

霞ヶ浦における急勾配養浜時の湖浜変形と 等深線変化モデルによる再現

CHANGES OF NOURISHED STEEP BEACH IN LAKE KASUMIGAURA AND
SIMULATION OF BEACH CHANGES BY CONTOUR LINE CHANGE MODEL

宇多高明¹・小菅 晋²・林 義之³・神田康嗣⁴・渡邊貴裕⁵

Takaaki UDA, Susumu KOSUGE, Yoshiyuki HAYASHI,
Yasutsugu KANDA and Takahiro WATANABE

¹正会員 工博 国土交通省土木研究所河川部長(〒305-0804 茨城県つくば市旭 1)

²正会員 工博 東海大学海洋学部海洋土木工学科教授(〒424-8610 静岡県清水市折戸 3-20-1)

³国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦工事事務所調査課計画係長(〒311-2424 茨城県行方郡潮来町潮来 3510)

⁴(有)水域ネットワーク(〒134-0088 東京都江戸川区西葛西 6-16-7 第2 白子ビル 303)

⁵東海大学大学院海洋学研究科海洋工学専攻 (〒424-8610 静岡県清水市折戸 3-20-1)

Beach nourishment was carried out at Ukishima area in Lake Kasumigaura in order to recover sandy beaches. Artificial beach slope was set to be steep as much as 1/2. After the nourishment, longshore and offshore sand movement occurred due to the wind wave action. Beach profile changes were measured and sea bottom sampling were conducted. Measured beach changes were compared with the results of the numerical simulation by using the contour line change model. Both results agreed well.

Key Words : Beach nourishment, Lake Kasumigaura, beach profile, contour line change model

1. まえがき

霞ヶ浦においては治水対策の一環として湖を取り囲む湖岸堤が建設された。これによって治水機能は高まったものの、一方ではコンクリート製の表のり面およびその基礎に設置されたブランケットに加えて鋼矢板が打たれたために水際線付近の自然環境条件が悪化している。これと歩調を合わせるようにして湖内の水質の低下が起きている。そこで環境条件の改良のために湖岸堤の表のり面に覆土を行い、その上部に植生の繁茂を許すことによって自然環境を復元する試みが行われている。また、湖浜侵食により砂浜が消失した区域では養浜による砂浜環境の復元も試みられるようになった。霞ヶ浦南東部に位置する浮島地区は最後まで残されていた湖水浴場であったが、ここでも湖浜が消失した。このことから当地区において霞ヶ浦の浚渫土砂を用いた養浜が計画され、計画は 1997 年から実施に移された。養浜は両側を突堤で挟まれた区域で行われており、2001 年 2 月現在で 19 区画の工事が完了している。

ここでは養浜に伴う湖浜変形について、とくに 1/2 と急勾配で養浜された湖浜が沖向き漂砂と沿岸漂砂によって安定化する機構について現地実測をもとに考察する。

2. 浮島地区における養浜工と気象・波浪特性の概要

霞ヶ浦（西浦）は面積 220km²を有し、わが国第 2 の規模を有する湖である。平均水深は約 4m、最大水深は 7m である。湖南東部には図-1 に示すように浮島砂嘴がある。この付近では北西方向にフェッチが長く、また N 方向の風が卓越するために南東方向への沿岸漂砂が卓越し、これによって湖岸線の急変部に砂嘴が発達した。図-2 は浮島地区の拡大図である。現況では砂嘴周辺に湖岸堤ができており、砂浜は砂嘴先端部のごく一部に残されているのみである。現況ではコンクリート製の湖岸堤によって取り囲まれており、好ましい湖岸環境条件ではない。また強風時には堤防のり先からの越波が著しい。こうしたことから既存の湖岸堤の前面に浚渫土による養浜工の計画がなされ、



図-1 霞ヶ浦における浮島地先の位置

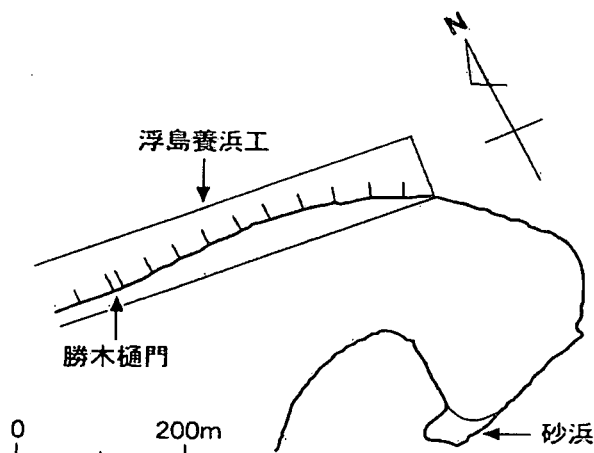


図-2 浮島地先における養浜工の位置

1997年から工事が始まった。

養浜工は図-3に示すように、勝木樋門東側の延長240mの区域において、間隔40m、長さ30m、幅2mで、板柵の間に土嚢を詰めた突堤を伸ばしその間で養浜が行われた。養浜区間は6区間(A～F)であり、これらのうち勝木樋門に隣接する3区間では1997年3月までに養浜が行われ、それより東側の3区間では1998年3月末に工事が完成した。養浜工と同時に図-3に示す30測線で測量が行われた。各区間を10m間隔で4等分し、各区間に5測線を配置した。測線の岸沖方向長さは約30mである。

図-1に示す霞ヶ浦湖心の気象観測所での気象観測から

1997年8月21日から1998年11月まではほぼ1年間の風向を測量期間別にまとめ、後述する測量時期に合わせて区分した時期ごとの風向特性を調べると、1997年8月21日～11月21日ではNまたはNE方向が卓越している。11月22日～1998年2月23日でもN方向が卓越しているが、冬季のためにWNW方向にもやや卓越風向がある。1998年2月24日～8月11日ではNE方向に著しい卓越が見られる。

全体を通じて浮島地区ではNまたはNE方向からの風向が卓越している。養浜区間のうちA～D区間の護岸線は直線であるが、それより砂嘴先端へと近づいた区間E、Fでは護岸線の方向が時計回りの方向にわずかに傾いている。そこでA～D区間の護岸線を基準に考えると、護岸線に立てた法線に対してN方向は反時計回りに 16° の入射、NE方向は時計回りに 29° の入射となる。入射角自体はNよりもNE方向が大きい。しかし浮島地区におけるフェッチは図-1に示したように北側に長いので、全体としてはN方向の風波の作用が著しく、したがって東向きに沿岸漂砂が卓越する。

霞ヶ浦の湖心観測所では気象観測とともに波浪観測が行われ、波浪の推算式が求められている²⁾。この推算式をもとに湖心での日最大風速と吹送距離(N=6.0km, NE=3.15km)より波浪推算を行った。さらに観測区間ごとにNとNE方向について出現波浪を大きい順に並べ、上位1/3の平均から平均有義波高を求めた。また、周期は選択された波高に対応する周期を平均して平均周期とした。表-1には推算結果を示す。表中のnは上位1/3の実数である。これによれば、N、NEとも平均有義波高は0.3m程度であるが、1998年2月24日～1998年8月11日ではN方向で0.53mの高波高が出現している。

表-1 各方向別の波浪推算結果

期 間	N		NE	
	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)
1997年8月21日	0.30	2.5	0.30	2.3
～1997年11月21日	(n=7)		(n=5)	
1997年11月22日	0.36	2.7	0.33	2.4
～1998年2月23日	(n=7)		(n=1)	
1998年2月24日	0.53	3.1	0.31	2.3
～1998年8月11日	(n=3)		(n=13)	

3. 養浜区間の湖浜地形変化

(1) 深浅図の比較

図-4には区間Cの深浅図を示す。区間A、B、Cは1997年3月までに養浜が行われた場所であり、その後1998年3月までにD、E、Fでも養浜が行われた。図-3によれば区間C、Fはそれぞれの養浜時に最も東側に位置していることから、一連区間の端部という意味で同一条件を有している。そこで代表的に区間CとFを取り上げて検討してみる。

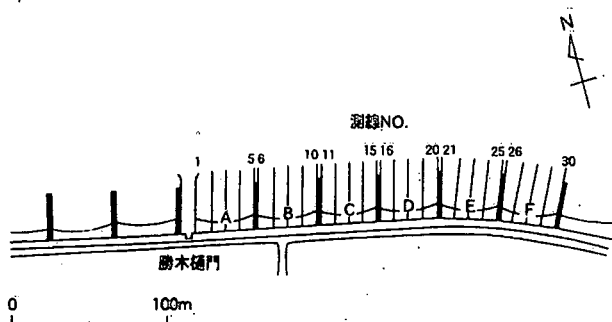


図-3 養浜工の詳細図

図-4 は区間 C の 1998 年 8 月 12 日の測量結果である。霞ヶ浦における平均汀線は Y.P.1.1m にあり、測量範囲の両端は長さ 30m の木製突堤によって区切られている。図-4 によるとほぼ 0.8m～1.5m の等深線は平均汀線とほぼ平行であって、この間沿岸漂砂移動が著しいことが分かる。平均汀線は全体にやや凹状であって、突堤に近接すると汀線が前進傾向にある。汀線形状は中心線を境に左右非対称であり、東（右）側半分ではなだらかなである。沖合のほぼ 0.8m から 0.4m では汀線付近と比較して緩やかな勾配となるが、0.4m より沖合では再び勾配がやや急になる。

図-5 には区間 F の深浅図を示す。この区間でも平均汀線は全体に凹状で、中心線より東（右）側では直線的であるが、西側では曲率大きい。区間 C の場合もこれと同じ特

徴が見られたが、これらの点は各区間の湖浜の中央線に対し反時計回りの方向（図では左側）からの入射波が卓越していることを意味している。区間 F では 0.9m～1.5m の等深線は平均汀線とほぼ平行であり、この範囲では汀線と一体的な地形変化が生じていることが分かる。陸上部では東端部で地盤高が急激に低下している。図-3 に示したように区間 F は養浜区間の東端に位置し、突堤と既設の護岸とが直交しているため、これらの隅角部で波の集中による越波が激しく、これによって岸側に運び込まれた水が護岸と突堤の接点におかれた土嚢を一部破壊して流出し、その際養浜砂の一部が流出したことが上記の理由である。この区間においても沖合の 0.6m 以深では再び勾配が急になる。

(2) 湖浜縦断面形の比較

図-6～図-11 は区間 C の測線 No.11～No.15 の湖浜縦断面形の経時変化である。図-6 に示す測線 No.11 は最も西側に位置する測線である。初期勾配が約 1/2 と急勾配で養浜されたあと、波浪の作用によって急速に緩勾配化した。その場合 0.5m 付近には不動点があり、そこを接点として地形変化が起き、0.5m 以深では初期に急激に冲向き漂砂が生じて緩勾配となったが、その後も時間経過とともに緩勾配化が継続している。沖合での堆積と汀線付近での侵食が対をなして生じていることから、この間の地形変化の大部分は冲向き漂砂によって生じたことが分かる。しかし詳細を見ると、例えば 1997 年 8 月 21 日から 11 月 22 日までの変化に見られるように、0.5m 以深ではほとんど変化が見られないにもかかわらず汀線付近では侵食が生じている。このことは単なる冲向き漂砂だけではなく、東向きの沿岸漂砂による地形変化も同時に生じたことを表している。図-7 に示す測線 No.12 でも No.11 とよく似た変形が起きており、0.5m を節点としてそれ以浅では侵食が、以深では堆積が起きているが、No.11 と比較して沖合の堆積域の勾配が全体に急になっている。

宇多 3 は、現地海岸（湖浜）における底質中央粒径の水深方向分布を調べ、それにより d_{50} が汀線付近で漂砂が活発な場所では粒径が粗いが、 d_{50} は水深方向に減少し、波による地形変化の限界水深付近（ h_c ）からは水深によらずほぼ一定の細粒となることを明らかにした。このことから

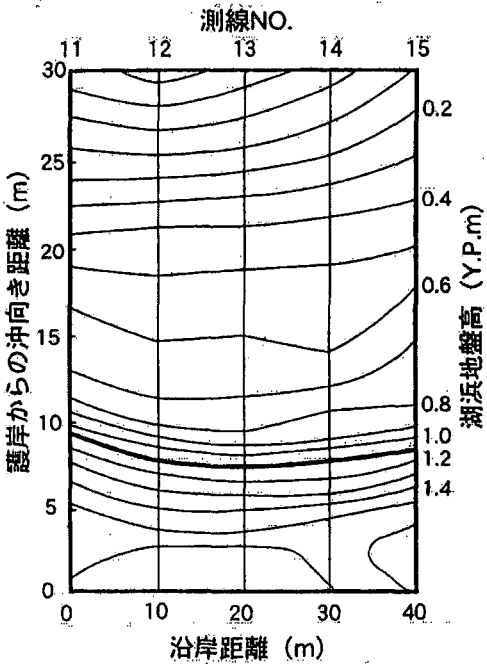


図-4 区間 C の深浅図(1998 年 8 月 12 日測量)

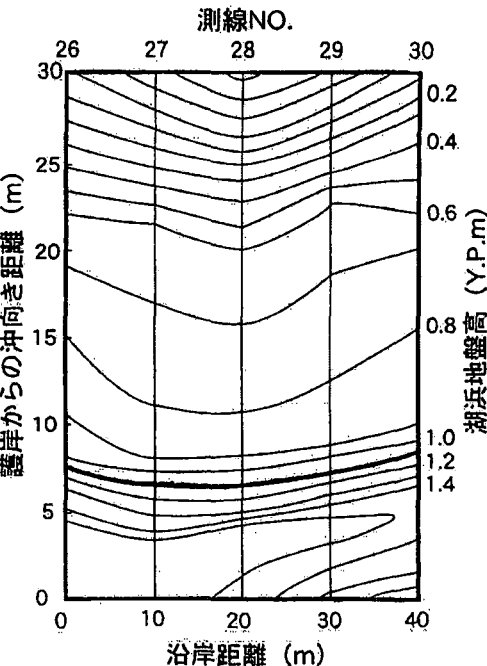


図-5 区間 F の深浅図(1998 年 8 月 12 日測量)

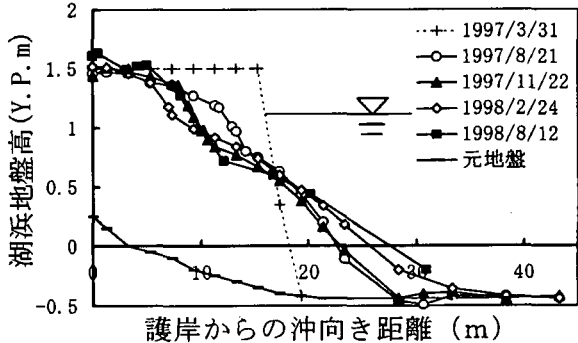


図-6 湖浜縦断面形の経時変化(区間 C, 測線 No.11)

d_{50} が水深方向にほぼ一定となる限界の水深より h_c が推定できる。本研究でも同様な意味から測線 No.12 上において水深方向に底質採取を行い、 d_{50} の水深分布を求めた。結果が図-8 であるが、 d_{50} は汀線付近で最大の 0.85mm を示し、水深方向に急速に減少し、Y.P.0.5m 付近ではほぼ一定の 0.35mm となる。この水深は図-7 に示した湖浜縦断面形において、汀線と一体的な地形変化を示す範囲の沖側限界に等しい。このことから、この水深が h_c に等しいこと、本研究においても他の海岸や湖浜で観察されたのと同じ結果が得られたことが分かる。湖浜縦断面形においては、Y.P.0.5m 以深で砂が堆積しているが、これは初期に設定された湖浜勾配が 1/2 と急であったために、中央粒径約 0.35mm の細砂が沖向きに流出し堆積したものと考えられる。また細砂が沖へと移動したために汀線付近では相対的に粗な粒径が残されたと考えられる。

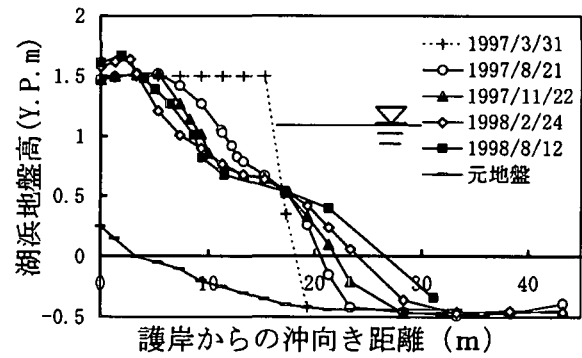


図-7 湖浜縦断面形の経時変化(区間 C, 測線 No.12)

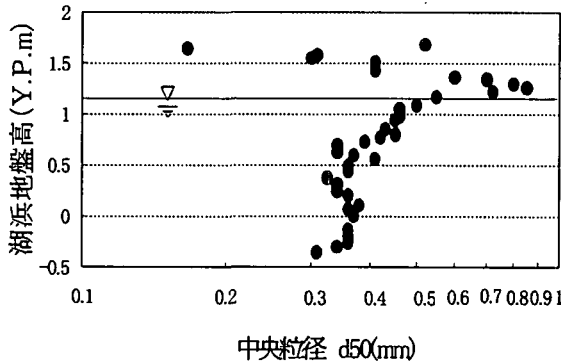


図-8 湖浜材料の中央粒径の水深方向分布

図-9 に示す No.13 の縦断面形では、No.12 と同様縦断面形変化の節点は 0.6m 付近にあり、0.6m 以深では時間経過とともに勾配が次第に緩やかになっている。一方、0.6m 以浅ではプロファイルの平行移動が見られる。図-10 に示す No.14 では、0.5m 付近に縦断面形変化の節点があるのは同一であるが、ここより沖合では短時間に大量の土砂が 1998 年 8 月 12 日の縦断面形とほぼ同様となるまで堆積し、その後の時間変化は小さい。また 1997 年 11 月 22 日までに 0.7m 以浅では著しく凸な縦断面形となっており、それより沖合の形状とは大きく異なる。このような縦断面形の特徴は、図-9 に見られた特徴をさらに強調したものになっている。図-11 に示す No.15 でも沖合での堆積が急速に起き、

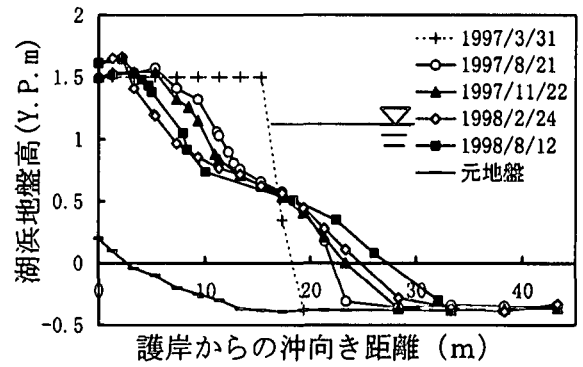


図-9 湖浜縦断面形の経時変化(区間 C, 測線 No.13)

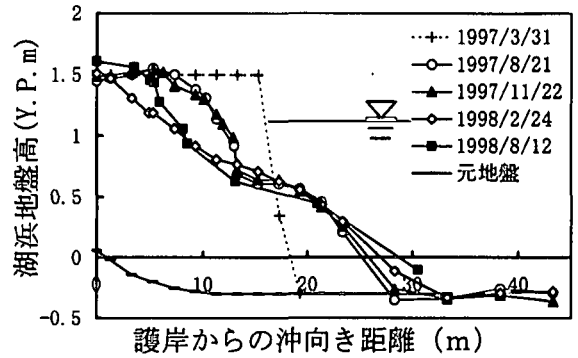


図-10 湖浜縦断面形の経時変化(区間 C, 測線 No.14)

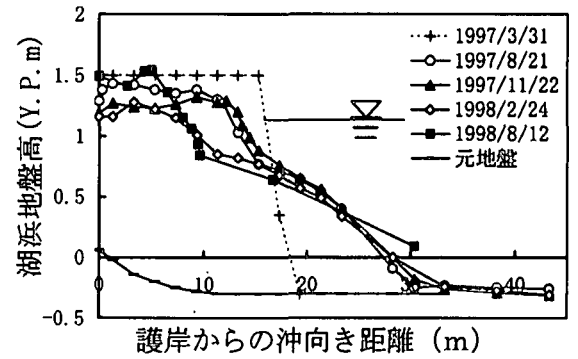


図-11 湖浜縦断面形の経時変化(区間 C, 測線 No.15)

1998 年 8 月 12 日の縦断面形に近い状態にまで達している。

以上のように東側の測線ほど沖合形状が急速に安定化した点は、全体に初期勾配が 1/2 と急であったために沖向きに土砂が移動したものの、東向きの沿岸漂砂によって土砂が運ばれ堆積した場所では十分な土砂供給を受けたため安定形状に達するのが速かったことを意味している。これと同様な結果は、田中ら⁴⁾の行った揖斐川での養浜でも報告されている。

(3) 侵食・堆積断面積と等深線位置の経時的変化

湖浜縦断面形より湖浜断面積の変化を算出し、経時的変化を調べた。湖浜断面積の計算においては、例えば図-7 を参照すると、初期の 1/2 勾配斜面に対して Y.P.0.5m 付近に節点があり、それより岸側では主として侵食が、沖では堆積が起きているので、それぞれについて初期からの断面積変化量を計算した。この場合、1998 年 8 月 12 日の縦断面形は

沖合で初期の縦断形と重なるまで測定が行われていないので、各測線上の最も沖合の測点と、その岸側の点を結んだ線を延長して初期の縦断形との交点を定め、この交点を積分の沖合限界とした。

図-12には侵食断面積の経時変化を示す。これによれば1997年8月21日までに各断面とも約4.5m²の侵食が起きていたが、その後も侵食面積は単調に増加している。このことは、湖浜縦断形は十分に安定形状に達していないこと、また各測線での侵食量は、ばらつきはあるもののほぼ同量である。同様にして堆積断面積の変化を示したのが図-13である。堆積断面積は区間東端のNo.15で最も大きく、中央から西側のNo.12,13で小さい。各断面内で純粋に沖向き漂砂でのみ土砂が移動したのであれば、侵食断面積は図-12に示したようにほぼ一定であるから、堆積断面積もまた一定になるはずである。それにもかかわらず東西で堆積断面積に違いが出たのは、全体として東向きの沿岸漂砂によって土砂が運ばれ、突堤により移動が阻止されたNo.15では堆積量が大きかったことによる。またこの区間ではNE方向からの入射波条件では一時的に西向きの沿岸漂砂移動も生じるので、西端のNo.11ではNo.12,13より堆積量が大きくなったと考えられる。

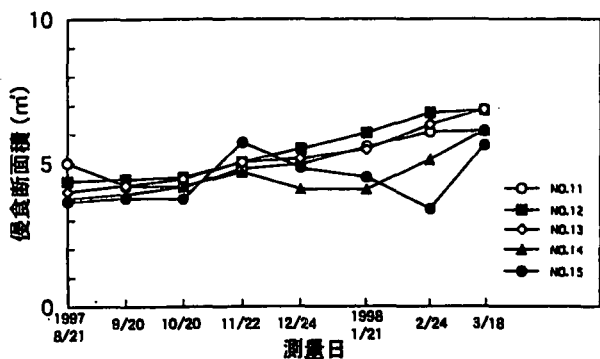


図-12 各測線における侵食断面積の経時変化

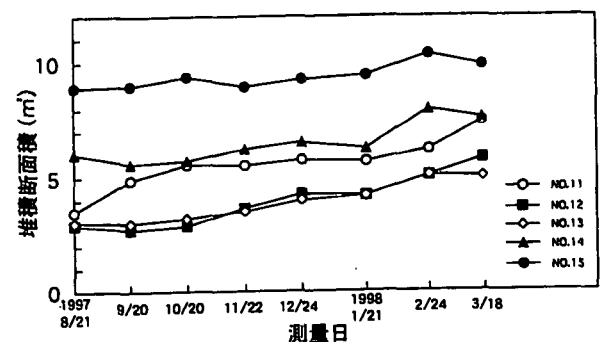


図-13 各測線における堆積断面積の経時変化

一連の縦断形変化によれば、Y.P.0.5mにある節点を境にそれ以浅では主に侵食が、以深では堆積が起きており、これに応じて例えばY.P.1.1mと縦断形の交点は後退、0.0mと縦断形の交点は前進している。そこで護岸線からこれらの高さに相当する等高線までの沖向き距離を読みとり、図-14に示したY.P.0mの等高線の変動は小さく単

調増加傾向にある。しかも5測線の変化では等高線までの沖向き距離の増加分はほとんど同一である。このことはY.P.0mの等高線が沿岸方向にほぼ平行移動しつつ前進していることを意味する。一方1.1mの等高線は変動を持ちつつ全体に後退傾向を示す。これらの等高線が互いに相反した変動を示しており、それらが一定状態に達していない点は、現在もお養浜砂の流出が継続していることを示している。

図-15には、沖合のY.P.0m位置での湖底勾配の時間的変化を示す。各測線での沖合の湖底勾配は時間経過とともに約1/20の一定勾配へと収束している。このことは、1/2と急勾配に養浜された湖浜は、波浪の作用で主として中央粒径約0.35mmの細砂分を中心として細粒部分が沿岸方向に移動しつつ沖方向へと移動し、各断面内で最終的に約1/16(図-15でNo.15を除く平均値)の勾配になって安定したことを意味している。しかも沖合に落ち込んだ土砂は各断面内から運ばれただけではなく、沿岸漂砂によって西側湖浜からも運ばれてきたことから、沖合地形が安定化するのに要する時間は東端部ほど速いという特徴がある。

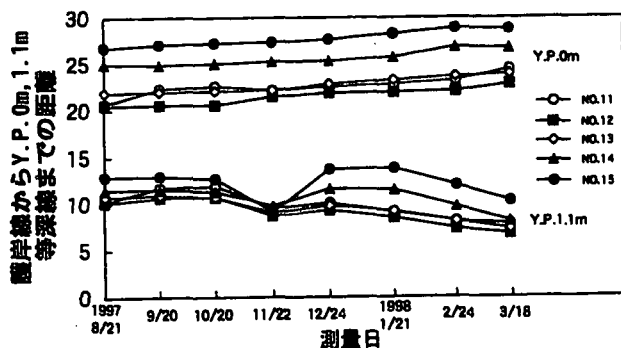


図-14 護岸からY.P.0m,1.1mの等深線までの沖向き距離の変化

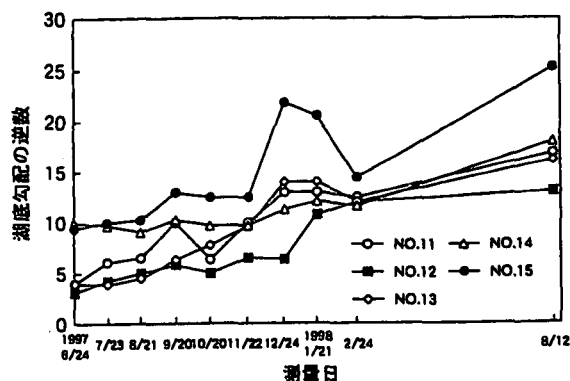


図-15 Y.P.0m付近の湖底勾配の時間的変化

4. 等深線変化モデルによる再現計算

初期に約1/2と急勾配での養浜工では、養浜土砂は沿岸漂砂によって移動しつつ沖向きにも移動・堆積したことが明らかになった。また、底質中央粒径の水深方向分布調査によれば、Y.P.0.5m以深での堆積土砂の中央粒径は約

査によれば、Y.P.0.5m 以深での堆積土砂の中央粒径は約 0.35mm と一定であり、さらに Y.P.0m 付近の湖底勾配は時間経過とともに約 1/16 の一定値に近づくことが分かった。

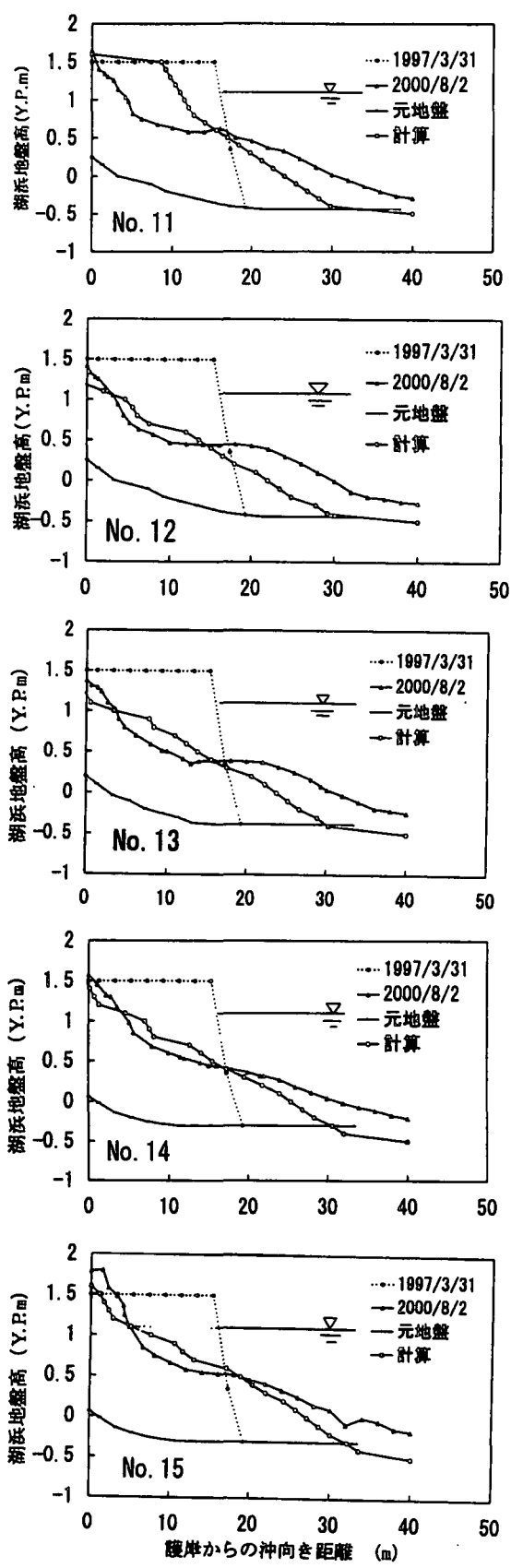


図-16 実測・予測プロファイルの比較

そこでこのような地形変化の予測が可能な等深線変化モデル⁵⁾による再現計算を行った。両端を不透過突堤で挟まれた 40m 区間を計算領域とし、碎波波高を 0.36m、波の入射方向を 16° とし、初期勾配 1/2 の一様海浜を設定して数値計算を行った。この場合、 Δx は 10m、波による地形変化の限界水深は $h_c=0.83m$ 、バーム高は 0.36m、等深線の鉛直方向の分割間隔は 0.1m、計算時間間隔は 150s、陸域および沖合での限界勾配はそれぞれ 10°、4° とした。

図-17 には施工直後の 1997 年 3 月 31 日の形状(初期形状)と 1219 日経過後の 2000 年 8 月 2 日における、測線 No. 11~15 における実測・予測プロファイルをまとめて示す。これによれば、沿岸漂砂と冲向き漂砂による地形変化はかなりよく再現されているが、冲向き漂砂について計算はやや過小評価している。汀線付近のプロファイルについては、西端の No. 11 では侵食量が小さいが、その他の場所では適合度が高い。この理由として、この計算では一方向からの波浪を設定したが、実際にはこの地区では NE 方向からの入射に伴う西向きの沿岸漂砂も生じ、それが考慮されていない分汀線付近での侵食量が減少し、これが沖合での堆積量の減少に繋がったと考えられる。

5. あとがき

霞ヶ浦浮島地区での浚渫土を用いた養浜に伴う湖浜変形について追跡調査と等深線変化モデルによる追算を行い、実測値に近い結果を得ることができた。今後、波の入射方向の周期的変化を取り入れるなどして予測精度を高めることなどが課題である。

参考文献

- 1) 宇多高明・小菅 晋・岡村和男・本田哲也・木内秀規 (1996) : 湖岸堤への覆土工による湖岸の環境改善と覆土の安定性, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp.831-835.
- 2) 宇多高明・西島照毅 (1998) : 風波の作用下における湖岸植生の繁茂限界と湖内の漂砂, 地形工学セミナー「水辺環境の保全と地形学」第 5 章, pp.112-147.
- 3) 宇多高明・小菅 晋・芹沢真澄・三波俊郎・古池 鋼 (1997) : d_{50} の水深分布から波による地形変化の限界水深を推定する方法, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 521-525.
- 4) 田中慎一郎・宇多高明・山内 博・瀬古真一・細野貴司・裴義光 (1996) : 掛斐川河口部における養浜実験-冲向き漂砂と沿岸漂砂による地形変化の分離-, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp.606-610.
- 5) 宇多高明・加藤憲一・見附敬三・山形 宙・赤松直博 (2000) : 突堤の陸側端を沿岸漂砂が通過する場合の海浜変形予測モデル-現地実測に基づく等深線変化モデルの拡張-, 海洋開発論文集, 第 16 巻, pp.589-594.