

諫早湾締切堤の進捗に伴う 湾内の水質変化の予測と評価に関する研究

西田 渉*・野口 正人*
満原 一徳**・柳本 諭***

Estimation of the Qualitative Changes in the Isahaya Bay under Construction of a Sea Dyke

by

Wataru NISHIDA*, Masato NOGUCHI*
Kazunori MITSUHARA** and Satoshi YANAMOTO***

In order to investigate the qualitative changes in Isahaya bay by construction of a sea dyke, field observation and numerical simulation have been carried out. Field observation was held for 12 hours at estuary of Honmyo River, main river to the Isahaya bay. Based on the analysis of observation, it becomes clear that water quality indices change periodically and some of them have peak values in the cycle. And suspended solids(SS) affect to another indices for water quality. Therefore, numerical model of SS is designed in regard to the resuspension and the deposition of particles. Calculated results show that current in the bay varies gradually with the progress of construction as well as changes of a range of wetland. The effect of deposition is dominant in the pond, consequently its influence on water quality can be considered from the bottom. Furthermore, the resuspension is occurred by the gate control, attention should be paid not to degrade the water quality.

1. はじめに

水域において大規模な社会基盤整備が実施された場合、当該区域の物質・水循環機構に大きな変化が生じ、水環境に与える影響は永い将来にわたることが予想される。従って、水環境の保全、保護に配慮した形で水域の整備を進めていくには、整備に伴って生じる水環境への悪影響を適切に予測し、最小限に抑えなければならない。

ところで長崎県東部の諫早湾では、西暦2000年の竣工を目指して諫早湾干拓事業が行われており、現在は湾奥部約3,550haを締め切る潮受堤の建設が完了間近である。潮受堤が完成する際には堤内に造成される調

整池の閉鎖性が強くなるために、富栄養化に伴う水環境の悪化が懸念されており、関係行政機関による環境モニタリングが定期的実施されている。著者らも諫早湾の環境が今後も好ましい状態で維持され続けることを願い、現地観測、水質変化機構のモデル化と数値シミュレーションを行うことで水質変化機構の把握を試みてきた¹⁻²⁾。これまでに得られた結果から、本明川河口付近の水質は、潮汐及び浮遊懸濁粒子(SS)の影響を受けた変化を示すことが推察された。

そこで本論では、現状における水質変化を明らかにするために、まず本明川河口付近において連続観測を実施した。つぎに、水質変化機構のモデル化を底泥の

平成8年4月26日受理

*社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

**佐賀県庁 (Saga Prefectural Office)

***大学院修士課程社会開発工学専攻 (Graduate student, Department of Civil Engineering)

挙動に注目して行い、数値シミュレーション結果を観測結果と比較することによりモデルの妥当性を検討した。最後に潮受堤の進捗に伴う湾内の水質変化の予測シミュレーションを行った。

2. 現地観測の概要

本明川での観測は、Figure 1 に示す河口から 0.8 km 地点の不知火橋で、平成 7 年 9 月 7 日に 12 時間連続で実施された。計測は 1.5 時間毎に河道中央の表面水を採取して行われた。計測項目は流速、川幅、水温、SS、生物学的酸素要求量 (BOD₅)、塩化物イオン濃度 (Cl⁻) 等である。また、ろ過処理した試料から得られた BOD₅ を溶存態 BOD₅ (BOD_d) とし、BOD₅ と BOD_d との差を懸濁態 BOD₅ (BOD_p) とした。なお、水位については、河川情報センター端末機 (モデル III 型) から 1 時間毎のデータを入手した。

観測から得られた水位、流速、DO、BOD₅、SS、Cl⁻の結果を Figure 2 に示す。この図を見ると、観測中に諫早湾の潮位変化に影響を受けた一回の水位変化が見られ、観測点での干満差は 3.0m 以上であることが分かる。干潮時の流速がほぼ一定となっているのは、Cl⁻値が小さくなっていることを考えると河川の固有流量で流下しているためであると思われる。BOD₅ と SS については、水位が最低になり始める時刻に最大値が現れており、その時刻の Cl⁻値は減少し、流速は最も速くなっていることが分かる。その後 SS 値は、急激に減少するが、BOD₅ は一度低下した後、再び増加している。このような時間変化は、以前行った連続観測の結果にも現れている。BOD_p と BOD_d については、BOD_p が BOD₅ と同様な変化を示している。一方、BOD_d は BOD_p とは異なり、干潮時に Cl⁻値が減少するにつれて漸増するような変化を示している。これらの指標が Cl⁻値の小さい干潮時に増加するのは、上流で流域からの汚濁負荷を受けた河川水

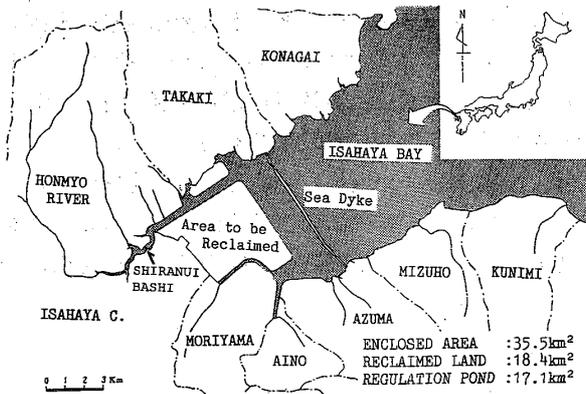


Figure 1. Schematic view of Isahaya Bay.

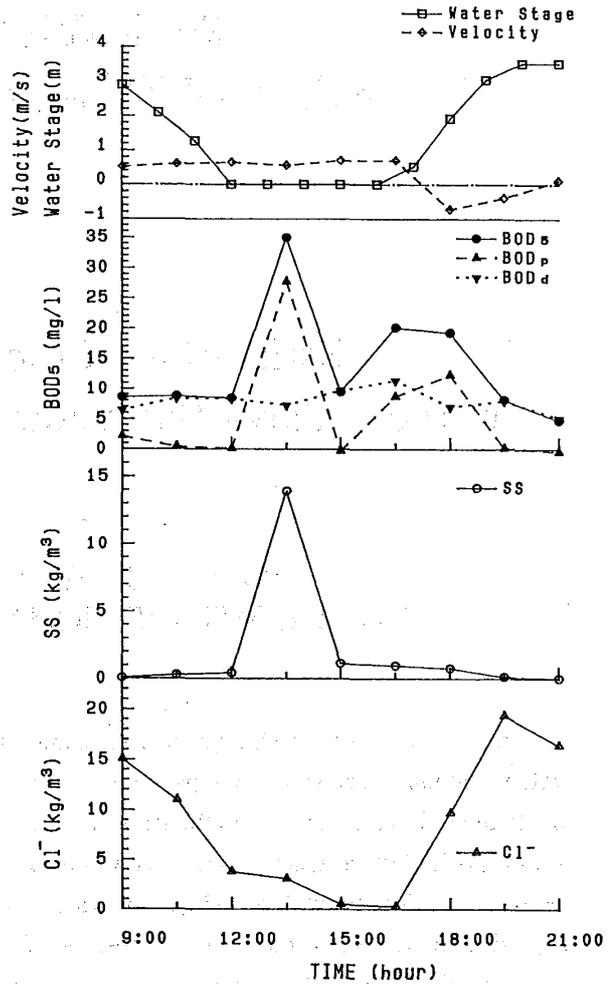


Figure 2. The temporal changes of each observed value.

が観測地点付近まで到達し、その時の SS には比較的多量の有機物が吸着しているためと思われる。以上の観測結果から、本明川河口付近での BOD₅ は、河川水や海水中の BOD_d と SS に含まれる BOD_p の両方の影響を受けて変化するものと思われる。

BOD と SS の関係と、最小二乗法により求められ

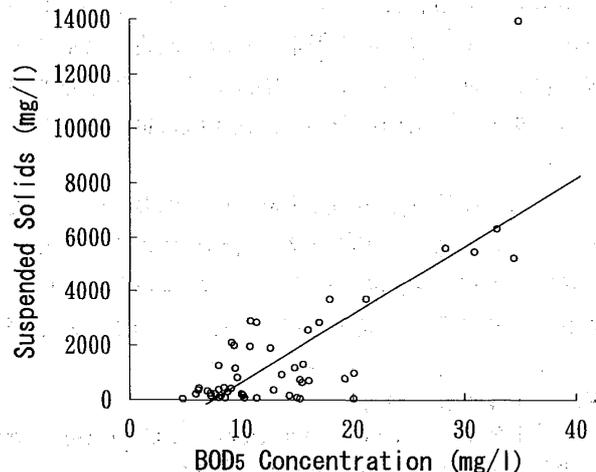


Figure 3. The relationship between SS and BOD₅.

た回帰直線とを Figure 3 に示す。なお表示している結果には、以前に本明川の感潮域で行われた連続観測から得られた結果も併記されている。図から SS 値が小さい時にはばらつきが見られるが、BOD 5 と SS には正の相関があり、相関係数は 0.784 と比較的高い値を示す。この結果から感潮域での BOD 5 の変化を明らかにするためには、SS 発生の評価が無視できないことが分かる。

3. SS の変化予測モデル

観測結果から SS が水質に少なからず影響を及ぼしているものと推察された。したがって、まずは SS の挙動に着目し、本明川を含めた形で水質変化予測モデルを作成した。SS については、Figure 4 に示されたように、底泥粒子の河床からの巻き上げと懸濁粒子の沈降の効果とに着目し、SS の収支式に組み込むことにした。底泥粒子の水底からの巻き上げ量については pick-up rate³⁾ を用いて評価し、離脱後の粒子の掃流形態は粒子が微細であることから、直ちに浮遊懸濁態として流送されるものとした。底泥粒子は、初期に厚さ D_{ini} で水底に堆積しているものとするが、流れによる堆積粒子の粗粒化や底泥粒子の粘着性等を考慮するために、粒子の存在位置が深くなるに従い離脱し難くなるものと仮定し、係数 (P_1) を導入した。本モデルは、海域と河川との物質交換を考慮できるように、河川に対し 1 次元解析法を、海域に対し 3 次元解析法を適用した。数値シミュレーションに用いた基礎方程式は、連続方程式、運動量方程式、SS の収支式であるが、紙面の都合上、SS の収支式を示すに止める。

SS の収支式

$$\frac{DC}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \frac{\partial F_d}{\partial z} + \frac{\partial F_c}{\partial z} \quad (1)$$

ただし、右辺第 5 項は、底層のみで考慮される。巻き上げフラックス (F_c)

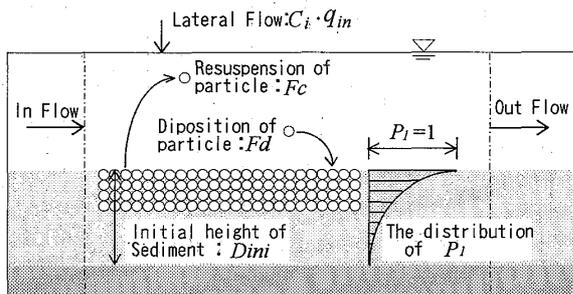


Figure 4. The definition sketch.

$$\begin{cases} \tau_{*f} \leq \tau_{*cf} \dots \dots \dots F_c = 0 \\ \tau_{*f} > \tau_{*cf} \dots \dots \dots F_c = \sigma \cdot v_s \cdot P_s \cdot P_1 / \alpha_s \end{cases} \quad (2)$$

$$P_1 = \exp\{-\gamma \cdot (1 - D/D_{ini})\} \quad (3)$$

沈降フラックス (F_d)

$$F_d = C_b \cdot w_0 \cdot \exp(-V^2/V_c^2) \quad (4)$$

ここに、 t : 時間, x, y, z : 空間変数, C : SS の濃度, K_x, K_y, K_z : 乱流拡散係数, F_c : 巻き上げフラックス, F_d : 沈降フラックス, τ_* : 無次元底面摩擦応力, τ_{*cf} : 無次元底面限界摩擦応力, σ : 底泥粒子の密度, v_s : 底泥粒子の体積, P_s : 底泥粒子の pick-up rate, α_s : 底泥粒子の投影面積, w_0 : SS の沈降速度, V : 流速, V_c : 浮遊限界流速, D : 底泥粒子の体積厚さ, D_{ini} : 底泥粒子の初期堆積厚さである。底泥粒子は、比重 2.60, 粒径 5.0×10^{-2} mm の球体と仮定し、河川及び海域での D_{ini} はそれぞれ 0.03, 0.01 m とした。基礎方程式は体積積分された後、陽形式の有限差分法を用いて離散化される。計算領域は、河川については河口から 6063.0 m 地点の裏山橋までとし、海域については河口から湾口へ 13.2 km までとした。空間差分間隔は 1 次元解析領域で 52.0 ~ 147.0 m, 3 次元解析領域は水平方向に 200 m の格子で覆い、水深方向に 2.0 m とした。計算時間間隔は、計算安定条件である C.F.L 条件を満たすように 2 秒とした。Manning の粗度係数は、0.040 ~ 0.021 sec/m^{1/3} の範囲で変化させている。各境界条件は、下流端では周期 12.5 時間、振幅 1.7 m の正弦波を与えることとし、上流端では従来の観測結果を基に決定した。

計算は、まず本モデルを現地に適用し、モデルの妥当性について検討した。つぎに潮受堤の建設による影響について、潮受堤の建設前、建設中、建設後の 3 つの場合について計算を行った。建設中の条件としては、湾奥の北部の小江干拓地は完成し、潮受堤は標高 -2.0 m まで建設が進んでいるものとされた。建設後の条件は、目下のところ潮受堤内の水位が -1.0 m で管理される計画であるため、潮受堤の南部と北部にある 2 つの水門で水位調整がなされるものとされた。

4. モデルの現地適用

本明川の不知火橋地点における水位、流速、SS、 D/D_{ini} の計算結果を Figure 5 に示す。なお、 D/D_{ini} とは底泥粒子の初期堆積厚さに対する堆積割合である。

まず SS 値の変化については、満潮時付近で値が減少していることが分かる。これは同時刻の流速が小さ

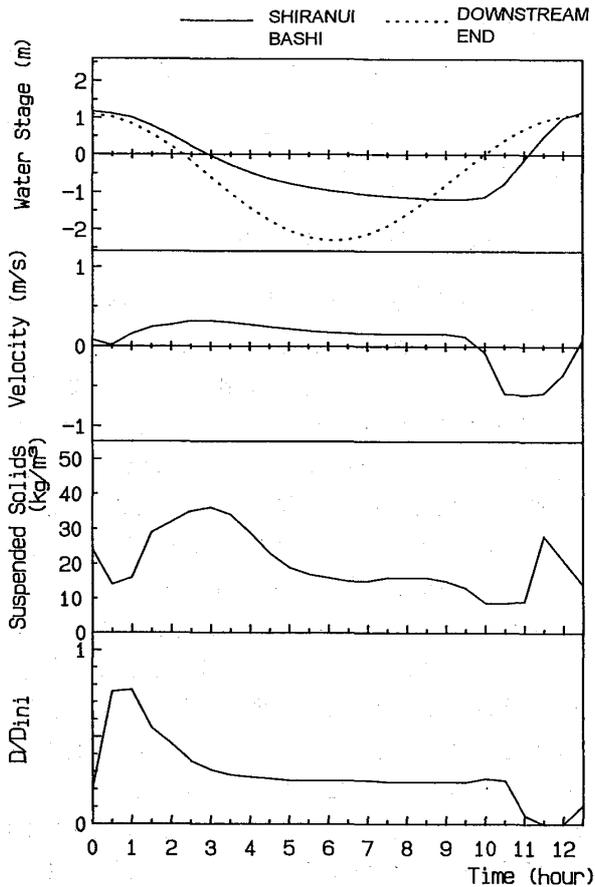


Figure 5. Calculated results at Shiranui bashi.

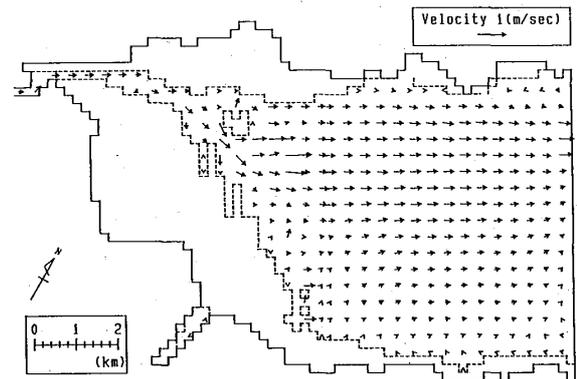
いこと、 D/D_{ini} が急激に増加していることから、SS の沈降量が巻き上げ量よりも多いためであると考えられる。その後、次第に水位が下がり流速が大きくなるにつれ、SS は急激に増加するが、水位が最低になるまでの間に SS 値は減少していることが分かる。このことは D/D_{ini} の変化から明らかなように、水位が低下し、流速が最大となるまでは底泥粒子は急激に巻き上げられているが、次第に堆積土砂量が減少し、底泥粒子の離脱の容易さを表す係数 (P_1) が小さくなることで巻き上げ量が減少するためと考えられる。一方、満ち潮時に SS 値は再び増加している。これは流速の絶対値が大きく、底泥粒子の巻き上げが行われているためであり、引き潮時に海域に押し流された SS 値の大きい水塊が再び河道へと押し戻されてくるためである。SS の計算結果を Figure 2 の観測結果と比較すると、SS 値が引き潮時に大きくなること、またその後の最低水位に至るまでの間に SS 値が減少していることなど、本モデルにより観測結果が概ね表現されているものと思われる。ただし、水位上昇時に SS 値が増加することや、引き潮時の SS の変化の割合に観測結果との違いがみられるが、これらの違いは計算結果が断面平均量で表示されていることや、観測の採水間隔

が1時間30分と長かったことによるものと思われる。

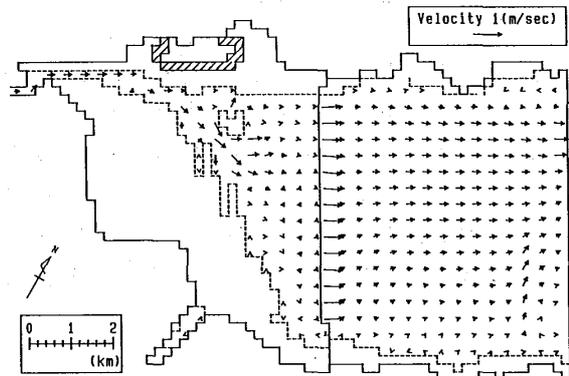
5. 諫早湾締切堤築造による湾内の水量・水質変化予測

計算から得られた干潮時における流速の平面分布を Figure 6 に、また鉛直分布を Figure 7 に示す。

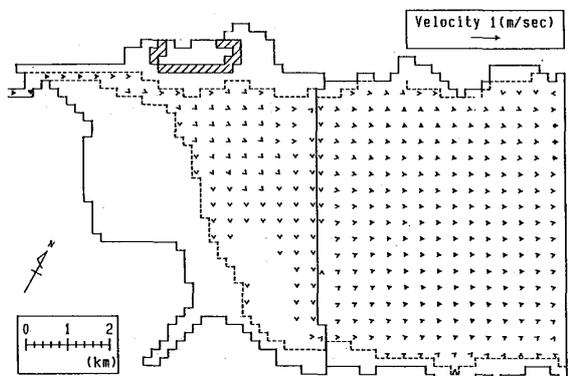
まず潮受堤建設前では、干潮時に広大な干潟が現れており、河川からの流入水は滞筋に沿って湾内へと流れ込んでいる。湾内の流速ベクトルは、河川水の流入に影響された北部域においてやや大きく、南部では小



(a) before the construction of sea dyke

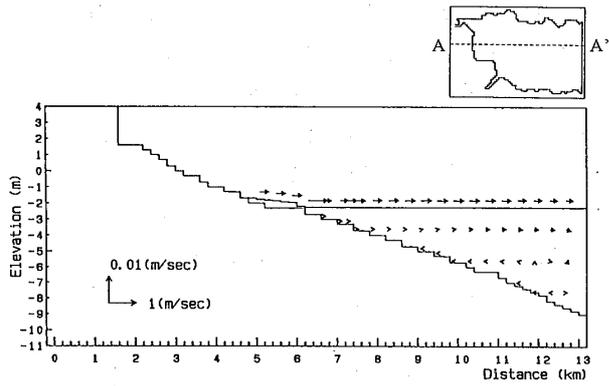


(b) the elevation of dyke is -2.0 m

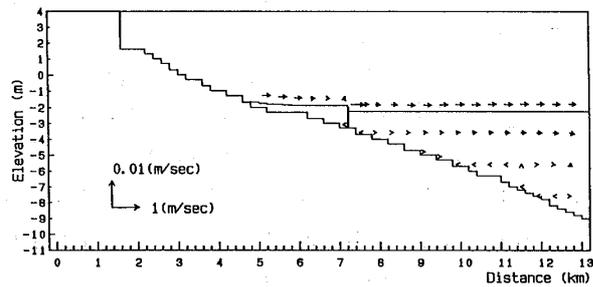


(c) after the construction of sea dyke

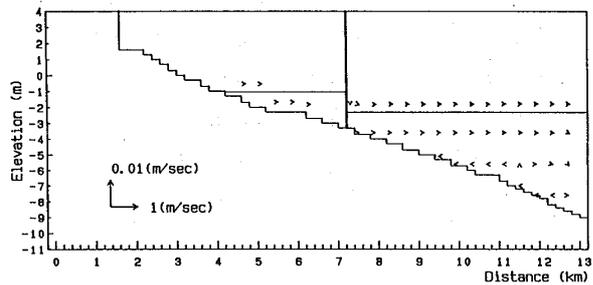
Figure 6. The velocity distribution of surface layer during an ebb tide.



(a) before the construction of sea dyke



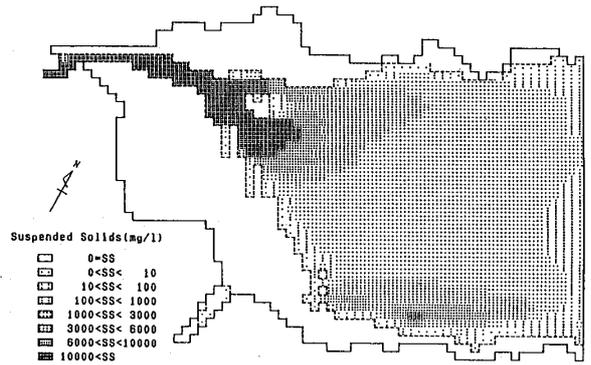
(b) the elevation of dyke is -2.0m



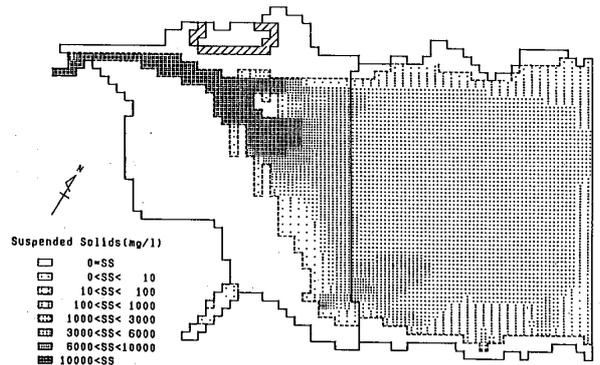
(c) after the construction of sea dyke

Figure 7. The longitudinal velocity distribution of A-A' section

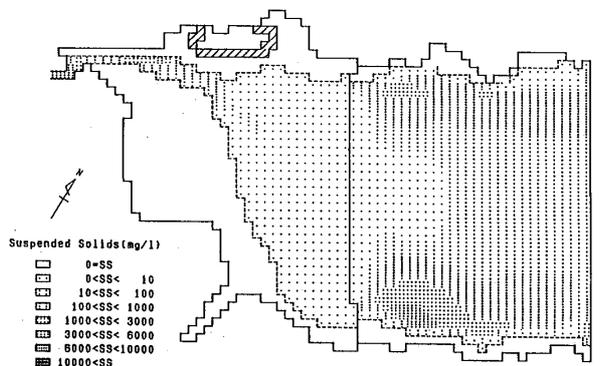
さくなっていることが分かる。流速ベクトルの鉛直分布については、水面付近の値が比較的大きい結果となっている。建設中の結果にも干潮時には干潟が現れるが、建設前に比べ面積は僅かに減少していることが分かる。河口付近の流速ベクトルは、建設前とはほぼ同程度の大きさで分布している。しかし堤内では、潮受堤の堤頂が海面上に現れ、河川水の湾口側への流れ込みが遮られるために建設前に比べて小さくなっており、ベクトルは潮受堤に沿って緩やかに湾の南部へと向いている。ただし堤外では、堤内と堤外の水位差が大きく、堤内の水が潮受堤を越流して堤外へと流れ出すために水表面付近の流速が大きくなる傾向にある。建設後になると、堤内の水位が一定になるように水門操作がなされているために、堤内の流速ベクトルは河口付



(a) before the construction of sea dyke



(b) the elevation of dyke is -2.0m



(c) after the construction of sea dyke

Figure 8. The SS of surface layer during an ebb tide.

近においても非常に小さく、河川からの流入水に押されるようにして湾の南部へと広がっていく流れが見られる。堤外の流速ベクトルも湾奥からの流れが遮られているために、建設前に比べて小さくなっている。

つぎに、計算から得られた SS の平面分布を Figure 8 に、SS の鉛直分布を Figure 9 に示す。潮受堤の建設前では、河川から SS 値の大きい水塊が滞筋に沿って湾の北部へと流入してきており、水表面付近の値が水底付近よりも大きいことが分かる。湾口方向には、SS 値は次第に減少するような分布となっているが、これは主に SS 値の小さい海水との混合や拡散による

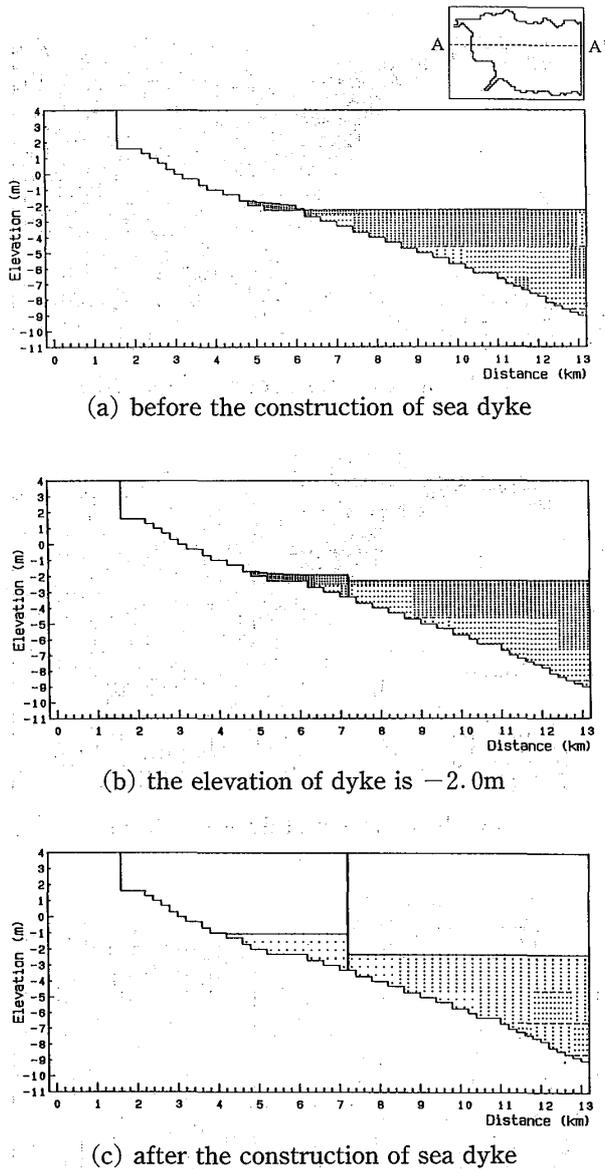


Figure 9. The spatial distribution of SS in the vertical plane.

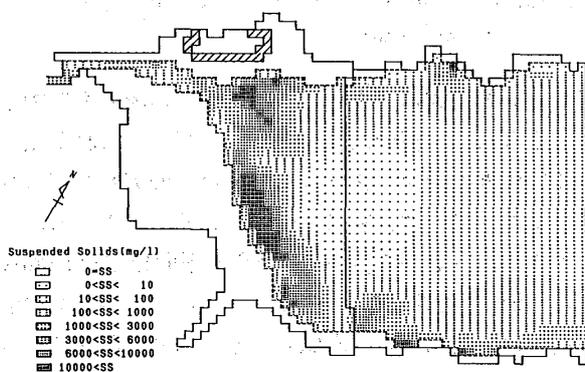


Figure 10. The spatial distribution of SS at the time, when gates are controlled.

ものと思われる。また湾の南部でも SS 値の比較的大きい場所がみられる。建設中では、潮受堤により湾口への流れが抑えられるために河川から流入してきた SS は堤防に沿うように南部へと広がっている。また堤内の流速の減少に伴い、相当量が堤内で沈降しているものと思われる。建設後になると、堤内の SS 値が非常に小さくなっている。これは堤内の流速の減少に伴って、海底からの底泥粒子の巻き上げは殆ど行われなくなったためであり、また、滞筋上での SS 値が次第に小さくなっていることから、河川から流入してきた水塊に含まれる SS も水底に沈降したためと思われる。堤外でも建設前に比べて SS 値が低くなっていることが分かる。

先に述べた計算条件からは、潮受堤の建設が進むにつれて堤内の流速が減少し、建設後には流水中の SS 値が非常に低くなるような結果が得られた。ただし Figure 10に示されるように、建設後において堤内の水位調整のために水門操作がなされると、流れが惹き起こされることで底泥粒子が再懸濁し、堤内においても SS 値が非常に高くなる場所が現れることが分かる。建設後においては堤内と海域との物質交換は乏しくなることから、堤内の水質は流入河川の水質に強く影響を受けることが予想され、堤内では底泥粒子に吸着する有機物等が益々増加することが考えられる。このため、水門操作に伴って SS がこのように高い値を示す時には、以前にも増した環境への配慮が望まれる。

5. 結 論

水環境整備に関連した大規模プロジェクトが実施された場合、その影響は永い将来にわたることが予想される。ここではその一例として諫早湾干拓事業を取り上げ、事業の一環である潮受堤の進捗に伴う湾内の水質変化の予測と評価を試みた。

まず諫早湾への代表的な流入河川である本明川において、水質変化を調査するために現地観測が行われた。この結果、本明川河口付近の水質は市街地からの汚濁負荷及び、SS の挙動に大きく影響を受けた変化を示すことが予想された。また SS と BOD₅ との間には正の相関があり、底泥粒子が巻き上げられて SS が高濃度となる時には、その他の水質指標への影響が大きいことが示された。そこで感潮域での水質変化を解明するには、SS の挙動を適切に評価することが重要であると考え、SS の変化が、底泥粒子の巻き上げと懸濁粒子の沈降とに密接に関連づけられるとしたモデルを作成し、数値シミュレーションを行った。計算結果を観測結果と比較したところ、感潮域の SS の変化を

概ね表現するような結果が得られた。SSについては、生物学的、理化学的側面での発生も考えられるために、これらの発生過程については今後共引き続き検討していく必要がある。つぎに、諫早湾の潮受堤築造に伴う湾内の水量・水質変化の評価を試みた。この結果、潮受堤の建設が進むに従い、堤防付近ではSSが海底へ沈降し、堆積が進むことが示された。更に潮受堤の建設後になると、堤内では流水中のSS値が非常に低くなる傾向にあることが分かった。ただし、一度水門が開放されると底泥粒子が巻き上げられて流水中のSS値が非常に高くなることが示され、水門操作次第では再懸濁の度合いが増すことが予想された。

以上のことから、本モデルが水環境管理を適切に進めていく上で、有効な手段となり得ると考えられる。今後、検討課題についてより詳しく考察し、精度の高い水環境への影響評価を行いたいと考えている。

謝 辞

現地観測を準備、実施するにあたって、工学部技官平山康志氏、星野公秀君（長崎大学大学院）、矢代まゆみさん（同）を始めとする本学河川工学研究室の学生諸君の協力を得た。ここに感謝の意を表します。また端末機を利用させて戴いている（財）河川情報セン

ターに深謝いたします。併せて、本研究の実施にあたり平成7年度文部省科学研究費；一般研究（C）（研究代表者：野口正人）の補助を受けたことを記し、関係各位に深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) M. Noguchi, W. Nishida and K. Kii: "The Impact upon the Water Environment by a Construction of Sea Dyke", Proc. 25th Congress of IAHR, Vol. V, pp. 489-496, 1993
- 2) M. Noguchi, W. Nishida, K. Kii and T. Nagaya: "The Effects of a Construction of Sea Dyke upon the Water Environment", Proc. Pollution in the Metropolitan and Urban Environment (POLMET)'94, pp. 891-899, 1994
- 3) 村上正吾, 辻本哲郎, 中川博次: "河床砂礫の pick-up rate 推定式について", 土木学会論文集, No. 443, II-18, pp. 9-16, 1992
- 4) Hydraulics and the Environment, Publication of the IAHR Workshop on "MATCHING HYDRAULICS AND ECOLOGY IN WATER SYSTEMS", J. Hydraulic Research, Vol. 29, Extra Issue, 1991.