

急激な気温上昇と大阪湾の海水温の変動： モニタリングポストデータの解析

山崎 あかり¹

¹近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 調査課（〒651-0082神戸市中央区小野浜町7番30号）

日本の年平均気温は、2000年から2010年代前半は緩やかな低下傾向であったが、2014年の冷夏を境に変動を伴いながら急激な上昇となっている。この気温上昇が、大阪湾の水温に与える影響を、2010年4月から2024年3月の期間で調査した。冬季（1月～3月平均）は、水温は気温と連動して上昇していた。一方、夏季（7月～9月平均）は、気温、表層水温ともに有意な上昇がみられなかった。表層水温は、大阪湾底層に紀伊水道の底層から流入する冷水の影響と、気温の影響を受けて変動していた。このため暑夏であっても、底層への冷水流入があると、表層水温は上昇しなかった。底層水温の季節変動には、冷水流入の有無が大きく影響していた。

キーワード 気候変動、海水温、気温、水質自動観測、大阪湾

1. はじめに

(1) 背景

気象庁の気候変動監視レポート2023年では、トピックスとして「2023年の日本近海の記録的な海面水温について」をあげ、「2023年の日本近海の月平均海面水温は、年を通じて平年よりも高く経過し、年平均海面水温の平年差は、統計を開始した1908年以降、最も高い値となった」と報じている¹。この水温上昇は、気候変動による100年当たり1.35℃の気温上昇、1.28℃の水温上昇よりも遙かに急激な水温上昇が、2010年代後半から日本近海で起きていることの表れである。

(2) 大阪湾再生に与える影響

閉鎖性海域である大阪湾では、良好な水循環と生物多様性の確保を目的とした大阪湾再生行動計画に基づく取り組みが進められており、近年確認されなかった生物の定着も確認されるなど一定の改善成果が見られている。一方で今後の気候変動による気温上昇に伴う海水温上昇により、大阪湾再生に大きな影響を与えることが危惧されている。

水温は、生態系を特徴づける重要な環境変数である²⁾。冬季の瀬戸内海の水温は8℃～10℃であるのに対し、湾口外の黒潮に面する海域は、冬季でも16℃～18℃であり、10℃程度の水温差が湾口付近に集中している³⁾。漁業に

おける重要漁獲対象種であるマダイでは、水温12℃以下では行動が極端に緩慢になり摂餌も行っていないと考えられている。またマダイは、冬季は閉鎖性海域の低水温を避け、湾口海域に越冬回遊することが知られている。大阪湾のクロダイでは、水温が10℃～13℃以下になると、養殖ノリを摂餌することを止めることがバイオテレメトリーで調べられている。タイ類に限らず、多くの魚種が冬季の低水温を避けて越冬回遊しており、冬季水温は閉鎖性海域の生態系に影響を与えている²⁾。一方夏季から秋季の高水温は、カキやノリなど養殖に影響を及ぼす。

このため今回は大阪湾で観測されている種々のデータから2010年4月から2024年3月までの水温上昇について解析した。また、気温と水温の相関関係についても、冬季と夏季に分けて調査した。

2. 調査材料および方法

調査の対象としたのは大阪湾であり、主とする調査期間は2010年4月～2024年3月である（図-1）。冬季は1月～3月とし、夏季は7月～9月とした。測点A～DおよびA'には、2010年国土交通省近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所によって水質自動観測装置が設置され、以降、毎時の水温、塩分などの水質がリアルタイムで配信されている。本報では測点A～Dのデータを解析した。

明石海峡の測点Aのデータが欠測のときは、測点A'およびA''のデータで補間し、欠測のない明石海峡の日平均水温データを得た。測点A''の日平均水温データは、第五管区海上保安本部海洋情報部によって測られ、日本海洋データセンターで提供されているものである⁴⁾。

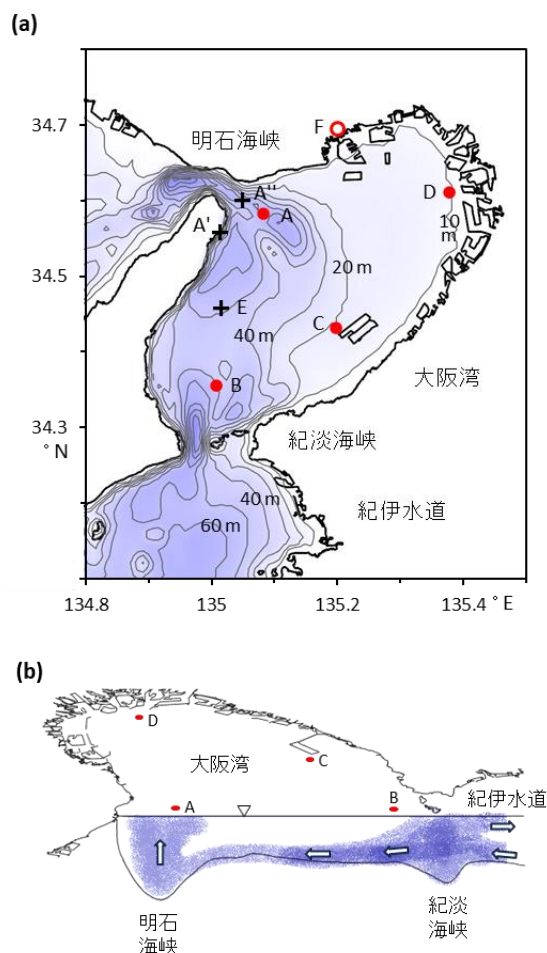


図-1 測点位置および海底地形

- (a) 平面図, A: 明石海峡航路東方灯浮標, B: 洲本沖灯浮標, C: 関空MT局, D: 大阪港波浪観測塔, E: 大阪府浅海定線調査測点5, F: 神戸地方気象台, A': 淡路交流の翼港, A'': 明石海峡航路第3灯浮標。
- (b) 135°E線, 縦断面図。陰影部は、夏季に外海から流入する冷水を模式的に示したもの

図中、測点Eは、大阪府立環境農林水産総合研究所水産技術センターが実施する浅海定線調査の測点5である。これの2000年～2023年の各層水温データを解析に用いた。

気温は気象庁のデータを用いた。長期の気温としては、日本の年平均気温偏差の算定に用いられている15地点のうち、多度津（香川県、備讃瀬戸南岸）および彦根（滋賀県、琵琶湖東岸）を用いた。また、1980年からの気温については、均質な欠測のないデータが得られており、臨海部に立地している蒲生田（徳島県、紀伊水道

西岸）、郡家（兵庫県、播磨灘東岸）、家島（兵庫県、播磨灘）、引田（香川県、播磨灘南岸）および彦根を用いた。2000年以降は、家島、郡家、徳島、和歌山、神戸（図-1中、測点F）を用いた。

気温及び水温変化傾向は、最小二乗法により回帰直線の傾きを調べ、導出した傾きについてはt検定を行った。なお、気温の平年差は平年値（1991～2020年の平均）との差を用いた。

大阪湾の海底地形を図-1aに示す。湾の中央部に水深20m線が南北に走り、以東は水深20m以浅の停滞性水域であるのに対し、以西は水深40m～60mと深く、塩分成層の弱い海域である⁴⁾。紀伊水道の海水は、大阪湾の底層に密度流として流入する。夏季には、紀伊水道の南斜面にある陸棚斜面水（SW: slope water）と呼ばれる、低温・高密度で、栄養塩を高濃度で含む水塊の一部が、紀伊水道の底層を通して大阪湾西部底層に流れ込むことがある。このSWの流れを、図-1bの陰影部で模式的に示す。SWは、紀伊水道の底層から紀淡海峡に入り、ここの強い鉛直混合により一部は海面にまで広がるものの、さらに大阪湾西部底層へと流入し、北上し、明石海峡の強い鉛直混合によって海面にまで広がる³⁾。なお、大阪湾へのSWの流入は、毎夏起きるものではなく、黒潮の流路との関係で年により強弱がある。

3. 海水温の変動要因の分析

(1) 気温

気温の長期的な変化を図-2aに示す。多度津、彦根とも日本の年平均気温と同じく長期的な上昇を示しており、それぞれの傾きは、100年あたり1.35℃および1.49℃の上昇である。この長期的な上昇が、気候変動による気温上昇といわれるものである。この緩やかな上昇に、数十年スケールの振動（Multi-decadal oscillation）が重なっているため、急激な気温上昇期間と、横ばいの期間が現れている。前者としては、1980年～2000年の期間と、2010年代後半が観察される。

図-2bは、1980年からの東部瀬戸内海近辺の年平均気温である。各測点の気温は、よく類似した変動をしており、1980年～2000年に上昇し、以降、横ばいか緩やかな低下傾向が2014年まで続く。西日本の2014年は、2003年以来11年ぶりの冷夏であり、また2015年は2年連続の冷夏であった。以後、2016年の高温、2017年の低温を経て、急激に上昇している。

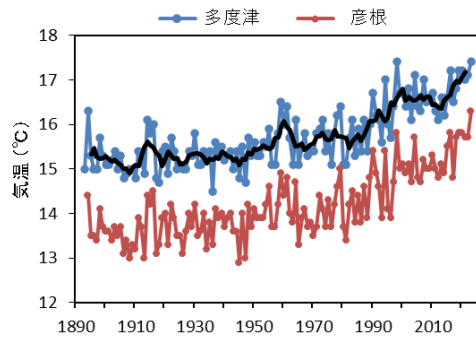


図-2(a) 長期の年平均気温

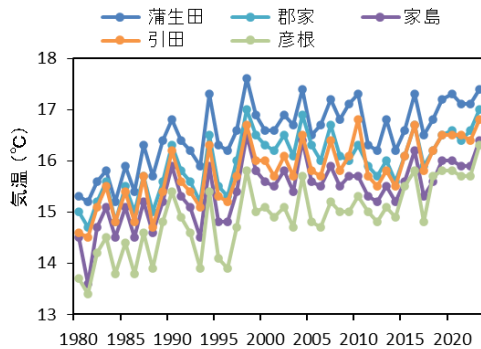


図-2(b) 1980年からの年平均気温

2010年代後半の気温上昇を、季節別に示す(図-3)。年平均の平年差は、図-2と同類である。冬季の平年差は、夏季よりも変動幅が大きく、2011年の谷から、2023年にかけて大きく変動しながら上昇している。一方、夏季の気温平均差は、2014、2015年の2年続きの冷夏、2022、2023年の暑夏が顕著であるものの、2011年～2023年間の気温上昇は有意ではなかった($p=0.162$)。2011年～2023年間の気温上昇は、年平均および冬季平均で、それぞれ10年当たり 0.89°C ($p=0.002$)、 1.77°C ($p=0.003$)であり、夏季平均については有意な変化はみられなかった。

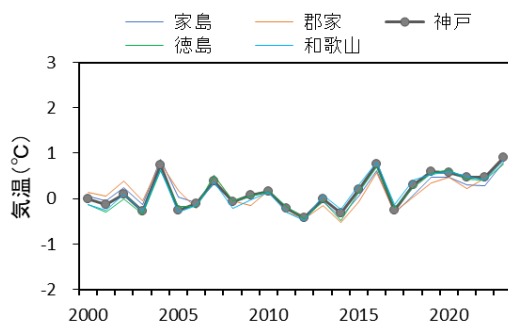


図-3(a) 気温平年差 (年平均)

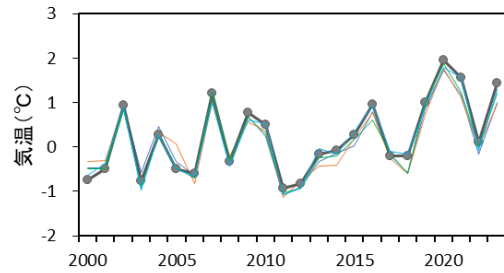


図-3(b) 気温平年差 (冬季)

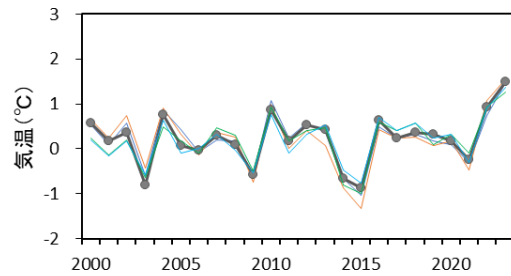


図-3(c) 気温平年差 (夏季)

(2) 冬季水温

冬季の表層水温と気温の関係を図-4に示す。気温と水温の間には相関関係があり、相関関係 R は 0.82 ($p=0.001$)であった。また、2011年～2023年間の、気温および水温上昇は、それぞれ10年当たりで 1.77°C ($p=0.003$)、 1.45°C ($p=0.033$)であり、水温上昇速度は気温上昇速度の82%であった。

このような冬季水温の上昇により、冬季の年最低水温にも変化が現れている。図-5aは、年最低水温の変化である。明石海峡の年最低水温は2011年の 7.3°C から2024年の 10.2°C へと、約 3°C 上昇した。図中に点線で示した近似直線の傾きは、10年当たり 1.59°C ($p=0.020$)の上昇である。

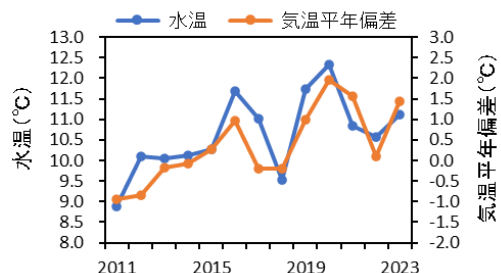


図-4 冬季平均の水温と気温の時系列

なお、2018年冬の顕著な低水温は、強い寒気の南下によるものであり、気象庁の報道発表資料では「(2018年)冬は、日本付近にしばしば強い寒気が南下し、冬の平均気温は全国的に低く、特に西日本では平年差 -1.2°C と過去32年間で最も低くなりました。日本海側では北陸地方を中心に大雪になり、交通障害が発生し

ました。」と記述している。

図-5bは、水温が魚類の行動に大きな変化が現れる10℃以下となる日の日数である。日平均水温が10℃以下となる日数は、2011年の84日から減少し（ $p=0.002$ ）、2023年、2024年は0日であった。

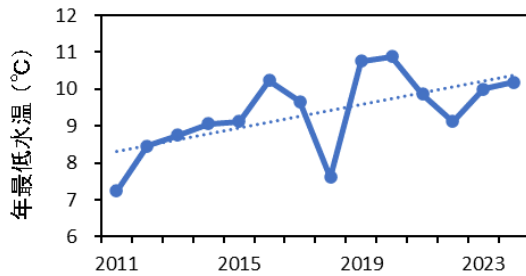


図-5(a) 明石海峡の表層水温（年最低水温）

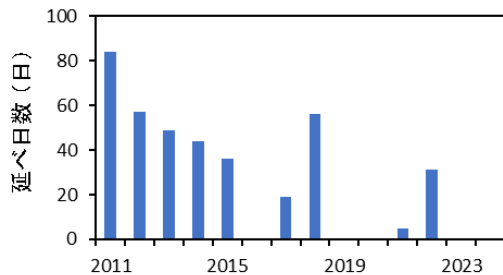


図-5(b) 明石海峡の表層水温（日平均水温が10℃以下の日数）

(3) 夏季水温と底層水温の影響

夏季の表層水温と気温の関係を図-6に示す。2011年～2023年の期間では、気温、表層水温共に有意な温度上昇はみられなかった。しかし、気温と表層水温の間にはやや弱いながら相関があり、相関係数 R は0.62（ $p=0.023$ ）であった。これは、表層水温を被説明変数、気温を説明変数とする回帰直線の決定係数 R^2 が0.38であることを意味し、気温以外の他の要因も表層水温に作用していることが考えられた。そこでもう一つの要因として、夏季に大阪湾底層に流入する冷水の影響を考えた。

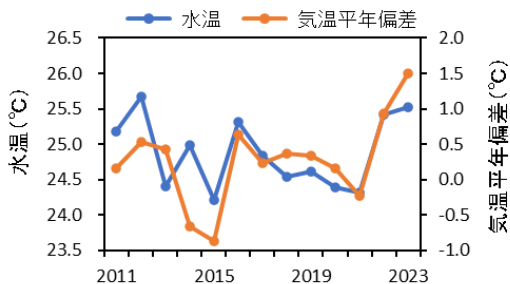


図-6 夏季平均の水温と気温の時系列

大阪湾西部の測点Eにおける夏季の各層の水温を図-7に示す。この測点は、鉛直混合の強い海峡部からは離れており、潮流振幅（ U ）および水深（ H ）から算定される混合エネルギー指標（ U^3/H ）は海峡部の100分の1以下である。夏季に紀伊水道から高密度海水が流入したと

きには、この測点の海底面上を密度流として流入し、この測点の底層が流入水のモニタリングに適した場所であると報告されている。この測点の底層の水温は表層とは異なった変動をしており、表層底層の水温差は4.8℃に及ぶ。底層の水温は、2010年以降では2013年、2018年～2021年には22℃以下となっている。このとき底層の塩分は高く、また栄養塩濃度は水温に逆比例して高くなっており、底層冷水は陸棚斜面水の特徴を示していた。

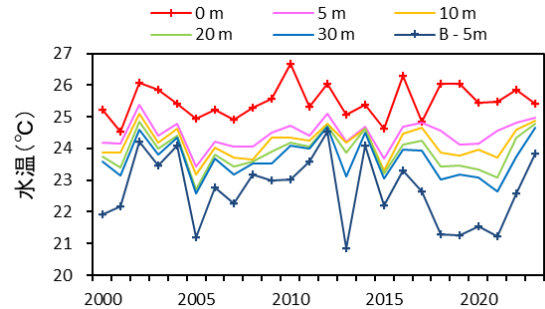


図-7 測点Eにおける夏季の各層水温

夏季における気温平年差と、明石海峡表層水温の散布図を図-8aに示す。青色点は、底層水温が22℃以下の年であり、オレンジ色点はその他の年である。オレンジ色点では、気温との相関関係 R が0.79と、全点を含んだ場合の0.62から向上しており、底層水温が表層水温に影響していることを示唆している。

そこで2010年～2023年夏季の表層水温 y を、気温平年差 x_1 と底層水温 x_2 の2変数で重回帰した。底層水温は、月に1回の測定値である。その結果

$$y = 0.396x_1 + 0.304x_2 + 17.91 \quad (1)$$

の予測式が得られた。実測水温と、式1による予測水温を図-8bに示す。重相関係数 $R = 0.969$ 、重決定係数 $R^2 = 0.939$ であり、表層水温のほぼ全ての変動が、気温と底層水温の2変数で説明された。説明変数 x_1 および x_2 の回帰係数の p 値はどちらも0.000であり、それぞれの標準誤差は0.060および0.031である。

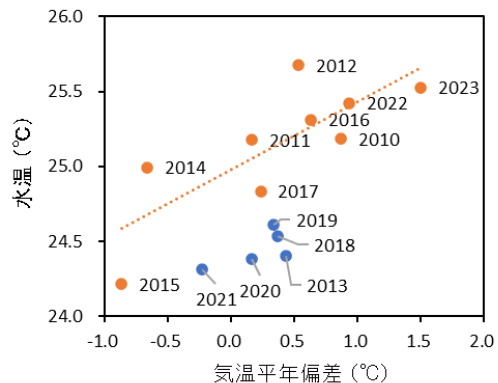


図-8(a) 夏季の気温平年差と水温の散布図

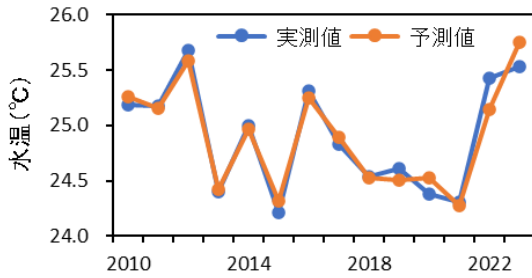


図-8(b) 実測水温と予測水温

(4) 冷水流入の有無と水温季節変動

底層冷水流入のある年(2013年夏季)と、ない年(2010年夏季)の各地の水温季節変動の違いを以下に示す。図-9は、測点BとCの、夏季を中心とする水温季節変動である。2010年も2013年も暑い夏であり、気象庁の報道発表資料では、それぞれ「夏の日本の平均気温は過去113年間で最も高い」、および「全国で暑夏、8月には熱波：西日本では夏の平均気温平年差が $+1.2^{\circ}\text{C}$ と1946年の統計開始以来第1位の高温となった。」と紹介されている。

どちらも暑夏であるにもかかわらず、冷水流入のある2013年夏季の表層水温は、2010年夏季の場合よりも顕著に低い。特に、底層(Bottom)の水温は、2010年には夏季の山があるのに対し、2013年には8月下旬の一時期を除き、明瞭な夏季の山がみられず、水温 23°C ~ 24°C が続いている。

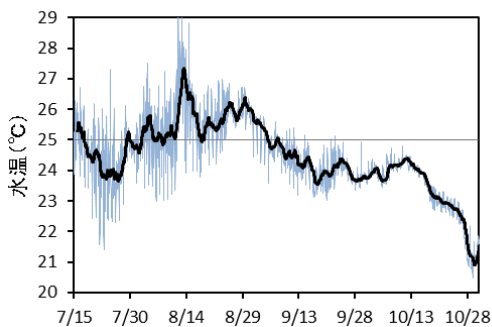
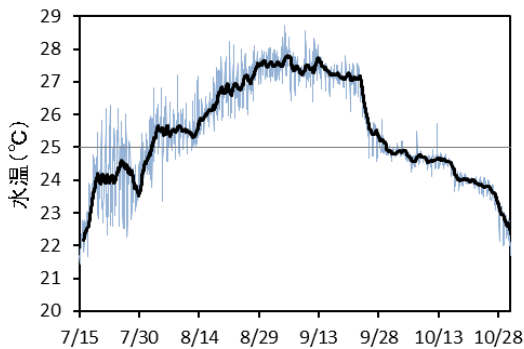


図-9(a) 測点B(洲本沖) 上：2010年夏季 下：2013年夏季

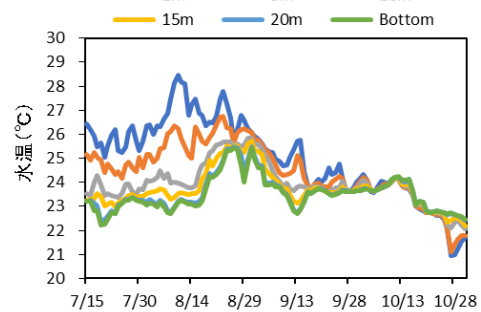
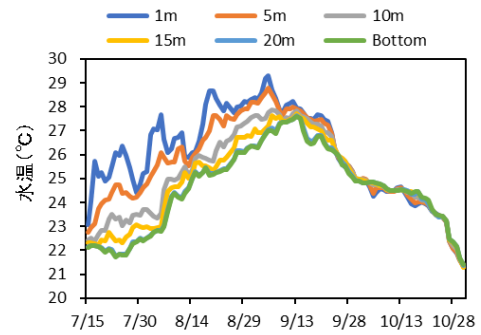


図-9(b) 測点C(関空MT局) 上：2010年夏季 下：2013年夏季

図-10は、測点D(大阪湾波浪観測塔)の水温記録である。この測点は、大阪湾奥部に位置し、水深も測点B,Cよりも浅いにもかかわらず、底層水温は、測点Cと類似の季節変動を示しており、冷水流入年には、夏の水温の山がなく、水温は 23°C ~ 24°C の間にほぼ留まっている。

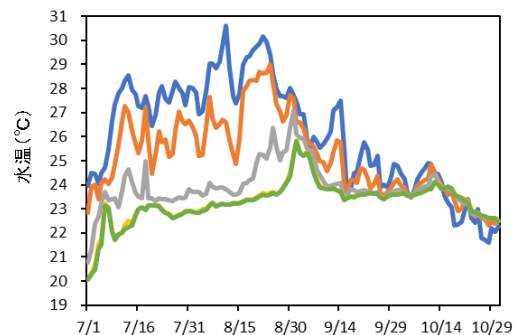
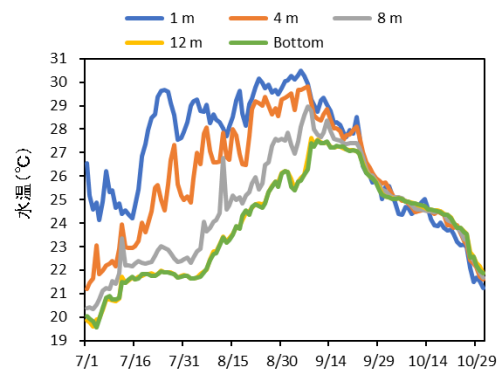


図-10 測点D(大阪港波浪観測塔) 上：2010年夏季 下：2013年夏季

4. 考察

本報の特色として、下記の3項目が挙げられる。：
 (1)2010年代後半からの急激な気温上昇に伴う水温上昇を対象としている、(2)水温の連続測定値を用いている、(3)湾外（紀伊水道の底層）から流入する冷水の影響に焦点を当てている、である。

多くの場合、気候変動に伴う水温上昇として、100年に1℃～2℃の緩やかな水温上昇が解析されるのに対し、本報では10年に数度という、近年の気温、水温の急上昇の大阪湾における実態を明らかにした。また、気温と同等な1時間ごとのサンプリング間隔のデータを用いることにより、月に1回のサンプリングでは測定が難しい夜間のデータも考慮した。このような理由により、冷水流入の有無によって、底層水温の季節変動パターンが大きく異なることは、今まで知られていなかった。

5. まとめ

本報では、2010年度～2023年度の期間において、以下の結果が得られた。

冬季(1月～3月平均)は、水温は気温と連動して上昇しており、明石海峡の年最低水温は2011年の7.3℃から2024年の10.2℃へと、約3℃上昇した。このため日平均水温が10℃以下となる日数は、2011年の84日から減少し、2023年、2024年は0日であった。

一方、夏季(7月～9月平均)は、気温、表層水温ともに有意な上昇が見られなかった。このため、暑夏であっても、底層への冷水流入があると、表層水温は上昇しなかった。

大阪湾奥部の浅海域においても、下層水温の季節変動には、湾外(紀伊水道の底層)からの冷水流入の有無が大きく影響していた。冷水流入が顕著な2013年の例では、底層水温に、夏季の気温上昇の山が見られず、表層水温は、例年の夏季よりも低かった。

2010年代後半からの、冬季の10年当たり1.77℃の気温上昇、1.45℃の水温上昇は、気候変動として言われる気温上昇速度の10倍以上の大きさである。この急上昇期は、まだその全貌が見えないが、1980年～2000年間にある急激な気温上昇期の次の気温上昇期とみられ、これが浅海域の冬季水温を上昇させていた。これらの結果は一基礎データとして、大阪湾再生に貢献すると考えられる。

6. 今後の課題

本報では2024年3月までのデータを元に調査を行ったが、図-11からわかるとおり、年平均の気温年差は2020年以降年々差が大きくなっている。参考に2025年までの冬季平均の水温と気温の時系列を調べると、2023年以降はやや横ばいで推移しているが、2011年から2025年の変化傾向としては冬季の年平均水温は上昇傾向を示している(図-12)。

気象庁の気候変動監視レポート2024年では、「日本の年平均気温が2年連続で観測史上1位を更新」をあげている⁶⁾。2024年度以降も非常に暑くなっているため、今後も気温上昇と水温上昇をモニタリングしていく必要があると考えられる。

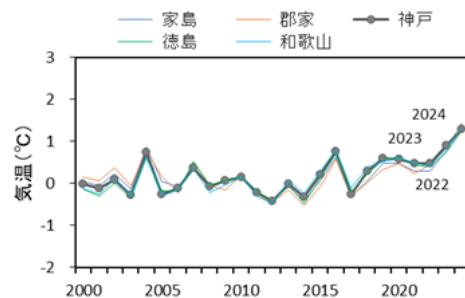


図-11 気温年差 (年平均)

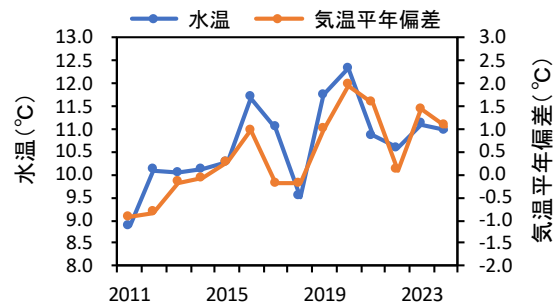


図-12 明石海峡の冬季平均の水温と気温の時系列

参考文献

- 1) 気候変動監視レポート 2023. URL
https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2023/pdf/ccmr2023_all.pdf
- 2) 日本水産資源保護協会, 1985. 水産生物の生物史と生態. 日本水産資源保護協会, 東京
- 3) 日本水産資源保護協会, 1985. 水産生物の生物史と生態 (続). 日本水産資源保護協会, 東京
- 4) 藤原建紀, 2013. 第2部第1章瀬戸内海の水温・塩分と海況変動. 海洋気象学会編, 瀬戸内海の気象と海象. 海洋気象学会, 神戸, pp. 37-61
- 5) 日本海洋データセンター. 海洋データ・プロダクト, J-DOSS, 定地水温データ
- 6) 気候変動監視レポート 2024. URL.
<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/index.html>