

# 湾奥の締切りが湾内の海底地形に及ぼす影響について

宮 野 仁\*・柴 木 秀 之\*\*

## 1. はじめに

昨年, 諫早湾干拓に伴う締切り堤建設による湾内水域・生物環境への影響に関して, 多数の議論がなされた。湾奥干拓に伴う締切り堤建設の例として, 1963 年に堤防が完成した児島湾が挙げられる。児島湾の湾奥 1,088 ha の締切りにより誕生した児島湖は, 生活・農業・工業排水の流入により, 淡水化とともに富栄養化が進展し, 湖内生態系は影響を受けたと報告されている。

他方, 児島湾の環境への影響を論じた報告は少なく, Okuda (1968) が湾内塩分及び海底地形への影響を論じている程度であり, その後, 追跡調査は実施されていない。そこで, 本報告では, 湾奥締切りに伴う湾内環境への影響を把握する第 1 段階として, 湾内の海水交換を左右する海底地形に注目し, 既存資料から明らかにされる海底地形の変化傾向と, 地形を左右する潮流及び湾内流入河川の流下土砂移動の変化を, 数値シミュレーションを媒体にして把握する。

## 2. 児島湾内の海底地形変化の変化特性

### (1) 海図から見た海底地形の変化

児島湾全体を対象とする水深測量は, 過去実施されていないため, 湾内水深に関する情報は, 海図に頼る以外ない。図-1 上図は, 1992 年(平成 4 年)発行の海図から描いた水深分布である。一方, 図-1 中図は, 1966 年(昭和 41 年)発行の海図から描いた水深分布であり, 1992 年まで公表されていた海図の基本となった。両水深分布を比較すると, 1966 年時点には, 最大水深-15.0 m 程度あった湾奥南側の滞筋が, 1992 年時点には, -6.0~-7.0 m まで浅くなっていることがわかる。図-1 下図は, 2 つの水深差を求め, 海底地形変化量の分布を表すものである。図中の正の値は, 1966 年~1992 年までの 26 年間に水深の減少(堆積)が生じていることを表し, 湾奥南側から湾口にかけての滞筋で, 5.0 m 以上の堆積が確認できる。この湾内堆積土量は, 12,516,000 m<sup>3</sup>に及び, 湾内面積で平均すると 0.5 m の堆積となる。また, 年間

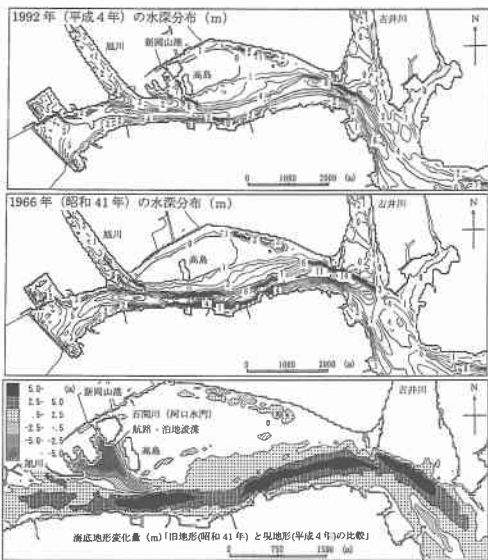


図-1 海図による湾内水深分布の比較と海底地形変化

平均堆積量は, 481,400 m<sup>3</sup>となり, 2.0 cm/年程度の堆積速度となる。ただし, 堆積域は, 相対的に水深が深い滞筋に集中しており, 滞筋の堆積速度は 20.0 cm/年以上になる。

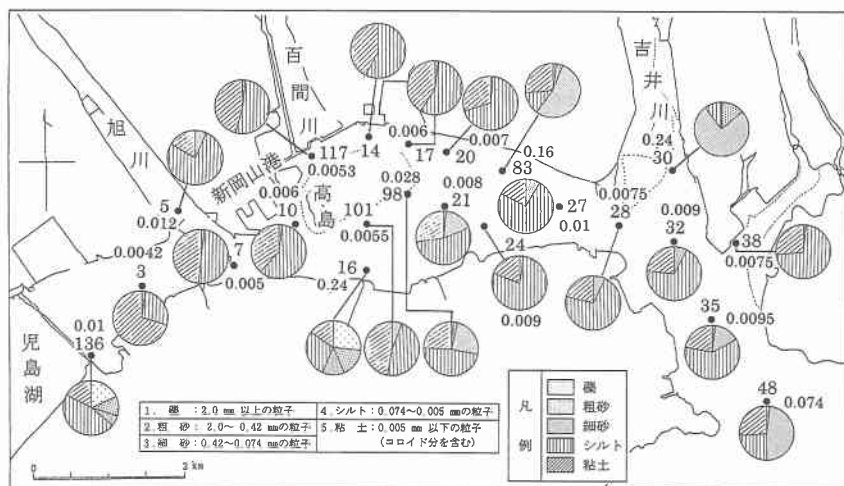
### (2) 湾内の底質分布

湾内に堆積する底質組成は, 岡山市 (1989) が実施した現地調査の成果より把握することが可能である。図-2 は, 1988 年 8 月に実施された底質調査による湾内 22 点における海底表層の底質組成と中央粒径の分布を表す。

底質分布を見ると, 湾奥部から湾央北側にかけての St. 3, 7, 10, 14, 20, 117 及び湾央南側の St. 24 でシルト・粘土がほぼ 100% を占めているのに対し, 湾央北側の St. 83, 湾央南側の St. 16 等の岸沿いや, 吉井川河口の St. 30, 湾口の St. 48 で礫・砂分が 50% 以上を占めていることがわかる。また, シルト・粘土が組成のほぼ 100% となる地点の中央粒径は, 0.01 mm 以下となる。

図-1 に見られた湾内堆積域の底質は, 主にシルト・粘土であり, 中央粒径も 0.01 mm 以下である。したがって, 湾内滞筋に堆積する底質は, 粒径の小さいシルト・粘土

\* 工修 株式会社エコー 環境水理部  
\*\* 正会員 工修 株式会社エコー 環境水理部



図一 1988年8月の底質調査による湾内底質組成及び中央粒径の分布

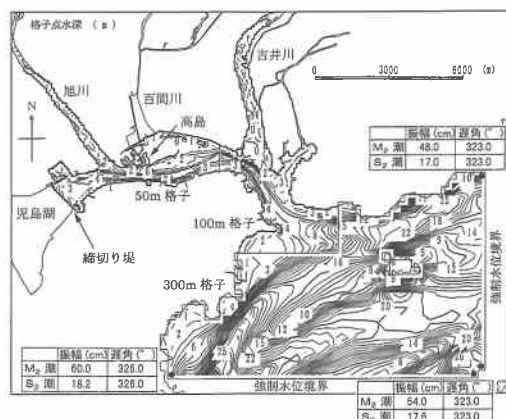
質であることが確認できる。湾外の底質は、砂質と礫が主であるため、底質の発生源は、湾内に流入する河川であると推定される。

### (3) 湾内堆積過程の要因

児島湾内に流入する主な河川は、吉井川、百間川、旭川が挙げられる。河川流量年表より、3河川の1985年～1995年までの11年間の日平均流量の年最大値を集計し、その平均を求めると、吉井川が $1,180 \text{ m}^3/\text{s}$ 、百間川が $460 \text{ m}^3/\text{s}$ 、旭川が $800 \text{ m}^3/\text{s}$ となる。なお、百間川の河川流量は岡山市の1997年観測データによる。3河川ともに、流量が多く、流出土砂量も相当量になると考えられる。

この流下土砂は、河川から流出し、湾内を移動する過程で、一部が湾内に沈降・堆積し、一部が湾外に流出する。このような、湾内の底質移動に寄与する外力としては、潮流、河川流、波浪が考えられる。このうち、潮流は常時作用する外力であり、底質分布に影響を与える頻度が高い。岡山市(1989)が湾内において実施した15昼夜観測によれば、平均大潮期に、湾口で $0.45 \text{ m/s}$ 程度、湾央で $0.27 \text{ m/s}$ 程度の流速が生じると報告している。また、湾内発生波は、湾内の吹送距離が短いため、年最大でも数10 cm程度の波高であると予想されるが、波の作用により底質が浮遊し、潮流により移動すると考えられる。

ここでは、湾内の底質分布に影響を与える潮流に注目する。湾内の潮流を左右する条件には、湾の形状が挙げられるが、児島湾は、湾奥の児島湖を造るために1963年に建設された締切り堤により湾内水域面積は急減した。潮汐現象の空間スケールに比して、児島湾のスケールは小さいことから、湾内水域面積の減少が、潮汐振幅を変



図三 潮汐・潮流計算の範囲と地形近似

化させることは少なく、潮汐に伴う湾外との海水交流量及び湾内流速の減少をもたらすことが予想される。これにより、湾内を浮遊するシルト・泥の湾外流出は減少し、沈降・堆積量は増加することが予想される。

この点を明らかにするために、締切り堤建設前、建設後、現況の3地形についた湾内潮流と出水時の河川流並びに河川流出土砂の移動に関する数値シミュレーションを行い、児島湾の潮流の変化及び河川流出土砂の移動状況に関する把握を行う。

### 3. 締切り堤建設に伴う外力の変化

#### (1) 湾内潮流による底面せん断力

##### a) 潮汐・潮流計算の方法と計算条件

潮汐・潮流計算は、浅水長波の連続式・運動方程式を、

空間差分にスタッガード格子を、時間差分にリープ・フロッグ法を用い、3層レベルモデルにより行う。層分割は、第1層が海面～-2.0 m、第2層が-2.0～-4.0 m、第3層が-4.0 m～海底とする。移流項は、風上差分を用いる。

計算範囲は、図-3に表す児島湾全体を含む広域とし、湾内の地形近似は、100 m 格子と 50 m 格子で行い、湾外の地形近似は 300 m 格子で行う。湾奥の締切り堤建設前及び建設直後の水深は、図-1に表す 1966 年の水深分布を、現況の水深は、1992 年の水深分布を用いる。

潮汐の強制水位を与える開境界は、図-3に表す2境界線とし、平均大潮期は $(M_2 + S_2)$ 分潮、平均潮は $M_2$ 分潮、平均小潮期は $(M_2 - S_2)$ 分潮の振幅・遅角から水位を求める。分潮の振幅・遅角は、近隣の潮汐記録を基に、試行計算により決定する。湾内平均水位は、岡山港検潮記録より D.L.+1.20 m とする。

#### b) 湾内の潮流流速と潮流による底面せん断力の計算

図-4は、実測と計算の $M_2$ 分潮(平均潮)潮流楕円を比較し、潮流の再現性を検証するものである。ここで、実測は岡山市(1989)の現地調査成果である。図によれば、最大流速、流向ともにほぼ実測と一致し、潮流計算の現地適合性は良好と評価できる。

図-5上図は、締切り堤建設前における湾内流速が最大となる上げ最強時の第1層の流速ベクトルと同時刻の潮流による底面せん断力の分布を表す。また、図-5中図は、締切り堤建設後の分布を、図-5下図は、現況の分布を表す。ここで、底面せん断力の表示は $0.1 \text{ N/m}^2$ 単位であり、Tanaka and Shuto (1981)により提案された波・流れ共存場における底面摩擦係数の算定式を用い、波高を微小(0.01 m)として潮流のみの値を求める。

3 地形の底面せん断力を比較すると、値が最も大きいのは締切り堤建設前であり、湾中央側の一部水域と湾口で $0.10 \text{ N/m}^2$ 以上になる。一方、建設後の値は湾口で最大 $0.06 \text{ N/m}^2$ 程度と急減する。その後、水深が浅くなった現況では幾分増加するが、締切り堤建設前の値までは回復しない。今、鶴谷ら(1990)にならい、底質の巻き上げ限界せん断力を $0.10 \text{ N/m}^2$ と仮定すると、締切り堤建設後と現況時の湾内浮遊泥は、湾のほぼ全域で、沈降・堆積すると予測される。このように、締切り堤建設に伴う湾内流速の低下に伴い、浮遊泥の沈降・堆積が生じ、湾外への流出効率は低下する。

#### (2) 湾内発生波の底面せん断力への効果

湾内発生波が、底質移動に寄与するか否かを判断するために、湾内格子点において年最大波の推定を行う。方法は、湾軸に沿う方向である E, W 系の有効吹送距離を格子点毎に求め、これと近隣の風観測点における年最大

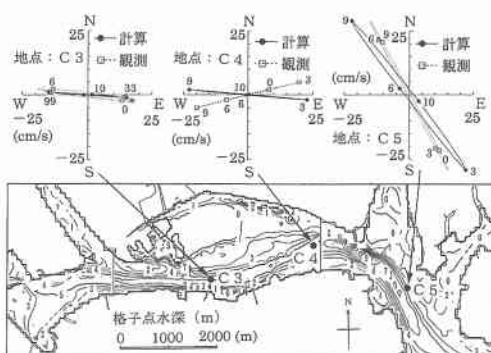


図-4  $M_2$ 分潮潮流楕円の実測と計算の比較

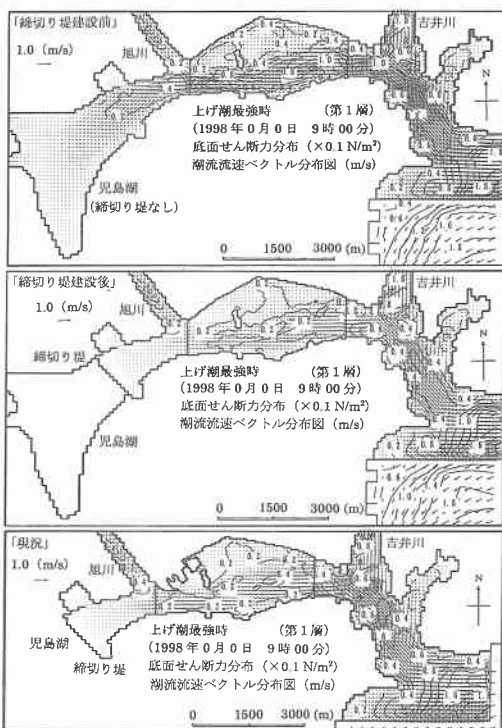


図-5 湾奥締切り堤建設前後の平均大潮期の潮流流速ベクトルと底面せん断力の分布

風速をウィルソン式に代入することにより、波浪を推定する。年最大風速は、岡山地方気象台による 1987 年～1992 年の 5 年間の風観測結果から、E, W 系の年最大風速の平均値を求める。波浪算定に用いる風速は、W 系が $10.0 \text{ m/s}$ 、E 系が $7.5 \text{ m/s}$ となり、算定される有義波高は、湾全域で $0.3 \text{ m}$ 、周期 $2.0$ 秒程度となる。この波浪条件と先に計算した平均大潮期の潮流が共存する場合の底面せん断力を求める。図-6は、締切り堤建設前後における潮流と波浪の共存場の底面せん断力の分布を、比較して表すもので、単位は $\text{N/m}^2$ である。

締切り堤建設前は、高島を中心とする浅い水深帯及び海岸で底面せん断力が大きくなり、湾奥と湾央南側の一部を除き、泥の巻き上げ限界せん断力  $0.10 \text{ N/m}^2$  を超える力が作用する。つまり、浅い水深帯に堆積した底質が再浮遊し、湾外へ流出する可能性が高い。一方、締切り堤建設後は、浅い水深帯のみ巻き上げ限界せん断力を超え、湾奥から湾央南側、湾口にかけて限界せん断力を下回る。したがって、波浪の影響が及ばない深い水深帯(例えば、滞筋が挙げられる。)に浮遊泥が集積し、堆積が助長される可能性がある。

図-7 に表すように、湾軸(湾奥→湾口)に沿う代表点において、波浪と潮流の共存による底面せん断力を3地形について比較すると、湾奥締切り直後の地形が相対的に底面せん断力が小さく、巻き上げ限界以下のせん断力となる。すなわち、締切り堤の建設は、湾内に浮遊泥が沈降・堆積し易い環境をもたらした可能性が高い。そして、この状態は、現況についても成立しており、将来的に浮遊泥の堆積は進行する可能性が指摘される。

#### 4. 河川から流出する浮遊泥の挙動

##### (1) 河川流と浮遊泥移流・拡散のシミュレーション

###### a) 計算方法と計算条件

河川流と河川からの流出泥の移流・拡散シミュレーションは、潮汐・潮流計算と同様に、3層レベルモデルにより行う。この計算は、前述した潮汐・潮流と河川流及び浮遊泥の移流拡散計算を同時に行うもので、河川からの淡水流入により生じる密度流についても考慮する。密度流の計算は、松梨(1993)にならい、水温と塩分の移流拡散式を差分化して解き、格子点毎に2成分から密度を計算し、この密度分布から駆動力である浮力を計算する。差分法は、潮汐・潮流計算と同様である。

潮汐条件は、前述した潮汐・潮流計算と同様の開境界において、平均潮( $M_2$ 分潮)の振幅・遅角を与えて行う。河川流計算は、旭川、百間川、吉井川の3河川から年最大の平均流量を与える。各河川の流量は、各々  $800 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $460 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1,180 \text{ m}^3/\text{s}$  である。また、河川流量の時間変化は、計算開始から12時間後に年最大流量まで増加させ、36時間までこの流量が継続すると仮定し、その後48時間で、0になるように減少させる。また、初期の密度は、岡山県により観測された1987年～1996年までの10年間の児島湾沖における公共用水域水質測定結果の平均から、水温  $25^\circ\text{C}$ 、塩分  $30\text{‰}$  と設定する。また、河川水の密度は、岡山市(1989)の現地調査結果を基に、水温  $27^\circ\text{C}$ 、塩分  $0\text{‰}$  とする。

浮遊泥の移流・拡散計算は、河川からの流下土砂量を、水理公式集(1985)のWash loadの推定式において、流砂量係数  $K=1.0 \times 10^{-6}$  と仮定し、河川流量の2乗に比例

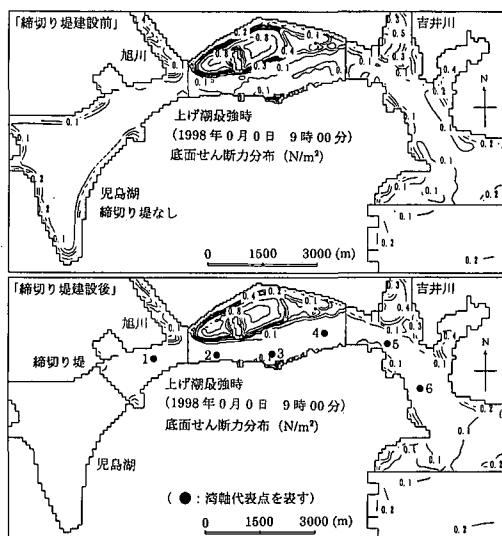


図-6 波浪と潮流による底面せん断力の分布

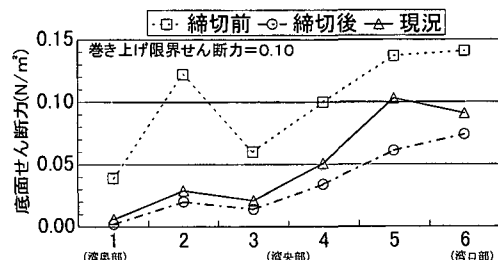


図-7 湾軸代表点における波浪と潮流による底面せん断力の比較(測点は図-6参照)

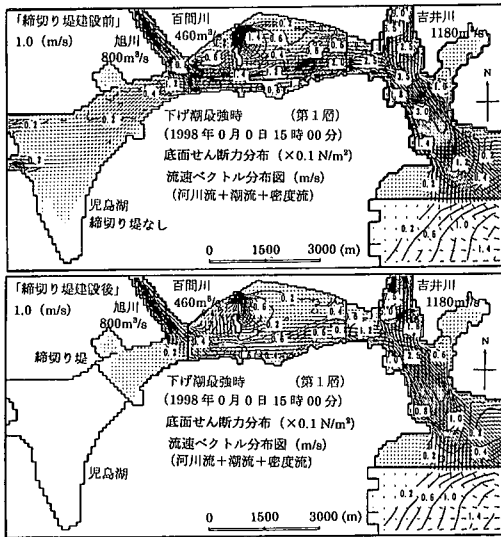
するとして与える。また、浮遊泥の粒径は、底質の代表粒径として、 $0.005$ 、 $0.01$ 、 $0.02 \text{ mm}$  の3種類を採用し、構成比は各々、 $0.40$ 、 $0.30$ 、 $0.30$  と仮定する。各粒径の沈降速度は、水理公式集(1985)のRubeyの式を基に設定し、底質の巻き上げはないものとする。拡散計算に用いる係数は、水平拡散係数を  $1.0 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、鉛直拡散係数を  $2.0 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{s}$  とする。

以上に述べた設定条件の妥当性に関しては、十分な資料がないことから、議論の余地は多々ある。しかしながら、出水時に河川から流出する浮遊泥の挙動について定性的に把握することは可能であると判断した。

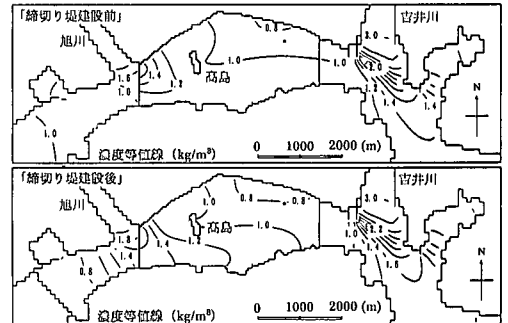
###### b) 出水時の流況と底面せん断力の計算

図-8は、締切り堤建設前後の出水時における下げ最強時の第1層の流速ベクトルと底面せん断力の分布を表し、単位は、 $0.1 \text{ N/m}^2$  である。

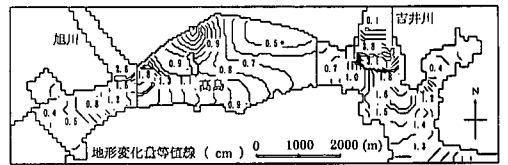
締切り堤建設前は、年最大相当の河川流により、湾内流速が増加し、底面せん断力は、湾奥と湾央北側の一部浅い水深帯を除き、泥の巻き上げ限界  $0.10 \text{ N/m}^2$  を超える。すなわち、出水による流速の増加に伴い、湾内底面



図一八 縮切り堤建設前後の河川流による流速ベクトルと底面せん断力の分布



図一九 縮切り堤建設前後の河川から流出する浮遊泥濃度の分布比較



図一〇 河川からの流出泥の湾内堆積量の分布

に作用する力は増し、河川から流出する浮遊泥は、移動過程で湾内に沈降・堆積することなく、湾外に流出することが予想される。一方、縮切り堤建設後は、湾口で泥の巻き上げ限界せん断力を超過するものの、湾奥から湾中央にかけてはそれを下回る。したがって、河川から流出する浮遊泥の一部は湾内に堆積することが予想される。

## (2) 浮遊泥の拡散及び底質への影響

図一〇は縮切り堤建設前後の下げ最強流速時における第1層の浮遊泥の濃度分布を表す。図中、濃度の単位は、 $\text{kg/m}^3$ であり、3粒径の濃度を合計したものである。

縮切り堤建設前後を比較すると、建設後の浮遊泥濃度は、河口部で相対的に高く、湾奥で幾分低くなっている。これは、湾外への流出効率が低下していることを意味する。今回の計算では、底質の巻き上げを考慮していないが、縮切り堤建設後は、底質を浮遊させる外力が湾奥で作用しないため、図一〇に表す1.0 cm程度の堆積は生じると考えられる。このような状況が、毎年繰り返されることから、湾内の深い水深帯において泥の堆積が進行すると予測される。河川流出泥に関する諸条件を再検討し精度の高い堆積予測を行うことが今後の課題である。

## 5. おわりに

児島湾内で生じたシルト・泥の堆積に伴う水深減少の要因を明らかにするために、潮流、波浪、河川流、浮遊泥移動の計算を行い、湾奥に建設された縮切り堤による湾内流速の低下に起因する可能性が高いことを述べた。

縮切り堤の建設は、潮流、河川流等の底質を移動させる外力を低下させ、湾内浮遊泥の移動過程で沈降・堆積

量を増加させる。また、湾内発生波により再浮遊する底質を湾奥の滞筋に集積・堆積させる。さらに、出水時に流出する浮遊泥の湾外への流出効率を低下させる等、湾内水深を浅くする複数の過程が指摘された。児島湾は、将来的にも堆積が進行する可能性が高いと考えられる。

謝辞：本研究は、児島湾の生態系に関わる予知モデル開発の一環として行ったものであり、研究の機会を与えて頂き、かつ貴重なご助言を賜りました九州大学応用力学研究所柳教授並びに岡山理科大学奥田教授に深甚の謝意を表します。また、児島湾の現地観測データの提供にご協力頂きました岡山県水産課、水産試験場の関係各位に感謝致します。

## 参考文献

- 岡山県 (1987～1996): 公共用水域及び地下水の水質測定結果。
- 岡山市 (1989): 岡東浄化センター建設に伴う児島湾海域への影響調査現地調査報告書, 523 p.
- 建設省河川局編 (1985～1995): 河川流量年表。
- 鶴谷広一・村上和男・入江 功 (1990): 多層レベルモデルによる港湾埋没の数値計算モデルの開発一熊本港への適用例一, 港湾技術研究所報告, 第29巻, 第1号, pp. 3-51.
- 土木学会編 (1985): 水理公式集, p. 221, p. 230.
- 松梨順三郎編 (1993): 環境流体汚染, 森北出版, pp. 170-177.
- Okuda, S. (1968): On the change in salinity distribution and bottom topography after the closing of the mouth of Kojima Bay, Bull. Disas. Prev. Res. Ins., Kyoto Univ., Vol. 18, Part 1, No. 132, pp. 35-48.
- Tanaka, H. and N. Shuto (1981): Friction coefficient for a wave-current coexistent system, Coastal Engineering in Japan, Vol. 24, pp. 105-128.