

2019～2021 年度

瀬戸内海の環境保全・創造に係る
研究委託事業

瀬戸内海の栄養塩濃度低下の
原因究明と将来予測に関する研究

瀬戸内海環境保全知事・市長会議

1 研究の目的と公募研究のサブテーマ

瀬戸内海では1970年以降、栄養塩類濃度が低下し、養殖ノリの不作やイワシ類、イカナゴ等の漁獲量減少の原因ではないかと懸念されているが、栄養塩類の供給源には陸域、外洋域・隣接海域からの流入、海底泥からの溶出といったものがあり、それぞれがどのように瀬戸内海の水質に影響を与えているのかを検討していくことが必要である。

今回の委託研究では、主に陸域からの窒素・リン負荷と水質との関係に着目して、瀬戸内海の海水中の経年的な栄養塩類濃度の変化について水平的に詳細に分析することにより、特に沿岸部と沖合部の経年的な栄養塩類濃度低下の違いについての解析を行い、陸域から流入する栄養塩類が瀬戸内海のどの範囲まで影響を及ぼしているかを明らかにし、その結果に基づいて今後の沿岸海域の栄養塩管理手法に関わる提言につなげることを目的とした。

そこで、2019～2021年度の3年間の公募研究として、瀬戸内海全体、および特定海域をそれぞれ対象とした2つのサブテーマを採択した。採択された研究により、既存の調査データと実測データを使って対象海域全体の栄養塩類濃度を検討するとともに、沿岸域、沖合域、およびその中間域という海域区分に基づいて、各区分の経年的な栄養塩類濃度変化の特徴を解析し、陸域からの栄養塩負荷が区分された海域ごとの栄養塩類濃度にどのような影響を及ぼしているかを評価することとした。

- (1) サブテーマ1「瀬戸内海における長期的な栄養塩濃度の時空間分布」
- (2) サブテーマ2「岡山県児島湾及びその沖合海域における栄養塩濃度の経年変化と将来予測に関する研究」

2 瀬戸内海における長期的な栄養塩濃度の時空間分布

(1) 目的

本研究では、瀬戸内海全域のマクロな視点で過去から現在までの栄養塩類の時空間分布の変化を明らかにし、代表海域の河口～沖合域に絞ったミクロな視点の両側から瀬戸内海の栄養塩濃度低下の原因究明のための動態把握を試みた。具体的には、①四季を通した瀬戸内海全域における表層栄養塩濃度分布の長期変化、②塩分に基づいた海域区分における表層栄養塩濃度およびChl.a濃度の長期変化、③代表海域における塩分区分の妥当性、および④堆積物からの栄養塩溶出量の推定と長期変化について評価した。

(2) 研究方法

ア 表層栄養塩濃度分布の長期変化

令和元年度に、1981～2014年の環境省広域総合水質調査(121地点)データ¹⁾の整理を実施し、過去から現在までの瀬戸内海全域の栄養塩類(溶存態無機窒素, DIN; 溶存態無機リン, DIP)の分布を明らかにした。特に、本研究では陸域流入負

荷量の減少との対応を見るために、表層栄養塩濃度の分布の変化について評価した。

イ 塩分に基づいた海域区分における表層栄養塩濃度および Chl.a 濃度の長期変化

降水量が多い夏季の平均的な表層塩分の分布は、瀬戸内海における河川水の拡散範囲（陸域負荷）の平均像を表していると考え、1981～2015年の夏季の表層塩分の中央値を用いて瀬戸内海を3つに区分し、ArcGISを用いて各区分の占有面積（ティーセン法）を推定した（図1）。各海域区分において、過去から現在までの夏季の表層栄養塩濃度および表層 Chl.a 濃度の変化を明らかにした。経年的な変化傾向を明らかにするために単回帰分析を実施し、有意な相関関係（ $p<0.01$ ）が認められたもののみ傾きを示した。単回帰分析の際には、イベント的に発生したと考えられる異常に高いまたは低い値は、全体の変動傾向を評価する上で誤った解釈をしてしまう可能性が考えられたため、経年変化の全体の傾向を把握するためにスミルノフ・グラブス検定により検出された外れ値は除いた。グラブス検定においては、相関式に基づく計算値と実測値の差分に対して検定を行い外れ値を検出し、外れ値を除いた相関式を求め、同様の操作を外れ値がなくなるまで繰り返した。令和3年度は、春季、秋季、および冬季についても同様に解析し四季評価を行った。

瀬戸内海全域平均などの平均値を算出する場合は、下式の面積加重平均を用いた。各地点の濃度データを単純に算術平均した場合、岸沖の測定点数の多さによって海域全体の平均値は左右されるため、Umehara et al.²⁾に従い、ティーセン法による各地点の支配面積を加味した（面積が広いところでは重みが増す）面積加重平均値を代表値とした。

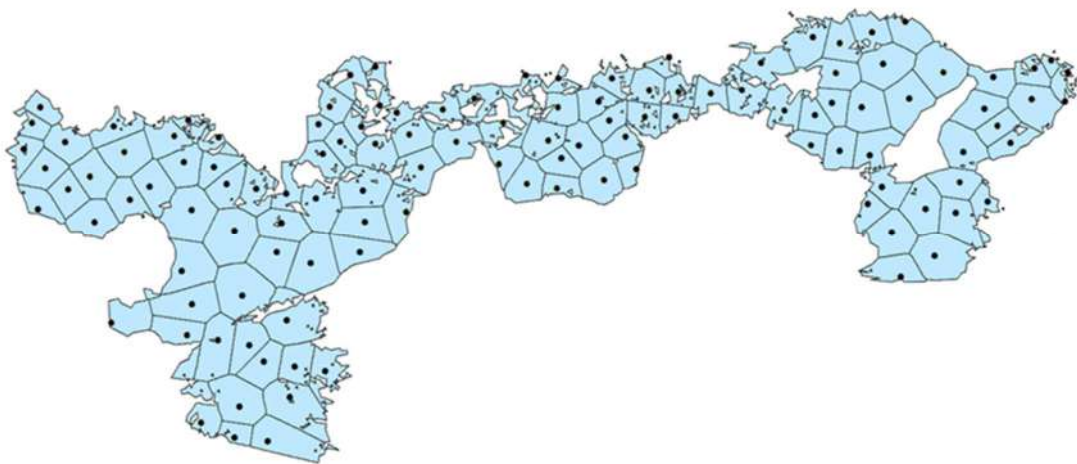


図1 環境省広域総合水質調査における調査地点（121 地点）

区分線はティーセン法による各地点の支配エリアを表す

ウ 代表海域における塩分区分の妥当性評価

広域解析における問題点として、環境省等の全域を対象としたデータセットでは、地点間隔が数キロメートルに渡り、沿岸から沖合にかけての詳細な連続データが不

足していることが挙げられる。広域データの海域区分において、一級河川が流入するような海域（例えば広島湾奥）では河川水が広域調査の調査地点へ届くため低塩区分となり比較的正確な区分と言えるが、小・中規模河川が流入する海域では河川水が調査地点へ届かず、低塩区分が沿岸付近に存在するにも関わらず高塩区分となっている可能性が考えられた。そうした場所での河川水の到達範囲を明らかにするために、二級河川の黒瀬川が流入する広島県の広湾を代表的な海域とし（図2）、2020年夏季～2021年冬季にかけて四季でライントランセクト調査を実施した。調査は黒瀬川河口から沖合にかけての7地点において大潮の下げ潮時に実施し、多項目水質計（CTD）による測定および採水（0, 2, 5, 10, B-1 m）を実施した。採水サンプルは栄養塩濃度（DIN、DIP）および Chl.a 濃度を測定した。

エ 堆積物からの栄養塩溶出量の推定と長期変化

瀬戸内海全域における栄養塩溶出フラックスを推定するために、広湾において栄養塩溶出速度や各種パラメータの取得を行った。広湾においては、四季で底質コア（KK コア）を各地点3本ずつ採取し、実験室にて暗条件、現場の水温および溶存酸素（DO）濃度で48時間攪拌しながら培養した（各地点 n=3, 図3）。培養時の採水は0, 6, 12, 24, 48時間で実施し、直上水の栄養塩濃度変化から算出した³⁾。また、堆積物の TOC 含量についても測定した。



図2 広湾における調査地点図



図3 底質コアの採取および溶出実験の様子

栄養塩溶出速度の推定式作成においては、「瀬戸内海環境情報基本調査および豊かな海の確保に向けた方策検討業務報告書」⁴⁾内のデータおよび上記広湾実測データ（夏～秋季の3季分）を用いた。推定式作成におけるパラメータとしては水温、DO 濃度、および TOC 含量を使用した。全域推定においては、広域総合水質調査（121 地点）の四季データの底層 DO 濃度および水温を使用し、TOC 含量については環境情報基本調査（416 地点）の夏季データを使用した。広域総合水質調査データは1981年以降のデータを使用し、10年平均値を用いた（例：1981～1990年の平

均値を 1980s の代表値)。底層 DO 濃度および底層水温は B-1 m の値を使用した。環境情報基本調査については第 1 回～4 回 (それぞれ 1980s, 1990s, 2000s, 2010s の代表値) のデータを使用し、TOC 含量は年間一定と仮定した。異なる調査地点のデータを統合するために、底質に比べ比較的分布が均一と考えられる水質調査の地点を用いてティーンセン区分を作成し (図 4)、その区分内の水質は一定であると仮定して環境情報基本調査の 416 地点 (図 5) における推定式を用いた溶出フラックスの推定を行った。TOC 含量が明らかにおかしいと考えられた一部の測点については、解析から除いた。

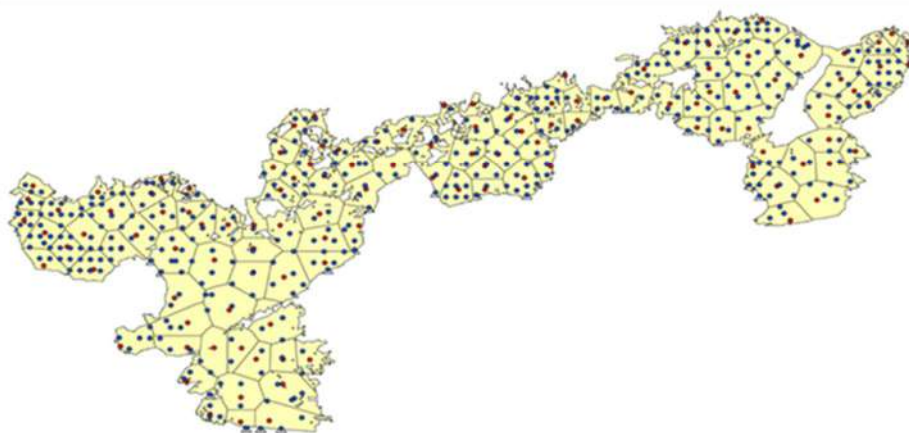
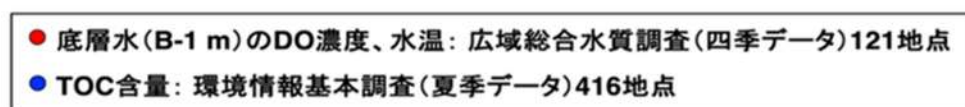


図 4 広域総合水質調査 (121 地点) および環境情報基本調査 (416 地点) における調査地点

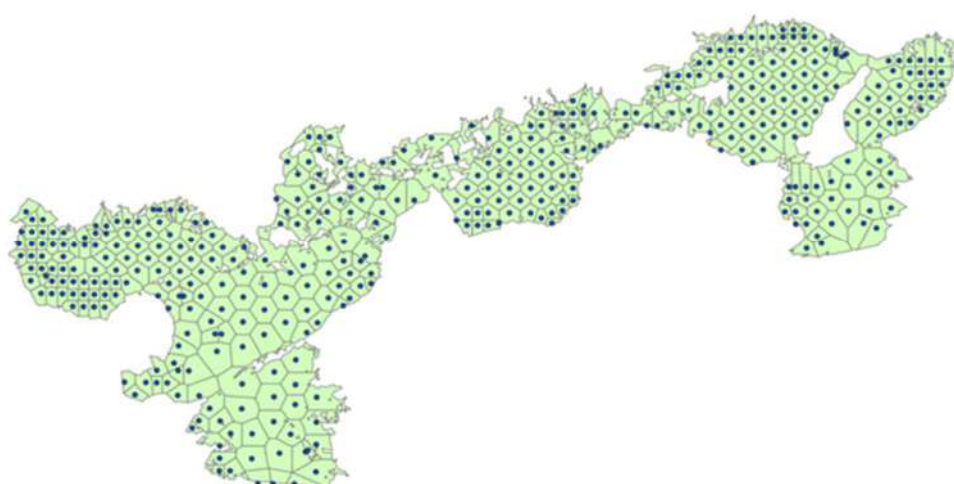


図 5 溶出フラックスが推定された環境情報基本調査 (416 地点) における調査地点

区分線は環境情報基本調査に基づいたティーンセン法による境界線を表す。

(3) 結果

ア 表層栄養塩濃度分布の長期変化

データ数の多い 1986-90 年および 2006-2010 年における過去から近年までの 5 年平均表層 DIN 濃度の空間分布の変化について図 6 に示す。1986-90 年においては、表層 DIN 濃度は四季を通して沿岸部ほど高い傾向であり、濃度は冬季>秋季>春季・夏季の順に高い傾向であった。近年（2006-2010 年）においても同様の空間分布パターンを示したが、濃度は過去に比べて大きく低下しており、特に大阪湾などの内湾域ではその傾向が顕著であった。

表層 DIP 濃度については、1986-90 年では DIN 同様に四季を通して沿岸部ほど高い傾向であり、濃度は冬季・秋季が春季・夏季に比べ高い傾向であった（図 7）。また、近年（2006-2010 年）においても過去と同様の空間分布パターンを示したが、濃度は大きく低下しており、DIN 同様に内湾域ではその傾向が顕著であった。

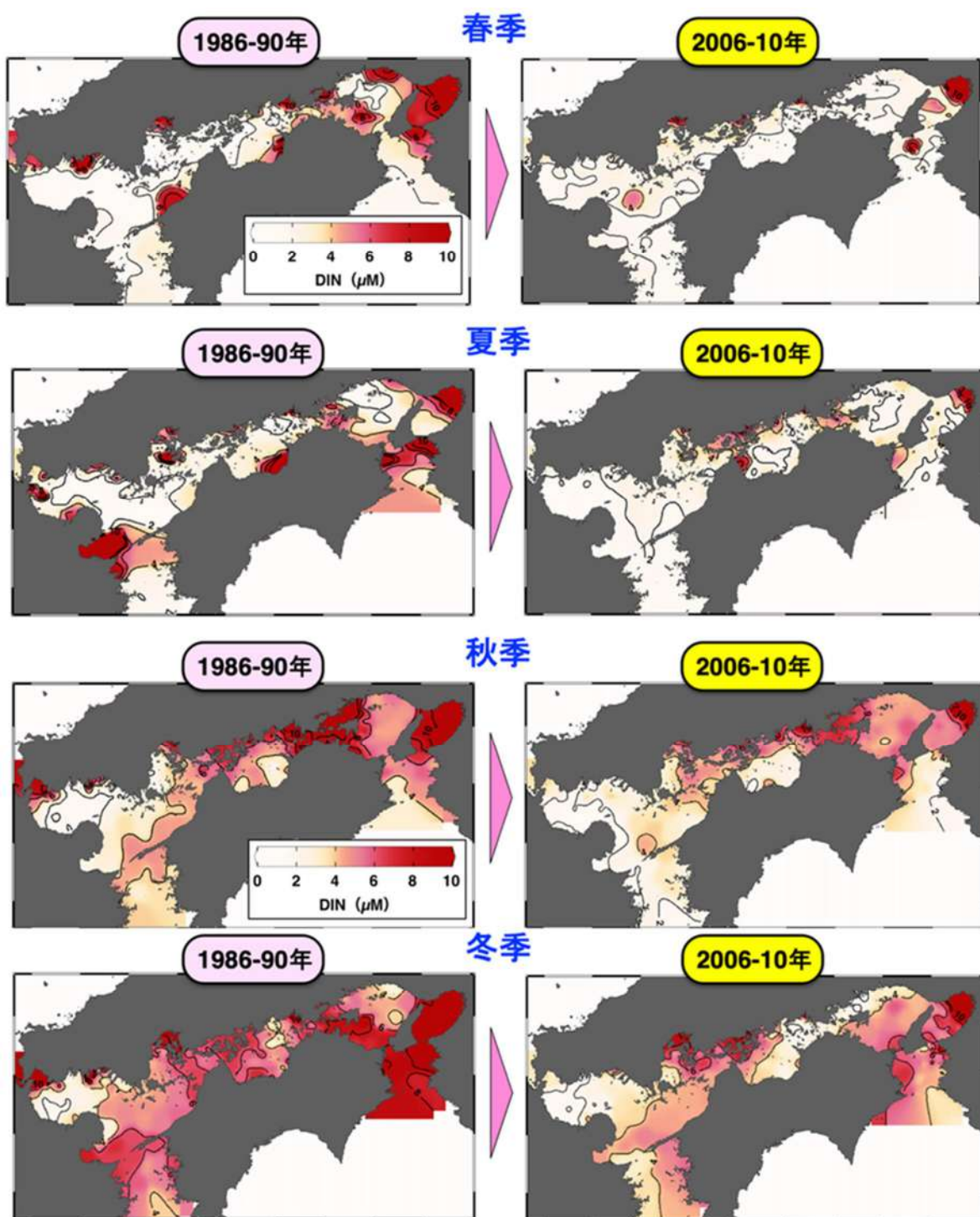


図6 表層 DIN 濃度分布の四季変化 (1986-90 年および 2006-10 年の 5 年平均値)

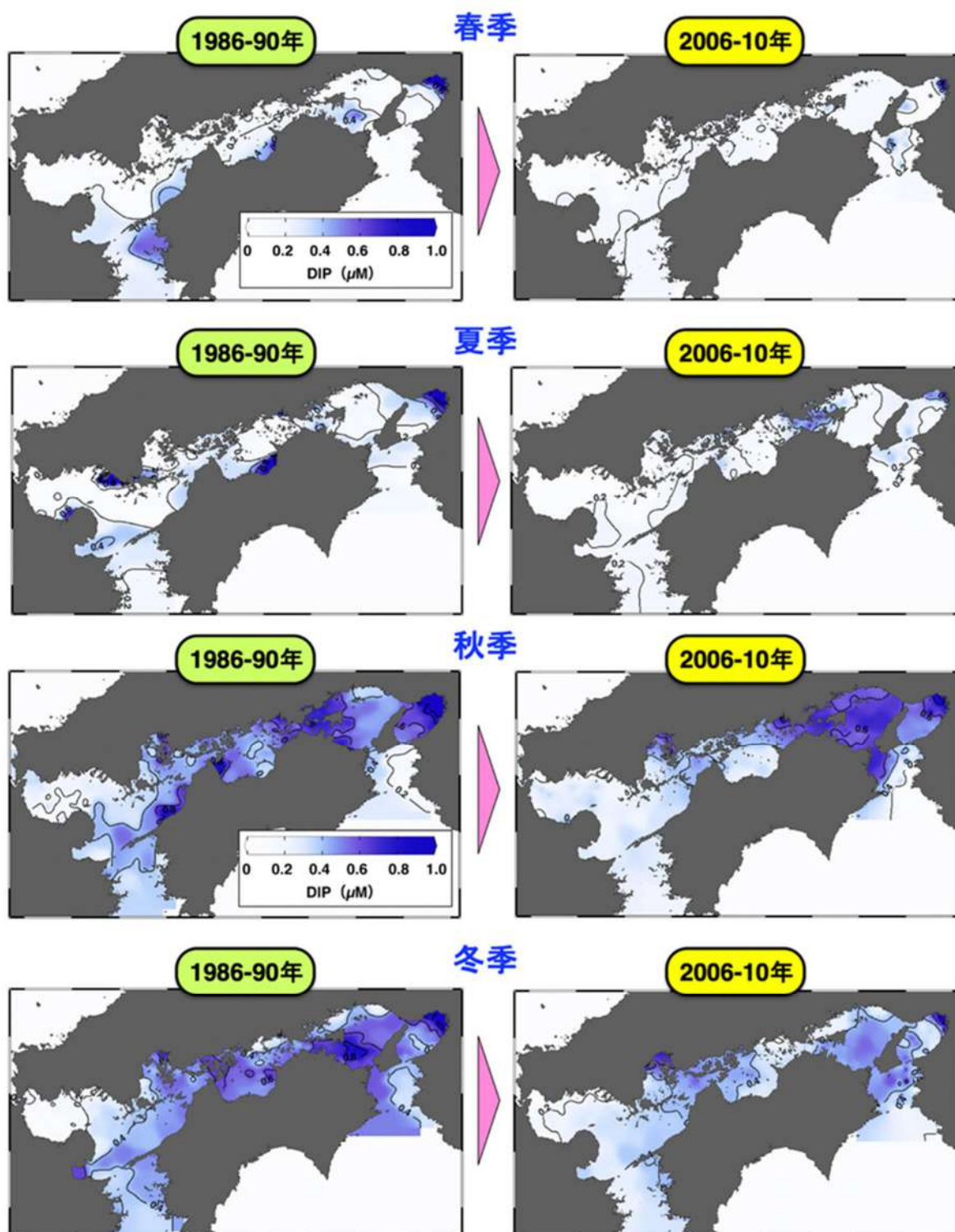
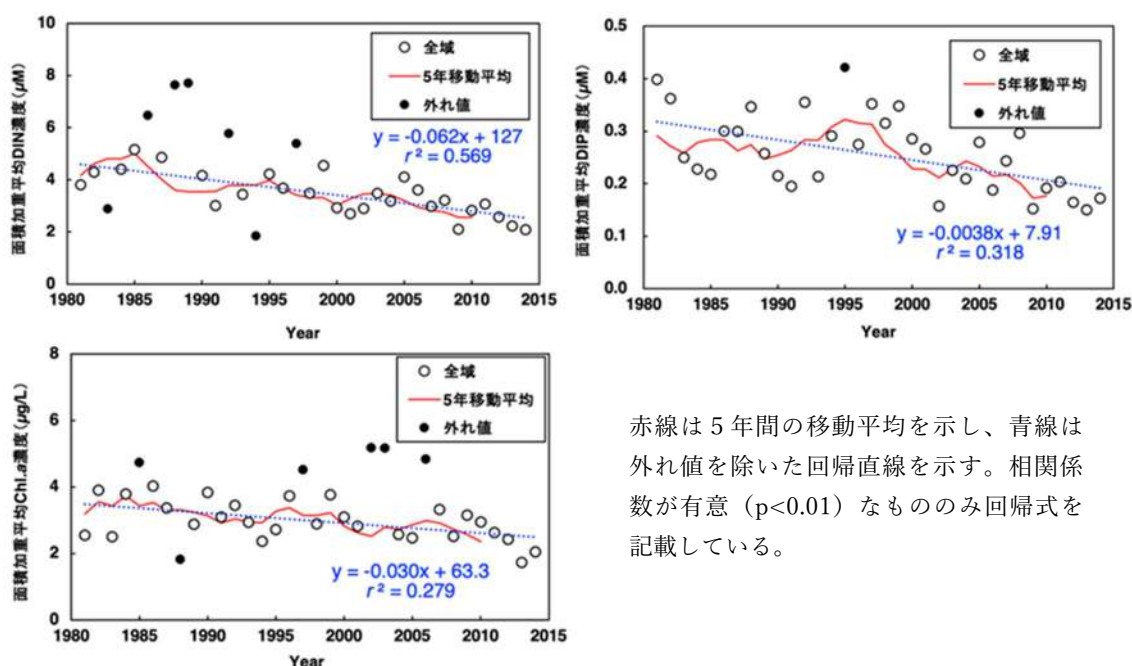


図7 表層 DIP 濃度分布の四季変化 (1986-90 年および 2006-10 年の 5 年平均値)

イ 塩分に基づいた海域区分における表層栄養塩濃度および Chl.a 濃度の長期変化

瀬戸内海全域における陸域流入負荷の減少と植物プランクトンの過剰な増殖（赤潮）の関係性を概観するために、夏季の表層栄養塩濃度（DIN・DIP 濃度）および表層 Chl.a 濃度の平均値について経年変化を調べた（図 8）。全域平均値については、ティーセン区分に基づいた面積加重平均値とした。夏季における全域平均の DIN、DIP、および Chl.a 濃度は経年的に低下傾向であり、それぞれ有意な回帰式が得られた。

岸沖の傾向をより詳細に把握するために、河川水の平均的な影響範囲となる夏季の表層塩分に基づいて瀬戸内海を 3 つ（塩分 <30、30～32、32≦）に区分した。塩分 30 未満の区分は瀬戸内海全面積の 8%（1,827 km²）を占めており、塩分 30～32 が 45%（10,399 km²）、塩分 32 以上が 47%（10,689 km²）であった（図 9）。塩分 30 未満の海域は一級河川が流入し閉鎖的な大阪湾、広島湾、および別府湾、また周防灘、備讃瀬戸（高梁川沖や児島湾沖）、および播磨灘の北岸部であった。塩分 32 以上の海域は豊後水道、伊予灘、および紀伊水道付近であり、外洋水の影響を強く受けるエリアであった。



赤線は 5 年間の移動平均を示し、青線は外れ値を除いた回帰直線を示す。相関係数が有意 ($p < 0.01$) なもののみ回帰式を記載している。

図 8 瀬戸内海全域における夏季の表層栄養塩濃度（DIN・DIP 濃度）および表層 Chl.a 濃度の面積加重平均値の推移

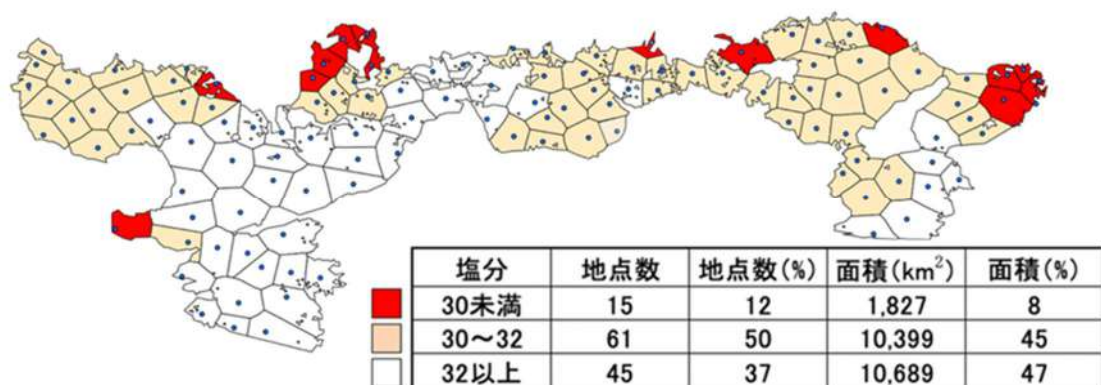


図9 1981-2015年の夏季表層塩分の中央値により区分された海域（上）および各区分における地点数および面積の割合（下）

図10から図13に夏季表層塩分に基づいた海域区分における四季の平均表層DIN濃度の推移を示す。DINは植物プランクトンが利用可能な栄養塩であり、特に一次生産が多い夏季におけるDIN濃度は赤潮等の植物プランクトンの過剰な増殖を評価する上で非常に重要である。いずれの季節においても、表層DIN濃度はわずか面積8%である塩分30未満の区分で経年的に大幅に低下しており、最も濃度の低下が著しかった夏季については、回帰式からの推定では1980年から2009年の30年間で約16.6 μM 低下していた（1980年から72%減）。塩分30～32の区分においては、秋季を除いて有意な濃度低下は認められなかった。

有意な回帰式が得られた秋季においても、30年間の濃度低下は約2.9 μM であり（37%減）、同じ季節の塩分30未満の区分（約10.8 μM 低下, 58%減）に比べると濃度の低下は比較的緩やかであった。32以上の外洋水の影響を強く受ける区分については、DIN濃度のレベルが塩分30～32の区分と類似しており、全ての季節で有意な回帰式は得られず、ほぼ横ばいの変動傾向を示した。

2010年代（2010～2014年の5年間）のDIN濃度レベルとしては、塩分30未満の区分では5年平均値で春季6.0 μM 、夏季4.6 μM 、秋季6.1 μM 、冬季9.5 μM 、塩分30～32の区分では春季2.4 μM 、夏季2.6 μM 、秋季3.9 μM 、冬季3.3 μM であり、近年においても2～3倍程度の濃度差はあるが、経年的にその差は狭まってきている。

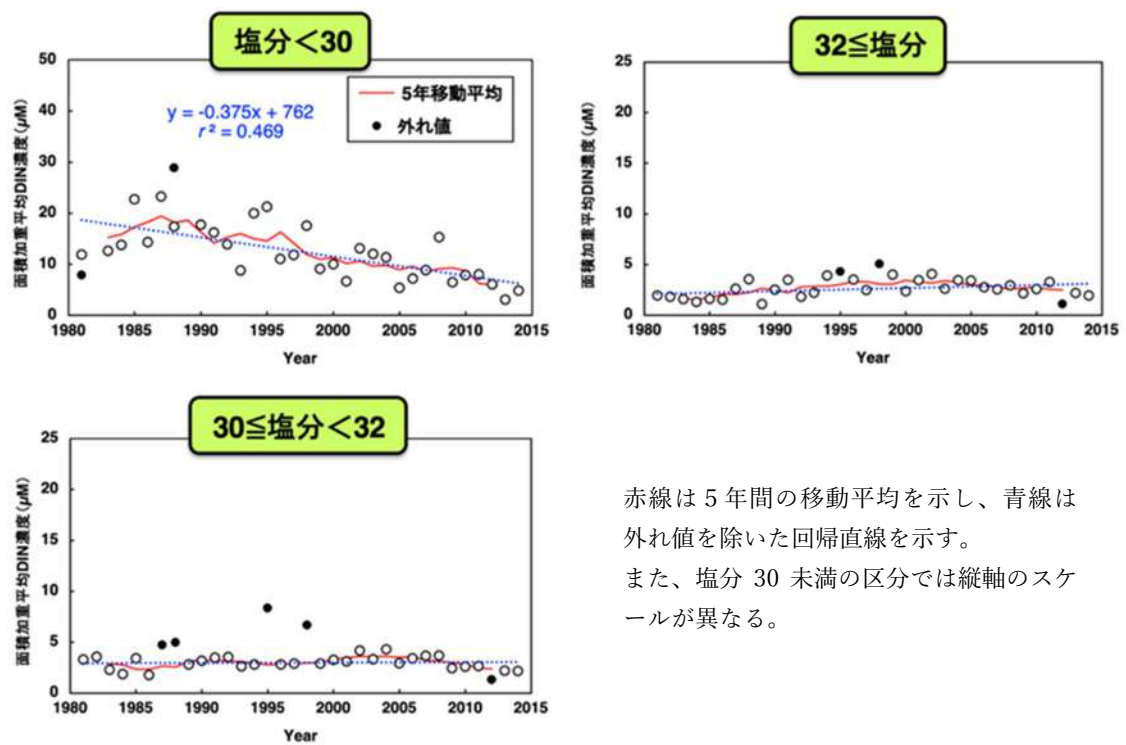


図 10 夏季表層塩分に基づいた海域区分における春季表層 DIN 濃度の推移

赤線は 5 年間の移動平均を示し、青線は外れ値を除いた回帰直線を示す。
また、塩分 30 未満の区分では縦軸のスケールが異なる。

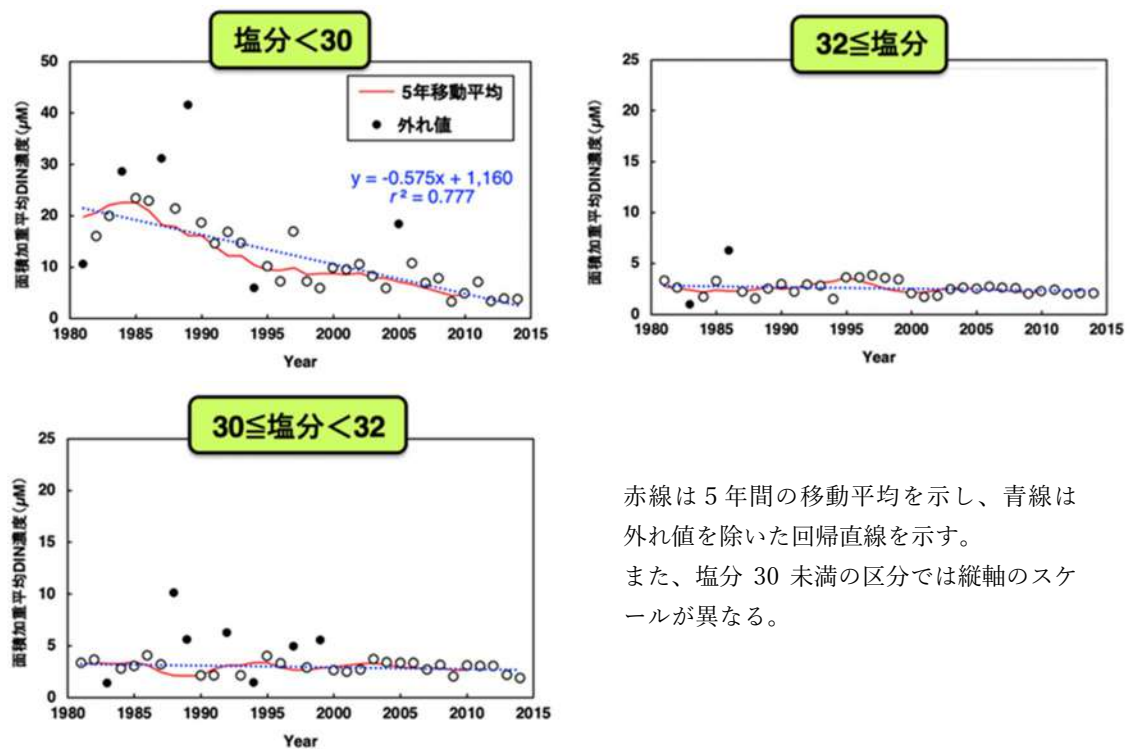


図 11 夏季表層塩分に基づいた海域区分における夏季表層 DIN 濃度の推移

赤線は 5 年間の移動平均を示し、青線は外れ値を除いた回帰直線を示す。
また、塩分 30 未満の区分では縦軸のスケールが異なる。

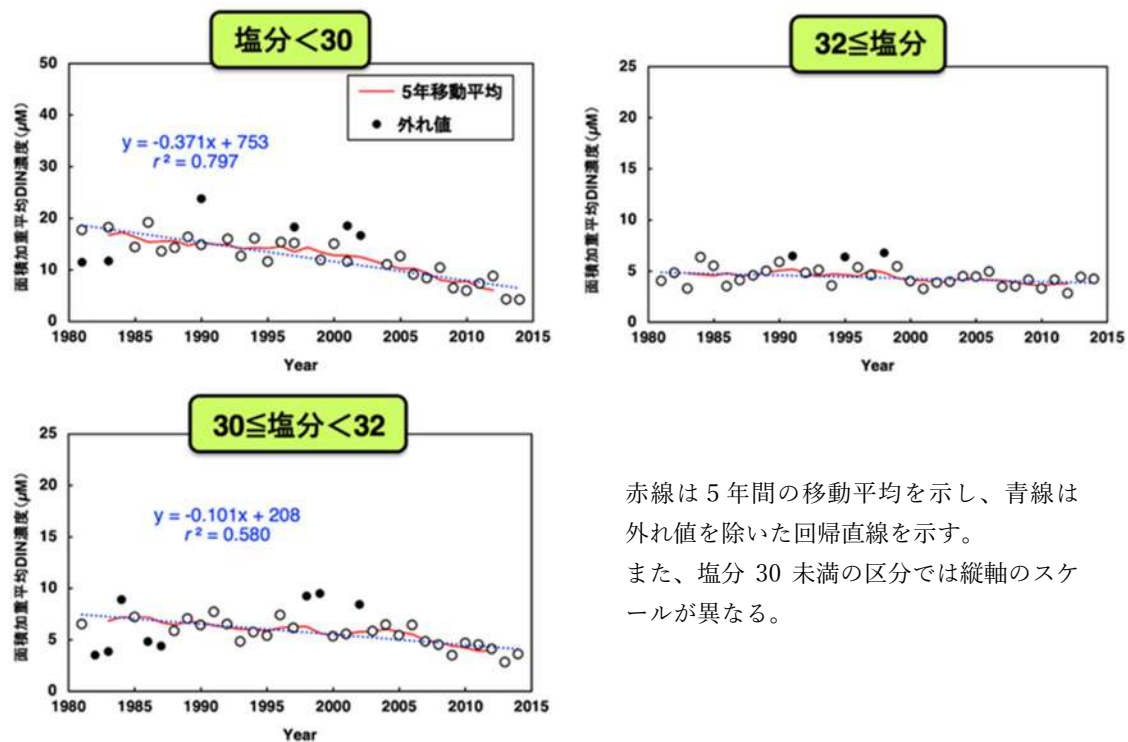
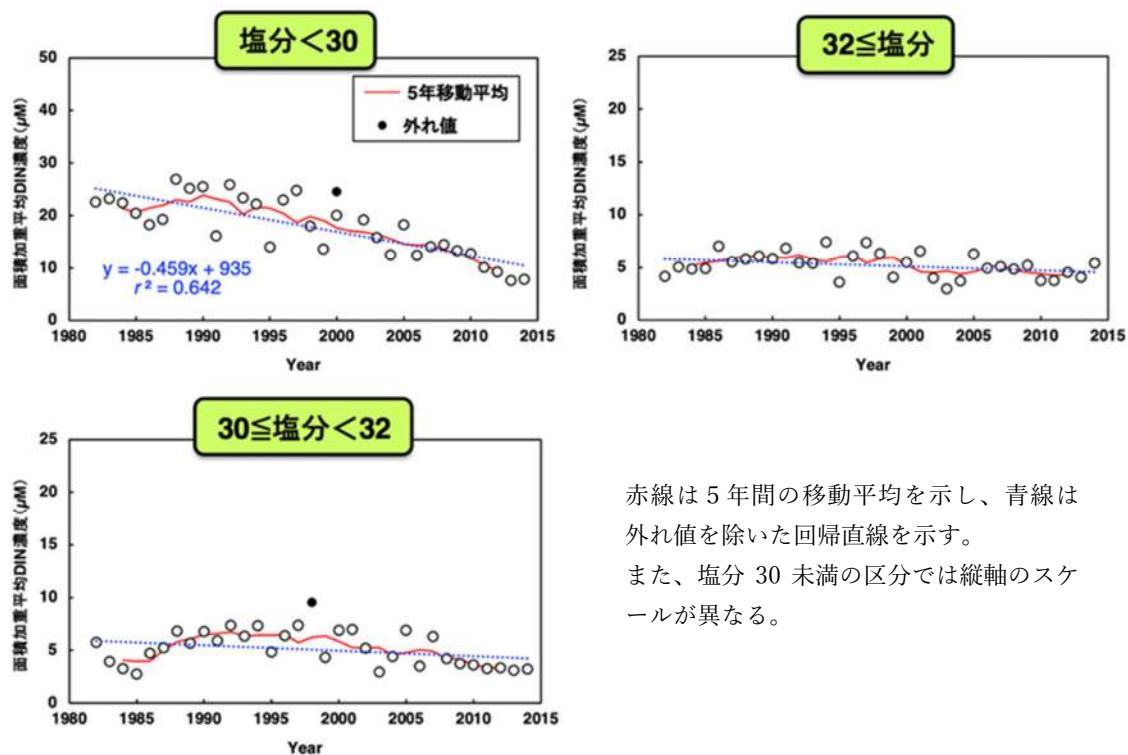


図 12 夏季表層塩分に基づいた海域区分における秋季表層 DIN 濃度の推移

赤線は 5 年間の移動平均を示し、青線は外れ値を除いた回帰直線を示す。
また、塩分 30 未満の区分では縦軸のスケールが異なる。



赤線は 5 年間の移動平均を示し、青線は外れ値を除いた回帰直線を示す。
また、塩分 30 未満の区分では縦軸のスケールが異なる。

図 13 夏季表層塩分に基づいた海域区分における冬季表層 DIN 濃度の推移

図 14 から図 17 に夏季表層塩分に基づいた海域区分における四季の平均表層 DIP 濃度の推移を示す。DIP についても DIN 同様に植物プランクトンの増殖に関わる重要な栄養塩であり、特に一次生産が多い夏季における DIP 濃度は赤潮等の植物プランクトンの過剰な増殖を評価する上で非常に重要である。春季を除いて表層 DIP 濃度は塩分 30 未満の区分で経年的に大幅に低下しており、最も濃度の低下が著しかった夏季については、回帰式からの推定では 1980 年から 2009 年の 30 年間で約 $0.67\ \mu\text{M}$ 低下していた（1980 年から 66%減）。有意な回帰式が得られなかった春季においても、1995 年までに見られた突出して高い値は 1995 年以降見られなくなっていた。塩分 30～32 の区分においては、全ての季節において有意な濃度低下は認められなかった。塩分 32 以上の外洋水の影響を強く受ける区分については、DIP 濃度のレベルが塩分 30～32 の区分と類似しており、春季および夏季を除いて有意な回帰式は得られず、ほぼ横ばいの変動傾向を示した。有意な回帰式が得られた春季および夏季における濃度変化は極めて小さく、回帰式より 30 年間でそれぞれ約 $0.07\ \mu\text{M}$ および $0.08\ \mu\text{M}$ の低下であったが、流入する外洋水の影響により僅かに変化していたと考えられた。2010 年代（2010～2014 年の 5 年間）の DIP 濃度レベルとしては、塩分 30 未満の区分では 5 年平均値で春季 $0.17\ \mu\text{M}$ 、夏季 $0.23\ \mu\text{M}$ 、秋季 $0.47\ \mu\text{M}$ 、冬季 $0.38\ \mu\text{M}$ 、塩分 30～32 の区分では春季 $0.14\ \mu\text{M}$ 、夏季 $0.18\ \mu\text{M}$ 、秋季 $0.49\ \mu\text{M}$ 、冬季 $0.34\ \mu\text{M}$ であり、全ての季節で濃度差が小さく、すでに同じ濃度レベルになってきている。

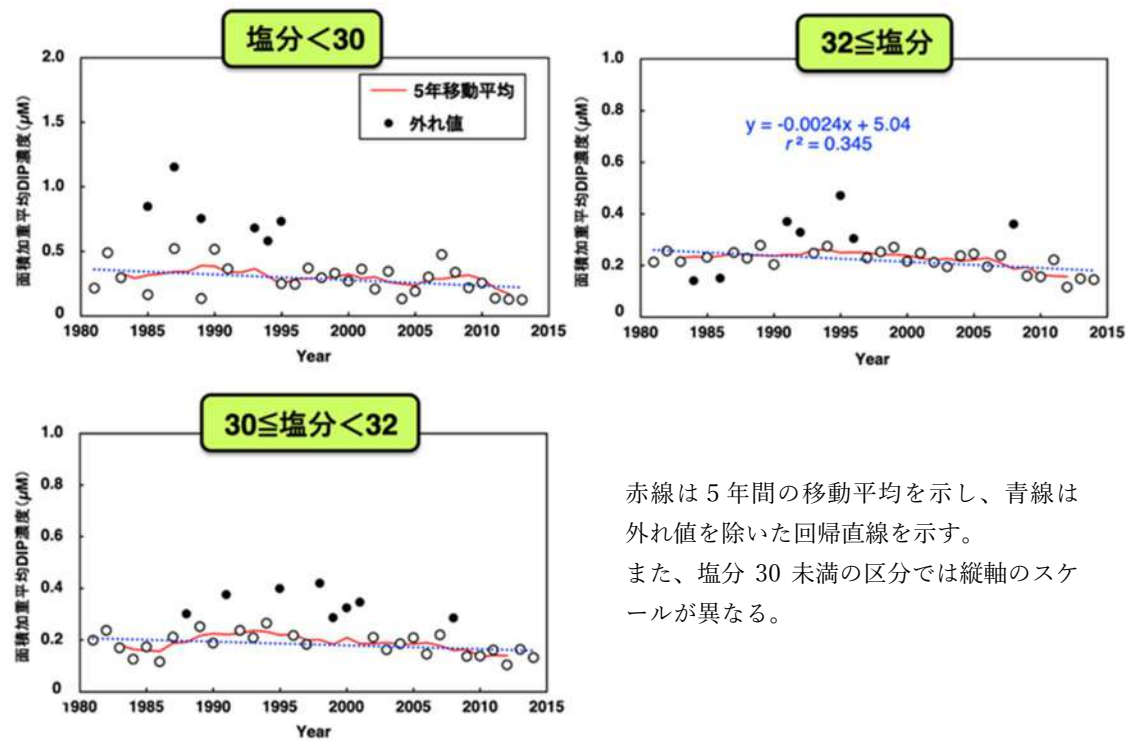
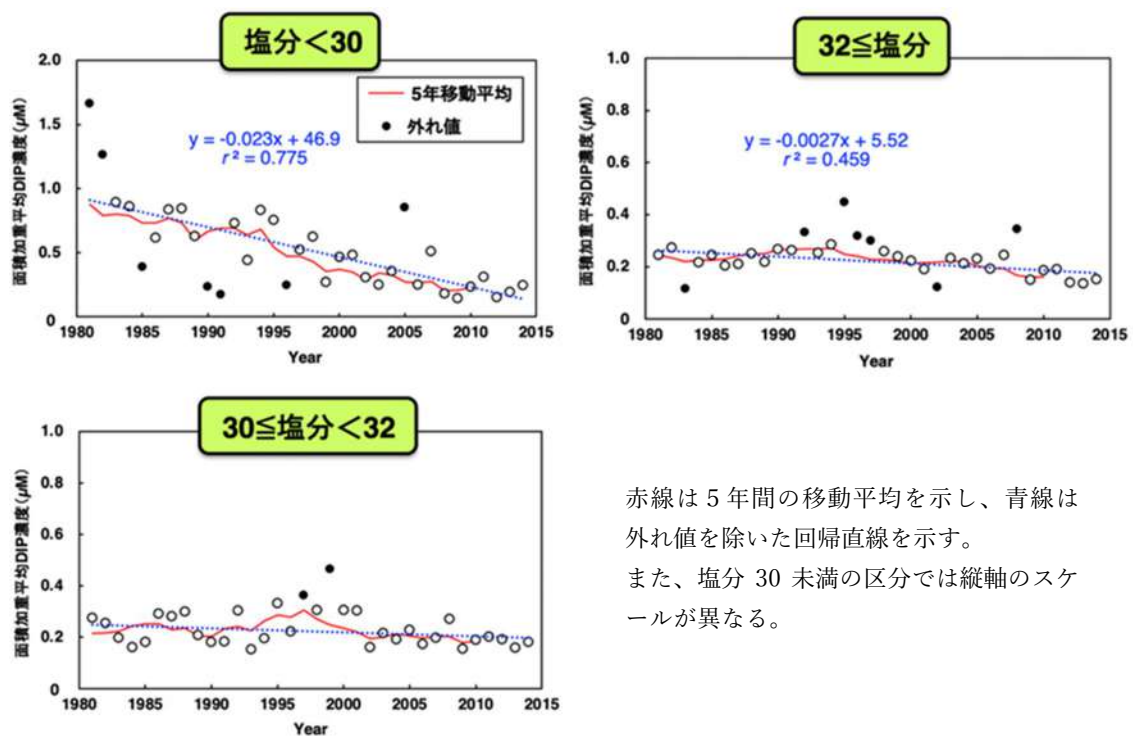


図 14 夏季表層塩分に基づいた海域区分における春季表層 DIP 濃度の推移

赤線は 5 年間の移動平均を示し、青線は外れ値を除いた回帰直線を示す。
また、塩分 30 未満の区分では縦軸のスケールが異なる。



赤線は 5 年間の移動平均を示し、青線は外れ値を除いた回帰直線を示す。
また、塩分 30 未満の区分では縦軸のスケールが異なる。

図 15 夏季表層塩分に基づいた海域区分における夏季表層 DIP 濃度の推移

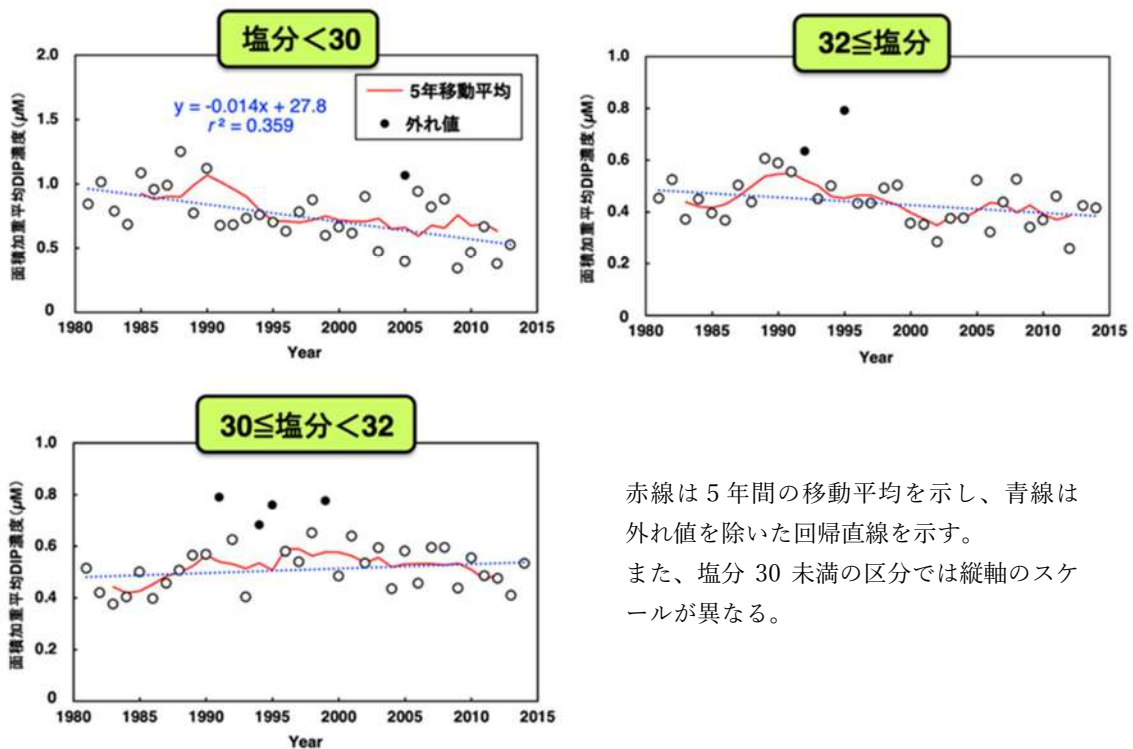


図 16 夏季表層塩分に基づいた海域区分における秋季表層 DIP 濃度の推移

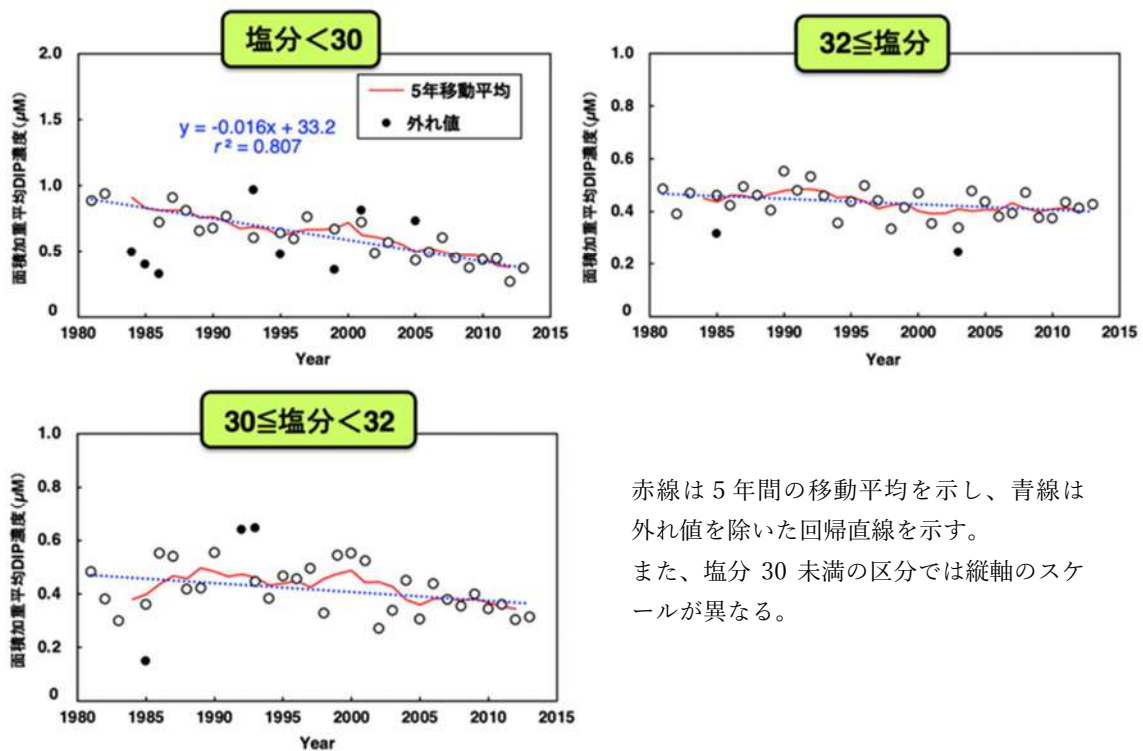


図 17 夏季表層塩分に基づいた海域区分における冬季表層 DIP 濃度の推移

図 18 から図 21 に夏季表層塩分に基づいた海域区分における四季の平均表層 Chl.a 濃度の推移を示す。Chl.a 濃度は植物プランクトン量の指標であり、光合成により無機栄養塩類が生物体（有機物）へと変換される一次生産を評価する上で重要であり、無機的环境と低次生物生産過程を繋ぐ重要なパラメータである。一般的に、赤潮は Chl.a 濃度が 10 $\mu\text{g/L}$ 以上となるような状態を指すが、植物プランクトンは増殖の条件（一般的に光、水温、栄養塩類）が揃うと大規模なブルージングを起こすことがあり、水中の Chl.a 濃度が数十 $\mu\text{g/L}$ となることがしばしばある。そのため、赤潮が起きるような場所では突発的な高 Chl.a 濃度が観測されることがあり、溶存物質に比べ濃度の変動が大きい傾向にある。

春季および夏季の表層 Chl.a 濃度は塩分 30 未満の区分で経年的に大幅に低下しており、濃度の低下が著しかった夏季については、回帰式からの推定では 1980 年から 2009 年の 30 年間で約 7.3 μM 低下していた（1980 年から 37%減）。Chl.a 濃度が高い夏季において、塩分 30 未満の区分では、80 年代には Chl.a 濃度が 10 $\mu\text{g/L}$ 以上となる赤潮が毎年のように繰り返されてきたが、2010 年代に入ると Chl.a 濃度が 10 $\mu\text{g/L}$ を超えない年もあり、近年ではあまり赤潮が発生しないような海域へとシフトしてきていることが示唆された。

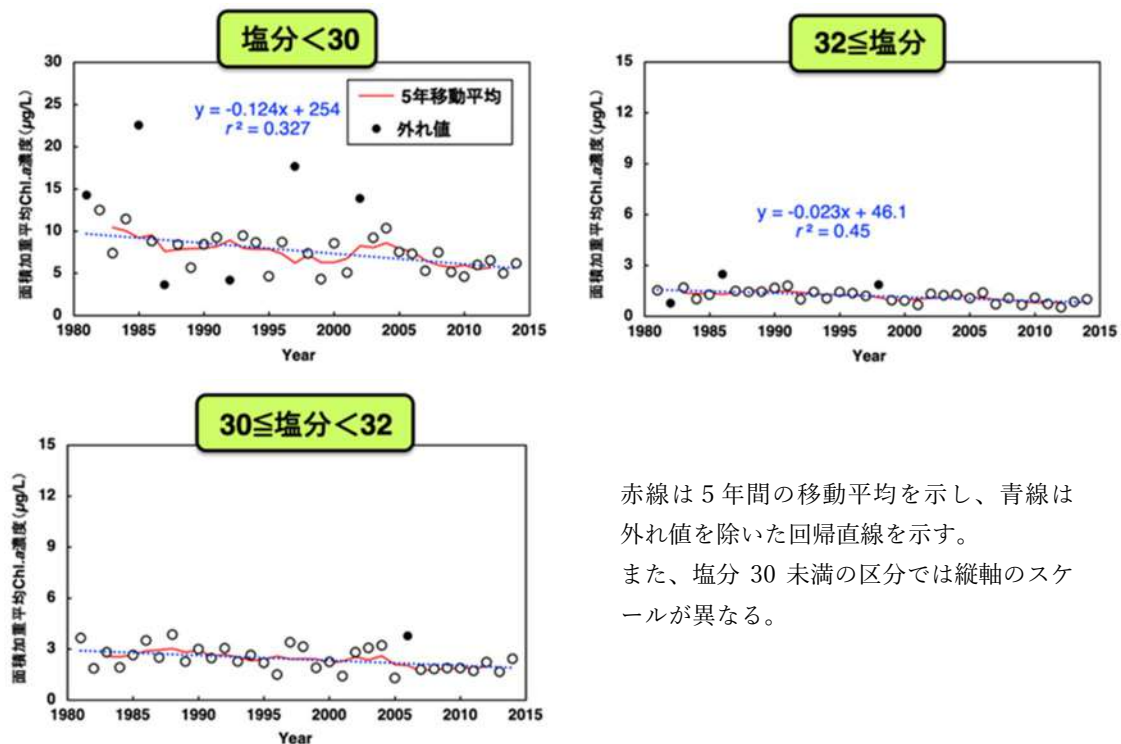


図 18 夏季表層塩分に基づいた海域区分における春季表層 Chl.a 濃度の推移

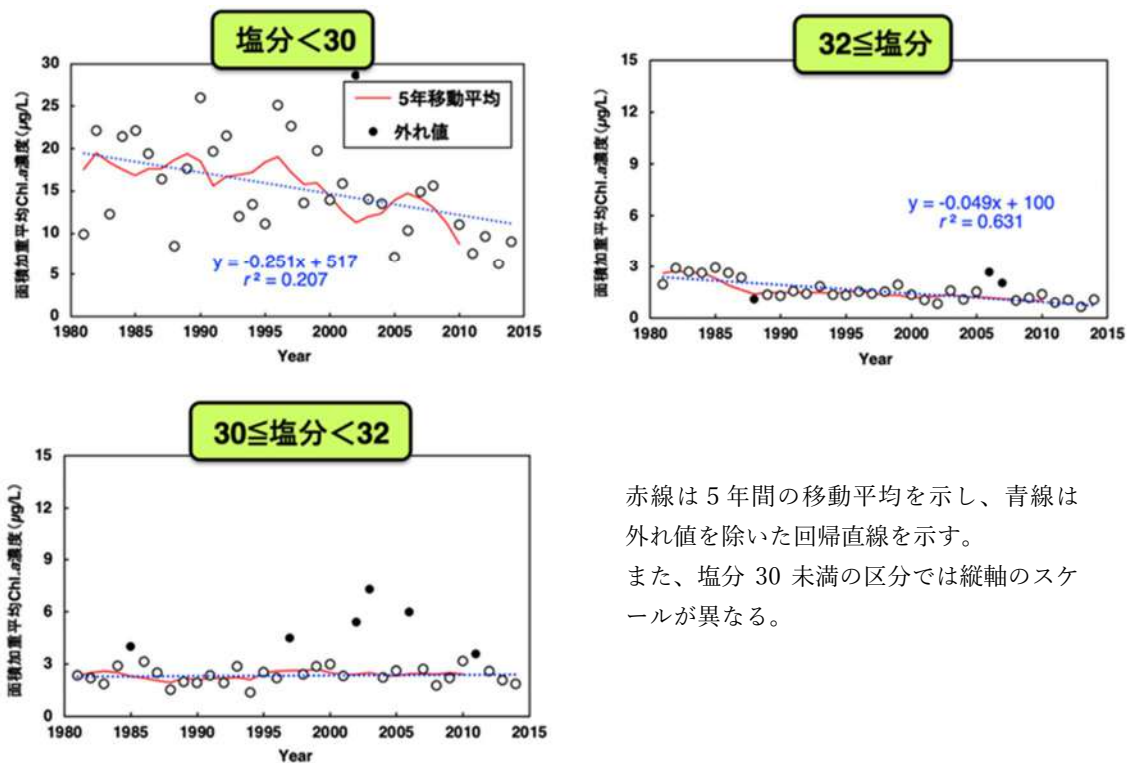


図 19 夏季表層塩分に基づいた海域区分における夏季表層 Chl.a 濃度の推移

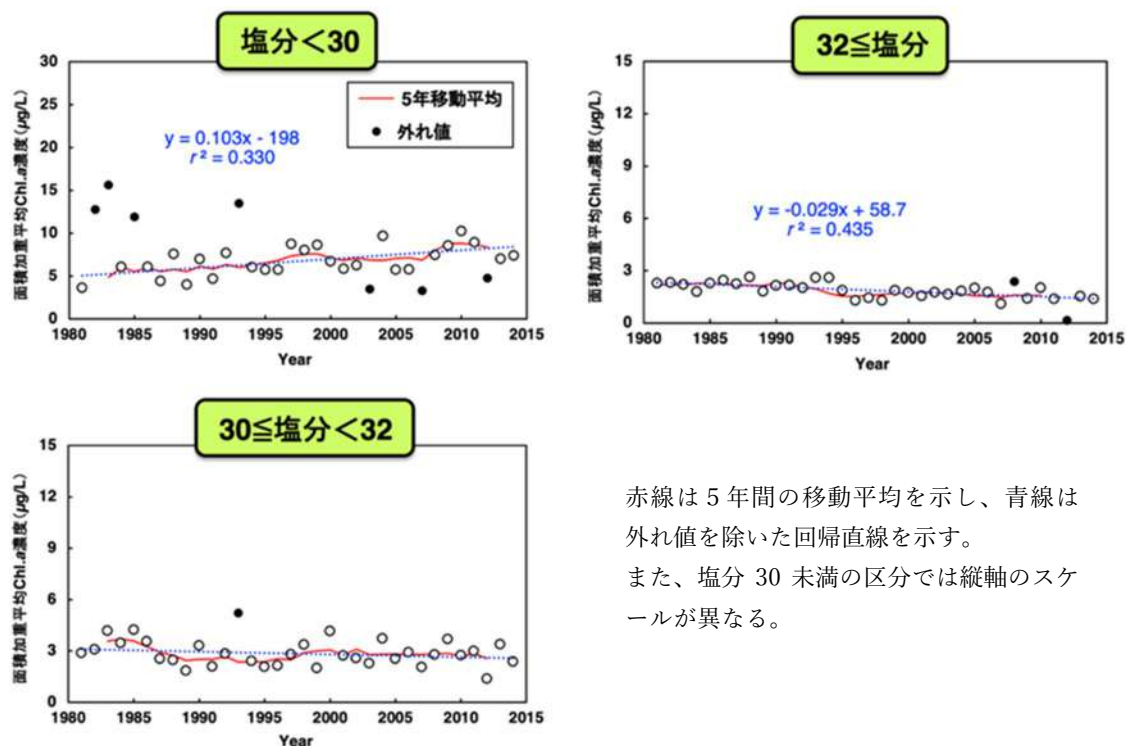


図 20 夏季表層塩分に基づいた海域区分における秋季表層 Chl.a 濃度の推移

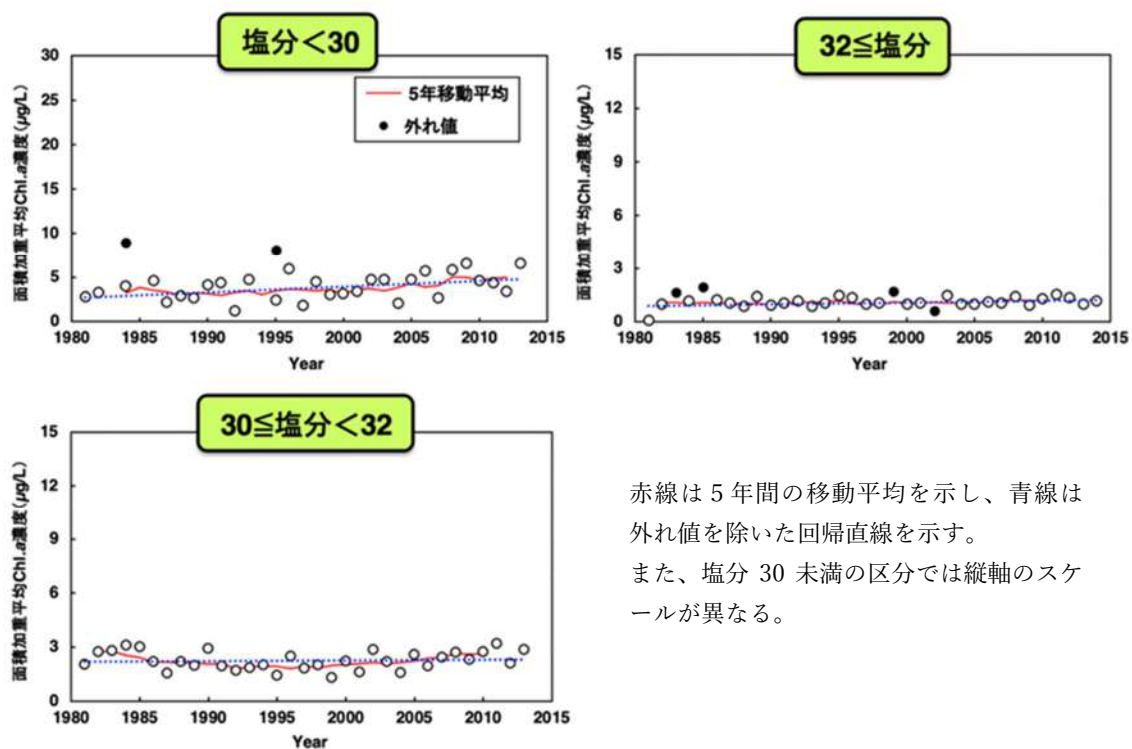


図 21 夏季表層塩分に基づいた海域区分における冬季表層 Chl.a 濃度の推移

当該区分において、冬季では明確な濃度の低下傾向が見られず、有意な回帰式が得られた秋季については 30 年間で 3.0 $\mu\text{g/L}$ と微増していたが、統計的に外れ値となった 10 $\mu\text{g/L}$ を超えるような赤潮は 1990 年代後半から起きていないため、総合的に考えると横ばいの傾向に近い可能性がある。塩分 30～32 の区分においては、全ての季節において明確な濃度変化は認められなかった。32 以上の外洋水の影響を強く受ける区分は Chl.a 濃度が最も低いエリアであり、冬季を除いて僅かに低下傾向にあったことがわかった。

有意な回帰式が得られた春季、夏季、および秋季における濃度変化は小さく、回帰式より 30 年間でそれぞれ 0.7 $\mu\text{g/L}$ 、1.4 $\mu\text{g/L}$ 、および 0.8 $\mu\text{g/L}$ の低下であったが、流入する外洋水の影響により僅かに変化していたと考えられた。

2010 年代（2010～2014 年の 5 年間）の Chl.a 濃度レベルとしては、塩分 30 未満の区分では 5 年平均値で春季 5.7 $\mu\text{g/L}$ 、夏季 8.7 $\mu\text{g/L}$ 、秋季 8.4 $\mu\text{g/L}$ 、冬季 5.0 $\mu\text{g/L}$ 、塩分 30～32 の区分では春季 2.0 $\mu\text{g/L}$ 、夏季 2.4 $\mu\text{g/L}$ 、秋季 2.6 $\mu\text{g/L}$ 、冬季 2.6 $\mu\text{g/L}$ であり、近年においても 2～3 倍程度の濃度差はあるが、春季および夏季では経年的にその差は狭まってきている。

表 1 に、1981～2010 年の 30 年間における、塩分 30 未満の区分の夏季の DIN 濃度、DIP 濃度、および Chl.a 濃度の変化を示す。30 年間で DIN、DIP、および Chl.a 濃度はそれぞれ 16.6 μM 、0.67 μM 、および 7.28 $\mu\text{g/L}$ 低下した。低下した栄養塩の DIN/DIP は 24.7 であり、植物プランクトンの平均体組成比であるレッドフィール

ド比 16⁵⁾より少し高い値であった。陸域負荷削減により、河川水が流入する塩分 30 未満の区分では栄養塩濃度が大幅に低下しており、それに伴い夏季の植物プランクトンの増殖も大幅に抑えられていた。

30年間(1981～2010年)の濃度の低下		
塩分<30の区分	DIN濃度(μmol/L)	16.6
	DIP濃度(μmol/L)	0.67
	Chl.a濃度(μg/L)	7.28

表1 30 年間における塩分 30 未満の区分の DIN 濃度, DIP 濃度, および Chl.a 濃度の変化 (夏季)

濃度低下が顕著であった当該区分において、実際に水中の DIN および DIP 濃度が低下したことで Chl.a 濃度が低下したのか、それらは量的に打倒な数値であるのかを把握するため、生態化学量論に基づいた評価を試みた。30 年間における水中の DIN および DIP 濃度の変化と、レッドフィールド比 C:N:P = 106:16:1 (mol/mol) および植物プランクトンの一般的な C:Chl.a (30～100 (g/g)) 比⁶⁾⁷⁾⁸⁾を用いて計算することで、窒素およびリンの減り分から植物プランクトン (Chl.a 濃度) 減少量を推定した。なお、C:Chl.a 比は生理活性状態で大きく変動するため、30～100 という幅を持った見積りになっている。

回帰直線の傾きを用いて、低下した DIN 濃度から計算した場合、Chl.a 濃度の低下は 13.2～44.0 μg/L と推定され、実際に低下した濃度 (7.28 μg/L) よりもやや高く見積もられた (表2)。DIP 濃度から計算した場合も同様に推定値がやや高めであったが、比較的類似した値 (推定値: 8.6～28.6 μg/L, 実測値: 7.28 μg/L) となった。水中にある栄養塩の全てを植物プランクトンが利用している訳でないため、栄養塩減少量に対して植物プランクトン減少量が小さいことは想定されることではあった。塩分 30 未満の沿岸部では DIN/DIP 比が過去から現在まで比較的高く、リンが植物プランクトンの増殖の制限因子となっており値が類似した可能性も考えられた。

回帰直線の傾きおよび一般的な植物プランクトンの比率を用いた計算においても推定値および実測値のオーダーは一致しており、栄養塩濃度の低下と植物プランクトン量の減少は量的に対応していたことが確認できた。

実際に減少した Chl.a濃度(μg/L)	NP減少量から推定したChl.a濃度(μg/L)	
7.28	DINから計算	13.2～44.0
	DIPから計算	8.6～28.6

表2 30 年間で低下した栄養塩濃度から求めた推定低下 Chl.a 濃度および実際に低下した Chl.a 濃度の比較 (夏季)

ウ 代表海域における塩分区分の妥当性評価

上記の広域データの解析における問題点として、環境省等の全域を対象としたデータセットでは、地点間隔が数キロメートルに渡るため、どうしても小・中規模河川が流入する海域区分では河川水が広域調査の調査地点へ届かず、低塩分区分が沿岸付近に存在するにも関わらず高塩分区分となっている可能性が考えられた。そうした場所での平均的な河川水の到達範囲を明らかにするために、二級河川の黒瀬川が流入する広島県の広湾を代表的な河口域とし、四季でライントランセクト調査を実施した。

本研究のモデル海域として選定された広湾は、広島湾のように水深の深い（40 m 以上）奈佐美瀬戸を境に北部と南部で明確に異なる海域特性をもつような場所ではなく、なだらかに水深が変化する海域であり（10 m 程度）、また水島灘のような多数の島による潮流の影響も少なく、一級河川は流入しない泥分 70%程度の一般的によくみられる砂泥質の湾である。

図 22 に夏季調査（2020 年 8 月 19 日）における広湾の塩分、DIN 濃度、DIP 濃度、DO 濃度、および Chl.a 濃度の鉛直断面分布を示す。調査範囲の表層塩分は 30.5 ～31.0 であり、前述した環境省データの広域解析における中程度の塩分区分（30～32）に該当した（図 9）。2020 年夏期調査では、河口から 1 km 離れた場所から沖合に向けてライン観測を実施したが、広域解析における塩分 30 未満の区分が河口から最大 1 km までと仮定してもその面積は 2.1 km²程度であり、広域解析における広湾区分面積（77.4 km²）の 2.7%程度しかなく、広域解析における小・中規模河川の影響は小さいことがわかった。

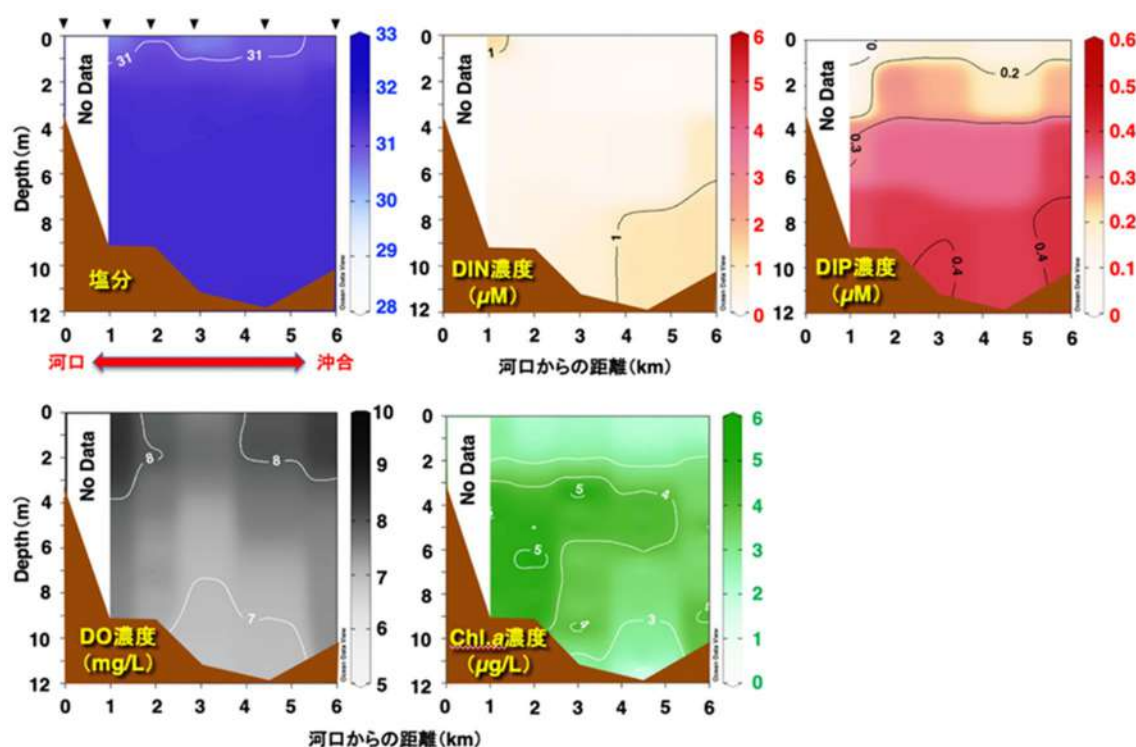


図 22 夏季調査（2020 年 8 月 19 日）における広湾の水質の鉛直断面分布（図の左側が黒瀬川河口）

表層の DIP 濃度 ($0.02\sim0.18\ \mu\text{M}$) および Chl.a 濃度 ($2.1\sim2.6\ \mu\text{g/L}$) においても広域解析における塩分 $30\sim32$ の区分の値に近く（図 15、図 19）、広域解析結果が妥当であることが示された。表層の DIN 濃度は $0.11\sim1.4\ \mu\text{M}$ と低い傾向にあり、中層付近では比較的高い Chl.a 濃度（最高値： $5.7\ \mu\text{g/L}$ ）であったことから、植物プランクトンの消費により水柱の DIN 濃度が大きく低下していた可能性が考えられた。

DIP 濃度は中～底層付近において高く、河口部表層（DIN/DIP = 53）を除く広湾全体が低い DIN/DIP 比となっており（DIN/DIP = $0.5\sim3.0$ ）、DIP が消費されず水柱に余っていた可能性が考えられた。溶出に関わる海底-1m 水深における DO 濃度は $6.9\sim7.5\ \text{mg/L}$ であり、夏季ではあるが貧酸素水塊は発生していなかった。同様の傾向を 2021 年の 8 月の調査においても把握することができた。

エ 堆積物からの栄養塩溶出量の推定と長期変化

図 23 に広湾における河口からの距離に応じた DIN および DIP 溶出フラックスの季節変化を示す。3 本のコアの平均値のため多少のばらつきはあるが、全ての季節において DIN は水中への拡散、DIP は堆積物方向への拡散傾向であった。夏季の 3 地点においては正の DIP 溶出フラックスとなった。5 地点における DIN フラックスは春季、夏季、秋季、冬季でそれぞれ $1.2\sim8.1\ \text{mgN/m}^2/\text{d}$ 、 $8.0\sim25.7\ \text{mgN/m}^2/\text{d}$ 、 $2.3\sim19.1\ \text{mgN/m}^2/\text{d}$ 、 $0.5\sim5.2\ \text{mgN/m}^2/\text{d}$ の範囲をとり、DIP フラックスは春季、夏季、秋季、冬季でそれぞれ $-0.83\sim-0.19\ \text{mgP/m}^2/\text{d}$ 、 $-0.99\sim1.63\ \text{mgP/m}^2/\text{d}$ 、-

0.82～-0.50 mgP/m²/d、-1.11～-0.39 mgP/m²/d の範囲をとり、多田ら⁹⁾による播磨灘の津田湾における溶出フラックスの夏季および秋季の観測値と類似した値となった。また、多田ら⁹⁾による津田湾および Komai et al¹⁰⁾による大阪湾奥における各月の溶出フラックスの観測結果によると、DIN、DIP ともに夏季～秋季にフラックスが最も上昇しており、広湾における結果と一致する。

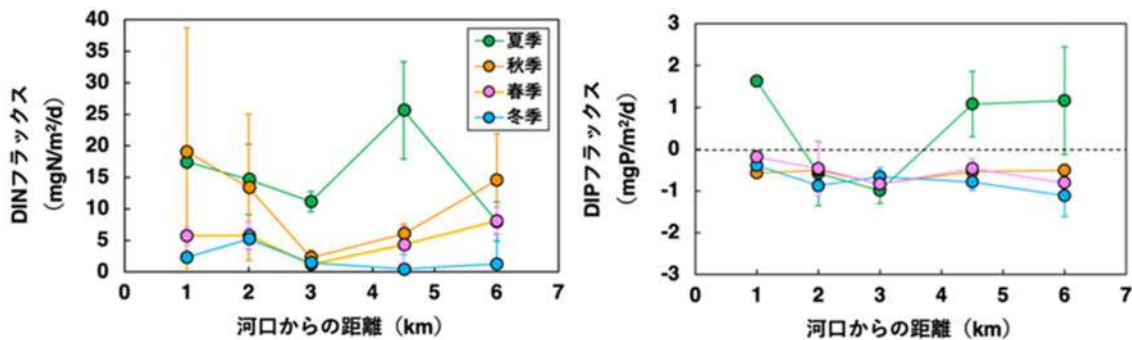


図 23 河口からの距離に応じた DIN (左) および DIP (右) 溶出フラックスの季節変化
図中のプロットは平均値を示しエラーバーは標準偏差を示す (n=3)

図 24 に広湾における培養水温および 5 地点平均栄養塩溶出フラックスの関係を示す。培養水温と DIN・DIP フラックスの間には有意な正の相関関係が得られたことから、広湾においては底層水温で栄養塩溶出フラックスを推定可能であることがわかった。空間分布については、広湾においては河口～沖合での距離に応じた溶出フラックスの明確な違いは見られなかった。

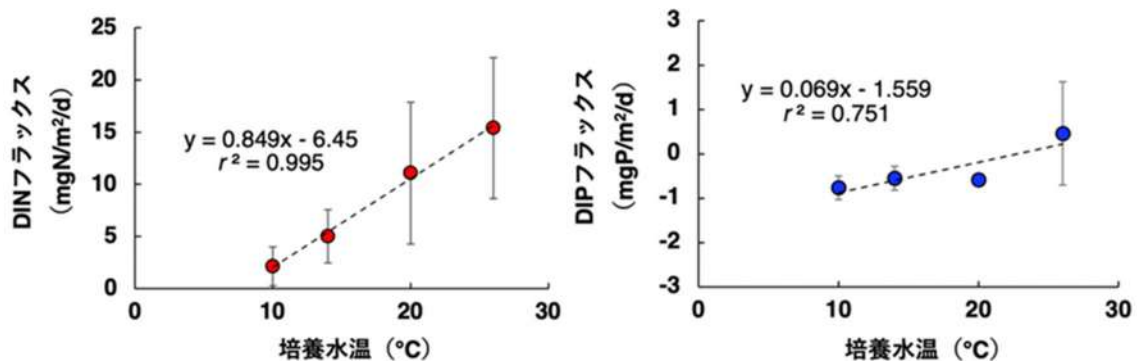


図 24 培養水温および栄養塩溶出フラックスの関係 (左: DIN、右: DIP)
プロットは 5 地点の平均値を示しエラーバーは標準偏差を示す

広湾においては底層水温を用いて溶出フラックスを推定可能であることがわかったが、瀬戸内海全域の溶出フラックスをより精度良く推定するためには、その他の溶出に関わるパラメータとの関係も見ることが必要であった。そこで、さらに「瀬戸内海環境情報基本調査および豊かな海の確保に向けた方策検討業務報告書」⁴⁾ 内のデータおよび広湾の DO 濃度および TOC 含量を加え、3つのパラメータを用いた溶出

フラックス推定式を作成した。

$$DIN\ Flux = -0.130 \times \left[\left(\frac{1.07}{T-15.5} \right)^{DO-13.8} (TOC+0) \right]$$

$$DIP\ Flux = -0.208 \times \left[\left(\frac{1.11}{T-25.3} \right)^{DO-10.0} (TOC-9.92) \right]$$

ここで、DIN Flux は DIN 溶出フラックス (mgN/m²/d)、DIP Flux は DIP 溶出フラックス (mgP/m²/d)、T は水温 (°C)、DO は DO 濃度 (mg/L)、TOC は TOC 含量 (mg/g) である。

図 25 に広湾および文献に基づく実測 DIN・DIP 溶出フラックスとモデル式推定 DIN・DIP 溶出フラックスの関係を示す。実測値と推定値の間の傾きは 1 に近く、水温、DO 濃度、および TOC 含量から精度良く溶出フラックスを推定できることがわかった (DIN の決定係数 $r^2 = 0.85$ 、DIP の決定係数 $r^2 = 0.95$)。

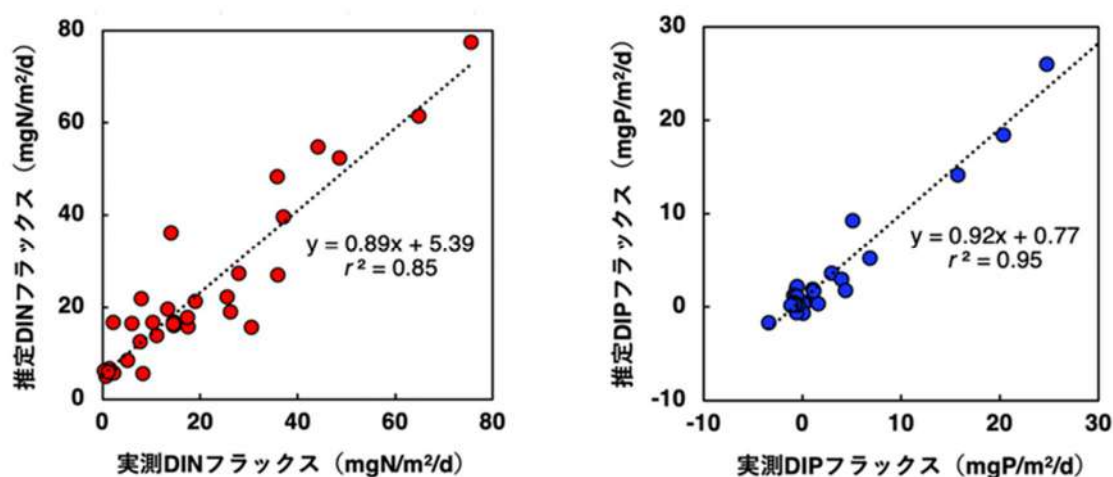


図 25 広湾および文献に基づく実測溶出フラックスと推定溶出フラックスの関係
(左) DIN (右) DIP

上記の推定式を用いて、広域総合水質調査および環境情報基本調査のデータから瀬戸内海全域の溶出フラックスを推定した。第 1 回～4 回の全 1,664 地点における解析不可地点は 34 地点 (全地点の 2%) であり、23 地点が 1980 年代の広島湾データ、11 地点が様々な海域における TOC 含量データ無しの地点であった。

図 26 および図 27 に有機汚濁が進んでいたと考えられる 1980 年代における DIN および DIP 溶出フラックスの空間分布の四季変化を示す。

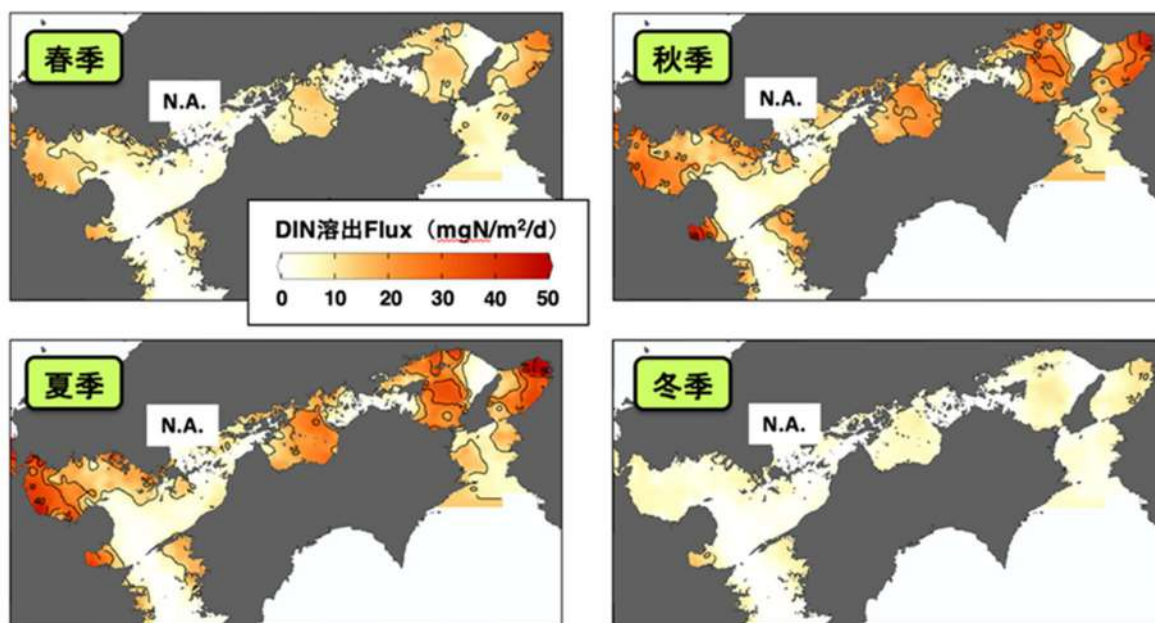


図 26 1980 年代における DIN 溶出フラックスの空間分布の四季変化

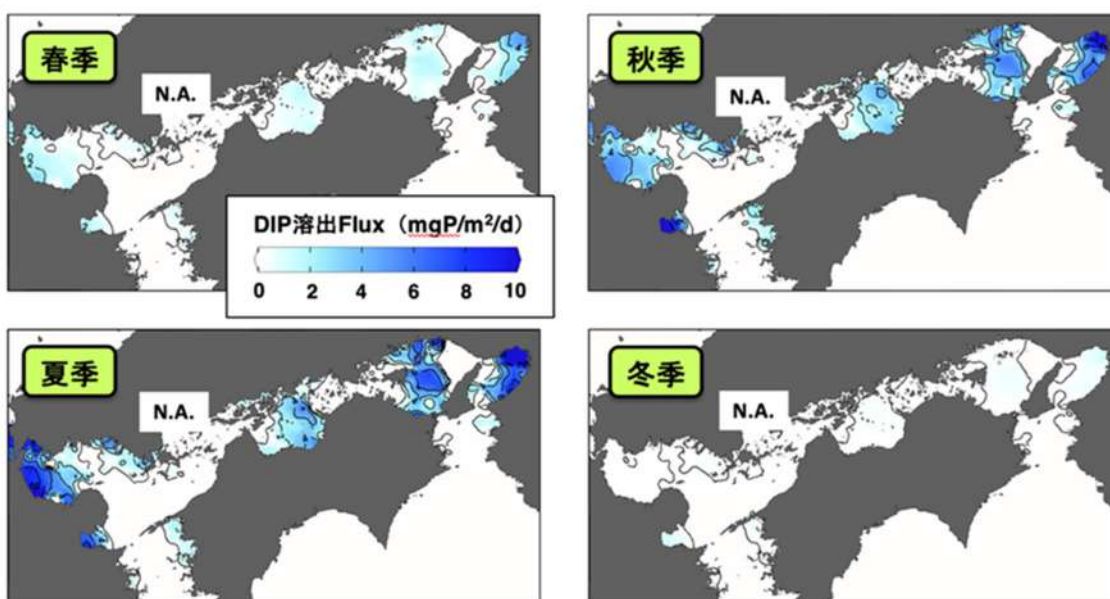


図 27 1980 年代における DIP 溶出フラックスの空間分布の四季変化

溶出フラックスは、DIN・DIP 共に夏季、秋季、春季、冬季の順で高い傾向にあった。DIN・DIP 溶出フラックスは四季を通して沿岸部で高い傾向にあり、特に大阪湾奥、播磨灘の中央部、燧灘東部、周防灘西部で高かった。空間分布の傾向は TOC 含量と類似しており、夏季については TOC 含量および推定溶出フラックスの間に強い正の相関関係が得られた (DIN : $r^2 = 0.94$ 、DIP : $r^2 = 0.92$)。全ての季節を用いて相関をとった場合、DIN・DIP 共に決定係数 (r^2) は 0.6 以上であり、DIN については底層 DO 濃度で $r^2 = 0.33$ 、底層水温では $r^2 = 0.22$ であり、季節的な溶出

速度の違いに影響を与える式となっていた。

図 28 および図 29 に溶出フラックスが最も高かった夏季における DIN および DIP 溶出フラックス分布の 1980 年代から 2010 年代までの経年変化を示す。溶出フラックスの絶対値は DIN・DIP 共に過去の瀬戸内海における報告値¹¹⁾¹²⁾¹³⁾同程度であり、1980～1990 年代をピークに 2000 年代以降溶出フラックスが低下傾向にあった。

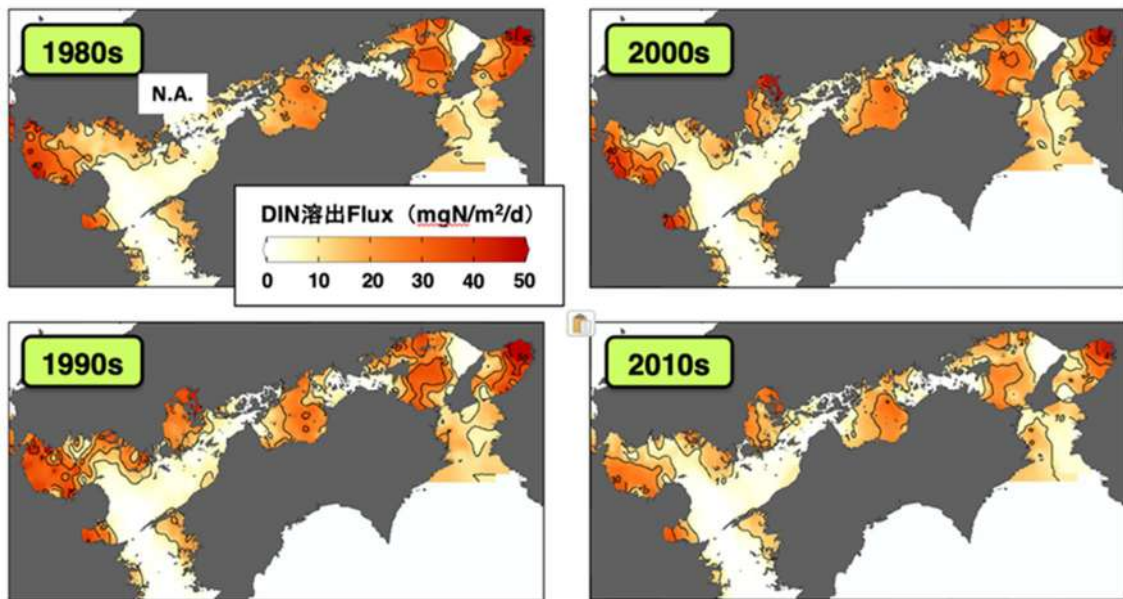


図 28 夏季の DIN 溶出フラックス分布の経年変化（1980～2010 年代）

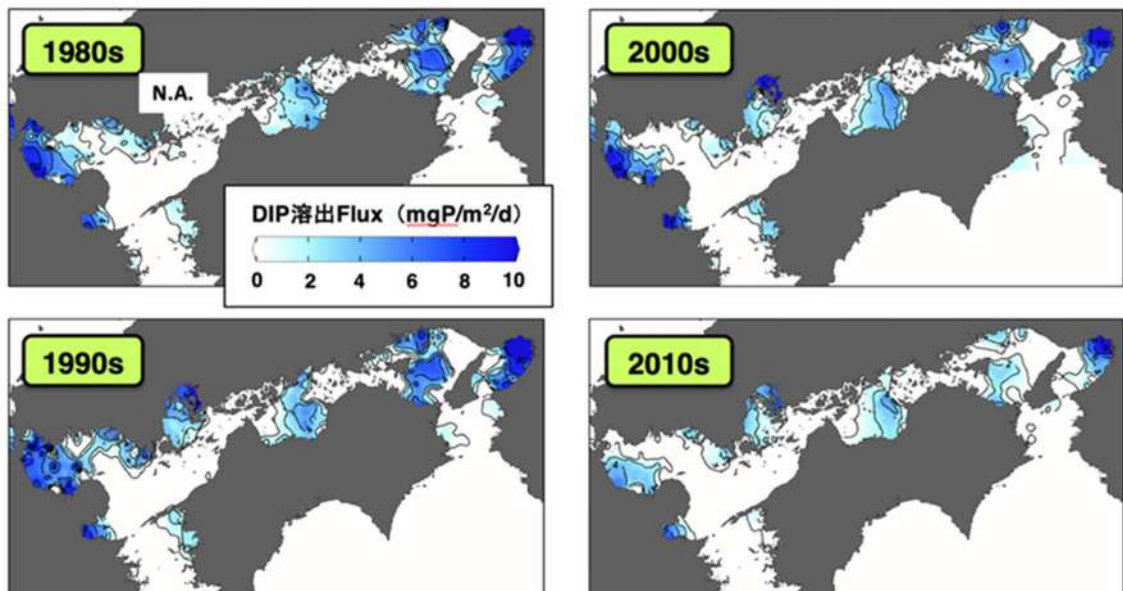


図 29 夏季の DIP 溶出フラックス分布の経年変化（1980～2010 年代）

栄養塩溶出フラックスの低下がどのような場所でおきているのかを把握するために、「②塩分に基づいた海域区分における表層栄養塩濃度および Chl.a 濃度の長期変化」にて作成した夏季表層塩分に基づいた海域区分を用いた評価を行った。

図 30 に、夏季塩分区分における年平均溶出フラックスの 1980 年代から 2010 年代までの変化を示す。DIN・DIP 共に塩分 30 未満の区分が最もフラックスが高く、次いで塩分 30～32 の区分、塩分 32 以上の区分となり、陸域負荷の影響の強さと栄養塩溶出フラックスの高さがリンクしていた。ピークの 1990 年代から 2010 年代にかけての低下率は、全ての区分において DIN で 2～3 割、DIP で 4～5 割程度であった。また、DIN・DIP 共にすべての区分で 1990 年代以降にフラックスが低下しており、陸域負荷削減に伴う底質への有機物負荷の低減、さらには TOC 含量の低下による堆積物からの栄養塩溶出フラックスの低下の可能性が考えられた。

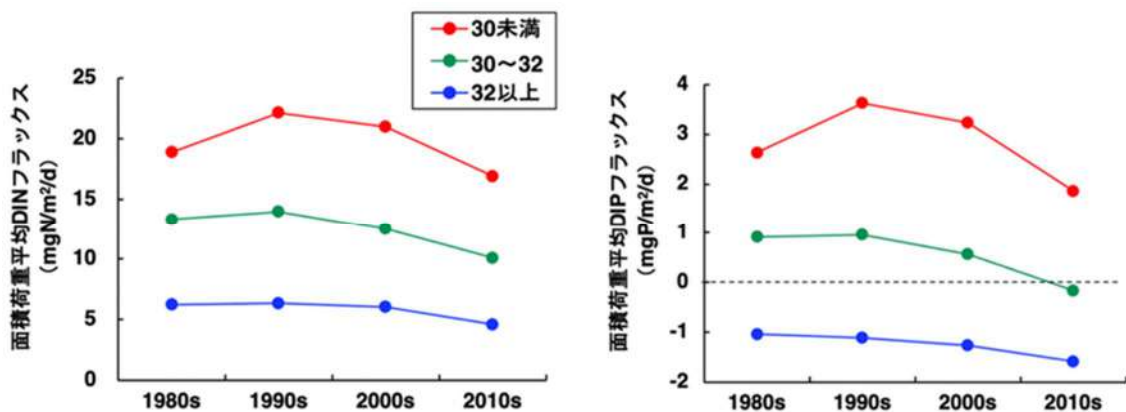


図 30 夏季塩分区分における年平均溶出フラックスの経年変化（1980～2010 年代）

図 31 に、夏季塩分区分における夏季 TOC 含量の経年変化（1980～2010 年代）と TN・TP 負荷量の推移（1980～2000 年代）を示す。TOC 含量も栄養塩フラックス同様に塩分 30 未満の区分が最も含量が高く、次いで塩分 30～32 の区分、塩分 32 以上の区分となり、栄養塩フラックスの推定値は TOC 含量の変化に起因していた。TOC 含量は全域で減少傾向であり、含量が高い塩分 30 未満の区分では 1990 年代にピークを示した。TN 発生負荷量の推移を見ると、1980～1990 年代の変化はほとんどなく、1990 年代はまだ有機物の堆積・蓄積のフェーズであったことが推察された。

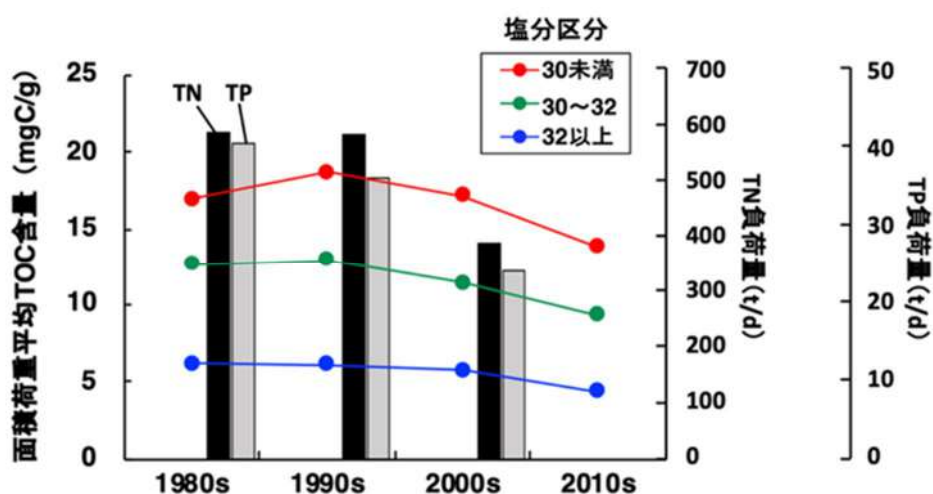


図 31 夏季塩分区分における夏季 TOC 含量の経年変化（1980～2010 年代）と TN・TP 負荷量の推移（1980～2000 年代）

一方で、TP 負荷量を見ると 1990 年代においてすでに減少傾向にあり、負荷による流入、堆積、分解（溶出）のタイムラグがある可能性も考えられた。Umehara et al.¹⁴⁾ は、1980 年代の表層 Chl.a 濃度を用いた海域区分において、Chl.a 濃度と TOC 含量の経年変化について示しているが、経年的な Chl.a 濃度の低下が見られなかった低濃度区分（ $< 2 \mu\text{gChl.a/L}$ ）の海域においても TOC 含量の有意な低下が認められたと報告している。本研究においても、栄養塩濃度の低下が著しい塩分 30 未満の区分において Chl.a 濃度が大きく低下しており、Chl.a 濃度がほとんど低下していない塩分 30 以上の区分においても TOC 含量の低下に伴う栄養塩溶出フラックスの低下が起きていた可能性が考えられた。

瀬戸内海における湾灘別の陸域負荷量に対する溶出量の寄与に関する過去の報告では、堆積物からの溶出が窒素およびリン共に数 10%、または 100%を超える寄与があるとされており¹¹⁾、水中の植物プランクトンにとって重要なソースとなりうる可能性が高い。あくまで推定の域を出ないが、今回の全域の栄養塩溶出フラックスの推定結果から陸域負荷量に対する溶出量の寄与を計算することができる。本報告書では、参考までに広島湾における寄与率の推定結果を記載する。なお、陸域負荷量に対する溶出量の寄与率（%）は以下の式で求めた。

$$\text{寄与率 (\%)} = \text{溶出量 (ton/d)} / \text{陸域負荷量 (ton/d)} \times 100$$

表 3 に、広島湾における推定栄養塩溶出量（DIN、DIP）、陸域負荷量（TN、TP）、および陸域負荷量に対する溶出量の寄与を示す。広島湾においては、窒素・リン共に陸域負荷量に匹敵するほど溶出量が多い可能性が示唆され、水中の栄養塩ソースにおける溶出の寄与が経年的に増加している可能性が考えられた。他の湾灘

では 1980 年代の溶出フラックスデータも利用可能であり、今後 2010 年代の陸域負荷量がわかれば 4 年代の変化を把握することが可能となる。

	窒素			
	1980s	1990s	2000s	2010s
DIN溶出量 (tonN/d)	–	21	20	17
TN陸域負荷量 (tonN/d)	33	28	24	–
陸域負荷量に対する溶出量の寄与 (%)	–	74	83	–

	リン			
	1980s	1990s	2000s	2010s
DIP溶出量 (tonP/d)	–	2.7	2.5	1.6
TP陸域負荷量 (tonP/d)	2.3	2.5	1.6	–
陸域負荷量に対する溶出量の寄与 (%)	–	110	150	–

表 3 広島湾における推定栄養塩溶出量 (DIN, DIP)、陸域負荷量 (TN, TP)、および陸域負荷量に対する溶出量の寄与

(4) 考察

瀬戸内海では、窒素で 40%、リンで 61%の栄養塩流入負荷削減により、塩分 30 未満の海域に限定して 1981 年から 2014 年までに表層栄養塩濃度が大きく低下してきており、それに伴い同区分で春季～夏季の一次生産も減少してきた可能性が示唆された。塩分 30 未満の区分では、80 年代には夏季の Chl.a 濃度が 10 µg/L 以上となる赤潮が毎年のように繰り返されてきたが、2010 年代に入ると Chl.a 濃度が 10 µg/L を超えない年もあり、近年ではあまり赤潮が発生しないような海域へとシフトしてきていることが示唆された。これにより水中における植物プランクトンの過剰な生産は抑えられ、大河川の流入する沿岸部では海底への有機物負荷も大幅に低減されたと推察される。陸域からの流入負荷がさらに低減されると、塩分 30 未満の区分では栄養塩濃度および植物プランクトン量が減少する可能性があるが、近年の濃度は塩分 30 以上の区分の濃度に近づいてきており、特に DIP 濃度については下げ止まりの可能性も考えられる。

一方、瀬戸内海の 5 割弱の面積を占め、陸域からの影響が比較的小さいと考えられる塩分 30～32 の区分においては、30 年間における明確な栄養塩濃度および Chl.a 濃度の低下が見られなかったため、陸域負荷削減の効果は塩分 30 未満の区分に限定的であると考えられた。

塩分 32 以上の区分については、暖季に僅かな DIP 濃度および Chl.a 濃度の低下が見られ、流入する外洋水の影響により変化していたと考えられたが、濃度の変化幅は小さく、塩分 30 以上の区分においては今後もあまり大きな変化をしない可能性が考えられた。

今回実施した解析のように、国の長期的かつ多地点のデータを活用することで、これまで見えてこなかった瀬戸内海の環境変化の大きなトレンドが見えてくることがわかり、水質や生態学的特性に基づき海域を区分する手法は、今後の栄養塩管理において重点的に監視、対策する海域の設定などに活用されることが見込まれる。一方で、全域を対象としたデータを用いた解析における課題としては、地点間隔が数キロメートルに渡り、特に水質の変化が大きい河口部から沖合にかけての詳細な連続データが不足していることが挙げられた。そこで広湾をモデルにライン観測を実施したところ、夏季における塩分 30 未満の区分は、河口から 1km（広湾区分面積のわずか 2.7%）にも満たないことが確認できた。

広域解析における塩分 30 未満の区分の面積は多少過小評価ではあるが、沿岸部の調査地点を追加してもおそらくそこまで大きく面積が変わることはないと考えられ、大雨を除く定常時の平均像としては利用可能であると推察される。本研究は瀬戸内海全域というかなり広いエリアと対照とし、一般的な岸沖の変化傾向の違いを見出すことが目的であった。そのため、大阪湾奥や別府湾など特に河川水の影響が広範囲に及ぶ海域が塩分 30 未満の区分となったが、本手法をローカルなエリアに適用する場合は、各府県が所有する高解像度データを用いて再度検証し、重点措置エリアを決定されることを薦める。

広域総合水質調査データにおいては、栄養塩濃度に報告下限値が設けられている（ $\text{NH}_4\text{-N}$: 0.01 mg/L, $\text{NO}_2\text{-N}$: 0.002 mg/L, $\text{NO}_3\text{-N}$: 0.01 mg/L, $\text{PO}_4\text{-P}$: 0.003 mg/L）。そこで、比較的栄養塩濃度の低い塩分 30~32 および塩分 32 以上の区分の数地点において検証を行った。夏季においては、1995 年以前の下限値は見られず、以降、数年に一回程度の頻度で下限値となっていた。一方、冬季においては比較的濃度が高く下限値のデータがほとんど見られず、下限値が解析結果に影響する可能性は小さいと考えられた。夏季において、仮に下限値のデータが支配的であった場合は平均値も下限値に近いはずだが、2010 年代においても下限値に比べて高かった。また、本研究の各塩分区分における栄養塩濃度の解析結果は四季を通して類似した変動傾向であったこと、および低塩分区分における栄養塩濃度の低下（数 μM ）と高塩分域における栄養塩濃度の低下（0.数 μM ）の量的な差は歴然であったことから、栄養塩濃度の変動傾向について大きな間違いはないと考えている。

堆積物からの溶出については、瀬戸内海ではこれまでに河口部から沖合にかけての岸沖の違いを意識した定量的知見は蓄積されておらず、そこにフォーカスした調査・分析も必要であったため広湾をモデルに調査を実施した。広湾においては四季を通じて河口～沖合での距離に応じた溶出フラックスの明確な違いは見られなかった。広湾においては底層水温を用いて溶出フラックスを推定可能であることがわかったが、瀬戸内海全域の溶出フラックスをより精度良く推定するために、DO 濃度および TOC 含量を加えた式を作成して推定した結果、溶出フラックスは DIN・DIP 共に暖季に高い傾向であり、四季を通して沿岸部で高かった。また、溶出量は

瀬戸内海全域で経年的に減少傾向にあり、今後も溶出量が低下する可能性が考えられた。

3 岡山県児島湾及びその沖合海域における栄養塩濃度の経年変化と将来予測に関する研究

(1) 目的

本研究では、陸域の影響を強く受ける児島湾内、その沖合にある備讃瀬戸海域それぞれの経年的な栄養塩濃度の変化を調べ、陸域からの供給量の減少が沿岸域、沖合海域それぞれの栄養塩環境に与えた影響を明らかにする。その結果をもとに、瀬戸内海における総合的な栄養塩管理手法の開発につなげるものとする。

上記の目的を果たすために、以下の3つの作業を主に行うこととする。

ア 児島湾及び備讃瀬戸海域への窒素等の負荷量の変化（R1 年度）

既存の調査結果を基に、児島湾及び岡山県海域への窒素、リン、COD の負荷量の変化について調べ、陸域からの負荷量と海域の窒素等の濃度の関係を解析する。

イ 海域における形態別の栄養塩濃度の分布状況調査（R1～R3 年度）

播磨灘西部から備讃瀬戸海域にかけて東西に設定した10～15測点において、毎月1回、表層及び底層の有機態、無機態の窒素（TN、DIN）、リン（TP、DIP）、COD、水温、塩分等を分析し、海域における形態別の栄養塩の分布を明らかにする。

ウ 沿岸域と沖合海域の栄養塩濃度の経年変化（R1～3 年度）

既存の調査結果を基に、児島湾と備讃瀬戸海域の栄養塩濃度の変化を調べ、陸域からの供給量との関係を解析する。

(2) 方法

ア 児島湾及び備讃瀬戸海域への窒素等の負荷量の変化

児島湾及び岡山県海域に対する陸域からの窒素等の負荷量を明らかにするため、1980～2017年度の岡山県におけるCOD、TN、TPの流域別負荷量の年平均値データ¹⁵⁾を取得し、整理した。

イ 海域における形態別の栄養塩濃度の分布状況調査

海域における形態別の栄養塩分布状況を明らかにするため、播磨灘西部から備讃瀬戸海域にかけて東西に設定した11測点において（図32）、2012～19年度の4月～3月に毎月1回、表層及び底層の採水を行い、有機態、無機態の窒素（TN、PON、DON、DIN）、リン（TP、PP、DOP、DIP）、クロロフィルa濃度、COD、水温、塩分等の分析を行った。なお、TN-DTN=PON、DTN-DIN=DON、

TP-DTP=PP、DTP-DIP=DOP である。



図 32 形態別の栄養塩濃度の分布状況調査地点

ウ 沿岸域と沖合海域の栄養塩濃度の経年変化

沿岸域と沖合海域における経年的な栄養塩濃度の変化を明らかにするため、1980～2019 年度の岡山県と香川県の公共用水域調査¹⁷⁾¹⁸⁾における COD、TN、TP 濃度のデータを取得し（図 33）、整理した。また、上記期間の岡山県と香川県の浅海定線調査における表層の水温、塩分、DIN、DIP、クロロフィル a 濃度を取得し（図 34）、整理した。なお、解析については、測点数や測定項目の整合性の観点から、1985 年度以降のデータを使用した。

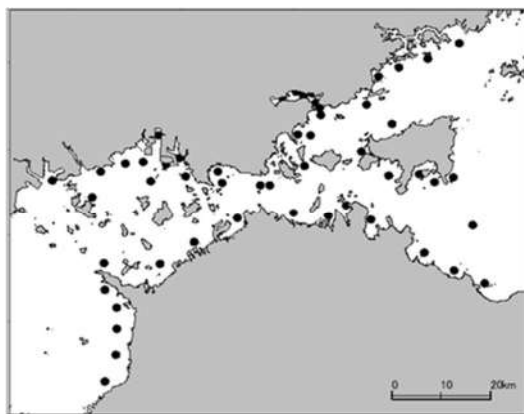


図 33 公共用水域調査測点

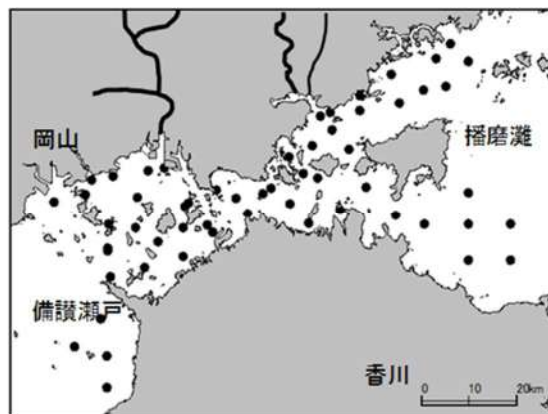


図 34 浅海定線調査測点

(3) 結果

ア 児島湾及び備讃瀬戸海域への窒素等の負荷量の変化

1980～2017 年度の岡山県における COD、TN、TP の流域別負荷量の推移を整理した結果は、2020 年度¹⁶⁾報告書を参照されたい。

イ 海域における形態別の栄養塩濃度の分布状況調査

2012～19年度の表層と底層における形態別の窒素、リンの全平均値を表4に示した。表層のTN、DON、PON、DIN濃度はそれぞれ $14.9 \pm 2.8 \mu\text{M}$ 、 $8.4 \pm 0.5 \mu\text{M}$ 、 $3.2 \pm 0.5 \mu\text{M}$ 、 $3.3 \pm 2.3 \mu\text{M}$ となり、TNに対するDON、PON、DINの割合はそれぞれ0.58、0.22、0.20となった。底層でのTNに対するDON、PON、DINの割合はそれぞれ0.55、0.27、0.18となり、表層と底層ともにTNの主成分はDONであった。

	TN	DON	PON	DIN	TP	DOP	PP	DIP
表層	14.9 ± 2.8	8.4 ± 0.5 (0.58)	3.2 ± 0.5 (0.22)	3.3 ± 2.3 (0.20)	0.79 ± 0.24	0.23 ± 0.07 (0.31)	0.21 ± 0.06 (0.28)	0.34 ± 0.21 (0.41)
底層	15.5 ± 2.6	8.5 ± 0.5 (0.55)	4.0 ± 0.7 (0.27)	3.0 ± 2.2 (0.18)	0.94 ± 0.28	0.24 ± 0.06 (0.25)	0.33 ± 0.12 (0.35)	0.37 ± 0.21 (0.40)

単位は μM ，（）内はTN,TPに対する割合を示す

表4 2012～19年度の表層と底層の形態別の窒素、リン濃度の全平均値

表層のTP、DOP、PP、DIP濃度はそれぞれ $0.79 \pm 0.24 \mu\text{M}$ 、 $0.23 \pm 0.07 \mu\text{M}$ 、 $0.21 \pm 0.06 \mu\text{M}$ 、 $0.34 \pm 0.21 \mu\text{M}$ となり、TPに対するDOP、PP、DIPの割合は0.31、0.28、0.41となった。底層でのTPに対するDOP、PP、DIPの割合は0.25、0.35、0.40となり、表層と底層ともにTPの主成分はDIPであった。

2012～2019年度の測線上における表層の形態別窒素と塩分の全期間平均値を図35に示した。吉井川と旭川の影響を受ける測点17において塩分は27.0となり、それ以外の測点と比較して低い値を示し測点間での塩分の違いがみられた。形態別の窒素は、測点17においてDON、DIN、PONの順に $9.6 \mu\text{M}$ 、 $7.0 \mu\text{M}$ 、 $5.2 \mu\text{M}$ となり、それ以外の測点と比較していずれの形態でも高い値を示した。

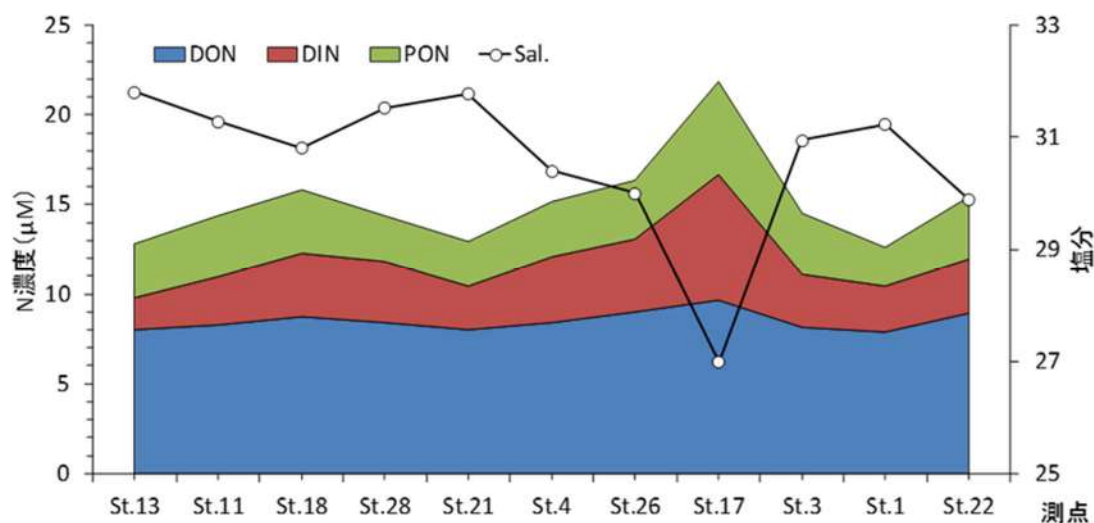


図35 測点上の形態別の表層窒素濃度の分布（全期間平均）

次に、2012～2019年度の表層全測点の塩分と形態別窒素濃度について、月ごとに平均した結果を図36に示した。塩分は、4月には31前後であったが、徐々に低下し7月には29.0となった。その後は、徐々に上昇し、3月には31.8となった。形態別の窒素についてみると、DON濃度はほぼ一定の値を示し、概ね $8\mu\text{M}$ 程度で推移した。DIN濃度は、4月には $1.9\mu\text{M}$ であったが、河川水の影響を受けて7月には、 $4.5\mu\text{M}$ まで上昇した。その後、8月には $1.8\mu\text{M}$ まで減少した後に上昇し、11月には $7.9\mu\text{M}$ となった。PON濃度は、夏季に高くなり、冬季に低下する傾向が見られた。

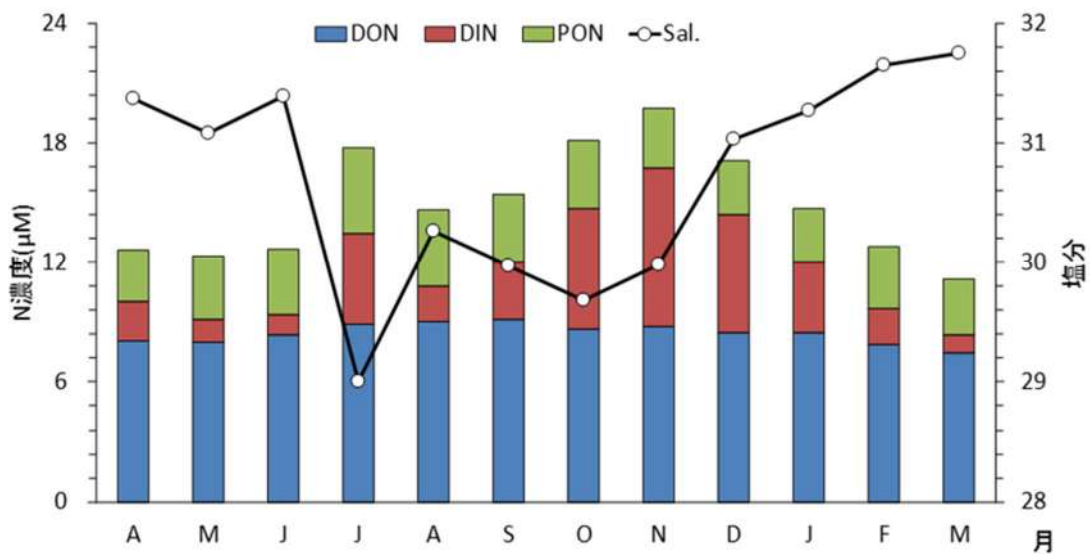


図36 全測点の表層における月ごとの形態別の窒素濃度と塩分の推移

瀬戸内海東部の窒素の季節変動については、以下のとおり考えられている¹⁹⁾。春季から夏季にかけて、河川からDINが供給されるが、植物プランクトンが吸収し、PONへと形態が変化する。秋季から初冬にかけての上下混合期に、底層から表層にDINが供給され、表層のDIN濃度が再び上昇する。以降は、新たな供給がないためにTN濃度そのものも低下する。本報告でも概ね上記のとおり推移しており、窒素の形態ごとに異なる動態を示した。

現在、減少が問題となっているDINについてみると、TNに対する割合は2割程度に過ぎず、TNのモニタリングによって、DINの変動を把握することは難しいと考えられた。さらに、TNの主成分であるDONの中には、生物が利用できないとされる難分解の窒素が存在し、DON濃度そのものは経年的に変化していない²⁰⁾。後述するTN濃度の減少を成分ごとに見た場合、一次生産に影響するDINが大幅に減少することによって、生じた可能性が高い。今後は、TNの成分に着目したモニタリングを行う必要がある。

ウ 沿岸域と沖合海域の栄養塩濃度の経年変化

1985～2019 年度の公共用水域調査における 1985～1989、1990～1994、1995～1999、2000～2004、2005～2009、2010～2014、2015～2019 年度のそれぞれの TN 濃度（5 か年平均）の分布図を図 37 に示した。

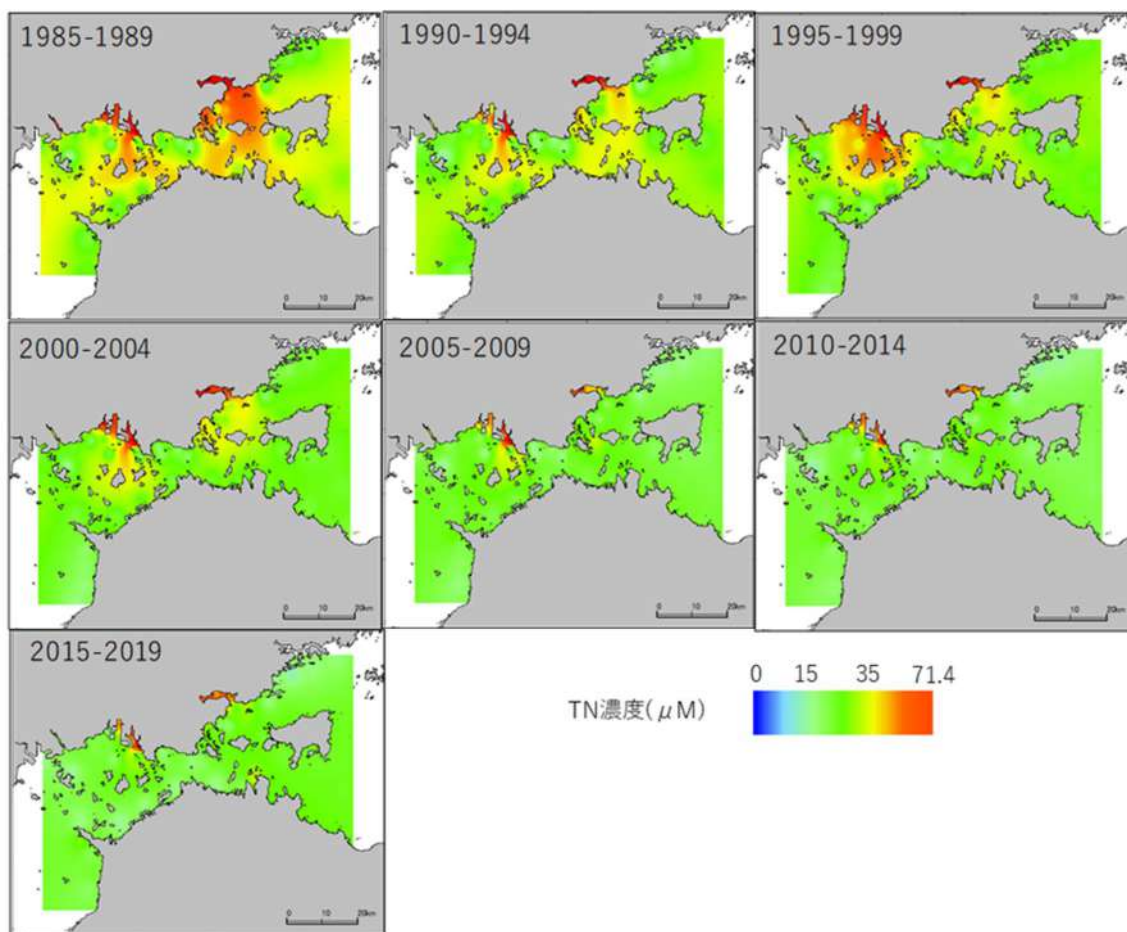


図 37 期間別 TN 濃度（5 か年平均値）の分布（岡山県・香川県両方のデータを含む）

1985～1989 年度（過去）の分布をみると、旭川と吉井川が流入する児島湾沖と高梁川の河口域を中心に $71.4\mu\text{M}$ (1.0mg/L) を上回る測点が見られた。北部（岡山県海域）と南部（香川県海域）を比較すると南部において低い傾向が見られた。経年的な変化についてみると、過去に高濃度であった場所を中心として、濃度低下が生じ、2015～2019 年度（近年）では $71.4\mu\text{M}$ を上回る場所はほとんど見られなくなった。

1985～2019 年度の浅海定線調査における表層の DIN 濃度について、5 か年平均の分布図を図 38 に示した。昨年度の結果に加えて、2015～2019 年度のデータを追加した。1985～1989 年度（過去）の分布をみると、旭川と吉井川が流入する児島湾沖と高梁川の河口域を中心に $10\mu\text{M}$ を上回る測点が見られたが、沖合の測点では

3 μ M を下回る場所も見られた。その後、過去に高濃度であった場所を中心として濃度低下が生じ、近年では 7 μ M を上回る場所が見られなくなった。北部と南部を比較すると、過去には北部において濃度が高い傾向が明確に見られていたが、近年その差が小さくなってきている。

図 32 で示した測点 1（沖合）と測点 17（沿岸）における 1985～2019 年度における月ごとの表層 DIN 濃度の推移を図 39 に示した。測点 17 の移動平均値でみると、1990 年代の前半までは、10 μ M 以上の値を示しながら推移していたが、1990 年代中ごろから減少し始め、2010 年代には 5 μ M を下回ることもあった。測点 1 では、1990 年代には 5 μ M 程度で推移していたが、その後減少し、2010 年代は 3 μ M 程度となった。両測点共に減少傾向がみられたが、低下量は沿岸の測点において大きかった。

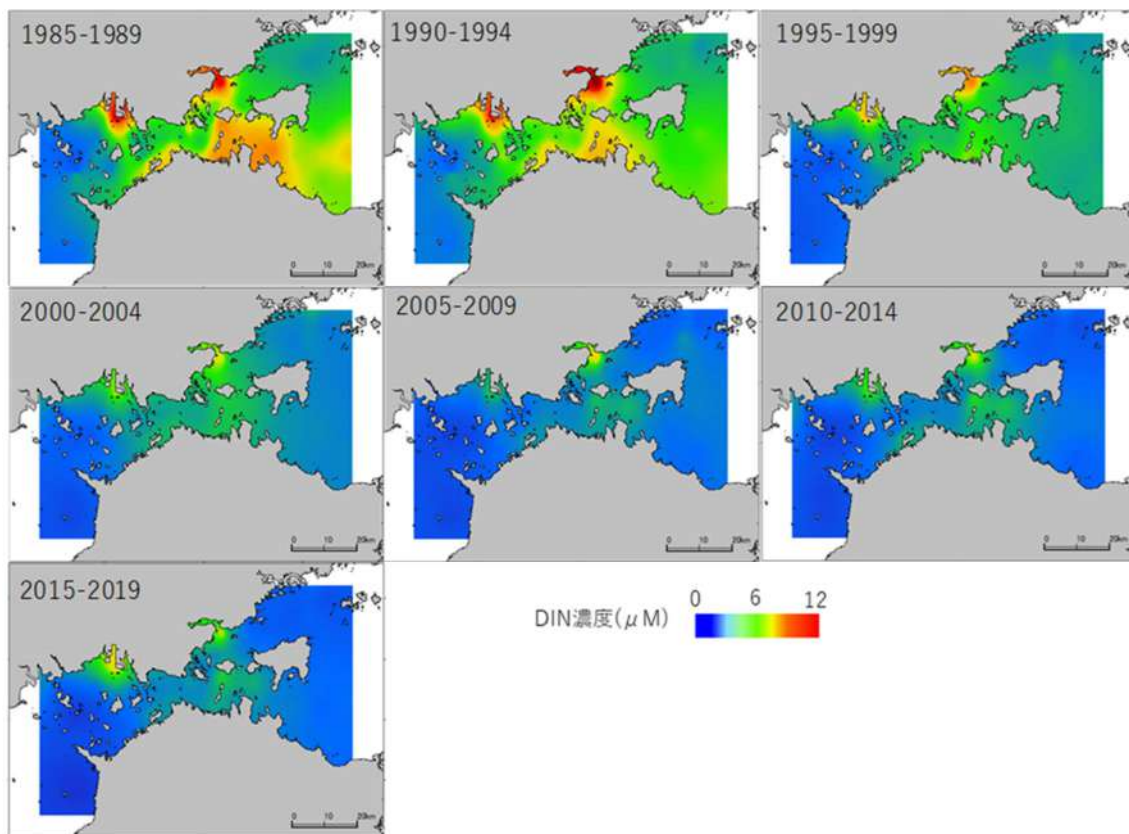


図 38 期間別 DIN 濃度（5 か年平均値）の分布（岡山県・香川県両方のデータを含む）

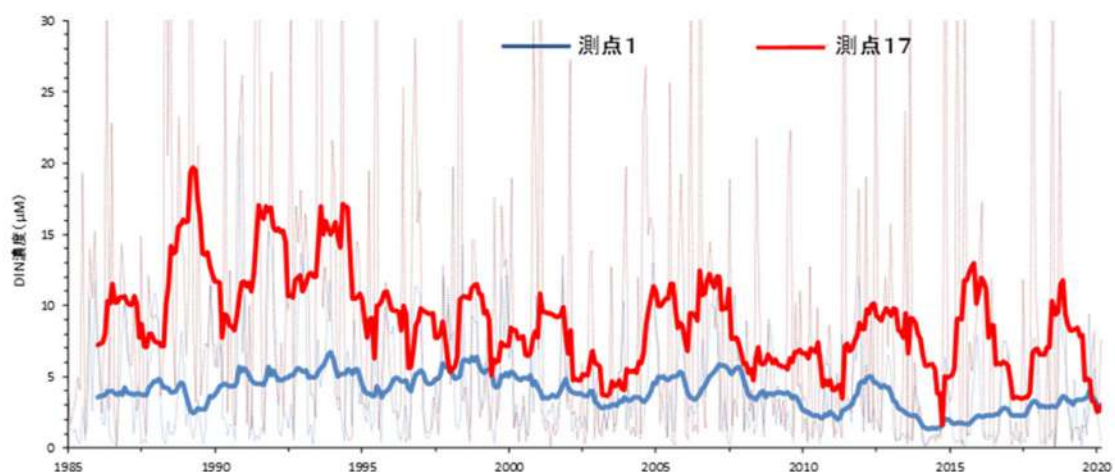


図 39 1985～2019 年度の測点 1 と 17 における月ごとの DIN 濃度の推移と 13 か月移動平均値

表層の DIN/DIP 濃度比について、1985～1989、1995～1999、2005～2009、2015～2019 年度の 5 か年平均の分布図を図 40 に示した。DIN/DIP 濃度比は、所謂レッドフィールド比を示し、16 を下回ると相対的に窒素不足とされる。過去では、沿岸域を中心にして 16 を上回っている状況が続いていたが、年代が進むに従って海域全体で値が低下し、ほぼすべての場所で 16 以下となり、現在は、窒素が一次生産の制限要因となっていることが分かった。

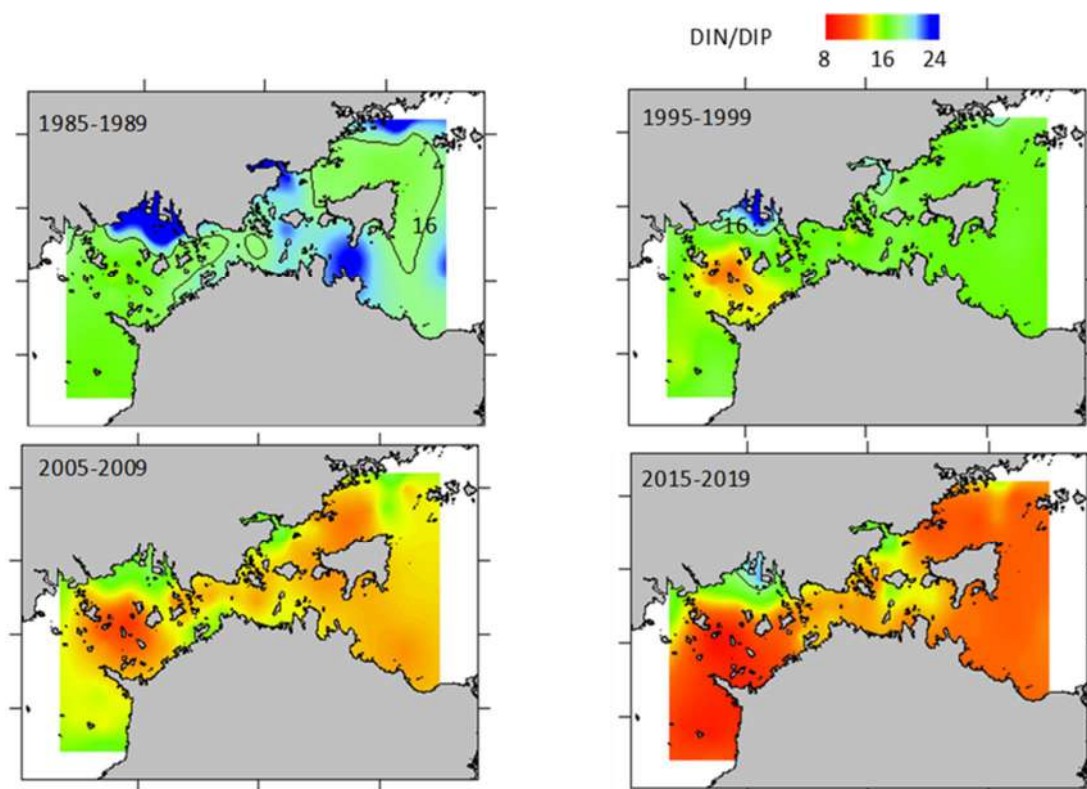


図 40 期間別 DIN/DIP 濃度比（5 か年平均値）の分布（岡山県・香川県両方のデータを含む）

過去と近年の春（4～6月）と秋（10～12月）の表層 DIN 濃度の5か年平均の分布図を図41に示した。

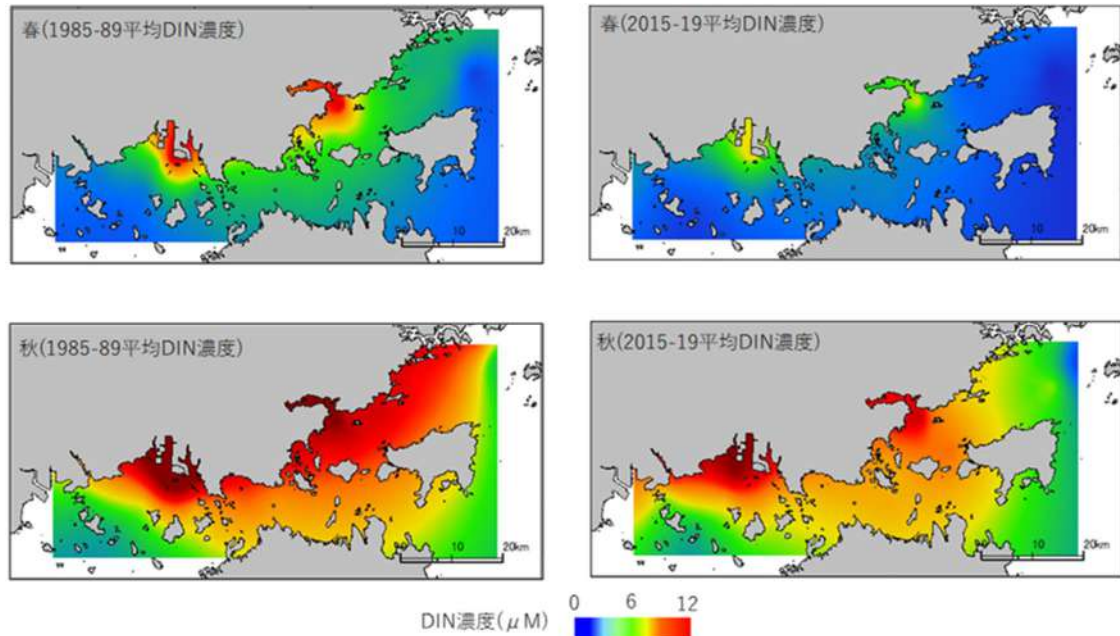


図41 1985-89年度（過去）と2015-19年度（近年）の春と秋における表層DIN濃度の5か年平均値

先に示した年間平均値の結果と同様に、春、秋ともに過去に高い値を示していた沿岸域において濃度低下が大きかった。また、夏と冬についてもこの傾向は同様であり、濃度低下が主に生じた海域について季節的な違いは見られなかった。

表層のクロロフィル a 濃度について、1985～1989、1995～1999、2005～2009、2015～2019 年度の5年平均の分布図を図42に示した。なお、データの一貫性の観点から、岡山県のデータのみ使用した。クロロフィル a 濃度は、過去には沿岸域を中心に $4\mu\text{g/L}$ 以上の場所がみられていたが、年代が進むとともに高い値を示す海域が減少し、 $3\mu\text{g/L}$ 以下の場所が多くみられるようになった。沖合については、過去と近年で明確な変化は見られなかった。

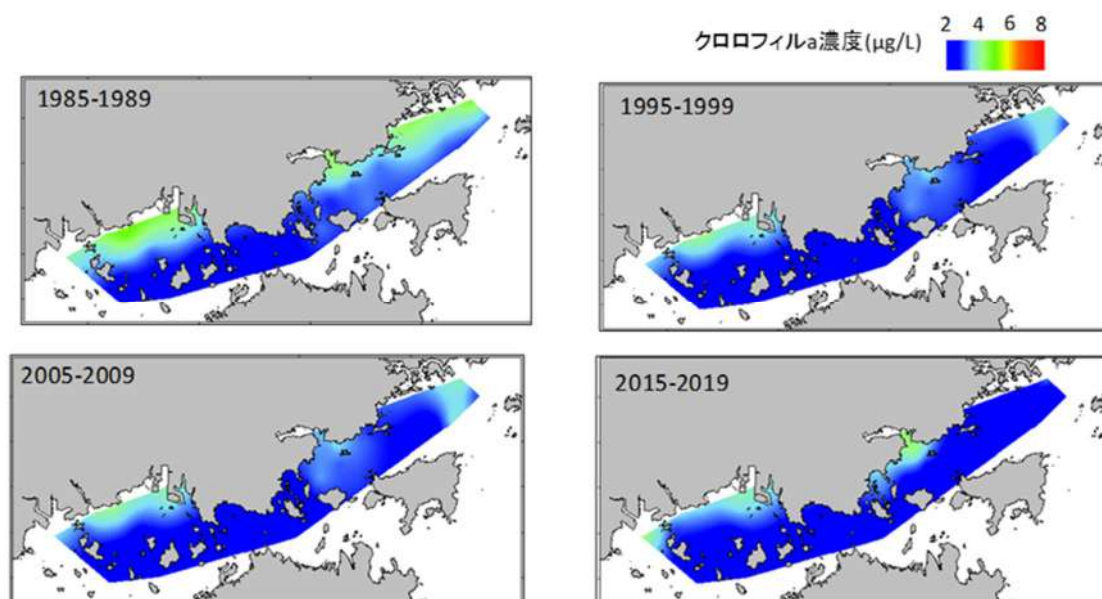


図 42 期間別クロロフィル a 濃度（5 か年平均値）の分布（岡山県のみ使用）

2010～2014 年度の表層塩分（5 か年平均）の分布を図 43 に示した。児島湾沖と高梁川の河口域を中心に塩分が 30 を下回る場所が見られたが、それ以外の場所では、32 を上回る場所もあり、陸水の影響を受ける場所は河口域周辺に限定されていた。北部と南部を比較すると、南部で塩分が高い傾向が見られた。

次に、測点別の塩分と DIN 濃度の平均値の関係を図 44 に示した。岡山と香川を含めたすべてのデータを対象とした場合でも、両者の間には、有意な ($p < 0.05$) 負の相関がみられ、陸域の影響を受ける場所ほど DIN 濃度が高い傾向が見られた。一方、香川県と岡山県のデータに分けて両者の相関式を比較すると、相関の傾きに違いが見られたことから、両海域ともに河川等の陸域からの供給の影響は受けているものの、供給源の濃度や供給量に違いがある可能性が考えられた。

ここまでの結果から、海域では DIP ではなく DIN が不足していること、海域の DIN 濃度の減少は一部の海域を中心に生じ、クロロフィル a 濃度も同様の場所で減少していたこと、DIN 濃度と塩分の間に関連関係がみられたこと、から海域を塩分によって区分し、DIN 濃度の低下が生じた海域を明らかにすることとした。

対象とした範囲は、岡山県と香川県の東西の県境を結んだ海域とし、その中に位置する浅海定線調査の 53 測点分のデータを使用した。それぞれの測点の 2010～2014 年度の期間中の平均塩分を用いて測点を区分し、区分分け A（塩分 30 以下、塩分 30～31、塩分 31～32、塩分 32 以上の 4 区分）、区分分け B（塩分 30 以下、塩分 30～32、塩分 32 以上の 3 区分）の 2 パターンを検討した。

区分分け A についてみると、塩分 30 以下は 3 測点、塩分 30～31 は 10 測点、塩分 31～32 は 33 測点、塩分 32 以上は 7 測点となった。測点間の距離を基にボロノイ法によって測点毎の専有面積を求めたところ、塩分 30 以下の専有割合は 3.0%、

塩分 30～31 は 15.0%、31～32 は 65.5%、32 以上は 16.5%となった（図 45）。

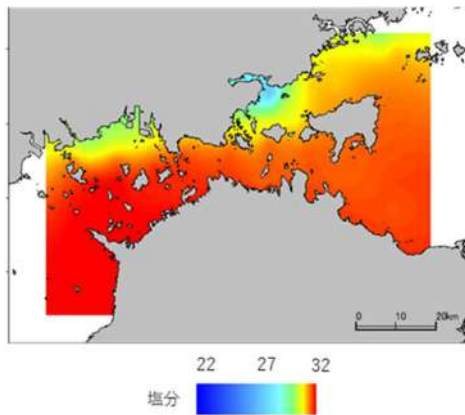


図 43 2010-14 年度の塩分の分布

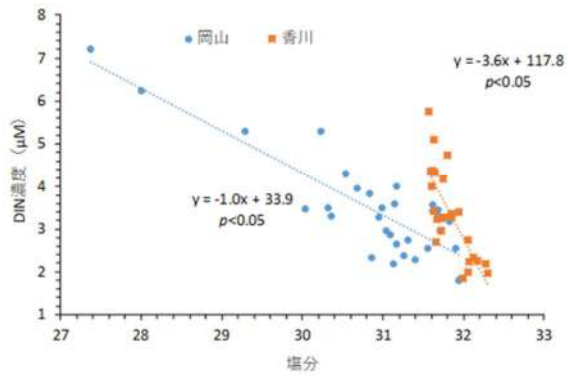


図 44 2010-14 年度の測点別塩分と DIN 濃度の関係

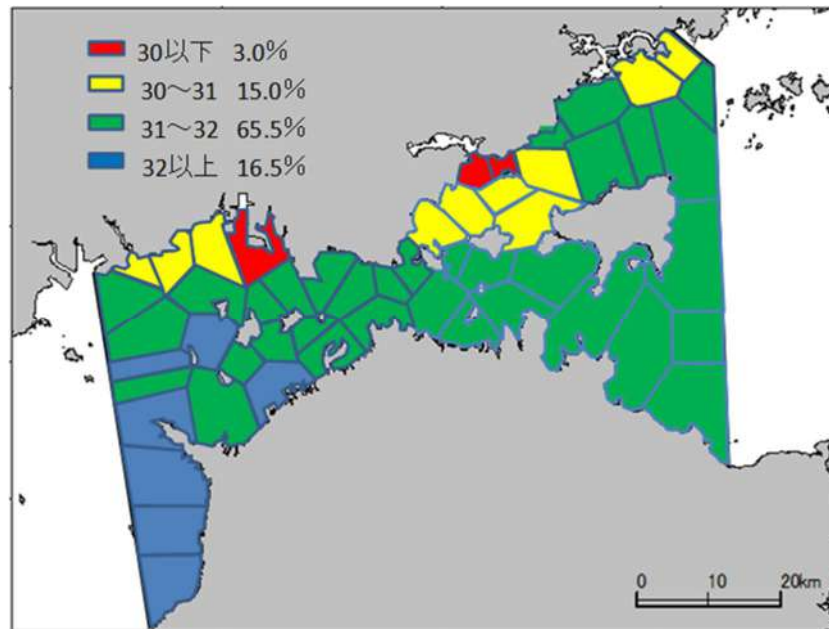


図 45 ポロノイ法（区分分け A）による塩分区分ごとの専有割合

（注）ポロノイ法とティーセン法は同じ方法である。

次に、それぞれの区分ごとの DIN 濃度の推移を図 46 に示した。5 か年平均を算出したすべての年代について一元配置の分散分析を行ったところ、塩分 30 以下と 32 以上の DIN 濃度の間には有意差がみられた（ $p < 0.05$ ）。また、塩分 30～31 と塩分 30 以下、塩分 31～32 と塩分 30 以下の間にも有意差がみられた。一方で、塩分 30～31 と 31～32 の DIN 濃度の間にはいずれの年代についても有意差は見られなかった。

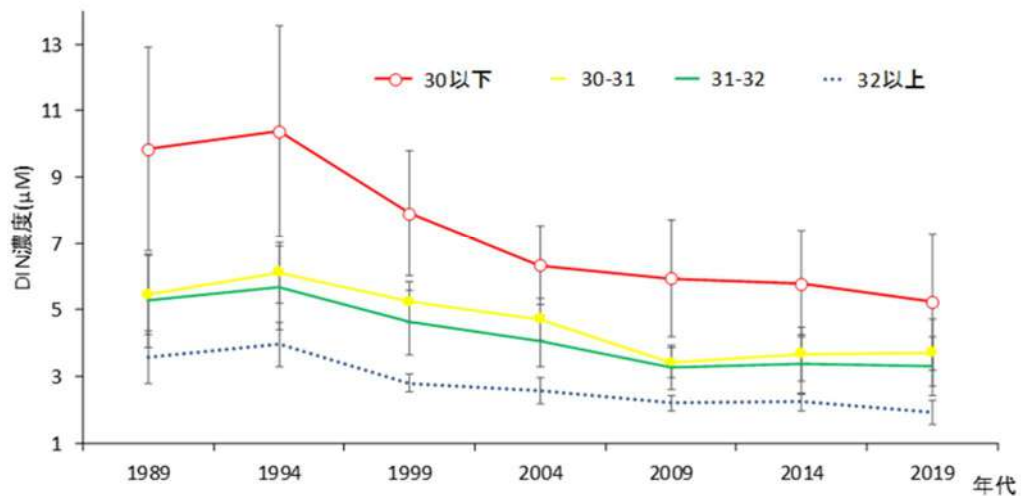


図 46 塩分区分（区分分け A）ごとの DIN 濃度の推移

これらのことから、塩分 30～31 と塩分 31～32 を分ける必要はないと考えられたので、区分分け A ではなく、区分分け B を用いることとした。

区分分け B では、塩分 30 以下は 3 測点、塩分 30～32 は 43 測点、塩分 32 以上は 7 測点であった。ポロノイ法によって測点毎の専有面積を求めたところ、塩分 30 以下の専有割合は 3.0%、塩分 30～32 は 80.5%、32 以上は 16.5% となった（図 47）。次に、それぞれの区分ごとの DIN 濃度の推移を図 48 に示した。DIN 濃度について一元配置の分散分析を行ったところ、ほぼすべての年代において、塩分区分ごとに有意差 ($p < 0.05$) がみられたことから、この区分に従って以下の結果は述べる。

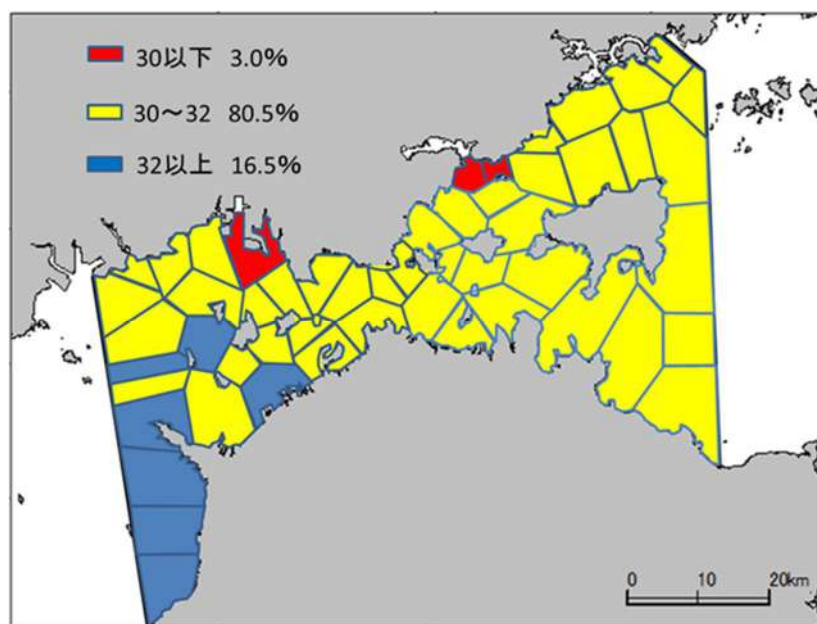


図 47 ポロノイ法（区分分け B）による塩分区分ごとの専有割合

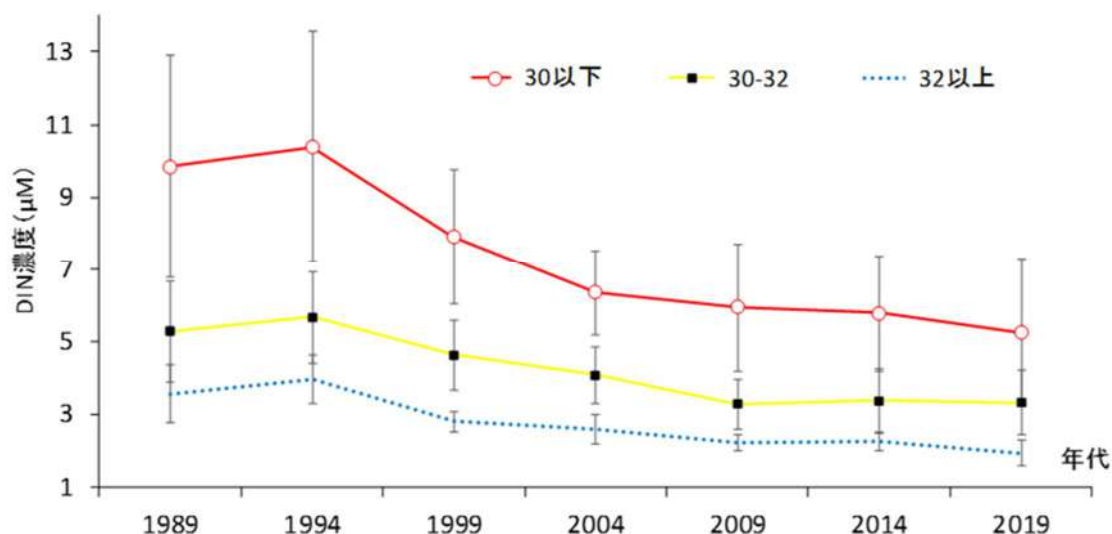


図 48 塩分区分（区分分けB）ごとの DIN 濃度の推移

塩分 30 以下における 1985～1989 年度の 5 か年平均 DIN 濃度は $9.8 \pm 2.6 \mu\text{M}$ であったが、その後減少し、2000～2004 年度には $6.3 \pm 1.4 \mu\text{M}$ 、2015～2019 年度には $5.2 \pm 1.1 \mu\text{M}$ となった。塩分 30～32 では、1985～1989 年度には $5.3 \pm 1.6 \mu\text{M}$ であったが、その後減少し、2000～2004 年度には $4.1 \pm 0.8 \mu\text{M}$ 、2015～2019 年度には $3.3 \pm 1.1 \mu\text{M}$ となった。塩分 32 以上では、1985～1989 年度には $3.6 \pm 0.9 \mu\text{M}$ であったが、その後減少し、2000～2004 年度には $2.6 \pm 0.5 \mu\text{M}$ 、2015～2019 年度には $1.9 \pm 0.4 \mu\text{M}$ となった。いずれの区分においても DIN 濃度は低下していたが、塩分 30 以下の区分における低下量が他と比べて大きかった。

DIN 濃度の推移について、塩分区分ごとに違いがみられたことから、クロロフィル a 濃度についても同じ区分に分けてその推移を調べた（図 48）。ほぼすべての年代について、塩分 30 以下と塩分 30-32 のクロロフィル a 濃度の間に有意差 ($p < 0.05$) がみられ、区分間の植物プランクトン量に違いがみられた。一方、DIN の結果とは異なり、塩分 30-32、32 以上においてはいずれの年代も濃度差は見られなかった。

塩分 30 以下における 1985～1989 年度の 5 か年平均クロロフィル a 濃度は $6.1 \pm 0.8 \mu\text{g/L}$ であったがその後減少し、2000～2004 年度には $3.8 \pm 1.3 \mu\text{g/L}$ 、2015～2019 年度には $4.6 \pm 0.5 \mu\text{g/L}$ となった。塩分 30～32 では、1985～1989 年度には $3.6 \pm 1.0 \mu\text{g/L}$ であったが、その後減少し、2000～2004 年度には $2.8 \pm 1.2 \mu\text{g/L}$ 、2015～2019 年度には $2.8 \pm 1.1 \mu\text{g/L}$ となった。塩分 32 以上では、2000～2004 年度には $1.9 \pm 0.5 \mu\text{g/L}$ 、2015～2019 年度には $2.3 \pm 0.8 \mu\text{g/L}$ となった。DIN 濃度とは異なりいずれの区分においても 2000～2004 年度以降は減少がとまり、ほぼ横ばいまたは微増となった。

植物プランクトンの増殖にとっては、光、適切な温度、栄養塩が重要な要素であ

るが、近年透明度と海水温については上昇が生じている²¹⁾。また、瀬戸内海の一部の海域では、植物プランクトンを構成種が変わってきていることも報告されている²²⁾。これらが複合的に作用することによって、DIN 濃度との乖離が生じた可能性が考えられた。

(4) 考察

今年度は、新たに取得したデータを用いて解析を実施するとともに、これまで得られた結果と合わせて、塩分区分ごとの DIN 濃度の推移を調べた。

河川水（陸域）の影響を受ける場所を中心にして、TN、DIN 濃度は減少しており、負荷量減少に伴う海域の栄養塩濃度の低下は、海域のすべての場所で同様に起きたのではなく、沿岸の一部を中心に生じたと考えられた。さらに、より詳細に塩分区分ごとに DIN 濃度の推移を調べたところ、陸域の影響を強く受ける塩分 30 以下の場所（海域全体の 3 %程度）では濃度低下が顕著であったが、海域の大部分の場所では減少量は小さく、1990 年代と比較すると近年の減少速度は緩やかであった。今後、この傾向は続くと考えられ、沿岸と沖合の DIN 濃度の差が小さくなるものと考えられる。

4 各研究成果のまとめ

(1) 瀬戸内海における長期的な栄養塩濃度の時空間分布

ア 環境省の長期データを用いて瀬戸内海全域の過去から現在までの四季の表層栄養塩濃度分布の変化を把握できた。瀬戸内海全域レベルでは DIN、DIP、および Chl.a 濃度は緩やかに低下していたが、陸域負荷の影響に基づいた夏季の表層塩分で瀬戸内海を 3 区分した評価により、塩分 30 未満の沿岸区分（瀬戸内海全面積の 8%）に限定して 1981 年から 2014 年までに栄養塩濃度が大幅に低下してきており、それに伴い同区分で春季～夏季の植物プランクトン量も低下していた。

イ 瀬戸内海の 90%以上の面積となる塩分 30 以上の沖合の海域では、30 年間における栄養塩濃度および Chl.a 濃度の変化は小さかった。広湾における現場調査により、広域解析における塩分 30 未満の沿岸区分の面積は多少過小評価ではあるが、おそらく数字が大きく変わることはないと考えられた。

ウ 水温、DO 濃度、および TOC 含量を用いた栄養塩溶出フラックスの推定式を作成し、過去から現在までの瀬戸内海全域の溶出フラックスの空間分布の変化を把握でき、溶出量は瀬戸内海全域で減少傾向にある可能性が示唆された。

エ 瀬戸内海の環境保全について、水質が良好な状態で保全されるとともに生物の多様性および生産性が確保されるためには、湾灘によらない水質特性に応じた海域区分と、各区分にける環境変化の把握、それに応じた適正な施策が必要であると考えられる。

オ 総量負荷削減による影響が大きかった海域を特定できる手法を明らかにできた

め、地域ごとの栄養塩管理における重点的に監視・対策する海域の設定などに活用されることが見込まれると考えられる。

カ 全域における海底からの栄養塩溶出量の推定により、各海域において栄養塩ソースとして溶出がどれほど寄与しているのかを把握可能となったため、重点管理海域において陸域負荷量と溶出量をと合わせて評価することで、地域ニーズにあわせた栄養塩管理の達成に貢献できると考えられる。

(2) 岡山県児島湾及びその沖合海域における栄養塩濃度の経年変化と将来予測に関する研究

ア 対象とした備讃瀬戸では、窒素（DIN）が制限要因であることが示唆された。

イ DIN 濃度とクロロフィル a 濃度の経年変化の結果は、いずれも長期的にみて減少傾向にあることが示された。

ウ DIN 濃度の減少は、調査海域において一様ではなく場所ごとに異なり、過去に高かった沿岸海域の地点を中心に生じていた。

エ DIN 濃度と塩分の間に明確な負の相関関係が認められたことから、塩分で海域を 30 以下、30～32、32 以上の 3 段階に区分して DIN 濃度の変化状況を検討したところ、区分されたすべての海域で DIN 濃度は減少していたが、その中で塩分 30 以下の場所（全体面積の約 3 %）における濃度は大きく減少していた。一方、塩分 30～32、および 32 以上の場所（全体面積の約 97 %）では、近年の減少は僅かであった。

オ 塩分の低い沿岸では DIN の減少は大きく塩分が高い沖合域ではわずかであり、その傾向が継続すると思われる。

5 今後の課題

(1) 瀬戸内海における長期的な栄養塩濃度の時空間分布

ア 本研究は栄養塩濃度低下の原因究明という目的であり、海域の栄養塩濃度と一次生産に着目した研究であったが、今後の瀬戸内海における生物生産構造把握のためのさらなる評価においては、干潟や藻場面積の減少とそこに依存する魚類の再生産場所の減少の関係や、魚類の餌となるベントスの生産量の長期変化の解明なども必要であると考えられる。

イ 浮遊系と底生系、また浅場と潮下帯を含めたエネルギーフローの解明が必要であると考えられる。

(2) 岡山県児島湾及びその沖合海域における栄養塩濃度の経年変化と将来予測に関する研究

ア 陸域の影響を強く受ける場所ほど TN、DIN 濃度は減少しており、陸域からの供給量減少の影響は沿岸域の限られた場所を中心に生じた可能性が高いと考えられた。そのため、海域の栄養塩管理（増加）対策を実施する際には、濃度低下が大きく生じた場所で優先的に実施することが望ましいと考えられる。

イ 海域の DIN と DIP は TN と TP の一部の成分に過ぎず、それぞれの割合は季節的

に変化しており、DIN と TN、DIP と TP の関係は一定ではなく、場所、時期ごとに異なっている。したがって、一次生産の動態に直結する栄養塩を含む海域環境の変動を把握するためには、TN および TP だけではなく DIN と DIP を合わせて調べ、評価する必要がある。

6 本研究で得られた成果

日本最大の閉鎖性水域である瀬戸内海は、その地形的な特徴に基づいて紀伊水道、大阪湾、播磨灘、備讃瀬戸、燧灘、備後灘、安芸灘、広島湾、伊予灘、周防灘、別府湾、豊後水道、燧灘という 13 の湾・灘によって構成されている。瀬戸内海の水環境を評価する場合、瀬戸内海全体や湾・灘ごと、あるいは東部瀬戸内海というような地理的な区分によって評価されることが普通であり、国や地方自治体によって実施されている各種の水質調査結果もこうした区分を基本に、環境基準の類型に基づいて評価されてきた。

しかし、大阪湾以外の海域では湾・灘の全体に類型あてはめがされておらず調査地点は沿岸部に集中しているので、瀬戸内海全域や個別の湾・灘全域の水質を評価するのはできない。一方、環境省の広域総合調査地点は瀬戸内海全域に均等に配置されているので瀬戸内海全体の水質の評価には適しているが、沿岸に近い海域の調査地点は少ないという問題があり、沿岸部に近い海域を含めた瀬戸内海の水質評価をするためには新たな方法を確立することが必要であった。また、瀬戸内海に関わる栄養塩類の供給源として陸域、外洋域・隣接海域からの流入、海底泥からの溶出があり、湾や灘の中でさらに地域的な特徴を踏まえて水質への影響を検討していくことが必要である。

本委託研究では、瀬戸内海全域を対象としたサブテーマ 1 と備讃瀬戸という特定海域を対象としたサブテーマ 2 のそれぞれの研究において、塩分を指標として海域を $30 >$ の陸域からの影響を強く受けている沿岸部、 $30 \sim 32$ の中間部、 $32 <$ の外洋水の影響を強く受けている沖合部の 3 つ区分に分けて、それぞれの区分ごとの栄養塩とクロロフィルの長期的な濃度変動の解析を行った。その結果、研究対象が瀬戸内海全域と備讃瀬戸というように違いがあるのも関わらず、栄養塩濃度は塩分が $30 >$ 以下の海域において減少傾向が顕著であること、 $30 \sim 32$ の中間の海域の減少傾向は沿岸部に比べて小さいこと、および $32 <$ の沖合部の濃度変化はほとんど認められないことが示された。

この結果は「豊かな瀬戸内海」を目指す取り組みとして、瀬戸内海のそれぞれの地域において一律ではない地域ごとの特性を踏まえた施策を講じる場合に、本研究で塩分を指標とした陸域からの影響を評価する方法の有用性を示唆しており、栄養塩管理手法に関わる提言につながる知見である。

また、サブテーマ 1 では、瀬戸内海全域を対象として底質からの窒素・リンの溶出量について、底質直上水の水温、DO、および底質の TOC 濃度を使ったモデル式による推定を行い、その結果を広島県広島湾の底質を用いた室内実測値や既往の文献値と比較することで妥当性について検証した。この結果に基づいて、瀬戸内海全域の底質からの窒素・リンの溶出量が経年的に減少傾向にあることを指摘している。瀬戸内海の栄養塩収

支を評価するうえで底質からの溶出量の評価は必要不可欠な要素であるが、これまでの現場実験や室内実験とは違う方法で一定の結果を示したものであり、有用な手法とその知見を示したといえる。

参考文献

- 1) 環境省, 2020. 水環境総合情報サイト, 広域総合水質測定データ, <https://water-pub.env.go.jp/water-pub/mizu-site/> (2021 年 2 月時点)
- 2) Umehara, A., Asaoka, S., Fujii, N., Otani, S., Yamamoto, H., Nakai, S., Okuda, T., Nishijima, W., 2018. Biological productivity evaluation at lower trophic levels with intensive Pacific oyster farming of *Crassostrea gigas* in Hiroshima Bay, Japan. *Aquaculture* 495, 311-319.
- 3) Srithongouthai, S., Sonoyama, Y., Tada, K., Montani, S., 2003. The influence of environmental variability on silicate exchange rates between sediment and water in a shallow-water coastal ecosystem, the Seto Inland Sea, Japan. *Mar. Pollut. Bull.* 47, 10-17.
- 4) いであ株式会社, 2017~2020. 瀬戸内海環境情報基本調査および豊かな海の確保に向けた方策検討業務報告書.
- 5) Redfield, A.C., Ketchum, B.A., Richards, F.A., 1963. The influence of organisms on the composition of sea water. In: Hill, M.N. (Ed.), *The Sea*, Vol. 2, Wiley-Interscience, New York, pp. 26-77.
- 6) Bienfang, P., Szyper, J., Laws, E., 1983. Sinking rate and pigment responses to light-limitation of a marine diatom: implications to dynamics of chlorophyll maximum layers. *Oceanol. Acta* 6, 55-62.
- 7) Harrison, P.J., Conway, H.L., Holmes, R.W., Davis, C.O., 1977. Marine diatoms grown in chemostats under silicate or ammonium limitation. III. Cellular chemical composition and morphology of *Chaetoceros debilis*, *Skeletonema costatum*, and *Thalassiosira gravida*. *Mar. Biol.* 43, 19-31.
- 8) Strzepek, R.F., Price, N.M., 2000. Influence of irradiance and temperature on the iron content of the marine diatom *Thalassiosira weissflogii* (Bacillariophyceae). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 206, 107-117.
- 9) 多田邦尚, 中嶋昌紀, 山口一岩, 朝日俊雅, 一見和彦, 2018. 沿岸海域における栄養塩濃度決定要因と堆積物. *沿岸海洋研究*, 55, 113-124.
- 10) Komai, Y., Sakata, M., Nakajima, M., Tanaka S., 2015. Release of nutrients from bottom sediments in Osaka Bay, Japan in 2015. EMECS11-Sea Coasts XXVI Joint Conference, St Petersburg, Russia, August 2016.
- 11) 山本民次, 2008. 瀬戸内海底泥からのリン・窒素の溶出. 柳哲雄編, 瀬戸内海の海底環境. 恒星社厚生閣, pp61-75.
- 12) 城 久., 1986. 大阪湾における富栄養化の構造と富栄養化が漁業生産に及ぼす影響について. 大阪府水産試験場研究報告, 7, 1-174.
- 13) 神山孝史, 辻野睦, 玉井恭一, 1998. 夏季成層期の播磨灘海底における栄養塩類溶出量. 南西海区水産研究所研究報告, 31, 33-43.
- 14) Umehara, A., Borja, A., Ishida, A., Nakai, S., Nishijima, W., 2022. Responses of the

benthic environment to reduction in anthropogenic nutrient loading in the Seto Inland Sea (Japan), based on M-AMBI assessment. Mar. Environ. Res. 173, 105509.

- 15) 岡山県, 1980~2017:岡山県流域別汚濁減別負荷量について, 岡山県.
- 16) 高木秀蔵,2020.令和元年度瀬戸内海の環境保全・創造に係る研究委託事業報告書.
- 17) 岡山県, 1980~2020. 公共用水域水質測定結果について, 岡山県.
- 18) 香川県, 1980~2020. 公共用水域水質測定結果について, 香川県.
- 19) 小林 志保ら, 2009. 播磨灘における全窒素濃度の季節変動と窒素の形態変化, 沿岸海洋研究, 47, 61-69.
- 20) 朝日 俊雅ら, 2019. 瀬戸内海表層水における 1990 年代と 2010 年代の溶存態および有機態窒素濃度の比較, 沿岸海洋研究, 56, 123-131.
- 21) 阿保 勝之ら, 2018. 瀬戸内海における栄養塩濃度と水質変化とその要因, 沿岸海洋研究, 55, 101-111.
- 22) 多田 邦尚ら, 2014. 瀬戸内海東部海域の栄養塩低下とその低次生物生産過程への影響, 沿岸海洋研究, 52, 39-47.