霞ヶ浦天王崎における湖浜再生に関する検討

RESTORATION METHOD OF SANDY BEACH AT TENNOZAKI IN LAKE KASUMIGAURA

宇多高明1・木暮陽一2・銭谷秀徳3・熊田貴之4・三波俊郎5・石川仁憲6 Takaaki UDA, Yoichi KOGURE, Hidenori ZENIYA, Takayuki KUMADA, Toshiro SAN-NAMI and Toshinori ISHIKAWA

 ¹正会員 工博 (財) 土木研究センター理事なぎさ総合研究室長兼 日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4タカラビル)
 ²関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所長(〒311-2424 茨城県潮来市潮来3510)
 ³関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所調査課長(同上)
 ⁴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)
 ⁵海岸研究室(有)(〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22ローヤル若葉301)
 ⁶正会員 (財) 土木研究センターなぎさ総合研究室主任研究員 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4タカラビル)

A restoration plan recovering sandy beaches at Tennozaki in Lake Kasumigaura was investigated. Past lakeshore changes were first investigated through the comparison of old map and aerial photographs. A stable shoreline of a pocket beach was predicted by applying a modified Hsu model (Serizawa et al., 1996). Numerical simulation using a contour-line-change model considering the change in grain size proposed by Kumada et al. (2003) was also carried out. Three-dimensional beach changes when beach nourishment was carried out were predicted by this model.

Key Words : Lake Kasumigaura, sandy beach, restoration, stable shoreline, beach changes

1. まえがき

過去,霞ヶ浦(西浦)では水質もよく,1960年代まで は湖岸各地で湖水浴も行われ,夏季には多くの人々に よって賑わった.とくに浮島と対岸の天王崎湖水浴場 (図-1参照)では近年まで両者を結ぶ遠泳大会が行われ ていた.しかし水質の悪化,湖浜侵食や湖岸堤の前出し などによる湖浜の喪失などによってこれらも廃れていっ た¹⁾.同時に湖岸植生帯の衰退も問題となり,これにつ いては2000年度より緊急対策が行われた²⁾.一方,湖浜 の喪失については現在見直しが行われ,「泳げる霞ヶ 浦」の目標のもとで水質浄化はもとより各地で湖浜の復 元も行われつつある.こうした状況を受けて,筆者らは 霞ヶ浦(西浦)の浮島地区において安定な湖浜を再生す るために,構造物周辺での安定汀線形の予測を行うこと



図-1 霞ヶ浦(西浦)の検討対象地区(天王崎)の位置

のできる修正Hsuモデル³⁾と、粒径を考慮した等深線変化 モデル⁴⁾を用いて、浮島地区の砂嘴周辺における砂浜の 復元計画について検討し⁵⁾、これを受けて2007年3月には 一部の養浜も行われた.既に述べたように、霞ヶ浦の浮 島と天王崎は遠泳コースとして考えればセットで湖浜が 復元されるがことが望ましいし、天王崎は過去かなり広 い湖浜があったがそれが消失したという履歴を有する. そこで、本研究では天王崎を対象として湖水浴場として の過去の変遷を調べた上で、その復元計画について検討 した. とくに天王崎は浮島と並んで砂嘴状地形であり、 湖岸線方向が場所的に極端に変化するという特徴を有す ることに注意して検討した.

2. 湖岸の長期的変遷調査

国土地理院の陸軍迅速測図(明治13~19年:1880~ 1886年作成)と、1972~2003年の間の4時期に撮影され た空中写真をもとに、天王崎周辺の湖岸地形の変遷を調 べた.図-2には2003年の湖岸線とともに各時期の湖岸状 況を示す.明治期には湖岸線は自然状態にあった(図-2(a)).この状態は1962年までほぼそのまま維持されて いたが、1972年では天王崎の突堤の北180mにほぼ矩形 状の埋立地が造られつつあった(図-2(b)).しかしそ の北側には幅約50mの植生帯が広がっていた.この植生 帯は、現在では完全に埋められて消失したことが2003年 の湖岸線形状との比較で見て取れる.また天王崎を含む 埋立地の南側の全域で湖岸線が約25m前出しされること となる.1985年には埋立地が天王崎公園となったが、こ の公園は従来の湖岸線より約80mも前出しして造られて いる(図-2(c)).また天王崎の突堤が改築され、突堤



図-2 天王崎周辺の湖岸地形の変遷

の北側隅角部に三角形状の砂浜が形成された.この当時, 天王崎の北側には既に埋立地が突出し南向きの沿岸漂砂 は流れることができない状態にあったことから,湖浜は 養浜によって造成されたと推定できる.1992年では, 1985年の湖岸線と大きな違いはないが,天王崎以南にお いて前出し方式で湖岸堤が建設され,現況とほぼ同様と なった(図-2(d)).2003年では,天王崎で2基の離岸堤 が造られ養浜も行われて舌状砂州が形成されているが, そのほかの地区の湖岸状況は1992年当時とほぼ同じであ る(図-2(e)).

図-3は1972年以降の湖岸線の変化を示す. 護岸の前出 しと同時に養浜が行われ,さらに離岸堤も造られた結果, 離岸堤背後にはトンボロが形成されている. 図-4は現況 の湖岸状況であるが,離岸堤と護岸に囲まれた狭い湖浜 があるのみである.この汀線は現護岸線から平均で約 50m前出しして造られている.一方,湖浜北側の護岸露 出区域では護岸が25m前出しされた結果として,図-5の ように緩傾斜護岸ののり先が湖内へと突っ込んでおり, 水たたき部分は生物付着によって歩行が危険な状態と なっている.

宇多ら⁵は、天王崎の対岸に位置する浮島地区において、地先ごとに卓越入射波を推定し、湖浜汀線がこの卓 越波向と直角となってはじめて安定化するという原理を もとに安定汀線を算定した。天王崎についても同様な検 討を行うために、1992年以前にあっては図-3のX=650m 地点を、また離岸堤が建設された2003年では離岸堤の北 側隣接部に位置するX=705m地点を選び、汀線への法線 の方向角を読み取った(表-1参照).卓越入射角は、 1982年以前は平均でN83°W、1985年以降N75°Wと読 める。天王崎の突堤は1985年までに改築され堤長が伸ば されたが、堤長が長くなるとともに南側からの入射波が





図-4 天王崎の現況離岸堤と砂浜



図-5 のり先が湖面と直接接している 緩傾斜護岸

表−1 汀線への法線の方向角	
撮影年月	汀線に立てた法線の方向角
1972年9月	N82°W(X=650m地点)
1978年8月	N85°W(同上)
1982年10月	N82°W(同上)
1985年9月	N74°W(同上)
1992年8月	N75°W(同上)
2003年10月	N77°W(X=705m地点)



図-6 天王崎湖水浴場の南端部から北向き に撮影した湖水浴場の風景



図-8 湖浜に集まった多数の湖水浴客



図-7 湖水浴の状況



図-9 天王崎の南端の突堤とその背後 にあった5本のヤナギの木

遮蔽され、結果として卓越波向が時計回りの方向に回転 したと考えられる.このことから、天王崎の卓越波向と しては、1992年の読み取り値N75°Wが採用できる. 2003年にも湖浜形状は明瞭であるが、この時期の湖浜形 状には離岸堤による波の遮蔽効果が含まれているので卓 越入射波向としては1992年の値を採用する必要がある.

3. 天王崎における過去の湖水浴場の復元

天王崎周辺の湖岸線は1982年以前には大きな変化はな く安定していた、しかし1982年から1985年の間に湖岸堤 が従来の湖浜を埋めて造られたため、従来からあった湖 浜がその分狭まった. 天王崎では養浜が計画されている が、その場合必要砂浜幅については過去の湖水浴場にお ける砂浜幅が一つの目標を与えると考えられる. そこで 天王崎周辺の過去の写真を調べた.まず天王崎湖水浴場 の南端部から北向きに湖浜を撮影したのが図-6である. この写真は湖岸堤が前出しされる以前の状況であって、 図-2でいうと1972年頃の湖浜状況にあたる.写真で見る 限り、少なくとも幅30~40mの前浜が存在し、しかも多 数の湖水浴を行う人々が膝まで水に浸かっている状況か ら遠浅な湖浜であったことが分かる。湖浜から北向きに 撮影したのが図-7である.中央を歩く女性が裸足であり, また多くの人々が砂浜に座っている状況から判断すれば、 湖浜は細砂で構成されていたと推定される. また遠方に は松林が見えるが、この松林の基部に沿って直立護岸が あること,そして直立護岸前面の砂浜は手前(南)側で 広く、北側では狭まっていたことが注目される. このよ うな汀線の特徴は写真撮影位置より南側に突堤があって そこで砂の流出が阻止されているからこそこのような湖

浜形状となっていることを示す.図-8は湖水浴の風景で ある.非常に緩勾配の湖浜が広がり、そこで多くの人々 が湖水浴を楽しんでいる.図-9は南端の突堤とその背後 にあった5本のヤナギの木を撮影したものである.遠方 に見える湖浜の汀線はこの護岸線と斜めに交差しており、 湖浜は南端で広く北側では幅が狭まるという三角形状で あった.これは図-2(b)で見られる特徴と一致する.

以上より,過去の天王崎の湖水浴場は細砂で構成され ており湖底勾配は緩かったこと,また1982年まではこの ような状況が続いていたが1985年までに行われた護岸の 前出しによって湖浜が狭まったことが分かる.また1982 年以前の湖水浴場の形状は南端に突堤が延び,その北側 に砂浜が広がるという三角形状であった.1972年の空中 写真の判読によれば,突堤と湖浜の接点での砂浜幅が最 も広い場所で約30mであった.

4. 天王崎の詳細地形

湖浜再生のための基本資料を得るために2006年11月に 天王崎地区において詳細深浅測量を行った.図-10には 測量結果を示す.天王崎地区の南部に設置された2基の 離岸堤(南をa,北離岸堤をbと呼ぶ)の背後には舌状砂 州が形成されている.舌状砂州の発達は離岸堤bの背後 で良好であってトンボロとなっている.これに対して離 岸堤aでは南端の突堤との開口部からの波浪侵入もある ために舌状砂州の規模は小さい.また離岸堤bの北側開 口部ではほぼY.P.+0.2m以浅の等深線が汀線と同様に凹 状となり,階段護岸と鋭角状に交差している.一方Y.P. -0.2mと0.0mの等深線は離岸堤bの沖合での突出量が大き い.この付近が波の作用で移動可能な材料でできていた



とすれば、等深線は沿岸方向にフラットなものになるは ずであるから、上記の点は波による地形変化の限界水深 hcがほぼY.P. +0.2m付近にあることを意味する.逆に離 岸堤背後の舌状砂州において汀線と連動した動きが見ら れる限界の標高はY.P. +1.6mである.したがって、バー ム高hkはほぼY.P. +1.6mと推定される.南部の湖浜につ いては以上の特徴を読み取ることができるが、北部に あっては階段護岸が斜めに大きく突き出ており、護岸前 面に砂浜は全く存在しない.沖合には護岸のり先部分に 護岸線と平行な等深線があるが、これは護岸がY.P. 0.0m 付近まで造られていることによる.

5. Hsuモデルを用いた安定汀線形状の予測

湖岸地形の変遷調査によれば、天王崎では護岸が前出 しされた結果入射波が護岸線に対して大きく斜め入射す る状況となった.このため現況湖岸線と直角方向に延ば した突堤により安定湖浜を創出可能かどうかについては 十分な検討が必要である.そこでまず必要砂浜幅を設定 した上で、養浜による安定汀線の創出の可能性を修正 Hsuモデル³により予測し、構造物の形状と配置の概略検 討を行った.湖浜創生への地元要望の高い区域は、図-3 において天王崎公園から南端の突堤までの約230m区間 である.現在この区間の南部は水遊び場として、また北 部は水上バイクなどの発着場として利用されている.安 定海浜を造る上で必要とされる施設は、基本的に波の遮 蔽効果を高めるために卓越波向と直角方向に伸ばす必要 がある.天王崎における卓越波向は前節で述べたように N75°Wである.一方,創生される湖浜の幅は,1970年 代の湖浜状況からは30m程度となるが,手づかずの自然 が残されていた明治期作成の迅速測図では10~20mで あった.したがって,自然再生の観点から目標浜幅は10 ~20mとする.

図-3に示すように、対象区域の中央部では護岸線が沿 岸方向に折れる位置があり、南北での利用がそこで分か れることを考慮し、図-11(a)に示すように、この位置に 突堤G2を設置する.また南北端にもG1、G3を設置する. その際、これらの突堤の横堤部と、護岸から先端部まで の長さを既設離岸堤の堤長のn倍(n=1, 2)とした.そ の上で突堤先端にP点(○)を、またポケットビーチ中 央部にQ点(●)を設定し、Hsuによる安定汀線の計算 法を適用した.その場合、侵食域と堆積域の前浜面積が 釣り合う(土砂収支を満足させる)ようにして安定汀線 を求めた.以下では、G1とG2、G2とG3に挟まれた湖浜 をそれぞれ湖浜A、Bと呼ぶ.

いずれの突堤も鈎形としたケース1の計算結果が図-11(a)である.既設離岸堤が撤去されるとその背後に堆 積していた砂が移動し,新設の突堤背後にトンボロが形 成される.しかし湖浜A,Bともポケットビーチ中央部 付近で既設護岸が波に晒され,計画砂浜幅を全く確保で きない場所が出る.とくに北側の湖浜Bでそれが著しい. そこでG3の堤長をケース1の2倍として同様に計算を 行った結果が図-11(b)である.G3の横堤部が長くなっ



た結果波の遮蔽度が向上し、G3の付け根部分でも汀線 が前進する.結果として湖浜Bの南側部分では予測汀線 が既設護岸より陸側となる.現実にはこのようなことは 起こらず、護岸位置で汀線は固定されるが、水深の増加 を介して越波の増大を招く.ケース1において湖浜Aで も護岸露出区間があったが、これはG1による波の遮蔽 効果が大きすぎることに一因がある. そこでG1の横堤 部を除去したケース3の結果を図-11(c)に示す. これに よれば湖浜Aの北部での護岸露出域をなくすことができ る. このようにケース3はかなり有効であるが、G1は卓 越波の方向に伸ばされており、

遮蔽効果を持たないので 沿岸漂砂の防止のみの機能から考えるとその先端から沿 岸漂砂が流出しない程度に堤長を短くすることも可能で あろう. そこで既設突堤をそのまま利用する案としたの がケース4である(図-11(d)). 既設突堤であっても養 浜砂の流出防止が可能である.

以上の検討により概略の安定湖浜形状が求められるが, 湖浜A,Bとも護岸前面の砂浜幅が非常に狭い場所が残 されており,そこでは防護水準を満たさない.そこで湖 浜A,Bに1,000m³と2,000m³の養浜を行って,砂浜幅全体 を広げる案について検討した(図-11(e)).その際,漂 砂の移動高は現地の深浅図判読より約1mとして計算し た.このように養浜を行えば湖浜A,Bとも必要湖浜幅 を満足することが可能となる.

6. 粒径を考慮した等深線変化モデルによる検討

養浜材料(粒径)に応じた3次元的な地形変化を把握

するため, 熊田らの粒径を考慮した等深線変化モデル4 を適用した.予測計算は5ケース行った.ケース1では 0.3mmの単一粒径を与えて現況再現を行った後、突堤を 設置した上で粒径0.25mm(沖合の1/200と緩い勾配斜面 に分布する粒径), 0.35mm(現在養浜可能な浚渫砂で ある粒径)の砂を用いた養浜を行うこととし、湖浜A, Bにそれぞれ2,000m³を投入する場合(ケース2, 4)と, 2,500m³, 5,000m³を投入する場合(ケース3, 5) につい て計算結果を示す. 初期縦断形は実測よりY.P. +1.7m~ +0.2mでは1/20, Y.P. +0.2m以深では1/200とした. 養浜 では、湖浜A、Bの中央(Hsuの計算結果で最も後退した 場所:X=135~145m, 160~200m)に土砂湧き出しを設 けた. 粒径0.25mmの砂の平衡勾配は実測より1/200, 0.35mmは大山の養浜観測結果より1/20とした. 1978~ 2004年の霞ヶ浦湖心の風データより推算したエネルギー 平均波を入力条件とし、砕波点の波高H_b=0.23m,波向を N75°W方向から入射させた. h_Rは実測結果よりY.P. +1.3m, hcltY.P.+0.2mとした. また陸上・水中での安息 勾配は1/2, 1/3とした.計算条件を表-2に示す.

初期地形は実測値より,湖浜AではY.P. +1.7m~+0.2m では1/20, Y.P. +0.2m以深では1/200勾配とし,卓越波向 (N75°W)に対して直線平行等深線として与えた.ま た湖浜Bでは湖岸線(護岸)に平行に1/200勾配の斜め等 深線形状を与えた.湖浜Aでの再現地形を図-12(a)に示 す.実測汀線同様,南北離岸堤背後の舌状砂州の非対称 な形状がうまく計算できている.ケース2の結果が図-12(b)であるが,湖浜Aでは砂浜が回復しているように 見えるが,これは養浜砂が前浜に寄与しているのではな く,現況の前浜の砂が新しく設置された構造物に引き込 まれた変化であり、養浜砂は養浜箇所に近いG2背後で 緩勾配の湖底面を形成しつつ沖へ流出していることが分 かる.また、養浜箇所南側では砂浜幅が狭い結果となっ た.同様に、湖浜Bでも養浜砂の大部分は勾配が緩く堆 積するため沖へ移動して前浜の創生はうまく行かない. 湖浜A、Bで養浜量を増やしたケース3では、図-12(c)の ように湖浜Aでは前浜は変わらず、沖への流出が大きく 等深線が前進し、南端の養浜ののり先はG1突堤先端を 越えて沖まで広がっている.湖浜BではG3背後に集中的 な堆砂が起こってトンボロが形成されるが、G2寄りで は護岸が波に晒される.

次に養浜砂の粒径を0.35mmと大きくし平衡勾配が大 きな砂を投入したケース3の予測結果を図-12(d)に示す. 湖浜AではG2背後の汀線の前進量が小さいものの,Hsu の方法による結果とほぼ同様な結果が得られる.一方, 湖浜Bでも砂浜の形成範囲が増加するが,G3背後までは 到達しない.そこで湖浜A,Bにそれぞれ2,500m³, 5,000m³投入した結果が図-12(e)である.投入土砂量は Hsuの方式より多いが,ほぼ同様な湖浜が形成される. 土砂量が多い理由は,主にHsuの方式では縦断勾配の影 響が考慮できないことにある.また図-12(e)において G3背後ではトンボロがG3に接続してしまい,その北側 では砂移動がないため池が残される.これが利用上の障 害となるならばあらかじめその部分を人工的に埋めるこ とも可能である.

以上より, 粒径0.25mmの砂は前浜形成に効果的でな いが, 粒径0.35mm程度の砂であれば土砂量に応じて前 浜の拡幅ができる. 南端の突堤先端水深は, 計算上では 養浜後, 限界水深であるY.P. +0.2mまでは最低必要であ り, 暴浪時の波浪(1991年の2月のエネルギー平均波 *H*₀=0.37m, *T*=2.28s)を想定すると, 10cm程度の余裕幅 を持ってY.P. +0.1m(岸沖距離約40m)までとなる.

7.まとめ

霞ヶ浦(西浦)の天王崎を対象として、湖水浴場とし ての過去の変遷を調べた上で、その復元を目指すための 計画について検討した。養浜の可能性をHsuモデルによ り予測し、湖浜創生に必要な構造物の形状と配置につい て検討した。さらに熊田らの粒径を考慮した等深線変化 モデルを用いて粒径ごとの養浜砂の安定性について3次 元的に検討した。この結果次の諸点が明らかになった。 ①北端の突堤の横堤部分の長さは現況離岸堤の2倍とし、 突堤基部は護岸法線方向に伸ばし、ヘッド部は波向 (N75°W)に直角とする。②G2は鍵形として護岸線の 屈曲点に設置し、突堤基部は護岸への法線方向に伸ばし、 現況の離岸堤から汀線までの離岸距離の2倍を想定し、 ヘッド部は現況離岸堤と同じ堤長とする。③G1は波向 方向に延伸し、突堤の先端水深は、下限値として限界水

表-2 計算条件

ケース	1:現況再現
中央粒径,養浜量	2:0.25 mm, 4000 m ³
	3:0.25 mm, 7500 m ³
	4:0.35 mm, 4000 m ³
	5:0.35 mm, 7500 m ³
養浜箇所	• X=135~145 m, 160~200 m, Z=Y.P. +1.2~+1.0 m
初期縦断形	•1/20(Y.P. +1.7 m~+0.2 m)
	•1/200(Y.P. +0.2 m~-0.6 m)
初期粒径	単一粒径(現況再現)
	養浜砂粒径:0.25 mm, 0.35 mm(ケース2~5)
平衡勾配	•0.25 mm:1/200, •0.35 mm:1/20
交換層の幅	<i>B</i> =0.12 m
入射波条件	• H_b =0.23 m, α_b =0° (N75° W), M.W.L. (Y.P. +1.1 m)
地形変化の水深範囲	 ・波による地形変化の限界水深 h_C=Y.P. +0.2 m
	・バーム高 h _R =Y.P. +1.3 m
谙界冬件	・岸沖端境界, · 側方(右端)境界,
2022121411	 ・側万(左端)境界:通過漂砂量0 (万)(万)(万)(万)(万)(万)(7)(7)(7)(7)(7)(7)(7)(7)(7)(7)(7)(7)(7)
漂砂量係数	 ・漂砂重係数 A=0.3 ・佐ゴニンージン ボッグガン たまの
	・小世フランフトン頃の係数 ζ=1.0
	・ 岸 泙 漂 砂 重 係 数 K _Z /K _X =0.1
漂砂量の水深分布	宇多・河野(1996)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:X=35~225 m
	鉛直方向:Z=Y.P. +1.7m~-0.6 m
計算メッシュ	沿岸方向⊿X=5 m, 鉛直方向⊿Z=0.1 m
計算時間間隔 △ t	⊿ t=0.005 hr
計算ステップ数	2,000,000 steps
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(酒井ら, 2003)

深であるY.P. +0.2mまでとするが、多少の余裕を持たせ てY.P. +0.1m、岸沖距離約40mまで延伸することが望ま しい. ③目標浜幅は、過去の迅速測図の浜幅より10~ 20m程度とする. この浜幅を安定的に確保するには、粒 径0.35mm程度の砂を湖浜A, Bにそれぞれ約2,500m³, 5,000m³程度投入する必要がある.

参考文献

- 平井幸弘(2006): 霞ヶ浦の湖岸・沿岸帯における人為的要因による環境変化,第四紀研究,第45巻,第5号, pp.333-345.
- 2) 霞ヶ浦河川事務所ホームページ:霞ヶ浦湖岸植生帯の緊急保 全対策評価検討会中間評価, URL: http://www.kasumigaura.go.jp/topic/071030/index.html.
- 3) 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・神田康嗣 (1996):修正HSUモデルによるヘッドランド周辺の最適 安定海浜形状の計算法,海岸工学論文集,第43巻, pp.646-650.
- 4) 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄(2003):沿岸・ 岸沖漂砂による粒径分級を考慮した等深線変化モデル,海岸 工学論文集,第50巻, pp.481-485.
- 5) 宇多高明・木暮陽一・平野一彦・大内香織・三波俊郎・熊田 貴之(2007): 霞ヶ浦浮島地区における湖浜再生に関する検 討,水工学論文集,第51巻,pp.1325-1330.
- 6) 宇多高明・河野茂樹(1996):海浜変形予測のための等深線
 モデルの開発,土木学会論文集,No.539/II-35, pp.121-139.
- 7)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.

(2007.9.30受付)