

1. はじめに

藻類はエアロゾル粒子の先駆物質となる硫黄化合物や炭素化合物を生成しています。エアロゾル粒子は太陽放射を散乱・吸収し、その一部は雲の凝結核となって雲を形成します。雲は太陽放射の2割程度を反射(図1)して、地球を適度に冷却しています。そこで、まず雲による地表温度の冷却効果を推定してみます。次に、藻類が生成する硫黄化合物である硫化ジメチル(DMS)について概説し、南大洋および南極海氷域でのDMSに関する観測例を紹介し、最後に、気候変動に対して藻類がどのように応答するのか考えてみたいと思います。

2. 雲による地表面の冷却

図2は短波放射(太陽放射)と長波放射(地球放射)によるエネルギーの出入りを示しています。 S_0 は太陽定数(1366 W m^{-2})、 A は地球反射率、 σ はシュテファン・ボルツマン定数($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)、 a_{sw} と a_{lw} はそれぞれ大気と雲の短波と長波の吸収率です。なお、吸収率=射出率(キルヒホッフの法則)です。地表温度 T_s と大気温度 T_a は、大気上端で $F_4 + F_5 + F_8 - F_1 = 0$ 、地表面で $F_3 + F_7 - F_2 - F_6 = 0$ とすると次の式で表されます。

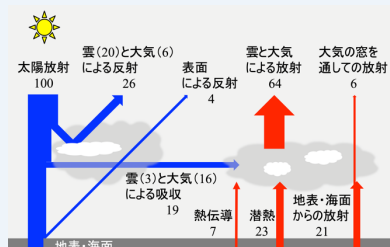


図1 地球のエネルギー収支

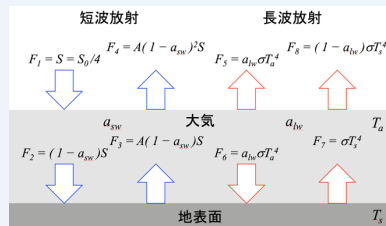


図2 簡易放射モデル
参考図書 大気放射学、グラント W.ペティ 著

$$T_s = \left[\frac{S}{\sigma} \{1 - (1 - a_{sw})A\} \left(\frac{2 - a_{sw}}{2 - a_{lw}} \right) \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$T_a = \left[\frac{S}{\sigma} \left\{ \frac{(1 - A)(1 - a_{sw})a_{lw} + \{1 + (1 - a_{sw})A\}a_{sw}}{(2 - a_{lw})a_{lw}} \right\} \right]^{\frac{1}{4}}$$

図1を参考に、温室効果や雲の有無を仮定した場合の適切な数値を A 、 a_{sw} 、 a_{lw} に代入して T_s と T_a を求めます。すると、地表温度は温室効果で約30 K加熱、雲の存在で約15 K冷却されていることがわかります。

数値を適当に変えて計算していると、放射収支への理解が深まって面白いですよ。

3. 藻類による硫化ジメチル(DMS)の生成

雲は地球の気温を適度に下げています。雲の形成には、エアロゾル粒子の存在が不可欠です。藻類は硫黄化合物や炭素化合物の生成を通じて、気候の維持に関与していることになります。ここでは、藻類が生成する硫黄化合物の一種である硫化ジメチル(DMS)について概説します。

対流圏下層では、直径0.1-1 μm のエアロゾル粒子の滞留時間は1週間程度[Jaenicke, 1993]であり、二酸化硫黄(SO_2)では1日程度になります。二酸化硫黄は気相反応および雲・霧や既存エアロゾル粒子中での液相反応を経て硫酸(H_2SO_4)になります。陸域と沿岸域では、エアロゾル粒子中の H_2SO_4 はアンモニアなどで中和されて硫酸塩になっています。しかし、産業活動による大気への影響が小さいと考えられる遠隔外洋域、南極域、さらには成層圏においてさえ、 H_2SO_4 がエアロゾル粒子を構成する主要成分として存在します。これは、自然起源の硫黄化合物が、大気に放出されていることを示しています。

図3は自然硫黄化合物の大気中での循環を示しています。陸上・海面からの放出量で、最も多いのがDMSです。海洋から28.2 TgS yr^{-1} 、植生と土壌から3.5 TgS yr^{-1} と推定されています。人為起源からの放出量は2.2 TgS yr^{-1} です。なお、産業活動に伴って大気に排出される SO_2 は年間約20 TgS yr^{-1} と推定されています[OECD, Stat., 2017]。硫化ジメチルは酸化反応により、メタンスルホン酸(MSA)や SO_2 などになり、これらは最終的に硫酸に変換されます。

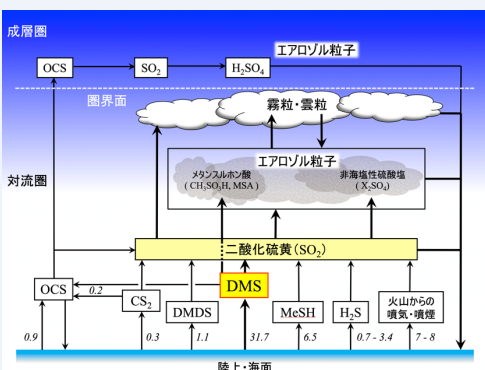


図3 自然起源硫黄化合物、エアロゾル粒子、雲の関係 数字はSeinfeld and Pandis (1998) と Lee and Brimblecombe (2016)から引用した推定放出量 (単位: TgS yr^{-1})

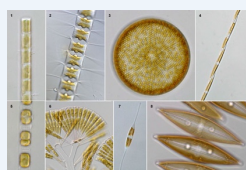


図4 珪藻
<https://photosyn.jp/pwiki/?珪藻>



図5 ハプト藻
<https://ja.wikipedia.org/wiki/ハプト藻>

多くの藻類は、周囲の環境から硫酸塩を取り込み、ジメチルスルフォニオプロピオナート(DMSP)を生成しています。硫化ジメチルはDMSPの分解生成物であり、“磯の香り”の成分の一つです。珪藻(図4)はDMSPを生産しますが、主要なのはパプト藻綱(図5)や渦鞭毛藻綱に属する藻類です。そのため、海水中のDMSP濃度はクロロフィルa(Chl a)濃度と常に相関があるとは限りません。

DMSPは、浸透圧調節[Keller et al., 1989; Stefels et al., 2007]、抗酸化[Sunda et al., 2002]、凍結防止[Stefels et al., 2002]、動物プランクトンなどからの捕食の抑止[Strom et al., 2003]といった機能を有しています。

4. 南大洋と南極海域での大気DMS濃度の観測

南大洋ではChl a濃度が高いため（図6）、大気DMS濃度も他の海域と比較して高いことが考えられます。大気中のDMS濃度の季節変動は、時空間的な平均値で比較すると、Chl a濃度の変動と同期しています[Preunkert et al., 2007]。また、海氷底面には海氷藻類（アイスアルジー）が多く生息しています（図7）。そのため、南大洋と海氷域における大気DMS濃度と大気へのDMS放出量について、研究者の間で高い関心が持たれています。

砕氷艦「しらせ」は、毎年ほぼ同一時期に同一航路を航海して、日本南極地域観測隊（JARE）と物資を昭和基地へ輸送します。「しらせ」艦上では大気DMS濃度の観測が、これまでに第32次隊（JARE32）[Koga et al., 1993]、JARE38 [Inomata et al., 2006]、JARE39[Yokouchi et al., 1999]、JARE51[Koga et al., 2014]で実施されてきました。観測の目的は、1. 大気DMS濃度の海況による違い、2. 海氷面からのDMS放出量、3. 自然起源エアロゾル粒子の個数濃度と大気DMS濃度との関係について調査研究することです。

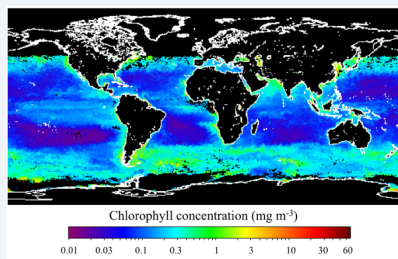


図6 2009年12月のクロロフィルaの濃度（SeaWiFSデータ）

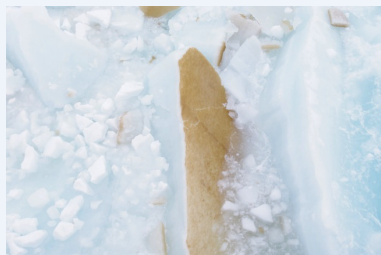


図7 砕氷された海氷
底面の色が海氷藻類の存在を示す

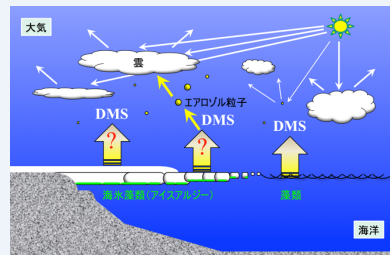


図8 海面・海氷を通してのDMSの動き

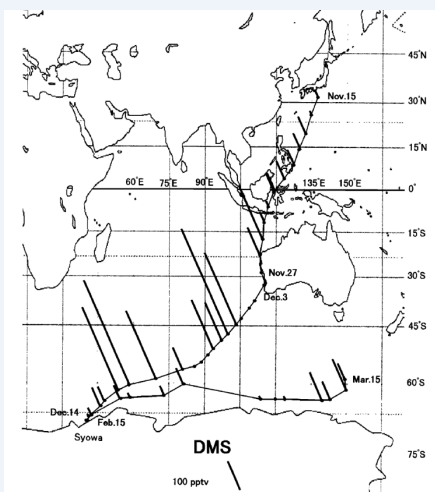


図9 JARE39航海中の1997年11月から1998年3月に観測した大気DMS濃度 [Yokouchi et al., 1999]

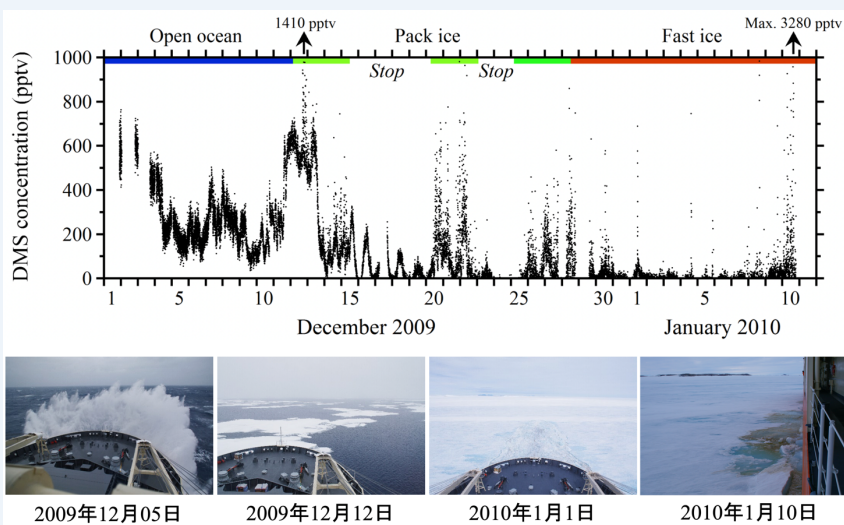


図10 JARE51航海中の2009年12月から2010年1月に観測した大気DMS濃度[Koga et al., 2014]および海況の様子

これまでの観測で、大気DMS濃度は海氷縁で比較的高いことがわかりました（図9と10）。JARE38では、海氷縁でChl a濃度と大気DMS濃度が共に高くなりました。しかし、JARE51では大気DMS濃度が高いにも関わらず、Chl a濃度に変動はありませんでした。JARE38とJARE51では、藻類の優占種が異なっていた可能性があります。

図10で示すように、海氷域では激しい濃度変動が生じています。これは、砕氷航行により、海氷底における高濃度のDMSが大気に放出されたことを示しています。図10の右下の写真は、「しらせ」が昭和基地に接岸する直前の左舷側の海氷面を捉えています。氷面が茶色なのは、砕氷によって有機物を含んだ海水が氷面を覆ったためです。砕氷されなければ大気へのDMS放出は無く、大気DMS濃度は低いままであると想像できます。昭和基地沖の海氷上で行ったDMS放出量の観測結果からも、海氷上の積雪と氷層が大気へのDMS放出を妨げていることがわかりました[Nomura et al., 2012]。また、ここには図を掲載していませんが、海氷上のエアロゾル粒子の個数濃度は、開水域でのそれと比較して10分の1程度に減少しました。海氷が海塩粒子の発生だけでなく、エアロゾル粒子の先駆物質であるDMS放出も妨げ、結果として新粒子生成を抑制したと考えられます。

5. 気候変動に対する藻類の応答

気温が上昇して海氷が溶け、海水中のDMSが大気に移動しやすくなった場合、エアロゾル粒子と雲粒の数濃度の増加が太陽光の入射量を減らして気温上昇を抑制するのか。逆に、海氷面積の減少が藻類によるDMS生産を減少させ、気温上昇が加速するのか。また、気温上昇により藻類の活動が活発になれば、大気中の二酸化炭素の増加が抑えられ、DMS起源のエアロゾル粒子と雲粒の数濃度が増加して、気温上昇が抑制されるのか。そもそも、藻類が地球の恒常性維持に関わっているのか。これらの問いに答えるには、現在の知識では不十分です。今のわたしたちにできることは、藻類種のバランスを崩さないように、海洋環境の保全に努めることであると思います。