風波と地震時の地盤沈下による 涸沼広浦砂州の変形とその復元

DEFORMATION OF HIROURA BEACH IN LAKE HINUMA DUE
TO WIND WAVES AND GROUND SUBSIDENCE ASSOCIATED
WITH 2011 GREAT EARTHQUAKE AND RECOVERY

宇多高明¹・高橋伸一²・中村和也³・三波俊郎⁴・宮原志帆⁴・酒井和也⁵

Takaaki UDA, Shin-ichi TAKAHASHI, Kazuya NAKAMURA, Toshiro SAN-NAMI,
Shiho MIYAHARA and Kazuya SAKAI

¹ 一般財団法人土木研究センター常務理事なごさ総合研究室長 (〒110-0016 東京都台東区台東 1-6-4)

² 茨城県土木部河川課 (〒310-8555 茨城県水戸市笠原町 978-6)

³ 茨城県水戸土木事務所 (〒310-0802 茨城県水戸市柵町 1-3-1)

⁴ 海岸研究室 (有) (〒160-0011 東京都 新宿区若葉 1-22 ロイヤル若葉 301)

⁵ 一般財団法人土木研究センター (〒110-0016 東京都台東区台東 1-6-4)

During the 2011 Great Earthquake, ground subsidence of 20 cm occurred in Lake Hinuma. Since then, lakeshore erosion became dominant on Hiroura Beach located in the eastern part of the lake, with pine trees grown along the shoreline being damaged and the root of the pine trees being exposed to waves. In this study, long-term lakeshore changes of the area were investigated using an old map produced in 1885 and aerial photographs taken since 1947 along with the site observation on February 24, 2012. Although Hiroura Beach was a cusped foreland before land reclamation, the lakeshore has eroded by wind waves and a marked change was triggered by ground subsidence associated with the Great Earthquake. To recover sandy beach, the effect of beach nourishment was investigated using the contour-line-change model considering the changes in grain size of bed materials.

Key Words : Lake Hinuma, Hiroura Beach, 2011 Great Earthquake, ground subsidence, erosion, beach nourishment

1. はじめに

涸沼は、水戸の南9kmに位置し、涸沼川と那珂川を経て太平洋と繋がる汽水湖であり、ヤマトシジミを始めとする貴重な種の生育場となっている。広浦砂州はこの湖の北岸東部に伸びており、東向きに細長く伸びた尖角岬であったが、砂州北側が干拓されたために現在では緩く湾曲した堤防の南面に沿って細長い砂州として伸びている。この砂州は現在公園として利用されている。広浦砂州は、湖内へと細長く伸びた形状を有するがゆえに砂州の両側に湖面を望むことができる風光明媚な場所であった。このことから、水戸徳川家第九代藩主斉昭公が天保四年(1833年)に領内を巡視した際、水戸八景の一つとして選ばれた。この砂州は、長い間ほぼ安定な姿を保つ

てきたが、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震による約20cmの地盤沈下¹⁾の後、侵食が顕在化するとともに、汀線沿いに生育していた多くの松の根が波に曝され、枯れ死する可能性が高まった。本研究では、広浦砂州の長期間の変遷を調べるとともに、2012年2月24日には現地踏査を行って侵食原因を考察した。湖浜の長期的変化の分析には宇多ら²⁾による霞ヶ浦の蓮河原地区での分析と同じ手法を用いた。その上で粒径を考慮した等深線変化モデル³⁾を用いて湖浜変形を再現し、海浜を復元するための養浜の効果について検討した。

2. 広浦砂州の長期的変遷

1885年作成の陸軍迅速測図より切り出した涸沼の地形

図を図-1に示す。1885年には広浦砂州は東向きに伸びていたが、戦後砂州の北側は干拓され、堤防南面に細長い砂州が残された。

図-1 (b) に示す矩形区域での湖岸線変化を図-2に示す。1885年には、長洲の集落から大きく左に湾曲した細長い尖角岬が伸びていた。当時既に長洲から約400m（現在の石碑付近）までの砂州上には家屋が建てられていた。1948年には、細長い尖角岬の北側に幅約20mの三日月状の水域を残して干拓堤防が伸ばされた。三日月状の水域の東端の地点Cには小さな湖口が開いていたが、これは干拓地からの排水がこの三日月状の水域を通して行われていたためと推定される。現在の広浦砂州から見ると、砂州の北面に沿って干拓堤防が伸ばされたように見えるが、実際には、1948年の空中写真に示すように、三日月状の水域を残して干拓堤防が伸ばされた。なお、1948年の空中写真に示す石碑は、その後次第に規模が拡大された水戸八景の碑である。

1961年には、砂州と堤防の間にあった水域には排水路からの土砂が堆積するとともに、水域の大部分が植生で覆われた。しかし砂州南面では大きな変化は生じていなかった。また、C点には旧河口があったために汀線が局部的に窪んでいた。1975年には、広浦の西側、長洲の集落の西側に広浦漁港が造られた。同時に広浦漁港の東側には突堤a, b, cが伸ばされ、突堤aの西側では汀線が前進した。これと対照的に、突堤cの東側の鳥居付近では汀線が後退傾向となった。このような汀線変化状況より、長洲付近では東向きの沿岸漂砂が卓越していることが分かる。また広浦砂州の北側にあった三日月状の水域を経た排水に代わって、干拓地の排水のための排水路が砂州を斜めに横断して開削された。このため地点Cに1961年まであった開口部は完全に閉ざされた。また砂州背後の三日月形の水域はヨシで覆われた低地変わった。その後、1992年には排水路の東側の浜幅がやや狭まり、2005年では大きな変化はなかったが、東日本大震災後の2012年には2005年と比べて汀線が後退した。

図-3は1948年基準での2012年までの汀線変化を示す。突堤a, b, cでは、2005年までに突堤西側で三角形の汀線前進が起きた一方、調査地域の西端にある鳥居から排水路までの間の汀線は鳥居の東側直近でやや大きな後退

図-1 瀬沼全域の迅速測図（1885年）

(a) 1885 年（迅速測図）

(b) 1948 年

(c) 1961 年

(d) 1975 年

(e) 1992 年

(f) 2005 年

(g) 2012 年

図-2 広浦周辺の迅速測図、空中写真および衛星画像

図-3 1948年基準の汀線変化

量を示してはいたがほぼ安定であった。しかし排水路の東側では汀線後退量が大きく、最大5m程度の汀線後退が見られた。また、地震後の2012年では、2005年と比較して汀線が全体的に2～3m後退した。当地近傍における地震時の垂直変動量は約0.2mであり、前浜勾配を1/10とすると約2mの汀線後退量に相当するが、この結果は図-3から読み取れる値と整合的である。

3. 広浦砂州の侵食実態

2012年の衛星画像（図-2(g)）に示したように、広浦砂州は排水路から東側に緩く湾曲している。この区域の踏査は2012年2月24日に実施した。まず踏査区域の西端にある排水路を東向きに望んだのが写真-1である。排水路は不透過構造のため東向きの沿岸漂砂が阻止され、排水路の西側直近で汀線が前進していた。この排水路の東隣には石積み護岸で囲まれた水戸八景の碑がある（写真-2）。護岸の手前付近は侵食の結果、粒径の大きな礫やコンクリート片のみが散乱していた。水戸八景の碑の東側隣接部では、写真-3のように汀線近傍に生育し、湖浜景観の一部を構成していた松付近が侵食されたため土嚢が円形に積まれていた。写真-4は、砂州の東部に生育し

写真-1 踏査区域西端にある排水路を東向きに望む

写真-2 石積み護岸で囲まれた水戸八景の碑

写真-3 水戸八景の碑の東側隣接部での松付近の侵食と土嚢による応急復旧

写真-4 応急復旧としての0.6m厚の盛土の流出

ていた松の根付近の侵食状況を示す。応急復旧として水面上ほぼ0.6mまで盛土が行われていたが、その下部にあった土嚢が露出していた。

4. 湖浜保全区域の選定と設定座標系

ここでは地震前後の変形に着目し、2012年の空中写真（図-4）を参照すると、広浦公園の西側にある突堤a, b, cでは、いずれも西側汀線が前進していることから、当地区では東向きの沿岸漂砂が卓越していると見られる。しかし、図-3によれば地震前には排水路西側の湖浜はほぼ安定状態にあったことから検討対象区域から外し、排水路の東180mにある点D点までの区域で保全策を検討した。この区域の湖岸線は緩やかな凸状を呈しているので、汀線位置の計測・解析にあたっては、図-4に示すように湖岸線に沿って西向きに座標軸（X軸）を設定し、この曲線座標に沿う距離を沿岸距離とし、各地点においてX軸に対し直角沖向きに汀線変化量を測定した。

検証計算に必要とされる汀線は、1975, 2005, 2012年に取得されたものの、地震直前の2011年汀線は測定されていない。一方、地盤高変動調査¹⁾によれば、2011年3月11日の大地震により広浦周辺では約0.20mの地盤沈下が生じており、当地の前浜勾配はほぼ1/10なので、この地盤沈下量に海底勾配の逆数を乗ずると汀線後退量はほぼ2mとなった。そこで地盤沈下後の2012年の実測汀線を2m沖にあったと仮定して2011年の地震前の汀線を推定した。次に、2011年の推定汀線を基準として各年の汀線変化量を算出した上で、2011年の推定汀線を直線に引き伸ばした展開座標上における汀線変化量として表示した。ここに、展開座標とは、宇多ら⁴⁾が涸沼親沢鼻を対象とした湖浜変形計算で用いたもので、曲線状の汀線に沿って沿岸方向距離を直線に引き伸ばした座標であり、汀線

図-4 2012年の空中写真上に定めた座標系

変化量はこの座標軸と直角方向の変位として示される。上記展開座標系では、D点と排水路の位置はそれぞれX=120m, 300mで与えられる。

2011年の推定汀線に沿って設定した展開座標系に基づいて各年の汀線変化量を読み取り、各時期の汀線変化量を1975年基準での汀線変化量に変換し、その上で1975年を初期値とした2012年までの汀線変化量を算出した結果を図-5に示す。図-5によれば、排水路西側区域では地震前の2011年までの汀線変化はわずかで汀線は安定していた。一方、排水路東側では2011年前までにX=125～280mの区域で全体的に汀線が後退する一方、X=95～125mではヨシ帯により東向きの沿岸漂砂が阻止された結果、局所的に汀線が前進していた。排水路の東側では2005年、2011年と時間経過とともに汀線後退量が増加していたが、2012年には地盤沈下に伴って汀線が平行移動しつつ後退した。このような汀線変化状況と現地の侵食状況より、侵食対策の必要区間は排水路より東側区域に絞ることができる。なお、図-5において1975年基準で見るとD点付近で汀線が大きく突出しているが、これは汀線が沖向きに突出したのではなく、その付近が旧水路の出口であったことにより元々汀線が凹状となっており、そこに砂が堆積して汀線が滑らかな形状になったためこのような汀線変化が現れたものである。

広浦砂州の構成材料については、2012年2月24日に排水路西側近傍の汀線付近で調査を行った結果、図-6が得られている。湖浜材料は中礫(4.75～19mm)から中砂(0.25～0.85mm)まで幅広い分布を有し、中央粒径は1.69mm、含有率が最も高いのは粗砂(0.85～2.0mm)の41.9%であった。

5. 再現計算の条件

湖浜変形予測計算には、粒径を考慮した等深線変化モデル³⁾を用いた。計算は、現況再現計算(ケース1)と予測計算(ケース2, 3)からなる。ケース1では、1975～2012年の汀線変化の再現を行い、これにより計算モデルの妥当性を確認した。予測計算は、養浜のみ行うケース2と、突堤+養浜のケース3からなる。計算において、溜沼の平均水面はM.S.L.=T.P.+0.3mにあるので、湖浜高はこの平均水面を基準とした高さとして表示した。湖浜縦断面形は、深浅測量データを基に図-7に示すように定め、バーム高 h_b を0.5m(T.P.+0.8m)、波による地形変化の限界水深 h_c を-1.8m(T.P.-1.5m)とした。湖浜勾配は $Z=0.5\sim 0m$ では1/10、 $Z=0\sim -1.8m$ では1/15、 $Z=-1.8\sim -2.3m$ では1/50とし、 $Z=-1.8m$ 以深(h_c 以深)は波作用による侵食は生じないものとして、固定床として扱った。

縦断面形は図-7のように汀線で勾配が変化し、前浜での1/10勾配が水面下では1/15と緩くなる。このことは水面上と水面下で粒径が異なることを示しているが、これに

図-5 1975年を初期値とした2012年までの汀線変化量

図-6 排水路西側近傍の汀線付近での底質調査結果

対応する実測データがない。そこで粒径数を2と仮定し、粒径ごとの平衡勾配を水深帯により変えた。図-6によれば、前浜底質は中砂～中礫の広い粒径バンドで構成されているものの礫を多く含む粗粒土砂が堆積しており、礫の含有率が38%、残りの42%が粗砂であって、中央粒径も1.69mmと大きい。このことから、前浜構成土砂の代表粒径は $d_2=2mm$ 、平衡勾配 $\tan\beta_c=1/10$ の砂が堆積していると仮定した。一方、湖面下では勾配が1/15と緩いことから、相対的に粒径が小さい代表粒径 $d_1=1.5mm$ の砂が、平衡勾配 $\tan\beta_c=1/15$ を保って堆積していると仮定した。

現況再現計算は、前述の2011年推定汀線上に設けた展開座標⁴⁾を用いるものとし、初期地形はこの展開座標上において1975年汀線位置を定めた上、図-7に示す縦断面形を汀線が一致するよう岸沖方向にずらすことにより断面形を定めた。入射波高はバーム高と同等の波高として0.5mとした。波向に関しては、広浦では西側からの入射波浪が卓越するものの、東側からの入射もあり、それらの作用が重なった結果として現況の砂州形状が定まっていると考えられる。

1948年基準での汀線変化(図-3)によれば、排水路西側の汀線は地盤沈下の影響を除けばほぼ安定していた。したがって排水路位置での卓越波の入射角はほぼ0と見なすことができる。一方、排水路東側のX=280～125m間では2005年までに中央部で最大5mの汀線後退が起きている。排水路東側で侵食のみが起きている状況より、この汀線変化は、排水路により西側区域からの沿岸漂砂が阻止される一方、東向きの沿岸漂砂により対象区域から土砂が運び去られたため生じたと考えることができる。このことから、排水路地点では波向角を0と仮定できるが、図-4によれば、湖岸線は広浦の東部では反時計回りに回転している。よって排水路からD点へ向かって次第に入射角が大きくなる分布となると推定できる。ただし既往の空中写真判読では入射角に関する情報が得られないことから、trial and errorの手法により東端のD点での入射角

表-1 計算条件

計算手法	粒径を考慮した等深線変化モデル (熊田ら, 2007)
計算区域	排水路～東部のヨシ帯
入射波条件	碎波波高 $H_b = 0.5\text{m}$, 碎波角 α_w : 図-8 参照
予測期間	10年
代表粒径 (2粒径) と平衡勾配	粒径 $d_1 = 1.5\text{mm}$, 平衡勾配 $\tan\beta_{s1} = 1/15$ 粒径 $d_2 = 2.0\text{mm}$, 平衡勾配 $\tan\beta_{s2} = 1/10$
初期地形	2011年汀線を展開座標でモデル化した直線平行等深線 (陸上 1/10, 0~-1.8m 1/15, -1.8m以深 1/50) 水深・標高の基準は M.S.L. = T.P. +0.3m
初期粒径含有率	$z = +0.5 \sim 0\text{m}$ $\mu_1 : \mu_2 = 0 : 1$ (海底勾配 $\tan\beta = 1/10$) $z = 0 \sim -1.8\text{m}$ $\mu_1 : \mu_2 = 1 : 0$ (海底勾配 $\tan\beta = 1/15$)
漂砂量係数	沿岸漂砂量係数の $A = 3 \times 10^{-3}$ 岸沖沿岸漂砂量比 $\gamma = 0.1$
沿岸・岸沖漂砂の水深分布	宇多・河野 (1996) の3次式
限界水深・バーム高	波による地形変化の限界水深 $h_b = 1.8\text{m}$, バーム高 $h_B = 0.5\text{m}$
土砂落ち込みの限界勾配	陸上: 1/2, 水中: 1/3
計算等深線範囲	$z = +0.5 \sim -2.3\text{m}$
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta X = 5\text{m}$, 鉛直方向 $\Delta Z = 0.1\text{m}$
境界条件	右端: $q_s = 0$, 左端: $dq_s/dy = 0$ (通過境界) 岸沖端: $q_s = 0$

図-7 深淺測量データを基に定めた湖浜縦断面形

図-8 波向の沿岸方向変化

を設定し、排水路～D点では線形的に波向が変化すると
して計算を行い、実測汀線と適合する波向条件を選定し
た。具体的には、D点での入射角を 10° と 5° と仮定し
て計算を行った。図-8には設定した波向分布を示す。

図-4によれば、1975年にはD点は砂浜と護岸との接点
に位置していたが、2012年までには西部から運び込まれ
た土砂が堆積してD点付近では汀線が前進している。こ
のことからD点 ($X=120\text{m}$) の東側には仮想領域 (ヨシ
帯) を設定した。このヨシ帯は、ある程度の沿岸漂砂の
阻止効果を有すると考えられるので、 $X=120\text{m}$ より東側
にあるヨシ帯の沿岸漂砂阻止効果は小突堤により考慮す
ることとし、小突堤の設置位置は $X=115\text{m}$ 、先端は2011
年の推定汀線位置とした。さらに、排水路の東側隣接部
には護岸が設置されているので、 $X=290 \sim 300\text{m}$ 区域の
2011年汀線位置には護岸を設置した。この護岸の西側
には排水路の壁体があることから、そこには沿岸漂砂を阻
止する壁を設置し、沿岸漂砂量を0とした。

予測計算に用いた初期地形は2012年の再現計算の結果
とし、再現計算で得られた地形で養浜を行った。予測計
算の結果は、2012年の現況汀線基準のほうが理解しやす
いことから、現況再現計算で用いた2011年汀線の展開座

図-9 1975～2011年の地形変化の再現計算結果

図-10 1975～2011年の汀線変化の比較

標を2m岸側にずらすことにより、2012年の再現計算で
求められた汀線上に設定した座標を用いて計算を行った。
養浜は、 $X=120 \sim 290\text{m}$ の区域で行うこととし、図-3に示
した1948年基準で見た2012年までの汀線後退量が最大

8m程度であることから養浜幅は8mとした。養浜は、排水路からD点までの間で行うこととし、水深方向には高さ0.5mから-1.8mまでの間で、 $20.2\text{m}^3/\text{m}$ の土砂を投入する案を設定した。土砂総量は 3638m^3 である。さらにヨシ帯の漂砂阻止効果を表わす小突堤は現況再現計算と同様 $X=115\text{m}$ に設置した。また、排水路左岸の護岸($X=290\sim 300\text{m}$)の護岸位置も同様に2012年汀線+2m沖とした。

6. 再現計算と予測計算の結果

(1) 再現計算

D点での波向角は -5° と -10° と設定したが、実測値との対応は -5° の場合であった。そこで以下では -5° の場合の計算結果を示す(図-9)。1975年と、求められた2011年地形、および初期地形からの水深変化量を示す。D点での入射角が右斜めに 5° と排水路へと波向角が小さくなる波向分布のため、D点から排水路間が侵食され、D点付近にあった窪みのうち $h_c=1.8\text{m}$ 以浅に集中的に堆積するという結果となった。図-10は2011年汀線を基準とした汀線変化、および1975年基準での2011,2012年までの汀線変化を示す。D点の西側の汀線がほぼ平行に後退する一方、1975年当時局所的に窪んでいた部分で堆砂が起きて汀線が前進するという変化が起きた。1975年基準での2011, 2012年の汀線変化でも実測と予測汀線はほぼ一致している。

(2) 予測計算の結果

図-11は、D点から排水路までの180m間で等深線を8m平行移動する形で養浜した場合の10年後の予測地形と地形変化量を示す。D点付近では等深線形状に段差が付くため、東向きに沿岸漂砂が発生し、D点から排水路間の堆積土砂が東側へと流れ出る。流出した土砂は現況のヨシ帯付近に堆積することになる。しかしながら5年後までの土砂流出量は 350m^3 、10年後でも 576m^3 と小さく、総養浜土砂量 3638m^3 に対する割合は5年後で9.6%、10年後で16%であった。このように養浜を行ったのみでは、東向きの沿岸漂砂により養浜砂の流出が起こるものの、その土砂流出量は大きくなかった。よってまずは養浜を行い、状況を監視しつつ必要に応じて土砂を戻す順応的管理での対応が可能と考えられた。

7. まとめ

最終的に、現在の広浦が有する優れた景観に配慮し、養浜を主とする対策を提案した。具体的には、排水路から東側に180m離れたD点(ヨシ帯との境界)までの間において、総量 3638m^3 の土砂を $20.2\text{m}^3/\text{m}$ の割合で投入すれば、前浜幅を平均8m前進させることができ、1948年当

図-11 養浜から10年後の予測地形

図-12 養浜から10年後の汀線変化

時の湖浜を復元させることが可能となった。その際、養浜材料としては現地湖浜を構成する $d_{50}=2\text{mm}$ 程度で、縦断勾配が1/10程度となる粗粒材料を用いる必要になった。東端部に突堤を配置すれば土砂の流出量を減少させることが可能ではあったが、江戸時代から続く砂州の景観への影響を考えれば今回構造物の選択は避けるべきとの意見が強かったことから、突堤案については省略した。

参考文献

- 1) 国土地理院 GPS 連続観測から得られた電子基準点の地殻変動: <http://www.gsi.go.jp>, 2011 (参照 2011 年 8 月 31 日)。
- 2) 宇多高明・三波俊郎・石川仁憲: 霞ヶ浦における湖岸植生帯の長期的変遷-蓮河原地区の例, 水工学論文集, 第53巻, pp.1363-1368, 2009.
- 3) 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄: 卓越粒径集団に応じた平衡勾配を考慮した等深線・粒径変化モデル, 土木学会論文集 B, Vol.63, No.2, pp.154-167, 2007.
- 4) 宇多高明・住谷迪夫・矢澤 肇・大谷靖郎・厚坂祐次: 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, 1998.

(2013. 9. 30受付)