

海田湾に堆積する有機泥性状と水質の変動特性

Variation Characteristic of Bottom Mud Property and Water Quality at Kaita Bay

今川昌孝¹・日比野忠史²・首藤 啓³・西田芳弘⁴

Masataka IMAGAWA, Tadashi Hibino, Akira SUTOU and Yoshihiro NISHIDA

In order to clarify formation and disappearance processes of dysoxic water mass which generates near the sea bottom at Kaita Bay, bottom mud properties which contain physical and chemical parameters and water qualities are investigated from summer season to winter season. From this investigation, it is revealed DO near sea bottom decreases when water temperature is low and turbidity increases. Generally, it is known turbidity increases causes formation of dysoxic water mass. It is estimated that the effective density (the difference between water density and suspended matter density) change by water temperature variation triggers the suspended matter motion and causes organic matter to maintain suspended condition.

1. はじめに

海田湾は広島湾奥部に位置する幅約1km, 奥行き約3.5km, 平均水深約10mの小湾であり, 湾内には猿猴川, 瀬野川が流入している. 海田湾は, 細長い袋状の地形であり, 停滞性が強いいため, 夏季～秋季にかけて強い貧酸素化が継続することを, 横田ら(2006)は長期観測結果から示している. 近年の調査においても広島湾での貧酸素状態が解消された後も海田湾では貧酸素状態が継続していることがわかっている. 海田湾は広島湾において水質悪化が最も進んだ海域であり海田湾の水質悪化のメカニズムを明らかにすることによって, 閉鎖性内湾の外湾への影響を検討することができる海域である.

広島湾の海底表層には, 有機物を多く含んだ含水比250～600%程度の底泥が堆積している. 特に, 数cmまでの底泥表層では, 海中中で分解しきらずに沈降した比較的新鮮な有機泥が非常に緩い状態で堆積し浮遊泥層を形成する. 海底に形成された高濁度浮泥層(500%以上の含水比状態の堆積泥層)から巻き上げられた有機泥が貧酸素化の原因であると推測されている(日比野, 松本(2006)).

本研究では, 広島湾に堆積した有機泥の特性を基礎知識として海田湾に堆積した有機泥および湾内で沈降・移流する有機泥の物理的・化学的性状, 海底層での水質の変動を把握し, 貧酸素水塊の形成に及ぼす有機泥の巻き上がりや移流の影響やそれらの起こるメカニズムを解明することを目的としている.

2. 流況・水質調査と沈降物捕集調査の概要

(1) 海底層における水質, 流速の調査

海田湾での貧酸素状態の形成と解消過程を把握するため海底層における水質と流向流速の連続観測を行った. 図-1に示す海田湾のST.1において, 2008年9月29日～10月14日(10月期)および2008年12月3日～12月19日(12月期)のそれぞれ15昼夜間に流速, 水質の連続測定が行われた. 連続観測前後には水質のプロファイル調査も行われている.

海底直上0.5m(B+0.5m)にDO計, 水温・塩分計を, 海底直上0.1m(B+0.1m)に濁度計, 流速計を, 海底直上4m(中層)に水温・塩分計をそれぞれ設置した. さらに海底下0.1m, 0.2m, 0.3mの深さに水温計を埋設した. 連続測定に用いたセンサーはアレック電子社製のコンパクトシリーズである.

(2) 底泥採取調査

海田湾底泥の性状を把握するために海田湾と異なる流況特性を有する呉湾奥海域での底泥との比較を行った. 図-1には呉湾奥(広島湾:HS09), 海田湾の地形図と底泥採取地点が示されている. 呉湾奥において2003～2006

- | | | |
|--------|------|---------------------------|
| 1 学生会員 | 修(工) | 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 |
| 2 正会員 | 博(工) | 広島大学准教授大学院工学研究科社会環境システム専攻 |
| 3 正会員 | | 港湾・海域環境研究所環境政策研究部 |
| 4 正会員 | | 国交省中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所 |

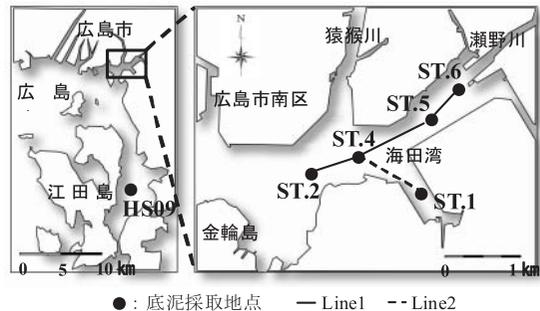


図-1 広島湾奥(海田湾)地形図と底泥採取地点

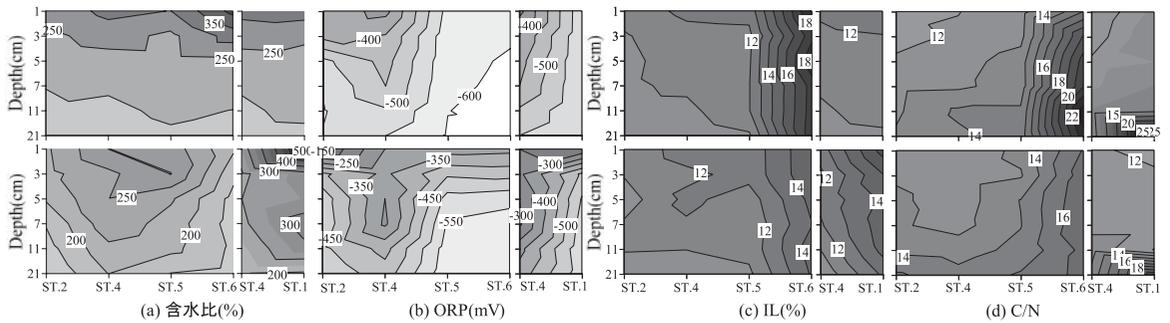


図-2 海田湾底泥の含水比および有機性状の分布（上段：2008年9月29日，下段：2008年12月19日）

年の夏～秋期に約1ヶ月毎，海田湾においては2008年に夏季～冬季にかけて約1ヶ月毎に柱状採泥機で不攪乱採取され，表層から約2cm毎に分割した後，含水比，ORP（酸化還元電位），IL（強熱減量値）およびPOC（懸濁態炭素），PON（懸濁態窒素）の含有量が分析された。

(3) 沈降物の捕集調査

ST.1において連続観測と同時に沈降泥の捕集調査を行った。10月期には海底面，12月期には海底面と海底面上より3mの地点にセジメントトラップを設置した。海底面での沈降物採取はセジメントトラップの開口部が海底面上5cmになるように埋設された。捕集された沈降泥のSS flux，IL，POC，PONが分析された。

3. 海底泥質調査と沈降物捕集調査結果

(1) 底泥の堆積状態

図-2に9月29日と12月19日に海田湾海底で採取された堆積泥の(a)含水比，(b)ORPおよび有機性状(c)IL，(d)C/N比の図-1中のLine1（湾口(ST.2)～奥部(ST.6)），Line2（湾央～ST.1）に沿う分布が示されている。湾全域の海底表層には200～350%程度の含水比状態で有機泥が堆積しており，湾口部と奥部では含水比，有機物性状の季節変動の状況が異なっている。12月に向かって湾央部では含水比が増加傾向にあるのに対し，湾口部と奥部では含水比の低下が顕著に現れている。湾口，奥部でのORPは全く逆の変化をしており，奥部で還元状態が強まり湾口では弱まっている。ILは湾奥に行くにしたがい増加する傾向にあり，9月29日にはST.6で最大18%程度である。湾奥部では12月にむかうにつれてILが低下するが，ST.1では夏季にILが12%程度であったのが冬季には約2%程度増加していることが確認された。海田湾全体でC/N=12～18程度の値を示し分解の進んだ有機物が堆積しており，湾奥にむかうにつれて増加する傾向を有している。ST.1では，他の地点とは逆の変化をしており，12月に含水比が増加し，C/N比は9月よりも低下していることから分解の進んでいない有機物が冬季に堆積していることがわかる。

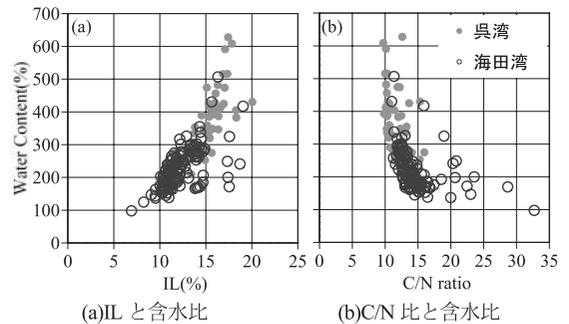


図-3 呉湾，海田湾堆積泥の有機物性状と含水比の関係

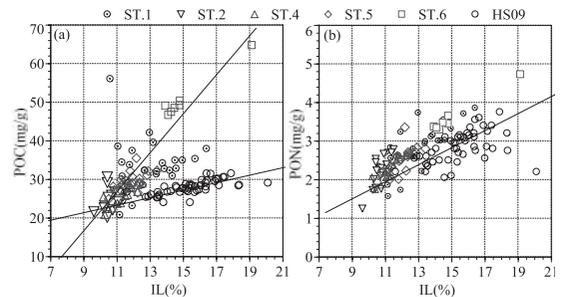
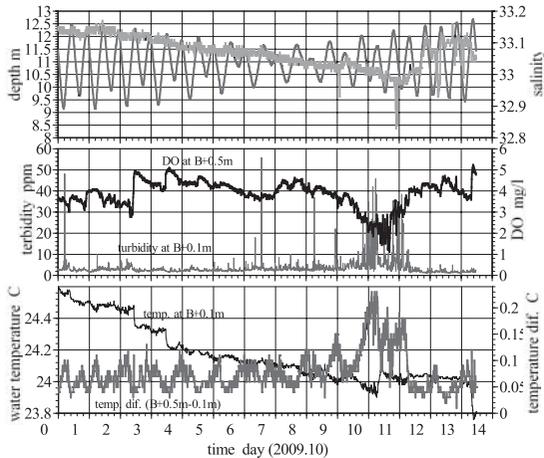


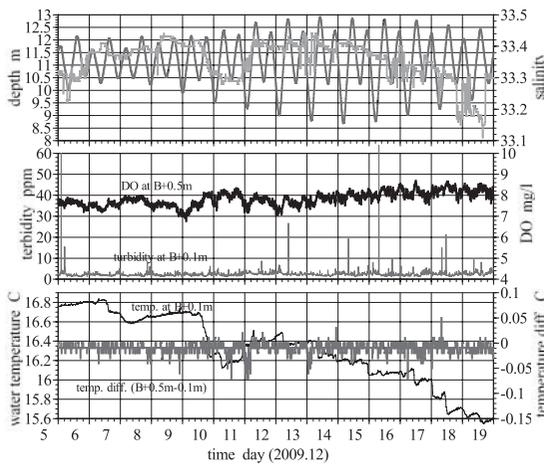
図-4 海田湾，呉湾堆積泥の有機物含有量とPOC，PONとの関係

(2) 海底堆積泥に含まれる有機物の性状

広島湾での有機泥の採取調査から海底堆積泥の有機物含有量が多く，有機物の分解度が低い（一次生産起源の有機物ではC/N比が小さい）場合に高含水状態が維持され易いことがわかっている（日比野ら，2008）。図-3に呉湾と海田湾で採取された堆積泥に含まれる有機性状（IL，C/N比）と含水比の関係，図-4に堆積泥の有機物含有量とPOC，PONとの関係を示した。図-3から海田湾堆積泥では呉湾堆積泥よりも含水比が100～200%程度小さく，呉湾で夏期に存在する浮泥層は海田湾では形成されていないこと，有機物を多く含むが含水比が高くない有機泥が海田湾に存在していることがわかる。図-4からILに対するPON含有量は海田湾，呉湾とも同程度であるのに対し，POC含有量は海田湾底泥では呉湾底泥の1.5～2倍である



(a)10月1日~14日 (10月期)



(b)12月6日~19日 (12月期)

図-5 潮位変動と海底直上(海底0.1m上と0.5m上)の濁度, DO, 塩分と水温, 水温差(海底0.5mと0.1mとの差)の経時変化 (2008年(a)10月1日~14日, (b)12月6日~19日)

ことがわかる。これらは呉湾底泥に比べて海田湾底泥には有機物含有量が2~4%程度小さく(図-3(a)), 分解の進んだ有機物が多く含まれている(図-3(b))ことが主な原因であるが, 海田湾での堆積泥を構成する有機泥の由来が一次生産起源ではないPOC含有量の高い有機物が多く存在していることも大きな要因であることが理解される。

PONに対してPOCを多く含む物質として植物由来でない油脂分が考えられる。採取した有機泥のヘキサノール抽出分析を行った結果, 海田湾呉奥海底に堆積した有機泥には1400mg/kg (C/N比16.07), 海底でセジメントトラップに捕捉された有機泥には500mg/kg (C/N比11.38), 呉湾海底堆積泥には300mg/kg (C/N比10.52)の油脂量が含有されていた。海田湾底泥には呉湾底泥の約5倍の油脂分が含まれていることから水質変動に伴う堆積有機泥の挙動が異なることが考えられる。また, 油脂

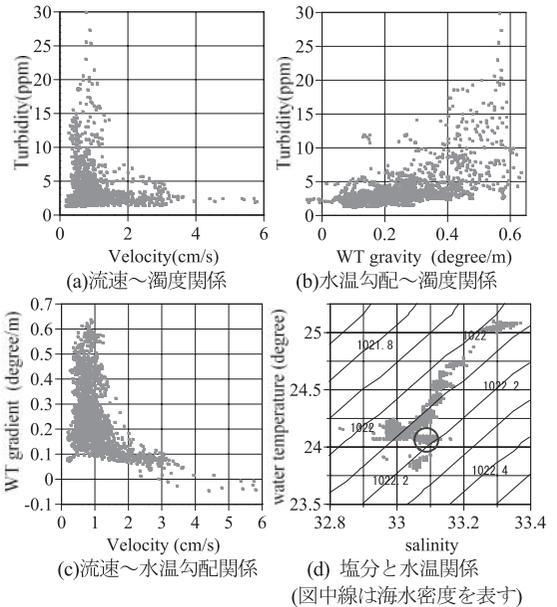


図-6 ST.1における海底10cm上の濁度, 水温勾配, 流速, 塩分の関係 (2008年9月29日~10月14日)

量はC/N比と正の相関があり, POC含有量の多い有機泥には, 例えば動物由来の油脂分等が多く含まれていることが推定される。

(3) 海底層での水温環境と濁度, DOの変動

図-5には2008年の(a)10月1日~14日と(b)12月6日~19日に測定された海底直上(海底+0.1mと0.5m)での濁度, DO, 塩分と水温の経時変化が潮位変動に併せて示されている。図(a), (b)とも下図には海底上0.1mの水温変化とともに0.5mと0.1mでの水温差(正值は海底+0.5mで水温差が高い)が示されている。

広島湾奥海域では10月には躍層が消滅し貧酸素状態が解消されており, 第六管区海上保安部による2008年10月の観測結果 (<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN6/>) では, HS09の海底上0.5m上でのDOは6.5mg/l程度であった。海田湾ではDOが5mg/l以下で貧酸素状態が継続しており, 海田湾と広島湾では水温躍層や貧酸素水塊の形成メカニズムが異なっていることが予想される。12月になると海田湾での貧酸素状態が解消され, 濁度の上昇も起こらなくなっている。12月期の水温低下は10月期の2倍程度あり, 10月期には海底直上0.1mで水温が低かったのに対し, 12月期では海底上0.5mの水温との逆転が起こり0.1mで水温が高いが, 水温勾配は0.1°C/m以下になっている。

10月期と12月期では海底直上での流速が小さいまま変化がないにも関わらず水温分布および濁度, DOの変動幅が異なっていることから, 濁度の上昇やこれに伴うDOの低下には海底直上での水温勾配や水塊密度が影響

していると考えられる。

10月期には海底直上で大きな水温差が生じており、濁度上昇期には $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以上の水温勾配 (B+0.5mで高水温) が形成されている。さらに、潮汐の干満によっても水温勾配が形成され、干潮時にも $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 程度の勾配が生じている。ただし、 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ の勾配ではDOの低下は起こっていないことがわかる。 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ より大きい水温勾配の形成と濁度の上昇、それに引き続いてDOの低下があり、海田湾での貧酸素化を起す外力として海底での水温変動が重要な割合を果たしていることが推定される。

(4) 海底直上での水温勾配の増大と底層での濁度上昇

図-6にSt.1の海底上10cmにおいて9月29日～10月14日に測定された(a)流速と濁度、(b)水温勾配と濁度、(c)流速と水温勾配、(d)塩分と水温の関係を示した。図-6(d)中の線は、塩分、水温から算出された海水密度を表している。図に示した各測定値は10分毎の測定値を70分間で移動平均したものである。流速と濁度に正の相関はない(図-6(a))が、水温勾配と濁度上昇には正の相関がみられる(図-6(b))。このことから流速の増大にともなった海底泥の巻き上げが起きているわけではなく、濁度の上昇は水温勾配の形成時に起きていることが推定できる。水温勾配は $1.5\text{cm}/\text{s}$ 以下の流速で(図-6(c))、かつ塩分の低下時に形成されており(図-5(a))、速度の遅い現象によって運ばれた低塩分・低水温の水塊が濁度の上昇を起していることが考えられる。

10月期の塩分～水温関係では低塩分の水塊が低水温であることから、この水塊が高い水温場に密度貫入した場合には、周辺から熱の伝達によって浮力が生じることになる。図-6(d)から図-5(a)に示した10日頃からの水温低下($24.1\rightarrow 23.9\text{ }^{\circ}\text{C}$)時には 33.05psu 以上の海水中に 33.05psu 以下の $1022.2\text{kg}/\text{m}^3$ 程度の水塊(図-6(d)の○の範囲)が貫入していること、この水塊の貫入によって海底直上に $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ の水温勾配が形成されていく様子が図-5(a)からわかる。

第六管区海上保安本部による2008年7月～10月の観測結果では海田湾に向かって貧酸素状態が強くなっており、本研究で10月14日に行ったプロファイル調査においても海田湾全域で $6\text{mg}/\text{l}$ 以下の貧酸素状態にあることが観測されている。特に湾奥部(瀬野川河口)においては水深4mの底層でのDOは $4\text{mg}/\text{l}$ 以下であった(西田ら, 2009)。図-5に示した連続測定結果においても10月期では海底層のDOは $2\sim 5\text{mg}/\text{l}$ の貧酸素状態で変動している。

これらの結果から、海田湾では海底層のみで貧酸素水塊が形成されているのではなく、全層で貧酸素状態が維持される機構があることが予想される。ただし、10月10日～11日の濁度の上昇に伴うDOの低下は水温勾配の形成によって浮遊した濁質が海底付近に滞留することでDO

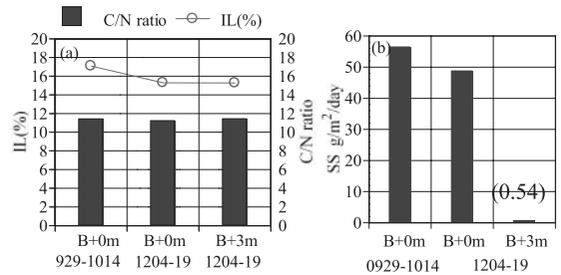


図-7 St.1で捕捉された沈降泥性状 (929-1014; 10月期, 1204-19; 12月期の観測結果)

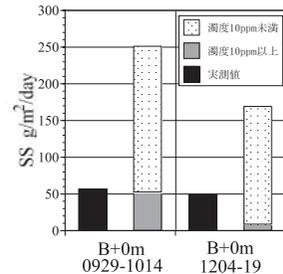


図-8 海底面に設置された濁度計の計測値から推算された沈降泥量と海底で捕捉された沈降泥量の比較

が低下しており、海底からの有機泥の浮遊がDOの低下の主な原因であると考えられる。

4. 海田湾における貧酸素水塊の形成機構

(1) 沈降・堆積する有機泥の特性

図-7に2008年の10月期と12月期にSt.1の海底 (B+0m) と中層 (B+3m) でセジメントトラップに捕捉された沈降泥の有機性状とSS fluxが示されている。なお、同時に採取された堆積泥のIL, C/N比は図-2に示されている。図から以下の①～④のことがわかる。①海底に沈降する有機泥のC/N比が11程度であり、堆積泥と同程度の分解度の有機物が含まれている、②有機物含有量は同時に採取した堆積泥のIL (12～13%) に比較して大きな値 (15～17%) を示している、③堆積泥のILは10月期から12月期の間での変化は小さいのに対し、沈降泥では10月期に比較して12月期に3%程度低い、④12月期の海底と海底上3mで捕捉された有機泥では沈降量は約100倍海底が多いが、ILとC/N比に相違がない。

これらのことから、海田湾海底では有機泥が比較的長期にわたり浮遊可能な状態、または再浮遊可能な状態にあること、有効密度 (有機泥と海水の密度差) の小さい移流可能な有機泥の多くは海底層に存在しており、海水の密度の変化を受けて運動していることが予想される。底層にある有機泥の有効密度が小さい場合に、暖かくて低塩分の海水の海底への貫入等によって海水密度の状態変化が起これば、浮遊有機泥の沈降、沈降泥の浮遊が誘発されることが考えられる。

一般的に有機物含有量が多く、有機物が未分解である程、有機泥の密度は小さくなる。また、沈降泥のILが堆積泥よりも大きいことから、海底層では有機物含有量が多く、浮遊し易い(有効密度の低い)有機泥が移流していることが推定できる。12月期には海水密度が高く水温勾配が小さいこと、および海底捕捉泥の有機物含有量が少なくなっているため、10月期よりも有効密度が大きくなり、海底に沈降した有機泥の浮遊能力が小さくなると考えられる。

(2) 海底直上での有機泥の浮遊特性

海底層において有機泥は海底面に沈降後、圧密堆積せず、浮遊可能な状態を維持していることが予想される。

図-8には海底上0.1mで測定された濁度の積算値をSS fluxに換算した有機泥量と海底面で捕捉された有機泥量の関係を示している。濁度からSSへの換算はセンサーが計測する濁度とSS濃度の関係式を用いた。この関係式は濁度0~100(ppm)、SS濃度0~0.2(g/L)の範囲で相関係数が0.99の関係にあった。SSに換算された有機泥量は10 ppm以上のSSとそれ以下のSSにわけて値を示している。SS換算された有機泥の全量はセジメントトラップに捕捉された有機泥量の約5倍の値を示している。濁度10ppm以上の値を用いてSS換算した有機泥量は実際に捕捉された有機泥量に比べて10月期では同程度、12月期では1/5程度の値を示している。セジメントトラップに捕捉される有機泥は少なくとも海底上5cmの高さまで浮遊し、沈降したものである。海底上10cmで測定された濁度はセンサー上12~15cm程度に存在する濁質を測定しており、センサーが捕えた濁質が全て沈降しているわけではないことがわかる。

補足されたSSが10月期と12月期で変化が小さいにも関わらず、濁度からSS換算されたfluxが10月期と12月期で変化が大きいのは、12月期に比べて海水密度が小さい10月期に、川起源の低水温、低塩分の水塊が海底層に貫入することで底泥に浮力が発生し、海底付近に存在する懸濁粒子が浮遊し易くなるのに対し、12月期には河川水量の低下と海水密度の増大に伴い、海底層が安定し巻き上がりが生じ難いことが考えられる。10月期は12月期に比較して、懸濁粒子の浮遊高さが高く、10ppmを越える濁度の上昇を濁度センサーに捉えられていることが推定できる。また、12月期に実測されたSSが10ppmを越える濁度の換算SSの5倍程度であること、12月期の密度が10月期の密度よりも大きいことから、海底面10cm上

の位置より下に高濁度層が形成されていること、10ppmよりも小さい濁度を示す懸濁粒子も沈降していることが考えられる。

5. おわりに

本論文では、海田湾海底での水温、塩分、濁度、DOの連続測定結果と捕捉された沈降泥、不攪乱採取された堆積泥の含水比状態と有機物の性状を総合的に評価することにより以下に示す結論を得た。

- 1) 海田湾に堆積する有機泥は、200~350%程度の含水比状態で堆積しており、夏季に呉湾で確認された高含水状態の浮泥層は形成されていない。堆積泥には、呉湾と比較して分解の進んだ有機物が含まれていること、有機物含有量が呉湾底泥より2~4%程度小さいことが含水比状態が低い要因であることが予想される。
- 2) 海底に低水温、低塩分の水塊が貫入し水温勾配が形成されることで濁度が上昇し、それに引き続きDOが低下することから、海田湾での貧酸素化を起こす条件として海底での水温分布が重要であることが推定される。
- 3) 海中で浮遊・沈降する有機泥と海底で移流・沈降する有機泥の有機性状が同じであること、堆積泥に比べてIL、C/N比の大きい有機泥が沈降していることから、海中~海底直上に比較的長期間にわたり有機泥が、浮遊可能な状態、または再浮遊可能な状態を維持していることが予想される。
- 4) 海底上3mを浮遊している有機泥のSS fluxが海底で移流・沈降する有機泥のSS fluxよりも100倍程度小さいことから、移流可能な有機泥の多くは海底層に存在しており、海水密度の変化を受けて運動していることが予想される。

参考文献

- 西田芳浩・川内清光・山本裕規・首藤 啓・日比野忠史 (2009) : 広島湾における効率的な底質改善技術の効果の検証 - 海田湾をパイロット海域とした現地調査および室内実験からの検討 -, 海洋開発論文集, Vol25, pp.407-412.
- 日比野忠史・永尾謙太郎・松永康司 (2008) : 有機泥の分解を考慮した沈降と堆積過程のモデル化, 土木学会論文集B, Vol64, No.3, pp.202-213.
- 日比野忠史・松本英雄 (2006) : 広島湾に分布する浮泥の特性と季節的な性状変化, 土木学会論文集, II-Vol.62, No.4, pp 348-359.
- 横田佳祐・橋本英資・長尾正之・高杉由夫 (2006) : 海田湾における貧酸素水塊の変動要因, 海と空, 82, pp.13-21.