

海洋ごみ運搬ロボットの開発 ～水中清掃ダイバーと協働した3年間の軌跡～

九州職業能力開発大学校 寺内 越三・牟田 浩樹・久場 政洋

海洋環境団体 Mr.DIVER 福田 佑介

1. はじめに

海洋ごみ（漂流・漂着・海底ごみ）は、生態系を含めた海洋環境の悪化や海岸機能の低下、景観への悪影響、船舶航行の障害、漁業や観光への影響など、さまざまな問題を引き起こしている⁽¹⁾。海洋ごみの約8割は陸域由来とされており、陸で発生したものが河川を経て海に流出することが分かっている^(2,3)。全国各地では海洋ごみ問題の周知啓発と、流出を少しでも防ぐことを目的として、街頭清掃活動や海岸清掃活動が実施されている⁽⁴⁾。

九州職業能力開発大学校応用課程生産システム技術系では、2004年度から開発課題実習において、海中ロボットの開発に取り組んできた。2022年4月、海中ロボット技術を応用して海洋ごみ問題に取り組む中で、海洋環境団体 Mr.DIVER（代表：福田佑介氏）に出会った。Mr.DIVERは10名余りからなるボランティアダイバーチームで、海洋環境の改善と海洋ごみ問題の啓発を目的に、北九州市の観光地などで水中清掃活動を行っている。水中清掃とは、ダイバーが河川や海中に潜水し、不法投棄された大型ごみや生活排出された小型ごみを回収する活動である。水中清掃活動（潜水作業、陸揚げ作業）の様子を図1、2に示す。ごみを回収する際は川底まで潜水し、収穫ネットにごみを拾い集め、一定量たまったところで浮上し、川岸まで泳いで運搬する。川岸までは10mから50mを泳いで往復する必要があるため、ダイバーは体力を消耗し、作業効率は低下する。ダイバーが拾い集めたごみを浮上地点

から川岸まで運搬するロボットがあれば、ダイバーは水中作業に専念することができ、水中清掃活動の効率化を図ることができる。

そこで本課題では、海洋環境の改善と海洋ごみ問題の啓発、そして水中清掃活動の効率化を目的に、ダイバーを支援するUSV（Unmanned Surface Vehicle：無人水上艇）、遠隔操縦型舟形協働ロボット「海洋ごみ運搬ロボット」を開発することを目標とした。



図1 水中清掃活動（潜水作業）



図2 水中清掃活動（陸揚げ作業）

2. Mr.DIVER との出会いと水中清掃活動

2022年3月、北九州市沿岸の海洋ごみ問題を調査する中で、2021年11月に北九州市で「海のお掃除プラントロボット夢コンテスト」が開催されたことを知った。このコンテストは、海洋ごみの回収と海洋汚染の改善をテーマに、海洋環境を改善するロボットのアイデアを表現するコンテストである。

コンテストの実施報告書の中から、Mr.DIVER代表の福田佑介氏のアイデアが目にとまった。福田氏はダイビングインストラクターや潜水士の経験を生かして、北九州市小倉北区を流れる紫川にごみフェンスを設置し、河川ごみの回収実験を行い、河川ごみ回収ロボットの概略図を提案していた。さらに、Twitter（現X）やInstagram、YouTubeからMr.DIVERが北九州市内で水中清掃活動に取り組んでいることを知り、福田氏に連絡を取った。

4月14日、福田氏に来校していただき、水中清掃活動について伺った。海洋環境団体Mr.DIVERは、「2050年の未来の海を守るチーム」として、2019年から北九州市小倉を代表する紫川や人気観光地である門司港レトロなど、多くの人の目に触れる場所で水中清掃活動を行っている。

水中清掃活動は水深3mから5mの川底や海底で行われる。川底には不法投棄された自転車、車のタイヤ、バッテリーなどの大型ごみや、瓶、缶、ペットボトル、財布などの小型ごみが広範囲に散乱している。視界が1mもない水中で、大型ごみは浮揚バッグを取り付け水面まで浮上させ、小型ごみは10kgまで収容できる収穫ネットに拾い集める。回収したごみは、ダイバーが川岸まで泳いで運ぶほか、SUP（Stand Up Paddleboard）やカヤックに乗った水上スタッフが舟にごみを載せ、手漕ぎで川岸まで運ぶ。運んだごみを水中から引き上げる際は、ごみに生じていた浮力がなくなるため、陸上スタッフにとっても重労働となる。

福田氏から、10月に紫川清掃活動が実施されることを伺い、半年後の水中清掃活動に向けて清掃活動を支援するロボットを開発することを約束した。

3. 海洋ごみ運搬ロボットの開発と実証実験

開発初年度である2022年度は、生産機械システム技術科（以下「機械科」という。）、生産電気システム技術科（以下「電気科」という。）、生産電子情報システム技術科（以下「電子情報科」という。）からそれぞれ2名、計6名の学生が開発を担当した。

5月17日、福田氏に来校していただき、10月に紫川で開催される水中清掃活動の詳細と、開発するロボットの機能についてヒアリングを行った。ヒアリングの様子を図3に、策定した機能要件を以下に示す。



図3 ヒアリングの様子

- ・10kg用収穫ネット2袋、最大20kgのごみの積載が可能であること。また、ごみの積載時にダイバーが船体をつかんでも沈まないこと。
- ・断続的に累計1時間以上の稼働が可能であること。
- ・200m以上の無線遠隔操縦が可能であること。
- ・GPSを利用した航行経路の地図表示、およびカメラによる動画配信により無線遠隔監視が可能であること。
- ・安全対策として、スラスタ（推進装置）に巻き込み防止措置を施し、水中ライトによりロボットの位置を表示すること。

また、ロボットによる水中清掃支援手順を立案した。清掃支援手順を図4に示す。はじめに、ダイバーとロボットが入水する。次に、ダイバーが川底のご

みを収穫ネットに回収する。その後、ダイバーが浮上し、ロボットのコンテナに収穫ネットを載せる。最後に、操縦者がロボットを川岸に寄せ、陸上スタッフがボートフックを用いて収穫ネットを引き上げる。

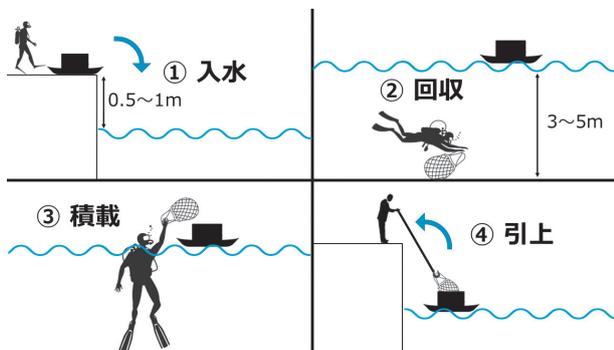


図4 清掃支援手順

上記の機能要件に基づき各種機能を実装し、福田氏にも実験に参加してもらいながらロボットを開発した。開発した海洋ゴミ運搬ロボット2022（ロボット名：海の宅配便）を図5に示す。ロボットの船体はボディーボードと4個のフロートで構成し、20kgの積載物を積載可能である。また、船体の上部には制御システムを収めた水密容器とメッシュコンテナを配置し、下部には4つのスラスタをハの字に配置した。無線遠隔操縦には920MHz帯の無線モジュールを使用し、地上にて見通し距離約450mの通信を確認した上で操縦システムを開発した。無線遠隔監視には2.4GHz帯のWi-Fiを使用し、地上にて見通し距離約80mの通信を確認した上で、Google Mapsへの航行経路表示とカメラ映像表示



図5 海洋ゴミ運搬ロボット2022

機能を持つ監視システムを開発した。そして安全対策として、スラスタはネットで覆い巻き込みを防止し、市販のダイビングライトを水中につり下げてロボットの位置を表示した。

10月22日13時より、北九州市小倉北区城内紫川艇庫前において、北九州市立水環境館主催「第4回くいとめろ大作戦！」が開催された。我々は、Mr.DIVERの水中清掃活動を支援する形で、ロボットの実証実験を行った。1回目の運搬要請では、ダイバーが空き缶、ペットボトル、弁当容器などが入った収穫ネット2袋をコンテナに載せ、ロボットが川岸まで運搬し、学生たちが引き上げた。ゴミを載せるダイバーを図6に、ゴミを運搬するロボットを図7に、ゴミを引き上げる学生を図8に示す。

2回目の運搬要請では、1m四方のトタン板が載せられ運搬を開始したが、川の中央でロボットが停止してしまった。ロボットを引き上げて確認したところ、バッテリーと接続する電源ケーブルが溶断



図6 ゴミを載せるダイバー



図7 ゴみを運搬するロボット

していたため、そこで実験を終了した。GPSで記録した当日の航行経路を図9に、Mr.DIVERと開発メンバーを図10に示す。



図8 ごみを引き上げる学生

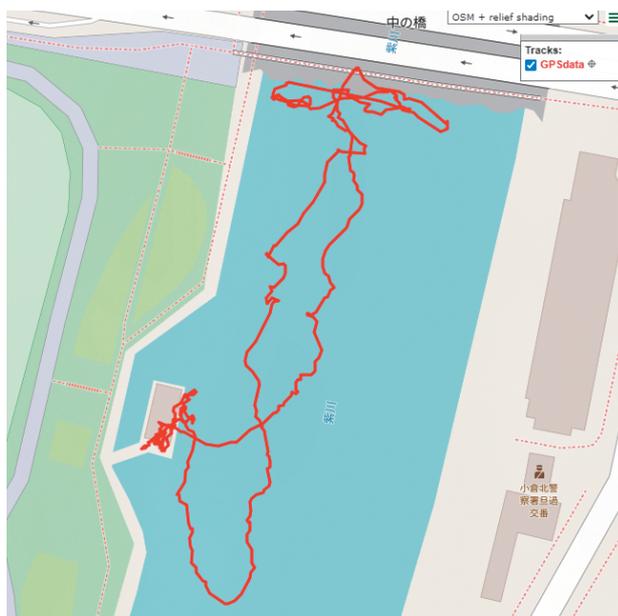


図9 当日の航行経路 (©2022 Google)



図10 Mr.DIVERと開発メンバー

実験後の調査で、許容電流16Aの電源ケーブルに、4つのスラストに向けた最大約36Aの電流が流れていたことが判明した。

原因として、実験当日の想定以上の川のの流れに対応するため、航行直前にスラストの回転数を上げた結果、駆動電流がケーブルの許容電流を超えたため、溶断したと考えられる。

その後、電源ケーブルには許容電流55Aのシリコンケーブルを用いることにした。

さらに、実証実験にて確認されたいくつかの問題点を改善し、2度ほど紫川にて追加実験を行ったが、川岸から25m以上離れると無線遠隔操縦が遅延したり途切れてしまったりする無線通信の不具合を解消することができず、次年度に課題を残した。

実験と並行して開発の成果をまとめ「海のお掃除プラントロボット夢コンテスト」へ応募した結果、11月20日、最優秀賞である「Sea Cleaning賞」を受賞した。また、実証実験までのロボット開発の様子はNHK北九州により密着取材され、11月17日に北九州地区に向けて、11月24日に九州・沖縄地域に向けて、2023年1月4日には全国に向けて放送された。さらに、ロボット開発と追加実験の様子は、読売新聞西部本社から3度にわたり取材を受け、2023年3月16日の地方版と4月1日の夕刊全国版に掲載された。

4. 支援に向けた信頼性の確保と新機能の実装

2023年度は、機械科から2名、電気科から2名、電子情報科から3名、計7名の学生が開発を担当した。

5月23日、福田氏に来校していただき、10月に門司港レトロで開催される水中清掃活動の詳細と、開発するロボットの新機能についてヒアリングを行った。追加策定した機能要件を以下に示す。

- ・ダイバーがゴミを載せる際に、船体につかまることが可能であること。
- ・遊覧船の通過前に、潜水作業中のダイバーに音で警告することが可能であること。

- ・ロボットを運搬する際に、公用車の荷室に載せることが可能であること。

そして福田氏からは、昨年度の反省を生かし、同じ失敗をしないようにと励まされた。そこで、本年度は、無線通信の不具合を解消し、清掃活動が終了するまでロボットを正常に稼働させ運搬支援を行うことを目標とした。

追加された要件を含め各種機能を実装し、新たなロボットを開発した。開発した海洋ごみ運搬ロボット2023を図11に示す。船体を構成するフロートは6個に増やし、幅を広く取り付けることで、浮力を確保し、航行中の安定感を高めた。また、フロートを固定するアルミフレームは、ダイバーがつかまるための手すりを兼ねている。加えて、公用車に載せるためにフロートの脱着機構を製作し、分解運搬後の作業開始前には1分以内に組立てが完了できるようにした。無線遠隔操縦には、清掃範囲において無線通信が途切れないように、昨年度から周波数を変えた429MHz帯の無線モジュールを使用し、事前に門司港レトロにて見通し距離約110mの通信を確認した上で操縦システムを開発した。また、無線モジュールが出力する受信信号強度の変化を操縦画面にグラフで表示し、常に監視できるようにした。操縦画面を図12に示す。無線遠隔監視には、Mr. DIVERの活動をWebサービスで公開することを念頭に、モバイルルーターにてNTTドコモのLTE回線を使用し、Google Mapsへの航行経路表示とYouTubeから水中映像配信を行う監視システムを

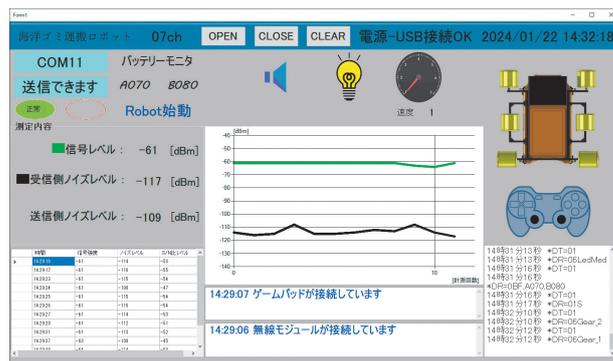


図12 操縦画面

開発した。さらに、安全対策として、アルミで水密容器を製作し、内部にスピーカー、アンプ、音源回路を内蔵した水中スピーカーを製作した。

10月8日10時より、門司港第一船溜において、Mr.DIVER主催「門司港水中清掃」が開催された。当日は雨天に見舞われたため、清掃時間は10時30分から11時30分までの1時間に短縮された。清掃活動中、ロボットは海洋ごみの運搬を計5回行うことができた。雨が降る中、海面には波が立ちロボットの操縦が難しい場面もあったが、安定した航行を行えた。清掃活動が終了するまで無線通信の不具合が発生することなく、ロボットによる運搬支援により、ダイバーは波止場に戻ることもなく水中作業に専念することができた。ダイバーからは、ごみを載せる際にロボットが横転する恐れがなく、船体は安定していたと評価された。ごみを運搬するロボットを図13に、GPSで記録した当日の航行経路を図14に、Mr.DIVERと開発メンバーを図15に示す。



図11 海洋ごみ運搬ロボット2023



図13 ごみを運搬するロボット



図14 当日の航行経路 (©2023 Google)



図15 Mr.DIVERと開発メンバー

5. カタマラン型船体の開発と実用化

2024年度は機械科から2名、電気科から2名、電子情報科から3名、計7名の学生が開発を担当した。本年度は、2年前に無線通信の不具合が発生した紫川において、清掃活動が終了するまでロボットを正常に稼働させ運搬支援を行うことを目標とした。

5月28日、福田氏に来校していただき、11月に紫川で開催される水中清掃活動の詳細と、開発するロボットの新機能についてヒアリングを行った。昨年までの運用経験を踏まえ、「大型ゴミ(トタン板や自転車)を載せたり、船体にぶら下げたりすることが可能であること。」という新たな機能要件を追加した。

追加された要件を含め各種機能を実装し、新たなロボットを開発した。開発した海洋ゴミ運搬ロボッ

ト2024を図16に示す。新たな機能要件に対応するため船体構造を大幅に見直し、2個のポートフロートをパイプで接続した双胴船(カタマラン)型を採用した。ポートフロートにより浮力を確保することができ、一般的な自転車の重さである20kgに加え、実験により最大40kgまでの積載物が積載可能なことを確認した。また、ポートフロートによる直進性を生かすためスラスタは前後方向に向けて配置した。そして、昨年度までの学内評価会で提案された、海洋ゴミを船体にぶら下げて水中輸送する方がダイバーの負担を軽減できるという意見を踏まえ、船体の右舷側に収穫ネットをぶら下げることができるフックを3個装備した。また、ロボットを運搬する際は、右舷側フロートと4個のスラスタを外すことで公用車に載せることができ、作業開始前には15分以内に組立てが完了できるように訓練を実施した。無線遠隔操縦システムについては、事前に清掃範囲となる紫川において、川岸から対岸までの約70mの川幅で受信信号強度を測定する実験を行い、安定した通信を確認した上で開発を行った。



図16 海洋ゴミ運搬ロボット2024

11月10日13時より、北九州市小倉北区内紫川艇庫前において、北九州市立水環境館主催「第6回くいとめろ大作戦!」が開催された。清掃活動は、13時30分から15時までの1時間30分実施され、最後まで無線通信の不具合が発生することもなく、ロボットは海洋ゴミの運搬を計7回行うことができた。しかしながら、ダイバーからの出動要請に応じて川上に向かって航行する際、期待したほどの速度

が出ず、浮上地点に速やかに接近できないもどかしさがあった。今後はスラスタの推進力を増やし、航行速度を上げる必要がある。フックに袋をぶら下げるダイバーを図17に、GPSで記録した当日の航行経路を図18に、Mr.DIVERと開発メンバーを図19に示す。



図17 フックに袋をぶら下げるダイバー



図18 当日の航行経路 (©2024 Google)



図19 Mr.DIVERと開発メンバー

実証実験の後、11月26日から28日の間、教員2名と学生4名にて東京ビッグサイトで開催されたアグリビジネス創出フェアにロボットを出展した。3日間で76名の方に来場いただき、ロボットの開発経緯や機能に関心を持っていただいた。来場者からは、「ダイバーと出会ったきっかけは」、「ダイバーが体重をかけても沈まないか」、「ダイバーからの評価は」といった質問に加え、今後の新機能に関するアドバイスをいただいた。

6. おわりに

2025年4月19日、20日、北九州市立水環境館において、Mr.DIVER主催「水の中ってどうなっ展!？」が開催された。初日は館内で展示を行い、2日目は屋外にある水上ステージで海洋ごみ運搬ロボットの操縦体験コーナーを催した。雨天を避けながらであったが、午前と午後にそれぞれ1時間、合計2時間の間に、子どもを中心に9名の市民の方に操縦を体験していただいた。操縦前には、Mr.DIVERがボランティアとして紫川などで水中清掃に取り組んでいることや、ロボットを用いて海洋ごみを運搬していることなどを説明し、開発の背景について理解を深めてもらった。操縦を体験した子どもたちからは、「すごい」、「楽しい」、「おもしろい」と感想が聞かれた一方で、両手を使ったコントローラーの操作やロボットが自分の方に向かってくるときに左右への旋回操作に慣れない様子の子も見られた。操縦を体験する市民の方を図20に示す。

この操縦体験から、ダイビング技術を持たない市民の方でも、海洋ごみ運搬ロボットを操縦することで、ダイバーが回収した海洋ごみを川岸まで運び、陸まで引き上げるなど、水中清掃活動に直接協力できる可能性を示唆していると感じた。今後、「市民が参加可能な水中清掃活動」へと発展することができれば、これまで以上に海洋環境問題の啓発効果が高まると考える。



図20 操縦を体験する市民の方

開発から3年が経過し、海洋ごみ運搬ロボットの開発はいったん区切りを迎えたが、Mr.DIVERによる水中清掃活動は毎年開催される。環境未来都市、そしてロボット都市である北九州市において、水中清掃ダイバーと海洋ごみ運搬ロボットが協働で水中清掃を実施することは、極めて意義深い。九州職業能力開発大学校として、今後とも Mr.DIVER の活動の支援していきたい。

<参考文献>

- (1) 環境省：令和6年版 環境・循環型社会・生物多様性白書 (2024)
- (2) 公益財団法人 日本財団：今、知っておきたい海洋ごみの実情 海と日本 PROJECT (<https://uminohi.jp/kaiyougomi/>)
- (3) 一般社団法人 JEAN：JEANについて (<https://www.jean.jp/about-jean/>)
- (4) 公益財団法人 日本財団：海ごみゼロウィーク _ 全国一斉清掃！海洋ごみをなくそう！ (<https://uminohi.jp/umigomi/zeroweek/>)

本文中で使用した会社名、製品・サービス名は、各社の商標または登録商標である。

原稿募集のお知らせ

「技能と技術」誌では職業訓練やものづくりにかかわる以下のような幅広いテーマで原稿を募集しています。執筆に関してのご相談は fukyu@uitech.ac.jp までお寄せください。また、記事に関するご意見やご感想もお待ちしております。

実践報告

各訓練施設における各種訓練コース開発、カリキュラム開発、訓練方法、指導法、評価法等の実践の報告

調査報告・研究報告

社会情勢や動向を調査・研究し、能力開発業務に関わる部分の考察をした報告

技術情報

技術的に新しい内容で訓練の実施に有用な情報

技術解説

各種訓練の応用に活かすための基礎的な技術を解説

教材開発・教材情報

各訓練コースで使用される教材開発の報告、教材に関する情報

企業の訓練

企業の教育訓練理念、体系、訓練内容、教材、訓練実践を紹介

実験ノート・研究ノート

各種の試験・実験・研究等で訓練に有用な報告、研究資料

海外情報・海外技術協力

諸外国の一般情報、海外訓練施設での訓練実践、教材等の情報

ずいそう・雑感・声・短信・体験記

紀行文、所感、随筆、施設状況等各種

伝統工芸

伝統工芸を伝承するための技能や人物を紹介