

学位論文

「諫早湾干潟域のアサリ養殖場における貧酸素化とその被害防止対策」

**Hypoxia Formation in an Aquaculture Ground of Short-neck Clams  
(*Ruditapes philippinarum* (Adams and Reeve, 1850))  
at the Tidal Flat of Isahaya Bay and a Preventive Measure  
Against Mass Mortality due to the Hypoxia**

長崎大学大学院生産科学研究科

平野慶二

目 次

	頁
第1章 序論	21
第2章 諫早湾干潟域のアサリ養殖場における貧酸素化の実態と機構	23
研究の背景と目的	23
材料および方法	23
結果	28
考察	37
第3章 大村湾における貧酸素化・青潮の事例との比較	41
研究の背景と目的	41
材料および方法	41
結果	44
考察	54
第4章 養殖アサリの大量へい死防止対策	55
研究の背景と目的	55
材料および方法	55
結果	59
考察	67
第5章 総括	69
謝辞	70
引用文献	71

## 第1章 序論

西九州有明海の支湾である諫早湾北岸の干潟域では、養殖されているアサリが夏季に大量へい死する事例が数年に1度発生している。特に深刻な漁業被害が生じた2004年8月の事例では、水温31℃以上の高水温と約14時間継続した貧酸素環境が複合的に作用したことがその原因と報告されている(松田2008)。しかしながら、干潟域でアサリの大量へい死を引き起こす底層水の貧酸素化の実態やその発生機構については、これまでほとんど明らかにされていない。

東京湾や三河湾など、人為的な富栄養化が過度に進行した内湾では、夏季に底層水が貧酸素化、あるいは極端な場合は無酸素化することが深刻な環境問題の一つとなっている。底層の無酸素水は、風の作用等によって沿岸に移動し湧昇する青潮(あるいは苦潮)をしばしば引き起こし、沿岸浅海域に生息する生物をへい死させる等の大きな被害をもたらしている(柿野ら1986、鈴木ら1998、青山ら1999)。一般に貧酸素化には、酸素の輸送に係る移流・拡散等の物理過程に加えて、底泥や底生生物による酸素消費等の生物・化学過程が関与していると考えられている(鈴木・寺澤1997)。しかし、海湾の地形的な特性等に応じて貧酸素化のメカニズムは複雑多様であり、溶存酸素の動態やその具体的な変動要因について、それぞれの海湾で総合的な調査・研究を進めることが必要となっている。

有明海は干満差が大きく強い潮流による混合のため、かつては貧酸素化が起きにくいと考えられていたが、佐賀県沿岸や諫早湾では夏季の小潮期に底層水の貧酸素化が進行することが報告されている(木元ら2005、田中ら2005、藤井・山本2002)。また、その発生要因に関する検討・解析も進められており、近年頻発するようになった赤潮による海底への有機物供給量の急激な増加(堤ら2007)や、それに加えて降雨による出水の繰り返しにより強い塩分成層が長期間維持されるような海洋条件(濱田ら2008)などが、貧酸素化が最近になっ

て有明海奥部で拡大し顕在化してきたことの直接の要因として指摘されている。さらに、諫早湾底層水の貧酸素化の要因に関しても、ボックスモデル解析により、酸素供給の77%の寄与を持つ鉛直拡散過程が小潮時に弱まり、成層化が進むことに伴って諫早湾湾口から湾内底層に流入する高密度の貧酸素水塊によって短期間に貧酸素化が進行することが明らかにされている(山口・経塚,2006)。

一方、長崎県の大村湾においても、古くから湾中央部で毎年のように底層水の貧酸素化が起こることが知られており(辻田1953)、それが沿岸浅海域に進入し魚介類をへい死させる等の被害を与える青潮(大村湾では澄潮とも呼ばれている)の発生例が報告されている(森1961)。大村湾における貧酸素化については、現地観測や数値モデル解析によってその基本的なメカニズム等が明らかにされてきたが(例えば、野上・松野2001)、年々の変動実態やその要因、青潮発生仕組みなど不明の点も多く残されている。

本研究の主な対象とした長崎県諫早市小長井町地先干潟は、有明海奥部の西側に位置する諫早湾の北岸に位置する泥質の前浜干潟である。1970年代からその泥質干潟の大部分に客土覆砂を行うことによりアサリ養殖が営まれている。1988年には878トン、2億9,000万円を漁獲するなど漁家の主要な収入源となっていたが、近年、夏季に度々アサリの大量へい死が発生し(藤井・山本2002,2003)、漁家経営を圧迫する要因となっている。

干潟及び干潟近傍での貧酸素化(特に無酸素化)は、アサリなど水産有用生物の大量へい死等の漁業被害を招くため、漁業者にとって深刻な問題であるばかりでなく、干潟の水質浄化機能を低下させるため海域の環境保全の面でも重要な問題である。しかしながら、水深2.0m以浅の干潟域の貧酸素化に関しては、既往の研究例がきわめて少なく、その実態や発生機構、生物への影響等の詳細は明らかにされていないのが現状である。さらに、上述のような貧酸素化に伴う有用二枚貝類のへい死を防止するための対策については、三河湾浅海域のアサリ漁場や佐賀県鹿島沖潮下帯のサルボウ漁

場等でいくつか検討された事例はあるものの（今尾・鈴木 2004, 藤田ら 2007）、諫早湾のアサリ養殖場のような干潟域での対策事例の報告はほとんどない。

しながら、今後の検討課題を取りまとめた。

## 本研究の目的および構成

以上のようなことを考慮し、本研究では諫早湾の干潟域で養殖アサリの大量へい死を引き起こす底層水の貧酸素化の実態を継続的に調査し、その実測データに基づくモデル解析によりその発生機構について検討を加えるとともに、貧酸素化によるアサリの被害を防止するための実用的な対策技術を開発することを目的としている。

貧酸素の状態についての定義について、既往の研究によると 2.9~4.3 mg/L の範囲でなされているが (Daiz and Rosenberg 1995, 門谷 1998)、本研究では、アサリのへい死を考慮して、0.3 mg/L 以下を無酸素、夏季のアサリが無機代謝を始めて数日間で大量へい死を起こす可能性がある 0.5mg/L (松田ほか 2006) 以下を強い貧酸素、夏季のアサリの生存を維持するための最低限の酸素濃度の 1.0mg/L (松田 2008) 以下を貧酸素、実際に多くの研究者が有明海において貧酸素と提唱している 3.0mg/L (磯部 2004, 山口ほか 2006, 濱田 2008) 以下を一般的な貧酸素とする。

第2章では、諫早湾の干潟域で養殖アサリの大量へい死を引き起こす底層水の貧酸素化の実態を明らかにし、その発生機構について数値モデルによる解析を行った。第3章では、古くから底層水の貧酸素化や青潮が発生している大村湾で、これまでの観測データの検討とそれに基づく数値モデル解析を行い、2007年9月に発生した青潮の発生機構を明らかにするとともに、諫早湾干潟域における貧酸素化の機構との違いについて考察した。さらに第4章では、貧酸素化の実態に関する調査データが蓄積された諫早湾の釜地区干潟域のアサリ養殖場において、貧酸素化によるアサリの被害を防止する実用的な対策技術の開発試験を実施した。最後に、第5章では、各章の研究成果を総括

## 第2章 諫早湾干潟域のアサリ養殖場における 貧酸素化の実態と機構

### 研究の背景と目的

近年、諫早湾北岸部の小長井町地先干潟のアサリ養殖場では、夏季にアサリの大量へい死による漁獲の減少が社会的問題となっている（藤井・山本 2002, 2003）。その原因としては、赤潮や貧酸素化による影響の可能性が示唆されている（藤井・山本 2003, 松田 2008）。

東京湾や三河湾をはじめとするわが国の内湾では、夏季に底層水の貧酸素化が進行することが社会的な問題となっており、離岸風により貧酸素水塊が沿岸浅海部に進入・湧昇し、アサリ等水産有用二枚貝類を大量にへい死させる事例がしばしば報告されている（柿野 1986, 鈴木ら 1998, 青山ら 1999）。本研究で対象とする諫早湾や有明海湾奥（特に佐賀県沿岸）の干潟周辺海域においても、近年、夏季の小潮期に貧酸素化が進行することが報告されている（木元ら 2005, 藤井・山本 2002）。

諫早湾底層水の貧酸素化の要因に関しては、湾全体を複数のボックスとして取り扱うボックスモデル解析により、酸素供給に77%の寄与を持つ鉛直拡散過程が小潮時に弱まり、成層化に伴って諫早湾湾口から湾内底層に流入する高密度の貧酸素水塊によって短期間に貧酸素化が進行することが指摘されている（山口・経塚 2006）。しかしながら、アサリやサルボウなど有用水産生物の主要な生産の場である干潟を含む水深5m以浅の浅海域（以降、干潟を含む水深5m以浅の海域を浅海域とする）における局所的な酸素動態については十分に解明されていない。

ほとんど有光層の範囲にあると考えられる浅海域においては、植物プランクトンによる酸素の生産が活発であり、また、海面を通じて大気から供給される酸素は、風や潮流による鉛直混合を通じて底層にも供給されやすい。このため、浅海域では酸素欠乏が起こりにくいことが予想されるが、実際には酸素欠乏が原因と考えられる水産生物の

大量へい死が発生している。現在のところ、溶存酸素濃度（DO）の変動の実測例そのものが乏しいために、貧酸素化を起こすメカニズムについては未解明な点が多い。浅海域の貧酸素化（特に無酸素化）は、水産有用生物の大量へい死等の漁業被害を引き起こすために、漁業者にとって深刻な問題であるばかりでなく、水質浄化機能を低下させるため海域の環境保全の面でも重要な問題である。

本研究では、2003年から2008年に、夏季の諫早湾北岸部小長井町地先干潟のアサリ養殖場で、海水流動や水質動態に関する詳細な現地観測を実施し、浅海域における貧酸素化の実態を把握するとともに、実測データを組み込んだ数値モデル解析によりDO低下の要因を明らかにすることを目的とした。

### 材料および方法

#### 係留調査

諫早湾北岸部（長崎県諫早市小長井町釜地区）のアサリ養殖場の最も沖側のSt.1（潮間帯, DL.+60 cm, Fig. 2-1）において、2003年から2008年まで各年8月に、下記の各種自記式記録計を用いて水温、塩分、DO、深度、クロロフィル蛍光値、流向・流速について連続測定を行った。水温、塩分、DO、深度（2004年、2005年のみ）については、水質計（HYDROLAB社製多項目水質計DS4a）を海底上約5cmに設置し30分間隔で、クロロフィル蛍光値については小型メモリークロロフィル濁度計（JFEアレック社製COMPACT-CLW）を海底上10cmに設置し10分間隔で、流向・流速については、流速計（JFEアレック社製COMPACT-EM）を干潟に埋め込み海底面上10cm層を10分間隔で、それぞれ測定を行った。クロロフィル蛍光値は、蛍光法によってクロロフィル濃度とフェオフィチン濃度を分析し、合計した植物色素量に換算している。以下では、植物色素量をクロロフィル濃度とした。なお、2003年の深度については実測データが得られていないが、2004年と2005年の測定深度から、当該水域の潮位の位相と振幅は佐

賀県大浦験潮所(気象庁)のそれと同じ値であり、潮位差が194cmであることが分かっている。そのため、大浦験潮所の実測潮位からその値を差し引いてDL.+60 cmの地盤高の潮位を推定した。

### 広域調査

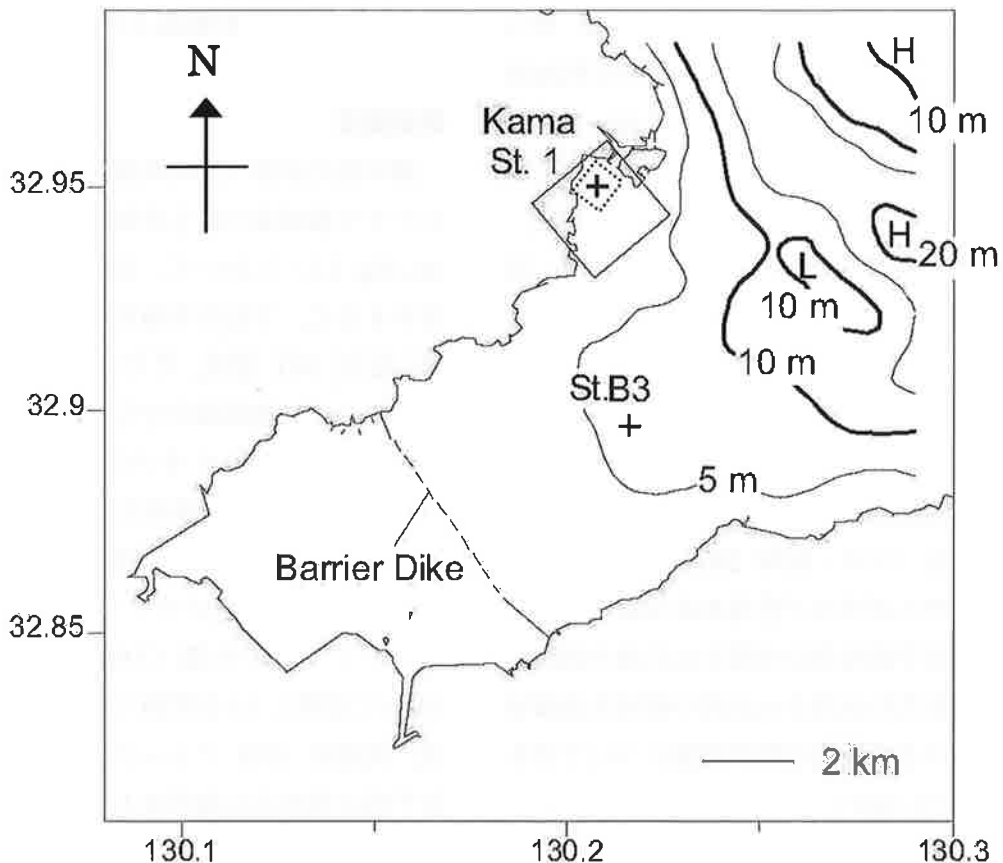
2003年8月6日、7日と2004年8月10日、11日に、それぞれ釜地区周辺海域(Fig. 2-1の点線区域内)の水質調査を実施した。水温と塩分の測定には、CTD(アレック電子社製ACL200DK)、溶存酸素濃度の測定には、多項目水質計(HYDROLAB社製多項目水質計クオンタ)をそれぞれ使用した。

### アサリのへい死状況調査(2004年8月)

諫早湾北岸部のアサリ養殖場一帯でアサリのへい死が見られた2004年8月16日に、小長井町釜地区のアサリ養殖場4ヶ所において、岸側、中央部、沖側のアサリ個体をそれぞれ20 cm × 20 cmの方形枠によって採集し、へい死個体の割合を算出した。

### 解析に用いたその他のデータ

風向・風速については、九州農政局が諫早湾中央部のB3橋(Fig. 2-1)で1時間毎に測定しているデータを使用した。赤潮原因種に関しては、長崎県総合水産試験場の報告を用いた(長崎県総合水産試験場, 2003~2008)。



**Fig. 2-1** Map of Isahaya Bay and stations for data collection. The solid rectangular box indicates the model domain. Intensive surveys on the horizontal distribution were conducted in 2003 and 2004 within the broken line.

## DOの数値モデル

アサリが死滅した2004年8月とアサリが死滅しなかった2003年8月を対象として、干潟域におけるDOの変動の要因を調べるために、実測データを利用した数値モデルを作成してそれぞれの要因の寄与のバランスを算出した。以下にその概要を記す。

アサリ養殖干潟域を一つのボックス（水平スケール2km×2km、水深2m）と仮定すると、単位体積当たりの干潟水中のDOの変化は次式で表わされる。

$$\frac{dc}{dt} = \frac{A_c}{V}(uC_0 - uC) + \alpha chl - \frac{A_s v_{o2}}{V}(C - Oxy_{sat}) - \frac{A_s}{V}R_{sediment} - \frac{A_s}{V}R_{clam} \quad \cdots (1)$$

ここで、 $V$ はモデル海域の体積 ( $m^3$ )、 $A_c$ は断面積 ( $m^2$ )、 $A_s$ は表(底)面積 ( $m^2$ )、 $C$ は溶存酸素濃度 ( $g/m^3$ )、 $C_0$ は境界濃度 ( $g/m^3$ )、 $u$ は移流 ( $m/s$ )、 $\alpha$ は単位クロロフィル濃度あたりの酸素生産速度 ( $g/mg/sec$ )、 $chl$ はクロロフィル濃度 ( $mg/m^3$ )、 $v_{o2}$ は海面を通じての酸素輸送係数 ( $m/s$ )であり、piston velocity と呼ばれる係数である (Sala et al. 2000)。 $C_0$ は実測水温と塩分から定まる酸素飽和濃度とした。 $Oxy_{sat}$ は酸素飽和濃度 ( $g/m^3$ )、 $R_{sediment}$ は底泥による酸素消費速度 ( $g/m^2/s$ )、 $R_{clam}$ はアサリによる酸素消費速度 ( $g/m^2/s$ )を表わす。 $u$ には、実測流速値の24時間移動平均値を残差流として用いた。ここでは、水平拡散の影響が小さいものとしてこれを無視した。 $\alpha$ の感度解析による算出法の詳細については、本節の最後に述べるが、 $\alpha$ の計算対象期間の2003年と2004年の赤潮では原因種が異なるので、各年の $\alpha$ の値をそれぞれ計算して決定した。なお、piston velocity ( $v_{o2}$ )は以下の(2)式により算出した。

$$v_{o2} = (kflow + kwind) \quad \cdots (2)$$

$kflow$ は表面流動による輸送係数 ( $m/s$ )、 $kwind$ は風による輸送係数 ( $m/s$ )をあらわす。 $kflow$ は、次式により算出した (O' Connor and Dobbins, 1958)。

$$kflow = \sqrt{\frac{uD}{h_f}} \quad \cdots (3)$$

$u$ は、 $h_f$ (等流水深 ( $m$ ))における流速 ( $m/s$ )であり、(1)式における $u$ と同じ値を用いている。等流水深には計算期間の平均水深 (2m)を用いた。 $D$ は酸素の分子拡散係数 ( $m^2/s$ )であり、ここでは、 $2.09 \times 10^{-9} m^2/s$ を用いた (Chapra, 1997)。

風による輸送係数 ( $kwind$ )は、次式で表わされる (Wanninkhof, 1992)。

$$kwind = \left(\frac{1}{3.6 \times 10^5}\right) Kw^2 \left(\frac{Sc}{660}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad \cdots (4)$$

上式で $K$ は風に対する定数であり、本研究では短周期風の典型的な値である0.31を用いた (O' Connor and Dobbins, 1958)。 $w$ は風速 ( $m/s$ )を表す。シュミット数 ( $Sc$ )は次式から求めた。

$$Sc = Sc_0(1 + 3.14 \times 10^{-3} S) \quad \dots (5)$$

$$Sc_0 = 1800.6 - 120.1T + 3.7818T^2 - 0.047608T^3 \quad \dots (6)$$

ここで、 $T$ は水温、 $S$ は塩分であり、 $T$ と $S$ に関しては実測値を用いた。

$R_{sediment}$ については、有機物飽和条件下での水温関数型を用いた (Chapra,1997)。

$$R_{sediment} = R_{T=20} \theta^{T-20} \quad \dots (7)$$

ここで、 $T$ は水温、 $R_{T=20}$ は水温 20°Cにおける酸素消費速度(g/m<sup>2</sup>/s)、 $\theta$ は水温係数である。

$R_{clam}$ については、養殖場の主要な水産生物であるアサリを対象として次のようにして算出した。すなわち、アサリの酸素消費速度は水温に依存していることから (例えば、磯野ら, 1998, Delgado and Camacho, 2007), ここでは、諫早湾のアサリを用いた松田 (2008) の実験結果に基づき、酸素消費速度を水温の関数とした。単位時間、単位組織湿重量当りの酸素消費速度  $R_c$  (mgO<sub>2</sub>/gDW/s) は、以下の式であらわされる。

$$R_c = 3.3 \times 10^{-6} T^{1.4698} \quad \dots (8)$$

ここで  $T$  は水温である。養殖場における単位面積あたりの酸素消費速度は、 $a$  をアサリの軟体部湿重量密度 (gDW/m<sup>2</sup>) とすると、次式で表わされる。

$$R_{clam} = aR_c \quad \dots (9)$$

ここでは、 $a$  の値として 360 gDW/m<sup>2</sup> (殻を含む湿重量密度 1.5 kgDW/m<sup>2</sup>, 軟体部割合 24%) を用いた。

用いた係数の一覧を Table 2-1 に示す。全ての実測値の入力データとしては、24 時間移動平均値を解析に用いた。特に同一水深で測定した水温、塩分、クロロフィル濃度のデータは、基本的に潮汐周期で表層と底層の値を測定していると考えられるので、24 時間の移動平均値は表層から底層までの平均値と同義であり、対象海域を単一のボックスとして取り扱う本モデルの計算条件に適している。なお、欠測がある期間については、線形補完によりデータを補った。(1)式において、水温、塩分、風速、クロロフィル濃度、流速の連続データが得られているので、未知変数は  $a$  のみである。 $a$  の算出にあたっては、 $a$  を変動させて DO の予測値を算出し、実測値と最小の標準誤差をとる値を採用することとした。

以上の条件のもとで、2003 年 8 月 18 日 0 時から 25 日 0 時、2004 年 8 月 7 日 0 時から 14 日 0 時の 2 期間についてタイムステップ 30 分で DO 値の計算を行った。また、(1)式の各項の値を求め、それに基づき干潟域における DO 変動の要因について解析した。



Table 2-1 List of the parameters used for the DO budget model, with their units and values (see the text for the details).

parameter	term	unit	value
V	volume	m <sup>3</sup>	8 × 10 <sup>6</sup>
A <sub>c</sub>	area of cross section	m <sup>2</sup>	4 × 10 <sup>6</sup>
A <sub>s</sub>	surface area	m <sup>2</sup>	4 × 10 <sup>3</sup>
C	DO	g · m <sup>-3</sup>	output
C <sub>0</sub>	saturated DO	g · m <sup>-3</sup>	calculation from observed T and S
T	temperature	°C	observation
S	salinity		observation
u	current speed	m · s <sup>-1</sup>	observation
w	wind speed	m · s <sup>-1</sup>	observation
chl	concentration of chlorophyl a	mg · m <sup>-3</sup>	observation
α	oxygen production per chlorophyl a	g · mg <sup>-1</sup>	sensitive analysis 2003 : 1.7 × 10 <sup>-3</sup> 2004 : 2.2 × 10 <sup>-3</sup>
D	molecular diffusivity of oxygen	m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup>	2.09 × 10 <sup>-9</sup>
h	average depth during duration time of calculation	m	2
h <sub>f</sub>	flow depth	m	2
a	clam tissue density	gDW · m <sup>-3</sup>	360
θ	temperature coefficient		1.04
R <sub>T=20</sub>	sedimental respiration at T=20 °C	g · m <sup>-3</sup>	1.4

## 結果

### 干潟底層の水温と溶存酸素濃度の推移

2003-2008年の各年8月にSt. 1 (Fig. 2-1)の海底付近で連続測定された水温とDOの変化を各年ごとに示す(Fig. 2-2(a)(b))。DOの変動はいずれの年も水温変動と酷似した日周期が卓越している。すなわち、高水温時にDOは上昇し、しばしば過飽和状態となるが、水温低下とともに低下する傾向が繰り返し見られた。このように水温とDOは基本的に正の相関関係を示すが、その一方で水温上昇時にDOが低くなる場合がしばしば観測された。すなわち、2004年は、8月3日から10日にかけて水温の上昇とともにDOも上昇しているが、水温が10日以降も30°Cを超えて上昇しているにもかかわらず、DOは持続的に低下し、11日以降14日まで断続的に無酸素化する状況が続く、この時期にアサリの大量へい死が発生した。同様の現象は2003年と2005年および2008年にも見られ、2003年は無酸素化してはいないが、27日以降にDOは低下した。2005年は8月11日以降の水温の上昇に対してDOは低下し、15日には無酸素化した。2008年は8月5日以降の水温の上昇に対してDOは持続的に低下し、11日以降15日まで断続的に無酸素化する状況が続いた。

アサリが大量へい死を起こす可能性のあるDOが0.5mg/L以下の強い貧酸素状態となったのは、2003年は8月22日から23日、2004年は8月11日から14日、2005年は8月15日、2006年は8月5日から6日、2007年は8月23日から26日、2008年は8月11日から15日の間であり、強い貧酸素状態となった合計時間はそれぞれ、14、43、5、15、15、29時間であった。また強い貧酸素時の水温はそれぞれ、24~26°C、28~35°C、27°C、24~25°C、24~28°C、22~29°Cであった。釜地区でアサリが全滅した2004年は強い貧酸素状態となった合計時間が最も長く、水温が最も高かった。

### アサリのへい死状況

2004年8月16日に釜地区のアサリ養殖場で実施したへい死状況調査の結果、釜地区のアサリ養殖場で通常1m<sup>2</sup>当たり3-5kgの密度で生息していたアサリが、調査した4地点すべてで全滅していた。へい死が確認される直前の8月11日から15日には、間欠的な回復をはさんで持続的な無酸素化が観測された(Fig. 2-2(a))。一方、2003年、2005年および2006年には、同海域においてアサリの大量へい死は報告されておらず、24時間を超えて持続する無酸素化も観測されていなかった。2007年、2008年には2004年のような詳細な調査は実施されていないが、水質観測を実施した漁場では30~50%程度のアサリのへい死があり(平野、未発表)、2007年の8月25日から26日、2008年の8月11日から15日の期間に間欠的な回復をはさんで持続的な無酸素化が観測された。

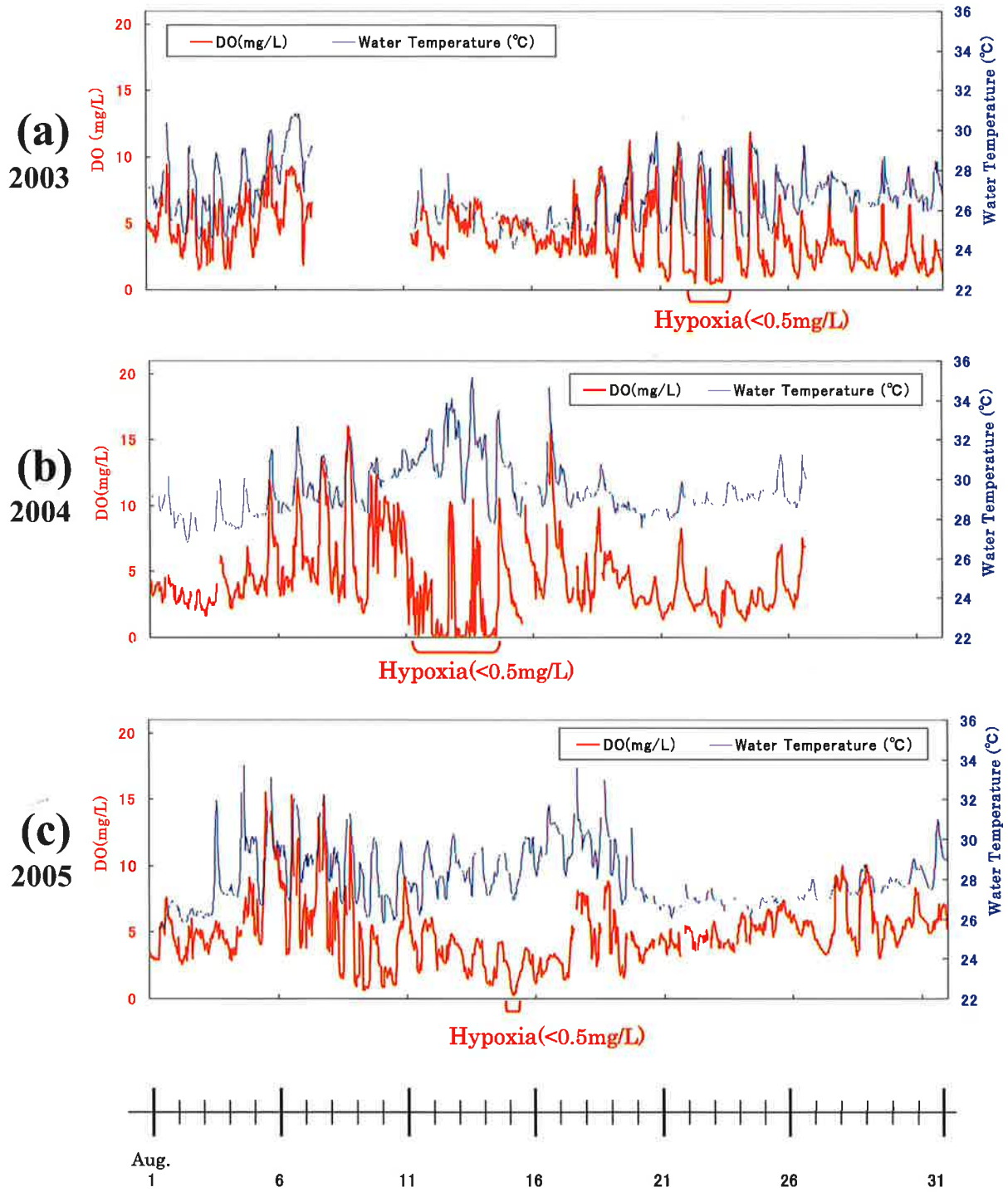


Fig. 2-2(a) Temporal variations in water temperature and DO in August of 2003(a), 2004(b) and 2005(c).

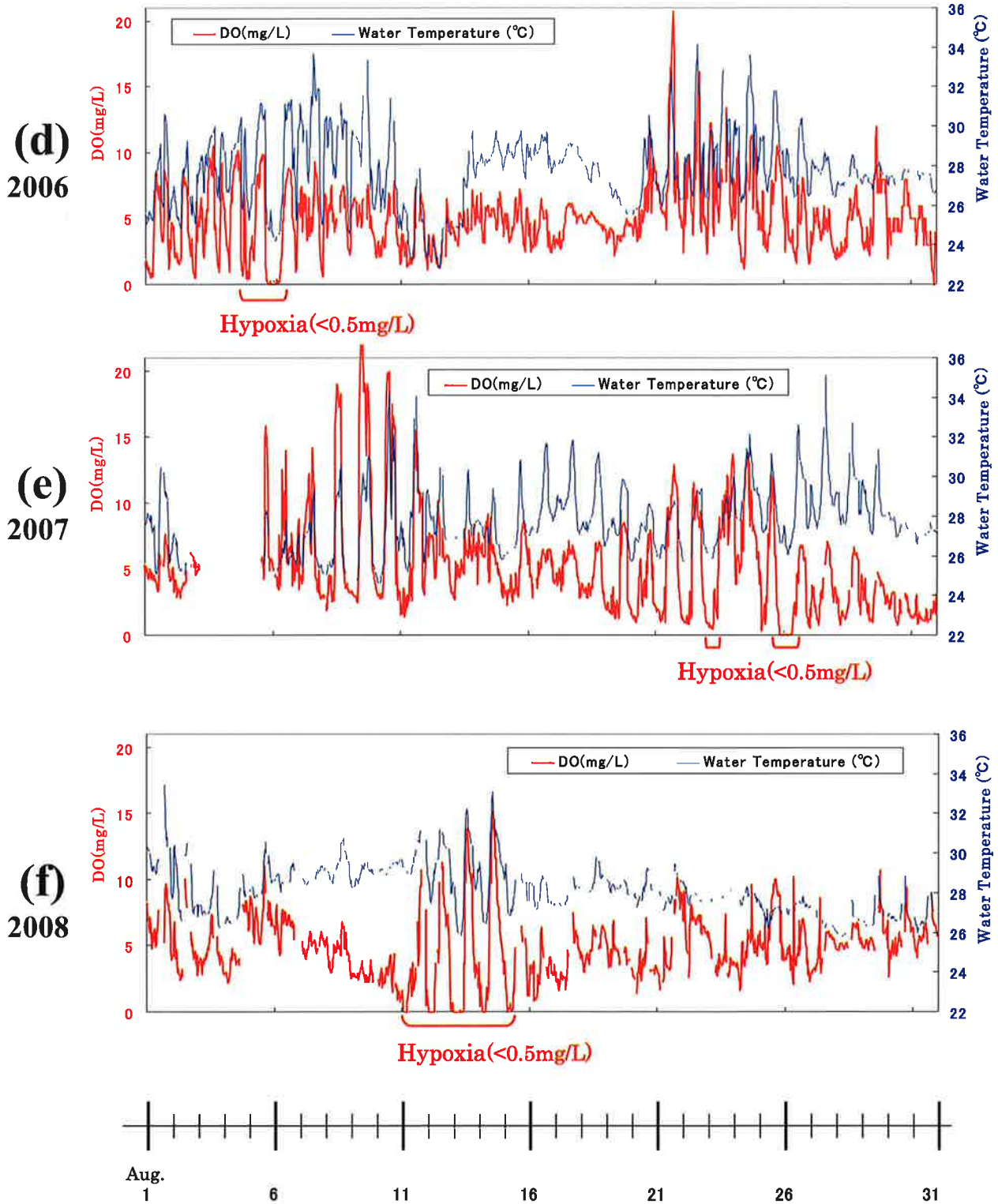
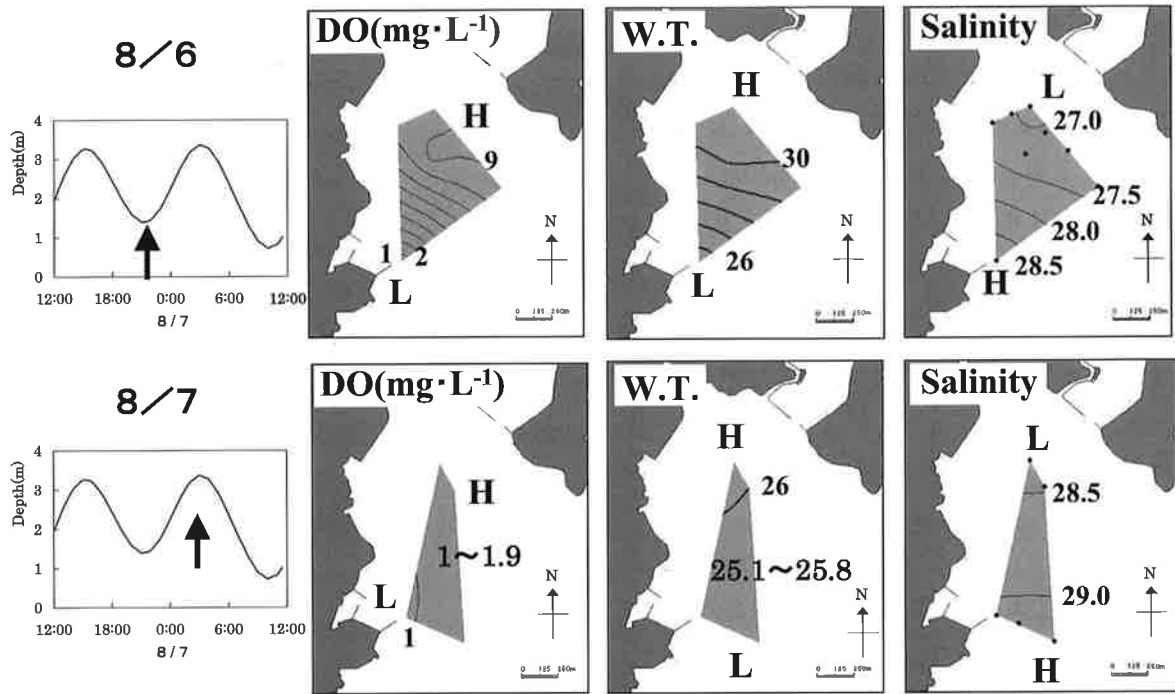


Fig. 2-2(b) Temporal variations in water temperature and DO in August of 2006(d), 2007(e) and 2008(f).

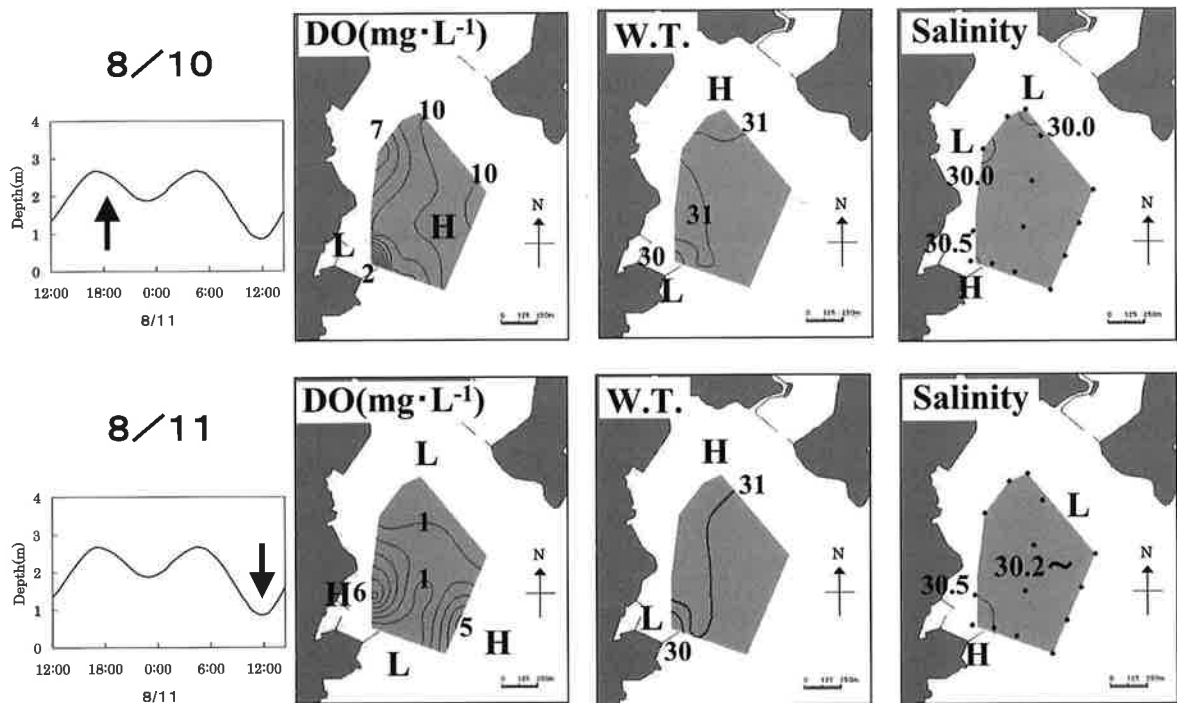
### 釜地区周辺海域の水質変化（広域調査）

釜地区の干潟域が溶存酸素濃度 2ml/L(2.8mg/L)以下の一般的な貧酸素状態（門谷 1998）となった2003年8月7日と、強い貧酸素化（0.5mg/L以下）が見られた2004年8月11日について、その前日と当日の釜地区周辺海域底層水の溶存酸素濃度、水温および塩分の水平分布をそれぞれ Fig. 2-3, Fig. 2-4 に示す。2003年8月6日に調査海域の南西部に見られた低温高塩で 2ml/L 以下の一般的な貧酸素水塊が、8月7日に全域に拡大していた(Fig.2-3)。

一方、2004年8月10日、8月11日に観測された強い貧酸素水塊は、8月10日の夕方にはみお筋の深み（南西側）だけに分布し、その水温は 29.1℃、塩分は 30.5～31.0 であった (Fig.2-4)。8月11日の正午頃には、浅海域一帯が強く貧酸素化したが、そのときの水温は 30～31℃、塩分は 30.2～30.5 であり、みお筋の強い貧酸素水塊とは水温、塩分が明らかに異なっていた。



**Fig. 2-3** Horizontal distribution of dissolved oxygen concentration (DO), water temperature (W.T.) and salinity in the bottom water (B-1m) around the Kama tidal flat on 6-7 August 2003.



**Fig. 2-4** Horizontal distribution of dissolved oxygen concentration (DO), water temperature (W.T.) and salinity in the bottom water (B-1m) around the Kama tidal flat on 10-11 August 2004.

### 数値モデルによる DO 変動の要因解析

2003 年 8 月と 2004 年 8 月のそれぞれ計算期間を対象に 24 時間移動平均の水温、流速、風速、クロロフィル濃度の変動状況を Fig. 2-5 に示した。観測値からは 2004 年の水温は、2003 年より平均で 4.4°C 高く、流速は 6 割程度小さく、風速は 3 割程度小さく、クロロフィル濃度は 5 割程度大きいことが分かった。

各年の DO の計算結果を Fig. 2-6 に示す。2003 年では計算値と実測値が負の相関を示したものの、計算値と実測値との標準誤差は  $0.9 \text{ g/m}^3$  (mg/L) であり、ほぼ実測値の変動 ( $4\text{-}5 \text{ g/m}^3$ ) の範囲内であった。一方、2004 年は、計算値と実測値間の標準誤差 ( $1.0 \text{ g/m}^3$ ) は 2003 年より若干大きいものの、両者の間に高い正の相関 (相関係数 0.93) が得られた。特に、実測値に見られる 8 月 10 日から 11 日にかけての DO の著しい低下はよく再現できていた。ただし、実測値に見られる DO の低下速度は  $0.1 \text{ g/m}^3/\text{h}$  であるのに対して、計算値では  $0.06 \text{ g/m}^3/\text{h}$  とやや遅い低下速度になった。

この数値モデルによって推定された 2003 年と 2004 年における各要因の DO 変動への寄与のバランスをまとめて Fig. 2-7 に示した。両年ともに供給項としては大気からの酸素供給速度と移流項のオーダーがほぼ等しいこと、消費項ではアサリの代謝速度が最も大きく、底泥の代謝速度の 7 倍に及ぶ。2004 年のアサリおよび底泥の代謝速度は 2003 年より 23% 程度大きいことが、両者ともに各計算期間中はほぼ一定で推移した。2004 年 8 月 7-10 日には植物プランクトンの生産項が大きくなるにつれて、大気からの酸素供給と移流項はほぼ 0 からマイナスに転じ消費へと移行した。また、2004 年 8 月 10 日以降に DO の持続的な低下が観測された時期には、これらはいずれも消費から供給に切り替わっていた (Fig. 2-6, Fig. 2-7)。

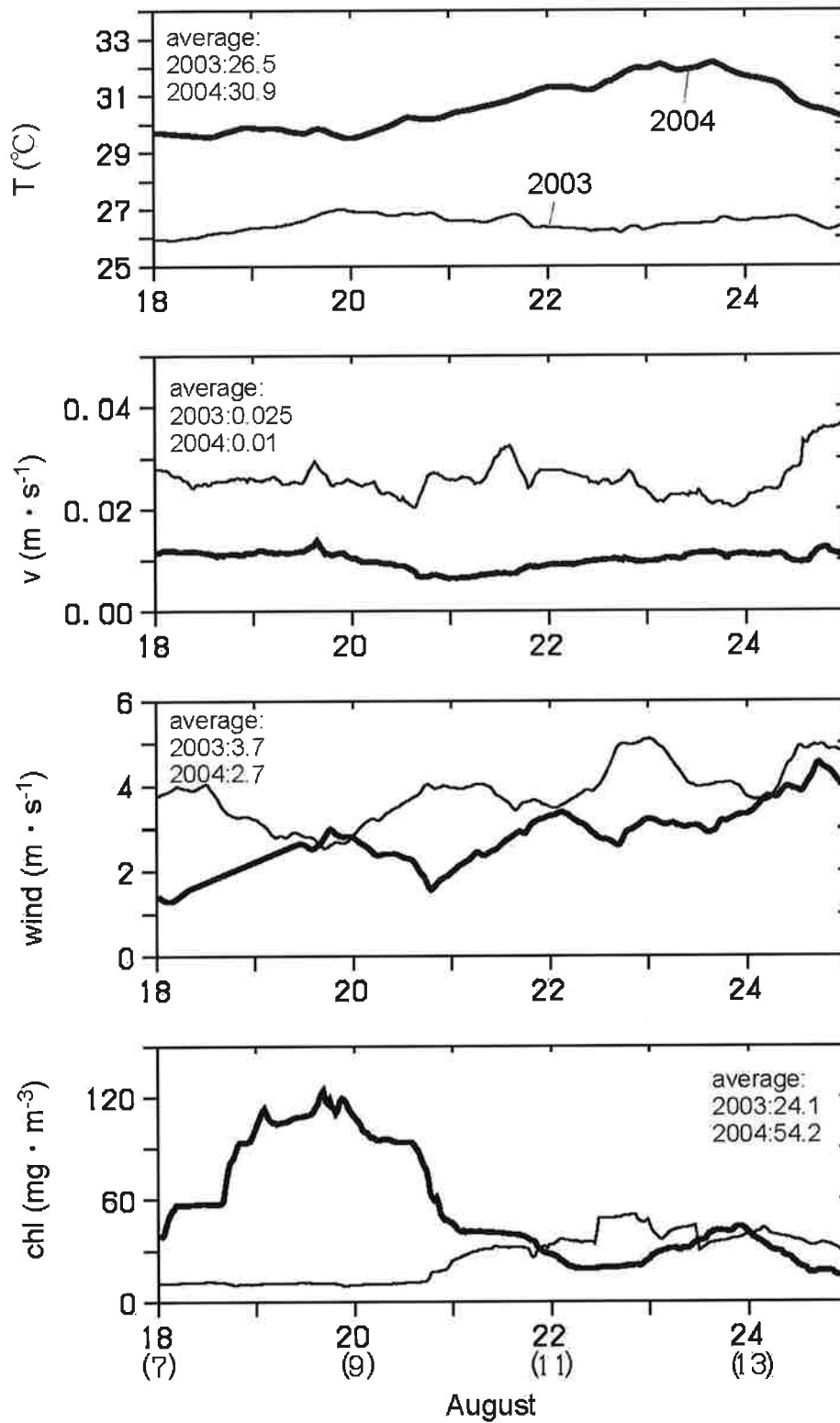
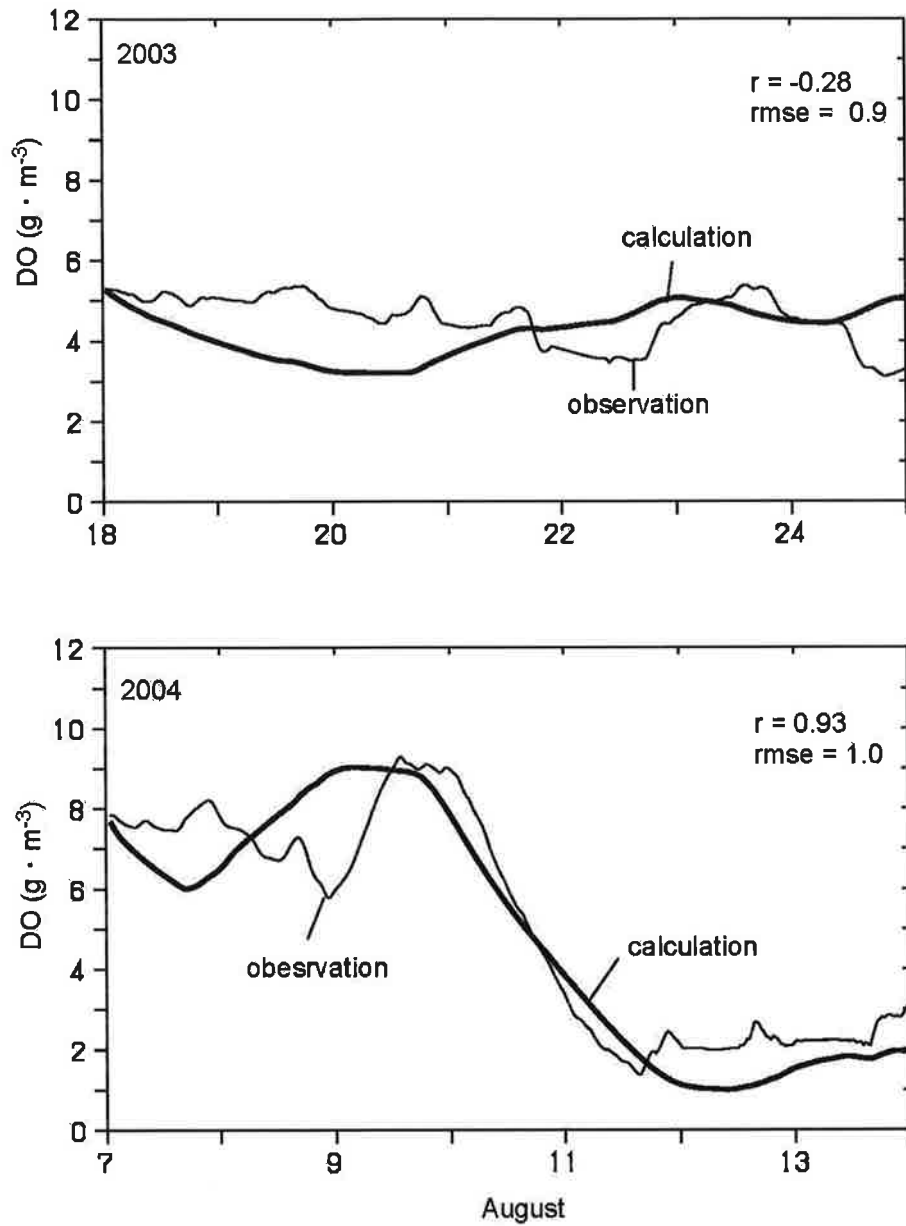
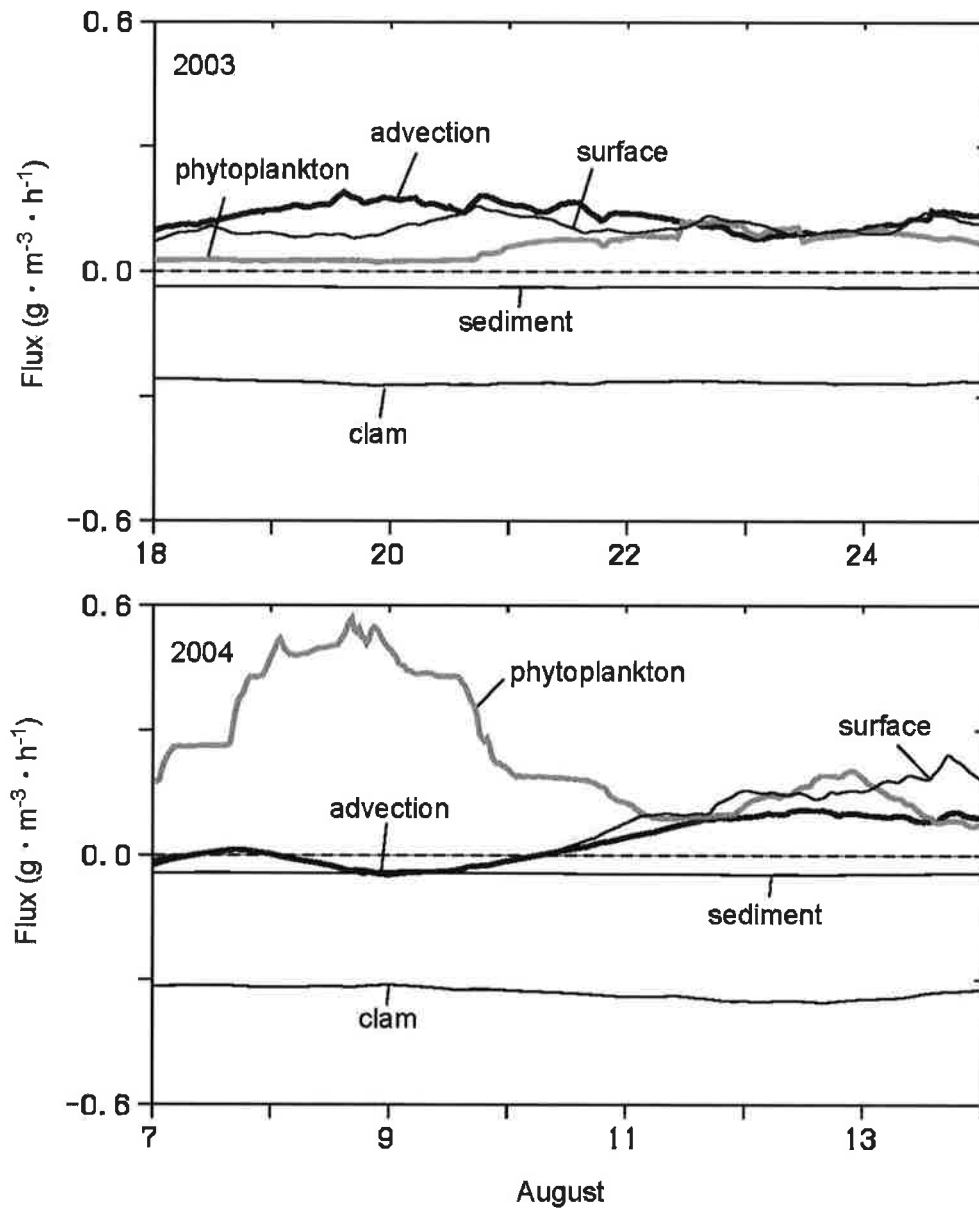


Fig. 2-5 Temporal variations in 24 hour moving averages of temperature, current velocity, wind velocity, and the chlorophyll concentration for the periods of 18-25 August 2003 (thin lines) and 7-15 August 2004 (thick lines).





**Fig. 2-6** Temporal variations in calculated and observed DO concentrations in August of 2003 (upper panel) and August of 2004 (lower panel). Correlation coefficients ( $r$ ) and root mean square errors (rmse) between calculated and observed values are described at the upper right of each panel.



**Fig. 2-7** Temporal variations in the oxygen transfer rate from the air to the sea surface (thin line), phytoplankton production rate (grey line), advection (thick line), respiration rates of sediment (sediment) and clams (clam) for the periods of 18-20 August of 2003 (upper panel) and 7-14 August of 2004 (lower panel). Positive and negative fluxes indicate the oxygen supply and consumption, respectively.

## 考察

2003年から2008年の各年8月の釜地区干潟の底層で実施した水質観測の結果 (Fig. 2-2(a)(b)) から、ほぼ毎年、アサリのへい死を招く可能性がある0.5mg/L以下の強い貧酸素状態になる時期があることが分かった。また、干潟域の底層におけるDOの日間変動の幅は極めて大きく、極端な場合には過飽和と貧酸素を繰り返す。このような大きな日間変動は、赤潮発生時に見られ昼間（主に干潮前後）に高水温で過飽和、夜間（主に満潮前後）に低水温で貧酸素になるためと考えられる。こうしたDOの変動は基本的に水温と相関しているが、その一方で水温が上昇する際にDOが急速に低下する事例があること(2003, 2004, 2005, 2008年)が分かった。このうち、2004年および2008年には強い貧酸素状態が顕著であり（総時間で43時間と29時間）、無酸素状態まで至り、アサリの大量へい死を招いた。

いかなる条件の時に強い貧酸素化（溶存酸素濃度で0.5mg/L以下）するのかを確認するため、諫早湾中央部 B3 櫓の日平均風速および釜地区干潟の潮位、底面付近のDOについて、各年8月1日から9月10日までの時系列変化を Fig. 2-8(a), (b) にまとめて示した。強く貧酸素化する時期は、いずれも潮汐振幅の小さな小潮期で、風が弱く、赤潮が発生している時期に対応していることが分かる。さらに、シャットネラ赤潮が発生した2003年9月と2004年8月および2008年8月には、DOは強い貧酸素から無酸素状態まで進行しており、水温が最も高い状態であった。特に、強い貧酸素状態におかれた時間が長かった2004年8月には釜地区干潟のアサリは全滅した。以上のことから、干潟域でアサリのへい死を生じるような強い貧酸素化には、シャットネラ赤潮の発生に加えて風や潮流の弱いことが関与しており、そのことが高水温で強い貧酸素の状態を継続させることに大きな影響を及ぼしている可能性が高いことが示唆された。

さらに、2003年および2004年の釜地区を対象

とした広域観測により、2003年8月7日の干潟域の低酸素化に関して、8月6日、8月7日の調査時間はそれぞれ干潮、満潮にあたり、また、南西部には周辺海域より1~2m深いみお筋（航路）があるため、潮汐に応じて南西部の低温高塩の低酸素水が干潟域まで移動したものと推察された(Fig. 2-3)。一方、釜地区のアサリを全滅させた2004年8月11日の干潟域の無酸素化は、干潟で無酸素化が急速に進行した結果として出現したことが分かった(Fig. 2-4)。このことは、釜地区の干潟で貧酸素化が進行する場合に、沖側の貧酸素水塊がみお筋に沿って広がる2003年のような事例に加えて、2004年に見られたような干潟そのもので底層水の貧酸素化が急速に進行する可能性があることも示唆している。

2003年とアサリの大量へい死が生じた2004年の干潟域におけるDOの動態について数値モデルによる比較解析を行った結果、以下のことが明らかとなった。①干潟域のアサリ養殖場においては、酸素消費の主要因がアサリの代謝速度であり、それは水温によって決定される。2004年は、2003年よりも高水温で水温差は4℃であり、両年のアサリによる酸素消費には2割程度の差があった(Fig. 2-7)。しかしながら、②DOの持続的低下が起こった時期（2004年8月10-12日）には、アサリや底泥による酸素消費速度はほぼ一定である。すなわち、2004年に見られた干潟域におけるDOの持続的な低下は、酸素消費速度の増加ではなく供給速度の減少によって説明できる。

大気からの酸素供給（海面過程）および水平移流による海水交換を通じての酸素供給は、DO濃度を飽和濃度と境界濃度（本研究では飽和濃度）に近づけるプロセスであり、その応答速度は風速と移流（残差流流速）によって決定される。アサリのへい死を引き起こした2004年8月の酸素低下時には、その直前に増加した植物プランクトンの生産が止まり、DOが飽和値を下回るようになるにつれて、海面過程と海水交換は飽和濃度へ近づけようと応答する (Fig. 2-7)。しかし、2004年のように風速が弱く、残差流が小さい場合には応

答速度(供給速度)が小さくなり、DOの持続的低下を引き起こすことになる。なお、海面過程を規定する piston velocity は、(2)-(4)式から明らかなように、風速の二乗と流速の平方根に比例するため、風速により強く依存する。

酸素低下がみられた2004年の風速は、計算期間平均で2.7 m/s、残差流流速は0.01 m/sであり、2004年の piston velocity の値は  $6 \times 10^{-6}$  m/s である。この piston velocity によって生じるDOの最大供給速度は  $0.14 \text{ g/m}^3/\text{h}$  (濃度勾配最大:  $C=0$  の条件)、海水交換による最大供給速度は  $0.11 \text{ g/m}^3/\text{h}$ 、合計で  $0.25 \text{ g/m}^3/\text{h}$  となる。これはアサリと底泥の合計酸素消費速度の計算期間平均値 ( $-0.37 \text{ g/m}^3/\text{h}$ ) を補うには不足しており、そのためDOの持続的低下が生じたものと考えられる。一方、2003年のアサリと底泥の合計消費速度は、計算期間平均で  $-0.3 \text{ g/m}^3/\text{h}$  であったのに対して、2003年の風と残差流の水準(計算期間平均風速3.7 m/s、残差流流速0.025 m/s)では、piston velocity およびそれによって生じるDOの最大供給速度は、それぞれ  $1.14 \times 10^{-6}$  m/s、 $0.25 \text{ g/m}^3/\text{h}$ 、海水交換による最大供給速度は  $0.28 \text{ g/m}^3/\text{h}$  であった。DOの最大供給速度の合計は  $0.53 \text{ g/m}^3/\text{h}$  となり、上記の消費速度を上回る。また、2003年の供給速度は、2004年の消費速度 ( $-0.37 \text{ g/m}^3/\text{h}$ ) を上回っており、2004年に2003年程度の風と残差流があれば、アサリの大量へい死を引き起こすDOの低下は起こらなかったものと考えられる。

以上のことから、2004年に起こったDOの持続的低下の原因は、風が弱く、残差流の流速が小さかったことと、高水温によりアサリと底泥の酸素消費速度が増大したことによるものと推定される。そもそも風速と残差流速は関係が深く、また、残差流は干潟系外の低温水との海水交換を通じて水温を低下させる役割を持っていると考えられる。このため、風の弱い時期には干潟域の高温化ならびに残差流の低下が同時に起こることになる。これらのモデル解析の結果は、干潟域でのDO変化 (Fig. 2-2) や釜地区周辺の広域調査の結果 (Fig. 2-3, Fig. 2-4) とも整合している。干潟域における風

と残差流および水温との関係を明らかにするためには、さらに詳細な調査が必要であり、それは今後の課題である。

干潟域は水深が浅く、基礎生産の場である有光層の範囲にある上に、有機物分解の主要な場である底泥の影響を強く受ける。したがって、DOの変動に関わる過程には、底泥の微生物による代謝、アサリをはじめとする底生生物の代謝、植物プランクトンの生産・分解過程、海面を通じての酸素フラックス、水平移流・鉛直混合による酸素交換など、海洋におけるほとんどの物理・生物・化学過程が関与しており、そのためDOの変動実態はきわめて複雑で、これまで不明な点が多かった。本研究では、わずか12時間の間に過飽和から無酸素まで変化する干潟域における酸素動態について報告するとともに、実測値を組み込んだ数値モデル解析により、アサリのへい死を引き起こすDO低下のメカニズムを明らかにした。近年の計測技術の発展により、水温、塩分、クロロフィル蛍光値および流速などの時系列データの収集は容易となってきている。本研究では、これらの実測データを数値モデルに組み込むことにより、干潟域の複雑なDOの変化を誤差  $1.0 \text{ g/m}^3$  で記述できる新たな手法を開発した。本手法は、顕著なDO低下など誤差範囲を超える変動の記述に有効である。

上述のモデル解析では、2003年8月の広域調査から明らかとなった干潟周辺の深みに沿って沖側の底層から進入する貧酸素水 (Fig. 2-3) の影響は考慮されていない。こうした貧酸素水の動態については、現地観測データも乏しく、また不明の点が多い。これも今後の課題の一つといえる。

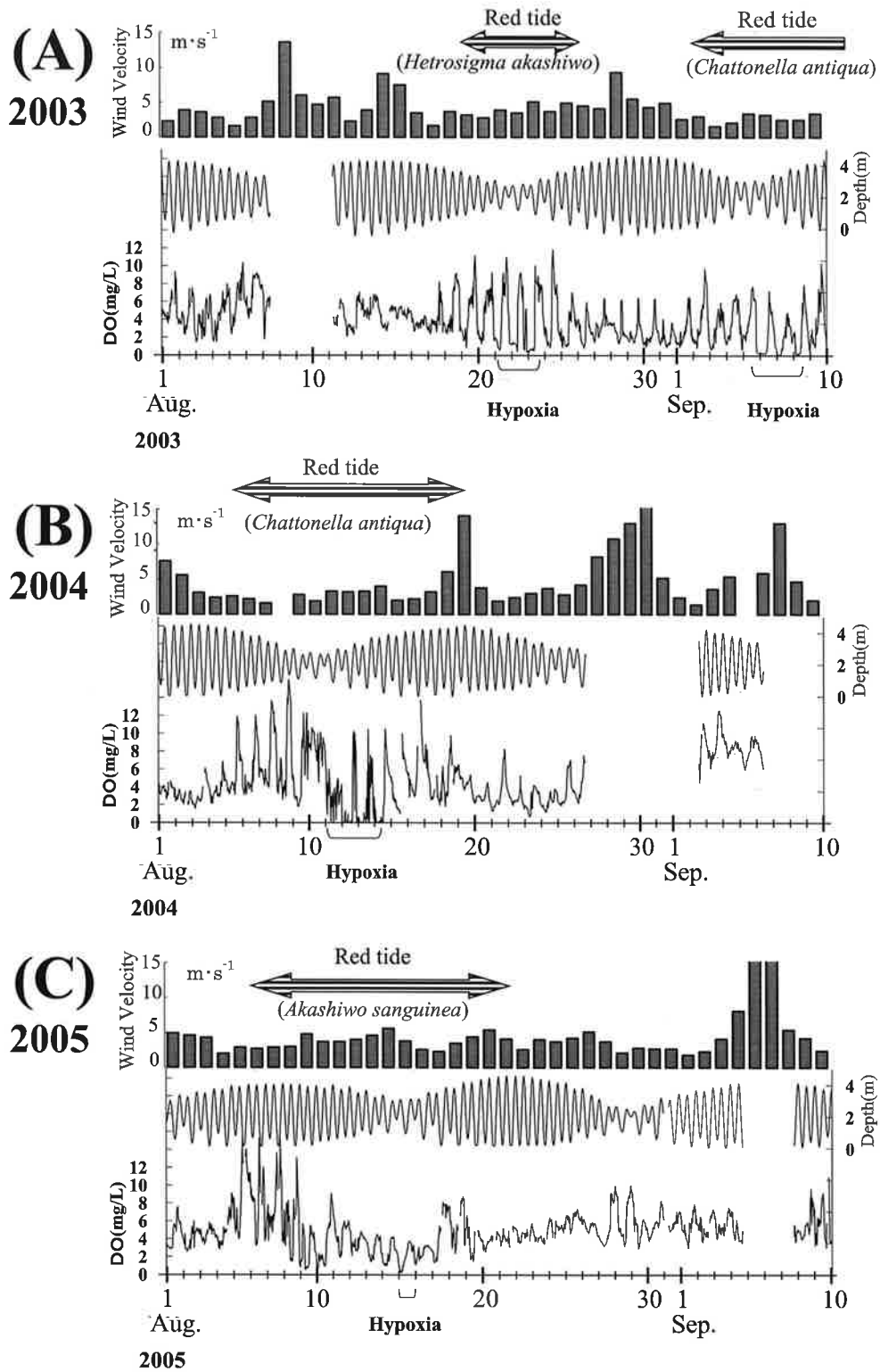


Fig. 2-8(a) Time series of daily mean speed of the wind at B3, tidal range (depth) and dissolved oxygen saturation (mg/L) in the bottom water at Stn1 in the Kama tideland during the period from 1 August to 10 September in 2003-2005.

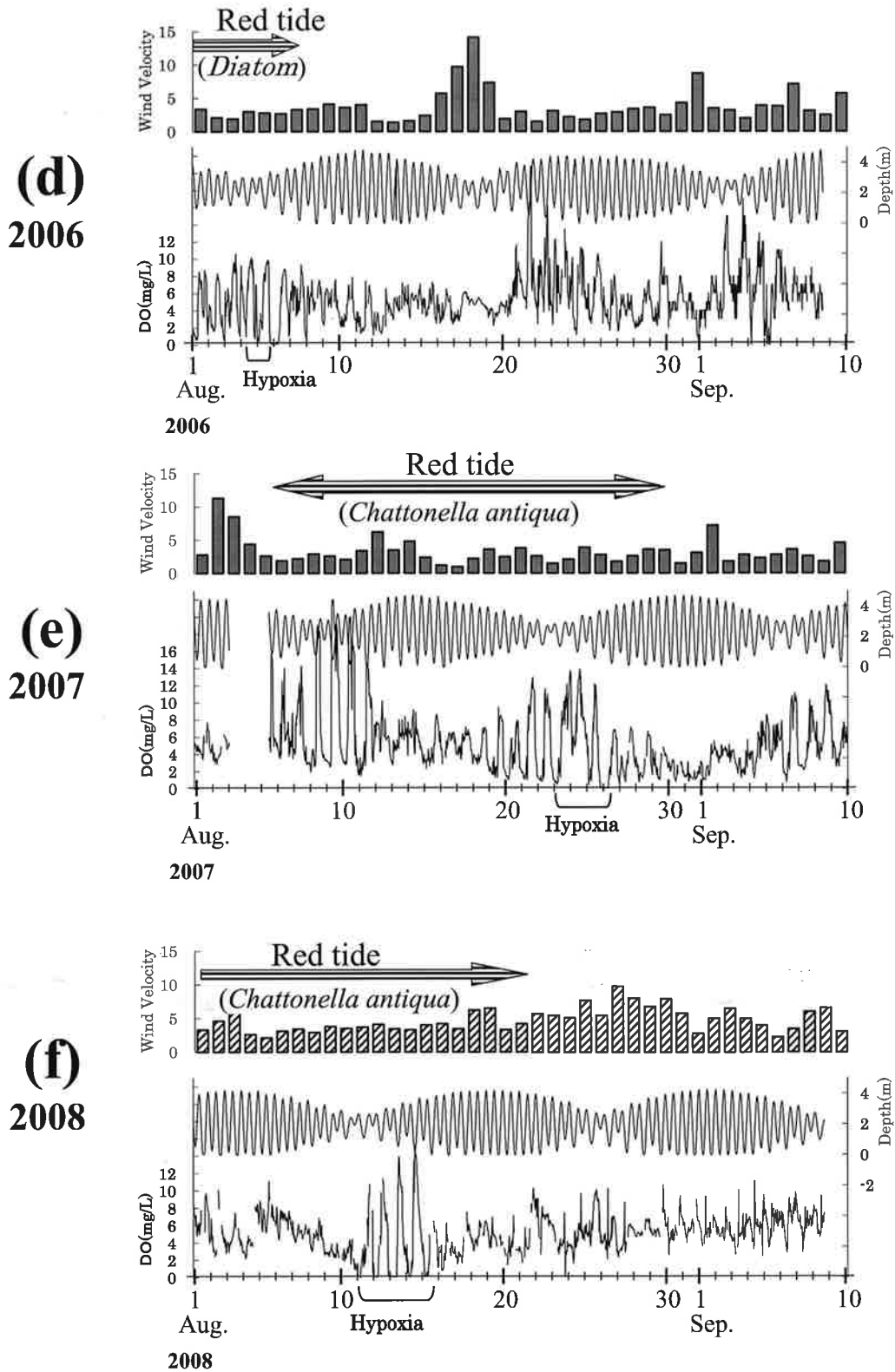


Fig. 2-8(b) Time series of daily mean speed of the wind at B3 , tidal range (depth) and dissolved oxygen saturation (mg/L) in the bottom water at Stn1 in the Kama tideland during the period from 1 August to 10 September in 2006-2008.

### 第3章 大村湾における貧酸素化・青潮の事例 との比較

#### 研究の背景と目的

東京湾や三河湾など夏季に底層水の貧酸素化の進行が問題となっている閉鎖性内湾では、“青潮”あるいは“苦潮”と呼ばれる底層の無酸素水塊が沿岸に進入し湧昇する現象がしばしば発生し、沿岸浅海域に生息する生物をへい死させる等の大きな被害をもたらすことが知られている。第2章で述べたように、諫早湾北岸部の干潟域に展開されているアサリ養殖場においても、諫早湾底層の貧酸素水（無酸素水）の干潟域への進入に起因するアサリ等のへい死の被害が起きている可能性が考えられるが、現在のところ、その実態には不明の点が多い。

一方、長崎県の大村湾では、古くから夏季になると底層水の貧酸素化がほぼ毎年のように認められており、1947年には、“澄潮”と呼ばれる貧酸素水塊の湧昇現象の発生事例が報告されている（辻田 1952）。さらに、2007年9月16-19日には表面海水が白濁する青潮が湾奥部（津水湾）の沿岸で発生し、魚類等のへい死が確認されている（Fig. 3-1, 長崎大学水産学部中田研究室提供）。また、この青潮の影響を受けて大村湾における主要資源の一つであるナマコが極度な不漁になるなどして社会的にも大きな問題となっている（平野, 未発表）。しかしながら、これまで大村湾における貧酸素水塊に関しては数多くの報告があるにもかかわらず（玉河 1980, 飯塚・関 1989, 野上・松野 2001）、貧酸素水塊の湧昇現象についてはほとんど報告事例がなく、その発生機構についてもほとんど分かっていない。

そこで本研究では、貧酸素水塊の移動・湧昇に重要な働きをしていると考えられる風の影響に着目して、既存のデータを含む現地観測結果の検討とそれに基づく数値モデル解析を行い、大村湾における貧酸素水塊の移動・湧昇による沿岸浅海域への影響のプロセスを明らかにしようとした。ま

た、諫早湾の干潟域において養殖アサリのへい死を引き起こす貧酸素化のプロセスとの比較検討を試みた。

#### 材料および方法

##### 現地観測

水質観測の定点を Fig. 3-2 に示す。1986年から夏季に長崎県総合水産試験場が実施している赤潮調査（Fig. 3-2 に+で表記, 18 定点）のデータのうち8月に実施した観測結果（水温と溶存酸素濃度）を解析に用いた。観測水深は、0, 2, 5m で、10m 以深は10m 毎に、底層については海底上の1, 2, 3, 5m である。

2007年については、2007年8月5日に長崎大学水産学部中田研究室が実施した大村湾全域の20 測点（Fig. 3-2 に●で表記）の調査結果を使用した。調査は、CTD（JFE アレック社製 ACL-208）によって水温、塩分、クロロフィル a の測定を深さ方向に10cm ピッチで、溶存酸素濃度は溶存酸素計（WTW 社製 Oxi 330i）によって1~2m ピッチで行ったものである。

後述するように、1mg/L 以下の貧酸素水塊の分布には大きくわけて3つのパターンが認められることから、それぞれに対応する最近年の事例（2002年、2005年および2007年）については、溶存酸素濃度や水温の水平・鉛直分布および直前の風に関して詳細な検討を加えた。風速のデータについては、気象庁が長崎空港で測定しているアメダスのデータを用いた。

##### 数値モデルによる解析

風が貧酸素水塊の発達や分布・移動に及ぼす影響を調べるために、3次元の数値モデル（multilevel primitive-equation model）による解析を行った。すなわち、佐世保湾外から大村湾をモデルの対象海域とし、水平方向は500m×500mのグリッド、鉛直方向は1m ごとに21層に分割し、流れや水温、溶存酸素濃度（DO）等の分布に関する計算を行った（用いたモデルの詳細に関しては Fujihara et al.

1992 を参照)。計算の初期条件については、上述した 2002 年 8 月 22 日の実測値に基づいて、湾内（成層域）と海峡部（混合域）の水溫、塩分、DO をそれぞれ与えた。佐世保港外の境界の水溫、塩分、DO は混合域の初期値（25℃, 31.4, 5.5mg/L）で一定と仮定し、この間、境界に振幅 0.8m の M2 潮の潮位変動を与えた。また、大村湾における 8 月の代表的な値として、湾内の最上層の DO を 6mg/L で固定し、海面の熱フラックス 17cal/m<sup>2</sup>/sec

とした。さらに、DO の消費速度として、底泥 1g/m<sup>2</sup>/day, 水柱 0.1g/m<sup>2</sup>/day をそれぞれ与えた。これらは、Nogami et al. (2000) が報告した消費速度の最大値にほぼ対応している。なお、鉛直拡散係数は 10<sup>-4</sup>m<sup>2</sup>/sec, drag 係数は 1.3×10<sup>-3</sup> でそれぞれ一定とした。計算のタイムステップは 15 秒で、北東風 7m/s, 南東風 7m/s および無風の 3 ケースについて、それぞれの 5 日間の計算を行った。



**Fig. 3-1** Mass mortality of fishes caused by "Aoshio" off Port Kikitsu in Tsumizu Bay on 21 September 2007. The white points in the upper picture are dead fish. Flathead fish (*Platycephalus* sp., body length: ca. 50 cm) and black sea bream (*Acanthopagrus schlegeli*, body length: ca. 30 cm) were identified (lower left and right pictures). Blow fish (*Takifugu niphobles*, body length: ca. 15 cm) and crabs (*Portunus trituberculatus*, body length: ca. 15 cm) were also identified.



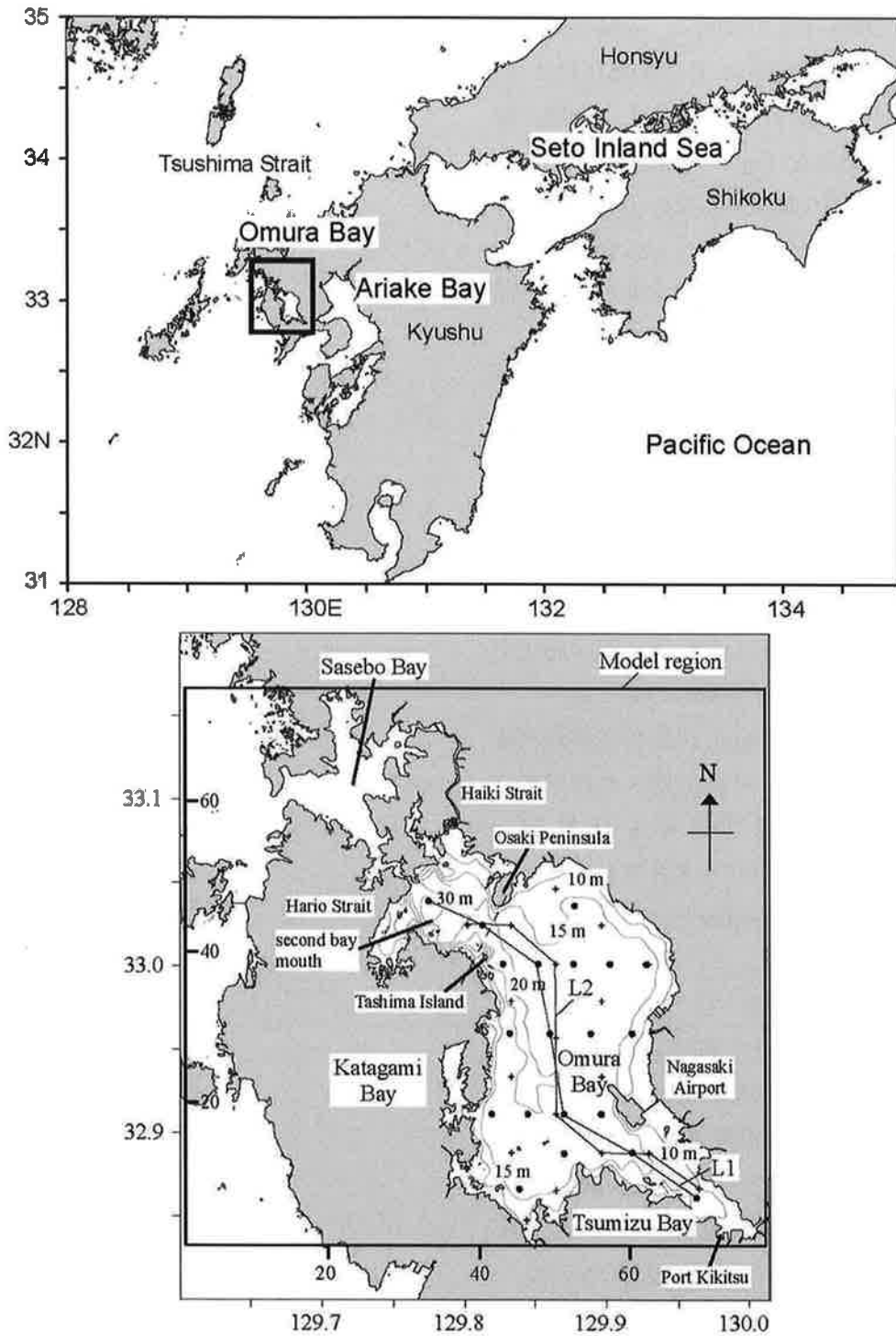


Fig. 3-2 Map of Omura Bay and station locations. The model region is indicated by the solid box with the model axis.

The symbols ● and + indicate the location of Nagasaki University and the Nagasaki Prefectural Institute of Fisheries stations.

## 結果

### 底層における溶存酸素の分布パターン

1986年から2006年までの間で、長崎県総合水産試験場による赤潮調査が8月に実施された14年分の観測データに基づいて、海底上1m層の溶存酸素(DO)の分布をFig. 3-3(a)(b)(c)に示した。3mg/L以下の一般的な貧酸素水塊の分布に注目すると、基本的に3つの分布パターンの存在が分かった。すなわち、一般的な貧酸素水塊が湾中央部から湾全体に大きな広がりを示す場合(1987年, 1993年, 1995年, 2005年)、湾北東部から東部に偏って分布する場合(1988年, 1989年, 1992年, 1994年, 2002年, 2003年, 2006年)と湾南東部に偏って分布する場合(1990年, 1997年)が見られた。後述するように、2007年8月の観測結果は、南東部に偏って分布するパターンを示した。なお、1991年(8月29日)は、一般的な貧酸素水塊が局在するのみで全体に底層のDOが高めであった。

そこで、2000年以降で1mg/L以下の貧酸素水域が出現した事例のうちで、上述した3つのパターンにそれぞれ対応している2005年8月31日、2002年8月22日および2007年8月5日の3つの事例をとりあげ、観測前の風況との関連を含めてさらに詳細な検討を行った。

上述した3つの事例について、底層のDOの水平分布を水温の分布と併せてFig.3-4に示した。低水温域と一般的な貧酸素水塊の分布がいずれの場合もよく一致していた。貧酸素水塊の中心(1mg/L以下)の位置は、2005年には湾中央部、2002年は北東部、2007年は南部～南東部にあり、一般的な貧酸素水の広がりには2005年が最も大きかった。

湾口部(早岐瀬戸)から津水湾に至る縦断ライン(Fig. 3-2のL1とL2)の水温とDOの鉛直断面図をFig. 3-5に示す。一般的な貧酸素水塊が北偏していた2002年は鉛直成層が弱く、水温およびDOは高めであった。2005年は湾中央部、2007年は津水湾側に1mg/L以下の貧酸素水塊が分布しており、それは底層の貧酸素の分布とよく一致していた。

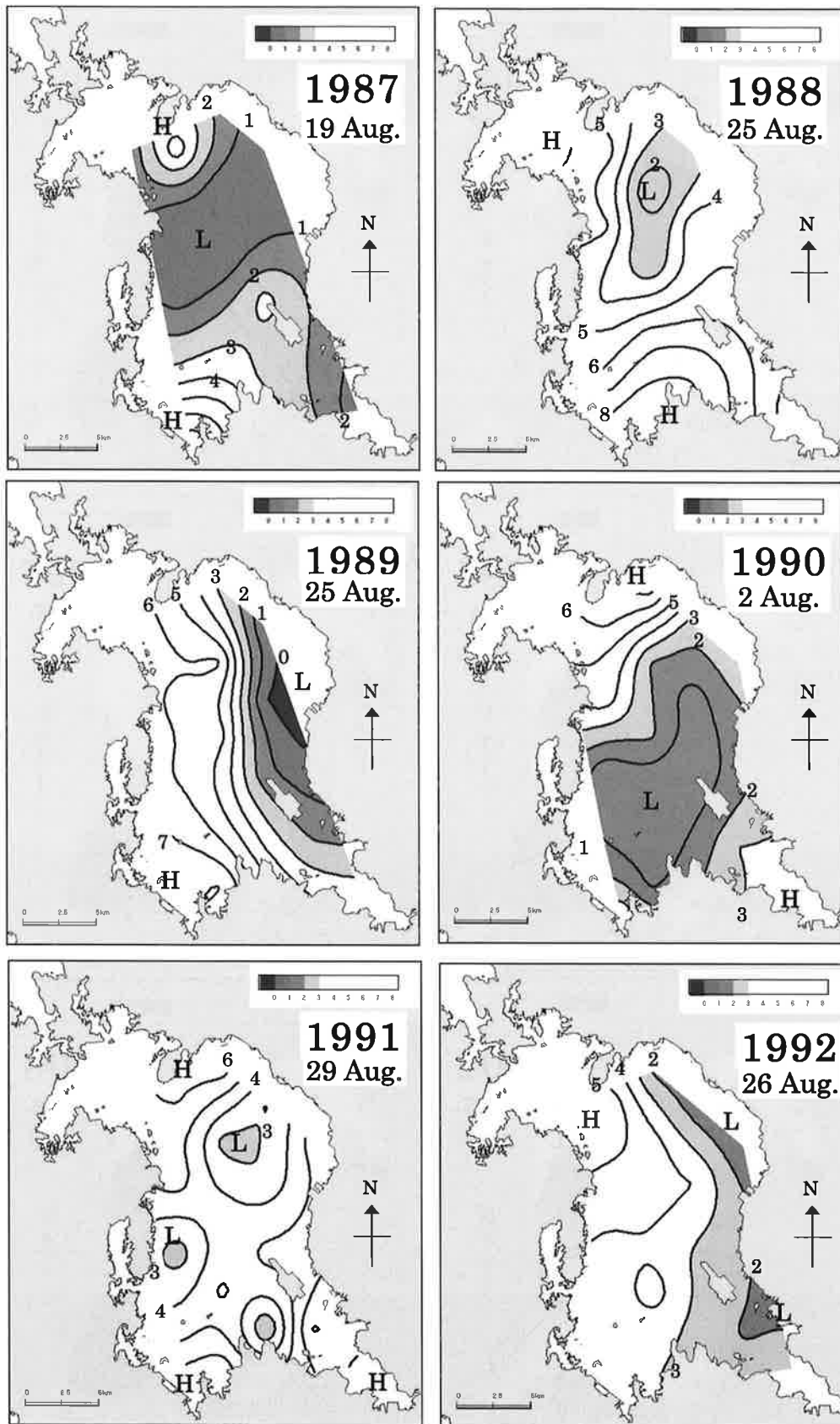


Fig. 3-3(a) Map of observed DO at 1 m above the bottom on August of 1987-1992.

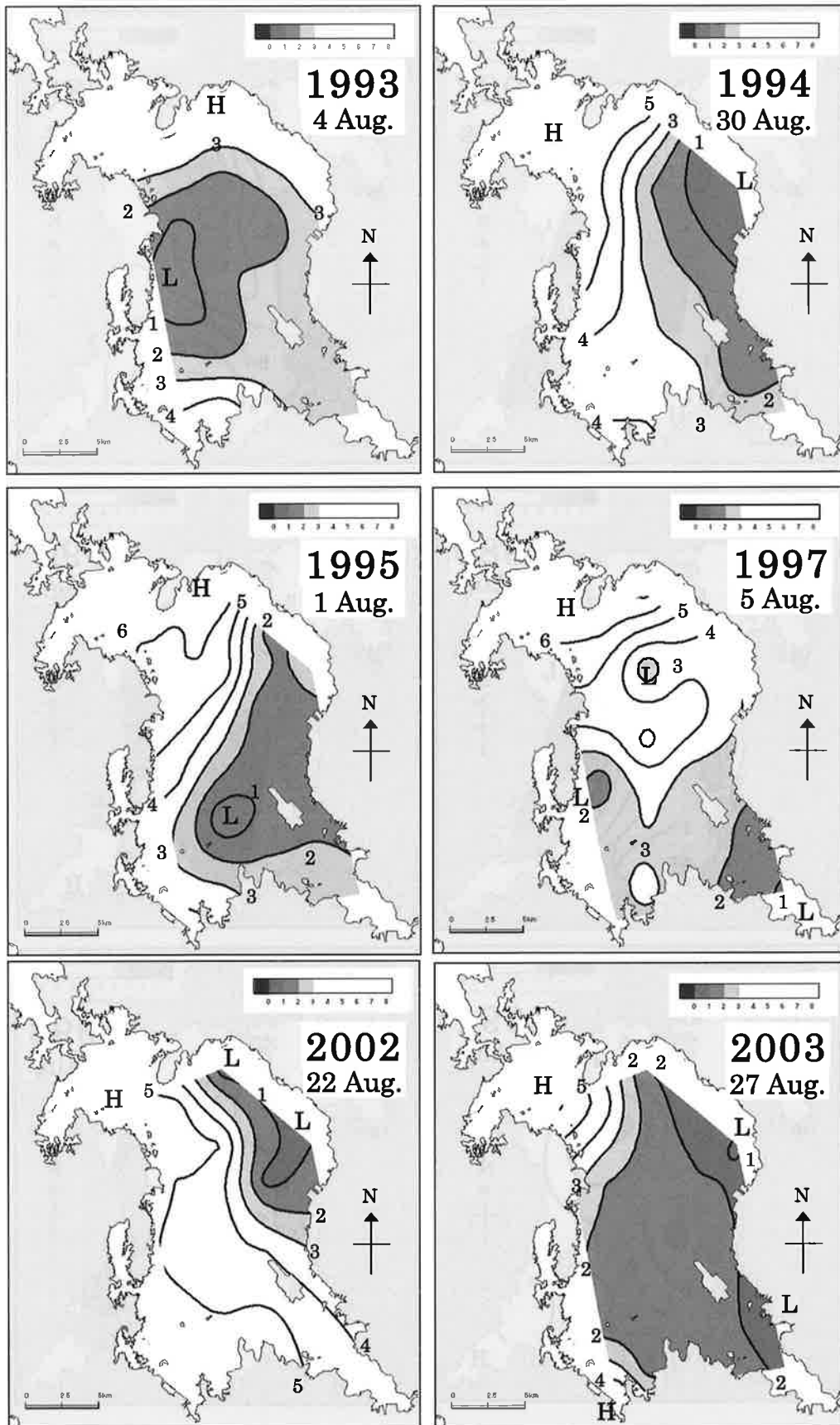


Fig. 3-3(b) Map of observed DO at 1 m above the bottom on August of 1993-2003.

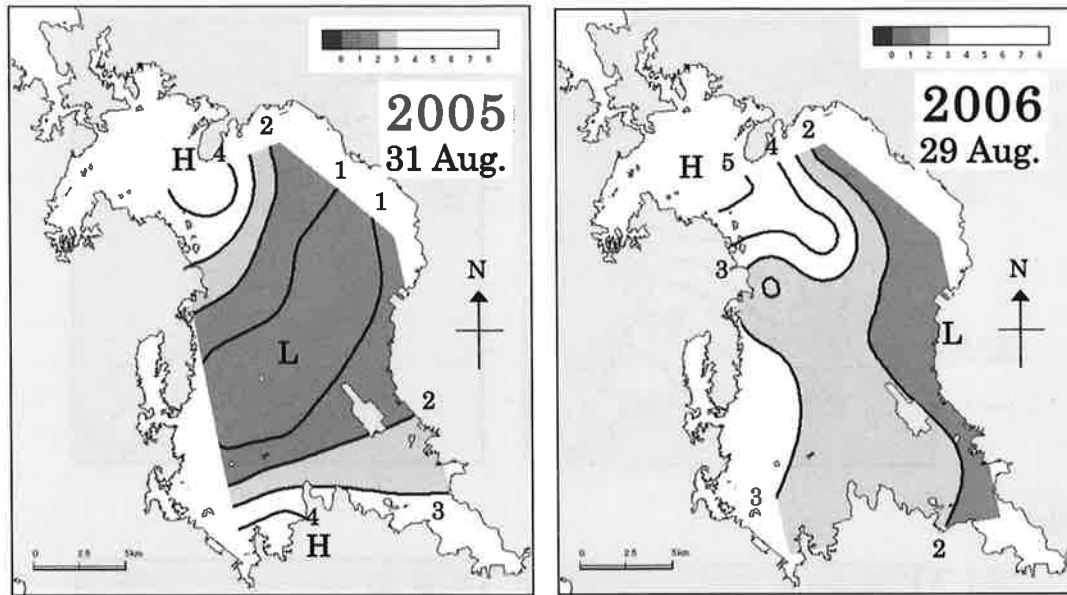
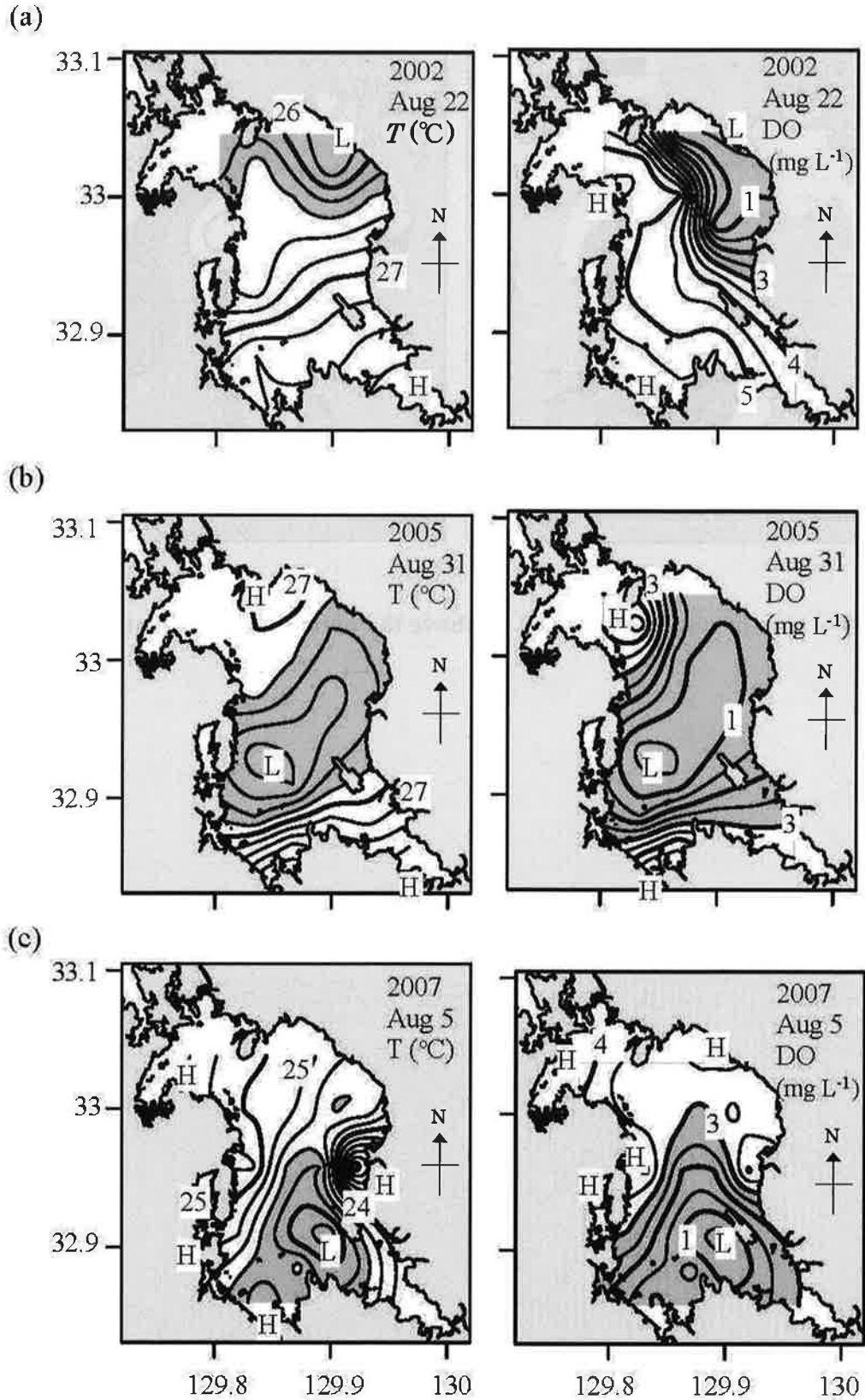
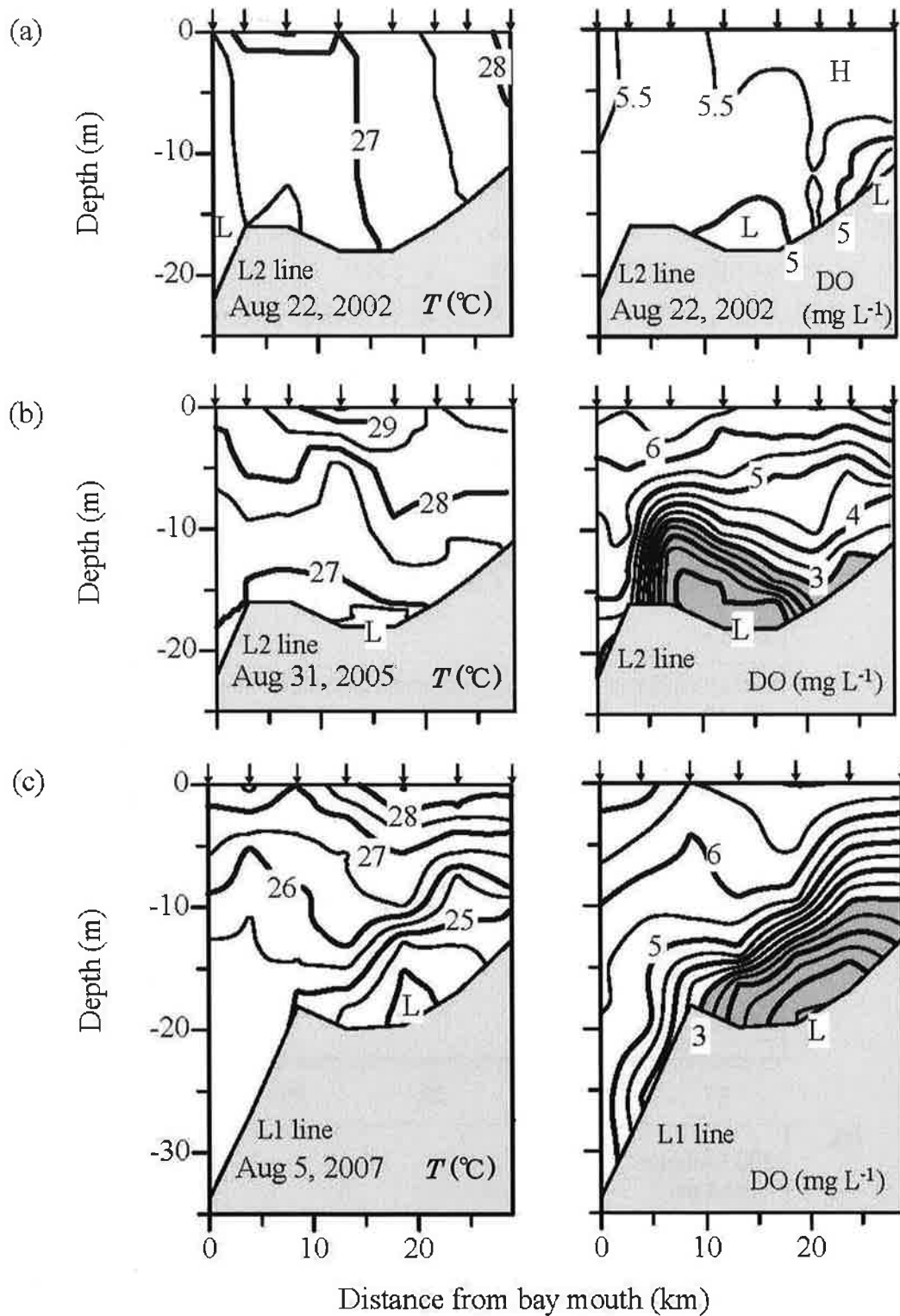


Fig. 3-3(c) Map of observed DO at 1 m above the bottom on August of 2005-2006.



**Fig. 3-4** Map of observed  $T$  (left panels) and DO (right panels) at 1 m above the bottom on 22 August 2002 (a), 31 August 2005 (b) and 5 August 2007 (c). The lowest areas ( $T < \text{lowest temperature} + 0.6^\circ\text{C}$  and  $\text{DO} < 3 \text{ mg/L}$ ) are shaded. Contour intervals are  $0.2^\circ\text{C}$  and  $0.5 \text{ mg/L}$  for  $T$  and DO, respectively.



**Fig. 3-5** Cross-sectional distributions of  $T$  (left) and DO (right) along the bay-axis shown in Fig. 3-2 on 22. August 2002(a), 31 August 2005 (b) and 5 August 2007 (c). The area of  $DO < 3 \text{ mg/L}$  are shaded. The contour intervals are  $0.5^\circ\text{C}$  and  $0.5 \text{ mg/L}$  for  $T$  and DO, respectively. Arrows indicate the observation stations.

観測前の風の状況との関連

一般的な貧酸素水塊が確認された2002年、2005年および2007年の観測前5日間の風向・風速の変化を Fig. 3-6 に示した。2002年および2007年は、それぞれ北東風（平均 6.9m/s）および南東風（平均 5.3m/s）が卓越していたのに対して、2005年は風が全般に弱く、5日間の平均風速は 2.5m/s であった。こうした風況の違いは、一般的な貧酸素水塊の分布と密接に関係しており、北東風が卓

越した2002年は一般的な貧酸素水塊が北東部に、南東風が卓越した2007年は逆に南側に偏って分布し (Fig. 3-4), 風が弱かった2005年には、一般的な貧酸素水塊が湾中央部から周辺に向かって大きな広がりを示した。

2007年には南東風の連吹によって鉛直断面でのDOの等値線が風上方向に向かって上方に傾斜しており、底層水の湧昇が起きていたことを示唆している (Figs. 3-5(c))。

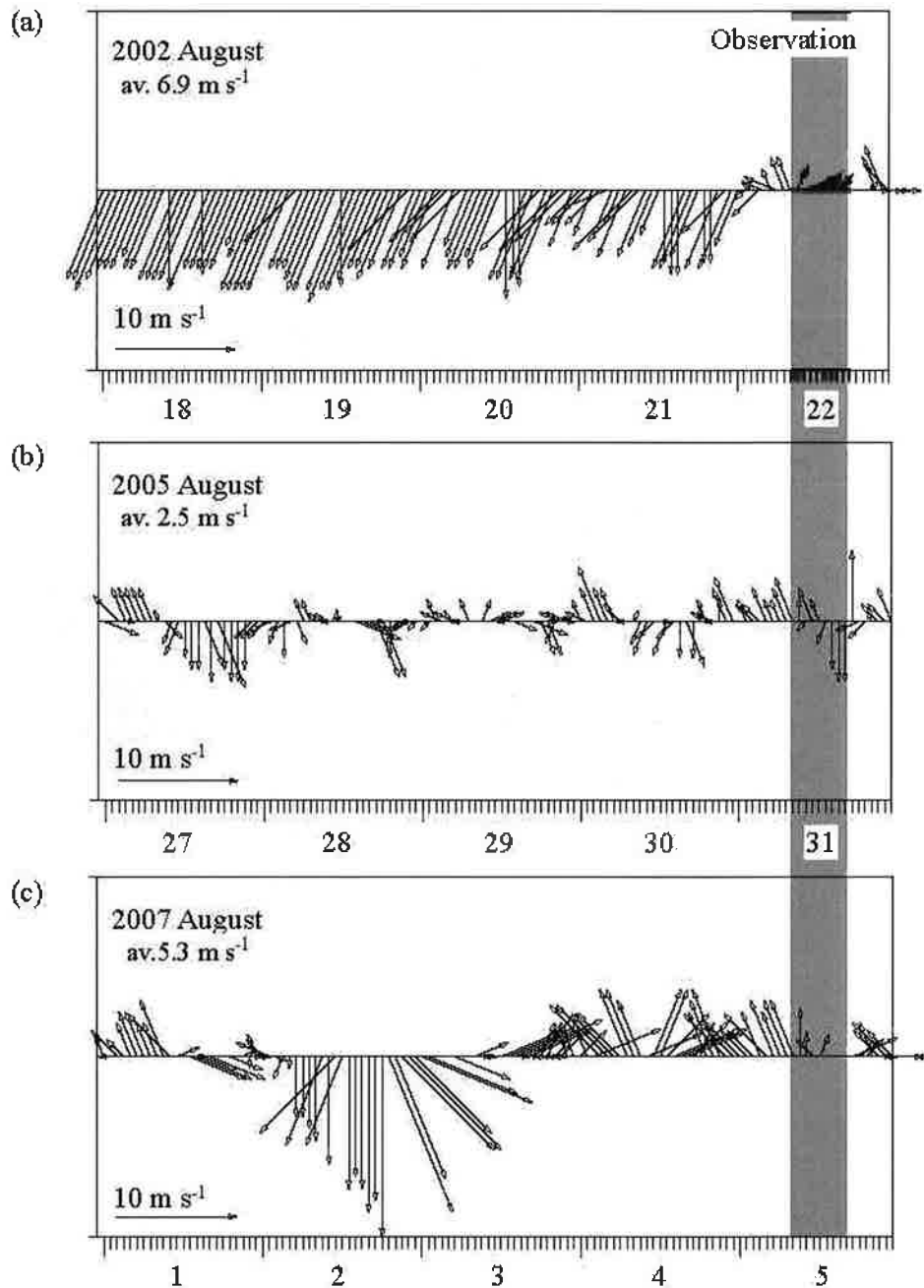


Fig. 3-6 Hourly wind vectors for 5 days before the date of the observations in August, 2002 (a), 2005 (b) and 2007 (c). The observation time is shaded.



### 風の影響に関する数値モデル解析の結果

北東風および南東風（それぞれ7m/s）を吹かせた場合と無風の場合の計算結果(14-15m層の水温、DOと海面水位の分布)をFig. 3-7に示した。

計算された一般的な貧酸素水塊と低水温の分布は、先に示した観測結果(Fig. 3-4)とよく一致した。すなわち、北東風や南東風の時には、低水温の一般的な貧酸素の水塊が、それぞれ湾の北東部や南東部に出現した。また、無風時は、一般的な貧酸素水塊が湾中央部に形成され(Fig. 3-7(b))、貧酸素水塊の広がり、北東風や南東風の場合と比較して最も大きくなった。なお、南東風の卓越時のみに津水湾に一般的な貧酸素水塊が出現した(Fig. 3-7(c))。

Figs.3-7の右側に海面水位の計算結果を示した。北東風または南東風に対応して海面が風下方向に向かって高くなっていることが分かる。さらに、無風時の表層および中層(9-10m)の残差流の計算結果をFig. 3-8に示す。水深9-10m層は、大村湾中央部では中層であるが、津水湾ではほぼ海底の深度に相当する。中層の流れの強さは、湾の西側が強いのに対して、表層の流れは西側が弱い。この反時計回りの循環の中心付近には、渦流の中心で停滞域が形成され、それは無風時の一般的な貧酸素水塊の分布の中心とほぼ一致していた。

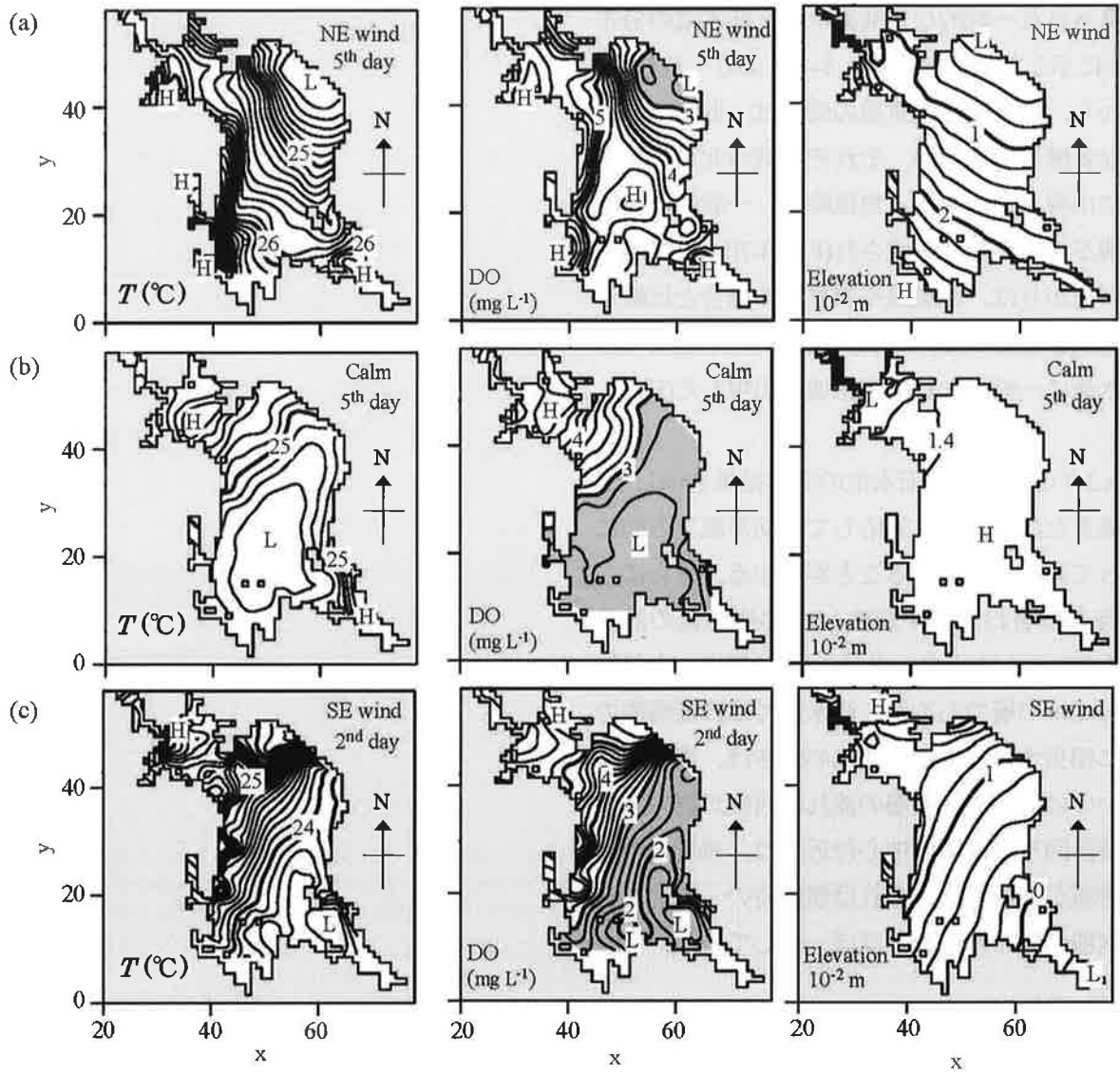


Fig. 3-7 Map of calculated  $T$  (left panels), DO (center panels), and elevation (right panels) at 14-15 m layer on the 5th day under the condition of NE wind (a), calm (b), and on the 2nd day of SE wind (c). The area of DO < 3 mg/L are shaded. The x-axis and y-axis correspond to coordinates of the model domain. Contour intervals are  $0.1^{\circ}\text{C}$ ,  $0.2\text{ mg/L}$  and  $2 \times 10^{-2}\text{ m}$ , respectively.

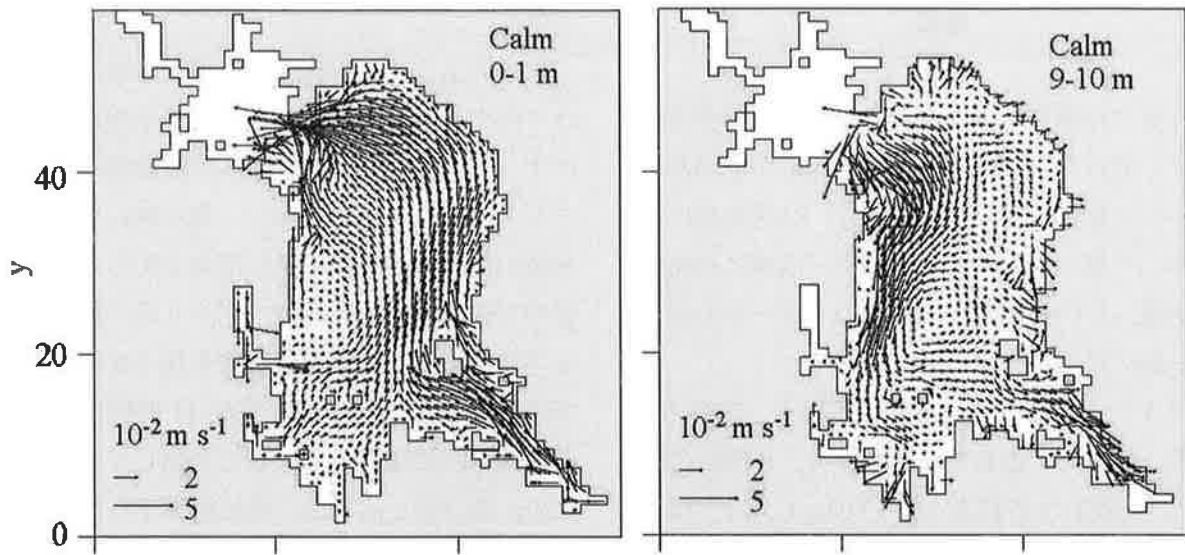


Fig. 3-8 Map of calculated residual currents in the surface (left) and middle layers (right) on the 5th day for the case of calm.

## 考察

これまでの調査結果から底層 DO の水平分布には大きく分けて、①湾中央部に分布の中心があり南西から北東に分布が広がる場合、②北東部に分布の中心が偏っている場合、③南～南東に分布の中心が偏っている場合の、3つのパターンの存在が明らかになった。

この3つのパターンに対応する近年(2002年、2005年、2007年)の事例に関するモデル解析の結果から、一般的な貧酸素水塊(3.0mg/L以下)は夏季の風が弱い時に大村湾の中央部で発達することが分かった(Figs. 3-4(b), Figs. 3-7(b))。

残差流の計算結果(Figs. 3-8)によれば大村湾中央部底層には、反時計回りの海水循環が形成されており、その中心付近では海水が停滞しやすいことが推測されている。実際に湾中央部は、底泥のCODが高い値を示すことが報告されており(水産庁1977)、上記の海水循環とよく対応している。したがって、この海水の停滞域で溶存酸素が急速に消費され、そこで一般的な貧酸素化が進行するものと考えられる。

湾中央部で発達した一般的な貧酸素水塊は、2002年の北東風および2007年の南東風のケースで数値モデルによって再現されたように、風の影響を受けて風上方向に移動する。

2007年8月のケースは、湾奥部に位置する津水湾の底層に湾中央部で発達した一般的な貧酸素水塊が流入し、沿岸部で湧昇する可能性があることを示唆している。2007年9月に津水湾で青潮が発生した事例についても、青潮発生前の9月13日から数日にわたって平均4.0m/sの南東風が連吹していた。観測データがほとんどなく、上述した風による貧酸素水塊の移動・湧昇の過程を検証することは出来ないが、おそらく共通のメカニズムが作用したものと考えられる。すなわち、2007年の青潮は、風の弱い日が続いたために反時計回りの循環が発達する湾中央部で貧酸素化が進行し、その貧酸素水塊が強い南東風の連吹により湾奥部の底層に流入することによって発生したものと推測

される。

以上のように大村湾では、海水循環の影響を受けて湾中央部で形成された貧酸素水塊が風的作用によって移動し、沿岸浅海域の貧酸素化を引き起こしている。これに対して、諫早湾の干潟域は、水深が浅いため基礎生産が活発であると同時に底泥の有機物分解の影響や、アサリ等の豊富なベントス類による酸素消費の影響を強く受け、第2章で述べたようにDOはわずか12時間ほどの間に過飽和から無酸素まで大きく変動している。そのため、風が弱く高水温で残差流が小さい状態が続くと、酸素消費に対して酸素供給の速度が著しく低下して貧酸素化が急速に進行する。このように諫早湾の干潟域では、内湾とは異なる干潟特有の貧酸素化のメカニズムが存在することが明らかとなった。しかしながら、その一方で、三品(2008)は、諫早湾の湾軸方向の離岸風によって、湾外底層の高密度水が湾内に流入し鉛直成層を強化するため底層の貧酸素化(3mg/L以下)が急激に進行する事例を報告している。すなわち、諫早湾沿岸でも同様に風による底層水塊の移動・接岸によって干潟域が貧酸素化する可能性があると考えられる。この点については、観測データが未だ十分ではなく、今後さらに詳細にわたる検討が必要である。

## 第4章 養殖アサリの大量へい死防止対策

### 研究の背景と目的

東京湾や三河湾をはじめとするわが国の内湾では、夏季に底層水の貧酸素化が進行し、それが沿岸浅海部に進入・湧昇してアサリ等の水産有用二枚貝類を大量にへい死させることが大きな問題となっている（柿野 1986, 鈴木ら 1998, 青山ら 1999）。有明海の佐賀県沿岸の干潟周辺海域でも、夏季の小潮期に貧酸素化が進行することが問題となっており（木元ら 2005, 田中ら 2005）、それに伴うサルボウの大量へい死が報告されている（藤田ら 2007）。

諫早湾の諫早市小長井町地先の干潟でも、養殖アサリの夏季大量へい死が数年に1度発生しており（藤井・山本 2003）、2000年8月には2億6千万円の漁業被害が生じた（長崎県総合水産試験場 2001）。そのへい死原因として、2000年と同程度の被害を生じた2004年8月の事例では、水温31℃以上の高水温と約14時間継続した貧酸素状態（0.5mg/L以下）が複合的に作用したためと報告されている（松田 2008）。しかしながら、諫早湾の干潟域でアサリの大量へい死を引き起こす底層水の貧酸素化のメカニズムやその影響の詳細については、未だに不明の点が多い。

一方、このような貧酸素化による有用二枚貝類のへい死対策として、三河湾では貧酸素の継続時間からへい死の危険性のある地盤高を推定し、浅場漁場をその地盤高に嵩上げすることが提唱されている（今尾・鈴木 2004）。また、有明海においては、佐賀県鹿島沖の潮下帯のサルボウ漁場において、サルボウのへい死を軽減するため、マイクロバブル海水の導入による底質の悪化防止の試験が実施されている（藤田ら 2007）。これらはいずれも潮下帯での貧酸素化によるへい死対策試験の事例であり、これまでに諫早湾のアサリ養殖場のような干潟域での対策事例は全く報告されていない。

本研究では、(1)干潟域のアサリ養殖場において、貧酸素化の発生を事前に予測し、(2)貧酸素化

する前に遮断幕で養殖場を囲って貧酸素水の進入を遮断し、養殖場内を曝気する底層溶存酸素の改善システムの試験を実施した。その結果、本改善システムがアサリのへい死および底質悪化の防止に効果的であることが確認されたので、その概要について報告する。

### 材料および方法

調査および試験海域を Fig.4-1 に示す。試験方法の詳細は以下の通りである。

#### アサリ養殖場（干潟）の底層水が強く貧酸素化する時期の推定

諫早湾北岸部（長崎県諫早市小長井町釜地区）の干潟に覆砂することで展開されているアサリ養殖場において、アサリの大量へい死を引き起こす底層水の強い貧酸素化に対して効果的に対策を講じるためには、その発生時期を予測することが必要である。そこで、強い貧酸素化が発生する条件を明らかにするため、養殖場の最も沖側の地点 Stn.1 (DL.+60cm, Fig.4-1) において、2003年から2008年までの夏季（7月～9月）に、自記式記録計による水質の連続観測を行った。水温、溶存酸素濃度については、水質計（HYDROLAB社製多項目水質計 DS4a）を底上約5cmに設置し30分間隔で連続測定し、測定データを携帯電話回線を利用してリアルタイムで入手した。

また、強い貧酸素化の発生に関与すると考えられる風速、潮汐（潮差）およびシャットネラ赤潮の発生状況については、九州農政局が諫早湾中央部の B3 櫓で1時間毎に測定している風向・風速データ、気象庁の大浦検潮所の観測潮位および長崎県総合水産試験場の赤潮調査データ（長崎県総合水産試験場,2004,2005,2008,2009）をそれぞれ収集し、強い貧酸素水の発生時期との関連性について検討した。

### アサリ養殖場における底層溶存酸素の改善試験

諫早湾干潟域のアサリ養殖場で実施した底層溶存酸素の改善試験の概要を Fig.4-2(a)に示す。本試験に用いたシステムは、沖から干潟域底層に進入する強い貧酸素水塊の漁場への進入を阻止するための遮断幕と、遮断した漁場内の溶存酸素の減少を補う曝気装置で構成される。遮断幕として市販のブルーシートを高さ 2m、長さ 20m に加工し、それを横方向にファスナーで継ぎたしたものを使用した。

曝気装置の側面図を Fig.4-2(b)に示す。本装置は低圧ポンプによって吸い上げた水流に圧力をかけながら空気を注入し、直径 7~54 $\mu$ m の微細気泡を混入させる装置である（水量 5 L/min、吐出口 4 箇所の合計エアール量 140L/min）。装置の設計に際しては、微細気泡の酸素溶入効果について試験を実施し、水中に溶けた空気の割合の中で最も低い 10%の溶解効率で、ブルーシートで囲った容積 600,000 L に一定レベルの溶存酸素濃度を確保するために、1 時間に 0.37mg/L（アサリと底泥の酸素消費速度、第 2 章参照）以上を供給できるように、吐出量を 140 L/min とした。曝気方法として微細気泡を使用したのは、シートで囲った漁場内の成層構造を壊さず、シート上部の上層水の影響を避けるためであり、そのため低圧ポンプで汲み上げる海水は、底層近くの比重が重い海水とした。

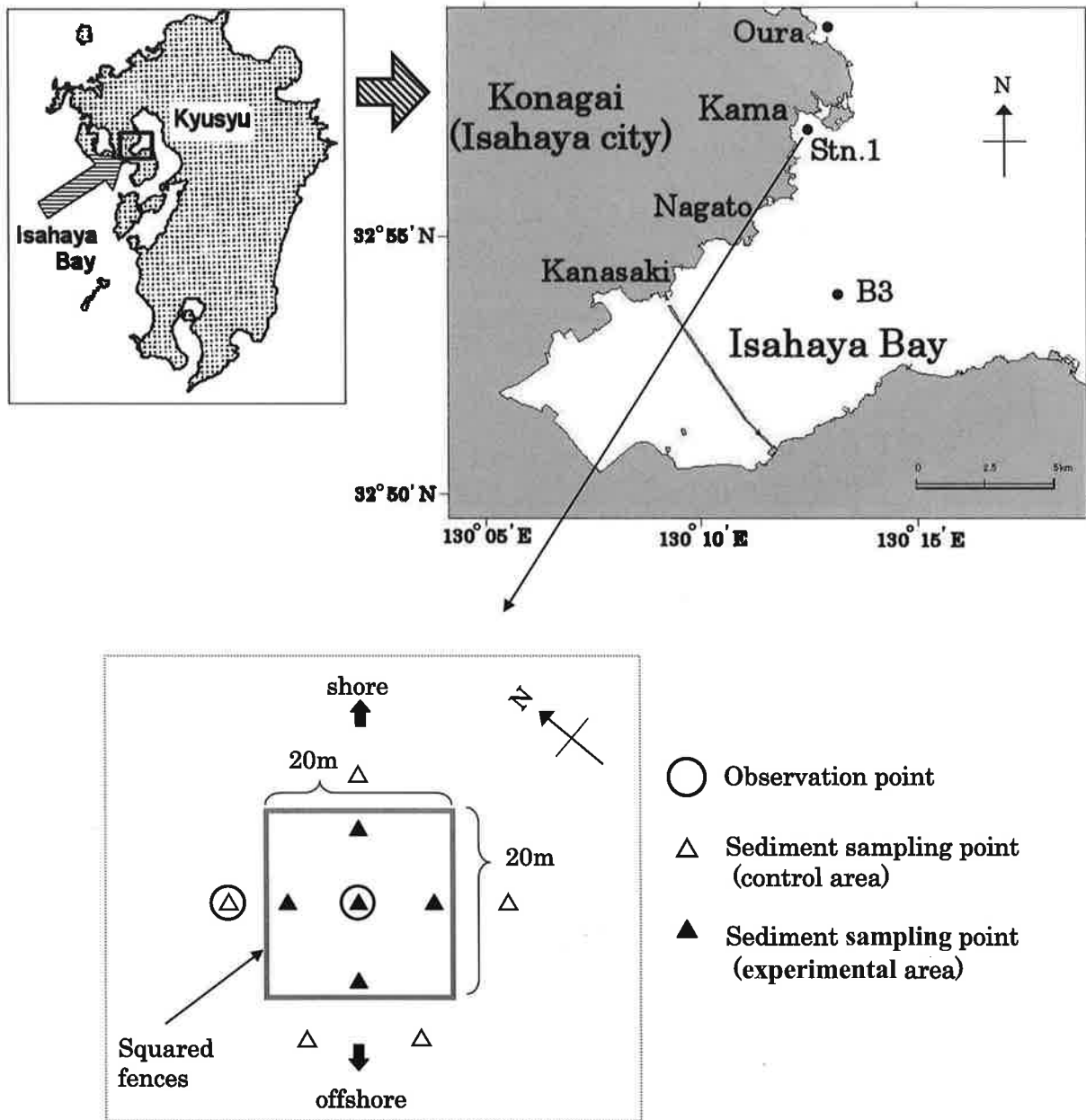


Fig. 4-1 Study site in Isahaya Bay and the Kama tidal flat, showing the locations of Stn.1 for continuous observation of temperature, salinity, and dissolved oxygen, and B3 for wind observation.

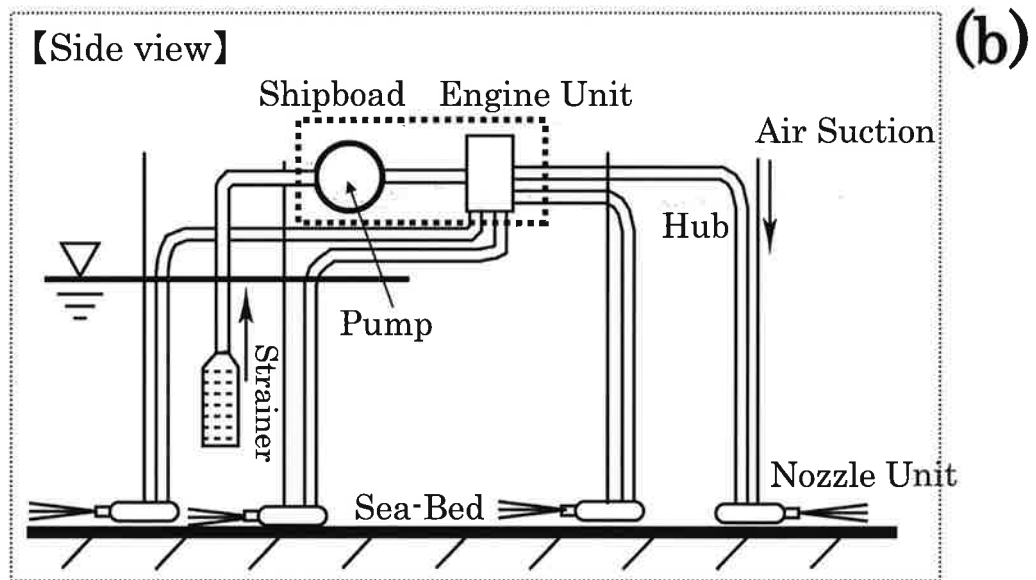
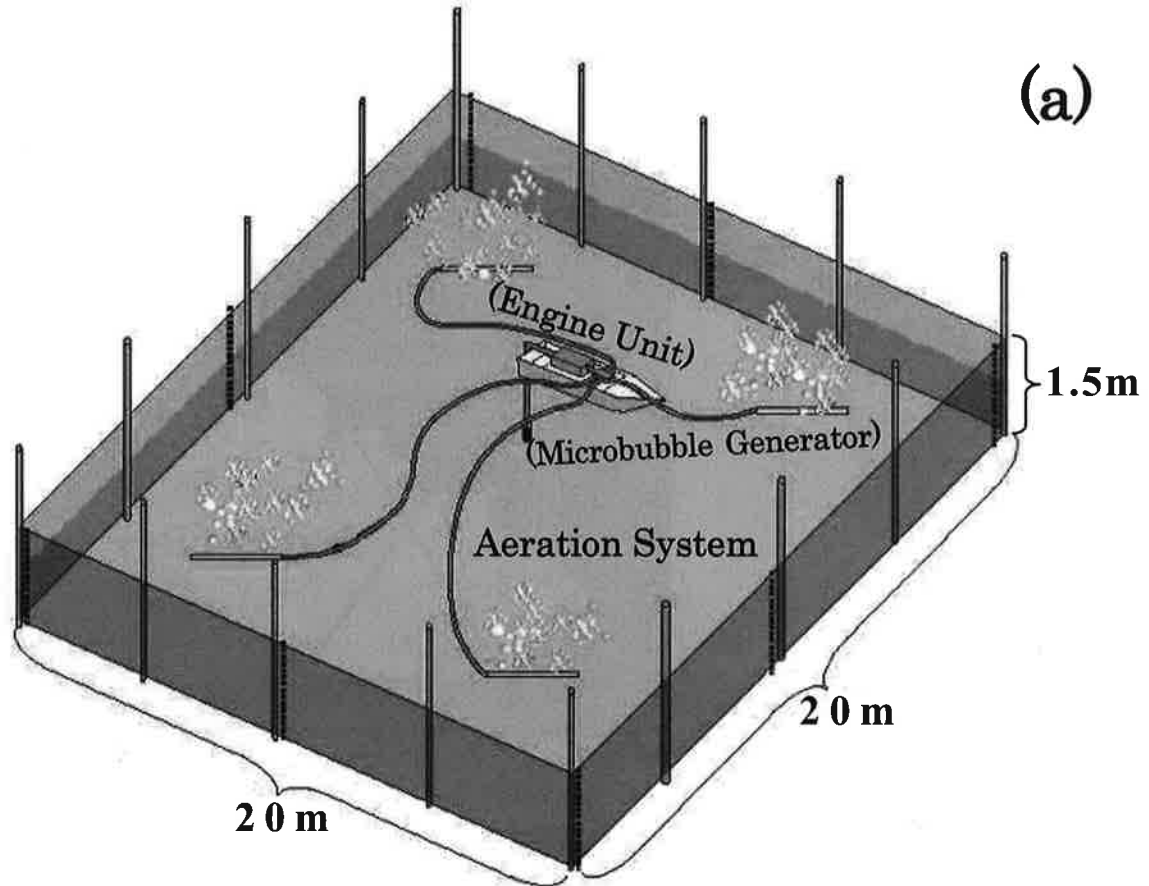


Fig. 4-2 (a) Schematic demonstration of the hypoxia prevention system used at the Kama tidal flat. The height of the squared fence was 1.5 m above the bottom. (b) Side view of the bubble aeration system.



改善試験は、Stn.1 近くの幅が 60m で岸沖方向に 200m の広がりを持つアサリ養殖場の中央 (DL.+120cm) に、20m×20m の正方形の区画 (試験区) を設けて実施した (Fig.4-1)。後述するように、これまでの水質連続測定データに基づく発生時期の検討から、2008 年は 8 月 11 日に強い貧酸素化が予測され、8 月 10 日から 8 月 14 日まで試験を実施することとした。

まず、アサリ養殖場が干出した 8 月 5 日 (大潮) の干潮時に、上述の遮断幕 (ブルーシート) の下端を漁場に 20~50 cm 程度埋め込み、その上部を丸めて 8 月 10 日からの試験に備えた。8 月 10 日の小潮時に潜水作業により、丸めたブルーシートを伸ばして、その上端をシートが垂直になるように支柱に固定した (シートの高さ:1.5m)。曝気装置は 8 月 10 日の 13:00 から稼働させ、8 月 13 日 11:00~13:00 は水位が 60cm 以下となったため稼働を一時休止した。また、同日 13:00 から再開し、その後は試験終了時 (8 月 14 日 10:00) まで稼働させた。底層溶存酸素の改善装置は、8 月 14 日の 12:00 には試験区から全て撤去した。

試験期間は多項目水質計 (JFE アレック電子社製 AAQ1183) を用いて、試験区の内外の溶存酸素濃度と水温を、1 時間毎に海底面から 10cm 間隔で計測をした。また、それと並行して試験区と対照区 (試験区の沖側で遮断幕から 5m 離れた場所) の海底上 10cm のところに溶存酸素計 (JFE アレック電子社製 COMPACT-DOW) を設置して、10 分ごとに溶存酸素濃度を計測した (Fig.4-1 に測点を○印で表示)。

また、試験期間のアサリの生存状況の推移を調べるため、8 月 14 日の 15:00 に試験区と対照区 (それぞれ 1 時間毎の水質観測場所) の海底上でネットに收容したアサリ 100 個体を置き、24 時間ごとにそのネットを引き上げてその時点の生残数を調べた。さらに、試験終了後の 8 月 15 日には、試験区と対照区で各 2 回、20cm×20cm の方形枠を用いた枠取り調査を行い、アサリの生存個体数と 4 日以内にへい死したと推定されるアサリの個体数 (軟体部が残ったへい死直後の個体やきれいな状

態の開殻した貝殻の数) を調べ、それらをもとに 8 月 15 日時点での生残率を推定した。

上記の生残状況調査用と同時にアサリに対する貧酸素の影響の程度を調べるため、別のアサリ 50 個体を同じようにネットに收容して海底に置き、試験期間中 (8 月 13 日 10:00 まで) の朝夕 2 回 (計 5 回)、それぞれ強い貧酸素状態が解消した時間帯に試験区と対照区で各 5 個体のアサリから外套腔液を採取し、アサリの嫌気代謝の最終代謝産物であるプロピオン酸 (Hochachka, 1984) の分析を行なった。なお、分析には中村 (1998) と同じく HPLC 有機酸分析システム (島津製作所製) を用いた。

さらに、試験終了後の漁場底質の相違を調べるため、9 月 1 日の干出時に試験区と対照区の各 5 地点 (Fig.4-1 に測点をそれぞれ▲と△で表示) から内径 3.5cm の円型コア採泥器を用いて底泥を 5cm 採取し、検知管法 (ガステック製ヘドロテック S (荒川 1980)) により酸揮発性硫化物 (AVS-S) を測定した。干潟底質の悪化は、アサリのへい死後に徐々に進行することから、この調査は大量へい死の約 2 週間後に実施した。

各測定値の差異の検定には、アサリの生残率が 2×2 分割表による  $\chi^2$  検定、底質の酸揮発性硫化物が等分散を仮定しない Welch の  $t$  検定を用いた (内田 1999)。

## 結果

### アサリ養殖場 (干潟) の底層水が強く貧酸素化する時期

2003 年~2008 年に釜地区のアサリ養殖場で発生した強い貧酸素化 (0.5mg/L 以下) の 7 事例について、貧酸素化の継続時間と水温、無酸素水の出現の有無、関連して発生した赤潮の原因種およびアサリの大量へい死 (2 週間以内に 30% 以上のアサリ個体がへい死) の発生の有無を Table 4-1 にまとめて示す。シャットネラ赤潮が発生した 2003 年 9 月、2004 年 8 月、2007 年 8 月、2008 年 8 月に発生した強い貧酸素化はさらに無酸素状態まで進行した。特に、そのうち 2004 年 8 月、2007 年

8月および2008年8月には、アサリの大量へい死が生じていたことが分かる。

さらに、シャットネラ赤潮が発生した4例について強く貧酸素化した時期と日間の潮差（最大満潮位から最低干潮位を差し引いたもの）、風の強さ、赤潮の発生期間との関係をFig.4-3に示した。強く貧酸素化した時期はいずれも風が弱く、シャットネラ赤潮が発生している期間のうちで潮差が小さい小潮時期にあたり、それぞれ3~4日間程度継続していることが分かる。風速変化との関連をさらに詳しく調べるため、強い貧酸素化が始まった日の前後の風速日平均値の推移をFig.4-4(a)に示した（横軸の0は貧酸素化の開始日）。強い貧酸素化開始日の前後それぞれ5日間の風速は、5m/s以下で推移していることが分かる。また、潮差の変化との関連を見るため、シャットネラ赤潮が発生した日以降の日間潮差（最大値）の推移をFig.4-4(b)に示した。強い貧酸素化の開始日（大きなマーカーで表示）は、いずれも潮差が230cm以下の小潮期間で、しかも潮差が極小になった日またはその翌日にあたることが分かる。

底層溶存酸素の改善試験を実施した2008年8月についても、Fig.4-3下段に示したように上記の強い貧酸素化の発生条件に合致していた。2008年8月の干潟底層の強い貧酸素化の状況を詳細に検討するため、8月10日から8月15日までの溶存酸素濃度と水温の推移をFig.4-5(a)に示した。これまでの事例から予測された通りに2008年8月11日から強い貧酸素化が始まり、貧酸素と過飽和を交互に繰り返す状態が8月15日まで続いた。アサリ養殖場である釜地区干潟が強い貧酸素水に曝露された時間は、8月11日には6時間、12日には8時間、13日には11時間、14日には4時間、15日には6時間であった。その間の水温は、それぞれ、29°C台(平均29.3)、27~30°C(28.3)、25~29°C(26.8)、26~30°C(26.9)、26~28°C(27.1)であった。水温は8月13日までは徐々に低下し、その後は上昇した。

**Table 4-1** The overall description of the various features associated with hypoxia formation at the Kama tidal flat, including water temperature, dominated species of red tide and mortality of cultured clams during 6 years (2003-2008).

Date	Duration of hypoxia (hours)	Water temperature (°C)	Anoxia*	Species of red tide**	Mass mortality of clams***
22-23 Aug. 2003	14	24~26	-	<i>Hetrosigma akashiwo</i>	-
5-8 Sep. 2003	32	25~28	+	<i>Chattonella antiqua</i>	-
11-14 Aug. 2004	43	28~35	+	<i>C. antiqua</i>	+
15 Aug. 2005	5	27	-	<i>Akashiwo sanguinea</i>	-
5-6 Aug. 2006	15	24~25	-	<i>Diatom</i>	-
23-26 Aug. 2007	15	24~28	+	<i>C. antiqua</i>	+
11-15 Aug. 2008	29	22~29	+	<i>C. antiqua</i>	+

\*Occurrence (+)/non-occurrence (-) of anoxic water (under 0.3 mg/L)

\*\*Dominated species of the red tide accompanied by hypoxia formation

\*\*\*Occurrence (+)/non-occurrence (-) of mass mortality of short-neck clams

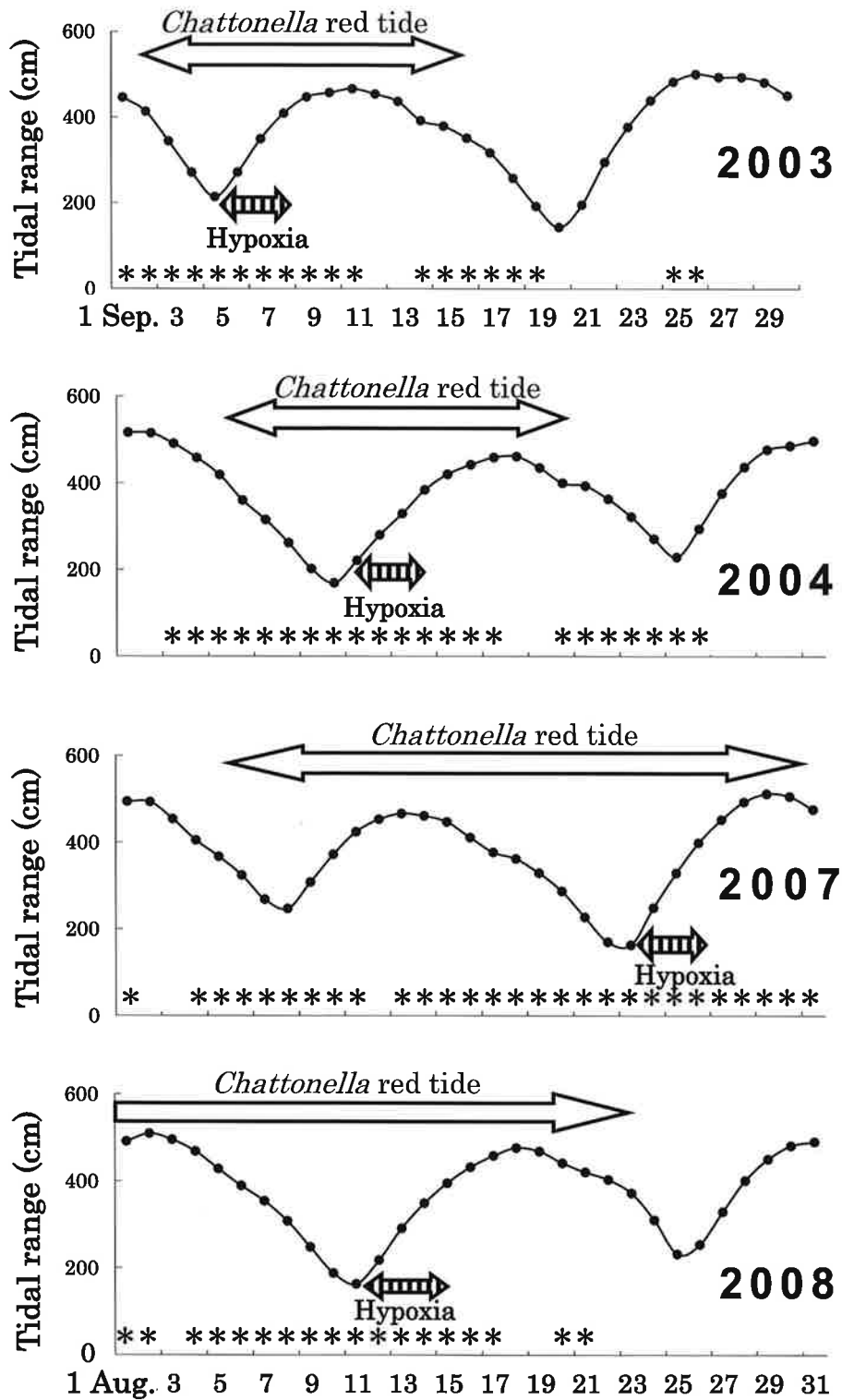
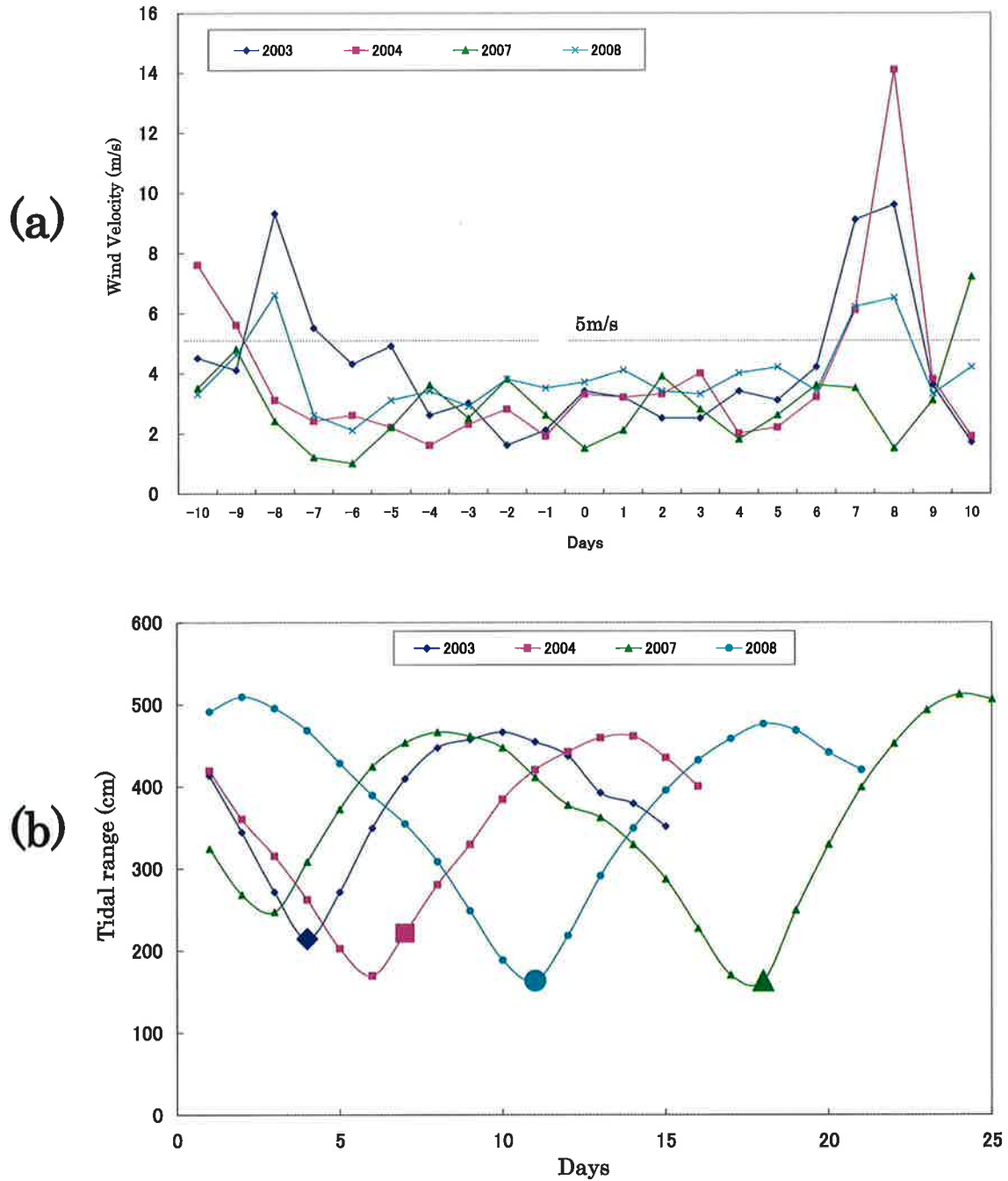


Fig. 4-3 Variations in the daily tidal difference at Oura, (see Fig.4-1) corresponding to hypoxia formation at the Kama tidal flat in 2003, 2004, 2007 and 2008 (no hypoxia occurred in 2005-2006). Bold open arrows indicate the period of *Chattonella* red-tide outbreaks. Asterisks indicate that daily mean wind speed was below 5m s<sup>-1</sup> at B3.



**Fig. 4-4**

(a) Time change in the wind speed (daily mean values) before and after the occurrence of the hypoxia at the Kama tidal flat.

Date 0 indicates the date of hypoxia was first observed (5 Sep. 2003, 11 Aug. 2004, 25 Aug. 2007 and 11 Aug. 2008).

(b) Time change in the tidal range (daily maximum) after the *Chattonella* red tide was first observed (2 Sep. 2003, 5 Aug. 2004, 6 Aug. 2007 and 1 Aug. 2008).

Larger marks indicate the beginning of the hypoxia in each year.

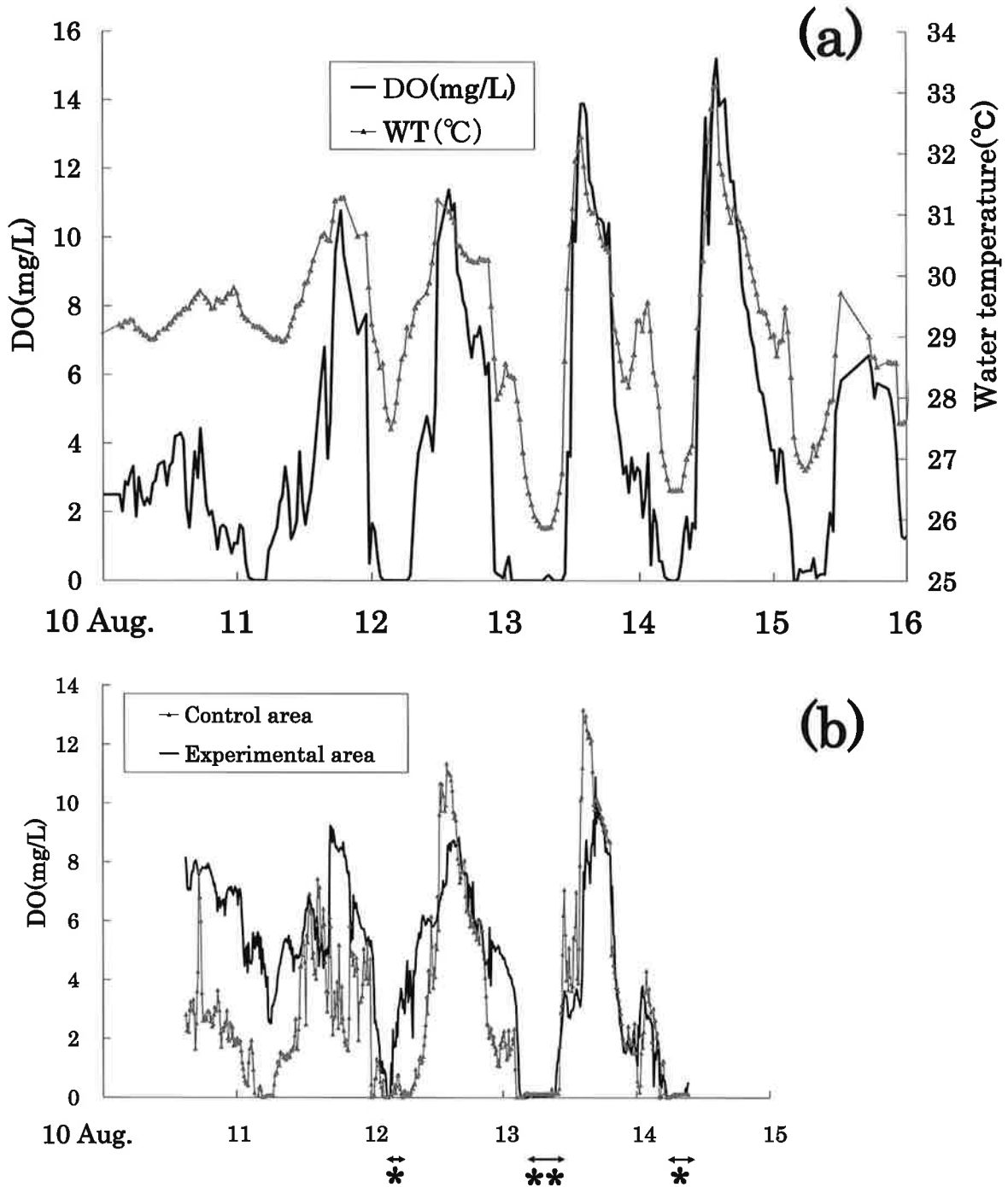


Fig. 4-5

(a) Time changes of dissolved oxygen (DO) concentration and water temperature in the bottom water at Stn.1 from 10 to 16 August 2008.

(b) Comparison of dissolved oxygen (DO) concentration in the bottom water between the experimental and control areas from 10 to 14 August 2008.

\* The fence for preventing intrusion of hypoxic water was partly broken.

\*\*Hypoxic water probably got over the fence and entered into the experimental area.

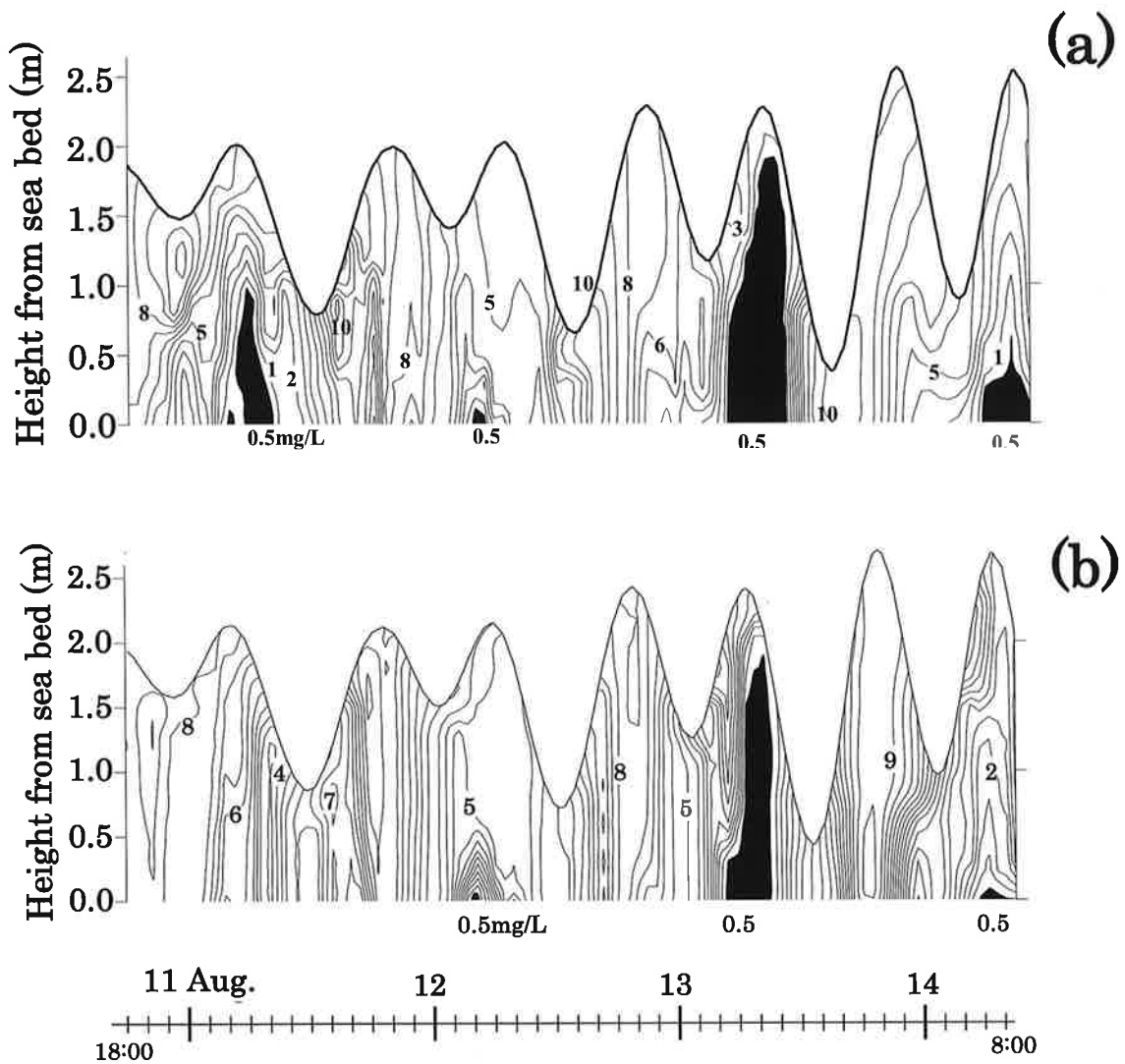
### 底層溶存酸素の改善試験の結果

試験区と対照区の底層溶存酸素濃度の推移を Fig.4-5(b) に示す。試験区の溶存酸素濃度は、8月11日までは対照区より全体的に高く 0.5mg/L 以上の溶存酸素濃度が維持されたが、8月12日の3:00~4:00、8月13日の2:50~9:20、8月14日の4:20~9:30は対照区とほぼ同じ値の強い貧酸素状態となった。これらのうち8月12日については、8月11日昼間の干潮時に試験区の水深が10cm程度となった際に、遮断幕として使用しているブルーシートの下端が、風速6m/sの強風によって埋め込んだ海底から捲り上がる状態が発生した。その後、潮が満ちてきた段階で潜水作業により埋め込みの作業を行ったものの、作業が完全でなかったため、シート外の強い貧酸素水が一部進入したものと考えられる。8月12日には急遽、潜水作業により埋め戻しを行った。このため、この時には一時的な低下に留まったが、8月14日の事例もおそらく同じ原因で起きたものと考えられる。一方、8月13日の事例については、Fig.4-6に示した試験区および対照区の溶存酸素鉛直分布の時間変化(8月10日18:00~8月14日8:00)から分かるように、貧酸素化した水塊の高さが1.9mとなり遮断幕の高さ(海底から1.5m)を一時的に超えたため、貧酸素水がシートの上部から進入したことによるものと推察される。

試験区と対照区の溶存酸素濃度を比べると、夏季の貧酸素時にアサリの生存を維持するための溶存酸素濃度として報告されている1mg/L(松田2008)以下となった延べ時間は、試験区で14時間、対照区で27時間であった。また、夏季に数日間で大量へい死を起こす可能性がある溶存酸素濃度(0.5mg/L以下(松田ほか2006))を基準にとれば、試験区で12時間40分、対照区では23時間50分であり、上記のトラブルにもかかわらず大きな違いが認められた。さらに、Table 4-2には、試験区と対照区でそれぞれ強い貧酸素水に曝露された延べ時間を水温区分別に示した。試験区では28℃台以上の高水温の強い貧酸素水に曝露された時間(2.5時間)が、対照区(14時間)に比べて明

らかに短いことが分かる。

試験期間の試験区と対照区におけるアサリの生残率の変化を Fig.4-7 に示す。8月13日の試験終了段階で、試験区が生残率93%に対して対照区は78%、8月15日の枠取り調査では、試験区が生残率91%に対して対照区は59%であった。試験区と対照区が生残率にはいずれの場合も危険率1%で有意差が認められた( $\chi^2_{df=1} = 7.9, P = 0.004$ ;  $\chi^2_{df=1} = 28.1, P = 1.1 \times 10^{-7}$ )。アサリ外套腔液のプロピオン酸含有量については、8月11日の対照区のみで1.3  $\mu\text{mol/ml}$ (サンプル5個体のうち2個体は2.0  $\mu\text{mol/ml}$ )が検出され、試験区とその他の対照区のサンプルからは全く検出されなかった。さらに、試験終了後(9月1日)に調査した底泥の酸揮発性硫化物(AVS-S)含有量は、試験区の平均値が $0.09 \pm 0.01(\text{SE})\text{mg/gDW}$ であったのに対して、対照区は $0.17 \pm 0.02\text{mg/gDW}$ であり、両者の間には危険率5%で有意差が認められた。



**Fig. 4-6** Time changes of the vertical distribution of dissolved oxygen concentration at the control (a) and experimental (b) areas from 10 to 14 of August 2008. It should be noted that the height of hypoxic water exceeded the fence height (1.5 m above the bottom) of the experimental area on 13 August 2008.

Table 4-2 Total hours exposed to hypoxia at the control and experimental areas under various water temperature conditions.

		10 Aug	11	12	13	14
Control area	25-26°C				3.0	
	26-27°C				4.0	3.0
	27-28°C			3.0	2.0	
	28-29°C			4.0	2.0	
	29-30°C		6.0	1.0		1.0
Experimental area	25-26°C					
	26-27°C				4.0	0.5
	27-28°C				2.0	3.5
	28-29°C			1.0	1.0	0.5
	29-30°C					

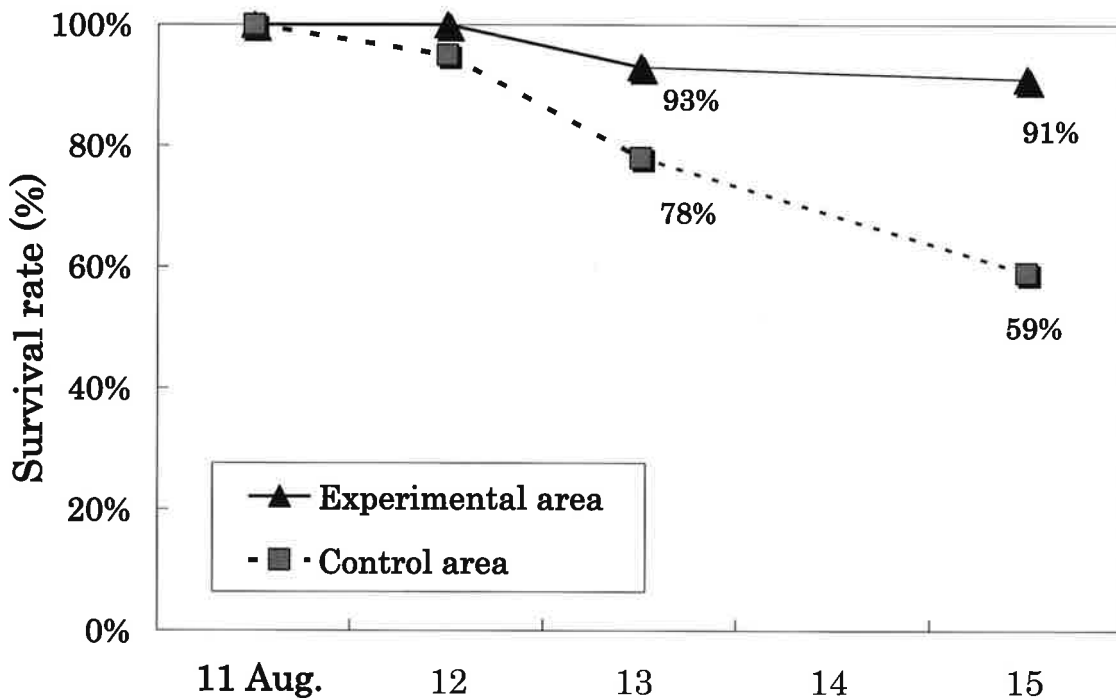


Fig. 4-7 Comparison of the survival rate of short-neck clams between the experimental (▲) and control (■) areas from 11 to 15 August 2008. See the text for the survival rate estimation on 15



## 考察

### アサリ養殖場（干潟）の底層水で強い貧酸素化が生じるための条件

本研究において底層溶存酸素の改善試験を実施した2008年は、8月11日から無酸素状態が始まった（Fig.4-5）。2003年以降の強い貧酸素化の事例を検討した結果、貧酸素化が始まる時期に共通する特徴として、シャットネラ赤潮の発生期間で、風が弱く（日平均風速5m/s未満）、日間の潮差が極小になった日またはその翌日であることが分かった。2008年に試験を開始した8月10日はシャットネラ赤潮が7月27日から発生し8月23日まで継続した期間で、潮差が極小になった日に該当し、上述の条件とほぼ一致していた。このことは上述した条件に基づいて強い貧酸素化の発生時期の予測が経験的に可能であることを示している。この経験則は、2003年以降に蓄積された釜地区の底層水質データに基づくものである。さらに、他の地区でも改善試験を実施するためには、同様のデータを蓄積し強い貧酸素化開始日の予測ができるようにする必要がある。すでに諫早市小長井町の東方に位置する金崎地区では2008年から、中央に位置する長戸地区では2006年から、7月～9月の底層水質の観測が開始されており、これらのデータが活用できるものと大いに期待される。

### アサリの大量へい死対策としての効果

今回の試験では、遮断幕設置の不備や幕上部からの強い貧酸素水の進入などのため、試験区でも一部貧酸素水の影響を受ける時間帯が生じたが、先に述べたように影響を受けた延べ時間は対照区に比べて明らかに短く、アサリの生残率に有意な違いが認められた。対照区では2008年8月11日にアサリの外套腔液からプロピオン酸（ $1.3 \mu\text{mol/ml}$ 、5個体中の2個体は $2.0 \mu\text{mol/ml}$ ）が検出されており、無酸素曝露試験によりプロピオン酸が $2.0 \mu\text{mol/ml}$ を超えたアサリは1～2日後に死亡することが室内実験で確認されている（学習院女子大学品川明博士の未発表データによる）。したが

って、この時点で一部のアサリは衰弱してへい死寸前で、そのことが以後の生残率を急に低下させた要因となったものと推察される（Fig.4-7）。Table 4-2 に示したように対照区でプロピオン酸が検出された8月11日には、 $29^{\circ}\text{C}$ 台の高水温で強い貧酸素状態が6時間続いていた。このような高水温と強い貧酸素の複合作用の影響を避けたことが、試験区でのアサリの生残を相対的に向上させた要因の一つと考えられる。

アサリ養殖場の底質の酸揮発性硫化物（AVS-S）含有量についても、試験区と対照区で有意差が認められた。アサリのへい死が多くみられた対照区では、8月15日からの大潮期の干出時に3日間程度へい死貝の取り上げが実施されており、これがなければ底質の悪化がさらに進み、アサリの生残率についても試験区との差がより大きくなったものと推測される。底質の悪化を防ぐためのへい死貝の取り上げ作業は、大潮時期の干出時間が3～4時間程度と制約がある中で集中的に人手を必要とし、アサリの歩留まりが大きかった試験区ではこのような作業は不要であり、大きな経費の節減となる。

今回の試験における費用対効果を算定してみることにする。試験区と対照区で生残率に30%以上の差があることが期待される。アサリは、養殖場内に $5\sim 10\text{kg/m}^2$ 現存しており、平均して $7.5\text{kg/m}^2$ とすると試験区内（ $20\text{m}\times 20\text{m}$ ）には $3,000\text{kg}$ のアサリが現存しているが、今回の試験によりおよそ $1,000\text{kg}$ のアサリがへい死を免れたと判断される。これに小長井での平均的な販売単価400円/kgを掛け合わせると、金額にして40万円程度に相当するアサリがへい死を免れたことになる。大量へい死が生じるとへい死貝の掃除および新たな覆砂が必要となる。聞き取り調査によれば今回の試験区で少なくとも10万円程度の出費となる。この分を単純に加算すれば、少なくとも合計で50万円程度の効果があったと言える。一方、今回使用した曝気装置は、試験面積の規模に換算して350万円程度の初期投資が必要である。なお、この費用には、設計・試作・運搬（北海道から長崎へ）

が含まれており、10台以上の生産で、費用を1/3程度に軽減することが可能である。燃料費3万円を加算しておよそ120万円の費用がかかった計算となる。以上、大まかな計算ながら、今回の試験規模(20m×20m, 面積400 m<sup>2</sup>)では、効果が50万円、費用が120万円であることから、3回へい死被害を防げば収支が合うことになる。小長井町地先のアサリ養殖場ではこれまで3~4年に1度の頻度で大量へい死が生じており、それを考慮すれば9~12年で採算が合うことになる。しかし、実際にはこれらの対策はシャットネラ赤潮が発生した年のみに実施すればよく、また、実施する時期もほぼ予想できるため、使用する装置の使用回数は限定され、12年程度の耐用年数は十分に期待できる。以上の試算は、遮断幕の遮蔽効果が不完全であった場合のものであり、遮蔽を完全にできればさらに大きな効果があると推察できる。

以上のように、20m×20mの小規模な面積ではあるが、干潟域への強い貧酸素水塊の進入を事前に予測し、それを遮断幕で阻止して、同時に曝気により養殖場内の溶存酸素濃度をアサリが生存可能な1mg/L以上に保つことで、アサリの大量へい死を軽減させ漁場底質の悪化をある程度防ぐことが可能であることが確認された。

一般的な貧酸素化による底生生物のへい死対策については、愛知県三河湾において、貧酸素化を回避し生残率70%を確保できる水深を造成高とする嵩上げが提唱されている(今尾・鈴木 2004)。一方、小長井地先のアサリ養殖場の地盤高は、DL 0.5~1.5mであり、アサリの成長を考えるとこれ以上に地盤高を嵩上げすることはきわめて難しい。また、有明海において、底質にマイクロバブルを吹き込んで表層泥の還元化を防ぎ、サルボウガイの生残率を改善する試みがなされているものの(藤田ら 2007)、底層の強い貧酸素状態を改善してへい死を防ぐものではない。いずれにしても、上記の2つの手法は潮下帯で実施可能なものであり、干潟域への適用は困難である。マイクロバブルは、上記の有明海のサルボウ漁場への適用例のほか、これまで広島のカキ養殖場や東京湾奥等の

一般的な貧酸素水塊対策としても適用されている(大成ら 2002, 鯉淵ら 2004, 田中ら 2004)。今回はその効果を上げるために漁場を囲って強い貧酸素水塊の漁場への進入を阻止する方法を併用した。諫早湾の干潟域で生じるような2~3日間程度の強い貧酸素化には本試験で提示したシステムは有効と考えられる。

諫早湾北岸部小長井町地先の干潟では、アサリ養殖が広い範囲で営まれ、この地域の漁家所得の主体をなしている。現在、アサリ養殖の生産は年による変動が大きく安定していない。その主たる原因は、シャットネラ赤潮に伴なって発生する強い貧酸素化の影響と考えられている。過去には800トン台であったアサリの生産量は、現在、200トン台で推移しており、タイラギ漁が休漁となっている諫早湾では、アサリ養殖を維持し安定化させることが、生産と水質浄化の両面で極めて重要である。本研究で提案したシステムを改良し、大規模化していくことによって、生産と経営の安定化に貢献できるものと期待される。

本システムを大規模化するためには、短時間で人手をかけずに遮断幕を展開することが必要である。すなわち、今回の試験で実施した埋め込み方式ではなく、船上から投下する方式などについて検討が必要である。また、養殖漁場内の曝気についても、広範囲の底層に効率的に酸素を供給するために、現存の装置の改良を含めた新たな手法の開発が必要不可欠である。

## 第5章 総括

干潟および干潟近傍での一般的な貧酸素化（特に無酸素化）は、アサリなど水産有用生物の大量へい死等の漁業被害を招くため、漁業者にとって深刻な問題であるばかりでなく、水質浄化機能を低下させるため海域の環境保全の面からも重要な問題である。しかしながら、干潟域でアサリの大量へい死を引き起こす底層水の強い貧酸素化の実態に関しては研究例が極めて少なく、その発生機構や生物への影響についてはほとんど明らかにされていない。また、強い貧酸素化による有用二枚貝類のへい死を防止するための対策についても、諫早湾のアサリ養殖場のような干潟域における事例はこれまで全く報告されていないのが現状である。

そこで本研究では、諫早湾の干潟域で養殖アサリの大量へい死を引き起こす底層水の強い貧酸素化の実態を調査し、その実測データに基づくモデル解析により貧酸素化の機構について検討を加えた。さらに、強い貧酸素化によるアサリの被害を防止する実用的な対策技術の開発試験を実施した。本研究で得られた成果は以下の通りである。

### 1 諫早湾干潟域のアサリ養殖場における強い貧酸素化の実態と機構

諫早湾北岸部（長崎県諫早市小長井町釜地区）のアサリ養殖場において、2003年～2009年の夏季に、水温、塩分、溶存酸素濃度（以下DO）および蛍光強度の連続測定を実施した結果、強い貧酸素化（DO0.5mg/L未満）が起こるのは、小潮期で風が弱いとき（日平均で風速5m/s未満）であり、その直前に赤潮が発生していたことが判明した。特に、シャットネラ赤潮が発生した場合には、貧酸素水塊がさらに無酸素状態まで進行し、無酸素状態に曝された合計時間が比較的長かった2004年8月、2007年8月および2008年8月には、アサリの大量へい死が引き起こされた。

アサリのへい死が起きた2004年8月とへい死が起きなかった2003年8月のDO変動要因の相

違について、数値モデルを用いた比較解析を行った。その結果、2004年は風が弱く残差流の流速が著しく小さかったために酸素供給速度が低下したことに加えて、高水温によりアサリと底泥の酸素消費速度が約20%増大したため、無酸素状態が継続したものと推測された。また、風速と残差流速は相互に関係するとともに、残差流は海水交換を通じて水温を低下させる働きをしていることから、風の弱い時期に干潟域の高温化と残差流の低下が同時に起こるものと考えられる。

### 2 大村湾における一般的な貧酸素化・青潮の事例との比較

大村湾では、夏季に底層水の一般的な貧酸素化（あるいは無酸素化）が以前から報告されていたが、2007年9月16～20日には、湾奥部の津水湾の沿岸に無酸素水が進入・湧昇して青潮が発生し、魚介類がへい死した。そこで、閉鎖性内湾における一般的な貧酸素化や青潮発生による沿岸生物へい死の事例として大村湾をとりあげ、これまでのフィールド調査データの検討とそれにもとづく数値モデル解析により青潮の発生機構について検討するとともに、諫早湾の干潟域における強い貧酸素化の機構との違いについて考察を加えた。

その結果、2007年の青潮は、風の弱い日が続いたために反時計回りの循環が発達する湾中央部で一般的な貧酸素化が進行し、その貧酸素水塊が9月13日～20日の強い南東風の連吹により湾奥部の底層に流入して発生したものと推定された。

大村湾では、海水循環の影響を受けて湾中央部の底層冷水域で一般的な貧酸素水塊が形成され、それが風的作用によって移動することによって沿岸浅海域の貧酸素化を引き起こしている。これに対して、諫早湾の干潟域は、水深が浅いため基礎生産が活発であると同時に底泥の有機物分解の影響や、アサリ等のベントス類の酸素消費の影響を強く受け、DOはわずか12時間ほどの間に過飽和から無酸素まで大きく変動している。このため、高水温で風が弱く残差流が小さい状態が続くと、酸素消費に対して酸素供給の速度が著しく低下し

て貧酸素化が急速に進行する。このように諫早湾の干潟域では、青潮の事例に見られるように内湾底層の強い貧酸素水塊（時に無酸素水塊）の移動による影響を受けることに加えて、内湾とは異なる干潟特有の強い貧酸素化のメカニズムが存在することが明らかとなった。

### 3 養殖アサリの大量へい死防止対策

釜地区干潟域の貧酸素化が始まる時期に共通する条件をさらに詳細に調べることによって設定された「強く貧酸素化する時期を特定する判定基準」により、強い貧酸素化の発生が予測された2008年8月11日に、新たに考案したへい死防止対策の試験を実施した。すなわち、アサリ養殖場に試験区（20m×20m）を設け、2008年8月10日～14日に遮断幕で周辺からの強い貧酸素水の進入を防止するとともに、養殖場内を曝気して底層水の溶存酸素濃度を維持する試験を行い、対照区と比較することによってその効果を評価した。

その結果、夏季に数日間で大量へい死を起こす可能性がある溶存酸素濃度（0.5mg/L以下）を基準とすれば、対照区は延べ23時間50分間、基準値以下の状態に曝露されたのに対して、試験区では12時間40分間であり大きな改善効果が認められた。とくに28℃台以上の高水温条件下で比較すると強い貧酸素水塊に曝露された時間の違いはさらに顕著であった（試験区：2.5時間、対照区：14時間）。そのためアサリの最終的な生残率は、対照区59%に対して試験区では91%となり、危険率1%で有意差が認められた。また、底泥の酸揮発性硫化物（AVS-S）含有量についても、対照区の0.17mg/gDWに対して試験区の平均値は0.09mg/gDWであり、両者には危険率5%で有意差が認められた。これらは試験したシステムがアサリのへい死および底質悪化の防止に効果的であることを示している。

以上、本研究により、これまで不明の点が多かった干潟域のアサリ養殖場における強い貧酸素化の実態を現地調査によって明らかにするとともに、

実測値を組み込んだ数値モデル解析により貧酸素化の機構について定量的に検討を加えた。その結果、これまでに幾つか報告されている内湾域の貧酸素化とは異なる干潟域に特徴的なDOの動態やその変動の仕組みが明らかとなった。今後さらに干潟域における酸素供給を規定する風や流れと、酸素消費に大きな影響を及ぼす水温の相互関係の詳細について、調査・解析を進めることが必要である。一方、アサリの大量へい死対策試験の結果、本研究で導入した改善システムにより一定の効果が得られることが分かった。今後、実用化に向けて、遮断幕の展開方法や曝気装置の改良を含めた新たな手法の検討・開発が必要不可欠である。

### 謝辞

本研究の遂行および本論文のとりまとめにあたり、懇切なる御指導と御校閲の労を賜った長崎大学教授中田英昭博士に心から感謝し、厚く御礼申し上げます。本論文をとりまとめるにあたり、御助言、御校閲の労を賜った長崎大学教授松岡敷充博士並びに多田彰秀博士に厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、終始激励の言葉を頂き、貴重な御助言を頂いた東京大学大学院新領域創成科学研究科高橋鉄哉博士、学習院女子大学国際文化交流学部教授品川明博士、独立行政法人水産総合研究センター養殖研究所生産システム部二枚貝増養殖チーム長日向野純也博士に心から感謝し、厚く御礼申し上げます。

調査および試料の採取や分析について御協力頂いた長崎県総合水産試験場漁場環境科北原茂主任研究員、水田浩二主任研究員、長崎県五島水産業普及指導センター松田正彦博士に感謝する。

調査を進める上で貴重な御助言と御協力を頂いた独立行政法人水産総合研究センター西海区水産研究所の漁場環境研究科木元克則科長に感謝する。

学位を取得するにあたって、御理解と御支援を頂いた小坂安廣元場長、濱口博彦元場長、池田修

二場長をはじめ長崎県総合水産試験場，科学技術振興局，水産部の関係者各位に感謝する。

現場調査で多大な御協力頂いた小長井町漁業協同組合 新宮隆喜代表理事組合長はじめ職員，漁業者の皆様，改善試験に際して漁場使用を快く承諾して頂いた鶴田武美氏に厚く御礼申し上げます。

最後に様々な御支援，御協力を頂いたすべての方々に厚くお礼申し上げます。

## 引用文献

- 青山裕晃・甲斐正信・鈴木輝明・中尾徹・今尾和正 (1999) 三河湾における貧酸素化によるアサリ (*Ruditapes philippinarum*) の死亡率の定式化 II. J. Adv. Mar. Soc., 5, 31-36.
- 荒川 清 (1980) 底質調査方法. 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, pp237-270.
- Chapra S.C. (1997) Surface water-quality modeling, 452-455, McGraw-Hill.
- Daiz, R. J. and R. Rosenberg (1995) Marine benthic hypoxia : A review of its ecological effects and the behavioral responses of benthic macrofauna. Oceanogr. Mar. Biol: Ann. Rev., 33, 245-303
- Delgado M., Camacho, A., P., (2007) Influence of temperature on gonadal development of *Ruditapes philippinarum* (Adams and Reeve, 1850 ) with special reference to ingested food and energy balance. Aquaculture 264, 398-407.
- Fujihara, M., S. Akeda and T. Takeuchi (1992) Development of multi-level density flow model and its application to the upwelling generated by artificial structures. Technical Report, National Research Institute of Fisheries Engineering, Aquaculture & Fish Port, Vol. 14, p. 13-35.
- 藤井明彦・山本憲一 (2002) 2001年夏季に諫早湾浅海域でみられた貧酸素化について. 長崎水試研報, 28, 9-14.
- 藤井明彦・山本憲一 (2003) 諫早湾におけるタイラギ・アサリの現状と問題点. 月刊海洋, 394, 235-240.
- 藤田孝康・木村和也・森 光典・田中勝久・木元克典・岡村和磨・森 勇一郎 (2007) 有明海奥部サルボウガイ漁場における曳航式微細気泡装置による底質改善試験. 水産工学, 44, 101-111.
- 濱田孝治・速水祐一・山本浩一・大串浩一郎・吉野健児・平川隆一・山田裕樹(2008) 2006年夏季の有明海奥部における大規模貧酸素化. 海の研究, 17, 371-377.
- Hochachka, P.W (1984) 低酸素適応の生化学. 酸素なき世界で生き抜く生物の戦略 (橋本周久・安部宏喜・渡部終五訳(2004)), 恒星社厚生閣, 東京, pp194.
- 飯塚昭二・関霽虹 (1989) 大村湾における無酸素水塊の形成. 沿岸海洋研究ノート, 26, 75-86.
- 今尾和正・鈴木輝明 (2004) 貧酸素化海域の浅場の造成法. 水産工学, 40, 185-190.
- 磯部雅彦・鯉渕幸生 (2004) 連続観測による有明海の水環境の現状特性. 沿岸海洋研究, 42(1), 27-33
- 磯野良介・喜田潤・岸田智穂 (1998) アサリの成長と酸素消費量におよぼす高温の影響. 日本水産学会誌, 64(3), 373-376.
- 柿野純 (1986) 東京湾奥部における貝類への死事例, 特に貧酸素水の影響について. 水産土木, 23, 41-47.

木元克典・田中勝久・児玉真史・山本憲一・那須博史 (2005) 有明海湾奥部における貧酸素水塊の動態. 2005年度日本海洋学会春期大会講演要旨集

鯉淵幸生・磯部雅彦・佐々木惇・藤田昌史・五明美智男・栗原明夫・田中真史・Mohammad Islam・鈴木俊之 (2004) 貧酸素水改善に向けた現地微細気泡実験. 海岸工学論文集, 51, 1156-1160.

松田正彦・日向野純也・品川明・石松惇 (2006) アサリの呼吸生理に関する研究. 平成18年度長崎県総合水産試験場事業報告, 204-206.

松田正彦 (2008) アサリ養殖漁場における夏季大量へい死要因の検討. 長崎大学大学院生産科学研究科博士論文, pp140.

松岡敷充 (1998) 大村湾. 長崎新聞新書, pp28-30, 長崎新聞社

三品裕史 (2008) 諫早湾における底層貧酸素水塊の変動特性. 長崎大学大学院生産科学研究科修士論文

森勇 (1961) 大村湾の苦潮について. 日本水産学誌, 27, 389-394.

門谷茂 (1998) 第2部化学的・生物的自然. 二瀬戸内海の水質. 柳哲雄・合田健 (編), 瀬戸内海 of 自然と環境, 社団法人瀬戸内海環境保全協会, 神戸, 100-129.

長崎県総合水産試験場 (1987) 赤潮防止対策事業報告-II.

長崎県総合水産試験場 (1988) 赤潮防止対策事業報告-II.

長崎県総合水産試験場 (1989) 赤潮防止対策事業報告-II.

長崎県総合水産試験場 (1990) 赤潮防止対策事業報告-II.

長崎県総合水産試験場 (1991) 赤潮防止対策事業報告-II.

長崎県総合水産試験場 (1992) 赤潮貝毒監視事業報告-II.

長崎県総合水産試験場 (1993) 赤潮貝毒監視事業報告-II.

長崎県総合水産試験場 (1994) 赤潮貝毒監視事業報告-II.

長崎県総合水産試験場 (1995) 貝毒成分・有害赤潮プランクトン等モニタリング事業報告-II.

長崎県総合水産試験場 (1997) 貝毒成分・有害赤潮プランクトン等モニタリング事業報告-II.

長崎県総合水産試験場 (2002) 貝毒成分・有害赤潮プランクトン等モニタリング事業報告-II.

長崎県総合水産試験場 (2003) 赤潮プランクトン等監視調査事業報告書-I, II.

長崎県総合水産試験場 (2004) 赤潮プランクトン等監視調査事業報告書-I.

長崎県総合水産試験場 (2005) 赤潮プランクトン等監視調査事業報告書-I, II.

長崎県総合水産試験場 (2006) 赤潮プランクトン等監視調査事業報告書-I, II.

長崎県総合水産試験場 (2007) 赤潮プランクトン等監視調査事業報告書-I.

長崎県総合水産試験場 (2008) 赤潮プランクトン等監視調査事業報告書-I.

中村幹雄 (1998) 宍道湖におけるヤマトシジミ *Corbicula japonica* PRIME と環境との相互関係に関する生理生態学研究. 島根県水産試験場研究報告, 第9号, pp.240.

Nogami, M., T. Matsuno, T. Nakamura and T. Fukumoto (2000) Estimation of oxygen consumption rate using T-DO diagram in the benthic layer of Ohmura Bay, Kyushu, Japan. *J. Oceanogr.*, 56(3), 319-329.

野上真子・松野健 (2001) 大村湾の海洋構造と第2躍層の形成・消滅過程. *海の研究*, 10, pp.191-202.

O'Connor, D.J. and Dobbins, W.E., (1958) Mechanisms of reaeration in natural streams. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 123, 641-684.

大成博文・前田邦男・松尾克美・山原康嗣・渡辺勝利・石川並木 (2002) マイクロバブル技術によるカキ養殖効果. *水工学論文集*, 46, 1163-1168.

Sala, O., Jackson, R., Mooney, H., and Howarth, R. (2000) *Methods in Ecosystem Science.*, 79-81, Springer-Verlag, NY.

鈴木輝明・寺澤知彦 (1997) 富栄養化海域における貧酸素水塊の数値シミュレーションによる再現と工学的改善効果の検討—三河湾における事例研究—. *海洋理工学会誌*, 3, 81-102.

鈴木輝明・青山裕晃・甲斐正信 (1998) 三河湾における貧酸素化によるアサリ (*Ruditapes philippinarum*) の死亡率の定式化. *海洋理工学会誌*, 4, 35-40.

水産庁 (1977) 昭和51年度漁場改良復旧基礎調査報告書 (大村湾. 気仙沼), pp.183.

玉河道徳 (1980) 夏季大村湾の底層低酸素水塊の分布に及ぼす風の影響. *長崎水試研報*, 6, 29-35.

田中真史・佐々木惇・柴山知也・磯部雅彦 (2004) 窪地海域を対象とした微細気泡エアレーションによる貧酸素水改善効果の解析. *海岸工学論文集*, 51, 1161-1165.

田中勝久・岡村和磨・藤田孝康・森 勇一郎 (2005) 微細気泡装置による有明海奥部サルボウガイ漁場の底質改善試験. 第4回全国漁港漁場整備技術研究発表会講演集, pp.69-80.

辻田時美 (1953) 大村湾の海洋生態学的一考察. *日本海洋学会誌*, 9, 1-10.

堤裕昭・堤 彩・高松篤志・木村千寿子・永田紗矢香・佃政則・小森田智大・高橋徹・門谷茂 (2007) 有明海奥部における夏季の貧酸素水発生域の拡大とそのメカニズム. *海の研究*, 16, 183-202.

内田 治 (1999) すぐわかる EXCEL による統計解析. 東京図書株式会社, pp.209.

Wanninkhof, R., (1992) Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *J. Geophys. Res.*, 97, 7373-7382.

山口創一・経塚雄策 (2006) 諫早湾における貧酸素水塊の形成機構. *海の研究*, 15, 37-51.

