

# 海跡湖の湖口通過波による湖岸侵食と砂嘴の形成

LAKESHORE EROSION DUE TO WAVES TRANSMITTED THROUGH ENTRANCE CHANNEL OF LAKE AND FORMATION OF SAND SPIT

宇多高明<sup>1</sup>・酒井和也<sup>2</sup>・芹沢真澄<sup>3</sup>・三浦正寛<sup>2</sup>・星上幸良<sup>4</sup>

Takaaki UDA, Kazuya SAKAI, Masumi SERIZAWA,  
Masahiro MIURA and Yukiyooshi HOSHIGAMI

<sup>1</sup>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  
(〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4 タカラビル3F)

<sup>2</sup>正会員 工修 (株) 水域ネットワーク  
(〒134-0088 東京都江戸川区西葛西6-8-10 朝日生命西葛西ビル6F)

<sup>3</sup>正会員 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)

<sup>4</sup>正会員 博(工) 国際航業(株) 防災統括部 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘3-6-1)

Lakeshore erosion due to waves transmitted through the entrance channel of a lake and the formation of a sand spit around the entrance were investigated through the field observation at lakes facing the Ohotsuku Sea. Waves transmitted from the ocean to lake diffract into a lake and propagate apart from the entrance channel, losing wave energy and resulting in longshore sand transport. Due to this longshore sand transport, sand is transported from the vicinity of the entrance channel to far side and the lakeshore adjacent to the entrance channel is eroded. The shoreline deforms to be normal to the incident wave direction, resulting in the formation of a sand spit. This mechanism was explained by the shoreline change model.

**Key Words :** Lakeshore erosion, entrance channel, sand spit, transmitted waves

## 1. はじめに

オホーツク海沿岸には数多くの海跡湖が存在する。これらの海跡湖にあつては、ホタテやカキなどの栽培漁業のため、および水害防除のために人工的に湖口が開削されている。そしてこれらの湖口には、一般に湖口閉塞防止のために平行導流堤が設置されている。オホーツク海沿岸のうち、紋別港からサロマ湖付近にあつては東向きの沿岸漂砂が卓越する<sup>1)</sup>ために、海岸線から突出して伸ばされたこれらの平行導流堤は卓越沿岸漂砂を阻止し、導流堤西側で堆積を、東側では侵食を引き起こすとともに、湖口を通過する入退潮流による湖口特有な海浜形状が形成されている。過去にこれらは研究対象とされ、筆者らも沿岸漂砂阻止の影響<sup>1)</sup>を調べるとともに、サロマ湖第一湖口や能取湖湖口における海浜変形<sup>2) 3)</sup>について調べた。これらの海浜変形はオホーツク海側の海岸で起こるものであるが、これらに対してしばしば見落とされる地形変化として、湖内の湖口近傍での地形変化がある。これは主として湖口通過波により生起された湖浜変形で

ある。湖内での侵食・堆積量は外海側の地形変化と比較しても見劣りするものではなく、湖岸防護策が必要となるが、地形変化の原理に忠実な対策が行われない場合、海跡湖の良好な自然環境にマイナスインパクトを及ぼす危険性がある。しかしこのような湖口からの侵入波による湖浜変形については過去に全く研究例がないのが現状である。本研究では、オホーツク海に面した3つの海跡湖の湖口を対象として、空中写真の比較、現地踏査および汀線変化モデルを用いて検討する。

## 2. 調査区域の概況と空中写真の比較

調査区域はいずれもオホーツク海沿岸にある海跡湖の湖口である。オホーツク海の紋別港からサロマ湖までは全体的に東向きの沿岸漂砂が卓越しているので、沿岸漂砂の上手側から順に調査区域を並べると、図-1のようにコムケ湖、サロマ湖第二湖口、能取湖湖口の順となる。最初にこれらの区域の空中写真をもとに湖口周辺の湖岸線の変化を調べた。

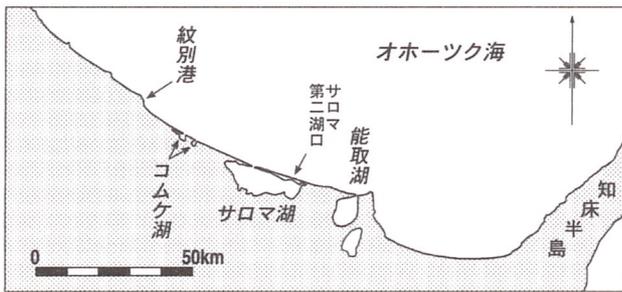


図-1 調査対象のコムケ湖，サロマ湖第二湖口および能取湖湖口の位置

コムケ湖の2001年5月撮影の空中写真を図-2に示す。湖口には平行導流堤が延びている。導流堤を挟んだ東西の汀線位置を比較すると、西側では前浜が広いのに対し東側では汀線が後退し、一部護岸が設置されている。これより東向きに沿岸漂砂が卓越することが明らかである<sup>1)</sup>。注目されるのは、湖内の湖口近傍の湖岸線形状である。湖口の西部は湖口通過波により汀線が後退し、砂が南向きに運ばれ長さ約300mの細長い砂嘴が形成されている。同様に東部でも湖口近傍の湖岸は護岸で守られているが、湖口の南東約370mには分枝砂嘴が形成されている。湖内で発達する風波はこのような突起を潰す方向に作用すると考えられるので、このような湖岸の特徴は、狭口水路の通過波によって形成されたと考えられる。

図-3はサロマ湖第二湖口の2000年撮影の空中写真である。サロマ湖第二湖口にあっても、湖口には平行導流堤が延びている。この付近では海岸線と卓越入射波とのなす角が小さく、一方向に沿岸漂砂の卓越が弱まる<sup>1)</sup>結果、平行導流堤の左右岸での汀線の非対称性はほとんど見られない。湖内側に着目すると、湖口西部にあつては

直線的に約250m延びた護岸の端部の汀線がフック状に後退し、その西側隣接部に砂が堆積して汀線が凸状となっている。これと同様に、湖口東部にあつても長さ約250mの護岸端部の汀線が大きくフック状に後退している。ちなみにサロマ第二湖口は、図-4のように1977年9月頃自然砂丘を開削して造られた湖口であり、建設以前の湖内側汀線は緩やかに湾曲していた。

図-5は2000年8月撮影の能取湖の状況である。外海側には防波堤が延びているが、湖口には平行導流堤が設置されている。これらの導流堤の湖内側端部では両岸とも汀線が大きく後退し、フック状となっている。これらの平行導流堤の湖内側端部から湖内側に約700mの間は汀線がフック状に延びているが、その先端部で砂嘴の伸長方向が急に変わり、平均海岸線とほぼ平行に伸びている。図-2に示したコムケ湖の場合、砂嘴は狭口水路の延長方向に伸びていたのと大きな違いを示す。

### 3. 現地踏査

#### (1) コムケ湖湖口

コムケ湖湖口の現地踏査は2002年10月26日に実施した。写真-1は、コムケ湖湖口の西側隣接部において湖内側に立って湖口を望んだものである。正面に見えるコンクリート構造物は湖内側に造られた台形状の護岸である。湖内へと突き出した護岸の西側には湖岸防御のために緩勾配の捨石斜面が造られている。この写真のみを見ると湖口からの侵入波浪に対して十分な防護がなされているように見える。しかし写真-1の撮影地点から逆方向を望む

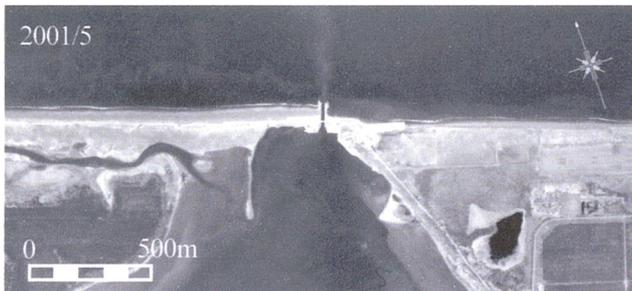


図-2 コムケ湖の空中写真 (2001年5月)

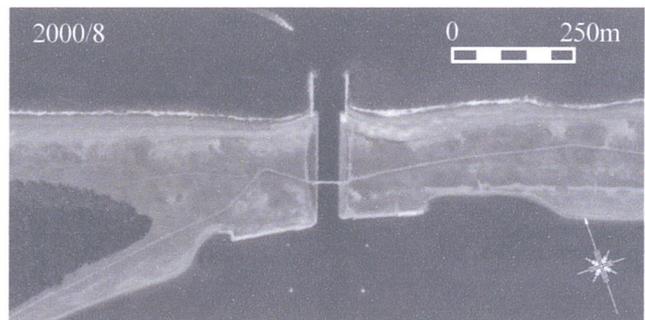


図-3 サロマ湖第二湖口の空中写真 (2000年8月)



図-4 サロマ湖第二湖口の空中写真 (1977年9月)

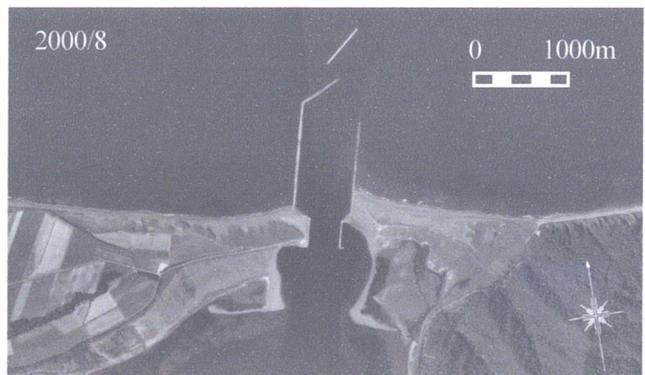


図-5 能取湖湖口の状況 (2000年8月)

と写真-2のように既設の捨石護岸の端部が大きく侵食され、非常に高い浜崖の形成が進んでいた。また湾曲した浜崖面の前面には新しく異形ブロックが置かれていたことから、侵食が進んだため新たな対策が取られたことが分かる。

写真-3は異形ブロックの端部からその前面の浜崖を撮影したものであるが、地層に見える層状模様から分かるように天然の砂丘地が侵食され、高さ約4mもの浜崖が形成されたことが見て取れる。また浜崖基部には上部に載っていた植生が侵食とともに多数滑り落ちていることから侵食が依然として継続中であることが分かる。この浜崖は南向きに次第に高さが低下する。写真-3の左端付

近で撮影したのが写真-4である。ここでは浜崖の高さは1.5mにまで低下する。この地点は図-2にも示したように、湖内へと次第に標高を下げる砂丘地が削られたために浜崖の高さが低くなったものである。

護岸端部から始まる侵食によって削り取られた土砂は、湖口から離れる方向に運ばれたが、湖口から離れるに従い侵入波のエネルギーが大きく減衰するため、湖心方向へ向いた砂嘴を形成しつつ堆積した。写真-5はこの砂嘴の付け根の状態を示す。砂嘴は図-2および写真-5のように、その付け根から約300mも湖心方向へ伸びている。砂嘴は湖内で発達したものであるために、砂州高は低く、水面ぎりぎりに形成されている。砂嘴の先端部は写真-6



写真-1 コムケ湖湖口の西側隣接部の湖内側地点から護岸を望む (2002年10月26日)



写真-2 捨石護岸端部の浜崖侵食 (2002年10月26日)



写真-3 異形ブロック隣接部に形成された高さ約4mもの浜崖 (2002年10月26日)



写真-4 次第に高さが低下し1.5mとなった浜崖 (2002年10月26日)



写真-5 湖岸から約300mも湖心方向へ伸びた砂嘴 (2002年10月26日)



写真-6 砂嘴先端部の状況 (2002年10月26日)

のように湖口からの侵入波に対して安定形状となろうとするために、内側にやや湾曲しつつ延びている。

## (2) サロマ湖第二湖口

サロマ湖第二湖口の調査は1988年5月7日に行った。写真-7は、当時の湖口の西側隣接部で撮影したもので、コムケ湖の場合と同様、湖口からの侵入波浪が湖浜に作用した結果、湖口から離れる方向の沿岸漂砂が生じ、護岸の端部が侵食されていた。写真のように侵食対策として捨石が設置されていたが、その端部付近では更なる侵食が起きていた。写真-8は、写真-7の左側隣接部を撮影し



写真-7 サロマ湖第二湖口の西側端部での侵食  
(1988年5月7日)

たものである。湖口の西側端部が削られ、そこから供給された土砂が湖心方向へとやや突出し、堆積していた。コムケ湖での観察結果では細長い砂嘴が湖内へと大きく伸びたが、サロマ湖第二湖口の場合には汀線は緩やかに湾曲して突出した。

## (3) 能取湖湖口

能取湖湖口の西部における現地踏査は1988年5月7日と2002年10月26日に行った。写真-9は、1988年5月7日撮影の湖口左岸導流堤の先に導流堤と直交する方向に造られた護岸先端部付近状況であり、図-5のフック状汀線の付



写真-8 写真-7の左側隣接部の湖岸状況  
(1988年5月7日)



写真-9 湖口左岸導流堤に隣接して造られた護岸先端部  
付近の状況 (1988年5月7日)



写真-10 護岸端部から削り取られた砂により形成された  
砂嘴 (1988年5月7日)



写真-11 護岸先端部とそこに形成されたフック状汀線  
(2002年10月26日)



写真-12 湖心方向へ延びた後、浅い湖岸帯において伸長方  
向が沿岸方向に変わる細長い砂嘴  
(2002年10月26日)



写真-13 細長い砂州の発達状況 (2002年10月26日)



写真-14 細長い砂州の発達状況 (2002年10月26日)

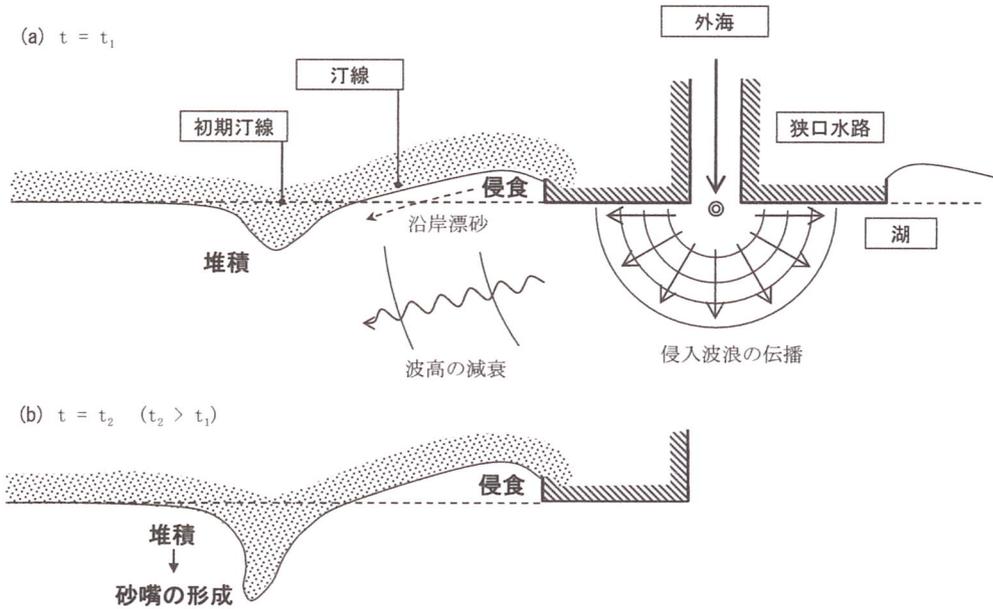


図-6 湖口侵入波浪による湖口近傍での侵食の模式図

け根付近の状況である。捨石護岸の先端部汀線が西向きにフック状となって後退している。さらにこの護岸背後の砂丘上から湖を望んだのが写真-10であるが、護岸端部から削り取られた砂が砂嘴を形成しつつ湖心方向へ大きく伸び、その後図-5に示したように砂嘴はその伸長方向を大きく変えている。

写真-9と同様、護岸の先端部とそこに形成されたフック状汀線を2002年10月26日に観察したのが写真-11である。護岸端部は侵食されてフック状となっただけではなく、侵食域は粒径の大きな礫で表面が覆われており、侵食の結果アーミングが進んだことが分かる。能取湖湖口隣接部での侵食に対し、そこからの侵食土砂は端部から写真-12のように細長い砂嘴を形成して湖心方向へまず延びた後、浅い湖岸帯において伸長方向が沿岸方向に変わり、写真-13, 14のように細長い砂州として発達していた。砂州の先端部はその標高が低いために越波も生じており、これによる岸向きの砂移動の痕跡も観察された。

#### 4. 汀線変化モデルによる再現

観察結果によれば、湖口からの侵入波浪によって湖側

では湖口近傍で侵食が進むと考えられる。湖口近傍での地形変化要因には飛砂・流水・潮流の作用も考えられるが、湖内において浜崖を形成しつつ礫を含む土砂が運ばれ、しかも水面上に出る砂州を形成したことから、地形変化は主に波の作用によってもたらされたことが明らかである。この原理を模式図として整理したのが図-6である。まず外海からの波浪が狭口水路を通過し湖内へと進行する。湖口は湖のスケールに比較すれば十分狭いので、あたかも点源として上半平面としての水域(湖)に波のエネルギーが伝播する。湖内の水深が一定の場合、点源からの波浪は回折問題に帰着する。波浪エネルギーは同心円状に広がり、湖口からの距離とともに波高が低下する。侵入波浪は実際には湖心方向へ次第に水深が増加する斜面であり、そこで屈折した波が湖岸に作用し、これが斜め入射波となるために湖口から離れる方向の沿岸漂砂を生じさせる。波浪が砂移動を起こすに十分でなくなればそこに砂は堆積し、結果として砂嘴を形成させるというものである。なお実際には湖口からの波浪に対して逆方向から作用する風波もあり、その作用が無視できない場合もある。

ここでは、サロマ湖第二湖口湖内西側の汀線変化について簡単な仮定を設けて汀線変化モデルを用いて計算し

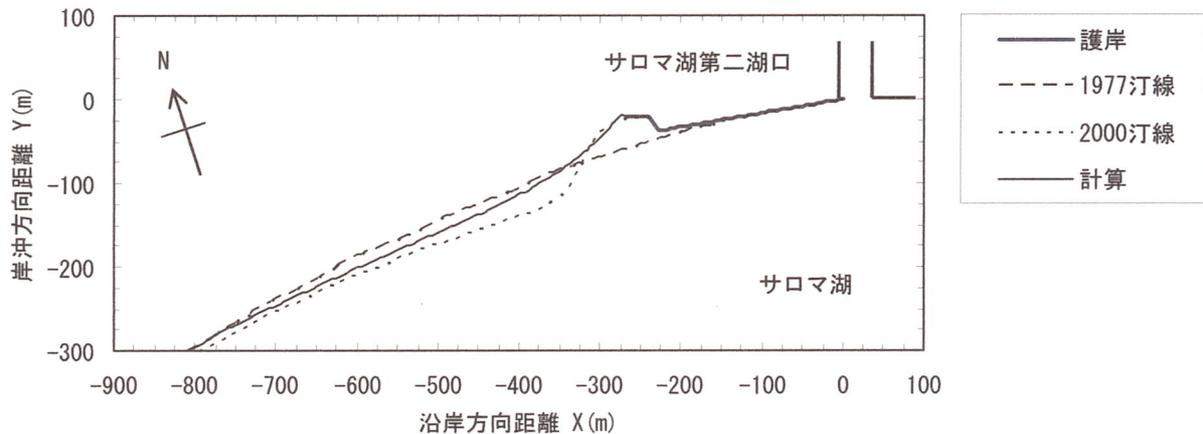


図-7 サロマ第二湖口の湖内西部での計算結果

てみる。初期汀線は掘削が完了する前年の1977年とし、これより2000年汀線の再現を行った。まず第二湖口湖内西側の1977年当時の汀線に対する法線の方向角は $N4^{\circ} E$ となる。計算では、外海から湖内への侵入波と、湖内で発達した風波を作用させた。侵入波は、そのエネルギーが湖口を点源として同心円状に伝播するとすれば、湖口からの距離  $r$  の地点における波エネルギーは上半面の円周  $\pi r$  に反比例することになるのでこれに応じて波高を低減させる。サロマ湖の湖沼図より、顕著な汀線の後退が見られる沿岸方向  $X=-250 \sim -300\text{m}$  付近における波による地形変化の限界水深を読み取ると、 $h_c=1.25\text{m}$  となった。次に、宇多・河野 (1996) の等深線変化モデルにおける  $h_c$  と碎波波高  $H_b$  の関係式 ( $h_c=2.5H_b$ ) を用いて  $h_c$  から碎波波高を逆算すると  $H_b=0.5\text{m}$  となる。さらに前述の湖口からの距離と侵入波波高の関係に基づき算出した  $X=-250 \sim -300\text{m}$  付近の波高から、沿岸方向全域の波高を推定した。推定の結果、第二湖口護岸端部 ( $X=-225\text{m}$ ) での碎波波高は  $0.55\text{m}$  となった。波向については屈折により斜め入射となるが、正確な湖底地形が不明なため、沿岸方向一様に  $20^{\circ}$  ( $N344^{\circ} E$ ) の斜め入射条件を与えた。

風波はSMB法により推算した。サロマ第二湖口で観測された年平均風速 (SW:  $2.7\text{m/s}$ ) を用い、サロマ第二湖口からSW方向の対岸距離  $7.1\text{km}$  を用いて波高を算定した結果波高は  $0.3\text{m}$  となった。風波の波向は、発達した風波が屈折により汀線付近で斜め入射波となるがこの場合も沿岸方向一様に  $20^{\circ}$  ( $N24^{\circ} E$ ) で与えた。沖からの侵入波と風波はどちらも通年的に作用する波と考えられるため、これら二つの入射波浪を出現比率  $1:1$  で作用させた。計算結果を図-7に示す。これによれば、護岸端部での汀線の後退とそこから離れた地点での汀線の前進とがほぼ再現されている。

## 5. 考察

湖ごとに砂嘴形状や侵食状況が相違する原因はいくつか考えられる。第1は波浪侵入が起きている狭口水路の幅である。図-2, 3, 5によれば、狭口水路の最狭部の水路

幅は、 $15\text{m}$  (コムケ湖)、 $45\text{m}$  (サロマ湖)、 $170\text{m}$  (能取湖) であり、波浪の侵入度は能取湖の場合が最も大きい。第2は、湖内で発達する風波の関与である。各地域での年間を通じた卓越風向である南西方向の対岸距離は、 $2.3\text{km}$  (コムケ湖湖口)、 $7.1\text{km}$  (サロマ第二湖口)、 $11.6\text{km}$  (能取湖湖口) となった。第3は湖内側の護岸形状の相違である。湖内の水路端から西向きに護岸長は  $70\text{m}$  (コムケ湖)、 $225\text{m}$  (サロマ湖)、 $100\text{m}$  (能取湖) であった。

これらの要素は互いに密接に関連しているが、能取湖の砂嘴が湖内で大きく方向を変えたのは湖内の吹送距離がコムケ湖と比較して著しく大きかったことが原因と考えられる。また能取湖の湖浜変形の規模が他の湖と比較して大きいのは、狭口水路の幅に対する相対的な護岸長が  $4.7$  (コムケ湖)、 $5.0$  (サロマ湖)、 $0.6$  (能取湖) と水路幅に対して護岸距離が非常に短く、したがって湖浜変形が起り易い条件にあったためと推定される。

ここでは3湖口の実例を示したが、水路とその周辺の湖岸線はその方向角が場所的に大きく変化することが特徴であり、そのような場所にあつては直線的な海岸線を有する海岸とは異なり、端部付近での局所的な侵食と砂嘴の発達とがセットで起こるといふ点において注意が必要である。

## 参考文献

- 1) 宇多高明・三波俊郎・星上幸良・芹沢真澄・熊田貴之・酒井和也：卓越沿岸漂砂の阻止に起因した海岸侵食一紋別港～サロマ湖口の例，海洋開発論文集，第21巻，pp. 451-456，2005。
- 2) 菊地健三・宇多高明・川森 晃・佐々木哲士：サロマ湖における海浜変形，海岸工学論文集，第38巻，pp. 341-345，1991。
- 3) 菊地健三・宇多高明・川森 晃：能取湖々口における漁港建設に伴う海浜地形変化，海岸工学論文集，第37巻，pp. 469-473，1990。
- 4) 宇多高明・河野茂樹：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. 121-139，1996。