋康徳、後藤大輔、村山昌平、森本真司、Year-to-year variations of the atmospheric Ar/N₂ and O₂/N₂ ratios observed in the northern mid-to-high latitudinal region for the period 2012-2016、第7回極域科学シンポジウム、2016年。
- (11) 遠嶋康徳、向井人史、町田敏暢、中岡慎一郎、2015/2016エルニーニョの際に観測された年平均APOの緯度分布の変化について、第22回大気化学討論会、2016年。
- (12) 石戸谷重之、遠嶋康徳、つくばと波照間における大気中アルゴン濃度と大気ポテンシャル酸素の変動、第22回大気化学討論会、2016年。
- (13) 遠嶋康徳、向井人史、町田敏暢、中岡慎一郎、大気中の酸素および二酸化炭素の観測に基づく過去15年間の炭素収支推定、日本地球惑星化学連合2016年大会、2016年。
- (14) 石戸谷重之、後藤大輔、菅原敏、森本真司、青木周司、村山昌平、中澤高清、スバルパール諸島ニールスンにおける大気主成分濃度・同位体比の観測から示唆される下層大気分子拡散分離、日本地球惑星化学連合2016年大会、2016年。
- (15) 石戸谷重之、菅原敏、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、村山昌平、インドネシア上空成層圏において観測された大気主成分の拡散分離、日本地球惑星化学連合2016年大会、2016年。
- (16) 石戸谷重之、村山昌平、Prabir K. Patra、田口彰一、青木周司、中澤高清、森本真司、後藤大輔、近藤裕昭、飛騨高山森林サイトにおける大気中酸素濃度観測に基づく2005-2015年の全球炭素収支、日本気象学会2016年度春季大会、2016年。
- (17) 遠嶋康徳、大気中酸素濃度の観測に基づく研究と課題、日本気象学会2015年度秋季大会、2015年。
- (18) 石戸谷重之、村山昌平、遠嶋康徳、坪井一寛、後藤大輔、田口彰一、松枝秀和、森本真司、菅原敏、気候変動と炭素循環の包括的評価を目指した大気中アルゴン濃度と酸素濃度の高精度観測、日本気象学会2015年度秋季大会、2015年。
- (19) 後藤大輔、森本真司、青木周司、中澤高清、Prabir K. Patra、Continuous measurements of APO at Ny-Ålesund, Svalbard、APO Workshop(国際学会)、2015年。
- (20) 石戸谷重之、坪井一寛、田口彰一、丹羽洋介、松枝秀和、村山昌平、高辻慎也、奥田智紀、出原幸志郎、森陽樹、細川周一、Time and space variations of Atmospheric Potential Oxygen over the Western North Pacific observed by using a cargo aircraft C-130H、APO Workshop(国際学会)、2015年。
- (21) 遠嶋康徳、Ralph F. Keeling、向井

- 人史、町田敏暢、Preliminary results on O₂/N₂ scale comparison between SIO and NIES based on flask sampling at La Jolla, 18th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases, and Related Measurement Techniques (GGMT)、2015 年.
- (22) 石戸谷重之、村山昌平、青木伸行、下坂琢哉、近藤裕昭、A system for continuous measurements of atmospheric O₂/N₂ and Ar/N₂ ratio, stable isotopic ratios of N₂, O₂ and Ar and its application in preparing gravimetric standards for atmospheric O₂/N₂ ratio, 18th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases, and Related Measurement Techniques (GGMT)、2015 年.
- (23) 遠嶋康徳、向井人史、町田敏暢、寺尾有希夫、落石岬における APO トレンド変化率の年々変動と PDO の関係、日本地球惑星科学連合 2015 年度連合大会、2015 年.
- (24) 石戸谷重之、村山昌平、遠嶋康徳、坪井一寛、松枝秀和、田口彰一、Prabir K. Patra、近藤裕昭、つくば市郊外、落石岬、波照間島および南鳥島における大気中アルゴン濃度と大気ポテンシャル酸素の同時観測、日本地球惑星科学連合 2015 年度連合大会、2015 年.
- (25) 石戸谷重之、田口彰一、笹野大輔、小杉如央、内田裕、森本真司、青木周司、村山昌平、石井雅男、遠嶋康徳、西野茂人、後藤大輔、藤田遼、弓場彬江、石島健太郎、中澤高清、北極域における船舶および地上観測による大気ポテンシャル酸素の変動要因の解明、日本気象学会 2015 年度春季大会、2015 年.
- (26) 石戸谷重之、菅原敏、森本真司、青木周司、中澤高清、本田秀之、豊田栄、稲飯洋一、橋田元、山内恭、植松光夫、長谷部文雄、後藤大輔、村山昌平、大気重力分離の観測に基づく成層圏大気循環の研究とその今後の展望、日本気象学会 2015 年度春季大会、2015 年.

[その他]

ホームページ等

<https://unit.aist.go.jp/emri/117aerg/ja/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石戸谷 重之 (ISHIDOYA Shigeyuki)
産業技術総合研究所・環境管理研究部門・
研究グループ付
研究者番号：70374907

(2) 研究分担者

遠嶋 康徳 (TOHJIMA Yasunori)

国立環境研究所・環境計測研究センター・
室長

研究者番号：40227559

坪井 一寛 (TSUBOI Kazuhiro)

気象庁気象研究所・海洋地球化学研究部・
主任研究官

研究者番号：10553167

田口 彰一 (TAGUCHI Shoichi)

産業技術総合研究所・環境管理研究部門・
上級主任研究員

研究者番号：10357395

後藤 大輔 (GOTO Daisuke)

国立極地研究所・気水圏研究グループ・助
教

研究者番号：10626386

村山 昌平 (MURAYAMA Shohei)

産業技術総合研究所・環境管理研究部門・
総括研究主幹

研究者番号：30222433

丹羽 洋介 (NIWA Yosuke)

気象庁気象研究所・海洋地球化学研究部・
主任研究官

研究者番号：70588318

(3) 連携研究者

松枝 秀和 (MATSUEDA Hidekazu)

気象庁気象研究所・海洋地球化学研究部・
室長

研究者番号：60354552

森本 真司 (MORIMOTO Shinji)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：30270424