

京都府沿岸域等における水温上昇の検討

田口 寛 辻 厚男*

A Trend Analysis of Water Temperature on the Coast of Kyoto Prefecture

Hiroshi TAGUCHI Atsuo TSUJI*

地球温暖化による海域の水温上昇が報告されている。しかし、沿岸域での水温上昇の報告が少ない。そこで、水質汚濁防止法に基づく常時監視で蓄積されてきた京都府沿岸域の水温データを解析した。山陰海岸の2地点は、気温の増加傾向はなく、水温が0.036～0.046℃/年の増加がみられた。若狭湾の3地点は、鷺崎沖が山陰海岸と同じく気温上昇がみられなかったが、他の2地点は気温、水温とも増加傾向0.038～0.059℃/年を示した。閉鎖性の宮津湾では、2地点とも増加傾向を示さず、舞鶴湾では、東湾に位置する2地点で、気温と水深10mの水温が0.025～0.061℃/年の増加がみられた。

キーワード：沿岸海域、水温、重回帰分析、ダミー変数

key words：Coastal marines, Water Temperature, Multiple regression analysis, Dummy variable

はじめに

2007年に発表された気候変動に関する政府間パネル第4次評価報告書によると、過去100年で世界平均気温が0.74℃上昇し、近年50年ではその2倍の上昇率であり、今後は10年あたり0.2℃上昇することが予測された^{*1}。一方、文部科学省等によると、我が国では、過去100年で1.1℃の上昇があり、今後も世界平均を上回る上昇率であること、及び、降雨量の変動幅が増加することが報告された¹⁾。また、環境省²⁾は、気温が1℃上昇すると、水温が0.84～0.89℃上昇すると試算しており、水温上昇による水質変化や生態系の悪化が懸念されている。陸水の河川水では、二宮ら³⁾が東京湾流入河川、福永ら⁴⁾が淀川水系で水温上昇がみられることを報告しており、温暖化の影響以外に都市活動による影響もあるとされている。しかし、人為的影響が大きい由良川においても、都市域と同程度の上昇率の水温上昇が生じていることを既に報告した⁵⁾。一方、気象庁は、日本周辺海域の水温も上昇しており、特に、日本海側での上昇幅が大きいことを示した^{*2}。しかし、それは、沿岸から離れた地域であり、沿岸域では、安藤ら⁶⁾による東京湾、飯村ら⁷⁾による房総半島等報告が少ない。

地方自治体では、昭和50年代から、水質汚濁防止法に基づく常時監視で沿岸に近い海域や湾での気温、水温等のデータが蓄積されている。しかし、そのデータは地点ごとに頻度等が異なり、そのような連続していないデータの統計計算法が確立されていなかった。しかし、二宮ら⁸⁾が、不連続データの場合のダミー変数を用いた重回

(平成23年7月31日受理)

*現在、中丹西保健所

*1 http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/ipcc_ar4_wg1_spm_Jpn.pdf

*2 http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/maizuru/maizuru_warm/maizuru_warm.html#2

帰分析法を報告した。そこで、京都府沿岸域の海水温の経年変化についてそれらの手法を中心に検討したところ、若干の知見が得られたので報告する。

方法

1. 調査方法

解析対象とした、若狭湾3地点、山陰海岸2地点、閉鎖性の湾である宮津湾2地点、舞鶴湾4地点を図1に示した。採水水深は、若狭湾、山陰海岸は0.5m、2mの2点、他の地点は、10mを加え3点であった。独立行政法人国立環境研究所のデータベース及び京都府公共用水域及び地下水の水質測定結果から、1981年から2009年までの対象地点の気温、水温や溶存酸素のデータを抽出した。陸地の気温として、気象庁の観測所に近い地点の採水時刻に相当するその観測所の気温データを抽出した。

なお、気温はすべてアルコールの棒状温度計を使用、水温は、バンドーン採水器で採水し、チューブからビーカーに採った後、測定した。測定方法は、舞鶴湾では棒状温度計(水銀、アルコール)で、それ以外の地点は、pH計の表示温度で行った。個々の温度の測定誤差が不明なため、それらを考慮することなく計算を行った。

2. 解析方法

抽出したデータの、それぞれの相関、二宮ら⁸⁾による重回帰分析法による係数と季節調整法(フリーソフトRのdecompose関数)に基づくトレンド成分の傾きを計算し、年あたりの増加率に換算した。採水は、月の前半で午前か午後で決まっていたが、決まった時期等と異なった場合の補正を、重回帰分析法でのダミー変数を用いた計算で行った。また、月別の経年変化もダミー変数を用いた方法で計算した。舞鶴湾と宮津湾は、奇数月のみの年6回採水であったが、山陰海岸と若狭湾は、4、6、8、10月の結果しかないため、年間平均値の算出及び季節調

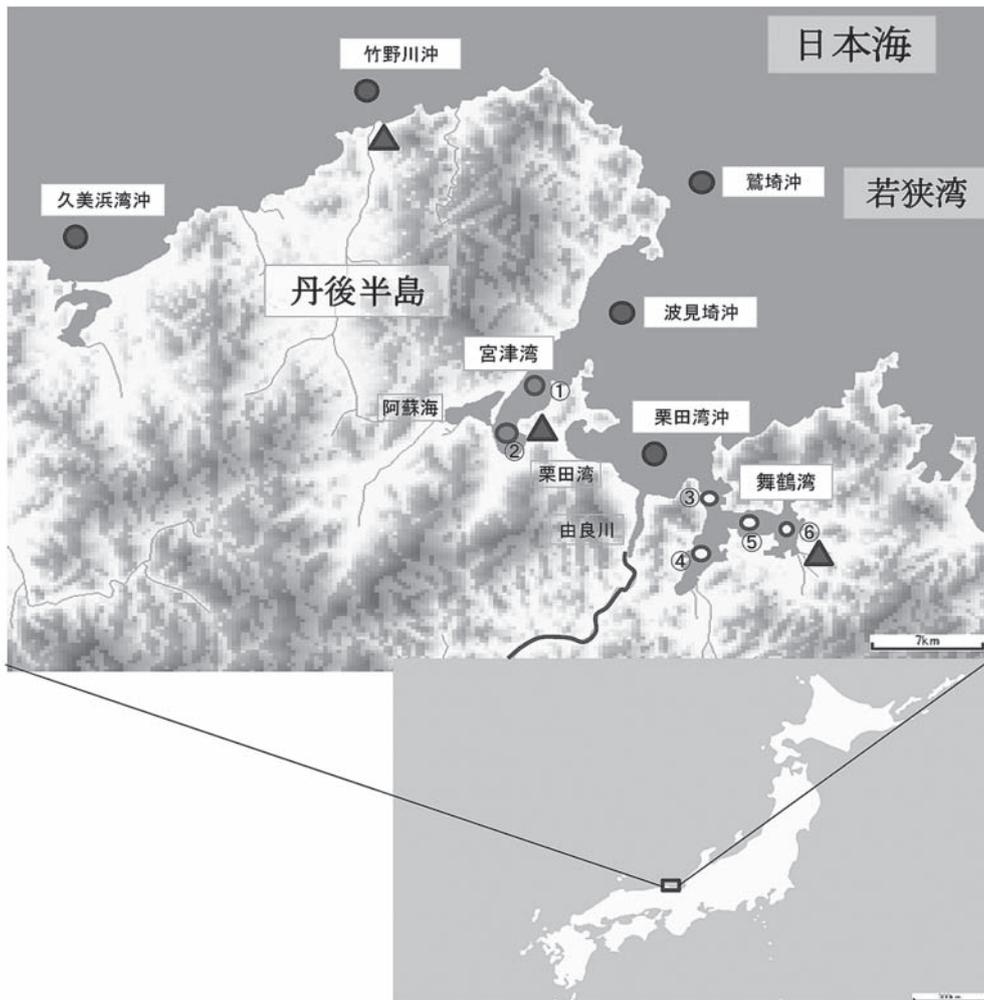


図1. 京都府北部海域の採水地点

①は江尻地先、②は島崎地先、③はキングヨ鼻地先、④は楢崎地先、⑤は恵比須崎地先、⑥は念仏鼻地先を示す。●、●、○は、採水地点を、▲は気象庁観測所を示す。(「ゼンリン電子地図帳Z」から)

整法によるトレンドの計算を行わなかった。重回帰分析法で計算されるP値が設定した有意水準より小さい場合、増減があるとした。

宮津湾は、採水時刻が1981～1983年度と2004年度以降が午前9時半前後、その間は、13時半前後であった。そこで、両者を分離して解析を行った。また、水深10mの採水は、1989年度から行われたため、1989年度からの計算も行った。

結果

各地点の全データを用いた平均値、重回帰分析法による年増加率と季節調整法による増加率の結果を表1に示した。全地点とも水深0.5mと2mで、気温との相関(0.87～0.95と0.86～0.94)及び溶存酸素の全平均値とも統計的には差がなかった。

山陰海岸では、気温は経年的な増加傾向を示さなかったが、水温は、久美浜湾沖の水深2mを除き、有意水準5%で増加傾向を示した。久美浜湾沖の気温と、採水時と同じ時刻での、陸地の気象庁の観測地点である間人の気温との相関は0.97、全平均値の差は-0.37℃であり、間人で

の重回帰結果も、有意水準10%でも増加傾向を示さなかった。また、水深0.5mの月ごとの結果を図2に示したが、2mも同様な結果であり、4月のみ経年的な増加傾向を示した(表2)。

若狭湾の栗田湾と波見崎沖では、気温、水温とも増加傾向を、鷺崎沖は、水深0.5mのみが有意水準5%で増加傾向を示した。月別では、気温は各月とも有意水準5%では増加傾向を示さず、水温が、表2と図3に示したように4月のみ増加傾向を示した。

宮津湾では、気温、水深別の水温とも、重回帰法では、経年変化を示している結果は得られなかった。採水時刻が午後であった1984年度から2003年度までの経年変化は、気温、水温とも、増加率はプラスであったが、江尻地先の水深2mのみが0.04℃/年となった地点を除き、有意な結果ではなかった。また、1983年度までと2004年度以降の各地点での全データの平均値の差をみると、気温で-0.1～-0.5℃、水温0.5m層で0～-0.7℃、2m層で+0.1～0℃となり、上昇傾向を示しているとは言えなかった。

舞鶴湾のキングヨ鼻地先は、水深2mのみ水温上昇がみられた。また、念仏鼻地先と恵比須崎地先の2地点は、

表 1. 1981 年度から 2009 年度までの京都府北部海域の気温、水温と溶存酸素の全平均値と気温、水温の重回帰分析法及び季節調整法による解析結果（山陰海岸、若狭湾は、4、6、8、10 月、宮津湾と舞鶴湾は、5、7、9、11、1、3 月の採水）

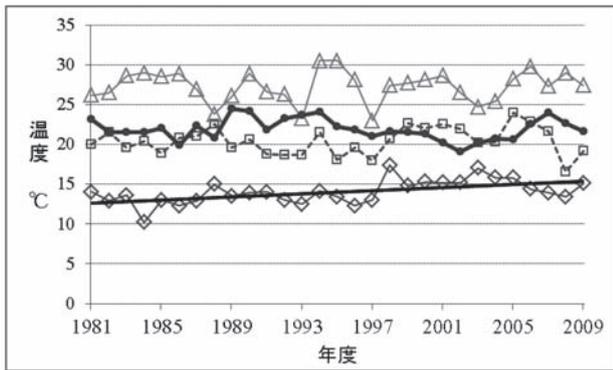
| 水域名 | 海域 < 平均水深 > | 項目 | 採水水深 (m) | 全平均値 | | 重回帰分析法 | 季節調整法の |
|---------------|----------------------|-----|-------------|------------|----------------|-----------------|---------------------------|
| | | | | 温度 (°C) | 溶存酸素 (mg/L) | 増加率 (°C / 年) | トレンド成分の 傾き (°C / 年) |
| 山陰海岸 | 久美浜湾 沖 <25m> | 気温 | | 22.2 | — | * | — |
| | | 水温 | 0.5 | 21.0 | 8.0 | 0.036 | — |
| | 竹野川沖 <23m> | 気温 | | 22.0 | — | * | — |
| | | 水温 | 0.5 | 20.8 | 7.9 | 0.046 | — |
| | 鷺崎沖 <65m> | 気温 | | 21.2 | — | * | — |
| | | 水温 | 0.5 | 20.5 | 8.0 | 0.034 | — |
| 若狭湾 | 波見崎沖 <47m> | 気温 | | 21.2 | — | 0.047 | — |
| | | 水温 | 0.5 | 20.7 | 8.0 | 0.047 | — |
| | 栗田湾沖 <26m> | 気温 | | 20.6 | — | 0.043 | — |
| | | 水温 | 0.5 | 20.5 | 8.0 | 0.041 | — |
| | 江尻地先 <20m> | 気温 | | 20.4 | 8.1 | 0.038 | — |
| | | 水温 | 2 | 18.5 | — | * | * |
| 宮津湾 | 島崎地先 <15m> | 気温 | 0.5 | 18.1 | 8.4 | * | * |
| | | 水温 | 2 | 18.0 | 8.3 | * | * |
| | キンギョ 鼻地先 <23m> | 気温 | 10 ※ | 17.9 | 8.0 | * | (-0.021) |
| | | 水温 | 0.5 | 18.5 | — | * | * |
| | 恵比須崎地 地先 <17m> | 気温 | | 17.9 | 8.6 | * | -0.021 |
| | | 水温 | 2 | 18.0 | 8.3 | * | * |
| 舞鶴湾 | 念仏鼻地 先 <13m> | 気温 | 10 ※ | 17.9 | 7.8 | * | (-0.017) |
| | | 水温 | 0.5 | 16.4 | — | * | 0.036 |
| | 榑崎地先 <12m> | 気温 | | 17.2 | 8.3 | * | 0.020 |
| | | 水温 | 2 | 17.2 | 8.3 | 0.035 | 0.037 |
| | 櫛崎地先 <12m> | 気温 | 10 | 17.1 | 8.0 | * | 0.022 |
| | | 水温 | 0.5 | 16.5 | — | 0.059 | 0.058 |
| 榑崎地先 <12m> | 気温 | | 17.3 | 9.1 | * | * | |
| | 水温 | 0.5 | 17.5 | 8.8 | * | 0.026 | |
| 榑崎地先 <12m> | 気温 | | 17.3 | 7.9 | 0.033 | 0.038 | |
| | 水温 | 0.5 | 16.7 | — | 0.061 | 0.056 | |
| 榑崎地先 <12m> | 気温 | | 17.4 | 9.4 | * | 0.018 | |
| | 水温 | 2 | 17.5 | 9.0 | (0.029) | 0.030 | |
| 榑崎地先 <12m> | 気温 | 10 | 17.4 | 7.6 | 0.025 | 0.025 | |
| | 水温 | 0.5 | 16.4 | — | * | 0.027 | |
| 榑崎地先 <12m> | 気温 | | 17.4 | 8.3 | * | (0.024) | |
| | 水温 | 2 | 17.3 | 8.3 | * | 0.017 | |
| 榑崎地先 <12m> | 気温 | | 17.2 | 7.7 | (0.025) | (0.028) | |
| | 水温 | 10 | 17.2 | 7.7 | (0.025) | (0.028) | |

※は 1989 年度からの計算結果、*は有意水準 10%で増減がないことを示す。() は、有意水準 5%では増減はないが、10%で増加傾向を示した場合の増加率を示す。

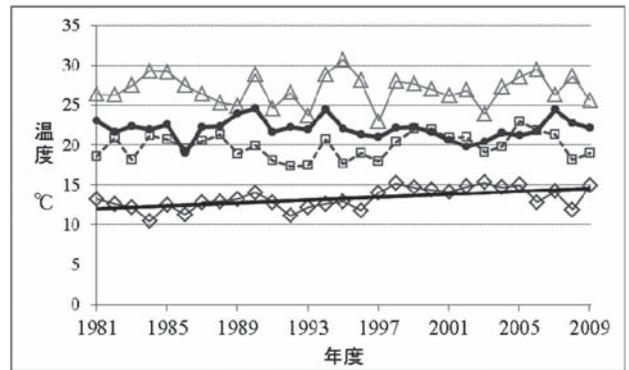
表 2. 京都府沿岸域の 4 月の水温の重回帰分析法結果

| 地点名 | 0.5m | 2m |
|------------|-----------------|-----------------|
| | 増加率 (°C / 年) | 増加率 (°C / 年) |
| 山陰海岸 久美浜湾沖 | 0.050 | 0.029 |
| 山陰海岸 竹野川沖 | 0.027 | 0.010 |
| 山陰海岸 鷺崎沖 | 0.035 | 0.052 |
| 若狭湾 波見崎沖 | 0.091 | 0.079 |
| 若狭湾 栗田湾沖 | 0.065 | 0.061 |

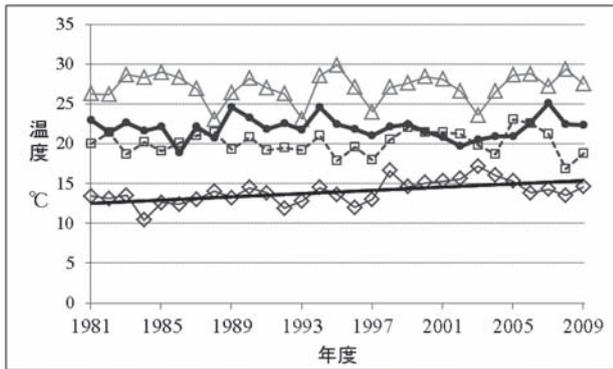
すべて有意水準 5%で有意。



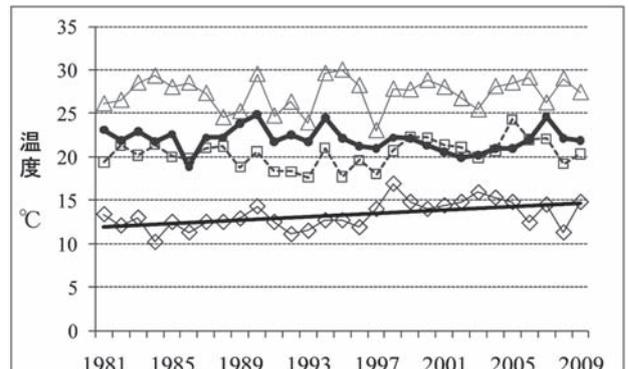
(久美浜湾沖)



(鷲崎湾沖)



(竹野川湾沖)



(波見崎湾沖)

図2. 山陰海岸2地点水深0.5mでの各月の水温の移動平均法によるトレンド成分の経年変化

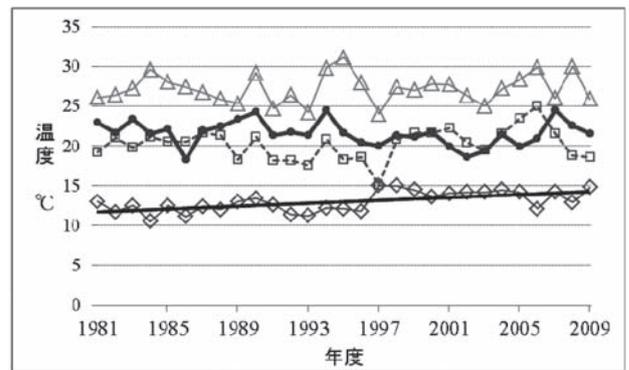
—◇—は、4月、—□—は、6月、—△—は、8月、—●—は、10月を示す。直線は、有意水準5%で増加を示した時の回帰直線を表す。

気温の経年的な上昇が有意水準5%でみられ、その2地点は水温では水深10mのみが上昇傾向を示していた。季節調整法のトレンド成分でみた場合には、多くの地点が増加傾向を示し、重回帰分析法で計算されたP値にかかわらず両者の増加率は良く一致していた。また、年間平均値の水深による水温差はないが、溶存酸素は、水深10mが小さくなっていった。要因を考えるため、念仏鼻地先の水温と溶存酸素の月ごとの平均値を図4に示した。月ごとの増加傾向を計算したが、春季以外は増加傾向を示さなかったため5月の結果を表3に示した。すべての地点の5月の気温と、恵比須地先と念仏鼻地先の水深10mが、有意水準5%で増加傾向を示した。

考察

1. 山陰海岸

日本海沿岸域の水温は、黒潮から分かれた対馬暖流の影響を大きく受けることとなる。一方、水温は、熱交換が生じるため気温と連動する。日本の気温の上昇が地球全体のそれより高く推移していることが報告され¹⁾、日本周辺海域での水温上昇も報告されている*2。今回の結果は、2地点とも水温上昇がみられ、気温と水温の相関は高かった。しかし、気温の上昇傾向が観察されなかつ



(栗田湾沖)

図3. 若狭湾3地点水深0.5mでの各月の水温の移動平均法によるトレンド成分の経年変化

—◇—は、4月、—□—は、6月、—△—は、8月、—●—は、10月を示す。直線は、有意水準5%で増加を示した時の回帰直線を表す。

たのは、採水時気温は、変動が大きく、統計的に有意でなくなったことと、1981年頃の温度が高かったためと考えられた。気温と水温の傾向が異なるのは、飯村ら⁷⁾も報告している。今回の場合、水温は、対馬暖流という大きな東進する流れに直接影響されており、気温の変動の影響が小さくなったことが考えられた。

季節ごとの水温上昇の傾向をみるため、気象庁発表の日本海南部の1981年からのデータを計算すると、全年で0.029℃/年、冬季(1~3月)0.029℃/年、春季(4~6月)、秋季(10~12月)とも0.033℃/年となり、夏季は増減傾向を示さなかった。今回の場合、6、10月は、

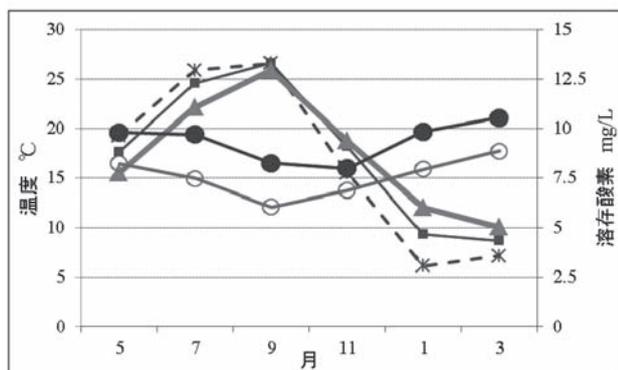


図 4. 舞鶴湾念仏鼻地先の気温、水深 0.5m、10m の水温と溶存酸素の月別の全平均値

—×—は、気温、—■—は、0.5m 水温、—▲—は、10m 水温、
—●—は、0.5m 溶存酸素、—○—は、10m 溶存酸素を示す。

表 3. 舞鶴湾における 5 月の気温、水温の重回帰分析法の解析結果

| 地点名 | 項目 | 水深 | 増加率 |
|---------|----|-----|----------|
| | | | (°C / 年) |
| キングヨ鼻地先 | 気温 | | 0.078 |
| | 水温 | 0.5 | (0.034) |
| | | 2 | (0.064) |
| | | 10 | * |
| 恵比須崎地先 | 気温 | | 0.099 |
| | 水温 | 10 | 0.029 |
| 念仏鼻地先 | 気温 | | 0.097 |
| | 水温 | 10 | 0.043 |
| 檜崎地先 | 気温 | | 0.070 |
| | 水温 | 10 | (0.034) |

*は有意水準 10% で増減がないことを示す。() は、有意水準 5% では増減はないが、10% で増加傾向を示した場合の増加率を示す。記載していない水深は、すべて有意水準 10% で増減がなかった。

気象庁での夏季に近いことから、増加傾向を示さなかったものと考えられた。また、上昇率は、日本海データと同程度であり、2 地点とも日本海を流れる対馬暖流の影響が大きいと考えられた。

また、海域での水温は、レジームシフトと呼ばれる、気候がある状態から別の状態へ地球規模で急激に変化し、その影響を受けて海の環境や生態系が大きく変化する自然現象により、上下することが知られている。近年では、1988 年度頃に上昇したと報告されている⁹⁾。しかし、今回は冬季の結果がないこともあり、その影響は明らかにできなかった。

2. 若狭湾

若狭湾の流れは、沿岸部を流れてきた対馬暖流が丹後半島から越前岬まで東進し、一部が南から西へ進む時計回りの環流が生じている場合が多い¹⁰⁾とされている。波見崎沖は、その西への流れに乗って丹後半島まで到着する地点にあるため、若狭湾の代表的な状況を表しているものと考えられた。すなわち、若狭湾では、気温、水温とも上昇傾向があると考えられた。また、湾西部奥にある栗田湾沖は、由良川河口の北に位置している。山崎ら¹¹⁾が

由良川からの流入水は、降雨のない場合表面に広がること、加藤ら¹²⁾が栗田湾は由良川の影響があると報告していることから、由良川の栗田湾沖への影響があると考えられた。しかし、由良川河口近くの由良川橋での水温上昇率は 0.032°C / 年⁵⁾で、栗田湾沖の 0.041°C / 年、0.038°C / 年と同程度で、また、波見崎沖との差がみいだせないことから、どの程度由良川の影響があるのか不明であった。一方、鷺尾ら¹³⁾が、若狭湾の流れは、丹後半島の周りを鷺崎沖近くまで回り込んでから東進することもあることを報告しており、そのことが鷺崎沖が久美浜湾沖とよく似た結果になったものと考えられた。また、3 地点とも 4 月のみ水温上昇が有意であったのは、山陰海岸と同じであり、府域北部沖合一帯の傾向を示しているものと考えられた。しかし、冬季の結果がないため、水温上昇が春季のみだけか冬季から引き続いていないのか不明であった。

3. 宮津湾と舞鶴湾

宮津湾の結果は、水温上昇がみられた山陰海岸や若狭湾とは異なっていた。宮津湾内では、反時計回りに流れることが報告されていること¹⁴⁾から、島崎地先は、閉鎖性の強い阿蘇海からの流出水が流れる方向にあると考えられる。江尻地先は、湾中央部の流れの方向の予測が難しい地点に位置している。これらの採水地点の位置や水の流れ方向が水温や水質にどのように関係したのかは不明であった。また、採水時刻の変更による影響がダミー変数ではカバーしきれなかったことも考えられた。宮津湾の水質に関する調査報告も少なく、今後もデータの収集が必要と考えられた。

舞鶴湾で、重回帰法と季節調整法でのトレンド成分の上昇率が同じであるのに有意水準で差があったのは、重回帰法は個々の数値での計算であり、一方、季節調整法はばらつきを平均化するため、検定結果に差がでたものと考えられた。また、水温と溶存酸素の関係(図 4)をみると、夏季は表層水温が高く、冬季には表層より水深 10m で水温が高いために、年間平均では差がなくなった。一方、溶存酸素は、夏季は底層水の停滞による酸素減少、冬季は水温が表層より高くなるため、年間を通して表層より水深 10m が低くなったことが分かった。

舞鶴湾のキングヨ鼻地先は、湾口にあたるため、若狭湾と同じ傾向を示すと考えられたが、山陰海岸と同様、気温上昇がなかったことの原因は不明であった。また、恵比須崎地先と念仏鼻地先で、気温と表層水温ではなく水深 10m の水温で上昇率が有意であり、月別では 5 月のみ有意であった。5 月時点の上層下層で水温と溶存酸素の差がみられたことから、5 月より前の春季の上下混合される時に底層の水温の増加傾向があることが考えられた。一方、上野・佐藤¹⁵⁾が、舞鶴湾の表層水質は陸水の流入量により変動を受けることを報告している。檜崎地先に近い気象庁の舞鶴観測所の採水時と同じ気温の重回帰分析法では、増加傾向を示さなかった。陸域の水温上

昇も少ない可能性が考えられ、表層の水温上昇がみられなかったことと関連がある可能性が考えられた。表層と水深 10m との傾向が異なるのは、水温躍層がみられたこととの関連も考えられた。常に水深 10m の溶存酸素が低いことから、低酸素の進行が懸念されるため、10m 以深の底層の溶存酸素濃度の把握が必要と考えられた。

京都府北部沿岸域でも水温上昇が確認された。山陰海岸や若狭湾と閉鎖性の宮津湾や舞鶴湾とは水温上昇の様相が異なっており、特に、水温上昇が、閉鎖性の湾での溶存酸素や他の水質にどのように影響してきているのか今後検討を進めていく必要がある。

謝辞

独立行政法人国立環境研究所との C 型共同研究「地球温暖化がもたらす日本沿岸域の水質変化とその適応策に関する研究」の共同研究員の皆様に感謝します。

引用文献

- 1) 文部科学省, 気象庁, 環境省, 2009, 温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響」。
- 2) 環境省地球温暖化問題検討委員会温暖化影響評価ワーキンググループ, 2001, 地球温暖化の日本への影響 2001。
- 3) 二宮勝幸, 柏木宣久, 安藤晴夫, 1996, 東京湾における水温と塩分の空間濃度分布の季節別特徴, 水環境学会誌, 19, 480-490。
- 4) 福永勲, 小紫将吾, 中室克彦, 奥野智史, 服部幸和, 加賀城

- 直哉, 西海暢展, 田口寛, 日下哲也, 2008, 河川・湖沼水温上昇に及ぼす環境要因の地域特性, 大阪人間科学大学紀要 HumanSciences, 7, 119-125。
- 5) 田口寛, 日下哲也, 2009, 由良川の水質状況－水温の長期変動について－, 京都府保健環境研究所年報, 54, 62-65。
- 6) 安藤晴夫, 柏木宣久, 二宮勝幸, 小倉久子, 1999, 東京都内湾の水質の長期変動傾向について, 東京都環境科学研究所年報 1999, 60-67。
- 7) 飯村晃, 小倉久子, 2009, 地球温暖化がもたらす日本沿岸域の水質変化とその適応策に関する研究 (その 2) - 気温変化トレンドとの比較 -, 千葉県環境研究センター年報, 9, 101 ~ 102。
- 8) 二宮勝幸, 柏木宣久, 岡敬一, 岩淵美香, 飯島恵, 2010, 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, 34, 46-51。
- 9) 京都府農林水産技術センター海洋センター, 2004, 京都府の海の水温変動, 季報, 80。
- 10) 第 8 管区海上保安部, 2008, 若狭湾流況調査報告書平成 19 年 3 月。
- 11) 山崎哲也, 渡辺健志, 田賀傑, 2005, 由良川河口流況調査, 海洋情報部技報, 23, 112-118。
- 12) 加藤安雄, 坂野安正, 久米正直, 藪本隆, 1980, 栗田湾の流動特性, 京都府立海洋センター研究報告, 4, 104-114。
- 13) 鷲尾圭司, 板野安正, 加藤安雄, 柏井誠, 1979, 沿岸海洋の変動－Ⅲ, 京都府立海洋センター研究報告, 3, 111-124。
- 14) 京都府公害対策技術者会議, 1984, 阿蘇海の汚濁機構 阿蘇海の汚濁機構解明調査研究報告書, 30-36。
- 15) 上野正博, 佐藤一夫, 1993, 舞鶴湾の水質環境 京都大学農学部付属水産実験所による舞鶴湾定期海洋観測結果, 京都大学農学部付属水産実験所報告, 2, 46-60。