

トカラ列島南西海域より採水した底層水の水素・酸素同位体組成

及川 一真^{1,*}・宮島 利宏²・高柳 栄子¹・井龍 康文¹

OIKAWA Kazuma, MIYAJIMA Toshihiro, TAKAYANAGI Hideko and IRYU Yasufumi (2023) Hydrogen and oxygen isotope compositions of bottom waters collected around off southwestern Tokara Islands. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 74 (5/6), p. 329–336, 5 figs, 1 table.

Abstract: We analyzed hydrogen and oxygen isotope compositions (δD and $\delta^{18}O$) of bottom water samples collected at depths of 248–1,169 m from 32 sites around the southwestern Tokara Islands during the GB21-1 cruise. The d-excess differs at the eastern margin of the Okinawa Trough and to the north of Takarajima Island from to the south to the east of off this island. The salinity– $\delta^{18}O$ relationship varied within the study area and at different water depths. These results suggest that (1) the origin of water masses in the southwestern Tokara Islands differs from region to region, (2) that the origin of seawater is the same, but the mixing rate differs among regions, or (3) both.

Keywords: isotope composition of seawater, salinity, d-excess, Kuroshio Current

要 旨

GB21-1航海において採取された32地点の底層水(水深248 m～1,169 m)の水素・酸素同位体組成(δD 値および $\delta^{18}O$ 値)を検討した。その結果、天水線の定数項であるd-excessが、沖縄トラフ東縁および宝島北部と、宝島南部および宝島沖東方とで異なる値を示すことが明らかになった。また、塩分– $\delta^{18}O$ 値の関係は調査海域内および水深ごとに異なる傾向を示した。これらの結果は、トカラ列島南西海域では、(1)各海域の水塊の起源が異なる可能性、(2)各海域の海水の起源は同じであるが混合率が異なる可能性、(3)両者、のいずれかであることを示唆する。

1. はじめに

トカラ列島周辺海域は、東シナ海を北上した黒潮が北太平洋へと通過する主要な流路である。トカラ列島を含む黒潮流軸周辺の小島では、非常に高い湧昇速度と乱流運動エネルギー散逸率が確認されており、宜蘭、伊豆と並んで湧昇と混合が起こる要所として注目されている(Hasegawa *et al.*, 2021)。しかし、同海域周辺で過去に実施された海洋調査は少なく、既存の観測データや採水した海水の分析データが限られている。よって、黒潮流軸周辺海域の水循環や水塊構造を理解するためには、海水の水素・酸素同位体比等の海洋化学データの蓄積が重要

である。これらの組成は、海洋表層における蒸発–降水のバランスや、海水の混合過程の推定に用いることができる。また、海水の物理・化学的特性(水温、塩分、pH、同位体組成など)に関する基礎データは、サンゴ・有孔虫・軟体動物・腕足動物等の炭酸塩生物骨格・殻の炭素・酸素同位体組成や微量元素濃度の古環境指標としての有用性を検討する上でも、必要不可欠である。以上の背景を踏まえ、本研究では、GB21-1航海で採水された底層水(水深248 m～1,169 m)の水素・酸素同位体組成分析(δD , $\delta^{18}O$)を行ったので、ここに結果を報告する。

2. 試料・方法

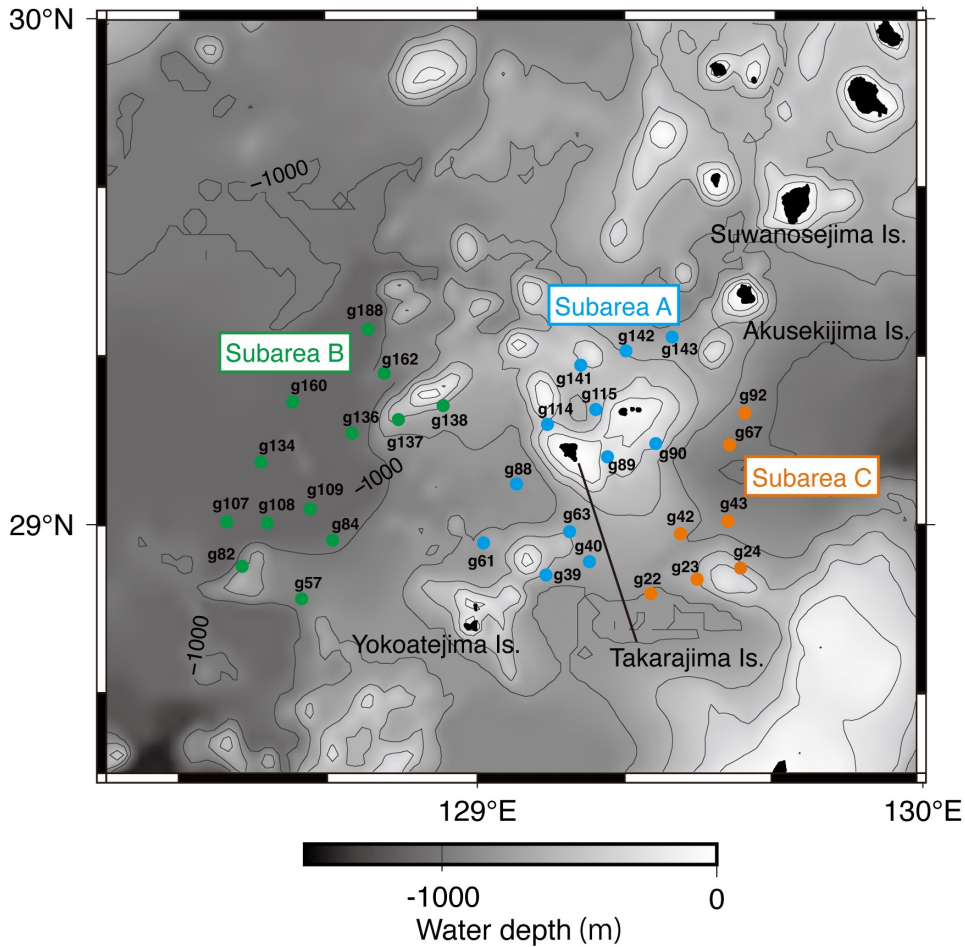
2.1 試料

本研究では、GB21-1航海(2021年2月28日～3月30日)の各採泥地点において採水された、32地点の底層水(水深248～1,169 m)を用いた(第1図)。採泥地点の緯度経度情報は鈴木ほか(2022)の第1表に記載されている。全ての採泥地点は黒潮の流軸の南側に位置していた。本底層水は、採泥器に取り付けられたニスキン採水器によって、海底面上約7 mより採取した。底層水は、採取直後にニスキン採水器から30 ccのガラスバイアル瓶に分取し、一時的に冷暗所で保管した。その後、同海水は0.45 μm のフィルターで濾過しながら再びガラスバイアル瓶に分取し、ガス交換や試料の漏出がないようにゴム栓およびアルミキャップでバイアル瓶を密封した。

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻 (Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University, Aobayama, Sendai 980-8578, Japan)

² 東京大学大気海洋研究所 (Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8564, Japan)

* Corresponding author: OIKAWA, K., 6-3, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan. Email: kazuma.oikawa.q3@dc.tohoku.ac.jp



第1図 水素・酸素同位体組成を検討した底層水の採水地点(水深248 m ~ 1,169 m)。海域ごとの比較を行うため、横当島-宝島周辺を海域A、沖縄トラフ東縁を海域B、宝島東方沖を海域Cと区分した。

Fig. 1 Bottom-water sample sites in the southwestern Tokara Islands. The study area is divided into three subareas: Yokoatejima-Takarajima (A), the eastern margin of the Okinawa Trough (B), and the east of Takarajima Island (C).

2.2 海水の水素・酸素同位体組成分析

海水の水素・酸素同位体組成 (δD , $\delta^{18}O$) の分析は、東京大学大気海洋研究所の所有するPicarro社製の安定同位体比分析装置(L2120-i)を用いて行った。測定する海水は、装置専用の試料瓶に海水試料を約2 ml入れ、専用キャップで密閉した。装置には、未知試料8試料ごとに実験室にて調整された人工海水を1試料セットし、測定値の時間変化を補正した(ドリフト補正)。また、スタンダード試料としてDOW (W0000-01: $\delta D = +0.215 \text{ ‰}$, $\delta^{18}O = -0.066 \text{ ‰}$), SLW2 (W0102-01: $\delta D = -71.1 \text{ ‰}$, $\delta^{18}O = -10.8 \text{ ‰}$), ICE2 (W0202-01: $\delta D = -106.9 \text{ ‰}$, $\delta^{18}O = -14.5 \text{ ‰}$)を用いて検量線を作成し、最終的な値を決定した。水素および酸素のデルタ(δ)値は、それぞれ、VSMOW標準試料の水素および酸素の同位体比($^2H/^1H$, $^{18}O/^{16}O$)に対する千分偏差として求めた。また、繰り返し測定を行った人工海水の水素・酸素同位体組成(ドリ

フト補正後)の標準偏差はそれぞれ $\pm 0.47 \text{ ‰}$, $\pm 0.09 \text{ ‰}$ ($n = 28; 1\sigma$)であった。

3. 結果・考察

3.1 水素・酸素同位体組成

GB21-1航海で採取された底層水の δD 値および $\delta^{18}O$ 値の結果を第1表と第2図に示す。2021年3月14日~3月23日の期間に採水された、トカラ列島南西海域の海水(水深248 ~ 1,169 m)の δD 値および $\delta^{18}O$ 値は、それぞれ $-1.2 \sim 3.6 \text{ ‰}$, $-0.3 \sim 0.5 \text{ ‰}$ の範囲にあった(第2図)。海域ごとの比較を行うため、横当島-宝島周辺を海域A、沖縄トラフ東縁を海域B、宝島東方沖を海域Cと区分すると、それぞれの海水の δD 値, $\delta^{18}O$ 値の範囲は $-0.3 \sim 3.2 \text{ ‰}$, $-0.2 \sim 0.5 \text{ ‰}$ (海域A), $-1.2 \sim 1.6 \text{ ‰}$, $-0.3 \sim 0.2 \text{ ‰}$ (海域B), $-0.5 \sim 3.6 \text{ ‰}$, $-0.1 \sim 0.2 \text{ ‰}$ (海域C)であった。また、本調査海域の $\delta^{18}O$ 値を、西部北太平洋中緯度域(北

第1表 底層水の採水地点, 海水温, 塩分, pH, 水素・酸素同位体組成, d-excess. 水温・塩分・pHは板木ほか(2022)のデータを引用した.

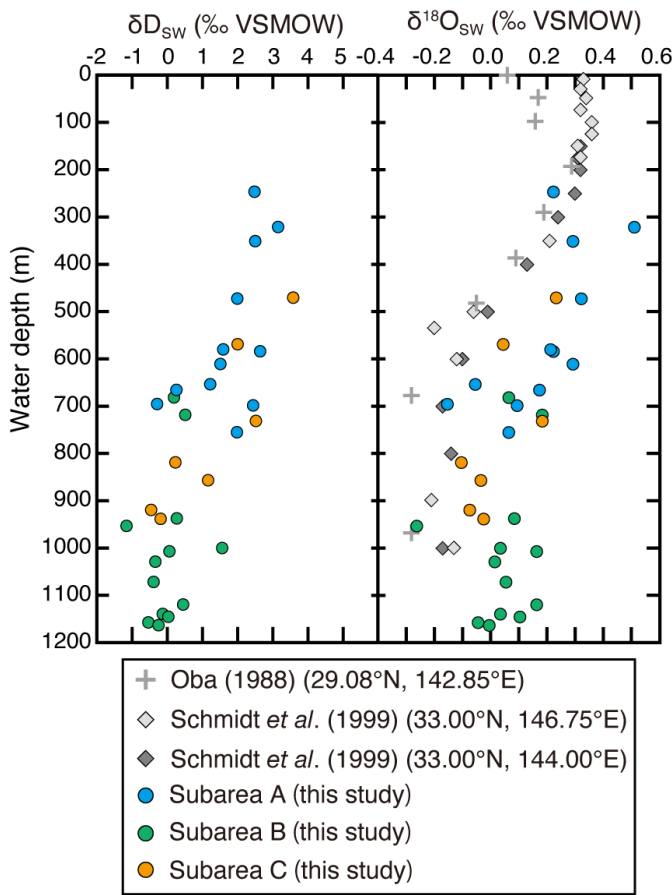
Table 1 List of sampling site, temperature, salinity, pH, hydrogen and oxygen isotope compositions, and d-excess in the southwestern Tokara Islands. Temperature, salinity, and pH were from Itaki *et al.* (2022).

Area	Site No.	Water depth (m)	Sampling date (in 2021)	Temperature (°C)	Salinity	pH	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ VSMOW)	δD (‰ VSMOW)	d-excess (‰)
Northern subarea A	g114	323	23-Mar	5.30	34.71	8.04	0.51	3.15	-0.91
	g141	475	16-Mar	12.78	34.52	7.85	0.32	1.99	-0.56
	g115	614	23-Mar	11.40	34.36	7.58	0.29	1.51	-0.79
	g143	669	16-Mar	6.74	34.37	7.71	0.17	0.26	-1.14
	g142	583	16-Mar	9.36	34.37	7.85	0.21	1.59	-0.10
Southern subarea A	g61	759	19-Mar	6.09	34.34	7.64	0.06	1.98	1.48
	g89	248	23-Mar	19.17	34.71	8.05	0.22	2.48	0.74
	g90	353	23-Mar	17.02	34.69	8.04	0.29	2.50	0.15
	g88	699	19-Mar	8.79	34.33	7.66	-0.16	-0.29	0.98
	g40	702	19-Mar	6.21	34.37	7.60	0.09	2.44	1.70
	g63	587	19-Mar	8.79	34.30	7.80	0.22	2.64	0.89
	g39	657	19-Mar	6.97	34.33	7.68	-0.06	1.22	1.66
Subarea B	g84	958	20-Mar	4.84	34.39		-0.27	-1.16	0.98
	g57	1005	20-Mar	4.83	34.38	7.55	0.03	1.56	1.32
	g136	1034	17-Mar	4.70	34.43	7.47	0.01	-0.34	-0.45
	g107	1077	20-Mar	4.46	34.40	7.60	0.05	-0.39	-0.82
	g160	1125	17-Mar	4.51	34.45	7.56	0.16	0.45	-0.86
	g188	1145	17-Mar	4.49	34.43	7.57	0.03	-0.13	-0.39
	g134	1151	14-Mar	4.33	34.50		0.10	0.03	-0.73
	g109	1163	14-Mar	4.40	34.49		-0.05	-0.54	-0.17
	g108	1169	14-Mar	4.34	34.50		-0.01	-0.25	-0.14
	g162	1012	15-Mar	4.62	34.42		0.16	0.06	-1.23
	g82	942	20-Mar	4.91	34.37	7.56	0.08	0.27	-0.35
	g137	685	15-Mar	6.19	34.41		0.06	0.19	-0.31
	g138	722	15-Mar	6.28	34.42		0.18	0.51	-0.95
Subarea C	g67	943	16-Mar	3.74	34.44	7.54	-0.03	-0.19	0.05
	g42	735	18-Mar	5.93	34.37	7.60	0.18	2.52	1.09
	g24	473	18-Mar	14.50	34.58	7.83	0.23	3.58	1.75
	g22	823	18-Mar	5.82	34.37	7.63	-0.11	0.23	1.11
	g43	861	18-Mar	3.85	34.42	7.68	-0.04	1.16	1.45
	g23	572	18-Mar	9.40	34.35	7.78	0.04	2.00	1.65
	g92	924	16-Mar	3.55	34.45	7.53	-0.08	-0.46	0.16

緯29°～33°)の海水の $\delta^{18}\text{O}$ 値(Oba, 1988; Schmidt *et al.*, 1999)と比較すると, 本調査海域の $\delta^{18}\text{O}$ 値の方が相対的に高い値を示した(第2図).

トカラ列島南西海域の各水深における海水の δD 値および $\delta^{18}\text{O}$ 値の傾向を確認するため, 両結果をReduced Major Axis回帰(Sokal and Rohlf, 1994)によって線形回帰し, 世界各地の降水および地表水の δD 値および $\delta^{18}\text{O}$ 値より得られている天水線($\delta\text{D} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$; Craig, 1961)と比較した(第3図). その結果, 全32地点(水深248 m～1,169 m)の海水の δD 値および $\delta^{18}\text{O}$ 値の関係式は $\delta\text{D} = 8.1 \times \delta^{18}\text{O} + 0.2$ ($r^2 = 0.62$)となり, 天水線と切片は異なるものの, 傾きは類似した値を示した. 一般に, 海水の水素・酸素同位体比は, 降水や河川からの淡水の流入量とそれらの同位体比, ならびに海面からの蒸発量と

蒸発する水蒸気の同位体比のバランスによってきまり, 垂表層以深の同位体組成は異なる同位体比をもつ海水との混合を除いて, その値は保存される(Craig and Gordon, 1965). 一方で, 前述したOba(1988)やSchmidt *et al.* (1999)などの既存研究では, 深度による同位体比の変化が報告されている(第2図). 本研究で得られた底層水の δD 値・ $\delta^{18}\text{O}$ 値の関係を海域別に比較すると, 海域A北部と海域Cの底層水は回帰線の上, 海域A南部と海域Bの低層水は回帰線の下にプロットされる傾向が認められた(第3図). この傾向を詳細に検証するため, 本研究では天水線の定数項を示すd-excess ($d = \delta\text{D} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$; Dansgaard, 1964)を計算した. d-excessとは, δD と $\delta^{18}\text{O}$ のクロスプロットにおいて δD 軸の切片として定義されたものであるが, 切片を正確に求めるには, 第3図に示したように, ある



第2図 検討した底層水の水素・酸素同位体組成の深度分布と北西太平洋中緯度の酸素同位体組成との比較。北西太平洋中緯度の酸素同位体組成は、GISSより取得したOba (1988), Schmidt *et al.* (1999)のデータを用いた。

Fig. 2 Depth profiles of hydrogen and oxygen isotope compositions in the study area. Grey-colored symbols represent $\delta^{18}\text{O}$ data obtained from the middle latitudes of the northwestern Pacific Ocean (Oba, 1988; Schmidt *et al.*, 1999).

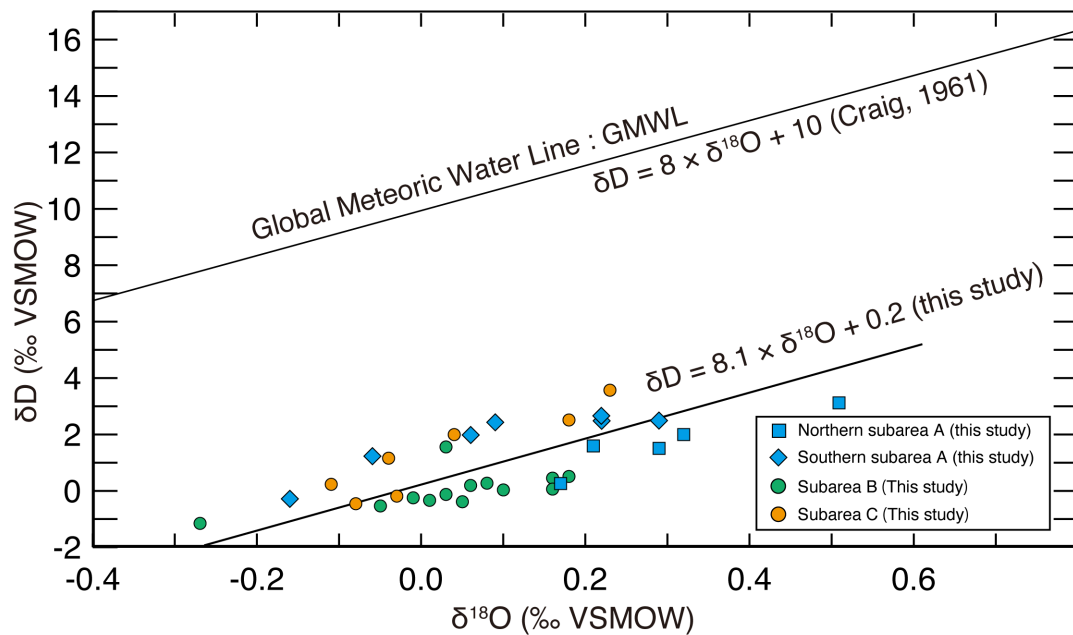
程度の広い範囲のデータが必要であり、1つ1つのデータに対して切片を求めることはできないため、ここでは、各プロットが $\delta\text{D} = 8 \times \delta^{18}\text{O}$ の直線からどれだけ離れているかを示す値と定義する(杉本, 2005)。このd-excessの違いは、非平衡の蒸発過程に起因することが知られており(Merlivat and Jouzel, 1979)、気象・陸水・地下水などの水文分野において広く用いられてきた。しかし、海水における微小な同位体比の変化を捉えることが可能となった結果、水塊を識別する指標とされるようになり(Benetti *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2022; Cruz Salmeron *et al.*, 2022)、本研究ではこれを踏襲する。今回検討した各底層水の水温・塩分・pH(以上、板木ほか, 2022)、 δD 値・ $\delta^{18}\text{O}$ 値およびd-excessをCruz Salmeron *et al.* (2022)の水塊区分に基づいて比較した。Cruz Salmeron *et al.* (2022)は南琉球の水塊をポテンシャル密度に従って西部北太平洋中層水(水深250 m ~ 500 m)、黒潮中層水(水深500 ~ 755 m)、より深層の黒潮中層水(水深755 m ~ 1900 m)と区分しており、本調査海域が含まれる北琉球にも、類似した水塊が分布していると予想される。その結果、海域間で水温・塩分・pHの鉛直分布に明瞭な違いが認められない一方で、d-excessには水深500 m ~ 760 m付近の低塩分層では海域に固有の特徴(海域Bでは負の値、海域C

では正の値)が認められた(第4図(f))。この特徴は、海域Bと海域Cの低塩分層を構成する水塊は、密度は変わらないが、(1)各海域の水塊の起源が異なる可能性、(2)海水の起源は同じであるが混合率が異なる可能性、(3)両者、のいずれかであることを示唆する。加えて、宝島を基準にして海域Aの底層水を北部(海域A北部)と南部(海域A南部)に区分すると、d-excessの値が海域A北部では負と、南部では正となり、前者は海域Bと後者は海域Cと類似した傾向がみられた。よって、前述同様、海域Aの低塩分層を構成する水塊は、海水の起源、海水の混合比率、もしくは両者が北部と南部で異なり、それぞれ海域Bおよび海域Cの低塩分層水塊と関連がある可能性がある。海域Bおよび海域A北部、海域Cおよび海域A南部とで、d-excessが類似する傾向は、水深500 m以浅および水深760 m以深でも認められた。

このように、本研究海域の水塊構造は極めて複雑であり、水塊構造の実態と動態を正確に理解するためは、さらなる基礎的データの取得が望まれる。

3.2 塩分と酸素同位体組成の関係

GB21-1航海で採取された底層水32地点の塩分(板木ほか, 2022)と海水の酸素同位体組成($\delta^{18}\text{O}$)の関係を先行



第3図 検討した底層水(水深248 m～1,169 m)の酸素-水素同位体組成の関係. 天水線はCraig (1961)の関係式を引用した. 海域A内の北部と南部とでは, 両者の関係が異なっている.

Fig. 3 Relationship between hydrogen and oxygen isotope compositions in the study area. The Global Meteoric Water Line was from the Craig (1961). Note the different relationship between the northern and southern subarea A.

研究で得られている琉球孤南部の沖縄トラフ側海域(以後, 南琉球と称す)と比較した(第5図). その結果, トカラ列島南西海域(水深248 m～1,169 m)の海水の塩分-酸素同位体比の関係には, 前述した水塊区分ごとに以下の3つの傾向・特徴が認められた. 1) 海域Aおよび海域Cにおける水深240 m～500 mの海水は, $\delta^{18}\text{O}$ 値と比較して塩分の変化量が大きく, 南琉球における西部北太平洋中層水(Western North Pacific Central Water: 水深250 m～500 m)と同様の傾向を示した. 2) 海域Aにおける水深500 m～760 mの海水は, 南琉球における黒潮中層水(Kuroshio Intermediate Water: 水深500 m～755 m)と類似した塩分を示す一方, $\delta^{18}\text{O}$ 値は南琉球の海水と比較して変動幅が大きい. 3) 海域Bおよび海域Cにおける水深760 m以深の海水は, 南琉球のより深層域に分布する黒潮中層水(Deeper Kuroshio Intermediate Water: 水深755 m～1900 m)と類似した塩分-酸素同位体比の関係を示している.

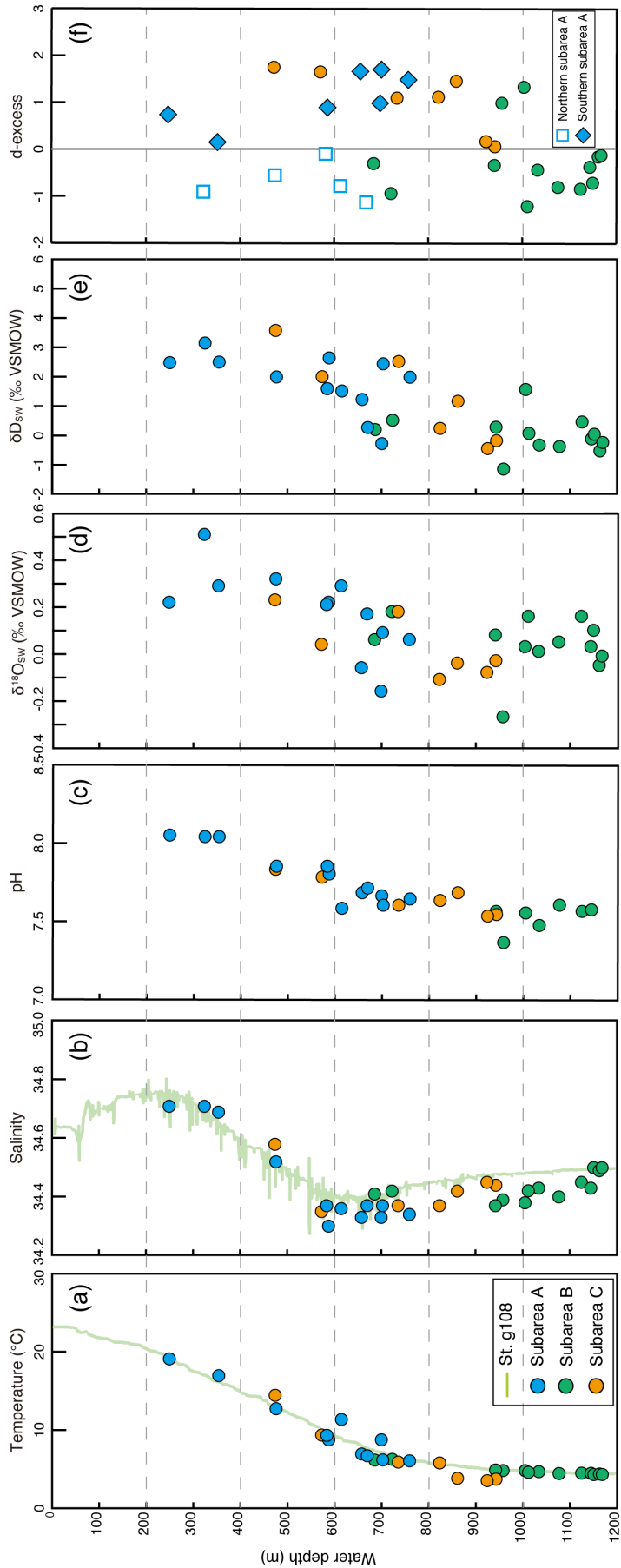
一般に, 塩分-酸素同位体比の正の相関関係は, 炭酸塩生物化石から復元した $\delta^{18}\text{O}$ 値から当時の塩分を推定する場合や, ある海域の塩分の観測結果から同海域周辺の $\delta^{18}\text{O}$ 値を推定する場合などに用いられている. しかし, 本調査地域のように塩分-酸素同位体比の関係が海域や水深によって異なる場合, 上記の推定や, 炭酸塩生物が生息する周囲の海水と同位体平衡で形成される方解石や

アラレ石の $\delta^{18}\text{O}$ 値(平衡値)を計算する際には, 海域の特性や水塊構造を正確に把握する必要がある.

4. 結論

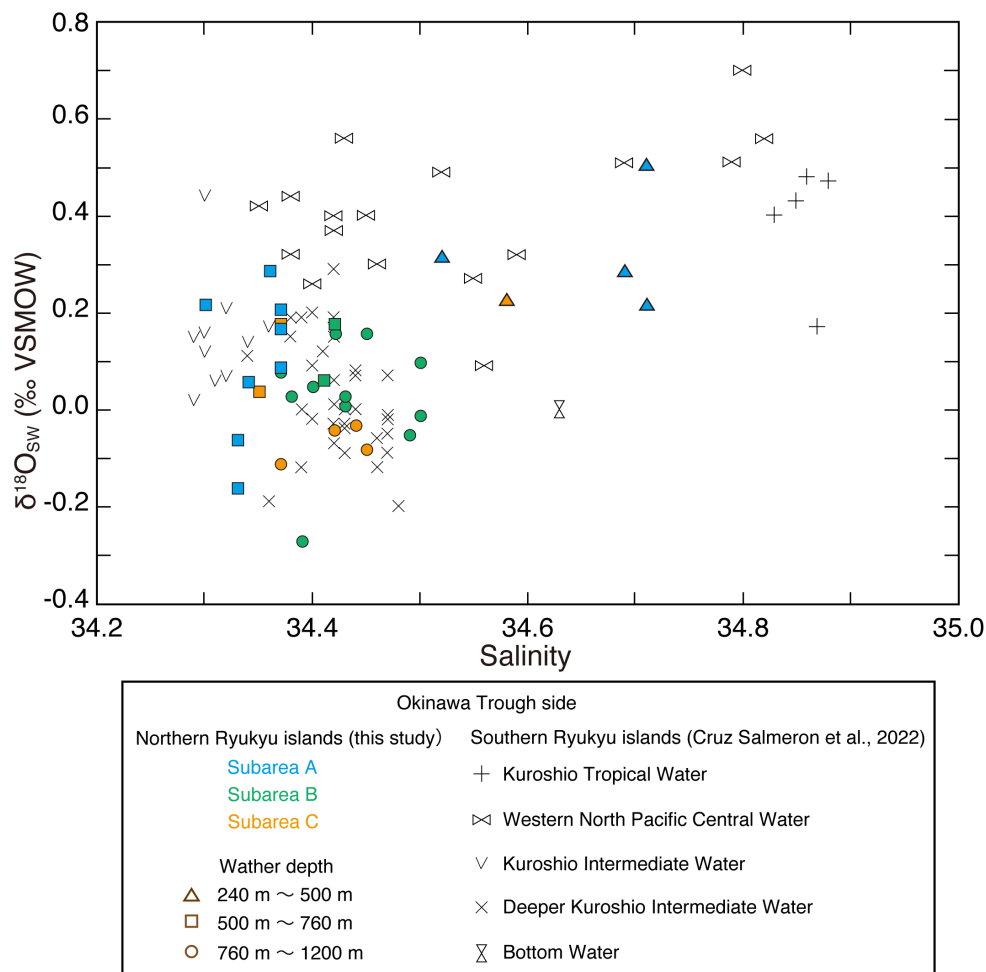
本研究では, GB21-1航海で採取された底層水(水深248～1,169 m)の水素・酸素同位体組成(δD 値, $\delta^{18}\text{O}$ 値)を検討した. その結果, トカラ列島南西海域の海水の δD 値および $\delta^{18}\text{O}$ 値はそれぞれ $-0.3 \sim 0.5 \text{ ‰}$, $-1.2 \sim 3.6 \text{ ‰}$ の範囲であった. 本調査海域を横当島-宝島周辺(海域A), 沖縄トラフ東縁(海域B), 宝島東方沖(海域C)の3海域に分けると, 天水線の定数項であるd-excessは, 宝島を基準として海域Aが北部と南部に分かれ, 海域Bと海域A北部は負の値, 海域Cと海域A南部は正の値をとることが明らかになった. この傾向は, 水塊の起源, 海水の混合比率, その両者のいずれかの違いを反映している可能性が示唆される. また, 塩分-酸素同位体比の関係は海域や水深によってなるため, 両基礎データをより蓄積させていく必要がある.

謝辞: 板木拓也氏, 鈴木克明氏および池内絵里氏(産業技術総合研究所地質調査総合センター地質情報研究部門)には, GB21-1航海における海水の試料採取にご尽力いただいた. ここに, 深く感謝する.



第4図 海域ごとの海水温、塩分、pH、水素・酸素同位体組成、d-excessの深度分布。d-excessのみ海域Aを北部と南部で区別した。各海域における水素・塩分の鉛直分布には、同航海のSt. g108で得られたCTDの結果を示した。水素・塩分・pHは板本ほか(2022)のデータを引用した。

Fig. 4 Depth profiles of temperature, salinity, pH, hydrogen and oxygen isotope compositions, and d-excess in the study area. The depth profile of the d-excess is shown for the northern and southern subarea A. Temperature, salinity, and pH data were from Itaki *et al.* (2022). A light green-colored line shows the salinity and temperature profiles measured with CTD at St. g108 during the GB21-1 cruise.



第5図 検討した底層水(水深248 m ~ 1,169 m)の塩分-酸素同位体組成の関係. 比較のため, 琉球孤南部(沖縄トラフ側)の塩分-酸素同位体組成の関係(Cruz Salmeron *et al.*, 2022)を示した.

Fig. 5 Relationship between salinity and oxygen isotope composition in the study area. Grey-colored plots represent the salinity-oxygen isotope composition data from the Okinawa Trough side of the southern Ryukyu Islands (Cruz Salmeron *et al.*, 2022).

文 献

Benetti, M., Reverdin, G., Aloisi, G. and Sveinbjörnsdóttir, Á. (2017) Stable isotopes in surface waters of the Atlantic Ocean: Indicators of ocean-atmosphere water fluxes and oceanic mixing processes. *Journal of Geophysical Research Oceans*, **122**, 4723–4742.

Craig, H. (1961) Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, **133**, 1702–1703.

Craig, H. and Gordon, L. I. (1965) Deuterium and Oxygen 18 Variations in the Ocean and the Marine Atmosphere, *In Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*, Tongiorgi, E. (ed), 9–130, Laboratorio di Geologia Nucleare, Pisa.

Cruz Salmeron, A. D., Takayanagi, H., Wakaki, S., Ishikawa,

T., Miyajima, T., Wakaki, H., Itaki, T. and Iryu, Y. (2022) Characterization of water masses around the southern Ryukyu Islands based on isotopic compositions. *Progress in Earth and Planetary Science*, **9**, 44.

Dansgaard, W. (1964) Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, **16**, 436–468.

Hasegawa, D., Matsuno, T., Tsutsumi, E., Senjyu, T., Endoh, T., Tanaka, T., Yoshie, N., Nakamura, H., Nishina, A., Kobari, T., Nagai, T. and Guo, X. (2021) How a small reef in the Kuroshio cultivates the ocean. *Geophysical Research Letters*, **48**, e2020GL092063. doi: 10.1029/2020GL092063

板木拓也・鈴木克明・池内絵里・及川一真・片山 肇・飯塚 睦・鈴木 淳・高柳栄子(2022) 宝島及び諏訪之瀬島周辺海域における海洋環境. 地質調査研究報

- 告, **73**, 301–311.
- Merlivat, L. and Jouzel, J. (1979) Global Climate interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation. *Journal of Geophysical Research Oceans*, **84**, 5029–5033.
- Oba, T. (1988) Paleoceanographic information obtained by isotopic measurement of individual foraminiferal specimens, *In Asian Marine Geology*, Wang, P., Lao, Q. and He, Q. (eds.), 169–180, China Ocean Press, Beijing.
- Schmidt, G. A., Bigg, G. R., and Rohling, E. J. (1999) "Global Seawater Oxygen-18 Database", [online]. Available from: <http://data.giss.nasa.gov/o18data/> [Accessed: 2019-12-26].
- Sokal, R. R. and Rohlf, F. J. (1994) *Biometry: The Principles and Practice of Statistics in Biological Research*, third ed. W.H. Freeman, New York.
- 杉本敦子(2005)水の安定同位体比から水の動きを追う. 細氷, 51号, 2–7.
- 鈴木克明・板木拓也・片山 肇・兼子尚知・山崎 誠・徳田悠希・千徳明日香(2022)宝島及び諏訪之瀬島周辺海域の底質分布とその制御要因. 地質調査研究報告, **73**, 275–299.
- Yang, J., Han, L., Sun, D. and Xing, Z. (2022) The spatial hydrological structure of the western tropical Pacific derived from $\delta^{18}\text{O}$ and δD signatures. *Journal of Hydrology*, **607**, 127537.
- (受付 : 2022年10月31日 ; 受理 : 2023年6月11日)