

福岡湾の栄養塩収支におけるアオサ類の影響について

片山 幸恵・江藤 拓也・江崎 恭志
(研究部)

福岡湾内のアオサ類が福岡湾の漁場環境へ及ぼす影響を評価するため、湾内のアオサ類の分布域及び量の把握と、アオサ類の消長による福岡湾の窒素・リンの物質循環収支の変化を数値モデルを用いて行った。

福岡湾におけるアオサ類の分布域は湾央海域及び湾奥海域であり、主に秋季の湾奥海域で年間現存量の7割を占めていた。アオサ類の生長速度は1990年代まで横ばい、2000年代になると減少していた。アオサ類の栄養塩への依存度でみると、春季はどの年代もリン制限にあったが、秋季はリンの流入負荷量が多かった1980年代は窒素制限、1990年代以降にリン制限状態に転じた。また、福岡湾内への年間流入負荷量とアオサの取り込み量を比較すると、2000年代では窒素0.7%、リン2.0%と非常に小さいことからアオサ類の福岡湾の栄養塩収支に対する影響は小さいと推察された。

キーワード：福岡湾、アオサ、栄養塩収支

福岡湾は半閉鎖的な構造をしており、夏季には湾奥部を中心に赤潮が発生し、¹⁾ 底層では貧酸素水塊が形成される。^{2), 3)} 近年、湾内の漁獲量は減少傾向にあり、ワカメ・ノリ等の藻類養殖では不作年があるなど福岡湾の漁場環境の悪化が懸念されている。

一方、同じ海藻類でも湾奥海域においては、夏から秋にかけてアオサ類が大量に繁茂し、沿岸に堆積、腐敗するため、アオサ堆積物下に生息する二枚貝やゴカイ等の生物がへい死⁴⁾ するとともに、生活環境への影響が懸念されている。

また、江藤ら⁵⁾ によりノリ、ワカメの栄養塩の吸収、漁獲等を組み込んだ福岡湾の栄養塩収支モデルが発表されているが、それにはアオサ類は組み込まれていない。そこで今回、大量に繁茂するアオサ類の福岡湾の漁場環境への影響を評価するため、湾内のアオサ類の分布域及び量の把握と、アオサ類の消長による福岡湾の栄養塩収支の変化を江藤ら⁵⁾ の栄養塩収支モデルを用いて行った。

方 法

1. アオサ類の分布域と量の把握

福岡湾内におけるアオサ類の分布状況をふまえた上で海域の代表点を図1のように設定し、45cm×30cmの枠を用いて枠取り取り調査を行った。海域別には湾央海域は今津、湾奥海域は和白と名島の合計3点を設定し、2010年4月から2011年3月まで毎月アオサ類の湿重量を計測し

た。また、既存の知見⁶⁾ から、アオサ類は2m以浅に分布することがわかっているため、湾奥、湾央それぞれの海域で2m以浅の面積に引き延ばし現存量を算出した。その際、湾奥海域については和白定点は和白干潟の2m以浅海域で、それ以外の2m以浅の海域については名島定点の結果を引き延ばした。

2. 福岡湾の栄養塩類の変動に及ぼすアオサ類の影響

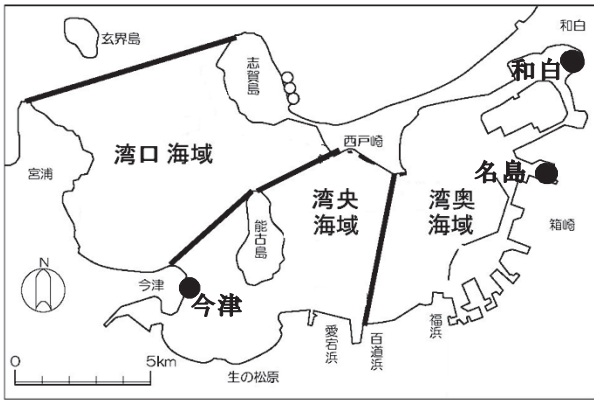
(1) モデルの概要

今回の解析は江藤ら⁵⁾ が行った栄養塩収支モデルにアオサ類を組み込む方法で行った。栄養塩収支のボックスモデルの概念図を図2に示す。モデルは、陸域からの栄養塩の流入、植物プランクトンやワカメ、ノリによる栄養塩の吸収、有機物の無機化、底泥からの溶出などの栄養塩の物質循環を考えたモデルとし、アオサ類もその中に組み込んだ。また、アオサ類の枠取り調査から、アオサ類には春の増殖と秋の増殖の2つの傾向が見られたため、春季増殖型（以下アオサ1という。）と秋季増殖型（以下アオサ2という。）の2種類を設定した。

(2) 解析期間と年代、季節の設定

解析は1980年から2007年の28年間とした。年代は1980年代（1980～1989年）、1990年代（1990～1999年）、2000年代は（2000年～2007年）とし、季節については4～6月を春季、7～9月を夏季、10～12月を秋季、1～3月を冬季とした。

(3) ボックスモデルの海域区分、鉛直方向の層区分



●: 枠取り調査定点

図1 枠取り調査定点及びボックスモデル海域区分

表1 ボックス番号とボックス名及び層番号と層名

ボックス番号	ボックス名	層番号	層名
1	湾奥海域	1	表層
2	湾央海域		
3	湾口海域	2	底層
4	湾外の境界値		

ボックスモデルの海域区分は図1のように湾口、湾央、湾奥の3つの海域に区分した。鉛直的には、夏季における水質の鉛直分布が水深3m 付近を境に2層構造を形成していることから、^{2,3)}海面から平均水面下3m を表層、平均水面下3m から海底までを底層とした。

(4) 基礎式

基礎式はアオサの式を追加した以外は江藤ら⁵⁾の方法と同様である。この基礎式では、各ボックス間の栄養塩の移流・拡散と各ボックスそれぞれの無機態窒素、無機態リン、有機態窒素、有機態リンの現存量及び沈降、溶出とアオサ、ノリ、ワカメ、植物プランクトンによる栄養塩の現存量及び取り込み量を、また、アオサ類については福岡市が1996年より行っている回収に伴う栄養塩の取り上げ量を表している。なお、式中のボックス番号は、表1に示すボックス名に対応している。

1) 水質の物質収支式

<湾奥海域>

$$V_{1,1} \frac{dC_{1,1}^I}{dt} = -Q_{1,1 \rightarrow 2} C_{1,1 \rightarrow 2}^* - W_{2/1,1} C_{2/1,1}^{**} - Kw_{1,1 \rightarrow 2} (C_{1,1}^I - C_{1,2}^I) - Kw_{2/1,1} (C_{1,1}^I - C_{1,2}^I) + L_{1,1}^I$$

<時間変化> = <移流> <拡散> <流入負荷> <反応>

$$V_{2,1} \frac{dC_{2,1}^I}{dt} = -Q_{2,1 \rightarrow 2} C_{2,1 \rightarrow 2}^* + W_{2/2,1} C_{2/2,1}^{**} - Kw_{1,1 \rightarrow 2} (C_{2,1}^I - C_{2,2}^I) + Kw_{2/2,1} (C_{2,1}^I - C_{2,2}^I) + R_{2,1}^I$$

<時間変化> = <移流> <拡散> <反応>

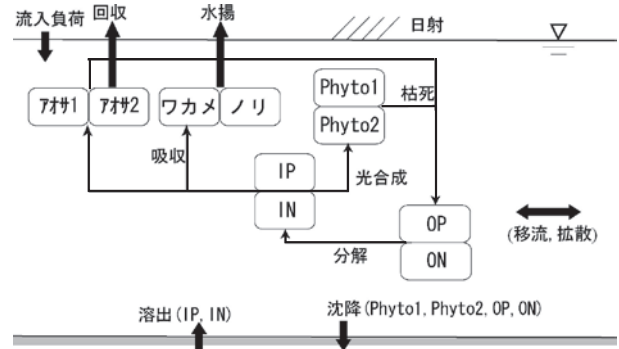
<湾央海域>

$$V_{1,2} \frac{dC_{1,2}^I}{dt} = Q_{1,1 \rightarrow 2} C_{1,1 \rightarrow 2}^* - Q_{1,2 \rightarrow 3} C_{1,2 \rightarrow 3}^* - W_{2/2,2} C_{2/2,2}^{**} + Kw_{1,1 \rightarrow 2} (C_{1,1}^I - C_{1,2}^I) + Kw_{1,2 \rightarrow 3} (C_{1,2}^I - C_{1,3}^I)$$

<時間変化> = <移流> <拡散> <流入負荷> <反応>

$$V_{2,2} \frac{dC_{2,2}^I}{dt} = Q_{2,1 \rightarrow 2} C_{2,1 \rightarrow 2}^* - Q_{2,2 \rightarrow 3} C_{2,2 \rightarrow 3}^* + W_{2/2,2} C_{2/2,2}^{**} + Kw_{1,1 \rightarrow 2} (C_{2,1}^I - C_{2,2}^I) + Kw_{2,2 \rightarrow 3} (C_{2,2}^I - C_{2,3}^I)$$

<時間変化> = <移流> <拡散> <反応>



Phyto1, Phyto2: 植物プランクトン, IN: 無機態窒素

IP: 無機態リン, ON: 有機態窒素, OP: 有機態リン

アオサ1: 春季増殖型, アオサ2: 秋季増殖型

図2 ボックスモデル概念図

<湾口海域>

$$V_{1,3} \frac{dC_{1,3}^I}{dt} = Q_{1,2 \rightarrow 3} C_{1,2 \rightarrow 3}^* - Q_{1,3 \rightarrow 4} C_{1,3 \rightarrow 4}^* - W_{2/3,3} C_{2/3,3}^{**} + Kw_{1,2 \rightarrow 3} (C_{1,2}^I - C_{1,3}^I) + Kw_{1,3 \rightarrow 4} (C_{1,3}^I - C_{1,4}^I)$$

<時間変化> = <移流> <拡散> <流入負荷> <反応>

$$V_{2,3} \frac{dC_{2,3}^I}{dt} = Q_{2,2 \rightarrow 3} C_{2,2 \rightarrow 3}^* - Q_{2,3 \rightarrow 4} C_{2,3 \rightarrow 4}^* + W_{2/3,3} C_{2/3,3}^{**} + Kw_{2,2 \rightarrow 3} (C_{2,2}^I - C_{2,3}^I) + Kw_{2,3 \rightarrow 4} (C_{2,3}^I - C_{2,4}^I)$$

<時間変化> = <移流> <拡散> <反応>

ここで、

- $C_{k,l}^I$: 第k層におけるボックスiの項目lの濃度 (g/m³)
- $C_{k,j \rightarrow i}^*$: $Q_{k,j \rightarrow i} \geq 0$ の時 $C_{k,j \rightarrow i}^* = C_{k,j}^I$, $Q_{k,j \rightarrow i} < 0$ の時 $C_{k,j \rightarrow i}^* = C_{k,i}^I$
- $C_{k+1/2,j}^{**}$: $W_{k+1/2,j} \geq 0$ の時 $C_{k+1/2,j}^{**} = C_{k,j}^I$, $W_{k+1/2,j} < 0$ の時 $C_{k+1/2,j}^{**} = C_{k+1,j}^I$
- $F_{k,j}$: ボックスiへの淡水流入量 (m³/s)
- $Kw_{k,j \rightarrow i}$: 第k層におけるボックスiからボックスjへの拡散水量 (m³/s)
- $Kw_{k+1/2,j}$: 第k層から第k+1層へのボックスiの拡散水量 (m³/s)
- $L_{k,i}^I$: ボックスiへの項目lの流入負荷量 (g/s)
- $R_{k,i}^I$: 第k層におけるボックスiの項目lの反応量 (g/s)
- $V_{k,i}$: 第k層におけるボックスiの容量 (m³)

式中の反応量 $R_{k,i}^I$ は、以下に示すとおりである。

<アオサ1>

$$R_{k,i}^{aosa1} = V_{k,i} G_{aosa1} C_{k,i}^{aosa1} - D_{aosa1} C_{k,i}^{aosa1} - G_{aosa1}$$

<— 生長 —> <— 枯死 —> <— 回収 —>

<アオサ2>

$$R_{k,i}^{aosa2} = V_{k,i} G_{aosa2} C_{k,i}^{aosa2} - D_{aosa2} C_{k,i}^{aosa2} - G_{aosa2}$$

<— 生長 —> <— 枯死 —> <— 回収 —>

<IP>

$$R_{k,i}^{IP} = -f_{pl1} V_{k,i} G_{pl1} C_{k,i}^{PL1} - f_{pl2} V_{k,i} G_{pl2} C_{k,i}^{PL2} - f_{wp} V_{k,i} G_{wp} C_{k,i}^{wp} - f_{op} V_{k,i} G_{op} C_{k,i}^{op}$$

<植物プランクトンによるリンの摂取> <ノリによるリンの摂取> <ワカメによるリンの摂取>

$$-f_{op} V_{k,i} G_{op} C_{k,i}^{op} - f_{wp} V_{k,i} G_{wp} C_{k,i}^{wp} + V_{k,i} D_{k,i}^{IP} + A_{k,i}^{IP}$$

<アオサによるリンの摂取> <OPの無機化> <溶出>

<IN>

$$R_{k,i}^{IN} = -f_{pl1} V_{k,i} G_{pl1} C_{k,i}^{PL1} - f_{pl2} V_{k,i} G_{pl2} C_{k,i}^{PL2} - f_{wp} V_{k,i} G_{wp} C_{k,i}^{wp} - f_{op} V_{k,i} G_{op} C_{k,i}^{op}$$

<植物プランクトンによる窒素の摂取> <ノリによる窒素の摂取> <ワカメによる窒素の摂取>

$$-f_{op} V_{k,i} G_{op} C_{k,i}^{op} - f_{wp} V_{k,i} G_{wp} C_{k,i}^{wp} + V_{k,i} D_{k,i}^{IN} + A_{k,i}^{IN}$$

<アオサによる窒素の摂取> <ONの無機化> <溶出>

ここで

- D_{aosa1} : アオサ1の枯死速度 (1/s)
- $D_{aosa1,T}$: 水温0℃でのアオサ1の枯死速度 (1/s)
- k_{aosa1} : アオサ1の枯死速度の温度定数 (1/℃)
- D_{aosa2} : アオサ2の枯死速度 (1/s)
- $D_{aosa2,T}$: 水温0℃でのアオサ2の枯死速度 (1/s)
- k_{aosa2} : アオサ2の枯死速度の温度定数 (1/℃)
- f_{pl1} : アオサ1のN含有量 (-)
- f_{pl2} : アオサ2のN含有量 (-)
- f_{wp} : アオサ1のP含有量 (-)
- f_{op} : アオサ2のP含有量 (-)

G_{aosa1} : アオサ1の生長速度(1/s)

$$G_{aosa1} = G_{max,aosa1} \cdot f(T) \cdot f(I) \cdot f(N)$$

$$f(T) = \left\{ \frac{T}{T_{opt,aosa1}} \left[1 - \exp\left(-\frac{T}{T_{opt,aosa1}}\right) \right] \right\}^{n_5}$$

$$f(I) = \frac{I}{I_{opt,aosa1}} \left[1 - \exp\left(-\frac{I}{I_{opt,aosa1}}\right) \right]$$

$$f(N) = \min\left(\frac{C_{k,l}^{N}}{C_{k,l}^{N} + K_{N,aosa1}}, \frac{C_{k,l}^{P}}{C_{k,l}^{P} + K_{P,aosa1}} \right)$$

$G_{max,aosa1}$: アオサ1の最大生長速度(1/s)
 $T_{opt,aosa1}$: アオサ1の生長に係わる最適水温(°C)
 n_5 : アオサ1の生長に係わる温度関数の係数(-)
 $I_{opt,aosa1}$: アオサ1の生長に係わる最適日射量(1x)
 $K_{N,aosa1}$: アオサ1の生長に係わる窒素の半飽和定数(g/m²)
 $K_{P,aosa1}$: アオサ1の生長に係わるリンの半飽和定数(g/m²)

G_{aosa2} : アオサ2の生長速度(1/s)

$$G_{aosa2} = G_{max,aosa2} \cdot f(T) \cdot f(I) \cdot f(N)$$

$$f(T) = \left\{ \frac{T}{T_{opt,aosa2}} \left[1 - \exp\left(-\frac{T}{T_{opt,aosa2}}\right) \right] \right\}^{n_5}$$

$$f(I) = \frac{I}{I_{opt,aosa2}} \left[1 - \exp\left(-\frac{I}{I_{opt,aosa2}}\right) \right]$$

$$f(N) = \min\left(\frac{C_{k,l}^{N}}{C_{k,l}^{N} + K_{N,aosa2}}, \frac{C_{k,l}^{P}}{C_{k,l}^{P} + K_{P,aosa2}} \right)$$

$G_{max,aosa2}$: アオサ2の最大生長速度(1/s)
 $T_{opt,aosa2}$: アオサ2の生長に係わる最適水温(°C)
 n_5 : アオサ2の生長に係わる温度関数の係数(-)
 $I_{opt,aosa2}$: アオサ2の生長に係わる最適日射量(1x)
 $K_{N,aosa2}$: アオサ2の生長に係わる窒素の半飽和定数(g/m²)
 $K_{P,aosa2}$: アオサ2の生長に係わるリンの半飽和定数(g/m²)

(5) ボックスモデルの諸条件の設定

1) アオサ類の計算条件

アオサ類については、経年的な現存量が確認できていないため、経験的に推定した初期値を用いて、28年間の発生量の時系列計算を行った。また、福岡市港湾局が1996年度より行っている回収作業についても回収時期及び回収量の聞き取り調査を行い、モデルの中で回収量を設定することとした。時期は9～10月の2ヶ月間で湾奥海域において毎日約30 tのアオサ類が回収される設定とした。

2) その他のパラメータ

水質環境及び植物プランクトンが増殖する速度などは、福岡市水質測定結果報告⁷⁾を、ノリが増殖する速度⁸⁾やワカメが増殖する速度^{9,10)}などは、福岡市農林統計¹¹⁾の統計値を、アオサ類の増殖する速度はアオサの枠取り調査の結果とを計算値との再現性を確認して表2に示すようにパラメータを設定した。

その他の設定は江藤ら⁵⁾と同じとした。

3. アオサの生長速度の変化と依存度(制限要因)

福岡湾の水質環境の経年変化がアオサの生長に及ぼす影響を把握するため、アオサの生長速度と環境要因との関係を整理した。一般に光合成を行う植物体の生長速度は基礎式(水質の物質収支式)で示したとおり以下の式で表わされる。¹²⁾

アオサの生長速度＝最大生長速度×水温依存度(0～1)×日射依存度(0～1)×栄養塩依存度(0～1)

表2 水質シミュレーションのパラメーター

記号	項目名	単位	設定値
$Dn, 0$	水温0°CでのO-Nの無機化速度	1/s	0.05
$Dp, 0$	水温0°CでのO-Pの無機化速度	1/s	0.05
$Daosa1, 0$	水温0°Cでのアオサ1の枯死速度	1/s	0.001
$Daosa2, 0$	水温0°Cでのアオサ2の枯死速度	1/s	0.01
$DPL1, 0$	水温0°Cでの植物プランクトン1の枯死速度	1/s	0.01
$DPL2, 0$	水温0°Cでの植物プランクトン2の枯死速度	1/s	0.05
$fan1$	アオサ1のN含有量	-	0.0291
$fan2$	アオサ2のN含有量	-	0.0291
$fap1$	アオサ1のP含有量	-	0.0017
$fap2$	アオサ2のP含有量	-	0.0017
fwn	ノリのN含有量	-	0.0682
fwp	ノリのP含有量	-	0.0068
$fpn1$	植物プランクトン1のN/chl-a比	-	6.022
$fpp1$	植物プランクトン1のP/chl-a比	-	0.833
$fpn2$	植物プランクトン2のN/chl-a比	-	6.022
$fpp2$	植物プランクトン2のP/chl-a比	-	0.833
fwn	ワカメのN含有量	-	0.0304
fwp	ワカメのP含有量	-	0.0036
$Gmax, aosa1$	アオサ1の最大生長速度	1/s	1.3
$Gmax, aosa2$	アオサ2の最大生長速度	1/s	2.5
$Gmax, nori$	ノリの最大生長速度	1/s	0.3
$Gmax, PL1$	植物プランクトン1の最大増殖速度	1/s	1
$Gmax, PL2$	植物プランクトン2の最大増殖速度	1/s	1.5
$Gmax, wakame$	ワカメの最大生長速度	1/s	0.7
$Iopt, aosa1$	アオサ1の生長に係わる最適日射量	1x	1230
$Iopt, aosa2$	アオサ2の生長に係わる最適日射量	1x	1230
$Iopt, nori$	ノリの生長に係わる最適日射量	1x	10000
$Iopt, PL1$	植物プランクトン1の増殖に係わる最適日射量	1x	15000
$Iopt, PL2$	植物プランクトン2の増殖に係わる最適日射量	1x	20000
$Iopt, wakame$	ワカメの生長に係わる最適日射量	1x	30000
$KN, aosa1$	アオサ1の生長に係わる窒素の半飽和定数	g/m ²	0.18
$KN, aosa2$	アオサ2の生長に係わる窒素の半飽和定数	g/m ²	0.18
$KP, aosa1$	アオサ1の生長に係わるリンの半飽和定数	g/m ²	0.017
$KP, aosa2$	アオサ2の生長に係わるリンの半飽和定数	g/m ²	0.017
$KN, nori$	ノリの生長に係わる窒素の半飽和定数	g/m ²	0.05
$KP, nori$	ノリの生長に係わるリンの半飽和定数	g/m ²	0.005
$KN, PL1$	植物プランクトン1の増殖に係わる窒素の半飽和定数	g/m ²	0.03
$KP, PL1$	植物プランクトン1の増殖に係わるリンの半飽和定数	g/m ²	0.0015
$KN, PL2$	植物プランクトン2の増殖に係わる窒素の半飽和定数	g/m ²	0.03
$KP, PL2$	植物プランクトン2の増殖に係わるリンの半飽和定数	g/m ²	0.0015
$KN, wakame$	ワカメの生長に係わる窒素の半飽和定数	g/m ²	0.15
$KP, wakame$	ワカメの生長に係わるリンの半飽和定数	g/m ²	0.015
kn	O-Nの無機化速度の温度関数	1/°C	0.0693
kp	O-Pの無機化速度の温度関数	1/°C	0.0693
$kaosa1$	アオサ1の枯死速度の温度関数	1/°C	0.0693
$kaosa2$	アオサ2の枯死速度の温度関数	1/°C	0
$kPL1$	植物プランクトン1の枯死速度の温度関数	1/°C	0.0693
$kPL2$	植物プランクトン2の枯死速度の温度関数	1/°C	0.0693
$n1$	植物プランクトン1の増殖に係わる温度関数の係数	-	2
$n2$	植物プランクトン2の増殖に係わる温度関数の係数	-	10

この式はアオサが理論上最も生長が速い速度(最大生長速度)に、生長速度の制限要因となる水温や日射量、栄養塩がそれぞれどの程度制限させているかを依存度で表し、0に近い程制限がかかり、1に近い程制限がかかっていないことを意味する。また、各依存度(計算値)の経年変化を水温、全日射量、窒素・リン流入負荷量(実測値)の経年変化と比較した。なお、流入負荷量については、有機態窒素と無機態窒素の合計値を全窒素、有機態リンと無機態リンの合計値を全リンとした。

なお、ノリ、ワカメについてもアオサと同様の計算を行った。

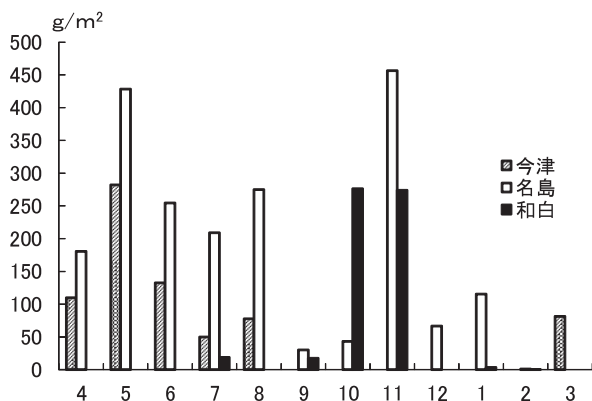


図3 枠取り調査結果（月別アオサの湿重量）

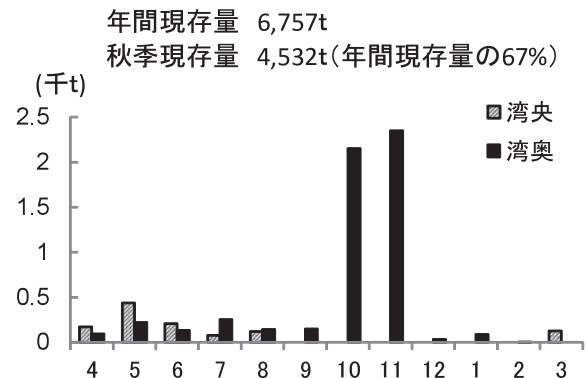


図4 福岡湾内の月別アオサ現存量

結 果

1. アオサ類の分布域と量の把握

図3, 4にアオサ類の枠取り調査結果及び月別アオサ現存量を示した。湾央海域の今津では春季に増殖するアオサ類が多く、3～8月に出現し、5月にピークがみられた。湾奥海域の名島では春季と秋季に増殖が見られ、2～3月を除きほぼ周年出現し、春季の5月と秋季の11月にピークがみられた。同じく湾奥海域の和臼では7～2月に出現し、10, 11月の秋季に増殖するアオサ類が確認された。この結果から、福岡湾におけるアオサ類の発生は秋季の湾奥海域が主であり、特に10, 11月に多く、年間現存量6,757 tに対して秋季現存量4,532 tとその時期には年間現存量の約7割を占めるアオサ類が湾奥海域に分布していることがわかった。

2. 福岡湾の栄養塩類の変動に及ぼすアオサ類の影響

(1) アオサの生長速度と依存度の変化（制限要因）

アオサ動向を明らかにするため、年代別の春季、秋季におけるアオサ、ノリ、ワカメの生長速度と水温、日射量、栄養塩それぞれの依存度の経年変化を図5に示した。さらに各依存度と実測値を比較するため水温、全日射量、窒素・リン流入負荷量の経年変化も併せて示した。

生長速度についてアオサ類とノリ、ワカメの傾向を比べるとノリ・ワカメは春季にも秋季にも1980年代が生長速度が大きく、経年的に減少していたが、アオサ類は春季及び秋季ともに1990年代までは横ばいで2000年代になり減少した。依存度を見ると、水温ではノリ、ワカメは同様の傾向を示し、春季より水温の低い秋季の依存度が高い。アオサは、水温の高い春季が秋季より依存度が高くなっているが、春季で約0.5、秋季になると約0.1とどちらも低く、制限がかかっていた。

全日射量については実測値は春季が高かったものの、ノリでは春、秋季とも依存度が約0.4とさほど差はみられなかった。ワカメはやや秋季の依存度が大きく、アオサは春季にやや高い傾向がみられた。

次に栄養塩類であるが、栄養塩類には窒素とリンがあり、依存度の低い方が制限要因となり、栄養塩類の依存度となる。ノリ、ワカメでは年代を問わず、春季、秋季ともにリンの依存度が低いためリンが栄養塩類の制限要因となっていた。依存度の大きさをみるとノリは春季で0.004～0.01、秋季で0.01～0.02、同じくワカメで0.002～0.003、0.003～0.006とどちらも小さく、制限が大きかかっていた。経年的にみるとリンの流入負荷量の減少に比例して依存度が低下しており、リンによる制限が大きくなっていた。アオサは、春季は年代を問わずリンの依存度が0.2～0.1と小さく、リンが栄養塩類の制限要因となっており、経年的にも流入負荷量に比例して依存度が小さくなっていた。一方、秋季は1980年代で、窒素の依存度が低く、窒素が制限要因となっていたが、1990年代以降リンの依存度が低くなり、栄養塩類の制限要因はリンへと変化した。その間の栄養塩類の依存度は1980年代から2000年代では0.45から0.28に減少した。ノリ、ワカメと比較すると、アオサはリン制限がかかっているものの、依存度の数値が高く、ノリ、ワカメほど制限は受けていない。また、水温、日射量、栄養塩の各項目の中でどの要因が最も制限になっているかを比較するとノリ、ワカメでは春、秋季ともリンが制限となっているが、アオサでは春季がリン0.2、水温0.5でリンが第一制限要因となっているのに対し、秋季ではリン0.4、水温0.2で水温が第一制限要因となり異なっていた。

(2) アオサの現存量の変化

アオサ類の季節別年代別現存量のシミュレーション結果を表3に示す。湾央海域のアオサ類は年代によらず春季が現存量の最大値をとっていた。湾奥海域のアオサ類

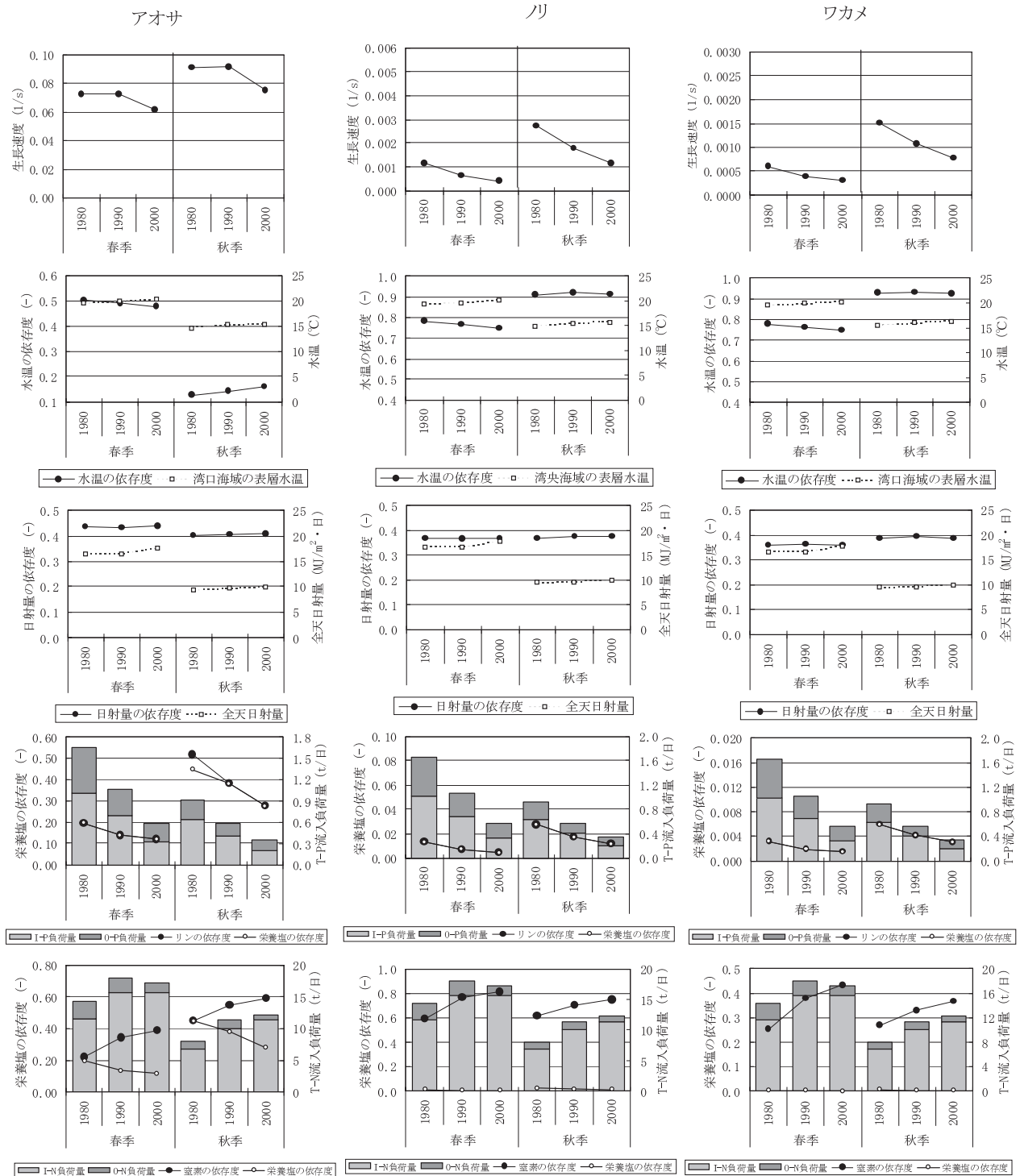


図5 年代別のアオサ、ノリ、ワカメの生長速度と水温、日射量、栄養塩それぞれの依存度の経年変化

の最大現存量は2000年代になると最大値であった1990年代の5,278.6 tの1/2以下まで減少していた。また、季節別では1980, 1990年代では夏季に発生量が多く湾奥海域の年間現存量の約5割を占めていたが、2000年代になると夏季の発生量が激減し、秋季のみで約7割の発生がみられるようになった。

(3) 栄養塩収支動向からみるアオサの評価

季節別に平均化した無機態リンの栄養塩収支を図6に示す。全体の傾向は江藤ら⁵⁾の報告と同様で、海域間の移流・拡散では、通常湾奥から湾央、湾口、湾外へと移流するが、無機態リンは湾全体に供給される栄養塩の量が減少したため、湾内の無機態リン濃度が湾外よりも低くなり、1980年代に湾奥から湾央、湾口、湾外へ移流していた無機態リンが1990年代になると冬季と春季に湾外

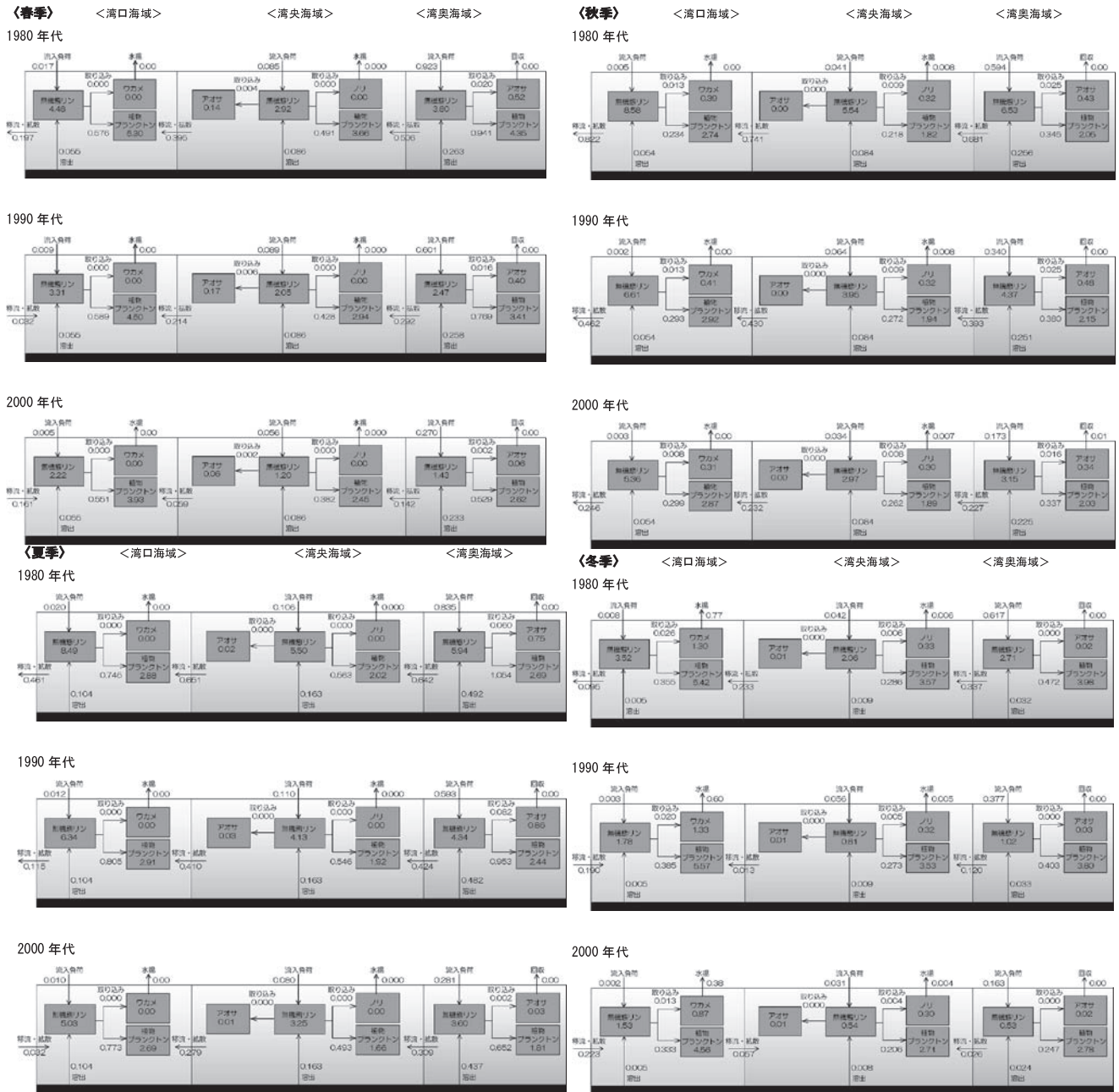


図6 無機態リンの季節別収支の経年変化

表3 季節別年代別アオサ類の現存量の変化

	湾奥海域(t)			湾央海域(t)			合計(t)		
	'80	'90	'00	'80	'90	'00	'80	'90	'00
春	3077.7	2445.2	422.5	1057.8	1323.0	484.7	4135.5	3768.2	907.2
夏	4460.1	5278.6	201.2	181.8	192.4	44.3	4641.9	5471.0	245.5
秋	2518.3	2885.2	2225.1	6.2	4.5	0.6	2524.5	2889.7	2225.7
冬	131.2	180.8	132.3	48.7	46.9	46.4	179.9	227.7	178.7

から湾口へ、さらに2000年代になると冬季から夏季は湾外から湾口へ、さらに冬季には湾外から湾口、湾央に移流していた。

また、本研究の主な課題である、アオサ類の福岡湾の栄養塩収支に対する影響評価は、今回の結果と江藤ら⁵⁾が行ったアオサ加入前の福岡湾の栄養塩収支の結果とを

比較し行った。特に、現存量の減少が著しい無機態リンに注目し、アオサ加入前、加入後のボックス間の一日あたりの無機態リンの移流・拡散の数値の変化を表4に示した。最も変化量が大きかったのは1980年代夏季であり、無機態リンの量で0.1 t / 日以上増加した。続いて1990年代夏季においても湾奥から湾央、湾口から湾外及び

表4 アオサ加入前と加入後の無機態リンのボックス間の移流・拡散量の変化
単位:t/日

季節	年代	湾外←湾口		湾口←湾央		湾央←湾奥		変化量(a-b)		
		a	b	a	b	a	b	湾外←湾口	湾口←湾央	湾央←湾奥
春	1980	0.197	0.164	0.395	0.368	0.506	0.483	0.033	0.027	0.023
	1990	-0.032	-0.042	0.214	0.205	0.292	0.281	0.01	0.009	0.011
	2000	-0.161	-0.162	0.059	0.058	0.142	0.139	0.001	0.001	0.003
夏	1980	0.461	0.335	0.651	0.537	0.642	0.542	<u>0.126</u>	<u>0.114</u>	<u>0.1</u>
	1990	0.115	0.043	0.41	0.365	0.424	0.372	<u>0.072</u>	0.045	<u>0.052</u>
	2000	-0.032	-0.035	0.279	0.275	0.309	0.304	0.003	0.004	0.005
秋	1980	0.822	0.754	0.741	0.684	0.681	0.64	<u>0.068</u>	<u>0.057</u>	0.041
	1990	0.462	0.421	0.43	0.401	0.393	0.372	0.041	0.029	0.021
	2000	0.246	0.239	0.232	0.227	0.227	0.223	0.007	0.005	0.004
冬	1980	0.095	0.088	0.223	0.227	0.337	0.331	0.007	-0.004	0.006
	1990	-0.19	-0.191	0.013	0.011	0.12	0.116	0.001	0.002	0.004
	2000	-0.223	-0.223	-0.057	-0.057	0.026	0.026	0	0	0

a:アオサ加入 b:アオサ未加入

表5 1980年代と2000年代における福岡湾内の窒素及びリンの年間負荷量に対するアオサの取り込み量の割合

		(A)年間負荷量(t)	(B)アオサ取り込み量(t)	B/A(%)
無機態窒素	'80年代	3,632	170	4.7%
	'00年代	5,067	33	0.7%
無機態リン	'80年代	296	10	3.3%
	'00年代	100	2	2.0%

1980年代の秋季においても湾央から湾口、湾口から湾外に向かう移流・拡散の数値が概ね0.05 t/日以上の変化みられた。1980、1990年代は数値が大きくなる傾向がみられたが、2000年代になるとほとんど数値の変化がなかった。

また、アオサ類による窒素、リンの取り込み量と年間流入負荷量の比較表を表5に示す。リン流入負荷量の多かった1980年代でみても、窒素4.7%、リン3.3%、リン流入負荷量の少なくなった2000年代では窒素では0.7%、リンでは2.0%となり福岡湾の栄養塩収支への影響は少ないと考えられた。

考 察

今回福岡湾におけるアオサの増殖特性と環境要因について詳細にみることができた。アオサは常にリンが制限要因となっているノリ、ワカメとは異なり、栄養塩類の依存度がノリ、ワカメと比べ桁違いに大きい。このように依存度が大きく異なった要因については、アオサの4日間の培養実験から、無機態リン源が無い状態でも光合成を行うことができること⁶⁾が確認されており、ノリ、ワカメに比べると低濃度環境下でも生長に影響が出にく

いのではないかと考えられた。また、秋季にノリ、ワカメはリンが第一制限要因となっていたのに対し、アオサでは水温が第一制限要因と異なっており、この要因としては、増殖適水温が、ノリの葉状体では6~16℃、¹³⁾ワカメでは15~20℃⁴⁾であり、アオサでは20、25℃がよく生長することが知られている。⁶⁾水温が15℃前後であった秋季はアオサのみ水温の影響を受け、生長に低リンの影響がでにくいこととも併せて水温が第一制限要因になったものと考えられた。

また、これまで不明であったアオサ類の発生動向を今回数値モデルから推測できた。2000年代と比較して1990年代以前は主発生時期が異なり、秋季は年代による変動は少ないが、1980年代及び1990年代では春季及び夏季に著しく増殖している結果となった。これについては本報告の結果からは春季のアオサについてはリンが第一制限となっており、1980年代、1990年代はリン負荷量が高かったが、2000年代は大きく減少していることが原因と考えられた。さらに片山ら⁵⁾によると福岡湾のリンの栄養塩濃度は6~9月は1980年代、1990年代に比べ2000年代が最も低くなっているが、10~11月では年代間の差が小さくなっている。これらのことからアオサの制限要因とも勘案して2000年代のアオサは相対的にリン濃度の低い春、夏季の発生量が減少し、濃度の高い秋季にアオサ現存量が大きくなったものと推察された。

本モデルの結果と観測値から、福岡湾全体で考えるとアオサ類は福岡湾の栄養塩収支に対する影響は小さい。しかし、福岡湾においてはリン濃度の低下がノリ、ワカメなどの藻類養殖に影響を及ぼしているという結果もあるため今後栄養塩濃度を回復する対策が講じられる事も考えられる。その際、春季及び夏季の栄養塩濃度が1990

年代並以上になると、アオサの発生量が今より増加する可能性が予想されるため、栄養塩濃度回復の手法は季節を重視した検討を行う必要がある。

文 献

- 1) 篠原満寿美, 杉野浩二郎, 佐藤利幸, 池内仁, 吉田幹英, 本田清一郎, 神菌真人. 福岡湾における植物プランクトン群集の季節変動. 福岡県水産海洋技術センター研究報告 1999 ; 9 : 33-38.
- 2) 篠原満寿美. 福岡湾における貧酸素水塊の発生状況. 福岡県水産海洋技術センター研究報告 2002 ; 12 : 81-87.
- 3) 吉岡直樹. 福岡湾における貧酸素水塊. 福岡県水産海洋技術センター研究報告 2003 ; 13 : 93-101.
- 4) 藤井 暁彦, 道山 晶子, 横山 佳裕, 関根 雅彦. アサリ資源の保全のための効率的なアオサ回収方法の検証. 水環境学会誌 2009 ; Vol. 32 No. 5 : 273-280.
- 5) 江藤拓也, 片山幸恵, 江崎恭志. 福岡湾における年代別・季節別栄養塩収支について. 福岡県水産海洋技術センター研究報告 2011 ; 21 : 47-58.
- 6) 能登谷正浩. アオサの利用と環境修復 成山堂書店, 東京. 2001.
- 7) 1980～2007年福岡市水質測定結果報告, 福岡市環境局, 福岡. 1980～2007.
- 8) 木幡進・墨利久・種村公平・坂本卓・下田誠・浅川牧夫. 八代海で養殖された海藻の特質と素材化に向けた酸素処理の検討. *Journal of Technology and Education* 2008 ; Vol. 15 No. 1 : 1-10.
- 9) 中島雅史・横山佳裕・内田唯史・中野拓治・山本耕士・中西弘. ボックスモデルによる有明海の窒素収支の構造解析. 水環境学会誌 2006 ; Vol. 29 No. 10 : 605-611.
- 10) 馬場将輔. 新潟産ワカメの生育に及ぼす温度, 光量, 塩分の影響. 海洋生物環境海洋研究所研究報告書 2008 ; 第11号 : 7-15.
- 11) 1980～2007年福岡市農林統計, 福岡市水産振興課, 福岡. 1980～2007.
- 12) 天野邦彦・渡辺正孝. *Chattonella antiqua* の増殖及び日周鉛直移動のモデリング. 月刊海洋 1996 ; No. 10 : 135-141.
- 13) わが国の水産業のり. 社団法人日本水産資源保護協会, 東京. 2003.
- 14) 小河久朗. ワカメ. 「有用海藻誌」(大野正夫編) 内田老鶴圃, 東京. 2004 ; 42-58.
- 15) 片山幸恵, 江藤拓也, 江崎恭志. 福岡湾の水質環境の長期変動について. 福岡県水産海洋技術センター研究報告 2009 ; 19 : 51-59.