

締切堤の建設に伴う湾内の水質変化予測

Prediction of the Water Quality Change under a Construction of Sea Dyke

西田 渉*・野口正人**・柳本 諭***

by Wataru NISHIDA, Masato NOGUCHI and Satoshi YANAMOTO

For investigating water quality change around the Isahaya Bay with the progress of a sea dyke construction, successive field observations and numerical simulations have been conducted. Observed data indicate clearly that water quality indices closely related to the tidal motion, and the biochemical oxygen demand varies as the change of the suspended solids(SS). Therefore, the numerical modelling of the SS is designed regarding to the resuspension and the deposition of particles. Calculated results show that current and wetland area in the bay reduce gradually as the on-going project, and the effect of deposition is dominant in the newly appeared pond. It suggests that the deterioration of water quality occurred from the bottom layer, and the attention must be paid to maintain a good water environment around the Isahaya Bay.

Keyword: sea dyke, BOD5, SS, sediment, mathematical simulation

1. はじめに

環境の保全、保護に配慮した開発を進めていくためには、開発対象区域ならびにその周辺区域の環境に及ぼす影響評価が十分になされなければならぬことは言うまでもない。本論で取り上げようとしている諫早湾干拓事業では、潮受堤築造による調整池や干拓地の造成、或いは周辺地域の土地利用形態の変化等により、当水域での水質変化機構が変化するであろうことは容易に推察される。とくに調整池のように閉鎖性の極めて強い水域については、富栄養化のおそれがあり、関係行政機関による定期的な環境モニタリングが実施されている。著者らも当該水域における水環境が今後も引き続き好ましい状態であることを願い、流域から当該水域への汚濁負荷流出量の把握や¹⁾、水域内での水質変化機構の把握に努めてきた²⁻⁴⁾。

以上のことから本論では、諫早湾で現在進んでいる潮受堤の建設が周辺水域の水質変化機構に与える影響について評価することにした。諫早湾の水質については、これまでに行ってきた観測結果から潮汐及び浮遊懸濁粒子(SS)の影響を強く受けた変化を示すことが推察されている。そこで、まず諫早湾への代表的な流入河川である本明川河口部において数回にわたり連続観測が実施された。得られた結果を基にSSと他の理化学的水質指標との関係を示す。つぎに、水質変化予測モデルをSSの収支に着目した形で作成し、数値シミュレーションを行うことによって潮受堤の進捗が湾内の水質に及ぼす影響について検討することとした。

2. 本明川と諫早湾干拓事業の概要

長崎県諫早市を流れる本明川は、福田川、半造川など複数の支川を有する幹川の流路延長 21.0km、流域面積 87.0Km²の長崎県唯一の一級河川である。また、河口は諫早湾湾奥部に位置しているが、諫早湾が干満差の大きい

* 正会員 工修 長崎大学助手 工学部社会開発工学科

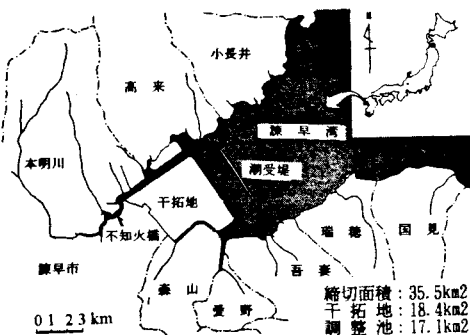
** 正会員 工博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科

*** 学生員 長崎大学大学院修士課程 社会開発工学専攻

有明海の一部であることから、河口から約 4.0km 地点までが感潮域となっている。河床は、上流側では主に礫や砂で、感潮域の下流側では粘土やシルト質の微細粒子で構成されている。現在、諫早湾では干拓事業が進行していることは前述されたが、計画では長さ 7 km の潮受堤により湾奥の約 35.5km² が締め切られ、内水面の約 18.4km² が干拓されて農耕地、レクリエーション用地等として利用され、残りの約 17.1km² が灌漑用ならびに洪水対策用の調整池として使われることになっており、平成 12 年(2000 年)の完成が目論まれている。

ところで、河川や湾などの受水域の水環境を良好に保つために流域水質管理が重要であることは当然である。この問題

に関しては、本明川流域の諫早市街地において分流式下水道の供用が開始されたばかりであり、水環境に密接に関連する処理水の放流方式も十分には定まっておらず、今後に残された問題は少なくない。

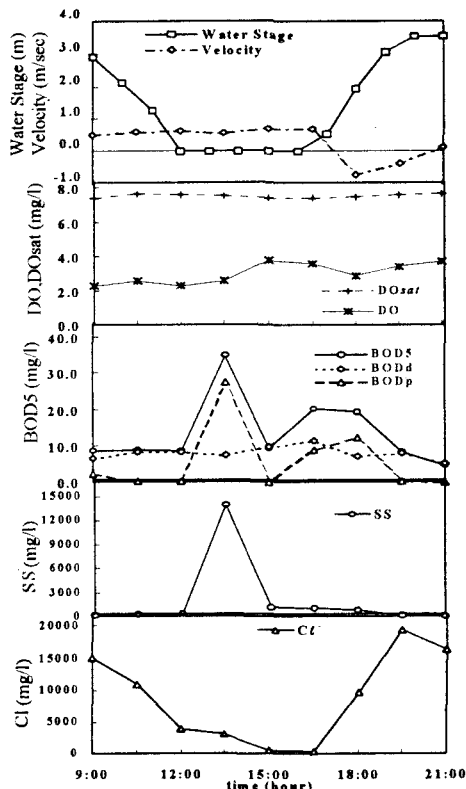


図－1 本明川と諫早湾の概要図

3. 現地観測の概要と考察

本明川感潮域での観測は平成 6 年から 4 回、24 時間若しくは 12 時間連続で実施された。計測は 1.5 または 1 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、生物化学的酸素要求量(BOD5)、塩化物イオン濃度(Cl⁻)等である。また濾過処理した試料から得られた BOD5 を溶存態 BOD5 (BODd) とし、BOD5 と BODd との差を懸濁態 BOD5 (BODp) とした。なお水位については河川情報センター端末機から 1 時間毎のデータを入手した。

図－2 に平成 7 年 9 月 7 日に不知火橋(河口から 0.8km 地点)で行われた観測結果を示す。DO については計測された水温から算出された飽和溶存酸素 DO_{sat} が併記されている。この図を見ると、観測時間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、観測地点での干満差は 3.0m 以上であることが分かる。干潮時の水位、流速がほぼ一定となっているのは、Cl⁻の値が小さくなっていることを考えると固有流量で河川水が流下しているためであると思われる。DO については、3±1mg/l の範囲で変化しており、飽和度は 40.0%程度であった。変化の傾向としては、水位が高い時に小さく、水位が低い時に大きくなっている。水位が低い時に値が大きくなるのは、同時刻に計測された Cl⁻の値が小さくなっていることから、上流から DO の高い水塊が流下してきているためと思われる。BOD5 と SS については、不知火橋での水位が諫早湾の潮位変化を受けて減少し、最低水位となる時に最大値となっている。水位が上昇する時刻に BOD5 は再び増加しているが、SS には目立った増加は見られなかった。BODp についても BODp の時間変化も BOD5 のそれと同様の傾向にある。一方、BODd については BOD5 のように顕著な時間変化は見られず、干潮時に漸増するような結果が得られた。これらの指標が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が観測地点付近まで到達し、その時の SS に比較的多量の有機物が吸着しているためであると思われる。ここに示されたそれぞれの水質指標の時間変化は、他の観測においても同様な結果が示されており、本明川河口付近での BOD5 は BODd と SS 中に含まれる BODp の両方の影響を受けて周期的に変化していることが推察された。



図－2 観測結果(平成 7 年 9 月 7 日)

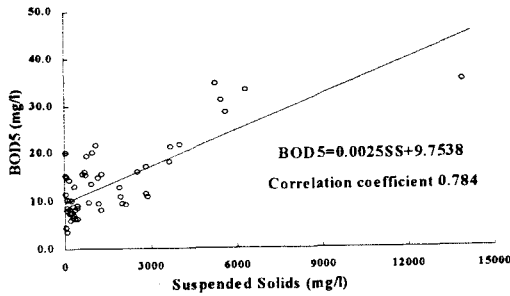


図-3 SSとBOD5の相関図

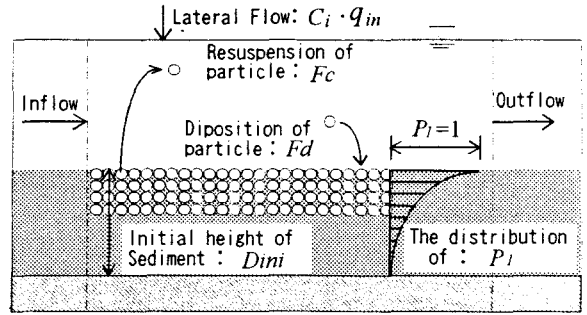


図-4 SSの発生の説明図

図-3には、BOD5 と SS の関係と、最小二乗法により求められた回帰直線とが示されている。なお表示された結果には、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。この図を見ると、SS が小さい時にばらつきがあるものの両者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している。このことから感潮域での BOD5 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。

4. 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ことが考えられたため、潮受堤の建設が水質に与える影響を SS の時間的、空間的变化を通して評価することにした。ここで提案したモデルは、SS の変化の支配因子として底泥粒子の巻き上げと懸濁粒子の沈降を取り上げて作成された。底泥粒子の巻き上げ量は pick-up rate P_s で評価した⁵⁾。流れによる河床の粗粒化や底泥粒子の粘性等を考慮して、底泥の堆積厚さが薄くなるに従い底泥粒子が離脱し難くなるものと仮定し、離脱した粒子の流送形態は底泥の表層が微細粒子であることから、離脱後は直ちに浮遊懸濁態として流送されるものとした。また SS の沈降速度については流速に応じて変化すると考えられるため、流速が増加するにつれて減少するものとした。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、ここでは紙面の都合上 SS の収支式のみを示す。

SS の収支式

$$\frac{DC_{ss}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{xy} \frac{\partial C_{ss}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial F_d}{\partial x_3} + \frac{\partial F_c}{\partial x_3} \quad (j=1,2,3) \quad (1)$$

底泥からの巻き上げフラックス (F_c)

$$F_c = \begin{cases} 0 & \dots \tau_* \leq \tau_{*c} \\ \sigma \cdot v_s \cdot P_s \cdot P_1 / a_s \dots & \tau_* \geq \tau_{*c} \end{cases} \quad (2)$$

懸濁粒子の沈降フラックス (F_d)

$$F_d = C_b \cdot w_0 \cdot \exp(-V^2 / V_c^2) \quad (3)$$

$$P_1 = \exp\{-\gamma(1 - D / D_{im})\} \quad (4)$$

ここに、 t : 時間、 x_j : 空間変数、 C_{ss} : SS の濃度、 k_{xy} : 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_* : 底面摩擦応力、 τ_{*c} : 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、 a_s : 底泥粒子の投影面積、 D : 底泥の堆積厚さ、 D_{im} : 底泥の初期堆積厚さ、 w_0 : 沈降速度、 V : 流速、 V_c : 懸濁粒子の重量と流体力の釣り合い式から評価される浮流限界流速、 γ , ξ : 補正係数である。底泥粒子については比重 2.60、粒径 5.0×10^{-2} mm の球体と仮定された。本モデルでは海域と流入河川との物質収支も考慮するために、河道区間に対して 1 次元解析法を海域に 3 次元解析法が適用されており、 x_3 軸は鉛直上向きに取られた。そのため基礎方程式は各コントロールボリュームに対して体積分された後、有限差分法を用いて離散化された。計算領域は、本明川については河口から 6063.0m の裏山橋までとし、諫早湾については河口から湾口へ向かった 13.2km までとした。空間差分間隔は 1 次元解析領域で 52~147m、3 次元解析領域は水平方向に 200m の格子で覆い、水深方向の差分間隔は 2 m とした。計算時間間隔は安定条件である CFL 条件を満たすように 2.0 秒間隔にとられた。Manning の粗度係数は $0.040 \sim 0.021 \text{sec/m}^{1/3}$ の範囲で変化させている。各境界条件は、上流端では従来の観測結果を基に決定し、下流端では周期 12.5 時間、振幅 1.7m の正弦波で与えられた。また底泥の初期堆積厚さ D_{im}

は河道及び海域でそれぞれ 0.03、0.01m とされた。

水質変化予測を行うにあたり、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が湾内の水質に与える影響を評価するために潮受堤の建設前、建設中、建設後の 3 ケースに対して計算が行われた。すなわち、建設中の条件として潮受堤の建設は標高-2.0m まで進んでいるものとし、湾奥北部の小江地区の干拓は既に完成しているものとされた。建設後の条件としては、目下のところ潮受堤内の水位は-1.0m で管理される計画となっているので、潮受堤の南部と北部にある水門により水位調整がなされるものとされた。

4. 計算結果と考察

4.1 河道区間

本明川の不知火橋地点における水位、流速、SS、 $D/Dini$ の計算結果を図-5 に示す。なお、 $D/Dini$ とは底泥粒子の初期堆積厚さに対する当該時刻の堆積割合である。まず水量的な変化について、潮受堤の建設前では下流端で与えた水位変化に伴って水位、流速が変化しており、その時間変化は遅れて生じることが分かる。満潮時の水位は、背水効果により下流端よりも 0.083m 高くなっている。干潮時に水位と流速はほぼ一定値となっており、固有流量で河川水が流下している。最大流速は上げ潮時に発生していることも分かる。建設中の計算結果についても建設前と同様に、下流端の水位変化に伴う水量変化が現れているが、水位、流速の時間変化は建設前よりも僅かに早く現れている。建設後については潮受堤内の水位が-1.0m に管理されているために、水門操作がなされた直後でも水位、流速に大きな変化は見られなかった。つぎに SS の結果は、潮受堤建設前で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いこと、 $D/Dini$ 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、水量変化が大きい下げ潮時に SS は急激に増加するが、干潮時に SS は減少していることが分かる。このことは $D/Dini$ の変化から、水位が低下し流速が増加するにつれて底泥粒子は急激に巻き上げられるが、底泥の堆積厚が薄くなるにつれて離脱の容易さを表す係数 (PI) が小さくなるためと考えられる。一方、上げ潮時に SS が再び増加しているのは、下げ潮時に海域に流送された SS 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り、また流速の絶対値が大きいことから底泥粒子が更に巻き上げられたためと思われる。計算結果を観測結果と比較すると、SS が下げ潮時に増加すること、その後最低水位に至るまでの間に SS が減少することなど、計算値は観測値を概ね表現しているものと思われる。ただし、上げ潮時に SS が増加することや、下げ潮時の SS の時間変化分に観測結果との差違がみられる。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。潮受堤建設中の結果を建設前と比べると同様の時間変化を示しているが、SS は殆どの時間で減少している。このことは $D/Dini$ の結果から、底泥粒子が河道から海域へと掃流され、底泥粒子の堆積厚さが減少するためであると思われる。潮受堤建設後には水門操作がなされた時刻に流速変化に伴う SS の増加があり、底泥は次第に河川から海域へと運ばれるものと考えられる。

4.2 海域

計算から得られた干潮時における流速の平面分布を図-6 に示す。同図には海底の等高線も記入されている。

まず潮受堤建設前では干潮時に 28.28km² の干潟が現れており、河川からの流入水は滞筋に沿って湾内へと流れ込ん

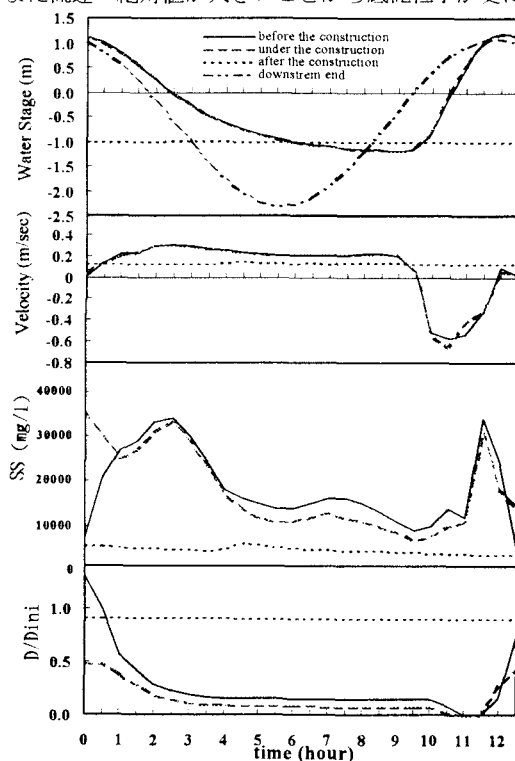


図-5 不知火橋地点における計算結果

でいる。湾内の速度ベクトルは、河川水の流入に影響された北部域においてやや大きく、南部では小さくなっている。建設中の結果にも干潮時に干潟が現れるが、建設前に比べ3.32km²減少している。河口付近の速度ベクトルは、建設前とほぼ同程度の大きさで分布している。しかし潮受堤の天端が海面上に現れ、河川水の湾口側への流れ込みが抑えられているために建設前に比べて堤内の速度は小さくなっており、潮受堤に沿って緩やかに湾の南部へと向いている。潮受堤付近では堤内の水が潮受堤を越流して堤外へと流れ出しており、水表面付近の速度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、堤内の速度ベクトルは河口付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調整池の南部へと広がっていく流れが見られる。また、湾奥からの流れが遮られているために、堤外への速度も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の平面分布を図-6(右)に示す。潮受堤の建設前では、河川からSS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。湾口方向にSS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の小さい海水との混合や拡散によるものと思われる。また湾の南部でもSS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

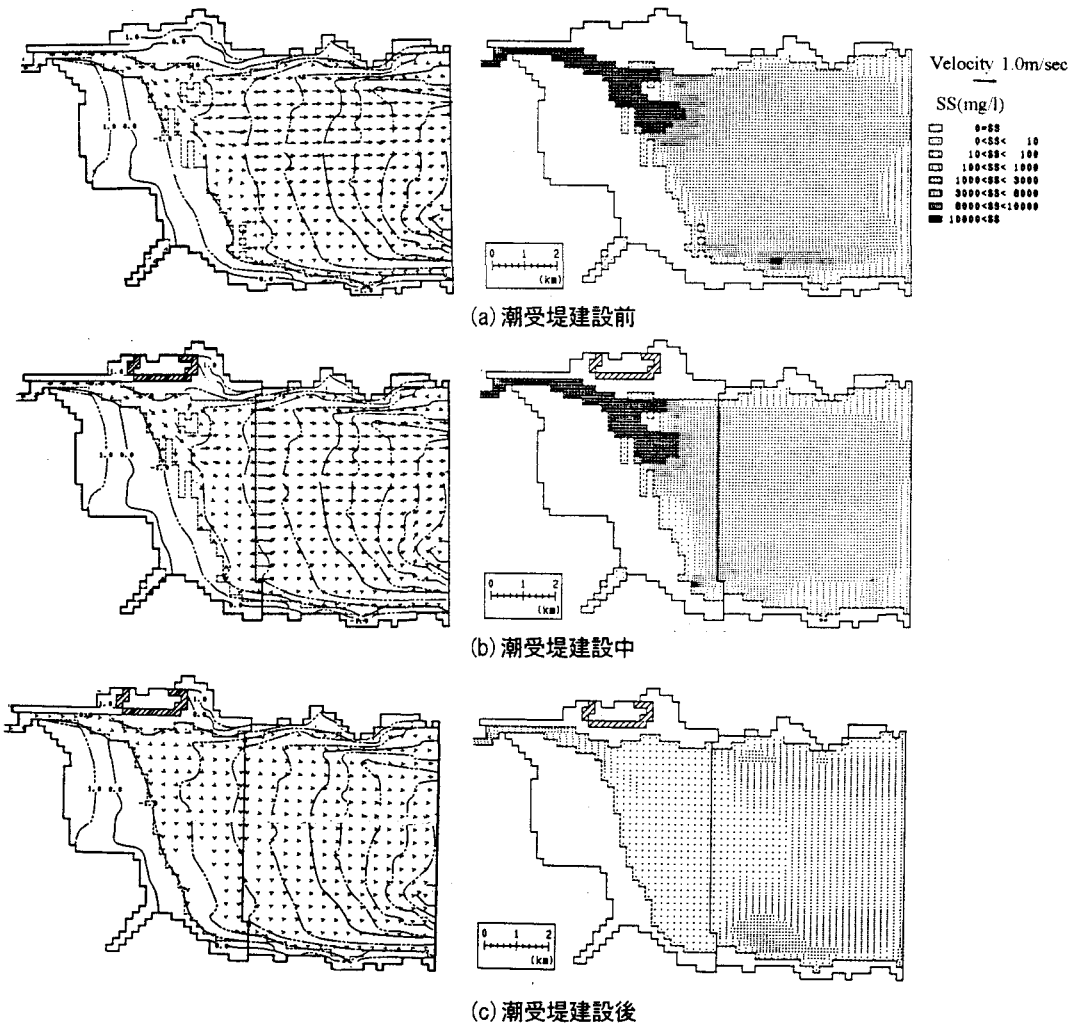


図-6 諫早湾における計算結果(左：流速、右：SS)

沈降しているものと思われる。建設後になると潮受堤内部でSS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、滞筋に沿って調整池へと流入するSS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SSも水底に沈降したためと考えられる。堤外でも建設前に比べてSSが低くなっていることが分かる。

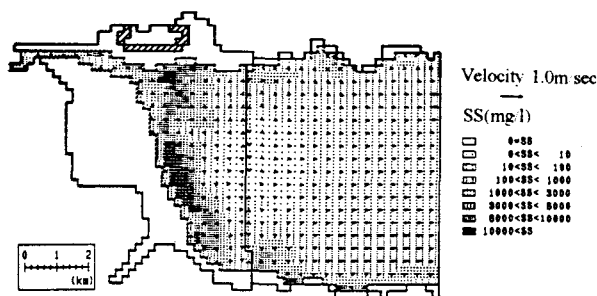


図-7 水門操作直後のSSの空間分布

先に述べた計算条件で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SSが非常に低くなるような結果が得られた。ただし図-7に示されるように、建設後においても堤内の水位調整のために水門操作がなされると、流れが引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が非常に高くなる場所が現れることが分かる。建設後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され、堤内に有機物等を吸着した粒子が沈殿、堆積することが予想される。したがって、水門操作に伴って底泥粒子の巻き上げが考えられる時には、十分な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で水質変化を調査するための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、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が、SSについては生物学的、理化学的側面からの発生も考えられるため、これらの発生過程は今後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SSが海底へ沈降し、堆積が進むことが予想された。更に潮受堤の建設後になると、堤内のSSは非常に低くなる傾向にあることが示された。しかし、一度水門が操作されると底泥粒子が巻き上げられて流水中のSS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。今後は、前述された課題について検討を進め、より精度の高い水環境への影響評価が可能になるように努力したい。

謝 辞

現地観測を準備、実施するにあたっては、工学部技官の平山康志氏や、星野公秀（長崎大学大学院）、矢代まゆみ（同）の両氏を始めとする本学河川工学研究室の学生諸氏の協力を得た。ここに記して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）河川情報センターの関係各位に深謝いたします。

参考文献 1) M. Noguchi et al, Proc. 6th ICUSD, Vol. 1, pp. 903-908 1993. 2) M. Noguchi et al, Proc. 25th IAHR, Vol. V, pp. 489-496, 1993. 3) N. Noguchi et al POLMET'94, pp. 891-899, 1994. 4) W. Nishida, M. Noguhi et al Proc. 10th APD-IAHR EH3-2, 1996. 5) 村上正吾他, 土木学会論文集, No. 443, II-18, pp. 9-16, 1992. 6) Hydraulics and the Environment, Publication of the IAHR Workshop on "MATCHING HYDRAULICS AND ECOLOGY IN WATER SYSTEMS", J. Hyd. Research, Vol. 29, 1991.