

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24404006

研究課題名(和文) ドミニカ共和国における近過去から現在のバッテリー工場起源沿岸域鉛汚染の調査・解明

研究課題名(英文) Survey of past/present lead pollution caused by a battery factory in the coastal area of Dominican Republic

研究代表者

中井 智司 (NAKAI, Satoshi)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80313295

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：バッテリー工場由来の鉛による河川及び沿岸域の汚染状況を把握するため、ドミニカ共和国のハイナ川河口付近において底質や塊状サンゴを採取し、鉛含有量を分析した。そして、懸濁物質を指標として、衛星データを使ってハイナ川からの周辺海域への拡散状態の推定を行った。分光反射率とSSの関係を元に、解像度のよい衛星データからハイナ川河口部のSS分布を定量化するモデルを導いた。また、これらのモデルから実際のALOS AVNIR-2データを使ってSS等のマッピングを行った。ハイナ川河口部からカリブ海に流出する物質の拡散を三次元的に求めるため、海洋環境シミュレーションを行った。

研究成果の概要(英文)：In order to reveal contamination of lead derived from a battery factory in the river and coastal area in Dominican Republic, many sediment and massive coral samples were collected from the river mouth of Rio Haina and analyzed for lead. In addition, diffusion of suspended matters from the river mouth of Rio Haina were predicted using the satellite observation data, while a quantitative model was proposed using the satellite observation data for estimation of suspended matters distribution. Applying the ALOS AVNIR-2 data to these models, mapping of suspended matters was carried out. Finally, a coastal environment simulation was carried out to predict 3-dimensional diffusion of suspended matters from the river mouth of Rio Haina to the Caribbean Sea.

研究分野：環境化学工学

キーワード：鉛汚染 汚染履歴 リモートセンシング 生物モニタリング 塊状サンゴ

1. 研究開始当初の背景

本調査研究が対象とするドミニカ共和国サンクリストバル市では 1980 年代に操業を開始したバッテリー工場の鉛汚染が原因となり、鉛中毒が発生した^{1,2)}。このバッテリー工場はハイナ川から直線距離でわずか 400 m の高台にあり、さらにハイナ川は 1.5 km 先でカリブ海に接続している。従って、汚染土壌中の鉛が降雨に伴って溶出あるいは懸濁態で河川に流出したり、粉塵となった汚染土壌が大気から沈着することにより、周辺沿岸海域が鉛によって汚染されたことは想像に難くない。一方、工場跡地では鉛汚染土の封じ込めが行われたが、汚染土の除去は行われていない。従って、過去の汚染履歴の解明と共に、今後の鉛の流出負荷を予測することが望まれる。

そこで本調査研究では、攪乱の有無に左右されず過去の海域汚染の再現が可能なサンゴ骨格を用いた方法に着目した。サンゴ骨格は炭酸カルシウムを主成分とし、高密度部分と低密度部分が交互に重なる年輪を形成しているが、炭酸カルシウム中に含まれる金属の量は、周辺海域の濃度によって変化する。既往の研究³⁾では、北大西洋に生息する *Diploria strigosa*, *Montastrea annularis* など様々なサンゴの骨格中の鉛が分析され、1920 年代の産業革命に起因したと考えられる濃度上昇を認めた。サンゴ骨格を用いた環境再現は、これまで産業革命、工業化、都市化など社会の大きな変化と関連づけられてきた。しかし、このサンゴ骨格を用いた解析方法を、汚染履歴が明確な特定の汚染源に起因する水域汚染の実態評価に応用した例はない。

2. 研究の目的

本調査研究では、工場周辺の沿岸海域に生息するサンゴ骨格に刻まれた年輪中の鉛を分析することで、当該工場に起因する沿岸海域の鉛汚染の近過去からの推移を明らかにする。さらに、衛星画像に基づきリモートセンシング技術を活用しながら、周辺沿岸海域への鉛の分散を三次元で表現できる数値モデルを作成する。

3. 研究の方法

3.1 底質の採取と分析

鉛による河川底質の汚染状況を把握するため、2012 年 11 月および 2013 年 9 月にドミニカ共和国のハイナ川河口付近において底

質を採取し、鉛含有量を分析した。サンプリング地点を図 1 に示す。鉛の分析方法は底質調査方法(環境省,平成 24 年 8 月)に従った。

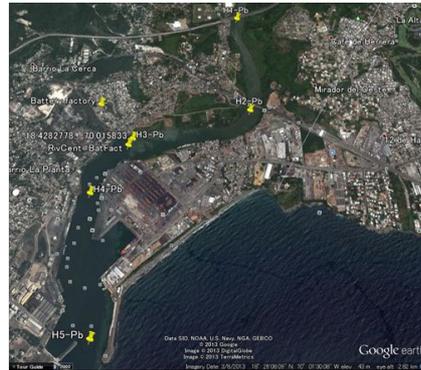


図 1 バッテリー工場と底質採取地点

3.2 サンゴの採取と分析

2012~2013 年度において、ドミニカ共和国ハイナ川河口域においてサンゴ試料(*Diploria* spp., 図 2)などを採取した。サンゴ試料について、鉛を含めた重金属類の測定を実施した。試料は MQ 水による超音波洗浄の後、骨格粉末試料 10mg を 2%硝酸溶液 10mL に溶解し、産業技術総合研究所所有の誘導結合プラズマ質量分析計(ICP-MS, Agilent 7700x)を用いて元素の計測を行った。



図 2 採取した塊状サンゴ

3.3 リモートセンシング技術を活用した三次元数値モデルの開発

(1) リモートセンシング技術による懸濁物質の定量

懸濁物質を指標として、衛星データを使ってハイナ川からの周辺海域への拡散状態の推定を行った。まず、現地調査によって分光放射計(MS720)を用いて分光反射率と現地懸濁物質の関係を実測データから明らかにし、衛星データから懸濁物質濃度(SS)を推定するためのモデル化を行う。実際には、2011 年 3 月と 6 月に図 3 に示す 10 点の現地調査で得られた分光反射率と SS の関係を元に、解像度のよい衛星データからハイナ川河口部の SS 分布を定量化するモデルを導いた。また、これらのモデルから実際の ALOS AVNIR-2 デ

ータを使ってSS等のマッピングを行った。

(2)三次元数値モデルの開発

ハイナ川河口部からカリブ海に流出する物質の拡散を三次元的に求めるため、海洋環境シミュレーションを行った。このシミュレーションは、主として質量保存の方程式、運動方程式(ナビエ・ストークス方程式)から成り立っている。ここでは、まずアメリカ海洋大気局 NOAA の WEB サイトから、同地域の空間解像度は約 1.8 km の海底地形データを得た。潮位変動、河川流入、気象データ(気温、水温、降水、風)、各種観測データを初期条件・境界条件として、同調査地域周辺の海域の流れを再現した。

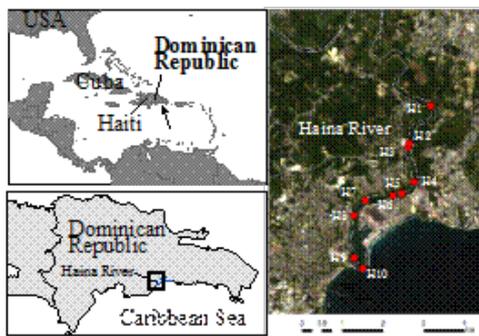


図3 調査地域

4. 研究成果

4.1 底質の分析結果

2012年11月にH2-Pb地点からH4-Pb地点に採取した底質のPbの分析結果を表1示す。汚染の深刻な底質では、mg/kgオーダーでPbが検出されるが(例、11~50 mg/kg、チャオプラヤ川⁴⁾)、採取した底質の濃度のPb濃度は極めて低いレベルであり、汚染底質とは言い難かった。但し、底質試料には礫が多く含まれておりシルト分が少なかった。そこで、2013年9月に

表1 H2-Pb地点からH4-Pb地点にかけて採取した底質のPb濃度

Sample	濃度[$\mu\text{g}/\text{kg}$]
1	4.81
2	20.66
3	28.61
4	29.64
6	26.04
7	22.63

再度底質の採取を行い、Pbを分析した。その結果、汚染サイトの上流から下流にかけて前年と同レベルのPb濃度しか検出されず、ハイナ川での鉛汚染は既に改善されている可能性が示された。

表2 H1-Pb地点からH5-Pb地点にかけて採取した底質のPb濃度

地点	Latitude (North)	Longitud (West)	濃度 [$\mu\text{g}/\text{Kg}$]
H1-Pb	18°26'20"	70°0'27"	23.04
H2-Pb	18°25'50"	70°0'23.6"	31.45
H3-Pb	18°25'41.8"	70°0'57"	28.76
H4-Pb	18°25'26.6"	70°1'7.6"	18.09
H5-Pb	18°25'51.5"	70°1'4.2"	27.73

4.2 塊状サンゴ試料のPb濃度

試料の測定の結果、鉛については100 ppb以下とこれまで太平洋の塊状サンゴ(*Porites* spp.)について報告されている値と同程度の濃度レベルが確認でき、その他の元素についても概ねこれまでの報告値と同程度であることが分かった。

この結果を踏まえて、2014年度は、2013年度にハイナ川河口域の水深約6mより採取されたサンゴ試料(*Diploria strigose*)を用いて、年輪に沿った重金属類の時系列解析を実施した。サンゴ試料は板状に整形した後、X線写真による年輪の観察を行った(図4)。さらに、海水温の間接指標とされているSr/Ca比、Mg/Ca比とU/Ca比の測定から、本試料には約15—18年程度の海洋環境が記録されていることが推察された。*Porites* サンゴと異なり、*Diploria* 属は年輪が不明瞭かつSr/Ca比などの変動もまだ現地の水温と対応できていないので、年代は今後変わることが予測されるが、Sr/Ca比、Mg/Ca比とU/Ca比の複合的な観察から年代を推測しているので大きなずれはないものと推察される。測定の結果、鉛の濃度はバッテリー工場の操業停止やその後の土壌流出対策との明瞭な関係は見られなかったが、骨格表面から2cm周辺にそれ以外の年代における鉛の濃度幅の10倍以上もの高いピークが確認された(図5)。また、これまでに土壌流出の指標として報告されているMnやBaなどにもこの期間を通じて変化が見られることから(図6)、今後は年代軸を

正確に決めていくと同時にこれら重金属類の変化についても詳細な考察を行う。

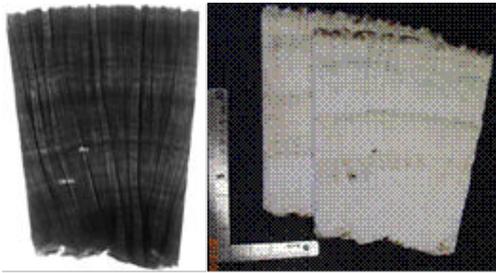


図 4 ドミニカ共和国ハイナ川河口より採取されたサンゴ(*Diploria strigosa*)の板状試料

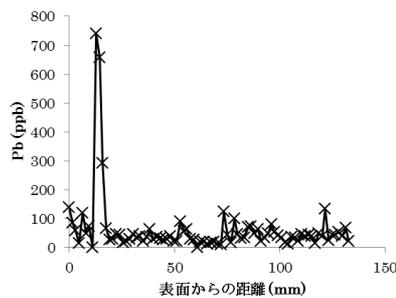


図 5 ハイナ川河口より採取されたサンゴ骨格中の鉛濃度変動

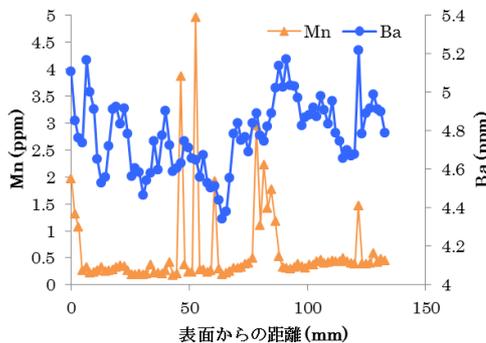


図 6 ハイナ川河口より採取されたサンゴ骨格中の Mn と Ba 濃度変動

4.3 三次元数値モデルの開発

図 7 に現地調査から得られた通常期と大雨後の分光反射率特性を示す。大雨後は明らかに通常期の植物プランクトン優勢の分光特性と異なり、物質量の増加で反射率が単純に増加する典型的な SS 優勢の分光特性となることがわかった。また、分光反射率解析の結果、10mの解像度を有する衛星センサ ALOS-2 AVNIR-2 による SS の定量には、図 8 に示すように、植物プランクトン量に依存されない近赤外バンド(AV4: 760-890nm)の反射率が有効であることが確かめられた。同様に、植物プランクトン量の指標であるクロロフィル a 濃度(Chl-a)のモデル化も行い、衛星データが得られ

ば、図 9 のような Chl-a や SS などの懸濁物がカリブ海へ拡散する状態を可視化できるようになった。なお、ALOS AVNIR-2 センサは 2011 年で観測を終えているが、2013 年 2 月から稼働している同様の衛星センサ LANDSAT-8 でモニタリングを継続している。なお、衛星と現場データを使った検証活動は現地のサントドミンゴ自治大学と共同で現在も続けられている。

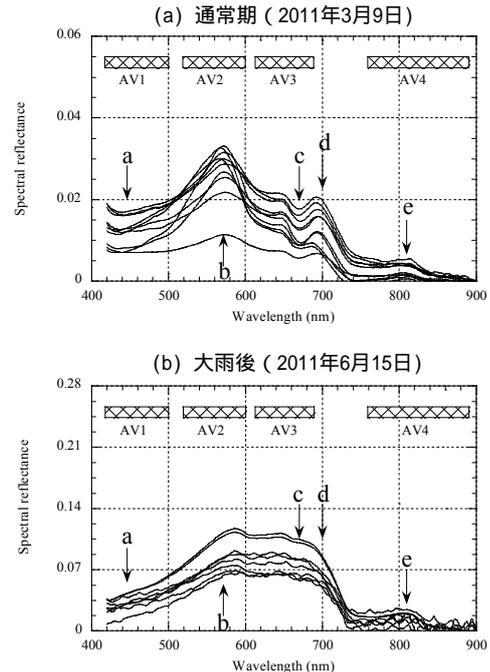


図 7 通常期と大雨後のハイナ川の分光反射率特性

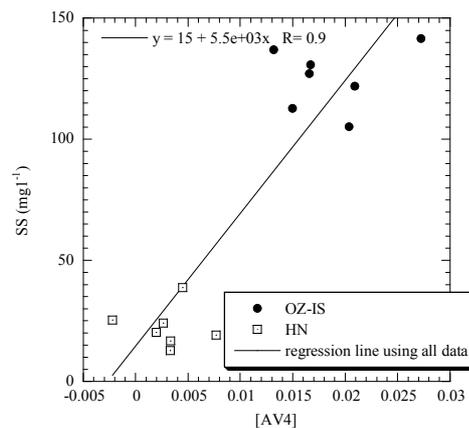


図 8 ALOS AVNIR-2 Band 4 [AV4]と SS の関係

ドミニカ共和国の地形データを図 10 に示す。この計算領域は、東西 170km、南北 78km の海域であり、Haina 川の河口域を含む。今回は、河口から流出する汚濁物質がカリブ海に流入・滞留する過程をシミュレーションによって再現した。計算期間は 2011.3.1 ~ 5.31

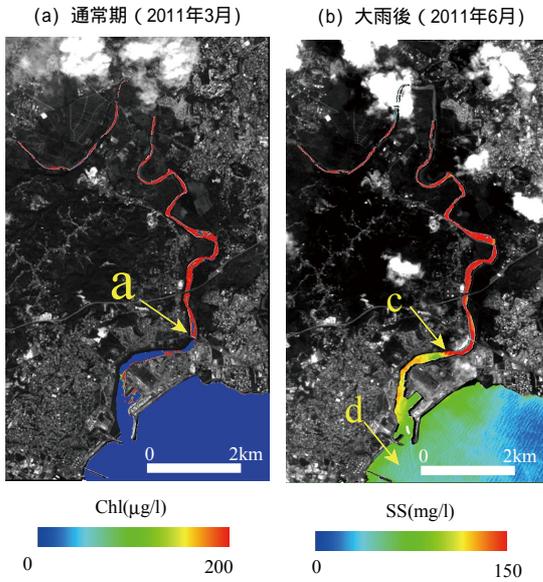


図9 ALOS AVNIR-2 から得られた通常期のChl-aと大雨時のオザマ川におけるマッピング例

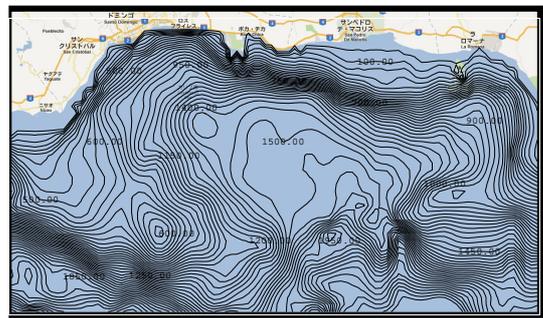


図10 ドミニカ共和国とその南海域(カリブ海)の海底地形

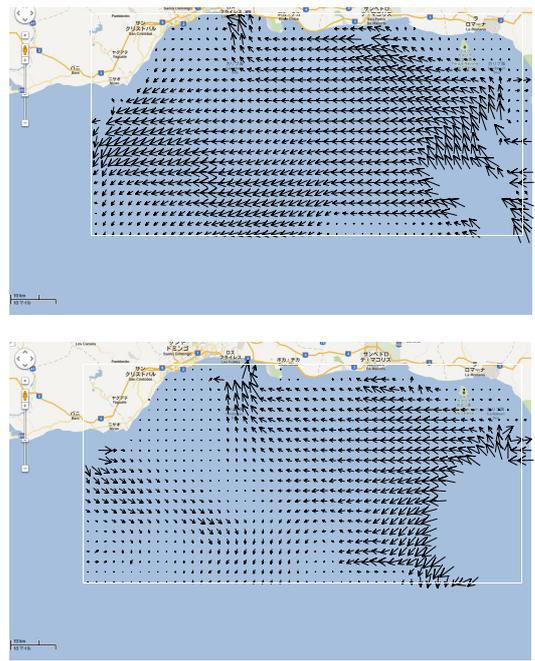


図11 カリブ海の潮流ベクトル分布(上, 下げ潮; 下, 上げ潮)

の3ヵ月間である。その結果、図11のように、カリブ海の潮流ベクトルを再現できるようになり、図9に衛星データから可視化されるような懸濁物質がどのように拡散していくか、三次元的にシミュレーションできるようになった。

【引用文献】

1) Kaul ら, Int J Occup Environ Health, 5, 307-312, 1999; 2) Kaul ら, Environmental Health Perspectives, 107, 917-920, 1999; 3) Shen ら, Earth Planet Sci Lett, 82, 289-304, 1987; 4) Wijaya A. R. ら, Bangkok. Journal of Geochemical Exploration, 126-127, 45-54 2013

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

Sakuno, Y. and Oki, K., Relationship between turbid water and coral damage distribution using ALOS AVNIR-2 images and diving survey data immediately after the heavy rain disaster of the Amami-Oshima Island, Japan, Advances in Remote Sensing, Vol.4, 査読有, 2015, pp.25-34.

DOI: 10.4236/ars.2015.41003

Sakuno, Y., Miño, E. R. A., Nakai, S., Mutsuda, H., Okuda, T., Nishijima, W., Castro, R., Garcia, A., Peña, R., Rodriguez, M., and Depratt, C. G., Chlorophyll and suspended sediment mapping to the Caribbean Sea from rivers in the capital city of the Dominican Republic using ALOS AVNIR-2 data, Environmental Monitoring and Assessment, Vol.186, 査読有, 2014, pp.4181-4193.

DOI: 10.1007/s10661-014-3689-6

Sakuno, Y., Makio, K., Koike, K., Maung-Saw-Htoo-Thaw, and Kitahara, S., Chlorophyll-a estimation in Tachibana Bay by data fusion of GOCI and MODIS using linear combination index algorithm, Advances in Remote Sensing, Vol.2, 査読有, 2013, pp.292-296.

<http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=40465#.VSYJ8pNy0sc>
作野裕司, 三宅拓馬, 生物光学モデルを

利用した濁ったサンゴ礁上の海色再現, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69(2), 査読有, 2013, I_1131-I_1135 .
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaigan/69/2/69_I_1131/_article/-char/ja/Sakuno_Y_and_Kunii_H.,_Estimation_of_growth_area_of_aquatic_macrophytes_expanding_spontaneously_in_Lake_Shinji_using_ASTER_data,_International_Journal_of_Geosciences,_Vol.4\(6A1\),_査読有,_2013,_pp.1-5.DOI:10.4236/ijg.2013.46A1001](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaigan/69/2/69_I_1131/_article/-char/ja/Sakuno_Y_and_Kunii_H.,_Estimation_of_growth_area_of_aquatic_macrophytes_expanding_spontaneously_in_Lake_Shinji_using_ASTER_data,_International_Journal_of_Geosciences,_Vol.4(6A1),_査読有,_2013,_pp.1-5.DOI:10.4236/ijg.2013.46A1001)

〔学会発表〕(計 3 件)

Sakuno, Y., Hatakeyama, K., Miyamoto, Y., Hatsuda, A., Mori, A., Kuki, T., Relationship between spectral reflectance and chlorophyll-a concentration in the eutrophic Lake Togoike, SPIE Remote Sensing 2014, 2014 年 9 月 22 日 ~ 2014 年 9 月 24 日, Amsterdam (オランダ)
Esteban R. Mino A., Yuji Sakuno, Tetsuji Okuda, Satoshi Nakai, Hidemi Mutsuda, Wataru Nishijima, Marco A. Jime Marcos, Rodriguez and Amarilis Garcia, Assessment of water quality in the coastal area of Santo Domingo, Dominican Republic using free satellite imagery, 第 17 回日本水環境学会シンポジウム, 2014 年 9 月 8 日 ~ 2014 年 9 月 10 日, 滋賀
作野裕司, 三宅拓馬, 水深と透明度の違いによるサンゴ礁上の水面分光反射率シミュレーションと検証, 第 53 回日本リモートセンシング学会, 平成 24 年 11 月 19 日(月) ~ 11 月 20 日, 広島

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://environ.hiroshima-u.ac.jp/HPmain/proje>

cts/Dominica.pdf

6. 研究組織

(1)研究代表者

中井 智司 (Satoshi NAKAI)
広島大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 80313295

(2)研究分担者

陸田 秀実 (Hidemi MUTSUDA)
広島大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 80273126

作野 裕司 (Yuji SAKUNO)

広島大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 20332801

奥田 哲士 (Tetsuji OKUDA)

広島大学・環境安全センター・助教
研究者番号: 60343290

鈴木 淳 (Atsushi SUZUKI)

産業技術総合研究所・地質情報研究部門・研究グループ長
研究者番号: 60344199

長尾 正之 (Masayuki NAGAO)

産業技術総合研究所・地質情報研究部門・主任研究員
研究者番号: 70251626

井上 麻夕里 (Mayuri INOUE)

岡山大学大学院・自然科学研究科・助教
研究者番号: 20451891

(3)連携研究者

なし