

深浅測量結果に基づく備讃瀬戸航路の地形変化

伊 福 誠* ・小林 泰之**・坂 田 健 治**
西 本 光 宏***・中 田 正 人****

三ツ子砂嘴に隣接する南北連絡航路においては、サンドウェーブの形成および航路埋没が進行している。また、三ツ子砂嘴から斜面に沿って西側に移動した土砂が東向きの流れによって三ツ子島の西側に押し戻され、サンドウェーブを形成しながら徐々に土砂が堆積している。なお、イノサキノツガイの南側領域では、サンドウェーブの移動は、約 1~2 m/month の速度で東側へ、一方、北側においては、約 0.15~0.5 m/month の速度で西側へ移動している。さらに、斜面の法肩から落ち込んだ土砂は、流れによって輸送され徐々にサンドウェーブを形成し成長する。

1. ま え が き

備讃瀬戸航路は、1960 年代から瀬戸内海沿岸の工場立地と港湾整備の進展とともに、航行船舶の増加・大型化が進み、航路の安全で円滑な整備が急務となっていた。こうしたなかで、運輸省(現国土交通省)は、1963 年 7 月に備讃瀬戸航路の整備計画を策定し、1963~1972 年にかけて、岩盤を含む土砂を浚渫し、北航路、南航路、南北連絡航路および水島航路の水深を、それぞれ 19, 13, 13 および 17 m に整備した。

しかしながら、航路周辺は多数の島嶼、暗礁等からなる複雑な地形であることから漂砂による航路の埋没現象が避けられず、航路を維持・整備するうえで大きな障害となった。とくに、北航路と南北連絡航路の交差部に位置する「イノサキノツガイ」では、起伏の大きい海底の地形変動(以下、サンドウェーブと記す)が顕著になったため、1981~1983 年にかけて再び維持浚渫を実施した。維持浚渫終了後、約 20 年を経過した現在では、サンドウェーブの再生が顕著になり、北航路側では 19 m より浅い部分が生じている。さらに、南北連絡航路においては計画水深が 13 m であるにも係わらず 12 m より浅い場所も確認されている。

航路内への土砂の流入が、調査等で明らかになっている一方、本航路がもつ産業経済のインフラとしての航路の埋没は、周辺の港湾活動に多大な影響を与えることが懸念される。現在でも、航行船舶は積み荷の整理などによって吃水を浅くする非効率な輸送を余儀なくされているが、このまま埋没が進行して船舶の航行制限が強化されれば、瀬戸内海の物流ネットワークにとって大きなハンデを背負うこととなる。

小笹(1975)は、北航路におけるサンドウェーブの形成過程や規模について詳細に検討している。しかしながら、南北連絡航路においては、三ツ子砂嘴と呼ばれる非

常に浅い領域が隣接しており、この領域からの土砂移動によって航路埋没が生じているのではないかと推測されるものの、その実体解明のための検討はなされていないのが実状である。

こうしたことから、本研究では、浚渫が完了した翌年、1985 年から定期的に実施している深浅測量結果に基づいた詳細な解析を行い、イノサキノツガイにおけるサンドウェーブの形成および発達、漂砂の移動状況について明らかにするとともに、イノサキノツガイおよびその周辺における流況と地形変化の時・空間的変動を数値解析的に検討し、航路維持に関する基礎的資料を得ようとしたものである。

2. 深浅測量結果に基づく解析

(1) 解析領域および解析範囲

イノサキノツガイでは、1984 年の浚渫工事完了後、年 1 回の定期的な深浅測量を実施している。解析対象とする深浅測量結果は、1985 年から 1998 年までの 12 年間分である。なお、深浅測量結果は、10 m の格子間隔でデジタル化している。

イノサキノツガイは図-1 に示すように、本島、与島、牛島および三ツ子島で囲まれた南東から北西に伸びる海域である。この海域の東側には三ツ子砂嘴があり、その南北は海釜となっており、水深は南側では 60 m 程度、北側では 90 m 程度である。

解析断面は、図-2 に示すイノサキノツガイを横切る Line 1~5 であり、各断面の間隔は 100 m である。また、Line 1~5 の解析対象範囲は、それぞれ 5,320~5,990 m, 5,160~5,980 m, 5,000~5,970 m, 4,860~5,950 m および 4,700~5,900 m である。

(2) 海底地形の経年変化

図-3(a)~(c)は、三ツ子砂嘴から西側に伸びる Line 2 の地形変化を示したものである。浚渫直後の(a)をみると、水深は 9.8~23.6 m であり、 $x=5,160\sim5,660$ m 付近は海底の起伏が大きく、東に向かって水深が浅くなる傾向にある。また、 $x=5,660\sim5,940$ m 付近の水深はほぼ一定であるが、 $x=5,940$ m 付近から三ツ子砂嘴のある

* 正 会 員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科
** 学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科
*** 正 会 員 国土交通省四国地方整備局高松港湾空港工事事務所所長
**** (株)エイトコンサルタント技術開発部

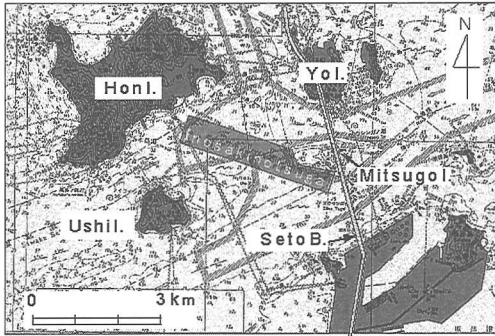


図-1 イノサキノツガイの位置関係

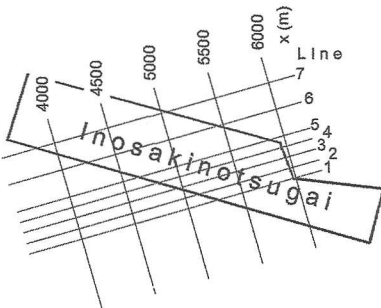


図-2 解析対象とした測線

東に向かい、水深が急激に浅くなる。さらに、 $x=5,280$ m 付近に比較的小さい規模の小さいサンドウェーブが形成されている。1987 年以降、新たに形成される幾つかのサンドウェーブは、消長を繰り返しながら東へ移動しており、1992 年の (b) では波高が 2 m にも達するサンドウェーブが形成されている。さらに、1992 年以降、サンドウェーブは消長を繰り返しながら徐々に東へ移動している。(c) の 1998 年には、 $x=5,800$ m 付近では波長 125 m 程度、波高 3 m 程度に成長したサンドウェーブが形成されている。なお、各々のサンドウェーブの平均移動速度は、東向きに 0.84~1.31 m/month である。

図-4 (a)~(c) は、斜面の法肩にあたる Line 4 の地形変化を示したものである。浚渫直後の (a) において、

水深は 14.5~17.2 m であり、海底の起伏は小さいが、 $x=5,550$ m 付近に比較的小さい規模の小さいサンドウェーブが形成されている。このサンドウェーブは、徐々に成長し、1989 年には波長が 80 m 程度、波高が 3.5 m 程度になる。また、1989 年以降、波高は僅かに変動するものの、位置はほとんど変化しない。さらに、1989 年の $x=5,480$ および 5,560 m 付近において、新たに形成された比較的小さい規模の小さいサンドウェーブは、徐々に間隔が狭まり、1995 年には 2 つのサンドウェーブが合体し、規模の大きいサンドウェーブを形成する。1998 年の (c) では、波長が 70~120 m 程度、波高が 1.5~2 m 程度のサンドウェーブとなる。Line 4 は Line 2 とは異なり、5,650 m 付近に形成されたサンドウェーブの位置はほとんど変化せず、1985 年以降、東西から徐々にこの付近に向かって収束し、地盤の褶曲に似た様相を呈する。1985 年と比較すると、その変動量は 3 m にも達し、解析した断面の中でも最も大きい。これは、この断面が斜面の法肩に位置することによるものと考えられる。

図-5 (a)~(c) は、斜面の法肩にあたる Line 5 の地形変化を示したものである。浚渫直後の (a) をみると、水深は 20.5~23.9 m であり、Line 2 および Line 4 の 1985 年 3 月と比較して水深が深い。 $x=5,200$ ~5,700 m 付近では、比較的小さい規模の海底の起伏が大きく、 $x=5,300$ ~5,590 m 付近では、比較的小さい規模の小さいサンドウェーブが多数形成されている。1987 年以降、 $x=5,300$ ~5,600 m 付近のサンドウェーブの波高は徐々に増大する。(b) の 1992 年には、1985 年と比較して最大で 3 m もの土砂の堆積がみられる。また、 $x=5,400$, 5,490 および 5,570 m 付近では、波長 100~120 m 程度、波高 4 m 程度に成長したサンドウェーブが確認される。1992 年以降、 $x=5,300$ ~5,600 m 付近の土砂の堆積量は僅かな増減があり、サンドウェーブは僅かに西へ移動しており、その平均移動速度は、0.10~0.15 m/month である。峯や谷の位置に大きな変化はなく波長 80~100 m 程度、波高 2~3 m 程度に成長する。なお、1995 年以降、 $x=4,700$ m 付近に小さなサンドウェーブが出現し、徐々に東側へ移動している。1998 年の (c) では、1995 年に出現したサンドウェーブは、 $x=$

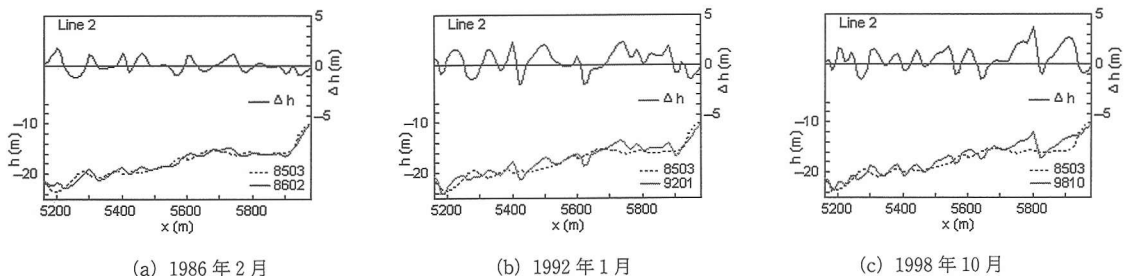


図-3 Line 2 の地形変化

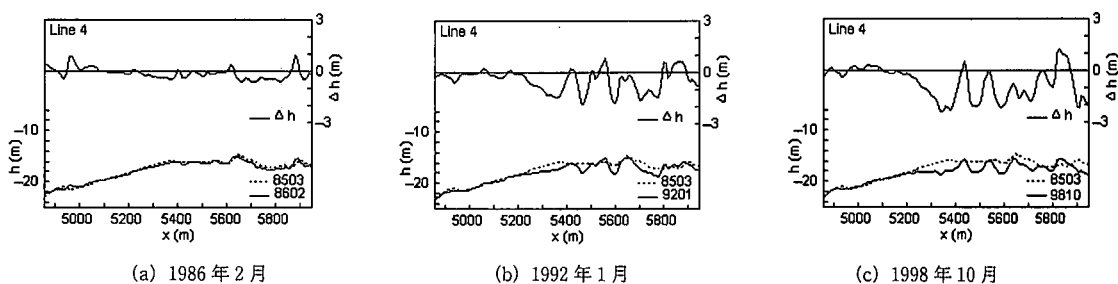


図-4 Line 4の地形変化

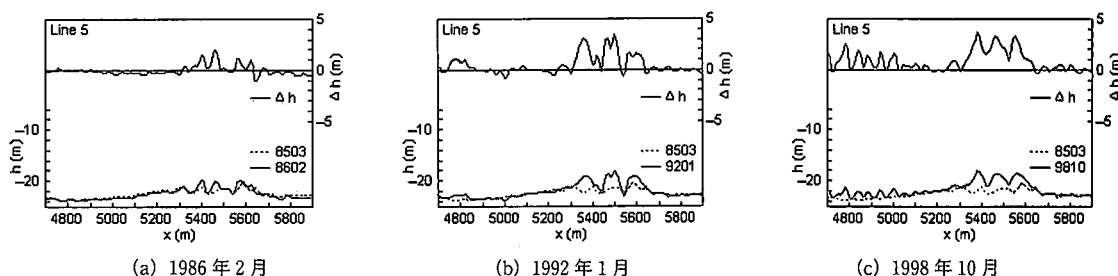


図-5 Line 5の地形変化

5,000 m 付近にまで拡がり、波長は 50 m 程度、波高は波高 1~2 m にも達する。

Line 5 は、Line 2 や Line 4 と比較すると、サンドウェーブの平均移動速度の絶対値は小さく、移動は逆である。この原因としては、Line 5 が斜面の法尻にあたり水深が深いため、砂の移動量が少ないことが考えられる。さらに、底質の粒径も要因として考えられるが、詳細な観測データがないので、これが及ぼす影響については言及できない。

(3) 断面積の変化

Line 1~5 における断面積の変動について調べ、土砂の移動量や移動方向について検討する。なお、断面積の算出範囲は、Line 1~5 でそれぞれ、5,320~5,990, 5,160~5,980, 5,000~5,970, 4,860~5,950 および 4,700~5,900 m であり、基準面は水深 25 m にとる。

表-1 は、Line 1~5 における 1985 年 3 月の断面積、1985 年 3 月の断面積と対象年の断面積との差 (ΔA_{ss}) および前観測時の断面積との差 (ΔA_p) を示す。

Line 1 の ΔA_{ss} をみると、断面積の変動はすべての深淺測量実施年月で比較的小さいが、1996 年 11 月では、1985 年 3 月と比較して断面積は約 250 m² 程度増大している。また、 ΔA_p は、1992 年 11 月~1997 年 10 月まで、前観測時からの断面積の変動が大きく、増減を繰り返しており、1992 年 11 月で約 150 m² 減少し、1993 年 11 月では約 240 m² 増大している。

Line 2 の ΔA_{ss} をみると、断面積の変動はすべての深淺測量実施年月で正の値を示しており、1996 年 11 月で

は、1985 年 3 月と比較して断面積は約 720 m² 増大している。また、 ΔA_p は、1996 年 11 月までは増大傾向にあり、とくに、1987 年 2 月、1988 年 11 月、1992 年 1 月、1995 年 9 月および 1996 年 11 月では前観測時と比較して 100 m² 以上増大している。なお、1997 年 10 月以降は、減少傾向にあり、1997 年 10 月では約 230 m² 減少している。

Line 3 の ΔA_{ss} をみると、断面積は増大傾向にあり、1996 年 11 月では、1985 年 3 月と比較して約 390 m² 増大している。また、 ΔA_p は増減を繰り返し、とくに、1993 年 11 月では約 350 m² 増大し、1997 年 10 月では逆に約 300 m² 減少している。

Line 4 の ΔA_{ss} をみると、断面積の変動はすべての深淺測量実施年月で負の値を示す。これは、Line 4 が斜面の法尻にあたり、北側へ土砂が落ち込んでいるためであると考えられる。1997 年 10 月では、1985 年 3 月と比較して断面積は約 800 m² 減少している。また、 ΔA_p は増減を繰り返しているが、増大の割合と比較して減少の割合が大きく、とくに、1993 年 11 月および 1997 年 11 月では、それぞれ約 380 m² および 220 m² 減少している。

Line 5 の ΔA_{ss} をみると、断面積の増大が顕著である。これは、Line 5 が斜面の法尻にあたり、南側から土砂が落ち込んでいるためであると考えられる。とくに、1992 年 11 月では、1985 年 3 月と比較して断面積は約 1240 m² 増大している。また、 ΔA_p は増大傾向にあり、とくに 1992 年 11 月では、前観測時と比較して約 700 m² 増大している。しかしながら、1993 年 11 月では、約 700 m² 減少する。

Line 1~5 において、 ΔA_p に着目すると、1986 年 2 月で

は、Line 1～3 および Line 5 の断面積の変動は比較的小さいが、Line 4 は、前観測時と比較して大幅に減少する。また、1987 年 2 月、1988 年 11 月および 1996 年 11 月では、すべての断面において断面積が増大する。さらに、1990 年 11 月および 1997 年 10 月では、Line 1～4 は前観測時と比較して断面積が大幅に減少するが、Line 5 では増大する。なお、1993 年 11 月では、Line 1～3 は前観測時と比較して断面積が増大するが、Line 4 および 5 は断面積が大幅に減少する。これらのことから、土砂の移動は、年月によって大きく変化し、Line 4 および 5 のような地形の急変部では、Line 1～3 とは異なる傾向にある。

以上のことから、図-6 に示すように、三ツ子砂嘴から斜面に沿って西側に輸送された土砂が東向きの流れによって三ツ子島の西側に押し戻され、サンドウェーブを形成しながら徐々に土砂が堆積している。さらに、イノサキノツガイの北部領域では、Line 4 の斜面の法肩から土砂が落ち込み、それが流れによって輸送され、サンドウェーブを形成し成長させている。

3. 数値解析

(1) 解析領域

解析は図-2 の Line 5, 6 および 7 について行った。各断面の水平距離は 4,500 m である。解析に用いる水深は、イノサキノツガイにあたる領域は、1984 年の浚渫工事完了後、年 1 回実施している深浅測量から得た値を用い、イノサキノツガイ以外の領域は、海上保安庁水路部が刊行している海図 No. 1122 の水深を用いる。

(2) 数値モデルおよび解析条件

流れの基礎式は、第一の著者が人工海藻周辺の流れや地形変化の計算で用いたもの（伊福、1997）にコリオリ力を付加し、抗力項を省いたものである。潮汐は、 M_2 分

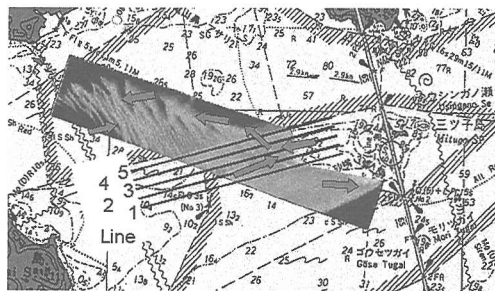


図-6 土砂の移動方向

潮を対象とし、潮位差は 2.5 m、両境界では微小振幅長波理論によって算出した水面変動量と流速を与えた。また、底面における境界条件は nonslip とした。流れを規定する方程式は、座標変換を行い境界適合型の座標系を用いて解析した。数値解析には、特性曲線法を用い、水平方向の格子間隔は 5 m、鉛直方向は 14 分割、時間間隔は 0.5 s とした。なお、解析対象となる領域の底質の中央粒径は、0.5 mm 以下あるいは 0.5～1 mm である（小笹、1975）。そこで、底質の粒径は 0.5 mm とした。掃流漂砂量は、Meyer-Peter・Müller の実験式（1948）、限界掃流力は岩垣の式で算出した。

4. 解析結果

(1) 流速ベクトルの空間分布

図-7 は、Line 5 での西向き流速が最大となる位相（以下、上げ潮と記す）における流速ベクトルの空間分布を示したものである。流速は、 $x=5,890$ m の水面付近で最大となり、1.65 m/s 程度の値を示す。なお、イノサキノツガイの $x=4,700\sim 5,900$ m では、流速は水面付近で 1.14～1.65 m/s 程度である。なお、東向き流速が最大と

表-1 Line 毎の断面積の変化

		Line 1		Line 2		Line 3		Line 4		Line 5	
		ΔA_{85}	ΔA_p	ΔA_{85}	ΔA_p	ΔA_{85}	ΔA_p	ΔA_{85}	ΔA_p	ΔA_{85}	ΔA_p
date	8503	5057.5	—	5918.2	—	7286.9	—	8028.6	—	2969.2	—
	8602	-85.7	-85.7	29.2	29.2	25.1	25.1	-150.2	-150.2	-22.8	-22.8
	8702	21.8	14.7	164.6	22.7	147.7	-1.2	-205.1	-94.7	421.0	192.4
	8811	63.9	42.1	285.9	121.2	264.7	117.0	-199.9	5.2	505.8	84.8
	8908	65.7	1.8	318.7	32.8	239.1	-25.6	-268.4	-68.5	528.2	22.4
	9011	50.9	-14.9	175.0	-143.6	774.	-161.7	-402.6	-134.2	615.6	87.3
	9201	25.2	-25.7	290.3	115.3	103.8	26.4	-497.7	-95.1	544.5	-71.0
	9211	-128.3	-153.5	324.8	34.5	-128.9	-232.7	-335.7	162.6	1240.1	695.6
	9311	116.4	244.7	412.1	87.3	222.4	351.3	-711.0	-375.3	532.9	-707.3
	9509	57.1	-59.2	536.2	124.2	150.9	-71.5	-680.9	30.1	838.1	305.3
	9611	245.9	188.8	723.4	187.1	385.1	234.2	-602.1	78.8	928.4	90.3
	9710	96.1	-149.8	492.2	-231.2	92.3	-292.8	-817.9	-215.7	969.0	40.6
	9810	118.3	22.2	456.1	-36.0	51.5	-40.8	-792.8	25.0	1037.4	68.4

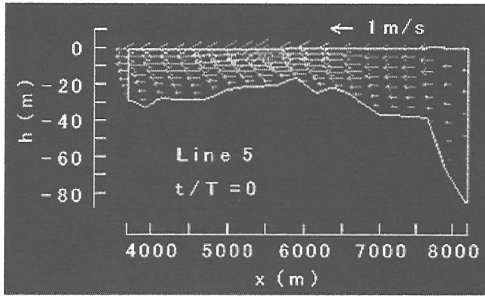


図-7 上げ潮時の流況 (Line 5)

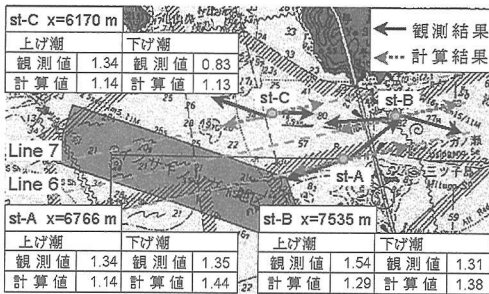


図-8 流速の観測値と計算値

なる位相では、流速は、 $x=5970\text{ m}$ の水面付近で最大となり、 1.87 m/s 程度の値を示す。なお、イノサキノツガイの $x=4,700\sim 5,00\text{ m}$ では、流速は水面付近で $0.99\sim 1.73\text{ m/s}$ 程度である。

図-8 は、第六管区海上保安本部による流速の観測結果 (運輸省第三港湾建設局, 1997) と Line 5, 6 および 7 上の観測点における計算結果を比較したものである。

Line 5 の $x=6,765\text{ m}$ 付近 (st-A) では、計算結果は上げ潮および下げ潮の位相において、それぞれ観測結果の 0.9 倍および 1.1 倍である。また、Line 6 の $x=7,535\text{ m}$ 付近 (st-B) では、計算結果は上げ潮および下げ潮の位相において、それぞれ観測結果の 0.8 倍および 1.1 倍である。さらに、Line 7 の $x=6,170\text{ m}$ 付近 (st-C) では、計算結果は上げ潮および下げ潮の位相において、それぞれ観測結果の 0.9 倍および 1.4 倍である。Line 5~7 とも観測結果は、上げ潮流速が下げ潮流速より大きいが、計算結果では逆の結果が生じている。こうした差異は、断面 2 次元の解析では、解析対象領域の複雑な地形を反映できなかったためであると考えられる。

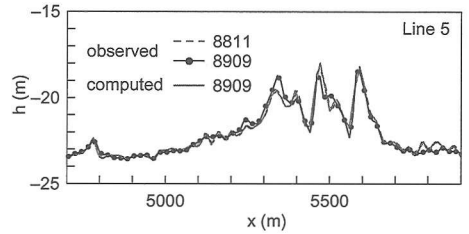


図-9 地形変化 (1988~1989 年)

(2) 地形変化

図-2 に示す Line 5 における 1988~1989 年までの地形変化を図-9 に示す。

計算結果と観測結果を比較すると、 $x=5,100\text{ m}$ 以西では地形の変動も小さく、観測結果と計算結果はほぼ対応している。しかしながら、 $x=5,350\sim 5,600\text{ m}$ 付近の海底の起伏が比較的大きい場所では、観測結果と計算結果との間には 1 m 程度の過小評価あるいは過大評価があり、計算結果は必ずしも観測結果を再現し得ていない。

5. おわりに

深浅測量結果に基づいた解析から、三ツ子砂嘴に隣接する南北連絡航路では、サンドウェーブの形成および航路埋没が進行していること、三ツ子砂嘴から斜面に沿って西側に移動した土砂が東向きの流れによって三ツ子島の西側に押し戻され、サンドウェーブを形成しながら徐々に土砂が堆積していることが明らかになった。

2 次元数値モデルを用いて、イノサキノツガイおよびその周辺における流況および地形変化の時・空間的変動を数値解析的に検討した。しかしながら、流況および地形変化とも観測結果を十分に再現するまでには至らなかった。なお、イノサキノツガイ付近の地形はかなり複雑なため、流況および地形変化を十分な精度で再現するには 3 次元の解析が必要であると考えられる。

参考文献

- 伊福 誠 (1997): 人工海藻による波・流れの制御と漂砂, 海岸工学論文集, 第 44 巻 (1), pp. 536-540.
- 運輸省第三港湾建設局 (1997): 備讃瀬戸航路埋没予測調査報告書, pp. 1-89.
- 小笹博昭 (1975): 備讃瀬戸航路における海底砂州, サンドウェーブの調査, 港湾技術研究所報告, Vol. 1, No. 2, pp. 1-45.
- Meyer-Peter, E. and R. Müller (1948): Formulas for bed-load transport, Proc. 2nd IAHR Congr., pp. 39-64.