

有明海における懸濁性物質の長期変動 に関する基礎的研究

石井孝憲¹・Patchraporn ITTISUKANANTH²・古賀憲一³
荒木宏之⁴・山西博幸⁵・園田彩乃⁶

¹学生会員 佐賀大学大学院工学系研究科 都市工学専攻(〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地)
E-mail:07537004@edu.cc.saga-u.ac.jp

²学生会員 佐賀大学大学院工学系研究科 システム生産科学専攻(〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地)
E-mail: 05642004@edu.cc.saga-u.ac.jp

³正会員 佐賀大学教授 理工学部(〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地)
E-mail:kogake@cc.saga-u.ac.jp

⁴正会員 佐賀大学教授 低平地研究センター(〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地)
E-mail: araki@ilt.saga-u.ac.jp

⁵正会員 佐賀大学准教授 低平地研究センター(〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地)
E-mail: yamanisi@ilt.saga-u.ac.jp

⁶正会員 東京建設コンサルタント 九州支店技術第 1 部(〒810-0801 福岡市博多区中洲 5 丁目 6 番 20 号)
E-mail:sonoda-a@tokencon.co.jp

有明海は九州に位置する閉鎖性の強い内湾海域である。近年、有明海では赤潮発生頻度が増加傾向にあり、その要因の一つとして有明海の透明度の上昇が指摘されている。本研究は、有明海における透明度、すなわち懸濁性物質濃度(以下、SS濃度)の長期的変動について現象解明の観点から検討を加えたものである。有限容積モデルによりSS濃度(透明度換算)の再現性を確認した後、懸濁性物質の輸送・変換特性を把握するための感度解析を行った。湾口部においては潮位上昇に伴うSS濃度希釈の促進、すなわち透明度上昇の可能性が確認された。湾奥部においては底泥の巻き上げ、沈降特性の変化が懸濁性物質の挙動に影響を及ぼしている可能性が示唆された。

Key Words : Ariake Sea, Transparency, SS, Finite-volume model, Sensitivity analysis

1. はじめに

有明海における赤潮発生頻度の増加要因の一つとして有明海の透明度の上昇が指摘されている¹⁾。有明海の透明度の上昇原因としては、潮流速の減少による浮泥の巻き上がりの減少、河川からの土砂流入の減少、有明海外海からの流入量増加などが挙げられている¹⁾。透明度は、一般的に懸濁性物質濃度、藻類濃度そして色度等の影響を受ける。有明海の透明度を把握するためには有明海特有の泥質干潟の巻き上げ・沈降特性の影響も考慮に入れ、懸濁性物質の長期的変動特性を明らかにする必要がある。本研究は、有明海における透明度、すなわち懸濁性物質濃度の長期的変動について現象解明の観点から検討を加えたものである。具体的には、懸濁性物質の輸

送・変換を考慮した有限容積モデルにより SS 濃度の再現性を確認し、感度解析を行い、SS 濃度の変動機構の解明を試みた。

2. 有明海の概要

有明海は九州西部に位置し、湾軸約 100km、平均幅約 15km、平均水深約 20m、海域面積 1,700km²の内海である。我国最大の干満差(約 6m)により国内で最も広大な干潟(約 20,000ha)が生じ、その面積は日本の全干潟の約 4 割を占める。筑後川と緑川河口部では干潮時に海岸から沖合いまで約 6km の干潟が出現する。熊本県沿岸では砂質、湾奥部では泥質の干潟が形成されている。また、有

明海は多くの内湾性種の生物を有し、ムツゴロウやシオマネキなどの貴重種が生息している。

(1) 透明度

図-1に有明海における透明度の経年変化(1977~2004年)を示す。有明海の湾口及び湾中央部において透明度は上昇傾向にあるものの湾奥部の透明度は、ほぼ一定の水準で推移していることがわかる²⁾。

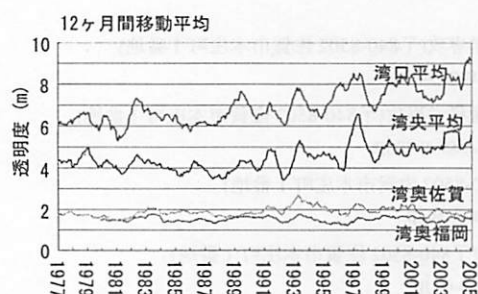


図-1 有明海における透明度の経年変化

(2) 流入河川

有明海には8河川の1級河川が流入している。図-2に、これら流入河川の日平均流量を示す。筑後川は日平均流量 $120\text{m}^3/\text{s}$ 程度と有明海流入河川の中で最も流量が多い。

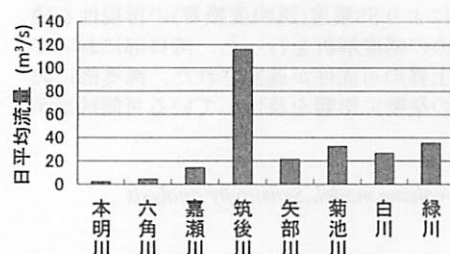


図-2 流入河川の日平均流量(1991~2004年)

3. 計算方法

有明海を11の領域ボックスで構成されることとして水質計算を行った。有限容積モデルの構成概略図を図-3に示す。水質濃度は各領域を空間的に平均化したものである。陸域からの流入負荷はLQ式に基づいて与えた。LQ式の一例を図-4に示す。図-4において過去30年間における筑後川と菊池川のLQ回帰式に顕著な変化は認められないようである。また、紙面の都合上割愛するが、有明海に流入する他の1級河川におけるLQ回帰式にも顕著な変化は認められなかった。SS濃度に関する物質

輸送・変換過程は沈降、巻き上げ、藻類由来によるものとした。図-5に示すようにSS濃度は透明度の実測値との相関関係から求めた。



図-3 有限容積モデル構成概略図

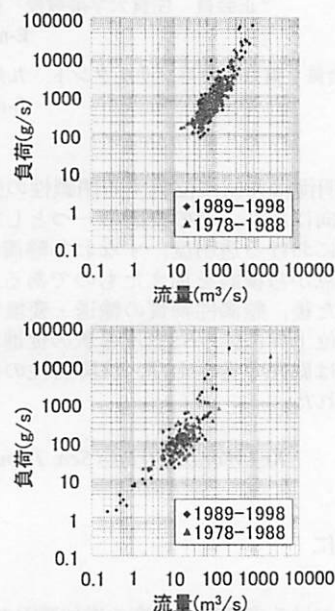


図-4 LQ式(上:筑後川 下:菊池川)

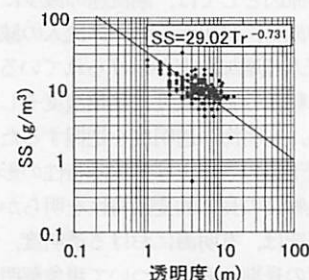


図-5 SS濃度。と透明度の相関³⁾

実測値は有明海で月1回大潮満潮時に行われている浅海定線調査データである。計算期間は1977～2005年の29年間で、計算時間は1日とした。計算対象とするボックスn内の物質収支に関する計算式を以下に示す⁴⁾。

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

c: 濃度[ML³], V: 体積[L³], Q_{nm}: ボックスnからボックスmへの流量[L³/T], δ_{nm}: ボックスnとボックスmの移流係数[無次元], δ_{nm}=1-δ_{mn}, E'_{nm}: ボックスnとボックスmの分散係数[L³/T], E'_{nm}=E'_{mn}, S: 反応項[MT], n,m: ボックス番号

SS濃度計算の反応項は、巻き上げ、沈降と藻類によって与えた。

$$S_{(n)} = SS_{RES} - SS_{SED} + SS_{CHL} \quad (2)$$

・巻き上げ

$$SS_{RES} = SS_{TID} + SS_{WIN} \quad (3)$$

$$SS_{TID} = R_T \cdot K_{RT} \frac{A_{MUD}}{D} \quad (4)$$

v_w>v_w^{*}のとき

$$SS_{WIN} = R_W \cdot K_{RW} \left[\left(\phi \frac{v_w}{v_w^*} \right)^2 - 1 \right] \frac{A_{MUD}}{D} \quad (5)$$

v_w≤v_w^{*}のとき

$$SS_{WIN} = 0 \quad (6)$$

・沈降

塩分>30000(g/m³)のとき

$$SS_{SED} = R_{S1} \cdot K_S \cdot SS \cdot A \quad (7)$$

塩分≤30000(g/m³)のとき

$$SS_{SED} = R_{S2} \cdot K_S \cdot SS \cdot A \quad (8)$$

・藻類由来のSS

$$SS_{CHL} = Y_S \cdot CHL \quad (9)$$

SS_{RES}: 巻き上げ由来のSS, SS_{SED}: 沈降, SS_{CHL}: 藻類由来のSS, SS_{TID}: 潮流による巻き上げ, SS_{WIN}: 風による巻き上げ, R_T: 潮流の巻き上げ係数[無次元], K_{RT}: 潮流による巻き上げ速度[ML/T], A_{MUD}: 干潟面積[L²],

D: 水深[L], R_W: 風の巻き上げ係数[無次元], K_{RW}: 風による巻き上げ速度[ML/T], v_w^{*}: 限界風速[L/T], v_w: 日最大風速[L/T], W_j: 風による影響係数[無次元], R_{S1}: 非降雨時沈降係数(フロックの沈降速度をボックス毎に調整するためのもの)[無次元], R_{S2}: 洪水時沈降係数(大粒子)[無次元], K_S: 沈降速度[L/T], SS: SS濃度[ML³], A: 面積[L²], Y_S: Chl-aのSS換算係数[無次元], CHL: Chl-a濃度[ML³]

4. 計算結果及び考察

長期的変動を把握するために、まず直近の10年間(1991～2000年)を対象にしてSS濃度の計算を行い、沈降と巻き上げ特性に関する基準パラメーターを定めた(表-1)。基準パラメーターを用いた際の湾口、湾央及び湾奥部の計算結果を図-6に示す。

表-1 計算に用いた基準パラメーター

パラメーター	値	単位
沈降速度	K _S	0.1 m/day
巻き上げ速度(風)	K _{RW}	2.0 g/m/day
巻き上げ速度(潮汐)	K _{RT}	10 g/m/day
限界風速	v _w [*]	4.0 m/s

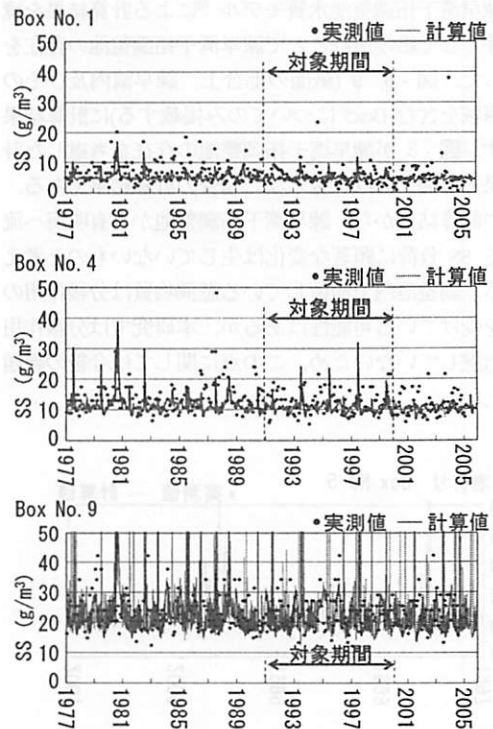


図-6 基準パラメーターを用いた計算結果

(1) 流入負荷の変化の影響

陸域流入負荷の変化が有明海の SS 濃度に及ぼす影響を把握するために、流入負荷を 2 倍にして、感度解析を行った。計算結果(紙面の都合上、筑後川河口の Box9 のみ掲載する)を図-7 に示す。図-6、図-7 から、流入負荷を 2 倍としても、降雨時を除いて SS 濃度に顕著な変化が確認されないことから、本例に示す範囲内では、長期的な SS 濃度の変化に及ぼす陸域負荷の影響は小さいことが分かる。また過去約 30 年間に於ける主要河川の L-Q 回帰式に顕著な変化が生じていないことから、陸域負荷の供給形態は長期的に見て大きく変化していないものと推察される。

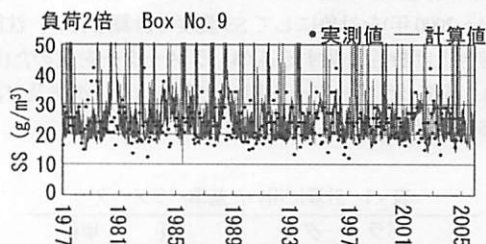


図-7 陸域からの流入負荷の影響

諫早湾干拓調整池からの SS 排出負荷が有明海の SS 濃度に与える影響について検討した⁹⁾。本モデルでは諫早湾干拓調整池の存在を考慮していないため、Box6 の位置に諫早湾干拓調整池水質モデル⁹⁾による計算結果を境界条件として組み込むことで諫早湾干拓調整池の存在を表現した。図-8、9 (紙面の都合上、諫早湾内及びその周辺海域を含む Box5 についてのみ掲載する)に計算結果を示す。図-8 が諫早湾干拓調整池の存在を考慮した計算結果で、図-9 は考慮しない場合の計算結果である。双方の計算結果から、諫早湾干拓調整池から有明海へ流出する SS 負荷に顕著な変化は生じていないものと考えられる。調整池内で滞留している懸濁物質は分級作用の影響を受けている可能性はあるが、本研究では分級作用まで考慮していないため、この点に関しては今後の課題としたい。

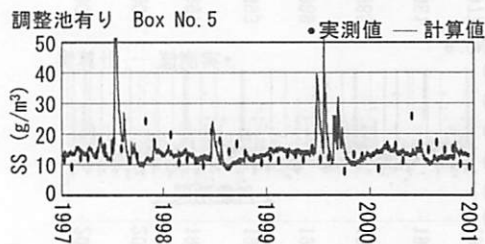


図-8 諫早湾及び周辺海域の計算結果 (調整池有り)

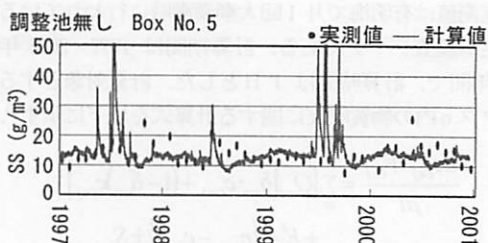


図-9 諫早湾及び周辺海域の計算結果 (調整池無し)

(2) 潮位上昇に伴う外海の影響

図-10 に示すように近年の有明海の潮位は 30 年程度で約 10cm 程度上昇したことが分かる。潮位上昇に伴う外海と有明海との交換流量の増大が有明海の SS 濃度に与える影響について検討した。本研究で使用したモデルは、保存系物質である塩分の良好な再現結果を得ることで、有明海内の輸送過程を再現している。よって分散過程を変化させ感度解析を行うには、塩分の再現性を維持しておく必要がある。図-11(a)、(b)に外海との分散係数を 2 倍(塩分の再現性を維持するための限界)にした計算結果と基準パラメーターでの計算結果との比較を示す(比較結果を見やすくするために実測値は図示していない)。外海と有明海の流量交換が大きくなることで、若干ではあるが湾口部の SS 濃度が希釈され透明度上昇の可能性が示唆された。

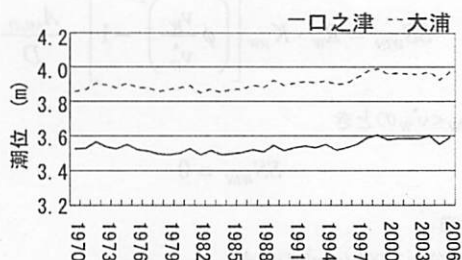


図-10 有明海の年平均潮位の経年変化²⁾

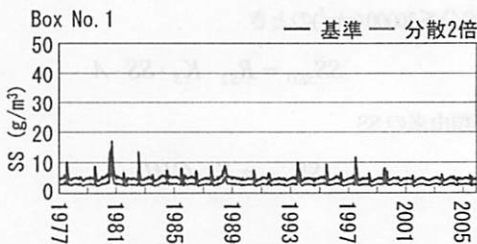


図-11(a) 計算結果の比較

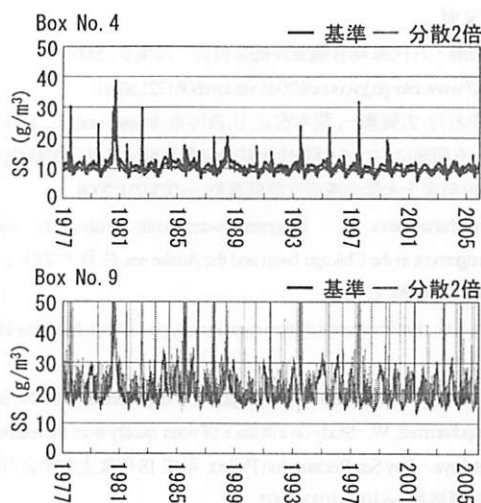


図 - 11 (b) 計算結果の比較

(3) 沈降・巻き上げ特性の変化

a) 沈降特性の変化の影響

近年、有明海の泥質干潟は細粒化傾向にあることが指摘されている¹⁾。底質の変化に伴い有明海の SS の沈降・巻き上げ特性も長期に変化すると考えられる。直近の 10 年間と比較して 1970 年代の 10 年間における湾奥部の SS の再現性を高めるために、沈降速度を変えて計算した結果を図 - 12 に示す。基準パラメータの計算結果を図 - 13 に示す。図 - 14, 15 に示す結果は、湾口部における計算結果の比較例である。図 - 12, 13 から、直近 10 年間の再現性を得るには沈降速度が 0.1m/day 程度であるのに対して、1970 年代の 10 年間の再現性を高めようとするには 2~3 割程度(0.07~0.08m/day)小さくする必要がある。一方、図 - 14, 15 に示すように、湾口部においては、SS 濃度が低いために沈降速度に対する感度が見かけ上低く現れている。湾口部の SS 実測濃度は若干ではあるが長期的に、近年減少する傾向も認められることから、沈降速度の影響に加え、湾口部においては流入負荷の減少(少雨傾向による流出負荷の減少)による影響も否定できないようである。

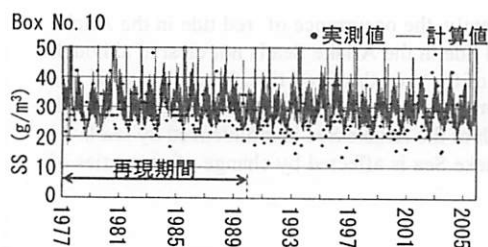


図 - 12 湾奥部(Box10)における沈降速度 0.07m/day の計算結果
(70・80年代の再現性重視)

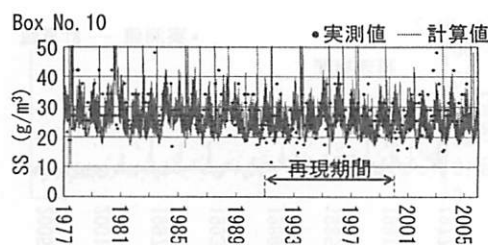


図 - 13 湾奥部(Box10)における沈降速度 0.1m/day の計算結果
(直近 10 年間の再現性重視)

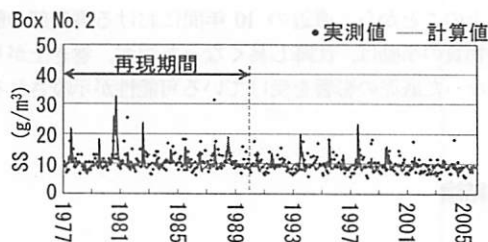


図 - 14 湾口部(Box2)における沈降速度 0.07m/day の計算結果
(70・80年代の再現性重視)

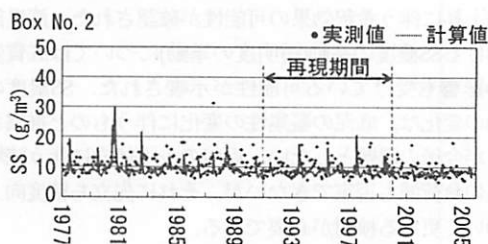


図 - 15 湾口部(Box2)における沈降速度 0.1m/day の計算結果
(直近 10 年間の再現性重視)

b) 巻き上げ特性の変化の影響

前項と同様の傾向は、巻き上げに関するパラメータを変更しても得ることができる(図 - 16, 17)²⁾。直近 10 年間の SS 濃度を再現するには巻き上げを生じさせる最小の風速(限界風速)は 4.0m/s であるのに対して 1970 年代では限界風速を 3.0m/s まで下げる必要がある。

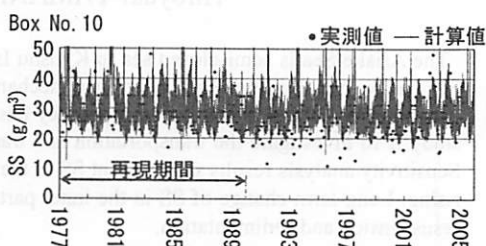


図 - 16 湾奥部(Box10)における限界風速 3.0m/s の計算結果
(70・80年代の再現性重視)

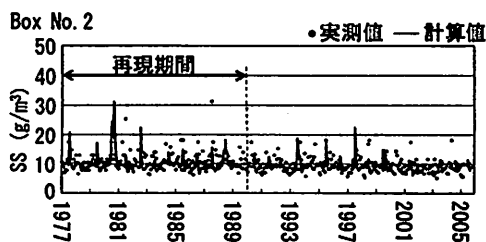


図 - 17 湾口部 (Box2)における限界風速 3.0m/s の計算結果
(70・80年代の再現性重視)

以上のことから、直近の 10 年間における湾奥部の懸濁性物質の挙動は、沈降し易くなった浮泥、巻き上がり難くなった底泥の影響を受けている可能性が示唆される。

5. 結論

本研究では有限容積モデルを用いて感度解析を行うことで、透明度上昇の要因、SS濃度の挙動の変化について検討した。湾口部における透明度の変化については、潮位上昇に伴う希釈効果の可能性が確認された。湾奥部におけるSS濃度の挙動(透明度の挙動)については底質変化の影響も受けている可能性が示唆された。SS濃度の挙動の変化は、底泥の凝集性の変化に伴うものと推察されるが今後の課題としたい。近年の少雨傾向に伴う陸域からの負荷減も否定できないが、それに先立ち精度向上について更なる検討が必要である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、九州地方整備局など関係機関からデータ提供など協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 有明海・八代海 総合調査評価委員会 環境省, 2006.
<http://www.env.go.jp/council/20ari-yatsu/rep061221/all.pdf>
- 2) 園田彩乃, 古賀憲一, 荒木宏之, 山西博幸, Ittisukananth, P., 石井孝憲: 有明海における懸濁性物質の挙動に関する基礎的研究, 平成 19 年度土木学会西部支部概要集, pp.973-974, 2008.
- 3) Vongthanasunthor, N.: Integrated water quality analysis for water management in the Chikugo basin and the Ariake sea, 佐賀大学博士後期課程学位論文, 2005.
- 4) Rich, L.G.: Environmental system engineering, pp.139-141, McGraw-Hill, 1973.
- 5) Yamasaki, Y., Ittisukananth, P., Koga, K., Vongthanasunthor, N., and Liengcharemsit, W.: Study on influence of water quality from the reservoir of Isahaya - Bay Sea Reclamation Project, 平成 18 年度土木学会西部支部概要集, pp.1031-1032, 2007.
- 6) 野口潤二, 古賀憲一, 荒木宏之, 山西博幸, Ittisukananth, P., 山崎良和: 干拓調整池の懸濁性物質の挙動に関する基礎的研究, 平成 18 年度土木学会西部支部概要集, pp.1029-1030, 2007.
- 7) 荒木宏之, Vongthanasunthor, N., 古賀憲一, 山西博幸, 大串浩一郎: 有明海の水質とボックスモデルを用いたシミュレーション, 平成 14 年環境工学研究論文集, 第 39 卷, pp.229-234, 2002.
- 8) 速水祐一: 有明海奥部における底質・懸濁物輸送の変化について, 平成 20 年度シンポジウム「有明海再生に向けての新たなステップ」資料集, 2008.
- 9) 平成 18 年度成果発表会講演録, NPO 法人有明海再生機構, 2007.
- 10) 雨量・流量データベース, 日本河川協会, 2007.

STUDY ON LONG-TERM CHANGE OF SUSPENDED SOLIDS IN THE ARIAKE SEA

Takanori ISHII, Patchraporn ITTISUKANANTH, Kenichi KOGA, Hiroyuki ARAKI,
Hiroyuki YAMANISHI and Ayano SONODA

The Ariake Sea is semi-closed sea in Kyushu Island. Recently, the occurrence of red tide in the Ariake Sea has been increasing. The occurrence mechanism of red tide in the Ariake Sea is not cleared although it is pointed out that change of transparency has an effect of the growth of red tide. The purpose of this study is to investigate the transportation and transformation processes of SS using finite-volume model. Sensitivity analysis results suggest that SS in the gulf mouth of the Ariake Sea is influenced by sea level rising. Long-term change of SS in the inner part of the Ariake Sea is affected by change of properties of resuspension and sedimentation.