

(65) 博多湾におけるホトギスガイが貧酸素水塊に与える影響

Influence of oxygen-deficient water body on *Musculista senhousia* in Hakata Bay

熊谷博史*, 山崎惟義**, 渡辺亮一**, 藤田健一***

Hiroshi KUMAGAI*, Koreyoshi YAMASAKI**, Ryoichi WATANABE**, Kenichi FUJITA***

ABSTRACT; Mussel, *Musculista senhousia*, was surveyed in Hakata Bay in northern part of Kyushu island to study its seasonal changes. As a result, the annual mortality of *M. senhousia* in the study area ranged from 90.0% to 93.3% when no oxygen deficient water body appeared. Numerical analyses were conducted to determine the parameters representing life characteristics and to reproduce seasonal changes of the *M. senhousia* density based on observed length-frequency distributions. Shell length-dry flesh weight relations obtained from the survey made possible estimation of the death number and dry flesh weight of *M. senhousia* at the observed stations.

Furthermore the contents of carbon, nitrogen, and phosphorus in dry samples of *M. senhousia* were analyzed and the oxygen demand to aerobically decompose them was estimated. In conclusion, extinction of *M. senhousia* by oxygen-deficient water body especially in late summer made a great negative impact on the benthic environment of Hakata Bay.

KEYWORDS; *Musculista senhousia*; eutrophication; oxygen -deficient water body; Hakata Bay.

1 はじめに

ホトギスガイ(*Musculista senhousia*)は、軟体動物・二枚貝綱・翼形目・イガイ科に属する二枚貝で、成体は殻長 30 mm, 殻高 13 mm, 殻幅 10 mm になり、千島・北海道～九州・朝鮮半島・台湾・中国に広く分布している。富栄養化海域の底床に群生し汚濁指標種に分類されている。ホトギスガイは群生時、足糸を出し絡み合い、その足糸は数 cm のマット状になり底床表面を覆う(Photo.1)。海底に生息する他の底生動物は、摂餌・呼吸を十分行えなくなり、窒息・死亡する。漁業者にとっては、水産対象貝類(アサリ・ハマグリ・サルボウ等)を窒息死させるので有害動物となっている¹⁾。ホトギスガイがこのように優占する理由には、汚濁耐性と高繁殖力が挙げられる。博多湾での調査では、清水域(底土 BOD₅ 100～600 ppm)、弱汚濁水域および汚濁水域(底土



Photo. 1 マット状になったホトギスガイ

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

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

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

BOD₅ 600~1600 ppm), 強汚濁水域(底土 BOD₅ 1600~3000 ppm), さらに底土 BOD₅ 3000 ppm 以上のいずれの水域においても, その生息が確認された²⁾. さらに, 船舶のバラスト水に含まれていたと思われる幼生が, ヨーロッパ・オセアニア・北アメリカといった世界各地で繁殖し, 世界的に問題になっている³⁾.

本研究の対象域としている博多湾においても, 他の底生動物に対してホトギスガイが影響を及ぼしている. 例えば, 湾内の全貝類の個体数変動は, 数量的に卓越するホトギスガイやシズクガイ(*Theora lubrica*)の消長に支配されているとの報告⁴⁾がある. また, 閉鎖度指数 2.04 と閉鎖性の高い博多湾では, 夏季に貧酸素水塊が出現する. 特に, 海水交換の悪い湾奥では, 近年造成された人工島の影響により夏季に長期間にわたって貧酸素水塊が出現し⁵⁾, その付近では貝類が見られなくなることが報告されている⁶⁾. また, ホトギスガイが死亡・分解することにより, 貧酸素水塊発生の付加的要因となりうることも報告されており⁷⁾, その二次的な貧酸素水塊への影響が懸念される. しかし, このホトギスガイの生態が貧酸素水塊の発生に及ぼす程度について定量的に調査された事例は見あたらない.

そこで, 本研究では, 博多湾においてホトギスガイを定期的に採取し, その季節的な変動を調査した. そして得られたデータをもとに, ホトギスガイの成長・死滅に関する速度係数を決定し数値解析を行い, ホトギスガイの死貝数および死貝量を算出した. さらに, そのホトギスガイの死貝を好氣的に分解するのに必要な酸素要求量を算出することで, ホトギスガイの死貝が貧酸素水塊の発生・継続にどの程度影響を与えているのかを定量化した.

2 調査方法

2.1 現地調査地点

本研究の調査地点は, 博多湾湾奥部の T-3, T-4, T-5 である(Fig. 1). T-3 と T-4 は, 南東側の人工島と北側の陸地とに挟まれた地点であり, 比較的速い潮流によって, 北東側の最湾奥部との海水交換が起こる地点である. 水深は, それぞれ 4.1 m, 4.4 m である. T-5 は西戸崎沖の比較的潮流の穏やかな海域にあり, 水深は 4.0 m である. なお, 全ての地点における底質はシルト質粘土であった.

2.2 現地調査方法

上記の 3 地点において, 2001 年 7 月から 2003 年 3 月まで, 月に一回の割合で現地調査を行った. 調査地点の確定には観測船搭載の GPS を用いた. スミス・マッキンタイググラブサンプラー (22 cm×22 cm; 0.05 m²) を用いて, 船上から試料を採取した. 1 地点あたり 5 回採取を行った. 採取した底泥をコンテナに移した後, 海水で軽く洗い 2 mm メッシュの篩で試料を分取した. 篩上の試料を袋に移して実験室に持ち帰った後, この袋に 10%ホルマリンを入れ, 48 時間放置して試料を固定した. その後, 固定した試料の殻長を測定した. 殻長測定後の貝を 70%エタノールにつけて保存し, 幾つかの試料については, 湿潤質量を測定した. 次に, 湿潤質量測定後の試料を, 塩酸に浸けて殻を溶解し, 被膜に包まれた身をピンセットで取り出して湿潤身質量を測定した. 取り出した身については 110 °C で 24 時間乾燥させた後, 乾燥身質量を測定した. さらに, 採取したホトギスガイの C・N・P 含有量を測定した. 採取した試料を水で良く洗った後に, 身を傷つけないように殻を開いて, ピンセットを用いて身を取り出した. これは塩酸によ

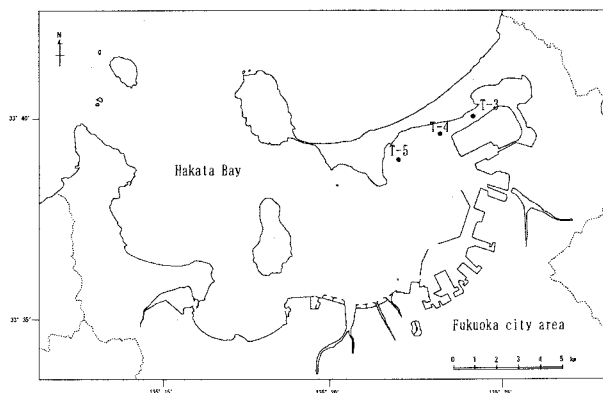


Fig. 1 現地調査地点

り身を取り出す方法では、貝の身の成分が変質する可能性があるためである。取り出した身の湿潤身質量を測定し、110℃で24時間乾燥させた後、乾燥身質量を測定した。そして乾燥試料をすり鉢で粉碎して均一な粉体とした後、C・N・P分析に供した。試料中のC及びNの含有量の測定には住友化学工業株式会社製SUMIGRAPH NC-80を、Pの含有量の測定には、試料を乾式灰化法で分解した後、アスコルビン酸還元吸光度法を適用した⁸⁾。

3 現地調査結果

3.1 生息密度と殻長一個体数分布

ホトギスガイは、一度着床すると広範囲に移動をせず、調査地点の水深は約4mであることから鳥類等に捕食され難く、また海産物としての商品価値もないために漁による捕獲の影響も受けないと考えられる。すなわち調査地点のホトギスガイ個体数の増減は、上位の大型ベントス捕食者の影響を無視すれば、ホトギスガイ自身の増殖・死亡の効果のみに支配されると考えられる。調査結果として、殻長一個体数の頻度分布(頻度の刻み1mm)をFig. 2に示す。1地点につき5回採泥を行っており、その5回分の平均値及び、最大値・最小値をバーの上下でそれぞれ表示している。全地点を通してみると、それらは、ある時期に着床した個体からなる集団、すなわちコホートを形成していることがわかる。またホトギスガイの大量に生息している月では、最小値と最大値の格差が大きくなっている。このことは、ホトギスガイが均一に生息しているのではなく、パッチ状に生息して

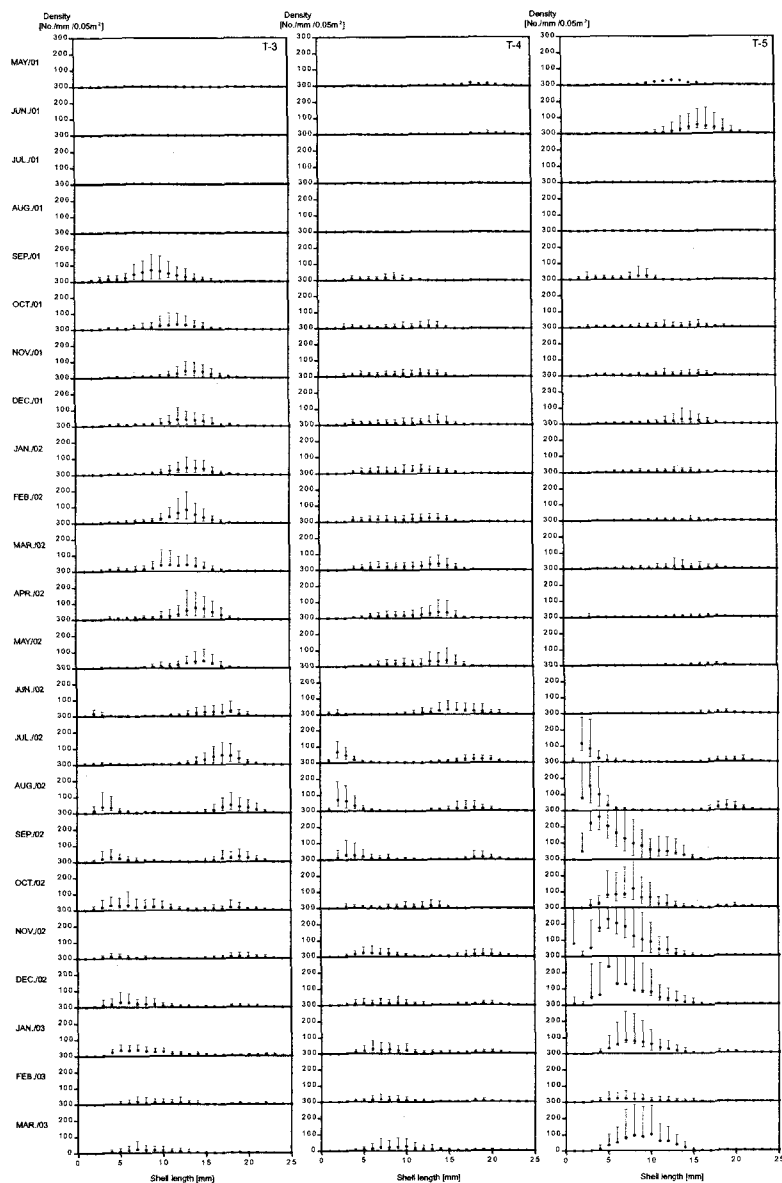


Fig. 2 殻長一個体数分布
(点は平均値、線は測定範囲を示す。)

おり、その存在の有無が地点により大きく変化していることを示唆している。

T-3では、2001年の5～8月の間、全てのサイズにおいてホトギスガイの生息が確認されなかった。この期間の周辺水域において、観測日が異なるものの、貧酸素水塊⁹⁾の発生が確認されていることから、これが原因となりホトギスガイが絶滅したものと考えられる。その後2001年9月には、最頻値9 mmのコホートが着床・回復している。また2002年の夏季には、博多湾湾奥部において貧酸素水塊が発生しなかった¹⁰⁾ために、前年

から生息するホトギスガイが夏季に絶滅することはなかった。また、2002年6～10月にかけては、新たな稚貝の着床もみられた。コホートの動きに着目すると、泥温が上昇する春から秋にかけての時期(4～10月)には、コホートの中心位置の殻長増加方向への移動が速くなっている。すなわち、この時期にはホトギスガイの成長速度が大きくなっている。一方、泥温の低下する晩秋から春にかけての時期(11～3月)には、コホートの中心位置の殻長増加方向への移動が遅くなっている。つまり、この時期にはホトギスガイの成長速度が小さくなっている。以上のことから、ホトギスガイの成長速度は泥温に依存していることが示唆される。T-4では、2001年の5～6月には若干の生息数が確認されたものの、2001年の7・8月に、貧酸素水塊の影響と思われる絶滅により、ホトギスガイの生息は確認できなかった。なお、5～6月に生息数が認められたのは、本地点がT-3よりも湾の外側に位置し、貧酸素水塊の影響を受けにくかったことが原因であると考えられる。そして2001年9月には新たな貝の着床がみられた。また2002年の夏には貧酸素水塊が発生せず、前年から生息するホトギスガイも死滅していなかった。そして2002年6～9月には、前年に比較して大量の稚貝の着床もみられた。また、T-3と同様の成長速度の泥温依存性も確認された。T-5についても、2001年の5～6月にはT-4よりも生息数が多かったものの、2001年の7・8月には他の地点同様、貧酸素水塊の影響と思われる絶滅により生息を確認出来なかった。この地点での大きな特徴は、2002年の夏における大量の稚貝の着床であり、その生息密度は29,000個/m²と非常に高かった。この地点では、雁ノ巣水道部域からの流れが滞留するため、多量の稚貝が着床したのではないかと考えられる。また千葉らは、ホトギスガイの分布を制約する要因として第一に塩素量を挙げており、10.46～16.87‰が好適な範囲であるとしている¹¹⁾。すなわち、塩素量が低下する淡水流入域や塩素量の高い湾口部は、ホトギスガイの生息上好ましくない場であることを示している。T-5は、ホトギスガイにとっての塩素量の好適条件を満足する生息環境下にあったと考えられる。

3.2 殻長—乾燥身質量の関係

調査各地点において、2002年1月～12月に採取されたホトギスガイ30～40個体の殻長と乾燥身質量を調べた。結果をFig. 3に示す。California Mission Bayの研究¹²⁾で得られた殻長—乾燥身質量のアロメトリー式も同時に図中に示している。このアロメトリー式は、次式で表される。

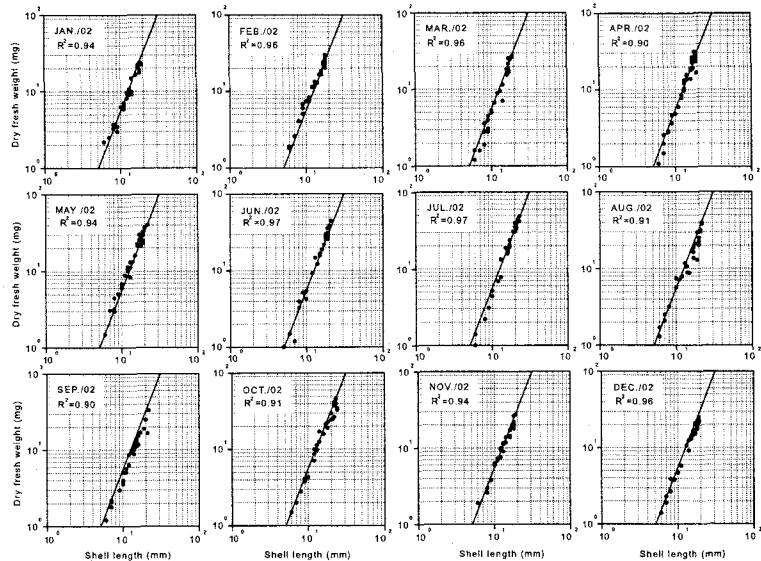


Fig. 3 ホトギスガイの殻長—乾燥身質量の関係

$$\ln W_{df} = -4.13 + 2.54 \ln x \quad (1)$$

ここで、 W_{df} :乾燥身質量[mg]、 x :殻長[mm]である。これらの図から博多湾での観測結果についても、Mission Bayでの観測結果と、ほぼ同様の関係が成り立っていることがわかる。一方、2002年8・9月の観測結果は、(1)式での値よりも若干低めの値が多かった。またその分布にも、ばらつきがみられ相関係数も低かった。これは夏季の生息環境が、ホトギスガイにとって悪条件となっていたためと考えられる。その悪条件の要因としては、夏場に発生する貧酸素水塊や、底床からの硫化水素の発生¹³⁾が影響している可能性がある。

3.3 ホトギスガイの C・N・P 分析

ホトギスガイの C・N・P 含有量について測定した結果を Table 1 に示す。分析に供したのは博多湾から採取した 12.0~17.7 mm のホトギスガイ 8 個体である。アサリについては、乾質量あたりの炭素の質量含有量は 0.429、また C/N(質量比)は 3.62 という報告がある¹⁴⁾。今回の分析結果では、乾質量あたりの炭素の質量含有量は 0.410、また C/N(質量比)は 4.05 であった。このことからホトギスガイの炭素の含有量はアサリとほぼ同程度であり、窒素の含有量についてはアサリの場合と比較して若干低いことがわかる。

Table 1 ホトギスガイの C・N・P 含有量

		C	N	P
乾燥身質量あたりの含有量 (mg/mg)	平均値	0.410	0.101	0.011
	標準偏差	0.019	0.005	0.002
	n	8	8	8
原子比 (—)		96.1	20.3	1.0

3.4 年間死亡率

年間死亡率の算定には以下の二式を使用した。死亡係数 z は次式¹⁵⁾によった。

$$N_t = N_0 \exp(-zt) \quad (2)$$

ここで、 N_t :時間 t 年における総個体数、 N_0 :時間 0 年における総個体数である。また、年間死亡率 q_x (%) は、上式において、 $t=1$ として N_1 を求めたうえ、次式から算出した。

$$q_x = 100 \times \frac{(N_0 - N_1)}{N_0} = 100 \times \{1 - \exp(-z)\} \quad (3)$$

ホトギスガイの年間死亡率は高く、せいぜい 2 年までしか生存できないといわれている。しかし実際に年間死亡率を算定するのは困難である。なぜなら、ホトギスガイは富栄養化域の底床に生息することが多く、このような環境下ではホトギスガイを斃死させる貧酸素水塊が発生しやすいためである。このような場所で死亡率を算定すると、その事象の影響も含んだ死亡率となる可能性がある。今回観測を行った 2002 年の夏には、博多湾東部における貧酸素水塊の発生は少なかったため、長期間にわたってホトギスガイの生息が観測された。そこで、各月の全生息数から新たな稚貝の着床による新規のコホート分の生息数を差し引いて、死亡係数と年間死亡率を算定した。算定の基準となる N_0 には、2001 年夏季の貧酸素水塊による絶滅後、初めて着床が確認された同年 9 月の個体数データを用いた。

Table 2 ホトギスガイの死亡係数と年間死亡率

	T-3	T-4
z	2.7	2.3
q_x (%)	93.3	90.0

なお、厳密には、この死亡率には上位の大型ベントスによる捕食の効果も含まれるが、ここでは考慮していない。T-3, T-4 における死亡係数と年間死亡率の結果を Table 2 に示す。なお T-5 は新規加入のコホートが前年のコホートに加わるため計算できなかった。これによると博多湾のホトギスガイの年間死亡率は高く、年間約 9 割近くが死亡することがわかる。他の研究結果と比較すると San Diego Bay¹⁶⁾ の値は 67・97 %, 千葉¹⁷⁾ の値は 80・90 % であり、各地点の最大値と同程度の値であった。

4 ホトギスガイ個体数の数値計算

次に数値解析を行い各地点・各時期における死亡量を求めた。

4.1 計算方法

観測結果によると、ホトギスガイは着床後コホートを形成しながら時間と共に成長・死滅していた。この時間変動は次式を用いて表現される^{18), 19)}。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} [g(x) \cdot n] - u(x) \quad (4)$$

ここで、 n : 時刻 t [day] における単位面積あたりに存在する殻長 x [mm] のホトギスガイの分布密度 [No. mm⁻¹ m⁻²] である。すなわち n を全殻長に渡って積分すると、単位面積あたりに存在するホトギスガイの全個体数となる。また $g(x)$: 成長速度 [mm day⁻¹ m⁻²], $u(x)$: 死亡速度 [No. day⁻¹ mm⁻¹ m⁻²] である。ここではハゼ科魚類、シヤコ・イシガニなどの大型甲殻類による捕食を考慮しないものとした。また上式の成長速度 $g(x)$ として次式のロジスティック成長を適用した。

$$g(x) = rx \left(1 - \frac{x}{K} \right) \quad (5)$$

ここで、 r : 成長速度係数 [day⁻¹], K : 最大殻長 [mm] である。Fig.2 の観測結果は、ホトギスガイは泥温の高くなる春から夏に向けて成長速度が大きくなり、泥温の低くなる秋から春にかけて成長速度が小さくなることを示していた。ここでは、成長速度係数を泥温のみの関数と仮定した。すなわち、成長速度係数を泥温 T の関数として考え、 (μ, σ) の正規分布に従うものとした。

$$r(T) = \begin{cases} \frac{R_0}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{(T-\mu)^2}{2\sigma^2} \right\} & (T \geq 0) \\ 0 & (T < 0) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 R_0 : 泥温 $T = \mu$ での成長速度係数 [day⁻¹ °C⁻¹], μ : 最適泥温 [°C] である。

死亡速度は以下のように設定した。Fig.2 の観測結果によるとホトギスガイの殻長が 20 mm を超える付近から、個体数は減少していく傾向にあった。すなわち殻長の増加と共に死亡速度が増加して、死亡率が高くなる。また、ホトギスガイの死亡率は泥温と関係し泥温が高いほど死亡速度が増加する²⁰⁾。以上から、本研究では、死亡速度としてゴンパーツ曲線²¹⁾を用いるとともに、それを温度の関数として表現した。なお、ゴンパーツ曲線はもともと成人の死亡率を記述するためのモデルとして提案されたものである。本研究では死亡速度を、この指数関数とホトギスガイの個体数との積で表した。

$$u(x) = v_d \cdot n \cdot \exp(ax + \beta T) \quad (7)$$

ここで、 v_d : 殻長 0 mm, 泥温 0°C での死亡速度 [day⁻¹], a : 成長に伴う死亡速度の増加の程度を示す係数, β : 温度定数である。

本研究では、陽解法を用いて以上の式を差分化し計算を行った。

4.2 計算条件

(1) 初期条件

博多湾 T-3, T-4, T-5 における 2001 年 9 月 18 日の殻長-個体数分布データを初期値として与える. この分布 $n_{init}(x)$ は, 着床日の異なる幾つかのコホートが加入したものであると考えられるので, 次式のように表現できる.

$$n_{init}(x) = \sum_{i=1}^{mc} n_{init,i}(x) \quad (8)$$

ここで, $mc: n_{init}(x)$ を形成するコホートの数, $n_{init,i}(x): i$ 番目のコホートの殻長分布である. i 番目のコホートの殻長分布は, $(\mu_{init,i}, \sigma_{init,i})$ に従う正規分布であるとみなされ, 次式で表される.

$$n_{init,i}(x) = \begin{cases} \frac{n_{init,i0}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{init,i}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu_{init,i})^2}{2\sigma_{init,i}^2}\right\} & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases} \quad (9)$$

(2) 境界条件

調査結果より, T-3, T-4 では 2001 年 6 月に, T-5 では 2001 年 7 月において, それぞれ稚貝の着床が見られた. 各地点の個体数の季節変化を表現するためには, 新規着床の稚貝も考慮する必要がある. 実際に稚貝の数は, 親貝の個体数が幼生の生産に関わり, 幼生の数が着床稚貝数に反映するという生活史に基づいて設定する必要がある. ここでは便宜的に, 着床した稚貝を分布形で与えるものとした. ただし, 着床した稚貝の数は, 分布密度の積分, すなわち生息分布密度と殻長を示す x 軸とで囲まれた面積に等しくなるが, 着床月には稚貝が小さいため, 2 mm メッシュでは篩を通過してしまい, 全ての稚貝をカウントできず過小評価している可能性がある. そこで, 着床月後で, 新規着床分の分布形の面積がその後の面積とほぼ一定になったと思われる月において, 境界条件として稚貝の分布形を与えるものとした. そこで, T-3 については 2002 年 8 月 21 日に, T-4, T-5 については 2002 年 7 月 29 日に着床稚貝の分布を与えた. 分布形は初期条件と同様, 以下のように正規分布の重ね合わせで表現させた.

$$n_{bound}(x) = \sum_{i=1}^{nc} n_{bound,i}(x) \quad (10)$$

ここで, $nc: n_{bound,i}(x)$ を形成するコホートの数, $n_{bound,i}(x): i$ 番目のコホートの殻長分布である. i 番目のコホートの殻長分布は, $(\mu_{bound,i}, \sigma_{bound,i})$ に従う正規分布であるとみなされ, 次式で表される.

$$n_{bound,i}(x) = \begin{cases} \frac{n_{bound,i0}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{bound,i}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu_{bound,i})^2}{2\sigma_{bound,i}^2}\right\} & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases} \quad (11)$$

(3) 泥温

採取地点の泥温の経月変化を Fig. 4 に示す. このように地点間の泥温に目立った空間的な差なく, ほぼ一様に季節的な変動をしていた. そこで以上の結果から, 数値計算中で用いる泥温は, 全地点において次式を適用して得た.

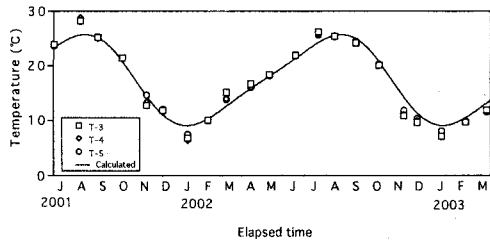


Fig. 4 各地点における泥温の経月変化と計算値

$$T = 17.4 - 7.79 \sin(t) - 1.515 \sin(2t) \quad (12)$$

ここで $t = 2\pi(d-57)/365$ であり, d : 2001 年 9 月 18 日からの経過日数である. すなわち日周等の短期的な温度変動は考慮しなかった. この式は底床上の水温や気象条件を考慮していない簡易的な式ではあるが Fig. 4 に示すように, ほぼ実測値の季節変動をうまく再現できていた.

(4) 成長, 死滅関連パラメータ

計算に採用した成長・死滅のパラメータを Table 3 に示す. 死亡速度に関する定数 β については, 泥温 10 °C 上昇につき, 死亡速度が 2 倍となる値 (0.0693) を採用した. また死亡速度に関する定数 a については実測値に合うように設定した. なお, これらの値については, 全ての地点において一定とした.

5 数値計算結果

以上の条件で数値解析を行った結果を Fig. 5 に示す. なお, ここに示す測定結果については次に示すように表現した. すなわち 1 地点について 5 回採取した値を積算し 0.25 m² あたりの個体数として算出した後に, それをさらに 1 m² あたりの個体数に換算したものである.

T-3 においては, ほぼ観測期間におけるコホートのピーク, および成長速度を再現できていた. このことから採用したホトギスガイの成長速度・死亡速度のパラメータ値については, ほぼ妥当であった.

Table 3 成長・死滅関連パラメータ

Rate	Parameter	Unit	Adapted Value
Growth	R_0	day ⁻¹ °C ⁻¹	0.1
	μ	-	20.0
	σ	-	3.0
	K	mm	23.0
Death	v_d	day ⁻¹	0.0003
	a	-	0.09
	β	-	0.0693

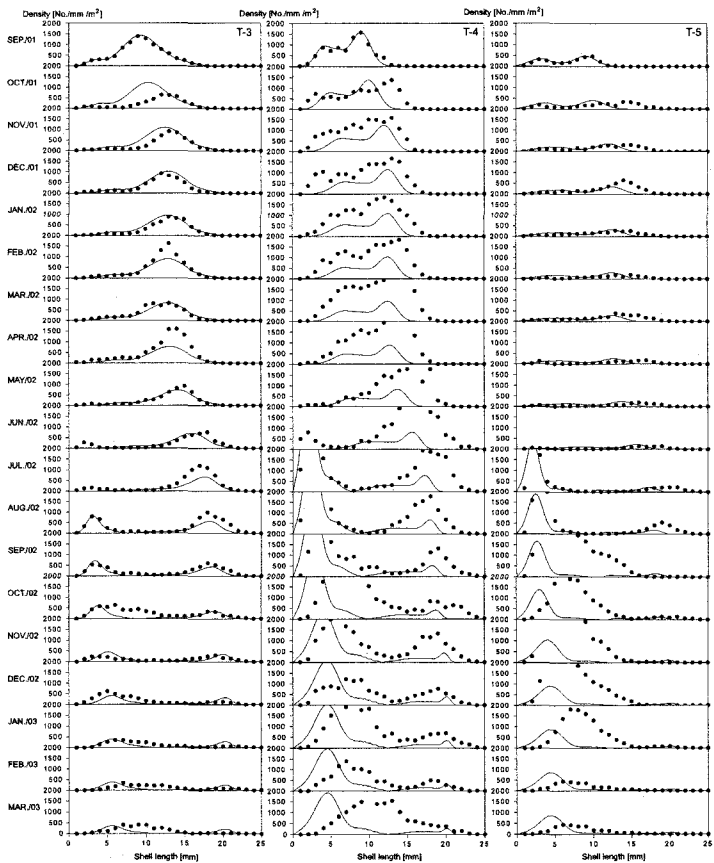


Fig. 5 各地点の個体数の数値計算結果

(点は実測値, 線は数値計算結果を示す.)

たと考えられる。

ところで 2001 年の 9 月に、ホトギスガイは 8 月の個体数が確認できなかった状況から回復しているが、前月の観測日 (2001 年 8 月 24 日) からこの観測日 (2001 年 9 月 18 日) までの期間は 25 日間である。着床稚貝の大きさを 0.25 mm とし、この間に最頻値 9 mm にまで成長したものと仮定すると、この間のバルクの成長速度は $0.350(\text{mm day}^{-1})$ となる。一方、数値計算で用いた成長速度は、最適条件下 (20°C) で $0.076(\text{mm day}^{-1})$ であるので、観測された成長速度は、その 4.6 倍になる。このように成長速度がかなり高いことから、着床した稚貝の成長速度を高める何らかの要因があったと想定するほかに、周辺に存在していたホトギスガイの群体が観測地点に移入した可能性も想定できる。実際、Imabayashi and Tsukuda²²⁾ は、同じく汚濁指標種であるシズクガイの個体数の変動において、大型個体の移動が重要であると指摘している。今回の計算では、2001 年 9 月の着床時の個体数分布を初期条件として与えているために、着床個体の移入・移出の効果を無視できた。しかし、年間を通して、その個体数自体を再現する際には、これらの効果を無視できないと考えられる。T-4 においては、2001 年着床のコホートの成長速度は再現することは出来ているが、そのピークにはばらつきが見られる。また 2002 年度に着床したコホートの成長速度については、観測値の成長速度の方が速く、再現できていなかった。T-5 においては、2001 年着床のコホートの成長速度およびピークをうまく再現していた。しかし 2002 年度に着床したコホートの成長速度については、観測値の成長速度の方が速く、またピークも再現できていなかった。

以上の実測値と計算値の不整合については、ピーク高さに対しては、着床稚貝数の定量化が不十分であったことと着床個体の移入・移出の効果を考慮していないことが原因であると考えられる。また成長速度に対しては、それを温度のみの関数としていることが原因であると考えられる。

6 考察

6.1 各地点の死貝の量と分解に必要な DO の定量化

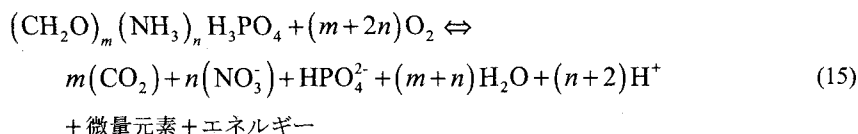
ここで各地点ごとの死貝の量を算定する。一ヶ月ごとの各地点の単位面積あたり死貝数 n_{death} は、次式でもとめられる。

$$n_{death} = \sum_{x=1}^K n_{death,x} = \sum_{x=1}^K \sum_{d=1}^{md} u(x) \Delta t \quad (13)$$

ここで、 $n_{death,x}$: 1 ヶ月あたりの殻長 x のホトギスガイの単位面積あたり死亡数、 md : 1 ヶ月の日数である。また、(1) 式でもとめた、殻長-乾燥身質量式を用いると、殻長から乾質量をもとめることができる。なお、貝の身が小さくなる夏季の 8・9 月についても同式に従うものとした。これにより、各月の単位面積あたりの総死亡乾質量 W_{death} を算出できる。すなわち、次式を用いることとなる。

$$W_{death} = \sum_{x=1}^K n_{death,x} \cdot W_{df}(x) \quad (14)$$

一方、有機物が好氣的に分解される際に必要となる酸素要求量は、C:N:P 原子比が $m:n:1$ で既知である場合には、次式により理論的にもとめることができる²³⁾。



この場合、単位炭素質量あたりに必要となる酸素質量[TOD:C]は次式で計算される。

$$[\text{TOD:C}](\text{質量比}) = \frac{32(m+2n)}{12m} \quad (16)$$

Table 1 から、博多湾で採取されたホトギスガイの C:N:P (原子比) = 96.1:20.3:1 であるので、 $[\text{TOD:C}] = 3.79$ である。すなわちホトギスガイの乾燥身質量の 41.0 % が炭素分なので、ホトギスガイの乾燥身質量 1mg を好氣的に完全に分解するには、1.56 mg の酸素が必要になる。なお、ここで算出された酸素要求量は、対象底床で実際に分解に必要となる酸素量を表すものでなく、その地点が有する酸素要求のポテンシャルとしての意味合いを持つ。以上に基づき、各地点における死亡数・死亡乾質量・必要酸素要求量を算定した。結果を Fig. 6 に示す。なお Fig. 5 に示すように、T-4、T-5 においては、数値解析結果と実測値との整合性が良くないが、数値解析の結果に基づいて算出を行った。全ての地点において、死亡数、死亡乾質量、必要酸素要求量は季節変動を示し、夏に増加し冬に減少している。また、その死亡乾質量および必要酸素要求量の最大月と最小月の比は、T-3 で 6.08、T-4 で 5.74、T-5 で 5.34 であった。このことから、夏には冬の 5.34~6.08 倍の死貝量が底床に蓄積され、それを分解する酸素が必要となることがわかる。また T-3 および T-4 を比較してもわかるように、死亡個体数が多い月でも、群体中を小形のものが占めている場合には、死亡乾質量および必要酸素要求量はそれほど大きくならない。その一方で死亡個体数が少ない月でも、群体中を大型のものが占めている場合には、死亡乾質量および必要酸素要求量は高めの値になる。すなわち、稚貝が貧酸素水塊によって絶滅するよりも、ある程度の大きさまで成長した貝が、貧酸素水塊により絶滅した方が、その後の貧酸素水塊の継続に与える影響が高いことになる。ホトギスガイの成長速度は、春から夏にかけて大きくなるので、ホトギスガイが成長し終わった晩夏に貧酸素水塊が発生すると、その後の二次的な貧酸素水塊の被害が拡大するものと考えられる。

本研究では、ホトギスガイが群生したときにできる足糸マットの被覆により他のベントスが死亡する事象や、夏季の貧酸素水塊によって底床に生息する全てのベントスが一齐に絶滅する事象を無視しているが、これらを考慮に入れた場合には、さらなる酸素量が必要になると考えられる。また本研究で算定したのは、死亡したホトギスガイを好氣的に酸化分解するのに必要な酸素量であり、ポテンシャルとしての意味合いをもつものである。実際にホトギスガイの死亡が、底床上部の水塊の DO 低下にどの程度影響するかを算定するには、今回算定した蓄積有機物量に時間的概念を加えて評価する必要がある。すなわち有機物分解の際の酸素要求速度、上層水からの底床への酸素供給速度、好気・嫌気条件下での有機物分解速度を考慮して、底床内での物理化学的・生物化学的な機構を導入した底床モデルを用いて算定する必要がある。これに加え、底床上部の水塊のモデルを用いることで、これらの蓄積する有機物量が実際の上部水塊に与える影響を算定することが可能と

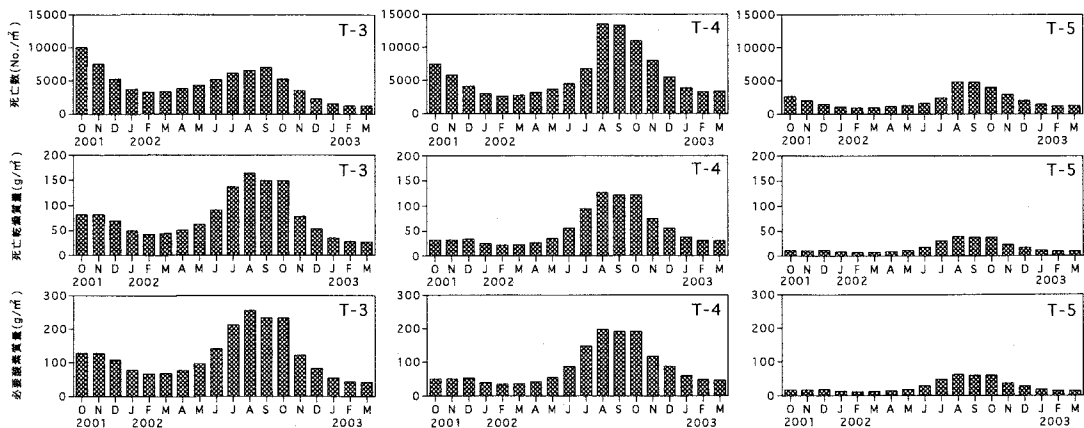


Fig. 6 各地点の死亡数・死亡乾質量・必要酸素要求量

なる。

6.2 今後の研究

本研究を通して得られた、今後の研究に対する示唆を示す。

まず、ホトギスガイの生息数を正確に予測するためには、稚貝の着床時期と着床数を、正確に予測する必要がある。今回行ったサンプリングでは、2 mm メッシュの篩を用いたが、稚貝が最初に着床した月では、多くの個体をカウントできず過小評価している可能性があった。実際、浮遊期間を終え、着床期に入った際の稚貝の殻長については、0.25 mm²⁴⁾あるいは、0.23~0.29 mm²⁵⁾という報告がある。この問題に関しては、着床時期には、今回の方法とは異なる、着床稚貝数の定量化を可能とする測定法を用いる必要がある。さらには、産卵後から着床までの浮遊する仔貝の挙動を把握することも必要となってくる。

また、今回の成長速度は泥温のみの関数として与えたが、T-3 以外の場所では幾分不整合が見られた。このことから、成長速度には塩素量等の別の因子が寄与している可能性がある。その地点の塩素量が、ホトギスガイの生育にとって最適かどうかは、底床上部の水質の影響を受けるが、さらにそれは、気象、潮流、陸上からの淡水流入といった影響を受けている。また博多湾において貧酸素水塊の変動は、短期スケールの変動成分を含み数十分で貧酸素状態に達することがある²⁶⁾。このように、移動性が低く回避行動の出来ないホトギスガイのような底生動物は、その影響を直接受けてしまう。

さらに、今回の計算においては着床個体の移入・移出を無視していたが、正確にその個体数分布を再現するには、それらの効果が無視できないことが明らかとなった。Imabayashi and Tsukuda²⁷⁾によれば、シズクガイの着床個体は、成長するに従い含泥率の高い底床に移動するとしている。すなわちホトギス個体数の再現計算を行うためには、底質の空間分布を考慮する必要があることを示唆している。

以上のことから、ホトギスガイの消長をより正確に再現するためには、例えばホトギスガイの仔貝、塩素濃度、DO といった水質項目の各々の流動と、ホトギスガイの生息場所である底床とを、その粒度分布とも関連づけてモデル化する必要がある。

7 まとめ

本研究では、ホトギスガイの消長の挙動を知るため、その分布を調査した。その結果、博多湾のホトギスガイは貧酸素水塊の発生しない条件下で年間 9 割近くが死亡することが明らかになった。また、得られた殻長一個体数分布をもとに個体数の数値計算を行い、おおむねその季節変化を再現できた。さらに、殻長-乾燥身質量のアロメトリー式を用いて、各地点・各月のホトギスガイの死亡数・乾燥死亡質量を算定したうえで、分析した採取したホトギスガイの C・N・P 含有量を用いて、それらを好氣的に分解する上で必要な酸素量を推定した。その結果、晩秋に起こる貧酸素水塊によるホトギスガイの絶滅は貧酸素水塊の二次的被害を拡大することが想定された。今後は、底床内での物理化学的・生物化学的な機構を導入した底床内部のモデルと底床上部の水塊のモデルを用いて、これらの蓄積する有機物量が実際の上部水塊に与える影響を算定する必要がある。

参考文献

- 1) 千葉健治:ホトギスガイの生態について, 海洋科学別冊 23 第 4 生物海洋学研究, pp.161-165 (1979)
- 2) 石尾真弥, 小林邦男, 矢野友紀, 大庭信良, 中川久機:博多湾富栄養化生物環境の評価, 九州大学農学部水産化学第 1 教室 (1976)
- 3) CARLTON, J.T.: History, biogeography, and ecology of the introduced marine and estuarine invertebrates of the Pacific Coast of North America, Ph.D. Dissertation, University of California, Davis, California (1979)
- 4) 濱野龍夫, 神谷崇, 下山正一, 松浦修平:博多湾における底生貝類群集の動態 一特に夏季成層期を中心として一, 日本ベントス研究会誌, No.29, pp.1-8 (1986)

- 5) 鮎本健治:博多湾奥部にける水質変動と貧酸素水塊発生機構に関する研究,九州大学大学院工学府都市環境システム工学専攻修士論文 (2003)
- 6) 兼子由起子:博多湾におけるホトギスガイとシズクガイの変動に関する研究,福岡大学学士論文,(2003)
- 7) 山崎惟義,渡辺亮一,堤敬晃:ホトギスガイから見た博多湾東部海域の状況(第2報)ーホトギスガイの消長と酸素消費速度についてー,土木学会第57回年次学術講演概要集 VII-047, pp.93-94 (2002)
- 8) 建設省都市局下水道部,厚生省生活衛生局水道環境部:下水試験方法上巻ー1997年度版ー,日本下水道協会, pp.329-331 (1997)
- 9) 前掲 5)
- 10) 前掲 5)
- 11) 千葉健治,大島トミエ:浜名湖におけるホトギスガイの分布について,昭和51年度日本水産学会秋季大会講演要旨集, p.107 (1976)
- 12) JEFFERY A.C.: The Population Ecology of an Exotic Mussel, *Musculista senhousia*, in a Southern California Bay, *Estuaries*, Vol.19, P42-50 (1996)
- 13) 長靖朗:博多湾底泥部における硫化物とORPの変動に関する研究,福岡大学学士論文,(2003)
- 14) 中田喜三郎,畑恭子:沿岸干潟における浄化機能の評価,水環境学会誌, Vol.17, No.3, pp.18-26 (1994)
- 15) BEVERTON,R.J.H. AND HOLT: On the dynamics of exploited fish populations, *Fishery Investigations Series2*, 19, pp.1-533 (1957)
- 16) TAKAHASHI,E.: A comparison of the macrobenthos of transplanted and natural eelgrass (*Zostera marina* L.) beds in San Diego Bay. M.S. Thesis. San Diego State University, San Diego, California (1992)
- 17) 内田晃:ホトギスの生長とアサリに及ぼす影響について,千葉県内湾水試調報, 7, pp.69-78 (1965)
- 18) 巖佐庸:数理生物学入門, 共立出版, pp.84-95 (1990)
- 19) 山崎惟義,渡辺亮一,熊谷博史:博多湾におけるホトギスガイの消長死滅シミュレーション,土木学会土木学会第57回年次学術講演概要集(提出中)
- 20) 山崎惟義,渡辺亮一,堤敬晃:ホトギスガイから見た博多湾東部海域の状況(第2報)ーホトギスガイの消長と酸素消費速度についてー,土木学会第57回年次学術講演概要集 VII-047, pp.93-94 (2002)
- 21) 木本新作:集団生物学概説, 共立出版, pp.11-15 (2002)
- 22) H. Imabayashi and S. Tsukuda : A population ecology of the small bivalve *Theora lubrica* in northern Bingo-Nada, *Nippon Suisan Gakkaishi*, 50, 1855-1862 (1984)
- 23) 松梨順三郎:環境流体汚染, 森北出版, pp.217-219 (1993)
- 24) 河原辰夫,加藤大輔:ホトギスガイの産卵誘発と発生成長,水産増殖, 17, 5/6, pp.247-261 (1970)
- 25) 吉田裕:ホトギス *Brachidontes senhousia* (Reeve)の浮遊仔貝並に稚貝に就て, ヴィナス, 7, 3, pp.121-128 (1937)
- 26) KUMAGAI,H.,SUSHIMOTO,K., and KUSUDA,T.: Kinetics of oxygen-deficient water body in Hakata Bay based on continuous monitoring data, e21265a,Enviro 2002 & IWA 3rd World Water Congress (2002)
- 27) 前掲 22)