

干潟を含めた浅海域の生態系研究

東部瀬戸内海の栄養塩異変の原因究明と栄養塩管理及び対策

チーム瀬戸内海（代表：多田邦尚）

本研究では、近年の瀬戸内海東部海域での栄養塩濃度減少（栄養塩異変）の原因究明と、今後の栄養塩濃度管理及び対策に向けた検討を行った。播磨灘および備讃瀬戸を対象に、流入河川、海水および海底泥の調査を実施した。また、栄養塩循環に大きな役割を果たすと考えられる干潟、藻場についても調査した。さらに、健全な栄養塩循環実現のために不可欠である干潟の保全・利用についても検討した。その一方で、栄養塩不足に悩むノリ養殖に対しノリの色落ち対策について検討した。

尚、本研究は、学長戦略調整費によるプロジェクト研究費「東部瀬戸内海の栄養塩異変の原因究明と栄養塩管理及び対策」に採択され実施したものであるが、同時に平成 20 年度文部科学省・連携融合事業（代表者：多田邦尚・3 年間）、平成 20 年度 JST「海域環境再生（里海創生）社会システムの構築」（代表者：柳哲雄（九州大学）・分担者：多田邦尚・4 年間）、平成 23 年度科学研究費・基盤研究(B)（代表者：多田邦尚・3 年間）、および平成 23 年度環境研究総合推進費・革新型研究開発領域課題（代表者：石塚正秀・2 年間）にも採択され、これらの研究経費を含めて実施されたものである。

また、本プロジェクト研究の成果を含めた、代表者の多田らのこれまでの研究成果が認められ、平成 24 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰、科学技術賞を受賞した。



文部科学省での表彰式。右から一見准教授、本城特任教授、多田教授、滝川技術補佐員



表彰状と記念楯

本プロジェクトでは、具体的には、下記の 5 課題について研究を実施した。

1. 陸域からの栄養塩の流入
2. 栄養塩異変の現状把握
3. 沿岸海域の栄養塩循環に大きな役割を果たす干潟・藻場

4. 健全な栄養塩循環実現のための干潟の保全・利用

5. 栄養塩不足によるノリの色落ち対策

本プロジェクトは、10名からなる研究集団、チーム瀬戸内海（代表者：多田邦尚）により実施されている。

【研究組織・チーム瀬戸内海】

多田 邦尚	農学部・教授
一見 和彦	瀬戸内圏研究センター・准教授
末永 慶寛	工学部・教授
石塚 正秀	工学部・准教授
井面 仁志	工学部・教授
東江（野村）美加	農学部・准教授
山口 一岩	農学部・助教
中山 充	連合法務研究科・教授
三野 靖	法学部・教授
滝川 祐子	農学部・技術補佐員

はじめに

近年の瀬戸内海東部海域では、栄養塩濃度、特に無機態窒素濃度の減少が顕著であり、ノリの色落ち等の問題が起きている。沿岸海水中の栄養塩の起源は、(1) 陸域からの流入、(2) 外洋からの流入、(3) 底泥からの溶出の3つが考えられる。従って、栄養塩濃度減少の原因に加えて、その供給源（河川、外洋、底泥）からもたらされる量あるいは割合がわからなければ、栄養塩管理の対策は立てられない。(1) について、本研究では、播磨灘をモデル海域とし、陸域から流入する河川水量を定量化した。

(2) については、過去、既に複数の論文報告がある（藤原ら 1997, 武岡ら 2002, Yanagi and Ishii 2004）。しかしながら、(3) については、過去、東部瀬戸内海においては研究例が非常に少ない。さらに、近年、底層の栄養塩濃度が夏季に増加せず低濃度化していることが報告されており（Tada *et al.* 2008, 多田ら 2010）、そのことを踏まえ、播磨灘の北部と南部において、底泥堆積物からの栄養塩溶出量を測定した。

沿岸海域の栄養塩循環に及ぼす干潟や藻場の役割は極めて大きい事が予想される。しかしながら、これまでの研究は非常に断片的であり、環境全体を総合的に解析した例はほとんどない。そこで、高松市の新川・春日川河口干潟域において、干潟域が栄養塩循環に及ぼす役割、および、干潟域の一次生産者として非常に大きな生物量を有するアオサ類（大型海藻、グリーンタイド原因種）の同定を行った。また、浅海域におけるもう一つの栄養塩吸収源と考えられるアマモ場の分布を把握するために、魚群探知機と GPS システムを利用し、短時間でアマモ場の分布マップを作製する手法を確立した。さらに、人工浮き藻場を用いて、SOM（Self- Organizing Map）分析によりアマモ場造成による環境改善の可能性を検討した。

前述のように、干潟域には、生物の住処としてではなく、栄養塩循環にも重要な役割を果たしている

と考えられ、沿岸海域の健全な栄養塩循環を実現するためにも、干潟を保全しなければならない。また、干潟域は、環境学習の場、市民の憩いの場としても重要である。香川大学の我々チーム瀬戸内海の長年の干潟研究の成果を踏まえ、『新川・春日川河口干潟の保全利用』を提案した。大学側から、具体的に、新川・春日川河口干潟を、香川県自然環境保全条例の自然環境保全地域に指定することを提案した。また、これと並行して公園化構想を提案した。

近年、海水中の溶存無機態窒素（DIN：Dissolved Inorganic Nitrogen）濃度の減少によりノリの色落ちが多発している。そこで、ノリ網の模型を作成して水面に染料を流し込み、ノリ網内における染料の拡散状況を把握するとともに、数値モデル実験により栄養塩の拡散過程を予測した。検討の結果、現在使用しているノリ網配置形体に潮通しを設けることが有効であると分かった。また、ノリの不作・色落ちの対策として、施肥を望む声が漁業者から出ている。その方法の一つとして、魚類養殖場の底質改善に有効とされている海底耕うんがノリ養殖場の栄養塩供給にも有効ではないかと考えられ、冬季のノリ養殖期前の海底耕うんの実施が望まれている。しかしながら、魚類養殖場の底質改善に関する海底耕うんが経験的に有効であるとされてはいても、その科学的根拠は示されていなかった。そこで、海底耕うんの効果を検討するために、室内実験を行った。さらに、ノリ養殖場への施肥を目的とし、ノリ網の周りを魚網で囲む方法（ノリスカート）を提案し、検討した。可変式開水路内にノリ網スカート模型を設置し、肥料にみため染料を投入し可視化実験を行った。また、ノリ網にスカートを装着した場合のスカートの高さ、およびスカートの目合いの大きさについて検討した。実際に、小豆島内海湾で、試験的にノリ網にスカートを装着させたセットを準備し、施肥実験を行った。

以下、本プロジェクト研究で実施する五つの課題について紹介する。

1. 陸域からの栄養塩の流入

我々は過去のプロジェクト研究（20, 21 年度）で、河川流量が測定されていない二級河川のそれを推定するために、分布型水文流出モデルを用いて、灘北部からの流入量が多いこと（全流入量の 85%）を明らかにしてきた。さらに、本プロジェクトでは出水時の短期的な河川流出による影響が大きいことを明らかにした。即ち、瀬戸内海の播磨灘を対象として、播磨灘に流入する河川流量を算出し、河川流入量の地域偏差および出水時の河川流入割合を推定した。あわせて、河川水質と海域水質の空間分布および出水イベントによる河川と海域の水質変動を調べ、水質の基礎的特徴や海域への淡水流入の影響を明らかにした。また、国土交通省の実測データを用いて、播磨灘に流入する COD 負荷量の出水時の割合を推定した。

分布型水文流出モデルを用いて播磨灘に流入する河川流量を推定した結果、播磨域に流入する河川流量のうち、兵庫県播磨域からの流入量が流域圏全体の約 85% を占める結果が得られた。この割合は 2002 年と 2003 年ではほぼ同じであった。また、1 年間の総流量のうち出水時に流入する割合は、出水日数を 30 日（1 年間の 8.2% の日数）とした場合に約 35%～60% を占めていることがわかった（図 1）。

播磨灘海域の水質は、2004 年の平均値と比較して出水直後（高松アメダス：47.5 mm/day、2004 年 9 月）は、播磨域側で溶存ケイ酸は約 6.5 倍、リン酸塩が約 2.5 倍、硝酸塩が約 11 倍に増加し、四国側ではそれぞれ約 2.1 倍、約 2.0 倍、約 1.5 倍に増加した（図 2）。この結果から、播磨域側では河川出水の影響を強く受けることが明らかとなった。

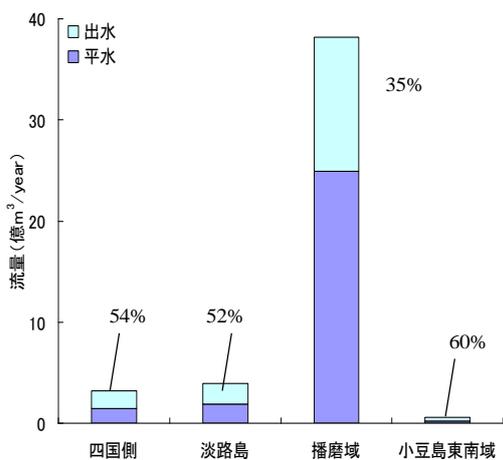


図1 地域毎の出水・平水時の河川流量の比較
(出水日数 30 日、2003 年)

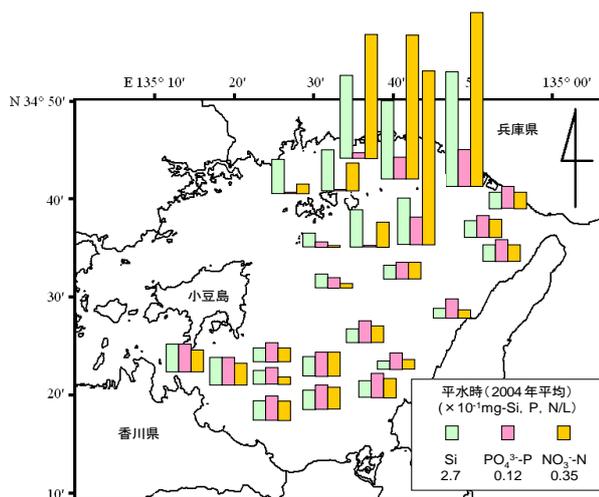


図2 播磨灘における出水時、平水時の水質比較
(溶存ケイ酸・リン酸塩・硝酸塩：
2004 年の平均値に対する 2004 年 9 月の比率)

播磨灘に流入する COD 負荷量を濃度 - 流量法 (C-Q 式) により推定した結果、加古川と揖保川における出水時の負荷量は、出水日数が 30 日の場合、2002 年、2003 年においては年間総負荷量の約 40%、2004 年においては年間総負荷量の約 70% を占める結果が得られた。

このように、播磨灘に流入する河川流量は播磨域からの流入量が多く、海域におよぼす影響が強いことが定量的に示された。とくに、出水時の短期的な河川流出による影響が大きく、播磨灘の海域環境を考察する際には河川流量の空間偏差や出水時の短期的な河川流出の影響を考慮することが重要である。

次に、河川の水質調査を実施した。その結果、窒素については、海域で植物プランクトンが直接利用可能な無機態窒素が全窒素の平均 67% を占めていた。また、この海域では 1976~2006 年の 30 年間に、森林と水田が減少し、建物用地等が増加しており、土地系からの窒素やリンの負荷量は減少傾向にあることがわかった。

2. 栄養塩異変の現状把握

(2-1) 東部瀬戸内海内湾域 (志度湾) における生物生産環境の短期・長期変動

東部瀬戸内海に位置する志度湾において、物理環境、栄養塩濃度およびクロロフィル *a* (Chl*a*) 濃度などのデータを解析した。本研究では、本湾において、カキが不作であった 2009 年におけるこれらのパラメーターの季節変動について解析するとともに、2002 年から 2008 年までの観測結果と比較することで、近年の志度湾における環境の変化を明らかにすることを目的とした。

解析の結果、志度湾における塩分の変動は降水量の影響を強く受けており、降水量の少なかった 2009 年は年間を通して高塩分であった (図 3)。溶存態無機窒素 (DIN) は 2009 年の冬期に低濃度であり、2009 年の Chl*a* 濃度も年間を通して低濃度であった。また、志度湾における経年変動としては、透明度の増加、DIN および N/P 比の減少傾向が認められた (図 4a, 4b)。また、降水量が多い年に Chl*a* 濃度が高い傾向が認められ、志度湾における Chl*a* 濃度の変動には降水に伴う淡水流入の影響が大き

いことが示唆された。これらの事から、近年、志度湾は経年的に栄養塩濃度が減少傾向にあり、特に2009年は降水量が少なく、それに伴い栄養塩濃度が低かったことにより、植物プランクトン量が低水準で推移し、夏季から秋季にかけて餌不足によりカキが不作となったと推察された。

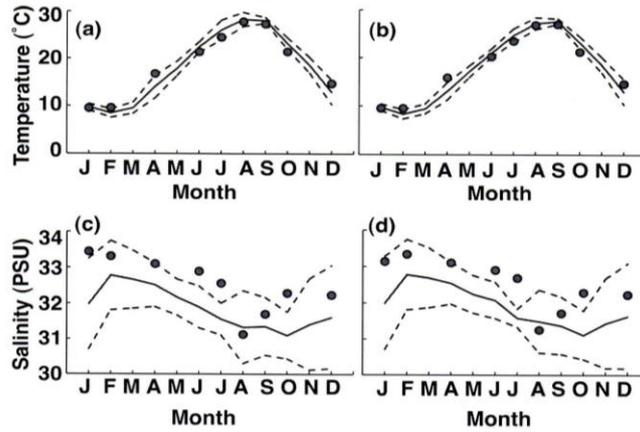


図3 水温・塩分の季節変化。●は2009年のデータを示す。実線と破線はそれぞれ、2002年から2008年の平均値、標準偏差を示す。(a)、(b)は表層水および水柱平均の水温を、(c)、(d)は表層水および水柱平均の塩分を示す。

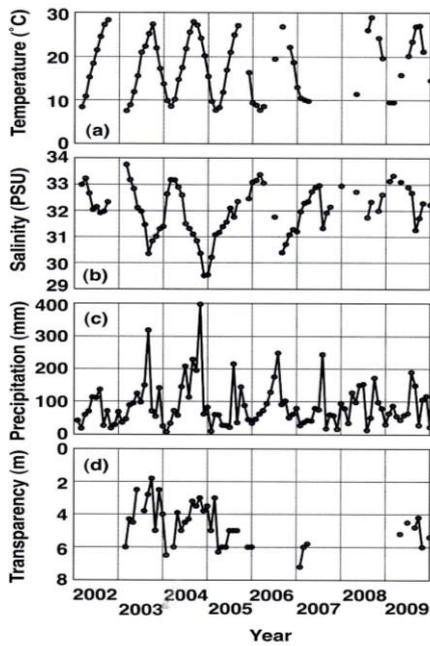


図4a 水温と塩分（水柱平均）、降水量及び透明度の経年変化

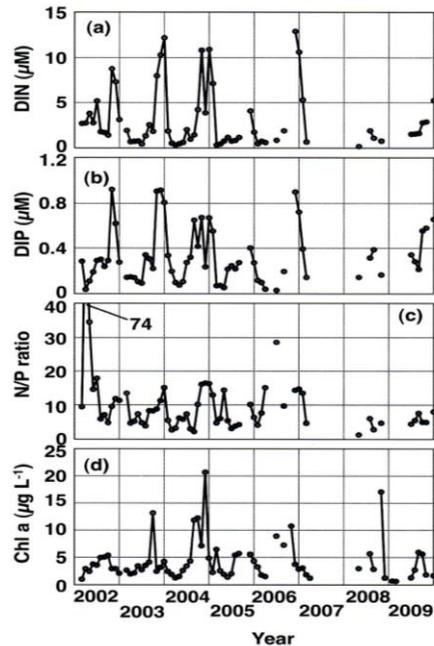


図4b DIN、DIP、N/P比、及びChl a（水柱平均）の経年変化

(2-2) 東部瀬戸内海内湾域（播磨灘）における生物生産環境の長期変動

近年、底層の栄養塩濃度が夏季に増加せず低濃度化していることが報告されている (Tada *et al.* 2008, 多田ら 2010)。そこで、播磨灘の北部と南部において、底泥堆積物からの栄養塩溶出量を測定した。播磨灘北部の姫路沖の定点では、Tada and Montani (1997) が、1980年代に底泥堆積物からのリン酸塩

の溶出量を測定しており、その報告と全く同じ定点と手法で、同じ時期にリン酸塩の溶出量を測定した。リン酸塩の溶出フラックスの測定法は、柱状堆積物における間隙水中の栄養塩濃度の鉛直分布から、Fick の拡散法則を用いて見積もる方法 (method I) と、柱状堆積物 (堆積物コア) をインキュベートして、その直上水中の栄養塩濃度変化から、見積もる方法 (method II) の 2 種の方法で行った。その結果、リン酸塩の溶出フラックスは 2011 年の方が明らかに低く、その平均として、1982 年のそれに比べて 35%低かった (図 5)。

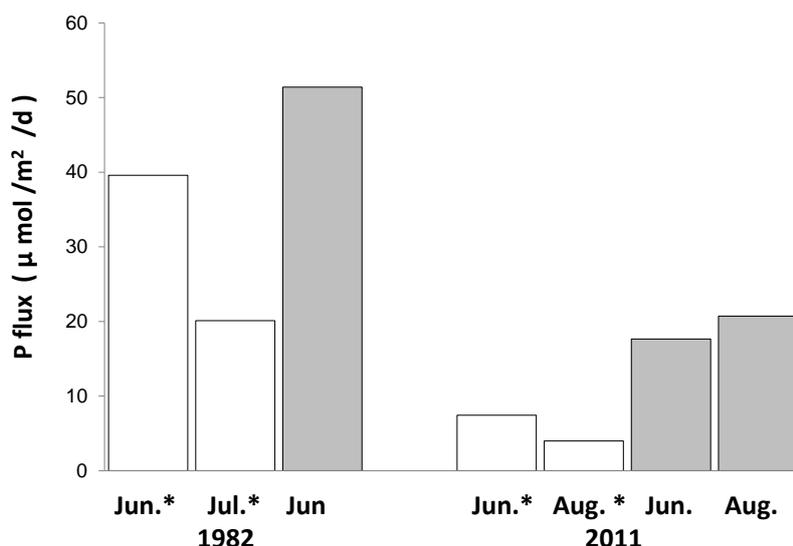


図 5 姫路沖定点における 1982 年、2011 年のリンの溶出速度. 図中*□は method I, ■は method II による値を示す。

また南部の志度湾でも 1990 年代と比べ、低い傾向にあり、以上の結果から近年海底表層堆積物から溶出してくる栄養塩の量が明らかに低下していると考えられた。

一方、播磨灘全域の表層堆積物を採取し、表層堆積物中の有機物量を測定した結果、その水平分布は同海域の 1980 年代の分布とほぼ同じ数値、分布傾向を示した。従って、表層堆積物の有機物含量は、変化していないが、その栄養塩溶出能力は低下している事が考えられた。即ち、表層堆積物の窒素やリン含量の極一部が海水中に回帰してきていると考えられた。

3. 沿岸海域の栄養塩循環に大きな役割を果たす干潟・藻場

沿岸海域の栄養塩の循環に及ぼす干潟や藻場の役割は極めて大きい事が予想される。そこで、高松市の新川・春日川河口干潟域において、干潟域が栄養塩循環に及ぼす役割、および、アオサ類 (グリーンタイド原因種) の同定を行った。また、アマモ場の簡易マッピング法の検討、さらに、人工浮き藻場を用いて、アマモ場造成による環境改善の可能性について検討した。

(3-1) 干潟域が栄養塩循環に及ぼす役割

新川・春日川河口干潟域において 5 月 (春季)、9 月 (夏季)、11 月 (秋季) に一潮汐間の連続観測を

行い、河川-干潟-海域間における富栄養化物質（窒素・リン）の収支を評価した。また、本年度の結果と過去に得られた観測結果を比較し、気象条件や生物群集の変動によってこれらの物質収支がどのように異なるかを評価した。

我々は過去に、干潟の栄養塩収支は、基本的に夏季に窒素やリンは干潟域に保持され、冬季には窒素やリンが干潟から放出される傾向を示すことを明らかにしてきた。しかし、その傾向は、その年の気象条件や生物群集の変動に大きく左右されることがわかった。即ち、2006年度に行った同様の連続観測では、秋季（11月）には干潟から海域へ流出するリンが河川から流入するリンの負荷量を大きく上回ったが、春季および夏季（5月・8月）には、河川から負荷されたリンの多くが干潟内に捕捉され（トラップ効果）、海域への流出は著しく抑制された。しかし本年度の結果は、実施したすべての観測月で、干潟から海域へ流出した窒素およびリンが、河川から干潟へ流入する窒素およびリンの負荷量を大きく上回った（図6a、b：9月の観測結果のみ表示）。したがって本年度は2006年度に観察された干潟へのトラップ効果が働いていないことになる。この要因として、本年度は河川流量とそれに伴う懸濁粒子の負荷量が2006年に比べて圧倒的に少なく、感潮域で懸濁態窒素・リンの沈降・堆積作用が非常に小さかったことが考えられる。また溶存態窒素・リンを同化するアオサが、その繁茂期（春～夏季）に2006年度の10%程度しか存在していなかったこと（図6c）、さらに底生生物の優占種であり、懸濁粒子を大量捕集するアサリの個体群密度が本年度は2007年度の20%程度しか現存しておらず（図6d）、富栄養化物質の捕捉能力が干潟全般で低下していたと考えられた。以上より、干潟の物質収支はその年の気象条件や生物群集の変動に大きく左右されることが示唆された。

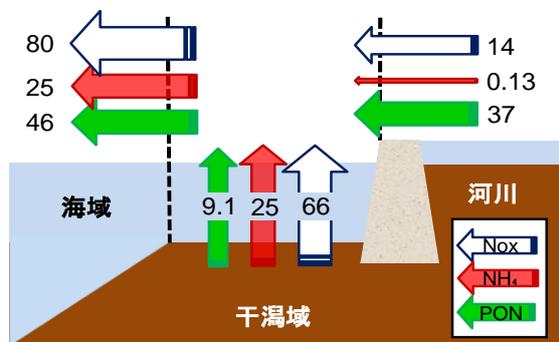


図.6a 9月における各態窒素の収支 (kg)

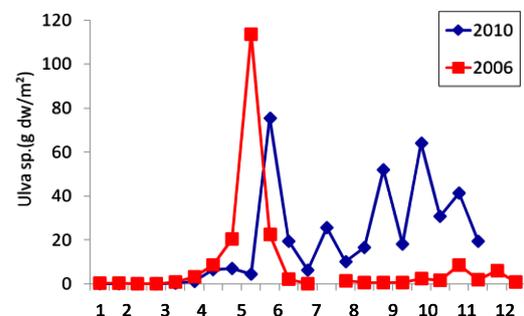


図.6c 2006年および2010年の各月におけるアオサ現存量

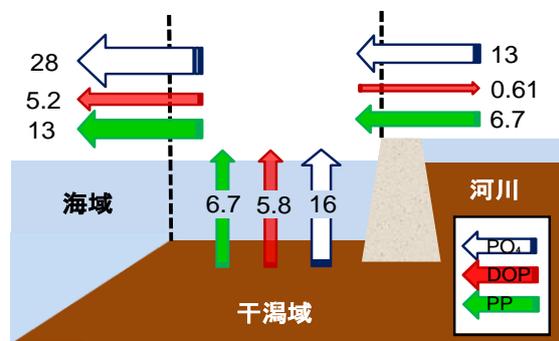


図.6b 9月における各態リンの収支 (kg)

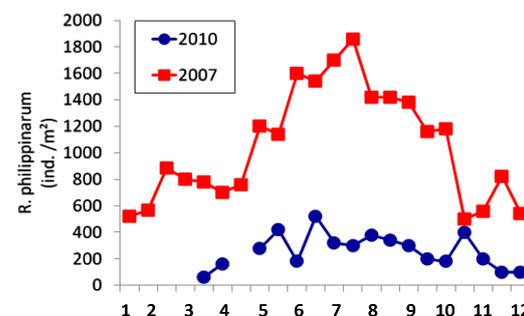


図.6d 2007年および2010年の各月におけるアサリ生息密度

図6 干潟域における栄養塩収支とアオサ、アサリの生物量

さらに、本干潟において、栄養塩循環に重要な機能をはたしていると考えられたアサリ（5月27日に採取）の可食部について、人体に有害な化学成分の分析を行った。その結果、可食部乾燥物でのカドミウム、総水銀、鉛、ヒ素の含量はそれぞれ、0.37、0.06、0.91、7.5 ppmであった。カドミウムについては、厚生省の安全基準が、玄米で1.0 ppm、精米で0.9 ppmとされている。アサリ可食部の今回の分析値の0.37 ppmはこの基準値以下の値であった。水銀については、厚生省の暫定的規制値が総水銀で0.4 ppmとされており、今回の分析値の0.06ppmはこれを大幅に下回る値であった。鉛、ヒ素については、わが国では明確な規制値が無いようである。JECFA（FAO/WHO 合同食品添加物専門家会議）は、TWI（Tolerable Weekly Intake：耐容週間摂取量、毎週一生涯摂取しても何も影響がでない量）を、鉛で50 μ g / Kg / week、ヒ素で15 μ g / Kg / weekとしている。ここで体重50 kgの成人を仮定して、上記の数値から計算すると、鉛とヒ素のTDI（Tolerable daily Intake：耐容一日摂取量、毎日一生涯摂取しても何も影響がでない量）はそれぞれ、357 μ g / 成人 / day、107 μ g / 成人 / dayとなる。今回の分析値から計算すると、アサリ可食部をそれぞれ1日当たり、毎日乾燥重量で392 g、14 g摂取すると、この鉛とヒ素のTWIに達する事になる。アサリ可食部の水分含量を70%と仮定すると、TWIに達するアサリ可食部の湿重は、鉛とヒ素の場合でそれぞれ、1300 g、46 gとなる。これらのことから、今回得られた分析値は、何れも一般的なヒトの摂取量の範囲では問題ないと判断された。今後、PCBやゴルフ場使用農薬等の分析が必要であろう。

(3-2) 新川・春日川河口干潟のアオサ類の同定

新川・春日川河口干潟において、アサリ同様に、その栄養塩循環に大きな役割を果たしていると考えられるアオサについて、その種の同定を試みた。現在、日本には11種のアオサ種の存在が

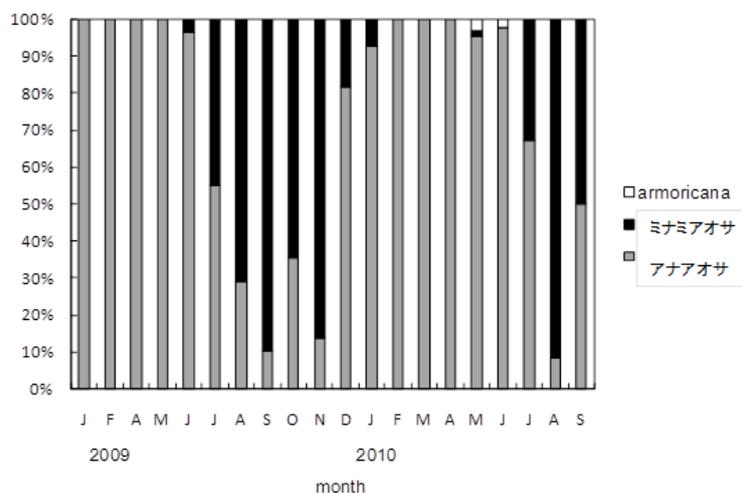


図7 香川県春日川河口域におけるアオサ分布

報告されているが、新川・春日川河口干潟のアオサ類の同定までには至っていない。そこで、本研究では、新川・春日川河口域におけるグリーンタイド原因種の同定を目的とした。2009年1月から2010年9月まで1年半を通してアオサ種の同定、またバイオマスを計算することで各アオサ種の発生量を見積もった。採取したアオサはそれぞれボイル法によりDNAを抽出後ITS1領域の増幅を行い、塩基配列の決定を行った。塩基配列決定後BLAST解析を行い、種の同定を行った。尚、塩基配列はITS1領域

以外に *rbcL* 領域も決定した。この結果、新川・春日川河口干潟域のアオサ類はアナアオサとミナミアオサが大量に発生していることが明らかとなった。各月の占有種を調べてみると12月～6月頃まではアナアオサが優占種であった(図7)。また、7月から次第にミナミアオサの割合が増加し11月頃には9割がミナミアオサで占めていることが明らかとなった。さらに *Ulva armonicana* もわずかであるが浮遊していた。当干潟域のアオサ類の全バイオマス量を測定した(一見・私信、図8B)。アナアオサとミナミアオサの相対量を計算した結果を図8Aに示す。この結果、6月、7月頃まではアナアオサが大量発生しており、ミナミアオサは、7月頃から増え始め、8月～11月頃まで優占的に増加していた。

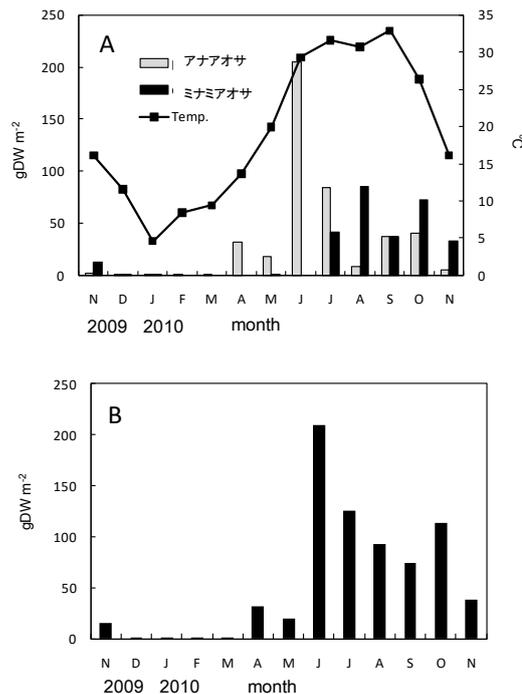


図8 アナアオサとミナミアオサの季節分布

A アナアオサ、ミナミアオサの季節分布と温度 B アオサの全バイオマス

さらに、アオサのバイオマス量は温度と相関関係があり冬に生息しているアナアオサは相対的に非常に少ないことが分かった。冬にはアナアオサしか確認できなかったが、成長速度が遅いためにバイオマス量が少なく、春先になると温度の上昇に伴いバイオマスが増加していると考えられる。ミナミアオサはアナアオサより最適温度が少し高く、8月頃にそのバイオマスが最大になった。能登谷(1999)によるとミナミアオサの最適温度は20～25℃であり、10℃以下では生息しないという。今回の結果でもミナミアオサは海水温が20℃以上で生育し始め、10℃以下の冬場には全く確認できなかった。新川・春日川河口干潟において表層堆積中の有機態炭素・窒素の濃度は、7～10月にかけて増加し、2～3ヶ月かけてゆっくりと分解し干潟堆積中に埋没しているという報告があり(多田・私信)、今回の結果から大量発生したアオサの一部は分解して堆積していると予想される。また、同干潟で同定された *U. armonicana* は、広島湾でも確認されている。これは、フランスでグリーンタイド原因種として知られていることから今後も監視を続けなければならないだろう。

(3-3.) 藻場のマッピング手法

浅海域における栄養塩吸収源と考えられる藻場について、定量的にその収支を明らかにするためには、まずその生物量を正確に知る必要がある。そこで、まず、アマモ場の分布を把握するために、魚群探知機と GPS システムを利用し、短時間で且つ正確にアマモ場の分布マップを作製する手法を確立した。

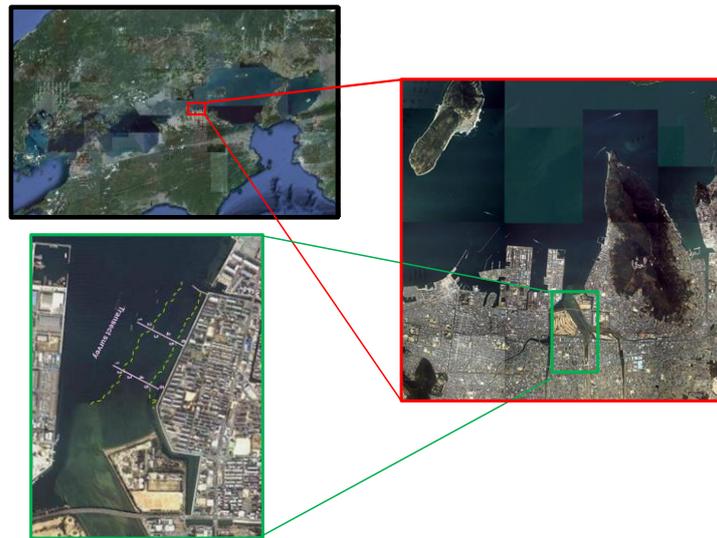


図9 香川県高松市郊外の新川・春日川河口のアマモ場

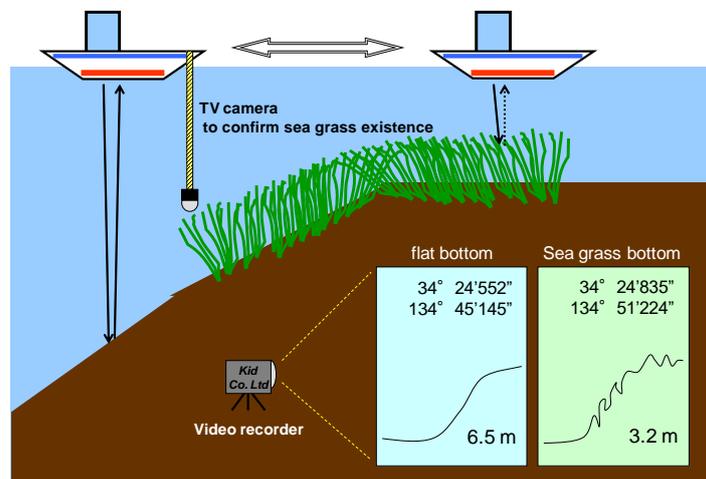


図10 藻場のマッピングシステム

香川県高松市郊外の新川・春日川河口のアマモ場（図9）において、香川大学瀬戸内圏研究センター庵治マリンステーション調査船ノープリウスを使用し、魚群探知機と GPS システムを使用し、位置情報と海底からの反射波からアマモ場のマッピングを試みた。マッピングの際には、水中カメラで海底あるいはアマモの状態を確かめながら、魚群探知機のディスプレイをビデオカメラで撮影し、実験室に持ち

帰った後、GPS の位置情報と合成した (図 10)。

マッピングの結果の一例を、図 11 に示した。本システムを使用すれば、数時間の観測で、簡易にアマモ場のマッピングが可能である事がわかった。

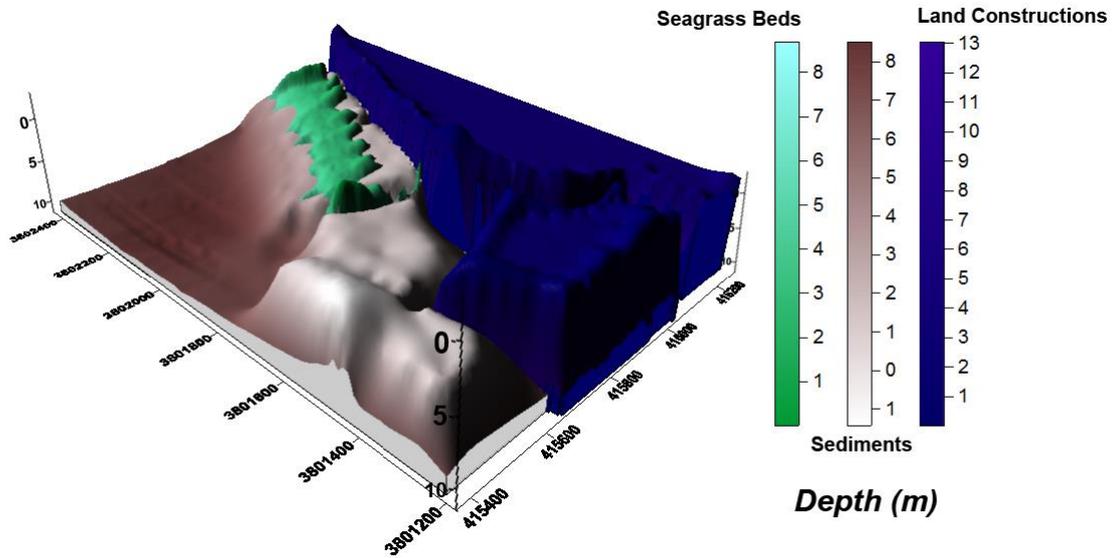


図 11 アマモ場のマッピングの一例

(3-4.)人工浮き藻場

我々の 21 年度までの研究に引き続き、浮き藻場においてアマモの生育を観察するとともに、その生育環境のモニタリングを行った。アマモが大きく育つ春季から夏季にかけて平成 21 年度よりも 22 年度の方がアマモは多く育った。アマモ葉部が最も良く育ち、アマモによる環境への影響が最も大きいと考えられる春季から夏季にかけて、複雑な非線形の現象をそのまま取り扱うソフトコンピューティングのひとつである SOM (Self - Organizing Map) を用いてアマモ有用性の分析を行った。SOM とは人工ニューラルネットワークの一種であり与えられた多次元情報からパターン認識を自己学習によって行い、パターン間の関係を 2 次元化したマップとして視覚化する方法である。分析は、5 項目のデータ (酸素飽和度、溶存酸素濃度、電気伝導度、塩分、水温) を入力して行った。その結果、酸素飽和度は波の影響を受けて変動しやすい成分であるが、付近の屋島マリーナや船着き場に比べて浮き藻場内で高い傾向を示した。この傾向は波の影響の少ない下層でさらに顕著であり、藻場の造成により付近の海域環境が改善される可能性が考えられた。

また、人工浮き藻場によるアマモの生育実験では、2 年経過後も生育を確認した。一方、底質の悪化により、アマモの衰退が顕著であった。2 年以上継続してアマモを生育させる環境創生が必要である。

4. 健全な栄養塩循環実現のための干潟の保全・利用

前述のように、干潟には、生物の住処としてではなく、季節によって栄養塩をトラップし、また海に放出する役割もあり、沿岸海域の健全な栄養塩循環を実現するためにも、干潟を保全しなければならない。また、干潟域は、環境学習の場、市民の憩いの場としても重要である。本連携事業では、香川大学側の長年の干潟研究の成果を踏まえ、『新川・春日川河口干潟の保全利用』を提案して来た。昨年度に引き続き、関係部署（香川県環境管理課・みどり保全課・河川砂防課・港湾課等）と議論した。

大学側からは、今年度は具体的に、新川・春日川河口干潟を、香川県自然環境保全条例の自然環境保全地域に指定することを提案した。大学側からの提案に対して、昨年度は、県側から河川管理者の立場から、『干潟が大切なものわかるが、洪水時などの際に県民の安全を守る必要があり、その為には、河床工事等も必要になることもある。いったん、特別な区域に指定してしまうと、県民の安全確保がしにくくなる』とのコメントが出されていた。この件については、大学側から提案された香川県自然環境保全条例での指定においては、自然環境保全地域に指定しても、県民の安全確保がしにくくなるようなことは無いと説明した。

その後、県から、『香川県に数ある干潟の中で、何故、新川・春日川河口干潟だけを守らなければならないのか？その理由を示して欲しい』との意見が出された。この件について、大学側から 1. 高松市内に位置し、中心部からも近い（アーバン型干潟）、2. 河口干潟としては面積的に最も大きい（前浜干潟を含めても県内で 2 位の広さ）、3. 提案する区域内には干潟、葦原、アマモ場がコンパクトに存在、4. 生物量・生物多様性（二枚貝、巻貝、甲殻類、多毛類、鳥類）が豊かである、5. 非常に多くの市民が潮干狩りに訪れている（シーズン中に 4000 人以上）、6. 市民の憩いの場、環境学習の場として大変貴重、7. 新川、春日川から海へ負荷される富栄養化物質の緩衝帯となっている、とする以上七つの理由を挙げて『何故、新川・春日川河口干潟だけを守らなければならないのか？の理由』を説明した。

現状では、条例による保全の必要が無いとする県に対し、大学側から、「環境問題は、危機が当面無いので何もしない」というのでは対応できないので、「保護規制」は必要であることを説明した。自然環境保全条例も、「広く県民が自然環境の恵沢を享受するとともに、将来の県民にこれを継承できるようにし、もって現在及び将来の県民の健康で文化的な生活の確保に寄与することを目的とする」としており、条例の目的に合っていること。また、平成22年の自然環境保全条例の改正で、「生物の多様性の確保」が目的に掲げられているとともに、生態系維持回復事業が位置づけられたことなどから、自然環境保全地域等の指定は、新川・春日川干潟を保全する方策の一つとして重要であること。さらに、県の施策の現状（本県は保護地域が干潟等の沿岸域に配置されておらず、多様な自然環境を十分に保全していない）、及び、瀬戸内海環境保全計画等からも、自然環境保全地域の指定等の取組みを進めることは県の政策として必要であると説明した。

上記の議論と並行して、大学側から干潟を保全地域と指定するなどして保全するだけでなく、近い将来に検討すべき課題として、公園構想を提案した。この公園構想は、「新川・春日川河口干潟を効果的に保全し利用するためには、自然環境保全地域等に指定するなどして保全するだけでなく、そこを中核にして、より広い地域を一つの公園に定めて、その環境の保全と利用を計ることが望ましい。将来へ向けて本干潟周辺の景観も含めた総合的な保全計画の構想づくりが必要。」とするものである。これについては、県側から「干潟の保全について市民・県民に関心を持っていただき、市民・県民レベルで当該干潟の大切さ保全の必要性が醸成され、その中から保全に向けての具体的な方策提案につながるこ

が望ましいとまとめるような提言にして欲しい。」と意見があった。

大学からは、提案した公園構想は、近い将来に検討すべき課題として位置づけて欲しい、と回答した。

上記のように本事業では、関係部局（環境管理課、みどり保全課、河川砂防課、港湾課、水産課）との協議が、事業終了期間（平成 22 年度）までに調わなかったため、平成 24 年 5 月まで延長して協議した。しかしながら、自然環境保全条例の所管課であるみどり保全課との間で、新川・春日川河口干潟の意義・重要性についての基本的認識は一定共有できたものの、具体的な施策のあり方については、合意に至らなかった。この件についての問題点は二つあり、一つめは、香川大学が提案した自然環境保全条例の自然環境保全地域への同干潟の指定について、みどり保全課が否定的な見解を示しており、大学側の意見に対して都合の悪い質問には回答しなかったり、担当者を変えて時間を稼ぐ等まともに対応しないことである。二つめは、同条例が同干潟の保全のための手法として必ずしも馴染まないとすれば、新たな仕組みを検討する必要があると考えられることである。以上、これまでの経過を踏まえると、香川大学と香川県の担当課との協議では、進展の可能性がなく、連携融合事業の総合窓口である政策課において、新川・春日川河口干潟の保全利用に関する今後の検討のあり方について、再度、協議願い、県としての政策のあり方についても検討頂けるよう申し入れることとした。

5. 栄養塩不足によるノリの色落ち対策

近年、海水中の DIN 濃度の減少によりノリの色落ちが多発している。そこで、実験室内でノリ網のモデルを用いて水面に染料を流し込み、ノリ網内における染料の拡散状況を把握するとともに、数値モデル実験により栄養塩の移動状況を求めた。また、ノリの不作・色落ちの対策として、施肥を望む声が漁業者から出ている。その一つとして、魚類養殖場の底質改善に有効とされている海底耕うんが、ノリ養殖場の栄養塩供給にも有効ではないかと考えられ、冬季のノリ養殖期前にも海底耕うんの実施が望まれている。しかしながら、その科学的根拠は示されていなかった。そこで、海底耕うんの効果について検討するために、室内実験を行った。

さらに、ノリ養殖場の施肥を目的とし、ノリ網の周りを魚網で囲む方法（ノリスカート）を検討した。可変式開水路内にノリ網スカートモデルを設置し、肥料にみため染料を投入し可視化実験を行った。ノリ網にスクートを装着した場合のスクートの高さ、およびスクートの目合いの大きさについて検討した。その結果、スクートの高さは横の長さの 1/10 程度、目合いの大きさは 4 mm と決定された。最後に、小豆島内海湾で、試験的にノリ網にスクートを装着させたセットを準備し、施肥実験を行った。実験の結果、施肥 1 時間後でも、セット内の栄養塩（硝酸塩）濃度は数十 μM （モル）あり、ノリの色落ちを防ぐ効果は十分にあると判断された。しかしながら、ノリ網セット内の施肥直後の硝酸塩濃度は均一ではなく、施肥の仕方は今後の検討課題である。

(5-1.) 魚類養殖場の環境保全策について

魚類養殖場において、昨年に引き続き、海底の耕うんの効果について検討した。昨年度は、ハマチ養殖場において、その効果を調べたが、有用な知見、データは得られず、今年度は現場観測とともに、室内実験により、海底耕うんの効果を検討した。

室内実験では、魚類養殖場近く（志度湾）において、エクマンバージ型採泥器により採取したもの

を用いた。得られた表層海底泥をサブコアで採取し、堆積物直上には、現場の底層水を加えたものを4本作成し、25℃の実験室に静置した。これに、乳鉢で摩砕したハマチ養殖用の餌、ドライペレットを表層に加えた。2本のサブコアについては、加えたペレット摩砕物が完全に沈降するのを待って、金属スパーテルを用いて泥を攪拌した。攪拌には、現場での海底耕うんをイメージし、直線的にスパーテルで攪拌した。攪拌した際に巻き上がった高濁度水をサイホンで抜き取り、これを現場の底層水で置き換えた。実験開始後は毎日、4本のサブコア内の直上水を現場の底層水で置き換えた。25℃の実験室に置いた4本のサブコアから、0、3、5、10、20、および30日目にサブサンプルを採取し、AVS（酸揮発性硫化物態硫黄）を測定した。AVSは、還元状況の指標であり、生物に有毒な化学成分である。サブコア内の堆積物は実験開始時には灰色だったものが、実験開始3日後あたりから、黒く変色し始めた。5日目には、耕うんしたものとしらないもので、堆積物の色は、はっきりと識別できるほど異なった（図12）。0、3、5、10、20、および30日目でAVS値は、0.024~0.795 mgS/g DWを変動し、明らかに耕うんした方が、しないものよりも低い値となった（図13）。

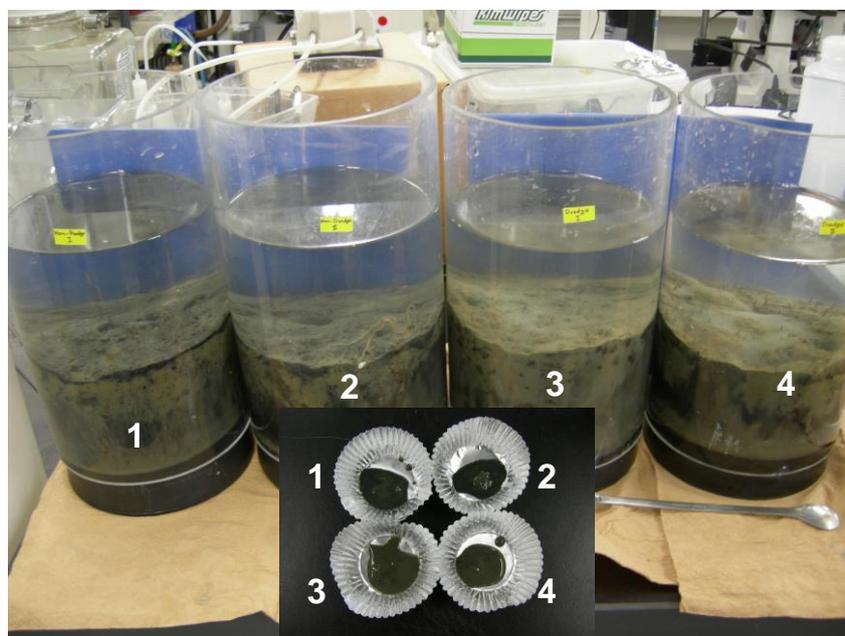


図12 実験開始5日後のサブコア内の堆積物の色の変化
番号1、2と3、4は、それぞれ、耕うんしないものとしたもの

海底耕うんが、魚類養殖場の底質改善に有効であることは、経験的によく知られていたが、その科学的根拠はこれまで示されていなかった。今回の研究結果より、海底泥を耕うんしたために、現場の底層水中に懸濁粒子として舞い上がった表層泥が潮流により水平的に運ばれ分散することにより、底質改善が起こると解釈できた。そのため、海底耕うんは、潮流の速い大潮の最大流速時に行うことが効果的であると考えられるが、養殖ノリへの栄養供給を合わせて考えると、海底耕うんが、栄養塩類の滞留時間の短さからノリ養殖場の栄養塩供給にも有効であるとは考えにくい。

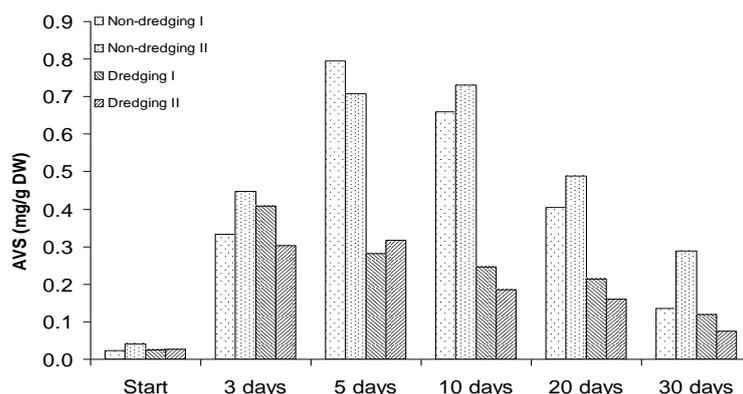


図 13 実験開始後 30 日目までのサブコア内の AVS 値

(5-2.) ノリの色落ち対策、ノリ網配置の検討

近年、溶存態無機窒素 (DIN) の減少によって、全国的にノリの色落ちが多発し、生産量が減少している。香川県におけるノリ漁場の DIN は、2002 年度以降、減少傾向にある。さらに、2007 年度以降は、ノリ養殖漁期中 (10 月～翌年 3 月) に DIN 濃度の最高値も低く、12 月下旬頃には、色落ち警戒濃度の $3\mu\text{M}$ を下回るようになり、色落ち被害がより深刻化している。その対策として、ノリ網セット内に栄養塩を供給 (施肥) することによりノリの生長を促し、色落ちを抑制することが考えられる。しかし、これまで瀬戸内海東部海域でも施肥は試験的に実施されているが、未だ効果が上がっていない状況である。

そこで本研究では、まず、ノリ不作問題についてのこれまでの調査研究結果について検討してとりまとめた。すなわち、瀬戸内海の近年の DIN の濃度低下やノリ不作のメカニズムについて考察した。その検討結果は、既に分析化学会誌に『瀬戸内海の水質環境とノリ養殖』(多田ら 2010) として公表した。次に、現在のノリ網配置形体に潮通しを設けたノリ網の模型を作成し、水面に浮かべた模型に染料を流し込んで、ノリ網内における染料の拡散状況を把握した。次に、現在のノリ網配置形体 (配置 A) および潮通しを設けたノリ網配置形体 (配置 B～F) について、3 次元マルチレベルモデルを用いて潮流計算を行い、オイラー・ラグランジュ法により栄養塩にみたてた粒子の移動状況を求めた。本研究では、計算領域内に西側から東側への一方向の流れ (0.25、0.50、0.75、1.00 m/s) を与えて計算を行った。

その結果、室内模型実験より、潮通しを設けることで、ノリ網内に染料が流れ込み、網全体に流れが発生することが判った。そして、数値計算からは、現状のノリ網配置形体 (配置 A) では、ノリ網セット内に潮が流れ込みにくいことが判った (図 14)。対照的に、潮通しを設けたノリ網配置形体 (配置 B～F) では、ノリ網セット内に適度な潮の流れが発生し、粒子がノリ網全体に拡散しており、中でも配置 F が良い結果を示した (図 15)。最後に、流速と SPAD 値 (ノリの等級評価の指標値) の関係式を用いて、生産されるノリの品質の検討も行った (図 16)。配置 F は配置 A と比較して、ノリ網内に十分に栄養塩が分布するため、配置 A よりも質の良いノリ生産が可能であることが示唆された。

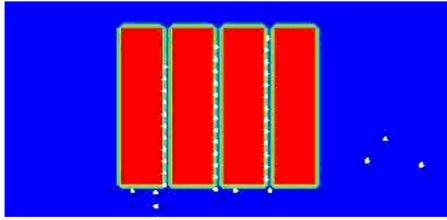


図 14 4 時間後の粒子の位置
(配置 A: 0.5m/s)

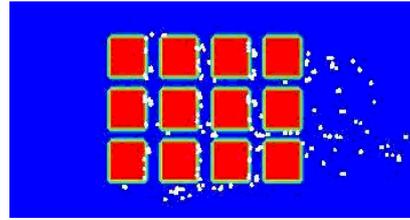


図 15 4 時間後の粒子の位置
(配置 F: 0.5m/s)

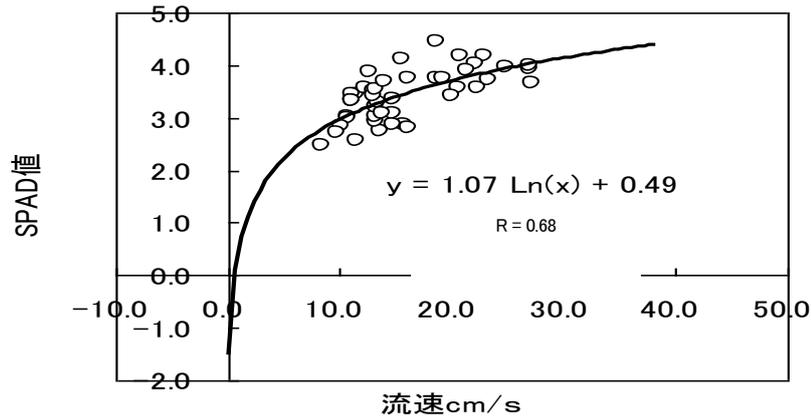


図 16 SPAD 値と流速の関係

本研究から、現在使用しているノリ網配置形体に潮通しを設けることが有効であると分かった。しかし、潮通しを設ける分、網数が減少し、それに伴う収穫量の減少が懸念される。また、条件の異なる海域でもノリ養殖が行われているため、他の海域においても設置可能なノリ網配置形体の検討が必要である。さらに、数値モデルの精度向上のために、今後も継続的な観測を行うと共に、生態的な要素を考慮したモデル開発が必要である。

(5-3.) ノリの色落ち対策、施肥方法の検討

今年度、これまで播磨灘と志度湾において実施してきた毎月の定点観測を継続し、栄養塩濃度のモニタリングを行った。定点観測の結果、2011 年度は、台風もあり、秋季以降の降水量が多く、表層海水中の塩分は低かった。栄養塩濃度、植物プランクトン量は平年並みであったが、冬季に珪藻類 (*Eucampia zodiacus*) が増殖し、栄養塩濃度は 12 月以降急激に低下し、無機態窒素濃度はノリの色落ちの目安とされている $3\mu\text{M}$ を下回っていた。

近年の瀬戸内海の海水中の窒素濃度から判断して、今後の海水中の無機態窒素濃度の上昇は望めず、ノリ養殖維持のためには、施肥が必要であると考えられた。しかし、海はノリ業者だけのものではないので、環境に配慮した施肥方法の確立が必要である。そこで、本研究では、ノリ網の周りを魚網で囲む方法 (ノリスカート、図 17) を検討した。まず、室内でノリスカート模型を設置し、肥料にみたてた

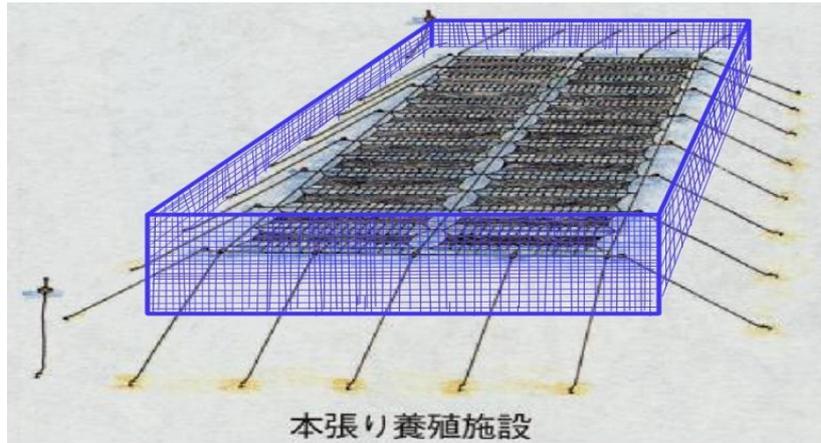


図17 ノリスカートのイメージ図

染料を投入し実験水槽内で可視化実験を行った。その結果、スカートの高さは横の長さの1/10程度、網目のサイズは4mmと決定された。さらに、香川県水産試験場前の魚類養殖生簀内におけるノリスカートセットの小型模型実験(図18)を経て、2011年11月より、実際に小豆島内海湾で、試験的にノリ網にスカートを装着したセット(52×45×1.9m)を準備し、施肥実験を行った(図19)。



図18 香川県水産試験場における小型ノリスカート実験



図 19 小豆島内海湾における肥料散布実験

実験では、塩化アンモニウム肥料を 20 kg 溶解させた 1/3～1/5 海水 2 トンを散布した。ノリは高濃度の栄養塩濃度に 1 時間さらされると色調を回復できることが報告されている（藤原 2011）。実験の結果を、図 20～23 に示した。現場実験では、ノリ網にノリスカートを着着させて施肥を行う試験区と、ノリスカートは設置せずに、ノリ網だけで施肥も行わない対照区を設けた（図 20）。試験区と対照区内に採水点 A, B, C、および X, Y, Z のそれぞれ三点を設けた。さらに、試験区と対照区のノリ網の周囲に①から⑩までの 10 点の採水点を設け、経時的に 30, 60, 90 分後に表層水を採取した。

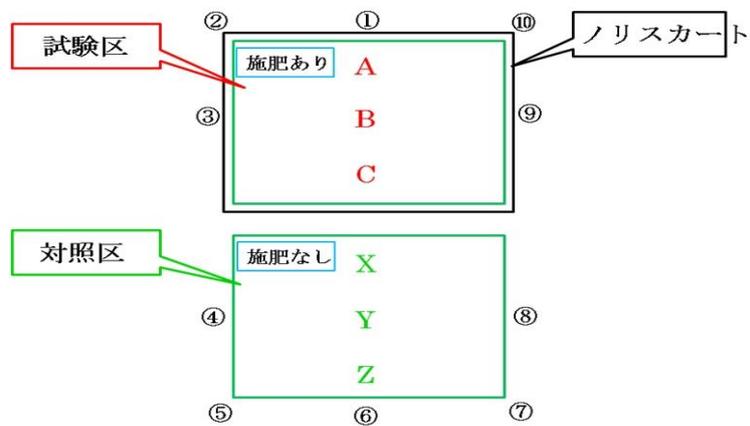


図 20 施肥実験の採水点

その結果、施肥 1 時間後でも、施肥区ではセット内の NH_4^+ 濃度は数十 μM 以上あることが確認された。それに対し、対照区では、硝酸塩濃度は、ほとんど観測できなかった（図 21）。一方、試験区と対照区周辺の観測点③と⑨のみでは、施肥直後、あるいは 30 分、60 分後に、高い NH_4^+ 濃度が観測されたものの、その他の観測点では、高い NH_4^+ 濃度は観測されなかった。以上のように、このノリスカートでは、施肥 60 分あるいは 90 分後まで、セット内にノリの色落ちを防ぐ事ができるだけの高濃度の NH_4^+ 濃度が保持でき、且つ、周辺海域への栄養塩の拡散も無視しえるものであると考えられた。

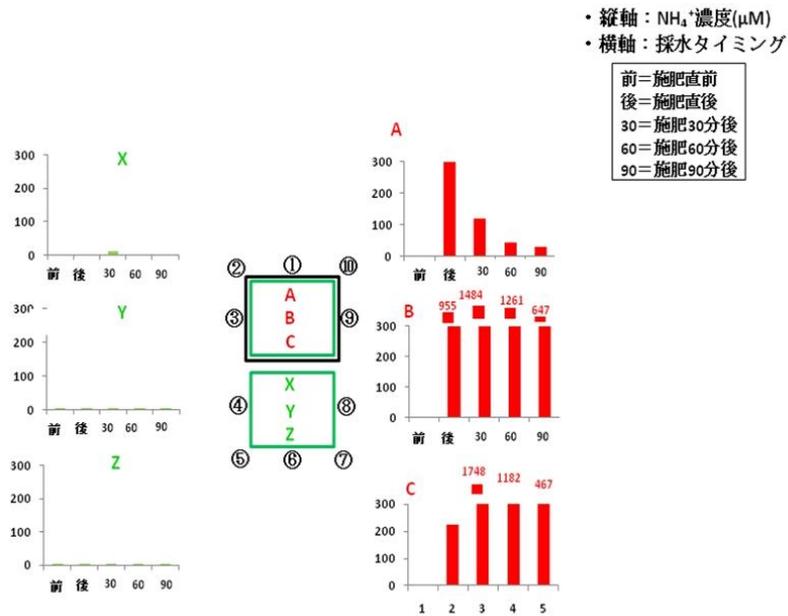


図 21 施肥実験における試験区、対照区内の NH₄⁺濃度の経時的変化

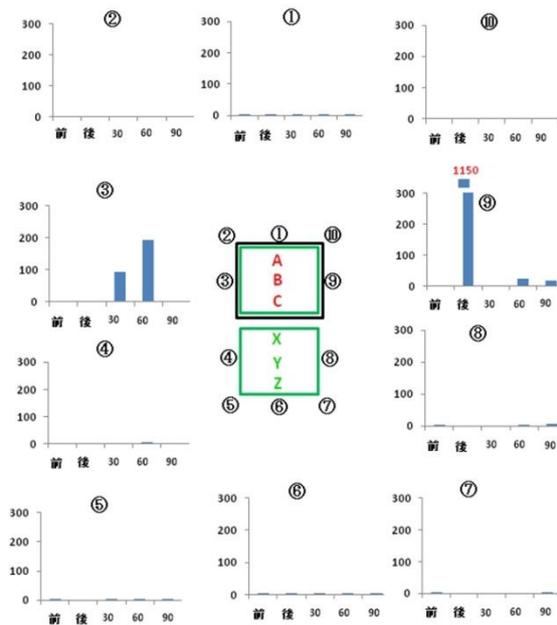


図 21 施肥実験における試験区、対照区周辺の NH₄⁺濃度の経時的変化

また、施肥区と施肥しなかった対照区において、収穫されたノリの色調に有意な差が認められた。さらに、両区画から製造された板海苔のノリ共販において決定された等級にも、有意な差が認められ、ノリスカートのノリの色落ちを防ぐ効果は十分にあると判断された。今回は、板ノリの値段で一枚当たり約 2 円の差が認められた (図 22)。

施肥はノリの色落ちが始まる直前より実施し、色落ちを止めるのが理想的である。しかしながら、今

回は、施肥のタイミングが遅れ、ノリの色落ちを進行させてしまい、その後の施肥により色を回復させた板ノリ値段差であった。次年度は、もっと早い時期から施肥を実施したいと考えている。尚、今回用いたノリスカートは、その効果が確認できたものの、ノリスカートを撤去後、スカートへの付着物の除去が非常に重労働であった。今後、ノリスカートの形状、施肥の時期、および施肥濃度等の改良も含め、次年度に向けて、さらに検討を進める予定である。

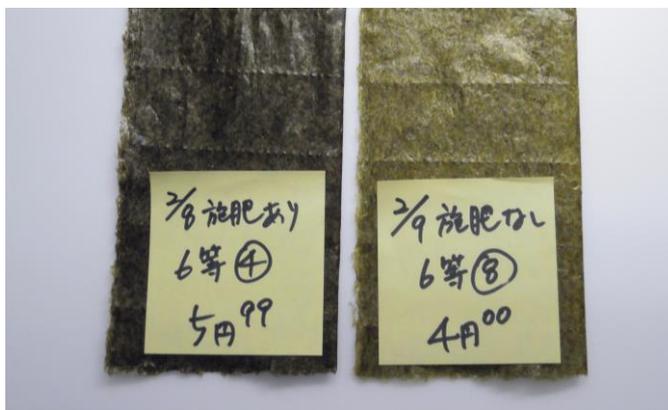


図 22 施肥実験における試験区と対照区からの板ノリ

今回の、ノリ漁場への施肥実験については、多くのテレビ、新聞等のマスコミに大きくとりあげられ(図 23)、本事業に対する地元のニーズの大きさと、注目度の高さが感じられた。



図 23 施肥実験の新聞報道

本プロジェクトに関連した著書・学術論文など

著書

一見和彦, 多田邦尚, 大田直友, 河井 崇, 吉田一代, 滝川祐子: 瀬戸内圏の干潟生物ハンドブック, 香川大学瀬戸内圏研究センター庵治マリンステーション編, 恒星社厚生閣, 95p. (2011).

学術論文

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, 59, 945-955 (2010).

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

帰山秀樹・朝日俊雅・中岡雅倫・一見和彦・橋本俊也・山田達夫・多田邦尚: 秋季の広島湾における植物プランクトン群集のサイズ組成および海洋細菌現存量. 沿岸海洋研究, 48, 65 – 74 (2010).

Yamada, M., Eri Katsuki, E., Otsubo, M., Kawaguchi, M., Ichimi, K., Kaeriyama, H., Tada, K. and Harrison, P.J.: Species Diversity of the Genus *Skeletonema* (Bacillariophyceae) in the Industrial Harbor Dokai Bay, Japan, *Journal of Oceanography*, 66, 755 – 771 (2010).

Fujiwara, M., Yamaga, K., Yoshimatsu, S., Miyagawa, M. and Suenaga, Y.: RESAECH ON THE APPROPRIATE CONDITION FOR *ZOSTERA* BED IN THE COASTAL AREA, PACON International, Program and Abstract p.56, (2010).

Ueda, T., Komatsu, H., Fujiwara, M., Yamanaka, R., Yasuoka, K. and Suenaga, Y.: THE *ZOSTERA MARINA* BEDS CREATION WITH DETACHED BREAKWATER, PACON International, Program and Abstract p.96, (2010).

Y. Suenaga: Technology for the Creation of Marine Habitat Using Numerical Model, Proceedings of ISE-2010, (CD-ROM), September (2010).

帰山秀樹・一見和彦・多田邦尚: 東部瀬戸内海内湾域の志度湾における物理環境、栄養塩濃度およびクロロフィル a 濃度の季節変化および経年変動. 海と空, 86, 25-33(2011).

一見和彦・住元宏栄・中山浩登・多田邦尚: 人手と干潟の生物環境—干潟底生生物の現存量と種多様性に与え得る人間活動の影響—. 沿岸海洋研究, 48, 109-116 (2011).

一見和彦・濱口佳奈子・山本昭憲・多田邦尚・門谷茂: 新川・春日川河口干潟 (瀬戸内海備讃瀬戸) におけるリンの収支. 沿岸海洋研究, 48, 167-178 (2011).

Nishikawa, T., Hori, Y., Nagai, S., Niyahara, K., Nakamura, Y., Harada, K., Tada, K. And Imai, I.: Long time-series observations in population dynamics of the harmful diatom *Eucampia zodiacus* and environmental factors in Harima-Nada, eastern Seto Inland Sea, Japan during 1974-2008, *Plankton Benthos Research*, 6, 26 -34 (2011).

Kaeriyama, H., Katsuki, E., Otsubo, M., Yamada, M., Ichimi, K., Tada, K., and Harrison, P.J.: Effects of temperature and irradiance on growth of strains belonging to seven *Skeletonema* species isolated from Dokai Bay, Japan, *European Journal of Phycology*, 46, 113 – 124 (2011).

山口一岩・三好慶典・加三千宣・槻木玲美・武岡英隆・多田邦尚: 東部瀬戸内海の表層堆積物における

生物起源珪素の分布と収支：全有機態炭素・全窒素・全リンとの比較，沿岸海洋研究,49, 69 -77 (2011).

藤原 宗弘, 末永 慶寛, 井面 仁志, 松島 学, 白木 渡：半閉鎖海域におけるアマモ生育環境の評価に関する研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学) , Vol. 67, No. 2, I_946-I_950. (2011)

Fujiwara, M., Yamaga, K., Yoshimatsu, S., Miyagawa, M. and Suenaga, Y. : RESAECH ON THE APPROPRIATE CONDITION FOR *ZOSTERA* BED IN THE COASTAL AREA, Recent Advances in Marine Science and Technology 2010, PACON International, pp.12-21, (2011).

Ueda, T., Komatsu, H., Fujiwara, M., Yamanaka, R., Yasuoka, K. and Suenaga, Y. :THE *ZOSTERA MARINA* BEDS CREATION WITH DETACHED BREAKWATER, Recent Advances in Marine Science and Technology 2010, PACON International, pp.22-32, (2011).

M. Fujiwara, M. Miyagawa and Y. Suenaga: Field Research on The Appropriate Growth Conditions for *Zostera* Bed, Proceedings of the 34th IAHR World Congress 2011, pp.3060-3067 ISBN 978-0-85825-868-6, (2011).

M. Miyagawa, M. Fujiwara and Y. Suenaga: Research on the Seaweed Rootage by Current Control Structure, Proceedings of the 34th IAHR World Congress 2011, pp.3060-3067 ISBN 978-0-85825-868-6, (2011).

H. Komatsu, M. Fujiwara, M. Miyagawa, H. Kakegawa and Y. Suenaga: Study on Selection for *Zostera marina* Beds Using Numerical Model, Proceedings of the 21st (2011) ISOPE Conference, pp.1166-1171, (2011).

日野良太・江種伸之・石塚正秀・平田健正：果樹園の月別窒素原単位に基づいた河川水質の季節変化特性に関する数値解析、土木学会論文集 B1 (水工学)，土木学会，第 67 卷，No.2、2012 (印刷中).