

注：これは 2024 年 3 月に発行された「瀬戸内海ブロック浅海定線調査 観測 50 年成果集」※の一部抜粋である。

※瀬戸内海ブロック浅海定線調査観測 50 年成果集. 水産研究・教育機構水産技術研究所編, 広島, 2024; 216-240.

9. 山口県海域（周防灘）

山口県水産研究センター 渡邊俊輝・茅野昌大

はじめに

周防灘は瀬戸内海西部に位置し、山口、福岡、大分の三県に囲まれている海域で、東部で伊予灘に接し、西部で関門海峡を通して響灘に接している。海域の地形は、西部に向かうほど浅くなる東深西浅の形状になっている。この周防灘の山口県海域において、山口県は 1972 年（昭和 47 年）に浅海定線観測を開始し、2023 年（令和 5 年）現在も観測を継続している（図 9-1）。

山口、福岡、大分の 3 県は、1973～2002 年（30 年間）の観測資料を使用し、周防灘の水温、塩分、栄養塩などの長期変化やそれらと漁業生産との関係をとりとまとめた¹⁾。その後山口県は、2012 年までの 40 年間の資料を用いて、周防灘の水温、塩分、栄養塩などの季節変化および長期変動傾向を調べ、さらに周防灘を 3 つの海域に区分して、海域別の長期変動傾向の特徴を報告している²⁾。1973～2022 年の 50 年間の資料を整理する今回の取組では、統計的な手法により長期トレンドの有無、トレンドの大きさ、ジャンプの検出を試み、周防灘の山口県海域における海洋環境の長期変化のより詳細な特徴を明らかにした。なお、フーリエ級数展開により、周期関数のあてはめが可能な観測項目である水温については、秋山・中嶋（2018）³⁾の手法に基づき、観測日の違いを考慮した平年値の算出を行い、求めた平年値を解析に利用した。

解析資料と方法

解析に用いた資料は、周防灘の山口県海域（図 9-1、以下、周防灘）で得られた 50 年間（1973 年 1 月～2022 年 12 月）の水温、塩分、透明度、DIN、DIP、DO の観測資料（一般項目の水温、塩分、透明度は毎月、特殊項目の DIN、DIP、DO は年間 4 回（2、5、8、11 月）の資料）である。今回の解析では、40 年成果集²⁾の解析には用いなかった 2 つの観測点（2007 年から観測を開始した Sta.23 および Sta.24）の資料も使用した。このため、観測点は 1973～1987 年の期間は Sta.1～20 の 20 点、1988～2007 年の期間は Sta.1～22 の 22 点、2008～2022 年の期間は Sta.1～24 の 24 点が解析の対象となる。水温、塩分は、表層と底層に加えて 10m 層のデータも用い解析を行った。

水温・塩分の観測に用いる測器は、平成 26 年（2014 年）4 月に AST-500（アレック電子（株））から ASTD102（JFE アドバンテック（株））に変更している。またサリノメーターは、令和元年（2019 年）10 月に Model3-G（（株）鶴見精機）から Digi-Auto Model 6（（株）鶴見精機）に変更した。これまでに用いた化学分析の方法は、30 年成果集¹⁾および 40 年成果集²⁾に記載された方法と同一であるため、ここでは省略する。

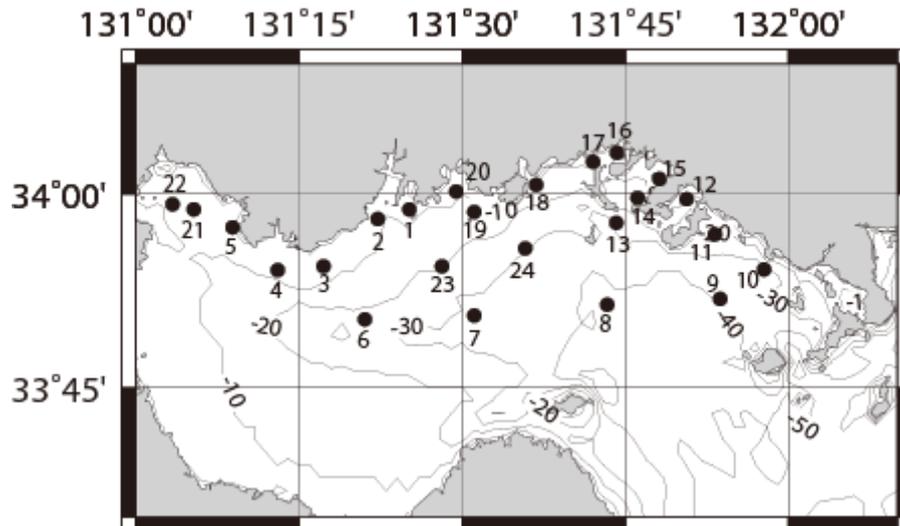


図 9-1. 観測点図 (●は観測点, 数値は測点番号, コンタは 10m ごとの等深線を示す。)

各観測項目（水温，塩分，透明度，DIN，DIP，DO）について，まず 1973 年 1 月から 2022 年 12 月までの資料を，月ごとに空間平均（海域平均）した。40 年成果集²⁾では，周防灘を西部，東部，沖合の 3 海域に区分したが，今回の解析では周防灘のすべての観測点で海域平均した。

冒頭に述べたとおり水温については，秋山・中嶋 (2018)³⁾ にならい周期関数を用いて，調査日の違いを考慮して平年値を求めた。フーリエ級数展開にあたり，数日にわたる観測期間の中から調査日（代表日）を決める必要があるため，観測した測点の最も多い日を代表日とした。また，観測した測点の数が同じ日が複数ある場合は，調査日の早い日を代表日とした。なお，周期関数のあてはめのできない水温以外の項目については，50 年間の各月のデータの単純平均によって平年値を求めた。

次に，観測値と平年値の差（平年偏差）の時系列データを用いて，秋山・中嶋 (2018)³⁾と同様に線形トレンドの有無と大きさ，ジャンプ検出についての長期変動解析を行った。すなわち，ノンパラメトリック検定である Mann-Kendall 検定によりトレンドの有無を，Sen's Slope によりトレンドの大きさを調べた。また，ジャンプについては，ノンパラメトリックの時系列の均質性検定である Pettitt 検定により変化点を求めた。これらの両検定の有意水準は，それぞれ 5%とした。これらの長期変動解析は，全ての月のデータを用いた場合と，季節依存性を調べるために 2，5，8，11 月をそれぞれ冬季，春季，夏季，秋季の代表月とみなし，各データを用いた場合とで行った。なお，周期関数を用いた水温の平年値推定と長期変動解析には R version 4.3.0⁴⁾を使用した。

結果

水温

観測日の違いを考慮して求めた平年値を図 9-2 に示す。各層とも 2 月中～下旬に最低値（表層：2 月 14 日 (9.38℃)，10m 層：2 月 24 日 (9.81℃)，底層：2 月 19 日 (9.38℃)) を示す。3 月中旬以降，表層と 10m 層・底層との間に差がみられはじめ，その後，表層で 8 月 15 日 (27.45℃)，10m 層で 9 月 4 日 (24.99℃)，底層で 9 月 7 日 (24.69℃) に最高値を示している。すなわち，最低値を示す時期は各層でほぼ一致したが，表層と 10m 層・底層との最高値には 20～27 日の位相差が

認められた。鉛直方向の水温差（表層との水温差）の最も大きい日は、表層-10m層の間では7月25日（3.80℃）、表層-底層の間では7月29日（4.05℃）となり、いずれも7月下旬であった。

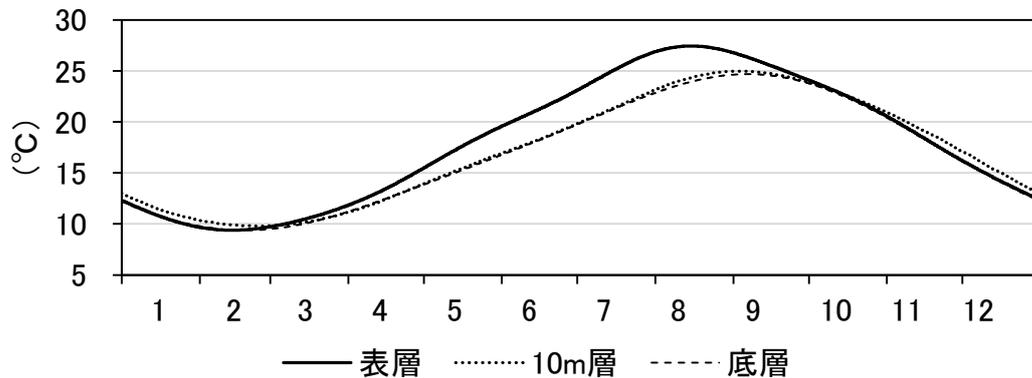


図 9-2. 周防灘における水温の季節変動（平年値）

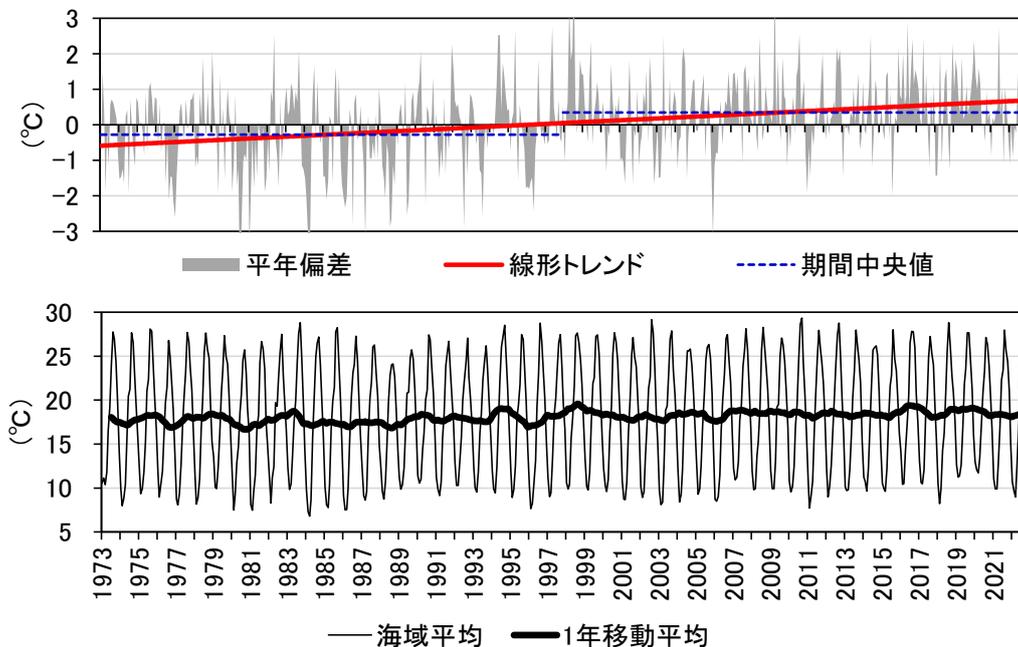


図 9-3. 周防灘における表層水温の経年変動（下段）と平年偏差（上段）

図 9-3 に表層水温の経年変動と平年偏差の時系列を示す。1 年移動平均（図 9-3 下段）に注目すると、目録で 2005 年あたりまで 2~4 年周期の変動がみられるが、それ以降の変動幅は小さい。年間水温の最高値の特徴は明瞭でないが、最低値は変動しながら徐々に高くなる傾向が認められる。

長期変動解析の結果、周防灘における表層水温には有意な上昇トレンドが認められ、その大きさは $+0.025 \text{ } ^\circ\text{C year}^{-1}$ であった（図 9-3 上段太線）。また水温の不連続的变化については、1997 年 11 月に上昇側への水温ジャンプが検出された（図 9-3 上段破線）。ジャンプ前の中央値は -0.28°C 、ジャンプ後は $+0.35^\circ\text{C}$ となり、ジャンプの前後で 0.63°C 上昇した。

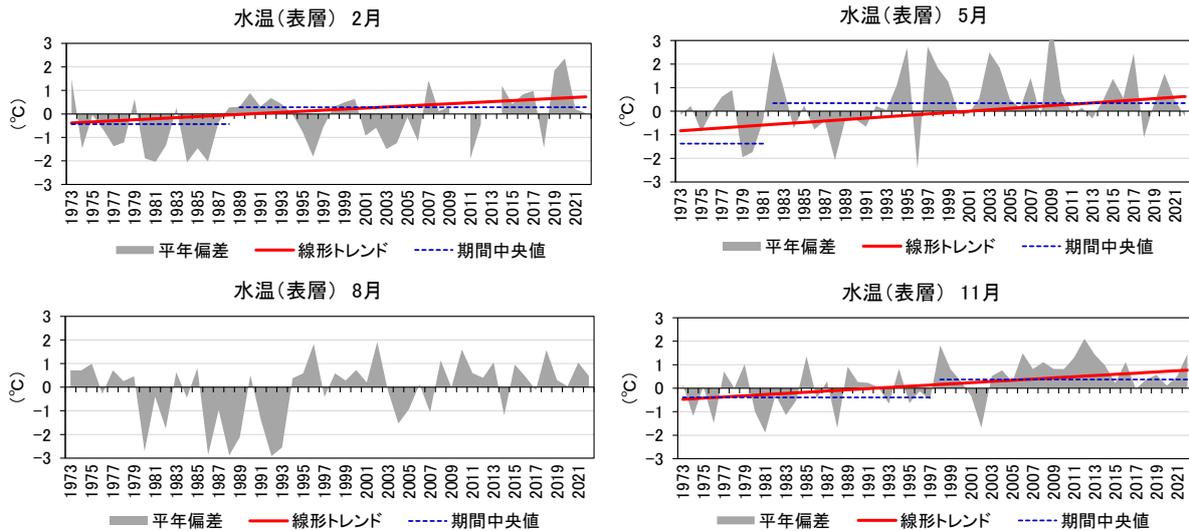


図 9-4. 表層水温の季節別の時系列 (2月:上段左, 5月:上段右, 8月:下段左, 11月:下段右)

水温の上昇傾向の季節依存性を調べるために、周防灘の表層水温を2月、5月、8月、11月の季節別に解析した結果、8月を除く2、5、11月に有意な上昇トレンドが認められ、その大きさは、それぞれ年当たり $+0.023\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $+0.030\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $+0.025\text{ }^{\circ}\text{C}$ であった (図 9-4)。

一方、水温の不連続的変化については、2月において1988年に上昇側への水温ジャンプが検出された。ジャンプ前の中央値は $-0.44\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、ジャンプ後は $+0.28\text{ }^{\circ}\text{C}$ となり、ジャンプの前後で $0.72\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上昇した (図 9-4 上段左 破線)。5月にも1982年に上昇側へのジャンプが検出された。ジャンプ前の中央値は $-1.38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、ジャンプ後は $+0.34\text{ }^{\circ}\text{C}$ で、ジャンプの前後で $1.72\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上昇した (図 9-4 上段右 破線)。さらに11月にも1998年に上昇側へのジャンプが検出され、ジャンプ前の中央値は $-0.39\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、ジャンプ後は $+0.37\text{ }^{\circ}\text{C}$ となり、ジャンプの前後で $0.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上昇した (図 9-4 下段右 破線)。以上のとおり表層水温では、5月の水温ジャンプの幅が最も大きかった。

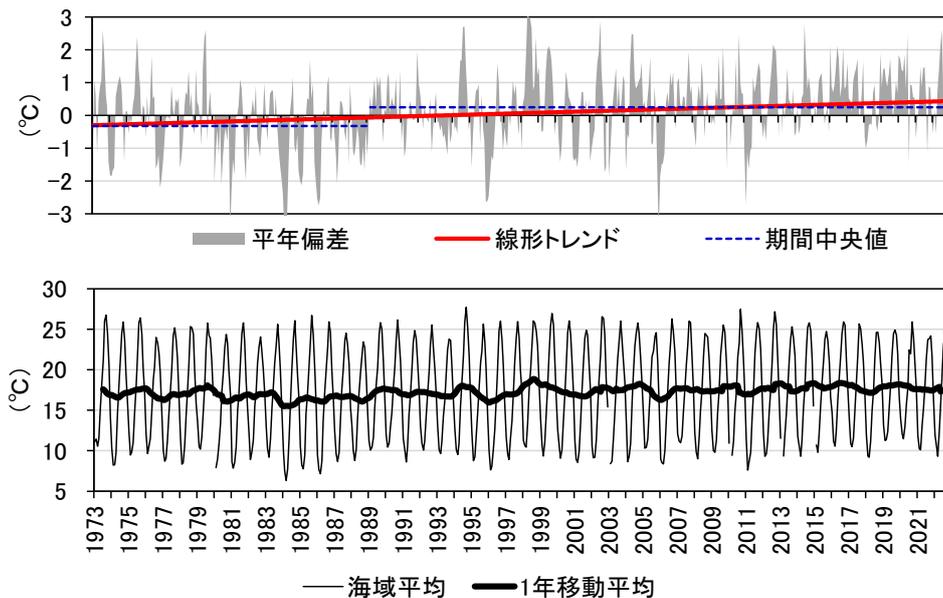


図 9-5. 周防灘における 10m 層水温の経年変動 (下段) と年平均偏差 (上段)

図 9-5 に 10m 層水温の経年変動と平年偏差の時系列を示す。10m 層水温も表層と同様に 2005 年あたりまで 2~4 年周期の変動がみられるが、それ以降の変動幅はやや小さい (図 9-5 下段)。年間の水温最低値の上昇傾向も表層のそれに類似している。

長期変動解析の結果、周防灘における 10m 層水温には有意な上昇トレンドが認められ、その大きさは $+0.015 \text{ } ^\circ\text{C year}^{-1}$ であった (図 9-5 上段太線)。また水温の不連続的变化については、1989 年 3 月に上昇側へのジャンプが検出され、ジャンプ前の中央値は -0.32°C 、ジャンプ後は $+0.25^\circ\text{C}$ となり、ジャンプの前後で 0.57°C 上昇した (図 9-5 上段破線)。表層水温ジャンプの検出時期 (1997 年 11 月) に対し、10m 層は 1989 年 3 月に検出され、両者の検出時期は約 8 年異なっていた。

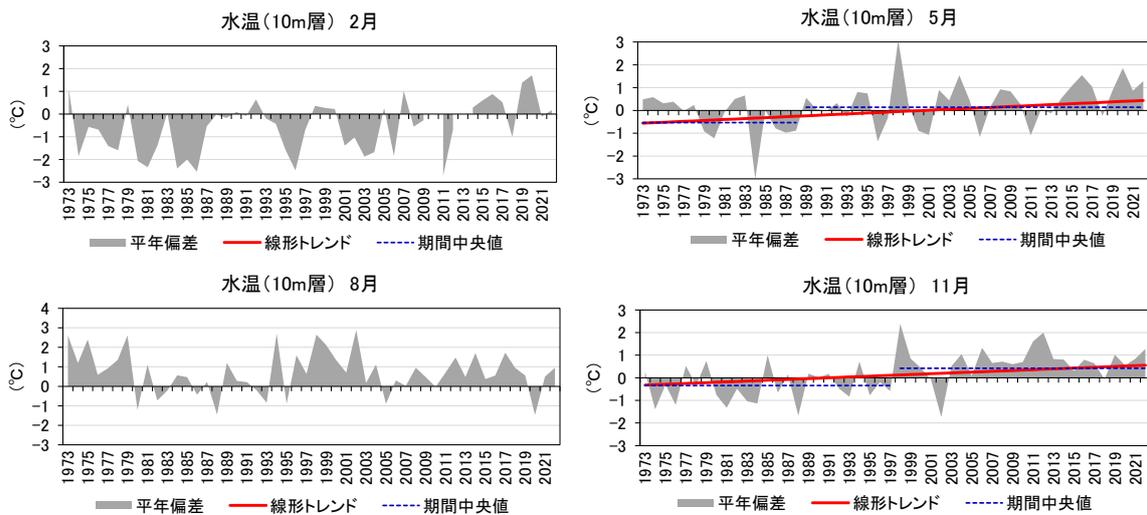


図 9-6. 10m 層水温の季節別の時系列 (2 月:上段左, 5 月:上段右, 8 月:下段左, 11 月:下段右)

10m 層水温を季節別に解析した結果、5、11 月に有意な上昇トレンドが認められ、その大きさはそれぞれ年あたり $+0.020 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $+0.018 \text{ } ^\circ\text{C}$ であった (図 9-6)。水温の不連続的变化については、5 月に上昇側へのジャンプ (1989 年) が検出された。ジャンプ前の中央値は -0.53°C 、ジャンプ後は $+0.14^\circ\text{C}$ となり、ジャンプの前後で 0.67°C 上昇した (図 9-6 上段右 破線)。11 月には 1998 年に上昇側へのジャンプが検出され、ジャンプ前の中央値は -0.34°C 、ジャンプ後は $+0.42^\circ\text{C}$ で、ジャンプの前後で 0.76°C 上昇した (図 9-6 下段右 破線)。

図 9-7 に底層水温の経年変動と平年偏差の時系列を示す。図 9-7 下段に示す底層水温の 1 年移動平均は、表層水温や 10m 層水温の 1 年移動平均の特徴 - 2000 年台の半ばまで 2~4 年周期の変動がみられる特徴 - と同じ様相を呈し、その後、周期性が不明瞭になること、変動の幅が小さくなること、さらに水温最低値の上昇傾向も類似している。

周防灘における底層水温には有意な上昇トレンドが認められ、その大きさは $+0.016 \text{ } ^\circ\text{C year}^{-1}$ であった (図 9-7 上段太線)。この値は 10m 層のそれとほぼ一致している。水温の不連続的变化については、1989 年 2 月に上昇側への水温ジャンプが検出された。ジャンプ前の中央値は -0.37°C 、ジャンプ後は $+0.19^\circ\text{C}$ となり、ジャンプの前後で約 0.56°C 上昇した (図 9-7 上段破線)。10m 層と底層のジャンプの検出時期およびトレンドの大きさは、ほぼ同じであった。

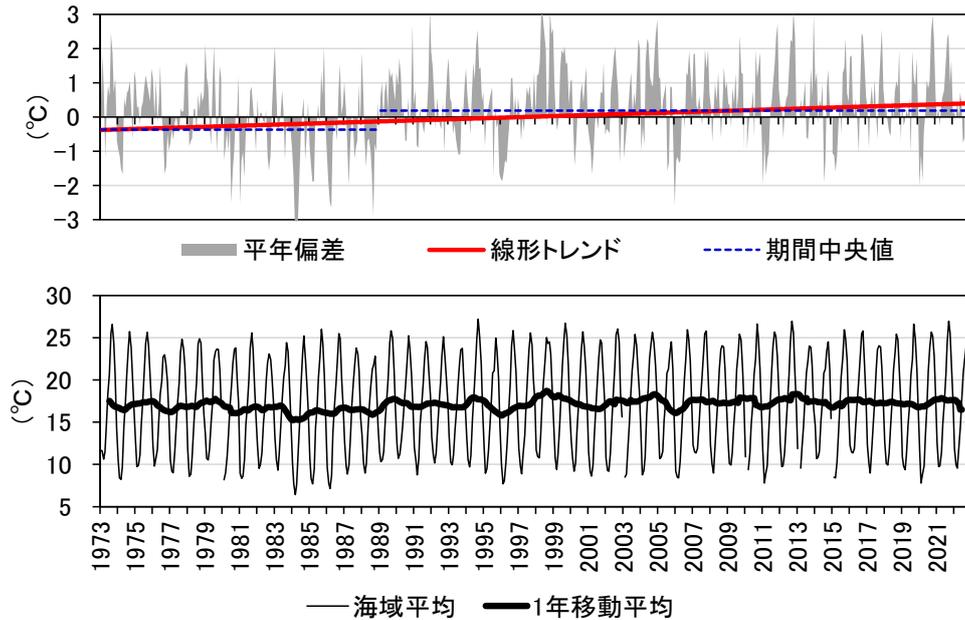


図 9-7. 周防灘における底層水温の経年変動（下段）と平年偏差（上段）

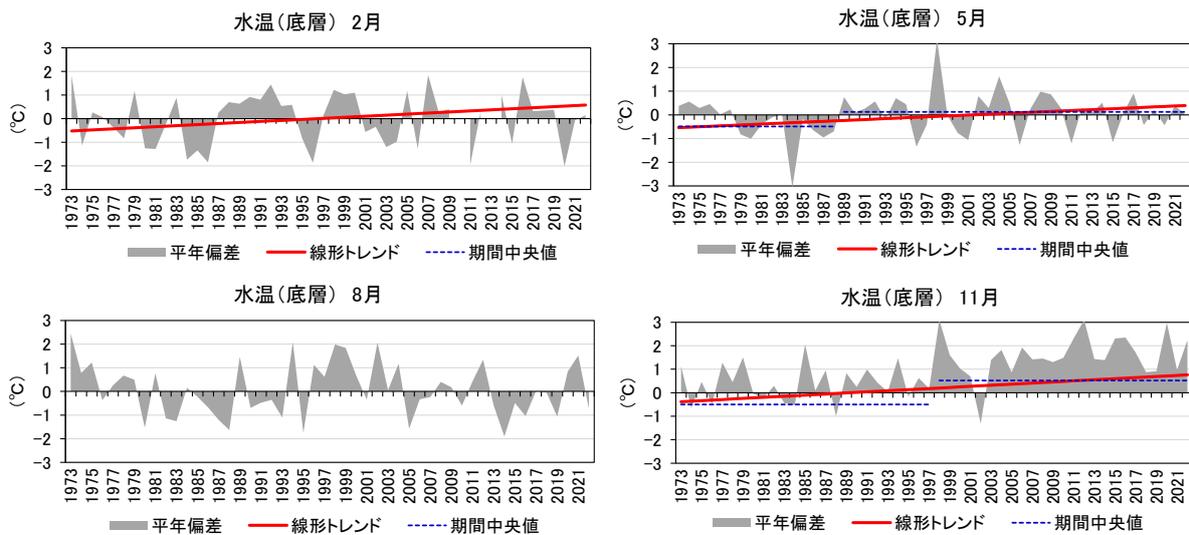


図 9-8. 底層水温の季節別の時系列（2月:上段左，5月:上段右，8月:下段左，11月:下段右）

底層水温を季節別に解析した結果，2，5，11月に有意な上昇トレンドが認められ，その大きさはそれぞれ年当たり $+0.022\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $+0.019\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $+0.023\text{ }^{\circ}\text{C}$ であった（図 9-8）。

水温の不連続については，2月，8月に水温ジャンプは検出されなかったが，5月に上昇側へのジャンプが1989年に検出された（図 9-8 上段右 破線）。5月のジャンプ前の中央値は $-0.49\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，ジャンプ後は $+0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ となり，ジャンプの前後で $0.62\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上昇した。11月にも上昇側へのジャンプ（1998年）が検出され，ジャンプ前の中央値は $-0.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，ジャンプ後は $+0.52\text{ }^{\circ}\text{C}$ で，ジャンプの前後で $1.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上昇した（図 9-8 下段右 破線）。

塩分

図 9-9 に示す塩分の季節変動によると、表層は 2 月に最高値 (32.986)、10m 層と底層は 4 月に最高値 (それぞれ 33.283, 33.157) を示す。また表層は 7 月に年間の最低値 (30.343) を示すのに対し、10m 層では 9 月 (32.400)、底層では 10 月 (32.324) に最低値を示し、表層と海面下 (10m 層、底層) とでは、最低値の出現する時期が異なる。

4 月以降、表層と 10m 層・底層との間に塩分差がみられ、7 月にその差が最も大きくなる。その後 8 月から 10 月にかけて、表層と 10m 層 (底層) との差が徐々に小さくなり、11 月には差がほぼなくなる (一様になる)。

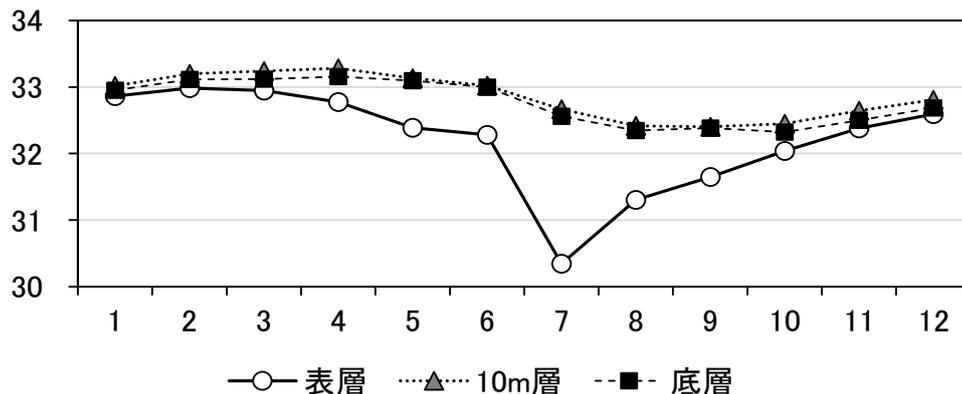


図 9-9. 周防灘における塩分の季節変動 (平年値)

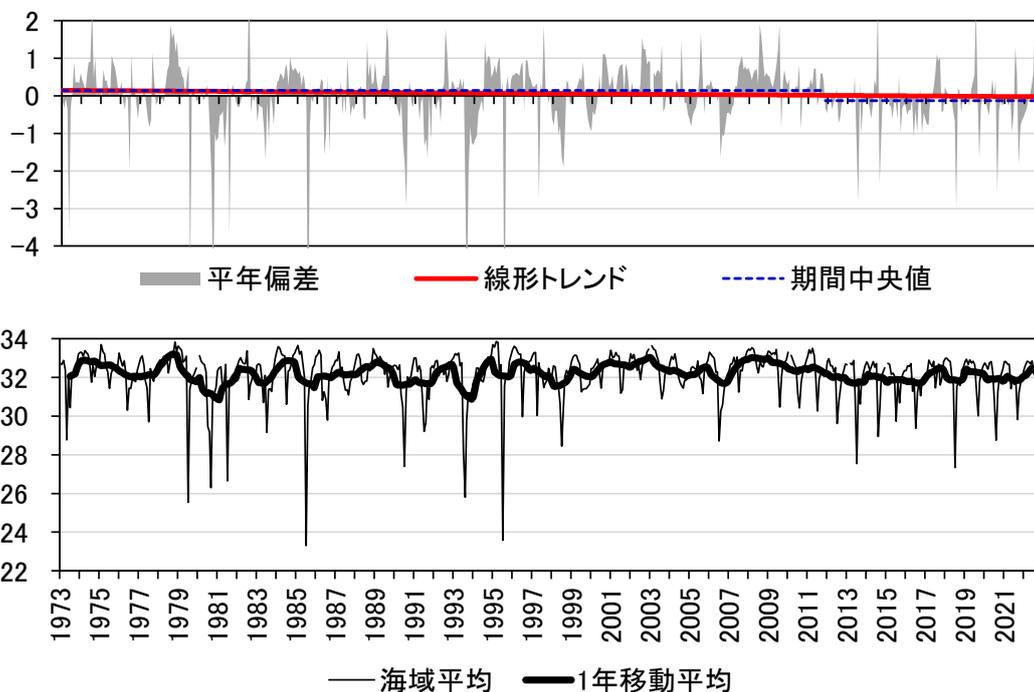


図 9-10. 周防灘における表層塩分の経年変化 (下段) と平年偏差 (上段)

図 9-10 に表層塩分の経年変動と平年偏差の時系列を示す。1 年移動平均 (図 9-10 下段) には、目撃で 2010 年あたりまで 2~5 年周期の変動がみられるが、それ以降、周期性は不明瞭になり、変動の幅も小さくなる。また年間の塩分最高値は、2010 年から 2016 年にかけて、徐々に低下している様子がわかる。一方、年間の塩分最低値は年によって変動が大きい。

長期変動解析の結果、周防灘における表層塩分には有意な低下トレンドが認められ、その大きさは $-0.0034 \text{ year}^{-1}$ であった (図 9-10 上段太線)。また塩分の不連続的变化については、2011年11月に下降側への塩分のジャンプが検出された(図 9-10 上段 破線)。ジャンプ前の中央値は $+0.147$ 、ジャンプ後は -0.124 となり、ジャンプの前後で 0.271 下降した。

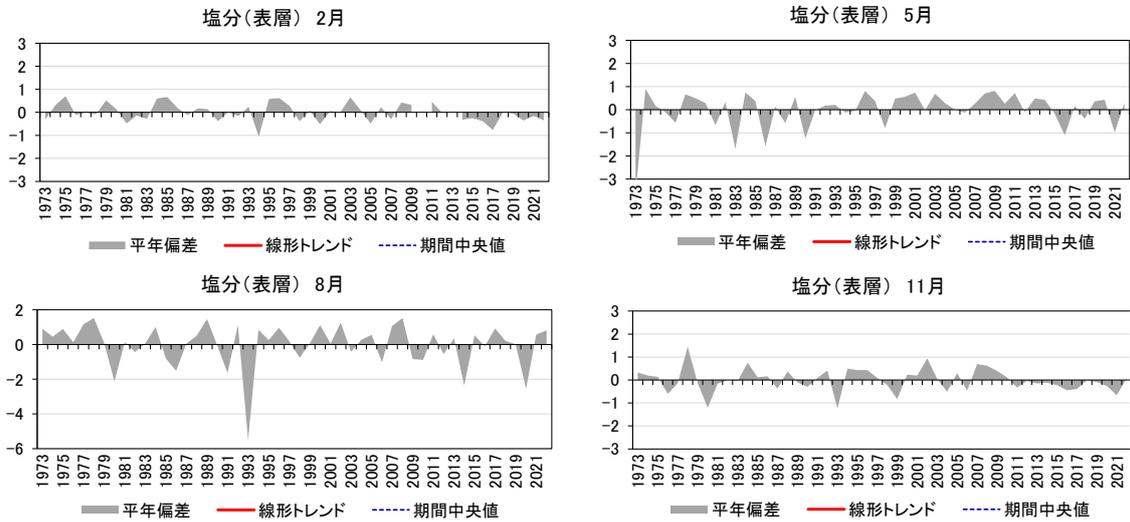


図 9-11. 表層塩分の季節別の時系列 (2月:上段左, 5月:上段右, 8月:下段左, 11月:下段右)

表層塩分変動の季節依存性を調べるために、2月、5月、8月、11月の季節別に解析した結果、すべての月で有意なトレンドは認められなかった。すなわち季節依存性のないことがわかった。また塩分の不連続的变化についても、すべての月で有意なジャンプは検出されなかった(図 9-11)。

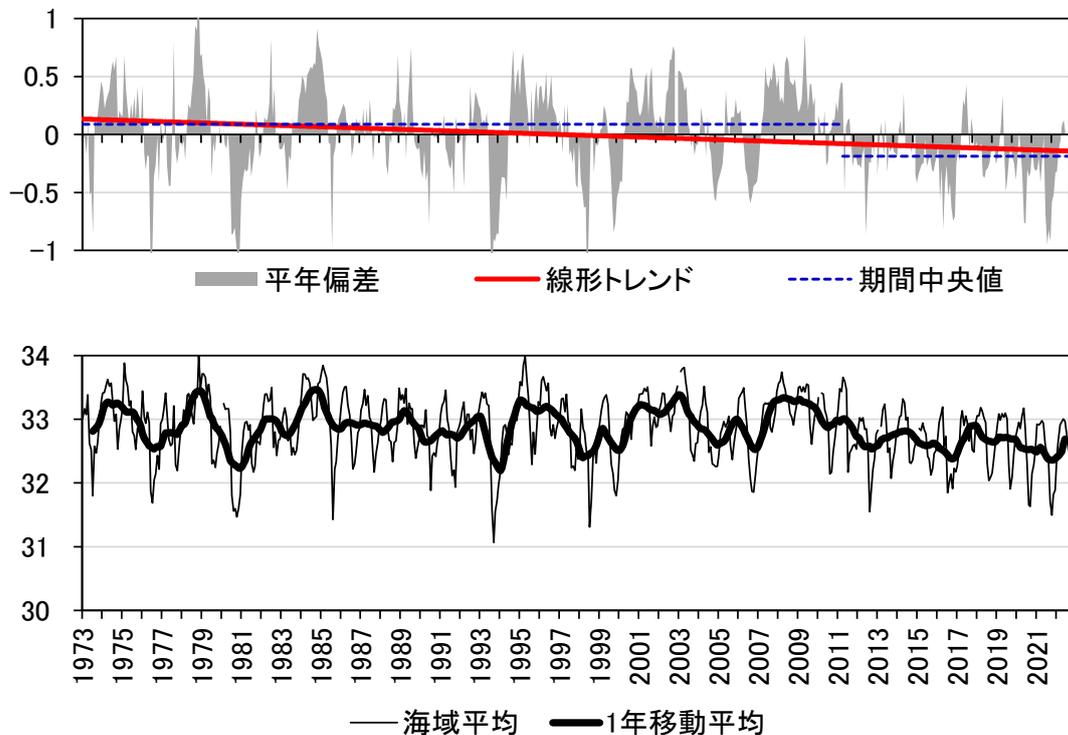


図 9-12. 周防灘における 10m 層塩分の経年変動 (下段) と平年偏差 (上段)

図 9-12 に 10m 層塩分の経年変動と平年偏差の時系列を示す。表層では 2010 年以降に 2~5 年の周期変動が不明瞭になったのに対し、10m 層では期間をとおして 2~5 年の周期的な変動が確認された (図 9-12 下段)。

長期変動解析の結果、周防灘における 10m 層塩分には有意な低下トレンドが認められ、その大きさは $-0.0055 \text{ year}^{-1}$ であった (図 9-12 上段太線)。また 10m 層塩分の不連続的变化については、2011 年 6 月に下降側へのジャンプが検出された (図 9-12 上段破線)。ジャンプ前の中央値は $+0.090$ 、ジャンプ後は -0.188 となり、ジャンプの前後で 0.278 下降した。ジャンプが検出された時期は、表層塩分のジャンプ時期とほぼ一致した。

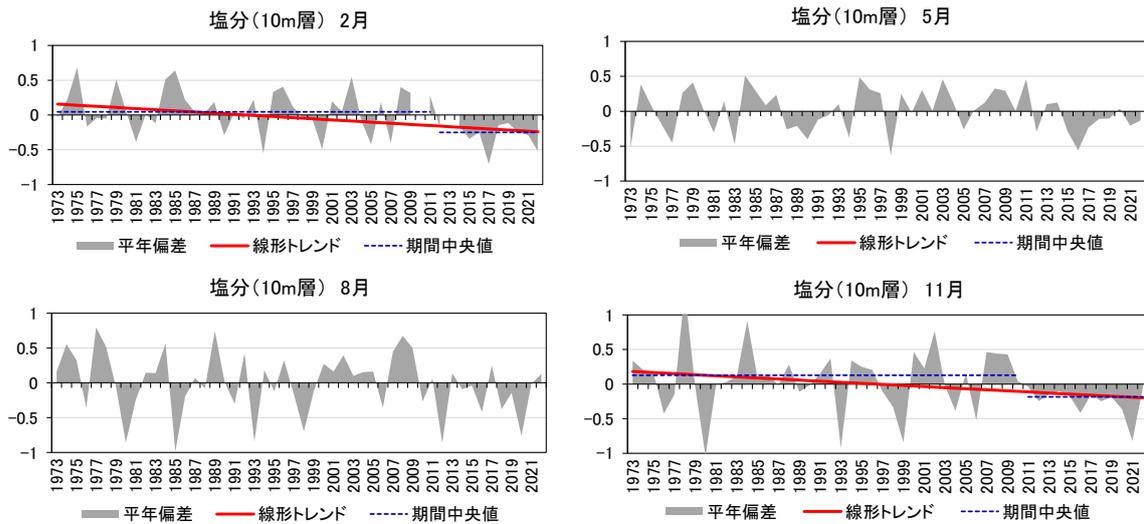


図 9-13. 10m 層塩分の季節別の時系列 (2月:上段左, 5月:上段右, 8月:下段左, 11月:下段右)

10m 層塩分を季節別に解析した結果では、2, 11 月に有意な低下トレンドが認められ、その大きさはそれぞれ年当たり -0.008 , -0.008 であった (図 9-13)。

10m 層塩分の不連続的变化については、低下トレンドの認められた月 (2, 11 月) に、いずれも下降側への塩分ジャンプが検出された。2 月の下降側へのジャンプは 2012 年で、ジャンプ前の中央値は $+0.044$ 、ジャンプ後は -0.250 となり、ジャンプの前後で 0.294 下降した (図 9-13 上段左破線)。11 月の下降側へのジャンプは 2011 年で、ジャンプ前の中央値は $+0.126$ 、ジャンプ後は -0.184 となり、ジャンプの前後で 0.311 下降した (図 9-13 下段右破線)。

図 9-14 に底層塩分の経年変動と平年偏差の時系列を示す。底層は 10m 層の変動に似ており、期間をとおして周期的な変動が確認された (図 9-14 下段)。

長期変動解析の結果、周防灘における底層塩分には有意な低下トレンドが認められ、その大きさは $-0.0031 \text{ year}^{-1}$ であった (図 9-14 上段太線)。また底層塩分の不連続的变化については、2011 年 11 月に下降側へのジャンプが検出された (図 9-14 上段破線)。ジャンプ前の中央値は $+0.079$ 、ジャンプ後は -0.134 となり、ジャンプの前後で 0.213 下降した。底層塩分のジャンプの検出された時期は、表層塩分 (2011 年 11 月)、10m 層塩分 (2011 年 6 月) とほぼ一致した。

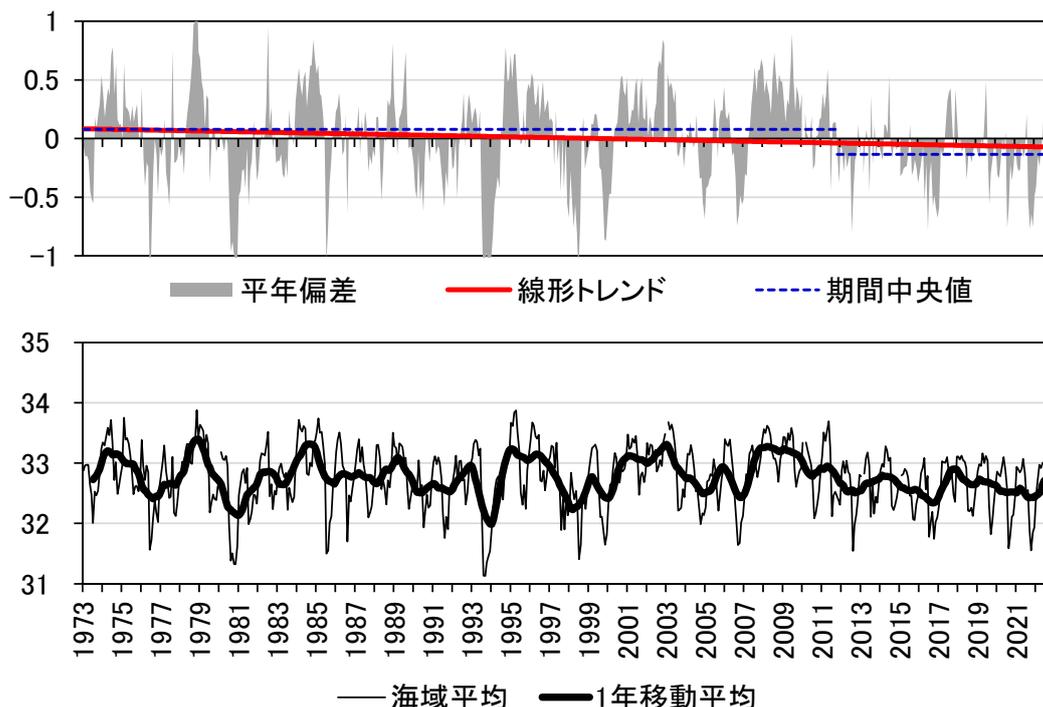


図 9-14. 周防灘における底層塩分の経年変動（下段）と年平均偏差（上段）

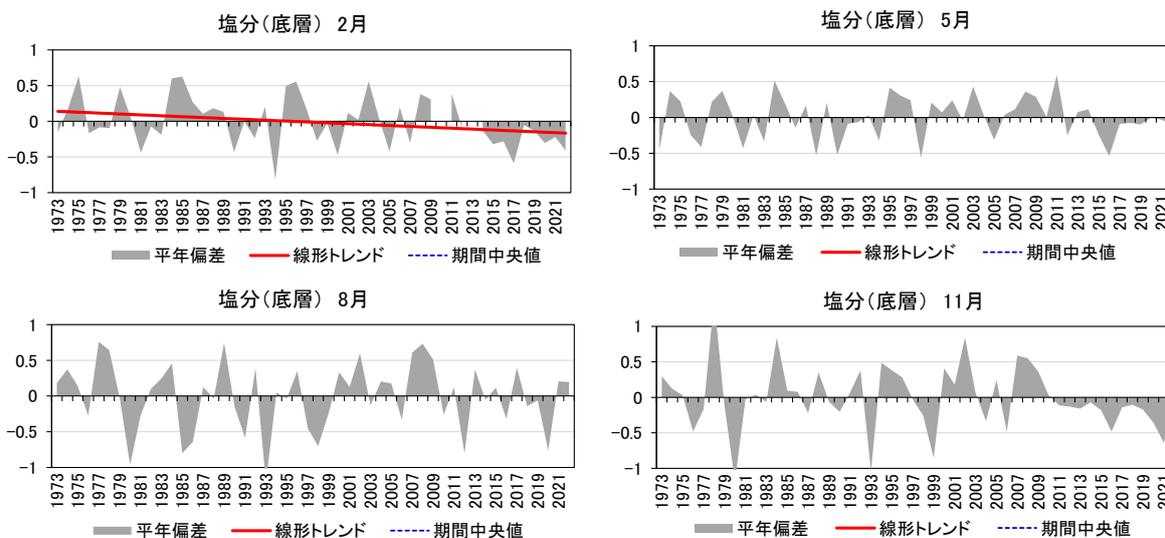


図 9-15. 底層塩分の季節別の時系列（2月:上段左，5月:上段右，8月:下段左，11月:下段右）

底層塩分を季節別に解析した結果，2月に有意な低下トレンドが認められ，その大きさは -0.006 year^{-1} であった（図 9-15）。その他の月では有意なトレンドは存在しなかった。底層塩分の不連続的变化については，いずれの月もジャンプは検出されなかった。

透明度

図 9-16 に示す透明度の季節変動によると、透明度は冬季に高く、3月に最高値(6.8m)を示す。その後7月(5.1m)まで低下し、8月にいったん上昇した後、再び低下し10月に最低値(5.0m)となる。

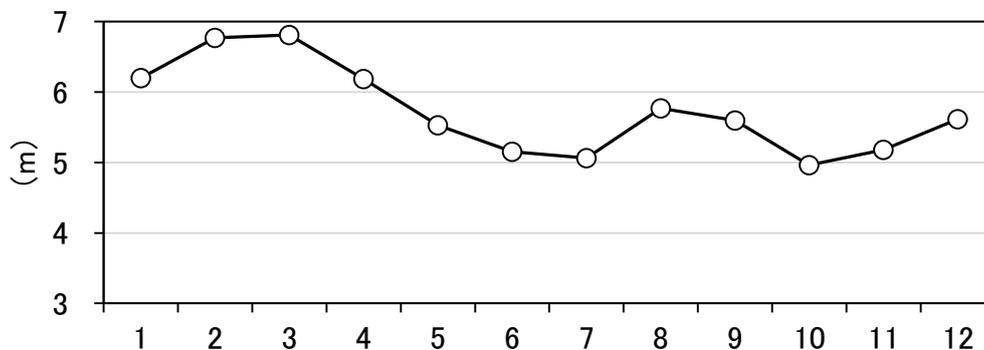


図 9-16. 周防灘における透明度の季節変動 (平年値)

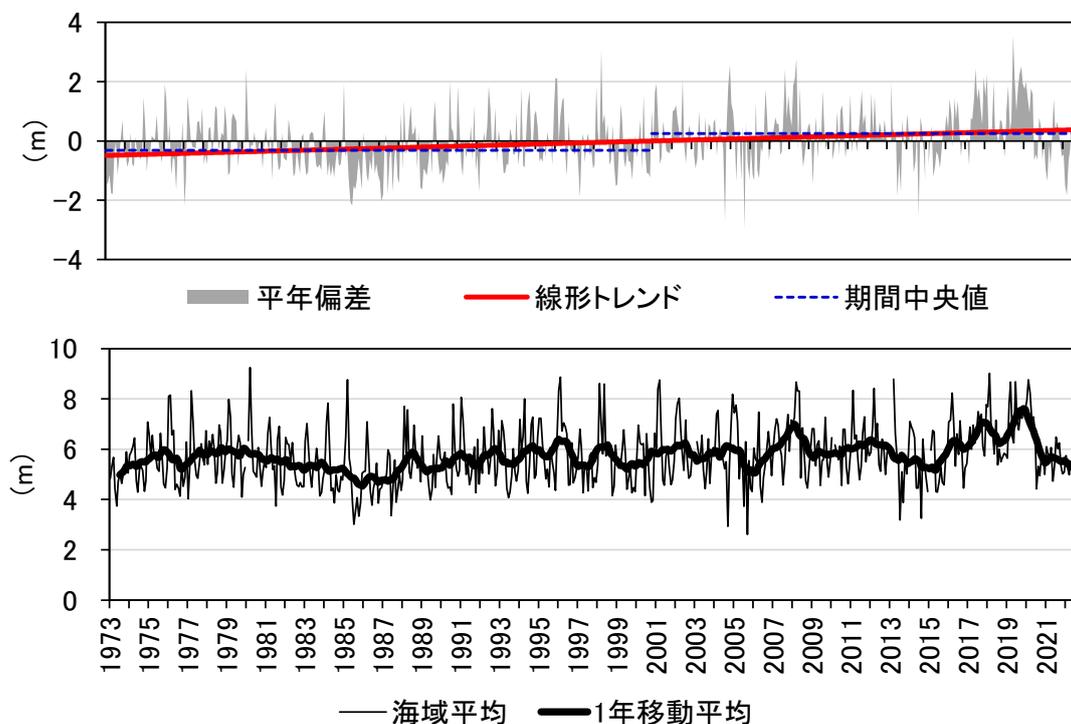


図 9-17. 周防灘における透明度の経年変動 (下段) と平年偏差 (上段)

図 9-17 に透明度の経年変動と平年偏差の時系列を示す。1980年代半ばに透明度が低下し、1989年から2006年にかけて約2年の周期の変動がみられる。その後の透明度は、やや高めで推移している。

長期変動解析の結果、周防灘における透明度には有意な上昇トレンドが認められ、その大きさは $+0.017\text{m year}^{-1}$ であった (図 9-17 上段太線)。また透明度の不連続的变化については、2000年12月に上昇側へのジャンプが検出された (図 9-17 上段破線)。ジャンプ前の中央値は -0.316m 、ジャンプ後は $+0.250\text{m}$ となり、ジャンプの前後で 0.564m 上昇した。

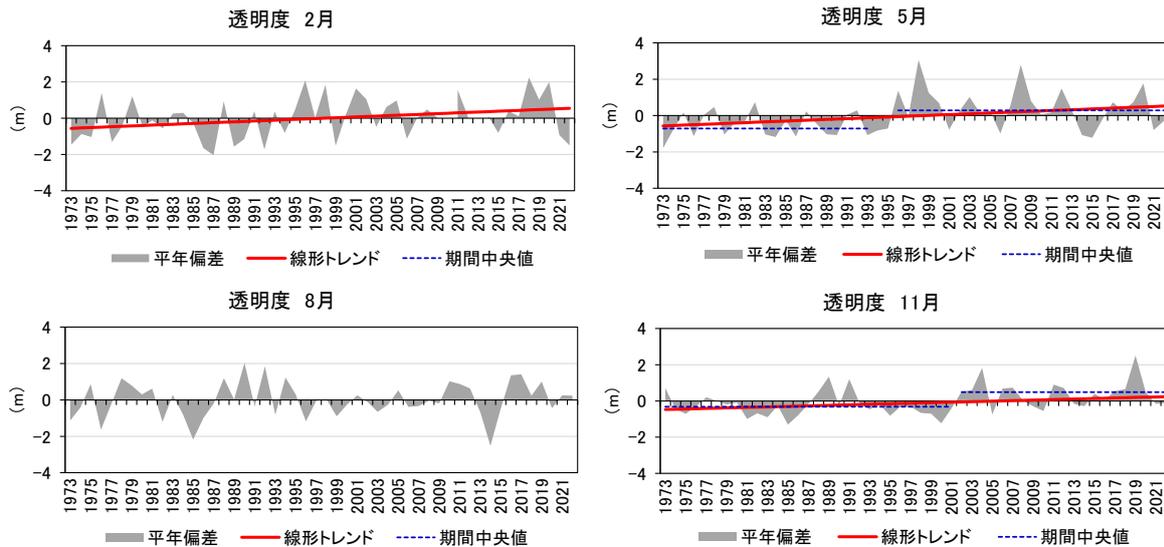


図 9-18. 透明度の季節別の時系列 (2月:上段左, 5月:上段右, 8月:下段左, 11月:下段右)

透明度を季節別に解析した結果, 2, 5, 11 月に有意な上昇トレンドが認められ, その大きさはそれぞれ年当たり $+0.022\text{m}$, $+0.022\text{m}$, $+0.014\text{m}$ であった (図 9-18)。

透明度の不連続的変化については, 5, 11 月に上昇側への透明度のジャンプが検出された。5 月の上昇側へのジャンプは 1995 年に検出され, ジャンプ前の中央値は -0.710m , ジャンプ後は $+0.284\text{m}$ となり, ジャンプの前後で 0.994m 上昇した (図 9-18 上段左 破線)。11 月のジャンプは 2002 年に検出され, ジャンプ前の中央値は -0.318m , ジャンプ後は $+0.485\text{m}$ となり, ジャンプの前後で 0.803m 上昇した (図 9-18 下段右 破線)。

DIN

図 9-19 に示す DIN の季節変動によると, 表層の DIN は 2 月から 5 月にかけて横ばいに推移した後, 8 月に最低値を示し 11 月に増加する。一方, 底層では 5 月に最低値を示し, その後 8 月, さらに 11 月に増加する。表層と底層とを比べると, 8 月から 11 月までの変化 (増加) は似ているが, 2~8 月の変化の様子は異なっている。

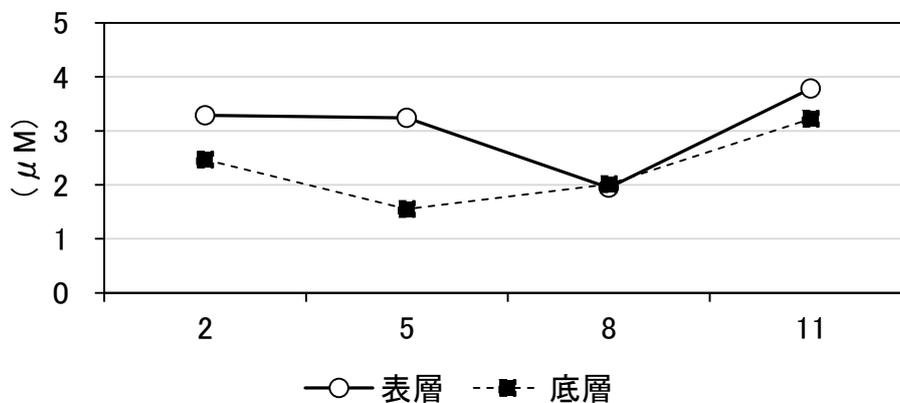


図 9-19. 周防灘における DIN の季節変動 (平年値)

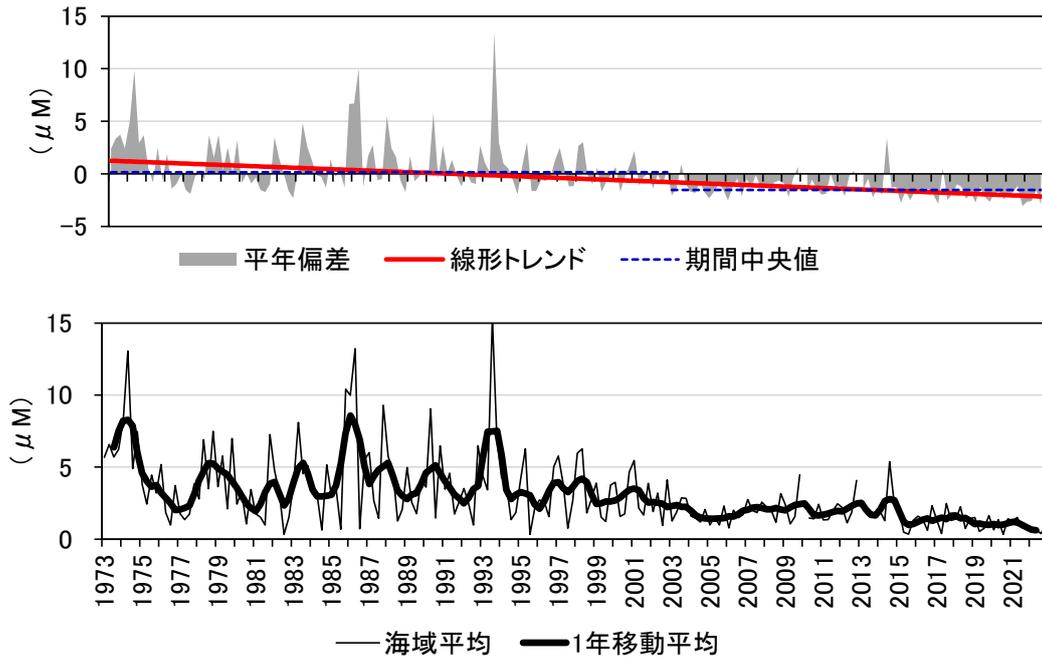


図 9-20. 周防灘における表層 DIN の経年変動（下段）と年平均偏差（上段）

図 9-20 に表層 DIN の経年変動と年平均偏差を示す。1 年移動平均（図 9-20 下段）に注目すると、1999 年以降、変動の振幅が小さくなりながら徐々に低下する傾向がみられる。

長期変動解析の結果、周防灘における表層 DIN には有意な低下トレンドが認められ、その大きさは $-0.068 \mu M \text{ year}^{-1}$ であった（図 9-20 上段太線）。また表層 DIN の不連続的变化については、2003 年 2 月に下降側へのジャンプが検出された（図 9-20 上段破線）。ジャンプ前の中央値は $+0.156 \mu M$ 、ジャンプ後は $-1.520 \mu M$ となり、ジャンプの前後で $1.676 \mu M$ 下降した。

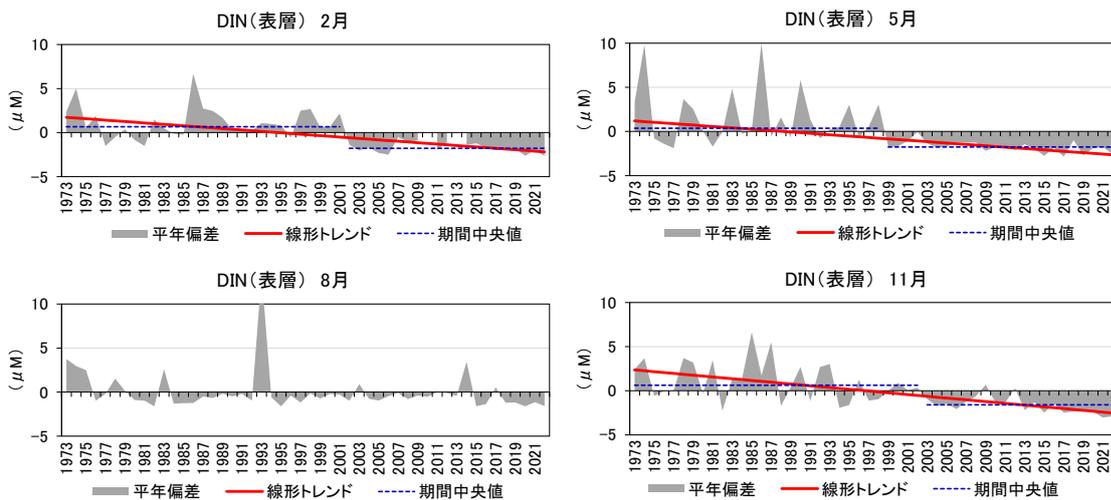


図 9-21. 表層 DIN の季節別の時系列（2 月:上段左、5 月:上段右、8 月:下段左、11 月:下段右）

表層 DIN を 2 月、5 月、8 月、11 月の季節別に解析した結果、2、5、11 月に有意な低下トレンドが認められ、その大きさはそれぞれ年当たり $-0.080 \mu M$ 、 $-0.078 \mu M$ 、 $-0.100 \mu M$ であったが（図 9-21 太線）、8 月には有意なトレンドは認められなかった。

表層 DIN の不連続的変化については、2月において2002年に下降側へのジャンプが検出され、ジャンプ前の中央値は $+0.658 \mu\text{M}$ 、ジャンプ後は $-1.777 \mu\text{M}$ となり、ジャンプの前後で $2.435 \mu\text{M}$ 下降した（図 9-21 上段左 破線）。5月には1999年に下降側へのジャンプが検出され、ジャンプ前の中央値は $-0.357 \mu\text{M}$ 、ジャンプ後は $-1.752 \mu\text{M}$ で、ジャンプの前後で $2.109 \mu\text{M}$ 下降した（図 9-21 上段右 破線）。11月には2003年に下降側へのジャンプが検出され、ジャンプ前の中央値は $+0.626 \mu\text{M}$ 、ジャンプ後は $-1.598 \mu\text{M}$ となり、ジャンプの前後で $2.224 \mu\text{M}$ 下降した（図 9-21 下段右 破線）。

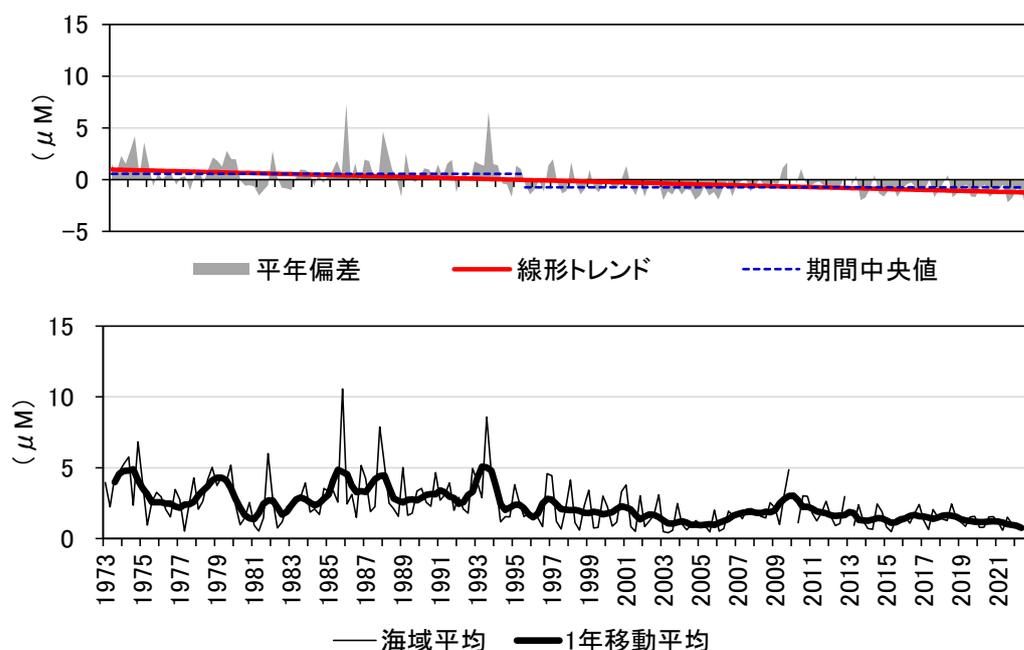


図 9-22. 周防灘における底層 DIN の経年変動（下段）と年平均偏差（上段）

図 9-22 に底層 DIN の経年変動と年平均偏差の時系列を示す。1年移動平均（図 9-22 下段）には、1995年あたりで減少し、かつ変動の振幅が小さくなり、その後横ばいに推移する特徴がみられる。

長期変動解析の結果、周防灘における底層 DIN には有意な低下トレンドが認められ、その大きさは $-0.045 \mu\text{M year}^{-1}$ であった（図 9-22 上段太線）。底層 DIN の不連続的変化については、1995年8月に下降側へのジャンプが検出された（図 9-22 上段破線）。ジャンプ前の中央値は $+0.551 \mu\text{M}$ 、ジャンプ後は $-0.739 \mu\text{M}$ となり、ジャンプの前後で $1.290 \mu\text{M}$ 下降した。底層 DIN を季節別に解析した結果、いずれの季節も有意な低下トレンドが確認され、その大きさは、それぞれ年当たり $-0.060 \mu\text{M}$ （2月）、 $-0.036 \mu\text{M}$ （5月）、 $-0.018 \mu\text{M}$ （8月）、 $-0.071 \mu\text{M}$ （11月）であった（図 9-23）。

底層 DIN の不連続的変化については、2月において2002年に下降側へのジャンプが検出された。ジャンプ前の中央値は $+0.939 \mu\text{M}$ 、ジャンプ後は $-1.330 \mu\text{M}$ となり、ジャンプの前後で $2.269 \mu\text{M}$ 下降した（図 9-23 上段左 破線）。5月には1998年に下降側へのジャンプが検出され、ジャンプ前の中央値は $-0.544 \mu\text{M}$ 、ジャンプ後は $-0.674 \mu\text{M}$ となり、ジャンプの前後で $1.218 \mu\text{M}$ 下降した（図 9-23 上段右 破線）。8月には1994年に下降側へのジャンプが検出され、ジャンプ前の中央値は $+0.253 \mu\text{M}$ 、ジャンプ後は $-0.489 \mu\text{M}$ となり、ジャンプの前後で $0.742 \mu\text{M}$ 下降した（図 9-24 下段左 破線）。11月には1994年に下降側へのジャンプが検出され、ジャンプ前の中央値は

+1.437 μM , ジャンプ後は -1.118 μM となり, ジャンプの前後で 2.555 μM 下降した (図 9-23 下段右 破線)。ジャンプの大きさは 11 月 (秋季) > 2 月 (冬季) > 5 月 (春季) > 8 月 (夏季) の順で, 秋季が最も大きかった。

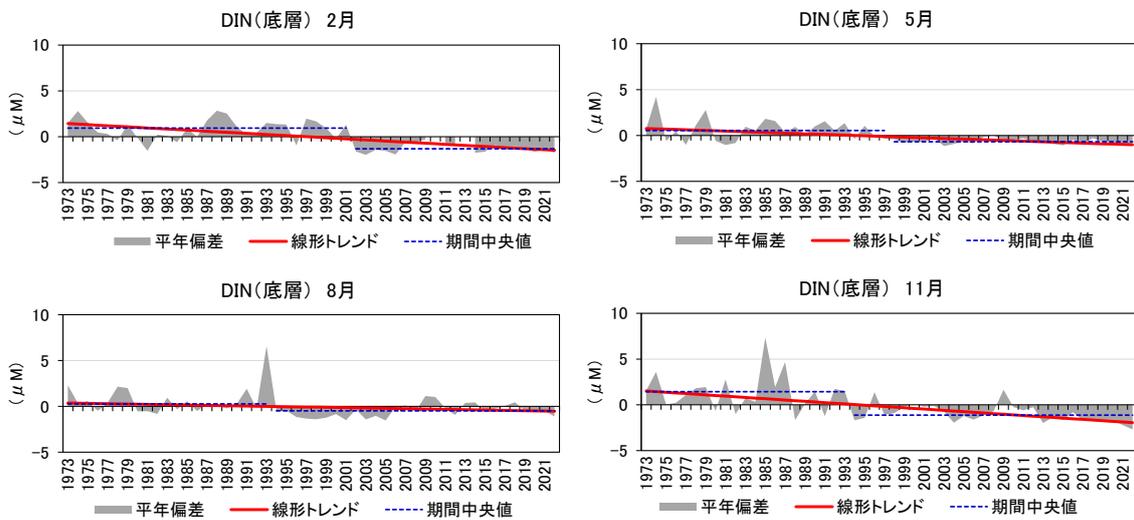


図 9-23. 底層 DIN の季節別の時系列 (2 月:上段左, 5 月:上段右, 8 月:下段左, 11 月:下段右)

DIP

図 9-24 に示す DIP の季節変動によると, 表層では 2 月から 8 月はおおむね横ばいに推移し, その後 11 月に大きく増加する。底層の DIP は 2 月から 5 月にかけて横ばいに推移し, その後 8 月, さらに 11 月に増加する。5 月から 8 月にかけての変化が, 表層 (横ばい) と底層 (増加) とで異なっている。

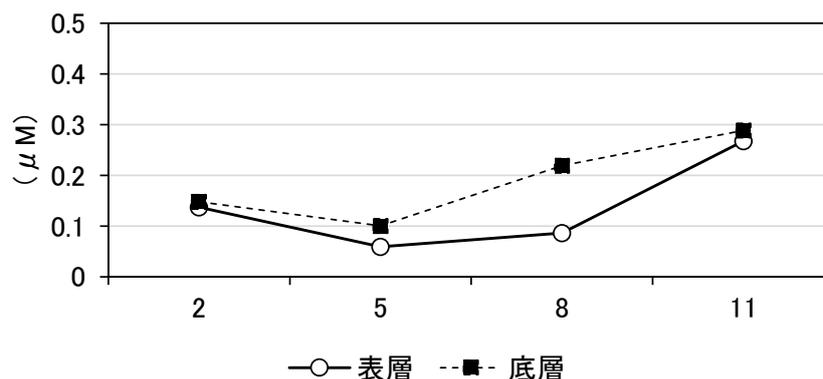


図 9-24. 周防灘における DIP の季節変動

図 9-25 に表層 DIP の経年変動と平年偏差の時系列を示す。1 年移動平均 (図 9-25 下段) は, 1970 年代前半に高い値を示した後, 1990 年代前半にかけて減少し, それ以降横ばいに推移している。

長期変動解析の結果, 周防灘における表層 DIP には有意なトレンドは認められなかった。また表層 DIP の不連続的变化についても, 有意なジャンプは検出されなかった (図 9-25 上段)。

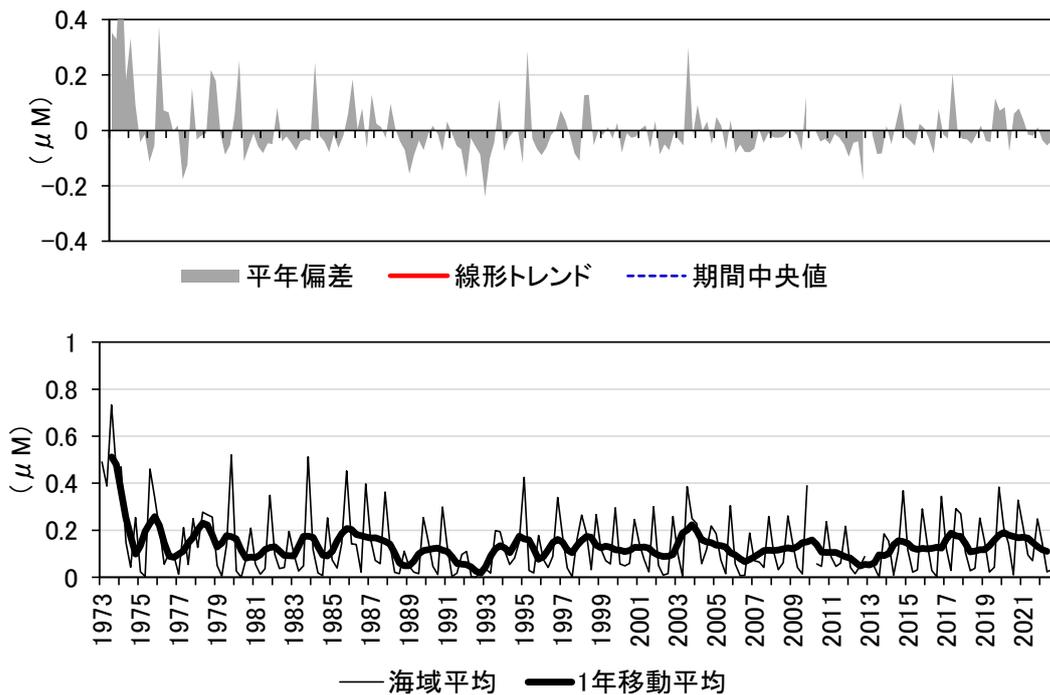


図 9-25. 周防灘における表層 DIP の経年変動 (下段) と年平均偏差 (上段)

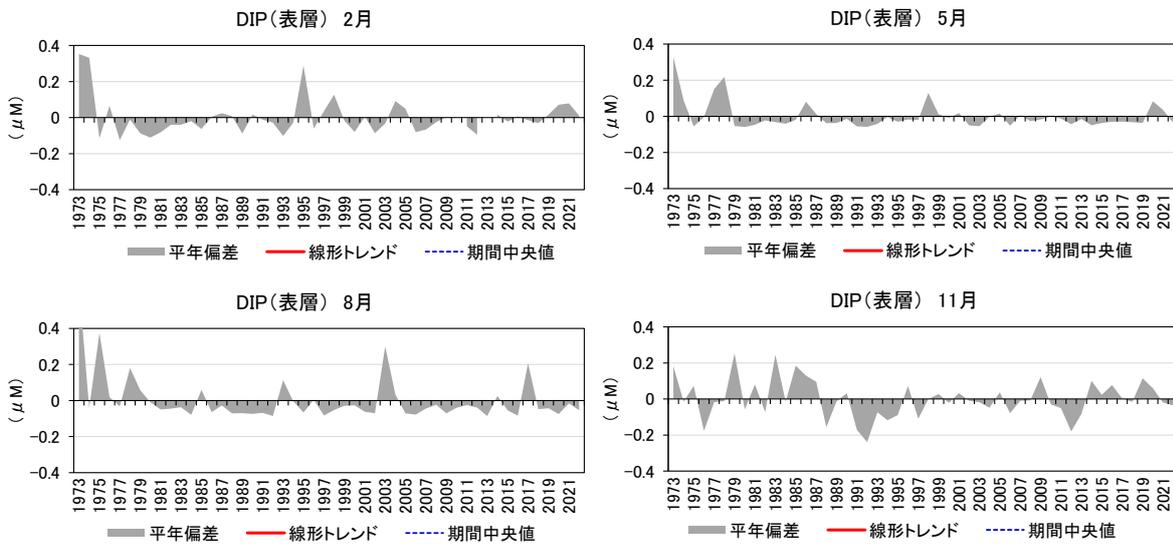


図 9-26. 表層 DIP の季節別の時系列 (2月:上段左, 5月:上段右, 8月:下段左, 11月:下段右)

表層 DIP を 2 月, 5 月, 8 月, 11 月の季節別に解析した結果, いずれの月も有意なトレンドは認められなかった。また, 表層 DIP の不連続的変化についても, いずれの月もジャンプは認められなかった (図 9-26)。

図 9-27 に底層 DIP の経年変動と年平均偏差の時系列を示す。1 年移動平均 (図 9-27 下段) には, 表層 DIP と同じように 1970 年代に高い値を示した後に減少する様子が見られる。その後 1997 年から 2004 年までの期間の振幅は小さくなり, 2005 年からはやや増加して推移している。

長期変動解析の結果, 周防灘における底層 DIP にも表層と同様に有意なトレンドは確認されな

かった (図 9-27 上段)。しかし不連続的变化については、2013 年 8 月に DIN のジャンプが検出され、ジャンプ前の中央値は $-0.029 \mu\text{M}$ 、ジャンプ後は $+0.022 \mu\text{M}$ となり、ジャンプの前後で $0.051 \mu\text{M}$ 上昇した。

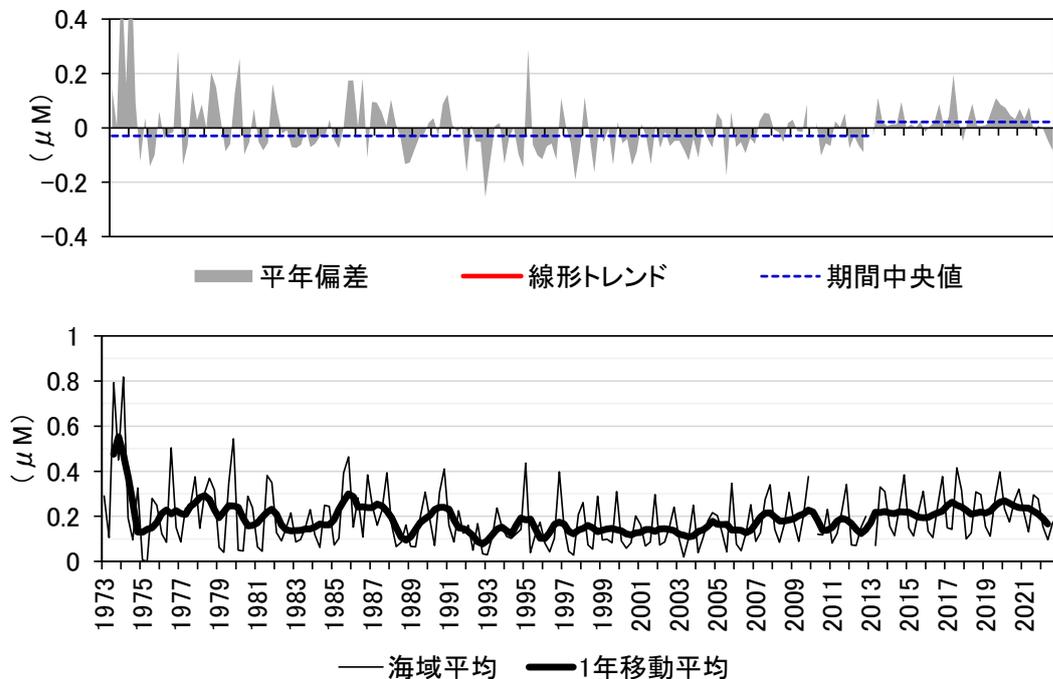


図 9-27. 周防灘における底層 DIP の経年変動 (下段) と平年偏差 (上段)

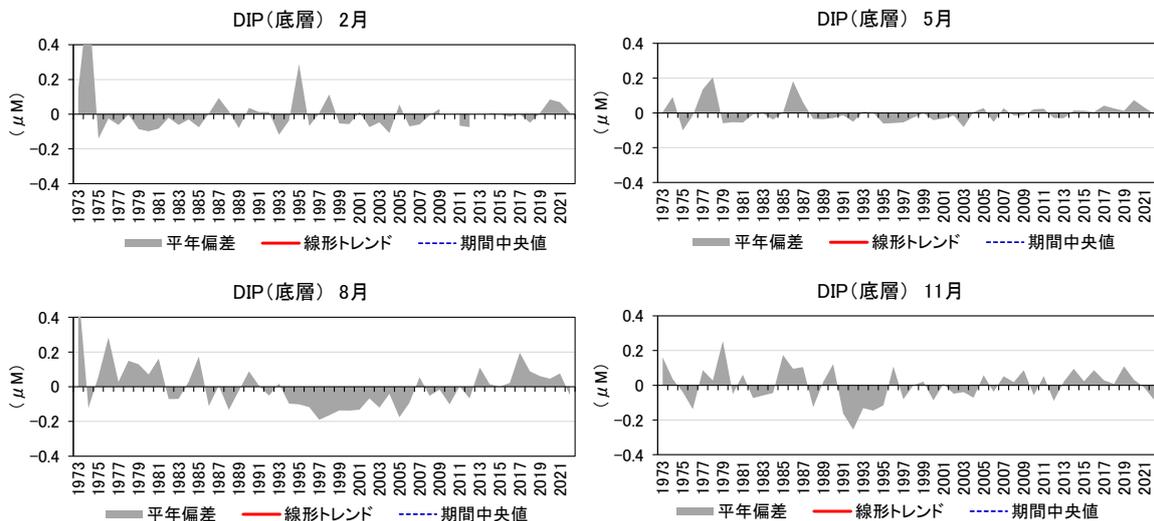


図 9-28. 底層 DIP の季節別の時系列 (2 月:上段左, 5 月:上段右, 8 月:下段左, 11 月:下段右)

底層 DIP を季節別に解析した結果、いずれの月も有意なトレンドは存在しなかった。また不連続的变化についても、いずれの月もジャンプは認められなかった (図 9-28)。

DO

図 9-29 に示す DO の季節変動によると、表層、底層ともに DO は 2 月から 8 月にかけて減少する。表層と底層で 8 月から 11 月にかけての変化は異なり、表層は横ばいで推移するのに対し、底層では増加する。

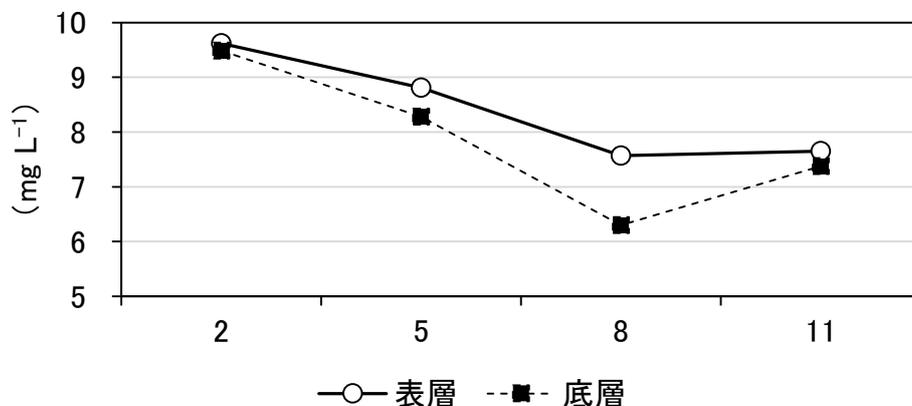


図 9-29. 周防灘における DO の季節変動 (平年値)

図 9-30 に表層 DO の経年変動と平年偏差を示す。1 年移動平均 (図 9-30 下段) には、1973 年から 1991 年の間には 2~4 年周期の変動がみられ、その後 1991 年から 1999 年にかけてやや減少し、さらにそれ以降は横ばいに推移する特徴がみられる。

長期変動解析の結果、周防灘における表層 DO には有意な低下トレンドが認められ、その大きさは $-0.014 \text{ mg L}^{-1}\text{year}^{-1}$ であった (図 9-30 上段太線)。また表層 DO の不連続的変化については、1996 年 5 月に下降側へのジャンプが検出された (図 9-30 上段破線)。ジャンプ前の中央値は $+0.145 \text{ mg L}^{-1}$ 、ジャンプ後は -0.225 mg L^{-1} となり、ジャンプの前後で 0.370 mg L^{-1} 下降した。

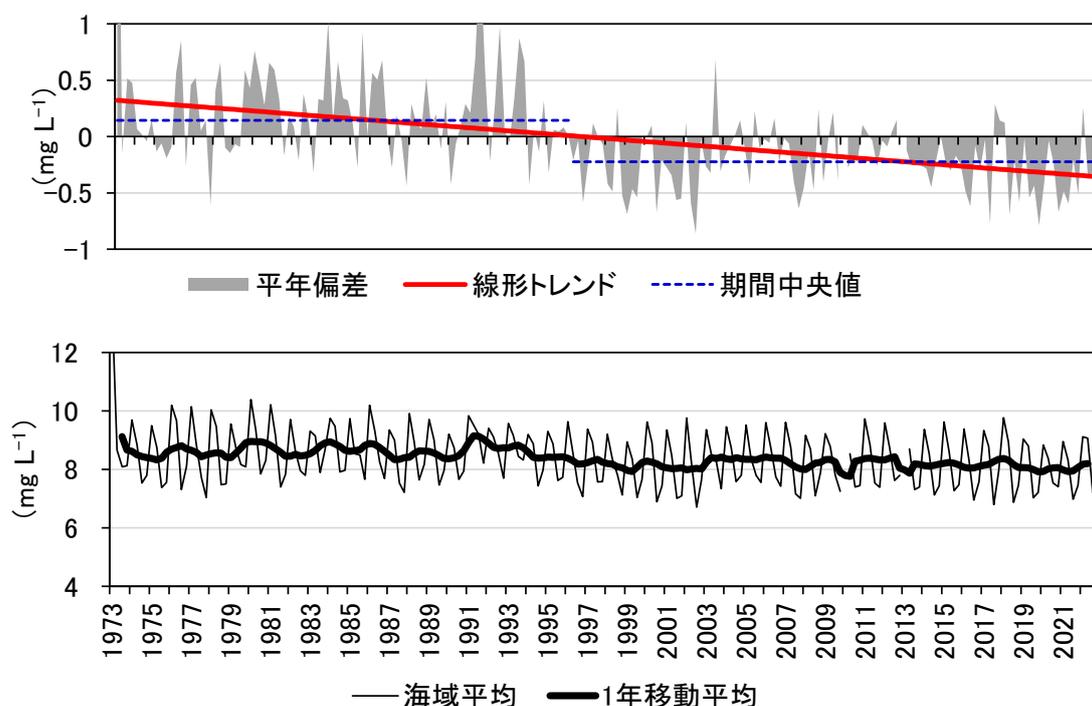


図 9-30. 周防灘における表層 DO の経年変動 (下段) と平年偏差 (上段)

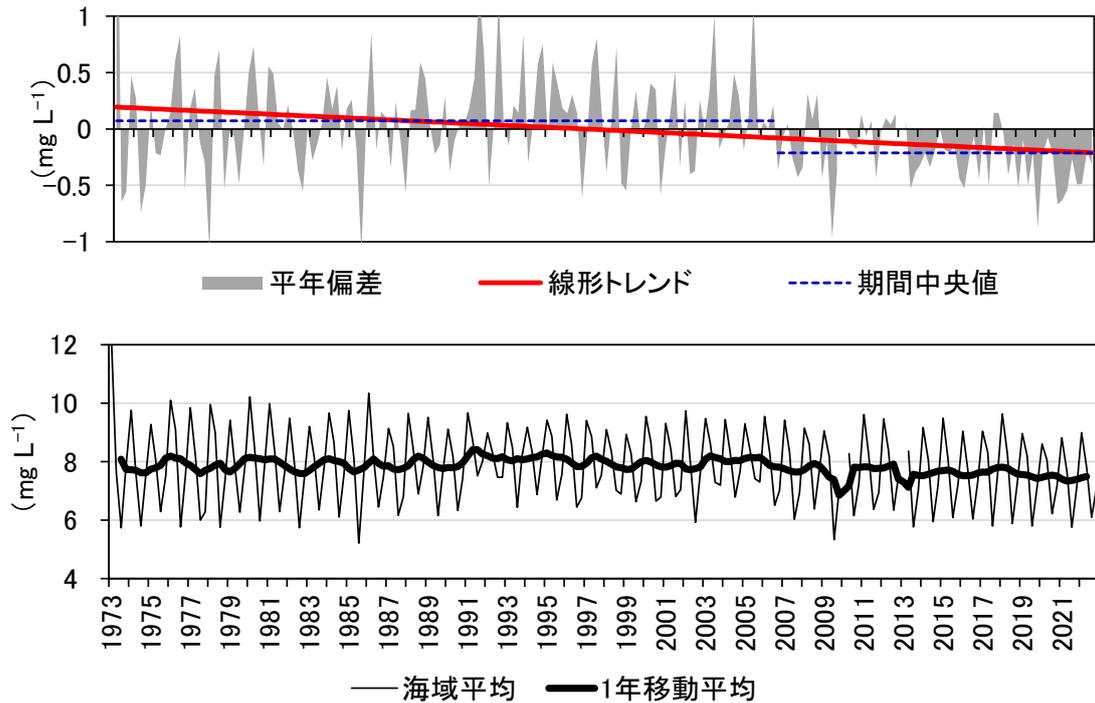


図 9-32. 周防灘における底層 DO の経年変動（下段）と平年偏差（上段）

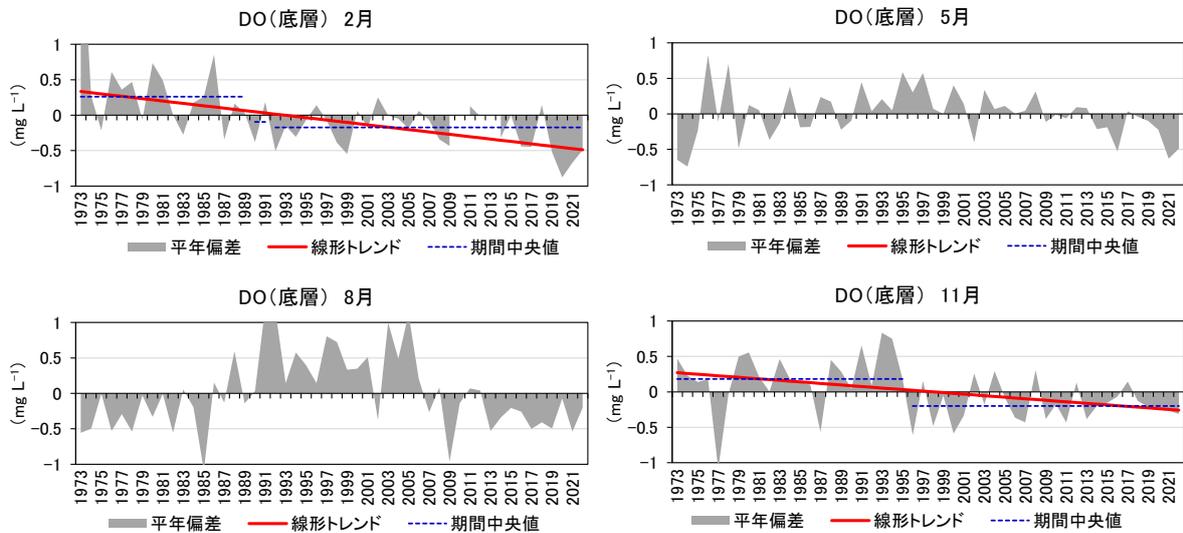


図 9-33. 底層 DO の季節別の時系列（2月:上段左，5月:上段右，8月:下段左，11月:下段右）

底層 DO を季節別に解析した結果，2月と11月に有意な低下トレンドが認められ，その大きさはそれぞれ年あたり -0.017 mg L^{-1} （2月）， -0.011 mg L^{-1} （11月）であった（図 9-31 太線）。

底層 DO の不連続的変化についても，有意な低下トレンドの存在した2月と5月において，下降側へのジャンプが確認された。2月には1990年と1992年と2つの変化点で下降側へのジャンプが検出された。1回目のジャンプ前の中央値は $+0.260 \text{ mg L}^{-1}$ ，ジャンプ後は -0.097 mg L^{-1} となり，ジャンプの前後で 0.357 mg L^{-1} 下降した。また2回目のジャンプ後の中央値は -0.174 mg L^{-1} となり，ジャンプの前後で 0.077 mg L^{-1} 下降した（図 9-33 上段左 破線）。11月には1996年に

下降側へのジャンプが検出された。ジャンプ前の中央値は $+0.183 \text{ mg L}^{-1}$ 、ジャンプ後は -0.200 mg L^{-1} で、ジャンプの前後で 0.383 mg L^{-1} 下降した（図 9-31 下段右 破線）。

まとめ

秋山・中嶋³⁾にならい観測日の違いを考慮した水温の平年値を求めることによって、周防灘の表層水温と 10m・底層水温との間で、年間最高水温の出現時期に位相差（20～27 日の差）のあること、また最低水温値の出現時期にはあまり差のないことを明らかにした（図 9-2）。水温以外の項目（塩分（図 9-9）、透明度（図 9-16）、DIN（図 9-19）、DIP（図 9-24）、DO（図 9-32））の季節変化（平年値）は、最高値・最低値の出現時期などを含め、40 年成果集²⁾の結果と大きく変わらなかった。

長期変動解析により求めたトレンドと 40 年成果集²⁾のトレンドとの比較結果および不連続的变化（変化点）を表 9-1 に示す。50 年間の観測資料を用い、Sens's Slope から求めた長期トレンドのうち、水温（上昇トレンド）、透明度（上昇トレンド）、DIN（低下トレンド）は、40 年成果集²⁾の結果とほぼ変わっていない。しかし、塩分および DO には、それぞれ有意な低下トレンドが新たに検出された。その一方で、40 年成果集²⁾において低下トレンドの確認された DIP には、有意なトレンドはみられなかった。

40 年成果集²⁾で検討していない不連続的变化、すなわちジャンプを周防灘で明らかにしたことは大きな成果といえる（表 9-1）。表層水温には 1997 年に上昇側のジャンプ（図 9-3）、10m 層および底層水温には 1989 年に上昇側のジャンプが確認された（図 9-5、図 9-7）。表層水温のジャンプと海面下（10m 層・底層）のジャンプの時期には違いがあった。塩分には 3 層（表層・10m 層・底層）とも、2011 年に下降側へのジャンプがみられた（図 9-10、図 9-12、図 9-14）。この塩分ジャンプや塩分の低下トレンドには、近年多発している九州北部・中国地方における集中豪雨の影響が考えられる。しかし、表層だけでなく海面下の塩分もシフトしていることから、河川水の影響だけでなく、豊後水道からの外洋水の移流についても検討する必要がある。透明度には 2000 年に上昇側のジャンプが確認された（図 9-17）。透明度には植物プランクトンやデトライトなどの懸濁物質の濃度が反映されるので、議論を深めるには、周防灘のクロロフィルでも同様の長期変動解析を行い、さらに河川水との関係も検討する必要がある。周防灘の栄養塩について、表層 DIN には 2002 年、底層 DIN には 1995 年にジャンプ（ともに下降側のジャンプ）が確認された。これは瀬戸内海環境特別措置法の窒素削減指導の年である 1996 年、あるいは 2000 年から始まった第 5 次水質総量規制とほぼ時期が一致している。リンについても同様に削減指導や総量規制が行われているが、周防灘の DIP（表層・底層）には有意なトレンドやジャンプは確認されなかった。DO には表層、底層ともに下降側のジャンプが確認された。表層 DO ジャンプの検出時期（1996 年）と、表層水温の上昇側へのジャンプの時期（1997 年）とはほぼ一致していることから（表 9-1）、表層水温の上昇により表層 DO の飽和濃度が低下し、それが表層 DO の低下に関与している可能性がある。40 年成果集²⁾では、底層 DO 低下の原因について、底泥からの栄養塩の溶出の可能性を指摘しているが、今回の解析では議論を深められなかった。

各項目について季節別に長期変動解析を行い、トレンドと不連続的变化の季節依存性を明らかにしたことも、今回の解析の成果である（表 9-2、表 9-3、表 9-4、表 9-5）。水温については、夏季を除く季節で、表層だけでなく下層も、すなわち水柱全体で上昇トレンドが確認され、不連続的

変化についても水温ジャンプが 1990 年代後半あるいは 1980 年代後半で確認された。夏季については、水温だけでなく他の項目もトレンドやジャンプが確認されていない。このような季節依存性を明らかにしたことは、水産生物の産卵期の環境や稚仔の生残を考えるうえで、たいへん重要なファクターになる。季節依存性が周防灘だけに局所的にみられるのか、あるいは瀬戸内海で共通してみられるものなのか、さらに大きな空間スケールの気象現象に関与しているのかについて、空間スケールを広げ、変動の原因を考える必要がある。

近年山口県では県予算での観測が困難になり、水産庁委託事業を充当して観測を継続している。海洋観測は地味ではあるが、得られる資料は、水産生物の基礎生態を把握するためだけでなく、魚種や漁業の長期的な変化を予測するためにも重要であることから、10 年、20 年先の水産施策を講じる上で極めて重要な基礎資料となる。山口県では令和 4 年度に新しい漁業環境調査船「すおう」を建造し、周防灘での観測に伊予灘、安芸灘の観測を加えて海洋観測を拡充するとともに、漁業に依存しない水産資源調査の充実も図ってゆくことにしている。

表 9-1 解析期間（40 年間/50 年間）の違いによるトレンドの比較および変化点。変化点はジャンプの検出された年を示す。比較のために 10 年あたりのトレンドとしている。

	水温表層 (°C/10years)	水温10m	水温底層	塩分表層 (/10years)	塩分10m	塩分底層	透明度 (m/10years)
40years	0.20	0.18	0.17	—	—	—	0.13
50years	0.26	0.15	0.16	-0.03	-0.06	-0.03	0.17
変化点	1997	1989	1989	2011	2011	2011	2000

	DIN表層 (μ M/10years)	DIN底層	DIP表層 (μ M/10years)	DIP底層	DO表層 (μ M/10years)	DO底層
40years	-0.77	-0.50	-0.03	-0.03		
50years	-0.68	-0.45	—	—	-0.14	-0.08
変化点	2002	1995	—	—	1996	2006

表 9-2 2 月（冬季）における解析期間（40 年間/50 年間）の違いによるトレンドの比較および変化点。変化点はジャンプの検出された年を示す。比較のために 10 年あたりのトレンドとしている。

	水温表層 (°C/10years)	水温10m	水温底層	塩分表層 (/10years)	塩分10m	塩分底層	透明度 (m/10years)
40years	0.19	—	—	—	—	—	0.24
50years	0.23	—	0.22	—	-0.08	-0.06	0.23
変化点	1988	—	—	—	2011	2011	—

	DIN表層 (μ M/10years)	DIN底層	DIP表層 (μ M/10years)	DIP底層	DO表層 (μ M/10years)	DO底層
40years	-0.64	-0.45				-0.14
50years	-0.80	-0.60			-0.16	-0.08
変化点	2001	2001	—	—	1989	1989

表 9-3 5月（春季）における解析期間（40年間/50年間）の違いによるトレンドの比較および変化点。変化点はジャンプの検出された年を示す。比較のために10年あたりのトレンドとしている。

	水温表層 (°C/10years)	水温10m	水温底層	塩分表層 (/10years)	塩分10m	塩分底層	透明度 (m/10years)
40years	—	—	—	0.26	—	—	0.40
50years	0.30	0.20	0.19	—	—	—	0.22
変化点	1981	1988	1988				1995

	DIN表層 (μM/10years)	DIN底層	DIP表層 (μM/10years)	DIP底層	DO表層 (μM/10years)	DO底層
40years	-1.17	-0.46	-0.02	—	—	—
50years	-0.78	-0.36	—	—	-0.107	—
変化点	1998	1997	—	—	1995	—

表 9-4 夏季（8月）における解析期間（40年間/50年間）の違いによるトレンドの比較および変化点。変化点はジャンプの検出された年を示す。比較のために10年あたりのトレンドとしている。

	水温表層 (°C/10years)	水温10m	水温底層	塩分表層 (/10years)	塩分10m	塩分底層	透明度 (m/10years)
40years	—	—	—	—	—	—	—
50years	—	—	—	—	—	—	—
変化点	—	—	—	—	—	—	—

	DIN表層 (μM/10years)	DIN底層	DIP表層 (μM/10years)	DIP底層	DO表層 (μM/10years)	DO底層
40years	—	-0.34	-0.04	-0.06	—	0.09
50years	—	-0.18	—	—	-0.16	—
変化点	—	1993	—	—	1998	—

表 9-5 秋季（11月）における解析期間（40年間/50年間）の違いによるトレンドの比較および変化点。変化点はジャンプの検出された年を示す。比較のために10年あたりのトレンドとしている。

	水温表層 (°C/10years)	水温10m	水温底層	塩分表層	塩分10m (/10years)	塩分底層	透明度 (m/10years)
40years	0.33	0.30	0.29	—	—	—	—
50years	0.25	0.18	0.23	—	-0.08	—	—
変化点	1997	1997	1997	—	2010	—	—

	DIN表層 (μ M/10years)	DIN底層	DIP表層 (μ M/10years)	DIP底層	DO表層 (μ M/10years)	DO底層
40years	-0.90	-0.73	-0.03	—	—	-0.08
50years	-1.00	-0.71	—	—	-0.12	-0.11
変化点	2002	1993	—	—	1995	—

引用文献

- 1) 瀬戸内海区水産研究所 (2005): 瀬戸内海ブロック浅海定線調査観測30年成果. 瀬戸内海区水産研究所, 197 pp.
- 2) 瀬戸内海区水産研究所 (2015): 瀬戸内海ブロック浅海定線調査観測40年成果（海況の長期変動）. 瀬戸内海区水産研究所, 256 pp.
- 3) 秋山諭, 中嶋昌紀 (2018): 不等間隔の月例観測データから見る大阪湾表層水温の経時的諸特性. 水環境学会誌, 41, 83-90.
- 4) R Core Team (2021): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>