

博多湾における養殖マガキの餌料指標としての クロロフィル *a* の変動

早川康博¹†, 伴佳一郎², 加茂 崇³, 江崎恭志⁴

Measurement of variations in chlorophyll-*a* as food index for oyster culture in Hakata Bay

Yasuhiro Hayakawa¹†, Keiichirou Ban², Takashi Kamo³
and Yasushi Ezaki⁴

Abstract : Daily measurement of chlorophyll-*a* as food index for oyster culture in Hakata Bay were taken by fluorescence method with chlorophyll meter from 2007 to 2009. High values of chlorophyll-*a* were coincident with observed red tides, with a total mean of 2.8 ($\mu\text{g l}^{-1}$). The 31 day running means of chlorophyll-*a* and other meteorological factors showed that several seasonal maxima of chlorophyll-*a* were occurred from spring to autumn, when water temperature, precipitation and solar irradiance exceeded 20 ($^{\circ}\text{C}$), 10 (mm) and 20 (MJ m^{-2}), respectively. Seasonal change in Apparent Relative Increase Rate (ARIR) of phytoplankton estimated from the measured chlorophyll-*a* coincided with that of precipitation. More positive correlation was found between the 7 day running means of ARIR with delay of 3 days and those of precipitation. Since the oyster culture rafts near the measurement station of chlorophyll-*a* were located in the west side of the bay-mouth, fluxes from open sea Genkai Nada could have great influence on oyster production. So, oysters in this area might owe most of their foods to the primary production from both the outside and the innermost of Hakata Bay where nutrients supplied by precipitation could accelerate the phytoplankton bloom to produce organic food materials.

Key words : Chlorophyll, Precipitation, Solar irradiance, Phytoplankton, Primary production, Oyster culture

諸 言

福岡県博多湾の西部湾口水域では、2000年の試験的なマガキ養殖開始以降、養殖量が順調に推移して、2008年度には生産量が215トンに達し、カキ焼き小屋での直販による消費量が増大する傾向にある^{1,2)}。これに伴って、養殖マガキの生存や成長に関する環境要因をモニターする必

要が生じている。一方、博多湾よりも早く1983年にマガキ養殖が開始され、2008年度に1000トンを超える生産量に達している豊前海では、環境要因の調査から秋期～冬期における養殖マガキの成長とクロロフィルの正相関が報告されている^{3,4)}。ろ過食性の養殖マガキの成長は、養殖水域の天然餌料に依存しているが、天然餌料には植物プランクトンやデトリタスなど海中の懸濁物質が含まれる。従

¹ 水産大学校生物生産学科 (Department of Applied Aquabiology, National Fisheries University)

² 愛媛県三崎漁業協同組合 (Misaki Fisheries Cooperative, Ehime Prefecture) (水産大学校生物生産学科平成21年度卒業生)

³ 鹿児島大学大学院連合農学研究科 (The United Graduate School of Agricultural Sciences, Kagoshima University) (水産大学校生物生産学科平成20年度卒業生, 水産学研究科平成22年度修了生)

⁴ 福岡県水産海洋技術センター海洋環境課 (Fukuoka Fisheries and Marine Technology Center, Marine Environment Division)

† 別刷り請求先 (Corresponding author) : hayakawa@fish-u.ac.jp

来の研究から、マガキがろ過した懸濁物質のうち約30～40%が排泄されることから、消化吸収される同化量を約10%として、ろ過懸濁物質のマガキによる捕捉率は約40～50%と推定され⁵⁾、懸濁物質の捕捉量は排泄量と同じ季節変化を示すことが報告されている⁶⁾。一般に成長量と排泄量は正相関するため、懸濁物質の捕捉量（懸濁物質濃度 \times ろ水量 \times 捕捉率）が養殖マガキの成長量を左右する。

養殖マガキによる上記懸濁物質の捕捉量を決定する環境要因としては、懸濁物質濃度が重要である。特に、懸濁物質中の植物プランクトンは炭素・窒素含有量がデトリタスなど他の有機物よりも高く、餌料として最重要である。そこで、植物プランクトン濃度の指標としてクロロフィル a を計測して、養殖マガキの餌料環境をモニターすることは、養殖マガキの持続的な生産維持や養殖管理にとって最も重要であると考えられる。

ただし、従来の採水調査では、当日の天候や海況に影響されやすく、養殖マガキ成長の餌料としてのクロロフィル a の変動を時系列的に測定するには、短い時間間隔で測定したデータが必要である。そこで本研究では、自記メモリー内蔵式のクロロフィル計を博多湾の定点に設置することにより、2007年～2009年の約3年間にわたる蛍光法によるクロロフィル a の日平均データを明らかにすることを目的とした。さらに、クロロフィル a 変動に対する気象的な要因である日間降水量や日照量の変動との関連も検討した。

測定方法

(1) 調査定点と調査期間

福岡県博多湾西部の唐泊地先に位置するマガキ養殖用筏に定点 H1 を設定した (Fig.1)。この定点の水深3m層に小型メモリークロロフィル濁度計 (Compact-CLW, アレック電子株式会社製; 以下、クロロフィル計と呼ぶ) を設置し、蛍光センサーによるクロロフィル a ($\mu\text{g l}^{-1}$) (蛍光法クロロフィル a と呼ぶ) とサーミスター抵抗による水温 ($^{\circ}\text{C}$) を測定した。測定層は、養殖筏にマガキを垂下している水深とほぼ同じ3m層とした。下記の調査月日に測定データを回収し、同時に、アセトン抽出法によるクロロフィル a 分析用の現場海水サンプルをバンドン採水器で各層 (0m, 1m, 3m, 5m, 6m) から採水した。

調査月日: 2007年2月6日, 4月24日, 6月22日, 8月20日, 10月18日, 12月18日, 2008年2月7日, 4月24日, 6月26日, 9月8日, 10月30日, 12月18日, 2009年2月18日, 4月22日, 6月24日, 8月18日, 9月29日, 12月17日。

このように、約2ヶ月毎の測定データの回収とセンサー部の付着物除去や電池交換を繰り返して、約3年間 (2007年2月～2009年12月) の蛍光法クロロフィル a と水温の日平均補正データファイルを作成した。ただし、蛍光法クロロフィル a は、後述のような方法で補正した。

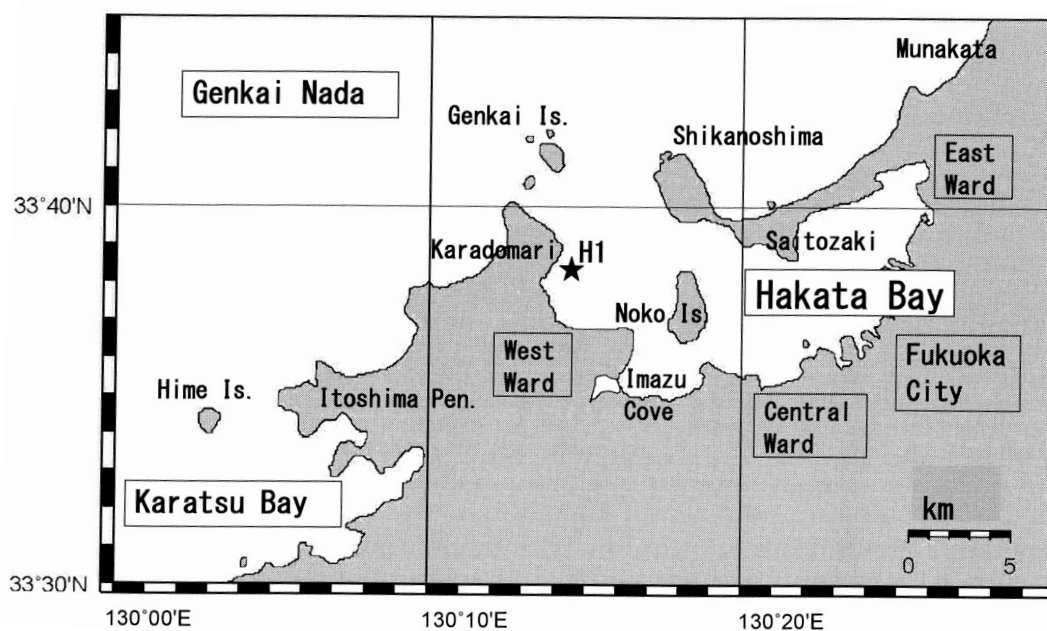


Fig. 1 Location of monitoring station (H1) for chlorophyll and water temperature in Hakata Bay

(2) 現場海水サンプルと珪藻培養液のアセトン法クロロフィル a

クロロフィル計による蛍光法クロロフィル a との比較および補正のために現場海水と室内実験の珪藻培養液についてアセトン法でクロロフィル a を算出した。なお、現場海水サンプルの処理は、グラスファイバーフィルター (47mm GFC) を用いてろ過後、ろ紙を乾燥冷凍して持ち帰り 90%アセトン中にて一昼夜冷蔵庫で抽出し、吸光度を測定して計算式からクロロフィル a を算出した⁷⁾。これをアセトン法クロロフィル a と呼ぶ。

珪藻培養液 (*Chaetoceros gracilis*, ヤンマー製) をろ過海水で希釈し、水温 20℃, 照明 3000ルクス 24時間連続点灯で培養した。この培養液をろ過海水で適宜に 0 ~ 40 ($\mu\text{g l}^{-1}$) 程度に希釈して数段階の希釈培養液を用意し、黒い円筒容器中でクロロフィル計による蛍光法クロロフィル a を測定すると同時に、この希釈培養液のアセトン法クロロフィル a を分析した。

(3) クロロフィル計による蛍光法クロロフィル a の補正

クロロフィル計のセンサー仕様は、クロロフィル a ($\mu\text{g l}^{-1}$): 蛍光測定, 測定範囲 0 ~ 400 $\mu\text{g l}^{-1}$, 分解能 0.01 $\mu\text{g l}^{-1}$, 精度 $\pm 1\%$ (0 ~ 200 $\mu\text{g l}^{-1}$), および、水温 (°C): サーマスタ抵抗法, 測定範囲 -5 ~ 40°C, 分解能 0.001°C 精度 $\pm 0.05^\circ\text{C}$, であった。測定は、バースト時間 30 分間隔でインターバル 1 秒ごとに 10 個の測定データを得た。このデータを平均して 30 分毎の測定値とし、この測定値 48 個を平均した日平均データの約 2 ヶ月間のファイルを約 3 年間分に相当する 17 個作成した (日平均原データファイル)。

クロロフィル計の回収と再設置までの約 1 日間にデータの欠測が生じるため、日平均原データファイルの相互に継

続する測定値に基づいて、蛍光法クロロフィルと水温データを線形補間した (補正 1)。また、蛍光法クロロフィルが極端に高い測定値の場合、測定値の常用対数を用いて全データの標準偏差と平均値を求め (日平均原データファイル毎)、標準偏差の 3 倍を越える数値を異常値として削除し、その前後の測定値を用いて線形補間した (補正 2)。

さらに珪藻培養液によるアセトン法クロロフィル a の分析値とクロロフィル計 (機番: #664, #825) の蛍光法クロロフィル a 測定値の散布図から、両者の回帰式を求めた (Fig.2)。アセトン法クロロフィル a を Y, 蛍光法クロロフィル a を X, とし、以下の回帰式と決定係数 (R^2) を得た。相関係数 (R) は 0.9 以上となり、これらの回帰式を用いて測定値 X を補正值 Y に置き換えた (補正 3)。ただし、現場海水のクロロフィル a は、10 ($\mu\text{g l}^{-1}$) 以下の低濃度が多く、低濃度での回帰式にある程度の誤差があることに留意する必要がある。

機番 #664 : $Y = 1.168 X + 0.610$ ($R^2=0.864$, $R=0.930$)

機番 #825 : $Y = 1.365 X + 0.491$ ($R^2=0.866$, $R=0.931$)

なお、水温値はクロロフィル計の測定値と他の電気水温計 (ATB-1, アレック電子社製) や棒状水銀水温計との良い一致のため補正 1 以外の補正は必要なかった。以上の様な補正 1 ~ 3 によって、約 3 年間にわたる日平均補正值のデータファイルを作成した (日平均補正データファイル)。

(4) 降水量データと日射量データ

海洋のクロロフィル a に影響を与える要因として、降水量のデータと日射量データを検討した。気象庁ホームページ『気象統計情報』より調査地点 H1 に最も近い福岡市のアメダスデータ (2007 年 ~ 2009 年) から、日間の降水量 (mm) と日間の全天日射量 (MJ m^{-2}) のデータを使用した⁸⁾。ここで、全天日射量は、全天からの直達日射量と散乱日射量の和の日間累積値である

結果と考察

(1) 蛍光法クロロフィル a と水温の経年的および季節的変動

日平均補正データファイルに基づいて、2007 年 2 月 7 日から 2009 年 12 月 17 日までの博多湾湾口近くの定点 H1 における蛍光法クロロフィル a と水温の日平均補正データを時系列的に示した (Fig.3-1)。現場海水 3m 層のアセトン法クロロフィル a 値を図の中に重ねて示した。蛍光法クロロフィル a が 10 ($\mu\text{g l}^{-1}$) を超える植物プランクトン大

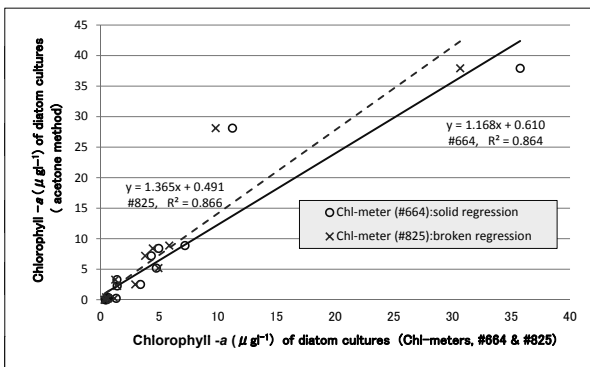


Fig.2 Correlation between Chlorophyll- a of cultured diatom measured by Chl-meter and acetone method

Table. 1 Red tides observed in Hakata Bay, 2007~2009

Period	Dominant species	Observation area	Max. cell density (cells/ml)
2007/Mar.08~May.09	<i>Gephyrocapsa oceanica</i>	Hakata Bay~Munakata	21,190
Jun.07~Jun.12	<i>Heterosigma akashiwo</i>	The inner most of Hakata Bay	26,200
Jun.22~Jun.27	<i>Skeletonema costatum</i>	The inner most of Hakata Bay	12,950
Jul.06~Jul.09	<i>Heterosigma akashiwo</i>	The inner most of Hakata Bay	42,100
Jul.09~Jul.16	<i>Skeletonema costatum</i> <i>Heterosigma akashiwo</i> <i>Prorocentrum triestinum</i>	Hakata Bay Imazu Cove Imazu Cove	17,800 106,800 66,000
Aug.06~Aug.16	<i>Chaetoceros costatum</i> <i>Prorocentrum triestinum</i>	The inner most of Hakata Bay	12,100 2,050
Aug.23~Aug.28	<i>Chaetoceros</i> sp. <i>Karenia mikimotoi</i>	The inner most of Hakata Bay	7,475 725
Sep.12~Sep.18	<i>Leptocylindrus</i> sp. <i>Cheatoceros</i> sp. <i>Skeletonema</i> sp.	The inner most of Hakata Bay ~Imazu Cove	14,875 9,100 8,125
Sep.20~Sep.25	<i>Skeletonema</i> sp. <i>Thalassiosira</i> sp. <i>Cheatoceros</i> sp.	The inner most of Hakata Bay	24,500 6,150 2,400
2008/May15~May29	<i>Prorocentrum minimum</i> <i>Prorocentrum dentatum</i>	Central pier of Hakata Bay Central pier of Hakata Bay ~Saitozaki	35,000 19,000
Jun.04~Jun.13	<i>Heterosigma akashiwo</i>	East area of Hakata Bay	30,000
Jun.23~Jun.30	<i>Skeletonema costatum</i>	The entrance of Hakata Bay ~Imazu Cove	25,000
2009/May25~Jul.06	<i>Nitzschia</i> sp.	Central Ward~West Ward of Fukuoka City	47,200
Jul.07~Jul.30	<i>Skeletonema</i> sp.	East Ward~West Ward of Fukuoka City	29,000
Jul.31~Aug.09	<i>Prorocentrum minimum</i>	East Ward~West Ward of Fukuoka City	13,800
Sep.24~Oct.13	<i>Prorocentrum sigmoides</i>	East Ward~West Ward of Fukuoka City	4,000

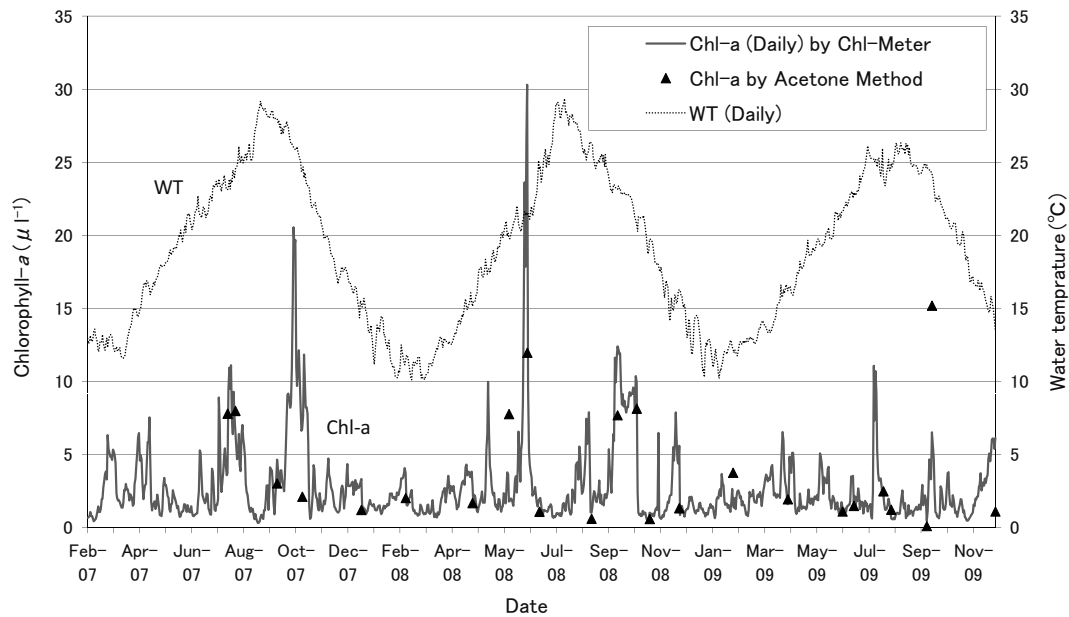


Fig. 3-1 Daily means of Chlorophyll-a (Chl-a) and Water Temperature (WT) in Hakata Bay.

増殖期と見られる時期が2007年、2008年では夏と秋の2回みられた。2009年でも夏に一度、秋には $10 \mu\text{g l}^{-1}$ には届かないが、 $5 \mu\text{g l}^{-1}$ を超えて急速に増える期間がある。さらに、福岡県水産海洋技術センターによる赤潮の観測結果と比較すると (Table 1)⁹⁾、2007年7月の *Heterosigma* 属など、9月の *Skeletonema* 属など、2008年5月の *Prorocentrum* 属、6月の *Heterosigma* 属や *Skeletonema* 属、2009年7月の *Skeletonema* 属による赤潮プランクトン最大細胞数密度の出現時期と蛍光法クロロフィル *a* のピーク期がほぼ一致した。ただし、観測値はないが、2008年9月～10月にも蛍光法クロロフィル *a* によるピークが認められた。また、現場海水サンプルのアセトン法クロロフィル *a* は、蛍光法クロロフィル *a* と大体一致するが、2007年10月、2008年6月、2009年9月のように両者にかかなりの差異がある場合も見られた。差異の要因としては、クロロフィル計の測定層付近や採水層付近における植物プランクトンの時空間分布の大きな変動や浮遊物の影響も考えられる。植物プランクトンが急激に変動してクロロフィル *a* にも時空間分布の大きな変動が生じる場合、いわば瞬間的な採水によるアセトン法クロロフィル *a* の方が、実際の現場の動態から大きく相違することも考えられる。

蛍光法クロロフィル *a* データ (データ数 $n = 1046$) の平均 $2.8 (\mu\text{g l}^{-1})$ 、標準偏差 $2.8 (\mu\text{g l}^{-1})$ 、範囲 $0.3 \sim 30.3 (\mu\text{g l}^{-1})$ であった。経年的には、2007年 ($n = 329$) が平均 $3.3 (\mu\text{g l}^{-1})$ 、標準偏差 $3.0 (\mu\text{g l}^{-1})$ 、範囲 $0.3 \sim 20.6$

$(\mu\text{g l}^{-1})$ 、2008年 ($n = 366$) が平均 $3.1 (\mu\text{g l}^{-1})$ 、標準偏差 $3.4 (\mu\text{g l}^{-1})$ 、範囲 $0.6 \sim 30.3 (\mu\text{g l}^{-1})$ 、2009年 ($n = 351$) が平均 $2.2 (\mu\text{g l}^{-1})$ 、標準偏差 $1.5 (\mu\text{g l}^{-1})$ 、範囲 $0.5 \sim 11.1 (\mu\text{g l}^{-1})$ 、と2009年は平均値がやや減少した。

水温データ (データ数は蛍光法クロロフィル *a* と同じ) の平均 $19.1 (^\circ\text{C})$ 、標準偏差 $5.2 (^\circ\text{C})$ 、範囲 $10.1 \sim 29.4 (^\circ\text{C})$ であった。2007年～2009年の平均水温は、各々 $20.0 (^\circ\text{C})$ 、 $18.7 (^\circ\text{C})$ 、 $18.7 (^\circ\text{C})$ で、範囲 $11.6 \sim 29.4 (^\circ\text{C})$ 、 $10.1 \sim 29.2 (^\circ\text{C})$ 、 $10.2 \sim 26.3 (^\circ\text{C})$ であった。他の年に比べて2007年の冬期最低水温は $1.5 (^\circ\text{C})$ ほど高く、2008年の夏期最高水温は他の年よりも1ヶ月ほど早く出現し、2009年の夏期最高水温は約 $3 (^\circ\text{C})$ ほど低かったことが経年的な特徴であった。

次に、蛍光法クロロフィル *a* の季節的変動を検討するために、31日間の移動平均 (当該日と前後15日の平均) を算出した ($n = 1015$)。また、植物プランクトンの増減速度の指標として、見かけの相対増加率 (Apparent Relative Increase Rate: ARIR) の日別値を次式で算出した。

$$\text{ARIR} (\text{d}^{-1}) = \ln (Y_{i+1}/Y_i)$$

ここで、 Y_i は測定日 i の蛍光法クロロフィル *a*、 Y_{i+1} は翌日の蛍光法クロロフィル *a*、 \ln は自然対数である。ARIRについても、31日間の移動平均を算出し、蛍光法クロロフィル *a* の日平均および31日移動平均と共に図示した (Fig.3-2)。

蛍光法クロロフィル *a* の日平均は大きく変動したが、31

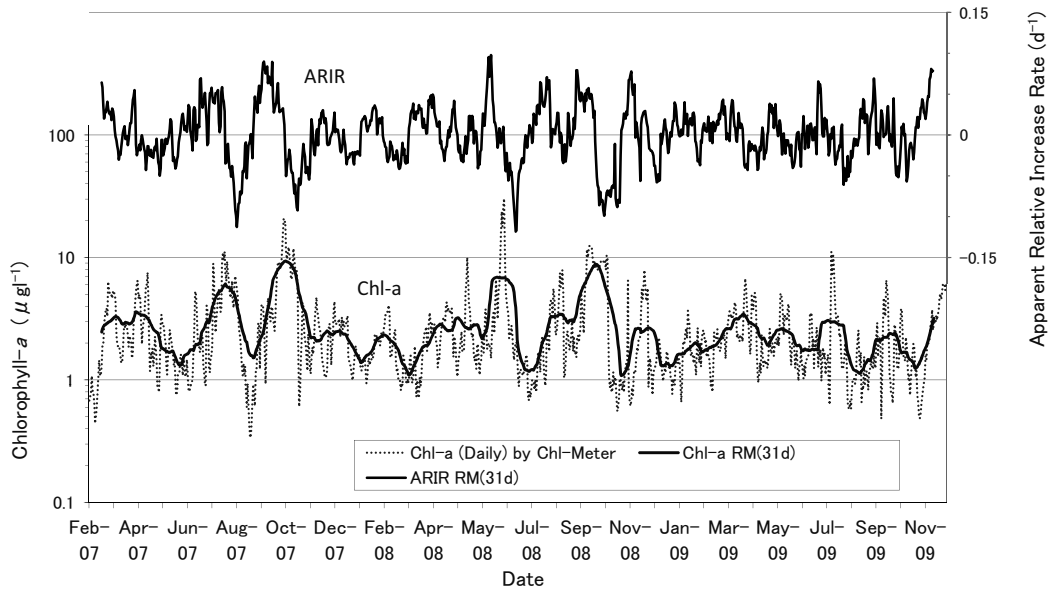


Fig. 3-2 Running means (31days) of Chlorophyll-*a* and Apparent Relative Increase Rate (ARIR)

日移動平均（データ数 $n = 1015$ ）は、平均 $2.8 (\mu\text{g l}^{-1})$ 、範囲 $1.1 \sim 9.4 (\mu\text{g l}^{-1})$ であった。季節的ピークに相当する $3.0 (\mu\text{g l}^{-1})$ 以上の値は、2007年3月～4月、7月および9月～10月、2008年5月～6月および9月～10月、また、2009年3月および7月に認められた。このように、31日移動平均は、前述した日平均と赤潮観測の結果を反映した季節的変動を示した。また、各年とも冬期の数値は低くなる傾向があった。

ARIRの日別全データ（データ数 $n = 1045$ ）の平均 $0.002 (\text{d}^{-1})$ 、日変動は大きく、標準偏差 $0.33 (\text{d}^{-1})$ 、範囲 $-2.06 \sim 1.68 (\text{d}^{-1})$ であった。このARIRがすべて植物プランクトンの2分裂による増減だとすれば、日間分裂回数の範囲は、 $-3.0 \sim 2.4$ （回）となる。博多湾に出現した赤潮原因プランクトン（Table 1）の天然群や培養実験における日間分裂回数は、*Heterosigma akashiwo* で $1.0 \sim 2.1$ （回）、*Prorocentrum minimum* で $0.55 \sim 3.3$ （回）、*Skeletonema costatum* で $2.3 \sim 4.3$ （回）などの報告がある¹⁰⁾。日別ARIRの正值は、赤潮時の増加率としても *Skeletonema* 属を除いて過剰であり、ARIRの増減には植物プランクトンの分裂増殖のほかに、流動や生物的走性による集積・発散および養殖マガキなどのろ過動物による捕食や細菌やウイルスの感染などによる消費・死滅の要因も大きいことを示している。なお、ARIRの年平均値が小さいことは、年間を通じての蛍光法クロロフィル *a* の現存量はほとんど増加しなかったことを反映している。これは、上述のよう

に増加に匹敵する減少があったため、結果として湾外流出や底泥への沈殿によって除去されたと考えられる。

また、季節変動を検討するために算出したARIRの31日移動平均（データ数 $n = 1015$ ）は、平均 $0.0004 (\text{d}^{-1})$ 、範囲 $-0.12 \sim 0.10 (\text{d}^{-1})$ であった（Fig.3-2）。図が示すように、この移動平均は、当然ながら蛍光法クロロフィル *a* の増減に対応した正負の値を示し、通常の増殖過程の日間分裂回数 0.1 （回）に相当する $0.07 (\text{d}^{-1})$ 以上となる時期は、蛍光法クロロフィル *a* の季節的ピークとほぼ一致した。特に2007年と2008年の夏と秋の数回の植物プランクトンの大增殖期はそれに先んじたARIR値の大きなピークとして示された。2009年の夏と秋にもARIRの限定的な増加が認められたが、他の年ほど顕著ではなかった。この理由として、後述のように梅雨の降水期における栄養塩供給の増大と日照量低下が植物プランクトンの増殖にプラスとマイナスの相殺的な影響を及ぼした可能性が考えられる。また、2009年秋の降水量は、2007年と2008年よりも低いまま推移した。2009年と他の年の違いは、いずれの年も2月～6月までARIRの変動は $0.07 (\text{d}^{-1})$ 以下の比較的低いレベルで変動しているため、夏と秋の植物プランクトンの増殖レベルの増加が、クロロフィル *a* の年平均値に大きく影響したと考えられる。

(2) ARIRと気象要因の季節変動

蛍光法クロロフィル *a* の季節変動に影響を及ぼす気象

要因を検討するために、ARIR と日間降水量と日間の全天日射量各々の 31 日間移動平均を比較した (Fig.4)。なお、日別降水量 (データ数は水温と同じ) の平均は 4.4 (mm)、範囲は 0 ~ 187 (mm) であった。2007 年 ~ 2009 年の平均降水量は、各々 3.5 (mm)、4.9 (mm)、4.8 (mm) で、最大値 111 (mm)、82.5 (mm)、187 (mm) であった。2009 年の蛍光法クロロフィル *a* や水温の年平均は、2007 年や 2008 年より低く、降水量は他の年よりやや多かった。図示したように移動平均の降水量と ARIR の季節変動は良く対応し、特に 10 (mm) 以上の降水量は、2007 年と 2008 年の夏と秋の ARIR のピーク時期とよく一致した。なお、2009 年 6 月 ~ 7 月の降水量約 20 (mm) の期間には ARIR の小規模な増加が繰り返された。全体的に ARIR の小規模な増加も降水量とよく対応する場合が多い。降水量と ARIR の季節変動が対応する理由は、河川由来の栄養塩の供給量が増加して植物プランクトン増殖速度が増加するためであろう。ただし、ARIR の増加には、分裂増殖以外の諸要因を含むため、降水量が通常より多い場合に ARIR への影響が顕著になると考えられる。

全天日射量の全データ (データ数は水温と同じ) の平均 13.8 (MJm⁻²)、範囲 0 ~ 28.7 (MJm⁻²) であった。2007 年 ~ 2009 年の平均値は、各々 14.8 (MJm⁻²)、13.5 (MJm⁻²)、13.1 (MJm⁻²) で、最大値 28.7 (MJm⁻²)、28.5 (MJm⁻²)、28.3 (MJm⁻²) であった。図示した 31 日間移動平均は全天

日射量の季節変動を反映し、各年とも 5 月と 7 月下旬 ~ 9 月初旬の極大期 2 回と 6 月と 12 月 ~ 1 月の極小期 2 回が見られた。全天日射量の初夏 ~ 秋の極大は ARIR の増加ピークの出現頻度とある程度対応するが、ARIR の季節的な変動と必ずしも対応しない。6 月の極小は、降水量の増加と関連して ARIR の減少と対応しないが、12 月 ~ 1 月の極小は、ARIR の増加ピーク値が冬に小さいことへの関連を示唆する。

蛍光法クロロフィル *a* および ARIR の季節的ピークは、水温 20 (°C) 以上、降水量 10 (mm) 以上、全天日射量 20 (MJm⁻²) 以上の春 ~ 秋に出現した。特に、降水量と ARIR の季節変動がよく対応したが、陸水からの栄養塩供給と共に水温や日射量が植物プランクトン増殖の重要な条件である点も明らかである。

(3) ARIR と降水量および日射量の相関関係

ARIR の増減に影響を及ぼす要因のうち、ARIR と降水量、および、ARIR と全天日射量の移動平均に関する相関関係を比較した。各々の移動平均値間の相関係数は、移動平均する日数に応じて日変動から季節変動にわたる両者の相関の程度を反映する。そこで、日別データ、3 日間移動平均、7 日間移動平均、31 日間移動平均について、データ相互に時間的な遅れ無しの条件 (遅れ = 0 日) で相関係数を比較した。ARIR と降水量の各々の R² (R) は、0.0002

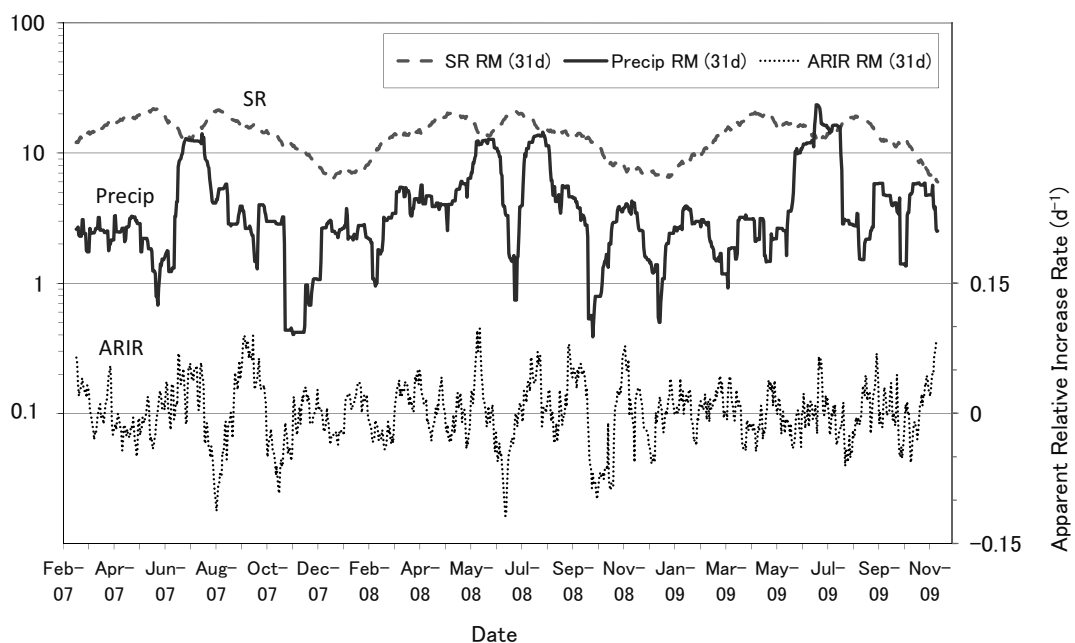


Fig. 4 Running means of Precipitation, Solar Irradiance and Apparent Relative Increase Rate

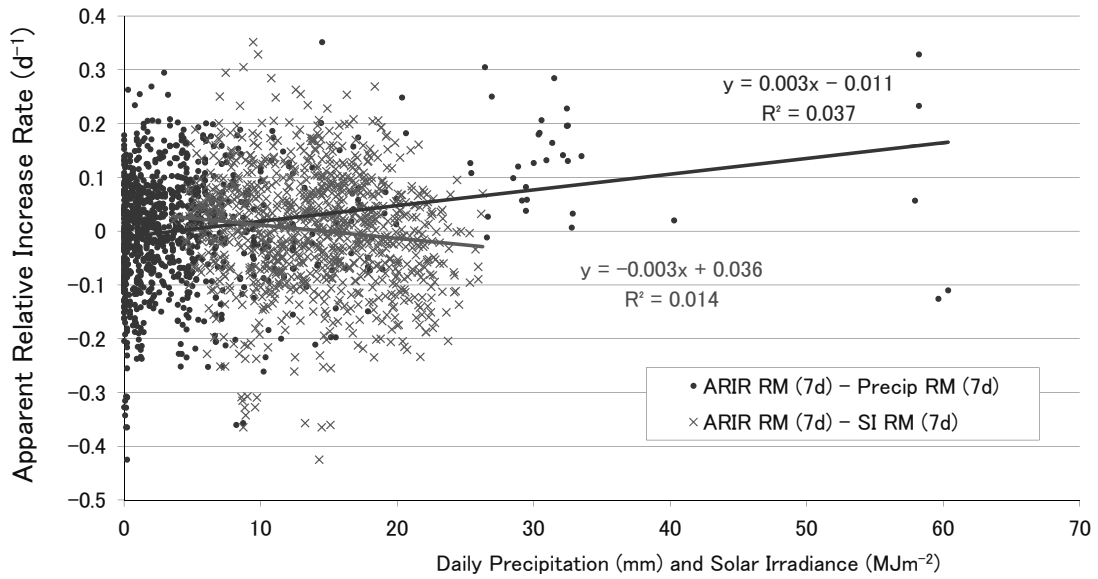


Fig. 5-1 Correlation of Running means (7 days) of Apparent Relative Increase Rate with Daily Precipitation and Solar Irradiance (2007 ~ 2009)

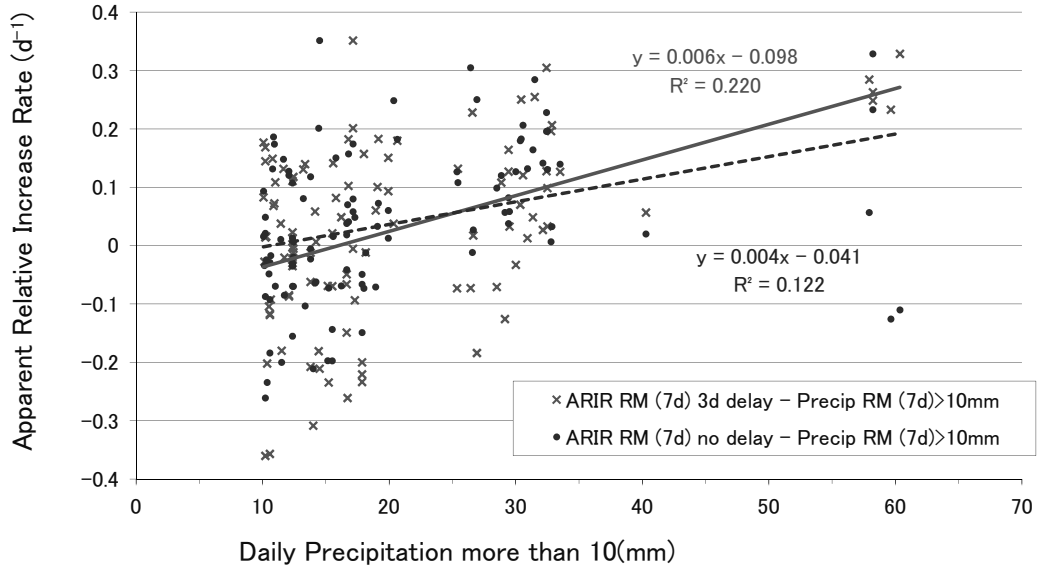


Fig. 5-2 Correlation between Running means (7 days) of Apparent Relative Increase Rate and Daily Precipitation more than 10 (mm) , 2007 ~ 2009.

(+0.014), 0.007 (+0.084), 0.037 (+0.190), 0.042 (+0.206)であった。ARIR と全天日射量では, 0.002 (+0.042), 0.004 (-0.064), 0.014 (-0.118), 0.010 (-0.101)であった。例として7日間移動平均の散布図を示した (Fig.5-1)。ARIR と降水量は日別データや3日間移動平均より, 7日間や

31日間の移動平均において相関係数が増加した。一方, ARIR と全天日射量との相関はどの移動平均においても低く, 負相関も見られた。負相関は梅雨6月の日射が低下する時期に降水量が増加し ARIR も増加する影響と考えられる。散布図 (Fig.5-1) が示すように, 降水量の移動平均は

移動平均の日数が短いと降水量ゼロ付近の分布が多く、相関係数を低下させるが、日数が長いと相関係数がやや増加する傾向がある。また、降水量が多いと ARIR と正相関する傾向が示されている。

降水量が多い場合の ARIR と降水量の相関については、降水量の 7 日間移動平均が 10 (mm) 以上のデータを選び出し (データ数 = 106), 当日 (遅れ = 0 日) または数日後 (遅れ = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 日) の ARIR の 7 日間移動平均との相関を算出した。これは降水の数日後に植物プランクトンが増殖すると考えられるからである。その結果, ARIR の遅れ = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 日に対する各々の R^2 は, 0.122, 0.166, 0.193, 0.220, 0.175, 0.091, 0.030, 0.001, であった。3 日後 ARIR との相関係数が最大 ($R = +0.47$) となった (Fig.5-2)。これは、降水量が多い場合に 3 日遅れで湾内の ARIR 増加と正相関する傾向を示している。

(4) 博多湾の西部湾口水域のマガキ養殖場における餌料環境

従来から、赤潮の発生予察に関連する要因として、大別して植物プランクトンの分裂増殖、気象や海象条件などによる集積の 2 大要因とその相互作用が様々に議論されてきた¹¹⁾。これらの議論と同様に、博多湾において植物プランクトンが大増殖する環境条件は、湾内の高水温、降水後の栄養塩供給と晴天継続による日射量の増加、および弱い風浪による湾内水の滞留である。蛍光法クロロフィル a の約 3 年間の平均値は $2.8 (\mu \text{g l}^{-1})$ であるが、養殖マガキが実施されている岩手県大船渡湾中部では毎月 10 年間 (1985 年 1 月 ~ 1994 年 12 月) のアセトン法クロロフィル a 平均値が、全層 (0, 5, 10, 15, 20, 25m 層) で $1.9 (\mu \text{g l}^{-1})$ 、表層から底層の各層で、 $3.1 (\mu \text{g l}^{-1})$, $2.3 (\mu \text{g l}^{-1})$, $1.9 (\mu \text{g l}^{-1})$, $1.7 (\mu \text{g l}^{-1})$, $1.4 (\mu \text{g l}^{-1})$, $1.0 (\mu \text{g l}^{-1})$ であった¹²⁾。アコヤガイとマガキの養殖が実施されている長崎県大村湾内の形上湾湾口部においては、1 年間 (2006 年 2 月 ~ 2007 年 2 月) の蛍光法クロロフィル a の 3m 層平均値が $5.8 (\mu \text{g l}^{-1})$ であった (早川康博: 未発表データによる)。博多湾の調査地点 3m 層のクロロフィル a は、大船渡湾と同レベルで形上湾より低い。また、従来の水質環境調査により、博多湾の湾奥水域は富栄養化しており貧酸素化も顕著で、この湾奥水は志賀島寄りの東部湾口水域から湾外の玄界灘に流出するが、西部湾口水域は比較的富栄養化や貧酸素化が顕著でないことが報告されている¹³⁾。本研究の調査定点は博多湾の西部湾口水域のマガキ養殖場に位置し (Fig.1), 冬の北西季節風や夏の南西季節風さらに潮流による流動の影響

を受けて、上記のように東部湾口部から低密度の湾内水が流出する一方で、西部湾口部から湾外水が流入すると考えられる。一般に、半閉鎖的な内湾では、潮流やどの方向への吹送流によっても表層または底層を通じて湾外水との海水交換が生じる。このため、特に湾口部は湾外水との海水交換による影響が大きい。例えば、大船渡湾では、栄養塩やクロロフィルの季節変化や空間分布には湾奥部と湾口部で違いがあり、湾口部では湾外の沖合水の時空間変化を反映することが知られている¹⁴⁾。養殖マガキの天然餌料には植物プランクトンやデトリタスなど海中の有機懸濁物質が含まれるが、西部湾口水域は当該水域での基礎生産のみならず湾外の玄界灘からの流入や湾奥水の再循環が餌料供給に大きく貢献している可能性が考えられる。陸水流入が集中する湾奥からの栄養塩が湾外に供給され、そこで基礎生産が増加する可能性も考えられる。また、マガキ養殖場からの有機物の沈降フラックスが底層付近に堆積し滞留する場合は、貧酸素化の原因になるが、海水交換によって貧酸素化は軽減される。このように、博多湾の西部湾口水域は、玄界灘との流入・流出過程によって、流入で餌料が供給され流出で貧酸素化が軽減される可能性があり、マガキ養殖場として好都合な特徴があると考えられる。本研究で測定したクロロフィル a は、一般の植物プランクトンの指標であり、養殖マガキの餌料生物の指標となる一方、近年は渦鞭毛藻の赤潮による二枚貝類の大量へい死が発生する例が報告されている¹⁵⁾。このため、養殖マガキ環境条件のモニタリングにおいて、プラスとマイナスの要因の監視、すなわちクロロフィル a のみならず植物プランクトンの種同定が重要であろう。

要 約

博多湾において蛍光法クロロフィル a の日別データ (2007 年 ~ 2009 年) を測定し、季節的ピークと観測された赤潮プランクトン最大細胞数密度の出現時期がほぼ一致した。また、全平均 $2.8 (\mu \text{g l}^{-1})$ であった。蛍光法クロロフィル a の季節的ピークは、水温 $20 (^\circ\text{C})$ 以上、降水量 $10 (\text{mm})$ 以上、全天日射量 $20 (\text{MJm}^{-2})$ 以上の春 ~ 秋に出現した。植物プランクトンに対する増減速度の指標として、蛍光法クロロフィル a に基づいた見かけの相対増加率 (ARIR) を算出し、ARIR と降水量の 31 日間移動平均において両者の季節変動が良く対応し、特に $10 (\text{mm})$ 以上の降水が夏と秋の植物プランクトン大増殖期とよく一致した。また、両者の相関は、3 日遅れの ARIR と降水量の

7日間移動平均の間で正相関を示した ($R=+0.47$)。

本研究の調査定点は博多湾の西部湾口水域のマガキ養殖場に位置し, 冬の北西季節風や夏の南西季節風さらに潮流による流動の影響を受けている。養殖マガキの天然餌料には植物プランクトンやデトリタスなど海中の有機懸濁物質が含まれるが, 西部湾口水域における餌料供給には当該水域での基礎生産のみならず湾外の玄界灘からの流入が大きく貢献している可能性が考えられる。博多湾の西部湾口水域は, 玄界灘との流入・流出過程において, 流入で餌料が供給され流出で貧酸素化が軽減される可能性があり, マガキ養殖場として好適であると考えられる。

謝 辞

本研究の一部は, 科学研究費補助金「内湾における養殖マガキ成長による環境浄化と沈殿粒子フラックスの季節変動」(基盤研究C:2006年度~2008年度)によって実施した。また, 調査や測定の実施には, 福岡県水産海洋技術センターおよび福岡市漁協唐泊支所の御協力と独立行政法人水産大学の卒論生各氏の助力を得たことを深く感謝します。

文 献

- 1) 渡辺大輔:福岡湾におけるイワガキ養殖事例とその展望. 福岡県水海技セ研報, **18**, 165-168 (2008)
- 2) 濱田弘之, 惠崎摂, 渡辺大輔:筑前海における耐波性かき養殖筏試験. 福岡県水海技セ研報, **20**, 127-130 (2010)
- 3) 徳田眞孝, 濱田弘之, 神園真人, 江藤拓也:豊前海における養殖カキの特性と環境要因との関係. 福岡県水海技セ研報, **1**, 155-163 (1993)
- 4) 中川浩一, 俵積田貴彦, 中村優太:近年の「豊前海一粒かき」の成育状況と漁場環境との関係. 福岡県水海技セ研報, **19**, 109-114 (2009)
- 5) 楠木豊:マガキのろ過水量の測定法について. 日本水産学会誌, **43**, 1069-1076 (1977)
- 6) 楠木豊:マガキ排せつ物量と懸濁物捕捉量との関係. 日本水産学会誌, **44**, 1183-1185 (1978)
- 7) 日本海洋学会:植物色素の定量法, 日本海洋学会(編), 海洋環境調査法, 恒星社厚生閣, 東京, 373-381 (1979)
- 8) 気象庁:気象庁ホームページ, 気象統計情報 (2011), <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 9) 福岡県水産海洋技術センター:平成19~21年における赤潮による漁業被害状況 (unpublished), (2009)
- 10) 飯塚昭二:群成長・生物間関係・行動生態. 岡市友利(編), 赤潮の科学, 恒星社厚生閣, 東京, 91-123 (1987)
- 11) 吉田陽一:赤潮の発生予察. 日本水産学会(編), 水産学シリーズ34, 赤潮一発生機構と対策, 恒星社厚生閣, 東京, 90-104 (1980)
- 12) Hayakawa Y., Kobayashi M, Izawa M: Sedimentation flux from mariculture of oyster (*Crassostrea gigas*) in Ofunato estuary, Japan. *ICES J. Mar. Sci.*, **58**, 435-444 (2001)
- 13) 池内仁, 佐藤利幸:福岡湾口海域における水質環境. 福岡県水海技セ研報, **7**, 53-57 (1997)
- 14) Hayakawa Y.: Mean seasonal changes of dissolved inorganic nutrients in the Ofunato estuary. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **56**, 1717-1729 (1990)
- 15) 佐藤博之, 山本千裕, 寺井千尋:福岡湾における *Heterocapsa circularisquama* 赤潮発生年の海洋環境について. 福岡県水海技セ研報, **15**, 71-75 (2005)