

愛知県内の海域，河川及び湖沼の水温変動傾向と水質データの解析 ～地球温暖化の影響に関する考察～

神戸 浩仲

愛知県内の海域，河川及び湖沼の水温の長期変動傾向について，1981年度から2018年度の公共用水域水質常時監視調査結果を解析したところ，海域及び河川において有意な水温上昇が確認された。県内海域における水域毎の特徴としては，沿岸部に近い地点で水温上昇率がより大きい傾向が見られた。海面水温の季節別の変動では秋季の水温上昇率が最も大きく，下層においても同様に秋季の水温上昇率が最も大きかった。

また，地球温暖化の影響により懸念される海洋酸性化や貧酸素化について，県内海域の溶存酸素量及び水素イオン濃度の推移を解析したところ，溶存酸素量の減少や海水の酸性化の傾向は見られなかった。

キーワード 愛知県，公共用水域，海域，水温，地球温暖化

1 はじめに

愛知県では，公共用水域（河川，湖沼，海域）の水質汚濁の状況を把握するため，水質汚濁防止法に基づき，公共用水域水質常時監視調査を毎年度実施している。この調査は40年以上継続して行われており，長期間に渡る膨大な水環境データが蓄積されている。

1950～1960年代の高度経済成長期に最も深刻化した水質汚濁は，1970年に制定された水質汚濁防止法に基づく規制等の施策により改善し，環境基準が定められている生活環境項目については，河川のBOD濃度を始めとして改善傾向にある¹⁾。

一方で，近年は地球温暖化による様々な環境影響が顕在化しており，水質環境への影響についても懸念されている。海水の熱容量は大気の約1,000倍といわれており²⁾，海水温の上昇には膨大な熱量が必要であるが，IPCCの報告では，1971年から2010年の間に蓄積されたエネルギーの90%以上が海洋に蓄積されており，海洋表層（0～700m）で水温が上昇したことはほぼ確実であるとしている³⁾。そして，海水温の上昇は，海面水位の上昇，水域の生態系の変化，台風等の極端な気象現象増加の要因の一つとして考えられている。

本県の公共用水域水質常時監視調査では，環境基準が定められている健康項目や生活環境項目以外に，水質の基礎データとなる水温等についても測定している。

本報では，本県がこれまでに実施した公共用水域水質調査結果を基に水温データの解析を行い，本県の海

域，河川，湖沼における水温の長期変動傾向を把握することを目的とした。併せて，水温変化が溶存酸素量に及ぼす影響や，海洋酸性化の指標となる水素イオン濃度の変動について考察した。

2 方法

2.1 使用データ

本県が実施した以下の公共用水域水質常時監視調査結果のうち，通年調査のデータを使用した。通年調査は，毎月1回（地点によっては月に複数回）採水し，測定を行う調査である。

○解析対象期間：1981年4月～2019年3月

（地点により期間が異なる場合がある）

○調査地点：海域41地点，河川108地点，湖沼1地点

（海域は中層，下層データがない地点がある）

なお，海域下層については，特定の季節のみ採水している地点は除外した。また，同一日に2回又は3回採水している場合については，採水時刻による影響を考慮し，1回目に採水した検体データのみを使用した。

2.2 統計手法

長期変動傾向を算出するための統計手法は，以下の二通りの手法を用いた。

第一は，海域，河川及び湖沼の年平均値から，各水域毎に最小二乗法による単回帰直線を求め，1981～1990年度と2009～2018年度の各10年間の年平均値に

ついて Welch の t 検定 (両側, 非等分散条件) を行い, 水温の変動傾向の有意差の有無を確認した.

第二は, 各年度の月毎の測定値について, ダミー変数を用いた重回帰分析⁴⁾ を行い, 採水月による影響を取り除いた水温の変動傾向を推定した.

いずれの分析も有意水準は 0.05 とした. なお, 季節別の変動傾向や, その他の溶存酸素量や水素イオン濃度等, 水温以外の水質データの変動傾向については, 単回帰分析により変動係数を算出した.

3 結果と考察

3.1 年平均水温の変動傾向

海域, 河川, 湖沼の各水域について, 年平均水温の推移を図 1~3 に示す. 特に記載のない場合は, 水温の年平均値は年度毎の平均値として算出している. なお, 視覚的に推移を把握しやすいように 3 年間の移動平均の推移を併記した.

海域については表層, 中層において有意な水温上昇 ($p < 0.0001$) が見られ, いずれも 10 年間あたり約 0.4°C の水温上昇が確認された. 下層については, 現在年間を通じて測定を行っている 9 地点のうち 6 地点が 2012 年度以降に測定を開始しているため, データの連続性の面で信頼度が低いと考えられた. このため, 1981 年度から調査を実施している 2 地点 (N-8, A-5) の推移について確認した結果, それぞれ有意な水温上昇 ($p < 0.05$) が認められた (図 4, 5).

河川についても有意な水温上昇 ($p < 0.05$) が見られた. 一方, 湖沼についてはほぼ横ばいとなった. この要因として, 湖沼については, 年度が進むにつれ採水時刻が早まっており, その影響により経年変化による水温上昇が抑えられている可能性が推察された. なお, 海域及び河川の採水時刻に顕著な変動傾向は見られな

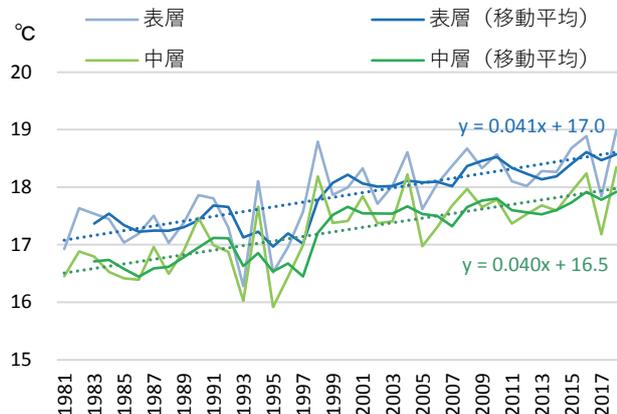


図 1 海域年平均水温の推移 (採水層別)

かった (単回帰直線の傾き換算で, 調査期間中で 30 分未満の遅れ).

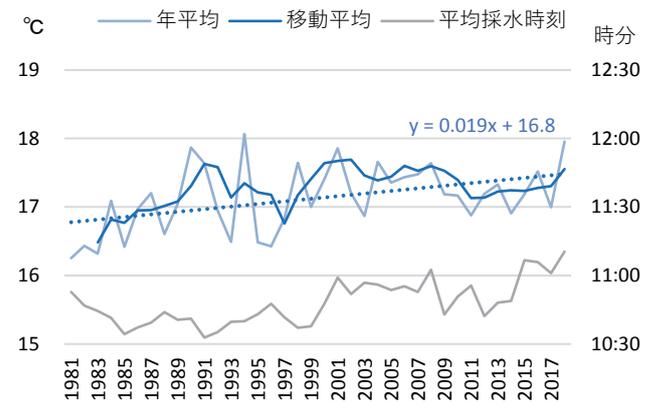


図 2 河川年平均水温及び平均採水時刻の推移

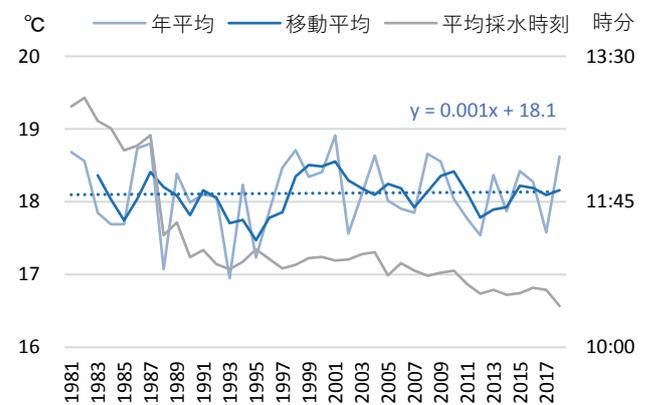


図 3 湖沼年平均水温及び平均採水時刻の推移

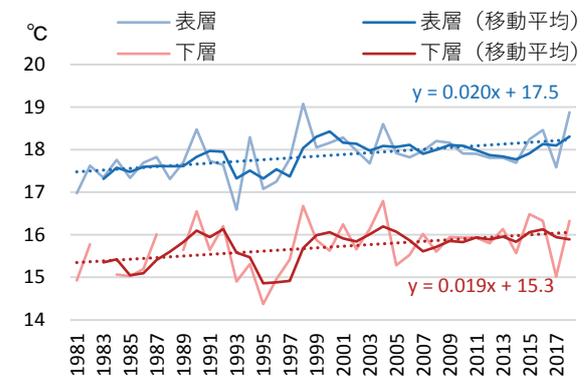


図 4 N-8 地点の年平均水温の推移

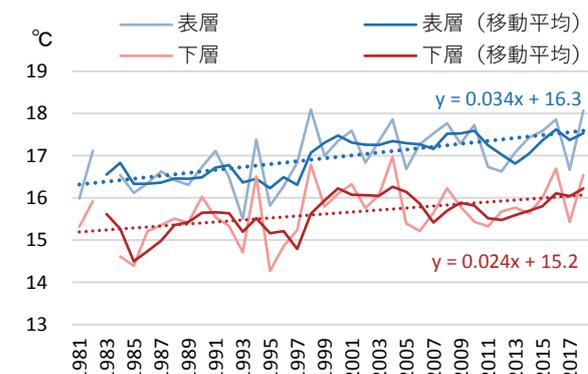


図 5 A-5 地点の年平均水温の推移

次に、海域表層の水温と気温の推移を図6に示す。なお、気温については、気象庁が所管する気象観測所のうち、名古屋観測所の測定値を使用しており、気象庁が公開している月平均気温を年度単位で平均した気温を表示している。

年平均水温は、年平均気温の上昇・低下の傾向と同様の挙動を示しており、強い相関が見られた($R=0.873$)。また、解析対象期間においては、水温の方が気温より上昇傾向がやや大きかった。

世界の海面水温は100年当たり 0.55°C 上昇しており、日本近海に限れば平均海面温度(年平均)は2019年までの100年間で 1.14°C 上昇している^{5),6)}。これに対し、愛知県海域の表層では水温が10年あたり 0.4°C 上昇しており、海洋全体と比べて水温上昇率は大きくなっている。これは、瀬戸内海や大阪湾といった日本国内の閉鎖性水域における水温上昇よりも大きかった⁷⁾。

この理由として、閉鎖性水域である伊勢湾は外海との海水交換が少ないことに加え、湾の水深が浅く⁸⁾、湾内の海水の熱容量が小さいことなどが原因として推察される。

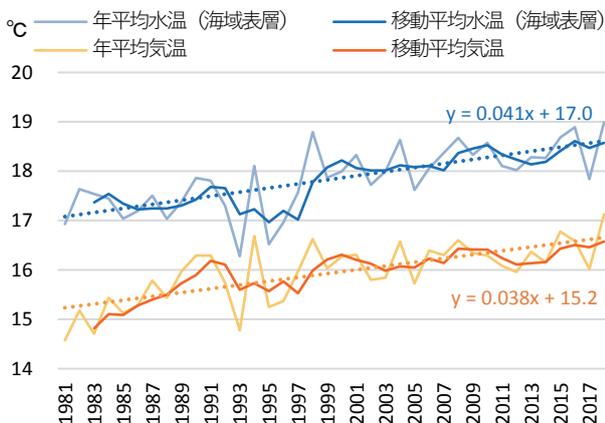


図6 年平均水温(海域表層)と年平均気温の推移

3.2 採水時刻による水温影響

前述したとおり、湖沼については公共用水域水質常時監視調査の採水時刻が早まっている傾向があり、その影響で経年変化による水温上昇が低く見積もられている可能性が推察された。

そこで、水温の経時変化を推計するため、本県が2013年度まで運用していた水質自動観測所の測定データを解析し、1時間当たりの水温変化量を算出した。水質自動観測所では、毎時水温等の水質基礎データを測定しており、今回は日毎の9時から13時までの水温変化量の年平均値を算出し、その値を時間数で除し、1時

間当たりの水温変化量とした。湖沼については油ヶ淵碧南水質自動観測所の一年間分のデータにより算定した。観測所の位置図は図7のとおりである。

その結果、1時間採水時刻が遅くなると、湖沼では約 0.16°C 水温が上昇すると推計された。この推計値により、採水時刻を全て11時として補正した湖沼の年平均水温の推移を図8に示す。補正後の水温についてt検定を行ったところ、こちらも有意差は見られなかった。 $(p=0.34)$

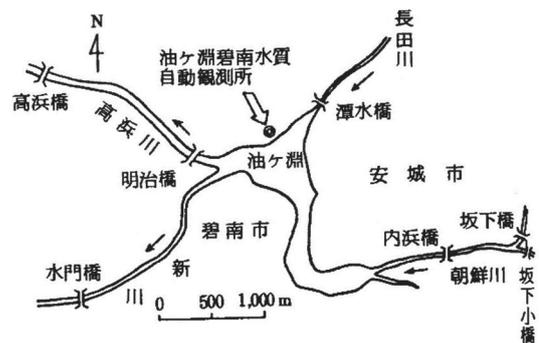


図7 水質自動観測所の位置図

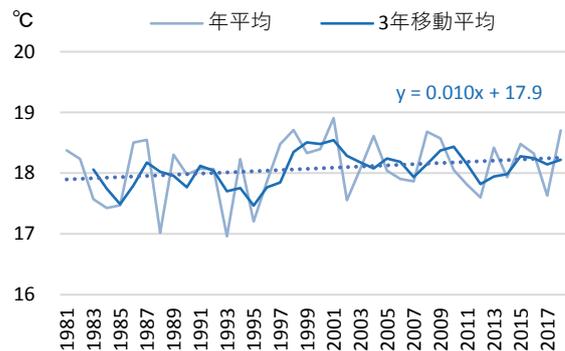


図8 採水時刻補正後の湖沼年平均水温

3.3 ダミー変数を用いた重回帰分析による変動傾向

海域、河川、湖沼の水温を年平均値としてではなく、月別のデータとして回帰分析するには、季節変動の影響を考慮して変化傾向を推定する必要がある。そこで、今回はダミー変数を用いた重回帰分析を行う統計手法を採用した⁴⁾。この方法では、各月の季節効果を推定するため、時系列データが該当する月は1、それ以外の月は0として月成分の係数を算出する。なお、毎年度の季節効果の総和をゼロとするため、3月は全ての月の季節効果を-1に設定した(表1)。

この重回帰分析法により、海域表層、河川、湖沼の全地点の月平均値から回帰式を求めた結果は、表2のとおりである。

表1 ダミー変数の設定値

測定年月	目的変数	説明変数	説明変数												
			傾き効果	季節効果											
				4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	
1981/04	Y ₁	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1981/05	Y ₂	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1981/06	Y ₃	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0		
1981/07	Y ₄	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		
1981/08	Y ₅	5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0		
1981/09	Y ₆	6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0		
1981/10	Y ₇	7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		
1981/11	Y ₈	8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0		
1981/12	Y ₉	9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0		
1982/01	Y ₁₀	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
1982/02	Y ₁₁	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
1982/03	Y ₁₂	12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1		
1982/04	Y ₁₃	13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
.		
.		
2019/03	Y ₄₅₆	456	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1		

表2 月平均水温の重回帰分析結果

説明変数	偏回帰係数		
	海域	河川	湖沼
傾き (°C/月)	0.0035	0.0016	** -0.0001
切片 (°C)	17.0	16.8	18.1
4月 (°C)	-4.6	-1.7	-1.2
5月 (°C)	** 0.3	2.3	2.8
6月 (°C)	3.6	5.0	5.8
7月 (°C)	7.1	7.9	9.2
8月 (°C)	10.0	10.0	11.1
9月 (°C)	9.2	7.9	8.2
10月 (°C)	5.1	3.2	3.4
11月 (°C)	0.9	-1.8	-2.3
12月 (°C)	-4.3	-6.4	-7.5
1月 (°C)	-8.5	-9.7	-11.1
2月 (°C)	-9.9	-9.4	-10.7
3月 (°C) *	(-8.9)	(-7.3)	(-7.7)

* なし : p<0.01, * : 0.01<p<0.05, ** : 0.05<p

※3月の偏回帰係数は、4月～2月までの係数との総和がゼロとなる数値

重回帰分析の結果、海域(表層)では約0.0035°C/月、河川では約0.0016°C/月の有意な水温上昇が確認された(p<0.0001)。これを年当たりに換算すると、それぞれ約0.042°C/年、約0.019°C/年の水温上昇となり、年平均値の単回帰直線から算出した水温上昇の値とほぼ一致した。湖沼については、有意な水温変動は確認できなかった。

なお、海域における5月のp値が有意水準の5%を上回っているが、これは5月の水温が年平均水温に近いいため、重回帰分析における帰無仮説、すなわち係数が0である可能性を排除できないことを示している。

3.4 地点別の水温上昇率

次に、各海域の詳細な水温変化傾向を把握するため、年平均値の推移、ダミー変数を用いた重回帰分析の両手法により地点別の水温上昇率を算定した。その結果は表3のとおりである。

解析を行った20地点全てにおいて、年平均値の推移、ダミー変数を用いた重回帰分析のいずれの結果も水温上昇が確認された。信頼度については、年平均値の推移では、N-9地点のみ有意水準5%の範囲外(p=0.057)となったが、それ以外は全ての地点で有意(p<0.05)であった。重回帰分析の結果では、水温上昇率(傾き)の偏回帰係数について全ての地点で有意差が確認された。水域毎の特徴として、沿岸部に近い地点では水温上昇率がより大きい傾向が見られた。また、伊勢湾では河口部に近い海域で水温上昇率が大きく、沖合では上昇率がやや小さかったのに対し、三河湾では全域で水温上昇率が大きかった(図9)。

表3 地点別の水温上昇率

地名	水温上昇率		
	年平均値	偏回帰係数	
	(°C/年)	(°C/月)	(°C/年)
N1	0.100	0.0084	0.101
N2	0.036	0.0030	0.036
N3	0.028	0.0024	0.028
N4	0.026	0.0022	0.026
N5	* 0.024	0.0022	0.026
N6	0.033	0.0027	0.033
N7	* 0.022	0.0019	0.023
N8	* 0.020	0.0018	0.022
N9	** 0.018	0.0016	0.019
K2	0.052	0.0043	0.052
K3	0.079	0.0066	0.079
K4	0.051	0.0042	0.051
K5	0.041	0.0034	0.041
K6	0.035	0.0029	0.035
A4	0.036	0.0031	0.038
A5	0.034	0.0030	0.036
A6	0.041	0.0034	0.040
A7	0.033	0.0029	0.035
A8	0.033	0.0028	0.033
A9	0.035	0.0030	0.036

* なし : $p < 0.01$, * : $0.01 < p < 0.05$, ** : $0.05 < p < 0.10$

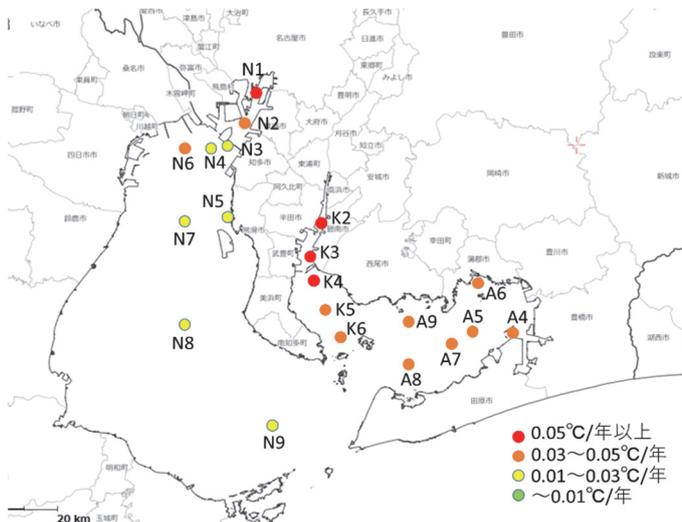


図9 海域（表層）地点別水温上昇率

3.5 季節別の変動傾向

次に、海域の季節別の水温変動傾向について調査した。表層については全地点、下層についてはA-5地点のデータを用いた。

その結果、図10のとおり、表層では全ての季節で有意な水温上昇が見られ、秋季は特に顕著であった。また、図11のとおり、下層については春季、夏季、冬季

の水温がほぼ横ばいである一方、秋季は水温上昇が顕著であった。秋季に水温上昇が顕著である傾向は、愛知県水産試験場が設置する海況自動観測ブイのデータを利用した解析結果と同様であった⁹⁾。

一般的に、夏季は表層水が温められることで下層より水温が高くなり、下層の低温水塊との密度差により鉛直混合が生じにくくなる。その後、秋季から冬季にかけて表層水が冷却され、下層との密度差が解消することで、表層と下層の水塊が混合しやすい状況が発生する^{10), 11)}。

愛知県の海域においても同様に、夏季は鉛直混合が起こりにくいため、下層は表層の水温上昇の影響を受けにくく、夏季から秋季にかけての表層水温の上昇の影響は、鉛直混合が活発になる秋季の下層における顕著な水温上昇に現れていると推察される。表4は、1981～1990年度の10年間と2009～2018年度の10年間の水温及び気温の月別平均値を比較したものである。表中の水温・気温はともに、採水時に現地で測定した値を用いた。解析の結果、近年は一年間のうち表層水温より気温の方が高い期間が長くなっている傾向が見られた。一日の中で気温と水温の関係は変化するものの、通年では従来に比べて表層水が冷却される期間が短くなっていると考えられた。

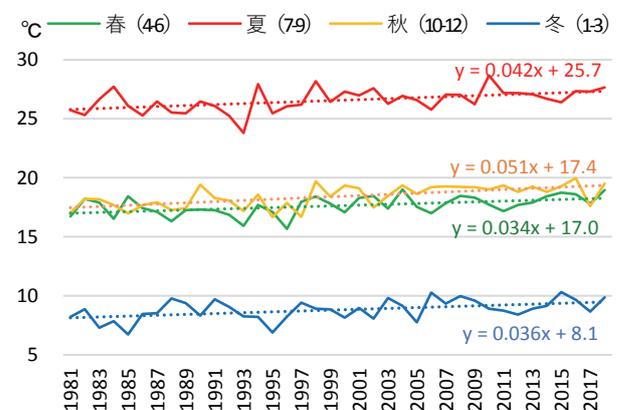


図10 海域表層（全地点）季節別経年変化

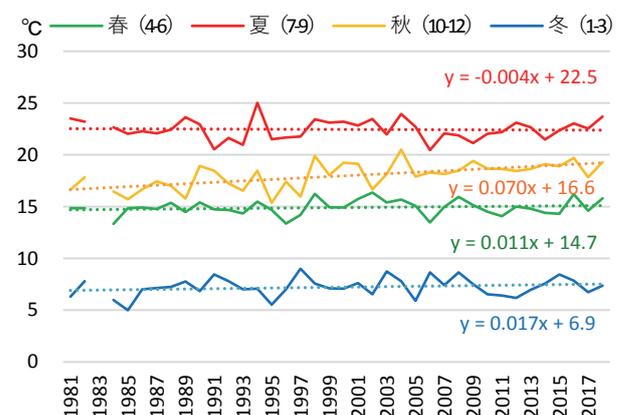


図11 海域下層（A-5）季節別経年変化

表 4 伊勢湾 (N-8 表層) における月別平均水温・気温

月	1981-1990		2009-2018	
	水温	気温	水温	気温
1	10.6	6.4	10.9	9.2
2	8.7	6.3	8.9	7.5
3	8.8	7.8	9.3	9.7
4	12.4	13.5	12.3	14.3
5	17.0	17.6	17.6	19.2
6	20.8	21.8	20.8	23.1
7	23.5	24.2	24.6	27.5
8	26.8	27.5	27.7	31.0
9	27.1	26.6	26.5	28.0
10	22.5	21.7	23.1	23.2
11	18.9	15.9	19.3	17.2
12	14.1	9.6	15.5	11.8

3.6 溶存酸素量 (DO) の推移

海域における水温上昇が溶存酸素量 (DO) に及ぼす影響について調べるため、DO と水温の相関について解析した。水温が高くなると酸素の溶解度が低下するとともに、生物活動の活発化により酸素消費速度が増加するため、実際の溶存酸素量も減少するのが通常の挙動であると考えられる(ただし、日間の変動としては、水温が上昇する昼間に植物の光合成が活発化するため、DO は増加する.)。また、日本周辺の一部海域では、深層水の DO が低下しており、その要因として冬季の海面冷却の低下に伴う深海への酸素供給量の減少が原因であると推測されている¹²⁾。

図 12 は、N-8 (表層) の溶存酸素量 (DO) と水温の散布図で、水温が高くなれば DO は低くなる相関性が見られる (左図)。また、植物プランクトンの大量発生時には DO の過飽和が生じることがあるため、クロロフィル濃度が 20mg/m³ 以上のサンプルを除外したところ、より強い相関性を確認できた (右図)。

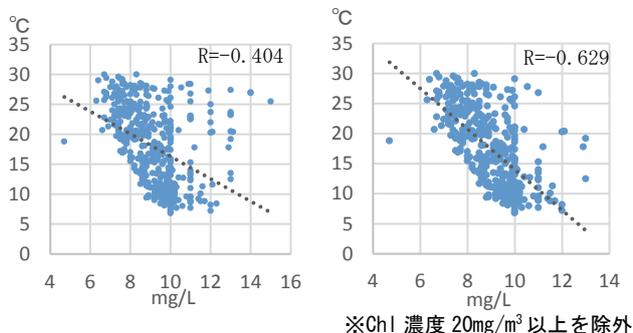


図 12 N-8 (表層) DO と水温の相関

次に、図 13、14 は海域表層及び下層 DO の年平均値の推移を示したもののだが、いずれも DO の低下は見られなかった。溶存酸素量は、大気からの酸素の取り込み

や、有機汚濁物質の流入、植物プランクトンの発生状況など複合的な要素が影響を及ぼしており、総合的に溶存酸素量が増加する要素が強く影響したと考えられる。具体的な例として、図 15 は海域表層の全窒素及び全りん濃度の年平均値の推移を示しているが、いずれも有意な減少傾向が見られ、有機物分解による DO の消費量が減少したことが DO 増加の一因であると考えられる。

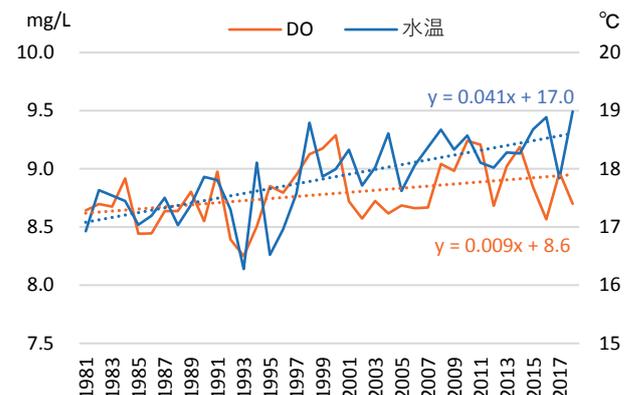


図 13 海域表層 (全地点) の DO と水温の推移

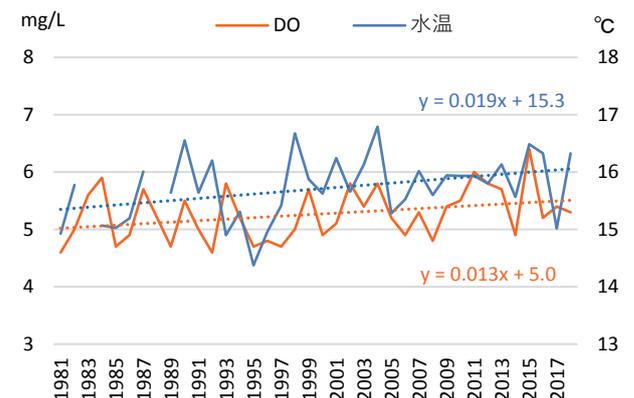


図 14 海域下層 (N-8) の DO と水温の推移

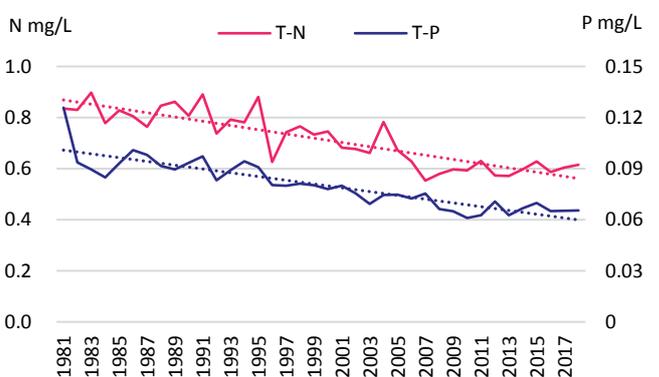


図 15 海域表層 (全地点) の T-N、T-P 推移

3.7 pHの推移から見た海洋酸性化の状況

次に、本県海域のpHの推移について解析した。

海洋は排出された人為起源の二酸化炭素の約30%を吸収し、地球温暖化の進行を遅らせているが、その一方で海洋酸性化を引き起こしているとされている³⁾。海洋の酸性化は、海中の生態系に大きな影響を及ぼすともいわれている。具体例として、貝類やサンゴなどは、海水中に含まれるカルシウムイオンと炭酸イオンから水に溶けにくい炭酸カルシウムの骨格や殻を作っているが、海洋が酸性化すると炭酸カルシウムの形成がしづらくなる¹³⁾。

図16に海域全地点(表層)のpH年平均値の推移を、図17にN-8地点の表層及び下層のpH年平均値の推移を示す。海域全地点の年平均値からは酸性化の傾向は見られなかった。また、N-8の表層及び下層においても同様であった。

この要因について、3.6で示した溶存酸素量の増加傾向を踏まえて考察した。図18は、DOとpHの推移をグラフ化したもの(一部期間)だが、その変動には相関性が見られる(R=0.51)。溶存酸素量は、植物プランクトンの光合成により増加し、呼吸や好気性微生物の有機物分解により減少する。呼吸や有機物分解の際には酸素を消費するとともに二酸化炭素を排出するため、水中の水素イオン濃度が上昇する(pHが低下する)方向に反応が進むと考えられる。逆に言えば、近年の栄養塩や有機物の海域への流入減少により、プランクトンの大量発生や好気性分解が減少し、水素イオン濃度の低下(pH上昇)の効果が強く現れた可能性が考えられた。実際に、海域全地点(表層)におけるクロロフィルa濃度の年平均値の経年変化は図19のとおりで、有意な減少傾向(p<0.01)が確認された。

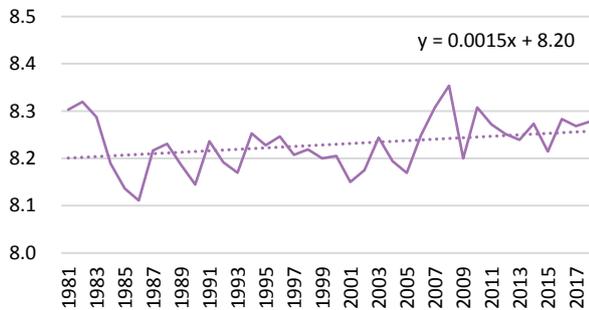


図16 海域表層(全地点)のpH年平均値推移

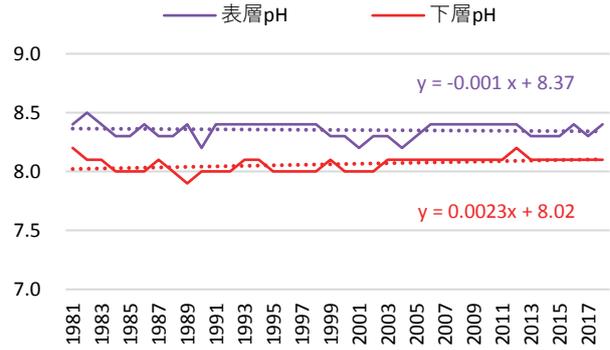


図17 N-8の表層及び下層のpH推移

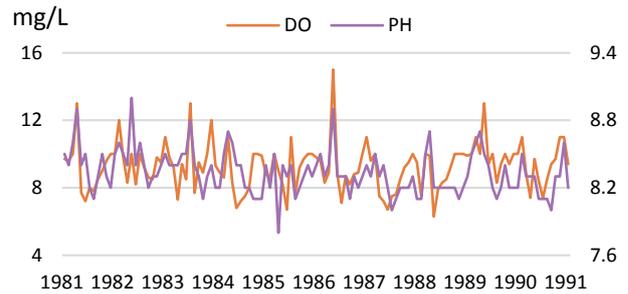


図18 N-8のDOとpHの推移

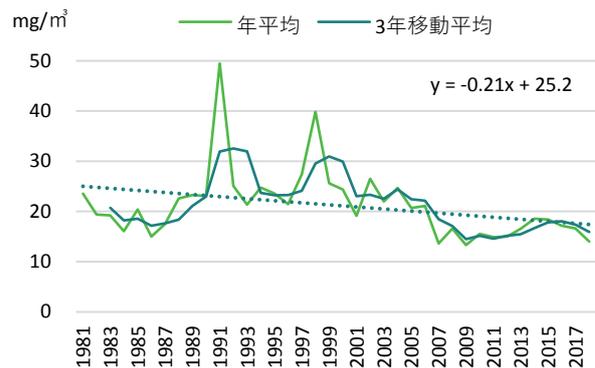


図19 クロロフィルa濃度年平均値の推移

4 まとめ

海域、河川、湖沼の各水域について、年平均水温の推移やダミー変数を用いた重回帰分析により水温変動傾向を解析した結果、海域については表層及び中層で10年あたり約0.4℃の水温上昇、河川については10年あたり約0.2℃の水温上昇が確認された。湖沼については、採水時刻が水温に及ぼす影響を補正した結果、10年あたり0.1℃の水温上昇と推定されたが、有意差は見られなかった。

年平均水温は、年平均気温の推移と同様の変動傾向を示しており、強い相関関係があった。

県内海域における水域毎の特徴として、沿岸部に近い地点で水温上昇率がより大きい傾向が見られた。ま

た、伊勢湾では、河口部に近い海域で水温上昇率が大きく、沖合では上昇率がやや小さかったのに対し、三河湾では全域で水温上昇率が大きかった。

海域の季節別の水温変動傾向について、表層では全ての季節で水温上昇が見られ、秋季は顕著であった。また、下層については秋季の水温上昇が顕著であった。

近年報告されている地球温暖化による海洋酸性化の影響等について調査するため、溶存酸素量や pH の推移を分析したところ、いずれも低下傾向は見られなかった。

今後は河川の詳細なデータ解析を進めたい。

謝 辞

本研究で利用したデータは、これまでに公共用水域水質常時監視調査に携わった多くの方々の御尽力により積み重ねられてきたものです。貴重なデータの蓄積に貢献された方々にこの場を借りて感謝申し上げます。

文 献

- 1) 愛知県環境局：公共用水域及び地下水の水質調査結果, <https://www.pref.aichi.jp/soshiki/mizutaiki/0000063715.html> (2021. 2. 12)
- 2) 日本海洋学会：海の温暖化～変わりゆく海と人間活動の影響, 朝倉書店 (2017)
- 3) IPCC: 第5次評価報告書, 第1作業部会報告書(2013)
- 4) 二宮勝幸ら：東京湾西部海域における表層水温のトレンド-ダミー変数を用いた重回帰分析による推定-, 横浜市環境科学研究所所報第34号(2010)
- 5) 気象庁：海面水温の長期変化傾向（全球平均）, https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a_1/glb_warm/glb_warm.html (2021. 2. 12)
- 6) 気象庁：海面水温の長期変化傾向（日本近海）, https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html (2021. 2. 12)
- 7) 阿保勝之ら：瀬戸内海における栄養塩濃度等の水質変化とその要因, 沿岸海洋研究第55巻第2号, 101-111 (2018)
- 8) 伊勢湾総合対策協議会：陸地に囲まれた海・伊勢湾, <http://kankyojoho.pref.aichi.jp/mizujunkan/06siryo/pdf/isewan.pdf> (2021. 2. 12)
- 9) ニノ方圭介ら：海況自動観測ブイデータを利用した三河湾東部（渥美湾）における水温、塩分、溶存酸素の変動の解析：愛知水試研報 22, 22-28 (2017)
- 10) 笥 茂穂, 藤原建紀, 山田浩且：伊勢湾における密度・流動構造の季節変化, 海岸工学論文集第49巻 (2002)
- 11) 関口秀夫：伊勢湾の環境保全のための総合調査マニュアル, 三重県 (2003)
- 12) 荒巻能史：日本海底層の無酸素化の懸念—地球温暖化との関係, Ocean Newsletter, 海洋政策研究所 (2018)
- 13) 海洋酸性化研究の動向：科学技術動向 2010年2月号, 20-29 (2010)