

閉鎖性海域の環境創生プロジェクト研究（抄録）

山形陽一・西村昭史・土橋靖史・清水康弘・増田健・国分秀樹・渥美貴史
農業研究部・保健環境研究部・四日市大学・大塚電子(株)・ジャパンテクノメイト(株)

目的

本事業は、近年環境の悪化が進行する英虞湾を対象とし、環境改善のための手法の検討と、養殖漁業等の経済活動が、持続的かつ円滑に行われる新たな環境を創生する技術の開発が目的である。このため、現在、負荷量>浄化量となっている英虞湾の自然循環のバランスを、極力負荷量=浄化量となるように、英虞湾内の物質循環の把握を研究の中心課題に据え、個々の問題解決型の技術（浚渫汚泥を利用した人工干潟の造成、それに連続した生態系としてのアマモ場の造成、環境に調和した真珠養殖等、新しい里海の創生を目指す技術）の開発を行う。同時に底質汚染対策として、底層への酸素補給等による底質改善技術の開発を行うとともに、英虞湾の環境動態予測システムを構築する。

本研究事業は財団法人科学技術振興機構の競争的研究事業として平成15年1月から19年12月までの5年間実施し、共同研究機関は合計29機関、32課題に取り組んだ。具体的な研究成果については、「英虞湾物質循環調査研究報告書」および「三重県地域結集型共同研究事業環境再生技術集」で別途報告されているため、その概要のみとりまとめた。ここでは、水産研究所が単独または共同で行った研究について記述し、他は省略した。

方法および結果

1. 人工干潟・藻場の造成技術の開発

1) 人工干潟および天然干潟の調査（水産研究部）

2) 干潟再生技術の開発（水産研究部）

本研究では、湾内の干潟における問題点を明確にし、その解決策として、底質の栄養レベルをコントロールすることにより、干潟の生産性を向上させる技術開発を行った。まず航空測量と画像解析により英虞湾内の干潟面積を調査することにより、過去から干拓により約70%以上の干潟が消失し、さらにその干拓地の80%以上が未利用地となっていることが分かった。さらに残された天然干潟の底質と底生生物の調査結果から、干拓による堤防建設により、陸からの栄養供給が遮断され、堤防の前後で底質の富栄養化と貧栄養化が起こり、残された干潟の生物生産までも低下していることが分かった。

上記の問題解決するために、干潟生物に最適な底質条件を小規模現地実験により明確にした。その結果を利用し、堤防前面の貧栄養な前浜干潟には湾内の栄養豊富な

浚渫土を用いることにより、また、過栄養な堤防後背地には失われた海水交換を促進することにより、底質の栄養レベルをコントロールし、生物生産性を向上させる干潟造成技術を開発した。その結果、造成前後で生物量、多様性共に約4倍まで向上することが分かった

今後人工干潟の維持管理と機能の長期安定化については課題であり、平成20年以降、後継事業として継続して取り組んでいく。

3) アマモ場造成技術の開発（水産研究部）

干潟とアマモ場の中間に生育する、海草コアアマモに着目し、干潟上で地下茎を張り巡らせるコアアマモの特性を利用することで、移植による人工干潟へのコアアマモ造成法を検討するとともに、コアアマモ場による干潟のシルト・粘土分流出抑制効果の把握を試みた。

天然のコアマモ場から人工干潟上へのコアアマモの移植を行った結果、コアアマモが2年以上群落を形成することを確認した。また、コアアマモ場造成による人工干潟のシルト・粘土分流出抑制効果については、移植、天然コアアマモともにアマモ場内の方がその周囲より、シルト・粘土分含有率が高いことが確認できた。

アマモ・コアアマモ栄養株の長期的な分株状況を把握することにより、天然群落からの母株採取を最小限とした移植用種苗生産が可能となった。コアアマモのアマモ場からの移植について、移植元で群落の減少が認められないことから、移植元にも大きな影響を及ぼさないことが明らかになった。

今後は、干潟との連続性を高めるために、より浅場でのコアアマモ造成技術を開発する必要がある。また、英虞湾内のコアアマモ場再生を推進するためには、市民参加型の簡易な造成技術を開発する必要がある。そこで、平成20年以降、後継事業として簡易な造成技術に取り組んでいく。

4) 細胞培養によるアマモの大量増殖技術の開発（農業研究部・水産研究部）

アマモの種苗法として、少量のアマモを大量に増殖させる細胞培養技術の確立とその育苗基盤を開発した。その結果、海域から採取したアマモ組織の無菌培養化、幼植物体の育成に成功し、種子からの無菌的な実生育手法も確立した。これらの基本技術の確立により、供試材料を周年にわたり安定的に調達可能になった。

また中間育成については、使用する海水を1ミクロン

でろ過することで、アマモ苗の生育を阻害する付着藻類の繁茂を防止できた。

海域移植用具としてマリンバスケットおよびマリンネットを考案した。マリンバスケットは苗の栽植が容易で、海域移植後の生育状況も良好であったが、移植時の操作性が悪かった。一方マリンネットは移植時の操作性は良好であったが、活着率の高い栽植手法を開発する必要があった。

移植後のアマモ場の変化については、マリンバスケットは海域移植後の生残率が高く成育も順調で、育成用基盤として有用であることが実証された。一方、マリンネットは苗の活力が弱かったことから多くの苗が流出し、有用性を明らかにできなかった。

今後は、これを材料としてアマモの種苗を大量に増殖する技術の開発について後継事業で取り組んでいく。

2. 干潟・藻場における物質循環の解明（水産研究部）

英虞湾内における干潟藻場の物質循環に果たす役割を明確にすることを目的に研究を実施した。英虞湾内の天然干潟（河口、前浜、堤防後背地）および、人工干潟、アマモ場について酸素生成速度と直上水の流入出フラックスを定量化した。その結果、干潟やアマモ場には海水中の懸濁態有機物に対してシンク、溶存態無機物についてはソースとなり、海水中の懸濁物を分解無機化する機能を有することが明らかになった。またその機能はそこに生息する生物量に比例することが分かった。さらに干潟と連続してアマモ場があることにより、光合成によって酸素供給が行われ、浅場での分解促進効果があることが分かった。

以上のデータを元に、本研究事業内で別途開発したモデルを利用し、現状の干潟と、消失干潟をすべて人工干潟並の生物量のある干潟に再生したと仮定した場合の条件で、炭素循環を算出した。計算の結果、英虞湾内の干潟をすべて再生することにより、干潟における生物量が現状の約10倍まで増加し、海水中の懸濁物除去量は現状の約8倍まで向上した。その結果、現在の真珠養殖による海底への沈降物量の約2倍の沈降物を減少させることができることが推測された。

今後英虞湾湾奥部の干潟、アマモ場を含む浅場生態系を再生することにより、潮受け堤防で分断され、貧弱化している浅場の生物生産性を向上させ、円滑な海域の物質循環を取り戻すことが、英虞湾の環境悪化を抑制する新たな沿岸域の利用手法として示された。

ただし、このモデル結果にはアマモ場の効果が考慮されていないため、平成20年度以降、後継事業にて干潟、アマモ場が連続した生態系における物質循環の検討を行う。

3. 環境調和型養殖技術の開発

1) 未利用海藻等の有効利用技術の開発（保健環境研究部・農業研究部・水産研究部）

流入負荷を系外に取り除く方法として、アマモ等を効率的に収穫するため、生育環境や収穫量に適した収穫技術を開発するとともに、現場海域に生育するアマモ等の未利用海藻等の有効利用技術を開発した。

既存機器の収穫能力の調査結果を基に、人力または動力を用いてアマモ及びアナアオサを収穫する機器（装置）を設計、試作し、現地で収穫試験を行い、試作機器利用の適性を確認した。洗浄は河川で行い、乾燥はビニルハウスで行うなど、環境にやさしい技術を確立した。粉碎法については、様々な粉碎機器で比較検討し、利用目的に適した効率的な粉碎技術を確立した。また、超音波または亜臨界水を利用した未利用海藻の液状化技術を開発した。低コストの単細胞化技術の開発を試みた結果、高塩分処理と成熟処理の併用法では自然成熟による単細胞化効率に比べ、遊離細胞で約2倍、精細胞で約6倍の効率で単細胞を得ることができた。

アマモ、アナアオサおよび、色落ちしたスサビノリから抽出した不溶性多糖類の保水性、乳化力等を明らかにした。また、食品および酒類を試作し、加工適性を明らかにした。スサビノリの遊離細胞・精細胞は、生後3週間以上のアルテミアにおいて餌料となり、成長させることが明らかになった。またアルテミアの栄養評価では、通常飼育と差が認められなかった。

2) アコヤガイ洗浄排水等処理技術の開発（水産研究部・ジャパンテクノメイト（株））

本研究では、真珠養殖用の作業船上で、貝掃除作業に併せて洗浄排水の浄化処理を行うことができる機器の開発、現地調査による貝掃除に伴う海域への汚濁負荷量の定量化、浜揚げ作業において排出される貝肉含有廃水を効率的に浄化処理する技術開発、貝肉含有廃水の処分方法における簡便でコストパフォーマンスに優れた技術を開発し、処理貝肉のリサイクル利用を検討した。

実用化に向け、英虞湾で標準となる仕様のフィルター濾過装置が完成した。貝掃除に伴う汚濁負荷量については、英虞湾全体で、年間TOCで35トン、TNで6.8トン、TPで1トンと推定された。貝肉含有廃水は、固液分離器を用い、ペーパースラッジ焼却灰を主成分とした固化材により水分と固形分に容易に分離できた。固液分離した固形物については、分解処理および堆肥化処理試験の現地実証試験を実施した。その結果、貝肉固形物の肥料への利用は充分可能であることが認められた。

現在浜上げ時に発生する貝肉については、ナイロンネットを利用した自主回収が行われている。貝肉含有廃水は1次処理としてナイロンネットで粗取りする。ネット

を通り抜ける細かい貝肉排水は、固化材による固液分離方法にて分離回収する。これら2段階の処理を行うことにより、海域への負荷は大幅に軽減できると考えられる。また、回収した貝肉片については堆肥化する等、地元農業での利用展開も期待できる。

4. 物質循環促進技術の開発

1) 酸素補給の技術の開発(水産研究部)

本研究では、硝酸カルシウムによる底質改良技術により、底泥浄化効果の実証と底質改善技術の確立を目的とした。

真珠養殖漁場で採取された底泥に硝酸カルシウムを底泥1Lあたり500mg程度、直接添加することにより、底泥からの硫化水素の発生防止、底泥中のAVS(底質汚染指標の1つ)の減少、底泥からのリンの溶出の抑制などの底質改良効果が、約2週間程度で顕著に認められた。底質汚染がかなり進行している英虞湾奥部での現場実証試験では、硝酸Caを底泥に埋め込んだ場所において、室内実験と同様な底質改良効果が認められ、その効果は、95日目においても認められた。硝酸カルシウムによる底質改良は短期間で顕著な効果が得られることが判明した。

5. 陸域海域の環境情報の収集と解明

1) 水質・底質・流動の観測と解析(四日市大学・水産研究部)

英虞湾の水質環境の動態を把握するため、湾内に水質自動観測局を設置し、1時間ごとに表層から底層までの水質計測を行った。また、自動観測した水質データをインターネットを通じてパソコンや携帯電話で受信可能都市、観測データの発信を4年間行った。このデータはリアルタイムで発信しているため、湾内で真珠養殖等を行っている漁業者に広く利用されるようになってきている。

英虞湾全域を対象に詳細な水質調査を実施するとともに走行型ADCPによる枝湾を含む詳細な流向流速観測および海底設置型ADCPによる湾央での流向流速の常時モニタリングを実施した。

英虞湾の水質の季節変動と湾全体の平均的な水質および、英虞湾の海水交換流量や海水流動の特徴が明らかになり、英虞湾では、夏秋は底層流入・表層流出、冬は逆に底層流出・表層流入になっていることがわかった。また、湾奥部の枝湾などの流況についても詳細に把握した。底質調査では、今まで把握できなかった貧酸素に大きく影響を及ぼす硫化物や鉄酸化物などの詳細な鉛直分布が明らかになった。また、水質については湾口海域の栄養塩濃度は季節的に大きく変動し、冬期にNO₃-N、PO₄-Pがかなり高濃度になることが観察された。また、TOC、TNのレベルは湾内と大差なく、外洋からの栄養塩の供

給の実態が明らかになった。

「鉛直拡散係数の実測」では、3次元微細流速計と高精度の水温塩分計を用いて、水温和塩分の鉛直拡散係数を求めた。その結果、鉛直拡散係数の値の範囲と、流速(潮汐流)と鉛直拡散係数の関係を確認できた。

「酸素消費速度と溶出速度の現場観測」では、3次元微細流速計と高精度の溶存酸素計を用いて、溶存酸素の鉛直フラックスを実測して酸素消費速度を求めた。

「流動モニタリングの評価」では、オンライン化された湾央の流動局の観測データを分析して、外海水の差込と湾奥の水質変化(貧酸素化現象等)の関連を探り、また、稼働率データからシステムの実用性を調査した。その結果、外海水の差込は、これまで酸素を湾奥部に運ぶものと考えられているが、湾奥部への貧酸素水塊の押し込みを引き起こす場合があることが明らかになった。さらに流動モニタリングシステムによる外海水の差込の検知は、湾奥の貧酸素化の予測で有効なデータを提供していることが確認された。

6. シミュレーションモデルの開発

1) 3次元流動モデルの開発(四日市大学)

本研究では、閉鎖性水域の環境動態予測のためのコンピュータシミュレーションモデルを開発した。英虞湾の流動特性と物質循環を研究し、予測システムを構築するために3次元流動モデルを開発した。開発するモデルは、英虞湾だけを含む英虞湾領域モデルと、外海を広く含む大領域モデルの2種類である。

英虞湾領域モデルと大領域モデルという2種類の流動モデルを完成させた。沿岸湧昇の計算や、黒潮変動の考慮、精度の高い海水交換の計算などが可能である。

海水交換率を調査することが流動モデル開発のひとつの目的であったが、湾内各所の海水交換率と、その季節変化を求めることができた。

湾央の海底設置型ADCPによる観測値との流速比較、また、走行型ADCPによる観測値との流速比較を行ったが、計算値は観測値を比較的良好に再現した。

自動観測局の水質観測値を同化データとして用い、さらに気象予報データと外海水質予報データを導入して湾の流動と水質の予測を行う英虞湾環境動態予測システムを構築した。

2) 生態系モデルの開発(四日市大学・水産研究部)

英虞湾に適応した水質モデルと底質モデルを開発した。水質モデルにはアコヤガイの成長モデルを組み込んだ。底質モデルには、湾奥の底質悪化の原因の検討が可能な特性を持たせた。また英虞湾の底質悪化の原因を探るため、炭素、窒素、リン関連物質を対象とした沈降物量調査と溶出量調査を行い、英虞湾の海底境界層における物

質移動状況を明らかにするとともに環境条件との関連を探った。

環境動態シミュレーションモデルと予測システムの開発の一環として、アコヤガイの代謝特性と環境条件との関係を解明し、アコヤガイ成長モデルを作成した。作成したアコヤガイ成長モデルおよび環境動態シミュレーションモデルを用いて、真珠養殖業による英虞湾の環境への影響を見積もった。英虞湾における真珠養殖の適正量の推定を試みた。

水質と底質モデルは、パラメータの調整を行うとともに、最終的な計算結果を観測値と比較した。植物プランクトン、栄養塩、溶存酸素、溶存態有機物などについてモデルの計算値と実測値を比較したが、実測値をよく再現した。また、基礎生産量、沈降物量、海底の酸素消費量、海底からの栄養塩溶出量などを評価したが、これらも観測データと比較的良く一致した。

底質モデルについては、欧州で開発されたモデルを参考に、モデルを完成させた。英虞湾の3地点の底質再現に成功し、また、解析結果から、海底堆積物内の物質循環のデータも得る事ができた。この底質モデルを用いた200年分の再現計算により、英虞湾の底泥悪化のシナリオを提示した。

沈降物のCNP物質の成分比から、英虞湾における沈降物は、陸上からの有機懸濁物、および植物プランクトンによる沈降量が、アコヤガイの糞よりも著しく多いことが示唆された。溶出フラックスは、高水温期に多く低水温期に少ない傾向が認められた。英虞湾における沈降フラックスは溶出フラックスと比較して、平均で炭素が7.5倍、窒素が4.4倍、リンが4.5倍となり、高水温期よりも低水温期において、沈降フラックスが溶出フラックスに対してかなり多いと推測された。

7. 環境予測システムの開発

1) 海水中のプランクトンの同定と鉛直分布観測装置の開発(大塚電子(株)・水産研究部)

英虞湾の環境動態予測のため、珪藻類や渦鞭毛藻類などの植物性プランクトンを現場で同定及び計数し、その鉛直分布が観測できる海中プランクトンの同定と垂直分布観測装置の開発を行った。

構築した顕微 CCD 観測システムは約 $2\mu\text{m}$ の分解能で、観測視野を $260\mu\text{m} \times 170\mu\text{m} \sim 1840\mu\text{m} \times 1200\mu\text{m}$ まで可変できる。画像はプランクトンの特徴的な動きを観察するために、動画を取得・記録する方式を採用している。観測システムには海水の濃縮機能が付帯しており、最大数百倍まで濃縮率を変える事が出来るため、プランクトンの個体数が 1cc 当り数十～数百といった少ない状況でも、効率よくプランクトンの観測ができる。また、顕微

CCD 部に加えてプランクトンの吸収・蛍光スペクトルを計測できる分光光度計を組み込んでおり、画像による観察とともに、スペクトルの成分解析による濃度分布の情報を取り出すことが可能である。このシステムにより、海水のサンプリングを行い顕微鏡にて観察することなく、現場海域において直接プランクトンをモニターすることができるが、種の同定にいたるまでの画像解像度は得られていない。

プランクトンのスペクトル解析による濃度分布の測定では、プランクトンの標準スペクトルが十分でなく、継続して解析データの信頼性の評価・検討を行っていく。プランクトンの同定と垂直分布観測をリアルタイムモニターで行うために、観測した情報の送信やデータの取扱いに関するシステムの構築は未解決の課題である。現在のシステムでは定点観測ができるまでには至っておらず、実用面で、継続的な観測のための機構の追加や保守性の確保が必要である。この課題については、まだ多くの試行錯誤が必要であり、既に定点観測を行っている他の観測機器との連携を念頭に将来的な課題として検討を行う。

8. まとめ

以上の物質循環の研究を総括することにより、英虞湾の底質悪化のシナリオを図1に示す。底質悪化の第1要因は1960年代の真珠の過密養殖(現在の5倍)で、これが養殖筏周辺の底質を局所的に悪化させ、ベントス生態系を崩壊させた。そこに干潟・藻場の減少による、懸濁物除去能力の低下や観光産業の発展、生活様式の変化による陸域負荷の増加により、真珠養殖が減少した後も湾奥海底への有機物堆積量は増加し、湾奥部の貧酸素化が進行した。このために底泥の有機物分解能力が低下し、底質悪化に拍車をかけるという負の連鎖に陥ったと推測された。従って、底質環境を改善し、貧酸素水塊の発生を軽減するためには、海底の有機物沈降量を特に湾奥部で減らす必要があり、図1に示した個々の要因に対する改善策が求められる。これらの改善策は、真珠養殖をはじめ、浅場の再生、陸域の負荷の減少と多岐にわたり、それぞれ単独ではなく、複合的に取り組んでいく必要がある。

個々の問題に対する具体的な対応策については、本研究事業で開発された技術をまとめた報告書「環境再生技術集」および本事業の成果を一般の方に分かりやすく解説した小冊子「英虞湾 新しい里うみへ」の中で提言されている。これから息の長い地域一丸となった活動が求められる。

最後に得られた成果の今後の展開について記述する。本事業終了後も地域 COE 活動として、水産研究所内に「閉鎖性海域環境研究センター」を設置し、本事業で得

