

トカラ列島周辺海域における CTD 観測および海洋大循環モデルに基づく海洋環境

齋藤 直輝^{1,*}・鈴木 克明¹・板木 拓也¹・鈴木 淳¹

SAITO Naoki, SUZUKI Yoshiaki, ITAKI Takuya and SUZUKI Atsushi (2024) Marine environment around the Tokara Islands based on CTD observations and ocean general circulation model. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 75 (5/6), p. 279–297, 9 figs and 2 tables.

Abstract: In order to make multifaceted interpretations of the seafloor geology around the Tokara Islands, it is necessary to understand the marine environment, including the Kuroshio Current. In this paper, we analyze CTD observations conducted from the south offshore of Yakushima Island to the north offshore of Takarajima Island during the GB21-2, GB21-3, GB22-1, and GB22-2 cruises. In addition, the flow patterns were analyzed using an ocean general circulation model. The Kuroshio Current generates relatively strong currents between Yakushima Island and Nakanoshima Island and between Nakanoshima Island and Suwanosejima Island, and the strong currents reach the seafloor. In the downstream direction of the Kuroshio Current between Nakanoshima Island and Suwanosejima Island, the surface layer has low water temperature and high salinity. This is thought to be due to the Kuroshio Current passing through the rising topography of the seafloor, causing vertical mixing. At the same location, dissolved oxygen in the surface layer is higher. This may be because vertical mixing supplies nutrients to the surface layer and stimulates primary production. In the vicinity of Kuchino-Erabujima Island, high turbidity layers on the seafloor were observed at many locations. This is possibly due to resuspension caused by strong currents associated with the Kuroshio Current or turbidity currents caused by active volcanic earthquakes.

Keywords: Tokara strait, Kuroshio current, CTD observation, dissolved oxygen, turbidity

要 旨

トカラ列島周辺の海底地質について多角的な解釈を行うためには、黒潮をはじめとする海洋環境を理解する必要がある。本稿では、GB21-2, GB21-3, GB22-1, およびGB22-2航海において、屋久島南沖から宝島北沖にかけて実施されたCTD観測を解析した。併せて、海洋大循環モデルによる流況解析を実施した。黒潮は屋久島–中之島間と中之島–諏訪之瀬島間で比較的強い流れを生じさせ、強い流れは海底上まで達する。中之島–諏訪之瀬島間の黒潮流下方向では、表層水が低水温・高塩分となる領域がみられる。これは海底地形の高まりを通過する黒潮が鉛直混合を引き起こすためと考えられる。同じ地点では表層の溶存酸素が高くなる。鉛直混合が表層へ栄養塩を供給し、一次生産を活性化させるためと推測される。口永良部島周辺では、海底付近で100 m程度の厚さを持つ高濁度層が多くの地点で観測された。黒潮に伴う強い流れによる再懸濁や、活発な火山性地震による混濁流の影響の可能性がある。

1. はじめに

トカラ列島は、九州南方の屋久島から奄美大島の間に位置する島嶼群である。主要な島は口之島、中之島、諏訪之瀬島、平島、悪石島、小宝島、および宝島から構成される。周辺海域には黒潮が流れる。黒潮は、トカラ列島の西側を北上したあと、屋久島の南側で東向きに変わり、トカラ列島周辺海域を通過して太平洋へと流れる。

トカラ列島周辺の海底地質に関する現地調査は、黒潮に代表される海洋環境の影響を示した。例えば、リップルなどのベッドフォーム、生物遺骸の局所的な濃集、露頭や礫質堆積物の分布といった底質分布は、黒潮の流路と強く関連している可能性がある(鈴木ほか, 2022)。貝形虫などの底生生物の群集組成の分布についても、黒潮の影響が推測されている(中野ほか, 2022)。宝島東方沖では、海底付近に厚さ数十mの高濁度層が観測され、黒潮が堆積物の再懸濁を引き起こしていることが示唆された(板木ほか, 2022)。トカラ列島周辺の海底地質を多角的に解釈するためには、黒潮をはじめとした海洋環境の

¹ 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 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation)

* Corresponding author: SAITO, N., AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: n.saito@aist.go.jp

実態の把握が必要である。

トカラ列島周辺では、海底地形と黒潮の相互作用により、複雑な海洋環境が形成される。トカラ列島周辺の海底には、島の斜面や海山など、地形の高まりが多く存在する。黒潮が通過する際、これらの地形が流れを歪め、海洋内部で強い乱流混合を引き起こす。現地調査により、トカラ列島周辺海域の黒潮下流側では、上流側と比べて乱流の強さが100～1000倍となることが示された(Tsutsumi *et al.*, 2017; Nagai *et al.*, 2021)。混合は底層から栄養塩を巻き上げ、表層の一次生産を活性化させている可能性がある(Hasegawa *et al.*, 2021)。黒潮がトカラ列島周辺の海洋環境に及ぼす影響は理解されつつあるが、研究対象は表層に集中しており、底層付近についてのデータや知見は不足している。板木ほか(2022)は、表層から底層までのCTD観測を実施した。しかし、調査対象地は黒潮の流軸からやや南に外れた宝島及び諏訪之瀬島周辺海域であり、黒潮の影響を網羅的に把握するには不十分であったと考えられる。

本稿では、トカラ列島周辺海域の海洋環境の実態を明らかにすることを目的に、屋久島南沖から宝島北沖にかけての計178地点でCTD観測を実施した。併せて、本海域を通過する黒潮について基本的な理解を得るため、海洋大循環モデルを用いて流れの解析を実施した。

2. 方法

2.1 CTD観測

CTD観測は4度の調査航海、すなわちGB21-2航海(2021年7月)、GB21-3航海(2021年11月)、GB22-1航海(2022年7月)、およびGB22-2航海(2022年11月)で実施した。観測地点は屋久島から宝島にかけての計178地点であり、その内訳はGB21-2航海で17地点、GB21-3航海で75地点、GB22-1航海で25地点、GB22-2航海で61地点を調査した(第1図)。

測器はSea & Sun Marine Tech社製CTD 90Mを使用した。測定項目は圧力(水深)、温度、電気伝導度(塩分)、濁度および溶存酸素(DO)とした。測定精度は、圧力センサーは-5～35℃において0.1%、温度センサーは-2～35℃の測定レンジで±0.005℃である。濁度センサーは光源波長880 nm、測定レンジは0～25 FTUである。DOセンサーは測定レンジ0～240%、精度は±2%である。DOについては校正を行っていないため、測定値は参考扱いとし、変化の傾向のみ議論する。採水による塩分の補正(板木ほか, 2022)は、採水試料の分析が完了していないため未実施である。CTDはセンサーが下向きになるように木下式グラフ採泥器(K-グラフ)に取り付け、採泥中に0.2秒間隔の連続モードで観測を行った。K-グラフは投入後、線速1.0 m/s程度で下降させ、海底面上30 m前後で一旦停止させてワイヤー傾角を調整した後、線速0.3～0.5 m/s程度で着底させた。

測定値の解析には、着底時の懸濁の影響を受けないようにするため、水面から海底までの下降中のデータを用いた。表層水は、一時的な降水などの影響を受けにくい水深2～5 mの平均値とした。底層水は、着底時の懸濁の影響を受けにくい海底上5～7 mの平均値の値とした。GB22-1航海およびGB22-2航海のDOと濁度は、異常値(負の値)が測定されたため、解析から除外した。

本稿では解析の便宜上、海底上の高濁度層を以下のように定義した。水深0 m～海底上100 mまでの濁度の中央値を $T_{surface}$ 、海底上0～100 mの濁度の中央値を T_{bottom} とする。ここで、 $T_{surface} \times 1.05 < T_{bottom}$ を満たすとき、海底上に高濁度層が存在するとみなした。

2.2 海洋大循環モデル

データ同化型海洋大循環モデルJCOPE2M(Miyazawa *et al.* 2017; Miyazawa *et al.* 2019)による流速を解析した。JCOPE2Mの特徴は、日本以南の黒潮の流路、海面高度、水温・塩分プロファイルを精度良く再現できることである(Miyazawa *et al.* 2017)。解像度は、水平分解能1/12°、垂直分解能はσ座標系で46層、データの時間間隔は1日である。データ同化により観測値を計算に取り込んでおり、用いているデータは衛星海面高度、衛星海面水温、および現場水温・塩分である。主な駆動力は大気強制であり、風応力および海面での熱・塩分フラックスで駆動される。数値モデルはPrinceton Ocean Model (POM)(Mellor *et al.*, 2002)を基盤としている。本稿では、2019年1月1日から2022年1月1日までの3年間の水平流速を解析した。

3. 結果と考察

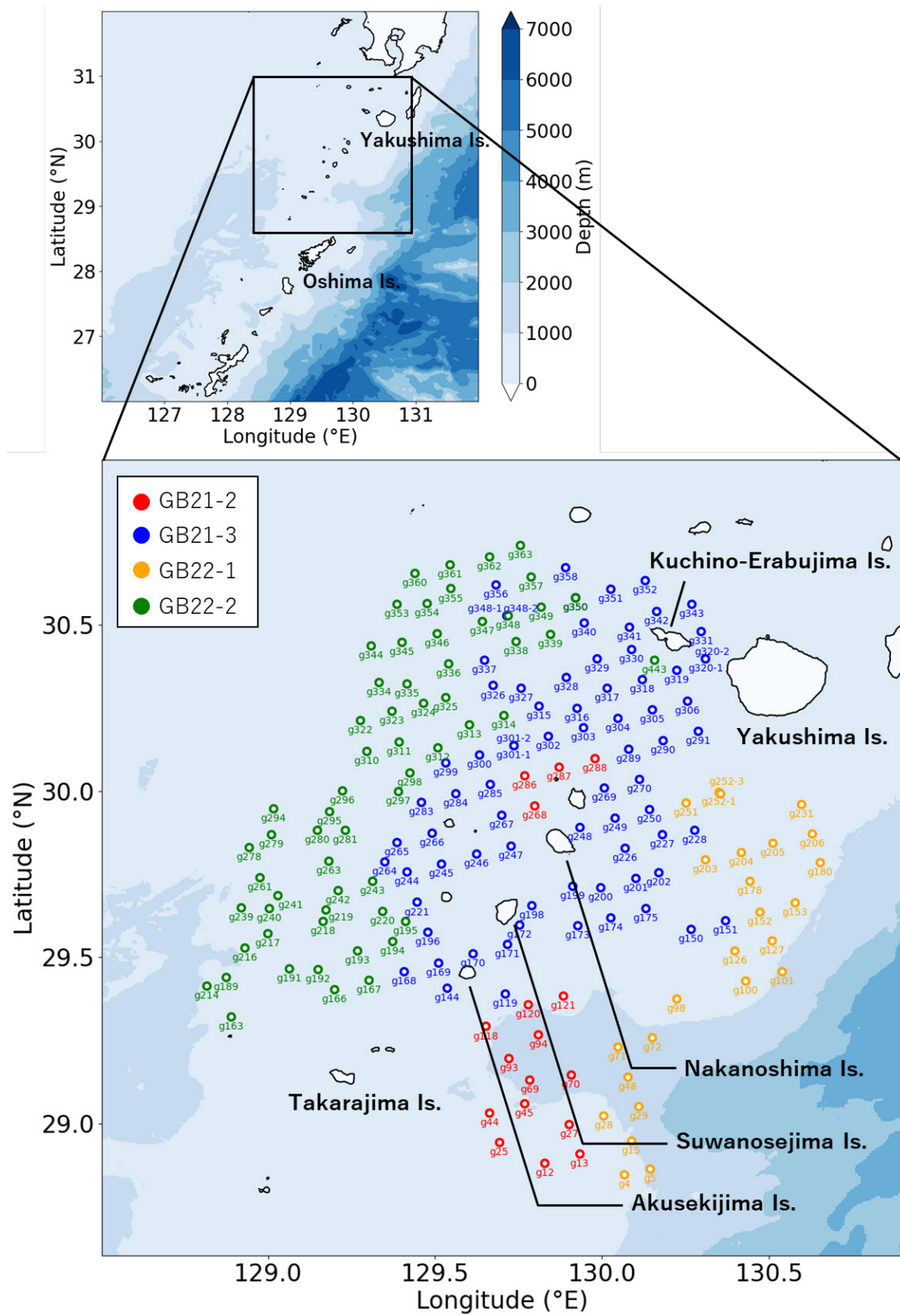
3.1 流況

水深0 mにおける3年間の平均流について、黒潮が通過する屋久島-中之島間で流速が最大(～1.2 m/s)となった(第2図)。上流側よりも流れが強い理由は、屋久島-中之島間を通過することで流路が狭まり、かつ島間の海底地形の高まりによって水深が浅くなるためだと考えられる。黒潮は中之島-諏訪之瀬島間にも流出し、～0.8 m/sの比較的強い流れを生じさせた。中之島や諏訪之瀬島の南西側は黒潮に対して島陰となり、流れが比較的弱い(～0.2 m/s)パッチ状の領域を形成した。黒潮が通過する屋久島から悪石島にかけて、流向は南東方向が卓越した。黒潮を横断する南北方向の断面図より、黒潮がもたらす比較的速い流れは海底上まで達していることが示された(第3図)。

3.2 水温・塩分

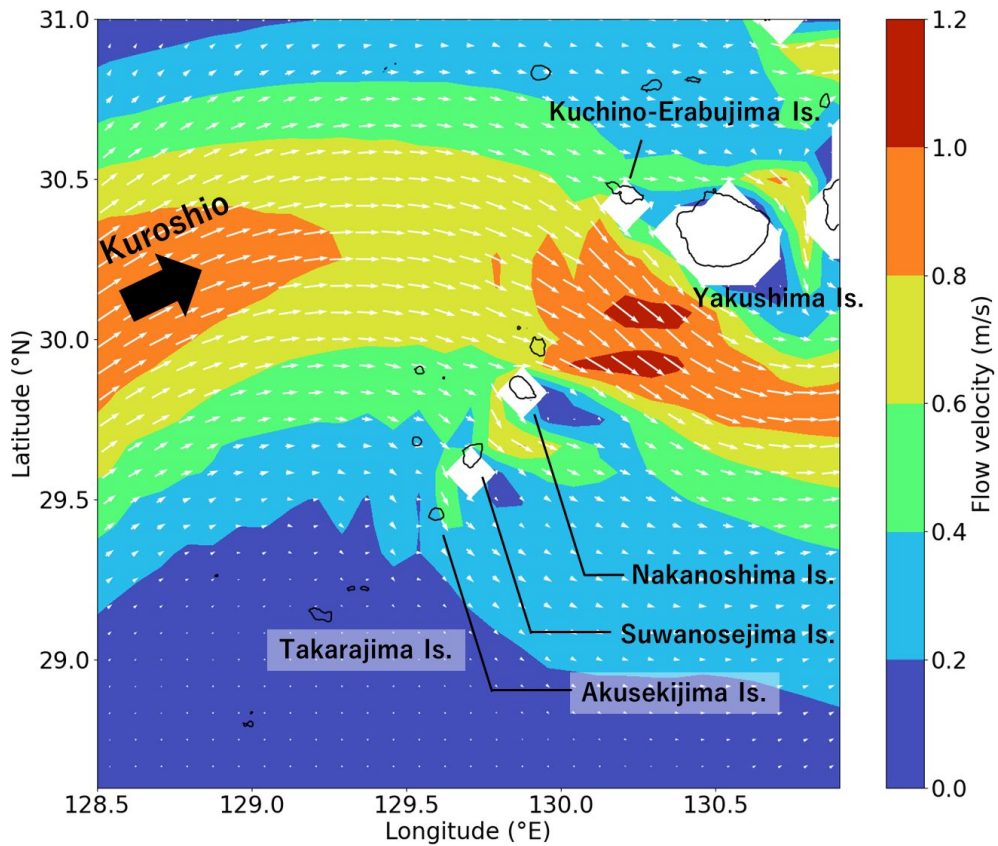
表層の水温・塩分の範囲は、水温が23.42～29.79℃、塩分が33.13～34.21であった(第1, 2表)。平均値は、水温で 25.82 ± 1.63 ℃、塩分で 33.72 ± 0.2 であった(±

トカラ列島の海洋環境 (齋藤ほか)



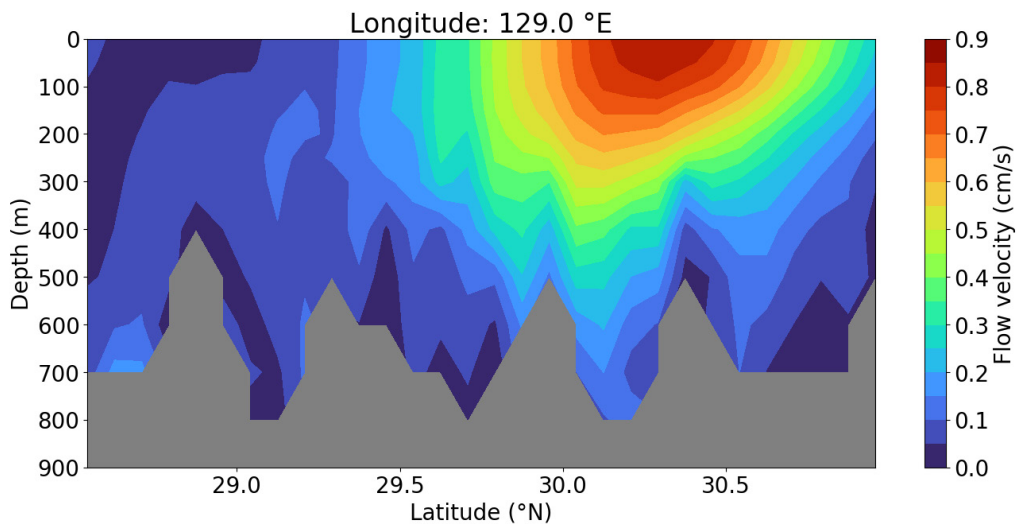
第1図 調査海域と観測地点.

Fig. 1 Study area and observation points.



第2図 海洋大循環モデルJCOPE2Mによる、水深0 mにおける3年間の平均流。色は流速の大きさ、矢印は流向を示す。

Fig. 2 Three-year mean flow at 0 m depth from the ocean general circulation model JCOPE2M. The color indicates the magnitude of the velocity and the arrow indicates the direction of the flow.



第3図 海洋大循環モデルJCOPE2Mによる、東経129°における3年間の平均流の断面図。

Fig. 3 Cross section of three-year mean flow at 129° E from the ocean general circulation model JCOPE2M.

第1表 CTDで取得された表層(水深2~5 mの平均)と底層(海底面上5~7 mの平均)の水温(Temp), 塩分(Sal), 濁度(Turb), 溶存酸素(DO). 観測日および位置, 水深はグラフ着底時のものを示した.

Table 1 Water temperature (Temp), salinity (Sal), turbidity (Turb), and dissolved oxygen (DO) in surface (average of 2 to 5 m depth) and bottom (average of 5 to 7 m above the seafloor) layers obtained by CTD. The date, locations, and water depths are those at the time of grab landing on the seabed.

Cruise	Site	Date	Lat (N)	Long (E)	Depth (m)	CTD surface (2-5 m below sea surface)				CTD bottom (5-7 m above seafloor)			
						Temp (°C)	Sal	Turb (FTU)	DO (ml/L)	Temp (°C)	Sal	Turb (FTU)	DO (ml/L)
GB21-2	g118	2021/7/28	29.292	129.650	942	27.45	33.84	1.25	3.92	3.45	33.93	1.18	1.87
GB21-2	g12	2021/7/27	28.881	129.828	244	28.00	33.95	1.37	3.83	17.57	34.26	1.17	3.96
GB21-2	g120	2021/7/28	29.359	129.778	1012	27.90	33.90	2.10	4.03	3.22	33.95	1.17	1.89
GB21-2	g121	2021/7/28	29.384	129.883	925	27.71	33.95	1.35	3.94	3.48	33.93	1.16	1.87
GB21-2	g13	2021/7/27	28.908	129.932	406	27.90	33.93	1.23	3.97	14.95	34.12	1.18	4.00
GB21-2	g25	2021/7/27	28.943	129.692	839	27.84	33.97	1.48	3.92	4.40	33.90	1.22	2.06
GB21-2	g268	2021/7/29	29.956	129.798	455.7	28.26	33.72	1.24	3.94	10.65	33.90	1.21	3.37
GB21-2	g27	2021/7/27	28.997	129.901	673	27.22	33.84	1.31	4.04	7.69	33.85	1.16	2.80
GB21-2	g286	2021/7/29	30.047	129.767	479	28.44	33.74	1.25	3.85	9.54	33.85	1.16	3.20
GB21-2	g287	2021/7/29	30.073	129.871	60	28.37	33.73	1.24	3.95	26.87	33.67	1.22	3.90
GB21-2	g288	2021/7/29	30.099	129.977	584	28.43	33.73	1.26	3.87	7.28	33.86	1.32	2.66
GB21-2	g44	2021/7/27	29.032	129.663	940	27.89	33.93	1.33	3.88	3.58	33.94	1.19	1.88

第1表 続き.
Table 1 Continued.

GB21-2	g45	2021/7/28	29,060	129,766	999	27.66	33.91	1.26	3.91	3.15	33.95	1.15	1.90
GB21-2	g69	2021/7/28	29,130	129,783	1025	27.12	33.85	1.22	3.93	3.20	33.99	1.17	1.91
GB21-2	g70	2021/7/27	29,146	129,906	1201	27.16	33.83	1.32	4.12	2.86	34.00	1.21	2.05
GB21-2	g93	2021/7/28	29,197	129,721	1053	27.82	33.92	1.38	3.88	3.22	33.95	1.21	1.90
GB21-2	g94	2021/7/28	29,268	129,808	1064	27.97	33.93	1.43	3.91	3.16	33.96	1.34	1.92
GB21-3	g119	2021/11/20	29,390	129,710	933	25.09	33.68	1.35	3.98	3.49	33.76	1.10	1.94
GB21-3	g144	2021/11/20	29,407	129,535	652	25.06	33.72	1.18	3.92	6.96	33.64	1.10	2.62
GB21-3	g150	2021/11/13	29,584	130,265	423	24.58	33.94	1.16	4.15	10.24	33.77	1.02	3.31
GB21-3	g151	2021/11/13	29,611	130,369	313	24.71	33.87	1.71	4.22	13.33	33.88	0.98	3.80
GB21-3	g168	2021/11/20	29,457	129,407	861	25.17	33.85	1.32	3.93	4.69	33.91	1.20	2.13
GB21-3	g169	2021/11/20	29,484	129,511	923	25.07	33.82	1.57	3.88	4.61	33.91	1.16	2.12
GB21-3	g170	2021/11/20	29,511	129,613	837	25.04	33.68	1.27	3.87	4.90	33.90	1.13	2.18
GB21-3	g171	2021/11/20	29,540	129,715	799	24.99	33.83	1.33	3.87	4.02	33.91	1.27	1.96
GB21-3	g172	2021/11/12	29,597	129,752	401	24.68	33.92	1.14	4.15	12.74	33.85	0.99	3.77
GB21-3	g173	2021/11/12	29,594	129,926	727	24.55	33.90	1.21	4.16	3.93	33.77	0.99	1.96
GB21-3	g174	2021/11/12	29,620	130,026	525	24.53	33.91	1.49	4.19	6.03	33.75	1.12	2.45
GB21-3	g175	2021/11/13	29,648	130,130	554	24.47	33.91	1.21	4.22	8.00	33.72	1.03	2.89
GB21-3	g196	2021/11/20	29,576	129,477	780	25.26	33.68	1.24	3.91	5.09	33.90	1.18	2.21
GB21-3	g198	2021/11/12	29,657	129,789	507	24.54	33.90	1.29	4.16	10.08	33.74	1.00	3.36
GB21-3	g199	2021/11/15	29,713	129,911	669	24.72	33.71	1.10	4.01	4.74	33.72	1.05	2.14

トカラ列島の海洋環境（齋藤ほか）

第1表 続き.
Table 1 Continued.

GB21-3	g200	2021/11/13	29.711	129.995	601	24.32	33.93	1.13	4.20	7.94	33.71	1.03	2.89
GB21-3	g201	2021/11/15	29.738	130.100	736	24.59	33.82	1.10	3.95	6.99	33.68	1.18	2.60
GB21-3	g202	2021/11/15	29.756	130.169	519	24.61	33.85	1.23	4.01	9.37	33.72	1.04	3.07
GB21-3	g221	2021/11/19	29.666	129.445	659	25.08	33.52	1.24	3.99	6.43	33.65	1.11	2.53
GB21-3	g226	2021/11/16	29.829	130.068	569	24.88	33.76	1.09	3.97	8.31	33.67	1.06	2.89
GB21-3	g227	2021/11/16	29.870	130.181	320	24.59	33.82	1.07	3.98	12.68	33.85	1.02	3.63
GB21-3	g228	2021/11/16	29.883	130.275	346	24.62	33.80	1.38	4.00	11.88	33.79	1.02	3.51
GB21-3	g244	2021/11/21	29.757	129.415	136	25.17	33.87	1.29	3.94	24.03	34.12	1.14	3.69
GB21-3	g245	2021/11/19	29.782	129.518	560	25.19	33.68	1.20	3.89	7.78	33.65	1.12	2.86
GB21-3	g246	2021/11/19	29.811	129.623	604	25.07	33.69	1.36	3.93	7.23	33.64	1.15	2.70
GB21-3	g247	2021/11/19	29.836	129.727	582	25.18	33.72	1.16	3.93	7.83	33.66	1.13	2.82
GB21-3	g248	2021/11/15	29.892	129.933	520	24.65	33.88	1.49	3.97	8.69	33.70	1.04	2.97
GB21-3	g249	2021/11/15	29.919	130.037	624	24.68	33.83	1.28	4.00	7.61	33.67	1.15	2.74
GB21-3	g250	2021/11/15	29.946	130.140	599	24.74	33.82	1.24	3.94	7.73	33.69	1.02	2.75
GB21-3	g264	2021/11/21	29.788	129.348	651	25.04	33.86	1.21	3.96	5.87	33.88	1.17	2.36
GB21-3	g265	2021/11/21	29.847	129.385	478	25.05	33.86	1.44	3.92	11.44	33.88	1.11	3.55
GB21-3	g266	2021/11/21	29.874	129.490	665	25.14	33.86	1.20	3.91	7.47	33.84	1.20	2.72
GB21-3	g267	2021/11/19	29.928	129.698	591	25.40	33.69	1.15	3.94	7.53	33.67	1.14	2.75
GB21-3	g269	2021/11/16	30.010	130.006	644	24.98	33.74	1.68	4.01	7.74	33.69	1.05	2.78
GB21-3	g270	2021/11/15	30.037	130.110	268	24.68	33.86	1.11	3.94	16.05	34.03	1.00	3.80

第1表 続き.
Table 1 Continued.

GB21-3	g283	2021/11/21	29.967	129.458	628	24.98	33.87	1.17	3.90	7.39	33.84	1.27	2.69
GB21-3	g284	2021/11/21	29.992	129.562	594	24.93	33.88	1.21	4.00	6.81	33.86	1.26	2.57
GB21-3	g285	2021/11/19	30.021	129.663	643	25.54	33.72	1.16	3.90	7.20	33.67	1.13	2.68
GB21-3	g289	2021/11/14	30.127	130.079	352	24.86	33.67	1.06	3.98	12.92	33.83	1.00	3.73
GB21-3	g290	2021/11/14	30.153	130.182	570	24.73	33.76	1.32	3.96	7.61	33.68	1.03	2.73
GB21-3	g291	2021/11/16	30.180	130.286	563	24.67	33.74	1.82	4.04	6.90	33.69	1.08	2.58
GB21-3	g299	2021/11/21	30.085	129.531	584	24.64	33.92	2.05	3.98	7.49	33.82	1.14	2.73
GB21-3	g300	2021/11/19	30.110	129.632	644	25.39	33.68	1.15	3.94	6.73	33.68	1.26	2.57
GB21-3	g301-1	2021/11/19	30.138	129.735	563	25.17	33.67	1.27	3.94	8.03	33.65	1.14	2.87
GB21-3	g301-2	2021/11/19	30.138	129.736	570	25.19	33.68	1.19	3.97	7.80	33.67	1.16	2.82
GB21-3	g302	2021/11/14	30.165	129.839	606	24.94	33.68	1.23	3.90	6.55	33.66	1.08	2.53
GB21-3	g303	2021/11/14	30.192	129.944	619	24.89	33.65	1.14	3.91	6.48	33.69	1.12	2.46
GB21-3	g304	2021/11/16	30.219	130.045	607	25.14	33.86	1.23	3.96	6.71	33.78	1.13	2.54
GB21-3	g305	2021/11/17	30.247	130.150	282	24.80	33.69	1.50	4.03	10.96	33.74	1.05	3.40
GB21-3	g306	2021/11/17	30.272	130.255	595	24.49	33.70	1.42	4.02	6.40	33.70	1.12	2.47
GB21-3	g315	2021/11/16	30.256	129.810	636	25.29	33.82	1.18	3.93	6.53	33.87	1.13	2.48
GB21-3	g316	2021/11/16	30.251	129.924	618	24.85	33.82	1.17	4.06	6.14	33.89	1.13	2.41
GB21-3	g317	2021/11/17	30.310	130.014	615	24.58	33.68	1.55	4.03	6.12	33.70	1.13	2.42
GB21-3	g318	2021/11/18	30.336	130.120	599	23.42	33.61	1.63	4.13	6.17	33.71	1.64	2.44
GB21-3	g319	2021/11/18	30.364	130.223	626	23.83	33.60	1.12	4.08	5.87	33.71	1.20	2.37

トカラ列島の海洋環境 (齋藤ほか)

第1表 続き.
Table 1 Continued.

GB21-3	g320-1	2021/11/18	30.400	130.309	590	24.27	33.69	1.33	4.07	7.08	33.68	1.15	2.64
GB21-3	g320-2	2021/11/18	30.400	130.309	590	24.39	33.70	1.40	4.06	6.80	33.67	1.25	2.59
GB21-3	g326	2021/11/24	30.318	129.674	548	24.78	33.88	1.28	3.82	7.07	33.83	1.22	2.58
GB21-3	g327	2021/11/16	30.312	129.757	676	24.78	33.77	1.30	4.00	6.11	33.90	1.11	2.41
GB21-3	g328	2021/11/17	30.342	129.891	639	24.92	33.64	1.28	4.01	6.59	33.69	1.10	2.52
GB21-3	g329	2021/11/18	30.400	129.984	639	24.42	33.80	1.34	4.07	6.11	33.89	1.24	2.42
GB21-3	g330	2021/11/17	30.427	130.088	636	23.92	33.76	1.12	4.10	5.81	33.90	1.17	2.36
GB21-3	g331	2021/11/14	30.481	130.296	546	24.51	33.75	1.61	3.96	7.17	33.70	1.14	2.62
GB21-3	g337	2021/11/24	30.394	129.648	752	24.62	33.87	1.69	3.92	5.63	33.87	1.29	2.30
GB21-3	g340	2021/11/14	30.508	129.946	598	24.82	33.69	1.35	3.93	6.56	33.70	1.06	2.50
GB21-3	g341	2021/11/17	30.494	130.081	636	24.00	33.65	1.37	4.11	5.76	33.71	1.25	2.35
GB21-3	g342	2021/11/14	30.542	130.162	592	24.90	33.85	1.23	3.90	6.63	33.71	1.20	2.50
GB21-3	g343	2021/11/14	30.564	130.268	502	24.33	33.72	1.24	3.97	7.31	33.69	1.34	2.65
GB21-3	g348-1	2021/11/17	30.528	129.714	615	24.69	33.63	1.18	4.06	6.08	33.70	1.14	2.42
GB21-3	g348-2	2021/11/17	30.528	129.716	615	24.68	33.76	1.32	4.04	6.08	33.71	1.14	2.42
GB21-3	g350	2021/11/17	30.582	129.920	545	23.70	33.62	1.37	4.08	6.73	33.86	1.10	2.54
GB21-3	g351	2021/11/13	30.609	130.025	185	24.86	33.83	1.16	3.94	17.21	34.08	1.00	3.73
GB21-3	g352	2021/11/13	30.636	130.128	184	24.34	33.71	1.10	4.00	17.13	33.99	1.04	3.56
GB21-3	g356	2021/11/13	30.622	129.681	536	24.18	33.65	1.29	3.90	6.90	33.71	1.03	2.54
GB21-3	g358	2021/11/13	30.674	129.889	472	24.79	33.81	1.15	3.93	7.32	33.70	1.03	2.64

第1表 続き.
Table 1 Continued.

GB22-1	g100	2022/7/17	29.429	130.428	606	29.47	33.97	NA	NA	NA	5.58	34.27	NA	NA
GB22-1	g101	2022/7/17	29.457	130.537	1105	29.23	33.96	NA	NA	NA	3.35	34.43	NA	NA
GB22-1	g126	2022/7/17	29.520	130.397	443	28.90	34.14	NA	NA	NA	7.18	34.30	NA	NA
GB22-1	g127	2022/7/17	29.549	130.508	740	29.12	34.06	NA	NA	NA	5.63	34.29	NA	NA
GB22-1	g15	2022/7/20	28.947	130.087	1070	29.53	33.90	NA	NA	NA	3.31	34.45	NA	NA
GB22-1	g152	2022/7/17	29.637	130.472	409	27.68	34.09	NA	NA	NA	14.05	34.52	NA	NA
GB22-1	g153	2022/7/16	29.664	130.578	521	29.35	33.87	NA	NA	NA	7.01	34.26	NA	NA
GB22-1	g178	2022/7/23	29.728	130.442	242	29.12	33.66	NA	NA	NA	17.29	34.63	NA	NA
GB22-1	g180	2022/7/16	29.786	130.652	682	28.95	33.93	NA	NA	NA	5.14	34.27	NA	NA
GB22-1	g203	2022/7/15	29.793	130.308	181	28.70	33.86	NA	NA	NA	20.65	34.64	NA	NA
GB22-1	g204	2022/7/15	29.817	130.415	208	29.13	33.58	NA	NA	NA	18.28	34.67	NA	NA
GB22-1	g205	2022/7/16	29.844	130.511	338	29.33	33.73	NA	NA	NA	12.37	34.43	NA	NA
GB22-1	g206	2022/7/16	29.873	130.627	590	28.45	33.92	NA	NA	NA	5.99	34.28	NA	NA
GB22-1	g231	2022/7/16	29.962	130.596	476	27.65	33.94	NA	NA	NA	7.53	34.27	NA	NA
GB22-1	g251	2022/7/15	29.966	130.250	469	27.98	34.21	NA	NA	NA	7.70	34.34	NA	NA
GB22-1	g252-1	2022/7/15	29.998	130.349	483	29.30	33.74	NA	NA	NA	8.23	34.33	NA	NA
GB22-1	g252-3	2022/7/15	29.994	130.353	485	28.41	33.92	NA	NA	NA	9.02	34.32	NA	NA
GB22-1	g28	2022/7/20	29.024	130.005	825	29.36	33.86	NA	NA	NA	3.89	34.39	NA	NA
GB22-1	g29	2022/7/20	29.050	130.110	1438	29.34	34.02	NA	NA	NA	2.57	34.53	NA	NA
GB22-1	g4	2022/7/20	28.845	130.065	737	29.50	33.82	NA	NA	NA	6.32	34.32	NA	NA

トカラ列島の海洋環境（齋藤ほか）

第1表 続き.
Table 1 Continued.

GB22-1	g48	2022/7/20	29.139	130.076	1402	29.46	34.01	NA	NA	NA	2.65	34.51	NA	NA
GB22-1	g5	2022/7/20	28.864	130.143	1044	29.54	33.89	NA	NA	NA	3.34	34.45	NA	NA
GB22-1	g71	2022/7/22	29.231	130.046	1277	29.79	33.63	NA	NA	NA	2.86	34.50	NA	NA
GB22-1	g72	2022/7/22	29.258	130.150	1186	29.69	33.71	NA	NA	NA	3.07	34.47	NA	NA
GB22-1	g98	2022/7/22	29.376	130.222	532	29.67	33.52	NA	NA	NA	7.58	34.27	NA	NA
GB22-2	g163	2022/11/15	29.320	128.888	771	25.47	33.49	NA	NA	NA	5.58	33.54	NA	NA
GB22-2	g166	2022/11/9	29.403	129.199	532	24.98	33.88	NA	NA	NA	9.77	33.79	NA	NA
GB22-2	g167	2022/11/9	29.431	129.302	797	25.00	34.18	NA	NA	NA	5.90	34.14	NA	NA
GB22-2	g189	2022/11/15	29.440	128.875	782	25.47	33.55	NA	NA	NA	5.46	33.58	NA	NA
GB22-2	g191	2022/11/9	29.466	129.064	825	25.00	33.84	NA	NA	NA	5.44	33.83	NA	NA
GB22-2	g192	2022/11/9	29.464	129.150	407	25.01	33.84	NA	NA	NA	15.56	34.05	NA	NA
GB22-2	g193	2022/11/9	29.521	129.266	760	24.98	33.92	NA	NA	NA	5.62	33.82	NA	NA
GB22-2	g194	2022/11/10	29.549	129.373	669	25.07	33.82	NA	NA	NA	7.07	33.70	NA	NA
GB22-2	g195	2022/11/10	29.607	129.410	673	25.04	33.82	NA	NA	NA	6.54	33.72	NA	NA
GB22-2	g214	2022/11/15	29.413	128.816	616	25.52	33.51	NA	NA	NA	8.91	33.51	NA	NA
GB22-2	g216	2022/11/15	29.529	128.929	905	25.53	33.52	NA	NA	NA	4.91	33.60	NA	NA
GB22-2	g217	2022/11/9	29.573	128.999	776	25.30	33.85	NA	NA	NA	5.57	33.83	NA	NA
GB22-2	g218	2022/11/9	29.608	129.165	820	25.08	33.87	NA	NA	NA	5.50	33.84	NA	NA
GB22-2	g219	2022/11/10	29.643	129.172	838	25.22	33.78	NA	NA	NA	5.51	33.73	NA	NA
GB22-2	g220	2022/11/10	29.639	129.343	433	24.99	33.80	NA	NA	NA	12.39	33.79	NA	NA

第1表 続き.
Table 1 Continued.

GB22-2	g239	2022/11/15	29.650	128.919	900	25.50	33.54	NA	NA	NA	4.70	33.62	NA	NA
GB22-2	g240	2022/11/15	29.647	129.003	869	25.45	33.54	NA	NA	NA	4.82	33.61	NA	NA
GB22-2	g241	2022/11/15	29.687	129.028	796	25.37	33.61	NA	NA	NA	5.80	33.57	NA	NA
GB22-2	g242	2022/11/10	29.702	129.209	822	25.11	33.78	NA	NA	NA	5.52	33.72	NA	NA
GB22-2	g243	2022/11/10	29.729	129.312	649	25.13	33.79	NA	NA	NA	6.97	33.71	NA	NA
GB22-2	g261	2022/11/21	29.740	128.974	729	25.04	33.45	NA	NA	NA	6.14	33.46	NA	NA
GB22-2	g263	2022/11/16	29.790	129.181	769	25.53	33.53	NA	NA	NA	5.38	33.53	NA	NA
GB22-2	g278	2022/11/16	29.830	128.942	901	25.36	33.55	NA	NA	NA	5.05	33.55	NA	NA
GB22-2	g279	2022/11/16	29.871	129.010	808	25.28	33.48	NA	NA	NA	5.71	33.54	NA	NA
GB22-2	g280	2022/11/16	29.883	129.146	757	25.26	33.46	NA	NA	NA	6.06	33.50	NA	NA
GB22-2	g281	2022/11/17	29.883	129.230	822	25.63	33.40	NA	NA	NA	5.32	33.52	NA	NA
GB22-2	g294	2022/11/16	29.948	129.016	916	25.35	33.42	NA	NA	NA	4.81	33.56	NA	NA
GB22-2	g295	2022/11/16	29.940	129.184	894	25.25	33.46	NA	NA	NA	4.78	33.56	NA	NA
GB22-2	g296	2022/11/17	30.002	129.223	891	25.64	33.37	NA	NA	NA	4.73	33.55	NA	NA
GB22-2	g297	2022/11/21	30.000	129.390	452	24.58	33.44	NA	NA	NA	13.16	33.57	NA	NA
GB22-2	g298	2022/11/21	30.056	129.424	561	24.76	33.43	NA	NA	NA	8.41	33.43	NA	NA
GB22-2	g310	2022/11/17	30.121	129.295	888	25.75	33.40	NA	NA	NA	4.79	33.55	NA	NA
GB22-2	g311	2022/11/11	30.149	129.391	506	25.52	33.65	NA	NA	NA	8.39	33.66	NA	NA
GB22-2	g312	2022/11/11	30.131	129.508	615	25.18	33.76	NA	NA	NA	7.98	33.68	NA	NA
GB22-2	g313	2022/11/11	30.200	129.602	495	25.18	33.75	NA	NA	NA	10.03	33.69	NA	NA

トカラ列島の海洋環境（齋藤ほか）

第1表 続き.
Table 1 Continued.

GB22-2	g314	2022/11/11	30.229	129.705	680	25.18	33.75	NA	NA	NA	6.70	33.69	NA	NA
GB22-2	g322	2022/11/17	30.213	129.277	881	25.06	33.28	NA	NA	NA	5.01	33.55	NA	NA
GB22-2	g323	2022/11/17	30.242	129.370	890	25.30	33.32	NA	NA	NA	4.97	33.54	NA	NA
GB22-2	g324	2022/11/11	30.266	129.465	597	25.73	33.66	NA	NA	NA	7.61	33.68	NA	NA
GB22-2	g325	2022/11/11	30.284	129.532	735	25.72	33.67	NA	NA	NA	6.61	33.70	NA	NA
GB22-2	g334	2022/11/20	30.328	129.332	639	24.83	33.51	NA	NA	NA	6.35	33.49	NA	NA
GB22-2	g335	2022/11/20	30.324	129.415	257	24.76	33.50	NA	NA	NA	14.21	33.67	NA	NA
GB22-2	g336	2022/11/11	30.384	129.539	791	25.83	33.67	NA	NA	NA	6.39	33.70	NA	NA
GB22-2	g338	2022/11/12	30.450	129.741	738	25.36	33.61	NA	NA	NA	6.36	33.71	NA	NA
GB22-2	g339	2022/11/12	30.473	129.845	616	25.31	33.60	NA	NA	NA	7.03	33.68	NA	NA
GB22-2	g344	2022/11/20	30.437	129.309	812	25.23	33.49	NA	NA	NA	5.15	33.54	NA	NA
GB22-2	g345	2022/11/20	30.448	129.401	778	25.41	33.42	NA	NA	NA	5.28	33.52	NA	NA
GB22-2	g346	2022/11/11	30.476	129.506	659	25.90	33.66	NA	NA	NA	7.11	33.69	NA	NA
GB22-2	g347	2022/11/12	30.511	129.640	673	25.38	33.64	NA	NA	NA	6.59	33.71	NA	NA
GB22-2	g348	2022/11/22	30.529	129.719	621	24.24	33.24	NA	NA	NA	6.08	33.45	NA	NA
GB22-2	g349	2022/11/12	30.554	129.816	611	25.64	33.64	NA	NA	NA	6.56	33.69	NA	NA
GB22-2	g350	2021/11/17	30.582	129.920	545	24.82	33.23	NA	NA	NA	7.08	33.43	NA	NA
GB22-2	g353	2022/11/20	30.563	129.384	796	25.07	33.24	NA	NA	NA	5.59	33.53	NA	NA
GB22-2	g354	2022/11/20	30.565	129.475	781	25.13	33.20	NA	NA	NA	5.64	33.52	NA	NA
GB22-2	g355	2022/11/12	30.610	129.546	732	25.71	33.66	NA	NA	NA	6.38	33.70	NA	NA

第1表 続き.
Table 1 Continued.

GB22-2	g357	2022/11/12	30.645	129.787	481	25.65	33.64	NA	NA	NA	9.15	33.70	NA	NA
GB22-2	g360	2022/11/20	30.656	129.439	723	24.96	33.13	NA	NA	NA	5.36	33.54	NA	NA
GB22-2	g361	2022/11/20	30.682	129.544	713	24.81	33.22	NA	NA	NA	5.51	33.51	NA	NA
GB22-2	g362	2022/11/20	30.705	129.662	596	24.77	33.28	NA	NA	NA	6.54	33.50	NA	NA
GB22-2	g363	2022/11/22	30.740	129.753	334	24.63	33.22	NA	NA	NA	10.41	33.46	NA	NA
GB22-2	g443	2022/11/12	30.394	130.156	635	25.39	33.60	NA	NA	NA	6.65	33.64	NA	NA

は標準偏差). GB21-3航海において, 中之島-諏訪瀬島間の黒潮流下方向に表層が低水温・高塩分となる地点が集中していた(第4図). また, 低水温・高塩分の領域を横断する断面図(第5図)より, 黒潮流下方向ほど海面下100 m前後に見られる塩分躍層が弱くなる傾向が認められた.

中之島-諏訪之瀬島間の東方海域において観測された表層水の低温・高塩分領域は, 黒潮と海底地形の相互作用による強い混合によるものである可能性がある. 一般に, 島の斜面や海山などの海底地形が存在する海域では, 通過する流れが妨げられ, 海洋内部の乱流混合が著しく強くなる(Garrett, 2003). トカラ列島周辺海域における過去の調査では, 中之島東沖で特に強い乱流が観測された. 黒潮がトカラ列島周辺海域の海山を通過した結果, 近慣性内部波が生じ, 亜表層で乱流を引き起こしたためである(Tsutsumi *et al.*, 2017; Nagai *et al.*, 2021). 今回観測された中之島-諏訪之瀬島間の東方に見られる表層の低温・高塩分領域は, このような混合によって, 下層の低温・高塩分な水塊が表層とかき混ぜられた結果と考えられる.

底層の水温・塩分の範囲は, 水温が2.57 ~ 26.87 °C, 塩分が33.43 ~ 34.67であった(第1, 2表). 平均値は, 水温で7.45 ± 3.79 °C, 塩分で33.83 ± 0.28であった. 標準偏差の大きさの主な要因は, 観測地点ごとに水深が大きく異なるためである. 観測地点の水深の範囲は60 ~ 1438 mであった.

3.3 溶存酸素

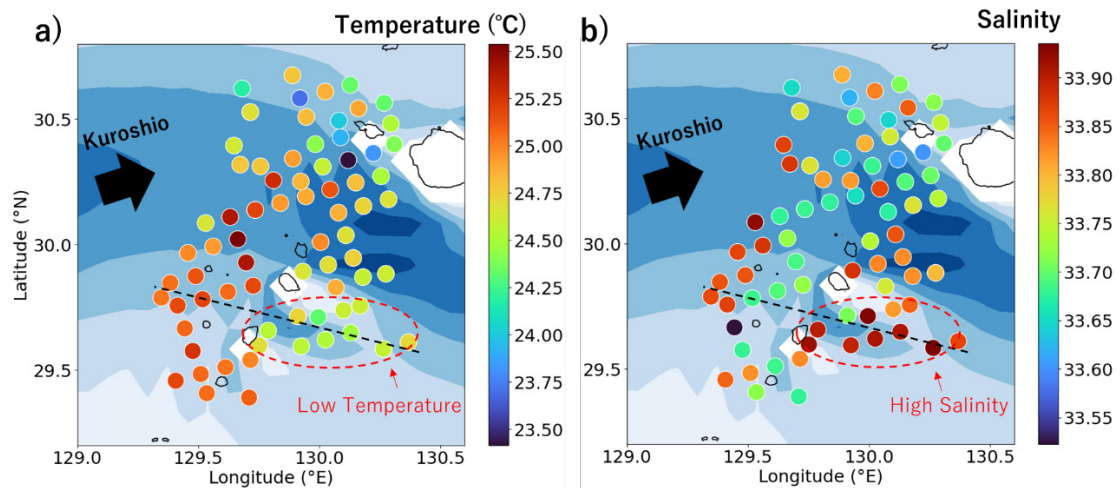
表層のDOの範囲は3.82 ~ 4.22 mg/L, 平均値は3.98 ± 0.09 mg/Lであった(第1, 2表). GB21-3航海において, 平均値を上回る高いDO(4.16 ~ 4.22 mg/L)が中之島-諏訪之瀬島間の黒潮流下方向に集中していた(第6図). 中之島-諏訪之瀬島間の黒潮上流側において, 水深 ~ 100 mのDOは ~ 4.0 mg/Lであった(第7図a). 対して, 下流側のDOは比較的高く, ~ 4.4 mg/Lであった(第7図b). 黒潮流下方向に沿った断面図においても, 中之島-諏訪之瀬島の下流側でDOが高くなる傾向が認められた(第7図c).

表層の高いDOは, 黒潮に伴う乱流混合に起因する可能性がある. DOが高い地点は, 表層の低水温・高塩分が観測された地点(第4図)とほぼ一致していた. すなわち, DOが高い地点では, 下層から表層への鉛直混合が生じていたと推定される. Hasegawa *et al.* (2021)は, トカラ列島周辺海域の黒潮による乱流混合に伴って, 多大な栄養塩の湧昇が起きることを観測した. これにより, 島や海山の下流側で植物プランクトンの一次生産が活発に行われる可能性が示唆された. しかし, Hasegawa *et al.* (2021)は, 栄養塩の湧昇による生態系への影響の解明には至っていない. 本稿で観測された高いDOは, 黒

第2表 表層 (水深2～5 mの平均)と底層 (海底面上5～7 mの平均)のCTD観測についての統計量. Countはサンプル数, Meanは平均値, Stdは標準偏差, Mdnは中央値, Minは最小値, Maxは最大値を示す.

Table 2 Statistics for CTD observations in the surface (average of 2 to 5 m depth) and bottom (average of 5 to 7 m above the seafloor) layers, where “Count” means the number of samples, “Std” means the standard deviation, “Mdn” means the median, “Min” means the minimum, and “Max” means the maximum value.

	Depth (m)	CTD surface (2-5 m below sea surface)				CTD bottom (5-7 m above seafloor)			
		Temp (°C)	Sal	Turb (FTU)	DO (ml/L)	Temp (°C)	Sal	Turb (FTU)	DO (ml/L)
Count	178	178	178	92	92	178	178	92	92
Mean	655	25.82	33.72	1.31	3.98	7.45	33.83	1.14	2.69
Std	225	1.63	0.2	0.19	0.09	3.79	0.28	0.10	0.55
Mdn	627	25.15	33.74	1.26	3.96	6.57	33.72	1.14	2.59
Min	60	23.42	33.13	1.06	3.82	2.57	33.43	0.98	1.87
Max	1438	29.79	34.21	2.1	4.22	26.87	34.67	1.64	4.00



第4図 GB21-3航海における表層 (水深2～5 mの平均)の水温 (a)と塩分 (b)の観測結果. 背景の青色は平均流速を示す (第2図を参照). 点線は第5図の断面の位置を示す.

Fig. 4 Observed water temperature (a) and salinity (b) in the surface layer (average of 2 to 5 m depth) during the GB21-3 cruise. The blue background indicates the mean current velocity (see Figure 2). The dotted lines indicate the locations of the cross sections shown in Figure 5.

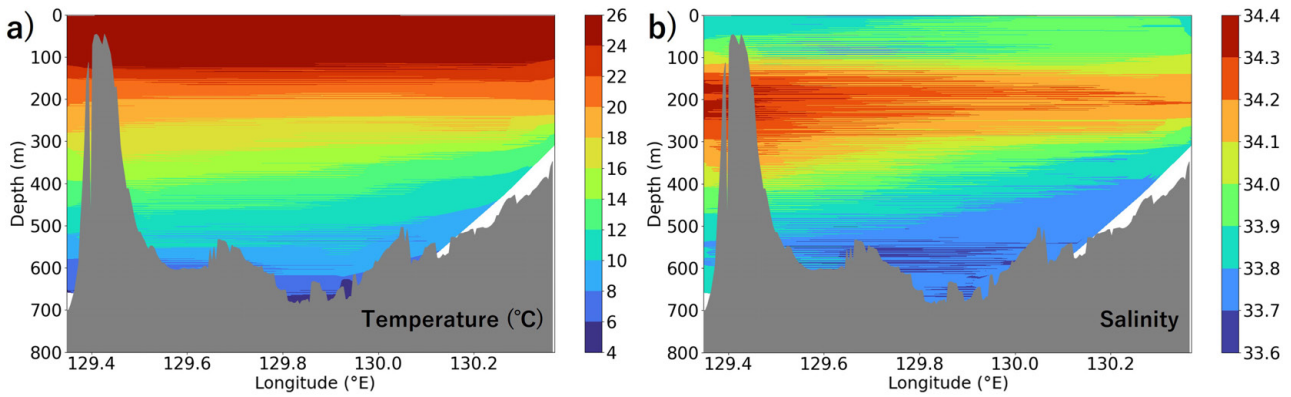
潮が島の下流側で湧昇を起こし、一次生産を活発化させ、結果として表層のDOを上昇させた可能性を示唆している。

3.4 濁度

GB21-2航海とGB21-3航海で観測を行った92地点のうち、15地点で海底上の高濁度層が認められた (第8, 9

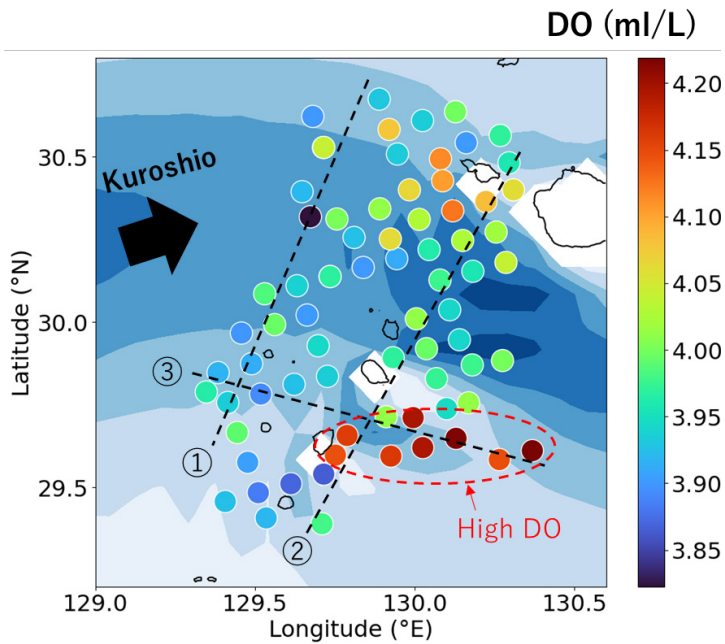
図). 高濁度層は今回の調査海域全体に見られるが、特に口永良部島くちのえらぶしま周辺で多く分布しており、15地点中6地点が口永良部島周辺に位置していた。

高濁度層の原因として以下の2つが考えられる。(1)口永良部島の周囲の海底には、島嶼部周辺で粗粒堆積物や露頭が多く見られるトカラ列島の他の島とは異なり、細粒砂から泥質堆積物が堆積していることが報告されて



第5図 水温 (a) と塩分 (b) の観測結果の断面図. 断面の位置は第4図の点線部分.

Fig. 5 Cross sections of the observed water temperature (a) and salinity (b). The location of the cross section is the dotted line in Figure 4.



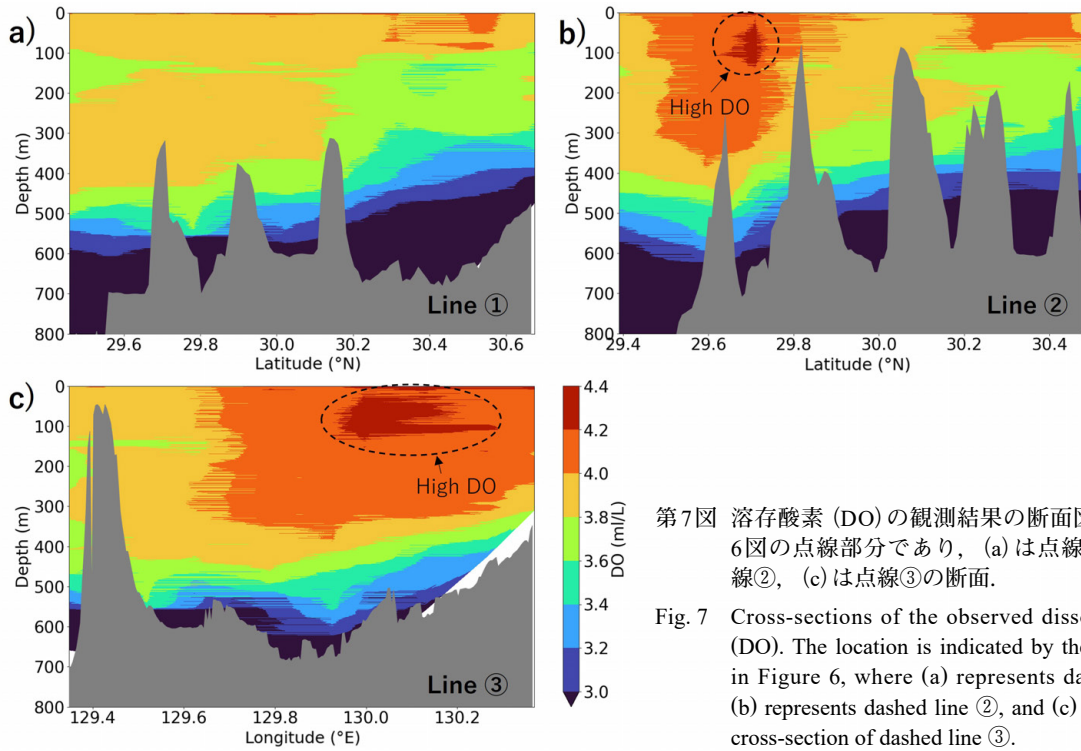
第6図 GB21-3航海における表層(水深2~5mの平均)の溶存酸素(DO)の観測結果. 背景の青色は平均流速を示す(第2図を参照). 点線は第7図の断面の位置を示す.

Fig. 6 Observed dissolved oxygen (DO) in the surface layer (average of 2 to 5 m depth) during the GB21-3 voyage. The blue background indicates the mean current velocity (see Figure 2). The dotted lines indicate the locations of the cross sections shown in Figure 7.

いる(鈴木ほか, 2023). 一方で黒潮が近傍を通過するため, 周辺海域の流れは比較的強い(第2図). 堆積物の特に細粒成分が, 黒潮の通過に伴う強い底層流によって活発に再懸濁されることで, 高濁度層を形成している可能性がある. (2)口永良部島は活発な噴火活動を繰り返している火山島であり(下司・小林, 2007), 月100回を超える火山性地震が継続的に発生している(気象庁, 2023). 火山島の海面下の斜面では, 火山性地震に伴う斜面崩壊などによって, 混濁流が発生し得る. 本稿で観測された高濁度層は, 火山性地震による混濁流, あるいはその痕跡を捉えた可能性がある.

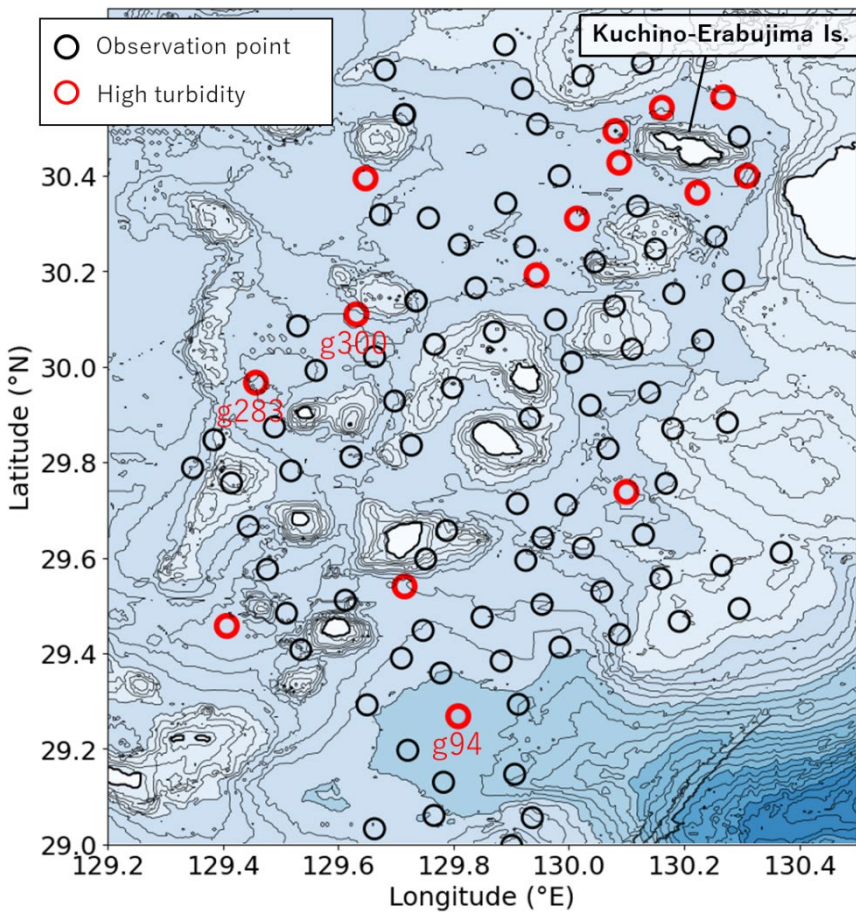
4. まとめ

GB21-2, GB21-3, GB22-1, およびGB22-2航海において, トカラ列島周辺海域の計178地点でCTD観測を実施した. 併せて, 海洋大循環モデルJCOPE2Mによる流況解析を行った. トカラ列島周辺海域の流況は黒潮に支配されており, 屋久島-中之島間と中之島-諏訪之瀬島間で特に強い流れが認められた. 黒潮による強い流れの影響は, 海底上まで達していることが示された. CTD観測より, 中之島-諏訪之瀬島の黒潮下流側において, 表層に低水温・高塩分が認められた. 島間を通過した黒潮が, 海



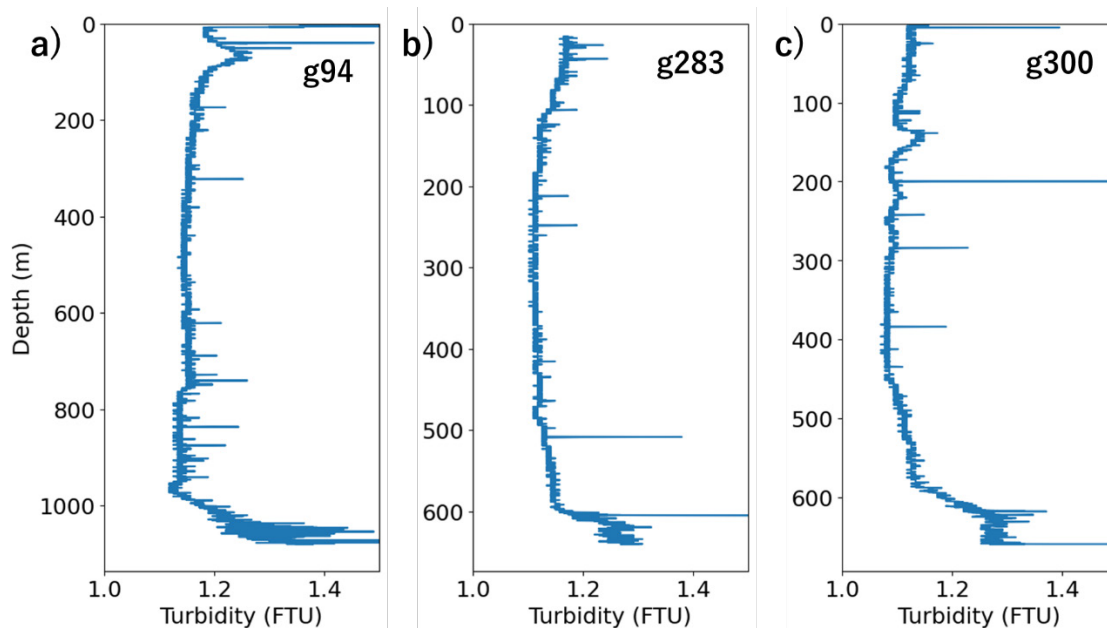
第7図 溶存酸素 (DO) の観測結果の断面図. 位置は第6図の点線部分であり, (a)は点線①, (b)は点線②, (c)は点線③の断面.

Fig. 7 Cross-sections of the observed dissolved oxygen (DO). The location is indicated by the dashed lines in Figure 6, where (a) represents dashed line ①, (b) represents dashed line ②, and (c) represents the cross-section of dashed line ③.



第8図 高濁度層の分布. 丸点はGB21-2およびGB21-3航海の観測地点であり, 赤い丸点は高濁度層が観測された地点を示す. 地形の等水深線は100 m間隔. 海底地形データはGEBCO 2023 Grid (GEBCO Compilation Group, 2023)を使用した.

Fig. 8 Distribution of the high turbidity layers. Red circles indicate locations where the high turbidity layers were observed. Topographic isobaths are at 100 m intervals. The bathymetric data used was the GEBCO 2023 Grid (GEBCO Compilation Group, 2023).



第9図 高濁度層が観測された地点における濁度の鉛直プロファイルの例。地点g94 (a), 地点g283 (b), 地点g300 (c)の鉛直プロファイル。

Fig. 9 Examples of vertical profiles of turbidity at sites where high turbidity layers were observed. Vertical profiles of point g94 (a), point g283 (b), and point g300 (c) are shown.

底地形との相互作用により、強い乱流混合を発生させたことが原因と考えられる。さらに、同じ地点で表層の高いDOも観測された。乱流混合が栄養塩を表層へ湧昇させ、植物プランクトンの一次生産を活発化させたためと考えられる。口永良部島周辺の多くの地点で海底上数十mの高濁度層が生じていた。黒潮による強い流れや、口永良部島の活発な火山活動に起因すると推測される。

文 献

- Garrett, C. (2003) Internal Tides and Ocean Mixing. *Science*, **301**, 5641, 1858–1859. doi: 10.1126/science.1090002
- GEBCO Compilation Group (2023) GEBCO 2023 Grid. doi:10.5285/f98b053b-0cbc-6c23-e053-6c86abc0af7b
- 下司信夫・小林哲夫 (2007) 口永良部島火山地質図。火山地質図, 14.
- 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**, e2020GL09206. doi: 10.1029/2020GL09206
- 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.
- 気象庁 (2023) 口永良部島の火山活動解説資料 (令和5年5月). https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/monthly_vact_vol.php?id=509 (閲覧日: 2023年7月10日)
- Mellor, G. L., Häkkinen, S. M., Ezer, T. and Patchen, R. C. (2002) A generalization of a sigma coordinate ocean model and an intercomparison of model vertical grids. *In*: Pinardi, N. and Woods, J. D. (eds) *Ocean Forecasting*. Springer, Berlin, 55–72. doi: 10.1007/978-3-662-22648-3_4
- Miyazawa, Y., Varlamov, S. M., Miyama, T., Guo, X., Hihara, T., Kiyomatsu, K., Kachi, M., Kurihara, Y., and Murakami, H. (2017) Assimilation of high-resolution sea surface temperature data into an operational nowcast/forecast system around Japan using a multi-scale three-dimensional variational scheme. *Ocean Dynamics*, **67**, 713–728. doi: 10.1007/s10236-017-1056-1
- Miyazawa, Y., Kuwano-Yoashida, A., Doi, T., Nishikawa, H., Narazaki, T., Fukuoka, T. and Sato, K. (2019) Temperature profiling measurements by sea turtles improve ocean state estimation in the Kuroshio-Oyashio Confluence region. *Ocean Dynamics*, **69**, 267–282. doi: 10.1007/s10236-018-1238-5
- Nagai, T., Hasegawa, D., Tsutsumi, E., Nakamura, H., Nishida, A., Senjyu, T., Endoh, T., Matsuno, T., Inoue,

- R. and Tandon, A. (2021) The Kuroshio flowing over seamounts and associated submesoscale flows drive 100-km-wide 100-1000-fold enhancement of turbulence. *Communications Earth & Environment*, **2**, 170. doi:10.1038/s43247-021-00230-7
- 中野太賀・岩谷北斗・鈴木克明・板木拓也・久保 観・佐々木聡史 (2022) トカラギャップ周辺海域における現生貝形虫群集 (予報). 地質調査研究報告, **73**, 329-335.
- 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.
- 鈴木克明・板木拓也・片山 肇・兼子尚知・山崎 誠・有元 純・徳田悠希・千徳明日香・清家弘治 (2023) トカラ列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, **74**, 259-286.
- Tsutsumi, E., Matsuno, T., Lien, R.-C., Nakamura, H., Senjyu, T. and Guo, X. (2017) Turbulent mixing within the Kuroshio in the Tokara Strait. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **122**, 7082-7094. doi: 10.1002/2017JC013049
- (受 付 : 2024年1月19日 ; 受 理 : 2024年7月25日)

