

英虞湾の真珠養殖漁場における 底泥の汚濁流動層に関する現地調査

上野 成三* ・ 灘岡 和夫** ・ 片倉 徳男***
勝井 秀博**** ・ 山田 二久次*****

1. はじめに

持続的養殖生産確保法（養殖新法）が制定された中、適正養殖容量に基づいた漁場管理が強く求められている。特に、流れの弱い閉鎖性海域の養殖漁場では、残餌や魚・貝の糞の堆積により海底のヘドロ化が進行し、漁場老朽化の問題が深刻化している。漁場の老朽化を防ぎ持続的な養殖事業を行うには、自然浄化能力を超えない養殖負荷を実現する必要がある。養殖負荷の主たる要因である残餌や魚・貝の糞は、その沈降速度が大きいため、速やかに海底に堆積する。よって、適正な養殖容量を求めるためには、養殖からの汚濁沈降量や海底での有機物分解を定量的に把握する必要があるものの、海底での有機物の堆積・分解過程に関する現地データは数少ない。そこで、本研究では、真珠養殖が盛んな英虞湾において底泥の通年調査を実施し、通常の採泥方法では検討が困難な底泥表層部の鉛直分布を詳細に調べた。また、同時に実施した真珠養殖の物質循環調査の結果（上野ら、2000）を元に、底泥汚濁の進行・分解過程を検討した。その結果、底泥が流動状態にあり汚濁が激しい「汚濁流動層」の存在を明らかにした。

2. 現地調査の概要

調査は、英虞湾の湾奥部に位置する枝湾の立神浦で実施した（図-1）。立神浦は、海域のほぼ全面で長年にわたり真珠養殖が行われ、海底のヘドロ化や有害赤潮の発生などの漁場の老朽化問題が深刻な海域である。調査・分析項目を表-1に、調査内容を図-2に示す。調査は1999年5月から12月までアコヤガイ2000個体を試験養殖し、アコヤガイの成長、養殖汚濁負荷、底泥汚濁、環境情報に関するデータを取得したものである。この調査の詳細については上野ら（2000）を参照されたい。本研究では、その内、底泥汚濁データを中心に解析した。

底泥汚濁調査では、立神浦の2点における底質の経時

変化調査と、立神浦全域6点における底質の鉛直分布調査を実施した。底質の経時変化調査では、養殖場の代表点として湾内の調査役のあるX1と、養殖場から離れた代表点として枝湾口部のX0を設定した。いずれの調査においても、底泥の鉛直構造を乱さない様に配慮して、潜水作業により不攪乱コア採泥を行った。底泥コアサンプルは現場で鉛直スライスした後、冷蔵状態で研究室へ持ち帰り表-1に示す項目の分析を行った。

本研究の解析に用いた項目の分析方法を述べる。強熱減量IL、含水比 w 、CODはJIS法により分析した。有機炭素量TOC、全窒素TN、酸揮発性硫黄AVSは、CNSコーダーの分析値から求めた。TOCは、底泥サンプルに含まれる貝殻などの炭酸塩を除去する前処理として塩酸処理を行った後、CNSコーダーにより計測した全炭素量である（日本海洋学会、1986）。酸揮発性硫黄AVSは塩酸処理前のTSから塩酸処理後のTSを引いたものとした。全窒素TNは塩酸処理前のTNを用いた。また、酸化還元電位ORPは採泥直後にORPメーターを用いて計測した。真珠養殖の養殖負荷量を示すPOC沈降量は、調査点X0、X1の水深2m位置に沈降物トラップを設置し、沈降物のTOC分析値から単位面積・1日当たりの有機炭素量POCを求めた。底層の溶存酸素DOは、X1の海底上1mに係留した多項目水質計から得られた連続データを用いた。底泥のせん断強度 τ_0 は簡易式のベン

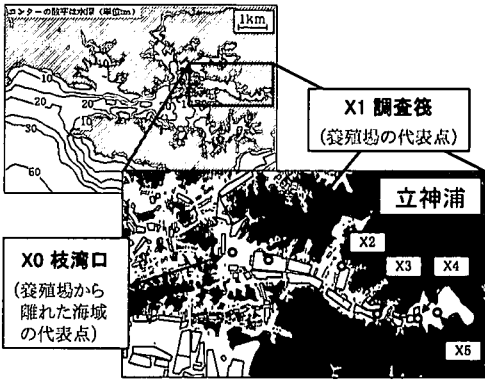
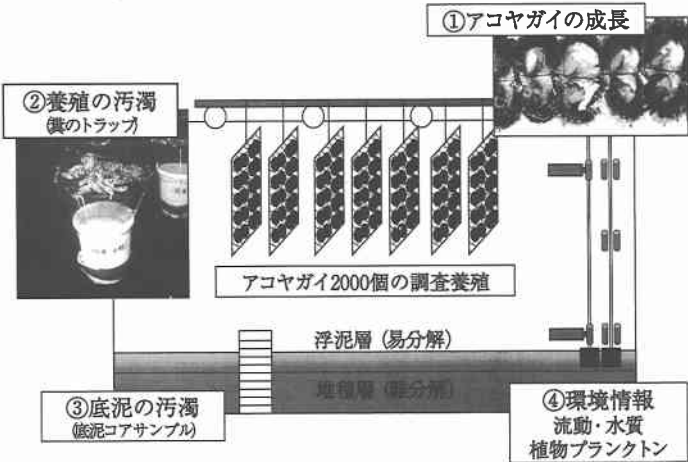


図-1 調査位置

* 正会員 工修 大成建設(株)技術研究所海洋水理研究室
** 正会員 工博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科
*** 正会員 大成建設(株)技術研究所海洋水理研究室
**** 正会員 工博 大成建設(株)技術研究所海洋水理研究室長
***** 水博 大成建設(株) (農林水産特別研究員)

表一 調査・分析項目

調査項目	計測場所	計 測 層	計測頻度	計 測 項 目	備 考
アコヤガイの成長	X1	—	毎月	殻寸法（幅，長さ，厚さ）	
				湿乾重量（殻，軟体部，生殖腺）	
				軟体部の C，N，S 含有量	CNS コーダー
				貝柱の変色	色彩計
養殖の汚濁	X0， X1	2 m 層	毎月	貝，筏，海域からの沈降物量（湿乾重量）	
				IL，含水率，COD，TP，T-SiO ₂ ，クロロフィル a，フェオ色素	JIS などによる分析
				TOC，TN，TS，AVS	CNS コーダー
底質の汚濁	X0	1 層（0-1 cm）	毎月	pH，ORP，TS	現場計測
	X1	3 層 （0-1 cm，4-6 cm，19-20 cm）		IL，含水率，COD，TP，T-SiO ₂ ，クロロフィル a，フェオ色素	JIS による分析
				TOC，TN，TS，AVS	CNS コーダー
	X0-X5	0-30 cm の範囲を 13 層分割	夏季	含水率，TOC，TN，TS，AVS	CNS コーダー
				せん断強度	簡易式ペーン試験機
環境情報	X1	3 層 （2 m，5 m，海底上 1 m）	毎月	SS，VSS，COD，D-COD，TOC，DOC，TP，DP，PO ₄ -P，TN，DN，NO ₃ -N，NO ₂ -N，NH ₄ -N，T-SiO ₂ ，D-SiO ₂ ，クロロフィル a，フェオ色素	採水 JIS などによる分析
			10 分間隔	T，S，DO，ORP，pH，濁度，蛍光強度，流向・流速	計測機器による連続計測



図一2 調査内容

試験機を用いて潜水作業により現地海底で計測した。

3. 現地調査結果

(1) 底泥表層の汚濁状態の経時変化

養殖場から離れた枝湾口地点 X0 と、海域養殖場の調査地点 X1 について、表層から 1 cm の底泥サンプルの強熱減量 IL, COD, 有機炭素量 TOC の月変化を比較した(図一3)。まず、IL の経時変化に着目する。X0 では通年に渡り IL はほとんど変化しないのに対して、X1 では 7, 8 月の夏場を中心に IL が増大した。COD, TOC の経時変化も、IL と同じく、X0 では変化が小さく X1 では夏場に増加する傾向が認められた。また、X1 の COD や、X0 と X1 の TOC の 5 月から 12 月までの全体的な変化は増加する傾向を示した。通常、底質分析は採泥地点の

選び方やその分析方法により値が大きく異なることから、結果の解釈にはその影響を十分に配慮する必要がある。本調査では、IL, COD, TOC の 3 種類の分析値を総合的に検討した結果、養殖場の底質は夏季に有機物量が増大し汚濁が進行すると判断した。また、夏季の悪化した底質は秋季から冬季に浄化される傾向にあるものの通年平均としては悪化傾向にあることが指摘される。

(2) 養殖負荷・底泥の酸化還元環境と底泥汚濁の関係

図一3 で示した底泥汚濁の経時変化パターンの原因を検討するため、海域の沈降物に含まれる有機炭素量 POC (1 m²・1 日当たり換算)、X1 での海底上 1 m の

DO, 底泥表層 1 cm の ORP の経時変化を示す(図一4)。まず、各海域の汚濁負荷量として、POC 沈降量の変化を述べる。X0 では、X1 に比べて極度に値が小さく、その通年変化も小さい。一方、X1 の POC 沈降量は大きく、その経時変化としては 8, 9 月に減少した。なお、8, 9 月に POC 沈降量が減少するのは、この時期の高水温や有害赤潮によるストレスのためアコヤガイが衰弱するためである(上野ら, 2000)。以上より、図一3 で示された X0 の底泥汚濁の経時変化が小さいのは、この海域の汚濁負荷がもともとと少ないことが原因と言える。

一方、X1 については、8 月に POC 沈降量が減少するにもかかわらず、底泥汚濁が進行する結果となり、POC 沈降量の経時変化のみでは底泥汚濁の変化パターンを説明できない。この点について、底泥の酸化還元環境によ

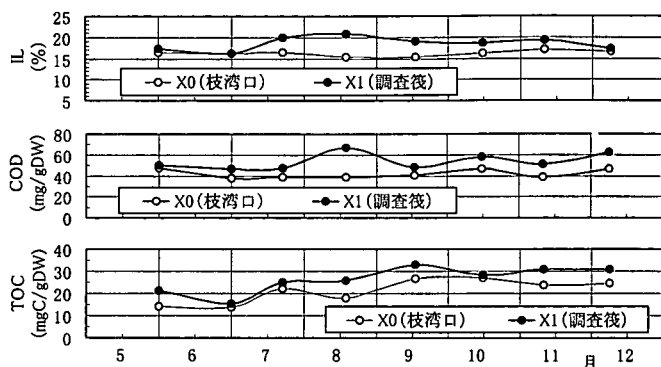


図-3 表層底質の経時変化

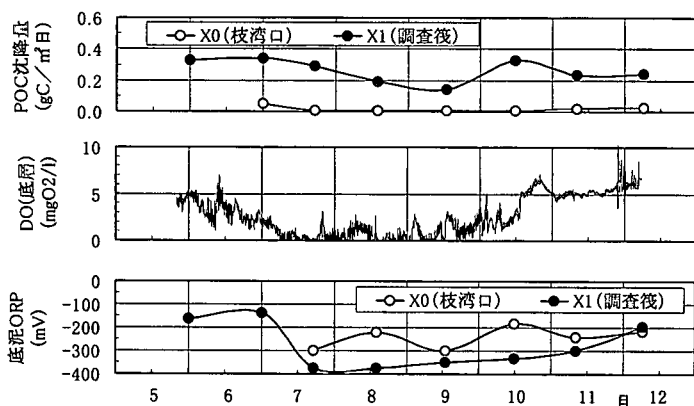


図-4 養殖負荷・酸化還元環境の経時変化

る有機物分解速度の違いから検討を加える。X1での海底付近のDOは7月中旬から9月中旬まで極度に貧酸素化した。また、X1の底泥表層のORPも、底層DOと同様に、7月中旬に急低下し、8月以降は徐々に上昇した。すなわち、X1での底泥環境は、7、8月に極度の還元状態にあったと言える。還元状態での有機物分解は嫌気性分解が主体となり、好気性分解に比べて分解速度が1オーダー以上低下するため(井上, 1998)、汚濁が進行しやすい状態にある。よって、養殖海域のX1でPOC沈降量は8～9月に減少したにも関わらず底泥汚濁が進行した理由は、7～9月にかけて海底付近で生じた貧酸素化により底泥表層が嫌気性環境となって有機物の分解速度が低下したことが原因と考えられる。

以上より、養殖海域の底泥汚濁は養殖からの沈降性汚濁が主因であることが明らかになった。また、2次的な要因として、底層の貧酸素化により底泥の有機物分解が低下し底泥汚濁を助長することが示された。なお、この結果は、底層の貧酸素化が解消すれば底泥汚濁が急速に改善できる可能性を同時に示している。

(3) 底泥汚濁の鉛直構造 ～「汚濁流動層」の定義～

養殖海域における底泥汚濁の鉛直構造の一例として、調査地点X4の底泥の不攪乱コアサンプルを図-5に示す。図では明確でないものの、表層から10 cmまでの底泥は黒色を示し有機物汚染が激しいことが分かる。一方、10 cm以深の底泥は灰色を示し有機物が少ない。図-5には表層から10 cmまでと、10 cmから20 cmまでのサンプルを円筒状容器で抜き取りその自立状態を示した(コンクリートのフロー試験を模擬した)。表層から10 cmの底泥サンプルは自立できず流動状態を示す。これに対して、10 cmから20 cmの底泥サンプルは自立し粘性土状態を示す。

X4で採取した不攪乱コアサンプルのTOC・含水比 w ・せん断強度 τ_v の鉛直分布を図-6に示す。TOCは表層10 cm以浅で大きく10 cm以深では徐々に減少する。 $w \cdot \tau_v$ ともに、TOCの分布と対応して、表層10 cm以浅では w が高く τ_v が小さくなり、10 cm以深では w は低下、 τ_v は増加する。表層10 cmの汚濁の激しい底泥は、 w が200%以上で τ_v は約1 kN/m²であり、自重圧密が進行していない流動的な状態にある(土田, 1999)。

以上より、底泥の鉛直構造として、表層の有機物汚濁が激しく流動的な層が存在することが明らかになった。本研究では、この層を「汚濁流動層」と呼ぶこととする。なお、類似した現象として浮泥層という用語がある。一般に、浮泥層は泥が巻き上がって高いSS濃度を持つ層と定義される。一方、ここで着目した汚濁流動層は、流動状態にあるものの泥が巻き上がった状態ではなく、泥と水に明確な境界が見られる。フワフワと舞い上がるイメージを持つ浮泥層と、水域と明確な境界を持つ汚濁流動層とは、汚濁底泥の除去方法を検討する際の発想が大きく異なる。そこで、その違いを明確にするため、本研究では「汚濁流動層」という新たな用語を使用する。

なお、本研究で着目する汚濁流動層では、小さいながらもせん断強度を持つ層である。これは、層内の底泥粒子の組織構造が維持された状態を示めており、常に流動状態にあるものではない。よって「流動層」という表現より「軟泥層」の表現が適している可能性もある。いづれにしろ、「汚濁流動層」の用語は今後再検討をする余地がある。

(4) 立神浦全域での汚濁流動層の特性

立神浦全域の6地点(X0~X5)において底泥の不攪乱コアサンプルを採取し、TOCの鉛直分布を求めた(図-7)。立神浦の全域において表層から10 cm 前後の範囲でTOCが増大する傾向が認められた。なお、ここでは示していないが、表層10 cmでは w が高く τ_v が低い傾向にあり、汚濁流動層が立神浦全域に渡って存在することが示された。また、TOCの分布を詳細に見ると、表層付近のTOCレベルは、枝湾口部付近のX0、X1では小さく、湾中央部のX3で最大となった後、湾最奥部のX5で再度低下する傾向となった。また、表層のTOCレベルが高い地点では汚濁流動層がより厚くなる。海水交換の最も悪いX5でTOCが若干低下するのは、この海域では真珠養

殖が行われておらず養殖負荷が小さいためと予想される。よって、底泥汚濁の状況は養殖海域の利用状況に大きく影響されることが同時に示された。

汚濁流動層の特徴として、底泥強度と底泥汚濁の関係を定量化するために、 τ_v とTOC・全窒素TN・酸揮発性硫黄AVSの関係を求めた(図-8)。TOC、TN、AVSともに τ_v と明確な逆相関が示され、 τ_v が2 kN/m²以下でTOC、TN、AVSが急増することが明らかになった。以上より、本調査の全域において、底泥の強度と底泥汚濁には高い相関があり、柔らかい底泥が汚濁しているという汚濁流動層の特性が定量化できた。

底泥表層や浮泥層に関する研究は、有機物などの汚濁項目に関する研究(例えば、井上, 1998)と底泥強度などの土質特性に関する研究(例えば、奥村・梅村, 1978; 五明・三村, 1992)が別途に行われてきた。本研究では、底泥強度と汚濁指標を定量的に関係づけることにより、汚濁流動層の特性を明確にした。今後は、他の海域における底泥の強度と汚濁の関係を確認し、汚濁流動層の特性を一般化する必要がある。

4. 汚濁流動層の浚渫に対する基本的な考え方

一般に、汚濁底泥を除去する浚渫事業では、汚濁層厚さを仕様項目とする層厚管理型の考え方が採用されている。近年、多くの海域の底泥汚濁が表層に限定されることが指摘され、表層の汚濁底泥を効率良く除去する薄層浚渫機が実用化された(福手ら, 1986)。しかし、薄層浚渫機の最小浚渫層は30 cmから50 cmとされており、本研究で示された層厚約10 cmの汚濁流動層のみを除去することは困難である。また、今後、浚渫機構の改良を加えても、海上での作業状態を考慮すると、10 cm以下の施工精度を達成するのは大変困難と予想される。

これに対して、本研究結果によると、汚濁底泥の層厚は立神浦の各点で微妙に異なること、汚濁の激しい底泥は柔らかい泥であることが明らかになった。よって、浚

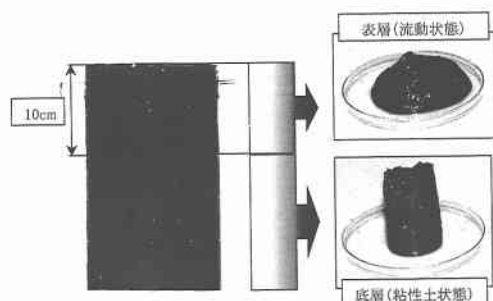


図-5 底泥の性状(採泥点:X4)

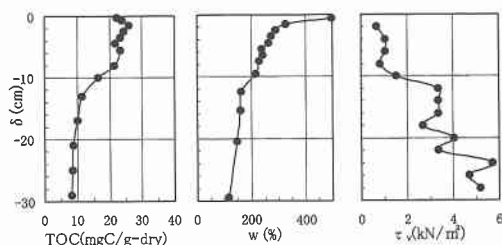


図-6 底泥の TOC・ w ・ τ_v の鉛直分布

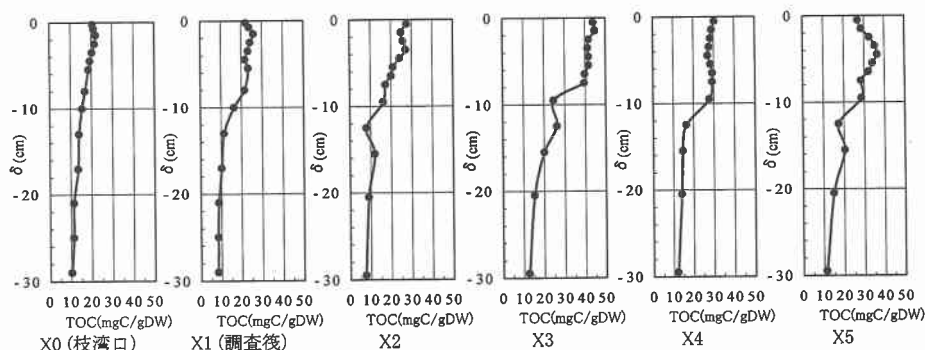
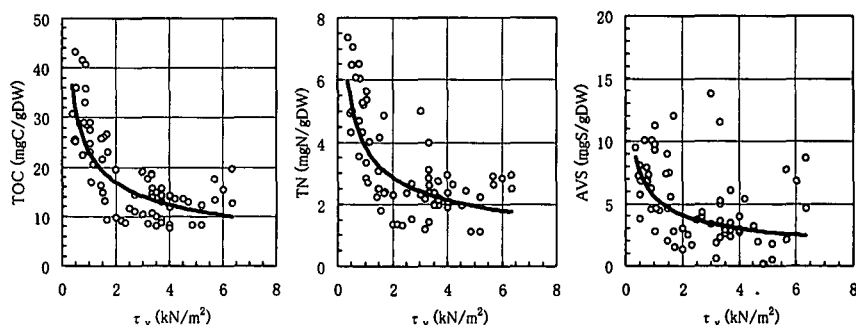


図-7 立神浦各点での底泥の TOC 鉛直分布

図-8 底泥の τ_v と TOC・TN・AVS の関係

渾工法として、吸引力や摩擦力で制御して柔らかい泥のみを除去する方法を開発すれば、汚濁底泥が合理的に除去できる工法になると予想される。これは、浚渫仕様を従来の層厚管理型から強度管理型へ移行することを意味しており、現地海域の底泥汚濁の実態に基づいた合理的な浚渫仕様に成り得るものと期待される。

5. 結 論

本研究の主要な結論を以下に示す。

- ①英虞湾立神浦の養殖海域の底泥汚濁は7, 8月に悪化する。この原因として、この海域の養殖負荷が大きいく、および、底泥環境が極度に還元状態になり有機物分解速度の低い嫌気性分解が主体となっていることが指摘された。
- ②英虞湾立神浦全域の表層10 cm前後の底泥層で、底泥の汚濁が激しく、かつ、強度が弱く流動的な特徴を持つ層として、本論文で新たに定義した汚濁流動層が存在することが明らかになった。
- ③底泥強度と有機炭素、全窒素、酸揮発性硫黄とは明確な逆相関を示し、せん断強度が 2 kN/m^2 以下の底泥で各汚濁項目が急増することが明らかになった。
- ④従来型の層厚管理型の浚渫に対して、現地の底泥汚濁の実態に基づいた考え方として、汚濁した柔らかい底泥を除去する強度管理型の浚渫工法を提案した。

謝辞：本研究の一部は農林水産新産業技術開発事業「水産養殖海域の水質汚染を予防する環境管理エキスパートシステムの開発」の成果である。また、現地調査では立神真珠研究会の皆様、芙蓉海洋開発株式会社松岡正敏氏から献身的な協力を得た。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 井上裕雄 (1998): 6.2.2 堆積物環境, 沿岸の環境図 (平野敏行監修), フジテクノシステム, pp. 612-646.
- 上野成三・澁岡和夫・高山百合子・勝井秀博 (1999 a): 水質環境の動的変化に着目した英虞湾の現地観測, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1051-1055.
- 上野成三・澁岡和夫・高山百合子・勝井秀博 (1999 b): 内部潮汐を考慮した英虞湾の流動シミュレーション, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 466-470.
- 上野成三・澁岡和夫・高山百合子・勝井秀博・山田二久次 (2000): 英虞湾の真珠養殖漁場におけるアコヤガイの成長過程と汚濁負荷に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1206-1210.
- 奥村樹郎・梅村靖文 (1978): 海底浮泥の基本的性質, 土と基礎, Vol. 26, No. 1, pp. 25-32.
- 五明美智男・三村信男 (1992): 現地不攪乱泥の強度特性, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 501-505.
- 土田 孝 (1999): 海成粘土地盤の間隙比-有効土被り圧関係に関する統一的な解釈, 港湾技術研究所報告, 第38巻, 第3号, pp. 153-179.
- 福手 勤・武村莞爾・横溝堅市・柴田 悟 (1986): 汚泥薄層浚渫技術の現状と開発課題について-浚渫～運搬～排泥～, 埋立と浚渫, No. 130, pp. 64-73.
- 日本海洋学会編 (1986): 沿岸環境調査マニュアル (底質・生物篇), 恒星書厚生閣, 266 p.