

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

開放性内湾が連なる三陸沿岸海域における沿岸環境管理法の開発 (S-13-2)

平成26年度～平成30年度

Development of coastal environmental management methods on the Sanriku Coast – a coastline that has a succession of open inner bays

(英文パンフレット等<https://www.emecs.or.jp/s-13/en/objectives/theme2>)

〈研究代表機関〉

学校法人横浜商科大学

〈研究分担機関〉

国立大学法人東京工業大学

国立大学法人東北大学

令和元年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	1
2. 研究開発目的	1
3. 研究開発の方法	1
4. 結果及び考察	4
5. 本研究により得られた主な成果	15
6. 研究成果の主な発表状況	16
7. 研究者略歴	24
II. 成果の詳細	
II-1 開放性内湾が連なる三陸沿岸海域における沿岸環境管理法の開発 （学校法人横浜商科大学）	25
要旨	25
1. はじめに	25
2. 研究開発目的	26
3. 研究開発方法	26
4. 結果及び考察	29
5. 本研究により得られた成果	51
6. 国際共同研究等の状況	52
7. 研究成果の発表状況	53
8. 引用文献	58
II-2 森一川一海の栄養物質輸送機構の解明 （学校法人横浜商科大学）	61
要旨	61
1. はじめに	61
2. 研究開発目的	62
3. 研究開発方法	62
4. 結果及び考察	66
5. 本研究により得られた成果	81
6. 国際共同研究等の状況	81
7. 研究成果の発表状況	82
8. 引用文献	85
II-3 森一海の物質輸送に果たす有機物の役割解明（鉄） （国立大学法人東京工業大学）	86
要旨	86
1. はじめに	86
2. 研究開発目的	87
3. 研究開発方法	87

4. 結果及び考察	93
5. 本研究により得られた成果	106
6. 国際共同研究等の状況	107
7. 研究成果の発表状況	107
8. 引用文献	111
II-4 森-海の物質輸送に果たす有機物の役割解明 (鉄) (国立大学法人東北大学)	••••• 112
要旨	112
1. はじめに	112
2. 研究開発目的	113
3. 研究開発方法	113
4. 結果及び考察	117
5. 本研究により得られた成果	133
6. 国際共同研究等の状況	134
7. 研究成果の発表状況	135
8. 引用文献	138
III. 英文Abstract	••••• 140

I. 成果の概要

課題名 S-13-2 開放性内湾が連なる三陸沿岸海域における沿岸環境管理法の開発

課題代表者名 小松 輝久（学校法人横浜商科大学商学部特任教授）

研究実施期間 平成26～30年度

累計予算額 143,037千円
 （うち平成26年度：31,507千円、平成27年度：29,932千円、平成28年度：28,935千円、
 平成29年度：26,788千円、平成30年度：25,875千円）
 累計予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 開放性内湾、大津波によるエコトーンの遷移、森は海の恋人仮説検証、志津川湾、物質循環、溶存鉄、養殖筏削減、協議会、エコラベル、ラムサール条約

研究体制

- (1) 開放性内湾が連なる三陸沿岸海域における沿岸環境管理法の開発(学校法人横浜商科大学)
- (2) 森－川－海の栄養物質輸送機構の解明(学校法人横浜商科大学)
- (3) 1 森－海の物質輸送に果たす有機物の役割解明(国立大学法人東京工業大学)
- (3) 2 森－海の物質輸送に果たす有機物の役割解明(国立大学法人東北大学)

1. はじめに(研究背景等)

沿岸海域は、多くの生態系サービスを人類に提供する重要な場である。しかし、過去の人間活動で沿岸域へ与え続けた過大な負荷は沿岸海域の環境容量を超えるものとなっている。外洋の影響を受けながら、河川から流入する陸起源物質と湾内の養殖漁業により人為的な影響を強く受ける開放性内湾については、閉鎖性内湾と異なり研究例が少ない。人と自然の共存を図る沿岸域管理手法を構築するための研究は少なく、開放性のリアス式内湾を対象とした研究、例えば三陸沿岸の研究はなく科学的に意義がある。沿岸海域とその後背地である陸域の自然・人間活動を総合的にとらえ、物質循環・エコトーンのあるべき姿を明らかにし、豊で賑のある開放性内湾域をつくるための具体的提案を行うことは、社会的・経済的に有意義である。大津波で破壊された三陸内湾の遷移過程を把握し、あるべき姿を提言することは、三陸の復興のために社会的にも重要で、かつ、緊急性がある。

2. 研究開発目的

大津波の甚大な影響を受けた開放性内湾からなる三陸の沿岸生態系と養殖などの人間活動の変遷をモニタリングし、津波で再生した塩性湿地や被害を受けた藻場などのエコトーン、海域利用の状況を明らかにする。また、森川海をつなぐ物質循環を調べ、開放性内湾における、環境収容力に見合い、良好な環境を維持でき、収益を確保できる、カキなどの最適養殖法の提案、塩性湿地などのエコトーンの機能の評価、「森が海の恋人」であることの定量的な証明を行う。三陸沿岸は、外洋に面し、それぞれが独立し、相互に環境が影響しないリアス式の開放性内湾を単位としシステムが成り立っている。上述の証明を行うために、適度な空間スケールの典型的リアス式湾である志津川湾を選んだ。また、津波防潮堤が沿岸海域の環境に及ぼす影響を分析し、自然生態系と共存可能な沿岸域のあり方を総括班(S-13-5)と共同で提案する。以上をもとに、三陸沿岸の開放性内湾においてどのような人手を加えることが豊かな沿岸海域を復活させることに有効かを明らかにする。

3. 研究開発の方法

(1) 遷移する沿岸環境監視とそれを応用した沿岸海域管理法開発

衛星画像により大津波の影響を受けた三陸沿岸の藻場分布の変化や、津波後に新たに形成された代表的なエ

コトーンである塩性湿地、津波の影響を受けた藻場の分布、河口域等の津波前後の分布の変化を調べた。本研究においてS-13-5で構築する生態系モデルの対象である志津川湾を重点海域として現場調査と衛星画像解析を行った(図1)。衛星画像はアーカイブされている高空間分解能商業衛星画像を取得し、また、空中写真も取得した。藻場マッピングには、教師付き分類を用い、教師データおよび分類精度確認用のデータとして、震災後直後に行った現場調査および本研究において行った現場調査データを用いた。現場調査では、ドロップ式カメラ、サイドスキャンソナーを用いた。震災前については、漁業者からの聞き取りや、環境庁自然保護局(1994)の第4回自然環境保全基礎調査などの既存資料を利用した。可視光マルチバンド衛星画像の解析には京都大学情報環境機構が共同利用研究として提供しているENVI 5(EXELIS社)を用いた。

開放性内湾においては、多数の養殖施設が設置されており、海洋環境に及ぼす影響は大きい。そこで、新しい沿岸環境監視手法として、合成開口レーダー(SAR)により得られる画像から筏を検出する方法および高解像度衛星のデータを高空間分解能の白黒画像であるパンクロマティック画像を用いてマルチバンド画像を高分解能にする手法を用いて養殖施設を検出する方法について検討した。宇宙開発機構(JAXA)が打ち上げたALOS-2に搭載されているLバンドSARセンサPALSAR-2およびJAXAの航空機搭載型LバンドSAR(Pi-SAR-L2)で得られたSAR画像を用いた。SAR画像は、PolSAR pro Version 5(ESA)で解析した。

志津川湾をモデルとして開放性内湾における海洋環境管理法を開発するために、宮城県漁業協同組合志津川支所、同志津川湾運営委員会、南三陸町、WWF、宮城県気仙沼水産試験場と「志津川湾の将来の海洋環境を考える協議会」を2015年から立ち上げ、2019年3月末まで6回の協議会を開催した。

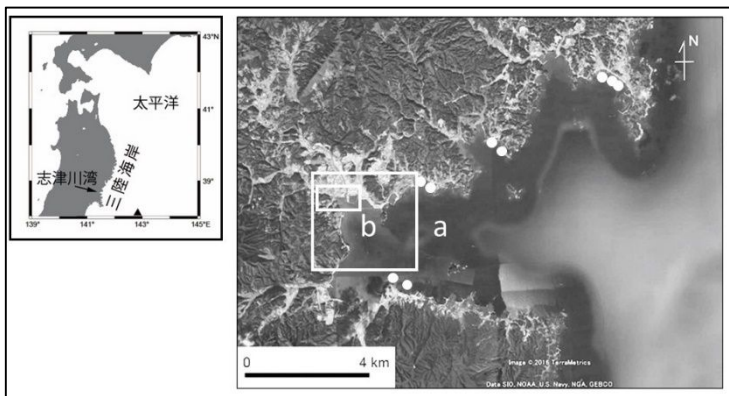


図1 三陸海岸、志津川湾(矢印)、震災(黒三角)を示した地図(左図)と志津川湾とその後背地を示す衛星画像にリモートセンシングで解析した範囲(正方形aと長方形b)、2011年10月19-20日に吊り下げカメラでアマモの残存を確認した場所(白丸印)を示した図(右図)。リアス式湾で、湾口部は広く深く、湾奥部に河川が流入し、海岸に迫る山が海岸を取り巻く。

(2) 森-川-海の栄養物質輸送機構の解明

モデル海域である志津川湾内において、物質循環の全体像解明のために一連の現場調査を行った。河川水を通じた負荷量長期間連続モニターとして、水試料を2014年7月から2015年度末までの期間、主要3河川の河口で毎週採取し、栄養塩濃度と光合成色素濃度を測定し、周年に亘る流入負荷量の推定を行った。湾内広域調査として、15定点において、四季にわたり、5m深ごとに採水して、栄養塩類の分析定量と粒子状の各種化学物質の定量を実施した(図2)。海底が岩質でない定点において、採泥を実施しクロロフィル濃度や有機物含有量を定量した。湾中央部の定点で採水を行い、陸上施設において ^{13}C 疑似現場法により基礎生産量の推定を行った。湾内の栄養塩類等の空間分布及び現存量推定を行った。湾内栄養塩現存量推定の補助として、湾内3定点で月3回、海水試料を採取して同様の分析定量を実施した。湾内で養殖されているカキとホヤを実験室に持ち帰り、栄養塩再生量の定量を四季にわたって実施した。同時に、養殖海域においてカキとホヤによる排泄物のインパクトを見積もるために、セジメントラップを観測時に毎回設置して、沈降粒子束を実測評価した。栄養塩を利用して光合成過程により生じる基礎生産物の起源や輸送過程を推定するために、海水中の粒子状物質、カキ養殖施設付着微細藻類、大型海藻、アマモおよび海底堆積物中の炭素・窒素安定同位体比を測定した。

ADCP流速断面調査(図2)をもとに、観測日に近い大潮および小潮の上げ潮時、下げ潮時の平均潮流流速を各層について推定し、上げ潮時を流入、下げ潮時を流出として、各層の断面積と平均潮流流速を乗じて上げ潮時の流入量と下げ潮時の流出量を求めた。湾外とした定点の上述の各層の各態栄養塩濃度 $[mg\ m^{-3}]$ を各層の流入流出量に乗じて、各層ごとの各態栄養塩の流入流出量の質量を求め、流入量質量と流出量質量の差(流入量質量を正とし、流出量質量を負として)を求めた。最後に、湾奥部面積($13.8km^2$)で除し、湾奥部単位面積当たりの外

洋からの各態栄養塩流入流出量質量とした。

付着藻類が実際にカキの餌料として利用されるのかどうかを確かめるために、現場での付着増殖試験と脱着量の定量化を試みた。マガキの摂餌および栄養塩再生能力測定実験には、給餌区、無給餌区、コントロール区それぞれ2基の水槽を準備して(図3)、餌料として珪藻(*Chaetoceros gracilis*)を与えた。実験は72時間行い、明暗周期は12L:12Dとした。温度条件は10℃区と20℃区を準備してそれぞれ複数回実施した。

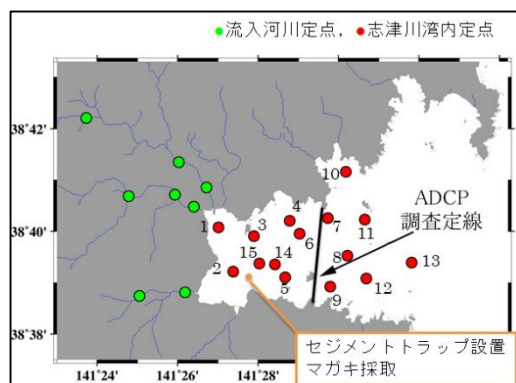


図2 志津川湾(赤丸)および流入河川(緑丸)の試料採取点。ADCP流速断面調査を行った定線(実線)と物質循環を検討したADCP調査定線より西側の海域(13.8km²)。

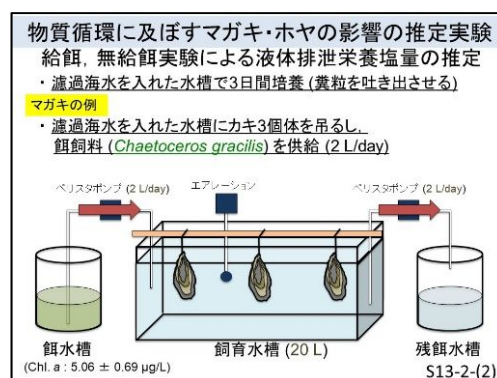


図3 マガキの給餌・無給餌実験による液体排泄栄養塩量推定のための実験装置。

(3) 1 森—川—海の有機物質輸送機構の解明(鉄)

鉄と有機物の動態を分析するため、2014年7月から2015年6月まで毎月1回、2015年7月以降は4ヶ月に1回、志津川湾内(湾口・湾央・湾奥)の2深度で海水、志津川湾の主要流入河川上下流域の河川水・河口水、集水域における井戸水・田面水・浄化槽排水を採取した。水試料は、事前に酸洗浄した1Lびんに採取し、ポリテトラフルオロエチレン製メンブレンフィルター(孔径0.45 μm)によりろ過し、溶存有機態炭素濃度、溶存有機物の光学的(吸光・蛍光)指標を測定した。全溶存態微量金属濃度を、Nobiasキレート樹脂で前処理してマトリックスの影響を除去し、誘導結合プラズマ質量分析装置により定量した。さらに、溶存鉄の酸化反応速度をルミノール法によって測定した。溶存鉄の酸化反応に及ぼす藻類が産生する有機物の影響を調べるため、志津川湾より単離した珪藻(*Chaetoceros radicans*)培養液の鉄酸化速度をルミノール法により測定した。単離した*C. radicans*を溶存鉄が欠乏した人工合成培地で培養し、培地中の溶存鉄濃度および得られた増殖速度から、珪藻による鉄摂取の半飽和濃度(K_0)と最大増殖速度を求めた。海洋において河川由来あるいは海洋由来の溶存鉄のどちらを効率よく利用するか知るため、2種の培地に、微細藻類(*Skeletonema marinoi-dohrnii* complex)および大型褐藻アラメを接種して溶存鉄摂取実験を行った。

溶存鉄に及ぼす土地被覆の影響を明らかにするために、北上山地水系を対象に2017年冬季・夏季に現地調査を実施した。三陸の11河川・北上川支流7河川で、冬季63地点、夏季61地点の表層河川水を採取し、水温、pH、DO、電気伝導度を記録した。植生の影響評価のために上流域の採水点33地点を、耕作地や都市部等の人為的土地被覆の影響を評価するために、中・下流域の調査地点(冬季30、夏季28地点)を選定した。上述の方法で水試料の溶存鉄濃度を測定した。5万分の1植生図(環境省自然環境局生物多様性センター)をもとに、各調査地点の集水域面積および土地被覆割合をGISソフトで計算した。土地被覆は、広葉樹林、針葉樹林、草地、水田、耕作地、都市部の6項目に分類し、針広混交林は広葉樹林に含めた。定地点の日流量は、3段タンクモデルによって推定した。溶存鉄濃度と河川流量から溶存鉄の負荷量に対し、各土地被覆の集水域面積を説明変数とする重回帰分析で原単位を推定した。

(3) 2 森—川—海の有機物質輸送機構の解明(粒状有機物)

志津川湾内の粒状有機物分布を調べるため、2014年6月から2015年6月まで流入する3河川の下流および湾奥・湾中・湾口の2深層で毎月採水した2014年8月に、志津川湾内における底質中有機物の分布(有機炭素・窒素含有率、炭素安定同位体比)多点で調査を行った。粒状有機物動態に関わる各種フラックスの比較を行うために、プランクトン群集による一次生産・呼吸を現地における明暗瓶法により測定した。志津川湾内の一次消費者の餌

料起源推定のため、2015年9月に湾奥部の干潟・浅海部系6地点でマクロベントス・養殖カキ・底質・潜在的餌起源となる各種有機物を採取し、それらの炭素・窒素安定同位体比分析を行った。2015年春季より四季にわたり、養殖カキの餌源としての海水中粒状有機物とカキ軟体部を採集し、それらの脂肪酸組成分析を行った。

2014年10月より同年夏季に採取された種カキを、防汚処理した養殖カゴに入れ志津川湾内の志津川地区・戸倉地区の全4定点に設置し、定期的に各定点から10個体を採取し、サイズ・重量の計測を行った。なお、飼育期間中はカキおよび養殖カゴを1～2ヶ月程度に一度ブラシ等で洗浄した。2014年11月に、養殖カキの月齢による海域への環境負荷の違いを把握するため、現場メソコズム実験を実施して3、15、27月齢のカキの排泄物を採取し、その有機炭素含有率と酸素消費速度を測定した。

2016年夏季より季節ごとに、志津川湾内のカキ養殖場内外各3地点の3深度層から海水を採取し、セディメントトラップによる沈降粒子の採取を行った。採取された粒子については元素分析と脂肪酸組成分析を行うとともに、粒子試料を海水で満たした蓋付きガラスバイアルに密封し屋内での培養実験により酸素消費速度を定量した。培養時、志津川湾の平均水温である18℃のもと暗条件で振盪攪拌を行った。バイアル中海水の溶存酸素濃度の時間変化を蛍光式非接触型DOセンサー(PreSens社)で計測した。沈降する粒状有機物中の起源となる有機物の混合状態を把握するため、沈降有機物と潜在的起源としてのカキ・イガイの排泄物やカキクラスター・養殖施設内のロープの付着物等の炭素・窒素安定同位体比分析を行った。

4. 結果及び考察

(1) 遷移する沿岸環境監視とそれを応用した沿岸海域管理法開発

本研究の重点海域である志津川湾については、津波により湾奥の北と南にあったアマモ等の海草藻場が無くなった。また、湾の南側の島の西側に広がっていたタチアマモも無くなった。津波から3年後の2014年1月15日の藻場の分布は、湾奥の南と北の海草藻場以外では、アマモ等の海草がほぼ津波前程度に回復した(図4)。一方で、津波直後に大幅に増加した岩礁性藻場は、2014年に大幅に減少した(図4)。これは、津波直後には、瓦礫などの付着基質が大幅に増えたが、多くの瓦礫が取り除かれた事により海藻の付着基質が減少したことと、津波の影響が少なかったウニにより震災直後の夏に産卵しされ成体になった個体が2013年以降大型海藻の摂餌をはじめ、岩礁性藻場にその食害が現れていることのためである。

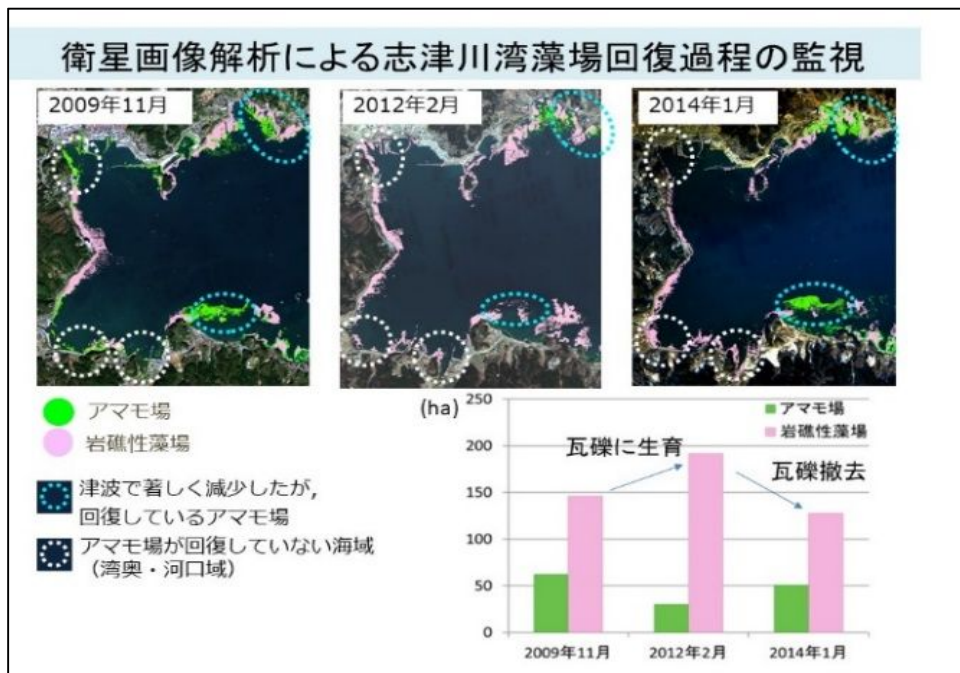


図4 衛星画像解析により得られた、震災前2009年11月、直後の2012年2月、3年後の2014年1月の岩礁性藻場とアマモ場の分布面積。

志津川湾湾最奥部(図1a)で確認された広範囲な磯焼けは(図5)、キタムラサキウニの大群が原因であった。この

範囲を衛星画像解析から調べると、湾奥部一体の岩礁が磯焼けになっていた。大槌湾の岩礁ではウニが震災後も多く生き残っていたことから(Komatsu et al., 2015)、志津川湾においても、津波後にも岩礁域では生き残った多くのウニ個体が2011年の夏に産卵し、生まれた個体が2013年ころから大型海藻を食害しはじめたと推測される。震災後は、ウニを採捕する漁船がなくウニ漁業がなかったこと、その後、漁船を確保できるようになっても、ウニが雑食性で、海底に人の死体があるとそれを食べることもあるために、三陸の漁業者がウニの漁獲をしなかったこと(黒沢正隆氏私信)で、磯焼けが起こるとされる5-10 ind./m²(水産庁, 2015)を大幅に超える爆発的なウニの増加をもたらしたと考えられる。現在、宮城県漁協志津川湾運営協議会と南三陸町とが、ダイバーを雇用してウニ駆除作業をおこなっている。このようにウニ漁業は、藻場を守る里海活動であり、健全な漁業が健全な海洋環境を維持する役割を果たしている。



図5 2015年2月25日に撮影された衛星画像(GeoEye-1)の解析により得られた磯焼けした藻場(濃い灰色)、健全な岩礁性藻場(薄い灰色)、陸地(黒)、それ以外(白)の分布。

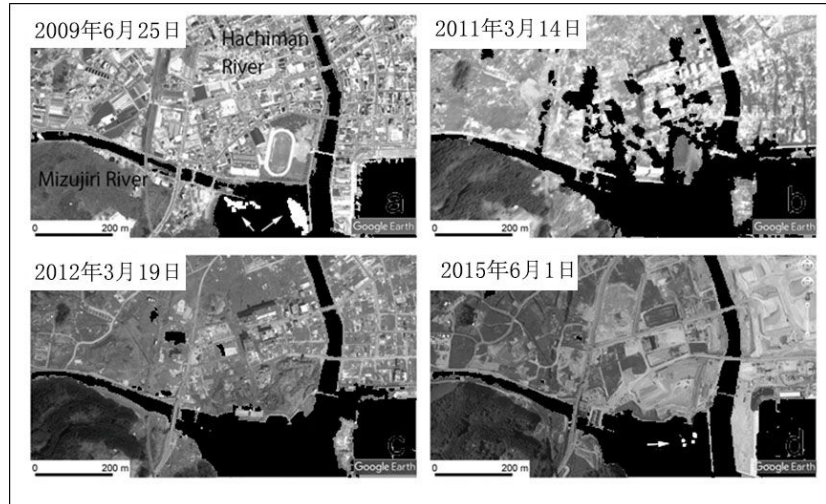


図6 衛星画像解析読図判別により得られた、震災前2009年6月、震災直後の2011年3月、1年後の2012年3月、4年後の2015年6月の、海域(黒色域)、矢印で示したアマモ場(白色域)、陸地の冠水域(黒色)の分布変化。

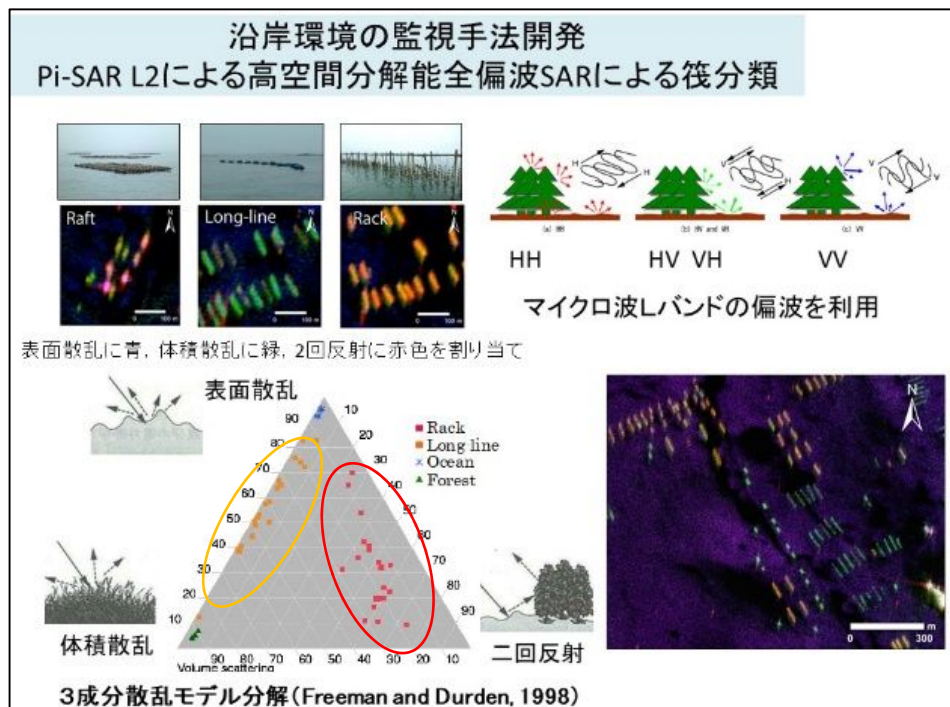


図7 SARの偏波の反射特性、松島湾の筏3種、2014年8月6日に撮影された松島湾のPi-SAR-L2データから求めたFreeman and Durden(1998)の3成分散乱モデル分解の結果。三角形の図の赤の楕円は木架式、橙の楕円は延縄式養殖施設のグループを示す。

志津川湾北西湾奥部(図1b)の震災前2009年6月、震災直後の2011年3月、1年後の2012年3月、4年後の2015年6月の衛星画像を讀図により、海域、アマモ場、陸域の冠水域に判別し、それらの分布の時間変化を調べた(図6)。河口域のアマモ場は、震災後の陸域における工事が進み濁水の流出が少なくなった4年後に再生した。一方、震災後の地盤沈下と防波堤の消失により干潟や冠水域で示される湿地が回復し、豊かな生態系が戻った。しかし、1年後には埋め立てが始まり消滅し始めた。防潮堤の工事により陸域と海域を遮断することで陸水と海水の連続が失われ、エコトーンである干潟および塩性湿地の環境や生態系が分断されていった。福島ら(2016)は、気仙沼湾舞根において震災後にできた塩性湿地に流入する地点、塩性湿地内の点、湿地から川として流出する点で、溶存鉄と錯体をつくり河口で溶存鉄が酸化されないようにする有機物の指標である水中のDOC濃度・UV254・フルボ酸様の相対蛍光強度などを調べた。その結果、塩性湿地を通過すると水中の指標すべてで値は上昇し、塩性湿地から湾内に供給される溶存態鉄が上昇していることを示唆していた。三陸の沿岸では、津波の後に塩性湿地ができ、陸地となるような生態遷移が数十年～百年という時間スケールで、津波のたびに繰り返されている。三陸復興国立公園では、地震・津波により大きく影響を受けた干潟・アマモ場、再生した塩性湿地といったエコトーンについて、地域の理解が得られた場合は、復興の歩みを妨げないよう配慮しながら、自然の回復力を助ける形で再生の取組を進めることになっている。津波の教訓を生かし、自然と共生する社会を築くために、生態遷移が観察できる湿地や干潟の積極的な保全が望まれる。

藻場・塩性湿地・干潟は、陸と海とのエコトーンとして生物多様性を涵養する重要な生息場であり、沿岸漁業を支えるブルーインフラである。また、生物多様性を確保することを日本政府は決め、環境省が自然生態系の回復を目指している(環境省, 2014)。特に強調しておきたいのは、大津波は、アマモ場を破壊し、海岸を破壊したが、埋め立てで失われていた塩性湿地や干潟を回復・再生させた(Komatsu et al., 2018)ことである。再生した干潟や塩性湿地の提供する生態系サービスの価値は、藻場と同様に、非常に高い。一方、人命が重要であるということで、巨大防潮堤および河川の巨大護岸提建設が進められている。三陸沿岸の基幹産業である水産業を支える、健全な海洋環境、ブルーインフラとそれをはぐくむ陸域環境の保全が強く望まれる。このように、衛星画像等を用いる監視は俯瞰的に状況を捉えることができ、ダイナミックに遷移する三陸沿岸のモニタリングに最適である。エコトーンの変化とその変化原因把握のため継続する必要がある。

開放的内湾では、多くの養殖筏が設置され、海洋環境に影響を及ぼしている。養殖筏による漁業は各県の知事が許可する区画漁業権内で営まれ、地元の組合が管理する。しかし、県も組合も実際の養殖筏の分布地図はもっておらず配置を把握していない。そこで、沿岸域の環境管理に必要な養殖施設の分布を把握する方法として、リモートセンシングによるマッピング手法を開発した。雲の影響を受けない合成開口レーダ(SAR)画像を用いる方法について松島湾を対象に検討した。Freeman and Durden(1998)の3成分散乱モデルを用いて、全電力のうちの表面散乱、体積散乱、2回反射が占める割合をそれぞれ求めた。橙の楕円で示した延縄式(long line)養殖施設(幅1.5 x長さ60 m)は大部分が表面散乱と体積散乱を示し2回反射はほとんどなく、赤の楕円で示した木架式(rack)養殖施設(高さ1-2 m x幅2-5 m x長さ60 m)は2回散乱、表面散乱、体積散乱の順で全電力への寄与が多く、2種類を、散乱特性に基づいて区別できた(図7)。一方、筏式養殖施設は、設置されている向きとセンサとの入射角の違いによって異なる散乱を示したが、高空間分解能画像であれば、幅5m x長さ15mに決められている筏式養殖施設の判読は可能である。以上、PiSAR-L2を用い三陸沿岸の養殖施設を分類できるようになった。

志津川における震災前後の養殖筏の設置状態をリモートセンシングで復元した。高空間分解能の光学衛星画像を用い、空間分解能0.5 m程度のパンクロマティック画像と4mのマルチバンド画像とを合成したところ、ワカメの延縄式養殖施設、カキ延縄式養殖施設、ギンザケ養殖生簀、カキ筏式養殖施設を判別できた。また、HH単偏波SAR観測データを用いることでカキ延縄式養殖施設、ギンザケ養殖生簀、カキ筏式養殖施設といった海面養殖施設を検出できた(図8)。そこで、入手可能な画像をもとに震災前から震災後にかけての海面養殖施設の変化を時系列的に把握した(図9)。漁業権の管理を行っている志津川地区と戸倉地区のそれぞれの範囲について、カキの延縄式養殖施設の台数の変化を調べた。震災前2009年2月3日では、志津川地区471台、戸倉地区916台あったが、震災後2015年8月6日では、それぞれ、震災前のおよそ55%、23%にまで減少した。湾奥部全体のカキ筏密度は、震災前の96.6台/km²から34.1台/km²になった。今回開発した方法は、海洋環境に大きな影響を及ぼす人的インパクトである養殖の程度を把握する上で役立つ。

志津川湾の生態系モデルのシミュレーションのために、人工衛星画像から、海草藻場、岩礁性藻場の分布を地

理上システムに入力した。また、湾内の各養殖施設の養殖物を判別し、各養殖施設が何の養殖しているのかを地理情報システムに入力し、それぞれを総括斑に提供した。また、水温塩分計と流速計を湾中央部に南北方向に沿って3か所の3深度に配置し、データを取得した。得られたデータを生態系モデルのシミュレーションのために、S-13-5に提供した。

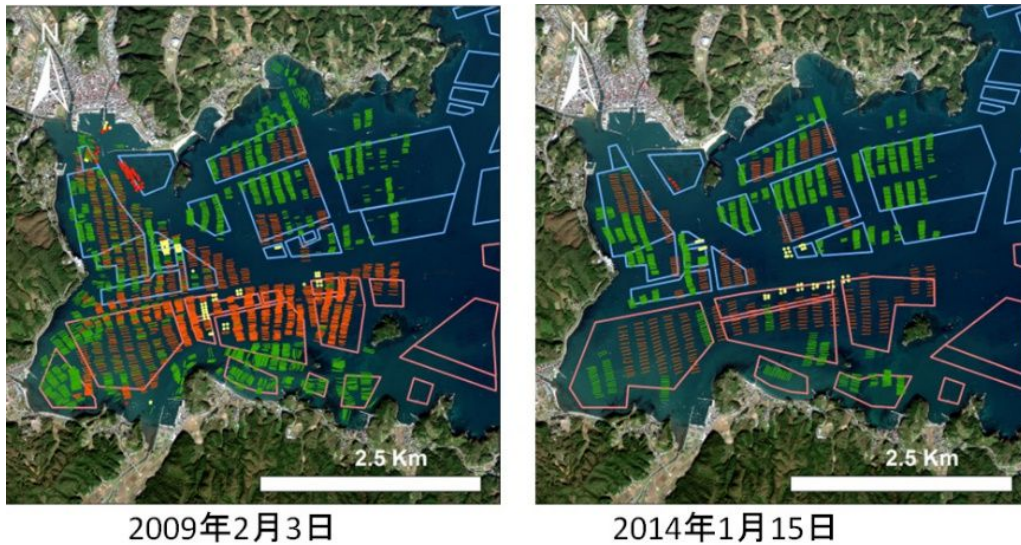


図8 衛星画像解析で検出した2009年2月3日(左図)と2014年1月15日(右図)の海面養殖施設配置図。多角形は志津川地区(青)と戸倉地区(赤)の区画漁業権、短線はワカメ延縄式(緑)、カキ延縄式(橙)、カキ筏式(赤)、サケ生簀(黄)。

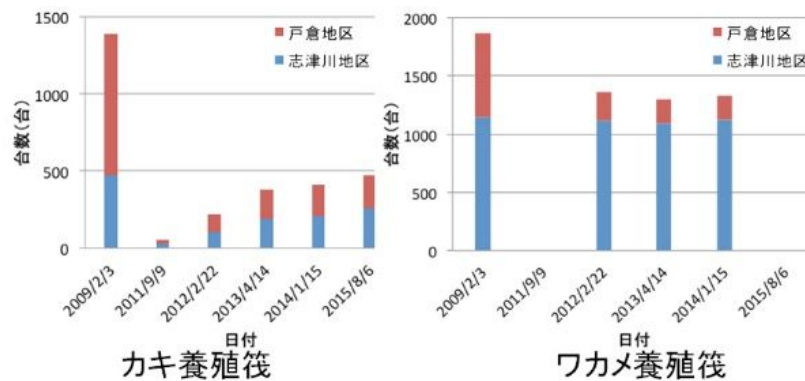
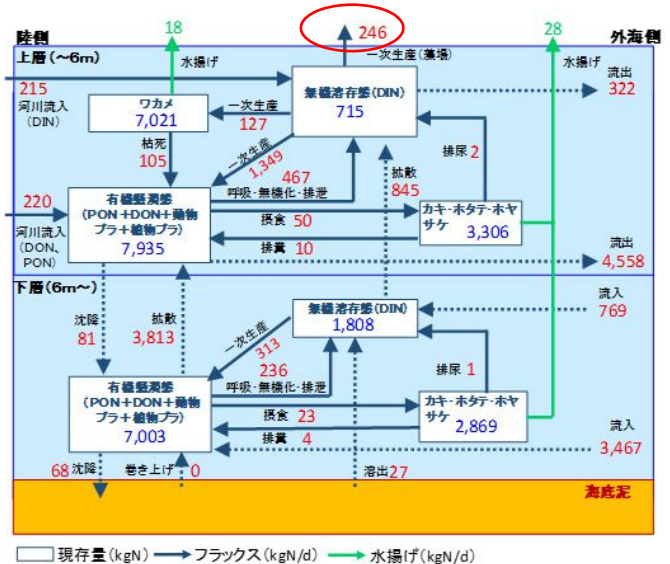


図9 衛星画像解析で検出した2009年2月3日から2015年8月6日までの志津川地区(青)と戸倉地区(赤)の区画漁業権内のワカメ養殖施設(右図)とカキ養殖施設(橙)。

図10 藻場を入れた生態系モデルのシミュレーションで計算した志津川湾湾奥部の年平均の窒素循環。現存量(kgN)、フラックス (KgN day⁻¹)、水揚げ(kgN day⁻¹)は、それぞれ、長方形、黒矢印、緑矢印で示し、藻場の一次生産による窒素フラックスの数値を強調のため赤楕円で囲む。



S-13-5の志津川湾生態系モデルを用いて窒素栄養塩循環に及ぼす藻場の影響を評価した(図10)。年間平均の無機溶存態窒素現存量2523kgNに対して、植物プランクトン、ワカメ、藻場が吸収する無機態窒素吸収速度は、それぞれ、1652kgN day⁻¹、127kgN day⁻¹、246kgN day⁻¹合計2025kgN day⁻¹となった。一次生産全体に対する植物プランクトン、ワカメ、藻場の割合は、82%、6%、12%となる。志津川湾湾奥部(13.8km²)では、藻場の窒素吸収速度は、ワカメの2倍ある。しかし、生長に窒素を必要とする時期は、ワカメが冬季から初春まで、藻場構成種が初春から初夏まで、カキの生長に必要な植物プランクトン・付着珪藻が晩夏から初冬までと時期的に重ならない。また、藻場種の窒素要求速度は河川からの窒素供給速度の1/2程度の範囲にあり、水深7m以浅の海底上に生育している藻場種にとっては、河川から供給される栄養塩が重要である。外洋からの窒素供給が支配的である三陸の開放性内湾では、一次生産者が窒素を要求する時期をお互いに違える(時期的すみわけ)システムとアマモなど河口域に生育する海草類が主に河川からの栄養塩供給に依存することで湾内の高い一次生産を支えている。

サブテーマ(1)では、開放性内湾の管理法を開発することを目的としている。そこで、研究結果を共有し、将来の志津川湾の環境と漁業のあるべき姿について議論する場として、地元である宮城県漁業協同組合志津川湾運営委員会、同志津川支所、同志津川支所戸倉出張所、支所及び出張所傘下の漁業種別委員会、南三陸町、宮城県泉仙沼水産試験場、WWFなどと「志津川湾の将来の環境を考える協議会」をつくった。2015年4月30日、2016年5月16日、2017年1月16日、2017年10月11日、2018年7月31日、2019年3月12日に開催し、栄養塩循環、養殖場の海底環境、漁業権更新に伴う養殖対象種の変更、ASC認証と海洋環境の現状、磯焼け、ラムサール条約への登録、S-13-4の志津川湾における組合員の意識調査などについて議論した。

その一例を示す。河川を通じて供給される栄養塩、溶存鉄、粒状有機物が、カキやワカメの養殖を決定するほどではないという本研究の結果を2016年5月16日の協議会で発表した。漁業者から、「そうだと思っていた。鉄については、森は海の恋人ではなく、森は海の友達」ではないかという指摘があった(小松ら, 2018)。物質循環の面では河口域に限られることから、全面的に依拠する恋人ではないが、一部助けてくれるという意味での表現である。物質循環以外の開放性内湾に対する森林の役割について検討すると、土砂の流出を防ぐ効果(北原 1998)、大量の降雨による淡水の湾内への流入を緩和させる貯水効果(藤枝, 2007)といった機能を通じて、湾内の養殖力キなどが成長する海洋環境に良い影響を及ぼしていると考えられる。植林され、放置された針葉樹林では、間伐、枝打ちなどがなされず、大雨が降ると、表層の土砂が流され、木の根が深く張らず、大雨で土砂崩れをおこしてしまう。広葉樹林では、林床まで光が届くため、広葉樹を植林することは、手入れをしない針葉樹林よりも海洋環境に良いということになる。したがって、畠山(2000)が根拠とした鉄仮説(松永, 1993)に依拠するのではなく、森林の多面的な機能に着目した視点から、広葉樹の植林が開放性内湾の環境に及ぼす影響を評価しなければならない。このような多面的な森林の機能をもとにすると、「森は海の恋人」といえる。

東日本大震災前に宮城県産養殖ホヤの約7割を消費していた韓国は2013年9月からホヤを含むすべての水産物の輸入を禁止し、県ではホヤが供給過剰になっている。宮城県沿岸で養殖ホタテガイから国の基準を超えるまひ性貝毒が検出され、2018年4月下旬以降、全海域で出荷の自主規制が続いている。さらに、志津川湾奥部では、栄養塩が不足し、葉部の商品価値がなくなり、メカブだけしか出荷できない。そこで、志津川湾運営委員会では、区画漁業権の免許の更新時に、湾央部で行われているホタテとホヤの養殖をワカメに転換できないか、湾奥部のワカメ養殖台数を適正な台数にできないかという検討を行うことにした。組合とS-13とのco-designで4つのシナリオをつくり、S-13-5で開発したモデルでシミュレーションした(山本ら, 2018)。その結果、筏台数の削減により筏1台当たりの生産効率が向上することと、筏台数の削減により経費が削減されることがバランスした「湾奥部はワカメ筏75%まで削減、湾央部はホヤとホタテ筏を75%まで削減し、削減した筏をワカメ筏に転換」というシナリオが最も湾奥部全体の収益を大きくすることがわかった。ホヤとホタテ筏をワカメの養殖筏に転換した場合に、ホヤやホタテの糞の負荷がなくなり、底質環境にはよい。また、ホヤやホタテは、ろ過食者であり同じろ過食者のカキと競合するが、ワカメに変更すると競合の問題は起こらない。また、ホタテやホヤの垂下養殖があると、垂下連は流れに対する大きな抵抗となり、海水交換を妨げるが、ワカメ養殖では流れによってたなびくため抵抗は減少し、海水交換はホヤやホタテを養殖していた時よりも促進される。栄養塩の供給は外洋が担っていることから、ホタテとホヤの養殖をワカメに変更することは、海水交換が促進され、カキ養殖にも湾内の環境にもよいということになる。

2017年に開催した協議会で、生態系モデルの計算結果をもとに議論を行った。漁業者からは、長年の経験から得ている感じ(経験知)と同じだという意見が寄せられた。2018年の区画漁業権の更新では、協議会での議論も

参考にして湾中央部の志津川地区のホタテガイとホヤ養殖をワカメに転換した。このように、協議会では、科学的データも利用して、持続的な海洋環境と漁業生産を両立させる取り組みを進めることができる。この取り組みを続けることで、豊かで賑わいのある志津川湾を実現できる。この協議会の経験は、物質循環に及ぼす最も大きな人為的影響が海面養殖である他のリアス式の開放性内湾へ広げていけるものである。

環境に大きな負担をかけず、地域社会にも配慮した養殖業を認証する世界的団体として、水産養殖管理協議会(ASC)があり、基準に沿った養殖で生産される水産物にASCのエコラベルを貼って出荷できるようになる。2020年東京オリンピックではエコラベルの食材のみが使われる予定だが、2016年当時では日本の食材でエコラベルを取得しているのは、MSCの3つの漁業の4つの食材と限られていた。S-13の提供したデータも役立ち、2016年5月に日本の二枚貝養殖で初めて、志津川湾戸倉地区のカキ養殖がASCに認証された。戸倉地区におけるカキ養殖は、松田(2007)が述べた里海を実現する健全な水産業の営みそのものである。ただし、戸倉地区だけでは志津川湾の海洋環境を保全できない。このエコラベルを維持するためには、集水域となっている陸域の使い方、志津川湾での養殖の在り方などに配慮していくことが不可欠になり、志津川湾をともに使っている他の地区の協力も重要になる。多くの関係者の理解を得るためには、生態系モデルで予測し、遷移する沿岸生態系を監視し、人手のかけ方の効果を可視化することが一層重要になっている。協議会では、これらの点について、志津川湾奥部の海洋環境を共有する志津川地区の漁業者とともに確認している。2019年3月12日の協議会では、志津川地区でもカキ養殖やワカメ養殖についてもASC認証を目指すことになり、戸倉地区から湾奥全域の取り組みに広がっている。

山の利用について里山をキーワードとして考えてみる。里地・里山は、特有の生物の生息・生育環境として、また、食料や木材など自然資源の供給、良好な景観、文化の伝承の観点からも重要な地域である。リアス式内湾の後背地の里地は山が迫り、狭いので、山の影響が強い。伝統的里山活動としては、肥料(緑肥)や燃料を得るために行われていた下草刈、間伐、枝打ちがある。これらの活動によって、幹が太く根が深く張り、光が十分あたるため森林も元気になり、林床にも光が当たり、生物多様性も増加する。このような持続的に森林を利用する伝統的な知恵が里山活動である。南三陸町森林組合では、2015年10月に森林管理協議会(FSC)からFSC認証を受けた。FSC認証は、将来世代の権利や需要を損なうことなく現在の世代の社会的、環境的、経済的な権利や需要を満たすことをビジョンとし、環境保全の点から見ても適切で、社会的な利益にかなない、経済的にも継続可能な森林管理を世界に広めることをミッションとしている。つまり、里山活動の認証である。志津川湾では、養殖カキのASC認証と森林のFSC認証とで、山と海が繋がった。



図11 FSC-Ramsar-ASCという国際認証を用いる里海型沿岸域管理の提案。

森と海の間をつなぐエコトーンについては、「特に水鳥の生息地として国際的に重要な湿地に関する条約」であるラムサール条約へ日本で初めてとなる低潮時6 m以浅の浅海域の海藻藻場を登録する準備を南三陸町は始めた。志津川湾には、寒海性コンブ目(マコンブ)と暖海性コンブ目(アラメ)が共存する海域の代表的な海藻藻場として貴重で、アラメ群落の北限に近い(阿部, 2017)。また、国の天然記念物であり、絶滅危惧種に指定されている

コクガンの越冬地ともなっている。2018年10月21から29日までアラブ首長国連邦ドバイで開かれた第13回ラムサール条約締約国会議で、志津川湾の藻場が登録された。ラムサール条約では、湿地の「保全(・再生)」と「ワイズユース(賢明な利用)」、これらを促進する「交流、学習(CEPA)」を3本柱としている。まさに、磯で行われるウニ漁業は、ラムサールで登録された藻場を保全する役割を果たしており、松田(2007)の、健全な物質循環系を維持し環境を保全するためには、沿岸域の健全な水産業の営みが重要であると指摘する水産業であり、里海活動である。ラムサール条約湿地登録で、志津川湾周辺の森から海までのつながりが完成し、南三陸町の目標である自然との共生が前進している。FSC、ラムサール条約、ASCを取得することで、物質循環に沿って、持続的な林業・水産業と生物多様性に富んだ豊かで健全な海洋環境を実現することができる(図11)。森林・養殖のエコラベルやラムサール湿地の登録は里山・里海活動であり、有効なツールであり、新しい沿岸域管理方法となる。

(2) 森－川－海の栄養物質輸送機構の解明

志津川湾で養殖されているマガキの生物量は多く低次生産過程で重要である。そこでマガキの餌資源を明らかにするため、水柱植物プランクトンの粒状有機物(POM)、マガキ、マガキ殻の付着藻類の $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ の季節変動を調べた。主な餌資源がPOMと付着微細藻類と仮定すると、マガキの $\delta^{13}\text{C}$ 値は水柱植物プランクトンと付着微細藻類の間の値で、付着微細藻類も餌資源としていることが強く示唆された。

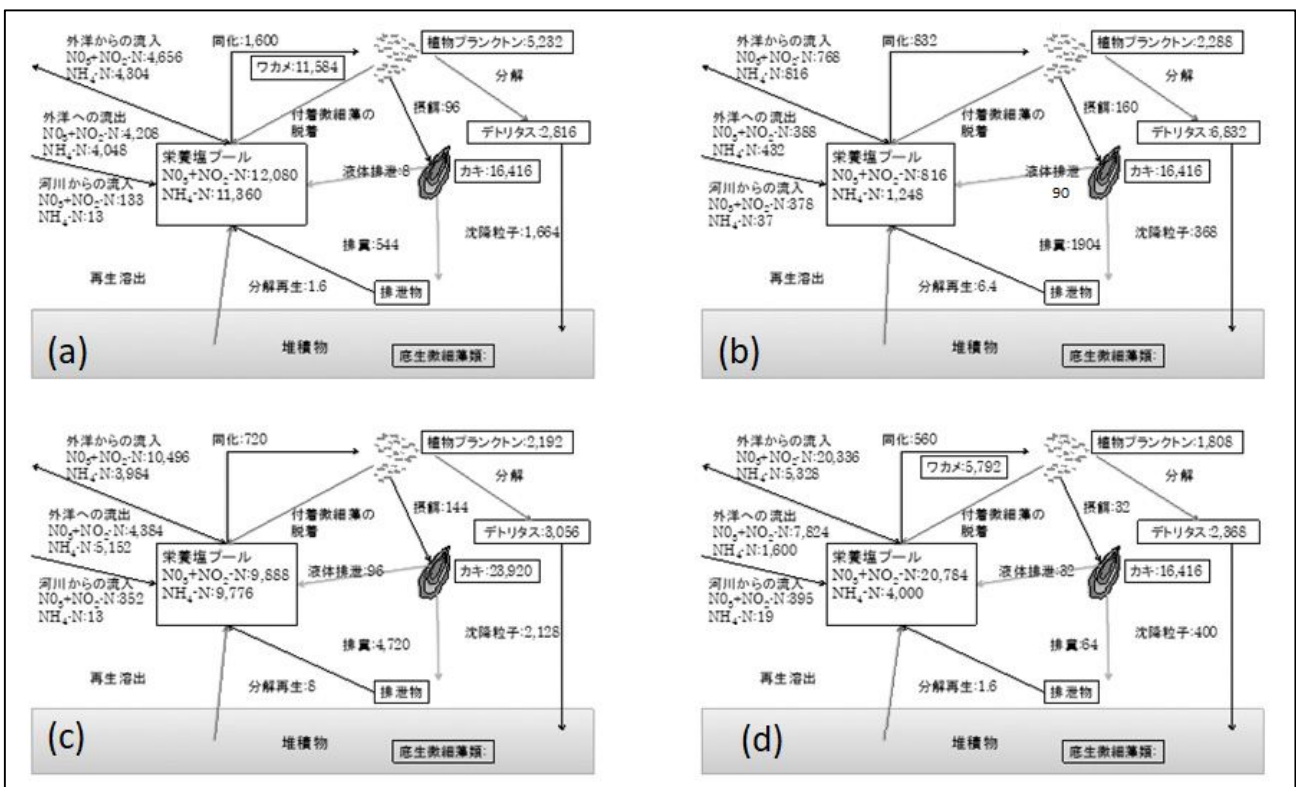


図12 志津川湾の窒素循環:春(a)、夏(b)、秋(c)、冬(d)(現存量: kgN、フラックス: kg day⁻¹)。

現場実験で、微細藻類の付着量と脱着量の間には有意な相関が確認できた。夏季の養殖ロープからは1日当たり0.051 $\mu\text{gChl.}a\text{ cm}^{-2}$ 脱着し、養殖筏1台(ロープ表面積753,600 cm^2)・1日当たりの脱着量は、0.038 gChl.aとなる。養殖筏1台にマガキが245,000個体養殖されているとすると、マガキの殻表面からは1日当たり0.012 gChl.aが脱着する。マガキは、脱着した微細藻類や水柱植物プランクトンを肉に変換するだけでなく、排泄による栄養塩再生を介して、再び基礎生産者に栄養塩を供給する。給餌・無給餌実験で得られた栄養塩再生速度をもとに推定した年間平均した液体排泄の栄養塩再生速度は、DINが2.68 kmol day^{-1} 、DIPが0.19 kmol day^{-1} 、糞粒溶出の栄養塩再生速度は、DINが0.36 kmol day^{-1} 、DIPが0.013 kmol day^{-1} となった。養殖場内に存在する年間平均のDINとDIPの現存量38.5 kmol 、2.81 kmol に対して、養殖マガキの1日あたりの栄養塩再生量は、養殖海域の栄養塩プールの約7

～8%と栄養塩循環過程に大きなインパクトを持つ。このように、マガキは、微細藻類に養殖ロープとカキ殻表面という基質を提供し、そこで生長脱落した微細藻類を摂餌し、消化排泄を通じて栄養塩を微細藻類に供給する。つまり、マガキ養殖と微細藻類とは共生関係にあり、環境悪化を起こさない適切なカキ養殖は物質循環を速く長くする里海活動であると言える。

主要な養殖物マボヤの摂餌や排泄に関する室内実験を、マガキとほぼ同様の系を用いて行った。その結果、摂餌したマボヤとマガキの液体排泄によって外洋からのDIN流入量の6.4%が直接還元されていた。これは河川流入の17.6%に達し、約2週間で一次生産分を補填できる。マボヤの資源量、摂餌速度はともにマガキの3割程度であるが、排泄される糞量はマガキの3倍にも達する。窒素排泄物に占める糞量がマガキでは6.8%しかないがマボヤでは64%にもなり、海底への窒素輸送にマボヤが大きく影響している。

2015年度の四季の志津川湾奥部における窒素循環図(図12)を、窒素ストックを mgN m^{-2} 、フラックスは $\text{mgN m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ として、湾奥部に対する流出入量(流入を+)とし作成した。志津川湾の栄養塩循環は、窒素律速で、外洋からの栄養塩供給が支配し、河川からの栄養塩は湾奥部の生産を支えていた。2015年4月には外洋からの流入が主要な窒素供給源で、植物プランクトンの現存量が多く、基礎生産速度は外洋からの流入量の20%近くを消費していた。2015年7月にはデトリタスが多く、栄養塩プールが枯渇に近い状態であった。デトリタスのNは、高水温によってバクテリアが増加し、浮遊粒子の分解が進んだため増加した。カキ養殖場下からの沈降粒子量はピーク時よりも少なく、水温躍層を挟む上層で粒子がトラップされてと思われる。この時期の外洋は貧栄養塩な黒潮系水が卓越する環境で、外洋に大きく影響を受ける開放性内湾では、湾内栄養塩プールが枯渇する。2015年10月にはカキ養殖量がピークで、成層化が緩和され養殖場下の沈降粒子量が増加した。2015年1月には窒素栄養塩プールは最大となり、生物の取り込みも低下していた。志津川湾では、基礎生産速度は1日当たり、湾内栄養塩プール全量の2%程度を消費する程度であった。このように、三陸沿岸の開放性内湾においては、外洋における水塊配置の変化・擾乱に伴って変動する外洋からの流入フラックスが湾内の栄養塩濃度を大きく変化させている。

(3) 1 森—川—海の栄養物質輸送機構の解明(鉄)

海域では、 Fe(II) が海産植物の溶存態鉄(以降溶存鉄と略す)の取り込みに不可欠であり、溶存鉄とは Fe(II) のことを指す。志津川湾では、溶存鉄濃度($[\text{Fe}]\text{T}$)は、表層で平均4.8 nM、水深10 mで平均9.4 nM、河川水中で数～数百nMの幅広い濃度範囲で存在した。湾内表層の $[\text{Fe}]\text{T}$ は、湾奥で季節を通じて高く(平均7.0 nM)、湾央では低かった(平均1.6 nM)。湾口部の表層 $[\text{Fe}]\text{T}$ は、夏季と冬季に高く(平均9.3 nM)、春季と秋季に低かった(2.2 nM)。珪藻 *C. radicans* の培養試験で得られた溶存鉄濃度と増殖速度の関係は、ミカエリス・メンテン式に回帰でき、半飽和定数 K_s 値(この濃度以下で増殖を制限する)は3.5 nMであった。春季と秋季に、湾内と湾外の境界部付近から湾外の表層で K_s 値より低く、溶存鉄による微細藻類の増殖制限が起こっていた。

実験により塩分と河川から沿岸への溶存鉄到達率(α)との関係を調べたところ、沿岸域への溶存鉄到達率(α)は1.0～83%の範囲となった。河川水試料の溶存鉄濃度は6.0から2100nMの範囲、到達可能な溶存鉄の濃度($[\text{Fe}]\text{transport}$)は、0.59から450nMの範囲であった。EEM-PARAFAC解析の結果、先行研究で報告されている発色団の励起-蛍光特性からC1は腐植物質様、C2およびC3はフルボ酸様、C4はタンパク質様の有機物に分けることができた。 $[\text{Fe}]\text{transport}$ は、夏季には耕作地の土地被覆割合と正の相関を、植生と負の相関を、冬季には耕作地と都市部正の土地被覆割合と正の相関を、植生と負の相関を示した。 α はC2とC3の割合との間に有意な正の相関が、C1とC4の割合と有意な負の相関があり、河川から海洋へと溶存鉄を輸送するにはフルボ酸様の有機物が重要であることを示唆している。さらに α は、夏季に植生の割合と有意な正の相関を、耕作地の割合と有意な負の相関を示した。このような相関は、森と海のつながりを示唆している可能性がある。

河川水と海水における溶存鉄 Fe(II) の酸化速度はpHの増加とともに直線的に増加し、同程度のpHでは、海水の Fe(II) 酸化速度は、河川水よりも有意に小さくなった(図13)。志津川湾に注ぐ河川水では腐植物質様の特性をもつ有機物が70%以上を、海水では腐植物質様の有機物・タンパク質様の有機物が各50%程度を占めた。珪藻 *C. radicans* 培養液で Fe(II) 酸化速度が低下したのは、微細藻類等を含む微生物群集由来有機物が Fe(II) 酸化速度を減少させ、微量金属の生物利用性を高めたことを示唆する(図14)。また、珪藻 *Skeletonema* と大型藻類のアラメ切片による河川由来および海洋由来の溶存鉄摂取実験では、培地の溶存鉄濃度が等しいとき、海洋由来培地のほうが鉄摂取速度は大きかった。藻類由来の有機物における鉄の錯離定数が、腐植物質等よりも低い値

を示すと報告されており、タンパク質様の有機物による発色団の蛍光強度組成が河川水より有意に大きかった海水では、微細藻類や大型藻類等由来の有機物が鉄摂取効率を高めている可能性があることが分かった。

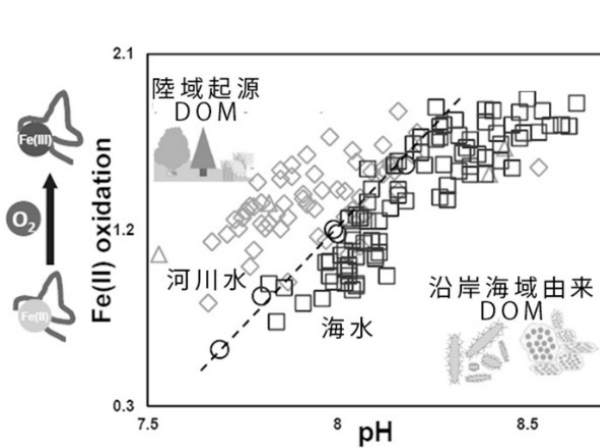


図13 pHおよび溶存態有機物(DOM)の起源とFe(II)の酸化速度の関係。

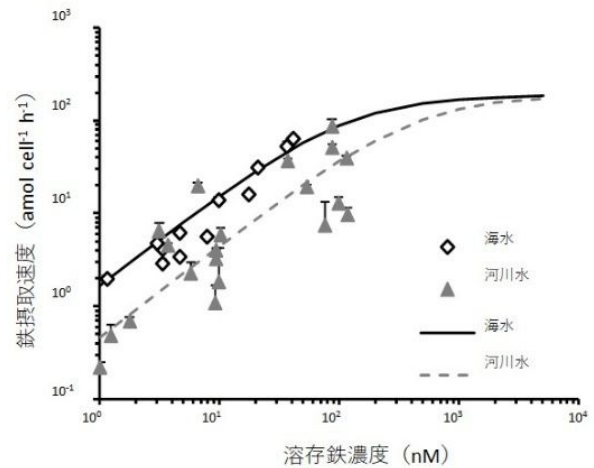


図14 海水と塩分30にした河川水とで培養した微細藻類の溶存鉄濃度に対する鉄摂取速度。実線と破線はそれぞれ、前者と後者に当てはめたミカエリス・メンテン曲線。

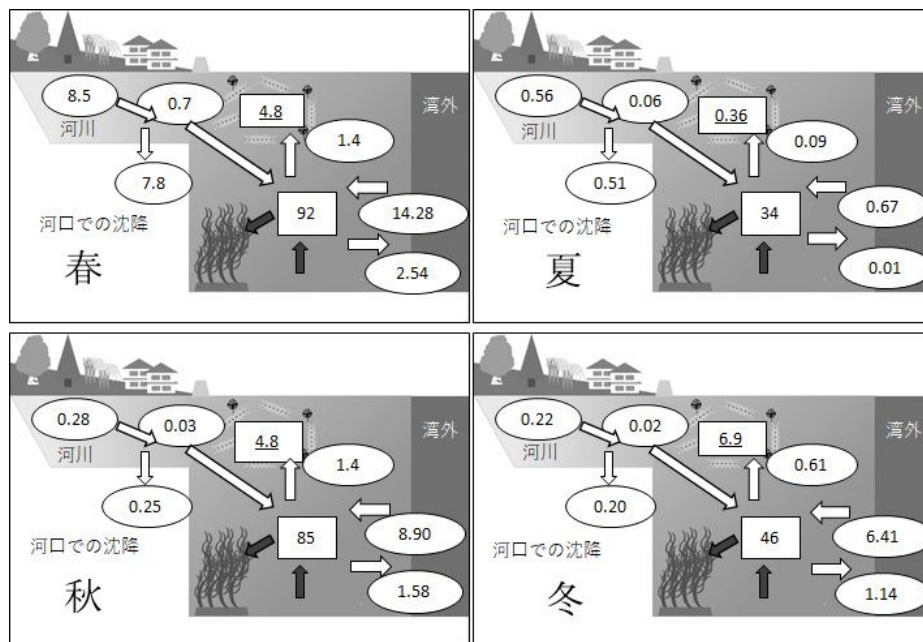


図15 各季節における志津川湾での溶存鉄の収支. 各矢印および楕円内の数値は一日あたりの溶存鉄のフラックス(kg day^{-1})を、長方形および長方形内の数値は湾内海水中の溶存鉄の現存量(kg)を、長方形内の下線を付した数値は湾内の植物プランクトンとしての溶存鉄の現存量(kg)を示す. 湾外との交換については、表層5m(上矢印)と底層5m位深(下矢印))に分けて示す

志津川湾における季節ごとの溶存鉄収支をまとめる(図15)。河川から $0.22 \sim 8.5 \text{ kg day}^{-1}$ の溶存鉄が流入し、約90%が汽水域で沈殿・除去され、 $0.02 \sim 0.71 \text{ kg day}^{-1}$ の溶存鉄が沿岸域へ供給される。この供給速度は、海水交換による外洋からの溶存鉄流入速度よりも約2桁低く、海水交換が湾内の溶存鉄濃度を決定していた。湾内の海水には溶存鉄が $34 \sim 85 \text{ kg}$ 存在し、微細藻類群集における溶存鉄現存量および鉄摂取速度は、それぞれ $0.4 \sim 6.9 \text{ kg}$ 、 $0.1 \sim 1.4 \text{ kg day}^{-1}$ で、微細藻類による鉄摂取速度は、湾内の溶存鉄現存量($34 \sim 85 \text{ kg}$)に対して $0.1 \sim 1.5\%$ 程度であり、微細藻類による鉄摂取は湾内の溶存鉄動態に大きな影響を及ぼさない。他方、河川からの溶存鉄供給速度は、微細藻類の鉄摂取速度の $2.3 \sim 51\%$ となり一定の貢献がある。

北上山地水系河川水中の溶存鉄濃度と、各採水地点での集水域における土地利用との関係を調べ、溶存鉄溶出負荷量を目的変数、土地被覆割合を説明変数とする重回帰分析により土地被覆ごとの溶存鉄溶出の原単位 ($\text{g km}^2 \text{ day}^{-1}$) を求めた。針葉樹、広葉樹をまとめて植生とし、水田と水田以外の耕作地については多重共線性を考慮し耕作地として一つにまとめた。耕作地 ($65.5 \sim 408 \text{ g km}^2 \text{ day}^{-1}$) と都市部 ($872 \sim 1182 \text{ g km}^2 \text{ day}^{-1}$) の原単位は、植生の原単位 ($1.55 \sim 6.63 \text{ g km}^2 \text{ day}^{-1}$) の数十～数百倍に達し、人為的な土地被覆からの溶存鉄溶出が非常に大きいことが明らかとなった(図16)。水田や都市部などの人為的な土地利用が溶存鉄の負荷に大きな影響を及ぼしており、日本の開放性内湾に共通しているものと思われる。

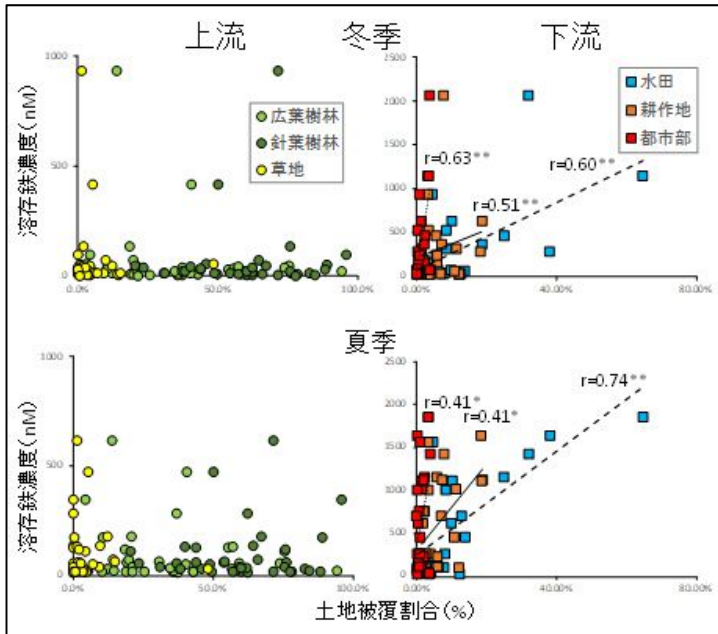


図16 北上山地水系河川水中の上流域(左)と下流域(右)における各採水地点での溶存鉄濃度と、集水域における土地被覆割合との関係。上は冬季を下は夏季の結果。水田、耕作地、都市部で有意な相関がみられた。

(3) 2 森—川—海の栄養物質輸送機構の解明(粒状有機物)

志津川湾での調査結果をもとにして、湾奥約 14 km^2 の海域を対象に海水中の粒状有機物の消長に関わる様々なプロセス(一次生産・呼吸、河川からの流入、沈降、養殖カキの摂餌と水揚げなど)の1日当たりフラックスを各季節について概算した。その結果、ほとんどの季節において海水中の一次生産が粒状有機物の供給源としてもっとも大きかった(図17)。また、そのフラックスは湾内の養殖カキが必要とする餌料に比べて2オーダー程度大きかった。一方で、河川からの粒状有機物の流入については、一次生産と比べると2オーダー程度小さく、湾内の海水中粒状有機物の消長への影響は相対的に小さいと考えられる。

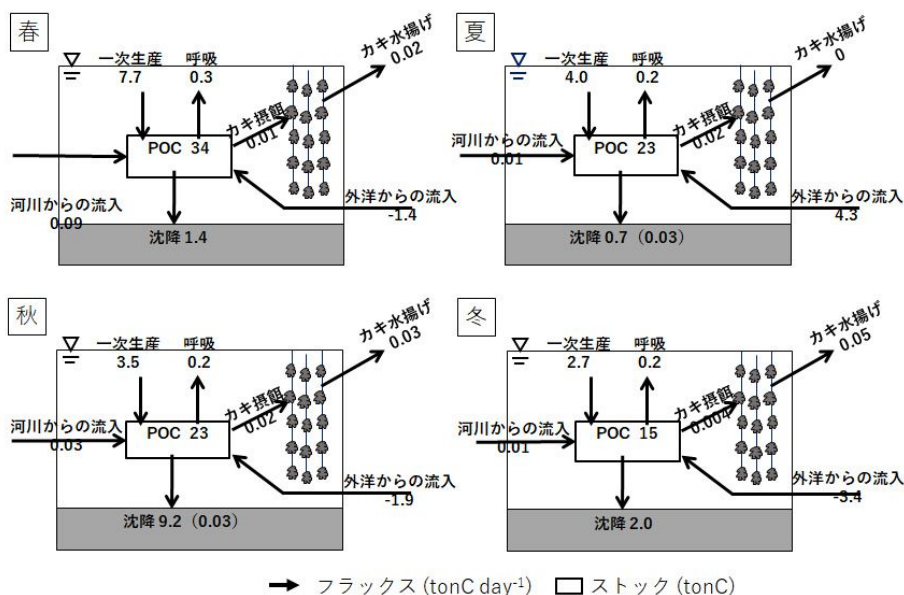


図17 静穏時を想定した志津川湾奥部 13.8 km^2 における粒状有機炭素の各種フラックスの比較。夏・秋の沈降フラックスの括弧内の値はカキ養殖施設からの沈降量推定値。

湾内の海水中粒状有機物は各種生物的起源を有するマーカー脂肪酸の組成が採取地点・採取時期によって大きく変化していたが、カキでは一貫して渦鞭毛藻および珪藻起源のマーカー脂肪酸の割合が高かった。カキは、様々な生物起源のものが混合した海水中粒状有機物の中から渦鞭毛藻および珪藻起源の有機物を選択的に同化し、陸域から河川を通じて輸送される粒状有機物(高等植物)を直接同化していなかった。

カキ養殖漁業者からの聞き取りによれば、志津川湾では、2011年に発生した東日本大震災の以前は、現在よりも高密度でカキ養殖が行われ、震災前の戸倉海域ではカキの本養殖開始から出荷までの期間として18ヶ月程度以上を要していた。震災後、その反省から、戸倉地区海域において震災前の70%に志津川地区では50%にまで養殖施設の削減を行い、養殖施設密度を低減したことで出荷までの期間は10ヶ月程度にまで短縮された。志津川地区と戸倉地区の海域における養殖カキの成長速度を地点間で比較する実験を行ったところ、湾南側の戸倉地区海域において他の海域よりもカキの成長が速かった(図18)。志津川海域では、垂下式カキ養殖の延縄の配置間隔が20-30m程度であるのに対して、戸倉海域では30-50m近くある。志津川地区と戸倉地区の筏間隔をそれぞれ25m、45mとすると、10000m²当たり、約4.5台、2.5台の養殖密度となり、カキの延縄1本当たりに割り当てられる面積の比で戸倉の延縄は志津川より1.8倍になる。粒状有機炭素のフラックス計測結果では、志津川湾奥部全域で一次生産がカキの摂餌よりも2オーダー程度大きく餌は十分にあることから、ろ過食者であるカキの成育では局所的なカキの養殖密度に依存し、養殖筏群レベルの空間スケールでのカキ延縄周辺での餌の可用性(availability)が重要となる。なお、カキ筏は流れに対して抵抗として作用し、養殖筏が多数配置されると海水の流動が低下し、カキがろ過する海水に含まれる餌が減少する(小松, 1992)。震災後にカキ成長速度が向上した理由として、筏台数削減による海水交換も大きく貢献していると考えられる。

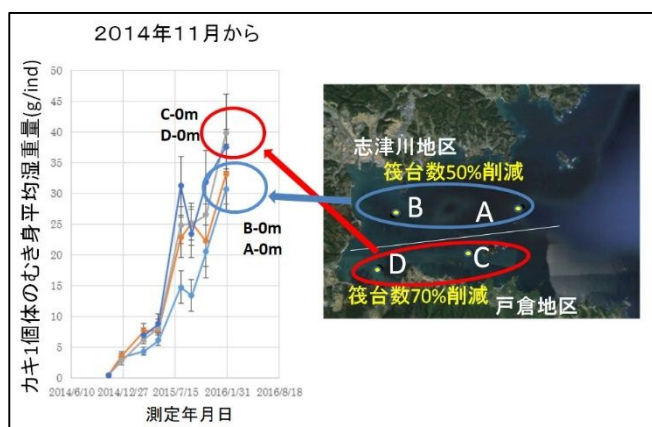


図18 2014年11月から約2年間、A、B、C、Dの定点(右)で追跡したカキの成長(左)。

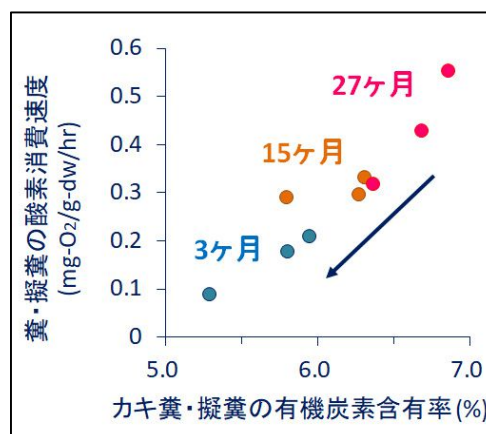


図19 カキの月齢ごとの糞・擬糞中の有機炭素含有量とその分解に必要な酸素の消費速度

3段階の月齢のカキを用いたメソコズム実験ではカキの排泄物中の有機炭素含有率は0.05~0.07gC g dw⁻¹で、月齢の大きいカキのものほど高いことが明らかになった(図19)。これについては、摂餌過程での餌料選択能力や消化特性の変化などによりカキの加齢にともなって同化率が低下しているためではないかと推察される。一方、カキの排泄物による酸素消費速度を測定した結果、カキ軟体部単位乾燥重量あたり排泄物の分解に必要な酸素消費速度は0.09~0.55 mgO₂ gDW⁻¹h⁻¹の範囲にあり、高月齢のカキの排泄物ほどより大きな酸素消費速度を要した。これらの結果は、養殖期間の長期化により高月齢カキの摂餌量と排泄量が増加し、排泄物の質的な変化が生じ、底層環境を悪化させることを示している。

カキを養殖する場合には、カキ養殖筏数密度を低くして、若いカキを速く成長させて出荷することで、カキ養殖の効率化と健全な海底環境を実現できる。つまり、志津川湾の戸倉地区ではカキの養殖筏を適正な数に削減するという「人手のかけ方」を変えたことにより、生産性向上と環境負荷の低減が両立できるようになった。したがって、これも沿岸環境の利用・管理の里海手法とよべるだろう。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

- ①津波後のエコトーン、養殖筏配置のダイナミックな変化を衛星リモートセンシングで初めて明らかにした。
- ②雲に影響されない合成開口レーダ画像を用い、世界で初めて養殖施設をタイプ別に分類した。
- ③ウニ漁業が、栄養カスケードを通じて藻場を維持する里海活動であることを明らかにした。
- ④宮城県漁協志津川湾運営委員会、南三陸町、宮城県、WWF、S-13メンバーとで「志津川湾の将来の海洋環境を考える協議会」をつくり、豊かな養殖漁業と持続的で健全な海洋環境を築く議論を深め、環境改善策を実践した。
- ⑤森林・海域の国際エコラベル、藻場のラムサール条約湿地登録が、山、エコトーン、海のつながりを配慮する里海手法となることを示した。
- ⑥開放性内湾の栄養塩循環の全体像を調べ、湾内では窒素律速で外洋からの窒素供給が支配的であることを明らかにした。
- ⑦適度なカキ養殖では、カキと施設が微細藻類の付着基質となり、微細藻類が増殖し脱着した微細藻類をカキがすぐに摂餌・排泄して微細藻類に栄養塩を提供するという共生関係にあり、物質循環を速く長くするという一種の里海手法であることを明らかにした。
- ⑧養殖カキの現存量が時にDIN現存量を上回り、養殖ホヤの糞の物質循環に及ぼす影響が大きいことを明らかにした。
- ⑨志津川湾における溶存鉄循環の全体像を調べ、河川からの溶存鉄が河口域に限られ、湾内では外洋からの溶存鉄の供給が支配的で、夏季には湾中央部から湾口側上層で溶存鉄が藻類増殖に不足することを明らかにした。
- ⑩溶存有機物と溶存鉄の関係を調べ、陸域からの溶存鉄輸送にはフルボ酸様DOMが、海域での藻類の溶存鉄取り込みには微生物由来タンパク質様DOMが正に相関することを明らかにした。
- ⑪河川を通じた溶存鉄の海域への供給について、土地利用ごとの原単位を推定し、広葉樹と針葉樹で溶存鉄輸送に対して差が見られないこと、耕作地と都市域が森林よりも数百倍あることを明らかにした。
- ⑫志津川湾における粒状有機物動態を調べ、湾内における内部生産が最も大きく、河川を通じた陸域からの粒状有機物の貢献が非常に小さいことを明らかにした。
- ⑬カキ養殖筏を削減し、速い成長での若齢出荷が、海洋環境にもよいという科学的根拠を提出した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

- ①海洋政策本部参与会議の総合的な沿岸域の環境管理の在り方PTにおいて本研究成果で得られた、「人が関わって、より良い海をつくって豊かな恵みを得るという志津川湾における『里海』づくりの例」を提示し、内閣府第3期海洋基本計画に反映された。
- ②宮城県南三陸町が推進していた志津川湾の藻場のラムサール条約湿地への新規登録にあたり、本研究成果で得られた藻場の分布データが利用された。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- ①「森は海の恋人運動」は広葉樹林の植林を介して海域への溶存鉄供給を増加させるということを根拠としているが、森林の多面的機能が重要であることを示した成果。
- ②今回推定した土地利用形態ごとの溶存鉄原単位を用いて、他の湾での陸域からの溶存鉄供給量の推定に利用可能にした成果。
- ③カキ養殖筏台数密度を減らし、速い成長でのカキの若齢出荷が、経営だけでなく、海洋環境にもよいという科学的根拠を提出した成果。
- ④ウニ漁業が藻場を維持するための重要な里海活動である根拠を提示した成果。
- ⑤協議会を構築し、モデルを用いて、将来の養殖漁業について漁業者、自治体、WWFなどNPOと議論することで、持続的な漁業と健全な海洋環境が実現できることを示した成果。
- ⑥FSC-Ramsar-ASCという国際認証を用いる里海型沿岸域管理の提案を行った成果。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) H. ITO, M. FUJII, Y. MASAGO, T. D. WAITE and T. OMURA: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 154, 81–97 (2015)
Effect of Ionic Strength on Ligand Exchange Kinetics between a Mononuclear Ferric Citrate Complex and Siderophore Desferrioxamine B
- 2) M. FUJII, A. C. Y. YEUNG and T. D. WAITE: *Environmental Science & Technology*, 49(15), 9133–9142 (2015)
Competitive Effects of Calcium and Magnesium Ions on the Photochemical Transformation and Associated Cellular Uptake of Iron by the Freshwater Cyanobacterial Phytoplankton *Microcystis aeruginosa*
- 3) 櫻庭敬之、伊藤紘晃、藤井学、Lee Ying Ping、梶原晶彦、吉村千洋、渡部徹: 土木学会論文集 G(環境), 71(7), III_287–III_295, (2015),
各種森林及び農耕地から供給される有機鉄の特性比較分析
- 4) M. FUJII, T.C. DANG, M.W. BLIGH and T.D. WAITE: *Limnology and Oceanography*, 61(6), 2151–2164 (2016)
Cellular Characteristics and Growth Behavior of Iron-limited *Microcystis aeruginosa* in Nutrient-depleted and Nutrient-Replete Chemostat Systems
- 5) Y.P. LEE, M. FUJII, K. TERAOKI, T. KIKUCHI, and C. YOSHIMURA: *Water Research*, 103, 160–169 (2016)
Effect of Dissolved Organic Matter on Fe(II) Oxidation in Natural and Engineered Waters
- 6) R. TSUJIMOTO, G. TERAUCHI, H. SASAKI, S. X. SAKAMOTO, S. SAWAYAMA, S. SASA, H. YAGI and T. KOMATSU: *International Journal of Remote Sensing*, 37(24), 5843–5863 (2016).
Damage to Seagrass and Seaweed Beds in Matsushima Bay, Japan, Caused by the Huge Tsunami of the Great East Japan Earthquake on 11 March 2011
- 7) 夏池真史、菊地哲郎、Lee Ying Ping、伊藤紘晃、藤井学、吉村千洋、渡部徹: 水環境学会誌, 39(6), 197–210 (2016)
自然水中における鉄の化学種と生物利用性—鉄と有機物の動態からみる森・川・海つながり— (総説)
- 8) T. KIKUCHI, M. FUJII, K. TERAOKI, R. JIWEI and C. YOSHIMURA: *Science of the Total Environment*, 576, 36–45 (2017)
Correlations between Aromaticity of Dissolved Organic Matter and Trace Metal Concentrations in Natural and Effluent Waters: A Case Study in the Sagami River Basin, Japan
- 9) Y.P. LEE, M. FUJII, T. KIKUCHI, M. NATSUIKE, H. ITO, T. WATANABE, and C. YOSHIMURA: *Chemosphere*, 180, 221–228 (2017)
Importance of Allochthonous and Autochthonous Dissolved Organic Matter in Fe(II) Oxidation: A Case Study in Shizugawa Bay Watershed, Japan
- 10) Y.P. LEE, M. FUJII, T. KIKUCHI, T. TERAOKI, and C. YOSHIMURA: *PLOS ONE*, 12(4), doi:10.1371/journal.pone.0176484 (2017)
Variation of Iron Redox Kinetics and Its Relation with Molecular Composition of Standard Humic Substances at Circumneutral pH
- 11) M. ATEIA, J. RAN, M. FUJII, and C. YOSHIMURA: *International Journal of Environmental Science and Technology* 14: 867, doi:10.1007/s13762-016-1214-x (2017)
The Relationship between Molecular Composition and Fluorescence Properties of Humic Substances
- 12) 山本裕規、吉木健吾、小松輝久、佐々修司、濱名正泰、村田裕樹、柳哲雄: 土木学会論文集 B2(海岸工学), 73(2), I_1339–I_1344 (2017)
志津川湾におけるカキ養殖等の環境容量に関する数値モデル解析—震災前と現在の比較
- 13) 小松輝久、大瀧敬由、佐々修司、澤山周平、阪本真吾、ゴンザルボ マロ サラ、浅田みなみ、濱名正泰、村田

裕樹、田中潔、辻本良: 沿岸海洋研究, 54(2), 117-127. (2017)

三陸の沿岸漁業を支えるブルーインフラの津波後の復興過程

- 15) 遠藤雄大、夏池真史、宮本真奈美、藤井学、吉村千洋: 土木学会論文集 B1(水工学), 74(4), 535-540, (2018)

北上山地水系の冬季における土地被覆の溶存鉄負荷量に対する影響およびその原単位

- 16) 小松輝久、佐々修司、門谷茂、吉村千洋、藤井学、夏池真史、西村修、坂巻隆史、柳哲雄: 沿岸海洋研究, 56(1), 21-29, (2018)

開放性内湾を対象とした沿岸環境管理法の研究: 南三陸志津川湾の例

- 17) 大原光司、湯上洋平、川畑達矢、藤林恵、西村修、坂巻隆史: 土木学会論文集 G(環境), 74(7) III_53-62 (2018)

脂肪酸組成分析を利用した内湾一次生産の制限因子の評価

- 18) 川畑達矢、藤林恵、湯上洋平、西村修、坂巻隆史: 土木学会論文集 G(環境), 74(7) III_63-72 (2018)

海中中粒状有機物の化学組成と酸素消費に及ぼすカキ養殖場の影響

- 19) 山本裕規、吉木健吾、小松輝久、佐々修司、濱名正泰、村田裕樹、柳哲雄: 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 73(2), I_1339-I_1344 (2018)

志津川湾におけるカキ養殖等の環境容量に関する数値モデル解析-震災前と現在の比較

- 20) M. FUJIBAYASHI, T. SAKAMAKI and O. NISHIMURA: Marine Environmental Research (in press)
Effect of Sedimentary Organic Matter on Species Richness of Deposit Feeders in Enclosed Bay Ecosystems: Insight from Fatty Acid Nutritional Indicators

<査読付論文に準ずる成果発表> (書籍の一章であるが、査読を経たものを掲載)

- 1) T. KOMATSU and T. YANAGI: In Marine productivity: Perturbations and resilience of socio-ecosystems, ed. by H.-J. Ceccaldi, Y. Hénocque, Y. Koike, T. Komatsu, G. Stora and M.-H. Tusseau-Vuillemin, pp. 283-290, Springer, Cham (2015)

Sato-umi: An Integrated Approach for Sustainable Use of Coastal Waters, Lessons from Human-nature Interactions during the Edo Period of Eighteenth-century Japan”

- 2) T. KOMATSU, T. OHTAKI, S. SAKAMOTO, S. SAWAYAMA, Y. HAMANA, M. SHIBATA, K. SHIBATA .and S. SASA: In Marine productivity: Perturbations and resilience of socio-ecosystems, ed. by H.-J. Ceccaldi, Y. Hénocque, Y. Koike, T. Komatsu, G. Stora and M.-H. Tusseau-Vuillemin, pp. 43-53, Springer, Cham (2015)

Impact of the 2011 Tsunami on Seagrass and Seaweed Beds in Otsuchi Bay, Sanriku Coast, Japan

- 3) T. KOMATSU, S. SASA, M. HAMANA, S. SAKAMOTO, M. ASADA, G. TERAUCHI, R. TSUJIMOTO and T. YANAGI: In The 2011 Japan Earthquake and Tsunami: Reconstruction and Restoration, ed. by V. Santiago-Fandiño, S. Sato, N. Maki and K. Iuchi, pp. 265-278, Springer, Cham (2018)

Temporal and Spatial Changes in a Coastal Ecotone in Shizugawa Bay, Sanriku Coast due to the Impacts of the Tsunami on 11 March 2011 and the Following Artificial Impacts

- 4) T. KOMATSU, S. SASA, H. MURATA, H. SAWAYAMA, M. HAMANA, M. ASADA, R. TSUJIMOTO, G. TERAUCHI and T. YANAGI: In Oceanography Challenges to Future Earth ed. by T. Komatsu, H.-J. Ceccaldi, J. Yoshida, P. Prouzet and Y. Henocque, pp. 95-104, Springer, Cham (2019)

Trophic Cascade in Seaweed Beds in Sanriku Coast Hit by the Huge Tsunami on 11 March 2011: Sea Urchin Fishery as a Satoumi Activity Serving for Increase in Marine Productivity and Biodiversity

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) 門谷茂: シンポジウム『豊かな志津川湾の創生』, (NPO)環境創生研究フォーラム,(公財)国際エメックスセンター, 東北大学青葉山キャンパス, 2014年10月24日(2014)
「森—川—海の栄養物質輸送」

- 2) 吉村千洋: シンポジウム『豊かな志津川湾の創生』, (NPO)環境創生研究フォーラム, (公財)国際エメックスセンター, 東北大学青葉山キャンパス, 2014年10月24日(2014)
「森—川—海の微量金属輸送」
- 3) 西村修: シンポジウム『豊かな志津川湾の創生』, (NPO)環境創生研究フォーラム, (公財)国際エメックスセンター, 東北大学青葉山キャンパス, 2014年10月24日(2014)
「志津川湾の有機物動態」
- 4) 小松輝久: シンポジウム『豊かな志津川湾の創生』, (NPO)環境創生研究フォーラム, (公財)国際エメックスセンター, 東北大学青葉山キャンパス, 2014年10月24日(2014)
「震災前後の志津川湾の藻場の変化」
- 5) 小松輝久: 環境省「環境研究総合推進費」S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成26年度公開成果発表会, 三宮研修センター, 神戸, 2014年11月21日 (2014)
「遷移する沿岸環境監視とそれを応用した沿岸海域管理法開発」
- 6) 門谷 茂: 環境省「環境研究総合推進費」S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成26年度公開成果発表会, 三宮研修センター, 神戸, 2014年11月21日 (2014)
「森—川—海の栄養物質輸送機構の解明」
- 7) 吉村千洋: 環境省「環境研究総合推進費」S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成26年度公開成果発表会, 三宮研修センター, 神戸, 2014年11月21日 (2014)
「森—海の物質輸送に果たす有機物の役割解明」
- 8) 西村修: 環境省「環境研究総合推進費」S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成26年度公開成果発表会, 三宮研修センター, 神戸, 2014年11月21日 (2014)
「森—海の物質輸送に果たす有機物の役割解明」
- 9) 小松輝久: 日本海洋学会沿岸海洋研究会沿岸海洋シンポジウム「震災復興に対する沿岸海洋学の貢献」, 東京大学山上会館, 東京, 2015年3月14日 (2015)
「三陸沿岸の藻場」
- 10) 菊地哲郎、藤井学、吉村千洋: 日本地球化学会第62回年会, 横浜国立大学常盤台キャンパス, 2015年9月16-18日 (2015)
「自然水および下水処理水中の微量金属の溶解性に及ぼす溶存有機物の分子特性の影響」
- 11) Y. P. LEE, M. FUJII, C. YOSHIMURA and T. KIKUCHI: Japan Geoscience Union Meeting, Makuhari, 24-29 May 2015 (2015)
“Seasonal and spatial variation of dissolved iron transformation kinetics in the Shizugawa bay and its adjacent rivers”,
- 12) 吉村千洋: 日本水環境学会東北支部セミナー 講演会, 2015年10月17日 (2015)
「『森は海の恋人』論を科学的に検証する」
- 13) Y. P. LEE, M. FUJII, C. YOSHIMURA and T. KIKUCHI: International Symposium on Concept and law of green infrastructure in rivers and coasts (2015)
“Seasonal and spatial variation of dissolved iron transformation kinetics in freshwater and treated municipal wastewater”,
- 14) Y. ENDO, Y. P. LEE, T. KIKUCHI, M. NATSUIKE, M. FUJII, C. YOSHIMURA, T. SAKURABA, H. ITO and T. WATANABE: International Symposium on Concept and law of green infrastructure in rivers and coasts, (2015)
“Iron transportation from land to ocean and its impact on primary production –To establish a new method for watershed management”
- 15) T. SAKURABA, H. ITO, T. KIKUCHI, M. FUJII, C. YOSHIMURA, and T. WATANABE: The 6th IWA-ASPIRE Conference and Exhibition, Beijing, 21-23 September 2015 (2015)
“Relation of land cover to elution characteristics of iron and organic matters from soil”,
- 16) 小松輝久: 環境省「環境研究総合推進費」S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の

- 開発 平成27年度公開成果発表会, WTCコンファレンスセンター Room A, 東京, 2015年11月5日 (2015)
「遷移する沿岸環境監視とそれを応用した沿岸海域管理法開発」
- 17) 門谷 茂: 環境省「環境研究総合推進費」S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成27年度公開成果発表会, WTCコンファレンスセンター Room A, 東京, 2015年11月5日 (2015)
「森-川-海の栄養物質輸送機構の解明」
- 18) 吉村千洋: 環境省「環境研究総合推進費」S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成27年度公開成果発表会, WTCコンファレンスセンター Room A, 東京, 2015年11月5日 (2015)
「森-海の物質輸送に果たす有機物の役割解明」
- 19) 西村修: 環境省「環境研究総合推進費」S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成27年度公開成果発表会, WTCコンファレンスセンター Room A, 東京, 2015年11月5日 (2015)
「森-海の物質輸送に果たす有機物の役割解明」
- 20) 坂巻隆史: 応用生態工学会 2015年度国際シンポジウム 流域・沿岸におけるグリーンインフラの概念と方法論 ~ 応用生態工学の今後の展開を考える ~、東京工業大学, 2015年9月13日<招待講演>(2015)
「沿岸域生態系の受ける流域の影響を理解する意義と難しさ」
- 21) 林恭平、坂巻隆史、西村修: 汽水域研究会, 東北大学, 2015年10月2-4日 (2015)
「カキの加齢が糞による酸素消費に及ぼす影響」
- 22) 松野匠、鄭 翊喆、林 恭平、坂巻隆史、西村修: 土木学会東北支部技術研究発表会, 岩手大学, 2016年3月5日 (2016)
「脂肪酸および炭素安定同位体比を用いた養殖カキの餌起源推定」
- 23) ジョン・イジョウ、西村修、坂巻隆史: 日本水環境学会年会, アスティ徳島, 徳島, 2016年3月16-18日 (2016)
「Seasonal variations of carbon and nitrogen stable isotope ratios and fatty acid compositions of different size fractions of plankton community in Shizugawa Bay」
- 24) 盛田暁子、坂巻隆史、西村修: 日本水環境学会年会, アスティ徳島, 徳島, 2016年3月16-18日 (2016)
「河口域に生息する多毛類の成長に対する陸上植物と海産性藻類の寄与」
- 25) 神崎洋青、藤林恵、坂巻隆史、西村修: 日本水環境学会年会, アスティ徳島, 徳島, 2016年3月16-18日 (2016)
「内湾の底生動物に対する高等植物由来有機物の餌料価値」
- 26) Y.P. LEE, M. FUJII, K. TERAOKA, T. KIKUCHI and C. YOSHIMURA: ASLO 2016 Summer Meeting, Santa Fe Community Convention Center in Santa Fe, New Mexico, USA, 10 June 2016 (2016)
“The influence of dissolved organic matter on Fe(II) oxidation in natural and engineered waters”,
- 27) Y.P. LEE, M. FUJII, K. TERAOKA, T. KIKUCHI and C. YOSHIMURA: Goldschmidt Conference, Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, 29 June 2016 (2016)
“Influence of dissolved organic matter properties on Fe(II) oxidation in natural and engineered waters”
- 28) Y. ZHENG, K. HAYASHI, T. MATSUNO, M. FUJIBAYASHI, M. NOMURA, O. NISHIMURA, T. SAKAMAKI: EMECS'11 SeaCoasts XXVI, AZIMUT Hotel, St. Petersburg, Russia, 24 August 2016 (2016)
“Interaction between biogeochemical environment and oyster farming in Shizugawa Bay, Japan”
- 29) M. NATSUIKE, T. KIKUCHI, Y.P. LEE, Y. ENDO, L. YUHE, M. FUJII and C. YOSHIMURA: EMECS'11 SeaCoasts XXVI, AZIMUT Hotel, St. Petersburg, Russia, 24 August 2016 (2016)
“Iron availability by coastal diatom Chaetoceros sp. in the Shizugawa Bay, Japan”
- 30) T. KOMATSU, S. SASA, S. MONTANI, O. NISHIMURA, T. SAKAMAKI, C. YOSHIMURA, M. FUJII and T. YANAGI: EMECS'11 SeaCoasts XXVI, AZIMUT Hotel, St. Petersburg, Russia, 24 August 2016 (2016)
“Satoumi approach for realizing sustainable coastal use in a rias-type bay: a case of Shizugawa Bay in Sanriku Coast hit by the huge tsunami on 11 March 2011”
- 31) T. KOMATSU and H. MURATA: EMECS'11 SeaCoasts XXVI, AZIMUT Hotel, St. Petersburg, Russia, 24 August 2016 (2016)
“Mapping aquaculture facilities in Shizugawa Bay before and after the huge tsunami on 11 March 2011”

by satellite remote sensing”

- 32) 夏池真史、Lee Ying Ping、遠藤雄大、菊地哲郎、藤井学、吉村千洋：日本プランクトン学会・ベントス学会合同大会、熊本県立大学、熊本、2016年9月8-9日（2016）
「宮城県志津川湾およびその流域における溶存鉄動態の解明」
- 33) 坂巻隆史、松野匠、鄭翊喆、西村修：日本水環境学会シンポジウム、秋田県立大学、秋田、2016年9月13-14日（2016）
「炭素安定同位体比と脂肪酸組成の分析に基づく志津川湾における粒状有機物動態の解析」
- 34) 矢田部創、門谷茂：汽水域研究会2016年(第8回)大会、ふじのくに地球環境史ミュージアム、静岡市、2016年10月9日（2016）
「炭素安定同位体比と脂肪酸組成の分析に基づく志津川湾における粒状有機物動態の解析」
- 35) 小松輝久：第40回「相模湾の環境保全と水産振興」シンポジウム、(公財)相模湾水産振興事業団、小田原市、神奈川県水産技術センター相模湾試験場、水産海洋学会共催、神奈川県西地域県政総合センター、2016年10月18日（2016）
「開放型内湾における里海の実現を目指して—三陸志津川湾を例として」基調講演
- 36) 小松輝久：平成28年度気仙沼水産試験場「浜と水試の情報交換会—養殖と生産環境—」、宮城県気仙沼水産試験場主催、宮城県気仙沼水産試験場、気仙沼市、2016年10月20日（2016）
「志津川湾における養殖筏削減効果—養殖と生産環境」基調講演
- 37) 小松輝久：環境省環境研究総合推進費戦略研究プロジェクトS-13 H28年度 公開成果発表会「持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発」、(公財)国際エメックスセンター主催、大手町ファーストスクエアカンファレンス Room A、東京、2016年11月30日（2016）
「遷移する沿岸環境監視とそれを応用した沿岸海域管理法開発」
- 38) 門谷茂：「環境省環境研究総合推進費戦略研究プロジェクトS-13 H28年度 公開成果発表会「持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発」、(公財)国際エメックスセンター主催、大手町ファーストスクエアカンファレンス Room A、東京、2016年11月30日(2016）
「志津川湾におけるカキ養殖を巡る栄養塩循環について」
- 39) 吉村千洋：環境省環境研究総合推進費戦略研究プロジェクトS-13 H28年度 公開成果発表会「持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発」、(公財)国際エメックスセンター主催、大手町ファーストスクエアカンファレンス Room A、東京、2016年11月30日（2016）
「森—海の物質輸送に果たす有機物の役割解明—志津川湾における溶存鉄の動態と生物利用性—」
- 40) 西村修：環境省環境研究総合推進費戦略研究プロジェクトS-13 H28年度 公開成果発表会「持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発」、(公財)国際エメックスセンター主催、大手町ファーストスクエアカンファレンス Room A、東京、2016年11月30日（2016）
「志津川湾における環境管理適正化に向けた粒状有機物動態の解析」
- 41) 松野匠、西村修、坂巻隆史：日本水環境学会東北支部研究発表会、仙台、2017年2月11日（2017）
「脂肪酸及び炭素安定同位体比を用いた養殖カキの餌起源推定」
- 42) 湯上洋平、松野匠、西村修、坂巻隆史：土木学会東北支部技術研究発表会、東北工業大学、仙台、2017年3月4日（2017）
「志津川湾内の有機物・栄養塩への外洋境界から流入する異なる水塊の影響」
- 43) 川畑達矢、ジョン・イジョウ、西村修、坂巻隆史：土木学会東北支部技術研究発表会、東北工業大学、仙台、2017年3月4日（2017）
「志津川湾における海水中粒状有機物の化学組成と酸素消費速度に及ぼすカキ養殖場の影響」
- 44) 坂巻隆史、川畑達矢、ジョン・イジョウ、西村修：第51回日本水環境学会年会、熊本大学、熊本、2017年3月15-17日（2017）
「内湾の粒状有機物動態と底層環境に及ぼすカキ養殖の影響」
- 45) 林恭平、木下龍之介、丸尾知佳子、藤林恵、西村修：第51回日本水環境学会年会、熊本大学、熊本、2017年3月15-17日（2017）

「アサリの成育に対する高等植物由来有機物の影響」

- 46) 丸尾知佳子、藤林恵、坂巻隆史、西村修: 第51回日本水環境学会年会, 熊本大学, 熊本, 2017年3月15-17日 (2017)
「干潟に生息する二枚貝間の相互作用が成長に与える影響の基礎的研究」
- 47) 小松輝久、門谷茂、吉村千洋、西村修、柳哲雄: 日本水産学会平成29年度春季大会シンポジウム企画「森川里海のつながりを科学で説明できるか?」, 東京海洋大学, 2017年3月26日 (2017)
「志津川湾における生物生産と陸からの負荷: 栄養塩, 微量金属, 有機物」
- 48) H. MURATA, S. SASA and T. KOMATSU: 10th WESTPAC International Scientific Conference, Shangri-La Hotel in Qingdao, China, 17-20 April 2017 (2017)
“A study to detect and identify aquaculture gears using synthetic aperture radar: Case study of Matsushima Bay, Japan”
- 49) M. FUJII: Goldschmidt 2017, Le Palais des Congrès de Paris, Paris, France, 16 August 2017 (招待講演) (2017)
“Effect of source and composition of dissolved organic matter on Fe(II) oxidation in freshwater and coastal seawater”
- 50) 門谷 茂、矢田部創: 2017年度日仏海洋学会学術研究発表会, 東京日仏会館, 東京, 2017年6月18日 (2017)
「二枚貝養殖の盛んな半開放性内湾(南三陸町志津川湾)の物質循環過程」
- 51) T. KOMATSU, S. SAWAYAMA, H. MURATA and S. SASA: International Fishery GIS Society, Seventh International Symposium on GIS/ Spatial Analyses in Fishery and Aquatic Sciences, Hakodate Research Center for Fisheries and Oceans, Hakodate, Hokkaido, Japan, 23 August 2017 (2017)
“Dynamic changes of coastal ecosystems in Sanriku Coast after the hit of huge tsunami in 2011”
- 52) 藤井 学: 日本陸水学会第82回大会(仙北市田沢湖大会)、秋田県田沢湖高原温泉郷駒ヶ岳グランドホテル、2017年9月28日 (2017)
「森と海の間における鉄と有機物の動態」(招待講演)
- 53) T. KOMATSU, S. SASA, S. MONTANI, O. NISHIMURA, T. SAKAMAKI, C. YOSHIMURA, M. FUJII and T. YANAGI: National Seminar on Science Technology for Sabang Marine Tourism Development and the 4th International Workshop on Sato Umi, Auditorium and Main Commission of BPPT II, Jakarta, Indonesia, 5 to 6 October 2017 (2017)
“Satoumi approach for realizing sustainable coastal use in a rias-type bay: a case of Shizugawa Bay in Sanriku Coast after the huge tsunami on 11 March 2011”
- 54) 小松輝久: 日本海洋学会2017年度秋季大会沿岸海洋シンポジウム「持続可能な沿岸海域管理法-環境省推進費戦略的研究開発領域(S-13)の成果から」, 東北大学青葉山北キャンパス数理科学記念館, 仙台, 2017年10月12日 (2017)
「三陸沿岸海域の沿岸管理法」
- 55) 湯上洋平、松野匠、西村修、坂巻隆史: 日本海洋学会2017年度秋季大会, 仙台国際センター, 仙台, 2017年10月13-17日 (2017)
「志津川湾内の有機物組成に及ぼす外洋水の影響」
- 56) 川畑達矢、鄭 翊喆、湯上洋平、西村修、坂巻隆史: 日本海洋学会2017年度秋季大会, 仙台国際センター, 仙台, 2017年10月13-17日 (2017)
「志津川湾内における海水中将有機物組成と酸素消費に及ぼすカキ養殖場の影響」
- 57) T. KOMATSU, S. MONTANI, C. YOSHIMURA, O. NISHIMURA, S. SASA, Y. YAMAMOTO and T. YANAGI: COAST Bordeaux 2017, University of Bordeaux, Bordeaux, France, 7 to 10 November 2017 (2017)
“Modern Satoumi approach to an open rias-type bay, Shizugawa Bay, Sanriku Coast, Japan after the hit by the huge tsunami in 2011 for realizing sustainable environment and prosperous aquaculture”
- 58) 小松輝久: 環境省「環境研究総合推進費」S-13 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の

- 開発 平成29年度公開成果発表会, AP 新橋 虎ノ門11階 Room A, 東京, 2017年11月21日 (2017)
「遷移する沿岸環境監視とそれを応用した沿岸海域管理法開発」
- 59) 門谷 茂:環境省「環境研究総合推進費」S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成29年度公開成果発表会, AP 新橋 虎ノ門11階 Room A, 東京, 2017年11月21日 (2017)
「森-川-海の栄養物質輸送機構の解明」
- 60) 吉村千洋:環境省「環境研究総合推進費」S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成29年度公開成果発表会, AP 新橋 虎ノ門11階 Room A, 東京, 2017年11月21日 (2017)
「森-海の物質輸送に果たす有機物の役割解明」
- 61) 西村修:環境省「環境研究総合推進費」S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成29年度公開成果発表会, AP 新橋 虎ノ門11階 Room A, 東京, 2017年11月21日 (2017)
「森-海の物質輸送に果たす有機物の役割解明」
- 62) H. MURATA, T. KOMATSU and C. YONEZAWA: The Joint PI Meeting of Global Environment Observation Mission FY2017 (The 3rd ALOS-2 PI Workshop), TKP Garden City Takebashi, 22-25 January 2018 (2018)
“Mapping aquaculture facilities in Sanriku Coast using ALOS-2 for sustainable development”
- 63) 湯上洋平、西村修、坂巻隆史: 第5回日本水環境学会東北支部発表会, 東北大学, 仙台, 2018年1月27日 (2018)
「志津川湾奥河口部における河川および外洋からの流入水の影響」
- 64) 大原光司、湯上洋平、川畑達矢、西村修、坂巻隆史: 土木学会東北支部技術研究発表会, 日本大学, 郡山, 2018年3月3日 (2018)
「河川水が内湾の一次生産に及ぼす影響の評価」
- 65) 野中健太郎、松野匠、西村修、坂巻隆史: 土木学会東北支部技術研究発表会, 日本大学, 郡山, 2018年3月3日 (2018)
「内湾における捕食性魚類と底生生物のトロフィック・マーカ-の関係」
- 66) 鄭 翊喆、川畑達矢、湯上洋平、西村修、坂巻隆史: 第52回日本水環境学会年会, 北海道大学, 札幌, 2018年3月15-17日 (2018)
「サイズ分画と脂肪酸組成を交えた内湾の粒状有機物生産に及ぼす栄養塩添加と温度上昇の影響解析」
- 67) 松野匠、坂巻隆史、西村修: 第52回日本水環境学会年会, 北海道大学, 札幌, 2018年3月15-17日 (2018)
「捕食性魚類のトロフィック・マーカ-の基づく河川影響を受ける内湾食物網の解析」
- 68) 小松輝久: 平成29年度環境研究総合推進費 研究成果発表会, 独立行政法人環境再生保全機構, 札幌, 2018年3月17日 (2018)
「開放性内湾が連なる三陸沿岸海域における沿岸環境管理法の開発(S-13-2)」
- 69) 村田裕樹、小松輝久、米澤千夏: 日本リモートセンシング学会第64回学術講演会, 東京大学柏キャンパス, 2018年5月17-18日 (2018)
「人工衛星および航空機搭載SARを用いた養殖施設マッピング」
- 70) 木下龍之介、丸尾知佳子、千葉信男、西村修: 第52回日本水環境学会年会, 北海道大学, 札幌, 2018年3月15-17日 (2018)
「アサリの餌摂取行動における選択性について」
- 71) T. SAKAMAKI, M. FUJIBAYASHI: 2018 ASLO Summer Meeting, Victoria, BC, Canada, 10-15 June 2018 (2018)
“Testing connections of an inner-bay food web system with riverine material inputs”
- 72) 小松輝久、佐々修司、門谷 茂、吉村千洋、藤井 学、夏池真史、西村 修、坂巻隆史、柳 哲雄: 日本水環境学会 第27回市民セミナー「豊かな里海の創生～河川流域と沿岸域の関係～」, 東京, 2018年8月3日 (2018)
「開放性内湾における豊かな里海の実現を目指して: 南三陸志津川湾を例として」
- 73) T. SAKAMAKI, T. KAWAHATA, Y. YUGAMI, M. FUJIBAYASHI, O. NISHIMURA: The 12th International

Conference on the Environmental Management of the Enclosed Coastal Seas (EMECS 12), Pattaya, Thailand, 4–8 November 2018 (2018)

“The dynamics of particulate organic matter and implications for sustainable oyster aquaculture in Shizugawa Bay”

- 74) Y. YUGAMI, K. OHARA, O. NISHIMURA, T. SAKAMAKI: The 12th International Conference on the Environmental Management of the Enclosed Coastal Seas (EMECS 12), Pattaya, Thailand, 4–8 November 2018 (2018)
“Effects of river and offshore water on primary production in the inner part of Shizugawa Bay”
- 75) T. KAWAHATA, Y. YUGAMI, O. NISHIMURA, T. SAKAMAKI: The 12th International Conference on the Environmental Management of the Enclosed Coastal Seas (EMECS 12), Pattaya, Thailand, 4–8 November 2018 (2018)
“Assessing the dynamics of particulate organic matter and potentials of hypoxia formation in oyster farms of Shizugawa Bay”
- 76) T. KOMATSU, S. SASA, S. MONTANI, O. NISHIMURA, T. SAKAMAKI, C. YOSHIMURA, M. FUJII, M. NATSUIKE and T. YANAGI: The 12th International Conference on the Environmental Management of the Enclosed Coastal Seas (EMECS 12), Pattaya, Thailand, 4–8 November 2018 (2018)
“Satoumi practice and sciences support sustainable use of a rias-type bay in southern Sanriku Coast after the huge tsunami 2011”
- 77) T. KOMATSU, H. MURATA and S. SASA: The 12th International Conference on the Environmental Management of the Enclosed Coastal Seas (EMECS 12), Pattaya, Thailand, 4–8 November 2018 (2018)
“Detecting aquaculture facilities with remote sensing of optical or SAR images”
- 78) 小松輝久: 環境省「環境研究総合推進費」S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成30年度公開成果発表会, WTCコンファレンスセンター 3階 Room A, 東京, 2018年11月29日 (2018)
「遷移する沿岸環境監視とそれを応用した沿岸海域管理法開発」
- 79) 門谷 茂: 環境省「環境研究総合推進費」S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成30年度公開成果発表会, WTCコンファレンスセンター 3階 Room A, 東京, 2018年11月29日 (2018)
「森—川—海の栄養物質輸送機構の解明」
- 80) 吉村千洋: 環境省「環境研究総合推進費」S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成30年度公開成果発表会, WTCコンファレンスセンター 3階 Room A, 東京, 2018年11月29日 (2018)
「森—海の物質輸送に果たす有機物の役割解明」
- 81) 西村修: 環境省「環境研究総合推進費」S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成30年度公開成果発表会, WTCコンファレンスセンター 3階 Room A, 東京, 2018年11月29日 (2018)
「森—海の物質輸送に果たす有機物の役割解明」
- 82) T. KOMATSU, S. SASA, S. MONTANI, O. NISHIMURA, T. SAKAMAKI, C. YOSHIMURA, M. FUJII and T. YANAGI: 12th International Conference on Oceanography and Marine Biology, Rome, Italy, 3–4 December 2018 (2018)
“A Satoumi practice to the semi-enclosed bay after the hit of huge tsunami on 11 March 2011 for realizing sustainable aquaculture and sound marine environments: An example of Shizugawa Bay, Japan”
- 83) T. KOMATSU and H. MURATA: The Joint PI Meeting of JAXA Earth Observation Missions FY2018 (4th ALOS-2 PI Workshop), TKP Tokyo Station Nihonbashi Conference Centre, Tokyo, 21–25 January 2019 (2019)
“Mapping marine aquaculture facilities for sustainable use of coastal waters”

7. 研究者略歴

研究代表者

小松 輝久

京都大学農学部卒業、東京大学大気海洋研究所准教授、現在、横浜商科大学商学部特任教授

研究分担者

1) 門谷 茂

北海道大学水産学部卒業、北海道大学名誉教授、現在、横浜商科大学地域産業研究所特任教授

2) 吉村 千洋

東北大学工学部卒業、岐阜大学工学部助教、現在、東京工業大学環境・社会理工学院准教授

3) 西村 修

東北大学工学部卒業、環境庁国立環境研究所研究員、現在、東北大学大学院工学研究科教授

II. 成果の詳細

II-1 遷移する沿岸環境監視とそれを応用した沿岸海域管理法開発

学校法人横浜商科大学

商学部

小松 輝久

平成26(開始年度)～30年度累計予算額：44,650千円

(うち平成26年度：9,750千円、平成27年度：9,264千円、平成28年度：9,301千円、平成29年度：8,158千円、平成30年度：8,177千円)

累計予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

外洋の影響を受けながら、河川から流入する陸起源物質と湾内の養殖漁業により人為的な影響を強く受ける開放性内湾において人と自然の共存を図る沿岸域管理手法を構築するための研究は、リアス式内湾が連なる三陸沿岸を含めて例はない。志津川湾を重点海域として調べ、衛星リモートセンシングにより、岩礁性藻場が2011年の震災後増加し、2013年ころから磯焼けし、磯焼けが拡大していることを明らかにした。ウニ漁業が震災後3年間行われず、2011年夏に産卵されたウニが2013-2014年ころから大量に加入し、海藻を摂餌したことが原因であった。海藻-ウニ-捕食者という栄養カスケードの捕食者の役割を通じて、生物多様性と水産資源涵養の場である藻場を、ウニ漁業は維持している。つまり、人手をかける積極的なウニ除去が必要で、これが里海活動である。湾内における最大の人的影響は養殖であり、施設の分布を把握し、可視化することは管理に不可欠である。雲に影響されない合成開口レーダ画像を用いる養殖施設の種別分類に世界で初めて成功した。震災前の過密養殖から震災後に50-70%に削減するという志津川湾の養殖筏配置のダイナミックな変化を衛星リモートセンシングで初めて捉えた。これらの養殖筏・藻場分布など各種データをS-13-5の志津川湾生態系モデルに提供した。宮城県漁協志津川湾運営委員会、南三陸町、宮城県、WWF、S-13メンバー(S-13-2、S-13-4、S13-5)と「志津川湾の将来の海洋環境を考える協議会」を、科学調査結果を関係者と共有するためにbottom-up方式で2015年4月に立ち上げ、養殖筏削減がカキの成育にも海洋環境にもよいというS-13-2の研究結果、S-13-4の志津川湾における組合員の意識調査結果を協議会で紹介し議論した。さらに、南三陸町、漁協とco-designした養殖シナリオをもとに、各種養殖物の生産量およびそれぞれの収入のシミュレーションを上述のモデルで行った。それらの結果を協議会で議論し、2018年の志津川湾における区画漁業権免許更新に反映された。カキ養殖の持続的養殖に関する国際エコラベルASC取得および藻場のラムサール条約湿地への登録に提供した各種マッピングデータは貢献した。森林認証(FSC)-ラムサール(藻場)-海(ASC)の結びつきは、物質循環を考慮する里海手法となる。以上の結果と経験は、開放性内湾における、環境収容力に見合い、良好な環境を維持でき、収益を確保できる沿岸域管理法の礎となるだろう。

[キーワード]

開放性内湾、沿岸域監視、カキ養殖、協議会、沿岸海域管理。

1. はじめに

沿岸海域は、多くの生態系サービスを人類に提供する重要な場である。しかし、過去の人間活動で沿岸域へ与え続けた過大な負荷は沿岸海域の環境容量を超えるものとなっている。外洋の影響を受けながら、河川から流入する陸起源物質と湾内の養殖漁業により人為的な影響を強く受ける開放性内湾については、閉鎖性内湾と異なり研究例が少ない。人と自然の共存を図る沿岸域管理手法を構築するための研究は少なく、開放性のリアス式内湾を対象とした研究、例えば三陸沿岸の研究はなく科学的に意義がある。沿岸海域とその後背地である陸域の自然・人間活動を総合的にとらえ、物質循環・エコトーンのあ

るべき姿を明らかにし、豊で賑のある開放性内湾をつくるための具体的提案を行うことは、社会的・経済的に有意義である。大津波で破壊された三陸内湾の遷移過程を把握し、あるべき姿を提言することは、三陸の復興のために社会的にも重要で、かつ、緊急性がある。

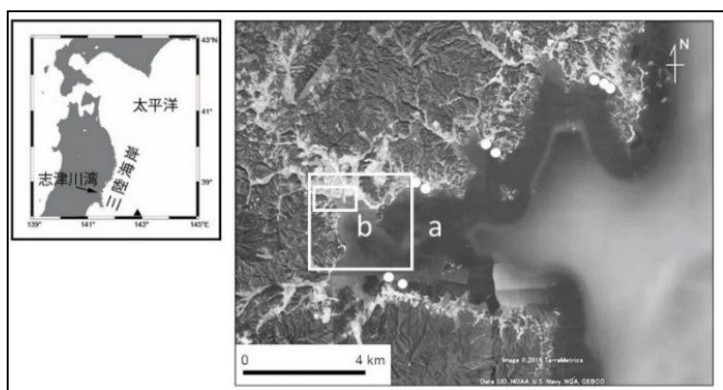
2. 研究開発目的

大津波の甚大な影響を受けた開放性内湾からなる三陸の沿岸生態系と養殖などの人間活動の変遷をモニタリングし、津波で再生した塩性湿地や被害を受けた藻場などのエコトーン、海域利用の状況を明らかにする。また、森川海をつなぐ物質循環を調べ、開放性内湾における、環境収容力に見合い、良好な環境を維持でき、収益を確保できる、カキなどの最適養殖法の提案、塩性湿地などのエコトーンの機能の評価、「森が海の恋人」であることの定量的な証明を行う。また、津波防潮堤が沿岸海域の環境に及ぼす影響を分析し、自然生態系と共存可能な沿岸域のあり方をS-13-4・S-13-5と共同で提案する。以上をもとに、三陸沿岸の開放性内湾においてどのような人手を加えることが豊かな沿岸海域を復活させることに有効かを明らかにする。

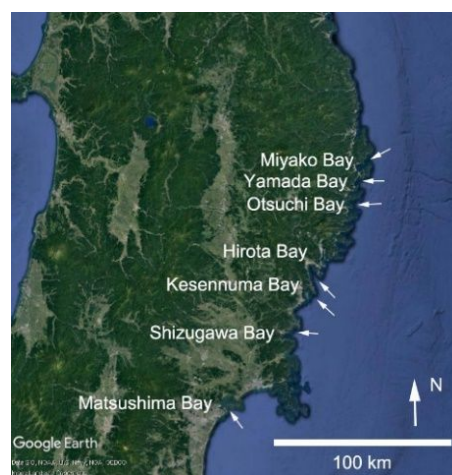
3. 研究開発方法

(1) 三陸におけるエコトーンに及ぼした大津波とその後の防潮堤建設の影響

衛星画像により三陸沿岸（図(1)-1；図(1)-2）における震災時の大津波の影響を受けた藻場の分布変化や、津波後に新たに形成された代表的なエコトーンである塩性湿地、津波の影響を受けた藻場の分布、河口域等の津波前後の分布の変化を調べた。三陸沿岸は、外洋に面し、それぞれが独立し、相互に環境が影響しないリアス式の開放性内湾を単位としシステムが成り立っている。後述するS-13-2(2)、S-13-2(2)の証明を行うために、適度な空間スケールの典型的リアス式湾である志津川湾を重点調査海域に選んだ。本研究において他のサブテーマおよびS-13-5で構築する生態系モデルの対象であるこの志津川湾（図(1)-1）において現場調査と衛星画像解析を行った。



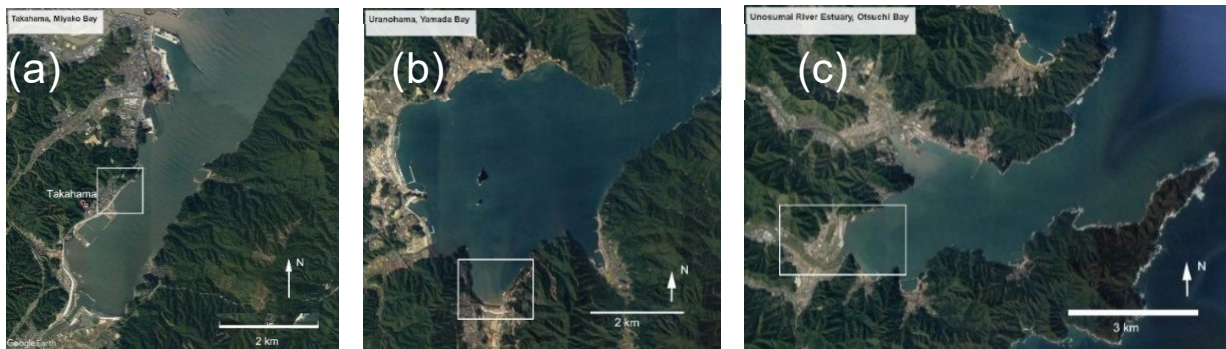
図(1)-1 三陸海岸、志津川湾(矢印)、震央(黒三角)を示した地図(左)と志津川湾とその後背地を示す衛星画像にリモートセンシングで解析した範囲(正方形aと長方形b)、2011年10月に吊り下げカメラでアマモの残存を確認した場所(白丸印)を示した衛星画像(右)。



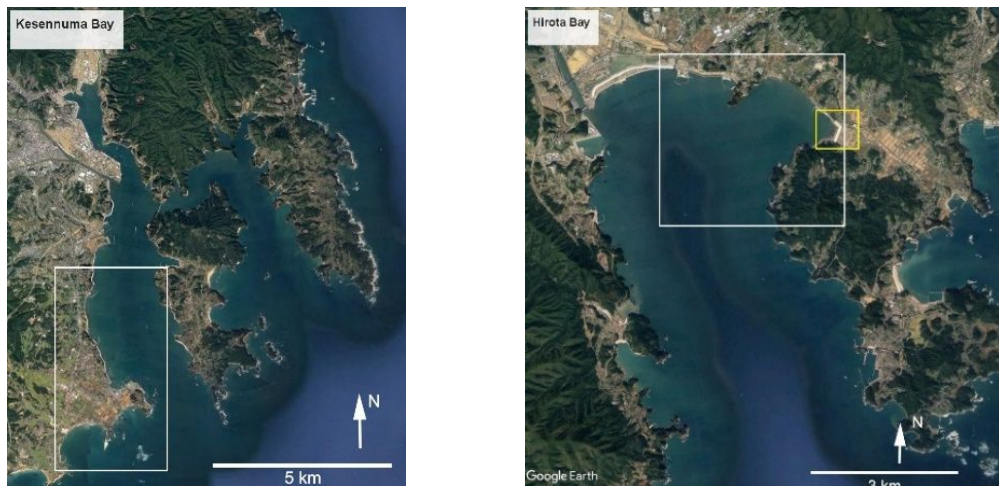
図(1)-2 調査を行った開放性内湾（リアス式湾）の宮古湾、山田湾、大槌湾、広田湾、気仙沼湾、志津川湾、松島湾。

エコトーンの遷移に及ぼす防潮堤建設の影響を衛星画像解析により調べた。2016年にほぼ巨大防潮堤が完成し、藻場に及ぼす影響を把握できることから宮古湾高浜地先を、小規模の防潮堤ができた山田湾湾奥部浦の浜地先を選定した(図(1)-2；図(1)-3a, b)。Google Earth(Google社)を通じて入手した津波前後の複数の可視光マルチバンド衛星(Digital Globe社提供)の画像データの解析を行った。宮古湾については、震災前年の2010年9月5日と震災後の堤防のほぼ完成した2016年2月3日に撮影された衛星画像

を取得した。山田湾湾奥部浦の浜地先については、震災前年の2010年8月8日、2016年2月3日に撮影された衛星画像を取得した。震災前後の河口域の変化を調べるために、岩手県の大槌湾に注ぐ鶴住居川河口(図(1)-2; 図(1)-3c)の2005年4月27日、震災以後の2011年3月14日、2012年4月14日、2014年4月13日、2015年6月1日、2016年2月3日の衛星画像を、Google Earthを通じて取得した。画像データは、JPEG画像として保存し、画像処理ソフト(Photoshop CS6 Adobe社)を用いて藻場の抽出を行った。まず、陸域をマスクした。次に、宮古湾では、岩礁性藻場であり、沖側で底深が急に深くなるリアス式の湾の中央付近に位置していたことから、海岸に沿った幅およそ100mの範囲を切り出した。これは、水深が深くなると、水柱で光が吸収されて、見かけ上、藻場と同じ輝度値を示すため、沖側の底深の深い海域を除去し、藻場のみを抽出するためである。山田湾では、おもに浅い砂地上に生育する海草が多く繁茂していたことから、深い海域の除去は行わず、藻場を抽出した。藻場抽出方法は、画像を強調した後に、藻場を示す輝度値に近い輝度値をもつピクセルを選択する方法でマッピングした。大槌湾鶴住居川河口域については、陸域にできた湿地、海岸地形の変化を調べた。



図(1)-3 調査を行った宮古湾高浜地先(a)、山田湾浦の浜地先(b)、大槌湾鶴住居川河口(c)。白線の長方形は調査対象海域を示す。



図(1)-4 調査を行った気仙沼湾西湾(左図)、広田湾湾奥部(右図)。白線の長方形は藻場の分布調査を、右図黄色線の長方形は、広田湾小友浦に出現した干潟を示す。

宮城県気仙沼湾西部(大谷海岸周辺から最知川原周辺まで)および岩手県広田湾湾奥部(沼田周辺から矢の浦周辺まで)を対象とし(図(1)-2; 図(1)-4)、2015年4月に撮影された可視光マルチバンド衛星(Pleiades衛星、Spot Image社)の画像データの解析を行った。気仙沼湾においては2015年7月2日から3日に、広田湾においては同年9月29日に、水中テレビカメラ(FM-4100, Q. I社)による海底の撮影による現場調査を行い、グランドトゥルースデータを取得した。DN値を放射輝度値に変換した人工衛星画像データを用いて、グランドトゥルースにより底質の判明している各地点の放射輝度値を教師データとし、最尤法による教師付分類を行った。画像中の各ピクセルを海草藻場(アマモ、タチアマモ等)、ガラモ

場（ホンダワラ類）、コンブ場またはアラメ場（コンブ類、アラメ・カジメ）、砂泥底のいずれかのクラスに分類し、各生息場を抽出した。砂泥底については、底深帯の深い場所と浅い場所でクラスを分けし、底深の違いによる放射輝度の値のばらつきの影響を補正した。なお、広田湾湾奥部においては、ガラモ場やコンブ場またはアラメ場の分布面積が相対的に小さく、多くの場所でこれらの海藻類が混生していたため、岩礫性藻場という単一のクラスにまとめて扱った。各マッピング結果について、グランドトゥルースデータのうち教師データとして使用しなかった一部を参照データとし、マッピング精度を検証した。また、既往の文献と漁業者からの聞き取り等をもとに、震災前の藻場の分布および面積の情報を得た。震災後に広田湾小友浦に出現した干潟について、衛星画像解析と現場調査を行った。

（2）志津川湾における震災後の沿岸生態系の遷移と人為的圧力

三陸沿岸は、外洋に面し、それぞれが独立し、相互に環境が影響しないリアス式の開放性内湾を単位としシステムが成り立っている。適度な空間スケールの典型的リアス式湾である志津川湾を重点研究海域として選んだ。志津川湾（図(1)-1）において、2011年10月10-11日に GPS（Holux, 245 m）で位置データを取得しながら、吊り下げ式水中カメラで直接海底の状況を観察するとともに、サイドスキャンソナーを使用し超音波で海底の状況を把握した。2河川が流入する湾奥部北西の河口域の変化を調べるために（図(1)-1）、震災前2009年6月25日、震災後の2011年3月14日、2012年3月19日、2015年6月1日の衛星画像をGoogle Earthを通じて取得した。これらの衛星画像データは、JPEG画像として保存し、（1）で述べた方法で、海藻藻場、アマモ場、陸域の冠水した湿地の抽出を行った。

2015年1月に小型ビデオカメラ（GoPro Hero3+, GoPro社）により撮影した映像を教師データとし、2015年2月12日撮影の可視光マルチバンド画像（GeoEye-1衛星, GeoEye社）を用いて最尤法教師付自動分類を行い、岩礫性藻場、磯焼け岩礫、アマモ場、砂泥底をマッピングした。



図(1)-5 松島湾に設置されている、筏式(左)、延縄式(中)、木架式(右)の各養殖施設。

（3）養殖筏マッピング法の開発と志津川湾における養殖筏マッピング

開放性内湾においては、多数の養殖施設が設置されており、海洋環境に及ぼす影響は大きい。そこで、新しい沿岸環境監視手法として、合成開口レーダー（SAR）により得られる画像から筏を検出する方法および高空間分解能の白黒画像であるパナクロマティック画像を用いてマルチバンド画像を高分解能にするマルチバンド光学衛星画像解析手法を用いて養殖施設を検出する方法を検討した。

前者では、宇宙開発機構（JAXA）が打ち上げたALOS-2に搭載されているLバンドSARセンサPALSAR-2およびJAXAの航空機搭載型LバンドSAR研究プロジェクトPi-SAR-L2により得られるSAR画像を取得した。SAR画像解析にはPolSAR pro Version 5（ESA）を用いた。開放的な内湾の多くには養殖筏が多数配置されている。そこで、様々な筏が湾内に設置されている松島湾（図(1)-2）を対象に監視方法の検討を行った。松島湾では、幅約5 m×長さ約15 mの筏式養殖施設、幅約1.5 m×長さ約60 mの延縄式養殖施設、幅2-5 m×長さ60 mの木架式養殖があり（図(1)-5）、木架式養殖施設が多く設置されている。筏は比較的幅が小さいため、高空間分解能をもつ画像が必須となる。レンジ方向1.76 mという海面設置漁具の検知に適した高い空間分解能をもつ航空機搭載LバンドSAR・PiSAR-L2により2014年8月6日に得られた松島湾の全偏波観測データを用いた。全偏波観測データは、3成分散乱モデルによる分類の可能性を検討した。

後者では、光学衛星画像から筏の抽出、判別を重点海域である志津湾において行い、震災前から震災

後の筏設置の時系列列変化を調べた。志津川湾では、10月後半から翌年4月末までがワカメ養殖の本養殖期間であることから、東日本大震災前の2009年2月3日、震災後の2012年2月22日、2013年4月14日の高空間分解能衛星画像、2014年1月15日に高度2000 mから航空機に搭載された光学センサから得られたカラー空中写真(空間分解能1 m)を取得した。カキの延縄式養殖施設は年間を通して設置されているので、ワカメの延縄式養殖施設の検知に用いたデータに加え、大震災直後の2011年9月9日、直近の2015年8月6日 PALSAR-2により観測されたHH単偏波SAR観測データ(空間分解能約3 m)を用いた。これらのデータはGISソフトウェアArcGIS 10.3 (ESRI) を用いて目視判別で手動抽出した。漁業権区画は平成25年から平成30年まで許可されている区画漁業権に関する情報を宮城県のホームページ(<http://www.pref.miyagi.jp/>)から取得し、作成した。また漁業権区画は平成25年度の漁業免許切替えに伴い一部が変更されているため、平成20年から平成25年までの区画漁業権に関する情報は宮城県漁業協同組合志津川支所から取得した。

(4) 開放性内湾における沿岸環境管理法の開発：志津川湾を例として

志津川湾内の場所による無給餌養殖生物であるカキの成長と餌濃度のデータを取得し、S-13-5の作成する生態系モデルのための資料とするために現場で購入したカキの軟体部重量の計測を行った。2015年2月12日、2016年2月26日に湾内のクロロフィル量とPOC量の水平分布を、2015年3月6日、2016年3月3日に本養殖を開始した養殖場の中央水路沿い、養殖場の奥の海域、志津川の河口側、袖浜の地先のカキの垂下連の上部、中部、下部のカキの身入りを測定した。2016年の出荷前の7月7日と本養殖を開始した2017年2月15日にカキ連のカキについて、養殖場の中央水路沿い、養殖場の奥部海域、平磯の地先のカキの垂下連の上部、中部、下部のカキの身入りを測定した。また、ホヤについても、静浜地先の養殖業者2名から2016年7月7日に購入し、垂下連の上部、中部、下部のホヤの身入りを測定した。

以上の研究結果を共有し、将来の志津川湾の環境と漁業のあるべき姿について議論する場として、「志津川湾の将来を考える協議会」を、本プロジェクト(S-13-2、S-13-4、S-13-5)と宮城県漁協志津川支所運営委員会が主催し、南三陸町、宮城県、環境省、WWF、NPO、志津川湾の漁業組合員などが参加し、2015年4月30日に志津川町平磯公民館、2016年5月16日、2017年1月16日に宮城県漁業協同組合志津川支所会議室、2017年10月11日、2018年7月31日、2019年3月12日に宮城県漁業協同組合志津川支所魚市場2階会議室において開催した。この協議会では、(1)、(2)、(3)の結果について発表し、意見交換した。さらに、S-13-5で開発した物質循環に関するデータを用い養殖漁業も入れた物質循環を含む生態系モデリングによる志津川湾の将来予測に取り組んでいるS-13-5の作成した生態系モデルを用いて、最適なカキなど無給餌養殖生物の養殖施設の配置、収容量について調べた結果を紹介し、議論した。これらの議論を踏まえて、実際に最適配置を行う際に生じる問題点の抽出と解決方策について検討した。

4. 結果及び考察

(1) 三陸における津波後の沿岸生態系の遷移と防潮堤

宮古湾における津波前後での藻場の状況を調べた。その中で、巨大防潮堤の建設がほぼ終わっている宮古市高浜地先について衛星画像解析を行った。震災前2010年9月5日の高浜地先では、海岸から80mの範囲に岩礁性藻場が広がっていた(図(1)-6a)。しかし、工事の終わった2016年2月3日には、ほとんど分布しなくなった(図(1)-6b)。これは、巨大防潮堤が建設され、震災前に藻場が分布していた岩礁域を埋め立てたためである(図(1)-7)。海岸に沿った狭隘な場所に巨大防潮堤を建設する場合には、埋め立てが必要となることを示している。一度埋め立てられた場所は、もとの藻場に戻すことはできず、不可逆的な藻場消滅であるといえる。画像解析を行った範囲について計測したところ、震災前の2010年、震災後の2016年の藻場面積は、469.4 m²、58.1 m²となり、震災後は12%にまで減少した。埋め立て範囲の面積を調べると、2010年の藻場の54%が建設により直接減少した(図(1)-6c)。直接的な減少以外に、32%の藻場が減少しており、地盤沈下による補償深度よりも海底が深くなったことによる藻場分布可能域の縮小、防潮堤基礎部の工事や捨て石の設置などの影響の可能性がある。

震災後、巨大防潮堤工事がなく(図(1)-8)、震災前にアマモが広がっていた山田湾湾奥部浦の浜地先に

ついて藻場分布の変化を調べた。この海岸には震災前に林野庁管轄の防潮林があった。画像解析の結果、震災前に、広くアマモ場が分布していたが、震災後の2012年4月5日には、2010年8月8日の38%になった(図(1)-9)。おもに、岩礁性藻場が多く、砂地上に生育する海草類は、少なかった。2016年2月3日には、中央部の砂地上に藻場が出現しており、海草類であると推定され、全体の藻場面積は、震災前の100%となった。このように、およそ、5年でほぼ震災前と変わらない藻場面積にまで戻ったのは、防潮堤の高さがT.P. 2.7 mと規模の小さな堤防で、藻場の再生に影響を及ぼさなかったためと考えられる(図(1)-8; 図(1)-9)。宮古湾高浜地先と比較すると、やはり、巨大防潮堤の建設が沿岸生態系に及ぼす影響は大きいものと判断される。



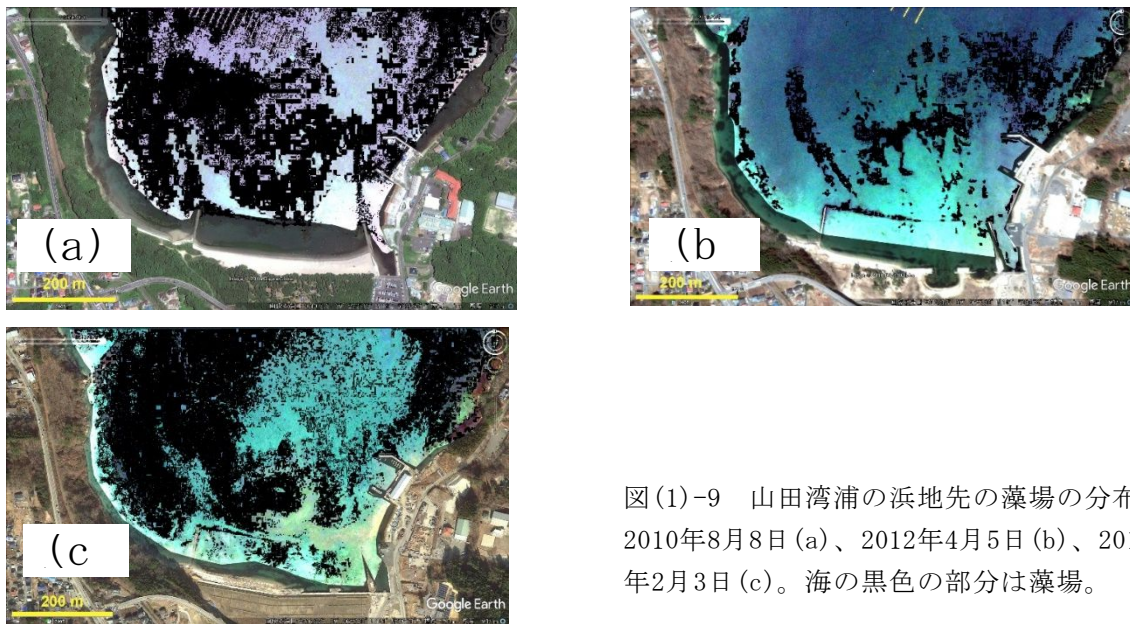
図(1)-6 宮古湾高浜地先の岩礁性藻場の分布。2010年9月5日(a)、2016年2月3日(b)、(a)に(b)の陸地をオーバーレイした図(c)。海の黒色の部分は藻場。(c)の矢印は、図(1)-11の写真をとった方向。



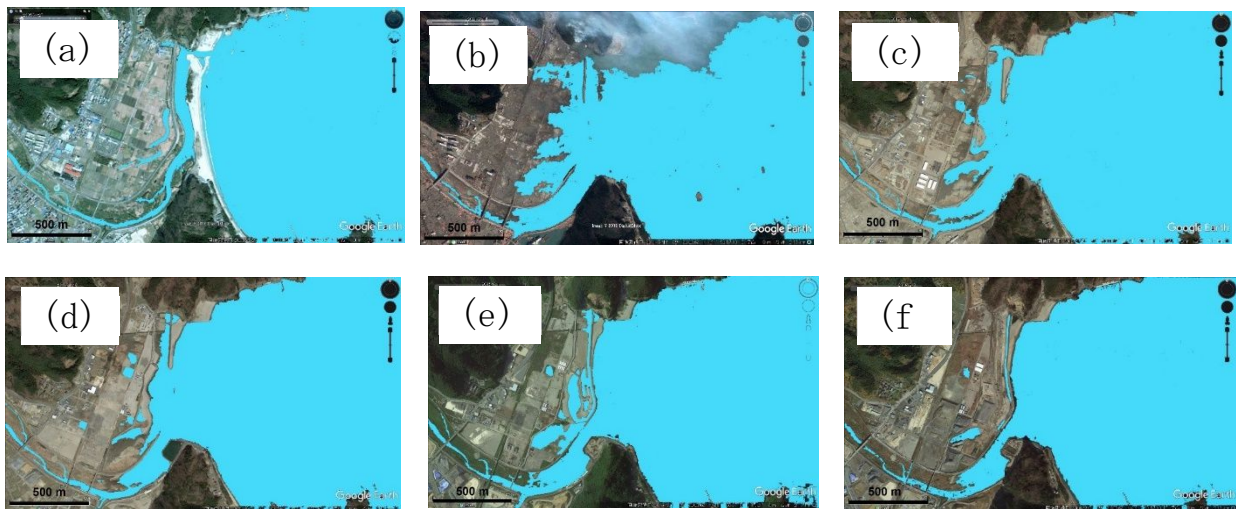
図(1)-7 2016年11月28日に撮影された宮古湾高浜地先の防潮堤工事の写真(岩手県情報公開)。



図(1)-8 山田湾浦の浜の震災後に完成した山田湾浦の浜地先の防潮堤(下右)と2016年に整備された防潮堤背後の防潮林(下左)(岩手県情報公開)



図(1)-9 山田湾浦の浜地先の藻場の分布。2010年8月8日(a)、2012年4月5日(b)、2016年2月3日(c)。海の黒色の部分は藻場。



図(1)-10 震災前の2005年4月27日(a)、震災後の2011年3月14日(b)、2012年4月14日(c)、2014年4月13日(d)、2015年6月1日(e)、2016年2月3日(f)の大槌湾鵜住居川河口域の変化で、青色は水域を示す。

岩手県大槌湾に注ぐ鵜住居川の河口域の震災前後の変化を画像解析により調べた。震災前の2005年4月27日では、河口域に砂州が発達し、河口閉塞が生じていた。陸域には、3か所の湿地が分布していた(図(1)-10)。震災直後の2011年3月14日では、砂州は破壊され、震災以前に海岸線の陸域に広がっていた水田は湿地となった。2012年4月14日、2014年4月13日と、震災以前の防潮堤が一部残っていた河口左岸の東側を埋め立てる工事が進行した。2015年6月1日には、防潮堤による閉め切り工事がさらに進行し、潮間帯は海との接続がほぼなくなり、潮間帯および湿地帯の陸地化が進行した。2016年2月3日には、防潮堤工事が終了し、陸域に取り残された湿地は、狭い範囲に限られた。

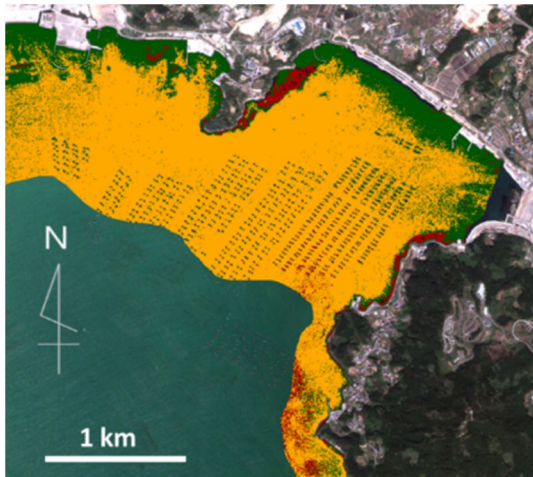
福島ら(2015)¹⁾は、気仙沼湾で現場調査を行い、湿地に流入する直前の河川水と湿地から河口域へと

流出する河川水の水質を比較すると、酸化還元電位が大きく低下し、NO₃-濃度の低下とNH₄⁺、TP、Fe濃度の上昇がみられると報告し、湿地は底泥中の有機物が豊富であり、嫌気環境下での底泥有機物分解に伴う養分動態が陸域から河口への栄養塩の量的かつ質的变化をもたらしたと推定した。このように、湿地では植物のリッターが多く、基部近くが還元状態になるため、湾内に流入する河川水中の鉄を増加させることが塩性湿地の機能の一として期待される。震災以前に埋め立てによりつくられた水田を震災後に取り戻す巨大防潮堤の建設は、大槌湾への鉄供給を減少させた可能性がある。震災により、回復した塩性湿地を、物質循環の面から、すべて元の水田に戻すのではなく、復興を支える開放性内湾の生産力を高めるため、海とつながる塩性湿地の一部を残すことも選択肢としてあったものと思われる。

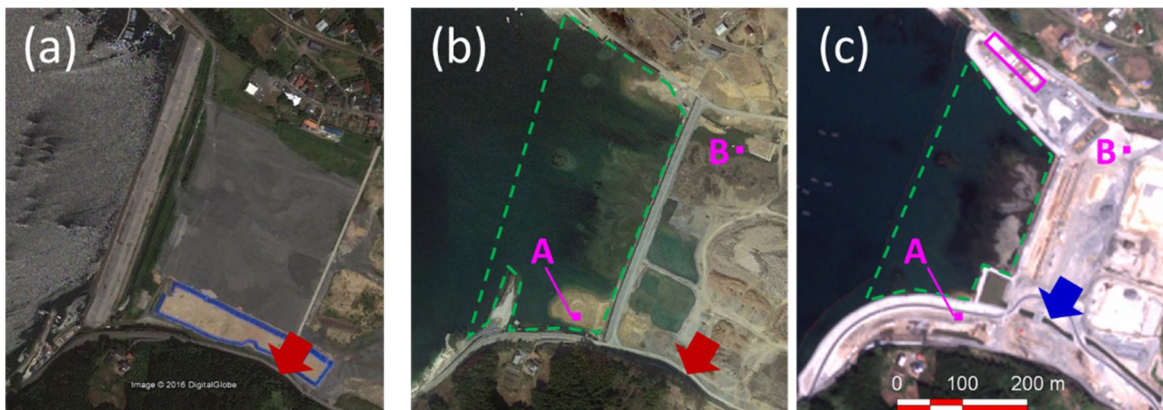
広田湾湾奥部藻場のマッピング(図(1)-11)の精度は、全体精度で94 %、タウ係数で0.91と非常に高く、海草藻場と岩礁性藻場のユーザ精度はそれぞれ99 %と96 %といずれも非常に高かった。広田湾湾奥部についても、後述の気仙沼湾と同様に藻場のマッピングと震災前後の藻場分布の比較を行った(表(1)-1)。2015年の秋には、湾最奥部の底深1mから2m程度の浅場には、アマモからなる濃密かつ広大な海草藻場が分布していた。底深およそ3mよりも深い場所には、パッチ状のタチアマモ群落も分布していた。このアマモとタチアマモの分布の底深による分布の違いは、震災前の2005年に行われた調査(環境省自然保護局生物多様性センター, 2008)²⁾と一致した。また、東側の海岸線近くには、アマモ群落に混じり、準絶滅危惧種に指定されているスゲアマモ (*Zostera caespitosa* Miki) の群落も確認された。この海域における上述2005年の調査および2012年の生態系監視調査(環境省自然保護局生物多様性センター, 2015)³⁾では、分布するアマモ類はアマモとタチアマモの2種のみと報告されており、震災前後を含めて初の分布報告となる。岩礁性藻場の分布は海岸線近くの狭い範囲に限られていた。海草藻場については、第4回自然環境保全基礎調査(環境庁自然保護局, 1994)⁴⁾で、三陸地域における最大規模の面積とされていたアマモ場の面積は、震災後大きく減少した。特に、底深3m以深での減少が明瞭で、震災前に存在した濃密なタチアマモの藻場が津波によって大幅に縮小し、パッチ状の小規模群落に変化したためである。震災前の広田湾湾奥部では、カキ等の養殖筏から落下する有機物に加え、夏季から秋季に枯死したタチアマモが海底に堆積することによって、海水の貧酸素化が生じていた(林崎健一私信)が、震災後は津波による底質の攪拌とタチアマモの減少により環境は改善していた。絶滅危惧種タチアマモの回復過程を監視していくことは生態学的に重要である。また、震災前は、過密養殖により、本養殖期間が数年に及び、カキ垂下連に付着する汚損生物の掃除により養殖筏から落下する有機物量も多くなっていた。したがって、養殖期間短縮により付着生物の落下を減少させることが重要である。本報告II-4のカキ筏削減によりカキ成長速度の上昇と海洋環境負荷削減が期待できる海域である。

表(1)-1 広田湾湾奥部における震災前後の藻場面積とその変化。震災前は第5回海域自然環境保全基礎調査(1993-1999)(環境省自然環境局生物多様性センター, 2019)⁵⁾、震災後は2015年の衛星画像解析結果による。震災前の藻場面積は浅海域のみ。

藻場クラス	震災前 (ha)	震災後 (ha)	変化量 (ha)
海草(アマモ、タチアマモ、スゲアマモ)	231.5	98.1	-133.4
岩礁性(ガラモ場、コンブ場、アラメ場)	18.2	14.6	-3.6
合計	249.7	112.8	-136.9



図(1)-11 広田湾湾奥部における津波後（2015年4月30日：Pleiades衛星）の藻場分布解析結果。緑色が海藻藻場（アマモまたはタチアマモまたはスゲアマモ）、赤色が岩礁性藻場（ホンダワラ類、コンブ類、アラメ等）、オレンジ色が砂泥底を示す。底深約10 m以深の範囲は解析から除外。



図(1)-12 広田湾小友浦の俯瞰図。(a)：2010年7月23日の画像(Google earth)、(b)：2012年4月14日の画像(Google earth)、(c)：2015年4月30日の衛星画像(Pleiades衛星)。(b)、(c)中の緑色の破線で囲まれた部分は震災後に出現した干潟。A地点は平成25年度東北地方太平洋沿岸地域生態系監視調査報告書(環境省自然環境局生物多様性センター，2014)⁶⁾でアシハラガニの生息が確認されていた地点。B地点は2012年には塩性湿地が存在した地点。赤色の矢印は震災以前からの旧水路で、2012年には干潟に直接流れ込んでいた。青色の矢印は2015年に新たに整備された水路で、一部は暗渠となり、干潟へ流れ込む地点は堤防で仕切られている。(c)上部のピンク色の四角形で囲んだ建造物は防潮堤。

震災前の2010年7月、震災後の2012年4月および2015年4月の広田湾湾奥部小友浦の俯瞰図を図(1)-12に示す。小友浦は震災前には干拓地だったが、有効利用されず遊休地化していた。平成25年度東北地方太平洋沿岸生態系監視調査報告書(環境省自然環境局生物多様性センター，2014)⁶⁾によれば、2013年8月の時点で、小友浦は震災後の地盤沈下と堤防の消失により礫底の干潟となり、豊かな生態系が戻っていた。また、同報告書によると、小友浦南北の水路の周囲にはヨシ原を伴った塩性湿地が出現し、岩手県では稀にしか見られないアシハラガニなどの生物も多く生息していた。しかし、衛星画像や現場調査で撮影した写真(図(1)-13左)にも見られるように、干潟の背後では大規模な土地のかさ上げ工事が進行している。また、小友浦の北側には高さ12.5 mもの巨大な防潮堤が建造されている(図(1)-13右)。これらの工事に伴い、2012年4月に約9 haあった小友浦の干潟の面積は、2015年4月には約6 haとなり、約2/3に縮小していることが、俯瞰図の比較から明らかとなった。特に図(1)-12b中のA地点付近は、上述の生態系監視調査でアシハラガニの貴重な生息地と報告されていたにもかかわらず、2015年に

は埋め立てにより消滅していた。また、南北の水路は大きく改変され、一部は暗渠化されたことが確認できた。2012年の時点では水路からの陸水は干潟のA地点付近に直接流れ込んでいたが、2015年には四角い堤防で仕切られ、溜池のようになっていた。また、2012年4月にB地点付近は広く塩性湿地となっていたが、2015年4月の時点ではかさ上げ工事に伴う埋め立てにより完全に消滅していることが分かった。このような沿岸域の人為的改変は、自然環境の面積を直接減少させるだけでなく、陸域と海域を遮断することで陸水と海水の連続性を失わせ、エコトーンである干潟および塩性湿地の環境や生態系に悪影響を与える恐れがある不可逆的な環境改変である。



図(1)-13 2016年2月撮影の広田湾小友浦(図(1)-12(c))のA地点から正面の防潮堤方向を撮影した写真(左)では、手前側には礫底の干潟が広がり、右奥でかさ上げ工事が進行。左の写真の正面の防潮堤の近接写真(右)。

気仙沼湾西部において、衛星画像解析により得られた震災後の藻場分布のマッピング結果を図(1)-14に示す。この画像について、参照データを基に分類精度を算出したところ、全体の精度で77%、タウ係数で0.71という値であった。藻場のクラスごとにユーザ精度を見ると、海草藻場では89%と高かったが、ガラモ場およびコンブ場またはアラメ場ではそれぞれ54%および57%と比較的低かった。誤分類の傾向を見ると、特にガラモ場とコンブ場の間での誤分類が多くなっていた。

既往資料から得られたそれぞれの海域の震災前の藻場分布の情報を用いて、震災前後の藻場面積の比較を行った(表(1)-2)。2015年の気仙沼湾においては、海岸線ごく近くの浅場の砂泥底にはアマモからなる濃密な海草藻場が分布していた。浅場の砂に小石や砂利が混ざるような底質では、タマハハキモク(*Sargassum muticum* (Yendo) Fensholt)等のホンダワラ類が繁茂していた。また、漁港内にもパッチ状の海草藻場が分布していた。さらに底深がやや深い場所では、絶滅危惧Ⅱ類に分類されているタチアマモの群落がみられた。岩井崎周辺の波当たりの強い岩礁帯にはアカモク(*Sargassum horneri* (Turner) C. Agardh)等のホンダワラ類からなるガラモ場が広がり、その他アラメ(*Eisenia bicyclis* (Kjelleman) Setchell)等のコンブ目藻類も見られた。また、水中テレビカメラによる現場調査では、砂泥底の広い範囲に大型のコンブ類が堆積している様子が観察された。これは、周辺のワカメやカキ等の養殖ロープに付着したコンブ類のうち、自然に脱落したり漁業者によって除去されたりしたものが海底に堆積し、成長を続けたものと推測された。1993-1995に行われた第5回自然環境基礎調査(環境省自然環境局生物多様性センター, 2019)⁵⁾の藻場面積を震災前とし、震災後の藻場の面積と比較すると、震災前と比べて全体的に藻場面積は増加していた。しかし、この結果は本海域で震災前の藻場分布情報が極端に不足していたためである可能性が高い。震災後に見られた岩井崎から北側の漁港内や海岸線沿いの海草藻場に関しては、第5回海域自然環境保全基礎調査では記載されていないが、地元漁業者からの聞き取り調査によると震災前から存在していたということである。表(1)-2中の震災後のコンブ場の面積には、海底の基質に付着していない堆積コンブも含まれ、藻場の面積はやや過大評価となったと考えられ、海底堆積コンブの面積については、現場調査をもとに除外する必要がある。堆積コンブの現存量が多ければ、これらの堆積コンブによる栄養塩の吸収量の見積もりも物質循環の評価の上で重要になる。



図(1)-14 気仙沼湾西部における津波後（2015年4月30日：Pleiades衛星）の藻場の分布解析結果。緑色が海草藻場（アマモまたはタチアマモ）、赤色がガラモ場（ホンダワラ類）、ピンク色がコンブ場またはアラメ場、オレンジ色が砂泥底を示す。底深約5m以深の範囲は解析から除外。

表(1)-2 気仙沼湾西部における震災前後の藻場の面積とその変化。震災前の藻場面積は1993-1995に行われた第5回海域自然環境保全基礎調査（環境省自然環境局生物多様性センター，2019）⁵⁾に、震災後の藻場面積は2015年の衛星画像解析結果による。震災前の藻場面積は浅海域のみに限られる。

藻場クラス	震災前 (ha)	震災後 (ha)	変化量 (ha)
海草藻場(アマモ、タチアマモ)	17.6	47.7	30.1
ガラモ場	55.7	75.4	19.7
コンブ場またはアラメ場	9.9	67.7	57.8
合計	83.2	190.8	107.6

(2) 志津川湾における震災後の沿岸生態系の遷移と人為的圧力

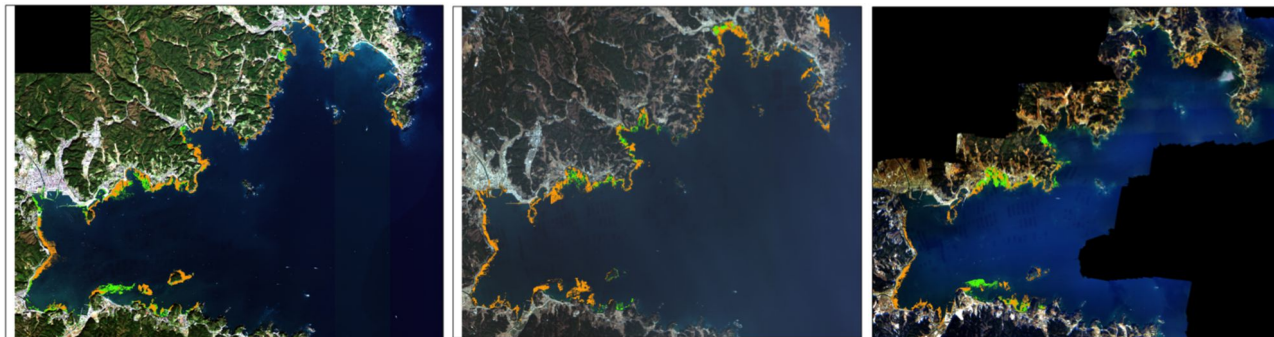
2011年3月11日の津波により湾奥の北と南にあったアマモ等の海草藻場が無くなった（図(1)-15；図(1)-16）。海草のアマモ類は陸上の植物が海に戻ったもので、成長すると花を咲かせ実をつける。草丈が伸長して花を咲かすものが花株（生殖株）、大きくなっていないものが栄養株（未成熟株）である。湾の南側の島の西側に広がっていたタチアマモも無くなった。津波から3年後の2014年1月15日では、震災前に分布していた湾奥の南と北以外では、アマモ等がほぼ津波前程度に回復した（図(1)-16）。一方で、津波直後に大幅に増加した岩礁性藻場は、2014年には、大幅に減少した（図(1)-17）。これは、津波直後には、瓦礫などの付着基質が大幅に増えたが、その後の復旧工事で多くの瓦礫が取り除かれた事により海藻の付着基質が減少した事と、後述の震災直後に2013年以降ウニが大量発生し岩礁性藻場にその食害が現れているためだと考えられる。

(2) 1 ウニによる磯焼け

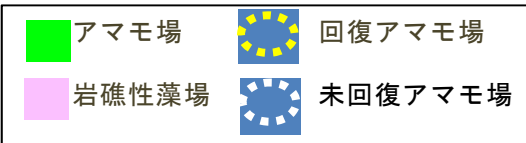
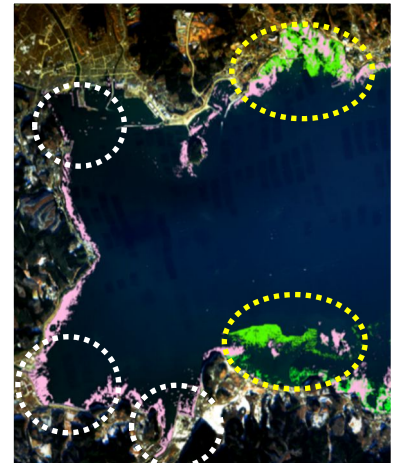
湾最奥部の岩礁帯では顕著な磯焼け現象が広範囲に確認された（図(1)-18）。これらの磯焼け岩礁帯においてキタムラサキウニの大群が見られ（図(1)-19）、磯焼けの原因と考えられた。衛星画像解析によると、湾奥部一体の岩礁が磯焼けしていた。大槌湾の岩礁ではウニが震災後も多く生き残っていたことから（Komatsu et al., 2015）⁷⁾、志津川湾においても、津波後にも岩礁域では生き残った多くのウニ個体が2011年の夏に産卵し、生まれた個体が2013年から加入し、食害したと推測される。震災後は、ウニを採捕する漁船がなくウニ漁業がなかったこと、その後、漁船を確保できるようになっても、ウニが雑食

性で、海底に死体があるとそれを食べるために、三陸の漁業者が3年間ウニの漁獲をしなかったこと(黒沢正隆氏私信; 図(1)-19)が、ウニによる磯焼けが生じる5-10inds./m²以上(水産庁, 2015)⁹⁾の爆発的なウニの増加をもたらしたと考えられる。震災以前は、毎年、夏の産卵時期前からウニ漁業が行われ、ウニを取り除くことでウニによる過剰な産卵を防ぎ、海藻の被食を妨げ、磯焼けから藻場を守ってきた。このような関係をtop-down cascadeという。アラスカでラッコがいる海岸といない海岸の海藻とウニの関係を調べたEstes and Palmisano(1974)⁹⁾によると、ラッコがいるところではラッコがウニ個体数を制御するため磯焼けが起こらない(図(1)-19)。藻場は、多くの海洋生物の生息場や産卵場として生物多様性に貢献する。ウニの餌となる海藻もウニの身入りにも影響するため、適切なウニの間引きが必要であり、ラッコのいない三陸ではウニ漁業がラッコの代わりにウニの間引き、藻場を保全する役割を果たしている。しかし、ウニ漁業が3年間なかったことで、top-down cascadeによりウニの大発生で藻場の磯焼けが生じた。松田(2007)¹⁰⁾は、健全な物質循環系を維持し環境を保全するためには、沿岸域の健全な水産業の営みが重要であると指摘しているが、三陸におけるウニ漁業は、健全な水産業の営みであり、これにより、太く、長く、滑らかな物質循環がつけられる。

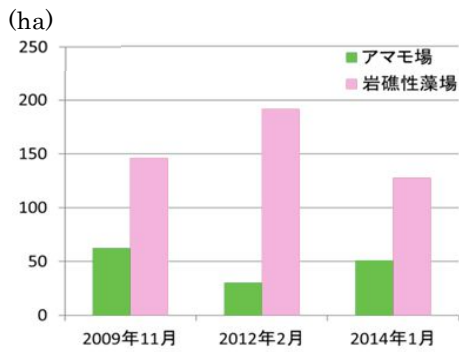
2013年以降、ウニの食害による岩礁性藻場の磯焼けは、三陸で広く生じており、磯焼けした岩礁域では、海藻の餌が不足し、身入りの悪い経済的価値の無いウニが増え、漁業者も採捕していない。もちろん、身入りが悪いウニの産卵量は少ないが、ウニの寿命は14-15年程度であり、放置すると磯焼けは継続するので、積極的に採捕する必要がある。採捕したウニを蓄養などで身入りをあげて出荷すると磯焼け対策としてのよい循環が生まれ、資源の有効利用も実現できる。志津川湾において、養殖ワカメの茎、養殖マコンブを用いてキタムラサキウニを畜養し、成熟状態を調べた研究(Takagi et al., 2018)¹¹⁾はあるが、実用化までには至っておらず、今後の取り組みが期待される。現在、宮城県漁協志津川湾運営協議会と南三陸町とが中心となり、ダイバーを雇用してウニ駆除の作業をおこなった。効果判定のためにも、遷移する沿岸生態系の監視の上でも、志津川湾の藻場マッピングを継続していく必要がある。



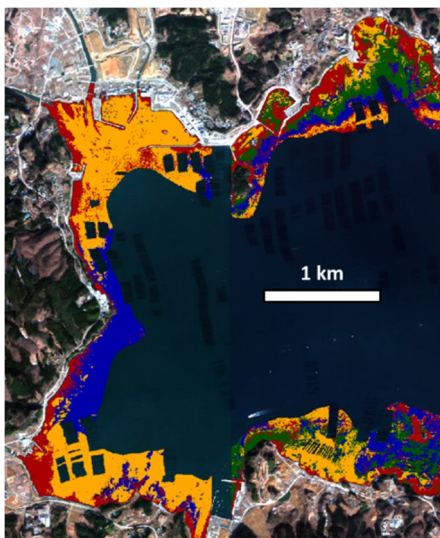
図(1)-15 志津川湾における津波前(2009年11月4日:GeoEye-1)(左)、津波から1年後(2012年2月22日:GeoEye-1)(中)、津波から3年後(2014年1月15日:航空機による空撮)(右)の藻場の分布。黄緑色が海草藻場、オレンジ色が岩礁性藻場を示す。



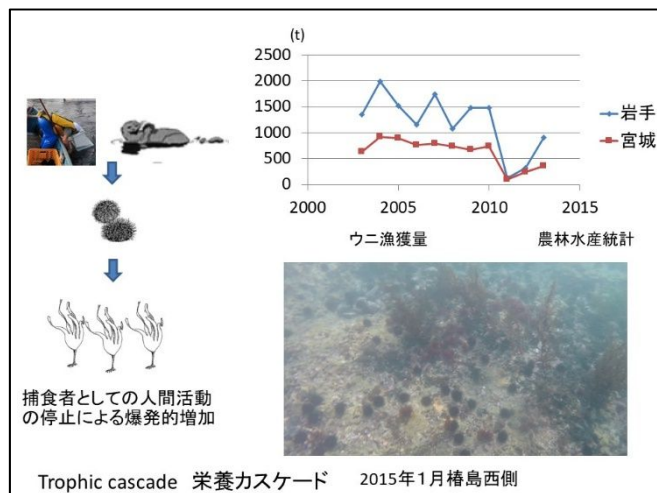
図(1)-16 志津川湾奥部における津波前（2009年11月4日）（左）、津波から1年後（2012年2月22日）（中）、津波から3年後（2014年1月15日）（右）の藻場の分布。緑色が海草藻場、マゼンタ色が岩礁性藻場を示す。



図(1)-17 志津川湾奥部における津波前（2009年11月4日）（左）、津波から1年後（2012年2月22日）（中）、津波から3年後（2014年1月15日）（右）の藻場の分布面積。緑色が海草藻場、マゼンタ色が岩礁性藻場を示す。



図(1)-18 志津川湾における衛星画像を用いた藻場及び磯焼け岩礁のマッピング結果（2015年2月12日撮影:GeoEye-1衛星）。赤色が岩礁性藻場、青色が磯焼け岩礁、緑色が海草藻場、オレンジ色が砂泥底を示す。底深約7 m以深の範囲は解析から除外。



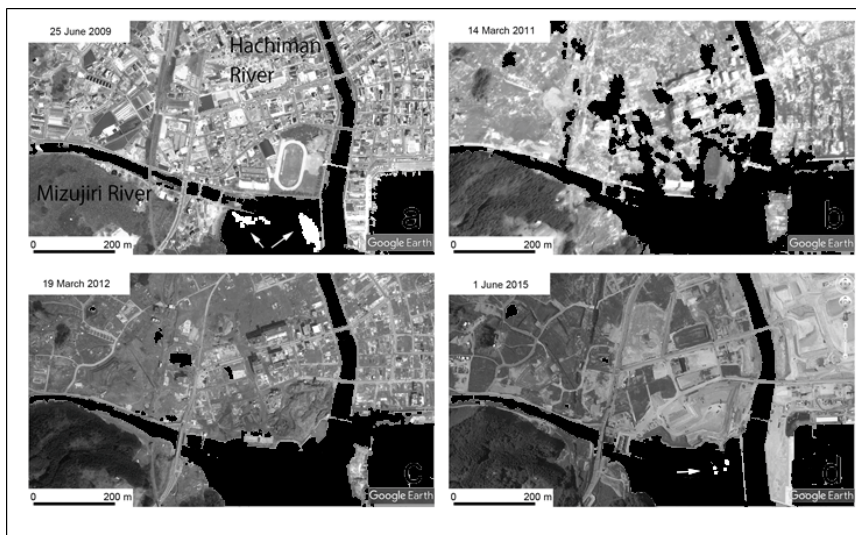
図(1)-19 宮城県と岩手県の震災前後のウニ漁獲量経年変化（右上：農林水産統計）、2015年1月の志津川湾樺島西側のウニによる磯焼けの状態（右下）、栄養カスケードの説明（左）。藻場をつくる海藻を食べるウニの個体数がそれらの捕食者（ラッコあるいはウニ漁業）の存在で決まり、ウニの捕食者がいないと藻場が磯焼けする。

(2) 2 アマモ場の回復

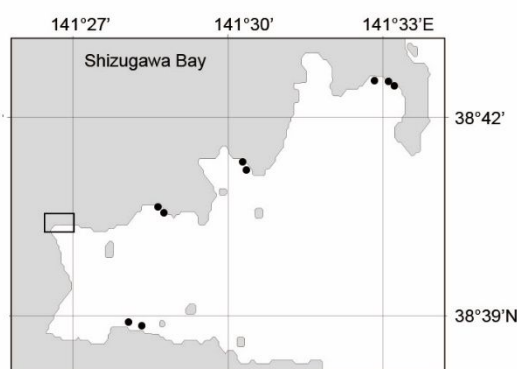
2015年になってようやく、湾奥北西部では、現場観察でアマモ場パッチが確認された(図(1)-20)。アマモ場の回復が遅れた理由として、復興工事、防潮堤および河川の護岸堤、高台造成に伴って、河川水が濁っていたため光量不足で回復が遅れていたが(小松ら, 2014)¹²⁾、最近では河川からの濁水が減少したためにアマモ場の小さなパッチが見られるようになったのではないかと推定される(Komatsu et al., 2018)¹³⁾。

志津川湾では、2011年10月の調査の結果、アマモ場が、残存していた場所は、津波が直接に当たる場所ではなかった(図(1)-21)。周期的に三陸沿岸を津波が襲っても、埋土種子による回復だけでなく、残存するアマモ場は、種子供給源の役割を担う。そのため、このような場所にあるアマモ場を重要な藻場として保全していくことで、消失したアマモ場の再生が担保され、促進される(小松ら, 2017)¹⁴⁾。

アマモの再生については、アマモの生育していた砂泥底上の海底に残存するゴミを除去し、今ある栄養株や花株を絶やさないように、また、種子が散布され発芽生育できるように大切に见守っていくことが必要である。河口域では工事による濁り水や、海底のかく乱によって、海草藻場の再生が遅れている。濁水の拡散を抑えるフェンスなども海草場再生に有効であろう(小松ら, 2014)¹²⁾。



図(1)-20 画像解析で得た、水尻川と八幡川が流入する志津川湾北西湾奥部における、震災前2009年6月25日(a)、震災後の2011年3月14日(b)、2012年3月19日(c)、2015年6月1日(d)の水域(黒)と海草藻場(海域における矢印で示した白色域)の分布。



図(1)-21 志津川湾において震災後の2011年10月10日-11日に吊り下げ式水中カメラで確認した海草が分布していた場所を黒丸印、図(1)-20において衛星画像解析を行った場所を長方形で示した図。

本テーマの重点研究対象海域である志津川湾でも塩性湿地と海とのつながりについて調べた(図(1)-20)。河川が流入する志津川湾北西部に位置する湾奥では、津波後に、防潮堤が破壊され海と陸とがつながり、また、地盤がおおよそ60cm沈降した(国土地理院, 2011)¹⁵⁾ことから、干潟と塩性湿地が出現した(図(1)-20)。震災後に再生した干潟ではアサリが大発生し、地元の人が潮干狩りをしてアサリを漁獲していたが、震災後の復旧工事によって干潟がなくなり、アサリも分布しなくなった(印南敏秀氏私信, 2016)。2012年3月には、水尻川と八幡川の間海岸の3か所で人工海浜の工事が始まっている(図(1)-20)。しかし、巨大防潮堤で陸とのつながりが分断されれば、生態学的な機能は発揮されないと考えられる。湿地と

海とのつながりは2012年3月にはなくなり(図(1)-20)、さらに復旧工事が進んだ2015年には、沼はほぼ見られなくなった(図(1)-20)。おそらく、三陸の沿岸では、津波の後に塩性湿地ができ、陸地となるような生態遷移が数十年からは百年という時間スケールで、津波のたびに繰り返されていたのではないかと考えられる。三陸復興国立公園(環境省, 2012)¹⁶⁾では、地震・津波により大きく影響を受けた干潟・アマモ場といった生態系について、地域の理解が得られた場合は、復興の歩みを妨げないよう配慮しながら、自然の回復力を助ける形での再生の取組を進めることになっており、そのような生態遷移が観察できる湿地や干潟の積極的な保全を望みたい。

なお、これらの藻場分布データを、南三陸町の要請で提供し、志津川湾の藻場のラムサール条約湿地登録の参考資料として用いられ、2018年10月18日に正式に登録された。



図(1)-22 志津川湾においてL2津波に備える防潮堤が建設される河川(青実線)河口域および海岸(赤実線)。(宮城県, 2019: <https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/kasen/sinntyoku.html>)

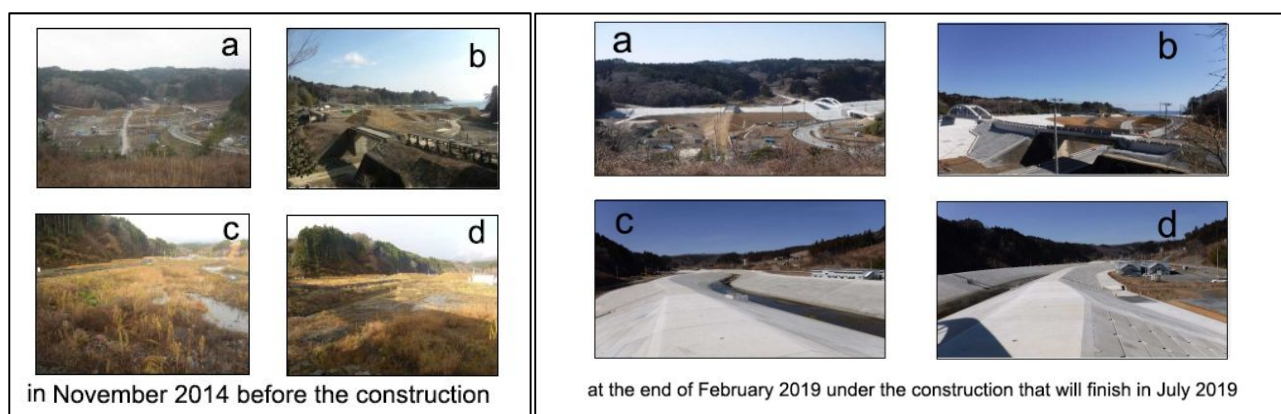
(2) 3 ブルーインフラ

藻場、塩性湿地、干潟は、陸と海とのエコトーンとして生物多様性を涵養する重要な生息場であり、沿岸漁業を支えるブルーインフラである。また、生物多様性を確保することを日本政府は決め、環境省が自然生態系の回復を目指している。津波は、おもにアマモ場を破壊したが、塩性湿地や干潟を再生した。干潟や塩性湿地の提供する生態系サービスの価値は、藻場と同様に、非常に高い(Costanza et al., 1997)¹⁷⁾。一方、宮城県や国土交通省などは、人命が重要であるということで、巨大防潮堤および河川の巨大護岸提建設を強力に推進している。巨大防潮堤は、緩傾斜護岸で基礎部分を広くすること、鋼矢板を深く打ち込むこと(e.g. 乙志ら, 2015)¹⁸⁾など、津波に耐えるように設計されているため、このような建築物が海岸に構築されれば、地下水脈に影響を及ぼす恐れがある(佐藤, 2015¹⁹⁾; 安田, 2015²⁰⁾)。海底湧水により育まれるアマモ(谷口, 2015)²¹⁾など海際や浅い海に分布する海草の生息場がなくなり、再生した塩性湿地とのつながりや(佐藤, 2015)²¹⁾、干潟が破壊される。

志津川湾を例にとると、志津川湾に流入する最も大きな10河川の河口域にL2津波に備える河川堤防が計画され(図(1)-22)、建設中である。工事前には、河口から河川に豊かな自然が残されていた。例えば桜川(図(1)-22)では2014年11月には豊かな河川敷の自然環境が残っていた(図(1)-24)。工事完了が2019年7月に設定され、ほぼ終了している2019年2月には、河川の3面張りが完成し、河川敷には草などの自然は全く残されていない(図(1)-23; 図(1)-25)。余談ではあるが、この工事を見ていると、堤防の土台は盛り土で、その上にコンクリートのパネルが載せてあるだけである。そのため、雨により、基礎の土が流出すると空洞になる恐れがある。いずれにせよ、生態系サービスを提供する持続的な河川環境は消滅した。このように、河川で建設中の、津波が遡上した場合に備える巨大な堤防は、海浜を養う砂の循環に影響を及ぼし、砂の供給と流出のバランスの上に成立している砂泥底の底質を変化させ、アマモ類の生息できない底質に変化させる影響もあるだろう。東北の河川にはシロサケ(*Oncorhynchus keta*)やサクラマス(*Oncorhynchus masou*)が遡上するが、シロサケの産卵は川床から湧水が湧き出るところであり、河床をコンクリートで覆うと産卵場がなくなること、また、ふ化した稚魚が降河するまで水生昆

虫などを摂餌するが、護岸がコンクリートで覆われることにより、水生昆虫の生産が減少し、収容できる個体数の減少が考えられる。このような建設中あるいは建設された巨大防潮堤と護岸堤によって、三陸沿岸の基幹産業である水産業を支える、健全な海洋環境、ブルーインフラとそれをはぐくむ陸域環境は現在も破壊され続けている。ブルーインフラの持続的な保全と利用という視点が欠落していると言えない。不可逆的な自然環境の改変は慎重に進めるべきである。

図(1)-23 志津川湾に注ぐ桜川において工事前と工事後に写真を撮影した位置を黄色丸印の中心とし、撮影方向を矢印で示す。アルファベットは、図(1)-24と図(1)-25の写真に対応。2019年4月19日に撮影された衛星画像(Google Earth)ではほぼ完成した河川堤防が白く写っている。



図(1)-24 2014年11月に撮影されたa、b、c、d点からの風景写真。(宮城県, 2019: <https://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/730687.pdf>)

図(1)-25 2019年2月末に撮影されたa、b、c、d点からの風景写真。明らかに河川敷に生息する生物の棲み場が喪失している。(宮城県, 2019: <https://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/730687.pdf>)

(3) 養殖筏マッピング法の開発と志津川湾における震災前後での養殖筏分布の変化

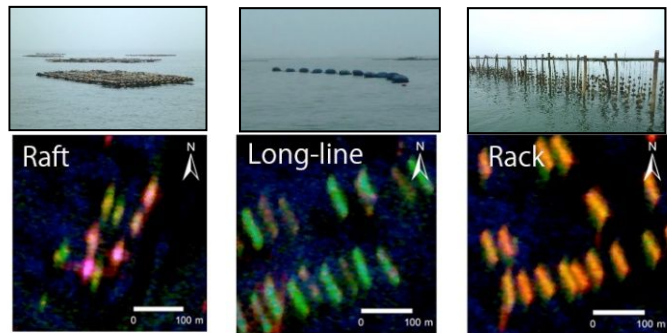
日本沿岸の開放性内湾の多くでは海面養殖が盛んである。沿岸で養殖漁業を営む場合、漁業者に区画漁業権の免許が県知事から与えられる。日本沿岸の開放性内湾における地先水域の海洋環境を考える上で、藻場・塩性湿地・干潟と同様に、養殖施設についても対象としなければならない。区画漁業権の管理は、県知事から地先の漁業協同組合が代行することになっている。区画漁業権の範囲と養殖種が決められているが、県も組合も実際の養殖筏配置を把握しているわけではない。例えば、宮城県志津川湾の区画漁業権の例を示す。公式にもこの図があるだけである(図(1)-26)。そこで、開放性内湾における沿岸環境管理のためにリモートセンシングによる養殖筏配置把握の研究開発を行った。

沿岸域を監視する手法として、光学衛星や空中写真が多く用いられている。しかし、雲がある場合には情報を取得できないという問題がある。マイクロ波を用いる合成開口レーダ(SAR)は雲の影響を受けないことから、SARを用いる沿岸域監視方法について松島湾を対象に検討した。Cloude and Pottier(1996)²²⁾の3成分分解を用いたが、3種類の漁具を正確に分類できなかった。そこで、Freeman and Durden(1998)²³⁾の3成分散乱モデルを用いて、全電力のうちの表面散乱、体積散乱、2回反射が占める割合をそれぞれ求めた。表面散乱に青、体積散乱に緑、2回反射に赤色を割り当て、カラー表示したと

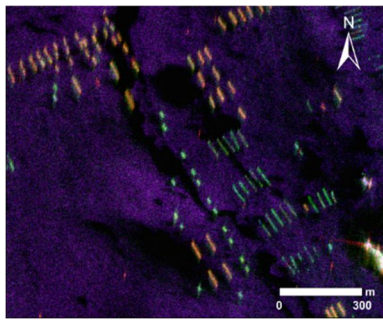
ころ、筏式養殖施設は緑色や淡紅色、延縄式養殖施設は緑色、木架式養殖施設は橙色や赤色、海面は青色、森林は緑色で表示された（図(1)-27；図(1)-28）。筏式養殖施設は表面散乱と体積散乱を示すものが多かったものの、2回反射を強く示す漁具もあった。筏式養殖施設を除いて三角図表示すると、木架式養殖施設、延縄式養殖施設、海面、森林が分類できた（図(1)-29）。このように、幅1.5 m×長さ60 mの延縄式養殖施設と、幅2-5 m×長さ60 mの木架式養殖施設の2種類を、散乱特性に基づいて区別できる。一方、筏式養殖施設は、設置されている向きとセンサとの入射角の違いによって異なる散乱を示していたため、他の2種類の漁具と区別できないが、Pi-SAR-L2のように高地上分解能であれば、筏式養殖施設は、幅5 m×長さ15 mと大きいいため判読可能である。以上、PiSAR-L2のように地上分解能が高いフルポーラロメトリーデータを用いれば三陸沿岸の養殖施設を分類できる。SARを用いて世界で初めて3種の養殖施設の分類に成功した(Murata et al., 2019)²⁴。



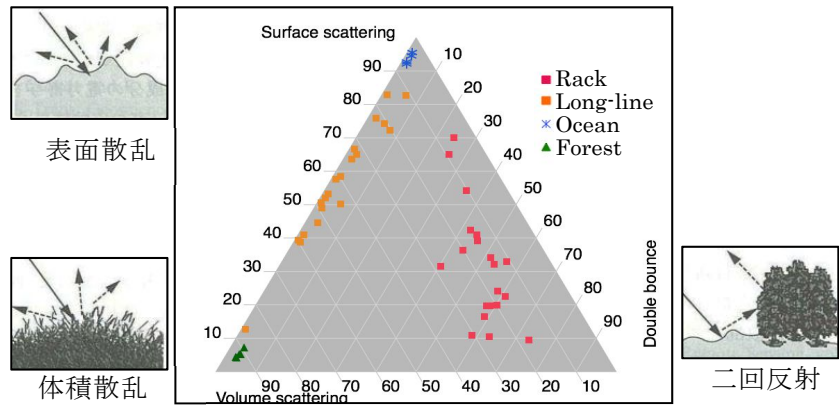
図(1)-26 志津川湾における区画漁業権（赤線の多角形）の図。公式にはこの図しかなく、筏配置は不明である。



図(1)-27 PiSAR-L2により観測された全偏波観測データから得られた2014年8月6日の松島湾の筏式（左）、延縄式（中）、木架式（右）海面養殖施設のPauli画像。



図(1)-28 PiSAR-L2により観測された全偏波観測データから得られた2014年8月6日の松島湾の海面養殖施設密集エリアのPauli画像。



図(1)-29 表面散乱，体積散乱，2回散乱の三角図に木架式（赤四角）、延縄式（橙色四角）の海面養殖施設、海面（星印）、森林（緑色三角）のピクセルを表示した図（筏式を除いた全て）

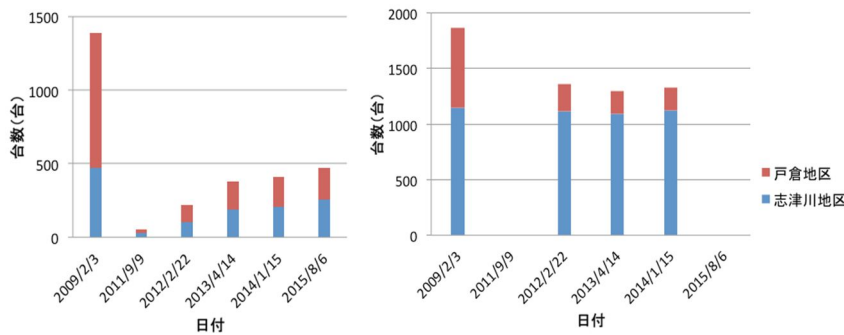
光学衛星画像の空間分解能0.5 m程度のパンクロマティック画像を4m程度のマルチバンド画像と合成しマルチバンド画像を高空間分解能にすると、ワカメの延縄式養殖施設、カキの延縄式養殖施設、ギンザケの養殖生簀、カキの筏式養殖施設を、また、HH単偏波SAR観測データを用いると、カキの延縄式養殖施設、ギンザケの養殖生簀、カキの筏式養殖施設といった海面養殖施設を検知できた。

志津川における震災前後の養殖筏（図(1)-30）の設置状態をリモートセンシングで復元するため、光学衛星画像とHH単偏波SAR観測データ、また光学センサを搭載した航空機によって観測された空中写真

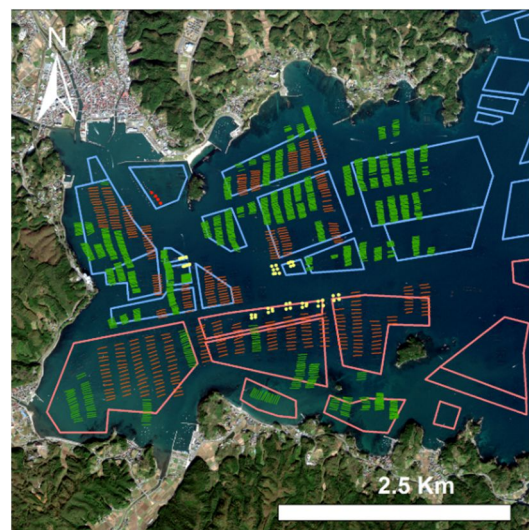
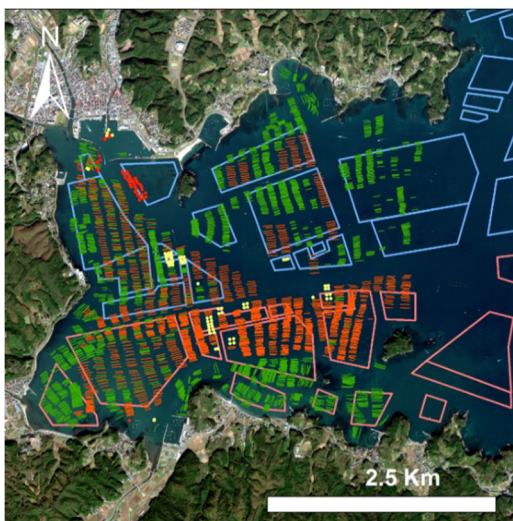
を用いて、震災前から震災後にかけての海面養殖施設の変化、および震災後の復旧状況を時系列的に把握した(図(1)-31; 図(1)-32)。漁業権の管理を行っている志津川地区と戸倉地区のそれぞれの範囲について、マッピング結果をもとにカキの延縄式養殖施設の台数の変化を調べたところ、震災前2009年2月3日では、志津川地区471台、戸倉地区916台あったが、震災後2015年8月6日では、志津川地区257台、戸倉地区214台と、それぞれ、震災前のおよそ55%、23%にまで減少した。震災前2009年2月3日では、志津川地区471台、戸倉地区916台あったが、震災後2015年8月6日では、それぞれ、震災前のおよそ55%、23%にまで減少した。湾奥部全体のカキ筏密度は、震災前の96.6台/km²から34.1台/km²になった。アーカイブされている衛星画像および空中写真を用いることで、過去の養殖筏設置状況を把握することができた。今回開発した方法は、海洋環境に大きな影響を及ぼす人的インパクトである養殖の程度を把握する上で役立つ。宮城県漁連志津川支所の要請で養殖筏種別分布データを提供し、持続的養殖の国際エコラベルASCの審査に用いられ、2016年3月30日に戸倉地区カキ養殖が認証された。



図(1)-30 志津川湾で行われている主な養殖。大きなブイでの延縄式のカキ・ホタテ・ホヤ(上段)、小さなブイでの延縄式のワカメ、八角形の生け簀のギンザケ(下段)の養殖施設。



図(1)-31 リモートセンシングで検出した2009年2月3日から2015年8月6日までの志津川湾におけるカキ養殖筏台数(左)とワカメ養殖筏台数(右)。戸倉地区と志津川地区の値を赤と青で示す。



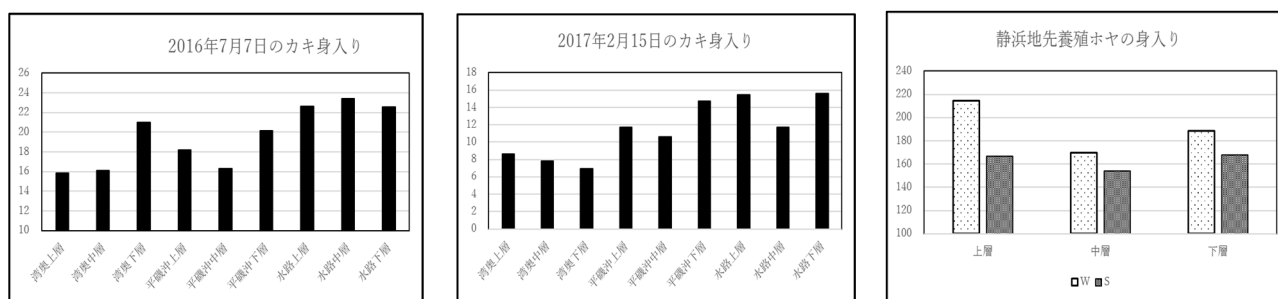
図(1)-32 リモートセンシングで検出した2009年2月3日(左図)と2014年1月15日(右図)の海面養殖施設配置図。多角形は志津川(青)と戸倉(赤)の区画漁業権、短線はワカメ延縄式(緑)、カキ延縄式(橙)、カキ筏式(赤)、サケ生簀(黄)。

(4) 開放性内湾における沿岸環境管理法の開発：志津川湾を例として

(4) 1 生態系シミュレーションのためのカキとホヤの身入調査

総括班のシミュレーションのためのデータとするため2016年7月7日と2017年2月15日に湾内の養殖場の中央水路沿い、養殖場の奥部、養殖場の北側の平磯地先においてカキの身入り（図(1)-33）を調べた。その結果、2016年7月も2017年2月も水路で身入が良く、湾奥部で悪かった。2015年度の調査では、湾奥表層でクロロフィル濃度が高く、餌の植物プランクトンは十分にあるため、湾奥部でカキの身入が悪かったのは、海水流動が悪かったためと考えられる。2016年7月7日に湾内の静浜沖で養殖されていたホヤを2名の漁業者（W氏とS氏）から購入し、身入りを調べた。その結果、上層、下層、中層の順に小さくなった。ホヤはろ過食者であるため、海水の流動が多いほど、ろ過効率がよくなる。そのため、流動のよい上層と下層の成長がよいと推察される。したがって、筏削配置密度を削減するとカキやホヤの成長が促進されることになる。

志津川湾の生態系モデルのシミュレーションのために、カキ、ホヤの身入りデータ、水温塩分計と流速計を湾中央部に南北方向に沿って3か所の3深度に配置し、データを取得したデータを生態系モデルのシミュレーションのために、震災前後の養殖筏の設置情報もあわせてS-13-5に提供した。



図(1)-33 志津川湾湾奥、平磯沖、水路近傍で、上層、中層、下層で養殖されていた2016年7月7日(左)と2017年2月15日(中)のマガキの身入りの平均重量(g)と志津川湾静浜沖でW氏とS氏により養殖されていた、ホヤの上層、中層、下層の身入り(右)

(4) 2 「志津川湾の将来の海洋環境を考える協議会」

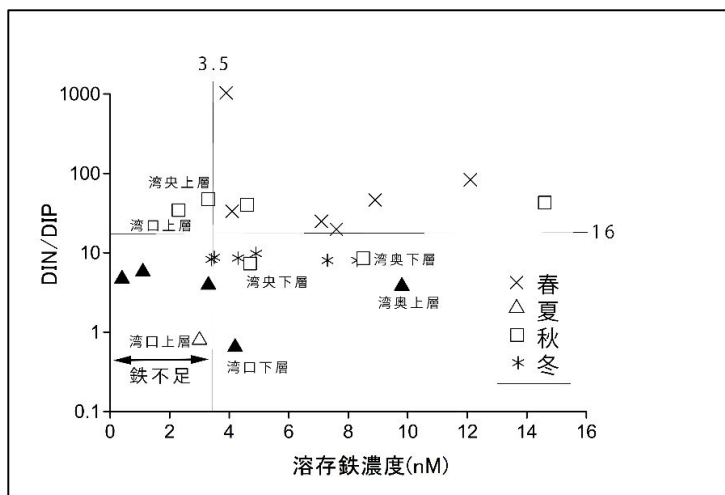
本プロジェクト(S-13-2、S-13-4、S-13-5)と宮城県漁協志津川支所運営委員会が主催し、南三陸町、宮城県、環境省、WWF、NPO、志津川湾の漁業組合員などが参加し、2015年4月30日から2019年3月12日まで6回「志津川湾の将来の海洋環境を考える協議会」を開催した(図(1)-34)。この協議会では、S-13-2の(1)、(2)、(3)の結果、S-13-4の漁業者の意識調査結果について発表し、意見交換した。さらに、S-13-5で開発した物質循環に関するデータを用い養殖漁業も入れた物質循環を含む生態系モデリングによる志津川湾の将来予測に取り組んでいるS-13-5の作成した生態系モデルを用いて、最適なカキなど無給餌養殖生物の養殖施設の配置、収容量について調べた結果を紹介し、議論した。2016年5月の意見交換では、海洋環境モニタリングおよび調査結果の概要を小松が、ASC認証と海洋環境についてWWF前川 聡氏が、S-13-4の志津川湾における組合員の意識調査を立命館大学仲上健一氏が、S-13-5の志津川湾のシミュレーションを復建コンサルタンツ山本裕規氏が発表し、今後のシミュレーションの方針について議論した。生態系シミュレーションの再現性について参加者の納得が得られ、次回の協議会でいくつかのシナリオについて紹介すること、ワカメの色落ちの発生について栄養塩の面から調べることに決まった。

2017年1月の協議会では、今までの調査結果を小松が、底質硫化物調査結果をS-13-(3)2西村修氏が、藻場再生調査結果を南三陸町産業振興課阿部拓三氏が、S-13-5の生態系シミュレーションの結果を復建コンサルタンツ山本氏が、温暖化が及ぼす海洋生態系への影響を柳哲雄氏が紹介した。ワカメの筏台数を3倍に増やした場合のシミュレーションについて、漁業者からは、実際の作業の困難性から、可能な範囲での筏台数の増減についての結果を見たいという意見があった。以上の議論を踏まえて、実際に最適

配置を行う際に生じる問題点の抽出と解決策について検討することになった。



図(1)-34 2015年4月30日南三陸町平磯公民館(左)、2016年5月20日宮城県漁連志津川支所会議室(中)、2017年1月16日(右)宮城県漁業協同組合志津川支所魚市場2階会議室で開催された「志津川湾の将来の海洋環境を考える協議会」



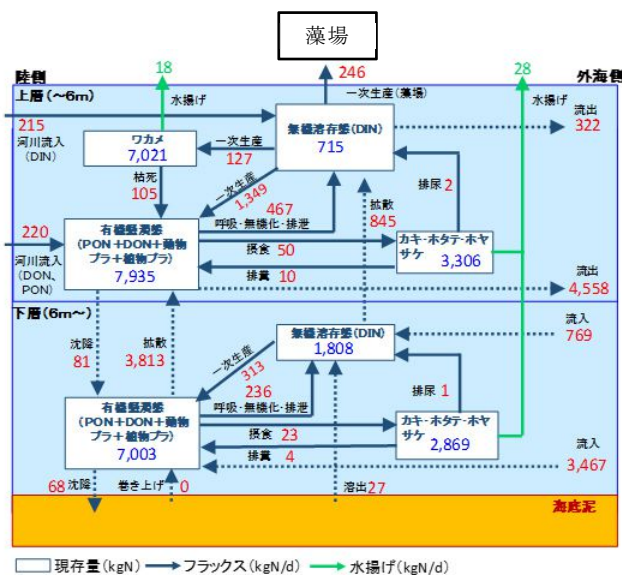
図(1)-35 DIN/DIPのレッドフィールド比は16であり、S-13-2-(3)1の珪藻の半飽和定数を示す溶存鉄濃度が3.5nMという結果から、横軸に溶存鉄濃度(nM)、縦軸にDIN/DIPをとり、16の値で横軸に平行なDIN/DIPの線と3.5の値で縦軸に平行な溶存鉄濃度の線を描き、観測値をプロットした。DINが1.6 μ M以下の場合に、シンボルを黒色で塗りつぶした。

(4) 3 志津川湾における栄養塩と溶存鉄と「森は海の恋人仮説」

協議会では、次のことを報告した。植物プランクトンはNとPを16:1の比で摂取し、106に相当する炭素(C)を光合成により固定することができる。つまり、プランクトンは海水から106:16:1の比でC:N:Pを摂取し、同じ比の体組成を維持する。海水中に栄養塩として存在するNとPの比をみると、やはり16:1で、それは世界の海洋の表層から深海まで共通している。この現象を発見した米国の研究者レッドフィールド(Alfred C. Redfield)の名をとって、生元素のモル比をレッドフィールド比という。海水中の栄養塩のモル比が、この比に近いほど栄養塩を効率よく吸収し、植物プランクトンは増殖することができる。栄養塩は、現存する植物プランクトンが必要とする量(取り込み速度の半飽和定数)がない場合には、増殖を制限することになるので、レッドフィールド比に近い値であっても、植物プランクトンの増殖は制限される。溶存鉄の観測データおよび珪藻の鉄取り込み速度の半飽和定数3.5nM、栄養塩の観測データおよび小型植物プランクトンの窒素栄養塩の取り込み速度の半飽和定数を1.6 μ Mと仮定し、鉄が植物プランクトンの増殖に必要な濃度を満たしているかどうか、DIN/DIPについてレッドフィールド比と比較した(図(1)-35)。横軸に溶存Feを、縦軸にDIN/DIPをつかって分析したところ、夏季では珪藻が要求する溶存鉄濃度(半飽和定数)以下となり、鉄不足となっていること、また、DINが不足していることがわかった。DIN/DIPが16の値よりも低い季節は、夏と冬であった(図(1)-35)。秋であっても、湾奥と湾中央の下層ではDIN/DIPが16以下で植物プランクトンは効率よく栄養塩を吸収できない。このように、志津川湾では、鉄不足は湾奥上層と湾口下層を除く夏と秋の湾中央と湾口の上層で起こり、窒素も夏と冬に不足していることが明瞭に示された。

S-13-5の志津川湾生態系モデルを用いて窒素栄養塩循環に及ぼす藻場の影響を評価した。年間平均の

無機溶存態窒素現存量2523kgNに対して、植物プランクトン、ワカメ、藻場が吸収する無機態窒素吸収速度は、それぞれ、1652kgN day⁻¹、127kgN day⁻¹、246kgN day⁻¹合計2025kgN day⁻¹となった(図(1)-36)。一次生産全体に対する植物プランクトン、ワカメ、藻場の割合は、82%、6%、12%となる。志津川湾湾奥部(13.8km²)では、藻場の窒素吸収速度は、ワカメの2倍ある。しかし、生長に窒素を必要とする時期は、ワカメが冬季から初春まで、藻場構成種が初春から初夏まで、カキの生長に必要な植物プランクトン・付着珪藻が晩夏から初冬まで、と時期的に重ならない。また、藻場種の窒素要求速度は河川からの窒素供給速度の1/2程度の範囲にあり、水深7m以浅の海底上に生育している藻場種にとっては、河川から供給される栄養塩が重要である。外洋からの窒素供給が支配的である三陸の開放性内湾では、植物プランクトン・大型海藻などの一次生産者が窒素を要求する時期をお互いに違える(時期的すみわけ)システムと藻場の構成種のアマモ類が河川からの栄養塩供給に依存することで湾内の高い一次生産を支えている。



図(1)-36 藻場も入れた場合の志津川湾湾奥部の年平均した窒素循環。現存量(kgN)、フラックス(KgN day⁻¹)、水揚げ(KgN day⁻¹)は、それぞれ、長方形、黒矢印、緑矢印で表す。

本テーマで得られた河川を通じて供給される栄養塩、溶存鉄、粒状有機物が、カキやワカメの養殖を決定するほどではないという結果を2016年5月16日の協議会で発表した。その結果についての議論において、漁業者の方から、「森は海の恋人」ではなく、「森は海の友達」という方がいいのではないかと指摘があった(小松ら, 2018²⁵)。物質循環の面からみると、絶妙の指摘である。森林は、物質循環の面において志津川湾では決定的な役割は果たしてはいないが、土砂の流出を防ぐ効果(北原, 1998)²⁶、大量の降雨による淡水の湾内への流入を緩和させる貯水効果(藤枝, 2007)²⁷といった機能を通じて、湾内の養殖カキなどが成長する海洋環境に良い影響を及ぼしていると考えられる。植林され、放置された針葉樹林では、間伐、枝打ち、下草刈がなされず、大雨が降ると、表層の土砂が流されてしまうこと、根が深く張らず、大雨で土砂崩れをおこしてしまう。広葉樹林では、林床まで光が届くため、広葉樹を植林することは、手入れをしない針葉樹林よりも海洋環境に良いということになる。したがって、畠山(2000)²⁸が根拠とした鉄仮説(松永, 1993)²⁹に依拠するのではなく、森林の多面的な機能に着目した視点から、広葉樹の植林が内湾環境へ及ぼす影響を評価し、科学的な理由をもとに環境省は里海の植林活動を支援すべきであろう。

(4) 3 養殖筏台数・養殖対象種を変更した場合のシナリオに基づく生態系モデルによる計算と議論
宮城県は養殖ホヤ(マボヤ)の一大産地である。東日本大震災前に県産養殖ホヤの約7割を消費していた韓国は2013年9月から東京電力福島第1原発事故による放射能汚染を理由にホヤを含むすべての水産物の輸入を禁止している。日本国内だけでホヤを消費できず、2016年は約13000トンの水揚げのうち約7600トン、2017年も約6900トンが供給過剰になった。そのため、東電はこれまで、処分数量に見合った

漁業者の減収分や、焼却処分に係る費用を補償してきた。2018年の河北新報によると、国内でのホヤ流通量は2017年に約4800トンで、宮城県漁協も生産調整を行うことにした。また、宮城県沿岸で養殖ホタテガイから国の基準を超えるまひ性貝毒が検出され、2018年4月下旬以降、全海域で出荷の自主規制が続いている。2018年4月のホタテガイの水揚げは17トンにとどまり、記録的不漁だった昨年の同月比で94%も減少し、ホタテ養殖は存続の危機に立っている。さらに、志津川湾湾奥部では、栄養塩が不足し、ワカメの葉部の色落ちが起こるようになり、メカブだけしか出荷できない状態となっている。このような中で、志津川湾では、湾中央部で行われているホタテとホヤの養殖をワカメに転換できないか、湾奥部のワカメ養殖台数を適正な台数にできないかという検討を行うことになった。議論には、科学的根拠が必要であり、S-13-2とS-13-5が協力することになった。漁業者、組合、S-13-2、S-13-5とのco-designによって、後述する4つのシナリオをつくった。これらのシナリオに基づいてS-13-5が生態系モデルによりワカメの生長と海洋環境について調べた。

2017年10月11日に開催した協議会では、湾奥部のワカメ筏の削減、湾中央部でのホヤとホタテの養殖をワカメに転換した場合について、現状も含めて次の4つのシナリオを志津川支所と協働してつくり、モデルでシミュレーションした(山本ら, 2018)³⁰⁾。

Case 1 現状のまま。

Case 2 湾奥部はワカメ筏75%まで削減。湾中央部はホヤとホタテ筏を75%まで削減し、削減した25%をワカメ筏に転換。

Case 3 湾奥部はワカメ筏50%まで削減。湾中央部はホヤとホタテ筏を50%まで削減し、削減した50%をワカメ筏に転換。

Case 4 湾奥部はワカメ筏25%まで削減。湾中央部はホヤとホタテ筏を25%まで削減し、削減した75%をワカメ筏に転換。

S-13-5で開発し、S-13-2の調査結果に基づいた沿岸生態系モデル計算の結果、湾奥部のワカメ養殖筏を削減するほど総水揚げ量・総水揚げ高は減少するものの、筏1台当たりの生産効率は向上した(山本ら, 2018)³⁰⁾ (図2.25)。なお、カキの収穫量・収穫高についてはほとんど変化が見られなかった。一方、養殖による生産性は、単に水揚げ高を増やすだけではなく養殖にかかるコストを差し引いた収益で評価する必要がある。計算の結果、筏台数の削減により筏1台当たりの生産効率が向上することと、筏台数の削減により経費が減ることがバランスしたCase 2が湾奥部全体の収益を最大化した(山本ら, 2018)³⁰⁾。

湾中央部でホヤとホタテ筏を25%まで削減し、削減した75%をワカメ筏に転換した場合のモデル計算では、ワカメ筏1台当たりの収穫量は、Case 2、Case 3、Case 4でもほとんど変わらず維持でき、Case 4が湾中央部全体におけるワカメ収穫量が最も多かった。さらに、ホヤとホタテ筏をワカメの養殖筏に転換した場合に、底層のDO環境には影響がでず、むしろ、ホヤやホタテの糞がなくなり、海底はよりよい環境となった(山本ら, 2018)³⁰⁾。

カキ養殖とワカメ養殖との間で競合するような問題が生じるか検討したところ、栄養塩の面でホヤとホタテの養殖をワカメ養殖に転換しても環境的に湾奥部のワカメ養殖やカキ養殖に影響を及ぼさないことが分かった。ワカメが栄養塩(窒素)を必要とする生長期(晩冬から春季)と、カキの摂餌が旺盛で、餌である植物プランクトンや付着珪藻が栄養塩を必要とする時期(秋季から初冬)は異なっており、ワカメ養殖の変化は、カキ養殖等への影響は小さいと考えられる。また、ホヤやホタテは、ろ過食者であり同じろ過食者のカキと競合するが、ワカメに変更すると競合の問題は起こらない。また、ホタテやホヤの垂下養殖があると、垂下連は流れに対する大きな抵抗となり、海水交換を妨げるが、ワカメ養殖では流れによってたなびくため抵抗は減少し、海水交換はホヤやホタテを養殖していた時よりも促進される。栄養塩の供給は外洋が担っていることから、ホタテとホヤの養殖をワカメに変更することは、外洋からの栄養塩の流入が促進され、カキ養殖にも湾内の環境にもよいということになる。

協議会では、生態系モデルの計算結果を紹介し、議論を行った。漁業者からは、長年の経験から得ている感じ(経験知)と同じであるという意見が寄せられ、2018年の区画漁業権の更新では、協議会での議論も参考にして養殖種目を組合で決めることになった。このように、協議会では、可視化された科学的データを利用して、持続的な海洋環境と漁業生産を両立させる取り組みを進めることができるように

なっている。この取り組みを続けることで、豊かで賑わいのある志津川湾を実現できる。そして、この経験は、物質循環に及ぼす最も大きな人為的影響が海面養殖である他のリアス式の開放性内湾へ広げていけるものである。

(4) 4 今までの協議会との違い

協議会の構成主体や枠組み、役割分担等を組織論として、他の組織との違いについて分析・考察する。すでに設立されている海洋環境に関係する協議会には、海を所管する関係省庁主体の国レベルあるいは市町村が主導する自治体レベルのものがある。国レベルの例では国土交通省が主催する海の再生プロジェクトがある。海域を管理する行政機関が集まって、広域の内湾の海洋環境を改善することを目的とし、東京湾、伊勢湾、大阪湾、広島湾で設立されている。例えば、東京湾海再生プロジェクトでは、参加者は、国土交通省関係部局、環境省、水産庁、9都府県市である(https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/TB_Renaissance/RenaissanceProject/RenaissanceProject.htm)。水産庁は、水産多目的機能発揮対策を実施しており、この事業において地域協議会が位置づけられている。この事業の目的は、古くから、国民に安全で新鮮な水産物を安定的に提供する役割に加え、環境監視・海難救助による国民の生命・財産の保全、保健休養・交流・教育の場の提供など国民に対して種々の多面的機能を提供する役割を担ってきた水産業及び漁村の多面的機能が近年発揮されていないことから、多面的機能の効果的・効率的な発揮に資する地域の取組を支援することである(http://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_thema/sub391.html)。水産多目的機能発揮対策では、地元の漁業協同組合等が主体となった提案による藻場再生などの補助事業を行ない、地域協議会が活動の指導と交付金の管理を行う。地域協議会のメンバーは、都道府県、市町村、業者団体、学識経験者で、それぞれの代表である。

環境省は、自然再生推進法に基づく自然再生協議会を全国で24の自然再生協議会を設立し(平成25年11月時点)、それぞれの地域において協議会が全体構想及び実施計画を作成し、自然再生に取り組んでいる。自然再生協議会では、地域の自然再生事業に参加する地域住民、NPO、専門家、土地所有者などの民間と、関係地方公共団体、関係行政機関メンバーとし(<http://www.env.go.jp/nature/saisei/law-saisei/shikumi.html>)、国や地方公共団体が幅広く参加することから、地域における様々な課題に対して、多様な事業制度を活用した自然再生事業の実施が可能になり、環境修復の事業をボトムアップで行う。自然再生協議会では、対象地域の自然再生に関心や関わりを持ち利害の異なる様々な者が参加し、地域の将来像について合意形成を図るよう協議を重ね、各参加者が連携協力しつつ自然再生の取組を実施することとしている。このため、自然再生協議会においては、地域の自然再生活動に参加しようとする者が、共通目標のもと対等の立場で協議することができ、地域に根ざした幅の広い取組を進めることが可能である。

自治体を中心とする協議会の例を上げる。小浜市海のまちづくり協議会では、委員は、①小浜市の自然環境に関する専門知識を有する者、②産業振興に関する見識を有する者、③教育に関する見識を有する者④国、福井県及び小浜市の職員で、市長が委嘱、又は任命するとなっている(<https://www.spf.org/global-data/20190108175259445.pdf>)。志摩市里海創生推進協議会では、地元漁協・地元自治会・観光協会・真珠組合・市民団体・志摩市となっていて、市が事務局を行う。取り組む内容も、①「伊勢志摩国立公園としての適切な自然の利用と景観の保全」・太陽光発電への対応として住民の反対運動、市条例の制定、漁協者への配慮について、②「産業連携の推進」・大王町まちづくり(モデル事業)として、漁港から大王崎灯台の活性化に取り組んでいける仕組みづくりのために自治会、燈光会、住民、地元商店、商工会、観光協会、漁協等の連携、③「市民や関係者の取り組み目標の共有と理解」としてアマモサミットを機会に市民が自発的に参加するきっかけ作りに活用することとなっている(<https://www.spf.org/global-data/20190108175259361.pdf>)。このように、自治体が事務局となる場合には、委員は市長の任命となり、対象海域は、市の行政範囲となる海域全体とされることが多いようである。

本テーマで設立した協議会は、参画する研究者と宮城県漁業協同組合志津川湾運営協議会と同志津川

支所が中心となり、南三陸町、宮城県、石巻市水産課、WWFなどのNGOに呼びかけてつくったものである。まず、協議の対象海域は、自治体を中心となっている協議会とは異なり、南三陸町全域ではなく、志津川湾奥部である。協議会には任命された委員はなく、だれでも参加が可能である。主に、志津川支所を通じて、組合員に開催目的、議事、日程、場所が通知される。研究者と志津川支所運営委員会・支所との相談により研究者が話題を提供し、それをもとに議論する。他の参加者も発表が可能であり、WWFおよび南三陸町も発表を行っている。このように、本テーマで提案する協議会は、リアス式の開放性内湾湾奥部で主に養殖を行う地元の漁業協同組合支所に、科学的研究で得た情報を提供し、それをもとに議論する場として協議会を位置づけている。そのため、科学者が海洋環境を研究している開放性内湾の湾奥部の漁業協同組合支所所属組合員が自由に議論に参加でき、委員の任命はない。開放性内湾の湾奥部は、区画漁業権でほとんど覆われており、リアス式内湾のため平地が少なく、海洋環境に及ぼす主な人為的駆動力は、養殖業である。したがって、持続的な養殖業と健全な海洋環境を実現するためには、自然再生を目指す、藻場再生をするというような既存の協議会とは異なり、湾奥部で養殖業を営んでいる漁業協同組合・組合員の漁業活動であり、海洋環境データを持つ科学者と漁業者との対話が重要となる。このように、本テーマの協議会は、各種事業制度を利用し、環境改善の取り組みを行う自然再生協議会や水産多面的機能発揮対策事業の地域協議会、自治体レベルの環境改善の取り組みの協議会とも異なるものではない。

持続的養殖のエコマークであるASCなどの認証をサポートしているWWFも加わって、取得したASC認証を維持するために必要な要件である健全な海洋環境をどのように実現するかについて議論も深めている。これには、S-13-5の総括班が開発した生態系モデルを用い、養殖筏の台数・養殖対象種・配置を帰るシナリオを志津川支所運営委員会とco-designし、計算して、海洋環境を予測し、得られた結果をもとに議論を行ない(co-production)、組合員の合意を得て区画漁業権の免許更新で養殖種目の転換に役立った(co-delivery)。これは、現在、Future Earthにおいて取り組まれている、問題解決型のアプローチである。

このような経験を活かし、他の開放性内湾においても海洋環境を考える協議会の設置ができれば、海洋環境の改善に向けた施策として環境行政に役立つ。

<p style="text-align: center;">ASC認証：筏データ提供 社会貢献Co-design, co-production, co-delivery</p> <p>河北新報 ONLINE NEWS 2016年3月30日</p> <p>カキ養殖場に国際認証 南三陸で国内初取得</p> <p>ASCの国際認証を取得した養殖場から収穫したカキ=30日、宮城県南三陸町戸倉</p> <p>宮城県南三陸町戸倉のカキ養殖場が30日、環境に配慮した養殖を後押しする水産養殖管理協議会(ASC、本部オランダ)の国際認証を国内で初めて取得した。東日本大震災で養殖施設が被災したことを受けて実施した。養殖いかだを大隈に減らす産地改革が成功した。生産者や町は「南三陸ブランド」としてカキを国内外に売り出す考えだ。</p> <p>認証を受けたのは、養殖協志津川支所出願所のカキ組合員7人が所有する志津川湾の養殖いかだ305台。県漁協が昨年10月、ASCに申請し、専ら環境に配慮した養殖施設などの審査を受けた。</p> <p>カキ組合の後継育成会長(55)は「被災地の新しい取り組みが認められてうれしい。認証取得がゴールではないので、今後も高品質のカキづくりを目指す」と話している。</p> <p style="text-align: center;">宮城県漁業協同組合志津川湾運営委員会、WWFとの協働</p> <p style="text-align: center;">持続可能で適切に管理された養殖場を認証</p>	<p style="text-align: center;">FSC認証取得：2015年10月7日南三陸森林管理協議会</p> <p>東北復興新聞 新報について 各種お問い合わせ</p> <p>BEYOND2020 まちづくり 産業振興 職 特長・コラム 地域</p> <p>「提案できる林業」を目指して、南三陸町が県内初のFSC森林認証を取得</p> <p>株式会社佐久(南三陸森林管理協議会) 南三陸町代々の森林経営・林業を思ひ佐久(さきゆ)。佐藤太一さんは12代目。「ハイオマス産業都市構想」を掲げる南三陸町で、林業のあり方を見直し、さまざまな新しい取り組みを進めています。佐久が所属する南三陸森林管理協議会では、2015年に国際環境認証FSCを取得。持続可能な森林経営に力を入れています。</p> <p style="text-align: center;">FSC認証とは環境保全の点から見ても適切で、社会的な利益にかなない、経済的にも持続可能な森林管理を理念とする認証(里山と一致)</p>
---	--

図(1)-37 ASC認証された志津川湾戸倉のカキ養殖(左)とFSC認証された南三陸森林組合(右)の説明。

(4) 5 カキ養殖のASC認証

環境に大きな負担をかけず、地域社会にも配慮した養殖業を認証する世界的団体として、水産養殖管理協議会(Aquaculture Stewardship Council: ASC)があり、基準に沿った養殖で生産される水産物にASCのエコラベルを貼って出荷でき、追跡すること(トレーサビリティ)ができるようになる(前川, 2016)³¹⁾。ロンドンおよびリオでのオリンピックでは、ASCやMSC(Marine Stewardship Council: 海洋管

理協議会)で国際認証されたエコラベルのついた食材だけが使用された。2020年の東京オリンピックでもエコラベルの食材が使われるが、日本の食材でエコラベルを取得しているものは、MSCの3つの漁業の4つの食材と限られていた。しかし、我々の提供したデータ(小松ら, 2018)²⁵⁾も役立ち、2016年5月に日本における二枚貝養殖で初めて、70%のカキ養殖筏を削減することに成功した志津川湾戸倉地区のカキ養殖がASCに認証された(図(1)-37左)。戸倉地区におけるASCエコラベルのカキ養殖は、松田(2007)¹⁰⁾が述べた里海を実現する健全な水産業の営みそのものである。ただし、戸倉地区だけでは志津川湾の海洋環境を保全できない。このエコラベルを維持するためには、集水域となっている陸域の使い方、志津川湾での養殖の在り方などに配慮していくことが不可欠になり、志津川湾で養殖を行っている他の地区の協力も重要である。多くの関係者の理解を得るためには、生態系モデルで予測し、遷移する沿岸生態系を監視し、人手のかけ方の効果を可視化することが一層重要になっている。

(4) 6 南三陸町森林組合のFSC認証

山の利用について里山をキーワードとして考えてみたい。環境省自然環境局によると、里地・里山とは、原生的な自然と都市との中間に位置し、集落とそれを取り巻く二次林、それらと混在する農地、ため池、草原などで構成される地域で、農林業などに伴うさまざま人間の働きかけを通じて環境が形成・維持されてきた。里地・里山は、特有の生物の生息・生育環境として、また、食料や木材など自然資源の供給、良好な景観、文化の伝承の観点からも重要な地域である。リアス式の内湾の後背地の里地は山が迫り、狭いので、山の影響が強い。里山の雑木林は、本来、薪や炭を生産するために利用されたことから薪炭林とも呼ばれ、生態学的には、人間の活動によって原生林が改変されて形成された二次林である。伝統的里山活動としては、肥料(緑肥)や燃料を得るために行われていた下草刈、間伐、枝打ちがある。これらの活動によって、幹が太く根が深く張り、光が十分あたるため森林も元気になり、林床にも光が当たり、生物多様性も増加する。このような持続的に森林を利用する伝統的な知恵が里山活動である。国際的な森林のエコラベルとしてFSC認証がある。この認証は、将来世代の権利や需要を損なうことなく現在の世代の社会的、環境的、経済的な権利や需要を満たすことをビジョン(理念)とし、環境保全の点から見ても適切で、社会的な利益にかなない、経済的にも継続可能な森林管理を世界に広めることをミッション(使命)とし、FSCが審査を行って決定する。FSC認証を受けた森林では持続的に森林を利用し、次世代に健全な森林を受け渡していくということ、つまり、里山活動が行われているということである。南三陸町森林組合では、2015年10月にドイツのボンに事務局を置くForest Stewardship Council (FSC: 森林管理協議会)からFSC認証を受けた(図(1)-37右)(丸岡・泰岡, 2016)³²⁾。

FSCの効果について、森林の多面的機能の発揮に関して、土壌流出量と保水容量の定量的な研究をもとに検討してみる。FSCでは持続的な林業ということで間伐が行われる必要がある。林野庁(1999)³³⁾は、22~34年生のヒノキ林を対象にした調査結果をもとに間伐が土壌流出を防止する効果について報告した。それによると間伐を行っていない林分に比べ20~40%の間伐を行った林分では土壌流出量は3分の1となり、低減効果が認められた。また、西山(2003)³⁴⁾は林齢19年から42年のヒノキ人工林の試験区について、間伐回数が0もしくは1回の放置区と、間伐回数が2回の保育区との土壌流出量を比較した。その結果、保育区では林床の被覆率、林内の相対照度ともに放置区に比べて高く、放置区では土壌流出量の平均値が6.4 t/ha/yrであるのに対して、保育区では2.2 t/ha/yrであった。池田ら(2012)³⁵⁾は、間伐により土壌流出が防止されるメカニズムとして、林内の光環境の変化、その結果としての下層植生の変化が土壌流出を防止すると推定している。大まかにいえば、間伐により1/3程度の土壌流出量の減少があり、FSC認証を受けた森林でも、同様の効果が期待できるのではないだろうか。

金行・中根(2006)³⁶⁾は、無間伐人工林プロット内と広葉樹自然林プロット内において、植生の影響を受ける表層土壌(深さ0~20cm)の土壌コアサンプルを採取した試料から土壌孔隙率及び最大容水量の測定を行った。その結果、土壌孔隙率は広葉樹自然林のほうが無間伐人工林より6.4%高く($p < 0.001$)、最大容水量も広葉樹自然林のほうが無間伐人工林より8.3%高かった($p < 0.001$)。広葉樹林が針葉樹林に比べ保水容量が多い傾向にあり(諫本, 2002)³⁷⁾、間伐等の人工林の手入れを行うことにより、広葉樹が混交しA層が発達すれば、土壌の貯水機能が増す可能性がある。ここで、A層とは、森林の堆積有機物層(A0

層)の直下にある腐植に富む暗色の層位で、動植物遺体の分解により生成された腐植が集積し、暗褐色を呈するに至った最表層の層位のことである。管理森林において、FSC認証は生きている木だけではなく、枯れた木を残すことも求めており、また針葉樹林における落葉広葉樹の導入や混交林の推進を求めていること(<https://jp.fsc.org/jp-jp/news/id/400>)から、A層の堆積有機物層が増え土壌の貯水機能を増進させると考えてよいだろう。



図(1)-38 Ramsar条約湿地に正式登録された志津川湾(左)とFSC-Ramsar-ASCという国際エコラベルと湿地登録を用いる物質循環の流れに沿った新しい沿岸域管理法の提案(右)。

(4) 7 志津川湾の藻場のラムサール湿地登録

森と海の間をつなぐエコトーンについては、「特に水鳥の生息地として国際的に重要な湿地に関する条約」であるラムサール条約へ日本で初めてとなる低潮時6 m以浅の浅海域の海藻藻場を登録する準備を南三陸町は始めた。志津川湾には、寒海性コンブ目(マコンブ)と暖海性コンブ目(アラメ)が共存する海域の代表的な海藻藻場として貴重で、アラメ群落の北限に近い(阿部, 2017)³⁸⁾。また、国の天然記念物であり、絶滅危惧種に指定されているコクガンの越冬地ともなっている。コクガンは、北極圏のツンドラ地帯で繁殖した後、冬鳥としてきた日本に飛来し、志津川湾では近年は100羽から200羽のコクガンが確認されている。コクガンの越冬期の生息場の条件は、静かな内湾であること、餌となる海藻や海草の安定した藻場群落があること、休憩場所となる岩礁帯があること、という条件で、志津川湾がこれらの条件を満たしている。2018年10月21から29日までアラブ首長国連邦ドバイで開かれた第13回ラムサール条約締約国会議で、志津川湾が登録された(図(1)-38左)。ラムサール条約に登録されると、志津川湾周辺の森から海までのつながりが完成し、南三陸町の目標である自然との共生が前進する。藻場を保全する重要な役割を果たしているウニ漁業は、ラムサール条約の基盤である湿地(志津川湾では藻場)のワイズユースである。松田(2007)¹⁰⁾の、健全な物質循環系を維持し環境を保全するためには、沿岸域の健全な水産業の営みが重要であるという指摘する水産業であり、里海活動である。このように、持続的な林業、水産業、生物多様性に富んだ健全な海洋環境を実現するために、里山・里海活動は有効なツールであるといえる(図(1)-38右)。

南三陸町では、2012年に決めた南三陸町震災復興計画の目標2で、「私たちは山々に守られた海から多大な恩恵を授かってこの地に住み続けてきました。しかし、その自然は時に猛威をふるって私たちを苦しめます。私たちは、自然への畏怖畏敬の念を忘れることなく風土・文化を後世に継承し、この豊穡の海と山からの恵みに感謝しながら、自然と共生するまちづくりを進めます。」と宣言している(南三陸町, 2012)³⁹⁾。上述したように、志津川湾では、里海活動とみなされる上述した戸倉地区の養殖カキのASC認証を受け、森のFSCと海のASCが、ラムサール条約湿地である藻場を介してつながり、自然と共生するつながりを維持する枠組みが整い、持続的な社会を築く基礎ができあがった。

(5) 開放性内湾における将来の海洋環境の管理に向けて

2012年に日本政府は、(1)生物多様性を社会に浸透させる、(2)地域における人と自然の関係を見直し、再構築する、(3)森・里・川・海をつなぐのを確保する、(4)地球規模の視野を持って行動する、(5)科学的基盤を強化し、政策に結びつけるという5項目を生物多様性国家戦略として閣議決定した(環境省、2012)⁴⁰⁾。2003年から施行された自然再生推進法では、過去に行われた事業や人間活動等によって損なわれた生態系その他の自然環境を取り戻すことを目的として、地域の多様な主体の参加により、河川・湿原・干潟・藻場・里山・里地・森林・サンゴ礁などの自然環境を保全・再生・創出、または維持管理することを求めている(環境省、2014)⁴¹⁾。2015年9月15日の国連総会では、2030年までに実現しなければならない持続可能な開発目標(Sustainable Development Goals: SDGs)を決め、日本政府も実現するための取り組みを始めた(外務省、2016)⁴²⁾。「持続可能な開発」という概念は、「将来の世代の欲求を満たしつつ、現在の世代の欲求も満足させるような開発」を意味する。その中の1つであるSDG14は、持続可能な開発のために海洋資源を保全し、持続的に利用することである。

2011年3月11日の津波は、高度経済成長期の埋め立てによって失われた三陸沿岸の湿地を再び取り戻した。湿地は、還元的な環境により、鉄の溶出が起こると同時に鉄と錯体を形成する腐植物質を豊富に生産する。湿地が広大に存在するアムール川の中下流域では、河川の氾濫時に後背湿地で溶存鉄、腐植錯体鉄が河川水に取り込まれ、これがアムール川の溶存鉄濃度を維持している(白岩、2011)⁴³⁾。北海道の風連湖で行われた研究でも、溶存鉄濃度と溶存有機炭素濃度は有意な正の相関を示し、溶存有機炭素濃度は、牧草地($r=-0.61$)、自然林($r=0.47$)、湿原・沼沢林($r=0.73$)との間に有意な相関関係があった(白岩、2017)⁴⁴⁾。生物多様性戦略・自然再生法・SDG14を考えれば、津波前の現状に復旧させることを目的とせず、持続的な内湾における一次生産を支える湿原を保全することも選択肢としてあった。震災後すぐに巨大防潮堤の建設や湿地の埋め立てを決定するのではなく、巨大防潮堤が建設され湿地が埋め立てられた場合の沿岸の姿と、津波で再生した湿地や干潟を残し、生物多様性戦略・自然再生法・SDG14に基づく沿岸の姿とを示しながら、住民・漁民との協議を通じて将来の海洋環境の在り方を考える必要があっただろう。

里海手法は、生物多様性戦略(環境省、2012)³⁵⁾・自然再生推進法(環境省、2014)³⁶⁾・SDG14(外務省、2016)³⁷⁾に沿っており、適度の人手をかけることで、藻場や干潟の生態学的機能を十分に生かし、生物生産と生物多様性を確保し、海洋環境を健全に維持できる好適な方法である。ウニ漁業は生物多様性を育む藻場の維持に不可欠である。また、S-13-5が行った志津川湾の生態系モデル計算では、湾内の基礎生産力を低下させない範囲において、カキ養殖を行った場合、セルフガーデニング(p77参照)を通じて栄養塩の回転速度を大きくさせることが分かった。また、同様に、震災前(2009年)とCase 2(2020年)について、比較したところ、湾全体の基礎生産速度と栄養塩回転率(=植物プランクトンとワカメの基礎生産速度をDIN現存量で除したものを)を算定すると、カキやワカメが過密に養殖されていた震災前に比べると、カキ養殖筏を震災前の1/3に削減し、ワカメ養殖筏を現在の台数から25%削減するCase 2では、基礎生産速度が約1.4倍、栄養塩回転率が約4.5倍に増加しており、栄養塩が効率的に再生産に利用されることが示された。また、カキ養殖では、過密養殖をやめて、適切な養殖筏台数密度にして、1年で出荷できるようにすると餌資源を有効に使い、海底への糞を通じた有機物負荷が減少することが分かった。このように適度な人手をかけることにより、沿岸域の生物生産の速度が上昇するとともに、持続的な海洋環境が維持できる。開放性内湾である志津川湾を対象として開発された里海手法による沿岸域管理法であるが、養殖が行われているリアス式内湾に広く適用できるユニバーサルな方法である。今後、環境省の新しいアプローチとして広く普及されることを期待したい。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- ①津波後のエコトーン、養殖筏配置のダイナミックな変化を衛星リモートセンシングで初めて明らかにした。
- ②雲に影響されない合成開口レーダを用い、世界で初めて養殖施設をタイプ別に分類した。

- ③ウニ漁業が、栄養カスケードを通じて藻場を維持する里海活動であることを明らかにした。
- ④宮城県漁協志津川湾運営委員会、南三陸町、宮城県、WWF、S-13メンバーとで「志津川湾の将来の海洋環境を考える協議会」をつくり、豊かな養殖漁業と持続的で健全な海洋環境を築く議論を深め、実践した。
- ⑤森林・海域の国際エコラベル、藻場のラムサール条約湿地登録が、山、エコトーン、海のつながりを配慮する里海手法となることを示した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

海洋政策本部参与会議の総合的な沿岸域の環境管理の在り方P Tの外部有識者として本研究成果で得られた、「人が関わって、より良い海をつくって豊かな恵みを得るといふ志津川湾における『里海』づくりの例」を提示し、内閣府第3期海洋基本計画の策定に貢献した（海洋基本計画の概要（その1） p.3の第3期海洋基本計画概要（その3）海洋環境の維持・保全；海洋基本計画の概要（その2） p.7の（参考）第3期海洋基本計画における具体的施策（その2）沿岸域の総合的管理；海洋基本計画（平成30年5月15日閣議決定） p.22-23 イ海洋環境の保全を前提とした海の恵みの持続的な享受、 p.54 ア沿岸域の総合的管理の推進：<https://www8.cao.go.jp/ocean/policies/plan/plan03/plan03.html>）

宮城県南三陸町が推進していた志津川湾の藻場のラムサール条約湿地への新規登録にあたり、本研究成果で得られた藻場の分布データが利用され、2018年10月21日（日）～29日（月）にアラブ首長国連邦のドバイで開催されるラムサール条約第13回締約国会議（COP13）開催に先立ち、ラムサール条約事務局が置かれているスイスで現地時間の10月18日（木）付、志津川湾（宮城県）がラムサール条約湿地登録簿に掲載された（http://tohoku.env.go.jp/pre_2018/post_109.html；<http://www.env.go.jp/press/106071.html>）。

<行政が活用することが見込まれる成果>

ウニ漁業が藻場を維持するための重要な里海活動であることを明らかにした。ウニ漁業によって、ウニによる海藻藻場の磯焼けが防がれ、海藻による光合成で二酸化炭素固定と酸素放出、栄養塩吸収が行われるとともに、海藻藻場に依存する多くの種の生息場が確保され、生物多様性と漁業に貢献する。

開放性内湾における協議会（志津川湾の将来の海洋環境を考える協議会）を構築し、S13-5の志津川湾統合モデルを用いて、将来の養殖漁業について可視化し、漁業者、自治体、WWFなどNPOと協議することで、持続的な漁業と健全な海洋環境が実現できることを示した。この協議会での経験は、今後の沿岸域における環境管理に活用が見込まれる。

沿岸域の一次生産に対する陸域の重要度は沿岸域の閉鎖性と密接な関係にあるため、その閉鎖性の異なる水域を対象として本研究のアプローチを適用することで、栄養塩、鉄、有機物の視点から、沿岸域の地形に応じた適切な河川の流域管理や沿岸生態系管理のための方法論を構築できる可能性がある。

FSC（里山）、ラムサール湿地（ワイズユース）、ASC（里海）という国際エコラベル認証や登録をセットで進めることで、物質循環にう沿岸域の健全な環境・生物多様性の維持、持続的な漁業生産を促進できる。このようなアプローチは、環境行政の施策として役立つものと考えられる。

6. 国際共同研究等の状況

国際共同研究計画Future Earthアジア太平洋地域プログラムSustainability Initiative in the Marginal Seas of South and East Asia (SIMSEA)、カウンターパート氏名・所属・国名はR. V. Azanza・フィリピン大学海洋科学研究所・フィリピン、参加、SIMSEAは、国際科学会議アジア太平洋地域委員会（ICSU RCAP）が、関係各国の研究者やステークホルダーの協働を促し、縁辺海の安定化に貢献することを目的に設立された国際プログラムと国際的に位置付けられており、アジアにおける開放性内湾などの沿岸海域におけるFuture Earthの重要な取組みとして発展している。

国際共同研究計画Future Earth Coasts、カウンターパート氏名・所属・国名はValerie Cummins・University College Cork・アイルランド、参加、Future Earth Coastsは、Future Earthの中で沿岸域

における持続可能性と地球スケールの環境変化への適応を目指した研究プロジェクトとして国際的に位置づけられており、IGBPとIHDPの下で実施されていたLOICZ (Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone) の後継のもので、沿岸域に関する国内の自然科学・工学・社会科学研究者が連携し、政策決定者、産業界との協業を目指して活動している。

国際共同研究計画 政府間海洋学委員会-西部太平洋小委員会 (IOC-WESTPAC) Ocean Remote Sensing Project (ORSP)、カウンターパート氏名・所属・国名は小松輝久・横浜商科大学・日本、IOC-WESTPAC ORSPは、沿岸域管理のためのリモートセンシング沿岸生態系のマッピングによる研究者のネットワークの構築、統一した手法での解析、成果の共有による高い価値をもつ生態系サービスを提供する生息場の保全を行うことを目的とし、沿岸生態系と共生する持続的な社会を西部太平洋地域において実現する取り組みを展開しており、IOCの地域における具体的な沿岸域管理のための研究プログラムとして国際的に位置づけられている。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) R. TSUJIMOTO, G. TERAUCHI, H. SASAKI, S. X. SAKAMOTO, S. SAWAYAMA, S. SASA, H. YAGI and T. KOMATSU: International Journal of Remote Sensing, 37(24), 5843-5863 (2016), Damage to Seagrass and Seaweed Beds in Matsushima Bay, Japan, Caused by the Huge Tsunami of the Great East Japan Earthquake on 11 March 2011
- 2) 山本裕規、吉木健吾、小松輝久、佐々修司、濱名正泰、村田裕樹、柳哲雄: 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 73(2), I_1339-I_1344 (2017), 志津川湾におけるカキ養殖等の環境容量に関する数値モデル解析-震災前と現在の比較
- 3) 小松輝久、大瀧敬由、佐々修司、澤山周平、阪本真吾、ゴンザルボ マロ サラ、浅田みなみ、濱名正泰、村田裕樹、田中潔、辻本良: 沿岸海洋研究, 54(2), 117-127. (2017), 三陸の沿岸漁業を支えるブルーインフラの大津波後の復興過程
- 4) 小松輝久、佐々修司、門谷茂、吉村千洋、藤井学、夏池真史、西村修、坂巻隆史、柳哲雄: 沿岸海洋研究, 56(1), 21-29, (2018), 開放性内湾を対象とした沿岸環境管理法の研究: 南三陸志津川湾の例
- 5) 山本裕規、吉木健吾、小松輝久、佐々修司、濱名正泰、村田裕樹、柳哲雄: 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 73(2), I_1339-I_1344 (2018), 志津川湾におけるカキ養殖等の環境容量に関する数値モデル解析-震災前と現在の比較

<査読付論文に準ずる成果発表>(書籍の一章であるが、査読を経たものを掲載)

- 1) T. KOMATSU and T. YANAGI: In Marine productivity: Perturbations and resilience of socio-ecosystems, ed. by H.-J. Ceccaldi, Y. Hénocque, Y. Koike, T. Komatsu, G. Stora and M.-H. Tusseau-Vuillemin, pp. 283-290, Springer, Cham (2015), Sato-umi: An Integrated Approach for Sustainable Use of Coastal Waters, Lessons from Human-nature Interactions during the Edo Period of Eighteenth-century Japan”
- 2) T. KOMATSU, T. OHTAKI, S. SAKAMOTO, S. SAWAYAMA, Y. HAMANA, M. SHIBATA, K. SHIBATA. and S. SASA: In Marine productivity: Perturbations and resilience of socio-ecosystems, ed. by H.-J. Ceccaldi, Y. Hénocque, Y. Koike, T. Komatsu, G. Stora and M.-H. Tusseau-Vuillemin, pp. 43-53, Springer, Cham (2015), Impact of the 2011 Tsunami on Seagrass and Seaweed Beds in Otsuchi Bay, Sanriku Coast, Japan
- 3) T. KOMATSU, S. SASA, M. HAMANA, S. SAKAMOTO, M. ASADA, G. TERAUCHI, R. TSUJIMOTO and T. YANAGI: In The 2011 Japan Earthquake and Tsunami: Reconstruction and Restoration, ed. by V. Santiago-Fandiño, S. Sato, N. Maki and K. Iuchi, pp. 265-278, Springer, Cham (2018), Temporal and Spatial Changes in a Coastal Ecotone in Shizugawa Bay, Sanriku Coast due to the Impacts of the

Tsunami on 11 March 2011 and the Following Artificial Impacts

- 4) T. KOMATSU, S. SASA, H. MURATA, H. SAWAYAMA, M. HAMANA, M. ASADA, R. TSUJIMOTO, G. TERAUCHI and T. YANAGI: In *Oceanography Challenges to Future Earth* ed. by T. Komatsu, H.-J. Ceccaldi, J. Yoshida, P. Prouzet and Y. Henocque, pp. 95-104, Springer, Cham (2019), Trophic Cascade in Seaweed Beds in Sanriku Coast Hit by the Huge Tsunami on 11 March 2011: Sea Urchin Fishery as a Satoumi Activity Serving for Increase in Marine Productivity and Biodiversity

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 小松輝久、門谷茂、吉村千洋、西村修、柳哲雄：水産学会誌，83(6)，1009，(2017)
「志津川湾における生物生産と陸からの負荷：栄養塩、微量金属、有機物」
- 2) 小松輝久、佐々修司、浅田みなみ、門谷茂、吉村千洋、藤井学、夏池真史、西村修、坂巻隆史、
柳哲雄：水産海洋研究，81(2)，125-128，(2017)
「基調講演 開放型内湾における里海の実現を目指して：三陸志津川湾を例として」
- 3) 柳哲雄編著：里海管理論、農林統計協会、9-11 (2019)
「第2章 開放性内湾の持続可能な利用と海洋環境の実現を目指して」（執筆担当：小松輝久）
- 4) 柳哲雄編著：里海管理論、農林統計協会、11-21 (2019)
「2. 1 震災とブルーインフラ（沿岸生息場）：大津波と人為的圧力下の遷移」（執筆担当：小松輝久、阪本真吾、澤山周平、村田裕樹、佐々修司）
- 5) 柳哲雄編著：里海管理論、農林統計協会、11-21 (2019)
「2. 5 開放性内湾における養殖と海洋環境管理」（執筆担当：小松輝久、村田裕樹、澤山周平、佐々修司）
- 6) T. KOMATSU: In *Integrated Coastal Management in the Japanese Satoumi* ed. by T. Yanagi, Elsevier, Amsterdam, pp. 16-17 (in press)
“Toward Realizing the Sustainable Use of and Healthy Marine Environments in an Open-Type Enclosed Bay”
- 7) T. KOMATSU, S. SAKAMOTO, S. SAWAYAMA, H. MURATA and S. SASA: In *Integrated Coastal Management in the Japanese Satoumi* ed. by T. Yanagi, Elsevier, Amsterdam, pp. 17-23 (in press)
“2.1 Strike of Large Tsunami on the Coastal Habitats Called Blue Infrastructure: Succession under the Impacts of Tsunami and the Human Activities Post-tsunami”
- 8) T. KOMATSU, H. MURATA, S. SAWAYAMA, and S. SASA: In *Integrated Coastal Management in the Japanese Satoumi* ed. by T. Yanagi, Elsevier, Amsterdam, pp. 46-55 (in press)
“2.5 Management of the Aquacultures and Marine Environments in an Open Inner Bay”

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 小松輝久：シンポジウム『豊かな志津川湾の創生』，(NPO) 環境創生研究フォーラム，(公財) 国際エメックスセンター，東北大学青葉山キャンパス，2014年10月24日 (2014)
「震災前後の志津川湾の藻場の変化」
- 2) 小松輝久：環境省「環境研究総合推進費」S-1 3 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成26年度公開成果発表会，三宮研修センター，神戸，2014年11月21日 (2014)
「遷移する沿岸環境監視とそれを応用した沿岸海域管理法開発」
- 3) 小松輝久：日本海洋学会沿岸海洋研究会沿岸海洋シンポジウム「震災復興に対する沿岸海洋学の貢献」，東京大学山上会館，東京，2015年3月14日 (2015)
「三陸沿岸の藻場」
- 4) 小松輝久：環境省「環境研究総合推進費」S-1 3 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管

- 理手法の開発 平成27年度公開成果発表会, WTCコンファレンスセンター Room A, 東京, 2015年11月5日 (2015)
「遷移する沿岸環境監視とそれを応用した沿岸海域管理法開発」
- 6) T. KOMATSU, S. SASA, S. MONTANI, O. NISHIMURA, T. SAKAMAKI, C. YOSHIMURA, M. FUJII and T. YANAGI: EMECS' 11 SeaCoasts XXVI, AZIMUT Hotel, St. Petersburg, Russia, 24 August 2016 (2016)
“Satoumi approach for realizing sustainable coastal use in a rias-type bay: a case of Shizugawa Bay in Sanriku Coast hit by the huge tsunami on 11 March 2011”
- 6) T. KOMATSU and H. MURATA: EMECS' 11 SeaCoasts XXVI, AZIMUT Hotel, St. Petersburg, Russia, 24 August 2016 (2016)
“Mapping aquaculture facilities in Shizugawa Bay before and after the huge tsunami on 11 March 2011 by satellite remote sensing”
- 7) 小松輝久: 第40回「相模湾の環境保全と水産振興」シンポジウム, (公財)相模湾水産振興事業団, 小田原市, 神奈川県水産技術センター相模湾試験場, 水産海洋学会共催, 神奈川県西地域県政総合センター, 2016年10月18日 (2016)
「開放型内湾における里海の実現を目指して—三陸志津川湾を例として」基調講演
- 8) 小松輝久: 平成28年度気仙沼水産試験場「浜と水試の情報交換会—養殖と生産環境—」, 宮城県気仙沼水産試験場主催, 宮城県気仙沼水産試験場, 気仙沼市, 2016年10月20日 (2016)
「志津川湾における養殖筏削減効果—養殖と生産環境」基調講演
- 9) 小松輝久: 環境省環境研究総合推進費戦略研究プロジェクトS-13 H28年度 公開成果発表会「持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発」, (公財)国際エメックスセンター主催, 大手町ファーストスクエアカンファレンス Room A, 東京, 2016年11月30日 (2016)
「遷移する沿岸環境監視とそれを応用した沿岸海域管理法開発」
- 10) 小松輝久, 門谷茂, 吉村千洋, 西村修, 柳哲雄: 日本水産学会平成29年度春季大会シンポジウム企画「森川里海のつながりを科学で説明できるか?」, 東京海洋大学, 2017年3月26日 (2017)
「志津川湾における生物生産と陸からの負荷: 栄養塩, 微量金属, 有機物」
- 11) H. MURATA, S. SASA and T. KOMATSU: 10th WESTPAC International Scientific Conference, Shangri-La Hotel in Qingdao, China, 17-20 April 2017 (2017)
“A study to detect and identify aquaculture gears using synthetic aperture radar: Case study of Matsushima Bay, Japan”
- 12) T. KOMATSU, S. SAWAYAMA, H. MURATA and S. SASA: International Fishery GIS Society, Seventh International Symposium on GIS/ Spatial Analyses in Fishery and Aquatic Sciences, Hakodate Research Center for Fisheries and Oceans, Hakodate, Hokkaido, Japan, 23 August 2017 (2017)
“Dynamic changes of coastal ecosystems in Sanriku Coast after the hit of huge tsunami in 2011”
- 13) T. KOMATSU, S. SASA, S. MONTANI, O. NISHIMURA, T. SAKAMAKI, C. YOSHIMURA, M. FUJII and T. YANAGI: National Seminar on Science Technology for Sabang Marine Tourism Development and the 4th International Workshop on Sato Umi, Auditorium and Main Commission of BPPT II, Jakarta, Indonesia, 5 to 6 October 2017 (2017)
“Satoumi approach for realizing sustainable coastal use in a rias-type bay: a case of Shizugawa Bay in Sanriku Coast after the huge tsunami on 11 March 2011”
- 14) 小松輝久: 日本海洋学会2017年度秋季大会沿岸海洋シンポジウム「持続可能な沿岸海域管理法—環境省推進費戦略的研究開発領域(S-13)の成果から」, 東北大学青葉山北キャンパス数理学記念館, 仙台, 2017年10月12日 (2017)
「三陸沿岸海域の沿岸管理法」

- 15) T. KOMATSU, S. MONTANI, C. YOSHIMURA, O. NISHIMURA, S. SASA, Y. YAMAMOTO and T. YANAGI: COAST Bordeaux 2017, University of Bordeaux, Bordeaux, France, 7 to 10 November 2017 (2017)
 “Modern Satoumi approach to an open rias-type bay, Shizugawa Bay, Sanriku Coast, Japan after the hit by the huge tsunami in 2011 for realizing sustainable environment and prosperous aquaculture”
- 16) 小松輝久:環境省「環境研究総合推進費」S-13 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成29年度公開成果発表会, AP 新橋 虎ノ門11階 Room A, 東京, 2017年11月21日 (2017)
 「遷移する沿岸環境監視とそれを応用した沿岸海域管理法開発」
- 17) H. MURATA, T. KOMATSU and C. YONEZAWA: The Joint PI Meeting of Global Environment Observation Mission FY2017 (The 3rd ALOS-2 PI Workshop), TKP Garden City Takebashi, 22-25 January 2018 (2018)
 “Mapping aquaculture facilities in Sanriku Coast using ALOS-2 for sustainable development”
- 18) 小松輝久: 平成29年度環境研究総合推進費 研究成果発表会, 独立行政法人環境再生保全機構, 札幌, 2018年3月17日 (2018)
 「開放性内湾が連なる三陸沿岸海域における沿岸環境管理法の開発(S-13-2)」
- 19) 村田裕樹、小松輝久、米澤千夏: 日本リモートセンシング学会第64回学術講演会, 東京大学柏キャンパス, 2018年5月17-18日 (2018)
 「人工衛星および航空機搭載SARを用いた養殖施設マッピング」
- 20) 小松輝久、佐々修司、門谷 茂、吉村千洋、藤井 学、夏池真史、西村 修、坂巻隆史、柳 哲雄: 日本水環境学会 第27回市民セミナー「豊かな里海の創生～河川流域と沿岸域の関係～」, 東京, 2018年8月3日 (2018)
 「開放性内湾における豊かな里海の実現を目指して: 南三陸志津川湾を例として」
- 21) T. KOMATSU, S. SASA, S. MONTANI, O. NISHIMURA, T. SAKAMAKI, C. YOSHIMURA, M. FUJII, M. NATSUIKE and T. YANAGI: The 12th International Conference on the Environmental Management of the Enclosed Coastal Seas (EMECS 12), Pattaya, Thailand, 4-8 November 2018 (2018)
 “Satoumi practice and sciences support sustainable use of a rias-type bay in southern Sanriku Coast after the huge tsunami 2011”
- 22) T. KOMATSU, H. MURATA and S. SASA: The 12th International Conference on the Environmental Management of the Enclosed Coastal Seas (EMECS 12), Pattaya, Thailand, 4-8 November 2018 (2018)
 “Detecting aquaculture facilities with remote sensing of optical or SAR images”
- 23) 小松輝久: 環境省「環境研究総合推進費」S-13 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成30年度公開成果発表会, WTCコンファレンスセンター 3階 Room A, 東京, 2018年11月29日 (2018)
 「遷移する沿岸環境監視とそれを応用した沿岸海域管理法開発」
- 24) T. KOMATSU, S. SASA, S. MONTANI, O. NISHIMURA, T. SAKAMAKI, C. YOSHIMURA, M. FUJII and T. YANAGI: 12th International Conference on Oceanography and Marine Biology, Rome, Italy, 3-4 December 2018 (2018)
 “A Satoumi practice to the semi-enclosed bay after the hit of huge tsunami on 11 March 2011 for realizing sustainable aquaculture and sound marine environments: An example of Shizugawa Bay, Japan”
- 25) T. KOMATSU and H. MURATA: The Joint PI Meeting of JAXA Earth Observation Missions FY2018 (4th ALOS-2 PI Workshop), TKP Tokyo Station Nihonbashi Conference Centre, Tokyo, 21-25 January 2019 (2019)

“Mapping marine aquaculture facilities for sustainable use of coastal waters”

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム「豊かな志津川湾の創生」（主催：（NPO）環境創生研究フォーラム・（公財）国際エメックスセンター、2014年10月24日、東北大学工学研究科青葉山会館、聴講者50名）にて講演
- 2) 一般公開シンポジウム「環境研究総合推進費S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成26年度公開成果発表会」（主催：環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト・（公財）国際エメックスセンター、2014年11月21日三宮研修センター、聴講者約70名）にて講演
- 3) 日本海洋学会2015年春季大会沿岸海洋シンポジウム「震災復興に対する沿岸海洋学の貢献」（主催：日本海洋学会沿岸海洋研究会、2015年3月14日、東京大学山上会館、聴講者80名）にて講演
- 4) 一般公開シンポジウム「環境研究総合推進費S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成27年度公開成果発表会」（主催：環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト・（公財）国際エメックスセンター、2015年11月5日、WTCコンファレンスセンター Room A、聴講者約70名）にて講演
- 5) 第40回「相模湾の環境保全と水産振興」シンポジウム（主催：（公財）相模湾水産振興事業団・小田原市・神奈川県水産技術センター相模湾試験場・水産海洋学会共催、2016年10月18日、神奈川県西地域県政総合センター、聴講者約70名）にて基調講演
- 6) 平成28年度気仙沼水産試験場「浜と水試の情報交換会 ー養殖と生産環境ー」（主催：宮城県気仙沼水産試験場主催・宮城県気仙沼水産試験場、2016年10月20日、宮城県気仙沼水産試験場、聴講者約50名）にて基調講演
- 7) 一般公開シンポジウム「環境研究総合推進費S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成28年度公開成果発表会」（主催：環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト・（公財）国際エメックスセンター、2016年11月30日、大手町ファーストスクエアカンファレンス Room A、聴講者約70名）にて講演
- 8) 日本水産学会平成29年度春季大会シンポジウム企画「森川里海のつながりを科学で説明できるか？」（主催：日本水産学会、2017年3月26日、東京海洋大学、聴講者約80名）にて講演
- 9) 日本海洋学会2017年秋季大会沿岸海洋シンポジウム「持続可能な沿岸海域管理法-環境省推進費戦略的研究開発領域(S-13)の成果から」（主催：日本海洋学会沿岸海洋研究会、2017年10月12日、東北大学青葉山北キャンパス数理科学記念館、聴講者約80名）にて講演
- 10) 一般公開シンポジウム「環境研究総合推進費S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成29年度公開成果発表会」（主催：環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト・（公財）国際エメックスセンター、2017年11月21日、A P 新橋 虎ノ門11階Room A、聴講者約70名）にて講演
- 11) 一般公開シンポジウム「平成29年度環境研究総合推進費 研究成果発表会」（主催：独立行政法人環境再生保全機構、2018年3月17日、北海道大学工学部フロンティア応用科学研究棟1階セミナー室1、聴講者約80名）にて講演
- 12) 日本水環境学会 第27回市民セミナー「豊かな里海の創生～河川流域と沿岸域の関係～」（主催：水環境学会、2018年8月3日、地球環境カレッジホール、聴講者100名）にて講演
- 13) 一般公開シンポジウム「環境研究総合推進費S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成30年度公開成果発表会」（主催：環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト・（公財）国際エメックスセンター、2018年11月29日、WTCコンファレンスセンター3階Room A、

聴講者約70名)にて講演

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) NHKスペシャル全国放送(2015年10月31日21時から:「シリーズ東日本大震災“津波の海”を潜る～三陸・破壊と回復の5年間～」において、S-13-2に関する小松の研究の結果を10分ほど紹介)
- 2) NHK「おはよう東北」朝のニュース番組、おはよう日本の東北版(2015年11月30日、小松のS-13-2に関する南三陸町志津川湾のアマモ調査の成果を朝7時45分頃から5分ほど紹介)。
- 3) NHK「さわやか自然百景新春特集水の国日本」全国放送(2016年1月1日、S-13-2に関する小松の研究結果を9時33分から3分ほど紹介)
- 4) 三陸新報(2016年10月25日、全国版、1頁、「いかだ削減の効果探るーカキ養殖『浜と水試の情報交換会』」)
- 5) 中国新聞(2017年6月14日、全国版、3頁、「利益保ち養殖減らす、カキの成育状態改善」)
- 6) 朝日新聞(2017年6月27日、全国版夕刊、11頁、「三陸の藻場再生に提言」)

(6) その他

受賞

口頭発表

受賞対象の口頭発表題名: “A Satoumi practice to the semi-enclosed bay after the hit of huge tsunami on 11 March 2011 for realizing sustainable aquaculture and sound marine environments: An example of Shizugawa Bay, Japan”

賞: Certificate of Recognition for his phenomenal oral presentation at the 12th Edition of International Conference on Oceanography and Marine Biology, EuroSciCon and the Editors of Journal of Marine Biology and Oceanography, Rome, Italy, 3-4 December 2018

受賞者: Teruhisa Komatsu

8. 引用文献

- 1) 福島慶太郎、富田遼平、横山勝英: (2016) 気仙沼湾に流入する河川水中の溶存態有機物の規定要因. 土木学会論文集G(環境), 72, 165-172.
- 2) 環境省自然環境局生物多様性センター: (2008) 第7回自然環境保全基礎調査 浅海域生態系調査(藻場調査) 報告書, 428p. 環境省自然環境局生物多様性センター, 吉田市.
- 3) 環境省自然環境局生物多様性センター: (2013) 6. 生態系監視調査, pp. 6-138 - 6-165, 平成24年度東北地方太平洋沿岸地域自然環境調査等業務報告書, 環境省自然環境局生物多様性センター, 吉田市.
- 4) 環境庁自然保護局: (1994) 第4回自然環境保全基礎調査海域生物環境調査報告書(干潟、藻場、サンゴ礁調査) 第2巻 藻場. 環境庁, 東京.
- 5) 環境省自然環境局生物多様性センター: (2019) 自然環境調査Web-GIS http://gis.biodic.go.jp/webgis/?_ga=2.258120266.1137423112.1557626194-1765737031.1557626194 (参照日2019年1月15日)
- 6) 環境省自然環境局生物多様性センター: (2014) 平成25年度東北地方太平洋沿岸地域生態系監視調査報告書. 環境省自然環境局生物多様性センター, 吉田市, 192pp+参考資料
- 7) T. Komatsu, T. Ohtaki, S. Sakamoto, S. Sawayama, Y. Hamana, M. Shibata, K. Shibata and S. Sasa: (2015) Impact of the 2011 Tsunami on seagrass and seaweed beds in Otsuchi Bay, Sanriku Coast, Japan. In Marine Productivity: Perturbations and Resilience of Socio-Ecosystems, edited by Ceccaldi, H. J., Hénocque, Y., Koike, Y., Komatsu, T.,

- Stora, G. and Tusseau-Vuillemin, M.-H., Springer, Cham, 43-53.
- 8) 水産庁：(2015) 4. 藻場・磯焼けに関する最近の知見. 改定磯焼け対策ガイドライン, 水産庁, 東京, 30-47.
 - 9) J.A. Estes and J.F. Palmisano : (1974) Sea otters: their role in structuring nearshore communities. *Science*, 185, 1058-1060.
 - 10) 松田 治：(2007)第4章水産の多面的機能を環境再生に生かす. 松田治、村岡浩爾、小林悦夫、柳哲雄編, 「瀬戸内海を里海に：新たな視点による再生方策」, 恒星社厚生閣, 東京, 29-38.
 - 11) S. Takagi, Y. Murata, E. Inomata, H. Endo, M.N. Aoki and Y. Agatsuma : (2018) Dietary effect of kelp (*Saccharina japonica*) on gonad quantity and quality in sea urchins (*Mesocentrotus nudus*) collected from a barren before the fishing season. *Journal of Shellfish Research*, 37(3), 659-669.
 - 12) 小松輝久、寺内元基、太齋彰浩、青木優和、名倉良雄、佐々木久雄、辻本良、佐々修司、阪本真吾、柳哲雄：(2014)東日本大震災からの沿岸漁業復興を目指す志津川湾藻場再生への取り組み. *沿岸海洋研究*, 52(1), 103-110.
 - 13) T. Komatsu, S. Sasa, M. Hamana, S. Sakamoto, M. Asada, G. Terauchi, R. Tsujimoto and T. Yanagi : (2018) Temporal and spatial changes in a coastal ecotone in Shizugawa Bay, Sanriku Coast due to the impacts of the tsunami on 11 March 2011 and the following artificial impacts. In *The 2011 Japan Earthquake and Tsunami: Reconstruction and Restoration*, edited by Santiago-Fandiño, V., Sato, S., Maki, N. and Iuchi, K., Springer, Cham, 265-278.
 - 14) 小松輝久、大瀧敬由、佐々修司、澤山周平、阪本真吾、ゴンザルボ マロ サラ、浅田みなみ、濱名正泰、村田裕樹、田中 潔、寺内元基、辻本 良：(2017) 三陸の沿岸漁業を支えるブルーインフラの大津波後の復興過程. *沿岸海洋研究*, 54(2), 117-127.
 - 15) 国土地理院：(2011) 本吉郡南三陸町調査点地盤沈下図. 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震に伴う地盤沈下調査. 国土地理院, 東京,
1p. <http://www.gsi.go.jp/common/000060294.pdf> (参照日2016年9月10日).
 - 16) 環境省：(2012) 三陸復興国立公園の創設を核としたグリーン復興のビジョン. 環境省, 東京, 12pp.
 - 17) R. Costanza, R. d' Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O' Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, Paul Sutton and M. van den Belt (1998): The value of the world' s ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253-260.
 - 18) 乙志和孝、黒澤辰昭、藤原覚太、戸田和秀、吉原健郎、奥田洋一、西部和生、黒崎和保：(2015) 巨大地震および津波遡上に対する海岸堤防・防潮堤のソリューション技術. *新日鉄住金技報*, 4033, 70-77.
 - 19) 佐藤正典：(2015) 波被災地における陸・海境界域の生態系保全を求める要望書. 日本ベントス学会, <http://benthos-society.jp/youbousho201501.pdf> (参照日2016年11月29日) .
 - 20) 安田喜憲：(2015) 震災復興と防潮堤. 森林環境研究会(編), 「森林文化2015」, 森林文化協会, 東京, 128-138.
 - 21) 谷口真人：(2015) 海底湧水と水産資源. *豊かな海*, 377, 2.
 - 22) S.R. Cloude and E. Pottier : (1996) A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(2), 498-518.
 - 23) A. Freeman and S. L. Durden : (1998) A three-component scattering model for polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on GeoScience and Remote Sensing*, 36(3), 963-973.

- 24) H. Murata, T. Komatsu and C. Yonezawa : (2019) Detection and discrimination of aquacultural facilities in Matsushima Bay, Japan, for integrated coastal zone management and marine spatial planning using full polarimetric L-band airborne synthetic aperture radar. *International Journal of Remote Sensing*, 40(13), 5141-5157.
- 25) 小松輝久、佐々修司、門谷 茂、吉村千洋、藤井 学、夏池真史、西村 修、坂巻隆史、柳 哲雄 : (2018) 開放性内湾を対象とした沿岸環境管理法の研究：南三陸志津川湾の例. *沿岸海洋研究*, 56(1), 21-29.
- 26) 北原曜 : (1998) 森林が表面侵食を防ぐ. *森林科学*, 22, 16-22.
- 27) 藤枝基久 : (2007) 森林流域の保水容量と流域貯流量. *森林科学総合研究所報告*, 403, 101-110.
- 28) 畠山重篤 : (2000) 漁師さんの森づくりー森は海の恋人ー. 講談社, 176pp.
- 29) 松永勝彦 : (1993) 森が消えれば海も死ぬ. 講談社, 東京, 190pp.
- 30) 山本裕規、吉木健吾、小松輝久、佐々修司、柳 哲雄 : (2018) 志津川湾における陸域ー海域統合数値モデルによる、持続可能な沿岸域環境実現のための最適養殖量の解析. *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 74(2), I_1279-I_1284.
- 31) 前川 聡 : (2016) 海の再生と水産養殖認証ー震災と南三陸町の水産業. 大元鈴子、佐藤哲、内藤大輔 (編) *国際資源管理認証 エコラベルがつなぐグローバルとローカル*, 東京大学出版会, 66-83.
- 32) 丸岡泰、泰松範行 : (2016) 東日本大震災の被災地への復興ツーリズムの可能性. *日本海水学会誌*, 70, 231-238.
- 33) 林野庁 : (1999) 森林の状況と表層土壌. 林野庁編, 「災害に強い国土づくりのための間伐方法に関する調査報告書」. 林野庁, 東京, 52-70.
- 34) 西山嘉寛 2003. 岡山県におけるヒノキ人工林の表面侵食と表面流出の研究 (II) 年侵食土砂量の予測. *森林応用研究* 12 : 53-58.
- 35) 池田英史、若松孝志、中屋 耕、阿部聖哉 : (2012) 森林流域からの土壌流出の実態・支配因子と予測モデル開発の現状. *水文・水資源学会誌*, 25(6), 396-409.
- 36) 金行悦子、中根周歩 : (2006) 吉野川上流域の同一斜面上に隣接する無間伐人工林と広葉樹自然林の土壌孔隙率と最大容水量の比較. *森林立地*, 48(1), 17-24.
- 37) 諫本信義 : (2002) 土壌孔隙組成を用いた森林の保水容量の推定とその要因解析. *森林立地*, 44(2), 31-36.
- 38) 阿部拓三 : (2017) 志津川湾のラムサール条約湿地登録へ. *つちおと*, 58, 3.
- 39) 南三陸町 : (2012) 南三陸町震災復興基本方針 (素案). 南三陸町役場, 南三陸町, 14pp.
- 40) 環境省 : (2012) 生物多様性国家戦略 2012-2020 [概要]. 官公庁環境専門資料, 47, 65-78.
- 41) 環境省 : (2014) 自然再生基本方針. 環境省, 東京, 23pp.
- 42) 外務省 : (2016) 持続可能な開発目標 (SDGs) 実施指針. 外務省, 東京, 30pp.
- 43) 白岩孝行 : (2011) 魚付き林の地球環境学. 昭和堂, 京都, 244pp.
- 44) 白岩孝行 : (2017) 陸域から河川・海洋への鉄供給：土地利用・土地被覆の違いが鉄供給量に与える影響. *日本水産学会誌*, 83, 1011-1011.

II-2 森-川-海の栄養物質輸送機構の解明

学校法人横浜商科大学 地域産業研究所

門谷 茂

平成26～30年度累計予算額：34,793千円（うち平成30年度：6,260千円）

累計予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

モデル海域である志津川湾内において、物質循環の全体像解明のために一連の現場調査を行った。河川水を通じた負荷量長期間連続モニターとして、水試料を2014年7月から2015年度末までの期間、主要3河川の河口で毎週採取し、栄養塩濃度と光合成色素濃度を測定し、周年に渡る流入負荷量の推定を行った。湾内広域調査を年度内に四季にわたって実施し、湾内の栄養塩類等の空間分布及び現存量推定を行った。湾内栄養塩現存量推定の補助として、湾内3定点で月3回、海水試料を採取して同様の分析定量を実施した。志津川湾内に設定した15定点において、四季にわたり、5mごとに採水して、栄養塩類の分析定量と粒子状の各種化学物質の定量を実施した。湾内の各定点において、採泥を実施しクロロフィル濃度や有機物含有量を定量した。湾中央部の定点で採水を行い、陸上施設において13C疑似現場法により基礎生産量の推定を行った。湾内で養殖されているカキを実験室に持ち帰り、栄養塩再生量の定量を四季にわたって実施した。同時に、養殖海域においてカキによる排泄物のインパクトを見積もるために、セジメントトラップを観測時に毎回設置して、沈降粒子束を実測評価した。栄養塩を利用して光合成過程により生じる基礎生産物の起源や輸送過程を推定するために、海水中の粒子状物質、カキ養殖施設付着微細藻類、大型海藻、アマモおよび海底堆積物中の炭素・窒素安定同位体比を測定した。養殖場において、二枚貝の摂餌と排泄は、栄養塩類の再生産などを通じて、養殖海域の物質循環過程に重要な役割を果たすが、二枚貝養殖が水質・底質環境及び生物生産過程に与える影響を定量的に示した知見は少なかった。そこで、三陸沿岸の開放性内湾で盛んに行われているマガキ養殖が物質循環過程に与えるインパクトを志津川湾で評価した。その結果、マガキの窒素現存量は、湾奥部窒素プールのストックと匹敵あるいは秋季には凌駕し、窒素循環に大きな影響を及ぼしている。また、物質循環に及ぼすホヤ養殖影響調べたところ、マボヤの資源量、摂餌速度はともにマガキの3割程度であるが、排泄される糞量は実にマガキの3倍にも達した。窒素排泄物に占める糞量がマガキでは6.8%しかないがマボヤでは64%にもなり、海底への窒素輸送に大きく影響していた。以上をもとに、四季の栄養塩収支の全体像を見積もることができた。開放性内湾である志津川湾では、窒素律速で、河川からの栄養塩供給は限定的で、外洋からの供給が支配的であり、海底環境を悪化させない範囲における適度なカキ養殖は、養殖施設、カキ殻に付着する微細藻類をガーデニングし、物質循環を長く、速くする里海活動となることが明らかになった。

[キーワード]

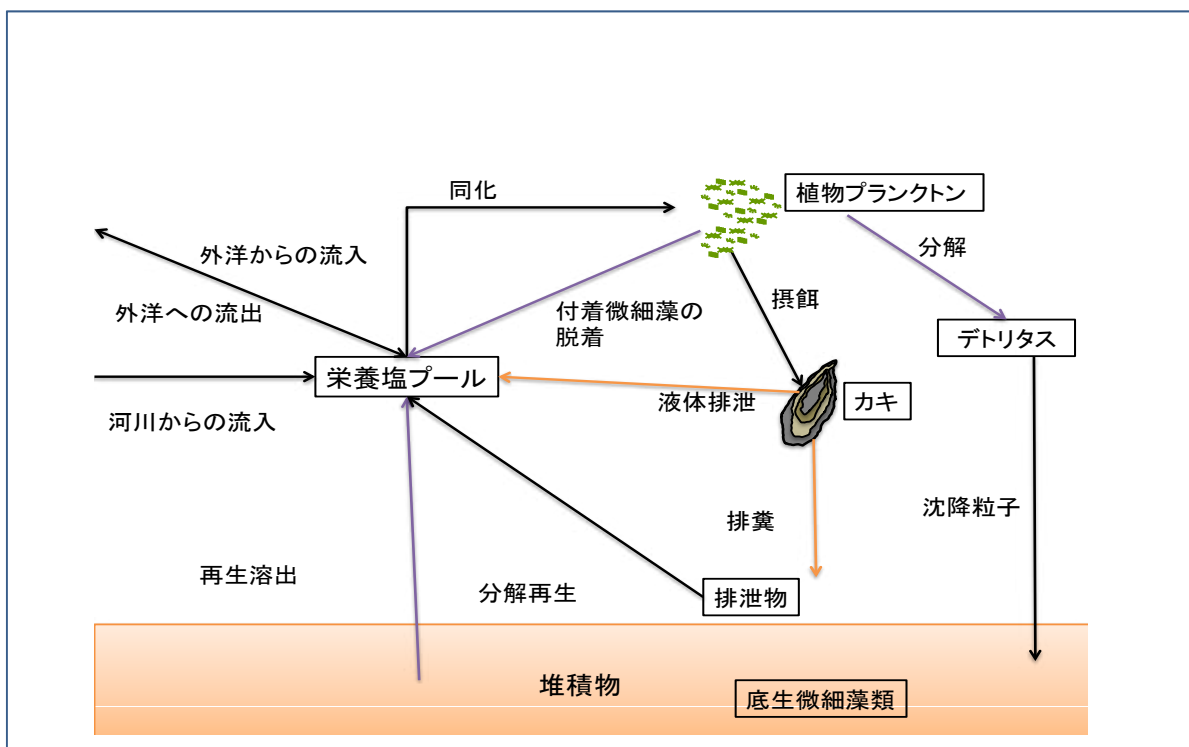
栄養塩類、基礎生産、物質循環、マガキ、マボヤ

1. はじめに

陸域と沿岸海域の関係が互いに切り離せないものであるとの認識が社会的に一般化しつつ有り、近年「森は海の恋人」という言葉に象徴されるように、沿岸域の生態系を考える上で陸域からの物質供給が重要であるという主張がみられるようになった。しかしながら、森林の腐葉土などを通して河川からの栄養豊富な水が海の生産力を支えているという考えは未だ定量的には実証されておらず、その実態については科学的に不明な点が多く、解明されたい状態である。森林域を含めた陸域からの栄養塩類が河川を通して海域にもたらされる過程を定量的に明らかにするとともに、図(2)-1に示したように、湾内にもたらされた各種栄養塩が、基礎生産過程にどのように分配され、当該水域内の生物生産を支えているのかを、多層的かつ包括的に解析して、養殖管理手法確立のための基礎的知見を獲得する。

2. 研究開発目的

本研究では、宮城県三陸沿岸の志津川湾をモデル海域として、生物生産の駆動力となる基礎生産量の多寡を規定する栄養塩の湾内での現存量を把握するとともに、その起源と規模および季節変化を定量化する。湾内に供給される栄養塩流入プロセスの候補は、(1) 森林域を含めた陸域から河川を通して海域にもたらされるもの。(2) 太平洋からの外海水流入によるもの。さらに、(3) 湾内で養殖されている牡蠣やホヤなどのろ過食性者の排泄再生によりもたらされるもの、である。同時に、湾内の栄養塩が、各種基礎生産者(植物プランクトン、付着性微細藻類、大型海藻およびアマモ)による光合成にどのように利用され、湾内生態系を駆動させている基礎生産に結びつくのかという観点から、志津川湾の物質循環系を理解するため湾内物質循環系の主要構成者について、ストックとフラックスを定量する事を試みた。加えて当該水域内の生物生産の規模と仕組みを多層的かつ包括的に解析して、開放性内湾の養殖管理手法確立のための基礎的知見を獲得することを目的とした。



図(2)-1 志津川湾におけるカキを中心とした栄養塩循環の模式図。
長方形の枠は現存量を、矢印はフラックスを示す。実測値は黒色で、
実験値はオレンジ色で、扱わないフラックスは紫色で表す。

3. 研究開発方法

志津川湾への陸域からの栄養塩流入量を定量するために、長期間に亘る連続モニターを行った。2014年7月9日から2015年3月までの期間、主要3河川(八幡川、水尻川および折立川)の河口で週1回採取し、栄養塩濃度と光合成色素濃度を測定した(図(2)-2)。さらに、志津川湾内に設定した15定点において、現地広域調査を2014年7月から四季に亘り計器観測を行うとともに、海面から水深5mごとに採水して、栄養塩類の分析定量と粒子状の各種化学物質の定量を実施した。湾中央部の定点で採水を行い、陸上施設において ^{13}C 疑似現場法により基礎生産量の推定を行った。同時に、養殖海域においてカキによる排泄物が海底環境に及ぼす影響を見積もるために、マガキ養殖場とその対照区にセジメントトラップを設置して、沈降粒子束を捕集し、カキ養殖場全体の個体排泄量を推定した(図(2)-3)。

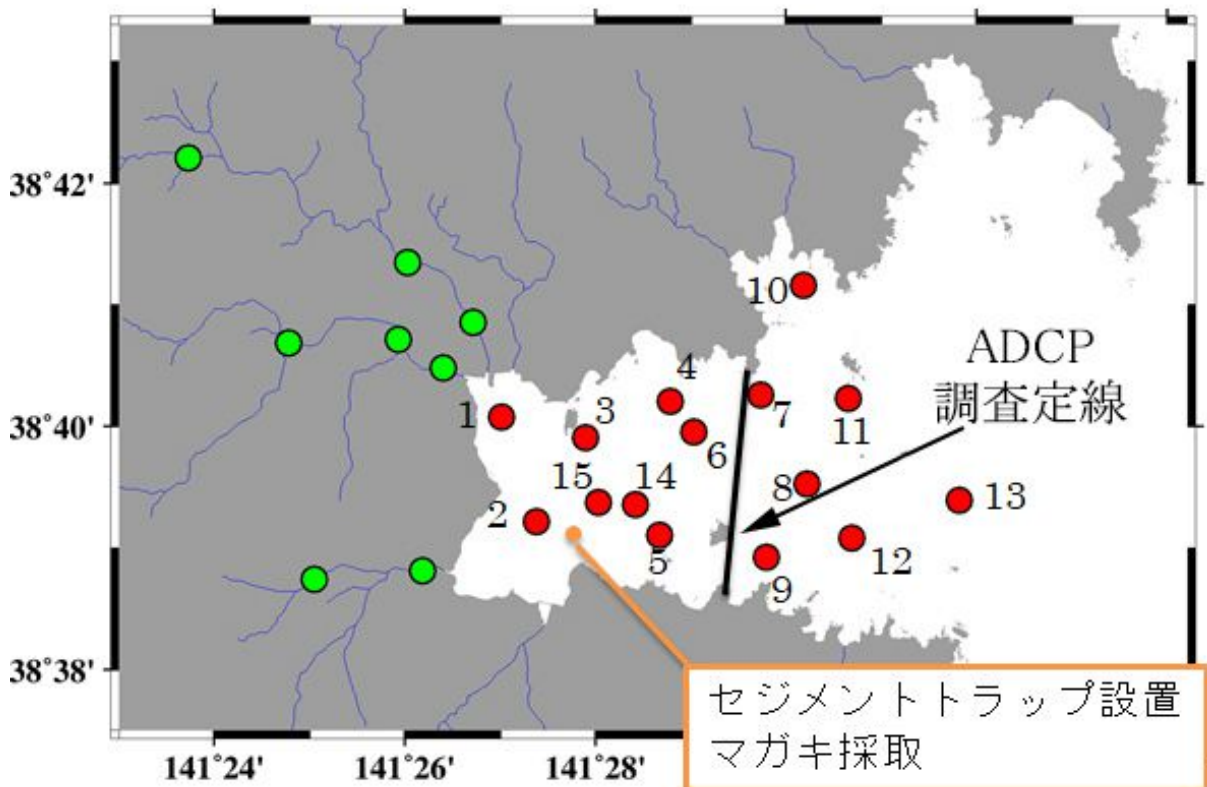
ADCP流速断面調査(図(2)-2)をもとに、観測日に近い大潮および小潮の上げ潮時、下げ潮時の平均潮

流流速を各層について推定し、上げ潮時を流入、下げ潮時を流出として、各層の断面積と平均潮流流速を乗じて上げ潮時の流入量と下げ潮時の流出量を求めた。湾外とした定点の上述の各層の各態栄養塩濃度 $[mg\ m^{-3}]$ を各層の流入流出量に乗じて、各層ごとの各態栄養塩の流入流出量の質量を求め、流入量質量と流出量質量の差（流入量質量を正とし、流出量質量を負として）を求めた。最後に、湾奥部面積 $(13.8km^2)$ で除し、湾奥部単位面積当たりの外洋からの各態栄養塩流入流出量質量とした。

栄養塩を利用して光合成過程により生じる基礎生産物の起源や輸送過程を推定するために、海水中の粒子状物質、カキ養殖施設付着微細藻類、大型海藻およびアマモの炭素・窒素安定同位体比を測定した。

沿岸海域における二枚貝養殖は、海水中の植物プランクトン及び懸濁態有機物等を主な餌とするため、給餌の必要がなく、環境負荷及び養殖漁業の経営の側面から見ても持続可能性が高い。また養殖場において、二枚貝は高い濾水能力や排泄物の堆積による底層の有機物の増加、排泄による栄養塩類の再生産などの役割を担うため二枚貝の摂餌・排泄は養殖海域の物質循環過程に重要な役割を果たす。しかしながら、二枚貝養殖が水質・底質環境及び生物生産過程に与える影響を定量的に示した知見は極めて少ない。宮城県のマガキ年間水揚げ量は震災前の2010年には41,653 tonで全国の25%を占め、震災後に低下はしたものの、2013年には11,581 ton（全国の7%）で高い水揚げ高を誇る。志津川湾においてもマガキ(*Crassostrea gigas*)は主要な漁業種であり、湾内の生態系を構成する主要な生物種として、低次生産過程を考える上で極めて重要である。そこで本研究では、湾内物質循環系の根幹部分を構成する要素として、湾内の主要な養殖生物種であるマガキに着目し、その餌資源の特定、およびその摂餌量や排泄量を定量化することによって、湾内の物質循環におけるマガキの生態学的な役割を定量的に評価する。また、志津川湾において、養殖が盛んに行われているマボヤ(*Halocynthia roretzi*)の摂餌及び排泄にも着目し、マガキに対するのと同様の詳細な室内実験を基にして、これらの養殖生物が湾内の物質循環過程に与える影響を評価した。

● 流入河川定点, ● 志津川湾内定点



図(2)-2 志津川湾（赤丸）および流入河川（緑丸）の試料採取点。ADCP流速断面調査を行った定線(実線)と物質循環を検討したADCP調査定線より西側の海域 $(13.8km^2)$ 。



図(2)-3 志津川湾湾奥部においてマガキの排泄量を実測するために、マガキ養殖場とその対照区にセジメントトラップを設置して、沈降粒子束を捕集し、カキ養殖場全体の個体排泄量を推定した。マガキ養殖場に設置して回収したセジメントトラップに捕集された沈降物量が対照区に比べ非常に多いことが明瞭にわかる。

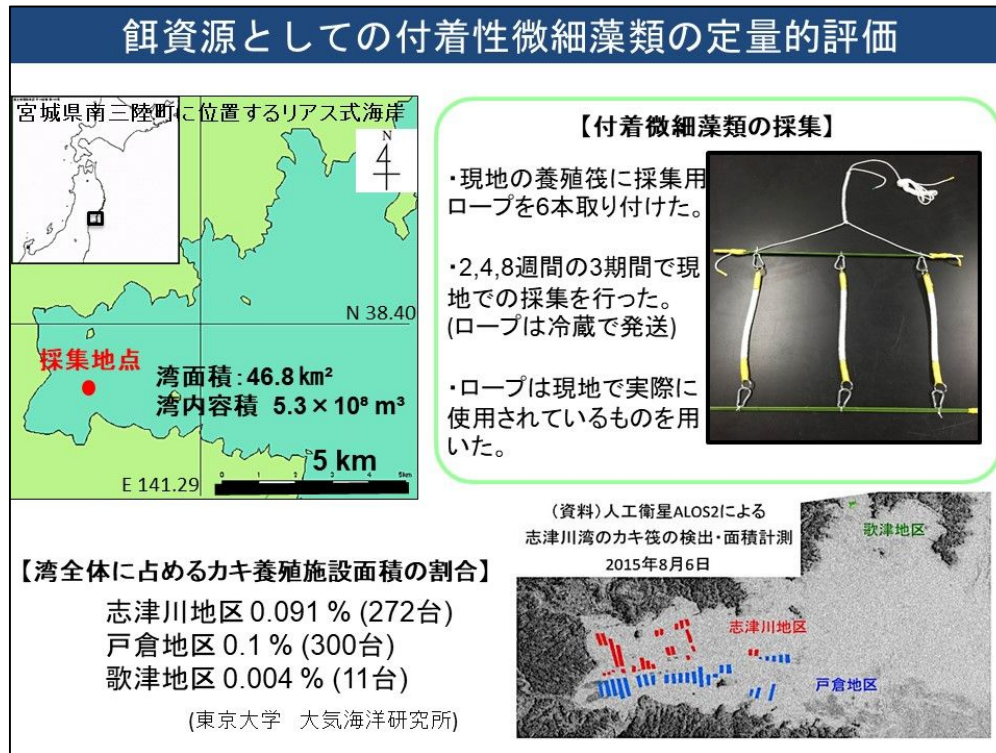
海水および河川水試料は、採取後数時間以内にWhatman GF/Fフィルターを用いて加圧ろ過を行った。海水試料中のChl. *a*およびPheo色素は、90%アセトン溶液で24時間抽出した後、蛍光光度計を用いて光合成色素の測定を行った。オートアナライザーを用いて各態栄養塩類である $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$ を測定した。海水試料中の粒状有機炭素 (Particulate Organic Carbon: POC)、粒状有機窒素 (Particulate Organic Nitrogen: PON) は、 450°C 下で12時間加熱し有機物の焼却処理をしたGF/Fフィルターを用いて加圧ろ過して後の分析に供した。なお、後述する各種室内実験の試料の取り扱いも同様に実施した。

志津川湾内のマガキ養殖場において、広域海洋観測時にマガキの採取、および養殖場外の筏ロープに海面から7m深の地点にセディメントトラップを設置した(図(2)-3)。セディメントトラップは内径7.5cm、高さ30cmのアクリルコアが6本ついたものを用い、これによって沈降粒子の捕集を行った(図(2)-3)。得られた試料はプランクトン分割器を用いて適時分割し、それぞれChl. *a*、粒状有機炭素 (POC) および粒状有機窒素 (PON)、炭素窒素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) などの分析を行った。

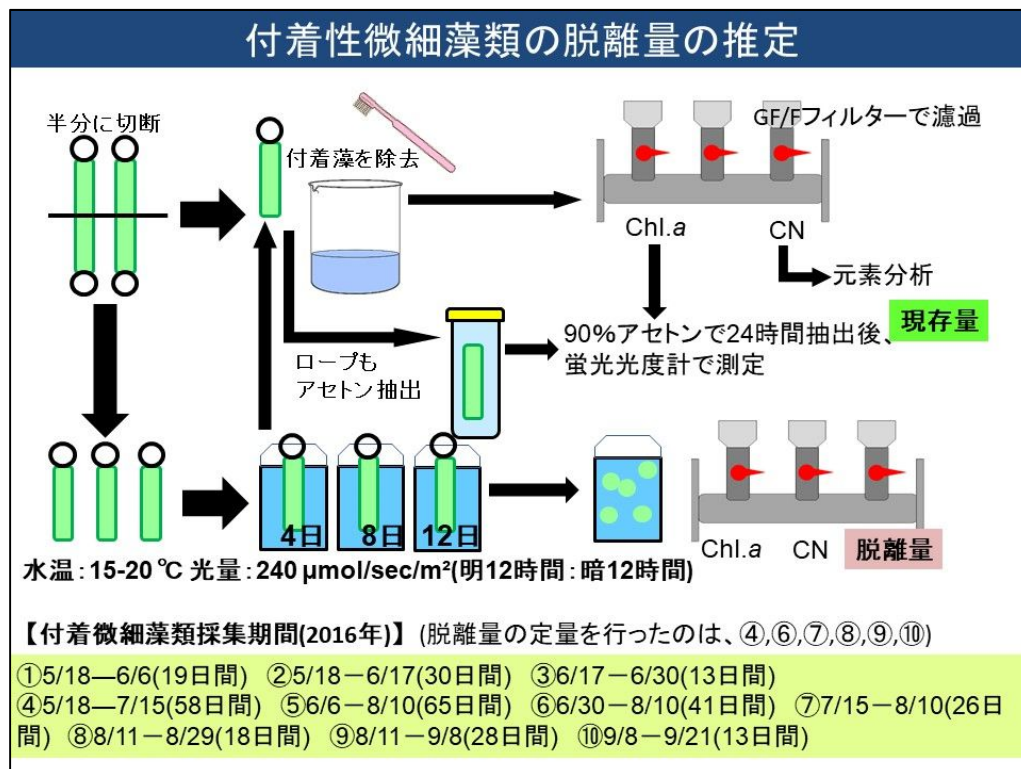
採取したマガキは、殻の表面に付着している付着藻類をブラシで削ぎ落とし、Whatman GF/Fフィルター(孔径 $0.7\mu\text{m}$)でろ過したろ過海水中で3日間無給餌飼育して糞粒を吐き出させる操作を行った。その後、軟体部を凍結乾燥し、メノウ乳鉢を用いて粉碎した。脱脂処理を行うため、粉末状になった試料はクロロホルム:メタノール(2:1)混合溶液を加え、24時間放置した。放置後、再び凍結乾燥したものを分析サンプルとした。

付着藻類が実際にカキの餌料として機能しているのかどうかを確かめるために、現場での付着増殖試験(図(2)-4)と脱着量の定量化(図(2)-5)を試みた。マガキの摂餌および栄養塩再生能力測定実験には、給餌区、無給餌区、コントロール区のそれぞれ2基の水槽を準備して(図(2)-6)、餌料として珪藻

(*Chaetoceros gracilis*)を与えた。実験は72時間行い、明暗周期は12L:12Dとした。温度条件は10℃区と20℃区を準備してそれぞれ複数回実施した。



図(2)-4 マガキ養殖ロープに付着する微細藻類の定量的評価のために現場で垂下した実験装置(右上)、設置場所(左上)、養殖筏分布(右下)、湾全体に占めるカキ養殖施設面積の割合(左下)。



図(2)-5 マガキ養殖ロープに付着する微細藻類の脱離量の推定方法。

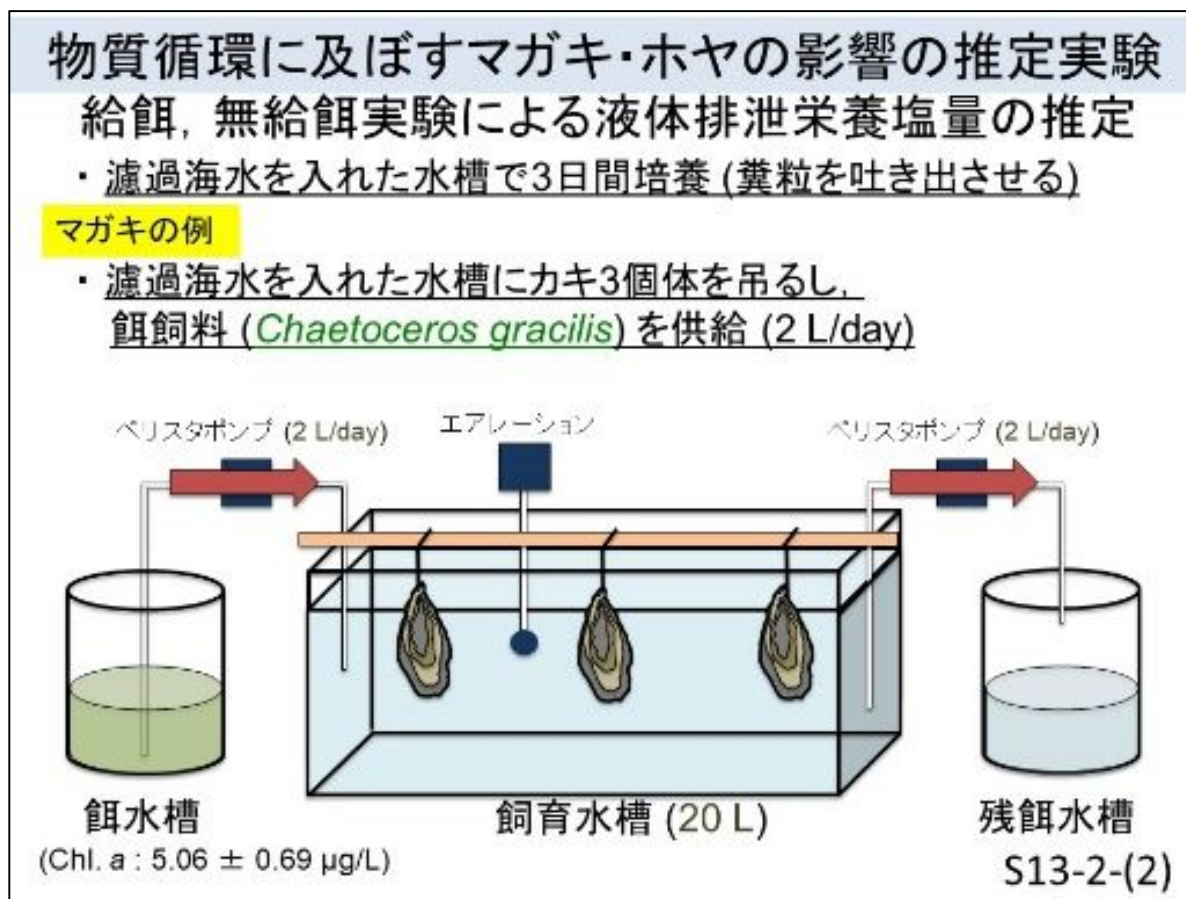


図 (2)-6 マガキの給餌・無給餌実験による液体排泄栄養塩量推定のための実験装置。

4. 結果及び考察

(1) 栄養塩類の組成比と現存量の推定

志津川湾内の栄養塩分布の特徴を見るために、湾内の15定点 (図 (2)-2) の海面から5m深層毎の深度から得られる海水試料中の各態栄養塩濃度を定量した。その結果をもとに栄養塩類のモル比を求めたところ、志津川湾ではいくつかの例外を除いて、常に窒素栄養塩 (DIN) が制限栄養塩である事が分かった。さらに栄養塩濃度をもとにして、志津川湾の各季節の平均濃度を算出した。これらの値と志津川湾の容積より湾内栄養塩の単位面積当たりの現存量を計算した。これから、窒素 (DIN) は、秋季 (10月) の184mgN m⁻²から冬季 (1月) の1287mgN m⁻²まで6.7倍の変化があり、窒素栄養塩が制限栄養塩であるとともに、大きく季節変化する事が明らかとなった。リン (DIP) は、秋季の73mgP m⁻²から冬季の235mgP m⁻²まで3.2倍の変化であり、季節変化のパターンはNと同様であった。ケイ素 (DSi) は、夏季 (7月) の5876 mgSi m⁻²から、秋季の9792 mgSi m⁻²まで、僅かに1.7倍の差しか観測されず、N、Pとは大きく異なる挙動が見られた。ケイ素は常に潤沢に存在しており、湾内の生物生産を制限する要素ではない事が明らかとなった。

(2) 河川および外洋からの湾内への栄養塩供給量の見積り

志津川湾に供給される河川と外洋からの栄養物質の定量的評価を行った。開放性内湾である志津川湾では、湾内の物質収支を考える場合、外洋からの栄養塩供給、特に親潮水系による栄養塩類の供給が大きな影響を及ぼしている可能性も高い。まず、河川流量および河川からの各態栄養塩供給量を推定した。志津川湾に流入する河川流量データは計測・公表されていないため、本研究では流域面積を用いて他河川の比流量として算出した。志津川湾に最も近い河川で、水位データが得られる二級河川は岩手県の気仙沼湾に注ぐ大川水系であったので、大川の水位および水位流量曲線から得られた流量から、湾内に注

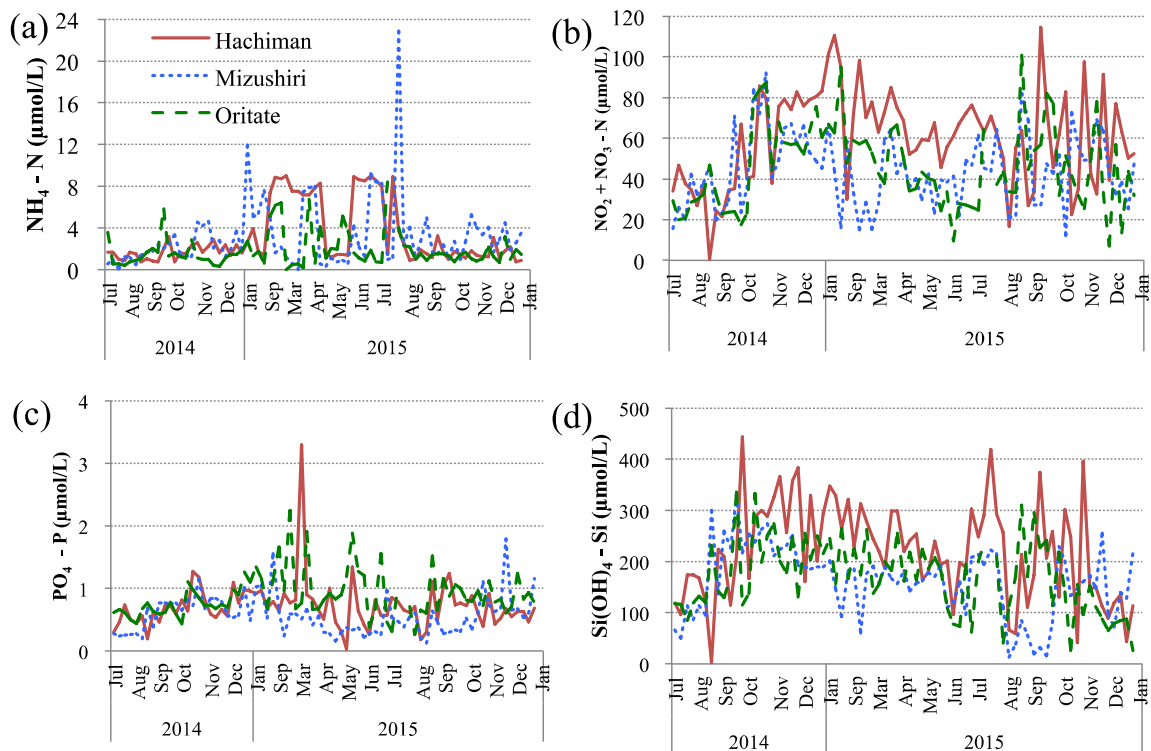
ぐそれぞれの河川の流量を推定した。主要3河川は八幡川、水尻川、折立川で(図(2)-2)、流域面積はそれぞれ31.6km²、19.2km²、15km²であり、大川の流域面積は168km²であった。大川の流量は大川水系の切通地点における2002-2015年の水位データを用い、環境省の提供する次の経験式から、切通地点における淡水流量Qを算出した。

$$Q = 18.11 \times (H - 0.210)^2$$

ここで、Qは切通地点淡水流量[m³ day⁻¹]、Hは切通地点日平均水位である。切通地点における集水域は127km²であり、切通地点での流域面積と志津川湾に注ぐ3河川の各流域面積の比から志津川湾集水域の3河川ごとの流量を算出した。さらに、次式より、志津川湾の各河川(添え字rで示す)から湾奥部の単位面積当たりの各態栄養塩供給量(添え字iで栄養塩の種類を示す) T_{ri}[mg m⁻² day⁻¹]を算出した。

$$T_{ri} = Q_r \times M_{ri} / A$$

ここで、Q_rは志津川湾に注ぐ河川rの流量[L day⁻¹]、M_{ri}は志津川湾に注ぐ河川rの平均各態栄養塩iの濃度[μg L⁻¹]、Aは志津川湾湾奥部面積(13.8km²)である。



図(2)-7 志津川湾に流入する主要3河川である八幡川(赤実線)、水尻川(青点線)、折立川(緑破線)の各態栄養塩濃度の推移。

(3) 河川からの各態栄養塩供給量の推定

志津川湾に注ぐ主要3河川河口における各態栄養塩濃度1年半にわたって得ることができた(図(2)-7)。年間の変動幅は、NH₄-Nで0.2~59.6 μmol L⁻¹、NO₂+NO₃-Nで0.6~114.6 μmol L⁻¹、PO₄-Pで0.1~22.6 μmol

L^{-1} 、 $Si(OH)_4-Si$ で $2.3\sim 930.4\ \mu mol\ L^{-1}$ であった。それぞれの栄養塩濃度に季節的傾向は確認できなかった。N/P比は折立川の一部を除いて、レッドフィールド比 (C:N:Si:P = 106:16:15:1というモル比) を上回る値であり、河口域では植物プランクトンの増殖に必要な PO_4-P に対して高濃度の窒素が常時供給されていると考えられる。N/Si比は水尻川と折立川のいくつかの試料で1を上回ったものの、常に高濃度の $Si(OH)_4-Si$ が供給されていた。年間平均 NO_2+NO_3-N は水尻川で最大値 $63.2\pm 24.8\ \mu mol\ L^{-1}$ を、年間平均 NH_4-N は八幡川で最大値 $3.2\pm 2.9\ \mu mol\ L^{-1}$ を示した。また、DINとして供給される窒素の内、そのほとんどが NO_2+NO_3-N であり、 NH_4-N と NO_2+NO_3-N はいずれも折立川で最小値となった。反対に、年間平均 PO_4-P は折立川で最大値 $0.9\pm 0.4\ \mu mol\ L^{-1}$ を示した。年間平均 $Si(OH)_4-Si$ は八幡川で最大値 $221.1\pm 96.4\ \mu mol\ L^{-1}$ を示した。各河川の各態栄養塩濃度と比流量の間には相関関係は見られなかった。

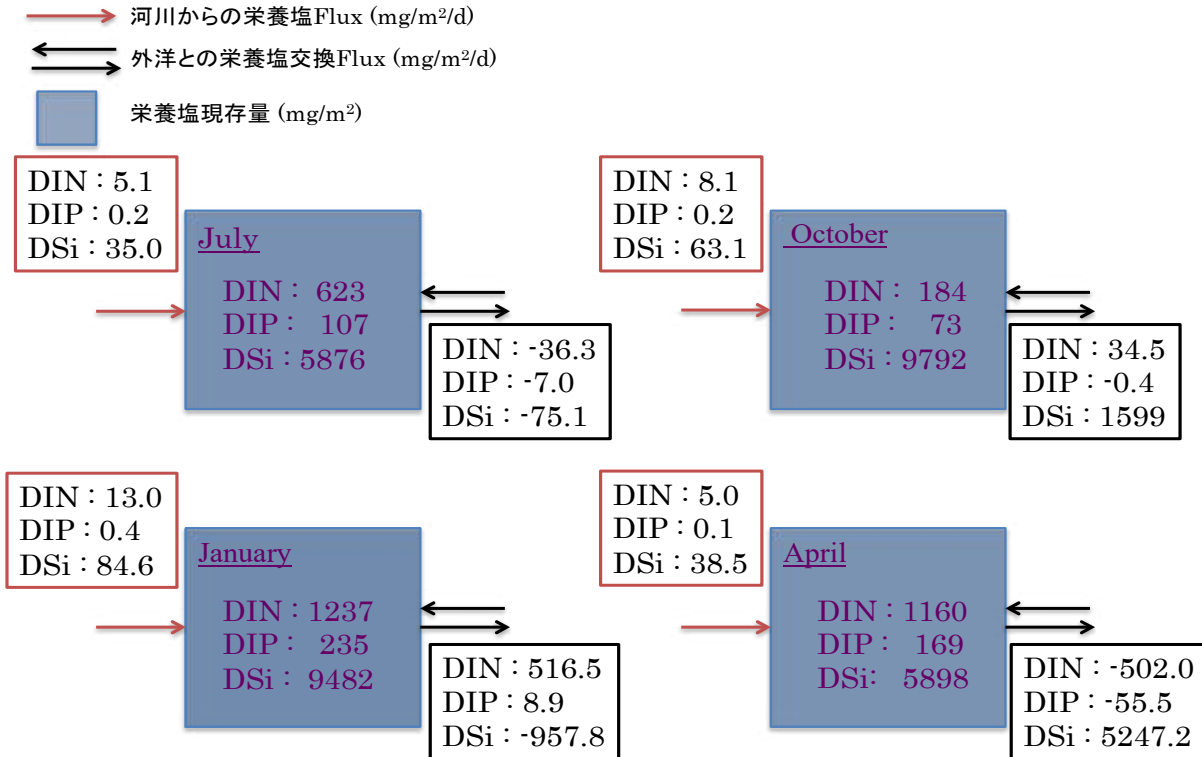
観測期間を通して、流量は9～10月に多く、3～4月に少なくなる傾向を示した。各態栄養塩供給量はいずれも、流域面積の大きい八幡川が最も大きかった。また、各河川流量と NO_2+NO_3-N 、 PO_4-P および $Si(OH)_4-Si$ 供給量は正の相関が見られ、流量の違いが栄養塩供給量を支配していた。志津川湾内に注ぐ他の中小河川の各態栄養塩濃度を主要3河川の各態栄養塩濃度の平均値と仮定し、全流域面積から推定した全河川流量を用いて、志津川湾に流入する全河川栄養塩供給量を算出した。

全河川からの湾奥部単位面積当たりへの各態栄養塩供給量の年間平均は、 NH_4-N で $0.9\pm 0.8\ mgN\ m^{-2}\ day^{-1}$ 、 NO_2+NO_3-N で $17.6\pm 13.7\ mgN\ m^{-2}\ day^{-1}$ 、 PO_4-P で $0.3\pm 0.2\ mgP\ m^{-2}\ day^{-1}$ さらに $Si(OH)_4-Si$ で $65.0\pm 49.9\ mgSi\ m^{-2}\ day^{-1}$ であった。2015年度の河川からの年間総栄養塩供給量は NH_4-N で $407\ mgN\ m^{-2}$ 、 NO_2+NO_3-N で $6661\ mgN\ m^{-2}$ 、 PO_4-P は $91\ mgP\ m^{-2}$ 、 $Si(OH)_4-Si$ では $22605\ mgSi\ m^{-2}$ となり、河川からのSiの供給が多い火山地帯の特徴を反映していた。年間栄養塩供給量の内、八幡川からの供給が NH_4-N で43 %、 NO_2+NO_3-N については46 %、 PO_4-P は39 %、 $Si(OH)_4-Si$ では47 %を占めていた。

河川からの栄養塩供給能力を評価するために、河川からの1日当り栄養塩供給量が湾奥部の栄養塩現存量 (表(2)-1) の何割に相当するかを計算した。河川からのDIN供給量は1月が $26\ mgN\ m^{-2}\ day^{-1}$ と1年で最も多くなっており、これは湾奥部の栄養塩 (DIN) 現存量 $1436\ mgN\ m^{-2}$ の約2%を1日で供給するものと推定できた。また2014年7月に湾内の1 %程度に相当する一方、2015年7月には最大11 %を占めることがわかった。これは、降雨などの突発的なイベントによって湾内に供給される栄養塩供給量が変動するためである。7月は湾内のDIN濃度が低下し、N/P比がレッドフィールド比を下回っていたため、DINの供給源として河川が大きな役割を担っていたと考えられる。河川からの PO_4-P 供給量は年間を通して湾奥部の PO_4-P 現存量に対して1 %を下回っており、河川が果たす湾内 PO_4-P 現存量に対する役割は極めて小さかった。一方、 $Si(OH)_4-Si$ 供給量は5月に最大29% (湾内の現存量に対して) に相当した。

表(2)-1 志津川湾の海水中栄養塩現存量の四季変化($mg\ m^{-2}$)。

季節	DSi	DIN	DIP
春 (4月)	5898	1100	169
夏 (7月)	5876	623	107
秋 (10月)	9792	184	73
冬 (1月)	9482	1237	735



図(2)-8 志津川湾海水中の栄養塩現存量 (mg m⁻²) と河川からの栄養塩流入フラックス (mg m⁻² day⁻¹) および外洋からの栄養塩交換フラックス (mg m⁻² day⁻¹) の季節変化。

(4) 外洋から湾内への各態栄養塩供給量の算出

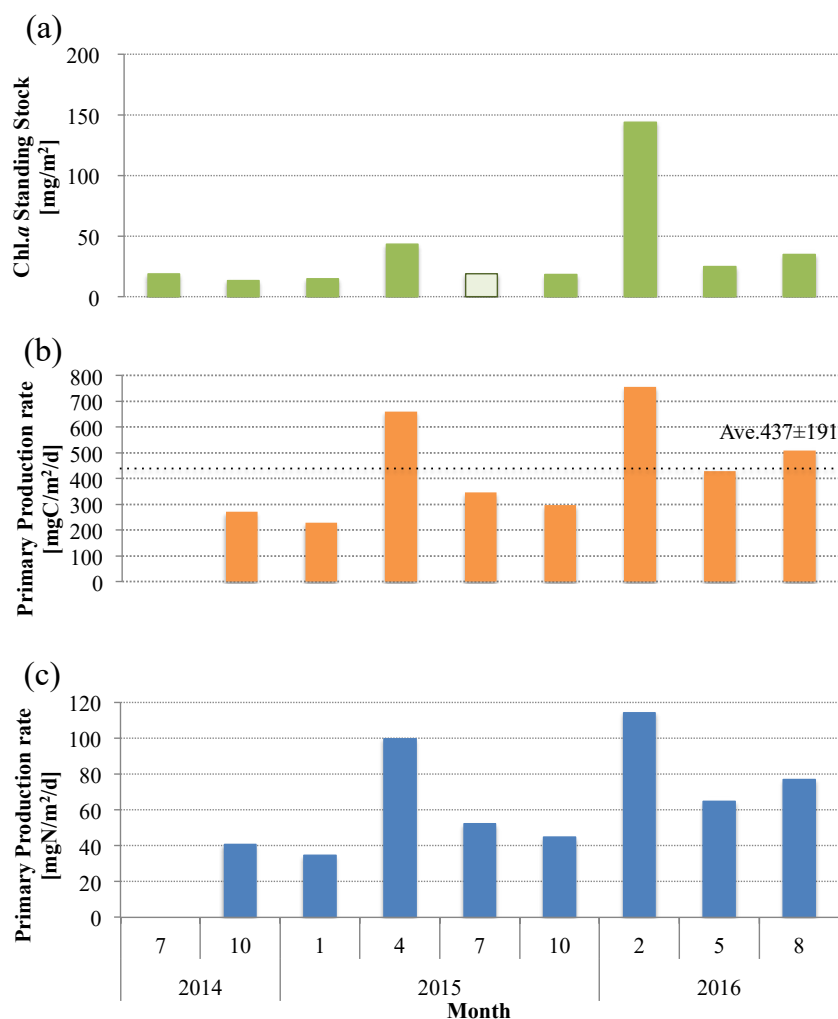
湾内に設定した定点のうち、最も外海側に位置する定点付近に南北に引いた線の外側を湾外と仮定して、海面から海底まで、水深5m間隔で、20m以深は1層とし、それぞれの断面積を水路図から算出した。ADCP観測による断面解析結果をもとに、観測日に近い大潮および小潮の上げ潮時、下げ潮時の平均潮流流速を各層について推定し、上げ潮時を流入、下げ潮時を流出として、各層の断面積と平均潮流流速を乗じて上げ潮時の流入量と下げ潮時の流出量を求めた。湾外とした定点の上述の各層の各態栄養塩濃度 [mg m⁻³] を各層の流入流出量に乗じて、各層ごとの各態栄養塩の流入流出量の質量を求め、流入量質量と流出量質量の差 (流入量質量を正とし、流出量質量を負として) を求めた。算出した小潮と大潮の2回の各態栄養塩流入流出量の質量について各層ごとに平均し、観測時期の平均の流入流出量質量とした。1日当たりの各層の各態栄養塩流入流出量質量について、それぞれで合計したものを湾内-湾外間の各態栄養塩流入流出量質量とした。最後に、湾奥部面積 (13.8km²) で除し、湾奥部単位面積当たりの外洋からの各態栄養塩流入流出量質量とした (3)、(4) に示した情報を基にして、志津川湾海水中の栄養塩現存量と河川および概要からの栄養塩やり取りの季節変化を図(2)-8に示した。

(5) 湾内の水中基礎生産速度推定

エスチュアリー (河口域) に存在する植物プランクトンを始めとする微細藻類の基礎生産 (光合成) 速度は光や栄養塩制限、鉛直混合や塩分勾配などによってダイナミックに変動する。志津川湾も同様に、海水交換や陸上由来物質の流入、養殖生物による影響等により、栄養塩や光環境が季節により大きく変化すると考えられる。そこで本研究では志津川湾内において水柱の基礎生産速度を定量することで志津川湾の生物生産を支える微細藻類の役割を評価した。

本研究で得られた基礎生産速度は2015年4月と2016年2月に高く、最大で756mgC m⁻² day⁻¹、2015年1月に最小値230 mgC m⁻² day⁻¹を示し、年間平均は437±191mgC m⁻² day⁻¹であった (図(2)-9)。この値は炭素

ベースの値なので、湾内の物質循環図を完成させるため、レッドフィールド比から窒素 (N) ベースの基礎生産速度を算出すると、最大値は $114 \text{ mgN m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 、最小値は $35 \text{ mgN m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であり、年間平均は $66 \pm 29 \text{ mgN m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であった。基礎生産速度はChl. *a*濃度に依存して増減していた。

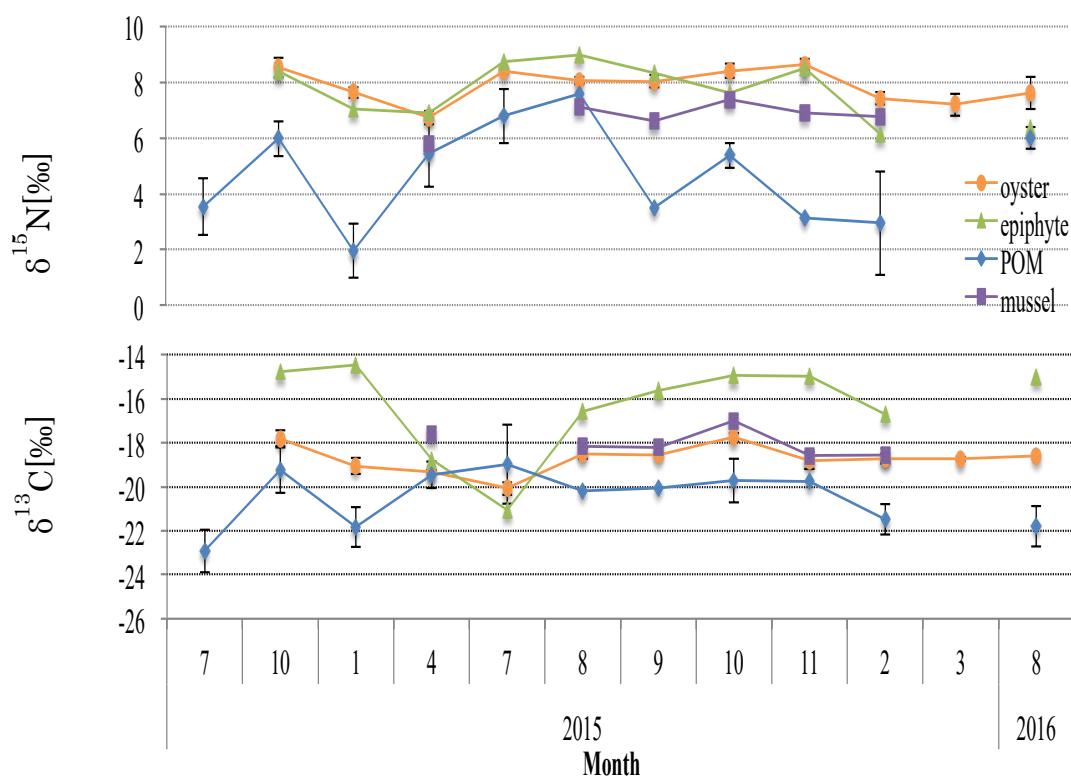


図(2)-9 志津川湾奥部のChl. *a*現存量(a)、炭素ベース基礎生産量(b)、窒素ベース基礎生産量(c)の2014年7月から2016年8月までの季節変化。

(6) 安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$) から見たカキの餌料推定

図(2)-10に粒状有機物 (Particulate Organic Matter: POM)、マガキ、マガキの殻に付着していた付着藻類の $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ の季節変動を示す。マガキの $\delta^{13}\text{C}$ は $-20.1 \sim -17.8$ の範囲で変動し、10月に最大値、7月に最小値を示した。 $\delta^{15}\text{N}$ は $6.7 \sim 8.6$ ‰の範囲で変動し、11月に最大値、4月に最小値を示した。カキ養殖の垂下連のロープ長は7mであるが、それぞれ表層付近と7m深付近でのカキの $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ 値に差は見られなかった。付着藻類の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ はそれぞれ $-21.1 \sim -14.4$ ‰、 $6.1 \sim 9.0$ ‰の範囲で変動しており、10月と1月に最大値、7月に最小値を示した。これらの結果は、カキ自身や養殖ロープから脱着した微細藻類をろ過し、摂餌している可能性を強く示唆している。

マガキの主な餌資源は水柱植物プランクトンと付着微細藻類のみであると仮定し、2016年8月における湾内のマガキとその餌資源 (水柱植物プランクトンと付着微細藻類) の安定同位体比を比較すると、マガキの $\delta^{13}\text{C}$ の値は水柱植物プランクトンと付着微細藻類の間の値をとり、カキが付着微細藻類を餌資源としている可能性が強く示唆された。

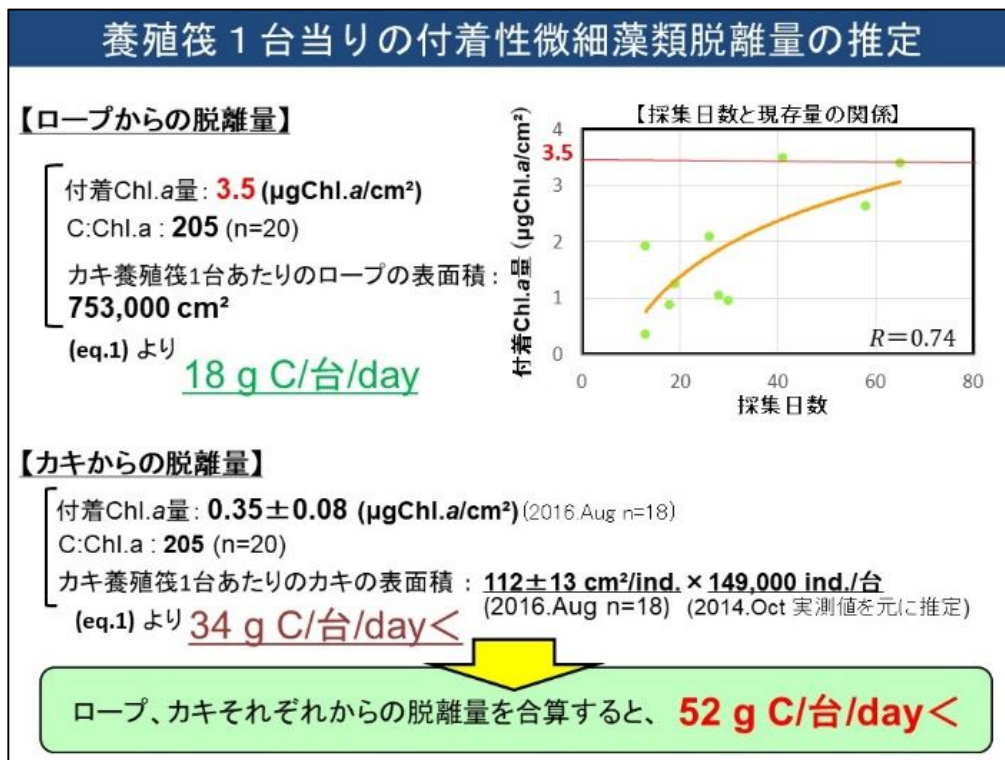
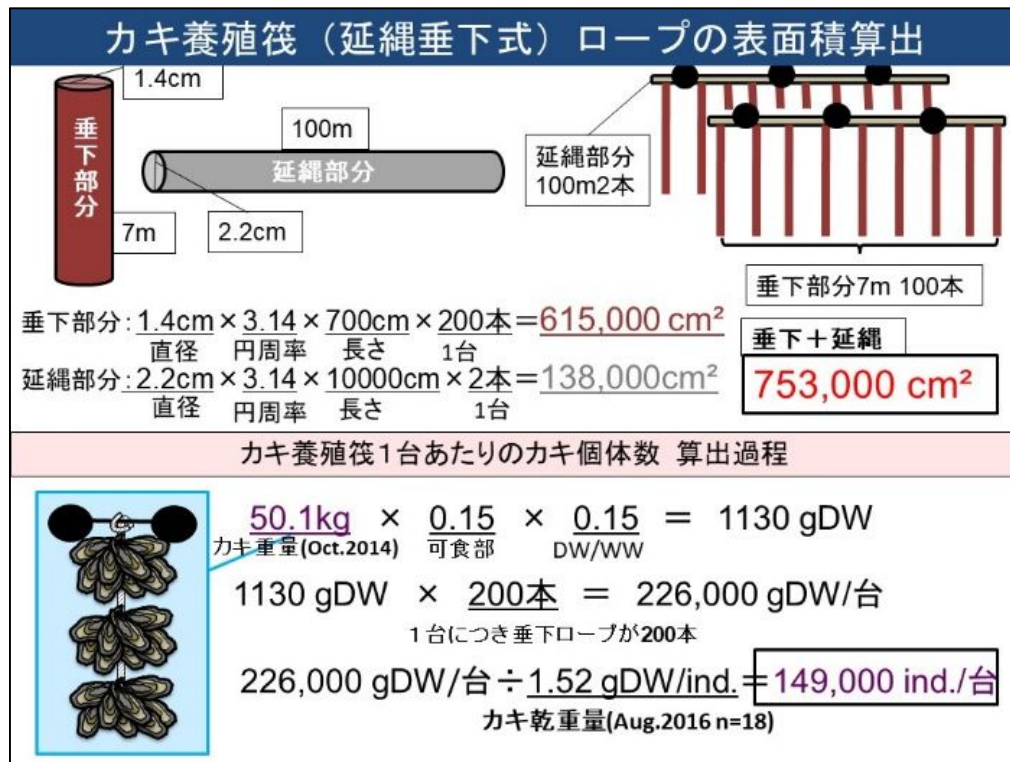


図(2)-10 志津川かき養殖場で採取したカキ、イガイ、付着微細藻類および水柱懸濁態有機物の窒素（上）と炭素（下）の安定同位体比の2014年7月から2016年8月までの季節変化

(7) カキ養殖筏からの付着微細藻類の離脱量の推定

付着藻類が実際にカキの餌料として機能しているのかどうかを確かめるために、現場での付着増殖試験と脱着量の定量化を試みた。志津川湾現地で実際に利用されているものと同じ垂下連の養殖ロープを20 cm長で14本用意し、志津川湾の養殖筏に取り付け、2016年5～11月の間、2・4・8週間の3期間で微細藻類を付着させ回収した(図(2)-4)。各期間で回収した2本のロープを半分に分断して4本とし、そのうちの1本はろ過海水を1L入れた容器の中で、ブラシを用いて丁寧にこすり、微細藻類を除去した。除去した微細藻類をWhatman GF/Fフィルターで捕集し、Chl. *a*・CN・炭素窒素安定同位体比分析を行った(図(2)-5)。残りの3本については、現地で採水しろ過した海水を500ml入れたボトルに1本ずつ吊るし、日長を明暗12時間、水温15～20°Cとし、4・8・12日の間室内培養実験を行った。培養後、これらのロープは上記と同様の処理、化学分析を行った。ボトル内の海水については、フィルターでろ過したものを、分取し-30°Cで冷凍保存した。

現場実験で得られた微細藻類の付着量 ($\mu\text{gChl. } a \text{ cm}^{-2}$) と脱着量 ($\mu\text{gChl. } a \text{ cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$) の間には有意な相関が確認できた ($R^2=0.3665$, $n=19$, $\alpha<0.01$)。また、付着量は約2か月で飽和し、 $3.5 \mu\text{gChl. } a \text{ cm}^{-2}$ となったことから、夏季の養殖ロープには同量の藻類が常に付着していると考えられた。飽和量である $3.5 \mu\text{gChl. } a \text{ cm}^{-2}$ と回帰式より、養殖ロープからは1日当たり $0.051 \mu\text{gChl. } a \text{ cm}^{-2}$ 脱着していることが示唆された。これにカキ養殖筏1台のロープ表面積 $753,600 \text{cm}^2$ を乗ずると(図(2)-11上図)、養殖筏1台・1日当たりの脱着量は、 $0.038 \text{ gChl. } a$ (18gC)となる。また8月におけるカキの殻表面の付着量は $0.35 \mu\text{gChl. } a \text{ cm}^{-2}$ で、平均表面積は 112cm^2 であった。養殖筏1台にマガキが245,000個体養殖されていると仮定すると、カキ養殖筏1台当たりのマガキの殻表面からは1日当たり $0.012 \text{ gChl. } a$ (34gC)脱着していることになる(図(2)-11下)。



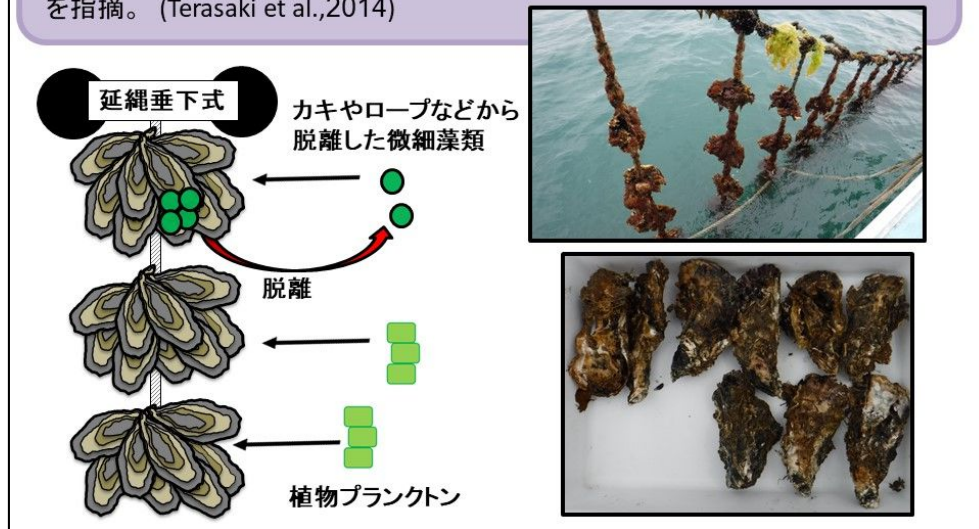
図(2)-11 カキ養殖筏1台当たりの、ロープの表面積とカキ個体数の算出方法（上）およびロープとカキ殻表面からの付着珪藻類脱離量推定方法（下）の説明。

(8) ろ過食者による栄養塩再生を伴う物質循環系駆動の定量化

マガキの垂下養殖はマガキが摂餌できる微細藻類を自らガーデニングするかのごとく栽培していることにより、結果として湾内の生物生産効率の向上に大きく寄与していることが明らかとなった(図(2)-12)。それだけではなく、微細藻類は、次に述べる理由からマガキと共生関係にある。

養殖マガキの摂食生態(ガーデニング)

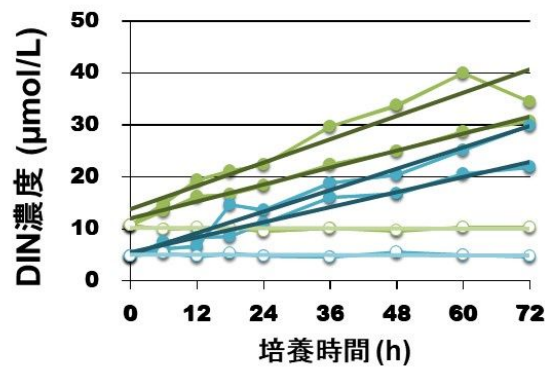
- ・カキは水柱の懸濁物をこしとることで摂餌を行う。
- ・ホタテが殻や養殖ロープから脱離した微細藻類を摂餌している可能性を指摘。(Terasaki et al.,2014)



図(2)-12 カキ養殖筏におけるカキのガーデニングの説明図。養殖ロープおよびカキ殻表面が微細藻類の付着基質となり、カキが微細藻類をあたかもガーデニング(栽培)しているように見える。

マガキの栄養塩再生速度

近似直線の傾きから栄養塩再生速度を算出



$$\text{SLOPE oyster} - \text{SLOPE control} = \text{SLOPE correct } (\mu\text{mol/h} \cdot \text{L})$$

$$\text{SLOPE correct } (\mu\text{mol/h} \cdot \text{L}) \times V (\text{L}) / \text{g 軟体部DW}$$

$$= \text{栄養塩再生速度 } (\mu\text{mol/h} \cdot \text{g 軟体部DW})$$

図(2)-13 マガキの栄養塩再生速度推定方法の説明。培養時間にほぼ平行する線2本は対照実験区のデータに当てはめた近似直線を、培養時間に対して右上がりの直線4本は、2試験区2回の実験で得られたデータに当てはめた近似直線を示す。マガキの栄養塩排泄速度産出方法はグラフ下部に示す。

一次消費者としてのマガキの機能的役割は、基礎生産物（植物）を肉に変換するだけでなく、排泄による栄養塩再生を介して、再び基礎生産者に栄養塩を供給することもあると予想される。そこで、マガキの摂餌・排泄能力を定量化する。

マガキの摂餌および栄養塩再生能力測定実験には、給餌区、無給餌区、コントロール区のそれぞれ2基の水槽を準備して、餌料として珪藻 (*Chaetoceros gracilis*) を与えた。実験は72時間行い、明暗周期は12L:12Dとした。温度条件は10°C、および20°C区を準備してそれぞれ複数回実施した。実験中は、適宜海水試料と排出された糞粒を採取して後の分析に供した。経過時間あたりの液体排泄栄養塩量の変化を、最小二乗法によって近似直線で表し、その傾きを用いて栄養塩再生速度を算出した(図(2)-13)。また、糞粒1gが1時間あたりに溶出した栄養塩量に、糞粒を採取した実験の前処理において算出した糞粒の排泄速度を乗ずることで、マガキ軟体部乾燥重量1gあたりに溶出した栄養塩量を算出した。

本実験で用いたマガキ軟体部乾燥重量と培養水温を、よく知られているろ過水量式にあてはめると、水温が10°C、および20°Cの時の1日あたりろ過水量はそれぞれ、20L gDW⁻¹、200L gDW⁻¹となった。このろ過水量を湾内の平均Chl. *a*濃度(μg L⁻¹)を乗じ、養殖場水域におけるマガキの1日あたり摂餌量をChl. *a*ベースで算出したところ、それぞれ約30 μgChl. *a* gDW⁻¹、200 μgChl. *a* gDW⁻¹となる。

給餌・無給餌実験によって得られた栄養塩再生速度を表(2)-2に示した。栄養塩再生速度は、DINでは0.12~2.66 μmol h⁻¹ gDW⁻¹、DIPでは0.008~0.19 μmol h⁻¹ gDW⁻¹となった。一連の実験で得られた栄養塩再生速度と志津川湾の栄養塩現存量を比較し、1日あたりに養殖マガキを通して再生される割合を求めるところを試みる。養殖場に垂下されている全マガキ分に換算すると、年間平均で算出した液体排泄による栄養塩再生速度は、DINでは2.68kmol day⁻¹、DIPでは0.19kmol day⁻¹、糞粒の溶出による栄養塩再生速度は、DINでは0.36kmol day⁻¹、DIPでは0.013kmol day⁻¹となった。また、季節的定点観測結果から、養殖場内に存在する年間平均のDINとDIPの現存量は、それぞれ38.5kmol、2.81kmolと見積もられた。以上のことから、養殖マガキの1日あたりの栄養塩再生量は、養殖海域の栄養塩プールの約7~8%に相当すると考えられ、予想したようにマガキ養殖が志津川湾内の栄養塩循環過程において、大きなインパクトを持つことが明らかとなった。

表(2)-2 マガキ飼育実験により求めた軟体部単位質量当たり液体排泄による栄養塩再生速度

季節	培養水槽	DIN	DIP
		液体排泄(μmol h ⁻¹ gDW ⁻¹)	液体排泄(μmol h ⁻¹ gDW ⁻¹)
10月 (20°C)	餌添加区	2.04	0.15
	餌無添加区	1.91	0.046
1月 (10°C)	餌添加区	0.94	0.073
	餌無添加区	0.36	0.014
4月 (10°C)	餌添加区	0.20	0.032
	餌無添加区	0.14	0.019
7月 (20°C)	餌添加区	1.92	0.11
	餌無添加区	0.52	0.056

マガキによる摂餌速度や栄養塩排泄量を算出するために、各月毎の湾内のマガキ現存量を推定した。志津川湾のカキ養殖ロープ1本あたりのマガキおよび付着物重量は、2014年10月に実測した湿重量ベースで84.4kgであり、この内マガキは50.1kgであった。他の生物はイガイを中心として34.3kg付着していた。志津川湾内のマガキの殻付き重量あたり剥き身重量、および剥き身湿重量当たり、むき身乾燥重量は15%であったことから、マガキの養殖垂下連のロープ1本あたりマガキ軟体部乾燥重量は1.1kgと推定された。湾内養殖筏台数は583台存在し、養殖筏1台あたりに垂下連ロープ100本を付けた水平方向のロープが2本付いていることから、志津川湾内奥部のマガキ現存量はむき身乾燥重量で129.0tonと推定された。2014年10月のマガキのむき身乾燥重量あたり、炭素含有量は47%、窒素含有量は16%であったことから、2014年10月における湾内マガキ炭素ベース、窒素ベース現存量は乾燥重量でそれぞれ60.6tonC、20.6tonNであった。

(9) マガキ餌要求量の推定とそのインパクト

マガキの懸濁物捕捉量は1年を通して炭素ベースで3.2~18.9mgC day⁻¹ ind.⁻¹窒素ベースで0.4~2.3mgN day⁻¹ ind.⁻¹の範囲で変動しており、7月に最大値を示した。湾奥部水柱1m²あたりに養殖ロープが1本垂下されていると仮定して、養殖ロープ1本あたりのマガキの乾燥重量換算の現存量(1月:0.4kg, 10月:1.1kg)をマガキの平均乾燥重量(1月・10月ともに1.1gDW)で除することにより、養殖ロープ1本あたりのマガキの個体数を算出し、懸濁物捕捉量とマガキの同化率(0.746)を乗じることで、湾奥部単位面積あたりマガキの餌要求量を算出した。結果は1月に1.7gC m⁻² day⁻¹、0.2gN m⁻² day⁻¹、10月に9.3gC m⁻² day⁻¹、1.1gN m⁻² day⁻¹であった。

志津川湾でのマガキは7月から8月に放精放卵、1月に出荷の盛期を迎えることから、今回算出した1月および10月のマガキ現存量はそれぞれ最小値、最大値を示していると言える。志津川湾では、水柱1m²あたりに養殖ロープ1本分が垂下されていると仮定し、同化されなかった分の懸濁態有機物をマガキからの排泄物と仮定すると、1月に564mgC m⁻² day⁻¹、73mgN m⁻² day⁻¹、10月に3,194mgC m⁻² day⁻¹、394mgN m⁻² day⁻¹であり、マガキ養殖場直下での沈降粒子束(1月:275mgC m⁻² day⁻¹、29mgN m⁻² day⁻¹、10月:4,831mgC m⁻² day⁻¹、427mgN m⁻² day⁻¹)によく一致していた。したがって、マガキ養殖場直下で採取された沈降粒子はほとんどがマガキからの糞粒由来であると考えられた。

(10) 湾内主要養殖種マボヤの物質輸送能力

志津川湾ではマガキだけではなく、マボヤも湾内の主要養殖生物の一つである。そこでマボヤの物質輸送能力を濾水速度と摂餌量から算出した摂餌速度と比較し、その妥当性を検証する。さらに、養殖現場におけるマボヤの餌起源推定も行い、それらを踏まえて実際の現場環境においてマガキと同様にマボヤが物質循環に及ぼす影響を定量的に評価する。

マボヤの摂餌や排泄に関する室内実験は、先に示したマガキとほぼ同様の系を用いて実施した。餌料としては、珪藻*C. gracilis*を各実験水槽に既知濃度となるように添加し、短時間でのマボヤの濾水速度・摂餌速度推定実験を行った。摂餌速度は0.28~1.53μgC h⁻¹ gDW⁻¹で変動し、0~18時間と43~66時間における摂餌速度よりも43~49時間における摂餌速度は有意に大きかった。排泄された栄養塩濃度については、各水槽でNH₄-N、NO₃-N濃度が大きく上昇し、NO₂-N濃度はほとんど変化しなかった。DINは全て的水槽で単調増加し、1個体平均1.9μmol h⁻¹ ind.⁻¹、単位乾燥重量当たり6.7μgN h⁻¹ gDW⁻¹という高い排泄速度が見られた。N/P比は20前後でありレッドフィールド比(N/P=16)よりも高くなった。

これらのデータを用いて志津川湾内におけるマボヤが駆動する物質循環の推定を行った。マボヤが養殖されている水域のChl. *a*濃度の年間平均値は2.2μgChl. *a* L⁻¹であり、室内実験から算出される摂餌速度は91.9μgC h⁻¹ gDW⁻¹であった。この摂餌速度にPOM、付着藻類、動物プランクトンの寄与率を考慮し、2016年のマボヤ平均資源量904tonから志津川湾奥部全体(13.8km²)において1年間にマボヤが駆動する炭素及び窒素循環を推定した。窒素ベースで見ると、志津川湾の窒素循環は外洋との海水交換に大きく左右されている。外洋からのDIN流入量のうち、少なくとも16%が一次生産に利用され、それを摂餌したマボヤとマガキの液体排泄によって外洋からのDIN流入量の6.4%が直接還元されていることが分かる。

これは河川流入の17.6%に達し、約2週間で一次生産分を補填できるほどの速度である。マボヤの資源量、摂餌速度はともにマガキの3割程度であるが、排泄される糞量は実にマガキの3倍にも達する。窒素排泄物に占める糞量がマガキでは6.8%しかないがマボヤでは64%にもなり、海底への窒素輸送にマボヤが大きく影響していることが分かった。

(11) 本研究により得られた成果

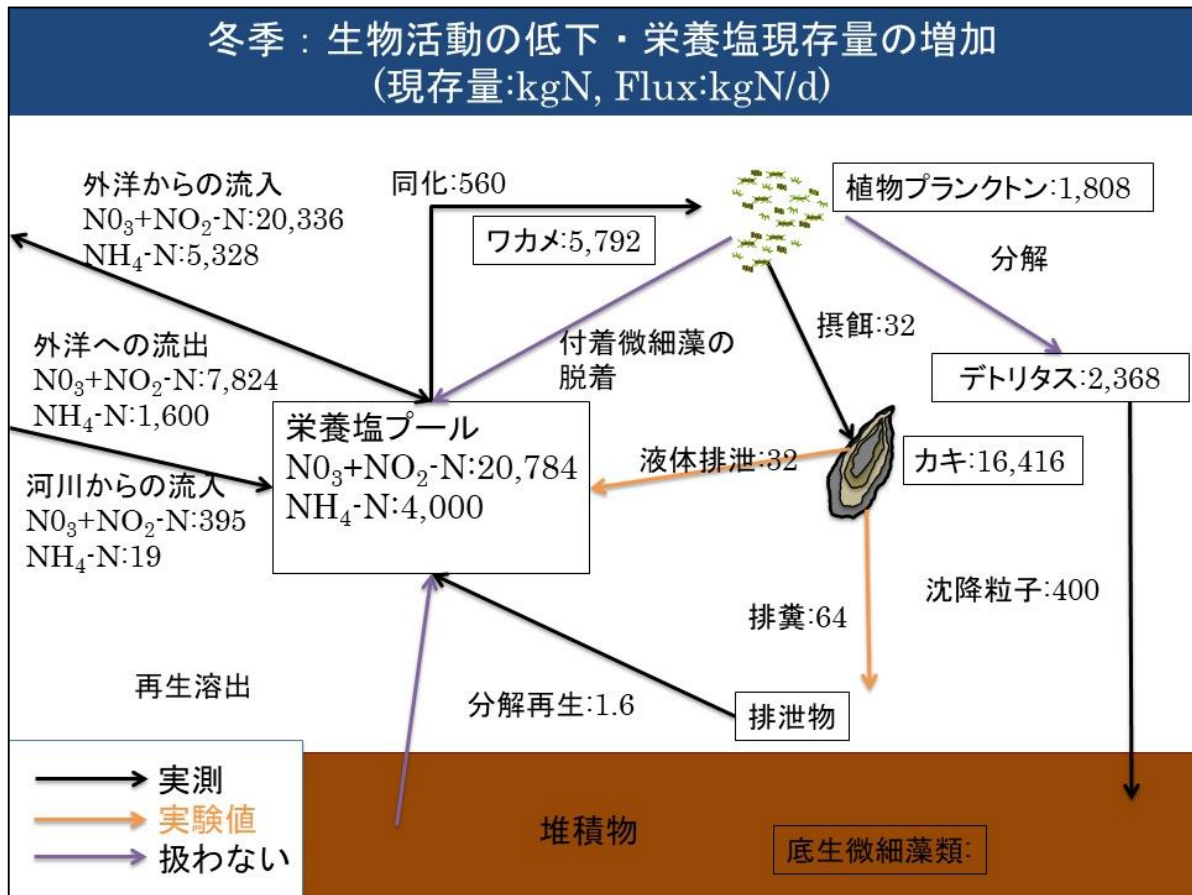
志津川湾における四季の窒素循環

結果及び考察に示したように、本研究で得られたデータを元に、志津川湾奥部における窒素循環図を作成した(図9a, b, c, d)。得られた図は2015年度の志津川湾における四季に渡る窒素フラックス[$\text{mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$]および窒素ストック(現存量)[mg m^{-2}]を表している。マガキからの栄養塩再生速度は液体排泄、および個体排泄のデータを使用し、志津川湾奥部面積(13.8km^2)で除することにより算出した。植物プランクトン現存量はPOC/Chl. *a*を重量比50と仮定して0~20m深までの積算のChl. *a*現存量に乘じ、さらにレッドフィールド比($C/N = 6.6$)から窒素ベースで算出した。なお、デトリタス現存量はこの値とPON現存量の0~20m深までの積算値との差から算出している。

$$\text{デトリタス現存量} = \Sigma \text{PON} - 50/6.6 \Sigma \text{Chl. } a$$

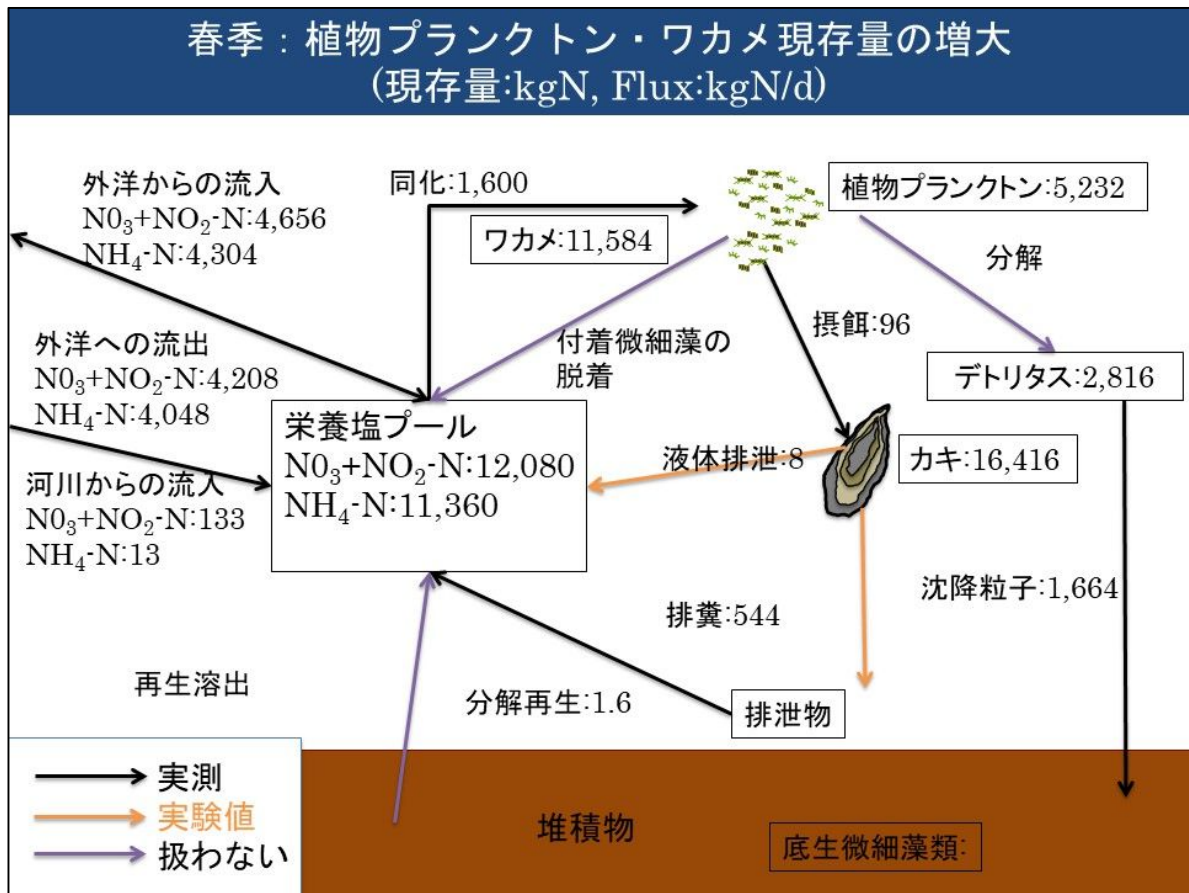
また、栄養塩現存量も0~20m深までの積算値とした。さらに2015年10月のマガキ現存量としては2014年10月の値を用い、その他の月については10月のマガキ現存量から漁獲量を差し引いた値を使用した。これについては志津川湾の7・8月の放精放卵後から10月がマガキ成長のピークとされているため、本研究の観測間隔では成長速度を考慮しなくても十分現存量を把握できると考えたためである。単位はストックを mgN m^{-2} 、フラックスは $\text{mgN m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ として、それぞれ湾奥部での現存量、湾奥部に対する流出入量(流入は+、流出は-)とした。

次に、各季節の栄養塩循環について図でしめす。それぞれの図の細部のデータをきちんと把握できるように図を大きくし、わかりやすいように季節ごとに1ページとした。



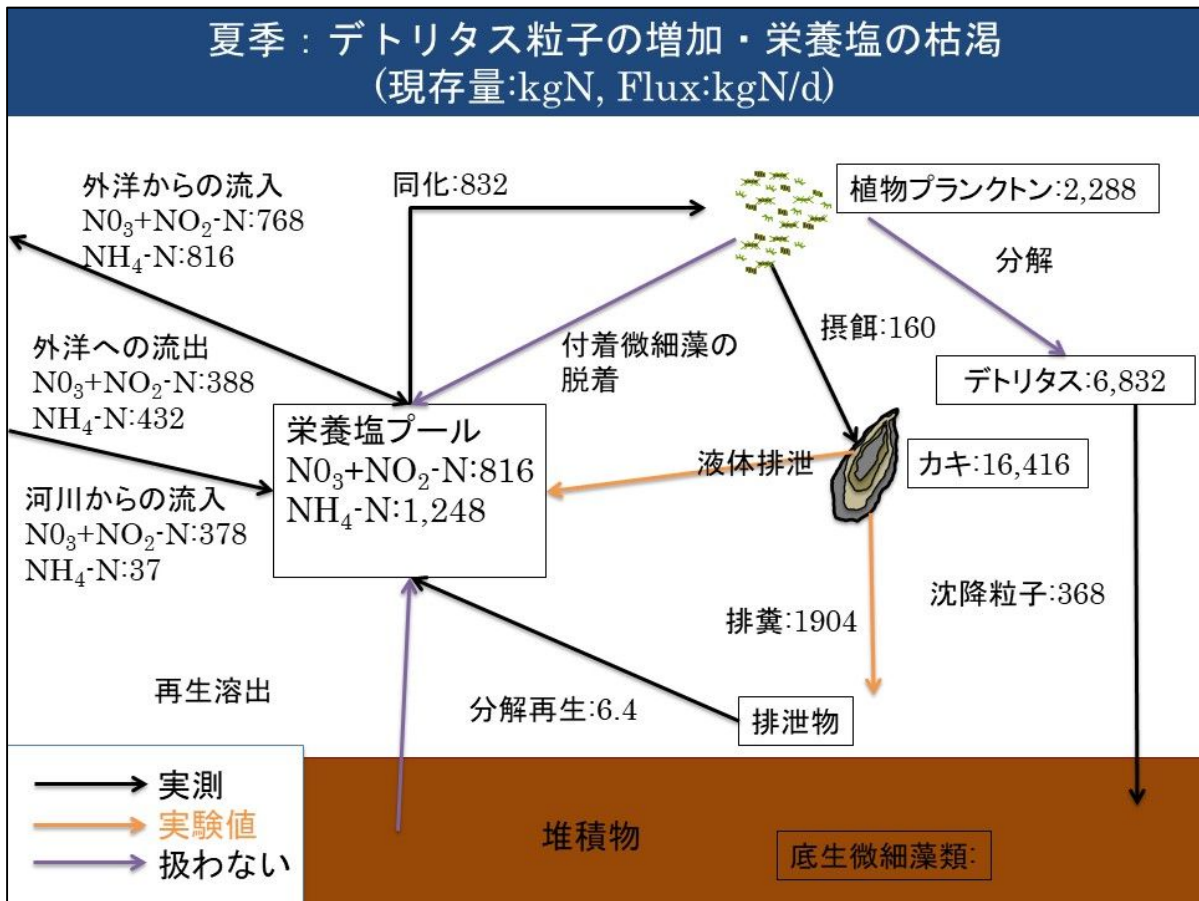
図(2)-14 冬季の志津川湾湾奥部における窒素循環。現存量(kgN)は長方形の枠で、フラックス(kgN day⁻¹)は矢印で、実測値は黒色で、実験値は橙色で、扱わないフラックスは紫色で表す。

この計算の結果、2015年1月には窒素栄養塩プールは最大となり、生物の取り込みアクティビティは低下していたことがわかる。この時期は外洋のNO₂+NO₃-N濃度が高かったため、外洋からのフラックスが大きくなっており、基礎生産速度は1日当たり、湾内栄養塩プール全量の2%程度を消費する程度であった(図(2)-14)。



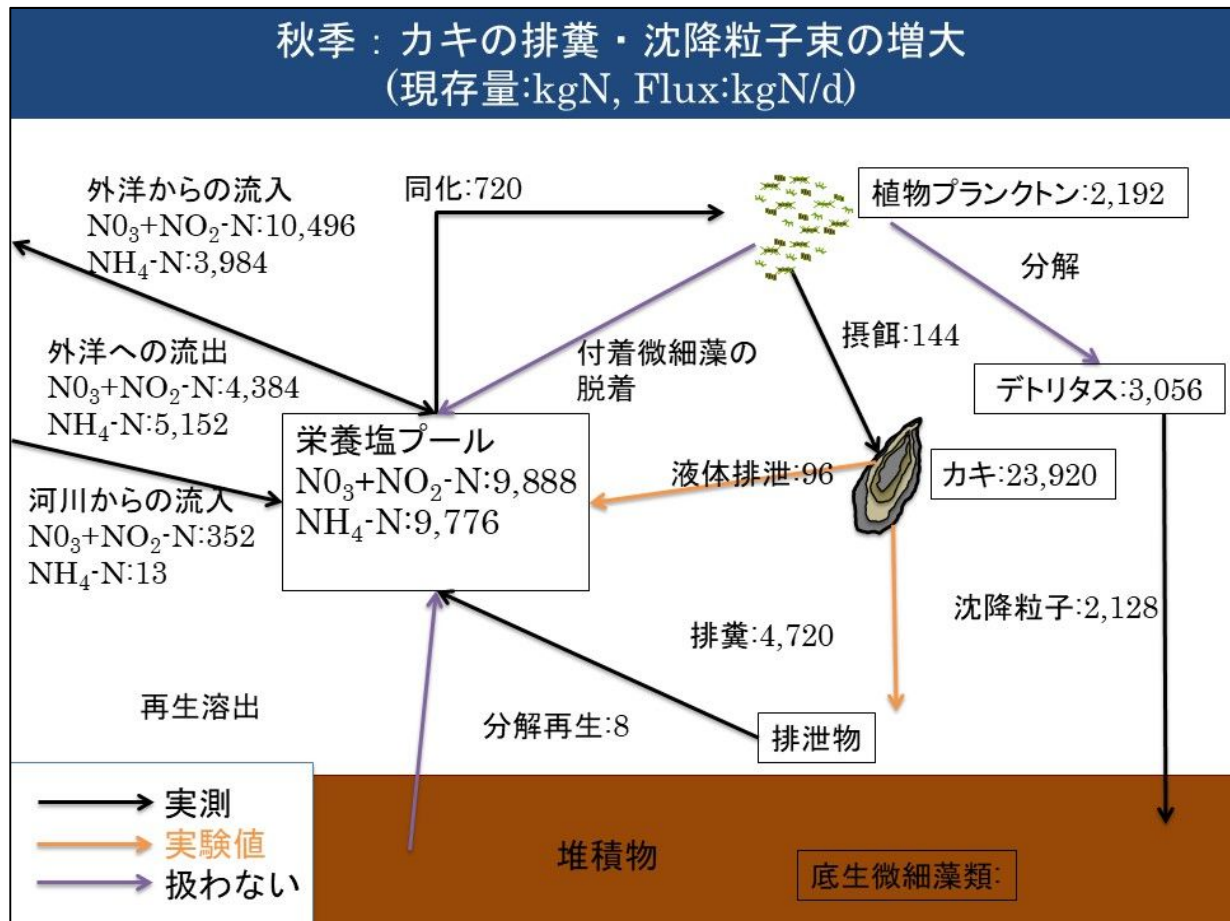
図(2)-15 春季の志津川湾湾奥部における窒素循環。現存量(kgN)は長方形の枠で、フラックス(kgN day⁻¹)は矢印で、実測値は黒色で、実験値は橙色で、扱わないフラックスは紫色で表す。

2015年4月は植物プランクトンの現存量が多く、基礎生産速度も高かったことから、窒素ストックとして植物プランクトンの寄与が大きいことがわかる(図(2)-15)。この時の基礎生産速度は外洋からの流入量の20%近くを消費していた。また降雨が少なく河川からの栄養塩供給が少なかったため、4月は外洋からの流入が主要な窒素供給源であった可能性が高い。



図(2)-16 夏季の志津川湾湾奥部における窒素循環。現存量(kgN)は長方形の枠で、フラックス(kgN day⁻¹)は矢印で、実測値は黒色で、実験値は橙色で、扱わないフラックスは紫色で表す。

2015年7月はデトリタスが多く、栄養塩プールが枯渇に近い状態であった(図(2)-16)。この時期は黒潮接岸時期であり、外洋が貧栄養塩な黒潮系水が卓越する環境であったと考えられる。したがって、外洋に大きく影響を受ける半開放性内湾においては、この時期の湾内栄養塩プールが枯渇するのは当然である。しかしながら、河川からの栄養塩供給量は栄養塩プールに対して相対的に寄与が増加しており、外洋からの栄養塩供給のみでは志津川湾内部での生物生産を支えられない可能性もある。一方で、POC/Chl. *a*比とC/N比から推定したデトリタスのNが多かったのは、高水温によって細菌が増加し、浮遊粒子の分解が進んだためと考えられる。またカキ養殖場下からの沈降粒子量はピーク時よりも少なかったが、これは7月に表層で成層化していたために、水温躍層を挟む上層で粒子がトラップされているものと思われる。



図(2)-17 夏季の志津川湾奥部における窒素循環。現存量(kgN)は長方形の枠で、フラックス(kgN day⁻¹)は矢印で、実測値は黒色で、実験値は橙色で、扱わないフラックスは紫色で表す。

2015年10月はカキ養殖量がピークで、かつ7月に比べ成層化が緩和されたために養殖場下の沈降粒子量が増加したと考えられる(図(2)-17)。カキの窒素ストックは、栄養塩プールのストックよりも大きくなり、志津川湾の窒素循環におけるカキ養殖のインパクトが大きいことが分かった。

(12) まとめ

これまで見てきたように、半開放性内湾である志津川湾内での窒素循環の特徴をまとめると、主要な窒素供給源は外洋からの流入であり、年間を通して外洋からの水塊の侵入によって、湾内の水理・栄養塩環境が大きく変わることが明らかとなった。森林からの栄養塩供給量は夏季降雨時に一定の影響を及ぼすものの、その流入のほとんどが河口域付近で植物プランクトンによって使用されていた。つまり、志津川湾内の生物生産系を考える上では「森は海の恋人」という位置付けではなく、栄養塩の面では「森は海の親しい友人」的なものであると評価される。志津川湾のような養殖海域ではマガキやホヤなどの養殖生物からの排泄は窒素源として、時に湾内の栄養塩プールを大幅に上回る値を持つことがわかり、沿岸海域での物質循環を考える上では二枚貝のもつ栄養塩シンクとしての重要性が示された。このようにさらに、人間の二枚貝(マガキ)養殖による付着基質の提供を通じてカキ殻表面やロープに珪藻が付着し、剥離した珪藻をカキが摂食し、カキは排泄により栄養塩を珪藻に与えるという一種の共生関係ができ、これを「セルフガーデニング」とよぶとすると、この効果が窒素循環の速度を大きくしている。今後、このセルフガーデニングに関する詳細な評価が必要になるであろう。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

高い生産性を有する開放性の内湾を支える栄養塩類の起源と分配プロセスを明示する事は、今後の沿岸域の持続的な発展を保障する上で極めて重要である。本研究の科学的意義は、次の通りである。

①高い生物生産能を持つ開放的内湾である、志津川湾に注ぐ主要3河川の河口部において、栄養塩濃度の平水時における詳細なモニタリングを実施した。これに加えて、出水時にも採水を行い、周年にわたる海域への栄養塩類負荷量を見積もる事を試み、森一川一海の物質循環系について栄養塩動態を軸にして総合的に評価した。今までに開放性内湾の栄養塩循環の季節的全体像を明らかにした研究はなく、これが初めての結果であり、科学的意義がある。

②湾内において各種基礎生産者(植物プランクトン・底生微細藻類・付着性微細藻類・大型海藻類)の現存量と基礎生産速度を季節ごとに定量化した。これらの情報を用いて、栄養塩を海洋生物が如何に受け止め、利用するか、正確にかつユニバーサルに見積もることが可能になった。

③養殖施設とカキ殻を基質として微細藻類に提供し、脱離した微細藻類を餌としてカキが取り込み、排泄により栄養塩を微細藻類に提供するという一種の共生関係にあることを定量的に示した。このセルフガーデニングの関係をを用いると、底質を悪化させないカキ養殖筏台数密度の範囲においては、カキ養殖は一次生産速度を大きくし、栄養塩の回転率を速くし、物質循環を長く、速くさせることができる。つまり、カキ養殖という人手をかけることで海を豊かにできるという里海手法の理論的根拠を提示した。

④ホヤ養殖とカキ養殖の糞量と窒素排泄物とを調べたところ、志津川湾ではマボヤの資源量、摂餌速度はともにマガキの3割程度であるが、排泄される糞量は実にマガキの3倍にも達した。窒素排泄物に占める糞量がマガキでは6.8%しかないがマボヤでは64%にもなり、海底への窒素輸送にマボヤが大きく影響していることが分かった。これらの結果は、開放性内湾における養殖対象種とそれらの筏台数密度・配置を検討するときの知見となる。

⑤本研究において開発した開放性内湾における栄養塩循環を解明するための上述の①から⑤というアプローチは、総合的・革新的なものであり、他の海域における開放性内湾にも応用可能である。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

海洋政策本部参与会議の総合的な沿岸域の環境管理の在り方P Tの外部有識者として本研究成果で得られた、「人が関わって、より良い海をつくって豊かな恵みを得るという志津川湾における『里海』づくりの例」の中で、適度なカキ養殖が、セルフガーデニング(p77参照)の効果で、物質循環を長く、速くすることを提示し、内閣府第3期海洋基本計画の策定に貢献した(海洋基本計画の概要(その1) p.3の第3期海洋基本計画概要(その3) 海洋環境の維持・保全; 海洋基本計画の概要(その2) p.7の(参考) 第3期海洋基本計画における具体的施策(その2) 沿岸域の総合的管理; 海洋基本計画(平成30年5月15日閣議決定) p.22-23イ 海洋環境の保全を前提とした海の恵みの持続的な享受, p.54ア 沿岸域の総合的管理の推進: <https://www8.cao.go.jp/ocean/policies/plan/plan03/plan03.html>)

<行政が活用することが見込まれる成果>

科学的意義において述べた①～⑤の成果は、開放性内湾だけでなく、堀瀬差性内湾においても適用ができるユニバーサルなもので、海域における栄養塩管理計画を策定する際の栄養塩循環の見積もりに活用が見込まれる。今後の環境行政では、持続的養殖業と健全な海洋環境を実現することが望まれており、それに沿った施策をつくる上で本成果はすぐに利用できるものである。

6. 国際共同研究等の状況

国際共同研究計画Future Earthアジア太平洋地域プログラムSustainability Initiative in the Marginal Seas of South and East Asia(SIMSEA)、カウンターパート氏名・所属・国名はR. V. Azanza・フィリピン大学海洋科学研究所・フィリピン、参加、SIMSEAは、国際科学会議アジア太平洋地域委員会

(ICSU RCAP) が、関係各国の研究者やステークホルダーの協働を促し、縁辺海の安定化に貢献することを目的に設立された国際プログラムと国際的に位置付けられており、アジアにおける開放性内湾などの沿岸海域におけるFuture Earthの重要な取組みとして発展している。

国際共同研究計画Future Earth Coasts、カウンターパート氏名・所属・国名はValerie Cummins・University College Cork・アイルランド、参加、Future Earth Coastsは、Future Earthの中で沿岸域における持続可能性と地球スケールの環境変化への適応を目指した研究プロジェクトとして国際的に位置付けられており、IGBPとIHDPの下で実施されていたLOICZ (Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone) の後継のもので、沿岸域に関する国内の自然科学・工学・社会科学研究者が連携し、政策決定者、産業界との協業を目指して活動している。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 小松輝久、佐々修司、門谷茂、吉村千洋、藤井学、夏池真史、西村修、坂巻隆史、柳哲雄：沿岸海洋研究, 56(1), 21-29, (2018)
「開放性内湾を対象とした沿岸環境管理法の研究：南三陸志津川湾の例」

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 小松輝久、門谷茂、吉村千洋、西村修、柳哲雄：水産学会誌, 83(6), 1009, (2017)
「志津川湾における生物生産と陸からの負荷：栄養塩、微量金属、有機物」
- 2) 小松輝久、佐々修司、浅田みなみ、門谷茂、吉村千洋、藤井学、夏池真史、西村修、坂巻隆史、柳哲雄：水産海洋研究, 81(2), 125-128, (2017)
「基調講演 開放型内湾における里海の実現を目指して：三陸志津川湾を例として」
- 3) 柳哲雄編著：里海管理論、農林統計協会、22-39 (2019)
「2.2 森は海の恋人か：栄養塩 —南三陸町志津川湾をモデル海域として」(執筆担当：門谷茂、矢田部 創、横地直哉、世古武嵩、中野雄貴)
- 4) S. MONTANI, H. YATABE, N. YOKOJI, H. SEKO and Y. NAKANO: In Integrated Coastal Management in the Japanese Satoumi ed. by T. Yanagi, Elsevier, Amsterdam, pp. 23-32 (in press)
“2.2 Is the Forest a Lover of the Sea? Nutrient”

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 門谷 茂：シンポジウム『豊かな志津川湾の創生』, (NPO) 環境創生研究フォーラム, (公財) 国際エメックスセンター, 東北大学青葉山キャンパス, 2014年10月24日(2014)
「森—川—海の栄養物質輸送」
- 2) 門谷 茂：環境省「環境研究総合推進費」S-13 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成26年度公開成果発表会, 三宮研修センター, 神戸, 2014年11月21日(2014)「森—川—海の栄養物質輸送機構の解明」
- 3) 門谷 茂：環境省「環境研究総合推進費」S-13 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成27年度公開成果発表会, WTCコンファレンスセンター Room A, 東京, 2015年11月5日(2015)
「森—川—海の栄養物質輸送機構の解明」
- 4) T. KOMATSU, S. SASA, S. MONTANI, O. NISHIMURA, T. SAKAMAKI, C. YOSHIMURA, M. FUJII and T. YANAGI: EMECS'11 SeaCoasts XXVI, AZIMUT Hotel, St. Petersburg, Russia, 24 August 2016 (2016)
“Satoumi approach for realizing sustainable coastal use in a rias-type bay: a case of

- Shizugawa Bay in Sanriku Coast hit by the huge tsunami on 11 March 2011”
- 5) 矢田部創、門谷 茂：汽水域研究会2016年(第8回)大会，ふじのくに地球環境史ミュージアム，静岡市，2016年10月9日（2016）
「炭素安定同位体比と脂肪酸組成の分析に基づく志津川湾における粒状有機物動態の解析」
 - 6) 門谷 茂：「環境省環境研究総合推進費戦略研究プロジェクトS-13 H28年度 公開成果発表会
「持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発」，（公財）国際エメックスセンター主催、大手町ファーストスクエアカンファレンス Room A，東京，2016年11月30日(2016)
「志津川湾におけるカキ養殖を巡る栄養塩循環について」
 - 7) 小松輝久、門谷茂、吉村千洋、西村修、柳哲雄：日本水産学会平成29年度春季大会シンポジウム企画「森川里海のつながりを科学で説明できるか？」，東京海洋大学，2017年3月26日（2017）
「志津川湾における生物生産と陸からの負荷：栄養塩，微量金属，有機物」
 - 8) 門谷 茂、矢田部創：2017年度日仏海洋学会学術研究発表会，東京日仏会館，東京，2017年6月18日（2017）
「二枚貝養殖の盛んな半開放性内湾（南三陸町志津川湾）の物質循環過程」
 - 9) T. KOMATSU, S. SASA, S. MONTANI, O. NISHIMURA, T. SAKAMAKI, C. YOSHIMURA, M. FUJII and T. YANAGI: National Seminar on Science Technology for Sabang Marine Tourism Development and the 4th International Workshop on Sato Umi, Auditorium and Main Commission of BPPT II, Jakarta, Indonesia, 5 to 6 October 2017 (2017)
“Satoumi approach for realizing sustainable coastal use in a rias-type bay: a case of Shizugawa Bay in Sanriku Coast after the huge tsunami on 11 March 2011”
 - 10) T. KOMATSU, S. MONTANI, C. YOSHIMURA, O. NISHIMURA, S. SASA, Y. YAMAMOTO and T. YANAGI: COAST Bordeaux 2017, University of Bordeaux, Bordeaux, France, 7 to 10 November 2017 (2017)
“Modern Satoumi approach to an open rias-type bay, Shizugawa Bay, Sanriku Coast, Japan after the hit by the huge tsunami in 2011 for realizing sustainable environment and prosperous aquaculture”
 - 11) 門谷 茂：環境省「環境研究総合推進費」S-13 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成29年度公開成果発表会，A P 新橋 虎ノ門11階 Room A，東京，2017年11月21日（2017）
「森－川－海の栄養物質輸送機構の解明」
 - 12) 小松輝久、佐々修司、門谷 茂、吉村千洋、藤井 学、夏池真史、西村 修、坂巻隆史、柳哲雄：日本水環境学会 第27回市民セミナー「豊かな里海の創生～河川流域と沿岸域の関係～」，東京，2018年8月3日（2018）
「開放性内湾における豊かな里海の実現を目指して：南三陸志津川湾を例として」
 - 13) T. KOMATSU, S. SASA, S. MONTANI, O. NISHIMURA, T. SAKAMAKI, C. YOSHIMURA, M. FUJII, M. NATSUIKE and T. YANAGI: The 12th International Conference on the Environmental Management of the Enclosed Coastal Seas (EMECS 12), Pattaya, Thailand, 4-8 November 2018 (2018)
“Satoumi practice and sciences support sustainable use of a rias-type bay in southern Sanriku Coast after the huge tsunami 2011”
 - 14) 門谷 茂：環境省「環境研究総合推進費」S-13 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成30年度公開成果発表会，WTCコンファレンスセンター 3階 Room A，東京，2018年11月29日(2018)
「森－川－海の栄養物質輸送機構の解明」
 - 15) T. KOMATSU, S. SASA, S. MONTANI, O. NISHIMURA, T. SAKAMAKI, C. YOSHIMURA, M. FUJII and T. YANAGI: 12th International Conference on Oceanography and Marine Biology, Rome,

Italy, 3-4 December 2018 (2018)

“A Satoumi practice to the semi-enclosed bay after the hit of huge tsunami on 11 March 2011 for realizing sustainable aquaculture and sound marine environments: An example of Shizugawa Bay, Japan”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム「豊かな志津川湾の創生」（主催：（NPO）環境創生研究フォーラム・（公財）国際エメックスセンター、2014年10月24日、東北大学工学研究科青葉山会館、聴講者50名）にて講演
- 2) 一般公開シンポジウム「環境研究総合推進費S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成26年度公開成果発表会」（主催：環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト・（公財）国際エメックスセンター、2014年11月21日三宮研修センター、聴講者約70名）にて講演
- 4) 一般公開シンポジウム「環境研究総合推進費S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成27年度公開成果発表会」（主催：環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト・（公財）国際エメックスセンター、2015年11月5日、WTCコンファレンスセンター Room A、聴講者約70名）にて講演
- 5) 一般公開シンポジウム「環境研究総合推進費S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成28年度公開成果発表会」（主催：環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト・（公財）国際エメックスセンター、2016年11月30日、大手町ファーストスクエアカンファレンス Room A、聴講者約70名）にて講演
- 6) 日本水産学会平成29年度春季大会シンポジウム企画「森川里海のつながりを科学で説明できるか？」（主催：日本水産学会、2017年3月26日、東京海洋大学、聴講者約80名）にて講演
- 7) 日本海洋学会2017年秋季大会沿岸海洋シンポジウム「持続可能な沿岸海域管理法-環境省推進費戦略的研究開発領域(S-13)の成果から」（主催：日本海洋学会沿岸海洋研究会、2017年10月12日、東北大学青葉山北キャンパス数理学記念館、聴講者約80名）にて講演
- 8) 一般公開シンポジウム「環境研究総合推進費S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成29年度公開成果発表会」（主催：環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト・（公財）国際エメックスセンター、2017年11月21日、A P 新橋 虎ノ門11階Room A、聴講者約70名）にて講演
- 9) 一般公開シンポジウム「環境研究総合推進費S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成30年度公開成果発表会」（主催：環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト・（公財）国際エメックスセンター、2018年11月29日、WTCコンファレンスセンター3階 Room A、聴講者約70名）にて講演

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) NHKスペシャル全国放送（2015年10月31日21時から：「シリーズ東日本大震災“津波の海”を潜る ～三陸・破壊と回復の5年間～」において、S-13-2-(2)に関係する門谷茂の研究結果を5分ほど紹介）

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

II-3 森-海の物質輸送に果たす有機物の役割解明（鉄）

国立大学法人東京工業大学 環境・社会理工学院	吉村 千洋
国立大学法人東京工業大学 環境・社会理工学院	藤井 学（平成26年度～平成30年度）
北海道立総合研究機構 函館水産試験場	夏池 真史（平成27年度～平成29年度）
国立大学法人熊本大学 くまもと水循環・減災研究教育センター	伊藤 紘晃（平成26年度～平成30年度）
国立大学学法人山形大学 農学部	渡部 徹（平成26年度～平成27年度）

平成26年度～30年度累計予算額：29,380千円（うち平成30年度：5,281千円）

累計予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

森林、特に広葉樹がつくる腐食物質が鉄と錯体をつくり溶存鉄となって海に供給されるという「森は海の恋人」仮説により、三陸のカキ養殖業者が中心となって植林運動がはじめられた。しかし、定量的な溶存鉄循環に関する研究はなかった。そこで、三陸の開放性内湾である志津川湾およびその流入河川の集水域も含め、鉄と有機物の発生源から沿岸域の一次生産および鉄収支までを網羅的に調べ、季節的な動態を明らかにした。その結果、陸域由来の溶存鉄が腐植物質様の有機物によって沿岸域へと輸送され、汽水域における凝集を免れて溶存鉄が輸送される点において腐植物質（フルボ酸様DOM）が重要であった。これは、森-海のつながりを示す証拠である。一方、海域での藻類の溶存鉄取り込みにはタンパク質様DOMが相関することも確認された。藻類群集による鉄摂取を含む溶存鉄の収支を解明した結果、流入河川の集水域が狭い志津川湾など開放性内湾では、一次生産に対する陸域由来の溶存鉄の貢献は河口域に限定的であり、湾全体としては外洋からの溶存鉄の供給が支配的であった。さらに、陸域における土地利用と溶存鉄の供給を推定する土地利用ごとの溶存鉄の原単位も推定したところ、広葉樹林と針葉樹林では有意な差はなく、人為的な土地被覆からの溶存鉄溶出が非常に大きいことが明らかとなった。以上、沿岸域における森-海の物質輸送（特に鉄）に果たす有機物の役割を定性的かつ定量的に解明し、鉄および有機物の観点から森-海のつながりを定量的に解明するための一連の方法論を提示できたことは重要な成果である。また、土地利用ごとの溶存鉄の原単位を推定したので、他の開放性内湾における河川を通じた陸域からの鉄供給量も推定可能である。鉄のように環境中に遍在する必須微量元素については、一般的な環境基準で規制されていないが、窒素・リンのような一般的な栄養塩に加えて微量元素も積極的にモニタリング・管理することで、沿岸生態系の管理をさらに効率化できることが示唆された。

[キーワード]

沿岸域、鉄、有機物、フラックス、生物利用性

1. はじめに

鉄は多くの海洋及び淡水生物の成長に必要な不可欠な微量栄養素である。植物プランクトンの細胞内において、鉄は光合成や呼吸における電子伝達、クロロフィルの生合成など生命活動の重要な役割を担っている。海洋では栄養塩が十分に存在するにもかかわらずクロロフィル濃度の低い水域があり、鉄の生物利用性が海洋性植物プランクトンの増殖を制限することがある。一方、淡水と海水が混合する河口ならびに沿岸域では、一般的に生物生産性が高く、豊かな海洋生態系が形成される。これは、微量金属や栄養塩が陸域から供給され、沿岸域における生物生産性の維持に重要な役割を果たしていることが理由の一つと考えられる。北海道大学松永勝彦名誉教授の鉄仮説による山と海とのつながりという考え方は、気仙沼のカキ養殖業者島山重篤氏著『森は海の恋人』という本で紹介され、全国的にも広く知られている。例えば、森は海の恋人という考えの下、沿岸域保全のため漁業者や市民が上流域に広葉樹等の植林

活動を行っている。

水中において、鉄は二価（第一鉄、Fe(II)）または三価（第二鉄、Fe(III)）の酸化状態で存在する。よって、自然水中の溶存鉄には、一般的に有機リガンド（特定の受容体に特異的に結合する有機物質：配位子）と錯形成したFe(II)とFe(III)、溶解性無機Fe(II)と溶解性無機Fe(III)ならびに酸化水酸化鉄コロイド(Fe^{III}OOH)などが含まれる。中性pHにおいてFe(II)溶存酸素によりFe(III)に酸化されるため、沿岸域や海洋の有光層では通常Fe(III)が卓越している。また、Fe(III)は水酸化物イオンと親和性が高く、中性pHにおけるFe(III)の溶解度は非常に低いため、外洋では溶存鉄の99%以上が有機リガンドと錯形成した状態で存在している。自然由来の重要な有機リガンドである腐植物質は、陸域土壌や水域を起源とする疎水性有機酸の総称であり、酸化分解過程で生成されるカルボキシル基などの酸性官能基を有するため、腐植物質は金属イオンと錯形成する。このような鉄錯体は、沿岸域では塩分の影響を受けて凝集反応により沈殿除去されやすいが、一方で、沈殿せずに残存する溶存鉄は、河口や沿岸域の高い生物生産性を維持する上で重要な役割を担っていると考えられている。

このように沿岸域の一次生産において重要な役割を担っている陸域から供給される腐植物質や鉄について、流域からの溶存鉄輸送や、沿岸域での鉄の化学的動態、ならびにそれらが沿岸域一次生産に及ぼす影響、環境中における有機鉄の反応性や有機リガンドの特性などを定量的に調べた報告は依然として少ない。つまり、森林を含め陸域から河川を経て沿岸域に供給される有機物質の種類やフラックス、鉄の輸送における役割については未解明な部分が多く、陸域由来有機物質がどのようなプロセスを経て沿岸域まで到達し、沿岸域の生物生産性にどのように貢献しているのか、よく分かっていないのが現状である。そこで本研究では、生物生産性が高く社会的価値のある沿岸域を将来にわたり永続的に保全・創出していくため、森・川・海の繋がりにおいて重要となる河川流域由来の溶存鉄の動態や一次生産への寄与に関して志津川湾を対象として定量的な評価を行うことで、鉄の輸送に果たす有機物の役割の解明に取り組んだ。

2. 研究開発目的

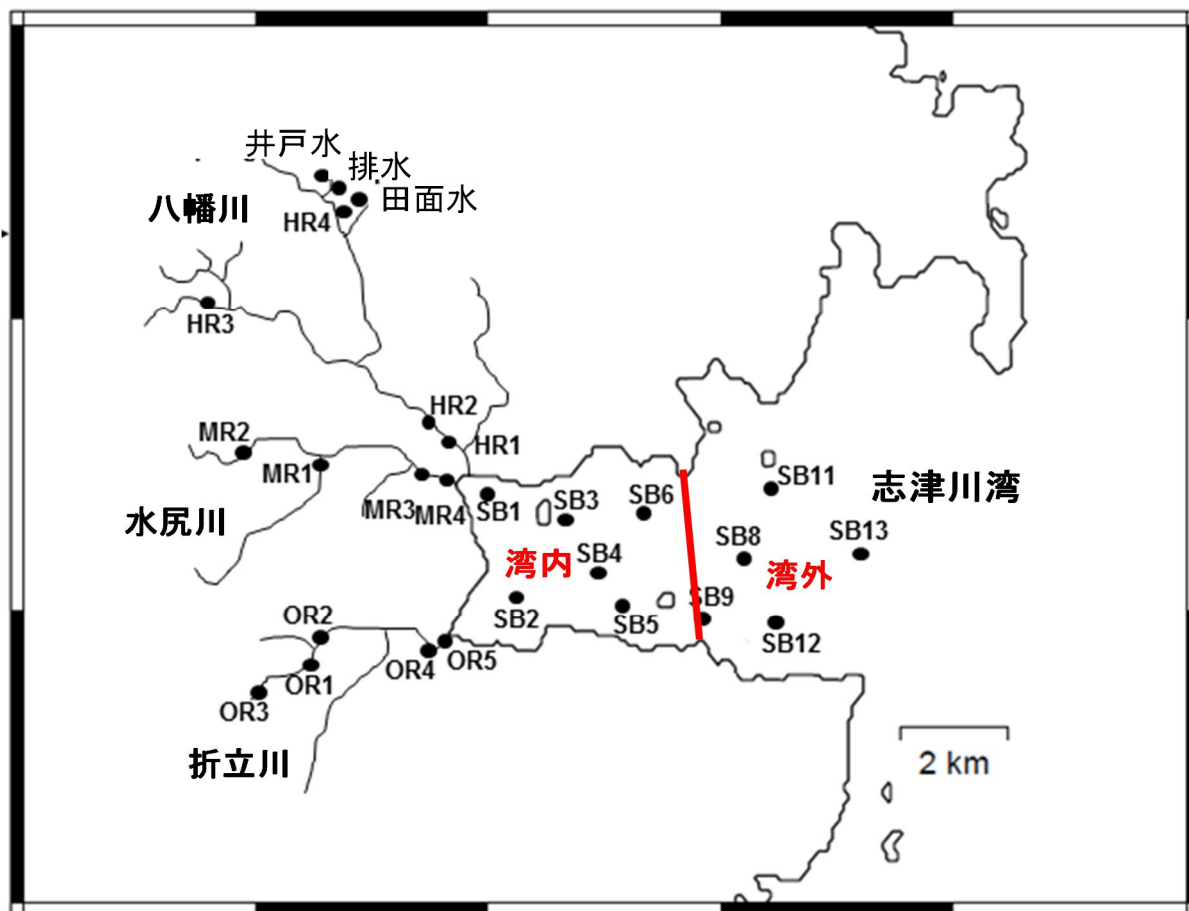
志津川湾を含む三陸沿岸において鉄とその化学形態に影響を及ぼす有機物の動態を調べ、鉄の酸化還元反応等の時空間的変化および物理化学的条件との関係を実験的に解明することで、内湾における鉄の生物利用性を定量的に評価することを研究目的とした。

3. 研究開発方法

(1) 宮城県南三陸町志津川湾における野外調査

宮城県南三陸町志津川湾とその流域において、鉄と有機物の動態を分析するための野外調査を実施した。湾内（湾口・湾央・湾奥）では2深度（表層0mと10m）において海水試料を、志津川湾への主要流入河川である八幡川・折立川・水尻川の上下流域では河川水・河口水を採取した。また、集水域における井戸水や田面水、浄化槽排水も採取した。試料の採取地点を図(3)1-1に示す。採水時には携帯型水質計等により各種基礎水質項目（水温、pH、溶存酸素濃度、酸化還元電位、照度等）を測定した。なお、この水質調査は2014年7月から2015年6月までの1年間は毎月1回、2015年7月以降は4ヶ月に1回の頻度とした。

水試料は、事前に酸洗浄した高密度ポリエチレン(HDPE)びん(1 L容)に採取し、実験室に持ち帰った後、ポリテトラフルオロエチレン(PTFE)製メンブレンフィルター(孔径0.45 μm)によりろ過した。ろ過は全ての水試料に対して行い、その後冷暗所に保管した。メンブレンフィルターによる濾過後、溶存有機態炭素濃度([DOC])、溶存有機物(DOM)の光学的(吸光・蛍光)指標の測定（例えば、蛍光指標であるFIは水中の有機物起源と関連があることが報告されている）を行った。また、鉄を含めた全溶存態微量金属濃度([Me]_T)の測定においては、Nobiasキレート樹脂を用いて前処理することにより、マトリックスの影響を除去し、誘導結合プラズマ質量分析装置により定量した。さらに、鉄の酸化還元反応をルミノール法により調べた。



図(3)1-1 水試料採取地点。赤線は、志津川湾内の溶存鉄収支を計算する上で設定した湾内と湾外の境界線を示している。

(2) 有機物が自然水中の微量金属（鉄）の酸化還元反応に及ぼす影響

微量金属の酸化・還元反応による微量金属スペシエーションの変化は、自然水中の藻類による微量金属摂取速度に影響を及ぼすと考えられている。鉄(Fe)の場合、三価鉄(Fe(III))よりも二価鉄(Fe(II))の生物利用性が高い。このような微量金属の酸化・還元反応速度は有機物やpHなどの環境要因によって変化すると考えられる。そこで、前述の志津川湾とその流域における調査によって得られた試料を用いて、河川水および海水中の溶存鉄の酸化反応速度を測定した。

この酸化反応速度を実験的に調べるために、2014年7、10月および2015年1月と4月の現地調査において、湾内の全13地点より海水試料を、また八幡川・折立川・水尻川の上下流域から河川水および浄化槽排水等を採取した(図(3)1-1)。採水時には携帯型水質計等により各種基礎水質項目(水温、pH、溶存酸素濃度、酸化還元電位、照度等)を測定した。水試料はメンブレンフィルターによる濾過後、溶存有機炭素濃度([DOC])、溶存有機物(DOM)の光学的(吸光・蛍光)指標の測定を行った。さらに、溶存鉄の酸化反応速度をルミノール法によって測定した。また、藻類が産生する有機物が、鉄の酸化反応に及ぼす影響を明らかにするため、志津川湾より単離した珪藻(*Chaetoceros radicans*)培養液の鉄酸化速度をルミノール法によって測定した。以上の結果を整理することで、溶存鉄の酸化速度定数と溶存有機物の特性やその他の水質との関係を解析した。

(3) 志津川湾海水を用いた一次生産者の溶存鉄摂取試験

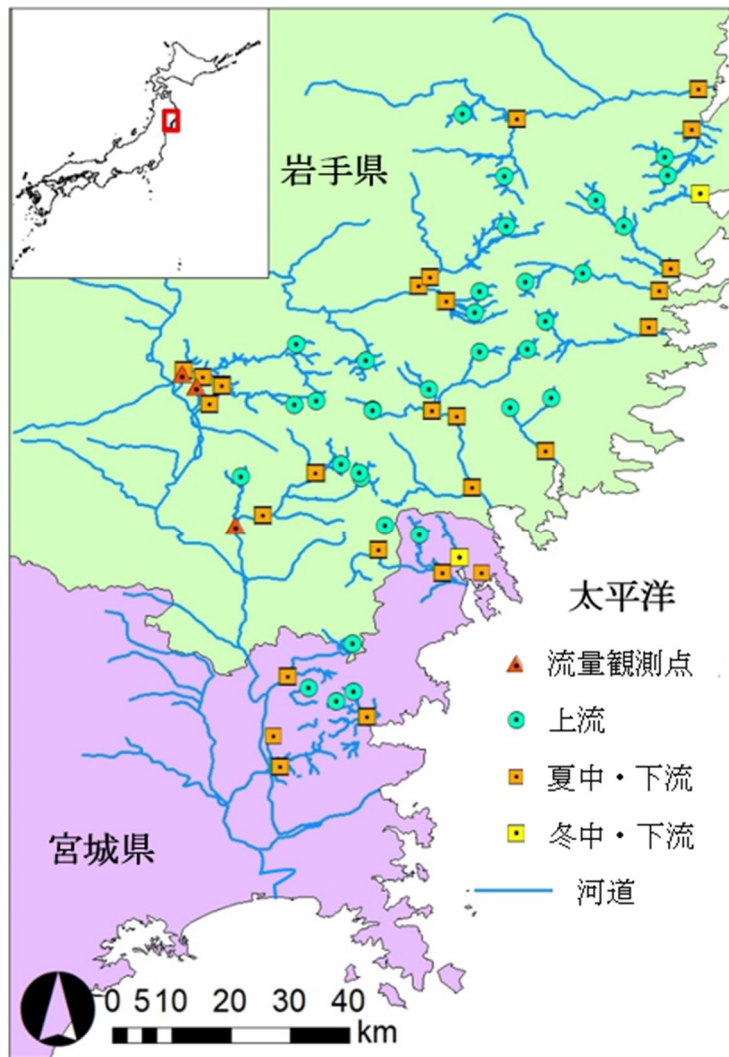
志津川湾内の溶存鉄が、微細藻類の増殖に及ぼす影響を明らかにすることを目的に、上記のサンプリングで得た志津川湾海水試料を用いて微細藻類の増殖試験を行った。まず、2015年4月の調査時に志津川湾内で最も優占していた微細藻類である珪藻 *Chaetoceros radicans* を単離し、無菌培養系を確立した。続いて、単離した *Chaetoceros radicans* を溶存鉄が欠乏した人工合成培地で培養することによって、鉄飢餓状態の藻類細胞を得た。上述の志津川湾調査で得た濾過海水に鉄以外の栄養塩(窒素やリン、珪素など)が成長制限とならないように十分に添加することで、溶存鉄濃度のみ志津川湾の状況を反映した培地を作成した。この海水培地に鉄飢餓状態の *Chaetoceros radicans* を少量接種し、恒温培養槽で一定の水温(15°C)および光環境(100-120 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、12時間明暗周期)条件下のもと培養した。藻類の増殖を細胞数計数および *in vivo* クロロフィル濃度測定によってモニタリングし、藻類の一日あたりの増殖速度を計算した。一般に微細藻類の栄養塩取り込みは、ミカエリス・メンテン式に近似できることが知られており、培地中の溶存鉄濃度および得られた増殖速度から、*Chaetoceros radicans* による鉄摂取における半飽和濃度(K_s)と最大増殖速度を算出した。

さらに、河川由来および海洋由来の鉄が藻類の鉄摂取におよぼす影響を明らかにする目的で、河川水起源の鉄源、および志津川湾と気仙沼湾から採取した海水という異なる起源(河川由来と沿岸由来)の溶存鉄を含む培地に、微細藻類(*Skeletonema marinoi-dohrnii* complex)および大型藻類であるアラメ(*Eisenia bicyclis*)を接種して鉄摂取実験を行った。この試験によって河川水と海水という異なる鉄源が鉄摂取におよぼす影響を評価した。

(4) 植生や人為的な土地被覆からの溶存鉄溶出に対する原単位の推定

一般に河川水質は、その流域が有する土地被覆の影響を受け、水田や都市部、森林等の土地被覆ごとに異なる原単位が、窒素やリンなどの栄養塩類、溶存有機物などで推定されている。そこで、様々な土地被覆を有する北上山地水系を調査地とすることで、植生や人為的な土地利用等の土地被覆と、河川水中の溶存鉄濃度、溶存有機物との関連を評価し、土地被覆の溶存有機鉄に関する影響や、その原単位を明らかにした。このために、北上山地水系を調査地として2017年冬季および夏季に現地調査を実施した。三陸海岸に流入する11河川(八幡川、大川、鹿折川、気仙川、盛川、甲子川、鶴住川、大槌川、関口川、津軽石川、閉伊川)および、北上川に流入する支流の7河川(南沢川、大関川、二股川、砂鉄川、人首川、広瀬川、猿ヶ石川)で、冬季は計63地点、夏季は計61地点で表層の河川水を採取し、水温、pH、溶存酸素濃度(DO)、電気伝導度を記録した。人為的影響を極力排除して植生の影響を評価するために上流域の調査地点(33地点)を設けた(図(3)1-2、表(3)1-1)。また、耕作地や都市部等の人為的影響が大きい土地被覆の影響を考慮するために、中・下流域の調査地点(冬季30、夏季28地点)を選定した。

採取した水試料はポリエチレン製ボトルに入れて暗所冷蔵にて実験室に持ち帰り、孔径0.45 μm メンブレンフィルターでろ過した。ろ液を溶存態画分とみなし、溶存鉄濃度を誘導結合プラズマ分析装置(Agilent社7700x)にて測定した。また、ろ液中の溶存有機炭素(DOC)濃度および、腐植物質の指標となる紫外外部吸光度(254 nm、A254)等の有機物の指標となる水質項目を測定した。環境省自然環境局生物多様性センターホームページにて公開されている5万分の1植生図(<http://gis.biodic.go.jp/webgis/sc-025.html?kind=vg>)をもとに、各サンプリング地点の集水域面積および土地被覆割合をGISソフト(GRASS GIS 7.0.5)によって計算した。土地被覆の項目は植生図の大区分にに基づき、広葉樹林、針葉樹林、草地、水田、耕作地、都市部の6項目に再分類した。なお、針広混交林は、広葉樹林に含めた。定地点の日流量は、3段タンクモデルによって推定した。溶存鉄濃度と河川流量から溶存鉄の負荷量に対し、各土地被覆の集水域面積を説明変数として重回帰分析することで原単位を推定した。



図(3)1-2 北上山地系河川における観測対象流域と観測地点。

表(3)1-1 各季節調査地点の集水域の面積と土地被覆割合の概要(平均±標準偏差%)。

集水面積 (km ²)	11.4±13.0	11.5±13.0	150±190	157±196
季節および調査地点数	冬、n=33	夏、n=33	冬、n=30	夏、n=28
広葉樹林	35.7±21.7	33.4±22.2	31.4±10.8	32.5±9.22
針葉樹林	58.1±20.9	60.7±22.2	45.2±14.4	46.7±13.2
草地	4.79±8.71	4.62±8.65	4.44±2.83	4.27±2.84
水田	0.661±1.08	0.538±0.903	12.1±13.5	9.74±9.76
耕作地	0.700±1.06	0.582±0.908	5.56±4.49	5.62±4.66
都市部	0.193±0.654	0.191±0.679	1.05±1.09	1.00±1.03

(5) 汽水域における河川から供給された溶存鉄の凝集挙動におよぼす土地被覆の影響

河川水は沿岸域において生物利用可能な鉄の重要な起源として考えられている。一方で河川から供給された溶存鉄の大部分が汽水域における凝集反応により取り除かれることが知られている。河川から供給される溶存鉄(3.1~32.9 μM)のおおよそ40~90%が沿岸域で除去されると報告されており、汽水域における鉄凝集反応は河川経由での生物利用可能な鉄供給を考える上で重要な要素である。そこで、(3)1-4.の野外調査で採取した河川水試料を人工海水と混合する擬似現場実験を行い、鉄の凝集沈降動態におよぼす土地被覆の影響を評価することを試みた。

まず、ろ過した河川水試料に放射性同位体(⁵⁹Fe)をラジオトレーサーとして添加して人工海水と混合することによって、河川水が沿岸域に到達したときの環境を擬似的に再現した。その後、フィルター濾過によって凝集した鉄を取り除いた。混合実験前のろ過した河川水試料のガンマ線量に対する人工海水と混合してつくった人工沿岸水から沈殿物を取り除いた後のろ液から放出されるガンマ線量とそれぞれの水試料の体積から、海水混合後の河川水中の溶存鉄到達率(α)を次の式(3)1-1により計算した。

$$\alpha = \frac{C_{Fe\ m} \cdot V_m}{C_{Fe\ r} \cdot V_r} \cdot 100 \quad (3)1-1$$

ここで、 $C_{Fe\ r}$ と $C_{Fe\ m}$ とは、それぞれ、混合前のろ過された河川水と混合実験後ろ過した人工汽水の⁵⁹Feのガンマ線量を表しており、 V_r と V_m はそれぞれろ過された河川水と人工沿岸水の体積である。また、河川水中の溶存鉄濃度と得られた溶存鉄到達率を用いて、河川から海へ到達可能な溶存鉄濃度を求めた。同時に、河川から海への過程でのDOM特性と溶存鉄の凝集動態との関連を調べるために、河川水と人工海水を用いた同様の混合実験を行い、実験前後の励起-蛍光波長マトリクス(EEM)を測定した。得られたEEMを多変量解析の一種であるEEM-PARAFACによって解析することで、フルボ酸様やタンパク質様などの異なる有機物組成を有する発色団の蛍光強度を検出した。

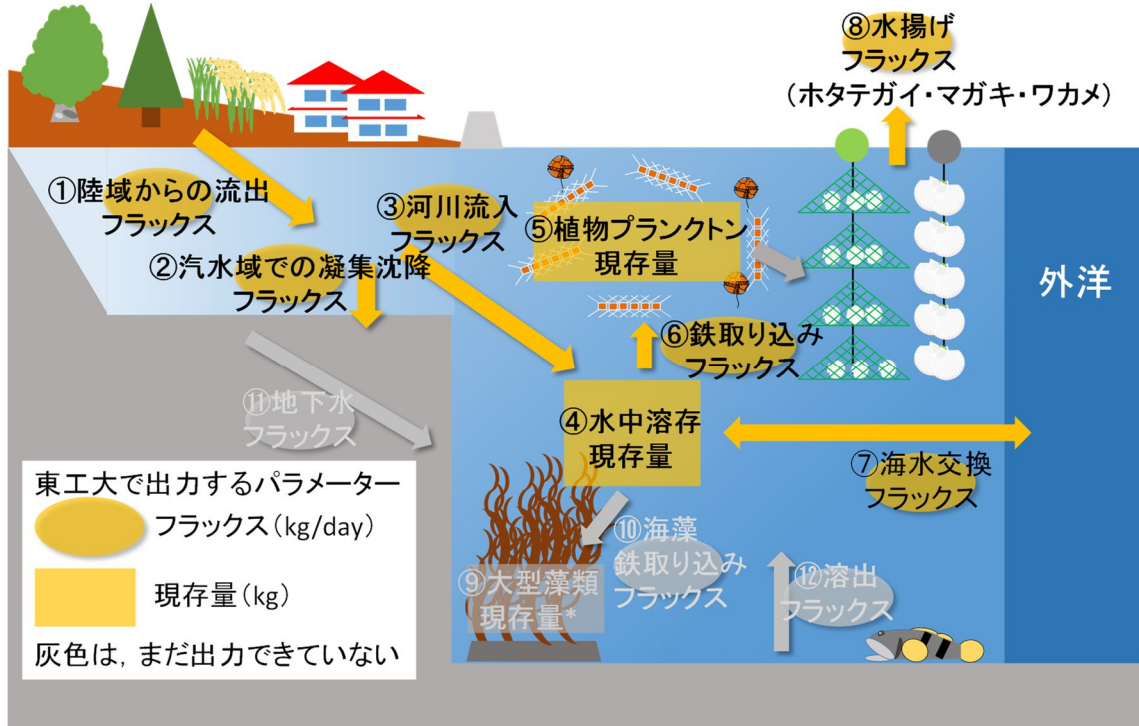
(6) 志津川湾における溶存鉄収支

上述の調査で得られた南三陸町および志津川湾における溶存鉄データを基に、南三陸町および志津川湾の溶存鉄現存量とフラックスを季節ごとに算出した(表(3)1-2および図(3)1-3に示した項目)。ここで、図(3)1-1で示した湾奥および湾央を湾内と定義し、湾内の溶存鉄の各流入流出経路および現存量を算出した。湾内の地形データはS-13-5より提供を受けて、面積と体積はそれぞれ13.6 km²、0.145 km³、湾内と湾外の境界部面積を5.52 km²とした。なお、南三陸町の各河川の流域面積をGISソフトウェアによって計算し、各河川の流量を、流域における降水量から蒸発散量を差し引くことによって近似した。汽水における河川水中の溶存鉄の除去率には、p.97-p100で得られた結果を用いた。また、湾内と湾外の境界面における物質交換は、S-13-2-(2)の海水交換の計算方法に従って上層と下層の湾外への流出、湾内への流入量を求め、湾内と湾外の溶存鉄濃度を乗じて、上層と下層のフラックスを求めた。

さらに、微細藻類群集による鉄摂取速度を測定した。具体的には、2016年春季の志津川湾の湾内において海水をポリカーボネートボトルに採取し、漁港内の海水循環施設に垂下し、湾内の物理化学的条件を再現した上で、1昼夜培養した。培養前後における微細藻類群集を目合い1 μmのフィルター上に捕集し、捕集物のクロロフィルa量および鉄量を測定した。培養前後でのクロロフィルaおよび鉄の変化から、湾内における微細藻類群集の増殖速度および鉄摂取速度を算出した。これら志津川湾における鉄の流入・流出経路(フラックス)および現存量(ストック)を定量的に算出することによって、湾内の基礎生産に及ぼす陸域からの鉄供給の影響を評価した。

表(3)1-2. 志津川湾内の鉄収支に関するパラメーターと計算式。

	パラメーター名	単位	計算式
①	陸域から河川への溶出フラックス	Kg day ⁻¹	(河川溶存鉄濃度) × (河川流量)
②	汽水域での凝集沈降フラックス	Kg day ⁻¹	① × (凝集率)
③	河川から海洋への供給フラックス	Kg day ⁻¹	① - ②
④	湾内現存量	Kg day ⁻¹	(湾体積) × (平均溶存鉄濃度)
⑤	湾内浮遊微細藻類現存量	Kg	(湾体積) × (平均微細藻類現存量) × (微細藻類鉄含量)
⑥	湾内浮遊微細藻類取り込みフラックス	Kg day ⁻¹	(湾体積) × (微細藻類鉄取り込み速度)
⑦	海水交換フラックス	Kg day ⁻¹	(湾断面積) × (拡散係数) × [(湾内の平均鉄濃度) - (湾外の平均鉄濃度)] / 湾外と湾内の距離



図(3)1-3 志津川湾における溶存鉄に関連する主なプロセス。矢印および楕円で囲った項目は溶存鉄のフラックスを示し、四角で囲った項目は現存量（ストック）を示している。

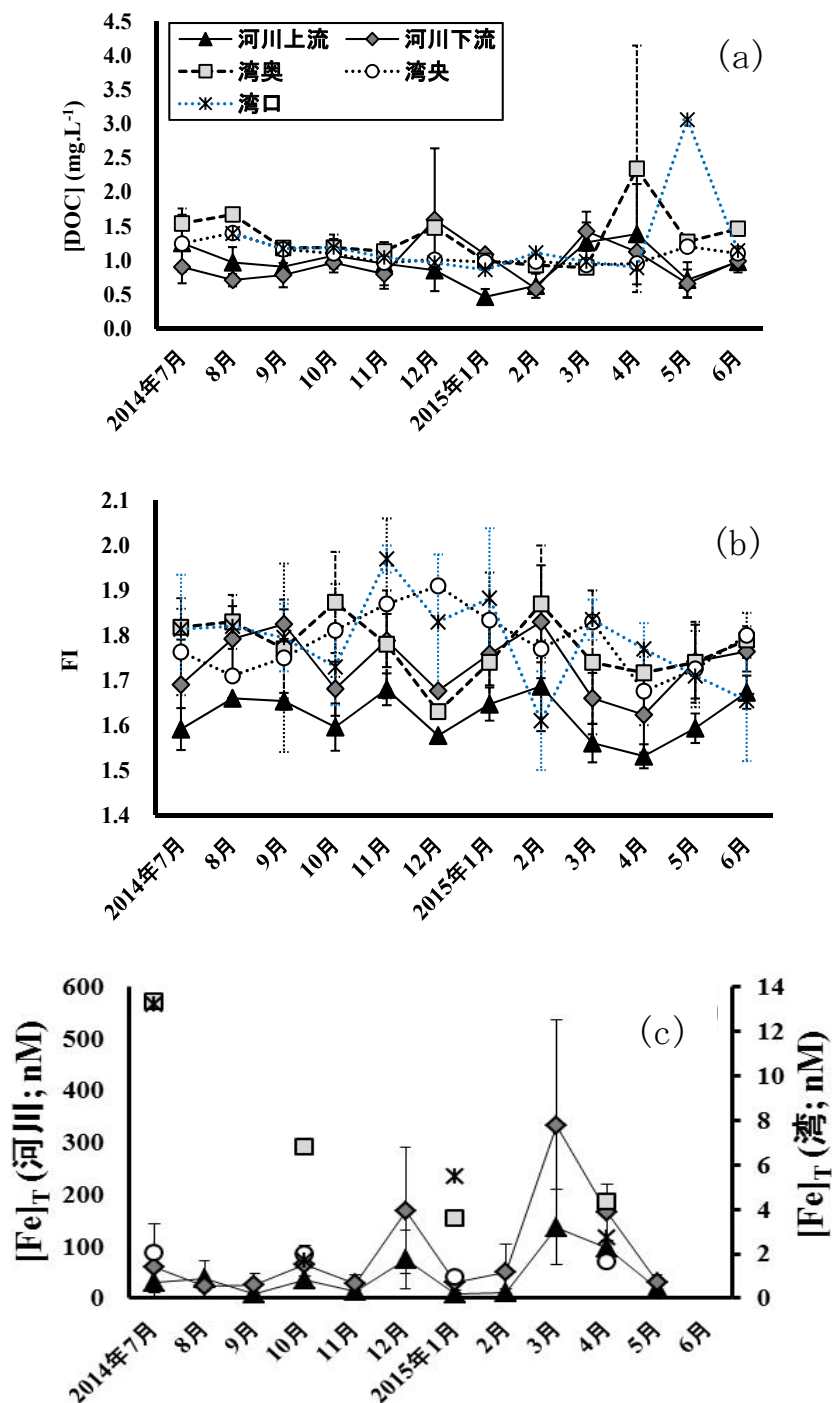
4. 結果及び考察

(1) 溶存有機物濃度と溶存鉄濃度の時空間変動

湾内の溶存有機炭素濃度([DOC])は河川と比べてやや高い傾向が見られた(図(3)1-4(a))。水中の有機物起源と関連がある蛍光指標(FI)は陸由来有機物が卓越すると想定される河川上流で平均1.6であったのに対し、水生生物に由来する有機物が卓越すると想定される湾内では平均で1.8の値を示し、明らかな違いが見られた(図(3)1-4(b))。河川下流ではFIの平均は1.7と、河川上流と湾内との中間の値を示し、海水の侵入により河川上流と比べて値が高くなっていると推察された。また、浄化槽排水のFIが2.1以上と高い値を示す場合もあることが認められたことから、これらの排水の流入が河川下流でFIが高くなる一つの要因であると考えられる。季節変化については、[DOC]、FI、SUVA₂₅₄(芳香族性の吸光指標)の変動から、陸域由来の芳香族性の高いDOMが、特に春先に多く河川を介して湾内に流入していると推察された。

溶存態鉄濃度([Fe]_T)は、河川水中で数～数百nMの幅広い濃度範囲で存在していた(図(3)1-4(c))。また、上流と比べて下流の方が高い濃度を示した。浄化槽排水や田面水中に高濃度の溶存鉄が存在することが認められたことから、下流の[Fe]_T上昇の原因の一つと示唆された。河川水中の[Fe]_Tの季節変化について、上・下流とではほぼ同様の季節変動パターンを示し、特に春季(3～4月)に濃度が高くなる傾向が見られた。DOMの第二鉄に対する錯形成容量はDOMの芳香族性と有意な正の相関を示すことが報告されていることから、同時期の河川水に含まれる芳香族性の高いDOMが鉄と錯形成することにより、[Fe]_Tを高めていると推察された。溶存鉄濃度を目的変数、各水質項目を説明変数として線形回帰を行った結果、上流・下流域ともにDOC濃度は溶存鉄濃度と有意な正の相関を示し、腐植物質の指標である254nmの波長の光の吸光度(A₂₅₄)は(夏季の上流域を除いて)溶存鉄濃度と有意な正の相関を示した。一方で、溶存鉄濃度とDOC濃度ならびにA₂₅₄の回帰直線の傾きは、上流と下流で有意差があり(ANCOVA, p < 5%)、下流で大きい傾向を示した。この結果は、DOM濃度の増加とともにDOMに結合した溶存鉄濃度が増加していることを意味している。また、北上山地水系では、上流の山間部よりも下流の農地(水田)や都市部においてDOMおよび腐植物質が比較的多く供給され、それに伴って、溶存鉄も下流部で増加している傾向が見られた。

湾内では、[Fe]_Tは表層で平均4.8 nM、水深10 mで平均9.4 nMと河川と比べて低かった。表層の[Fe]_Tは、湾奥で季節を通じて高い傾向が見られる一方(平均7.0 nM)、湾央では低い傾向が見られた(平均1.6 nM)。湾口部の表層[Fe]_Tは、季節的に大きく変動し、夏季と冬季に高く(平均9.3 nM)、春季と秋季に低い傾向が見られた(2.2 nM)。これらの結果は、湾奥に河口が集中する主要河川から供給される溶存鉄が、湾奥部における表層の高い溶存鉄濃度の維持に貢献すると考えられた。ただし、季節的に湾外から供給される溶存鉄や底層から供給される溶存鉄も湾内の鉄の分布に影響を及ぼしている可能性がある。



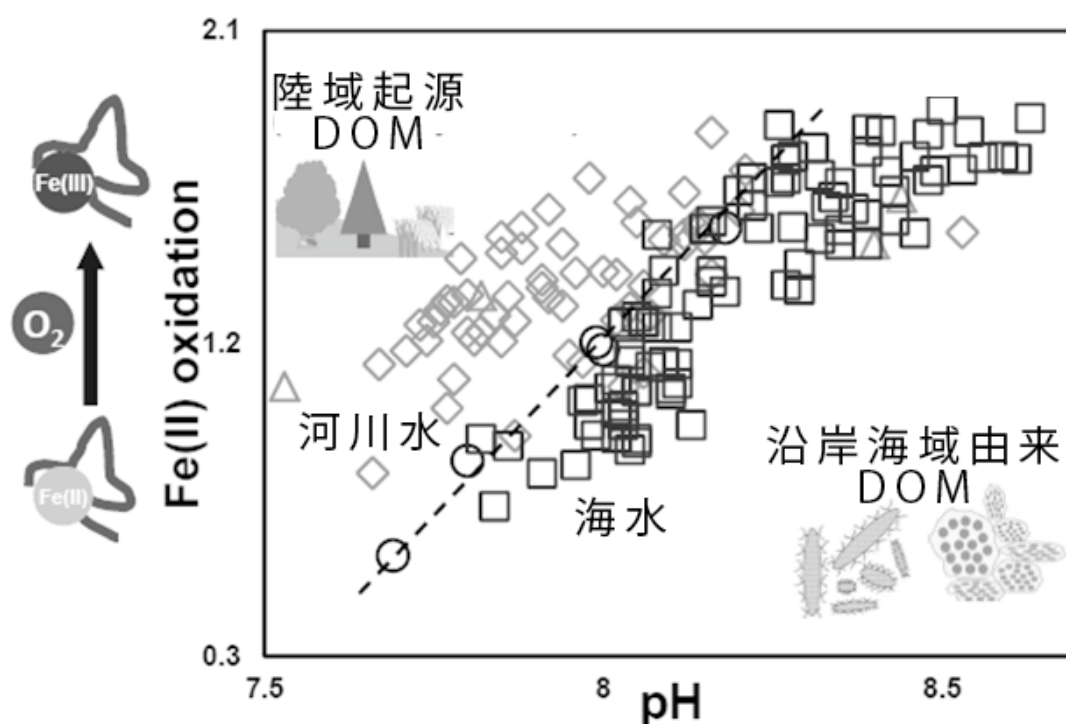
図(3)1-4 志津川湾流域での(a) 溶存有機態炭素濃度([DOC])、(b) 蛍光指標(FI)、および(c) 全溶存態鉄濃度([Fe]_T)の各月別変動。河川上・下流値は八幡川、折立川、水尻川に対する平均値。湾内の[Fe]_Tは、表層(0 m)における値。

(2) 有機物が自然水中の微量金属（鉄）の酸化還元反応に及ぼす影響

河川水と海水におけるFe(II)の酸化速度はpHの増加とともに直線的に増加することが示された(図(3)1-5)。同程度のpHにおいて河川水と海水のFe(II)酸化速度を比較すると、河川水のFe(II)酸化速度は、海水のそれよりも有意に大きくなった。一般に鉄の酸化還元反応は、水中に存在する腐植物質等の有機物の影響を受けることから、海水中の有機物は、河川水中の有機物よりもFe(II)が酸化されにくいと考えられる。一般にFe(II)の生物利用性はFe(III)よりも高いため、海水中に存在する有機物によって

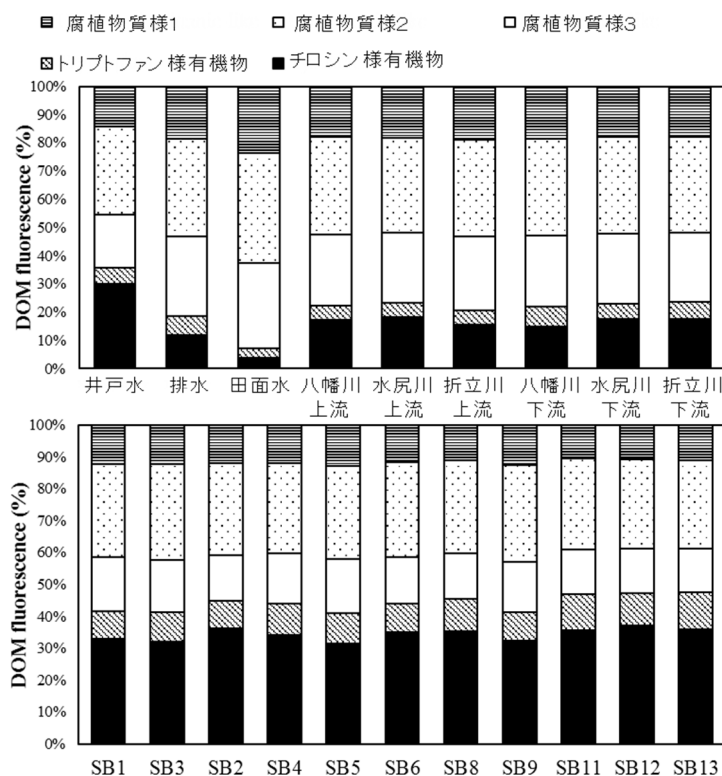
Fe(II)の酸化が抑制されることは、微細藻類による鉄の生物利用性を高めることに貢献している可能性がある。

溶存有機物の蛍光特性は、その有機物の性質に従って変化することが知られており、腐植物質様やタンパク質様の性質を持つ有機物は異なる蛍光特性を持つ。南三陸町と志津川湾における河川水および海水試料の蛍光特性を見ると、河川水では、腐植物質様の特性をもつ有機物が70%以上を占める一方で、海水試料中の有機物では腐植物質様の有機物が50%程度を占め、タンパク質様の有機物も50%程度を占めており、海水中では腐植物質以外の生物由来の有機物の存在割合が増加していた(図(3)1-6)。さらに、珪藻*Chaetoceros radicans*培養液においてもFe(II)酸化速度の低下が認められたことから、微細藻類等を含む微生物群集由来有機物は、Fe(II)酸化速度を減少させることによって、微量金属の生物利用性を高めることに貢献している可能性が示された(Fe(III)還元速度の変化が小さい場合)。



図(3) 1-5 pHおよび溶存態有機物(DOM)の起源とFe(II)の酸化速度の関係。塩分を30に調整した陸起源の他生性有機物が多く占める河川水(灰色のひし形と三角形)と海域由来の自生性有機物が多く占める沿岸水(黒色の四角と丸)の比較。同じpHではDOMの組成の違いのためFe(II)がFe(III)に酸化されにくい。破線は、河川水と沿岸海域の統計的な分布境界。

志津川湾に流れ込む河川の水質調査から、河川水中の溶存鉄濃度は、腐植物質様の有機物の存在量を示す紫外波長吸光度(A_{254})と正の相関を示すことが明らかとなっており、腐植物質は河川において鉄と錯体結合することによって、沿岸域へと溶存鉄を輸送する上で重要であることが明らかとなっている。したがって、陸域由来の腐植物質は陸域から海域へと生物利用が可能な溶存鉄を輸送する上で重要な役割を果たしている。そして、沿岸域において溶存態鉄が腐植物質から解離して微細藻類に摂取されるプロセスにおいて、微生物由来有機物は鉄の酸化還元反応や生物利用性に強く関与している可能性が示された。



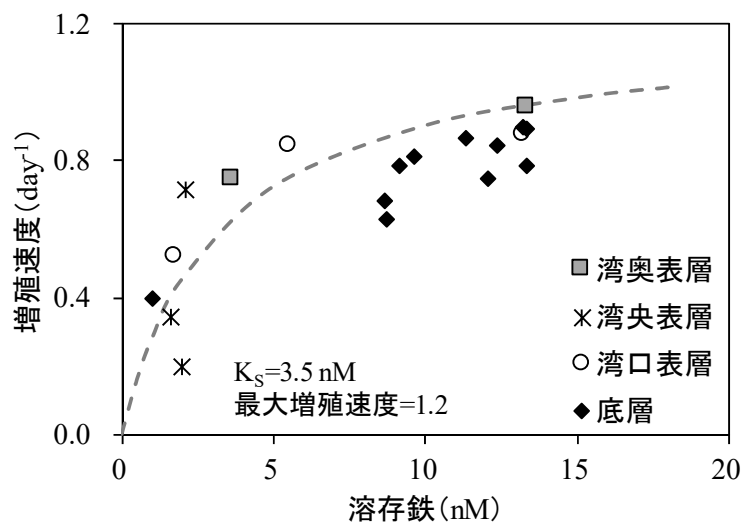
図(3)1-6 河川水（上）と海水（下）における紫外蛍光ピークの組成。ここで腐植物質様1は、海域で多く存在する腐植物質様有機物であり、腐植物質様2と3は、陸域に多く存在する腐植物質様有機物と考えられている。

(3) 志津川湾海水中での藻類の溶存鉄摂取ならびに河川・海洋由来の鉄の生物利用性

珪藻 *Chaetoceros radicans* の培養試験から得られた溶存鉄濃度と増殖速度の関係を図(3)1-7に示した。本種の増殖速度と溶存鉄濃度の関係は、ミカエリス・メンテン式に回帰でき最大増殖速度は 1.2 day^{-1} 、 K_s は 3.5 nM と推定され、多くの河川溶存鉄濃度はこの K_s 値より高いことが明らかになった。湾内（図(3)1-1の湾奥部の定点SB1とSB2）の溶存鉄濃度は、季節を通じて高い傾向が見られる一方（平均 7.0 nM ）、湾内と湾外の境界部付近の定点（図(3)1-1の定点SB6とSB8）では低い傾向が見られた（平均 1.6 nM ）（表(3)1-3）。湾外（図(3)1-1の定点SB13）の溶存鉄濃度は、季節的に大きく変動し、夏季と冬季に高く（平均 9.3 nM ）、春季と秋季に低い傾向が見られた（ 2.2 nM ）。以上の溶存鉄の分布から、湾内と湾外の境界部付近から湾外にかけての表層では、 K_s 値より低くなることが多く、潜在的に鉄による増殖制限が起こりうることを示唆している。一方、湾奥では河川から供給される溶存鉄によって、表層においても微細藻類の増殖に十分な鉄濃度が維持されていることが示唆された。

微細藻類である珪藻 *Skeletonema* の培養および、大型藻類のアラメ切片による河川由来および海洋由来の溶存鉄試料を用いた鉄摂取試験の結果、最大取り込み速度を一定としたときの両種の鉄摂取に関する半飽和定数 (K_s) は、河川由来と海洋由来で異なることが示唆された（表(3)1-4、図(3)1-8）。すなわち、海洋由来の培地と河川水由来の培地で溶存鉄濃度が等しいとき、海洋由来の培地のほうが鉄摂取速度は高い可能性が示唆された。EEM-PARAFAC解析を、鉄摂取試験に用いた河川水試料と海水試料とに適用すると河川水と海水で発色団の蛍光強度特性は有意に異なり、河川水では腐植物質様の有機物の蛍光強度組成が大きい、海水ではタンパク質様の有機物による発色団の蛍光強度組成が大きくなることが示された（図(3)1-9）。このような河川水と海水の有機物組成の違いが、鉄の化学形態や酸化還元速度だけでなく、微細藻類および大型藻類の鉄摂取に影響する可能性が示唆された。一般に、藻類由来の有機物における鉄の錯乖定数は、腐植物質等のそれよりも低い値を示すことが報告されている。すなわち、

海洋における微細藻類や大型藻類等由来の有機物が鉄摂取効率を高めている可能性があり、三陸沿岸を対象とした本研究においても先行研究と矛盾しない結果が示された。



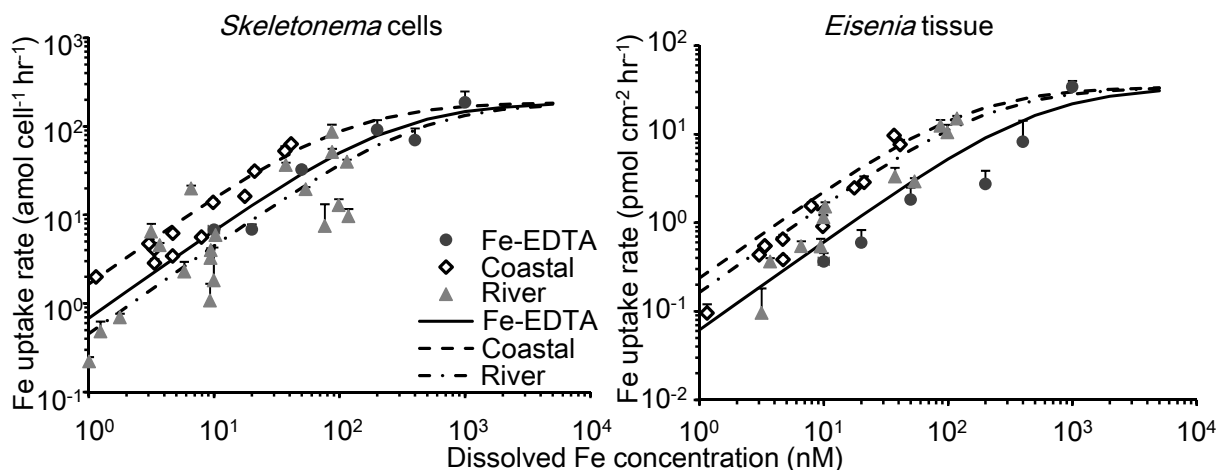
図(3)1-7 志津川湾の海水を添加した人工合成海水培地で珪藻 *Chaetoceros radicans* を培養したときの溶存鉄濃度と増殖速度の関係。

表(3)1-3 志津川湾における溶存鉄水平・鉛直分布の季節変動。

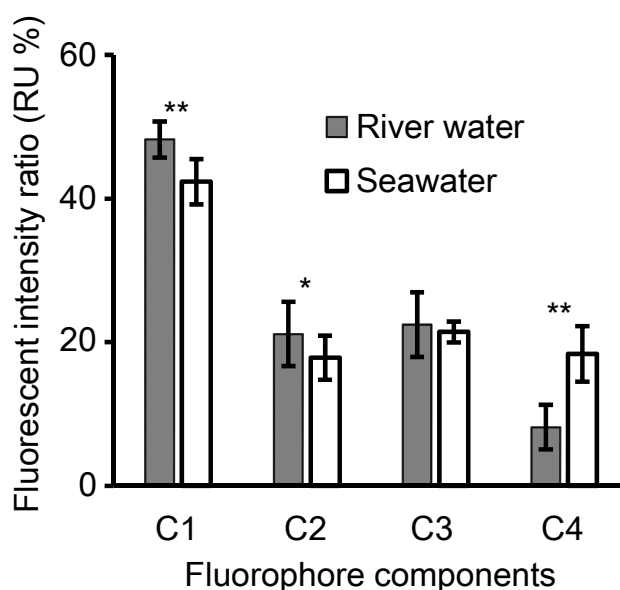
		溶存鉄 (nM)			塩分		
		湾内	境界部	湾外	湾内	境界部	湾外
2014年7月	0 m	4.3	2.1	13.2	32.1	33.3	32.6
	10 m	8.7	12.4	13.2	32.1	33.5	32.6
2014年10月	0 m	13.3	2.0	1.7	32.9	33.1	33.5
	10 m	13.3	9.1	9.6	33.3	33.4	33.3
2015年1月	0 m	6.8	0.9	5.5	33.5	34.5	34.3
	10 m	11.3	13.3	8.6	34.3	34.3	34.4
2015年4月	0 m	3.6	1.6	2.7	32.4	32.6	33.3
	10 m	12.1	1.0	0.6	32.4	32.6	33.3
2016年3月	0 m	11.1	8.9	4.1	33.5	33.9	34.0
	10 m	11.3	7.6	3.9	34.3	34.1	34.0

表(3)1-4 微細藻類 *Skeletonema* 細胞と大型藻類アラメ切片の鉄摂取試験によって得られた最大鉄摂取速度と半飽和定数 K_s (*、**、***はそれぞれp値が0.05、0.01、0.001%以下であったことを示す)。

		V_{max}	K_s (nM)		
			Fe-EDTA	Coastal	River
<i>Skeletonema</i> cells	187	$\text{amol cell}^{-1} \text{hr}^{-1}$	273*	112***	412***
<i>Eisenia</i> tissue	34.4	$\text{pmol cm}^{-2} \text{hr}^{-1}$	557	144***	209***



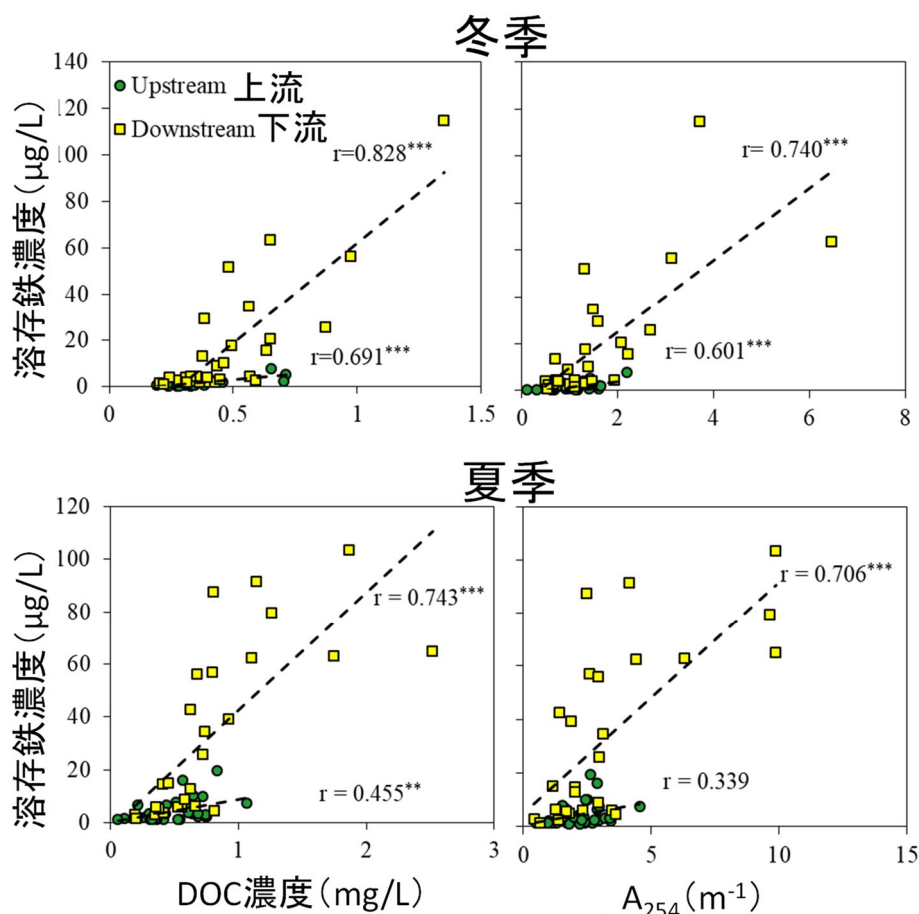
図(3)1-8 微細藻類*Skeletonema*細胞と大型藻類アラメ切片の鉄取り込み。海水（ひし形）および塩分30に調整した河川水（三角形）で培養した藻類の溶存鉄濃度に対する鉄摂取速度（平均値±標準偏差）。実線と破線はそれぞれ、前者と後者に当てはめたミカエリス・メンテン式を表す曲線。



図(3)1-9 鉄摂取試験に用いた河川水試料と海水試料によるEEM-PARAFAC解析の結果。C1～C3は腐植物質様の発色団を、C4はタンパク質様の発色団を示す。C1～C4については、図(3)1-13の図の説明および表(3)1-6を参照。

(4) 植生や人為的な土地被覆からの溶存鉄溶出に対する原単位の推定

様々な土地被覆を有する北上山地水系における調査結果から、中・下流域の溶存鉄濃度は $0.843 \sim 115 \mu\text{g L}^{-1}$ 、上流域の溶存鉄濃度は $0.161 \sim 7.64 \mu\text{g L}^{-1}$ であることが示され、この濃度レベルは国内河川で報告されている溶存鉄濃度の平均値($1 \sim 100 \mu\text{g L}^{-1}$)と概ね同程度であった。溶存鉄濃度を目的変数とし、各水質項目を説明変数として線形回帰すると、DOC濃度、 A_{254} は、上流、中・下流ともに溶存鉄濃度と有意な正の相関を示した(図(3)1-10)。この結果は、上述の南三陸町における河川水質調査の結果と一致しており、陸域から河川への溶存鉄溶出に対する有機物の重要性がこの調査でも確認できた。



図(3)1-10 三陸地方の河川における溶存鉄濃度と溶存有機物濃度および紫外部吸光度の関係。

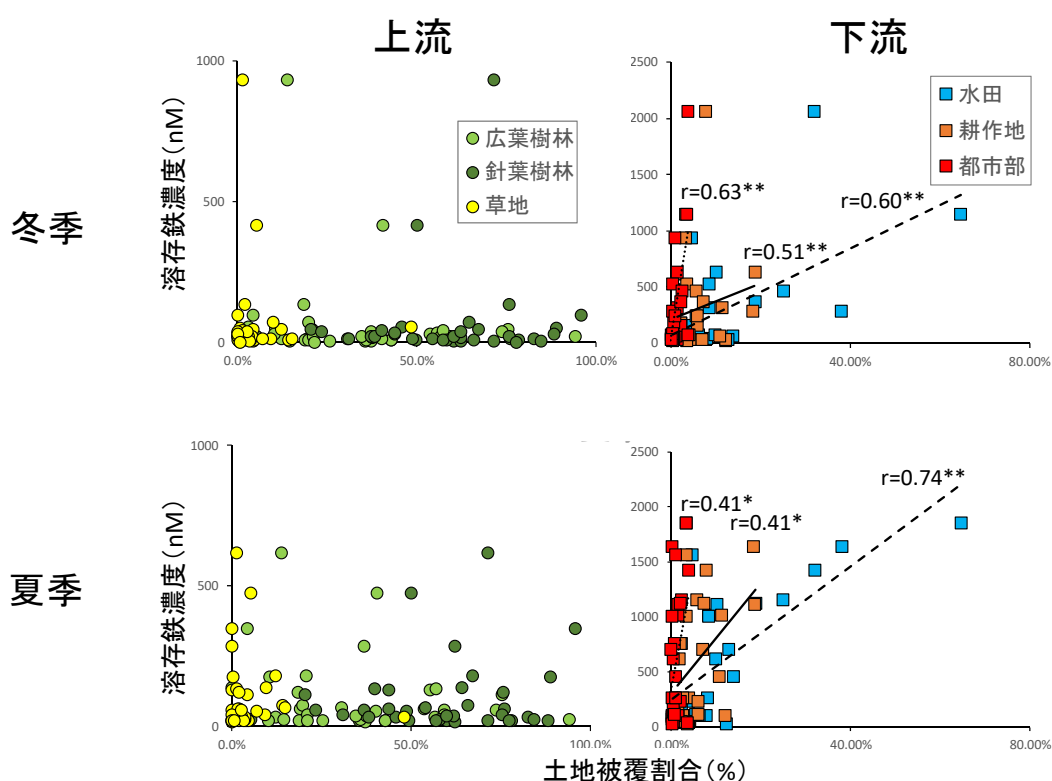
溶存鉄濃度は、上流、中・下流ともに水田と、中・下流で都市部と有意な正の相関があり、水田と都市部が鉄の供給に大きな影響を与えることが示された。一方、上流域において広葉樹林と針葉樹林等植生の土地被覆割合は、溶存鉄濃度と有意な関係を示さなかった(図(3)1-11)。このことは、中・下流域における人為的な土地利用からの溶存鉄溶出負荷が大きいこと、植生間での溶存鉄溶出負荷に大きな差がないことを示唆している。以上に加え、溶存鉄溶出負荷量を目的変数、土地被覆面積を説明変数とする重回帰分析から、土地被覆からの溶存鉄溶出の原単位 ($\text{g km}^2 \text{ day}^{-1}$) を明らかにした(表(3)1-5)。ここで、上流域の植生間に溶存鉄溶出に差が見られないことから、各植生をまとめて一つの植生として計算した。また、水田と水田以外の耕作地については多重共線性を考慮して、耕作地として一つにまとめた。耕作地 ($65.5 \sim 408 \text{ g km}^2 \text{ day}^{-1}$) と都市部 ($872 \sim 1182 \text{ g km}^2 \text{ day}^{-1}$) の原単位は、それぞれ植生の原単位 ($1.55 \sim 6.63 \text{ g km}^2 \text{ day}^{-1}$) の数十～数百倍に達し、人為的な土地被覆からの溶存鉄溶出が非常に大きいことが明らかとなった。

一般に、世界的な大河川であるアムール川や北海道の泥炭地を流れる河川などでは、溶存鉄の負荷源として湿原帯や河畔林が重要であり、アムール川では農地化や都市化によって溶存鉄濃度が減少することが指摘されている。他方、自然の平野部や湿地環境や少ない三陸沿岸では、水田や都市部などの人為的な土地利用が溶存鉄の負荷に大きく影響していることが示唆された。一般に水田では、植物・藻類残渣や堆肥など多くの有機物が存在する。さらに、冠水期間中の水田表層水は好氣的であり、微生物や光を介した反応により有機物は酸化分解を受け、酸性官能基(鉄との結合部位)が生成される。そして、水田土壌中などの嫌氣的な環境では、水酸化鉄が還元され、水中にFe(II)が溶出する。したがって、水田では土壌から溶出したFe(II)が表層水中の溶存有機物と錯体を形成することにより、溶存鉄濃度が上

昇すると考えられる。また、都市部から発生する家庭排水には、一般に河川水よりも高濃度の溶存有機物が含まれており、溶存鉄濃度も比較的高いことが知られている。

表(3)1-5 各土地被覆における溶存鉄溶出の原単位。

土地利用	原単位 (g km ² day ⁻¹)	
	冬季	夏季
植生	1.55	6.63
耕作地	65.5	408.0
都市部	872.0	1182.0



図(3)1-11土地被覆割合と溶存鉄濃度の関係。左側は上流域、右側は下流域、上側は冬季、下側は夏季の結果。

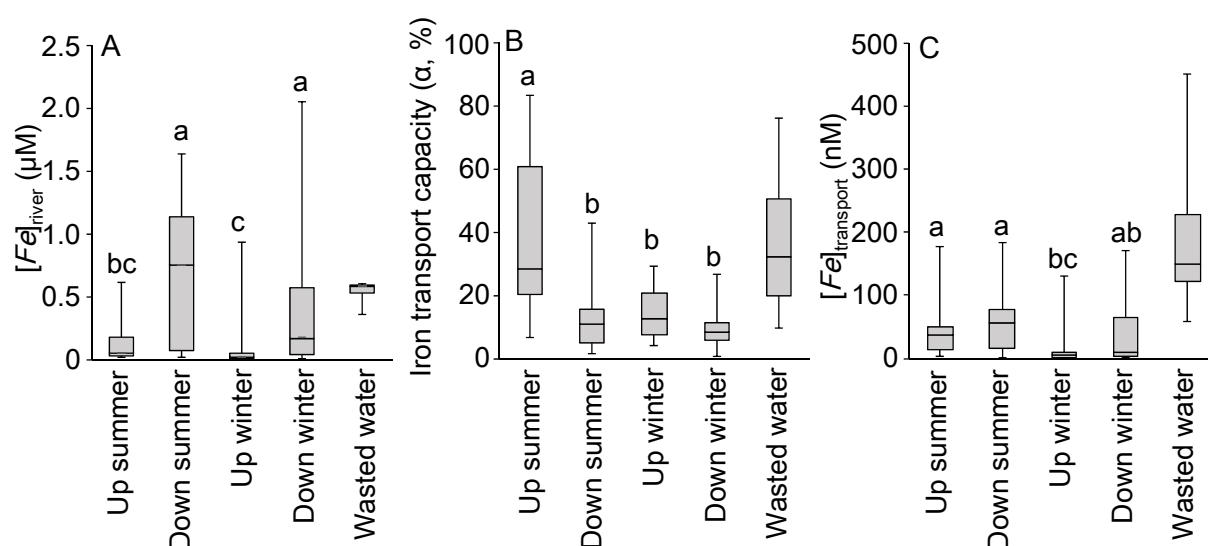
(5) 汽水域における河川から供給された溶存鉄の凝集挙動におよぼす土地被覆の影響

塩濃度に着目した実験では、河川から沿岸域への溶存鉄到達率 (α) は1.0 ~ 83%の範囲となった。実験前の河川水の溶存鉄濃度 ($[Fe]_{\text{river}}$) との積をとり、河川水中に含まれる海域に溶存態として到達可能な溶存鉄濃度 ($[Fe]_{\text{transport}}$) を計算すると、河川水試料の溶存鉄濃度 ($[Fe]_{\text{river}}$) が6.0 ~ 2,100 nMの範囲で変動するのに対し、到達可能な溶存鉄の濃度 ($[Fe]_{\text{transport}}$) は、0.59 ~ 450 nMの範囲であった(図(3)1-12)。調査期間(冬季と夏季)、調査地点(上流と中・下流)の4群に分けた多重検定の結果、上流における $[Fe]_{\text{river}}$ はそれぞれの季節の下流の値より有意に低い値を示した。夏季の上流のサンプル群

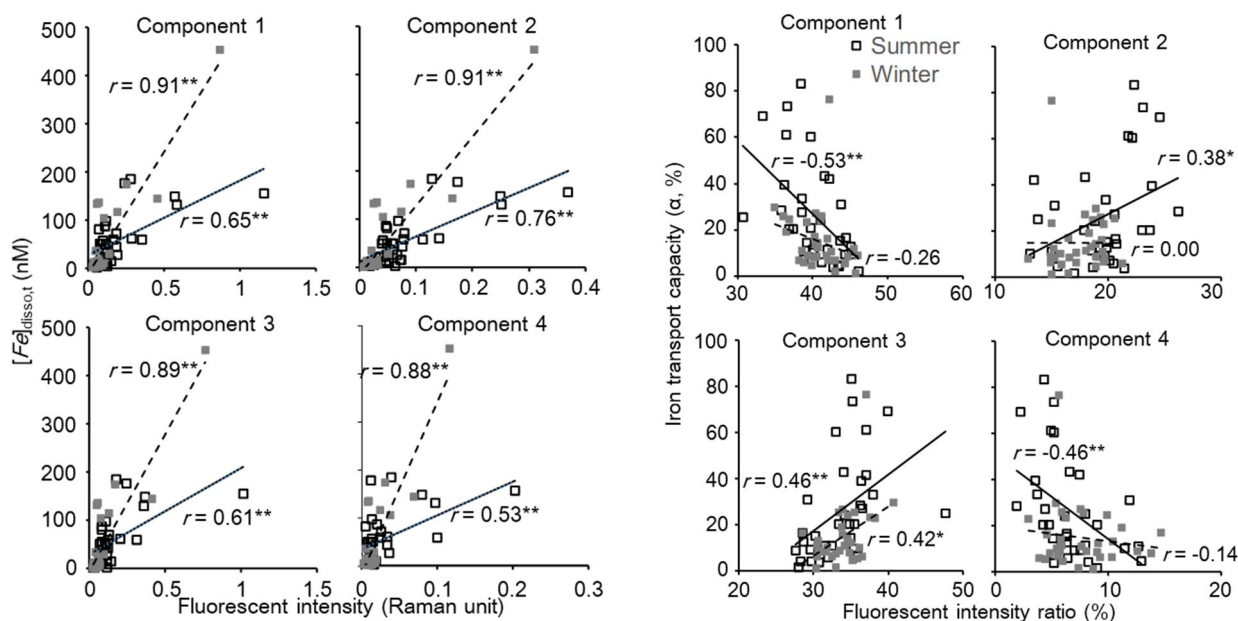
における $[Fe]_{transport}$ は、夏季および冬季の下流域における群の $[Fe]_{transport}$ に匹敵し、さらに冬季の上流域よりも高い値を示した。すべての水試料を含んだ $[Fe]_{transport}$ は、混合実験後の A_{254} 、EEM-PARAFACによる各蛍光ピークの蛍光強度と有意な正の相関を示した(図(3)1-13、表(3)1-6)。ここで、EEM-PARAFAC解析の結果、河川水のEEMは4種類の蛍光発色団(C1~C4)に分けることができ、先行研究で報告されている発色団の励起-蛍光特性からC1は腐植物質様、C2およびC3はフルボ酸様の有機物、C4はタンパク質様の有機物に対応すると考えられた(表(3)1-6)。

夏季に耕作地の土地被覆割合と正の相関を示し、一方で植生と負の相関を示した(表(3)1-7)。さらに、冬季には耕作地と都市部で正の相関を示し、一方で植生と負の相関を示した。混合実験後の $[Fe]_{transport}$ においても A_{254} 、EEM-PARAFAC分析による蛍光ピークと正の相関を示しており、河川から海洋に溶存鉄を供給する上でも腐植物質等の有機物は、重要な役割を果たしていることが明らかとなった。また、汽水域における鉄の凝集を考慮しても人為的な土地被覆は河川から海洋への溶存鉄輸送に関して重要であることが示された。

一方、河川から沿岸域への溶存鉄到達率(α)はC2とC3の割合と有意な正の相関を示し、一方でC1とC4の割合と有意な負の相関を示した(表(3)1-7、図(3)1-13)。C2やC3はフルボ酸様の有機物を含む発色団と考えられており、汽水域における溶存鉄の凝集を免れ、鉄を河川から海洋へと輸送するにはフルボ酸様の有機物が重要な働きをしている可能性が示唆された。 α は、冬季には土地被覆との関連は見られなかったものの、夏季に植生の割合と有意な正の相関を、耕作地の割合と有意な負の相関を示した(表(3)1-7、図(3)1-14)。このことは、植生由来の有機物は、河川から海洋へと溶存鉄を効率よく輸送している可能性を示唆している。実際に、夏季の上流域における高い溶存鉄到達率により植生から海洋に供給される溶存鉄($[Fe]_{transport}$)は、人為的な負荷が加わった中・下流域における $[Fe]_{transport}$ に匹敵した(図(3)1-12)。このような植生起源の有機物による高い溶存鉄輸送効率は、森と海のつながりを示す一旦であるかもしれない。また、鉄の凝集率は試水中の有機物組成や流域の土地被覆に従い大きく変化することが示された。



図(3)1-12 混合実験に用いた季節毎の上下流、排水のろ過済み河川水における溶存鉄濃度(A)、溶存鉄輸送率(B)、到達可能溶存鉄濃度(C)の比較(x軸のUp summer, Down summer, Up winter, Down winter, and wasted waterはそれぞれ、夏の上流(n = 15)、夏の下流(n = 15)、冬の上流(n = 15)、冬の下流(n = 15)、夏冬の排水(n = 4)を表す)。



図(3)1-13 混合実験後のEEM-PARAFAC分析による蛍光ピーク(Component 1~Component 4)と到達可能溶存鉄濃度($[Fe]_{\text{transport}}$) (左)、溶存鉄到達率(α) (右)との関係。EEM-PARAFAC解析の結果、河川水のEEMは4種類の蛍光発色団(Component 1~Component 4)に分けることができ、先行研究で報告されている発色団の励起-蛍光特性からComponent 1は腐植物質様、Component 2(C2)およびComponent 3(C3)はフルボ酸様の有機物、Component 4(C4)はタンパク質様の有機物に対応すると考えられた(表(3)1-6 参照)。

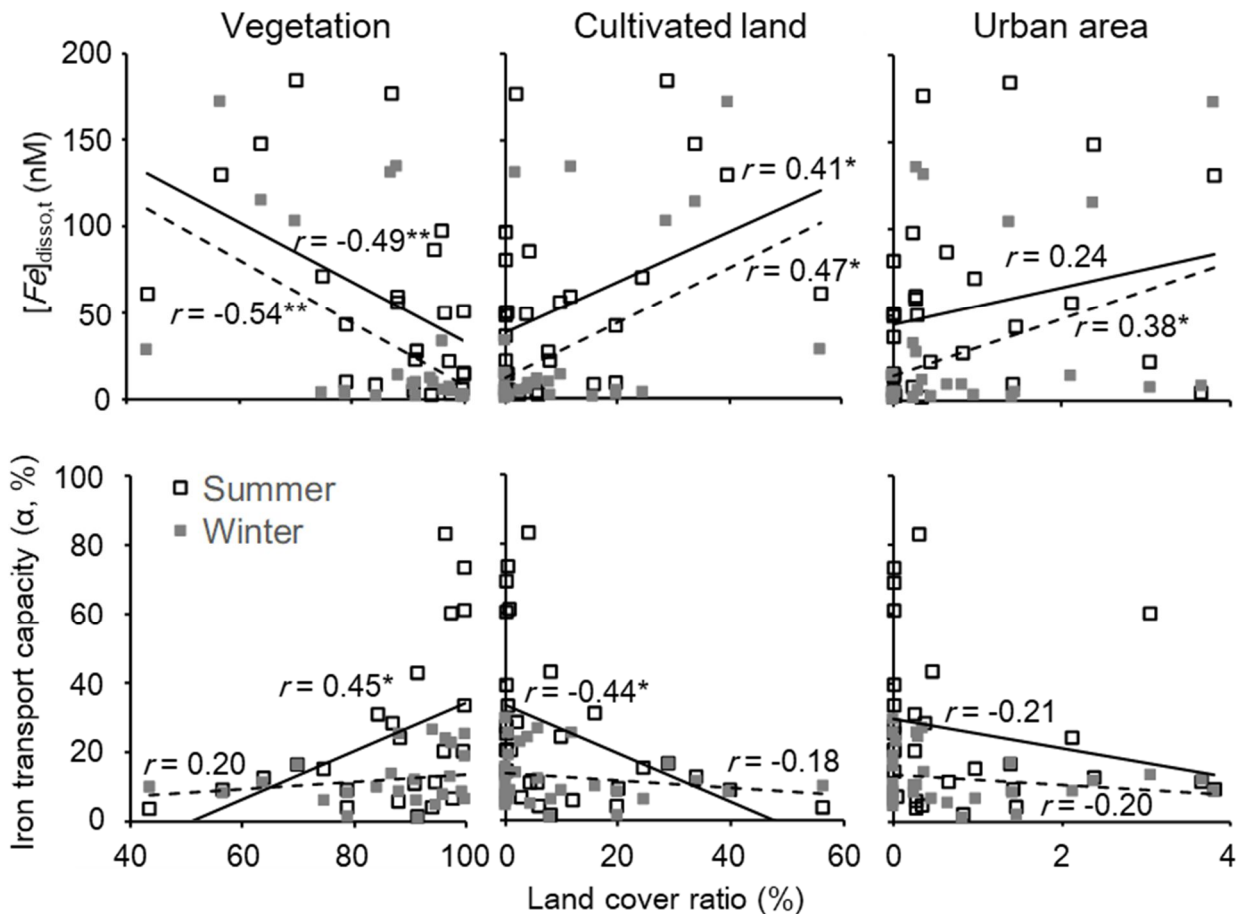
表(3)1-6 EEM-PARAFAC分析により分離した各蛍光有機物ピーク(Component 1~Component 4)と既存文献との比較。

Component	In this study		Description of DOM characteristics	References
	Excitation peak (nm)	Emission peak (nm)		
1	250, 325	440	Humic-like Terrestrial humic, highest in forest stream + wetland Terrestrial origin, humic fluorophore group. Dominating the DOM exposed from the natural catchments during the warmer months of the year. Also explored from agricultural catchment; absent in wastewater	Coble, 1996 Stedmon et al., 2003 Stedmon and Markager 2005a
2	260, 330, 445	490	Humic-like Terrestrial humic, common to a wide range of fresh water environments Terrestrial/autochthonous origin, fulvic acid fluorophore group. Present in all environments	Coble, 1996 Stedmon et al., 2003 Stedmon and Markager 2005a
3	260, 370	460	Humic-like Terrestrial humic, common to a wide range of fresh water environments Terrestrial/autochthonous origin, fulvic acid fluorophore group. Present in all environments	Coble, 1996 Stedmon et al., 2003 Stedmon and Markager 2005a
4	275	350, 470	Tryptophan-like, protein-like Autochthonous DOM Autochthonous origin, tyrosine like fluorescence. Fluorescence peak almost identical to free autochthonous processes. Correlated to terrestrial fluorescent material in forested catchments	Coble, 1996 Stedmon et al., 2003 Stedmon and Markager 2005a

表(3)1-7 到達可能溶存鉄濃度($[\text{Fe}]_{\text{transport}}$)、溶存鉄到達率(α)とEEM-PARAFAC分析による蛍光ピーク(C1~C4)、調査地における土地被覆割合との相関係数(*、**、***はそれぞれp値が0.05、0.01、0.001%以下であったことを示す)。

A		Objective variables	
		$[\text{Fe}]_{\text{river}}$	
Explanatory variables		Summer	Winter
Flourescent intensity	C1	0.65**	0.91**
	C2	0.76**	0.91**
	C3	0.61**	0.89**
	C4	0.53**	0.88**
Land cover ratio	Vegetation	-0.49**	-0.54**
	Cultivated land	0.41*	0.47*
	Urban area	0.24	0.38*

B		Iron transportation capacity (α)	
		Summer	Winter
Flourescent intensity ratio	C1	-0.53**	-0.26
	C2	0.38*	0.00
	C3	0.46**	0.42**
	C4	-0.46*	-0.14
Land cover ratio	Vegetation	0.45*	0.20
	Cultivated land	-0.44*	-0.18
	Urban area	-0.21	-0.20



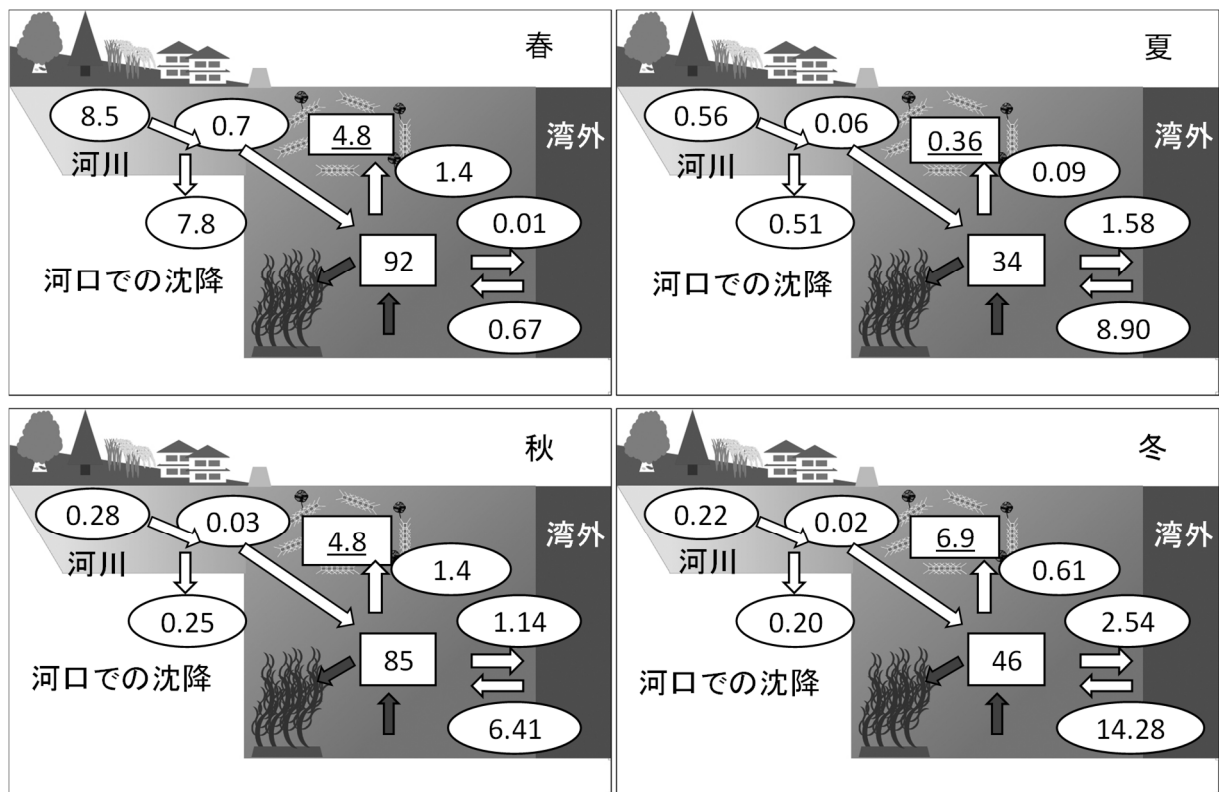
図(3)1-14 到達可能溶存鉄濃度($[\text{Fe}]_{\text{diss},t}$)、溶存鉄到達率(α)と土地被覆割合(植生、耕作地、都市部)との関係(*、**、***はそれぞれp値が0.05、0.01、0.001%以下であったことを示す)。

(6) 志津川湾における溶存鉄収支

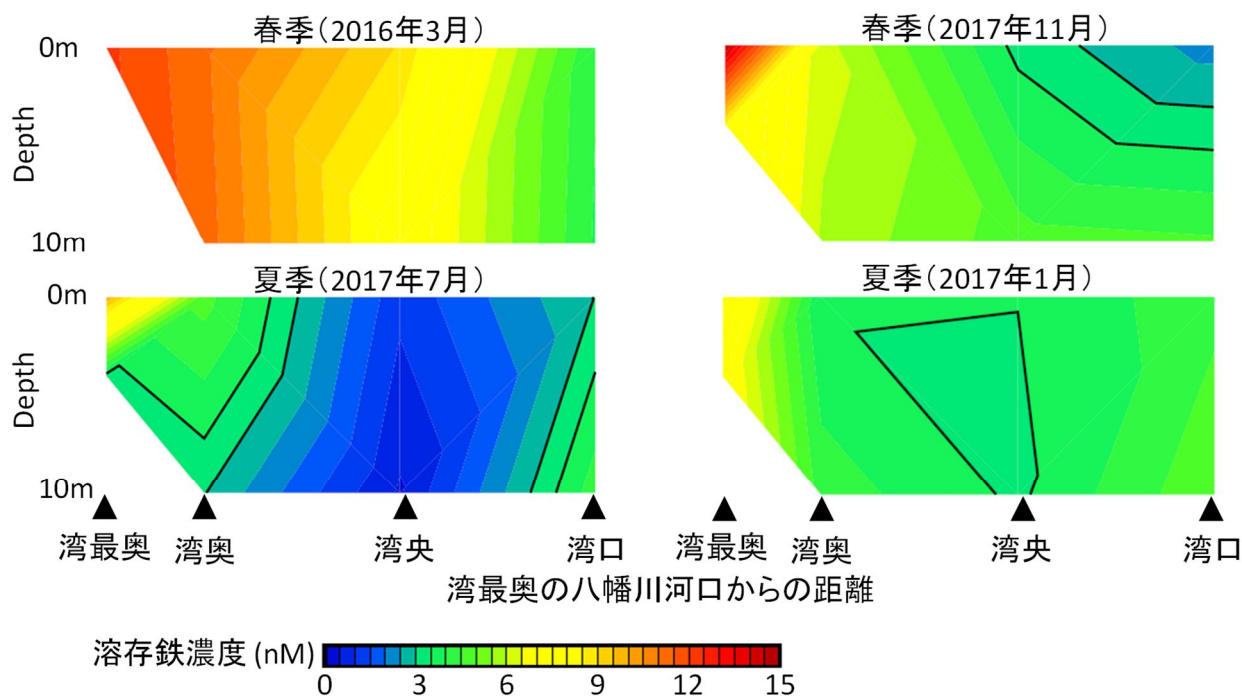
図(3)1-15に志津川湾内およびその流入河川における季節ごとの鉄収支を示した。河川から河口部へ0.22~8.5 kg/dayの溶存鉄が流入すると推定された。一方、河川水に含まれる溶存鉄の約90%が汽水域で除去されるため、河川から沿岸域へ供給される溶存鉄は1日あたり0.02~0.71 kg/dayであると計算され

た。志津川湾内の海水には溶存鉄が34～85 kg存在した。ここで湾内から湾外にかけて溶存鉄濃度の水平・鉛直分布は季節を問わず、河口付近で最も高く、湾奥部から湾口にかけて低くなる傾向が顕著であった(図(3)1-16)。ここで、河口部定点の表層における高い溶存鉄濃度は、河口域のごく狭い範囲の減少であると考えられたため、鉄収支図において、志津川湾の溶存鉄の内部ストックの計算範囲を湾奥から湾奥の定点とした。この時、平均溶存鉄濃度は冬季を除いて湾外より湾内で大きくなるため、物質拡散係数に基づく計算では、海水交換による湾内外での物質輸送では冬季を除き溶存鉄は湾内から湾外へ流出し、その値は7.8～33.9 kg day⁻¹であった。冬季には5.7 kg day⁻¹の溶存鉄が湾外から湾内へと流入すると計算された。いずれにせよ、河川から湾内への溶存鉄の供給量は海水交換による溶存鉄輸送量よりも2桁近く低く、海水交換は湾内の溶存鉄濃度を決定する支配的な要因であると示唆された。また、湾奥における高い溶存鉄濃度は、河川水による供給量だけでは説明が難しいため、海底からの溶出や風成塵等の溶存鉄供給機構が重要である可能性が示唆された。なお、調査期間中、湾外の定点の塩分は、33.7～34.1程度で一定しており、低塩分である親潮や高塩分である黒潮等の海流の顕著な影響は認められなかった。

湾内の微細藻類群集における溶存鉄現存量および鉄摂取速度は、それぞれ0.4～6.9 kg、0.1～1.4 kg day⁻¹であった(図(3)1-15)。微細藻類による鉄摂取速度は、湾内の溶存鉄現存量(34～85 kg)に対して0.1～1.5%程度であり、微細藻類による鉄摂取は湾内の溶存鉄動態に大きな影響を及ぼさないと考えられた。他方、河川からの供給速度(0.02～0.71 kg day⁻¹)は、微細藻類の鉄摂取速度の2.3～51%に達しており、湾内における微細藻類の鉄摂取に対して一定の貢献がある可能性があることが示された。



図(3)1-15 各季節における志津川湾での溶存鉄の収支。各矢印および楕円内の数値は一日あたりの溶存鉄のフラックス(kg day⁻¹)を、長方形および長方形内の数値は湾内海水中の溶存鉄の現存量(kg)を、長方形内の下線を付した数値は湾内の植物プランクトンとしての溶存鉄の現存量(kg)を示す。なお、大型藻類による溶存鉄の摂取、海底からの溶出については未推定(ダークグレーの矢印)。



図(3)1-16 湾最奥部から湾口までの溶存鉄濃度の鉛直プロファイルの季節変動。

(7) 志津川湾における有機物および鉄動態の概要（まとめ）

本節では、志津川湾を中心に、三陸沿岸を対象とした調査研究の成果を含めて、河川流域からの溶存鉄輸送と沿岸域における一次生産への溶存鉄の寄与についての知見を報告した。沿岸域生態系に対して河川流域からの物質輸送は重要であるという一般的な認識があり、鉄に関して定量的にまた具体的に解明されつつある。本節で取りまとめたように、特に河川流域の土地被覆が溶存鉄の供給量に影響しており、また鉄の輸送体としての有機リガンドについても土地被覆と関係していることが解明された。本研究では主に志津川湾およびその流域を中心として取り組んだが、沿岸域に対する流域の寄与については、河川流域の土地利用や規模、ならびに沿岸域の閉鎖性で相対的な重要度が決まるだろう。また、沿岸域での溶存鉄の生物利用性を明らかにするという観点では、流域から沿岸域への鉄輸送には原単位で示される負荷量と河口域での凝集や酸化還元反応などの化学的な特性の両面を把握して、沿岸域における生物生産に対する重要性を検討する必要がある。

以上のことを踏まえ、沿岸域の地形的および水文学的特性に着目して、一次生産者である海産植物の生存に必要な鉄を含めた微量金属類輸送の観点から、河川と沿岸のつながりに関する知見を一般化すると同時に、それに基づき沿岸における一次生産および河川流域と沿岸域の一体的な環境管理手法を開発することが重要である。鉄のように環境中に遍在する必須微量元素については、一般的な環境基準で規制されていないため、管理対象とはなっていない。しかし、本節でまとめたように、必須微量元素は一次生産プロセスに直接的に影響するため、窒素・リンのような一般的な栄養塩に加えて微量元素も積極的にモニタリングおよび制御することで、沿岸生態系の管理をさらに効率化できると考えられる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

森林、特に広葉樹がつくる腐食物質が鉄と錯体をつくり溶存鉄となって海に供給されるという「森は海の恋人」仮説により、三陸のカキ養殖業者が中心となって植林運動がはじめられた。しかし、定量的な溶存鉄循環に関する研究はなかった。そこで、三陸の開放性内湾である志津川湾およびその流入河川流域における溶存鉄の収支を解明した。集水域も含めた沿岸環境での鉄と有機物の発生源から沿岸域の一次生産および鉄収支までを網羅的に調べ、季節的な動態を明らかにした研究は世界初である。陸域由来の溶存鉄が腐植物質様の有機物によって沿岸域へと輸送され、汽水域における凝集を免れて溶存鉄が輸送される点において腐植物質(特にフルボ酸様のDOM)が重要であることを見出した。これは、森-海のつながりを示す証拠である。一方、海域での藻類の溶存鉄取り込みにはタンパク質様DOMが関連することも確認された。流入河川の集水域が狭い志津川湾など開放性内湾では、一次生産に対する陸域由来の溶存鉄の貢献は外洋からの供給に比べて限定的であったが河口域では貢献していた。さらに、陸域における土地利用と溶存鉄の供給を推定する土地利用ごとの溶存鉄の原単位も推定したところ、広葉樹林と針葉樹林では有意な差はなく、人為的な土地被覆からの溶存鉄溶出が非常に大きいことが明らかとなった。以上、沿岸域における森-海の物質輸送(特に鉄)に果たす有機物の役割が定性的かつ定量的に解明されたこと、またその鉄および有機物の観点から森-海のつながりを定量的に解明するための一連の方法論を提示したことは科学的意義がある。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

海洋政策本部参与会議の総合的な沿岸域の環境管理の在り方P Tの外部有識者として本研究成果で得られた、「人が関わって、より良い海をつくって豊かな恵みを得るという志津川湾における『里海』づくりの例」の中で、広葉樹が鉄と錯体をつくる腐食物質を生産するので広葉樹を植林しようという「森は海の恋人仮説」という考えに依拠するのではなく、海に土砂を流さない、大量出水を抑制するといった森林の多面的機能の重要性と山川里海のつながりを考慮する必要性を指摘し、内閣府第3期海洋基本計画の策定に貢献した(海洋基本計画の概要(その1) p.3の第3期海洋基本計画概要(その3) 海洋環境の維持・保全; 海洋基本計画の概要(その2) p.7の(参考) 第3期海洋基本計画における具体的施策(その2) 沿岸域の総合的管理; 海洋基本計画(平成30年5月15日閣議決定) p.22-23イ海洋環境の保全を前提とした海の恵みの持続的な享受, p.54ア沿岸域の総合的管理の推進:
<https://www8.cao.go.jp/ocean/policies/plan/plan03/plan03.html>)

<行政が活用することが見込まれる成果>

森-海の物質輸送に果たす有機物の役割に関して、研究成果を踏まえると次のような環境政策へ貢献でき、行政の活用が見込まれると考えられる。

流域から沿岸域への鉄輸送や志津川湾における鉄収支については、地域の環境行政に活用されることが期待される。具体的には流域の土地利用、植生管理、植林計画、排水処理に関する行政活動の参考となる。さらに、全国的には、各地での検証が必要となるものの、三陸沿岸域を対象とした研究成果が環境省の“支えよう 森里川海プロジェクト”といった森里川海のつながりを意識したプロジェクトなどに対して鉄動態の観点から科学的根拠を与えることができる。

推定した土地被覆と溶存鉄負荷量の原単位を含め、鉄の輸送プロセスや生物利用性などの観点から、三陸沿岸において、陸域での植林事業、農業、排水処理などに関して沿岸域を豊かにするための科学的かつ具体的な方針を提示することが可能となった。

鉄のように環境中に遍在する必須微量元素については、一般的な環境基準で規制されていないが、窒素・リンのような一般的な栄養塩に加えて微量元素も積極的にモニタリング・管理することで、沿岸生態系の管理をさらに効率化できる。

沿岸域の一次生産に対する陸域の重要度は沿岸域の閉鎖性と密接な関係にあるため、その閉鎖性の異

なる水域を対象として本研究のアプローチを適用することで、鉄や有機物の視点から、沿岸域の地形に応じた適切な河川の流域管理や沿岸生態系管理のための方法論を構築できる可能性がある。

前述の成果および方法論は世界的にも貴重な内容であるため、国際的にも本プロジェクトの成果をアピールすることで、沿岸環境保全の観点で国際貢献に貢献できる。

6. 国際共同研究等の状況

国際共同研究計画Future Earthアジア太平洋地域プログラムSustainability Initiative in the Marginal Seas of South and East Asia (SIMSEA)、カウンターパート氏名・所属・国名はR. V. Azanza・フィリピン大学海洋科学研究所・フィリピン、参加、SIMSEAは、国際科学会議アジア太平洋地域委員会 (ICSU RCAP) が、関係各国の研究者やステークホルダーの協働を促し、縁辺海の安定化に貢献することを目的に設立された国際プログラムと国際的に位置付けられており、アジアにおける開放性内湾などの沿岸海域におけるFuture Earthの重要な取組みとして発展している。

国際共同研究計画Future Earth Coasts、カウンターパート氏名・所属・国名はValerie Cummins・University College Cork・アイルランド、参加、Future Earth Coastsは、Future Earthの中で沿岸域における持続可能性と地球スケールの環境変化への適応を目指した研究プロジェクトとして国際的に位置付けられており、IGBPとIHDPの下で実施されていたLOICZ (Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone) の後継のもので、沿岸域に関する国内の自然科学・工学・社会科学研究者が連携し、政策決定者、産業界との協業を目指して活動している。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) H. ITO, M. FUJII, Y. MASAGO, T. D. WAITE and T. OMURA: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 154, 81-97 (2015)
 “Effect of Ionic Strength on Ligand Exchange Kinetics between a Mononuclear Ferric Citrate Complex and Siderophore Desferrioxamine B”
- 2) 櫻庭敬之、伊藤紘晃、藤井学、Lee Ying Ping、梶原晶彦、吉村千洋、渡部徹：土木学会論文集G (環境), 71(7), III_287-III_295, (2015)
 「各種森林及び農耕地から供給される有機鉄の特性比較分析」
- 3) M. FUJII, A. C. Y. YEUNG and T. D. WAITE: *Environmental Science & Technology*, 49(15), 9133-9142 (2015)
 “Competitive Effects of Calcium and Magnesium Ions on the Photochemical Transformation and Associated Cellular Uptake of Iron by the Freshwater Cyanobacterial Phytoplankton *Microcystis aeruginosa*”
- 4) M. FUJII, T. C. DANG, M. W. BLIGH and T. D. WAITE: *Limnology and Oceanography*, 61(6), 2151-2164 (2016)
 “Cellular Characteristics and Growth Behavior of Iron-limited *Microcystis aeruginosa* in Nutrient-depleted and Nutrient-replete Chemostat Systems”
- 5) Y. P. LEE, M. FUJII, K. TERAOKA, T. KIKUCHI, and C. YOSHIMURA: *Water Research*, 103, 160-169 (2016)
 “Effect of Dissolved Organic Matter on Fe(II) Oxidation in Natural and Engineered Waters”
- 6) 夏池真史、菊地哲郎、Lee Ying Ping、伊藤紘晃、藤井学、吉村千洋、渡部徹：水環境学会誌, 39(6), 197-210 (2016)
 「自然水中における鉄の化学種と生物利用性—鉄と有機物の動態からみる森・川・海のつながり— (総説)」
- 7) T. KIKUCHI, M. FUJII, K. TERAOKA, R. JIWEI and C. YOSHIMURA: *Science of the Total*

- Environment, 576, 36-45 (2017)
 “Correlations between Aromaticity of Dissolved Organic Matter and Trace Metal Concentrations in Natural and Effluent Waters: A Case Study in the Sagami River Basin, Japan”
- 8) Y.P. LEE, M. FUJII, T. KIKUCHI, M. NATSUIKE, H. ITO, T. WATANABE, and C. YOSHIMURA: Chemosphere, 180, 221-228 (2017)
 “Importance of Allochthonous and Autochthonous Dissolved Organic Matter in Fe(II) Oxidation: A Case Study in Shizugawa Bay Watershed, Japan”
- 9) Y.P. LEE, M. FUJII, T. KIKUCHI, T. TERA0, and C. YOSHIMURA: PLOS ONE, 12(4), doi:10.1371/journal.pone.0176484 (2017)
 “Variation of Iron Redox Kinetics and its Relation with Molecular Composition of Standard Humic Substances at Circumneutral pH”
- 10) M. ATEIA, J. RAN, M. FUJII, and C. YOSHIMURA: International Journal of Environmental Science and Technology 14: 867, doi:10.1007/s13762-016-1214-x (2017)
 “The Relationship between Molecular Composition and Fluorescence Properties of Humic Substances”
- 11) 遠藤雄大、夏池真史、宮本真奈美、藤井学、吉村千洋：土木学会論文集B1(水工学), 74(4), 535-540, (2018)
 「北上山地水系の冬季における土地被覆の溶存鉄負荷量に対する影響およびその原単位」
- 12) 小松輝久、佐々修司、門谷茂、吉村千洋、藤井学、夏池真史、西村修、坂巻隆史、柳哲雄：沿岸海洋研究, 56(1), 21-29, (2018)
 「開放性内湾を対象とした沿岸環境管理法の研究：南三陸志津川湾の例」

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 小松輝久、門谷茂、吉村千洋、西村修、柳哲雄：水産学会誌, 83(6), 1009, (2017)
 「志津川湾における生物生産と陸からの負荷：栄養塩, 微量元素, 有機物」
- 2) 小松輝久、佐々修司、浅田みなみ、門谷茂、吉村千洋、藤井学、夏池真史、西村修、坂巻隆史、柳哲雄：水産海洋研究, 81(2), 125-128, (2017)
 「基調講演 開放型内湾における里海の実現を目指して：三陸志津川湾を例として」
- 3) 吉村千洋、夏池真史、藤井学：月刊下水道, 2018年4月号, 41-45 (2018)
 「微量元素動態からみる下水・川・海のつながり～スマートな地域環境管理に向けて～」
- 4) 柳哲雄編著：里海管理論、農林統計協会、40-52 (2019)
 「2.3 森は海の恋人か：鉄」(執筆担当：藤井学、夏池真史、伊藤紘晃、吉村千洋)
- 5) M. FUJII, A. AYMAN, M. NATSUIKE, H. ITO and C. YOSHIMURA: In Integrated Coastal Management in the Japanese Satoumi ed. by T. Yanagi, Elsevier, Amsterdam, pp. 32-39 (in press)
 “2.3 Is the Forest a Lover of the Sea? Iron”

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 吉村千洋：シンポジウム『豊かな志津川湾の創生』(2014)
 「森一川一海の微量元素輸送」
- 2) 菊地哲郎、藤井学、吉村千洋：日本地球化学会第62回年会(2015)
 「自然水および下水処理水中の微量元素の溶解性に及ぼす溶存有機物の分子特性の影響」
- 3) Y. P. LEE, M. FUJII, C. YOSHIMURA and T. KIKUCHI: Japan Geoscience Union Meeting (2015)
 “Seasonal and spatial variation of dissolved iron transformation kinetics in the

- Shizugawa bay and its adjacent rivers”
- 4) 吉村千洋：日本水環境学会東北支部セミナー 講演会 (2015)
「『森は海の恋人』論を科学的に検証する」
 - 5) Y. P. LEE, M. FUJII, C. YOSHIMURA and T. KIKUCHI: International Symposium on Concept and law of green infrastructure in rivers and coasts (2015)
“Seasonal and spatial variation of dissolved iron transformation kinetics in freshwater and treated municipal wastewater”
 - 6) Y. ENDO, Y. P. LEE, T. KIKUCHI, M. NATSUIKE, M. FUJII, C. YOSHIMURA, T. SAKURABA, H. ITO and T. WATANABE: International Symposium on Concept and law of green infrastructure in rivers and coasts (2015)
“Iron transportation from land to ocean and its impact on primary production -To establish a new method for watershed management”
 - 7) T. SAKURABA, H. ITO, T. KIKUCHI, M. FUJII, C. YOSHIMURA, and T. WATANABE: The 6th IWA-ASPIRE Conference and Exhibition, Beijing (2015)
“Relation of land cover to elution characteristics of iron and organic matters from soil”
 - 8) 櫻庭敬之、伊藤紘晃、藤井学、Lee Ying Ping、梶原晶彦、吉村千洋、渡部徹：第52回環境工学研究フォーラム (2015)
「各種森林及び農耕地から供給される有機鉄の特性比較分析」
 - 9) 吉村千洋：環境省「環境研究総合推進費」S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成27年度公開成果発表会シンポジウム (2015)
「森-海の物質輸送に果たす有機物の役割解明」
 - 10) 櫻庭敬之、伊藤紘晃、藤井学、渡部徹：平成27年度土木学会東北支部技術研究発表会 (2016)
「盛岡市森林及び農耕地から供給される有機鉄の季節別特性」
 - 11) Y.P. LEE, M. FUJII, K. TERA0, T. KIKUCHI and C. YOSHIMURA: Goldshmidt Conference (2016)
“Influence of dissolved organic matter properties on Fe(II) oxidation in natural and engineered waters”
 - 12) Y.P. LEE, M. FUJII, K. TERA0, T. KIKUCHI and C. YOSHIMURA: ASLO 2016 Summer Meeting (2016)
“The influence of dissolved organic matter on Fe(II) oxidation in natural and engineered waters”
 - 13) M. NATSUIKE, T. KIKUCHI, Y.P. LEE, Y. ENDO, L. YUHE, M. FUJII and C. YOSHIMURA: EMECS’ 11 SeaCoasts XXVI (2016)
“Iron availability by coastal diatom *Chaetoceros* sp. in the Shizugawa Bay, Japan”
 - 14) 夏池真史、Lee Ying Ping、遠藤雄大、菊地哲郎、藤井学、吉村千洋：日本プランクトン学会・ベントス学会合同大会 (2016)
「宮城県志津川湾およびその流域における溶存鉄動態の解明」
 - 15) 小松輝久、門谷茂、吉村千洋、西村修、柳哲雄：日本水産学会平成29年度春季大会シンポジウム企画「森川里海のつながりを科学で説明できるか？」, 東京海洋大学 (2017)
「志津川湾における生物生産と陸からの負荷：栄養塩, 微量金属, 有機物」
 - 16) T. KOMATSU, S. SASA, S. MONTANI, O. NISHIMURA, T. SAKAMAKI, C. YOSHIMURA, M. FUJII and T. YANAGI: National Seminar on Science Technology for Sabang Marine Tourism Development and the 4th International Workshop on Sato Umi, Auditorium and Main Commission of BPPT II, Jakarta, Indonesia (2017)
“Satoumi approach for realizing sustainable coastal use in a rias-type bay: a case of

Shizugawa Bay in Sanriku Coast after the huge tsunami on 11 March 2011”

- 17) T. KOMATSU, S. MONTANI, C. YOSHIMURA, O. NISHIMURA, S. SASA, Y. YAMAMOTO and T. YANAGI: COAST Bordeaux 2017, University of Bordeaux, Bordeaux, France, 7 to 10 November 2017 (2017)
 “Modern Satoumi approach to an open rias-type bay, Shizugawa Bay, Sanriku Coast, Japan after the hit by the huge tsunami in 2011 for realizing sustainable environment and prosperous aquaculture”
- 18) 遠藤雄大、夏池真史、宮本真奈美、藤井学、吉村千洋：第62回水工学講演会（2018）
 「北上山地水系の冬季における土地被覆の溶存鉄負荷量に対する影響およびその原単位」
- 19) 吉村千洋、遠藤雄大、夏池真史、藤井学：第21回日本水環境学会シンポジウム（2018）
 「河川流域から沿岸域への溶存鉄の供給～溶存有機物との関係～」
- 20) 小松輝久、佐々修司、門谷 茂、吉村千洋、藤井 学、夏池真史、西村 修、坂巻隆史、柳 哲雄：日本水環境学会 第27回市民セミナー「豊かな里海の創生～河川流域と沿岸域の関係～」，東京（2018）
- 21) M. NATSUIKE, Y. ENDO, H. ITO, M. MIYAMOTO, C. YOSHIMURA and M. FUJII: The 12th International Conference on the Environmental Management of the Enclosed Coastal Seas (EMECS12) (2018)
 “Relation of land cover in river basins to fluorescent dissolved organic matter and iron flocculation in estuaries”
- 22) C. YOSHIMURA, M. NATSUIKE, M. FUJII, Y. ENDO and A. AYMAN: ASLO 2019 Aquatic Sciences Meeting (2019)
 “Land cover in river basins and iron supply to coastal ecosystem in northeast Japan”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム「豊かな志津川湾の創生」（主催：（NPO）環境創生研究フォーラム・（公財）国際エメックスセンター、2014年10月24日、東北大学工学研究科青葉山会館、聴講者50名）にて講演
- 2) 一般公開シンポジウム「環境研究総合推進費S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成26年度公開成果発表会」（主催：環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト・（公財）国際エメックスセンター、2014年11月21日三宮研修センター、聴講者約70名）にて講演
- 4) 一般公開シンポジウム「環境研究総合推進費S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成27年度公開成果発表会」（主催：環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト・（公財）国際エメックスセンター、2015年11月5日、WTCコンファレンスセンター Room A、聴講者約70名）にて講演
- 5) 一般公開シンポジウム「環境研究総合推進費S-13持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成28年度公開成果発表会」（主催：環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト・（公財）国際エメックスセンター、2016年11月30日、大手町ファーストスクエアカンファレンス Room A、聴講者約70名）にて講演
- 6) 日本水産学会平成29年度春季大会シンポジウム企画「森川里海のつながりを科学で説明できるか？」（主催：日本水産学会、2017年3月26日、東京海洋大学、聴講者約80名）にて講演
- 7) 日本水環境学会 第27回市民セミナー「豊かな里海の創生～河川流域と沿岸域の関係～」（主催 日本水環境学会、2018年8月3日、地球環境カレッジホール、聴講生約100名）にて講演（2018）

- 8) 日本海洋学会2017年秋季大会沿岸海洋シンポジウム「持続可能な沿岸海域管理法-環境省推進費戦略的研究開発領域(S-13)の成果から」(主催:日本海洋学会沿岸海洋研究会、2017年10月12日、東北大学青葉山北キャンパス数理科学記念館、聴講者約80名)にて講演
- 9) 一般公開シンポジウム「環境研究総合推進費S-13 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成29年度公開成果発表会」(主催:環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト・(公財)国際エメックスセンター、2017年11月21日、AP 新橋 虎ノ門11階Room A、聴講者約70名)にて講演
- 10) 一般公開シンポジウム「環境研究総合推進費S-13 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成30年度公開成果発表会」(主催:環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト・(公財)国際エメックスセンター、2018年11月29日、WTCコンファレンスセンター3階Room A、聴講者約70名)にて講演

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 特集・水環境マネジメント, 日本下水道新聞, 2016年12月21日

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

II-4 森-海の物質輸送に果たす有機物の役割解明（粒状有機物）

国立大学法人東北大学 大学院工学研究科
国立大学法人東北大学 大学院工学研究科

西村修
坂巻隆史（平成26年度～平成30年度）

平成26年度～30年度累計予算額：34,214千円（うち平成30年度：6,155千円）

累計予算額は、間接経費を含む

【要旨】

開放性内湾である南三陸町志津川湾において、流域由来の粒状有機物(POC)の流入を含めて湾内におけるPOC動態の特性を理解するとともに、湾内の養殖カキや底生動物を含む一次消費者にとってより重要な餌源となっている粒状有機物の起源を明らかにした。さらに、カキ養殖場における粒状有機物の動態と、そこから供給される粒状有機物による酸素消費およびそれらの底層環境への影響を明らかにした。湾内においてカキ養殖筏台数密度の異なる2海域のそれぞれ2点でカキ稚貝からの成長をおよそ2年にわたって調べた。その結果、養殖密度の低い海域でカキの成長が速かった。メソコズム実験により、月齢の異なる3、15、27ヶ月のカキの糞・擬糞中の有機物量（同化されなかった有機物）の占める割合を調べたところ、若齢ガキほど有機物量の割合は低かった。糞・擬糞の単位乾燥重量あたりの分解に必要な酸素消費速度は、老齢ガキほど多かった。これらの結果は、養殖筏台数密度を下げれば、若齢で出荷でき、海底環境にもよいということを示している。本研究は、適切な人手のかけ方（養殖筏台数密度の削減）にすること（里海手法）で、持続的な養殖と健全な環境が両立することの根拠を与えた。三陸沿岸地域全域を対象に河川水中のPOC濃度と土地利用の関係を調べた。その結果、POC濃度は、流域内の森林面積割合と負の、農地と市街地の面積割合の和と正の有意な関係を示した。流域内の森林を広葉落葉樹林と針葉樹林に分けた各面積割合と河川水中のPOC濃度との間には明確な関係は認められなかった。S-13-5総括班での志津川湾数値生態系シミュレーションモデル構築の際のモデルパラメータを提供した。

【キーワード】

粒状有機物、流域、一次消費、カキ養殖、酸素消費

1. はじめに

流域からは、森林植生により生産された有機物のほか、河道内での一次生産や人為起源のものなど様々な粒状有機物が河川を通じて沿岸海域へ供給される。それらの量・質は、流域の地形や植生、土地利用など様々な因子に依存し流域間で大きく異なる¹⁻³⁾。また、沿岸海域へは、流域以外にもそこで生産される植物プランクトンや海藻・海藻、外洋起源のものなど、様々な起源を持った粒状有機物が供給される。沿岸海域の消費者生物には、栄養的な要求や摂餌様式が異なる生物が多様に存在し、粒状有機物の利用の仕方も潜在的に多様と考えられる⁴⁾。そのような中で、流域から流入する粒状有機物の沿岸海域における生態学的な役割は一義的に定まらず、実際に様々な海域で研究された沿岸海域の二次生産に対する流域由来の粒状有機物の役割・重要性をめぐっては、研究によって異なる結論や解釈が導かれてきた⁵⁾。これらの理解には、様々な流域・海域の特性をふまえた知見の集積が必要である。

沿岸海域における粒状有機物の動態は、現行のCODに基づく環境管理とも密接に関わる。これまで、発生源負荷対策等を通じて陸域からの有機物そのものの流入と栄養塩削減を通じた内部生産の抑制により、海域のCODの低減が図られてきた。一方で、本研究が対象とした三陸沿岸を含め多くの各地の内湾では、養殖漁業が盛んに行われている。養殖漁業の中でもカキ等の無給餌型の養殖漁業は、投餌を必要とせず比較的環境負荷が少ないと考えられてきた。しかしそのような養殖漁業においても、養殖生物のろ過摂食と排泄を通じて海水中の粒状有機物が強制的に海底へ輸送され、さらに養殖施設から様々な付着生物が枯死・脱落する。よって、無給型養殖も底層への有機物供給を増大させ、その分解による溶存酸素濃度の低下や底質悪化を引き起こす可能性がある。それらのプロセスは現行のCOD管理の空間スケールに比べて比較的局所的ともいえるが、養殖が大規模になれば内湾海域で広く底層環境を悪化させる恐れもある。しかしながら、無給餌型養殖における有機物動態やその環境影響についてはこれまで詳細な検討が行われていない。

2. 研究開発目的

本研究では以下の4点を目的として、比較的開放性の高い内湾である南三陸町志津川湾を対象とした現地調査を実施した。

- 1) 流域由来の粒状有機物の流入を含めて湾内における粒状有機物動態の特性を理解するとともに、湾内の養殖カキや底生動物を含む一次消費者にとってより重要な餌源となっている粒状有機物の起源を明らかにする。特に、流域から供給される粒状有機物の利用が行われているかに着目した。
- 2) カキ養殖場における粒状有機物の動態を明らかにする。さらに、そこから供給される粒状有機物による酸素消費とそれらの底層環境への影響を明らかにする。
- 3) 上記の一連の調査を通じて、S-13プロジェクトのサブテーマ5における数値生態系シミュレーションモデル構築にあたって、粒状有機物の動態に関わる境界条件やモデルパラメータの提示を行う。
- 4) 上記で得られる知見をもとに、粒状有機物動態の観点から、同湾において環境との調和をはかりながら養殖漁業が持続的に維持されるような環境管理の考え方・あり方を提示する。

3. 研究開発方法

(1) 志津川湾における粒状有機物の分布と河川からの流入の調査

(1) 1 河川と海域における粒状有機物の分布調査

志津川湾における粒状有機物の時空間変動の特性を理解するため、2014年6月から2015年6月まで河川水および海水の定期採水を実施した。志津川湾内の湾奥・湾中・湾口各付近に採水地点ずつを設け、さらに各地点で表層および水深10mを採水点とした(図(3)2-1)。同じ期間、志津川湾に流入する3河川(八幡川、水尻川、折立川)の下流付近に採水地点をそれぞれ設定し毎月採水を行った。採取された試料については、有機炭素・窒素の濃度定量およびそれらの炭素安定同位体分析を行った。

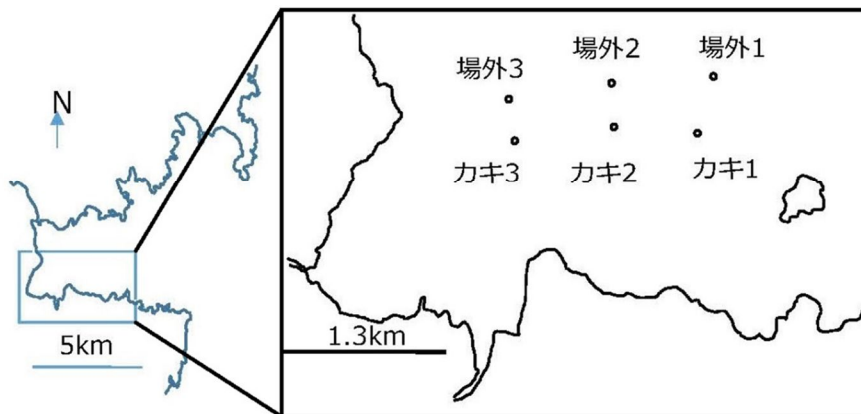
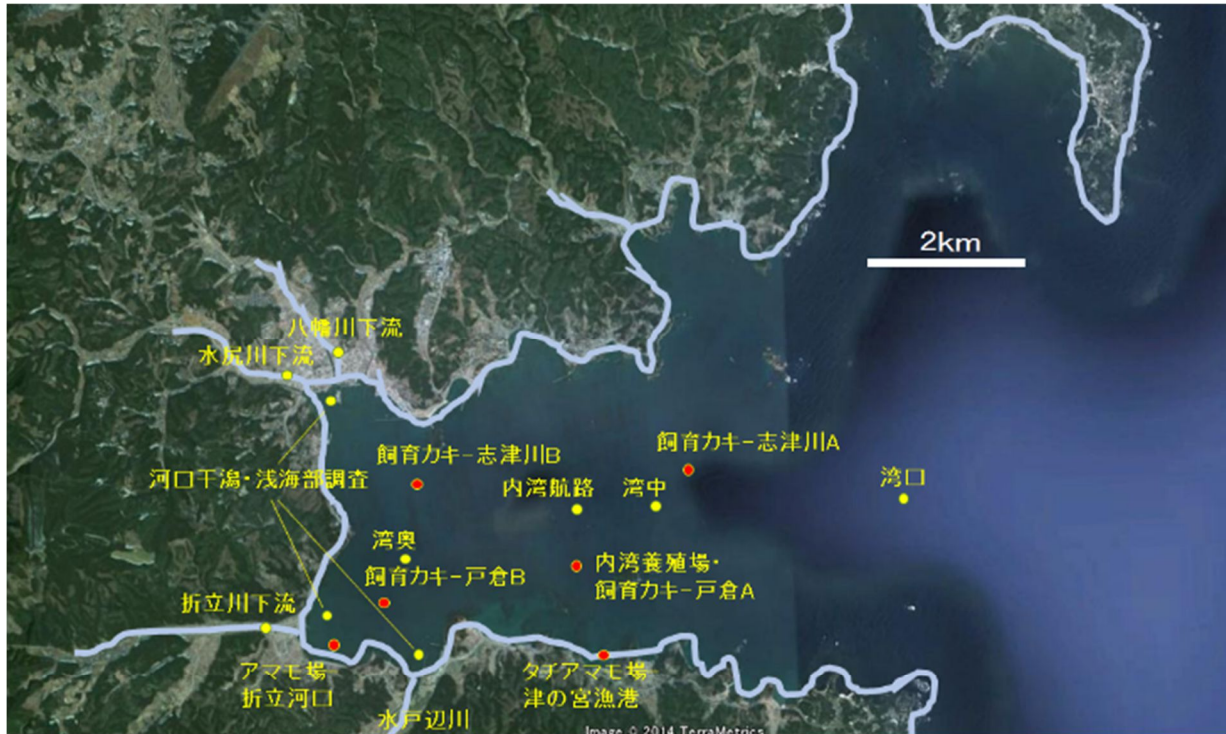
また、志津川湾内の底質における有機物含有量およびその起源の分布を明らかにするため、2014年8月に志津川湾内の多点における底質サンプリングを実施した。湾内の湾中から湾奥部を中心に14地点において、船上からエクマンバージ採泥器を投下し海底の表層底質を採取した。これらの底質試料は、有機炭素・窒素の含有率および安定同位体比の分析に供した。

(1) 2 粒状有機物動態に関わる各種フラックスの比較

志津川湾において粒状有機物動態に関わる各種フラックスの比較や収支を検討した。2015年9月には、現地での明暗瓶法により湾内のプランクトン群集による一次生産および呼吸のフラックスの空間的な比較を行なった。湾内の3地点において、酸素センサーを貼り付けた明暗のガラス瓶を3~4水深帯に日中係留し、非接触蛍光式の溶存酸素濃度計(PreSens社)で濃度変化を読み取り一次生産と呼吸のフラックスを算出した。また、2016年から2017年にかけては、湾内の3地点において採取した水深2mの海水を屋内において明暗条件でインキュベーションし、そこから一次生産および呼吸のフラックスを算出して現場における測定結果との比較を行なうとともに各季節の変化について検討した。また、湾内の養殖カキによる摂餌フラックスは、後述のメソコズム実験におけるろ過摂食実験の結果および現地養殖施設において調査した養殖カキクラスターの結果等に、湾内の養殖施設密度を掛け合わせて推定した。

(1) 3 流域の土地被覆形態と河川における粒状有機物濃度の関係の調査

河川を流下して海へ流れ込む粒状有機物の濃度が、河川流域の土地被覆形態とどのような関係を有しているかを明らかにするため、S-13-2-3(1)東京工大グループの協力を得て、2017年夏季に志津川湾周辺流域を含む岩手から宮城にかけての南三陸地域内の14流域において河川水を採取した。これらの河川水試料については、粒状有機炭素濃度の測定を行なった。そして、それぞれの河川水採取地点に対して流域内の各種の土地被覆形態の面積割合をGISから算出して、回帰分析により河川水中の粒状有機炭素濃度と各種土地利用形態の関係を解析した。



図(3)2-1 志津川湾湾奥部における調査地点の配置図。上の図は、2014年から2016年にかけて行った志津川湾湾奥部全体の粒状有機物に関する網羅的調査の定点およびカキの成長と養殖筏台数密度との関係調べた定点、下の図は、2016年から2018年に行ったカキ養殖場内外の比較調査・実験に関する調査定点の配置を示す。

(2) カキの成長と一次消費者餌源の調査

(2) 1 カキの成長速度と餌源の調査

志津川湾内の複数地点における養殖カキの成長速度を比較するため、2014年10月より同年夏季に採取された種カキを、防汚処理した養殖カゴに入れ志津川湾内の志津川地区・戸倉地区の全4定点に設置した(志津川A・B, 戸倉A・B; 図(3)2-1, 図(3)2-2)。そして、カキ成育状況の調査を1年半にわたり実施した。生育状況については、定期的に各地点で10個体を採取し、サイズ・重量の計測を行った。なお、カキの成長や摂餌への付着生物や汚れの影響を排除するため、飼育期間中はカキおよび養殖カゴを1~2ヶ月程度に一度ブラシ等を用いて洗浄した。さらに、採取されたカキについては、餌の組成を推定するため海水中の粒状有機物の試料と合わせて、炭素・窒素安定同位体比および脂肪酸組成の分析を行った。



図(3)2-2 志津川湾において実施したカキ成長実験用ネット



図(3)2-3 志津川湾波伝谷漁港内で実施したカキメソコズム実験に用いたカキの飼育かご（左）と飼育かごを設置した漁船での実験の様子（右）。

(2) 2 ベントス群集の餌源の調査

志津川湾内のベントス群集（特に一次消費者）の餌料起源推定のため、2015年9月に湾奥部（八幡川、水尻川、折立川河口近く）の干潟・浅海部計6地点において、マクロベントス、底質および各種潜在的有機物起源を採取した。ここでは、底質をスコップやエクマンバージ採泥器により採取し、その後すみやかに海水で洗い流しながら1mmメッシュでふるい、ふるい分けで残ったベントスをすべて採取した。ベントス試料は、60℃で乾燥したのち炭素・窒素安定同位体比分析に供した。

(3) カキ養殖場における粒状有機物の動態と酸素消費の調査

(3) 1 月齢の異なる養殖カキの排泄物による酸素消費速度の比較

養殖カキの月齢の違いによって、それらの排泄物の海域への環境負荷がどのように変化するかを明らかにするため、2014年11月に現場メソコズム実験を実施した（図(3)2-3）。ビニール製でプラスチック製フレームの容量約120Lのメソコズムを12基用意し、志津川湾内の漁港内に停泊する漁船の船の縁から構内海中に吊るした。そして、各メソコズム内へは滞留時間が1時間となるように、ポンプアップした海水を連続的に流入させた。メソコズム内には、3つの月齢（3、15、27ヶ月）のカキを殻付き湿重量で約1.5kgごとカゴに入れて漁船舷側につるした。カキを入れないコントロールをあわせて、各操作条件につき3つのメソコズムを設定した。22時間のインキュベーションを行い、終了時にメソコズム内に堆積したカキ排泄物を全量採取した。それらの試料は、有機炭素含有率および酸素消費速度の測定に供した。

(3) 2 カキ養殖場内外における粒状有機物動態と酸素消費の比較調査

カキ養殖場における浮遊性・沈降性粒状有機物の動態、化学組成、酸素消費活性を明らかにするため、2016年夏季から2018年夏季にかけて季節ごとの現地調査を行った。ここでは、志津川湾戸倉海域内（図(3)2-1中の内湾航路地点～戸倉B地点にかけてのエリア内）で、養殖場内・場外それぞれについて3地点を調査地点として設定した。そして各季節に、各地点で海水採取およびセディメントトラップによる沈降粒子の採取等を行った。さらに、エクマンバージ採泥器を用いて、養殖場内外の表層底質を採取した。

採取した浮遊性・沈降粒子および底質の試料について、炭素・窒素の元素分析、安定同位体比分析、脂肪酸組成分析を行った。酸素消費速度を測定するため、粒子試料を海水で満たした蓋付きガラスバイアルに密封し、屋内で志津川湾のおおよその年平均水温である18℃のもと暗条件・振盪攪拌でインキュベーション実験を行った。インキュベーション時に、バイアル中海水の溶存酸素濃度の時間変化を蛍光式非接触型DOセンサー（PreSens社）により計測することで酸素消費速度を推定した。さらに、カキ養殖場内の沈降有機物の潜在的起源有機物として、カキ・イガイの排泄物やカキクラスター・養殖施設内のロープの付着物等の採取を行い、上記と同様に化学組成分析や酸素消費速度の定量を行った。

(4) 炭素・窒素安定同位体比分析および脂肪酸分析

本研究では、粒状有機物および一次消費者生物（マクロベントス、養殖カキ）の餌の起源推定にあたり炭素・窒素安定同位体比分析および脂肪酸組成分析を用いた。それらの分析方法概略を次に記す。

(4) 1 炭素・窒素安定同位体比分析

粒状有機物の炭素窒素含有量および安定同位体分析には元素分析計 (Flash2000, Thermo Scientific) を接続した安定同位体質量分析計 (Delta V, Thermo Scientific) を用いた。無機炭素を除くため、海水や沈降物を濾過したろ紙および底質の試料を10%の塩酸に浸した。その後ミリQ水で洗い流し60℃の乾燥炉で乾燥させて分析試料とした。標準物質にはアラニンを、キャリアガスにはヘリウムを用いた。

(4) 2 脂肪酸分析

脂肪酸分析のための試料の前処理は、One Step Method⁶⁾に従った。サンプルを凍結乾燥した後遠沈管にサンプル、BF₃メタノール2ml、ヘキサン4mlを入れ、100℃に沸騰させたウォーターバスで2時間煮沸して脂肪酸の抽出とメチルエステル化を同時に行った。室温で冷却した後、ヘキサン1ml及びミリQ水2mlを添加し、1分程度攪拌した後に遠心分離器にかけた(遠心加速度698G、3分間)。水層とヘキサン層に分離後、脂肪酸メチルエステルを含むヘキサン層を回収し分析試料とした。各種脂肪酸の定量にはガスクロマトグラフィ(GC2014、株式会社島津製作所)を用いた。キャタピラーカラム(Agilent社、SelectFAME、0.25mm、100m)を用い標準物質のリテンションタイムとの比較から脂肪酸の同定を行った。標準物質にはスペルコ社のspelco37、bacterial FA、PUFA-3を用いた。カラムの昇温プログラムは150℃(5min)−4℃/min−230℃(10min)−4℃/min−250℃(20min)、キャリアガスにはヘリウムを用いた。

定量された脂肪酸については、特に粒状有機物および一次消費者の餌の生物学的起源を推定するため既往の研究で用いられている一般的な定義に沿って、i-15:0、a-15:0、i-16:0、i-17:0および18:1 ω 7を細菌、18:2 ω 6t、18:2 ω 6c、18:3 ω 6および18:3 ω 3を緑藻、20:5 ω 3を珪藻、18:4 ω 3および22:6 ω 3を渦鞭毛藻、炭素数24以上の飽和脂肪酸を高等植物のマーカ脂肪酸として用いた⁷⁾。

4. 結果及び考察

(1) カキ等一次消費者の潜在的餌料としての湾内粒状有機物の動態と起源

(1) 1 志津川湾内における粒状有機物の時空間分布と起源

湾奥・湾中・湾口の各2水深帯の海水中懸濁態有機炭素濃度の時系列はおおむね連動して推移し、月ごとの変動は地点間の差よりも大きかった(図(3)2-4)。さらに、懸濁態有機炭素濃度と炭素安定同位体比の間で有意な正の関係が認められた(図(3)2-5、 $R^2=0.39$)ことから、特に温暖期を中心に一次生産の活発化にともなって懸濁態有機物濃度が上昇していたと考えられる。

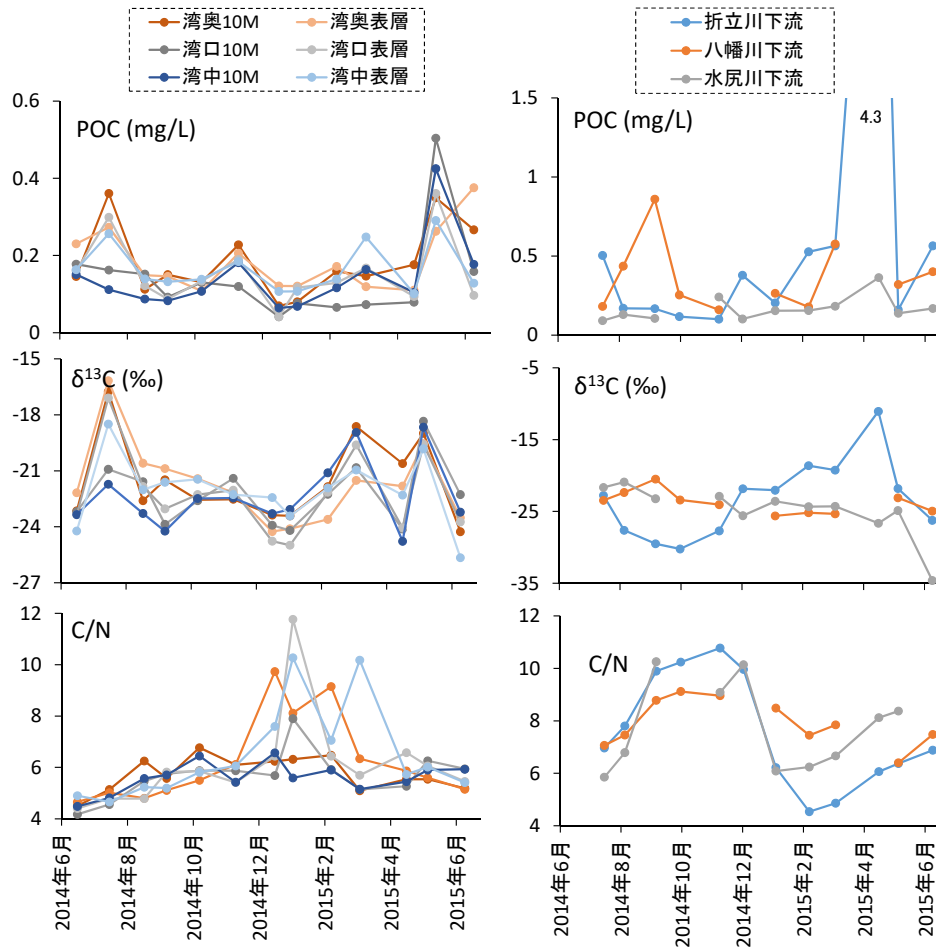
流入河川水中の懸濁態有機物濃度は、海水中と同様にその変動に季節性は認められなかった(図(3)-4)。しかし、CN比については秋季から冬季にかけてC/N比が比較的高い値となった。この時期、落葉リターが河川に供給されることで、それらを起源とするC/N比の高い粒状有機物の割合が河川水中で高くなった可能性が考えられる。

志津川湾内の底質中の有機炭素含有率は、0.01~1.26%程度であり砂分を多く含む底質の地点が多かった。底質中有機物の炭素安定同位体比は-21.6‰~-26.2‰の範囲にあった(図(3)2-6)。最低値を示した水戸辺川河口付近においては、河川を通じて流入してきた陸上高等植物起源ものが底質中の有機物の中で比較的多くを占めていたと推測される(通常陸上起源は-28‰程度以下)。一方、他の地点では概ね-24‰以上で植物プランクトン起源のものが混在するとともに、特に湾奥から沖合い方向への分布傾向は示されず有機物の起源としては比較的均質に分布していることが示された。底質への陸上起源有機物の顕著な堆積は、河口の一部で局所なものと考えられる。

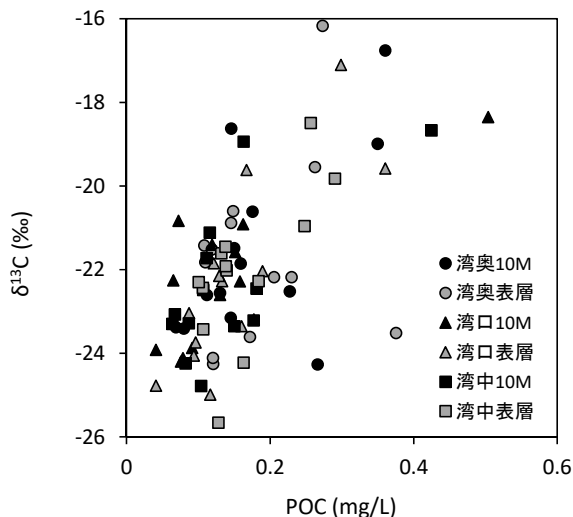
(1) 2 河川水中の粒状有機物濃度と流域の土地被覆形態の関係

南三陸町をふくむ三陸沿岸地域全域を対象に行った採水調査では、特に、流域の森林被覆割合や人為的な土地利用の程度に対応して、河川水中のPOC濃度が大きく異なっていることが示された。河川水中の

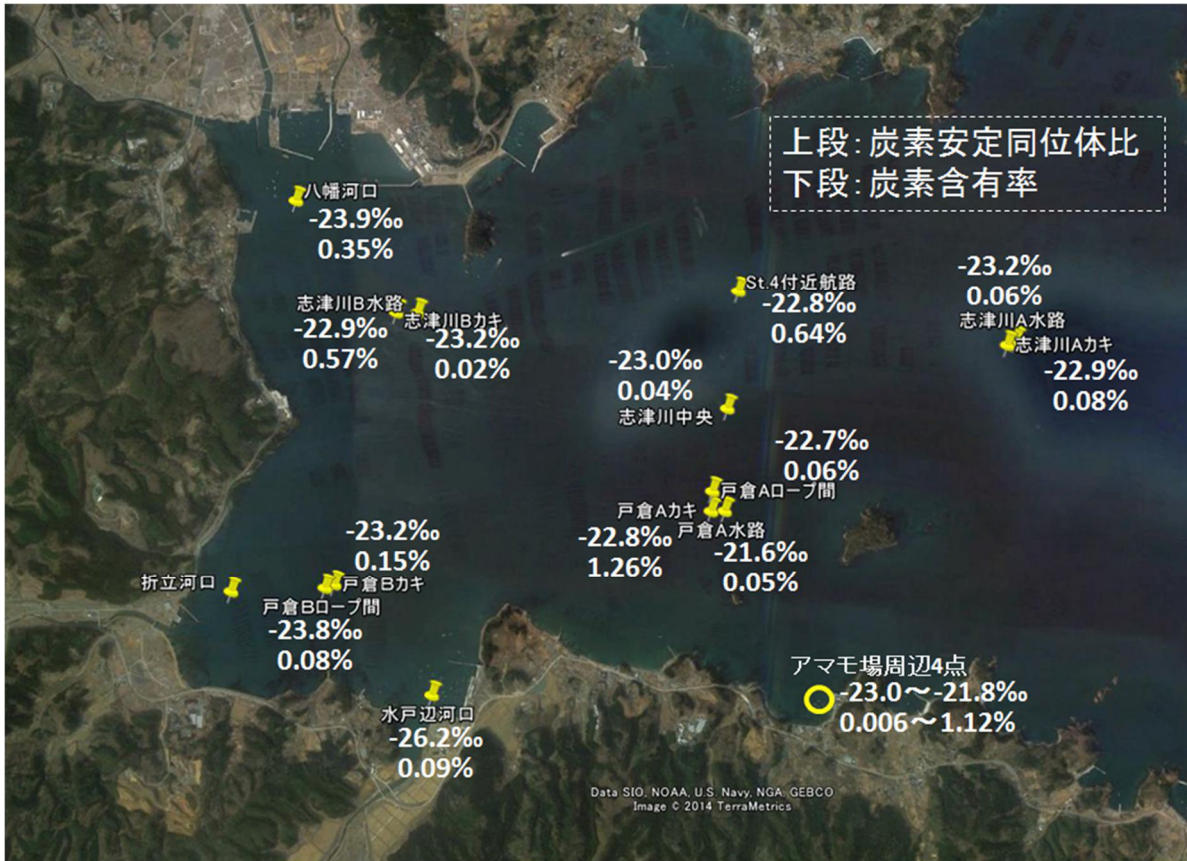
POC濃度は、その流域内の森林面積割合と負の関係、農地と市街地の面積割合の和と正の関係を示した(図(3)2-7)。一般に、上流森林域を流れる小河川では落葉をはじめとする森林植生起源の粒状有機物の供給がある一方で、樹冠により日射が遮られ河川内の藻類による一次生産は低い。河川の中下流域では川幅が広がるとともに樹冠による遮光の影響が少なくなるとともに、さらに農地や市街地などが周囲に増えることで人為起源の栄養塩が流入して一次生産が増加する。これらのことが、上述のようなPOC濃度と土地被覆状態に関連する変量との間の有意な関係をもたらしたと考えられる。一方、流域内の森林を広葉落葉樹林と針葉樹林に分けて各面積割合と河川水中のPOC濃度との関係を解析したところ、それらには明確な関係は認められなかった。



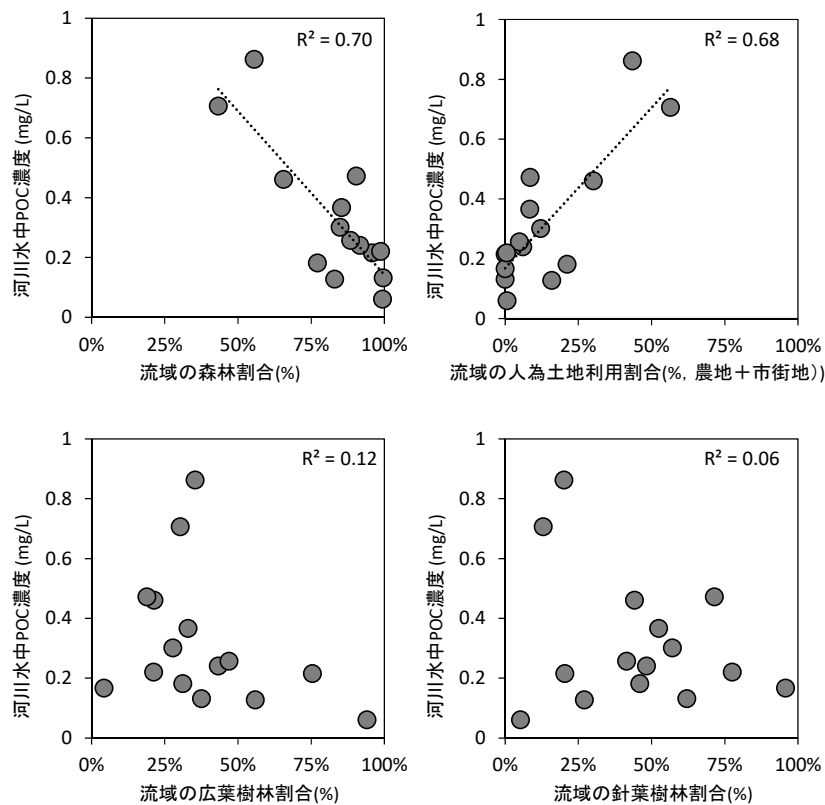
図(3)2-4 志津川湾内の海水中(左列)および流入3河川における粒状有機物(右列)の定期調査結果



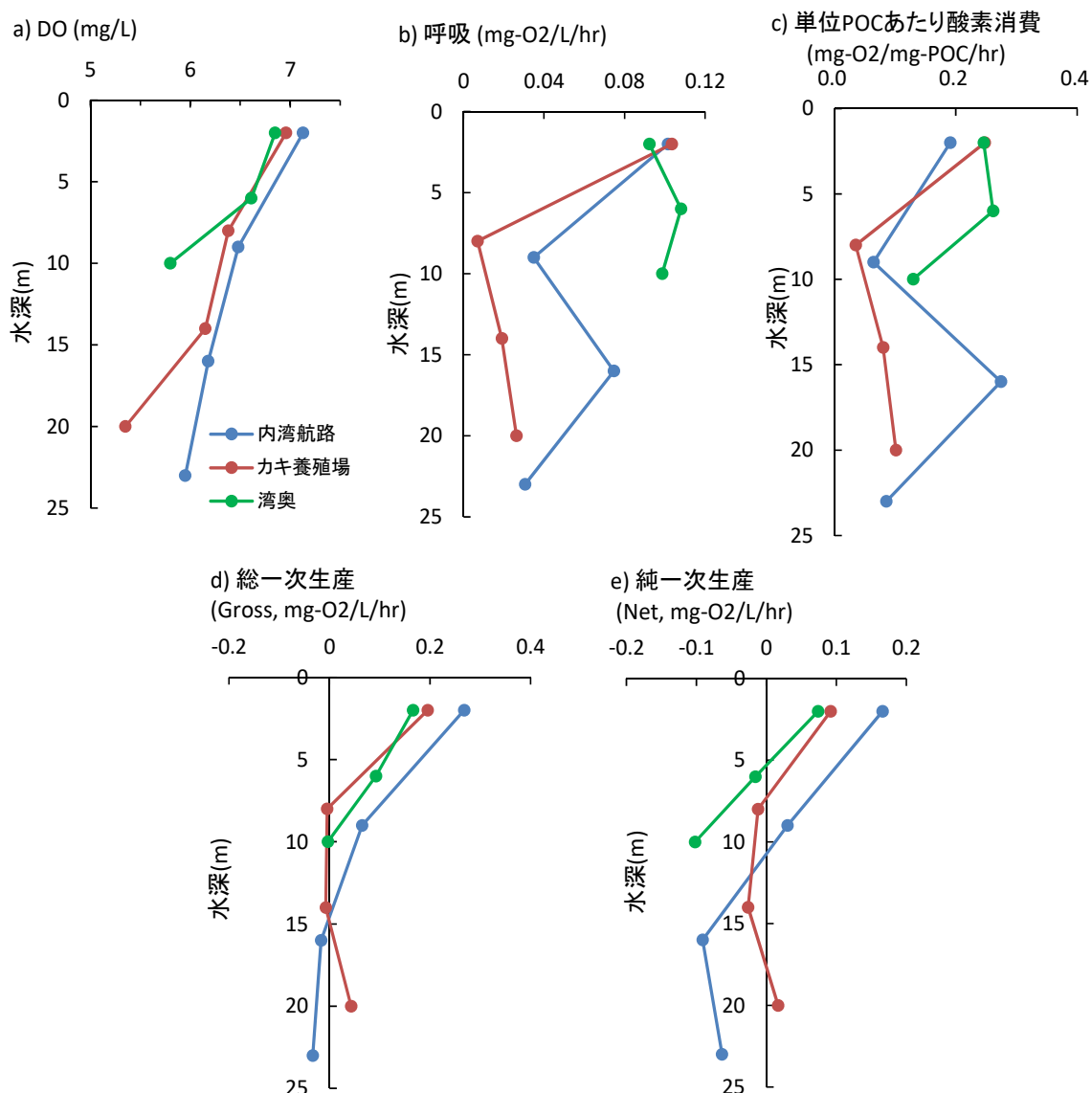
図(3)2-5 湾内海水中懸濁態有機物の濃度と炭素安定同位体比の関係



図(3)2-6 志津川湾内表層底質の有機炭素含有率および炭素安定同位体比。



図(3)2-7 2017年夏季の三陸沿岸域15河川における採水調査に基づく流域の土地被覆形態と河川水中の粒状有機炭素(POC)濃度の関係。

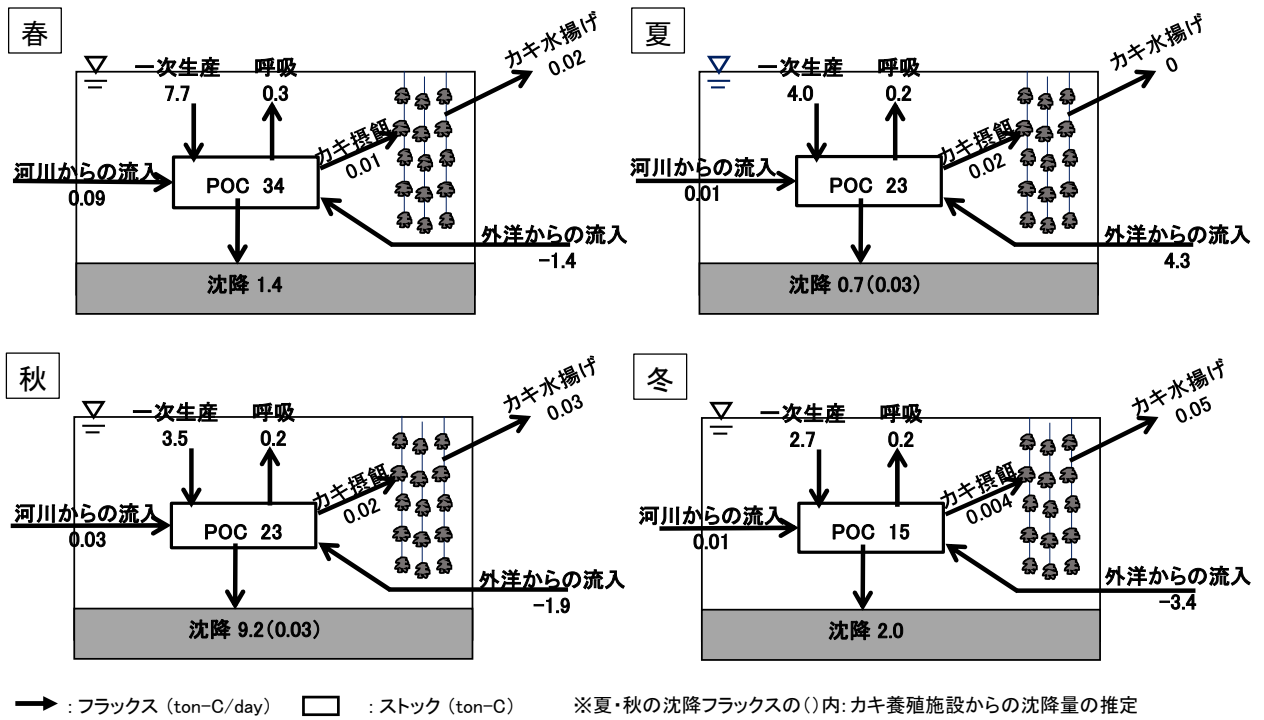


図(3)2-8 2015年9月15日湾内3点における明暗瓶法から求められた懸濁態細粒有機物による呼吸速度と一次生産速度。a)フラックス定量時初期条件としてのDOの鉛直分布、b)呼吸速度(暗瓶)、c)単位POC当たりの酸素消費速度(暗瓶)、d)総一次生産(明瓶 - 暗瓶)、e)純一次生産(明瓶)。

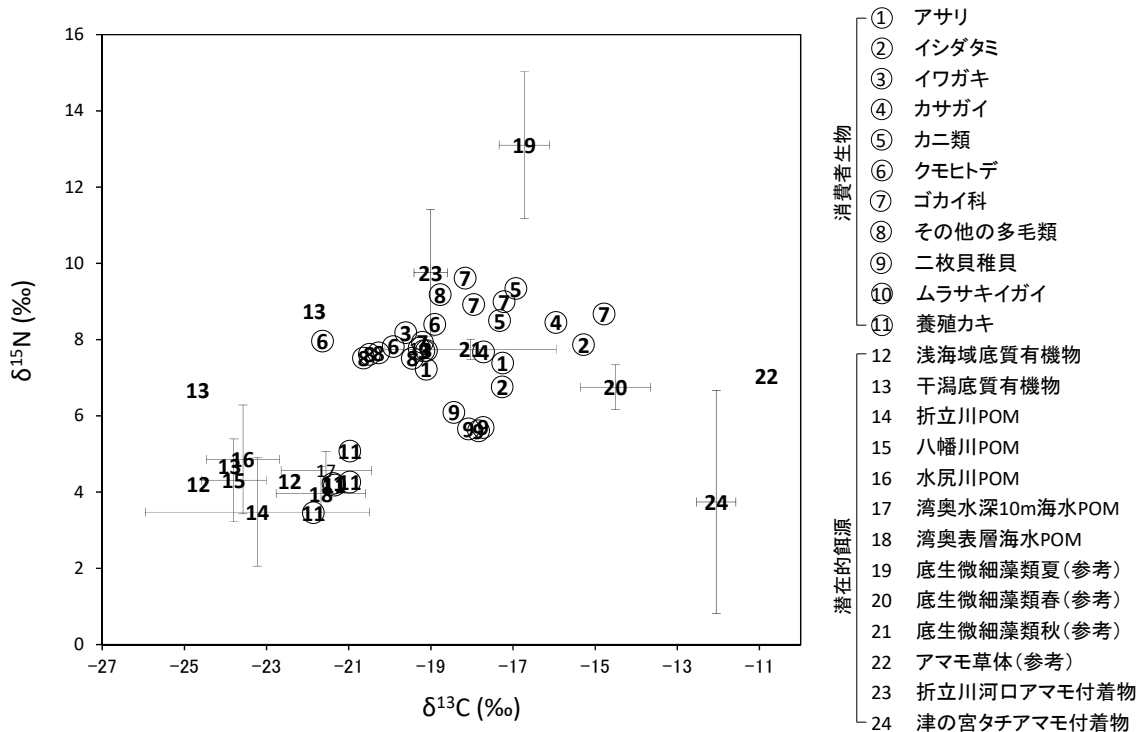
(1) 3 粒状有機炭素の各種フラックスの比較

2015年9月の湾中航路部と湾中カキ養殖施設ではいずれも水深方向に酸素消費(呼吸)速度が低下したが、湾奥部では水深方向に酸素消費速度の低下がみられずいずれの水深帯でも比較的高い消費速度がみられた(図(3)2-8)。総一次生産に関しては、いずれの地点において、水深方向に減少し約10m以深でほぼ0となった(図(3)2-8)。純一次生産に関しても、総一次生産と同様に水深方向に減少し、いずれの地点においても、水深約5~10mで正から負に転じた。

これらのフラックス測定結果および前述の境界条件等に関する情報をもとに、静穏時の志津川湾奥部14km²における粒状有機炭素の各種フラックスの比較では、季節を問わず、志津川湾奥部全域で一次生産が全養殖カキの必要とする餌料よりも2オーダー程度大きいと推定された(図(3)2-9)。また、一次生産と比べて、河川から供給される粒状有機物のフラックスは2オーダー程度小さく、その寄与は量的には小さいものと見積もられた。



図(3)2-9 静穏時を想定した志津川湾奥部14km²における粒状有機炭素の各種フラックスの比較。

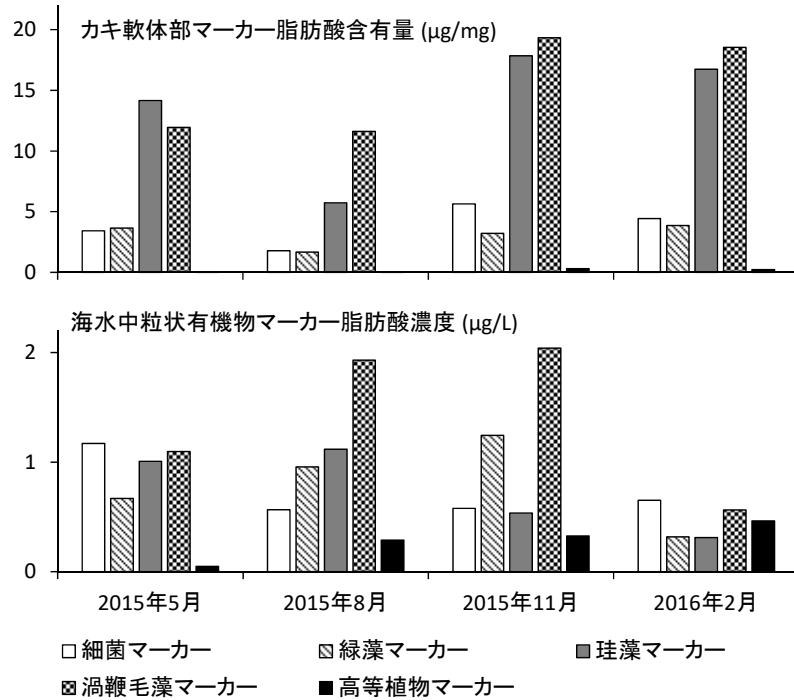


図(3)2-10 志津川湾奥に位置する干潟・浅海部ベントスと各種エンドメンバーの炭素・窒素安定同位体比。底生微細藻類およびアマモ草体はSakamaki&Richardson(2008)より引用。

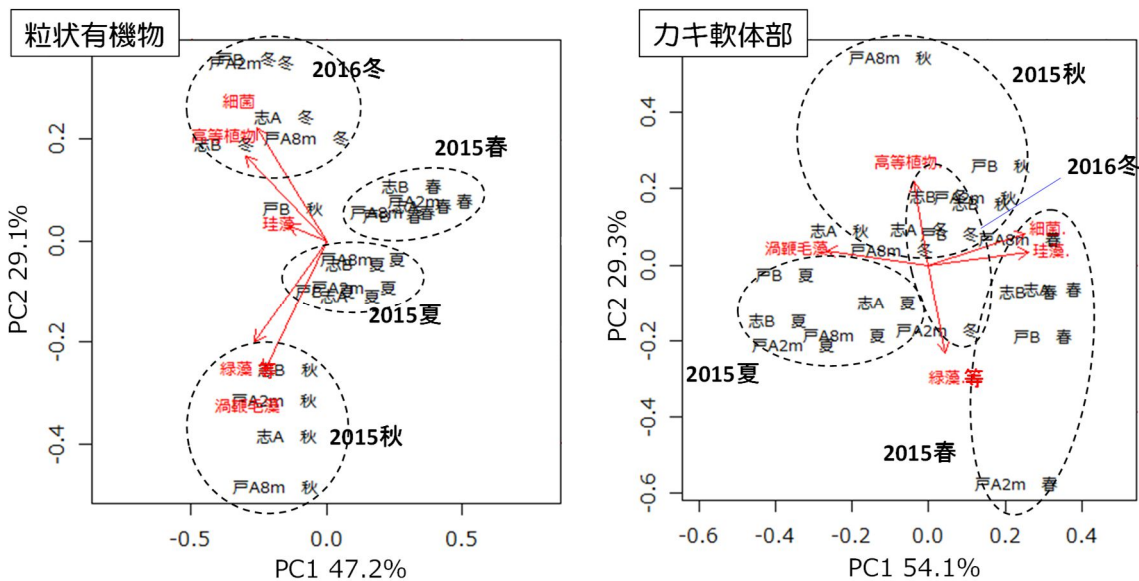
(2) 湾内一次消費者の餌料源と養殖カキの成長

(2) 1 湾内底生動物の餌料源

湾奥干潟・浅海部の計6地点で採取されたマクロベントスの炭素安定同位体比は、地点間と生物グループ間でともに同等な分散を有し有意な差があった(Two-way ANOVA 地点: $F_{5,14}=3.96$ ($p = 0.02$), 生物分類: $F_{9,14}=3.02$ ($p = 0.03$)). 窒素安定同位体比は、地点間では有意差が見られなかったが ($F_{5,14}=2.43$, $p = 0.09$)、生物グループ間では有意差が認められた ($F_{9,14}=8.07$, $p<0.001$). しかし、マクロベントスと各種エンドメンバーの間で炭素・窒素安定同位体比を比較したところ、いずれのグループもおおむね底質中有機物や底生藻類のそれに近い値を有していたことから、それらが多くのマクロベントスグループにとっての主な餌源になっていると考えられた(図(3)2-10)。一方で、河川から供給される陸上起源有機物は、これらの底生動物にあまり利用されていないと考えられた。



図(3)2-11 志津川湾内の海水POMおよびカキ軟体部のマーカー脂肪酸含有量



図(3)2-12 海水中粒状有機物および飼育カキの脂肪酸マーカー組成(相対量)に基づく主成分分析結果

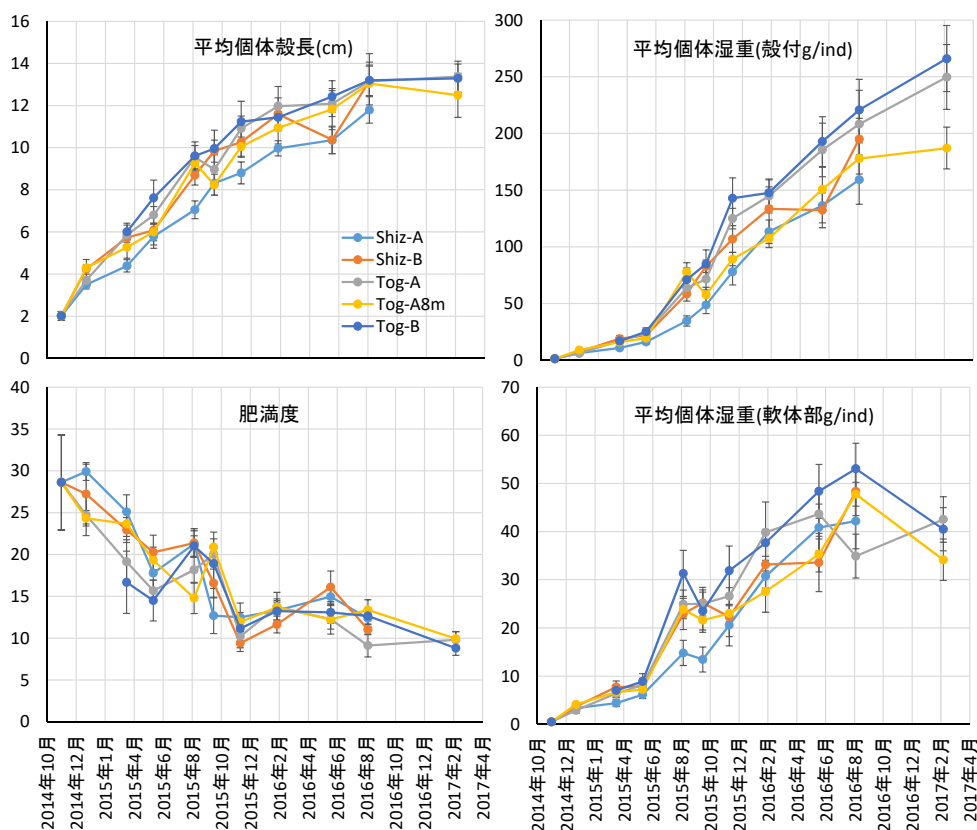
(2) 2 養殖カキの餌料源

養殖カキについては、マクロベントスとは明らかに異なる炭素・窒素同位体比を示し、海水中の粒状有機物を主要な餌源としていると推定される。脂肪酸組成分析からは、湾内の海水中粒状有機物は各種生物的起源を有するマーカー脂肪酸の組成が採取地点・採取時期により大きく変化するが、カキでは一貫して渦鞭毛藻および珪藻起源のマーカー脂肪酸の割合が高かった（図(3)2-11・図(3)2-12）。様々な生物起源のものが混合した海水中粒状有機物の中から渦鞭毛藻および珪藻起源の有機物を選択的に同化していると考えられる。安定同位体分析および脂肪酸分析の結果からは、養殖カキについても底生動物と同様に、陸域から河川を通じて輸送される粒状有機物を直接同化している結果は得られなかった。

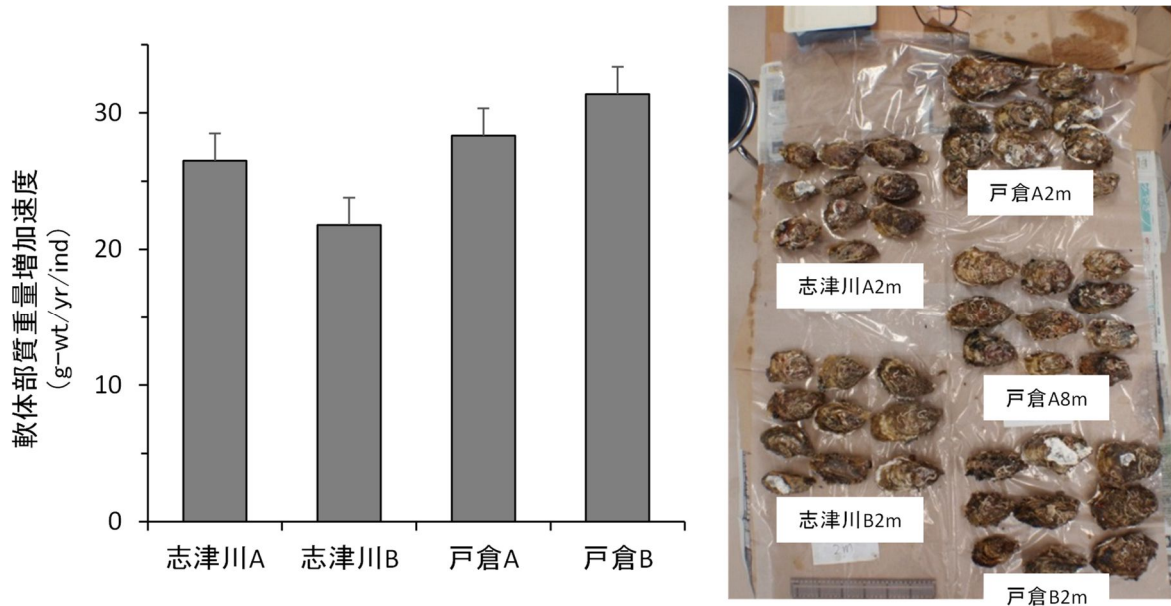
(2) 3 湾内における養殖カキの成長

飼育カキの成長速度を地点間で比較をすると、湾南側の戸倉地区海域では他の海域よりもカキの成長が速いことが示された（図(3)2-13・図(3)2-14）。この要因として、戸倉海域では現在、垂下式カキ養殖のための延縄の配置間隔や狭いところでも約30m、広いところでは50m近く確保されている。これは、他海域の20mから30m程度の施設間隔に比べてかなり広い。戸倉海域では、カキの養殖施設密度が低いために、餌料供給環境がよくカキの成長がより速かったものと考えられる。このことに関連しては、戸倉海域では、2011年に発生した東日本大震災の以前は、現在よりもかなりの高密度でカキ養殖が行われていた。震災後の養殖施設の再建過程では先の反省もあって、戸倉海域において震災前の1/3にまで大幅な施設密度の削減が行われた。カキ養殖に携わってきた漁業者からの聞き取りによれば、震災前の戸倉海域ではカキの本養殖開始から出荷までの期間として18ヶ月程度を必要としていたが、震災後に養殖密度を低減したことで10ヶ月程度にまで短縮されたとのことである。

粒状有機炭素のフラックス推定の結果においては、志津川湾奥部全域では一次生産がカキの摂餌よりも2オーダー程度大きく十分餌が供給されうるとの推定結果であった。しかし本実験の結果は、実際にはカキの成長は局所的なカキの養殖密度に依存し、養殖施設レベルの空間スケールでの餌料供給環境がカキの成長にとってより重要な因子になっていることが示された。



図(3)2-13 志津川湾内4地点で飼育されたカキの成長。a) 殻長時系列、b) 殻付き湿重時系列、c) 肥満度時系列、d) 軟体部質重時系列。

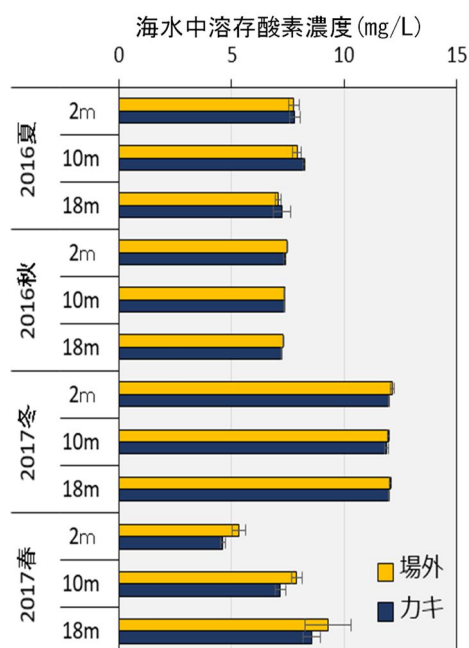


図(3)2-14 志津川湾内の4地点の水深2mにおける実験開始1年半後までのカキ成長速度の比較(左)とそのときに得られた各定点のカキ個体の写真(右)。

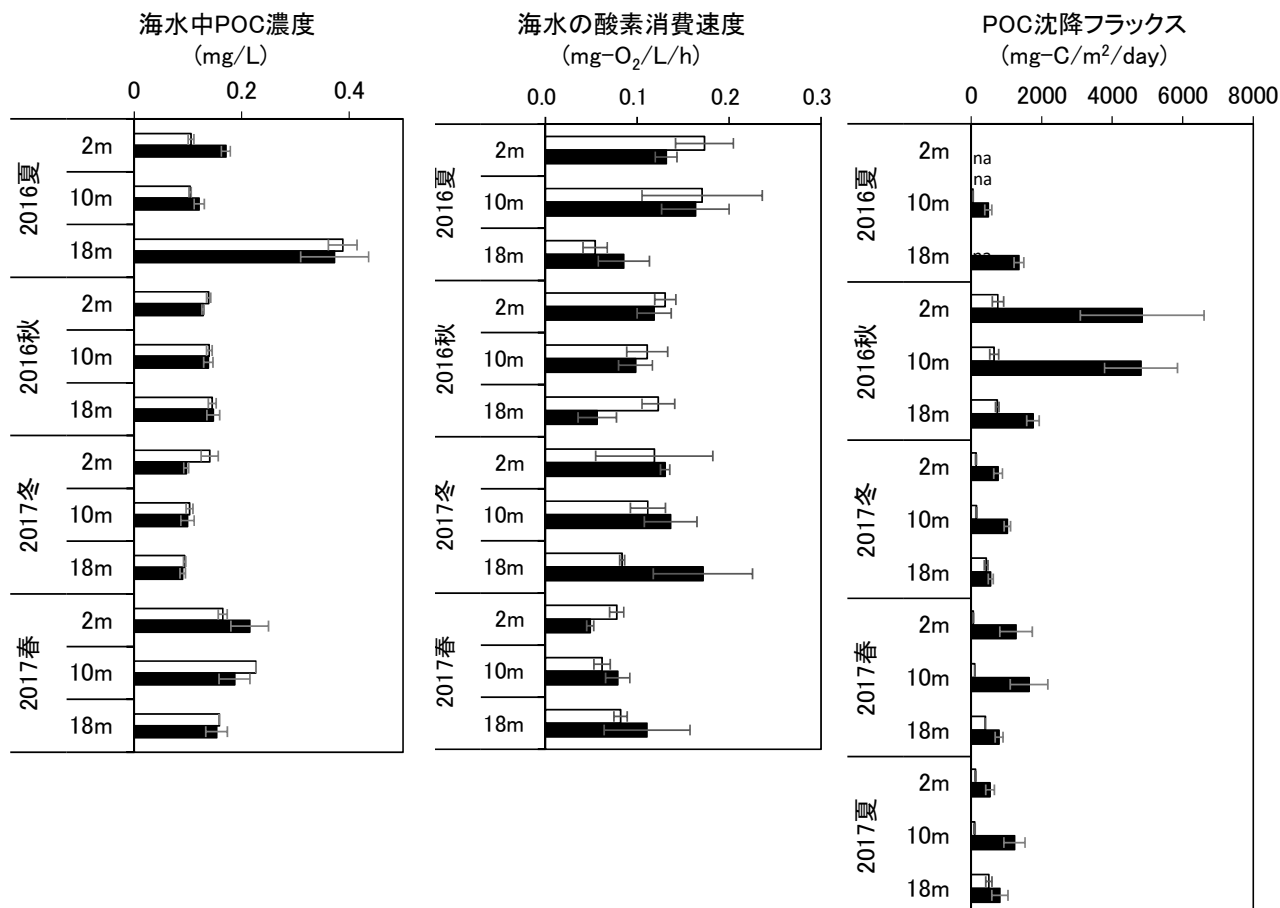
(3) 志津川湾のカキ養殖場における粒状有機物の動態と酸素消費

(3) 1 カキ養殖場内の粒状有機物分布と脂肪酸組成

海水温は、夏季の試料採取時には水深が深くなるにつれて顕著に低下し、水温躍層の形成がみられた(図(3)2-15)。しかし、秋季には水深方向に水温差がほとんどみられず、夏季と比較して鉛直方向の混合がなされていたと考えられる。同時に各地点3水深帯で測定された溶存酸素濃度は、4.4~12.3mg/Lの範囲にあり、試料採取時には底層に貧酸素水塊の発生は認められなかった。水温躍層が形成されていた夏季は水深18mにおいて水深2mと10mよりも溶存酸素濃度が若干低かったが、秋季・冬季には18mにおける低下が夏季ほど顕著ではなかった(図(3)2-15)。一方春季には、18m層と比較して2m層で溶存酸素濃度が低く、低水温・高溶存酸素濃度の海水が底層に貫入してのではないかと考えられる。



図(3)2-15 季節調査時のカキ養殖場内外各水深帯における海水中溶存酸素濃度



図(3)2-16 カキ養殖場内外の海水中POC濃度(左)、酸素消費速度(中)、POC沈降フラックス(右) (白：養殖場外，黒：養殖場内)。

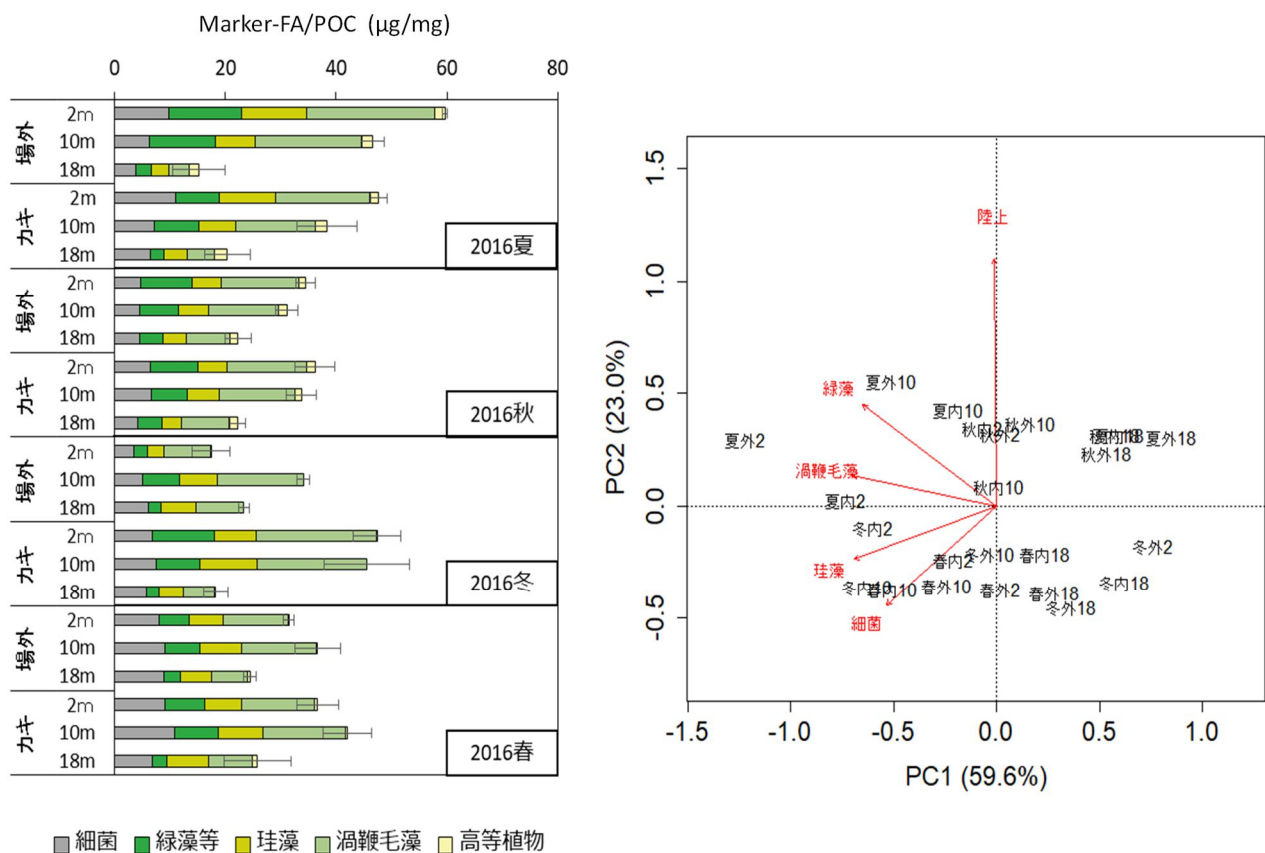
粒状有機炭素濃度 (POC) は、夏季と春季に濃度が高く特に夏季の底層で突出して高かった (図(3)2-16)。一方、秋季や冬季においては全体的にPOC濃度が低く水深方向に濃度の明確な変化傾向が認められなかった。また、夏季・春季ではカキ養殖場内の2m層においてカキ養殖場外よりもPOC濃度が有意に高かった。カキ養殖場では常にロープやブイ、カキ塊等に付着藻類等がみられるが、それらの藻類等の生産も温暖期に高まり剥離が盛んに起こることで、養殖場内の海水中に浮遊する粒状有機物の濃度を上昇させたのではないかと推察される。一方で、春季の養殖場内10mでは場外よりも濃度が低下しており、これはカキのろ過摂食による影響が考えられる。一般に、養殖カキによるろ過摂食と漁獲による有機物・栄養塩の削減効果を支持する研究事例も多いが、比較的開放性が高く海水中のバックグラウンドとしての粒状有機物濃度の低い志津川湾のような海域では、カキ養殖が海水中の粒状有機物濃度の上昇に寄与していることを示している。さらにこれらの結果は、カキ養殖場の海水塊中への粒状有機物の供給とそこからの除去のバランスが同じ場であっても季節的に変化し、垂下式のカキ養殖場が周辺水塊に対して粒状有機物のsinkにもsourceにもなりうることを示唆している。

カキ養殖場内外の海水中の粒状有機物の脂肪酸含有量については、季節間・水深間・養殖場内外間でそれぞれ異なっていた (図(3)2-17)。特に水深2m・10mより採取された海水中の粒状有機物については、夏季には緑藻・渦鞭毛藻等由来のマーカ脂肪酸の含有率が大きく、さらにカキ養殖場外の方が場内よりも有意に大きかった。秋季はカキ養殖場内外で顕著な差異がみられなかった。冬季・春季は特にカキ養殖場内において細菌や珪藻由来のマーカ脂肪酸の含有率が高かった。また、緑藻・渦鞭毛藻・珪藻・細菌の各マーカ脂肪酸含有率は互いに正の相関関係を示したが、高等植物由来のマーカ脂肪酸は他のマーカと相関関係を示さなかった。一方、18m層海水中の粒状有機物に関しては、主成分分析の結果から、2m・10m層のそれと比べて緑藻・渦鞭毛藻・珪藻マーカ脂肪酸の含有率が顕著に低かった。さらに18m層では、粒状有機物に含有される脂肪酸組成が、養殖場内外間での差異について傾向を示さなかつ

たが、季節間では特に夏・秋と冬・春の間で組成に違いがみられた。特に、夏・秋は冬・春に比べて渦鞭毛藻や緑藻のマーカーク割合がやや高いのに対して、珪藻や細菌のマーカーク割合はやや低く、水深2m・10m層で顕著に見られた傾向と類似していた。

カキ養殖場内外で海水中粒状有機物のPOCあたりの各種マーカーク脂肪酸量が異なっていたことから、養殖場は有機物の量のみならずその組成にも影響していたといえる。特に、夏季には、海水中粒状有機物中の緑藻や渦鞭毛藻など藻類由来のマーカーク脂肪酸の割合が高かったが、カキ養殖場内では場外と比較してその割合は低かった。一方で冬季・春季にはカキ養殖場内の方が場外と比較して藻類由来マーカーク脂肪酸の割合が有意に高かった。要因としては季節による藻類の生産性の違い、優占する藻類によるカキのろ過特性の変化等が考えられる。また、カキの排泄物やカキ養殖施設・カキ塊からの剥離物の供給も海水中粒状有機物の組成に影響する。一般に、カキの摂餌量は水温上昇に伴って高くなることから、本調査にでもそのことにより夏季のカキ養殖場内で藻類が相対的に少なかったのではないかと考えられる。一方、冬季・春季にはカキの摂餌量が減少することから、相対的にカキ養殖場付着藻類等の剥離物の供給が卓越した影響した可能性が考えられる。

底層付近（水深18m層）の海水中粒状有機物が2m・10m層と比べて緑藻・渦鞭毛藻・珪藻マーカーク脂肪酸の含有量が顕著に低かったことについては、底層では光環境が悪く光合成による生産が低下したことの他に、沈降過程ですでに分解が進行した有機物が多いこと、潮汐等の影響により堆積している分解の進んだ有機物が再懸濁したことなどが原因として考えられる。さらに、潮汐等による水平輸送によって、底層では分解の進んだ有機物が広く混ざり合っていることも考えられ、養殖場内外で底層の粒状有機物の脂肪酸組成に浅い層ほど顕著な差が見られなかった要因となっている可能性も考えられる。一方で、18m層の粒状有機物の脂肪酸組成は水深2m・10m層と類似した傾向をもって季節的に変化しており、浅い水深帯の海水中で生産される藻類組成等の季節変化は、沈降を通じて底層有機物の脂肪酸組成にも緩やかに反映されていることが示された。



図(3)2-17 志津川湾内のカキ養殖場内・場外の海水中粒状有機物の各種マーカーク脂肪酸含有量(左)と、その結果を用いた主成分分析結果(右)。図中の季節・地点の情報に付いている数値は水深帯。

表(3)2-1 カキ養殖場内外における沈降物の見かけの沈降速度の推定結果。

		場外			カキ		
		平均(m/day)	標準偏差	着底までの日数	平均(m/day)	標準偏差	着底までの日数
2016夏	2m						
	10m	0.4	0.2	24.7	4.1	1.8	2.3
	18m				4.0	1.7	0.4
2016秋	2m	5.4	2.0	3.5	38.3	28.8	0.5
	10m	4.7	2.2	2.3	34.6	13.6	0.3
	18m	5.4	1.3	0.3	12.0	2.8	0.1
2017冬	2m	1.0	0.3	19.5	8.0	3.3	2.2
	10m	1.4	0.2	7.9	10.9	3.8	0.9
	18m	4.5	1.0	0.3	6.2	1.8	0.2
2017春	2m	0.3	0.2	58.5	5.9	3.9	3.0
	10m	0.4		27.2	8.1	4.5	1.2
	18m	2.5		0.6	5.1	0.5	0.3
2017夏	2m	0.7	0.3	27.7	3.9	1.8	4.5
	10m	0.6	0.3	19.1	11.9	6.0	0.8
	18m	2.1	1.1	0.7	3.3	2.5	0.5

測定失敗のためN=1

見かけの沈降速度 ω と沈降フラックス F は、得られた沈降POC量をもとに以下の計算式から算出した。

$$\omega = \frac{F}{C_0} = \frac{R - C_0 V}{AT} \frac{1}{C_0}$$

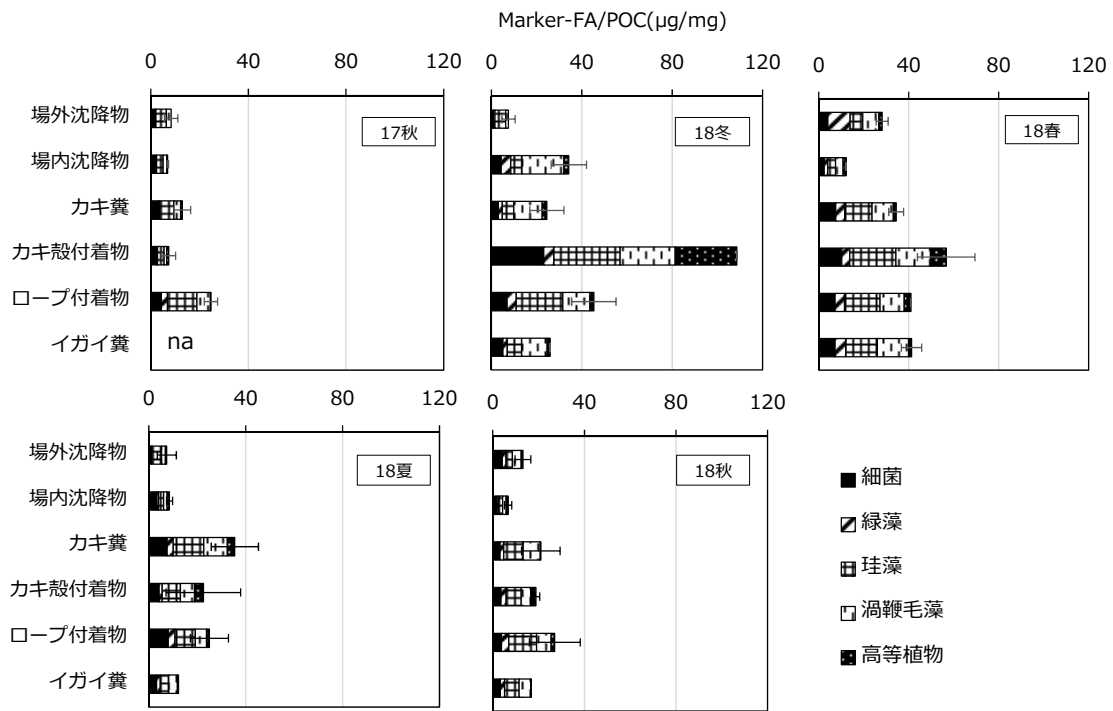
ここに、R：セディメントトラップ内の沈降物量、 C_0 ：周辺海水中のPOC濃度、V：セディメントトラップ容積、A：セディメントトラップ開口部断面積、T：設置期間である。

(3) 2 カキ養殖場内の粒状有機物の沈降フラックスと脂肪酸組成

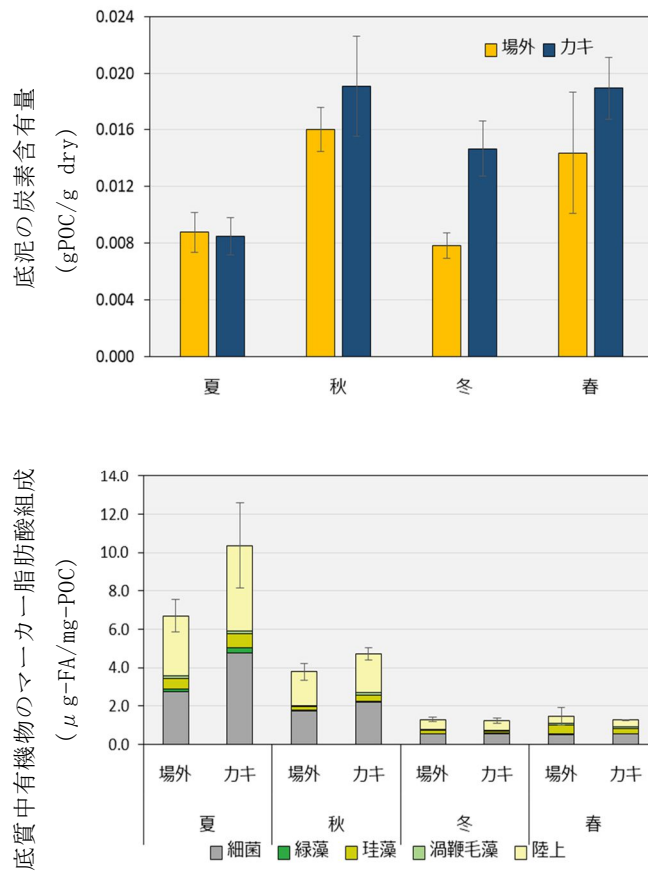
カキ養殖場内の粒状有機物の沈降フラックスは秋季に突出して大きかった(図(3)2-16)。夏季に生産され滞留していた沈降速度の遅い有機物が、秋季において海水の鉛直混合がなされると共に沈降することで沈降フラックスが大きくなるとの既往の報告もあり⁸⁾、そのような機構が働いた可能性が考えられる。また、既往の別の研究では秋季におけるカキの糞・擬糞の排泄量が他の季節と比較して2倍から4倍程度まで増加したとの報告があり⁹⁾、カキからの糞・擬糞の排泄が秋季に増加したことも考えられる。

カキ養殖場外では秋季を除いて2、10m層より18m層の沈降フラックスが大きかったが、カキ養殖場内では2、10m層が18m層より大きい傾向がみられた。見かけの沈降速度も沈降フラックスと同様の傾向を示した(表(3)2-1)。カキ養殖場外の沈降フラックスが18m層において大きな値をとったのは、底質の巻き上げ・沈降が起きたためと推察される。カキ養殖場内において2、10m層の方が18m層より沈降フラックスが大きかったことについては、対象としたカキ養殖場ではカキが表層から約10mまで吊るされていたためカキの糞や擬糞、また付着藻類等の剥離・沈降の影響を2、10m層の方がより強く受け、底層に沈降するまでに潮汐や分散等により水平輸送されたことが原因として考えられる。また、沈降物が沈降過程で変化しないものと仮定し海底に到着するまでにかかる日数を計算したところ、カキ養殖場外2mの沈降物は3～58日で、カキ養殖場内2mの沈降物は半日～4日程度で底泥に沈降することが分かった。カキ養殖場内10mの沈降物は多くの場合1日以内に底泥まで沈降することが分かった。カキ養殖場内では粒状有機物の沈降フラックスが大きく沈降速度も速いことから、分解性をある程度保持した状態で有機物が底質まで沈降し底層環境の悪化につながりやすいと考えられる。

季節によって逆転することもあったが、カキ養殖場内の沈降有機物中の藻類由来マーカ脂肪酸割合は養殖場外と比較して明らかに小さいケースが存在した(17秋、18春、18秋)(図(3)2-18)。これらは、カキのろ過摂食により藻類が摂餌されたことによる影響と推察される。一方、冬季は沈降有機物中の藻類由来マーカ脂肪酸割合は養殖場内の方が大きかった。冬季は、カキ殻の付着物を含め潜在的起源としての各種有機物(付着物、糞等)の藻類由来マーカ脂肪酸の割合が大きかったことから、これらが混合することで養殖場内の沈降有機物中の藻類由来マーカ脂肪酸の割合も高くなったのではないかと推察される。また、全般的に沈降有機物の起源となりうる排泄物や付着物等の有機物は、養殖場内沈降有機物と比べてPOC量当たりの藻類由来マーカ脂肪酸量がいずれも大きかった。養殖場内で沈降する有機物は、その起源となる有機物に対して分解が進行した状態のものであったと推察される。



図(3)2-18 カキ養殖場内外の沈降有機物および各種潜在的起源有機物のPOC量あたりのマーカー脂肪酸量。



図(3)2-19 カキ養殖場内外の底質の比較。(a)底泥の炭素含有量 (gPOC/g dry)、(b)底質中有機物のマーカー脂肪酸組成 (µg-FA/mg-POC)。

(3) 3 カキ養殖場内の底質の有機物含有量と脂肪酸組成

底質の炭素含有量は夏季を除いてカキ養殖場内の方が場外より大きかった（図(3)2-19）。カキ養殖場内における沈降物量の増大に伴い堆積量が増加したことが原因と考えられる。

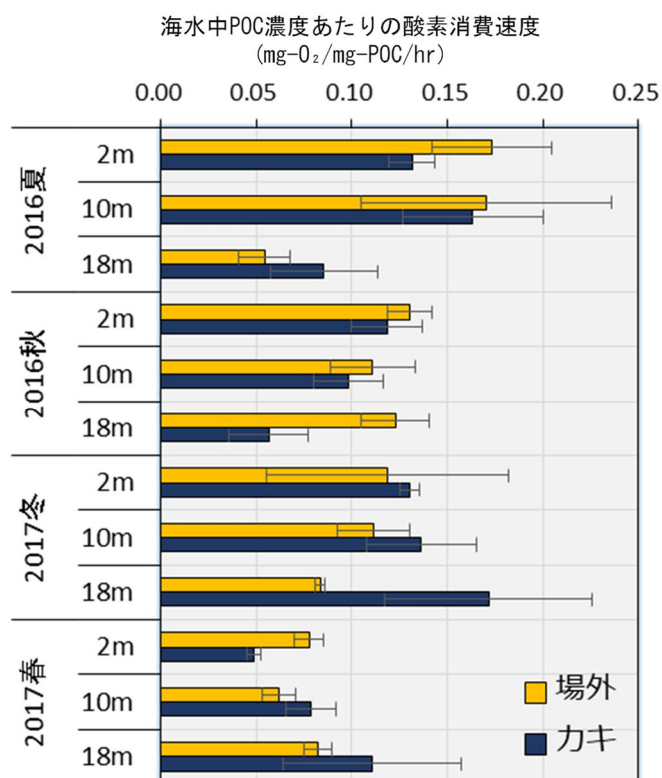
一方で、POC濃度あたりの各マーカー脂肪酸濃度は夏季にその割合が最も高く、次いで秋季が高かった。また、夏季と秋季において藻類由来マーカー脂肪酸割合が場外よりカキ養殖場内の方が有意に高かった、カキ養殖により底質は有機物が蓄積するだけでなく、その質も変化しているといえる。

底質中POCあたりの藻類由来マーカー脂肪酸割合は、浮遊性や沈降性の粒状有機物のそれと比べてカキ養殖場内外とも非常に小さく、沈降過程で多くが分解されていると考えられた。一方、4季節とも、細菌由来マーカー脂肪酸の割合が高かった。夏季と秋季には、特に、カキ養殖場内で細菌由来マーカー脂肪酸の割合が増加していたことから、養殖施設からさかんに沈降してきた堆積初期の有機物を分解する細菌が活発になっていたことも示唆される。

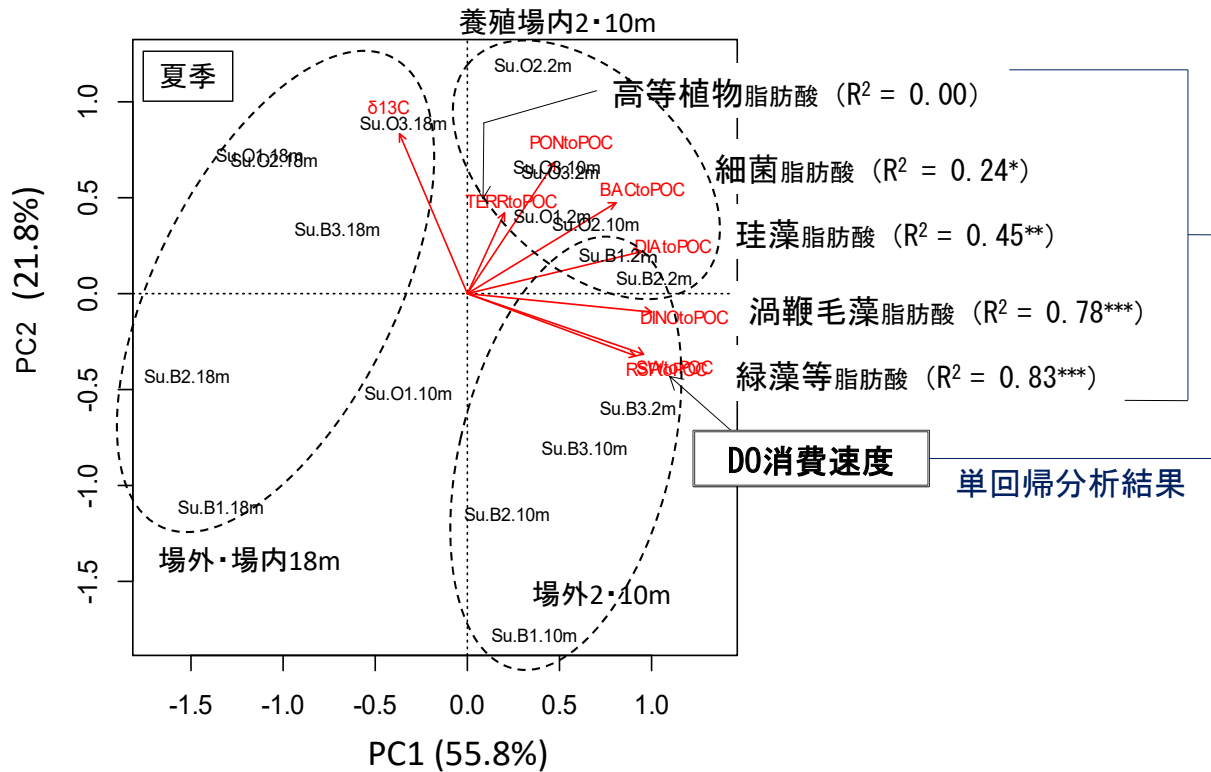
(3) 4 粒状有機物の化学組成と酸素消費の関係

海水中の浮遊性の粒状有機物濃度と酸素消費速度には有意な関係がみられなかった。一方で、海水中のPOC濃度あたりの酸素消費速度は、水深帯や季節、さらには養殖場内外で異なっていた（図(3)2-20）。このことは、粒状有機物の量だけでは水中の酸素消費が説明できず、その質によっても酸素消費速度が大きく変化するを示す。

海水中に浮遊する粒状有機物については、酸素消費速度が最も盛んだった夏季に、その質的指標としての炭素量あたりの緑藻・珪藻・渦鞭毛藻および細菌の各種マーカー脂肪酸含有量と酸素消費速度の間に有意な正の関係が認められた（図(3)2-21, 図(3)2-22）。さらに、水深が大きくなるほど粒状有機物中の脂肪酸含有量と酸素消費速度がともに小さくなっていった。より深い水深帯の海水中粒状有機物ほど分解が進行しており、酸素消費活性が有意に低下していることを示した。底質については、POCあたりの脂肪酸量と酸素消費速度はともに海水中のそれらと比較して著しく小さく、分解が進んだものが底質に堆積していたことがわかる。

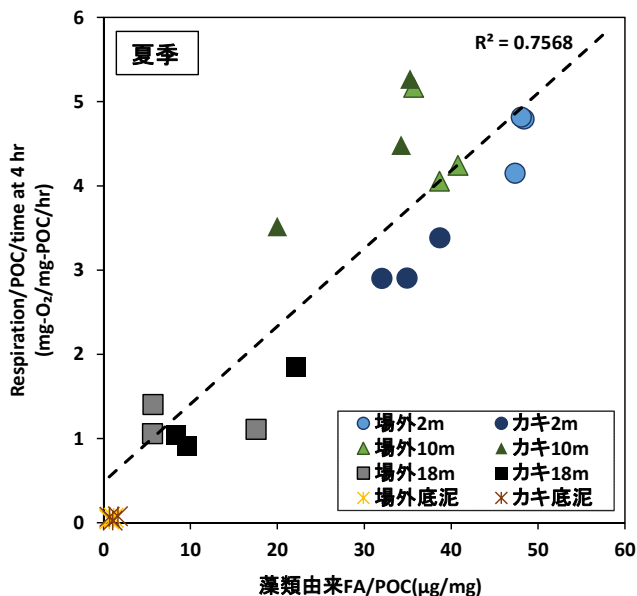


図(3)2-20 各季節各水深帯で採取された海水中POC濃度あたりの酸素消費速度

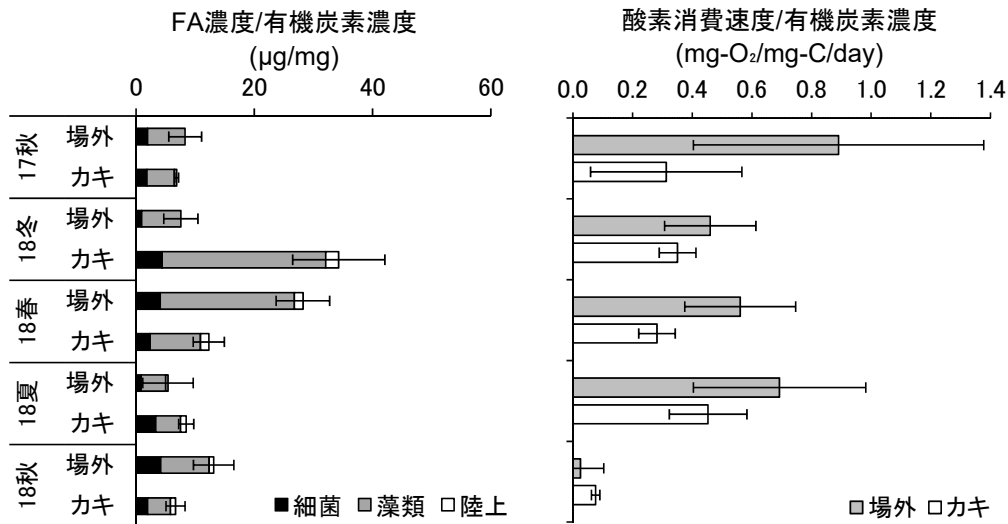


図(3)2-21 2016年夏季調査時のカキ養殖場内外における海水中粒状有機物の脂肪酸組成（主成分分析結果）および酸素消費速度との関係（単回帰分析結果）。なお、すべて有機炭素量あたりのデータにより解析。

沈降物についても同様にその藻類系の脂肪酸含有量と酸素消費の間に有意な正の関係が認められた（図(3)2-23、図(3)2-24）。カキ養殖場内の沈降物の潜在的起源としての生物の糞や付着物等は、藻類起源有機物に富んでおり、藻類の呼吸及び分解のために酸素を多く消費していると考えられる。一方で、養殖場内の沈降有機物は、前述のとおり藻類由来マーカ脂肪酸の割合と酸素消費活性がともに小さかった。カキ養殖場内では、排泄物・付着物に含まれる易分解性である藻類起源有機物が沈降過程である程度分解し、比較的分解しにくく酸素消費能が比較的低下した有機物が多く底層に沈降・堆積していると考えられる。養殖場内の沈降物の潜在的起源としての生物の糞や付着物等は、いずれも沈降物よりも高い酸素消費活性を持っていたことから、付着物を削減するために施設表面積の低減は、底層環境への負荷を抑制するうえで有効な戦略となりうるかもしれない。



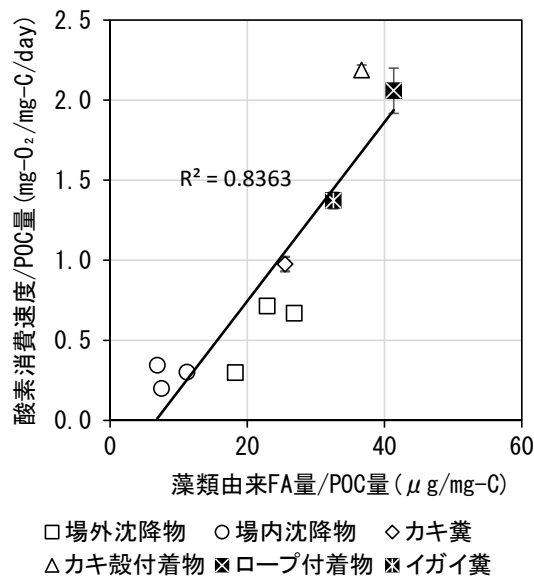
図(3)2-22 2016年夏季に採取された養殖場内外の海水中粒状有機物の有機炭素量あたりの酸素消費速度と藻類由来脂肪酸マーカ含有量の関係。



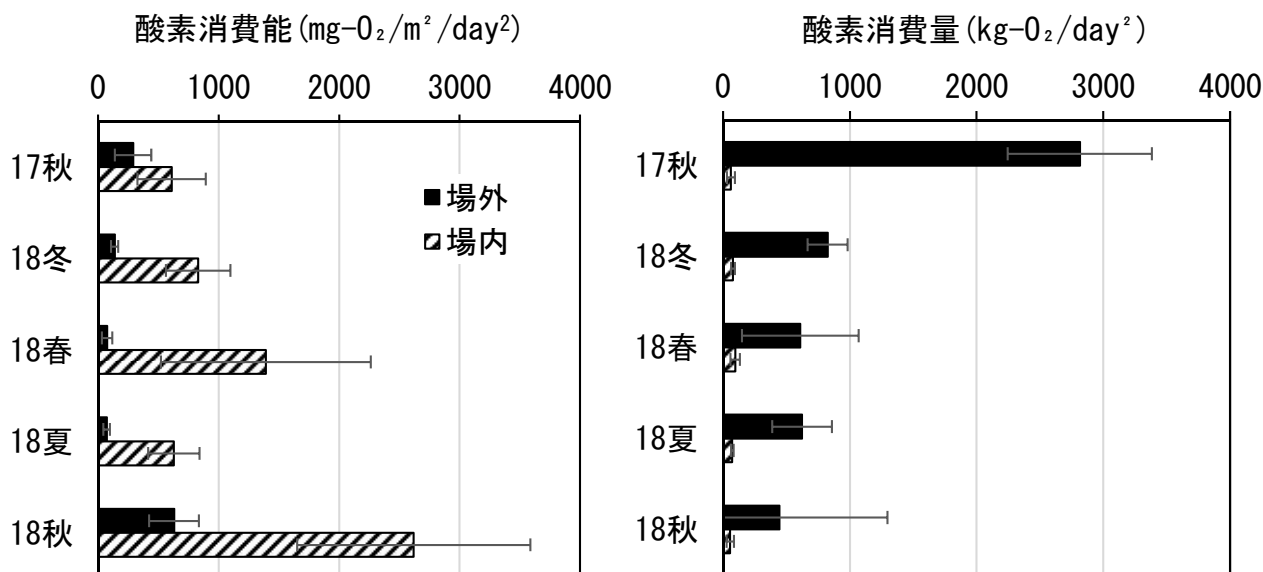
図(3)2-23 養殖場内外にてセディメントトラップにより採取された沈降性粒状有機物の有機炭素量あたりの藻類由来脂肪酸マーカ含有量と酸素消費速度。

上述の一連の結果は、粒状有機物中の藻類由来有機物の存在が酸素消費に大きく関与していたことを示す。この機構としては、藻類自身による呼吸と枯死した藻類の分解にはたらく従属栄養細菌による呼吸の2つが主に考えられる。しかし、本研究では、藻類と細菌のマーカ脂肪酸量の間にも正の関係が認められており、これらの機構を分離しそれぞれの寄与を判断することは出来なかった。

POC濃度と水塊中の酸素消費速度の間に有意な正の関係が認められなかったことは、酸素消費を粒状有機物の量的指標のみをもって予測あるいはモデル化する場合にその精度が低くなることを示している。本研究で用いた脂肪酸マーカは、粒状有機物の酸素消費と有意な関係性を示したことから、酸素消費に関わる粒状有機物の質的側面を捉える指標として有用であることが期待できる。しかしながら、本研究ではそのような明瞭な関係性を示したのは夏季の調査時のみであり、他の季節については酸素消費と有意な関係性を示さなかった。夏季は、分解過程にある枯死した藻類の割合が春季よりも高く、それに伴い酸素消費が大きかった可能性などが考えられるが、そのような粒状有機物の質・状態を的確に反映できる指標についてはさらに検討が必要である。



図(3)2-24 2018年春季の各有機物のマーカ脂肪酸割合と酸素消費活性の関係。



図(3)2-25 カキ養殖場内外で1日に沈降する有機物がもつ酸素消費能力（左：単位面積あたりの評価）と酸素消費量（右：湾奥部全体13.8 km²での評価）。カキ養殖用の延縄施設面積は海域の2%と仮定。

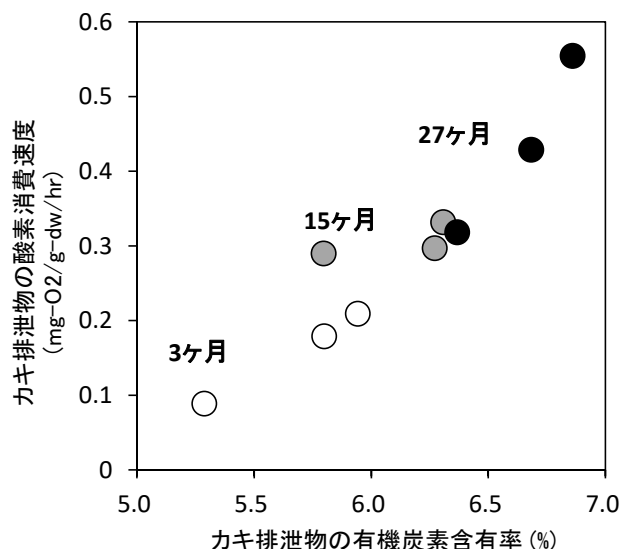
(3) 5 カキ養殖施設からの粒状有機物沈降が湾の酸素消費に及ぼす影響

カキ養殖場内では、沈降有機物の酸素消費活性が低下していることが示唆されたものの、まだ酸素消費活性を有した状態で多量かつ速い速度で沈降しているため底層への影響は無視できないと考えられる。養殖場内では単位面積当たりの沈降有機炭素量が養殖場外と比較して、差の小さかった秋季で約2倍から4倍、差の大きかった春季では18倍にも及んだ（図(3)2-25）。単位面積当たりの沈降有機炭素量とPOC量当たりの酸素消費速度を掛け合わせた養殖場内外の単位面積当たりの沈降有機物による酸素消費能力を比較すると、2017年秋を除き、養殖場内のほうが4~7倍程度場外よりも大きい結果になった。養殖場外と比較し、養殖場内では沈降有機物の酸素消費活性そのものは場外のそれよりも小さいものの、多量の有機物が沈降するため単位面積当たりの酸素消費は大きくなる。

志津川湾奥海域全体（約14km²）での沈降有機物による酸素消費は、より大きな面積を占める養殖場外の海域における沈降有機物の寄与が大きかった。一方で、カキ養殖用の延縄の面積は湾奥海域全体の2%に過ぎないが、酸素消費量では湾全体の10%程度を占めていると考えられる。先述のとおりカキ養殖場から発生する沈降有機物はその分解速度が低下しているものの酸素消費活性は保持していることから、それらが速い沈降速度で底質上へ輸送されその後長期間堆積した状態にあることで、底層の溶存酸素を消費し続けるものと考えられる。

6) カキの月齢と排泄物の有機物含有率および酸素消費の関係

3段階の月齢のカキを用いたメソコズム実験からは、排泄物の有機炭素含有率は0.05~0.07g-C g-dw⁻¹で、月齢の大きいカキのものほど高いことが明らかになった（図(3)2-26）。これについては、摂餌過程での餌料選択能力や消化特性の変化などによりカキの加齢にともなって同化率が低下しているためではないかと推察される。一方、カキの排泄物による酸素消費速度を測定した結果、0.09~0.55 mg-O₂ g-dw⁻¹ h⁻¹の範囲にあり高月齢のカキの排泄物ほど、より大きな酸素消費速度を有することも明らかとなった。この結果は、養殖期間の長期化が、高月齢のカキによる摂餌量と排泄量の増加のみならず、排泄物の質的な変化を通じて底層環境の悪化を助長しうることを示唆するものである。



図(3)2-26 月齢の異なるカキ排泄の有機炭素含有率と酸素消費速度の関係 (2014年11月メソゾム実験結果)

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

1) 養殖カキの成長に及ぼす局所的な養殖密度の重要性

志津川湾では、湾内の養殖カキが必要とする餌料も量的には十分供給されるレベルにあった。このようなレベルにあっても、局所的な餌料供給環境はカキの養殖密度に依存し、カキの成長速度が養殖筏台数密度の低い定点で高い定点よりも有意に大きくなって見出した。湾全体といった大きな空間スケールで、養殖カキにとって十分な餌料供給環境であっても、生産性を高く維持するためには、養殖施設程度の空間スケールでカキ個体の餌料供給環境として健全な養殖筏台数密度にすることを重要性を初めて明らかにした。

2) 開放性内湾における二次生産に及ぼす流域起源粒状有機物の影響解明

開放性内湾である志津川湾では、湾内の植物プランクトンに比べ、河川から輸送される粒状有機物の供給量および一次消費者生物の餌源としての利用は非常に小さかった。三陸の開放性内湾では、湾に流入する河川の集水面積が狭く流量も少なく湾内における内部生産が重要であること、河川を通じた流域起源粒状有機物の湾内食物網への直接的寄与が小さいこと、という特性を初めて明らかにした。

3) 養殖カキの年齢の違い海洋環境に及ぼす影響の解明

カキ養殖場ではカキの排泄物だけではなくカキや施設表面の付着物の剥離・脱落などもあわせて多くの粒状有機物が海底に沈降し、内湾環境を悪化させる一つの原因となっている。今回、養殖カキの年齢が高くなるほど、糞・擬糞中の有機物量の占める割合が増加し、それらを微生物が有機的に分解するのに必要な酸素消費速度も増加することを実験的に解明した。上記1)の科学的意義とこの成果を合わせると、筏密度を低下させて若齢で出荷サイズに成長させると、養殖カキからの糞・擬糞による海底環境への有機物負荷を低減でき、カキ養殖の生産性を高めるとともに健全な海洋環境を実現できるという科学的根拠を初めて提出した。これは、人手のかけ方を変えるという里海手法といえる。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

海洋政策本部参与会議の総合的な沿岸域の環境管理の在り方P Tの外部有識者として本研究成果で得られた、「人が関わって、より良い海をつくって豊かな恵みを得るという志津川湾における『里海』づくりの例」の中で、志津川湾におけるカキ養殖筏削減によるカキの生産性向上と健全な海洋環境実現

の成果を示し、適切な人手を加えることで持続的な漁業と環境が実現できると指摘し、内閣府第3期海洋基本計画の策定に貢献した（海洋基本計画の概要（その1） p.3の第3期海洋基本計画概要（その3）海洋環境の維持・保全；海洋基本計画の概要（その2） p.7の（参考） 第3期海洋基本計画における具体的施策（その2）沿岸域の総合的管理；海洋基本計画（平成30年5月15日閣議決定） p.22-23イ海洋環境の保全を前提とした海の恵みの持続的な享受， p.54ア沿岸域の総合的管理の推進：
<https://www8.cao.go.jp/ocean/policies/plan/plan03/plan03.html>）

<行政が活用することが見込まれる成果>

1) カキ養殖施設の密度低減がもたらす生産効率向上と環境汚濁負荷削減の効果

カキ養殖施設密度の低減がカキの成長速度の上昇と養殖期間の短縮につながることを示した。施設密度低減は、生産効率とサイクルを早めて養殖カキ個体群としてより若い個体の割合を増す。そのことで個体あたりの摂餌量が抑えられるとともに、高い同化効率によって排泄物の有機物含有量・酸素消費も低く抑えられる。また、養殖施設密度の低減は、施設から供給される粒状有機物の量を削減することにつながる。これらは、養殖施設密度の低減によって、養殖の生産効率の向上と底質・底層に対する環境負荷の低減が同時に期待できることを示している。一般に、二枚貝養殖の漁業者が漁獲量を増やすことを意図して養殖施設数を増やし過密養殖となって結果的に生産性が低下し、海洋環境を悪化している問題が各地で生じている。より大きな個体に成長させてから漁獲するために養殖期間を長くとする漁業者も少なくない。本研究の知見は、今後行政が内湾における漁業生産性と環境保全の両立にむけた施策を講ずるうえでの科学的根拠になるとともに、漁業者コミュニティをはじめ広く社会的合意形成を図るうえでも有用な情報となりうる。

2) 無給餌型垂下式養殖による局所的な有機汚濁についての理解進展

閉鎖性海域における富栄養化・有機汚濁問題への対策としては、長年にわたり外部負荷の削減がすすめられてきた。これに対して本研究は、海域内における人為活動としての無給餌垂下式養殖漁業が引き起こす局所的ではあるが顕著な有機汚濁プロセスについての科学的理解を進展させた。これについては、これまでその環境影響の理解の不足もあり海域環境管理の対象として十分に取られてこなかった側面がある。本研究の成果は、特に養殖が盛んに行われる内湾において海域環境保全のための行政施策を考える際、養殖の影響を判断するうえでの有用な科学的知見となりうる。

3) 数値生態系シミュレーションモデルの精度向上への貢献

本研究で得られた知見の一部に基づき、S-13-5総括班での志津川湾数値生態系シミュレーションモデル構築の際のモデルパラメータを提供した。特に、養殖カキの月齢の変化にともなう排泄物の化学組成および酸素消費速度の変化に関する知見は、カキ養殖密度を変化させた際の底層環境への影響等をより精度よく見積もるうえでの有用なものである。環境影響評価などにおいて数値シミュレーションは広く用いられており、上述のような観点からもモデル性能の向上を通じて本研究の成果は環境行政が活用しうる有用な知見を提示したといえる。

6. 国際共同研究等の状況

国際共同研究計画Future Earthアジア太平洋地域プログラムSustainability Initiative in the Marginal Seas of South and East Asia (SIMSEA)、カウンターパート氏名・所属・国名はR. V. Azanza・フィリピン大学海洋科学研究所・フィリピン、参加、SIMSEAは、国際科学会議アジア太平洋地域委員会 (ICSU RCAP) が、関係各国の研究者やステークホルダーの協働を促し、縁辺海の安定化に貢献することを目的に設立された国際プログラムと国際的に位置付けられており、アジアにおける開放性内湾などの沿岸海域におけるFuture Earthの重要な取組みとして発展している。

国際共同研究計画Future Earth Coasts、カウンターパート氏名・所属・国名はValerie Cummins・University College Cork・アイルランド、参加、Future Earth Coastsは、Future Earthの中で沿岸域における持続可能性と地球スケールの環境変化への適応を目指した研究プロジェクトとして国際的に位

置づけられており、IGBPとIHDPの下で実施されていたLOICZ (Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone) の後継のもので、沿岸域に関する国内の自然科学・工学・社会科学研究者が連携し、政策決定者、産業界との協業を目指して活動している。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 大原光司、湯上洋平、川畑達矢、藤林恵、西村修、坂巻隆史：土木学会環境工学論文集（74巻，7号）III_53-62（2018）
「脂肪酸組成分析を利用した内湾一次生産の制限因子の評価」
- 2) 川畑達矢、藤林恵、湯上洋平、西村修、坂巻隆史：土木学会環境工学論文集（74巻，7号）III_63-72（2018）
「海水中粒状有機物の化学組成と酸素消費に及ぼすカキ養殖場の影響」
- 3) M. FUJIBAYASHI, T. SAKAMAKI and O. NISHIMURA: Marine Environmental Research (in press)
“Effect of Sedimentary Organic Matter on Species Richness of Deposit Feeders in Enclosed Bay Ecosystems: Insight from Fatty Acid Nutritional Indicators”

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 小松輝久、門谷茂、吉村千洋、西村修、柳哲雄：水産学会誌，83(6)，1009，(2017)
「志津川湾における生物生産と陸からの負荷：栄養塩，微量金属，有機物」
- 2) 小松輝久、佐々修司、浅田みなみ、門谷茂、吉村千洋、藤井学、夏池真史、西村修、坂巻隆史、柳哲雄：水産海洋研究，81(2)，125-128，(2017)
「基調講演 開放型内湾における里海の実現を目指して：三陸志津川湾を例として」
- 3) 柳哲雄編著：里海管理論、農林統計協会、52-65（2019）
「2.4 森は海の恋人か：粒状有機物」（執筆担当：坂巻隆史、西村修）
- 4) T. SAKAMAKI and O. NISHIMURA: In Integrated Coastal Management in the Japanese Satoumi ed. by T. Yanagi, Elsevier, pp. 39-46 (in press)
“2.4 Is the Forest a Lover of the Sea? Particulate Organic Matter”

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 西村修：シンポジウム『豊かな志津川湾の創生』，(NPO) 環境創生研究フォーラム，(公財) 国際エメックスセンター，東北大学青葉山キャンパス，仙台（2014）
「志津川湾の有機物動態」
- 2) 西村修：環境省「環境研究総合推進費」S-13 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成26年度公開成果発表会，三宮研修センター，神戸(2014)
「森-海の物質輸送に果たす有機物の役割解明」
- 3) 坂巻隆史：応用生態工学会国際シンポジウム（2015）
「沿岸域生態系の受ける流域の影響を理解する意義と難しさ」
- 4) 林恭平、坂巻隆史、西村修：汽水域研究会（2015）
「カキの加齢が糞による酸素消費に及ぼす影響」
- 5) 西村修：環境省「環境研究総合推進費」S-13 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成27年度公開成果発表会，WTCコンファレンスセンター Room A，東京（2015）
「森-海の物質輸送に果たす有機物の役割解明」
- 6) 松野匠、藤林恵、坂巻隆史、西村修：土木学会東北支部研究発表会（2016）
「脂肪酸および炭素安定同位体比を用いた養殖カキの餌起源推定」
- 7) ジョン・イジョウ、西村修、坂巻隆史：日本水環境学会年会（2016）
“Seasonal variations of carbon and nitrogen stable isotope ratios and fatty acid compositions of different size fractions of plankton community in Shizugawa Bay”
- 8) 盛田暁子、坂巻隆史、西村修：日本水環境学会年会（2016）
「河口域に生息する多毛類の成長に対する陸上植物と海産性藻類の寄与」
- 9) 神崎洋青、藤林恵、坂巻隆史、西村修：日本水環境学会年会（2016）
「内湾の底生動物に対する高等植物由来有機物の餌料価値」

- 10) 西村修:環境省環境研究総合推進費戦略研究プロジェクトS-13 H28年度 公開成果発表会「持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発」, (公財) 国際エメックスセンター主催、大手町ファーストスクエアカンファレンス Room A, 東京 (2016)
「志津川湾における環境管理適正化に向けた粒状有機物動態の解析」
- 11) Y. ZHENG, K. HAYASHI, T. MATSUNO, M. FUJIBAYASHI, M. NOMURA, O. NISHIMURA and T. SAKAMAKI:EMECS' 11-SeaCoasts XXVI Joint Conference (2016)
“Interaction between biogeochemical environment and oyster farming in Shizugawa Bay, Japan”
- 12) 小松輝久、門谷茂、吉村千洋、西村修、柳哲雄:日本水産学会平成29年度春季大会シンポジウム企画「森川里海のつながりを科学で説明できるか?」, 東京海洋大学 (2017)
「志津川湾における生物生産と陸からの負荷:栄養塩, 微量金属, 有機物」
- 13) 坂巻隆史、川畑達矢、ジョン・イジョウ、西村修:日本水環境学会年会 (2017)
「内湾の粒状有機物動態と底層環境に及ぼすカキ養殖の影響」
- 14) 林恭平、木下龍之介、丸尾知佳子、藤林恵、西村修:日本水環境学会年会 (2017)
「アサリの成育に対する高等植物由来有機物の影響」
- 15) 丸尾知佳子、藤林恵、坂巻隆史、西村修:日本水環境学会年会 (2017)
「干潟に生息する二枚貝間の相互作用が成長に与える影響の基礎的研究」
- 16) 川畑達矢、ジョン・イジョウ、西村修、坂巻隆史:土木学会東北支部技術研究発表会 (2017)
「志津川湾における海水中粒状有機物の化学組成と酸素消費速度に及ぼすカキ養殖場の影響」
- 17) 湯上洋平、松野匠、西村修、坂巻隆史:土木学会東北支部技術研究発表会 (2017)
「志津川湾内の有機物・栄養塩への外洋境界から流入する異なる水塊の影響」
- 18) 松野匠、西村修、坂巻隆史:日本水環境学会東北支部研究発表会 (2017)
「脂肪酸及び炭素安定同位体比を用いた養殖カキの餌起源推定」
- 19) 坂巻隆史、松野匠、鄭翊喆、西村修:日本水環境学会シンポジウム (2016)
「炭素安定同位体比と脂肪酸組成の分析に基づく志津川湾における粒状有機物動態の解析」
- 20) 湯上洋平、松野匠、西村修、坂巻隆史:日本海洋学会秋季大会 (2017)
「志津川湾内の有機物組成に及ぼす外洋水の影響」
- 21) 西村修:環境省「環境研究総合推進費」S-13 3 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成29年度公開成果発表会, AP 新橋 虎ノ門11階 Room A, 東京 (2017)
「森一海の物質輸送に果たす有機物の役割解明」
- 22) 川畑達矢、鄭翊喆、湯上洋平、西村修、坂巻隆史:日本海洋学会秋季大会 (2017)
「志津川湾内における海水中有機物組成と酸素消費に及ぼすカキ養殖場の影響」
- 23) 湯上洋平、西村修、坂巻隆史:第5回日本水環境学会東北支部発表会 (2018)
「志津川湾奥河口部における河川および外洋からの流入水の影響」
- 24) 大原光司、湯上洋平、川畑達矢、西村修、坂巻隆史:土木学会東北支部技術研究発表会 (2018)
「河川水が内湾の一次生産に及ぼす影響の評価」
- 25) 野中健太郎、松野匠、西村修、坂巻隆史:土木学会東北支部技術研究発表会 (2018)
「内湾における捕食性魚類と底生生物のトロフィック・マーカーの関係」
- 26) 鄭翊喆、川畑達矢、湯上洋平、西村修、坂巻隆史:日本水環境学会年会 (2018)
「サイズ分画と脂肪酸組成を交えた内湾の粒状有機物生産に及ぼす栄養塩添加と温度上昇の影響解析」
- 27) 松野匠、坂巻隆史、西村修:第52回日本水環境学会年会 (2018)
「捕食性魚類のトロフィック・マーカーの基づく河川影響を受ける内湾食物網の解析」
- 28) 木下龍之介、丸尾知佳子、千葉信男、西村修:日本水環境学会年会 (2018)
「アサリの餌摂取行動における選択性について」
- 29) T. SAKAMAKI and M. FUJIBAYASHI: ASLO Summer Meeting (2018)
“Testing connections of an inner-bay food web system with riverine material inputs”
- 30) T. SAKAMAKI, T. KAWAHATA, Y. YUGAMI, M. FUJIBAYASHI and O. NISHIMURA: The 12th International Conference on the Environmental Management of the Enclosed Coastal Seas (2018)
“The dynamics of particulate organic matter and implications for sustainable oyster aquaculture in Shizugawa Bay”
- 31) Y. YUGAMI, K. OHARA, O. NISHIMURA and T. SAKAMAKI: The 12th International Conference on the Environmental Management of the Enclosed Coastal Seas (2018)
“Effects of river and offshore water on primary production in the inner part of Shizugawa Bay”

- 32) T. KAWAHATA, Y. YUGAMI, O. NISHIMURA and T. SAKAMAKI : The 12th International Conference on the Environmental Management of the Enclosed Coastal Seas (2018)
 “Assessing the dynamics of particulate organic matter and potentials of hypoxia formation in oyster farms of Shizugawa Bay”
- 33) 小松輝久、佐々修司、門谷 茂、吉村千洋、藤井 学、夏池真史、西村 修、坂巻隆史、柳哲雄：日本水環境学会 第27回市民セミナー「豊かな里海の創生～河川流域と沿岸域の関係～」，東京（2018）
 「開放性内湾における豊かな里海の実現を目指して：南三陸志津川湾を例として」
- 34) 西村修：環境省「環境研究総合推進費」S-1 3 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成30年度公開成果発表会，WTCコンファレンスセンター 3階 Room A，東京（2018）
 「森-海の物質輸送に果たす有機物の役割解明」
- 35) 野中健太郎、松野匠、坂巻隆史：廃棄物資源循環学会東北支部・日本水環境学会東北支部合同研究発表会（2019）
 「底生動物のトロフィックマーカーを同化した捕食性魚類体内組成の応答」
- 36) 畠山勇二、川畑達矢、西村修、坂巻隆史：土木学会東北支部技術研究発表会（2019）
 「カキ養殖場から発生する沈降有機物の空間的起源と酸素消費速度」
- 37) 丸山千賀、小瀬知洋、玉置仁、坂巻隆史：日本水環境学会年会(2019)
 「波津々浦湾干潟における周辺域からの堆積物負荷が干潟底質へ及ぼす影響」
- 38) 湯上洋平、大原光司、西村修、坂巻隆史：日本水環境学会年会(2019)
 「志津川湾奥部の脂肪酸生産に及ぼす湾外からの窒素・リン流入の影響」
- 39) 川畑達矢、畠山勇二、西村修、坂巻隆史：日本水環境学会年会（2019）
 「脂肪酸分析を用いた内湾カキ養殖場の粒状有機物動態と酸素消費への影響評価」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム「豊かな志津川湾の創生」（主催：（NPO）環境創生研究フォーラム・（公財）国際エメックスセンター、2014年10月24日、東北大学工学研究科青葉山会館、聴講者50名）にて講演
- 2) 一般公開シンポジウム「環境研究総合推進費S-1 3 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成26年度公開成果発表会」（主催：環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト・（公財）国際エメックスセンター、2014年11月21日三宮研修センター、聴講者約70名）にて講演
- 4) 一般公開シンポジウム「環境研究総合推進費S-1 3 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成27年度公開成果発表会」（主催：環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト・（公財）国際エメックスセンター、2015年11月5日、WTCコンファレンスセンター Room A、聴講者約70名）にて講演
- 5) 一般公開シンポジウム「環境研究総合推進費S-1 3 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成28年度公開成果発表会」（主催：環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト・（公財）国際エメックスセンター、2016年11月30日、大手町ファーストスクエアカンファレンス Room A、聴講者約70名）にて講演
- 6) 日本水産学会平成29年度春季大会シンポジウム企画「森川里海のつながりを科学で説明できるか？」（主催：日本水産学会、2017年3月26日、東京海洋大学、聴講者約80名）にて講演
- 7) 日本海洋学会2017年秋季大会沿岸海洋シンポジウム「持続可能な沿岸海域管理法-環境省推進費戦略的研究開発領域(S-13)の成果から」（主催：日本海洋学会沿岸海洋研究会、2017年10月12日、東北大学青葉山北キャンパス数理科学記念館、聴講者約80名）にて講演
- 8) 一般公開シンポジウム「環境研究総合推進費S-1 3 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成29年度公開成果発表会」（主催：環境省環境研究総合推進費S-13プロジ

エクト・（公財）国際エメックスセンター、2017年11月21日、A P 新橋 虎ノ門11階Room A、聴講者約70名）にて講演

- 9) 一般公開シンポジウム「環境研究総合推進費S-13 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 平成30年度公開成果発表会」（主催：環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト・（公財）国際エメックスセンター、2018年11月29日、WTCコンファレンスセンター3階Room A、聴講者約70名）にて講演

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載する事項はない。

(6) その他

受賞

査読付論文

川畑達矢、藤林恵、湯上洋平、西村修、坂巻隆史：土木学会環境工学論文集（74巻，7号）III_63-72（2018）「海水中粒状有機物の化学組成と酸素消費に及ぼすカキ養殖場の影響」に対して第55回環境工学研究フォーラム論文奨励賞

8. 引用文献

- 1) T. SAKAMAKI and J. S. RICHARDSON: *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 360, 13-24 (2008)
“Effects of Small Rivers on Chemical Properties of Sediment and Diets for Primary Consumers in Estuarine Tidal Flats: a Comparison between Forested and Agricultural Watersheds”
- 2) T. SAKAMAKI and J. S. RICHARDSON: *J. Applied Ecol*, 48, 1462-1471 (2011)
“Biogeochemical Properties of Fine Particulate Organic Matter as Indicators to Assess Local and Catchment Impacts on Forested Streams”
- 3) S. MORITA, S. TOUYAMA, T. KUWAE, O. NISHIMURA and T. SAKAMAKI: *Estuar. Coastal Shelf Sci.*, 184, 207-213 (2017)
“Effects of Watershed Land-cover on the Biogeochemical Properties of Estuarine Tidal Flat Sediments: a Test in a Densely-populated Subtropical Island”
- 4) T. SAKAMAKI, J. Y. T SHUM and J. S. RICHARDSON: *Ecosystems*, 13, 328-337 (2010)
“Watershed Effects on Chemical Properties of Sediment and Primary Consumption in Estuarine Tidal Flats: Importance of Watershed Size and Food Selectivity by Macrobenthos”
- 5) 坂巻隆史：日本生態学会誌，61，63-69（2011）
「河口干潟における河川由来有機物の動態と底生動物による利用」
- 6) S. ABDULKADIR and M. TSUCHIYA: *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 354, 1-8 (2008)
“One-step method for Quantitative and Qualitative Analysis of Fatty Acids in Marine Animal Samples”
- 7) T. MEZIANE and M. TSUCHIYA: *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 200, 49-57 (2000)
“Fatty Acids as Tracers of Organic Matter in the Sediment and Food Web of a Mangrove/Intertidal Flat Ecosystem, Okinawa, Japan”
- 8) 清木 徹、伊達 悦二、井澤 博文：水質汚濁研究，8，5，304-313（1985）
「広島湾におけるセディメント・トラップ捕集物から推定した水中懸濁物の沈降フラックス」
- 9) Y. KUSUKI: 広水試研報，11，1-93（1981）

“Fundamental Studies on the Deterioration of Oyster Growing Grounds”

III. 英文Abstract

Study on Development of Coastal Environmental Management Methods on the Sanriku Coast, Which Has a Succession of Open Inner Bays

Principal Investigator: Teruhisa KOMATSU

Institution: Faculty of Commerce, Yokohama College of Commerce
 4-11-1, Higashiterao, Tsurumiku, Yokohama-City, Kanagawa
 230-8577, JAPAN
 Tel: +81-45-8503 / Fax: +81-45-850
 E-mail: komatsu@shodai.ac.jp

Cooperated by: Research Center for Community Economy, Yokohama College of Commerce
 School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology
 Graduate School of Technology, Tohoku University

[Abstract]

Key Words: Open inner bay, Succession of coastal ecotone by huge tsunami, Examination of a hypothesis called “a forest is a lover of the sea”, Shizugawa bay, Material cycling, Dissolved iron, Reduction of aquaculture rafts, Council for marine environment, Ecolabel, Ramsar Convention

This study aimed to clarify what human interventions are effective to regenerate prosperous open-type inner bays such as the rias-type bays of Sanriku Coast. In Shizugawa Bay, we examined temporal changes in distributions of sea use and coastal ecotone before and after the tsunami in 2011 and material flows of nutrients, dissolved iron and particulate organic matters from 2014 to 2018.

Seaweed beds have changed to sea urchin barrens since 2013 due to the interruption of the sea urchin fishery from 2011 to 2013 after the tsunami. Such fishery enhances biodiversity and productivity in the sea by maintaining seaweed forests luxuriant. The “Satoumi” is defined as Yanagi (2005) proposed the concept of “Satoumi” for human management of coastal seas for high productivity while maintaining high biodiversity. Thus, the sea urchin fishery is an activity of Satoumi.

After the tsunami, fishermen decided to reduce the number of oyster culture rafts in two districts of inner Shizugawa by 50% and 70% of those before the tsunami. The reduction of rafts shortened the oyster culture period from more than two years to less than one year. The percentage of organic matter in oysters’ feces and pseudofeces increases in proportion of oyster’s age. Therefore, a reduction of the rafts contributes to healthy marine environments, a cost reduction and a sustainable yield for the aquaculturist. This reduction is also an activity of Satoumi.

Oyster culture including oysters and facilities provides substrates for attached microalgae. Attached microalgae overgrown detach from the substrates. Cultured oysters feed detached microalgae immediately and excrete nutrients into the sea quickly. The attached microalgae intake them quickly and grow on the substrates. Such a relation between the

cultured oysters and the attached microalgae is symbiotic. When a density of oyster culture facilities is under a limit of bottom environment deterioration, the oyster culture make a nutrient cycle in the bay long and fast. Thus, it is also an activity of Satoumi.

Dissolved iron and nutrients in the inner Shizugawa Bay are mainly supported by inflow of open sea waters because river discharge in a rias-type bay is much less than inflow from the open sea. Afforestation movements of broadleaf trees by fishermen around such bays don't contribute to enhance dissolved iron supply through increase in supply of dissolved organic matter produced by broadleaf trees but do prevent sediment and freshwater runoff to the bay from broadleaf forests. Maintained coniferous forests also prevent them.

This study established the "Council for Future Environment of Shizugawa Bay" with local fishermen, officers of local governments, WWF Japan and scientists in 2015, which was held six times till 2019. A physical-biological coupling model of Shizugawa Bay developed by S-13-5 calculated physical and chemical environmental conditions as well as biological productions of aquaculture of oysters, scallops, sea squirts and wakame. According to scenarios of aquaculture co-designed by fishermen and scientists, the model estimated environments, productions and net profits of aquaculturists. The council discussed about these results. It was reflected to a rearrangement of aquaculture species at the aquaculture license renewal in 2018.

The study provided the distribution map of aquaculture facilities in Shizugawa Bay to local fishermen who needed it for obtaining Aquaculture Stewardship Council certification in 2016 as an international ecolabel to sustainable aquaculture products and the macrophyte bed distribution map to Minamisanriku Town Office for registering the macrophyte beds in 2018 as a Ramsar Site that is a wetland site designated to be of international importance under the Ramsar Convention. At the center of the Ramsar philosophy is the "wise use" of wetlands, which encourages sea urchin fishery as a Satoumi activity to maintain healthy seaweed beds in Shizugawa Bay. The forestry of Minamisanriku Town acquired the Forest Stewardship Council certificate in 2015. These two certifications and one registration serve to realize a sustainable marine environment with prosperous and sustainable aquaculture by connecting the forest in the mountain to the sea (aquaculture) through the ecotone.

In this way, this study succeeded to develop a management method to enable sustainable aquaculture and a healthy marine environment in Shizugawa Bay. The results and experiences will contribute to other open-type enclosed bays in Japan and the world.