

# 潜堤背後の洗掘溝の漂砂特性

## Sediment Transport Characteristics on a Scoured Channel behind Submerged Breakwater

吉田秀樹<sup>1</sup>・金井 実<sup>2</sup>・山田貴裕<sup>3</sup>・片野明良<sup>3</sup>

Hideki YOSHIDA, Minoru KANAI, Takahiro YAMADA and Akiyoshi KATANO

In Niigata west coast, a belt-shaped scour is formed behind the submerged breakwater. The scour is considered as a cause of the loss of filled sand. In this study, field experiments by installation of filled sand and fluorescent tracer were conducted to examine the sand movement around the scour. The result of experiments indicates that the sand on the filled beach is transported in the offshore toward the scour and that the sand settled in the scour is also transported along the submerged breakwater and flows out. These characteristics have become clear, and therefore, basic policy of countermeasures to prevent the loss of filled sand has been suggested.

### 1. はじめに

激しい侵食で砂浜を失った新潟西海岸を蘇らすため、水深8mのところへ天端幅40mの潜堤を建設し背後に養浜して砂浜を回復するという面的防護方式による海岸保全が1989年に着工された。新潟西海岸の中でも整備が優先された第1区画は、2000年までに約40万m<sup>3</sup>の養浜を行って完成し、その後8年が経過した。この間、様々な調査を行いつつ、面的防護方式の効果を注意深く監視してきた。その結果、まず洗掘溝（潜堤背後の帯状の窪み地形、図-1参照）が形成されていることが明らかになった。栗山ら（2007）は、洗掘の形成要因を調べるため、新潟西海岸の長期深浅測量成果に基づいた地形変化解析を行って、突堤と潜堤端部の平面的な位置関係により増大した潜堤端部の洗掘深の残存が、洗掘溝の形成要因であると述べている。著者ら（吉田ら、2008）も、同様の解析を行って潜堤の施工速度が遅いことによって増大した潜堤端部の洗掘深が、埋め戻されることなく残存することで洗掘溝が形成されると述べている（以下、要因A）。

一方、第1区画に投入した養浜砂は、年間0.7～0.8万m<sup>3</sup>の割合で区画外に流出していることが明らかになった。第1区画の土砂流出は、その他の区画においても起こり得ることなので、第1区画で起きている養浜砂の流出を詳細に調べて、維持管理を少なくする方策を事前に検討しておく必要がある。

本研究では、洗掘溝内の漂砂特性を調べるため、洗掘溝内に養浜砂を投入して、その挙動を追跡した。更に、洗掘溝を含む潜堤背後の養浜砂の移動経路を把握するため、蛍光砂調査を含む現地調査を実施し、調査結果を踏まえた養浜砂流出対策の基本方針を検討した。

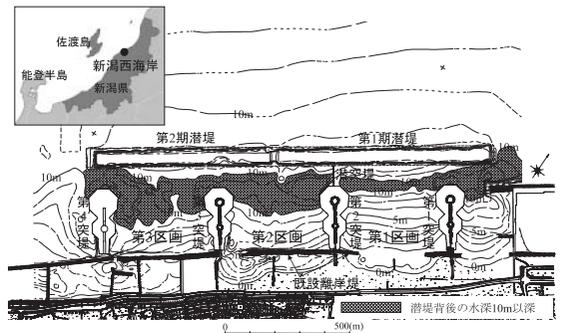


図-1 新潟西海岸の位置と施設名称

### 2. 潜堤天端幅拡張過程に生じた潜堤背後の洗掘

深浅測量成果に基づいた地形変化解析を再度実施したところ、潜堤延伸過程に生じた潜堤端部洗掘の残存だけでは、洗掘溝の形成要因を説明できない地形変化が第1区画で確認された。

図-2 (a) (b) は、第1区画沖で整備される第1期潜堤の端部が第1・第2突堤沖まで延伸された後に生じた地形変化を2期間について示したものである。図-2 (a) (b) の構造物条件の違いは、潜堤の延長と潜堤天端幅である。潜堤天端幅は、暫定断面（天端幅15～17m）から完成断面（天端幅40m）に拡張したことで約25m広がった。

暫定断面で整備された潜堤の背後で生じた地形変化（図-2 (a)）は、潜堤の両端部の洗掘だけでなく、沿岸方向に帯状の侵食が現れている。暫定断面で整備された潜堤の中央の250m区間を完成断面に拡張した後に生じた地形変化（図-2 (b)）にも、再び潜堤の背後に帯状の侵食が現れており、しかも1m以上に及ぶ侵食は、暫定断面で生じた侵食を上回る。

図-3は、潜堤背後に形成された洗掘溝の断面形状と潜堤の位置関係を示したものである。潜堤天端幅を暫定断

1 正会員 前 新潟港湾・空港整備事務所 所長  
2 (財) 沿岸技術研究センター主任研究員  
3 正会員 (株) エコー 調査・解析部

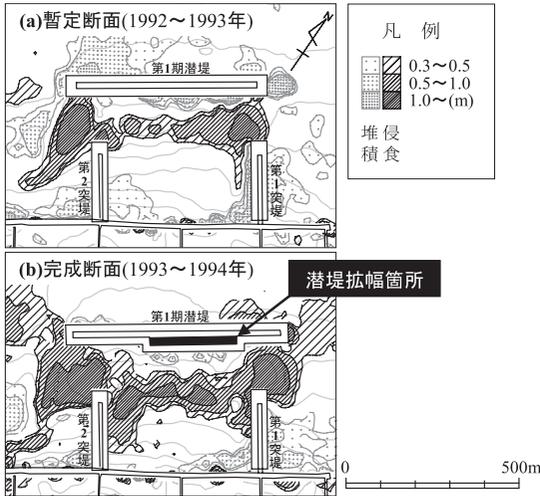


図-2 暫定断面時と完成断面時の地形変化の平面分布

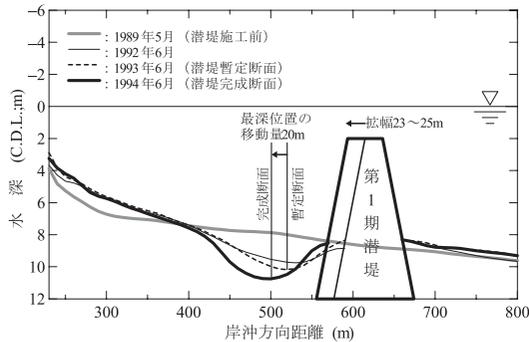


図-3 暫定断面と完成断面の岸沖方向の断面変化

面から完成断面にしたことで、最大洗掘深の現れる場所が岸方向に約20mシフトしており、このシフトした距離は、潜堤の拡幅に対応している。潜堤の拡幅に伴う最大洗掘深の移動は、最大洗掘深の位置が潜堤岸側エッジに依存することを示すとともに、潜堤端部が沿岸方向に離れた位置にあるときに生じた潜堤背後の洗掘を、潜堤端部洗掘の残存による要因Aで説明することができない。

### 3. 洗掘溝の漂砂特性を調べる養浜砂の試験投入

洗掘溝の形成要因を確かめるため、潜堤完成後の洗掘溝に養浜砂を投入し、その移動を追跡する現地実験を行った。

#### (1) 養浜砂の追跡調査

試験養浜砂は、阿賀野川河口で採取した中央粒径0.4mmの底質を用いた。これは、第1区画の養浜砂の中央粒径とほぼ同じである。養浜砂の投入時期と投入量は、2002年9月～10月に第1区画の洗掘溝に1.5万 $\text{m}^3$ 、2003年10～12月に第2区画の洗掘溝に1.4万 $\text{m}^3$ である。

2地点に投入した養浜位置の違いは、第1区画が第1・

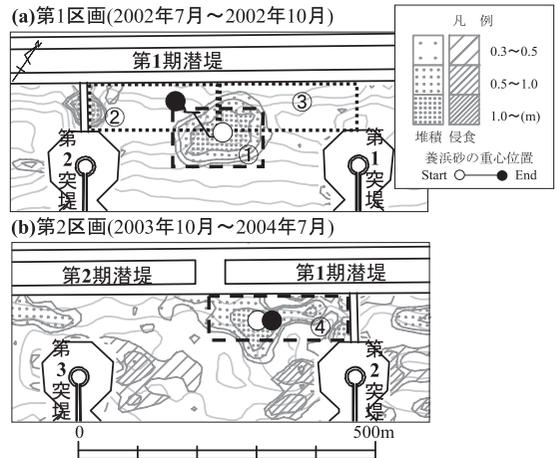


図-4 養浜前後の地形変化の平面分布

第2突堤間中央の洗掘溝に投入したのに対し、第2区画は、第2・第3突堤間のやや第2突堤側の潜堤基部に投入したことである。

2地点の試験養浜投入前後の地形変化の平面分布を図-4に示し、図中には投入した養浜砂の移動を追跡するため、養浜砂の重心位置の移動経路を実線で示した。

第1区画(図-4(a))の養浜砂の重心位置は、潜堤背後の第2突堤側に移動している。一方、第2区画(図-4(b))の養浜は、養浜砂の重心位置に変化がない。

図-4に示す投入位置と主な堆積域となる4領域(①～④)の土砂量と平均水深の経年変化を図-5に示した。

養浜砂の移動に伴う土砂量の経年変化を見ると、第1区画の領域①の養浜砂は、時間の経過とともに減少するのに対し、領域②の土砂量は、養浜量の5割相当分の増加に止まる。領域③や区画内のその他に、これと均衡する堆積が認められないことから、残りの養浜量は区画外に流出した。領域④が示す第2区画に投入した土砂量は、養浜砂の投入量の8割以上が残存しており、第1区画に比べて残存割合が多い。

一方、平均水深に着目すると、領域①は、養浜砂の投入によって8.6mまで浅くなるものの、5年が経過した2007年に再び養浜前の9.2mに戻り、2008年現在は、その水深を維持していることから、領域①は、ほぼ平衡状態にあると考えられる。養浜前の水深が9.5mであった領域②・③は、養浜砂の移動に伴い、領域②が浅くなるのに対し、領域③に変化が認められない。

第1区画の領域①～③の平均水深に比べて2m程度深い第2区画の領域④では、養浜砂の投入後に11m弱となり、その後の4年間に変化が少なく、その水深を維持していることから、第1区画の領域①と同様にほぼ平衡状態と考えられる。

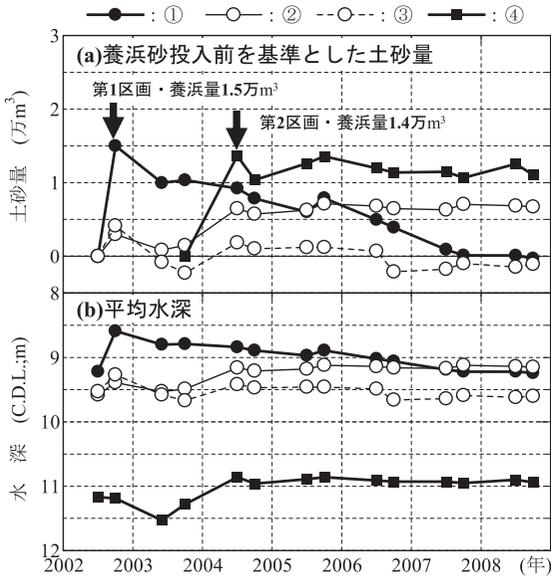


図-5 領域別の土砂量と平均水深の経年変化

(2) 洗掘溝の漂砂特性の推論

養浜砂の投入位置の違いとその後の堆積域に着目すると、次のような推論が成り立つ。

第1・第2突堤間中央の洗掘溝に投入された第1区画の養浜量の5割が第2突堤側の潜堤基部に捕捉され、残りの養浜量が区画外に流出したことは、第1突堤と第2突堤側の2方向に向かう砂移動があったことを意味する。このうち、第1突堤側に移動した砂は、第1突堤先端を通過して区画外に流出した。養浜砂の重心位置が示すように、第2突堤側に移動した砂は、その後、潜堤に捕捉されたことで堆積したと考えられる。すなわち、第1区画に投入した養浜砂が移動した事象は、洗掘溝の形成要因が要因Aだけであることを否定する。

一方、第2区画の養浜砂は、第2突堤側の潜堤基部に投入されたことで、第3突堤側に向かう砂移動が少なく、第1区画と同じ潜堤基部にそのまま残存したと考えられる。よって、第2区画の養浜砂が移動しなかった事象は、洗掘溝の形成要因が要因Aだけであることを肯定する。

4. 洗掘溝を含む潜堤背後の漂砂調査

2地点に投入した養浜砂の移動は、相反する漂砂特性を示した。洗掘溝の形成要因に対し、第1区画の養浜砂の移動は、要因Aを否定し、第2区画の養浜砂は、要因Aを肯定する。また、第1区画の養浜砂は、冲向き移動によって洗掘溝まで運ばれて区画外に流出している可能性があった。そこで、維持管理を少なくする方策を検討するため、洗掘溝より岸側の漂砂特性も併せて把握する調査を実施した。

(1) 調査手法

洗掘溝の漂砂特性は、解明されていない複雑な水理現象による砂移動のため、モデル化されていない。また、水理模型実験で検討する際にも、相似則の問題や現地で生じる複合的な外力場を実験に取り込むことが難しい。そこで、蛍光塗料で着色した蛍光砂を現地に投入して追跡する現地調査を実施することとした。

蛍光塗料として使用できる色が少ないため、蛍光砂の投入地点数は、洗掘溝と汀線の2地点に限定した。

洗掘溝を蛍光砂の投入地点に選定した理由は、蛍光砂が移動することなく洗掘溝に留まれば要因Aを肯定し、移動すれば要因Aを否定する結果が得られる。更に、蛍光砂の動向から、現在の洗掘溝が平衡状態にあるかの判断に資する結果が得られるためである。

もう1色の蛍光砂の投入地点を汀線付近に選定した理由は、汀線付近の土砂の流出経路を特定する必要があったためである。地形変化解析を実施した吉田ら(2008)は、高波浪時に侵食し、静穏時に回復しない砂の非可逆的な冲向き移動によって生じた汀線付近の土砂流出が第1区画の土砂流出量の約7割を占めていると述べている。また、移動床断面実験を実施した著者ら(吉田ら, 2009)も、夏季の静穏な波浪が新潟西海岸の養浜地形に作用しても岸向き漂砂が発生しない結果を得ている。したがって、汀線付近に投入した蛍光砂を追跡することで、汀線付近の土砂流出経路が把握でき、養浜砂の流出防止策の検討に必要な基礎資料が得られると考えたためである。

(2) 調査内容

冬季風浪時を対象とした現地調査は、2008年11月～2009年2月の約3ヵ月間に、図-6に示す海域において、波浪・流況観測、蛍光砂調査等を実施した。

a) 波浪・流況観測

蛍光砂の移動に寄与する波と流れを把握するため、蛍光砂投入前から最終採取までの約3ヶ月間、潜堤周辺海域に波浪計5台を設置し、波と流れの観測を行った。

b) 蛍光砂調査

第1区画の汀線付近で採取した中央粒径0.3～0.4mmの砂2.4m<sup>3</sup>を2色の蛍光塗料で着色し、汀線付近(赤色)と洗掘溝(緑色)の2地点に投入し、沖波波高4m以上(NOWPHAS)の高波浪が来襲する毎に、投入地点周辺の58地点以上で蛍光砂採取(200cc/地点)を3回繰り返して実施した。

(3) 調査結果

a) 観測期間中の海象条件

図-7は、観測期間中にNOWPHASで観測された有義波と波向である。NOWPHASでは、有義波高6m以上の擾乱が年1回程度観測されるのに対し、観測期間中の有義波高は6m以上になることがなかった。蛍光砂の採取は、図中に示す高波浪来襲後の静穏時に実施した。第1回は、

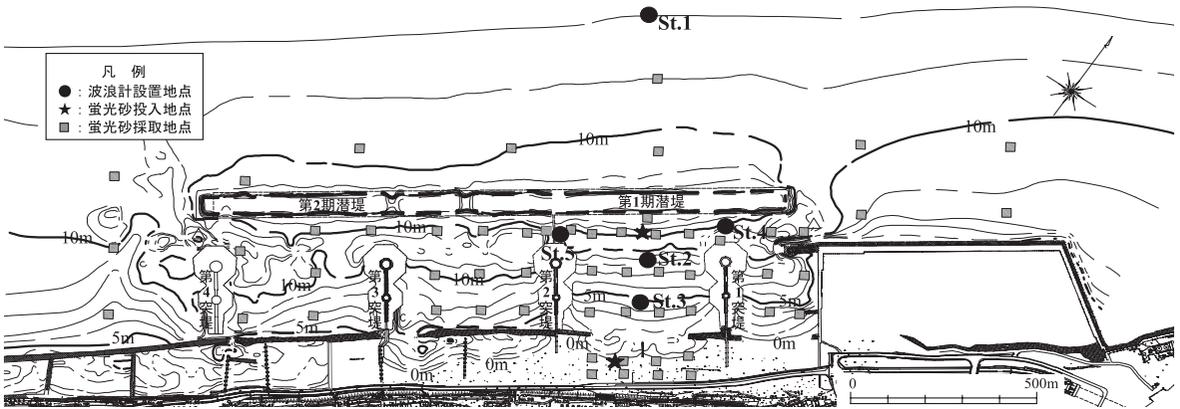


図-6 観測地点及び蛍光砂投入・採取地点

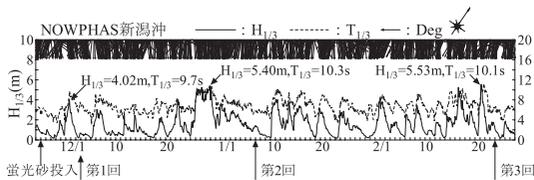


図-7 観測期間中の海象条件

年間の出現率99.7% (1日程度)となる波高4mの来襲後に、第2回は波高5mを超過した高波浪来襲後に、第3回は観測期間最大となる波高5.53mの高波浪来襲後に実施した。

**b) 流況観測結果**

蛍光砂の移動方向に寄与する流況特性を確認するため、観測地点別の流況出現分布を作成した (図-8)。

突堤に挟まれたSt.2とSt.3の流速は、20cm/s以下の出現が多いのに対し、第1突堤先端のSt.4の流速は、潜堤法線方向とほぼ平行方向に50cm/s以上の強い流れが発生する。一方、第2突堤先端のSt.5の流速は、St.4に比べて遅く、沖向き流れが卓越する。

St.4の流況は、養浜砂の追跡調査で考察された区画外に流出する砂移動を示唆するものであり、St.5の流況も

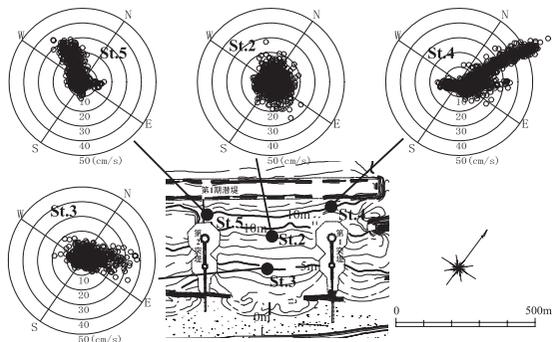


図-8 観測地点別・流況出現分布

潜堤背後で捕捉された砂移動を示唆する。

**c) 蛍光砂の検出結果**

第1回検出結果は、洗掘溝に投入した蛍光砂が投入地点周辺の2地点の検出だけで50m以上移動しておらず、汀線付近に投入した蛍光砂も水深5m付近に移動した程度であった。

図-9に示す第2回検出結果は、洗掘溝に投入した蛍光砂 (図中☆印) が投入地点よりも第2区画側に広く薄く拡散している。これに対し、投入地点よりも第4区画側で検出された2地点の検出数は多く、第2区画側の総検出数の倍程度であった。一方、汀線付近に投入した蛍光砂 (図中★印) が第1区画内に拡散し、一部は第2区画内でも検出されている。

観測期間中の最大有義波来襲後に実施した第3回検出結果 (図-10) は、洗掘溝より岸側の拡散状況に変化が認められないものの、2地点に投入した蛍光砂が沿岸方向の広い範囲に分布しており、洗掘溝の投入地点より約1km離れた北東方向でも検出された。

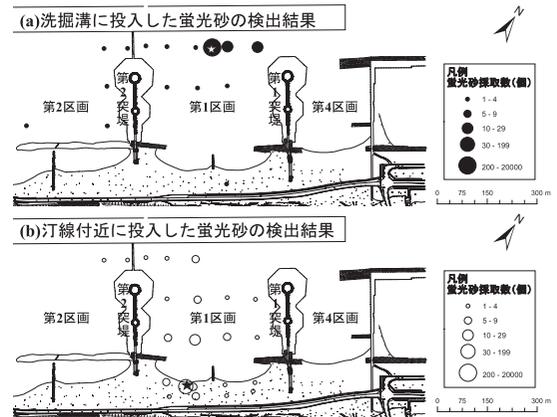


図-9 蛍光砂の第2回検出結果 (波高5.40m, 周期10.3sの高波浪通過後)

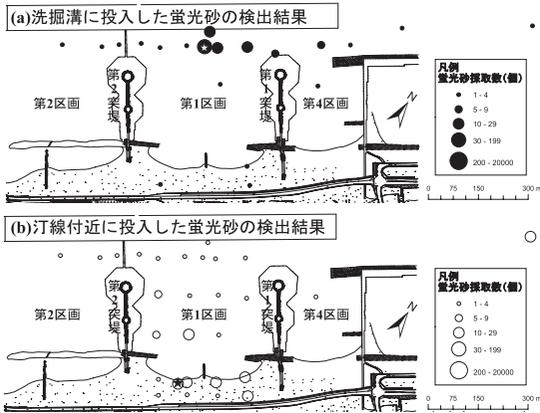


図-10 蛍光砂の第3回検出結果  
(波高5.53m, 周期10.1sの高波浪通過後)

また、洗掘溝に投入した蛍光砂の3回の検出結果は、いずれも投入地点が最多検出数であった。つまり、洗掘溝より岸側の養浜砂が洗掘溝まで移動すれば、養浜砂は洗掘溝に止まることなく流出したものの、蛍光砂のように養浜砂の流出量に比べて微量な土砂が洗掘溝に投入されても移動が少なかった。こうした事象は、試験養浜の追跡結果と同様に洗掘溝が平衡状態に達していることを示唆する。

### 5. 養浜砂流出対策の基本方針

仮説の検証結果と洗掘溝より岸側の漂砂特性を以下にまとめ、対策の基本方針を提案する。

#### (1) 仮説の検証結果と漂砂特性

- 潜堤岸側エッジに依存する洗掘溝は、潜堤天端上の碎波に伴う強い乱れが潜堤背後に突入して海底砂を巻き上げ、浮遊状態となった砂が流れによって運ばれる形成機構で生じたと考えられる（以下、要因B）。
- 洗掘溝に投入した蛍光砂と洗掘溝に運ばれた蛍光砂が留まることなく移動したことから、洗掘溝の形成要因は、前記する要因Aだけでなく、要因Bも寄与していた。こうした事象は、例え、要因Aによる洗掘溝の形成を回避するよう潜堤計画延長を短期間に整備したとしても、潜堤背後に洗掘溝が形成されることを示す。
- 養浜砂の追跡調査で考察したように、現状の洗掘溝がほぼ平衡状態に達しているため、養浜砂の流出量に比べて微量な蛍光砂を洗掘溝に投入しても、移動が少なかった。
- 洗掘溝に到達した蛍光砂と洗掘溝に投入した蛍光砂

の主な移動方向が北東方向であったことから、洗掘溝より岸側の養浜砂の主な流出経路は、浅海域から沖向き移動で洗掘溝まで到達した砂が、その後第1突堤先端を通過して区画外に流出する経路である。

#### (2) 対策の基本方針

洗掘溝より岸側に約40万<sup>m</sup>の養浜砂を投入して海浜を造成した。養浜砂の一部は、沖向き移動により洗掘溝まで移動し、現状の洗掘溝がほぼ平衡状態に達しているため、洗掘溝に留まることなく、第1突堤先端を通過して区画外に流出している。こうした過程を経た養浜砂の流出を防止する方策の基本方針としては、まず浅海域から洗掘溝へ運ばれる砂を防止あるいは捕捉することである。更に、砂の流出防止効果が小さければ、洗掘溝まで運ばれた砂の区画外流出を防止することが基本方針として考えられる。

### 6. まとめ

潜堤背後の洗掘溝の漂砂特性に関する検討結果を以下に示す。

- ① 洗掘溝の形成要因は、潜堤端部洗掘の残存だけでなく、潜堤背後で生じる洗掘も含まれる。
- ② 洗掘溝の現状は、ほぼ平衡状態にあることが追認された。
- ③ 砂の流出経路は、浅海域の砂が沖向き移動で洗掘溝に到達し、その後第1突堤先端を通過して区画外に流出する経路が主な経路である。
- ④ 養浜砂の流出対策の基本方針は、洗掘溝に運ばれる砂を防止あるいは捕捉すること、砂の流出防止効果に応じ洗掘溝に運ばれた砂が区画外に流出することを防止すること、が考えられる。

謝辞：本研究遂行にあたり、「新潟西海岸技術委員会」（入江功委員長）の委員の方々の貴重なご意見を賜った。ここに記して感謝の意を表する次第である。

#### 参考文献

栗山善昭・山口里美・池上正春・伊藤 晃・高野誠紀・田中純彦・友田尚貴（2007）：新潟西海岸における大規模潜堤周辺の地形変化特性，土木学会論文集B, Vol.63, No.4, pp. 255-271.

吉田秀樹・清水利浩・伊部知徳・山田貴裕・片野明良（2008）：大規模潜堤背後の海浜地形の特徴と地盤沈下による断面変化，海岸工学論文集，第55巻，pp. 751-755.

吉田秀樹・二瓶 章・金井 実・長谷川巖・片野明良・山田貴裕（2009）：汀線付近の集中的な侵食と地盤沈下について，海岸工学論文集，第56巻，（投稿中）。