

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24340114

研究課題名(和文) 海洋生物起源エアロゾルから捉える東シナ海の生物生産が雲場に及ぼす影響の解明

研究課題名(英文) The effects of bioproduction in the East China Sea on cloud fields viewed from marine bio-originated aerosols

研究代表者

河本 和明 (KAWAMOTO, Kazuaki)

長崎大学・水産・環境科学総合研究科(環境)・教授

研究者番号：10353450

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：東シナ海上空における海洋の生物過程から生じる硫酸塩エアロゾル(海洋生物エアロゾル)について、海洋現場観測や同位体分析、数値大気モデルによる計算を通して動態を明らかにし、その雲場への影響について調査した。海洋生物エアロゾルの寄与は、様々な種類のエアロゾルが混在する東シナ海上空ではあまり大きくない。しかし雲場は、衛星搭載のレーダと受動型放射計による解析から特徴的な振る舞いを示すこと、海洋現場観測によってDMSとクロロフィルの季節変動、同位体分析によって鉛の起源について知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：Sulfate aerosols originated from marine production processes in the East China Sea and the effect on cloud fields were examined through marine in-situ measurement, isotope analysis and numerical model simulation. Although the contribution of marine bio-originated aerosols is not considerable over the East China Sea where various types of aerosols co-exist, following results were obtained: Cloud fields showed characteristic features via analyses of active radar and passive radiometer. Seasonal variations of DMS and chlorophyll, and the origin of lead were revealed with marine in-situ measurement and isotope analysis, respectively.

研究分野：大気物理学

キーワード：地球環境システム リモートセンシング エアロゾル 海洋化学

### 1. 研究開始当初の背景

東シナ海上空のエアロゾル環境は、近隣諸国の急速な経済発展に伴う工業起源および黄砂など自然起源エアロゾルが偏西風に乗って越境してくる他に、海塩やローカル汚染、また様々な海洋生物化学過程から生じるエアロゾル(ここでは海洋の生物過程から生じる硫酸塩エアロゾルを海洋生物エアロゾルと呼ぶ)が加わって、混沌としている。東シナ海付近では、河川水の流入や沿岸域の人為活動のため、海洋物質循環および生物生産過程は複雑であり、それから生じる海洋生物エアロゾルの間接効果への寄与は殆ど解明されていない。

植物プランクトン起源の DMS(硫化ジメチル)が硫酸塩エアロゾルに変換し、それが雲凝結核になって雲特性をコントロールしているという説は以前からあったが、近年は南洋上でクロロフィル量と雲粒径の関係に負の相関の報告がある。これは植物プランクトン起源のエアロゾル量が増加して雲粒径が収縮した例であるが、この関係は人為影響の非常に小さい南洋であるために明瞭に観測されたと考えられる。

### 2. 研究の目的

東シナ海において行う詳細な海洋現場化学観測と同位体観測の結果を、エアロゾルモデルによって計算された海洋生物エアロゾル量と比較することによって、海洋生物生産過程と海洋生物エアロゾルとの関係を解明する。

また衛星リモートセンシングにより、雲粒径、光学的厚さ、雲水総量や降雨特性等の雲場を観測し、その特徴を明らかにする。

### 3. 研究の方法

本課題の研究体制は、雲系、海洋系、エアロゾル系の3つの分野からなる。雲系には河本和明(研究代表者)、鈴木健太郎(研究協力者)

の2人、海洋系には梅澤有(研究分担者)、斎藤有(研究分担者)の2人、エアロゾル系には鶴野伊津志(研究分担者)を擁している。全体として、海洋系は大気降水物とともに海洋表・中層の現場で物質循環・生物生産の視点から様々な化学物質を測定・同位体分析を行い、底層や陸域から供給される栄養塩物質の植物プランクトンへの寄与率等を求める。エアロゾル系はモデリングによって、海洋生物起源に加えて越境する人為起源エアロゾル、ローカルな汚染の寄与、海塩粒子などを含めたトータルのエアロゾル量の地理分布や、海洋生物起源の寄与を計算し、それらを海洋系が現場観測する海洋生産の指標と結びつける。雲系は雲場の変動をリモートセンシング解析から検出する。

### 4. 研究成果

数値モデルによるエアロゾル特性の計算について、世界的に広く活用されている GEOS CHEM 化学輸送モデルを用い、全球計算にアジア域を 50 km 格子でネストさせて、東アジアスケールの大気汚染物質と海洋起源の DMS の輸送シミュレーションを行った。計算は 2004-2012 年までの9年間について行った。DMS の大気濃度の再現性を検討したが、最近の大気濃度の変動を再現するためには、海洋中の DMS 濃度のデータベースの更新が必要であることが示された。先行の観測研究結果を幾つか入力して計算し、海洋生物エアロゾル量を定量的に評価したところ、あまり大きくないことがわかった。

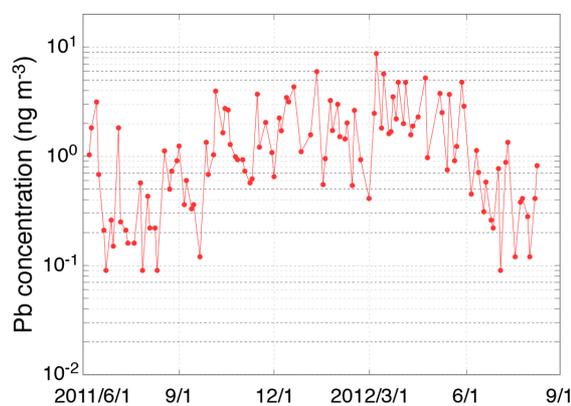
次に雲場の性質について述べる。CloudSat 衛星に搭載されている Cloud Profiling Radar (CPR)が受信する 95-GHz のレーダ反射率(以降は  $Z_e$ )と Aqua 衛星に搭載されている MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer)データの同時解析によって 2B-GEOPROF や 2B-TAU といったプロダクトを使って様々な物理特性解析が行われ

てきている。海洋生物エアロゾルによる雲への影響は大きくはないが、一層の水滴でできた雲について、(1)有効粒径・雲の幾何学的厚さ・雲水総量の3つの雲物理特性を例に取り、雲物理量の値が小・中・大と変化するに伴って雲層内の最大  $Z_e$  ( $\max Z_e$ ) の頻度分布がどのように変化するか、また(2)雲頂高度を0、雲底高度を1のように規格化し、最大レーダ反射率が0 dBZ を超える割合(Probability of Precipitation; POP)の雲層内での相対的位置について議論する。

(1)の雲物理特性の変化に伴う  $\max Z_e$  の頻度分布について、有効粒径と雲の幾何学的厚さに関しては、 $\max Z_e$  は mono-modal であり、値が増えるに従って  $\max Z_e$  の頻度は高い方にシフトして降水が生じる可能性が高まるというリーズナブルな振る舞いを示した。しかし雲水総量は値が少ない時に  $\max Z_e$  の頻度は bi-modal となり、15dbZ 程度の降雨領域で一方のピークを示した。調査の結果、この状況は粒径は大きい光学的に薄い雲に対応しており、衰退期の雲を捉えていることが明らかとなった。

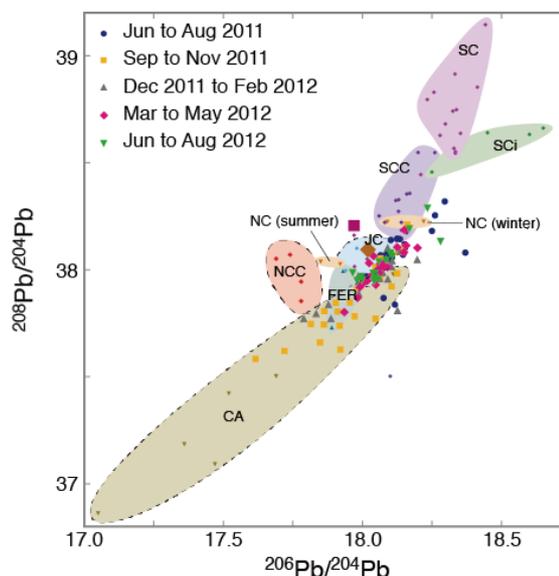
(2)の POP の雲層内位置について、有効粒径の値別に示すと形状は「弓型」であった。この解釈として、雲頂付近から中部にかけて粒径が成長して  $\max Z_e$  は概ね大きくなること、中部から雲底にかけて粒径が更に大きくなるが  $Z_e$  の減衰によって POP は小さくなることが挙げられる。

同位体分析による結果は以下の通りである。大村市において 2011 年夏から 2012 年夏にかけて数日おきに吸引採取されたエアロゾル粒子の起源を高精度で明らかにするため、エアロゾル試料を塩酸可溶成分と難溶成分(ケイ酸塩成分)とに分けてそれぞれ、鉛濃度及び鉛同位体比と、Sr-Nd 同位体比を測定した。その結果、鉛濃度は、秋から翌春にかけて高く、特に3月から5月に最大となること(図A)、鉛同位体比は、秋から



図A. 大村市エアロゾル粒子の塩酸可溶成分中鉛濃度の時間変動

冬は中国北部及び中央アジア、夏の数日間は中国南部の値と類似すること(図B)、春と夏の鉛同位体比は日本の大気中の値と類似するが、鉛が最高濃度を記録する3月から5月のSr-Nd 同位体比は中国の砂漠粒子の値と類似すること、が明らかとなった。



図B. 大村市エアロゾル粒子の塩酸可溶成分中鉛同位体比と、起源候補地域の大气中鉛同位体比との比較

これらのことから大局的には、大村市のエアロゾルは夏以外、大陸由来であるということが言える。さらに、鉛同位体比を詳細に検討することにより、大陸内の起源地域の変化を精度良く検出でき、後方流跡線との照合の

結果、それは季節風の向きに応じた変化であることが明らかとなった。一方、3月～5月の鉛同位体比は日本の値と類似するが、この値は、中国北部と中国南部の値の中間的な値であり、両者の混合と考えることができる。同期間の Sr-Nd 同位体比は中国の値であり、後方流跡線も大陸からの大気流入を示すことから、3～5月の粒子も中国由来であると考えられる。3～5月は鉛濃度が最も高いことから、それに続く夏の鉛同位体比は日本の値では無く、3～5月に飛来したもののメモリーであることが示唆される。

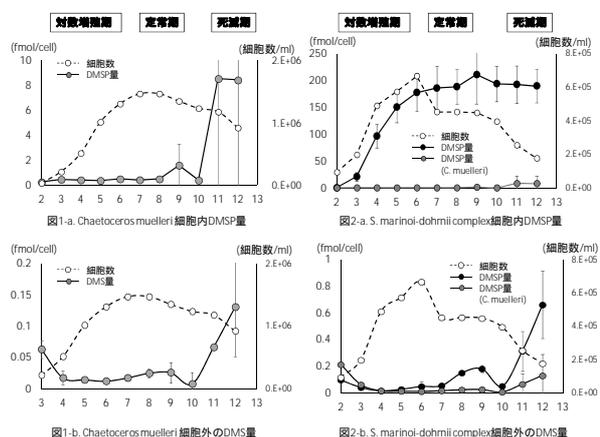
以上のように大村湾周辺の大気は大陸の影響を強く受けていることが明らかとなった。

海洋化学観測による研究結果として、DMS 研究の第一人者である Yang G.P. 教授の研究室を訪問し、海水に溶存する DMS および DMSP を抽出精製するシステムについて学び、研究室に同様の設備を作成し、GC 接続型の測定システムを立ち上げた。次に、対象海域である東シナ海や、沿岸域に生息する主要な珪藻類で、赤潮を形成する単体の *Chaetoceros muelleri* (細胞サイズ 5-10  $\mu\text{m}$ ) と、群体の *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex (細胞サイズ 5-10  $\mu\text{m}$ , 群体のサイズ 10-50  $\mu\text{m}$ ) の2種を培養し、細胞の増殖期で DMSP 生成量が異なるかどうか調べて実際の海域での DMSP の役割について考察を行った。

培養実験の結果、*C. muelleri* では、死滅期に細胞内での DMSP 生成量の増加 (図 1-a) および細胞外での DMS 量の増加が見られた (図 1-b)。一方で、*S. marinoi-dohrnii* complex では、対数増殖期から DMSP 生成量が増加し (図 2-a) 細胞外での DMS 量の増加は対数増殖期の後期からみられたものの、死滅期に一気に DMS 量の増加が見られた (図 2-b)。1細胞あたりの DMSP 生成量については、*S. marinoi-dohrnii* complex は *C. muelleri* の、約

100 倍程度大きく、この生成量の違いが、細胞外への放出によって培養海水中の DMSP 量や、DMSP の分解によって生じる DMS 量の違いにも影響したと考えられた。

黄海や、長江希釈水の影響がある西部東シナ海では、5-20  $\mu\text{m}$  の画分の植物プランクトンの画分の DMSP 生産量が大きく、主要構成種の渦鞭毛藻類の寄与が指摘されている。しかしながら、栄養塩が枯渇する長江希釈水の縁辺部で、植物プランクトン種が珪藻類から渦鞭毛藻類に移行する海域では、死滅期に移行して浮遊する珪藻類も多く存在することが想定されるため、沿岸部だけでなく、東シナ海大陸棚西部でも、珪藻類由来の DMS の生産の寄与を見逃すことは出来ないと考えられる。特に、珪藻類の現存量が相対的に多い冬季～春季には、夏季よりもクロロフィル a 色素当たりの DMS 濃度が高いという報告もある。対象海域からの DMS 放出のポテンシャルを明らかにするためには、対象海域の植物プランクトン種とバイオマス、および栄養塩環境という現場データに加え、個々の植物プランクトン種の成長時期に応じた DMSP 生産、DMS 生成量の培養実験データを組み合わせるモデルが必要とされ、今後、出現する主要種を用いた培養実験の継続が必要とされる。



<参考文献>

Meskhidze and Nenes, Phytoplankton and cloudiness in the southern ocean, 2006, Science

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 9件)

Kawamoto, K. and K. Suzuki : Distributional correspondence of 94-GHz radar reflectivity with the variation in water cloud properties over the northwestern Pacific and China. J. Quant. Spectros. Radiat. Transfer, 153, 38-48, 2015. (査読有)  
doi:10.1016/j.jqsrt.2014.10.012

Michibata, T., K. Kawamoto and T. Takemura : The effects of aerosols on water cloud microphysics and macrophysics based on satellite observations over East Asia and the Northern Pacific. Atmos. Chem. Phys., 14, 11935-11948, 2014. (査読有)  
doi:10.5194/acp-14-11935-2014

Umezawa Y., Yamaguchi, A., Ishizaka, J., Hasegawa, T., Yoshimizu, C., Tayasu, I., Yoshimura, H., Morii, Y., Aoshima, T., and Yamawaki, N.: Seasonal shifts in the contributions of the Changjiang River and the Kuroshio Current to nitrate dynamics in the continental shelf of the northern East China Sea based on a nitrate dual isotopic composition approach, Biogeosciences, (査読有) 11, 1297-1317,  
doi:10.5194/bg-11-1297-2014, (2014)

Kawamoto, K. and K. Suzuki : Comparison of water cloud microphysics over mid-latitude land and ocean using CloudSat and MODIS observations. J. Quant. Spectros. Radiat. Transfer, 122, 13-24, 2013. (査読有)

doi:10.1016/j.jqsrt.2012.12.013

Ithashi, S., I.Uno and S.-B.Kim, 2013: Seasonal source contributions of tropospheric ozone over East Asia based on CMAQ/HDDM, Atmospheric Environment, 70, 204-217. (査読有)  
doi:10.1016/j.atmosenv.2013.01.026

鵜野伊津志, 弓本桂也, 大原利眞, 黒川純一, 2013: タグ付き CO 輸送モデルを用いたアジア域のソース・リセプター解析 . 大気環境学会誌 ,48, 5月号, pp.123-132. (査読有)  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/taiki/48/3/48\\_123/pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/taiki/48/3/48_123/pdf)

鵜野伊津志, 弓本桂也, 大原利眞, 黒川純一, 2013: タグ付き輸送モデルによるアジア域の CO 濃度と発生源寄与の長期解析 . 大気環境学会誌 ,48, 5月号, pp.133-139. (査読有)  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/taiki/48/3/48\\_133/pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/taiki/48/3/48_133/pdf)

鵜野伊津志, 板橋秀一, 弓本桂也, 入江仁士, 黒川純一, 大原利眞, 2013: 東アジア域の NOx 排出量の経年変化と窒素化合物の挙動のモデル解析 . 大気環境学会誌 ,48, 9月号, pp.223-233. (査読有)  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/taiki/48/5/48\\_223/article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/taiki/48/5/48_223/article/-char/ja/)

鵜野伊津志, 弓本桂也, 原由香里, 板橋秀一, 金谷有剛, 杉本伸夫, 大原利眞, 2013: 何故 2013 年冬季の中国で PM2.5 が高濃度になったか? . 大気環境学会誌 ,48, 11月号, pp.274-280. (査読有)  
[https://www.kyushu-u.ac.jp/f/1129/2013\\_10\\_30.pdf](https://www.kyushu-u.ac.jp/f/1129/2013_10_30.pdf)

〔学会発表〕(計 3件)

河本和明、鈴木健太郎、  
中緯度低層雲の雲粒・ドリズル・降雨遷移過程の海陸の違いについて  
日本気象学会秋季大会  
2012年10月5日、北海道大学(札幌市)

K. Kawamoto and K. Suzuki,  
Examining Microphysical Transition in Water Clouds Over the Amazon and China from Active and Passive Sensors,  
AOGS - AGU (WPGM) Joint Assembly.  
2012年8月14日, シンガポール

K. Kawamoto and K. Suzuki,  
Microphysical transition in water clouds over the Amazon and China derived from space-borne radar and radiometer data,  
International Radiation Symposium,  
2012年8月8日, ベルリン(ドイツ)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

河本 和明 (KAWAMOTO, Kazuaki)  
長崎大学・水産・環境科学総合研究科(環境)・教授  
研究者番号: 10353450

### (2)研究分担者

鵜野 伊津志 (UNO, Itsushi)  
九州大学・応用力学研究所・教授  
研究者番号: 70142099

梅澤 有 (UMEZAWA, Yu)  
長崎大学・水産・環境科学総合研究科(水産)・准教授  
研究者番号: 50442538

斎藤 有 (SAITO, Yu)  
総合地球環境学研究所・研究高度化支援セ

ンター・センター研究員

研究者番号: 60469616