

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：62611

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K20444

研究課題名(和文)北極域における大気ポテンシャル酸素(APO)の変動解明

研究課題名(英文)Studies on the atmospheric potential oxygen in the Arctic region

研究代表者

後藤 大輔(Goto, Daisuke)

国立極地研究所・研究教育系・助教

研究者番号：10626386

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文):大気ポテンシャル酸素(APO( $=O_2+1.1\times CO_2$ ))は大気-海洋間の $O_2$ 交換によって変動するトレーサーであり、大気-海洋間の $O_2$ 交換のメカニズムや、海洋循環、海洋生物過程の理解、全球炭素収支の定量評価に利用されている。本研究では、スバルバル諸島ニーオルスンにおいて $O_2$ 、 $CO_2$ およびAPOの系統的観測を実施し、十年規模周期の海水面温度の変動やエルニーニョ現象といった気候変動因子との比較から、APOの年々変動の実態を把握するとともに、 $O_2$ 、 $CO_2$ 、APOの長期変動を解析することにより海洋と陸上生物圏の全球平均的な $CO_2$ 吸収量を評価し、近年の炭素循環の定量的な理解に貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

産業革命以降の人為起源の $CO_2$ 排出量増加を主因とする「地球温暖化」は、国際的に重要な問題となっている。この問題に対応するためには、 $CO_2$ がどこからどれだけ大気に放出され、どこでどれだけ吸収されるか、という地球表層における炭素収支を解明し、 $CO_2$ 増加の原因を定量的に理解しなければならない。本研究では、全球 $CO_2$ 収支の定量評価に利用可能な大気中 $O_2$ および $CO_2$ 濃度の長期観測を実施した。観測された両者の長期的な変動傾向を解析することにより、近年の地球表層の $CO_2$ 収支を定量的に評価し、全球炭素循環の定量理解に貢献した。

研究成果の概要(英文):Atmospheric Potential Oxygen (APO) is a unique tracer that varies due to oxygen exchange between the atmosphere and the ocean, and is used for understanding the mechanism of oxygen exchange between the atmosphere and the ocean, ocean circulation, marine biological processes, and quantitative evaluation of the global carbon budget. In this study, systematic observation of atmospheric  $O_2$ ,  $CO_2$  and APO at Ny-Alesund, Svalbard was carried out. By comparing the inter-annual variation of the observed APO with climate change factors such as ENSO events and changes in sea surface temperature (SST) with decadal cycle, it was suggested that changes in atmosphere-ocean oxygen exchange associated with SST changes influence the inter-annual variation of APO. Furthermore, by analyzing the secular trend of  $O_2$ ,  $CO_2$  and APO, oceanic and terrestrial  $CO_2$  uptake was evaluated.

研究分野：大気科学

キーワード：炭素循環 大気中酸素 北極域

1. 研究開始当初の背景

産業革命以降の人為起源のCO<sub>2</sub>排出量増加を主因とする「地球温暖化」は、国際的に重要な問題となっている。この問題に対応するためには、CO<sub>2</sub>がどこからどれだけ大気に放出され、どこでどれだけ吸収されるか、という地球表層における炭素収支を解明し、CO<sub>2</sub>増加の原因を定量的に理解しなければならない。CO<sub>2</sub>吸収量の定量的な推定手法として、大気中CO<sub>2</sub>濃度とO<sub>2</sub>濃度を高精度で長期間同時に観測し、両者の増加・減少の傾向を組み合わせる手法が考案されている。この手法は、化石燃料の燃焼や陸上生物圏における光合成・呼吸の過程ではCO<sub>2</sub>とO<sub>2</sub>は負相関の関係にあるが、大気-海洋間でCO<sub>2</sub>の交換が起こる場合には必ずしもO<sub>2</sub>の交換を伴わない、という、各CO<sub>2</sub>吸収源の性質の違いを利用したものである。一方で、大気中O<sub>2</sub>濃度の変動が大気-海洋間のガス交換に密接に関連していることを利用し、観測されたCO<sub>2</sub>とO<sub>2</sub>濃度の和(=O<sub>2</sub>+1.1×CO<sub>2</sub>)として定義される大気ポテンシャル酸素(Atmospheric Potential Oxygen, APO)の変動に基づき、大気-海洋間のO<sub>2</sub>交換、およびそれを介した海洋循環や海洋生物過程の理解に関する研究が進められている。APOは、大気中O<sub>2</sub>変動のうち植物活動起源と化石燃料起源の大部分が除去され、主に大気-海洋間のO<sub>2</sub>交換によって変動するトレーサーである(図1)。現在、国立環境研究所のグループにより、船舶を利用した太平洋上での2次元的なAPOの観測が展開され、APOの時空間分布が徐々に明らかになるとともに、南太平洋東部の海水温が上昇するエルニーニョ現象といった全球的な気候変動因子に応答したAPOの時空間変動が発見されている。さらに、英国の研究グループが中心となり大西洋上でのAPOの2次元観測も開始されており、太平洋、大西洋の広範なAPOの時空間変動の把握と要因理解が進みつつある。このような観測に加え、海洋モデルを利用して気候変動に対する大気-海洋間のO<sub>2</sub>交換の応答についての理解も進められている。しかし、北極域はAPO変動の解析・理解が未成熟な領域の一つであり、北極域APOの理解推進が望まれている。このような研究の進展により、大気-海洋間のO<sub>2</sub>交換メカニズムに対する理解も進み、O<sub>2</sub>観測に基づいた地球表層のCO<sub>2</sub>吸収量定量評価の精度向上への貢献が期待されている。

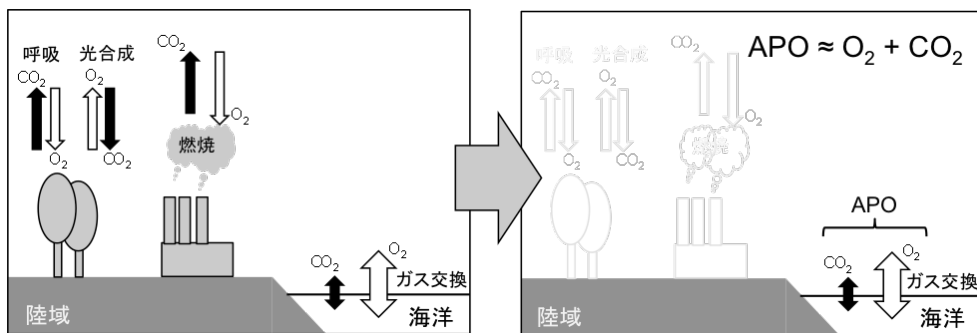


図1. 大気中O<sub>2</sub>およびCO<sub>2</sub>の関係(左)とAPOの概念(右)

2. 研究の目的

本研究では、ニーオルスンにおける大気中O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>濃度およびAPOの観測を実施することで、過去に取得された観測データと合わせて2001年以降の約20年の時系列データを取得し、様々な気候因子との比較により、これまで理解が未成熟であった北極域のAPOの数年~十年規模の周期を持つ長期変動の実態把握を目指すとともに、観測された大気中O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>濃度およびAPOの長期的な変動に基づいて、海洋と陸上生物圏による全球平均的なCO<sub>2</sub>吸収量変化の評価し、炭素循環の理解に貢献することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、スバル諸島ニーオルスン(78.92°N, 11.93°E)(図2)において、大気中CO<sub>2</sub>およびO<sub>2</sub>濃度(δ(O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>))の系統的高精度観測を実施する。本観測では、専用の大気保存容器に週に一度の頻度で大気試料を採取する。採取した大気試料を概ね二ヶ月に一度日本に返送し、返送された大気試料のCO<sub>2</sub>濃度およびδ(O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>)を非分散型赤外分析計および質量分析計を用いて分析する。分析したCO<sub>2</sub>に陸上植物の呼吸光合成によるO<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub>交換比である1.1を乗じた値をδ(O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>)に加えることによりAPOを導出する。これらの得られたデータは、これまでに蓄積されてきた2001年以降のδ(O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>), CO<sub>2</sub>およびAPOデータと結合して約20年の時系列データベースを作成したのち、時系列データにデジタルフィルタリング処理を行い、統計的に長期変動成分、季節変動成分、その他の成分を分離・抽出して様々な時間スケールの変動の特徴を検出する。また、観測されたAPOとエルニーニョ現象や大西洋数十年規模振動(AMO)、太平洋十年規模振動

(PDO) といった気候因子とを比較することで、APO の長期的な変動、年々の変動を把握し、APO の変動を駆動する要因について考察する。さらに、長期的な  $\delta(O_2/N_2)$ 、 $CO_2$ 、APO の長期トレンドをもとに、過去約 20 年間の全球平均的な海洋および陸上生物圏の  $CO_2$  吸収量を評価する。

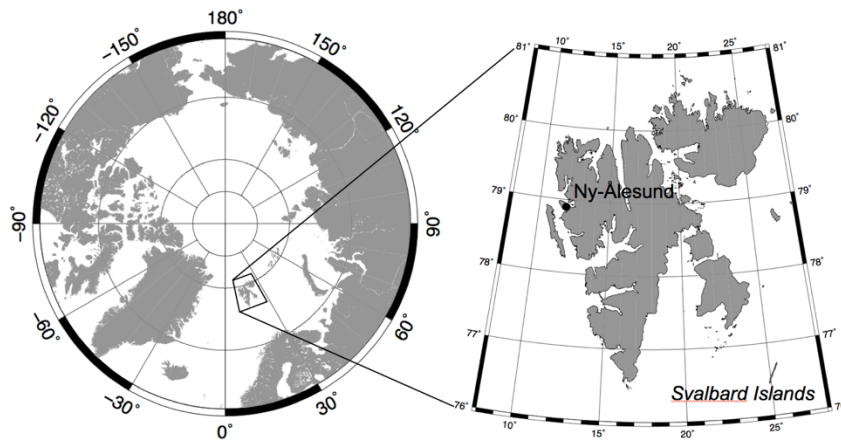


図 2. スバルバル諸島ニーオルスン (78.92°N, 11.93°E) の位置を示した地図

#### 4. 研究成果

ニーオルスンで採取された大気試料を分析することにより、2019-2021 年の大気中  $CO_2$  濃度、 $\delta(O_2/N_2)$ 、APO の時系列データを取得し、過去に蓄積してきたデータと統合して、2001-2021 年の 21 年間の各成分の変動を明らかにした (図 3)。各成分、陸上植物活動の季節性や、海水温変動の季節性による一年周期の季節変化を伴いながら、主に化石燃料の消費に伴う  $CO_2$  の経年的増加傾向、 $\delta(O_2/N_2)$  および APO の経年的な減少傾向が確認された。大気中  $CO_2$  濃度の年増加率は、2001~2021 年の平均として約 2.3 ppm/yr であった。一方、 $\delta(O_2/N_2)$  および APO の年増加率は、同期間の平均として約 -22.6 および -11.1 per meg/yr であった。これらの増加率は、南北両半球で報告されている増加率と同程度であり、ニーオルスンにおける各成分の長期変動は、全球平均的な変動であると考えられた。

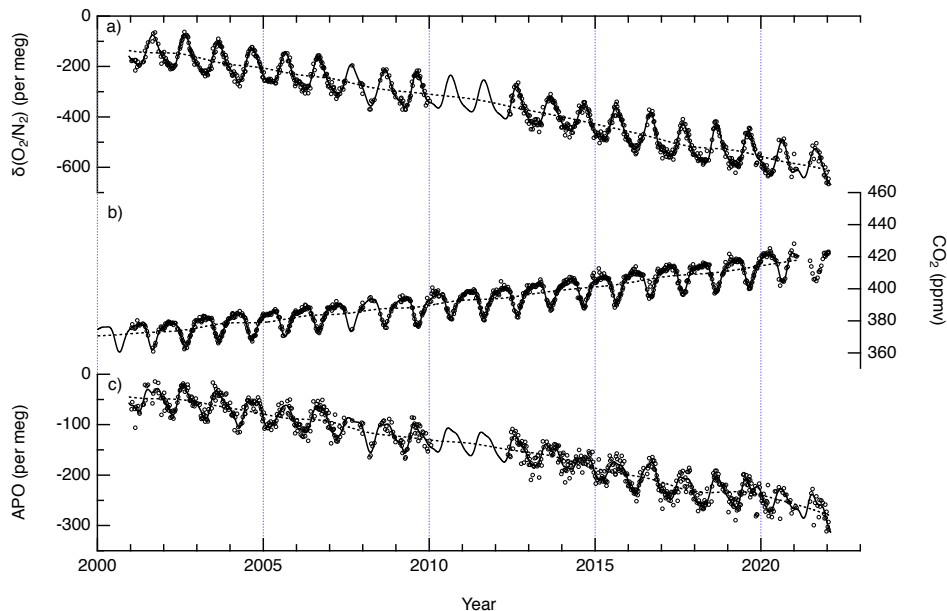


図 3. ニーオルスンで観測された大気中 a)  $\delta(O_2/N_2)$ 、b)  $CO_2$  および c) APO の時間変動。ベストフィットカーブ (実線) および長期変動成分 (点線) も一緒に示す。

図 4 a) および b) に APO の時系列変化およびその増加率の変化を示す。この図に見られるように、APO の長期変動には年々の変動があることが確認された。図 4 c), d) および e) には ENSO イベントの指標、大西洋数十年規模振動 (AMO) 指数、および太平洋十年規模振動 (PDO) 指数を示した。ENSO イベントの指標と APO の年々変動の比較から、2002 年および 2018-2019 年のエルニーニョ現象発生時には APO の減少率が増加し、一定の相関が見られることが確認された。一方で 2014-2016 年のエルニーニョ発生時には同様の傾向が見られなかった。また、PDO 指標と APO の年々変動に、わずかながら 10 年程度の周期で負の相関関係が確認され、様々な周期の海水温の変化による大気-海洋間の  $O_2$  交換の変化が、全球的な APO の年々変動に影響していることが示唆

された。今後、大気輸送モデルを用いた数値実験との比較等により、年々変動を生じさせる要因についてさらなる研究が必要である。

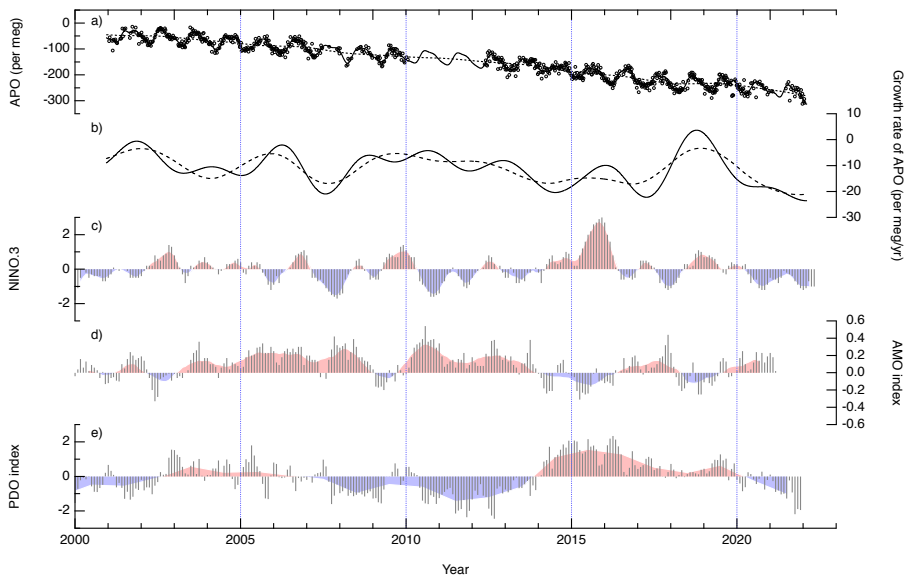


図4. a) ニーオルスンで観測された APO の時間変動、b) APO の年増加率の変動、c) エルニーニョ監視海域 (NINO.3) の海面水温の基準値との差、d) 大西洋数十年規模振動 (AMO) 指数、および e) 太平洋十年規模振動 (PDO) 指数。

観測された  $\delta(O_2/N_2)$ 、APO および  $CO_2$  の長期変動傾向を解析することにより、2001~2017 年の全球平均の海洋および陸上生物圏の  $CO_2$  吸収量をそれぞれ  $2.6 \pm 0.6$  および  $1.6 \pm 0.9$  GtC/yr と評価した (図5)。 $CO_2$  吸収量の評価誤差は依然として大きく残されているが、その大部分は海洋から大気への正味の  $O_2$  放出量の不確実性によるものである。大気中アルゴン濃度が海洋貯熱量の変化のみによって変動することから、近年その長期変動に基づいて海洋から大気への  $O_2$  放出量の定量的な評価が期待されている。より正確な  $CO_2$  吸収量定量化のためには、APO の系統的観測に加えて、大気中アルゴン濃度の系統的観測の展開が望まれる。

さらに、同様にして 2001~2010 年、2004~2014 年および 2008~2017 年の 10 年毎の海洋および陸上生物圏の  $CO_2$  吸収量、2001~2006、2004~2009、2007~2013 および 2012~2017 年の 6-7 年毎の海洋および陸上生物圏の  $CO_2$  吸収量を評価した結果 (図5)、近年の海洋による  $CO_2$  吸収量が増加傾向にあることが示された。海洋による  $CO_2$  吸収能力にも限界があると考えられ、今後の  $CO_2$  吸収量変化の推移を注意深く監視していく必要がある。

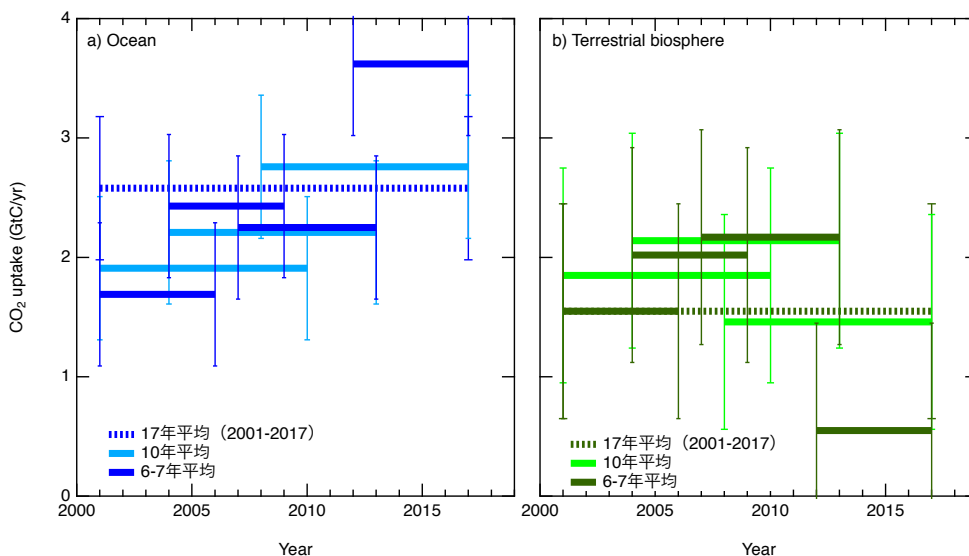


図5. ニーオルスンにおいて観測された  $\delta(O_2/N_2)$ 、APO および  $CO_2$  の長期変動から評価された海洋 (a) および陸上生物圏 (b) による  $CO_2$  吸収量。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Shinji Morimoto, Daisuke Goto, Shohei Murayama, Ryo Fujita, Yasunori Tohjima, Shigeyuki Ishidoya, Toshinobu Machida, Kazuhiro Tsuboi, Yoichi Inai, Prabir K. Patra, Shamil Maksyutov, Akihiko Ito, Shuji Aoki
2. 発表標題 Studies on variations of atmospheric greenhouse gases in the ArCS project 2015-2019
3. 学会等名 The 11th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daisuke Goto, Shinji Morimoto
2. 発表標題 Status report on O2 research activities at NIPR & TU
3. 学会等名 APO2020 Virtual Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------