

豊前海の長期環境変動に関する研究

後川 龍男・黒川 皓平・田中 慎也・鹿島 祥平
(豊前海研究所)

地球温暖化について世界的に議論される中、日本近海でも長期的な水温上昇傾向が報告されていることから、豊前海における長期水温変動について48年分の浅海定線調査データを元に解析した。また同データを用いて長期栄養塩濃度の変動についても解析した。その結果、豊前海の水温は長期上昇傾向、DIN濃度は長期減少傾向にあることが確認され、48年間の年平均全層平均値では、水温が0.89℃上昇、DIN濃度が2.38μM減少したと試算された。水温に関しては夏季以外の上昇傾向が顕著であった。DIN濃度に関しては夏季を除いて減少傾向にあり、特に秋季と冬季の減少傾向が顕著であった。

キーワード：豊前海，水温，DIN

地球温暖化の議論は近年世界的に盛んとなっており、海水温の上昇についても同様である。日本近海でも長期的な海水温の上昇傾向が報告されており、瀬戸内海の周辺海域でも、直近の報告では四国・東海沖で+1.24℃/100年、東シナ海で+1.25℃/100年¹⁾の長期的な水温上昇傾向が報告されている。瀬戸内海西部の周防灘の一部である豊前海でも過去に佐藤、神菌²⁾が長期的な水温上昇傾向を報告しており、その要因としてレジームシフトが示唆されているが、それ以降の観測データによる検討は未実施である。

また、瀬戸内海の水質汚濁防止対策として1973年に瀬戸内海環境保全特別措置法（以下、特措法）が制定され、海域への窒素やリンの排出が強力に規制された結果、栄養塩不足による養殖ノリの色落ちや基礎生産力の低下による漁獲量の減少など、瀬戸内海の栄養塩濃度が低下し水質が大幅に改善した一方で当初想定されていなかった負の影響も指摘されるようになった³⁾。これに対応するため2021年に特措法が改正され、これまでの栄養塩削減のみを進める対策だけではなく、関係府県知事が策定した計画に基づき、特定の海域への栄養塩供給も可能となった。

こうした状況の中、今後の水産施策に活用する基礎データとして、温暖化に関連する水温と、特措法改正に係る栄養塩（DINおよびDIP）濃度について、豊前海における長期変動をとりまとめたので報告する。

方 法

豊前海では昭和20年代から月1回の定期海洋観測調査

が行われている。初期の調査定点は3~5点で位置も度々変更されてきたものの、1971（昭和46）年4月以降は、現在と同一地点で浅海定線調査が行われている⁴⁾（図1）。これを踏まえて使用可能なデータを精査した結果、1972年1月から2019年12月までの48年間の水温およびDIN、DIP濃度について、観測データの抽出、取りまとめおよび解析を行った。

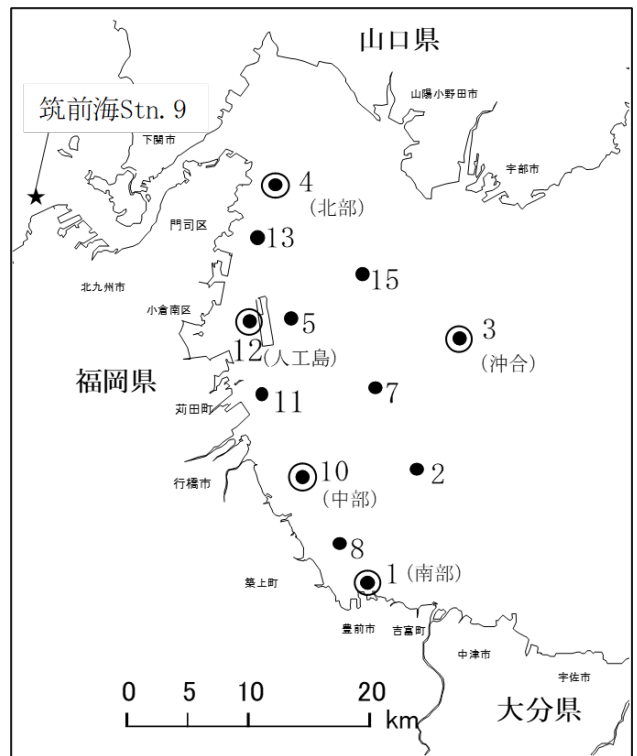


図1 調査定点（数字はStn番号，○囲みは代表点）

浅海定線調査は月1回、原則として月上旬に行われている。今回使用したデータの調査点は図1に示した12定点、観測層は0m層（表層）、5m層、B-1m層の3層とし、抽出した観測項目は水温及びDIN、DIP（リン酸態リン）濃度とし、DINについては、アンモニア態窒素および硝酸態窒素、亜硝酸態窒素の合計とした。観測項目ごとの観測方法を表1に示した⁴⁾。使用期間等については事業報告書等に記録のない場合もあったため、一部は機器の購入履歴等から推定し記載した。

解析にあたっては、観測値の平均値を算出してデータを取りまとめた。豊前海全体の層別月平均値は同月の12調査点の同一観測層における観測値の単純平均、全層月平均値は層別月平均値の単純平均、層別年平均値および全層年平均値はそれぞれ層別月平均値および全層月平均値の単純平均とした。これらを48年分取りまとめて解析した。

水温については更に、海域別の特徴を検討するため図1に示した沖合1点（Stn.3：沖合）と沿岸4点（Stn.4：北部、Stn.12：人工島、Stn.10：中部、Stn.1：南部）の計5点を代表点として解析した。代表点別の層別月観測値はそれぞれの生観測値を使用し、全層月平均値は層別月観測値（0m、5m、B-1mの3層）の単純平均、層別年平均値および全層年平均値はそれぞれ層別月平均値および全層月平均値の単純平均とした。これらを48年分取りまとめて解析した。

データの解析は、各データを48年分並べて最小二乗法による線形回帰分析を行い、P値から有意水準95%で回帰直線の有意性を判断した。有意と判定されたデータ項目のみ上昇（あるいは下降）傾向があると評価し、回帰直線の傾きから48年間での上昇（下降）幅を試算した。

なお欠測値についてはこれを含めずに回帰分析を行

った。すなわち豊前海全体の月別平均値については、観測自体の中止による全点欠測のみ欠測値とし、一部定点の欠測や、一部定点の一部観測層における欠測の場合は、これを無視して層別平均値および全層平均値を算出した。代表点別の月平均値については、調査水深3層の中に欠測値がある定点では全層平均値を算出せず、欠測値とした。また豊前海全体、代表点別とも、欠測月がある年の年平均値は欠測値とした。

結果

豊前海の水温の解析結果を表2、3に、DIN、DIP濃度の解析結果を表4にそれぞれ示した。表には回帰直線の傾きを「変化率」、回帰直線のR2乗値から算出された「P値」、 $P < 0.05$ となり回帰直線の有意性が5%水準で確認された項目について変化率から試算した48年間の上昇（下降）幅を「変化量」として数値を記載した。なお $P \geq 0.05$ となり5%水準で有意性が確認されなかった項目の変化量は「-」で記載した。

豊前海全体の全層平均水温は、年平均値および2～4月、10～12月の月平均値で上昇傾向を示し、全層年平均水温は48年間で0.89℃上昇したと試算された（図2）。層別月平均水温は2月の0m層を除き2～4月、10～12月に各層で上昇傾向を示した。

代表点別の全層平均水温は、年平均値及び3～4月、10～12月の全点、1～2月の北部、2月の中部、南部、5月の人工島で上昇傾向を示した。層別月平均水温は3月、11月、12月に全点の各層で上昇傾向を示した。また、1月に北部の各層、2月に北部の5m、B-1m層および中部、南部の各層、4月に沖合と中部の0m層を除く全点の各層、5月に北部のB-1mと人工島の5m層、10月に人工島の0m層を除く全点の各層で上昇傾向を示した。

表1 観測項目別の主な観測機器、分析方法、使用期間（一部重複期間あり）

観測項目	水温	栄養塩			DIP
		DIN	DIP		
		NH4-N	NO2-N	NO3-N	P04-P
使用期間 観測機器・手法 (メーカー)	1972-1976 電気温度計 (電気化学計器 K.K.製)	1972-1983 インドフェノール法	1972-1974 グリース・ロミン法	1972-1980 銅還元法	1972-1974 ドンゼ法
	1976-1982 棒状水銀温度計		1974-1983	1980-1983	1974-1983
	1982-1985 電気温度計 (東邦電探 ET-5D)		ストリ克蘭ド法	Cu-Cdカラム 還元法	ストリ克蘭ド法
	1985-1989 CSTD (アレック電子 ADR-500)			1984-	
	1989-2001 STD (アレック電子 AST-1000M)		テクニコンオートアナライザーII (1984-1998) オートアナライザートラックス800 (1998-)		
	2000-2015 クロロテック (アレック電子 ACL-208)	インドフェノール青 吸光度法	ナフチルエチレンジアミン 吸光度法	Cu-Cdカラム 還元法	モリブデン青-アスコルビン酸還元 吸光度法
	2015- クロロテック (JFEアドバンテック ASTD-102)				

豊前海の長期環境変動

表2 豊前海における水温の長期変動解析結果（豊前海全体（全点平均），沖合（Stn.3），北部（Stn.4））

水深	時期	豊前海全体 (全点平均)			沖合 (Stn. 3)			沿岸 北部 (Stn. 4)		
		変化率 (°C/年)	P値	変化量 (°C/48年)	変化率 (°C/年)	P値	変化量 (°C/48年)	変化率 (°C/年)	P値	変化量 (°C/48年)
0m	1月	0.0213	0.1446	-	0.0228	0.1413	-	0.0373	0.0151	1.791
5m		0.0237	0.1051	-	0.0230	0.1368	-	0.0440	0.0042	2.114
B-1m		0.0243	0.0950	-	0.0164	0.3288	-	0.0394	0.0075	1.892
全層		0.0231	0.1129	-	0.0207	0.1886	-	0.0403	0.0070	1.933
0m	2月	0.0201	0.0581	-	0.0140	0.1390	-	0.0231	0.0946	-
5m		0.0212	0.0446	1.016	0.0149	0.1186	-	0.0270	0.0470	1.296
B-1m		0.0223	0.0353	1.070	0.0154	0.1396	-	0.0290	0.0250	1.393
全層		0.0212	0.0448	1.017	0.0148	0.1256	-	0.0264	0.0472	1.265
0m	3月	0.0258	0.0252	1.238	0.0238	0.0190	1.141	0.0330	0.0015	1.584
5m		0.0298	0.0083	1.430	0.0300	0.0024	1.438	0.0368	0.0004	1.767
B-1m		0.0290	0.0088	1.392	0.0270	0.0039	1.297	0.0355	0.0007	1.702
全層		0.0282	0.0121	1.354	0.0269	0.0045	1.292	0.0352	0.0007	1.690
0m	4月	0.0244	0.0140	1.170	0.0157	0.0784	-	0.0295	0.0011	1.415
5m		0.0285	0.0012	1.370	0.0265	0.0017	1.274	0.0354	0.0001	1.702
B-1m		0.0268	0.0021	1.286	0.0203	0.0128	0.977	0.0384	0.0001	1.842
全層		0.0266	0.0029	1.275	0.0209	0.0072	1.001	0.0344	0.0002	1.653
0m	5月	0.0041	0.7368	-	-0.0116	0.3801	-	0.0085	0.4480	-
5m		0.0123	0.2802	-	0.0020	0.8748	-	0.0137	0.1877	-
B-1m		0.0161	0.1201	-	0.0039	0.6734	-	0.0242	0.0141	1.162
全層		0.0108	0.3208	-	-0.0019	0.8430	-	0.0154	0.1268	-
0m	6月	-0.0106	0.3519	-	-0.0121	0.7579	-	-0.0048	0.6803	-
5m		0.0022	0.8325	-	0.0010	0.8288	-	0.0026	0.8164	-
B-1m		-0.0006	0.9543	-	-0.0176	0.3061	-	-0.0068	0.5626	-
全層		-0.0030	0.7645	-	-0.0096	0.3980	-	-0.0030	0.7834	-
0m	7月	-0.0049	0.7274	-	-0.0006	0.9652	-	-0.0067	0.6267	-
5m		0.0042	0.7069	-	0.0104	0.4195	-	0.0011	0.8246	-
B-1m		0.0018	0.8813	-	-0.0114	0.5053	-	0.0127	0.4725	-
全層		0.0004	0.9744	-	0.0013	0.9062	-	0.0035	0.7717	-
0m	8月	0.0139	0.3068	-	0.0141	0.3280	-	0.0149	0.2884	-
5m		0.0077	0.5450	-	0.0122	0.3930	-	0.0129	0.3340	-
B-1m		0.0109	0.4604	-	0.0114	0.5326	-	0.0237	0.2757	-
全層		0.0108	0.3648	-	0.0125	0.2252	-	0.0172	0.2353	-
0m	9月	-0.0018	0.8791	-	0.0041	0.7424	-	-0.0019	0.8657	-
5m		0.0070	0.5462	-	0.0047	0.6978	-	0.0053	0.6252	-
B-1m		0.0081	0.5044	-	-0.0108	0.4797	-	0.0084	0.5641	-
全層		0.0044	0.6987	-	-0.0007	0.9519	-	0.0039	0.7359	-
0m	10月	0.0266	0.0126	1.278	0.0292	0.0024	1.403	0.0282	0.0071	1.355
5m		0.0325	0.0017	1.559	0.0346	0.0003	1.663	0.0318	0.0021	1.528
B-1m		0.0336	0.0008	1.615	0.0339	0.0003	1.625	0.0340	0.0011	1.631
全層		0.0309	0.0027	1.484	0.0326	0.0005	1.564	0.0314	0.0025	1.505
0m	11月	0.0293	0.0074	1.407	0.0365	0.0005	1.752	0.0377	0.0011	1.812
5m		0.0312	0.0039	1.496	0.0374	0.0004	1.796	0.0391	0.0006	1.876
B-1m		0.0319	0.0016	1.530	0.0382	0.0008	1.834	0.0396	0.0006	1.898
全層		0.0308	0.0036	1.478	0.0374	0.0005	1.794	0.0388	0.0007	1.862
0m	12月	0.0434	0.0009	2.083	0.0477	0.0001	2.288	0.0434	0.0002	2.082
5m		0.0444	0.0006	2.130	0.0477	0.0001	2.288	0.0423	0.0003	2.030
B-1m		0.0445	0.0006	2.136	0.0528	0.0003	2.535	0.0398	0.0003	1.911
全層		0.0441	0.0007	2.115	0.0494	0.0002	2.371	0.0418	0.0003	2.008
0m	年平均	0.0149	0.0040	0.717	0.0149	0.0094	0.714	0.0187	0.0005	0.896
5m		0.0197	0.0002	0.944	0.0197	0.0008	0.947	0.0230	0.0000	1.105
B-1m		0.0209	0.0003	1.001	0.0163	0.0234	0.783	0.0255	0.0001	1.223
全層		0.0185	0.0005	0.887	0.0172	0.0042	0.824	0.0223	0.0001	1.069

表3 豊前海における水温の長期変動解析結果（人工島（Stn.12），中部（Stn.10），南部（Stn.12））

水深	時期	沿岸								
		人工島（Stn.12）			中部（Stn.10）			南部（Stn.1）		
		変化率 (°C/年)	P値	変化量 (°C/48年)	変化率 (°C/年)	P値	変化量 (°C/48年)	変化率 (°C/年)	P値	変化量 (°C/48年)
0m	1月	0.0172	0.3280	-	0.0156	0.3263	-	0.0222	0.1479	-
5m		0.0197	0.2646	-	0.0206	0.1957	-	0.0216	0.1344	-
B-1m		0.0180	0.2812	-	0.0205	0.1905	-	0.0265	0.0588	-
全層		0.0196	0.8560	-	0.0189	0.2301	-	0.0214	0.1395	-
0m	2月	0.0210	0.1114	-	0.0263	0.0365	1.264	0.0253	0.0262	1.216
5m		0.0254	0.0560	-	0.0267	0.0279	1.280	0.0233	0.0438	1.119
B-1m		0.0234	0.0888	-	0.0278	0.0191	1.334	0.0249	0.0223	1.197
全層		0.0233	0.0812	-	0.0269	0.0263	1.292	0.0238	0.0350	1.140
0m	3月	0.0274	0.0467	1.316	0.0273	0.0304	1.310	0.0327	0.0128	1.569
5m		0.0319	0.0492	1.532	0.0340	0.0097	1.630	0.0321	0.0134	1.542
B-1m		0.0308	0.0177	1.479	0.0302	0.0137	1.449	0.0335	0.0070	1.610
全層		0.0323	0.0173	1.548	0.0317	0.0128	1.522	0.0328	0.0110	1.573
0m	4月	0.0268	0.0075	1.287	0.0222	0.0837	-	0.0290	0.0120	1.393
5m		0.0309	0.0045	1.484	0.0287	0.0037	1.378	0.0296	0.0026	1.420
B-1m		0.0271	0.0054	1.300	0.0260	0.0045	1.247	0.0270	0.0041	1.295
全層		0.0325	0.0030	1.558	0.0260	0.0112	1.250	0.0274	0.0050	1.317
0m	5月	0.0064	0.6057	-	0.0110	0.4008	-	0.0168	0.2234	-
5m		0.0270	0.0247	1.295	0.0174	0.1682	-	0.0183	0.1620	-
B-1m		0.0225	0.0581	-	0.0134	0.2652	-	0.0198	0.1359	-
全層		0.0261	0.0275	1.253	0.0207	0.0787	-	0.0183	0.1539	-
0m	6月	-0.0048	0.6803	-	-0.0048	0.6803	-	-0.0048	0.6803	-
5m		0.0219	0.0740	-	-0.0012	0.9180	-	-0.0110	0.3902	-
B-1m		0.0081	0.4552	-	-0.0034	0.7788	-	-0.0058	0.6289	-
全層		0.0188	0.1190	-	-0.0001	0.9887	-	-0.0108	0.3638	-
0m	7月	-0.0034	0.8004	-	-0.0058	0.7158	-	-0.0093	0.6038	-
5m		0.0142	0.2973	-	0.0021	0.8878	-	0.0020	0.8987	-
B-1m		0.0222	0.2693	-	-0.0119	0.9310	-	-0.0016	0.8965	-
全層		0.0212	0.0960	-	0.0032	0.8057	-	-0.0009	0.9489	-
0m	8月	0.0140	0.3151	-	0.0171	0.2416	-	0.0250	0.1320	-
5m		0.0132	0.3883	-	0.0017	0.9156	-	0.0054	0.7627	-
B-1m		0.0176	0.2670	-	0.0025	0.8841	-	0.0097	0.5509	-
全層		0.0242	0.0859	-	0.0070	0.6221	-	0.0129	0.4244	-
0m	9月	-0.0031	0.8108	-	-0.0057	0.6547	-	0.0002	0.9880	-
5m		0.0092	0.4623	-	0.0109	0.3964	-	0.0020	0.8642	-
B-1m		0.0114	0.4016	-	0.0119	0.3776	-	0.0097	0.4202	-
全層		0.0087	0.5122	-	0.0080	0.5163	-	0.0002	0.9865	-
0m	10月	0.0208	0.0620	-	0.0243	0.0375	1.168	0.0295	0.0254	1.418
5m		0.0294	0.0059	1.413	0.0369	0.0008	1.771	0.0391	0.0018	1.877
B-1m		0.0300	0.0044	1.442	0.0351	0.0009	1.685	0.0368	0.0010	1.768
全層		0.0285	0.0073	1.367	0.0350	0.0013	1.679	0.0354	0.0051	1.700
0m	11月	0.0248	0.0435	1.192	0.0294	0.0120	1.410	0.0351	0.0018	1.686
5m		0.0268	0.0355	1.288	0.0295	0.0123	1.414	0.0352	0.0031	1.692
B-1m		0.0289	0.0138	1.389	0.0331	0.0052	1.588	0.0331	0.0043	1.587
全層		0.0256	0.0401	1.231	0.0293	0.0138	1.407	0.0348	0.0030	1.669
0m	12月	0.0361	0.0101	1.734	0.0451	0.0015	2.167	0.0466	0.0035	2.237
5m		0.0336	0.0130	1.613	0.0474	0.0009	2.274	0.0486	0.0004	2.332
B-1m		0.0434	0.0021	2.082	0.0471	0.0008	2.259	0.0413	0.0020	1.983
全層		0.0341	0.0179	1.636	0.0465	0.0009	2.233	0.0492	0.0004	2.363
0m	年平均	0.0145	0.0120	0.697	0.0157	0.0043	0.754	0.0187	0.0005	0.896
5m		0.0282	0.0001	1.355	0.0181	0.0148	0.867	0.0210	0.0019	1.006
B-1m		0.0229	0.0002	1.099	0.0194	0.0011	0.931	0.0204	0.0004	0.980
全層		0.0187	0.0035	0.898	0.0210	0.0015	1.007	0.0219	0.0008	1.053

表4 豊前海における栄養塩類の長期変動解析結果

水深	時期	DIN			DIP		
		変化率 ($\mu\text{M}/\text{年}$)	P値	変化量 ($\mu\text{M}/48\text{年}$)	変化率 ($\mu\text{M}/\text{年}$)	P値	変化量 ($\mu\text{M}/48\text{年}$)
0m	1月	-0.0708	0.0013	-3.399	-0.0028	0.1252	-
5m		-0.0699	0.0015	-3.357	-0.0006	0.6096	-
B-1m		-0.0743	0.0008	-3.567	-0.0015	0.2329	-
全層		-0.0717	0.0011	-3.441	-0.0016	0.2383	-
0m	2月	-0.0313	0.0164	-1.500	-0.0034	0.2300	-
5m		-0.0323	0.0157	-1.549	-0.0015	0.4491	-
B-1m		-0.0350	0.0108	-1.682	-0.0051	0.1678	-
全層		-0.0328	0.0134	-1.577	-0.0033	0.2331	-
0m	3月	-0.0651	0.0006	-3.125	-0.0007	0.5370	-
5m		-0.0578	0.0012	-2.774	-0.0005	0.5987	-
B-1m		-0.0618	0.0012	-2.967	-0.0008	0.4958	-
全層		-0.0546	0.0033	-2.623	-0.0007	0.5357	-
0m	4月	-0.0476	0.0005	-2.285	0.0003	0.7165	-
5m		-0.0326	0.0077	-1.565	0.0001	0.8513	-
B-1m		-0.0380	0.0029	-1.822	0.0002	0.7645	-
全層		-0.0394	0.0019	-1.891	0.0002	0.7660	-
0m	5月	-0.0250	0.0041	-1.1982	-0.0006	0.4418	-
5m		-0.0282	0.0040	-1.3516	-0.0006	0.5522	-
B-1m		-0.0393	0.0001	-1.8847	-0.0013	0.1494	-
全層		-0.0308	0.0011	-1.4782	-0.0008	0.3284	-
0m	6月	-0.0048	0.6803	-	-0.0048	0.6803	-
5m		-0.0114	0.1589	-	-0.0001	0.9208	-
B-1m		-0.0227	0.0228	-1.0893	-0.0004	0.5232	-
全層		-0.0151	0.0712	-	-0.0003	0.6254	-
0m	7月	-0.0055	0.7929	-	0.0000	0.9802	-
5m		-0.0091	0.4938	-	-0.0001	0.9698	-
B-1m		-0.0545	0.0154	-2.6166	-0.0003	0.9226	-
全層		-0.0230	0.1571	-	-0.0001	0.9462	-
0m	8月	-0.0032	0.7253	-	-0.0021	0.0692	-
5m		-0.0081	0.3584	-	-0.0020	0.0689	-
B-1m		-0.0514	0.0006	-2.4654	-0.0049	0.0010	-0.2331
全層		-0.0209	0.0314	-1.0035	-0.0030	0.0076	-0.1442
0m	9月	-0.0177	0.3881	-	0.0018	0.1944	-
5m		-0.0297	0.1258	-	0.0011	0.4729	-
B-1m		-0.0610	0.0267	-2.927	-0.0010	0.6606	-
全層		-0.0361	0.0914	-	0.0006	0.7025	-
0m	10月	-0.0593	0.0396	-2.845	0.0018	0.1901	-
5m		-0.0661	0.0249	-3.171	0.0018	0.2048	-
B-1m		-0.0959	0.0068	-4.605	0.0007	0.6500	-
全層		-0.0738	0.0171	-3.541	0.0015	0.3141	-
0m	11月	-0.1005	0.0074	-4.824	0.0019	0.2356	-
5m		-0.1006	0.0053	-4.827	0.0012	0.5771	-
B-1m		-0.1311	0.0020	-6.292	0.0003	0.8468	-
全層		-0.1107	0.0040	-5.315	0.0011	0.5100	-
0m	12月	-0.0718	0.0383	-3.449	0.0009	0.5210	-
5m		-0.0740	0.0317	-3.551	0.0006	0.7029	-
B-1m		-0.0983	0.0067	-4.716	0.0003	0.8313	-
全層		-0.0814	0.0199	-3.905	0.0006	0.6702	-
0m	年平均	-0.0422	0.0001	-2.025	-0.0003	0.7139	-
5m		-0.0431	0.0000	-2.069	0.0000	0.9459	-
B-1m		-0.0635	0.0000	-3.050	-0.0011	0.2194	-
全層		-0.0496	0.0000	-2.382	-0.0005	0.5323	-

豊前海の全層平均 DIN 濃度は、年平均値および 6 月、7 月、9 月を除く月平均値で減少傾向を示し、全層年平均 DIN 濃度は 48 年間で 2.38 μ M 減少したと試算された (図 3)。特に 10~1 月の減少幅は 3.44~5.32 μ M と試算され、年平均値の減少幅よりも大きくなった。

層別でも、全層平均 DIN 濃度が減少傾向を示した月のほとんどで各層とも減少傾向を示したが、全層平均値では減少傾向が示されなかった 6 月、7 月、9 月でも、B-1m 層のみ減少傾向を示した。一方全層平均値で減少傾向を示した 8 月は、0m, 5m 層で減少傾向が示されず、B-1m 層のみ減少傾向を示した。

豊前海の DIP 濃度については、年平均値では有意な変動傾向を示さず、増加あるいは減少の傾向は認められなかった (図 4)。全層月平均値では、8 月のみ減少傾向を示し、48 年間で 0.14 μ M 減少したと試算された。層別月平均値でもほとんどの層、月で有意な変動傾向は示されなかったものの、8 月の B-1m 層のみ減少傾向を示した。

考 察

本研究により確認された豊前海の全層年平均水温の上昇幅は 48 年間で 0.89 $^{\circ}$ C であった。1973 年 1 月から 2003 年 12 月までの豊前海における浅海定線調査データを解析した佐藤、神菌²⁾によれば、解析期間の 28 年間で豊前海の水温は約 0.57 $^{\circ}$ C 上昇していると報告されており、本研究によればその後も現在まで上昇傾向が続いていることが確認された。また豊前海に隣接する山口県の周防灘海域でも 1972 年 4 月から 2003 年 3 月までの 30 年間で約 0.71 $^{\circ}$ C 上昇していることが報告されている⁵⁾。いずれも解析期間が異なるため今回得られた上昇幅との差については論じないが、豊前海を含む周防灘およびその周辺海域で水温が長期にわたって上昇傾向にあることは確実である。

この豊前海の水温上昇幅 0.89 $^{\circ}$ C/48 年は、同期間に換算して比較すると気象台から報告されている東シナ海北部や四国・東海沖の水温上昇幅 1.24~1.25 $^{\circ}$ C/100 年¹⁾より

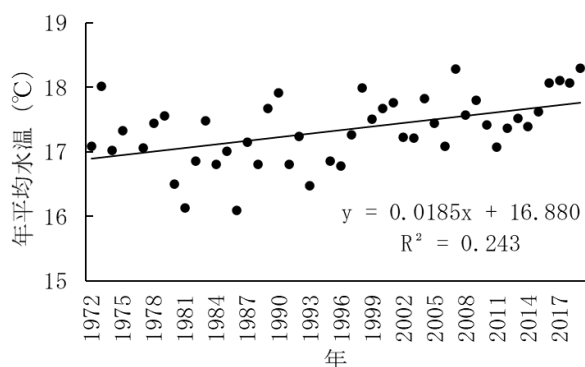


図 2 豊前海全体の全層年平均水温 (1972~2019)

り大きい。福岡の気温の上昇幅は 2.45 $^{\circ}$ C/100 年¹⁾で先述の水温上昇幅より大きいことが報告されており、水深が浅い豊前海は気温の影響を受けやすいため、東シナ海北部や四国・東海沖より水温上昇幅が大きくなったと考えられる。逆に、4 月の Stn. 3 や Stn. 10 等、表層水温のみ上昇傾向を示さない事例は、直前の気象の影響を受けたために生じた可能性があり、豊前海のような浅海域において表層水温のみで変動傾向を評価する際には注意が必要である。

次に月別の水温上昇傾向を見ると、2~4 月および 10~12 月の水温が上昇しており、特に 12 月の水温上昇が顕著であった。福岡の気温は 3~5 月 (春季) と 9~11 月 (秋季) に、東シナ海北部や四国・東海沖の水温は 10~3 月に、それぞれ上昇幅が他の時季より大きいと報告されている¹⁾。すなわち豊前海の 12 月の水温上昇幅が特に大きい理由としては、もともと東シナ海北部や四国・東海沖の水温上昇幅が他の時季より大きいことに加え、9~11 月の気温上昇幅が大きいことため水温が以前より下がりにくくなっている可能性がある。

周辺海域の水塊が豊前海に及ぼす影響としては、1 月に北部のみで水温上昇傾向が確認されていることが挙げられる。北部 (Stn. 4)、沖合 (Stn. 3)、豊前海全体および福岡県の筑前海側で行われる浅海定線調査のうち豊前海に最も近い定点 (図 1 の筑前海 Stn. 9)⁶⁾における 1999 年から 2019 年までの 1 月上旬の水温 (3 層平均水温) を図 5 に示した。これらを比較すると、1 月上旬の水温は概ね

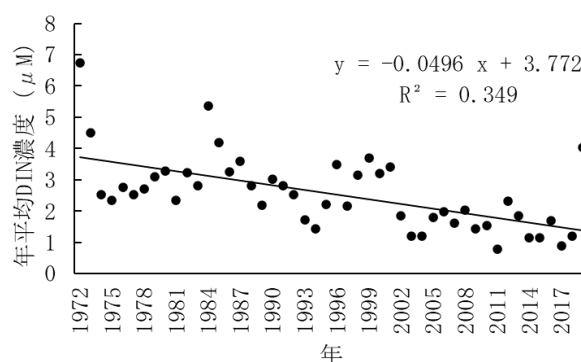


図 3 豊前海全体の全層年平均 DIN 濃度 (1972~2019)

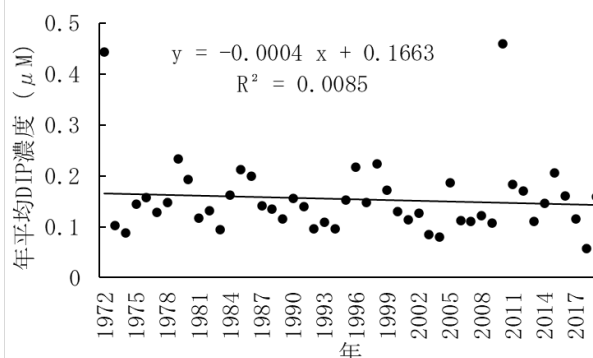


図 4 豊前海全体の全層年平均 DIP 濃度 (1972~2019)

豊前海平均<北部<筑前海 Stn.9 となっており、筑前海 Stn.9 の水温は豊前海平均よりも約3℃高く、北部の水温は豊前海平均よりも約1℃高かった。また伊予灘や豊後水道など南方由来の海水の影響を受けやすいと思われる沖合よりも北部のほうが高水温となる年が多く、1月の水温が北部>沖合となった年では両定点の水温差は2℃を超えることもあった。すなわち、豊前海全体の長期変動傾向とは異なり北部のみで1月に水温の上昇傾向が見られたのは、関門海峡から流入する筑前海由来の高水温の水塊による影響が北部で特に大きくなるのが要因と示唆された。

月別の水温上昇傾向から、豊前海の海況を過去と比較した場合、「秋の水温低下時期が遅れてきている」「冬が早く終わり春の水温上昇時期が早まっている」という傾向が認められた。こうした海況の変化は漁業にも影響を与えている可能性がある。例えばカキ養殖では高水温化に伴う秋季のカキの身入り遅れが示唆されており⁷⁾、実際過去には10月下旬頃であったカキの販売開始時期が、近年では11月中旬以降となっている。また豊前海におけるノリ養殖の採苗時期は、1970年代から2000年ごろまでは10月上旬だったが、2000年台半ばには10月中旬となり、近年では11月1日頃の採苗となっている⁶⁾。採苗方法の違いによる差はあるものの、ノリの採苗時期の変化は、秋の水温低下時期が遅れていることによる影響と考えられる。これらの他にも、水温が有意に上昇した季節に関連する代表的な魚種として、春のコウイカや、秋のガザミ、サワラ、冬のカレイ類などの来遊や漁獲にも影響が及んでいる可能性が考えられる。水温上昇と水産業との関連については今後、市場への魚種別水揚げ状況や、各漁業種の操業実態、特に操業位置が固定されている桁網に着目した魚種別の来遊状況を解析する等の方法で、より詳細に影響を検討する必要があるだろう。

栄養塩のうち、DIN 濃度については減少傾向が認められた一方、DIP 濃度については減少傾向が認められなかった。DIN 濃度については夏季を除いて減少傾向が認められ、特に底層では一年を通じて減少傾向が認められた。このこと

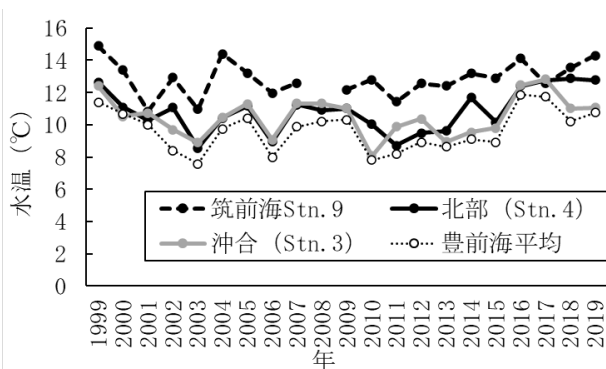


図5 1月の水温比較 (豊前海, 筑前海 Stn.9)

は特措法により水質改善が着実に進んできたことを示す一方、同じ瀬戸内海の播磨灘等で報告される DIN の減少によるノリ色落ち被害³⁾など、豊前海でもノリ養殖への影響が懸念されることを示している。豊前海区のノリ養殖経営体数は、1974年には700経営体を上回っていたが⁷⁾、現在は数経営体まで減少している。豊前海では特にノリ養殖の最盛期である10~1月にDIN濃度の減少幅が大きいことから、DINの減少が海区内のノリ養殖業の衰退につながった要因の一つである可能性がある。またDINが減少傾向にあることで、海域の基礎生産を担う珪藻類などの植物プランクトンも減少傾向にある可能性がある。カキの身入りとクロロフィル濃度との相関が中川ら⁸⁾によって示唆されているが、本研究でDIN濃度の減少幅が特に大きかった10~1月はカキの出荷時期と一致することから、DINの減少が植物プランクトンの減少につながれば、出荷時期のカキの身入りに悪影響を及ぼす可能性もある。今後この時期の植物プランクトン量の増減、あるいはクロロフィル濃度の長期変動傾向についても解析する必要がある。

一例として8月の底層DIN濃度を図6に示したとおり、本研究において6~9月のDIN濃度が底層のみで減少傾向を示した要因は次のとおりと考えられる。すなわち、夏季は成層が発達し海水の上下混合が起こりにくいため、夏季の底層DINの供給源は陸域由来よりも底質からの溶出が主体と考えられる。底質中の有機物量は過去と比較して減少しており底質が改善したことが報告されている³⁾ことから、夏季の底層DINの主供給源である底質が改善されたことにより底質からの溶出が減少傾向となり、6~9月の底層DIN濃度が減少したと考えられる。底質改善による栄養塩溶出量の減少は、8月の底層でDIP濃度も減少傾向を示したことから示唆される。一方で、覆砂によって窒素溶出速度が大きく低下することが実験的に確かめられていることから⁹⁻¹¹⁾、底質改善を目的として豊前海で行われてきた覆砂の効果により夏季の底質からの栄養塩溶出量が減少した可能性もある。

以上述べてきたように、豊前海の長期環境変動としては、

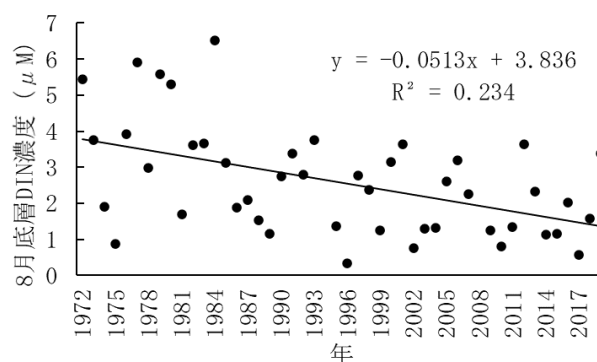


図6 8月の平均底層DIN濃度

水温の長期的な上昇傾向と、DIN 濃度の長期的な減少傾向が挙げられる。長期的な水温の上昇傾向については地球規模での気候変動と関連すると思われるため人為的な制御は難しいものの、昨今全国各地で導入され豊前海でも試験を開始した ICT プイのようなリアルタイムの海況観測システムを整備し、漁業関係者が水温などの海況情報にアクセスしやすい環境を整備することで、実際の海況に合わせて効率的な操業や養殖管理ができる体制をとることが有効と考えられる。また DIN 濃度の長期的な減少傾向については、現状を関係機関で共有するとともに、水産部局からは特措法の改正に伴い漁業生産の維持増大につながる提案を行っていく必要があると考えられる。提案の一例としては、赤潮発生のリスクが少なく DIN 濃度の減少幅が大きい秋～冬季に、沿海下水処理場での栄養塩管理運転を行い海域に栄養塩を供給する試みなど¹²⁾が挙げられるだろう。

文 献

- 1) 福岡管区气象台. 九州・山口県の気候変動監視レポート2020.
- 2) 佐藤利幸, 神菌真人. 豊前海の水温・塩分変動と漁獲量の変動. 福岡県水産海洋技術センター研究報告 2006 ; 16 : 121-127.
- 3) 瀬戸内海における今後の環境保全の方策の在り方について (答申). 中央環境審議会, 東京, 2021.
- 4) 神菌真人. 周防灘西部の海洋観測について. 昭和58年度福岡県豊前水産試験場研究業務報告 1985 : 239-244.
- 5) 和西昭仁. 山口県周防灘海域における最近 30 年間の水温変動. 山口県水産研究センター研究報告 2004 ; 2 : 1-6.
- 6) 平成11年度～令和元年度福岡県水産海洋技術センター事業報告. 福岡県水産海洋技術センター, 福岡. 2001-2021.
- 7) 第21次福岡農林水産統計年報水産編. 九州農政局福岡統計情報事務所, 福岡. 1974.
- 8) 中川浩一, 俵積田貴彦, 中村優太, 近年の「豊前海一粒かき」の成育状況と漁場環境との関係. 福岡県水産海洋技術センター研究報告 2009 ; 19 : 109-114.
- 9) 神菌真人, 江藤拓也, 上妻智行. 覆砂による豊前海の底質改善効果. 福岡県水産海洋技術センター研究報告 1994 ; 2 : 129-134.
- 10) 江藤拓也, 中川浩一, 佐藤博之. 豊前浅海域における覆砂による底質改善効果. 福岡県水産海洋技術センター研究報告 1999 ; 9 : 61-65.
- 11) 江藤拓也, 佐藤利幸, 長本篤, 上妻智行. 豊前海沖合域における覆砂による底質改善効果. 福岡県水産海洋技術センター研究報告2006 ; 16 : 115-120.
- 12) 水産研究・教育機構瀬戸内海区水産研究所他. ノリ, ワカメ養殖場における栄養塩供給技術実証試験事例集. 国立研究開発法人水産研究・教育機構 瀬戸内海区水産研究所, 広島, 2018.