

### Ⅲ

## 有明海・諫早湾の底層環境の変化と それが底棲生物に与える影響

有明海・諫早湾底層環境調査研究グループ

## 諫早湾及び諫早干拓調整池の音波探査

松岡數充\*

### The acoustic detection of Isahaya Bay and Isahaya reclaimed regulating reservoir

Kazumi Matsuoka\*

#### 要 約

2002年の2月、7月と2003年6月に、それぞれ諫早湾干拓調整池と有明海の北西部に位置する諫早湾全域を対象とした海底表層部の音波探査をおこなった。探査測線は締め切り堤防に平行に調整池で2測線 (Line T1, T2)、諫早湾で北西～南東方向の6測線 (Line 1～6)、潮受け堤防に直交する南西～北東方向の3測線 (Line 7～9)、及び竹崎沖を南下する2側線 (Line10, 11) の合計13測線である。計測機器には、24kHzと200kHzの異なる2種類の音波を送受信することが可能な(株)カイジョー製のC-85型音響底質探査装置を用いた。音波探査のみでは、海底の堆積物の様子を十分に把握することは出来ないため、エクマン・バージ式グラブ採泥器や改良型TFOコーラーを使って、200kHzの反射強度から推定される堆積物の性状と実際の堆積物との比較を試みた。24kHzと200kHzの音波では海底面からの反射深度に差が生じるため、この差を浮泥層厚とした。その結果、浮泥層は調整池では諫早湾に比べて厚く堆積しており、また潮受け堤防に平行な北西～南東方向の測線 (Line 1～6) では、堤防側ほど浮泥層が厚くなる傾向がみられた。諫早湾の北 (多良岳側) と南側 (島原半島側) では、顕著な変化はなかったが、これと直交する測線 (堤防～湾口にかけて) では浮泥層は堤防側で厚くなる傾向があった。諫早湾南部海域では、24kHz反射がほとんどなくなる穴のような構造が認められ、地下水の湧出が推定された。200kHzの反射像では海底表面からの反射強度に明確な違いがみられたので、海底から採取した堆積物と比較したところ、この違いは海底表面を構成する堆積物の性状 (粒度組成) との対応がみられた。泥分を多く含んだ堆積物は湾北東部の竹崎付近から、南西部の締め切り堤防の南部排水門付近にかけて分布し、砂から礫質堆積物は湾両岸と東南部の湾口域に分布していることが明らかになった。

#### はじめに

諫早湾では潮受け堤防工事の進行と軌を一にするかのように大規模な鞭毛藻赤潮が頻発し、またアサリやタイラギなどの底棲生物資源の著しい減少が報告された (松岡 2003, 堤ほか 2003, 菊池 2002)。このような現象によって諫早湾を含む有明海の生態系に何らかの変化が生じていることは明らかである。海水の富栄養化や低酸素水塊の出現などが直接の要

因と考えられてはいるものの未だその因果関係が十分に解明されたとは言い難い。諫早湾では潮受け堤防工事に伴っていわゆる浮泥層の厚さが増加したとの報告もあり (自然保護協会 2001)、それが諫早湾域で発生している底棲生物資源の極端な減少の要因の一つとも考えられている。本調査研究では異なる2種類の超音波 (24kHzと200kHz) を用いて浮泥層の分布状況を調査するとともに、200kHzの音波反射状況から底質の粒度組成を推定した。

好気性底棲生物の生息環境は堆積物と海水の境界

\* 長崎大学環東シナ海海洋環境資源研究センター

\* Institute for East China Sea Research, Nagasaki University

部、いわゆる海底面付近であるが、その環境を実際に測定するのはかなりの困難を伴う。底棲生態学や海洋学、海洋地質学などの分野で一般的に海底面という表現がなされているが、海水と海底を形成する堆積物は連続的に移り変わっていく。従って、海底面と表現するには海水と堆積物の連続する部分の密度値で示すことになる。これは、便宜的に堆積物のある物性値（密度）を用いて海底面を定めることである。当然のことながら海底面は定めた密度によって海面からの深度が異なってくる。その一方で、異なった密度の差は特定の物性を備えた堆積物であると言うことができ、それを利用することによって特定の物性を持った堆積物の厚さ等を測定することができる。

本論ではこのような観点から、諫早湾において底棲生物が生息する領域、すなわち浮泥層の厚さを音波探査によって明らかにする。このような方法で、諫早湾に現在いかなる堆積物が分布しているのかを明らかにすることは、海底堆積環境のみならず海水環境を理解する上でも極めて重要な資料の一つとなる。

音響底質探査（音波探査）による浮泥層の層厚と堆積物の粒度組成との関係

音響底質探査では使用する音波の周波数と堆積物の見かけ密度との関係を把握することが重要である。水産工学研究所・(株)カイジョー(1984)によると400kHzの超音波では堆積物の見かけ密度1.10g/cm<sup>3</sup>のところ、3kHzでは見かけ密度1.39g/cm<sup>3</sup>で反射される。現在の音波探査では3kHzの反射面以下を原地盤と規定している(図1)。これが海洋地質学でいうところのいわゆる海底面に当たる。しかし、この面は一般的な好気性底棲生物生息深度以深であり、好気性底棲生物の生息環境を推定する海底面と

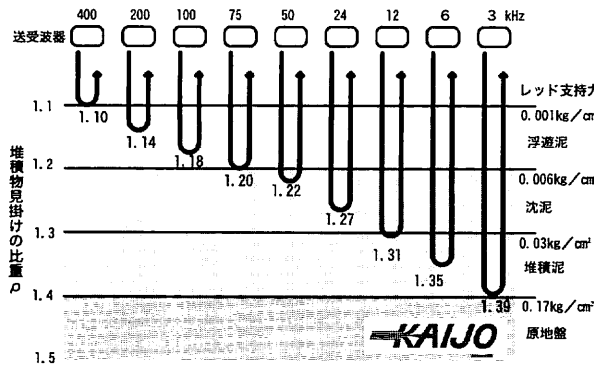


図1 堆積物の見かけ密度と周波数の関係  
水産工学研究所・(株)カイジョー(1984)による

するには不適切である。また、いわゆる浮泥層は見かけ密度が1.39g/cm<sup>3</sup>よりも小さいため3kHzの超音波を用いてその分布を明らかにすることは不可能である。本研究で用いた音響底質探査装置(カイジョー製C-85型)には200kHzと24kHzの超音波を送受信することが可能な機器が装着されている。200kHzは1.14g/cm<sup>3</sup>で、24kHzは1.27g/cm<sup>3</sup>で反射することが明らかにされている(水産工学研究所・(株)カイジョー, 1984)ことから、本論ではこの200kHzと24kHzからの海底面反射深度の差を浮泥層と定義する。

海底堆積物含水率の垂直方向への変化

前述のように堆積物の見かけの比重と周波数との関係は既に示されているので、諫早湾から採取した海底泥を用いて200kHzの超音波が反射する見かけ密度1.14g/cm<sup>3</sup>と24kHzが反射する見かけ密度1.27g/cm<sup>3</sup>の泥質試料を研究室で作成し、その時の各試料の含水率を測定した。その結果、見かけ密度1.14g/cm<sup>3</sup>試料の含水率は約75%、見かけ密度1.27g/cm<sup>3</sup>試料の含水率は約60%であった。実際に現場での泥質堆積物の含水率を知るために、諫早湾

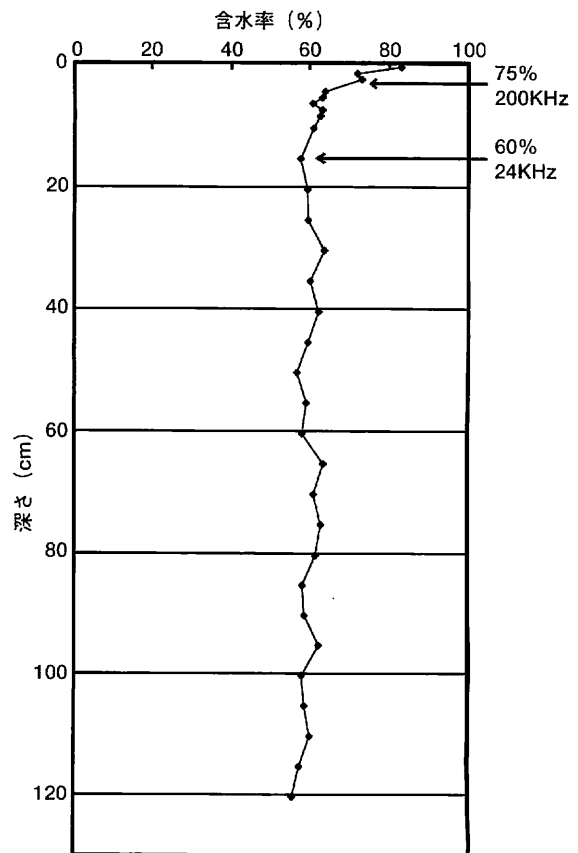


図2 海底堆積物含水率の垂直方向への変化

中央部で長さ120cmの不攪乱柱状試料を採取した。それを1cm間隔に切り分け、上部10cmまでは1cmごとに、それより下位の試料については5cmごとに含水率を測定した。表層部1cmの含水率は80%以上であったが、3～4cm付近で75%に、20cm付近で60%までに減少し、それ以深はほぼ一定が徐々に減少した(図2)。この結果は後述する浮泥層の厚さを明らかにするための観測結果と総合的であり、諫早湾海底では浮泥層の下限が含水率60%程度の半固結堆積物に相当するといえる。

堆積物と200kHz反射波画像との関係

音波探査によって堆積物の性状を判断するには反射波と堆積物の性状との対応を明らかにしておかなければならない。200kHzの反射波は反射強度の違い(dB)が画面上では色の違いとして表現される。一般に強い反射は赤色で、弱い反射は緑色で表わされる。反射強度と堆積物の性状、特に粒度組成との対応を確認するために、諫早湾で二次反射を伴う赤色反射域と緑色反射域からエクマンバジ採泥器や改良型TFOコアラを用いて堆積物を採取し、粒度分析を行った。その結果、赤色反射域では砂質堆積物で、緑色反射域では泥質堆積物で、中間の黄色反射域では砂混じり泥質堆積物で構成されていることが確認できた。

観測方法

・使用機器の概要(図3)

C-85型音響底質探査装置は、C-85型制御演算装置

本体および200kHz用のT-105R型送受波器と24kHz用のT-51C型送受波器の2つの送受波器、位置決定のためのDGPS受信機を備えている。演算装置とWindowsノート型パソコンをEthernetケーブルを通して接続し、観測結果をパソコン内に収録した。結果はノート型パソコンにインストールしたカイジョー製の音響底質探査装置計測再生ソフト(Ver.1.08)を用いて、観測と同時に音波探査画像として見ることができるとともに、さらに観測データはパソコンのハードディスクに保存され、観測後にも再生ソフトウェアによって再生が可能となっている。

・調査海域と探査側線

諫早湾全域及び調整池の浮泥層とその下位の堆積物の性状を明らかにすることを目的とし、2002年2月19日に調整池で、7月18日と7月29日、および2003年6月23日は諫早湾で調査をおこなった。潮受け堤防構築以前の諫早湾は幅約7km、奥行き約16kmであったが、1997年4月に諫早湾の潮受け堤防が設置されたことにより、湾全域の約1/3に相当する干潟とそれに続く浅海域が失われた。本調査では潮受け堤防で閉め切られた内側を調整池、堤防の外側を諫早湾とし、今回の調査は調整池と、諫早湾域を調査対象とした。

潮受け堤防に平行した調整池の2測線(Line T1, T2, T3)と諫早湾で北西～南東方向の6測線(Line 1～6;2002年7月18日)と、潮受け堤防～湾口にかけての堤防に直行した北東～南西方向の3測線(Line 7～9;2002年7月29日)、および竹崎沖から東南方向への2測線(Line10～11;2003年6月23日)

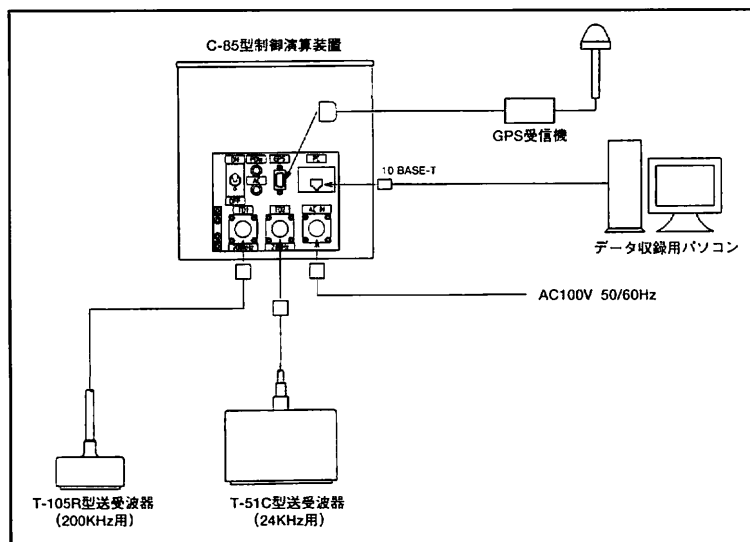


図3 装置概要(株)カイジョー資料

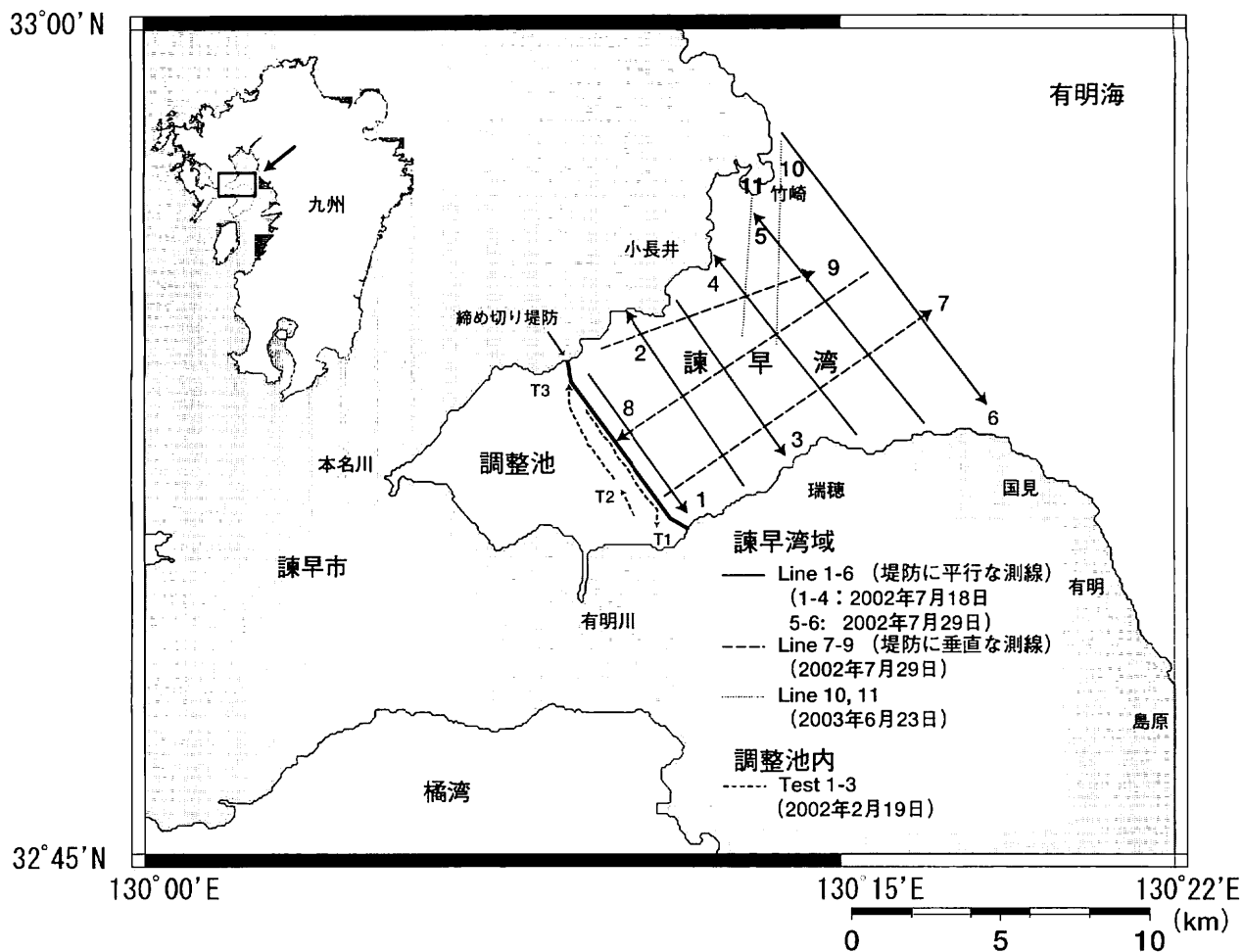


図4 位置図 (測線図を含む)

の計13測線で音波探査をおこなった(図4)。ただし、調整池では水深の都合上、潮受け堤防の西方およそ300m以内での調査であった。Line 9は締め切り堤防の北部排水門近くの金崎から諫早湾干拓事務所が設置しているS9観測塔までであり、湾口部にまで達していない。また、Line10~11の調査途中で激しい降雨に遭遇したので、その時点で調査を打ち切った。いずれの測線も直線の測線となるように設定し、GPSで位置を確認しつつ、船速10km以下で探査した。ただし、測線と測線間の移動時には計測していない。

#### データ解析法

現場でパソコン内に保存したデータを研究室内ですべて印刷してから解析作業を開始した。1枚の印刷紙には4画面が印刷され、左上に24kHz反射像、右上に200kHz反射像、左下に24kHz変化率、右下

に200kHz変化率が表現されている(口絵-IIページ、図5)。印刷画面に現れた200kHz、24kHz音波の海底面反射深度を定規で読み取り、200kHzと24kHzの反射深度差を浮泥の層厚とした。作業手順としては、印刷紙面の観測範囲をほぼ7等分し、それぞれの地点で200kHzと24kHzの反射深度の違いを求めた(図6-1, 2)。しかし、地点間のばらつきが大きいため隣接する3地点のデータを平均化して各測線のグラフを作成した(図7-1, 2, 3, 4)。200kHz反射像には反射強度の違い—堆積物の粒度組成—が表現されている。反射強度の強い順、すなわち反射強度が大きい砂質堆積物は赤で、逆に反射強度の小さい泥質堆積物は緑で表現されるようになっている。この点に着目し、200kHz反射像の印刷画面で、色調を4段階に区分した。緑色、黄色、赤色、さらに二次反射を伴った赤色である。Lineごとに色調を判別し、それを総合して音波探査結果から推定される堆積物の粒度組成の水平分布図を作成した。

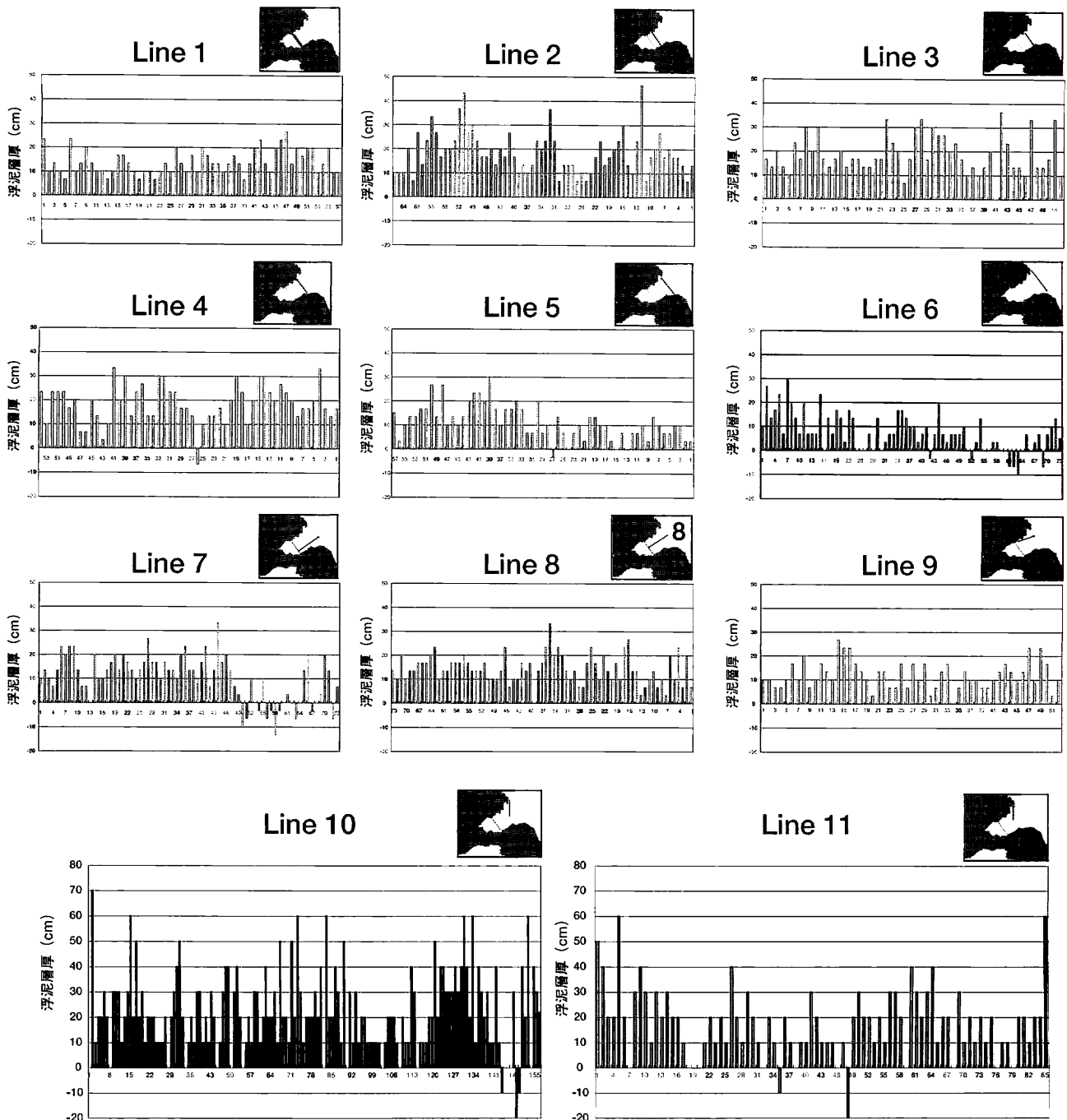


図6-1 各測線ごとの浮泥層厚（諫早湾）（棒グラフ）

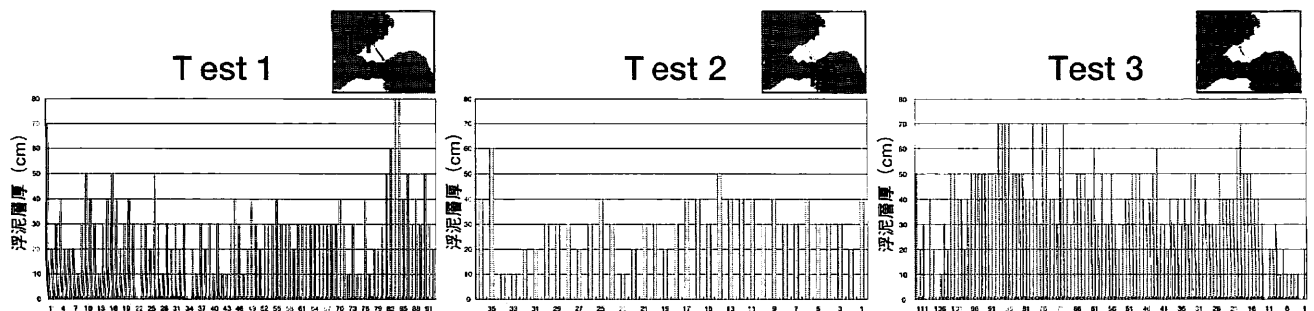


図6-2 各測線ごとの浮泥層厚（調整池）（棒グラフ）

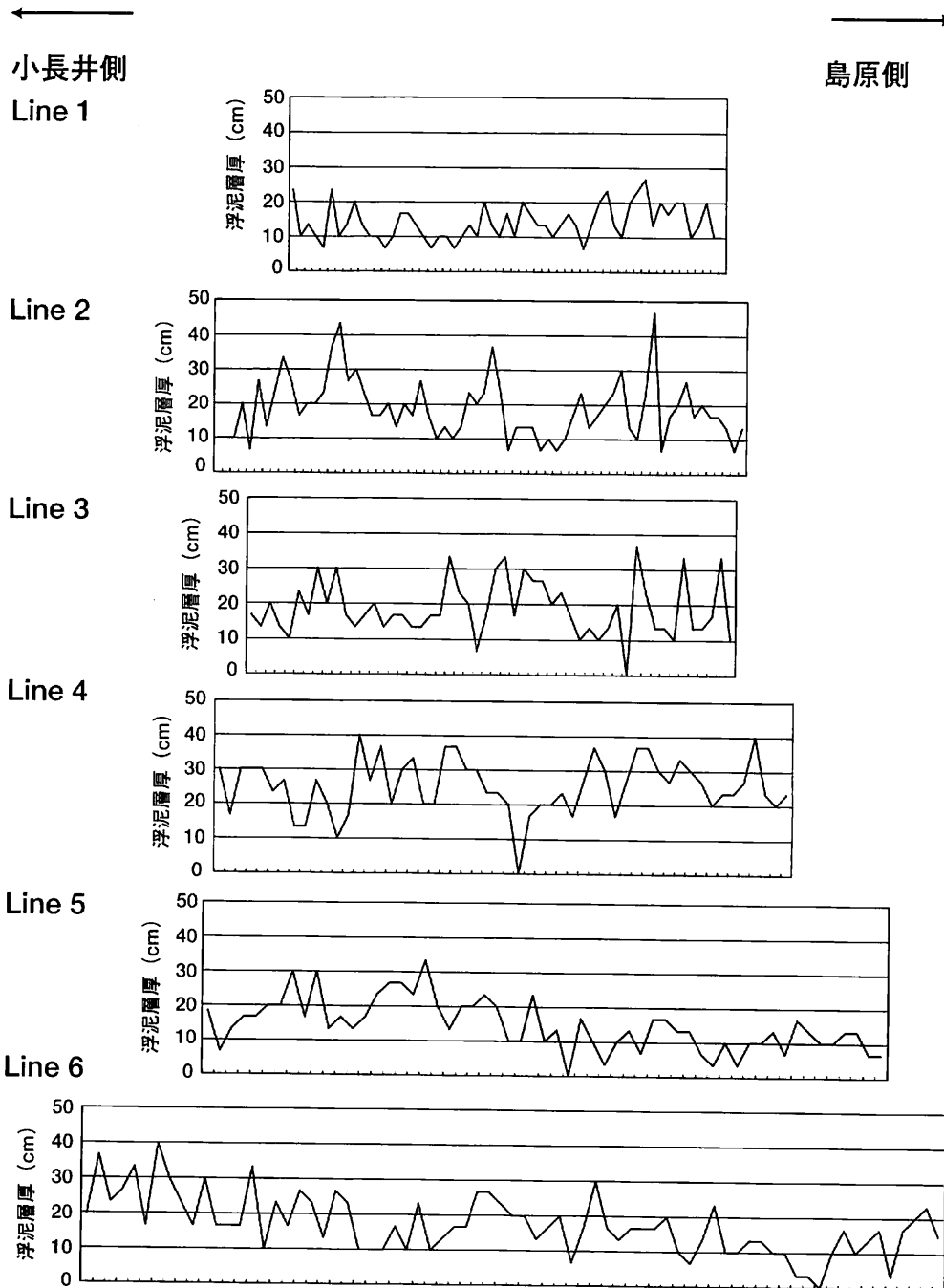


図7-1 各測線ごとの3点移動平均浮泥層厚 (Line 1 ~ 6)

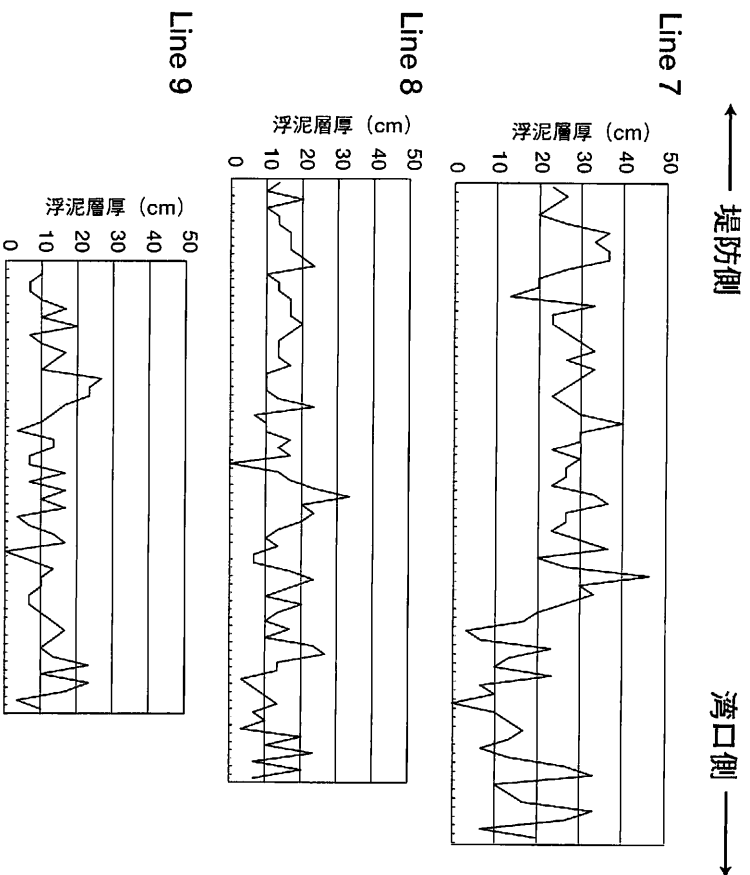


図7-2 各測線ごとの3点移動平均浮泥層厚 (Line7~9)

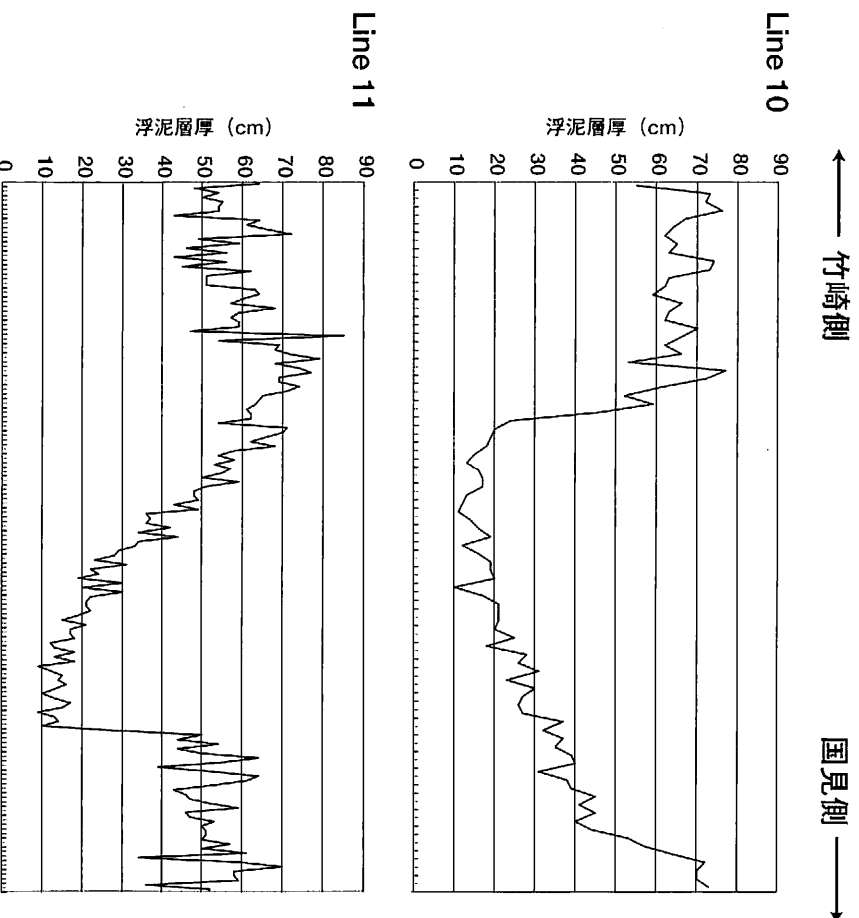


図7-3 各測線ごとの3点移動平均浮泥層厚 (Line10, 11)



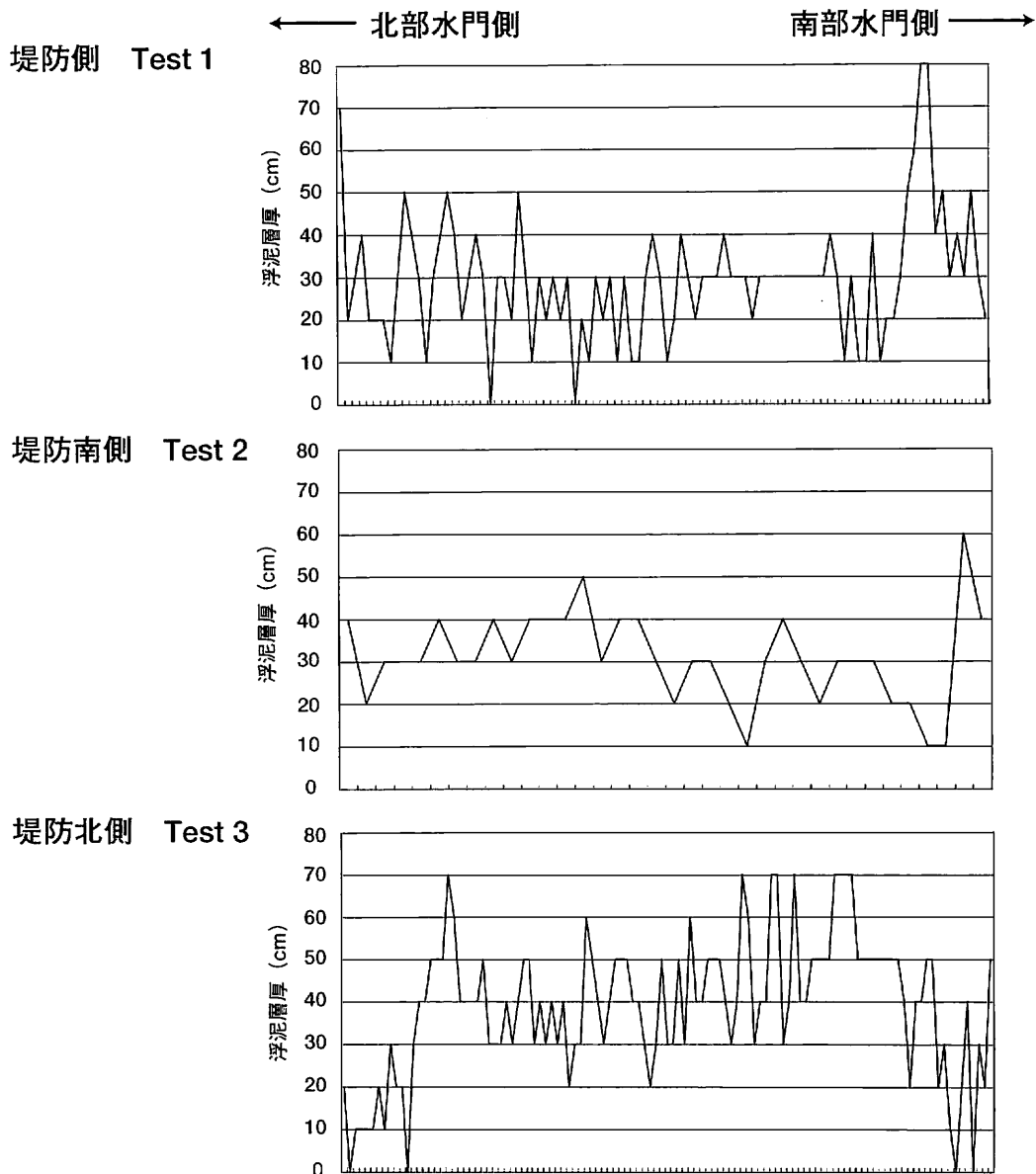


図7-4 調整地内各測線ごとの3点移動平均浮泥層厚 (Test 1～3)

## 解析結果

### 1. 浮泥層厚

Line T1：潮受け堤防に最も近い測線で、浮泥層の平均層厚は約29cm、南部水門近傍で最も厚くなり、80cmに達する。

Line T2、T3：Line T1の西方約200mの測線で、浮泥層平均層厚は約35cm、中央部では70cm程度である。北部排水門近くでは10cm以下になる。

Line 1～6は潮受け堤防にほぼ平行な北西～南東測線である。

Line 1：浮泥層の平均層厚は約14cmで、南北間での層厚の違いはあまり見られない。

Line 2：浮泥層の平均層厚は約19cmであるが変化に

富む。北部の小長井沖で厚く、40cmを越えるところもあるが、中央部では10cmと薄くなり、また南部の瑞穂町沖で厚く40cmを越えるところもある。

Line 3：浮泥層の平均層厚は約19cmであるが、Line 2と比較すると層厚変化が小さくなる。

Line 4：浮泥層の平均層厚が約19cmとなり、北西～南東測線中でもっとも厚い。小長井沖と瑞穂沖でやや厚いが、中央部では10cm前後と薄くなる。

Line 5：浮泥層の平均層厚は約11cmになるが、北部の竹崎沖から中央部にかけては16cmで、厚いのに対して中央部から神代沖までは数cmと薄くなる。

Line 6：諫早湾口に位置し、浮泥層の平均層厚は約8cmと測線中もっとも薄くなるが、北部海域で12cmと厚く、南部では4cm程度になる。

Line 7～9は潮受け堤防に直交する北東～南西の

測線である。

Line 7：もっとも島原側の南西～北東方向（潮受け堤防側～湾口側）での違いが顕著である。すなわち潮受け堤防寄りでは浮泥層の平均層厚が約10cmと厚く、神代沖から湾口にかけては約8cmと薄くなっている。

Line 8：湾中央部では浮泥層の平均層厚が約14cmで、潮受け堤防側から中央部にかけては浮泥層の厚さの変化は10cm程度で比較的小さいが、中央部から湾口にかけては浮泥層厚が最大で30cmにもなるなど層厚の変化が激しい。

Line 9：最も北に位置する側線での浮泥層の平均層厚は約12cmであり、最大で28cmにも及ぶとともに、小長井沖でやや薄くなる傾向が認められる。

Line10：夜灯鼻沖から南下する測線で、測線での浮泥層の平均層厚は約18cmであるが、夜灯鼻沖では60cmに達するところもある。

Line11：肥前大浦沖からLine 10に並行して南下する測線で、浮泥層の平均層厚はおよそ22cmになる。最も厚いところでは肥前大浦沖で70～60cmに及ぶところもある。

以上の結果を概括すると（表1）、24kHzと200kHz反射面深度の差から求めた浮泥層は調整池で最も厚く、平均すると30～40cmであり、厚いところでは80cmを超える。北部排水門付近では10cm以下になる。諫早湾の浮泥層厚は、有明海北西湾奥南部に位置する肥前大浦沖で最も厚く、70cmに達するところがあり、ついで潮受け堤防に近い海域と湾北部の小長井沖から夜灯鼻沖で20～30cmと厚く、湾東南部の瑞穂町沖から多比良沖で10cm以下と薄くなる傾向がある。

表1 平均浮泥層厚

調整池内	平均厚 (cm)		
Test 1	29.46		
Test 2	30.83		
Test 3	39.03		
諫早湾	平均厚 (cm)		平均厚 (cm)
Line 1	14.08	Line 7	10.37
Line 2	18.68	Line 8	14.34
Line 3	18.71	Line 9	11.99
Line 4	18.64	Line 10	17.65
Line 5	11.35	Line 11	22.06
Line 6	7.66		

## 2. 200kHzの反射強度の違いからみた堆積物の水平分布

200kHz反射像画面では緑色、黄色、赤色、さらに二次反射を伴った赤色が表れる。これは色調の違いによって堆積物からの反射強度の強弱が表現されており、堆積物の粒度組成（泥、砂、礫など）を反映している。すなわち含水率の高い軟弱な泥質堆積物は緑色から黄色で、含水率が低い砂質から礫質堆積物は赤色で表現されている。以上の区分に基づき各測線ごとに堆積物の性状を検討した（口絵-Ⅲページ、図8）。

LineT1, T2, T3：表層部は緑色の反射波であるが、中央部では2次反射を伴う黄色反射波がある。南部の吾妻沖でその傾向が強い。これは砂質堆積物上に固結度が極めて低い浮泥層が発達していることを反映している。また、北部排水門付近では海底面の凹凸が激しく、また黄色反射波が見られ、砂質堆積物が露出し、浮泥層が全く堆積していない状況を反映している。

Line 1：この側線の大部分は緑色から黄色反射波が卓越し、泥質堆積物が分布しているが、中央部からやや吾妻町よりで二次反射を伴う赤色反射波が検出される。ここでは砂質堆積物が分布している。また、小規模な赤色反射波の砂質堆積物が金崎沖で認められる。

Line 2：北岸の長里沖と南岸の瑞穂町沖では二次反射を伴う赤色反射波であるが、その他は緑色の部分も交えた黄色反射波が卓越する。南北両岸では砂質堆積物が分布しているが、中央部は泥質堆積物が覆っている。

Line 3：小長井沖では二次反射を伴った赤色反射波であるが、徐々に黄色から緑色反射波に移行し、その状況が南岸まで続く。小長井沖では砂質堆積物が、それ以外のところでは泥質堆積物が広く分布している。

Line 4：南岸の西郷沖から測線の1/3までと北岸の井崎沖は二次反射を伴った赤色、それ以外の部分は黄色から緑色反射波である。中央部には泥質堆積物が、両岸には砂質堆積物が分布している。なお、北緯32°53.192′、東経130°14.866′付近には24kHz反射画像では堆積物の成層構造と直交するような地下深所からの湧き上がり、その上位の海水密度が垂直方向に変化している様子を捉えた探査記録が得られている。これは堆積物中に形成された単なる孔ではなく、そこを通して液体が湧出している状況を捉えたもの、すなわちここでは地下水が湧出していると考えられる（口絵-Ⅲページ、図9）。

Line 5：南岸の神代沖から北方に向けて測線の2/3

ほどが強い二次反射を伴う赤色で、粗粒な砂質堆積物が分布している。残りが緑色から黄色の反射波で、泥質堆積物。さらに夜灯鼻沖で二次反射を伴う赤色で、砂質堆積物が分布する。この測線でも北緯 $32^{\circ}54.355'$ 、東経 $130^{\circ}15.219'$ には地下水の湧出を示すと見られる構造が認められた。また、北緯 $32^{\circ}54.355'$ 、東経 $130^{\circ}15.219'$ から北緯 $32^{\circ}54.631'$ 、東経 $130^{\circ}14.890'$ にかけて海底面が波打っている。これは潮受け堤防工事の際に採取された砂の採取跡である。

Line 6：この測線は諫早湾湾口部に位置し、肥前大浦沖から多比良沖を通る。肥前大浦沖は緑色、北緯 $32^{\circ}57.814'$ 、東経 $130^{\circ}14.067'$ で一旦弱い二次反射を伴う黄色の反射波になったあと、北緯 $32^{\circ}56.449'$ 、東経 $130^{\circ}15.381'$ までは緑色から黄色の反射波である。大局的にはこの部分までは泥質堆積物が優占して分布する。それ以南では二次反射を伴う赤色反射波が卓越し、粗粒砂質堆積物が存在する。北緯 $32^{\circ}54.409'$ 、東経 $130^{\circ}16.980'$ 付近では海底面が不規則に波打っており、速い低層流の存在が考えられる。

Line 7：島原半島よりの北東～南西方向の測線である。潮受け堤防に近いところは緑色反射波の泥質堆積物が、そこより北緯 $32^{\circ}52.422'$ 、東経 $130^{\circ}12.862'$ までは弱い二次反射を伴う赤色反射波の砂質堆積物が、続いて北緯 $32^{\circ}53.058'$ 、東経 $130^{\circ}13.926'$ までが黄色反射波の泥質堆積物、北緯 $32^{\circ}53.406'$ 、東経 $130^{\circ}14.489'$ までが二次反射を伴う赤色反射波の砂質堆積物、北緯 $32^{\circ}53.736'$ 、東経 $130^{\circ}15.026'$ までは緑色反射波の泥質堆積物、それ以东は黄色から赤色反射波の砂質堆積物が分布する。北緯 $32^{\circ}53.406'$ 、東経 $130^{\circ}14.486'$ 付近では湧水構造が見られる。

Line 8：諫早湾中央部の北東～南西測線である。北緯 $32^{\circ}53.784'$ 、東経 $130^{\circ}12.019'$ までは黄色反射波の泥質堆積物が、そこ以西から潮受け堤防前面までは弱い二次反射を伴う黄色から赤色反射の砂混じり泥質堆積物が分布する。

Line 9：諫早湾北部の金崎沖から夜灯鼻沖にいたる東北東から西南西の測線である。金崎沖から北緯 $32^{\circ}55.126'$ 、東経 $130^{\circ}12.620'$ までは緑色反射波で示される泥質堆積物であるが、ごく狭い範囲に砂が分布する。それ以东から北緯 $32^{\circ}55.598'$ 、東経 $130^{\circ}13.866'$ までは弱い二次反射を伴う黄色から赤色反射波の泥混じり砂質堆積物が、それ以东では緑色反射波の泥質堆積物が分布する。

以上の結果を大局的に見ると、諫早湾では小長井沖から夜灯鼻沖にかけての岸寄りと瑞穂町沖から多比良沖の岸より、さらに湾南東部には砂質堆積物が卓越して分布している。その他は泥質や砂混じり泥質

堆積物が広く分布している。

## 考 察

本調査の結果、調整池では北部排水門付近では浮泥層は全く堆積せず、砂質堆積物が露出しているようである。調整池からの排水は水門下部から行われるので、その際の流れによって堆積物が削剥されていることを反映していると思われる。それに引き替え、中央部から南部排水門付近での浮泥層は80cmも堆積している。潮受け堤防が構築されたことによって水深の浅い調整池となり、風や河川からの淡水の流入によってのかつて干潟を構成していた細粒な泥質堆積物が再懸濁するとともに、流速が低下したことによって池底に沈積していることを示している。北部排水門付近では調整池の水位調整のために調整池の水が排出されているが、この付近での水深が急に深くなること、また池底面が不規則な凹凸であることから、排水の際に池底を削剥するような流れが生じていると推察される。

諫早湾での浮泥層は潮受け堤防に近い北部の長里沖や南部の下高田沖（Line 2）で40cmを超えるほか、Line 2, 3, 4, 5の湾中央部で30cm程度であるのに対して、北岸や南岸さらには湾口部で10cm以下と薄くなる。これは底層流速が南北湾岸や湾東南部よりも湾奥部や湾中央部でより小さいことを反映していると考えられる。

諫早湾の底質分布については日本自然保護協会（2001）が2001年3月9日～11日にかけて実施した調査結果を水質とともに中間報告として取りまとめている。底質調査はCTIサイエンスシステムのGPS搭載水深計測装置を用いて200kHzと50kHzの超音波を海底面に照射する方法で実施している。結果の解析の前提として200kHzの音波は底泥表面で50kHzの音波は砂質層で反射されることから、200kHzと50kHz反射深度差がシルトや微細な粘土粒子などの軟泥の厚さになるとしている。その結果、北部排水門付近では軟泥の堆積はなく、北緯 $32^{\circ}53'30''$ 、東経 $130^{\circ}10'24''$ 付近では1m近くの層厚があるとした。南側（島原半島側）では潮受け堤防付近での軟泥の層厚が厚く、湾口部では小さいとした。北側（多良山系側）では潮受け堤防から東方へ1～3kmの付近でもっとも厚く、50～100cmの軟泥堆積があるとした。さらに中央部では200mと5km測線で50cmほどの厚さの軟泥があるとした。このような結論を得るにあたって日本自然保護協会（2001）では200kHzと50kHz音波の反射面を単純に泥と砂と仮定して結果を解析している。しかし、水

産工学研究所・(株) カイジョー (1984) に示されているように200kHzと50kHz音波の反射面は一義的には堆積物の見かけの密度に一致することから判断すると、日本自然保護協会 (2001) の仮定は適切ではないといえる。50kHz超音波は見かけ密度1.22 g/cm<sup>3</sup>の泥質堆積物でも反射するからである。従って、日本自然保護協会 (2001) の調査結果はその考察が不十分であると考えられることから本調査の結果とを直接比較することはできない。

また、日本自然保護協会 (2001) では排水門付近を除く潮受け堤防の中央部付近や沖合で堆積物量 (0.5~1 m) が増えており、それは流速が低下したことによるとしている。しかし、この堆積物は潮受け堤防形成後に沈積したものではないといえる。松岡 (2004) は潮受け堤防から2 kmほど離れた地点での平均堆積速度を<sup>210</sup>Pb法によって0.58cm/年と推定している。従って、0.5~1 m層厚の堆積物は数年のオーダーで形成されるものではないことは明らかである。

自然保護協会が2001年に調査したD測線 (堤防から3 km) と本研究で2002年に調査したLine 2 は近い位置にあり、200kHz反射面深度の比較が可能である。この2測線間での200kHz反射面深度には違いがある。D測線の海底面の凹凸は50cmと顕著であるが、Line 2 ではこの凹凸が埋められて平らになっている。このことから2測線の観測にはおよそ1年の隔たりがあるために、この1年の間に浮泥の堆積によって海底表層地形が変化した可能性もある。

日野ほか (2004) は有明海北西部湾奥 (鹿島~多良沖) で本研究と同じ音響底質探査装置 (カイジョー製C-85型) を用いて底質調査を行っている。それによると有明海北西部湾奥海域では浮泥・底泥層の層厚が70~100cmにあると推定している。この値は本調査で得た諫早湾における浮泥層の厚さの約2倍である。この差は24kHz反射面認定の違いによる可能性が高い。泥質堆積物では24kHzには明瞭な反射面が表れにくいことから、日野ほか (2004) ではより確実性の高いと判断された下位の反射面との深度差を用いていることによると考えられる。それが浮泥・底泥層と表現されている理由ではないかと思われる。

今回用いた音波探査では反射波の強弱が堆積物の性状、とりわけ粒度組成の違いとして捉えることができる。この調査方法では短時間に広域的に堆積物の分布状況を把握することができる利点がある。諫早湾の堆積物粒度組成を大局的に見ると湾奥部と湾

中央部には泥質や砂混じり泥質堆積物が、北岸と南岸および東南部海域には砂質堆積物が分布する。これまで諫早湾全域での詳細な粒度分析は行われていないが、秋元ほか (2004) は諫早湾29地点でスミスマッキンタイヤー採泥器を用いて採取した試料の粒度を礫、砂、泥に区分してそれらの組成を明らかにしている。それと比較すると、細分された砂粒径との詳細な対応を見ることはできなかったが、湾奥部から湾中央部、さらに竹崎沖にシルト (泥質堆積物) が、小長井沖の北岸と湾東南部に細粒砂や細礫が分布するという結果と良く対応している。

浮泥層の層厚分布と堆積物の粒度組成分布は大局的には一致している。すなわち、浮泥層は湾奥部の潮受け堤防付近や湾中央部では厚く堆積し、南北両岸や湾口東南部では薄くなる傾向は、泥質堆積物の分布がそれと同じような傾向を示している。このことは、諫早湾の底質分布は基本的には底層の流向と流速に支配されていることと、その供給源が有明海湾奥北西部の鹿島沖から多良沖にあることを示している。この傾向が潮受け堤防の構築によってどのように変化したのかを明らかにするには、沈積年代が明らかな柱状堆積物の粒度組成変化を調査することが必要である。

堆積物の分布とは異なるが、Line 7, 8 測線の南部から中央にかけて湧水活動を反映したような音波反射像が確認された。Line 2, 3, 4 でも小規模ながらも数多い湧水活動を示すような反射像が観察され、とりわけLine 4 では100地点以上で確認された。諫早湾の別名は泉水海ともいわれる。これらが実際に淡水の湧水であることは未だ確認できていないが、古来より泉水海と呼称された謂われを科学的に追求する手がかりを得たといえる。

## 謝 辞

現地調査及び観測資料の取りまとめには、長崎大学大学院生産科学研究科院生松橋基さん、藤井理香さん、長崎大学環東シナ海洋環境資源研究センター職員坂本綾香さんの協力を得た。記して感謝の意を表する。

## 文 献

秋元和實・滝川 清・島崎英行・鳥井真之・長谷義隆・松田博貴・小松俊文・本座栄一・田中正和・大久保功史・筑紫健一・松岡敷充・近藤 寛 2004 「がらか

- ぶ」が見た有明海の風景—環境変化をとらえるための表層堆積物（底質）データベース—, 20pp., 熊本大学沿岸域環境科学教育研究センター, NPOみらい有明・不知火.
- 菊池泰二 2002 有明海の環境・漁業を考える. I-2 底生物相の変化. 日本水産学会誌, 68, p.97-98.
- 水産工学研究所・(株)カイジョー 1984 多目的計量魚群探知機—その応用と原理—, 51pp.
- 堤 裕昭・岡村絵美子・小川満代・高橋 徹・山口一岩・門谷 茂・小橋乃子・安達貴浩・小松利光 2003 有明海奥部海域における近年の貧酸素水塊および赤潮発生と海洋構造の関係. 海の研究, 12, p.291-305.
- 日本自然保護協会 2001 諫早湾潮受堤防内外の底質・水質の現状 (中間報告), 18pp.
- 日野剛徳・林 重徳・五十住一人・丸本大介・黒木克己・今村 敬 2004 有明海底質調査における音響底質探査装置の適用について. 有明海の研究 (論文集), p.348-351, 佐賀大学低平地研究センター・低平地研究会.
- 松岡数充 2003 諫早湾における赤潮原因プランクトンの最近の変化. 月刊海洋, 35, p.246-250.
- 松岡数充 2004 有明海・諫早湾堆積物表層部に残された渦鞭毛藻シスト群集から見た水質環境の中長期的変化. 沿岸海洋研究, 42, p. 55-59.

# 有明海・諫早湾における貧酸素水塊の出現状況（2003–2004年）

松岡數充<sup>1)</sup>・水島康一郎<sup>2)</sup>・広瀬雄太<sup>3)</sup>

## Hypoxia water mass in Isahaya Bay, Ariake Sound (2003–2004)

Kazumi Matsuoka<sup>1</sup>, Koichiro Mizushima<sup>2</sup>, Yuta Hirose<sup>3</sup>

### 要 約

底棲生物が生息している海水と堆積物境界部の溶存酸素濃度を正確に測定するには従前の計測器やダイバーによる採水法では困難であると考えられる。海水と堆積物との境界は連続的で、海底面を決定するには困難が伴うからである。本研究では改良型TFO式採泥器を用いて海水と堆積物を攪拌することなく採取する方法で、海水と堆積物境界部の溶存酸素濃度を測定することを試みた。その結果、海水と堆積物境界部の溶存酸素濃度はB-1 m層の溶存酸素レベルより低いことが観測された。

### はじめに

1997年4月に諫早湾干拓事業による潮受け堤防の締め切りによって諫早湾のほぼ1/3が淡水化するとともに乾陸化した。その後の2000年秋季から2001年春季にかけて発生したノリ養殖被害を契機に、諫早湾のみならず有明海全域での環境異変に関する調査研究が展開されてきた。これまでに環境変化の中で生物、とりわけ底棲生物資源との関わりで明らかにされた現象は貧酸素水塊の出現である（東 2000, 程木ほか 2002, 木元ほか 2003, 渡辺ほか 2003）。それらの結果によると、諫早湾における貧酸素水塊の出現は年によって初期発生の日時は異なるもの、およそ6月下旬から7月上旬に出現し始め、8月中旬に大規模に発達し、9月下旬には消滅していくことが明らかにされている。ところで底棲生物の耐溶存酸素レベルは種によって異なっている（萩田 1985, 玉井 1993）ことから、貧酸素水塊が底棲生

物に与える影響を正確に判断するには、底棲生物の生息域での溶存酸素濃度を正確に測定することが必要である。諫早湾でのこれまでの調査方法は、底層水をウインクラ法で測定する方法（程木ほか 2002）、多項目水質計などの測器を海底直上にまで垂下して測定する方法（西ノ首 2002）、海底から約10cm～1mの位置に自記式水質計を設置し連続観測する方法（藤井・山本 2003）、ダイバー等によって直上部の海水を直接採取し測定する方法などがとられてきた。しかしながら、一般に海水と堆積物との境界は連続的で、どの部分を持って海底であると正確に定義するかは困難が伴う。従って、上述の方法では底棲生物が生息している海水と堆積物境界部の溶存酸素濃度を正確には測定できていないと考えられる。

本研究ではこれまでとは異なった方法で、この海水と堆積物境界部の溶存酸素濃度を測定することを試みた。その結果、海水と堆積物境界部の溶存酸素濃度はこれまでのB-1 m層の溶存酸素レベルより

<sup>1)</sup> 長崎大学環東シナ海海洋環境資源研究センター

<sup>2)</sup> 長崎大学大学院生産科学研究科海洋生産科学専攻

<sup>3)</sup> 長崎大学水産学部沿岸環境学研究室

<sup>1</sup> Institute for East China Sea Research, Nagasaki University

<sup>2</sup> Graduate school of Science and Technology, Nagasaki University

<sup>3</sup> Laboratory of Coastal Environmental Sciences, Faculty of Fisheries, Nagasaki University

も低いことが明瞭に観測された。本文では貧酸素水の定義として3 mg/lを用いる(柳 1989)。なお、日本水産資源保護協会による水産用水基準(2000年度版)では「内湾漁場の夏季底層において最低限維持しなければならないDOは4.3mg/l」としている。

## 方法

### DOの測定方法

表層からB-1 m層まで、クロロテック(AAQ1183-H アレック電子製)を用いてDO、水温、塩分、クロロフィルを測定した。堆積物直上水中のDOはDOメーター(9520-10D HORIBA製)を用いて測定した。クロロテックとDOメーターといった2つの異なる測定機器によるDO測定を行ったため、どちらもウィンクラー法による補正を行った。それぞれの測定方法は以下の通りである。

表層からB-1 m層まではクロロテックをゆっくりと下ろしていき、1 m間隔でDOを測定した。

直上水中のDOはTFO式コアサンプラーで採取した柱状試料を用いた。このコアサンプラーは船上から垂直に投げ込むと、内装したアクリルパイプ内に海水と堆積物が攪拌されることなく採取すること

ができる(図1)。

TFO式コアラーで採取した海水と堆積物境界部試料のDO低下は直後に船上でアクリルパイプに採取した堆積物の直上(0~10cm)に直接DOメーターを垂下してDOを測定した。クロロテックとDOメーターによって得た測定値を補正するために、任意の2地点で海水を採取し、ウィンクラー法によって溶存酸素濃度を測定した。

なおTFO式コアラーで海水と堆積物の境界試料を採取する際に浮泥層やその下位にある還元層の攪拌が直上水の溶存酸素量に及ぼす影響を見るために室内で以下のような実験を行った。採取した堆積物試料から堆積物が巻き上がらないようにして海水部分を抜き取った後、曝気して溶存酸素量を調整した海水を注入し、同時に浮泥層を5 cmぐらい巻き上げらせ、コアリングの際の巻き上げと同様の状況を再現する。その直後に浮遊物も含んだ直上水を採取し、ウィンクラー法によって溶存酸素量を測定し、採泥時のDOと比較した。その結果、攪拌によって0.15mg/l程度のDOの低下を認めた。

従って、今回の調査ではコア採取法による堆積物—海水境界部の測定DOは0.1~0.2mg/lの差があることになる。

## 結果と考察

### 2003年の貧酸素水塊出現状況

2003年度の調査(St.1~25)は基本的に底層流が弱くなると考えられる小潮時に合わせて実施した。

6月23日の調査時には、湾中央北部(St.4)で堆積物直上水の溶存酸素量が1.98mg/lとすでに貧酸素状態にあったが、B-1 m層では3.36mg/lで貧酸素状態を確認することはできなかった(図2)。7月7日には湾中央部のSt.15, 18でそれぞれ2.79, 2.82mg/lの溶存酸素量が得られ、またSt.22でも2.25mg/lの値であったことから、直上水が貧酸素状態にあったことを確認できたが、6月23日と同様にB-1 m層では貧酸素状態ではなかった。8月4日には、St.6, 19, 23以外の直上水で貧酸素状態を示す溶存酸素量が測定されたものの、B-1 m層ではSt.4, 13のみで貧酸素水が確認できた。また、8月21日には全調査地点の直上水で貧酸素状態が確認できたとともに、さらにSt.5, 21, 24のB-1 m層で貧酸素水の出現を認めた(図3)。9月9日にはSt.10, 18, 22の直上水のみで溶存酸素量が2 mg/l以下の貧酸素状態を確認できた。それ以降の観測(10月3日, 15日)では貧酸素水の出現は確認されなかった。しかし、水塊が成層状態になく、直上水が貧酸素状態に

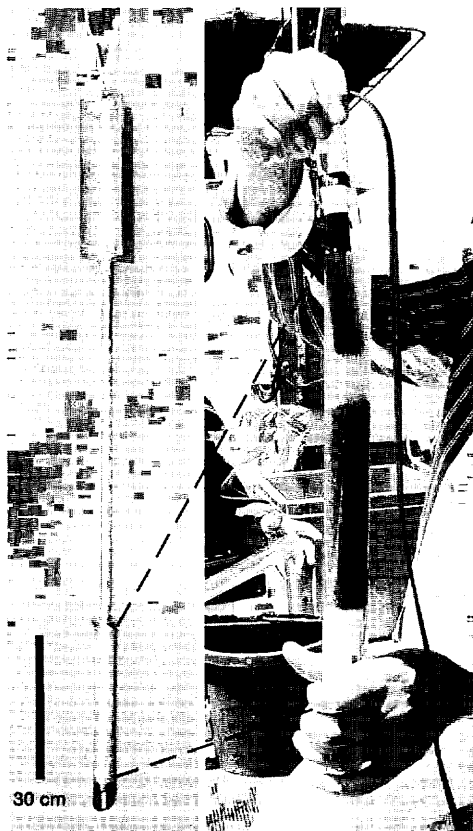


図1 TFO式コアサンプラー

2003.6.23

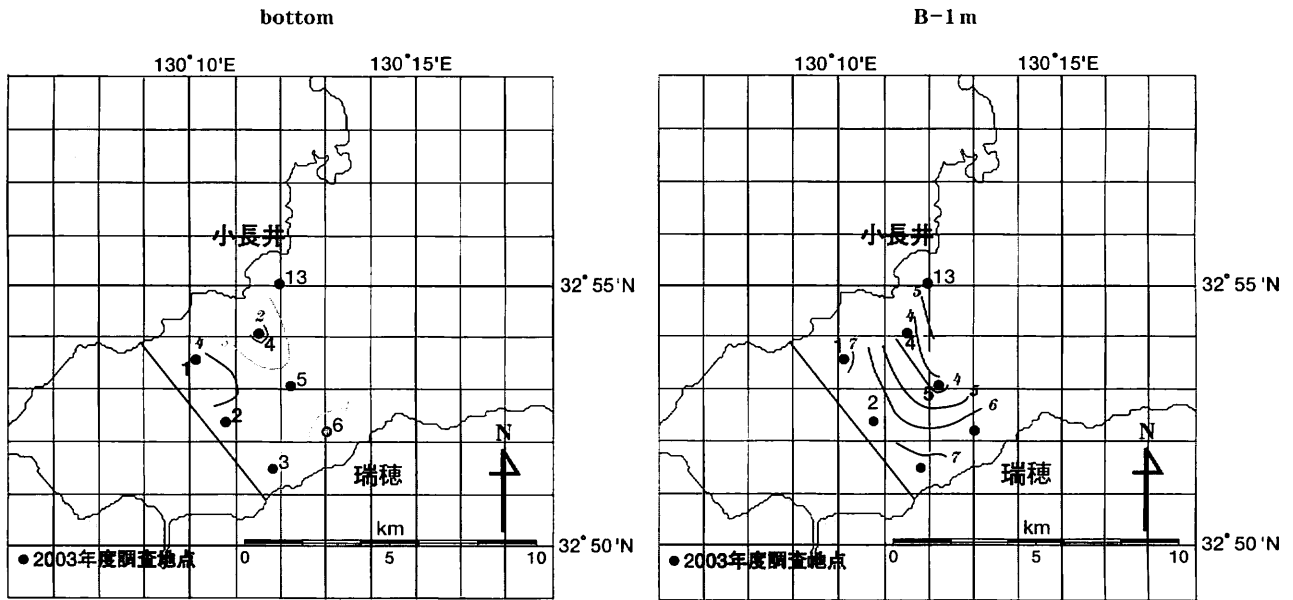


図2 2003年6月23日調査結果

2003.8.21

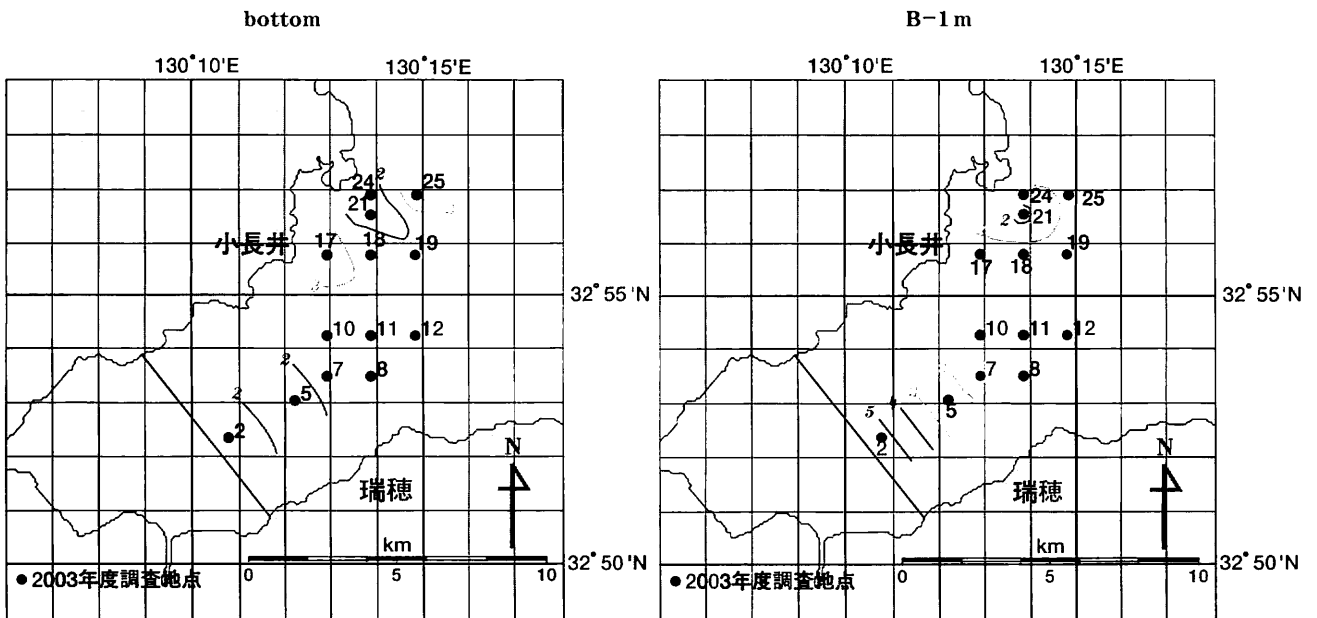


図3 2003年8月21日調査結果

なっていない時でも直上水の溶存酸素量はB-1 m層が低かった。

2003年には堆積物直上水は湾中央部 (St.5, 7, 10, 11, 15) と竹崎付近 (St.21, 24) で貧酸素状態が出現した。特に、7月7日ではSt.15, 18の堆積物直上水には上層の水塊との密度差がさほど発達していなかったにも関わらず貧酸素状態になっていた。この

ことは諫早湾中央部では成層の発達に関係なく堆積物直上水が貧酸素状態になりやすいことを示唆している。貧酸素水塊の出現と発達を規制している物理的要因に2つのことが考えられる。一つは成層構造の発達と一つは海底堆積物の種類である。この両者は基本的には底層での流れの強さによって規定されているともいえる。秋元ほか (2004) によると、諫早湾での堆積物分布の特徴は次のようにまとめる



2003.9.9

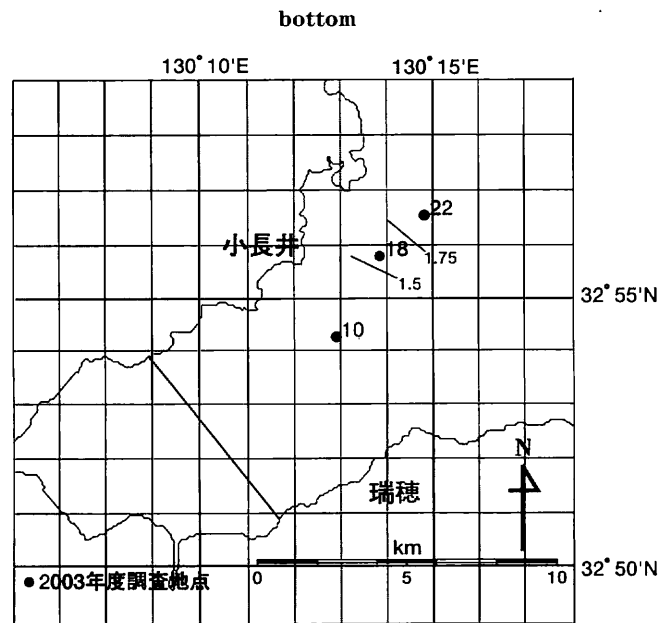


図4 2003年9月9日調査結果

ことができる。

1. 南北沿岸部は砂質もしくは砂礫質堆積物が分布する。
2. 潮受け堤防前面から湾中央部にかけては泥（シルト）質堆積物が広く分布する。
3. 北岸の竹崎から南岸の神代にかけてと南岸の多良にかけては砂礫質堆積物が分布する。

以上のことを踏まえると、湾奥部（StA.1付近）と湾口部（StA.4付近）よりも湾中央部（StA.2, 3）、すなわち泥質堆積物が分布する海域で貧酸素水が出現しやすい傾向にあるといえる。特に水塊が成層化していない時期でも、湾中央部の海域では海水と堆積物境界部で貧酸素状態が観察されていることから、この海域では海水/堆積物境界部では特に春季から秋季にかけて海水中の溶存酸素消費が進行していると推察される。それは細粒の泥質堆積物は有機物を多量に含むことから、それを分解するバクテリア等の活動が活発になる結果として酸素消費が促進されると考えられる。

また、竹崎沖（St.21, 24）では、貧酸素状態がB-1 m層にも確認できたことより、この海域では貧酸素化が底層1 m以上まで達することがある。しかし、その要因については有明海湾奥部からの貧酸素水塊の移入等も想定されている（木元他 2003）が、本調査の結果からは特定できない。

#### 2004年の貧酸素水塊出現状況

2004年度の調査（StA.1~4）は前年度と異なり、潮位に関係なく大潮や小潮、中潮時に実施した。海底直上水の貧酸素状態は7月21日（中潮）にStA.1（1.59mg/l）およびStA.2（1.87mg/l）で初めて観測された。しかし、それぞれの地点のB-1 m層における溶存酸素量は4.53mg/l（水深5 m）、3.61mg/l（水深9 m）であり、貧酸素状態ではなかった（図5）。このことは海底堆積物の直上水のみが貧酸素化していたことを示している。その時の水温と塩分から計算した海水密度（ $\sigma_t$ ）はStA.1で19.15~19.44、StA.2で18.98~19.68であり、それぞれの地点では成層構造が見られなかった。しかし、その2日後の全域調査では直上水の貧酸素状態が2003年度の調査地点であるSt.1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 24で確認され、広域にわたって貧酸素水塊が発達していた。しかし、これらの地点でもB-1 m層は7月21日と同様に貧酸素状態にはなっていなかった。8月25日（長潮）にはStA.2とStA.3の直上水で溶存酸素量がそれぞれ1.19mg/l、1.25mg/lとなる貧酸素状態が観察された。St.3のB-1 m層では2.36 mg/lと貧酸素状態であったが、B-2 m層では4.81mg/lを示し、貧酸素化していなかった。また9月以降は、全4地点の各層及び直上水の溶存酸素量は3 mg/lを下回ることはなく、貧酸素状態は解消されていた。また、測定地点ごとに直上水の溶存酸素量を比較してみると、貧酸素状態にならない時で

2004.7.21

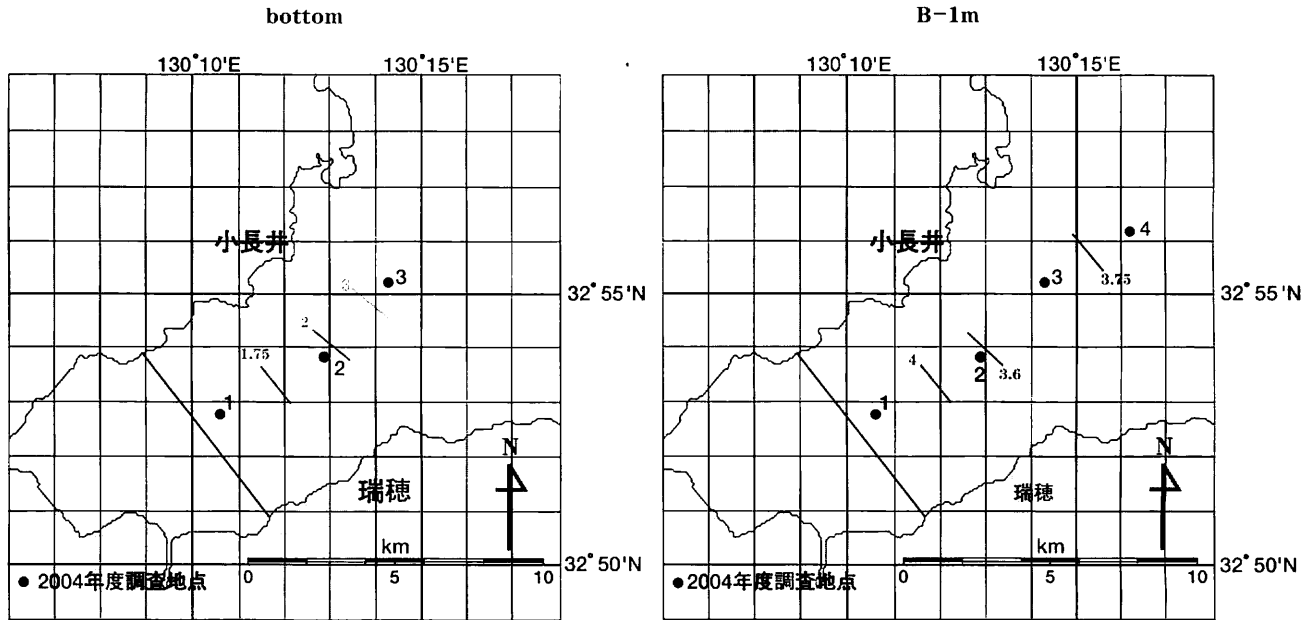


図5 2004年7月21日調査結果

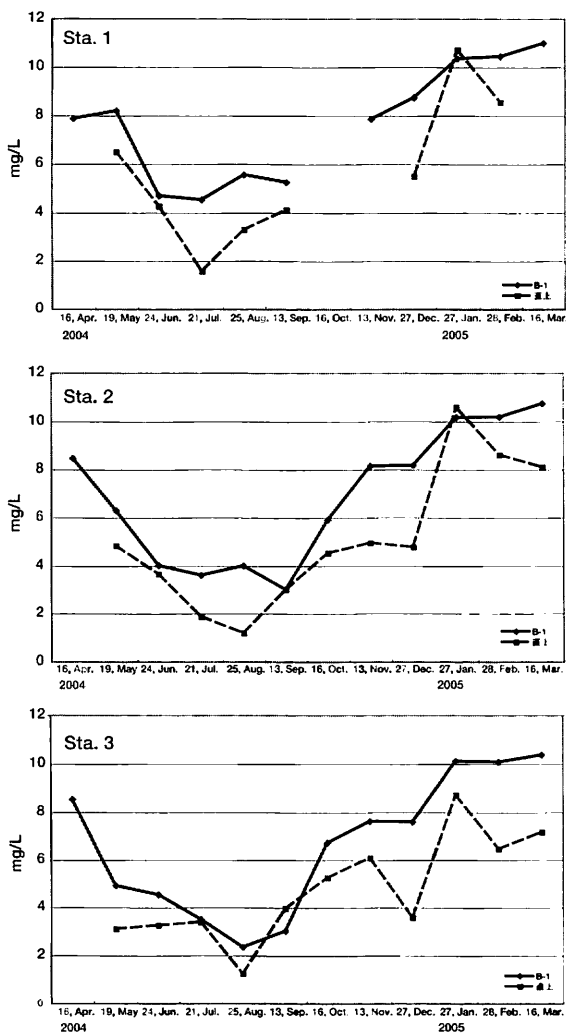


図6 直上水の溶存酸素量比較 (Sta. 1, 2, 3)

もStA.2, 3がStA.1より低い値を示すことが多かった(図6)。

2004年の調査では夏季に海底直上水で貧酸素状態がしばしば出現したが、B-1m層以浅では8月25日のStA.3での観測以外に貧酸素状態を確認することができなかった。また、7月21日では諫早湾湾口よりも湾奥の直上水で貧酸素水が発達しており、その2日後には諫早湾のより広い範囲で直上水が貧酸素化していたが、それでも全てのB-1m層以浅では貧酸素状態ではなかった。表層海水とB-1m層海水の密度差から判断すると、7月21日は全地点(StA.1~4)で成層構造は発達していなかったのに対し、7月23日には直上水が貧酸素状態であった地点で $1.43\sim 3.75\text{kg/m}^3$ と密度差が確認でき、成層の出現が示唆された。また、StA.2, 3では他地点よりも直上水の溶存酸素量が低い傾向にあることから、この海域は水塊が成層状態になっていなくても潮汐流が湾口よりも弱いこと、また水深が浅いことから海底まで水温が上昇しやすいことが、堆積物直上水の溶存酸素量が低くなる要因であると考えられる。

まとめ

・コアリング法によると海水と堆積物境界部の溶存酸素濃度はB-1m層のそれよりも低い。特に水塊が成層化していない秋季や冬季においても湾中央部の海域では海水と堆積物境界部で海水よりも低い溶

存酸素値が測定されている。また、2004年の調査結果によると大潮や小潮などの時期に関連することなく、海水と堆積物境界部でB-1m層よりも溶存酸素濃度が低い。従って、この海域での海水と堆積物境界部では低水温期でも、また底層流がある時でも酸素消費が進行していると推察される。その要因の一つとして、この海域に有機物を多量に含んだ細粒のシルトが広く分布している(秋元ほか2004)ことがあげられる。

・2003年、2004年とも貧酸素水塊は7月から9月上旬にかけて出現している。この状況は、既存の調査結果とも一致し、海洋構造の成層化、すなわち水温成層や塩分層によって海水混合が弱くなることによって貧酸素水塊が形成されると考えられる。

### 謝 辞

観測資料の取りまとめと整理は、長崎大学大学院生産科学研究科院生藤井理香さんと長崎県産業復興財団渡辺智美さんの協力を得た。記して感謝の意を表す。

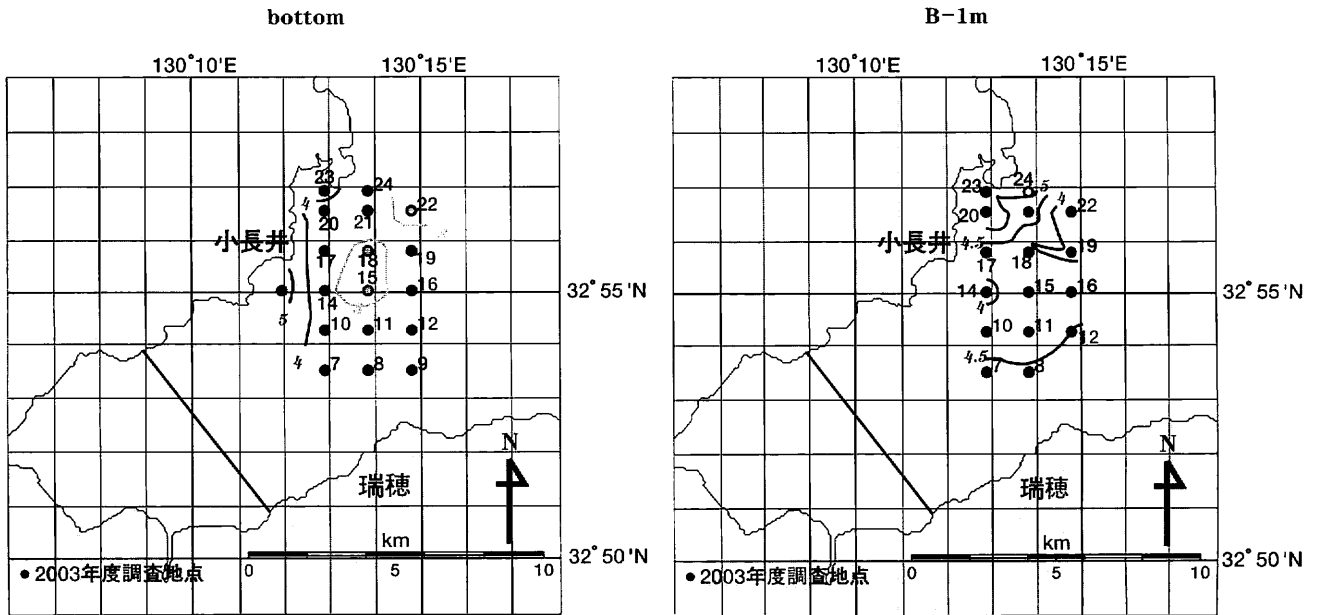
### 文 献

秋元和實・滝川 清・島崎英行・鳥井真之・長谷義隆・松田博貴・小松俊文・本座栄一・田中正和・大久保功史・筑紫健一・松岡数充・近藤 寛 2004 「がらかぶ」が見た有明海の風景—環境変化をとらえるための表層堆積物(底質)データベース—, 20pp.,

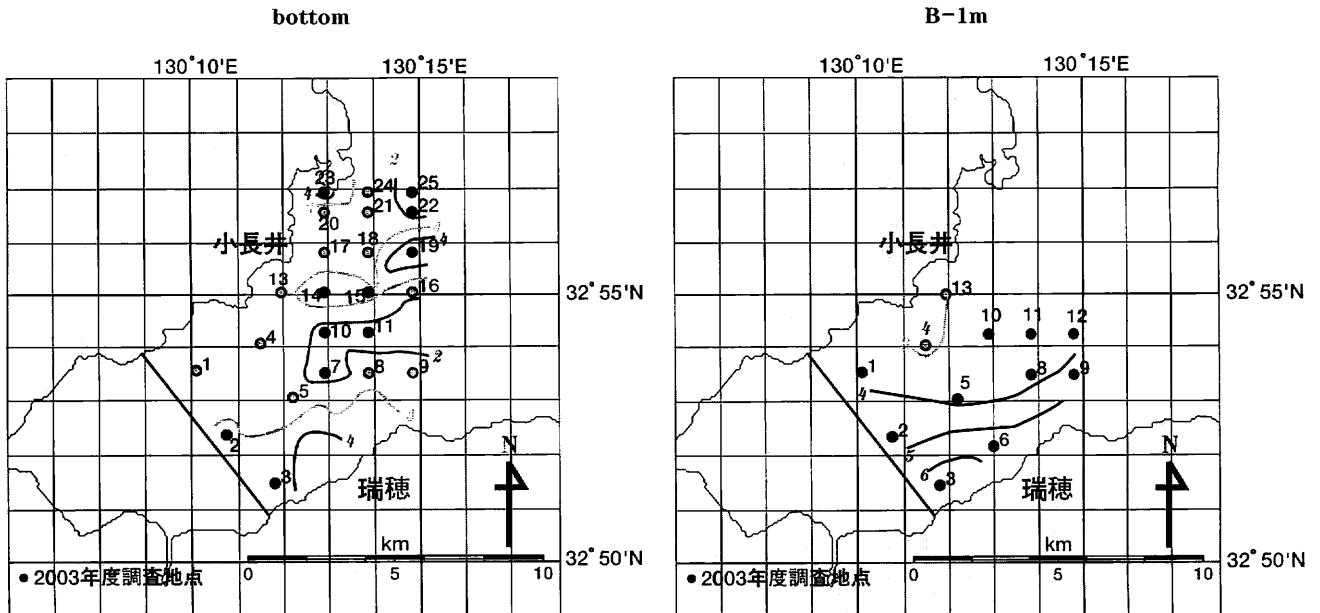
熊本大学沿岸域環境科学教育研究センター, NPOみらい有明・不知火。

- 東 幹夫 2000 諫早湾干拓事業の影響。「有明海の生きものたち—干潟・河口域の生物多様性—」, 佐藤正典 編, 海游舎, p. 320-337.
- 本元克則・西内 耕・岡村和磨 2003 有明海における溶存酸素分布. 月刊海洋, 35, p.261-265.
- 玉井恭一 1993 シズクガイの貧酸素耐性. 日本水産学会誌, 59, p.615-620.
- 西ノ首英之 2002 諫早湾における海砂採取跡の海底地形測定および貧酸素水塊の形成状況。「有明海プロジェクト中間報告書—その1」有明海プロジェクト研究チーム, p.135-138.
- 萩田健二 1985 貧酸素水と硫化水素水のアサリのへい死に与える影響. 水産増殖, 33, p.67-71.
- 藤井明彦・山本憲一 2003 2001年夏季に諫早湾の浅海域でみられた貧酸素化について. 長崎県水産試験場研究報告, 第28号, p.9-14.
- 程木義邦・佐々木克之・村上哲生 2002 干拓地からの負荷と貧酸素水塊形成. 第8回ジョイントシンポジウム「諫早湾締切が有明海環境に及ぼす影響の検討」, 土木学会海岸工学委員会・日本海洋学会海洋環境問題委員会・日本水産学会環境保全委員会・日本水産工学会物質循環研究会, 要旨集, p.13-19.
- 柳 哲雄 1989 沿岸海洋学—海の中でものはどう動くか—, pp.154, 恒星社厚生閣.
- 渡邊康憲・山本憲一・藤井明彦・川村嘉応・半田亮司 2003 有明海における貧酸素水塊の発生機構. 2003年日本海洋学会秋季大会(長崎市)講演要旨集, p.221.

2003.7.7

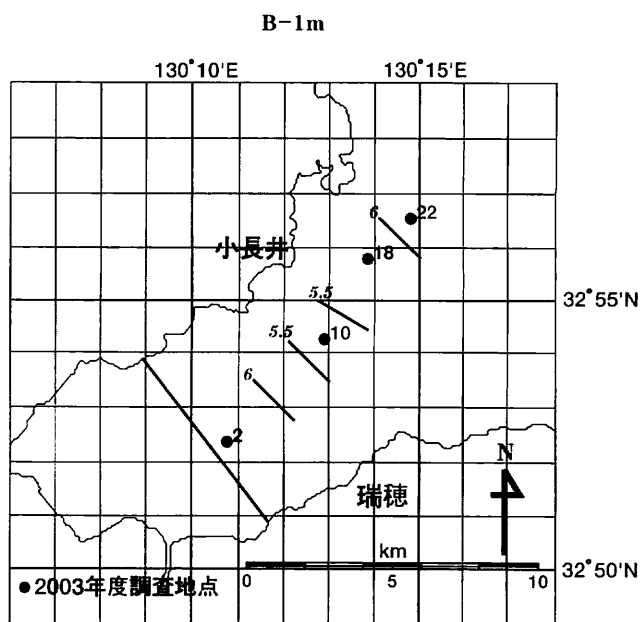
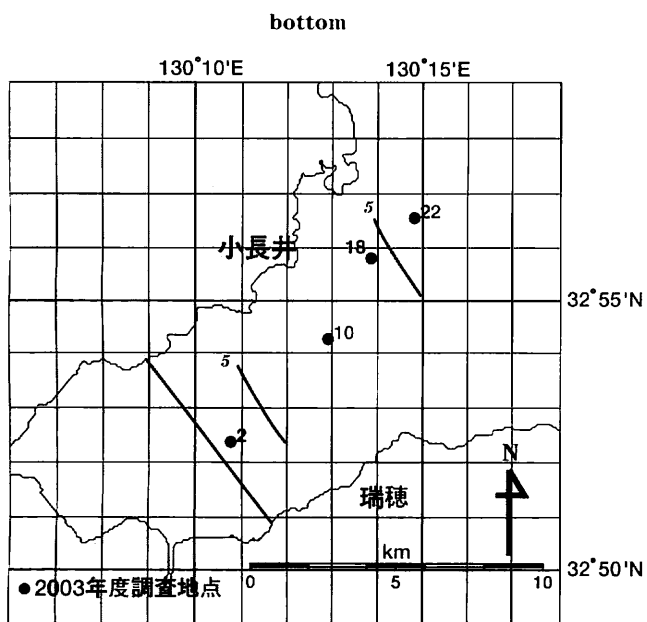


2003.8.4

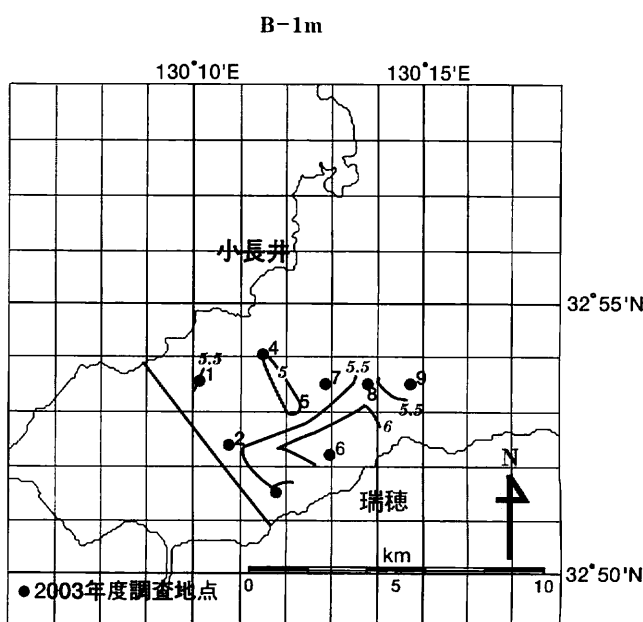
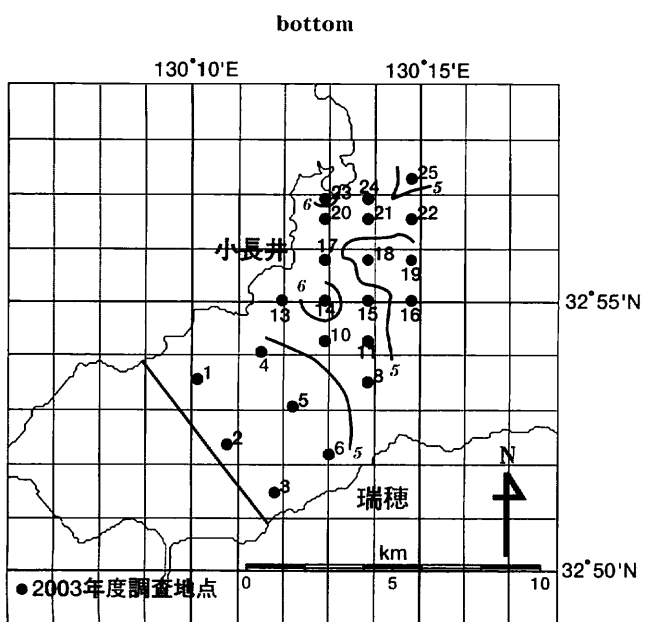


付図1

2003.10.3



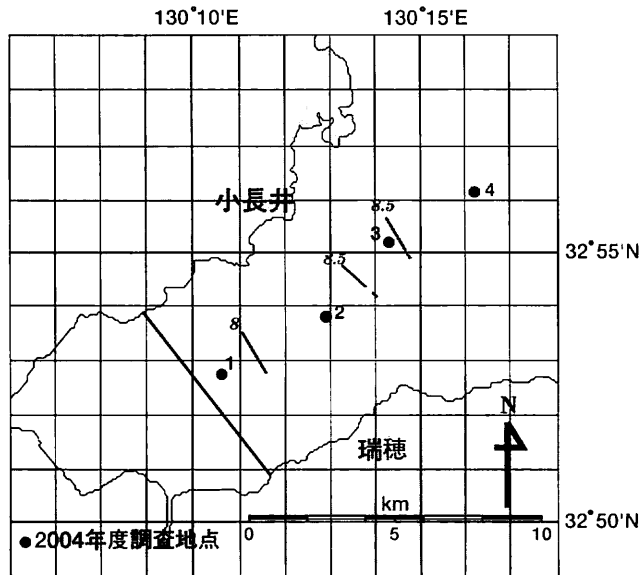
2003.10.15



付図 2

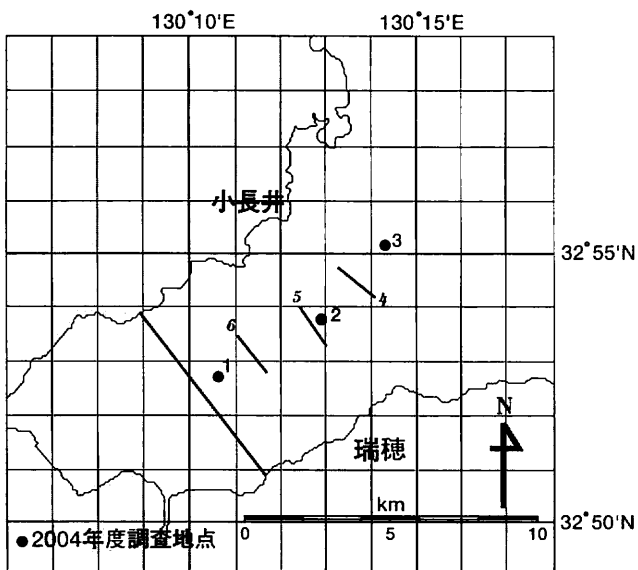
2004.4.16

B-1m

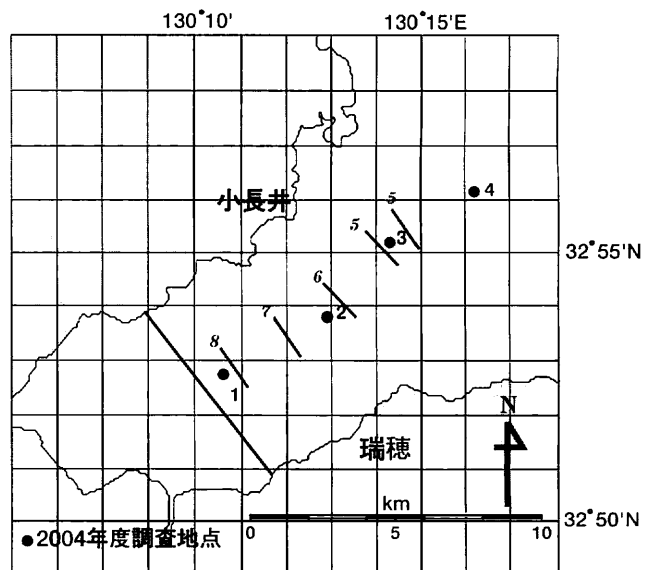


2004.5.19

bottom

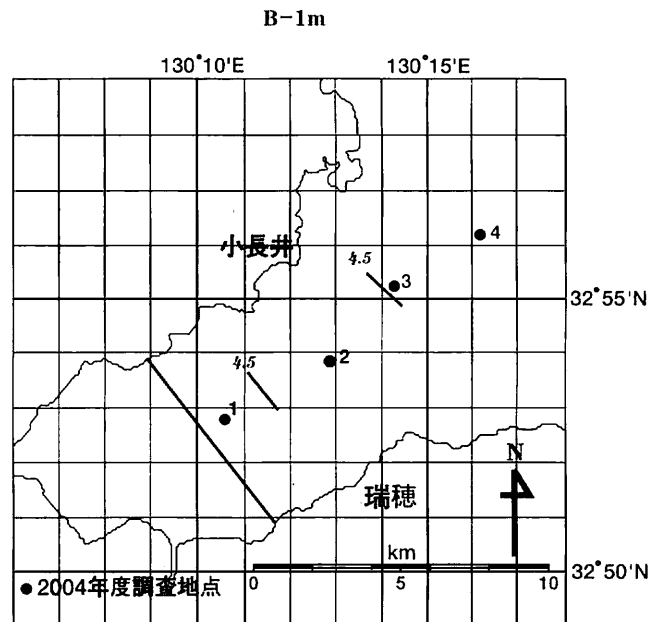
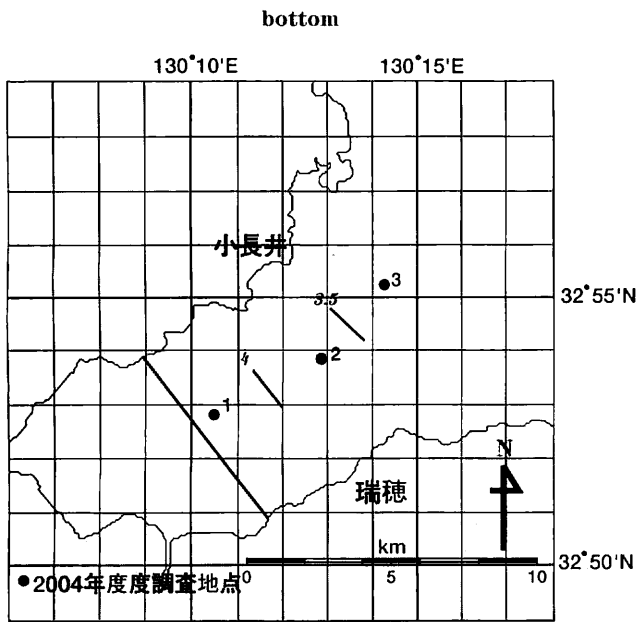


B-1m

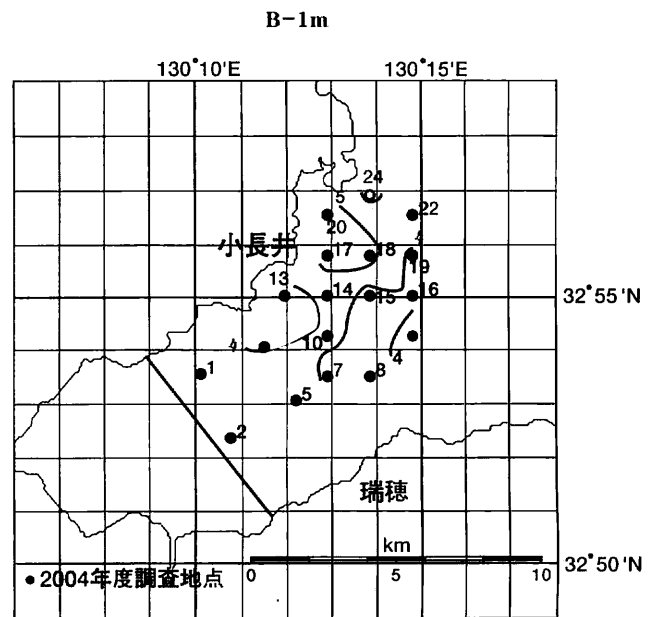
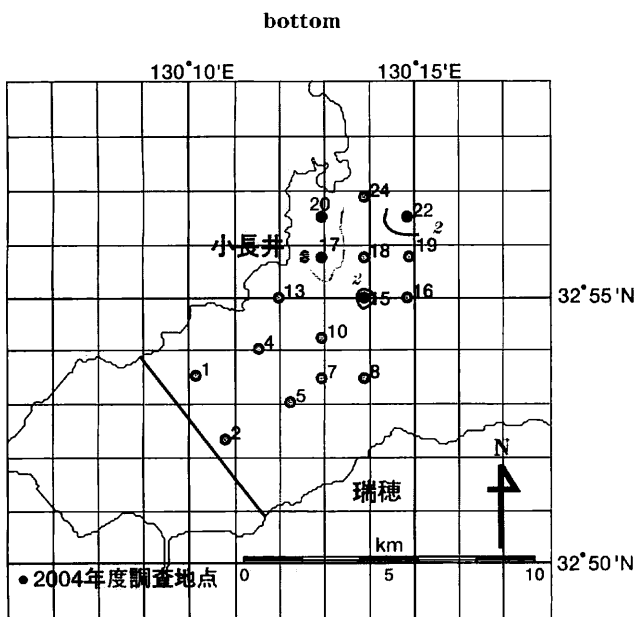


付図3

2004.6.24

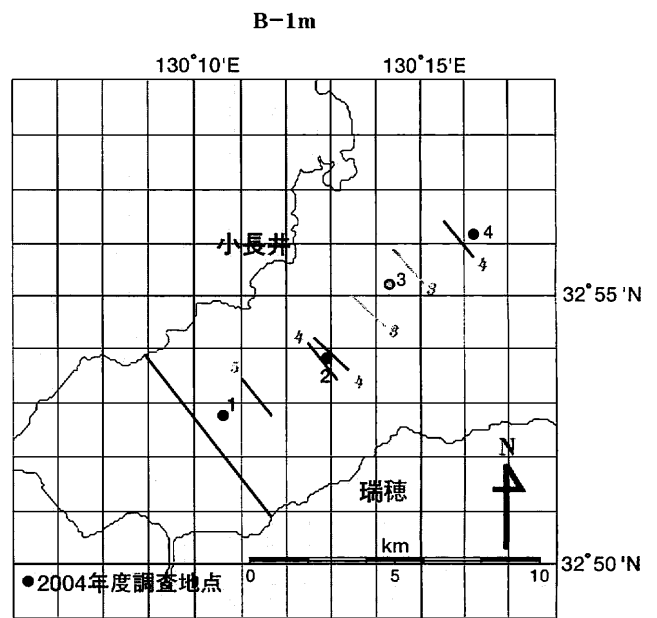
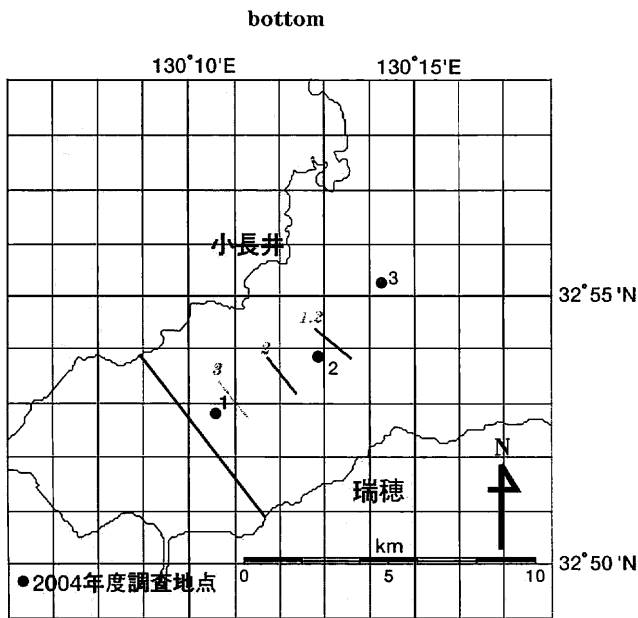


2004.7.23

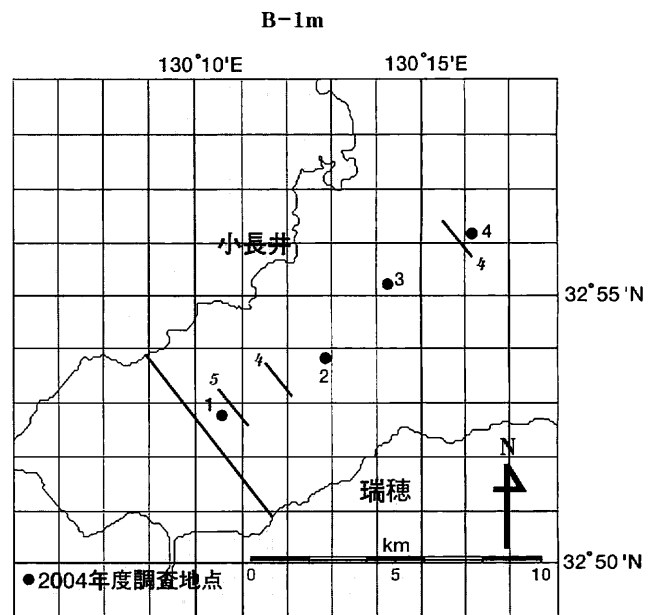
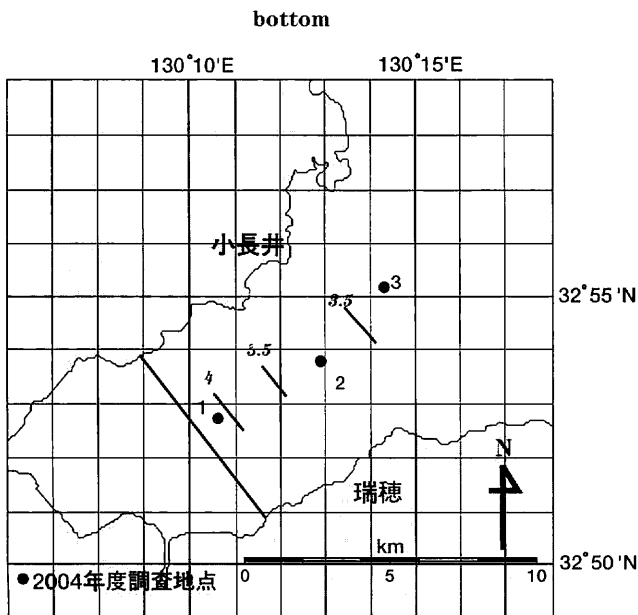


付図4

2004.8.25



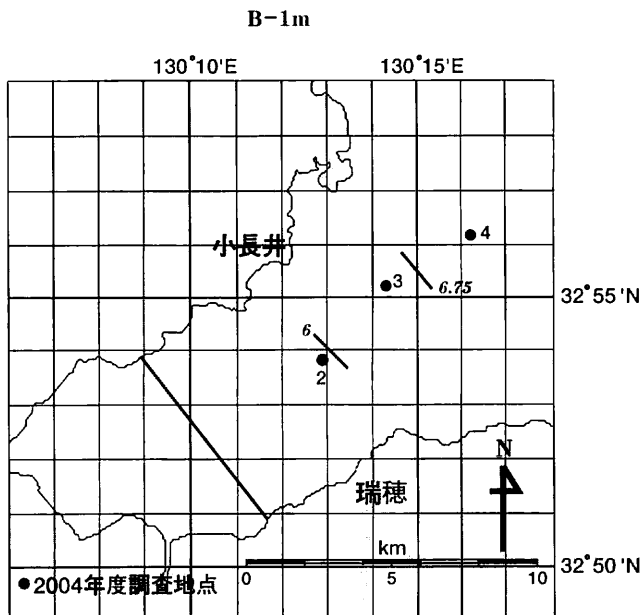
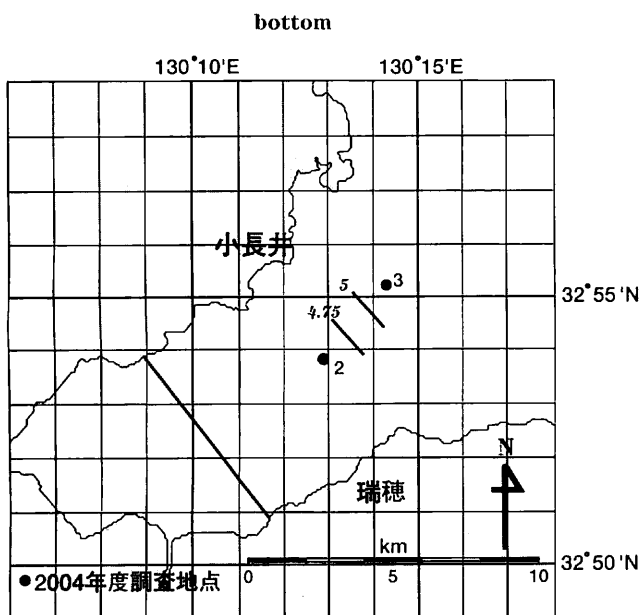
2004.9.13



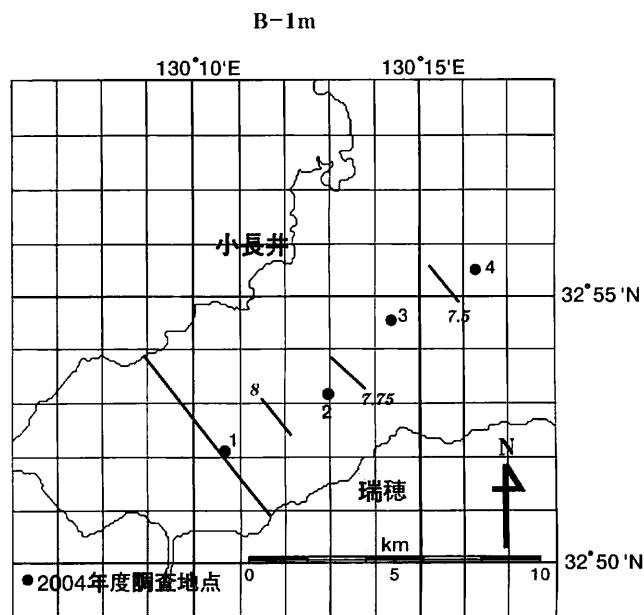
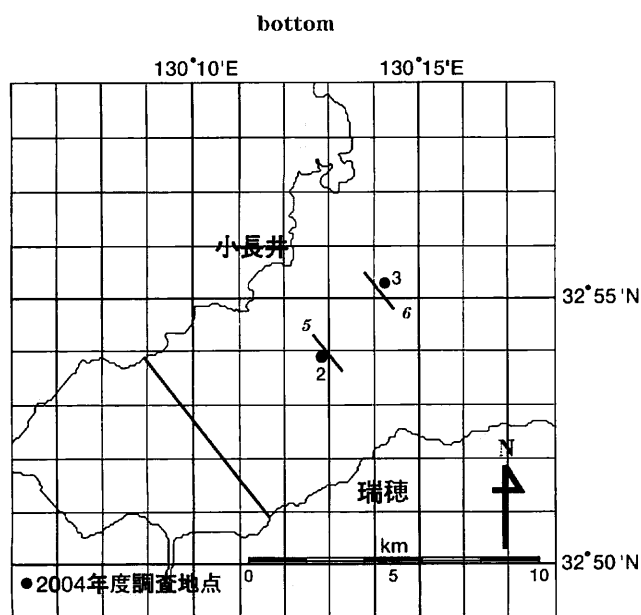
付図 5



2004.10.16

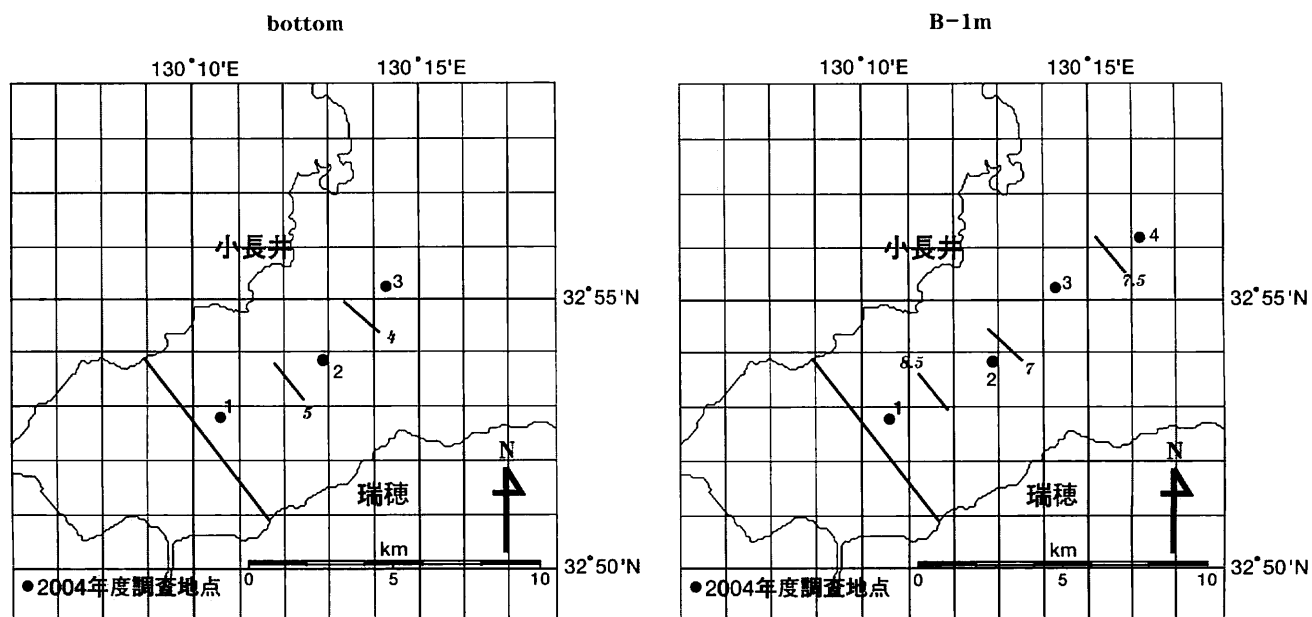


2004.11.13



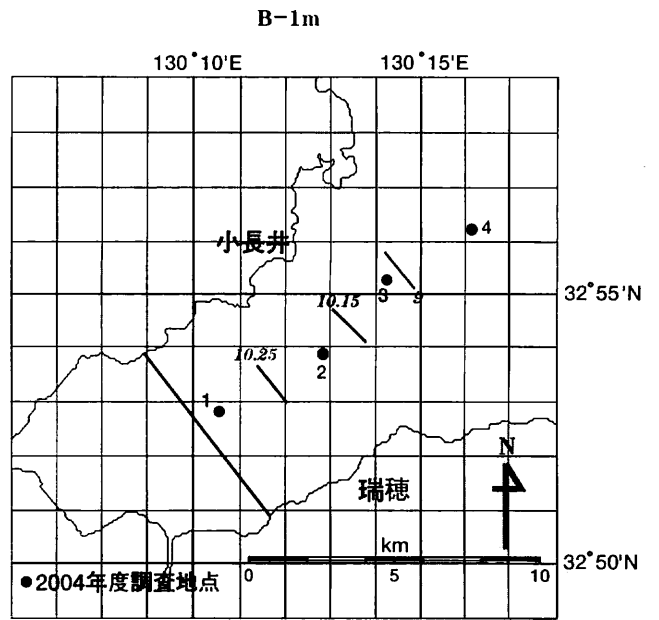
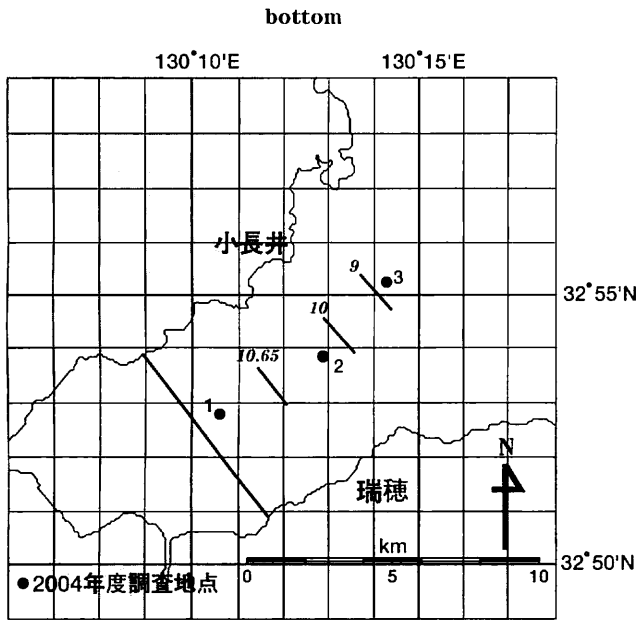
付図6

2004.12.27

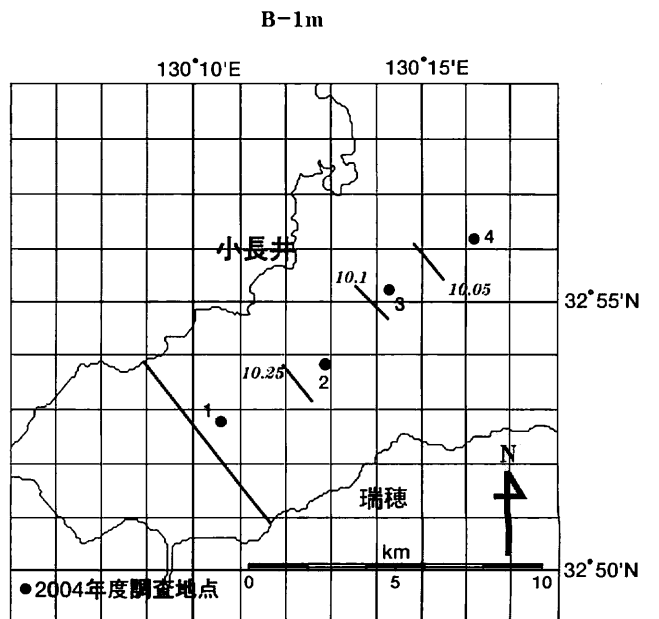
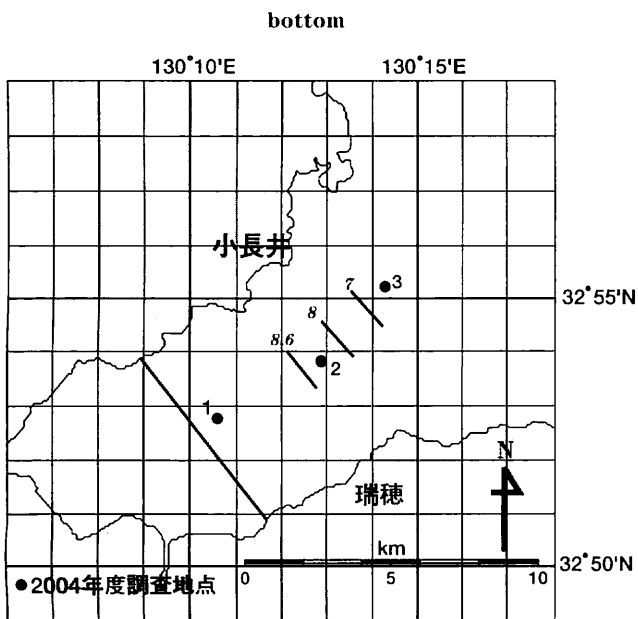


付図7

2005.1.27

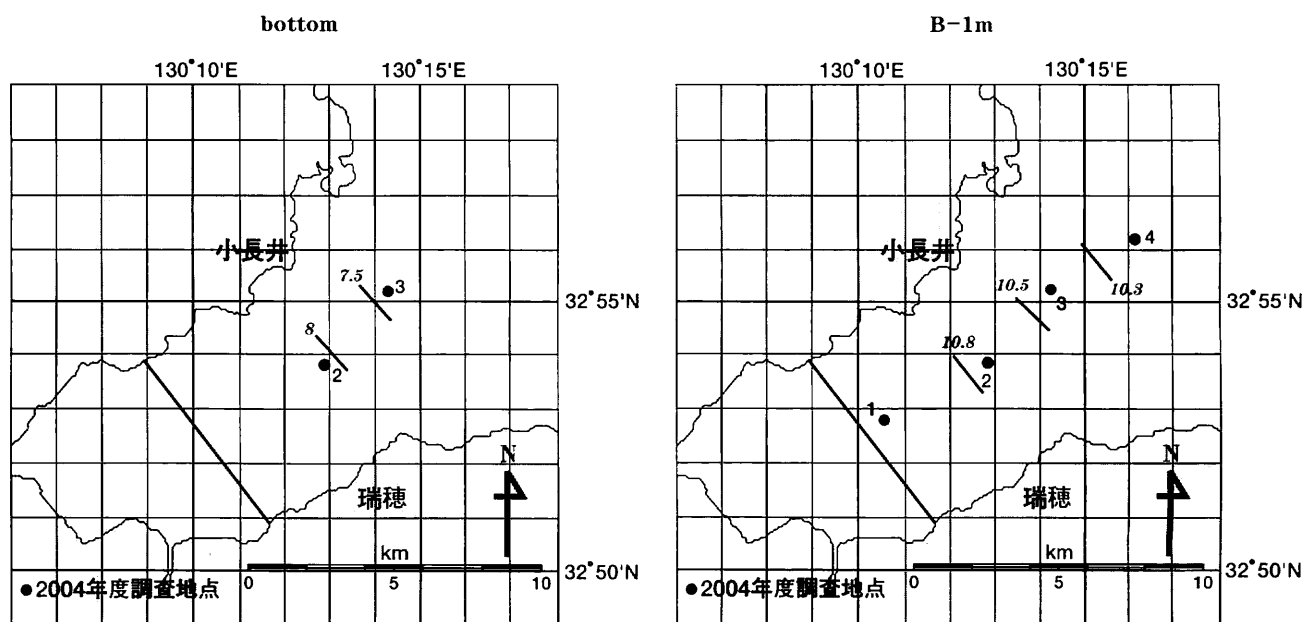


2005.2.28



付図 8

2005.3.16



付図9

# 底泥の酸素消費および栄養塩溶出に関する実験的研究

古本勝弘\*

## Consumption of Dissolved Oxygen and nutrient supply of bottom sediments in Isahaya Bay and Omura Bay, West Japan

Katsuhiko Furumoto\*

### 1. はじめに

近年、有明海や大村湾では、夏場を中心に赤潮が多発する(松岡 2003)。特に夏季には底層で貧酸素水塊が形成されやすく、底泥中の栄養塩が溶出され、栄養塩負荷が高まるのが赤潮多発の大きな要因として考えられる。本報告は、有明海と大村湾において貧酸素水塊が形成されやすい箇所(木元ほか 2003)から採取した底泥を用いて室内実験により酸素消費速度、栄養塩溶出速度を調査した結果を述べる。

### 2. 対象海域と底泥性状

過去の調査資料から貧酸素水塊が形成されやすい水域である、有明海では小長井町沖合を、大村湾では尾戸半島沖合を中心に5点を選び、エッグマンバージ採泥器を使い採泥した(図1)。採泥は有明海

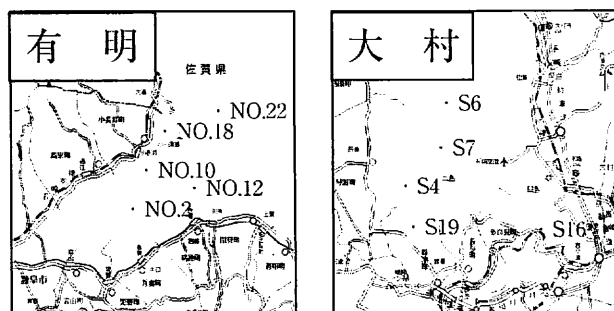


図1 有明海、大村湾の採泥地点

では2003.9.10、大村湾では2003.10.28に行った。表1と表2は、実験で用いた底泥の物理的・化学的項目について所定の方法で分析した結果を示している。COD、T-N、T-Sはいずれも大村湾の方がかなり高い値を示すことが注視される。

### 3. 実験方法

実験装置を図2に示す。樹脂製箱(縦36×横23×高14cm)を用いた。蓋には採水と多項目水質計(YSI 600QS)の挿入のために円筒(直径6cm高

表1 有明海の底質分析結果

地点名 (深度)	COD ( $\text{mgg}^{-1}$ )	T-N ( $\text{mgg}^{-1}$ )	T-P ( $\text{mgg}^{-1}$ )	T-S ( $\text{mgg}^{-1}$ )	D <sub>50</sub> (mm)
No2(6m)	15.8	1.74	0.6	0.99	0.055
No10(8m)	18.8	1.62	0.68	0.84	0.065
No12(10m)	5.9	0.62	0.45	0.21	0.15
No18(7m)	14.4	1.36	0.59	0.48	0.065
No22(10m)	17.2	1.73	0.75	1.03	0.075

表2 大村湾の底質分析結果

地点名 (深度)	COD ( $\text{mgg}^{-1}$ )	T-N ( $\text{mgg}^{-1}$ )	T-P ( $\text{mgg}^{-1}$ )	T-S ( $\text{mgg}^{-1}$ )	D <sub>50</sub> (mm)
S4(21m)	29	1.96	0.66	1.11	0.1
S6(20.3m)	32.7	3.22	0.69	1.42	0.085
S7(21.3m)	35.5	3.04	0.62	1.84	0.085
S16(13m)	32	3.23	0.62	1.07	0.09
S19(18m)	26.5	2.83	0.6	1.52	0.08

\* 長崎大学工学部

\* Faculty of Engineering, Nagasaki University

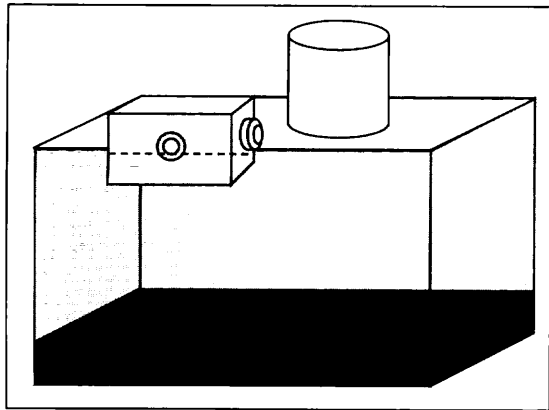


図2 実験装置概略図

15cm) を取り付け、内部には一定の循環流を与え水質が均一になるように水中ポンプを備え付けた。実験装置は6つ準備し、5つにはそれぞれの海域の5地点の底泥を、1つは海水のみを入れて実験した。底泥は厚さ約3cmに敷き詰め、各槽には深度10mから採水した同じ海水を入れ、内部の気泡を全て追い出して実験を開始した。

1日2回12:00と18:00に多項目水質計によりDOやORPなどを計測した。また栄養塩溶出状況を調査するため、定期的に底泥付近の海水を250ml採水し水質分析を行った。なお採水の際、水質分析のために採水した水量は新たに海水を補給し容器内水量を一定にしている。

#### 4. 実験結果・考察

##### 1) DOの経時変化

DOの経時変化を図3,4に示す。DOは有明海では約30時間後、大村湾では約90時間後にほぼ0となる。海水だけでは同じく120および420時間で無酸素となり、両海域のものでかなり酸素消費は異なる。

##### 2) 栄養塩溶出の経時変化

各実験槽のT-N, T-Pの経時変化を図5,6に示す。有明海の図では、実験開始時のT-N, T-Pの値が既に高い。これは、酸素消費速度の予備実験(5日間)と1日間の曝気の後、実験を始めたため、既に溶出し濃度に差のある初期水質となっているためである。

海水のみの槽の濃度変化は殆どないため、T-N, T-Pの濃度増加は底泥からの溶出であることがわかる。T-Nについては実験開始直後から増加するのに対して、T-Pは溶出が遅れることが、特に大村湾の資料から分かる。T-Pは約90時間後から増加が始まっておりDOがほぼ0となる時間とほぼ一致してい

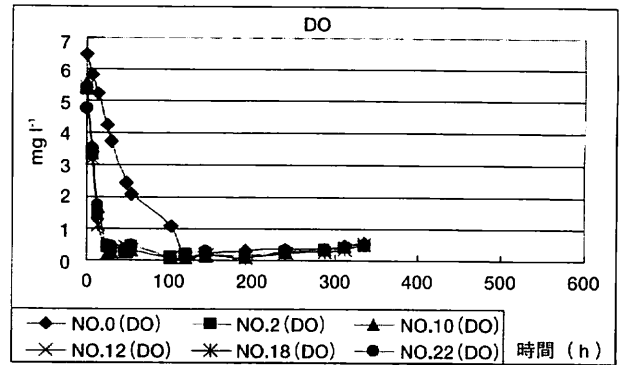


図3 DOの経時変化(有明海)

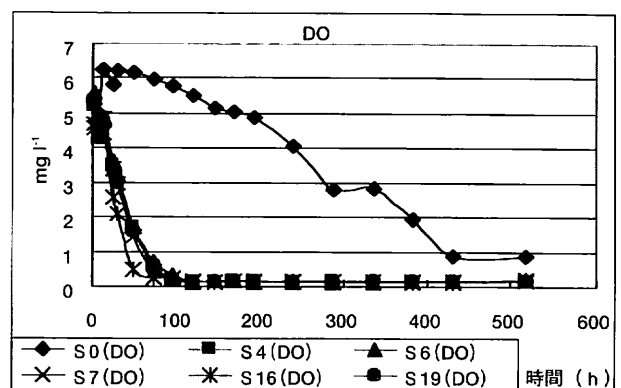


図4 DOの経時変化(大村湾)

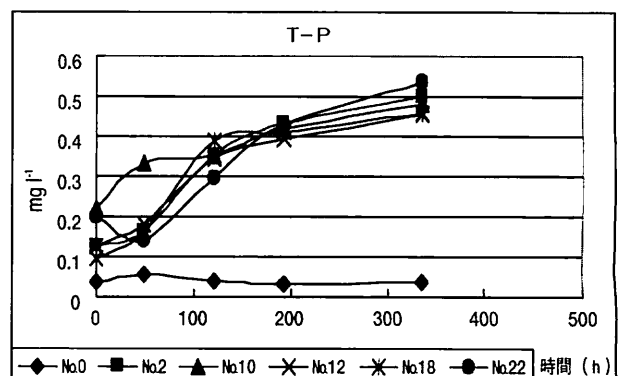
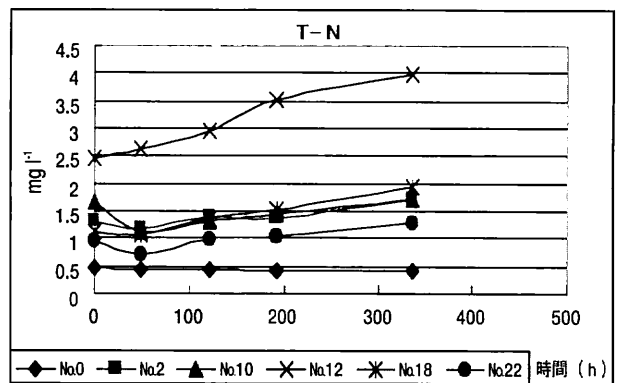


図5 有明海の栄養塩溶出量の経時変化

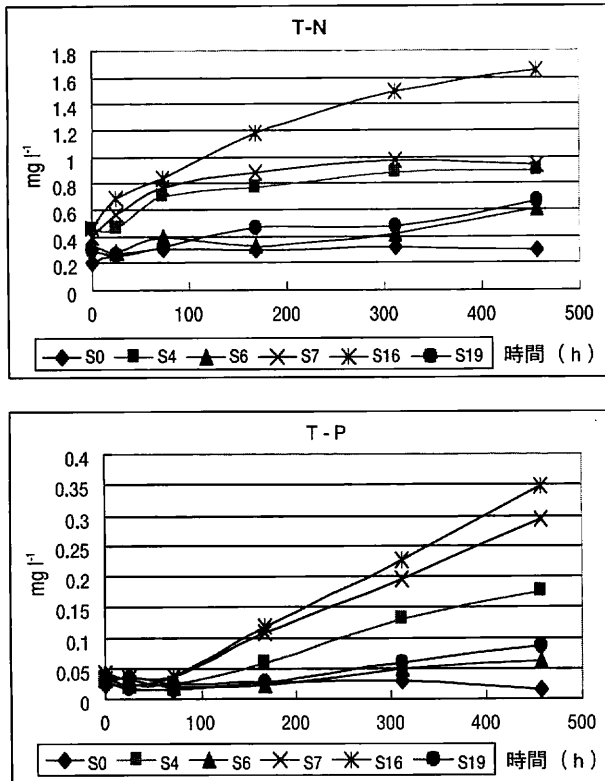


図6 大村湾の栄養塩溶出量の経時変化

ることから、T-PはDOの影響を受け、還元的状態にならなければ溶出されないといえる。

3) 底泥の酸素消費速度と栄養塩溶出速度

底泥の酸素消費速度 ( $v_1$ ) と栄養塩溶出速度 ( $v_2$ ) は下式を用いて算出した。

$$v_1 = (\Delta C_1 - \Delta C_0) \cdot V \cdot 24 / A \quad (\text{mgm}^{-2}\text{day}^{-1})$$

$$v_2 = \Delta C_2 \cdot V \cdot 24 / A \quad (\text{mgm}^{-2}\text{day}^{-1})$$

$\Delta C_0$ : 海水槽のDO減少の傾き ( $\text{mg l}^{-1}\text{h}^{-1}$ )

$\Delta C_1$ : 底泥槽のDO減少の傾き ( $\text{mg l}^{-1}\text{h}^{-1}$ )

$\Delta C_2$ : 栄養塩濃度増加の最大傾き ( $\text{mg l}^{-1}\text{h}^{-1}$ )

V: 底泥上の海水体積 ( $\ell$ )    A: 底泥の表面積 ( $\text{m}^2$ )

実験結果を表3, 4に示す。酸素消費速度についてはCOD<sub>24</sub>に関係することが予想されるようであるが、有明海の方が大村湾より大きい値となっている。また、T-N溶出速度はほぼ等しいもののT-Pについては有明海の方が大きな値をとった。水温制御できなかったため温度の影響が大きいものと思われる。

ここで求めたT-N, T-P溶出速度を他海域で調査された値(土木学会 1999)と比較すると、有明海と大村湾の溶出速度はいずれもかなり低い。他海域で求められた溶出速度にも調査時期および富栄養化の程度により大きな差がある。溶出速度には、温度の他にも流速や底泥性状にも影響されるため本研究では明らかにならなかった。

表3 有明海の酸素消費, 栄養塩溶出速度 (水温29℃)

地点名	底泥の酸素消費速度 ( $\text{gm}^{-2}\text{day}^{-1}$ )	T-N溶出速度 ( $\text{mgm}^{-2}\text{day}^{-1}$ )	T-P溶出速度 ( $\text{mgm}^{-2}\text{day}^{-1}$ )
No.2	6.89	8.11	7.58
No.10	6.94	7.61	4.59
No.12	8.26	27.08	6.61
No.18	7.77	12.09	9.07
No.22	6.32	11.69	11.57
平均	7.23	13.31	7.88

表4 大村湾の酸素消費, 栄養塩溶出速度 (水温20℃)

地点名	底泥の酸素消費速度 ( $\text{gm}^{-2}\text{day}^{-1}$ )	T-N溶出速度 ( $\text{mgm}^{-2}\text{day}^{-1}$ )	T-P溶出速度 ( $\text{mgm}^{-2}\text{day}^{-1}$ )
S4	1.69	14.26	1.03
S6	1.97	6.26	0.36
S7	1.73	20.07	2.12
S16	2.41	26.51	2.51
S19	1.99	4.44	0.52
平均	1.96	14.3	1.31

## 5. まとめ

底泥溶出実験を行い、次のことがわかった。

- ・ 底泥のDO消費と栄養塩溶出の状況を把握し、この2つの関連性、特にDOとT-Pの関係を明らかにした。
- ・ 実験から酸素消費速度と栄養塩溶出速度を求め、評価した。

栄養塩溶出は温度・流速・底質粒径など底泥の特性によって異なると考えられるので、これらを評価する実験が必要である。

## 6. 文献

- 木元克則・西内 耕・岡村和磨 2003 有明海における溶存酸素分布. 月刊海洋, 35, p.261-265.
- 土木学会 1999 水理公式集H11版, p.609, p.677.
- 松岡数充 2003 諫早湾における赤潮原因プランクトンの最近の変化. 月刊海洋, 35, p.246-250.



# 諫早湾のセディメントトラップ試料S9の元素組成の特徴

石賀裕明\*

## Geochemical composition of sediment trap sample S9 collected in Isahaya Bay of Ariake Sound, Japan

Hiroaki Ishiga\*

### はじめに

諫早湾のセディメントトラップ試料の元素組成の分析を行ったのでここに報告する。セディメントトラップは水中の懸濁物や生物に由来する。それらは陸源の粘土鉱物と高等植物起源の有機物、そして海域で形成される基礎生産に由来する有機物などからなる。粘土鉱物は堆積環境に影響を受けその元素組成を変化させる。また、海洋プランクトンは生体濃縮を行い、重金属（主に亜鉛、鉛、銅、バナジウムなど）を生体内部に蓄積する傾向がある。生態系のより高次の生物ほどこれらの元素は濃縮傾向があることは良く知られている。懸濁物にはこれらのプランクトンの遺骸が含まれ、基礎生産量に比例してセディメントトラップ堆積物の元素組成を変化させると考えられる。しかし、これらの変化が総合されたものが堆積物の元素組成を構成する。また、海洋の酸化還元電位の変化によっても鉄、マンガンをはじめ銅やその他の重金属濃度も変化するのでここでは限られた試料のなかで可能な限りマンガンの定量も行った。以下にその概要を示す。

### セディメントトラップ試料について

試料は2002年9月から2003年11月にかけて採取された6試料(S9-1~6)である。測定を行ったのは主元素(TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MnO)および微量元素(As, Pb, Zn, Cu, Ni, Cr, V, Sr, Y, Nb, Zr, U, Th, Sc, Br, I, TS)である。分析は

試料を110℃で乾燥後、粉体として、粉末プレス法による蛍光X線分析によった。MnOは乾燥粉末試料を1050℃にて強熱減量を行った後にガラスビードを作成して測定を行った。微量元素のうちAs, Pb, Zn, Cu, Ni, Cr, V, Br, I, TSは環境評価において有用な元素である。一方、Y, Nb, Zr, U, Th, Scは粘土鉱物の後背地の組成を反映する元素である。CaOやSrは炭酸カルシウムとして貝殻や石灰質の生物片に濃縮する傾向がある。

### 主 元 素

TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は試料間で大きな変化はない。CaOはS9-3(03Jan-Feb)で4.47wt%と最も高い。他の試料では1.22wt%-1.99wt%である。P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>は0.20wt%前後であるがより詳細に見ればS9-1, S9-2は0.18wt%で最も低く、S9-5の試料で高い(0.26wt%)。MnOについてはS9-1(MnO=0.27wt%)からS9-6(0.14wt%)まで値はやや変化するが、緩やかな減少傾向が見られる。

### 微 量 元 素

微量元素ではAs, Pb, Crは試料間での変化は少ない。ZnはS9-3で最も低く(Zn=97ppm)、その他の試料は全て110ppm以上である。CuはS9-1の試料で最も高く(Cu=43ppm)、その他の試料では22-26ppmである。

Nb(8-9ppm), Zr(118-125ppm), U(2.3-2.5ppm), Th(7-8ppm), Sc(12-15ppm)などは試料間での組成の変化は少ない。

\* 島根大学総合理工学部地球資源環境学科

\* Department of Geoscience, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University

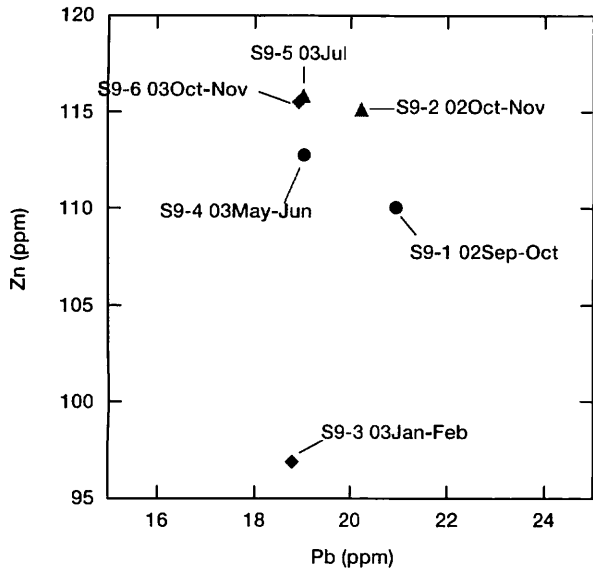


図1 諫早湾のセディメントトラップ試料のZn-Pbの相関図

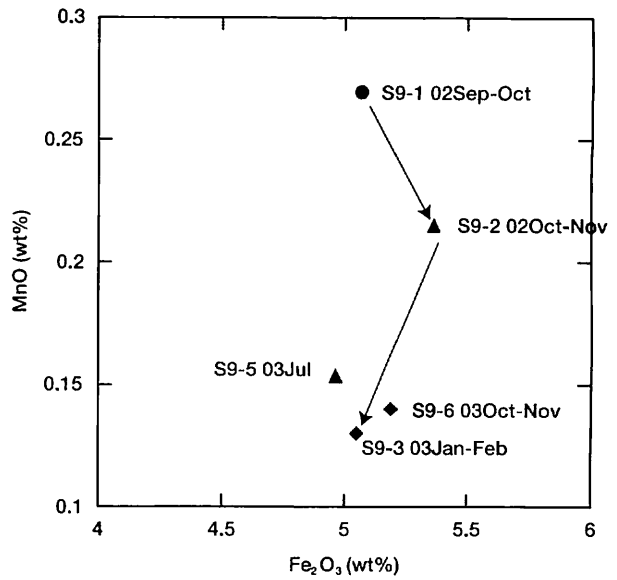


図3 諫早湾のセディメントトラップ試料のMnO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相関図

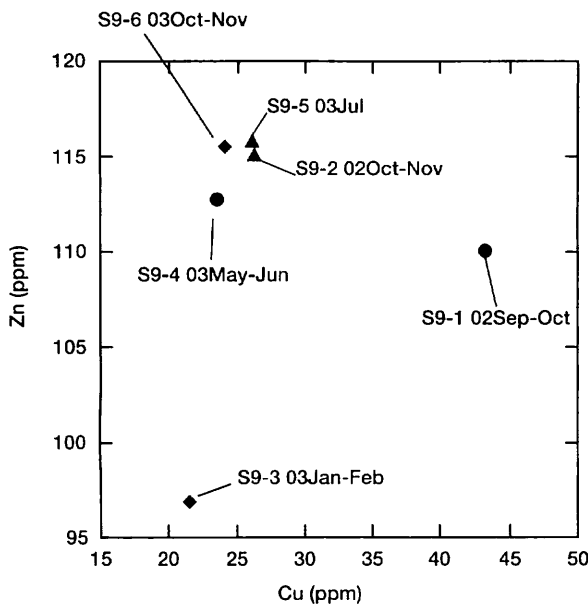


図2 諫早湾のセディメントトラップ試料のZn-Cu相関図

図1はZn-Pbの相関を検討したものである。試料間のPb濃度の変化に対してS9-3(03Jan-Feb)のZnは著しく低くなっていることが分かる。この試料はCaOが4.47wt%と高くなっており、貝殻や炭酸塩を構成物とする生物片が含まれている可能性が考えられる。しかし、上述のようにPb, Cu, Crなどで顕著な減少傾向を示さないで炭酸塩鉱物による希釈効果は少ないものと考えられる。Znは生体濃縮により濃縮しやすい元素であり、また、海生の藻類に濃縮する。従って、もっともZnの低い試料は基礎

生産の低下した、しかも比較的堆積環境が酸化的事であったことが予想される。試料採取した時期は1月から2月でありこのような推定と矛盾しない。

図2はZn-Cuの相関を示す図である。S9-1(02Sep-Oct)の試料はCu=43ppmと最も高くなっている。Cuは生態系や堆積物の堆積環境との関係では不明瞭な点が多いが、一般にはMnと化学的な挙動が類似しているとされている。そのため、酸化還元環境の変化によって堆積物中への濃縮の程度に影響がある。S9-1の試料の形成時には比較的海水中にCu濃度が高く、他の試料にくらべこの試料中に2倍程度の濃縮を生じたのではないかとと言える。

次にMnO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の相関を検討した。鉄—マンガンは一般には酸化還元環境の変化により堆積物からの溶出や溶液からの沈澱について類似の挙動を示すとされている。しかし、イオン化傾向ではMn<Feであり、Feの酸化水酸化物や酸化物(FeOOHやFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)に対して選択的にMnがMnO<sub>2</sub>として析出すると考えられる。海洋水では鉄はもともと不足しておりたえず陸水環境から補給されていることが多い。しかし、還元的な環境ではリンと共に堆積物から鉄が溶出すると想像されている。このような環境変化と堆積物中のFe-Mn含有量は微妙な関係を持っていると想像される。分析値をもとにMnO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の相関を図3に示した。

MnO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相関図ではS9-1試料からS9-3試料へFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に対してMnOが減少していることが明ら

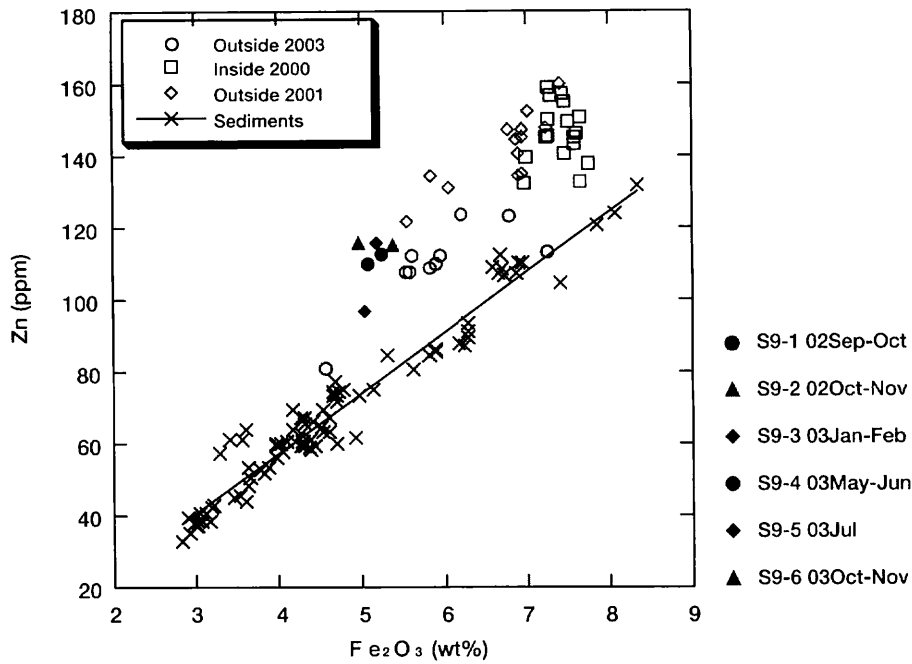


図4 諫早湾のセディメントトラップ試料の組成をZn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相関図にプロットしたもの。比較のために諫早湾の締め堤防の内部および外部の試料もプロットした。

かである。一般の堆積物のMnO濃度は0.10wt%以下であるのでこの変化は海水中の環境や海水組成の変化に対応しているものと思われる。S9-5およびS9-6試料ではMnOおよびFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の値はS9-3のそれとほぼ同じ濃度となっている。従って2002年の9月から10月にかけては海水中のマンガン濃度は高くなっており、それ以降は次第に低下したことが予想される。このことは先に述べたようにCu濃度がS9-1試料で最も高くなっていることと調和的である。

最後に諫早湾の内部及び外部の堆積物の組成との比較を行う。別にまとめたZn-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の相関図にセディメントトラップ試料の組成を示す(図4)。

S9-3の試料はその他の試料と比較してFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に対してZn濃度がやや低くなっている。その他の試料は2001年に採取された諫早湾の堤防の外側の試料

の組成が構成する組成線にほぼ重なるところにプロットされる。2003年の同じく堤防の外側の試料ではこの組成線よりも亜鉛が低い領域にプロットされる。堤防の締め切りによる環境がわずかつつ変化していることを示唆する。セディメントトラップ試料は季節変化を明瞭に示しており、2003年の1月～2月には生物生産性の低下と環境の変化により亜鉛濃度のセディメントトラップ試料への濃縮がわずかばかり減少していること示しているものと思われる。有明海の堆積物はこのようにわずかな変化に対応して元素組成をかえていると言える。逆に言えば、このような重金属の濃度やそれらの組み合わせによる判別図は環境評価の有効な指標となっていることが明らかである。

# 干拓による有明海の潮流の変化：1940年代と1990年代の比較

万田敦昌<sup>1)</sup>・松岡数充<sup>2)</sup>

## Changes in Tidal Currents in the Ariake Sound Due to Reclamation

Atsuyoshi Manda<sup>1</sup>, Kazumi Matsuoka<sup>2</sup>

### 1. はじめに

有明海では1960年代後半から1970年代に渦鞭毛藻シスト群集が変化したことが柱状堆積物試料の分析結果から指摘されている(松岡, 2004)。またアサリなどの貝類資源の減少も1980年代前半から顕著になっている(水産庁増殖促進部, 2001)。これらの現象は1960年代後半から1980年代にかけての生態系の変化を推察させるものである。有明海湾奥部では、主に干拓により1960-70年代に湾の面積が減少した。湾面積の減少によって一般的に湾内の潮流流速が減少することは広く知られている(例えば柳・大西, 1999)。潮流流速の減少は、密度成層の強化や、底質の細粒化など、物理環境の変化を引き起こすと推察される。そのような物理環境の変化は、上述のような生態系の変化と何らかの関係がある可能性がある。そこで、1960-70年代に行われた干拓が、有明海の潮流流速に及ぼす影響を数値実験によって検討した。

### 2. 数値模型

使用した数値模型は、プリンストン海洋モデル(Blumberg and Mellor, 1987)である。順圧モードのみの水平2次元の計算を行った。海底摩擦に関しては、塚本・柳(2002)と同様にマニング式を用い、粗度係数は0.02とした。開境界における境界条件と

して、橘湾湾口においてM<sub>2</sub>潮の潮位変動を強制的に与えた。その際の振幅と位相はそれぞれ、78cm、229°とした。

### 3. 実験条件

1960-70年代の地形改変の影響を見るために、下記の4種類の地形条件のもとで実験を行った。

実験1：'40年代の地形, 堤防なし

実験2：'90年代の地形, 堤防なし

実験3：'90年代の地形, 堤防あり

実験4：'40年代の地形, 堤防あり

ここで'40年代の地形とは、1929年発行1941年小改正の海図をもとに、客観補間によって作成された地形データのことを指す。また、'90年代の地形とは、日本海洋データセンター提供のJ-EGG500データセットと米国地質調査所提供の海岸線データをもとに作成した地形データのことを指す。堤防とは、諫早湾潮受け堤防のことを指している。'40年代の地形と'90年代の地形は、それぞれ1960-70年代以前とそれ以後の地形条件を代表している。

なお、地形変化の影響だけを見るため、上記実験において数値模型の開境界条件やパラメータは全て同一の値とした。

### 4. 結果

図1は潮流楕円の長軸の長さ(最大流速)の減少

<sup>1)</sup> 長崎大学生産科学研究科

<sup>2)</sup> 長崎大学環東シナ海海洋環境資源研究センター

<sup>1</sup> Graduate school of Science and Technology, Nagasaki University

<sup>2</sup> Institute for East China Sea Research, Nagasaki University

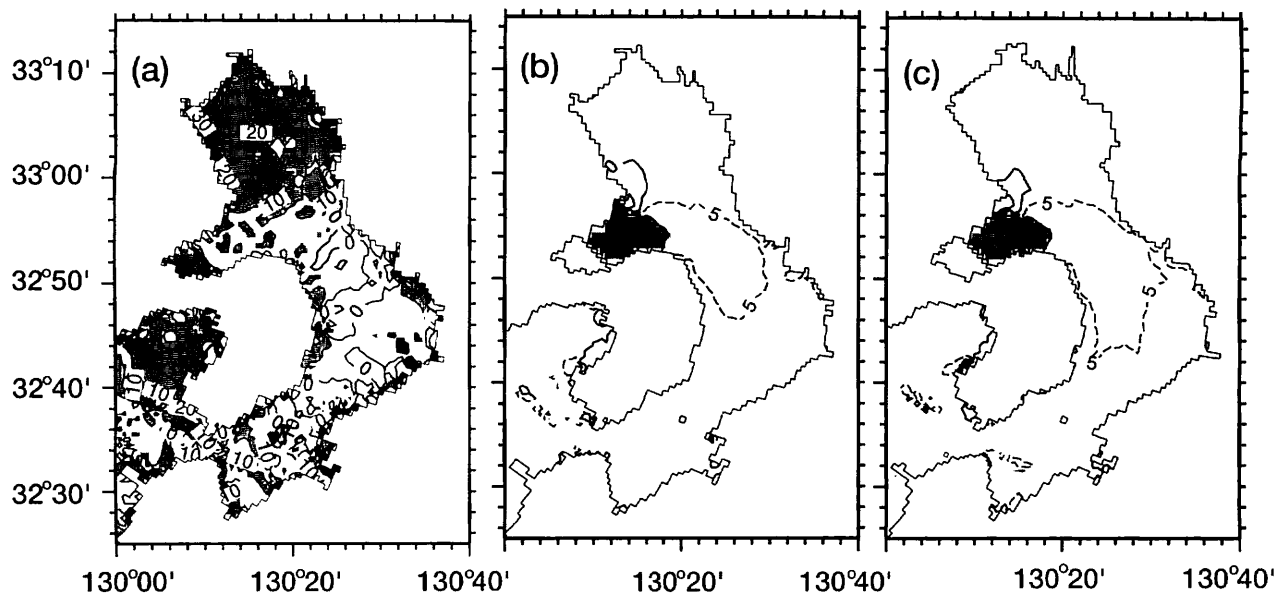


図1 潮流楕円の長軸の長さの減少率(%). 等値線間隔は10で、値が10以上の範囲に陰影をつけている。但し点線は5%の等値線を示す。

率を示している。図1(a)は実験1と比較して、実験2で最大流速がどの程度減少したかを示している。橋湾北部と口之津周辺に加え、有明海湾奥の広い範囲において最大流速が10-20%減少している。図1(b)は、実験2に対する実験3の減少率を示している。図1(a)とは異なり、諫早湾内を除くと主に島原沖合の湾中央部において最大流速が減少している。しかしその割合は5%以下と、図1(a)と比較すると小さい。図1(c)は実験1に対する実験4の減少率を示しているが、これは図1(b)とほぼ同じ結果となった。

### 5. 議論とまとめ

月軌道の昇降点の変動に伴う潮位振幅の変化の影響(武岡, 2003)を検討するため、実験1と実験2における開境界の潮位振幅をそれぞれ-4%と+4%した場合を比較した。この場合においても、湾奥で10-20%最大流速が減少するという結果が得られた。このことから地形改変の影響は、月軌道の昇降点の変動に伴う湾口の潮位振幅の変化で打ち消されることは無いと考えられる。

1960年代以前の有明海奥部の底質の粒径は現在よりも大きかった(鎌田, 1967)。その影響を検討するため、実験1の粗度係数を大きくした場合(0.025)と実験2の結果を比較した。この場合には最大流速が減少する範囲は小さくなるものの、やは

り湾奥において10-20%程度最大流速が減少するという結果が得られた。

以上の結果は、1960-70年代の干拓によって、有明海における潮流流速が湾奥部の広い範囲で減少したことを強く示唆するものである。

### 6. 文 献

- 鎌田泰彦 1967 有明海の海底堆積物。長崎大学教育学部自然科学研究報告, 18, p.71-82.
- 水産庁増殖促進部 2001 有明海の漁業生産の概要。平成13年度農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会資料集(1), 水産庁増殖促進部, p.108-120.
- 武岡英隆 2003 有明海におけるM<sub>2</sub>分潮の変化に関する講義のコメント。沿岸海洋研究, 41, p.64-64.
- 塚本秀史・柳 哲雄 2002 有明海の潮汐・潮流。海と空, 78, p.31-38.
- 松岡数充 2004 有明海・諫早湾堆積物表層部に残された渦鞭毛藻シスト群集から見た水質環境の中長期的変化。沿岸海洋研究, 42, p.55-89.
- 柳 哲雄・大西和徳 1999 埋め立てによる東京湾の潮汐・潮流と底質の変化。海の研究, 8, p.411-415.
- Blumberg and Mellor 1987 A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, p.1-16. In N. Heaps(ed.), Three-dimensional Coastal Ocean Models, Volume 4. American Geophysical Union, Washington, D.C.