

# 霞ヶ浦浮島地区における 湖浜再生に関する検討

## RESTORATION OF SANDY BEACH ON LAKESHORE IN LAKE KASUMIGAURA

宇多高明<sup>1</sup>・木暮陽一<sup>2</sup>・平野一彦<sup>3</sup>・大内香織<sup>4</sup>・三波俊郎<sup>5</sup>・熊田貴之<sup>6</sup>  
Takaaki UDA, Yo-ichi KOGURE, Kazuhiko HIRANO, Kaori OHUCHI,  
Toshiro SAN-NAMI and Takayuki KUMADA

<sup>1</sup>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  
(〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4タカラビル)

<sup>2</sup> 国土交通省霞ヶ浦河川事務所所長 (〒311-2424 茨城県潮来市潮来3510)

<sup>3</sup> 国土交通省霞ヶ浦河川事務所調査課長 (〒311-2424 茨城県潮来市潮来3510)

<sup>4</sup> 国土交通省霞ヶ浦河川事務所調査課 (〒311-2424 茨城県潮来市潮来3510)

<sup>5</sup> (有) 海岸研究室 (〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22ローヤル若葉301)

<sup>6</sup>正会員 博(工) (株) 水圏科学コンサルタント (〒145-0064 東京都大田区上池台1-14-1明伸ビル)

Numerical simulation using the contour line change model was carried out to restore the sandy beach on the lakeshore in Ukishima area in Lake Kasumigaura. Past aerial photographs were compared to investigate the long-term shoreline changes of the Wadamisaki sand spit formed in the southeast part of the lake. The predominant wave direction of wind waves was determined from the shoreline changes in Ukishima area. Given the wave height predicted using the SMB method and predominant wave direction, the optimum arrangement of groins was determined using the contour line change model considering the effect of grain size changes.

**Key Words :** Lakeshore, beach changes, aerial photographs, Lake Kasumigaura

### 1. はじめに

霞ヶ浦(西浦)は、面積172km<sup>2</sup>、平均水深4mの水域を持つわが国第二の規模の湖である。霞ヶ浦にあっても従来の治水・利水に加え、自然の湖岸帯の再生が大きなテーマとなっており、景観の保全・利用にも配慮した湖岸植生・砂浜の回復が求められている。本研究で対象とする浮島地区にはかつて砂浜が存在し、水泳場として利用されていた。浮島地区では、1962年当時護岸や道路などの構造物もほとんどなく、背後の松林から汀線へと緩やかな勾配を持った砂浜が続いていた。砂浜幅も10m程度はあり、湖浜利用も盛んであつて、海と比べて静穏なため安全な水泳場として賑わいを示していた。しかし1970年代には汀線付近に護岸や道路が造られ湖浜も消失していった。また水質悪化に伴って湖浜の水泳場としての賑わいも消えた。その後1997年には突堤群が造られ養浜が実施されたが、1960年代のような湖浜の回復には至らず、現在養浜材はほぼ全て流出し突堤群も破損しており養浜材を留めておく効果はなくなっている。こうした

状況を受けて、本研究では、**図-1**に示す浮島地区を対象として安定な湖浜づくりについて検討した。まず空中写真や深淺図などの実態データを分析し、その上で粒径変化を考慮した等深線変化モデル<sup>1)</sup>を用いて安定な湖浜形状を予測した。

### 2. 湖岸線の長期的変化と卓越波の入射角

#### (1) 湖岸線の長期的変化

浮島地区における過去の湖浜変形の実態を調べるために、1962~2003年に撮影された6時期の空中写真をもとに地形変化を調べた。まず、**図-1**にAで示す和田岬周辺の1962年、1985年および2003年の空中写真を**図-2**に示す。1962年では湖岸線は構造物がほとんどない自然湖浜からなっていた。砂嘴には砂嘴の形成過程で残された湾曲した浜堤列が何列も認められる。浜堤列の北側は現況汀線と大きく斜交しており、もともとあつた土地が侵食によって後退してきたことを示し、複合砂嘴として和田岬の砂嘴が形成された当時の姿を残していた。また当時和

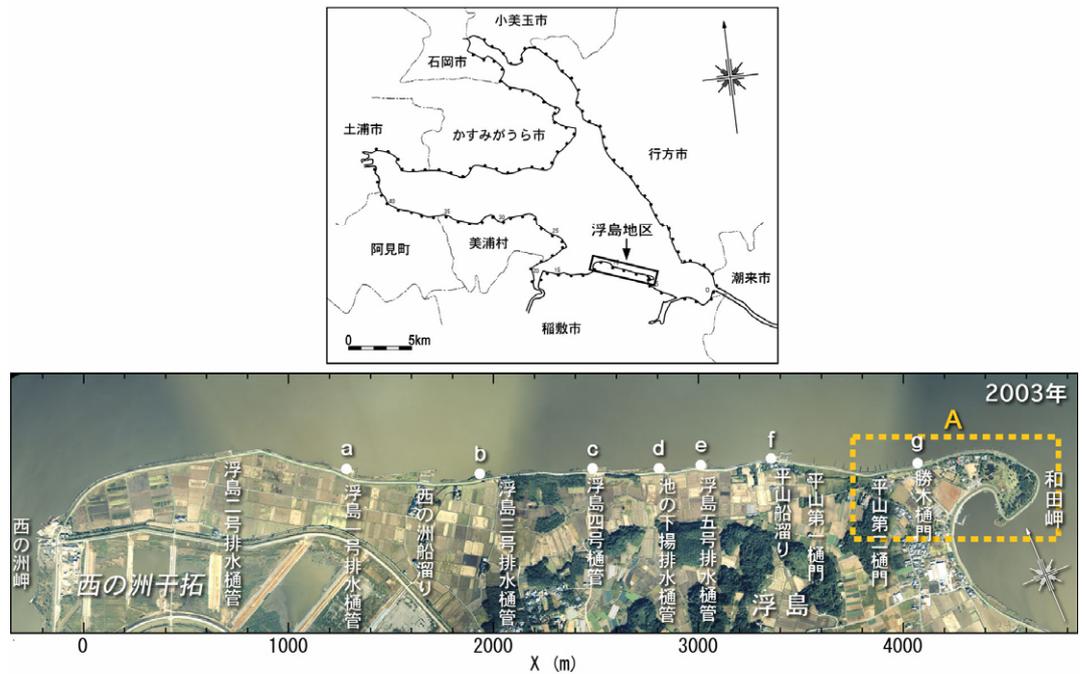


図 - 1 検討対象域

湖岸堤は当時の汀線に沿って造られたため湖浜の大部分が湖岸堤に覆われた。1985年には既にこの区域は全て湖岸堤によって囲まれた。湖岸堤の前面には前浜がほとんど残されていないが、和田岬東端のすぐ南側には半円形の砂浜が一部残されていた。

2003年では勝木樋門の西側に11基、東側に9基の突堤群が設置されている。勝木樋門の両側では1997年に突堤の建設後養浜が行われた。この当時の湖浜の大部分は消失したが、勝木樋門の両側には一部安定した砂浜が残されている。また1985年当時和田岬の東端にあった細長い砂州はほとんど消失した。砂嘴先端の尖りの面積が増加したことから、そこにあった砂は砂嘴の先端へと移動したと考えられる。

## (2) 卓越波の入射角

浮島地区における卓越波向を調べるために、2003年撮影の空中写真において樋管・船溜りへの漂砂流入防止のために設置された矢板またはコンクリート防波堤の西側に形成された堆砂域の安定汀線に法線を引き、その方向角を調べた。これらの施設の先端水深は大きく、沿岸漂砂をほぼ阻止しているため、この方向はほぼ各地点の卓越波向を与える。結果を護岸線に立てた法線の方角の分布と併せて図-3に示す。

汀線に立てた法線の方角はa(浮島一号排水樋管)付近ではほぼ $N20^{\circ}E$ で、そこから和田岬方向へと徐々に反時計回りに回転してg(勝木樋門)では $N5^{\circ}E$ となり、同一地点の湖岸線への法線方向( $N10^{\circ}E$ )より $5^{\circ}$ 反時計回りに回転した向きとなる。この入射方向では、和田岬に近接する区域のほとんどで護岸法線に対し反時計回りの方向からの入射となり、強い東向きの沿岸漂砂を発生させる。また上記方向角のデータを回帰直線に当てはめると図中の破線となる。直線を外挿すれば前浜のない和田岬

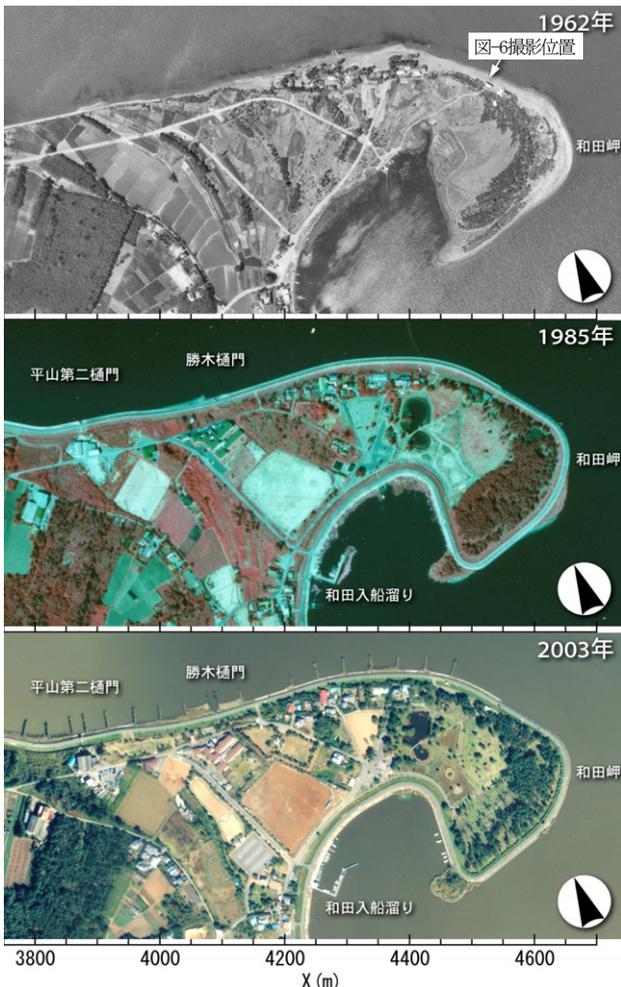


図 - 2 和田岬周辺の空中写真

田岬東端での砂浜幅は最大で40mは存在した。砂嘴は東向きの沿岸漂砂が絶えず堆積することによりほぼ動的安定状態にあったと考えられる。

その後1970年代初頭から湖岸堤の建設が始められた。

付近での卓越波向の推定が可能であり、卓越波向は勝木樋門では $N2^{\circ} E$ 、和田岬においては $N2^{\circ} W$ となる。

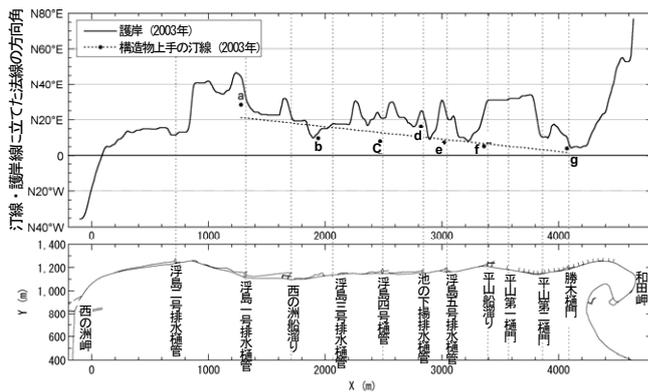


図-3 汀線および護岸法線に立てた垂線の方向角

### 3. 深浅図の判読

図-4は2002年3月測量の浮島地区の深浅図である。水深はY.P.m基準 ( $Y.P. \pm 0m = T.P. -0.84m$ ) である。浮島砂嘴先端部の汀線は大きく屈曲し、その先端には砂が堆積して鳥の嘴のような尖りがある。砂嘴沖の湖底地形に注目すると、砂嘴の汀線とやや斜行しつつ $-0.4m$ から $-3.0m$ の間に勾配が $1/5$ と急な湖底斜面が走っており、ちょうど砂嘴の外縁を縁取っている。これと対照的に、この急斜面の陸側には $-0.2m$ から $-0.4m$ の緩やかな勾配の平坦面が存在している。砂嘴先端の地形は東向きに沿って沿岸漂砂が堆積してできたものであるが、その際現況汀線に沿って沿岸漂砂が運ばれたのではなく、図-5の模式図に示すように変形前の汀線は現況汀線と大きく交差しており<sup>3)</sup>、このようにして砂嘴が変形する際、当時の、湖面下の波による地形変化の限界水深 ( $h_c$ ) より深い場所には急斜面が、また $h_c$ 付近には侵食平坦面が残されたためこのような地形となったと考えられる。

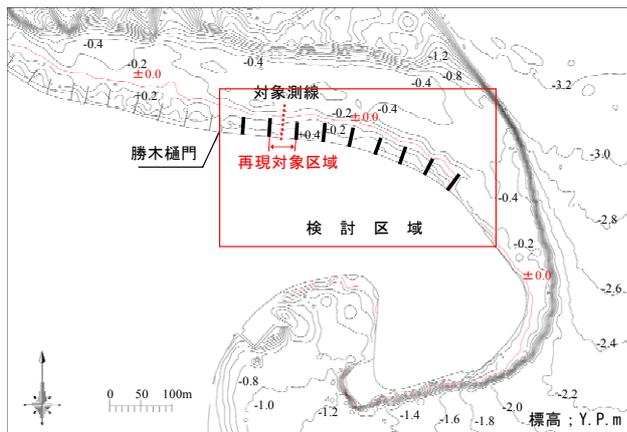


図-4 浮島地区の深浅図

図-4には、1995年に勝木樋門の東側に設置された9基の突堤群 (太い実線) の位置も示す。東端の突堤までは突堤沖の約 $-0.2m$ の等深線が汀線と平行に伸びているが、この突堤を境に $-0.2m$ の等深線が大きく湾入し、湖岸線

へと大きく接近している。またその沖には広い平坦面がある。このことはこの突堤が南東方向へ向かう沿岸漂砂を阻止し、突堤の南東側では侵食平坦面が形成されたことを意味する。本研究で湖浜再生を検討する区域は図-4に示すように、西端を勝木樋門、東端を既設突堤から東に80mまでの区間とする。なお、検討区域の北側に不規則に並んだ深みは砂利採取のための湖底掘削によってできた穴である。

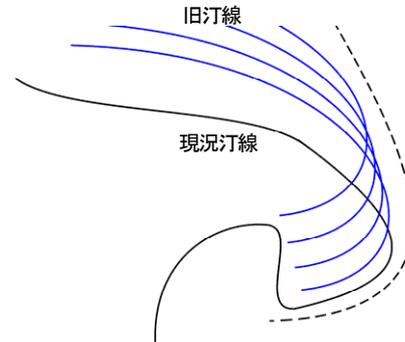


図-5 砂嘴の発達と湖面下の急勾配斜面の関係

### 4. 安定な湖浜づくりの基本的考え方

湖浜再生に際してはいくつかの基本原則を立てた。まず、対象域の勝木樋門から和田岬の間には、1950年代には図-6に示すように砂浜が存在し水泳場として利用されていたことから、ここでも水泳場として利用可能な湖浜 (砂浜) の再生を目指した。まず、湖浜利用や景観への配慮から、可能な限り連続した砂浜とすることが重要である。図-6から判断すれば、背後の松林から汀線まで緩やかな砂浜が $10m$ 程度の幅で続いていたと推定される。そこで護岸前面の前浜幅約 $10m$ の確保を目指す。また、養浜材の流出防止施設については、利用者の眺望を遮らずまた遊泳の障害とならないよう配慮する。

突堤間の汀線はその上手側では前進、下手側では後退し、突堤間隔が広がるとともに汀線の前退・後退量が大きくなる。したがって突堤間で最も汀線が後退すると予想される場所において目標浜幅が確保されるように突堤間隔を決めなければならない。ここでは湖浜利用や景観に配慮し可能な限り連続した湖浜を創出するものとし、突堤間隔は目標浜幅 $10m$ を確保しつつ、突堤の先端水深は $h_c$ 以深に設定し、主波向および汀線安定角を考慮して可能な限り突堤間隔を広くするように設定する。

一方、対象区域の現地踏査によると、過去に造られた突堤についていくつかの問題点が指摘された。まず砂の流出防止を図る上で、突堤法線は主波向と直交させることが経済的であるが、既設突堤は波向とは無関係に護岸線と直交する方向に延ばされおり、このため相対的に突堤長が短くなって突堤の先端を回り込む漂砂の流出が起きていた。また既設突堤の先端水深は $Y.P.+0.3m \sim -0.1m$ にあり、半数は $Y.P.+0.2m$ よりも浅く、沿岸漂砂の流出

防止を図る上で長さが不足していた。さらに、既設突堤の天端高は+1.6m（平均水面上0.5m）にあったが、湖岸堤の遡上痕から判断すれば対象域の遡上高は+1.6m程度あるので、養浜材の流出防止を図る上で突堤天端高は、灌漑期（Y.P.+1.3m）と非灌漑期（Y.P.+1.1m）の水位差も考慮してこれより0.2mは高める必要がある。

過去の養浜では浚渫土が用いられた。浚渫土砂は細砂が主成分となっている。一方、現況の浮島地区湖岸の構成砂は、現地調査によれば粗砂・礫を含む砂で構成され浚渫土砂より粒径が大きい。したがって安定な砂浜を創出するには、現地砂浜と同等以上の中央粒径を持った養浜材を用いる必要がある。



図 - 6 勝木樋門～和田岬の水泳場（1950年代）

## 5. 湖浜再生案の比較

### (1) モデルの検証

まず勝木樋門東側区域での湖浜変形データを用いてモデルの検証を行った。宇多ら<sup>4)</sup>は、この区域において1997年実施の養浜後の湖浜変形を調べた。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の突堤群が造られ、その間で1/2勾配で養浜が行われた。図-7は40m間隔で設置された突堤群のうち、図-4に示す区域の突堤間中央を通る測線の縦断形変化である。また図-8は同じ測線に沿って湖浜材料を採取して調べた中央粒径の水深分布である。この湖浜にあっては東向きの沿岸漂砂による地形変化も起きたものの、大部分の変化は沖向きの漂砂による地形変化であり、この当時の $h_c$ （Y.P. 0.4m）から汀線付近が大きく侵食され、 $h_c$ 以深へと土砂が落ち込んでいる。沖合の湖底勾配は投入後1年5ヶ月でほぼ1/20勾配へと近づいた。このような土砂輸送が生じた原因は、養浜土砂の粒径が小さく、安定な勾配になろうとして沖向きに砂が移動したことによる。

宇多ら<sup>4)</sup>は、当時の等深線変化モデルをこの湖浜変形に適用し、沿岸漂砂による地形変化の再現には成功したが、従来の等深線変化モデルでは粒径毎の平衡勾配が考慮されていなかったため、粒径に応じた岸沖方向の縦断形変化は再現できなかった。さらに熊田ら<sup>5)</sup>は、粒径に応じた平衡勾配の概念を導入した縦断形予測モデルを本対象地へ適用した。この結果岸沖漂砂に伴う粒径分級や、

分級に伴う勾配変化をある程度まで再現したが、前浜付近の勾配の再現は十分な精度ではなかった。前浜付近の勾配は、安定性が高く歩留まりの高い養浜材を選定する上で重要な意味を持つ。そこで、本研究でも熊田ら<sup>5)</sup>のモデルを用いるものの、前浜付近の勾配の再現性を高めるために、粒径と勾配の組み合わせをもう一組増やして再現計算を行った。

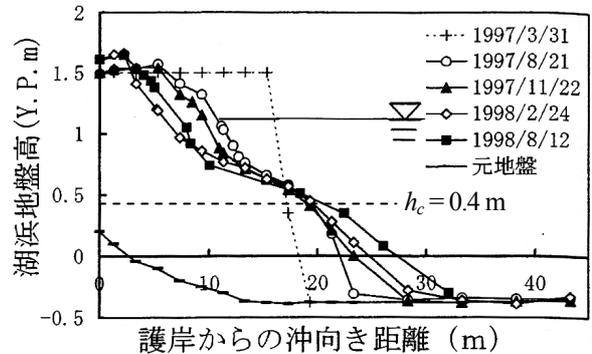


図 - 7 中央測線の縦断形変化

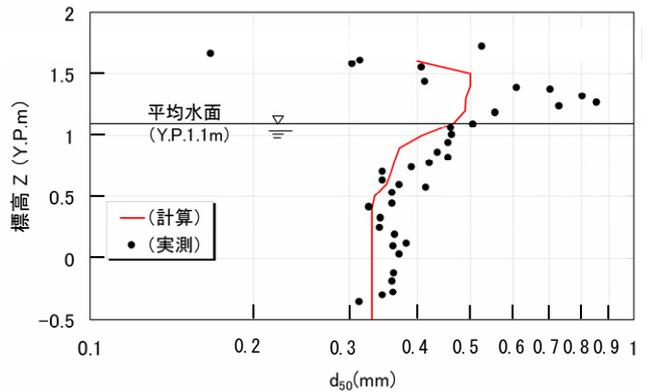


図 - 8 中央粒径の水深分布

再現計算にあつては、養浜形状は図-9の縦断形に示すように、汀線付近の勾配を1/2とし、Y.P. -0.4m以深で原湖底面と交差する形状とした。図-9の縦断形は養浜後3年が経過し勾配が安定し平衡勾配に達したと見られることから、この図をもとに勾配がほぼ一定の水深帯に区分し、得られた勾配を平衡勾配 ( $\tan\beta_c$ ) とした。また、各水深帯の粒径の平均値を図-8から読み取って、各平衡勾配に対する粒径として与えた。この結果、Y.P. 1.46m～0.7mでは平衡勾配が1/6（粒径0.5mm）、0.7m～0.5mでは1/20（0.37mm）、0.5m～0.4mでは1/50（0.33mm）となり、0.4m以深では土砂落ち込みによって1/20の緩斜面が形成されていた。養浜時の粒径データは存在しないため、上記のように分布した粒径を混合して、それぞれの含有率を1/3とし、初期粒径データとした。本計算では、沖向きの砂移動のみを再現対象としているため波は直角入射とし、波高は0.4mとした。この波高は湖心観測所での観測データから推算したものであり、1978～2004年の観測結果より、代表風速として27年間の日最大風速の方位別平均値を求め、それと吹送距離より波浪推算を行い、

全方位の中で最も高い有義波高（浮島地区）を採用した。またバーム高（ $h_R$ ）は0.36m（Y. P. 1.46 m）， $h_c$ は0.7 m（Y. P. 0.4 m），交換層厚は0.01 mとした。交換層の岸沖方向の幅は、まずKraus<sup>9)</sup>を参考に碎波波高の2.7%として交換層の深さを定め、それを平均前浜勾配で除して求めた。さらに陸上・水中での安息勾配は測量結果よりそれぞれ1/6，1/20とした。

予測された縦断形の変化を図-9に示す。計算で与えたいずれの粒径の砂であっても初期勾配より平衡勾配がはるかに小さいため岸側が侵食され、侵食土砂が沖合に堆積するという変化が起き、実測値を良く再現できた。また予測された粒径の水深分布を図-8に示すが、水深が深くなるにしたがい粒径が細くなる実測の粒径分布がかなりよく計算されている。このように、混合粒径砂を用いた養浜時の縦断変形の再現が可能となったことから、次節ではこのモデルを用い浮島地区を対象とした養浜計画の検討を行った。養浜に際しては現象の理解を容易にするため、できるだけ単純な条件を設定することとし、混合砂の代わりに単一粒径を用い、その場合の粒径（平衡勾配）を変化させて安定海浜形状の相違を調べた。

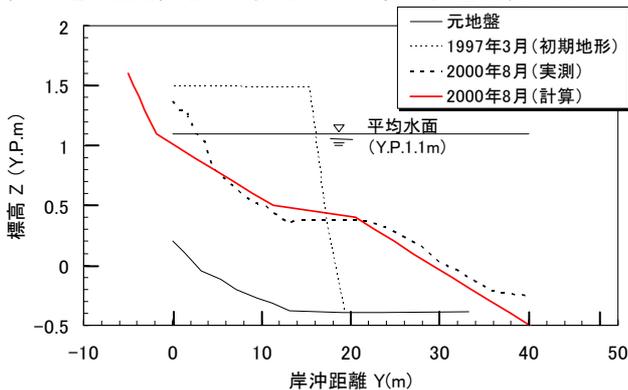


図-9 縦断形の再現計算結果

## (2) 予測計算の条件

初期地形については、2003年の深浅測量結果をもとに図-10に示す複断面を考えた。汀線付近は養浜時の勾配として1/6とした。養浜材としては図-8を参考に表-1に示すように粒径0.5mm（平衡勾配1/6）と0.37mm（同1/20）の2種類とした。計算範囲は、勝木樋門から東側の延長480m区間を対象とし、図-11に示すようにまずその両端にのみ突堤を配置する施設案（ケース1）を考えた。しかしこの配置では安定汀線を造れないことが計算から明らかとなったため、対象区間に新たに2基の突堤を追加する案（ケース2,3），さらには突堤の先端に横堤を付けた逆L形突堤案（ケース4）を検討対象とした。

通常の突堤ではその東側で汀線後退が著しくなるので、これを防ぐために突堤先端を下手側に曲げ、波の遮蔽域を形成することで安定な前浜を形成させようとしたのが逆L形突堤である。なお図の施設規模は予測計算で妥当な結果が得られた場合の施設規模である。

入射波浪は、再現ケース同様、浮島地区における有義波高の推算値を用いた。波向は2方向性が強いが、現地

形を再現する外力場（波向N2°W）（図-3参照）を採用した。また右端境界は、境界上の沿岸漂砂量が一つ左の点と同じ値を持つという条件として設定した。上述の3タイプの施設のもとで、養浜材の粒径の差異がもたらす湖浜形状の相違を調べるために、表-1に示す4ケースの計算を行った。また計算条件をまとめて表-2に示す。

表-1 計算ケース

ケース	突堤基数と種類	養浜粒径mm (平衡勾配)
1	2基	0.5 (1/6)
2	4基	0.5 (1/6)
3	4基	0.37 (1/20)
4	逆L字形4基	0.5 (1/6)

表-2 計算条件

初期養浜地形	平行等深線（護岸線と平行）、勾配1/6、初期浜幅30m
養浜砂の粒径（平衡勾配）	0.5mm (tanβ=1/6) 0.37mm (tanβ=1/20)
交換層の幅	B=0.01m
入射波・水位条件	波高 H=0.4m、入射波向 (N2°W)、水位Y.P.1.1m
$h_c$ と $h_R$	$h_c=0.7m$ , $h_R=0.36m$
境界条件	岸沖端境界：通過漂砂量0 西端側方境界：通過漂砂量0 東端側方境界：漂砂通過自由（固定境界）
漂砂量係数	・漂砂量係数内の A=0.1 ・小箱・ランプトン項の係数 ζ=1.62 ・岸沖・沿岸漂砂量係数比 γ=0.2
漂砂量水深分布	宇多・河野 <sup>2)</sup> の3次式
土砂落ち込みの限界勾配	陸上：1/2，水中：1/3
計算範囲	沿岸方向：670m、鉛直方向：z = +0.5~2.0m
計算メッシュ	沿岸方向Δx=10m、鉛直方向ΔZ=0.1m
計算時間間隔Δt	Δt=1hr
計算ステップ数	100,000steps
数値計算法	陽解法による差分法
その他	波浪場の計算法：方向分散法

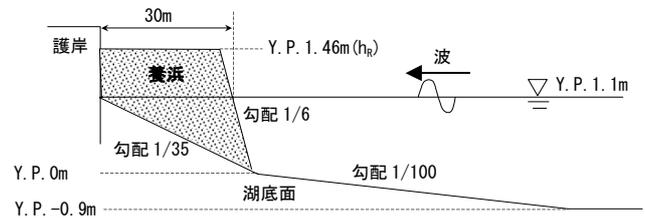


図-10 養浜時縦断形

## (3) 予測計算の結果

図-11(a)はケース1の予測計算結果である。西側突堤の上手では砂が堆積し、下手では侵食が起こる。波がN2°W方向から入射するため、汀線はこの波向に対して直角となって安定する。この結果西部では、東部の突堤による砂捕捉効果が西突堤まで及ばず、広範囲で侵食され護岸が露出する。計算では東側突堤の長さを漂砂が完全に遮断できる長さまでを想定しているが、実際には先

端水深1m程度の突堤では砂の多くは突堤東側へと流出することになる。結局、対象区域の両端にのみ突堤を配置する手法では、沿岸距離が長くなって安定した砂浜の形成ができないことが分かる。

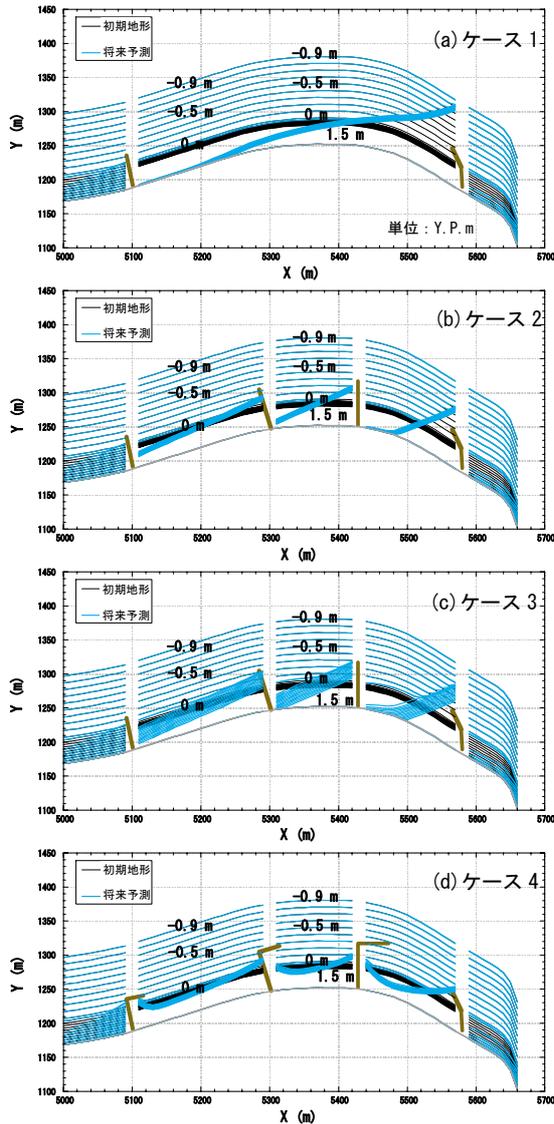


図-11 計算結果(等深線の変化)

図-11(b)はケース2の予測結果である。突堤間の西部では等深線が後退し、東側では前進するが、和田岬の先端に接近するほど初期汀線に対する汀線の角度が大きくなる。これは波向と初期汀線への法線方向とのなす角が和田岬先端ほど大きいためである。突堤の先端水深を東側ほど大きくしない限り沿岸漂砂による流出が起こる。

同様の施設配置に対し粒径の細かい $\phi 0.37\text{mm}$ の砂で養浜した場合のケース3の予測結果を図-11(c)に示す。初期の急勾配の湖浜は急速に緩勾配へと変わり、砂が沖へ流出している。ケース2と比較すると、粒径は湖浜の形成に大きく影響し、粗な粒径が養浜には有利であることが分かる。ある程度の間隔で突堤を設置し粗粒材を養浜するケース2では安定性が高まるものの、突堤下手側の侵食は免れない。そこで突堤の下手側に波の遮蔽域を作り、堆積域を促進する案(ケース4)の計算結果が図-11(d)

である。ケース2と比較すると、突堤下手側では波の遮蔽域形成の効果により汀線が前進している。これより、和田岬先端(東側)付近における突堤下手の顕著な侵食は防止できることが計算より明らかであり、逆L形突堤を配置した上で礫を用いた養浜が効果的であることが数値計算より明らかとなった。なお、実際には東端の突堤の長さは、計画浜幅30mと東端の汀線前進量30mに、水深が増大する区間における沿岸漂砂の流出を防ぐために、汀線から平衡勾配1/6で現海底面(Y.P. -0.20m)までの長さ9mを考慮し、全体で69mが必要となる。

## 6. 結論

勝木樋門から和田岬にかけて護岸法線と波の入射方向とのなす角が大きくなり、それに伴い汀線の前進量は東側ほど増大する。したがって突堤の長さも東側ほど長くする必要がある。東端の突堤の長さは70m以上が必要である。また突堤を設置した場合下手側は大きく侵食されるため、下手側に波の遮蔽を創出するためその形状を逆L字形とする必要がある。また逆L字形突堤は、直線で構成された構造物なため、湖浜利用者に人工的な印象を強く与えることが懸念される。よって、突堤法線は景観面を配慮し曲線とすることが望ましい。また養浜材料としては、計算で用いた最低0.5mm以上の砂、具体的には1mm以上の粗砂または礫を選ぶことが砂浜の安定化には望ましい。

## 参考文献

- 1) 熊田貴之, 小林昭男, 宇多高明, 芹沢真澄, 野志保仁: 粒度組成の3次元変化を考慮した等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 441-445, 2004.
- 2) Ashuton, A., A. B. Murray and O. Arnault: Formation of coastline features by large-scale instabilities induced by high angle waves, Nature, 414, pp. 296-300, 2001.
- 3) 宇多高明, 山本幸次: 北海道野付崎の形成過程, 地形, 第13巻, pp. 19-33, 1992.
- 4) 宇多高明, 小菅 晋, 林 義之, 神田康嗣, 渡邊貴裕: 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, 海洋開発論文集, 第17巻, pp. 529-534, 2001.
- 5) 熊田貴之, 宇多高明, 芹沢真澄, 小林昭男: 混合砂による養浜時縦断形予測モデル, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 596-600, 2003.
- 6) 宇多高明: 「日本の海岸侵食」, 山海堂, p. 442, 1997.
- 7) 宇多高明, 河野茂樹: 湖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, 1996.
- 8) Kraus, N. C.: Field experiments on vertical mixing of sand in the surf zone, J. Sedimentary Petrology, Vol. 55, pp. 3-14, 1985.

(2006. 9. 30受付)