

安価で連続分離可能な海苔廃水分離装置の開発と地域と協働した 環境改善活動

Development of Economical and Continuous Seaweed Separator and Environmental Improvement by means of Co-operation with Local Communities

研究代表者 有明工業高等専門学校創造工学科 教授 坪根 弘明
共同研究者 有明工業高等専門学校技術部 技術専門職員 石橋 大作
Hiroaki Tsubone, Daisaku Ishibashi

In this study, in order to solve the seaweed waste water problem, the experimental and analytical investigations have been conducted through the development of a swirl flow separator to remove fine seaweeds from wastewater drained from each process of seaweed production. However, the swirl flow separator could not continuously separate the actual deposited material in a local channel because of the different material size. Therefore, in this project, as a purpose of development of hybrid separator by means of swirl flow and oscillation to separate continuously actual deposited material, the separation characteristics of the hybrid separator have been experimentally investigated by using quasi seaweed wastewater in laboratory and accrual wastewater in Yanagawa city. In the experiment, the concentration ratio of 6 % was achieved for flowrate of 40 L/min and oscillation of 153.8 Hz. Furthermore, field test in the actual area was conducted for several experimental conditions, and some important knowledges on the differences of separation experiments between quasi and actual wastewater. The details of the experimental and analytical results are presented and discussed in this report.

要旨

本研究では、これまで解決されていない海苔廃水に関する環境問題を解決するため、乾海苔自動生産機から排出される海苔廃水から、微細海苔を安価に連続的に分離可能な旋回流式分離装置の開発を行ってきた。しかしながら、これまでの分離装置では、水路等に堆積している腐敗した海苔を主とする有機物の分離はできないことも分かっていた。そこで、本研究では、より微細な海苔粒子を分離するため、加振装置を組み込んだハイブリッド型の分離装置の開発を行った。本分離装置では、装置の分離性能を実験的に明らかにするため、流入流量や振動周波数、分離部に使用する金網の目等の分離性能への影響を調査した。さらに、実地試験を行うために、該当する自治体や地域への協力を得て、本実験装置で現地での分離実験を行ったので、これらの結果について報告する。

1. 緒言

海苔の加工工程では、攪拌タンクやミンチ、成形・乾燥、洗浄等の多くの工程で大量の廃水が排出される。その廃水は海苔細胞内のフィコピリンの溶出により赤色に変色し、海苔工場周辺の水路は赤く染まる。さ

らに、微細海苔が水路等に堆積・腐敗し、悪臭の原因となっている。これまでに、海苔廃水の改善に関する様々な方法が提案されているものの^{[1][3]}、高額な設置・メンテナンス費等により、廃水処理装置を導入する生産者は多くない。

これまでに、本研究では海苔廃水問題の根本的な解決を目指し、多くの海苔生産者が導入する乾海苔自動生産機に搭載可能で、動力を用いず安価に廃水から微細海苔を連続的に除去できる方法について検討してきた^[4]。これまでの研究において、90%以上の微細海苔を連続除去できる分離装置は開発できているものの、海苔廃水が工業廃水に定義されていないことに起因して、本装置の乾海苔自動生産機への組み込みや乾海苔生産工場への導入はなかなか進まないのが現状である。しかしながら、有明海沿岸地域の自治体は、海苔廃水に関する農業と漁業の対立問題を解決することや、水路の赤水や悪臭による観光業への影響を改善するため、この海苔廃水の処理については高い関心を持っているものの、有効な手段を見出せていない状況である。

次に、著者らは、これまでに開発している旋回流式分離装置による水路に堆積している有機物の除去実験を行ったものの、すぐに分離部で目詰まりを起こし、

連続分離は出来ないことが分かっている。

そこで、本研究では、水路に堆積しているより細かな微細海苔を巡回流式分離装置により除去することを目的として、振動装置を付加した巡回流と加振によるハイブリッド式分離装置の開発を行った。第一段階として、研究室でより細かな海苔を含む疑似海苔廃水を用いてハイブリッド式分離装置による実験を行い、流入流量や振動周波数、分離部に使用する金網の目等の分離性能への影響を調査した。第二段階では、実際に海苔を主成分とする微細な有機物が堆積している地域での実地試験を行った。なお、当初、実験室での分離特性実験および実地試験スケジュールは以下の表1のように計画していたものの、ステップ3に示す実験室での分離可能条件の発見に多大な時間を要し、ステップ6の途中までに得られた実験結果について検討を行なったので、それらの結果を報告する。

表1 当初の研究スケジュール

段階	内容
ステップ1 (実験室)	水路に堆積している有機物と同程度の大きさの微細海苔による分離実験
ステップ2 (実験室)	これまでの条件では微細海苔の分離ができないことを確認後、加振装置の開発と測定
ステップ3 (実験室)	分離特性実験と分離可能条件の発見
ステップ4 (実験室)	太陽光発電パネル、DCポンプ、ソーラーチャージャーコントローラー、バッテリー等の水路設置型ハイブリッド分離装置システムの設計と製作
ステップ5 (現地)	現地での分離実験
ステップ6 (実験室)	水路設置型ハイブリッド分離装置全体の設計・製作・組み立て
ステップ7 (現地)	水路設置型ハイブリッド分離装置による実地試験と改善
ステップ8 (現地)	水路設置型ハイブリッド分離装置による運用実験

2. 分離特性実験

図1に、本研究で提案している巡回流と加振によるハイブリッド型分離装置の実験装置概略図、図2に分離装置の詳細図を示す。まず、円筒内壁に沿って廃水を導入し、巡回流を形成した。ステンレス製の金網円

筒部分で廃水は遠心力とともにアウトパイプ内部の負圧により海苔と水分に分離され、分離された海苔はインナーパイプ部、水分はアウトパイプ部にそれぞれ移動した。なお、金網円筒部内径は48 mm、長さは120 mmであり、表2に示すような3種類(80番、150番、200番)のステンレス製金網を用いて実験を

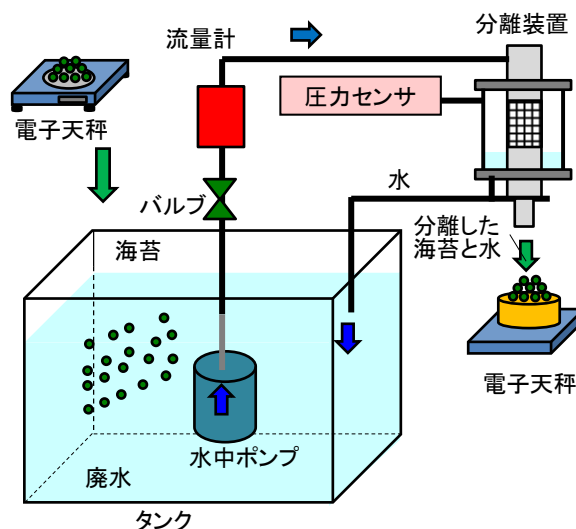


図1 実験装置概略図

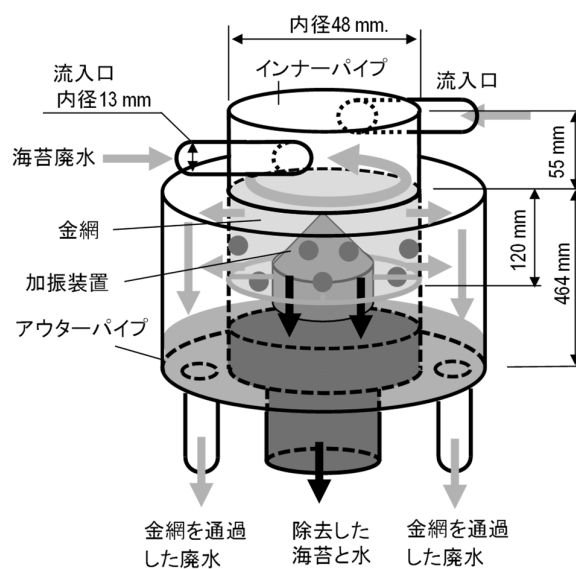


図2 分離装置詳細図

表2 円筒金網およびパンチングシート詳細

種類	番目	目開き (mm)	開孔率 (%)
ステンレス 金網	80	0.198	38.8
	150	0.109	41.6
	200	0.077	34.9
ステンレス パンチングシート		孔径 0.5	19.1

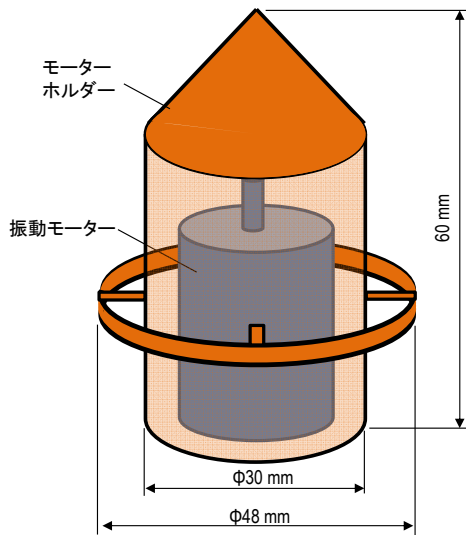


図3 加振装置詳細図

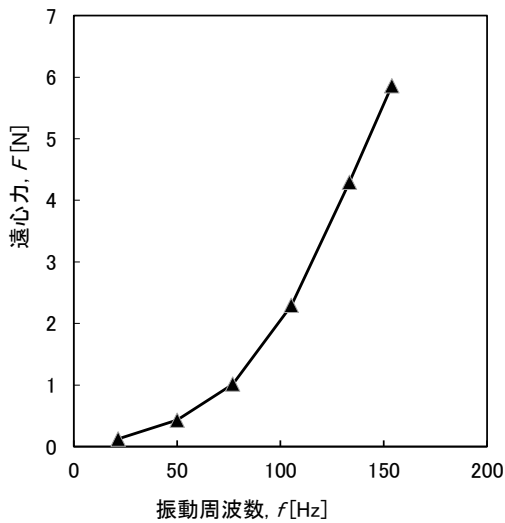


図4 振動周波数と遠心力の関係

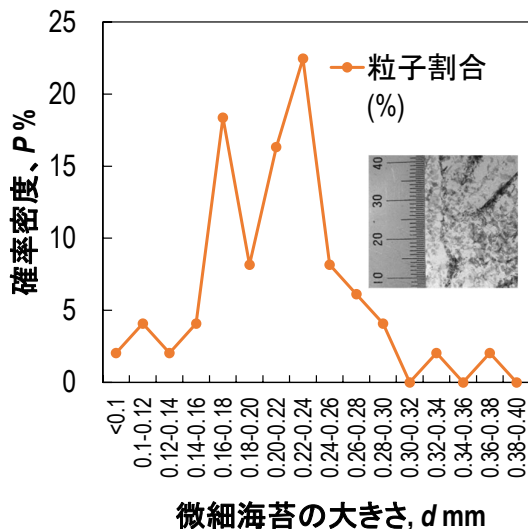


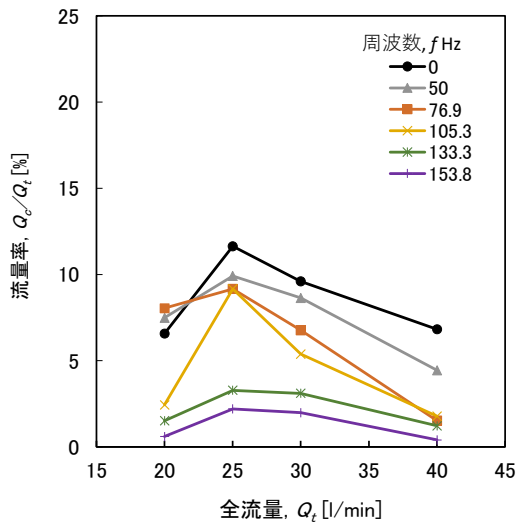
図5 疑似海苔廃水の微細海苔の粒度分布

行った. 図3に示す加振装置は, 3Dプリンタおよび光造形機で作製した外径30 mm, 長さ65 mmの先端が円錐状の容器に振動モーター(スリーピース社製, TP-2528A-15)を入れ, それを金網円筒部に図のように設置した. 今回, 本モーターによる加振方向はインナーパイプの半径方向であり, 図4に示すように, その周波数は0~153.8 Hz, 最大周波数時における半径方向の加振力はおよそ6 Nであった.

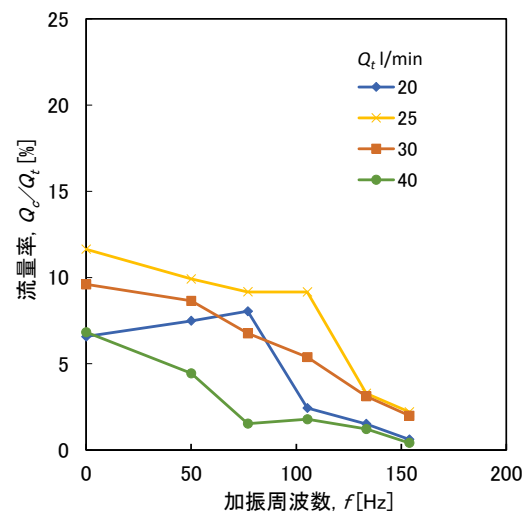
本研究では, 海苔廃水の流量率(インナーパイプからの流量/全流量)に対して, 旋回流発生部への流量, 振動モーターによる加振周波数, およびステンレス金網の目の大きさによる影響について性能試験を行った. ここで, 海苔廃水の流量率で本分離装置の性能を評価した理由として, これまでの研究において, インナーパイプからの流量が非常に少ない状態であれば, 微細な海苔が目詰まりせずに連続分離が可能な状態であることを確認しているためである. つまり, 本分離装置は濃縮機のような役割を果たすとも言える. 流入部における流量は流量計(愛知時計電機社製, NW20-NTN), インナーパイプからの流量は電子天秤(A&D社製, EJ-6100)でそれぞれ測定し, 海苔廃水の流量率を算出した. また, アウターパイプ内の圧力は, 圧力計(長野計器社製, GC62)およびマンノメータを用いて測定した. なお, 本研究では, 乾海苔40枚をミキサーで細かくし, 水道水と混ぜ合わせ, およそ0.2 wt%濃度の疑似海苔廃水を供試流体として使用した. 図5に, 疑似海苔廃水中の微細海苔の粒度分布を示す. ここで, 平均径は長径と短径の平均値とした. 平均径は0.2165 mmであり, 水路底に堆積している微細な有機物とある程度同じ大きさであることを確認した.

3. 実験結果と考察

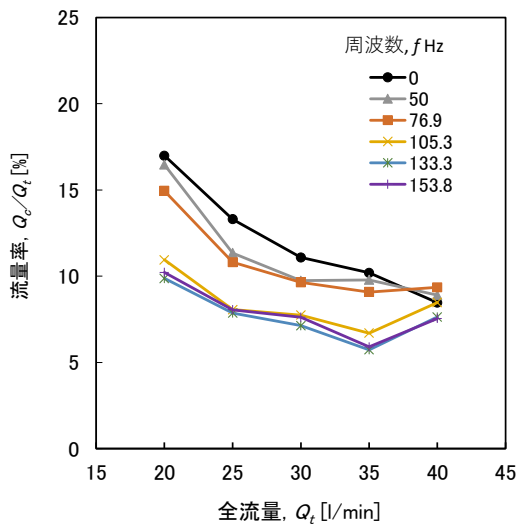
図6に, それぞれの番目の金網における流入させた全流量 Q_t に対する振動モーターによる加振周波数毎のインナーパイプからの流量 Q_c の割合 Q_c/Q_t を示す. 80番の金網の場合, 基本的に, 加振の有無にかかわらず, 流入量の増加とともに25 l/minにおいて流量率がピーク値を示し, さらに流入量の増加とともに流量率が減少する傾向を示した. これは, 流入量が増加すると, 微細海苔による目詰まりの影響により金網を通過する流量の割合は減少したが, 25 l/minを超えると, 捕捉された微細海苔を強い旋回流が移動させ, さらにアウターパイプ内の流量が増えることでより高くなる負圧の吸引効果も高まったためと考えられる. ただし, 特に高い加振周波数の場合で非常に低い流量



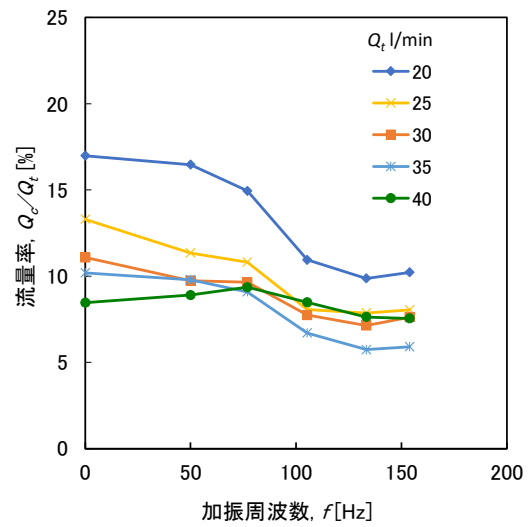
(a) 80番



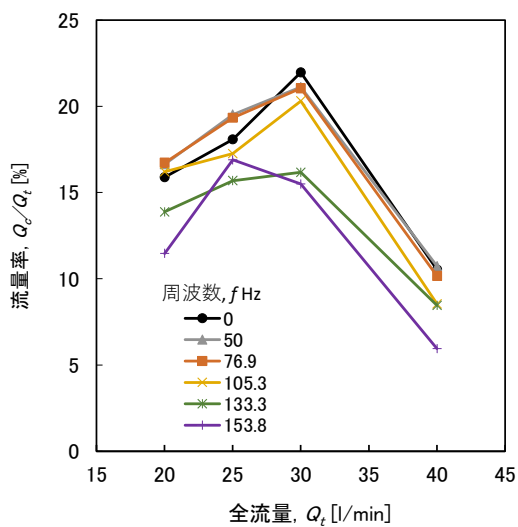
(a) 80番



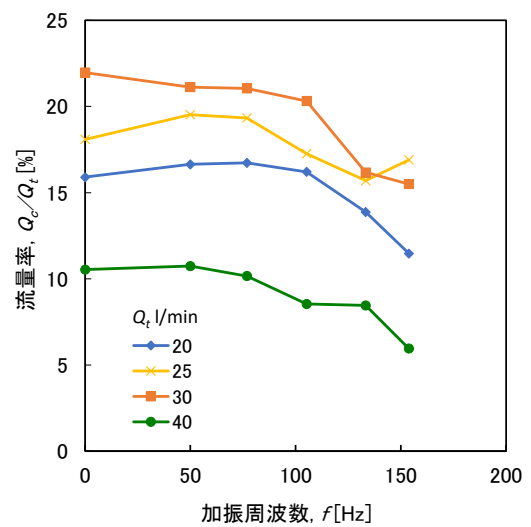
(b) 150番



(b) 150番



(c) 200番



(c) 200番

図6 流入体積流量に対する流量率

図7 加振周波数に対する流量率

率を達成しているように見えるが、これは加振により柔らかい微細海苔が金網の目を通過してしまい、結果として金網の目詰まりがなく、微細海苔とともに水がインナーパイプ側からアウトパイプ側へ移動し、インナーパイプからの流量が減少して低い流量率になってしまったと考えられる。これは、微細海苔をアウトパイプ側へ移動させずに低い流量率にするという当初の目的とは異なるため、加振を行う際には80番程度の金網は使うべきではないことが分かった。

次に、150番の金網では、流入量の増加に伴うピークは見られず、流入量の増加とともに流量率は減少する傾向であった。なお、基本的に、加振周波数の増加に伴い、流量率は低くなる傾向であった。

さらに、200番の金網の場合、流入量の増加に伴い流量率が一旦増加するものの、30 l/minにおいて流量率がピークに達し、さらに流入量が増加すると、流量率が急激に減少する傾向であった。なお、全体的な傾向として、金網の番目が大きくなるほど、つまり目開きが小さいほど、流量率が大きくなった。

次に、図7に金網別の加振周波数 f に対する流量率の割合 Q_c/Q_t を示す。全体的な傾向としては、加振周波数の増加とともに、どの流入量においても基本的に減少する傾向を示し、番目が増加（目開きが減少）するとともに、加振による流量率への影響は加振周波数の高い領域で現れる傾向であった。次に、例えば200番の金網の場合、どの流量においても100 Hz未滿の加振周波数では流量率の変化は明確には確認できなかったものの、100 Hzを超えるとその影響が見られるようになり、加振なしと加振周波数150 Hzを比較すると、加振により5%程度減少する傾向であった。また、150番の金網の場合と比較すると、より高い加振周波数でなければずり落ち効果が出ないことも見て取れる。つまり、振動により金網を微細海苔が通過しない程度の番目の金網を使用することが、本装置を設計する上で必要な知見であることが分かった。

4. 無次元数による整理

全流量に対するインナーパイプからの流量率 Q_c/Q_t について、分離実験での条件（旋回流の強さ、金網の目開きの大きさ、加振周波数の大きさ）が流量率のどれ程の影響を与えているのか知見を得るため、それぞれのパラメーターを含む以下の3つの無次元数で実験結果を整理する試みを行った。

4.1 無次元粒径

微細海苔の平均粒径 d_s と金網の目開きの水力学的相当直径 d_m との比を取り、無次元粒径 d^* を以下の式で定義した。

$$d^* = \frac{d_s}{d_m} \quad (1)$$

4.2 スワール数

旋回流の強さを表す無次元数として、スワール数が良く用いられる。本研究では、円筒状の旋回流により金網分離部へ流れを導入するため、以下の式でスワール数 S を定義した。

$$S = \frac{\int_0^R u_z u_\theta r^2 dr}{R \int_0^R u_z^2 r dr} = \frac{u_\theta}{u_z} \quad (2)$$

ここで、 R はインナーパイプ内径、 u_z は自由落下として算出した管軸方向速度、 u_θ は流入量から算出した流入口での周方向速度である。

4.3 ストローハル数

流体の流れと振動の関係を表す無次元数として、ストローハル数がある。本研究では、加振周波数 f を含む以下の式でストローハル数 St を定義した。

$$St = \frac{f d_m}{u_\theta} \quad (3)$$

4.4 流量率

(1)～(3)式に示す無次元を用いて、流量率を算出する無次元式(4)を導出した。

$$\frac{Q_c}{Q_t} = 1 - 1.346 d^{*-0.149} S^{0.0668} S_f^{0.064} \quad (4)$$

図8に、流量率の実験値と無次元数による計算値の比較を示す。一部の条件を除く、概ね±30%程度で両者の関係を表すことができた。なお、一致していないところについての主な要因として、特に80番の金網の場合において、加振なし、もしくは低い加振周波数であれば捕捉できていた微細海苔が、加振周波数を上げると金網の目開きのほうが微細海苔の粒子径より小さいにも関わらず、振動により微細海苔が金網を通過していることを(4)式では表現できていないと考えられる。

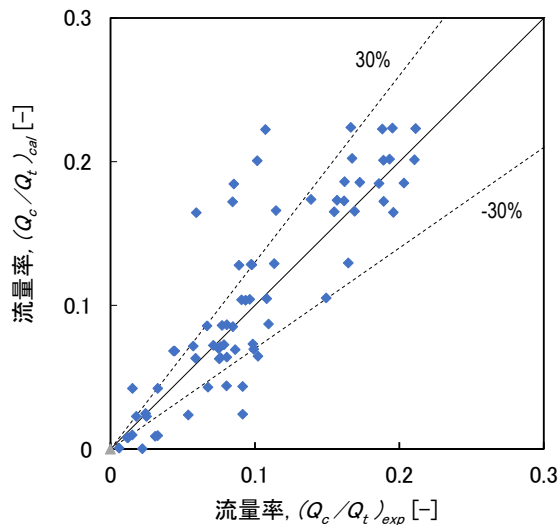


図8 流量比の実験値と無次元数による計算値の比較

5. 水路設置型ハイブリッド分離装置システム

図9に、水路設置型ハイブリッド分離装置システムの動作実験の様子を示す。本装置は太陽光発電パネル（300 W×2枚）、バッテリー（12 V×2個）、ソーラーチャージャーコントローラー、DCポンプを配線し、太陽光パネルによる発電、バッテリーへの充電、DCポンプへの給電等の動作チェックや稼働時間、充電時間等を確認した。特に、バッテリー電圧が低下した際に、出力がオフとなる電圧や一旦出力がオフになってからの充電時間、発電していない間のソーラーチャージャーコントローラーの稼働時間など、実際に実用化する際の細かい問題点の洗い出しや改善策の検討を行った。



図9 水路設置型ハイブリッド分離装置システムの動作実験の様子

6. 水路での実地試験

実験室において行ったハイブリッド型分離装置による分離特性実験結果を参考に、柳川市大和町中島にて実地試験を行った。なお、水路での実験を行うにあ

たり、これまでの研究成果や本研究の意義や予想される効果等、年度当初に関係者と打ち合わせを行っており、水路での実験に対して自治体や地元区長等の許可を得て実施した（図10、図11）。

実地試験（ステップ4）では、以下の手順で分離実験を行った。

【手順1】加振なしで80番、150番、200番の金網を用いた場合における分離実験を行った。

【手順2】加振ありの状態手順1と同じ実験を行った。

【手順3】円筒メッシュの代わりにパンチングシートを使用して、分離実験を行った。

手順1・2では、実験室での分離実験と同じ条件で実施したが、すぐ目詰まりを起し連続分離ができなかった。実験室での分離特性実験より、150番の金網で加振ありの場合であれば、ある程度の連続分離は可能であると予想していた。この原因の一つとして、水路底の有機物の腐敗状態が事前調査のときと異なっており、有機物の粒度がより小さい可能性が挙げられる。また、たとえ同じ粒度であったとしても、腐敗した状態のものと単純にミキサーで細かくしたものとでは、金網への目詰まりの状況が異なる可能性が示唆される。そこで、手順3に記したように、平織りの金



図10 実地試験の様子①



図11 実地試験の様子②

網ではなく、滑らかな表面を有するパンチングシートを用いた追加の実験を行った。結果として、加振なしではパンチングシートでも目詰まりを起こしたが、加振することで目詰まりの解消が確認でき、加振することで連続分離できる可能性を確認することができた。

7. 結言

本研究では、これまでに開発を行ってきた乾海苔自動生産機から排出される海苔廃水から微細海苔を連続分離できる旋回流式分離装置をベースに、水路底に堆積している微細海苔を主成分とする有機物を加振装置と旋回流を組み合わせて連続分離するハイブリッド式分離装置の開発を行った。また、太陽光発電パネルやバッテリー、ソーラーチャージャーコントローラー等と組み合わせて、水路に設置して地域の水路底に堆積した微細海苔を外部電源を用いずに日常的に除去できる『微細海苔回収ユニット』の製作を目指し、システムの設計、組立、試作、動作確認等を行った。さらに、実験室で見出したハイブリッド式分離装置の諸条件を用いて、現地水路において堆積物を回収、分離できるのか実地試験を何度も行い、様々な知見を得た。以下に主な結果をまとめる。

- (1) 流入量の影響：金網の目の大きさや加振周波数にかかわらず、流入量を増加すると150番の金網以外はインナーパイプからの流量率は一旦増加してピークに達し、さらに流量を増加するとセンターパイプからの流量率が低下する傾向を示した。つまり、本分離装置では流量がある程度高いほうが負圧の効果も期待できるので、流量率を下げる事が出来るということが分かった。
- (2) 加振周波数の影響：流入量に関係なく、基本的には加振周波数が高いほど流量率が低下し、200番の金網で153.8 Hzの加振の場合、40 l/minのときにインナーパイプからの流量率は6%を達成した。これは、加振なしの場合と比較して、流量率はおよそ43%減少できた。
- (3) 金網の目の大きさの影響：基本的にどの流入量および加振周波数の条件でも、金網の番目が小さいほど、インナーパイプからの流量率が低くなる傾向であった。しかしながら、特に80番の金網の場合、加振周波数がある程度以上になると、金網の目を微細海苔が通過してしまうことも確認できた。

- (4) 実地試験：実験室で得られた知見に基づいて分離装置を組み、現地の水路で底に堆積している有機物の回収および分離実験を行ったものの、腐敗等の影響もあり、予定の設定では堆積物を分離、回収することが出来なかった。また、パンチングシートを用いた追加実験も行ったところ、加振装置を作動させることで連続分離の可能性があることを確認できた。

今後の研究として、まずハイブリッド式分離装置の加振装置と分離部の設計を再度見直し、より振動が減衰せずに、かつ、機能を満たすように改良を加える予定である。それにより、基本的な目詰まり問題をより効果的に解決できると考えている。また、ハイブリッド式分離装置の2号機による実験室での分離性能試験を行う予定である。さらに、2号機による現地での実地試験を行い、実際の廃水や堆積物による分離実験を行う予定である。また、同時に、水中ポンプへ安定して堆積物を吸い込ませる方式（例えば水中ポンプの水流とバブル等を組み合わせて水中ポンプ周りの堆積物を攪拌するなど）も検討しなければならないと考えている。それらを達成できれば、実際に水路での実用化試験と改善を行うことで、自移動型のハイブリッド分離装置として自治体や地元の漁業協同組合等で運用できる場所までたどり着けると考えている。これらを実現することで、現在まで解決できていない有明海周辺の海苔産業に起因する環境問題の解決の一役を担えると考えている。

発表論文

- [1] 坪根弘明, 大澤悠, 石橋大作, 円筒旋回流を利用した海苔廃水中からの微細海苔の除去, 日本機械学会九州支部第76期総会・講演会講演論文集, 2023年3月.
- [2] 石橋大作, 坪根弘明, 海苔養殖産業と環境問題について—地域と一体となった取組み—, 日本高専学会年会講演会講演論文集, 2022年8月

参考文献

- (1) 日向ほか, 特開2011-161431.
- (2) 奥園一彦, 山本哲也, 特開平9-299956.
- (3) 李洪武ほか, 特開2005-254040.
- (4) H. Tsubone, S. Shimomura, S. Takesue, Proceedings of 9th International Conference of Multiphase Flow (ICMF2016), CD-ROM, Paper No. 356 (2016).