

浅海域を対象とした海底遺跡探査手法の検討

正会員 山口 悟* 学生会員 福田 雄**

Sub-bottom Exploration of Ship Wreck in Shallow Water

by Satoru Yamaguchi, Member Yu Fukuda, Student Member

Key Words: Ocean Exploration, Mongolian Invasion Ship, Underwater towed vehicle

1. 緒言

水中考古学は水面下の遺跡や沈没船を発掘、保存、調査する研究分野であり、全世界の海域で宮殿や沈没船の発掘が行われているが、その歴史は比較的浅く、海底には歴史的、学術・技術的に価値を有する船舟類に関する遺跡が数多く未調査のまま残されていると考えられる¹⁾。

本報告では、水中考古学における従来の探査手法について調査し、その課題を検討する。また、鷹島神崎遺跡の元寇沈没船探査のため、浅海域を対象とする音波探査と曳航体を組み合わせた探査システムを計画し、試作機の流体力学的特性、運動制御性能について検討する。

2. 水中考古学における探査手法

水中考古学における調査の第一段階では、海底における対象遺跡、遺物の位置が特定される。その際の一般的な探査手法は以下のとおりである。はじめに、サイドスキャンソナー (SSS) により対象海域の詳細な海底地形図が作成される。これをもとに遺跡の存在可能性が高い海域で磁気探査、電磁誘導探査により金属製遺物の調査を実施するとともに、サブボトムプロファイラー (SBP) による地層探査、その後のボーリング調査、試掘調査などが行われる。調査の際には対象となる遺跡や沈没船の海底における位置の精密な測位が重要となる。

一方で、水中遺跡の発掘調査には調査時期や時間の制限、人材確保の難しさなど多くの課題が残されている。以下に、各国で実施された水中考古学関連調査の内、浅海域を対象とした調査例を中心に概要を示す。

ギリシャのイオニア海、Kefallinia 島沿海の自然、文明遺産評価調査において、海底にローマの沈船とその積み荷である壺が確認された²⁾。これらの沈船は紀元前1世紀から1世紀のものであり、これまでに地中海で発見された最大のものの一つであった。沈船は約6,000個の壺を搭載していたと推測され、海底に確認できる貨物の保存状態は非常に良好であり、当時の航路、貿易、壺、船体構造に関する貴重な情報により高い考古学的価値を有している。調査手法として SSS, SBP, 古代の沈船を類似の音響信号を示す他の海底地形から識別するためのコンピュータビジョン技術の有効性が確認されている。Fig. 1 にソナーイメージの一例を示す。

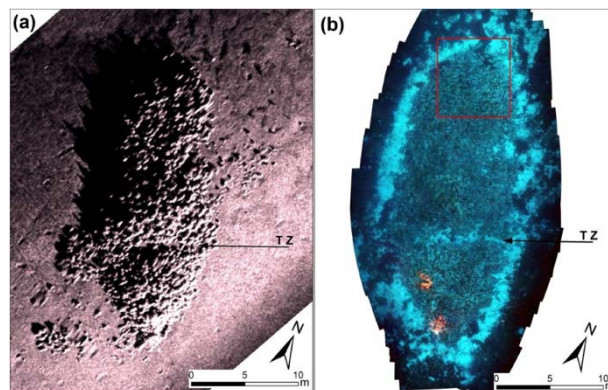


Fig. 1 High resolution sonar image²⁾.

浅海域においては、対象水域の特徴に合わせた適切な探査機器、探査手法の適用が重要である。Lin ら³⁾は、米国ウイソコンシン州の内陸湖と河川の沿岸域において、音波 (SBP) と電磁波 (Grand Penetrating Radar) による浅水域での測深および堆積物中の観測調査を実施した。スペリオル湖のようにシルトと粘土が多く見られる水域では SBP による堆積層の計測が有効であり、一方で、砂や植物が覆うような水域では GPR による観測が有効であった。一般に、SBP による計測は垂直・水平方向の解像度において GPR より優れており測深の精度が高いが、Yahara 川における SBP 計測では層間のコントラストは不明瞭であったが、GPR はシルトと粘土層の電磁波の減衰により上層の二層を明瞭に描写した。ミシガン湖では堆積物の平均サイズがシルトと微細砂の間であったため、両装置は類似の堆積層の計測結果を示している。調査では3次元の水深、堆積層の地図が作成され GPR と SBP の複合利用が浅水域での計測に有効であることが示された。Fig. 2 に SBP と GPR の計測結果を示す。

1418年に進水したヘンリー5世の旗艦 Grace Dieu は現在、南イングランド Hamble 川の河口の堆積物中に横たわっている。従来の発掘調査は船体形状の情報不足や侵食によって難航していた。Plets ら⁴⁾は Chirp 式3次元 SBP と RTK-GPS からなる計測システムを用いて沈没船の調査を実施した。RTK-GPS の高精度測位と SBP の高精細データにより、木製船体内部の3次元イメージの構築が可能となり、埋蔵木造物の侵食状況が解析されるとともに船体の再構築が船体設計ソフトウェアを用いて試みられた。その結果、Grace Dieu は当時としては巨大な船体 (船長60m以上、船幅16m) であることが確認された。Fig. 3 に調査結果の一例を示す。

* 九州大学大学院工学研究院

** 九州大学大学院工学府

原稿受付 令和4年3月4日

公開日 令和4年5月19日

春季講演会において講演 令和4年5月26, 27日

©日本船舶海洋工学会

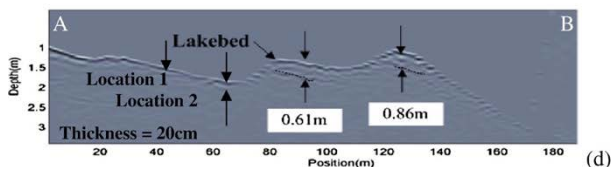
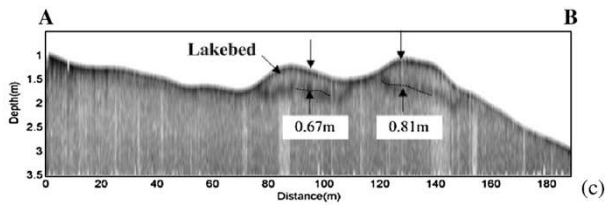
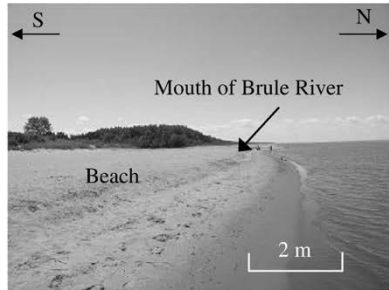
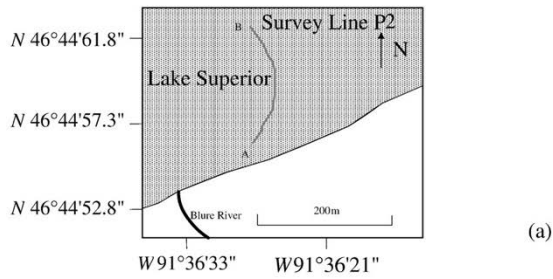


Fig. 2 SBP survey results(C) and GPR survey results(d)³⁾.

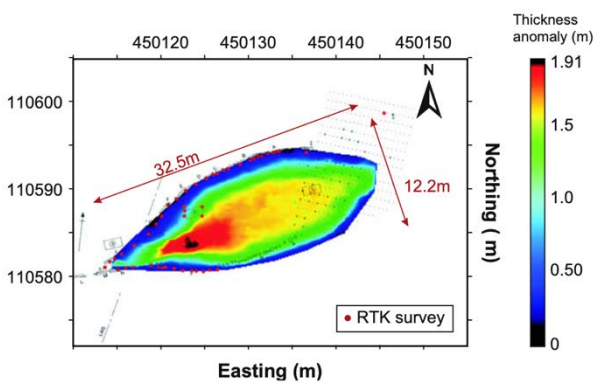


Fig. 3 Isopach map showing the thickness of the anomaly⁴⁾.

一方で、深海における水中考古学調査では機材の運用や技術的制限により、さらに困難さが増す。一般的には船舶により曳航される SSS が使用されるが、合成開口ソナー (Synthetic Aperture Sonar) による計測では、水深と解像度のトレードオフの制限を受けないため、SSS に比較して高精度の結果が期待できる。Ødegård ら⁵⁾は 2015 年と 2016 年にノルウェー南岸沖の Skagerrak 海峡の水深約 600m の海域において、AUV に搭載された干渉型 SAS を用いた沈没船の調査を実施している。Fig. 4 に SAS による計測結果の一例を示す。

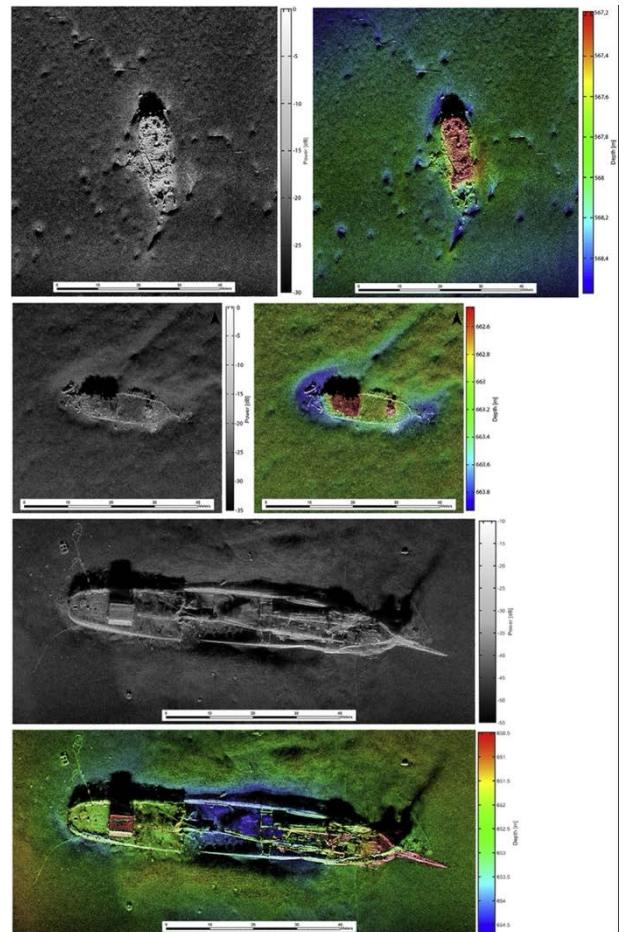


Fig. 4 Three historical wrecks in various stage of disintegration⁵⁾.

沈没船の探査においては、対象海域の水深の他、様々な外乱についても検討を要する。対象海域は、沈殿物、水、有機・無機物の流入出、波、潮流、嵐といった様々な影響を受けるが、沈没の初期段階においては特に力学的影響が強い。中でも、流体力により発生する潜掘と堆積は特に大きな影響を及ぼす。すなわち、船が海底に沈没すると水流と渦が船体周りに発生し、くぼみが形成される。これらは、船体と外乱の相対関係、海底地形、海底下の状況の影響を受け、好条件下においては沈没船の周りの潜掘の特徴が周囲の沈殿物として保存される。Quinn⁶⁾は SSS とマルチビームソナーにより海底下 5~10m に埋蔵されたアイルランド東岸沖、Arklow Bank 海域の沈没船と 1510 年に英国のヘンリー 8 世により建造され 1545 年に Solent の海戦で沈没した軍艦 Mary Rose の調査を実施している。Fig. 5 に SSS による計測結果と沈没船周囲の海底地形を示す。

3. 鷹島神崎遺跡の海底調査

松浦市鷹島町神崎免の沖合いは、1281 年の弘安の役において元軍の船団が暴風雨により沈没した海域として伝えられ、鷹島の南岸では以前より地元の漁師などによって壺類や刀剣、碇石などが引き揚げられていた。

1980 年から開始された調査では、弘安の役で沈没した元軍のものと思われる船体の一部や陶磁器類、漆製品、矢束、刀剣、冑などの武器や武具類などが多量に出土した。その後、2006 年から琉球大学の池田らの研究グループにより考古学的手法に基づく調査研究⁷⁾が実施され、

2012年には松浦市鷹島町神崎免の沖合い海域が海底遺跡「鷹島神崎遺跡」として国史跡に指定された。

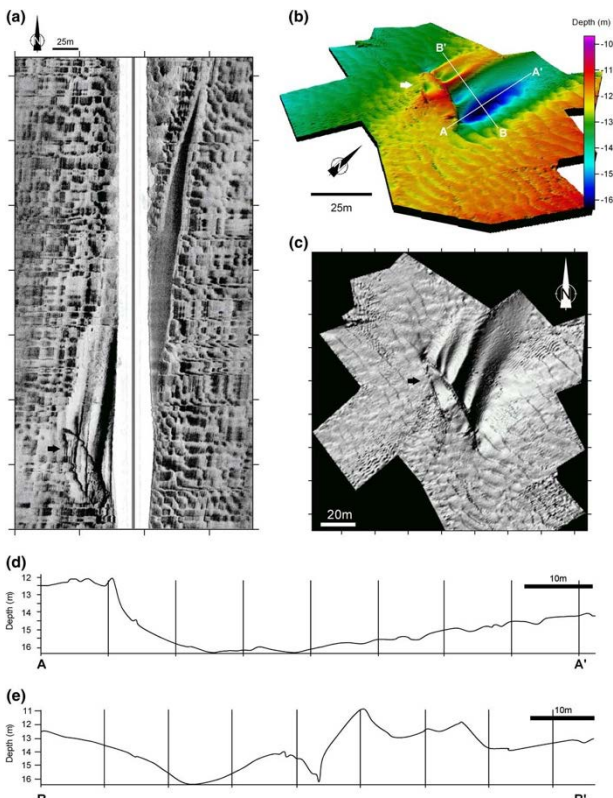


Fig. 5 Side-scan sonar data acquired on the Arklow Bank wreck site and bathymetric profiles⁶⁾.

これまでの考古学的手法に基づく調査研究では、海底音波探査装置により伊万里湾全域の海底地形図と海底地層図が50m間隔で作成され、その情報分析に基づき音波探査装置による10m間隔の精査が実施された。得られた探査反応の地層断層情報は類型化され、元寇沈没船と推測される探査反応が選出された。これらの作業に基づき設定された調査区における試掘調査により、船体を構築する船材が検出されている。

2010年度の調査では鷹島1号沈没船の一部が確認され、2011年10月と2012年6、10月に本沈没船の調査が実施された。ここでは、沖合約200m、水深約23~25mの海底下約1mにおいて竜骨と両舷側外板、隔壁、肋材が確認されている。また、それらの上には大量のレンガ材や中国産陶磁器等が散乱した状態で確認されている。

鷹島2号沈没船は2014年9、10月に実施された音波探査と突き棒調査によって確認され、2015年6、7月に本沈没船の調査が実施されている。ここでは、沖合約200m、水深約13~15m、海底下約1mにおいて幅約10mの音波反応が認められ、水中ドレッジによる掘り下げが行われた。沈没船の残存部の最大幅は約3.2mであり、復元船体長は20m前後と予想される。残存する船体部材は両舷の外板と9箇所の隔壁である。Fig. 6に鷹島2号沈没船の写真を示す。



Fig. 6 Photo of the Takashima shipwreck No. 27⁷⁾.

4. 曳航式海底探査システムの開発

鷹島神崎遺跡を対象海域として、比較的浅い海域に埋没した沈没船を音波探査の技術を用いて探査するため、新方式の探査システムを計画する。提案する探査システムは水深10~30mの海底下約1mに埋没した木造船を探査するため音波探査用の音源と受信機を水中曳航体に搭載し、海底のごく近傍から音波を照射し反射波の計測を行う。曳航体に搭載した振動子を調査対象に近けることにより、音波探査における可探深度と分解能の制限が緩和される。従来に比較して高精度な音波探査の計測結果が期待でき、試掘調査に至るまでの探査時間が短縮されるため、曳航式海底探査システムは海象に左右される水中遺跡の発掘調査に対する有効な探査手法であると考えられる。

本システムによる探査では、海底から一定の高度を保ち海底の地形に沿った姿勢で計測を実施するための運動性能が曳航体に求められる。ここでは、簡単な構造の機体を試作し、その流体力学的特性と制御性能について実験と数値計算により調査した。Fig. 7に曳航式海底遺跡探査システムの概念図を示す。

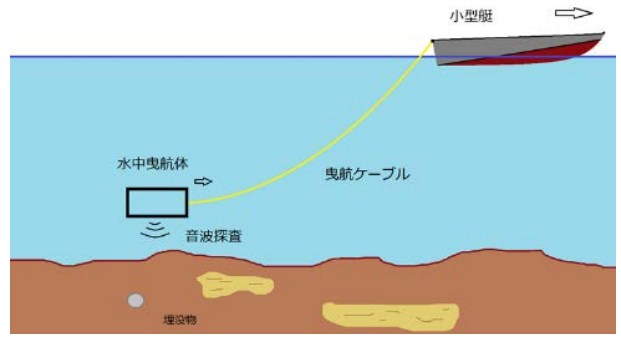


Fig. 7 Sea-bottom exploration using a towed vehicle.

はじめに、機体の静安定性、水中重量、heel角の制御性能に留意して機体を計画した。Fig. 8に試作機の形状を、Table 1に主要目を示す。機体フレームにはパイプを使用し、翼等の部品は3Dプリンターを用いて製作した。翼角の制御機構としては、防水、制御の容易さを考えソレノイドを使用したアクチュエータを新規に考案し採用した。ソレノイドはコイルに電流を流すと鉄芯が引き込まれる単純な構造の装置であり、一対のソレノイドにより正負方向の翼角変更を可能にする。運動制御用に地上、水中にマイコン各1台を使用し、テザーケーブルを利用した通信により曳航体に装備されたIMUと深度センサからの情報を取得する。

製作した試作機体を用い、九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽において曳航試験を実施した。実験に用いた曳航体をFig. 9に示す。また、CFD計算により曳航体に作用する流体力を推算した。計算に使用した

メッシュ数は約 140 万，乱流モデルは SST K- ω である。実験条件と同様の条件で曳航体を配置し，1.0m/sec の定常流中において計算を実施した。Fig. 10 に機体周りの流速分布の計算結果の一例を示す。実験によって計測された抗力は迎角 11deg, 14deg の条件において 32.4N, 37.7N であった。対応する CFD 計算結果は 30.62N, 36.29N であり，誤差はそれぞれ 5.4%, 3.7% となる。また，PID 制御による heel 角制御系を実装し曳航試験を実施した結果，その有効性が確認された。

Table 1 Principal dimensions of the vehicle.

Length (mm)	744
Breadth (mm)	718
Depth (mm)	335
Weight (kg-f)	5.477
Buoyancy (kg-f)	6.327

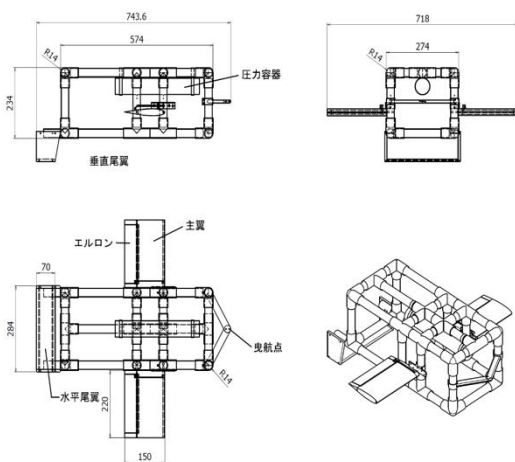


Fig. 8 Prototype of the vehicle.



Fig. 9 Photo of the vehicle.

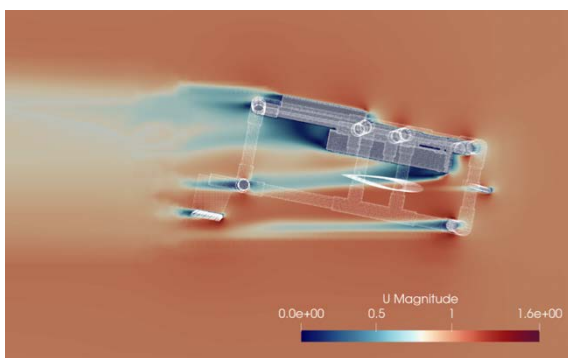


Fig. 10 Calculated velocity distribution around the vehicle.

5. 結 言

水中考古学における従来の海底遺跡および沈没船に関する探査手法について調査した。また，鷹島神崎遺跡の元寇沈船を対象として音波探査器と曳航体から構成される探査システムを提案し，試作機体を計画した。

海底遺跡探査用水中曳航体の試作機の性能を水槽実験と数値計算により調査した結果，試作曳航体の安定性とソレノイドを使用した翼角操作機構および運動制御系の有効性を確認した。また，機体に作用する流体力の数値計算結果と実験結果の比較より，CFD 計算の有効性が認められた。

今後は，従来の海底遺跡探査手法の課題を解決するため，曳航式海底遺跡探査システムに搭載する音波探査装置の開発，探査対象の精密測位に関する検討を予定している。

謝 辞

本研究は，九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けたものです。

参 考 文 献

- 1) 井上たかひこ：水中考古学，中公新書，2015。
- 2) G. Ferentinos et.al. : Optimal sidescan sonar and sub-bottom profiler surveying of ancient wrecks -The 'Fiskardo' wreck, kefallinia Island, Ionian sea-, Journal of Archaeological Science, Vol113, 105032, 2020.
- 3) Y.T. Lin, C.C. Schuettelz, C.H. Wu and D. Fratta : A combined acoustic and electromagnetic wave-based techniques for bathymetry and sub-bottom profiling in shallow waters, Journal of Applied Geophysics, Vol68, pp.203-218, 2009.
- 4) M.K.R. Plets et.al. : The use of a high-resolution 3d chirp sub-bottom profiler for the reconstruction of the shallow water archaeological site of the Grace Dieu (1439), river Hamble, UK, Journal of Archaeological Science, Vol36, pp.408-418, 2009.
- 5) Ø. Ødegård, E.R. Hansen, H. Singh, J.T. Maarleveld : Archaeological use of synthetic aperture sonar on deepwater wreck sites in Skagerrak, Journal of Archaeological Science, Vol89, pp.1-13, 2018.
- 6) R. Quinn : The role of scour in shipwreck site formation processes and the preservation of wreck-associated scour signatures in the sedimentary record - Evidence from seabed and sub-surface data, Journal of Archaeological Science, Vol33, pp.1419-1432, 2006.
- 7) 池田栄史：水中考古学手法による元寇沈船の調査と研究，平成 23 年度～平成 27 年度 科学研究費補助金 基盤研究 (S) 研究成果報告書，2016。