

清水海岸のL字突堤沖における細砂の移動帯の形成機構

Formative Mechanism of a Belt of Movement of Fine Sand off L-type Groin on Shimizu Coast

宇多高明¹・吉添高兆²・町井 靖³・西谷 誠⁴・芹沢真澄⁵・三波俊郎⁶・石川仁憲⁷

Takaaki UDA, Takayoshi YOSHIKOE, Yasushi MACHII, Makoto NISHITANI
Masumi SERIZAWA, Toshiro SAN-NAMI and Toshinori ISHIKAWA

On the Shimizu coast, artificial headlands and L-type groin were built as a measure against beach erosion. After the construction of the L-type groin, fine sand accumulated on the seabed covered with gravel off L-type groin, causing damages in the fishing ground on a shallow seabed. Seabed sounding and sampling test of bed materials were carried out. The contour-line-change model was applied to the coast to study the mechanism. On this beach, a steep (gentle) slope covered with gravel (fine sand) develops in a zone shallower (deeper) than -4 m, and beach changes take place without strong mixing of bed materials. The change in grain size is implicitly considered as the difference in the equilibrium slope in these areas. Measured phenomena were well explained by the present modeling.

1. はじめに

三保松原砂嘴の外縁に沿って延びる清水海岸では、過去、広範に行われた安倍川での砂利採取の影響により漂砂供給が激減した結果、著しい侵食が安倍川河口から静岡海岸を経て清水海岸へと広がった(宇多, 1997)。このため清水海岸では2基の離岸堤からなるヘッドランド(HL)が計画され、1989～1999年に合計5組のHLが造られた。また羽衣の松の前面海浜では、景観保護のためその正面を避けた北側にL字突堤が造られた。これらの施設の建設とともに毎年養浜が行われ、現況でようやく汀線が維持される状況となっている(宇多ら, 2006)。しかし一方でL字突堤沖では従来砂礫で覆われていた海底面に細砂が堆積して浅海域漁場の劣化を招いたとの報告が漁業者から出され、海岸保全と漁場保全を調和させつつ海岸保全を行う努力が必要とされている。このことから本研究では、まず深浅測量データを分析して海浜変形の実態を明らかにするとともに、新たに底質調査を行い、それらを基礎データとして芹沢ら(2002)による等深線変化モデルを用いて上記現象の解明を進める。

2. 清水海岸の海浜形状と汀線変化

図-1は清水海岸の2006年3月測量の深浅図を示す。測

線は北側から南向きに100m間隔で配置されている。また5組のHL群のうち南端のNo.65にあるのが1号HLである。また北端のNo.32にはL字突堤がある。対象区域の地形特性として、-5m以深の等深線は沿岸方向に滑らかに延びているが、-5m以浅の等深線はHL群の南側では平均海岸線と斜交し、北側ではいずれの場所でも大きく凹んでいる。一方、L字突堤の近傍には深い海底谷が迫っており、非常に急深な海底地形となっている。

深浅測量データをもとにHL建設直前の1989年を基準として汀線変化を調べたのが図-2である。この区域では宇多(1997)に明らかなように、北向きの沿岸漂砂が卓越しているが、まず1, 2号HLの建設後の1992, 1994年の汀線変化に見られるように、HLの下手側では

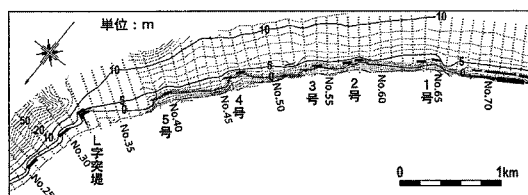


図-1 測線配置と2006年3月測量の深浅図

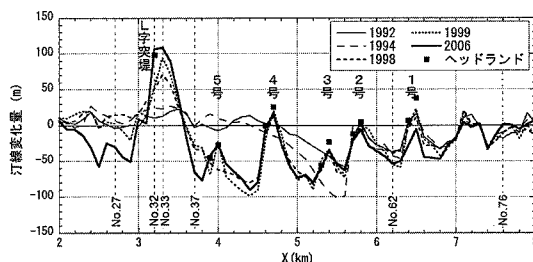
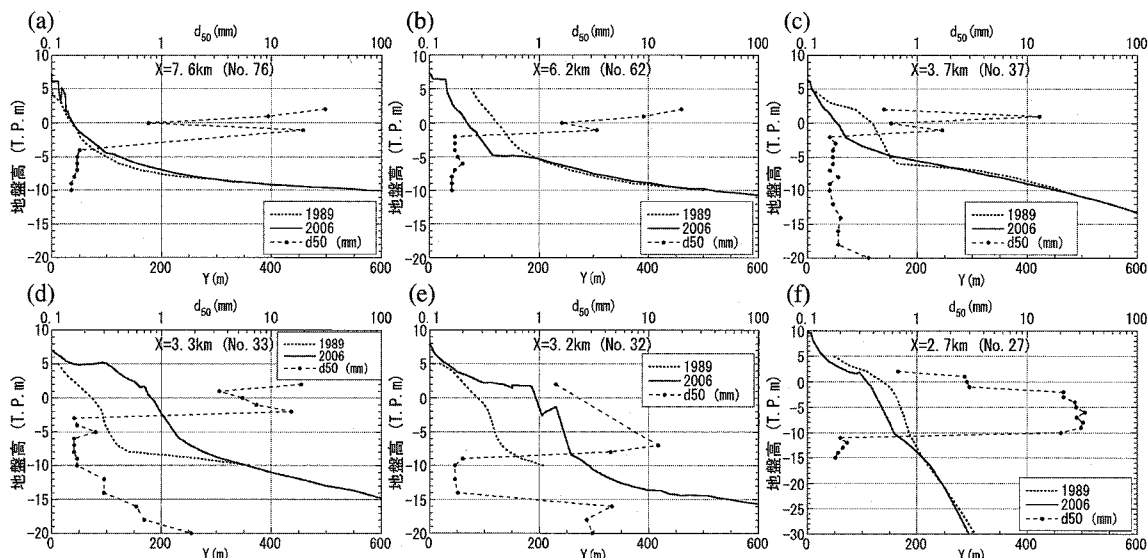


図-2 汀線変化量の沿岸分布 (1989年基準)

- | | | |
|-------|----|--|
| 1 正会員 | 工博 | (財)土木研究センター理事なごさ総合研究室長
兼日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科 |
| 2 | | 静岡県建設部建設管理局企画監 |
| 3 | | 静岡県土木部河川海岸整備室主任 |
| 4 | | 静岡県土木部静岡土木事務所清水支所主幹 |
| 5 正会員 | | 海岸研究室(有) |
| 6 | | 海岸研究室(有) |
| 7 正会員 | 工修 | (財)土木研究センターなごさ総合研究室主任研究員 |

図-3 海浜縦断面形と d_{50} の水深方向分布

汀線が楔状に後退し、最大汀線後退量は2号HLの北側直近で100mに達した。また汀線後退域の沿岸方向の長さは1989～1994年で約1.2kmに及んだ。2号HL下手側での著しい汀線後退に対し、3,4号HLが1994～1995年に2号HLの下手に建設された。これらのHLの建設により、3号HLの背後では部分的に汀線が前進したが、そのすぐ北側での汀線の後退が著しくなった。同時に4号HLの下手では最大約100mに及ぶ汀線の後退が生じた。その後L字突堤の建設が1998年以降に始まったことにより上手側汀線が徐々に前進し、突堤の南側では最大110mに及ぶ汀線の前進が起きた。

以上の汀線変化では、各HLおよびL字突堤上手側の汀線は構造物建設前の1989年と比較していずれも時計回りに回転するという変化を示した。この場合、汀線角の変化量はL字突堤の上手側直近において最大の約26°であった。L字突堤とHL群の建設により、最近では汀線がほぼ安定状態にあるが、L字突堤の下手側では侵食が進み、最大の汀線後退量は約60mとなっている。

3. 海浜縦断面形変化と d_{50} の水深分布

対象区域の地形変化特性を、海浜縦断面形と d_{50} の水深変化から調べるために、図-2の実測汀線変化において特徴的な変化が見られる測線を抽出して海浜縦断面形の変化を調べた。併せて2006年8月に実施した底質調査の結果についても述べる。

対象区域の南端部に位置する測線No.76での測定結果を図-3(a)に示す。この測線は早い時期に侵食を受けており、1989年と2006年の比較でも大きな汀線変化が見られなかった場所である。ここでは鉛直上方に凹な縦

断面形となっており、-4m付近まで約1/10と急に落ち込んだ後緩勾配に変わる。これと対応して前浜は $d_{50}=10\sim30$ mmの礫で覆われるが、-4～-7mでは0.18mm、-9m以深では0.16mmの細砂と水深方向に急激に小さくなる。とくに-5～-8mの1/50勾配の海底面は細砂で覆われているのが特徴である。

1号HLの下手側に位置し、1989～1992年に汀線が大きく後退した測線No.62では、図-3(b)のように、2006年までに-5m以浅で集中的な侵食が起き、海浜断面がきれいに平行移動した状況が見て取れる。一方、-5m以深においては緩やかな堆積も生じているが、そのほとんどは d_{50} が0.16mmの細砂で覆われている。

5号HLの下手側で、5号HLの建設後汀線の後退が生じた測線No.37では、図-3(c)のように侵食前には鉛直上方に凸であったが、侵食とともに凹状の縦断面形へと変化した。顕著な侵食は-4m以浅で起きている。これと対照的に-4～-7mでは堆積が生じており、しかも2006年測定の d_{50} から判断すれば、そこへ堆積した土砂の粒径は $d_{50}=0.16$ mmであり、これより汀線付近に集中して堆積している礫と比較してはるかに粒径の小さな砂が集中的に堆積したことが分かる。

L字突堤の南200mに位置する測線No.33での測定結果を図-3(d)に示す。ここでは1989～2006年に100mもの汀線の前進が生じ、この間海浜縦断面形がほぼ平行移動しつつ前進した。地形変化は他の測線と比較して水深の大きい区域まで起き、-9m以浅で顕著な地形変化が見られる。注目点は、-3m以浅では礫の集中的な堆積が見られるのに対し、-3～-10mでは他の測線と同様 $d_{50}=0.16$ mmの細砂で覆われているものの、それより水深

が増加すると礫が見られることである。これは他の測線では見られなかった特徴であり、この測線の沖合の海底面は粗砂または礫で覆われており、そこに汀線の前進とともに波による地形変化の限界水深付近で細砂が堆積して粗砂または礫で覆われた海底面を覆ったように見える。

L字突堤のすぐ上手側に位置する測線 No. 32 の測定結果を図-3(e)に示す。1989～2006年に汀線が約110m前進したが、その際+2m～-8mの範囲の縦断面形もほぼ平行移動している。この測線では、L字突堤が沿岸漂砂を阻止したため汀線が最も大きく前進した。1989年には沖合の測量範囲がやや狭かったため一部外挿する必要があるが、-8m付近で海底勾配が急勾配から非常に緩やかな勾配へと変化しており、そのまま外挿すると2006年の縦断面形とほぼすり付く。一方、2006年の縦断面形にあっては-8mで縦断面形が折れ、そこから勾配が緩やかになる。ここで d_{50} の分布と2006年の縦断面形を比較すると、 d_{50} は-9m以浅では1.4mm以上、最大12mmと礫が堆積しているのに対し、-9～-14mでは $d_{50}=0.16$ mmの細砂で覆われ、そこから再び礫床に変化している。縦断面形の変化比較から見れば主要な地形変化は-8m付近までで起きているが、その沖の-10m付近まででも堆積が生じている。そしてその部分の d_{50} は0.16mmと細かい。しかし水深が増加して-15m付近になると礫床に変化している。このことは、もともとこの付近の海底面は礫で覆われていたが、そこが最近細砂で覆われるようになったことを強く示唆する。すなわち汀線前進とともに砂礫が大量に堆積して海浜断面は沖向きに平行移動したが、-9m以深の区域には細砂が集中して流れており、そのような細砂の流れの帯が海浜断面の前進によって沖向きに押し出され、結果として沖合の礫で覆われた海底面を覆うことになったと推定される。

L字突堤の北側で突堤建設後汀線が大きく後退した測線 No. 27 の測定結果を図-3(f)に示す。ここでは海底勾配が急であり、汀線から-30mまで1/6の勾配で落ち込んでいる。顕著な地形変化は-10m付近までで起きている。侵食が起きた水深帯は、 d_{50} が20～30mmの大きな礫で覆われているが、-10m以深では海底表面が $d_{50}=0.2$ mmの細砂で覆われており、急勾配の海底であるものの $X=3.2$ km断面と同様な特徴が表れている。

4. 沿岸漂砂量分布

汀線変化図をもとに、対象区域のうち汀線変動が見られない $X=7.3$ km地点を基点として1989～1992年と、1994年までの汀線変化量を下手方向に積分し、1, 2号HL建設後の沿岸漂砂量を推定した。 $X=7.3$ km地点では北向きの沿岸漂砂が生じているが、この量は不明であるため、便宜上この沿岸漂砂量は0と仮定した。沿岸漂砂

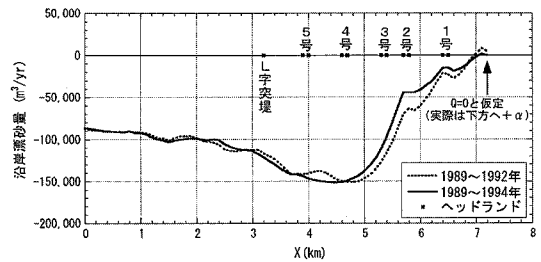


図-4 沿岸漂砂量の沿岸分布の推定(1989年からの平均値)

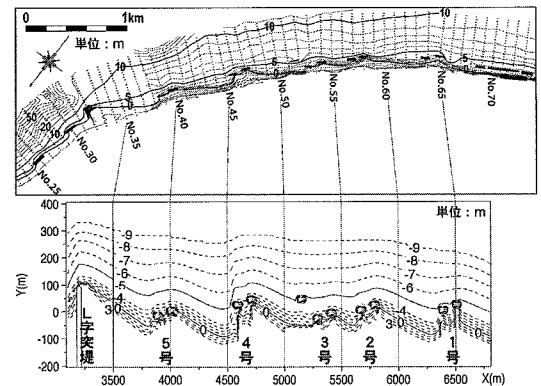


図-5 計算領域

量は、汀線変化量に移動高を乗じ経過年数で割るという手法で求めた。宇多(1997)によれば、波による地形変化の限界水深を h_c としたとき、移動高 h は $h=(1.0\sim1.3)h_c$ で表される。 h_c については宇多(1997)によれば $h_c=7$ mと与えられているので、移動高はほぼ8mと与えられる。この値を用いて計算したのが図-4である。これによれば沿岸漂砂は全域で北向きであり、 $X=4.5\sim4.8$ kmで最大約15万 m^3/yr の沿岸漂砂量となる。 $X=7.3$ km地点での沿岸漂砂量と期間内における養浜量(約10万 m^3)が考慮されていないが、結果的には宇多(1997)が求めた自然状態の値(13万 m^3/yr)とほぼ等しくなった。

5. 海浜変形予測

清水海岸の海浜変形予測においては、汀線付近を覆う礫と沖合の海底面を広く覆う細砂では平衡勾配が異なると考えられるので、それを考慮したモデルが必要となる。またHLの設置以前には一定量の沿岸漂砂が連続的に流れることにより動的平衡状態が保たれており、そのため見かけ上汀線変化が生じなかったと考えられるので、予測計算ではまずこのような動的平衡海浜を再現した。

図-5に示す計算領域において汀線形状を調べると、汀線形状は左回りに緩やかに傾き、汀線への接線の方角は計算対象区域の南端と北端では 20° ずれる。一方、宇多(2006)によれば、計算領域南端にあっては卓越波の

沖波向はS(碎波角 $=17^\circ$)である。そこで宇多ら(2006)と同様に展開座標を用いるものの、波の入射角を沿岸方向に一定とはせず、汀線の方角角のずれを考慮して波の入射角が南端から北端まで線形的に変化する分布形を仮定した。この場合上述のように動的平衡海浜であるためにはHL群建設前の沿岸漂砂フラックスは一定でなければならないので、漂砂フラックスを一定に保つよう入射角の変化と対応させて波高を沿岸方向に低減させた。

予測モデルは芹沢ら(2002)を基本とするが、実態データで明らかにしたように、 -4 m 付近を境としてその岸側では主に砂礫からなる急勾配斜面があり、沖側では細砂からなる緩勾配斜面に分かれることから、このような海底勾配の相違を計算に取り込んだ。これには混合粒径モデルを用いる手法も考えられるが、汀線近傍の礫で構成される砂浜と、沖合の細砂で覆われた区域とでは急激な混合は見られずに変形が生じていることを考慮し、本研究では粒径の相違を汀線近傍と沖合での平衡勾配の相違として陰形式で取り込んだ。

計算条件を表-1に一括して示す。計算は侵食が始まる前の1983年を初期とし、これより2006年まで行った。その際、HL群の設置過程を考慮するため、1990、1994、1998、2006年の4時期ごとにHLの設置基数を増やして計算した。初期等深線形状は、宇多ら(2006)と同様、展開座標(宇多ら、1998)による直線平行等深線で与える。実測縦断面形をもとに $+3\text{ m} \sim -4\text{ m}$ の海底勾配を $1/10$ 、 -4 m より沖合は $1/50$ の緩勾配とした。 -4 m は砂礫を主体とする粗粒材が分布する沖合の限界水深であり、また -4 m から -9 m は平衡勾配の小さい細砂の分布領域である。バーム高は宇多(1997)により $h_R=3\text{ m}$ と与えた。 h_c は宇多(1997)による -7 m を用いるが、前述の海浜縦断面形の比較において -8 m 以深で見られた地形変化も考慮するため、 -8 m 、 -9 m の等深線も移動可能として扱った。この場合、沿岸漂砂量の水深方向分布は、バーム高から -7 m までは宇多・河野(1996)の3次式を用い、それより深い $-8\text{ m} \sim -9\text{ m}$ は -7 m 以浅全体の3%と仮定し直線分布で与えた。3%とした理由は微量と考えたもので一応の仮定値である。

境界条件として、南端からは宇多・河野(1996)の分布に従った沿岸漂砂を流入させるとともに、細粒分は上記の分布をそのまま与えた。その場合の限界水深は $h_c=-7\text{ m}$ とする。この流入量は、自然供給土砂量と1号HLの上手側での養浜量との和に相当する。自然の漂砂量は、1983～1990年にあっては、この期間の上手隣接海岸での実績侵食量 $13\text{ 万 m}^3/\text{yr}$ (宇多、1997)を与え、1990年以降は、試行計算より現況再現性のよい値を見出し $3.5\text{ 万 m}^3/\text{yr}$ とした。また養浜は土砂の湧き出しを与えることで考慮し養浜量は実績より与えた。沿岸漂

表-1 計算条件

計算対象範囲	1号ヘッドランド(HL)～L字突堤: 3.7 km (測点 No. 31～No. 68)
初期地形	侵食前1983年地形を展開座標でモデル化した直線平行等深線(海底勾配: -4 m 以浅 $=1/10$ 、 -4 m 以深 $=1/50$)
予測期間	10年
入射波条件	5%程度出現頻度: $H_0=3\text{ m}$, $T=9\text{ sec}$, 波向S 1号HL: 初期汀線への波の入射角 $\theta_w=17^\circ$ (屈折考慮) 1号HL～L字突堤間: 汀線の方角角の変化(20°)を考慮し、入射角 $\theta_w=17^\circ \sim 37^\circ$ と直線的に変化。 侵食前の自然状態での動的安定状態を満たすように沿岸方向にエネルギーフラックスが一定に保たれるように波高を補正。
潮位条件	M.S.L. $\equiv$ T.P. $+0.0\text{ m}$
h_c と h_R	$h_c=7\text{ m}$ (細砂分: 9 m), $h_R=3\text{ m}$
漂砂量係数	沿岸漂砂量係数 $K_x=0.0059$ 岸沖漂砂量係数 $K_z=0.1 K_x$ 小笹・プランプトン項の係数 $K_2=1.62 K_x$
沿岸・岸沖漂砂の水深分布	$+3 \sim -7\text{ m}$: 宇多・河野(1996)の3次式。 $-8 \sim -9\text{ m}$ の細砂分は直線分布(-7 m 以浅全体の3%)。
平衡勾配	-4 m 以浅(砂礫): $\tan \beta_c=1/10$ -4 m 以浅(細砂): $\tan \beta_c=1/50$
土砂落ち込みの限界勾配	陸上: $1/2$, 水中: $1/2$
計算等深線範囲	$z=3.5 \sim -9.5\text{ m}$
計算メッシュ	沿岸方向 20 m , 鉛直方向 1 m
計算時間間隔	$\Delta t=10\text{ hr}$
境界条件	左端(上手端): 1983～1990年 $Q_m=13 \times 10^4\text{ m}^3/\text{yr}$ (自然供給) 1990年～将来 $Q_m=3.5 \times 10^4\text{ m}^3/\text{yr}$ (自然供給)+養浜 右端(下手端): 漂砂通過境界(沿岸漂砂の沿岸方向変化率 $=0$) 岸沖端: $q_z=0$ (漂砂の流出入なし)
構造物の波高伝達率	HL: $K_t=0.5$ 3号HL下手沖の消波堤: $K_t=0.8$ 3号HL背後～下手汀線の消波工: 固定境界 L字突堤: $K_t=0.0$
数値計算法	陽解法による差分法
波浪計算法	方向分散法(酒井ら, 2003) $S_{\max}=25$

砂量係数は、HL設置前に激しく侵食され始めた1983～1990年の汀線変化をよく再現できる値を見出して使用したが、このとき動的安定維持に必要な土砂供給量は $18\text{ 万 m}^3/\text{yr}$ に相当した。つまり自然状態では上手から $18\text{ 万 m}^3/\text{yr}$ の供給で動的安定状態が維持されていたが、供給土砂量の激減により侵食が進んだと解釈される。また計算ではHL群を段階的に設置するにあたり、HLの離岸距離は測量結果にもとづき1983年の初期汀線を基準とした離岸距離に改めて設置した。HLによる波の遮蔽効果は方向分散法(酒井ら, 2003)で評価した。

図-6は1、2号HLが設置される直前の1990年までの予測結果である。上手側から侵食が進み始めた。図-7は1、2号HLが設置された後の1994年までの予測結果である。1、2号HLの設置によって北向きの沿岸漂砂が阻止された結果、HLの下手側の等深線が後退し、同

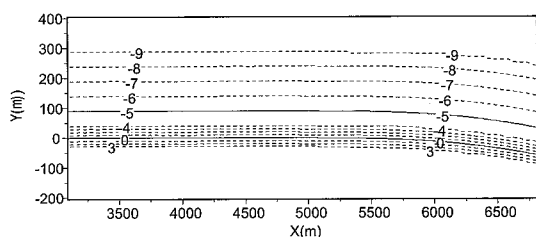


図-6 再現1 (1990年)

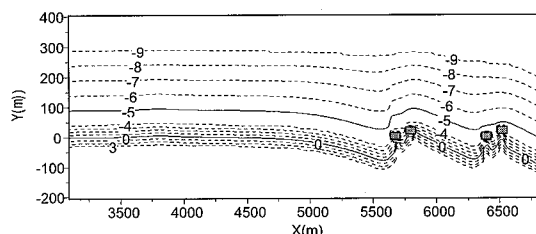


図-7 再現2 (1994年)

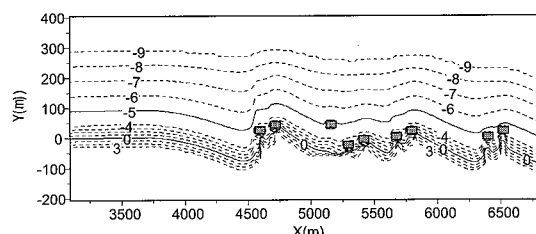


図-8 再現3 (1998年: L字突堤設置直前)

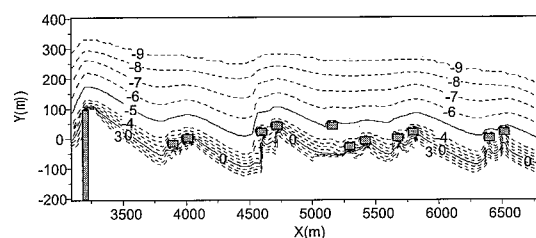


図-9 再現4 (2006年: 現在)

時に離岸堤群の沖合を沿岸漂砂の一部が回り込むため沖合の等深線が蛇行している。さらに図-8はL字突堤建設直前の1998年までの予測結果である。HL群の設置が進むとともに下手側の侵食域も北側へと広がりを示した。同様にして2006年までの予測結果が図-9である。北端にはL字突堤が建設され、その南側で汀線が大きく前進している。

図-10は1983年を基準とした2006年までの実測汀線変化と計算結果との比較である。HLごとに多少の変動はあるものの、全体的に計算結果は実測汀線の特徴をよく再現している。

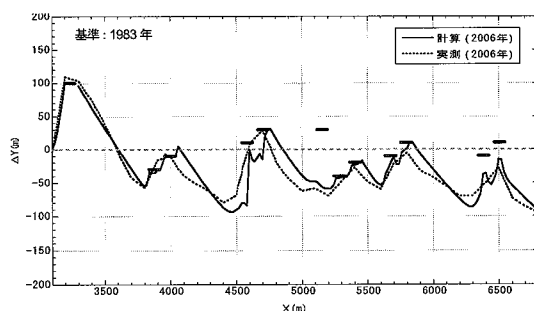


図-10 汀線変化の計算結果と実測の比較

6. ま と め

図-9に示した2006年までの予測海浜変形においてL字突堤付近の等深線形状を調べると、L字突堤の建設に伴って突堤南側の汀線が100mも前進したが、汀線の前進は-7m以浅の海浜縦断面形全体の前進に繋がったことから、その沖の-7~-9mの細砂からなる緩勾配の海底斜面も前進することになった。この緩い海底斜面上では南側から緩い平衡勾配に見合った細砂が連続的に流れてきている。この細砂の流れが、この付近にあった礫が露出した海底面を覆い、これが浅海域漁場の喪失の一因になったと推定される。ただこの細砂はL字突堤の先端を越え蛇行しながら北側海岸へと流れ出ている。したがってL字突堤の建設直後は堆積が著しかったが、現況では平衡状態に達しており、いま以上の堆積は起こらないと推定できる。したがってこの付近の漁場復活を試みる場合には、北向きの細砂の流れを阻害しないことが求められる。もし細砂の流れを阻害するならば、細砂で覆われた区域を一層広げる危険性があるからである。

参 考 文 献

- 宇多高明・河野茂樹(1996): 海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発, 土木学会論文集, No. 539/ II-35, pp. 121-139.
- 宇多高明(1997): 「日本の海岸侵食」, 山海堂, 442p.
- 宇多高明・住谷勉夫・矢澤 肇・大谷靖郎・厚坂祐次(1998): 展開座標を用いた汀線変化モデルによる親沢鼻砂嘴の地形変化予測, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 541-545.
- 宇多高明・石井 隆・杉山喜一郎・西谷 誠・荻原 智・芹沢真澄・石川仁憲(2006): 動的平衡海浜に建設されたヘッドランド群の漂砂制御効果の定量的評価, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 661-665.
- 酒井和也・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之(2003): 波の遮蔽構造物を有する海岸における3次元静的安定海浜形状の簡易予測モデル, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 496-500.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之(2002): 海浜縦断面の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 496-500.