干潟を含めた浅海域の生態系研究

チーム瀬戸内海（代表：多田邦尚）

第１章　はじめに

瀬戸内海は過去の高度経済成長期には、重工業化と特定地域への人口集中化、生活環境整備の立ち遅れなどのため著しく富栄養化が進行し、赤潮の多発、貧酸素水塊の発生などの状況から「瀕死の海」と呼ばれるまでその環境は悪化していた。1973 年には瀬戸内海環境保全臨時措置法（後に、特別措置法と改称。いわゆる瀬戸内法）が制定され、その後、水質を中心に環境改善の努力が続けられ、その結果、水質はかなり改善されたと言われている。実際に当時から現在までの連続した栄養塩濃度の変化等のデータセットは無いが、赤潮の発生件数が瀬戸内法制定当時の 1/3 にまで減少した事実から考えても、現在では、その水質はかなり改善され、瀬戸内海の水はきれいになったと言える。しかし、一方では、イワシ類やアサリ等の漁獲量は低迷を続け、特にここ数年では、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するという問題が起きている。

瀬戸内海の水質改善に大きな役割を果たした瀬戸内法が制定されて既に 35 年以上が経過し、単に水質のみの改善を目標とした時代は終わりを告げ、今、新たな海域保全の方策が求められている。我が国の代表的な閉鎖性海域で、「巨大な環境管理の実験海域」とも言われる瀬戸内海の環境保全・修復を実施するために、まず、第一歩として、この海の現状を正しく把握することが大変重要である。

そこで、我々は『干潟を含めた浅海域の生態系研究』を実施することにした。本研究プロジェクト（平成 20、21 年度）は干潟を含めた浅い海（浅海域）が、沿岸海域の環境に対して、いったいどのような機能を持ち、また、それを支えている生物の役割はどのようなものかを明らかにしようとするものである。本プロジェクト研究は、浅海域の生態系や環境保全だけでなく、地元の基幹産業である水産業の視点からもその将来（現状と未来）を考えることを目的とし、浅海域の環境とそこに生息する生物、あるいは水産環境に関する総合的な分野横断型の研究である。また、本プロジェクトの内容は、平成 20 年度文部科学省・連携融合事業（平成 20～22 年度）に採択され、文部科学省と香川県からの連携研究費（平成 20～22 年度）を受けて、地元の香川県との連携のもとに実施された。

具体的には、五つの研究課題即ち、(1) 干潟域の生物生産と物質循環、(2) 藻場・干潟域の植物の生物機能、(3) 浅海域の生物生産環境の長期・短期的変動、(4) 水産養殖場の環境保全、および、(5) 浅海域の環境保全に関する研究、を実施した。

次頁に、本プロジェクト研究を実施した『チーム瀬戸内海』のメンバーを示す。

＜ チーム瀬戸内海 ＞

多田邦尚	（農学部・教授）研究代表者
末永慶寛	（工学部・教授）
中山 充	（連合法務研究科・教授）
三野 靖	（法学部・教授）
田島茂行	（元農学部・教授）
田村啓敏	（農学部・教授）
一見和彦	（瀬戸内圏研究センター・准教授）
石塚正秀	（工学部・准教授）
井面仁志	（工学部・准教授）
東江（野村）美加	（農学部・准教授）
山田佳裕	（農学部・准教授）

第２章　各研究課題の成果

(1) 干潟域の生物生産と物質循環

〔概要〕

干潟の生物機能を知るためには食物連鎖系の出発点である干潟の微細藻類の生産量を明らかにすることが重要である。そこで、まず、干潟域の生物生産について、現場培養実験により季節別あるいは干潮時（干出時）と満潮時（冠水時）に分けて定量化することを試みた。さらに、干潟域の PAM 蛍光光度計による干潟一次生産量の簡易測定法を検証した。干潟一次生産量は現場あるいは擬似現場培養実験により求めるのが一般的で、その操作は非常に時間と労力を必要とする。事実 20 年度は、干潟一次生産量の現場培養実験に多大なるエネルギーをつぎ込んだ。21 年度は、PAM 蛍光光度計により各試料の蛍光収率を測定し、既存の算出式から各観測日における一次生産速度を求めた。その結果、観測期間における一次生産量の平均値は 0.71 gC/m^2/d と見積もられ、この結果は、20 年度に試料の培養実験から見積もった干潟微細藻類の一次生産量（0.77 gC/m^2/d）とほぼ一致した値となっており、PAM 蛍光光度計を用いることで干潟域の一次生産量を容易に見積もることが出来る可能性が示された。

また、干潟の様々な生物のアミノ酸組成を指標として、干潟生態系における有機物循環を検討した。その結果、干潟の食物連鎖系において、より上位の栄養段階の生物ほど（食う食われるの関係でより上位のものほど）、タンパク質が良質のものに組み変わっていることがわかった。

〔研究成果〕

(a) 干潟の一次生産量

干潟域に生息する低次生産者（底生微細藻類とアオサなどの大型藻類）の年間を通した生産量（光合成量）を冠水時、干出時にわけてそれぞれ定量的に明らかにすることができた（図 1）。即ち、新川・春日川河口干潟域における総一次生産量は 1.21 gC/m^2/d であり、そのうち、水柱の浮遊性微細藻類によるものが、20%（0.25 gC/m^2/d）、干潟の干出時の堆積物上が 5%（0.06

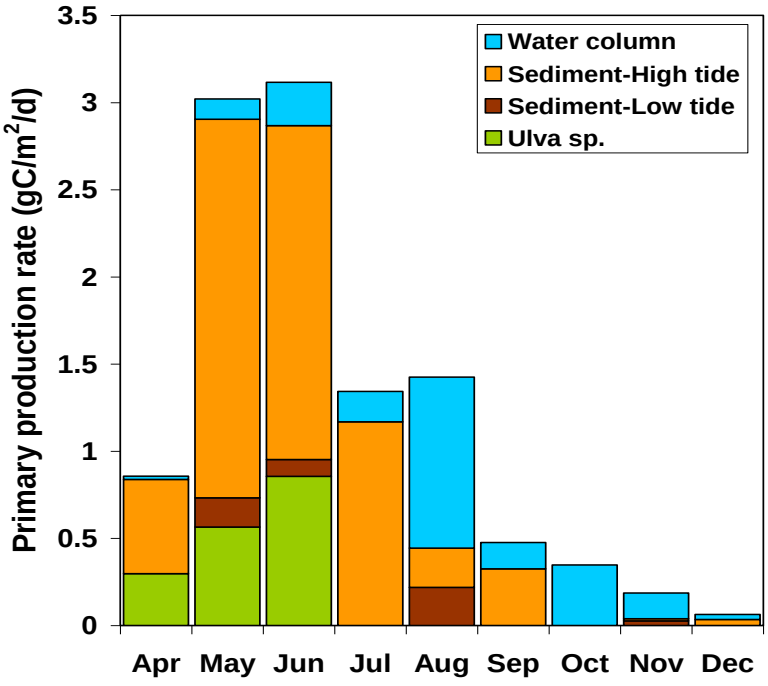


図１　調査干潟域における各月の一次生産速度

gC/m^2/d)、干潟の冠水時の堆積物上が 59%（0.71 gC/m^2/d)、干潟上の大型藻類のアオサによるものが、16%（0.19 gC/m^2/d）であった。従って、干潟の微細藻類の一次生産速度は干潟の干出時の堆積物上（0.06 gC/m^2/d）と冠水時の堆積物上（0.71 gC/m^2/d）の和で、0.77gC/m^2/d と見積もられた。また、底生微細藻類の生産量は 5、6 月の初夏に高く、アサリが大量に採れる時期と一致しており、底生微細藻類がアサリの良い餌となっていることが予想された。

図 2　PAM（藻類高感度クロロフィル蛍光測定器）

さらに、高松市郊外の新川・春日川河口干潟の一次生産量（光合成量）について、PAM 蛍光光時計（図 2）を用いて、従来法よりも簡単に測定できる可能性を示すことができた。即ち、PAM 蛍光光度計により各試料の蛍光収率を測定し、既存の算出式（図 3）から各観測日における一次生産速度を求めた。

【PAM 測定項目】

F0：最小蛍光収率，Fm：暗条件下における最大蛍光収率

【一次生産速度の計算式】

一次生産速度（g C/m^2/day）

$$= \{(Fm-F0)/Fm\} \times PPFD \times 0.5 \times (1/k) \times nPSII \times Chl\ a\ conc. \times 3600 \times t$$

PPFD　：光量子量（mol/m^2/s）
$1/k$　：酸素発生の最大収率 0.002（mol O_2/mol e）
nPSⅡ　：Chl *a* 当たりの反応中心数 0.25（mol e/mol Chl *a*）
Chl *a* conc.：クロロフィル *a* 濃度（mol/m^2）
t　：日長時間（h）

*光合成商（C:O_2）=1 として算出

図 3　PAM 測定項目と一次生産底度の算出式

その結果、観測期間における一次生産速度の平均値は 0.71 gC/m^2/d と見積もられ、この結果は、20 年度に現場培養実験から見積もった干潟堆積物中の微細藻類の一次生産速度（0.77 gC/m^2/d）とほぼ一致した値となっており、PAM 蛍光光度計を用いることで干潟域の一次生産量を容易に見積もることが出来る可能性が示された。

（b）干潟の食物連鎖系におけるタンパク質の質的変化

また、干潟の様々な生物のアミノ酸組成を指標として、必須アミノ酸指数（EAA Index）という値（図 4）を算出した。必須アミノ酸指数は、食物連鎖系の中である餌をすぐ上位の生物が捕食すると高い値（98～103、あるいは 69～95）を示したが、栄養段階を一段階以上越えて捕食した場合には、低い値（70～78）を示した。このことは、干潟生態系における食物連鎖系において、上位のものほどタンパク質が良質のものに組み変わっていることを示している（図 5）。

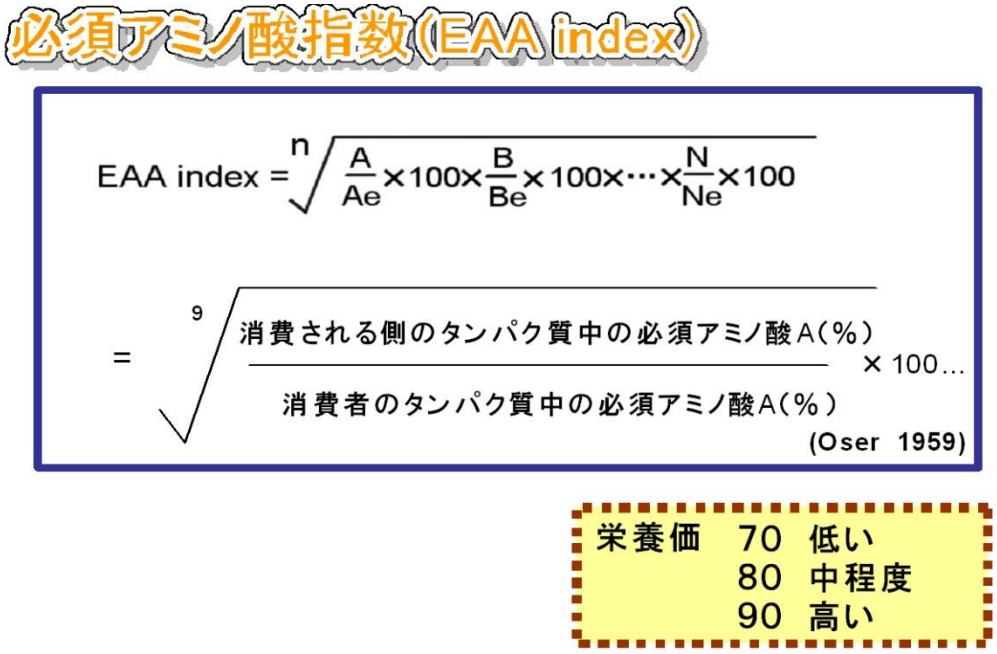


図 4　必須アミノ酸指数

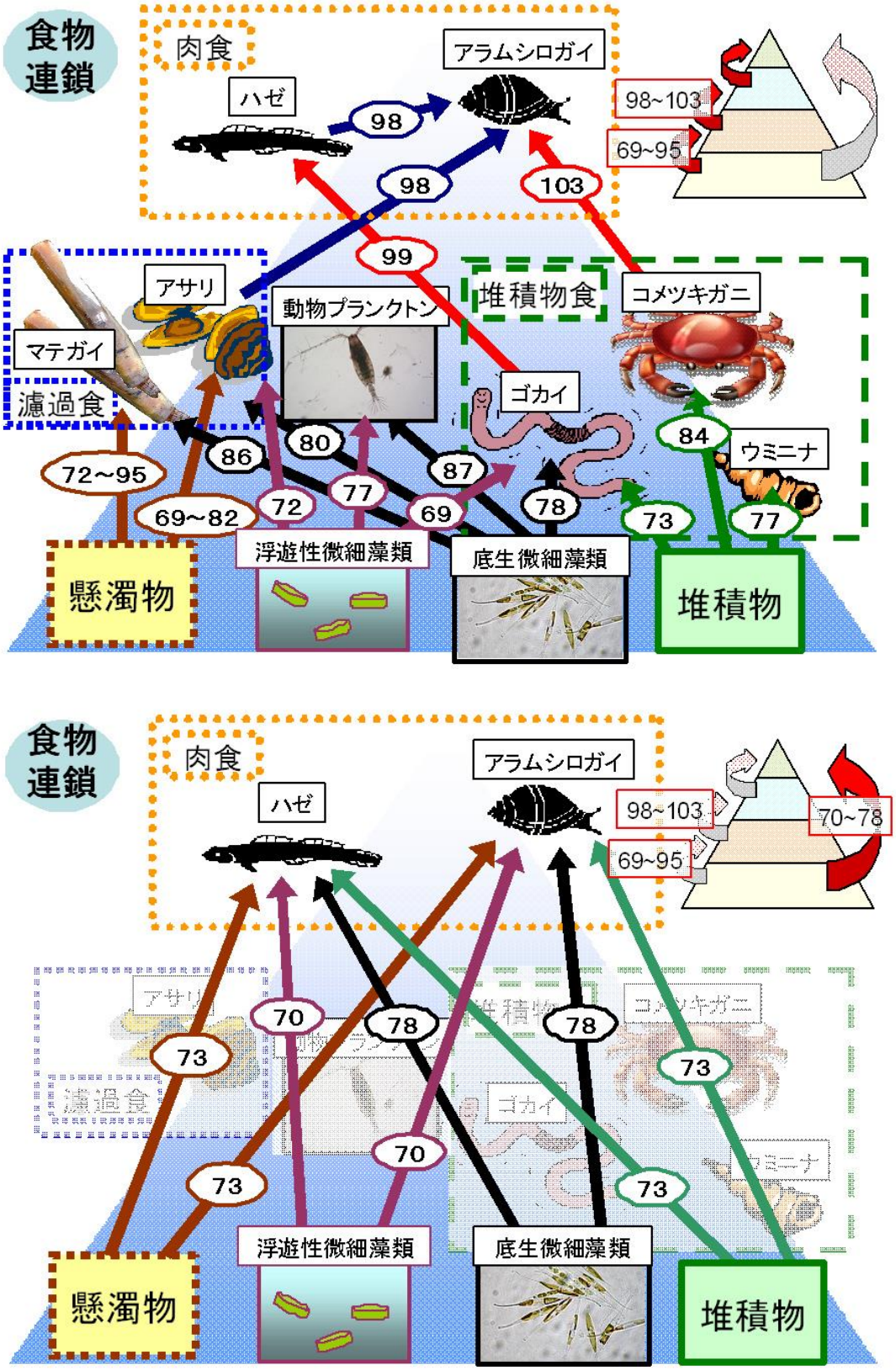


図５　食物連鎖系における必須アミノ酸指数

(2) 藻場・干潟域の植物の生物機能

〔概要〕

干潟は干潮時と満潮時でその環境は大きく変化することから、そこに生息する植物は、乾燥、温度、塩分の急激な変化を受けており、植物の環境ストレスを研究できる貴重な場である。そこで干潟の大型藻類であるアナアオサについて、その乾燥ストレス耐性メカニズムについて調べた。

まず、干潟に多量に発生するアオサ類について、遺伝子解析技術を用いて出現するアオサ類の種類を明らかにすることを試みた。その結果、季節によって、出現するアオサの種組成が変化することがわかった。また、その環境ストレス耐性について検討した。その結果、アオサは好塩性の海藻であり、下げ潮時の塩分が低くなった河口部では、その藻体のアミノ酸やアントシアニン含量等を調節してストレスに耐えている可能性を示すことができた。

また、アマモの生態についての研究ツールとして実験用小型アマモ場（浮き藻場）の検討を行った。この実験藻場の実用化は、アマモの生態を研究する上で、非常に期待されるものである。検討の結果、本装置は実験開始時に問題であった砂の流出も少なく，アマモを１年を通じて生育させることが可能となった。

〔研究成果〕

(a) 干潟域の大型藻類アナアオサの出現種の季節変化

新川・春日川河口干潟に多量に繁茂するアオサ類について、毎月アオサを採取し、遺伝子解析技術を用いて出現するアオサ類の種類を明らかにすることを試みた。その結果、季節によって、出現するアオサの種組成が変化することがわかった（図 6)。

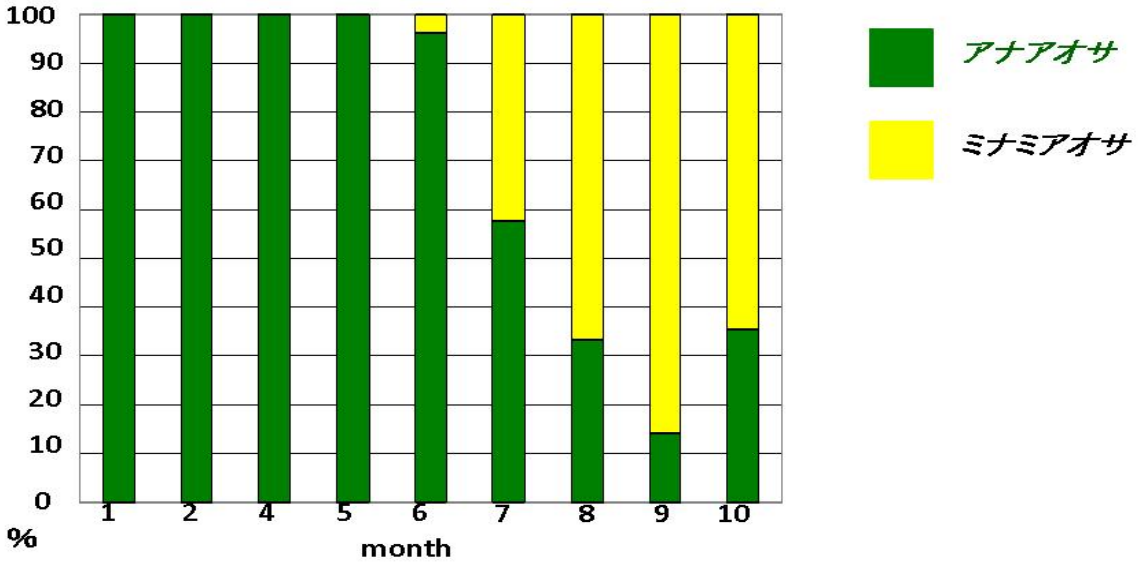


図 6　新川・春日川河口干潟域に生息するアオサの種組成の月別変化

(b) 干潟域の大型藻類アナアオサの環境ストレス耐性

干潟で大量に増殖するアナアオサは干潟の自然の様々な環境の変化の中で生育していかなくてはならない。このような環境の変化にどのように対応しているのかを代謝レベル、形態レベルでの適応について調べた。

まず、アナアオサは形態的にも変化していることが明らかとなった（図 7）。海水温度６℃の干潟域から採取した殆どのアナアオサは液胞が大きく支配しているタイプ A の形態を示すのに対し、そのアナアオサを２５℃で生育させると液胞が観察できないタイプ B に変化することがあった。

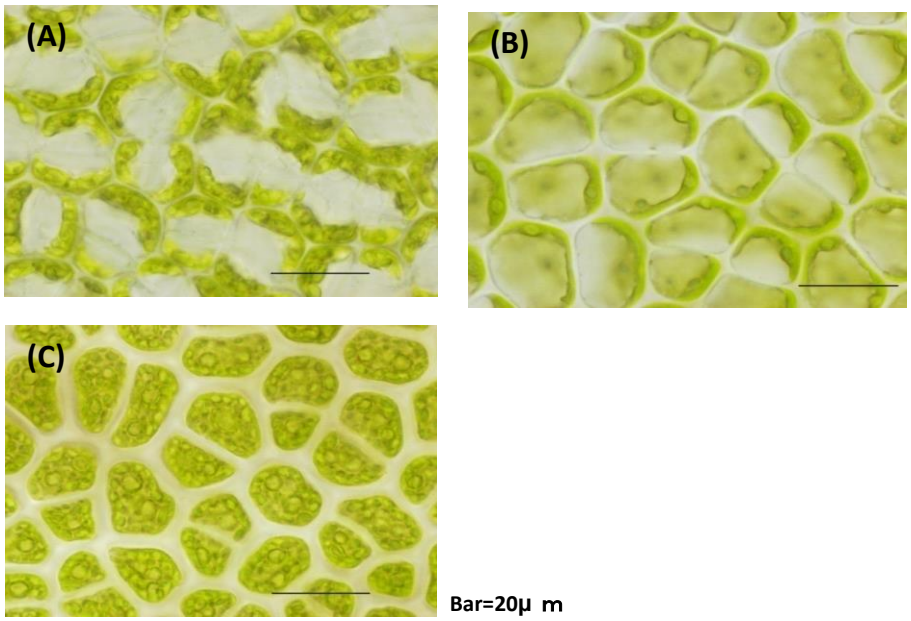


図 7　アナアオサの表面。(A) 海水域、(B) 波打際、(C) 干潟域で採取したアオサの表面を顕微鏡で観察。2007 年 8 月 29 日採取。　(A) を TypeA、(C) を TypeB とした。

この形態的な違いをさらに調べるために２次元電気泳動後にペプチドマスフィンガープリント法を用いてタンパク質の同定を行い、どのようなタンパク質が増加しているのか調べた。アナアオサのデータベースが無いため殆どが機能未知タンパク質と同定されてしまったが、今回タイプＡのアナアオサから stearoyl-acyl carrier protein desaturase を同定できた。このタンパク質はステアリン酸（18:0）をオレイン酸（18:1）に変換する酵素である。一般的に植物では低温ストレスがかかると不飽和脂肪酸が増加すると言われている。今回このタンパク質を海水温度６℃のタイプ A から同定できたと言うことはアナアオサが低温ストレスに適応するために stearoyl-acyl carrier protein desaturase 酵素の活性化を誘導して不飽和脂肪酸量が増加したのではないかと考えられる。今後はこれらの仮説を証明するためにさらに調べる必要がある。

さらに、アナアオサはグリセロールを蓄積することで細胞内の浸透圧を調節していることが示唆された。また、アナアオサは海水中の塩濃度が約 20%減少してもグリセロールを蓄積することにより適応していることが考えられた。さらに様々な塩濃度で培養したアナアオサのグリセロール合成酵素であるグリセロール３フォスファターゼ酵素活性を測定した。干潟域は河川から淡水が流れてくるため塩濃度が減少することもある。そこで海水中の塩濃度を減少させてグリセロール３フォスファターゼ活性を測定した。その結果、海水の塩濃度の８０％で生育させたときに通常の海水より高い酵素活性を示した。この結果から、アナアオサは海水の塩濃度が約 20%減少してもグリセロールを蓄積することにより適応していることを示している。

また、その環境ストレス耐性について検討した。その結果、アオサは好塩性の海藻であり、下げ潮時の塩分が低くなった河口部では、その藻体のアミノ酸やアントシアニン含量等を調節してストレスに耐えている可能性を示すことができた。即ち、塩濃度によって細胞内の蓄積物も異なっていることがわかった（図 8）。

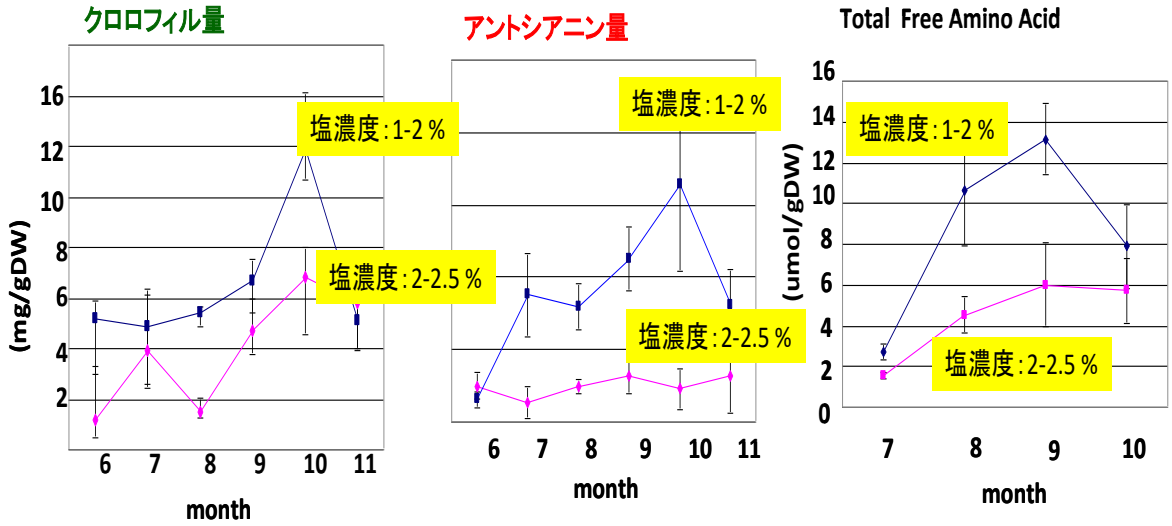


図 8　塩濃度に依存して変化しているアオサのクロロフィル、アントシアニン、アミノ酸量

(c) 実験用小型アマモ場の試み

また、アマモの生態を明らかにするひとつの手段として、実験用小型アマモ場（浮き藻場、図 9，10）を用いた生育実験を実施した。ジオファイバーを利用することにより，実験用小型アマモ場の土壌の流出を防ぐことが可能であることを確認した。さらに、アマモの生育も良く、

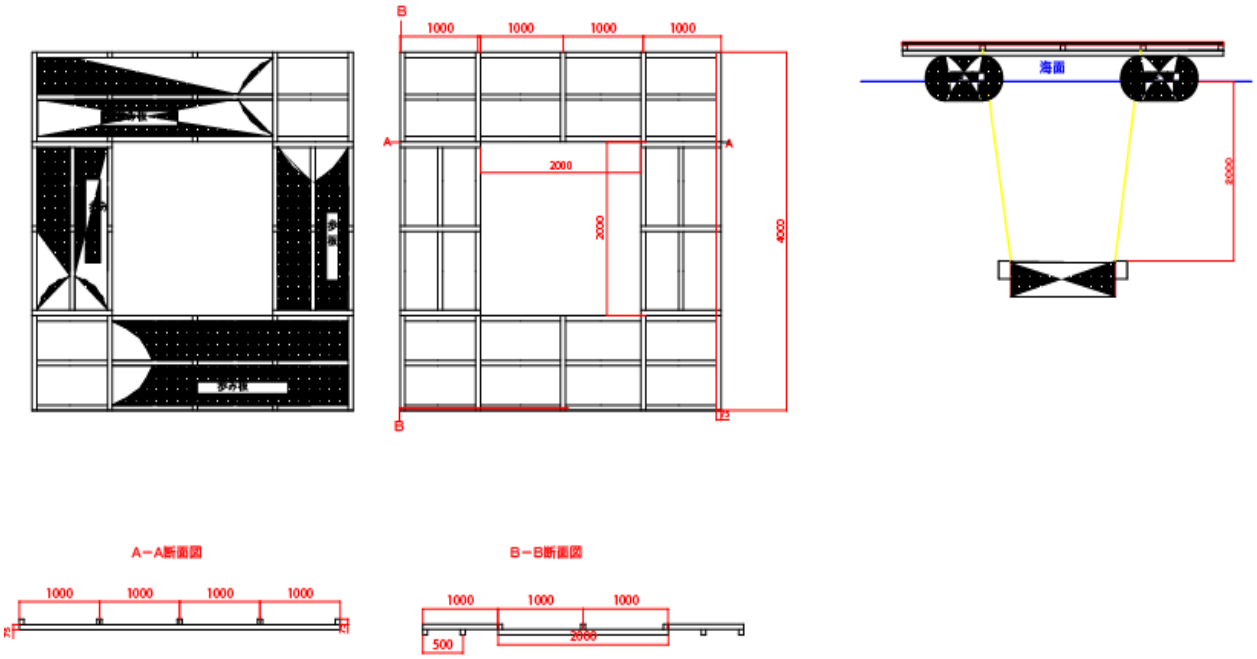
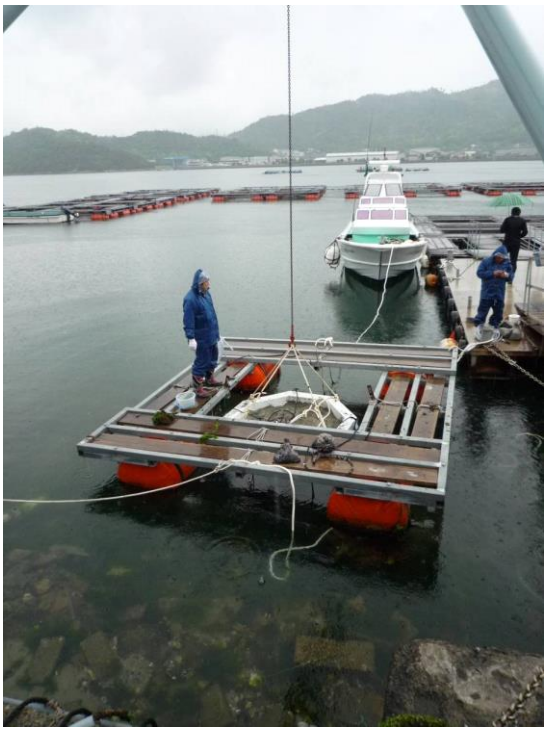


図 9　浮き藻場の概略図

1 年を通じて生育させることが可能となり、稚魚が集まっているのも観察できた（図 11)。今後この技術を用いて、様々なアマモの生態の研究を実施することが可能になった。



香川県水産試験場のご協力により、同試験場内に設置

図 10　浮き藻場の設置の様子

5月12日の状況

・アマモの流出も無く順調に定着している 。
・稚魚も集まってきている。

図 11　浮き藻場の経過観察

(3) 浅海域の生物生産環境の長期・短期的変動

〔概要〕

香川県水産試験場と共同で、ノリの色落ち現象を播磨灘の栄養塩の低下現象（栄養塩の異変）として捉え、最近の５、６年と過去 10 年間の栄養塩濃度の変化について考察した。また、瀬戸内海播磨灘南部における植物プランクトン群集の長期変動についても解析した。播磨灘南部における植物プランクトンの種組成は4月から7月にかけて渦鞭毛藻類が 1993 年以降減少していたのに対し、1 月から 3 月にかけて珪藻類の出現が増加する傾向にあった。調査期間を通して春季以降の硝酸態窒素濃度が減少しており、このことが渦鞭毛藻類の増殖を抑制していたものと推察された。

一方、河川からの窒素・リンの流入について検討した。その結果、河川水の一時的な出水時には、播磨灘の栄養塩分布に大きく影響を与えること、さらに、有機物の割合が河川水中の濃度、および海への供給ともに高いこともわかった。

さらに、瀬戸内海播磨灘の栄養塩分布におよぼす各河川水出水の影響を検討した。その結果、播磨灘への兵庫県側からの河川流量は東讃域に対して７倍以上であり、灘北部に注ぐ河川水の一時的な出水時には、播磨灘の栄養塩分布に大きく影響を与えることがわかった。

一方、近年の海水中の栄養塩濃度の低下のもとでの効率的なノリ養殖を目指して、水理模型実験と数値計算により適正なノリ網配置について検討した。

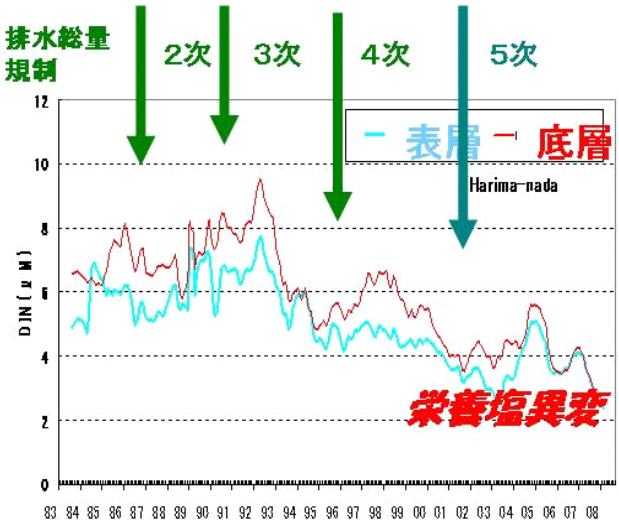
〔研究成果〕

(a) 植物プランクトンの種組成変化とその要因

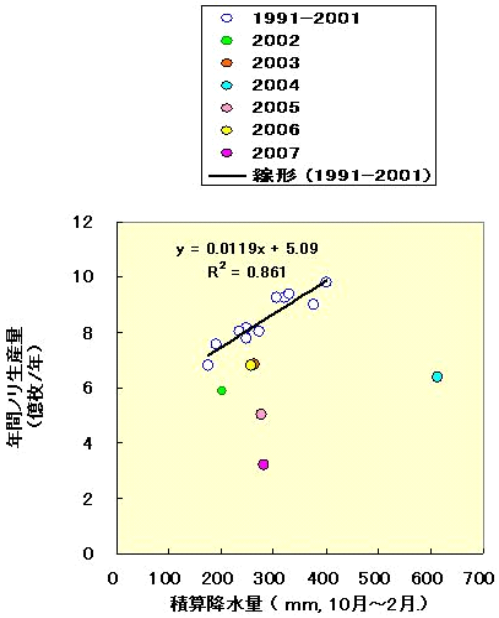
まず、播磨灘、特に北部海域の海水中の植物プランクトンの生物量の変化は、特に梅雨時期に陸域から供給される栄養源（窒素・リン・ケイ素）の負荷が主な要因であることを明らかにした。

次に、香川県水産試験場と共同で過去の経年的な栄養塩の変化について解析した。その結果、最近の５、６年間で明らかに栄養塩濃度は低下していた（図 12-(1)．栄養塩異変）。過去の栄養塩の減少の理由（図には示していないが、特に 1970 年代後半）は、基本的には瀬戸内法の排水総量規制による効果と考えられるが、近年の栄養塩の減少については不明である。養殖カキやノリの不作は、この栄養塩異変の象徴的な現象である。

一般に、降雨は陸上から河川を通して窒素やリンを沿岸海域へと運ぶので、ノリ漁期中の降水量とノリ収穫量は比例する。瀬戸内海で兵庫県に次いでノリの水揚げを誇る香川県（全国６位）を例に解析したところ、2002 年以前は両者に比例関係が認められたものの、2002 年以降、降水量に見合うだけのノリ収穫量が無いことが判明した（図 12-(2)，Tada *et al.*，2009）。即ち、単純な、『降雨 → 陸域からの栄養塩流入 → 海水中の栄養塩濃度増加 』という図式がここ数年では当てはまらなくなったことが明らかとなった。これは、『雨が降っても、もうノリは採れない』、つまり、明らかに『ノリ養殖のための窒素が不足している』ことを意味している。



12-(1). 播磨灘のDIN濃度変化(12ヶ月移動平均)
(香川県浅海定線データより。矢印は総量規制の実施年を示す)



12-(2). 降水量とノリ生産量

図 12　瀬戸内海播磨灘の栄養塩濃度変化(1)、および降水量とノリの生産量の関係(2)

さらに、瀬戸内海播磨灘南部における栄養塩濃度と植物プランクトン群集の長期変動について解析した。播磨灘南部における植物プランクトンの全細胞数の年平均値の変動には一定の傾向は認められず、珪藻類が優占していた。1987 年 4 月よりから 2008 年 3 月までの香川県水産試験場・赤潮研究所のデータを解析した結果、1987 年より 4 月から 7 月に出現の認められた渦鞭毛藻類が 1993 年以降減少したのに対し、1 月から 3 月にかけて珪藻類の出現が増加する傾向にあった。また、調査期間を通し、硝酸態窒素濃度が減少したのに対し、リン酸塩濃度およびケイ酸塩濃度はほぼ一定で推移していた。

そのため、播磨灘南部海域では、1994 年以降 N/P 比が低下し Si/N 比はほぼ一定であったことが冬季-春季における珪藻類の増殖に有利に働き、春季以降の硝酸態窒素濃度の低下が渦鞭毛藻類の増殖を抑制していたものと推察された。

特に、近年の栄養塩減少に伴って、出現する植物プランクトンの種が変化してきていることを明らかにできた。即ち、播磨灘の海水中の無機窒素（DIN）濃度が減少し、それに伴って、1990 年前半に度々認められた鞭毛藻類の高い細胞密度は見られなくなり、逆に珪藻類が高く推移していた（図 13)。また、冬季の珪藻類の組成に注目すると、1990 年代後半まで *Chaetoceros* 属や、*Skeletonema* 属および、*Eucampia* 属が優占種であったが、1990 年代後半以降には、*Eucampia* 属の優占率が高くなっていることがわかった（図 14)。

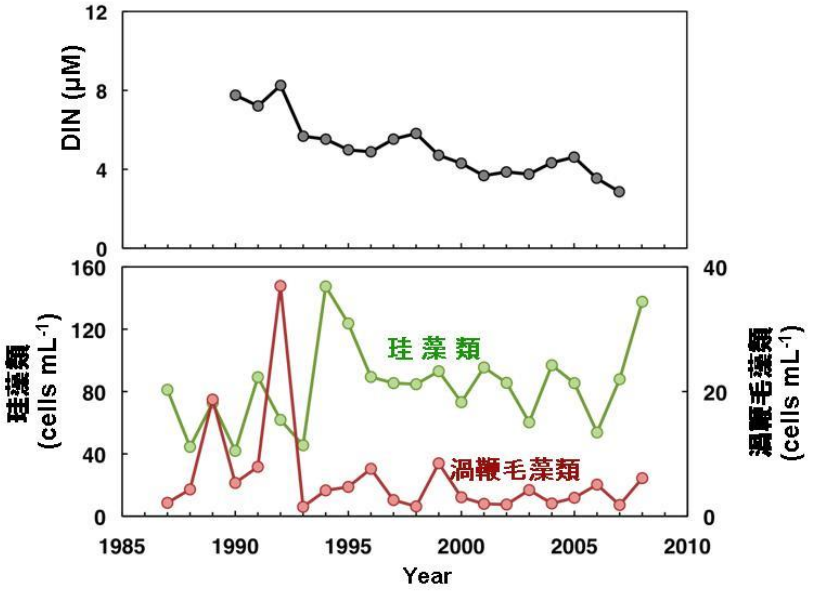


図 13 播磨灘南部における栄養塩濃度と植物プランクトン細胞数の経年変化

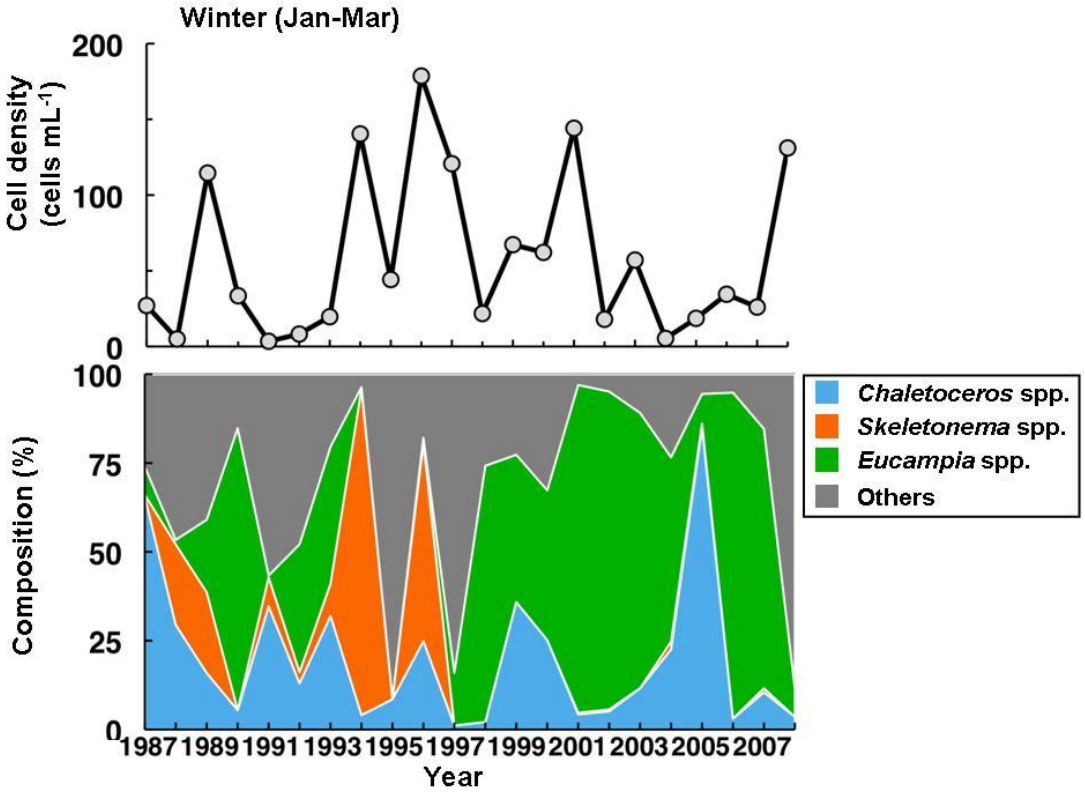


図 14 冬季の珪藻類の種組成の変化

(b) 河川からの窒素・リンの流入

河川水中の窒素やリン濃度について検討した。まず、高松市郊外の新川水系で調査を実施し、窒素、リンの栄養塩としての流出量を見当した。その結果、平常時の窒素・リンの流出量は極めて小さく、梅雨時期に河川流量が急激に増大し栄養塩類が大量に流出していることが明らかとなった（図 15)。

次に、有機態と無機態の割合を含めて、さらに詳しく見てみると、新川河口堰直上において、全窒素(TN)は年平均値で 2.37mg L^{-1}、全リン(TP)は 0.33mg L^{-1} と高い値を示した（図 16)。季節的な変動をみると TN は秋から冬の間と洪水時に高かった。TP には顕著な変動はみられなかった。窒素・リンの形態別の割合をみると、溶存無機態(DIN、PO_4^{3-}-P)の割合が、それぞれ、年平均で 37.9、9.9%と、日本における一般的な河川に比べて少ないことがわかった（図 17)。一方で、懸濁態有機窒素の割合は 34.7%と他の河川に比べ高い値を示した。窒素における差分の 27.4%は溶存態有機窒素等であると考えられる。新川河口堰直上ではクロロフィル a 濃度が最大値で 600 μg L^{-1} を超えることから考えて、藻類による有機物汚濁が著しい水域であるといえる。これは、沿岸海域への物質の供給に大きな影響を及ぼすことになる。

河口堰から海への河川水の年間総流出量は 2.45×10^7 トンであった。河川水の流出は降水時にみられ、平常時はほとんどみられなかった。まとまった降水があると流出量は大きくなり、台風が通過した 2007 年 7 月 14 日には年間流出量の 32%にあたる 7.9×10^6 トンの流出があった。これより、窒素・リンは降水時に海域へ供給され、平常時は河川水からは供給されていないことがわかる。

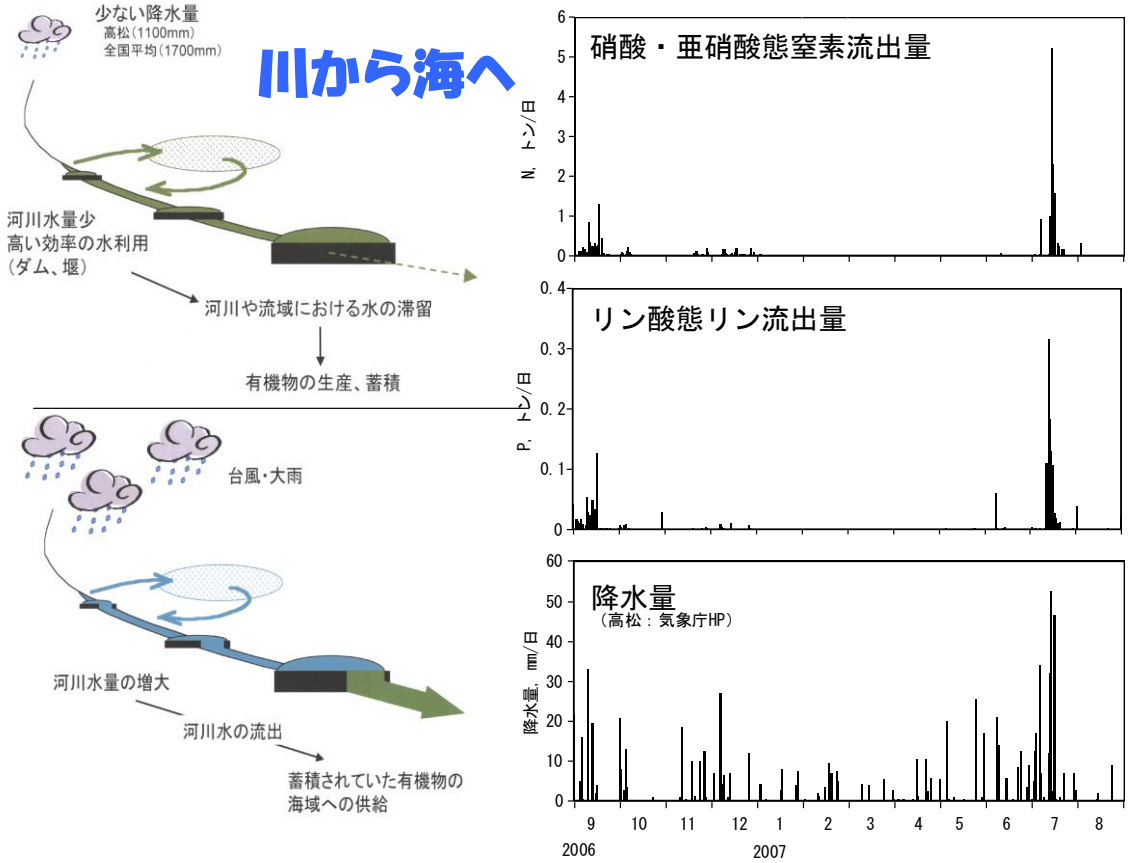


図 15　降水量と河川（香川県・新川）から海に流入する栄養塩量

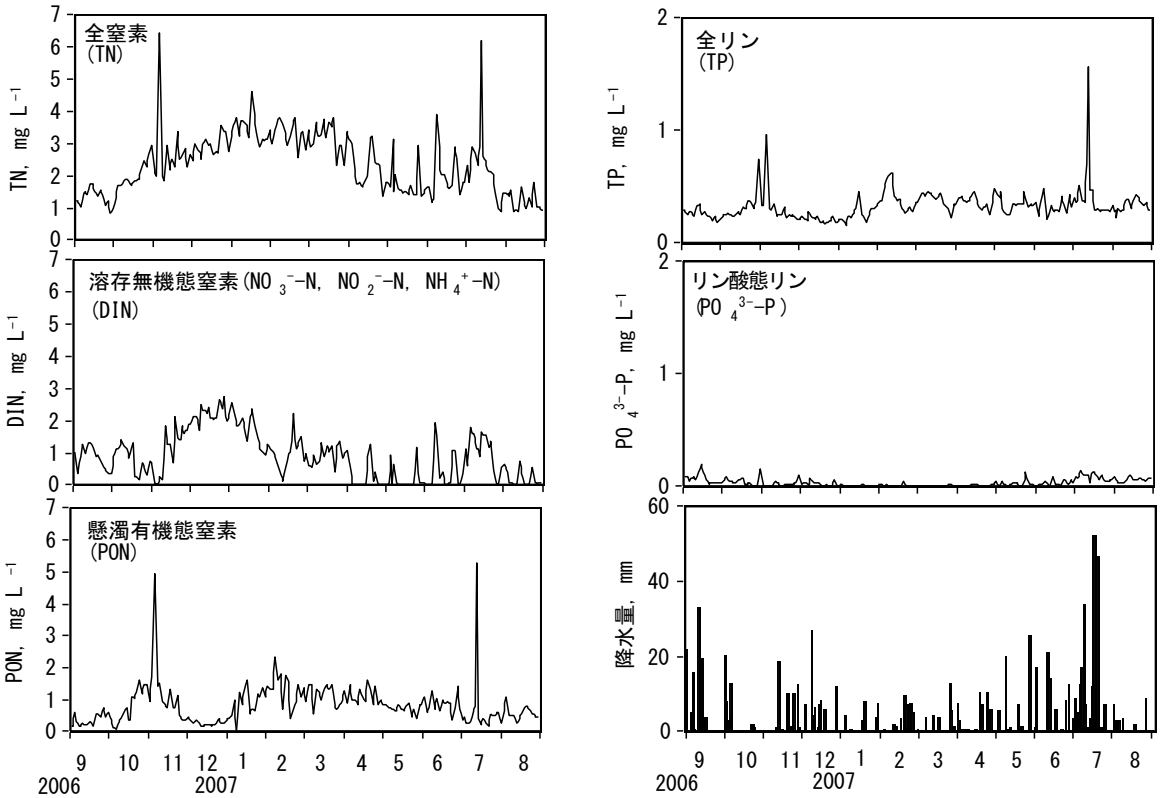


図 16　河口堰直上における窒素・リン濃度

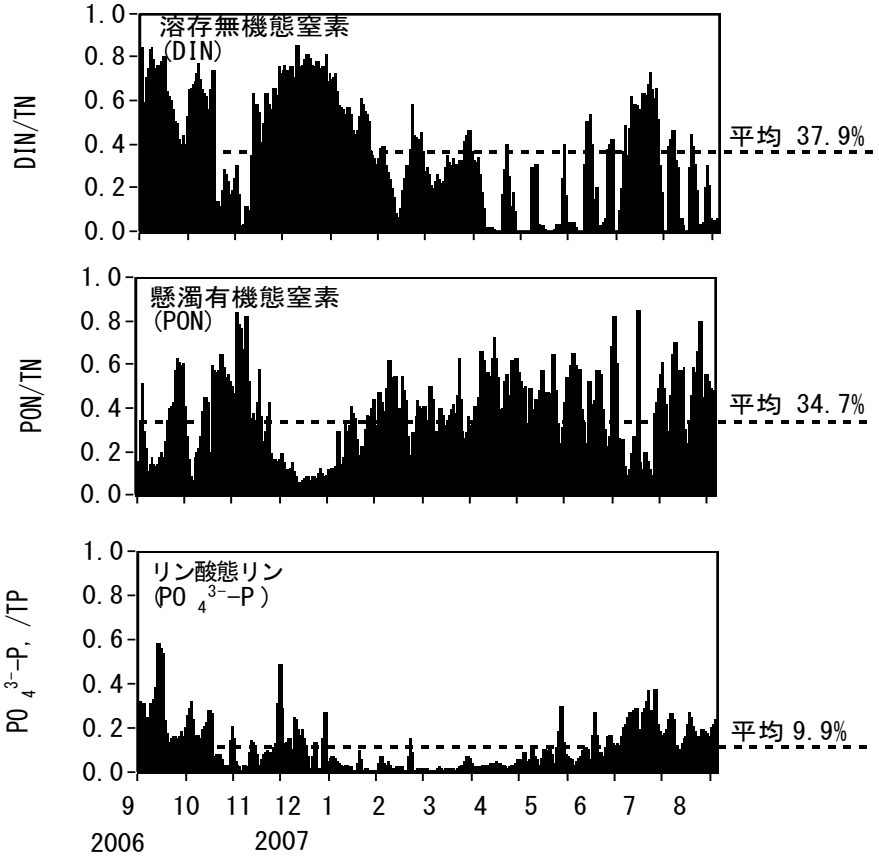
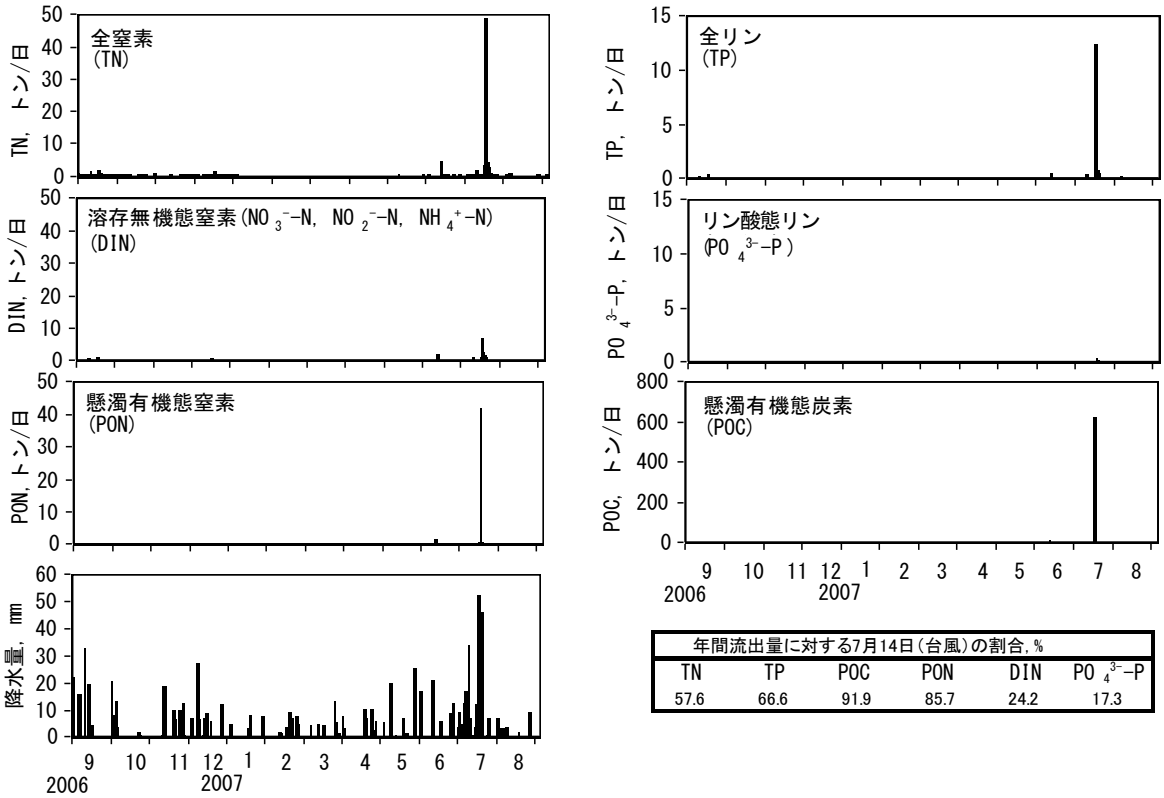


図 17　河口堰直上における全窒素・全リンに占める各種形態の窒素・リンの割合



年間流出量に対する7月14日(台風)の割合, %					
TN	TP	POC	PON	DIN	PO_4^{3-}-P
57.6	66.6	91.9	85.7	24.2	17.3

図 18　各種形態の炭素・窒素・リンの河口堰からの流出量

2007 年 7 月の台風時の全窒素・全リンの流出量はそれぞれ 49 トン、12 トンで年間の 58、67%が台風時に河川から海へ供給されていたことになる（図 18)。特にリンでその割合は高い。形態別にみると、懸濁態有機炭素の 92%、懸濁態有機窒素の 86%が台風時に供給されていた。これらは、河川水の流出割合よりも大きい。平常時に流域に溜まった物質が洪水によって洗い流され、海へと供給されると考えるのが妥当である。

本研究では、新川から沿岸海域へは窒素・リンの多くは有機物粒子として供給されていることがわかった。また、平常時には河川からの供給は無く、台風等のまとまった降水時にその大部分が供給されていることがわかった。河川からの物質を海域の藻類が利用するには、栄養塩の形態で供給される必要がある。新川のように有機物の形態で供給されると海域の藻類は直接利用できない。瀬戸内海沿岸域、特に四国の北域では降水量が少なく、同様のことが起こっていると推測される。瀬戸内海の生態系や近年の環境動態を理解するには、本研究で明らかになったような河川から瀬戸内海への物質供給の特性を知ることと、有機物として供給された窒素・リンの海域での挙動を明らかにする必要があると考えられる。

(b) 陸域から播磨灘海域への窒素・リンの供給量の見積もり

河川から海へ栄養塩類の流入量を定量的に明らかにするためには、海域ごとに、総ての河川流量データが必要となる。瀬戸内海東部に位置する播磨灘に注ぐ主要な河川は、本州側が圧倒的に多く、千種川、市川、加古川などで、播磨灘に流入する総河川流量のかなりの部分を占めている（図 19)。ところが、兵庫県側から播磨灘に注ぐ大きな一級河川の流量データは国土交通省などが持っているものの、香川県側から注ぐ２級河川では観測データが存在しない。そこで、水文流出過程の空間分布を考慮した分布型水文流出モデルを用いて東讃域の２級河川の河川流量を推定

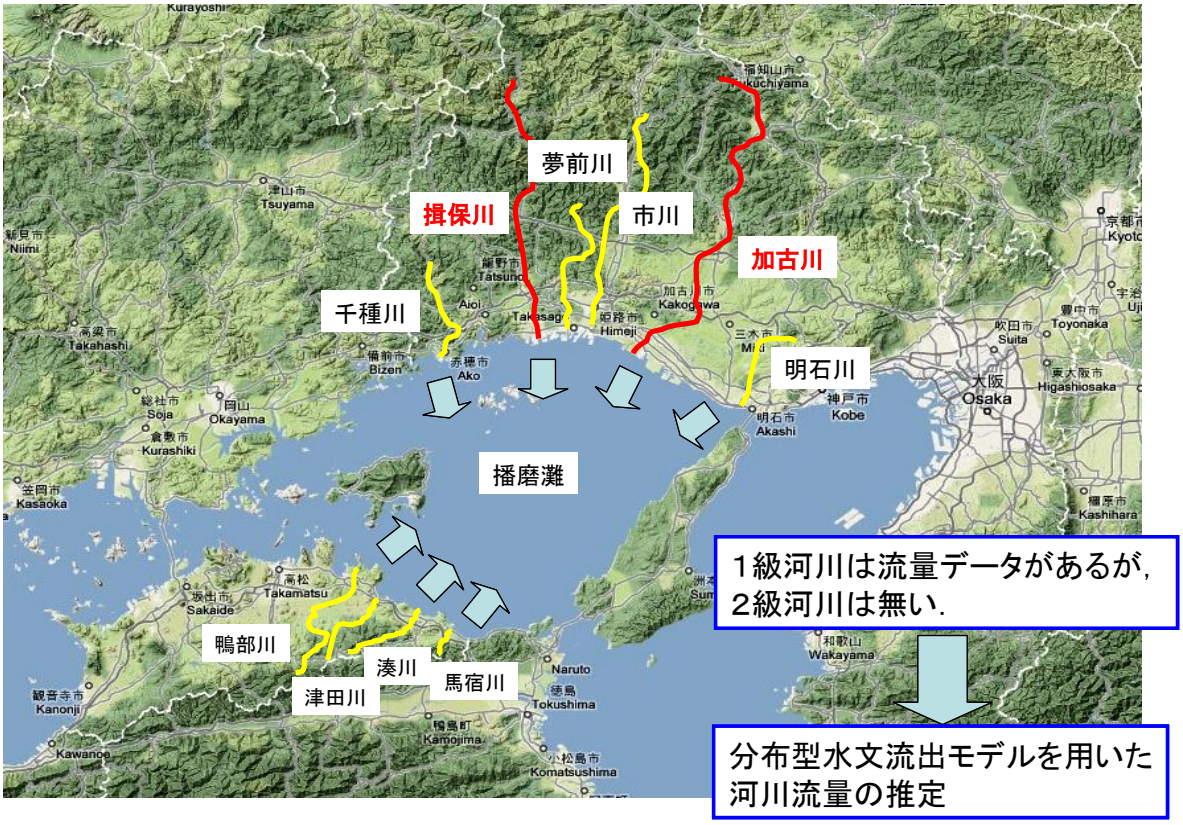


図 19　播磨灘を囲む河川流域

した。その結果、兵庫県側からの河川流入量が東讃域側と比べて約 14 倍多いことが明らかとなった。さらに、分布型水文流出モデルに、香川用水からの流量も加える等してモデルの精度をあげ、瀬戸内海播磨灘の栄養塩分布におよぼす河川水出水の影響を検討した。その結果、①播磨灘への兵庫県側からの河川流量は東讃域に対して７倍以上あること、②河川水の一時的な出水時には、播磨灘の栄養塩分布に大きく影響を与えること、③東讃域における洪水年（2004 年）の河川流量は渇水年（2002 年）の約３倍であったが、海域の栄養塩濃度差は小さいことがわかった。

渇水年であった 2002 年（高松市: 766 ㎜）と、洪水年であった 2004 年（高松市: 1610 ㎜）の両年のデータを用いて、兵庫県側と香川県側からの播磨灘への河川流量を見積もった。その結果、洪水年（2004 年）の河川流量は渇水年（2002 年）の約３倍であったが、兵庫県側からの河川流量は香川県側からのそれに対してそれぞれの年で、7.5 倍および 7.4 倍以上であった。一方、両年における海域の栄養塩濃度差は小さいことがわかった。

(c) 低栄養塩濃度下におけるノリ養殖への提案

20 年度、21 年度の両年は、冬季の香川県沿岸の栄養塩濃度が著しく低く、ノリの色落ち被害も特に大きかった。地元からの要望もあり、栄養塩散布（施肥）を行なう場合の適正なノリ網配置について検討するため、香川県直島地区で設置されているノリ網配置間隔をヒアリングし、ノリ養殖業者の方々の立会いのもとに、香川大学工学部において水理模型実験を行った（図 20）。検討の結果、既存のノリ網施設の構造および配置方法を考慮して、現在採用しているノリ網間隔を潮流の主流方向に対して垂直な方向に２倍程度広げることにより、ノリ網施設内に流入した栄養塩類は、より広い範囲でノリ網施設に供給されることが示唆された（図 21）。

今回は、水理実験結果を実海域におけるノリ網配置に適用した場合の効果の検証および数値モデルによるノリ網内流動解析に伴う栄養塩粒子の分布を計算するためのモデル（図 21 参照）を構築できた。今後は、このモデルを用いて施肥の効果に関する定量的な評価を行なうことが可能である。

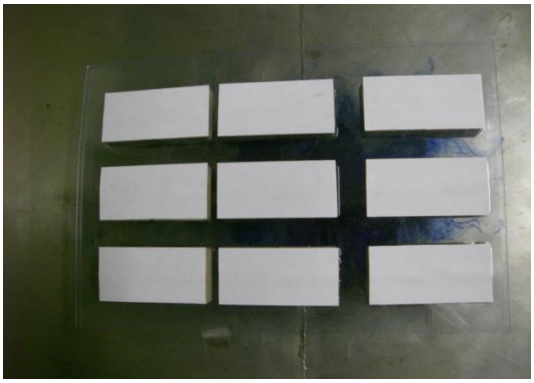


図 20　ノリ網模型を用いた水理実験状況

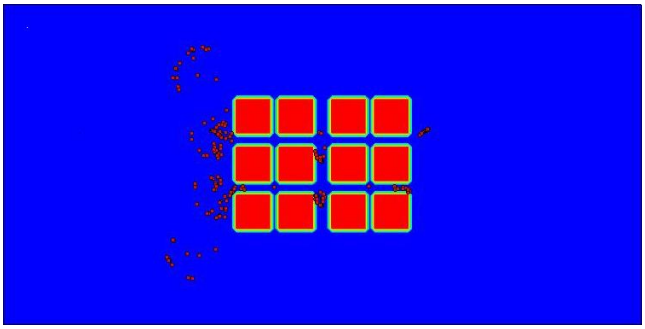


図 21　ノリ網内栄養塩粒子分布の計算結果

(4) 水産養殖場の環境保全

〔概要〕

香川県は魚類養殖発祥の地であり、養殖業が盛んである。魚類養殖は、狭い範囲に高密度で魚を飼い、且つ、餌をまくので（投餌）、水産養殖場が富栄養状態に陥る恐れがある。香川県内のハマチ養殖場では、毎年 2 月までに養殖が終了し、4 月から次年度の養殖が始まるまでの間は養殖が行われない。この点は養殖ハマチを越冬（2 年物のハマチ）させる隣県の愛媛県の養殖とは大きく異なっている。香川県では、この養殖を行わない間に養殖生簀が撤去されるので、その間に海底耕うんを実施することが奨励されている。そこで、ハマチ養殖場の底泥を年間を通して調べ、その有機物蓄積過程を明らかにするとともに、海底の耕うんの効果について検討した。その結果、養殖場の表層堆積物中の有機物は堆積物内での分解が進んでおり、見かけ上、有機態の炭素や窒素含量の顕著な増加は認められないが、リン含量には増加が認められた。一方、海底耕うんの効果の実証については、その効果を明確に数値で示すことはできず、今後の課題である。

また、ハマチ養殖場で、投餌の際に魚が食べ残した餌（残餌）がどのように拡散しつつ付近の海底に到達するのかについて調べた。その結果、残餌は、投餌の 1 時間後にはほぼ生簀の真下に沈降していることを明らかにできた。

〔研究成果〕

(a) 魚類養殖場における底泥への有機物の堆積

魚類養殖場の海底泥を周年にわたって採取し、その有機物含量について調査した。その結果、表層堆積物中の有機物は堆積物内での分解が進んでおり、見かけ上、有機態の炭素や窒素含量の顕著な増加は認められないが、リン含量には増加が認められた（図 22）。このことは、餌に含まれる小魚の骨のような成分、即ち、分解して容易に無機態になり海水中に回帰しないリン等が、堆積物中に蓄積されていることを示している。さらに、ハマチ養殖場において、海底耕う

んの効果について検討した。海底の耕うんの効果については、明らかにできなかった。今後、その効果を科学的に証明するためには、自然環境におけるさまざまな要因を除去して考えるために、室内実験を行う等して、さらに研究が必要である。

(b) 魚類養殖場における残餌の行方

ハマチ養殖場における富栄養化防止と環境管理のための基礎的データを蓄積する目的で、ハマチ養殖の投餌の際の残餌の行方（残餌の沈降と拡散）について検討した。本県の引田のハマチ養殖場をモデル海域として、ハマチの餌の沈降速度の実測と数値モデル実験を行った。引田養殖場で実際に用いられている餌の沈降速度および引田養殖場付近の潮流データを用いて、数値モデル実験を行った。その結果、残餌は、投餌の１時間後には、ほぼ生簀の真下に沈降していることを明らかにできた。図 23 は、投餌後１時間後の水平方向および、鉛直方向の残餌の密度分布を図示したものである。引田養殖場および近隣の養殖場で実際に用いられている餌の沈降速度は、0～19.2 cm/s であるが、沈降速度が 8.0 cm/s 以上であれば、投餌終了後に海水中に残っている残餌の量はほぼ 10%以下で、生簀外で水柱内に残っている残餌の量も 6.0%と極わずかであった。尚、この研究成果は日本水産学会誌(75, 666-673 (2009))に論文として発表した。

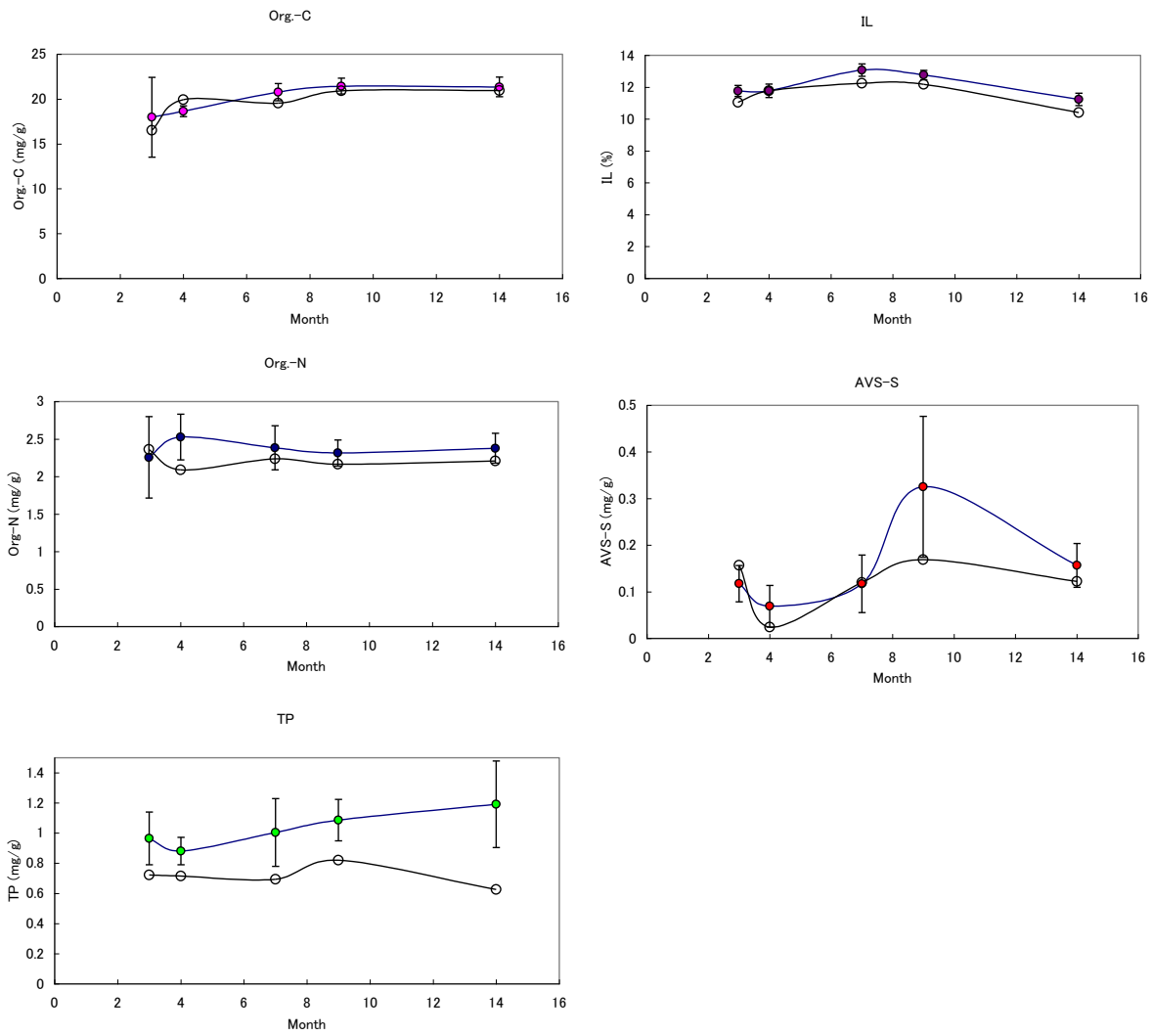


図 22　引田魚類養殖漁場の表層堆積物中の有機態炭素（Org.-C)、有機態窒素（Org.-N)、全リン（TP)、強熱減量（IL)、硫化水素量（AVS-S）.
〇は対照区（非養殖区）で、色のついた●が養殖区.

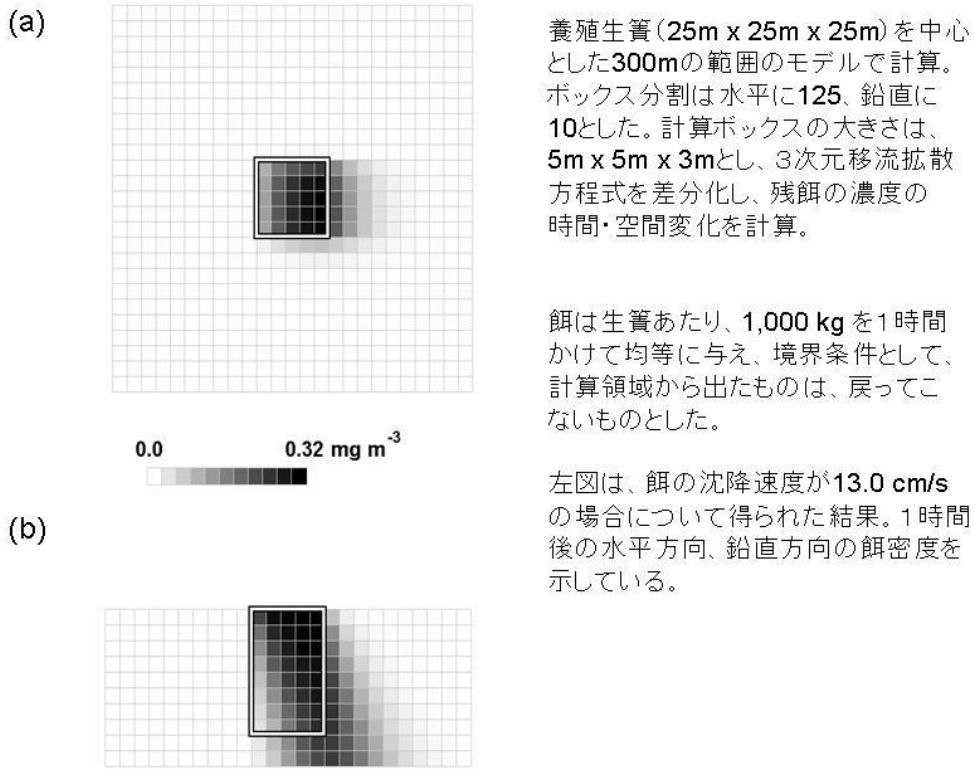


図 23 投餌後 1 時間後の残餌の水平方向（a）、鉛直方向（b）の密度分布

(5) 浅海域の環境保全

〔概要〕

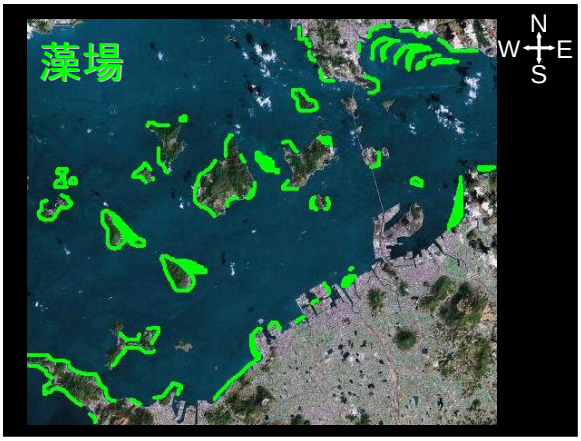
近年、沿岸海域で藻場の衰退が問題となっている。一方で、浅海域は沿岸の開発事業の対象となり、今後も、開発工事は進められてゆく。そのため、現在は藻場の環境に配慮した開発工事が求められている。我々は、過去、「チーム瀬戸内海」が海砂利採問題の研究であげた研究成果を応用し、浚渫工事等により生じる濁水の広がりとアマモ場への影響について数値シミュレーション法を用いて検討した。検討の結果、西風の強さが海砂採取の際に排出される砂粒子の運搬に大きく影響していることがわかった。

また、「チーム瀬戸内海」が研究フィールドとしてきた地元の高松市郊外の新川・春日川河口干潟が県内で生物量が最も豊富であることがわかってきた。そこで、今後も、この干潟を今の状態で持続させ、環境学習の場として、また、市民の憩いの場として存続し続けることを目指してその保全利用の方法を検討した。実際には、里海の観点から、環境共同利用権の概念を用いて、干潟保全利用区の制定に向けて、法的問題点を検討し、既存の制度の適用、又は、新たな法制度の構築を試みた。また、このことについて、香川県の関係部署と協議した。

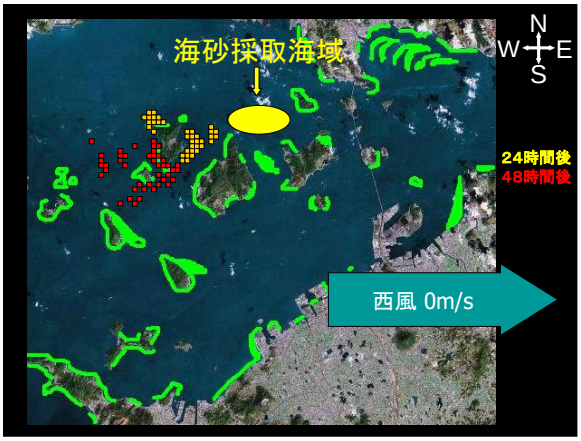
〔研究成果〕

(a) 海砂採取に伴い排出される微粒子の行方

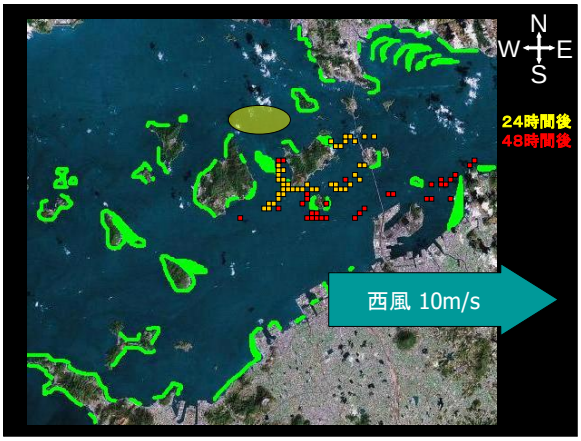
海砂を採取する際に採取船から排出される砂粒子によって海水の透明度が低下し、海藻の光合成が阻害されることが懸念されている。瀬戸内海において、ほとんどの県で海砂の採取は禁止されたが、航路浚渫は行われ、浚渫船からは砂粒子が排出され続けている。また、藻場再生事業において、盛砂を行なう場合についても同様に、波の洗掘作用や潮流によって砂粒子の移動・拡散が予想され、周辺の藻場への影響や盛砂の安定性を考慮する必要がある。本研究では、３次元マルチレベルモデルを用いた数値シミュレーションにより、砂粒子の移動機構の解明および砂粒子の藻場への影響について検討した。本研究課題のモデル海域に選んだ備讃瀬戸海域は、冬季の西風が非常に強い海域である。検討の結果、西風の強さが海砂採取の際に排出される砂粒子の運搬に大きく影響していることがわかった。図 24 には、西風が 0m/s および西風が 10m/s 時の砂粒子の行方と、西風が 0～10 m/s の条件下での砂粒子の付近の藻場への到達率を示した。砂粒子の藻場への到達率は、西風 6m/s の条件下で最も高く、48 時間後の砂粒子到達率は 50%を越えた。この成果は、今後の埋め立てや浚渫工事等の開発工事のアセスメントに役立つ成果だと考えている。



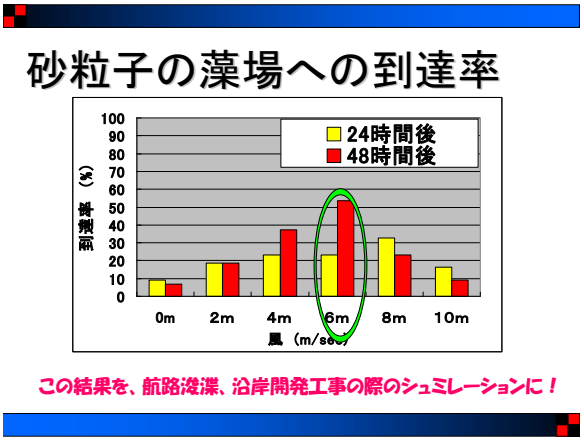
図中緑色の部分が藻場



西風 0m/s 時の砂粒子の行方



西風 10m/s 時の砂粒子の行方



砂粒子の藻場への到達率

図 24 海砂利採取現場から藻場への砂粒子の到達のシュミレーション.
３次元マルチレベルモデルを用い、西風を変化させて計算.

(b) 新川・春日川河口干潟の保全利用

高松市郊外の新川・春日川河口干潟は、県内の干潟の中でも、面積が広く、河口干潟としては最大であり、しかも、高松市の中心部からもアクセスが良く、市民にとって非常に身近な場所である。本研究の結果などから、本干潟は現在、適度に富栄養化され、生物量も豊富になっていることも分かってきた。そこで、本干潟を環境学習の場として、また、市民の憩いの場として存続させることを目指し、干潟保全利用区の制定に向けて、香川大学と香川県（政策課・環境政策課・みどり保全課・水産課・河川砂防課・港湾課・環境保険研究センター・環境管理課・水産試験場・赤潮研究所）及び高松市（高松市環境指導課）と協議した。

まず、はじめに、干潟特別保護区の制定を提案するために、そのモデルとなると考えられる東京都の海上公園（大井ふ頭中央公園や葛西海浜公園）の事例について調査した。東京都の独自の条例を参考に、本プロジェクトで取り扱う新川・春日川河口干潟の保護等のための法整備について検討した。その結果、東京都の海上公園（大井ふ頭中央公園や葛西海浜公園）の事例は、東京都が東京湾の埋立事業を行うことに伴って地元住民に説明会を開き、失われる自然海浜の代替地として、造成されたものであることがわかった。即ち、埋め立て工事に伴って干潟の保全区域ができたものであり、膨大な工事費と調査費を費やして実現したものである。しかし、今回、提案する新川･春日川干潟保全利用地区の制度化は､もともとあった自然を生かすためのものであり、実現すれば､全国初となる。また､新川・春日川河口干潟の北側は海､西側は工場地帯（F 地区)､東側は住宅地であり､景観維持も含めた都市計画のモデル地区としては最適であると考えられた。

次に、実際に保全利用区の制定に向けて、香川県河川砂防課、港湾課、みどり保全課、水産課および環境管理課と会合を持ち、干潟特別保護区の制定について意見交換した。その結果､『住民のコンセンサスは得られるか？』という問題について、対象となる干潟を利用している団体等についての把握が必要との指摘があった。また､『県の関係部署は賛成、協力できるか？』という問題については、河川管理者の立場からは、堆積した土砂の除去が必要なこともあるので、それが妨げられない内容にする必要があるとの意見が出された。

さらに検討の結果、干潟保全利用区の制定に向けて、以下の二つの可能性を検討した。

A. 現存の制度の活用

B. 保全利用地区の新たな制度化

上記、二つの可能性を検討した結果､B の戦略が有効であると考えられた。A の現行制度の活用としては､「自然環境保全地区｣､「鳥獣保護区」条例を活用することが考えられる。しかし、これらの条例は規制を前提としており、人間の手を入れないようにする方向にあると判断された。これは里海の概念｢人の手を加えることによって生物生産性と生物多様性を高く維持する沿岸海域｣にそぐわない。従って､A の現行制度の活用の可能性もさぐりつつ､B の保全利用地区の新たな制度化を目指すべきであると考えられた。具体的には、干潟周辺の地区を公園とし、その中で、利用、保全すべき区域のゾーニングを行うべきであるという考えに達した。

第３章　おわりに

前述のように、瀬戸内海は高度経済成長期には著しく富栄養化が進行し、一時は、『死の海』と言われるまでにその環境は悪化していた。その後、水質改善の努力が精力的に続けられ（瀬戸内法の施行など）、瀬戸内海の水質はかなり改善されたと言われている。しかし、その一方では、イワシ、アサリの不漁、ノリの色落ちなどの問題が起きている。図 25 は、環境省（当時の環境庁）が出した図を著者の研究室で一部改変したものである。高度経済成長期以前の瀬戸内海は水質も生物量も良好だったが、高度経済成長期以降は工場排水などで富栄養化が進み、その環境は悪化し、その水質と生物量は著しく低下した。そこで、水質と生物量を高度経済成長期以前の状態に戻すために、瀬戸内法が施行された。しかし、約 35 年が経過した今、その現状は、水質は良くなったものの、生物量は高度経済成長期以前に戻るどころか、さらに悪化してしまった。水質改善を図れば､魚の種類も量も増えるはずだったのが､何故こんなことになってしまったのだろうか？この理由としては、干潟・藻場が埋め立てにより消失したこと、および、海岸線が護岸工事等によって変化したことによると考えられる。即ち、干潟・藻場といった浅場は、海のゆりかご（魚の産卵場、幼稚魚の育成場）として、あるいは、生物による自然浄化の場として重要である。従って、いくら水質が良くなっても、魚が卵を産みつける場所や、魚が幼稚漁期を過ごす場がなくなってしまっては、魚の種類も量も増えることはないのである。ところが、それは定量的な話ではなく、図 25 も概念的な図である。水質が改善しても生物量や生物多様性が戻らない理由とは、まさしく、浅い海の生物機能が低下、あるいは奪われてしまったからだと考えている。さらに、それ以前の問題として、その重要な浅い海がどのような場でどのような役割をになっている場所であるのかが、きちんと把握されていない。本プロジェクト研究では、浅海域がどのような場か？（浅い海の機能）、特に、そこに生息する生物機能がどのようなものかを示すことができたと考えている。

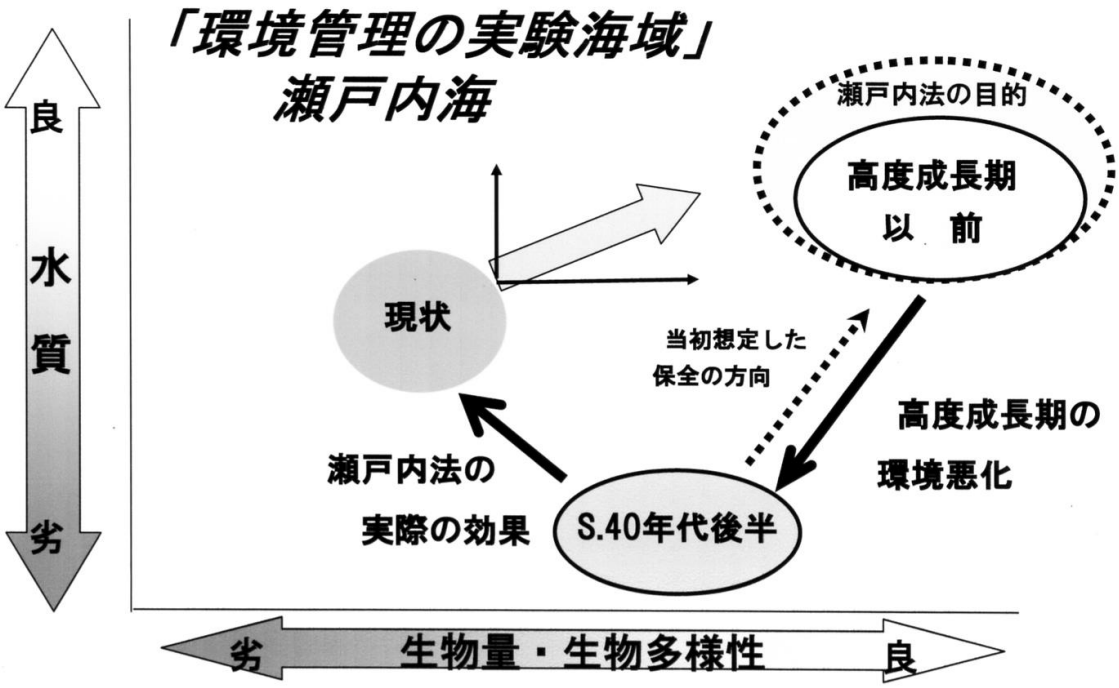


図 25　新たな環境保全・創造施策のイメージ（環境省の図を改変）

本研究では、前述のように、五つの小課題について研究を実施した。各小課題で実施した研究内容と得られた成果を、全体としてひとつの図にまとめると、以下の図のようになる（図 26）。本プロジェクトで得られた成果が、上の図 25 に示された『何故、水質は改善されたのに・・・・』の問いの答えであると考えている。本プロジェクトの 2 年間という限られた時間の中で、そのひとつひとつの成果を十分にまとめられていない部分、あるいは、ひとつひとつの成果の意義を代表者自身が把握しきれていない部分があるかもしれない。今後、研究メンバー個人の努力で、それらの成果を学術論文の形で公表できるように努力を続けて欲しいと考えている。

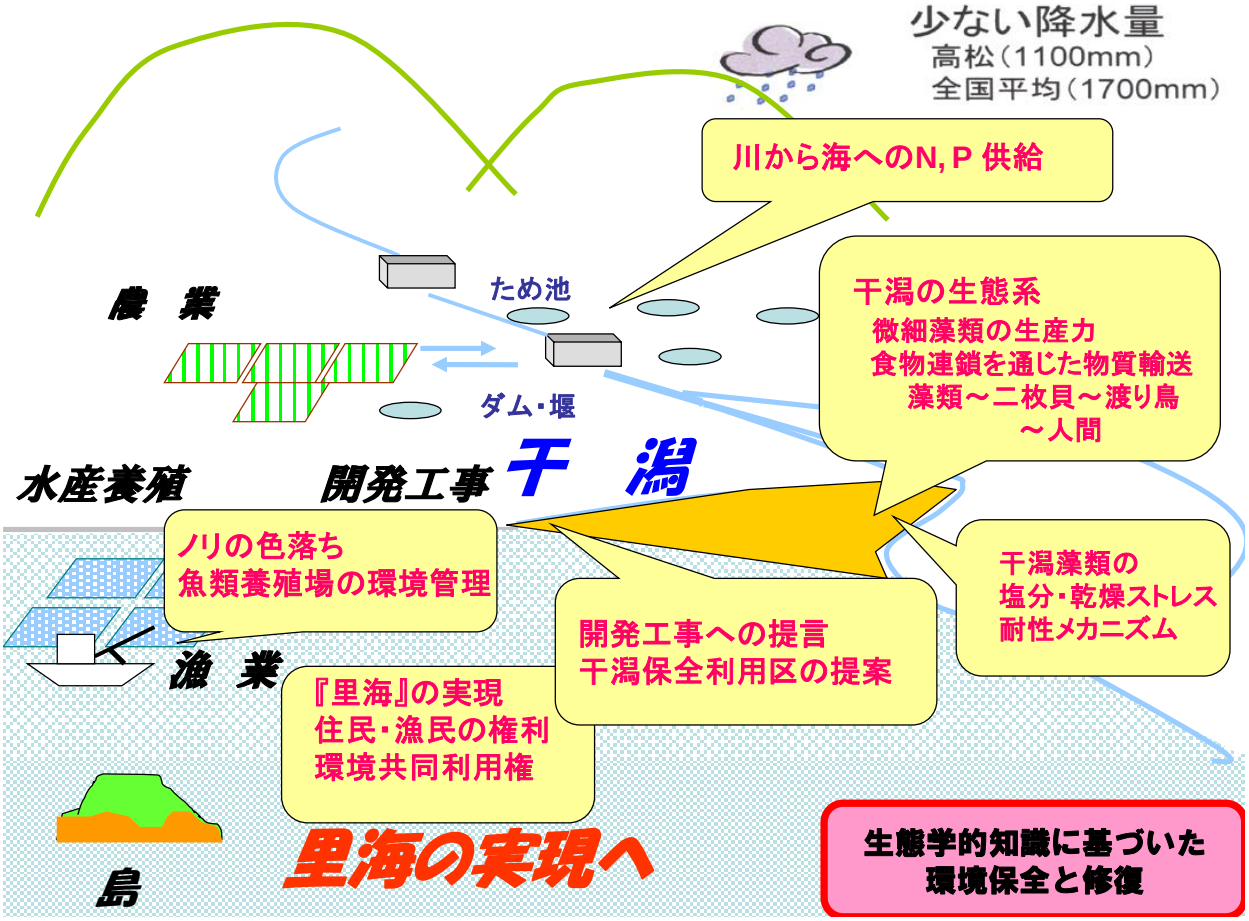


図 26　本プロジェクト研究の取組み内容

今後さらに研究が必要な項目は、干潟の自然浄化機能と、河口干潟が周辺海域への栄養塩供給に果たす役割の把握、海域の栄養塩環境の変化（栄養塩異変）とその原因の究明である。これらを念頭において、今後、瀬戸内海における河川からの栄養塩負荷量の把握、および総合的な栄養塩管理と適切な栄養塩農度レベルの実現を目指すべきであると考えている。浅海域では必ず開発行為が行われている。現在は、浅海域の生態系をよく理解した上で、開発行為に伴う海域環境への影響を最小限におさえ、さらに、その環境を良好に保つ方法を模索することが求められている。従って、浅海域の環境保全とは、自然のままで人の手を加えないという事では無く、「人の手を加えることによって生物生産性と生物多様性を高く維持する沿岸海域」、即ち、「里海」を守ることと定義できよう。そして、この「里海」を守り、育てるためにさらに継続して学際的研究を実施してゆくことを考えている。

本プロジェクト研究に関連した著書・学術論文等

著 書

多田邦尚：8.2 海砂採取時の濁水の挙動.：瀬戸内海の底質 (柳 哲雄編), 恒星社厚生閣 (2008).

Tada, K. : 2.3 Changes of the water and sediment quality: Environmental Conservation of the Seto InlandSea, International EMECS Center, 31-42 (2008).

Tada, K. : 3. Measures for conservation of the environment of the Seto Inland Sea: Tada, K. : Conservation of the Seto Inland Sea, International EMECS Center, 59-75 (2008)

学術論文

一見和彦・山下裕明・澤山稔・多田邦尚・門谷茂：新川・春日川河口干潟域（瀬戸内海播磨灘）に生息する底生微細藻類の増殖ポテンシャル. 日本プランクトン学会報, 55, 1-8 (2008).

Ichimi, K, K. Tada, and S. Montani: Simple estimation of penetration rate of light in intertidal sediments. Journal of Oceanography, 64, 399-404 (2008).

Ono, A, K. Tada and K. Ichimi: Chemical composition of *Coscinodiscus wailesii* and the implication for nutrient ratios in a coastal water, Seto Inland Sea, Japan. Marine Pollution Bulletin, 57, 94 - 102 (2008).

Loassachan, N. and Tada, K.: Effect of Solid to Solution Ratio on Biogenic Silica Determination in Coastal Sediments, Journal of Oceanography, 64, 657—662 (2008).

Tada, K, Y. Suenaga, S. Yoshimatsu, S. Matsuoka, T.Yamada, K. Ichimi and M. Fujiwara: Bleaching of Nori (Porphyra) and Characteristics of Water Quality in Eastern Seto Inland Sea, Proceedings of 5th World Fisheries Congress (CD-ROM), October, 2008 (2009).

Ohta, H., T. Ueda, Y. Suenaga, T. Tamura, K. Ichimi and K. Tada: Movement of Sand Particles from Sand Mining Area to Plant Bed, PACON International, Recent Advances in Marine Science and Technology 2008 (2009).

小野哲・多田邦尚・一見和彦：大型珪藻 *Coscinodiscus wailesii* の沈降に伴う生元素の鉛直輸送と沿岸海域の栄養塩環境への影響, 沿岸海洋研究, 46, 153 - 160 (2009)

Ohta, H., T. Ueda, Y. Suenaga, T. Tamura, K. Ichimi and K. Tada: Movement of Sand Particles from Sand Mining Area to Plant Bed, PACON International, Recent Advances in Marine Science and Technology 2008, pp.1-8, 2009

Miyagawa, M., M. Tochino, M. Aminaka, M. Fujiwara, Y. Suenaga and H. Kakegawa: Research on the Safer Shelter for Released Fish Juveniles, PACON International, Recent Advances in Marine Science and Technology 2008,pp.8-14, (2009).

小野哲・多田邦尚・一見和彦 ：大型珪藻 *Coscinodiscus wailesii* の沈降に伴う生元素の鉛直輸送と沿岸海域の栄養塩環境への影響, 沿岸海洋研究, 46, 153-160 (2009).

Loassachan, N., Ichimi, K. and Tada, K.：Evidence of Microphytobenthic Roles on Coastal Shallow Water of the Seto Inland Sea, Japan, Journal of Oceanography, 65, 361-372 (2009).

多田邦尚・門谷 茂・Veeraporn Suksomjit・広瀬敏一・一見和彦 ： ハマチ（*Seriola quinqueradiata*）養殖場における沈降粒子束. 日本水産学会誌, 75, 383-389 (2009) .

山田達夫・橋本俊也・末永慶寛・一見和彦・多田邦尚：　魚類（ハマチ）養殖場における残餌の沈降と拡散.　　日本水産学会誌, 75, 666 - 673 （2009）.

多田邦尚・一見和彦：浅海域海底の微細藻類の活性と底泥からの栄養塩の溶出, 沿岸海洋研究,, 47,29 - 37 (2009).

Nishikawa, T., Hori, Y., Nagai, S., Miyahara, K., Nakamura, Y., Harada, K., Tanda, 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)

Suksomjit, M., Nagao, S., Ichimi, K., Yamada, Y., and Tada, K.：Variation of Dissolved Organic Matter and Fluorescence Characteristics Before, During and After Phytoplankton Bloom Journal of Oceanography, 65, 835 -846 (2009)

Suksomjit, M., Tada, K., Ichimi, K., and Montani, S.：High tolerance of phytoplankton for extremely high ammonium concentrations in the eutrophic coastal water of Dokai Bay (Japan), La mer, 47, 75 -88 (2009).

Suksomjit, M., Ichimi, K., Hamada, K., Yamada, Y., Tada, K. and Harrison, P.J. ：Ammonium accelerates the growth rate of Skeletonema spp. In the phytoplankton assemblage in a heavily eutrophic embayment, Dokai Bay, Japan.：La mer, 47, 89-101 (2009)

Tada, K., Suksomjit, M., Ichimi, K., Funaki, Y., Montani, S. Yamada, M., and Harrison, P.J.：Diatoms grow faster using ammonium in rapidly flushed eutrophic Dokai Bay, Japan, Journal of Oceanography, 65, 885 -891 (2009)

報告書等

多田邦尚:特集にあたって. 特集 1 瀬戸内海の浅海を考える～浅海その生物生産環境とその保全・防災～ 学術の動向 2008 年 6 月号 p8-9

多田邦尚：浅海域の生物生産環境. 特集 1 瀬戸内海の浅海を考える～浅海その生物生産環境とその保全・防災～ 学術の動向 2008 年 6 月号 p24-29

末永慶寛：浅海における物質の輸送機構解明と防災への活用～特集 1 瀬戸内海の浅海を考える～浅海その生物生産環境とその保全・防災～ 学術の動向 2008 年 6 月号 p30-37

その他

香川大学全学共通科目・高学年向け主題科目「瀬戸内海の浅海環境」講義テキスト

瀬戸内海の浅海環境　香川大学教育開発センター　美功社