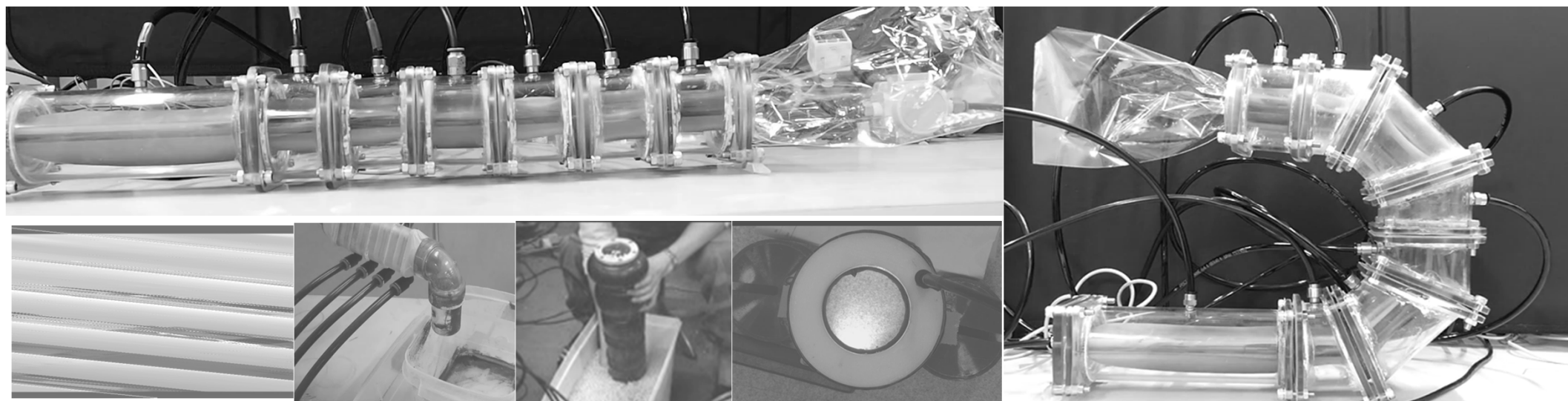


宇宙トイレのための蠕動ポンプを用いた 革新的混合搬送・処理システムの開発

中央大学 中村太郎



発表の内容

- 1 腸の蠕動運動について
- 2 蠕動運動型ミキシングポンプの紹介
- 3 蠕動運動型ミキシングポンプの宇宙トイレへの適用
 - 3-1 長期にわたる有人宇宙滞在技術
 - 3-2 研究の目的と具体的な目標
 - 3-3 研究成果の紹介
- 4 課題と今後やりたいこと
- 5 宇宙への展開に向けた検討状況

1. 腸の蠕動運動とは？

蠕動運動とは？

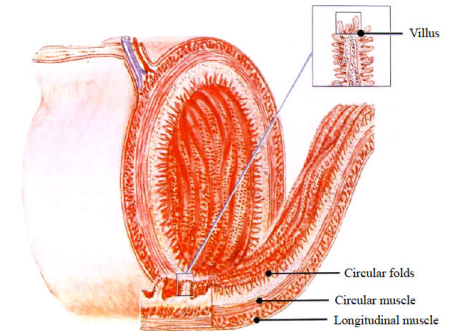
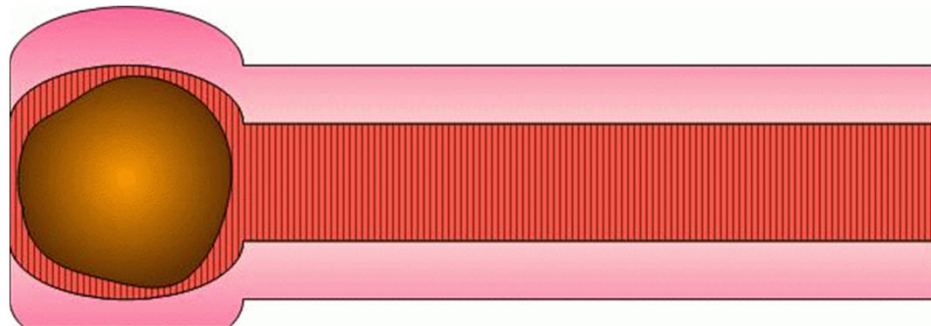
環状形状における非骨格系の運動様式

柔軟駆動

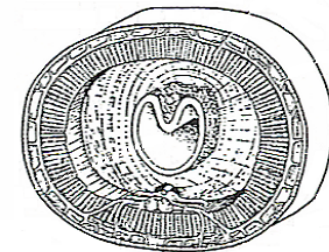
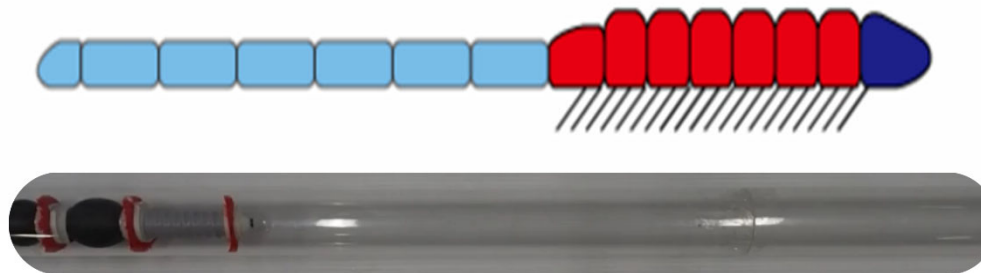
非骨格機構

分散制御系

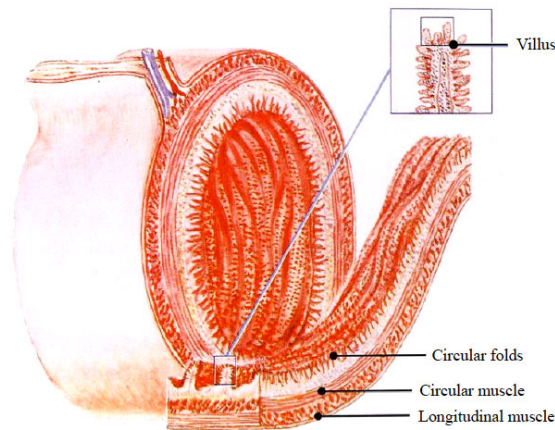
消化器系の
運搬機構
内側運動



ミミズの
移動機構
外側運動



腸の蠕動運動について



柔軟駆動

第2の脳

平滑筋(輪状筋と縦走筋)の収縮により駆動

高粘度・固液混相流である食塊を
「柔らかく・揉むように」効率よく運搬

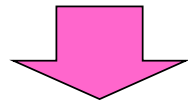
無数の感覚器と神経が分散されて配置
ネットワーク化：腸管内の状況や人の精神状態
の外的要因に対して、脳からの指令とは独立して制御

蠕動運動の運搬について

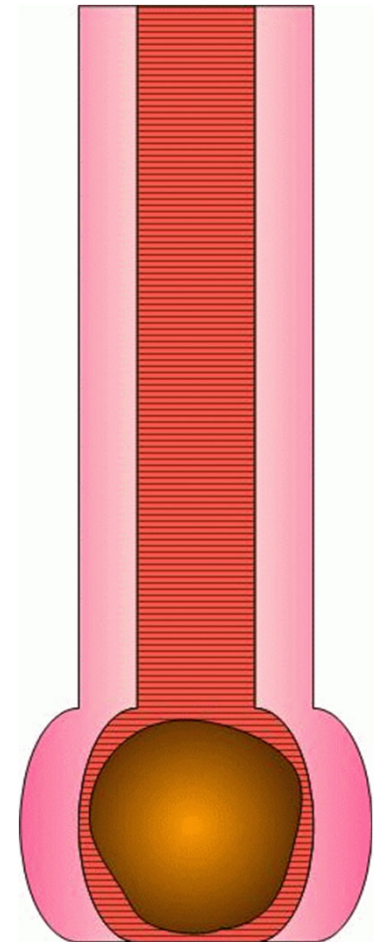
腸の蠕動運動は輪走筋の

収縮と弛緩の繰り返し

柔らかく・揉むように**パイプ自体**が
ムニュムニュ動きながら搬送・混合する



粉体と高粘度流体を
混ぜながら搬送可能

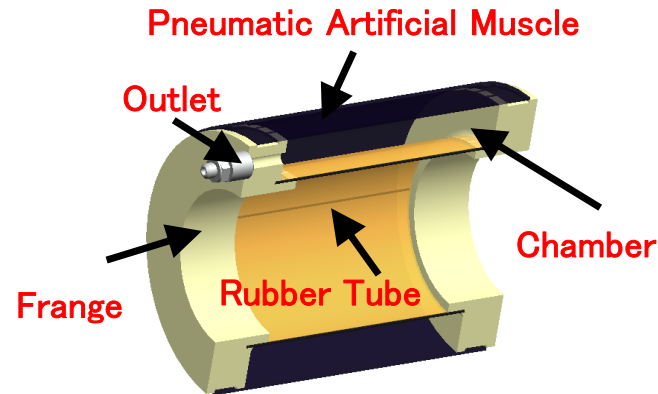


2. 蠕動運動型ミキシングポンプの紹介

蠕動運動型ミキシングポンプ

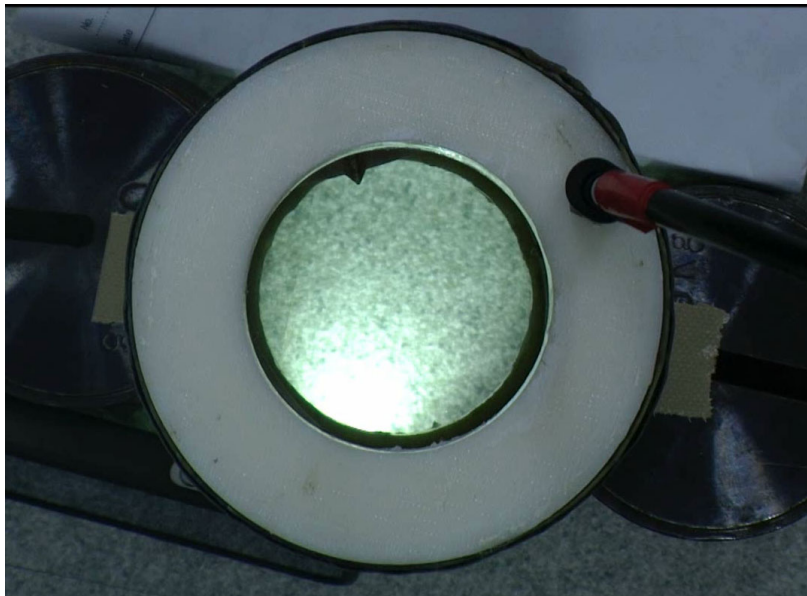


Peristaltic mixing pump



Cross-section of the unit

軸方向繊維強化型空気圧人工筋肉



ユニットを複数連結した構造

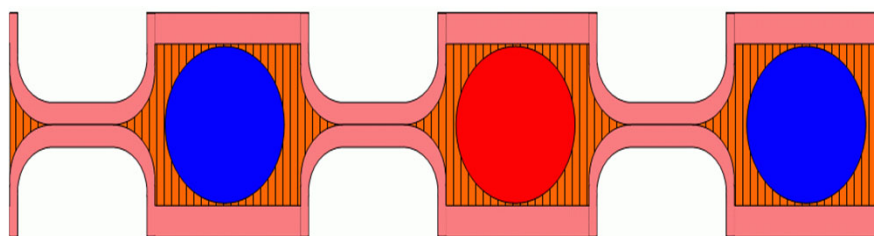
人工筋肉とゴムチューブが平滑筋の役割をになう

空気圧による分散駆動系駆動

低圧駆動 (0.04MPa) で低せん断

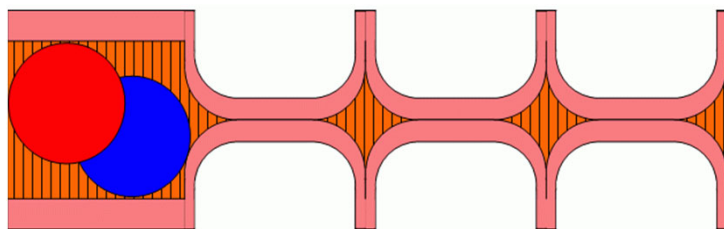
蠕動運動ミキシングポンプ混合動作の

分節運動



- 間隔を開けて閉塞と開放を繰り返す
- 分割と再結合で混合

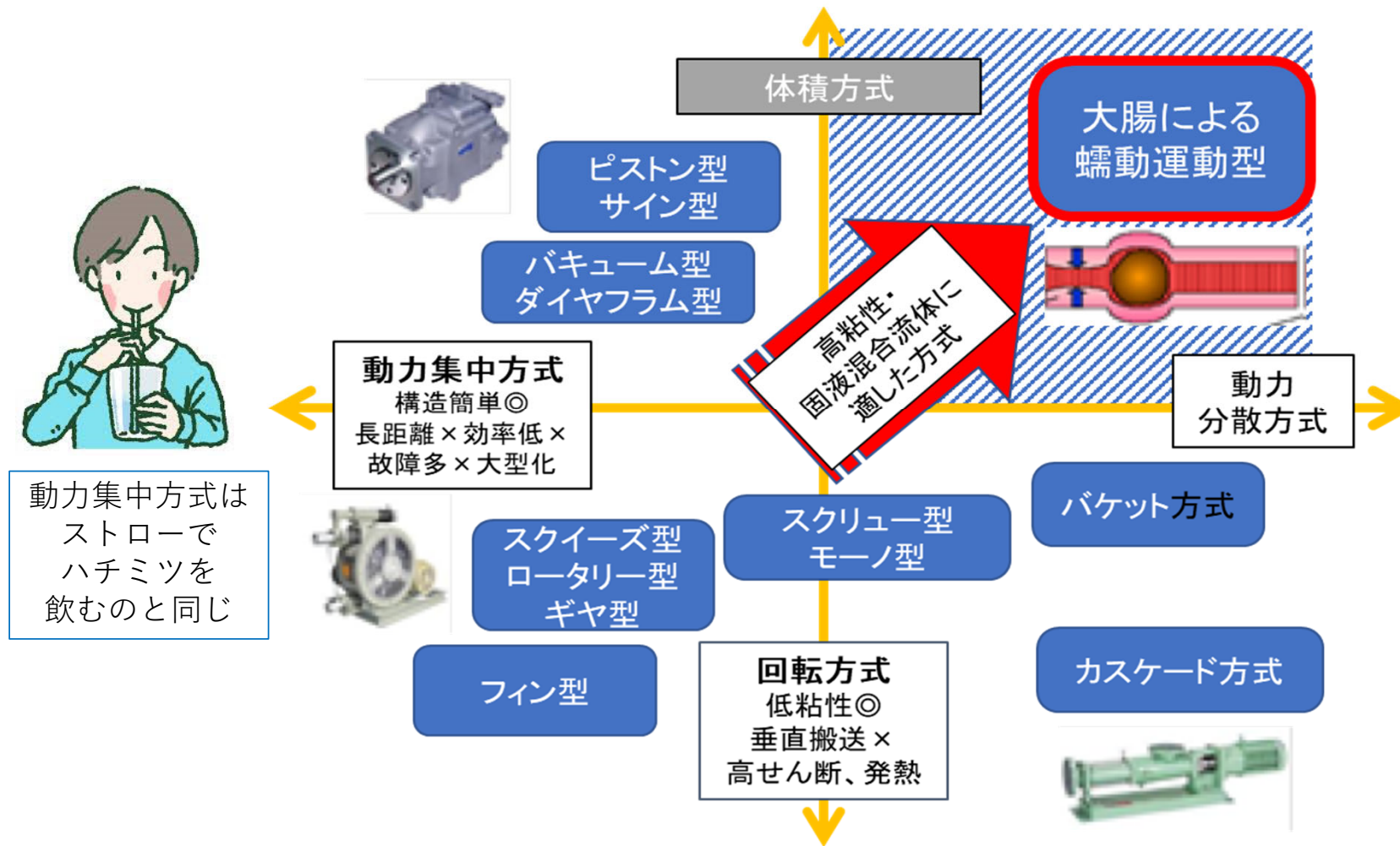
振子運動



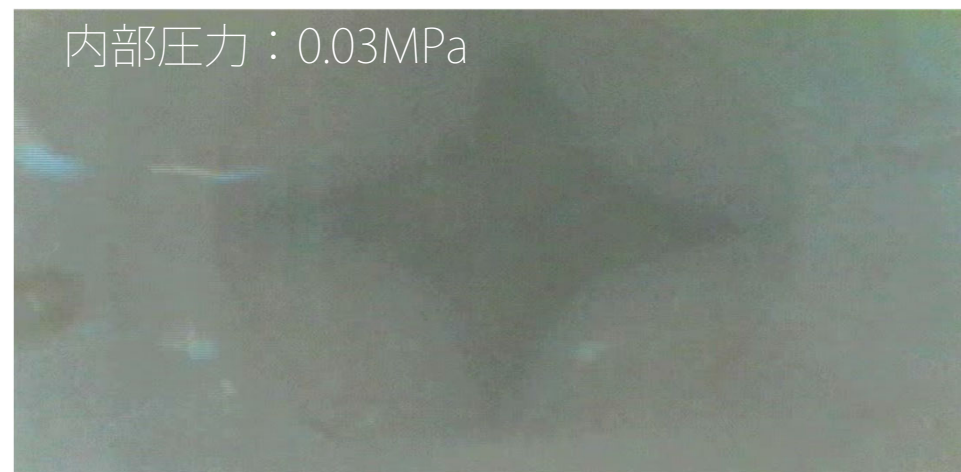
- 管内を往復して移動
- 押出しにより徐々に捏ねて混合

広い面積・低せん断で「揉むように」混ぜる！！

高粘度・固液混合流体搬送のチャート図



蠕動運動ミキシングポンプの搬送実験



内部の状態



分岐弁として



粉体搬送

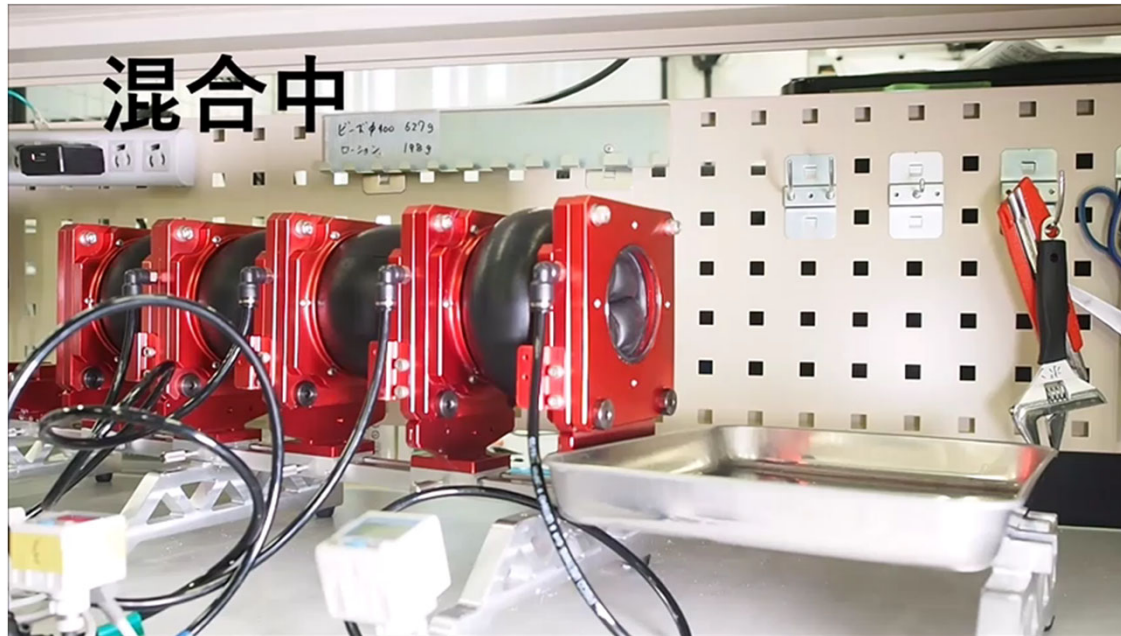
蠕動運動型ミキシングポンプ 混ぜて運ぶ こんな感じ

空気圧人工筋肉によって、腸の動きである蠕動運動を再現した混合搬送装置

今まで難しいとされていた高粘度流体、固液混合流体を混合搬送可能

低せん断での固液混合が可能

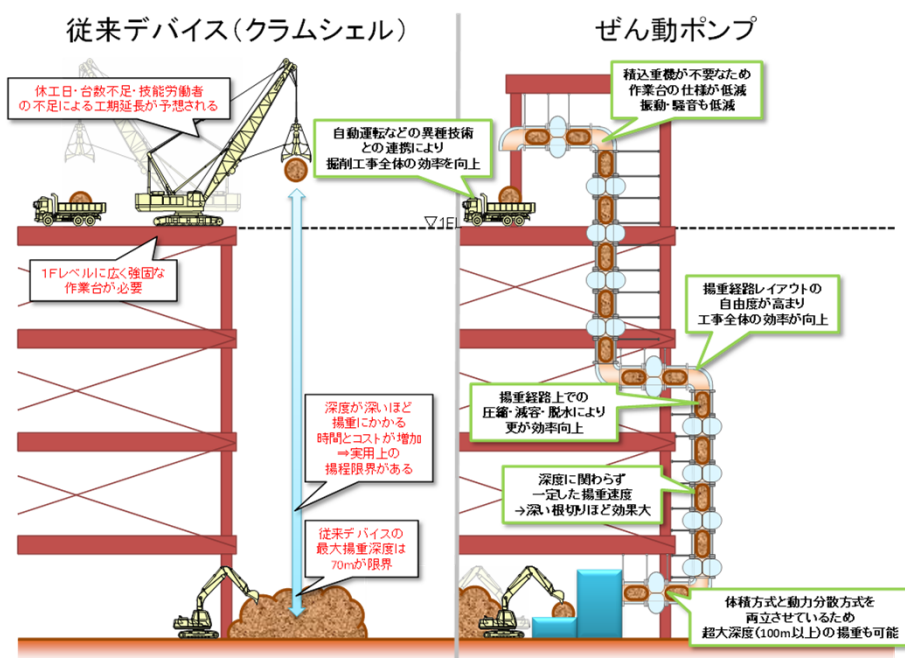
人件費等を含めた革新的なコスト削減、環境負荷低減、新素材系の研究用途に利用



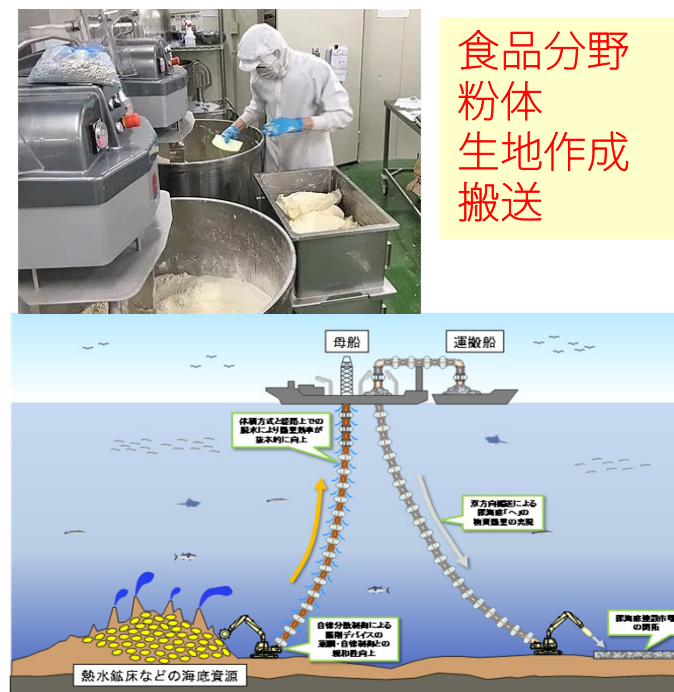
粉体と高粘度流体を柔らかく・混ぜながら連続的に搬送

広がっていく蠕動運動型ミキシングポンプの応用分野

- 粉体搬送と生地との混合や搬送可能→食品分野
- 内部で攪拌作業も可能→セメント分野
- 高粘度流体の搬送→汚泥搬送
- 固液分離機能 土砂搬送



大深度揚重用ポンプ

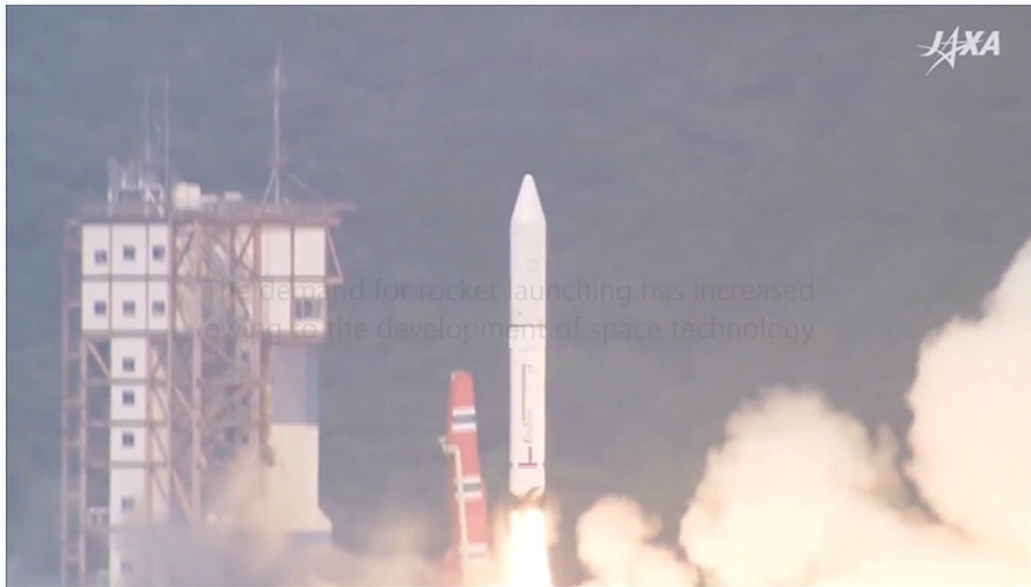


海底鉱山揚重ポンプ

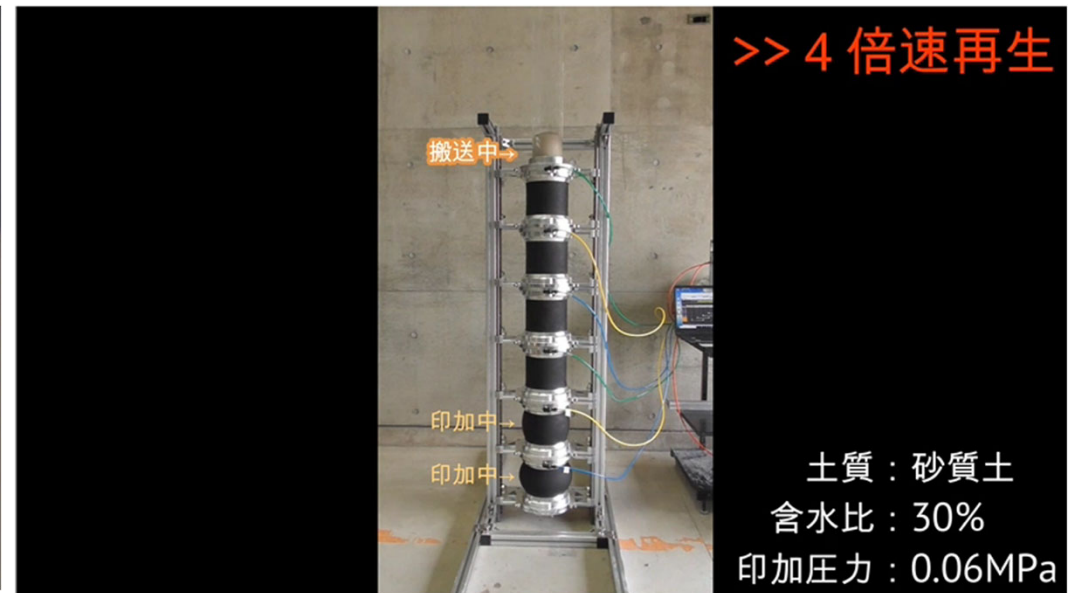
蠕動運動型ミキシングポンプの応用事例

- 事例① 固体ロケット燃料連続生成装置→高粘度な固液体を混ぜながら運搬する装置(JAXA)
- 事例② 建設現場での土砂揚重ポンプ →建設現場の効率化を図れる切り札！（竹中工務店）
- 事例③ 食品・薬剤関連 →食品工場関連の人件費削減可能な画期的装置(多数)

ロケット用燃料の連続製造



建設現場での土砂揚重ポンプ

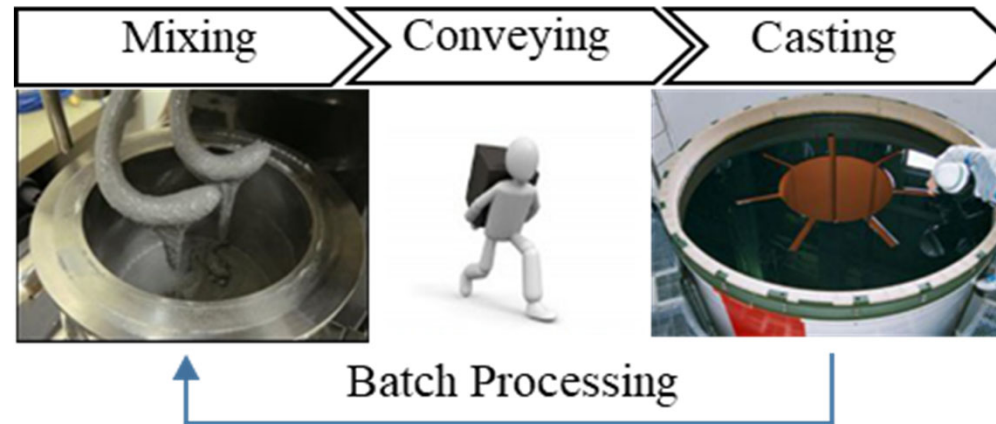


例えば：食品工場における搬送の課題

運搬不可能な食材の運搬
食材の形崩れ
混合の運搬のバッチ処理
パイプの詰まり
パイプ・ミキサーの掃除



蠕動ポンプにより解決！

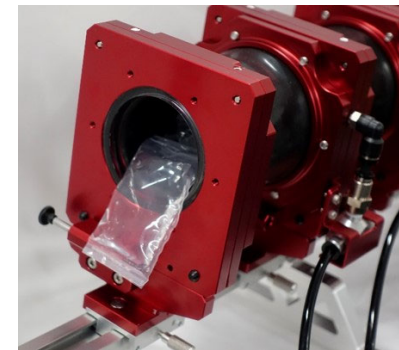


オプション：袋（インナーシート）を使った混錬・搬送

材料をインナーシートに包み、密閉した状態でポンプに投入して混錬・搬送する

小さいゾーン（バッチ）に分けることも可能

密閉状態のまま他の生産ラインに運ぶことができる



内容物の劣化を防ぐ

空気に触れないため、酸化しやすい薬品や気化乾燥が激しい薬品を使用することが可能。

清掃不要・ロス低減

ポンプに材料が残らないため、ポンプ清掃が不要。
清掃に必要な時間、人件費、製品ロスをなくすることができる。

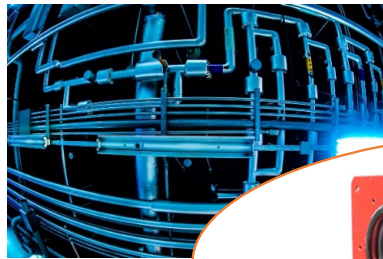
小ロット連続生産が可能

ロットに分けることで定量を守りながら連続生産が可能。
ロット生産と連続生産のそれぞれの利点を得ることができる。

蠕動ミキシングポンプ：こんな場面で使えます

高粘度スラリーの長距離搬送

高粘度スラリーを長距離搬送して途中で詰まってしまうような時、搬送路自体が動く蠕動ポンプはその問題を解決できます。またポンプ自体を加温することで、温度低下による粘度上昇を防ぐこともできます。



バッチ処理から連続工程へ

ミキサーで混練した後、人手により次工程に運搬するバッチ処理を、蠕動ポンプを使うことで混練と搬送を同時に行う連続工程に変えることができ、人手工数削減によるコストメリットを享受できます。



新製品の開発に向けて



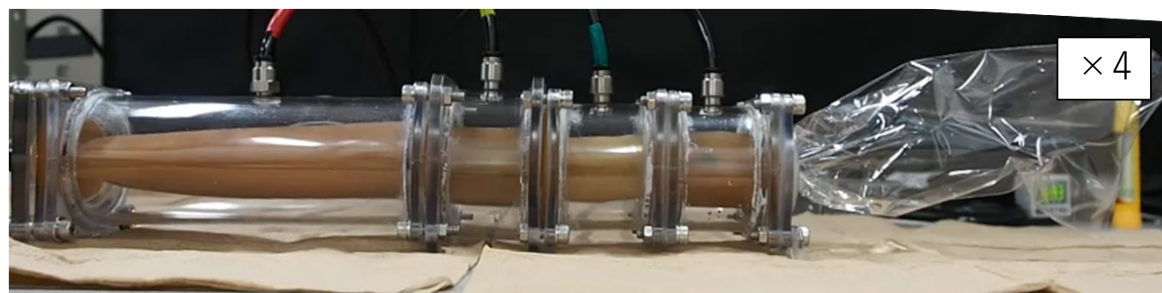
これまでになかった全く新しい混練システムにより、新価値を提供できます。新しい化粧品や食品など、蠕動ポンプでしか生成できない商品を生み出せる可能性があります。

パイプで詰まりそうなところ



乳製品をはじめとした高粘度流体を扱うパイプは、パイプが詰まってしまうことがあります。これらをメンテナンスするのは非常に大変なので、詰まりそうなところにあらかじめ部分的に蠕動ポンプロボットを適用することで、恒常的なつまりを解消できます。

3. 蠕動運動型ミキシングポンプの宇宙トイレへの適用



長期有人宇宙滞在技術

有人宇宙滞在技術：酸素や飲用水の供給，排泄物の処理等の環境制御，生命維持技術など

長期の宇宙探査は補給が困難であり、酸素や水の再生システム(ECLSS)が必要

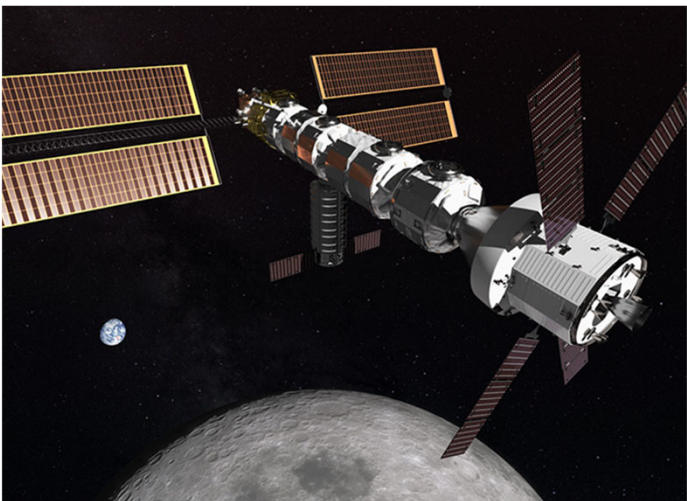


Fig. 1 Gateway[1]

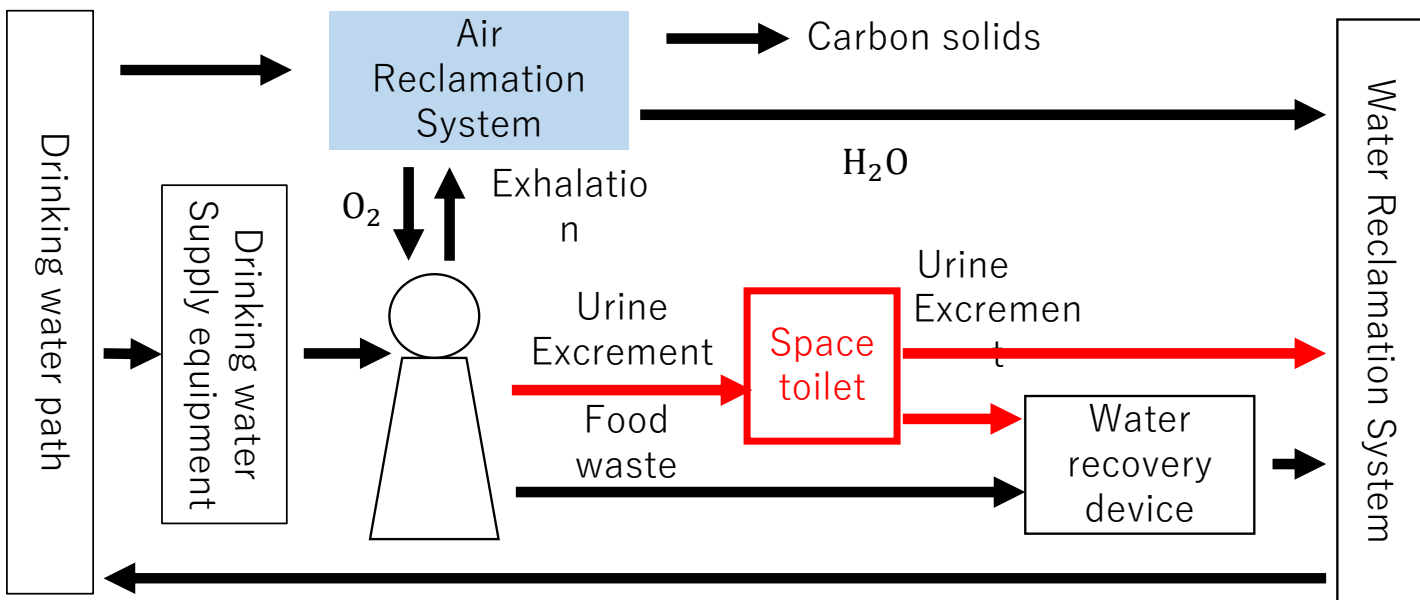


Fig. 2 Outline of ECLSS[2]

排泄物を再利用するため，移送部分である宇宙トイレが重要

[1] <http://www.exploration.jaxa.jp/program/>

[2] <http://www.kenkai.jaxa.jp/research/exploration/eclss.html>,

微小重力環境で使用される宇宙トイレは大量の水や重力を利用することができない

現在の宇宙トイレ

- ・尿の再生のみ
- ・タンクや袋の交換が必要

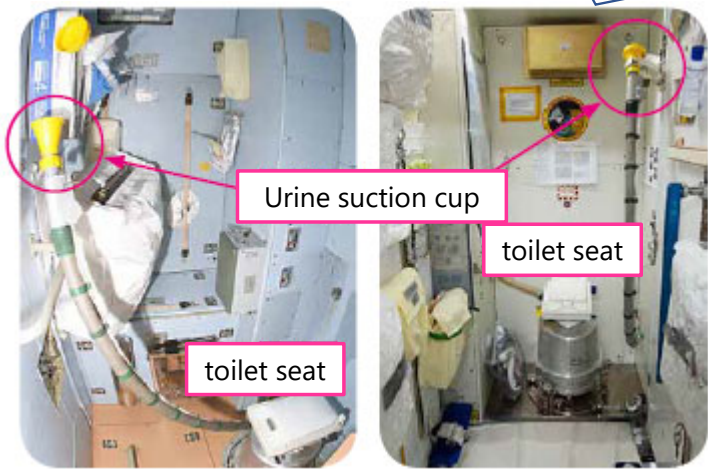
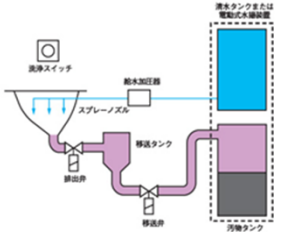


Fig. 3 Toilet system used on the ISS [3]

既存の地上技術

家庭用節水型トイレ	真空式
便器素材／コーティングの工夫により汚れをつきにくくするとともに、洗浄水を渦を巻くような水流を作り、効率よく便器内を洗浄する。	水流ではなく、大気圧より低い気圧（航空機が上空にいるときは外気圧を利用）の気密容器に取り付けた気密を遮断する弁の開閉により、大気圧中にあった汚物を減圧容器に吸引する。
無重力下 × 大量の水	詰まりやすい 修理困難
	

消耗品を少なくし，少量の水（省エネルギー）で
宇宙空間で排泄物の移送・再生を可能とする宇宙トイレが求められる

[3] <https://fanfun.jaxa.jp/topics/detail/7771.html>

研究の目的



蠕動ポンプを用いて、
微小重力下かつ少量の水で、
便の搬送・集結を可能とするポンプを開発する。

目標設定

搬送率 70%以上

使用する水 数十グラム程度(地上では5-10L)

省エネルギーでの搬送 (人力で空気をためる程度)

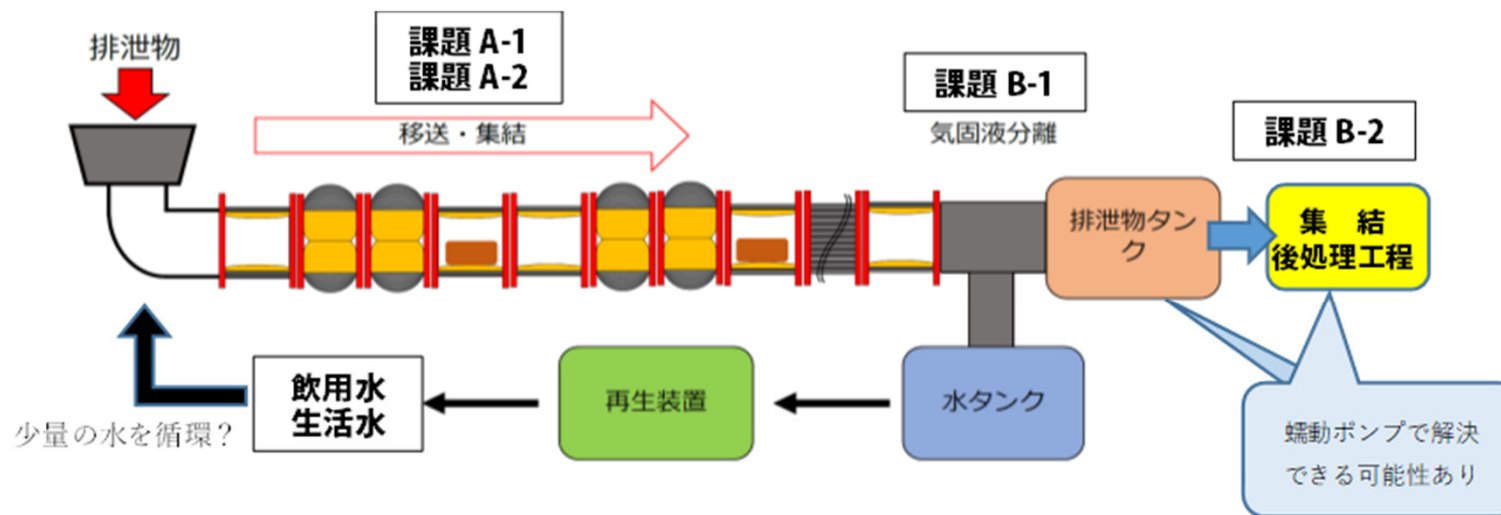
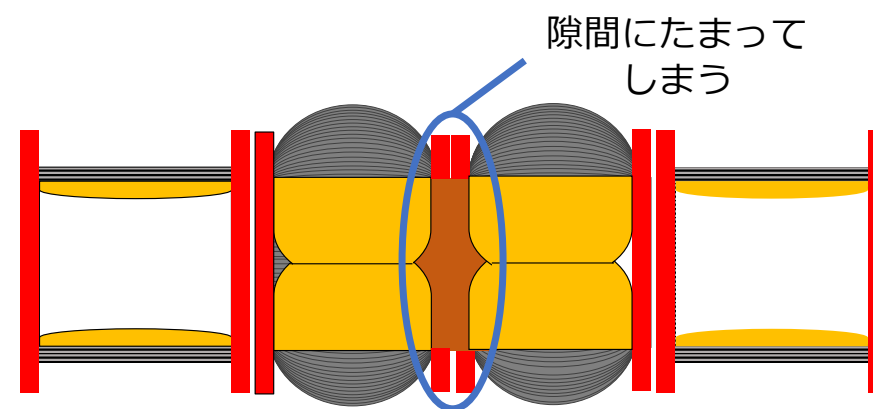
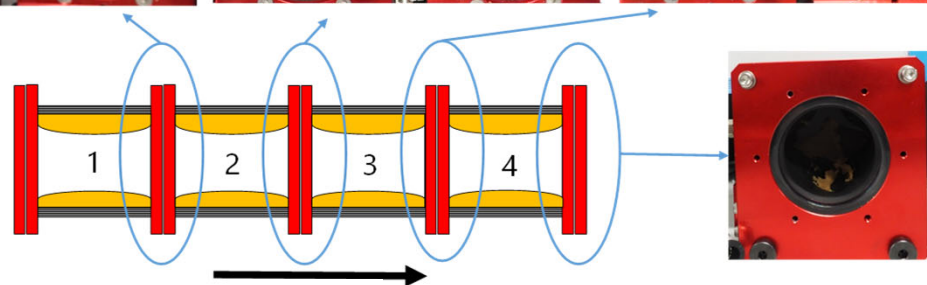
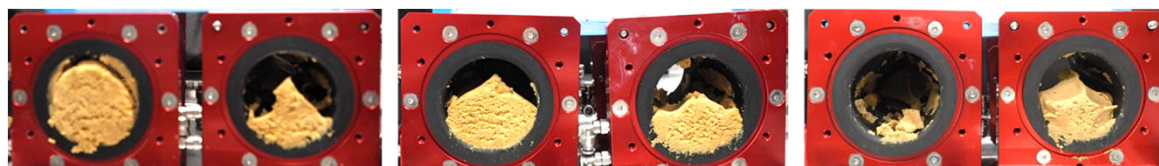


図0 蠕動ポンプによる排出物の搬送・終結・処理システム

試しに既存の装置でやってみた⇒沈没



模擬便は運べず
搬送率 0 %

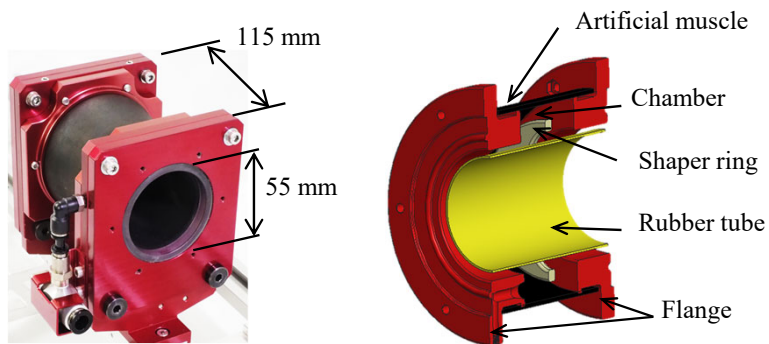


従来の蠕動運動型搬送装置での搬送の課題

- ・ ユニット間のデッドスペースでの模擬便の集結により詰まり
- ・ 連続的に供給されない内容物は搬送できない

開発したユニットの概要

既存の蠕動ポンプ



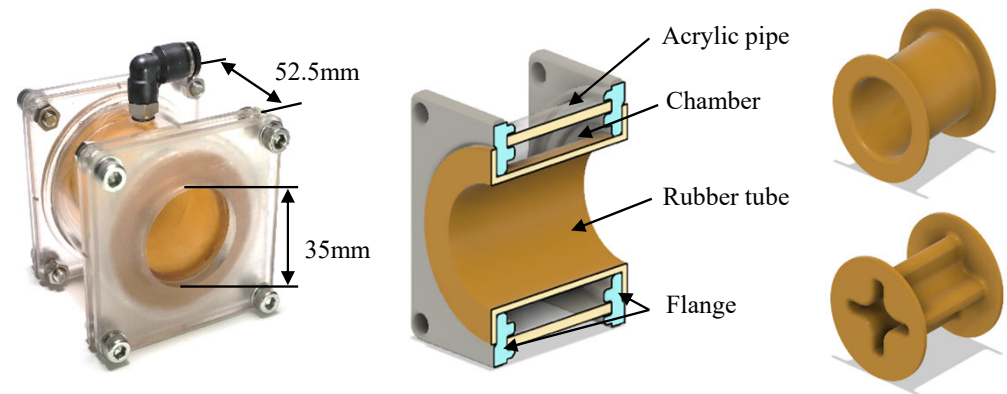
人工筋肉を有しており蠕動運動により搬送可能

○ 水、高粘性流体、固液混合流体、ロケット燃料、土砂など様々な流動体の連続搬送が可能

✕ 間欠的に存在する粘性流体の搬送は困難

➤ 予備実験で便を搬送したところ内部に便が残留し搬送率は0%であった。

今回開発した蠕動ポンプ



- ・ 便の大きさに合わせたサイズに変更
- ・ 内側ゴムチューブの形状を変更し移送率向上（後述）
- ・ 陰圧を活用することで移送率を向上（後述）
- ・ 管路内空気流入を併用し移送率を向上（後述）
- ・ 水の消費削減などにも貢献（後述）

挟れ型チューブの開発

宇宙トイレ用の蠕動ポンプを開発

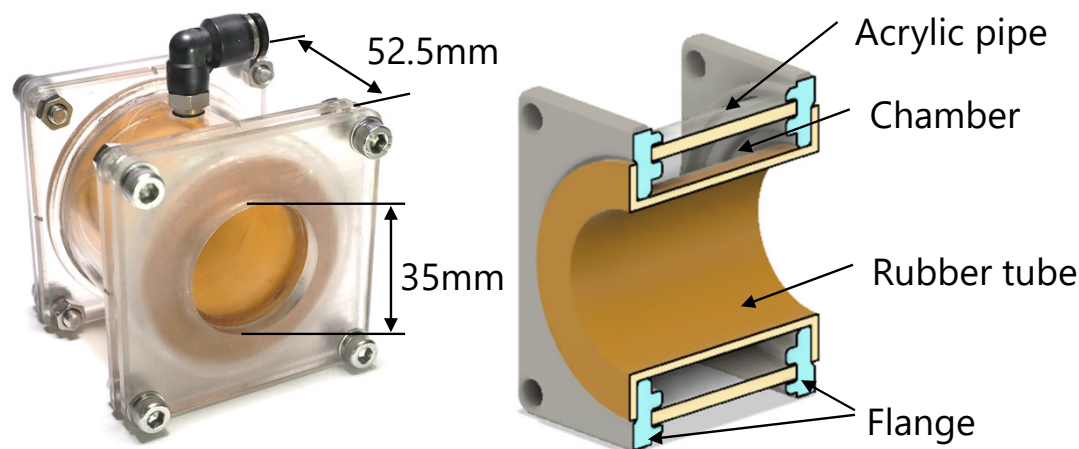


Fig. 15 Peristaltic Pump for Space Toilet[9]

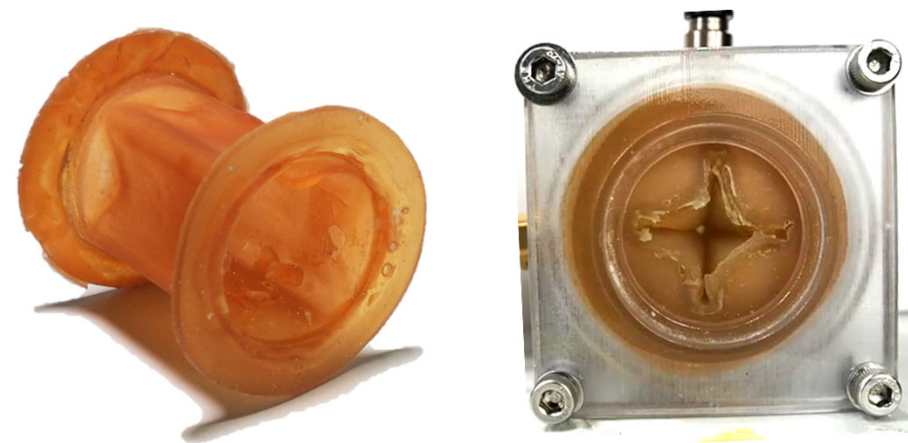
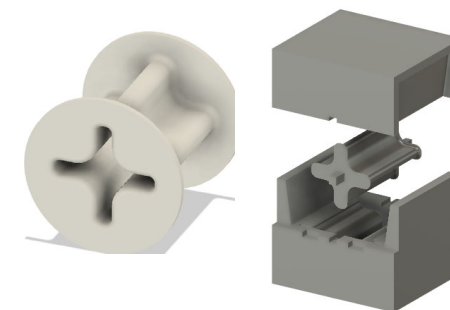


Fig. 16 Gouge-shaped rubber tube[9]

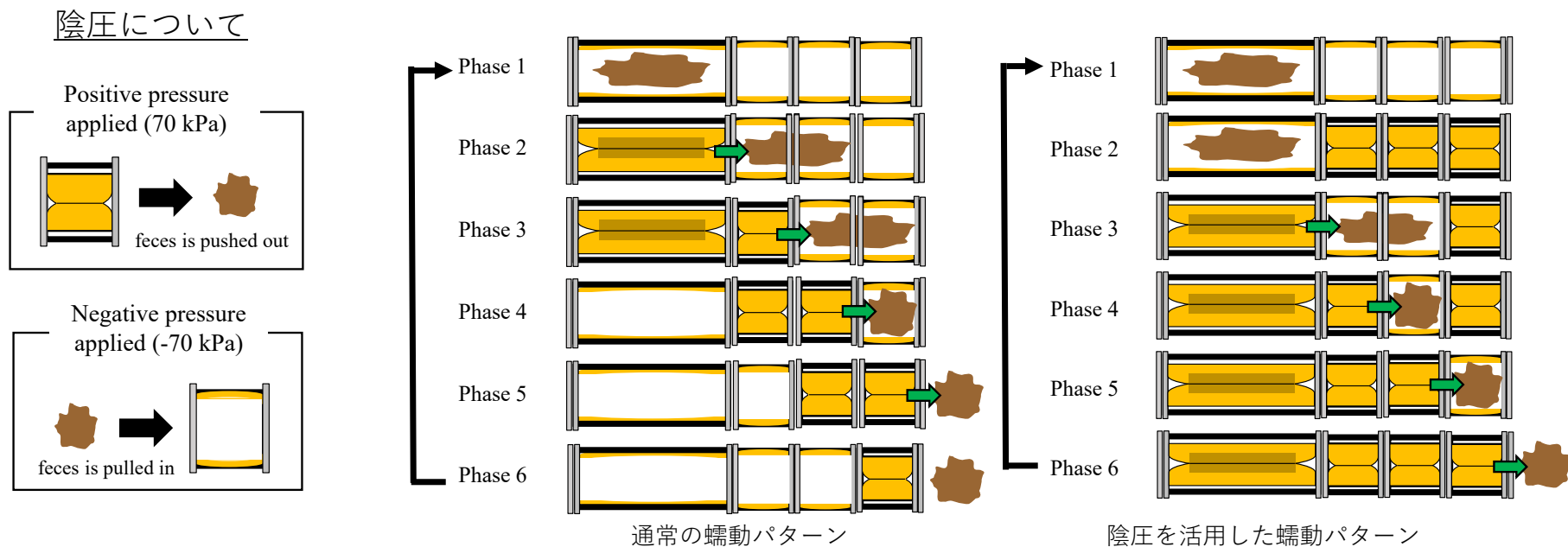
- 外側はアクリルパイプ, 内側はゴムチューブで構成
- チャンバ空間に陽圧を加えることで, 内側ゴムチューブが管内を閉じる
- チャンバ空間に陰圧を加えることで, 内側ゴムチューブが開く
- 挟れ型ゴムチューブは四隅が挟れた形状になっており, 排除率を向上させる



挟れ型ゴムチューブが従来の円筒型ゴムチューブより排除率を**約11.0 %**向上させることを確認

[9]熊本寛也, 鶴澤匠吾, 松井大育, 押野紗菜, 大島熙恭, 中村太郎, "宇宙トイレのための蠕動運動型搬送装置の内側ゴムチューブの開発". システムインテグレーション部門講演会2021(SI2021), 2E1-05, pp.1719-1722. (2021.12)

蠕動ポンプによる効率的な排泄物の搬送技術の構築



- チャンバ空間に陰圧を印加することで管路が拡大し、搬送物を移送方向に引き込む気流が発生

宇宙トイレ用蠕動ポンプの改良点と成果

搬送率が向上し必要な水量が低下

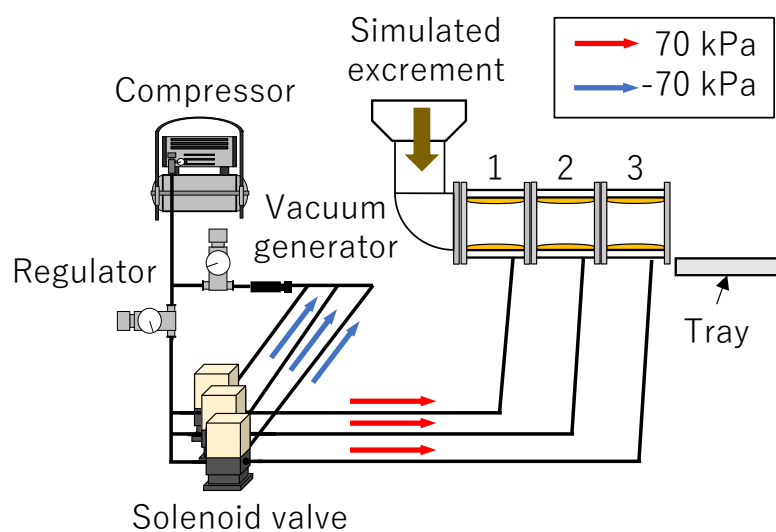
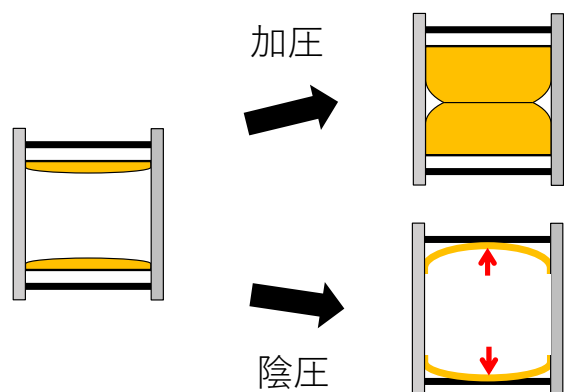
	平均搬送率	必要な水
① 内側チューブ 円筒型	17.6%	27.1g
② 内側チューブ 挟れ型	32.6%	27.1g
③ ② + 陰圧印加による効果	39.2%	27.1g
④ ③ + 空気流入 + 加水 + タンク	76.3%	27.1g
⑤ ④ + 無水の繰り返し搬送	86.9%	9 g

※必要な空気流量 2 L程度@0.7MPa(自転車空気入れで充填可)

※曲管搬送 & 揚重可能 (重力に依存しない搬送)

陰圧による搬送効果

蠕動ポンプに陰圧を印加し発生する吸い込みを活用する加圧パターンで搬送率の向上を確認



陰圧なし



陰圧あり



宇宙トイレ用蠕動ポンプの改良点と成果

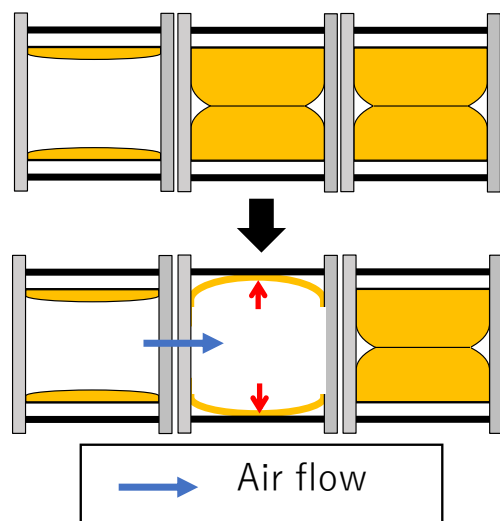
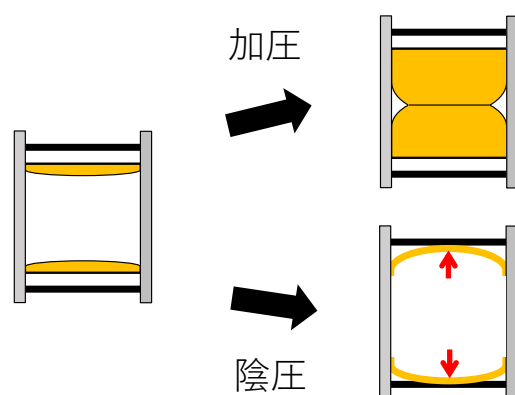
搬送率が向上し必要な水量が低下

	平均搬送率	必要な水
① 内側チューブ 円筒型	17.6%	27.1g
② 内側チューブ 挟れ型	32.6%	27.1g
③ ② + 陰圧印加による効果	39.2%	27.1g
④ ③ + 空気流入 + 加水 + タンク	76.3%	27.1g
⑤ ④ + 無水の繰り返し搬送	86.9%	9 g

※必要な空気流量 2 L程度@0.7MPa(自転車空気入れで充填可)

※曲管搬送 & 揚重可能 (重力に依存しない搬送)

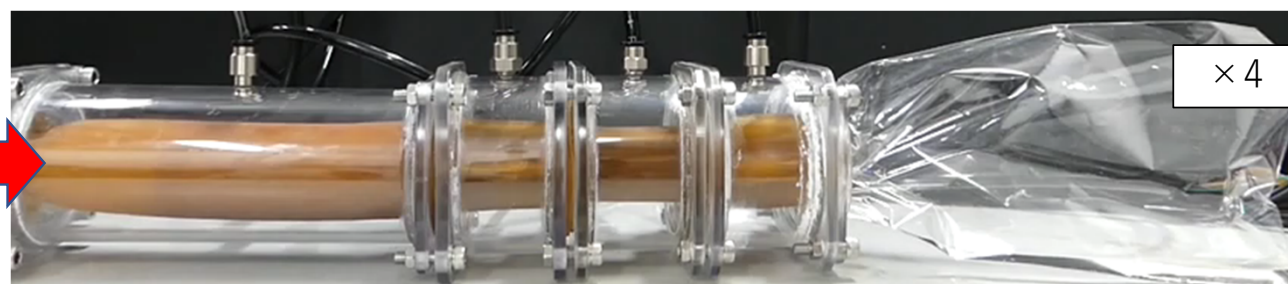
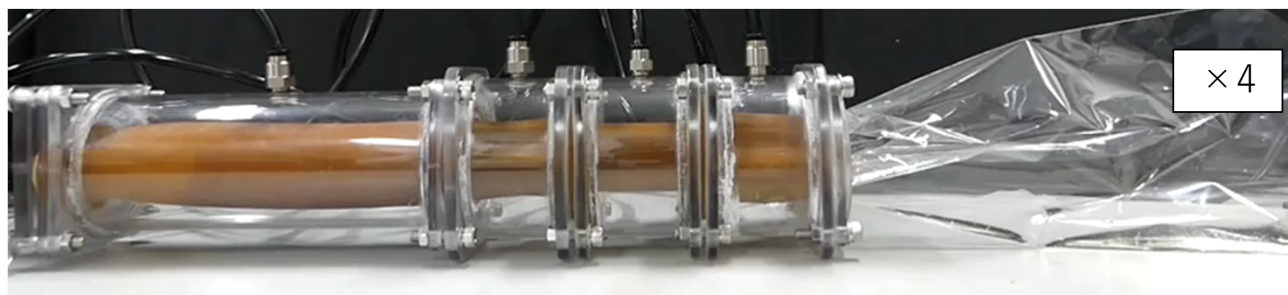
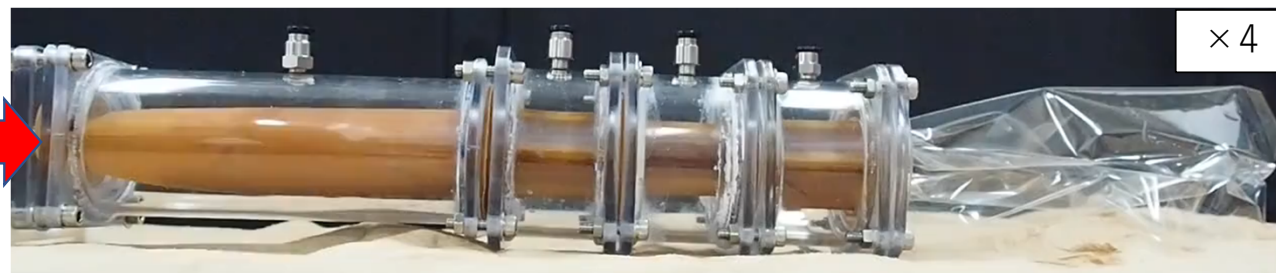
管路内空気流入方式の搬送実験



空気流入のみ
(ポンプ駆動無)

空気流入なし
(ポンプ駆動のみ)

空気流入あり
(全部載せ)



現在の開発状況と将来展望

開発状況

フレキシブルチューブによる
宇宙トイレ用の蠕動ポンプ

将来展望

アルテミス計画における人の宇宙長期滞在計画

→発酵による排泄物の再利用

蠕動運動による発酵促進効果に関する研究

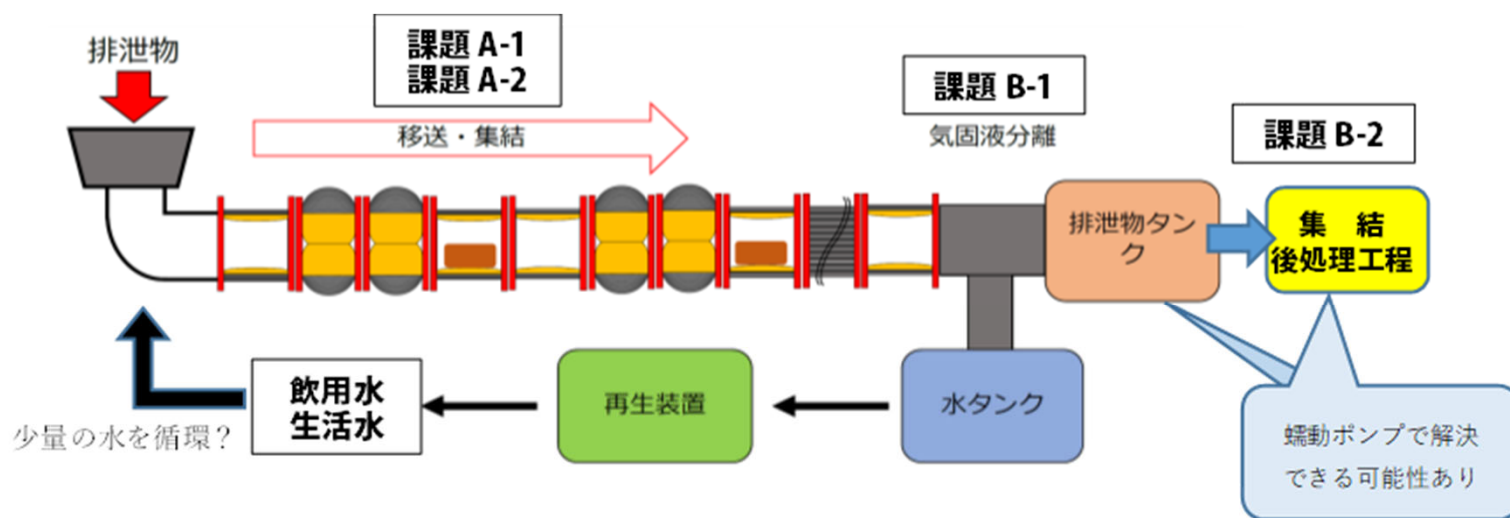


図0 蠕動ポンプによる排出物の搬送・終結・処理システム

謝辞

本研究は、JAXA宇宙探査イノベーションハブRFP6の支援と多大なる協力により研究を推進することができました。

JAXA山崎千秋様をはじめ、研究に協力していただいた皆様に感謝いたします。

また本研究がうまくいったのは、中村研究室 大学院生 熊本寛也さん, 鵜澤匠吾さんの献身的な研究の取り組みのおかげです。