

研 究 成 果

サブテーマ名：	- 1 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		
小課題名：	・ (B) 水質・底質・流動の解析と分析		
サブテーマリーダー	四日市大学環境情報学部	教授	千葉 賢
研究従事者	四日市大学環境情報学部	教授	千葉 賢
	三重県科学技術振興センター水産研究部 総括研究員 山形陽一、主任研究員 清水康弘、主任研究員 増田健、藤原正嗣、研究員 奥村宏征、国分秀樹、渥美貴史、研究員 辻将治、畑直亜、中西麻希		
	(独) 産業技術総合研究所 長尾正之		
	(財) 三重県産業支援センター 雇用研究員 湯浅城之		
研究の概要、新規性及び目標	<p>研究の概要</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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う。計測したデータはコア研内のサーバーに一括管理し、インターネットを通じてリアルタイムで発信する。 ・シミュレーションモデルの精度の確保には、現場海域に適合したパラメータをいかに得るかが最も重要な要因となる。そのためには、綿密な水質・底質調査や流動観測を実施し、英虞湾の水質・底質の季節変動を含めた特性や海水の流動特性をできるだけ詳細に把握する必要がある。そこで、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。また、平成16年に成層期の空間的・時間的な海洋構造および鉛直混合強度の変化を観測した。平成17年度からは底質モデルのパラメータ取得のため、3測点で柱状採泥による鉛直微細構造把握のための調査を実施した。 ・「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、水温と塩分の鉛直フラックスを実測し、そのデータから鉛直拡散係数を求める。 ・「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る。 ・「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）の関連を探る。また、稼働率データからシステムの実用性を調査する。 <p>研究の独自性・新規性</p> <ul style="list-style-type: none"> ・自動観測システム自体は他にも事例があるが、その多くが波浪・流速・流向・水温などの物理情報に限定されており、水質項目における鉛直分布の連続データが取得できるシステムはほとんどない。 ・英虞湾のような比較的狭い海域で、今回のような詳細な調査が長期間にわたり実施された例は国内ではない。また、流動観測におけるテレメーターシステムの導入により、リアルタイムで観測データが公表されたのも初めてと思われる。 ・「英虞湾の鉛直拡散係数の実測」、「酸素消費速度と溶出速度の現場観測」、「流動モニタリングの評価」で実施される観測や観測システムは、国内でもほとんど実例のないもので、計測データと観測システムに新規性がある。 <p>研究の目標（フェーズ毎に数値目標等をあげ、具体的に）</p> <p>フェーズ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・自動観測局を3局設置するとともに、県が設置した2局を含めた5局のデータを収集し、インターネットによって観測データを発信する。 また、観測およびデータ発信を円滑に行えるように定期メンテナンス等の維持管理を行う。 ・できるだけ詳細な水質調査を実施することにより、英虞湾全域の平均的な水質と季節変化を明らかにし、英虞湾の水質環境の特性を知る。 ・ADCPを用いた流動観測により、英虞湾の海水交換流量および湾口における海水交換機構を明らかにし、英虞湾の流動特性を把握する。 <p>フェーズ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・モニタリングシステムの維持管理を継続して行い、観測およびデータ発信を円滑に行えるようにする。 ・引き続き詳細な水質調査を実施し、生態系モデルの検証に必要なデータの蓄積を図る。 		

- ・ 走行型ADCPを用いて湾奥枝湾の流動観測を行い、枝湾での海水交換流量と交換機構を明らかにする。また、深谷水道での海水交換量を明らかにする。
- ・ 底質の鉛直微細構造を明らかにし、底質の季節変動を捉えると共に底質モデルの検証や底質悪化要因の解明につながるデータを取得する。
- ・ 外洋水による英虞湾への栄養塩の流入を知るため、湾口海域での水質調査を実施する。
- ・ 鉛直拡散係数の実測
予備試験後に立神浦に水中タワーを設置して複数回/年の観測を実施する。
- ・ 酸素消費速度と溶出速度の現場観測
3次元微細流速計と溶存酸素電極を取り付ける架台を製作し、立神浦等の海底に装置を沈めて複数回の観測を実施する。
- ・ 流動モニタリングの評価
流動モニタリングシステムのオンライン化以降の観測データと稼働率のデータを収集して、システムの性能を評価する。

研究の進め方及び進捗状況（目標と対比して）

1. 自動観測局は、波浪状況の厳しい湾口はブイ式、その他は筏式として設計を行い、平成15年9月より運用を開始した。以後、データを円滑に発信できるよう、定期メンテナンスやオーバーホール、また、故障時には、早期復旧を行ってきた。
2. 平成15～16年度に、英虞湾の10測点において、月1～4回、水質観測（クロロテックによる水温、塩分、PH、DO、クロロフィル、濁度の測定と表層、中層、底層での採水によるTOC、DOC、TN、DIN、TP、DTP、栄養塩類の分析）を行った。別途、26測点において、クロロテックのみの観測を実施した。
平成15年度は、走行型のADCPを用いて、一潮汐（12時間）の間に、湾口部横断面、湾口から湾内6測線をそれぞれ4～5回航行して、層別の流向・流速データを取得した。平成16年度には、湾奥枝湾の立神浦の8測線で同様の調査を実施した。
流動観測は上記以外に、湾口（17年度には湾中央に移動）、湾中央の海底設置型ADCPによる連続観測を平成15年7月から実施している。
平成16年8月に湾口から湾奥まで14地点でMSP（Micro Scale Profiler）の観測を実施し、3次元流速（ADV）に関しては、7月～8月に観測を実施した。
平成17年4月～平成18年3月まで10測点でのクロロテック、採水調査を実施した。大きな環境変化がなかったため、26測点でのクロロテック調査は行わなかった。
走行型ADCPによる湾奥枝湾の流動観測は、平成17年6月立神浦、8月鵜方浦、9月船越浦でそれぞれ基礎生産量調査と同時に実施した。
流向流速データについては、海底設置型ADCPのテレメータシステム化により、平成18年2月から水質と同様、リアルタイムにWeb上で公開されている。
17年度から新たに、タコノボリ、立神、鵜方で底質調査を2ヶ月に1回程度の頻度で実施した。柱状採泥により鉛直方向に深さ10cmまで10層に切り出し、層別にAVS、ORP、TOC、TN、H₂S等を測定した。また、タコノボリと立神のサンプルは東京大で鉄化合物の化学種形態分析（メスバウアー分光法）を行った。また、湾口での採水調査（0.5,10,20,30,50mの6層）を月1回の頻度で実施した。
3. 3次元微細流動計測装置（NORTEC社Vector）の予備試験として、立神浦（湾奥）のシェルナースに設置し、微細流動を観測して、データを分析した。（英虞湾の鉛直拡散係数の実測）
立神浦の自動観測局の傍に水中タワーを設置し、高精度の水温塩分計を組み込んだVectorをタワーに取り付けて微細流動を4回観測した。データを分析して鉛直拡散係数を求める。季節や水深を変えて観測を繰り返す。（英虞湾の鉛直拡散係数の実測）
応答速度が速い溶存酸素計（UNISENSE社OX10）とVectorを用いて、海底直上の溶存酸素の鉛直フラックスを計測する。このデータを分析して海底の酸素消費速度を求める。季節と地点を変えて観測3回を実施した。（酸素消費速度と溶出速度の現場観測）
底質鉛直プロファイル観測装置（UNISENSE社MP4）を用いて、立神浦海底の酸素・硫化水素・酸化還元電位の鉛直分布を現場観測する。取得データを分析して、海底面における酸素消費速度、硫化水素の溶出速度を求める。（酸素消費速度と溶出速度の現場観測）
流動モニタリングシステムを開発して運用している。このシステムは、タコノボリ（湾中央）で観測中の海底設置型ADCPを水中モデム（LINKQUEST社UMM2000）によりオンライン化し、観測データをリアルタイムにWebページで公開している。観測データを分析して、システムの有効性や稼働率を評価する。（流動モニタリングの評価）

主な成果

具体的な成果内容

1. 観測局の設計・製作・設置および通信網の整備によって、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発信を4年間行っている。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いる。
2. フェーズでは、平成15年7月～平成17年3月の間に73回の水質調査を実施し、英虞湾の水質の季節変動と湾全体の平均的な水質が明らかになり、平均塩分量からボックスモデルにより、海水交換量を算出した。また、ADCPによる調査から、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。枝湾の立神浦では、湾口から最遠の北側の水路を通して海水が流入していることが分かった。
フェーズでは、枝湾での流動観測から、立神浦では下げ潮時に立神浦の水が神明浦の底層に流れ込んでいることが分かった。船越浦の調査から深谷水道からの流れは非常に弱いことが確認された。底質調査では、今まで把握できなかった詳細な鉛直分布が明らかになった。鉛直分布の様式は測点間でかなりの違いがみられた。貧酸素の影響を受けやすい立神ではAVSのピークは1~2cm層にあり、表層が一番高い時もあることから、 H_2S の水中への溶出が窺えた。いずれの測点も明確な季節変動はみられなかった。汚染度は、立神>神明>タコノボリとなり、湾口からの距離に比例した。鉄化合物の化学種形態分析から、常磁性高スピン3価(主に $FeOOH$)、常磁性高スピン2価(主に珪酸塩鉱物)、反磁性低スピン2価(パイライト)の3種の鉄化合物が検出され、パイライトに対して常磁性高スピン3価の成分が相補的に変動する傾向がみられた。湾口海域の栄養塩濃度は季節的に大きく変動し、冬期に NO_3-N 、 PO_4-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も示唆された。

3. (1)鉛直拡散係数の実測

合計6回の鉛直拡散係数の実測により、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。鉛直拡散係数は 10^{-5} のオーダーから $5 \times 10^{-4} m^2/s$ の範囲、同時に計測した鉛直粘性係数はそれより1オーダー低かった。

(2)酸素消費速度と溶出速度の現場観測

酸素電極の不具合や水平流速が小さすぎたことなどから観測値が得られたのは1回だけで、その値は $2.1 \sim 6.0 gO_2/m^2/day$ で、他の観測で得られた酸素消費速度よりも高すぎる傾向にあった。

(3)流動モニタリングの評価

2005年10月から約2年間の運用を行ってきた。この運用期間に塩分上昇を伴う外海水の差込を検知できた回数は合計27回であった。差込の流速はいずれの場合も $8cm/s$ から $10cm/s$ 程度で、差込の継続期間は通常は2日間程度、最長で5日間であった。27回の中で湾奥(立神浦)の溶存酸素が低下したのは13回で、この中の9回は貧酸素化を引き起こした。貧酸素になったのは全て7月から9月の期間に集中していた。溶存酸素の低下については、酸素濃度の低い水塊が底層から中層へと広がることで中層の酸素濃度が低下する場合と、それに加えて底層の酸素濃度がさらに低下する場合があった。外海水の差込は、一般的には酸素を湾奥部に運ぶものと考えられているが、今回の観測により貧酸素を引き起こす場合があることが明らかになった。この現象は、外海水が湾奥から湾奥部へ進む過程で酸素を消費し、さらに途中の貧酸素水塊と混合することで酸素濃度を低下させ、その後湾奥に達するために生じているとみられる。湾奥部が既に貧酸素化していれば貧酸素水塊が中層まで広がり、湾奥部が貧酸素化していなければ外海水の到来で貧酸素化するわけである。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の上で有効なデータを提供していることが確認された。

特許件数： 0

論文数： 3

口頭発表件数： 9

研究成果に関する評価

1 国内外における水準との対比

・これまでに行われてきた海洋観測システムは、ほとんどが物理情報に限定されていた。また、海外においてもギリシャで波浪・流動・水温・溶存酸素等の総合観測が行われているが、観測総数は1~3の固定層となっており、本システムのような水質の鉛直分布を1時間ごとに取得できるシステムは殆どない。

・英虞湾での水質、底質、流動観測については、観測密度の濃さが特徴と言える。数年間にわたりこれ程綿密な調査が行われた海域はないのではないかと考える。この結果が世界で初めて

とも言えるリアルタイムの環境動態予測モデルの開発につながったと考えられる。

- ・3次元微細流速計と高精度の水温・塩分計による鉛直拡散係数の実測は、国内では最初の例と考えられる。沿岸域の鉛直拡散係数については、あまりデータが知られておらず、この分野の研究者にとって有益なものとなる。

- ・オンライン化された流動モニタリングシステムは河川用のシステムを含めて国内でも設置例があるが、閉鎖性海域の海水交換と湾奥部の貧酸素化の検知を目的としたシステムは世界的にも最初の例である。約2年間の運用により実用性と有効性が確かめられたと考えられる。

2 実用化に向けた波及効果

- ・波浪状況の厳しい湾口局では、5年間の稼働率は85.6%であったが、静穏な湾奥局では98.5%という非常に高い稼働状況であり、十分な実用レベルに達することが出来た。

- ・観測手法としては、流動モニタリングシステムをオンライン化し、Web上で運用した点が新しい技術と言えるが、別項で詳細が報告されているように、十分実用性の高いことが実証された。他海域での運用が期待される。

- ・流動モニタリングシステムについて、実用的なシステムであることは証明された。論文発表等で有効性が知られるようになれば、他海域での設置運用も検討される。

残された課題と対応方針について

1 観測システムを運用するために必要な経費は、小さなものではない。今後も円滑に観測データを発信できるように、県を中心とした新たな管理体系を築き、運用を継続していく必要がある。

2 底質調査において、間隙水中のH₂S、Fe²⁺の濃度、底泥表層での有機物の分解特性などについては満足いく測定ができなかった。このため、底質と直上水間の物質収支の解明が不十分であった。

3 (1)鉛直拡散係数の実測

合計6回の鉛直拡散係数の実測により鉛直拡散係数の値の範囲はほぼ確認できたが、鉛直方向の物質輸送に重要な鉛直拡散係数の鉛直分布については十分な情報を得られなかった。今後の研究では、その点を追求してゆくべきである。

(2)酸素消費速度と溶出速度の現場観測

微細流速計を用いた酸素消費速度の計測については、計測値が想定値よりも高く、何らかの計測誤差が起因している推定されたが、計測機会が少なく、その原因解明には至らなかった。使用したUnisense社の酸素電極は非常に脆弱で、信号のドリフトも大きく、実用に耐えるものではないという印象である。応答速度が速く、感度も高く、かつ堅牢な酸素センサーを使用できるようになれば、このような計測も現実的になると考えられる。

(3)流動モニタリングの評価

現在のシステムは外海水の差込を流速データの変化として表示しているだけで、差込発生時に警報を出すような機能を持っていない。事業終了後に流動モニタリングシステムを運用することになれば、そのような改善策も検討すべきである。

	J S T 負担分 (千円)							地域負担分 (千円)							合計
	H 14	H 15	H 16	H 17	H 18	H 19	小計	H 14	H 15	H 16	H 17	H 18	H 19	小計	
人件費	-	2,500	1,300	1,955	2,004	1,313	9,072	800	8,999	9,599	16,749	18,422	9,559	64,128	73,200
設備費	18,369	50,715	-	16,968	786	-	86,838	-	-	-	-	-	-	-	86,838
その他 研究費 (消耗 品費、材 料費等)	2,731	5,074	9,500	12,484	38,169	15,237	83,195	100	6,523	3,208	1,837	1,883	1,747	15,298	98,493
旅費	30	200	1,879	404	456	217	3,186	150	400	207	160	197	102	1,216	4,402
その他	403	-	-	202	232	541	1,378	5,672	-	-	-	-	-	5,672	7,050
小 計	21,533	58,489	12,679	32,013	41,647	17,308	183,669	6,722	15,922	13,014	18,746	20,502	11,408	86,314	269,983

代表的な設備名と仕様 [既存 (事業開始前) の設備含む]

J S T 負担による設備：全有機炭素分析装置 (TOC-VCPH)、全自動元素分析装置 (vario MAX CN S)、英虞湾環境モニタリングシステム、ミニプロファイラー (ユニセンス M P)、他

地域負担による設備：原子吸光分析装置 (HITACHI-Z5300)、ICP発光分光分析装置 (PerkinElmer Optima 5300DV)