

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23241013

研究課題名(和文) 海洋生物ポンプにおけるエアロゾルの役割

研究課題名(英文) The impact of aerosol on the biological pump

研究代表者

本多 牧生 (HONDA, Makio)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・チームリーダー

研究者番号：20359160

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,100,000円、(間接経費) 9,330,000円

研究成果の概要(和文)：衛星データ、数値モデルデータによりクロロフィルと水温、日射量、エアロゾルとの多変量解析を行った。その結果、エアロゾルと生物生産の相関関係は必ずしも高くはなかった。しかし船舶観測では亜熱帯海域で栄養塩が枯渇した夏季に表層のみ栄養塩濃度が高く、生物生産が比較的に高い現象が観測された。船舶観測や係留系観測からバナジウムや鉛等の重金属並びに福島原発由来の放射性物質等人為起源物質が大気経由で海洋へ活発に輸送されていることが明らかとなった。エアロゾル成分の溶出実験を行った結果、人為起源の微小粒子の鉄は溶存しやすいことが明らかとなった。今後は増加する人為起源物質の影響について注目する必要があると思われる。

研究成果の概要(英文)：With satellite data and numerical simulated data, multiple regression analysis was conducted between chlorophyll and surface temperature, photosynthetically available radiation and aerosol. The correlation between chlorophyll and aerosol was not necessarily high. However high nutrient was observed near surface in summer when nutrient is usually deficit. Primary productivity this time was higher than that in summer of other years. Aerosol observation onboard and time-series observation with mooring system clarified that terrestrial artificial materials such as heavy metals (V, Pb) and radionuclide derived from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident were quickly and widely transported to the ocean. Based on experiment, iron (Fe), which is micro-nutrient for phytoplankton, in artificial small particle such as PM2.5 is easily dissolved compared to that in natural aerosol. In future, impact of artificial aerosol on biological pump should be focused.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：エアロゾル 生物ポンプ セジメントトラップ 複数仰角差分吸光分光計(MAX-DOAS) 黄砂 MODIS 大気汚染物質輸送モデルWRF/Chem 人為起源物質

1. 研究開始当初の背景

(1) 海洋の生物ポンプ

海洋は大気中二酸化炭素 (CO₂) の約 60 倍の CO₂ を貯蔵している。近年では人類活動により放出された二酸化炭素の約 30% 強を吸収しており、海洋が大気中の CO₂ 濃度をコントロールしているといっても過言ではない。海洋の CO₂ 吸収メカニズムとして、海洋植物プランクトンの光合成 (基礎生産) を皮切りに一連の食物連鎖を経て海洋内に粒状物 (マリンスノー) として輸送されるメカニズム (生物ポンプ) がある。海洋の生物ポンプは年間約 11GT (ギガトン) の CO₂ を海洋内へ輸送している。もしも海洋の生物ポンプがなければ産業革命前の大気中 CO₂ 濃度は 400ppm 以上であった (実際は 280ppm) との試算もあり海洋の CO₂ 吸収能力において極めて重要なメカニズムである。中でも西部北太平洋の生物ポンプは大気 CO₂ 吸収に多大に貢献していることが同海域の時系列観測で明らかになってきた。しかし近年は同海域の植物プランクトン優占種 “ケイ藻” が減少し生物ポンプ能力の低下の可能性が報告されている。

(2) 海洋の生物ポンプにおける大気塵 (エアロゾル) の役割

この生物ポンプ能力が陸域から輸送される大気塵 (エアロゾル) の供給により活性化される可能性が指摘されてきた。例えば黒潮域、日本海で黄砂現象の後に植物プランクトンが増加した、西部北太平洋で沈降粒子量 (マリンスノー量) が中国大陸の砂塵嵐の発生頻度と相関がある等である。前者はエアロゾルに含まれる主要栄養分 (リン酸や硝酸) や微量栄養分 (鉄) が海水に溶出し植物プランクトンが利用したため、後者は有機物に富む比重の小さいマリンスノーに比重の大きい陸起源物質が付着、錘 (おもり、あるいはバラスト) となりマリンスノー量が増加したためと推定される。これらのメカニズムは最終氷期に大気中 CO₂ 濃度が約 80ppm 低かった (約 200ppm) のは海洋生物ポンプが活発であったため、という仮説の根拠にもなっている。近年では様々な HNLC (High Nutrient Low Chlorophyll) 海域で鉄散布実験が実施され鉄供給による植物プランクトン増加が観測されてきた。しかし自然界のエアロゾルからどの程度鉄や栄養塩が溶出し植物プランクトンに利用されるのか? 植物プランクトン量と同様にマリンスノー量も増加するのか? という点については未だに解明されていない。

(3) エアロゾル供給量の変化に伴う生物ポンプの変化予測

西部北太平洋はアジア大陸の砂漠や黄河起源のエアロゾル供給量が多い海域である。代表的なエアロゾルである黄砂の研究はこ

れまでも多くの研究が実施されてきた。しかし黄砂他自然発生したエアロゾルが西部北太平洋の生物ポンプにどのように影響しているのか? という観点の研究例は極めて少ない。現在、地球温暖化に伴い乾燥地帯/湿地地帯の地理分布変化、気象変化、そして人類活動による土地利用変化が報告されており、今後はアジア大陸からのエアロゾルの西部北太平洋への輸送量、輸送範囲が大きく変化することも考えられる。そのため生物ポンプにおけるエアロゾルの役割を明確にしておくことが急務である。また近年では東アジア都市部から発生する産業起源エアロゾル (硫酸塩、硝酸塩、黒色炭素等) の越境汚染が報告されている。これらが海洋へ供給された場合の生物ポンプへの影響も考慮すべき時期となっている。

2. 研究の目的

海洋観測、大気観測、数値モデル構築という三位一体のアプローチにより、海洋の二酸化炭素吸収メカニズムである “生物ポンプ” における大気塵 (エアロゾル) の役割を把握する。そして地球環境変化/海洋環境変化に伴う自然起源および産業起源 (人為起源) エアロゾルの供給量、供給過程の変化が海洋生物ポンプをどのように変化させ、その結果、海洋の二酸化炭素を中心とする物質循環過程がどのように変化するかを考察する。

3. 研究の方法

(1) 生物ポンプにおけるエアロゾルの役割の把握

海洋観測船や自動観測装置による海洋観測を実施。生物ポンプとエアロゾルに関する観測、データ/試料収集を行う。

(2) エアロゾル供給量の時空間変動の把握

海洋観測船上で自然起源/産業起源エアロゾルの収集/化学分析、および複数仰角差分分光光計 (MAX-DOAS) による光学的測定を実施する。

(3) エアロゾル輸送量/供給量の変動予測

海洋/陸上観測データ、衛星観測データを再現できる数値モデルを構築する。

4. 研究成果

(1) 生物ポンプにおけるエアロゾルの役割の把握

① バラスト効果

セジメントトラップ中の有機炭素を海洋内部へ輸送するバラストとして何が有効であるかを明らかにするために、有機炭素と生物起源オパール、炭酸カルシウムおよび (エアロゾルの指標である) 陸起源物質の関係を多変量解析した。その結果、K2 ではどの深度のセジメントトラップ試料でも生物起源オ

パールが最も高いバラスト効果（輸送係数）を持つ事が明らかとなった。一方、S1では水深によって有機炭素と相関の高いバラストが異なり、水深 500m ではバラストとは関係ない有機炭素(residual)が優占的であった。いずれにせよ両地点では陸起源物質が有機炭素のバラスト効果は低いと推定された。

②生物生産力の制限因子の把握

観測地点 K2 と S1 における時系列式衛星データを用いて、海洋表層クロロフィル (Chl-a) と水温 (SST)、日射量 (PAR)、エアロゾル (AOT) の関係を多変量解析した。K2 では Chl-a は SST と最も高い正の相関があり、続いて PAR と正の相関関係が見られた。しかし AOT との相関は低いものであった。S1 では Chl-a は SST と負の相関が見られた。また S1 では SST, PAR, AOT と相関をもたない Chl-a も多く見られた。いずれにせよ S1 でも AOT と chl-a の間に高い相関は見られず生物ポンプに対するエアロゾルの役割について単純な相関解析からは関係性は見いだせなかった。影響が及ぶまでの時間ラグなどについても今後考慮する必要がある。

③栄養塩の供給過程

西部北太平洋亜熱帯域では表層付近の栄養塩濃度が極めて低いか枯渇している。それにもかかわらず栄養塩が豊富な亜寒帯海域の基礎生産力と同等の基礎生産力があった。従って同海域への栄養塩供給のメカニズムの解明が重要な研究課題であった。2013年7月、海洋地球研究船「みらい」MR 13-04航海において貧栄養海域である亜熱帯観測地点 S1 では、栄養塩が枯渇する同時期においてはこれまでの観測より若干高い基礎生産力が観測された。同航海では表層付近で通常同季節には枯渇している硝酸塩が検出された (図 1)。このことから大気経由で輸送されたエアロゾルに含まれる硝酸塩が溶出し基礎生産力を増加させた可能性が示唆された。

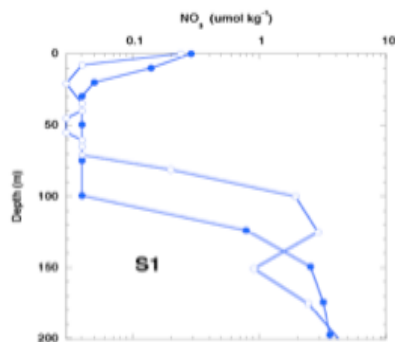


図 1 MR13-04 で観測された亜熱帯観測地点 S1 における硝酸塩 (NO₃) の鉛直分布

④陸域データから推定するエアロゾルの一次生産への寄与

亜熱帯海域 S1 に供給され沈着する栄養塩と生物ポンプへの影響を推定するため、東アジア酸性雨ネットワークモニタリングネットワーク (EANET: <http://www.eanet.asia/jpn/>) のデータベースに登録されている小笠原島で観測された硝酸 (NO₃) とアンモニアデータ (NH₄) を解析した。NO₃ と NH₄ の湿式沈着量 (濃度と降水量から計算: mmol-N m⁻²) はともに大きく季節変動し 4 月にピークを持つ事が窺えた。両者の年間積算量総和は約 13 mmol-N m⁻² yr⁻¹ と見積もられた。これが海洋の植物プランクトンに使用されるとすると、86 mmol-C m⁻² yr⁻¹ (13 x 6.6: Redfield 比) の基礎生産量と試算される。S1 での基礎生産力は約 300 mg m⁻² day⁻¹ (= 9125 mmol-C m⁻² yr⁻¹) と観測されている。従って S1 の基礎生産力の約 1% をエアロゾル (ここでは湿式沈着されるもの) が支えているということになる。ただし S1 の基礎生産力のうち約 75% は“再生産”であり、外部から供給された栄養塩による基礎生産 (新生産) は約 25% と考えられている。従ってエアロゾルは新生産の約 4% を支えている、という結果になる。なお、硝酸ガスや有機窒素化合物類 (粒子状・ガス状) の沈着寄与も考えると、ここでの値は大気からの窒素供給によるインパクトの下限見積となる。

(2) エアロゾル供給量の時空間変動の把握

大気から海洋への物質供給の時空間変動に関する知見を得るため、「みらい」航海において、自然/産業起源エアロゾルの収集/化学分析、および複数仰角差分吸光分光計 (MAX-DOAS) による大気中 NO₂ 等の光学的測定を実施した。エアロゾル粒子は、2.5 ミクロン境界として粗大・微小粒子を区別して捕集した。人為・自然起源別の寄与推定に必要な、各種水溶性イオンや V, Fe 等微量金属の粗大・微小別の濃度分析結果を得た。また、エアロゾル形状・蛍光測定装置 (WIBS4) では、土壌ダスト粒子を、散乱強度の非対称から非球形性粒子として選別観測できることを確かめた。

①人為起源物質の長距離輸送

図 2 に MR11-05 および MR12-02 で行ったエアロゾルサンプリング地点と、各地点における金属成分濃度の一例を示す。鉄 (Fe) の質量濃度が微小粒子 (< 2.5 μm) で 0 - 157 ng m⁻³, 粗大粒子 (> 2.5 μm) で 0 - 546 ng m⁻³ の範囲で測定され、ダストが主である粗大粒子と同時に、人為起源物質が主と考えられる微小粒子の寄与も高いことが示された。また、石油燃焼由来の物質であるバナジウム (V) が微小粒子で有意に測定され、重油燃焼などの人為起源汚染の影響が遠く外洋域まで及んでいること

が示唆された。MR11-05において、黄砂粒子で

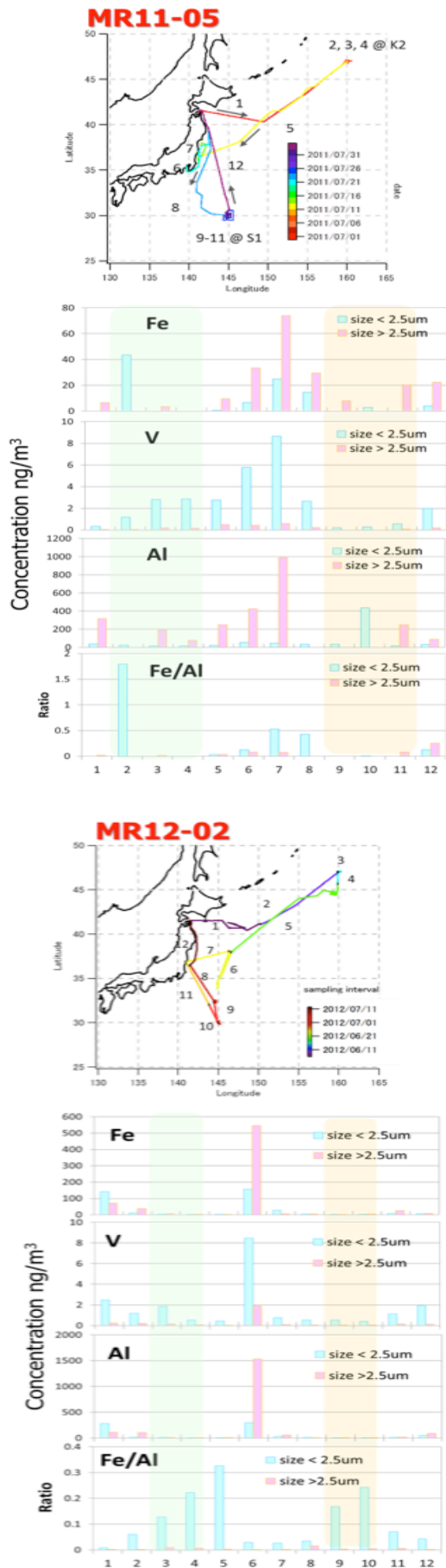


図2 MR11-05、MR12-02 航海時のエアロゾルの採集地点と金属成分濃度

はFe/Al比がおおよそ0.44-0.82の範囲であることが知られているが、K2ではそれを大きく上回る値(1.8)が見られ、別の発生源(産業活動等)の影響を受けていることが示唆された。

②粗大粒子、微小粒子中の可溶鉄

大気から供給される鉄のうち、微量栄養素として生物が利用できるのは可溶性成分のみと考えられる。そのため、天然起源の粗大粒子と人為起源が主の微小粒子に含まれる鉄の可溶性割合を分析し、比較を行った。その結果、微小粒子中の可溶性鉄の割合が多いことが明らかになった(図3)。したがって、可溶性を考慮すると、微小(人為)粒子の相対的な重要性は、図2に示した質量濃度に対する単純な寄与よりも相対的に大きいと考えられた。今後、陸域人為起源物質の海洋への供給量の増加が予想されるが、本実験結果は将来的に海洋へ供給される鉄の量が増加し、とくにHNLC海域において海洋の生物生産が高まる可能性を示唆するものである。一方では、陸起源物質の増加は有害金属である銅(Cu)や鉛(Pb)の海洋への供給量の増加も示唆される。どちらの影響が優位になるのか、観測と実験的研究の継続が必要である。

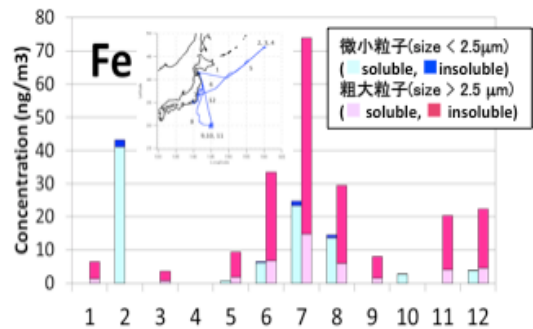


図3 粗大粒子、微小粒子中の可溶鉄と難溶鉄の割合

(3) エアロゾル供給量の変動予測

①衛星データ解析

観測定点K2とS1付近のエアロゾルの時空間分布を把握するため、NASAよりMODISの9kmメッシュ、Daily dataを入手し、2002年から2011年までのエアロゾルの季節変動を調べた。さらに両観測定点付近の植物プランクトン分布と物理環境との関係を調べるため、衛星マルチセンサー(海色、水温、日射、海面高度等)の画像解析も開始した。

衛星データを用いて観測定点K2とS1付近におけるクロロフィルa濃度とエアロゾルの光学的厚さの時空間分布を比較した結果、両者の変動パターンにはあまり良い関係が見られなかった。さらにエアロゾルの光学的厚さは

他の衛星プロダクトやモデル結果と比較してもまだ大きな不確実性が見られることが明らかとなった。

S1に近い南鳥島におけるエアロゾル光学的厚さの現場観測値と衛星観測値とを比較した結果、衛星観測値が若干過大評価の傾向であることがわかった。

②数値モデル解析

現行の大気汚染物質輸送モデルWRF/Chemをベースに黄砂等の自然起源エアロゾル、アジア都市部からの人為起源エアロゾルの時空間変動を再現する輸送モデルを構築した。以前のバージョンとの改善点としては、NCEP Global Upper Air and Surface にアーカイブされた地表および高層気象観測、衛星観測、ウインドプロファイラによる気象場観測データをモデル内にナッジングを用いて取り込むことによりモデル内気象場の再現性を向上したこと、およびNCARで開発された植生起源炭化水素・エアロゾルエミッションモデルMEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) を化学輸送モデルとオンライン結合し、モデル内で各タイムステップに計算される気温、比湿、日射量に応じて天然起源の大気化学成分の放出量推定を行えるよう変更したこと、および同じくオンラインのダストフラックスモデルを導入したことである。また森林火災によって引き起こされる大気擾乱によって高層にまで森林火災エアロゾル等が輸送される、pyroconvectionについても考慮した。焼失面積等については人工衛星MODISによる観測を、また各化学成分の放出量についてはMODISおよびIGBPによる土地利用分布に基づく、全球1km解像度、一日ごとのNCARによるFINNデータベースを使用した。人為起源エミッションとしてはREASバージョン2を使用した。またエアロゾルによる放射場および雲生成に対する直接効果、間接効果についても考慮した。黄砂の卓越する春季における粗大粒子の大気中密度を隠岐および辺戸岬における観測と比較したところ、定性的によく一致した。また、2010年4月におけるK2およびS1におけるElemental Carbon, Organic Carbonおよび土壌性エアロゾルの沈着フラックスを調べたところ、K2における各エアロゾルの沈着フラックスの変動はほぼ同じような振る舞いをしていたのに対し、S1では土壌性エアロゾルと炭素エアロゾルの極大は異なる日に見られた。これはK2に陸起源エアロゾルが輸送されるような風系は北日本を低気圧が通過するケースが主であるが、S1には風系によって大陸起源と日本起源との異なるソース域からの輸送が見られるためであると考えられた。また広域かつ長期的な大気経路輸送の影響を評価するため全球

エアロゾルモデルSPRINTARSを用いた2010年の通年計算を行い、炭素性エアロゾルおよび土壌性エアロゾル降下量と当該期間におけるS1およびK2での沈降粒子中陸起源物質濃度と比較するとともに、エアロゾルの光学的厚さを衛星観測と比較した。その結果、SPRINTARSモデルで推定された降下量はセジメントトラップデータと比較して過大評価傾向にあった。

領域化学輸送モデルWRF/Chemを用いて比較したところ、通年での外洋域への輸送が示唆された。

③放射性物質の粒状態としての海洋への供給過程と海洋内輸送

2011年3月11日の東日本大震災時に発生した東京電力福島第一原子力発電所 (FNPP1) 事故により、事故由来 (陸由来の人為起源) 物質が迅速に海洋へ長距離輸送されることが検証された。FNPP1 事故由来の放射性セシウム 134 (^{134}Cs) が事故一ヶ月後には西部北太平洋広域の表層海水から検出された (Honda et al., 2012)。数値モデルを用いてFNPP1 事故由来放射性物質の大気経路による海洋への降下量を推定したところ、観測地点 K2 や S1 のように FNPP1 から 2000~1000km 離れた遠方の海域へは大気経路でエアロゾルとして ^{134}Cs が輸送されていた事が推定された (Honda et al., Miyazawa et al., 2013)。さらに両地点のセジメントトラップ試料の結果、事故一ヶ月後には ^{134}Cs が沈降粒子として水深約 5000m に到達していたこと、また海洋へ供給された ^{134}Cs のほとんどは溶存したことが示唆された (Honda et al., 2013)。

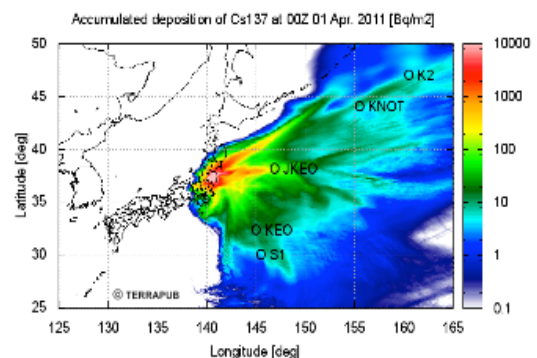


図4 2011年4月1日段階でのFNPP1事故由来の放射性セシウム沈着量の数値シミュレーション結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

①Honda, M. C., H. Kawakami, S. Watanabe and

T. Saino: Concentration and vertical flux of Fukushima-derived radiocesium in sinking particles from two sites in the Northwestern Pacific Ocean. *Biogeosciences* 10, 3525-3534 (2013). (査読有)

- ② Miyazawa, Y., Y. Masumoto, S. M. Varlamov, T. Miyama, M. Takigawa, M. Honda and T. Saino: Inverse estimation of source parameters of oceanic radioactivity dispersion models associated with the Fukushima accident. *Biogeosciences* 10, 2349-2363 (2013). (査読有)
- ③ Honda, M. C., Aono, T., Aoyama, M., Hamajima, Y., Kawakami, H., Kitamura, M., Masumoto, Y., Miyazawa, Y., Takigawa, M., Saino, T.: Dispersion of artificial caesium-134 and -137 in the western North Pacific one month after the Fukushima accident. *Geochemical Journal* Vol. 46, pp. e1 to e9 (2012). (査読有)

[学会発表] (計6件)

- ① 宮川拓真、金谷有剛、竹谷文一、Xiaole Pan、駒崎雄一: Ship-borne measurements of black carbon aerosols over northwestern Pacific and Bering Sea. 第25回地球惑星連合大会. 2014/5/1. パシフィコ横浜。
- ② 竹谷文一、金谷有剛、宮川拓真、駒崎雄一、Xiaole Pan、松本和弘、本多牧生: 西部太平洋における蛍光性エアロゾル粒子の測定. 第25回地球惑星連合大会. 2014/5/1. パシフィコ横浜。
- ③ 本多牧生: K2S1プロジェクト、日本海洋学会 2014年度春季大会シンポジウム. 2014/3/30, 東京海洋大学。
- ④ 竹谷文一: 西部北太平洋における大気エアロゾル微量成分の現場測定. ブルーアース 2013. 2013/3/15, 東京海洋大学。
- ⑤ 本多牧生: 西部北太平洋の生物ポンプとエアロゾル(1). 日本海洋学会 2013年度春季大会. 2013/3/22, 東京海洋大学。
- ⑥ 本多牧生: 西部北太平洋の生態系・物質循環南北比較研究: 沈降粒子. 日本海洋学会 2012年度春季大会. 2012/3/29, 東京海洋大学。

[その他]

ホームページ等

「生物ポンプにおけるエアロゾルの役割」

http://ebcrpa.jamstec.go.jp/rigc/j/ebcrp/rr/proj_aerosol/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本多 牧生 (HONDA, Makio)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環

境変動領域 チームリーダー

研究者番号: 20359160

(2) 研究分担者

金谷 有剛 (KANAYA, Yugo)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境
変動領域 チームリーダー

研究者番号: 60344305

滝川 雅之 (TAKIGAWA, Masayuki)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境
変動領域 チームリーダー

研究者番号: 30360754

笹岡 晃征 (SASAKA, Kosei)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境
変動領域 技術専任スタッフ

研究者番号: 20371148

(3) 連携研究者

松本 和彦 (MATSUMOTO, Kazuhiko)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境
変動領域 技術研究主任

研究者番号: 50359155

藤木 徹一 (FUJIKI, Tetsuichi)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境
変動領域 主任研究員

研究者番号: 30598248

川上 創 (KAWAKAMI, Hajime)

独立行政法人海洋研究開発機構・むつ研究
所 技術研究主任

研究者番号: 20415988

脇田 昌英 (WAKITA, Masahide)

独立行政法人海洋研究開発機構・むつ研究
所 技術研究副主任

研究者番号: 30415989

長島 佳奈 (NAGASHIMA, Kana)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境
変動領域 研究員

研究者番号: 90426289

高島 久洋 (TAKASHIMA, Hisanori)

福岡大学・理学部 講師

研究者番号: 20469620

竹谷 文一 (TAKETANI, Fumikazu)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境
変動領域 主任研究員

研究者番号: 50377785

岩本 洋子 (IWAMOTO, Yoko)

金沢大学・環日本海域環境研究センター
特別研究員

研究者番号: 60599645