

仕切堤建設に伴う鮫川河口周辺の地形変化

清水 琢三*・横山 博実**・近藤 浩右*
 鎗木 宏***・松原 良夫****

1. ま え が き

常磐共同火力株式会社勿来発電所では、8・9号機の増設に伴い増量される発電所放流水が鮫川内水面漁業に与える影響を低減するため、鮫川河口左岸側に仕切堤を設けて河川水を分離し、放流水は増設の放水口前面の砂州を開削して外洋へ放流することとした(図-1)¹⁾。仕切堤建設と砂州開削部からの放流が周辺地形に及ぼす影響として、①河口通過流量の減少に伴う河口断面の縮小、②砂州開削部からの放流水による沿岸漂砂の遮断、が考えられる。しかしながら、当地点の漂砂現象は波浪、海浜流、潮汐、河川流、発電所放流水等の外力要因が絡み合っているため極めて複雑であり、このような河口付近の地形変化予測や河口閉塞機構については、未だ定量的な解明が十分になされていないのが現状である。そこで、仕切堤建設以前より発電所前面砂州の地形変化について現地調査を継続してきた。

本研究では、現地調査結果をもとに仕切堤建設および砂州開削部からの放流が周辺地形に及ぼす影響を明らかにするとともに、数値シミュレーションにより河口断面縮小過程について検討を行った。

2. 現地調査の概要

調査地点は、図-1に示すように福島県南端の太平洋岸、鮫川の河口砂州が発達した竜宮岬から蛭田川に至る約3kmの範囲である。竜宮岬前面の岩礁地帯を除くと、ほぼ海岸線に平行な等深線を持つ砂浜海岸である。

仕切堤建設工事は昭和57年8月に開始され、昭和58年2月には現状とほぼ同じ先端位置まで延長された。昭和58年4月28日に砂州開削部の工事が終了し、同年5月9日に仕切堤が締切られた。

現地調査は昭和55年10月に開始され、仕切堤完成以前の昭和58年2月までは、深浅測量と河口周辺地形測

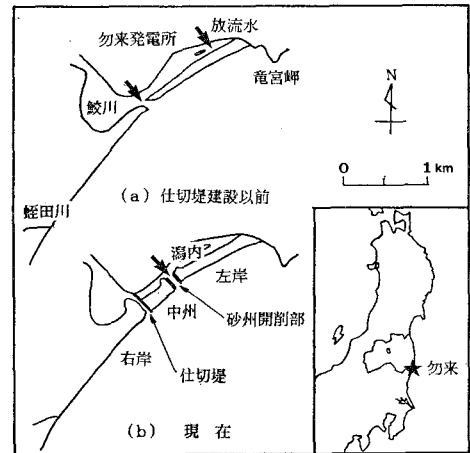


図-1 調査地点

量のほか、定期総合調査(河口断面測量、河口流速調査、水温塩分調査、沿岸流況調査など)を14回、蛍光砂追跡調査を1回、屈折波観測調査を2回実施した。仕切堤完成後の昭和58年4月から昭和60年3月までの2年間は、年4回の深浅測量と月1回の汀線および河口断面測量、さらに昭和59年2月と7月に総合現地調査(河口および砂州開削部流速調査、蛍光砂追跡調査、潟内流況調査など)を実施した。また、毎日の9時と15時に発電所屋上より沖合約2kmの波向をトランシットにより目視観測した。

3. 仕切堤建設に伴う地形変化

3.1 外力特性

当地点の北東約9kmの小名浜港三崎沖における昭和56年4月から昭和60年3月までの波浪観測資料によると、平均有義波高1.0m、平均有義波周期8.1秒であり、有義波高2m以上の高波浪は6%弱である。また、発電所からの目視観測によると、波向はESE~SSEに限られ、平均波向はE39°SでSEに約81%が集中する。波浪エネルギーフラックス、河川固有流量、発電所放流量の日平均値の経時変化を図-2に、また河川固有流

* 正会員 工修 五洋建設(株) 土木設計部
 ** 正会員 五洋建設(株) 土木設計部
 *** 正会員 常磐共同火力(株) 取締役 土木建築部長
 **** 正会員 常磐共同火力(株) 調査環境部長

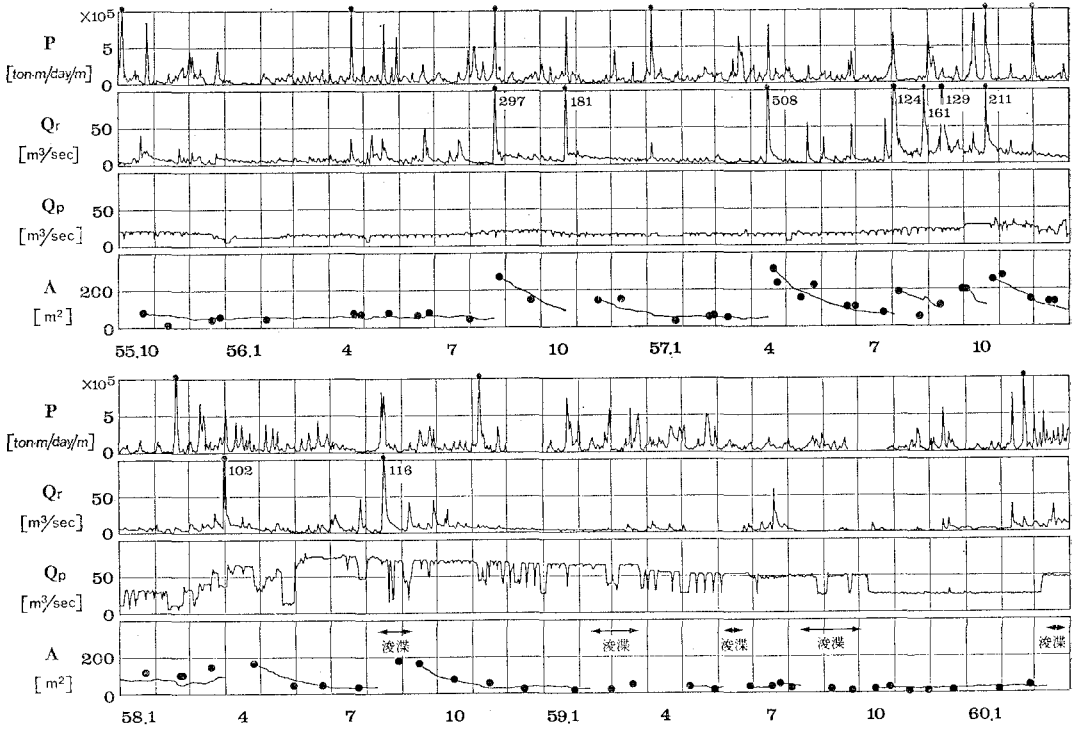


図-2 波浪エネルギーフラックス P , 河川固有流量 Q_r , 発電所放流量 Q_p と河口断面積 A の経時変化

量, 発電所放流量, 潮汐プリズム, 河口通過流量の各年度の平均値を表-1に示す。潮汐プリズムとは上げ潮時あるいは下げ潮時に河口を通過する潮汐流の総流量であり, 河口流速調査より感潮面積に河口部の潮位差を乗じて算出できることが確かめられている。河口実測潮位と小名浜港計算潮位の干満ピーク値の相関を河口幅 60 m 以上と未満に分けて求め, これをもとに潮汐プリズムを算定した。河口通過流量は河川固有流量と潮汐プリズムの和として求めたが, 仕切堤締切以前は発電所放流量も加えてある。なお, 当地点の年平均的な沿岸方向の波浪エネルギーフラックスは, 左岸, 右岸ともに河口向きである。

波浪条件は仕切堤建設前後で大差ないが, 河口通過流量は, 仕切堤締切以前の年平均 50~60 m^3/s に対して, 発電所放流水の分離および感潮面積の減少に伴う潮汐プリズムの減少により, 年平均 20 m^3/s 前後と減少した。

表-1 河川固有流量, 発電所放流量, 潮汐プリズム, 河口通過流量の年平均値

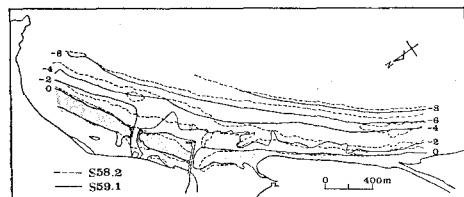
	55.10 ~56.3	56.4 ~57.3	57.4 ~58.3	58.4 ~59.3	59.4 ~60.3
河川固有流量	7.6	9.6	15.1	7.2	3.9
発電所放流量	16.0	15.7	21.2	60.6	37.6
潮汐プリズム	25.9	23.3	22.3	16.3	15.4
河口通過流量	49.5	48.6	58.6	23.4	19.3

*) 単位: m^3/s

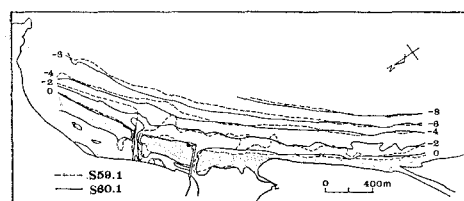
3.2 地形変化特性

図-3(a), (b) は, 仕切堤がほぼ完成した昭和 58 年 2 月と仕切堤締切約半年後の昭和 59 年 1 月および昭和 59 年 1 月と昭和 60 年 1 月の等深線比較図である。図-3(a)によると, 河口部では, 河口通過流量の減少に伴い河口幅が約 20 m と縮小し, 右岸砂州が上流側にまで発達している。砂州開削部周辺では, 年平均約 60 m^3/s の発電所放流水により, 放水口前面から開削部にかけて放流水の主流線が著しく侵食され, 開削部前面も水深 2 m 以下に侵食されている。左岸前面では, 水深 2 m の等深線が大きく前進し, 放流水により沿岸漂砂がある程度遮断されたことを示している。また, 中州前面では堆積が著しく, 水深 2 m の等深線が沖に突き出している。さらに, 潟内の左岸側の開削部護岸付近には舌状の堆積地形が発達している。次に, 図-3(b)よりその後の 1 年間の地形変化をみると, 河口部は年に数回の河口幅維持工事が行われていることもあり, 河口幅はあまり変わらないが砂州幅が拡大する傾向にある。開削部周辺では, 放流水の主流線上の水深 2 m 以深の幅が狭くなり, 開削部前面には水深 2 m 以浅の堆積域が生じている。それに伴い, 左岸および中州前面の水深 2 m の等深線は開削部からの放流を開始する以前の状態に戻っている。これは, 定期点検により発電所放流水が昭和 59 年 10 月以後約 24 m^3/s と減少したため, 沿岸漂砂の遮断が実質的

になくなり、左岸から中州へ、あるいは中州から左岸へと砂が移動したものと考えられる。さらに、渦内では逆に中州側に舌状砂州が形成されている。左岸側の舌状地形は汀線形状としては小さくなったが、水深1m以浅の舌状地形は大きくなっている。



(a) 昭和58年2月～昭和59年1月



(b) 昭和59年1月～昭和60年1月

図-3 等深線比較図

4. 螢光砂追跡調査

螢光砂追跡調査は、昭和59年2月と7月に短期移動観測と長期移動観測に分けて実施した。

短期移動観測は、灘岡ら²⁾と同様に投入点を中心とする円周上で鉛直採取する方法により実施した。碎波有義波高 1.4~2.2 m, 平均流速 0.21~0.27 m/s の外力条件に対し、混合深さ 4.3~7.6 cm, 移動速度 0.16~0.2 cm/s, 漂砂量フラックス 0.86~1.4 cm³/s/cm であった。

長期移動観測では、左岸、中州、右岸にそれぞれ黄澄、赤、緑の螢光砂 1300 kg を投入し、投入日と投入後 1, 3, 8, 14, 28 日目の合計 6 回、表層採取した。図-4 は、検出状況を模式的に示したものである。

左岸では開削部へ向かう流れにより砂が移動する。2月の調査では放流水による沿岸漂砂の遮断を示唆する結果が得られたが、7月の調査では投入後8日目に中州および中州側の開削部護岸付近でも螢光砂が検出された。中州では開削部へ向かう流れにより砂は移動するが、2月は左岸と同様に沿岸漂砂の遮断を示す結果が得られた。また、開削部へ移動した砂が、放流水により沖へ運ばれ循環して河口へ向かう移動もみられた。しかし7月には、放流量の減少と開削部の流水断面の縮小に対応して渦内の舌状砂州および左岸でも検出された。このように沿岸漂砂の遮断が放流量の増減に依存することは、3.2 の地形変化からも裏付けられる。また、開削部では tidal inlet と違って常に沖向きの流れであるが、波によ

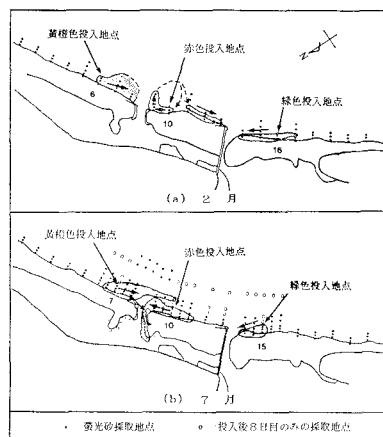


図-4 長期移動観測の螢光砂検出状況模式図

り運び込まれた土砂によって渦内に舌状砂州が形成されることがわかった。一方、右岸では入射波向、潮位、地形等の影響を受けるため、必ずしも河口向きの沿岸流が卓越するわけではないが、汀線付近でのみ多量の螢光砂が検出され、右岸砂州伸長に対する swash zone の漂砂の重要性が示された。

5. 河口部の地形変化

5.1 河口断面の変化

河口断面積の経時変化は外力とともに図-2 に示されている。図中の実線は 5.4 で後述する河口断面変化シミュレーションの結果である。河口断面は洪水時に急拡大し、その後徐々に縮小するというパターンを繰り返す、ある程度縮小すると平衡断面に収束する。最近2年間は大きな出水がなかったことと発電所放流水の分離に伴い河口通過流量が減少したことにより河口断面積は縮小し、昭和59年度は特に鮭が遡上するため河口幅維持工事のできなかった10月から1月にかけて約 12 m² (河口幅約 13 m) となった。河口断面積 A (m²) と河口幅 B (m) および平均水深 $\bar{h}$ (m) の関係をべき乗回帰して求めた。

$$B = 1.83A^{0.80} \quad (\text{相関係数 } 0.91) \quad \cdots \cdots (1)$$

$$\bar{h} = 0.55A^{0.20} \quad (\text{相関係数 } 0.48) \quad \cdots \cdots (2)$$

B は A と比較的高い相関を示す。 $\bar{h}$ は一般に A が減少すると小さくなるが、逆に仕切堤近くで深掘れする場合があります。ばらつきが大きい。

5.2 河口部の水理量の計算

河口流速調査の結果、河口断面縮小に伴い、特に河口幅が 60 m 以下になると、河口部の水位が下げ潮時に下がりきらず、潮汐プリズムが減少することが明らかになった。鮫川の場合、河口部の河川固有流量が少なく、発電所放流水の分離後、潮汐プリズムが河口通過流量の 70~80% を占めるため、このような潮汐プリズムの低下は

河口断面の縮小過程に大きな影響を与えると考えられる。そこで、河口部の摩擦、流入、流出、曲がりの損失を考慮して、河口通過流量の減少の定量的な評価を試みた。

河口部の狭水路の底面勾配と慣性項を無視し、水路内で流速が変化しないと仮定すると、運動方程式と連続式は式(3)、(4)で表される(河口から上流向きを正とする)。

$$\partial u / \partial t + g \partial \eta / \partial x + g n^2 |u| \cdot u / R^{4/3} = 0 \quad \cdots \cdots (3)$$

$$A \cdot u + Q_r = S \partial \eta / \partial t \quad \cdots \cdots (4)$$

ここに、 u : 断面平均流速、 g : 重力加速度、 η : 水位、 R : 径深、 n : マニングの粗度係数、 A : 河口断面積、 Q_r : 河川固有流量、 S : 感潮面積である。水面勾配は流入および曲がりの損失を考慮して式(5)で表す。

$$\partial \eta / \partial x = (\eta - \eta_s + f_o |u| / 2g) / l \quad \cdots \cdots (5)$$

ここに、 η_s : 外海水位、 f_o : 損失係数、 l : 狭水路長である。式(4)、(5)を式(3)に代入すると、 η の t に関する2階の常微分方程式を得る。Runge-Kutta-Gill法により満潮位から計算を開始し、計算潮位が最低になるかあるいは外海水位と同じになったところから次の満潮までは5次関数で接続した。初期条件は、 $t=0$ のとき、 $\eta=\eta_s + \Delta \eta$ 、 $\partial \eta / \partial t = 0$ とした。ここに、 $\Delta \eta$ は不等流計算で求めた河川流によるせき上げ量である。

図-5は、河口部の潮位および流量変化の計算値と実測値の比較の一例である。非常に簡単な計算手法であるにもかかわらず、両者はよく一致している。他のケースについても損失係数 f_o と狭水路長 l を適切に選べば、±10%の誤差で潮汐ブリズムの低下を算定できる。

5.3 河口断面縮小に伴う河口通過流量の減少が河口閉塞過程に及ぼす影響

5.2の計算手法を用いて、河口幅の変化に伴う河口通過流量の一潮汐間(12.5時間)の絶対値平均の変化を求めた。1.45m(朔望時)、0.91m(大潮時)、0.33m(小潮時)の3つの外海潮差に対して、河川固有流量を0として計算した結果を図-6に示す。河口通過流量は、河口幅の減少に伴い指数関数的に減少する。例えば朔望時には、河口幅が5m

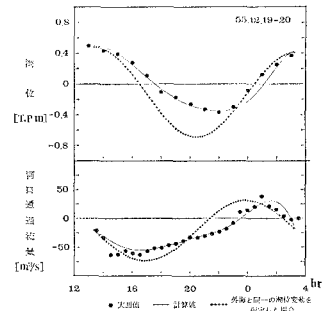


図-5 河口部の水位および流量変化

図中には外海と同一の潮位変動をする場合も示されている。

河川では流砂量 q_r にKalinske-Brown型公式を用いることが多いが、将来、波・流れ共存場への拡張を考えて、渡辺⁸⁾の局所漂砂量評価式にならない次式で表されるBagnold型公式を用いた。

$$q_r = K(u_*'^2 - u_{*c}'^2) \times |u| / g \quad \cdots \cdots (6)$$

ここに、 u_* : 摩擦速度、 u_{*c} : 限界摩擦速度である。 u_{*c} は限界シールズ数を0.06、代表粒径を0.25mmとして、 u_* は対数分布則より評価した。また無次元定数 K を1として計算した。河口部の流砂量は、一般に河口幅が縮小すると流れが速くなるため急激に増大するが、ある程度の河口幅以下では、河口通過流量の減少に伴い外海と同一の潮位変動を仮定した場合に比べてかなり小さくなる。例えば河口幅が20m以下のとき、朔望時の流砂量は1~2オーダー小さい。

5.4 河口断面変化シミュレーション

青田⁴⁾は、河口部では河口通過流による砂の排除作用と波による砂の流入作用が独立に作用すると考えて、河口断面変化をシミュレートする方法を提案した。さらに、小川⁹⁾は、漂砂量係数の物理的意味を地形変化に対する効率という形で評価し、モデルに修正を加えた。河口断面変化の基本式は式(7)で表される。

$$L \frac{dA}{dt} = e_r q_r B - e_w q_w B \quad \cdots \cdots (7)$$

ここに、 L : 砂州幅、 A : 河口断面積、 B : 河口幅、 q_r : 河口部の流れによる流出砂量フラックスと排除作用効率、 q_w 、 e_w : 波による流入砂量フラックスと流入作用効率である。ただし、 q_r 、 q_w は空隙を含む有効体積表示

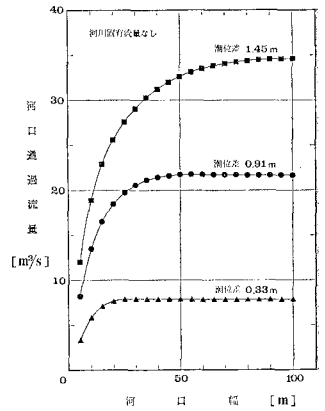


図-6 河口幅の変化に伴う河口通過流量の変化

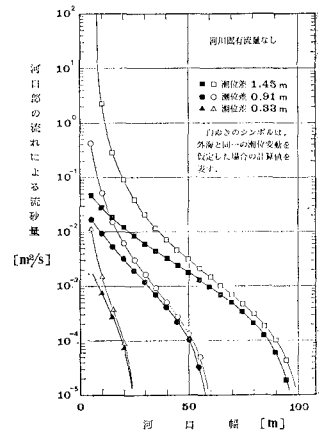


図-7 河口幅の変化に伴う流砂量の変化

である。小川ら⁵⁾の鮫川河口断面変化シミュレーション結果によれば、対象期間により最適の効率が異なり、例えば昭和56年8月の砂州崩壊以前は、以後に比べて e_r に対する e_w の値が相対的に大きくなっている。小川らは、これを砂州の状況変化に伴う流入作用効率の変化と考えて説明を試みているが、物理的解釈は必ずしも明確ではない。

そこで、5.3 の検討で明らかにされた河口断面縮小に伴う河口通過流量の低減効果をモデルに取り込んで、仕切堤建設前後の河口断面変化をシミュレートすることを試みる。満潮から満潮までを Δt とし、その間の河口部の水位および流速変化を、小名浜港の計算潮位を外海潮位として 5.2 の計算法により求め、式(6)で時々刻々の q_r を評価し、 Δt 間の総排除砂量を算定する。一方、 q_w は沿岸漂砂と波の打ち込みによる漂砂が考えられるが、定量的な評価がむずかしいので式(8)で評価する。

$$q_w = C \cdot H_b^{1.5} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 H_b は碎波有義波高であり、式(8)は、碎波帯内の漂砂量が碎波波浪エネルギーフラックスに比例すると考えて、これを碎波帯幅で平均することにより得られる。定数 C は、螢光砂追跡調査短期移動観測によると $4.2 \sim 5.5 \times 10^{-5} (\text{m}^{1/2}/\text{s})$ であり、 10^{-5} のオーダーの値をとるものと考えられる。以上のようにして q_r 、 q_w を評価し、式(7)を用いて Δt ごとに河口断面の変化を計算した。

本モデルによる計算結果は、図-2 に示されている。ただし、狭水路長、損失係数、砂州幅は、深浅測量の結果をもとに適宜変化させた。洪水時など河川固有流量が増大すると、せき上げ量が大きくなり、本モデルでは適切な水位、流速変化を計算できないので、20 cm 以上のせき上げがある場合にはそこで計算を打ち切り、河口断面の縮小過程のみをシミュレートした。全期間を通して、定数 $e_r' = Ke_r$ 、 $e_w' = Ce_w$ をそれぞれ 1.0、 $2.5 \times 10^{-5} (\text{m}^{1/2}/\text{s})$ で一定としたにもかかわらず、実測値と比較的良好一致を示す。しかも、 e_r' の値は剪断応力の表示に違いがあるが渡辺ら³⁾の係数と、また e_w' の値も螢光砂調査で得られた係数と同じオーダーである。したがって、今回提案したように河口断面縮小に伴う河口通過流量の低減を考慮して、流れによる排除砂量を適切に算定すれば、漂砂量係数を砂州形状による効率という形で評価する必要はないことがわかる。

図-8 は、平衡断面 ($dA/dt=0$) となる沖波有義波高を河口幅の変化に対してプロットしたものである。図中の各曲線の右上になると河口幅が縮小し、左下になると拡幅する。現在の鮫川の河口幅(10~30 m)についてみる

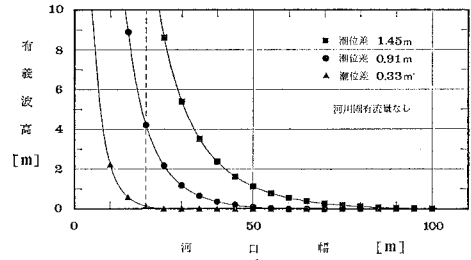


図-8 平衡断面に対応する沖波有義波高

と、波浪条件と潮位差により拡幅と縮小が繰り返される状況にあることが理解される。したがって、現在の河口断面はほぼ平衡に達しており、従来の平均水深と河口断面の関係に変化がなければ、小潮時に河口の一部が一時的に閉塞することはあっても、完全閉塞することはないものと考えられる。

6. あとがき

現地調査結果をもとに仕切堤建設に伴う地形変化について明らかにするとともに、河口断面の縮小過程について検討を行った。その結果、河口断面の縮小に伴う河口通過流量の減少が河口閉塞過程に重大な役割を果たしていることが明らかになった。さらに、河口断面変化シミュレーションモデルにこの効果を取り入れることにより漂砂量係数の物理的意味の曖昧さが除去できた。しかしながら、河口部の漂砂は本来、波による漂砂と流れによる漂砂に分けて取り扱うのではなく、その相互作用を考慮した検討が必要であると考えられる。

最後に、本研究を進めるにあたり、調査の立案、解析に終始ご指導頂いた電力中央研究所 鹿島遼一氏に深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 国土開発技術研究センター (勿来発電所周辺海浜変形検討委員会 委員長堀川清司東京大学教授): 勿来発電所第7期工事鮫川河口処理基本計画作成業務報告書, 112 p., 1982.
- 2) 灘岡和夫・田中則男・加藤一正: 螢光砂を用いた碎波帯内における局所的砂移動の観測, 港湾技術研究所報告, 第20巻, 第2号, pp. 75~126, 1981.
- 3) 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉: 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 406~410, 1984.
- 4) 青田 茂・首藤伸夫: 河口断面積変化過程の数値モデル, 第24回水理講演会論文集, pp. 203~208, 1980.
- 5) 小川由信・藤田義治・首藤伸夫: 河口断面・河口地形の変化について, 第28回水理講演会論文集, pp. 129~135, 1984.