

海底遺跡調査における海中ロボットの利用

正会員 山口 悟* 学生会員 澤田 恵理子**

Ship Wreck Investigation using Underwater Robot

By Satoru Yamaguchi, Member Eriko Sawada, Student Member

Key Words: Ocean Exploration, Underwater archaeology, Underwater robot

1. 緒言

水面下の遺跡や沈没船を発掘、保存、調査する水中考古学分野では、全世界の海域で宮殿や沈没船の発掘が行われている。一方で、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隻類に関する遺跡が数多く未調査のまま残されている。

前報¹⁾では長崎県松浦市の鷹島神崎遺跡を対象として、比較的浅い海域の海底遺跡探査を対象とした小型曳航体を計画し、その運動制御性能を調査した。沈没船の調査において遺物の位置が特定された後、多数の画像データに基づくフォトグラメトリ等の方法により遺物の相対位置等が詳細に記録される。本報告では発見された遺物の記録に有索式AUVを利用する手法について調査する。すなわち、海底の沈没船の記録調査を想定した有索式AUVを計画し、その運動モデルを構築する。また、得られた運動モデルに基づく運動制御系の設計と海底遺物の記録作業のシミュレーションをもとに、有索式AUVによる記録作業の効率について検討する。

2. 水中遺跡

ユネスコの「水中文化遺産保護条約」によれば、水中文化遺産とは文化的、歴史的または考古学的な性質を有する人類の存在の全ての痕跡であり、その一部または全部が定期的あるいは恒常的に少なくとも100年間水中にあった遺跡、構築物、建造物、人工物および人間の遺骸、船舶、航空機その他の乗物もしくはその一部、その貨物あるいはその他の積載物で、考古学的、自然的な背景を有するもの、先史的な性格を有するものである²⁾。沈没船とその積荷は水中文化遺産の代表的なものであり、ユネスコは沈没船遺構の総数を全世界で約300万と推計している。

これらの船の沈没の原因は事故、戦禍など様々であるが、海域で分けると陸地、暗礁などの付近で沈没する場合とそれ以外に分類される。このうち前者が大多数であり、水中文化遺産、沈没船の多くは沿海に分布する。現在、沈没海域が確認されている日本沿海の代表的な沈没船をTable 1に示す²⁾³⁾⁴⁾。

沈没後の船体が水中に長期間残ることは木造船の場合は特に稀であるが、低温高塩分の海域でフナクイムシの

活動が抑制される、サンゴ礁域で石灰分が船材に浸透すると行った理由により比較的長期間船材が保存される場合がある。また、沈没後、短時間のうちに海底の砂泥に埋没した場合には良好な状態で船体が保存されることが期待できる。

Table 1 日本沿海の沈没船

| | |
|-----------|-------------|
| 開陽丸 | 北海道檜山郡江差町 |
| 洞爺丸 | 北海道函館港沖 |
| 成臨丸 | 北海道上磯郡サラキ岬沖 |
| 美加保丸 | 千葉県銚子沖 |
| ハーマン号 | 千葉県勝浦市 |
| オネイダ号 | 千葉県富津岬沖 |
| 初島沖海底遺跡 | 静岡県熱海市 |
| ニール号 | 静岡県賀茂郡南伊豆町 |
| ディアナ号 | 静岡県駿河湾 |
| エルトゥールル号 | 和歌山県東牟婁郡串本町 |
| ノルマントン号 | 和歌山県大島沖 |
| 沖ノ島北方海底遺跡 | 和歌山県和歌山市 |
| 第二氷川丸 | 京都府舞鶴港沖 |
| いろは丸 | 広島県福山市 |
| 芦屋沖海底遺跡 | 福岡県遠賀郡芦屋町 |
| 鷹島神崎遺跡 | 長崎県松浦市 |
| 伊号第58潜水艦 | 長崎県五島列島沖 |
| 戦艦大和 | 鹿児島県宇治向島西方 |
| ベナレス号 | 沖縄県国頭村宜名真沖 |
| プロビデンス号 | 沖縄県八重干潟 |

3. 沈没船の調査

一般に沈没船の調査手順はサーヴェイ（事前調査）、発掘作業、保存処理の3段階で行われる⁵⁾。水中考古学における調査の第一段階では、海底における対象の遺跡、遺物の位置が特定される。このためには事前調査における情報収集が重要となり、その結果に基づいて様々な機器を用いた海底の探索が実施される。一般には、はじめにサイドスキャンソナーにより対象海域の詳細な海底地形図が作成され、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。

発掘作業においては、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。考古学は遺物の位置関係から当時の状況を再現する学問であるため、遺物の記録を取ることが不可欠である。ここではダイバ

* 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5年3月3日

公開日 令和5年5月25日

春季講演会において講演 令和5年6月1,2日

©日本船舶海洋工学会

一が必要事項を記録した後、水の透明度が高ければ水中カメラで遺跡を撮影する。続いて遺跡全体を格子で区切り、各格子の枠内から順に掘り進め、出土した遺物は都度記録される。

沈没船の場合は特に、遺物の相対位置により貨物か個人の持ち物かを推定できるため、遺物の出土位置が極めて重要となる。ここでは、視界が良ければ遺跡を様々な角度からカメラで撮影し、デジタル処理により3次元で復元するフォトグラメトリが用いられる。

以上の調査においては、ダイバーが長時間水中で作業すると減圧症を発症する危険が高まるため、事前に作業時間を決定し、これに従って調査を進める必要がある。例えば、沈没船が水深30mにある場合、潜水は1日2回まで、潜水時間は各30分等と計画され、作業中は残り時間とタンクの空気残量をチェックすることが不可欠となる。また、現代になって発見される沈没船の多くは透明度が低い視程の悪い海域に沈んでおり、これらの調査においては水中ライトを点灯すると水中に舞う砂やシルトに光が反射して数cm先が見えないこともある。また、一般に考古学者ダイバーが作業可能な水深は約50mが限度となる。

その後はブラスター、エアリフト、水中ドレッジによる堆積物の除去、引き上げまたは水中での遺跡保存や保存処理が行われるが、水中遺跡の発掘調査には実施時期や時間の制限、人材確保の難しさなど多くの課題が残されている。

本報告で調査の対象とする松浦市鷹島町神崎免の沖合は、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、サイドスキャンソナーや改良型の魚群探知機が導入され、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大量に出土した⁹⁾。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⁾⁸⁾が実施され、2012年には松浦市鷹島町神崎免の沖合海域が海底遺跡「鷹島神崎遺跡」として国史跡に指定された。

鷹島では全ての遺物が深さ1~2mのシルトに埋まっていたためサイドスキャンソナーによる探査は有効ではない。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。

その後、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月、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月、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月、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。

4. 有索式 AUV による海底遺跡調査計画

本報告では、海底遺跡のフォトグラメトリなど、現在ダイバーにより実施されている発掘調査における対象物の精密位置情報記録作業を効率化するため、有索式のAUVの機体を計画し、その有効性をシミュレーション計算により検討する。

水中ロボットには曳航体、ROV、AUVなどの種類があり、それぞれ利点と欠点を有している。前報では広い海域を高速で探査することができる曳航体による海底遺跡探査手法を検討した。ここではテザーケーブルによる電力供給により長時間の連続計測と計測結果のリアルタイム取得が可能であるという利点を有するROVを自律化することにより、オペレータの負担を軽減することを目指し、海底遺跡調査用有索AUVを提案する。本機体により自動化された連続計測が可能となり、トラブルの発生時にはAUVと比較して、これへの対応が容易となることが期待できる。また自律制御のための機能の一部を船上に設置することにより、機体自体は小型で簡単な構造とすることが可能である。一方で、通常のAUVには存在しないテザーケーブルに作用する潮流等の影響が大きいと予想されるため、経路追従と計測作業のための運動制御性能には注意が必要である。

計画した機体の概略をFig. 1に示す。機体は1辺の長さが300mmの正三角形の形状で高さは150mmである。機体の重心は底面から10mmの高さで機体中心に位置し、水中重量は鉛直上向きに0.5kgfとした。海底の遺物撮影に用いるカメラは機体の底面下向きに搭載する。水平方向に3基、鉛直方向に4基の合計7基のスラスタを搭載し、これにより機体の6自由度運動を制御する。図中のth_v1~4の円柱は鉛直方向のスラスタをth_h1~3は水平方向のスラスタを示している。直径70mmのスラスタの取り付け方向は固定されており、最大約1kgfの推力を正方向または逆方向に発生することが可能である。

運動制御系の設計とシミュレーション計算のため、機体形状を単純な幾何学形状で近似し、これに作用する流体力を簡易推定式より求め、機体固定座標系に関する6自由度運動モデルを作成した。

機体の位置と姿勢はPID制御系により制御する。すなわち3次元の位置座標とロール、ピッチ、ヨーの各姿勢角のそれぞれに目標値を与え、フィードバック制御により各スラスタ推力を制御する。テザーケーブルの長さとして直径はそれぞれ25mと0.01mと仮定し、計算においてケーブル運動はランプドマス法によりモデル化した。

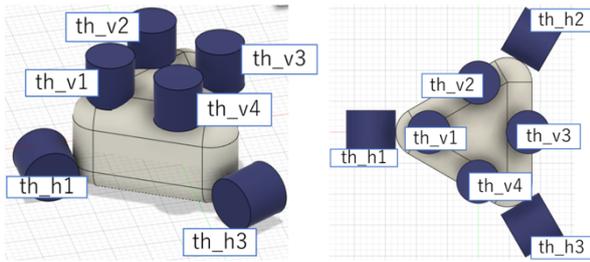


Fig. 1 Schematic view of the AUV

有索式 AUV による自動調査の作業効率を、通常のダイバーによる作業と比較するため、シミュレーション計算を実施した。水深 20m の 1 辺 10m の正方形の海域を調査対象とし、計測点を 1m 間隔の格子状に配置する。AUV は各計測点を順に移動しながら、遺物の映像を撮影するために計測点上で 1 秒間停止することを繰り返す。シミュレーション計算結果の一例を Fig. 2 に示す。ここで AUV には Way Point となる計測点の位置が順次、目標値として与えられ、図中の実線で示されるように与えられた経路を移動する。この間、機体姿勢は計算開始時の水平状態を維持するように制御される。ここでは、対象海域には図の横軸と縦軸方向にそれぞれ 0.05(m/sec)の流速成分を外乱として与え、テザーケーブルの影響は小さいとして無視した。

機体は Fig. 2 の原点を開始点として最初の計測点に移動した後、計測点を順次通過しながら指定された経路を追従して移動している。機体速度の時刻歴を Fig. 3 上図に、ロール角、ピッチ角、ヨー角の時刻歴を下図に示す。計算開始直後に外乱影響等により速度とヨー角が大きく変動するが、その後は安定した姿勢を保ちながら各計測点への移動と停止を繰り返している。Fig. 4 上図には同計算における 3 機の鉛直方向スラストの発生推力の時刻歴を、その他の図に水平方向の各スラストの発生推力の時刻歴を示す。計算開始直後にスラストの推力が大きく変動しているが、その後は一定水深での移動と停止を繰り返すため適切に各スラスト推力が制御されていることが分かる。

以上のシミュレーション結果をもとに、計画した機体が 30 分間に調査可能な海域を推算したところ約 676(m²)であることが確認された。一般的なダイバーが 1 回 30 分の潜水で調査できる範囲は 75(m²)である⁹⁾と考えると、提案する有索 AUV による計測手法によりダイバーと比較して約 9 倍の面積を計測することが可能である。

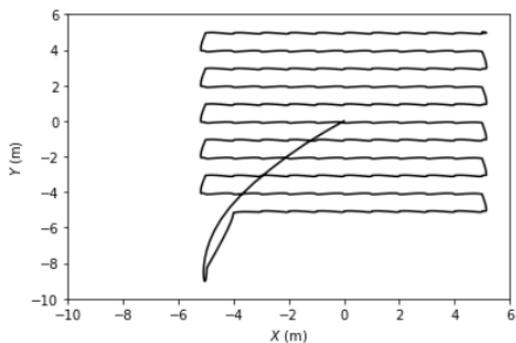


Fig. 2 Track of the AUV

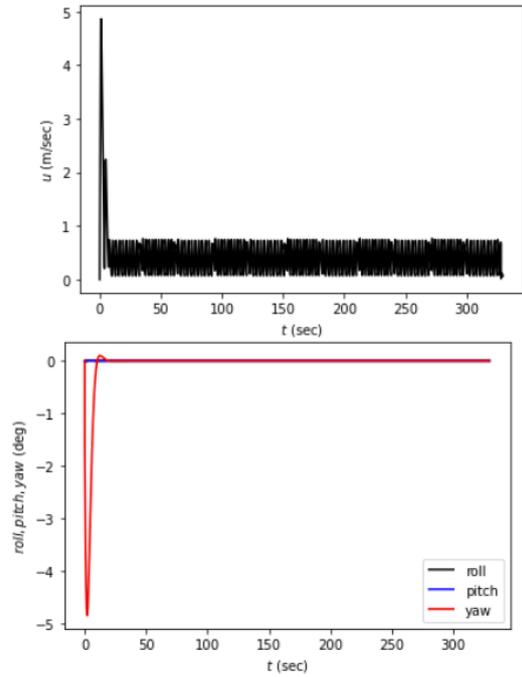
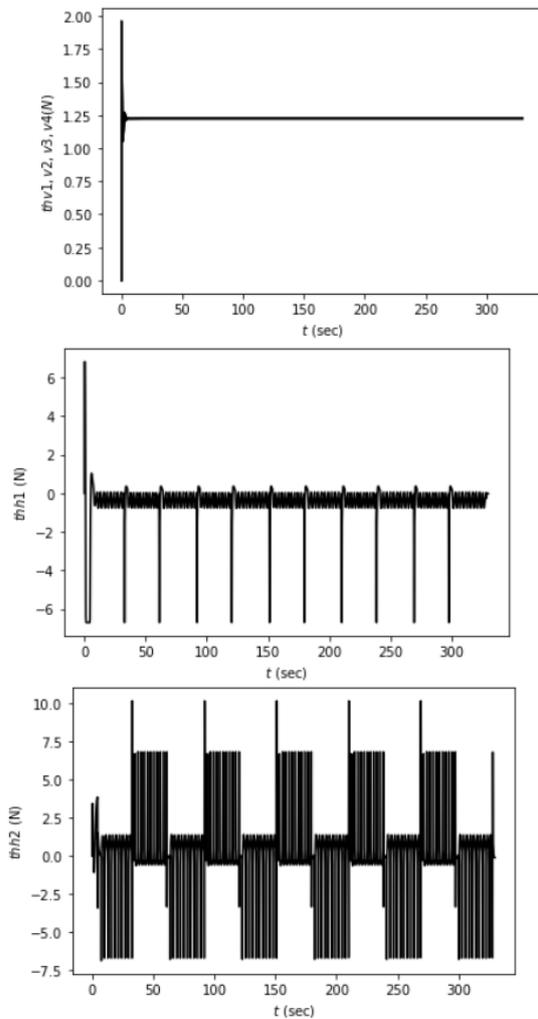


Fig. 3 Time histories of the velocity and the posture



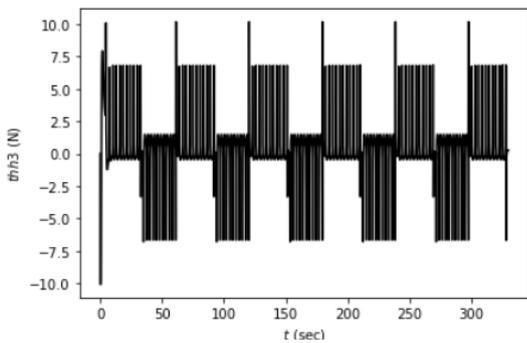


Fig. 4 Time histories of the thrusts

5. 結 言

水中考古学における海底遺跡および沈没船の調査へ海中ロボットによる自動計測を導入する手法について検討した。有索 AUV を用いたフォトグラメトリを想定し、機体の計画と簡易的な運動モデルの構築を実施した。これに基づき設計された運動制御系の性能をシミュレーション計算により調査した結果、提案する計測手法により通常のダイバーによる作業と比較して約 9 倍の海域を同じ時間内に計測することが可能であることが示され、提案する計測手法の有効性が確認された。

海中ロボットによる計測作業では、1 日あたりの潜水回数、連続計測時間に制限が無く、調査時期が季節に左右され難い。また、撮影された画像はリアルタイムで船上に送られるため、計測作業と並行してデータの解析を実施することが可能となる。有索式 AUV を使用することにより通常の ROV と比較してオペレータの負担も軽減されることが考えられ、今後の有望な計測手法となることが期待できる。

一方で、今回計画した機体寸法では潮流等の外乱により経路追従性能が悪化することが懸念される。今後は、機体の大型化、対象海域の海象条件、テザーケーブルの影響等についてより詳細に検討し、実海域での運用を目指す。

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) 山口悟, 福田雄: 浅海域を対象とした海底遺跡探査手法の検討, 日本船舶海洋工学会講演会論文集第 34 号, pp.103-106, 2022.
- 2) 岩淵聡文: 文化遺産の眠る海 水中考古学入門, (株)化学同人, 2012.
- 3) 佐々木ランディ: 水中考古学 地球最後のフロンティア 海に眠る遺跡が塗り替える世界と日本の歴史, (株)エクスマレッジ, 2022.
- 4) 「遺された歴史」取材班: 「水中遺跡」消えた日本史を追え!, (株)青春出版社, 2022.
- 5) ランドール・ササキ: 沈没船が教える世界史, メディアファクトリー新書, (株)メディアファクトリー, 2012.
- 6) 井上たかひこ: 水中考古学, 中公新書, 2015.
- 7) 池田栄史: 水中考古学手法による元寇沈没船の調査と研究, 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.

- 8) 池田栄史: 海底に眠る蒙古襲来 水中考古学の挑戦, (株)吉川弘文館, 2018.
- 9) Terayama, K et. al.: Cost-effective seafloor habitat mapping using a portable speedy sea scanner and deep-learning-based segmentation, Method in Ecology and Evolution, 13(2), pp.339-345, John Wiley & Sons Ltd, 2021.