

閉鎖性海域の海底に堆積した有機汚泥のバイオリメディエーション Bioremediation of organically enriched sediment deposited on the sea bed of an enclosed bay

堤 裕昭¹⁾・山田真知子²⁾・濱田建一郎²⁾・門谷 茂³⁾

Hirroaki Tsutsumi, Machiko Yamada, Kenichiro Hamada, Shigeru Montani

熊本県立大学環境共生学部 (教授)、北九州市環境科学研究所、香川大学農学部

¹⁾Prefectural University of Kumamoto (Professor), ²⁾ Kitakyushu City Institute of Environmental Sciences, ³⁾ Kagawa University

The Environment of Dokai Bay in Kyushu, Japan, has been suffered from occurrence of dissolved oxygen depletion of the bottom water in the sea floor with organically enriched sediments which was accompanied with extreme eutrophication of the water. We have conducted the field experiments to treat the organically enriched sediments with biological activities of a deposit feeding polychaete, *Capitella* sp. I, aiming at further recovery of environmental conditions of the bay. Since the winter in 1996, we cultured dense colonies of *Capitella* in a factory, and put approximately 1 kgWW of *Capitella* colonies on the organically enriched sediments every winter. Due to the addition of the cultured colonies, the field population of *Capitella* increased more rapidly in early winter, and reached two to four times denser patches in the fields than before. The oxidation of the reduced sediments was enhanced by the increase of *Capitella*. This polychaete has a potential for bioremediation agent to treat the organically enriched sediments.

1. 研究目的

北九州市の洞海湾は、1900年頃から半世紀以上にわたり未処理の工場排水が大量に放出され続け、外洋水との交換率の悪い閉鎖性の強い地形も相まって、我が国でも有数の汚染海域となった[1],[2]。1970年の水質防止法制定後、工場排水の規制と下水道の整備が行われ、洞海湾の水質は国の環境基準を達成するまでに回復し、1973～1976年には汚染底質も浚渫され、湾内の環境改善は急速に進んだ。

1989年度に実施された洞海湾総合調査においては、115種の魚類および大型甲殻類の生息が確認され[1]、1989～1990年の底生生物の分布調査では、秋季から翌年の春季にかけて底生生物が比較的豊富に分布していることが確認された[3],[4]。しかしながら、底生生物の種組成は非常に単純で、小型で短命な種で占められ、有機汚濁域に特有の底生動物相がみられた。湾奥部の海底は依然として大量の有機物が堆積し、夏季には貧酸素水が発生していた[5]、

[6]。この閉鎖性水域である洞海湾の環境をさらに健全な海域に改善するためには、湾奥部の海底に堆積する有機汚泥の処理が不可欠と考えられる。

Capitella sp. 1は、世界各国の有機汚染域に生息する堆積物食の多毛類である[7]。個体群としては周年にわたって繁殖を行うことができ、環境の回復によりしばしば爆発的な個体群繁殖能力を発揮する[8],[9]。室内実験においては、*Capitella*の底泥の摂食や攪拌などの生物活性により、泥中の酸化が著しく促進されることがわかっている[10]。

本研究では1995年度よりこの*Capitella*の生物活性を用いた汚泥浄化法の開発を行ってきた。湾奥部での*Capitella* sp. 1の生息は、1995年度の調査で確認された(未発表)。湾奥部より採取した底質と*Capitella*を用いた実験では、*Capitella*コロニーの急速な増加が見られ、湾奥部において*Capitella*が正常に増殖できると考えられた。この研究では、八代市のマリンバイオ(株)の協力を得て*Capitella*コロ

ニーを大量培養し、1996年より毎年11月～翌年の1月に洞海湾湾奥の海底へ散布し、*Capitella* 個体群の急速な増殖を誘発し、海底環境の改善を試みた。

本論文においては、1995年9月～2000年1月までの調査における *Capitella* 個体群の密度および底質の化学組成の季節変化の結果より、洞海湾湾奥部に散布した *Capitella* コロニーが、潜在的な個体群の増殖能力および底質の酸化力を発揮できるかを検証し、洞海湾のみならず、閉鎖性の高い内海湾奥の海底に堆積した有機汚泥の処理法として、*Capitella* sp. 1の生物活性を利用する方法の有効性を検討した。

2. 研究経過

洞海湾は北九州工業地帯および北九州市の市街地に隣接し、奥行き約13km、幅は湾奥部で0.3kmの東西に細長い水路状の地形的閉鎖性の強い海域である。水深は両岸からほぼ中央部が8～10mである。湾奥部に5地点で(StnC、StnE、StnW、StnS、およびStnN)を調査地点として設置した(図1)。

洞海湾湾奥部の水質ならびに海底の環境調査を1995年9月～2000年1月まで毎月1回、StnCで行った。他の調査地点では、年間に4回の調査を行った。StnCでは、海底への培養した *Capitella* コロニー散布を、1996年から11～翌年の1月にかけて行った。*Capitella* コロニー散布は、ダイバーが潜水し、培養した *Capitella* コロニーを培養用の泥ごとStnCの海底に散布した。*Capitella* コロニーの散布湿重量は、毎回、合計で約1kg程度であると推定された。

環境条件の調査は、水質調査に関して、水深1mご

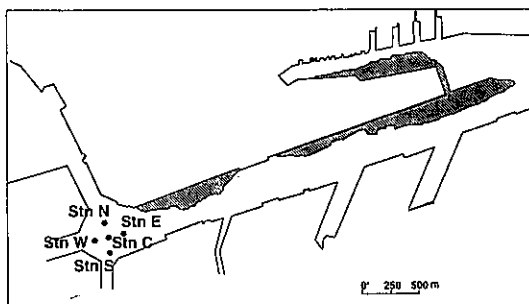


図1 洞海湾湾奥部の調査地点

との水温、塩分、DO(溶存酸素)の鉛直分布を測定した。底質の化学分析用の底質サンプルは、コアサンプラーを用いて、各調査地点で3サンプルずつ採取した。このサンプルを表層より1cmごとに切断し、化学分析用底質サンプルとした。検知管法を用いて底質のAVS(Acid Volatile Sulfide)を測定した。

*Capitella*の定量調査の底質サンプルは、各調査地点において、船上からエックマン・バージ型採泥器を用いて採泥し、方形コア(5×5×5cm)によりサブサンプリングを行った。10サンプルを採取した後、船上でローズベンガル入りホルマリン液で固定した。このサンプルは1mm及び0.125mmのふるいを用いてふるい、実体顕微鏡下において *Capitella* を選別し計数した。*Capitella*の湿重量は、まず、実体顕微鏡に装着したCCDカメラを通してパーソナルコンピュータの画面に表示し、画像解析ソフトウェア(NIH Image Ver. 1.61)を用いて *Capitella*の最大胸部幅節を計測し、最大胸部節幅の値を乾燥重量に換算し、さらに湿重量に換算して求めた。

3. 研究成果

3.1 海水のDOの季節変化

洞海湾湾奥部の水質においてもっとも特徴的な現象は、夏季における貧酸素水の発生である。StnCにおける1998年8月～2000年1月までの調査結果では(図2)、夏季にDOが著しく低下する。1998年9月18日には底層で0.5mg/l、1999年8月26日には0.2mg/lを記録した。表層でもDOが著しく低下する6月～9月の期間は、3～4mg/lまで低下した。

3.2 培養した *Capitella* コロニーの散布とその効果

夏季における底層水における溶存酸素の欠乏は、海底に大量の有機物が堆積し、それが溶存酸素を消費し尽くすためである。そこで、本研究では、この堆積した大量の有機汚泥を *Capitella* の生物活性を利用して浄化することを試みた。10月以降、底層水の溶存酸素条件が快復するのを待って、培養した

Capitella コロニーを1996年の11月より洞海湾湾奥部の Stn C の海底に毎年散布した。

Stn C における1995年9月～2000年1月までの *Capitella* 個体群の密度変化を図3に、湿重量の変化を図4に示した。*Capitella* は冬季に急速な増殖を見せ、海底で貧酸素が発生する夏季には個体群が一旦完全に消滅する。コロニーを散布しなかった1995年9月～1996年9月までの *Capitella* 個体群の密度は、10月にわずかな個体がプランクトン幼生のかたちで再移民して増殖を開始し、1996年の3月に密度で6,160個体/m²、湿重量で9.9gWW/m²に達した。

これに対して、Stn C に11月～翌年の1月にかけて培養した *Capitella* コロニーを散布した1996年以降、冬季に *Capitella* 個体群の密度が著しく増加した。1999年3月には、個体群密度は19,840個体/m²、湿重量は28.0gWW/m²を記録し、*Capitella* 散布前の密度の最高値の約3.2倍、湿重量の3.0倍に増加した。

Capitella 個体群の増殖が嫌気化した底質の酸化にどの程度貢献できるかについて、底質表層（深さ1cmまで）のAVS（酸揮発性硫化物）レベルの変化を調べた（図7）。嫌気化した底質では硫酸還元菌の作用によって有機物が嫌気的な分解を受け、その結果として硫化水素が生産される。その硫化水素は、底質中の金属類と結合して嫌気性の硫化物となり、AVSレベルは上昇する。一方、底質が酸化されると、

嫌気性の硫化物は酸化されるので底質中のAVS（酸揮発性硫化物）のレベルは低下する。

Capitella コロニーを散布しなかった1995年9月～1996年9月のAVSの値は、0.98～4.93mg/g乾泥の範囲を変動した。*Capitella* コロニーを11月～翌年の1月に散布した1996年の10月以降は、AVSの最高値および最低値がともに3年続けて減少していく傾向が見られた。1998年および1999年5月には、0.18mg/g乾泥、0.38mg/g乾泥まで低下した。最高値では、1997年1月に5.64mg/g乾泥を記録したが、1999年のAVSの最高値は10月に記録された3.54mg/g乾泥であった。*Capitella* コロニーの散布が、周年にわたって底質の酸化を促進する効果を及ぼし始めていることが示唆された。

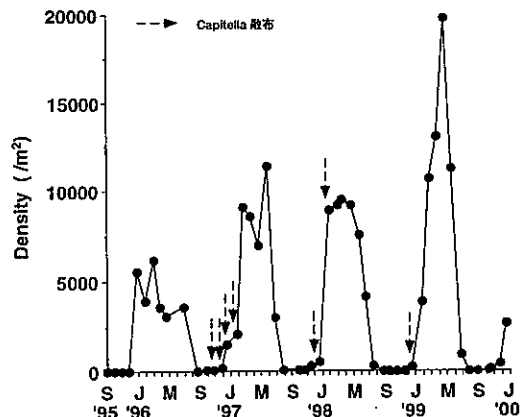


図3 Stn C における *Capitella* の密度変化
矢印は *Capitella* コロニーを散布したことを示す。

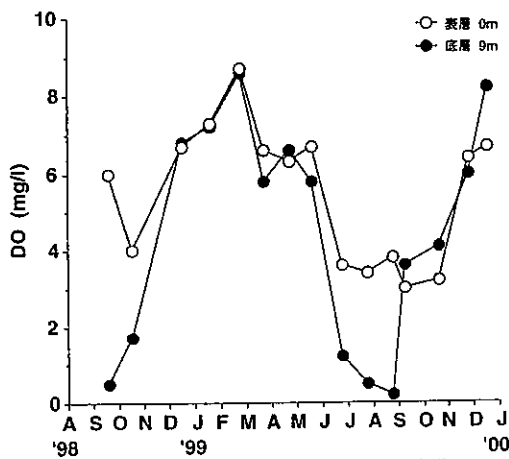


図2 表層と底層のDOの季節変化

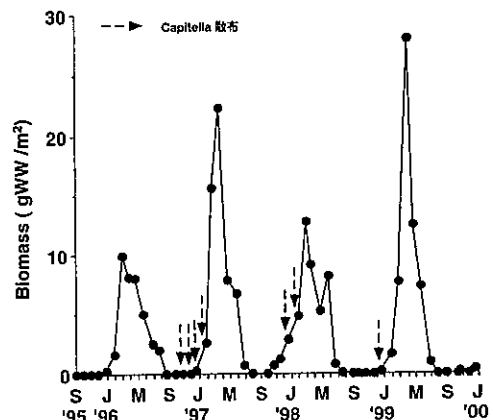


図4 Stn C における *Capitella* の湿重量の変化

4. 今後の課題と発展

培養した *Capitella* コロニーを有機汚泥の上に散布して、その浄化を試みるに際して、実験当初、一応の目標としていたものは、現場において $20\text{gWW}/\text{m}^2$ を越える個体群を、現場の海底における DO が秋季に回復した後、可能なかぎり早急に作り上げることであり、その結果として、底質表層の AVS のレベルを $0.5\text{mg}/\text{g}$ 乾泥以下の値に減少させることであった。経験的には底質表層の AVS のレベルが $0.5\text{mg}/\text{g}$ 乾泥を下回ると、泥に少なくとも数センチ程度の灰褐色の酸下層が見られるようになり、硫化水素臭もなくなり、通常の泥と評価されるようになる。実際、1998 年および 1999 年の 5 月には、*Capitella* 個体群の増殖の結果として、 $0.5\text{mg}/\text{g}$ 乾泥を下回る AVS の値が底質表層に見られた。この培養した *Capitella* コロニーを用いた有機汚泥の浄化法の一定の効果が、これまで実験室内でしか確認されていなかったが [10]、野外の現場において実現されたと評価することができる。

培養した *Capitella* コロニーを野外の有機汚泥上に散布した後の *Capitella* 個体群の増殖に関しては、しかしながら、筆者らが想定した増殖率をはるかに下回っている。実験室における *Capitella* コロニーの培養実験では、密度は最高で約 320 万個体/ m^2 、湿重量は約 $500\text{g}/\text{m}^2$ に達している (未発表)。

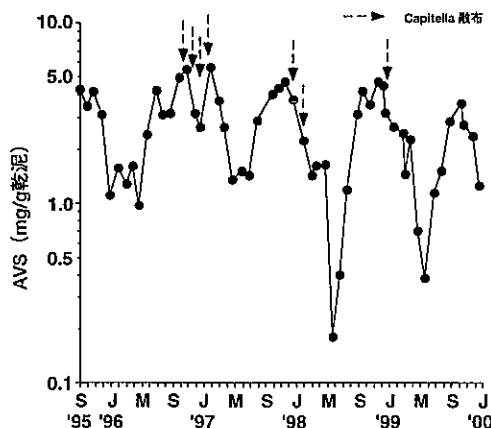


図 7 Stn C における底質表層の AVS の変化

魚類養殖場直下における有機汚泥の浄化実験では、この値に近い値が過去に見られているので (未発表)、どのような原因によって、個体群の増殖が抑制されているのか、野外における実用性を高める上で明らかにする必要がある。また、潜在的には、得られた増殖率が低いことから、今回得られた有機汚泥の酸化促進効果よりもはるかに高い効果が期待される。そのためにも、この種に内在する増殖率を發揮させることができる方策を見いだす必要がある。

参考文献

- [1] 北九州市保険局環境衛生研究所 (1990) 洞海湾総合調査報告書. 1 魚・エビ・カニ類, 89p.
- [2] 山田 真知子 (1990) 洞海湾の水質汚濁の進行と水質回復途上における生物相の変遷. 瀬戸内海科学 4: 52-58
- [3] 北九州市環境衛生研究所 (1992) 洞海湾総合調査報告書. 2 底質と底生動物, 50p.
- [4] 上田 直子・堤 裕昭・徳崎 健史・竹内 良治・城戸 浩三 (1992) 洞海湾の海底環境と底生生物の分布. 日本ベントス学会誌 42: 55-62
- [5] 山田 真知子・上田 直子・梶原 葉子・徳崎 健史・堤 裕昭・門谷 茂 (1993) 洞海湾の湾奥部に存在する干潟が生態系に果たす役割. 日産科学振興財団研究報告書 16: 223-230
- [6] Ueda N, Tsutsumi H, Yamada M, Takeuchi R, Kido K (1994) Recovery of the marine bottom environment of a Japanese Bay. Mar. Pollut. Bull. 28: 676-682
- [7] Pearson TH, Rosenberg R (1978) Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev. 16: 299-311
- [8] Grassle J F, Grassle J P (1974) Opportunistic life histories and genetic systems in marine benthic polychaetes. J. Mar. Res. 32: 314-318
- [9] Tsutsumi H (1987) Population dynamics of *Capitella capitata* (Polychaeta; Capitellidae) in an organically polluted cove. Mar. Ecol. Prog. Ser. 36: 139-149
- [10] 門谷 茂・堤 裕昭 (1996) ベントスによる漁場底泥の環境修復. 石田 祐三郎・日野 明徳 (編) 生物機能による環境修復, 恒星社厚生閣, 東京, p.65-78