

令和元年6月6日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H05631

研究課題名(和文) ドミニカ共和国沿岸の重金属汚染の時空間的推移と流入実態の調査と負荷源対策の検証

研究課題名(英文) Investigation of spatial-temporal transition and influx of heavy metal pollution on the coast of the Dominican Republic and validation of load source measures

研究代表者

作野 裕司 (Sakuno, Yuji)

広島大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20332801

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：ドミニカ共和国沿岸域への重金属の流出実態を把握するため、河口部におけるサンゴ試料の化学分析と衛星リモートセンシングや数値モデルによる流出パターンの解析が行われた。この研究により、首都サントドミンゴ周辺は生活及び産業廃棄物処理施設が不十分であることから、ハイナ川に代表される大河川から洪水に伴って重金属類が海域にもたらされる可能性が示唆された。特にバッテリー工場による鉛汚染を塊状サンゴにより検出できることが明らかとなった。さらに、ハリケーン等の洪水イベントによって他の汚染源からの深刻な負荷もあることも見出された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ドミニカ共和国は、周囲がカリブ海で囲まれる風光明媚な国である。一方、ハリケーンの通り道としても知られ、ハリケーンなどのイベント後には陸域から大量の汚染物質がカリブ海に流出する懸念が常にある。本研究では、特に重金属汚染が問題となるハイナ川河口とサマナ湾などを対象として、サンゴ試料や衛星・数値モデルなどを使って重金属の流出実態を明らかにした。このような試みは過去にはなく、学術的・社会的に非常に意義深い。

研究成果の概要(英文)：Chemical analysis of coral samples in the estuary and analysis of outflow patterns by satellite remote sensing and numerical model were carried out to understand the actual situation of heavy metal outflow to the coast of the Dominican Republic. The study suggests that heavy sanitation in the capital Santo Domingo is insufficient for living and industrial waste treatment facilities, and that heavy metals may be brought to the sea area from the large river represented by the Haina River. In particular, it has become clear that lead contamination from battery factories can be detected by massive corals. In addition, it was also found that flood events such as hurricanes have serious impacts from other sources.

研究分野：リモートセンシング

キーワード：重金属汚染 サンゴ ドミニカ共和国 水温 衛星 数値モデル

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

管理不備による汚染が常態化しており、特に重金属汚染が深刻である。ドミニカ共和国では、フェロニッケル、金、銀等の鉱物資源を主要な輸出品としており、全国に鉱山が分布する。特に同国南部には金鉱山があるユナ川流域、数万 ppm に及ぶ鉛土壌汚染の原因となったバッテリー工場が隣接するハイナ川、人口 2000 万人以上の首都サントドミンゴが含まれ、南部沿岸の重金属汚染に対する関心は高い。しかしながら、発展途上にある同国では機器分析による精緻かつ定常的な重金属のモニタリングは困難であり、汚染の推移も把握できていない。このため、工場や鉱山の環境管理の強化といった汚染対策を実施してもその効果を検証できず、重金属汚染対策を検討、実施する際の大きな障害となっている。

そこで、近過去～現在の重金属汚染を再現可能な塊状サンゴの骨格に着目した。サンゴ骨格から過去の汚染履歴を再現する研究は学術的にも注目されており、本研究の参加者らの成果は 2011 年に *Nature* 誌に掲載された。サンゴ骨格は CaCO_3 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が形成される。年輪の重金属含有量は周辺海水の重金属濃度に伴い変化するため、サンゴ骨格の各年輪の重金属を分析することにより、サンゴ生息域の海水中の重金属濃度の近過去～現在の推移を再現できる。

一方、重金属汚染への対策を検討する際、負荷実態の把握が肝要となる。申請者らは、後述するように同国沿岸の海底地形を取り入れた海洋環境シミュレーションモデルを構築しており、河口から流出する物質の拡散を三次元的に計算することが可能である。そして、計算結果の検証に必要となるリモートセンシング技術も有している。

2. 研究の目的

本研究では、ドミニカ共和国沿岸から採取した塊状サンゴ骨格の分析により、同エリアにおける重金属汚染の推移を経時的、空間的に再現するデータを得る。また、晴天時と雨天時に現地調査を行って重金属の流出負荷実態を把握すると共に、衛星画像に基づくリモートセンシングによる検証を行いながら、海洋環境シミュレーションモデルを用いて各調査域の河川から沿岸海域への重金属の分散を三次元で予測する。そして、このモデルを用いて沿岸海域の近過去や現在の鉛汚染状況を時空間的に再現すると共に、重金属発生源での過去の汚染対策の実施による効果を検証する。

3. 研究の方法

ドミニカ共和国南部沿岸域への重金属の流出実態を把握するため、晴天時と雨天時に流入河川水を採取して重金属を形態別に分析すると共に、有機物や懸濁物質の濃度、pH 等も測定する。さらに、室内実験により、懸濁物質からの溶出挙動も明らかにする。また、重金属の流出を数値モデル化するため、懸濁物質を指標とし、衛星の画像を使用して異なる気象条件下における河川水の流出解析を行うと共に、溶存態及び懸濁粒子に付着して流出した重金属の分散挙動を表現し、これを海洋環境シミュレーションモデルに適用する。そして、重金属の汚染状況を時空間的に把握するため、塊状のサンゴを成長方向に板状に切り出し、年輪ごとでの各重金属の含有量を分析すると共に、周辺海域での重金属濃度の空間的分布を把握する。最終的に、過去の重金属対策の実施状況を照合しながら、モデルにより将来の鉛の汚染状況を予測する。

4. 研究成果

以下の 3 項目について調査・研究を行った。すなわち、1)各河川河口から塊状サンゴ生息域への重金属の負荷実態調査、2) リモートセンシング技術を活用した海洋環境シミュレーションモデルの開発、3) サンゴ骨格を用いた重金属汚染実態の再現と汚染の空間分布の調査、である。

まず、1)の調査に関しては、サマナ湾流入河川において、各河川河口から塊状サンゴ生息域への重金属の負荷実態調査を行い、複数のサンゴ試料の取得とそれと同期した重金属・水質試料の採取を行った。水質試料については、固相抽出ディスクにより濃縮し、国内に持ち帰り分析に供した。この採水試料について、水質分析（栄養塩、塩分、全アルカリ度等）を行った。塩分と全アルカリ度の顕著な相関関係から陸水の流入が示唆されるが、濁度と塩分には明瞭な関係がみられず、調査測線が設定された湾口部では、海水の濁度は必ずしも陸水の影響ではないことが示唆された。また塩分とケイ酸濃度にも明瞭な相関関係が認められた。溶存無機態窒素 (DIN)及び溶存無機態リン濃度は、 $0.8 \mu\text{M}$ 及び $0.09 \mu\text{M}$ 以下で、サマナ湾の湾口部では、一般的なサンゴ礁にみられるレベルの水質であった。また、サンゴについてはスラブ化と分析を行った。砂割サマナ湾の湾口部及び外洋部から採取されたサンゴ骨格試料を切断し、軟 X 線撮影により年輪を可視化して、群体の年齢算定を行った。さらに、Sr/Ca 比測定による水温記録の復元と群体の成長履歴の解明も実施した。

次に 2)の研究に関しては、すでに開発された海洋環境シミュレーションの改良や現地の環境に合わせたチューニング作業に必要なサマナ湾の水利・水質環境特性を把握するための現地調査を行うとともに、近年の Landsat-8 データの可視・水温画像を使って、ユナ川からサマナ湾へ流出する懸濁物質の二次元的な拡散状態（分布パターン）を把握した。その結果、図 1 にみられるように少なくともサマナ湾のユナ川河口から 30 km までは頻りに濁質が流出していることがわかった。さらに、その沖のサンゴ地帯（河口から 30～60km エリアの南東側）にも濁り

が達していることが伺えた。ただし、SSTのパターンは季節により水温差が数°C以上あることがわかったが、濁りのパターンと比べて不明瞭であった。関連研究として、同国首都のサントドミンゴを貫くオザマ川において新たな分光反射率・水質データセットを取得した。さらに過去にハイナ川河口沖のカリブ海で取得したサンゴコア試料から推定された過去の水温環境変遷と、衛星 AQUA MODIS データから得られた表面水温 (SST) データを比較も行った。

さらに3)の調査に関しては、ハイナ川の河口沖からは30年の成長期間を有するものも含め、サンゴ試料(試料名SDM13-1~3)を採取し、骨格中の微量元素濃度の測定を実施した。骨格を切断してスラブを作成した後、軟X線写真撮影により年輪計数をした。また、ストロンチウム・カルシウム比(Sr/Ca)と、一部の試料については、降水量(陸水流入)の指標とされているバリウム・カルシウム比(Ba/Ca)も測定し、これらを合わせて年代決定を行った。ハイナ川河口沖からの2つの試料SDM13-02及びSDM13-03の骨格には1999年から採取された2013年までの変動が記録されたと推定され(図3)、鉛濃度は2000年までは濃度が高かったが、それ以降は低濃度でほぼ一定であった。これは、鉛汚染が問題となったバッテリー工場の閉鎖に伴って、陸域からの鉛の流入が減少したと時期に対応する可能性がある。一方、同じくハイナ川河口沖の試料SDM13-01に対応する鉛濃度がみられないのは、この群体の成長開始がより遅い時期から開始されたことによると思われる。なお、試料SDM13-01のみ、およそ2010年頃に対比される骨格部分に顕著な鉛濃度のピークが認められ、ハイナ川の河口からの距離などが影響している可能性がある。群体SDM13-01及びSDM13-03については鉛同位体比が測定された(図4)。鉛同位体比プロット上で、SDM13-01の大部分とSDM13-03の全ての分析結果が一つのクラスターを作るのに対し、SDM13-01群体表層部の高い鉛濃度部分のみ異なる同位体組成であった。これは、鉛の供給源が異なっていることを示す。

ドミニカ共和国はハリケーンの経路に位置し、今までも数年毎に豪雨による河川洪水が発生している。被害をもたらした主たるハリケーンとして、George(1998年)、Olga及びNoel(2007年)、Sandy(2012年)などがある。サントドミンゴ周辺は人口増加が顕著でありながら生活及び産業廃棄物処理施設が不十分で埋立処理が主体であることから、ハイナ川などの洪水に伴って重金属類が海域にもたらされ、サンゴ骨格に見られた鉛濃度のピークとして記録されていることが考えられた。本研究により、バッテリー工場による鉛汚染を塊状サンゴにより検出できることが明らかとなった。さらに、ハリケーン等の洪水イベントによって他の汚染源からの深刻な負荷もあることも見出された。将来的には、こうした場に着目した鉛汚染管理へのアプローチが必要である。

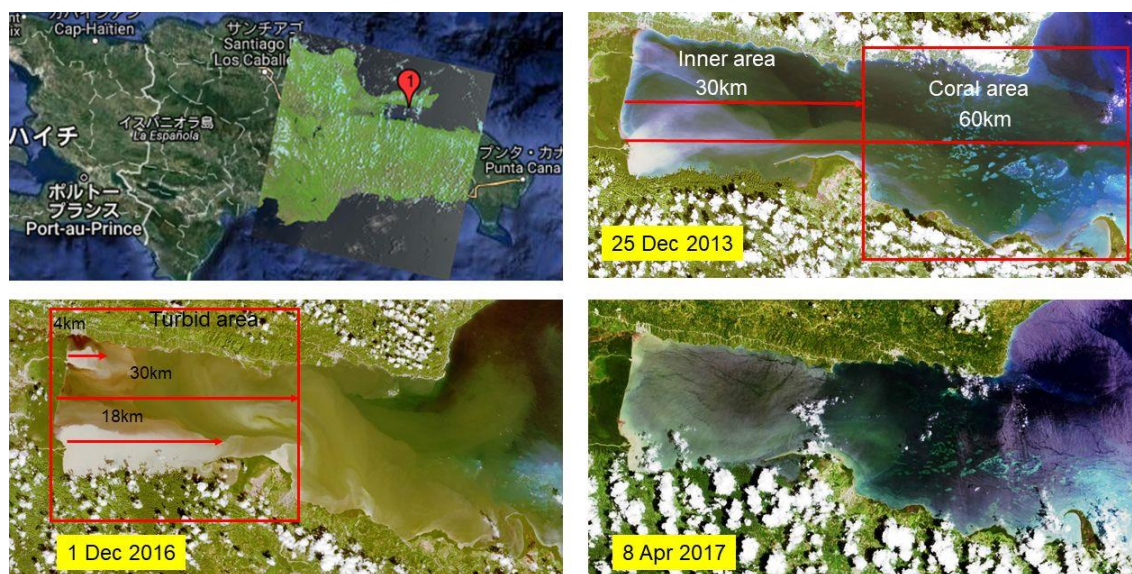


図1 衛星 Landsat-8 から見たサマナ湾から流出する濁質の広がり

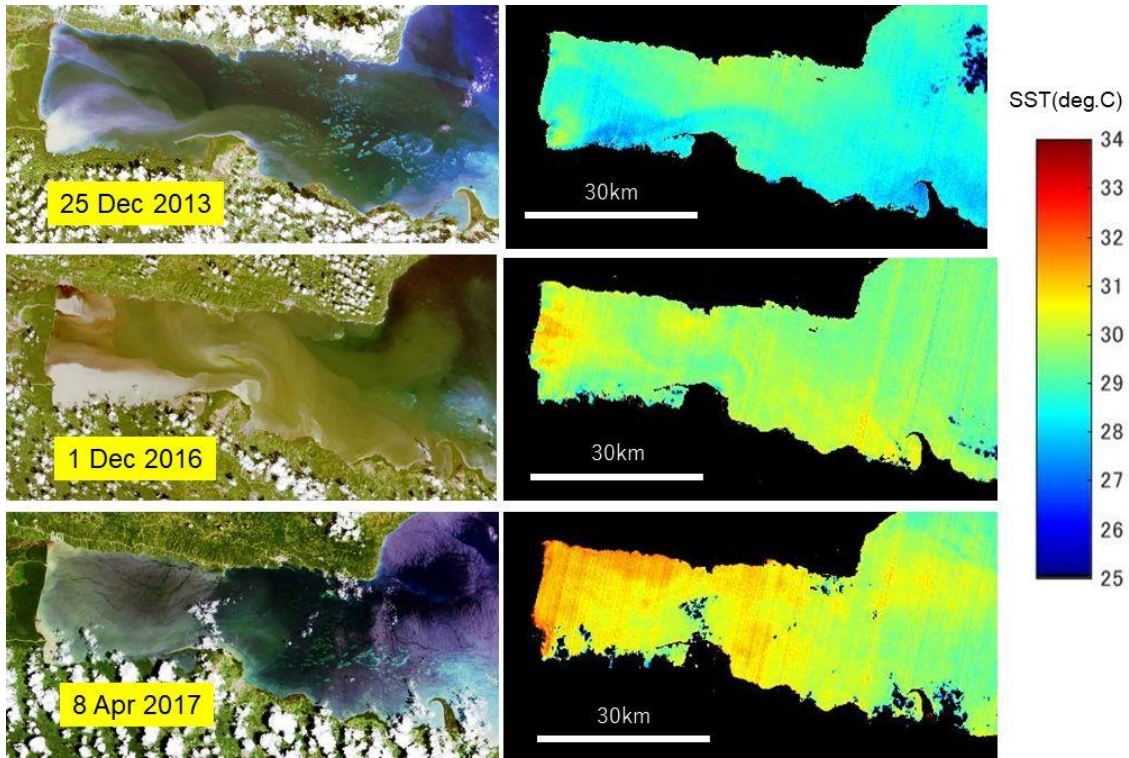


図2 衛星 Landsat-8 から見たサマナ湾から流出する濁質（左）と SST（右）の分布

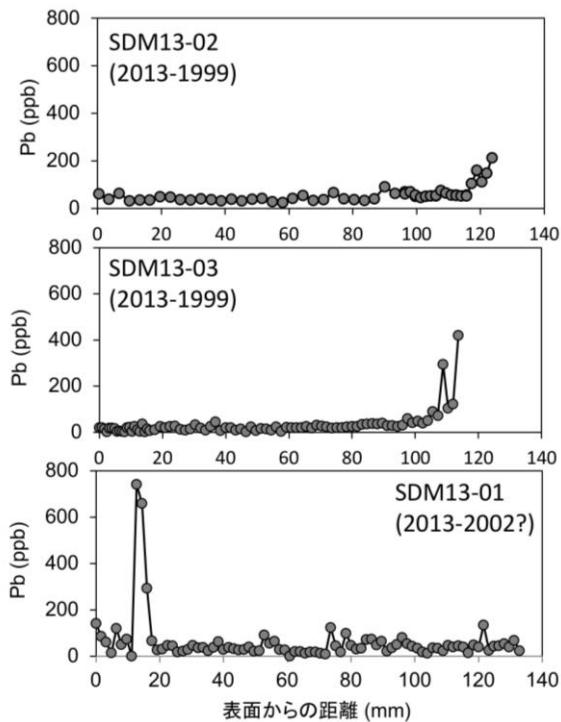


図3 ドミニカ共和国南部のハイナ川河口沖から採取されたサンゴ群体の骨格の鉛濃度。

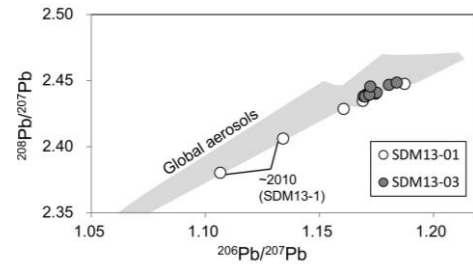


図4 ドミニカ共和国南部ハイナ川河口沖のサンゴ群体 2 試料の骨格の鉛同位体比。世界の平均的なエアロゾルの鉛同位体比範囲をハッチで示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- 1) 鈴木 淳：サンゴ骨格に基づく気候及び海洋環境の研究（海洋化学学術賞（石橋賞）受賞記念論文），海洋化学研究，30，72-89，2017（査読無）

- 2) Mutsuda, H., Rahmawati, S. Miyata, Y. and Doi, Y.; Numerical Investigation into the Restoration of Ocean Environments Using Steelmaking Slag, *Marine Pollution Bulletin*, 131, pp.428-440, 2018. (査読有)
- 3) Wang, Z., Kawamura, K., Sakuno, Y., Fan, X., Gong, Z., and Lim, L., Retrieval of chlorophyll-a and total suspended solids using Iterative Stepwise Elimination Partial Least Squares (ISE-PLS) regression based on field hyperspectral measurements in Irrigation Ponds in Higashihiroshima, Japan. *Remote Sensing*, 9(3), 264-278, 2017. (査読有)
- 4) 作野裕司, 榎尾慶太, Landsat-8 TIRS データによる日本湖沼の表面水温推定の精度検証, *LAGUNA*, 24, 39-48, 2018. (査読有)
- 5) Wang, Z., Sakuno, Y., Koike, K., and Ohara, S.: Evaluation of Chlorophyll-a Estimation Approaches Using Iterative Stepwise Elimination Partial Least Squares (ISE-PLS) Regression and Several Traditional Algorithms from Field Hyperspectral Measurements in the Seto Inland Sea, Japan. *Sensors*, 18(8), 2656, 2018. (査読有)
- 6) Sakuno, Y., Yajima, H., Yoshioka, Y., Sugahara, S., Abd Elbasit, M. A., Adam, E., & Chirima, J. G.: Evaluation of Unified Algorithms for Remote Sensing of Chlorophyll-a and Turbidity in Lake Shinji and Lake Nakामी of Japan and the Vaal Dam Reservoir of South Africa under Eutrophic and Ultra-Turbid Conditions. *Water*, 10(5), 618, 2018. (査読有)

[学会発表] (計 9 件)

- 1) Inoue, M., Suzuki, A., Okuda, T., Nakai, S., Nishijima, W., Marcos Rodríguez, Conrado Depratt : Reconstruction of lead pollution history based on analysis of coral skeleton samples, The 4th Edition of International Conference on Environmental Science & Technology, March 30, 2018, Vienna, Austria, Best poster presentation award.
- 2) Suzuki, A., Coral-based approaches for paleoclimate studies, future ocean environment assessment and disaster research, The 14th International Symposium on Biomineralization (BiominXIV), 12 Oct. 2017, Tsukuba, Japan, 招待
- 3) Inoue, M., Suzuki, A., Okuda T., Nakai, S., Sakuno, Y., Nishijima, W., Rodriguez, M., Depratt, C., Heavy metal concentrations in coral skeleton from the Republic of Dominica, XIII International Scientific Research Congress (XIII CIC), 8-9 Jun. 2017, Santo Domingo, Dominican Republic, 招待
- 4) Sakuno, Y. and Wang, Z., Validation of surface chlorophyll-a in the center of Seto Inland Sea using GOCI data, ISRS2016 (The International Symposium on Remote Sensing 2016), 20-22 Apr. 2016, Jeju, Korea
- 5) Wang, Z., Kawamura, K., Sakuno, Y., Chlorophyll-a and total suspended solids estimation for irrigation ponds in Higashi-Hiroshima using hyperspectral measurement data, ISRS2016 (The International Symposium on Remote Sensing 2016), 20-22 Apr. 2016, Jeju, Korea
- 6) Sakuno, Y., Nakai, S., Ohno, M., Suzuki, A., Initial results of simultaneous mapping for bottom feature and water quality in Samana Bay of the Dominican Republic using Landsat-8 data, XIII International Scientific Research Congress (XIII CIC), 8-9 Jun. 2017, Santo Domingo, Dominican Republic
- 7) Wang, Z., Sakuno, Y., Koike, K., Ohara, S.: Sea surface salinity estimation in the center of Seto Inland Sea using in situ reflectance and water quality, IGARSS 2017, 発表確定, 招待なし, 国際学会
- 8) Sakuno, Y., Kurokawa, N., Taniguchi, N.: The estimation of surface flow velocity for Indonesian flow (ITF) using Himawari-8 SST data. *Proceedings of SPIE Asia-Pacific Remote Sensing*, Vol.10778, 24-27, Sep. 2018, Hawaii, USA.
- 9) Sakuno, Y. and Sakamoto, Y.: Automatic detection of the sea grass bed in the central part of Seto Inland Sea of Japan using Landsat-8 data, International Symposium on Remote Sensing 2018 (ISRS2018), Pyeongchang, Korea, May 9-10, 2018.

[図書] (計 1 件)

- 1) Suzuki, A. Coral-based approaches to paleoclimate studies, future ocean environment assessment, and disaster research. In Endo, K., Kogure, T., Nagasawa, H. (Eds.), *Biomineralization: From Molecular and Nano-structural Analyses to Environmental Science*, 275-282, 2018. DOI : ISBN 978-981-13-1002-7

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

[その他]

ドミニカ共和国に関する独自の環境情報サイト

https://home.hiroshima-u.ac.jp/sakuno/DRinfo/DR_index.htm

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：中井 智司

ローマ字氏名：(NAKAI, satoshi)

所属研究機関名：広島大学

部局名：大学院工学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：80313295

研究分担者氏名：鈴木 淳

ローマ字氏名：(SUZUKI, atsushi)

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：地質調査総合センター

職名：研究グループ長

研究者番号（8桁）：60344199

研究分担者氏名：長尾 正之

ローマ字氏名：(NAGAO, masayuki)

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：地質調査総合センター

職名：主任研究員

研究者番号（8桁）：70251626

研究分担者氏名：陸田 秀美

ローマ字氏名：(MUTSUDA, hidemi)

所属研究機関名：広島大学

部局名：大学院工学研究科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：80273126

研究分担者氏名：西嶋 渉

ローマ字氏名：(NISHIJIMA, wataru)

所属研究機関名：広島大学

部局名：環境安全センター

職名：教授

研究者番号（8桁）：20243602

研究分担者氏名：井上 麻夕里

ローマ字氏名：(INOUE, mayuri)

所属研究機関名：岡山大学

部局名：大学院自然科学研究科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：20451891