

アコヤガイを用いた内湾環境修復技術の開発

— 実験海域の特性について —

川井 仁、粕谷 智之、山口 仁士

Study on Bioremediation of Enclosed Estuaries Using Aeration and Pearl Oyster, *Pinctada fucata martensii*: Characteristics of the Nagagushi, Sahoura and Katagami Estuaries

Hitoshi KAWAI, Tomoyuki KASUYA and Hitoshi YAMAGUCHI

The purpose of this research is to verify that both bioremediation in the enclosed estuaries and the high-quality pearl production can be achieved using the aeration in the bottom. The relation among the dissolved oxygen concentration, shell activity of pearl oyster, and feeding activity of pearl oyster was clarified in 2006. In 2007, three enclosed estuaries (Nagagushi bay, Sahoura bay and Katagami bay) were selected to verify the effect of the aeration on the cultivation area of pearl oyster and the characteristic of each sea area in summer was investigated.

The sea surface temperature was 30 °C or more and the thermal stratification was confirmed in the all estuaries. The chlorophyll-*a* concentration at the bottom were 1~2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ higher than at the surface in all estuaries. The oxygen-deficient water (DO concentration is lower than 4.29 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) was observed only in the Katagami bay.

It is expected that the aeration at the bottom would decrease sea surface temperature in the all estuaries, increase chlorophyll-*a* concentration at the surface in the all estuaries, and increase DO concentration in Katagami bay. The aeration would have important effect on the aquaculture of pearl oyster and water environment.

Key words: enclosed estuary, bioremediation, aeration, pearl oyster

キーワード: 内湾、生物学的環境修復、曝気、アコヤガイ

はじめに

筆者らは、平成18年~20年度の研究期間で「アコヤガイを用いた内湾環境修復技術の開発」に取り組んでいる。これは海底から曝気を行うことによって成層期の貧酸素化を軽減し、生物が棲息しやすい内湾環境に近づけることを目的としている。また同時に海底からの曝気と真珠養殖を組み合わせることで高品質真珠の生産を実現し、県内の水産業を振興することを目標としている¹⁾。

平成18年度は水槽実験で溶存酸素濃度(以下 DO 濃度という)の変化に伴うアコヤガイの摂餌活動の変化ならびに殻体運動の変化に関して知見を得た。すなわち DO 濃度の低下が摂餌活動を大きく妨げること、またそれに伴って殻体運動が急激に増加することが明らかとなった。この結果から殻体運動のモニタリングによって摂餌活動を把握できる可能性を見出した^{2, 3)}。

そこで本研究では次の段階として海底からの曝気が真珠養殖を行っている海域にどのような効果をもたらす

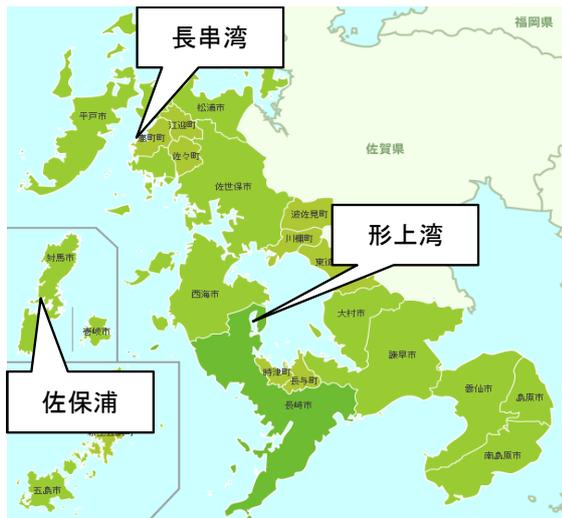


図1 実験海域に選定した3海域

特性が異なっている

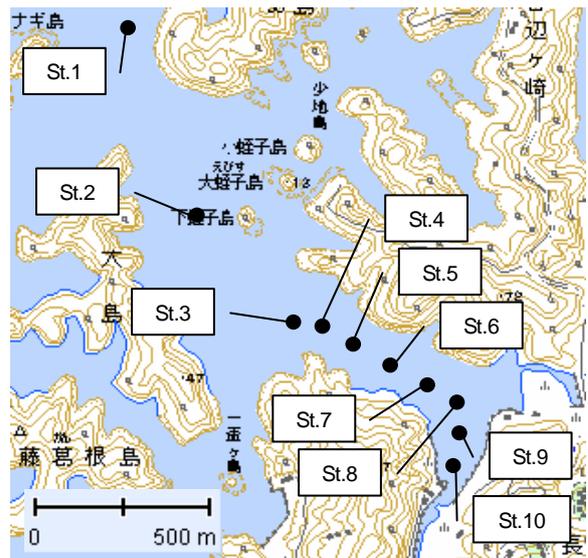


図2 長串湾の調査地点図

のかに関して検討を行うこととした。海底からの曝気は大きく2つの効果がある。1つ目は DO 濃度を上昇または維持できることである。海底からの曝気は生物の呼吸や微生物による好気性分解で消費された DO を補給できることから、成層期の内湾に有効であると考えられる。2つ目は気泡の上昇が誘起流れを発生させて鉛直混合が起こることである。鉛直混合によって水温、DO 濃度、植物プランクトンなどが表層から底層までほぼ均一の状態になる⁴⁾。この効果は夏期の表層の水温を低下させることや底層付近に沈降した植物プランクトンなどの有機懸濁物を再び表層まで浮上させることが可能である。以上のような曝気の効果は真珠養殖を行っている海域だけでなく波の穏やかな内湾であれば十分に得られると考えられる。

(社)日本水産資源保護協会(1989)は内湾の漁場において最低限維持しなくてはならない DO 濃度を $3.0 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ ($4.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) と指摘している⁵⁾。この数値を目標として、当センターではこれまでに大村湾の支湾である形上湾(長崎市)で海底からの曝気とカキ養殖を組み合わせた実験を実施した。その結果、ほとんど毎年のように底層で貧酸素水が確認されているにもかかわらず、夏の期間中に曝気を行うことで底層の DO 濃度を $4.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上に維持できることが実証された^{6, 7)}。またカキは従来の養殖で生産されたものよりも大きく成長し、生産量も増加したことからカキ養殖の増産効果も実証された^{6, 7)}。しかしながら先行実験は閉鎖性内湾である形上湾で実施されたものであり、実際に県内で盛んに真珠養殖を行っている外海に面した海域とは海洋構造の

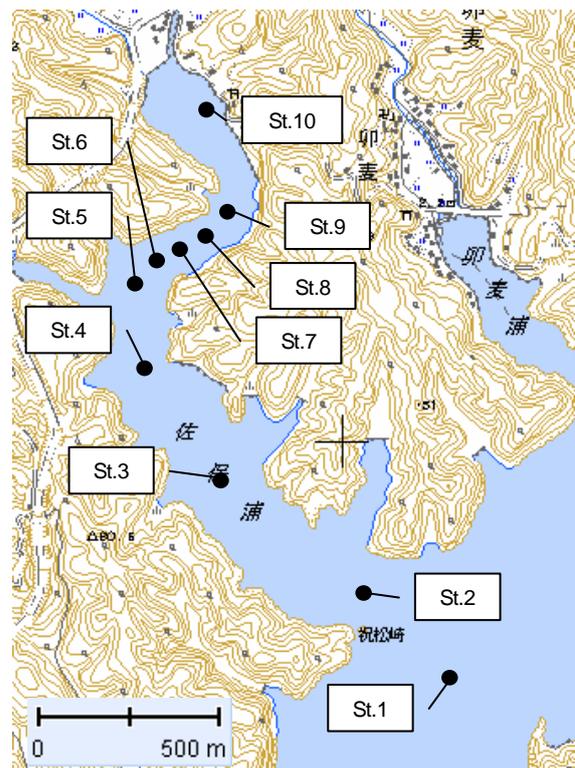


図3 佐保浦の調査地点図

と考えられる。さらに形上湾で対象とした養殖生物はカキであったが、本研究では真珠貝(アコヤガイ)を対象にしたため、実際に真珠養殖を盛んに行っている海域で検討する必要がある。

そこで、実験を行う海域として長崎県内で盛んに真珠養殖が行われている長串湾(鹿町町)ならびに佐保浦

(対馬市)の2海域が選定された。また、カキを用いた先行実験で成果が得られており、真珠養殖も行われている形上湾についても併せて検討を行うこととし、図1に示す3海域で曝気の効果を検証することとした。曝気の効果として DO 濃度の上昇と鉛直混合の促進が期待されるので、夏季成層期に適用することが基本である。したがって、各実験海域の夏季成層期の海洋構造を調査し、各海域の特性を明らかにすることとした。

ところで、実験海域の1つである形上湾に関しては、これまでに当センターでも複数回にわたって観測が実施されており、最近では浅野(2007)によって夏季の湾内の特性が、水温、DO 濃度およびクロロフィル a 濃度などの調査結果に基づいて明らかにされている⁸⁾。このことから形上湾における夏季の特性に関しては浅野(2007)の観測データを参考にする事とし、平成 19 年度は夏季における長串湾ならびに佐保浦の観測を行い、それぞれの海域特性を明らかにすることを試みた。また曝気によって得られる効果についてそれぞれの海域別に考察した。その結果、形上湾では DO 濃度の上昇に伴う貧酸素化の軽減ならびにアコヤガイの養殖深度(水深約 2~3m)における餌料密度の上昇が期待できると考えられた。また外海に面した長串湾ではアコヤガイの養殖深度における餌料密度の上昇が期待できると考えられた。そして3海域すべてでアコヤガイの養殖深度における水温の低下が期待できると考えられたので報告する。

調査方法

1. 調査地点

調査は湾軸に沿って行い、長串湾は図2に示す 10 地点、佐保浦は図3に示す 10 地点で実施した。

2. 測定方法

水温、塩分ならびにクロロフィル a 濃度はクロロテック(アレック電子株式会社製, ACL1180-DK)を用いて表層から海底までの鉛直方向に0.1m間隔で計測した。また底層の DO 濃度については各調査地点の海底から 1m 上部の海水を採取し、よう素滴定法(JIS K0102 32.1)で測定した。なお、クロロフィル a 濃度については各地点の表層水を蛍光光度計による測定(海洋観測指針 9.6.5)で測定し、その測定値に基づきクロロテックの計測データを補正した。

3. 気象ならびに潮汐の観測データ

台風や大雨などの気象条件は海洋構造に影響を与えることから、長串湾および佐保浦についてそれぞれ観測前 14 日間の気圧、気温および降雨量の観測デー

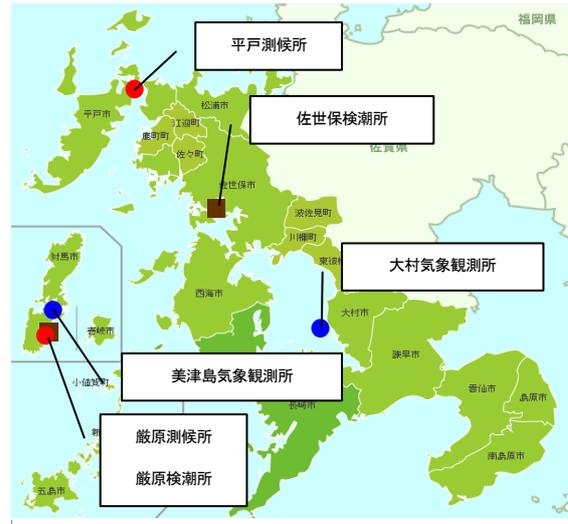


図4 観測データを利用した測候所、気象観測所ならびに検潮所の配置図

タから観測当日の海洋構造に影響を与えている否かについて検討を行うこととした。さらに潮汐および風向風速は観測当日の海洋構造に影響することから、観測当日の潮汐および風向風速についても長串湾および佐保浦それぞれの観測データをもとに海洋構造に影響を与えているか否かについて検討を行うこととした。観測データを利用した測候所、気象観測所ならびに検潮所の配置図は図4に示す。長串湾の気圧、気温、降雨量ならびに風向風速は気象庁平戸測候所の観測データを利用した。佐保浦の気温、降雨量ならびに風向風速は気象庁美津島気象観測所の観測データを利用し、気圧は厳原測候所の観測データを利用した。また長串湾ならびに佐保浦の潮汐は第七管区海上保安本部佐世保検潮所ならびに厳原検潮所の検潮データをそれぞれ標準として利用し潮汐表に基づき算出した⁹⁾。

結果

1. 夏季の長串湾の海域特性

長串湾の観測は 2007 年 8 月 10 日に実施した。気圧は 7 月 28 日から観測日までおおよそ 1000 hPa 以上を維持しており、台風などの影響はなかった(図5)。また平均気温は 7 月 30 日に 24℃ 近くまで低下したが、観測日が近づくに従い徐々に上昇した。降雨は 8 月 2 日および 8 月 3 日に確認されているが、それ以降の 6 日間は確認されていない。このことから観測当日の長串湾は典型的な夏の状態であったと考えられた。

観測当日の潮汐は中潮で、観測時間(14:00~

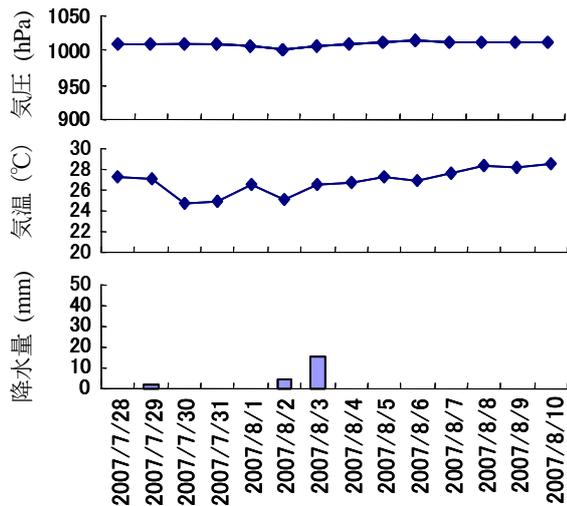


図5 観測前14日間の長串湾の気象状況

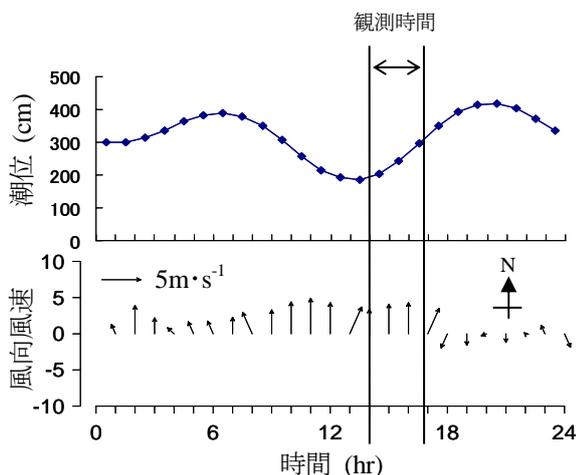


図6 2007年8月10日の長串湾における潮位と風の状況

16:50)は干潮から満潮への移行期にあたる(図6)。また、風向は0時から観測時間まで南風が常に吹いており、風速は1日を通して $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下であった。図2に示すように長串湾は東西に広い湾で湾口は西側に開いており周囲は山で囲まれていることから、観測当日の風による湾内海洋構造の変動は小さいと考えられた。

長串湾の観測点に沿った水温、塩分、クロロフィル *a* 濃度の鉛直断面図を図7に示す。塩分は底層で若干高いものの湾全体ではほぼ同様であった。水温は湾奥の表層で 30°C 以上であり湾の中央付近から外海にかけて 27.5°C であった。また水深が深くなるに従い水温は徐々に低下し、底層では $25\sim 26^{\circ}\text{C}$ であった。このこと

から夏季の長串湾は典型的な水温成層が見られた。クロロフィル *a* 濃度は表層で $5\sim 6\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ で、底層では $7\sim 9\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ であった。底層の DO 濃度の計測結果を表1に示す。夏季の長串湾では水温成層は見られるものの底層の貧酸素化は見られなかった。

2. 夏季の佐保浦の海域特性

佐保浦の観測は2007年8月23日に実施した。気圧は8月10日から観測日まで 1000 hPa 前後であり、台風などの影響はなかった(図8)。また平均気温は観測前の14日間で $27^{\circ}\text{C}\sim 29^{\circ}\text{C}$ を維持していた。降雨は観測前の14日間のうち5日間で確認されているが、降水量は少なく、観測日の佐保浦への影響は小さい。このことから観測当日の佐保浦は典型的な夏の状態であったと考えられた。

観測当日の佐保浦の潮汐は図9に示すとおり若潮で潮位差が小さく、さらに観測時間(10:15~13:05)は干潮時刻と重なっていたことから、潮流による海水の移動はほとんど無かったと推測される。また、風向は0時から8時まで北西風が吹いていたが、9時から観測時間までは北東風が吹いており、風速は1日を通して $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下であった。図3に示すように佐保浦は南北に細長い湾であり、湾の形状は東西に大きく折れ曲がっている。また湾口は南側に開いており周囲は山で囲まれていることから観測当日の風による湾内への影響は小さいと考えられた。

佐保浦の観測点に沿った水温、塩分、クロロフィル *a* 濃度の鉛直断面図を図10に示す。塩分は湾内と外海で若干の差が見られるものの湾全体で一様であった。水温は湾奥から湾口にかけて表層から水深 15 m までは 29.5°C 以上、水深 20 m までは 29°C 以上そして水深 25 m までは 28.5°C 以上であった。一方、 25 m 以深は 28°C 以下であり、夏季の佐保浦は水温成層していた。また、クロロフィル *a* 濃度は表層から中層で $4\sim 5\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ であったが中層から底層では $5\sim 6\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ であった。底層の DO 濃度の計測結果を表2に示す。夏季の佐保浦では水温成層は見られるものの、底層の貧酸素化は見られなかった。

3. 夏季の形上湾の海域特性

形上湾の海域特性は、浅野(2007)の観測データを参照した⁸⁾。浅野は2006年8月22日に大村湾の湾口から大村湾の西岸に沿って南下し形上湾の湾口を経て湾奥まで観測を行っており、観測地点に沿った水温、DO 濃度ならびにクロロフィル *a* 濃度の鉛直断面図を示している。その結果、表層の水温は 30°C を超えている

○数字は観測地点

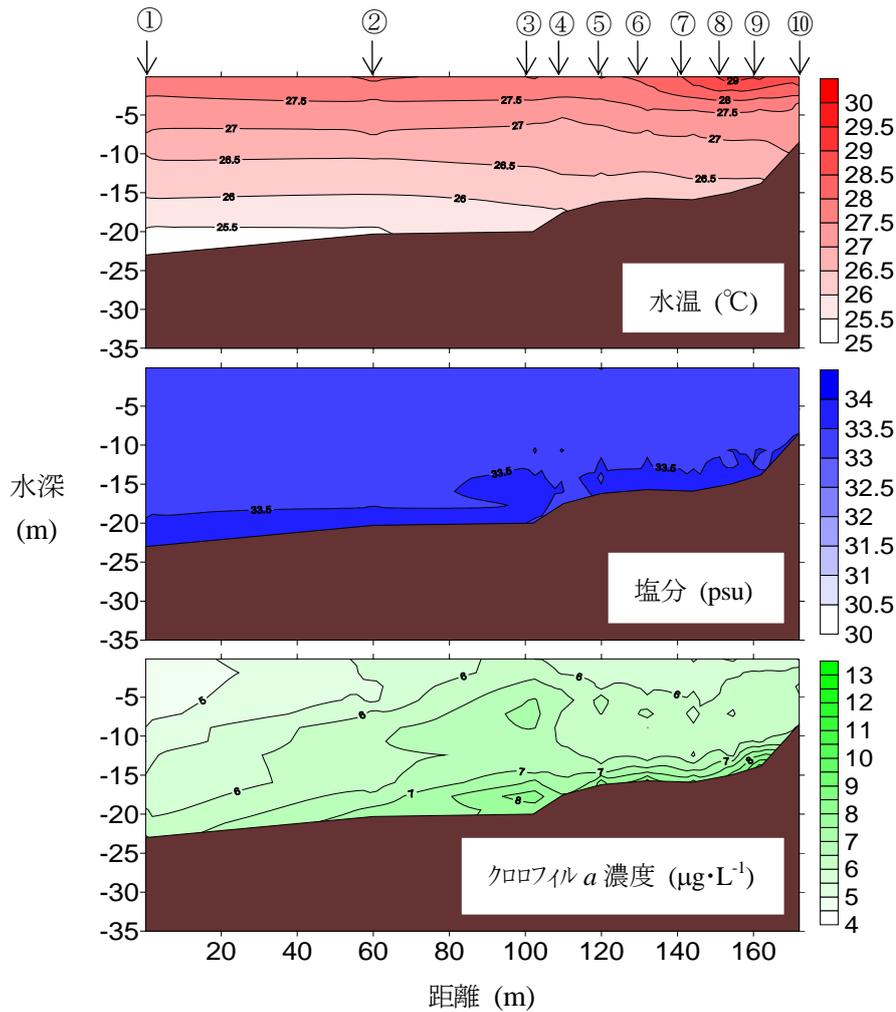


図7 2007年8月10日(中潮)の長串湾の鉛直断面図

表1 長串湾の底層における調査10地点のDO濃度

調査地点	DO濃度(mg·L ⁻¹)
St.1	7.47
St.2	7.38
St.3	7.14
St.4	7.64
St.5	8.11
St.6	8.03
St.7	8.10
St.8	8.08
St.9	8.18
St.10	8.47
平均±標準偏差	7.86±0.43

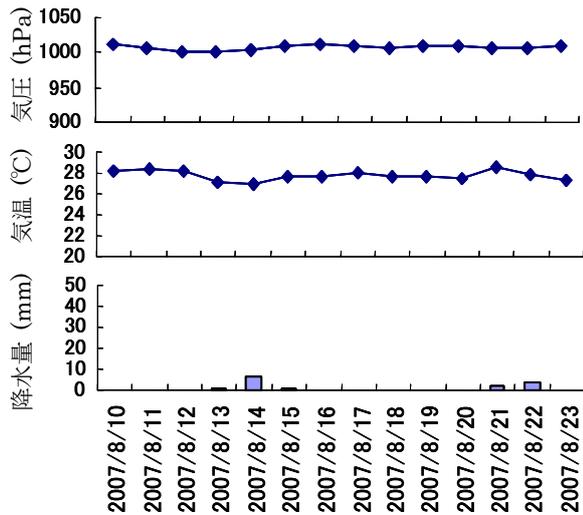


図8 観測前14日間の佐保浦の気象状況

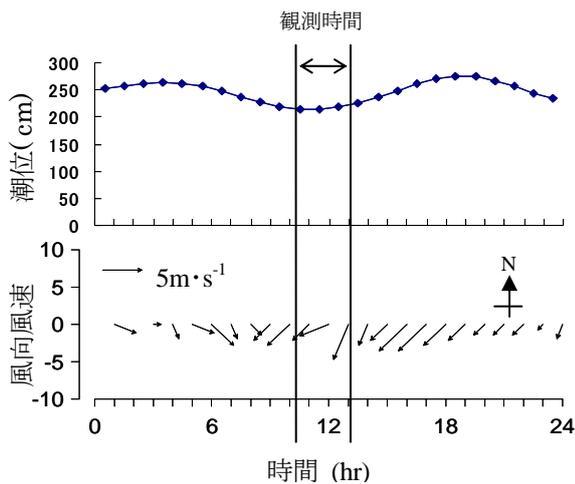


図9 2007年8月23日の佐保浦における潮汐と風の状況

が湾奥の底層では 28°C であり、また湾中央付近の水深 10m 以下の底層では 26°C と低く、夏季の形上湾では典型的な水温成層が形成されていた。クロロフィル a 濃度は表層で $3\sim 5\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ であるが水深 $5\sim 7\text{m}$ では $8\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上と高く、特に湾奥の底層では $10\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上の高い値を示した。底層の DO 濃度は水深が 5m 以下になると徐々に低下し、湾中央付近の底層では約 $3\sim 4\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ となっており、貧酸素水塊の存在が確認された。

浅野の観測データが降雨による影響を受けているか否かについて確認するため、気象庁大村気象観測所

の観測データを利用した。その結果、観測日の3日前と4日前である8月18と19日に降雨が観測されているが、8月20日と21日は降雨が無く平均気温もそれぞれ 28.1°C と 29.2°C であった。また観測当日の8月22日は降雨が無く、平均気温は 29.0°C であった。このことから観測当日は典型的な夏の状態であったことが窺えた。さらに観測当日の風の影響についても確認するため、気象庁大村気象観測所の観測データを利用した。観測当日の風向は0時から9時までは南東風が吹いており、10時から15時までは南西風が吹いていた。風速は0時からの15時まで $5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下であった。観測を行った時間が15時以前であった(本観測に筆者も同行した)ことから、当日の風による湾内海洋構造の変動は小さかったと考えられた。

考 察

長串湾、佐保浦および形上湾の調査結果を踏まえ各実験海域で海底からの曝気を行った場合に得られる効果について考察する。カキを用いた先行実験でも実証されたように曝気は底層の DO 濃度を直接上昇させ、一定の濃度に維持させることが可能である。夏季の形上湾は貧酸素水塊の存在が確認されたことから、海底からの曝気によって貧酸素化を軽減できると期待される。長串湾と佐保浦については夏季でも底層の DO 濃度が共に $4.29\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上であることから、曝気による DO 濃度への効果は小さいと考えられる。

曝気のもう一つの効果は誘起流れの発生である。誘起流れの発生は鉛直混合を起こすため、表層の水温を低下させると考えられる。夏季の高水温は長串湾、佐保浦および形上湾のいずれにおいても確認されており、沼口(1994)は水率と水温の関係からアコヤガイは水温が 28°C を超えると摂餌活動が不活発になると報告しており¹⁰⁾、木村(1965)は水温が 30°C 以上では斃死が増大すると報告している¹¹⁾。このことから夏季の水温上昇は真珠養殖にとって大きな被害をもたらす深刻な問題である。長串湾では湾奥の表層が 30°C である一方底層が 26°C であったことから、鉛直混合によってアコヤガイの養殖深度(水深約 $2\sim 3\text{m}$)での水温低下が期待できる。形上湾においても湾奥の表層水温より底層水温が低かったことから、曝気によって水温を低下させることができると考えられ、アコヤガイの斃死を減少させることが期待される。佐保浦の場合は、湾の中央から湾奥に掛けて表層から底層までの水温がほぼ一定であった。しかしながら、観測当日は若潮で干満の差が小さく、さらに観測時間はちょうど干潮時であったことから、潮汐

○数字は観測地点

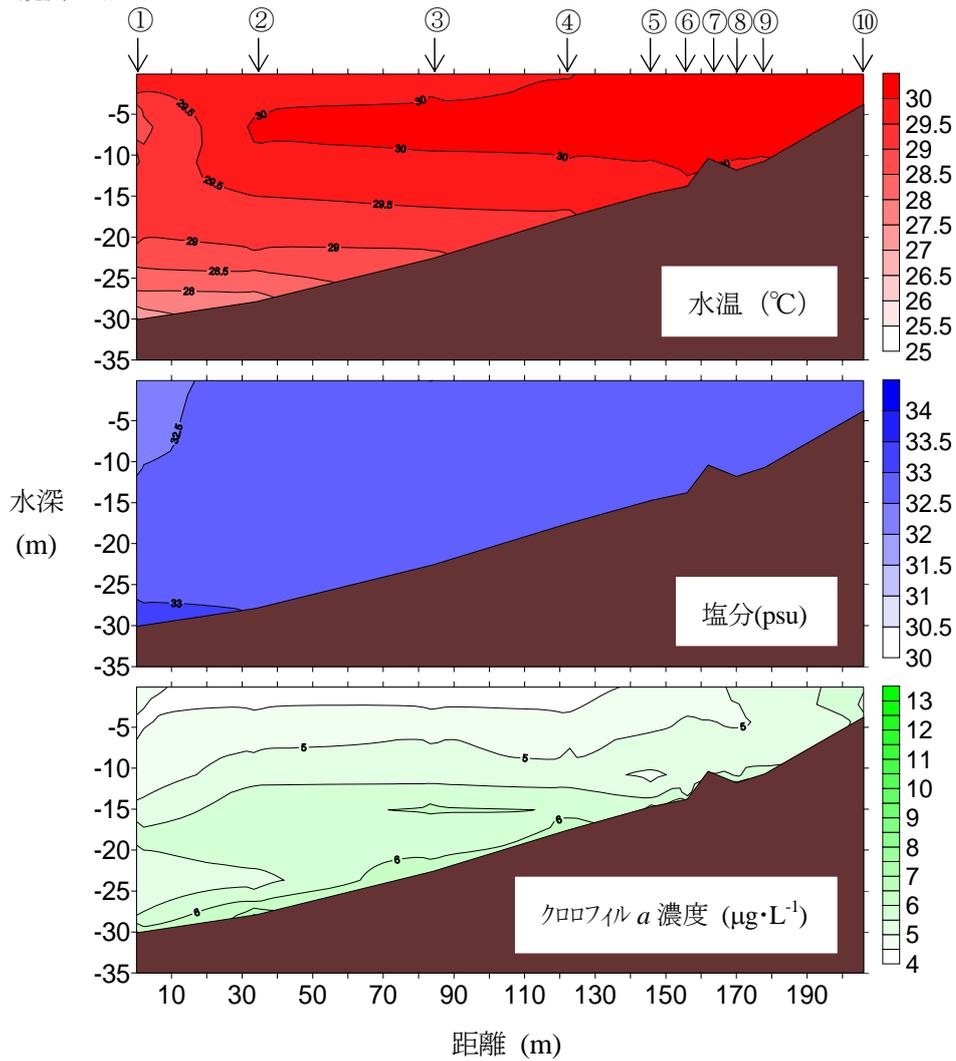


図10 2007年8月23日(若潮)の佐保浦の鉛直断面図

表2 佐保浦の底層における調査10地点のDO濃度

調査地点	DO濃度(mg·L ⁻¹)
St.1	6.88
St.2	6.46
St.3	6.84
St.4	6.76
St.5	6.65
St.6	6.64
St.7	6.80
St.8	6.57
St.9	6.71
St.10	6.69
平均±標準偏差	6.70±0.13

による海水の移動がほとんど無かったと考えられる。それ故、潮汐によって低水温の外海水が湾内に流入した場合に曝気を行えば、表層水温の低下が期待される。

曝気地点では誘起流れの発生によって底層付近に存在する植物プランクトンを上昇させるかもしれない。長串湾や形上湾では、クロロフィル *a* 濃度は表層よりも底層の方が高いため曝気によってアコヤガイの養殖深度の餌料密度を上昇させるであろう。一方、佐保浦においてはクロロフィル *a* 濃度は鉛直的に差は小さかったものの潮汐によってクロロフィル *a* 濃度の高い海水が湾内に流入した場合は、曝気による餌料密度の上昇が期待される。今回の計測結果はいずれの実験海域においても潮汐による海水の移動をほとんど考慮していないことから、実際の曝気による効果については潮汐による流れや外海から流入する海水の影響も考慮しなければならない。

今後の検討課題は各実験海域で海底からの曝気をもたらす効果を明らかにし、曝気の影響範囲がどの程度なのかを明確にすることである。それによって各海域に必要となる曝気量を計算することができ、経費等を含めた実用化への検討が可能になると考える。

まとめ

各海域の特徴から曝気によって得られる効果について以下のことが考えられた。

長串湾での曝気は、鉛直混合によってアコヤガイの養殖深度の水温を低下させ、さらに餌料密度を上昇させることが期待された。

佐保浦での曝気は、潮汐による海水の流入を考慮した場合に鉛直混合によってアコヤガイの養殖深度の水温を低下させ、さらに餌料密度を上昇させることが期待された。

形上湾での曝気は、貧酸素化を軽減させること、そして鉛直混合によってアコヤガイの養殖深度の水温を低下させ、さらに餌料密度を上昇させることが期待された。

参考文献

- 1) 川井仁, 内田浩, 粕谷智之, 山口仁士: アコヤガイを用いた内湾環境修復技術の開発 (I) - 研究の背景 -, 長崎県環境保健研究センター所報, 資料, (2006)
- 2) 川井仁, 内田浩, 粕谷智之, 山口仁士: アコヤガイを用いた内湾環境修復技術の開発 (III) - アコヤガイの殻体運動と摂餌活動との関係 -, 長崎県環境保健研究センター所報, 報文, (2006)
- 3) 川井仁, 内田浩, 粕谷智之, 山口仁士: アコヤガイを用いた内湾環境修復技術の開発 (II) - アコヤガイの摂餌活動並びに殻体運動の計測に関する検討 -, 長崎県環境保健研究センター所報, 資料, (2006)
- 4) 上野武: 最近の水域浄化技術の概要, 用水と廃水, **39**, 767-773, (1990)
- 5) (社) 日本水産資源保護協会: 漁場の適正溶存酸素濃度の検討, 漁場環境容量策定事業報告書 (第1分冊), 931-1003, (1989)
- 6) 山口仁士, 白井玄爾, 濱邊聖, 中田英昭: カキ養殖と曝気による環境の修復, 月刊養殖, 緑書房, 72-75, (2004)
- 7) 山口仁士: 富栄養化した海を利益を上げながら活性化していく方法, 技術と経済, (社) 科学技術と経済の会, 50-60, (2005)
- 8) 浅野繭子: 形上湾における海水流動とそれにともなう水質の変化, 長崎大学大学院生産科学研究科修士論文, 付図 ii, (2007)
- 9) 海上保安庁: 平成19年度潮汐表第1巻日本及び付近, 書誌第 781 号, 394-395, (2007)
- 10) 沼口勝之: アコヤガイのろ水率におよぼす水温の影響, 水産増殖, 1-6, (1994)
- 11) 木村三郎: 浅海養殖60種, 大成出版社, 199-218, (1965)