

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.46 NO.2 June 2007

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 46 卷 第 2 号 (Vol. 46, No. 2) , 2007 年 6 月 (June 2007)

目 次 (CONTENTS)

- 鉄筋が腐食した RC 部材のひび割れ性状とテンションスティフニング効果
.....戴 建国・加藤 絵万・岩波 光保・横田 弘 3
(Cracking and Tension Stiffening Behavior of Corroded RC Members
.....Jianguo DAI, Ema KATO, Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA)
- 新潟西海岸における潜堤周辺の地形変化特性
.....栗山善昭・山口里実・池上正春・伊藤 晃・高野誠紀・田中純壺・友田尚貴25
(Morphological Changes around Submerged Breakwater on the Niigata Coast
..... Yoshiaki KURIYAMA, Satomi YAMAGUCHI, Masaharu IKEGAMI, Akira ITO,
Seiki TAKANO, Jyunichi TANAKA, Naoki TOMODA)

新潟西海岸における潜堤周辺の地形変化特性

栗山善昭*・山口里実**・池上正春***・伊藤 晃****
高野誠紀*****・田中純吉*****・友田尚貴*****

要 旨

潜堤周辺の地形変化特性を検討するために、新潟西海岸の大規模潜堤（天端幅 40m、沿岸方向距離約 1500m）周辺において潜堤建設開始の 1989 年から 2004 年までの 16 年間に取得された地形データを解析した。その結果、潜堤背後では、潜堤完成後、侵食が抑えられ地形が安定したこと、潜堤沖側では、潜堤建設以前は侵食傾向にあったものの、潜堤建設後は堆積傾向となったことが明らかとなった。

潜堤背後では、1994 年～2000 年にかけて前浜、後浜に投入された砂の 70%が 2004 年の時点で投入地点近傍に残存していた。その一方で、潜堤背後では、洗掘が発生し潜堤の延伸とともに洗掘域が沿岸方向に拡大した。洗掘域は、第 1、第 2 突堤周辺では特に深くなったけれども、第 3 突堤周辺では洗掘深の増大は見られなかった。ただし、第 2 突堤西側の洗掘の発達した測線においても、潜堤と既設離岸堤との間の領域の海底勾配は、潜堤整備後に急になった後、最近数年間はほとんど変動がなかった。潜堤背後の突堤の設置は、洗掘量そのものは軽減しないけれども、洗掘域を潜堤背後にとどめ、その影響を岸に及ぼさない効果があった。

以上の解析結果より、潜堤と突堤の整備が終了した領域では、潜堤背後では最大 4m にも及ぶ洗掘が発生したけれども、汀線近傍の地形の安定には洗掘孔は大きな影響を及ぼしておらず、潜堤と突堤の組み合わせは汀線近傍の地形の安定に寄与していると結論づけた。

キーワード：潜堤，突堤，地形変化，洗掘，侵食，養浜，海底勾配

* 海洋・水工部 漂砂研究室長
** 前海洋・水工部 漂砂研究室
*** 前国土交通省北陸地方整備局新潟港湾・空港整備事務所 所長
**** 国土交通省北陸地方整備局新潟港湾・空港整備事務所 所長
***** 前国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所 所長
***** 国土交通省北陸地方整備局新潟港湾・空港整備事務所
***** 海洋・水工部 漂砂研究室

Morphological Changes around Submerged Breakwater on the Niigata Coast

Yoshiaki KURIYAMA*
Satomi YAMAGUCHI**
Masaharu Ikegami***
Akira ITO****
Seiki TAKANO*****
Jyunichi TANAKA*****
Naoki TOMODA*****

Synopsis

Morphological data obtained for 16 years from 1989 to 2004 around a submerged breakwater on the Niigata coast, which is 40 m in width and about 1500 m in alongshore length, were analyzed. The submerged breakwater and groins stopped beach erosion that had taken place on the seaward side of the existing detached breakwaters. They also stabilized the sandy beach behind the submerged breakwater.

A scour of 1.5 m was generated shoreward of the submerged breakwater just after the start of the construction work of the submerged breakwater. The scour expanded with the breakwater extension. When the ends of the submerged breakwater reached near the tips of the first and second groins constructed before the extension of the breakwater, the scour deepened to about 3 m. However, in spite of the generation and development of the scour, the influence of the scour was limited. The beach shoreward of the scour was stable in the region protected by the submerged breakwater and groins.

Although existing detached breakwaters induced beach erosion on the seaward side of the structures, accretion was observed seaward of the submerged breakwater.

Key Words: submerged breakwater, groin, morphology change, scour, beach erosion
beach nourishment, beach slope

* Head, Littoral Drift Division, Marine Environment and Engineering Department
** Former Member of Littoral Drift Division, Marine Environment and Engineering Department
*** Former Director, Niigata Port and Airport Construction Office, Hokuriku Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT)
**** Director, Niigata Port and Airport Construction Office, Hokuriku Regional Development Bureau, MLIT
***** Former Director, Niigata Port and Airport Technical Investigation Office, Hokuriku Regional Development Bureau, MLIT
***** Section Chief, Niigata Port and Airport Construction Office, Hokuriku Regional Development Bureau, MLIT
***** Member of Littoral Drift Division, Marine Environment and Engineering Department
Nagase 3-1-1, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan
Phone : +81-46-844-5045 Fax : +81-46-841-9812 e-mail: kuriyama@pari.go.jp

目 次

要 旨	25
1. はじめに	29
2. 潜堤・人工リーフに関する過去の研究	29
3. 新潟西海岸における過去の地形変化と海岸保全対策	30
4. 解析データ、波浪特性および解析方法	31
4.1 解析データの概要	31
4.2 波浪特性	32
4.3 解析領域と解析方法	34
5. 解析結果	34
5.1 経験的固有関数法による解析結果	34
5.2 潜堤周辺の地形変化	35
5.3 土量変化	36
5.4 潜堤背後の洗掘の時間変動	38
5.5 潜堤背後の洗掘に及ぼす突堤の影響	39
5.6 洗掘原因の検討	41
5.7 潜堤沖側の堆積原因の検討	42
5.8 岸沖方向断面と海底勾配	42
6. おわりに	45
謝辞	45
参考文献	45
付録	49

1. はじめに

潜堤・人工リーフは景観面や環境面で優れた海浜保全工法であることから、最近その整備が進められてきている。潜堤・人工リーフは前述の長所を持つ反面、その背後において潜堤・人工リーフ上の wave setup などに起因する沿岸方向の速い流れを発生させ、それが海浜の不安定を招く可能性があるという短所を持っている。しかしながら、地形変化に及ぼす潜堤の影響が現地データで十分に検討されているわけではない。

新潟西海岸では、大規模な潜堤（天端幅 40m、沿岸方向距離約 1500m）の整備が 1989 年より行われており、長期の深浅データの蓄積がある。そこで、本研究では、新潟西海岸における潜堤周辺の長期地形データを解析することにより、潜堤周辺の地形変化特性を検討した。

2. 潜堤・人工リーフに関する過去の研究

幅の広い潜堤や人工リーフが普及し始めたのは最近のことであるけれども、幅の狭い潜堤に関する研究は、古くは 1950 年代後半より、白石ら (1958)、本間・酒匂 (1958)、本間・堀川 (1959) などによって行われ、潜堤背後の波浪変形や水位上昇、洗掘、汀線変動などが検討された。

1960 年代後半になると、現在施工されているような幅広タイプの潜堤・人工リーフに関する研究が始まり、波浪変形、海浜流、地形変化、ブロックの安定性などに関する室内実験、現地観測、数値シミュレーションが今までに数多く行われてきた。

波浪に関しては、中村ら (1966)、佐藤ら (1967)、永井ら (1975)、田中 (1976)、田中ら (1977)、永井ら (1977)、三浦・遠藤 (1978, 1979)、高山ら (1985)、宇多・小俣 (1986)、高山・池田 (1988)、小島・井島 (1989)、榎木ら (1989)、谷野ら (1989)、喜岡ら (1991)、加藤 (1992)、中山 (1993)、d'Angremond ら (1996)、Seabrook・Hall (1998)、許ら (2000)、山城ら (2000)、吉田ら (2001)、野口ら (2002)、Calabrese ら (2002)、van der Meer ら (2005) などが規則波や不規則波を用いた断面・平面実験によって天端水深、天端幅、波形勾配などが潜堤背後の波浪減衰や平均水位上昇、反射率、波の分裂や非線形性、長周期変動に及ぼす影響を検討しており、それらの検討結果を基に潜堤背後の波浪変形や平均水位上昇を推定する実験式が提案されている (永井ら, 1977; 高山ら, 1985; 高山・池田, 1988; 加藤, 1992; d'Angremond ら, 1996; Seabrook・Hall, 1998; Calabrese ら, 2002; van der Meer ら, 2005)。現地では浜口ら (1988)、宇多ら (1990)、荘

司ら (1990, 1991)、大中・吉沢 (1992)、青野ら (1995) などが現地における潜堤周辺の波浪変形、平均水位の分布、反射率などを整理している。また、それぞれの現地観測結果より、中田ら (1992) は潜堤上での波浪減衰に関する高山ら (1985) の実験式が現地にも良く合うことを示すとともに、清水ら (1993) は磯部 (1986) のモデルが現地における潜堤背後の波高を精度良く推定することを示している。

海浜流に関しては、榎木ら (1981) の研究以降、いくつかの室内実験 (例えば、岩谷ら, 1987; 宇多ら, 1987; 河島ら, 1992; 鷺見ら, 1997; 下園ら, 2004) や現地観測 (例えば、荘司ら, 1992; 清水ら, 1993) が行われてきた。これらの結果を総合すると、下園ら (2004) が示しているように、潜堤周辺では、潜堤上では岸向きで潜堤背後において開口部へ向かう循環流 I と、それより岸側に形成される汀線近傍で開口部から潜堤背後に向かい潜堤中央付近で沖に向かう循環流 II との組み合わせにより海浜流が形成されていることが多いようであり、循環流 I が強まると海浜が不安定となる可能性がある。このような流れは、数値シミュレーションでもほぼ再現されている (佐々木ら, 1990; 小原ら, 1990; 清水ら, 1993; van der Biezen, 1998; Lesser ら, 2003; 高野ら, 2004; 下園ら, 2004; Avgeris ら, 2004; De Vroeg ら, 2004; 下園ら, 2005; Caceres ら, 2005a; 田島ら, 2006)。そのなかで、Caceres ら (2005b) は潜堤周辺の流れに及ぼす潜堤上の岸向きの質量輸送の重要性を数値シミュレーションにより示している。

潜堤背後の地形の安定性に関しては、田中 (1976)、田中ら (1977)、宇多ら (1984) などが断面二次元の移動床模型実験を行い、潜堤背後の断面変化に及ぼす天端高さ、幅などの影響を検討しており、宇多ら (1987)、河野ら (1987)、鷺見ら (1997) などが平面二次元の移動床模型実験を行い、地形変化に及ぼす潜堤の沿岸長や開口幅の影響を検討している。入江ら (1987) は、静岡県宇久須港海岸の人工海浜沖に設置する潜堤の検討において、断面二次元移動床実験で潜堤の断面諸元を決定し、その効果を平面二次元の移動床実験で確認している。Sumer ら (2005) は潜堤の岸側、沖側の二次元洗掘および端部の局所洗掘を実験的に検討している。

数値シミュレーションによる検討 (Lesser ら, 2003; 高野ら, 2004; De Vroeg ら, 2004; Caceres ら, 2005a) では、開口部における洗掘のみならず、上記の平面二次元の移動床実験では目立たなかった潜堤端部における洗掘が顕著に現れており、潜堤による地形変化を検討する上での注意すべき点となっている。さらに、Zyserman ら

(2005) は天端高さが潜堤背後、端部での洗掘に及ぼす影響を数値シミュレーションを用いて検討している。

現地では、Dean ら (1997) が潜堤によって海岸侵食が助長されたアメリカ、フロリダの事例 (原因は、潜堤による波浪減衰が十分でないためと考えられる) を報告しているけれども、浜口ら (1989)、岡田・河野 (1991)、荘司ら (1992)、清水ら (1993)、黒木 (2002)、鷺見ら (2004)、Lamberti ら (2005) は潜堤・人工リーフが現地の地形安定に対して有効であったことを確認している。ただし、12 年間のデータを用いた黒木 (2002) の検討を除くと、浜口ら (1989)、岡田・河野 (1991)、荘司ら (1992)、清水ら (1993)、鷺見ら (2004) が解析に用いたデータは 2 ヶ月～3 年の短期間に取得されたものである。また、Lamberti ら (2005) の検討では、汀線の変動量や変化土量が記述されているけれども図面は示されておらず詳細は不明である。潜堤背後や開口部の洗掘に関しては、南・真野 (2001) や黒木 (2002) が、それぞれ、6、12 年間の現地データを基にその特性を検討している。

上記の研究により、潜堤周辺の波浪変形特性に関しては数多くのデータと知見が得られ、潜堤周辺の流れに関しても前述した循環流に代表される海浜流の特性が明らかになってきている。しかし、潜堤周辺の地形変化に関しては、長期現地データに基づいた潜堤背後の地形変形に関する検討が不足しており、例えば、潜堤背後の洗掘の発達の実態など、地形変形に及ぼす潜堤の影響には不明な点が多く残されている。

3. 新潟西海岸における過去の地形変化と海岸保全対策

佐藤 (1996) や加藤 (2005) を参考に新潟西海岸における海岸保全の歴史をまとめると以下ようになる。新潟海岸では信濃川からの流出土砂によって砂浜が長年にわたって形成されてきた (新潟西海岸の位置は図-1 参照)。古地図からは信濃川からの流出土砂により 400 年にわたって海浜が発達してきた様子が推測できる (豊島, 1972)。しかしながら、河川改修工事 (1875～1903 年) や導流堤建設 (1897～1924 年)、大河津分水の通水 (1922 年)、関屋分水の通水 (1972 年) などの影響により、1900 年代より海岸侵食が進行し、1948 年には、1889 年と比較して最大で 350m の汀線の後退が生じた。さらに、1960 年代になると新潟市において地下水のくみ上げによる地盤沈下が発生し、これが海岸侵食を悪化させた。

このような海岸侵食に対する取り組みは 1952 年より開始され、当初は潜堤 (現在整備されているものとは異



図-1 新潟西海岸の位置

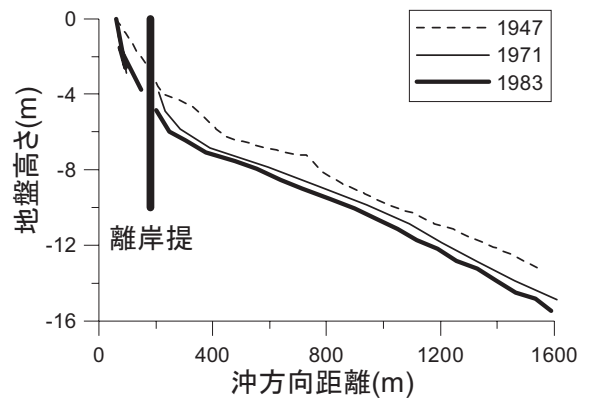


図-2 新潟西港の防波堤 (導流堤) 基部より 1km 西側の測線における 1947 年, 1971 年, 1983 年の断面の重ね合わせ

なり天端幅が狭い) が整備された。その後、1960 年以降に天端が嵩上げされ離岸堤に整備された。

これらの海岸保全によって、汀線近傍の海岸侵食は抑えられたものの、離岸堤より沖では侵食が進行していることが 1980 年代に明らかになった。図-2 は、新潟西港の防波堤 (導流堤) 基部より 1km 西側の測線 No.10 における 1947 年, 1971 年, 1983 年の断面を示したものである。1947 年から 1971 年にかけては汀線付近から水深 15m の地点まで広域に侵食が生じているのに対して、1971 年

から 1983 年にかけては離岸堤の効果により汀線近傍の侵食は抑えられている。しかし、離岸堤よりも沖では依然として侵食が進行していた様子がこの図からも把握できる。

離岸堤よりも沖での侵食対策が検討された結果、低反射率の構造物が必要ということになり、構造形式として潜堤が選定された。目標反射率としては二次元移動床模型実験の結果を基に砂浜海岸の反射率と同程度の 0.2 が設定され、この目標反射率を満足するように潜堤の天端高さ (L.W.L. -1.5m) が設定された。さらに、潜堤の目標通過率としては、代表波 (エネルギーピーク波: 沖波波高 3.0m, 周期 8.0s) の潜堤背後の波高が 1m 程度になるように 0.4 が設定され、上記の天端水深のもとで目標通過率を満足するために潜堤の天端幅 (40m) が決定された。代表波の潜堤背後の波高が 1m 以下という目標は、現地観測の結果、潜堤設置付近の水深 8m における地形変化が 1m より小さい波高では生じにくいことから設定された。

上記の潜堤の天端高さは小型船舶の航行に支障を与えるものではなく、潜堤は船舶航行に対してデメリットを有しない。一方、天端が干潮時にも海面上に現れないことから、本潜堤は離岸堤に比べて沖への眺望を妨げないという景観上のメリットを有する。さらに、潜堤に対しては、離岸堤に比べて、その背後での海水交換がより活発であるという環境上のメリットも期待できる。

新潟西海岸では、全体の海岸保全工法として、以上の潜堤に、潜堤背後の沿岸方向の流れによる底質の移動量を軽減するための突堤と、砂浜によって波浪エネルギーを減衰させるとともに新たな親水空間を創出するための

養浜とを加えた面的防護工法 (砂浜を含む複数の海岸保全施設を組み合わせた海岸保全工法) が採用された。

突堤、潜堤の建設はそれぞれ 1988 年、1989 年より開始され、養浜は 1994 年から開始された。潜堤、突堤の建設状況および各年度の養浜量は 4.1 で示す。

4. 解析データ、波浪特性および解析方法

4.1 解析データの概要

新潟西海岸では図-3 における沿岸方向 $x = 0 \sim 5800\text{m}$ 、岸沖方向 $y = 0 \sim 2400\text{m}$ の範囲の深淺測量が、突堤の建設が開始された 1988 年より、1 年に 1 回行われている (図中の解析領域については 4.3 で述べる)。測量間隔は沿岸方向に 25~50m、岸沖方向に 5~50m であるけれども、解析では沿岸方向、岸沖方向ともに 20m の間隔で補間したデータを用いる。

図-3 から見て取れるように、地形は沿岸方向にほぼ一様である。粒径に関する 2006 年 6 月の調査によると、中央粒径は水深 10m 以浅では 0.2~0.4mm であり、水深 10m 以深では約 0.15mm であった。

新潟西海岸における潜堤、突堤の整備状況は図-4 に示す通りであり、潜堤の断面図は図-5 に、養浜量と位置は表-1 に示す通りである。なお、第 1 突堤よりも東においても主として新潟西港の浚渫土砂 (主な成分はシルト) を用いた養浜が行われているけれども、第 1 突堤より東では、護岸の建設が 1997 年から始まり (図-4)、養浜と地形変化との関係が明確に把握できないため、第 1 突堤より東側の養浜は今回の解析の対象外とした。

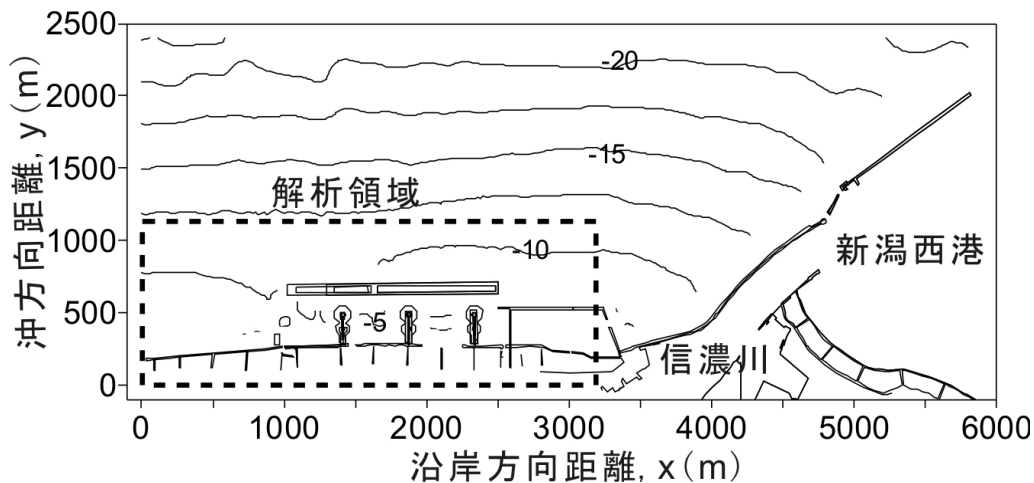


図-3 新潟西海岸の平面地形と解析領域

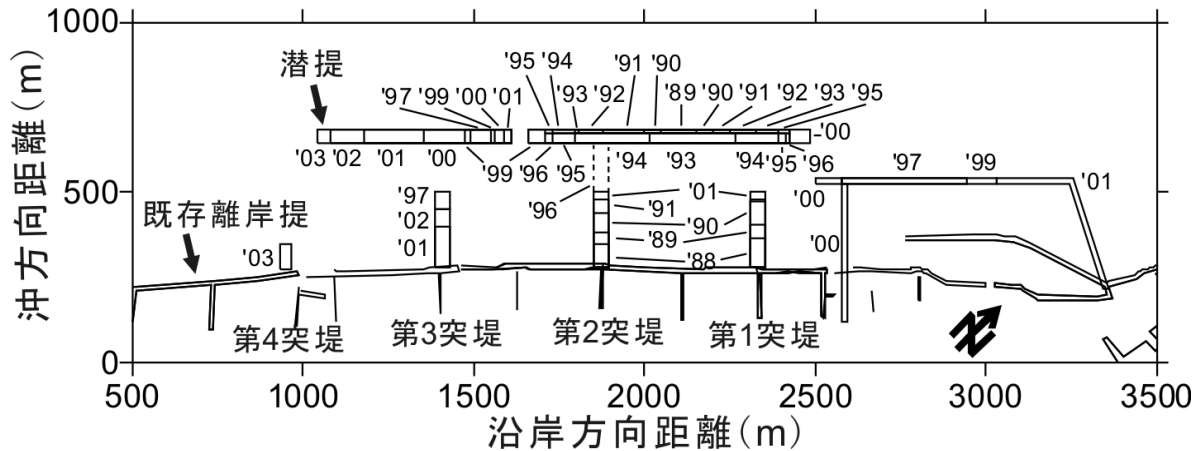


図-4 構造物の整備状況

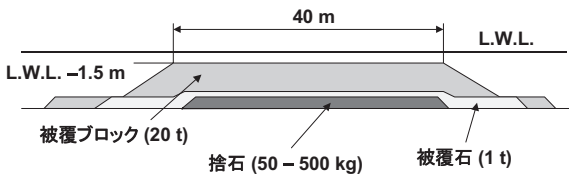


図-5 潜堤の断面図

表-1 養浜量と位置

	第1突堤と 第2突堤と の間 (m ³)	第2突堤と 第3突堤と の間 (m ³)	第3突堤の 西側 (m ³)
1994	64,000	-	-
1995	90,000	-	-
1996	146,000	-	-
1997	57,000	-	-
1998	-	30,000	60,000
1999	20,000	-	-
2000	50,000	-	-
2001	-	-	-
2002	17,000	-	-
2003	-	13,500	-

4.2 波浪特性

新潟西海岸では、全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS) の観測地点として水深35mの地点で波高、周期、波向の観測が行われている。しかしながら、年によってはデータ取得率が20%以下のときがあることから、本研究では、広範囲の風データを入力データとして非線形相互作用による波浪エネルギー伝達を定式化したWAMと呼ばれる第三代波浪推算モデルを用いて橋本ら(1999)が推算した波浪データを使用した。

橋本らによって得られたデータは北緯 38.0 度、東経 139.0 度の地点における深海波として求められた波向毎のスペクトル密度である。このデータには陸からの風による波浪も含まれており、場合によっては平均波向きが沖向きとなることがあるけれども、NOWPHAS 観測地点では平均波向きが沖向きとなることはほとんどない。そこで、NOWPHAS 観測地点では陸からの風による波浪エネルギーは小さいと仮定し、橋本らの方法で得られた波浪スペクトルのうち岸へ向かう成分だけを合成し、そのようにして求めた有義波高、周期、波向と NOWPHAS データを比較した。

図-6 は 1989 年 10 月～2003 年 12 月における比較の結果を示したものであり、両者の関係を原点を通る直線で近似すると以下の通りとなる。

$$H_m = 1.79H_p \quad (1)$$

$$T_m = 0.91T_p \quad (2)$$

ここで、 H と T はそれぞれ有義波高と有義波周期を示し、下付きの m と p はそれぞれ実測値と推定値を示す。

以下の解析では、式(1)、(2)で補正された波高、周期を用いることとする。なお、波向に関しては実測値と推定値のバラツキが大きいため、補正は行わず、推算値そのものを用いる。

図-7、8 は、波浪諸元の季節変動と年変動を示したものである。新潟西海岸における波浪は季節的にはっきりした変動を持っており、冬期(11月～2月)には月平均波高が 2.5m 以上の高波浪(周期約 6.4s)が沖よりやや東

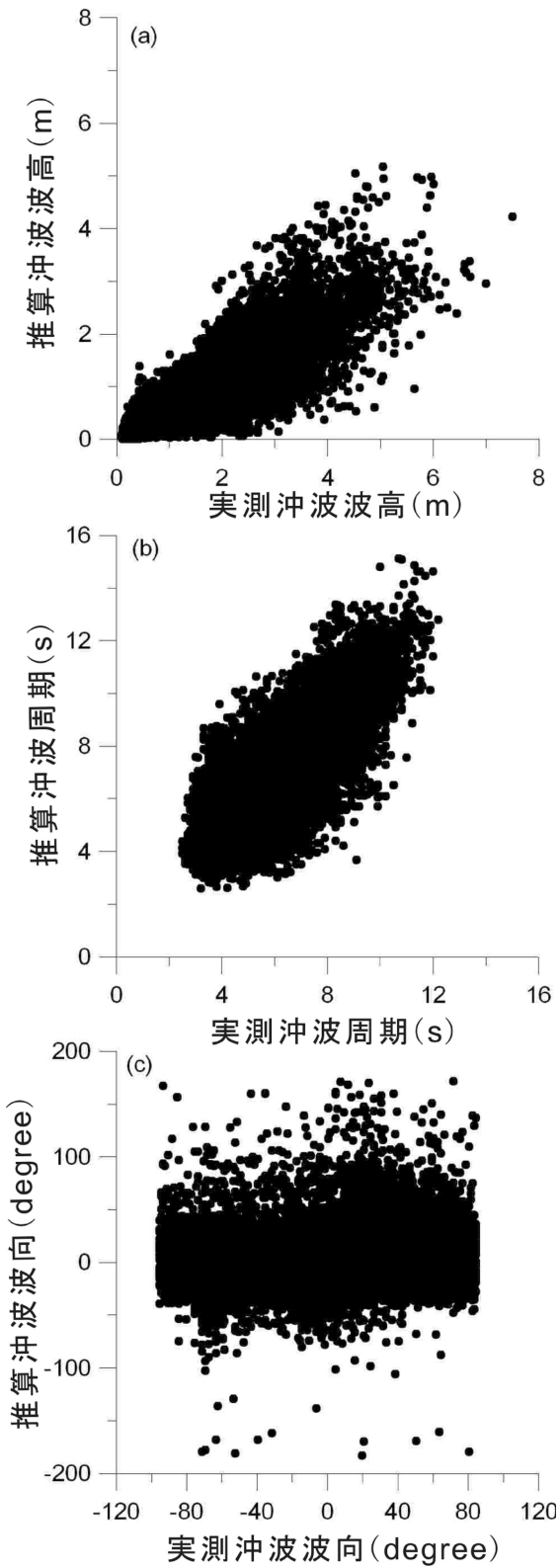


図-6 沖波有義波高、周期の実測値と推定値との比較。
波向は沖からの入射を0度とし、時計回りを正とする。

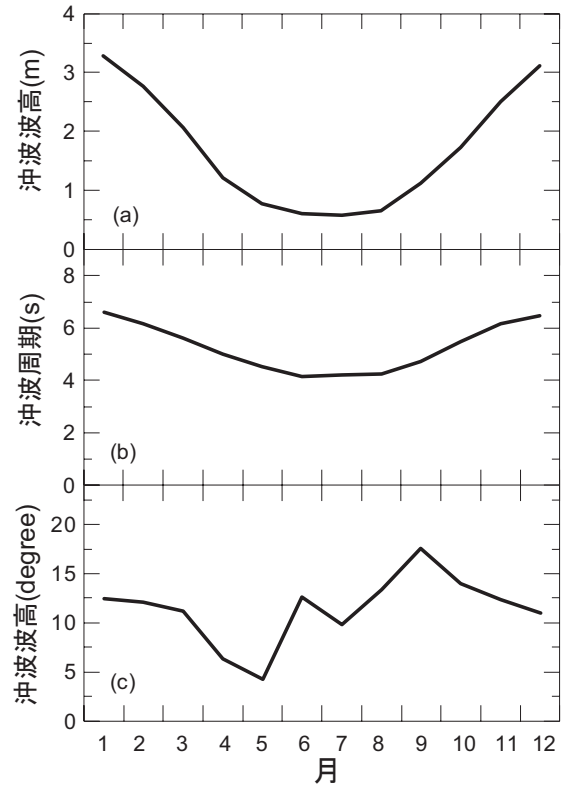


図-7 沖波有義波高、周期、波向の月変動

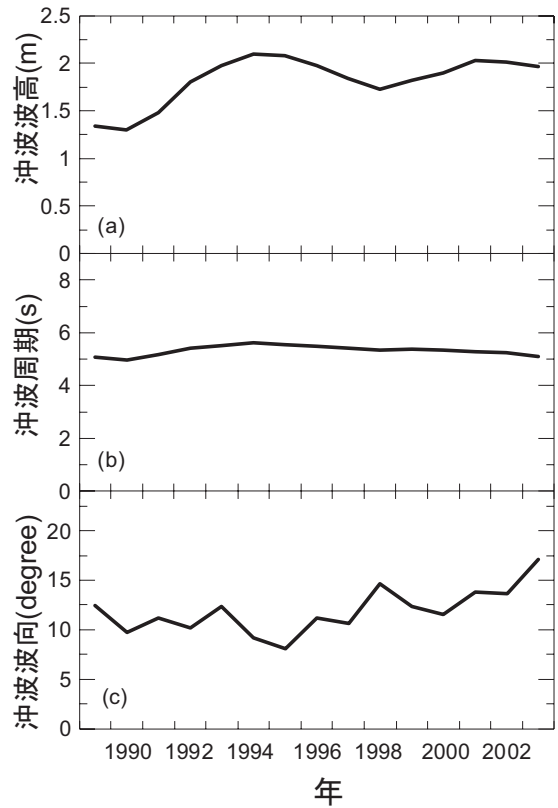


図-8 沖波有義波高、周期、波向の年変動

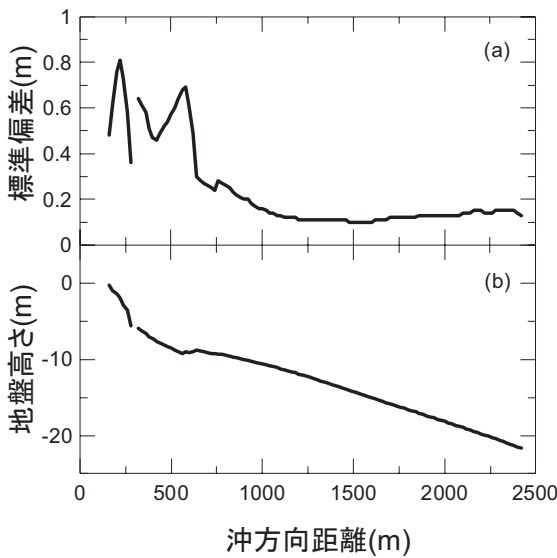


図-9 $x=0\sim 3000\text{m}$ における1989年～2004年の(a)地盤高さの標準偏差と(b)平均断面

側を中心として来襲するのに対して、夏期（5月～8月）には月平均波高が1.0m以下（周期約4.3s）となっている。

一方、年変動を見てみると、周期がほとんど一定であるのに対して、波高は1989年、1990年には年平均波高が1.5m以下と小さかったものの、1994、1995、2001年には年平均波高が2.0m以上と大きくなっており、期間平均の波高（1.8m）に対して40%程度の変動がある。波向に関しては、解析期間後半でやや東よりとなっている傾向が見られる。

4.3 解析領域と解析方法

4.1 で示したように深浅測量は潜堤周辺のみならず、その沖側ならびに東側の広い範囲で行われているけれども、本研究では潜堤が地形変化に及ぼす影響を検討することを目的とするため、解析領域を潜堤周辺に限定することとした（図-3の破線で囲まれた範囲）。

具体的には、沿岸方向に関しては、深浅測量の西側端である $x=0\text{m}$ を解析領域の西側端とした。一方、潜堤の東側には新潟西港防波堤が存在し、防波堤周辺の地形変化はその影響を受けると考えられるので、解析領域の東側端は潜堤の東側端と防波堤のほぼ中間である $x=3000\text{m}$ とした。

解析領域の沖側端に関しては、地形変化の特徴から判断することとした。図-9は解析範囲である $x=0\sim 3000\text{m}$ における1989年～2004年の各岸沖方向測線毎の地盤高さの標準偏差の岸沖分布を沿岸方向に平均した値(a)、および各測線毎の時間平均断面を沿岸方向に平均した値

(b)を示したものである。地盤変動の標準偏差は $y=1100\text{m}$ 付近（平均地盤高さ-11.2m）よりも沖側ではほぼ一定となっており、それより岸側とは特徴が異なるので、解析領域の沖側端は $y=1100\text{m}$ とした。解析領域の岸側端は $y=0\text{m}$ とした。

本研究では、潜堤の建設が開始された1989年から2004年までの16年間の上記解析領域（沿岸方向 $x=0\sim 3000\text{m}$ 、岸沖方向 $y=0\sim 1100\text{m}$ ）の深浅データを用いて、まず、経験的固有関数法を用いて潜堤周辺の地形変化の概略を把握した後、解析領域をいくつかの小領域に分割し小領域別の土量変化を調べるとともに、養浜砂の残存率を求めた。さらに、潜堤近傍の地形変化に注目し、潜堤背後（岸側）の洗掘の発達・移動の様子、洗掘に及ぼす突堤の影響、潜堤岸側・沖側の海底勾配の時間変化などを検討した。

5. 解析結果

5.1 経験的固有関数法による解析結果

解析領域全体の地形変動特性を把握するために、まず、経験的固有関数法による解析を行った。経験的固有関数法（Empirical Orthogonal Function Analysis, EOF解析；Principal Component Analysis (PCA)とも呼ばれる）は、不規則な変動から独立したいくつかの変動パターンを見いだす手法で、複雑な変動を少数のいくつかの変動パターンで表現する際に有利な方法であり（von Storch・Zwiers, 1999）、地形データの解析にも数多く用いられている（Winantら, 1975；加藤・吉松, 1984）。地形データの解析においては、地盤高さの変動パターンは次式のように時間の関数と空間の関数との積で表される変動パターンの和として表現される。

$$z(x,y,t) = \sum_n C_n(t) e_n(x,y) \quad (3)$$

ここで、 $z(x,y,t)$ は地盤高さ、 x は沿岸方向距離、 y は沖方向距離、 t は時間、 $C_n(t)$ は n モードの時間係数、 $e_n(x,y)$ は n モードの固有関数である。通常は、寄与率（もとの変動の大きさ（分散）に対する n モードの変動の大きさの割合）の大きい順に、モード1、モード2、・・・と呼ぶ。すなわち、 n が小さいモードほど、解析領域の解析期間における、より支配的な地形変化を表している。また、本研究では、上向きを正として地盤高さを表しているため、あるモードのある二つの期間の時間係数の差と固有関数との積が正となる場合には、その期間では堆積

が生じていることを表しており、その値が負になる場合には侵食が生じていることを表している。

解析では、大規模な養浜が行われた第1突堤と第2突堤との間の既設離岸堤前面の領域 ($x=1880\sim 2320\text{m}$, $y=300\sim 440\text{m}$) と既設離岸堤よりも岸側の領域 ($x=0\sim 3000\text{m}$, $y=0\sim 280\text{m}$) とを図-3 に示されている解析領域から除いた領域を対象とし、各地点における平均地盤高さからの変動量を変数とした。

図-10, 11 は、それぞれ、モード1~3の時間係数と固有関数の分布を示したものである。モード1 (寄与率62%) では、時間係数が解析期間中、単調に増加しており、固有関数が解析領域全体で負であることから、このモードは $e_1 < 0$ となる第2突堤から第3突堤までの領域と第3突堤先端より西側の領域、および第1突堤先端を中心とした領域で、解析期間を通じて侵食が生じていたことを表している。ただし、時間係数の変化率、すなわち、地形の変化率は一定ではなく、図-12 に示されているように、時間係数の変化率 (縦軸) と深浅測量実施日間の平均沖波波高 (横軸) との間には弱い相関 ($r=0.52$) がある。これについては5.3で詳しく解析する。

モード2 (寄与率16%) では、1996年を境として時間係数の変動が減少から増加に変化していることから、モード2は、 $e_2 > 0$ である第1突堤と第2突堤との間の潜堤背後および第2突堤先端の西側においては1996年まで侵食が生じていたことを、一方、 $e_2 < 0$ である第3突堤周辺 (特に東側) においては1996年以降に侵食が生じたことを表している。モード2における侵食域は東から西に移動しており、このモードは、潜堤の延長に応じて洗掘域が西に拡大していく様子を表していると言える。

モード3 (寄与率7%) では、時間係数の変動が1995年と2001年を境として減少, 増加, 減少と変化している。1995年以降の第2突堤より西側の領域に注目すると、2001年以前 (C_3 が増加) では $e_3 < 0$ となる第2突堤と第3突堤との間で侵食が生じていたのに対して、2001年以降 (C_3 が減少) ではそれより西の領域で侵食が生じており、2001年を境として侵食領域が西に移動している。モード3も、モード2同様に、洗掘域が西に拡大していく様子を表していると言える。

5.2 潜堤周辺の地形変化

上記の経験的固有関数法の解析結果を基に解析期間を3つの期間 (1989~1996年, 1996~2001年, 2001~2004年) に分割し、それぞれの期間における地形変化を図-13に示す (毎年地形変化は付録の図-A.1に示す)。図中の構造物の位置は、各期間の最終年のものである。

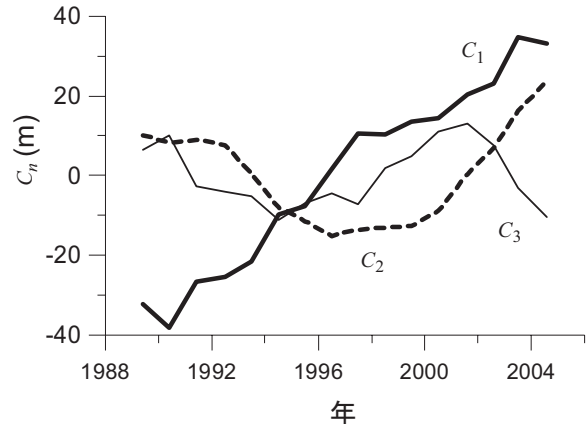


図-10 C_n の時間変動

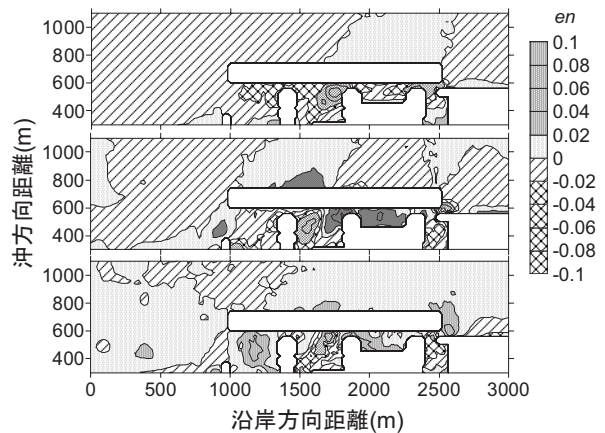


図-11 e_n の空間分布 (白抜きは構造物周辺もしくは養浜実施により解析対象外とした領域)

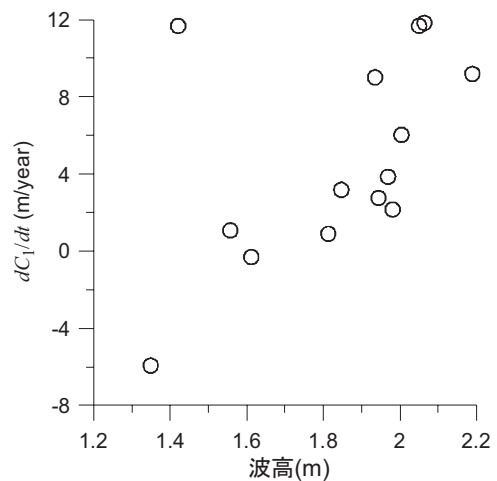


図-12 dC_1/dt と深浅測量実施日間の平均沖波波高との関係

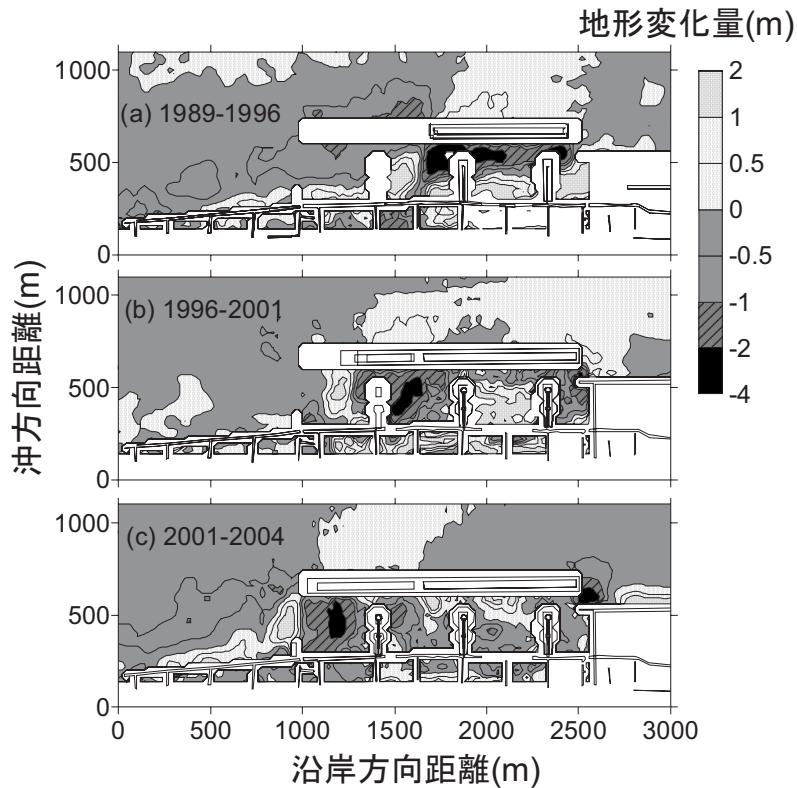


図-13 3 期間（1989～1996 年，1996～2001 年，2001～2004 年）における地形変化

1989～1996 年にかけては，第 1 突堤から，第 2 突堤と第 3 突堤との間まで ($x=1600\sim 2400\text{m}$) の潜堤背後において侵食が生じている．一方，その西側では堆積が生じている．潜堤の西側端 ($x=1700\text{m}$, $y=700\text{m}$) 周辺からは侵食領域が西側に次第に岸に近づくように広がっており，潜堤より沖では $x=2000\text{m}$ 付近で小規模な堆積が生じている．なお，第 1 突堤と第 2 突堤との間の堆積は養浜によるものである．

1996～2001 年にかけては，潜堤背後で，1989～1996 年に比べて侵食域が西に移動しており，第 3 突堤の東側を中心に侵食域が広がっている．その西側には，堆積領域が存在している．第 1 突堤と第 2 突堤との間の堆積は，1989～1996 年の期間と同様に養浜によるものである．潜堤の沖側では，1989～1996 年に比べると堆積域が西側に移動しており， $x=1600\text{m}$ を中心として堆積域が存在している．

2001～2004 年になると，潜堤背後の侵食域はさらに西に移動するとともに，堆積域も西に移動している．さらに，潜堤よりも西側の侵食域は，1989～1996 年の期間と同様に，潜堤西端から西側に岸に向けて広がっている．

5.3 土量変化

(1) 潜堤の岸側，沖側における土量変化

前述の地形変化による土量変化を検討するために，解析領域を図-14 の様に分割し，各領域の土量変化を調べた．領域名の数字は西から順に 1 から 6 までとなっており，アルファベットは岸から順に a, b となっている．領域 3～5 にかけては，岸側の領域 a をさらに，養浜が行われた岸近くの aI (領域 3,4 : $y=0\sim 380\text{m}$, 領域 5 : $y=0\sim 500\text{m}$) と沖の aII (領域 3,4 : $y=400\sim 660\text{m}$, 領域 5 : $y=520\sim 660\text{m}$) とに分割した．なお，養浜の正確な位置の情報がないので，養浜の行われた場所は毎年の地形変化から推定した．

潜堤よりも岸側の領域 (領域 a) の土量に注目すると (図-15)，潜堤より西側の領域 1a, 2a では，侵食が継続的に進行しており，侵食量は領域 1a において $10,500\text{m}^3/\text{year}$ ，領域 2a において $6,700\text{m}^3/\text{year}$ である．一方，潜堤の建設が始まった領域 5a では，その領域における潜堤が完成し比較的大規模な養浜が終了した 1996 年以降，追加の養浜砂の多少の流出はあるものの，潜堤背後では土量がほぼ一定であり，地形が安定していることがわかる．領域 4a においても，潜堤完成後 (2001 年以

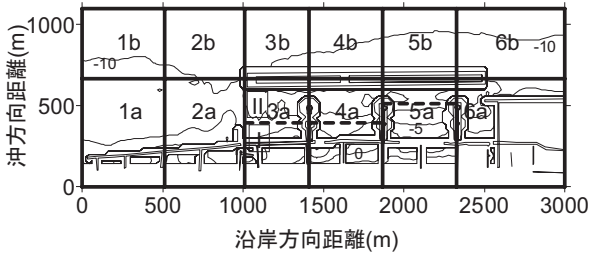


図-14 分割された小領域の位置

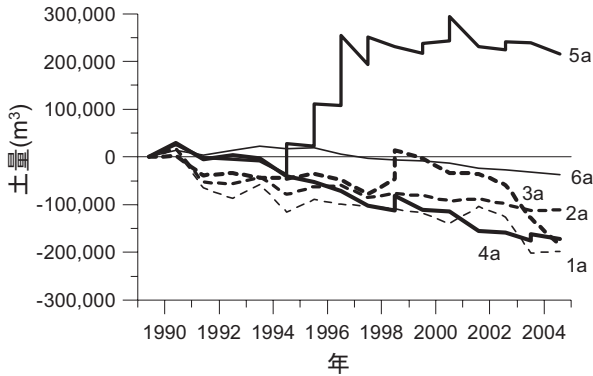


図-15 潜堤よりも岸側の土量変化

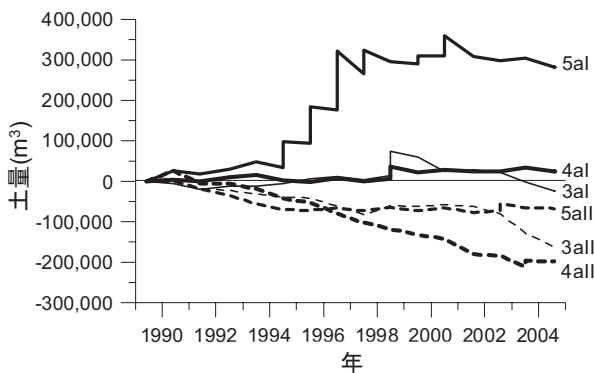


図-16 領域3, 4, 5における潜堤よりも岸側の土量変化

降)は土量がほぼ一定であり、地形が安定していることがわかる。一方、領域3aにおいては、潜堤端部が領域3に達した2002年以降、侵食量が大きくなっており、1989～1998年の侵食量 $6,200\text{ m}^3/\text{year}$ 、1999～2001年の侵食量 $15,500\text{ m}^3/\text{year}$ よりも大きい $63,100\text{ m}^3/\text{year}$ の侵食が2002年以降生じている。

潜堤背後の領域3～5について、さらに細かく見てみると(図-16)、領域5の潜堤直背後(領域5aII)では、本領域における潜堤が完成した1994年以降、土量がほぼ一定となっており、侵食が止まっている。領域4の潜堤直背後(領域4aII)においても、潜堤完成前である2001年以前には侵食が進行していたものの、完成後の2001

年以降は土量が一定となっている。一方、領域3の潜堤直背後(領域3aII)では、この領域での潜堤の延長が長くなってきた2002年以降、侵食量が大きくなっている。

これらの領域における深浅測量実施日間の変化土量と沖波平均波高との相関を調べてみると、領域5aIIでは相関係数 $r=0.16$ となり両者の相関がほとんど無かったのに対して、領域4aIIでは $r=-0.54$ 、領域3aIIでは $r=-0.39$ となり両者の間に負の相関があった。領域5では解析期間の前半である1994年に潜堤が完成したのに対して、領域3,4では解析期間中、構造物の無い状態が長かったことを考えると、上記の結果は、潜堤の整備が進んでいない状態では地形変化は波浪の変動の影響を受けやすいけれども、潜堤が整備されるとそのような影響は受けにくくなることを示唆していると言える。

5.1で示したモード1の地形変化では、領域3,4のaIIの地形変化が主となっており、モード1の全体の地形変動量(各地点における平均地盤高さからの変動量の2乗の総和)に対する領域3aII,4aIIのモード1の地形変動量の割合は72%である。さらに、領域3aII,4aIIの実際の地形変動量に対するモード1で表される領域3aII,4aIIの地形変動量の割合は80%である。よって、領域3aII,4aIIにおける土量変化と沖波波高との負の相関の影響を受けて、モード1の時間係数の変化率 dC_1/dt と沖波波高との間に正の相関が生じたと考える。

領域5の最も岸側の領域(領域5aI)では、領域5aにおける土量変化(図-15)同様に、潜堤が完成し比較的大規模な養浜が終了した1996年以降、養浜砂の多少の流出はあるものの、潜堤背後では土量がほぼ一定であり、地形が安定していることがわかる。一方、領域4の最も岸側の領域(領域4aI)でも潜堤完成以降(2001年以降)では土量が漸増しており侵食は生じていない。ただし、本領域では潜堤完成以前でもそれ程の侵食は生じていない。また、領域3aIでも、潜堤完成以前にそれほどの侵食がない。これは、領域5で侵食された土砂が隣接する領域3,4に運ばれたことによって侵食量が抑制されたためかもしれない。

潜堤よりも沖の領域では、潜堤建設の影響が比較的顕著に現れている(図-17)。潜堤のない領域1bと2bでは、継続的に侵食が進行しており、侵食量は領域1bにおいて $7,300\text{ m}^3/\text{year}$ 、領域2bにおいて $10,000\text{ m}^3/\text{year}$ である。それに対して、領域5bでは潜堤の建設がある程度進んだ1991年以降から堆積が生じ、1991年以降の堆積量は $3,800\text{ m}^3/\text{year}$ である。領域4bでも1997年以前は $12,900\text{ m}^3/\text{year}$ の侵食が生じていたのに対して、1997年以降は $8,800\text{ m}^3/\text{year}$ の堆積が生じている。さらに、領域3b

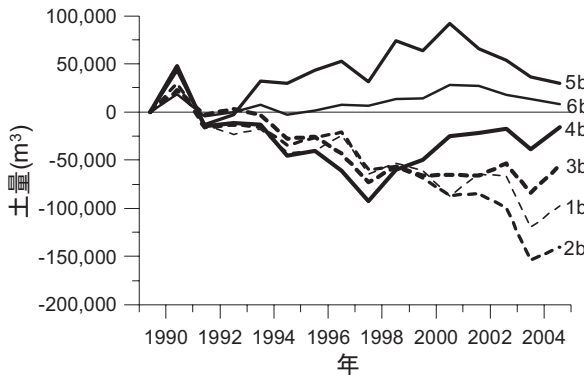


図-17 潜堤よりも沖側の土量変化

においても、潜堤建設が始まった2000年以降、侵食が止まり、土量がほぼ一定となっている。

以上の結果より、潜堤建設により、潜堤背後の侵食が抑えられ地形が安定すること、および、潜堤沖側では侵食から若干の堆積に地形変化の傾向が変化することが明らかとなった。

(2) 養浜砂の残存率

養浜砂が行われた領域4aI, 5aIにおける土量変化をもとに養浜砂の残存率（残存した養浜砂の量と投入された養浜砂の量との比）を検討する。領域4aIでは1998年以降、領域5aIでは1994年以降、養浜が行われていることから、残存土量は領域4aI, 5aIにおいて、それぞれ、1998～2004年の変化土量、1994～2004年の変化土量とする。ただし、残存土量の推定においては、測量実施範囲の岸側にも養浜砂が投入されている、あるいは移動していること、および、領域5aIでは既設離岸堤が設置されていた場所（1995年より一部を撤去）やその周辺の欠測領域にも養浜砂が移動していることを考慮する。具体的な方法は図-18を用いて説明する。図-18は、領域4における1998～2004年の各測線の断面変化量を沿岸方向に平均した値および領域5における1994～2004年のそれを実線で示したものである。測量実施範囲の岸側では沿岸方向平均の変化量が岸に向かって直線的に変化すると仮定し、図中、 $y < 140\text{m}$ で破線と一点鎖線とで囲まれた三角形の領域の土量を残存土量に加えるとともに、既設離岸堤周辺の欠測領域においても沿岸方向平均の変化量は直線的に変化すると仮定し、 $y = 240 \sim 300\text{m}$ の破線と一点鎖線とで囲まれた四角形の領域の土量を残存土量に加える。

以上のようにして求めた残存土量 $320,000\text{m}^3$ （領域4： $30,000\text{m}^3$ ；領域5： $290,000\text{m}^3$ ）を養浜土量 $457,000\text{m}^3$ （領域4： $30,000\text{m}^3$ ；領域5： $427,000\text{m}^3$ ；領域4における2003年の養浜と領域5における2002年の養浜は潜堤直背後の

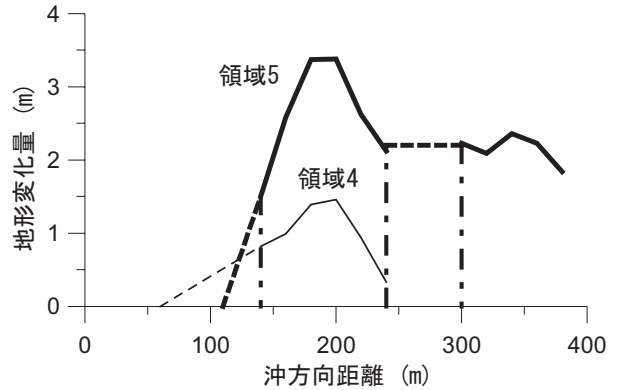


図-18 領域4における1998～2004年の（太い実線と破線）、および領域5における1994～2004年の（細い実線と破線）沿岸方向平均の断面変化量。実線は深淺データのある領域の断面変化量、破線は深淺データがない領域の仮定された断面変化量を表しており、一点鎖線は縦軸に平行な直線である。

養浜であるため養浜土量に含まれていない）で除したところ、養浜砂の残存量は70%であった。

5.4 潜堤背後の洗掘の時間変動

潜堤完成後はその岸側で地形が安定し、養浜砂も70%が投入場所近傍に残存しており、潜堤はそれよりも岸側の地形の安定に寄与している。しかし、図-13に見られるように潜堤背後では洗掘が発生している。新潟西海岸では、この洗掘は構造物の安定を脅かすまでには至っていないものの、洗掘の発生・発達には潜堤のデメリットの一つである。そこで、本節では、潜堤背後に発生、発達した洗掘の特性を検討する。

図-19は潜堤直背後の岸沖方向60mの範囲（ $y = 560 \sim 600\text{m}$ ）の岸沖方向に平均した沿岸方向断面の時間変化を潜堤、突堤の延伸状況とともに示したものであり（(a)1989年からの変化量、(b)前年からの変化量）、図-20はその平均断面のいくつかを重ね合わせたものである（それぞれのカラーの図を付録の図-A.2, A.3に示す）。

沿岸方向距離 $x = 2200\text{m}$ 付近から潜堤の建設が始まり、1990年以降、潜堤が延伸されるとともに、洗掘域が沿岸方向に広がっている。1992年まででは、洗掘深（1989年の断面との差）は大きいところで約2mである。洗掘域の端では小さな堆積域が存在し、洗掘域の拡大とともに潜堤延伸方向に移動している。潜堤西側では、堆積域がそれより西の地形に比べて約1m高くなっている。

潜堤の両端がそれぞれ第1、第2突堤の先端に到達した直後の1992～1994年にかけては、それぞれの突堤の外

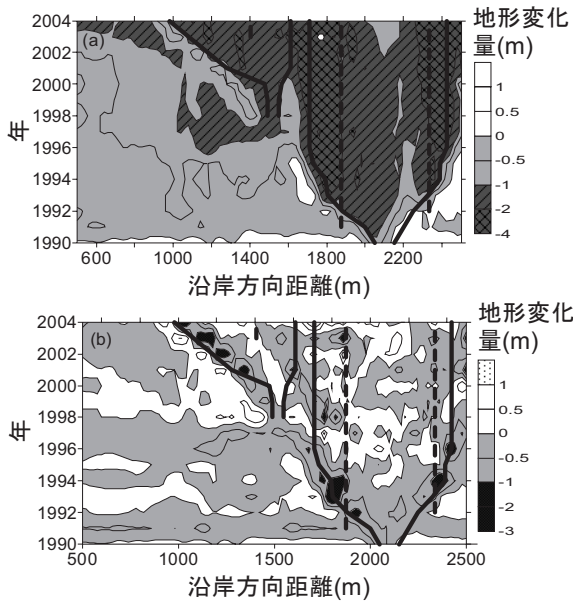


図-19 潜堤直背後における沿岸方向断面の時間変化および潜堤、突堤の延伸状況。(a)1989年からの変化量、(b)前年からの変化量。実線は離岸堤の端部の位置を、破線は突堤の位置を示している。深浅データの時間間隔は約1年である。

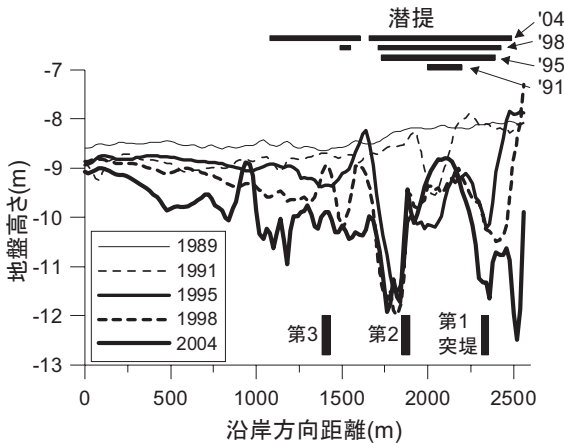


図-20 潜堤直背後の沿岸方向断面の重ね合わせおよび潜堤の延伸状況

側（潜堤の延伸方向）で洗掘が一段と深くなり、洗掘深が約2mから約3mとなった。それ以降は、洗掘域が拡大するにもかかわらずこの深掘れの位置はほとんど移動していない。1992～1994年にかけての第1、第2突堤外側での洗掘深の増大は、潜堤端部と突堤先端とが近い位置にあり、潜堤端部の乱れに突堤先端の乱れが重なったことにより生じたものと考えられる。

その後、第2突堤先端西側では、1997～1998年にかけて、第1突堤先端東側では2002～2003年にかけて洗掘孔がさらに一段と深くなり、洗掘深は最大で約4mとなった。1997～1998年にかけての第2突堤先端西側における洗掘深の増大には1996年度に設置された潜突堤が影響していると考えられる。すなわち、潜突堤の西側では西向き流れによる乱れが発生し、それが洗掘深の増大につながった可能性がある。一方、2002～2003年にかけての第1突堤先端東側での洗掘深の増大には、2000年に第1突堤先端東側に建設された廃棄物護岸付属の波除堤先端の乱れが何らかの影響を及ぼしていると考えられる。ただし、それぞれ、第1、第2突堤周辺の洗掘深増大と構造物の完成との間には1～2年の時間遅れがあり、その正確な原因は不明である。

洗掘深は、以上のように、ある時期に局所的に急激に大きくなっているけれども、図-15の土量変化にはこのような急激な変化は現れておらず、局所的な洗掘深の急激な増大は、より広い領域における土量変化には大きな影響を及ぼしていない。

沿岸方向 $x=1500\text{m}$ より西側では、1997年までは一般的な侵食が生じていたけれども、潜堤がこの領域にまで延伸されるようになると、前述と同様の地形変化、すなわち、潜堤端部における洗掘とそれよりも外側の堆積が潜堤の延伸とともに移動する地形変化が生じた。しかしながら、第1、第2突堤周辺で見られた大きな洗掘は第3突堤周辺では見られない。このような洗掘深の違いには、潜堤開口部、あるいは突堤の施工順序（第1、第2突堤建設は潜堤の延伸に先立って行われたのに対して、第3突堤は潜堤の延伸後に建設された）が影響している可能性がある。前者に関しては、潜堤開口部から沖へ向かう流れによって、第3突堤先端を通過して西の潜堤端部に向かう流れが弱くなったことにより第3突堤先端の洗掘深が小さくなったことが考えられる。一方、後者に関しては、潜堤端部が第1、第2突堤先端に達したときに、潜堤端部の乱れと突堤先端の乱れとが重なることにより洗掘が発達したのに対して、第3突堤周辺では潜堤端部と突堤先端部とが近くに位置することが無く、前述のような乱れの重合が無かったために洗掘が大きく発達しなかったと考えられる。

5.5 潜堤背後の洗掘に及ぼす突堤の影響

突堤が潜堤背後の地形変化に与える影響は、新潟西海岸における潜堤による海岸侵食対策を検討する際の調査事項の一つとなっており、流れの模型実験や地形変化の数値計算が行われている（岩谷ら、1987）。前述したよう

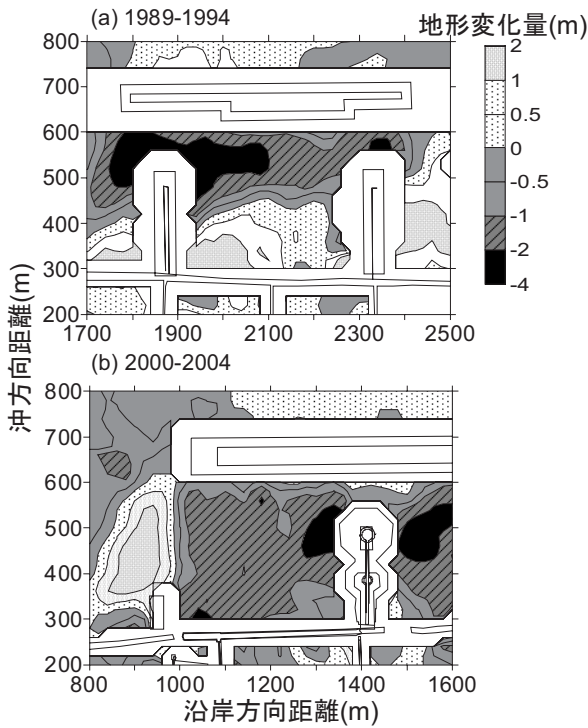


図-21 (a)1989～1994年の $x=1700\sim 2500\text{m}$ (第1突堤と第2突堤との間およびその周辺), (b)2000～2004年の $x=800\sim 1600\text{m}$ (第3突堤と第4突堤との間およびその周辺)の地形変化

に、第1、第2突堤は潜堤建設に先立って建設されたのに対して、第3、第4突堤は潜堤延長後の延伸されており、特に第4突堤はまだその延長が短い(図-4)。そこで、第1突堤から第2突堤にかけての地形変化と第3突堤から第4突堤にかけての地形変化とを比較することにより、突堤が地形変化、特に潜堤背後の洗掘に及ぼす影響を検討する。

潜堤端部背後に突堤がある場合の地形変化として、養浜などの影響がなく第1、第2突堤の影響が地形変化に明瞭に現れている1989～1994年の地形変化を選択し、一方、潜堤端部背後に突堤がない場合の地形変化として第3突堤と建設間もない第4突堤との間の2000～2004年の地形変化を選択し、それらの地形変化を図-21～23に示す。さらに、それぞれの領域の断面変化として、1989～1994年の $x=1700\sim 2500\text{m}$ 、2000～2004年の $x=1000\sim 1400\text{m}$ の沿岸方向平均の断面変化を図-24に示す。

図-21～24より、第1突堤と第2突堤の周辺およびその間では、洗掘深は大きいものの、洗掘域が潜堤直背後に集中しており、 $y=240\sim 300\text{m}$ に位置する既設離岸堤には洗掘域が達していないのに対して、第3突堤と第4突堤の間では洗掘深は小さいものの既設離岸堤にまで洗

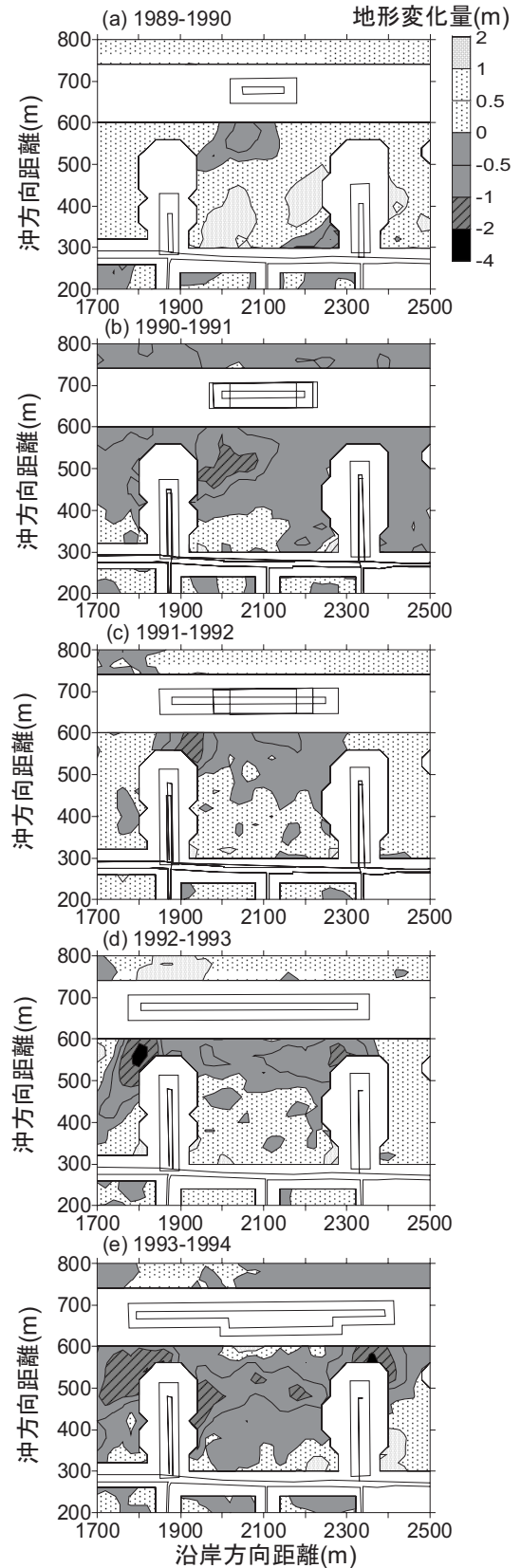


図-22 1989～1994年の $x=1700\sim 2500\text{m}$ における各年の地形変化

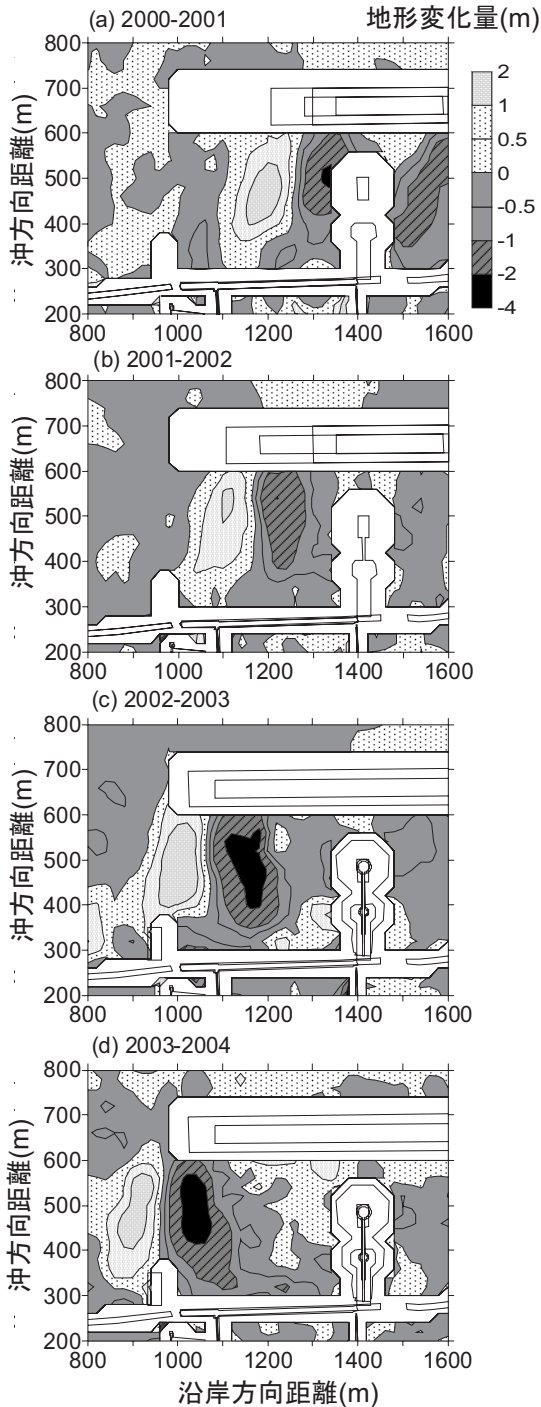


図-23 2000～2004年の $x=1000\sim1400\text{m}$ における各年の地形変化

掘が広がっている。ただし、洗掘量を比較してみると、第1突堤と第2突堤との間およびその周辺($x=1700\sim2500\text{m}$, $y=280\sim720\text{m}$)における侵食量のみを累積した値は $155,000\text{m}^3$ 、第3突堤と第4突堤との間($x=1000\sim1400\text{m}$, $y=280\sim720\text{m}$)のそれは $152,000\text{m}^3$ であり、両者

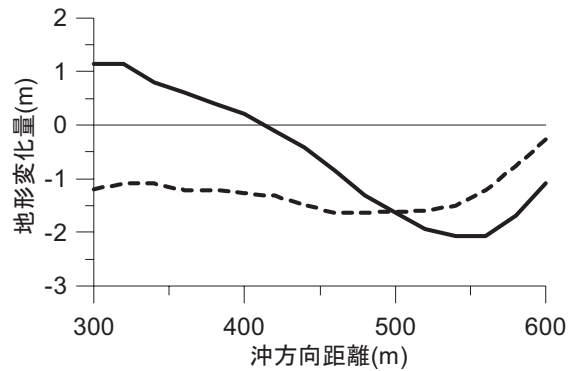


図-24 1989～1994年の $x=1700\sim2500\text{m}$ (実線), および2000～2004年の $x=1000\sim1400\text{m}$ (破線)の沿岸方向平均の断面変化量

はほとんど同程度である。したがって、新潟西海岸における潜堤背後の突堤の設置は、洗掘量そのものは軽減していないけれども、洗掘域を潜堤背後にとどめ、その影響を岸に及ぼさない効果があったと言える。なお、上記の結果は、潜堤端部周辺に生じた洗掘が支配的な地形変化を基にしたものであり、潜堤背後の端部から離れた地点において、洗掘の進行が収まった後の地形変化が突堤の有無によってどのように異なるかは今のところ不明である。

潜堤背後で養浜を行う場合には、養浜を行っていない区域への沿岸方向の養浜砂の流出を防止するために突堤は有効であると考えられる。ただし、その施工順序に関しては、前述した地形変化が示しているようにそれぞれ一長一短がある。突堤を潜堤延伸よりも先に施工した場合には、流れが潜堤背後の集中することによって岸側の地形は安定し、さらに、潜堤背後の一部の砂は岸に移動することにより、突堤を後に施工する場合に比べて養浜土量を少なくすることができるかもしれない。しかし、洗掘深は大きくなるため、そのための対策が必要である。一方、突堤を後に施工する場合には、この逆のことが当てはまる。結局、突堤の施工順序は洗掘対策と養浜土量との兼ね合いなどを考慮して決定されることになる。

5.6 洗掘原因の検討

突堤の有無によって洗掘域の広がり異なるという上記の結果は、岩谷ら(1987)の流れの実験結果(図-25)からも推察できる。岩谷らの実験によると、突堤が潜堤背後に設置されている場合には、潜堤端部において潜堤と突堤との間に流れが集中しているのに対して、突堤が設置されていない場合には潜堤端部において潜堤から既

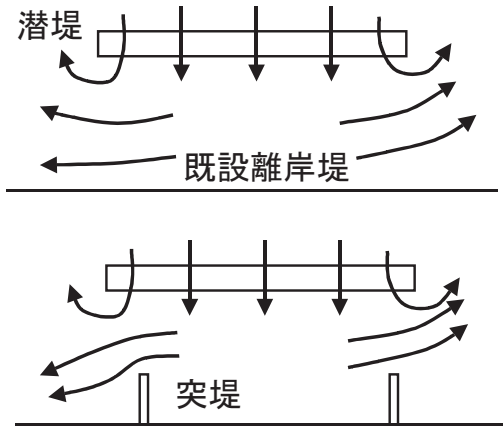


図-25 岩谷ら(1987)によって示された新潟西海岸における潜堤周辺の流れの実験結果の模式図 (岩谷ら(1987)を基に作成)

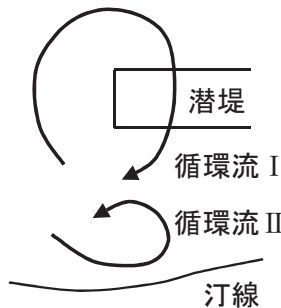


図-26 下菌ら(2004)によって示された潜堤周辺の流れの模式図 (下菌ら(2004)を基に作成)

設離岸堤までの間で沿岸方向の流れが発達している。これらの流れは、侵食を引き起こす原因になるとして下菌ら(2004)が示した潜堤周辺の循環流 I (図-26) であり、突堤の有無による循環流 I のパターンの違いが図-21 に示される潜堤背後の洗掘領域の違いになったと考えられる。

ただし、洗掘量に関する現地の結果は、岩谷ら(1987)が流れの実験結果を基に数値シミュレーションによって予測した結果、すなわち、突堤を潜堤背後に設置した場合の方が設置しない場合に比べて洗掘深が小さくなる結果と異なる。これは、計算では、構造物端部の乱れによる局所洗掘を再現することが難しかったためであると考えられる。

山城ら(2000)は潜堤背後において底質が波の非線形性が0となる地点を境として岸、沖それぞれの方向に輸送されることが潜堤背後の洗掘の原因であると述べている。第1, 第2突堤の間ではそのような現象で説明できる地形変化が見られるものの、第3突堤西側ではそのような地形変化は見られない。したがって、新潟西海岸では、潜堤背後の波の非線形性は、洗掘にある程度の影響を及ぼしている可能性はあるものの、洗掘の主要な原因ではないと考えられる。

幅が狭い潜堤では砕波による波の突っ込みが洗掘の原因となりうる。ただし、新潟西海岸では潜堤幅が40m(暫定時でも17m)と広く、砕波開始位置と波の突っ込み位置との距離に関する砂村の実験式(1985)を用いて計算しても、波の突っ込み位置は砕波開始位置(潜堤の沖側端)から高々数mなので、波の突っ込みが洗掘の原因であるとは考えにくい。

5.7 潜堤沖側の堆積原因の検討

図-13, 17に見られるように潜堤沖では堆積が生じていた。その詳細なメカニズムは不明であるけれども、潜堤岸側で侵食された土砂が図-26に示されている循環流 I によって潜堤沖側に運ばれた可能性がある。

5.8 岸沖方向断面と海底勾配

(1) 岸沖方向断面の安定と海底勾配の時間変化

今までの検討によって、潜堤と突堤の建設により潜堤背後では洗掘が発達するものの侵食が抑えられ汀線近傍の地形が安定することや潜堤沖では堆積が生ずることなどが明らかになった。本節では、以上の結果を岸沖方向の断面変化から確認する。

図-27は、潜堤の建設が始まった $x=2200\text{m}$ における岸沖方向断面の重ねあわせと海底勾配の時間変化を示したものである。1994年までに $y=550\text{m}$ 付近で発達した洗掘孔は、その後もそこに存在しているけれども、主要な養浜が終了した2001年以降は洗掘孔よりも岸側の断面は安定している。洗掘孔よりも岸側の断面の安定は海底勾配にも現れており、1999年以降、洗掘孔から既設離岸堤が存在していたところまでの領域($y=300\sim 600\text{m}$)の海底勾配は約1/30でほぼ一定である。

一方、潜堤よりも沖側の地形に注目してみると、5.1におけるEOF解析の結果や5.3における土量変化からも推察されるように、地形は非常に安定しており、海底勾配($y=740\sim 1100\text{m}$)も約1/150で一定である。なお、図-2を基にすると離岸堤や潜堤が建設される以前の1947年における水深8~11mでの海底勾配も約1/150であり、

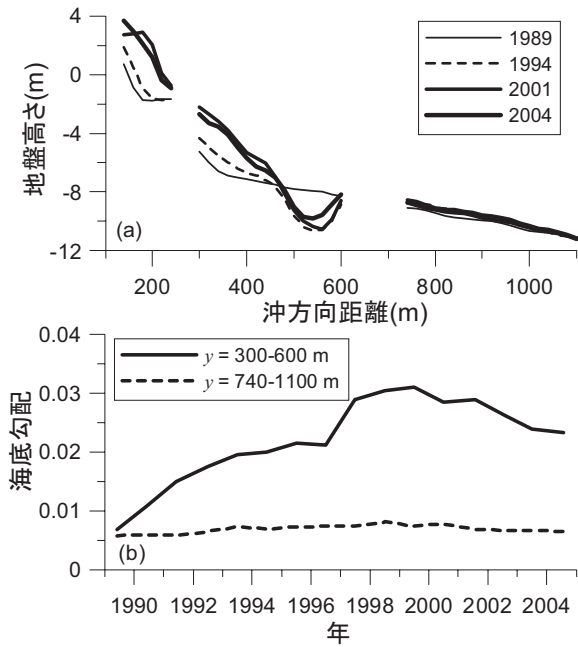


図-27 $x=2200\text{m}$ における(a)岸沖方向断面の重ねあわせと(b)海底勾配の時間変化

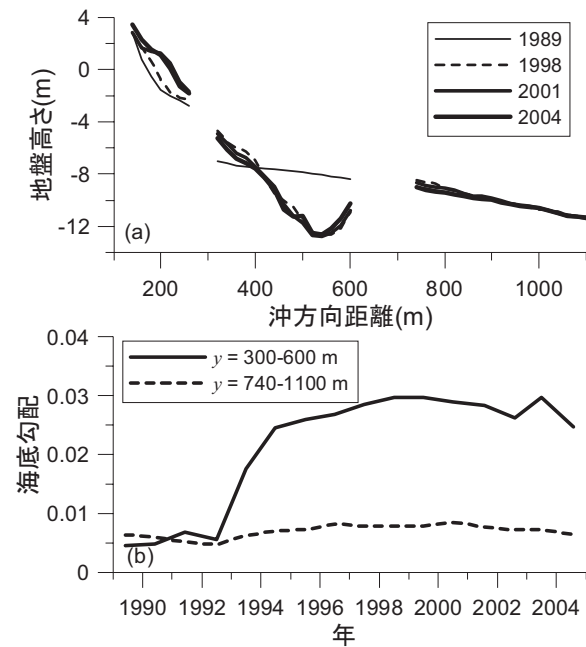


図-28 $x=1800\text{m}$ における(a)岸沖方向断面の重ねあわせと(b)海底勾配の時間変化

水深8m以深の海底勾配は1940年代よりほとんど変化していない。

このような断面変化の特徴は洗掘孔が発達した $x=1800\text{m}$ の断面でも見て取れる (図-28)。洗掘孔は1998年までに発達したけれども、それ以降、洗掘孔よりも岸

側の断面は安定しており、海底勾配も約 1/30 で一定である。潜堤よりも沖側でも、地形は安定しており、海底勾配は約 1/150 である。

以上の結果より、潜堤と突堤の建設が終了した領域では、潜堤背後では深さが最大 4m に達する洗掘孔が発達したけれども、洗掘孔の影響は限られた領域にとどまっており、洗掘孔よりも岸側の断面の安定には大きな影響を及ぼしていないことが岸沖方向の断面変化からも裏付けられた。さらに、既設の離岸堤がその沖側において侵食を発生させていたのに対して、潜堤よりも沖側では地形が安定していることも確認された。

(2) 海底勾配の推定方法の検討

続いて、潜堤よりも岸側の海底勾配 (約 1/30) を推定する方法を検討する。栗山ら (1989) に示されているように前浜勾配を推定する方法としては各種の推定式が提案されているけれども、前浜より沖の海底勾配を推定する方法は少ない。ここでは、平衡断面の形状を示す Dean の式 (Dean・Dalrymple, 2002) と前浜勾配を推定する式とを組み合わせることにより潜堤よりも岸側の海底勾配を推定する。

Dean の平衡断面は以下の式で表される。

$$h = A_e y^{2/3} \quad (4)$$

ここで、 y は汀線を基準とする沖方向距離であり、 A_e は次元を持つ係数で粒径が小さくなるほど小さい値を取り、粒径 0.2~0.5mm の範囲では $A_e = 0.1 \sim 0.16 \text{ (m}^{1/3}\text{)}$ である (Dean・Dalrymple, 2002)。波浪や潮位が変化する現地では、平衡断面は平均地形としての意味を持つことになると考えられる。Dean の平衡断面には波浪の影響が含まれていないけれども、本検討では前浜勾配が粒径のみならず波浪の影響も受けることを考慮して、係数 A_e が粒径だけでなく波浪によっても変化すると仮定する。

前浜勾配 $\tan \beta_f$ の推定式としては、構造物のない全国 12 海岸での現地観測結果に基づいた前浜勾配の上限值を示す経験式 (運輸省港湾局, 1979) を用いる。

$$\left. \begin{aligned} \tan \beta_f &= \left(\frac{1}{37.2} \frac{d_{50}}{H_0} \right)^{0.158} & : & \frac{d_{50}}{H_0} \geq 2.4 \times 10^{-4} \\ \tan \beta_f &= \left(376.6 \frac{d_{50}}{H_0} \right)^{0.7856} & : & \frac{d_{50}}{H_0} < 2.4 \times 10^{-4} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 d_{50} は中央粒径、 H_0 は沖波波高である。

以上の推定式を用いて、潜堤背後の洗掘孔と既設離岸堤までの領域の海底勾配を以下の手順で求める。

- (a)式(4)における y' の指数も変数 α と仮定して、潜堤建設以前の断面を最も良く表現する係数 A_e と α とを見出す。
- (b)上記の係数を用いて式(4)より前浜勾配を推定する。ただし、式(4)から明らかなように、汀線位置では前浜勾配(dh/dy)は無量大となるため、ここでは $y=10\text{m}$ の地点の勾配を前浜勾配と定義する。
- (c)前浜勾配を推定する式(5)より、(b)で求めた勾配を発生させる波高を求める。
- (d)上記(c)で求めた波浪の潜堤通過後の波高 H_t を潜堤の透過率 0.41 を用いて求める。
- (e)潜堤通過後の波高 H_t による前浜勾配を式(5)より求める。
- (f) $y=10\text{m}$ において(e)で求めた海底勾配になるように係数 A_e を求め、その係数を用いて式(4)より断面形状を求める。さらに、この断面形状における $y=300\sim 540\text{m}$ の領域の平均海底勾配を求める。

手順(a)では、潜堤建設以前の断面を必要とする。ただし、1950年代以降は離岸堤が建設されており汀線近傍の地形は離岸堤の影響を受けている。そこで、手順(a)で用いる断面として1947年の断面を用いることとし、新潟西港の防波堤(導流堤)基部より1km西側の測線 No.10(図-2)と2km西側の測線 No.20の断面の平均断面を検討で用いる。

図-29は、離岸堤建設以前の1947年の断面と最小二乗法を用いて手順(a)より求めた式(6)で表される断面とを示したものである。

$$h = 0.117y^{0.651} \quad (6)$$

式(6)で表される断面は現地の断面を良く表現している。さらに、式(6)の $A_e=0.117$ は前述の A_e の範囲内である上、 y' の係数 0.651 は Dean によって示された $2/3(0.667)$ (Dean・Dalrymple, 2002) に非常に近い。よって、式(6)は離岸堤建設以前の断面を表す式として妥当であると言える。

式(6)を用いると、 $y=10\text{m}$ における海底勾配は $0.034(=1/29.2)$ となり、式(5)よりこの勾配を発生させる波高は 5.54m (超過確率 3.6%) となる。この波高に潜堤の透過率 0.41 を乗じた波高 2.27m を用いて、式(5)より前浜勾配を求めると $0.0689(=1/14.5)$ となる。さらに、 $y=10\text{m}$

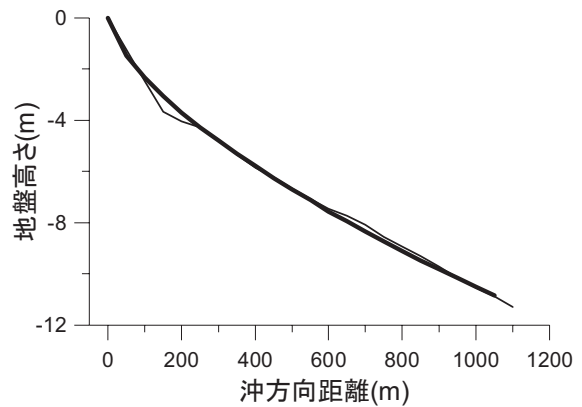


図-29 1947年の岸沖方向断面(細い実線)と式(6)より求められた断面(太い実線)

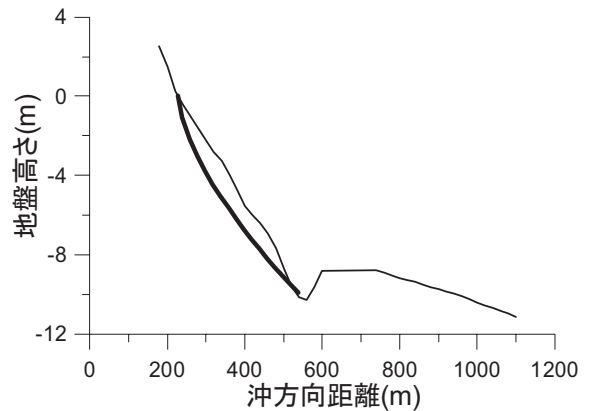


図-30 2004年における $x=1880\sim 2320\text{m}$ の平均断面(細い実線)と計算で求められた断面(太い実線)

において前述の海底勾配を生じさせる係数 A_e は 0.237 となる。

図-30は、そのようにして求めた断面と2004年における $x=1880\sim 2320\text{m}$ の平均断面とを比較したものである。既設離岸堤が存在していた地点から洗掘孔までの領域 ($y=300\sim 540\text{m}$) における平均勾配は、現地において $1/30.5$ であり、計算では $1/35.5$ である。この結果より、上記の方法で前浜よりも沖における潜堤による海底勾配の変化をある程度の精度で求めることが可能であることが明らかになった。なお、手順(b)において、式(4)より前浜勾配を推定する地点を $y=5\text{m}$ あるいは $y=20\text{m}$ としても、既設離岸堤が存在していた地点から洗掘孔までの領域における潜堤建設後の平均勾配の計算値は、ともに約 $1/36$ であり、 $y=10\text{m}$ として求めた値とほとんど差がなかった。このことは、本方法が前浜勾配を求める地点の影響を受けにくいことを示していると言える。ただし、現地の断

面や海底勾配に及ぼす洗掘孔の影響が明確でない点や粒径の岸沖分布を考慮していない点などの課題が残っており、上記の方法の有効性は、より広範囲の条件のもとの検証を必要とする。

6. おわりに

新潟西海岸の潜堤周辺において潜堤建設開始の1989年から2004年までの16年間に取得された地形データを解析した結果明らかになった結論を以下に示す。

(1) 潜堤背後では、潜堤完成後、侵食が抑えられ地形が安定した。さらに、潜堤沖側では、潜堤建設前は侵食傾向にあったものの、潜堤建設後は堆積傾向となった。

潜堤背後では、前浜、後浜に1994～2000年に投入された砂の70%が2004年の時点で残存していた。

(2) 潜堤背後では、洗掘が発生し、潜堤の延伸とともに洗掘域が沿岸方向に拡大した。さらに、洗掘域よりも外側に形成された堆積域も潜堤の延伸とともに沿岸方向に移動した。

洗掘域は、第1、第2突堤周辺では特に深くなったけれども、第3突堤周辺では洗掘深の増大は見られなかった。これには、開口部や構造物の施工順序などが影響していると考えられる。

(3) 潜堤背後の突堤の設置は、洗掘量そのものは軽減しないけれども、洗掘域を潜堤背後にとどめ、その影響を岸に及ぼさない効果があった。

(4) 前浜より沖の海底勾配を推定する方法として、新潟西海岸では、平衡断面の形状を示すDeanの式と前浜勾配を推定する式とを組み合わせる方法が有効であった。

以上のように、新潟西海岸においては潜堤背後に最大4mにも及ぶ洗掘が発生したけれども、汀線近傍の地形の安定には洗掘孔は大きな影響を及ぼしておらず、潜堤と突堤の組み合わせは汀線近傍の地形の安定に寄与していると結論づけられる。このことは、新潟西海岸と同様の自然条件の場所において、新潟西海岸と同様の潜堤、突堤を設置すると、潜堤背後の地形が安定する可能性が高いことを示している。ただし、自然条件や潜堤の設置条件が異なり、その背後の流れの発達状況が異なると、潜堤背後の地形が安定しないことも考えられる。よって、現地で潜堤を計画する場合には、異なる潮位における潜堤背後の流れや洗掘孔の発達に注意して潜堤背後の地形の安定性を十分に検討する必要がある。

(2007年2月6日 受付)

謝辞

新潟西海岸の整備は、技術調査委員会の支援のもと1950年代より進められ、その過程で数多くの貴重なデータが収集された。本研究を実施するに当たっては、それらのなかから、いくつかのデータを使用させて頂いた。具体的には、国土交通省北陸地方整備局 新潟港湾・空港整備事務所ならびに新潟港湾空港技術調査事務所より深淺データと沖波波浪実測データを、当所海洋・水工部海象情報研究室より沖波波浪実測データを、そして、当所海洋・水工部 海洋水理・高潮研究室より沖波波浪推算データを提供して頂いた。地形変化の解析結果に関しては、北陸地方整備局の両事務所と何回か議論を行い、両事務所の皆様から貴重なコメントを頂いた。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

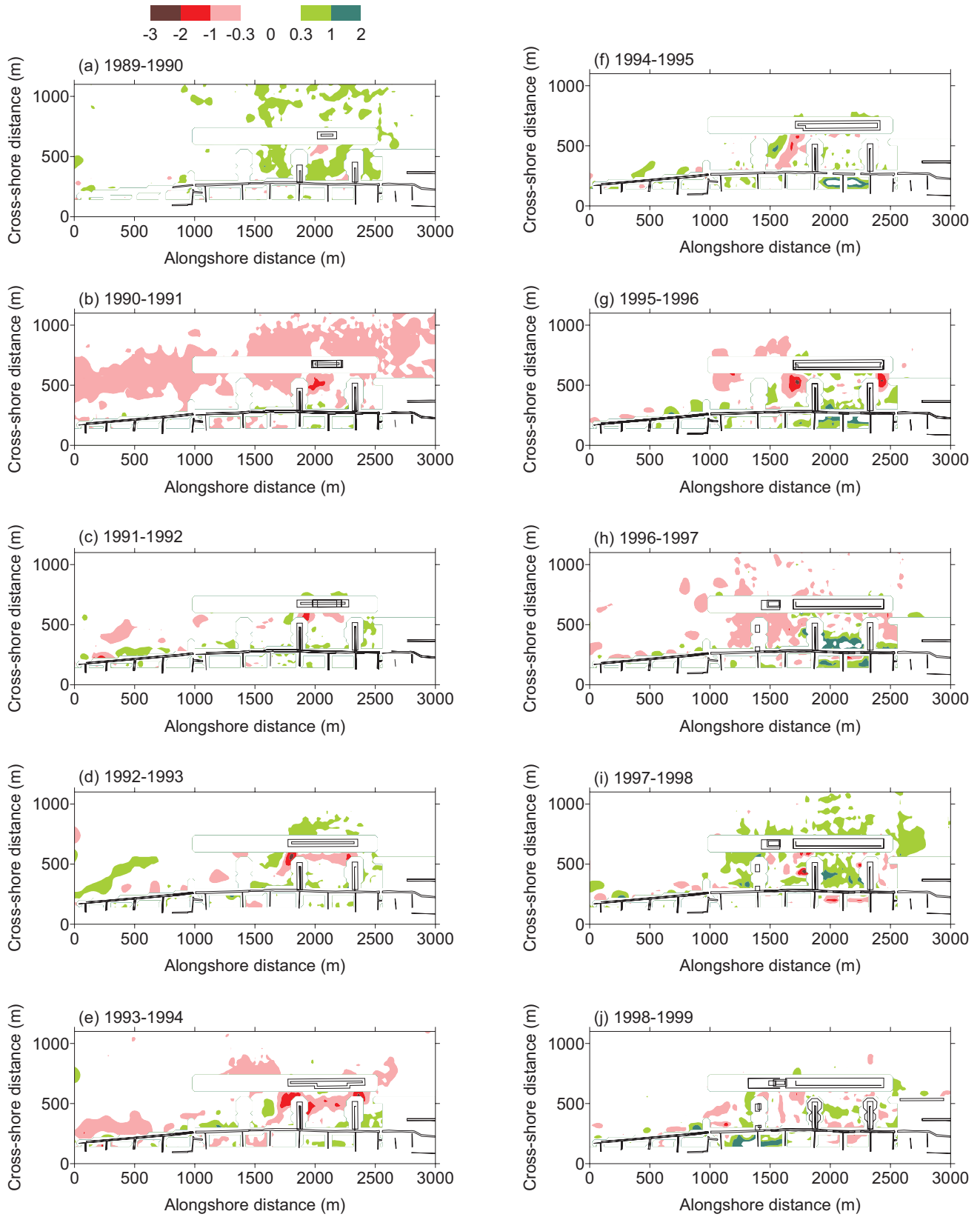
- 青野利夫・Cruz, Eric・大中 晋・後藤智明 (1995) : 人工リーフ上の波と流れの現地観測, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.761-765.
- 磯部雅彦 (1986) : 放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・砕波変形の計算法, 第33回海岸工学講演会論文集, pp.134-138.
- 入江 功・菅原一晃・森 好生・滑川伸孝 (1987) : 人工海浜への潜堤の利用, 第34回海岸工学講演会論文集, pp.436-440.
- 岩谷文方・宮本卓次郎・松下正弘・吉永 茂・川又良一・足立有平 (1987) : 沖合に設置する潜堤周辺の波, 流れ, 地形変化の予測について, 第34回海岸工学講演会論文集, pp.372-376.
- 宇多高明・田中茂信・筒井保博 (1984) : 人工リーフによる波浪と漂砂の制御, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.340-344.
- 宇多高明・小俣 篤 (1986) : 人工リーフの波浪減衰機能と海浜流場の形成に関する考察, 土木技術資料, 28-2, pp.32-37.
- 宇多高明・小俣 篤・横山揚久 (1987) : 人工リーフ周辺に生じる海浜流と地形変化, 第34回海岸工学講演会論文集, pp.337-341.
- 宇多高明・坂野 章・横山揚久 (1990) : 人工リーフによる養浜砂の安定化に関する実験的検討, 海岸工学論文集, 第37巻, pp.459-463.
- 運輸省港湾局 (1979) : 人工海浜の建設技術マニュアル, 112p.
- 大中 晋・吉沢央明 (1992) : 人工リーフの天端幅の違いによる波浪低減効果及び反射率に関する現地調査,

- 海岸工学論文集, 第 39 卷, pp.641-645.
- 岡田 豊・河野二夫 (1991): 青島海岸に設置された潜堤の効果に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第 38 卷, pp.321-325.
- 小原恒平・永井紀彦・入江 功・首藤 啓 (1990): 水質及び景観を改善するための離岸堤の潜堤化, 海岸工学論文集, 第 37 卷, pp.454-458.
- 加藤一正・吉松 晃 (1984): 三次元の経験的固有関数法による深淺図解析法, 港湾技術研究所報告, 第 23 卷, 第 2 号, pp.27-47.
- 加藤一正 (2005): 新潟西海岸の保全, 平成 17 年度 港湾空港技術特別講演会 in 新潟 講演集 (別冊), 20p.
- 加藤 始 (1992): 透過潜堤による波高減衰効果と堤内水位上昇に関する研究, 海岸工学論文集, 第 39 卷, pp.636-640.
- 河島宏治・岡本正由・喜岡 渉・佐藤公己・若松正文 (1992): 捨石潜堤周辺に生じる海浜流パターンについて, 海岸工学論文集, 第 39 卷, pp.216-220.
- 喜岡 渉・松野忠幸・岡本正由・佐藤公己 (1991): 潜堤背後の平均水位と長周期変動に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 38 卷, pp.306-310.
- 許 東秀・松本幸久・中村昭男・岩田好一朗 (2000): 傾斜水域に設置された潜堤による多方向不規則波の碎波変形特性, 海岸工学論文集, 第 47 卷, pp.741-745.
- 栗山善昭・加藤一正・入江 功: 離岸堤を備えた人工海浜の地形特性, 港湾技研資料, No.659 (1989), 49p.
- 黒木敬司 (2002): 新潟西海岸の地形変化特性, 学位論文, 鹿児島大学, 113p.
- 河野二夫・堀川毅信・高野重利・宮脇隆志 (1987): 潜り離岸堤の堆砂効果に関する実験的研究, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp.436-440.
- 小島治幸・井島武士 (1990): 没水水平版による波の分裂と波浪制御に関する研究, 海岸工学論文集, 第 37 卷, pp.529-533.
- 佐々木幹夫・首藤 啓・竹下 彰 (1989): 潜堤周辺の海浜流・海浜変形数値計算法の検討, 海岸工学論文集, 第 36 卷, pp.404-408.
- 佐藤正一 (1996): 海岸制御工法の実例, 水工学に関する夏期研修会講義集, B-8-1-B-8-20.
- 佐藤稔夫・三橋宏次・秦英樹 (1967): 透過式潜堤に関する研究, 第 14 回海岸工学講演会講演集, pp.167-172.
- 榎木 亨・出口一郎・泉 雄士 (1981): 離岸堤及び潜堤周辺で生ずる海浜流セルに関する研究, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp.310-314.
- 榎木 亨・出口一郎・岡原義典 (1989): 幅広潜堤の波浪減衰効果とその縮尺効果について, 海岸工学論文集, 第 36 卷, pp.633-637.
- 清水琢三・今井澄夫・寺田賢二 (1993): 人工リーフ建設に伴う地形変化, 海岸工学論文集, 第 40 卷, pp.546-550.
- 下園武範・鈴木淳也・佐藤慎司・磯部雅彦 (2004): 人工リーフ背後における海浜流と漂砂の制御, 海岸工学論文集, 第 51 卷, pp.606-610.
- 下園武範・佐藤慎司・磯部雅彦 (2005): 潜堤周辺における海浜流場の発達機構, 海岸工学論文集, 第 52 卷, pp.121-125.
- 荘司喜博・中山春雄・滝口要之助・黒木敬司・坂井隆行 (1990): 新潟西海岸におけるの波, 流れおよび地形変形の観測, 海岸工学論文集, 第 37 卷, pp.429-433.
- 荘司喜博・中山春雄・滝口要之助・高橋豊喜・黒木敬司・坂井隆行 (1991): 新潟西海岸の潜堤設置による波, 流れおよび地形変形の観測, 海岸工学論文集, 第 38 卷, pp.316-320.
- 荘司喜博・中山春雄・田村宏二・遠山豊一・坂井隆行・黒木敬司 (1992): 新潟西海岸潜堤周辺の波, 流れおよび地形変化に関する調査, 海岸工学論文集, 第 39 卷, pp.451-455.
- 白石直文・沼田 淳・長谷直樹 (1958): 潜堤の効果について - 新潟海岸の現場の観測による -, 第 5 回海岸工学講演会講演集, pp.189-196.
- 砂村継夫 (1985): 沿岸砂州の形成位置と規模, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp.331-335.
- 高野誠紀・坂井秀雄・中宮正人・山田貴裕・黒木敬司・佐藤道郎 (2004): 新潟西海岸での潜堤背後侵食についての数値解析, 海岸工学論文集, 第 51 卷, pp.471-475.
- 高山知司・永井紀彦・関口忠志 (1985): 広天端幅潜堤の波浪低減効果に関する不規則波実験, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp.545-549.
- 高山知司・池田直太 (1988): 広天端幅潜堤による波浪変形と護岸越波流量の低減効果, 港湾技術研究所報告, 第 27 卷, 第 4 号, pp.63-92.
- 田島芳満・佐藤慎司・鈴木淳也・下園武範・磯部雅彦 (2006): 潜堤周辺の碎波・乱流特性を考慮した海浜流場予測モデルに関する一考察, 海岸工学論文集, 第 53 卷, pp.106-110.
- 田中則男 (1976): 天端幅の広い潜堤の波浪減殺および砂浜安定効果について, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp.152-157.
- 田中則男・小笠原昭・小山内英雄 (1977): 養浜工に関する

- る研究 (その 1), 港湾技研資料, No.260, 86p.
- 豊島 修 (1972): 現場のための海岸工学 侵食編, 森北出版, 320p.
- 永井荘七郎・小田一紀・倉田克彦 (1975): 大水深緩斜面捨石潜堤に関する研究, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp.409-414.
- 永井荘七郎・倉田克彦・長谷川恵一 (1977): 潜堤の消波効果におよぼす天端幅の影響, 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp.303-307.
- 中田博昭・鈴木 勝・阿部勝雄・川又良一・南 将人 (1992): 潜堤周辺の地形変化に関する数値モデルと現地観測結果との比較, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp.431-435.
- 中村 充・白石英彦・佐々木泰雄 (1966): 潜堤による消波について, 第 13 回海岸工学講演会講演集, pp.76-79.
- 中山哲厳 (1993): 人工リーフの水理特性及び被覆材の安定に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp.816-820.
- 野口賢二・鳥居謙一・人見 寿・笹田俊治・丸山 準・岸田弘之・山崎真嗣 (2002): 人工リーフと緩傾斜堤に関する平成 13 年全国実態調査, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.921-925.
- 橋本典明・川口浩二・真期俊行・永井紀彦 (1999): 第 3 世代波浪推算法 (WAM) の推算精度に関する検討, 港湾技術研究所報告, 第 38 巻, 第 4 号, pp. 3-47.
- 浜口達男・宇多高明・井上 力・五十嵐晃: 中山 修 (1988): 人工リーフの波浪制御効果に関する現地実験, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp.128-132.
- 浜口達男・宇多高明・市ノ瀬栄彦・五十嵐 晃 (1989): 新潟海岸の人工リーフの沈下実態調査, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp.434-438.
- 本間 仁・酒匂敏次 (1958): 潜堤に関する研究, 第 5 回海岸工学講演会講演集, pp.175-182.
- 本間 仁・堀川清司 (1959): 潜堤に関する研究(2) - 沈下機構ならびに維持 -, 第 6 回海岸工学講演会講演集, pp.114-120.
- 三浦 晃・遠藤茂勝 (1978): 潜堤の波高伝達特性について, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp.293-296.
- 三浦 晃・遠藤茂勝 (1979): 潜堤による伝達波の特性について, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp.304-308.
- 南 将人・真野 明 (2001): 潜堤開口部周辺の地形変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.951-955.
- 谷野賢二・水野雄三・渡辺康玄・平沢充成 (1989): 人工リーフによる波の変形について, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp.628-632.
- 山城 賢・吉田明德・入江 功 (2000): 大水深潜堤背後の海底洗掘要因について, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.561-565.
- 吉田明德・越智宏充・Shuguang, Yan・入江 功 (2001): 複列潜堤背後の波動場特性, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.771-775.
- 鷺見浩一・小菅 晋・和田 明 (1997): 人工リーフ周辺の流れ・漂砂についての実験的検討, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp.541-545.
- 鷺見浩一・野口将志・水谷法美・羽原琢智・三浦正一 (2004): 石川海岸の人工リーフ建設に伴う汀線位置変化と漂砂動向に関する研究, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp.476-480.
- Avgeris, I., Karambas, T.V. and Prinos, P. (2004): Boussinesq modeling of wave interaction with porous submerged breakwaters, *Proceedings of 29th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp.604-616.
- Caceres, I., Sanchez-Arcilla, A., Alsina, J.M., Gonzalez-Marco, D. and Sierra, J.P. (2005a): Coastal dynamics around a submerged barrier, *Proceedings of Coastal Dynamics '05*, ASCE, CD-ROM.
- Caceres, I., Sanchez-Arcilla, A., Zanuttigh, B., Lamberti, A. and Franco L. (2005b): Wave overtopping and induced currents at emergent low crested structures, *Coastal Engineering*, Vol. 52, pp.931-947.
- Calabrese, M., Vicinanza, D. and Buccino, M. (2002): Large-scale experiments of the behaviour of low crested and submerged breakwaters in presence of broken waves, *Proceedings of 28th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp.1900-1912.
- d'Angremond, K. van der Meer, J.W. and de Jong, R.T. (1996): Water transmission at low-crested structures, *Proceedings of 25th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp.2418-2426.
- Dean, R.G., Chen, R. and Browder, A.E. (1997): Full scale monitoring study of a submerged breakwater, Palm Beach, Florida, USA, *Coastal Engineering*, Vol.29, pp.291-315.
- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (2002): *Coastal Processes with Engineering Applications*, Cambridge University Press, pp.162-209.
- De Vroeg, H., Morelissen, R., Ali, A.M. and Fahmy, H.R. (2004): A hybrid approach for modeling the impact of submerged offshore breakwaters on Egypt's north-west

- coast, *Proceedings of 29th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp.2633-2645.
- Lamberti, A., Archetti, R., Kramer, M., Paphitis, D., Mosso, C. and Di Risio, M. (2005): European experience of low crested structures for coastal management, *Coastal Engineering*, Vol. 52, pp.841-866.
- Lesser, G.R., de Vroeg, J.H., Roelvink, J.A., de Gerloni, M. and Ardone, V. (2003): Modelling the morphological impact of submerged offshore breakwaters, *Proceedings of Coastal Sediments '03*, ASCE, CD-ROM.
- Seabrook, S.R. and Hall, K.R. (1998): Wave transmission at submerged rubblemound breakwaters, *Proceedings of 26th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp.2000-2013.
- Sumer, B.M., Fredsoe, J., Lamberti, A., Zanuttigh, B., Dixen, M., Gislason, K. and Di Penta, A.F. (2005): Local scour at roundhead and along the trunk of low crested structures, *Coastal Engineering*, Vol. 52, pp.995-1025.
- van der Biezen, S.C., Roelvink, J.A., van de Graaff, J., Schaap, J. and Torrini, L. (1998): 2DH morphological modelling of submerged breakwaters, *Proceedings of 26th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp.2028-2041.
- van der Meer, J.W., Briganti, R., Zanuttigh, B. and Wang, B. (2005): Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change, *Coastal Engineering*, Vol. 52, pp.915-929.
- von Storch, H. and Zwiers, F. (1999): *Statistical analysis in climate research*, Cambridge University Press, pp.289-365.
- Winant, D.C., Inman, D.L. and Nordstrom, C.E. (1975): Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunction, *Journal of Geophysical Research*, Vol.80, No.15, pp.1979-1986.
- Zyserman, J.A., Johnson, H.K., Zanuttigh, B. and Martinelli, L. (2005): Analysis of far-field erosion induced by low-crested rubble-mound structures, *Coastal Engineering*, Vol. 52, pp.977-994.

付録 A



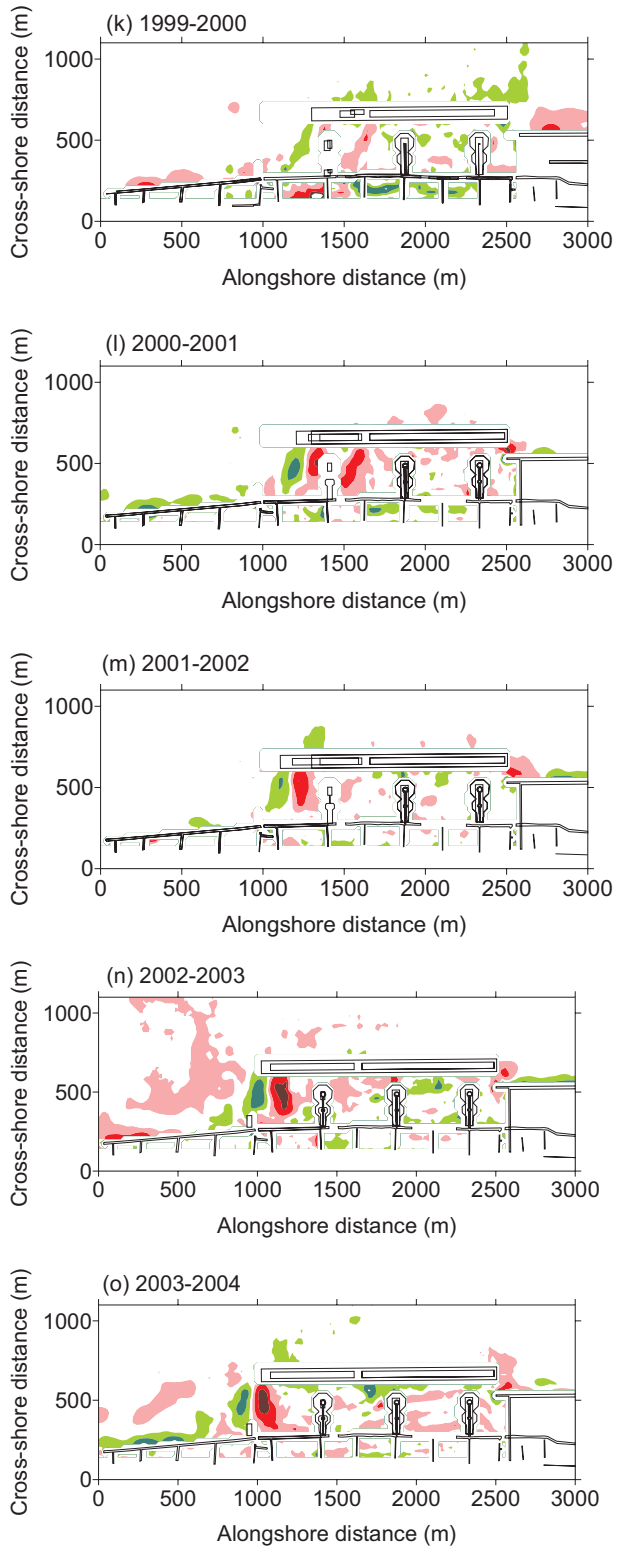


図-A.1 各年毎の地形変化

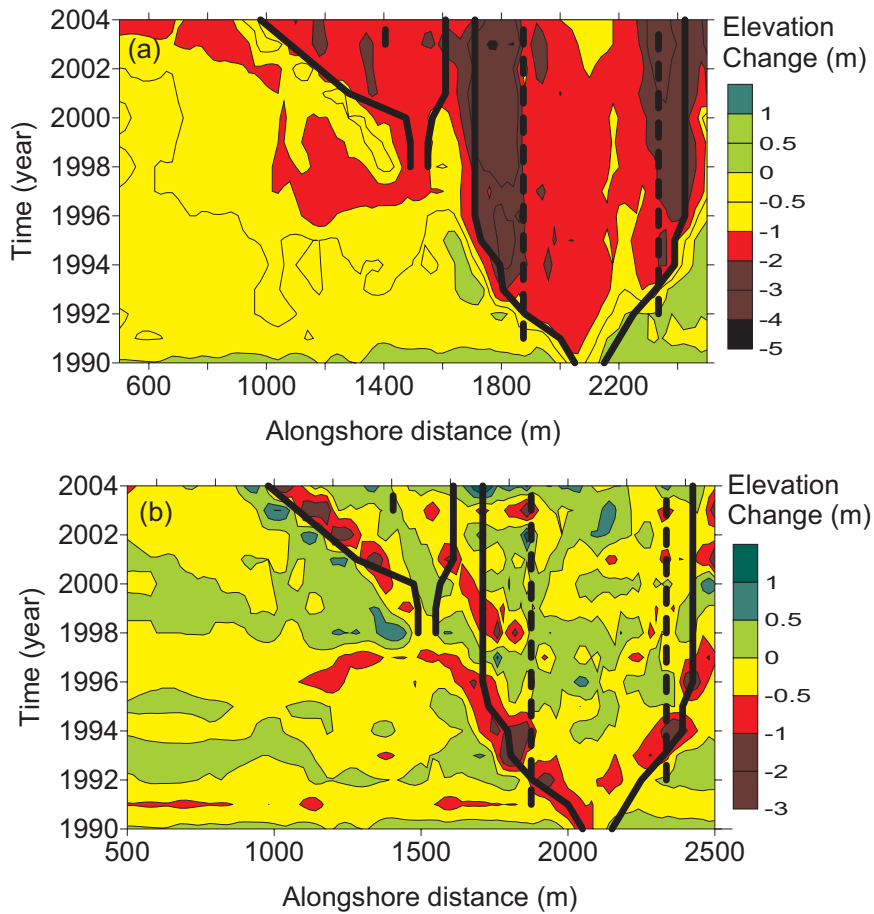


図-A.2 潜堤直背後における沿岸方向断面の時間変化および潜堤、突堤の延伸状況。(a)1989年からの変化量、(b)前年からの変化量。実線は離岸堤の端部の位置を、破線は突堤の位置を示している。

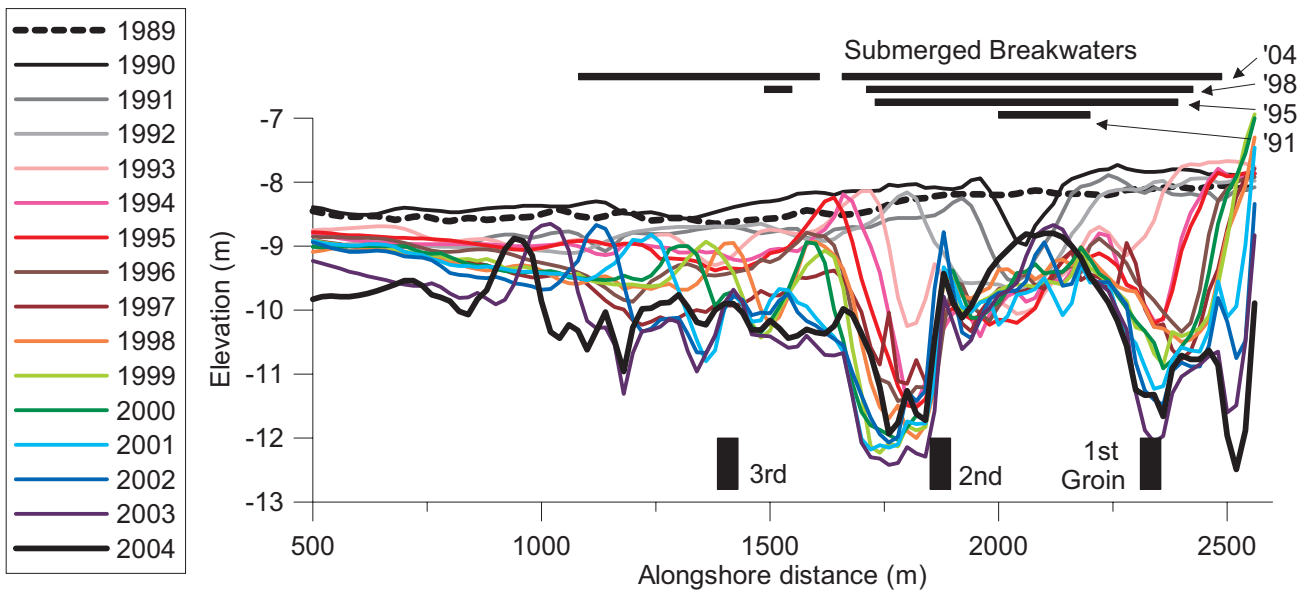


図-A.3 潜堤直背後の断面の重ね合わせおよび潜堤の延伸状況

港湾空港技術研究所報告 第46巻第2号

2007. 6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 新高速印刷株式会社

Copyright © (2007) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

Cracking and Tension Stiffening Behavior of Corroded RC Members	Jianguo DAI, Ema KATO, Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA	3
Morphological Changes around Submerged Breakwater on the Niigata Coast	Yoshiaki KURIYAMA, Satomi YAMAGUCHI, Masaharu IKEGAMI, Akira ITO, Seiki TAKANO, Jyunichi TANAKA, Naoki TOMODA	25