

令和元年6月3日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05329

研究課題名(和文) インドネシア通過流の表層環境が気候システムおよびサンゴ礁環境に及ぼす影響評価

研究課題名(英文) Studies on marine environments of Indonesian throughflow and its impact on the climate and coral reefs

研究代表者

井上 麻夕里 (Inoue, Mayuri)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：20451891

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,370,000円

研究成果の概要(和文)：ジャワ海に位置するインドネシア・セリブ島より採取されたサンゴ骨格試料についてストロンチウム・カルシウム比やウラン・カルシウム比、酸素・炭素同位体比を測定することで、過去約70年間の海洋環境を復元した。その結果、この海域ではこの70年間で海水温が約0.7度上昇していることが分かった。また、1970年代以降は化石燃料放出の影響を受けて海水のpHが低下していることも推察された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現代の海洋観測技術が発展した社会においても、地形の複雑さなどによりインドネシア多島海の海洋環境はよく分かっていない点が多い。今回のサンゴ試料を用いた研究により、ジャワ海においても全球規模と同様の温暖化の影響が見られたこと、さらに人為起源二酸化炭素放出の影響も受けており、海洋酸性化の影響もこれから深刻になってくることが予測されたことは、学術的、社会的にも意義のある発見である。

研究成果の概要(英文)：Geochemical tracers such as Sr/Ca, U/Ca, oxygen and carbon isotope ratios were measured on annual bands of the coral skeleton collected from Java Sea in order to reconstruct marine environments for the past 70 years. As a result, 0.7 degree C warming was found for this time period. Especially impact from emission of fossil fuels seems to be intensified since 1970s as seen in the record of carbon isotope ratios as well as U/Ca ratios. Based on the variation of Sr/Ca and U/Ca ratios for 70 years, seawater pH would be decreased since 1970s probably due to the anthropogenic CO<sub>2</sub> emission.

研究分野：地球化学

キーワード：インドネシア サンゴ骨格 微量元素 温暖化 酸性化

### 1. 研究開始当初の背景

インドネシア通過流 (ITF) は太平洋とインド洋間の熱・水収支、および大気-海洋の熱フラックスに影響を与えることから、エル・ニーニョ南方振動 (ENSO) やアジアモンスーンといった、特に熱帯～亜熱帯域に特徴的な気候現象に重要な役割を果たしていると考えられている。その流れはインドネシア多島海の島々の間を流れるユニークな海流であるが、主にマカッサル海峡を通過した後、ロンボク海峡やオムバイ海峡、チモールパッセージを通過してインド洋へと流れ込む。近年の複数年に渡る観測の結果、このような主要な流路を通過する流量を合計すると、ITF は約 15 Sv ( $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) の流量でインド洋に流れ込み、これは南半球における極域方向への最大の熱フラックスであることが見積もられている。しかしながら地形の複雑性や社会的にアクセスしにくいことなどにより、このような ITF に関する研究は歴史が浅く、大型の研究船を用いて観測が行える太平洋や大西洋の外洋域に比べ、ITF の流路であるインドネシア多島海のデータや知見の蓄積が少ない。

### 2. 研究の目的

本研究では炭酸カルシウムの外骨格を形成しながら数十年から時には 100 年以上も成長する造礁サンゴを地質学的試料として利用することで、ITF の流路であるインドネシア多島海の表層環境を明らかにし、そして ITF と ENSO などの気候現象との関係を明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、インドネシア通過流 (ITF) の影響下より採取されたハマサンゴコアについて、月単位の高時間分解能でストロンチウム・カルシウム比 (Sr/Ca 比)、酸素同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) などの化学成分を測定し、海水温と塩分の復元を行う。また、それらと同一試料について近年 pH 指標として報告されているウラン・カルシウム (U/Ca) 比についても測定を行い、海水の pH の復元も実施し、ITF 表層環境の詳細な時系列変動を復元し、気候変動との関係を明らかにする。具体的には、ジャワ海のセリブ諸島より採取されたサンゴ骨格試料について重点的に化学分析を行い、ブナケンおよびバリ島のサンゴ試料については蛍光バンドの観察等を実施した (図 1)。ジャワ海のサンゴ試料は年輪に沿っておおそ 2 週間～1 ヶ月間の成長に相当する間隔 (200~400 $\mu\text{m}$ ) で微小試料採取を行い、各種化学分析の実施は約 2 ヶ月の時間分解能で実施した。この微小試料について、海水温復元のための Sr/Ca 比と塩分復元のための  $\delta^{18}\text{O}$ 、海水の溶存無機炭素などを反映する炭素同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) および pH 指標としての U/Ca 比について分析を行なった。

### 4. 研究成果

ジャワ海のサンゴ骨格試料にはおおそ 1930~2000 年までの約 70 年間の年輪が認められたが、Sr/Ca 比の測定の結果、この 70 年間を通じて約 0.7 °C の海水温

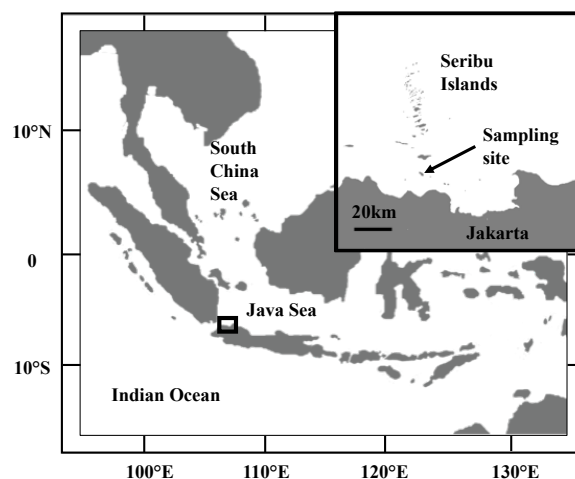


図 1. ハマサンゴ採取場所

の上昇が認められた (図 2)。気象庁が報告している全球の平均海面水温は 100 年あたり 0.54 °C の上昇であるので、全球的な温暖化の影響と同程度の影響がジャワ海というローカルな海域にも及んでいることが明らかとなった。この Sr/Ca 比のデータと  $\delta^{18}\text{O}$  のデータから復元した塩分データは 70 年を通してダイナミックな変動を示しているが、モンスーンによる局所的な塩分 (降雨) 変動から ENSO のような広域にわたる影響など複数の気候イベントの影響を受けて複雑に変動していることが示唆された (図 2)。実際に Sr/Ca 比から復元した海水温の時系列解析を行ったところ、6 ヶ月~1 年という季節変動に加え、4~7 年という ENSO 周期に関連したピークが検出され、モンスーンなどの局所的な影響に加え ENSO の影響を受けて海水温が変動していることが示唆された。しかしながら、ENSO やインド洋ダイポールの挙動とジャワ海の海水温および

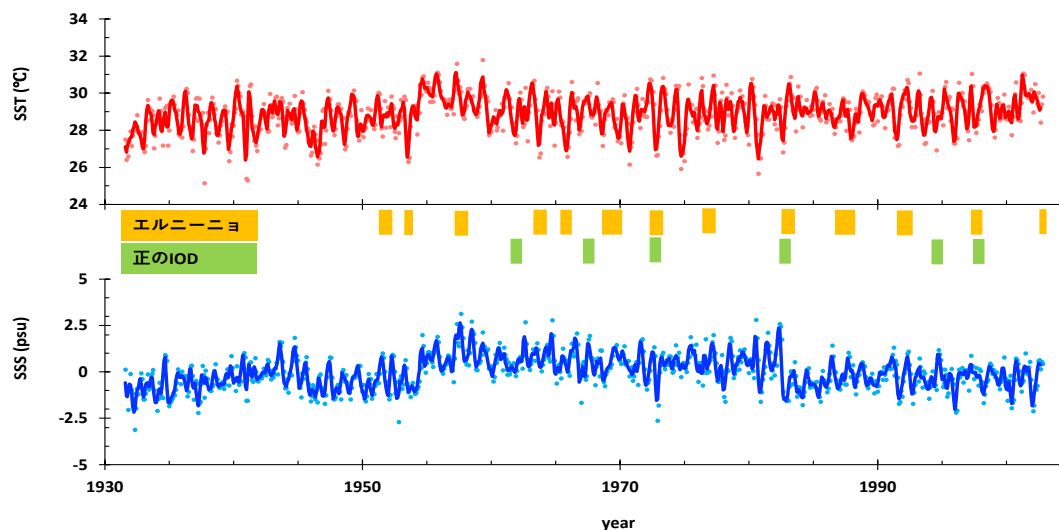


図 2. サンゴ試料から復元された過去 70 年間に於ける海水温 (上) と塩分 (下) の変動。塩分の変動が 70 年を通して一致して変動することはなく、地域的な湧昇や潮汐混合なども含め複雑に影響しながら海洋環境が変化していることが推察された。

地球温暖化と並び、人為起源の  $\text{CO}_2$  排出の影響を受けて海洋が酸性化する「海洋酸性化」問題が世界的にも懸念されているが、温暖化の影響と共にインドネシア多島海における酸性化の影響の程度はあまり理解されていない。これまでにサンゴ骨格や海綿試料などの  $\delta^{13}\text{C}$  の分析から、化石燃料放出の影響を受けて、近年にかけて炭酸塩試料中、つまり海水の  $\delta^{13}\text{C}$  が低下する現象 (Suess 効果) が各地で報告されている。本研究でも 70 年間を通して  $\delta^{13}\text{C}$  の低下が見られ、特に 1970 年以降その低下速度が増加しており、化石燃料放出の影響がジャワ海においても大きく寄与していることが分かった (図 3)。また、サンゴ骨格中の U/Ca 比は pH あるいは炭酸イオン濃度 ( $[\text{CO}_3^{2-}]$ ) の指標になることが指摘されているが、同時に水温の影響も受ける。よって、本研究では海水温のみの指標である Sr/Ca 比と炭酸系と海水温の指標となり得る U/Ca 比を組み合わせ、両者の差分を見ることで、pH 変動の復元を試みた。その結果、 $\delta^{13}\text{C}$  変動に認められた

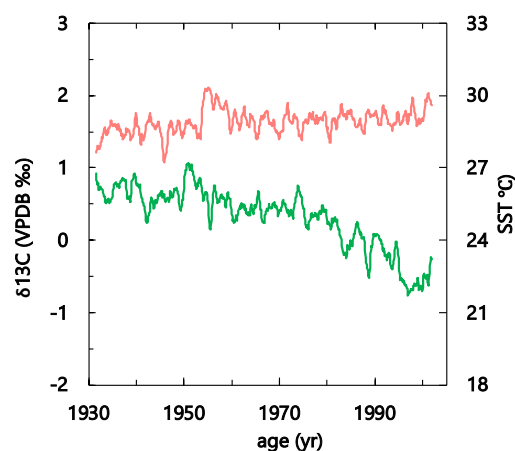


図 3. サンゴ試料から復元された過去 70 年間に於ける海水温 (赤) と  $\delta^{13}\text{C}$  (緑) の変動

Suess 効果の影響が大きくなって以降の 1970 年代に pH ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) の低下と考えられる変動が見ら

れた(図4)。しかし、1990年以降は $\delta^{13}\text{C}$ の変動とは異なり、pHが上昇する傾向が見られた。サンゴの骨格はサンゴ体内の母液を用いて作られるが、この母液の化学組成は海水のものとは異なっていることが指摘されている。炭酸系に関しても同様であり、その骨格形成メカニズムは複雑でまだ分かっていないことが多い。ただ、いずれにしても、骨格形成のための最初の材料となるものは海水であり、よってサンゴ骨格は海水温や塩分、海水の化学成分を反映している。今回得られたpH指標としてのU/Ca比の結果は、1970年代以降のpHの低下傾向は化石燃料放出の影響で海洋が酸性化する影響を捉えており、その後の1970年以前の値に戻るような上昇傾向は、サンゴが体内のpH調整を行うことで酸性化環境に順応し、サンゴ体内のpHが相対的に上昇したことを示しているのかもしれない。実際に海洋酸性化に対するサンゴの順応(順化)については、対照的な研究結果が最近いくつか報告されており、順応できるかどうかはよく分かっていない。また、種や群体による差異もあると思われる。本研究で用いたジャワ海のハマサンゴ試料は、骨格のX線写真の観察からも近年に向けて骨格の成長速度が減少するような傾向は特に見られていないので、このサンゴは酸性化に順応しながら成長したことも推察される。サンゴが数十年という期間で酸性化環境に順応できるのであれば、興味深い。

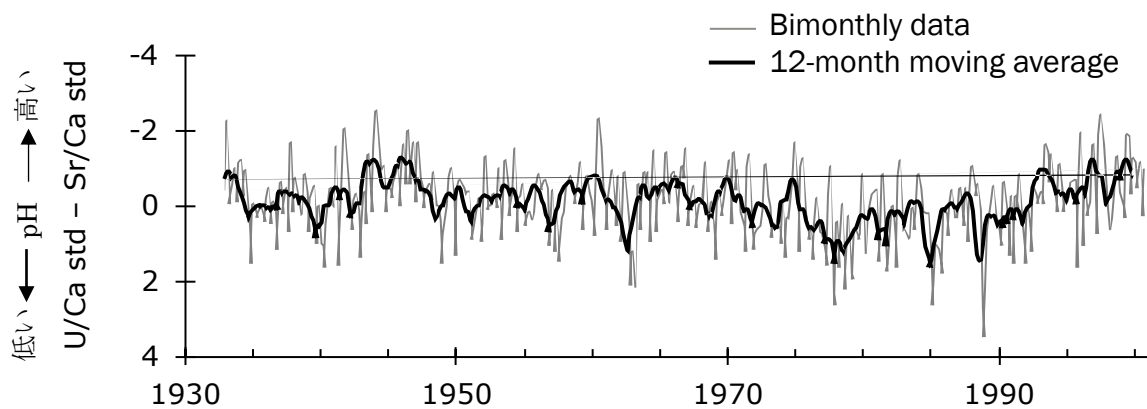


図4. サンゴ試料から測定されたSr/Ca比とU/Ca比から、U/Ca比から温度変化分を差し引いた変動。pHあるいは $\text{CO}_3^{2-}$ の変動に相当する。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

- ① A simple role of coral-algal symbiosis in coral calcification based on multiple geochemical tracers. M. Inoue, T. Nakamura, Y. Tanaka, A. Suzuki, Y. Yokoyama, H. Kawahata, K. Sakai, N. Gussone, *Geochim. Cosmochim. Acta* **235**, 76–88 (2018). (査読有り)

〔学会発表〕(計 6件)

- ① 源田亜衣、鈴木淳、石村豊穂、池原実、井上麻夕里、サンゴ骨格中のSr/Ca比と $\delta^{18}\text{O}$ を用いたジャワ海の表層海水温と塩分の復元. 2018年度日本地球惑星科学連合, (2018)
- ② 井上麻夕里, 中村 崇, 田中 泰章, 鈴木 淳, 横山 祐典, 川幡 穂高, 酒井 一彦, Nikolaus Gussone, 多元素・同位体分析に基づく造礁サンゴの骨格成長における褐虫藻の役割, 2018年度日本地球化学会年会, (2018)
- ③ 源田亜衣、鈴木淳、井上麻夕里、インドネシア・セリブ諸島から採取されたサンゴ骨格中 Sr/Ca

- 比を用いた 50 年以上にわたる海水温の復元. 日本地球惑星科学連合 2017 年大会 (2017)
- ④ 源田亜衣、鈴木淳、石村豊穂、池原実、井上麻夕里. サンゴ骨格 Sr/Ca 比・ $\delta^{18}\text{O}$  を用いたインドネシア・セリブ諸島の海洋環境復元. 第 3 回地球環境史学会年会 (2017)
- ⑤ 源田 亜衣, 鈴木 淳, 井上麻夕里, インドネシア・セリブ島から採取されたサンゴコアを用いた海洋環境復元とインドネシア通過流との関係. 2016 年度日本地球惑星科学連合大会, (2016)
- ⑥ Inoue, M., Gussone, N., Nakamura, T., Yokoyama, Y., Suzuki, A., Sakai, K., and Kawahata, H., Roles of coral-algal symbiosis in coral calcification based on culture experiments using symbiont and aposymbiont primary polyps. Goldschmidt Conference 2016, (2016)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。