

雲を作る磯の香り

亀山 宗彦

1. はじめに

海の近くを通ると潮風に乗ってきた磯の香りを感じた経験がある方も多いかと思います。磯の香りということは、海でできた物質が空気中を漂い、私達の鼻に届いているわけです。さて、この磯の香り、実は地球全体の気候に関わる可能性があるといわれ、30年以上も研究者に注目されているものなのです。今回の講義ではこの磯の香りがなぜ注目されているのか、この30年間で何がわかってきたのか、紹介したいと思います。

2. CLAW 仮説とガイア理論

近年の地球温暖化は人間活動が原因で起こっているということは誰もが耳にしたことがあると思います。この地球温暖化に関係する「CLAW 仮説」という仮説が1987年に Charlson らによって発表されました（“CLAW”は4人の著者、Charlson、Lovelock、Andreae、Warrenの頭文字から取られています）。この仮説では先に挙げた「磯の香り」の一つである硫化ジメチル（Dimethyl sulfide、DMS）によって地球温暖化が抑制される可能性が指摘されました（図1）。

DMSは硫黄に2つのメチル基（1つの炭素原子と3つの水素原子からなる）が結合した分子（ CH_3SCH_3 ）です。海に住む海藻や植物プランクトンの活動によってDMSが放出されていることが観測されており、大気中の自然由来の硫黄の化合物では最も量が多いことが知られています。

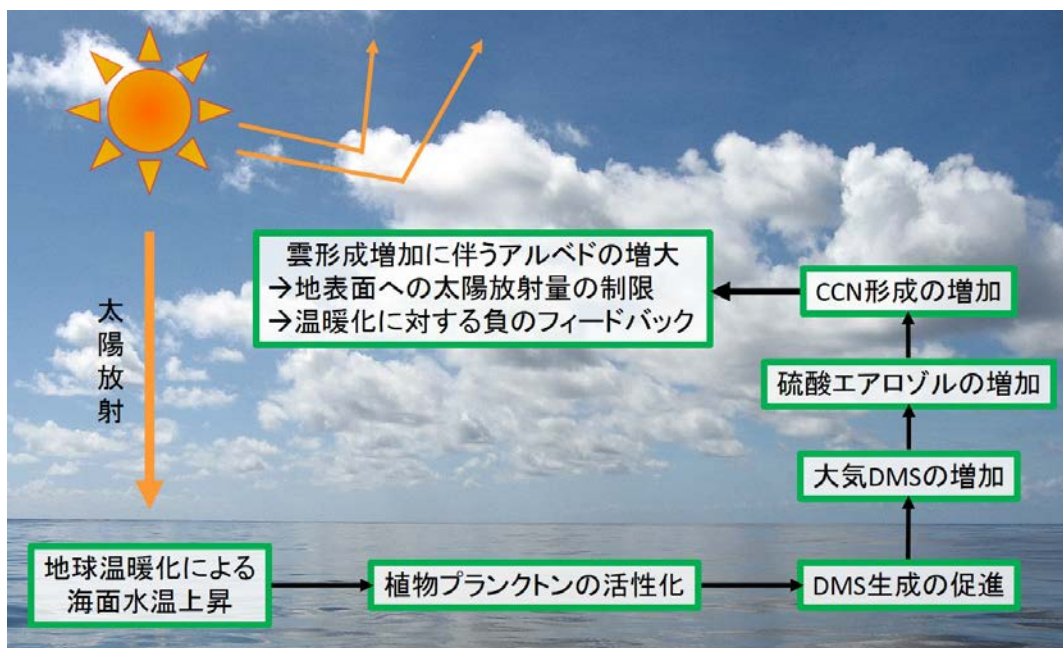


図1 CLAW 仮説に基づく地球温暖化に対する負のフィードバック効果

地球温暖化が進むと海洋表層の水温も上昇します。海水中の植物プランクトンは一般に水温が高いほど活動量が多くなります（これを「活性が高くなる」といいます）。つまり、温暖化が進むと海水で作られ大気中に放出される DMS が増加することが予想されます。大気中で DMS は酸化作用によって硫酸等の硫黄化合物に変質します。この硫黄化合物が空気中の水蒸気を集めたり硫黄化合物同士がくっついたりすることによって粒子（エアロゾル）化します。この粒子のうち硫酸エアロゾルは水蒸気を集める性質（吸湿性）を持つため、雲を形成する元となる核（雲凝結核）を作ることが知られており、結果的に雲の形成に寄与しているといわれています。以上のことから、温暖化によって大気中に放出される DMS が増えると、雲が増えることに繋がることになります。

さて、ここで何かおかしいことが起きていることに気づく方もいるかもしれません。白い雲は光を反射します。そのため、地球温暖化に伴って DMS が増えることによって雲が増えると、太陽から地表面に降り注ぐ光が雲によって宇宙空間に反射される割合（アルベド）が高くなります。太陽光は地表面を温める元となるエネルギー源ですので、アルベドが高くなると地表面に到達するエネルギーが少なくなり地球が冷えることとなります。つまり、CLAW 仮説を一番単純な文章で表すと「地球が温暖化すると、冷却化する」となり、一見矛盾する地球の作用、言い換えると地球温暖化に対する冷却効果（負のフィードバック）を表現しているのです。ここで大事なことはこの負のフィードバックに人間活動が関わっていないということです。

皆さんは「ガイア」という言葉を見聞きしたことはあるでしょうか。ガイアとは、地球が地球上に存在する生物と相互に作用しながら環境の変化に対して自己調整システムを持つ、あたかもひとつの「巨大な生命体」として振る舞う地球の呼び名とされています。そこで、このような地球が自浄作用を持つという理論は「ガイア理論」と呼ばれています。上述の CLAW 仮説はこのガイア理論を支持する一つの重要な仮説とされ、仮説提唱後、様々なアプローチで CLAW 仮説が検証されてきました。

3. DMS を中心とした海洋－大気境界における硫黄循環

CLAW 仮説が提唱された後、DMS を中心とした海洋－大気境界における硫黄循環の研究が飛躍的に進みました。その結果、CLAW 仮説提唱時よりも非常に複雑な硫黄循環系が存在していることが現在わかっています（図 2）。

DMS は海洋において主に植物プランクトンが生産するジメチルスルフォニオプロピオネート（Dimethylsulfoniopropionate、DMSP）を前駆物質として、植物プランクトン、動物プランクトン、細菌が関与する食物網の複雑な相互作用を通して生成されることがわかってきました。DMSP は大きさによって粒子態の DMSPp と溶存態の DMSPd として区分され、これらのうち、一般に DMSPd が細菌に分解される事によって DMS が生成されるといわれています。DMSP は数～数十 nM（nM = 10^{-9} mol L⁻¹、mol は物質の単位）で海洋表層水中に存在し、その寿命は数時間～数日程度であるといわれています。一方 DMS は、海域や季節によってその濃度分布が大きく変化するのですが、DMSP よりも低濃度（1-5 nM 程度）で海洋表層水中に存在します。

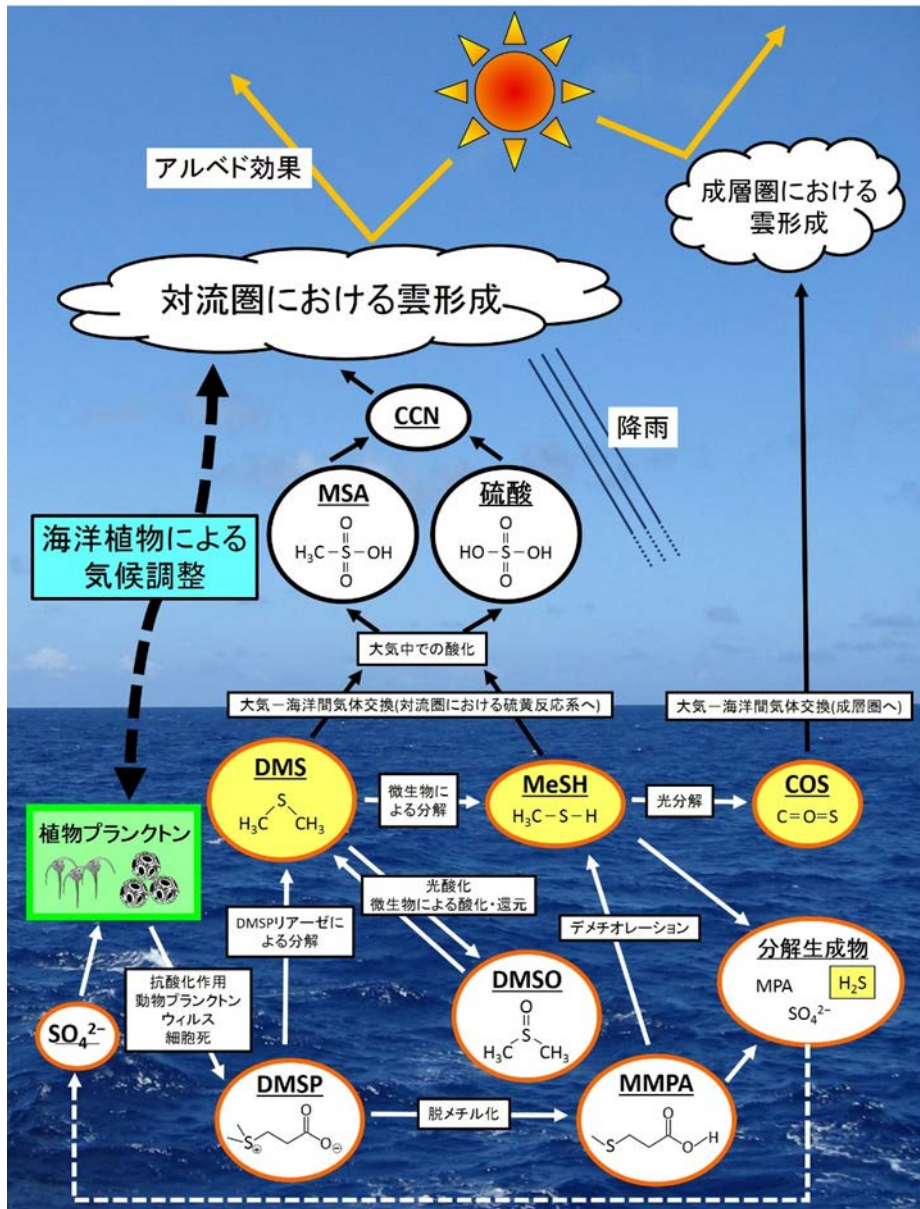


図2 複雑な海洋-大気境界における硫黄循環

DMSPは海水中に含まれる硫酸イオン (SO_4^{2-}) を基に主に植物プランクトンの細胞内で生産されます。DMSPの生産量は植物プランクトン種によって異なることが知られており、ハプト藻や渦鞭毛藻はDMSPの高生産者として知られており、一方、海洋における主要な一次生産者である珪藻はDMSPの生産量が比較的少ないといわれています。細胞内に含まれるDMSPは植物プランクトンの抗酸化作用、細胞内の浸透圧調整、動物プランクトンによる摂餌、ウィルスによる細胞破壊、細胞死等をきっかけとして細胞外、つまり海水中へと放出されます。海水中へ放出されたDMSPは主にバクテリアや植物プランクトン自身が持つ酵素(DMSPリアーゼ)によって分解されます。現在までに少なくとも7つのDMSPリアーゼ(DddD、DddP、DddL、DddQ、DddW、DddY、DmdA)が報告されており、このうちDmdAを除く6つのDMSPリアーゼによるDMSP分解過程によってDMSが生成されるといわれています。DmdAによるDMSP

分解では脱メチル化によってメチルメルカプトプロピオネート (methylmercaptopropionate、MMPA) が生成され、その後の分解過程によりメルカプトプロピオネート (mercaptopropionate、MPA) やメタンチオール (methanethiol、MeSH) といった硫黄化合物へと複雑に変化します。

では、DMSP 分解過程によって生成した海水中の DMS はその大部分が大気へと放出されるのでしょうか。答えは No です。DMS の海水からの除去過程は大気への放出だけでなくバクテリアや太陽光による分解過程があります。これまでのバクテリアの DMS の分解に関する研究では、プロテオバクテリアの *Methylophaga* 属が DMS を炭素源として利用していることが報告されており、代謝の副産物としてジメチルスルホキシド (dimethylsulphoxide、DMSO) や MeSH といった硫黄化合物が生成されます。それぞれの除去過程は水深によってその寄与が異なるといわれており、海洋表層では大気への放出、水深 10~20 m では光分解、それより深い水深ではバクテリアによる分解が卓越していると考えられています。海洋における DMS の除去過程全体を考えると、バクテリアによる DMS の分解が約 80% を占め、大気へ放出される DMS は海洋で生成される DMS の約 10% に過ぎないといわれています。

それでは、大気へ放出された DMS はその大部分が硫酸エアロゾル、雲凝結核となるのでしょうか。答えはやはり No です。大気へ放出された DMS のうち、雲凝結核となるのは 17% 程度であるという報告もあります。以上のことを鑑みると、海洋で作られた DMSP から DMS を経由して雲凝結核となる割合はわずか 0.2% 程度であるがわかっています。

4. おわりに

本テキストでは、地球温暖化に対する負のフィードバック効果がある可能性が指摘され注目を浴びてきた CLAW 仮説について紹介しました。このテキストで紹介した複雑な硫黄循環に基づく見積もりから、近年では CLAW 仮説によって示された地球全体を冷却する効果は小さいといわれています (Quinn and Bates, 2011)。しかし、環境変化に対する応答が最も大きい極域においては、海洋から放出される硫黄化合物が雲の形成に非常に大きく寄与しているといわれており、今後も研究の発展が期待されています。講義では、私が行っている実際の海洋観測の様子もお見せしつつ、最新の研究の結果を含め「磯の香り」の世界を解説したいと思います。