

## 福岡湾における年代別・季節別栄養塩収支について

江藤 拓也・片山 幸恵・江崎 恭志  
(研究部)

福岡湾を湾奥・湾中央・湾口の3海域に分け、河川や下水処理場などからの栄養塩の流入や植物プランクトン・ノリ・ワカメによる栄養塩の取り込みといった窒素・リンの物質循環を数値シミュレーションにより計算し、この結果から窒素・リンの移動量を集計することで、経年的・季節的な栄養塩収支の変化を明らかにした。

年代別・季節別栄養塩収支の動向をみると、全リンと無機態リンの現存量は経年的に減少傾向であり、全窒素と無機態窒素は増加傾向である。無機態リンは、湾全体に流入する栄養塩の量が少なくなり、湾内の無機態リン濃度が湾外より低くなったため、1990, 2000年代の春季や冬季の湾口・湾中央海域において湾外から移流していた。全窒素、全リン、無機態窒素はいずれも湾奥から湾中央、湾口、湾外へ移流していた。

栄養塩収支から、福岡湾では湾奥海域から栄養塩の供給が少なくなった1990年代以降の冬季において、湾口海域では外海から無機態リンが供給される状況がみられ、ノリ、ワカメの栄養となる無機態リンの現存量が減少した。また、ノリ、ワカメが生長する制限要因は無機態リンであり、1990年代以降、経年的なリンの減少により、ノリ、ワカメの生育量が減少していることが推察された。

キーワード：福岡湾，ノリ，ワカメ，栄養塩収支

福岡湾は福岡市の西に位置した半閉鎖的な内湾である。福岡市内には多くの河川が存在し、その大部分が福岡湾に流入している。また、湾周辺には下水処理場があり、多量の処理水が湾内に放流されている。夏季には湾奥部を中心に赤潮が発生し、<sup>1)</sup>底層では貧酸素水塊が形成される。<sup>2,3)</sup>湾内では、小型底びき網、かご・刺網漁業やノリ・ワカメ養殖業が営まれているが、近年、漁獲量の減少やノリ・ワカメの不作年が発生するなど、漁場環境の悪化が懸念される。

このような状況を改善するためには、湾内の物質循環・輸送を考慮した環境保全対策を講じる必要がある。なかでも栄養塩収支（栄養塩の循環・移動）は、赤潮の原因となる植物プランクトンの増殖やノリ・ワカメ等の藻類の生長に直接影響することから、環境保全対策を講じる上で、その把握が不可欠となる。福岡湾の栄養塩収支については、柳<sup>4)</sup>が1993年のデータを用いてボックスモデル解析を行い、湾奥での栄養塩収支を、神菌ら<sup>5)</sup>が1993年から4年間のデータから窒素、リン収支を明らかにしているが、長期的な年代別、季節別の解析を行った事例はない。

そこで、福岡湾を湾奥・湾中央・湾口の3海域に分け、河川や下水処理場などからの栄養塩の流入や植物プランクトン・ノリ・ワカメによる栄養塩の取り込みといった

窒素・リンの物質循環を数値シミュレーションにより計算し、この結果から窒素・リンの移動量を集計することで、経年的・季節的な栄養塩収支の変化を明らかにした。

### 方 法

#### 1. 年代別、季節別の栄養塩収支動向

##### (1) モデルの概要

栄養塩収支のボックスモデルの概念を図1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た。植物プランクトンのモデル化にあたっては、夏季だけではなく、冬季にも植物プランクトンが増える傾向にあったため、ここでは夏季に増加しやすい植物プランクトンと冬季に増加しやすい植物プランクトンの2種類を設定した。

##### (2) 解析の対象期間と年代、季節別の解析期間

解析期間は、水質調査が開始された1980から2007年度の28年間とした。年代別の設定は、片山ら<sup>6)</sup>の方法に従い28年間の長期的な変動をみるために1980年代（1980～1989年度）、1990年代（1980～1989年度）、2000年代

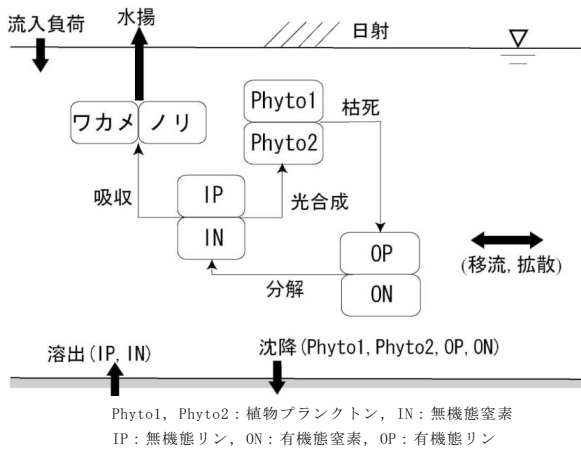


図1 ボックスモデルの概念図

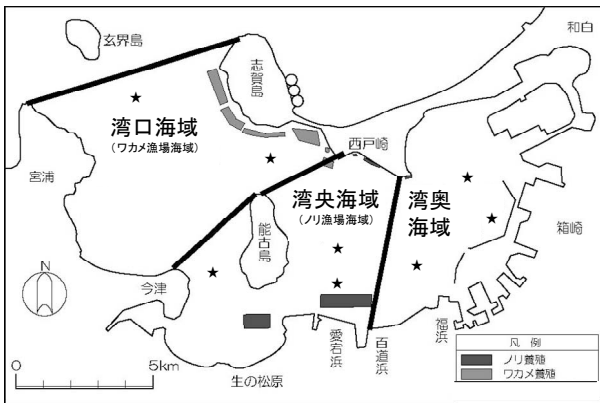


図2 ボックスモデルの海域区分  
(★: 水質調査点)

(2000～2007年度)の3区分とし、季節の期間区分は、春(4～6月)、夏(7～9月)、秋(10～12月)、冬(1～3月)とした。

(3) ボックスモデルの海域区分、鉛直方向の層区分

ボックスモデルの海域を図2のように湾口、湾中央、湾奥の3つの海域に区分した。水平的には湾口海域と湾中央・湾奥海域で水質が異なること、<sup>5)</sup>さらに湾奥海域では、夏季に顕著な貧酸素水塊が形成され、<sup>2,3)</sup>湾中央海域と環境が異なることが海域区分の根拠である。以下、湾中央はノリ漁場が位置することからノリ漁場海域、湾口はワカメ漁場が位置することからワカメ漁場海域とした。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、<sup>2,3)</sup>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。

各ボックス毎の海域面積と平均水深は、表1に示すとおりであり、博多湾環境保全計画<sup>7)</sup>に記載されている海域面積・水深(2002年度時点)をもとに、アイランドシティの埋立面積と航路浚渫の進捗を参考に設定した。

(4) 基礎式

流量収支式と水質の物質収支式の基礎式を以下に示す。この基礎式を用いて、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とノリ、ワカメの水揚げに伴う栄養塩の取り上げ量を計算した。なお、式中のボックス1～4は、表2に示すボックスに対応している。

表1 各ボックスの容積・面積

年度	平均水深			面積			容積					
	湾奥海域	ノリ漁場海域	ワカメ漁場海域	湾奥海域	ノリ漁場海域	ワカメ漁場海域	湾奥海域		ノリ漁場海域		ワカメ漁場海域	
							表層	底層	表層	底層	表層	底層
1980～1989	6.23	8.65	15.33	43.43	37.12	47.84	126.44	110.81	143.32	13.11	144.02	210.43
1990	6.23	8.65	15.33	43.43	37.12	47.84	126.44	110.81	143.32	13.11	144.02	210.43
1991	6.23	8.65	15.33	43.43	37.12	47.84	126.44	110.81	143.32	13.11	144.02	210.43
1992	6.22	8.65	15.33	43.49	37.12	47.84	126.62	110.81	143.32	13.11	144.10	210.43
1993	6.22	8.65	15.33	43.49	37.12	47.84	126.62	110.81	143.32	13.11	144.10	210.43
1994	6.30	8.65	15.33	42.27	37.12	47.84	123.00	110.81	143.32	13.11	143.21	210.43
1995	6.35	8.65	15.33	41.89	37.12	47.84	121.86	110.81	143.32	13.11	143.99	210.43
1996	6.44	8.65	15.33	41.86	37.12	47.84	121.77	110.81	143.32	13.11	147.79	210.43
1997	6.71	8.66	15.33	40.71	37.13	47.84	118.32	110.84	143.32	13.11	155.03	210.67
1998	6.76	8.67	15.33	40.71	37.13	47.84	118.32	110.84	143.32	13.11	157.00	211.25
1999	6.85	8.72	15.33	40.19	37.13	47.84	116.76	110.84	143.32	13.11	158.68	212.92
2000	6.89	8.74	15.33	40.06	37.13	47.84	116.37	110.84	143.32	13.11	159.52	213.85
2001	7.01	8.75	15.33	39.42	37.13	47.84	114.45	110.84	143.32	13.11	161.71	214.03
2002	7.06	8.76	15.33	39.42	37.13	47.84	114.45	110.84	143.32	13.11	163.78	214.30
2003	7.06	8.76	15.33	39.30	37.13	47.84	114.09	110.84	143.32	13.11	163.54	214.30
2004	7.06	8.76	15.33	39.30	37.13	47.84	114.09	110.84	143.32	13.11	163.54	214.30
2005	7.06	8.76	15.33	39.30	37.13	47.84	114.09	110.84	143.32	13.11	163.54	214.30
2006	7.06	8.76	15.33	39.30	37.13	47.84	114.09	110.84	143.32	13.11	163.54	214.30
2007	7.06	8.76	15.33	39.30	37.13	47.84	114.09	110.84	143.32	13.11	163.54	214.30

表2 ボックス番号とボックス名及び層番号の層名

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	ノリ漁場海域		
3	ワカメ海域	2	底層
4	湾外の境界値		

1) 流量収支式

<湾奥海域>

$$-Q_{1,1 \rightarrow 2} - W_{3/2,1} + F_1 + A_1 R = 0$$

$$-Q_{2,1 \rightarrow 2} + W_{3/2,1} = 0$$

<ノリ漁場海域>

$$Q_{1,1 \rightarrow 2} - Q_{1,2 \rightarrow 3} - W_{3/2,2} + F_2 + A_2 R = 0$$

$$Q_{2,1 \rightarrow 2} - Q_{2,2 \rightarrow 3} + W_{3/2,2} = 0$$

<ワカメ漁場海域>

$$Q_{1,2 \rightarrow 3} - Q_{1,3 \rightarrow 4} - W_{3/2,3} + F_3 + A_3 R = 0$$

$$Q_{2,2 \rightarrow 3} - Q_{2,3 \rightarrow 4} + W_{3/2,3} = 0$$

ここで、

- $A_i$  : ボックス*i*の面積 (m<sup>2</sup>)
- $F_i$  : ボックス*i*への淡水流入量 (m<sup>3</sup>/s)
- $Q_{k,i \rightarrow j}$  : 第*k*層におけるボックス*i*からボックス*j*への移流量 (m<sup>3</sup>/s)
- $R$  : 降水量 (m)
- $W_{k+1/2,i}$  : 第*k*層から第*k*+1層へのボックス*i*の移流量 (m<sup>3</sup>/s)

2) 水質の物質収支式

<湾奥海域>

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

<時間変化> <移流> <拡散> <流入負荷> <反応>

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

<時間変化> <移流> <拡散> <反応>

<ノリ漁場海域>

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

<時間変化> <移流> <拡散> <流入負荷> <反応>

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

<時間変化> <移流> <拡散> <反応>

<ワカメ漁場海域>

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

<時間変化> <移流> <拡散> <流入負荷> <反応>

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

<時間変化> <移流> <拡散> <反応>

ここで、

- $C_{k,j}^i$  : 第*k*層におけるボックス*i*の項目*i*の濃度 (g/m<sup>3</sup>)
- $C_{k+1,j}^i$  :  $Q_{k+1,j} \geq 0$ の時  $C_{k+1,j}^i = C_{k,j}^i$ ,  $Q_{k+1,j} < 0$ の時  $C_{k+1,j}^i = C_{k,j}^i$
- $C_{k+1/2,j}^i$  :  $W_{k+1/2,j} \geq 0$ の時  $C_{k+1/2,j}^i = C_{k,j}^i$ ,  $W_{k+1/2,j} < 0$ の時  $C_{k+1/2,j}^i = C_{k+1,j}^i$
- $F_i$  : ボックス*i*への淡水流入量 (m<sup>3</sup>/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 (m<sup>3</sup>/s)
- $Kw_{k+1/2,i}$  : 第*k*層から第*k*+1層へのボックス*i*の拡散水量 (m<sup>3</sup>/s)
- $L_{k,i}^i$  : ボックス*i*への項目*i*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*i*の反応量 (g/s)
- $V_{k,i}$  : 第*k*層におけるボックス*i*の容量 (m<sup>3</sup>)

式中の反応量 $R_{k,i}^i$ は、以下に示すとおりである。

<塩化物イオン>

$$R_{k,i}^{Cl} = 0$$

<植物プランクトン1>

$$R_{k,i}^{PL1} = V_{k,i} G_{PL1} C_{k,i}^{PL1} - V_{k,i} D_{PL1} C_{k,i}^{PL1} - A_i W_{PL1} C_{k,i}^{PL1}$$

<- 増殖 -> <- 枯死 -> <- 沈降 ->

<植物プランクトン2>

$$R_{k,i}^{PL2} = V_{k,i} G_{PL2} C_{k,i}^{PL2} - V_{k,i} D_{PL2} C_{k,i}^{PL2} - A_i W_{PL2} C_{k,i}^{PL2}$$

<- 増殖 -> <- 枯死 -> <- 沈降 ->

<ノリ>

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

<- 生長 -> < 漁獲 >

<ワカメ>

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

<- 生長 -> < 漁獲 >

<I-P>

$$R_{k,i}^{IP} = -f_{pn1} V_{k,i} G_{PL1} C_{k,i}^{PL1} - f_{pn2} V_{k,i} G_{PL2} C_{k,i}^{PL2} - f_{np} V_{k,i} G_{Nori} C_{k,i}^{Nori} - f_{wp} V_{k,i} G_{Wakame} C_{k,i}^{Wakame} + V_{k,i} D_{IP} C_{k,i}^{IP} + A_i I_{IP}^{IP}$$

<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> <OPの無機化> <溶出>

<O-P>

$$R_{k,i}^{OP} = f_{pn1} V_{k,i} D_{PL1} C_{k,i}^{PL1} + f_{pn2} V_{k,i} D_{PL2} C_{k,i}^{PL2} - V_{k,i} D_{OP} C_{k,i}^{OP} - A_i W_{OP} C_{k,i}^{OP}$$

<- 植物プランクトンの枯死 -> <OPの無機化> <- 沈降 ->

<I-N>

$$R_{k,i}^{IN} = -f_{pn1} V_{k,i} G_{PL1} C_{k,i}^{PL1} - f_{pn2} V_{k,i} G_{PL2} C_{k,i}^{PL2} - f_{nm} V_{k,i} G_{Nori} C_{k,i}^{Nori} - f_{wn} V_{k,i} G_{Wakame} C_{k,i}^{Wakame} + V_{k,i} D_{IN} C_{k,i}^{IN} + A_i I_{IN}^{IN}$$

<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> <ONの無機化> <溶出>

<O-N>

$$R_{k,i}^{ON} = f_{pn1} V_{k,i} D_{PL1} C_{k,i}^{PL1} + f_{pn2} V_{k,i} D_{PL2} C_{k,i}^{PL2} - V_{k,i} D_{ON} C_{k,i}^{ON} - A_i W_{ON} C_{k,i}^{ON}$$

<- 植物プランクトンの枯死 -> <ONの無機化> <- 沈降 ->

ここで、

- $D_n$  : O-Nの無機化速度 (1/s)
- $D_n = D_{n,0} \exp(k_n T)$
- $D_{n,0}$  : 水温0°CでのO-Nの無機化速度(1/s)
- $k_n$  : O-Nの無機化速度の温度定数(1/°C)
- $D_p$  : O-Pの無機化速度 (1/s)
- $D_p = D_{p,0} \exp(k_p T)$
- $D_{p,0}$  : 水温0°CでのO-Pの無機化速度(1/s)
- $k_p$  : O-Pの無機化速度の温度定数(1/°C)
- $D_{PL1}$  : 植物プランクトン1の枯死速度 (1/s)
- $D_{PL1} = D_{PL1,0} \exp(k_{PL1} T)$
- $D_{PL1,0}$  : 水温0°Cでの植物プランクトン1の枯死速度(1/s)
- $k_{PL1}$  : 植物プランクトン1の枯死速度の温度定数(1/°C)
- $D_{PL2}$  : 植物プランクトン2の枯死速度 (1/s)
- $D_{PL2} = D_{PL2,0} \exp(k_{PL2} T)$
- $D_{PL2,0}$  : 水温0°Cでの植物プランクトン2の枯死速度(1/s)
- $k_{PL2}$  : 植物プランクトン2の枯死速度の温度定数(1/°C)
- $f_{nn}$  : ノリのN含有量 (-)
- $f_{np}$  : ノリのP含有量 (-)
- $f_{pn1}$  : 植物プランクトン1のN/chl-a比 (-)
- $f_{pn2}$  : 植物プランクトン2のN/chl-a比 (-)
- $f_{pp1}$  : 植物プランクトン1のP/chl-a比 (-)
- $f_{pp2}$  : 植物プランクトン2のP/chl-a比 (-)
- $f_{wn}$  : ワカメのN含有量 (-)
- $f_{wp}$  : ワカメのP含有量 (-)
- $G_{Nori}$  : ノリの生長速度(1/s)
- $G_{max, Nori}$  : ノリの最大生長速度(1/s)
- $f(T) = \left[ \frac{T}{T_{opt, Nori}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{T}{T_{opt, Nori}}\right) \right] \right]^{n_3}$
- $f(I) = \frac{I}{I_{opt, Nori}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{I}{I_{opt, Nori}}\right) \right]$
- $f(N) = \min\left(\frac{C_{k,i}^{IN}}{C_{N, Nori}^{IN} + K_{N, Nori}}, \frac{C_{k,i}^{IP}}{C_{P, Nori}^{IP} + K_{P, Nori}}\right)$
- $T_{opt, Nori}$  : ノリの生長に係わる最適水温(°C)
- $n_3$  : ノリの生長に係わる温度関数の係数(-)
- $I_{opt, Wakame}$  : ノリの生長に係わる最適日射量(Ix)
- $K_{N, Wakame}$  : ノリの生長に係わる窒素の半飽和定数(g/m<sup>3</sup>)
- $K_{P, Wakame}$  : ノリの生長に係わるリンの半飽和定数(g/m<sup>3</sup>)

$G_{PL1}$  : 植物プランクトン1の増殖速度 (1/s)

$$G_{PL1} = G_{max,PL1} \cdot f(T) \cdot f(I) \cdot f(N)$$

$$f(T) = \left\{ \frac{T}{T_{opt,PL1}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{T}{T_{opt,PL1}}\right) \right] \right\}^{n_1}$$

$$f(I) = \frac{I}{I_{opt,PL1}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{I}{I_{opt,PL1}}\right) \right]$$

$$f(N) = \min\left(\frac{C_{k,i}^{IN}}{C_{k,i}^{IN} + K_{N,PL1}}, \frac{C_{k,i}^{IP}}{C_{k,i}^{IP} + K_{P,PL1}}\right)$$

$G_{max,PL1}$  : 植物プランクトン1の最大増殖速度 (1/s)

$T_{opt,PL1}$  : 植物プランクトン1の増殖に係わる最適水温 (°C)

$n_1$  : 植物プランクトン1の増殖に係わる温度関数の係数 (-)

$I_{opt,PL1}$  : 植物プランクトン1の増殖に係わる最適日射量 (lx)

$K_{N,PL1}$  : 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<sup>3</sup>)

$K_{P,PL1}$  : 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<sup>3</sup>)

$G_{PL2}$  : 植物プランクトン2の増殖速度 (1/s)

$$G_{PL2} = G_{max,PL2} \cdot f(T) \cdot f(I) \cdot f(N)$$

$$f(T) = \left\{ \frac{T}{T_{opt,PL2}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{T}{T_{opt,PL2}}\right) \right] \right\}^{n_2}$$

$$f(I) = \frac{I}{I_{opt,PL2}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{I}{I_{opt,PL2}}\right) \right]$$

$$f(N) = \min\left(\frac{C_{k,i}^{IN}}{C_{k,i}^{IN} + K_{N,PL2}}, \frac{C_{k,i}^{IP}}{C_{k,i}^{IP} + K_{P,PL2}}\right)$$

$G_{max,PL2}$  : 植物プランクトン2の最大増殖速度 (1/s)

$T_{opt,PL2}$  : 植物プランクトン2の増殖に係わる最適水温 (°C)

$n_2$  : 植物プランクトン2の増殖に係わる温度関数の係数 (-)

$I_{opt,PL2}$  : 植物プランクトン2の増殖に係わる最適日射量 (lx)

$K_{N,PL2}$  : 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<sup>3</sup>)

$K_{P,PL2}$  : 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<sup>3</sup>)

$G_{wakame}$  : ワカメの成長速度 (1/s)

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

$$f(T) = \left\{ \frac{T}{T_{opt,wakame}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{T}{T_{opt,wakame}}\right) \right] \right\}^{n_4}$$

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

$$f(N) = \min\left(\frac{C_{k,i}^{IN}}{C_{k,i}^{IN} + K_{N,wakame}}, \frac{C_{k,i}^{IP}}{C_{k,i}^{IP} + K_{P,wakame}}\right)$$

$G_{max,wakame}$  : ワカメの最大生長速度 (1/s)

$T_{opt,wakame}$  : ワカメの生長に係わる最適水温 (°C)

$n_4$  : ワカメの生長に係わる温度関数の係数 (-)

$I_{opt,wakame}$  : ワカメの生長に係わる最適日射量 (lx)

$K_{N,wakame}$  : ワカメの生長に係わる窒素の半飽和定数 (g/m<sup>3</sup>)

$K_{P,wakame}$  : ワカメの生長に係わるリンの半飽和定数 (g/m<sup>3</sup>)

$G_{nori}$  : 単位時間あたりのノリの漁獲量 (g/s)

$G_{c,wakame}$  : 単位時間あたりのワカメの漁獲量 (g/s)

$I_{k,i}^{IP}$  : 単位時間・単位面積あたりのIP溶出量 (g/m<sup>2</sup>・s)

$I_{k,i}^{IN}$  : 単位時間・単位面積あたりのIN溶出量 (g/m<sup>2</sup>・s)

$W_{\beta}$  : O-Pの沈降速度 (m/s)

$W_n$  : O-Nの沈降速度 (m/s)

$W_{PL1}$  : 植物プランクトン1の沈降速度 (m/s)

$W_{PL2}$  : 植物プランクトン2の沈降速度 (m/s)

## (5) ボックスモデルの諸条件の設定

### 1) 計算時間

計算時間は精度を高めるため時間刻みを10分とした。従って季節別の栄養塩収支は、10分×6×24時間×3ヶ月の平均値とする。

### 2) 気象条件

基礎式で使用する気温、全日射量、降水量の気象条件は、福岡管区気象台<sup>9)</sup>の日別値を使用した。

## 3) 淡水流入量、流入負荷量

淡水流入量と流入負荷量は江藤ら<sup>9)</sup>の方法に従い降雨、河川、下水処理の3つ合計とし、それぞれの淡水流入量と流入負荷量の日別値を算出した。

## 4) ボックス間の水の移動量と拡散する量

ボックス間の水の移動量は、流量の収支式より設定した。拡散水量は、福岡市水質測定結果報告<sup>10)</sup>の塩化物イオンの再現性を確認して表3に示すように設定した。

## 5) 水温

水温は福岡市水質測定結果報告<sup>10)</sup>の月1回の観測値を用いた。図3に示す福岡管区気象台<sup>9)</sup>における日平均気温と水温の関係式から10分刻みの水温の値を算出した。

## 6) 溶出速度

溶出速度は、神菌ら<sup>5)</sup>による年平均値（無機態窒素が0.023g/m<sup>2</sup>・日、無機態リンが0.0096g/m<sup>2</sup>・日）を用いた。一般に無機態窒素、無機態リンはともに夏に多く、冬に少ないため、図4に示す気温がピークとなる8月15日を1としたCOSカーブを係数として10分刻みの溶出量を算出した。

## 7) 水中日射量

水中日射量は、ボックス別・層別に、以下の式より求めて与えた。<sup>7)</sup>式中の透明度は、福岡市水質測定結果報告<sup>10)</sup>の月別値を与えた。

$$\text{水中日射量} = 1.7 \div \text{透明度}$$

## 8) ノリやワカメの計算条件

各年度それぞれノリは10月1日に採苗し、15日から3月31日までを漁獲対象期間として200tを漁獲することとし、ワカメは11月1日に採苗し、2月1日から3月31日までを漁獲対象期として720tを漁獲することとした。ノリ、ワカメの漁獲量は、過去28年間の平均漁獲量とした。<sup>11)</sup>

表3 拡散水量の設定値

水平方向の拡散水量			
ボックス間の境界名		係数	設定値 (m <sup>3</sup> /s)
湾奥海域⇔ノリ漁場海域	表層	$KV_{1,1-2}$	$8.0 \times 10^2$
	底層	$KV_{2,1-2}$	$4.0 \times 10^2$
ノリ漁場海域⇔ワカメ漁場海域	表層	$KV_{1,2-3}$	$1.0 \times 10^3$
	底層	$KV_{2,2-3}$	$5.0 \times 10^2$
ワカメ漁場海域⇔境界値	表層	$KV_{1,3-4}$	$1.0 \times 10^3$
	底層	$KV_{2,3-4}$	$5.0 \times 10^2$
鉛直方向の拡散水量			
ボックス間の境界名		係数	設定値 (m <sup>3</sup> /s)
湾奥海域		$KW_{1,3/2}$	$1.5 \times 10^2$
ノリ漁場海域		$KW_{2,3/2}$	$2.2 \times 10^2$
ワカメ漁場海域		$KW_{3,3/2}$	$3.0 \times 10^2$

9) 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<sup>10)</sup>を、ノリが増殖する速度<sup>12)</sup>やワカメが増殖する速度<sup>13,14)</sup>などは、福岡市農林統計<sup>11)</sup>の実測値と計算値との再現性を確認して表4に示すとおりに設定した。

2. ノリ, ワカメ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ノリ, ワカメ養殖に及ぼす影響を詳細にみるためにノリ, ワカメ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。<sup>15)</sup>

$$\text{ノリ, ワカメの生長速度} = \text{最大生長速度} \times \text{水温依存度} (0 \sim 1) \times \text{日射依存度} (0 \sim 1) \times \text{栄養塩依存度} (0 \sim 1)$$

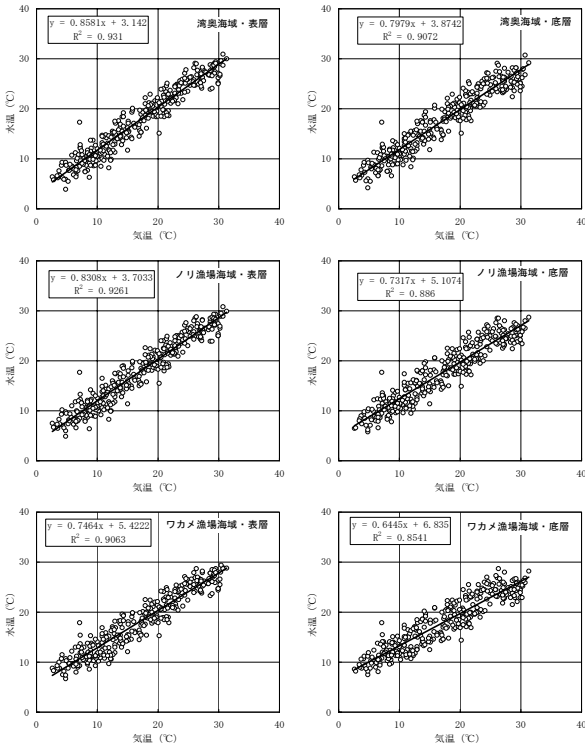


図3 気温と水温の関係

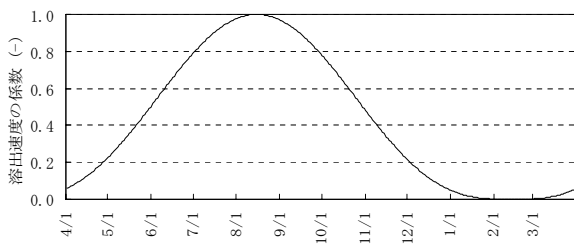


図4 溶出速度の季節変化

この式はノリ, ワカメが理論上最も生長が早い速度(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, 栄養塩がそれぞれの程度制限させているかを表すものである。さらに各依存度(計算値)の経年変化を水温, 全日射量, 窒素・リン負荷量(実測値)の経年変化と比較した。なお, 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。

表4 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
$D_{0-N,0}$	水温0°Cでの0-Nの無機化速度	1/s	0.05
$D_{0-P,0}$	水温0°Cでの0-Pの無機化速度	1/s	0.05
$D_{PL1,0}$	水温0°Cでの植物プランクトン1の枯死速度	1/s	0.03
$D_{PL2,0}$	水温0°Cでの植物プランクトン2の枯死速度	1/s	0.05
$f_{N0}$	ノリのN含有量	-	0.0682
$f_{NP}$	ノリのP含有量	-	0.0068
$f_{PL1}$	植物プランクトン1のN/chl-a比	-	6.022
$f_{PP1}$	植物プランクトン1のP/chl-a比	-	0.833
$f_{PL2}$	植物プランクトン2のN/chl-a比	-	6.022
$f_{PP2}$	植物プランクトン2のP/chl-a比	-	0.833
$f_{Nw}$	ワカメのN含有量	-	0.0304
$f_{Pw}$	ワカメのP含有量	-	0.0036
$G_{max,nori}$	ノリの最大生長速度	1/s	0.3
$G_{max,PL1}$	植物プランクトン1の最大増殖速度	1/s	1.0
$G_{max,PL2}$	植物プランクトン2の最大増殖速度	1/s	1.5
$G_{max,wakame}$	ワカメの最大生長速度	1/s	0.7
$I_{opt,nori}$	ノリの生長に係わる最適光強度	1x	25000
$I_{opt,PL1}$	植物プランクトン1の増殖に係わる最適光強度	1x	15000
$I_{opt,PL2}$	植物プランクトン2の増殖に係わる最適光強度	1x	20000
$I_{opt,wakame}$	ワカメの生長に係わる最適光強度	1x	10000
$K_{N,nori}$	ノリの生長に係わる窒素の半飽和定数	g/m <sup>3</sup>	0.05
$K_{P,nori}$	ノリの生長に係わる窒素の半飽和定数	g/m <sup>3</sup>	0.005
$K_{N,PL1}$	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 <sup>3</sup>	0.03
$K_{P,PL1}$	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 <sup>3</sup>	0.0015
$K_{N,PL2}$	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 <sup>3</sup>	0.03
$K_{P,PL2}$	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 <sup>3</sup>	0.0015
$K_{N,wakame}$	ワカメの生長に係わる窒素の半飽和定数	g/m <sup>3</sup>	0.15
$K_{P,wakame}$	ワカメの生長に係わる窒素の半飽和定数	g/m <sup>3</sup>	0.015
$k_p$	0-Nの無機化速度の温度関数	1/°C	0.0693
$k_p$	0-Pの無機化速度の温度関数	1/°C	0.0693
$k_{PL1}$	植物プランクトン1の枯死速度の温度関数	1/°C	0.0693
$k_{PL2}$	植物プランクトン2の枯死速度の温度関数	1/°C	0.0693
$n_1$	植物プランクトン1の増殖に係わる温度関数の係数	-	2
$n_2$	植物プランクトン2の増殖に係わる温度関数の係数	-	10
$n_3$	ノリの生長に係わる温度関数の係数	-	3
$n_4$	ワカメの生長に係わる温度関数の係数	-	1
$T_{opt,nori}$	ノリの生長に係わる最適水温	°C	13.5
$T_{opt,PL1}$	植物プランクトン1の増殖に係わる最適水温	°C	10
$T_{opt,PL2}$	植物プランクトン2の増殖に係わる最適水温	°C	26
$T_{opt,wakame}$	ワカメの生長に係わる最適水温	°C	20
$W_p$	0-Pの沈降速度	m/s	0.01
$W_n$	0-Nの沈降速度	m/s	0.01
$W_{PL1}$	植物プランクトン1の沈降速度	m/s	0.03
$W_{PL2}$	植物プランクトン2の沈降速度	m/s	0.03

結 果

1. 年代別、季節別の栄養塩収支動向

1980, 1990, 2000年代の季節別の栄養塩収支を図5~8に示す。

季節別の栄養塩収支の動向をみると、全窒素と無機態窒素の現存量は経年的に増加傾向にあり、無機態窒素の増加の程度は全窒素よりも大きい。

全リンと無機態リンの現存量は経年的に減少傾向であり、無機態リンの減少の程度は全リンよりも大きい。

経年的な全リン、無機態リンの減少の程度は、リンの供給量が少ない冬季が他の季節よりも大きい。

海域間の移流・拡散をみると、全窒素、全リン、無機態窒素はいずれも湾奥から湾中央、湾口、湾外へと移流し

ていた。一方、無機態リンは湾全体に供給される栄養塩の量が少なくなり、特に冬季は1980~2000年代にかけて、最も多い湾奥部の流入負荷が0.617→0.377→0.163t/日と減少した。このように湾内の無機態リン濃度が湾外よりも低くなったため、1980年代に湾奥から湾中央、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、特に冬季には湾外から湾口、湾中央に移流していた。

ノリやワカメによる栄養塩の取り込み量と水揚げに伴う栄養塩の取上げ量は1990年代以降、経年的に減少している。減少割合は、無機態リンの現存量が少ない冬季が秋季よりもやや大きかった。

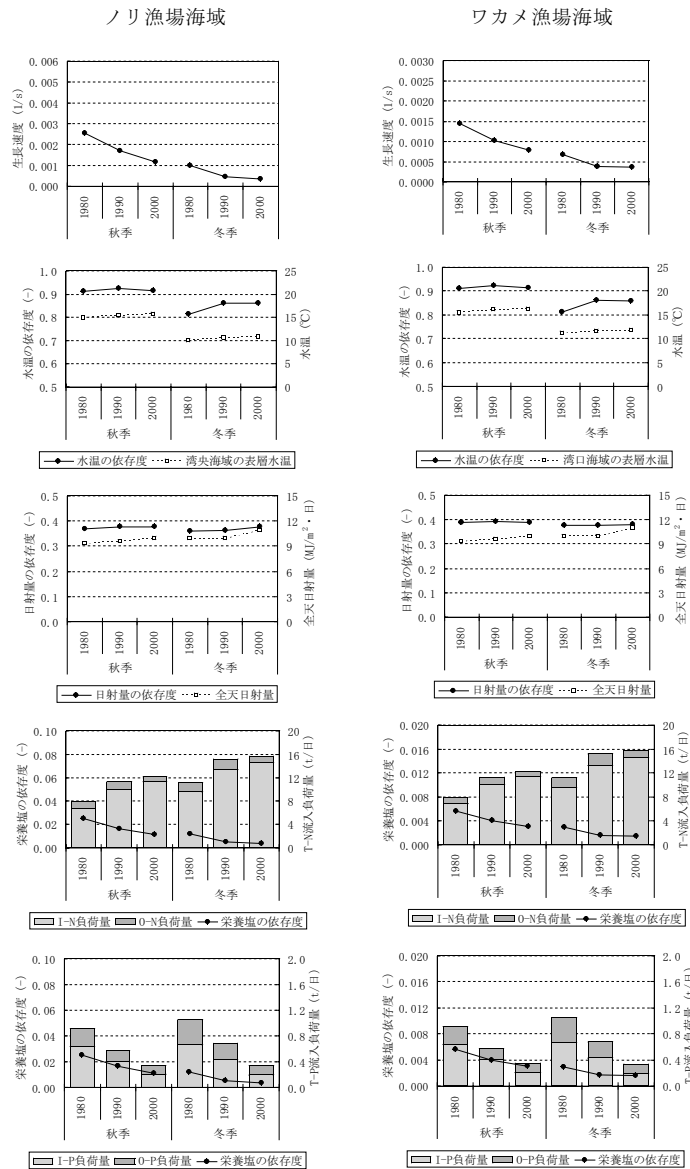


図9 年代別のノリ、ワカメの生長速度と水温、日射量栄養塩それぞれの依存度の経年変化

福岡湾における年代別・季節別栄養塩収支

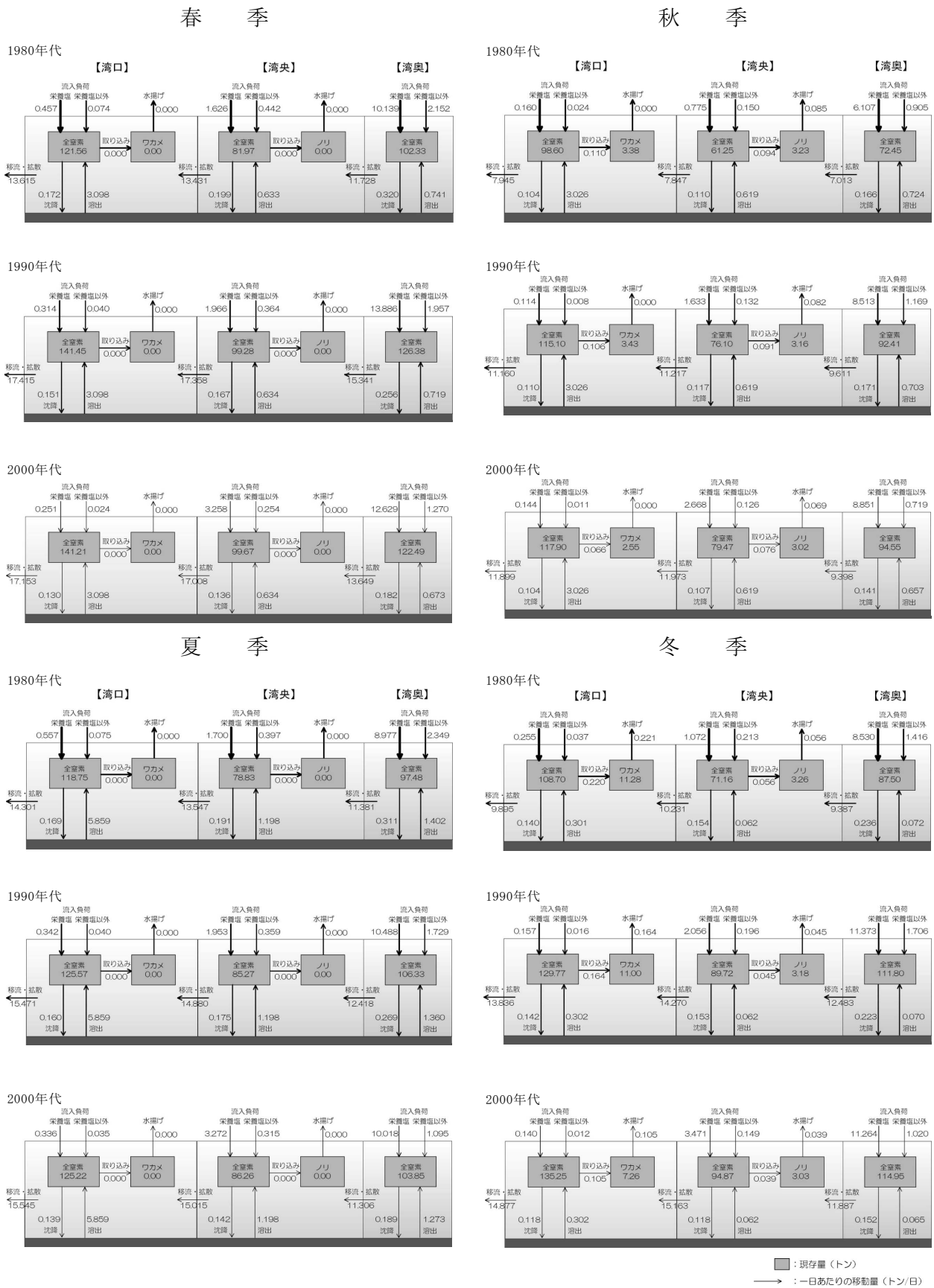
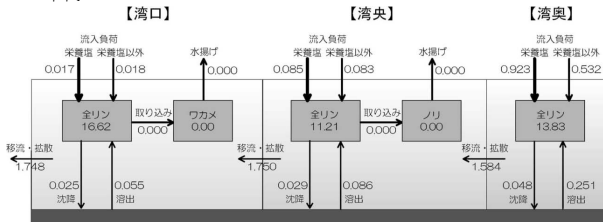


図5 全窒素の季節別収支の経年変化

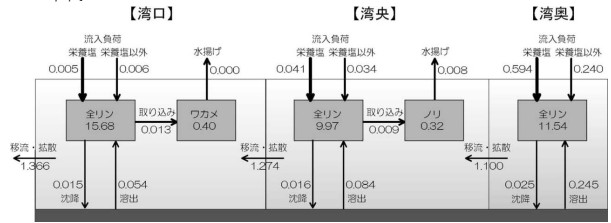
春季

秋季

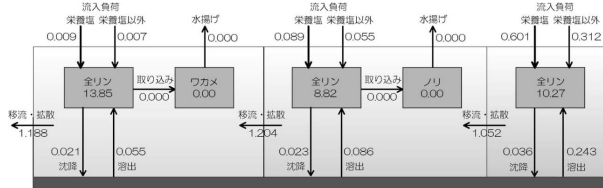
1980年代



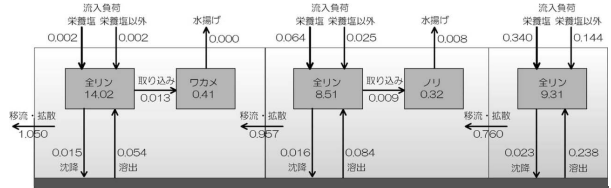
1980年代



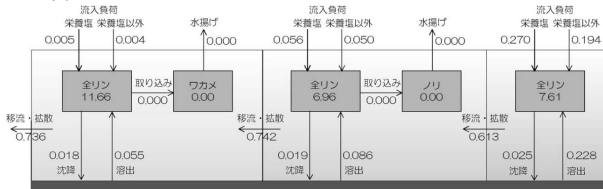
1990年代



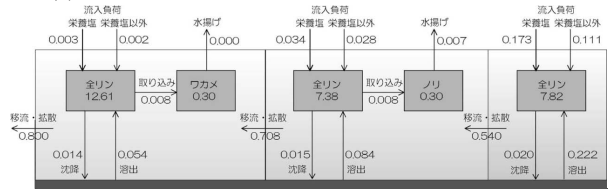
1990年代



2000年代



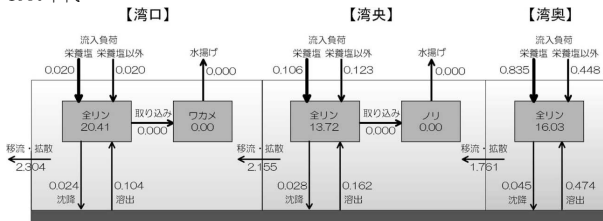
2000年代



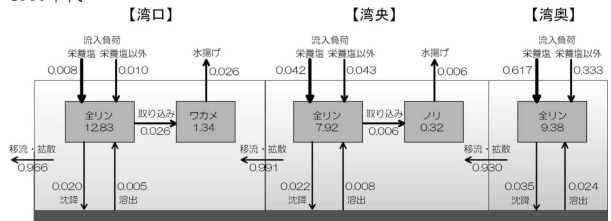
夏季

冬季

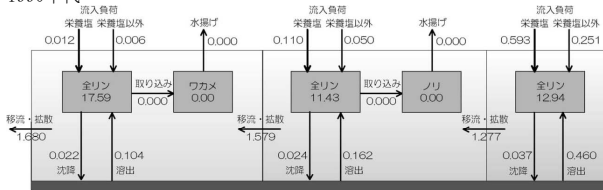
1980年代



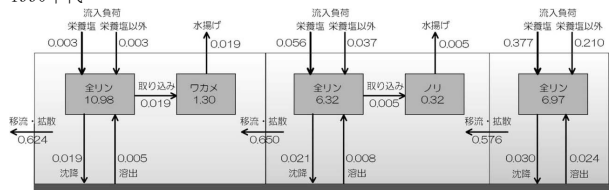
1980年代



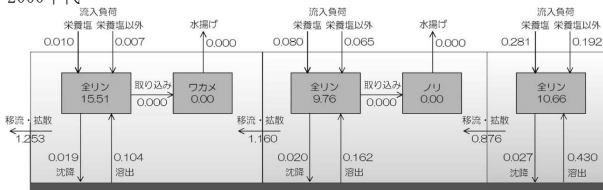
1990年代



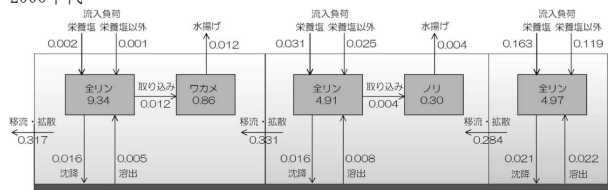
1990年代



2000年代



2000年代



■ : 現存量(トン)  
→ : 一日あたりの移動量(トン/日)

図6 全リンの季節別収支の経年変化

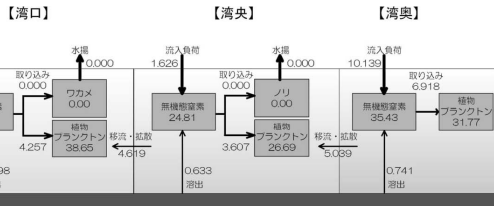


福岡湾における年代別・季節別栄養塩収支

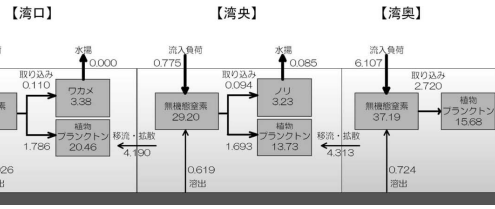
春季

秋季

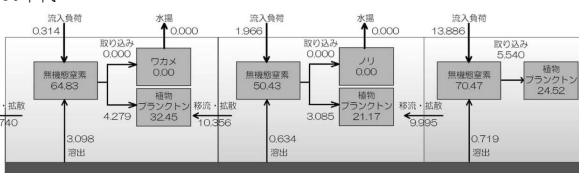
1980年代



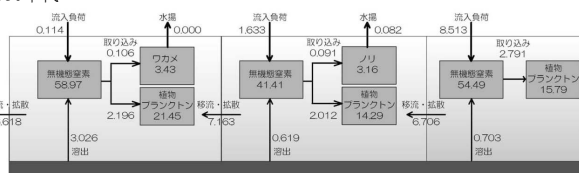
1980年代



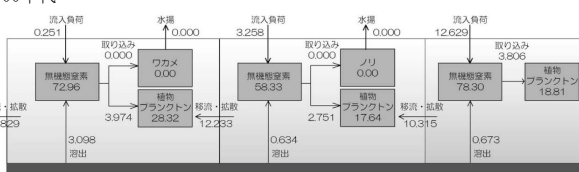
1990年代



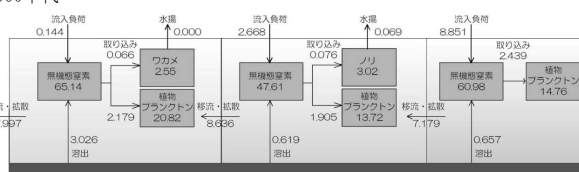
1990年代



2000年代



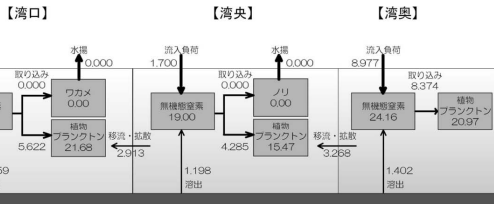
2000年代



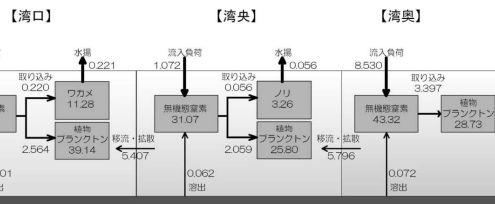
夏季

冬季

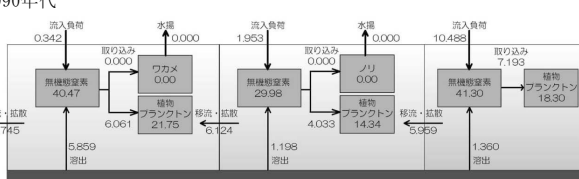
1980年代



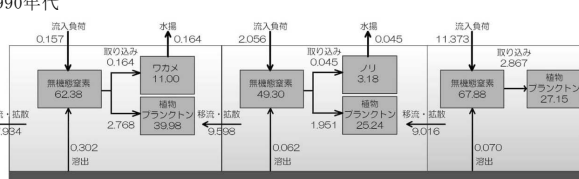
1980年代



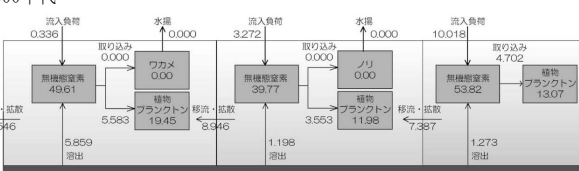
1990年代



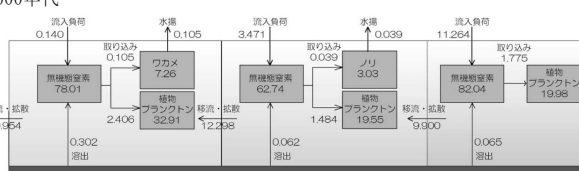
1990年代



2000年代



2000年代



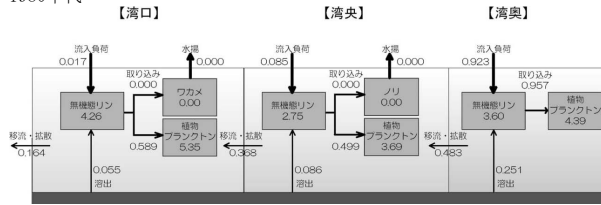
■ : 現存量 (トン)  
 → : 一日あたりの移動量 (トン/日)

図7 無機態窒素の季節別収支の経年変化

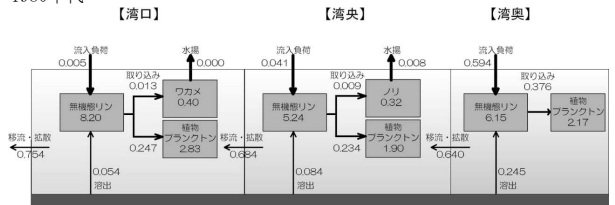
春季

秋季

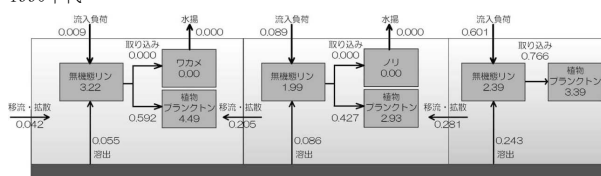
1980年代



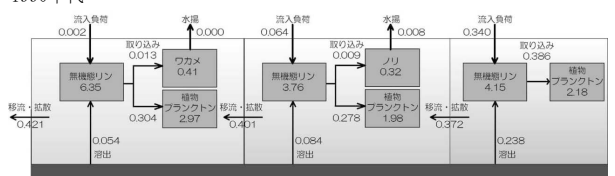
1980年代



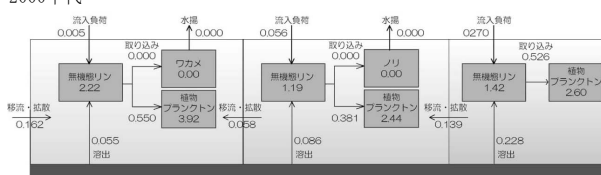
1990年代



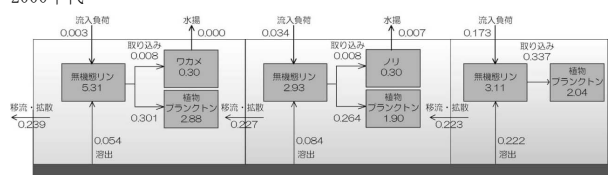
1990年代



2000年代



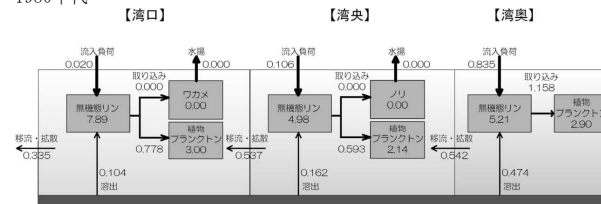
2000年代



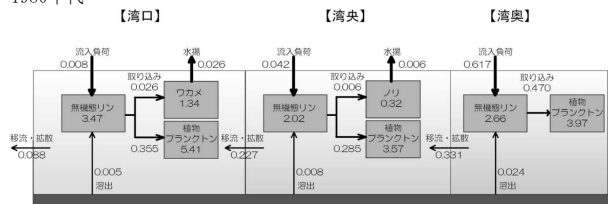
夏季

冬季

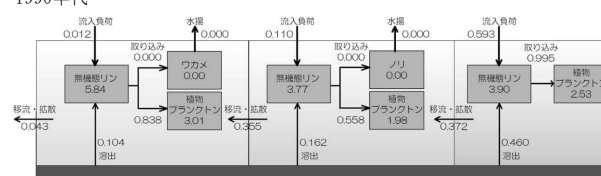
1980年代



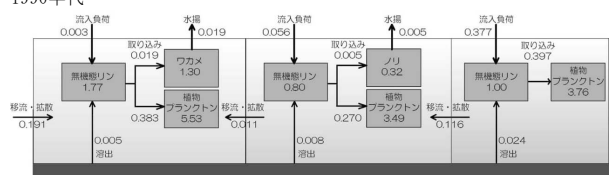
1980年代



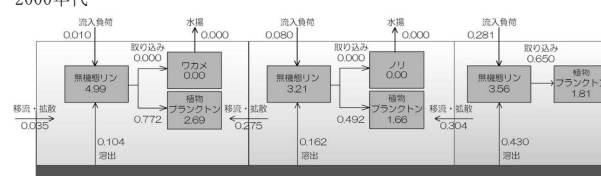
1990年代



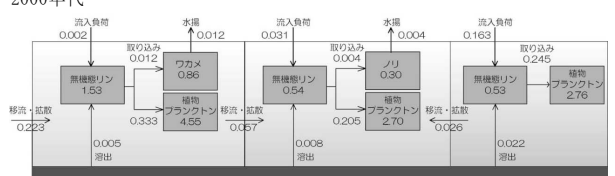
1990年代



2000年代



2000年代



■ : 現存量 (トン)  
→ : 一日あたりの移動量 (トン/日)

図 8 無機態リンの季節別収支の経年変化

## 2. ノリ、ワカメの生長速度の変化と依存度（制限要因）

年代別の秋季、冬季におけるノリ、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・リン負荷量の経年変化を図9に示した。

ノリ、ワカメの生長速度は減少傾向を示した。3つの依存度をみると、栄養塩が減少傾向を示し、他の2つは横ばいであることから、栄養塩の依存度の減少が、ノリ、ワカメの生長速度の減少要因となっていることが伺えた。

実測値の経年変化をみると、水温、全日射量は横ばいであった。全窒素、全リンは、ともに有機態窒素・リンより無機態窒素・リンの割合が多くを占めた。1990年代以降、全窒素、無機態窒素は増加傾向を示したのに対し、全リン、無機態リンは減少傾向を示した。

各依存度を実測値と比較すると、水温、日射量は横ばいで合致する。栄養塩の供給源となる窒素・リン負荷量は、全リン、無機態リンの負荷量が栄養塩依存度と同様に減少傾向を示しており、リンが栄養塩依存度の減少要因となっていた。

## 考 察

福岡湾への負荷量は、全窒素が上昇傾向を、全リンが下降傾向を示し、全リンは河川水由来が約60%、下水処理水由来が約40%を占めている。<sup>9)</sup>

河川水によるリン負荷量の減少要因は家庭食生活、畜産業、農地から河川へのリン減少が指摘されている。<sup>16)</sup>一方、下水処理場は、1990年代前半からリンの高度処理施設が整備され、高度な脱リン処理を行っており、処理水からの全リン、無機態リン負荷量の減少要因となっている。今回の栄養塩収支からもリン負荷量の減少が、湾内の全リン、無機態リン減少要因となっていることが伺える。

福岡湾で減少傾向にある無機態リン収支について、当該湾と同様に都市が隣接する閉鎖的な内湾である大阪湾を比較する。

大阪湾<sup>17)</sup>では、1996年の観測結果を用いたボックスモデルによると、夏季の負荷が7.0t/日に対して湾外へ9.9t/日移流し、冬季の負荷が2.5t/日に対して湾外へ17.5t/日移流した。同時期である1990年代の福岡湾では、夏季の負荷が0.72t/日に対して湾外へ0.04t/日移流し、冬季の負荷が0.44t/日に対して湾内へ0.19t/日移流した。

両湾の容積は、大阪湾が440億 m<sup>3</sup>、福岡湾が14億 m<sup>3</sup>であり、<sup>7)</sup>リン負荷量を1億 m<sup>3</sup>当たりで比較すると、大

阪湾では夏季が0.016t/日、冬季が0.006t/日に対して、福岡湾では夏季が0.051t/日、冬季が0.031t/日と両季節とも福岡湾の方が負荷量が多い。一方、湾内の無機態リン濃度をみると、1985年から1998年の平均値が、大阪湾では0.49μMであったのに対し、福岡湾では0.37μMと大阪湾の7割であった。<sup>6,18)</sup>

福岡湾は、大阪湾に比べて、リン負荷量が多いにもかかわらず、無機態リン濃度が低い点については、福岡湾の方が湾口が狭く、海水交換が行われにくいこと<sup>7)</sup>や負荷後に植物プランクトンやノリ、ワカメ等藻類による消費が大きいことなどが考えられるが、今後、詳細に検討する必要がある。

ノリ、ワカメの生長速度は、1990年代以降、栄養塩特にリンの減少によって減少傾向を示し、栄養塩収支におけるノリ、ワカメの取り込み量や水揚げに伴う栄養塩の取り揚げ量が減少している。

これらの結果は、近年、2、3年に1度の割合でノリ、ワカメの不作年が発生している事実と合致しており、<sup>19,20)</sup>冬季を中心としたリン不足は、ノリ、ワカメ養殖の安定生産を妨げる要因となっている可能性が高い。

今回は負荷量の変動が栄養塩を直接摂取するノリ、ワカメ養殖に及ぼす影響について検討を行い、その結果、長期的なリン負荷量の減少がノリ、ワカメ生産量の減少に関与していることが推察された。

リン負荷量の減少は、ノリ、ワカメ養殖のみならず、福岡湾全体の漁業資源、ひいては福岡湾の生態系に大きな影響を与える恐れがある。今後は、負荷量の変動が基礎生産から漁業生産へどのように変化するかを検討する必要がある。

## 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；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；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；93-101.
- 4) Yanagi, T. : Seasonal variations in nutrient budgets of Hakata Bay, Japan., J. Oceanogr. 1999；55：439-448.

- 5) 神菌真人・池内仁・杉野浩二郎・本田清一郎・佐藤利幸・磯辺篤彦：福岡湾の窒素・リン収支，沿岸海洋研究 2001；第38巻，第2号：131-138.
- 6) 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；51-59.
- 7) 福岡市環境保全課：博多湾環境保全計画，2002.
- 8) 気象庁：福岡県気象月報．(1980-2007).
- 9) 江藤拓也・片山幸恵・江崎恭志：福岡湾への窒素・リン負荷量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；35-40.
- 10) 福岡市環境局：福岡市水質測定結果報告．(1980-2007).
- 11) 福岡市水産振興課：福岡市農林統計．(1980-2007).
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 岡市友利・小森星児・中西弘：瀬戸内海の生物資源と環境，恒星社厚生閣，東京．1996.
- 17) 谷本照巳・星加章・三島康史・柳哲雄：大阪湾における懸濁物質・窒素，リンの収支と循環，海の研究 2001；第10巻 第5号：397-412.
- 18) 永田誠一・井口久和・柴宏有・亀田賢一・中谷明泰・中筋昭夫・井川直人・西田一豊・谷田圭亮：大阪湾における水質の経年変化．兵庫県水産試験場研究報告 1999；第35号：33-42.
- 19) 淵上哲・中本崇：博多湾栄養塩変動現況調査(2)ノリ養殖漁場(3)ワカメ養殖漁場．H20福岡県水産海洋技術センター事業報告 2010；139-150.
- 20) 淵上哲・中本崇：博多湾栄養塩変動現況調査(1)ノリ養殖漁場(2)ワカメ養殖漁場．H21福岡県水産海洋技術センター事業報告 2011；111-122.