

海洋破碎プラスチックごみ回収ロボットの開発

第2報 安定な掘り出しを実現するツメ機構の開発

○宇野 光輝 (九州大学), 倉爪亮 (九州大学)

Development of garbage collecting robot for marine microplastics

○ Mitsuki UNO (Kyushu University), and Ryo KURAZUME (Kyushu University)

Abstract: Plastic garbage crushed by waves and scattered on sandy beaches is very difficult to collect by human hands because the particles are small, mixed with sand, and scattered over a wide area. In this research, we are developing a garbage collecting robot that moves and collects crushed plastic garbage autonomously. The garbage collecting robot is required to have two functions: "excavating" sand and garbage and "separating" them. This paper discusses the optimal design of the claws for the "excavation" function and shows the results of an excavation experiment on a sandy beach.

1. 緒言

海洋破碎プラスチックごみとは、人々が海へと捨てたペットボトルやストロー等のプラスチック製品が、海洋を漂う間に破碎され、砂浜等に打ち上げられた小さなごみのことを指す。これらのごみの存在は、砂浜の景観やそこで遊ぶ人々の安全を損なうだけでなく、海洋生物が餌と勘違いして食べてしまい、海の生態系が崩れるといった危険性を含んでいる。現在、大型のプラスチックごみは現地住民などによって清掃されているが、Fig.1に示すように、海洋破碎プラスチックごみは砂と交じり合い広範囲に散在しているために、非常に処理が困難である。



Fig.1 Marine microplastics on beaches

そこで本研究では、砂浜で海洋破碎プラスチックごみを自動で回収するロボットの開発を進めている。本稿では、このロボットの基本的な仕組みを紹介し、海岸で効率的にごみ回収するために必要な機能の検討と、砂とごみを掘り出すためのツメの機構、および開発したツメの性能確認実験について述べる。

2. 先行研究

現状、海洋汚染の解決策としてロボットを活用する提案が多くされ、先行研究では様々なごみ回収ロボットが開発されている。例えば、悪路に適したタイヤを採用し、シャベル状のツメでごみを回収する小型クリーンロボット^[1]や、ほうきとちりどりの仕組みを模倣してごみ回収する清掃ロボット^[2]が存在する。さらに、ベルトコンベアを利用して廃棄されたボトルを回収するロボット^[3]も提案されている。しかし、これらのロボットは主にペットボトルのような大きなごみを

収集することに重点を置いており、砂浜に散在する小さな海洋破碎プラスチックごみ(5mm未満)の回収に対応した効率的なごみ回収ロボットは提案されていない。そこで我々は、Fig.2に示すように、吸引力を利用してごみ回収するロボット^[4]を開発した。このロボットはバキュームでの吸引により微細なごみ回収を目指したロボットであるが、バキュームの電力効率やごみと砂の分離性能に課題があった。



Fig.2 Vacuum-type marine microplastics cleaning robot^[4]

3. ごみ回収ロボット

先行研究を踏まえ、我々はごみ回収において必要な機能として、砂とごみの「掘り出し」と「分離」が重要であると考えた。そこで、Figs.3, 4に示すように、ツメによる砂とごみの「掘り出し」と、メッシュ網のベルトコンベアによる砂とごみの「分離」を行うロボットを開発している。このロボットは、前方に搭載したツメと、後方に伸びるベルトコンベアによって構成され、縦1600mm、横1500mmの大きさによって一度に大量のごみを回収することができる。ロボットが前進することで、前方に搭載したツメにより、砂地中に存在する小さなごみを砂と共に掘り出し、後方のメッシュ網のベルトコンベアによってそれらを分離する。さらに、砂と分離されたごみはベルトコンベア上の複数のスキージによって、大きさ毎に分類・回収される。また動力源は全てモータであるが、バキュームに比べて電力消費を抑えることができる。

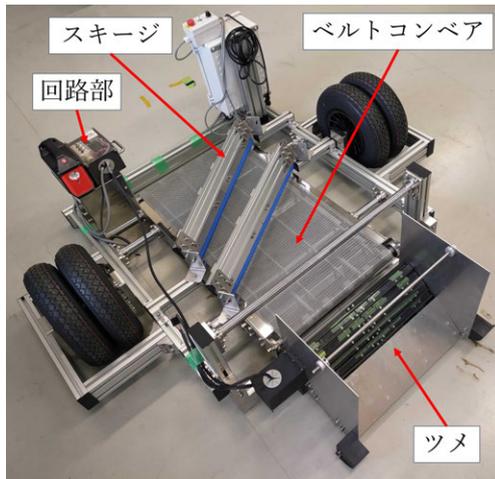


Fig.3 Conveyor belt-type marine microplastics cleaning robot

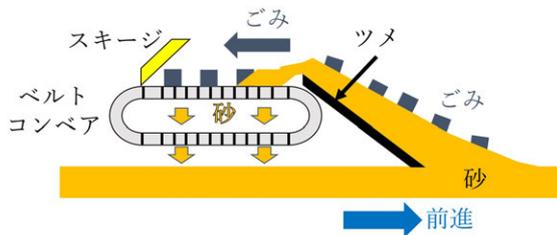


Fig.4 Garbage collection process

本稿では、特に砂とごみの「掘り出し」に関する検討について述べる。我々はロボットによるごみ回収において、大きなツメを前方に搭載する方法を採用したが、これは地中に存在する小さなごみを逃がすことなく回収でき、砂地の不安定な状況にも対応可能と考えたためである。

4. ツメ掘削実験

小さなごみを安定して回収する方法として、我々は Fig.5 に示すように、ツメによって砂とごみをまとめて掘り出し、掘削時に形成される砂山とその砂の流れによってごみを移送する方法を採用した。その理由として、小さなごみは不用意に力を加えると、本来意図しない動きをする可能性があり、安定した回収を実現するためには自然の流れを利用する方法が最適と考えたためである。しかし、この砂山の形状や砂の流れは、搭載するツメの角度、掘削の速度、さらに砂の含水率などによって変化する。そこで本実験では、効率的な掘削が可能なツメの調査を行うことを目的とし、Fig.6 に示すように、砂山を形成する砂の量 (形成量 $[cm^3]$)、ツメを乗り越えごみを送り出す砂の量 (流出量 $[cm^3]$) に加え、掘削に伴うごみの回収率 [%] を評価指標として最適なツメの形状について検討した。形成量を求める際には、深度カメラ Azure Kinect を用いて、ツメと砂山の表面の間の体積差を計算し計測した。また流出量と回収率は、Fig.7 にて示す回収ボックスによって回収された砂の量とごみの数を計測した。また同じ距離を掘削する際、より小さな砂山を形成し、より多くの砂が流出することで効率的な掘削が可能と考えたため、これらの指標については、形成量が少なく、かつ流出量が多いほど優れた掘削性能を持つとした。

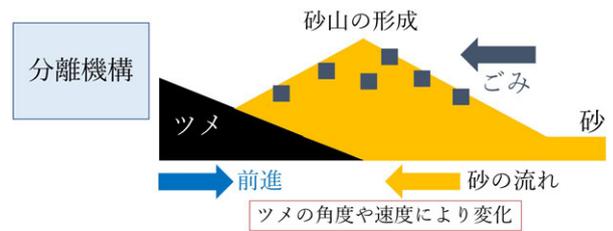


Fig.5 Sand and garbage flow from excavation



Fig.6 Evaluation index

4.1 実験方法

本実験で使用したツメの 3D モデルを Fig.7 に示す。3D プリンタによる部品とポリカーボネート板によって製作し、ツメの高さが 5cm、幅は 12cm である。ツメの斜面は、角度を 20、40、60、80 度の 4 パターン用意し、ツメの側面にあるポリカーボネート板は各ツメの長さと同しくなるようにした。また Fig.7 は斜面角度が 20 度のツメを提示している。ポリカーボネート板でツメを挟むことでごみ回収に重要な砂を効率的に確保でき、ツメの後部に搭載した回収ボックスによって流れ出した砂とごみを回収し、流出量と回収率を計測する。また Fig.8 で示すワイヤを、ワイヤ留めに固定しツメを引くことで掘削が可能である。

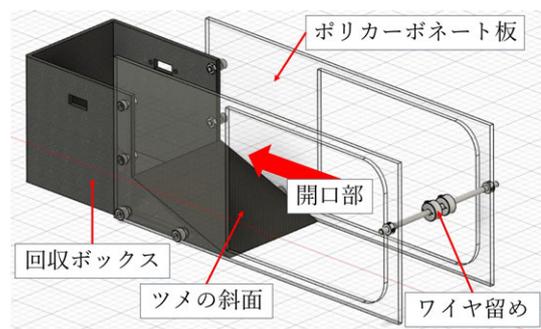


Fig.7 Claw

次に、複数回の掘削を行うための掘削実験用器具の 3D モデルを Fig.8 に示す。掘削する砂を確保するため、ポリカーボネート板とアルミフレームによってケースを構成し、そのケース上に長さ 1m のレールを設置した。その間に Fig.7 で示したツメを搭載し、黄色の線で示したワイヤをモータで巻き取りツメを引くことで掘削した。

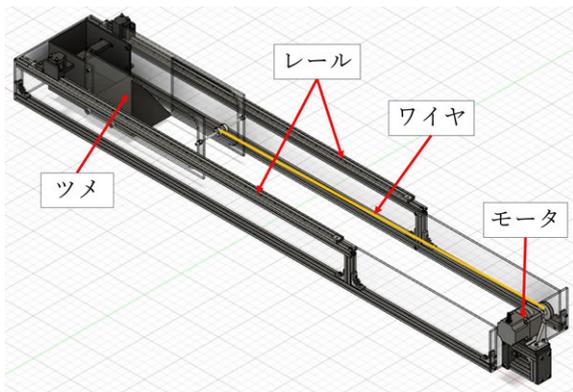


Fig.8 Excavation experiment equipment

実験の様子を Fig.9 に示す。形成量を計測するための Azure Kinect を実験器具上部に設置し、器具内を砂で満たした。そして器具中に搭載したツメを砂中に2~2.5cmほど侵入させた状態で、約1mの距離を掘削した。掘削速度は0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3m/sの6パターンとし、さらに砂の含水率は約0, 8, 16%の3パターンで実験を行った。今回の含水率の最大値である16%は、使用した砂の含水率が飽和した状態であり、また含水率を3パターンに分類したのは、実際のロボットの使用状況を踏まえ、晴れ・曇り・雨の日の砂の様子を簡易的に再現するためである。

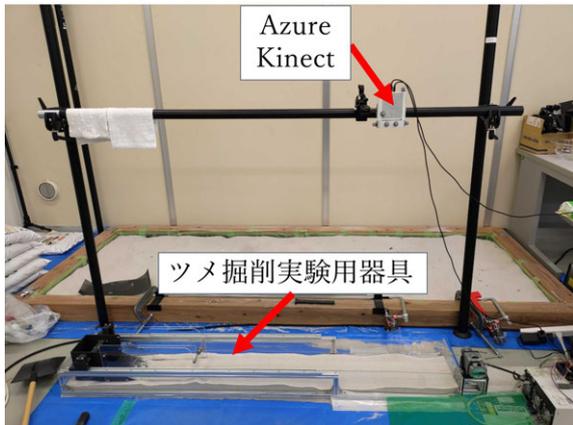


Fig.9 Claw excavation experiment

また回収するごみとして、Fig.10に示すように、実際に砂浜に多く散在する2次マイクロプラスチックに近い、大きさ約3mmのプラスチック板を自作して使用した。このごみを掘削前のツメの前方に10個配置し、各実験条件で5回ずつ掘削を行い、形成量、流出量、ごみの回収率を計測し性能を調査した。



Fig.10 10 pieces of plastic garbage

4.2 結果

実験の結果について、Fig.11に形成量、Fig.12に流出量、Fig.13に回収率のグラフを示す。各評価指標のグラフは4枚構成となっており、青い3本線のグラフが傾斜角度20度のツメ、赤が40度、緑が60度、紫が80度のツメを示す。各色の3本線は、色が濃くなるほど含水率が高い砂であることを示している。また各グラフの横軸が速度、縦軸が各評価指標の値を示している。

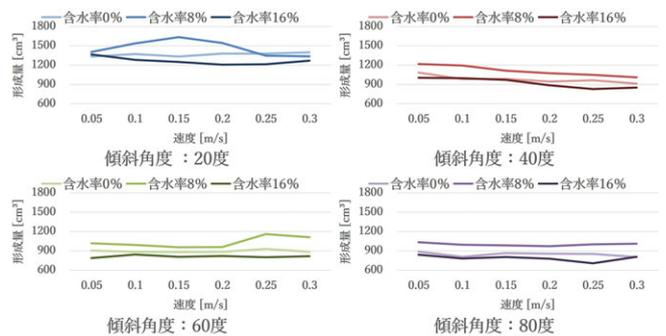


Fig.11 Amount of formation

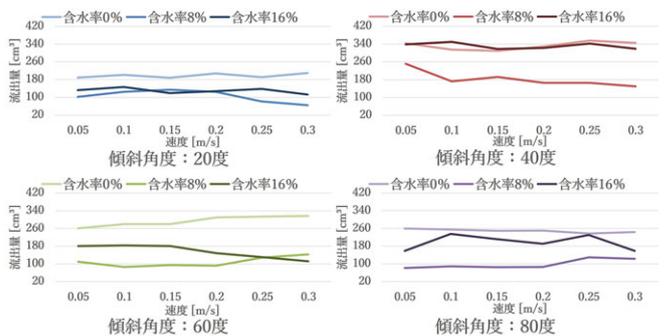


Fig.12 Amount of outflow

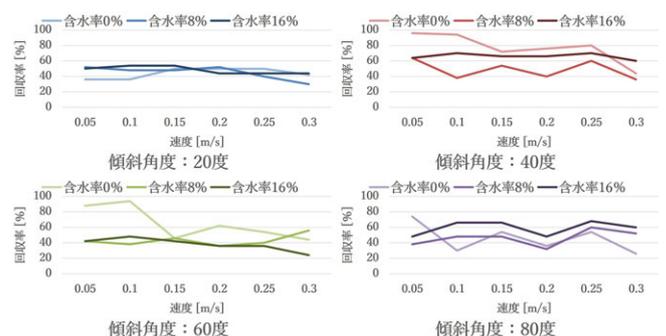


Fig.13 Collection rate

全体の傾向として、まず速度変化については、速度の上昇に伴いごみの回収率が下がる傾向で、その他にはほぼ影響は無かった。また速度と違い、含水率と傾斜角度の影響は大きくあった。形成量は含水率が8%のときに最も大きな値を示し、0%と16%では小さな値を示した。また角度の増加に伴い形成量の値は低下し、80度のとき最小値となった。次に流出量は形成量と逆

に、含水率が0%と16%のときに値が大きくなり、8%で最小値を示した。また角度が40度のときに流出量は最大値を示した。回収率は、各ツメでその傾向が様々であり、20度のツメは回収率が全体的に低く、含水率や速度の影響は無かった。40度では、流出量の傾向と同様に、含水率が0%と16%で回収率が大きくなり、8%で最小値を示した。60度では、含水率の増加に伴って回収率が低下した。80度では、60度と逆に、含水率の増加に伴って回収率が増加する傾向であった。また回収率については、全体を通して40度のときに最大値を示した。

4.3 考察

各評価指標の傾向に関して考察を述べる。まず形成量は、含水率8%のときに最も大きな値を示し、0%と16%では小さな値を示したが、これには「サクシオン[Pa]」と呼ばれる力が関係すると考えられる。土木におけるサクシオンとは、粒子間に存在する見かけ上の粘着力を指し、参考論文^[5]によると、このサクシオンが大きいほど砂のせん断強度(砂の崩れにくさ)が大きくなる。またサクシオンの値は含水率変化にも左右され、対象となる粒子によってサクシオンが大きくなる水量は変わる。つまり本実験ではこの含水率8%が、最も大きなサクシオンを発生させ、砂山の形成量を最大にする最適含水率に近いと考えられる。次に流出量は、形成量と負の相関を示したが、これは掘削された砂の配分において、形成された砂山が多く崩れるほど流出量が大きくなるため自然な結果と考えられる。次に回収率は、ツメの角度によってその傾向が変化した。この原因として考えられる点は、各ツメを挟む板の長さである。角度が違うツメは全て高さが統一されており、角度の増加でツメの水平方向の長さが短くなるため、そのツメを挟む板も短くなる。20度は回収率が特に低い結果となったが、これはツメを挟む板が最も長いことで、ツメの前に砂が滞留しごみの移送を阻害したためと考えられる。また80度になると、板が最も短いことで掘削した砂が山を形成せず周囲に逃げるため、含水率の増加で砂が固まり周囲に逃げにくくなる作用が重要となり、含水率の増加で回収率が増加したと考えられる。これに対して60度では逆に含水率の増加で回収率が低下したが、これは80度よりも壁が長いために山を形成しやすく、含水率の増加に伴い形成された砂が固まることでごみの移送が阻害されたと考えられる。40度のツメは、流出量とほぼ同様の傾向を示したが、これは砂の流れに従ってごみが移送されたことを示しており、他のツメに比べ掘削における流出量と形成量のバランスが良いと考えられる。また回収率は掘削速度の上昇に伴いその値が下がる傾向にあったが、これは速度の上昇によって、ごみが周囲に逃げる砂の流れに従って移動してしまうためと考えられる。

実験全体を通して、形成量の最小値を示した角度は80度となり、流出量と回収率の最大値を示した角度は40度となった。ただし形成量については、20度のツメが突出して値が大きくその他は大きな変化が無い点を踏まえると、形成量が小さく流出量と回収率が高いという評価に対して、40度のツメが最適と考えられる。また掘削速度に関しては、0.15m/s以上になると回収率の値が下がる傾向があるため、0.05~0.1m/s程度が良いと考えられる。

5. 砂浜実験 1

ツメ掘削実験により、40度のツメが最適と判断した。本実験では、実際の砂浜にてツメの掘削を行いその性能を評価することを目的とした。また比較対象として、80度のツメも同様に製作しその性能を評価した。

5.1 実験方法

福岡市の寺山海岸にて実験を行った。砂の含水率は1~3%であり、木片、プラスチック片、海藻などが散在していた。Fig.14に本実験で使用した2種類のツメの3Dモデルを示す。砂浜での実験を考慮して錆に強いステンレスを用いて製作した。ツメの高さは約200mm、幅は約500mmである。それぞれのツメには、砂を確保するための横壁が取り付けられており、その長さは各ツメの水平方向の長さと同しくした。これにより、掘削した砂の堆積量を減少させ掘削効率を高めることができる。これらのツメを株式会社オーレック製のクローラロボットに取り付け、ロボットを前進させ掘削を行った。

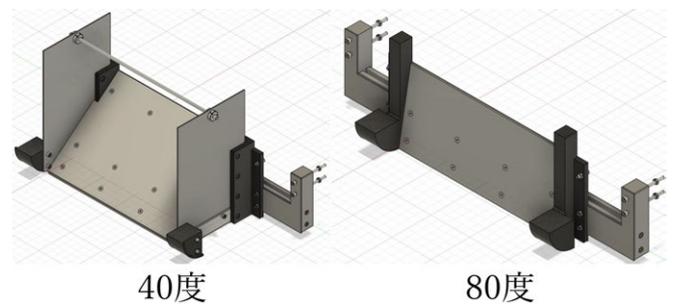


Fig.14 2 types of claws

5.2 結果

実験の結果、80度のツメは砂山の形成ができなかったが、40度のツメは掘削による砂山の形成と連続稼働を達成した。ただし、40度のツメは砂山の形成はできたが、砂の流れによるごみの移送は断続的で不安定であった。Fig.15に80度のツメ、Fig.16に40度のツメによる掘削の様子を示す。Fig.16については、左図が掘削中のロボットの様子、右図がツメの上面図である。Figs.15, 16の赤い丸で囲んでいる部分を見ると、80度では砂山ができず、40度では掘削によりツメの中に砂山ができていることが分かる。



Fig.15 Excavation by 80° claw



Fig.16 Excavation by 40° claw

5.3 考察

40度のツメの成功の要因として考えられる点は、砂の滞留を減らしつつ、ごみを回収できる程度まで砂山を形成可能な角度として、80度よりも40度の方が有効なためと考えられる。本実験では、80度のツメは横壁が短すぎたためにツメの前方に全く砂が溜まらず砂山が形成できなかったが、40度のツメであれば十分な砂山を形成することができた。ただしその40度のツメであっても、ごみの移送が不安定となった問題点が存在した。この原因は、ツメ掘削実験の場合と違い、砂浜という不整地での凹凸によってロボットの前進動作が水平に行われないことで、掘削によって形成される砂山が安定せず、ごみを移送する流れを維持することができなかつたためと考えられる。砂浜によっては大きな窪みや丘のような砂の堆積が存在するため、そのような状況であってもごみの移送を維持可能な機構を搭載する必要があると考えられる。

6. 砂浜実験 2

先の砂浜実験1の結果を踏まえ、後述するごみの移送を安定させるための機構を加えた40度のツメ機構を製作し、再度砂浜での掘削実験を行った。なお、今回は先の実験により80度のツメでは砂山の形成が厳しく、40度のツメが最も掘削性能が高いことが判明しているため、40度の場合のみを製作した。Fig.17に、実験で使用したロボットを示す。砂浜実験1と同様に、オーレック製のクローラロボットに製作したツメ機構を取り付けている。

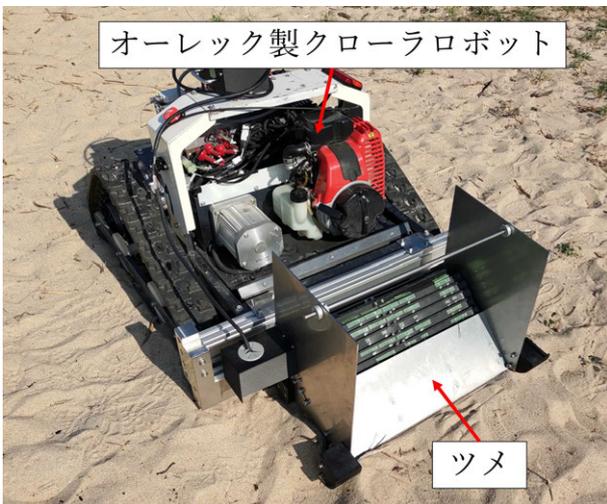


Fig.17 Crawler robot

6.1 安定なごみの掘り出しを実現するツメ機構

Fig.18 に新たに製作したツメ機構と回路部を示す。

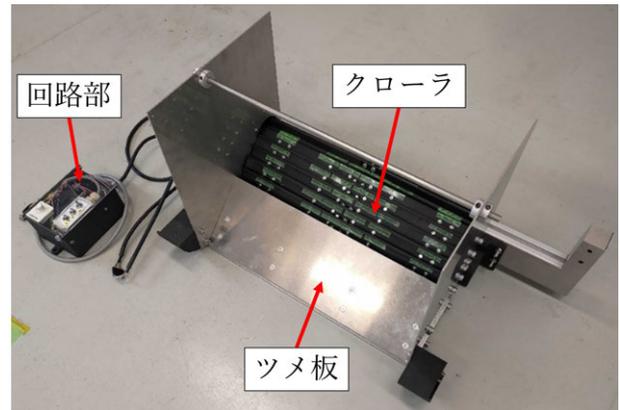


Fig.18 Claw with crawler

先の実験ではツメの傾斜部分は全て板となっていたが、このツメ機構は傾斜部分の下半分が板、上半分がクローラで構成されている。ツメの上部をクローラにすることで、形成された砂山中に存在するごみを強制的に移送することができ、先の実験の問題点であった不安定なごみの移送を解消する。クローラのモータには、水しぶきや粉塵に対応可能なオリエンタルモータ製のBLHシリーズブラシレスDCモータ(BLHM450KC-50)を採用した。保護等級はIP65、定格出力は50W、クローラ回転速度は約0.05~0.17m/sである。Fig.19にモータ周りの配線図を示す。モータの回転と速度制御には、トグルスイッチボックスとオリエンタルモータ製の速度設定器を採用し、素早く簡単に操作できる構成とした。Fig.20に、ツメ機構の3Dモデルと、クローラの履帯部分・軸受けユニットの3Dモデルの詳細を示す。Fig.20の左下図が履帯部分、右下図が軸受けユニットである。クローラの履帯には、3Dプリンタによって作成した履板をアタッチメント付きチェーンに取り付けることで履帯として機能させている。また防塵対策を行うため、軸受けユニットのベアリングには接触シールを施した防塵ベアリングを採用し、さらにオイルシールを用いて軸の回転を保護する設計とした。軸受けユニットに通した軸と、アタッチメント付きチェーンに噛ませた歯車を組み合わせ、モータで回転させ履帯を回すことで無限軌道を実現した。

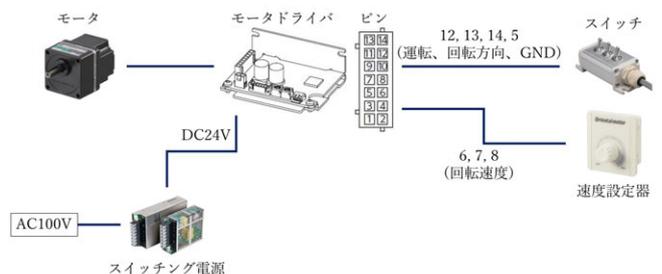


Fig.19 Wiring diagram

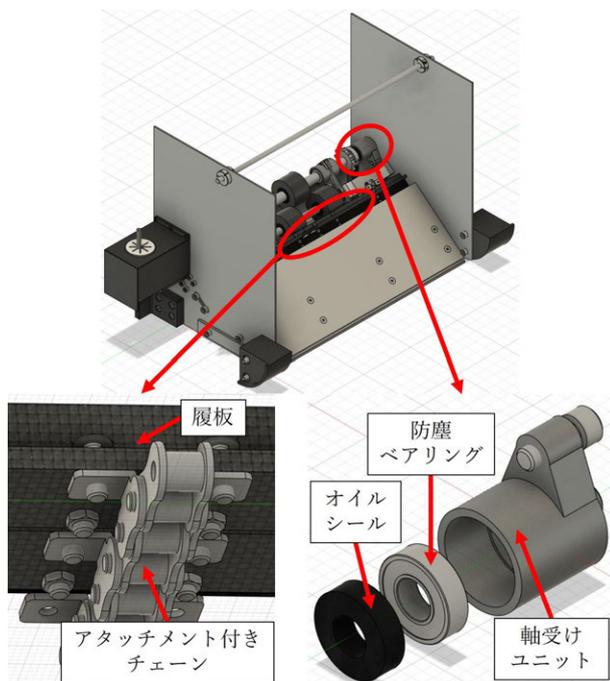


Fig.20 Design of the crawler

6.2 結果

実験の結果、掘削による砂山の形成と、問題点であったごみの移送を達成できた。Fig.21に掘削の様子を示す。左図が掘削中のロボットの様子、右図がツメ機構の上面図である。Fig.21の赤丸の部分から、掘削により砂山が形成され、その山の上に載ったごみや自然物がクローラの補助によって移送されていることが分かる。



Fig.21 Excavation by claw with crawler

6.3 考察

本実験から、ツメに搭載したクローラ機構は、ごみを移送するうえで十分な性能と考えられる。現状クローラの回転速度は最高でも0.17m/sであるが、今後は、このクローラの回転速度をより上昇させ、さらに効率的なごみ回収を実現するため、高トルク・高捻り剛性を持つクローラ機構へと改良する。

7. 結言

本稿では、人による回収が困難な海洋破碎プラスチックごみを回収する効率的なロボットに関して、その要求仕様を定義し、開発中のロボットについて紹介した後、主に「掘り出し」の機能を実現する機構の開発と実験について述べた。「ツメ掘削実験」では、3パ

ターンの含水率の砂に対し、複数のツメの角度と掘削速度を変化させて掘削を行い、ごみ回収に最適なツメを調査した。その後の「砂浜実験1」では、掘削実験を踏まえて製作したツメによって実際の砂浜で掘削を行い、「砂浜実験2」にて更なる改良を施したツメ機構による実験を行い、ごみの移送を成功させた。

今後は、今まで開発してきた機構をさらに改良し、ごみと砂を掘り出すツメ機構と、ごみと砂を分離するベルトコンベアを組み合わせ、小さなごみを効率的に回収可能なロボットの実現を目指す。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP20H00230 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Medhasvi Kulshreshtha et al.: "OATCR: Outdoor Autonomous Trash-Collecting Robot Design Using YOLOv4-Tiny". *Electronics* 10.18, (2021).
- [2] 市村 智康 and 中嶋 新一: "自律型海浜清掃ロボット「ひろっ太郎」の開発 — 砂浜におけるゴミ回収と自律走行の評価 —". 自動制御連合講演会講演論文集 60, pp. 456–458, (2017).
- [3] J. Shalini Priya et al.: "Beach Cleaning Bot Based On Region Monitoring". *2019 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*. 2019, pp. 1–4.
- [4] 宇野 光輝 and 倉爪 亮: "海洋破碎プラスチックごみ回収機構の開発". 第 22 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2021), pp. 1054–1057, (2021).
- [5] 山本 大輔 and 清水 マサヨシ: "大山倉吉軽石風化土のサクシオン, 含水比, せん断強さ". 地盤工学研究発表会 発表講演集 JGS39, pp. 825–826, (2004).