

## 伊万里湾の物質循環特性に関する基礎的研究

永瀬真豪\*・古賀憲一\*\*・荒木宏之\*\*\*・山西博幸\*\*\*

### Study on the Characteristic of Transport Process in Imari Bay

By

Shingo Nagase, Kenichi Koga, Hiroyuki Araki and Hiroyuki Yamanishi

**Abstract:** One of marine environmental problems in Imari Bay is the occurrence of red tide although its mechanism is not cleared. Main purpose of this study is to investigate the mass transport process in Imari Bay using the finite volume method. In order to realize behavior of water quality parameters, significant processes of transport and transform are evaluated through sensitivity analysis. It is confirmed that discharged COD loading from land area and algal production have low contribution on the mean level of COD concentration in Imari Bay. The result of sensitivity analysis shows that the mass transport of release from sea bottom is major source to surface water quality. It is suggested that high settling flux based on settling velocity causes high release potential.

**Key words:** Imari Bay, finite volume method, release, sediment, COD, nutrients

#### 1. はじめに

伊万里湾では過去 20 年間ほぼ毎年赤潮が発生している。1999 年 8 月に発生した赤潮は約 8 億円の漁業被害を与えた。これを受けて関係自治体や漁協らによる赤潮対策が行われるようになった。伊万里湾の水質・底質特性として、底質 COD が高いこと及び伊万里湾の水質は底質の影響を強く受けていることが指摘されている<sup>(1)-(3)</sup>。湾内の物質循環機構については未解明な部分が多いようである。本研究は、有限容積法を用いて伊万里湾の物質循環機構の解明を試みたものである。

#### 2. 伊万里湾の概要

伊万里湾は佐賀県と長崎県との間に位置しており、流域は伊万里市、唐津市、松浦市と 3 市にまたがっている。湾内面積は 120km<sup>2</sup>、湾内平均水深は 23m である。佐賀県側と長崎県側の流域面積は、それぞれ 228 km<sup>2</sup>、93km<sup>2</sup> である。図 1 に伊万里湾の概略図を示す。流域の土地利用で主なものは森林と水田であり、これらが流域の約 8 割を占めている。湾内の長崎県海域には鷹島、福島、飛島といった多数の

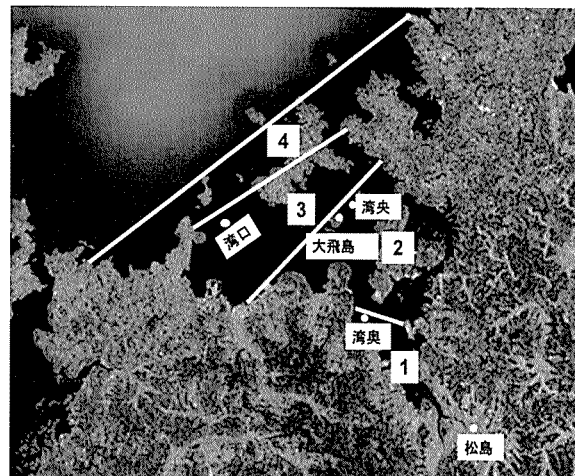


図 1 伊万里湾の概略図

島が存在している。伊万里湾では水産業が営まれブリ、タイ、クルマエビなどの養殖業が行われている。

#### 3. 伊万里湾の水質・底質特性

図 2 に伊万里湾の環境基準点、底質 COD・強熱減量の測定地点を示す<sup>(4)</sup>。伊万里湾の COD、T-N と T-P の環境基準値はそれぞれ 2(mg/l)、0.3(mg/l) と 0.03(mg/l) である。図 3、図 4 に示す水質の経年変化から、COD、窒素、リンは 2000 年以降概ね湾全体

平成 24 年 5 月 1 日受理

\*工学系研究科システム創成科学専攻

\*\*工学系研究科都市工学専攻

\*\*\*佐賀大学低平地沿岸海域研究センター

©佐賀大学大学院工学系研究科

で環境基準値を下回っている。湾口部においては、COD、窒素、リンが 2007 年から減少傾向が確認できる。湾全体の底質 COD、強熱減量は図 5、6 に示す。底質においては底質 COD が 20(mgO<sub>2</sub>/gdry) (水産用基準) を超える地点が湾全体で認められる。近年、底質の実測データに見られる底質 COD の上昇並びに強熱減量の減少傾向から、底質の質的な変化が推測される。

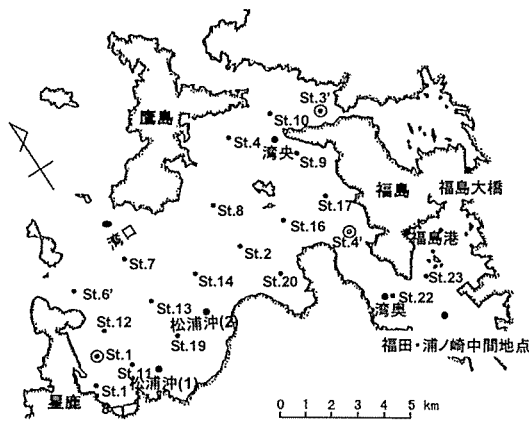


図 2 水質・底質観測地点の概略図

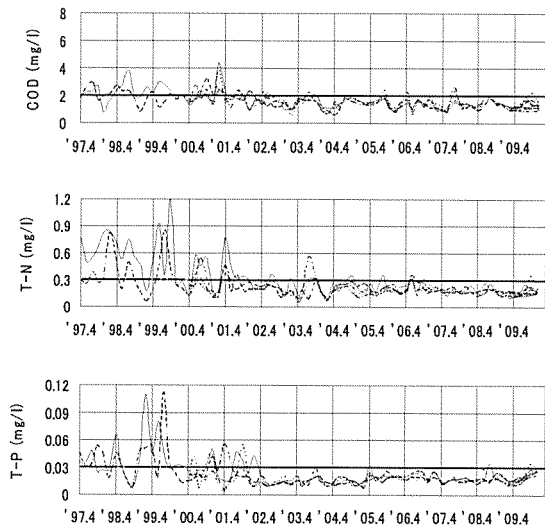


図 3 湾口部の水質の経年変化  
(上 COD 中: T-N 下: T-P)

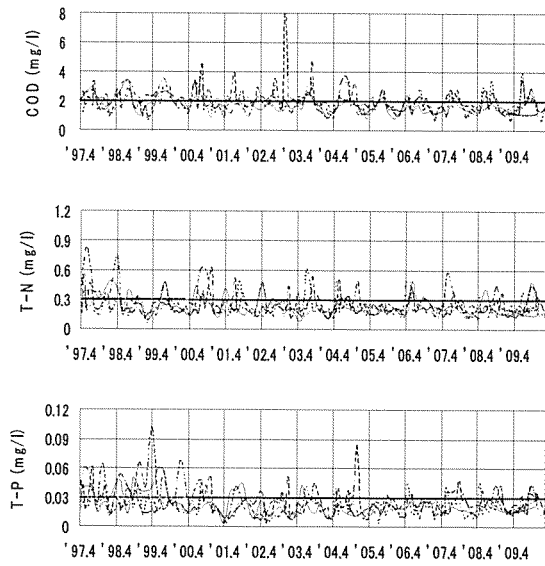
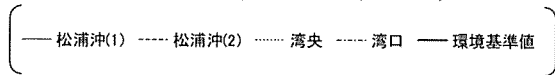


図 4 湾奥部の水質の経年変化  
(上 COD 中: T-N 下: T-P)

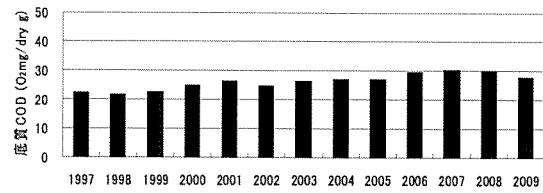
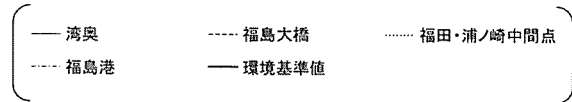


図 5 底質 COD の経年変化

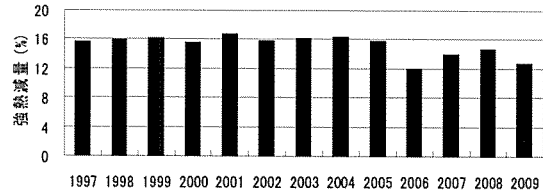


図 6 強熱減量の経年変化

#### 4. 有限容積法

式 (1) に有限容積法の基礎式<sup>(5)</sup>を示す。

$$\frac{d}{dt}(C_{(n)} \cdot V_{(n)}) = \sum \{ Q_{nm} [\delta_{nm} \cdot C_{(m)} + (1 - \delta_{nm}) \cdot C_{(n)}] + E'_{nm} \cdot (C_{(m)} - C_{(n)}) \} \pm S_{(n)} \quad (1)$$

ここに

$C_{(n)}$ :濃度[ML<sup>-3</sup>]

$V_{(n)}$ :体積[L<sup>3</sup>]

$Q_{nm}$ :ボックス m からボックス n に流入量[L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>]

$\delta_{nm}$ :ボックス m からボックス n に移流係数[-]

$E_{nm}$ :ボックス m とボックス n の分散係数[L<sup>3</sup> T<sup>-1</sup>]  
 $S_{(n)}$ :反応項[MT<sup>-1</sup>]  
 n, m :ボックス番号

有限容積法は、有限の容積で積分(平均化)された質量の変化を求める方法である。物質保存等の支配方程式を有限境界域で積分化(体積平均)されたものを離散化して計算する。本研究で採用するモデルでは、時間刻みを1日(約2潮汐)としている。

5. 計算方法

伊万里湾の水質・底質特性を考慮して4つのエレメントに分割した。本研究で計算対象とした水質はChl-a及びCODである。潮位データは松島と大飛島の観測値を用いた。各エレメントにおける水質の実測値に関しては佐賀県及び長崎県公共用水域水質測定データを用いた。陸域からの流入負荷は、L-Q式を参考にし、外海からの境界条件は一定値で与えている。計算期間は1997年4月1日から2010年3月31日として、計算ステップは1日とした。CODについては溶存性と懸濁性の和とした。以下に藻類、CODの反応項等の基礎式を(2)から(7)に示す。

増殖

藻類の増殖速度は Monod 型で与えている<sup>(6)</sup>。

$$Chla_{Gw} = \mu_{max} \cdot T_G \frac{DIN}{K_N + DIN} \frac{PO_4}{K_P + PO_4} Chla \cdot V \quad (2)$$

死滅

藻類の死滅を式(3)に示す<sup>(7)</sup>。

$$Chla_{Dev} = K_D \cdot \theta^{(T-T_D)} \cdot Chla \cdot V \quad (3)$$

沈降

式(4)、(5)に藻類とCODの沈降を示す。

$$Chla_{Sed} = K_{SA} \cdot Chla \cdot A \quad (4)$$

$$COD_{Sed} = K_{SC} \cdot PCOD \cdot A \quad (5)$$

溶出

溶出を式(6)に示す<sup>(8)(13)</sup>。

$$COD_{Rel} = T_C \cdot K_R \cdot A \quad (6)$$

藻類のCODへの換算

Chl-aのCODへの換算を式(7)に示す。

$$COD_{Alg} = Y_C \cdot Chla \quad (7)$$

ここに

$\mu_{max}$ :最大比増殖速度 [T<sup>-1</sup>]

$T_G$ :増殖に関する温度補正係数[-]

$T$ :水温[°C]

$K_N, K_P$ :DIN, PO<sub>4</sub>-Pの半飽和定数[ML<sup>-3</sup>]

$A$ :エレメントの面積[L<sup>2</sup>]

$K_D$ :死滅速度[T<sup>-1</sup>]

$\theta$ :温度係数[-]

$T_D$ :死滅最適温度(°C)

$K_{SA}, K_{SC}$ :藻類、PCODの沈降速度[LT<sup>-1</sup>]

$PCOD$ :粒子態COD [ML<sup>-3</sup>]

$T_C$ :溶出に関する温度係数[-]

$K_R$ :CODに関する溶出速度[ML<sup>-2</sup>T<sup>-1</sup>]

$Y_C$ :藻類からPCODへの換算係数 [MM<sup>-1</sup>]

基準パラメーター、増殖に関する温度補正係数を表1、図7にそれぞれ示す。

表1 基準パラメーター

パラメータ		値	
$\mu_{max}$	最大比増殖速度 (1/d)	藻類1	0.3
		藻類2	0.2
$K_d$	死滅速度 (1/d)	藻類1	0.005
		藻類2	0.003
$\theta$	温度補正係数 (死滅)	藻類1	1.04
		藻類2	1.06
$T_D$	死滅最適温度 (°C)	藻類1	20
		藻類2	20
$K_N$	DINの半飽和定数(mg/l)	藻類1	0.05
		藻類2	0.05
$K_P$	PO <sub>4</sub> Pの半飽和定数(mg/l)	藻類1	0.01
		藻類2	0.01
$K_S$	沈降速度 (m/d)	藻類1	0.1
		藻類2	0.1
		PCOD	0.1
$Y_C$	COD換算係数 (mg-COD/μg-Chl-a)	藻類1	0.035
		藻類2	0.035
$K_R$	溶存性CODの溶出速度 (mg/m <sup>2</sup> /d)	DCOD	0.25
$T_C$	溶出に関する温度係数 (-)	T ≤ 18	0.1
		18 < T ≤ 23	0.5
		23 ≤ T	1

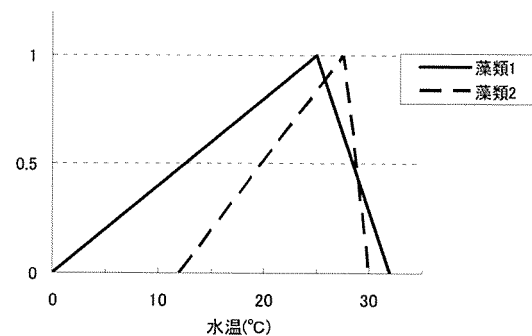


図7 温度補正係数

6. 移流・分散係数の決定

有限容積法により非保存系物質を計算するにあたって、保存系物質の再現結果による移流・分散係数の設定が必要である。本研究では保存系物質として塩分を用いた。伊万里湾の塩分再現結果を図8に示す。湾央(エレメント2)、湾口部(エレメント3)にお

いて実測値との乖離がみられることは、外海との境界条件の与え方によるものと思われる。このことから、湾内の塩分に対して外海の影響が強いと推測される。しかし、降雨時における塩分の低下など定性的な傾向は再現されている。エレメント間の移流過程と分散過程を用いて以下に示す水質計算を行った。

### 7. 流入負荷の影響

図9に水質反応項を考慮せず陸域からの流入負荷のみで行ったCOD計算結果を示す。陸域からの負荷の影響が顕著にでる湾奥においても降雨時の一時的な計算値の上昇を除いて実測値のレベルを下回っている。従って、伊万里湾のCODは流入負荷に加えて、付加的な負荷(内部生産、溶出等)の影響を受けていることが確認される。本研究では、既往の研究<sup>(1)</sup>で示唆されている内部生産と底質からの溶出を付加的な負荷として計算を実施した。

### 8. 栄養塩

藻類の計算を行うにあたって必要となる栄養塩の計算を行い図10、11に示す。湾口部(エレメント3)におけるDINの平均的な値は湾内の他の地点(湾奥部、湾中央部)と比較して低い値を示しており、後に示す湾口部でのChl-aの再現結果からも、藻類による消費は考えられないために外海との海水交換による希釈が示唆される。2008年4月以降を除いて概ね実測値を再現できている。また、窒素に対するリンの比率は高いようである。春季及び秋季の実測値においてSSの上昇とPO<sub>4</sub>-Pの上昇が同時期に見られる、このことはSSの巻き上げ由来によるものと考えられる。

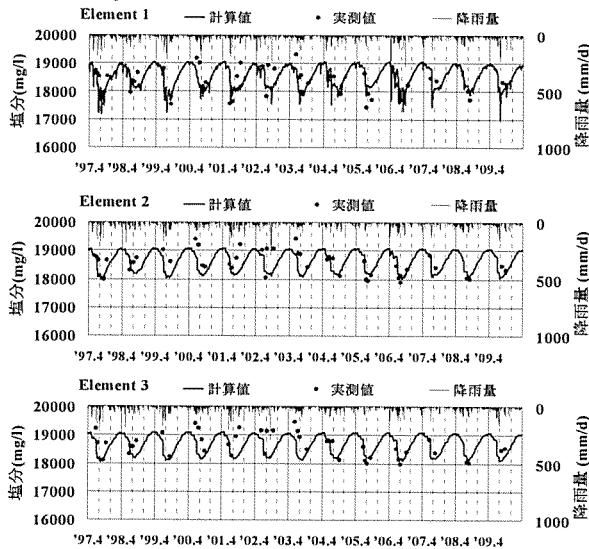


図8 塩分の計算結果  
(上: 湾奥 中: 湾央 下: 湾口)

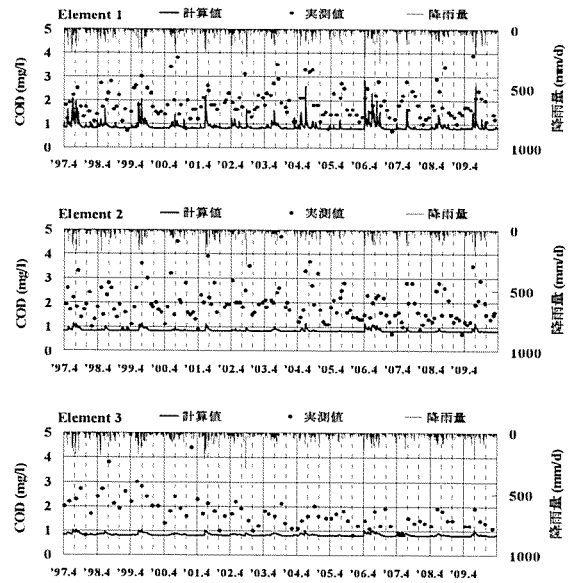


図9 流入負荷のみでの計算結果  
(上: 湾奥 中: 湾央 下: 湾口)

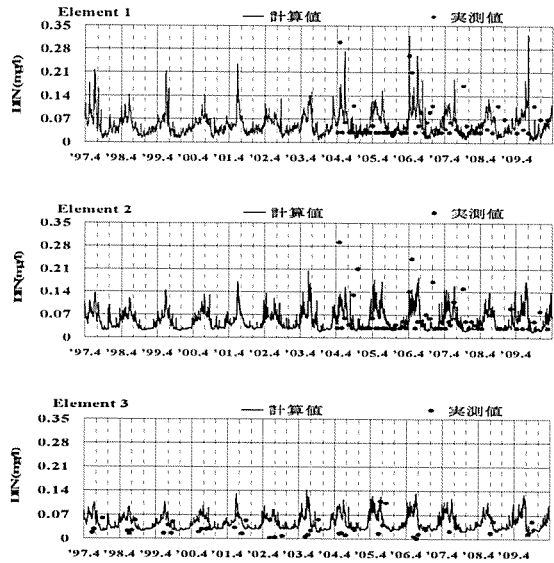


図10 DINの計算結果  
(上: 湾奥 中: 湾央 下: 湾口)

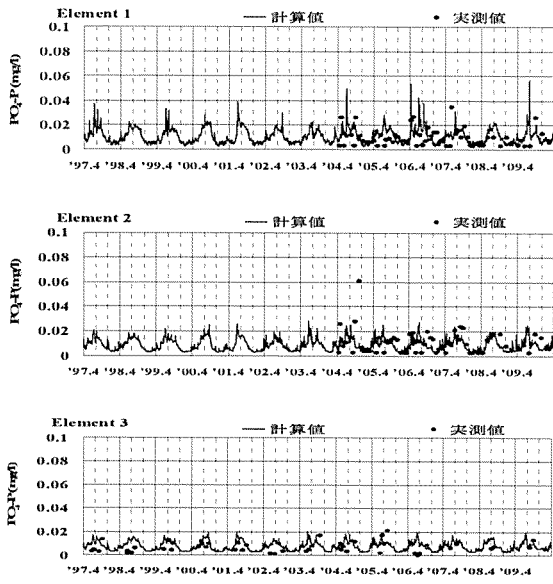


図11 PO<sub>4</sub>-Pの計算結果  
(上：湾奥 中：湾央 下：湾口)

### 9. 藻類の影響

藻類、陸域からの流入負荷と内部生産の双方を考慮した計算を行い、その結果を図12、13に示す。夏季の藻類増殖に伴うChl-aの再現性は比較的良好であるが、CODについては湾奥部においても実測値との乖離が確認される。Chl-aのCODへの換算係数については、有明海で確認された値を用いていること、別途で行った換算係数についての感度解析の結果から実測値との乖離が確認できるために、底質からの溶出現象を考慮する必要性が確認された。

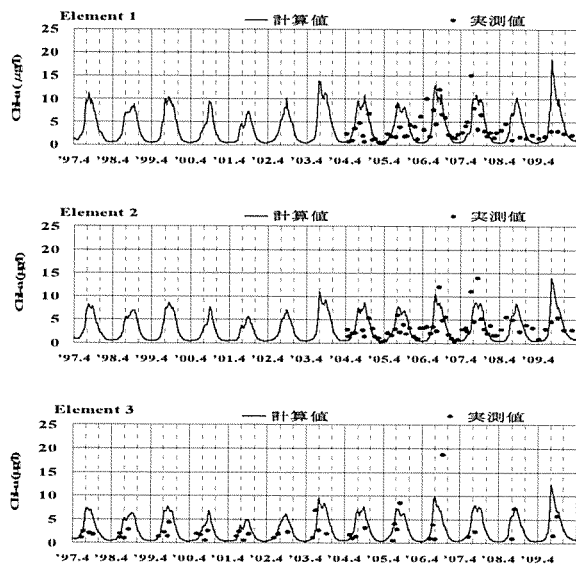


図12 藻類の計算結果  
(上：湾奥 中：湾央 下：湾口)

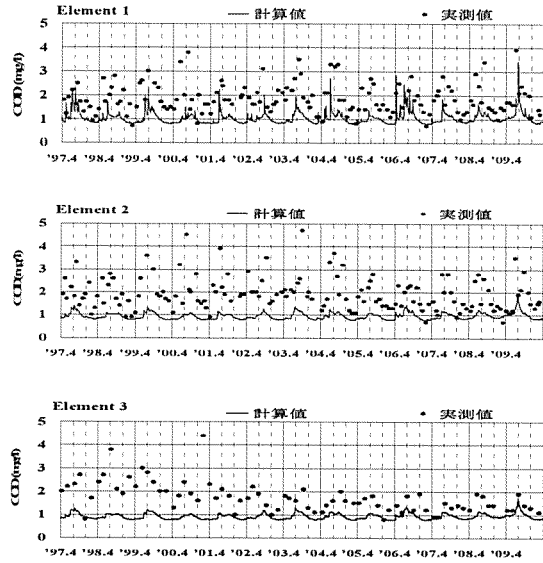


図13 内部生産も考慮した計算結果  
(上：湾奥 中：湾央 下：湾口)

### 10. 溶出の影響

流入負荷、内部生産に加え溶出を考慮したCODの再現結果を図14に示す。溶出を考慮したことにより夏季における湾奥のCOD濃度の増加(季節的な変化)が確認される。

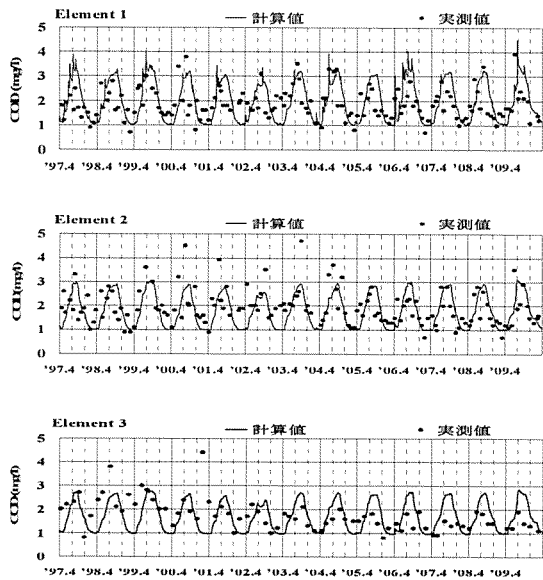


図14 CODの計算結果  
(上：湾奥 中：湾央 下：湾口)

### 11. 溶出特性

平均的な伊万里湾、大阪湾並びに三河湾のCOD、T-NとT-Pの溶出速度並びに上層水の年間平均水質を表2に示す。表2から、伊万里湾の溶出速度は他の水域に比べて大きいことが分かる。また、海域の

COD、T-N と T-P 濃度から、伊万里湾の溶出ポテンシャルは、これらの海域に比して上層水質で規定される沈降フラックスでなく、相対的に高沈降フラックスにより底質が形成されているものと考えられる。このことは、前述の底質 COD が近年上昇傾向にある一方で、強熱減量は減少していることから、伊万里湾の底質が比較的新鮮な（排出時間の短い）有機物で構成されている可能性が高いことを示唆している。

表 2 溶出速度と年平均水質

		COD	T-N	T-P
溶出速度 (mg/m <sup>2</sup> /d)	伊万里湾	1000	130	13
	大阪湾 <sup>(14)</sup> (15)	130	30	3
	三河湾 <sup>(16)</sup>	84	15	8.4
上層水 (mg/l)	伊万里湾	1.5	0.4	0.05
	大阪湾	2.6	0.6	0.06
	三河湾	3.8	0.5	0.06

## 1 2. まとめ

底質の影響を考慮して水質計算をすることにより夏季における COD 濃度の増加を再現することができた。溶出速度を計算期間で一定として計算を行っているために 2003 年以降の湾口部においては実測値との乖離が生じている、このことから湾口部の底質に変化が生じていると考えられる。また、大阪湾及び三河湾の溶出速度と年間平均水質濃度の比較から、伊万里湾の溶出特性は、沈降速度の速い物質が沈降するため、水質濃度に依存しない堆積過程によって底質の形成が行われているものと推察される。

## 参 考 文 献

- (1) 永瀬真豪, 古賀憲一: 伊万里湾の水質・底質環境に関する基礎的研究, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, 第 VII 部門, pp.27-28 (2010)
- (2) 永瀬真豪, 古賀憲一, 橋口尚平, V. Narumol: 伊万里湾の水質解析モデル, 平成 22 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.811-812 (2010)
- (3) 永瀬真豪, 古賀憲一, V. Narumol: 有限容積モデルを用いた伊万里湾の水質解析, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, 第 VII 部門, pp.47-48 (2011)
- (4) 国土交通省九州地方整備局: 伊万里湾に係る下水道整備総合計画に関する基本方針算定調査について, pp.7-9 (平成 21 年 12 月)
- (5) L.G Rich: Environmental systems engineering, McGraw-Hill. ,p.139 (1973)
- (6) 奥川光治, 宗宮功: 数理モデルによる富栄養化のシミュレーション解析, 土木学会論文集, No. 337, pp.119-126 (1983)
- (7) Michael J. et al.: MINLAKE A DYNAMIC LAKE WATER QUALITY, Ecological Modelling, Volume 43, Issues 3-4, November, pp 155-182(1988)
- (8) 河合泰治ら: 底泥からの栄養塩の溶出, 衛生工学研究討論会, pp91-98 (1979)

- (9) 細見正明, 須藤 隆一: 底泥からの窒素の溶出, 衛生工学研究論文集, pp100-107 (1983)
- (10) Thomas. L et al.: Phosphorus dynamics in hypereutrophic lake sediments, Water Research, Volume 12, Issue 9, pp677-685(1978)
- (11) Masaaki Hosomi et al.: Release of phosphorus from lake sediments, Environment International, Volume 7, Issue 2, pp93-98(1982)
- (12) 古米弘明: 自然水域における底泥からのリンの溶出, 東京大学学位論文 (1983)
- (13) 堀江毅, 細川恭史: 海底中のリンの挙動モデルについて, 港湾空港技術研究所報告第 23 巻, 第 2 (1984)
- (14) 近畿地方整備局: 平成 19 年度大阪湾流域別下水道整備総合計画, pp.106 (2008 年 3 月)
- (15) (財)九州環境管理協会有明海研究: 海域の高度な栄養塩管理, pp.126 (平成 23 年 10 月)
- (16) 国土技術政策総合研究所: 流域における物質循環の動態と水域環境への影響に関する研究, pp.6-51 (2009)