

西表島網取湾および崎山湾におけるケイ素・アルミニウムの水平分布

南 秀樹^{*1}, 深澤 徹^{*2}, 捫垣勝哉^{*3}, 渡邊 裕^{*1}, 野坂裕一^{*1}, 崎原 健^{*4}, 村上智一^{*5}

^{*1} 東海大学 生物学部

^{*2} 新潟大学大学院 自然科学研究科

^{*3} 高知大学大学院 総合人間自然科学研究科

^{*4} 東海大学 沖縄地域研究センター

^{*5} 国立研究開発法人 防災科学技術研究所

Horizontal distribution of Silicon and Aluminum in the surface water of Amitori Bay and Sakiyama Bay, Iriomote Island

Hideki MINAMI^{*1}, Tohru FUKAZAWA^{*2}, Katsuya NEJIGAKI^{*3}, Yutaka WATANABE^{*1},
Yuichi NOSAKA^{*1}, Ken SAKIHARA^{*4} and Tomokazu MURAKAMI^{*4}

^{*1} School of Biological Sciences, Tokai University.

^{*2} Graduate School of Environmental Science and Technology, Niigata University.

^{*3} Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Kochi University.

^{*4} Okinawa Regional Research Center, Tokai University.

^{*5} National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience.

Abstract

Amitori and Sakiyama bays are located in the western part of Iriomote Island, Ryukyu Islands, Japan. These bays were designated in Sakiyamawan-Amitoriwan nature conservation area in Japan by Ministry of the Environment, Government of Japan, 2015. Therefore grasp of the present environmental information is necessary in this region.

Aluminum (Al) is the third most abundant element in the earth's crust and the hydrolysis states of $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ and $\text{Al}(\text{OH})_3$ are the dominant species in seawater. The biogeochemical processes controlling the Al distributions have also been suggested in the previous studies¹⁾. Some evidence for removal of dissolved Al during phytoplankton growth were shown^{2) 3) 4)}, though the removal mechanism via a passive adsorption onto the surface of particle is also suggested^{5) 6)}. On the other hand, there is a relation close to biogenic production of marine surface layer for silicate. The distribution of bio-limited and scavenged elements reflect the influence of source, they can be used as tracers to help map the movements of water masses through the oceans.

The distribution of salinity, silicate, Al and suspended particulate matter (SPM) in surface seawater were investigated in Amitori and Sakiyama bays. Silicate concentration in surface seawater decreased with the

increment of salinity, we suggest that the water of a low silicate level on the Amitori bay is promoted by dilution with silicate-poor water originated from open ocean. Therefore, the original river water of silicate concentration is estimated by $700.7 \mu\text{mol/L}$. In Amitori bay, the Si/Al ratios in the central part was higher than those in the mouth. Although it is known that some of particulate Al dissolved into seawater in this bay, the dissolved Al in surface water may be soon absorbed and scavenged by sinking particles.

1. はじめに

西表島は周囲 130km, 面積 289km^2 で沖縄県では沖縄本島について 2 番目に大きな島である。西表島の西部に位置する網取湾・崎山湾およびその周辺海域は、亜熱帯海域に属しており、湾口側は黒潮の影響を受けているが、湾内は河川（網取湾にはウダラ川とアヤンダの 2 河川、崎山湾にもイドウマリ川、パインタ川、ウボ川の 3 河川が流入している）、潮汐、風の影響もあり複雑な海洋環境を呈している。なお、この海域は 1983 年環境省が指定した沖縄県西表島（八重山群竹富町）の崎山湾自然環境保全地域の区域が、2015 年 2 月に海域が拡張され、名称が崎山湾・網取湾自然環境保全地域となり（日本唯一指定海域）、保全計画も変更されている状況にあり（環境省ホームページ：<http://www.env.go.jp/>）、環境状態の現状把握が必要である。なお、西表島周辺海域の化学的研究は、浦内川から浦内湾におけるマングローブ林内で行われているものが幾つかある^{7) 8) 9) 10) 11) 12) 13) 14)}。ケイ素は地殻中で 2 番、アルミニウムは 3 番に多い元素であるが、海水中では μM あるいは nM オーダーの微量元素として溶存している。主にアルミノケイ酸塩鉱物などに含まれ風化浸食によって河川から海洋に流入するため、どちらも陸起源物質の化学的トレーサーとして活用されることが多い。すなわち、河川から供給された化学物質が海水中でどのように除去されるのかの指標となる。化学物質の湾内への供給や除去過程の情報は、海洋環境や海洋生物の生態系などに貴重な情報となり得る。また、ケイ素はケイ藻種の発生に必須な元素のため海洋表層の生物生産と密接な関係がある。ケイ藻は直接アルミニウムを取り込むことはしないが、骨格（軟組織）には吸着して海水からアルミニウムは除去（スキヤベンジング）される。アルミニウムは酸化的な表層海水中では Al (III) が安定であり、その水酸化物や酸化物の溶解度は小さい。海洋における一般的な鉛直分布は、ケイ素は表層で少なく、下層にいくにつれて

高濃度となるいわゆる栄養塩型（bio-limited）を示すが、アルミニウムは表層で高く、下層にいくにつれて減少し、底層付近で再び高濃度となる除去型（scavenged）を示し、その海洋における平均滞留時間が数 10 年から 100 年前後と極めて短い特徴を示す¹⁵⁾。本研究では、現在の化学環境情報の収集が不可欠である網取湾および崎山湾で、供給過程は同様な過程を示し生物活動と密接に関わっているケイ素と、水塊や化学物質のスキヤベンジングプロセスの指標となるアルミニウムに注目してその分布や挙動について考察する。なお、粒状物質の挙動、物理情報やそのモデルなどについては既に報告例がある¹⁶⁾。

2. 試料採取および分析方法

2-1 試料採取

網取湾では 2017 年 5 月 17 日に 33 試料、崎山湾では 11 月 8 日に 21 試料の表面海水を採取した。観測点については Fig. 1, Table 1 および Table 2 に示した。なお、網取湾の観測点は St.AO、崎山湾は St.SO として以降では記載する。

2-2 分析方法

ケイ酸塩については、採取した海水試料を沖縄地域センターの研究室で Millex[®]-HV メンブレンフィルター（口径 $0.45 \mu\text{m}$ ）でろ過した後冷蔵保存して持ち帰り本学研究室で、モリブデンイエロー法により分光光度計を使用して定量分析を行った。アルミニウムは、同様にろ過した海水試料に 0.1M となるように硝酸を添加して冷蔵保存し、ルモガリオンに在る微量アルミニウム蛍光定量法により定量分析を行った¹⁷⁾。また、SPM（Suspended particulate matter）は海水試料をスクレポアメンブレンフィルター（口径 $0.40 \mu\text{m}$ ）でろ過し、脱塩処理を行った後、重量法にて定量した。塩分は塩分計で測定したが、現場水温のデータがないため、現場温度補正は行っていない（ 25°C の値）。

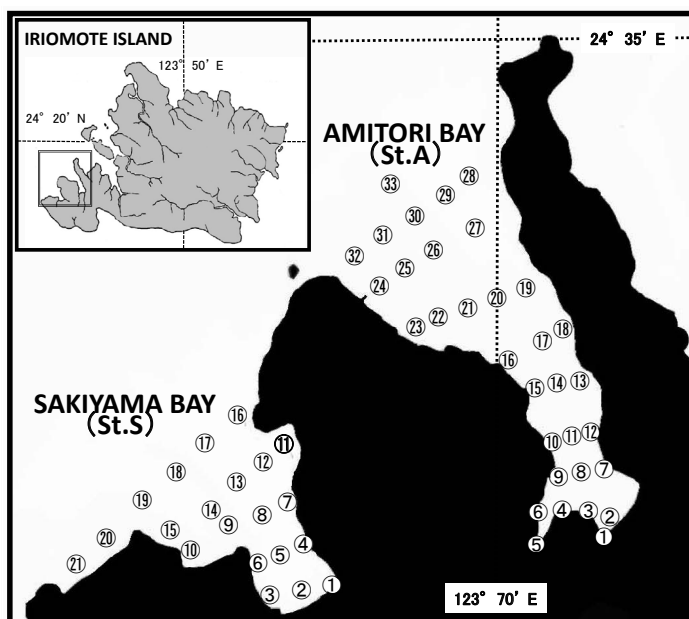


Fig. 1 Location of stations in the Amitori and Sakiyama bays, Iriomote Island, Ryukyu Islands, Japan.

Table 1 Place of sampling stations in Amitori bay.

St. No	Latitude (N)	Longitude (E)	St. No	Latitude (N)	Longitude (E)	St. No	Latitude (N)	Longitude (E)
A①	24° 31.41	123° 70.84	A⑫	24° 32.20	123° 70.75	A⑲	24° 32.88	123° 69.47
A②	24° 31.48	123° 70.89	A⑬	24° 32.50	123° 70.62	A⑳	24° 33.18	123° 69.14
A③	24° 31.53	123° 70.78	A⑭	24° 32.46	123° 70.45	A㉑	24° 33.30	123° 69.31
A④	24° 31.59	123° 70.56	A⑮	24° 32.45	123° 70.20	A㉒	24° 33.46	123° 69.52
A⑤	24° 31.31	123° 70.30	A⑯	24° 32.62	123° 70.05	A㉓	24° 33.70	123° 69.80
A⑥	24° 31.63	123° 70.36	A⑰	24° 32.82	123° 70.24	A㉔	24° 34.05	123° 69.87
A⑦	24° 31.91	123° 70.85	A⑱	24° 32.88	123° 70.30	A㉕	24° 33.93	123° 69.61
A⑧	24° 31.86	123° 70.65	A⑲	24° 33.24	123° 70.14	A㉖	24° 33.81	123° 69.38
A⑨	24° 31.84	123° 70.51	A⑳	24° 33.16	123° 70.01	A㉗	24° 33.66	123° 69.11
A⑩	24° 32.13	123° 70.35	A㉑	24° 33.06	123° 69.82	A㉘	24° 33.56	123° 68.93
A⑪	24° 32.16	123° 70.57	A㉒	24° 32.95	123° 69.61	A㉙	24° 34.06	123° 69.21

Table 2 Place of sampling stations in Sakiyama Bay.

St. No	Latitude (N)	Longitude (E)	St. No	Latitude (N)	Longitude (E)
S①	24° 31.00	123° 68.72	S⑫	24° 31.92	123° 68.15
S②	24° 30.97	123° 68.34	S⑬	24° 31.73	123° 67.95
S③	24° 30.89	123° 68.08	S⑭	24° 31.57	123° 67.77
S④	24° 31.36	123° 68.43	S⑮	24° 31.41	123° 67.35
S⑤	24° 31.24	123° 68.24	S⑯	24° 32.45	123° 67.89
S⑥	24° 31.19	123° 67.98	S⑰	24° 32.20	123° 67.68
S⑦	24° 31.65	123° 68.31	S⑱	24° 31.86	123° 67.38
S⑧	24° 31.55	123° 68.07	S⑲	24° 31.64	123° 67.20
S⑨	24° 31.49	123° 67.92	S⑳	24° 31.33	123° 66.86
S⑩	24° 31.24	123° 67.41	S㉑	24° 31.14	123° 66.54
S⑪	24° 32.04	123° 68.27			

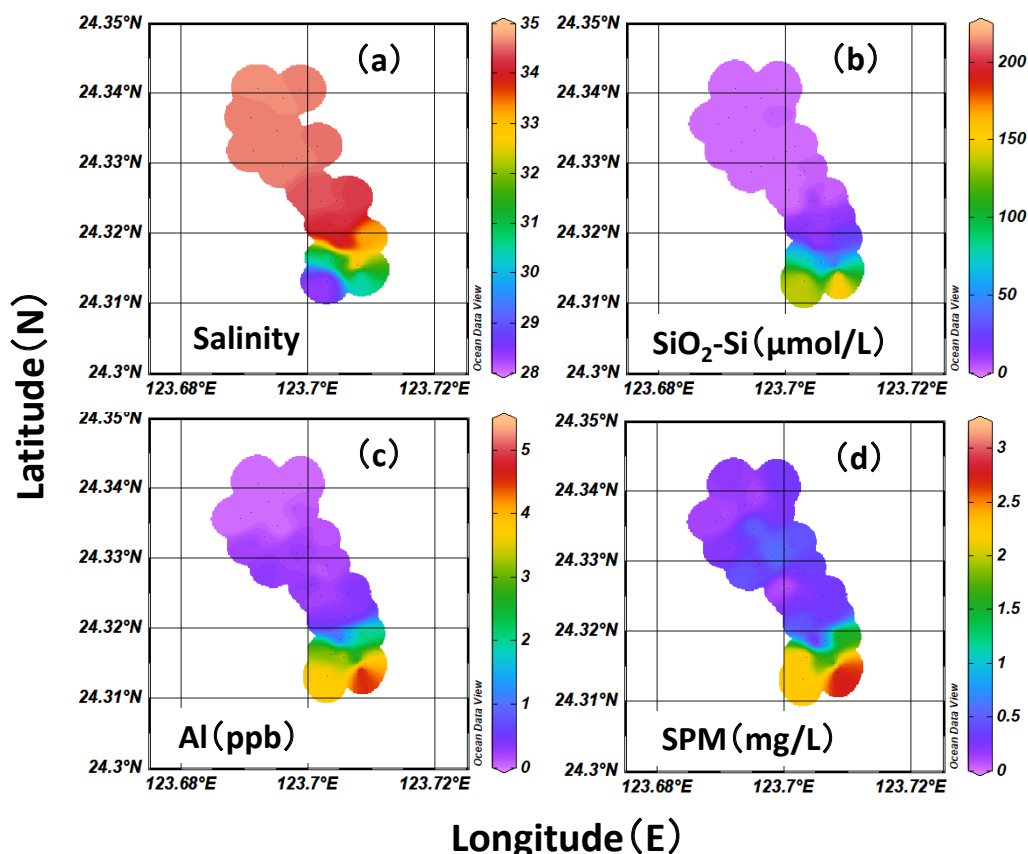


Fig. 2 Horizontal distribution of salinity(a), silicate(b), aluminum(c) and SPM(d) in Amitori bay (Ocean Data View).

3. 結果および考察

3-1 網取湾における各項目の水平分布

網取湾における各項目の水平分布を Fig. 2 に示した。網取湾における塩分（試水量により塩分は 24 試料しか測定できていない）の水平分布をみると、最も低塩分を示すのはアヤンダ川の河口に位置する St.A⑤の 28.369 であり、続いて低いのはウダラ川の St.A①の 29.485 であった。また、最も高いのは湾口中央部の St.A⑳の 34.694 であった。この時期の網取湾では、北緯 24.32N (St.A①から⑨) よりも南側の湾奥部では、河川水（淡水）の影響が強く、北緯 24.33N (St.A㉒以北の観測点) より北側では外洋水の影響が強くなっていることが明らかとなった。ケイ酸塩 ($\text{SiO}_2\text{-Si}$) の分布は、ウダラ川河口の St.A①の $216.7 \mu\text{mol/L}$ で、アヤンダ川の河口 St.A⑤の $139.7 \mu\text{mol/L}$ とケイ酸塩

はウダラ川河口の方が高濃度となる。湾口域では 1 から $2 \mu\text{mol/L}$ 程度の濃度は検出できてはいるが極めて低濃度であり、過去の浦内川のデータを見てもリン酸塩や硝酸塩も極めて低濃度であることから推察すると¹³⁾、この周辺海域の栄養塩は湾口付近ではほぼ枯渇してしまうことが明らかとなった。アルミニウムの水平分布は、ケイ酸塩と同様にウダラ川河口の方が 5.3 ppb 、アヤンダ川の河口が 3.7 ppb と比べて高濃度を示し、河口域では検出限界以下 ($\text{ND} < 0.1 \text{ ppb}$) であった。懸濁粒子量 (SPM) もウダラ川河口の方が 3.01 mg/L 、アヤンダ川の河口が 2.25 mg/L と比べて高濃度を示している。しかし、湾中央部の St.A㉒や St.A㉓で、それぞれ 0.58 mg/L 、 0.62 mg/L と北側の湾口域に比べて 3 倍程度高い値を示しており、アルミニウムの分布とは少し異なる傾向を示した。

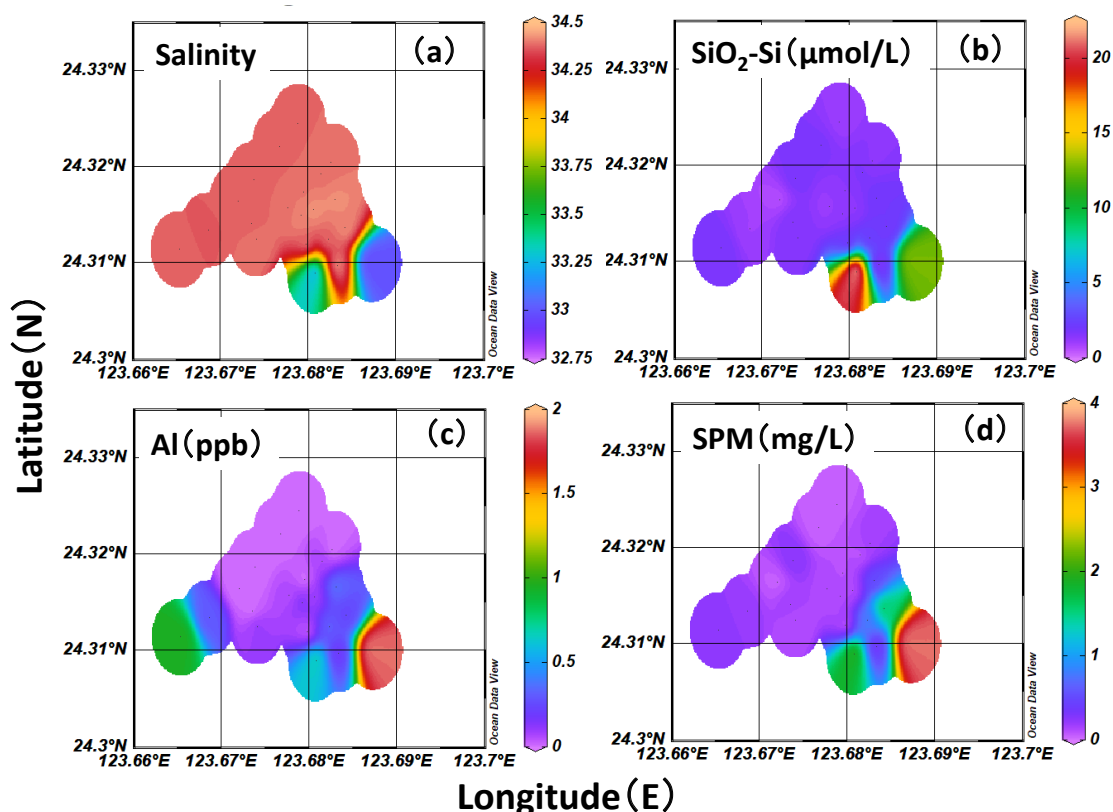


Fig. 3 Horizontal distribution of salinity(a), silicate(b), aluminum(c) and SPM(d) in Sakiyama bay (Ocean Data View).

3-2 崎山湾における各項目の水平分布

崎山湾における各項目の水平分布を Fig. 3 に示した。崎山湾における塩分の水平分布をみると、低塩分を示すのは湾奥にあるウボ川河口域の東側 St.S①の 32.982 と、西側パイタ川河口域にある St.S③の 33.237 であった。その他は全て 34 を越えており、網取湾の湾口よりは低塩分であるものの湾全体が高塩分であり、外洋水の影響が地形効果の影響もあり強い湾であることが明らかとなった。ケイ酸塩の分布は、西側パイタ川河口域にある St.S③の 21.9 $\mu\text{mol/L}$ の方が高く、東側ウボ川河口域 St.S①の 12.8 $\mu\text{mol/L}$ が低濃度で、残りの観測点は 3 $\mu\text{mol/L}$ より低い値を示した。St.S③の方が St.S①より高くなる傾向を示したのはケイ酸だけであった。アルミニウムの水平分布は、網取湾に比べて全体的に低濃度であり、塩分と同様に東側ウボ川河口域 St.S①の方が 1.9 ppb、西側パイタ川河口域にある St.S③が 0.7 ppb と比べて高濃度を示し、湾央

から河口域では検出限界以下 ($\text{ND} < 0.1 \text{ ppb}$) であったが、最も西側の湾口の St.S②では 1.0 ppb と高い値を示した。これは St.S②の水深が浅く、外洋に面しているため波の影響が強く海底堆積物が巻き上がり再懸濁したためと推察される。懸濁粒子量 (SPM) もアルミニウムの分布と良く一致しており、湾奥でのみ粒子が多く (1.59 ~ 3.77 mg/L)、その他は水深が浅い岩礁となっている部分が少し高い値を示した (St. ⑮: 0.25 mg/L, St. ⑳: 0.20 mg/L, St.S㉑: 0.25 mg/L,)。

3-3 塩分、ケイ酸塩およびアルミニウムの挙動

網取湾における塩分とケイ酸塩の関係を Fig. 4 に示したところ、負の相関関係を示した。この相関図にはウダラ川河口 St.A①のデータを除いて統計処理を行った。これにより網取湾におけるケイ酸塩の分布は河川水 (淡水) と海水 (外洋水) の単純な混合で説明ができることになる (外洋水による希釈効果)。過去

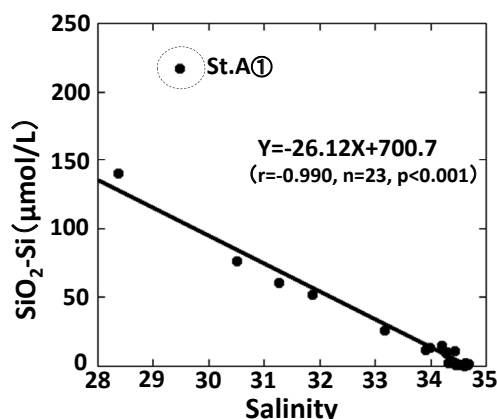


Fig. 4 Relationship between silicate and salinity in Amitori bay.

の浦内川の研究でも塩分とケイ酸塩の関係は強く、ケイ藻種の発生も少ないことから、この時期の網取湾のケイ酸塩は、生物によるスキヤベンジングよりは水塊構造の変化に強く影響を受けていることが明らかとなった。ただし、ウダラ川河口 St.A①は、河川水と海水混合のよりも過剰なケイ酸塩の付加が観察されており、鉛直混合による下層からの供給など別のプロセスが考えられる。なお、ケイ酸塩の主な起源が河川水であったと仮定すると、河川水（起源水）のケイ酸の濃度はこの直線式の切片である $700.7 \mu\text{mol/L}$ であったと推定される。マングローブ林域の干潮時にしみ出てくる塩分 4.5 程度の地下水（仮定）で最大値 $332 \mu\text{mol/L}$ となる報告⁷⁾ からすると、この値は高い値とも考えられるが、日本地下水学会のホームページ (<http://jagh.jp/>) に掲載してある一般的な地下水の濃度が 10 から 30 mg/L ($356 \mu\text{mol/L}$ から $1068 \mu\text{mol/L}$) 程度であることを考慮すれば妥当な値でもあるので、今後の観測などに貴重な情報となる。崎山湾では外洋水の影響が湾奥まで入っていることから、塩分およびケイ酸塩の間には明確な関係はみられなかった。次に網取湾における Si/Al 比（重量比）と塩分との関係を Fig. 5 に示した（アルミニウムが ND だったデータは加えていない）。点線は東シナ海の大陸斜面における表層水 Si/Al 比の 200 を表している（塩分 34.06, ケイ酸塩 $5 \mu\text{mol/L}$, アルミニウム 26 nmol/L から算出¹⁸⁾）。この図より Si/Al 比は大きく変化していることが明らかとなった。湾奥のウダラ川河口 St.A①は、上述したように下層からの

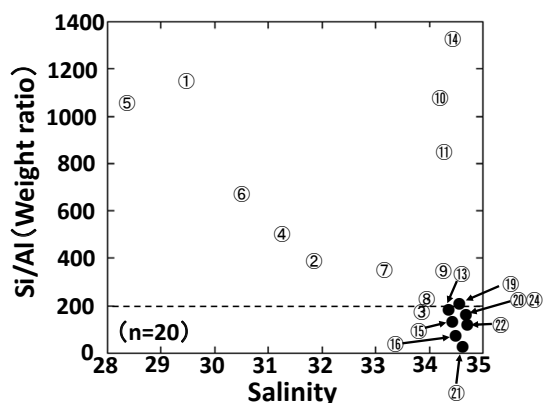


Fig. 5 Relationship between Si/Al and salinity in Amitori bay.

ケイ酸塩の供給のためその比が 1150 と大きくなっている。その他の観測点では、St.A②⑦（ケイ酸の濃度が高い）を除くと湾奥に近い海域で、高い比を示していることから、アルミニウムが河口から湾奥にかけて、表層水から急激にスキヤベンジングされたと推察される。このアルミニウムのスキヤベンジングは河川水と外洋水の単純な希釈過程よりもすばやく除去されており、St.A⑭まで及んでいる（SPM の分布とも矛盾はない）。これよりも湾口側の観測点の Si/Al 比は低い値を示しており、外洋水との混合による希釈効果の方がアルミニウムの減少率よりも大きいと考えられる。

4. まとめ

網取湾と崎山湾は表層水の塩分、ケイ酸塩およびアルミニウムの分布から、地形効果により河川水（淡水）の各湾に対する影響は大きく異なることが明らかとなった。網取湾では、この時期の表層水ではケイ酸塩の挙動は河川水（淡水）と外洋水との混合作用により希釈されており（ケイ酸塩は水塊のトレーサーとなる）、アルミニウムはケイ酸塩よりも早く湾奥でスキヤベンジングされていることが推察された。また、起源水のケイ酸塩濃度を $700.7 \mu\text{mol/L}$ と推定することができた。崎山湾では、外洋水の影響が湾奥まで広がり、河川水（淡水）の影響が強いのはウボ川およびパイタ川河口域のみであり、浅い湾口域においては波の影響により巻き上がった懸濁粒子から海水へのアルミニウムの供給が推察された。

5. 謝 辞

本研究は、沖縄地域研究センター教育研究助成金「網取湾・崎山湾における高分解能地形調査および生物を取り巻く総合的環境評価」(研究代表者: 南 秀樹)の一部を使用して行いました。また、化学分析を担当いただいた、國島綾乃さん、開米真子さん、福原かりんさんに感謝致します。

6. 参考文献

- Obata H., Nozaki Y., Alibo D. S. and Yamamoto Y. (2004): Dissolved Al, In, and Ce in the eastern Indian Ocean and the Southeast Asian Seas in comparison with the radionuclides ^{210}Pb and ^{210}Po . *Geochem. Cosmochim. Acta*, 68, 5, 1035-1048.
- Moran S. B. and Morse R.M. (1988a): Evidence from mesocosm studies for biological removal of dissolved aluminum from sea water. *Nature*, 335, 706-708.
- Moran S. B. and Morse R.M. (1988b): Temporal variations in dissolved and particle aluminum during a spring bloom. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 27, 205-215.
- Moran S. B. and Morse R.M. (1992): Kinetics of the removal of dissolved aluminum by diatoms in seawater: A comparison with thorium. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 56, 3365-3374.
- Orians K. J. and Bruland K. W. (1985): Dissolved aluminum in the Pacific Ocean. *Nature*, 316, 427-429.
- Orians K. J. and Merrin C. L. (2001): Refractory metals. In *Encyclopedia of Ocean Science*. Vol.4 (eds. J. Steel, S. Thorpe, and K.K. Turekian, pp.2387-2399. Academic Press, London.
- 高橋理恵・遠藤太郎・横山由香・佐藤義夫・安田訓啓・福江正治・澤本彰三 (2011): 西表島浦内川における微量元素 (Mn, Fe, Ni, Cu, Zn) 濃度を支配する要因. *東海大学紀要海洋学部*, 9(1), 1-7.
- 高橋理恵, 佐藤義夫, 安田訓啓, 澤本彰三, 福江正治 (2011): 浦内川河口マングローブ水域の化学成分の変動要因. 第10回海環境と生物および沿岸環境修復技術に関するシンポジウム発表論文集, 79-84.
- 高橋理恵, 佐藤義夫, 安田訓啓, 福江正治, 澤本彰三 (2010): 浦内川河口マングローブ水域からの栄養塩の流出. 第9回海環境と生物および沿岸環境修復技術に関するシンポジウム発表論文集, 43-48.
- 安田訓啓・澤本千恵・佐藤義夫・横山由香・澤本彰三・福江正治 (2010): 西表島浦内川のマングローブ水域における海水交換と化学成分の輸送. *東海大学海洋研究所研究報告*, 31, 51-63.
- 高橋理恵, 横山由香, 佐藤義夫, 安田訓啓, 福江正治, 澤本彰三, 古河幸雄 (2009): マングローブ水域の潮汐周期に伴う化学成分の挙動. 第8回海環境と生物および沿岸環境修復技術に関するシンポジウム, 1-6.
- 澤本千恵, 安田訓啓, 佐藤義夫, 澤本彰三, 福江正治 (2008): 西表島浦内川マングローブ域における海水交換と化学成分の輸送. 第7回海環境と生物および沿岸環境修復技術に関するシンポジウム発表論文集, 21-2.
- 安田訓啓・佐藤義夫・吉野美紀・稲葉 章 (2004): 西表島の浦内川と浦内湾の物理的・化学的特性. *東海大学海洋研究所研究報告*, 25, 73-89.
- 安田訓啓・佐藤義夫・吉野美紀・稲葉 章 (2004): 西表島の浦内川と浦内湾の物理的・化学的特性. *東海大学海洋研究所研究報告*, 25, 73-89.
- 中山瑛一郎・小畑 元・岡村 慶 (1995): 海水中の鉄, マンガン, アルミニウムについて. 月刊海洋号外「現代海洋化学」, No.8, 37-47.
- Shimokawa S., Murakami Y., Kohno H. and Mizutani A (2017): Transport properties of soil particles in Sakiyamawan-Amitoriwan nature conservation area, Irimomote Island, Jpn. *Geosci. Lett.*, doi: 10.1186/s40562-017-0084-5.
- Hydes D. J. and P. S. Liss (1976): Fluorimetric method for the determination of low concentration of dissolved aluminium in natural waters. *Analyst*, 101, 922-931.
- Minakawa M. and Watanabe Y. (1998): Aluminum in the East China Sea and Okinawa Trough, marginal sea areas of the Western North Pacific. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 54, 629-640.

