

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23310007

研究課題名(和文) 瀬戸内海の栄養塩異変の原因究明と海域栄養塩管理

研究課題名(英文) The reason of the nutrient decrease of the Seto Inland Sea and its management

研究代表者

多田 邦尚 (TADA, Kuninao)

香川大学・農学部・教授

研究者番号：80207042

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円、(間接経費) 4,080,000円

研究成果の概要(和文)：瀬戸内海東部海域における近年の栄養塩低下とその原因について研究した。瀬戸内海では高度経済成長期に富栄養化が著しく赤潮も多発していた。その後、水質は改善されたが、逆に近年では養殖ノリの色落ち等の被害が出ている。栄養塩の減少原因には、陸域からの窒素負荷量の減少だけでなく、堆積物からの栄養塩溶出量の低下も大きく影響していると考えられた。栄養塩濃度と赤潮発生件数等との関係についても検討した。

研究成果の概要(英文)：The nutrient decrease in the Seto Inland Sea. During high economic growth since the 1960s, the Seto Inland Sea became heavily eutrophicated. However, the total nitrogen (TN) and phosphorus (TP) loads decreased from 1990s following the enactment of the Law for Conservation of Environment of Seto Inland Sea in 1973. Nutrient concentrations also gradually decreased. Recently, Nori culture has often heavily damaged due to the lack of nutrient. One explanation for the gradual decrease of DIN concentration from 1970 to present is fundamentally due to the law enacted by the Environmental Agency. But the reason for the recent decrease of DIN concentrations is still unknown. It was thought that the decrease of the upward nutrient flux across the overlying water-sediment interface greatly affected the water column nutrient concentrations. From the relationship between nutrient and red tide occurrence, appropriate nutrient concentration was also discussed.

研究分野：複合領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：生物海洋学

## 1. 研究開始当初の背景

過去、瀬戸内海では、高度経済成長期には著しく富栄養化し、その環境は悪化していた。このような状況下で、1973年に瀬戸内法が制定され、水質を中心に環境改善の努力が続けられ、その結果、赤潮発生件数の減少に代表されるように水質はかなり改善された。しかし、瀬戸内海がきれいになったことにより、イワシ類やアサリ等の漁獲量は低迷を続け、特に、養殖ノリの収穫期である冬季に栄養塩が不足してノリが色落ちし、最盛期に比べて1/3程度まで生産量が減少する深刻な問題が起きている。海水中の栄養塩の減少原因は、基本的には瀬戸内法の排水総量規制によるものと考えられるが、近年の減少の原因は不明である。沿岸海域における栄養塩の供給源は三つあると考えられる。即ち、①河川から、②海底泥からの溶出、③外洋からの栄養塩流入である。沿岸域では河川からの供給量が最も注目されるが、近年、海水中で特に底層の栄養塩濃度が、夏に低下している事実がある。

## 2. 研究の目的

瀬戸内海域の栄養塩濃度減少について以下の①～④を通してその原因を明らかにするとともに、適切な栄養塩負荷量と栄養塩管理法について検討する。

①瀬戸内海東部海域（主に播磨灘）をモデル海域とし、灘全域の表層堆積物中の有機物含量の調査を実施し、**約30年間で表層堆積物中の有機物含量がどのように変化したかを明らかにする。**

②同海域の底泥からの栄養塩溶出速度を測定し、同時に過去のデータと比較し、**海底泥からの溶出量の変化を明らかにする。**

③原単位法を用い、陸域から海への窒素・リンの負荷量を見積もり、過去から現在までにその負荷量がどのように変化したのかを検討する。

④同海域の過去から現在までの栄養塩、塩分、水温等の基礎データとともに、赤潮発生件数およびノリの生産枚数等のデータを総合的に解析し、適切な栄養塩濃度管理について検討する。

## 3. 研究の方法

### (1) 陸域からの生活系 NP 負荷の見積もり

GIS (Geographic Information System) を用いて、播磨灘流域圏の範囲データを作成し、国勢調査の人

口基準メッシュデータを切り出した。また、兵庫県下水道計画図を基に下水道の整備地範囲を切り出した。さらに生活排水処理施設の整備範囲を考慮して、可視化したデータと原単位法を用いて発生負荷量の算出を行った。河道網、流域界には国土数値情報、人口には国勢調査人口調査の1 kmメッシュデータの1985年から2010年の5年ごと計6回分を使用した。下水道の整備範囲は兵庫県かが公表している兵庫県下水道計画図(平成24年3月, <https://web.pref.hyogo.lg.jp/>)をGISによって、デジタル化した。

### (2) 海域(播磨灘)の調査・観測

香川大学調査船カラヌス III を用いて、播磨灘の全域にわたる33定点において、観測を実施し海水中の光環境と懸濁物の水平分布および季節変動を調査した。観測ではCTDによる水温、塩分、クロロフィル蛍光、および海水中の光量子量の鉛直測定を測定し、有光層内の光減衰係数を算出した。また、バケツによる表層海水の採取し、浮遊懸濁物量(SPM)、クロロフィル a (Ch1a)、懸濁態有機炭素・窒素(POC・PON)、および懸濁態リン(PP)を測定した。PPについては全懸濁態リン(PP)と懸濁態無機リン(PIP)に分別して定量した。

さらに、播磨灘の全域にわたる63定点から、KK式柱状採泥器を用いて堆積物試料を複数本採取した。採取した試料は0-1, 1-2cm層に分画し、それぞれの含水率および全有機態炭素(TOC)・全窒素(TN)含有量を測定した。

### (3) 堆積物からの NP 溶出量の測定

堆積物からのNP溶出量の測定は、本研究で明らかにした播磨灘全域63点の堆積物表層(0-1 cm)のTOC・TNの水平分布(図5; Yamaguchi et al (in press))から、有機物含有量の高い順にStn. 9, 81, 119の3点を設けて実施した。調査は2012年7月、8月、9月の計3回行った。CTDで水温、塩分および溶存酸素(DO)濃度を、また温度計で泥温を測定した。さらに、KK式柱状採泥器にて柱状堆積物試料、およびバンドン採水器にて底層水を採取し、以下の方法でNP溶出量を測定した。柱状堆積物試料のコア上部の海水のDO濃度を窒素ガス注入により現場底層水と同程度に調整した後、現場水温・暗条件で24時間インキュベートし、経時的に採集した直上水の栄養塩濃度

を測定し、その変化から栄養塩 flux を算出した。

#### 4. 研究の成果

##### (1) 陸域からの生活系 TN、TP 負荷量

本研究では生活系排水に注目して N, P 負荷量を見積もった。高度経済成長期には、COD 負荷量でみると産業系排水の占める割合が高かったが、1980 年以降は生活系排水が全負荷量の約半分程度を占めている。図 1, 2 に示すように、播磨灘流域圏の生活系 TN, TP 負荷量はともに緩やかに減少している。TN では 1985 年から 2010 年にかけて、15.1 t/day から 13.7 t/day へと、1.4 t/day 減少した。TP では 1985 年から 2010 年にかけて、1.4 t/day から 0.97 t/day へ、約 30% (約 0.4 t/day) 減少した。各処理方法別の負荷量の変化を見てみると、TN では 1985 年に兵庫県浄化槽からの負荷量が最も多く全体の 41% を占めていたが、2010 年では、単独公共下水道の割合が最も高く、全体の 42% を占めるようになり、兵庫県浄化槽は 17% となった。また TP では、1985 年に兵庫県浄化槽および兵庫県未整備がそれぞれ全体の 37% を占めており、ついで単独公共下水道が 10% を占めていた。2010 年では、単独公共下水道の割合が高くなり、全体の 33% を占めるようになり、また、25 年間で、兵庫県浄化槽および兵庫県未整備の占める割合は、それぞれ 20% と 19% となった。全体的な割合をみると、兵庫県・香川県の未整備地区・浄化槽の割合が 1985 年では 82% であり、兵庫県・香川県の未整備地区・浄化槽からの発生が多くを占めている。2010 年では、兵庫県と香川県の未整備地区および浄化槽の割合が 45% となり、2010 年では未整備地区と処理施設からの発生負荷量がほぼ同じとなった。

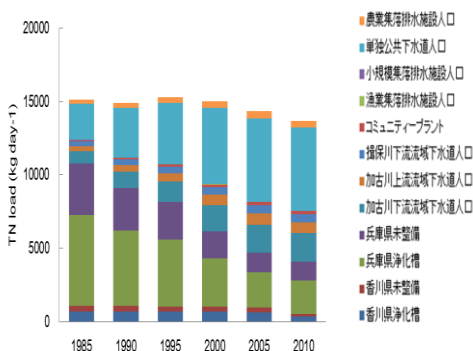


図1 播磨灘流域圏における生活系 TN 発生負荷量の長期変化

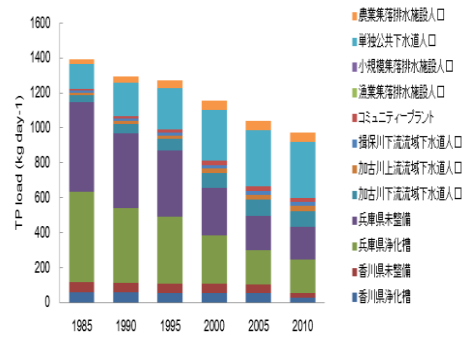


図2 播磨灘流域圏における生活系 TP 発生負荷量の長期変化

##### (2) 海域の植物プランクトンの生育環境 (懸濁物の挙動と光条件)

播磨灘全域における表層水中の懸濁物量について、これらの一連の懸濁粒子の水平分布、季節変動から総合して判断すると、植物プランクトン量は灘北部で高く、そのため懸濁粒子量あるいは懸濁態有機物量も灘北部で高い。しかし、海峡部では、堆積物の舞い上がりあるいは再懸濁を含めて常に植物プランクトンに由来しない粒子が多く存在していることが考えられた。また、光環境については、申請者らの別のプロジェクトの研究も合わせて、水柱の光消散係数には、トリプトン (植物プランクトン以外の懸濁粒子) が一番寄与するが、その変動には植物プランクトン量の変動が一番大きく影響していることが明らかとなった (Asahi *et al.* 2014a, b)。

##### (3) 海底の堆積物表層の有機態炭素・窒素、全リンの水平分布の変化 (1980、2010 年の比較)

播磨灘全域における表層堆積物中の TOC, TN の水平分布を図 3 に示した。灘の北部や中央部などで TOC, TN は 20 mgC/g, 2.0 mg N/g 以上の高濃度域が、また、小豆島北部、明石海峡や鳴門海峡付近に 10 mgC/g, 1.0 mgN/g 以下の低濃度域が見られた。また、TOC・TN が高濃度を示した地点に 63 μm 以下の粒子が比較的多く見られ、TOC・TN 含有量と 63 μm 以下の粒子の割合との間にはそれぞれ強い相関性 (r=0.756, r=0.750) が認められた。

また、TOC・TN 含有量の平均値は、それぞれ 15.0 ± 6.6, 13.9 ± 6.3 mgC/g (0-1, 0-2 cm 層)、1.91 ± 0.83, 1.75 ± 0.74 mgN/g (0-1, 0-2 cm 層) であった。一方、70 年代の平均 TOC, TN 含有量は、それぞれ 16.7 mgC/g, 1.7 mg N/g であり (塩沢ら 1975)、80 年代はそれぞれ 12.1 mgC/g, 1.6 mgN/g であった (門谷

ら 1987)。これらの平均含有量の年代間の変動幅は 10%以内であった。

TOC・TN と 63  $\mu\text{m}$  以下の粒子の関係から、水平分布の決定要因は播磨灘の潮汐流による粒子の運搬作用が大きく影響していると考えられた。このため、70、80 年代の TOC・TN の水平分布は現在のもので類似した傾向を示し、水平分布の決定要因は変化していない事が考えられた。今回得られた結果と 70 年代、80 年代の TOC の値は、測定法の違いを考慮しても、過去の水柱の有機物濃度の減少が著しい一方で、堆積物中の有機物含有量の年代間の変動は小さいと示唆された。一般的に、水質の応答に比べて底質の応答はタイムラグが生じる事が知られており、底質の有機物量が減少するためには、より多くの時間が必要である事が推察された (Yamaguchi *et al.* in press)

#### 4) 栄養塩濃度減少の原因と底泥からの栄養塩溶出

近年、瀬戸内海に存在する窒素やリンが、大方の予想に反してその半分以上が外洋起源であると報告されている (藤原ら 1997、武岡ら 2002、Yanagi and Ishii 2004)。事実、過去 25 年間で、瀬戸内海の陸域からの栄養物質の流入は窒素で 2 割、リンでは 4 割も削減されていながら、海水中の窒素・リン濃度は期待するほど改善されない事実と照らし合わせると、この研究結果は理解しやすい。しかし、外洋域からの栄養塩流入量がこの 40 年で減少してきた報告はない。

一方、播磨灘の表層と底層における各月ごとの平均の DIN 濃度の変化については、夏季の成層期に、これまでのように底層水中に DIN が蓄積されていないことが報告されている (多田ら 2010)。夏季の成層期に底層で栄養塩が蓄積されない理由としては、①近年、透明度が高く、太陽光がより深い層まで届き、植物プランクトンの光合成が深い層まで可能になり、栄養塩の消費が活発であったこと、②近年、成層構造が弱くなって、底層に蓄積された栄養塩が拡散しやすいこと、③底泥から底層への栄養塩溶出が減少したことの、三つの可能性が考えられる。①に関しては、著者らは、現場観測において 2007 年にはより深い層にまでクロロフィル蛍光値 (植物プランクトン量の指標) が高かったことを、また、②については、1990 年以降、夏季の表層と底層間の水温と塩分の差はともに小さい傾向にあり、成層強度が弱ま

っていることを報告した (Tada *et al.* 2008)。③については、著者らが過去、1982 年に播磨灘北部沿岸の姫路沖

で底泥からのリンの溶出量を測定した結果

( Tada and

Montani

1997) と、

その約

30 年後

の 2011 年に測定した値を比較してみると、約 35%減少していた。また、播磨灘に隣接する香川県志度湾において、2000 年に測定された底泥からの栄養塩の溶出量 (Srithongouthai *et al.* 2003a) と、その 10 年後の 2010 年に測定した値とを比較すると、有意に減少していた (Tada *et al.*, 2012)。

本研究では、播磨灘全域の底泥からの栄養塩の溶出を見積もる事を試みた (多田ら、印刷中)。その結果、夏の成層期で、窒素では堆積物からの TN 溶出量が、96.7 ton/day、DIN 溶出量が 46.4 ton/day と見積もられた (Table 1)。これは TN 発生負荷量の 38.0 ton/day と比較すると 2.5 倍となり、陸域よりも底泥からの供給量の方が大きい事がわかる。また、TN の河川流入量の 18.5 ton/day、DIN の河川流入量の 14.5 ton/day (山本ら 1996) と比較すると、それぞれ 5.2、3.2 倍となる。一方、リンでは堆積物からの TP 溶出量が、3.8 ton/day、DIP 溶出量が 1.2 ton/day と見積もられた (Table 1)。これは TP 発生負荷量の 1.8 ton/day と比較すると 2.1 倍となり、陸域よりも底泥からの供給量の方が大きい。また、TP の河川流入量の 1.6 ton/day (山本ら 1996) と比較すると、2.4 倍となる。いずれにしても、播磨灘への NP 供給量としては、陸域からよりも底泥の方が大きい。但し、播磨灘において窒素やリンの供給量としては陸域よりも底泥からの方が大きい事は、単なる供給量の比較であり、播磨灘における NP の循環あるいは収支ではない。しかし、窒素やリンの供給源として堆積物からの溶出を考えると、この溶出量が減少することは、

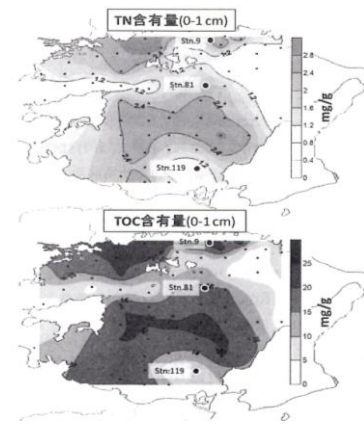


図3 播磨灘全域の堆積物表層の全窒素 (TN)・全有機態炭素 (TOC) 含有量

単純に陸域からの供給が同じ割合で減少するよりも海水中の濃度の減少への寄与は大きい事になる。今、瀬戸内海を大きな水槽として考えた際に、水質は蛇口を締めれば比較的短時間で改善されるが、底泥堆積物の泥質はさらに長い時間をかけて改善すると考えられる。現在、瀬戸内法制定 40 年を経て、底質が徐々に改善され、底泥堆積物からの溶出量が減少している可能性が考えられる。

著者らは、過去、1999 年および 2000 年に、香川県沿岸の志度湾において、底泥堆積物から供給される窒素およびリン量が水柱内の植物プランクトンによる光合成の栄養塩要求量に対して、それぞれ平均 33% および 22% を占めると見積もっており (Srithongouthai *et al.*, 2003b)、この見積もり値から判断しても、底泥からの栄養塩の供給量は決して小さいものではなく、この溶出量が減少すれば、当然、水柱の植物プランクトンの増殖にも影響が及ぶものと考えられる。

Table 1 N and P loads from the land and upward N and P fluxes from the bottom sediment during summer period in the Harima-Nada, the Seto Inland Sea

	ton / day	Reference
TN load	38.0	Ministry of Environment (2012)
Discharged TN from the river	18.5	Yamamoto <i>et al.</i> (1996)
Discharged DIN from the river	14.5	Yamamoto <i>et al.</i> (1996)
TN flux from the sediment	96.7	This study
DIN flux from the sediment	46.4	This study
-----		
TP load	1.8	Ministry of Environment (2012)
Discharged TP from the river	1.6	Yamamoto <i>et al.</i> (1996)
TP flux from the sediment	3.8	This study
DIP flux from the sediment	1.2	This study

### (5) 海水中の栄養塩濃度減少と赤潮発生件数

前述のように、瀬戸内海の赤潮発生件数は、高度経済成長期から現在まで減少してきた。赤潮発生件数と海域への TP 負荷量の減少との関係について見てみると (図 4)、近年、TP の発生負荷量が 1960 年代レベルまで減少しているのに、赤潮発生件数は 1960 年代前半のレベルにまでは減少していない。即ち、ある TP 負荷量に対する赤潮発生件数は、富栄養化進行過程と栄養塩濃度減少過程では異なり、TP 負荷量を以前のレベルに減少させても、赤潮発生件数は以前のレベルには戻らない。Mee(2006)は、栄養塩濃度低下と生態系の復元について報告しており、荒廃した生態系を元の状態に戻すには、栄養塩濃度を富

養化以前の水準に下げただけでは不十分であり、それ以上に減らさなくてはならないとしている。TP 負荷量と赤潮発生件数との関係は、このこととよく一致している。

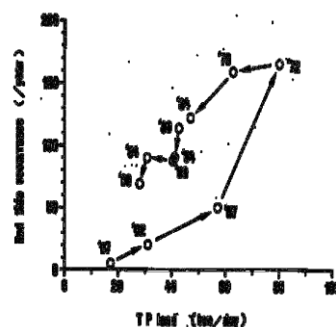


図4 全リン負荷量と赤潮発生件数との関係 (Yamamoto(2003)の図にデータを追加して作成)

瀬戸内海の栄養塩濃度レベルとしてどの濃度が一番適切か? が近年話題となっている。瀬戸内海東部海域では、1990 年代がノリ養殖も好調で赤潮発生件数も少なかった。従って、1990 年代の栄養塩濃度レベルが適当との考えがある (反田、未発表)。しかしながら、瀬戸内海では干潟・藻場の面積は高度経済成長期から著しく減少しており、栄養塩濃度は浅場の回復とペアで考えるべきである。更には、荒廃した生態系を元の状態に戻すには、栄養塩濃度を富栄養化以前の水準に下げただけでは不十分であり、それ以上に減らさなくてはならない事も考慮して考えるべき事も含め今後さらに議論する必要がある。

### 5. 主な発表論文等

石塚正秀・石川真菜・宮川昌志・赤井紀子・多田邦尚 : 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. 土木学会論文集 (水工学) B1, **69**, I\_1423 - I\_1428 (2013).

Yamaguchi, H., Katahira, R., Ichimi, K. and Tada, K. : Optically active components and light attenuation in an offshore station of Harima Sound, eastern Seto Inland Sea, Japan, *Hydrobiologia*, **714**, 49 - 59 (2013).

Yamaguchi, H., Hirade, N., Kayama, M., Ichimi, K. and Tada, K. : Total organic carbon and nitrogen contents in surface sediments of Harima Nada, eastern Seto Inland Sea, Japan : A comparison

under two different trophic states. *Journal of Oceanography*, (in press).

Nishikawa, T., Hori, Y., Nagai, S., Miyahara, K., Nakamura, Y., Harada, K., Tada, K., Imai, I.: Long-term (36-year) observations on the dynamics of the fish-killing raphidophyte *Chattonella* in Harima-Nada, eastern Seto Inland Sea, Japan, *Journal of Oceanography*, **70**, 153 – 164 (2014).

朝日俊雅・竹本沙紀・一見和彦・山口一岩・多田邦尚：新川・春日川河口干潟（瀬戸内海備讃瀬戸）における懸濁粒子中のリンの挙動，*海の研究*，**23**，29-44（2014）。

Asahi, T., Yamaguchi, H., Ichimi, K. and Tada, K. : PIP/PP ratio as an indicator of phytoplankton activities and origin of particulate matter in Harima-Nada, the Seto Inland Sea, Japan, *La mer*, **52**, 1-11 (2014a).

Asahi, T., Ichimi, K. , Yamaguchi, H. and Tada, K. : Horizontal distribution of particulate matter and its characterization using phosphorous as an indicator in surface coastal water, Harima-Nada, the Seto Inland Sea, Japan, *Journal of Oceanography*, **70**, 277-287 (2014b).

Yamaguchi, H., Hirade, N., Kayama, M., Ichimi, K. and Tada, K. : Total organic carbon and nitrogen contents in surface sediments of Harima Nada, eastern Seto Inland Sea, Japan : A comparison under two different trophic states. *Journal of Oceanography*, (in press 2014).

多田邦尚・西川哲也・樽谷賢治・山本圭吾・一見和彦・山口一岩・本城凡夫：瀬戸内海東部海域の栄養塩減少とその低次生産過程への影響，*沿岸海洋研究*，**52**，（印刷中 2014）

香川大学・瀬戸内圏研究センター・准教授  
研究者番号：70363182

山口 一岩（YAMAGUCHI HITOMI）  
香川大学・農学部・准教授  
研究者番号：50464368

石塚 正秀（ISHIZUKA MASAhide）  
香川大学・工学部・准教授  
研究者番号：50324992

本城 凡夫（HONJO TSUNEO）  
香川大学・瀬戸内圏研究センター・特任教授  
研究者番号：80284553

樽谷 賢治（TARUTANI KENJI）  
独立行政法人水産総合研究センター・西海区水産研究所・グループ長  
研究者番号：20371966

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

多田 邦尚（TADA KUNINAO）  
香川大学・農学部・教授  
研究者番号：80207042

### (2) 研究分担者

一見 和彦（ICHIMI KAZUHIKO）