



Title	長時間分解能アイスコアに記録された海洋生物活動由来の硫黄化合物に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	黒崎, 豊
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(環境科学)
Dissertation Number	甲第15715号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/91776
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yutaka_Kurosaki_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学位論文内容の要旨

博士 (環境科学)

氏名 黒崎 豊

学位論文題名

高時間分解能アイスコアに記録された海洋生物活動由来の硫黄化合物に関する研究
(Studies on the sulfur compounds derived from the ocean biological activity recorded in
the high-time-resolution ice core)

温暖化の影響が顕著に表れている北極域では、季節を問わず海水が減少していることが人工衛星から明らかになっている。海水に覆われていない海水面積の拡大は、そこから放出される水蒸気、熱、エアロゾルの増加を経て、雲量を増加させることが指摘されている。エアロゾルは種類によって雲凝結核 (CCN) や氷晶核に成長し雲粒子特性に作用する。海洋上においてCCNとなるエアロゾルで最も自然発生量が多いのは、海洋生物活動を起源として生成される硫化ジメチル (DMS) である。DMSは、大気に放出された後、二酸化硫黄 (SO_2) とメタンスルホン酸 (MSA) に酸化され、CCNの形成に寄与し、雲による負の放射強制力を増加させる効果を持つ。

過去の研究より、衛星観測により得られた海洋表層のクロロフィルa (Chl-a) 濃度と風速等の気象要素からDMS放出量の時空間変動が推定されている。しかし、衛星によるChl-a濃度の見積もりは観測データが外洋の晴天域に限ることによるバイアスや、海洋中の生物組成によるDMSの生成効率の違い、海洋中のDMSの大気への放出量を見積もるときに使用するガス交換速度定数の不確かさなどに起因する誤差が大きく、雲形成に対する定量的な評価を議論するには精度が不十分である。一方で、DMSから生成されるMSAは、DMS以外の起源がないことから大気中のMSA濃度はDMS放出量の指標として利用できる。しかし、北極域におけるMSAの長期観測は、Ny-Ålesundなど5地点でしか行われておらず、その内20年以上継続して観測している施設はカナダ北東部エルズミア島のAlertのみである。

アイスコアには、過去に氷床上に堆積したエアロゾルが保存されており、過去から現代の大気中のエアロゾル濃度を連続に復元し得る唯一のアーカイブである。グリーンランド南東部は、涵養量がグリーンランドの他の地域と比べて約4倍高く (1.01 m yr^{-1})、高時間分解能で環境復元が可能であり、化学成分の大気への再放出など堆積後の変化が極めて少ない。また、季節毎の降水量が偏っておらず、エアロゾル沈着量を復元する際の降雪量のバイアス効果がほとんどない。また、アイスコア解析で重要な要素である深度と年代の関係は、SE-Domeアイスコア中の水同位体比と水同位体大気大循環モデルの降水の酸素安定同位体比が良く一致しているのを利用し、約2カ月の誤差で決定されている。以上のことから、SE-Domeアイスコアはこれまで掘削されたどのアイスコアよりも高時間分解能でエアロゾル沈着量が正確に復元できる。本研究では、SE-Domeアイスコアを使用してグリーンランド南東部の季節海氷域における DMS放出量の変遷とそのメカニズム、および、上

空の雲粒子特性に海洋生物活動起源の硫黄化合物が与える効果を明らかにした。

SE-Domeアイスコア中の年間のMSA堆積フラックス (MSA_{flux}) は、1960年から2001年にかけて有意に減少し、2002年以降に急激に増加した。 MSA_{flux} の季節変動は、1960年–2001年は、春(4月–6月)のみにピークが現れたが、2002年–2014年は、春と夏(7月–9月)にピークが現れた。春の MSA_{flux} は、有意な経年変化を示さなかったが、イルミンガー海のクロロフィルa (Chl-a) 濃度と高い正相関を示した ($r = 0.69$, $p < 0.01$)。海洋観測データによれば、DMSのガス交換速度のピークは海上10 mにおいて風速8–11 $m s^{-1}$ であるが、春のイルミンガー海における8–11 $m s^{-1}$ の風速の頻度と MSA_{flux} には有意な相関は示されなかった。つまり、SE-Domeアイスコア中の春の MSA_{flux} の経年変化は、イルミンガー海の生物生産量に大きく影響されていることが分かった。この関係を過去に外挿すると、1960年から2014年にかけて、春のイルミンガー海表層の海洋生物生産量は有意に変化していなかったことが考えられる。2002年–2014年の夏の MSA_{flux} は、1972年–2001年に対して3–6倍増加した ($p < 0.01$)。気象再解析データから、2002年–2014年のグリーンランド南東沿岸部の海氷は、1972年–2001年と比べると約1カ月早く消失することが示された。また、同海域において2002年–2014年の開水面のChl-a濃度は1998年–2001年に対して有意に増加したことが示された。つまり、2002年–2014年の MSA_{flux} の増加は、グリーンランド南東沿岸海域の海氷が、光合成有効放射量が大きくなる7月に消失し、開水面表層への光環境が改善され、植物プランクトンのブルームが活発化したことに起因すると考えられる。

2002年以降にグリーンランド南東沿岸海域においてDMS放出量が夏に増加したことによる同海域上空の雲粒子特性と雲アルベドへの影響を衛星による雲観測データを用いて考察した。2002年–2014年の液相の雲粒有効半径 (CER_{Liquid}) の平均値は、1982年–2001年の平均値に対して1.7 μm 小さくなり ($p < 0.01$)、液相の雲粒個数濃度 ($N_{d,Liquid}$) の平均値は8.8 cm^{-1} 増加した ($p < 0.01$)。雲粒の成長に寄与する雲水量や水雲の光学的厚さは有意な変化を示さず、 $N_{d,Liquid}$ の増加と CER_{Liquid} の減少に作用しなかった。次に、雲アルベドに影響を与えるDMS以外のエアロゾルとして、強風時の海水飛沫により大気に放出される微小粒径の海塩と有機物が夏の $N_{d,Liquid}$ を増やし、 CER_{Liquid} を小さくした可能性を考察した。SE-Domeアイスコア中の海塩成分である Na^+ の堆積フラックスは、1982年–2001年と2002年–2014年において有意な変化がなかった。グリーンランド南東沿岸海域の海上10 mにおいて、1982年–2014年における6.0 $m s^{-1}$ 未満と12 $m s^{-1}$ 以上の風が吹く頻度は、それぞれ36 %と3 %であった。また、風速12 $m s^{-1}$ 以上の強風頻度は、1982年–2001年と2002年–2014年において変化がなかった。これら結果から、2002年以降の夏の $N_{d,Liquid}$ の増加と CER_{Liquid} の減少には、海水飛沫による海塩や有機物の放出よりも、ガス交換によるDMS放出量の増加が影響したことが考えられる。最後に、2002年以降の夏のDMS放出量の増加が個々の雲のアルベドに与えた効果を考察した。雲粒粒径の影響を受ける近赤外波長の雲アルベドの夏の平均値は1982年–2001年と2002年–2014年において有意に変化しなかった。したがって、2002年以降の夏のグリーンランド南東沿岸海域では、DMS起源のエアロゾルが増加したため、 $N_{d,Liquid}$ が増加し CER_{Liquid} が減少したが、 CER_{Liquid} の減少量が個々の雲のアルベドの変化に与える効果は小さかったことが考えられる。

以上より、夏の北極域の季節海氷域では、近年の地球温暖化による海氷後退日の早期化に起因して、植物プランクトンのブルームが強化され、海洋から大気へのDMS放出量が増加し、 $N_{d,Liquid}$ の増加や CER_{Liquid} の減少に作用していることが示唆された。