

汀線付近の集中的な侵食と地盤沈下について

Beach Erosion around Shoreline and Effect of Land Subsidence

吉田秀樹¹・二瓶 章²・金井 実³・長谷川巖⁴・片野明良⁵・山田貴裕⁵

Hideki YOSHIDA, Akira NIHEI, Minoru KANAI, Iwao HASEGAWA
Akiyoshi KATANO and Takahiro YAMADA

Characteristic beach profile change has been observed at the beach with integrated shore protection system by large scale submerged breakwater, jetties and nourishment. In this study the cause of characteristic beach profile change was presumed. Two-dimensional hydraulic model test with movable bed was carried out to verify the presumed result. Through the model test, it was found that the cause of constant shoreline erosion is land subsidence, the beach erosion by storm surges in winter is accumulated because sand transport onshore is not occurred in calm, the flat profile is formed at the depth equal to transferred wave height by submerged breakwater.

1. はじめに

新潟西海岸では大規模な潜堤と突堤及び養浜を組み合わせた、面的防護による海岸保全事業が進んでいる。この工法では、潜堤背後に洗掘溝が形成されるという独特の地形変化が、潜堤施工に着手した1990年当初から現れ、認識されていた。これに加えて、潜堤背後の浅海域の養浜断面についても非常に特徴的な断面変化が生じていることが、最近分かった。著者ら(吉田ら, 2008)はこの点について指摘しているが、十分な考察には至っていない。そこで今回は、浅海域の養浜断面変化に目的を絞り、現地データと模型実験データによる養浜断面変化要因の検討結果を報告する。

2. 養浜断面変化の実態

吉田ら(2008)は、潜堤背後の浅海域で生じる養浜断面変化の実態を述べるため、潜堤と突堤の建設及び主要な養浜を終えた、2本の突堤で囲われた区画の、2001年から2007年の養浜断面変化を調べている。吉田らは単一測線の養浜断面変化に着目しているけれども、ここには検討対象区画内の50m間隔6測線の平均養浜断面の経年変化として図-1に示す。吉田らは養浜断面変化と同じ区画、同じ期間の汀線変化についても調べている。汀線変化の対象測線は、過去の侵食対策事業で建設された離岸堤の影響が少ない10m間隔の22測線としている。これらの調査により吉田らが得た養浜断面変化の実態は、①地盤高+3m~-1.5mの範囲に集中して侵食が生じていて、

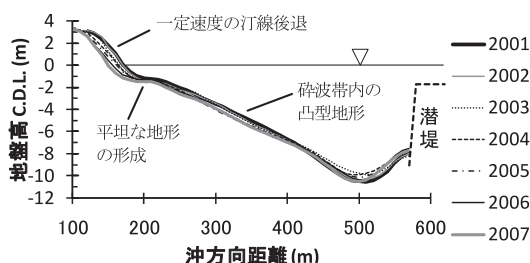


図-1 潜堤背後の養浜断面変化(現地データ)

汀線は約3m/年の一定速度で後退していること、②高波浪が続く冬期だけでなく波浪が静穏な夏期にも汀線の後退を生じていること、③地盤高-1.5m付近に平坦な地形が形成されていること、④地盤高-1.5m~-8mにかけて凸状の断面形状を形成していること、である。

なお、検討対象区画が突堤で囲われていること、22測線の汀線変化量の標準偏差が小さいことから、検討対象区画内では沿岸漂砂が少なく、主に岸沖及び水深方向の漂砂である二次元的な地形変化を生じているといえる。

3. 地形変化要因の推定

(1) 一定速度で変化する外力等

6年間にわたり一定速度で汀線が後退するのであるから、同じように一定速度で変化する外力等が汀線後退の要因であると考えられる。全国港湾波浪観測網(NOWPHAS)の新潟沖の観測地点(水深35m)における2001年から2007年の有義波高は図-2のとおりである。夏に小さく冬に大きい日本海側の特徴的な波高の変化を毎年繰り返していて、波高が年々大きくなるという事実は認められない。その他の条件の変化として、地盤沈下がある。新潟市周辺では、水溶性天然ガスを採取するために地下水のくみ上げが行われ、昭和30年代から急激な地盤沈下を生じた。昭和48年に天然ガス採取のための地下

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

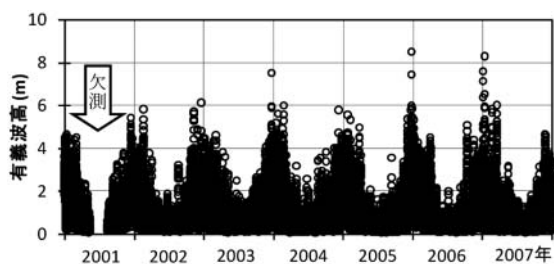


図-2 NOWPHAS新潟沖の波浪観測結果

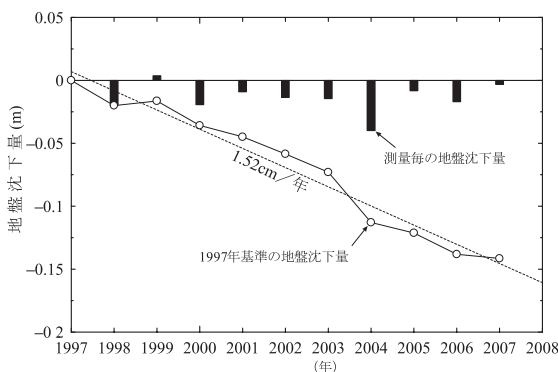


図-3 新潟西海岸付近の地盤沈下量

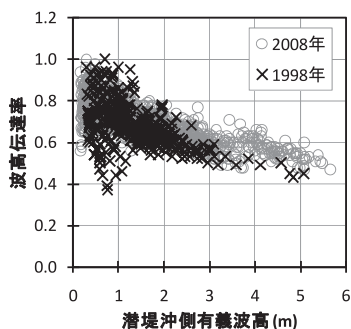


図-4 波高伝達率の経年比較

水のくみ上げが全面禁止されたために昭和50年代からは地盤沈下が穏やかになっている。しかし、図-3に示すように現在も1.5cm/年のほぼ一定速度で地盤沈下が進行している。地盤沈下は相対的な海面上昇と考えることができる。三村ら(1993)が指摘しているように、海面上昇は汀線後退の要因になると考えられる。新潟西海岸の汀線測量において潜堤の天端高も計測しており、それにより潜堤の天端も同じ速度で低くなっていることがわかった。すなわち、地盤沈下は汀線の約500m沖の潜堤設置位置にも及んでいる。潜堤の天端水深が年々大きくなっているため、図-4に示すように高波浪時の波高伝達率は1998年に比べて2008年が大きくなっている。潜堤の天端水深は一定速度で大きくなっているため、波高伝達率も一定速度で増加したと考えられる。

三村ら(1993)は、海面上昇に伴う汀線後退量を式(1)のように提案している。

$$\frac{3}{5}AW_*^{5/3} - \frac{3}{5}A(W_* - \Delta y)^{5/3} - SW_* + B\Delta y + \frac{0.5S^2 - SB}{\tan \beta} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 A は各海岸に固有の定数、 W_* は汀線から移動限界水深までの岸沖方向距離、 Δy は汀線後退量、 S は海面上昇量、 B はバームの高さ、 $\tan \beta$ は前浜勾配である。この式を用いて、海面上昇(地盤沈下)に伴う汀線変化量を求めてみる。 A は栗山ら(2007)が新潟西海岸について検討した0.117、移動限界水深を10mとして W_* は300m、 B は3m、 $\tan \beta$ は0.075として、1年間の地盤沈下量0.015mにIPCC第4次評価報告書統合報告書政策決定者向け要約(2007)に示される観測された海面上昇量0.003m/年を加えた0.018mを海面上昇量 S とする場合の汀線後退量 Δy を求めると0.74mである。前述のとおり現地海岸における汀線後退量は約3m/年であるから、式(1)による汀線後退量は実際の約1/4となった。このような違いを生じた原因として、三村らの式がなだらかな地形を対象としているのに対して新潟西海岸の海浜断面が平坦部を含む複合断面であること、三村らの式では水位上昇による波高の変化はないが新潟西海岸は潜堤背後の波高が大きくなること、などの条件の違いが考えられる。また、新潟西海岸では潜堤背後に窪み地形(以下、「洗掘溝」とする)が形成されており、高波浪時には養浜砂が洗掘溝に落ち込んでいる現象が確認されている。この現象も、新潟西海岸の汀線後退量が三村らの式による算定結果より大きい原因になっていると考えられる。

以上のように、汀線変化と同じように一定速度で変化する外力等は、地盤沈下であると言える。

(2) 養浜断面変化に及ぼす静穏波浪の影響

前述のとおり、新潟西海岸の波高は夏に小さく冬に大きい。新潟西海岸の汀線測量は、6月と10月の年2回実施されているので、6月の測量結果は冬期の高波浪による地形変化を、10月の測量結果は夏期の静穏波浪による地形変化を示していると考えられる。吉田ら(2008)の汀線変化解析によると、一部例外はあるものの、6月測量と10月測量のどちらも汀線の後退を示している。安定な砂浜海岸では、一般的に高波浪時に侵食しても、その後の静穏期に砂浜が回復することで安定性が保たれる。しかし新潟西海岸では、静穏期に砂浜が回復しないことが、汀線が後退し続ける要因であると推定できる。また、静穏期に砂浜が回復しないので、高波浪時に形成された砂州が残りが残ることが、碎波帯内に凸型地形を形成する要因となっている可能性が考えられる。

(3) 旧離岸堤と潜堤の影響

新潟西海岸では、C.D.L.-1.5m程度の高さに平坦な地形が形成される特徴がある。この位置は旧離岸堤（図-5参照）の設置位置である。旧離岸堤とは、1950年代に建設された潜堤が嵩上げされて離岸堤となったものを、1990年代に新たな面的防護工法の養浜実施と同時に上層部が撤去されて、再び水面下の構造物とされたものである。旧離岸堤の残存部分の天端高はおよそC.D.L.-1.5mであり、平坦地形の高さと一致している。また、沖合の潜堤の天端高はC.D.L.-1.7m～-1.8m程度で施工されている。この天端高は平坦地形の高さと概ね一致していることから、平坦地形の形成に潜堤の天端高（伝達波高）が影響していることが連想される。

以上をまとめると、養浜断面変化の要因の推定結果は以下のとおりである。

- 地盤沈下（相対的な海面上昇）による汀線の後退。
- 静穏期に砂浜が回復しないことによる侵食の蓄積。
- 旧離岸堤の残存天端高または潜堤の天端高（伝達波高）による平坦地形の形成。

4. 水理模型実験による地形変化要因の検証

前章に示した地形変化要因の影響を検証するために、移動床水理模型実験を実施した。前述のとおり、現地の養浜断面変化は沿岸漂砂が少ない断面二次元的なものであるため、水理模型実験は二次元実験とした。水理模型実験の内容を以下に示す。

(1) 地盤沈下影響評価実験

新潟西海岸における地盤沈下は、汀線の沖合500m付近の潜堤設置位置にも及んでいる。したがって、地盤沈下は相対的な水位の上昇として扱うことができる。そこで、実験水位を段階的に高くして荒天時波浪を作用させ、地形変化を確認した。事前に模型ひずみ率検定実験を実施し、現地海岸と同様な地形変化を示す条件として、水平が1/30で鉛直が1/20の模型縮尺を採用した。現地養浜砂の中央粒径0.34mmに対し、実験砂の中央粒径は0.11mmである。地盤沈下影響評価実験では、現地の海浜断面を模擬した海浜断面を設置し、まず平均潮位であるC.D.L.+0.17mの潮位で有義波高4.5m、有義波周期9.5sの荒天時波浪を10時間作用させて、実験水路内に安定地形を形成した。次に潮位をC.D.L.+0.31m、C.D.L.+0.45mと0.14mずつ段階的に高くしながら荒天時波浪をそれぞれ10時間ずつ作用させ、地形変化の状況を調べた。

3種類の潮位で荒天時波浪を10時間ずつ作用させた後の海浜断面と、波作用中に計測した有義波高の空間分布は図-5のとおりで、有義波高の数値データは表-1の「旧離岸堤あり」とおりである。表-1の右側2列の「旧離岸堤なし」は図-9の有義波高であり、この内容については

後述する。表-1の左から2列目の距離は現地海岸の測量基準点からの沖向き距離である。「造波板前面」は現地換算水深が約18mの一定水深部で、この地点の有義波高はどのケースでも約4.1mの値を示していることから、造波板から発生している波高はすべてのケースで同じである。ところが、表-1の「旧離岸堤あり」の「潜堤直背後」（図-5の距離が約500m地点）の有義波高を見ると、潮位を0.14m高くすると有義波高が約0.06mずつ大きくなっている。これは潜堤の天端水深を大きくすると、天端水深増加分の約1/2だけ波高が大きくなることを示しており、前出の図-4に示したように地盤沈下によって高波浪時の波高伝達率が大きくなった結果と一致している。しかし、距離が約230mの「平坦部」の有義波高は潮位が異なっても同じである。このことから、水位上昇（地盤沈下）によって潜堤背後の波高が大きくなっても、浅海部に到達する波高は同じであることがわかる。

図-5において養浜断面変化に着目すると、C.D.L.+4m程度の遡上の先端からC.D.L.-1.7m程度の平坦地形の岸端の範囲において、海浜勾配は変わらずに平行移動で汀線が後退している。また、図-6の拡大図に示すように、潮位を高くすると遡上の先端のバームは高い位置に移動している。旧離岸堤付近の平坦地形の沖側端部（横軸の250m付近）は潮位を高くしても位置が変わらないけれども、平坦地形の岸側端部位置は岸側に移動するので、潮

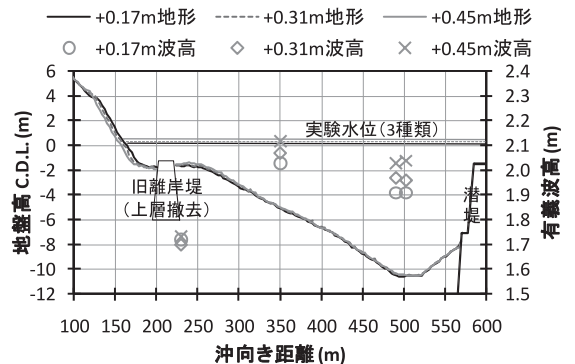


図-5 水位変更による海浜断面と有義波高の変化

表-1 有義波高の数値データ

計測地点	距離(m)	旧離岸堤あり			旧離岸堤なし	
		潜堤あり			潜堤あり	潜堤なし
		+0.17m	+0.31m	+0.45m	+0.17m	+0.17m
造波板前面	937.3	4.08	4.08	4.10	4.07	4.08
	916.9	4.15	4.16	4.18	4.13	4.17
潜堤直背後	502.3	1.91	1.96	2.04	1.92	3.21
	490.0	1.91	1.97	2.03	1.92	3.21
外浜	349.9	2.03	2.07	2.12	2.01	3.70
平坦部	229.9	1.72	1.70	1.73	1.81	2.09

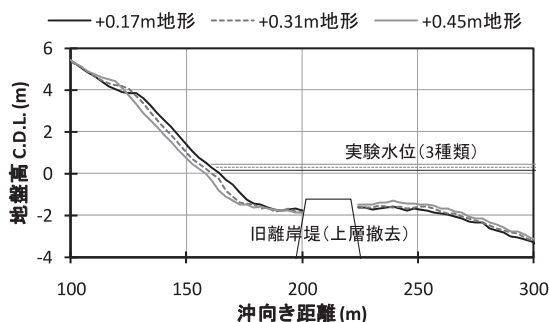


図-6 水位変更による海浜断面変化 (汀線付近拡大図)

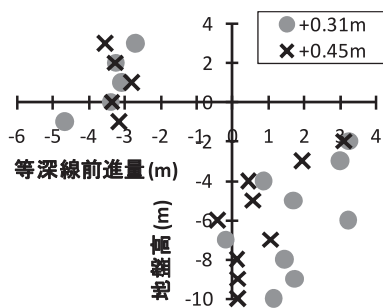


図-7 水位変更による等深線変化量

位を高くすることにより平坦地形は広がっている。このことから、地盤沈下によって平坦地形が徐々に広がったと推察できる。なお、後述するように新潟西海岸では静穏期に汀線が後退しているが、静穏期に砂浜の回復が起これば、平坦地形は形成されないと考えられる。したがって、潜堤を有するすべての海岸で平坦地形が形成されるものではない。

C.D.L.+3mから-10mの1m刻みの等深線の前進量を調べると図-7のとおりである。●印は潮位を+0.17mから+0.31mに変更したときの等深線前進量で、×印は+0.31mから+0.45mに変更した場合である。地盤高±0m以上の変化量が負の一定値を示しているのは海浜勾配が変わらずに汀線が後退したことを示しており、その変化量は2種類の潮位で同じである。これは、一定速度の地盤沈下により汀線も一定速度で後退することを示しており、現地における地形変化の特徴と一致している。

このように、地盤沈下の代わりに水位を段階的に高めた移動床実験により、現地海岸と同様に海浜勾配は変わらずに一定速度で汀線が後退したことから、地盤沈下が汀線後退の要因であると考えられる。

(2) 砂浜回復影響評価実験

汀線付近において継続的な侵食を生じる要因として、静穏期に砂浜が回復しないことが考えられるので、模型実験において静穏期の波浪による海浜断面変化と漂砂量を確認した。結果は図-8のとおりである。静穏期波浪は、

夏期における比較的大きな波高として1.0m (未超過出現率96.1%)で、有義波周期は6.0sとした。凡例に示した「旧離岸堤あり」は旧離岸堤と潜堤の両方がある状態、「旧離岸堤なし」は旧離岸堤なしで潜堤ありの状態、「潜堤なし」は旧離岸堤と潜堤の両方がない状態である。それぞれの構造物配置で現地の海浜断面を模擬した海浜断面を設置し、荒天時波浪を10時間作用させた後に静穏期波浪を10時間作用させた後の断面は図-8の上段で、静穏期波浪10時間の波作用による漂砂量は図-8の下段のとおりである。荒天時波浪を10時間作用させた時点で各構造物配置の海浜断面が異なったものとなっているので、上段の海浜断面図で静穏期波浪の比較は行えない。そこで、海浜断面図は下段の漂砂量図と位置関係の確認に用いた。漂砂量図は右上がりの勾配部分が堆積で、右下がりの勾配部分が侵食である。漂砂量図を見ると、波高と構造物配置によって漂砂量に違いはあるものの、いずれのケースでも汀線より岸側の遡上域から平坦地形の岸端の範囲で侵食、平坦地形の岸端から旧離岸堤の範囲で堆積、旧離岸堤から平坦地形の沖端付近の範囲で侵食、それより沖側で堆積している。すなわち、汀線付近の砂は旧離岸堤付近に移動し、平坦地形の旧離岸堤より沖側の砂は沖側に移動していることから、漂砂方向は沖向きであることがわかる。「旧離岸堤あり」の構造物配置では有義波高1.5m (未超過出現率99.4%)の実験も実施しており、波高1.0mと同じ傾向で漂砂量が約2倍大きい結果であった。これらの結果は、現地海岸において夏期に侵食が進行している観測結果と一致している。

新潟西海岸において静穏期に砂浜が回復していない原因は二つ考えられる。一つは潜堤と養浜を組み合わせた面的防護海浜では静穏期にも砂浜が回復しにくい可能性である。ただし、潜堤なしの実験断面においても砂浜が回復しなかったことから、砂浜の回復に対して潜堤の影

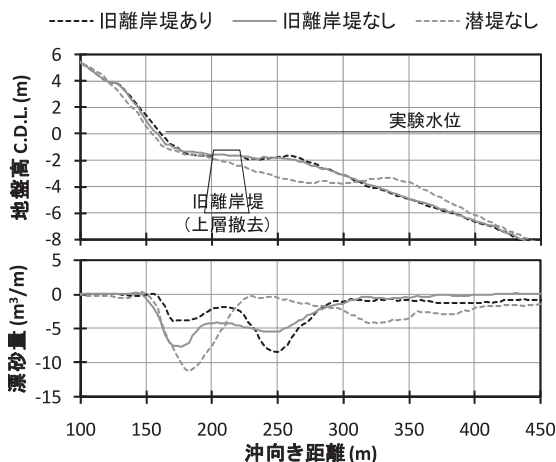


図-8 静穏期波浪 (波高1.0m) による海浜断面変化と漂砂量

響は小さいといえる。もう一つは、日本海側では潮位の変動幅が小さいので、静穏期の漂砂量が少なく、そのために砂浜の回復も起こりにくい可能性である。加藤ら(1981)は潮位が-0.4mから+0.6m、有義波高が1.0mから1.8mの範囲で変動する4日間にわたり、現地海岸に設置した仮設の二次元水路内の地形変化を計測し、上げ潮時には岸向き漂砂を生じ、下げ潮時には沖向き漂砂を生じることを報告している。服部・小松(1980)も現地観測によって同様な成果を得ている。新潟西海岸は潮位変動が平均的に0.5m程度で、夏期の有義波高は1m未満の出現頻度が96%を占めることから、夏期の漂砂量が少ないため、砂浜の回復も起こりにくい可能性がある。

このように、静穏な波浪によって岸向き漂砂が発生しないため、冬期の高波浪による侵食が残存し蓄積されることで、継続的に汀線が後退していると考えられる。

(3) 旧離岸堤・潜堤影響評価実験

前述のとおり、C.D.L.-1.5m付近に平坦地形が形成される要因として旧離岸堤や潜堤の存在が考えられるので、これらの影響について検討する実験を実施した。

旧離岸堤なしの状態での現地の海浜断面を模擬した海浜断面を設置し、平均潮位であるC.D.L.+0.17mの潮位で荒天時波浪を10時間作用させた結果は、図-9の「潜堤あり」のとおりである。この海浜断面を図-5に示した旧離岸堤ありの結果と比較すると、波作用10時間後の両者の地形はほぼ同じであり、どちらも平坦地形が維持されている。したがって、C.D.L.-1.5m程度の平坦地形の形成に旧離岸堤は影響していないといえる。

潜堤の影響を確認するために、図-9に破線で示す潜堤の消波ブロック層を撤去した状態で現地の海浜断面を模擬した海浜断面を設置し、平均潮位であるC.D.L.+0.17mの潮位で荒天時波浪を10時間作用させた結果は、図-9の「潜堤なし」のとおりである。潜堤なしではC.D.L.-1.5m程度の平坦地形が完全に削り取られ、沖向き距離300m以上に堆積している。その結果として、若干の起伏はあるけれども沖向き距離250～350m付近に新たな平坦地形

が形成されており、その高さはおよそC.D.L.-3.5mである。「潜堤なし」の潜堤直背後の有義波高を図-9及び表-1で確認すると3.2mであり、新たな平坦地形の水深とはほぼ一致している。「潜堤あり」の潜堤直背後の有義波高は1.9mでこの条件の平坦地形の地盤高はおよそC.D.L.-1.7mであるので、やはり有義波高と平坦地形の水深がほぼ一致している。すなわち、平坦地形は波高水深比がほぼ1の地点に形成され、その水深は移動限界水深と比べるとかなり小さい。

以上により、旧離岸堤の存在は平坦地形の形成に影響していないこと、平坦地形の形成には潜堤の存在が影響しており、平坦地形は潜堤の伝達波高と同じ水深に形成されること、を確認した。

5. まとめ

新潟西海岸の養浜地形で生じている汀線後退や平坦地形形成の要因を推定し、その要因の影響を二次元移動床水理模型実験で評価した結果は以下のとおりである。

- 一定速度で生じている汀線後退と同様に、一定速度で変化している外力等は地盤沈下である。地盤沈下は相対的な海面上昇と見なすことができ、水位を段階的に高くした移動床実験により、現地海岸と同様に海浜勾配は変わらずに一定速度で汀線が後退したことから、地盤沈下が汀線後退の要因であると考えられる。
- 静穏な波浪によって岸向き漂砂が発生しないため、高波浪が頻発する冬期の侵食が残存し、そのために継続的に汀線が後退していると考えられる。
- 汀線の沖側に平坦地形が形成される要因は潜堤の存在であり、平坦地形は潜堤の伝達波高と同じ水深に形成される。また、新潟西海岸では地盤沈下による相対的な海面上昇によって平坦地形が徐々に広がっている可能性がある。

参考文献

- 加藤一正・田中則男・灘岡和夫(1981)：前浜の二次元的地形変化と潮位・波について，第28回海岸工学講演会論文集，pp.207-211。
- 栗山善昭・山口里実・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。
- 服部昌太郎・小松 登(1980)：現地海浜の岸沖漂砂量に関する研究，第27回海岸工学講演会論文集，pp.187-191。
- 三村信男・幾世橋慎・井上肇子(1993)：砂浜に対する海面上昇の影響評価，海岸工学論文集，第40巻，pp.1046-1050。
- 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。
- IPCC第4次評価報告書統合報告書政策決定者向け要約(2007)：http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/syr_spm.pdf，p.2.，参照2009-05-15

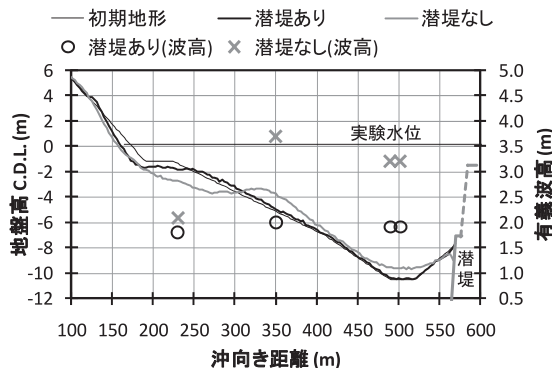


図-9 潜堤なし・ありの海浜断面変化と波高の比較