

# アコヤガイを用いた内湾環境修復技術の開発

## —曝気の効果について—

川井 仁、粕谷 智之、中村 心一、山口 仁士

Study on a Bioremediation of Enclosed Estuary using Aeration and Pearl oyster, *Pinctada fucata martensii*

—Effects of the Aeration in the Estuaries—

Hitoshi KAWAI, Tomoyuki KASUYA, Shinichi NAKAMURA and Hitoshi YAMAGUCHI

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

キーワード: 曝気、アコヤガイ、内湾、生物学的環境修復

### 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」に取り組んできた<sup>1)</sup>。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<sup>1)</sup>。

平成18年度は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<sup>2), 3)</sup>。平成19年度は長串湾(鹿町町)ならびに佐保浦(対馬市)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した<sup>4)</sup>。また夏季の形上湾の海域特性は、浅野(2007)の観測データ<sup>5)</sup>から表層の水温が30℃を超える典型的な水温成層を形成し、湾中央付近の底層では貧酸素水塊の存在が確認された。また、クロロフィルa濃度は表層より底層で高いことが確認された。

平成20年度は、図1に示す各実験海域の海域特性を踏まえて実際に海底からの曝気を行い、長串湾と佐保浦ではアコヤガイ養殖深度の水温低下ならびに餌料密度の上昇、形上湾では貧酸素化の軽減、アコヤガイ養殖深度の水温低下ならびに餌料密度の上昇といった効果が得られるか否かについて検証を行った。また曝気によるアコヤガイへの影響ならびに生産される真珠

への影響についても検討を行ったので併せて報告する。

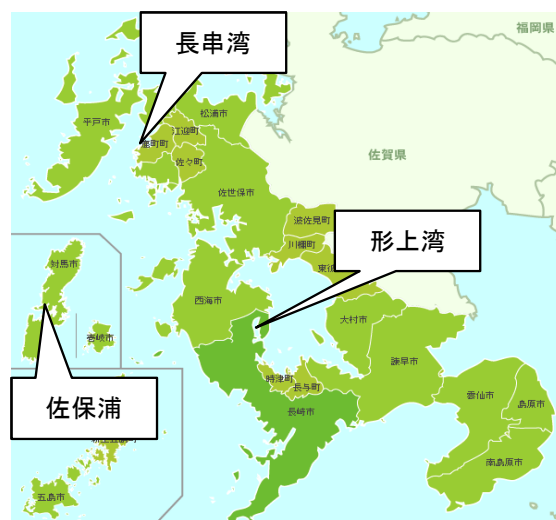


図1 実験海域に選定した3海域

### 調査方法

#### 1 調査地点

海底からの曝気実験は、長串湾は図2に示す実験地点、佐保浦は図3に示す実験地点そして形上湾は図4に示す実験地点で実施した。

#### 2 測定方法

曝気管は3海域ともに湾軸に対して垂直に敷設した。曝気の効果を確認するための連続観測地点は3海域と

も曝気管から湾軸に沿って湾口方向に各実験海域の水深の間隔(長串湾:8m、佐保浦:5m、形上湾:5m)で

K0102 32.1)で測定した測定値に基づき補正を行った。また、クロロフィル *a* 濃度についても同様に採水し蛍光



図2 長串湾の実験地点図

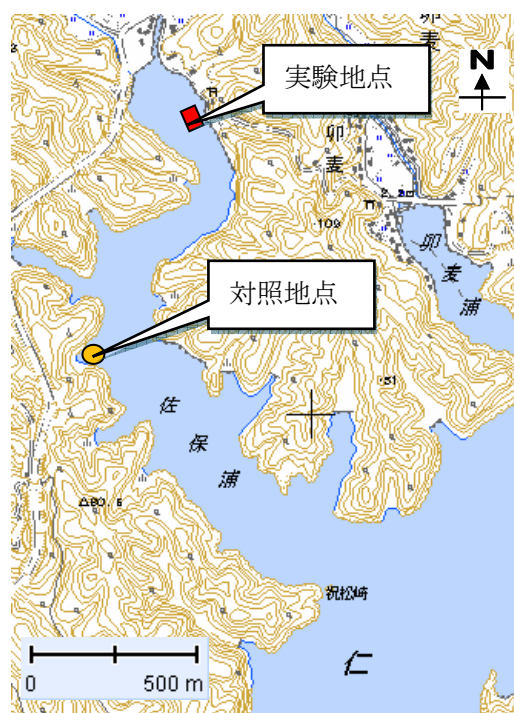


図3 佐保浦の実験地点図

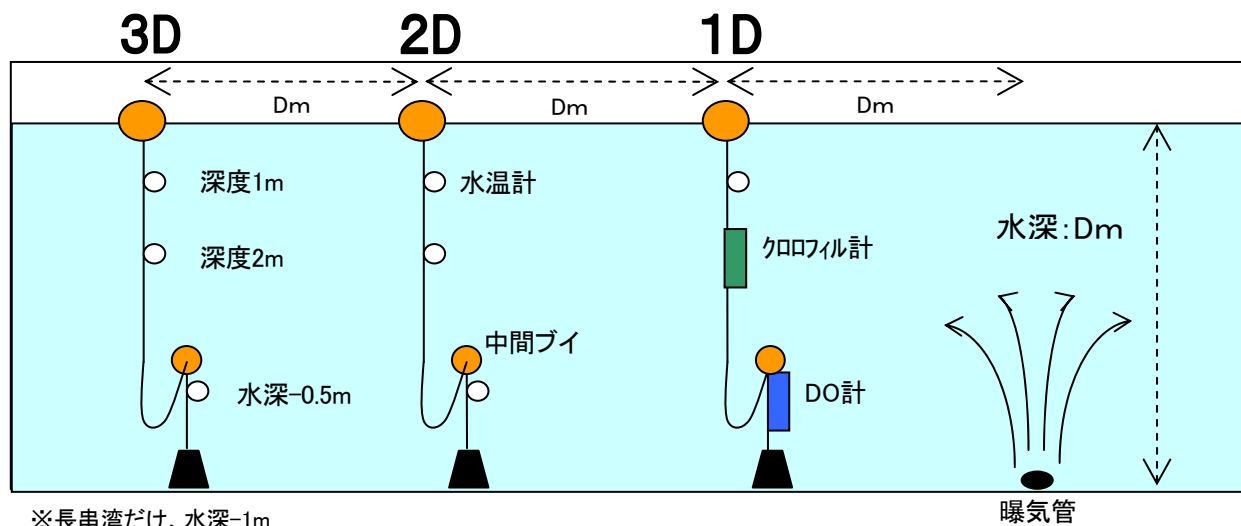
設定し、曝気管に近い方からそれぞれ 1D、2D および 3Dとした。そして各観測地点の深度 1m、深度 2mならびに海底から 0.5m 上部(水深-0.5m)に図5に示すとおり観測機器を設置した。ただし、長串湾は深度が深いことから海底から 0.5m 上部の代わりに海底から 1m 上部(水深-1m)とした。長串湾ならびに佐保浦での曝気は小型空気圧縮機(株式会社日立産機システム社製 スーパーオイルフリーベビコン 0.4LE-8S)を用い、給気量(曝気量)は  $18\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ とした(最大  $49\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ )。形上湾での曝気は小型空気圧縮機(株式会社日立産機システム社製 オイルフリーベビコン 1.5OP-9.5G5/6)を用い、給気量(曝気量)は  $55\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ とした(最大  $165\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ )。曝気管(株式会社イノアックコーポレーション製 ポリパイプ JIS 二層管 内径 13mm 長さ 120m)は 3 海域とも先端を密栓し先端から 2m 間隔で直径 1mm 程度の穴を 8カ所空けたものを使用した。水温の計測は 3 海域とも耐圧防水温度計測データロガー(Onset Computer Corporation 社製 テイドビット v2)を用い、30 分間隔で計測した。クロロフィル *a* 濃度は 3 海域とも小型メモリークロロフィル濁度計(アレック電子株式会社製, ACLW-CMP)を用い、30 分間隔で計測した。DO 濃度は 3 海域とも小型メモリーDO 計(アレック電子株式会社製, ADOW-CMP)を用い、30 分間隔で計測した。なお、DO 濃度は小型空気圧縮機を発動あるいは停止させる直前に採水し、よう素滴定法(JIS

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補正を行った。

曝気によるアコヤガイへの影響を確認するため、各実験海域にアコヤガイを吊り下げて月に 1 回生残数を計測した。なお、実験に供したアコヤガイはすべての海域で深度 2m(アコヤガイの養殖深度)に吊り下げた。



図4 形上湾の実験地点図



※長串湾だけ、水深-1m

図5 各海域での連続観測模式図

長串湾では稚貝(一年貝)256個、二年貝135個、手術貝(珠入れ貝)54個を通常の養殖と同様にそれぞれ養殖籠に入れて観測地点1Dに吊り下げ実験員とした。また曝気の影響がほとんどない地点として観測地点(1D~3D)の延長上で曝気地点から水深の5倍離れた地点を対照地点とし、実験員と同個体数のアコヤガイを吊り下げ対照員とした。アコヤガイの吊り下げは実験員および対照員共に2008年9月5日に開始し、2009年1月21日に浜上げ(真珠の取り出し)した。

佐保浦では稚貝50個、二年貝50個、手術貝25個を観測地点1Dに吊り下げ実験員とした。また曝気の影響がほとんどない地点として図3に示す対照地点を選

定し、実験員と同個体数のアコヤガイを吊り下げ対照員とした。アコヤガイの吊り下げは実験員および対照員共に2008年9月27日に開始し、2009年1月21日に浜上げた。

形上湾では稚貝50個、二年貝50個、手術貝25個を観測地点1Dに吊り下げ実験員とした。また曝気の影響がほとんどない地点として観測地点(1D~3D)の延長上で曝気地点から水深の5倍離れた地点を対照地点とし、実験員と同個体数のアコヤガイを吊り下げ対照員とした。アコヤガイの吊り下げは実験員および対照員共に2008年8月21日に開始し、2008年12月15日に浜上げた。

各海域で浜上げされた真珠の品質はすべて長崎県真珠養殖漁業共同組合に鑑定していただいた。

### 3 気象ならびに潮汐

曝気期間中の気圧、気温、降雨量、潮汐および風向風速については、各実験海域に近い測候所ならびに検潮所の観測データを利用することとした。長串湾の気圧、気温、降雨量ならびに風向風速は図6に示す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図6に示す気象庁美津島測候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。形上湾の気温、降雨量ならびに風向風速は図6に示す気象庁大村測候所の観測データを利用し、気圧は佐世保測候所の観測データを利用した。また長串湾ならびに形上湾の潮汐は図6に示す第七管区海上保安本部の佐世保検潮所の検潮データを佐保浦の潮汐は第七管区海上保安本部の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<sup>6)</sup>に基づき算出した。

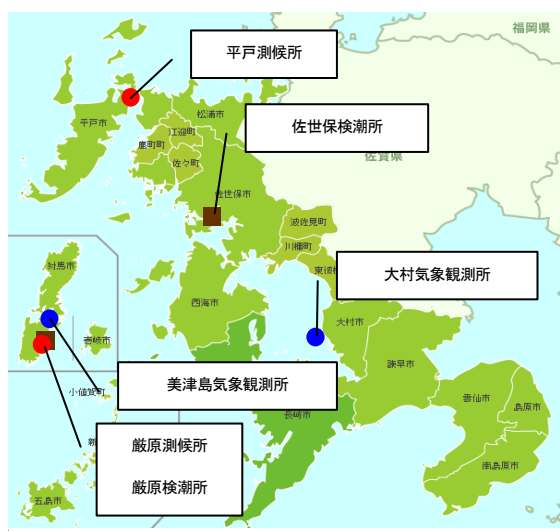


図6 観測データを利用した測候所、気象観測所ならびに検潮所の配置図

## 結果

### 1 長串湾における曝気の効果

長串湾での曝気は2008年8月9日～8月18日を第1曝気期とし、2008年8月27日～9月5日までを第2曝気期として実施した。また曝気を停止している2008年8月19日～8月26日を第1停止期とした。2008年9月6日以降は気温が低下したものの、引き続き2008年9月11日～9月26日の期間で曝気を実施

し、曝気実験を終了した。

各計測器による連続観測は2008年8月9日から開始し、気温が低下したことに伴い2008年9月10日で終了した。計測器による連続観測によって得られた水温、DO濃度およびクロロフィルa濃度と、計測期間中の気象データならびに潮汐データを図7に示す。図7の結果から、気温は第1曝気期で1日平均27～28℃程度であったが、第1停止期になると1日平均25℃程度まで低下していた。第2曝気期以降も気温は上昇せず、観測地点の水温も第2曝気期以降は24～25℃にまで低下していた。気圧は観測期間中おおよそ1000hPa前後で推移しており、台風などの影響は無かった。DO濃度は $3.0\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$  ( $4.3\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>7)</sup>以上を維持しており貧酸素化していなかった。

夏季の海域における曝気の効果を検討するため、第1曝気期と第1停止期における水温とクロロフィルa濃度について比較を行った。気温が低下した第2曝気期以降は検討の対象から除外することとした。まず曝気による水温上昇の緩和するか否かについて検討した。曝気による水温上昇の緩和は曝気による鉛直混合によって表層から底層までの水が一樣化されることで発現する<sup>8)</sup>。これによってアコヤガイの養殖深度の水温が低下すると考えられる。そこで第1曝気期および第1停止期の表層(深度1m)と底層(水深-1m)の水温差(表層の水温-底層の水温)の平均値を算出した。観測地点1D、2Dおよび3Dにおける水温差の平均値を図10に示す。図10の結果からいずれの観測地点も水温差は第1曝気期の方が第1停止期よりも高かった。次に曝気がクロロフィルa濃度を上昇させるか否かを検討するため、図11に示すように第1曝気期および第1停止期のクロロフィルa濃度平均値を算出した。図11に示す結果からクロロフィルa濃度は第1曝気期よりも第1停止期の方が高かった。

### 2 佐保浦における曝気の効果

佐保浦での曝気は2008年8月27日～9月2日を第1曝気期とし、2008年9月18日～9月27日までを第2曝気期として実施した。また曝気を停止している2008年9月3日～9月17日を第1停止期とした。2008年9月26日以降は気温が低下したものの、引き続き2008年10月4日～10月11日の期間で曝気を行い、曝気実験を終了した。

各計測器による連続観測は2008年8月27日から開始し、気温が低下したことに伴い2008年9月30日で終了した。計測器による連続観測によって得られた水

温、DO 濃度およびクロロフィル *a* 濃度と、計測期間中の気象データならびに潮汐データを図8に示す。図8の結果から、気温は第1曝気期、第1停止期および第2曝気期まで1日平均24~25°C程度であった。そのため水温は連続観測期間の最高で26°C程度であった。気圧は観測期間中おおよそ1000hPa前後で推移しており、台風などの影響は無かった。DO 濃度はおおよそ4.3mg・L<sup>-1</sup>以上を維持しており貧酸素化していなかった。

夏季の海域における曝気の効果を検討するため、第1曝気期、第1停止期ならびに第2曝気期における水温とクロロフィル *a* 濃度の比較を行った。気温が低下した2008年9月27日以降は検討の対象から除外することとした。まず曝気が水温の上昇を緩和するか否かについて検討するため、長串湾と同様に第1曝気期、第1停止期ならびに第2曝気期の表層(深度1m)と底層(水深-0.5m)の水温差(表層の水温-底層の水温)の平均値を算出した。観測地点1D、2Dおよび3Dにおける水温差の平均値を図12に示す。図12の結果から水温差はいずれの観測地点でも第1曝気期と第2曝気期に比べて第1停止期が0.2°C程度高かった。次に曝気がクロロフィル *a* 濃度を上昇させるか否かを検討するため、図13に示すように第1曝気期、第1停止期ならびに第2曝気期のクロロフィル *a* 濃度の平均値をそれぞれ算出した。図13に示す結果からいずれの観測地点もクロロフィル *a* 濃度は第1曝気期で最も高かった。次に第2曝気期が高く、第1停止期が最も低かった。

### 3 形上湾における曝気の効果

形上湾での曝気は2008年8月21日~9月1日を第1曝気期とし、2008年9月9日~9月16日までを第2曝気期として実施した。また曝気を停止している2008年9月2日~9月8日を第1停止期とし、2008年9月17日~9月23日を第2停止期とした。2008年9月26日以降は気温が低下したものの、引き続き2008年9月24日~10月6日の期間で曝気を行い、曝気実験を終了した。

各計測器による連続観測は2008年8月21日から開始し、水温が低下したことに伴い2008年9月30日で終了した。計測器による連続観測によって得られた水温、DO 濃度およびクロロフィル *a* 濃度と、計測期間中の気象データならびに潮汐データを図9に示す。図9の結果から、気温は第1曝気期、第1停止期、第2曝気期および第2停止期までで1日平均25~26°C程度であった。水温は連続観測期間中で変動しているものの

高い時で28°C以上にまで上昇していた。気圧は観測期間中おおよそ1000hPa前後で推移しており、台風などの影響は無かった。DO 濃度は観測期間を通して日変動が大きく、昼間に高く夜間に低い傾向を示した。また、8月12日~8月18日の期間で底層が貧酸素状態であったことが確認された。

夏季の海域における曝気の効果を検討するため、第1曝気期、第1停止期、第2曝気期および第2停止期における水温とクロロフィル *a* 濃度の比較を行った。気温が低下した2008年9月25日以降は検討の対象から除外することとした。まず曝気が水温の上昇を緩和するか否かについて検討するため、長串湾と同様に第1曝気期、第1停止期ならびに第2曝気期の表層(深度1m)と底層(水深-0.5m)の水温差(表層の水温-底層の水温)の平均値を算出した。観測地点1D、2Dおよび3Dにおける水温差の平均値を図14に示す。図14の結果からいずれの観測地点も水温差は第1曝気期が最も低く第1停止期および第2停止期に比べて0.5°C程度高かった。第2曝気期の水温差は第1曝気期に比べて0.3°C程度高かった。次に曝気がクロロフィル *a* 濃度を上昇させるか否かを検討するため、図15に示すように第1曝気期、第1停止期、第2曝気期および第2停止期のクロロフィル *a* 濃度平均値をそれぞれ算出した。図15に示す結果からクロロフィル *a* 濃度は第1停止期で最も高かった。次に第1曝気期と第2曝気期が高く、第2停止期が最も低かった。最後に曝気がDO 濃度を上昇させ貧酸素化を軽減するか否かを検討するため、図16に示すように第1曝気期、第1停止期、第2曝気期および第2停止期のDO 濃度平均値を算出した。図16に示す結果から第1曝気期のDO 濃度平均値が最も高かった。しかしながら目標である4.3mg・L<sup>-1</sup>には至らなかった。第2曝気期のDO 濃度平均値は他の期間よりも低く、曝気を行っているにもかかわらず底層が貧酸素状態であった。

### 4 曝気によるアコヤガイへの影響

3海域で吊り下げたアコヤガイの生残数を表1に示す。いずれの海域も生残数は実験貝と対照貝とでほとんど差がなかった。この結果から曝気はアコヤガイの生残数に影響を及ぼさないことが確認された。生残数を向上させる効果は今回行った曝気実験では確認できなかった。原因としては、実験期間中に水温が30°Cを超える日がほとんど無かったことから高水温による貝の死亡が少なかったと考えられる。しかしながら、少なくとも曝気はアコヤガイの生残に悪影響を及ぼさないことが明らかとな

った。

## 5 曝気による真珠への影響

3 海域で吊り下げた手術貝から取り出された真珠の品質を表2に示す。いずれの海域も実験貝と対照貝とでほとんど差がなかった。今回の実験で生産された真珠は高品質のものもあったが、実験貝と対照貝とではほとんど差がなかったことから曝気による効果ではないと考えられた。しかしながら、少なくとも曝気は真珠に悪影響を及ぼさなかったことが確認された。

## 考 察

長串湾、佐保浦および形上湾での曝気実験の結果から曝気によって得られた効果について考察する。今回の曝気実験は実際の真珠養殖に適用することを目的として計画された。すなわち本実験は曝気が高額な設備投資を必要とせず、さらに長期的に利用可能な技術で真珠養殖に有効な技術であることを実証するために実施された。したがって曝気に使用した空気圧縮機は

安価なものを使用することとした。長串湾と佐保浦では貧酸素化が起こっていないことから少量の曝気量でも効果が期待できると予測し小型の空気圧縮機を使用した。一方形上湾は貧酸素化が起こることから、曝気量を多くするため、中型の空気圧縮機を使用した。また空気圧縮機を長期的に利用するため、全海域とも稼働時間と停止時間が1:2になるように給気量(曝気量)を調節した。

その結果、佐保浦と形上湾において曝気を停止していた期間よりも曝気を行っていた期間の方が水温差の平均値が低かったことから、曝気によって水温上昇が緩和される可能性が確認された。しかしながら長串湾では水温上昇が緩和される可能性は確認されるには至らなかった。これは第1曝気期の気温が27~28℃程度であったが、第1停止期の気温は25℃程度と低くなったことによって、気温の変化が水温に影響したことが原因であると推察された。また、佐保浦と形上湾において曝気を停止していた期間よりも曝気を行っていた期間の方がク

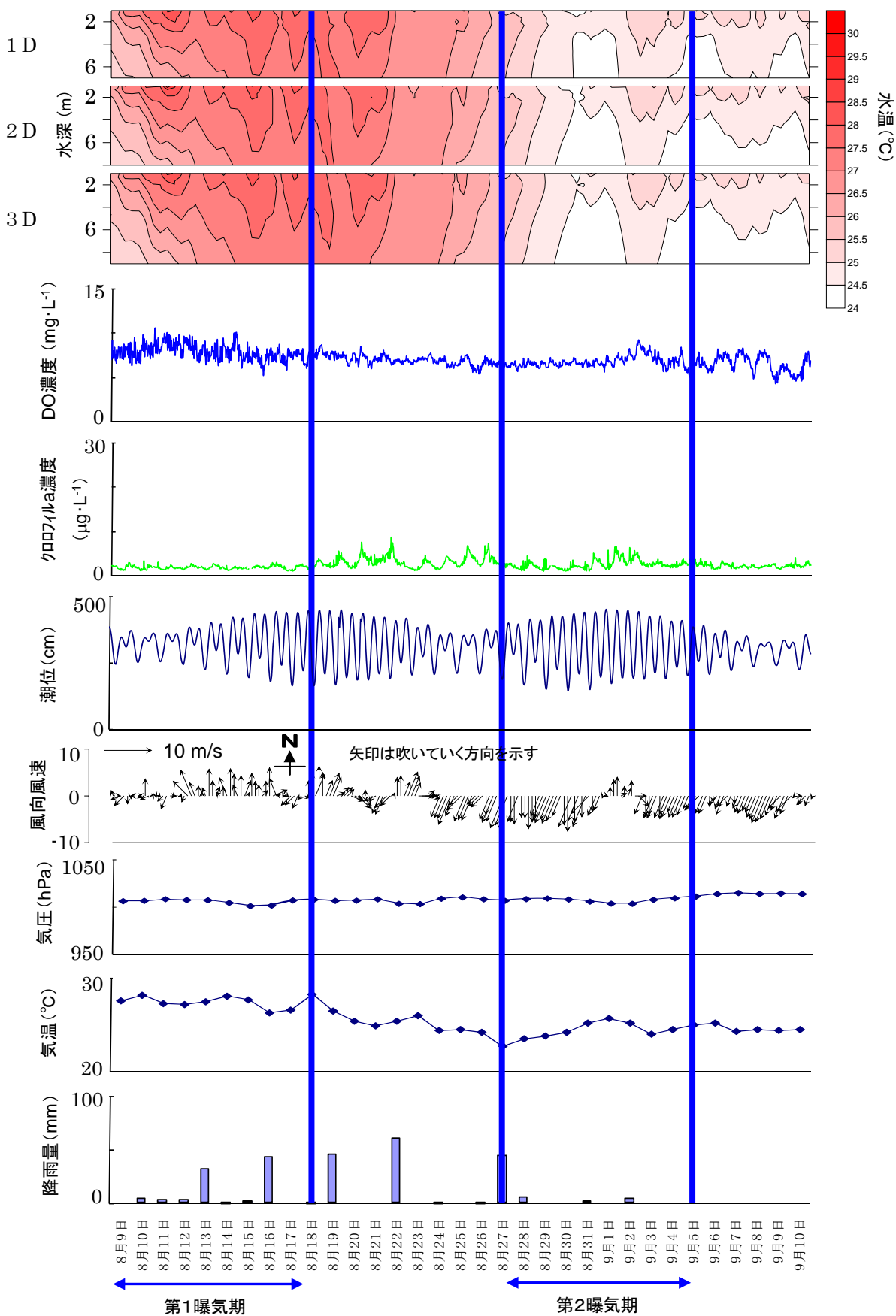


図7 長串湾における連続観測結果ならびに連続観測中の潮汐・気象グラフ

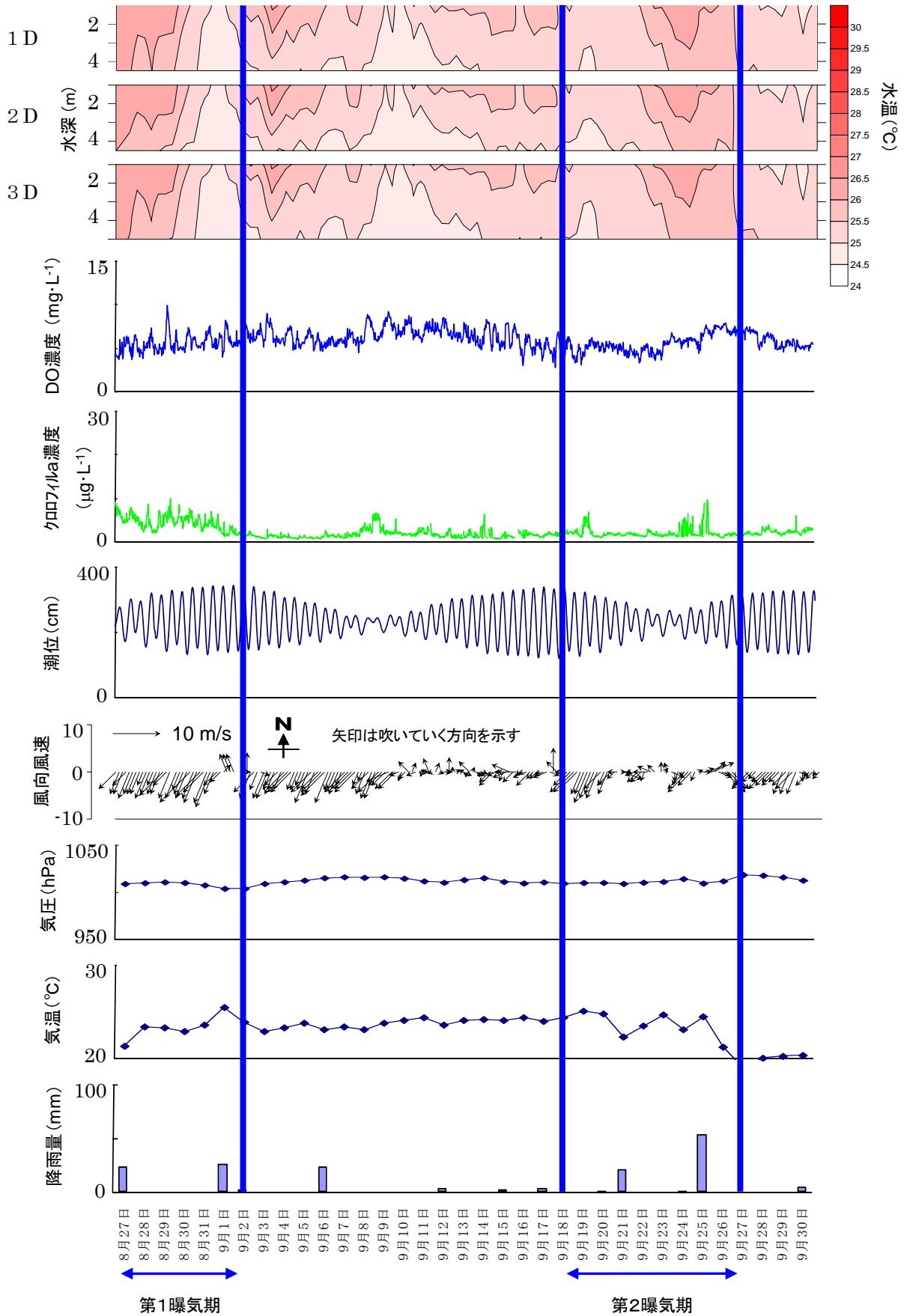


図8 佐保浦における連続観測結果ならびに連続観測中の潮汐・気象グラフ



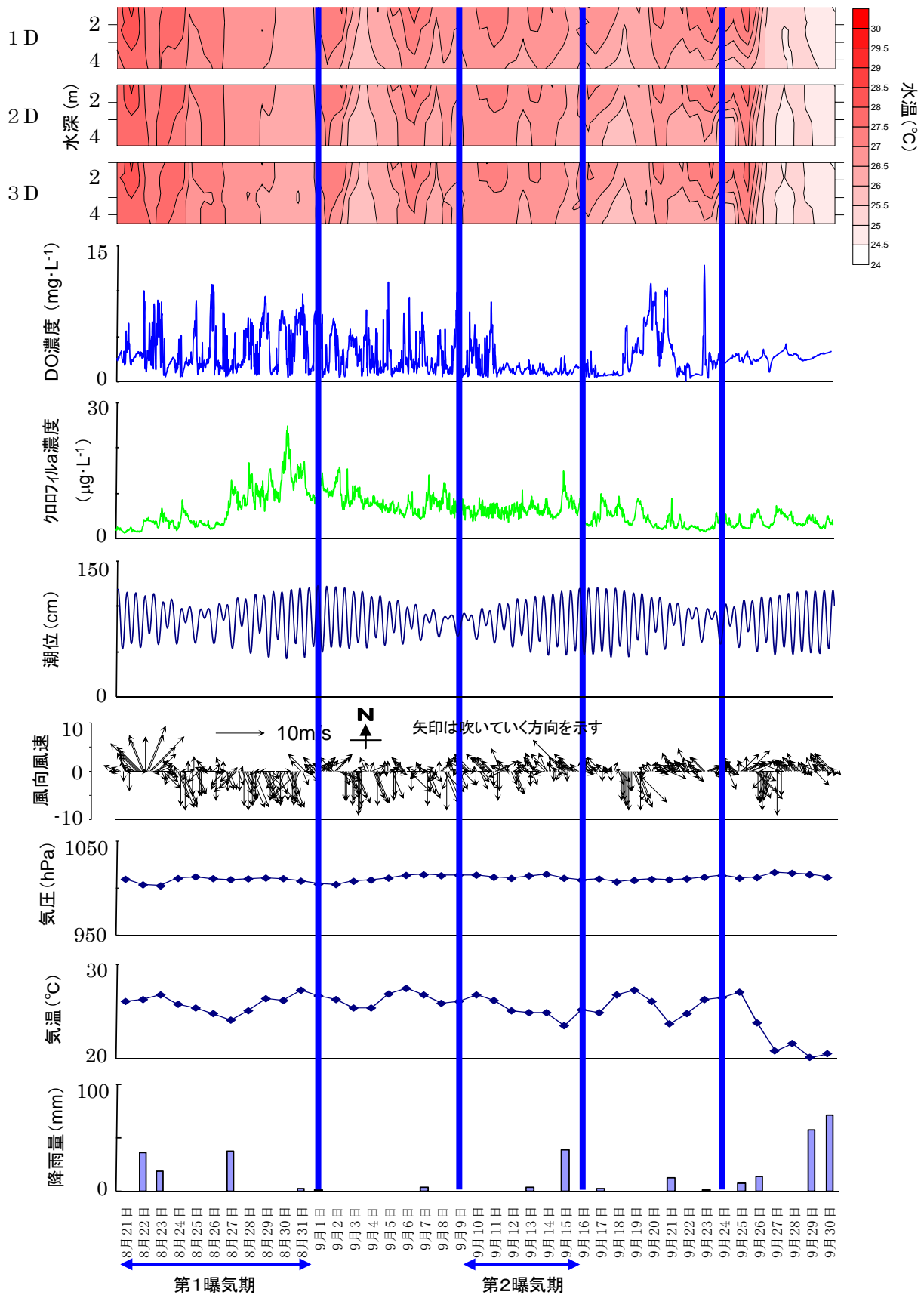


図9 形上湾における連続観測結果ならびに連続観測中の潮汐・気象グラフ

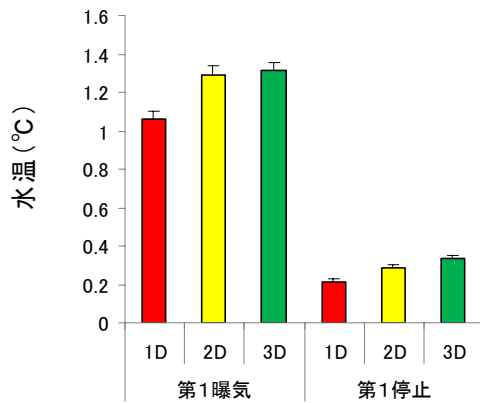


図10 長串湾における3Dの水温差平均

エラーバーは標準誤差を示す

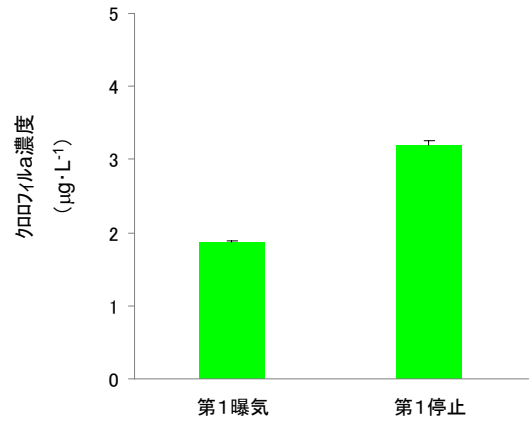


図11 長串湾におけるクロロフィル a 濃度の平均

エラーバーは標準誤差を示す

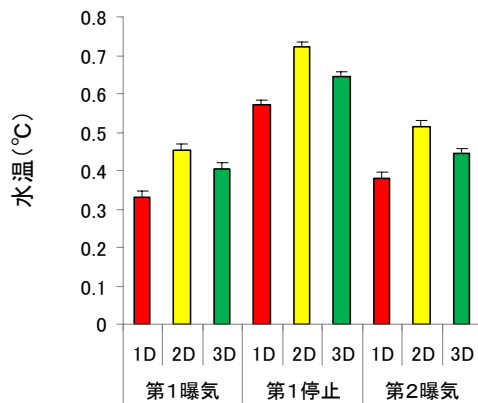


図12 佐保浦における水温差平均

エラーバーは標準誤差を示す

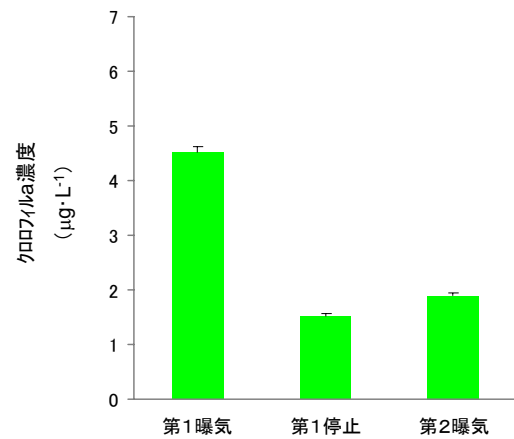


図13 佐保浦におけるクロロフィル a 濃度の平均

エラーバーは標準誤差を示す

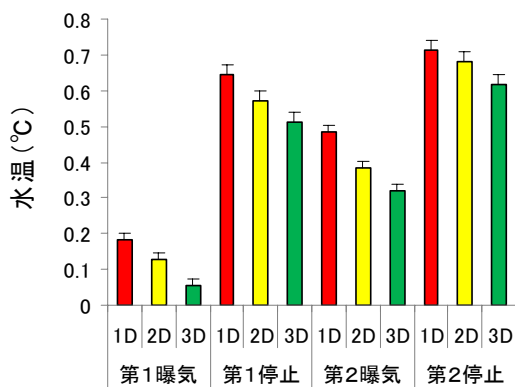


図14 形上湾における水温差平均

エラーバーは標準誤差を示す

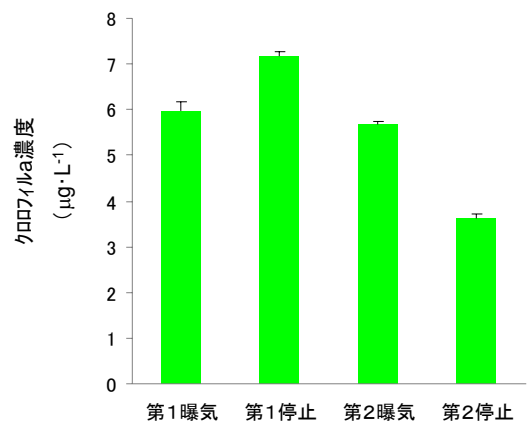


図15 形上湾におけるクロロフィル a 濃度の平均

エラーバーは標準誤差を示す

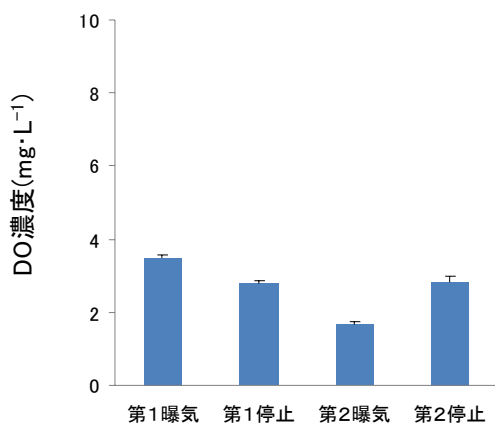


図 16 形上湾における DO 濃度の平均グラフ

エラーバーは標準誤差を示す

クロロフィル *a* 濃度の平均値が高かったことから、曝気によってクロロフィル *a* 濃度が上昇する可能性が確認された。しかしながら長串湾ではクロロフィル *a* 濃度が上昇する可能性は確認されるに至らなかった。これは今回行った曝気実験の曝気量では実験海域のクロロフィル *a* 濃度を上昇させるに足りなかったことが考えられた。これらの結果から佐保浦や形上湾のように水深が 5m 程度の浅い内湾であれば、本実験の曝気量で水温上昇の緩和とクロロフィル *a* 濃度の上昇が可能であると推察する。また、形上湾における平均 DO 濃度は曝気を停止していた期間よりも曝気を実施していた期間の方が高かった。このことから、曝気によって貧酸素化が軽減される可能性が示唆された。しかしながら、曝気を実施している期間でも DO 濃度  $4.3\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  を維持できなかったこと、さらに曝気を行っているにもかかわらず貧酸素状態を解消できなかったことから曝気量が不足していたことが考えられた。

今回の実験結果から曝気がアコヤガイの生残あるいは真珠品質に効果があったとは言い難い結果であった。しかしながら、曝気は少なくともアコヤガイの生残ならびに真珠品質に悪影響を及ぼさないことが実証された。今回実施した曝気実験は曝気期間が2ヶ月程度と短く断続的であったことから曝気の効果を確認されるに至らなかったと考えられる。曝気がアコヤガイの生残ならびに真珠品質に効果があることを実証するためには、長期的な連続曝気を実施する必要があると考えられた。今回曝気実験を行ったのはいずれも閉鎖性内湾である。そのため水温、DO 濃度およびクロロフィル *a* 濃度は湖沼や貯水池とは異なり潮汐による潮流などの影響

を受けることから曝気の効果が発揮されにくいことが予測された。しかしながら一方で今回の実験結果のように限られた曝気量でありながら曝気による効果が示された。このことから養殖海域ごとに曝気量を調整することで、曝気は水温上昇の緩和、餌料密度の上昇ならびに貧酸素化の軽減に有効な技術であると考えられる。

## まとめ

佐保浦での曝気は、水温上昇の緩和および餌料密度の上昇に効果がある可能性が示唆された。

形上湾での曝気は、水温上昇の緩和、餌料密度の上昇ならびに貧酸素化の軽減に効果がある可能性が示唆された。

長串湾での曝気は、気象あるいは潮汐などの影響によって曝気の効果を示すには至らなかった。

## 謝辞

今回の曝気実験を実施するため、長串湾での実験に多大なご協力をいただきました西村真珠有限会社の西村慎吾様、佐保浦での実験に多大なご協力をいただきました三洋真珠合資会社の犬束美樹様ならびに形上湾での実験に多大なご協力をいただきました有限会社琴海真珠の瀬戸協勇様に心から感謝申し上げます。また、真珠の品質を鑑定していただきました長崎県真珠養殖漁業共同組合の組合長ならびに理事の方々へ厚く御礼申し上げます。

表1 各海域におけるアコヤガイの生残数

長串湾						
	実験貝			対照貝		
	稚貝	二年貝	手術貝	稚貝	二年貝	手術貝
9月	252個	135個	54個	256個	135個	54個
10月	252個	135個	49個	256個	135個	48個
11月	251個	135個	48個	255個	135個	48個
12月	251個	135個	48個	255個	134個	48個
1月	251個	135個	45個	255個	134個	45個
生残率	99.6%	100%	83.3%	99.6%	99.3%	83.3%
佐保浦						
	実験貝			対照貝		
	稚貝	二年貝	手術貝	稚貝	二年貝	手術貝
9月	50個	50個	25個	50個	50個	25個
10月	49個	46個	24個	50個	46個	22個
11月	—	—	—	—	—	—
12月	44個	39個	23個	47個	42個	22個
1月	40個	35個	22個	44個	37個	20個
生残率	80%	70%	88%	88%	74%	80%
形上湾						
	実験貝			対照貝		
	稚貝	二年貝	手術貝	稚貝	二年貝	手術貝
8月	50個	50個	25個	50個	50個	25個
9月	39個	50個	25個	28個	50個	25個
10月	34個	49個	24個	25個	50個	21個
11月	34個	41個	20個	24個	48個	18個
12月	32個	38個	18個	23個	46個	17個
生残率	64%	76%	72%	46%	92%	68%

※佐保浦の11月は欠測

表2 各海域で生産された真珠の品質

		取出した真珠数	品質が良いもの	品質が悪いもの
長串湾	実験貝	44個	22個	22個
	対照貝	43個	18個	25個
佐保浦	実験貝	26個	9個	17個
	対照貝	25個	13個	12個
形上湾	実験貝	17個	2個	15個
	対照貝	18個	4個	14個

※真珠の品質は長崎県真珠養殖漁業共同組合による鑑定

### 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)ー研究の背景ー, 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)ーアコヤガイの殻体運動と摂餌活動との関係ー, 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)ー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ー, 長崎県環境保健研究センター所報, 資料, (2006)
- 4) 川井仁、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ー実験海域の特性についてー, 長崎県環境保健研究センター所報, 報文, (2007)
- 5) 浅野繭子:形上湾における海水流動とそれにもなう水質の変化, 長崎大学大学院生産科学研究科修士論文, 付図 ii, (2007)
- 6) 海上保安庁:平成 20 年潮汐表第1巻日本及び付近, 書誌第 781 号, 394-395, (2008)
- 7) (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)
- 8) 上野武:最近の水域浄化技術の概要, 用水と廃水, 39, 767-773, (1990)