

48. 海底ゴミ回収装置の開発

(独) 港湾空港技術研究所 ○ 平林 丈嗣
(独) 港湾空港技術研究所 吉江 宗生
国土交通省 四国地方整備局 杉浦 悠介

1. 背景と目的

海面清掃船の活躍により海面浮遊ゴミ回収が実施(図-1)され、船舶の安全な航行と環境保全に役立っている。しかし海底に存在するゴミについては、直接目視による確認ができないため、底曳き網が沈木等に絡まる事案が発生している。

直轄作業船による海底ゴミ回収について、過去の事例として第三港湾建設局広島港工事事務所における海中ゴミ回収試験に関する文献調査を実施した。本試験は昭和57年度から昭和63年度にかけて実施されており、主に広島湾において海底ゴミ回収を行なっている。また回収機構に関して、初年度は4爪錨を用いていたが、次年度からは籠型を利用している(図-2)。これは初年度の回収物について機構的に番線類が多く、他の種類についての回収が少なかったためであった。しかし籠型に変更した後も番線類とカキ殻の割合が多くを占めており、またその形状から、長尺の木材等については籠内に納まることができず把持する機構も無いため、沈木等の回収には不適であると考えられる。

2. 回収機構検討

本件における回収対象物として、底引き網漁船の事案を踏まえ長さ5m程度の海底面に点在している沈木と設定した。回収対象が点在している場合、対象物の座標を正確に認識し回収装置をその座標まで誘導する必要がある。ここで回収対象物の座標は事前にサイドスキャンソナーによる測量により把握が可能であるが、誘導については船舶の四点係留および対地定点保持が直轄作業船では困難であると考えられるため、回収機構の検討条件として考慮すべき事項である。そのためピンポイントで位置決めを必要とするグラブ式の機構は本件において適応が困難であるものと考えられる。

対象物の位置が特定できず、把持装置の位置制御に関しても期待ができない場合、チェーンを広域に敷設し絞り込む方式が考えられる。あらかじめ半径30m程度の範囲に途中ブイを配置したチェーンを敷設していき、ブイに重りを通し、その重量で引き寄せ・固縛する。広範囲の面積を引き寄

せるため、正確な位置決めが必要無く、対象物の位置が正確に把握できない場合でも運用は可能となる。



図-1 海面清掃船ゴミ回収作業状況



図-2 過去事例での回収機構

しかし敷設のための支援船が必要となる可能性があり、さらに回収に失敗した場合は再度敷設する時間が必要となる。また、チェーン外周が100m近くなるため、総重量として非常に重くなる可能性があり、運用には課題が残る。

比較的広域、かつ軽量の回収装置の機構として、消波ブロック等の撤去に実績を有する網チェーン方式(図-3)が挙げられる。これはチェーン以外の稼働部が無く、張力により荷重を受けるため、機構全体の構造が簡単であり軽量である利点がある。しかし点在する対象物を効果的に回収するためには装置の大型化が必要となり、その機構から鋼材のフレームを大きく伸ばす必要がある。本事案のように装置の位置精度が確保できない場合、回収可能面積を広げることで対応することが考えられる。ただし、装置自体を大型化することは重量増加による運用性の低下を招く。さらにクレーンなど周辺装置や甲板の占有面積などを考慮すると、単に大型化することは望ましくない。

これらの課題点や条件を考慮し、海底ゴミ回収機構として網チェーンフレーム改良型を提案する。これは中心部から放射状に伸びる6本のアームによって、対象物をかき寄せて回収する方式であり、アームの延長によりある程度広範囲のかき寄せが期待できるものである。また脚部間から抜ける状況への対応策として、脚間にワイヤを通し、回収対象を引っかけ中央へ引き寄せせる機構を付加した。さらにワイヤを引っ張ることで、脚先端部を閉じる力に変換されるため、把持力の向上に繋がる。また脚が閉じた状態となれば、アウター管が下がり、脚の広がりやを構造的に防ぐことができるため、揚収作業途中での回収物落下などを防止することが期待できる。脚が閉じた状態で回収対象を把持することができれば、脚部材にかかる負荷のほとんどが引張り方向となるため、関節などはワイヤを展開するため強度を有するだけで良く、構造強度面において有利であり軽量化が期待できる。図-4に水槽用模型を、図-5に動作概念図を示す。



図-3 網チェーンによるブロック撤去作業

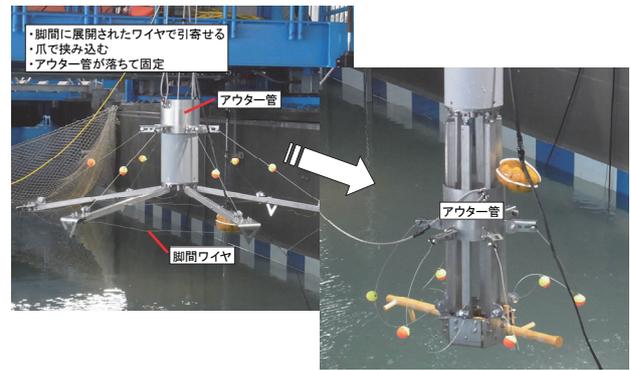


図-4 海底ゴミ回収水槽用模型

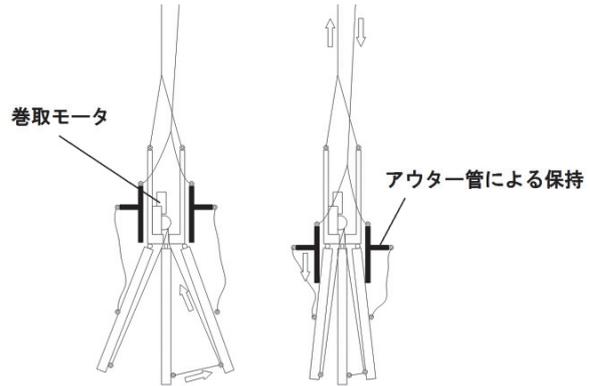


図-5 動作概念図

3. 水槽模型による機構検討

3.1 水槽試験による動作確認

提案する機構に関し、水中での回収動作の挙動等の確認を目的として水槽試験を行った。また海底面条件を砂地盤とし、水槽内に直径3mの砂槽(図-6)を設置した。ここに回収対象物として木材、針金、ロープを設置し、把持成功回数と作業時間を計測する。また波浪の状況によっては船舶の動揺が考えられる。船舶が動揺した場合、船舶クレーンの上下運動に連動し、回収装置も上下運動が起こることが予想される。そこで、水槽上部の門型クレーンに回収用ホイストと展開用ホイストを吊り、作業中に門型クレーンの上下運動を行うことで、船舶の動揺を再現することとした。図-7にクレーン設置の概念図を示す。

網チェーン改良型における回収成功確率は、木材の場合に良好な回収結果となった(表-1)。これは長尺である木材では、その一部が爪により把持される場合が多く、巻取り装置により把持力が加えられるためであると考えられる。しかし針金やロープについては失敗した件数が多く見られた。これらは引寄せワイヤに掛からず、脚の間からすり抜けた場合に多く見られ、回収対象に引っ掛かりが少ない場合や小さい場合について本機構は適していないと考えられる。



図-6 水槽内に設置した砂槽

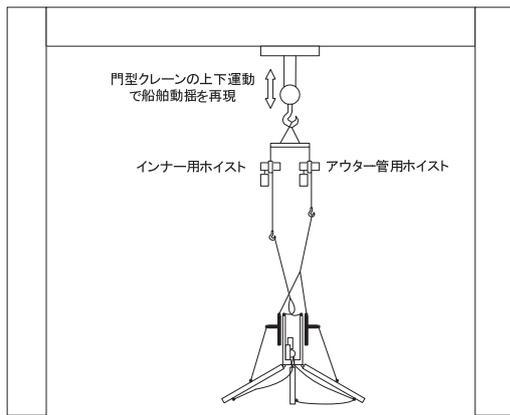


図-7 門型クレーン設置概念図

また波条件として波高 30cm の造波のほか、船舶動揺を再現するために門型クレーン操作による上下運動を付加させた。表-2 に実験結果を示す。これにより海底面離床時に上下運動が加えられ、把持動作完了前に離床する場合があったが、このような場合においても回収効率に大きな差は見られなかった。そのため本機構について波浪の影響は少ないと考えられる。

回収試験では、水面上での操作開始から着水・着底・回収動作を行い、揚収終了までを回収時間とした。実運用時の作業を考えると、ある程度海底面に近い付近まで降ろした状態で位置決めを行うことと、回収後は水面付近まで揚げるだけの動作となるため、この投入・揚収にかかる時間は、回収効率に大きく影響することは無いと考えられる。しかし砂層着底から巻取モータ動作終了までを着床時間としており、この時間は海底面に接地した時間となる。現場海域の潮流により作業船舶が流された場合、回収装置の姿勢変化に関係するため、回収効率に影響を与える時間となる。本試験装置では、回収の確実性を向上させるため動力によるワイヤ巻取りで爪を開閉する機構を用いており、全開で地面に接地した状態でワイヤを巻き取るには負荷が大きくなるため、本体を引き上げ

つつ巻取り動作を行なったが、実運用を考えると可能な限り着底時間を減少させる必要がある。

表-1 実験結果 (波, 動揺無し)

回収対象	設置条件	作業回数	成功回数	回収時間平均(秒)	着床時間平均(秒)
木材	露出	5	5	172	106
	半埋没	5	5	184	116
木材枝あり	露出	5	5	164	96
	半埋没	5	5	162	95
針金	露出	6	2	171	106
ロープ	露出	5	5	176	106

表-2 実験結果 (波高 30cm, クレーン動揺あり)

回収対象	設置条件	作業回数	成功回数	回収時間平均(秒)	着床時間平均(秒)
木材	露出	5	5	176	108
	半埋没	5	5	165	101
木材枝あり	露出	5	5	173	107
	半埋没	5	5	140	78
針金	露出	9	8	166	101
ロープ	露出	5	4	174	109

3.2 海底着底時間の改善案

本水槽試験では確実な把持のため、巻き取り装置による脚閉じ機構を持たせている。しかし、完全に開いた状態で着底した場合、機構的に初期段階での必要トルクが大きくなり、装置全体を揚げる動作と脚閉じ動作の連動操作が必要となる。このような連動操作のためにはクレーンオペレータと回収装置操作者の二名が海中での装置姿勢を確実に認識する必要がある。また、これらを電子式に制御するためには、脚角度、接地センサ、巻き取り装置回転計や、過負荷防止のためのトルク計測が必要となり、機構が複雑化する。

そこで、インナー管の引き上げで脚を閉じる機構とすれば、二基のウィンチの操作だけで操作可能となり、また引き込み動作時に脚先端が常に着底しているため、回収時間の短縮に大きく寄与できるものと考えられる。ただし、引き込み力は自重に依存するため、回収の確実性は低下すると予想される。

3.3 自重式開閉機構

引上げワイヤにより脚を閉じる場合、図-8 のような取り回しが考えられる。閉じ動作の場合、引上げワイヤのみに張力がかかっており、各脚にかかる張力 F_1 は F を脚の本数で割ったものとなる。ここで軸 J を回転中心とした力 Ft は角度 θ の大きさによって変化することがわかる。把持力を増加するためには角度 θ を大きくする必要があるが、脚が閉じるにしたがって θ 成分が減少する。

そこで図-9 のように隣接する脚に接続すること

で脚を閉じた状態での把持力を増加させることとした。

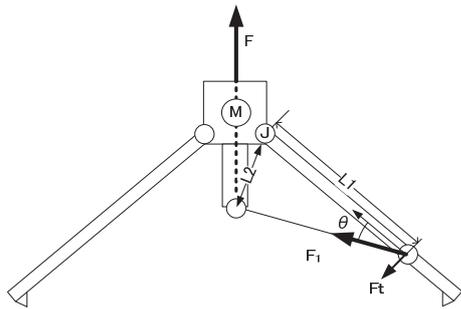


図-8 脚閉じ動作時のワイヤ取り回し

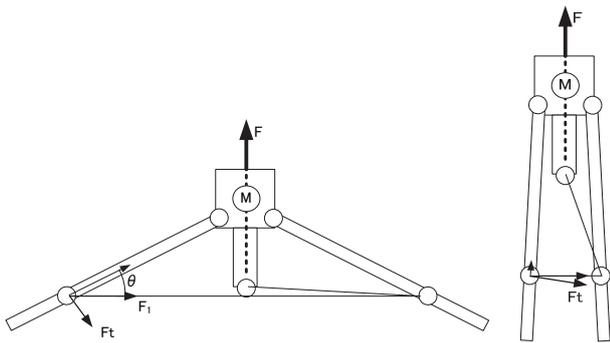


図-9 脚連結による締付け力の向上

脚を広げる場合 (図-10) は、アウター管に接続されたワイヤで脚を引き上げることになり、脚を広げるための力 F_o はワイヤ張力と脚の角度によって定まる。同様に、脚の質量によって脚を閉じる力 F_c が発生する。 F_o 、 F_c ともに脚の角度によって値が変化するため、脚の可動範囲において F_o が F_c より十分大きくなるように吊り環の位置や本体質量 M を設定する必要がある。

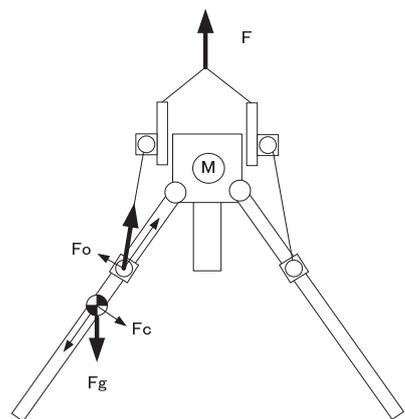


図-10 脚開き動作時のワイヤ取り回し

自重式開閉機構による回収装置の能力を試験するため、前述 3.1 節と同様の水槽実験を行った。条件として、波高 30cm、クレーン動揺ありで行い、着床時間については水中に設置したビデオカメラにより計測した。本回収試験の結果、装置着床か

ら離底までの平均時間は約 10 秒となり、作業時間の大幅な改善が確認できた。

表-3 自重開閉式機構による水槽実験結果

回収対象	設置条件	作業回数	成功回数	回収時間平均(秒)	着床時間平均(秒)
木材	半埋没	8	8	70	10.0
木材枝あり		5	5	71	9.3

しかし図-11 に示すように回収物の突起に脚が掛かり各脚の角度が同じとならない場合、ワイヤ張力がかからない脚が発生する。回収作業時の落下を防ぐためには、各脚に接続されたワイヤの長さを滑車等を用いて可変できる機構とし、締付け力を均等に各脚に分散する必要があると考えられる。



図-11 枝等に引っかかった状態

3.4 船舶移動時の回収状況確認試験

海上での作業において係留ができない場合には、潮流により船舶が流されることが予想される。その場合、クレーンで吊り下げる網チェーン式では回収装置自体も船舶と同様に移動する。また回収動作で海底面に着底すると船舶に引きずられる姿勢となり、確実な把持力が期待できない自重開閉型では引き込み動作や、引き上げ時の姿勢により回収効率に影響があるものと考えられる。たとえば船舶が 1 ノットで流された場合、10 秒では 5.14 m 流されることがとなり、水深-20m の海域では、約 14.1 度の角度がつくこととなる (図-12)。

そのような状況を想定し、門型クレーンを走行 (約 0.5m/sec) させながらの回収試験を行った。本試験ではクレーン位置を移動させており、水槽内では対象物との位置関係が把握できないため、気中での試験とした。船舶移動を考慮した回収試験の様子を図-13 に示す。

本試験の結果、引き込みワイヤに掛からなかった場合に失敗した場合は 2 例存在したが、クレーンが移動し引きずられた状態でも、各脚の先端は

地面に設置しており、ほぼ確実な回収を行えた。ただし操作者は直接目視により状況が把握できたため、着底後すぐに回収動作に移行しており、スイッチやカメラの設置等なんらかの形で着底を認識する必要があると考えられる。

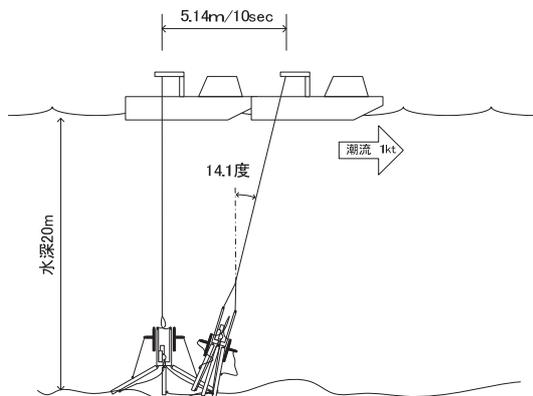


図-12 回収作業時の装置姿勢変化



図-13 姿勢変化時の回収実験

4. 回収装置投入時の船舶誘導試験

本回収方式では回収装置を対象物の直上に誘導する必要がある。しかし海底の対象物への直接目視ができず、ブイ等の間接的な目標も敷設自体に手間がかかるため、操船者に対象物位置情報を呈示する必要がある。また船舶は潮流や風、波浪等の外乱を受け、かつ、推力が無い状態では舵が効かないため、目的位置の近傍で位置の修正を行うことは困難である。そこである程度離れた場所からアプローチする方法とするが、風や潮流の状況により操船方法が変わると考えられる。

本誘導試験では、船舶の位置を D-GPS、回収装置の船舶との相対位置を SSBL により計測した位置データを基に、それぞれの位置関係を平面上に表示するシステムを構築し、実海域試験により投入精度や操船方法について検証した。対象物（海底ゴミ）の位置については、事前の測量により座標が既知であるものとし、本誘導システム画面に目標

位置として表示する。

図-14 に使用船舶を、図-15 に投入する錘の座標を取得するための SSBL を示す。図-16 に実験概要図を、図-17 に誘導システム画面を示す。

実験では目標座標を可能な限り低速で通るように操船し、発信器付きの錘を投下する。錘の着底座標と目標位置の差分、船舶の最接近距離および船舶速度を評価する。さらにアプローチ方法について実験時の操船者にヒアリングを行うこととした。



図-14 使用船舶



図-15 水中座標計測用 SSBL

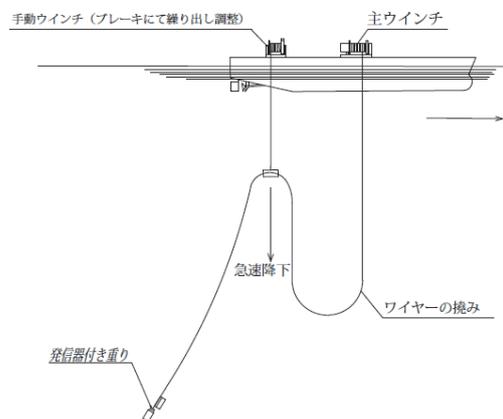


図-16 実験概要図

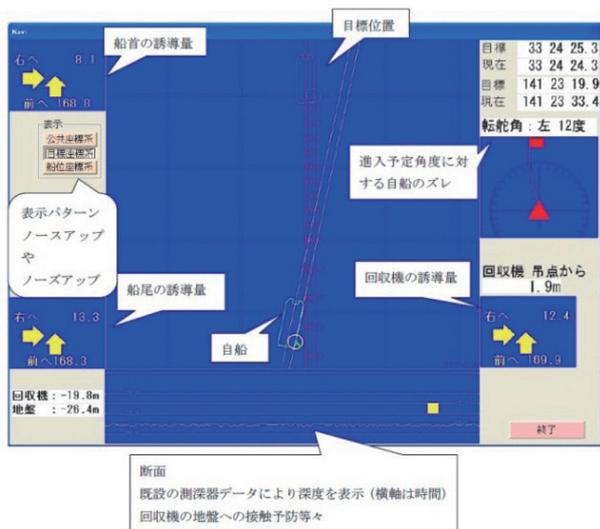


図-17 船舶誘導画面

本試験の結果として、最高で0.8mまで船舶を接近させることができた。また潮流に逆らう方向からのアプローチでは推力を用いるため、操舵が可能であり、2m程度の誤差で接近することができた。

しかし推進力を用いた場合、回収装置が水中の抵抗によって船体後方に大きく振られており、回収装置を落下させた際の着底位置精度が悪化すると考えられる。また、回収装置の姿勢を安定させる翼等が必要になる可能性がある。

このような課題に対しては、潮流に流された状態でアプローチする方法が考えられる。本実験では風上から流されアプローチすることも実施したが、舵が効かず、船舶のノーズと流される方向が異なることもあり、目標座標との接近距離が3m～5mとなった。

しかし回収装置は船舶の真下で姿勢も安定しており、船尾のペラや舵との干渉の危険性が少なく、また回収装置自体の再投入は容易である。さらに操船者のヒアリングでは「操船に習熟(準備期間を十分に確保できる)すれば、潮流に流されながらのアプローチでも船舶前進の場合と同程度に接近できる」との意見もあった。本海上試験では試行回数が少なく、実際には風向と潮流の向きが異なることもあり、実運用時に試行を繰り返しながら、条件に応じて効率の良い方法を選択する必要があると考えられる。

5. まとめ

本報告では、海底に点在する沈木等の回収を目的とした装置の開発と、回収作業に関する装置の投入方法に関して述べた。

回収装置の開発では、運用上の条件を考慮し、広範囲のものをワイヤでかき寄せせる機構を提案し、水槽試験模型によりその動作を確認した。また着底時間の短縮を目的とした自重開閉機構について

も水槽実験を行った。

装置の投入に関しては、船舶の操船方法について検討し、開発した誘導システムを用いて実海域における投入精度を確認した。

これらの結果から下記の項目が明らかとなった。

- ・回収装置に関して、脚間にワイヤを張ることで広範囲の回収が可能
- ・自重による開閉とすることで着底時間を少なくすることが可能
- ・着底を検知するセンサが別途必要
- ・すべての脚についてワイヤ張力を発生するため、各ワイヤ長を可変とする機構が必要
- ・操船精度については推力を用いた場合が良好であるが、回収装置の姿勢が課題
- ・投入時の姿勢を優先した場合、操船精度は3mであった。

本年度は発生したこれら課題点を検討し、実海域試験を実施する予定である。