

(55) 博多湾の底層酸素濃度とホトトギス貝の分布に関する研究

Sturdy on the distribution of DO in bottom waters and
Musculista semhousia in HAKATA bay.

山崎惟義*、渡辺亮一*、熊谷博史**、藤田健一***、北野義則****
Koreyoshi YAMASAKI, Ryouich WATANABE, Hiroshi KUMAGAI,
Kenichi Fujita, Yoshinori KITNO

ABSTRACT; DO in bottom waters, temperature, AVS, ORP of sediments and *Musculista semhousia*(MS) in Hakata bay were surveyed monthly for three years, in this sturdy. The DO distribution in bottom waters were estimated by solving diffusion equation based on the observed data. The estimated distribution shows good agreement with observed data. The cohorts of MS and their environmental history were analyzed. We show mass distraction of a cohort was caused by high temperature and low DO. The remediation methods of Hakata bay were proposed.

KEYWORDS; DO distribution, *Musculista semhousia*, cohort; Hakata bay.

1 はじめに

博多湾は福岡市に囲まれた閉鎖性の浅い海域であり、静穏度も高く市民のレクリエーションの場としても親しまれた海域である。しかし、大都市に面した他の閉鎖性海域と同様、底層の貧酸素化や底生生物の死滅などが問題とされてきた^{1,2,3)}。

博多湾の環境に関しては多くの調査研究がなされてきた^{4,5,6)}。しかし、博多湾の環境構造を十分に把握したとは言いきれず、適切な対策も提案されていない。

そこで本研究では、底層酸素濃度の空間・時間分布を推定することにより博多湾の環境構造を解明し、ホトトギスガイを指標底生生物として、そのコホートの環境履歴を追跡することにより、死滅の原因と死滅ポテンシャルを明らかにしようとした。さらに、これに基づき、博多湾における底生生物の保全に関しての提案を試みた。

2 調査方法

2.1 博多湾の概要

Fig.1 に示したように、博多湾は志賀島、能古島、海の中道に囲まれ、平均水深は 8m と閉鎖性の浅い湾である。また、同図から分かるように、湾口から湾奥に向かって水深が浅くなっている。その中で、アイランドシティ、箱崎埠頭などの港湾施設に通じる航路や港内の泊地など水深の深い部分がみられる。さらに、百道、姪浜沖には埋立のために土砂を採取した 2 つの窪地がみられる。

2.2 調査地点、調査期間、調査頻度

調査地点は Fig.1-a に示したように、博多湾の中部東部海域でホトトギスガイの採取地点は 10 点

*福岡大学工学部社会デザイン工学科 (Department of Civil Engineering, Fukuoka University)

**福岡県保健環境研究所 (Fukuoka Institute of Health and Environmental Science)

***九州環境管理協会 (Kyushu Environmental Evaluation Association)

****関東学院大学 (Department of Civil and Environmental Engineering, Kanto Gakuin University)

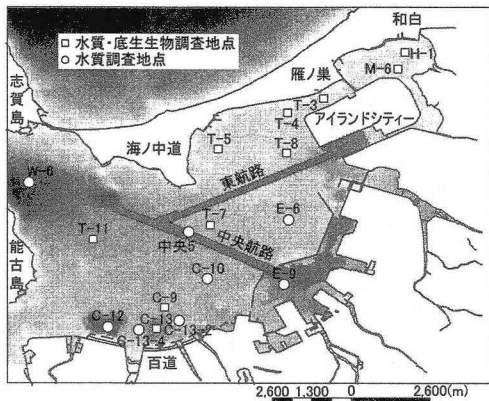


Fig.1.a 全調査地点

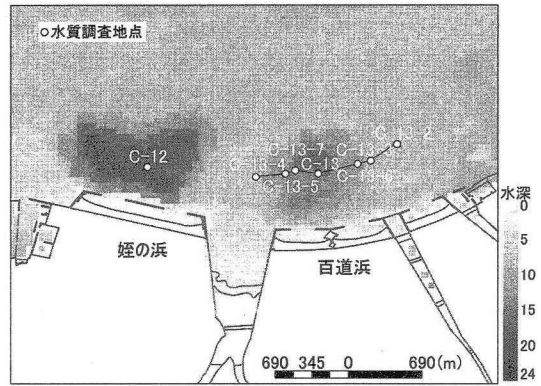


Fig.1.b 窪地周辺の調査地点

であり、水質の測定点は18点である。調査期間は'01年5月～'04年10月である。調査はほぼ一月おきに実施したが、台風などにより調査できなかった月('03年2月、'04年8月)もある。

さらに、'03年6月から8月には、Fig.1-bに示したように、窪地周辺のC-13-2からC-13-4間に測線を設定し、詳細に調査した。

2.3 調査方法

(1) ホトトギスガイの採取と殻長の測定

スミスマッキンタイヤ型採泥器(0.05m²)により、同一地点で5回(全部で約0.25m²に相当)採泥し泥温を測定後、船上にて2mmメッシュの篩上で水洗した試料を持ち帰り、ホルマリンを用いて24時間固定した後、ホトトギスガイをよりわけた。全てのホトトギスガイをバット上に並べ、物差と同一画面上にデジタルカメラで写しこみ、パソコンの画面上で殻長(長径)を測定した。個体数は1m²当りの値とした。

(2) 水質(DO,温度、電気伝導度)

堀場製作所製マルチ水質モニタリングシステムU-22XDを用い、各調査地点において、水面下10cm、海底上10cmと水面下ほぼ1mおきに温度、濁度、電気伝導度、溶存酸素濃度、水圧、pHを測定した。測定は午前9時ころより開始し、午後4時ころに終了した。測定時の潮汐については、特に設定していない。

(3) 底泥(泥温、AVS、ORP)

ホトトギスガイの環境耐性を評価するため、ホトトギスガイ採取に合わせて採泥し、それぞれの採泥に際して、直径5cmの亚克力パイプをサンプル中に差込み、密封後実験室に持ち帰った。持ち帰った直後(最長で採取時より約7時間)、パイプ内のサンプルを押し出ししながら、表層から1cmずつの層に5.0cmまで切り取り、AVS: 酸揮発性硫化物量(検知管法)、ORP(東亜データケーケー社製ポータブルORP計PM-20P)を分析、測定した。以降、用いるデータは5回採泥分の平均値である。

3 調査結果

3.1 ホトトギスガイの殻長分布

調査した殻長分布の例(T-5地点)を、各調査時の結果を一つのボックスとし、縦軸に殻長、各殻長のホトトギスガイ数が全体に占める割合を横軸に、各月のボックスを横に並べ、年度ごとに積み重ね、Fig.2に示した(木村らに倣った⁷⁾)。各ボックスには総個体数も示した。

この地点の例の図から分かるように、総個体数が数百程度以上の場合('01年の7,8月、'03年の7

月～'04年8月まで以外の期間)は、分布に1～2個の山が明瞭に見受けられ、これらの山が時間とともに上へ移動(成長)していることが分かる。一つの山は、ある程度短い期間に着底した(加入してきた)一つのコホートを表していると考えられる。そして、山の移動は春から秋にかけて速く、秋から春にかけて遅くなっており、成長速度の温度依存性によると考えられる。木村らも同様の結果を報告している⁷⁾。

'01年9月から'02年8月まで続いたコホート(コホート7と呼ぶ)に注目すると、このコホートは'02年9月に着底しその後成長してきていることが分かる。そして、5～7月へと大きくなり、7～8月ではあまり変化は見られず、9月には消滅している。この過程が、通常の状態でのホトギスガイのコホートの消長と考えられる。すなわち、9月ころに着底し、次の年の9月に死滅するのが博多湾における代表的なコホートの消長と考えられる。木村らも同様の報告をしている⁷⁾。

ところが、'01年と'03年の5月に見られるコホートは7月に消滅している。9月に死滅する消長が通常の消長とすると、この死滅は何らかの環境的要因で死滅している可能性が高い。

一方、総数が数十と少ない時は、はっきりした山は見受けられない。このような場合は、コホートとして捕らえるのは難しい。そこで、本研究では400個/m²(採取数にして100個/地点)以上存在する場合をコホートとした。

4 解析法

4.1 ホトギスガイのコホート履歴解析

どのような条件でホトギスガイが死滅するのかを明らかにするために、ホトギスガイの履歴解析を行った。全調査データよりホトギスガイコホートを抽出し、34個のコホートを分離した。それぞれのコホートが着底してから消滅するまでどのような環境を経験したかを、それぞれのコホートの所在地点の底層酸素濃度、泥温、底泥表層0-1.0cmのAVS、ORPの値⁸⁾として示した。すなわち、それぞれのコホートが着底(厳密には2mm以上に成長)した時から消滅するまでの各時期の泥温を横軸に、AVS、ORP、DOを縦軸にとり各点を線で結んで図示した。他の項目についても同様である。例として、T-5のコホート7について、AVSをFig.3に、ORPをFig.4に、DOをFig.5に示した。これらの図のマークを結ぶ矢印はそのコホートの着底から死滅(この場合は自然死滅)までの経路を示している。

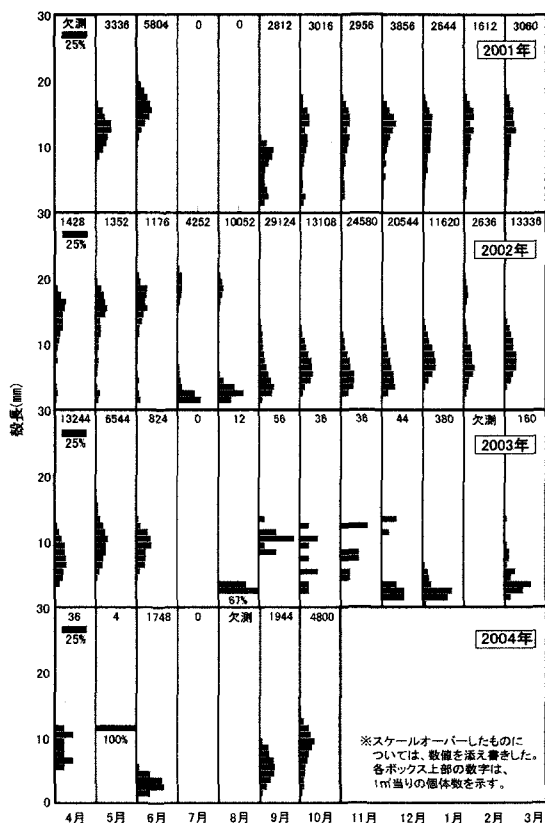


Fig. 2 T-5地点におけるホトギスガイの総個体数に対する般長ごとの比率の変動

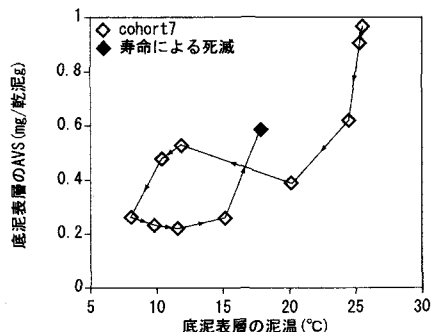


Fig. 3 T-5のcohort7の泥温とAVSの履歴

4.2 溶存酸素濃度分布

(1) 底層酸素濃度・温度分布

調査領域の全体像を知るためには、全ての点の値を知る必要がある。その方法としては、調査地点周りのデータを調査地点の値から内挿（外挿を含む）により推定する方法が多用されている。内挿法には種々の方法があり、Spline 補間が一般的である^{9,10,11,12}。ArcGIS の Spatial Analyst では内挿法として Inverse Distance Weighted (IDW)、スプライン (Spline)、クリギング(Kriging) が提供されている¹¹。

しかし、これらの方法は、境界条件や分布形態などのそれぞれの項目特有の分布メカニズムを無視しているため、不合理な分布となることがある。例えば、底層酸素濃度を補間する場合、水深が浅い岸近くでは実際には酸素濃度が高くなるが、これらの補間法を用いると水深がより深い測定点の値に近い酸素濃度を推定することがある¹²。

そこで、本研究では、まず調査領域の海水を、平均海面を基準にして、水深 1m の水平層（全 17 層）に分割した。そして、各層において存在する測定値を満足するような平面 2 次元の定常状態の拡散方程式の解で補間した。拡散方程式の境界条件としては、海岸、防波堤、海底および調査領域の境界はフラックスを 0 とした。また、海域のシミュレーションでは鉛直方向の拡散係数は水平方向に対して非常に小さくとられるので、各層間のフラックスも 0 とした。水平方向の拡散係数は場所、方向によらず一定とした。また、拡散係数が方向によらず一定としているので、定常拡散方程式はラプラスの方程式となり、拡散係数の値そのものは不要となる。拡散計算でのメッシュは 50m×50m とし、計算領域全体(Fig. 1-a)で約 58000 個である。

各地点の底層溶存酸素濃度は、その地点の水深と上記の酸素濃度を求めた層の水深が等しい層の酸素濃度の値として求めた。

同様に温度分布も求めた。

(2) 検証解析

このような補間法がどの程度実際の値を示しているのかを明らかにするために、検証を行った。まず、C-9,中央 5,T-4,H-1 の 4 地点の測定値を除いて調査領域にわたって補間した。次に、その除いた地点の補間値と測定値を比較した。

(3) 窪地鉛直酸素濃度分布

百道沖の窪地については貧酸素が早期に現れ、しかも、その強度も強い。そこでこの地点で溶存酸素の鉛直断面における分布を示すこととした。Fig.1-b に示した測線に沿った鉛直断面において、測定点の値から定常状態の拡散方程式を解いて内挿した。ただ、この場合、水平方向の拡散係数を鉛直方向の拡散係数の 10 倍以上にすると、分布にほとんど差が見られなかった。そこで、本解析に当たっては、鉛直・水平の拡散係数の比率を 10 とした。

5 解析結果

5.1 溶存酸素濃度分布

(1) 補間と測定結果の比較

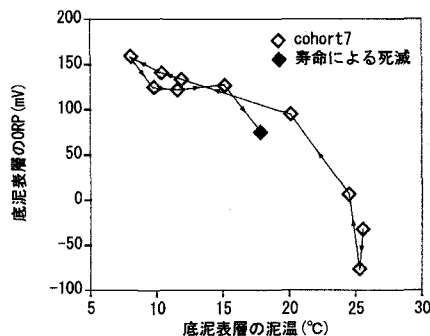


Fig. 4 T-5のcohort7, 10泥温とORPの履歴

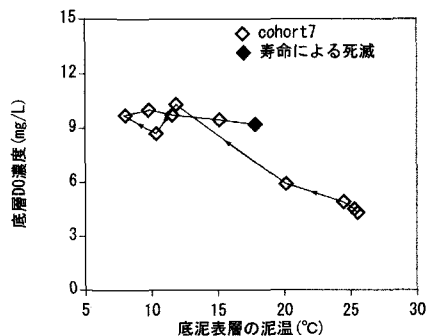


Fig. 5 T-5のcohort7の泥温とDO濃度の履歴

Fig.6 から Fig.9 に縦軸に水深を、横軸に溶存酸素濃度の補間値と実測値をとり図示した。11 月の時点では、どの地点においても補間値と実測値とは良く一致している。これは、博多湾全体で DO がこの時期ほとんど差が無いためである。中央 5 を除いて夏季（6 月、7 月）においても、補間値は実測値をほぼ表しているように見える。すなわち、表層付近は補間値と実測値に若干の差が見られるが、底層に行くにしたがってその差は小さくなっている（精度も上がっているものが多い）。その中で、H-1 (Fig.8) は水深によらず非常によく合っているが、これはこの地点が実測地点 M-6 地点(Fig. 1-a) に近接しているためと考えられる。

一方、中央 5(Fig. 6)では、水深 7-8m 付近で補間値と実測値にかなり大きな差が見られる。これは、この点は航路横で水深が深い(14m)が、周辺に水深の深い測定値が無く（隣接する T-7 で水深 8m 程度）、8m 以下の水深の補間値は遠距離にある E-9、T-11、W-6 の (Fig. 1-a)の値から補間しているためと考えられる。また、水深 7-8m 付近で差が大きいのは、隣接する T-7 の実測値が影響しているためと考えられる。すなわち、T-7 地点では 8m 層は底に接しているのに対して、中央 5 の地点は水中に存在している。この補間では、鉛直方向の輸送を無視しているため、この地点の 8m 層では T-7 の影響で溶存酸素濃度が小さく見積もられたと考えられる。しかし、値に差はあるものの、補間値と測定値は定性的に同様の傾向を示している。すなわち、水深が深くなるにつれて水深 6~8m まで DO は低くなり、それ以深では一旦 DO は高くなり、9m 以深では再び低くなる傾向を示している。また、底層付近では補間値と測定値の差が小さくなっている。

このように、若干の問題はあるものの、この方法により調査領域全体の底層の DO はほぼ推定できたとと思われる。

(2) 補間した底層底層酸素濃度分布

上記の方法により、底層の DO 濃度が測定値から推定できたと考え、全ての測定値に基づいて全調査領域にわたって、底層 DO 濃度を推定し、'03 年 6 月から 8 月のデータを、Fig.10 から Fig.12 に図示した。これらの図から次のことが分かる。①'03 年 6 月の時点で百道沖の 2 つの窪地では 1.0mg/L 以下の低酸素となっている。同時期に港内と和白付近および T-5 付近で 2-3mg/L の低酸素となっている (Fig.10)。②'03 年 7 月の時点で、窪地は 1.0mg/L 以下が続き、窪地から東の海域、港内、T-5 付近で 1-2mg/L の低酸素となっている。しかし、和白付近では返って底層 DO は上昇している (Fig.11)。

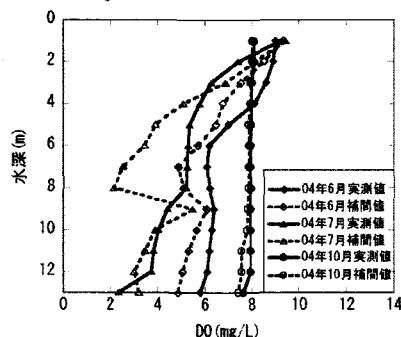


Fig. 6 中央5におけるDOの補間値と実測値

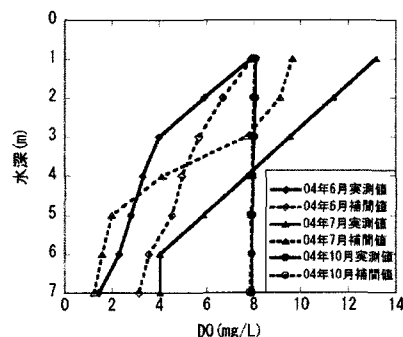


Fig. 7 C-9におけるDOの補間値と実測値

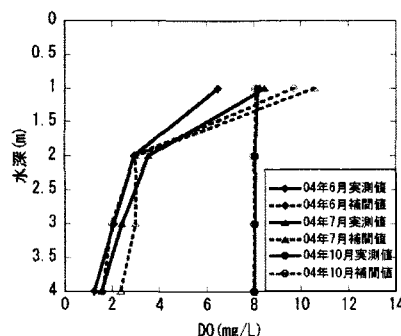


Fig. 8 H-1におけるDOの補間値と実測値

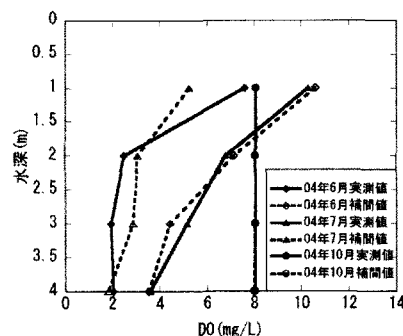


Fig. 9 T-4におけるDOの補間値と実測値

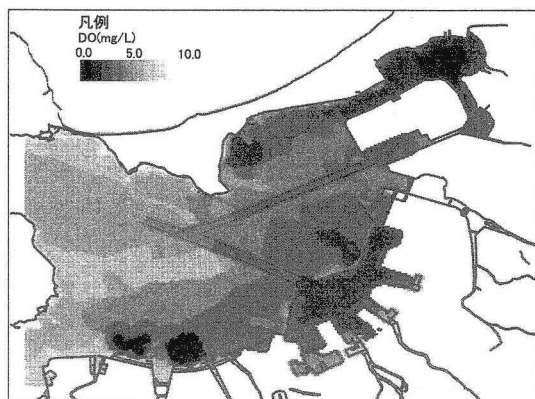


Fig.10 底層DO補間結果①('03年6月)

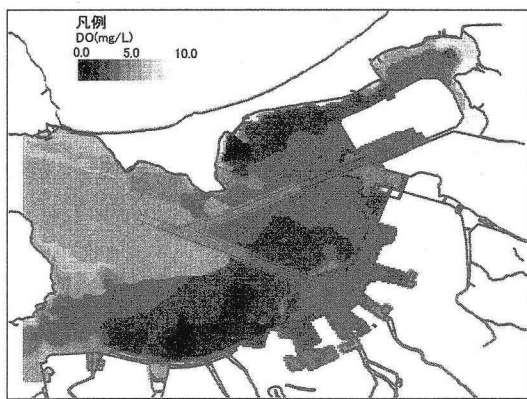


Fig.11 底層DO補間結果②('03年7月)

③'03年8月の時点では、低酸素の領域が湾全体に広がっており、特に低酸素の領域は②の場合と大差ない (Fig.12)。

このように、窪地付近、T-5、港内、和白海域から湾口に向かって底層の低酸素が広がっていく様子が分かる。

(3) 窪地鉛直酸素濃度分布

百道沖にある2つの窪地のうち、東に位置する窪地の'03年6月、7月、8月の鉛直酸素濃度分布をFig.13に示した。この図から次のことが分かる。

①6月には窪地底部の水深12m以下は1.0mg/L以下の濃度になっており、等濃度線はほぼ水平になっている。一方、表層付近は10mg/L以上の高濃度になっている。②7月では1.0mg/L以下の濃度の部分が広がっている。ただ、この時点では1.0mg/Lの等濃度線がかなり傾いている。しかし、その他の等濃度線はほぼ水平である。③8月では1.0mg/Lの等濃度線は窪地の上、水深7mの付近まで上昇してきている。

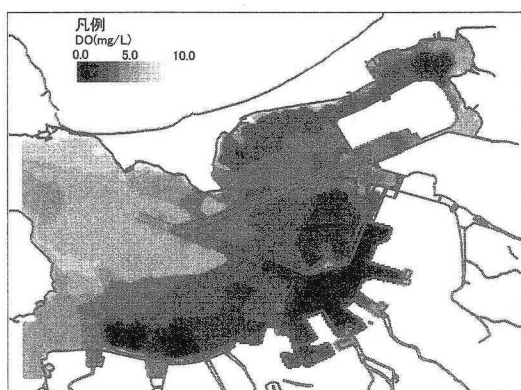


Fig.12 底層DO補間結果③('03年8月)

5.2 ホトトギスガイコホートの履歴解析

本調査で得られた全34のコホートについて、環境要因による突然消滅の要因を抽出するため、

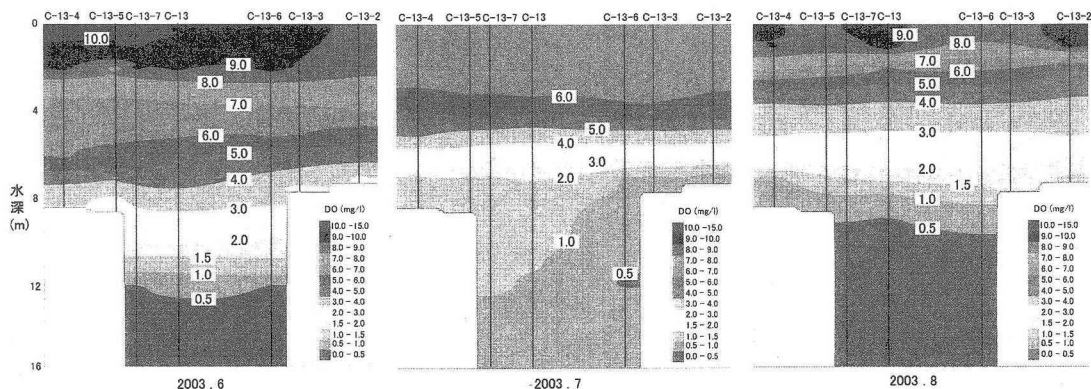


Fig.13 鉛直方向DO分布経月変化

4.1(1)で述べた方法により、全コホートについて Fig.14 から Fig.16 に示した（ただし、これらの図では履歴の追跡線は除いている）。これらの図では、自然消滅した条件は灰色の塗りつぶしで、突然消滅した条件は黒塗りで示した。

(1) 温度・酸化還元電位

温度・酸化還元電位履歴を示した Fig.14 を見ると、寿命以外により突然死滅した黒塗の点は酸化還元電位では-100mV から+100mV まですでかなり広範囲に広がって

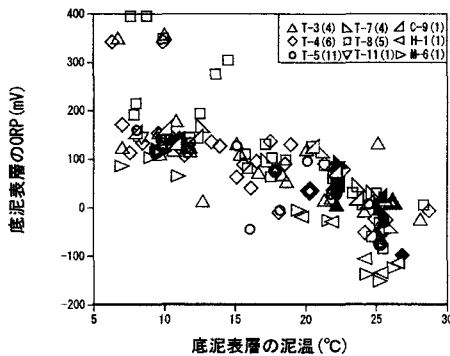


Fig. 14 全cohortの泥温-ORP履歴

いることが分かる。温度は 22℃から 27℃の範囲である。また、コホートが存在した点（白塗）と突然死滅の点（黒塗）とが入り混じっている。このことから、温度・酸化還元電位により突然死滅を説明することは難しいように見える。

(2) 温度・AVS

温度・AVS 履歴を示した Fig.15 を見ると、寿命以外により突然死滅した黒塗の点は、AVS でみると、0.1mg/乾泥g から 1.4 mg/乾泥g とかなり広い範囲に分布していることがわかる。この幅はほとんど全測定値をカバーしている広さである。また、当然ではあるが、AVS においてはコホートが存在した点（白塗）と突然死滅の点（黒塗）とが入り混じっている。このことから、AVS により突然死滅を説明することは難しいように見える。

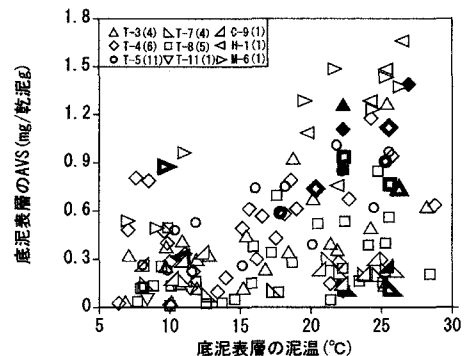


Fig. 15 全cohortの泥温-AVS履歴

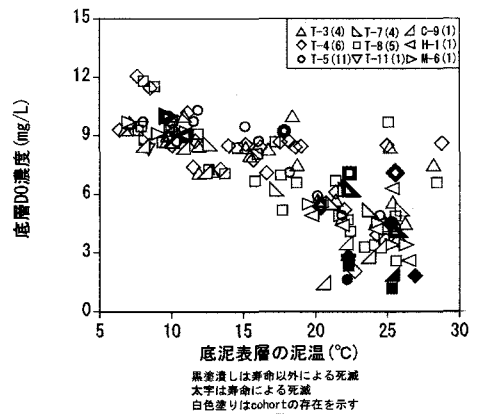


Fig. 16 全cohortの泥温-DO履歴

(3) 温度・DO

温度・DO 履歴を示した Fig.16 を見ると、寿命以外により突然死滅した黒塗の点は、DO3mg/L 以下に集中していることが分かる。温度は 22℃から 27℃の範囲である。この領域にはコホートが存在していた点（白塗）は少ない。このことは、この領域に入るとホトトギスガイは死滅するか存在し得ない可能性が高いと考えられる。

そこで、この領域を拡大して Fig.17 に示した。同図には、コホートの存在しない点（灰色）と突然消滅した点（黒）とコホートが存在していた点（白）を示した。また、黒の点と灰色の点が存在する領域を線で示した。この領域には白の点は 5 点である。全 44 点中 5 点のみがコホートの存在を示しており、この領域内

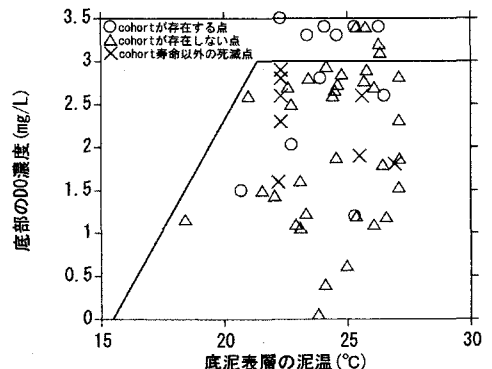


Fig. 17 ホトトギスガイ死滅ポテンシャルの高い領域

ではコホートが存在する確率はかなり小さいと考えられる。そこでこの領域を死滅ポテンシャルの高い領域と考えた。

5.3 底生生物死滅ポテンシャルの空間・時間分布

上記の高死滅ポテンシャルの領域が、博多湾においてどのような時間・空間分布を示しているかを推定するために、底層 DO と同様に底層温度も同様の方法で推定し、この条件に入ったメッシュを'03 年 6 月、7 月、8 月の期間について Fig.18 から Fig.20 に示した。同図には、ホトギスガイの存在密度も合わせて示した。

この図に示された領域が時間・空間的に底生生物の死滅ポテンシャルの高い領域と推定される。

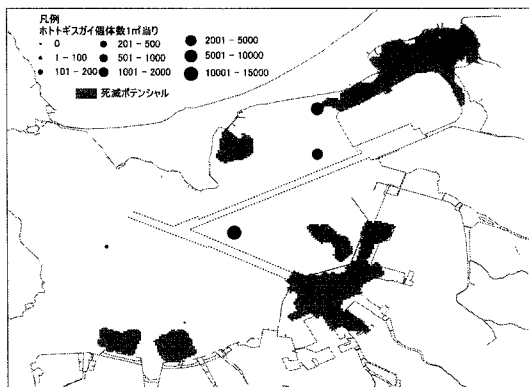


Fig.18 博多湾におけるホトギスガイの高死滅ポテンシャルの分布①('03年6月)

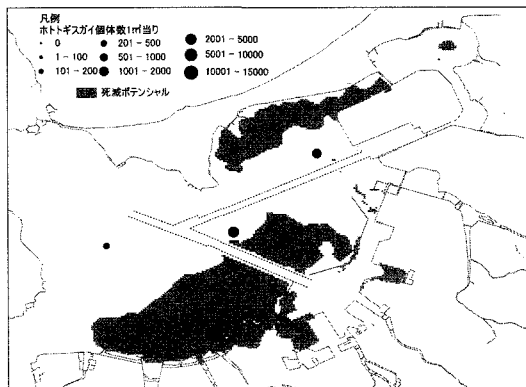


Fig.19 博多湾におけるホトギスガイの高死滅ポテンシャルの分布②('03年7月)

6 考察

6.1 底層酸素濃度分布内挿法の妥当性

全調査領域にわたった底層酸素濃度を試みたが、Inverse Distance Weighted (IDW)、スプライン (Spline)、クリギング(Kriging)などの方法で生じる不合理な点が無く、ほぼ妥当な内挿結果が得られたと考えられる。これは、これらの方法が環境現象のメカニズムを考慮しておらず、単なる内挿法であり、二次元の内挿法であるのに対し、本法は移流による輸送や非定常性は考慮していないものの、拡散による輸送を考慮に入れたこと、また、鉛直輸送は考慮していないものの、準三次元的な手法であることによると考えられる。特に、鉛直方向の輸送を無視したにもかかわらず、準三次元的な現象をある程度再現できたのは、博多湾が成層し易く鉛直混合が生じにくい海域であったためと考えられる。

しかし、周辺より水深が深い航路内の中央 5 地点 (Fig.6) での検証結果は、周辺の海底の水深 (8m) 付近で内挿値と測定値にかなりの相違がある時期 (8 月) もある。これは、周囲が海底の地点ではこの時期底泥による酸素の消費により底層付近で酸素濃度が低下しているが、この水深は航路では中層に当たっており、周辺のように底層による消費がないこと、また、下層からの輸送もあるためによるのではないかと考えられる。

また、T4 地点 (Fig.9) では、全水深にわたって内挿値と測定値がずれている。この結果について

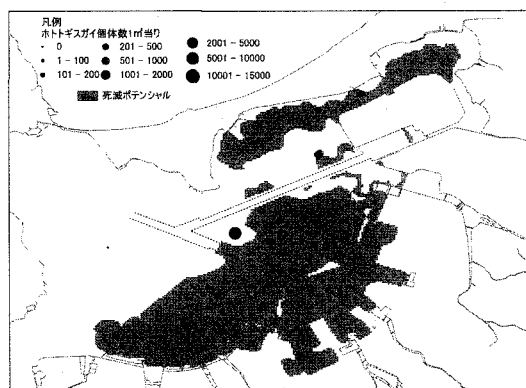


Fig.20 博多湾におけるホトギスガイの高死滅ポテンシャルの分布③('03年8月)

は十分な考察は難しいが、この地点に近接し内挿に影響を与えたと考えられる T-3 地点は水路状の狭窄海域となっており、他の海域と比較し鉛直混合が激しい地点であることによるのではないかと考えられる。

いずれにしても、本内挿法は流れや地形が複雑な地点では、十分な精度が得られない可能性があると考えられる。さらに、底泥による酸素の消費を考慮していないため、底泥による酸素の消費が場所的に大きく異なる地点でも問題が生じる可能性がある。このような場合は調査点の配置を十分考慮して本手法を適用する必要があると考えられる。

このように問題はあっても、本手法により本調査の全領域にわたる底層酸素濃度の季節的、空間的分布をほぼ推定できたのではないかと考えられる。

6.2 ホトトギスガイの突然死滅の原因

博多湾における代表的な底生生物であるホトトギスガイについて、その寿命以外による突然の死滅についてその原因を明らかにするため、全 34 のコホートに対し、底泥の温度、AVS、ORP ならびに底層の DO に関してその履歴を追跡した。その結果、温度と底層 DO 以外の項目が突然の死滅に影響を与えているとは考え難い結果を得た。すなわち、ホトトギスガイの突然死滅の原因としては高温・低酸素によって説明できると考えられる。この結果（低酸素でも低温では殆ど死滅しないことも含め）はホトトギスガイの死亡の室内実験の結果ともよく一致している¹³⁾。

そこで、死滅の可能性の高い泥温と底層酸素濃度の領域を Fig.18 から Fig.20 のように示した。すなわち、博多湾ではこの領域の環境になるとホトトギスガイが死滅する可能性が高いことを示すことができたと考えられる。

6.3 ホトトギスガイ死滅ポテンシャルの時間空間分布

上記のホトトギスガイが死滅する可能性が高い環境領域をホトトギスガイ死滅ポテンシャルの高い環境と考え、本調査の全領域にわたって図示した。また、同図にホトトギスガイの存在量を合わせて示し、ホトトギスガイの死滅と高死滅ポテンシャルの領域とがよく一致することを示した。このことから、博多湾におけるホトトギスガイの死滅する地点とその時期を推定できたと考えられる。

6.4 博多湾における底生生物の保全

ホトトギスガイが全ての底生生物を代表するとは考えられないが、現時点の博多湾ではその存在量が最も多く、広範囲に棲息している。また、ホトトギスガイは着底後は移動することがなく、その地点の環境を現す指標性が高い。さらに、漁獲対象となっておらず漁獲圧による攪乱も少ない。そこで、ホトトギスガイを指標にして、底生生物について検討可能ではないかと考え、その保全についての検討を試みる。

Fig.18 に示したように、百道沖の窪地と和白沖で早期に高死滅ポテンシャル領域が出現し、これらの領域が周辺に広がるように見える。そこで、この二つの領域に分けて検討する。

窪地に対しては、技術的にはこれを周辺海域と同じ高さまで埋めるのが最も容易と考えられる。現在、アイランドシティに向かう航路の浚渫が検討されており、この浚渫土で埋めると言う案が考えられる。ただ、その場合、その周辺への高ポテンシャル領域の広がりが防止できるかどうかについてはさらに検討が必要と考えられる。

和白沖の海域はアイランドシティの埋立に伴い、海水混同が弱まったと考えられる。また、この海域では密度成層と底層酸素濃度の低下が非常によく同期していることが知られ知られている¹⁴⁾。さらに、底層が貧酸素の時期には表層が高酸素濃度になることも知られている。そこで、この海域では T-3 地点付近の狭窄部の速い流速を利用した海水の上下混合も底層低酸素化に対する対策の一つとして提案される^{15,16,17)}。

7 結論

水平二次元の拡散方程式を解くことにより、準三次元的底層酸素濃度分布の推定法とその有効性を示した。

ホトトギスガイのコホートの環境履歴を追跡することにより、博多湾におけるホトトギスガイの寿命以外による突然死滅の要因が高温・低酸素であることを示した。

ホトトギスガイの高死滅ポテンシャルとして、高温・低酸素環境を挙げ、博多湾における高死滅ポテンシャル領域の時間的空間的分布を示した。

上記の分布により、博多湾においては、百道沖の窪地と和白沖の海域からこの領域が広がる様子を示した。

博多湾における底生生物の保全手法として、ホトトギスガイを指標に、百道沖の窪地の埋戻しと和白沖海域の海水の上下混合を提案した。

謝辞

本研究に当たり、調査では福岡大学水圏システム研究室の学生諸君の尽力が多岐である。また、文部科学省科学研究費補助金課題番号16560487の補助金を一部使用した。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 児玉真史, 松永信博, 水田健太郎, 徳永貴: 和白干潟における水質の動態に関する現地観測, 土木学会論文集, No.720, Page53-61(2002)
- 2) 児玉真史, 徳永貴久, 松永信博: 干潟における水質の季節変化とその変動要因に関する研究, 海岸工学論文集, Vol.49, No.2, Page1116-1120(2002)
- 3) 熊谷博史, すし本健治, 楠田哲也: 長期連続観測と数値解析による貧酸素水塊の生成消滅機構の解明, 環境工学研究フォーラム講演集, Vol.38th, Page97-99(2001)
- 4) 熊谷博史, 山崎惟義, 渡辺亮一, 藤田健一: 博多湾におけるマクロベントスを考慮した水質解析, 環境工学研究論文集, Vol.41, Page437-446(2004)
- 5) 熊谷博史, 山崎惟義, 渡辺亮一, 藤田健一: 博多湾におけるホトトギスガイが貧酸素水塊に与える影響, 環境工学研究論文集, Vol.40, Page595-606(2003)
- 6) 山崎惟義, 渡辺亮一, 熊谷博史, 藤田健一: 博多湾におけるホトトギスガイの消長死滅シミュレーション, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.58th, No. Disk 2, PageVII-034(2003)
- 7) KIMURA T, SEKIGUCHI H: Some Aspects of Population Dynamics of a Mytilid *Musculista senhousia* (BENSON) on Tidal Flats., Benthos Res., No.44, Page29-40(1993)
- 8) 中村幹雄, 品川明, 戸田顕史, 中尾繁: 宍道湖および中海産二枚貝 4 種の環境耐性, 水産増殖, Vol.45, No.2, Page179-185(1997)
- 9) 加藤進, 中川喜明, 和田一人, 市岡孝生, 松本正: 伊勢湾の貧酸素水塊について, 三重県環境科学センター研究報告, No.9, Page47-52(1989)
- 10) 木幡邦男, 渡辺正孝: 海洋環境データの鉛直 2 次元補間法について, 国立公害研究所研究報告, No.30, Page363-370(1982)
- 11) ArcGIS Spatial Analyst ユーザーズ・ガイド P.136
- 12) 中西敬, 上嶋英機, 上月康則, 平田元美, 宮城佳世: 海生生物の生息空間に及ぼす貧酸素水塊の定量的影響評価, 海岸工学論文集, Vol.48, No.2, Page1061-1065(2001)
- 13) 堤敬見, 山崎惟義, 藤井暁彦, 渡辺亮一: 博多湾におけるホトトギスガイの生態学的調査 (第二報), 平成13年度土木学会西部支部研究発表会後援概要集, Page B-408 B-409(2002)
- 14) 江口洋一, 山崎惟義, 渡辺亮一, 岸川勝典, 博多湾における密度成層エネルギーの蓄積速度に関する研究, 平成16年度土木学会西部支部研究発表会後援概要集, VII959-960(2005)
- 15) 金山進, 佐々木洋之, 佐々木淳, 岡田知也, 春谷芳明, 城野清治, 広海十朗, 中瀬浩太: 密度流を利用した底層貧酸素対策装置の効果とその再現計算, 海岸工学論文集, Vol.51, No.2, Page1166-1170(2004)
- 16) 重松孝昌, 小田一紀, 延広玲子, 遠藤徹, 池田憲造, 小池敏也, 藤田孝: 密度成層場における鉛直循環流誘起堤体の効果に関する研究, 海岸工学論文集, Vol.50, No.2, Page1206-1210 (2003)
- 17) 山崎惟義, 渡辺亮一, 北野義則: 博多湾における密度成層の破壊に関する研究, 日本水環境学会年会講演集, Vol.39th, Page16(2005)