

湖沼環境下にある甌穴群の形成に関する造波水槽実験

渡壁卓磨*・小玉芳敬**

A wave tank experiment on pothole formation under a lake environment

WATAKABE Takuma*, KODAMA Yoshinori**

キーワード：甌穴群，水位観測，造波水槽実験，湖山池

Key Words : potholes, water level gauging, wave tank experiment, Lake Koyama-ike

I. はじめに

甌穴 (pothole, ポットホール) とは、主に岩石海岸の波食棚面や岩盤侵食河川の河岸・河床など、岩石の表面にできる円形の深い穴のことを指す。甌穴の中には、多くの場合、角が取れて丸くなった円礫が入っている。流水や磯波から派生する渦流の作用で、礫が穴の中で回転し、穴を深く削ることによって形成された微地形であると考えられている (伊藤, 1979; 町田ほか, 1981)。甌穴が多数存在する箇所を甌穴群と呼び、国内では八釜の甌穴群や関之尾の甌穴群などが有名で、これらは国指定の天然記念物となっている。鳥取県では鳥取市用瀬町を流れる赤波川の河床にある甌穴群が、平成24年8月に鳥取市の指定文化財となった。

2011年2月、湖山池南東岸で甌穴群の存在が確認された (小玉ほか, 2011) (図1)。甌穴は河川や海岸など、水流や波の営力があるところに形成されることが一般的であり、閉鎖性水域で水流の動きが不活発な池の環境で見つかったことは珍しい。

とは言うものの、湖山池で猛烈な風が吹いたとき、風下側沿岸には波高50cm近くの白波が立ち、池の底質が舞い上がり、湖山池全体が茶色く

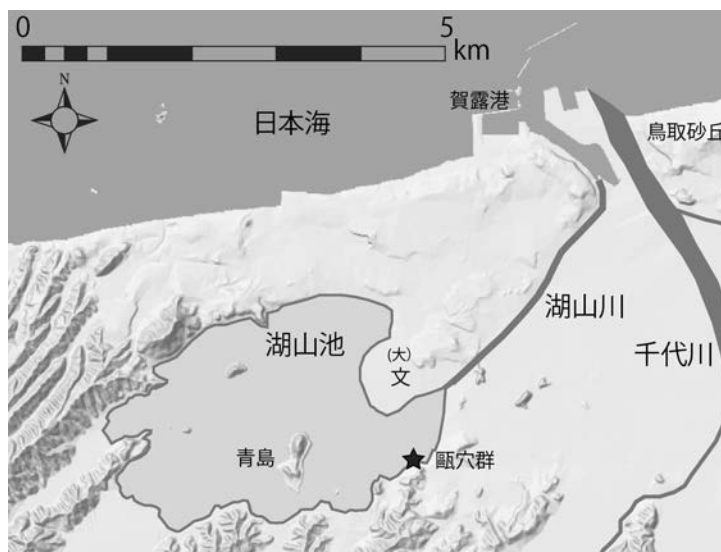


図1 湖山池周辺の地形陰影図と甌穴群の位置

*鳥取大学大学院地域学研究科

**鳥取大学地域学部地域環境学科

濁ることがある。このようなときに起こる波高50cm近くの波が、甌穴群の形成に関与している可能性が考えられる。あるいは、湖山池が砂州によって海から隔てられる前に、日本海の波が作用して形成された可能性も考えられる。

そこで本研究の目的は、湖山池南東岸の甌穴群が湖沼環境下で果たして形成されうるものかを明らかにすることである。湖山池の環境を知るために、水位の季節変動をまとめ、また冬の強風の日実際にどれ程の波が起こるのか水位の現地観測を実施した。これと並行して造破水槽実験から、波の営力（渦流）によって起こる侵食が、水位を変えることでどのように変化するのか調べた。これらを通して、湖沼環境下における甌穴群の形成の可能性を考察する。

II. 調査地域の概要

湖山池は面積6.88km²・周囲17.5km・海拔高度0.2mの海跡湖で、湖山砂丘の発達によって日本海から隔てられ形成された（星見，2009）。湖山池には6本の流入河川がある一方、流出河川は湖山川のみである。湖山川は今では賀露港（海）に直接流出しているものの、千代川河口部の付け替え事業および賀露港の整備事業が実施された昭和58年以前には千代川に直接合流していた。千代川と湖山川では河道深や流量が大きく異なるために、湖山川が千代川に合流していた当時、塩水くさびが湖山川に入り込む機会は少なかったと思われる。しかし湖山川が直接海（賀露港）に注ぐと、塩水くさびが湖山川に差し込み、池の塩分濃度が急上昇し、農作物の塩害問題が表面化した。そこで千代川からの洪水逆流防止及び高潮対策のために造られていた水門を利用して塩分濃度を調節する水門操作を行うようになった（鳥取県・鳥取市，2012）。

調査対象の甌穴群は、鳥取県鳥取市湖山池の南東岸（鳥取市桂見，図1）の湖岸から2mほど沖合にある波食棚上に形成されている。小玉ほか（2011）の見取り図に基づいて甌穴群の概要を述べる（図2）。甌穴群が形成されている波食棚（図3a）の岩質は花崗岩で、幅約2m、長さは5m以上にもなる。岸側には火砕岩が露出し、割れ目が多く、甌穴群は形成されていなかった。図2中で示している甌穴Aの中には、藻類が付着した花崗岩円礫が入っており（図3b）、甌穴内で角が取れて丸くなったものと考えられる。Aの他にも典型的な孤立型の甌穴は6つ程見られ

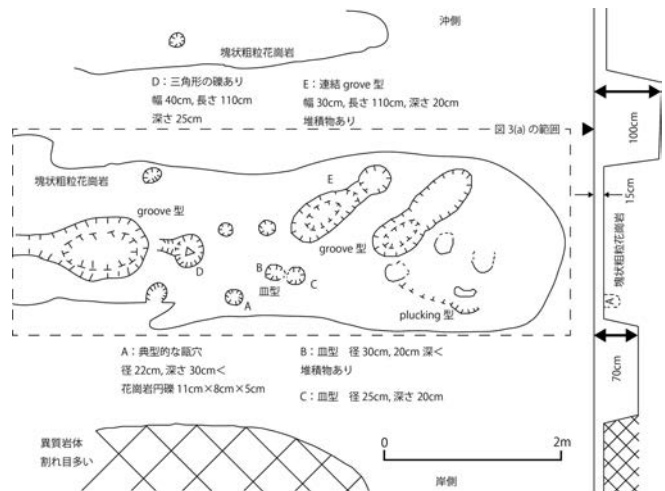


図2 甌穴群の見取り図および断面図（小玉ほか，2011に加筆）

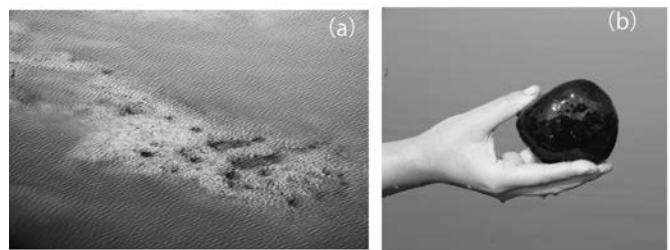


図3 湖山池で発見された甌穴群 (a) 波食棚に形成された甌穴群 (b) 甌穴の中で見つかった円礫

た。その他、皿型の甌穴、groove（溝）型の甌穴や、ちりどりの形に似たplucking型の侵食微地形が確認できた。このplucking型の凹みは、何らかの衝撃で岩盤がはぎ取られた形態と考えられる。

Ⅲ. 湖山池の水位の経年変化と波浪の状況

1. 湖山池の水位の経年変化

湖沼環境下における甌穴群形成の可能性を探るために、まず湖山池の水位の経年変化を調べた。水位データは鳥取県河川課からご提供頂いたもので、湖山池の青島にかかる栈橋の橋脚脇に設置された水位計の観測値である。観測期間は1998年6月～2011年10月までの期間で毎正時である。ただし、2007年3月以前はデータの欠損が多く、月のうちの1日の数時間しか観測値が残っていない月（例えば1998年7月）もあった。しかし湖山池の水位変遷を長期間にわたり調べるには、欠くことのできないデータである。

湖山池における1998年6月～2011年10月の毎月の平均水位・日平均最高水位・日平均最低水位を図4にまとめた。平均水位は、毎正時の水位データから日平均水位を算出し、月ごとに平均した値である。日平均最高水位と日平均最低水位は、毎正時ごとのデータを1日単位で平均し、最も水位の高かった日と低かった日を抜き出した。

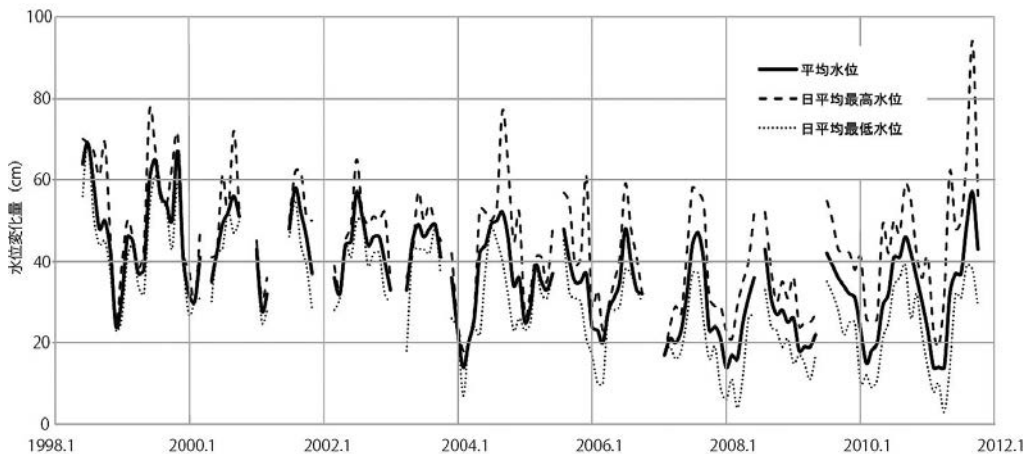


図4 湖山池の水位の経年変化（1998年6月～2011年10月）

毎年冬期（特に1月～2月）にかけて湖山池の水位が低下し、夏期には水位の上昇が見られ、その差は40cmほどにおよんだ。水位の季節変化が、如何に大きいか理解できる。湖山池の日水位の変化量は、通常、降水がなければ1cm未満とほとんど変化しない。観測データ中で最も水位の日変化量が大きかったのは、2011年9月3日の台風12号通過前で、その差は30cmほどであった。水位の経年変化に注目すると、水位の低下傾向が認められる。1998年から2010年までの12年間で約30cmの水位低下が生じた。しかしこの原因は今のところ不明である。

小玉ほか（2011）が甌穴群の存在を確認した2011年2月は、湖山池の水位が最も低かった時期にあたる。それにもかかわらず、甌穴群の立地する波食棚は水面下15cmに存在していた。したがって水位が高くなる夏期には、甌穴群は水深50cmほどの水面下に位置する。このため、甌穴群は冬期には波の影響を受けるものの、水位が高くなる夏期には波の影響を受けにくくなることが予想される。

2. 湖山池で生じる波浪の現地観測

冬に湖山池周辺で強風が吹いたとき、湖山池ではどれほどの波高の波が立つのかを把握するために、波浪観測を実施した。波高の観測をするために、Onset社製水位計データロガー U20-001-01-Ti (水圧測定) と U20-001-04 (気圧測定) を用いた。水圧と気圧の値を専用のアプリケーションである HOBO Ware Pro によって補正をすることで、水圧計から水面までの距離、つまり水深を求めることができる。水圧計・気圧計のデータロガーへの記録は、1秒間隔に設定した。

2011年から2012年にかけての冬には、「底質の巻き上がりにより湖山池の水全体が茶色く濁る」といった状況を観察できなかった。また豪雪の影響で湖山池の水位が例年より高くなっており、波が波食棚にぶつかって碎破する様子も視認することが困難であった。そのため、強風が吹くと予想される前線通過時に波浪観測を実施した。

2012年2月1日に前線を伴った低気圧が鳥取県を通過し、平均風速が10m/sを超える西風が8時間以上続いた。北風ではなかったため波浪観測は甌穴群の近くではなく、西風で最も高い波が立つ湖山池の東岸で実施し、岸から約2m沖合の水深1.1mほどのところに水位計を投げ入れた。現地観測は午前10時～午後4時までの6時間行った。

気象データは、アメダス湖山観測所で記録されたものを使用した。気象庁によって発表される平均風速・風向データは、毎正時前10分間の記録を平均したものである。そこで、波浪観測データのうち、毎正時前の6分前～4分前のものを解析対象とし、風況との関係をみた。

観測結果の中から最も高い波浪が記録されたのは、午後1時54分～56分までのものであった(図5)。この時の平均風速は14.5m/sで、風向は西であった。水位観測からは約2秒の間隔で水位の上下が認められ、周期2秒ほどの波が発生していたと考えられる。最高水位差は0.229m、つまり波高約20cmの波が押し寄せていたことがわかる。

「底質の巻き上がりにより湖山池の水全体が茶色く濁る」ような波浪条件では波高20cm以上の波がたつと考えられる。つまり波食棚上に形成されている甌穴群は、強風が吹いたときには波の影響を受ける可能性が充分考えられる。

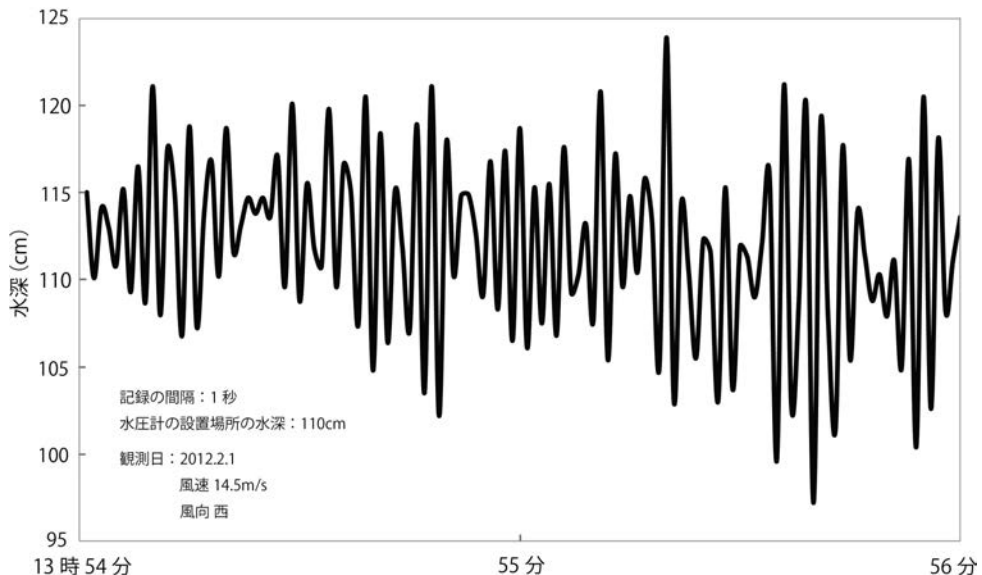


図5 湖山池での波浪観測の結果 (2012年2月1日)

IV. 碎波による波食棚の侵食作用に関する造波水槽実験

Alexander (1932) は、甌穴を模擬したガラスの円筒内に水流を流し込む実験を行い、円筒内で生じる渦流が甌穴の成因に重要な役割を果たしていることを示した。しかし、この実験では円筒内での水流の動きを確認するものであったため、碎破した波が甌穴に与える影響は不明である。本研究では小型の造波水路をツープイフォー材と透明アクリル板で製作し、波食棚上で生じる碎波に伴う侵食作用について観察した。

1. 実験条件

造波水槽は、長さ165cm×幅9cm×深さ41.5cmである(図6)。水槽の片端にレンガブロックを長さ53cm×幅9cm×高さ21cmで設置し、レンガブロック間および水槽壁との間隙を砂(豊浦標準砂：中央粒径0.2mm)で埋めることで波食棚を模擬した。ただし水槽の端から32cm~42cmの区間はレンガブロックを抜きとり、長さ10cm×幅9cm×厚さ10cmの凹地を形成し、この中に豊浦標準砂を詰め、平坦にした。この砂区間で波食棚面における碎波に伴う侵食作用の強さを評価した。43cm~53cm区間を構成するレンガブロックの両側には、水槽を横断する遮水壁を厚さ1mmのアクリル板で入れた。これは、レンガブロックの間隙を埋めた砂の流亡を防ぐためである。アクリル板の固底には、シリコンパテとガムテープを用いた。

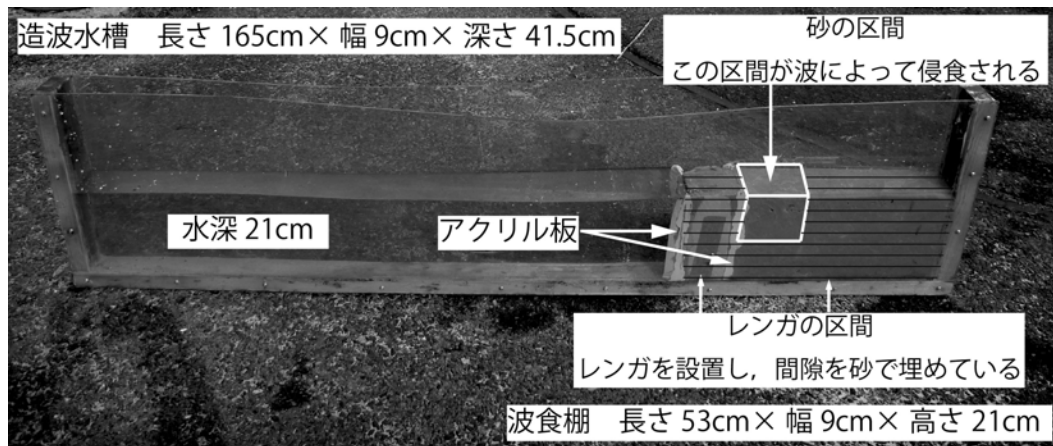


図6 造波水槽の全景

実験では、水位を変化させることで、波食棚の砂区間がどの程度侵食されるかを調べた。基準水位を波食棚の高さである21cmとし、水位を5段階で変化をさせた。つまり、波食棚のレベルと水位とが等しいものをCase1 (± 0 cm)、水位が高いものをそれぞれCase2 (+2cm)・Case3 (+4cm)、水位が低いものをCase4 (-2cm)・Case5 (-4cm)とした。

実験はそれぞれ砂区間の断面形がほぼ変化しなくなる定常状態になるまで続けた。いずれのCaseにおいても、水槽の対岸部において角材を手動で上下させることで、波高8cm前後の波を約2秒の周期で起こした。砂区間の断面形態変化をデジタルビデオカメラで水路横から撮影・記録した。

2. 実験結果

実験結果を図7にまとめた。Case1とCase2ではほぼ同様の結果を得ることができた。つまり、砂

の侵食深が共に3cmとなり、今回実験をした条件の中では最も深く掘れた。Case4では2cmの侵食が生じた。Case3では侵食深が1.5cm、またCase5では侵食深が1cmとなり、Case 1, 2や4と比べほとんど侵食が進まなかった。Case1・Case2・Case4における波食柵面と水位の差は、碎波波高の25%以内であった。この時、波食柵面で侵食が活発に起こった。いっぽうCase3・Case5では、水位の差が碎波波高の50%以上であった。この時、波食柵面で侵食がほとんど進まないことが明らかになった。

Case1・Case2・Case4では、観察から、波食柵にぶつかって碎破した波が渦を巻いて、砂区間に到達する様子を確認することが出来た。碎破した波が砂区間の砂を巻き上げ、侵食が進んだと考えられる。Case3では、碎破した波のエネルギーがCase1・Case2・Case4ほど大きくなく、また波食柵までの水深が他の実験Caseと比べて4cmと深かった。そのため、碎破した波が波食柵の砂区間に入り込むうちにエネルギーが吸収されてしまい、あまり侵食が進まなかった。Case5では、波食柵の海側にある垂直に切り立った小崖 (nip) で波が反射し、ごく一部の波が波食柵上を薄い水流として流れ、砂の区間の侵食はわずかであった。

Case1・Case2・Case4では、砂区間の侵食に伴いレンガブロックが露出した。レンガブロックに反射した波がどれほど侵食深に影響を及ぼしたかは不明である。この点に関しては、砂の区間を広くした実験で確かめることが課題として残った。

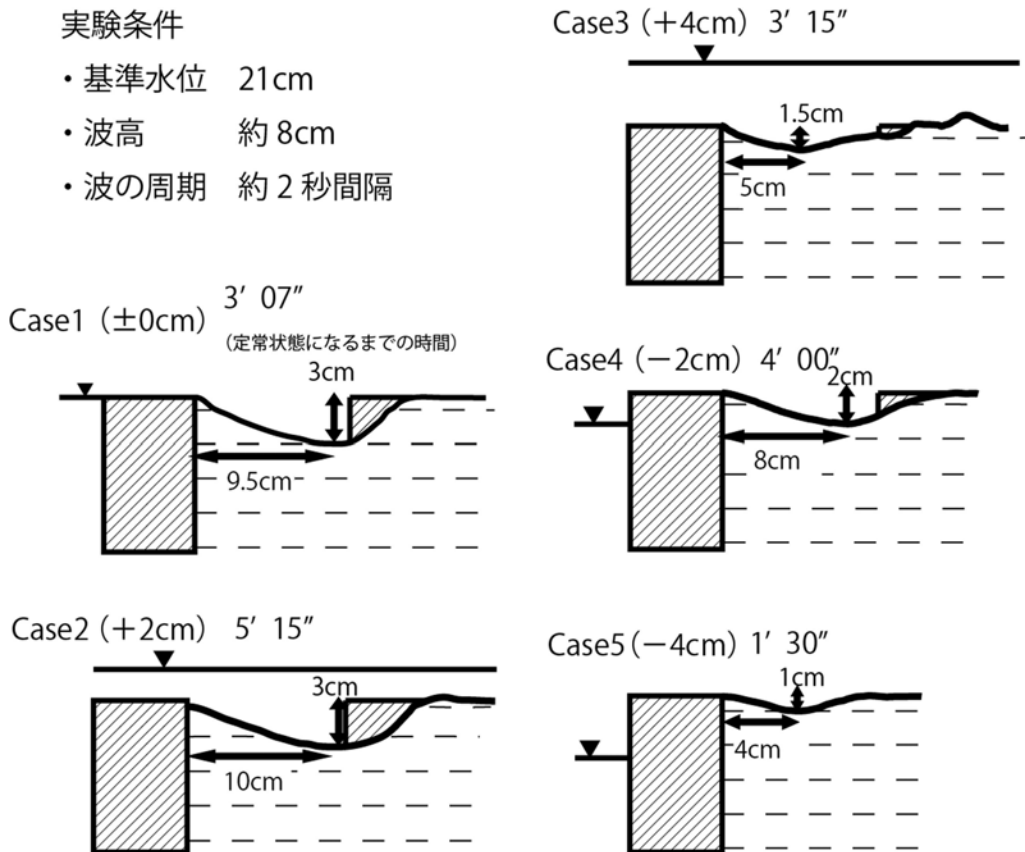


図7 碎波に伴う波食柵面の侵食作用に関する水位の影響を調べた造波水槽実験

V. 現地観測と造波水槽実験の関係

湖山池の水位観測の経年変化から、現在は徐々に湖山池の水位が低下しているものの、波食棚が水面近くに現れるときは、冬でかつさらに水位が低下した時とかなり限られた期間である。小玉ほか(2011)が甌穴群を確認した時は水位がかなり低下したときにもかかわらず、水面下15cmに存在していた。つまり少なくとも1998年以降、湖山池の甌穴群は1年間のうち大半(300日以上)は水面から離れたところに存在している。

波による甌穴の侵食プロセスでは、碎波の渦流により渦動する岩屑が重要な役割を担う。波食に及ぼす水位の影響を調べた小型の造波水槽実験では、碎波に伴う渦流の強度を評価したこととなる。造波水槽実験では、波食棚面と水位の差が波高の50%以上を超えると波食棚面への波の侵食作用が弱くなった。つまり現在の環境で甌穴内での侵食作用が活発になるには、湖山池の水位が最も低下した時(波食棚まで15cmの水深の時)に波高30cm以上の波が起こらなければならない。そのため、現環境下での甌穴群の形成は極めて考えにくい。実際、甌穴群の中で発見された円礫には藻類が付着しており、しばらくの間、活発な削磨が起きていなかったことを裏付けている。

VI. おわりに

本研究では、湖山池南東岸の甌穴群の形成環境を探り、特に湖沼環境下での甌穴群形成の可能性を明らかにすることを試みた。湖山池の水位観測の経年変化からは、冬期は夏期に比べて水位が約40cm低下していることが確かめられた。また湖山池の水位は最近12年間で30cmほど低下していることが明らかとなったが、この原因は不明である。

小型の造波水槽実験から、波食棚と水位の差が0cmの時か、あるいは+2cm(波高の25%)のときに、波食棚上では最も侵食が進み、±4cm(波高の50%)を超えるとほとんど侵食が見られなかった。このことから、湖山湖での甌穴群の形成は、波食棚とほぼ同等の水位の時に活発であったと考えられる。水位・波浪観測と造波水槽実験の結果からは、現在、湖山池湖畔の甌穴の侵食はほとんど起きていない。

2012年3月12日より湖山水門が常時開放された。これにより、湖山池の水位も潮の満ち引きの影響を直接的に受けることになる。甌穴群の形成を考えるためにも、今後の水位変動を注視していく必要がある。

謝辞

湖山池情報プラザの遠藤浩明様には、水位計の設置や回収にあたりご協力いただいた。鳥取県東部総合事務所 県土整備局維持管理課管理班の中井拓也様と西川昌志様には、水位計の設置にあたり、河川占用の申請において便宜を計っていただいた。鳥取県生活環境部 水・大気環境課 水環境保全室 衛生技師の奥田益算様には、湖山池の水質・水位観測データを、鳥取県県土整備部 河川課 計画担当の前田 崇文様には湖山池の水位観測データをご提供いただいた。なお、本研究の実施にあたり、平成23年度山陰海岸ジオパーク学術研究奨励事業「湖山池南東岸にみつかった甌穴群をジオサイトに加えるためのストーリー構築(代表:渡壁卓磨)」および平成23年度鳥取大学学長経費(教育・研究改善推進費)「閉鎖系水域研究プロジェクト(代表:福間三喜)」より支援をいただいた。記して御礼申し上げます。

参考文献

Alexander, H. S. (1932) Pothole Erosion: *The Journal of Geology*, 40(4), 305-337.

星見清晴 (2009) 湖山池—その生い立ち—. 鳥取地学会誌, 13, 23-36.

伊藤隆吉 (1979) 「日本のポットホール」. 古今書院, 132pp.

小玉芳敬・遠藤浩明・新名阿津子 (2011) 湖山池南東岸の甌穴群. 鳥取地学会誌, 15, 37-40.

町田貞・井口正男・貝塚爽平・佐藤正・榎根勇・小野有吾編 (1981) 「地形学辞典」. 二宮書店, 767pp.

鳥取県・鳥取市 (2012) 湖山池将来ビジョン 恵み豊かで親しみのもてる湖山池を目指して. 湖山池会議, 8pp.

(2013年2月1日受付, 2013年2月14日受理)