

CONTENTS—目次

月が導く深海の流れ

—地球を巡る深層海洋循環の謎への挑戦—

東京大学 大学院理学系研究科 教授 日比谷 紀之 …… 1～3

ROV・AUVによる湖底遺跡調査

立命館大学 教授 熊谷 道夫・教授 矢野 健一

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所

海洋先端技術系水中ロボティクス研究グループ グループ長

篠野 雅彦 …… 3～4

月が導く深海の流れ —地球を巡る深層海洋循環の謎への挑戦—

ひびや としゆき

東京大学 大学院理学系研究科 教授 日比谷 紀之

【はじめに】

皆さんにとって海はどんな存在だろうか。はるか昔、生命が誕生した頃から現在に至るまで、私たちは常に海とともに暮らしてきた。しかし、それ程までに身近な存在であるにもかかわらず、海には未だ説明されていない謎が多い。近年、この謎の一つであり、私たちの生活環境に大きな影響を与える「深層海洋循環」と呼ばれる海水のグローバルな循環のメカニズムが、次第に明らかになってきた。

【深層海洋循環とは】

海洋の表層には、黒潮や親潮など、その上を吹く風の作用によって、水平方向に帯状をなす海水の流れが存在する。このような表層海洋循環が水平循環であるのに対し、深層海洋循環は、鉛直循環として特徴付けられる。水は冷やされる(温められる)と収縮(膨張)して、密度が増加(減少)する。また、海水に含まれる塩分濃度が高い(小さい)ほど、重く(軽く)なる。このような理由により、強く冷却された北大西洋北部の表層の塩分濃度の高い海水が海洋の深部まで沈み込み、いわゆる深層水として海底を這うように流れ、約1,500年の歳月をかけて全球を巡った後、インド洋や北太平洋で湧き上がり、表層を元の深層水形成域に戻っていくという深層海洋循環の初めてのイメージ(プロッ

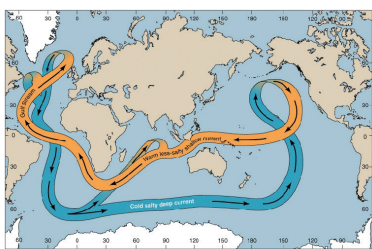


図1 深海を巡る海流の模式図

このように、高緯度の冷たい海水を低緯度に運び、低緯度の暖かい海水を高緯度に運ぶ深層海洋循環は、高緯度域の極端な寒冷化や低緯度域の極端な温暖化を防ぐエアコンのような役割を果たしている。実際、この深層海洋循環が停止すると、例えば北大西洋では5℃以上の気温変化が生じるなど、全球規模で気温が大きく変化することが数値シミュレーションから示されている²⁾。また、海洋の生物生産にも大きな影響が及ぼされ、全球の海洋生物生産、特に、太平洋における海洋バイオマスにいたっては、約半分にまで減少してしまうと推察されている³⁾。

【深層海洋循環の駆動メカニズム】

近年の人工衛星によるリモートセンシング技術の発展などにより、深層水が形成されている領域は、北大西洋北部や南極海であることがわかってきた。こうした地域では、1秒間に約2,000万トンの海水が沈み込んでいとされる。深層海洋循環が定常的に存在しているとすれば、どこかで同量の海水が深層から表層に上昇していなければならない。冷たい深層水を上昇させるには浮力が必要である。この過程に重要な役割を果たしていると考えられているのが「乱流」という海洋中のミクロ(1cmスケール)な渦である。実際に、太陽熱で温められた表層の水がこの乱流という小さな渦の効果で少しずつ下方に混合し、次第に温められて密度の減少した深層水が表層に上昇してくるプロセスが数値実験で再現されている(図2)。

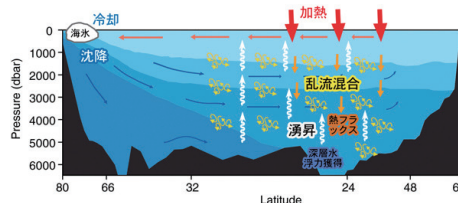


図2 深層海洋循環に関わる物理過程

では、乱流の動力源は何なのだろうか。海洋中では、月や太陽の引力による作用で常に存在している潮汐流が海嶺や海山に衝突することで内部潮汐波を励起している。そこで、深海に普遍的に存在するとされる内部波場を数値モデル内に組み込み、12時間周期の内部潮汐波を外力として与えた数値実験を行った。その結果、特に緯度20°-30°では「パラメータ共振」という内部波間の非線形相互干渉により、海山の周囲に約24時間で1周する円盤状の流れ(近慣性流)が形成され、その近傍で強い乱流が励起されていることを突き止めた⁴⁾。この12時間周期の内部潮汐流による24時間周期の近慣性流の増幅には、ブランコが中央に来たタイミングにあわせ乗り手が1往復に2回しゃがむことでその揺れ幅が増加していくのと同じメカニズムが働いている。

例えば、この潮汐流の主要な励起源である月が、地球の周りからなくなってしまうと、この円盤状の近慣性流が弱くなって乱流が十分に励起されず、表面からの熱を下層に伝える媒体もなくなるので、やがて深層海洋循環は止まってしまう。現在の地球の温和な気候をもたらす、人類の存在を可能にした深層海洋循環の駆動には、実は「月」の存在が大きく絡んでいるのである。

【乱流の緯度依存性の実証】

米国では、以前から乱流観測を中心とした研究が活発に行われていたが、その結論は、深海における鉛直乱流強度は極めて小さく、深層海洋循環を維持するのに必要な乱流強度と比べて1/10程度に過ぎないというものであった。これは、彼らの乱流観測のほとんどが、顕著な海嶺・海山の存在に乏しい東部太平洋で行われていたためである。2000年代に入って、ハワイ海嶺域を中心とするアメリカの乱流研究プロジェクトが開始されてから、かなりの海域が凹凸の激しい海底地形で占められている西部太平洋での乱流観測の必要性が、次第に認識されるようになってきた。

我々の研究グループは、我が国に未だ深海乱流計が存在しなかった1990年代、上述した数値実験の結果を基に、深度2,000mまでの近慣性流の鉛直構造を計測できる投棄式流速計(XCP)を太平洋、インド洋、大西洋の広範囲にわたって約700台投入して水平流速の鉛直微細変動の振幅を計測した。その結果、アリューシャン海嶺の近傍では、水平流速の鉛直微細変動の振幅が小さいのに対し、ハワイ海嶺近傍では、その振幅が著しく大きくなるのがわかった。既存のパラメタリゼーションの式⁹⁾を用いて水平流速の鉛直微細変動の振幅から鉛直乱流強度を算出し、緯度分布のグラフにすると、同じような内部潮汐波が発生しているにもかかわらず、緯度50°付近のアリューシャン海嶺では鉛直乱流強度が小さいのに対し、ハワイ海嶺や伊豆・小笠原海嶺など、緯度が30°より低緯度側の海嶺付近では1cm/sよりも大きな鉛直乱流強度をもつことが明らかになった(図3)⁶⁾。

その後、待望の国産初の深海乱流計 TurboMap-D を当時、神戸にあったアレック電子(株)と共同開発し、北太平洋を中心として様々な海域で乱流観測を実施した。その結果、乱流ホットスポットが、顕著な海嶺・海山が多数存在する大洋の西側、しかも緯度20°-30°付近に集中して存在していることが明瞭に示された(図4)⁷⁾。この結果は、数値実験で予測された鉛直乱流強度の緯度依存性を改めて実証するとともに、中・深層における鉛直乱流強度の世界初となるグローバルマップとして国際的に注目を集めた(図4)。

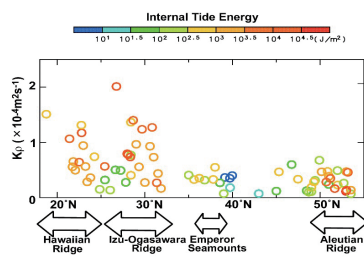
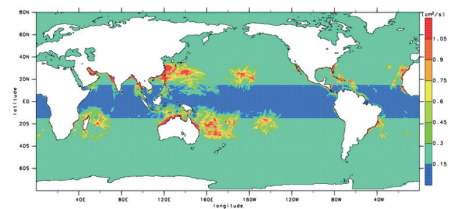


図3 乱流強度の緯度分布



鉛直乱流混合のホットスポットは、緯度30度よりも赤道側の海嶺・海山の近傍に局在

図4 乱流強度のグローバルマップ

【深層海洋循環における乱流強度不足(Missing Mixing)問題】

前述した通り、北大西洋や南極海では、1秒間に約2,000万トンの深層水が沈み込んでいるとされているが、表層にこれらを全て引き上げるには深さ1,000m-2,000mで平均的に1cm/s程度の鉛直乱流強度が必要であるといわれている。しかしながら、現在までに明らかにされた乱流ホットスポットを全て足し合わせたとしても、この鉛直乱流強度の半分程度にしかない。

この乱流強度不足(Missing Mixing)問題を解決する鍵となり得るのが、海底凹凸地形上に形成される乱流ホットスポットである。実際、各大洋の海底凹凸地形上では、潮汐流との相互作用により鉛直上方に強い乱流ホットスポットが形成されることが数値実験により判明している⁸⁾。また、南大洋では、上空の偏西風によって励起されている南極周極流が深海底にまで達しており、これが海底凹凸地形と相互作用することで、強い乱流ホットスポットが形成されている

可能性がある。

この理論的予測を確認するため、我々の研究グループは、海底凹凸地形直上までの乱流強度を計測可能な超深海乱流計 VMP-6000 や VMP-X(カナダ・Rockland社製)を用いて、過酷な環境のために乱流観測が極めて困難であった南大洋⁹⁾や、これまで観測船を領海内に入れることさえ困難だったインドネシア多島海¹⁰⁾など、世界気候に大きな影響を与えるとされながら、乱流観測の空白域として残されてきた海域でも観測を実施している。

【今後の課題】

現在の深層海洋循環の数値モデルは昔と比べてはるかに精密になってきているが(図5)、それでも、本研究で明らかにされてきた乱流強度の情報、例えば「深海乱流強度の緯度依存性」は未だに組み込まれていない。今後は、これらの研究成果を深層海洋循環モデルに組み込むことで、ミクロな情報からグローバルな深層海洋循環像の確立を目指していきたい。

最後に、日本海洋学会が中心となって取りまとめた大型研究計画「深海アルゴフロートの全球展開による気候・生態系変動予測の高精度化」についても触れておきたい。この研究の目的は、約1,000台の深海アルゴフロートをグローバルに展開し、得られた乱流データを数値モデルに組み込むことで、数千年~数万年スケールの過去から、数十年~数百年スケールの未来にわたる気候変動過程を世界に先駆けて再現することである。本研究計画は、日本学術会議が策定する「第24期学術の大型研究計画に関するマスタープラン(マスタープラン2020)」では重点大型研究計画として採択され¹¹⁾、現在、文部科学省「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想ロードマップ(ロードマップ2020)」に提案中である。地球環境変動が加速している現在、このような深海乱流の解明による気候変動予測・海洋環境予測の精緻化を実現することで、人類社会の持続的発展に大きく寄与できるものと確信している(図6)。

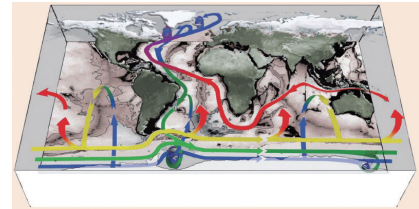


図5 現在の深層海洋循環の数値モデル

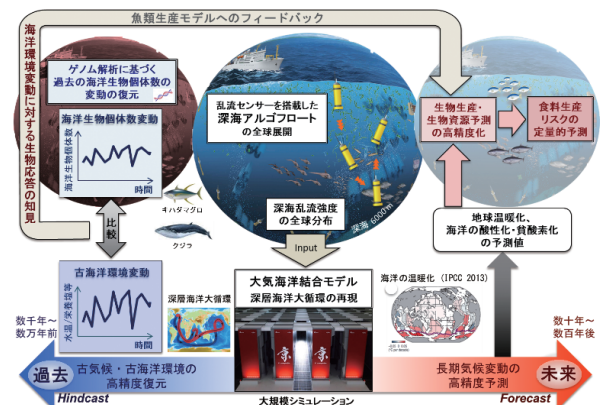


図6 計画の概要図

- 1) Broecker, W. S.(1991), The great ocean conveyor, *Oceanography*, **4**, 79- 89.
- 2) Vellinga, M. and R. A. Wood(2002), Global climatic impacts of a collapse of the Atlantic thermohaline circulation, *Climate Change*, **54**, 3, 251-267, doi:10.1023/A:1016168827653
- 3) Schmitter, A.,(2005), Decline of the marine ecosystem caused by a reduction in the Atlantic overturning circulation, *Nature*, **434**, 628-633, doi:10.1038/nature03476.
- 4) Hibiya, T., M. Nagasawa, and Y. Niwa(2002), Nonlinear energy transfer within the oceanic internal wave spectrum at mid and high latitudes, *Journal of Geophysical Research: Oceans* **107**(C11), 3207, doi:10.1029/2001JC001210.
- 5) Gregg, M. C.(1989), Scaling turbulent dissipation in the thermocline, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **94**(C7), 9686-9698, doi:10.1029/JC094iC07p09686.

- 6) Hibiya, T., and M. Nagasawa(2004), Latitudinal dependence of diapycnal diffusivity in the thermocline estimated using a finescale parameterization, *Geophysical Research Letters*, **31**(1), L01301, doi:10.1029/2003GL017998.
- 7) Hibiya, T., M. Nagasawa and Y. Niwa(2006), Global mapping of diapycnal diffusivity in the deep ocean based on the results of expendable current profiler(XCP) surveys, *Geophysical Research Letters*, **33**, L03611, doi:10.1029/2005GL025218.
- 8) Hibiya, T., T. Ijichi, and R. Robertson(2017), The impacts of ocean bottom roughness and tidal flow amplitude on abyssal mixing, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **122**, 5645-5651, doi:10.1002/2016JC012564.
- 9) Takahashi, A., and T. Hibiya(2019), Assessment of finescale parameterizations of deep ocean mixing in the presence of geostrophic current shear: Results of microstructure measurements in the Antarctic Circumpolar Current Region, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **124**, 135-153, doi:10.1029/2018JC014030.
- 10) Nagai, T., and T. Hibiya(2015), Internal tides and associated vertical mixing in the Indonesian Archipelago, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **120**, 3373-3390, doi:10.1002/2014JC010592.
- 11) <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-t286-1-pl.pdf>

ROV・AUVによる湖底遺跡調査

立命館大学 教授 ^{くまがい みちお} 熊谷道夫・教授 ^{やの けんいち} 矢野健一

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 ^{ささの まさひろ} 篠野雅彦
海洋先端技術系水中ロボティクス研究グループ グループ長

1. はじめに

琵琶湖は、わが国最大(面積約670km²)にして最古の湖(形成約420万年前)である。古来、中国大陸や朝鮮半島から多くの人々や文物が日本海を横断して上陸し、福井から琵琶湖を経て大津・奈良・京都方面へと向かった。当時、琵琶湖最北の港であった塩津湾から出港する船が、最初に通過する難所として、尾上(滋賀県長浜市湖北町尾上)の対岸に位置する葛籠尾崎(つづらおざき)があった。この岬付近の気象が変わりやすいことは、かつて船でこの地を訪れた紫式部の短歌「かき曇り夕立つ浪の荒ければ 浮きたる舟ぞ静心なき」にも詠まれている。

しかし、この周辺に縄文時代から平安時代の長期間にわたる湖底遺跡が存在していることは、一般によく知られていない。ほぼ1万年におよぶ古代の湖底遺跡群の存在は、世界的に見ても稀有な存在であり、これらの探索や保全が日本の古代史解明や地域経済の振興にもたらすプラスの効果は計り知れないものがある。

尾上の湖底遺跡は葛籠尾崎沖にあり、1924年に地元の漁師がイサザ漁の底引きを行っていた際に複数の土器を引き上げた。当時はその価値もよくわからなかったが、土器を奉納した寺(真宗寺)の住職であった小江慶雄(1911-1988)が調査と分析を行った。小江慶雄は水中考古学者で、京都学芸大学の学長を務めた人物でもあった。しかし、当時、水中考古学という分野はわが国では主流でなく、せっかく集めた貴重な湖底土器も尾上地区の小さな資料館で長年保存されてきて、保存状態も大きな博物館と比べて決して良好とは言えず、未解析の土器も多数残されている(矢野ら、2019a)¹⁾。

我々は、2017年12月に、当該水域で有索遠隔操作型水中ロボット(ROV)を用いた湖底の撮影調査を実施した(図1)。その結果、水深71.5m地点で、ほぼ完全な形の古代土器(土師器の甕)

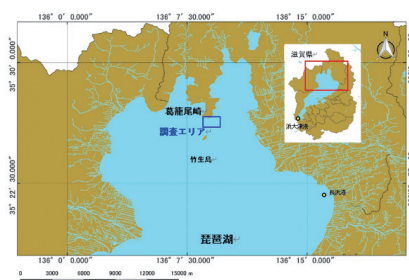


図1 湖底遺跡調査地点

を発見することができた。これまでは潜水による調査が主体であったので、湖底遺跡の分布は水深が20m程度までしか明らかになっていなかったが、このことから水深50m以深の場所にも保存状態の良い古代土器が数多く存在していることが明らかになった。

続いて、2018年6月から7月にかけて、自律型水中ロボット(AUV)「ほぼりん」(以下、ほぼりん)とROVを用いた湖底の撮影調査を行った。これまでに琵琶湖の湖底遺跡調査でAUVを利用した実績はなかったが、23,110mに及ぶ広範囲な水域の遺跡マップを作成することができた。ただし、この

面積は滋賀県が指定している湖底遺跡水域の約3分の1にすぎない。

また、サブボトムプロファイラーを用いた堆積層の音響調査も実施した。この調査によって、土師器の発見現場周辺の湖底地質構造が明らかになった。すなわち、土師器が発見される岩場の斜面は水深80mあたりまで続き、それより深くなると厚い堆積層が見られた。この堆積層の音響調査データを詳細に調べると、0.5m-1.0mの間隔で強い反射層が見られる。これは礫などによる音響反射であり、地震などによる地滑りが原因で形成された構造ではないかと考えられる。

このような事実は、なぜこの場所に古代遺跡が存在するのかという不思議へのヒントを与えてくれる。つまり塩津湾と琵琶湖の間に発生する強い水流の存在は葛籠尾崎斜面への堆積を阻害しており、斜面に着底した古代の土器が埋没しない形で長期間露出している可能性がある。一方、琵琶湖の堆積速度から考えると、500年から1000年ごとに発生する大地震による地滑りが、古代土器の水平輸送に貢献している可能性もある。例えば、近年に琵琶湖で発生したマグニチュード7以上の大きな地震としては、西暦1185年の文治地震(M7.4)と、西暦1662年の寛文地震(M7.6)があげられる。ともに琵琶湖周辺に大きな被害を与えたことが記録されている。

このように、葛籠尾崎湖底遺跡の調査は、縄文時代から中世におよぶ日本の歴史を紐解く上で重要な意味を持っている。それだけでなく、定期的に発生する地震などの地殻活動を通して日本列島の成因とも深く関係している。したがって、ROVやAUVを用いた琵琶湖の湖底遺跡調査は、社会文化的小および地球科学的に重要な意味を有している。本報では、2017-2018年に実施した湖底遺跡調査の結果を示し、その意義について検討する。

2. ROVおよびサブボトムプロファイラーによる葛籠尾崎湖底遺跡調査

2-1. 2017年の予備調査

2017年12月14日に、びわ湖トラスト・TBS・いであ株式会社の共同で、葛籠尾崎湖底遺跡の撮影調査を実施した。このとき用いたROVは、米国Teledyne BENTHOS社製のSeaROVERである。このROVは、耐水圧300m、空中重量70kgで、最大速度3ノットで移動でき、高解像度のビデオカメラと、2次元ソナー、3次元スキャニングソナーを搭載している。このROVを用いて、葛籠尾崎沖水深71.5m地点で土師器の甕を発見した。大きさは約30cmであり、形状から飛鳥時代から奈良時代に製作されたものであることが推察された。興味深いのは、このような深い湖底で、損傷のないほぼ完全な形状で、約1500年前の土師器が発見されたことである。

2-2. 2018年の調査

2018年7月13日-17日に、日本財団の支援を受けてROV

を用いた葛籠尾崎湖底遺跡調査を実施した。このとき用いたROVは、米国Blue Robotics社製のBlue ROV2であり、耐水圧100m、空中重量10kg、最大速度2ノットである。また、船舶曳航型サブボトムプロファイラー(Odom Hydrographic社製 Chirp III)を用いて湖底堆積層の音響調査も実施した。これらの撮影調査および音響調査から興味深い事実が判明した。

図2で示したように、葛籠尾崎から竹生島までの断面は、湖岸側(葛籠尾崎側)の岩場斜面と、湖中央側(竹生島側)の厚さ数10mの堆積層から成り立っている。堆積層

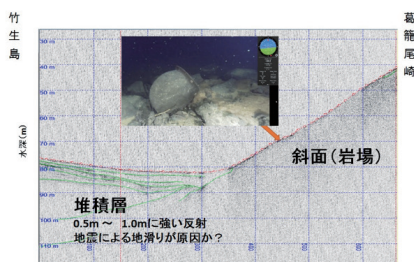


図2 葛籠尾崎沖の堆積構造と土師器の発見場所

の表面には0.5mから1.0mの間隔で複数の強い反射層があり、複数回の土砂流入があったことを物語っている。このような明瞭な堆積層は、琵琶湖の他の水域では顕著でないことから、葛籠尾崎沖で見られる湖底地質構造の特徴であると考えてよい。

土師器の甕は、この堆積層ではなく、葛籠尾崎側に向けて上昇している斜面の岩場で多く発見されている。この斜面に堆積物がほとんどないのは、塩津湾と琵琶湖の間に発生する周期的な強い水流(内部波)が原因しているのではないかと考えられる。

ROVの調査からは、他にも複雑な湖底模様(大量の土器が埋まった様子)が確認されている。これらが何を意味するのか、そしてどのくらいの範囲まで広がっているのかについては、今後のAUVを用いた広範囲の調査を待たなければならない。いずれにしても葛籠尾崎湖底遺跡には解明されていない古代土器が多数埋蔵されている可能性が高いので、さらなる調査研究が不可欠である(矢野ら、2019b)²⁾。

3. ホバリング型AUVによる葛籠尾崎湖底遺跡調査

2018年6月27日~7月1日に、ほばりんを用いて、葛籠尾崎湖底遺跡の広域調査を実施した。ほばりんは、SIP「次世代海洋調査技術(海のジパング計画)」のプロジェクトで海底熱水鉱床調査用に2015年に建造されたAUVであり(Okamoto et al., 2019)³⁾、最大深度2,000mの深海仕様である。本調査が初めての淡水域での潜航調査であった。葛籠尾崎湖底遺跡の調査水域が水深60~70mで、ほばりん調査潜航としては初めての“浅さ”であったこと、海水に比べて浮力が3%程度減少したこと、外洋の深海底に比べて透明度が低かったこと等、湖底調査のために機体調整および運用法の調整をするべき点がいくつか存在した。

ホバリング型AUVは、艇体形状、スラスター配置、移動速度等はROVとほぼ同じであるが、テザーケーブルがないため、湖底での水平移動の制約が少なく、広範囲の計画的な撮影調査に適している。ただし、湖底で得られた撮影画像について、対象物が遺跡かどうか現場で自律判断する機能は有していない。写真および動画を連続撮影し、湖底の計画測線を一巡し、浮上・揚収後に人の目で画像確認作業が行われる。このため、湖底目標物に対する多方向からの詳細撮影や、マニピュレーター等を用いた水中操作については、オペレーターが判断し現場操作できるROVの方が高

性能である。一方で、AUVは自律航行を行うため、一般的にROVでは搭載を省略しがちな、高精度の自己位置推定機能(慣性航法装置、対地速度計等)、および調査母船からのAUV測位機能(水中音響測位機等)が充実している。このため、AUV調査では、湖底遺跡を光学撮影するだけでなく、撮影時の湖底位置も高精度に記録し、次の調査時に同じ遺跡を再調査するための情報提供が可能となる。図3に、今回のほばりん潜航調査で撮影に成功した9個の甕と思われる写真を示す。

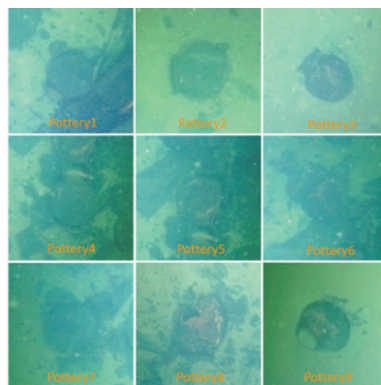


図3 ほばりん広域連続調査で撮影された9個の甕の画像

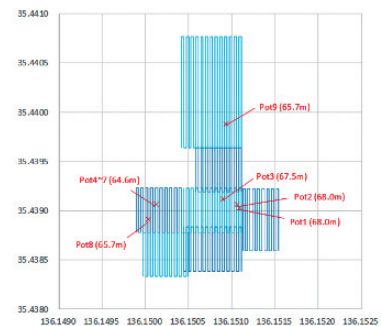


図4 ほばりん広域連続調査(23,110m²)の湖底測線と9個の甕の位置

また、その湖底位置を図4に示す。測位誤差は全て2m以内(ほばりんの1枚の湖底写真撮影範囲内)に収まっていると考えられる。

今後の湖底遺跡調査については、ROV・AUVの積極的な適用が、20m以深の水中調査の効率を飛躍的に上げるための重要な技術になると考えられる。2018年のほばりん潜航調査で撮影された9個の甕について、次の調査機会に正しく同一の甕を確認できるか、また、それぞれの甕の状態が数年の時間を経て変化しているか等の水中技術課題が、葛籠尾崎湖底遺跡の起源を探り、今後を占う上で、重要な鍵になると思われる。

謝辞

本研究の一部は、日本財団「海と日本プロジェクト」及び、総合科学技術・イノベーション会議のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「次世代海洋資源調査技術(海のジパング計画)」(管理法人:JAMSTEC)の「AUV複数運用手法等の研究開発」によって実施いたしました。関係者各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 矢野健一・西山集・小野大輔・山中俊樹・岡智康・林亮太 2019a 「葛籠尾崎湖底遺跡出土土器の調査成果概要」『日本考古学協会第85回総会 研究発表要旨』pp.202-203.
- 2) 矢野健一・川村貞夫・島田伸敬・熊谷道夫 2019b 「水中ロボットを利用した葛籠尾崎湖底遺跡調査の成果とその意義」『環太平洋文明研究』3: 77-90.
- 3) A.Okamoto, T.Seta, M.Sasano, S.Inoue, and T.Ura, "Visual and autonomous survey of hydrothermal vents using a hovering-type AUV: launching Hobalin into the western offshore of Kumejima Island", *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol.20, Iss.12 (2019) 6234-6243.

編集室から

新型コロナウイルス「SARS-CoV-2」が蔓延して世の中大変なことになっている。すでに「SARS-CoV-2」に何百もの変異が起きていることが明らかになっているが、この変異が感染力やワクチンの効きに影響を及ぼすか否かは不明とのことなので不安が残る。with コロナの生活が当たり前の世の中だが、それでも地球は回っていて、これからの海洋関連研究の企画提案等にもコロナ対策を盛り込むことが当たり前になるかもしれない。(白)

Techno-Ocean News No.75 2020年7月発行(年4回)

発行: テクノオーシャン・ネットワーク (TON)

〒650-0046 神戸市中央区港島中町6丁目9-1

(一財) 神戸観光局内

☎078-303-0029 ☎078-302-6475

URL: <http://www.techno-ocean.com>

e-mail: techno-ocean@kcva.or.jp