香川県における河川水の栄養塩形態と 備讃瀬戸・播磨灘への影響

CHEMICAL FORMS OF NUTRIENTS IN RIVER WATERS IN KAGAWA
PREFECTURE AND ITS EFFECT ON SEAWATERS IN BISAN-SETO SEA AND
SEA OF HARIMA-NADA

石塚正秀¹・石川真菜²・宮川昌志³・赤井紀子⁴・多田邦尚⁵

Masahide ISHIZUKA, Mana ISHIKAWA, Masashi MIYAGAWA, Noriko AKAI and Kuninao TADA

¹正会員 博士(工学) 香川大学准教授 工学部 (〒761-0396 香川県高松市林町2217-20)

²非会員 島根県庁 浜田県土整備事務所 (〒697-0041 島根県浜田市片庭町254)

³非会員 博士(工学) 主席研究員 香川県水産試験場 (〒761-0111 香川県高松市屋島東町75-5)

⁴非会員 主任研究員 香川県水産試験場 (〒761-0111 香川県高松市屋島東町75-5)

⁵非会員 水産学博士 香川大学教授 農学部 (〒761-0795 香川県木田郡三木町池戸2393)

This paper shows the relation of chemical forms of nutrients between river and seawaters in Kagawa prefecture and the Bisan-seto sea and the sea of Harima-nada. We obtained the following results: 1) the ratio of nitrogen of river waters was DIN : DON : PON=63 : 17 : 20 and that of seawaters was DIN : DON : PON=19:69:12. This means that the chemical forms of nutrients between river and seawaters were different, and 2) the ratio of phosphorus of river water was DIP : DOP : PP=43:21:36 and that of seawaters was DIP:DOP:PP=60:16:24.

Key Words: Chemical forms of nutrient, river water, Kagawa, Bisan-seto sea and Sea of Harima-nada

1. はじめに

瀬戸内海は1960年代から水質汚濁が急激に進行し、赤潮の発生と漁業への影響が重要な問題となっていた。1973年に制定された瀬戸内海環境保全臨時措置法や、1979年から始まった水質総量規制などにより、赤潮発生件数は減少した¹⁾。しかし、近年ではアサリ、イワシ、イカナゴといった漁業資源の減少や、カキ養殖生産量の減少、養殖ノリの色落ちといった新たな問題が発生している²⁾。これらの問題は、窒素やリンといった栄養塩濃度の変動に原因がある可能性が高いといわれており、その原因の一つとして、長期的にみた河川からの栄養塩負荷量の減少が考えられている³⁾。

海洋において、様々な生物を支えているのは植物プランクトンであり、植物プランクトンによる一次生産は、その海域の漁獲量と密接な関係にあることが知られている⁴⁾。植物プランクトン量を左右する主要な要因は水温、光、栄養塩の3つで、沿岸海域では栄養塩が最重要視されている³⁾。植物プランクトンの生産にとって重要なのは、無機態の窒素やリンであり、栄養塩中にこれらのも

のがどれだけ含まれているのかを明らかにする必要がある。また、溶存態無機物と懸濁態有機物の量の変化は対応しており、その過程で溶存態有機物も発生することから⁵⁾、貧栄養化においては栄養塩の形態別特徴を明らかにすることが重要である。

半閉鎖性海域の栄養塩濃度は、河川からの栄養塩負荷の影響を受けるため、河川水中の栄養塩の形態を明らかにすることや、河川から海域にかけて栄養塩形態がどのように変化するのかを明らかにする必要がある。淀川水系における溶存態窒素と溶存態リンの構成比が調査されており⁶⁾、下流域での溶存態窒素の構成比は硝酸態窒素が約50～65%、溶存態有機窒素が約20～30%、アンモニウム態窒素が約16%、亜硝酸態窒素が約4%を占めることが明らかになっている。溶存態リンの構成比は溶存態無機リンが約75%、溶存態有機リンが約6～10%を占めることがわかっている。しかし、河川水中の溶存態、懸濁態を含めたすべての栄養塩の形態や、河川と海域での形態の変化についてはあまり研究がされていないのが現状である。

以上より、河川の水質を単にTN、TP、CODといった総量としての濃度を用いて川と海の水環境のつながりを

図-1 河川と海域（浅海定線調査）の調査地点
（海域の丸印は、形態別濃度分析の調査地点を示す⁷⁾。）

表-1 調査対象河川の諸量および流入対象海域

name	area (km ²)	class ¹⁾	inflow sea	name	area (km ²)	class ¹⁾	inflow sea
Aya	137.5	A	Bisan west	Daisoku	58.6	B	Bisan west
Doki	127.0	A	Bisan west	Takase	57.0	B	Bisan west
Koutou	113.2	B	Bisan east	Minato	51.6	A	Sea of Harima
Shin	69.0	B	Bisan east	Honzu	51.1	B	Bisan east
Kabe	68.0	A	Bisan east	Tsuda	43.7	A	Sea of Harima
Kasuga	62.9	B	Bisan east	Hirota	33.7	A	Bisan west
Kanakura	60.2	A	Bisan west	Tsumeta	16.8	E	Bisan east

1) class for environmental quality standard

考えるだけでなく、河川水中の栄養塩形態を把握し、川と海との連続性を把握することが重要である。

本研究では、香川県内の14ヶ所の河川の水質調査を行い、備讃瀬戸、播磨灘に流入する河川水の栄養塩の形態別特徴を明らかにし、さらに、海域における栄養塩形態との関係を調べる。また、河川水の栄養塩負荷と海域水質との関係について、備讃瀬戸西部・東部、播磨灘の三つの海域別に考察することを目的とする。

2. 調査・分析の概要

(1) 河川の現地調査

2011年2月から2012年1月の期間に1ヶ月に1度の頻度で合計12回、香川県内の14ヶ所の河川を対象に調査を行った（図-1）。調査は晴天・雨天を問わず実施したが、結果的に調査日に降雨の影響を受けた月は5月であり（15.5 mm：高松アメダス）、また、6月は調査前日から降雨は無かったが、1週間前からの積算雨量が177.5 mm（高松アメダス）であった。各河川の地形⁸⁾、環境基準類型、流入する海域を表-1に示す。中讃の丸亀平野を流れる土器川が一級河川であり、それ以外の河川はすべて二級河川である。河川の採水地点は、海域に流入する直前の場所を選定した。河川水は流下過程において、潮止め堰や取水堰などによって水が滞留している場合が多い。滞留することによって栄養塩形態は溶存態から懸濁態への変化が考えられるが⁹⁾、人為的な影響を受けた河川水が海域に流入する最終的な栄養塩形態であることから、

海水の影響を受けていない最下流部を観測地点とした。なお、海水の影響の有無は電気伝導度の値より判定した。

(2) 海域の観測データの概要

海域における栄養塩の形態別の水質調査が2010年12月から2011年10月の期間に1ヶ月に1度の頻度で実施され⁷⁾、本研究で実施した河川水質結果との比較に用いた。採水場所は図-1の丸印で示した7地点である。

また、溶存態無機窒素（DIN）、溶存態無機リン（DIP）、溶存ケイ酸（ $\text{Si}(\text{OH})_4$ ）の分析が、浅海定線調査¹⁰⁾として1ヶ月に1度の頻度で香川県側の計21点で行われており、形態別の調査と比較して測点数が多いため、溶存態無機物の考察に用いた。

(3) 河川水の実験方法

河川の水質をオートクレープ滅菌後のポリ瓶に採水し持ち帰り、ポンプ（ULVAC社製、DAP-15）を用いて吸引濾過を行った。全リン（TP）、化学的酸素要求量（COD）は試水の一部を用い、それぞれ吸光度式多項目水質測定装置（WTW社製、photoLab®6100VIS型）、JISの過マンガン酸カリウム酸性法により分析した。残りの試料はガラス繊維ろ紙（Whatman社製、GF/F(450°Cで加熱処理)）により、ろ液試料とフィルター試料に分別した。ろ液試料について、硝酸（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）、亜硝酸（ $\text{NO}_2\text{-N}$ ）、アンモニア（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）、リン酸（ $\text{PO}_4\text{-P}$ ）、ケイ酸態ケイ素（ $\text{SiO}_2\text{-Si}$ ）はオートアナライザ（BLTECH社製、SWAAT(5sch)）、溶存全窒素（DTN）は全有機炭素・窒素計（島津製作所製、TNM-1）、溶存全リン（DTP）は上述の吸光度式多項目水質測定装置により分析した。なお、硝酸、亜硝酸については、イオンクロマトグラフィ（島津製作所製、PIA-1000）を用いて相互比較を行った。フィルター試料について、クロロフィルa（Chl.a）は90%アセトンで抽出後、蛍光光度計（Turner designs社製、Fluorometer TD-700）により、懸濁態有機窒素（PON）はCHNコーダ（J-Science Co Ltd社製、MICRO CORDER JM10）により分析した。

(4) 香川県の地形と流域の土地利用

河川水質に与える影響を考察するには、詳細な流域単位の負荷量解析が必要であるが、本研究では、各河川の相互的な水質の特徴を簡便に考察するために、各流域の土地利用状況を参考にした。図-2に、各河川における土地利用面積割合（2006年）を示す。なお、土地利用データおよび流域境界データには国土数値情報を用い、ArcGIS（ESRI社製、Ver.9.2）により解析した。

香川県の北側は瀬戸内海に面し（図-1）、南側は阿讃山地が南北に分布している。高松平野と丸亀平野では扇状地による平坦な地形が広がり、水田が広く分布している。高松平野下流域では、建物用地が多い。平均的にみて、森林の割合が最も高く、47%を占めている。つぎに、

図-2 河川流域の土地利用割合(2006年)

水田の割合が高く、28%を占めており、森林と水田をあわせると流域の75%を占めることがわかった。

河川毎にみると、中讃域西部の高瀬川、弘田川はその他の農地の割合が20%と他の河川に比べて高くなっている。金倉川では、水田と森林がそれぞれ37%あり、土器川、綾川では森林面積の割合が高く、それぞれ59%、52%ある。大東川では、水田が40%、その他の農用地が11%と多い。高松域西部の本津川では、水田が37%で最も多く、建物用地が14%と多く、香東川では、森林が流域の約77%を占める。高松域中部の詰田川では建物用地が47%と多く、新川水系（春日川、新川）では、森林が37%と最も多く、建物用地も11%と多い。東讃域の鴨部川では、森林が50%と最も多く、津田川では森林が81%、湊川では60%を占めている特徴があった。

3. 河川水の栄養塩の形態別特徴

(1) 窒素

全窒素（TN）、溶存態無機窒素（DIN）、および溶存態有機窒素（DON）は、以下の式により求めた。TN = DTN + PON, DIN = $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$, DON = DTN - DIN. 図-3より、平均的にみるとTNに対するDINの割合は66±14%, DONの割合は15±4%, PONの割合は19±10%であり、河川水の窒素の多くは溶存態無機物として存在していることがわかった。

DINは東讃地区の湊川、津田川、鴨部川と中讃西部の弘田川、金倉川で72～85%と多くなっている。人為的影響の少ない東讃域では、濃度が低いことから他の形態の窒素成分が少ないため、相対的に割合が高くなったと考えられる。香川県は、汚濁処理人口普及率が平成23年度末で69.3%（全国平均78.6%）¹¹⁾（このうち、下水道普及率は42.4%（全国平均75.8%））¹²⁾であり、生活排水処理が進んでおらず、生活排水と河川水質との関係が強いと考えられることから、各河川流域の建物用地面積と水質項目との関係を調べた。その結果、 $\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/L)は建物用地面積 L_A (km²)と正の相関 ($\text{NH}_4\text{-N} = 0.021 \times L_A + 0.029$, $R=0.79$, $p<0.01$)、がみられた。また、DONは高瀬川、春日川で21～25%と多くなっている。PONは、春日川、

図-3 河川ごとの窒素の形態別割合

図-4 河川ごとのリンの形態別割合

新川で37～39%と多くなっており、金倉川、湊川で8～9%と少なくなっている。全体的にみると、PON(mg/L)はChl.a(μg/L)と正の相関 ($\text{PON} = 0.021 \times \text{Chl.a} + 0.02$, $R=0.94$, $p<0.01$) があり、植物プランクトンによる一次生産の寄与が大きいと考えられる。しかし、PONの割合が高い春日川、新川では、必ずしもChl.aと有意な相関がみられず、さらなるデータの蓄積が必要と考えられる。

(2) リン

懸濁態リン（PP）、溶存態有機リン（DOP）は、それぞれ以下の式により求めた。PP = TP - DP, DOP = DP - PO₄-P. 図-4より、平均的にみると、TPに対するDIPの割合は45±12%, DOPの割合は19±4%, PPの割合は36±13%であり、リンの多くは溶存態、とくに溶存態無機物として存在していることがわかった。窒素と比べて、リンは溶存態無機物の割合が小さい結果が得られた。

DIPは金倉川で65%と多く、綾川、春日川、湊川で25～31%と少ない。DIP(mg/L)は建物用地と正の相関 ($\text{DIP} = 0.0077 \times L_A + 0.079$, $R=0.64$, $p<0.05$) があり、生活排水の影響を受けていると考えられる。DOPは中・西讃地区の河川で21～23%と多くなっているが、河川毎の違いは明瞭ではない。また、水田や畑の面積割合が大きい河川（高瀬川、大東川、本津川、詰田川、新川）はTNやTP濃度が高い河川であり、7、8月にDOPの割合が多くなる傾向がみられた。また、PPは綾川、春日川、新川で50～63%と多くなっており、金倉川で12%と少なくなっている。ここで、PP(mg/L)とChl.a(μg/L)には正の相関 ($\text{PP} = 0.005 \times \text{Chl.a} + 0.023$, $R=0.82$, $p<0.01$) があり、植物プランクトンによる一次生産の寄与が大きいと考えられる。

図-5 河川と海域の窒素形態の比較

図-6 河川と海域のリン形態の比較

4. 河川から海への栄養塩の形態変化

(1) 河川水と海水の栄養塩形態の比較

香川県に近い海域（図-1丸印）において観測された結果⁷⁾をもとに、河川水質調査と同じ期間について、TNに対するDIN、DON、PONの割合を算定すると、それぞれ19%、69%、12%の結果が得られた（図-5）。河川水のと海水の栄養塩形態を比較すると、河川ではDINの割合が63%と高かったが、海域ではDONの割合が69%と高くなっており、河川と海域では栄養塩形態の構成比が異なる結果が得られた。ただし、海域においても窒素の多くは溶存態として存在している結果が得られ、PONの割合は河川も海も低いことが分かった。河川から流入したDINは、海水によって希釈されることで濃度が低下するため、海水のDIN濃度（平均0.07 mg/L）は河川水（平均0.61 mg/L）の約10分の1になった。一方、DONは内部生産により生成されるため¹³⁾、河川から海域にかけて濃度がDINほど大きく低下せず、DONの割合が相対的に高くなる可能性が考えられる。ただし、海水のPONの割合

は増加していない。

図-6より、海水のTPに対するDIP、DOP、PPの割合⁷⁾も窒素と同様に算定すると、それぞれ60%、16%、24%となり、海域ではDIPの割合が多く、河川水の割合（43%）よりも増加する結果が得られた。つまり、窒素とは異なり、河川と比べて溶存態無機物の割合が増えている。ただし、TP濃度は河川の平均値が0.13 mg/Lであるのに対して、海域では0.013 mg/Lに減少している。

(2) 栄養塩比の比較

図-7は、2011年2月～2012年1月に備讃瀬戸西部、備讃瀬戸東部、播磨灘にそれぞれ流入する河川水および各海域の海水の溶存態無機物の窒素、リン、ケイ素のモル比の関係を示す。海のデータは浅海定線調査¹⁰⁾の結果を用いた。各河川が流入する海域は表-1に示している。

(a) N/P比

図-7(a)より、すべての河川でDIN/DIP比はレッドフィールド比（=16）（以下、RF比）より大きくなっており、窒素に富みリンに乏しい状態にあることがわかった。この結果から、リンが河川の植物プランクトンによる一次生産の制限因子になっている可能性が考えられる。また、流入する海域別に比較すると、播磨灘に流入する河川は、備讃瀬戸に流入する河川と比較して、DIN/DIP比が大きい結果が得られた。この理由は、第3.1節で述べたように東讃域の河川は、流域内の人為的活動による変化が小さいため、リンの負荷が少なく、自然由来の硝酸態窒素が相対的に多いため（図-3）と考えられる。

一方、海域では、各水域の違いは河川と比べて小さいことが分かった。また、RF比よりも小さく、海域では、窒素が不足傾向にあることが分かった。この結果は、播磨灘中央部と北部海域で示された1994年以降の状況¹⁴⁾と一致しており、播磨灘南部の香川県側および備讃瀬戸においても同様の状況となっていることが分かった。

(b) N/Si比

図-7(b)より、すべての河川でDIN/Si比は、RF比（=1）より小さくなっており、ケイ素に富み窒素に乏しい状態にあることがわかった。流入する海域別に比較すると、備讃瀬戸に流入する河川は播磨灘に流入する河川と比較して、DIN/Si比がわずかに大きい結果が得られた。図には示していないが、河川別にみると、大東川、詰田川な

図-7 河川水と海水のレッドフィールド比の海域別比較

ど栄養塩濃度の高い河川においてDIN/Si比がとくに大きくなっている。また、河川水のDIN/Si比では明瞭な季節変化がみられ、夏季に値が低くなり、冬季に高くなる傾向がみられた。冬季に値が上昇した理由は、河川の堰において珪藻プランクトンが増殖し、ケイ素濃度が減少した可能性が考えられる。

一方、海域では、河川と同様に、RF比よりも小さく、各海域の違いは河川と比べて小さいことが分かった。また、備讃瀬戸のDIN/Si比は西部・東部ともに河川よりも小さくなっており、海域においてDINがSiよりも優先的に減少していることが分かる。一方、播磨灘に流入する河川のDIN/Si比は海域とほぼ同程度（=0.2）であることがわかった。

(c) Si/P比

図-7(c)より、すべての河川でSi/DIP比はRF比（=16）より大きくなっており、ケイ素に富みリンに乏しい状態にあることがわかった。上記(a), (b)で示した結果から、河川水のケイ素は豊富にあり、リンよりも窒素が多いことから、リンが河川の植物プランクトンによる一次生産の制限因子になっていることが考えられる。また、流入する海域別に比較すると、播磨灘に流入する河川は備讃瀬戸に流入する河川と比較して、Si/DIP比が大きい結果が得られた。また、河川水のSi/DIP比の季節変化は、DIN/Si比でみられたような変化は無く、リンの変化は窒素と比べて複雑であると推察される。

一方、海域では、各水域の値はほぼ同じとなることが分かった。また、海のSi/DIP比は河川よりも小さくなっており、ケイ素がリンよりも優先的に減少している結果が得られた。河川と同様に海域でもRF比よりも大きく、ここでも、陸域の豊富なケイ素が海域に供給されていることが分かった。

(d) まとめ

以上より、河川水の特徴としては、備讃瀬戸西部および東部に流入する河川の栄養塩比の特徴は似ており、播磨灘に流入する河川の特徴と異なっていた。一方、海域では、備讃瀬戸の早い潮流により海水が移動するため、海域別の特徴の違いはみられなかった。また、N/P比より、河川水と海水における窒素とリンのバランスが逆転しており、河川ではリン不足、海では窒素不足であることが明らかとなった。

5. 川からの負荷指標値と海域水質との関係

(1) 負荷指標値の定義

河川の水質は降水に伴う流量増加によって、大きく時間変化するため、海域水質の変化を考察するには陸からの負荷量を算定する必要がある。しかし、原単位法では時間変化を考慮できない。また、公共用水域調査では、溶存態栄養塩が分析されていない。そこで、河川からの

図-8 河川から流入するDINの負荷指標値

図-9 海域のDIN濃度の季節変化⁷⁾

月毎の負荷指標値を以下の式のように定義し、河川水質と海域水質の時間的な変化の関係を調べた、

$$I(y, t) = A(y) R(y, t-1) \bar{C}(y, t-1) \quad (1)$$

ここで、 I : 負荷指標値(ton), A : 流域面積(km²), C : 河川の栄養塩濃度(mg/L) (ここで、変数の上に付した $\bar{}$ は海域 y に流入する各河川における C の空間平均値を表す。), R : 月合計降雨量(m), y : 場所(海域番号, =1, 2, 3), t : 時間(月)とする。なお、比較する海域の栄養塩濃度は、香川県水産試験場が行っている浅海定線調査結果¹⁰⁾を用いた。降雨量データ(アメダス)には、備讃瀬戸西部に対しては多度津、備讃瀬戸東部に対しては高松、播磨灘に対しては引田のデータを用いた。各海域へ流入する河川水は、本研究で行っている河川以外にもあることから、流域面積 A は、香川県が実施している公共用水域調査の28ヶ所の河川の公表値⁸⁾をおよび河川整備基本方針を用いて流入する海域別(図-1)に算出した。

(2) 河川からの無機態窒素負荷と海域水質との関係

図-8より、DINの負荷指標値は、備讃瀬戸では播磨灘よりも大きい月が多い結果が得られた。これは、備讃瀬戸西部流域圏の流域面積が523 km²、備讃瀬戸東部流域圏では444 km²、播磨灘南部流域圏(香川県内)では154 km²と後背の流域面積の違いが大きい。また、2011年5月に301.0 mm(高松アメダス)、9月には451.5 mmの降水量が観測され、河川から海域への負荷指標値が増加したが、備讃瀬戸に流入する河川の5月の平均DIN濃度(3.8 mg/L)は9月(0.74 mg/L)よりも約5倍大きいため、備讃瀬戸流域圏の6月の負荷指標値が10月と比較して大き

くなった。一方、海域のDIN濃度(図-9)は、降水量が増加した翌月の6月にいずれの海域でも増加し、10月にも増加する結果が得られた。このことから、負荷指標値の時間変化との対応関係がみられる結果が得られた。なお、2011年は6月、7月、8月の降雨量がそれぞれ、177、229、103 mm観測されており、海域のDIN濃度は継続的に増加する傾向がみられる。このように、負荷指標値を用いることで、陸域からの栄養塩負荷量と海域の栄養塩濃度の時間変化の関係を簡易的に説明することができた。ただし、備讃瀬戸海域においては、10月のDIN濃度が大きく増加しているが、10月の負荷指標値は6月の負荷指標値と比較すると増加量は小さい。香川県は降水量が少なく、流域面積も小さいことから、河川流量、流入負荷量が多くない。備讃瀬戸海域は、対岸の岡山県に近いことから、香川県側の河川流入負荷によりすべて決まるものではないといえる。なお、出水直後の陸近くでは、栄養塩濃度が高い結果も得られており、少量の負荷であっても短期的な非定常性について今後考えることが局所箇所での栄養塩評価に必要である。

6. まとめ

本研究で得られた結果をつぎに示す。

- 1) 香川県の主要な計14河川の2011年2～10月の窒素の栄養塩形態は、DIN : DON : PON=63 : 17 : 20であるのに対して、香川県側の備讃瀬戸・播磨灘においては、DIN : DON : PON=19 : 69 : 12という結果が得られた。このことから河川水の窒素の多くは溶存態無機物として存在していること、また、海水は溶存態有機物として多く存在していることがわかった。つまり、河川水と海水の窒素の栄養塩形態は、河川水とは異なることがわかった。
- 2) 河川水のリンの栄養塩形態は、DIP : DOP : PP=43 : 21 : 36であるのに対して、香川県側の備讃瀬戸・播磨灘においては、DIP : DOP : PP=60 : 16 : 24という結果が得られた。リンの多くは溶存態、とくに溶存態無機物として存在しており、また、海水のDIPの割合が河川よりも高い結果が得られた。
- 3) 河川水の特徴としては、備讃瀬戸西部および東部に流入する河川の栄養塩比(RF比)の特徴は似ており、播磨灘に流入する河川の特徴と異なっていた。一方、海域では、海域別の特徴の違いはみられなかった。また、N/P比より、河川水と海水における窒素とリンのバランスが逆転しており、河川ではリン不足、海では窒素不足である結果が得られた。
- 4) 負荷指標値を用いることで、陸域からの栄養塩負荷量と海域の栄養塩濃度の時間変化の関係を説明することができた。

今後は、河川水中の栄養塩形態のデータ数を増やし、

現象の理解を進め、河川から供給された栄養塩が海域においてどのように変化するのか明らかにする必要がある。

謝辞：本研究は、平成23年度環境研究総合推進費「環境汚染」革新型研究開発領域[課題番号：RFb-1102]（代表：石塚正秀）、平成23年度 水産庁事業「海面養殖業振興対策事業のうち新たなノリ色落ち対策技術開発」、JSPS科研費（22760373、若手B、代表：石塚正秀）の助成を受けたものです。また、PONの分析には、香川大学農学部多田研究室の朝日俊雅氏の協力を得た。

参考文献

- 1) 水産庁瀬戸内海漁業調査事務所：瀬戸内海の赤潮発生件数、漁業被害件数、<http://www.jfa.maff.go.jp/setouti/akasio/nenkan/index.html>, 2012.9月取得。
- 2) 藤原建紀・渡邊康憲・樽谷賢治編：海の貧栄養化とノリ養殖、海洋と生物, 181, 第31巻, 第2号, pp.109-172, 2009。
- 3) 多田邦尚・藤原宗弘・本城凡夫：瀬戸内海の水質環境とノリ養殖, 分析化学, Vol. 59, No.11, pp.945-955, 2010。
- 4) Smith, P. E. and Eppey R. W.: Primary production and the anchovy population in the Southern California Bight: Comparison of time series, Limnol. Oceanogr., 27, 1, 1982。
- 5) 藤原建紀・駒井幸雄：沿岸海域の栄養塩動態, 海洋と生物, 181, 第31巻, 第2号, pp.134-139, 2009。
- 6) 中口謙・山口善敬・西村崇・秦野善行・今中麻幸代・有井康博：淀川水系における富栄養化関連物質の挙動とその季節変化, 地球化学, 第39巻, pp.173-182, 2005。
- 7) 宮川昌志・藤原宗弘・龍満直紀・赤井紀子・吉松定昭・大山憲一：播磨灘南部海域における窒素・リンの動態解明と栄養塩の有効利用技術の開発, 沿岸海域の栄養塩管理技術の開発委託事業成果報告書, pp.28-49, 2012。
- 8) 香川県：河川海岸現況調査, 2010。
- 9) 石塚正秀・寺本健士・紺野雅代・井伊博行・平田健正：紀ノ川下流の淡水域・汽水域における冬季から夏季の栄養塩・植物プランクトンの現地調査, 水工学論文集, 第49巻, 第2号, pp.1519-1524, 2005。
- 10) 香川県水産試験場：浅海定線調査, 2011-2012。
- 11) 国土交通省：平成23年度末の汚水処理人口普及状況について（報道発表資料）, 2011.8.31。
- 12) 国土交通省：平成23年度末の下水道整備状況について（報道発表資料）, 2011.8.31。
- 13) 中岡雅倫：3次元励起蛍光光度法(3D-EEMs)を用いた広島湾の溶存有機物の定量・定性解析, 香川大学大学院農学研究科修士論文, 56p, 2012。
- 14) Nishikawa, T., Hori, Y., Nagai, S., Miyahara, K., Nakamura, Y., Harada, K., Tanda, M., Manabe, M., Manabe, T. and Tada, K.: Nutrient and Phytoplankton Dynamics in Harima-Nada, Eastern Seto Inland Sea, Japan During a 35 Year Period from 1973 to 2007. *Estuaries and Coast*, 33, 417-427, 2010。

(2012. 9. 30受付)