

瀬戸内海表層底泥に見られる強熱減量, 酸化還元電位 および酸揮発性硫化物濃度の関係*

山本 民次**・松田 治**・橋本 俊也**・妹背 秀和**

Relationship Observed among Loss of Ignition, Oxidation-Reduction Potential and Acid-Volatile Sulfide Content of Surface Sediment from the Seto Inland Sea, Japan

Tamiji Yamamoto, Osamu Matsuda, Toshiya Hashimoto and Hidekazu Imose

1993~1994年に, 瀬戸内海全域の表層底泥の調査を行った。1994年4月および6月に比べ, 1993年10月と1994年1月には強熱減量(IL)と酸揮発性硫化物(AVS-S)が高く, 酸化還元電位(Eh)が低かった。これらは1993年夏の多量の降雨による影響を反映しているものと考えられた。泥の含水率とILの間には明瞭な曲線関係が得られた。また, $IL > 5\%$, $Eh < +200\text{ mV}$ において硫酸還元が進行してAVS-Sが高くなることが理解された。Eh $< -200\text{ mV}$ の値は今回の調査からは得られず, このことから瀬戸内海表層底泥($< 3\text{ cm}$)ではメタン発酵は起こっていないことが示唆された。今回の調査から, 大阪湾, 広島湾, 周防灘, 播磨灘, 備後灘, 燧灘などの湾・灘部は $IL > 6\%$, $Eh < +100\text{ mV}$, $AVS-S > 0.1\text{ mg g}^{-1}$ で富栄養状態にあるが, 安芸灘, 伊予灘, 備讃瀬戸, 豊後水道などの瀬戸部は $IL < 5\%$, $Eh > +200\text{ mV}$, $AVS-S < 0.1\text{ mg g}^{-1}$ でそれほど富栄養化していないことが理解された。最近の20年間に瀬戸内海の水質は次第に改善されてきたようであるが, 今回の結果からは, 底質の改善にはさらに長い時間を要することが伺われる。水質, 底質とも貧酸素あるいは低酸素状態にさせないことが, 底棲生物を繁栄させ, ひいては生物攪乱による底泥への酸素の供給と食物連鎖を通じた物質循環を活発化させる上で重要である。

The quality of the surface sediment from the Seto Inland Sea was investigated seasonally during 1993 and 1994. In October 1993 and January 1994, ignition loss (IL), an indicator of organic matter, and the concentration of acid volatile sulfide (AVS-S) showed high values while oxidation-reduction potential (Eh) showed lower values, compared to April and June 1994. The differences of these parameters between two periods indicated the effects of a record heavy rain during the summer of 1993. An apparent curvilinear relationship was observed between water content and IL. Sulfate reduction caused an increase in AVS-S under the conditions of $IL > 5\%$ and $Eh < +200\text{ mV}$. Since Eh values lower than -200 mV were not observed in the present study, methanogenesis may not have occurred in the surface 3 cm of sediment in the Seto Inland Sea. From the results of this study, regional bays and Nadas (wide regions of the inland sea) such as Osaka Bay, Hiroshima Bay, Suo Nada, Harima Nada, Bingo Nada and Hiuchi Nada are eutrophied with $IL > 6\%$, $Eh < +100\text{ mV}$ and $AVS-S > 0.1\text{ mg g}^{-1}$, while Setos (narrow regions of the inland sea) such as Aki Nada, Iyo Nada, the Bisan Strait and the Bungo Channel are less-eutrophied with $IL < 5\%$, $Eh > +200\text{ mV}$, $AVS-S < 0.1\text{ mg g}^{-1}$. Although eutrophication of sea water in the Seto Inland Sea seems to have been slightly alleviated during the two recent decades, the results of the present study indicate that improvement of the sediment quality will take a longer time. A suggestion was made that anoxic or hypoxic conditions both in the water and sediments must be prevented so that the condition allows the benthic community to flourish and, in turn, accelerate the removal of organic matter in the sediments due to the supply of oxygen by bioturbation, and stimulation of the material cycling through the food web.

キーワード: 瀬戸内海, 底質, 強熱減量, 含水率, 酸揮発性硫化物, 酸化還元電位

* 1998年4月27日受領, 1998年7月24日受理

** 広島大学生物生産学部

連絡先: 山本民次, 広島大学生物生産学部

〒739-8528 東広島市鏡山1-4-4

E-mail: tamiyama@ipc.hiroshima-u.ac.jp

1. はじめに

瀬戸内海は主に紀伊水道, 豊後水道の2つの水道で外海につながる閉鎖性の強い海域である。海水交換の悪い閉鎖的な海域に対して栄養物質が負荷されると容易に富栄養化する。これが我が国の高度経済成長期に瀬戸内海

のたどった道である。しかし、1973年の「瀬戸内海環境保全臨時措置法」(1979年に「瀬戸内海環境保全特別措置法」として恒久化)により、同海域に対して陸域から負荷される有機物量がCODの総量規制方式により抑えられるとともに、植物プランクトンの増殖を引き起こす無機リンの排出量も無リン洗剤の使用促進等により低下してきた(城, 1991¹⁾)。このことは赤潮発生件数の減少に如実に現れており(瀬戸内海環境保全協会, 1997²⁾)、瀬戸内海の水質は最悪であった1970年代を基準にすれば改善の方向に向かっていると云える。

一方、底質は水質に比べて短い時間スケールでの変動は小さく、海域の汚濁の進行あるいは改善を累積的に反映すると言われている。海域に負荷される物質のうち、溶存無機栄養塩類は植物プランクトンに利用されて粒状化して沈降するため、底泥に対する有機物の蓄積に寄与している(田中ほか, 1984³⁾; 浮田ほか, 1991⁴⁾)。海底に堆積した粒状態有機物はバクテリア等の分解を受けて無機化し、一部は溶存物質として直上水中へ回帰するが、残りの難分解性有機物は埋没して、場所によっては有機物含量の高い底質を形成する。

有機物が好氣的に分解される際にバクテリアは酸素を

消費するため、底質の環境は次第に還元的となり、硫酸還元過程により硫化物が形成されるようになる。このような一連の過程を考慮すると、底質の有機物量の指標となる強熱減量、底質中のさまざまな生物化学的過程を反映するとともに微生物活動を支配する酸化還元電位、および硫酸塩還元細菌による産物である硫化物量など、比較的測定が容易な項目を測定することによっても底質の汚濁状況を包括的に知ることが可能であると思われる。

瀬戸内海の水質調査が環境庁、水産庁などの主導のもと、定期的に行われているのに対して、瀬戸内海全域にわたる底質調査で公表されているものは、これまで、(1)1971~72年に行われた水産庁「漁場改良復旧基礎調査」(山田, 1976⁵⁾)、(2)1975~77年に行われた通産省工業技術院中国工業技術試験所によるもの(塩沢ほか, 1979⁶⁾)、(3)1979~82年に行われた通産省工業技術院中国工業技術試験所によるもの(谷本ほか, 1984⁷⁾)、(4)1981~85年に行われた環境庁「瀬戸内海環境情報基本調査」によるもの(瀬戸内海環境保全協会, 1988⁸⁾)、のわずか4回である。今回は主に上述した3項目を測定することで、瀬戸内海全域の底質の状況を把握するとともに評価を試みたので報告する。

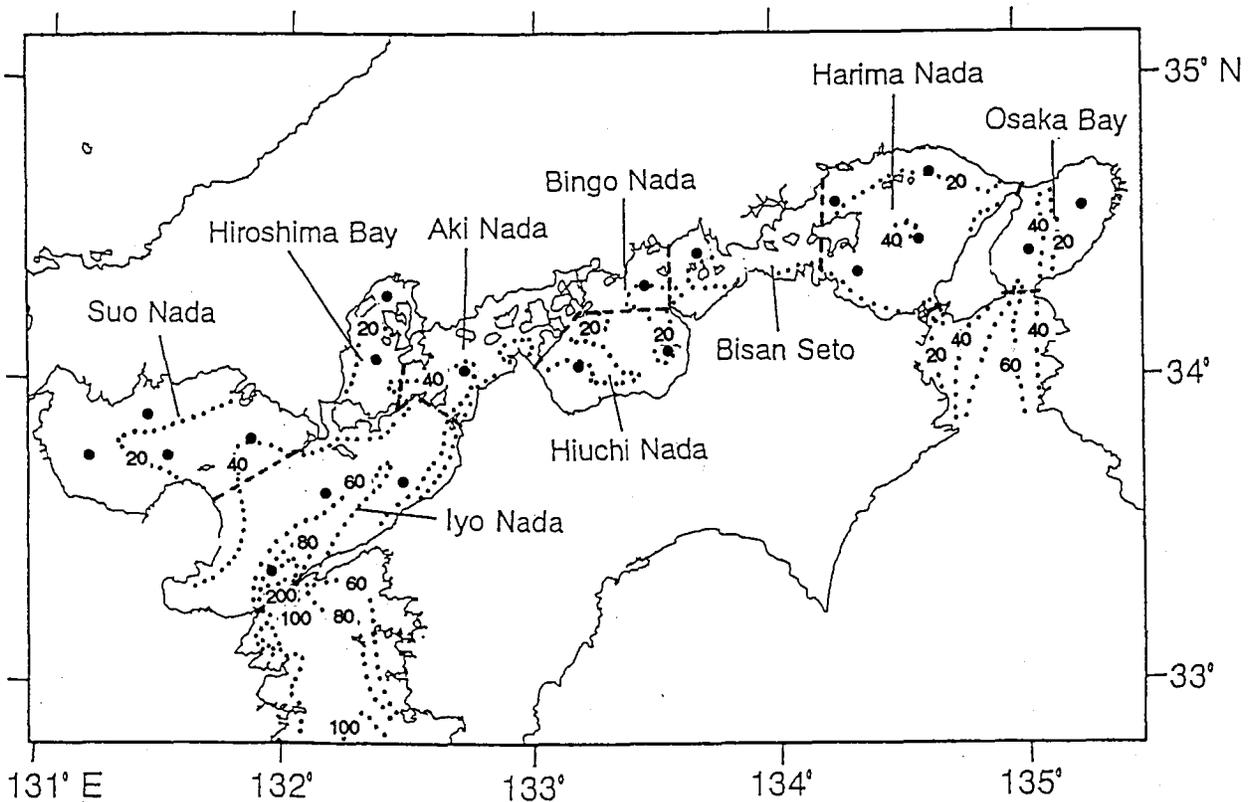


Fig. 1 Map showing the locations of sampling stations in the Seto Inland Sea and its areal demarcation. Number with dotted line denotes depth in meter.

2. 方 法

1993年10月, 1994年1, 4, 6月の4回にわたり Fig. 1 に示した測点において, コア採泥器 (K・K 式, 橋本科学, アクリル製チューブ内径5.2 cm, 高さ67 cm; 原型は木俣ほか, 1960⁹⁾) を用いて2本ずつ底泥を採取した。測点数は1993年10月と1994年1月は15点, 4月と6月は20点であった。前の2回で測点が少ないのは, 予定していた測点が砂質のためコア採泥器による採泥が困難であったためであり, 後の2回ではスミス・マッキンタイヤー採泥器 (採泥面積0.1 m²) を用いて採取したためである。

チューブ内の底泥コアを下部から押し上げて直上水を静かに捨て, そのまま底泥最上部3 cm を押し上げて切り取り, 2本のコアから得られた試泥をそれぞれ別々のプラスチック容器に移した。直ちに, この試泥の一方に水銀棒状温度計を差し込んで泥温を測定し, もう一方に pH メーター (PHS-120, 電気化学計器株式会社) と ORP メーター (飽和塩化銀電極 PS-112C, 東亜電波社) 電極を挿入して pH と酸化還元電位 (Eh) を測定した。これらの測定終了後, 酸揮発性硫化物 (AVS-S) 量を検知管法 (ヘドロテック S, ガステック; 荒川, 1980¹⁰⁾) により測定した。ここで, AVS-S を構成する硫化物は, 金属と結合した FeS などと H₂S が主要なものである (門谷, 私信)。スミス・マッキンタイヤー採泥器を使用した場合, サイフォンによって直上水を排水した後, 底泥上部3 cm を採取し, コア採泥器で得られた底質と同様の手順を踏んだ。

残った試泥の含水率 (%) と強熱減量 (IL) を小山 (1982)¹¹⁾ に基づいて測定した。いずれの項目の測定値も2本のコア間の違いは小さかったので, ここではそれらの平均値を用いて得られた関係について解析した。なお, 生の分析データは調査結果報告「資料」(山本ほか, 1997¹²⁾) として公表されている。

3. 結果と考察

IL, Eh および AVS-S の分布と季節変動

今回得られた底質調査結果において, IL は大阪湾奥部, 播磨灘北部, 広島湾奥部, 周防灘西部の測点で高く, 平均して9.8%であった。一方, 備讃瀬戸や速吸瀬戸を含む伊予灘といった測点では平均2.7%と低かった (Fig. 2a)。AVS-S も同様に大阪湾奥部, 播磨灘北部, 広島湾奥部, 周防灘西部で平均0.544 mg g⁻¹ と高く, 備讃瀬戸や伊予灘では0.003 mg g⁻¹ と低かった (Fig. 2b)。水産用水基準では全硫化物 (TS) 濃度が0.2 mg g⁻¹ 以上を「汚染の始まりかかった泥」と定義しており, 大阪湾奥部, 播磨灘北部, 広島湾奥部, 周防灘西部などでは底棲性の

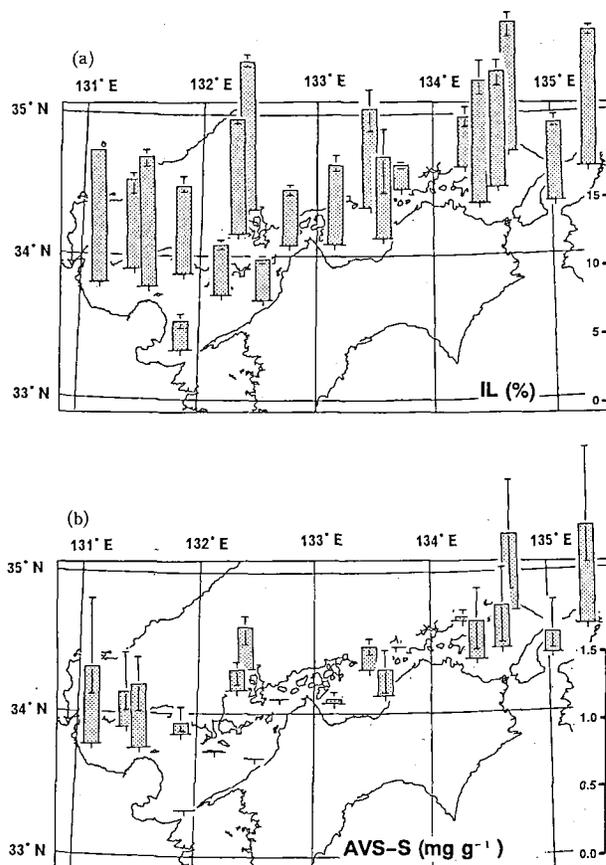


Fig. 2 Annual average (column) and standard deviation (bar) of (a) ignition loss (IL, %) and (b) concentration of acid volatile sulfide (AVS-S, mg g⁻¹) in the surface sediment (0-3 cm) of the Seto Inland Sea. n = 4.

水産生物の生息が困難な状況にあると思われる。Eh は図示していないが, 大阪湾奥部, 播磨灘北部, 広島湾奥部, 周防灘西部の測点で平均-14 mV と低く, 備讃瀬戸や伊予灘では353 mV と高かった。

IL は1993年10月および1994年1月に高く (ともに平均7.7%), 1994年4月および6月にわずかに低かった (それぞれ平均6.7%および6.4%) (Table 1)。AVS-S の空間的変動幅はかなり大きいものの, 1993年10月および

Table 1 Average and standard deviation of IL, AVS-S and Eh measured for the surface sediments (0-3 cm) from the Seto Inland Sea in Oct. 1993, Jan., Apr. and June 1994.

Date	IL (%)	AVS-S (mg g ⁻¹)	Eh (mV)	n
Oct., 1993	7.7 ± 2.0	0.352 ± 0.317	-76 ± 101	15
Jan., 1994	7.7 ± 2.1	0.330 ± 0.337	57 ± 115	15
Apr., 1994	6.7 ± 2.8	0.169 ± 0.187	130 ± 178	20
June, 1994	6.4 ± 3.1	0.178 ± 0.207	201 ± 128	20

1994年1月に有意に高く(それぞれ平均 0.352 mg g^{-1} および 0.330 mg g^{-1}), 1994年4月および6月に低かった(それぞれ平均 0.169 mg g^{-1} および 0.178 mg g^{-1}) (t-検定, $p < 0.005$) (Table 1). Ehは1993年10月および1994年1月に低く(それぞれ平均 -76 mV および 57 mV), 1994年4月および6月に高かった(それぞれ平均 130 mV および 201 mV) (Table 1). 前2回の観測において全域で有機物量が多く, 硫化物量も多く, 酸化還元電位が低い傾向は, 1993年の夏季の記録的な大雨によって(神戸海洋気象台, 1994¹³⁾), 陸域からの有機物負荷量が増大したことによるものと推察される(橋本ほか, 投

稿中¹⁴⁾). 今回の船舶観測期間中に測定された $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出速度も1993年10月には非常に高い値を示したことが報告されている(山本ほか, 1998¹⁵⁾).
含水率, IL, EhおよびAVS-Sの関係

四季にわたって測定した瀬戸内海全域における底質の含水率, IL, AVS-SおよびEhについてFig. 3のような関係が得られた。まず, ILと含水率においては, ILが高い底質ほど含水率が上昇するというプロットが得られた(Fig. 3aの○印)。この関係は定性的には有機物含量が高い底質ほど含水率が高くなるということの意味するものであるが, 理論的にはILが十分高くなっても含水率が100%になることはないので, 線形ではなくある漸近線に近づくと考えるのが適当である。この関係は今回測定された $2 < \text{IL} < 12\%$ では, 概ね以下の直角双曲線(Fig. 3の曲線)で近似することができる。

$$Y = a(X - X_0) / \{(b - X_0) + (X - X_0)\},$$

ここで, X_0 : X -切片,

a : X が無限大の時の Y の漸近線,

b : $Y = a/2$ の時の X の値,

である。

ILおよびEhとAVS-Sとの間にはFig. 3bおよび3cに見られるような関係が得られた。これら2つの図からは, 底質中における硫化物の蓄積が, ILが約5%以上, Ehが約 $+200 \text{ mV}$ 以下という状態で進行するということが見て取れる。微生物の代謝はそれ自体が酸化還元過程であり, それぞれが生育に適した酸化還元環境の中で活動している。FeSを生じる鉄還元はEhが $+200 \sim -200 \text{ mV}$, H_2S を生じる硫酸還元作用は $0 \sim -200 \text{ mV}$ で

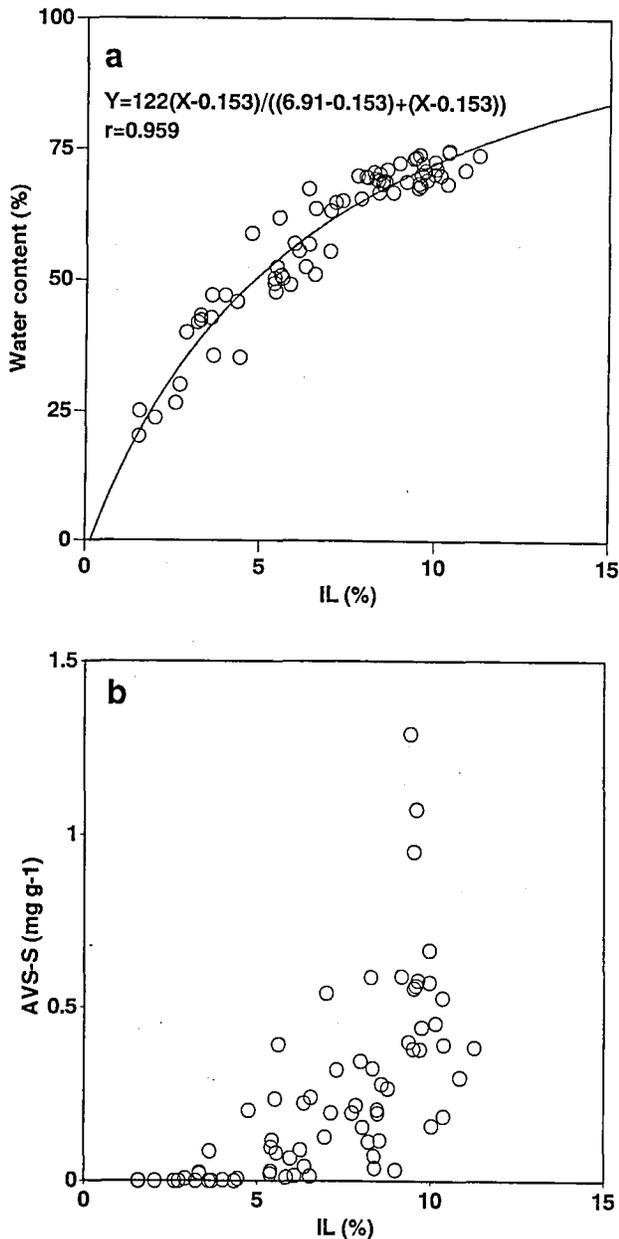


Fig. 3 Relationships between sediment parameters. (a) Ignition loss (IL, %) and water content (%), (b) IL and acid volatile sulfide (AVS-S, mg g^{-1}), and (c) redox potential (Eh, mV) and AVS-S.

起こると言われている(高井, 1978¹⁶⁾). これらのことから, 底泥の有機物含量が増加し ($IL > \text{約} 5\%$ 以上), バクテリアによる分解が盛んになり, 底質が還元的になると ($Eh < \text{約} +200 \text{ mV}$), 硫化物が蓄積するという過程がよく理解できる。

IL および Eh と AVS-S が IL と含水率 (Fig. 3a) のように直線あるいは何らかの曲線で表されるような明瞭な相関関係を示さないのは, 次のような二つの理由によるものと考えられる。一つは, IL として測定される有機物の内容が硫酸還元菌が利用しにくい難分解性のものである場合には, IL が十分高く, Eh が硫酸還元菌に好適であるほど低くても, AVS-S 量に反映されない (畑, 1974¹⁷⁾). また, もう一点としては, IL や Eh が瞬間値的指標であるのに対して, AVS-S は微生物活動の進行にともなって蓄積されるため, それらの間にはタイムラグが生じるということである。例えば, 水柱から海底に対する有機物の負荷が急増した瞬間には, IL は高いが AVS-S が低いということになる。

今回の測定においては, Eh が -200 mV 以下になることはなかった。このことから次のことが想像される。硫酸還元が $0 \sim -200 \text{ mV}$ で起こるのに対して, メタン発酵はさらに還元的な $-200 \sim -300 \text{ mV}$ で起こり (高井, 1978¹⁶⁾), 硫酸還元とは同時に起こることはないと言われている (Martens and Berner, 1974¹⁸⁾). 海域では海水中に硫酸イオンが十分に存在するので, 底質表層では有機物分解過程の最終段階は $Eh > -200 \text{ mV}$ の硫酸還元であり, メタン発酵はほとんど生じていないことを示唆している。

底質から見た瀬戸内海各海域の特徴

今回の観測結果のうち, IL, Eh および AVS-S の平均値を用いて, 瀬戸内海各海域の特徴を見てみた (Fig. 4)。この図からわかるように, 大阪湾, 広島湾, 周防灘, 播磨灘, 備後灘, 燧灘などの湾や灘部は, 有機物量が多く ($IL > 6\%$), 還元的で ($Eh < 100 \text{ mV}$), 硫化物量が多い ($AVS-S > 0.1 \text{ mg g}^{-1}$)。一方, 安芸灘, 伊予灘, 備讃瀬戸, 速吸瀬戸などの瀬戸部では, $IL < 5\%$, $Eh > 200 \text{ mV}$, $AVS-S < 0.1 \text{ mg g}^{-1}$ と先の海域とは対照的である。底泥に対する有機物負荷量は陸域からの物質の負荷量に依存していると考えるのは普通であろう。例えば, 山本ほか (1996)¹⁹⁾ が最近まとめた河川経由の全窒素 (TN) および全リン (TP) 負荷量は, 大阪湾が他の海域を圧倒してそれぞれ $3,900 \text{ ton N month}^{-1}$ と $380 \text{ ton P month}^{-1}$ であり, これに比べて安芸灘や伊予灘では一桁低い。直接的な有機物の負荷に加え, このような窒素やリンなどの負荷により, 海域の一次生産が加速され^{3,4)}, 底泥への有機物負荷を高める。しかし, 底泥に堆

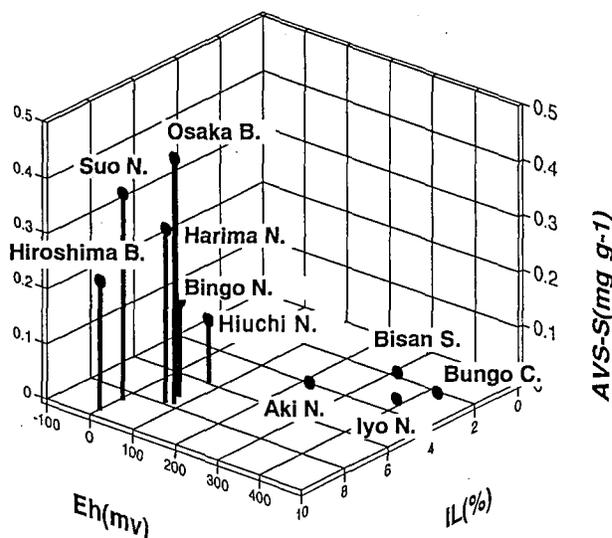


Fig. 4 Characteristics of the sediment quality in the respective areas of the Seto Inland Sea. Refer Fig. 1 for the areal demarcation.

積するかどうかは海水の流動にも左右される。周防灘に対する河川による TN および TP 負荷量はそれほど大きくないにも関わらず ($400 \text{ ton N month}^{-1}$ と $20 \text{ ton P month}^{-1}$)¹⁹⁾, 大阪湾の底泥と近い性状を示した。逆に, 備讃瀬戸では海域面積が狭く, 河川による TN と TP 負荷量はかなり高いので (それぞれ $560 \text{ ton N month}^{-1}$ と $45 \text{ ton P month}^{-1}$)¹⁹⁾, 単位面積当たりの負荷量にすればかなり大きい, 底質の有機物量は少ない。したがって, 瀬戸内海のような沿岸域では物質の流入負荷に加え, 潮汐混合過程が底質の性状を決める大きな要因であると考えられ, 比重の小さい有機物粒子は潮流振幅の小さい湾・灘部 (日本海洋学会沿岸海洋研究部会, 1985²⁰⁾) で堆積し, 潮汐振幅の大きい瀬戸部ではあまり堆積しないことを今回の結果は示している。

この研究では $0 \sim 3 \text{ cm}$ の表層泥を採取した。瀬戸内海における底泥の堆積速度は最も大きい大阪湾中央部で $0.8 \text{ g cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ であると報告されている (星加ほか, 1994²¹⁾). したがって, 今回のサンプルは少なくとも 4 年以上前に堆積したものから現在までのものの混合物である。他の公表結果と今回の測定結果を比べることは重要なことであるが, それぞれの調査で測点数や位置, さらには測定項目が必ずしも同じではない。実測値は公表されていないので, 比較検討はほとんど不可能である。あえて過去の報告の中で今回と同じ測定項目について分布図が描かれているものについて視覚的に比較してみると, 前述の法的措置が執られる直前 (約 20 年前の 1971~72 年調査) の状況 (山田, 1976⁹⁾) に比べて IL で $1 \sim 2\%$ の減少, AVS-S は広島湾を除いて 0.2 mg g^{-1} 程度減少

しているようであるが、法的措置が執られた後(約15~10年前の1979~85年調査)の状況(谷本ほか, 1984⁷⁾; 瀬戸内海環境保全協会, 1988⁸⁾)はあまり変わっていない。このことは赤潮発生件数の減少に代表されるように(瀬戸内海環境保全協会, 1997²⁾), 陸域からの汚濁物質の減少にともなう水質の応答が速いものに対して、底質の応答はタイムラグをもって現れることを示唆している。

この原因としては次のようなことが考えられる。瀬戸内海の海水交換は15か月程度であり(Takeoka, 1984²²⁾), 陸域からの排出量が増加あるいは減少すれば、この程度の時間スケールで比較的容易に沖合域の濃度に近くなる。一方、底質中の有機物の分解には長い年月を要する。これは、海底に堆積埋没する有機物は最終的には難分解性のものであることや、水中での分解が酸化的に行われるのに対して、底質中ではごく表層を除いて酸素供給が制限されるため、速度の遅い嫌氣的分解が卓越するためである。生物攪乱(バイオターベーション)は嫌氣的な底質に酸素を供給する重要な役割を果たしている。しかし、底質中の窒素含有量とベントス現存量との間に明瞭な負の相関が見られることから(玉井, 1996²³⁾), 底質中の有機物含量の増加によってベントス現存量が低下すると考えられ、大阪湾奥部などの極度に還元的な底質では生物量が少ないために生物攪乱の効果はあまり期待できない。

以上のことから、底質の改善を進めるためには、夏季においてさえも水質、底質ともに低(貧)酸素化しない環境が維持されることが必要条件であると言えよう。すなわち、このことによって底生生物の生息を可能にし、生物攪乱によって底質中に酸素を供給することでバクテリアによる酸化分解を促すとともに、食物連鎖を通した生物間の有機物転送と排泄による無機化を促進する、という自然が有する浄化機能を効果的に利用することが可能となるからである。

本研究における現場調査は広島大学生物生産学部附属練習船「豊潮丸」によって行われたものである。同練習船の船長、郷 秋雄助教授ほか乗組員の方々に感謝します。また、本論文の英文を手直しいただいた広島大学生物生産学部教授 N. Rajendran 博士およびカナダ、ブリティッシュ・コロンビア大学地球海洋学科の P. J. Harrison 博士に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 城 久 (1991): 大阪湾の開発と海洋環境の変遷. 沿岸海洋研究ノート, 29, 3-12.
- 2) 瀬戸内海環境保全協会 (1997): 瀬戸内海的环境保全一資料集一. 環境庁水質保全局 (監修), 161pp.
- 3) 田中庸央・佐野方昂・西野友彦・大沼淳一 (1984): 三河湾表面水中の植物プランクトン由来の二次汚濁量について. 水質汚濁研究, 7, 583-587.
- 4) 浮田正夫・山原康嗣・中西 弘 (1991): 大阪湾における流入負荷量の推移と内部生産. 沿岸海洋研究ノート, 29, 51-59.
- 5) 山田 久 (1976): 底質. p. 90-100, 瀬戸内海の海域生態と漁場, 村上彰男 (編), フジ・テクノシステム, 東京.
- 6) 塩沢孝之・川名吉一郎・星加 章・谷本照巳・滝村 修 (1970): 瀬戸内海の底質. 中工試報, 4, 1-24.
- 7) 谷本照巳・川名吉一郎・山岡到保 (1984): 瀬戸内海における底質の粒土組成と有機物. 中工試報, 21, 1-11.
- 8) 瀬戸内海環境保全協会 (1988): 瀬戸内海的环境一瀬戸内海環境情報基本図一. 51pp.
- 9) 木俣正夫・河合 章・石田祐三郎 (1960): 海底泥土の採取法. 日水誌, 26, 1227-1230.
- 10) 荒川 清 (1980): 底質調査法. p. 237-270, 水質汚濁調査指針, 日本水産資源保護協会 (編), 恒星社厚生閣, 東京.
- 11) 小山忠四郎 (1982): 水質・底質化学分析法. 成文堂, 東京, 238pp.
- 12) 山本民次・妹背秀和・橋本俊也・松田 治・郷 秋雄・中口和光 (1997): 瀬戸内海全域の季節別底質調査結果. 広島大学生物生産学部紀要, 36, 43-49.
- 13) 神戸海洋気象台 (1994): 1993年夏の不順な天候について. 神戸海洋気象台彙報, 213, 25-39.
- 14) 橋本俊也・山本民次・松田 治・芳川 忍 (投稿中): 1993年夏および1994年夏の異常気象が広島湾奥部の海況に与えた影響. 海と空.
- 15) 山本民次・松田 治・橋本俊也・妹背秀和・北村智顕 (1998): 瀬戸内海底泥からの溶存無機態窒素およびリン溶出量の見積もり. 海の研究, 7, 151-158.
- 16) 高井康雄 (1978): 微生物の生態 5—環境汚染をめぐる—. p. 1-21, 学会出版センター, 東京.
- 17) 畑 幸彦 (1974): 硫黄サイクルと微生物との関連. p. 187-204, 海洋微生物, 多賀信夫 (編), 海洋学講座11, 東京大学出版会, 東京.
- 18) Martens, C. S. and R. A. Berner (1974): Methane production in the interstitial waters of sulfate-depleted marine sediments. Science, 185, 1167-1169.
- 19) 山本民次・北村智顕・松田 治 (1996): 瀬戸内海に対する河川流入による淡水, 全窒素および全リンの負荷. 広島大学生物生産学部紀要, 35, 81-104.
- 20) 日本海洋学会沿岸海洋研究部会 (1985): 日本全国沿岸海洋誌. 東海大学出版会, 東京, 1106pp.
- 21) 星加 章・谷本照巳・三島康史 (1994): 大阪湾における懸濁粒子の堆積過程. 海の研究, 3, 419-425.
- 22) Takeoka, H. (1984): Exchange and transport time scale in the Seto Inland Sea. Cont. Shelf Res., 3, 327-341.
- 23) 玉井恭一 (1996): 漁業生産を支える環境と低次生産—ベントス—. p. 71-75, 瀬戸内海の生物資源と環境, 岡市友利・小森星児・中西 弘 (編), 恒星社厚生閣, 東京.