

研究テーマ概要



研究テーマ名 | パワー密度が世界最高の小型アクチュエータの開発

機関名：新明和工業株式会社、大分大学、茨城大学、日本文理大学、静岡大学

プロジェクト概要

【目的】

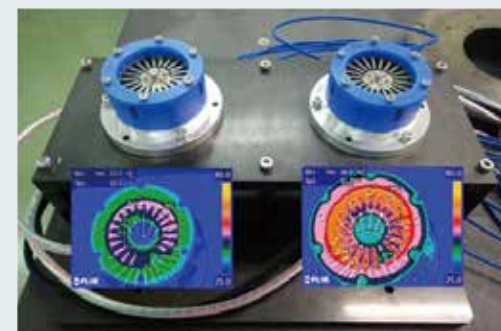
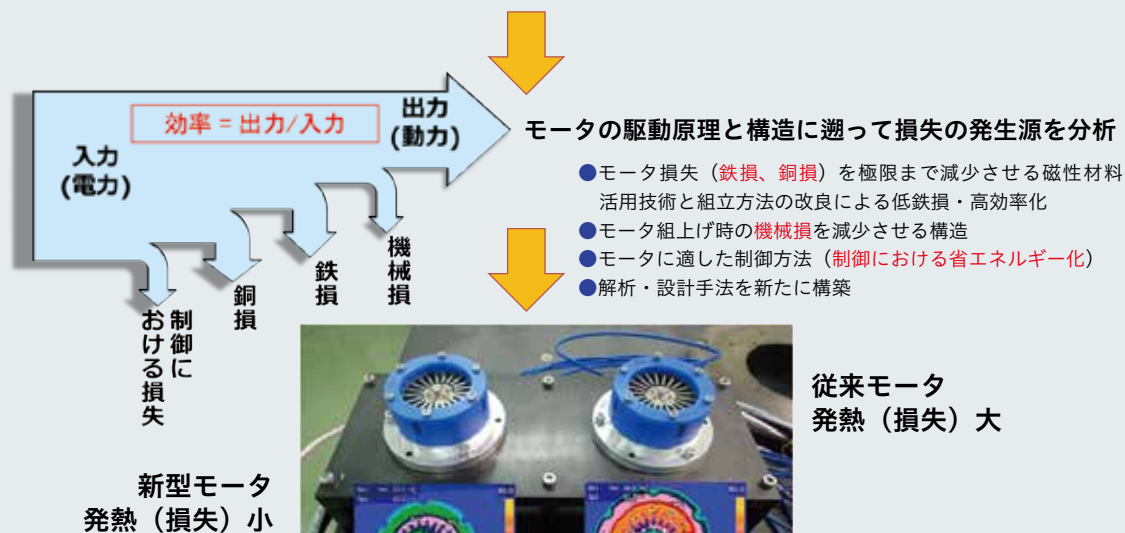
従来のモータ製作方法を踏襲し、大電力を送り込んでパワー密度を上げる方法には限界がある。そこで、モータの駆動原理と構造に遡って損失の発生源を分析し、モータ損失を極限まで減少させる磁性材料、組立方法、機械損を減少させる構造、モータに適した制御方法、ならびに解析・設計手法を新たに構築することでパワー密度が世界最高の性能を達成する。

本研究課題はモータ本体の高効率化に正面から取り組むことにより、アクチュエータの設計・製造方法に革命を起こし、ブレークスルーを引き起こす技術を生み出す。

【成果】

- ①ステータを構成する磁性材料の性能改善により10,000rpmの高周波領域においてモータ鉄損の40%削減を達成した。
- ②パワー密度向上に向けて、巻線密度を従来の1.3倍に高める巻線を開発している。
- ③軸受け構造を改善した、機械損が従来の1/2に減少する軸受けを開発している。
- ④高速回転モータに適した制御装置を開発中である。
- ⑤質量25gで連続出力50W、広範な領域で効率80%以上、高速回転域（15,000～25,000rpm）で効率85%以上の、極めて低発熱のモータを開発し、目標を達成した。

従来のモータは、大電力を送りこみ効率（発熱）を犠牲にして、高いパワー密度を達成している
→決して**効率の良いモータではない**。



1次試作



2次試作

開発した小型モータ
(測定装置取り付け用の治具付き)

研究テーマ名 | 次世代アクチュエータ用超小型高精度絶対角度センサ変調波レゾルバの開発

機関名：エクストコム株式会社

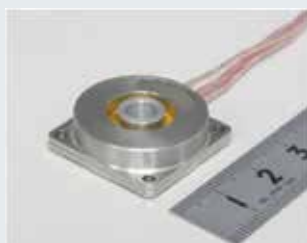
プロジェクト概要

【目的】

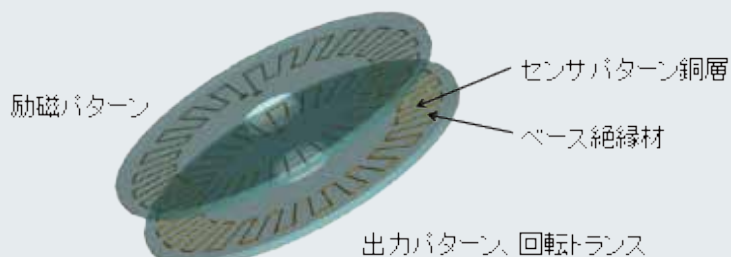
アクチュエータに使用される角度センサにも小型、高精度の絶対角度センサが求められている。これらの課題及びニーズに対応するため、独創的な構造の変調波レゾルバで超小型、高精度、高分解能を実現する絶対角度センサを開発・実用化する。すでに変調波レゾルバで従来技術以上に構造がシンプルで堅牢、振動、衝撃に強く悪環境での使用可能にもかかわらず、小型軽量、高精度、高分解能を同時に実現する絶対角度センサを開発しているが、本研究では従来技術より高精度なフォトリソ技術を活用し、外径φ20mm、分解能50万以上のレゾルバを開発する。

【成果】

- ①レゾルバコイルパターン製作方法の最適化開発
フォトリソ技術を活用して直径20mm、分解能50万以上のレゾルバを開発し、当初目標を達成した。
- ②入出力リード線の薄型化開発
入出力リード線のフレキ化により厚さ2.5mmのリード線を開発した。
- ③レゾルバセンサ部の超小型化可能性の追求
直径4mm以下のレゾルバ開発の可能性を検討中である。
- ④ドライバ回路の小型化開発
□50mm、厚さ20mm以下、応答速度100kHz以上のドライバ回路を開発中である。
- ⑤小型化検討
モータドライバとレゾルバドライバコア処理部の共用一体化を検討している。



製品外形 □25mm
分解能 8192



- ①レゾルバコイルパターン製作方法の最適化開発
- ②入出力リード線の薄型化開発
- ③レゾルバセンサ部の超小型化の見極め
- ④ドライバ回路の小型化開発
- ⑤モータドライバとレゾルバドライバコア処理部の共用一体化と小型化

目標
φ20mm
分解能524288



レゾルバは電磁誘導現象を利用し、回転角度や位置を検出するセンサで、回転または直進の変位を検出する磁気式のアップリケートセンサ。レゾルバは構造が比較的簡単で丈夫、耐環境性に優れてる等の利点がある。

第1回RFP 広域未踏峰探査技術／課題解決型

2016年3月～2018年3月

研究
テーマ名

医療福祉機器向け小型高トルクアクチュエータの開発

機関名：株式会社安川電機

プロジェクト概要

【目的】

提案者はいままでに足首アシスト装置などのアプリケーションに関節駆動ユニットを開発している。しかしながら、作業支援や麻痺脚歩行アシストなどの比較的大トルクを要求されるアクチュエータについては未開発である。そこで、本研究では、医療福祉機器向けの小型高トルクアクチュエータを開発する。小型高トルクアクチュエータと小型軽量の減速機を組み合わせ、減速機込みで質量1kg、最大トルク110Nmの扁平高トルクアクチュエータを実現する。併せて、本アクチュエータの駆動性能を向上する制御方式を開発する。

【成果】

- ①小型高トルクアクチュエータの開発
扁平さを確保しつつトルク密度を向上させるため、以下の項目を開発した。
- A) 瞬発的な大トルクを発生可能な小型モータを実現した。
 - B) 厚さ40mmの扁平な減速機を開発した。
 - C) 目標達成に向けて、厚さ40mmでトルク密度110Nm/1kgの小型高トルクアクチュエータを試作した。
- ②制御技術の開発
モータと減速機の組み合わせに最適な制御技術を確立した。

医療福祉機器(アシスト装置)に求められる
トルクとアクチュエータ

アクチュエータの最大トルク

リハビリ 筋力補助

関節駆動ユニット

最大トルク 9N・m
質量 0.38kg※ 第42回 国際福祉機器展
H.C.R.2015 出展

作業支援 麻痺脚歩行アシスト

小型高トルク
アクチュエータ最大トルク 100N・m ~
質量 1kg ~

アシスト装置

開発項目と目標

1. 小型高トルク
アクチュエータの開発
2. 制御技術の開発

目標

扁平さを確保しつつトルク密度を向上

- ・ 扁平さ：40mm
⇒ 従来技術の2/3
- ・ トルク密度：110N・m/kg
⇒ 従来技術の2倍

研究
テーマ名 | 超高出力密度を実現する流体系スマートアクチュエータシステムの開発と実用化検討

機関名：株式会社明治ゴム化成、中央大学

プロジェクト概要

【目的】

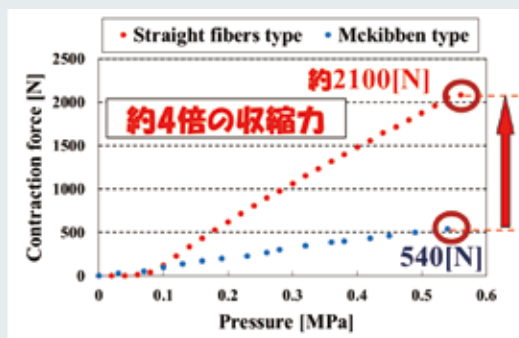
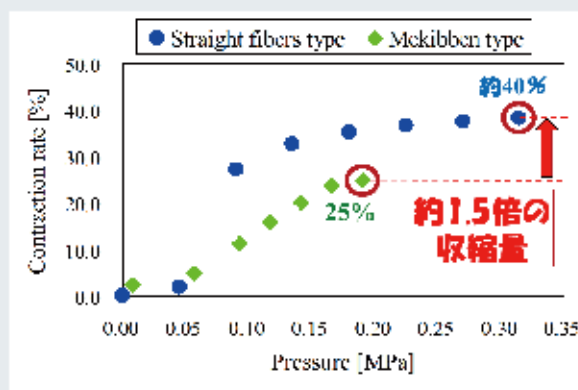
提案者が開発した軸方向繊維強化型人工筋肉は、ゴムチューブに内包されたマイクロカーボン繊維層が軸方向のみに配向された構造となっている。内部に流体圧を印可すると、軸方向には伸長せず半径方向のみに膨張するため、軸方向へ大きな収縮力が得られる。さらに瞬発力・振動制御・可変粘弾性等の従来のモータでは実現しがたい可変構造系の多様なモーションを、フィードフォワード制御のみで実現できると考えられる。本研究では、超高出力密度をもつ流体系アクチュエータである軸方向繊維強化型人工筋肉の品質仕様の確立を目的として、システム全体の小型軽量化と応用分野の実用化に必要な技術課題について検討を行う。

【成果】

軸方向繊維強化型人工筋肉は、安定した品質で製作することがMcKibben人工筋肉と比較して難しい。そこで、本研究では配合ゴム混練りおよび成型の現有設備を使用して、材料物性の優れる固体の配合ゴムを用いて人工筋肉を製造し、高出力密度化と品質安定を両立させる。高出力密度化と品質の安定を両立する人工筋肉の形状最適化のため、有限要素法によるシミュレーションを援用し人工筋肉の形状最適化を図った。人工筋肉の長さ対直径比を最適化すれば低圧駆動が可能となる。シミュレーションと試作アクチュエータの試験により出力を最大化し実用に耐える人工筋肉の長さ対直径比を検討し、以下の結果が得られた。

- ①McKibben型人工筋肉の3倍以上の発生力密度を有する人工筋肉を開発し、当初の目標を達成した。
- ②地上での応用を想定して新しい構造の人工筋肉を試作し、さらに発生力が向上することを確認した。

軸方向繊維強化型空気圧ゴム人工筋肉：世界最高レベル収縮力・収縮率



同形状の従来（McKibben型）のゴム人工筋との比較

課目標

実用化可能な人工筋肉の品質確立
発生力：McKibben型人工筋肉の3倍以上

研究テーマ名 | マルチステータ型耐環境高効率電磁モータの研究

機関名：アダマンド並木精密宝石株式会社

プロジェクト概要

【目的】

本研究では、耐環境性（防水・防塵構造）をクリアできる小型高出力モータを実現する。提案者が開発したセンサレスブラシレス／複数（マルチ）ステータ構造モータの、小型で高出力化が可能な特長を活かし、質量400g以下で最大出力1kw以上かつ防水・防塵構造（IP56クリア）のマルチステータ型耐環境高効率電磁モータを開発する。また、モータの消費電力を最適化し、モータの効率的な運用を可能にする小型の制御回路を開発する。

【成果】

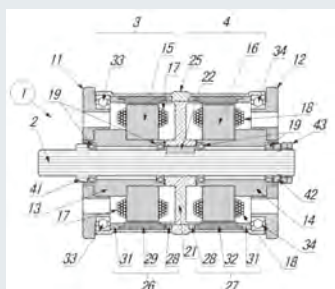
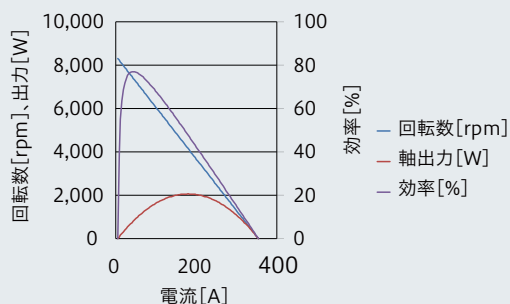
- ①マルチステータ型電磁アクチュエータの耐環境研究
防塵・防水性能IP56をクリアするマルチステータ型電磁アクチュエータを実現した。
- ②マルチステータ型電磁アクチュエータの放熱研究
防塵・防水性能を維持しつつアクチュエータ内部に熱がこもらない放熱性能を有するアクチュエータを開発した。
- ③個別制御回路の研究
モータの消費電力を最適化し、モータの効率的な運用を可能にする小型制御回路を開発中である。
- ④マルチステータ型電磁アクチュエータの開発
目標達成に向けて、最大出力1000W、質量435gのマルチステータ型電磁アクチュエータを開発した。

防水・防塵構造を施し、電源電圧24Vで出力1000W以上を達成しているモータは現時点ではない。

【1次試作品】



電圧	24V
最大電流	10A
質量	460g
最大入力	240W
最大出力	185W



特許第5292530号

目標
ダブルステータ式アウトロータの
防水・防塵モータを開発した
防水、防塵（IP56クリア）
最大出力 1000W
質量 435g

研究
テーマ名 | 地中・地表面探査を目的とした昆虫タイプ小型移動ロボット

機関名：中央大学、プログレス・テクノロジーズ株式会社

プロジェクト概要

【目的】

複数の小型探査機（ロボット）を協調させることで、未踏峰地点の広範囲で密度の濃い探査を行うことを目指す。そこで、地中、表面などを移動しながら情報収集する探査システムを実現するために、以下の2点の技術を用いて、地上および地下に小型のロボットが分散されることによって3次元的な環境計測を行うシステムの一部を構築することを目標とする。

- ①蠕動運動による小型埋没型地中内掘削ロボット
- ②ジャイロ効果を用いたはね付クローラの不整地走行安定化

小粒でも情報収集能力の高い探査ロボットを構築することにより、宇宙探査だけでなく、地上の配管検査、地盤調査、海底や災害地などの場所での情報収集を可能とする。

【成果】

- 蠕動運動による小型埋没型地中内掘削ロボット
(以下：ミミズ型掘削ロボット)

ミミズの蠕動運動を規範とした掘削ロボットを開発することで、従来の埋没型掘削ロボットよりも大幅に深い深度の掘削を目指している。特に本提案における新しい取り組みとして、掘削方向の制御が可能な機構の搭載を検討し、開発した。先端部に能動的な屈曲部を有しており、地中での3次元的な掘削移動が期待できる。本ロボットは、先端部の能動屈曲部の制御により目標の屈曲掘削を実現することができた。

- ジャイロ効果を用いたはね付クローラの不整地走行安定化（フナ虫ロボット）

情不整地走破性と移動速度を両立するシンプルな移動機構として、フナ虫やムカデ等の多足歩行を行う生物の歩行を規範とした小型移動型はね付きクローラを開発した。はね付クローラ機構はステップ的に変化する地面傾斜への対応が困難であることから、それらの路面への走行切替を実現する安定化装置としてジャイロホイールを用いた安定化装置を開発し、従来のはね付クローラに比べて走行が安定することを確認した。



研究テーマ名 不整地を歩行・跳躍探査する昆虫型ロボットのプロトタイプ開発

機関名：株式会社ispace、東北大学

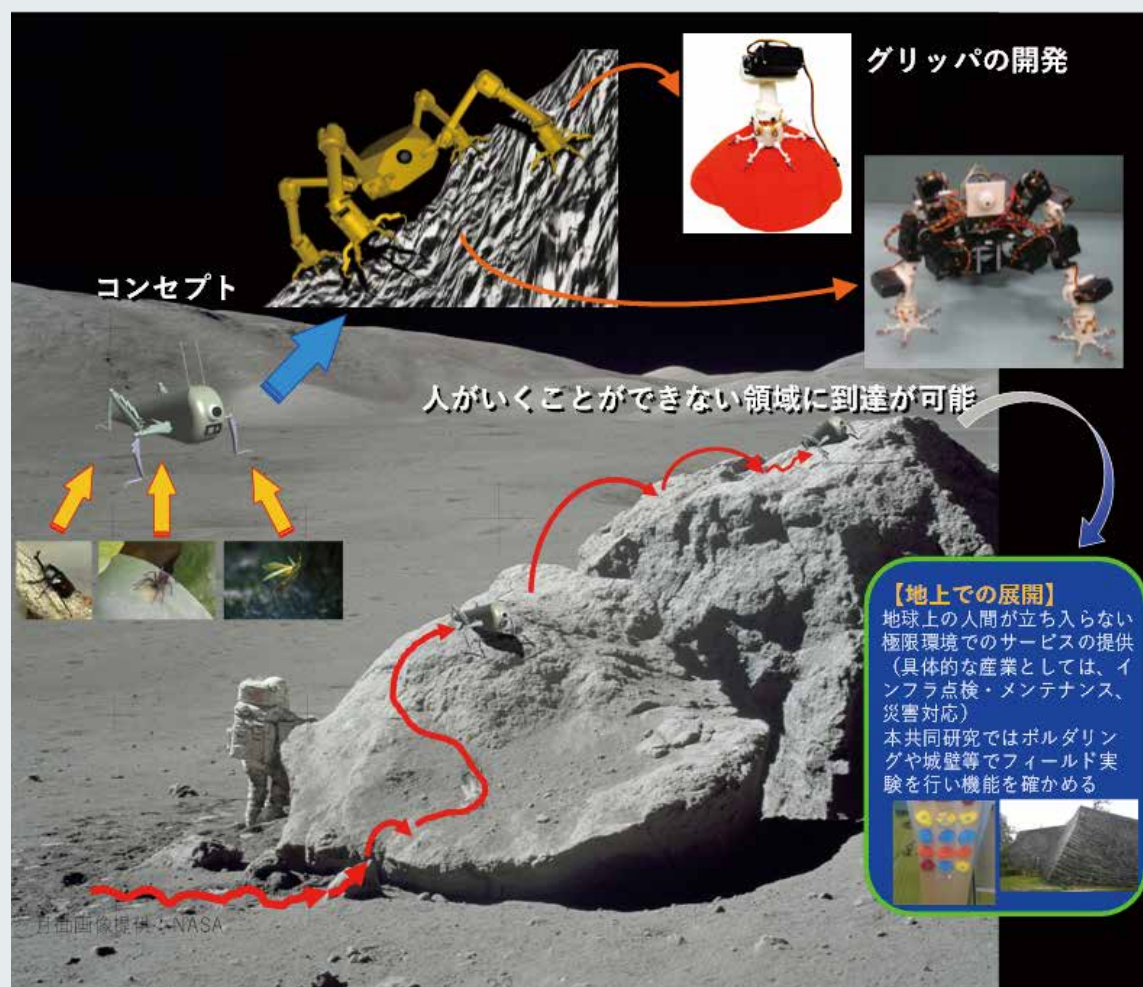
プロジェクト概要

【目的】

本研究では、未知の不整地を探索可能とする昆虫型多脚ロボットのプロトタイプ開発を行う。従来の車輪型では踏破が困難な地形では、脚型のメリットが大きく、障害物を難なく乗り越える移動ロボットの開発を目指してプロトタイプモデルを製作することにより、アイデアの実現性を検証する。

【成果】

昆虫型ロボットのコンセプトをハードウェアとして実現し、プロトタイプを開発した。特筆すべき成果として、自然地形表面を構成する岩石などの不定形な凹凸を把持するための革新的なロボットハンド機構を、昆虫の肢先構造に着想を得た鉤爪型グリップという形で実現した。また、開発したグリップを用いた把持実験により、性能を定量的に評価するとともに、凹凸地形に対する優れた「しがみつき」動作を実現可能であることを実証した。本グリップ機構は特許申請中の新技術である。プロトタイプの動作試験では凹凸急傾斜での踏破が可能であることを実証することで、実現性と新規性を示すことができた。



研究
テーマ名 | 小型ロボット技術 制御技術

機関名：株式会社タカトミー

プロジェクト概要

【目的】

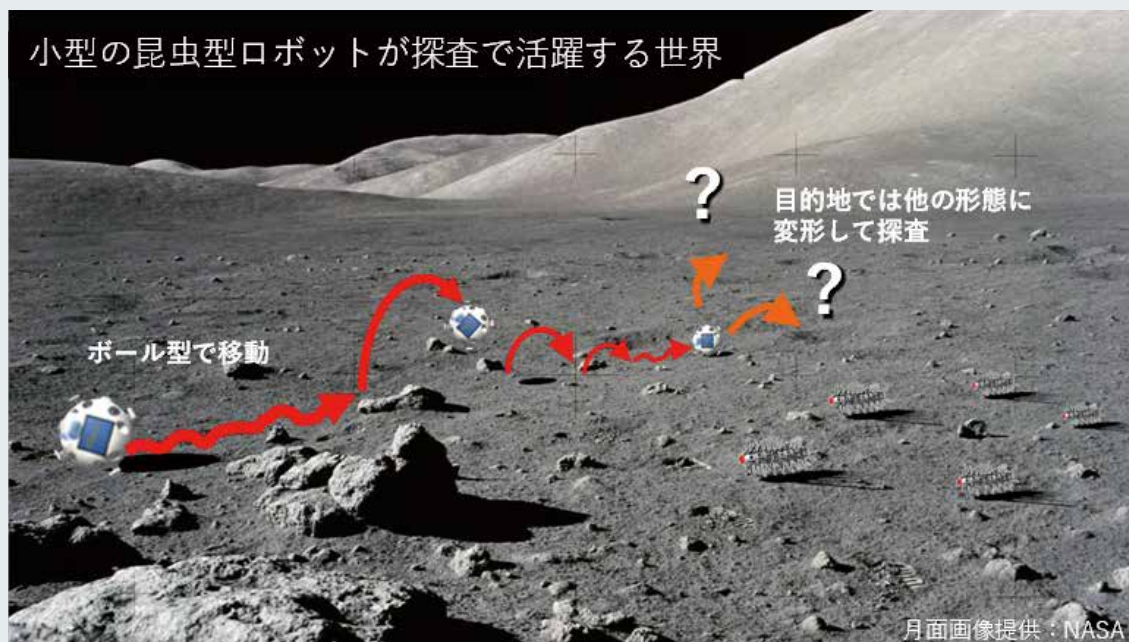
宇宙空間および地球上で活動できる安価な昆虫型ロボットを民生玩具の技術を使って開発することを目的とする。いままで研究開発した簡易通信、省電力化、長寿命化、小型化などの技術開発をベースに各技術の市場展開と昆虫型ロボットの市場展開をねらっている。

【成果】

玩具で用いられている機構、ノウハウをうまく適用し、直径100[mm]、重量300[g]の移動型ロボットを開発した。サイズはソフトボールと同程度の小型サイズになっている。初期形状は完全な球形であり、WiFiによって外部コントローラから指令を送り、球形から拡張走行モードに変形して前進、右ターンの走行が可能。球体なので下傾斜では転がることにより移動が速く、省電力で移動できる。

また、走行動作は球形から両サイドに車輪、後部に補助輪を出すことによって安定走行を実現。現状では月面を模した実験フィールドで傾斜10度の登坂に成功している。

小型の昆虫型ロボットが探査で活躍する世界



研究テーマ名 複数の非駆動型探査機のフォーメーション制御による高効率・低コスト広域探査技術

機関名：東北大学

プロジェクト概要

【目的】

本研究では能動的な駆動力を持たない非駆動型の小型探査機を協調運用することで効率的な広域探査を実現する新しいリーダ・フォロワ型探査技術の開発を目的とする。これは、駆動力を有するリーダ探査機がテザーによって連結された複数の非駆動型小型フォロワ探査機をけん引し、小型フォロワ探査機は方向舵の制御のみでリーダ探査機との位置関係を制御するというものである。これにより、環境に応じて適切にフォロワ探査機のフォーメーションを制御し、同時刻に広域の情報を効率的に取得する。

【成果】

以下の項目を実施した。

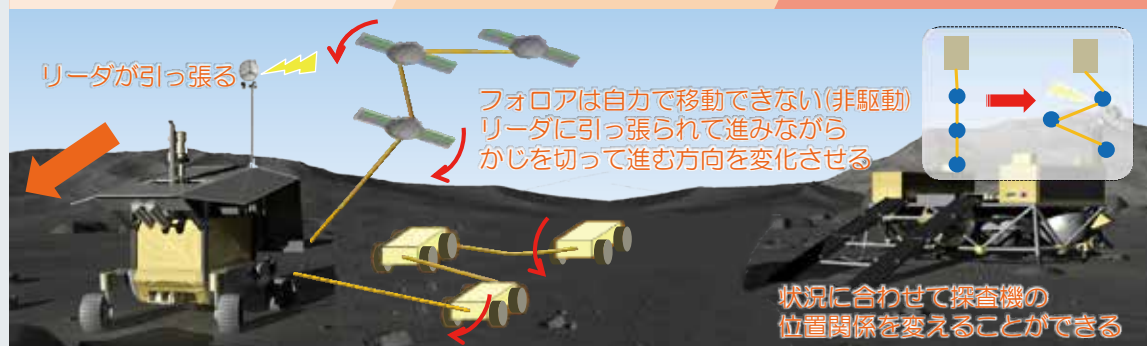
- ①フォーメーション制御検証用シミュレータの開発
- ②フォロワ型探査車両の原理検証モデルの開発
- ③フォーメーション制御のための基本制御系設計
- ④実時間可変フォーメーション制御技術の構築
本研究成果をさまざまな分野で応用することを検討している。

複数の探査機のフォーメーションを制御し同時刻に広域の情報を効率的に取得

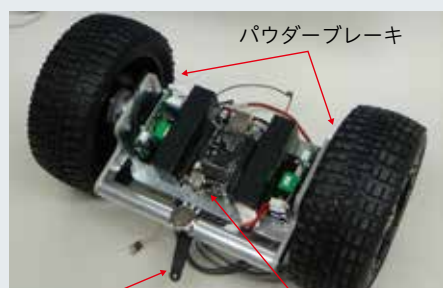
リーダ探査機が複数の小型フォロワ探査機をけん引

フォロワ探査機は操舵（かじ取り）のみを行う

低コスト低消費電力デブリ化防止



ブレーキ制御型フォロワ探査機



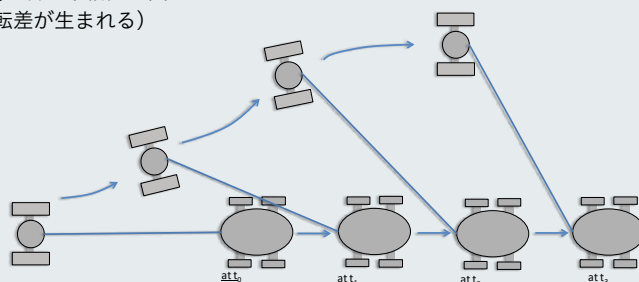
コントローラ
サイズ:355x180x180(mm) 重さ:5.6 (kg)

制御例

左側の車輪にブレーキ力を加える（左右の車輪間に回転差が生れる）

左旋回

左右車輪のブレーキトルクを制御することで牽引方向に関係無く、任意の方向にフォロワロボットを操ることが可能



陸上・空中・水中への応用が可能なさまざまな調査・探査に
火山や震災被害・土砂災害等の調査、月・惑星や宇宙空間の探査、海洋探査

研究
テーマ名 超分散ロボット群による三角測量に基づく自己位置推定と地図生成

機関名：会津大学

プロジェクト概要

【目的】

これまでの多くの屋外作業ロボットは、GNSS（衛星測位システム）を用いて測位を行っていた。しかしロボットの活動範囲が広がり、屋内、山林のような見通しの悪い屋外、水中、地球外のような非GNSS環境におけるロボット測位システムが必要である。本研究では（A）三角測量の原理に基づき他のロボットへの方向を観測量とし、ネットワーク通信により他のロボットと推定量を共有できる分散型カルマンフィルタを開発する。さらに（B）全方位カメラを搭載した無線通信機能を持つ小型のセンサノードを開発し、自己位置推定と地図生成を実現する。このセンサノードを現在手持ちにロボットに搭載し、実環境での適応可能性を調査する。

【成果】

- ①分散型カルマンフィルタアルゴリズムを開発し、理論面からの収束性の評価と数値実験による有効性の検証を行った。開発されたアルゴリズムはサーバー上に実装し、自己位置推定と地図生成機能も実現した。
- ②上述の分散カルマンフィルタを実際にロボットのカメラ画像に適用し、自己位置推定と地図生成を実現するために、各ロボットにおける画像処理アルゴリズムとシステムインターフェースを開発した。
- ③上の両者を統合し、超分散ロボット群による三角測量に基づく自己位置推定と地図生成を実現する。



研究
テーマ名

環境適応型不整地自律走行プラットフォームの研究

機関名：株式会社竹中工務店、株式会社竹中土木

プロジェクト概要

【目的】

段差等がある建設途中の建物や究極には地球以外の重力惑星における急斜面や洞穴などの不整地環境下でも走行可能な移動ロボットと環境認識技術を取り込んだ制御系からなる自律走行プラットフォームを開発する。2つの具体的な適用を考えており、高速道路の床版補強のための形状計測を自動で実施して総延長320kmに及ぶ都心の高速道路では検査のみで19,200人日の労働力の削減することと、年間発注量推定2,500万 m^2 に及ぶ高速道路の盛土の品質管理（締固め度計測、水分量計）が必要であるところをロボットで実施する。

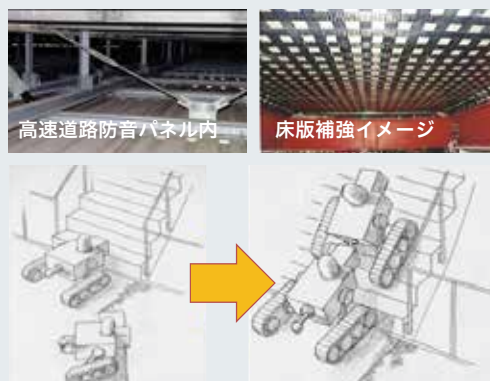
【成果】

高速道路の床版補強のための形状計測については、高速道路防音パネル内はH鋼などが密に配置されており移動が困難であるところ合体モジュラー型とすることで、単体では小回りがきき合体により踏破性を向上させることができた。また、工事現場の盛土の品質管理に関しては、工事現場の環境認識、自己位置推定しつつ複数の測定点を経由する自律移動制御が必要なのでGPSやIMU、LiDARのセンサ情報を統合し、環境認識、自己位置推定する手法を構築し、実験により検証した。

①合体型環境適応ロボット研究

様々な機構・機能を有するモジュール（モジュールはそれ単体でも機能する）を自在に合体させて柔軟に環境に応じた機能が得られるようにする技術の基礎研究

目 標：高速道路の床版補強のための形状計測を自動で行う
課 題：高速道路防音パネル内はH鋼などが密に配置されており移動が困難
解決手法：合体型とすることで、単体では小回りがきき合体により踏破性を向上させる
市場規模：総延長320kmに及ぶ都心の高速道路では検査のみで19,200人日の労働力が必要



合体型環境適応型知能ロボットイメージ

②自律走行のための認識・制御システム研究

既存走行プラットフォーム「健気」へSLAMを実装し、自律走行を可能とする研究

目 標：盛土の品質管理（締固め度、水分量）を自動で行う
課 題：環境認識、自己位置推定しつつ複数の測定点を経由する自律移動制御
解決手法：GPSやIMU、LiDARのセンサ情報を統合し、環境認識、自己位置推定する
市場規模：高速道路における盛土の面積は2,500 m^2 に及び、25,000箇所の点検が必要



マルチクローラ探査ロボット「健気」



盛土



盛土の品質管理を行う計器



計器を搭載した台車を連結した「健気」

<http://www.netis.mlit.go.jp/yori>

R1密度水分計「ANDES」
本体 10.5kg + 線源棒 2kg



研究テーマ名 | RTソリューション技術に基づく合体変形型移動ロボットの環境認識移動知能化技術の研究開発

機関名：東京大学、THK株式会社

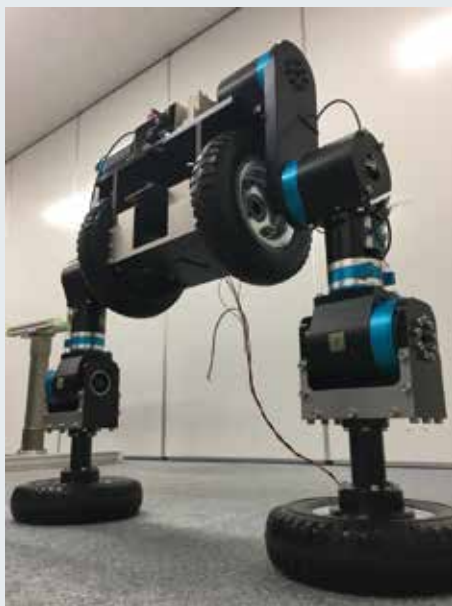
プロジェクト概要

【目的】

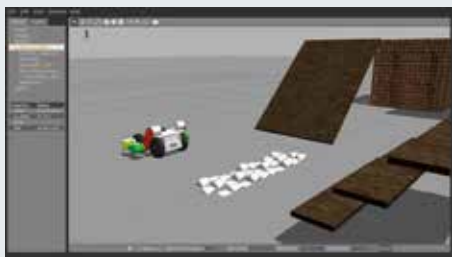
省電力と運用性を特徴とするRTソリューション技術を用いて形態の切り替えが可能（走る、作業する、階段を登る、etc.）で、身体の状態が不安定になるような歩容を行うことなく移動できる環境適応型ロボットを対象として、三次元の環境地図の生成と理解に基づく移動制御技術を融合し、環境に応じて適切な移動形態と移動戦略を有するロボット知能の実現を目的とする。事業化としてはサービスロボットで求められる環境適応型ロボット、および、そのコンポーネント販売を目指し、宇宙利用としては将来の宇宙探査で必要となる極域環境や縦孔などで求められる環境適応型ロボットを目指す。

【成果】

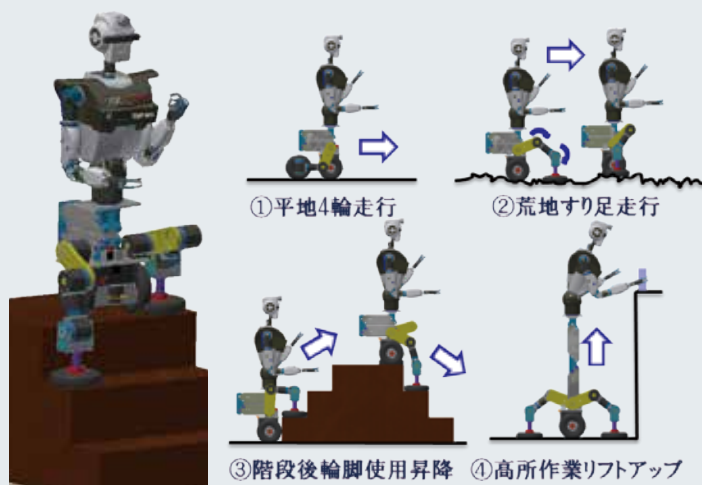
具体的な目標を日本家屋（階段が急）、およびオフィスのサービスロボットの開発と設定し、以下を実施した：1）省電力化システムにおける三次元の環境認識と行動生成システムの統合、2）環境認識に応じた移動行動戦略制御法の構築。合体変形型移動ロボットのシミュレーション環境を構築し、省電力型ロボット計算機システムの検討を実施しつつ、実機を開発した。



省電力型ロボット計算機システムの検討



合体変形型移動ロボットのシミュレーション環境の構築



研究テーマ名 大型マルチロータ機のコンパクト化の研究開発について

機関名：ヤンマー株式会社中央研究所、名古屋大学、大阪府立大学

プロジェクト概要

【目的】

研究の背景

マルチロータ型のUAV (Unmanned Aerial Vehicle) が様々なビジネスへ展開されつつある。

しかし運搬を目的とする大ペイロードを必要とする機体の開発は遅れている、その原因の一つとして、推力を向上させるために多くのロータを用いることから、地上への投影面積が大きくなり、UAV機体を運搬する場合や、狭隘部での飛行が困難となることが挙げられる。

研究の狙い

そこで、ロータを多段に重ねることによって、地上への投影面積を小さくしつつ、効率を落とさないような最適なロータ配置の設計指針を得ることを狙いとする。

【成果】

実験と結果

効率の定義を入力トルクに対する推力をロータの掃引面積でノーマライズした尺度 (FoM: Figure of Merit) とし、以下の実験を行った。

- ①比較のために同一平面に複数のロータを並べ、ロータの軸間距離とロータのピッチ角をパラメータにとったときのFoMを計測した。その結果、ロータ間の干渉による効果は見られず、単独ロータの結果を大きな違いは見られなかった。
- ②次にFig.1に示すようにロータ配置を上下2段とし、 v :ロータ面間距離、 h :ロータ軸間距離をパラメータにし、FoMを計測した。その結果をFig.2に示す。 $v/r=0.5$ 、 $h/R=1.35$ 付近において、ロータを平面に並べたときの結果と同程度の効率を示した。
- ③上記の結果を用いて、Fig.3に示す、より実用に近い8ロータ構成 (上段、下段それぞれ4ロータ) での実験を行った。地上投影面積は従来 (ロータを平面に並べたとき) に比べ30%減少している。その結果、 $v/R=0.75$ 付近、かつヨーイングトルク差の調整のために上下ロータのピッチ角差3度にした場合、効率が従来と同等となった。またこのときの回転方向は上下段のロータが上方から見て重なっている領域において、上段、下段のロータの回転ベクトル v_u , v_l の内積が正になることが条件である。

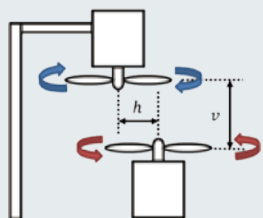


Fig.1: ロータ配置を上下2段にした実験装置

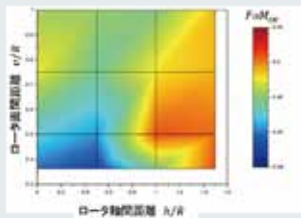
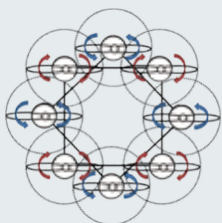
Fig.2: ロータ配置を上下2段にした場合の実験結果。それぞれロータ面間距離とロータ軸間距離は、 R (ロータ半径) でノーマライズしている。

Fig.3: ロータ配置を上下それぞれ4ロータにした実験装置。



設計指針

効率を落とすことなく地上投影面積を小さくするためには、以下の条件でロータ配置を2段構成にする $h/R=1.35$ 、 $v/R=0.5$ (2ロータの場合)、 0.75 (4ロータの場合)、上下ピッチ角差が2～3度、上下段ロータの重複領域で $v_u \cdot v_l > 0$

モックアップ製作

今回の実験で得られた設計指針によって、以下のマルチロータのUAVのモックアップを製作した。



主要諸元

機体直径	470mm	
ロータ半径(R)	100mm	
ロータ軸間距離(h)	160mm	$h/R=1.6$
ロータ面間距離(v)	52mm	$v/R=0.52$
機体重量	950g	コントローラ、バッテリー除く

研究
テーマ名 | 小型・軽量化のためのMHz帯駆動DC-DCコンバータの先進要素開発

機関名：株式会社イチカワ、信州大学、大阪大学

プロジェクト概要

【目的】

高効率・超小型軽量を両立するMHz帯スイッチングDC-DCコンバータの実現を目的としている。

磁性粉の材質・形状・大きさなどを検討して、周波数2 MHz、最大磁束密度10 mTの励磁条件で、比透磁率20以上、鉄損0.1 W/cm³以下、200℃以上の耐熱性を持つ磁性コンポジット鉄心を実現する。また、表皮効果と近接効果に起因するコイルの交流抵抗を50%低減した磁性塗布線を開発する。さらに、トランスと駆動回路を一つの基板上に配置した共振型およびチョッパ型コンバータを製作して小型・軽量DC-DCコンバータ（出力50W、電力密度10 W/cm³、効率95%以上）を実現する。

【成果】

- ①磁性コンポジット材のパラメータが鉄損に与える影響を明らかにした。特に鉄損は世界のベンチマークと比較して1/10以下を実現した。
- ②電力密度10 W/cm³の実現に向けて、高密度実装技術を開発した。
共振型コンバータとチョッパ型DC-DCコンバータの両方において、電力密度10W/cm³を実現した。

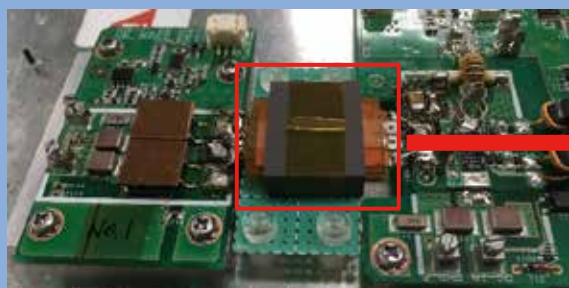
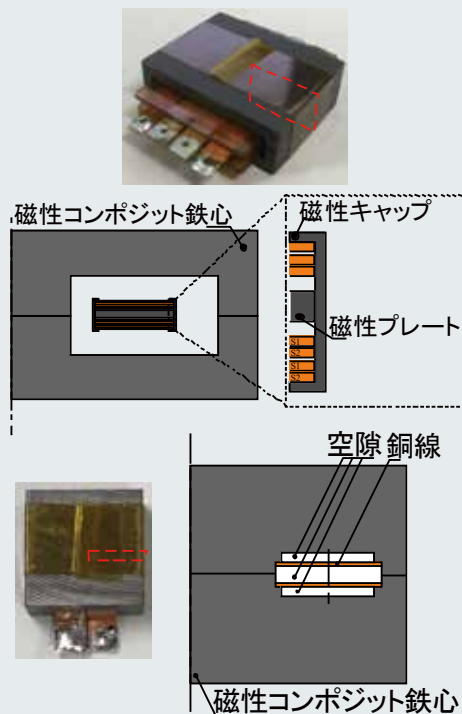


図1 絶縁形DC-DCコンバータ（LLC共振形）



図2 非絶縁形DC-DCコンバータ

1次試作品



最終目標

- (1) 効率：95%以上
- (2) 電力密度：10W/cm³

研究テーマ名 | フィールドのエネルギーを利用した超低消費エネルギー型環境探査モニタリングシステム

機関名：東北大学、日本大学

プロジェクト概要

【目的】

環境探査対象フィールドのエネルギー(重力場、流体場など)を利用することで移動のためのエネルギー消費を極限に抑えた超低消費電力型の自律移動マルチエージェント環境探査システム実現のための制御・推定技術を構築する。長期間の環境探査を自律移動マルチエージェントで実現するためには、消費電力を抑えることが必要不可欠である。このため、重力場、流体場のエネルギーを移動に利用し、移動のためのエネルギー消費を極限に抑えつつ、探査フィールド全体の状況を推定する技術の研究開発を行う。

【成果】

- ①自律移動型水環境モニタリング用センサの開発
水環境モニタリングのための自律移動型センサパイを設計・試作した(図1)。
- ②観測データと数値シミュレーションのデータ同化による流速場のリアルタイム推定技術
各センサの観測データ(流速、温度など)をリアルタイム収集し、数値シミュレーションに外挿して、データ同化により対象とする水環境全体の流速場を推定する技術を構築した(図2)。
- ③流速場推定結果と移動に要するエネルギーを考慮した効率的な環境探査のためのセンサ群制御技術
計測ポイントの評価アルゴリズムを構築した。
- ④実証試験
フィールド(猪苗代湖)において4台のセンサパイによる実証試験を実施し、観測データからの流速場の推定に成功した(図4。図3は観測データを用いない推定値で比較用)。



図1

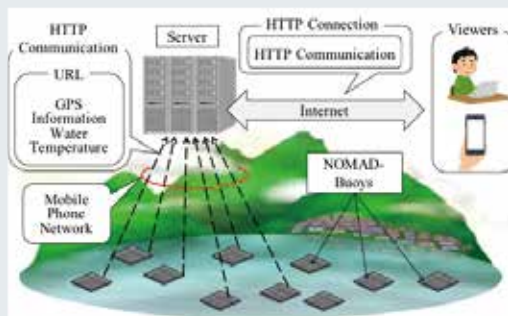


図2

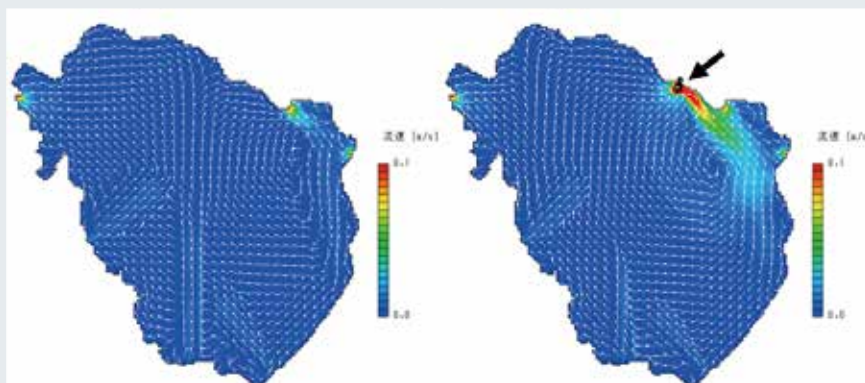


図3

図4

研究テーマ名 | 異種・複数小型ロボットを用いた確率的領域誘導による環境探索システムと要素技術の検討

機関名：中央大学、プログレス・テクノロジーズ株式会社

プロジェクト概要

【目的】

表面探索において異種複数の小型ロボットを用いることで、対象領域内の観測情報を確率的に収集し探索効率を向上する手法を提案し、それに関わる技術、アルゴリズム、システム（ハード・ソフト）を検討する。

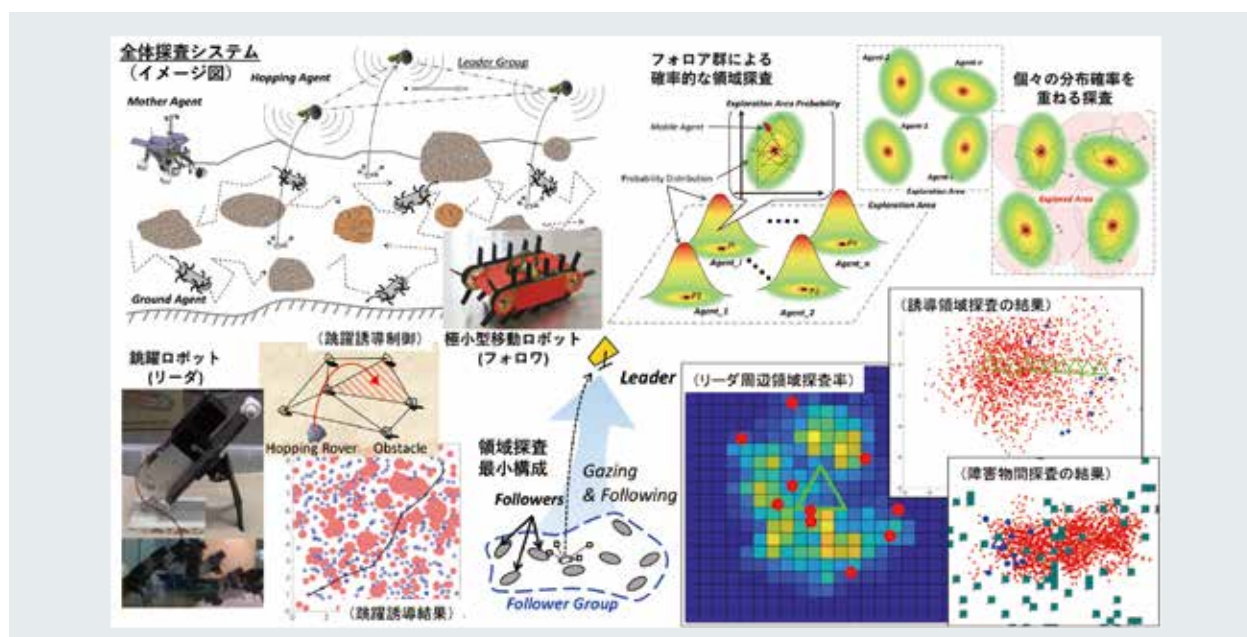
このために以下の課題を設定している。

- ①異種・複数ロボットによる領域内協調探索技術
- ②ロボット間相対配置認識手法の検討
- ③小型軽量空中移動機構を有するロボットの研究開発（リーダー機）
- ④小型軽量表面移動機構を有するロボットの研究開発（フォロア機）

最小構成探索ユニットを想定して各アルゴリズム、機能を検証する。また月惑星探索のみではなく、地上における建物・インフラなどの検査、観測、調査への応用なども検討する。

【成果】

- ①異種・複数ロボットによる領域内協調探索技術
リーダー（1機）とフォロア（多数）を最小構成単位とし領域探索を行う。フォロア群は低知能で環境とのインタラクションにて確率的移動及び観測を行い、時間と共にリーダー周囲の空間観測率を上昇させ、リーダーの移動に追従する。リーダーは観測率に応じ、他のリーダーと協調移動する。この際の行動アルゴリズムを検討している。
- ②ロボット間相対配置認識手法の検討
フォロアがリーダーを認識し、自らとリーダーの相対距離を把握する方法を検討している。
- ③小型軽量空中移動機構を有するロボットの研究開発（リーダー機）
機体の小型化に伴うスケールの移動性能低下とセンサの低位置設置による視野狭窄問題を解決するため、リーダー機に跳躍移動を採用し大域的な探索戦略決定とフォロアの位置制御を検討している。そのための跳躍機構を提案し、試作を行っている。
- ④小型軽量表面移動機構を有するロボットの研究開発（フォロア機）
分散観測データ取得のため、小型軽量の表面移動方式および観測ロボットを昆虫型ロボットをベースに検討し、移動・観測機能に関して試作を実施している。



研究テーマ名 | 超高感度マルチカメラや深層学習を利用した高付加価値vSLAM技術の研究開発

機関名：株式会社アイヴィス、株式会社ビュープラス

プロジェクト概要

【目的】

本研究では、宇宙探査ロボットが用いられる月惑星表面上や、同様の地球環境で、視覚の役割を果たすvSLAM※技術について、技術開発と性能評価を行う。暗闇の撮影やコントラスト変化に強い超高感度カメラを用いることや、深層学習にもとづくアルゴリズム改良により、従来は応用の難しいような環境でもvSLAMを行うことを目指す。

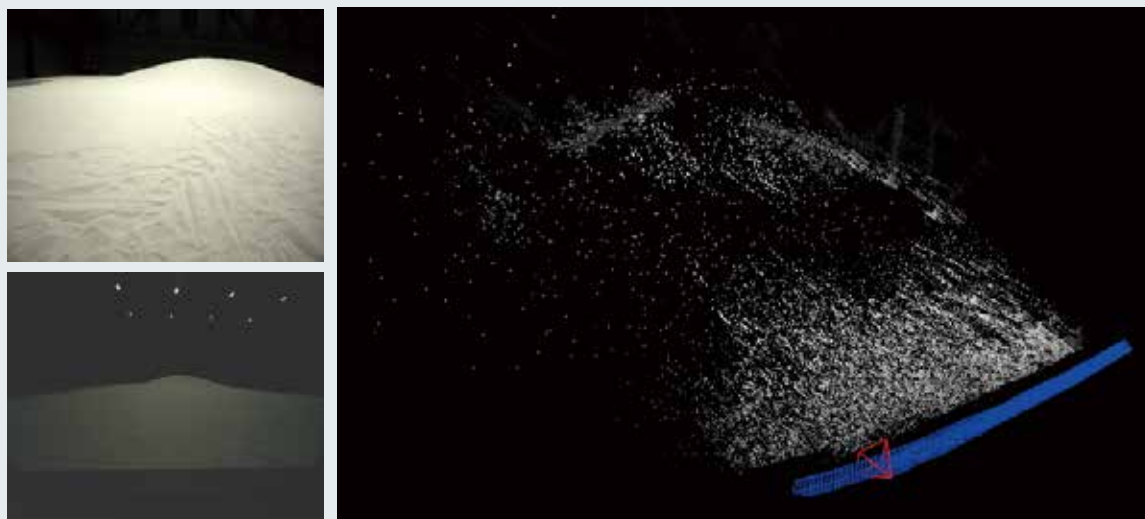
※ vSLAM (Visual Simultaneous Localization and Mapping) は、画像計測に基づき自己位置推定と環境地図作成を同時に行う技術。未知の環境を探索するロボットが、移動したり作業するために、ロボット自身の位置と、周辺の起伏などの地図情報が必要となる。

【成果】

画像計測は、画像濃淡変化の強さ等の特徴を利用するが、砂地などはこの特徴が弱いため、画像計測が難しいという問題がある（テクスチャレス問題）。

このテクスチャレスの自然地形に対する研究開発のために、提案者が既に研究開発したvSLAMをもとに、本研究開発用のプラットフォームを構築し、深層学習などを利用した高性能なvSLAM技術の検討に発展させる。また、弱い照明や、明るさの強弱の大きな（コントラストの強い）環境でも画像撮影が可能な超高感度カメラも用いる。

H29年度に、JAXA相模原キャンパスの宇宙探査フィールドを暗室とし、様々な照明条件での実験を行い、超高感度カメラを用いたvSLAM技術による自己位置推定や環境地図作成が、一般的なカメラで得られた画像より、よい結果が得られることが研究開発プラットフォームで確認できた。



宇宙探査フィールドのvSLAM処理例：（左上）超高感度カメラの取得画像、（左下）照明が弱いため、一般カメラでは画像取得が難しい、（右）超高感度カメラによるvSLAM処理結果、3次元環境地図とカメラ位置（青い枠）



実際の探査画像（はやぶさ、イトカワ）によるvSLAM処理例：（左）vSLAM処理過程の画像：2枚の画像間での対応関係を示す。（中）推定した小惑星のワイヤフレームモデル、（右）同テクスチャマッピングモデル

研究
テーマ名 | テクスチャレスシーンのためのロバストな Visual SLAMの研究

機関名：株式会社コンセプト、株式会社モルフォ

プロジェクト概要

【目的】

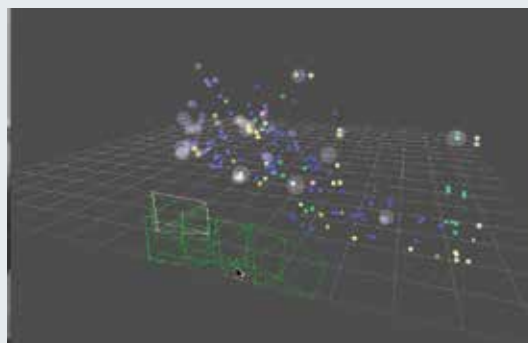
Visual SLAM*は、画像計測に基づき、カメラで得られた複数枚の画像から、カメラの位置推定や環境地図を作成する技術である。利用できる環境をより広げるために、従来の画像の特徴抽出方法に加え、画像の輪郭情報や濃淡変化の弱い部分（テクスチャレスな部分）毎に特徴抽出方法を変える統合的な手法の研究開発を行う。

※ Visual SLAM (Visual Simultaneous Localization and Mapping) は、画像計測に基づき自己位置推定と環境地図作成を同時に行う技術。未知の環境を探索するロボットが、移動したり作業するために、ロボット自身の位置と、周辺の起伏などの地図情報が必要となる。

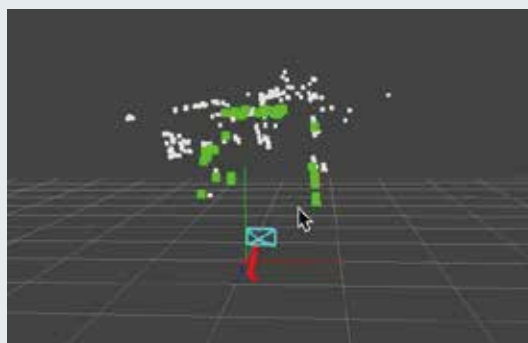
【成果】

室内の壁や天井のようなテクスチャレス部分は、奥行きを計算するための手がかりとなる特徴（模様やキズなどの濃淡変化）が少ないことが問題である。弱い特徴を取り出すために、多種の処理を取ることもできるが、計算に時間がかかりすぎて、実時間処理ができなくなる。このような問題の解決方法として、前処理としてのハイダイナミックレンジ化や学習ベースの推定方法を検討する。

このような技術課題に対し、アルゴリズム改善による研究性能評価や、実際のカメラを用いた実時間処理装置の研究開発を進めている。また、宇宙探査実験棟の砂地形や、特殊な照明環境（真横から強い明かりが当たる）での実験を通じて、宇宙探査ロボットでも利用可能なロバストな Visual SLAM技術の研究開発を行う。



オフィスシーンのVisualSLAM処理例（1）：（左）取得画像と抽出した画像特徴の重畳表示、（右）得られた3次元環境地図とカメラ位置：空間中の点が特徴点の3次元位置を表し、手前の緑枠線がカメラ位置を示している



オフィスシーンのVisualSLAM処理例（2）：（左）取得画像と抽出した画像特徴の重畳表示（テクスチャレス部分の特徴抽出が工夫されている）、（右）得られた3次元環境地図とカメラ位置

第4回RFP 広域未踏峰探査技術／課題解決型

2019年2月～2022年2月

研究テーマ名 複数小型ロボットを用いた確率的環境探査システム

機関名：株式会社竹中工務店、中央大学

プロジェクト概要

【目的】

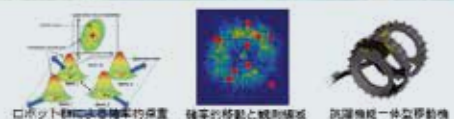
建設現場等での工事進捗管理あるいは品質確認検査を行う複数小型ロボットの分散協調検査システムを開発する。システムの実現には、複数小型ロボットが協調し効率よく分散していく仕組みや、現場での画像撮影を満遍なく行う仕組みなどが必要となる。ロボットがランダムに動くのみでは取得される環境情報にムラができ、環境全体の情報取得に長い時間を要する。また、建設現場では日々変化する資機材配置や段差などがあらゆる箇所に存在し、これらを回避・乗り越える移動性能を持つローコストで高い踏破性能を有するロボット移動機構が必要となる。これらの必要機能を研究開発し統合することで、分散協調検査システム構築を行い、建設現場や老朽化インフラ等での適用を目指す。

【内容】

- ①ロボット群により観測時間縮小と事象発見率向上を可能にするアルゴリズムの開発
人またはロボット1台と比較して観測時間、事象発見率の優位性を示す。
- ②高走破性を有する小型軽量表面移動型観測ロボットの開発
全長15cmかつ質量500gで15cmの段差乗り越えの走破性達成を目指す。
- ③小型跳躍機構の実現および跳躍飛翔能力の活用検討
跳躍を可能とする小型跳躍機構を開発する。
- ④提案システムの実用化及び適用実証実験、事業化検討
最小構成システムを構築し、建設現場において検査実証実験および事業化に向けた評価を行う。



複数小型ロボットが協調し拡散するシステムを用いて、建設現場や老朽化インフラにおける、作業進捗確認やモニタリング、点検や調査を行います



研究
テーマ名 分散協調型ロボットによる製造工場等の物品供給システムの開発研究

機関名：JOHNAN株式会社、京都大学

プロジェクト概要

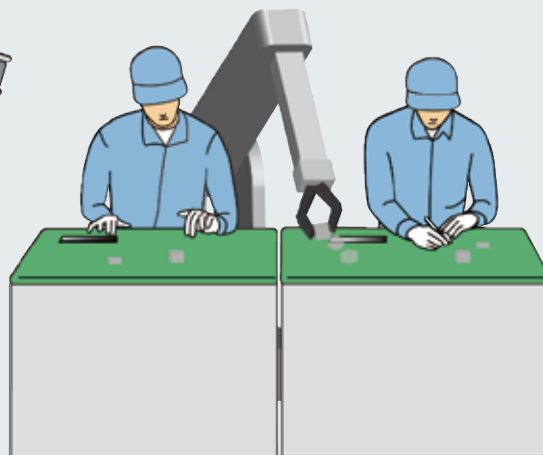
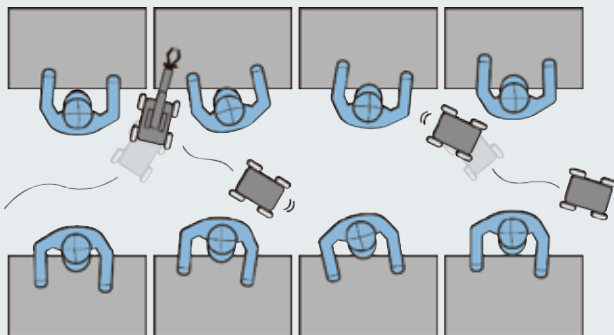
【目的】

月面などの惑星広域探査活動において、多数の小型探査ロボットが互いに連携しながら、安全に持続的に探査活動を行うシステムの構築を目指す。このようなシステムの実現に向けて、JOHNANでは、瓦礫などが散乱した環境下を走破できるレスキューロボット技術および半自律ロボット群による編隊制御ロボット技術を保有する京都大学松野研究室と連携し、さらにJOHNANが販売代理店を務めるRealtime Robotics社の瞬時にロボットの衝突回避制御を可能とするロボットモーションプランニング技術を活用する。

【成果】

- ①ロボットの自動走行へのMPA(モーションプランニングアルゴリズム)適用可能性検証
自走型ロボットが動的な障害物との衝突を回避しながら目的地に達成するタスクを、MPAを活用して実現できるかを検証した。
- ②自走型ロボットに搭載されたロボットアームによるピック&プレース作業へのMPA適用可能性の検証
自走型ロボットマニピュレータが、目標地まで移動し、指定されたオブジェクトをピックし目標位置にプレースする作業をMPAにより実現できるかを検証した。
- ③MPAを用いた複数の自走型ロボットにおけるピック&プレース協調作業システムの開発
複数台の自走型ピック&プレースロボットシステムの協調作業システムを開発した。

セル生産現場の狭い複雑なレイアウトにおいて、工程全体の供給状況を監視しながら、作業者の作業に影響を及ぼすことなく、個々のセルに安全に、タイムリーに、安定的に部材を配送・供給するシステムを構築する



研究
テーマ名

機関名：株式会社コガネイ、東京電機大学

プロジェクト概要

【成果】

自走ロボット群を「物質の三態」に見立て、固体のような集団維持、液体のような集団形状の変化、気体のような集団の離散という特性を得られる「熱力学モデルに基づく集団移動制御手法」をもとにした分散協調システムの実現。

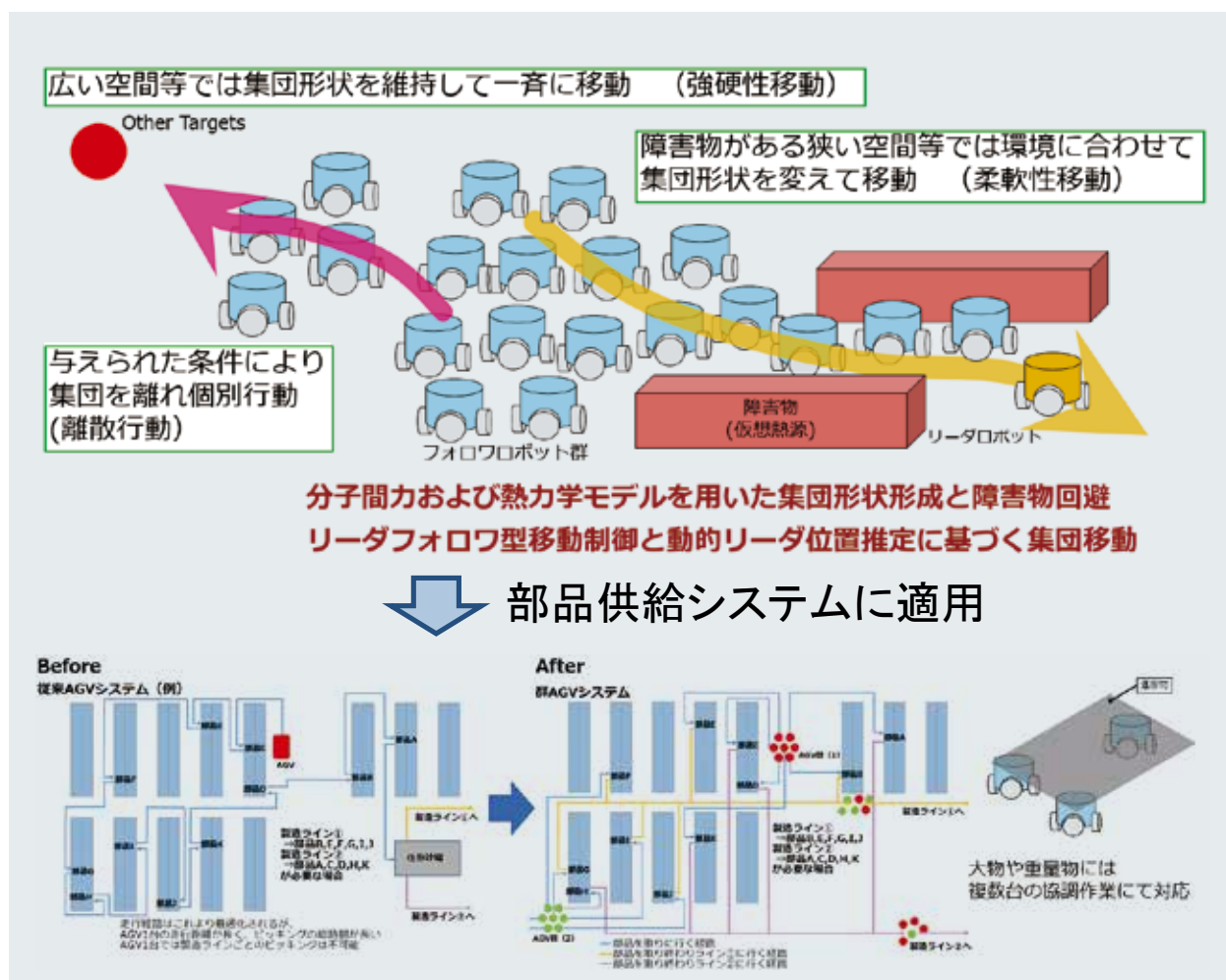
①「熱力学モデル」に基づく群制御手法のメリットである通信負荷の低さ等の効果検証

「集中制御モデル」、「流体など他の力学モデル」、「生物模倣モデル」などに対して、通信負荷や計算負荷などの低減効果検証をシミュレーションで行った。

②「熱力学モデル」に基づく群制御手法にマッチする 局所通信／測距手法の確立

各種通信／測距手法を組み合わせ、屋外・屋内・その他特殊環境において複数台での同時利用が可能な通信／測距方式を見出し、新規センサモジュール等を開発した。選定された局所通信／測距方式の活用によって、移動体の総移動距離または所要時間を最小化する群行動を検討した。

③実機による動作確認／評価を行った。



研究
テーマ名

空気圧人工筋肉を用いた蠕動運動による連続捏和・搬送技術の実用化検討

機関名：株式会社ソラリス、中央大学、株式会社ブリヂストン、法政大学

プロジェクト概要

【目的】

空気圧人工筋肉を用いた多機能型蠕動運動混合搬送機の実用化に向けて、固体ロケット推進薬等の製造工程における材料の連続捏和・搬送技術を確立するため、捏和状態の評価手法の確立と整備性生産性の向上を目指した材料のコンポジット化を行う。産業利用の実用化に向けて、システムの頑健化・長寿命化とシステムのプラント化を進める。

【成果】

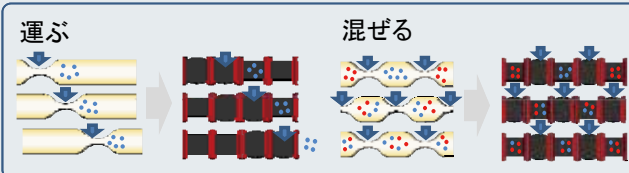
- ①捏和状態の評価手法の確立
 - ・空気圧と流量計測によるリアルタイムセンシング可能な評価手法を構築
 - ・空気圧の積算流量から内容物の体積を検知し、材料の分布状態≒混合の進行状態が把握可能
- ②整備性生産性の向上（材料のコンポジット化）
 - ・コンポジット用素材（薄膜袋）を選定し固体推進薬に対する耐性確認
 - ・整備や清掃等の前後処理を含めた工程時間短縮に寄与することを確認
 - ・材料直接投入と比較して混合時間短縮のほか、混合度改善の優位性を確認
- ③システムの頑健化・長寿命化
 - ・実運用想定に加温環境下の繰返し膨脹試験で内側チューブ4.7千回以上、外側人工筋肉：100万回以上を達成
 - ・人工筋肉ゴム厚さと直径の調整にて使用駆動圧に準じた蠕動運動ポンプを構築できることを確認
- ④捏和・搬送システムのプラント化（システムインテグレーション）
 - ・サーキット状態において捏和・搬送評価ができるシステムを構築
 - ・捏和・搬送部（蠕動運動ポンプ）の大型化成功（直径の2倍化：内径φ57⇒φ114）
 - ・大型化したシステムの高速駆動装置を実現

【図表】

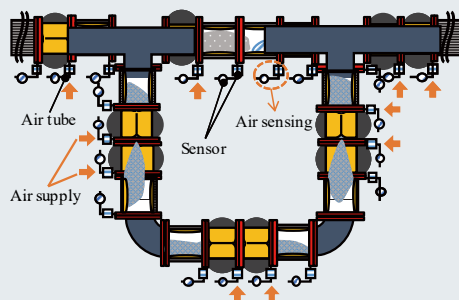
空気圧人工筋肉を用いた蠕動運動型ポンプ



大腸の動きを模した動作



センシング・制御構想案



多分野への利用展開を目指す

- * 高粘度流体、固液混合流体、粉体を運ぶ・混ぜる
- 固体推進薬製造工程による材料の混和・搬送
- 汚泥、土砂などの楊重・搬送
- 食品の原材料の搬送



研究
テーマ名 | インフレータブル構造部材を用いた自動展開・収納方法の検討

機関名：清水建設株式会社、太陽工業株式会社、摂南大学

プロジェクト概要

【目的】

月表面を走行するローバを越夜可能とする越夜シェルター実現に向けて、円筒のインフレータブル材を骨組構造材として、重力環境下でも自立する構造物の展開／収納手法を確立する。

【成果】

- ①構造物展開・収納の自動化検討
 - ・大型構造物を自動構築する手法の実現可能性を示す。
 - ・部分試作により自動展開の実験的な検討を行う。
- ②越夜シェルターの仕様検討
 - ・月面ローバの越夜シェルターのサイズ、ローバ入り口形状、開閉方法、熱条件、レゴリスとのインターフェース、膜材料、付加的な発電や通信、着陸機との関係等にもとづく仕様を決定する。
- ③展開した構造物の計測方法の検討
 - ・インフレータブル構造の展開状況がモニタできる計測法を提案する。
 - ・試作モデルの展開実験で計測データを取得する。
- ④構造物の結合・拡張方法の検討
 - 展開後あるいは収納状態のインフレータブル構造物を結合し、空間を拡張する機構について調査する。

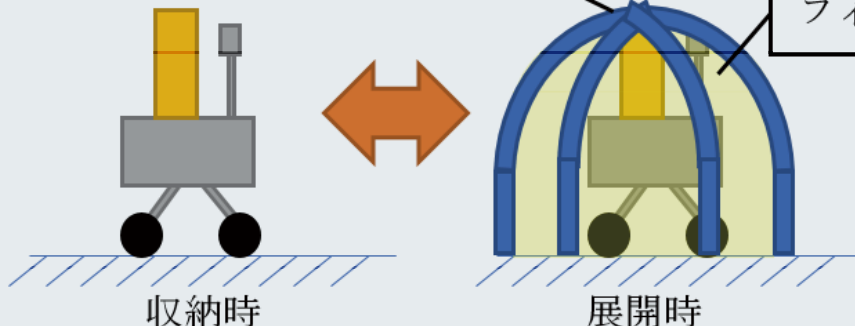


太陽工業の展開技術
がベース



インフレータブルチューブ

フィルム



研究テーマ名 | ポリイミドフィルムを用いた極薄・極軽量インフレータブル構造体の検討

機関名：埼玉大学、精電舎電子工業株式会社

プロジェクト概要

【目的】

ポリイミドフィルム上への金属薄膜成膜技術とポリイミドフィルム製バルーンを前処理・接着剤レス溶着で製作する技術をもとに、ガス圧の印加により展開するインフレータブルアンテナを実現する。

【成果】

- ①インフレータブル構造の仕様策定
インフレータブル構造体のサイズを決定する。
- ②アンテナ電極成膜技術の確立
ポリイミドフィルム上に電極を塗布する技術を確立する。
- ③2種類の成型技術およびPIフィルム溶着の検討を行い、インフレータブル構造体を試作する。
折り紙技術を基にしたインフレータブル構造体の製作
熱間圧空成型法によるインフレータブル構造体の製作
2枚のPIフィルムの溶着による空気室の製作
- ④インフレータブルアンテナの製作
上記技術を組み合わせ、インフレータブルアンテナを製作する。
- ⑤インフレータブルアンテナの評価試験
アンテナとしての性能評価および宇宙環境下への適用性を評価する。

保有技術

- ・ 接着剤・前処理・特殊材料不要のポリイミドフィルム溶着技術
- ・ 月面着陸用エアバッグ気室の製作技術
(従来品から約70%の質量削減を達成)

応用

気体の流入によって展開する
極限環境用展開構造体の可能性を検討



ポリイミドフィルム溶着装置

溶着により製作したPIバルーン
(展開前の外径円直径300mm)

研究テーマ名 | 広域探査および通信網確立のための羽ばたき移動体の開発

機関名：東京電機大学、千葉工業大学、株式会社大同機械

プロジェクト概要

【目的】

蝶の構造や羽ばたき飛翔時の姿勢制御メカニズムをモデルとすることで、以下の特徴を有した小型軽量な移動体を開発することを目的とする。

- ・翼幅長300mm以下、質量3g以下の機体サイズ
- ・省自由度な羽ばたき機構
- ・羽ばたきと滑空を併用する省エネルギーな飛行

これにより、地上用途では建設現場での移動式通信アンテナや広域センシングシステムとしての実用化を目指し、現在推進されているi-Constructionに貢献する。

宇宙利用の想定としては、大気を有する火星表面における通信網確立のための中継点（マルチホップ通信等）の設置をメインとし、滑空モードを利用した表面の観測や大気状態の計測などが挙げられる。

【成果】

これまでに開発してきた、翼幅長100mm、質量0.5gの蝶型羽ばたき移動体は、初速0m/sからの飛び立ちを実現していたが、ゴムを動力としていたために飛行時間はわずか数秒であった。よって、以下の3項目に従い、バッテリーとモータを搭載した新たな機体を開発している。

(1)小型モータとギアモジュールの開発

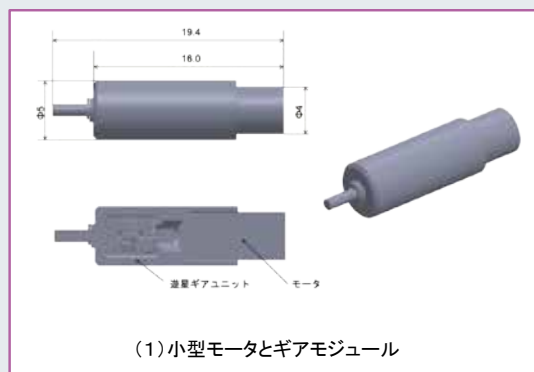
遊星ギアユニットを搭載した、直径5mm、全長20mm、質量1g程度の小型高トルクモータを開発中である。

(2)小型軽量な移動体の開発

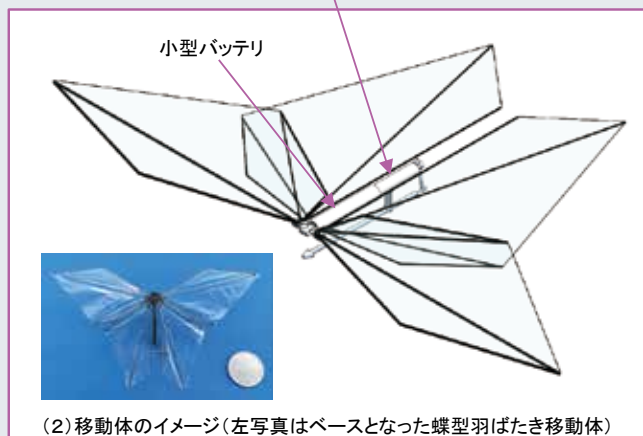
開発中のモータを実装するための、翼幅長200mm程度、質量約2.5gの試作機を設計中である。

(3)重心位置と翅形状の最適化

最適な重心位置を探索するため、まずは滑空実験による姿勢変化の様子を解析している。CFD解析も併せて行うことで翅形状なども最適化する。



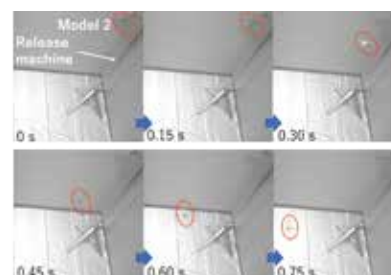
(1)小型モータとギアモジュール



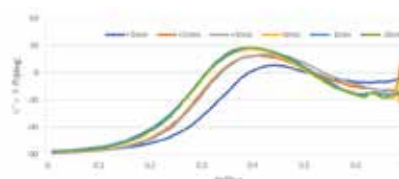
(2)移動体のイメージ(左写真はベースとなった蝶型羽ばたき移動体)



＜滑空用の実験機＞



＜滑空時の連続写真＞



＜重心位置を変えた際のピッチ角変化の推移＞

機体を真下に向けた状態(ピッチ角-90deg)から自由落下させてピッチ角の推移を解析。重心位置を変えることにより機体上げの傾向が変わっていることがわかる。

(3)最適な重心位置探索のための滑空実験

研究
テーマ名

路面情報に基づくSLAM技術と動的経路生成のための組込実装技術の研究

機関名：三菱電機株式会社

プロジェクト概要

【目的】

探査ローバが月惑星の表面を移動する場合、現在の位置や目標地点、周辺の地形を正確に知る必要がある。また、ローバに搭載したカメラ等のセンサで計測することで、遠くからでは計測が難しい小さい岩などの障害物を発見することができ、移動経路を更新することで、より安全な移動が可能になる。本研究では、自分の位置と周辺の3次元地図を同時に推定するSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術を用いて、この動的な経路計画のためにより効率的に用いる研究を行う。そして、探査ローバに搭載しやすいように、低リソースで高速に処理ができるような改良も同時にすすめる。この技術は、宇宙探査での活用に加えて、自動車の自動運転や工場内の荷物運搬ロボット等への応用も期待できる。

【内容】

研究者のもつ特別なSLAM技術 (Point-Plane SLAM) をベースに、路面情報しか得ることのできない月惑星環境で、高精度な自己位置推定と3次元地図の生成をより低リソースの計測センサで実現する技術を目指す。低解像度の広域3次元情報による動的な経路計画を行うために、アルゴリズムやスキャン範囲限定等の工夫を検討する。

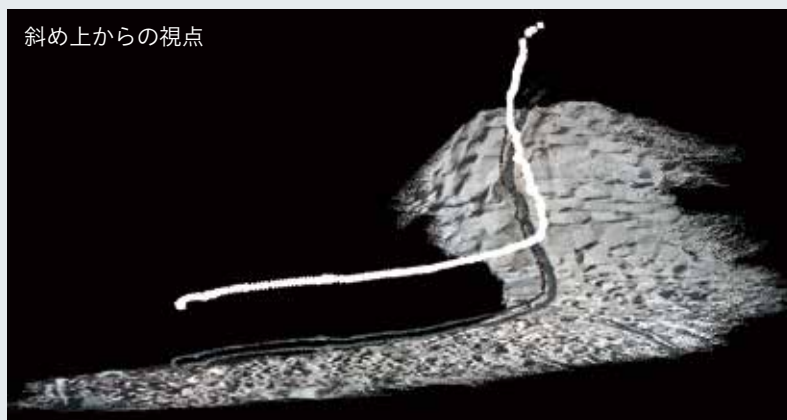
図は、JAXA相模原キャンパスの宇宙探査実験棟にある模擬月面環境実験場で、提案方法の実験を行った結果を示す。月の極域を想定し、非常に低い位置に配置した照明環境のため影の多いシーンとなり、ローバ自身の影が映り込むという問題があるが、Point-Plane SLAMによる自己位置推定と3次元地図作成が実現できることを確認した。今後は、動的経路計画を含めた検討を行い、宇宙探査での利用や地上応用を目指す。

宇宙探査実験棟 宇宙探査フィールド
(天井照明)

移動ローバにセンサを搭載



横からの強い照明環境で斜面を降りる



斜め上からの視点



横からの視点



上からの視点

Point-Plane SLAM により計測した移動経路（白線）と3次元環境地図

研究テーマ名 不定形物質サンプルの複段採取を実現するトラス型分収納ハンド機構の開発

機関名：東北大学、小野電機製作所

プロジェクト概要

【目的】

複数の不定形物質サンプルの連続的かつ小分けにして収納を行うハンド機構技術の開発を目的とする。具体的には、先端部分で折り返して反転する袋状のトラス型のハンド構造により、様々な形状を有し、かつ多少ずれた位置・向きに存在する物質サンプルであっても、包込み採取が可能となるという特徴を有する機構を具現化する。さらに、トラス先端部には、互い違いへら構造を設定し、隙間なく連続的に物質サンプルを分収納しながら回収可能であることから、回収後に、小型ロボットが姿勢を変えても物質サンプルを保持し続けることができる機能の実現を目指す。

【内容】

①実機設計・組立て・実験実施・全体統括

実機基本性能仕様の決定、サイズ・重さの範囲での実機具現化、実機実験を通しての性能評価、および実機設計へのフィードバックをかけることでの開発の促進、移動体への搭載性も考慮したハンド機構の構成検討を通して、考案原理の有効性を確認する。

②部品素材・加工法検討

耐極限環境性を考慮しての加工法の検討・実験的加工の実施・蓄積を通して、実機部品加工において、新しい加工法を確立する。

③実環境での使用・運用にあたっての検討

体制継続しながら本プロジェクトおよびその後においても共同で技術開発や知財化を推進する。

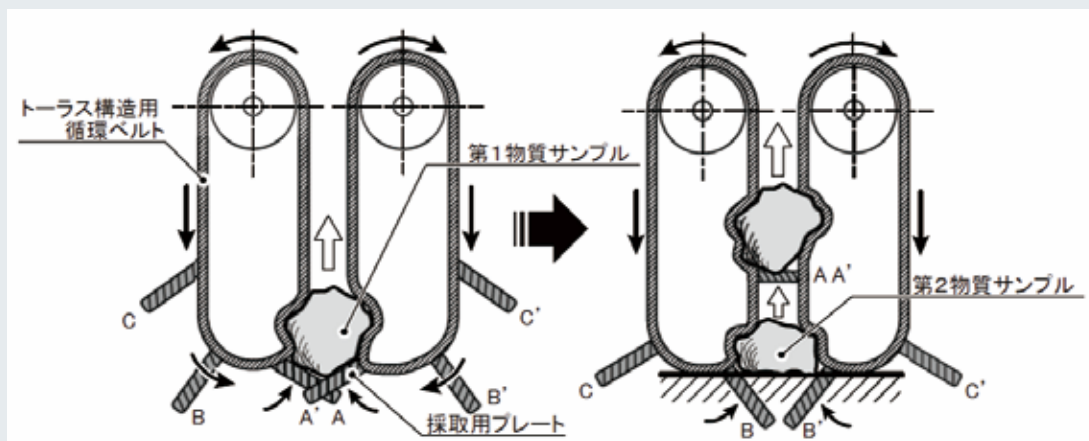


図1：トラス型採取機構の概念図



図2：月面上での物質サンプル採取の概念図

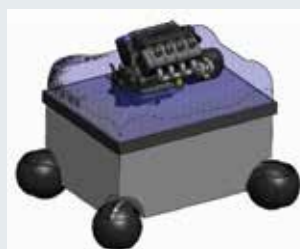
(a)産業用ロボットへの応用
(不定形柔軟物の把持)(b) 不定形のエンジン
(精密機械)の確実な保持

図3：事業化応用例

研究
テーマ名 月面有人と圧ローバ用太陽電池パドル及びアンテナへの適用を想定した扇子型展開機構による軽量かつ再収納可能な展開機構の研究

機関名：株式会社テクノソルバ、オリガミ・イーティーエス合同会社

プロジェクト概要

【目的】

扇子型展開機構は、衛星搭載用高精度展開アンテナへの適用を目的としてJAXA研究開発部門とともに開発を進めてきた。本展開方式は、有人探査用太陽電池パドルや展開ラジエータにも適用が期待できる。

本展開方式では、中心部の回転運動のみで、展開動作を行うことが可能である。また、収納動作も可能な機構である。

これらの特性を活かし、有人と圧ローバへの太陽電池パドルおよびアンテナへの適用を想定した、信頼性が高く、堅牢で取扱い易い扇子型展開機構の検討を実施する。

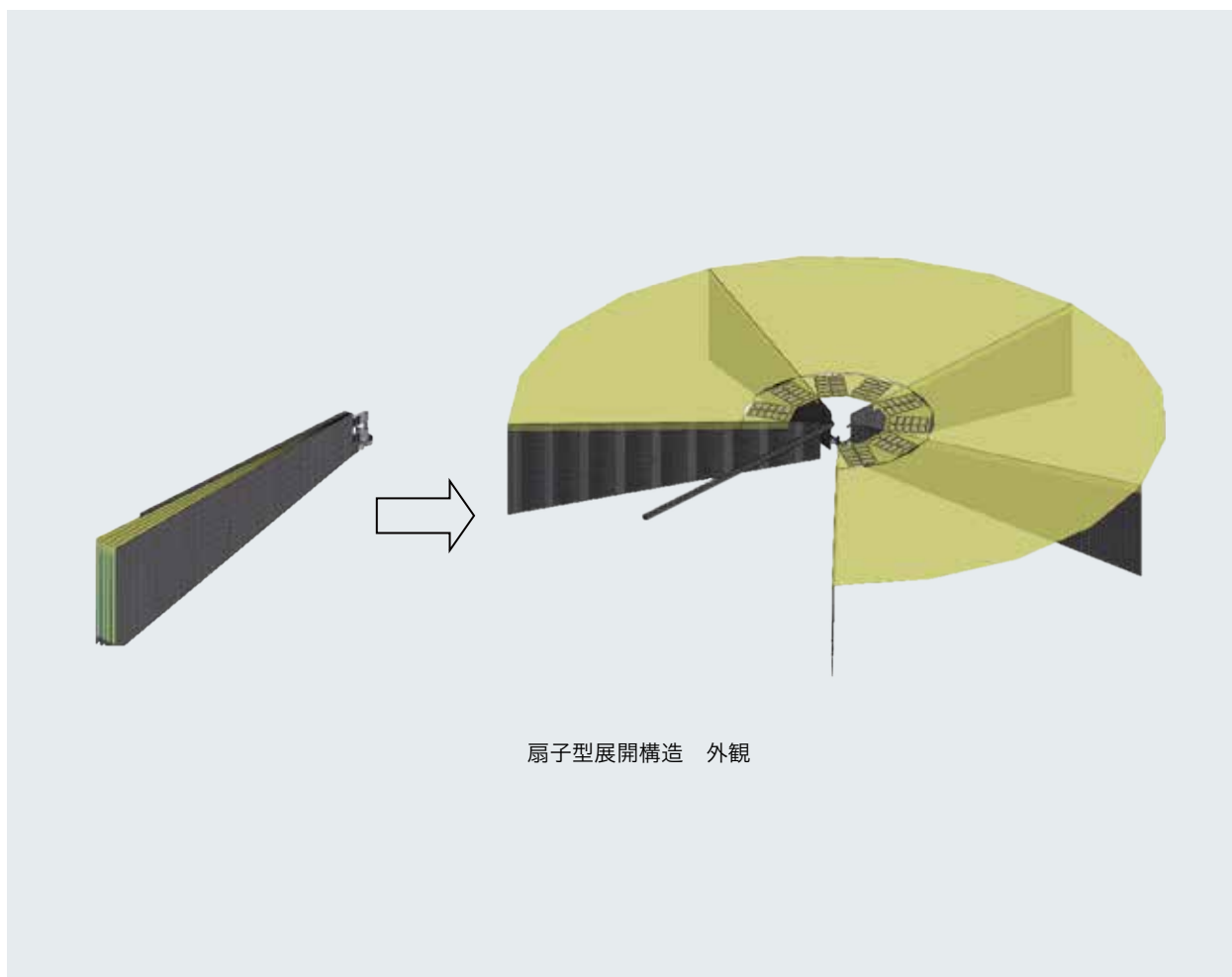
【内容】

本研究においては図に示す扇子型展開構造をベースに以下に示す項目を実施する。

- ①堅牢な扇子型展開機構の実現性検討
- ②扇子型展開機構のSAPへの適用検討
- ③扇子型展開機構の展開ラジエータへの適用検討

下記項目を兼ね備えた展開機構の実現性を確認する。

- (1)月面重力環境下における展開/収納可能な機構
- (2)収納状態で、打上げ環境を含む振動環境に耐える
堅牢性
- (3)ワンアクションで展開、収納が可能な取扱性の
容易性
- (4)Ka帯まで使用可能なアンテナの検討
- (5)試作品(展開機能モデル)を製作する。



扇子型展開構造 外観

研究
テーマ名

従来の金属線からなる信号用電線を軽量かつ高強度とする繊維電線の研究

機関名：株式会社KANZACC、古河電気工業株式会社、福井県工業技術センター

プロジェクト概要

【目的】

有人と圧ローバは、時速10～20kmで月面を走行することが想定される。車両の動力および走行、自動運転を制御するコンピュータ（ECU）と各機器を接続する信号線は、可動部の繰り返しの動作に追従するための曲げや走行荷重に対する疲労強度が要求される。加えて、真空環境下での使用や低温での使用に対する耐性や軽量であることが求められる。

本研究では、繊維電線の特徴である耐屈曲性および疲労耐性を活かした信号線を、アルミ電線と比して半分程度の軽量化を目指す。

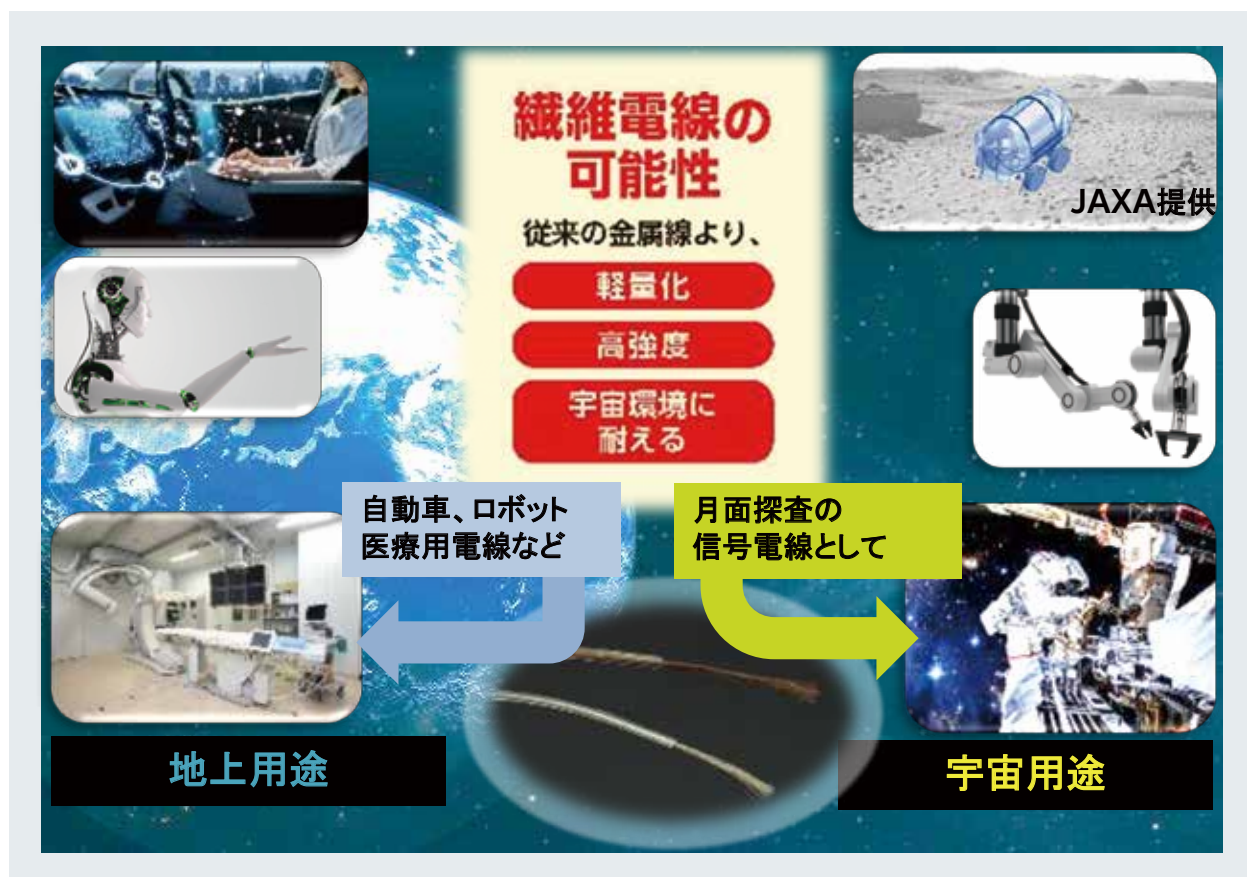
※繊維電線は地上において自動車やロボット、医療用電線等に適用することが期待される。

【内容】

繊維電線とは繊維の表面に金属めっきを施し、導電性を付与した導電性繊維を導体として用いた電線である。軽量かつ高強度な繊維を用いることで、その基本特性をそのまま生かした電線となる。

これら繊維電線を宇宙用途、あるいは地上用途に適用することを目的とし、材料および製造技術の研究と性能評価に取り組む。

- ①軽量繊維電線の材料（母材、絶縁材）の研究
- ②軽量繊維電線の製造技術の研究
- ③軽量繊維電線の性能評価
 - ・機械的性質、耐熱特性、耐振動特性の評価
 - ・紫外線・宇宙線影響の評価、
 - ・シールド周波数遮蔽特性の評価



研究
テーマ名 遠隔操作と自動制御の協調による遠隔施工システムの実現

機関名：鹿島建設株式会社、芝浦工業大学、電気通信大学、京都大学

プロジェクト概要

【目的】

月や火星の建設作業では人間が現場に常駐して作業することが難しい。一方、地上においても作業員不足や生産性・安全性の向上のため、遠隔地からの遠隔操作による無人化施工やさらには自動化された建設機械による作業が必要とされている。

これらを実現するには、従来の技術として、建設作業で蓄積された確実な無人化施工システムがあり、これに建設機械の自動化を組み合わせる技術や時間遅れを考慮した施工技術の確立が研究課題となる。これらの技術が実現すれば、月面においては対象範囲数十m四方のゾーンを整地し構造物を設置・遮蔽する遠隔施工システムが、地上では生産性や安全性の高い新しい建設施工システムが実現できる。

【成果】

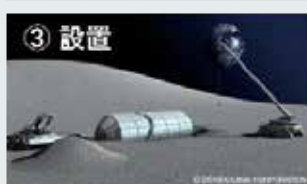
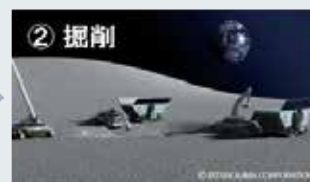
地上の建設作業における開発で得られた建機の本格的な自動化機能に加えて、月面拠点建設作業を想定した遠隔操作と自動制御の協調による遠隔施工システムの実現に向けて、以下の機能の研究開発を実施しました。

- ①通信遅延に対応した操作支援機能
- ②地形変化に対応した動作判断機能
- ③複数建機の協調作業機能

自動運転と遠隔操作の双方が可能のように改造を施した建設機械を用いて、拠点建設の主要作業を定型的・反復的な動作の組合わせに再構築して自動運転で行い、定型化できない細かな調整が必要な作業は遠隔操作で行うことにより、月での無人による有人拠点建設の実現可能性を見出すことができました。



地上と宇宙の遠隔施工イメージ



月面拠点の施工法の詳細検討



建機模型/試験モデル→試験プラットフォーム車両→建設機械と段階的に試験を実施

©JAXA ©2019KAJIMA CORPORATION

研究
テーマ名

超軽量建機アタッチメントおよびブーム等の開発および実地検証

機関名：株式会社タグチ工業、東京農工大学

プロジェクト概要

【目的】

現在地球上には多種多様な建機が存在しており、機動性・安全性・軽量化・燃費向上に対する高い要求がある。

一方、月面拠点基地建設を想定した建機は地球上から輸送し、輸送コスト面から『汎用性が高い』『大型軽量化』がより求められると考える。

そこで軽量化する建機として汎用性が高い『油圧ショベル』を採択した。油圧ショベルは『アタッチメント』と呼ばれる作業用途に応じた機能を有する装置を取付・交換する事で1台で様々な作業が可能となる。

本研究では油圧ショベルの『アーム』『ブーム』等の部品や『アタッチメント』を従来とは異なる素材で設計・試作・評価試験をする事で『軽量化』と将来の『実用化』を目指す。

【成果】

1tonクラス油圧ショベル用構成部品であるアーム・ブームを鉄製から軽量金属製あるいはCFRP製へサイズを維持したまま軽量化設計・試作・性能評価試験を実施し、強度・剛性・操作性において鉄製オリジナル部品と同等であり実用レベルの評価を得た。また、軽量化により油圧ショベルの性能向上も定量的に確認出来た。

CFRP適用による軽量化へ向けた要素技術として、コーティングによるCFRPの耐摩耗性向上、TFBG光ファイバセンサによるCFRPの温度・ひずみ同時測定技術、トラスによるCFRP製油圧ショベル用アーム構造軽量化基礎技術を確立した。

評価・操作性試験は試作品を油圧ショベルへ取付けた状態で実施した。



- ◆ 実用レベルで作業可能な強度・剛性
- ◆ 軽量化による油圧ショベルの性能向上
- ◆ 軽量化による作業効率・生産性の向上

◆ 研究成果物一例

- ・ 軽量金属製アーム試作品（約45%軽量化）
 - ・ CFRP製アーム試作品（約61%軽量化）
 - ・ CFRP製ブーム試作品（約67%軽量化）
 - ・ CFRP製アタッチメント試作品（約20%軽量化）
- ※鉄製オリジナル品重量と比較



1tonクラス油圧ショベル用
CFRP製アーム・ブーム
油圧ショベル取付状態（実物）



7tonクラス油圧ショベル用
CFRP製テレスコープアーム
油圧ショベル取付状態（実物）

CFRPの耐摩耗コーティング

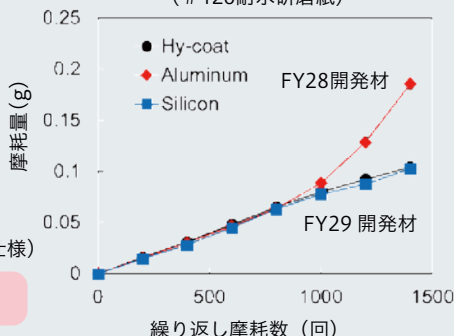
トップコート
アンダーコート
ボンドコート
CFRP



多層コーティングによる耐摩耗性の向上（Hy-coat仕様）

優れた耐摩耗性を確認

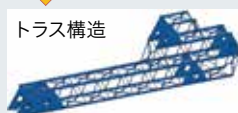
（#120耐水研磨紙）



CFRPアーム構造の軽量化検討



ベースモデル
30～40%の構造重量低減(FEM解析)



研究テーマ名 | スクリュードライビングサウンディング(SDS)による月面でも利用可能な地盤調査技術の確立

機関名：東京都市大学、ジャパンホームシールド株式会社、日東精工株式会社、東急建設株式会社

プロジェクト概要

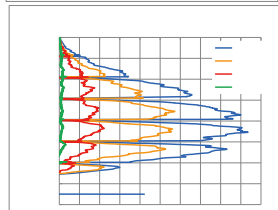
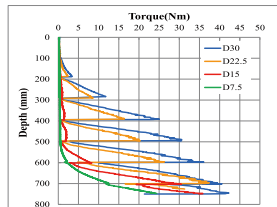
【目的】

月・火星においては、地上と同様に拠点構築には地盤調査は不可欠だが、使用できるリソースに限りがある。地上においても、既製杭を施工する場合は、支持地盤を推定するために、事前にアースオーガで対象地盤を掘削し各種調査を行う必要がある。そこで、特別な機器を使用せず、アースオーガの掘削情報から地盤特性を逆推定する手法を確立する。これにより、月・火星探査において地盤調査を容易にすると共に、地上においても、掘削時の情報から地盤特性が求まり、コストダウンや工期の短縮が可能となる。そこで、地盤調査専用の機器を用いず、アースオーガの掘削情報により、地盤定数を逆推定する手法を確立する。

【成果】

アースオーガの掘削情報に対して、スクリュードライビングサウンディング (SDS) と呼ばれる現行の地盤調査方法の定数推定アルゴリズムを援用して、月面の地盤定数を推定する方法を提案する。推定式構築には、月面アースオーガによる系統的な掘削実験を必要とするが、これらの実験結果の検討を通して、杭打ち工事等でよく用いられるアースオーガ形状の掘削特性を把握することが可能となるため、杭打ち施工管理方法の提案につながるものと期待できる。

基礎実験



現行SDSの理論と試験方法を基に、アースオーガ特性を把握する。

SDS-lunaという新提案



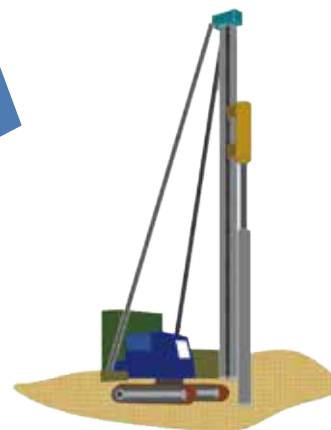
現行のSDSにアースオーガを組み込んだ今までにない地盤調査手法を確立。地上でのデータを蓄積し、更なる進化へ。

月面地盤調査



月面探査ローバ搭載のアースオーガを用いた調査手法の確立

杭施工管理システム



SDS-lunaの調査結果を基に、高精度システムを提案する。

研究テーマ名 | アースオーガによる地盤掘削時の施工情報を利用した地盤定数推定法

機関名：立命館大学、日特建設株式会社

プロジェクト概要

【目的】

月・火星においては、地上と同様に拠点構築には地盤調査は不可欠であり、図1のように専用機器を使った調査を行えるのが理想である。しかし、宇宙では使用できるリソースに限りがある場合が多く、他の目的で持っていくアースオーガ（図2）などの機器を活用できれば効果的である。地上においても、既製杭を施工する場合は、支持地盤を推定するために、事前にアースオーガで対象地盤を掘削し各種調査を行う必要がある。そこで、特別な機器を使用せず、アースオーガの掘削情報から地盤特性を逆推定する手法を研究した。これにより、月・火星探査において地盤調査を容易にすると共に、地上においても、掘削時の情報から地盤特性が求まり、コストダウンや工期の短縮が可能となる。

【成果】

スクリーオーガがボアホールを作成する際（掘削時）には、月面地盤より掘削抵抗を受ける。このスクリーオーガと月面地盤との掘削抵抗情報を利用して、間接的に地盤強度を推定することを試みた。

まず、理論上での掘削時にかかる力学の計算を行い、次に実際に掘削する際のデータを取得した上で、この2つの関係を利用して地盤強度を推定した（図3）。深さ1m程度の任意点で計測可能で安定した推定が可能なアルゴリズムをまとめ、地上の代表的地盤と月の模擬土壌で実験的に検証し有効性を確認した（写真1）。



図1 月面地盤調査計画の一例

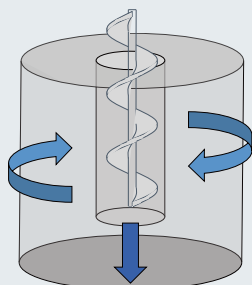


図2 アースオーガ

スクリー型のオーガは排出と掘削が同時に行える効率の良い掘削機構である。



写真1 地上応用を想定した掘進制御の可能な大型掘削試験機

理論上での計算 → 掘削データの取得 → 地盤強度の推定

図3 推定手法のフローチャート

研究テーマ名 締固め困難材料に対する振動等を用いた効果的な締固め方法と走行安定性の検証

機関名：酒井重工業株式会社

プロジェクト概要

【目的】

月面拠点では、着陸場や居住等のゾーン及びそれらをつなぐ道の地盤を締め固める必要があるが、地上の締固め機械は重く簡単に輸送することができない。地上においても、従来、自重に加え振動を加えることによって締固める手法が行われてきたが、砂や粘土はローラを用いた単純な締固めによって密度を高めることが困難である。

そこで、自重に極力依存せず軽量の機材で地盤を締め固める手法を検討し、地上でもより効果的な手法として応用することとした。締固め困難材料に対する振動ローラ（振動方式）の適用性を見極めることで、その応用範囲を広げると共に、新たな振動方式の可能性を探った。

【成果】

締固め機械としては、既存の振動方式である通常、垂直または水平振動を有し、比較に適した仕様の車両を試験車両に選定した。試験材料としては、締固めが困難な材料を現存する土質から粒度調整も視野に入れて選定し、振動効果が多角的に評価可能となる測定方法を検討した。締固め試験では、試験材料に対する振動効果が含水比によって異なると予測されたため、複数含水比の条件にて試験を実施した。

その結果、砂に対する振動方式ごとの締固め効果の違いを定量的に得ることができ、地上応用及び宇宙応用の可能性が高まった。



研究 テーマ名

建築分野の無人化施工に関するシステム検討

機関名：清水建設株式会社

プロジェクト概要

【目的】

建築施工では欠かすことのできないクレーンによる揚重作業の無人化を目指すことで、構造物の位置決め、資材の盛替、クレーンの揚重計画等の大幅な省人化が見込めるとともに、設計、施工管理や建物管理との情報連携が円滑になる。また、月惑星環境や災害地域などの極限環境において遠隔施工を行うことで、コストや二次災害のリスクを減少させることができる。遠隔作業や自動組立においては、位置決め手法およびその位置誤差を許容するシステムが特に必要であり、位置決めについてはGNSS/RTK(Global Navigation Satellite System / Realtime Kinematic)、LIDAR(レーザー測距計)、IMU(慣性計測装置)などを利用した実証実験を実施し、誤差許容システムについては角錐と角穴から成る嵌合接合の手法を応用した月面無人化施工の概念検討を行う。

【成果】

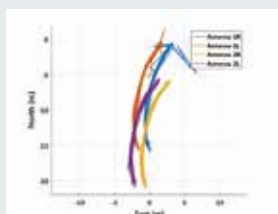
月面を想定した空間、荷重、結合等の条件を満たす構造物の概念設計を行った。月面における無人化施工システムの全体像を明らかにするとともに、構造物位置計測の精度検証を行い、システム検討に反映した。

地上応用も視野に、無人化施工に向けた揚重物の位置姿勢決定システムを設計製作し、実際の建設現場に近い状況において試験を実施することでその有用性を確認した。

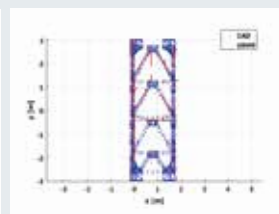
周囲のクレーンや金属製の構造物により電波環境が悪化することが懸念されていたが、位置の算出はGNSS-RTKの一般的な精度以下に収まったことから、十分に遠隔操作による嵌合接合を実施できることが確認された。



センサおよび墨出システムの検証実験



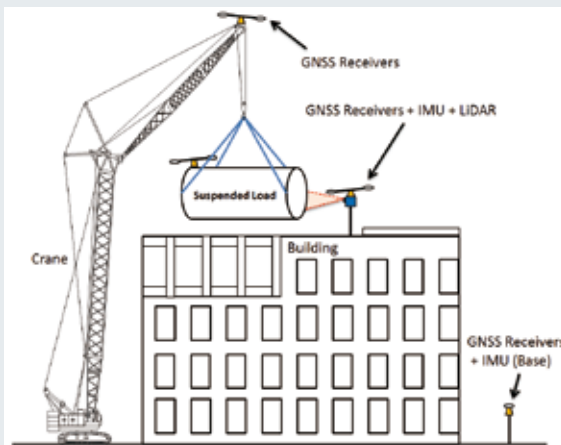
GNSSによる
位置検出の結果例



LIDARデータによる
移動体位置姿勢検出



概念検討に基づく月面居住モジュールの組立状況図



遠隔クレーン作業のための位置決めシステム

研究テーマ名 | 遠隔操作およびアタッチメントの自動脱着可能な軽量建機システムの開発と実地検証

機関名：株式会社タグチ工業、東京農工大学

プロジェクト概要

【目的】

近年地上では都市開発に伴う高層ビルの内装解体工事等の需要増や災害現場に対応可能な建設機械の軽量化や遠隔化、自動化が課題となっている。

一方、月面拠点基地建設において使用される宇宙用建設機械は地球上からの輸送コスト削減の為大型軽量化や無人作業を可能とする操作の遠隔化、自動化がより求められる。

そこで、本研究では建設機械用部品を従来と異なる素材で設計、試作し建設機械のサイズ、性能、機能を維持した軽量化を図る他、建設機械の遠隔操作化、電動化、機能の自動化など新たなシステムを設計、試作し、将来の実用化を目指す。

【成果】

①軽量化研究：1tonクラス油圧ショベル用構成部品を複合材（CFRP）にて設計、試作し性能評価試験を実施。

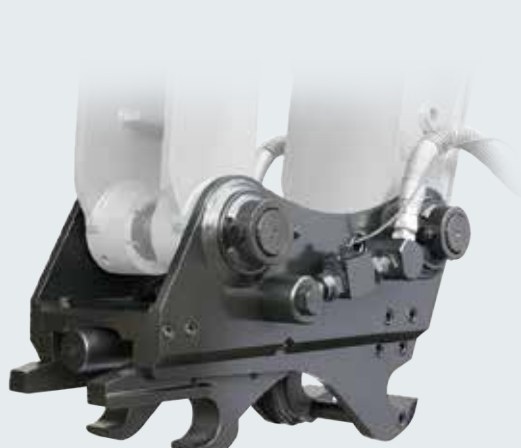
全体重量は鉄製オリジナル油圧ショベルより210kg軽量化し、性能評価試験においても試験中に試作部品の破損や掘削不能といった事は無く、鉄製オリジナル油圧ショベルと同等な性能評価を得た。

②遠隔化・自動化研究：12tonクラス油圧ショベル用アタッチメント着脱装置を設計、試作し性能評価試験を実施。アタッチメント着脱装置により作業者が油圧ショベル運転席から降りる事なくアタッチメントの交換（着脱）が可能となる。交換したアタッチメントの脱落を防止する3種類のオリジナルロック機構を備えており、ロック機構は着脱作業に応じて自動で作動する。これにより作業者の安全性や着脱作業工数削減による作業効率の向上を得た。事業化として研究成果物の量産製品化に成功し販売を開始した。

③電動化：バッテリーユニットシステムを設計、試作し性能評価試験を実施。容易に着脱可能なバッテリー（リチウムイオン電池）を複数搭載し、いずれかのバッテリーを電力源として使用。現在使用中のバッテリーが空になると別の未使用バッテリーへ無瞬断で切り替える事で連続して電力を供給する事が可能となり、同電力の鉛電池を用いた場合と比べて軽量化となった。



複合材製軽量油圧ショベル（実物）



アタッチメント着脱装置（実物）

研究テーマ名 | 持続可能な新たな住宅システムの構築

機関名：ミサワホーム株式会社、株式会社ミサワホーム総合研究所、
大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所

プロジェクト概要

【目的】

持続可能な新たな住宅システムの具体的な目標として“未来住宅”を想定。これを構成する技術要素を提案し、その具体化と有効性を検証する。

また、これら技術要素の中から、有人宇宙探査へ寄与し得る技術を模索する。

【成果】

1. 技術要素の具体化

“未来住宅”を構成する技術要素を、「①建造物の柔軟な拡張・縮小を可能とする工法」、「②専門性を要しない簡易な施工方法」、「③自立型エネルギーシステム」、「④簡易な維持管理システム」に分類、技術要素の具体化を試みた。

2. 南極地域での実証

前述の4つの技術要素は、南極地域における有人観測拠点の構築及び運用時の要求事項にも共通する。さらに、南極同様に極限環境である宇宙での有人探査活動とも多くの共通要素を有する。そこで、各技術要素を具体化させた、南極移動基地ユニット（以下、AMSU）2基を製造し、南極地域にて各技術要素の実証を行った。

3. 各技術要素の実証

①施工省力化と柔軟な可変性

AMSUは、輸送時は櫓に乗せて雪上車で牽引する。観測拠点に到着した後、2基のユニットを接続して観測隊員の生活拠点とする。この形態変更作業を、限られた施工能力下で簡易的に行えるかを検証する。



輸送時はユニット単独

利用時はユニット連結

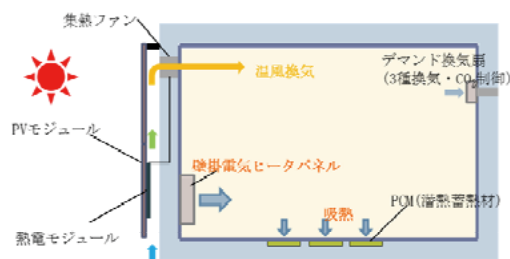
②高度な断熱性能基準

AMSUでは省エネルギー性を確保するため、高

度な気密・断熱性能を必要とする。ユニット接続を乾式工法としながらC値=1.0cm²/m²、Ua値=0.2W/(m²・K)を実現した。

③太陽光を利用した独立エネルギーシステム

AMSUは外部からのエネルギー供給に依存しない独立したエネルギーシステムを有する。これは太陽光エネルギーを多段階に活用し、エネルギー利用効率の向上を目指したものである。



④センサを用いた見守り

AMSUは南極地域観測活動の拠点として利用するため、機能と安全性を維持しなければならない。そこで、機能及び安全性を見守る各種センサを装備し、利用者にユニットの状況をリアルタイムで表示することを可能とした。

4. 南極地域での実証

2019年度に製造したAMSU 2基は、2020年1月に砕氷艦しらせにより南極昭和基地へ上陸した。現在、第61次南極地域観測隊により前述の各技術要素の実証が進められている。

これらの実証結果は、“未来住宅”のみならず宇宙有人探査に向けた有効性評価へも展開する。

これまでの実証の例として、防寒装備（服、手袋など）を装着した状態での作業性実証に基づく、宇宙服装着時の作業性評価などが挙げられる。

今年度の南極地域は雪不足のため、一部の実証スケジュールに遅延が生じているが、引き続き各技術要素の有効性の実証を進める。

砕氷艦しらせへの搭載作業
(2019年11月)昭和基地への陸揚げ
(2020年1月)

研究
テーマ名 | アースオーガ掘削情報による地盤推定のシステム化検討

機関名：日特建設株式会社、立命館大学

プロジェクト概要

【目的】

月・火星においては、地上と同様に拠点構築には地盤調査は不可欠であり、専用機器を使った調査を行えるのが理想である。

しかし、宇宙では使用できるリソースに限りがある場合が多く、他の目的で持っていくアースオーガ（図1）などの機器を活用できれば効果的である。地上においても、既製杭を施工する場合には、施工中のアースオーガによる掘削情報から、支持地盤に達していることを確認することが求められる。そこで、特別な機器を使用せず、アースオーガの掘削情報から地盤特性を逆推定する手法を研究した。これにより、月・火星探査において地盤調査を容易にすると共に、地上においても、掘削時の情報から地盤特性が求まり、コストダウンや工期の短縮が可能となる。

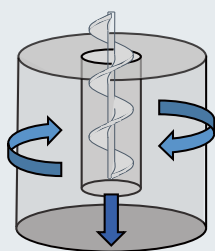


図1 アースオーガ
スクリー型のアースオーガは排出と掘削が同時に行える効率の良い掘削機構である。

【成果】

本課題に先立つアイデア型研究では、スクリーオーガがボアホールを作成する際（掘削時）に地盤より受ける掘削抵抗情報を利用して、間接的に地盤強度を推定することを試みた。その結果、深さ1m程度の任意点で計測可能で安定した推定が可能なアルゴリズムをまとめ、地上の代表的地盤と月の模擬土壌で実験的に検証し有効性を確認した（写真1）。

本課題では、アイデア型研究の成果を発展させ、地上地盤における杭工事へ適用することを目指した。径200～500mm、深さ10～20m程度の杭の掘削を対象とした原位置掘削試験機を製作し（写真2）、この試験機により地盤の性状がわかっている試験地において掘削を行い、地盤性状データと推定値との整合性を確認することにより、有効性の検証を進めた。

地上工事では、地盤の飽和・不飽和条件、砂、粘土等の地質条件、礫分含有量等の条件が、地盤特性の逆推定に影響を与える可能性がある。このため現場検証試験と並行して室内掘削試験も実施した結果、地質条件やオーガ形状の違いが掘削トルクにおよぼす影響が明らかとなり、本推定手法の適用性検証および推定精度の向上に有効な知見が得られた。



写真1 地盤定数の推定手法の検討に使用した掘進制御の可能な大型掘削試験機



写真2 現場検証試験用の原位置掘削試験機



写真3 現場検証試験の状況（杭基礎工事をイメージ）

現場での検証を経て
地上での工事に適用

地盤定数推定手法の応用の流れ

研究テーマ名 効率的なバケット掘削のための地盤情報取得技術

機関名：東北大学、清水建設株式会社

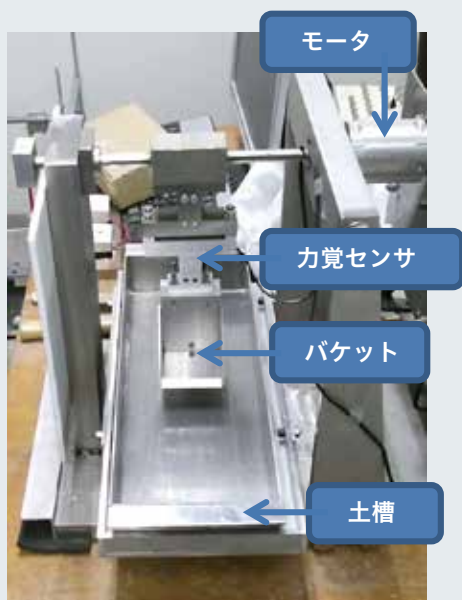
プロジェクト概要

【目的】

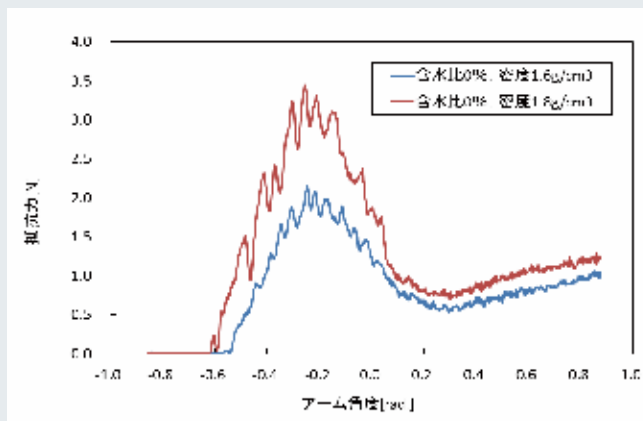
月や火星あるいは地上の無人化施工においては、遠隔や自動操作による地盤の掘削作業が要求される。その場合に効率的な掘削を行うためには、地盤の変化を把握し、適切な掘削手順をリアルタイムに決定することが重要となる。本検討では、バックホウによる効率的な自動掘削を実現するために、地盤の形状変化や掘削抵抗に基づく掘削手順の最適化を図る。

【成果】

- ①模型バックホウによる地盤の掘削抵抗計測実験：土質条件を変化させた供試地盤を作製し、掘削実験を行ってバケットに作用する地盤の掘削抵抗を把握した。
- ②模型バックホウによる掘削後の地盤形状計測実験：砂質土をバックホウで掘削した後の地盤形状を把握するための計測実験を行った。
- ③掘削シミュレーションモデルの構築：模型実験で得られた基礎データを基に、効率的な掘削手順の決定に必要な掘削シミュレーションモデルを構築した。
- ④実機による地盤の掘削実験：実機を用いた地盤の掘削実験を行い、掘削シミュレーションモデルの妥当性を検証した。
- ⑤地上および宇宙への適用性検討：地上の事業化シナリオ作成および宇宙への適用課題の抽出を行った。



模型バックホウによる掘削実験



レゴリスシミュラントを掘削した際の抵抗力



実機を用いた掘削実験

研究テーマ名 | 林業機械システムの自動化による省力化の研究について

機関名：株式会社熊谷組、住友林業株式会社、光洋機械産業株式会社、株式会社加藤製作所

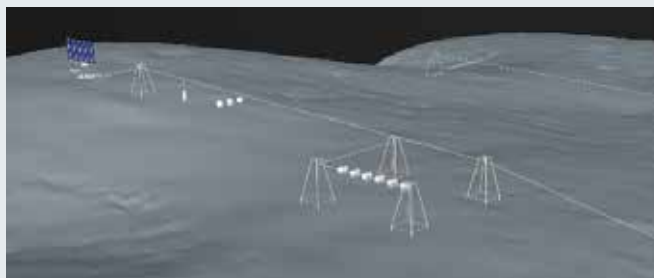
プロジェクト概要

【目的】

我が国の林業分野で発達してきた架線集材システムは、エンジン駆動で手動運転のウインチを用いています。これを高度な制御技術を適用するために電動化し、これにより架線集材システムの自動運転を実現します。さらにこれを月面での構造物や資材の運搬、設置等の運搬システムに応用する研究開発を行いました。

【宇宙への展開】

熱交換が困難な月面では、動力源が固定され吊荷の移動が容易である架線集材システムを採用することにより、繰り返し運搬等を安定して実施することが可能となります。さらに架線集材で使用する搬器は掘削機能を持たせることもできるため、材料採取と同時に貯蔵し、運搬することで、月面での土木作業の効率化を実現します。



月面の架線集材システムの運搬イメージ



月での無人による有人拠点建設のイメージ図 (JAXA 提供)



集材試験



評価実験



新たなコンセプトにもとづいた架線集材システムを試作し、林業現場における評価実験により基本的な自動運転操作を実証しました。本課題で得られた成果をもとに開発を進め、将来的な集材システムの設置の省力化、操作性と安全性の向上、省人化の実現を目指します。

事業化イメージ



株式会社熊谷組

造成工事やダム工事等での伐採作業への適用や、災害復旧対応における急斜面での立木の処理などに活用・展開を進めます。



住友林業株式会社

傾斜地の多い日本の森林で必要な架線集材の労働生産性の向上等を目指します。



光洋機械産業株式会社

自社製品への活用として自然災害への対策に材料や仮設資材他の輸送設備への展開を進めます。



株式会社加藤製作所

新集材システムに適合した製品の開発、および自社林業機械の改良・改善による拡販を進めます。

研究テーマ名 | ロードヘッダ／掘削機械の自律的動作を実現するAI,IoT技術を用いた制御方式研究

機関名：株式会社三井三池製作所

プロジェクト概要

【目的】

自由断面掘削機（ロードヘッダ）は、トンネル閉空間等の危険な作業現場において、オペレータの操作により切削ヘッドの回転と油圧シリンダ機構を作動させ岩盤等を掘削する作業等に用いられる。その際、事前の地質調査とは異なる硬い／軟らかい地質断面が都度出現し掘削ズリ（掘削塊）の状態も変化するため、各状況に適した掘削操作が必要となる。

一方、月面での地形等の事前情報が無く遠隔操作によるタイムラグがある環境下において、周辺状況に応じ自律的・継続的に動作が可能な調査掘削機等の制御方式が求められる。

本研究では環境に応じた自律的な動作・制御を行うシステムの検討にあたり、AI・IoT技術を用いたセンシングシステムの試作、実機データによる異常検知・岩盤分類モデル化、ならびに掘削動作の学習モデル化の検討を行い、将来的に各種ICT技術を活用した「AIロードヘッダ」実現に寄与する各種要素技術の有効性の確認を目的とする。

【成果】

- ①トンネル坑内環境認識システム試作・検証：3次元点群による模擬トンネル壁面認識、AI深層学習を用いた坑内の画像認識システム（精度90%）を構築した。
- ②RHデータ収集・可視化・異常検知検証：センサ群、データロガー、クラウドシステムを連携し、掘削データの収集→可視化→分析（二項分類による異常判断）→RH制御へフィードバックを行うシステムを構築。自動走行停止検証の実施、データサンプリング精度等の知見を得た。
- ③重機の自律的動作に必要なAI学習モデル検討：各種センシングの実データと機械学習手法による岩盤硬度分類モデル化、強化学習手法による掘削機械制御のモデル化を実施した。
- ④自律動作重機制御システムの試作・検証：強化学習（Q学習、深層強化学習）によるRH掘削（経路）計画モデルをシミュレーション上で実装・検証、報酬の与え方によるAI学習効率の改善等を確認した。

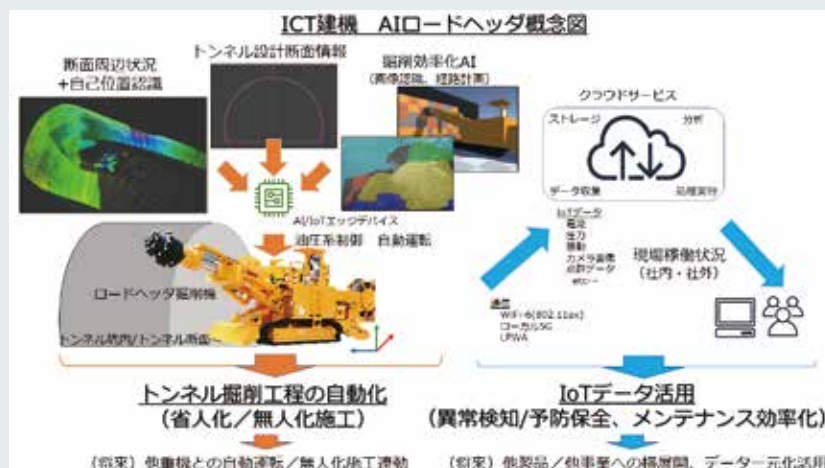


図1. AIロードヘッダ概念図



図2. 深層学習AIによる映像認識例
（左）：赤外線画像（模擬岩盤掘削中）
（右）：領域認識
（黄：掘削塊、緑：トンネル断面）



図3. 模擬トンネル試験場での実機掘削検証



図4. 強化学習AIシミュレーションモデル検証

研究
テーマ名 超広帯域電磁波計測による地下電気物性分布の可視化

機関名：兵庫県立大学、京都大学、名古屋大学、川崎地質株式会社

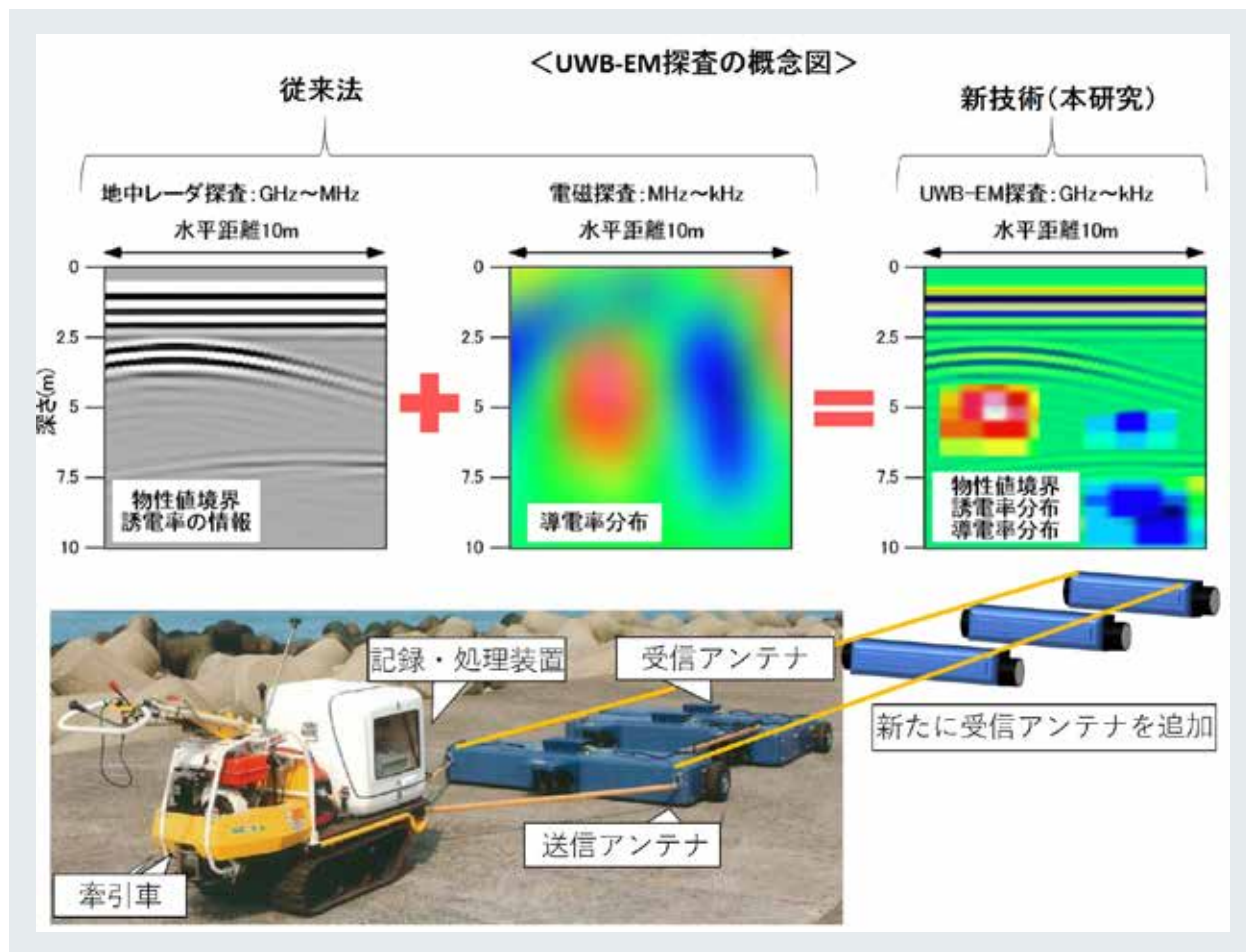
プロジェクト概要

【目的】

地上や地下の利用においては、空洞の有無や規模を事前に高い精度で把握することが必要である。空洞内部と周囲の地層では電気的物性が異なることが知られており、さらに地層の誘電率・導電率は周波数によって数十倍変化するが、空洞中の空気の誘電率・導電率は周波数によらず一定値に近い。この特性に着目すれば、地中の電波の伝搬状態から、空洞の有無や規模を見分けられると期待される。そこで本研究では、超広帯域の電磁波信号を地上で送受信し、周波数毎に振幅・位相特性を計測する。従来は別々の探査法であった地中レーダ探査と電磁探査を統合した新技術を検討し、物性境界の高精度検出と物性値分布の可視化を同時に達成するものである。

【成果】

FDTD法からスペクトルの山谷を特定できれば、空洞厚さを求められることがわかった。さらに、電界の方向成分に着目することで、誘電率情報を推測できる可能性が高いことが示唆されたが、数値計算精度の改善必要性が認められた。また、SARの利用により、レゴリス層の厚さを知ることができる可能性が示唆された。実測としては、土槽による模擬実験を行い、分散曲線の取得、トモグラフィによる毛管帯や水位面のモニタリングを実施し、土層中の地下水分分布を可視化できた。加えて、DOWT理論の構築と1次元波動方程式を用いた数値的検証を実施し、物性パラメータの表現は不連続における波の透過・反射を正しく記述すると結論できた。以上から、物性境界の高精度検出と物性値分布の可視化への足掛かりを得た。



研究テーマ名 電動駆動制御による砂地走破性の向上

機関名：日産自動車株式会社

プロジェクト概要

【目的】

砂漠などの砂地を自動車が走行する際には、砂にタイヤが潜ることで、自動車が脱出困難な状態に陥る可能性がある。このような事態を回避するためには、自動車の細かなアクセル操作によって、タイヤの空転量と前進力を適切に制御しなければならない。

本研究では、電動四輪駆動車の有する高応答かつ高精度な特性を生かすことで、砂地においてタイヤが空転／スタックすることなく走破できる駆動力制御技術を開発する。試験車や月面ローバに提案する制御技術を実装し、砂地における走行試験を通して、制御技術の効果を評価する。この制御技術の確立によって、砂地を走行する市販車両や月面ローバの走破性と走行効率の向上が期待される。

【内容】

①メカニズムの解明

試験車や月面ローバを用いて基礎データを取得し、砂地走行時のタイヤと砂地に働く力学的メカニズムを解明する

②駆動力制御系の構築

量産車開発で培ってきたモータ制御技術と4WD制御技術を活用し、砂地走行に適した駆動力制御系を構築する

③制御の検証

日産テストコースやJAXA宇宙探査実験棟にて、試験車や月面ローバを用いた走行試験を行い、制御効果の検証及び路面環境影響や車両状態の変化に対するロバスト性の検証を行う

①試験車を用いた基礎データ取得、砂地走行時のメカニズム明確化



②モータ制御技術と4WD制御技術を活用した駆動力制御系の構築



③試験車や月面ローバを用い、各環境試験にて制御の検証



日産テストコース

JAXA探査実験棟

NISSAN
MOTOR CORPORATION

市販車両の砂地走破性、走行効率の向上

JAXA Tan'saX



月面ローバの砂地走破性、走行効率の向上

研究
テーマ名 | 力制御機能を有した建設機械の研究開発

機関名：ヤンマーホールディングス株式会社

プロジェクト概要

【目的】

建設機械が自動、自律的に作業を行うためには環境へ及ぼす力や環境から受ける力をうまく扱う必要がある。中でも不意に大きな外力が発生した場合の損傷を回避する「力のいなし」、ツールを対象にあてがいがいながら位置合わせを行う「力のならい」の動作が特に重要である。

従来用いられてきた油圧アクチュエータでは、一定のいなし動作を実現できていたが、制御性能の低さから高精度のならい動作は困難であった。電動モータを使用すれば高精度のならい動作が実現可能であるが、衝撃を受けた際にその力をいやすことができなかった。本研究では、電動モータによる高精度のならい動作を実現しつつ、いなし動作も両立できるアクチュエータ機構とその制御手法を明らかにする。

【内容】

以下のステップに分けて研究を推進する。

①シミュレーション解析

シミュレーションモデルを構築し、シミュレーション上でアクチュエータ構成と制御手法の開発を実施する。

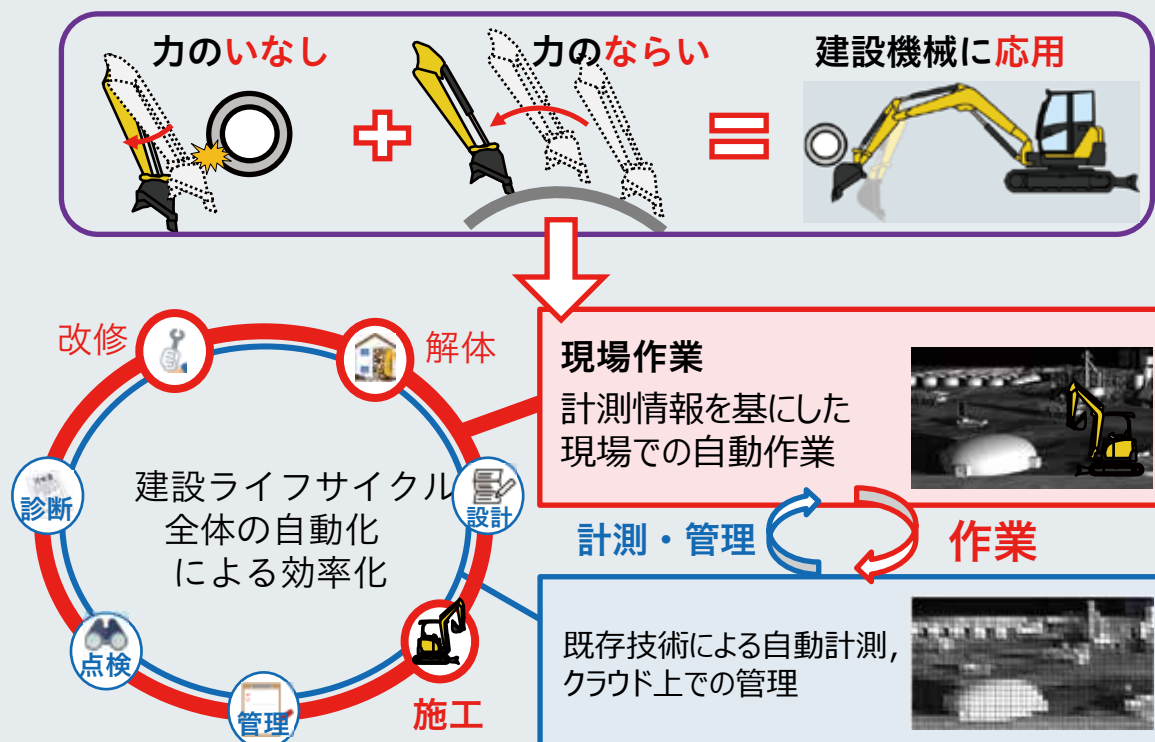
②アクチュエータ単体での実機試験

アクチュエータ単体の試験ベンチを構築し、1関節に対する制御性能の確認を実施する。

③3関節システムでの実機試験

②で構築したシステムを3軸に拡張し、3関節に対する制御性能の確認を実施する。

力のいなし/ならい挙動により、現場で作業を行える自動化技術を実現でき、既存の自動計測、点検技術と組み合わせることにより、ライフサイクル全体の自動化を実現可能となる。



研究テーマ名 カメラ可視光通信を用いた非GNSS利用広域高精度測位

機関名：カシオ計算機株式会社

プロジェクト概要

【目的】

宇宙空間においてVisual SLAM等の特徴点を用いた画像認識のアプローチは特徴が捉え難い場面が多く、それ単体で測位を行う事が難しい。

そこで本研究では自社が保有する可視光通信技術(Picalico)の応用により、長距離測位における運用指標の確立や測位特性などの検証を実施し月面における測位技術としての有効性評価を行う。

研究の基盤となるPicalicoは下図に示すようにLED送信機から送信されるRGBの変化パターンを信号とし、カメラで撮影することでIDを受信する技術である。画角内に捉えたLED送信機からIDと画像上座標を捉えることが可能であり、IDが確定した特徴点として軽処理負荷で高精度な測位を実現している。

今後は屋外や広域エリアへ対象を広げ、将来的に月面環境のようなオフロード環境でも高精度測位を可能にするようなPicalicoの基本性能向上及び、アルゴリズム開発を行うことを予定している。

【内容】

①基本測位動作実証

屋内においてローバー等にカメラを装着し、自由移動測位の実証試験を行う。基本動作による精度目標を達成すること、また種々の条件を変更して測定を行い、精度特性や移動速度限界などの特性を得る。

②広域・屋外測位動作実証

広域・屋外のエリアにおいて300m以上の距離を確保し、測位動作の実働検証を行う。

③まとめ

研究項目の進捗を把握し、下記に挙げるような課題に対して必要と判断した場合には実施機関で協議して進行を調整する。

- ・広域/屋外における挙動特性の把握
 - ・kmオーダーでの範囲への対応
 - ・今後の改善
- (ex 3 自由度 (平面拘束) → 6 自由度への課題抽出)

Picalicoを用いた測位



※工場・倉庫のフィールドで製品化された例

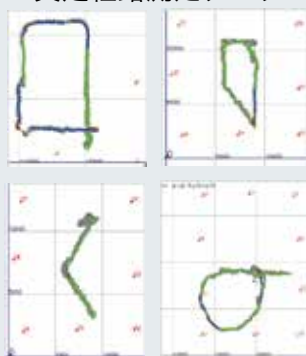
情報送信イメージ



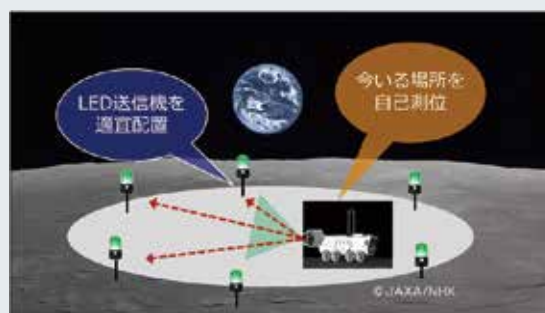
カメラ設置イメージ



実走経路測定データ



宇宙利用の構想



研究テーマ名 | 小型2次元イメージング分光器の開発による水氷センシング技術の研究

機関名：株式会社センテナリア、大阪大学

プロジェクト概要

【目的】

既存の2次元イメージング分光器には各種方式の機種が存在するが、小型・軽量化には、その方式ゆえの限界がある。本研究においては、その制約条件の少ない方式を用いて、大幅な小型・軽量化を図った機種を開発することが大きな目的である。28年度はそのための光学系の最適化、駆動方式の検討、検出器の調査、一部光学部品の最適設計と試作、29年度は試作機を製作し、性能試験および水氷センシングの試行試験を行った。また、鉱物に微量の霜をつけて観察し、氷検出に必要な分光カメラのシグナルノイズ比性能を見積もった。

以上により、本方式の製作および性能実現の目処を得た。

【成果】

- ①原理確認モデルを用いて水、氷の反射データを計測して原理確認を行うとともに試作機を設計、製作し、野外での試験データをとることを目標とした。
- ②試作機を写真1に、試作機仕様表を表1に示した。
- ③この試作機を用いて、設計仕様の評価を行った。その結果の内、光量試験、波長校正の結果を図1、図2に示す。
- ④試作機の性能としては所期の目的を達成できたが、試験車両搭載が野外使用という条件であったため、防水機能などを追加したために、サイズが大きくなったことに伴い重量が増えた。
- ⑤月面の永久影領域の環境を模して、鉱物に微量の霜をつけて観察し、氷検出に必要な分光カメラのシグナルノイズ比性能を見積もり、低温下では鉱物の近赤外吸収スペクトルの形状が変化することも確認され、温度によるスペクトル変化の過去研究と整合するデータを出すことができた。図3にその結果を示す。
- ⑥積雪の観測画像の一例を図4に示した。

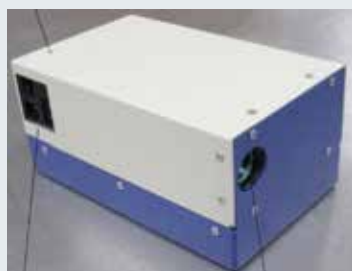


写真1 試作機

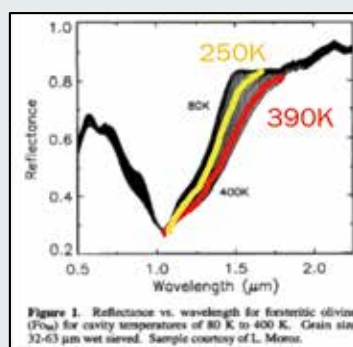


図3

温度によるカンラン石の反射スペクトル変化の先行研究 (Hinrichs et al., 1999) に今回の実験のカンラン石のデータ (赤: 390K、黄: 250K) のデータを重ねたもの。

表1 試作機仕様

項目	仕様値
焦点距離	25mm
分光器F値	F2.5
光学系F値	F62.5
観測波長範囲	900nm~1700nm
波長分解能	約25nm
波長精度	±5nm
作動距離	1m
観測範囲	200mm×200mm
サイズ	163mm(d)×99mm(w)×75mm(h)
重量	1.5kg
駆動電力	10W
駆動ソフト	PCによるUSB接続にて駆動
使用環境	温度: -20℃~40℃、湿度: 20% ~ 80% (結露無き事)
その他	防水機能はあるが、水没は不可

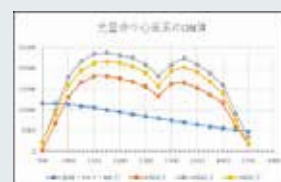


図1 光量試験結果

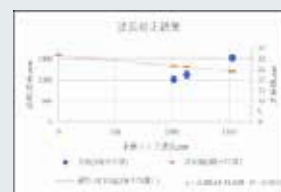


図2 波長校正結果

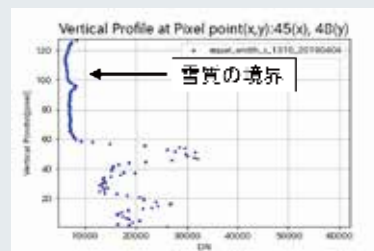
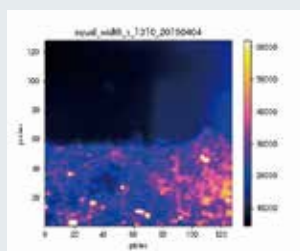


図4 積雪の観測画像の一例 左:出力値毎に色付けした観測画像 右:画素値の追直プロファイル (2019年 雪氷研究大会 山形大会で発表)

研究テーマ名 液体を使わない建設資材の現地生産技術の研究

機関名：東急建設株式会社、東京都市大学、日東製網株式会社

プロジェクト概要

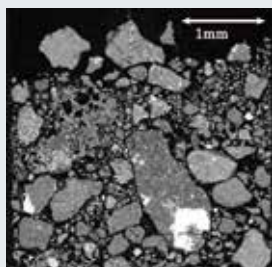
【目的】

遠心成型技術やジオテキスタイル技術を用いることによって、水などの液体を使わずに地上の土質原料や月の砂を締固めて固化させる技術の検討を行う。各種の土質原料や繊維補強材を使用した場合の固化の原理ならびに実現性を明らかにするとともに、ブロック状や土のう状の建設資材としての適用性を評価する。

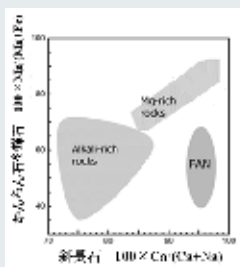
【成果】

- ①土質原料および繊維補強材の選定：圧縮による破碎性、廃棄物としての消費需要などを考慮して、検討用の土質原料を選定した。また、圧縮固化材料の補強機能を有し、かつ月面等の過酷な環境においても適用可能な繊維補強材（材質、形状）を選定した。
- ②圧縮固化・強度試験：種々の土質原料単体あるいは各種繊維補強材を混入させた試料に、最大100MPaの一次元圧縮応力を加え、固化の状況、固化に必要な圧縮応力ならびに一軸圧縮強度等を調べた。
- ③遠心成型による固化体の試作：遠心機を用いて土質原料を固化させ、その特性を把握するとともに、連続的な自動化生産方法の検討を行った。
- ④網状補強材の検討：網状の補強材で圧縮固化した材料やその組立構造体を覆い、構造体としての形状や強度の維持を可能とする方法の検討を行った。

月面の砂



写真引用：松島亘志
月面表層土粒子の高精細X線CT画像の取得とその利用



図引用：荒井朋子
かぐやデータと月試料の融合研究が拓く月科学

Median size: $70\mu\text{m}$ (soil)。Meteorite Impactにより高温高压で溶融・粉碎されたため、ガラス質が多い。平地部では数m、クレーター部で10数mの厚さで堆積する。その下は岩盤。主な成分：Si, Al, Ca, Mg, Fe



Mission!!
Regolithを使用して
Lunar base を建設

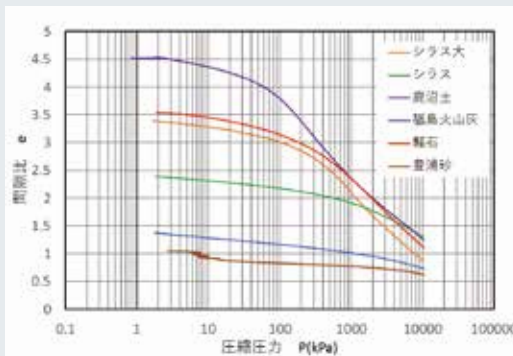
Regolith and short fibers are mixed and compressed using centrifugal device

圧縮試験

圧縮試験の材料



シラス大 鹿沼土 福岡火山灰 鹿児島軽石 シラス 豊浦砂



1次元圧縮試験で、固結状態を確認

Compressive strength of the regolith simulant is investigated

研究
テーマ名 現地資源からの建設資材の製造システム

機関名：三菱マテリアル株式会社、北海道大学、山口大学、株式会社大林組、有人宇宙システム株式会社、株式会社IHI、株式会社IHIエアロスペース

プロジェクト概要

【目的】

ジオポリマー（Geopolymer：GP）の原料物質（アルカリ、ケイ酸）を地球表層の土壌や月面レゴリス（現地資源）から抽出し、その固化体（以下GP固化体）を製造するプロセス、ならびに現地資源から建設資材としての焼結材を迅速製造・利用するプロセスにおける必要エネルギーを導出する。これを元に、地球の一日あたり、1,000 kg以上の月レゴリスを処理し、月面で建設資材を創製するための低エネルギーな手法を提案する。本手法により、従来のコンクリートやセメントに比べてCO₂排出を大幅に削減でき、かつ高強度な固化体が作製できる。これらの固化体の性能を活かせる市場の調査および、新たな固化体製法に基づく事業化案の策定を行う。

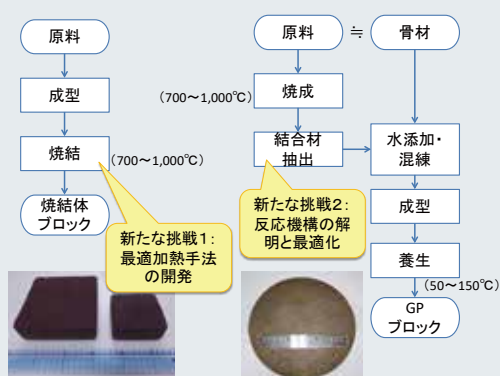
【成果】

- ①原料の調査・選定（粘土、シラス、模擬月土、スラグ、スラッジ）を行った。
- ②DSC（示差走査熱量分析）およびXRF（蛍光X線分析）、XRD（X線回折）およびMELTS解析等による原料の溶融特性把握を行った。
- ③GP-A固化試験：焼成した各種原料に水を加え、粒子界面に溶出したアルカリによって原料自身を固化させる手法の検討を行った。
- ④GP-B固化試験：焼成原料から溶脱したアルカリ溶液を用いて新たな原料を固化させる手法の検討を行った。
- ⑤焼結材熱特性試験：焼結材内部温度計測ならびに各種焼結温度プロファイルの適用による低エネルギー焼結手法の検討を行った。
- ⑥固化体の物性総括と製造所要エネルギーの算定を行った。
- ⑦新たな固化製法の展開と事業化に向けた検討を行った。

焼結、ジオポリマー（GP）固化体、二つの建設資材

焼結体：粉体を型枠に入れ、高温（700～900℃）で焼結・固化することで得られる固型化物（例）レンガ、土器
GP：ローマセメントとして知られる人工岩石系材料。結合材（フィラー）と骨材を脱水縮合反応により固化
例）ローマのパンテオンやコロッセオ

製造プロセス案（例）



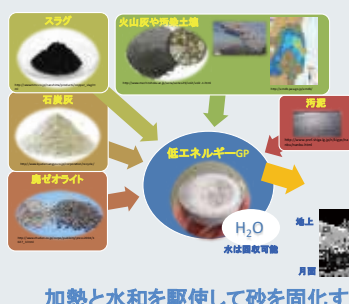
焼結体とジオポリマー固化体のメリット・デメリット及び研究対象

	焼結体	ジオポリマー固化体
メリット	●水を使うコンクリートに比べ工程が簡単 ●現地材料のみで製造可能	●製造工程におけるCO₂排出が少ない ●強度、耐酸アルカリ性、耐熱性に優れる ●長寿命
デメリット	●高温処理が必要 ●厚いブロックでは時間がかかる。	●少量の水が必要 ●焼結材と比較して工程が複雑
研究対象	●製造の最低温度（エネルギー）の測定 ●焼結時間が最適なブロック厚の算出	●合理的な新規GP製造手法の開発 ●製造の最低温度（エネルギー）の測定

候補原料と想定用途

原料	建設資材の用途	焼結体	GP固化体
レゴリス・シミュラント	月面基地	○	○
粘土（ベントナイトなど）	発展途上国レンガ	○	○
シラス（火山灰）			○
スラグ廃材（銅スラグ）	一般建設用		○
スラッジ（浄水汚泥）		○	○

現地資源や
廃材安定固化
そして月面拠点建設



現地資源のみを
原料とする建築
資材製造方法を
開発する

極限環境での長期
安心安全居住を
可能にする

研究
テーマ名 | 土砂や火山灰の形成技術の研究

機関名：モルタルマジック株式会社

プロジェクト概要

【目的】

提案者が現在保有する「紛体を自由な形に形成し固める技術」の適用範囲を拡大し、新たな市場の開拓を目指す。具体的には、砂や火山灰を用いて作製した形成物の実用的な展開先ならびに月面における適用性を探るとともに、その形成物に要求される性能を確保するための新しい形成技術を提案する。

【成果】

- ①砂および火山灰形成物の適用検討：形成物の実用的な展開先の調査ならびに展開に必要な形成物の目標性能を明らかにした。
- ②形成物の基本性能確認：基材（砂・火山灰等）の安定的な調達方法を調査し、それらの基本的な性質（化学組成、粒子密度、粒度等）の把握を行った。
- ③各基材について従来のバインダー混合比を変えた形成物を作製し、それらの強度特性を把握を行った。
- ④形成物の改良研究：実用展開に必要な形成物の性能を満たすバインダーを調査・調達し、形成物を試作しその性能を評価した。
- ⑤砂および火山灰形成物の地上における新たな用途製品を提案するとともに、宇宙での適用可能性について検討した。

基本性能試験

- ①バインダ材の混入率を変えてベース試験体を形成
- ②ベース試験体表層に各種トップコートを塗布し特性を把握



簡易強度試験装置



強度試験後の試験体

研究
テーマ名

火成岩あるいは粘土鉱物を主体とする土質材料からの建設材料の作製

機関名：株式会社大林組

プロジェクト概要

【目的】

- ①土質原料および繊維補強材の選定：圧縮による破碎性、廃棄物としての消費需要などを考慮して、検討用の土質原料を選定する。また、圧縮固化材料の補強機能を有し、かつ月面等の過酷な環境においても適用可能な繊維補強材（材質、形状）を選定する
- ②圧縮固化・強度試験：種々の土質原料単体あるいは各種繊維補強材を混入させた試料に、最大100MPaの一次元圧縮応力を加え、固化の状況、固化に必要な圧縮応力ならびに一軸圧縮強度等を把握する
- ③遠心成型による固化体の試作：遠心機を用いて土質原料を固化させ、その特性を把握するとともに、連続的な自動化生産方法の検討を行う
- ④網状補強材の検討：網状の補強材で圧縮固化した材料やその組立構造体を覆い、構造体としての形状や強度の維持を可能とする方法の検討を行う。

【成果】

- ①土質材料調達・調整：粘土鉱物、汚泥廃棄物、模擬月土（シミュラント）等の原料を入手し、粒度等の調整を行った。
- ②マイクロ波溶融技術の研究：模擬月土および汚泥廃棄物のマイクロ波による加熱特性を調べた。加熱後試料の外観ならびに一軸圧縮強度と、投入積算電力を調べた。
- ③コールドプレス技術の研究：粘土鉱物、玄武岩、汚泥廃棄物ならびに水分を種々の混合比で調整した材料を一軸載荷して成型し、さらに乾燥養生を行って固化試料を作製する。固化試料の外観ならびに一軸圧縮強度を把握し、最適な混合比、養生条件等を特定した。
- ④地上における廃棄物固化ならびに月・火星における利用のための技術およびコストの最適化についての検討を行った。



作製例：マイクロ波利用（左）、コールドプレス法利用（右）

コールドプレス法手順



A. 原料混合



B. 容器への充填



C. 圧縮後 容器からの取り出し

研究テーマ名 | 月土壤の水素還元システムの構築 —低品位原料の工業的利用を目指して—

機関名：九州大学、若狭湾エネルギー研究センター、ヒロセ・ユニエンス株式会社

プロジェクト概要

【目的】

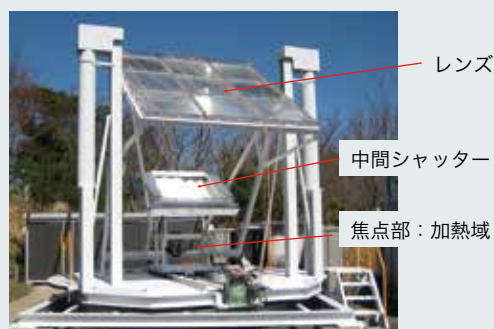
月土壤などの低品位の酸化物原料を還元対象とした反応炉の設計と反応条件の最適化を行い、還元が難しい酸化物からの金属製造プロセスの工業的応用を検討する。また、太陽炉を用いた本プロセスの実現性、および地上では今までには用いられることがなかった低品位の酸化物原料や難還元性の酸化物原料を用いた金属製造プロセスの工業化を検討する。

【成果】

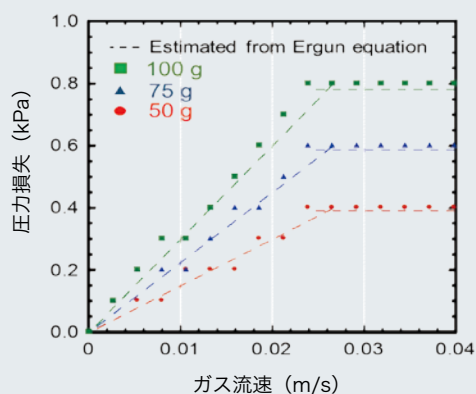
- ①流動層による模擬月土の水素還元を行い、その流動・反応条件の最適化を検討した。
- ②太陽炉を用いた固定層反応炉では、短時間で目標温度まで到達する能力が実証された。流動層反応炉に向けた受光部や伝熱構造の設計指針を得た。
- ③流動層反応炉における低品位チタニアの水素還元実験により、酸素欠損型チタニアの作製に成功した。
- ④実験成果をもとに1,000 kg/dayの原料処理を行う場合の反応炉の設計と必要なエネルギー量を見積もった。



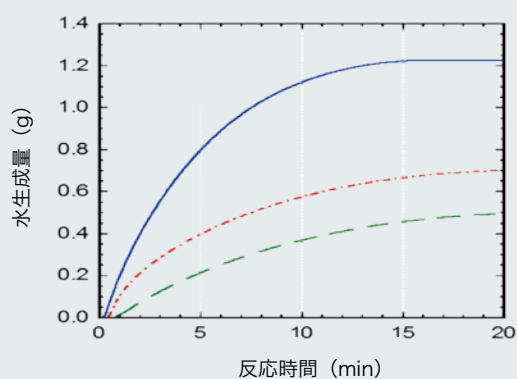
流動層水素還元システム



10 kW 大型太陽炉



流動化実験結果



水素還元反応例

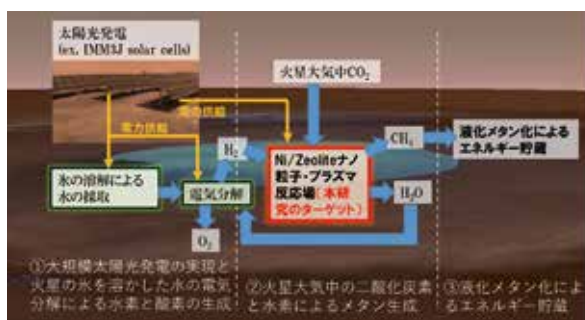
研究テーマ名 | プラズマ・触媒ナノ粒子複合反応場によるCO₂資源化技術の開発

機関名：九州大学

プロジェクト概要

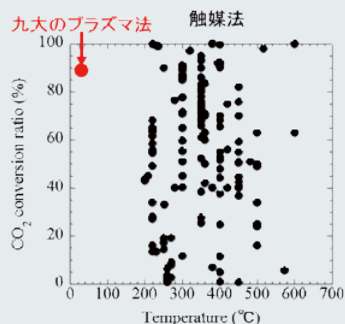
【目的】

火星に存在するCO₂とH₂OからCH₄への自立型エネルギー固定化実現を最終目標とする本研究は、その中核技術となる火星大気中の二酸化炭素と水素によるメタン生成について、地上実験による製造プロセスの原理検証を研究目的とする。

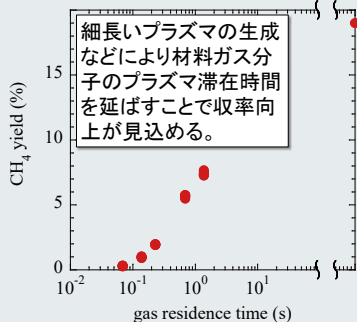


【成果】

- ①Ni/Zeliteナノ粒子とプラズマの相互作用によるCH₄変換機構解明：プラズマパラメータやナノ粒子物性に対するCO₂分解からCH₄への分解反応プロセスを定量的に明らかにした。
- ②実用的に意味がある高スループット、高変換効率の実現：プラズマと触媒の併用によるCH₄の収率向上を実現。
- ③火星におけるCO₂資源化プラントの概念検討：CO₂資源化プラントに必要なシステム要求を明確化し、CO₂資源化プラントの概念検討を行った。

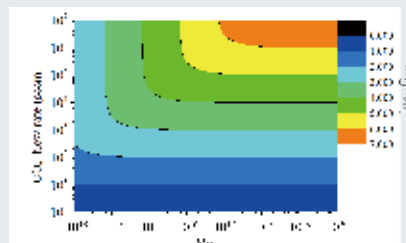
【成果① Ni/Zeliteナノ粒子とプラズマの相互作用によるCH₄変換機構解明】

- 従来の触媒法では実現出来ない、室温でCO₂変換率90%達成（上図）。
- CO₂メタン化プロセスの理論的検討に必須の電子衝突解離定数を初めて決定した。



【成果②実用的に意味がある高スループット、高変換効率の実現】

- 火星大気圧条件下において、プラズマと触媒の併用によるCH₄収率19%達成（上図）。
- 触媒劣化なしに長時間運転の可能性を示すとともに・高スループット高変換効率の実現可能性を示した。



1日に原料1000kgをCH₄に変換した場合のCH₄生成速度 $G_{CH_4}=3 \times 10^5 \text{ cc/min}$
今後のエネルギー効率向上により、達成可能

【成果③火星におけるCO₂資源化プラントの概念検討】

- 1日に1000kgの原料を変換するために必要なプラズマ体積は10m³であることを理論計算より明らかにした（上図）。

研究テーマ名 | ガス中微量水分計の小型・軽量・ロバスト化技術の研究

機関名：神栄テクノロジー 株式会社、産業技術総合研究所、大阪大学、茨城大学、鹿児島大学

プロジェクト概要

【目的】

月や火星探査で水を現地調達し利用可能とする事が考えられており、月探査上で水氷を含む揮発性物質の分布や濃度を知ることが最優先項目とされている。そのため、その要求を満たすセンサが求められている。地上用途ではppbレベル迄の微量ガス測定の要求があり、半導体／有機半導体などの先端プロセス現場ではこのような微量水分領域での小型センサが必要とされている。

本研究では、上記のような様々な分野で必要とされている、小型軽量（重量3kg、サイズ200mm×200mm×200mm程度）で高感度・高精度、かつロバスト性を有するガスセンサーの実現を目指す。

【成果】

重量2.7kg, サイズ100mm×100mm×260mmの小型軽量な水分計を実現した。体積比は目標の33%まで削減できた。世界最小の小型を実現しながら、最高検出感度0.8ppbから20ppmの幅広い測定レンジを実現した。懸念だったロバスト性についても、固定軸を工夫することで振動試験をクリアし、半導体製造ライン・リチウムイオン電池生産ライン・ガス精製プラントなどの高感度でリアルタイム水分計が必要とされる市場への投入を念頭に、製品化の目処がたった。月や小惑星などの水や水同位体計測などの観測装置にも応用が期待される。

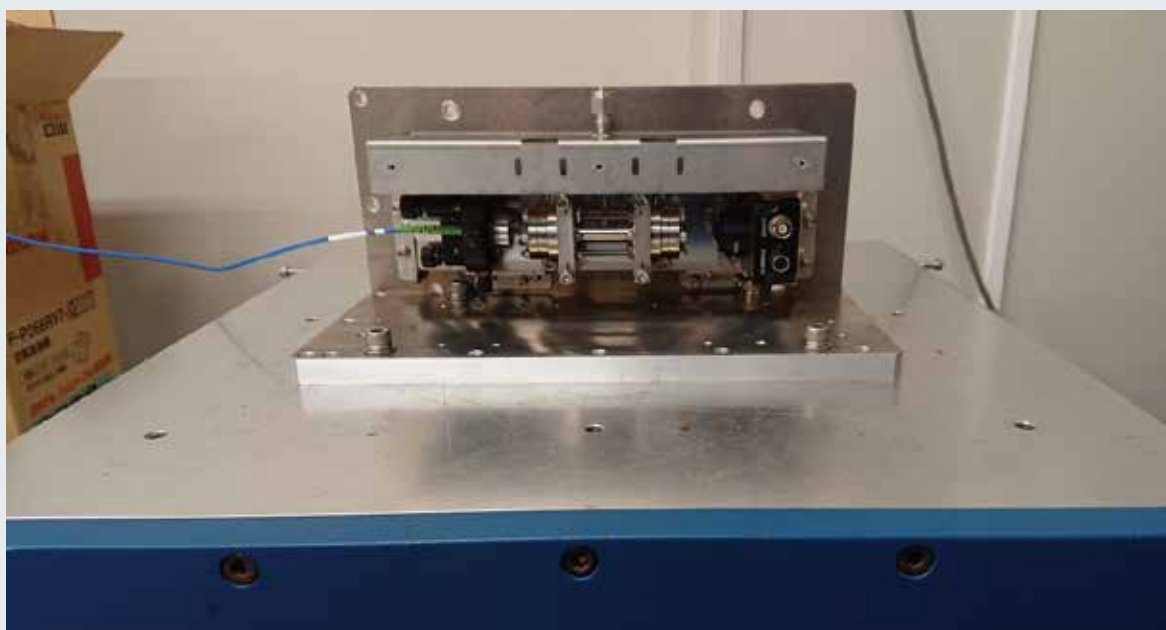


図 振動試験中の水分計

研究
テーマ名 | マイクロ波凍結乾燥（氷から水をつくる技術）

機関名：マイクロ波化学株式会社、東京工業大学

プロジェクト概要

【目的】

月や火星の地下に存在する水氷において水を効率的に分離する技術として、マイクロ波による凍結乾燥技術の応用を提案する。伝熱では無く、直接氷状態の水分子にマイクロ波を相互作用させることが重要である。物質のマイクロ波吸収能(ϵ'')は固有値であり、表土と氷が混ざった状態において、 ϵ'' (表土成分) < ϵ'' (氷) の周波数を選定すれば、マイクロ波や高周波により氷に選択的にエネルギーを伝達できる。

さらに、半導体型マイクロ波発振器により複数地点から位相を制御したマイクロ波を照射することにより、ある深度で電界強度が最大となる設計が可能となる。つまり、氷存在する領域に選択的にマイクロ波を照射できる。

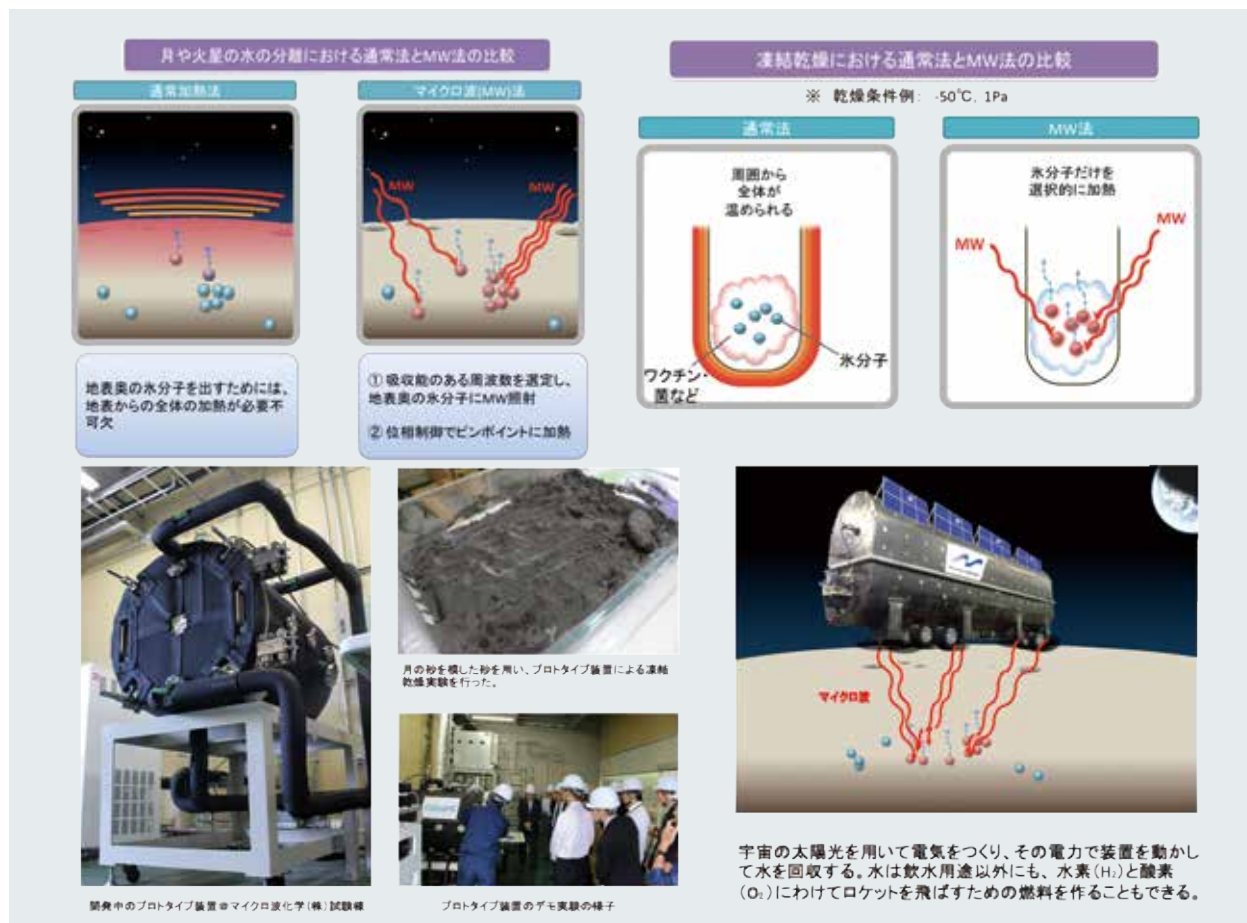
本コア技術を地球においてマイクロ波凍結乾燥技術として事業化する。

【成果】

マイクロ波の投入エネルギーと物質、系内、コールドトラップの温度変化から条件を最適化した。系内の温度変化を観察しつつ、マイクロ波のエネルギー投入量や、排気速度を調整することによって適切な乾燥が行えるようになった。

電磁波による氷融解あるいは束縛水からの水回収系の原理を解明した。水、含水月レゴリス模擬砂、NaCl水溶液を対象として複素誘電率測定、マイクロ波・高周波照射下における凍結乾燥、in situ ラマン測定を行い、誘電特性、乾燥特性、水の構造変化から水分子運動性や昇温特性を明らかにした。

さらに、1m級の大きなマイクロ波凍結乾燥キャビティを作成し、内部で-50℃、1 Paを達成することが出来た。位相制御試験に依りては2つのマイクロ波発振源の位相差によって、加熱される水の位置が異なることを確認した。



研究テーマ名 | 植物生産へ適用可能な高性能人工構造タンパク質素材の開発

機関名：Spiber株式会社

プロジェクト概要

【目的】

構造タンパク質材料「ブリュード・プロテイン™」は、多様な機能や特性を有するだけでなく、炭素や窒素等の元素を豊富に含み、かつバイオプロセスにより分解可能な高分子材料である。長期ビジョンとして月面での植物生産が検討される中、植物の生育に必要な肥料の輸送コストが課題となっている。本プロジェクトでは、窒素の月面への効率的輸送を実現するため、月面探査機部品や月に輸送する各種物資等の一部を構造タンパク質材料に代替することを目指す。この目的のため、探査機等に採用可能な物性的要求仕様の抽出、及び月面でのバイオプロセスによる肥料化を実現する新規タンパク質材料の開発に取り組む。

【成果】

高性能タンパク質材料の宇宙領域における利用を検討する目的で下記①②の評価試験を実施し、同結果を持って宇宙航空部品等へ実装可能な製品提案を行った。

①タンパク質材料の宇宙航空部品としての性能評価規格に準拠した評価試験を実施し、構造タンパク質材料の各種機械的特性、難燃性、及びオフガス特性等を評価した。

難燃性においては、樹脂・テキスタイル・フィルムそれぞれで高評価獲得。オフガステストにおいても、樹脂で最高判定基準、またテキスタイル・フィルムにおいても高評価を得た。

②タンパク質材料の植物生産における肥料としての性能は、タンパク質材料が高い分解率を示す環境条件の確立、及び同タンパク質分解物が植物生育に及ぼす影響を評価した。生分解性試験の結果、植物の育成に必要な化合物が生成されることが確認できた。様々な機能や特性を付与できる素材でありながら、生分解性に優れ、さらに植物育成の肥料としての再利用が期待できる。

シーズ技術
(タンパク質素材)

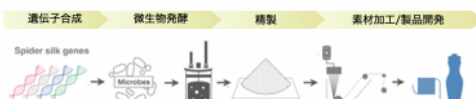
20種類のアミノ酸の組み合わせにより多種多様な素材や特性を生み出すことが可能なタンパク質。アパレル分野における脱石油・脱アニマル、輸送分野における軽量化など、様々な産業のニーズに対して、大きな役割を果たせる可能性を秘めている。Spiber社ではこのようなタンパク質素材を普及させるべく、低コスト大量生産技術、及び素材加工技術の開発に取り組んでいる。

量産工場完成イメージ図



タイ国ラヨーン県に建設中の大規模構造タンパク質生産設備の完成イメージ図。年間最大数億トン規模の生産を見込んでおり、2021年以内に操業予定。

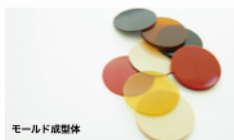
人工タンパク質素材の生産プロセス一例



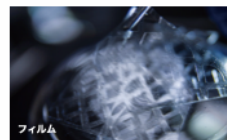
人工タンパク質を加工してできた素材の一例



繊維・テキスタイル



モールド成型体



フィルム

JAXAとの連携

人工タンパク質素材の特殊物性評価、生分解性評価、及び課題抽出

将来の展望

宇宙分野への貢献



Aerospace



Apparel



Automotive

一般社会への普及



Construction



Robotics



Sports



Furniture



Medical

研究テーマ名 袋培養技術を活用した病虫害フリーでかつ緊急時バックアップも可能な農場システムの研究

機関名：株式会社竹中工務店、キリン株式会社、千葉大学、東京理科大学

プロジェクト概要

【目的】

月面農場では、大規模安定作物生産のための病虫害防止と緊急時食料バックアップへの対応が必要である。加えて、ペイロードの低減には構築物建設資材低減、運用時のエネルギー低減が必要となる。これらを実現するためには植物組織培養法による袋培養技術の活用が有効であり、同じ袋培養設備が居住フェーズに合わせて小ロット栽培とウイルスフリー苗供給の両機能を兼ね備えることが期待できる。そこで、袋培養技術による作物の栽培可能性について実証的確認を行うことを目的とした。

【成果】

栄養成分評価、物質収支評価、低圧環境栽培や水循環などペイロード低減策の成立性の基礎的確認を行った。さらにこれらを踏まえた月面農場モデルのイメージ構築を行った。作物として、ビタミンC源としてのレタスの植物体、炭水化物源となるジャガイモの種イモ、タンパク質源となるダイズ苗を対象とした。



袋培養のイメージ



低圧栽培の考え方



低圧栽培試験チャンバー



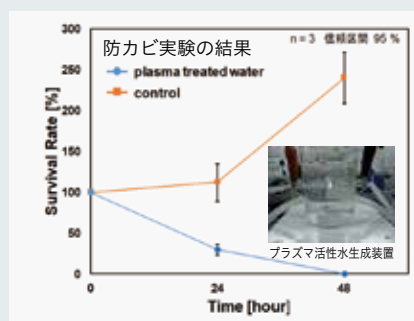
レタス生育状況（低圧）



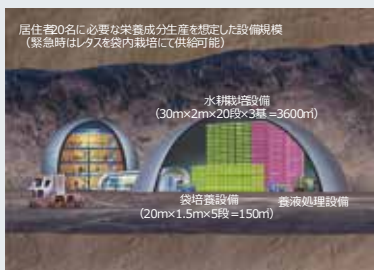
ジャガイモマイクロチューバー形成状況



ダイズ不定胚生育状況（低圧）
※本試験に使用した細胞は、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 次世代作物開発研究センターから研究試料として提供いただいたものです



プラズマ活性水による養液処理の可能性検討



20名の食料を供給するための農場モデル

研究テーマ名 穀物増産を実現する種子へのプラズマ大量処理技術開発

機関名：九州大学、ケニックス株式会社

プロジェクト概要

【目的】

長期有人月滞在におけるカロリー供給を月面で実現する基幹技術を創成するとともに、日本における農業生産性向上に資する技術に発展させることを目的とする本研究では、「穀物を対象とした、発芽・成長促進による穀物増産技術」について検討する。

提案代表者は近年、モデル植物であるシロイヌナズナ種子への処理による、11%の収穫時期短縮と56%の収穫量増加効果を見出した。本研究では、対象をイネとジャガイモへ展開し、発芽・成長促進効果の最適化と大量処理実現のための問題点を明らかにしてこれを解決すると共に、得られた知見を基に大量処理装置を開発する。

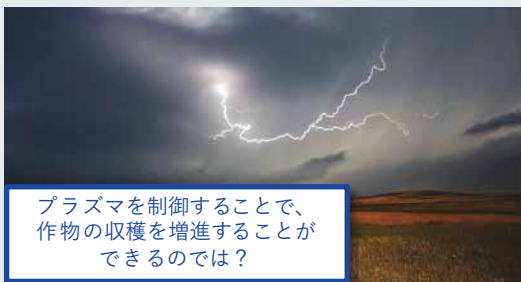
【成果】

本研究では以下の内容について検討を行う。

- ①イネ・ジャガイモへの成長促進効果検討と条件最適化
提案代表者が開発したコンビナトリアル照射法を用いて照射効果の検討と、照射条件の最適化を行う。コンビナトリアル法では、発生した活性酸素窒素種（RONS）やイオンの照射量を空間的に変化させて、一度の実験で様々な条件で処理可能である。イネの種子に対してコンビナトリアル照射法を適用して照射条件の最適化を短期間で実現する。
- ②種子の大量処理技術開発
1時間当たりイネの種子で5kgの自動種子処理を実現する。
- ③フィールドでの実証試験
圃場での栽培における課題の抽出と、収穫量増加、収穫時期短縮を確認する。

1. プラズマ技術の農業応用

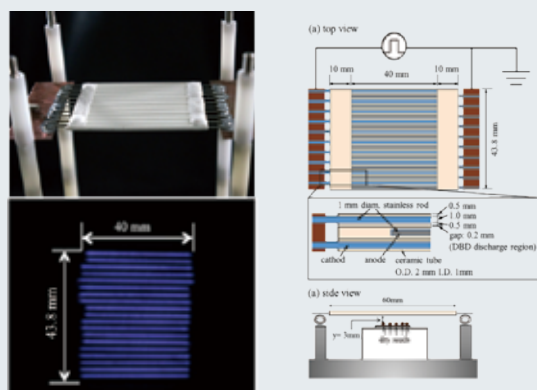
古来、雷（自然界のプラズマ）がよく起きた年は稲の実りが良いといわれていた。雷の別称は、稲妻。



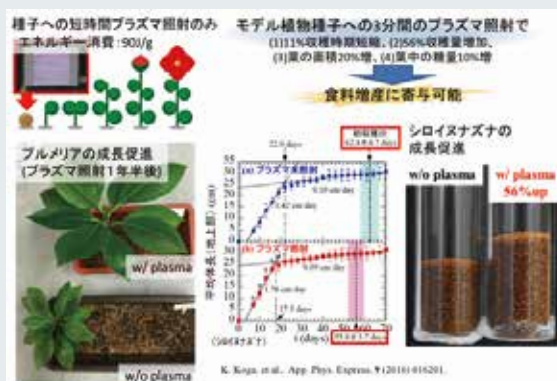
プラズマを制御することで、作物の収穫を増進することができるのでは？

2. プラズマ発生装置の開発

誘電体バリア放電で大気中で非平衡プラズマを生成し、種子へのプラズマ照射を実現した。



3. モデル植物でのプラズマ成長促進



4. フィールドでの実証

農家の方の協力でフィールド実験を遂行しています。



研究テーマ名 月面農場における高カロリー作物栽培システムの要素技術開発

機関名：千代田化工建設株式会社、メビオール株式会社

プロジェクト概要

【目的】

月面居住区では、容易に確保可能な物質以外は、可能な限り循環使用が必要とされる。植物は光合成により居住者が排出する二酸化炭素を呼吸に必要な酸素に変えるだけでなく、居住者のエネルギー源となることから、月面での物質循環において大きな役割を担うことが予想される。

本研究では、月面農場を想定して月レゴリスを用い、高栄養植物であるアメリカホドの栽培検討を行うとともに、植物工場や砂漠、荒地の農地化など地上への応用も目指し、研究を行った。また、特に重要な物質である水・炭酸ガスの損出量を最小とする栽培システムの構築を目指して検討を行った。

【成果】

本研究では、以下の検討及び試験を実施した。

① アメリカホド栽培技術開発

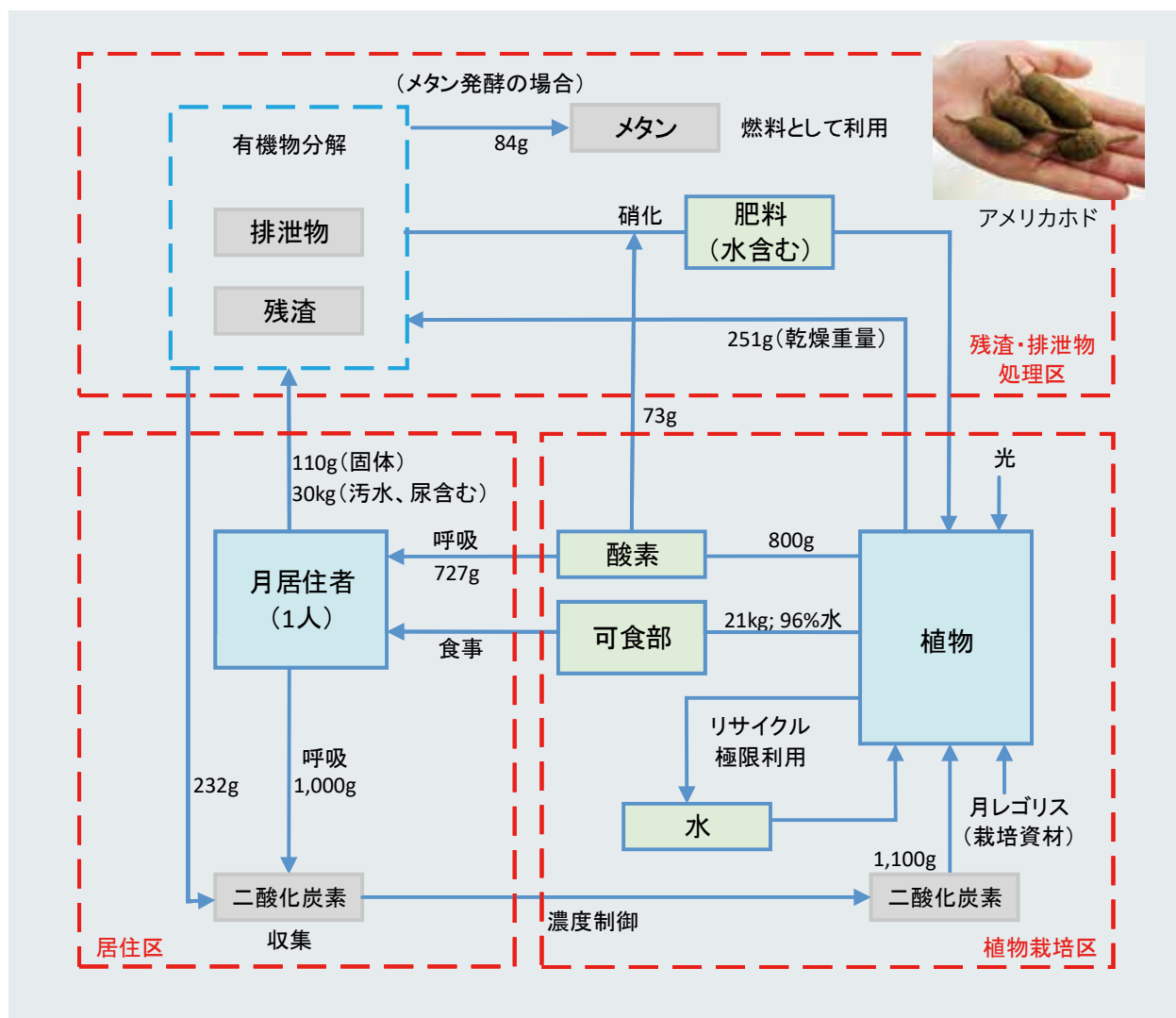
ラボスケールでのアメリカホドの栽培方法の検討、及び栽培実証を行った。その結果、月レゴリス模擬品を用い、アメリカホドが生育することを確認した。

② 水再利用システムの検討

リーフレタスに対し、既知の生育阻害物質、及び細菌類の影響について調査した結果、どちらもほとんど影響が見られないことを確認した。

③ 二酸化炭素供給システムの検討

植物栽培区を含むCO₂供給システムの施設構成・規模及び物質収支を検討した（下図）。



研究テーマ名 | 摂食可能なジャガイモの完全閉鎖型・完全水耕型人工栽培システムの基礎検討

機関名：玉川大学、パナソニック株式会社ライフソリューションズ社

プロジェクト概要

【目的および実施内容】

小麦やトウモロコシのような主食となりうる高カロリー作物のうち、ジャガイモは比較的低光強度かつ少量で生育できる性質を有する。一方で、ジャガイモは連作障害が顕著に発生するが、水耕栽培であれば水耕液を交換するだけで連作障害を回避できることから、水耕栽培を適用するメリットがある。

しかし、従来の水耕栽培は主として地上部を摂食する作物が対象であり、地下部（根域）を対象とした研究開発は遅れており、さらに摂食可能な品質でジャガイモの水耕栽培が実用化された事例は少ない。

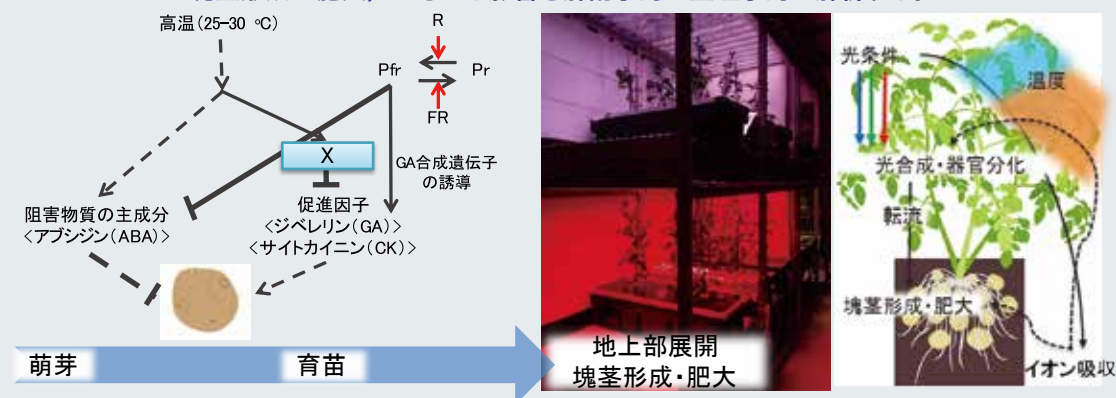
そこで本研究では、完全閉鎖型・完全水耕型であり、かつ摂食可能な塊茎を形成できるジャガイモの人工栽培技術を確認し、実用化検討を行った。

- ①光と温度が塊茎形成に与える影響のin-vitro評価
- ②栽培可能品種の拡大検討
- ③高収量安定化のための基本栽培手法の検討
- ④月面環境や宇宙環境に関する情報提供及び宇宙応用への適用検討

【成果】

1. 光質（RGB）条件の違いによる地上部光形態形成と塊茎形成応答の傾向把握
2. 萌芽・育芽促進に寄与する光および温度環境の知見獲得
3. 新規水耕栽培方式を用いて、栽培困難品種である‘インカのめざめ’の塊茎形成に成功 → 新規栽培法（低層地下2段構造方式）はジャガイモ栽培において品種を問わず有用である可能性を示唆
4. ジャガイモ（男爵、インカのめざめ）における本実験で実施したin-vitro試験系（成長点培養）と水耕栽培方式での光形態形成応答に非常に高い相関を確認 → 生理応答知見獲得のための期間短縮と必要スペースの縮小に有効
5. 栽培環境改善（地下空間環境、地上空調）により光合成産物量の増加を確認し、更なる塊茎収量増加の可能性も示唆した。

光および温度条件を振り分け、各生長ステージ（萌芽、育苗、地上部展開、Sink形成（ストロン）、塊茎形成・肥大）へ与える影響を解剖学的・生理学的に解析する。



栽培システム例（冷凍コンテナ利用型）



- 達成目標：株あたり平均収量1.2kg
- 開発課題：高収量安定化に向けた栽培手法の構築
- 実施内容：LED配置変更による光合成効率向上効果の確認
密植部への送風による蒸散促進効果の確認
塊茎周辺の空間拡大による増収効果の検証



研究テーマ名 | 難還元性酸化物の水素還元システムによる機能性材料の製造

機関名：九州大学、H4、超微細科学研究所

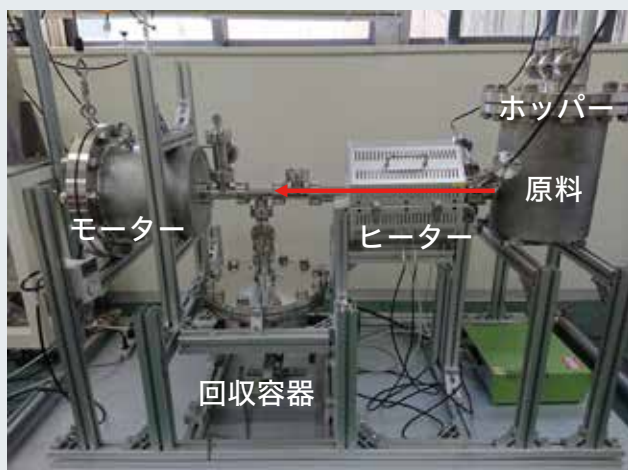
プロジェクト概要

【目的】

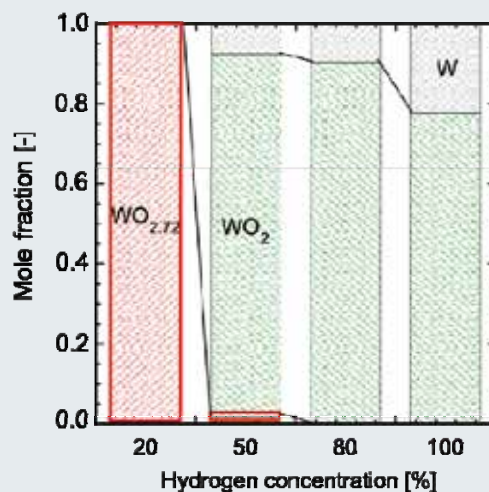
- ・連続運転式の水素還元装置として回転反応炉の検討および設計を行い、酸素欠損型酸化物の製造を行う。
- ・高品質機能性材料の製造として、酸素欠損型酸化物の格子欠陥制御の半導体素子の製造を行い、事業化に向けたプロセスを開発する。
- ・月面基地建設に向けて、難還元性鉱物や月土壌の水素還元プロセスによる金属製造、それに伴う水、酸素の製造プロセスの開発を行う。

【成果】

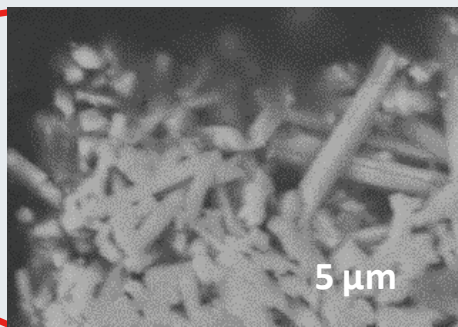
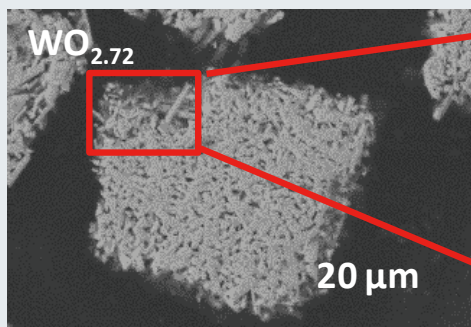
- ①水素還元反応炉の設計
TiO₂等の酸化物の還元反応を連続で行う水素還元炉を設計・製作した。
- ②酸化物の水素還元実験
各種の酸化物を用いて酸素欠損型酸化物を製造し、反応速度を計測した。
- ③酸素欠損型酸化物の事業化調査
- ④月土壌シミュラントの水素還元実験
既存の反応装置を用いて月土壌シミュラントの水素還元実験を行い、反応データを取得した。



回転炉による水素還元システム



酸素欠損型酸化物の生成に及ぼす水素濃度の影響



生成した酸素欠損型酸化物

研究テーマ名 AM技術による舗装の構築・修復に関する研究開発

機関名：ニチレキ株式会社

プロジェクト概要

【目的】

「混合」「整形・敷均」「加熱・硬化」の機構を兼ね備えた車両（自動制御ロボット）を開発し、その車両が通過した後は道路が構築・補修されるような工法の開発を目指す。

また、このような工法を月面の鉱物（レゴリスや金属化合物）に適用し、月面に舗装を構築する可能性を探る。

【成果】

本研究では、「誘導加熱」を月面での舗装構築と地上での自己修復工法に活用することを試みた結果、以下の成果を得た。

①誘導加熱装置

- ・研究に用いる最適な機種を選定した。

②月面への応用

- ・レゴリスとステンレス球の混合物を誘導加熱することで固化物を得た。
- ・レゴリスと樹脂の混合物を誘導加熱することで固化物を得た。

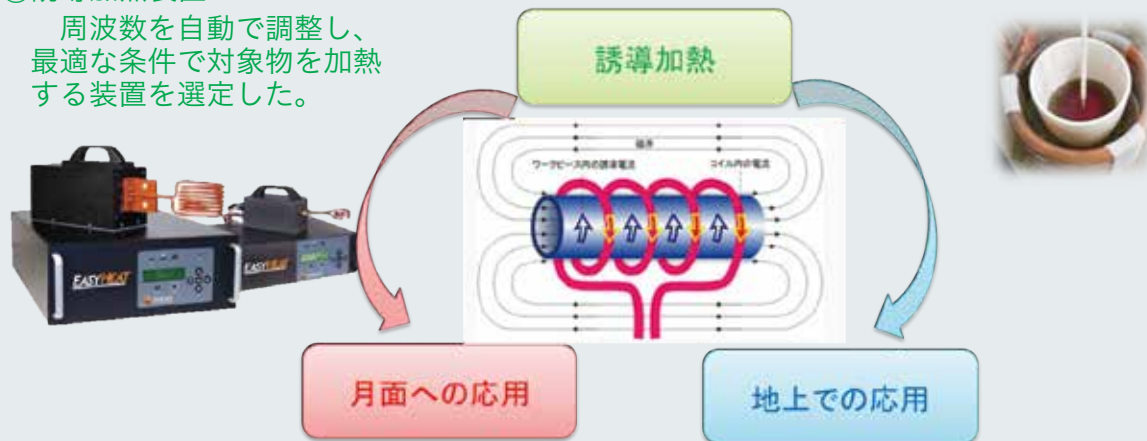
③地上への応用

- ・鉄化合物を含む骨材を用いることで誘導加熱による自己修復の可能性を見出した。

研究成果

①誘導加熱装置

周波数を自動で調整し、最適な条件で対象物を加熱する装置を選定した。



②月面への応用



レゴリス単体を固化することは出来なかったが、地球上の金属や樹脂を混合し加熱することで固化物を得た。

③地球上への応用



鉄化合物を含む砕石や砂を舗装に用いることで、誘導加熱により舗装が加熱され、ひび割れが修復できた。

研究
テーマ名 水利用効率を高めた屋内型ドライフォグ栽培システムの開発

機関名：株式会社いけうち、大阪府立大学

プロジェクト概要

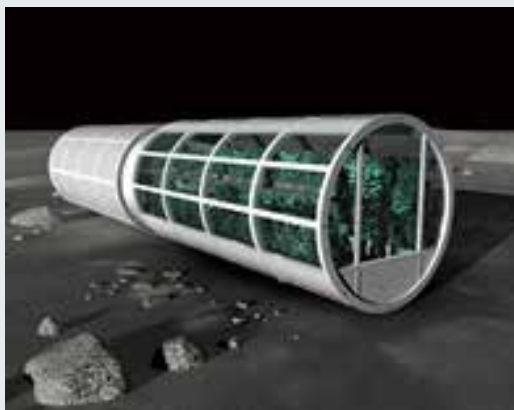
【目的】

限られた資源である水の利用効率を最大まで高め、植物が吸収する水分以外の水使用量を最小化する栽培システムとして、特殊なノズルにより養液をドライフォグ化して根圏に充滿させる屋内型ドライフォグ栽培システムを開発する。

噴霧された養液ドライフォグがすべて根に吸収され、根以外への付着によるドレンの発生を最小限とすることによる節水性の向上と、作物の生産レベルでの生育を両立させる霧粒子径の最適化および噴霧コントロール技術開発、並びに月面を含めた屋内での利用を想定した栽培装置構造（気密性、軽量化、栽培効率、作業性など）の最適化を目指す。



ドライフォグ栽培システム



月面農場栽培イメージ図

【成果】

植物の根以外への付着によるドレンの発生を最小限とし、かつ地上での営利生産用装置としてのコストの課題を満足するため、装置内に充滿する養液粒子を平均粒子径30 μ m程度のセミドライフォグとし、植物の生長に応じて必要な養液量のみを噴霧するような制御を検討した。また、栽培装置本体を筒状の密閉型とし、培地を必要としないセミドライフォグ栽培の特長により装置の全周に定植できるようにしたことで霧を捕集する効率を高めた。これらにより、栽培装置内に噴霧された養液のうちドレンとして回収、再噴霧される割合を10%以下とすることができた。

この密閉型セミドライフォグ栽培装置をもちいた栽培試験ではリーフレタス、トマト、イチゴの生育、収穫を確認したほか、超音波加湿器を用いた霧栽培試験装置においてサツマイモの栽培もおこなった。リーフレタスでは慣行の湛水水耕での栽培を上回る生育が確認され、4週間の栽培で125.5gの収穫を得たことで屋内型栽培装置としての有効性を示した。サツマイモでは塊根の形成がされたほか、茎葉の割合が従来の培地耕よりも高くなることが明らかになった。今後、塊根の収量向上など、栽培改善に向けた取り組みが期待される。

本研究で示された密閉型セミドライフォグ栽培装置の節水性は、水資源が限られる地域や環境における食糧生産に有益である他、装置内にドレンが溜まらないことから装置本体やシステム全体の軽量化、簡素化が可能であり、屋内での多段化による栽培の効率化や、従来水耕装置の導入が困難であった場所への展開が期待できる。また、装置内に霧を充滿させるという特徴は、月面農場などの宇宙利用における微小あるいは無重力下においてより大きな効果を得られると考えられる。噴霧された養液粒子の浮遊時間が長くなることにより根に付着する割合が増加し、ドレンの発生を極端に小さくすることが期待できるほか、装置の全周定植についても上下面での生育差が小さくなると考えられる。このことから、月面農場ワーキンググループにより試算された初期の宇宙滞在規模を想定したシステムをJAXA内に設置し、機能および運用性を検証することとした。

研究
テーマ名

食用藻類スピルリナを用いた省資源かつコンパクトなタンパク質生産システムの開発

機関名：株式会社ちとせ研究所、株式会社タベルモ、株式会社IHエアロスペース、藤森工業株式会社

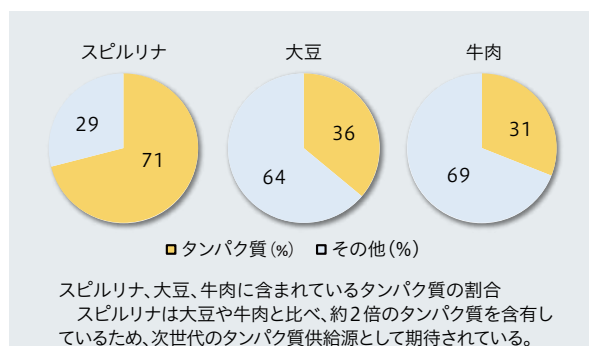
プロジェクト概要

【目的】

本プロジェクトは微細藻類の一種である スピルリナ (*Spirulina platensis* / 学名: *Arthrospira platensis*) を省スペースで高効率に生産できる装置の開発を行い、地球上での室内農業システムおよび月面有人滞在時におけるタンパク質の自給生産への応用を目指す。

スピルリナに含まれる栄養素の中でもタンパク質の含有量が特に高く、乾燥重量あたり70%程度までに上る。この結果、単位面積あたりの年間タンパク質生産性は、大豆の15倍以上という圧倒的な数値を誇る。また、省資源で生産できる特徴も兼ね備えている。

我々はこれらのスピルリナの特徴を用いて、月面有人滞在時のタンパク質自給装置の開発を進めている。本技術は地球上でも応用でき、将来的には室内農業への展開を目指す。



スピルリナはその高い栄養価により、古くから貴重な食資源として重宝されてきた。現在ではスムージーやサラダ、ヨーグルト等、様々なアレンジを加え楽しまれていて、新しい食材として認知されつつある。

【成果】

本研究では以下の内容について検討を行った。

- ①人工光および標準培地を用いたスピルリナ培養試験による担持体培養素材の選定
論文等で藻類の培養実績がある素材25種類に対して評価を行い、担持体に適している素材を選定した。
- ②LED光源を搭載した小型実証機の製作および実証試験
①で選定した担持体素材を用いて小型実証機を開発し、スピルリナ培養実証試験に成功した。
- ③硝化菌群を利用した植物非可食部残渣の液体肥料化
葉野菜を利用して硝化菌群による硝酸発酵を行った結果、硝酸イオンの遊離した液体肥料化に成功した。また、人工尿やスピルリナ残渣を利用した液体肥料化にも成功した。
- ④植物非可食部残渣から得られた液体肥料を用いたスピルリナ培養
③で得られた液体肥料を用いてスピルリナの培養に成功した。
- ⑤宇宙利用を想定したシステムの検討

本プロジェクトで開発した小型実証機によるタンパク質生産システムを、宇宙利用を想定して大規模化した場合、成人男性の1日分のタンパク質（約50g）が培養床面積1.25m²で、毎日獲得できる試算となった。



宇宙空間では、省資源かつ省スペースでスピルリナを培養可能な装置を利用することで、ISSや月面などでも、高タンパク、高栄養価の生食糧として現地でも培養することができる。そのため、長期間にわたるミッションの間でも、スピルリナを毎日摂取することで、クルーの健康を支え続けることができると期待している。

研究テーマ名 多種類の揮発性物質に対する高感度・高精度な可搬型ガスクロマトグラフの開発

機関名：ボールウェーブ株式会社

プロジェクト概要

【目的】

惑星大気や表土中に存在する揮発性物質の同定と定量を行い、生命活動や資源探掘の可能性を探り、リターン試料の採取場所や量の最適化に用いる検出限界1ppb以下の可搬型のガスクロマトグラフ(portable gas chromatograph ; PGC)を開発する。地上利用においては、天然ガス、リチウム電池材料の放出ガス、生鮮食品や食用油などの劣化成分、シックハウスガス、生体ガスの分析など、工業、農林水産業、ヘルスケアの事業化基盤を確立し、環境マップ作成など新事業分野を開拓する。

本開発の基盤となるボールSAWセンサでは、PGCの概要を示す下図右に示すように、球の直径と波長の幾何平均の幅で励振したSAWは、自然にコリメートして多重周回し、平面SAWセンサに比べて飛躍的な長距離伝搬が可能となる。SAWの伝搬経路上に成膜した感応膜にガス分子が吸着すると、感応膜との相互作用によりSAWの振幅や遅延時間が変化する。これらの変化量は周回を繰り返すごとに増加するため、多重周回後の振幅や遅延時間の変化を測定することで高感度にガスを検知できる。また、ボールSAWセンサは高感度なため感応膜を薄くすることができ、応答が非常に速いためGCのセンサとしても優れた特性を示す。

【内容】

①小型軽量電子回路の開発

PGCで用いる大きさ80×80×20mm、重量300g以下のPGC用小型軽量電子回路を開発する。

②感応膜作製条件の最適化

PGCの宇宙利用と地上利用において必要な1ppbv以下の検出限界を達成するため、ボールSAWセンサに成膜する感応膜作製条件の最適化を行う。

③メタルMEMSカラムの高度化

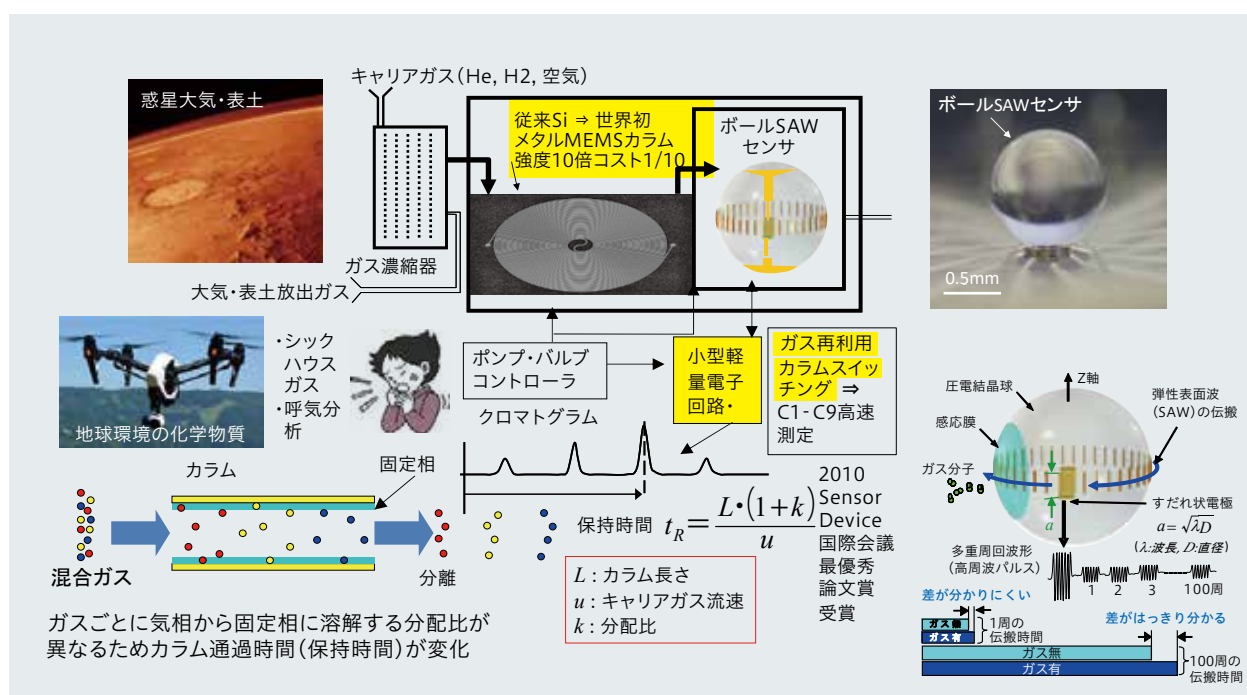
耐久性が高く高精度なPGCを実現するため、高強度なステンレス鋼（SUS）の微細加工（micro electro mechanical system；MEMS）により理論段相当高さ0.5mm以下でカラム長10m以上のメタルMEMSカラムを開発する。

④高速・高感度・高精度な分析法の確立

宇宙および地上で利用できる高速・高感度・高精度なPGCを確立するため、ボールSAWセンサの特性を活用する高効率カラムスイッチング法と1ppb以下の検出限界を達成するクロマトグラムピーク面積に基づく定量分析法を開発する。

⑤まとめ

研究項目の進捗を把握し、必要と判断される場合実施機関で協議して進行の調整を行う。



研究テーマ名 LEDによる多段型回転式ミニトマト栽培システムおよび自動収穫ロボットの開発

機関名：銀座農園株式会社、東京工業大学、京都大学

プロジェクト概要

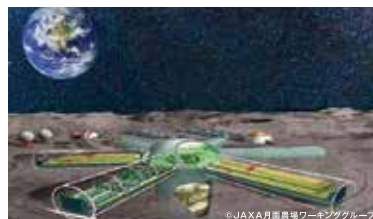
SUBJECT 課題概要 宇宙だけでなく、地上の農業におけるイノベーションを目指して

宇宙探査イノベーションハブは、「地面の存在」という地球上との共通点に着目し、「地球の優れた農業・バイオ技術の応用と更なる技術革新」「地産地消(可能な限り地球からの補給を最少にする自給自足型の宇宙システム)」をキーワードに掲げ、宇宙だけでなく、地上におけるイノベーションを起こすような新たな技術を獲得することを目指しています。

近年、就業者の高齢化や後継者不足が原因で、日本の農業は深刻な労働力不足に陥っており、その解決手段の一つとして農業ロボット、作業支援装置等の重要性が高まっています。農業ロボット、作業支援装置は、産学官で技術開発が進められておりますが、まだ十分な実用化までには至っておりません。

JAXAでは、人類が宇宙ステーションや月・火星で生活するための植物生産システム(月面農場)の研究を進めています。月面農場は、宇宙飛行士の作業を最小限と

するために、作業の自動化、高効率化を目指した技術開発が必要になります。探査ハブではここに着目し、地上の優れたロボティクス技術を応用して、宇宙だけでなく、地上の農業にもイノベーションを起こすような共同研究を目指しています。



研究目標

01

将来の月面農場での栽培を目指して、省リソース(空間、電力、水など)の作業支援ロボット、装置の試作及び試験を行う。

02

宇宙飛行士の作業支援を想定しているため、農作業を削減するための自動自律ロボット、装置、もしくは遠隔から作業支援を行うロボット、装置とする。

03

対象とする作業は既に植物工場での自動作業が普及している葉物栽培などの自動化技術ではなく、果菜類、イモ類の自動収穫、イチゴの自動受粉、播種育苗の自動化など研究期間内での試作試験が可能な作業に絞って行う。

04

対象作物は、月面農場の検討で対象としている稲、大豆、いも類(ジャガイモ、サツマイモ等)、葉菜類(レタス、小松菜等)、トマト、キュウリ、イチゴとする。

高効率食料生産システムの試作品開発

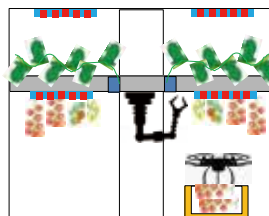
- ①テストモジュールを構築を行う
- ②今回のテストモジュールでは播種・育苗・定植については手動で行うこととする
- ③ミニトマトが自重で垂れるようにラック穴の間隔を設計する
- ④わき芽かきは行わず、4段栽培・年4作型の低段密植栽培を行う
- ⑤環境(気温・湿度・光量・CO₂・気流)は定期的にセンシングを行う
- ⑥画像判断は、Mask R-CNNなどを用いてアルゴリズム設計、果実だけでなく果房の位置認識を行う
- ⑦アームやカメラ、PC等のスペックを設計する
- ⑧収穫したミニトマトは中心部に設置のアームで自動収穫、所定のラック内に置く
- ⑨収穫物の積載が終わったラックはドローンかローバーで棚外に搬送、収穫作業は終了となる

<ロボットアームの演算>

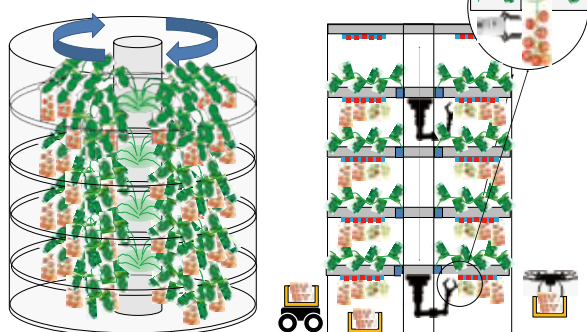
- ①検出
 - ・果実の位置・果便の位置
 - ・天井の位置・障害物の位置
- ②マップ作成
 - ・水平マップの作製
- ③平面経路の測定
 - ・キネマ計算により経路算出

<ミニトマトの収穫工程>

- ①固定(今回)のロボットアーム位置測定
- ②センサー部で房の認識
- ③房の位置検出
- ④アームの経路計算、アプローチ
- ⑤房をカット、カット後は籠に落とす



高効率食料生産システムのイメージ



事業化までのロードマップ

	第1フェーズ 2020/1～2020/12	第2フェーズ 2021/1～2021/12	第3フェーズ 2022/1～未定
播種～発芽～育苗		一部の区画でアームによる実証	LEDによる多段型回転式栽培システムは事業化(一部検証)
定植～栽培		一部の区画でアームによる定植移行の実証	
誘引～栽培管理	テストサイズでの誘引・栽培実証	標準サイズでの誘引・栽培実証	
画像解析処理	LED光源下で果実の過期判断を実証	LED光源下で果実・果房の位置判断を実証	自動収穫ロボットは事業化
過期判断～収穫	アームによる収穫の実証(目標精度50%)	アームによる自動収穫の実証(目標精度80%)	
収穫～運搬	ドローン、ローバーによる手動運搬の実証	ドローン、ローバーによる自動運搬の実証	

研究テーマ名 人工光型植物工場に適したリサイクル可能な新規作物栽培用培地の開発

機関名：国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 九州沖縄農業研究センター、株式会社JSP

プロジェクト概要

【目的】

人工光型植物工場での作物生産や苗の生育に適したリサイクル可能なポリ乳酸製培地（以下：PLA培地）を開発し、これまで培地とともに廃棄されてきた有機性廃棄物から可能な限り元素を回収できる栽培体系の開発を目指す。

従来の人工光型植物工場で用いられるウレタンやロックウール等の培地は、使用後にリサイクルができず、植物の根が混在したまま産業廃棄物として廃棄される。しかし、そこからは炭素や窒素などの元素が回収できる可能性が高いことや廃棄物処理の観点から環境負荷の軽減も求められる。

そこで、リサイクルが可能で天然素材から作成されるPLAに着目し、作物生産後に発生する廃棄物から可能な限り元素を回収し、かつ、環境負荷の少ない苗の培地を開発し、循環型社会の実現、並びに月面長期滞在における安定的な食糧生産の実現への貢献を目指す。

【成果】

本研究では、植物栽培に適したPLA培地の開発と使用後の培地の堆肥化による元素のリサイクルの可能性を検証・評価した。その結果、主に植物工場で用いられている培地と同様に使用可能であり、コンポスト化によるリサイクルも可能なPLA培地の可能性を見出した。

①作物の栽培に適したPLAの形状の検証

複数の形状のPLA培地を試作し、三相分布や保水力などを検証した。従来植物工場で用いられている培地と比較して有意性が認められる培地形状を確認できた。

②PLA培地を用いた際の発芽特性の評価

試作したPLA培地を用いてリーフレタスなどの発芽特性を評価したところ、PLAを特定の形状に加工することで、従来の培地を用いた時よりも発芽までの日数を短縮できることや発芽の揃いが向上することが判明した。

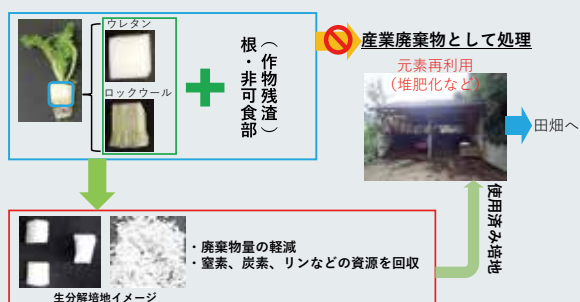
③PLA培地上で栽培した葉菜類の生育（可食部）検証

PLA培地上でリーフレタスなどを栽培した結果、従来の培地と同等の生育が可能であった。

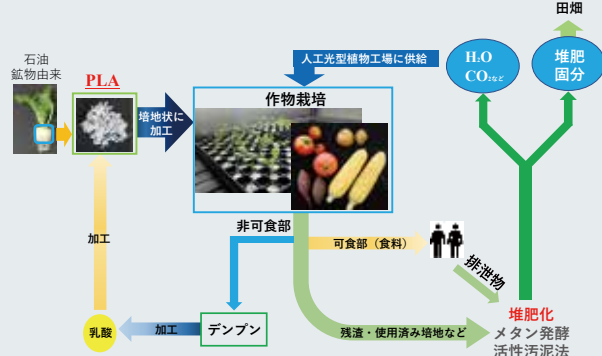
④PLA培地の簡易的な堆肥化試験

試作した各PLA培地を堆肥化したところ、PLAは特定の形状に加工すると分解されにくくなることが判明した。今後、堆肥化により分解しやすい形状や分解方法を検討する必要がある。

1. 生分解性プラスチックの人工光型植物工場への応用



2. 物質循環とPLA培地を用いた作物栽培のイメージ



研究テーマ名 | メタン発酵を基盤とした省スペースなクワッドジェネレーション型植物残渣リサイクルシステムの開発

機関名：大阪府立大学、ヤンマーエネルギーシステム株式会社

プロジェクト概要

【目的】

月面農場のような閉鎖システムでは、食物残渣をはじめとした有機性廃棄物を資源化し、生産システムに再投入することが求められる。本研究開発では、嫌気性微生物ならびに好気性微生物の機能を資源化に利用しつつ、空間利用効率と物質利用効率を極限まで高めた資源循環型の植物生産システムを構築することを目的とした。本研究開発では、主に植物残渣からなる異なる濃度の有機性廃棄物を嫌気性微生物による高濃度メタン発酵と好気性微生物の生物酸化で分解し、熱・電気・二酸化炭素・肥料成分といった4種類の資源（クワッドジェネレーション）として回収した。そのうち、肥料成分については植物養液栽培の培養液としての利用を試みた。

【成果】

植物性残渣等からなる有機性廃棄物を微生物処理してメタン・二酸化炭素・肥料成分を回収する実験装置を製作した。また、植物の養液栽培に利用可能な培養液を、有機性残渣から連続的に生成することに成功した。本実験装置を用いて、有機物や窒素の物質収支を求め、投入する有機性廃棄物の濃度と資源回収率の関係性について評価した。その結果、有機性廃棄物を対照の1.3倍に高めても微生物処理速度は低下せず、肥料成分の窒素濃度が高くなり、資源回収率を高められることがわかった。このことは同時に、微生物処理の省スペース化が可能であることも意味している。これらの成果は、資源枯渇に直面している地上においても適用可能であると考えられる。

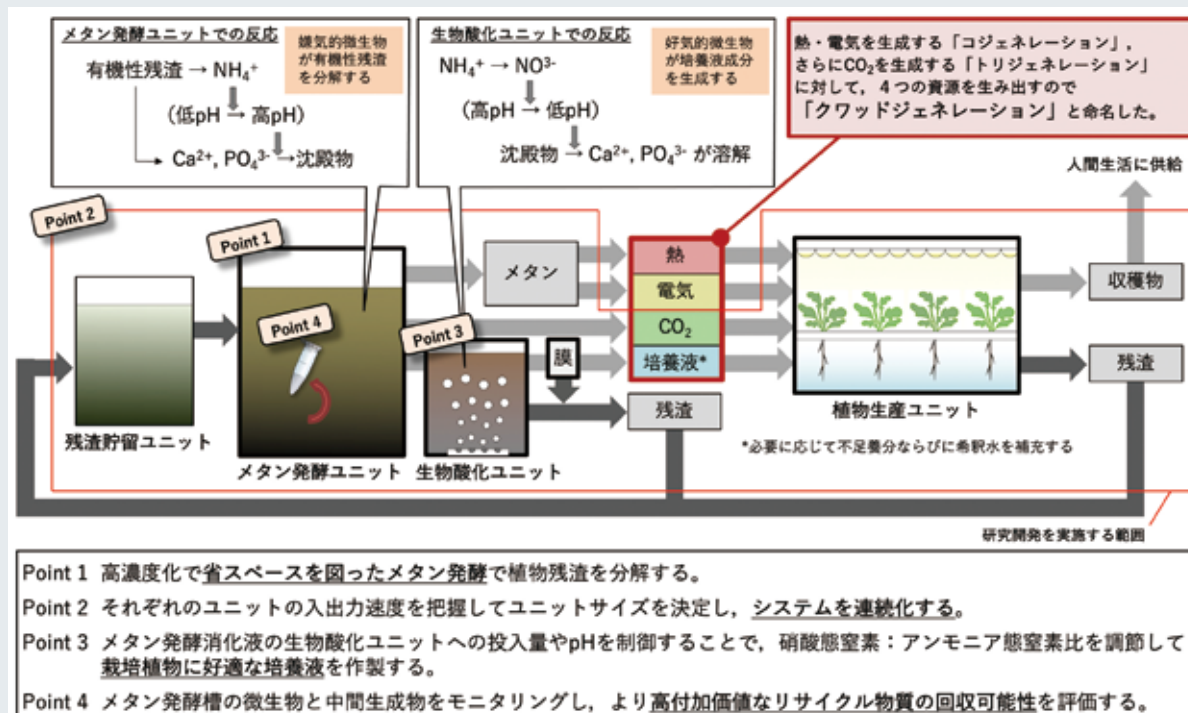


図 省スペースなクワッドジェネレーション型植物残渣リサイクルシステムとポイントの概要

研究テーマ名 | 月面探査と土木建築でのデュアルユースを視野に入れた次世代型の中性子水モニタの開発

機関名：理化学研究所、学校法人聖マリアンナ医科大学、学校法人立命館、
ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

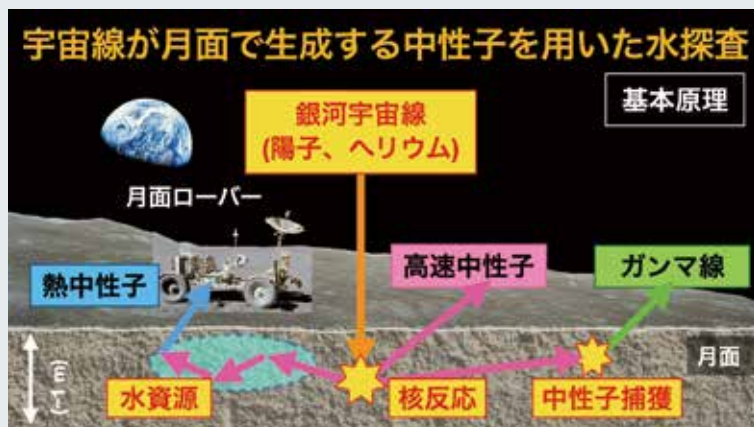
プロジェクト概要

【目的】

中性子による水探査は、月惑星や地上での非接触な含水量の調査法の一つとして用いられている。本提案では、近年の放射線測定技術の進展を活かし、従来の中性子検出器に比べ、高圧電源を用いず、省電力、安価、耐振動に優れた次世代の中性子モニタを開発する。また、大気のない地球上や火星、月の地下空洞内など天然の中性子量が期待できない場所では、安全で効率的な中性子源も必要となるため、中性子ビーム・集光技術を応用した小型の中性子源の開発を進める。これら組み合わせることで、建設現場での地盤調査、コンクリート構造物や配管の内部劣化検査といった用途に向けた事業化も推進する。宇宙放射線の測定、加速器科学、月探査、土木分野という異分野の専門家が集結したコラボレーションを構築する。

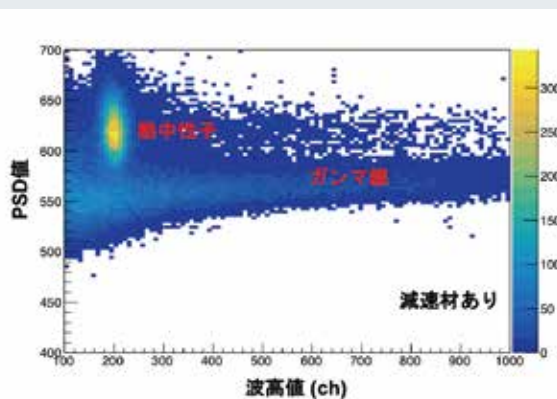
【内容】

1. リチウム添加のプラスチックシンチレータを用い、ガンマ線と熱中性子、高速中性子をパルス波形で弁別するプロトタイプ検出器を製作した。
2. 理化学研究所・中性子ビーム技術開発チームの知見をもとに、宇宙利用を想定した、オンオフ機能を有する小型の中性子源の概念設計を行った。
3. 実験室でのモデル土壌を用いた、 ^{252}Cf 放射線測定による含水率計測の実験設計を進めている。
4. 月面での中性子環境を再現する放射線シミュレーションを Geant4 を用いて構築している。異なる研究背景を持つグループ間でのシミュレーション設定の共通化なども行った。
5. 宇宙での放射線イベントの読み出し回路の概念設計を進めている。



月面での水資源探査の概念図

月面や小惑星には銀河宇宙線をシールドする大気がなく磁場も弱いため、宇宙線が地表に叩き込まれ、地中の原子核に衝突して、約1mの深さで中性子を発生させる(図左)。中性子は地中で散乱を繰り返しながら熱化し、熱外中性子や熱中性子として地表から染み出す。このとき、中性子と質量がほぼ等しい陽子(水素の原子核)との衝突によって運動エネルギーを最も失いやすいため、地中に水が存在について、地表面での中性子の測定から、掘削による直接測定によることなく見定めることができる。



(左図) ^{252}Cf と減速材を用いた中性子測定の様子、(右図)放射線イベントの熱中性子とガンマ線の分離の様子。

研究テーマ名 低濃度CO₂の低コスト分離・濃縮・貯蔵・利用装置の開発

機関名：株式会社日本炭素循環ラボ、九州大学

プロジェクト概要

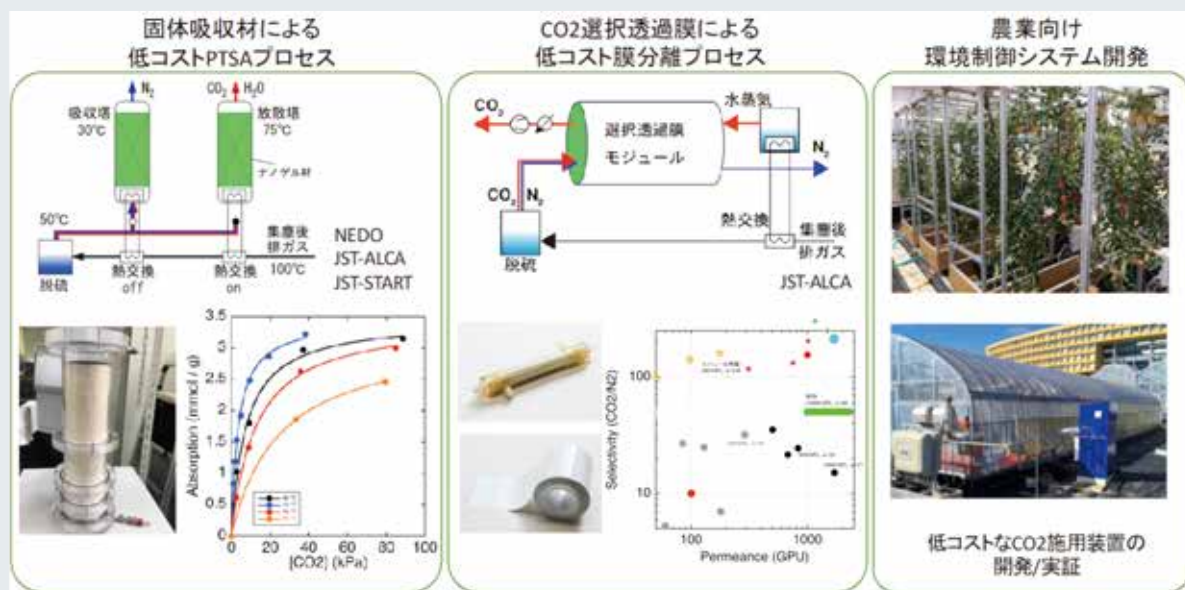
【目的】

本研究では、九州大学がNEDOやJSTの支援を受け燃焼後排ガスからのCO₂分離の為に開発したCO₂選択透過膜、CO₂の吸収材料およびCO₂分離装置を進化させ、地球外有人探査の際にクルーが呼気から排出するCO₂を回収し、これを利用するためのCO₂分離・濃縮・貯留・利用装置を開発する。本開発により、地球外有人探査における炭素循環効率を向上させ、月や火星など地球からの距離が遠く物資の輸送が難しい場所での長期間の有人探査を可能にする。

並行して以上の材料および装置を地球上のCO₂排出量削減や炭素循環の正常化のために利用する方法を検討・研究し、地上における材料・装置の社会実装を加速する。

【内容】

- ①低濃度のCO₂分離回収用の高性能なCO₂の吸収材料および吸収モジュールの開発
- ②低濃度のCO₂分離用に最適なCO₂選択透過膜および膜モジュールの開発
- ③小型・省エネルギーなCO₂濃縮・貯留・施用装置の開発
- ④CO₂選択透過膜、CO₂吸収材料およびCO₂分離装置の地上における社会実装方法の検討・研究



研究テーマ名 閉鎖型生物残渣高速液化技術と環境浄化型養液栽培技術の確立

機関名：デリカフーズ株式会社、株式会社メディカル青果物研究所、菱熱工業株式会社、産業技術総合研究所、千葉大学

プロジェクト概要

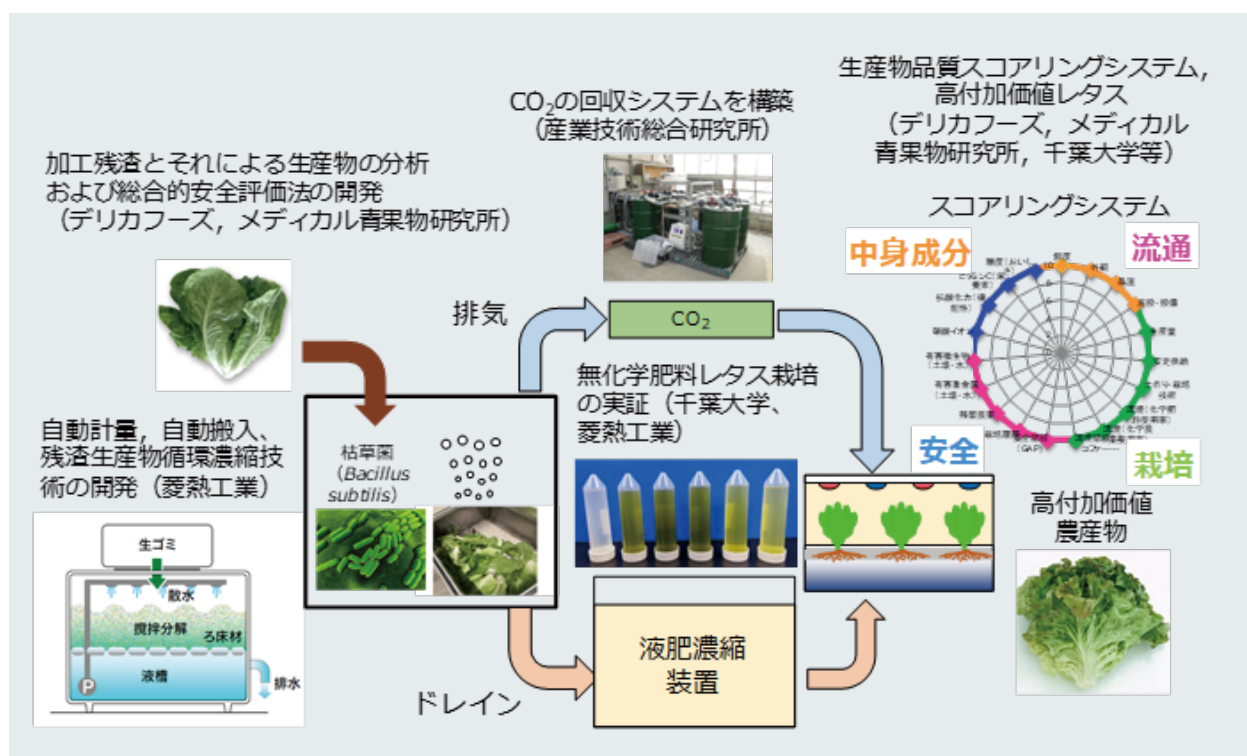
【目的】

宇宙において食料の自給のためには、生物残渣に含まれる元素を有効に活用するとともに、限られたスペースで効率的に処理し、且つ循環システムとして構築する必要がある。本研究では、植物性の残渣を高速分解する技術を基盤として、そこから発生する炭酸ガス、および無機元素を全量回収し、養液栽培に利用する手法の確立を目指す。本システムは残渣の投入から農産物の生産において閉鎖型管理で実施し、環境浄化型植物生産法の確立を目指す。本技術はリサイクル処理技術の導入だけでなく、月面などの宇宙や地上の両方に有効なものを達成することで、資源循環社会に向けた自立循環型水耕栽培システムの構築を目的とする。

【内容】

加工処理工程に搬入される野菜類の量と、それぞれの元素含量を定量的に評価するとともに、閉鎖型残渣高速分解装置において発生する液肥の分析を実施し、安定的な処理に資する条件を解明する。また、残渣投入において、装置の自動化や物質循環のモニタリングの自動化を行う。さらに、CO₂回収ユニットを設置し分解工程からのCO₂の回収システムを構築する。

上記の要素技術を確立後、閉鎖型残渣高速分解装置から発生した液肥およびCO₂を活用して、通常の養液栽培処方と遜色の無い生育を示すことを明らかにする。また、元素分析および成分分析から、本システムにより生産された農産物の優位性を示すデータを定量的に示す。



研究テーマ名 セミドライフォグ栽培システムにおける噴霧制御の自動化

機関名：株式会社いけうち、中村牧場、大阪府立大学

プロジェクト概要

【目的】

植物の根圏部に平均20-30 μ mの霧を噴霧し、栽培するセミドライフォグ®栽培システム「IKEUCHIPonics®」にカメラやセンサー類を設置し、畳み込みニューラルネットワークにより作物（レタス）の環境ストレスを推定する。そして、得られた作物の環境ストレスと現在手作業で行われている噴霧制御のパラメータの関係を機械学習によりモデル化し、その植物が水分ストレスを受ける前兆段階に必要な量だけ培養液を噴霧する制御手法を構築する。これにより、同システムのさらなる節水化ならびに生育の最適化を図ることで、水利用効率を向上させることを目的とする。

最終的には、環境特性やシステムの個体差、作物の個体差がある場合でも、オンライン学習、強化学習を利用することで、植物画像ならびに環境情報から一つのニューラルネットワークで完全自動噴霧制御を実現し、将来の月面農場へ適用することを目標とする。

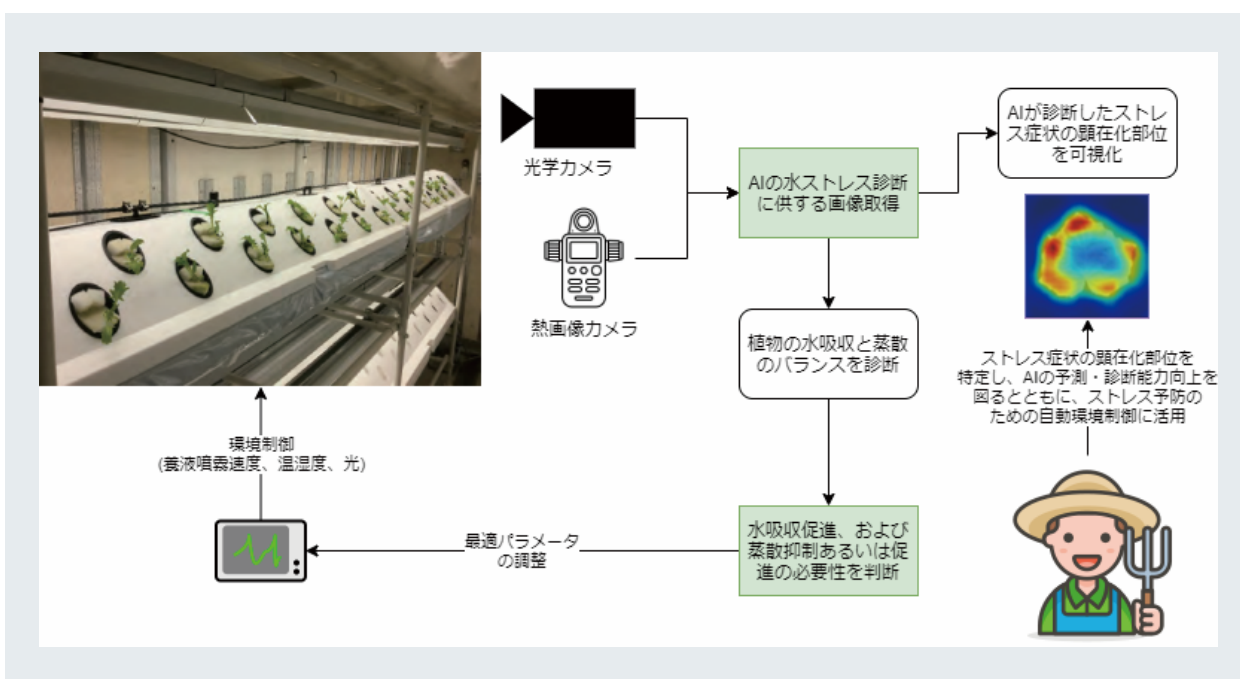
【内容】

レタスを上面あるいは水平方向から定時撮影して、連続的な画像データを取得する。噴霧量を手動で制御することで、水分ストレスを意図的に生じさせる栽培と生じさせない栽培を行い、教師データを作成する。栽培システム内で栽培された作物の画像と水分ストレスの教師データに対し、畳み込みニューラルネットワークにより学習を行う。取得した画像、AIが推定した水分ストレス、噴霧制御のパラメータを学習に利用し、噴霧制御モデルを構築する。

IKEUCHIPonicsのセンサー類のデータをAIに送る仕組みとAIの推論結果から噴霧制御を行えるように、AIを搭載した計算機を設置し、配線、つなぎこみの開発等システム化を行う。

レタスを様々な環境下でIKEUCHIPonicsにて栽培、噴霧制御を行い、画像、収穫状況のデータを所得し、実用に供されるシステムを目指す。

本手法を確立したのち、月面農場に適用した場合の環境を想定した適用性の評価を行う。



研究テーマ名 | レーザー加熱による土質材料の有効利用に関する研究

機関名：公益財団法人レーザー技術総合研究所、国立大学法人大阪大学、株式会社大林組

プロジェクト概要

【目的】

これからの宇宙における人類活動では、基地建設を含むインフラ整備が不可欠となり、大量の建設材料を現地で入手して製造することが求められる。このような建設材料を月面で調達するために、月の表土をレーザーで焼結・溶融させて積層する方法が有効と考えられる。一方、地上においても天然砂や火山灰などの土質材料から様々な資材や部品を製造することは、地産地消の観点から有効と考えられる。

しかし、レーザー加熱による土質材料からの立体物製造に関しては、これまで十分な検討がなされていないのが現状である。そこで本研究では、月の模擬砂や地上の土質材料をレーザーで加熱し、3Dプリンティングの手法を利用することで立体物を作製し、建設材料や各種部品材料としての性能を評価することを目的とする。

【内容】

- ①月面模擬砂を用いた立体物作製
 - ・粉末床溶融結合（Powder Bed Fusion : PBF）法と指向性エネルギー堆積（Directed Energy Deposition : DED）法を用いて立体物を作製する。それぞれの手法に適したレーザーの照射条件・粉末の調整条件を明らかにすると共に、各手法による建設材料調達における長所・短所を明確にする。
- ②地上の土質材料を用いた立体物作製および地上応用の検討
 - ・天然砂や火山灰等を用いて立体物を作製し、得られた物性や作製精度から建設材料やその他各種部品材料としての適用可能性を評価するとともに適用シナリオについて検討する。
- ③作製物の強度特性等評価
 - ・上記①、②で作製した立体物の圧縮強度と変形性能を評価し、レーザー照射条件による立体物の焼成具合、内部構造が圧縮強度に与える影響を明らかにする。

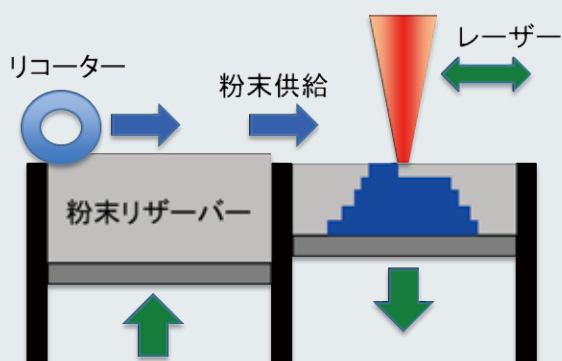


図1. 粉末床溶融結合（PBF）法概念図

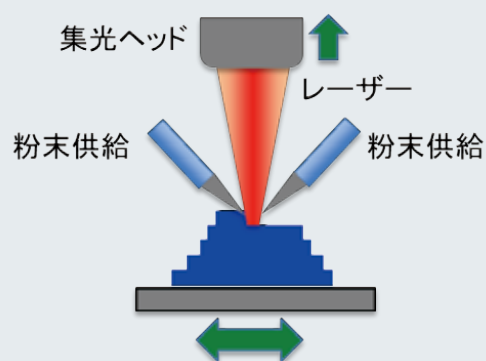


図2. 指向性エネルギー堆積（DED）法概念図



図3. 月の模擬砂（原料例）



図4. 積層物の例

研究テーマ名 バイオベースCFRPと真空対応型ケミカルリサイクルシステムの開発

機関名： 京都府公立大学法人（京都府立大学）、国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所

プロジェクト概要

【目的】

本研究は、「PEG改質リグニン（以下「改質リグニン」）」の分解率が最も高くなるイオン液体システムを見出すとともに、分解に適した改質リグニンを調製し、真空対応型ケミカルリサイクルシステムを開発することを目的としています。

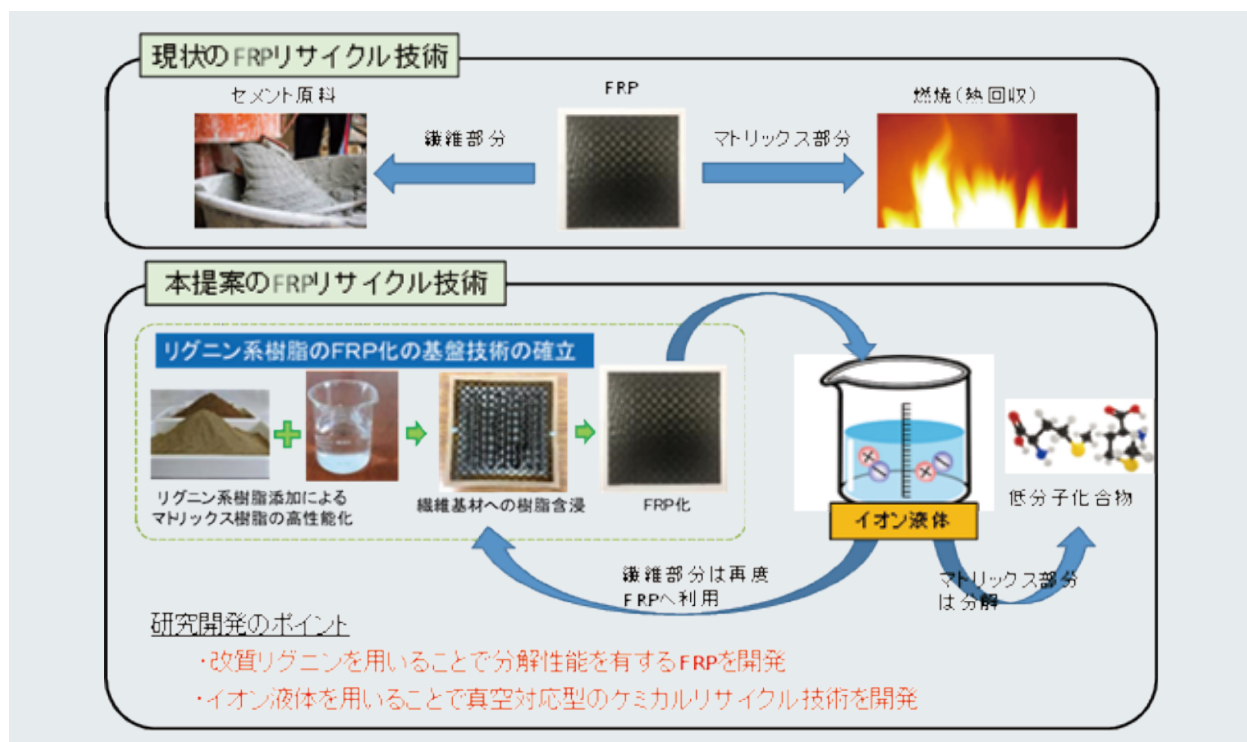
木材成分を活用した新素材「改質リグニン」は高強度なCFRPのマトリックス樹脂であり同強度の石油化学系樹脂を使用した場合に比べて20%もの軽量化を達成でき、更に廃棄時には分解してケミカルリサイクルを行うことが可能となると考えられています。

現状のFRPの廃棄処理では、マトリックス樹脂を燃焼させて除去することが多く、リサイクルする場合でも高温高压やアルカリ金属が触媒として必要になっていたりしています。これに対して、イオン液体によるリサイクルでは常圧かつ200℃程度以下で処理が可能であるほか、イオン液体に蒸気圧がないことから、分解生成物の分離精製に減圧蒸留法が有効であることが示されています。さらに、イオン液体自体がマトリックス樹脂の溶媒としてだけではなく分解反応に対して触媒能を有することもわかってきました。

これらの特性から、改質リグニンを用いたCFRPおよびそのイオン液体によるリサイクルは、地上でのバイオベースFRPの普及を後押しするだけでなく、月面に持ち込まれるFRPの真空という宇宙特有の環境を活用したリサイクルへの適用が期待されます。

【内容】

- ①イオン液体による真空対応型ケミカルリサイクルシステムの構築するため、分解率が最も高いイオン液体を見出し、さらに分解条件の最適化をおこないます。
- ②上記①のイオン液体システムでの分解に有利となるリグニンのPEG改質条件を設定するとともに、得られた改質リグニンにより性能の高いCFRPを試作します。さらに、試作したCFRPで実際にイオン液体による分解性を評価します。



研究テーマ名 | 宇宙線に対し高い遮蔽能を有する“特殊”BASHFIBER（及び繊維構造体）の開発

機関名：新日本繊維株式会社、量子科学技術研究開発機構、伊藤忠商事株式会社、住友商事株式会社

プロジェクト概要

【目的】

月等に普遍的に存在する天然資源（主に玄武岩）及び再資源化物資である石炭灰などを主たる原料として、これまでに無い、まったく新たな放射線遮断繊維を創生し、その繊維の製造事業を実現させることを目的とする。具体的にはNFCが培ってきたアモルファス化技術を生かし、通常は繊維化させることが難しい特殊な元素や同位体を玄武岩と石炭灰の熔融物から固溶させることで、既存の鉛繊維と比較して粒子線（宇宙線を含む）を遮断する単位質量あたりの能力が50倍以上の放射線遮断繊維を生成させることを目的とする。

【内容】

放射線遮断能力の高い金属元素及びそれらの同位体をBASHFIBER®へ質量比30%まで固溶させる方法を確立する。放射線遮断要素を固溶させた複数種類のサンプルに対し、その遮断効果を比較する。QST等にて同遮断効果に対する粒子・波長特性を分析する。

繊維試料に量子ビーム（主に電子線）を照射し、照射の前後で各々の試料に対して陽電子消滅実験を行い、点欠陥や微小空隙の増減を調べ、原子レベルで劣化しないか等の構造安定性を分析する。

日本国内の主要石炭火力発電所の品位データから、粒子線遮蔽能力の高い繊維の事業化に適する石炭灰等、銅スラグ等を選定し、そのサンプルの調達を行う。

最終的には、宇宙放射線に適用させるための新しい繊維の設計方針と従来遮蔽材料との比較評価を行う。

期待される成果の例

—宇宙線（特に10MeV以下の中性子線）を高い効率で遮断する繊維の発明と事業化—



従来の遮蔽物(PP with B、コンクリ、鉛等)では数十センチ必要)



本研究開発の目的
→特殊“BASHFIBER®”により遮蔽物を薄く・しなやかにする



陽電子消滅実験装置
(放射線耐性の評価)



遮断能評価装置 (^{241}Am を数ミリ厚の繊維素材で覆い、遮蔽する実験の様子)



※予算で一部高度化した研究装置(QST高崎量子応用研究所に整備)



—事業化にむけて—

1. 次世代宇宙服用の生地をはじめとした新しい宇宙素材の開発・提供
2. 地上における放射線環境下での新素材活用 の推進

研究テーマ名 養液ゼロエミッション型水耕栽培システムの実現に資するパルス電界印加法を応用した殺菌技術の開発

機関名： 北里大学、大分工業高等専門学校

プロジェクト概要

【目的】

パルス電界（Pulsed Electric Field：PEF）印加法は、医療や食品分野における応用研究が積極的になされている技術であり、特に液状食品の非加熱殺菌法については、すでに製品化されている。PEF印加法は、様々な病原体に対して不活化効果を示すことが明らかになっている。提案者らは、PEF印加法を下水処理場における消毒技術として応用する研究を進めており、これまでにおいて大腸菌や腸球菌を5 log（99.999%）以上削減できることを明らかにしている。

本プロジェクトでは、PEF印加法を水耕栽培に用いる養液の殺菌に応用して、使用済み養液を再利用する養液ゼロエミッション型水耕栽培の実現を目的としている。具体的には、PEF印加法の植物病原体（細菌やカビ等）に対する不活化効果を明らかにするとともに、その不活化を達成する殺菌処理条件を実現できるPEF発生装置の構成素子の選定・設計、および市販の水耕栽培装置にフレキシブルに導入可能な殺菌装置の構築を目指す。

【内容】

これまでの取り組みにおいて、以下のような知見・情報を得ている。

- ①青枯病菌 *Ralstonia solanacearum* は、不活化率8 log以上を達成し、検出下限値以下まで削減することができた（図1）。不活化率は処理条件における電気的パラメータによって変動するが、周波数を上げることによって、より短時間で効果的に不活化できることが明らかとなった。
- ②植物病原糸状菌 *Pythium aphanidermatum* についても不活化効果を示すことが明らかとなり、PEF印加後の試料からは *P. aphanidermatum* が検出されなかった（図2）。
- ③市販の養液のインピーダンス特性を測定し、回路シミュレーションの結果から、植物病原体を不活化できる電気的パラメータ条件を見出して、その条件を実現できるPEF発生装置の構成素子の選定・設計を行った。

以上の得られた知見を踏まえて、今後は、連続式で養液の殺菌を可能とするPEF発生装置の構築、および殺菌チャンバーの設計・構築（図3）を行い、それらを用いて植物病原体の不活化効果を明らかにしていく予定である。

PEF印加による植物病原体の不活化効果

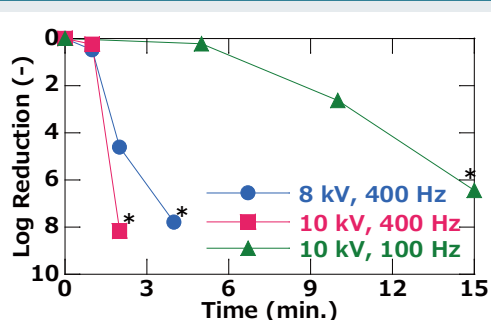


図1 *R. solanacearum*の不活化効果
*検出下限値以下 (<10 CUF/mL)



図2 PEF印加前後における *P. aphanidermatum*

連続式養液殺菌チャンバー

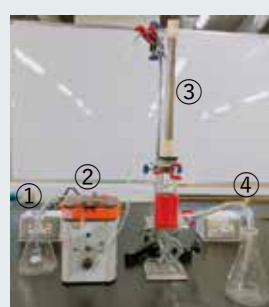
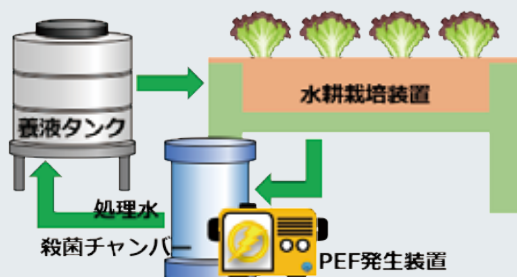


図3 連続式溶液殺菌チャンバープロトタイプ概略

PEF印加殺菌を導入した水耕栽培システム（将来像）



研究テーマ名 | 植物工場に使用する養液の自動殺菌およびその技術を組み込んだ養液再生システムの研究

機関名： 島根大学、株式会社米子シンコー、関西電力株式会社

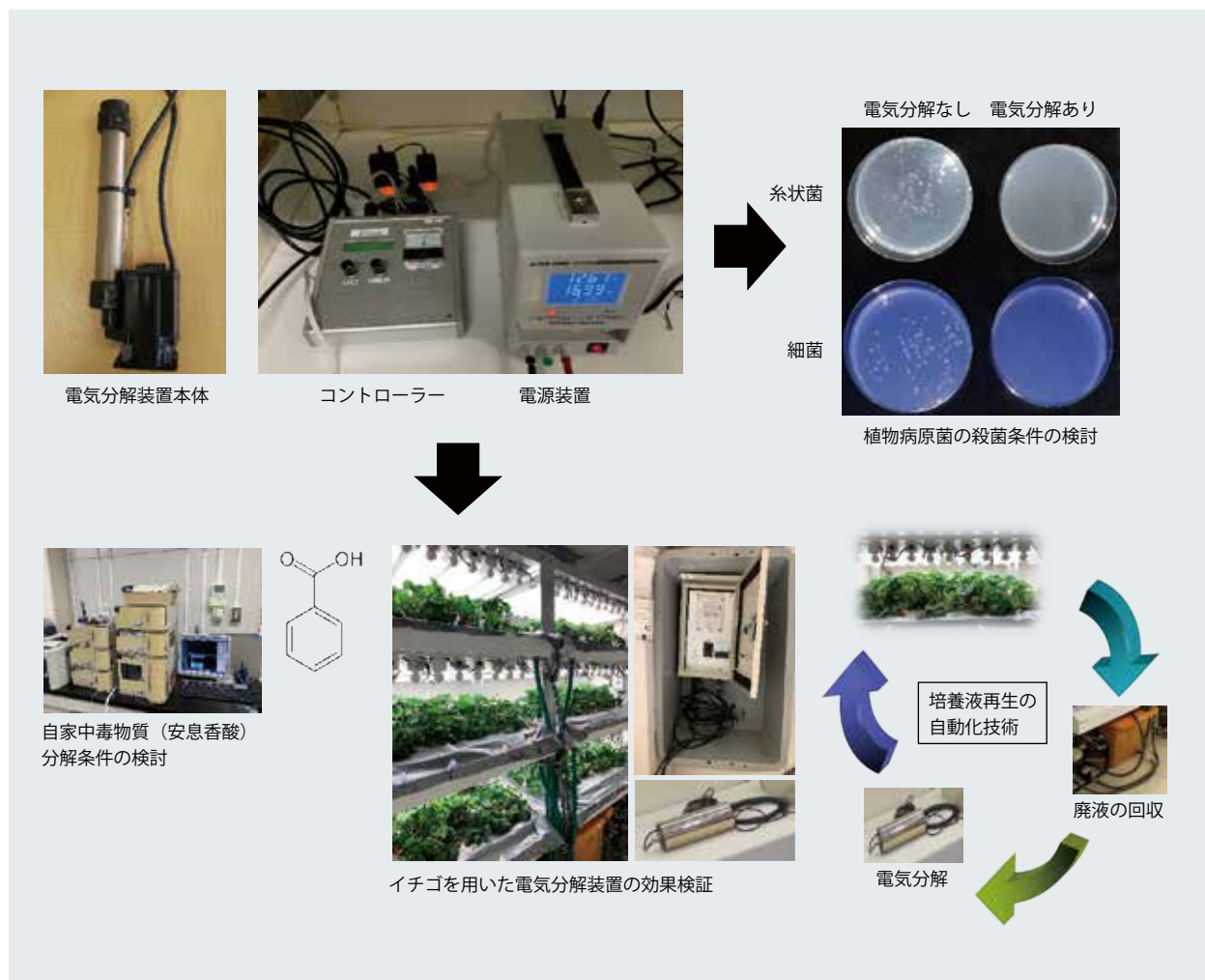
プロジェクト概要

【目的】

植物生産性向上を目指した植物工場では、養液の効率的利用、垂れ流しによる環境汚染を防ぐために養液の循環再利用が検討されている。しかし、循環再利用された養液には植物の根から滲出する自家中毒物質が蓄積し、生育抑制が引き起こされるだけでなく、植物病原菌の増殖による収量低下などの課題がある。そこで、本研究では、交流式電気分解装置による自家中毒物質の分解及び植物病原菌の殺菌技術を確立し、植物工場での交流式電気分解装置による養液再生システムの社会実装の可能性を検討する。また、この技術は宇宙空間での植物生産と水利用率向上に貢献すると思われる。

【内容】

- ①交流式電気分解装置による自家中毒物質（安息香酸）の電気分解条件（電流、電圧、周波数、デューティ比など）と分解特性を検討する。
- ②交流式電気分解装置による植物病原菌の殺菌条件と殺菌特性を解明する。
- ③電気分解したモデル尿の特性把握と宇宙空間での有効利用を検討する。
- ④自家中毒による生育阻害が確認されている作物（レタスとイチゴなど）において、自家中毒を回避できる電気分解条件を検討する。
- ⑤交流式電気分解装置による培養液再生の自動化技術を組み込んだ植物工場の概念設計を行い、宇宙空間、地上における利用の可能性を検証する。



研究テーマ名 | 持続的・地産地消型の食料生産を目指した「藻類・動物細胞リサイクル培養システム」の構築

機関名：東京女子医科大学、インテグリカルチャー株式会社

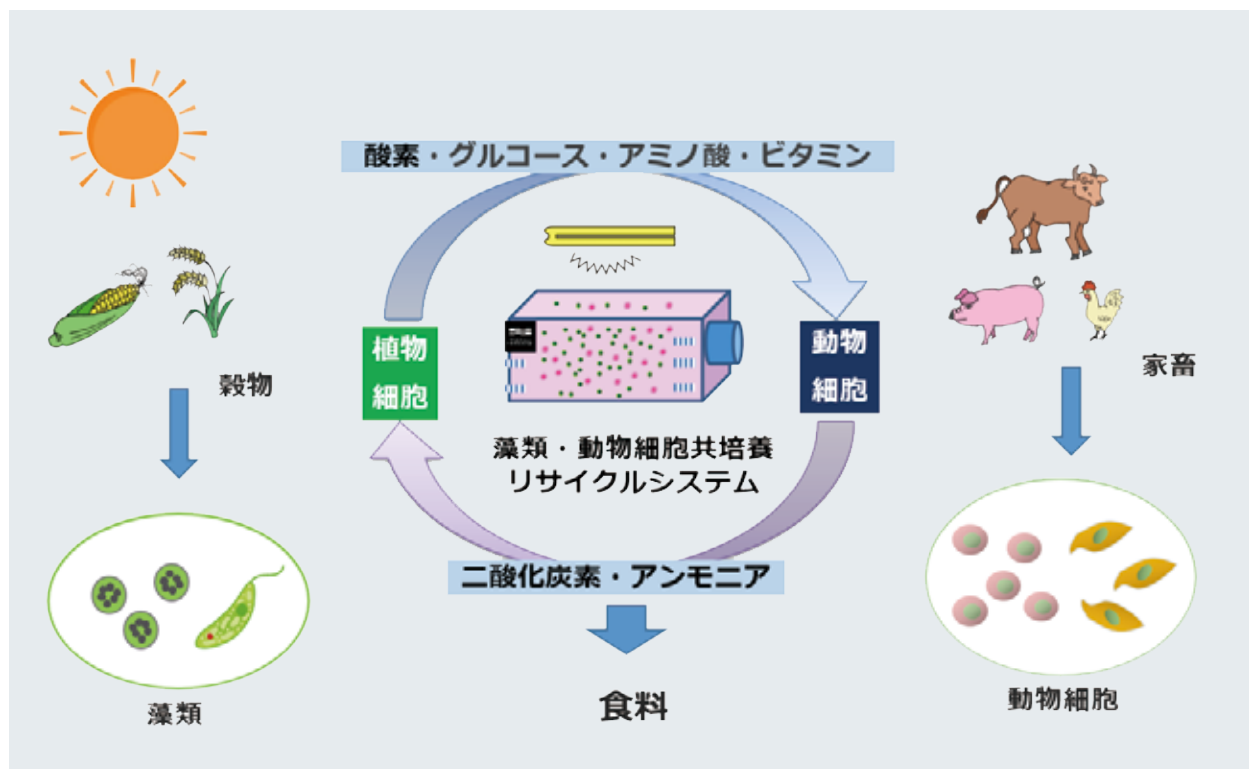
プロジェクト概要

【目的】

本提案では、光エネルギーを駆動源として食材となる藻類と動物細胞を持続的に増幅できるリサイクル培養システムの構築を試みる。すなわち光合成能を持つ藻類が動物細胞の増幅に必要な酸素・栄養素やビタミン類を供給、一方で動物細胞が老廃物として排出する二酸化炭素やアンモニアなどを藻類が利用するという、現在の穀物栽培と家畜飼育を主体とした食料生産プロセスと比較して省資源かつコンパクトな細胞培養による食料生産プロセスの開発を目指す。このリサイクル培養システムを確立することで、地上においては持続可能で安価な、また宇宙においては閉鎖空間での安定した革新的食料生産プロセスを実現する。

【内容】

- ①藻類と動物細胞の共培養ユニットの開発
藻類と動物細胞間で酸素・二酸化炭素・アンモニア等の物質交換可能な共培養ユニットを開発する。
- ②藻類から動物細胞への栄養素供給機構の開発と共培養ユニットへの導入
藻類が産生したグルコース・アミノ酸・ビタミンを利用して動物細胞が培養できる系を確立する。
- ③事業化を目指し藻類と動物細胞を持続的に増幅できるリサイクル培養システムの開発
藻類・増殖因子分泌細胞・食材となる細胞（筋細胞）の各培養ユニットを連結した藻類と動物細胞を持続的に増幅できるリサイクル培養システムのプロトタイプを開発する。
- ④宇宙への技術展開に向けた検討



研究テーマ名 | CO₂を炭素源とする電気化学的アミノ酸合成プロセスの開拓

機関名： 国立大学法人九州大学、株式会社ナノメンブレン

プロジェクト概要

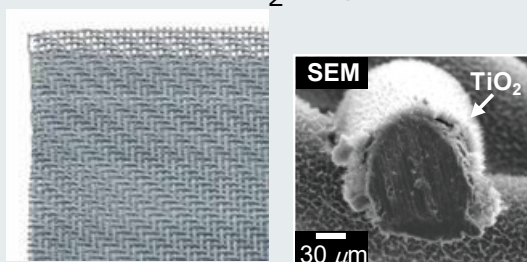
【目的】

人類が宇宙環境で生命を維持するには、太陽光発電で得られる電力を使って、CO₂から生命活動を支えるアミノ酸などの化学物質を効率よく合成する技術の開発が求められている。これまでに、二酸化チタン触媒上での電気化学反応により、有機酸と水と窒素源から9種類のタンパク質構成アミノ酸を合成することに成功している。本研究では、工業的価値の高いシステインの電気化学合成に挑戦する。さらに、CO₂を出発原料とするアミノ酸の合成ルートの探索を行う。

【内容】

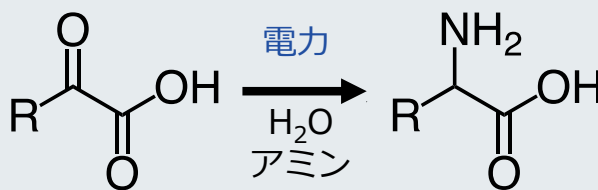
二酸化チタン電極触媒は、水溶液中でα-ケト酸を高選択的に還元する。この特異な反応選択性を利用すれば、窒素源共存下におけるα-ケト酸の電気化学的還元によりアミノ酸を効率よく合成することができる。本研究では、電気化学的にシステインを合成するため、その原料となるα-ケト酸の合成経路を探索するとともに、原料合成とシステイン合成を行う。

また、CO₂から電気化学的にアミノ酸を合成するために最適な前駆体についての机上検討を行う。

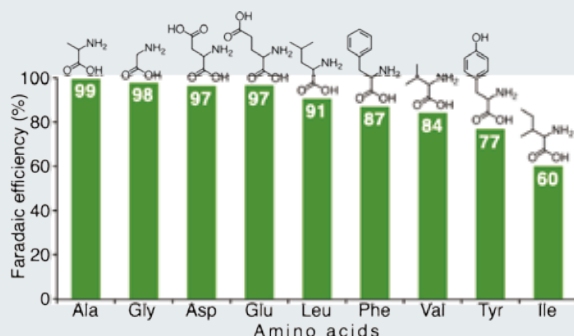
TiO₂触媒M. Sadakiyo, M. Yamauchi et al. *Sci. Rep.* (2017)

α-ケト酸

アミノ酸



アミノ酸合成のファラデー効率



T. Fukushima, M. Yamauchi
Chem. Commun. (2019)
“世界初”アミノ酸のフロー合成

研究テーマ名 | 次世代分光技術デュアルコム分光による多成分ガスの高精度・リアルタイム分析技術の開発

機関名： 国立研究開発法人産業技術総合研究所、ネオアーク株式会社

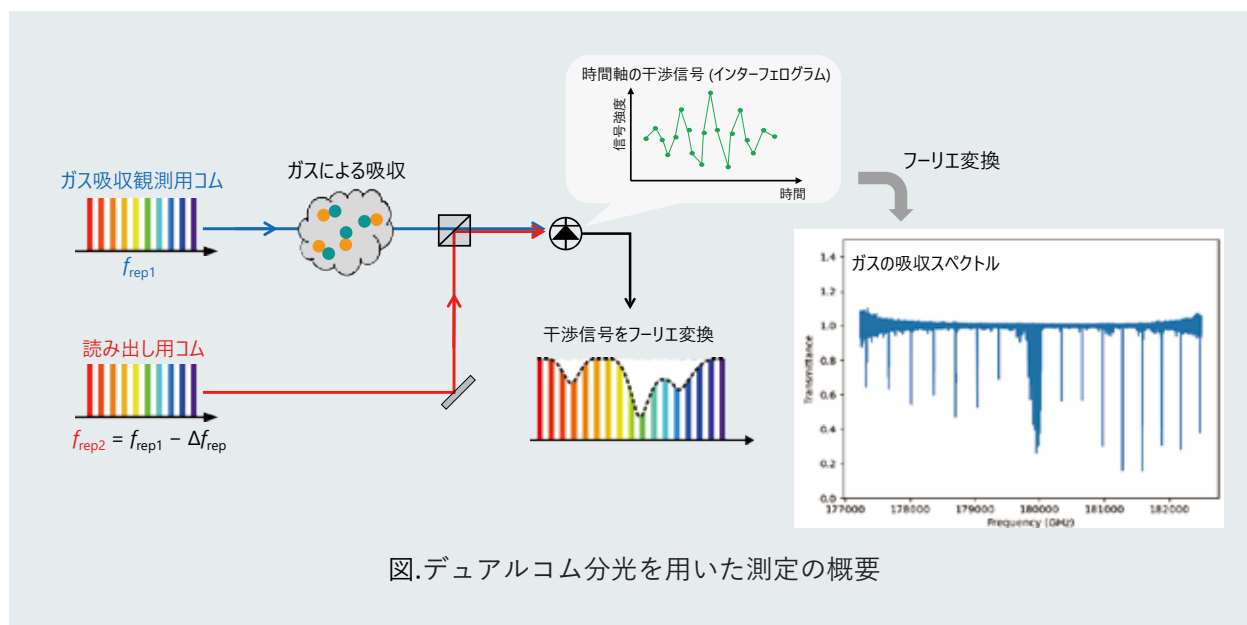
プロジェクト概要

【目的】

物質成分特定や定量化、分子構造解析など、分析技術は広く産業分野で活用されている一方で、測定精度と即時性の両立が課題となっている。宇宙の閉鎖環境では人や装置から発生する多成分の有害ガスが蓄積し健康被害を及ぼすため、危険の素早い検知にはリアルタイムモニタが必要になる。さらに月面や火星において、その場分析は資源探査の観点より不可欠な技術として挙げられている。このような分析技術のベンチマークとしてフーリエ変換型赤外分光（FTIR）があげられるが、装置の大きさがスペクトル分解能が制限されてしまうため、デュアルコム分光を用いた高精度・コンパクト・リアルタイム性を有する分析技術の研究開発に着手した。

【内容】

本研究は小型で高精度、リアルタイムかつ簡便な計測手法を目指し、デュアルコム分光による多成分ガスの分析に取り組んでいる。デュアルコム分光とは、2つのパルス光を用いる分光法で、片方の光をターゲットガスに通し、出てきた光に読み取り用の光を干渉させることでターゲットガスに含まれるガス種特有のスペクトルからガス種・ガス濃度を特定することが可能である。本研究の目標は、①複雑な炭化水素も含めた多成分ガスの高分解能な分析（スペクトル分解能100 MHzオーダー、周波数決定精度1 kHzオーダー）、②多成分ガス的高速・リアルタイム分析（100 msecごとの計測を可能にする）、③分析装置の小型・軽量・省電力化があげられる。



研究テーマ名 移動体搭載用の燃料再生可能な燃料電池システム用超高压複合容器製造技術

機関名：中国工業株式会社、九州工業大学、産業技術総合研究所

プロジェクト概要

【目的】

月・火星の拠点、移動車両、作業機械などでは、大きな電力を必要とし、大容量で軽量の電池が必須となるため、発電後に生じた水を回収・電気分解し、酸素と水素を再生可能な燃料電池システムの構築を目指している。そのためには軽量でガス貯蔵効率が高く、ガス透過が少なく、極限環境下でも使用可能な燃料電池システム用超高压複合容器が求められている。本研究では、質量効率としては燃料電池自動車用と同程度を維持しつつ、水素ガス透過量を従来の10分の1、そして広い温度範囲と放射線環境下で使用可能な極限環境適用性材料で構成される超高压複合容器の実現を目的とする。

【成果】

移動体搭載を目的とし超高压複合容器製造技術を獲得するため、各研究実施項目に対して、以下の成果を得た。

- ①質量効率の向上：フィラメントワインディングパターンの効率化により、安全率2.25、設計圧力42MPaにおいて水素貯蔵効率6.3%を達成
- ②ガス透過量の低減：クレーストをガスバリア材に採用し、試作・透過試験を実施し、目標値（0.2cc/L/h）に対して透過率が1/5に抑制されたことを確認
- ③極限環境下で適用可能なライナー開発：液体酸素適合性を有する樹脂炭素繊維複合材を開発
- ④上記成果を統合した水素ガス高压容器を実現

複合容器の研究開発内容

● 質量効率を上げるためのFWパターンの効率化

超高压複合容器の質量効率を上げるために、フィラメントワインディングパターンの効率化



● 高ガスバリア性、極限環境適用性材料の検討

適用性材料の検討として、熱可塑樹脂、クレースト等の候補となる各種ライナー材、ガスバリア材について強度試験、酸素適合試験、ガス透過試験を実施、評価し、その最適構成を検討

● 目標仕様

上記の研究開発成果を統合し、以下の目標を達成する

項目	目標仕様
設計圧力	42 Mpa（移動体用を想定）
H ₂ ガス透過量	従来と比較して 1/10 以下
サイズ	45 L（180Lまで拡張可）
質量効率	燃料電池自動車用と同程度

適用先

地上用途 → 水素ステーション
(出典：大阪ガス プレスリリース)



宇宙用途 → 再生型燃料電池システム
(ガス貯蔵タンク)



研究
テーマ名 全固体リチウムイオン二次電池の開発

機関名：日立造船株式会社

プロジェクト概要

【目的】

全固体リチウムイオン二次電池は、高エネルギー密度、使用温度域が広い、高い安全性、そして長寿命と言った特徴を有することから、従来の電解液式のリチウムイオン電池で抱えていた課題の解決が期待されている。宇宙用途においても、従来の電池では適用することが困難であった極限温度環境下での適用が有望視されている。本研究では、全固体リチウムイオン二次電池の試作・評価を通じ、極限環境に対する耐性強化、ならびに大型化・高容量化を実現し、将来の惑星探査ミッション適用に向けて革新的な蓄電池技術を獲得することを目的とする。

【成果】

宇宙探査機への適用を目的とし、これまでの実績を上回る性能の実現するため、各研究項目を実施し以下の成果を得た。

- ①極限環境下で安定動作可能な全固体リチウムイオン二次電池の検討、試作：材料、構造の改良により目標である $-40^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$ において1年以上の運用に耐え得る電池の開発に成功。
- ②二次電池の大型化・高容量化：積層構造改良により、これまでの実績を大きく上回る5Ah級電池の試作に成功し、大型化・高容量化を実現。
- ③試作電池の各種評価：各種極限環境下での評価を行うことにより課題を抽出し、劣化要因の絞込みを行った。

本電池の特長・研究目標

無機固体電解質を使用しているため以下の特長を有する

● 高い安全性

可燃性ガスが生じることがない

● 高エネルギー密度

同一パッケージ内で積層でき、高電圧、高容量化が可能

● 幅広い使用温度範囲

液式の同電池とは異なり、電解質の凍結や蒸発がなく、低温から高温まで動作可能

● 長寿命

リチウムイオンのみを移動させるため、副反応が抑制され、劣化の少ない安定な動作が可能



探査ハブ研究では、厳しい高温・低温環境耐性、ならびに高容量化に関して、これまでの実績（温度範囲： $-40^{\circ}\text{C}\sim +100^{\circ}\text{C}$ 、容量：数Ah）を上回る性能の実現を目標とする。

適用先、事業化構想

今後、成長が見込まれる蓄電池3分野への用途を検討中

【電力系統用蓄電池】

太陽電池発電所の出力を安定させるほか、揚水発電の代替手段



【定置用蓄電池】

非常用自家発電機の代替や猛暑時のピークカットに活用



【車載用蓄電池】

電気自動車・燃料電池自動車など、次世代車に必要不可欠



併せて、宇宙用途への展開も視野に

【宇宙用蓄電池】

従来の電池が適用困難である極限環境下のミッションに搭載



研究
テーマ名 固体化マリンレーダーの開発

機関名：株式会社光電製作所、株式会社東洋技術工業

プロジェクト概要

【目的】

船舶の航行の安全を守る“マリンレーダー”では、周波数の有効利用や維持費負担の低減から、マイクロ波の出力に半導体増幅器を用いた“固体化マリンレーダー”の開発が求められている。近年半導体増幅器はワイドバンドギャップを達成するGa₂N（窒化ガリウム）を代表に、高い出力電力を得ることが可能になってきているが、小さな船舶に搭載するには未だ高価であるのが現状である。本テーマではこの低コスト化に着目し、商用機として市場展開が可能な性能、価格、寸法を満たした固体化マリンレーダーを開発することを目的とする。高出力な半導体増幅器は様々なシステムに応用可能であり、この成果は宇宙応用を含め、広く展開が可能と考える。

【成果】

JAXAが保有する半導体増幅器の開発実績と、光電製作所が保有する船舶用センシング機器の技術を融合し、民生用途としては世界最高となる出力レベルのX帯固体化マリンレーダーを発表した。

開発したレーダーは空調設備のない屋外環境において安定的に400Wの送信信号を出力することが可能であり、また周波数安定性の獲得から移動物体の速度情報検知など探知能力の向上も果たした。

この成果は船舶用途としてユーザーの維持費負担低減や周波数利用効率の向上を通じて産業の活性化に寄与するとともに、宇宙応用としては2020年12月に予定されている「はやぶさ2」の帰還カプセル回収に適用される。



研究テーマ名 長距離空間光通信を実現する光通信モジュールに関する研究

機関名：ソニー株式会社

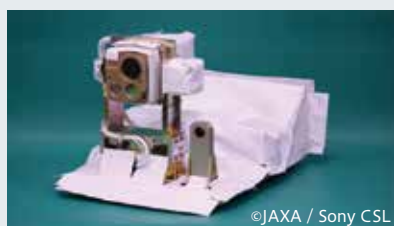
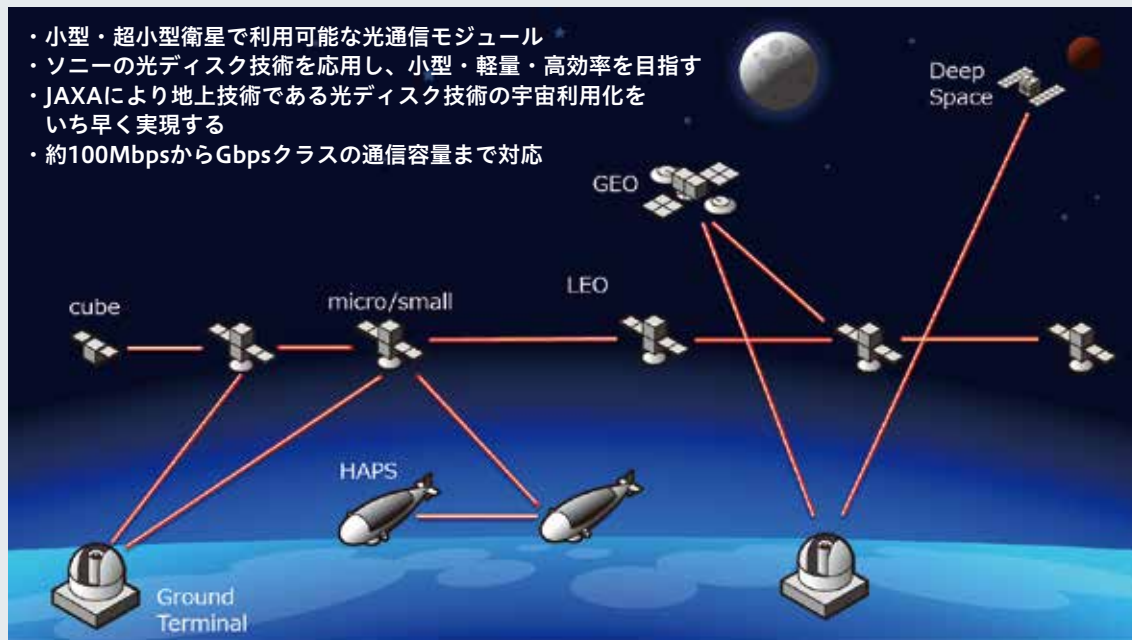
プロジェクト概要

【目的】

近年、超小型衛星技術や再利用ロケット技術の進展を中心とした技術革新により地球低軌道の利用が進んでいる。一方で地球低軌道はインターネット通信網には常時接続されていない。本研究は、地球低軌道をインターネット通信網と常時接続可能とすることを目的として、超小型から小型衛星において運用可能である光通信モジュールの基盤技術を確認することを目的としている。このため、衛星向けの光通信モジュールを小型、軽量、高効率することが重要である。本研究では、すでに長年の実績を有する小型・軽量・高効率の光学系および機械制御系を持つ光ディスクの技術を適用した基盤技術開発を行う。

【成果】

本研究により、光ディスクのレーザー光学技術、集積光学系技術、制御技術などを導入し、光通信光学系の重量を約1.5 (kg) 程度、制御角度範囲を±約500 (mrad) において約10 (μ rad) の精度で実現することができる見通しを得た。本成果に基づいて宇宙探査イノベーションハブと軌道実証を目的とした共同研究を実施しSOLISS (Small Optical Link for ISS) を開発、国際宇宙ステーションにおける曝露部を利用した光地上局との通信試験を2019年10月より行った。その結果、2020年3月に予め設定したサクセスクライテリアのうち、エクストラサクセスと定義したEthernet100Mbpsによる双方向通信を実現した。また、SOLISS光通信は第4回宇宙開発利用大賞の内閣総理大臣賞を受賞した。



SOLISS フライトモデル



SOLISSからの光通信で転送されたHD画像

研究
テーマ名 | 多目的全方向移動クローラー共通台車の設計

機関名：トピー工業株式会社、福井大学、有人宇宙システム株式会社、東北大学

プロジェクト概要

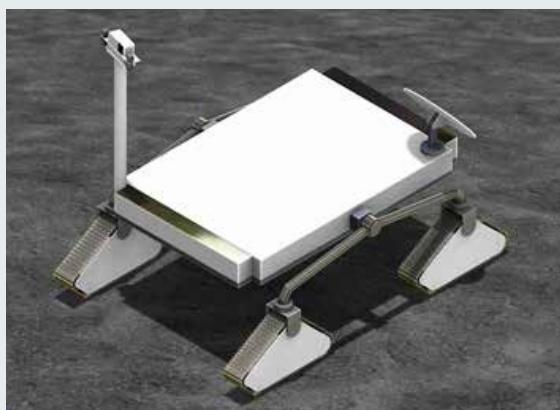
【目的】

月・火星拠点では、移動、作業、運搬など、多くの場面で車両が必要となるが、地上のように多種多様の車両を持ち込むことは現実的ではない。一方、地上においても、人が立ち入れない極限環境（海洋、原発など）を想定し、多目的な移動機構が検討されている。

そこで、目的に合わせた異なる作業部分を取付可能な、走破性・機動性が高い共通台車を研究する。具体的には、上載質量が大幅に変化した場合にも走行性能を維持可能で、登坂能力や全方位移動可能での位置決め精度が高い、革新的移動機構を備えた共通台車を実現する。

【成果】

悪路の走破性は通常のクローラー方式で実現可であり、位置決めは路面が整った条件ではタイヤ等で可能である。これらの両立と軽量化を兼ね備えた多目的全方向移動クローラー共通台車の検討及び設計を行った。具体的には、模擬路盤の走行試験装置を用いてタイヤ方式や履帯方式と走行性を評価し、さらに登坂や乗り越えの試験により履帯方式としての優位性を明確化した上で概念検討を行い、概念図を作成した。



共通台車のイメージ

共通機能（移動、通信など）を受け持つベースとなり、多目的に使う。

全方向クローラの試験風景

©トピー工業



研究
テーマ名 超高感度二次元同時距離計測センサの開発

機関名：浜松ホトニクス株式会社

プロジェクト概要

【目的】

月や惑星表面での活動において周囲の地形を正確に認識することは、自己位置や障害物の少ない走行経路の決定など自動・自律制御のために必須の技術です。また、地上の自動運転車、自動建設機械、ドローンなどにおいても対象物（道路、地面、障害物等）の形状と位置を把握する必要があります。そのため周囲の地形や人工物の形状を正確に認識する、これまでに無い距離画像（3次元形状認識）センサの実現を目指した研究開発を行います。このようなセンサは、自動運転車、自動建設機械、ドローンなどをはじめ、汎用的に、幅広く産業界で利用されると考えられます。

本研究では、距離計測センサをアレイ状に並列構成し、単一の光パルスによって、同時に距離計測を可能とする、超小型軽量かつ超高感度の二次元同時距離計測センサ Flash LIDAR の開発を目的とします。

【成果】

本研究の距離画像センサは、光センサと光の往復時間（TOF: Time Of Flight）を測定する回路（ROIC: Read Out IC）を一体とした画素をアレイ状に配置した専用デバイスで3次元距離画像を取得することができます。光センサには単一光子も検出可能な高感度APD（Avalanche Photo Diode）をアレイ状に配置、その下に集積回路で製作したROICを垂直接合しています。画素数は128×128、視線方向の距離分解能は10cm以下を実現しています。

本センサを使った測距システムは、

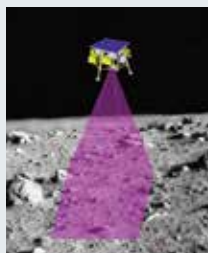
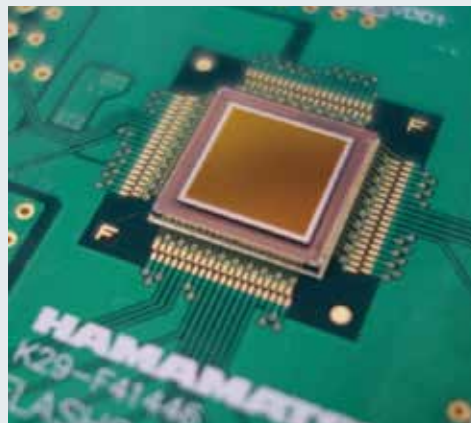
- ・超高感度で必要な光量や光学系への負担が少ない
- ・時刻同時性が高く飛翔体や走行する車両などに適用可能
- ・構造が簡易で小型軽量
- ・太陽などの背景光との識別が可能

といった特徴があり、地上での自動運転車から宇宙探査機まで幅広い応用が期待できます。

距離画像センサの応用例



自動運転車の車載LIDAR

月惑星探査機の
障害物検出センサ軌道上ランデブー
ドッキングセンサ

試作した距離画像センサ 128×128画素



撮像対象



距離画像 (m)

試作センサの屋外での距離画像撮像結果

研究テーマ名 | マルチスケール構造制御による最適設計可能な衝撃吸収金属材料の理論構築と実用化検討

機関名：株式会社ロータスマテリアル研究所

プロジェクト概要

【目的】

一方向性気孔を有するロータス型ポーラス金属を優れた衝撃吸収材料として実用化するためにCAEツールを確立し、最適な構造を提案・実証すると共にその実現性を材料開発および生産性の面から検証する。それにより将来的な最適材料およびその衝撃吸収材料としてのアプリケーションとその有用性の指針を見いだす。

■研究項目と達成目標

- ①10-100 m/s以上の低速-高速衝撃の広い速度領域にて高いエネルギー吸収能を発現するエネルギー吸収材を開発するための理論構築：非線形・衝撃解析等を用いてそのミクロ・マクロ構造と衝撃吸収挙動の関係を明らかにすること等。
- ②設計理論の構築および最適構造の提案のための実験的アプローチ
- ③衝撃吸収材料としてのロータス金属の製法確立と生産性の検証：現有の連続 casting 装置を利用してロータス金属(CuおよびMg)を作製する際の気孔率、スキン層の構造およびその体積分率を任意に制御する手法を確立する。

【成果】

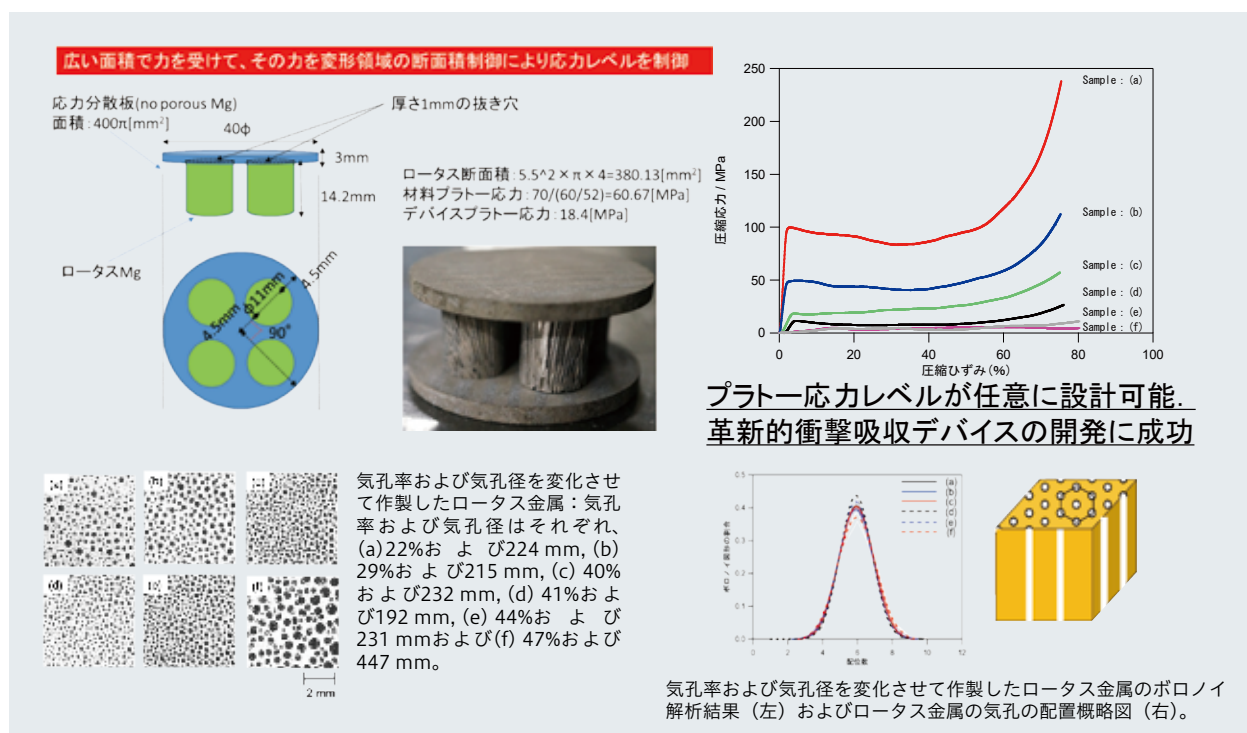
円柱状の気孔が一方向に配列したロータス型ポーラス金属（ロータス金属）を作製し、エネルギー吸収材料としての用途開発を行った。具体的には、ロータスマグネシウムの圧縮特性を調べ、要求されるエネルギー吸収量に対応可能なマルチ構造を付与した衝撃吸収デバイスを開発した。

■特筆すべき成果

エネルギー吸収デバイスを開発し、特に以下のことを明らかにした。

- 要求される吸収量、応力レベルに合わせた最適設計が可能で広い用途が期待できること。
- デバイス体積に対し最も高い吸収効率を有し、エネルギー吸収材料の小型化、軽量化に期待できること。
- 開発したデバイスは高いコストパフォーマンスを有し、量産が期待できること。

上記のような、最適設計可能で最もエネルギー吸収効率の高いデバイスは、金属においては、類を見ない。世界に先駆けて将来の衝撃吸収材料のイノベーションとなる技術シーズを開発・顕在化した。



研究テーマ名 ポーラスAlの気孔構造制御による軽量衝撃吸収材料の開発

機関名：名古屋大学

プロジェクト概要

【目的】

本研究では、超軽量金属素材であるポーラスアルミニウム（以後、Alと略記）の気孔構造を高次制御する。特に、ポーラスAlの衝撃吸収能力に着目し、高プラトー応力と高緻密化開始ひずみの並立により、軽量で高衝撃エネルギー吸収量を示すポーラスAlを開発する。ポーラス構造化の技術としては、スパーサー法および金属粉末積層造形法（3Dプリンタ）を用い、前者では気孔径のバイモダル化、後者ではラティス構造の最適化を通じて課題解決を図り、デザインナブルな軽量高衝撃吸収素材を開発する。

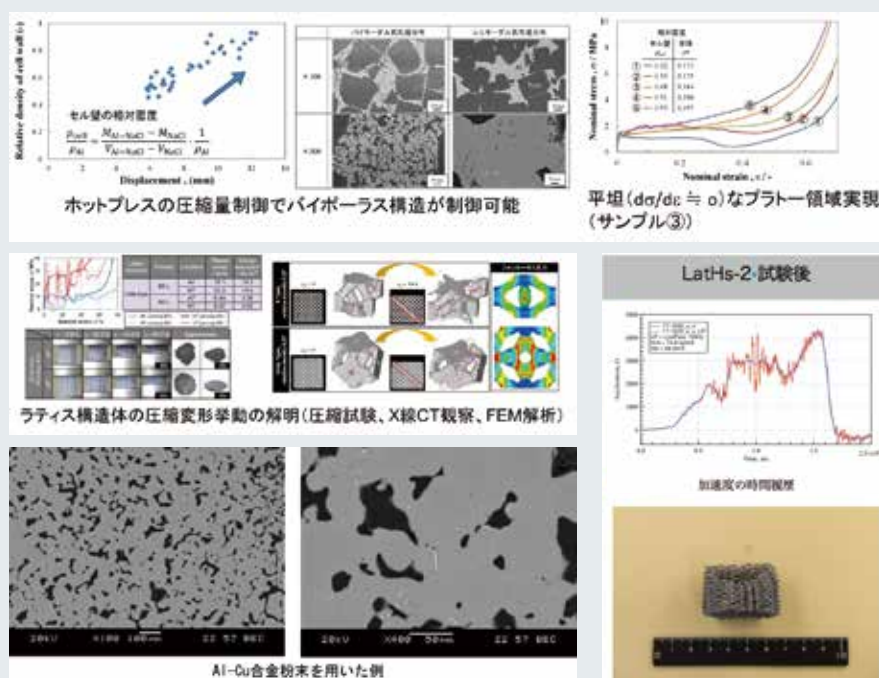
■研究項目と達成目標

- ①スパーサー法によるポーラスAlの製造と気孔形態高次制御：気孔率80%以上、気孔径30 μm 以下と300 μm 以上のバイモダル構造を持つポーラスAlの製造
- ②金属3Dプリンタを用いたポーラスAlの製造と熱処理による組織制御：達成目標：熱処理により、延性が20%を超える金属組織を得る。ポーラス構造としては、少なくとも3種類以上を作製し、圧縮変形挙動を明らかにする。
- ③ポーラスAlの特性評価とその解析（静的圧縮強度と熱伝導率）：変形メカニズムの解明。緻密化開始ひずみ60%以上、プラトー応力1～10 MPaで可変。エネルギー吸収効率が90%以上とする。押込試験により高速圧縮試験のための予備データを取得する。
- ④高速圧縮試験による衝撃吸収エネルギー：変形メカニズムの解明。衝撃圧縮試験でエネルギー吸収を評価する。

【成果】

本研究課題では、ポーラスAlを用いた衝撃吸収部材の開発に取り組んだ。ポーラスAlを粉末法焼結法および3D積層造形法により作製し、気孔形態（ラティス形態）と圧縮変形挙動との関係を解明した。設計自由度が高く使用環境に応じた衝撃吸収特性を任意に付与できる材料開発および産業応用可能な簡便なプロセス開発を実施した。

- (a) バイポーラス構造を持つポーラスAlの圧縮変形挙動を実証した。バイポーラス構造をもつポーラスAlを作製し、目標として掲げていた平坦なプラトー領域（ $d\sigma/d\varepsilon \approx 0$ ）を得ることに成功した。
- (b) ラティス構造体の圧縮変形挙動を理解するための観察・解析手法を構築した。3D積層造形により製造したラティス構造体を用い、圧縮変形挙動を連続写真およびX線CTを用いて観察した。また、ラティス構造特有の変形挙動をFEMを用いたイメージベースシミュレーションにより解析した。
- (c) 独創的なバイポーラスAl製造手法を開発した（大型化・量産化への道筋）。焼結助剤として二元系共晶Al合金（Al-Cu, Al-Mg）粉末を用いると無加圧焼結でバイモダルポーラスAlが製造できる可能性を見出した。この方法では、焼結時の加圧や焼結前の圧粉成形も不要であることから、簡便に大型の部材を作製する可能性が示唆された。
- (d) 高速圧縮試験により、高速ひずみ変形における衝撃吸収材料としての特性を評価することができた。また、簡便な静的圧縮試験から高速ひずみ変形中の変形挙動を予測可能であることを明らかにした。



研究テーマ名 | カーボンナノチューブ/シリカ多孔体コンポジット材料による軽量断熱材料の開発

機関名：名古屋大学、株式会社LIXIL、株式会社名城ナノカーボン

プロジェクト概要

【目的】

長期間にわたり極低温推進の蒸発を極めて小さく抑えて保持する必要がある軌道間輸送機や、半月の長く冷たい夜を越える必要のある月面探査ローバにおいて、断熱材は最も重要な要素のひとつである。

特に、軌道間輸送機などのロケット推進薬タンクの断熱は、射場における有圧環境下から打上後の宇宙空間における真空環境下の双方で高い断熱性能を発揮する必要がある。

また、地上技術においても、水素社会の実現に向け、液体水素の大型貯蔵タンクや液体水素タンクなど、極低温領域において適用可能な高い断熱性能を発揮する断熱材が求められている。

本研究では、極低温領域において高い断熱性能を有し、かつ軽量の断熱材の開発を目的とする。

【成果】

カーボンナノチューブは極めて熱伝導率が高い材料として知られており、断熱材への応用は皆無である。一方、機械的特性の高さや微量でも輻射伝熱を抑制する効果が見込めることが利点として挙げられる。

シリカ多孔体は、微小な空隙を多数有する微粒子であり、微粒子間の界面で熱抵抗が発生し、高い断熱性能を示す。しかし、シリカ単体から作製する成形体やシリカエアロゲルは機械的特性が低くバルク体としての応用は困難である。

そこで本研究では、自己耐圧性を有する真空断熱材の開発に向けて、芯材となる『軽くて、強い』支持体の作製を目的とし、この両材料の特性を組み合わせた「カーボンナノチューブ/シリカ多孔体コンポジット材料による軽量断熱材料」を開発した。

軽量断熱材の試作と評価



カーボンナノチューブ/
シリカ多孔体コンポジット試作品

適用先

地上用途 → 住宅、自動車
宇宙用途 → 軌道間輸送機、月面ローバー、スラスタ



ボイルオフカロリメータと
新芯材を封入した断熱材

研究テーマ名 極低温領域を想定した高性能断熱材および軽量な真空断熱構造の開発

機関名：有限会社オービタルエンジニアリング

プロジェクト概要

【目的】

長期間にわたり極低温推進の蒸発を極めて小さく抑えて保持する必要がある軌道間輸送機や、半月の長く冷たい夜を越える必要のある月面探査ローバにおいて、断熱材の性能は最も重要な要素のひとつである。特に、極低温領域では輻射熱伝達に比べ熱伝導が支配的となるため、従来型の宇宙用断熱材であるMLI (Multi-layer insulation) の断熱性能の低下が顕著となる。極めて高い断熱性能が要求されるこのような宇宙機においては、実装状態でMLIの断熱性能を高く維持し、試験前の設計時に精度よく断熱性能を予測できることが重要である。

また、地上技術においても、水素社会の実現に向け、液体水素の大型貯蔵タンクや液体水素タンカなど、極低温領域において適用可能な高い断熱性能を発揮する断熱材が求められている。

本研究では、極低温領域において高い断熱性能を有し、かつ軽量な断熱材の開発を目的とする。

【成果】

従来のMLIにおいて輻射フィルムの間に使われているネット状のスペーサに代わり、熱抵抗の極めて高い間欠型のスペーサ (NICS) により輻射フィルムを完全に分離することで、極めて高い断熱性能を有するとともに、断熱性能の不確定性を小さく抑えることが出来るNICS MLIの産業応用を検討する。

(1) 極低温タンク断熱材の開発

大規模な極低温タンクへNICS MLIを適用することを想定した断熱材の実装方法を検討し、実装可能な断熱方式手順を確立した。

(2) 自己耐圧性真空断熱材の開発

NICS MLIを真空パックすることで、VIP (真空断熱パネル) タイプの自己耐圧性を有する真空断熱材について検討し、空気がある地上においても真空二重層を用いることなく断熱性能を保持出来る断熱材を開発した。



研究テーマ名 | 高効率・低コスト・軽量薄膜ペロブスカイト太陽電池 デバイスの高耐久化開発

機関名：桐蔭横浜大学、兵庫県立大学、紀州技研工業株式会社、ペクセル・テクノロジーズ株式会社、株式会社リコー

プロジェクト概要

【目的】

提案者らが発明したペロブスカイト太陽電池は、低価格・20%以上の高変換効率・低照度下でも高効率を維持・フレキシブル化可能、などの優れた特徴を持つことから、次世代の太陽電池として世界中で注目され、開発が盛んに行なわれている。ただし、温度や湿気・光に対する耐久性の低さが大きな課題であり、実用化には至っていない。

本活動では、IoT社会におけるセンシング機器等の供給電源を主な適用先として、低照度の光に対して高い変換効率を持ちながら高い耐久性を有する軽量・薄膜型のペロブスカイト太陽電池モジュールの開発を目指す。

【成果】

1. 高効率化：太陽光（AM1.5、100mW/cm²）で変換効率 $\eta = 22.7\%$ 、屋内低光量下（白色LED、照度200lx）で $\eta = 27.6\%$ を達成。
2. 高耐久性化：高耐光性（1SUN、1000hクリア）、高耐熱性（80℃、1000hクリア）を有するセルを開発。
3. モジュール化：低照度対応の28×32mm（8.96cm²）6直モジュールで白色LED照明光入射時に $\eta = 26.2\%$ 達成。
インクジェット法によるペロブスカイト層成膜方法を確認し、 $\eta = 15.8\%$ を達成。
4. 高放射線耐性化：単セルにて1 MeV電子線照射量10¹⁶/cm²に対して発電性能維持率100%を達成。

【ペロブスカイト太陽電池の特徴】

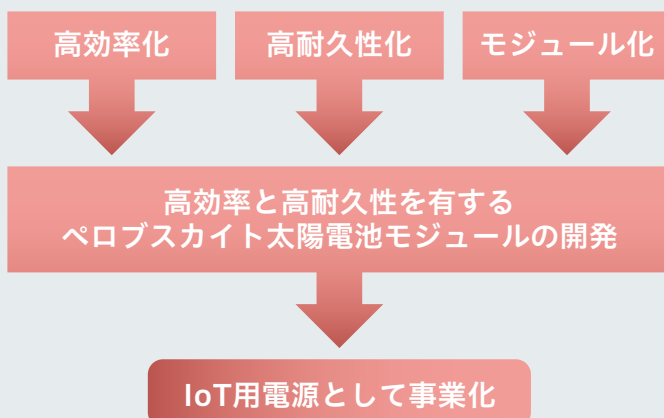
- ・低コスト（簡易な製造方法、安価な材料）
- ・20%以上の高変換効率可能
- ・低照度下でも高い変換効率維持
- ・フレキシブル化可能

【ペロブスカイト太陽電池の課題】

- ・温度や湿気・光への耐久性が低い

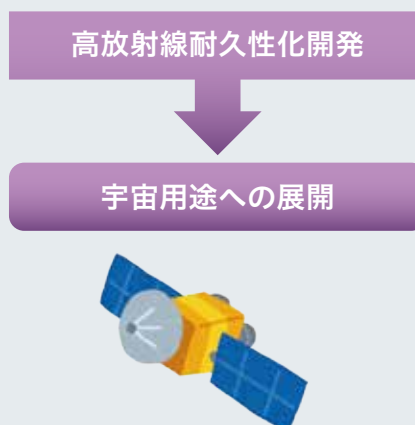
**JAXAが有する過酷な環境での
耐久性試験と評価技術で改善を目指す**

<ステップ1>



開発した6直列モジュール

<ステップ2>



研究
テーマ名

光電変換材料を用いた高感度放射線検出デバイスの開発

機関名：桐蔭横浜大学、ペクセル・テクノロジーズ株式会社

プロジェクト概要

【目的】

直接に量子変換して増幅電気信号として出力することが可能な新しいタイプの放射線検出素子を、有機無機ハイブリッドペロブスカイト材料を放射線吸収層に用いて開発し、宇宙用放射線を高感度にセンシングする性能を実証する。

ペロブスカイト結晶自体が光による発電が可能であることから、従来のセンサのような特別な電源系統を持つ事無く、自ら発電して駆動電力をまかなう事が原理的に可能である。また、厚膜結晶の製造が可能となれば、同時に高い検出能力を持つセンサへの応用が可能となる。これは地上における用途、たとえば医療用高感度センサ等への応用のみならず、電源状況に乏しい宇宙環境においては非常に有効であり、宇宙環境における放射線環境観測等への応用が考えられる。

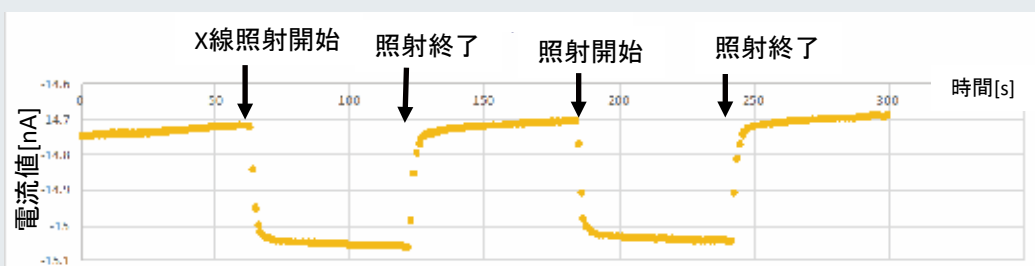
【成果】

- ① ペロブスカイト結晶厚膜の製法の確立
 - ・厚さが100 μm の平坦で緻密性の高い結晶膜に成型するペロブスカイト結晶粒子の製膜法開発を目的とし、いくつかの製造方法について試作を行った結果、熱圧縮による製造方法において400 μm 厚の素子を安定的に製造出来る手順を確立した。
- ② ペロブスカイトX線検出素子の開発
 - ・X線に対して感度を確認するため、軟X線発生装置を用いた照射試験を実施し、照射中において検出素子からの電流増加を確認した。
 - ・温度変化によるリーク電流の変化を測定した。
- ③ 放射線検出素子の宇宙環境における耐久性試験
 - ・若狭湾エネルギーセンターにおいて、陽子線照射試験を実施し、照射前後において電氣的な性能に大きな変化が無い事を確認した。

X線発生装置(Mini-X)



試作したX線検出素子

X線発生装置による
照射試験の様子ペロブスカイトX線検出
素子試作品（MaPbI3）陽子線照射試験の様子
@若狭湾エネルギーセンター

X線照射時のリーク電流変化の様子（X線による電流量増加を確認）

研究
テーマ名 高機能化マリンレーダーの開発

機関名：株式会社光電製作所

プロジェクト概要

【目的】

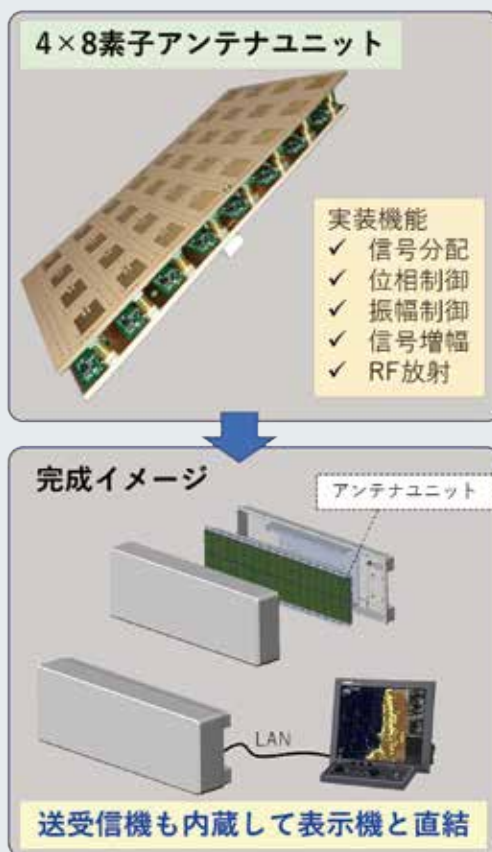
船舶に搭載する“マリンレーダー”では、長尺のアンテナをモーターにより回転させることで全周方向の障害物等の情報を得ているが、回転半径確保のために装置を設置する場所への制約が生じる。制約緩和の方策としてアンテナ走査を電子的に行う技術（フェーズドアレー技術）が有効であるが、回路規模の大幅な増大を伴うため非常に高価であり、一部の大規模システムにしか適用されていないのが現状である。

本テーマでは船舶搭載用のマリンレーダーの高機能化として、安価なフェーズドアレーレーダーを開発し、レーダーの使い方に革新をもたらすシステムを構築することを目的とする。

【成果】

位相・振幅制御、信号増幅・分配等の各種機能を積層構造で薄型に集積した4×8素子アンテナユニットを完成させた。本ユニットは独立に動作が可能であり、配置数・配置方向による性能選択が可能である。また位相・振幅制御ではアナログ方式の採用と校正手法の簡素化による小型・低コスト化も図った。

今後は完成したアンテナユニットと第1回RFP課題解決型テーマ『固体化マリンレーダーの開発』の成果物である固体化レーダー用送受信機を組み合わせ、レーダーの適用分野拡大に資するシステムを構築する。

適用
(大型船舶の近距離監視)FY2020の成果と
完成イメージ

研究テーマ名 スケーラブル完全孤立系燃料電池の研究開発

機関名：三菱重工業株式会社、JAMSTEC

プロジェクト概要

【目的】

北極観測や深海探査で使用する海中ビークルは、長期間にわたり陸地から孤立した状態で長距離の航行をします。そのため制限された体積の中で大容量な電源が必要となります（図1）。大容量でコンパクトな密閉型燃料電池は、海中ビークル用の電源として期待されています。

また、海中ビークルに洋上で給電する洋上電源として、太陽電池からの電力で水を電気分解して水素と酸素を再生・貯蔵し、必要に応じて発電する再生型燃料電池システムの研究も進んでいます。

密閉型/再生型燃料電池共に、不純物の蓄積が発電性能低下に直結する課題であるため、その課題を解決するシステムを試作し、長時間の発電試験を実施することで、システムの連続安定作動技術の確立を目指します。

宇宙でも海中/洋上で同様に完全に孤立したシステムで長期間の運用が求められるため、本研究で開発した技術を将来的に宇宙で転用することを考えています。

【成果】

- 密閉/再生型燃料電池システムの検討→完了
 - a. 製品仕様の検討及び設定
 - b. 試作仕様の検討及び設定
- 燃料電池スタックの製作→2019年度完了
- 水電解スタックの製作→2019年度完了
 - a. セル試作及び評価
 - b. スタック製作
- 試作システムの製作→2020年度完了
 - a. システム詳細設計
 - b. システム組立
- 試作システムの運転試験→2020年度完了
- 試作システムの評価・まとめ→2020年度完了

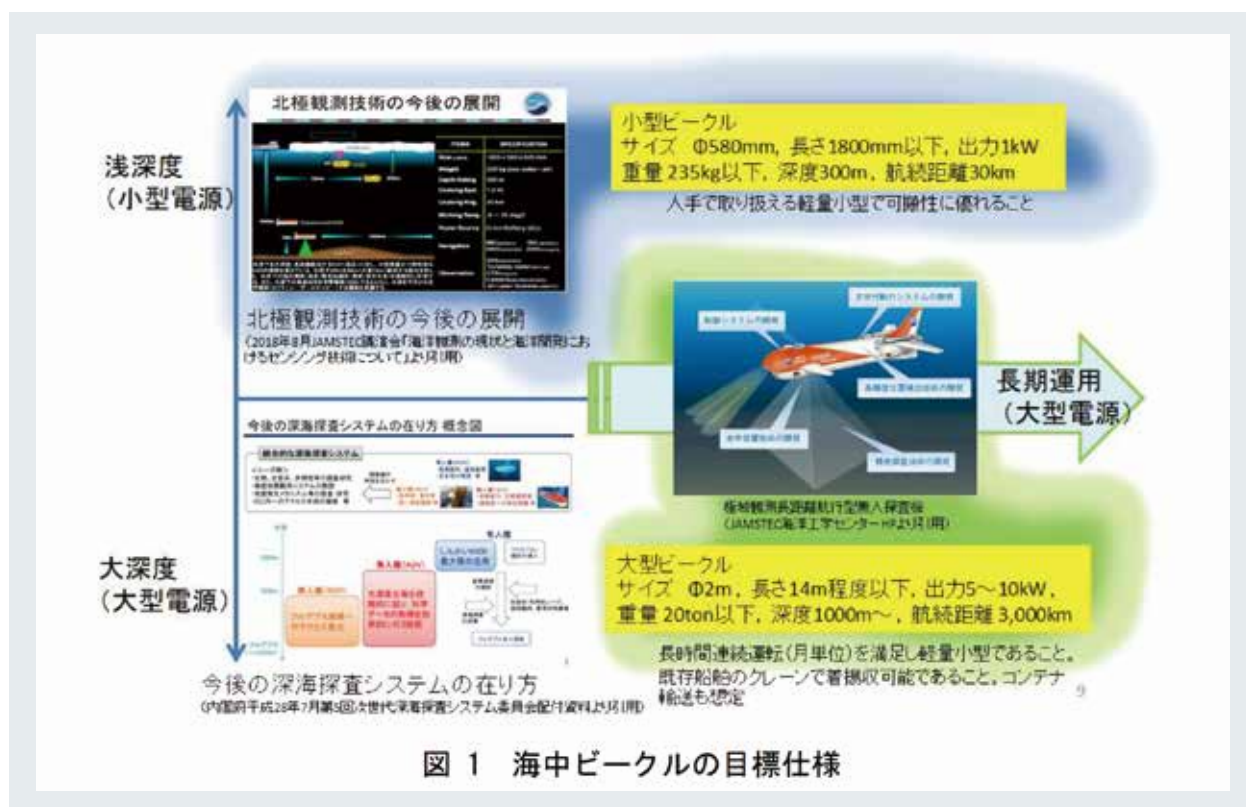


図1 海中ビークルの目標仕様

研究
テーマ名 高信頼性・小型スターリング冷凍機の開発

機関名：ツインバード工業株式会社

プロジェクト概要

【目的】

FPSC (Free Piston Stirling Cooler) 技術は、冷媒として少量の安全なヘリウムガスを用いた完全脱フロンの冷却システムである。冷却排熱構造が一体であることからコンパクトでありながら極低温の冷却を実現でき、また冷却制御がフルレンジで行える特徴を持つことにより、地上においては医薬、食品物流、エネルギー、計測の4分野で、品質管理などの観点で高度な温度管理が求められる比較的特殊な用途で採用が広がっている。今後民生用途や多様な製品へと応用を広げていくためには、当該技術の特徴である小型化を進め、信頼性を高めていく必要がある。

一方、将来計画されている月極域探査や始原天体探査において水氷や揮発性有機物などを調査することは、資源利用や科学の観点で非常に意義の高いミッションと考えられている。

例えば、月の極域や永久影に存在すると考えられている氷を蒸発させることなく回収して研究するには極低温に維持したまま、採取から分析まで行うことが理想であり、限られたリソースでも極低温に維持できる小型冷凍機の技術が非常に有効である。特に、長寿命を実現することで、木星以遠の天体からの極低温のままサンプルリターンする探査ミッションにも応用可能となり、これまでにない科学的知見を得ることができる。

このような地上の需要や探査ミッションへの応用のために、高信頼性化と小型化を最終的なターゲットとし、それに向けた要素技術検討を行い、実現に向けた指針を得ることを目的とする。

【成果】

既存技術をベースに、次の活動を実施した。

①アイデア創出と実現性の検討

FPSC冷凍機における各構成要素(再生器、モーター、ピストンの挙動、有効容積など)につき再レビューを行い基本設計を実施する。

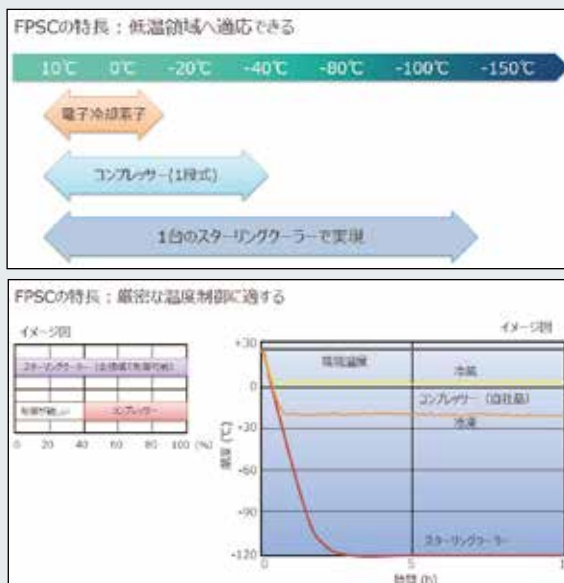
②冷凍機試作品の製作

FPSCは各構成要素が相互連鎖的に作用している。構成要素変更に伴い、内部ピストンの運動を都度調整する必要がある為、試作を通して運動バランスの調整を行い最適化を図る。

③冷凍機試作品の評価

試作した冷凍機の性能レビューを行う。

この結果、今後の製品の、性能・信頼性向上と小型化の指針を得た。



研究テーマ名 | 太陽電池用波長変換材料の開発

機関名：パナソニック株式会社

プロジェクト概要

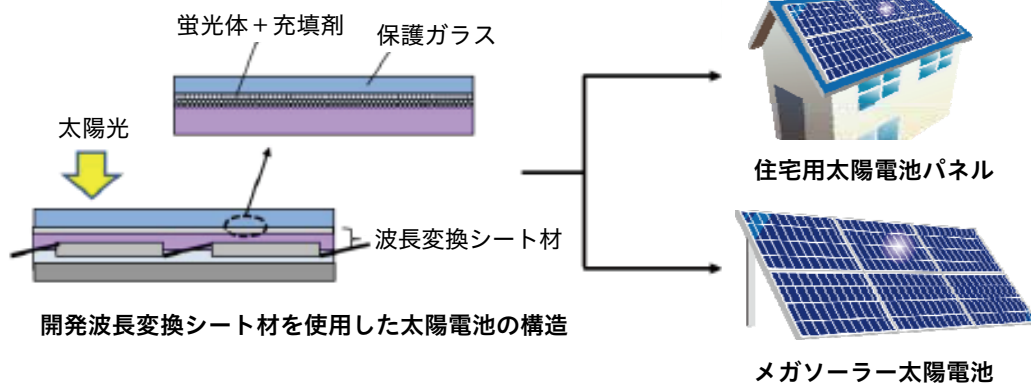
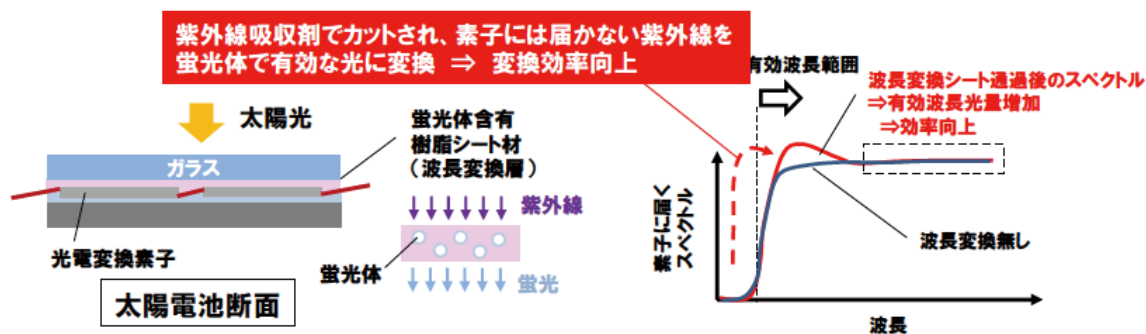
【目的】

太陽電池の発電効率を向上させるための波長変換材料およびこれを配合した波長変換シート材の開発を行う。太陽電池では光電変換素子を紫外線から保護するために、素子を封止する樹脂シート材には紫外線吸収剤が配合されており、紫外線はセルに届かず従って発電には寄与しない。波長変換技術では、この紫外線を吸収し、より長波長の可視光を発光する波長変換材料を樹脂シート材に含有させることにより、利用できる光量を増加させ発電効率を向上させる。高耐候性で信頼性が高く、太陽電池の樹脂シート材に配合した際、可視光の透過を妨げない波長変換材料の開発を行う。

【成果】

太陽電池用波長変換材料としての新規蛍光体を開発し太陽電池の光電変換効率向上を可能とするため、各研究項目を実施し以下の成果を得た。

- ①紫外線励起可能な高発光量蛍光体の開発：低屈折率の無機系蛍光体の探索を行い、シリカ蛍光体の合成を実現した。また、蛍光体の局所構造解析を実施し、発光及び外部量子効率向上に大きく影響を与える組成の相関関係を明らかにした。
- ②蛍光体の信頼性評価：合成したシリカ蛍光体に対して各種信頼性評価試験（高温高湿度試験・熱衝撃試験・耐光試験）を実施の上、試験前後において、目標値である吸収極大波長および蛍光極大波長が維持されていること、外部量子効率が初期値の90%以上であることを確認した。



研究テーマ名 | システム機器診断のための超小型ハーネスフリーセンサシステム実現の基盤研究

機関名：鹿児島大学、株式会社ビーコンテクノロジーズ、株式会社東洋技術工業

プロジェクト概要

【目的】

5Gシステム等の地上系の通信環境が大幅に進展していく中で、衛星搭載機器における通信環境も地上系と同等にすることで、地上、衛星に関係無く、大容量の情報伝送が可能になる。特に衛星系の情報伝送レートの高度化は、機器診断の精密化を可能とするだけでなく、地上系と結ぶことで、地上の診断（災害、気象等）を可能とし、新しいサービスを生み出す可能性がある。本研究ではHySICをベースとしたマイクロ波電力回収によるハーネスフリーセンサシステム実現にむけて、蓄電デバイス内蔵整流回路、送信モジュール、受信モジュールの実装技術の確立を図る。本アイデア研究ではその最初の段階として、個別技術の開発を進める。

【成果】

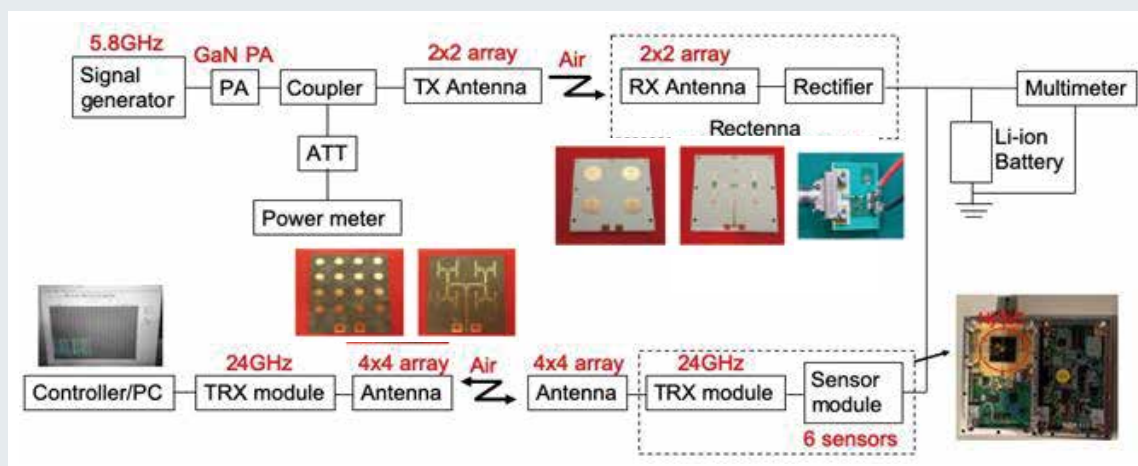
以下の項目について実施した。

- ①K帯HySIC基盤技術開発
- ②高安定K帯発振器の開発
- ③C帯高効率整流器の開発
- ④K帯C帯デュアルバンドアンテナ開発
- ⑤K帯電力増幅器を含む無線伝送システムの実現可能性検討

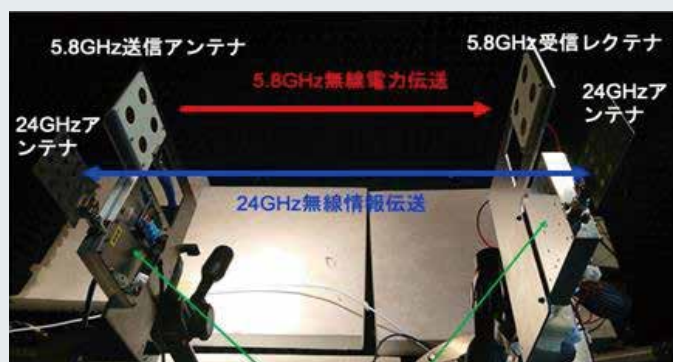
システムの集積化・小型化HySICに向けた基本性能を確認した。

【研究成果】

K帯ワイヤレス温度・湿度センサシステムをC帯無線電力伝送によりバッテリーを充電しながら駆動することに成功。



超小型ハーネスフリーセンサシステムと開発した要素技術



24GHzセンサ内蔵RFハーベスタ・送受信モジュール

ワイヤレス電力伝送によるセンサ駆動システム（プロトタイプ）

K帯ワイヤレス温度・湿度・加速度・振動センサシステムをC帯ワイヤレス電力伝送により、バッテリー充電しながらセンサを駆動しデータ伝送を行うことに成功

研究テーマ名 | ゼーベック素子を用いたサーマルハーベスター基盤研究

機関名：アクトロニクス株式会社、センサーコントロールズ株式会社、株式会社守谷刃物研究所

プロジェクト概要

【目的】

本研究ではワイヤレスセンサシステム（図1）の電力源に向けたサーマルハーベスタ実現のための基盤技術の確立を進める。

本研究は宇宙空間において、ゼーベック素子のエネルギー変換効率を最大限に高めるために高熱伝導材蓄熱材をコンパインしたゼーベック発電である。また、蓄熱材で貯めた熱を用途に応じて使用することができる。

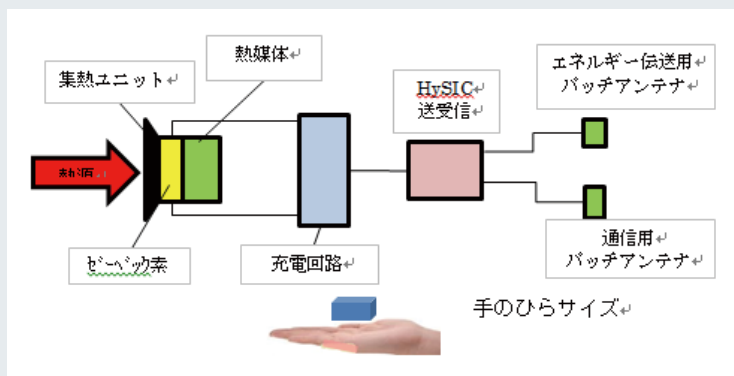
月や火星の惑星探査に関わるロケット、探査機、現地発電所等における応用も可能であり、「地産地消型」の技術課題への対応も見据えている。

【成果】

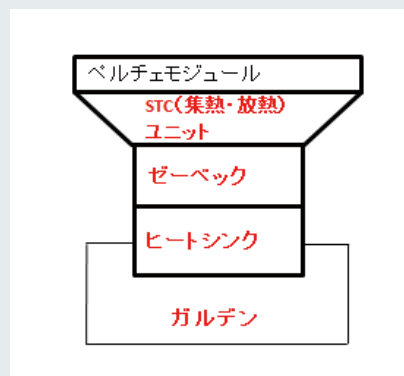
ゼーベック素子と蓄熱材を組み合わせ、蓄熱材の吸熱、放熱を利用することにより、ゼーベック素子の温度差を利用した常時発電ユニットである。

今回の研究では次のユニットを開発（図2）する。

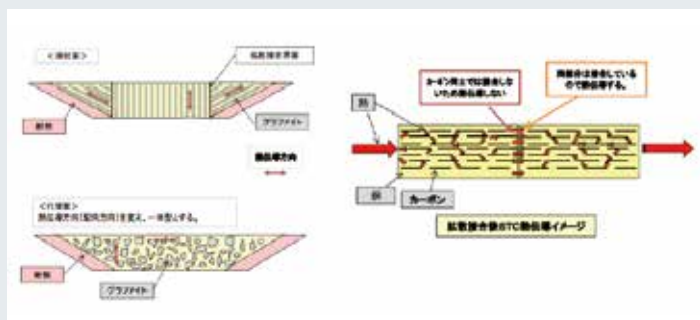
1. 蓄熱による日射、日陰を利用した繰返し発電ユニット
2. 高効率充電回路
3. 高効率集熱／放熱ユニット



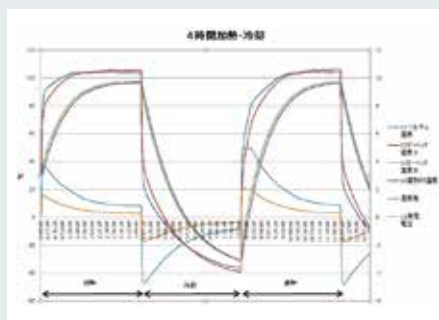
ゼーベック素子によるサーマルハーベスタ



蓄熱によるサイクリック発電ユニット



高効率集熱／放熱ユニット



加熱・冷却によるサイクリック発電

研究テーマ名 | 小型・軽量・高効率・低EMC電源を実現する電源基板設計技術

機関名：Link T&B 株式会社、名古屋大学、愛三工業株式会社

プロジェクト概要

【目的】

本研究では、地上の電気機器及び人工衛星などで用いられるコンバータなどで課題となるEMC低減を基板設計技術応用で具現する。パワー半導体の動作に起因して発生するノイズを、デバイスの容量特性を加味しながら、基板の寄生パラメータを最適化することでシステム全体のEMC低減を具現し、周辺回路や他の装置の安定動作に寄与する事を目的とする。低ノイズ化を実現することは、高効率や小型・軽量化にも寄与する。また、低ノイズ化により、SiC MOSFETやGaN HEMTなど高速動作を得意とする半導体デバイスを低ノイズで駆動することが可能となり、高効率を具現すると共に、低発熱が具現できるため、放熱フィン的小型化や軽量化のにも期待ができる。

【成果】

本研究では1 kW級の低EMC動作に重点を置き、システム全体のEMC低減を具現するデバイスの容量特性を加味した基板の寄生パラメータを最適化に関する研究と、宇宙応用を見据えた基板内の温度分布測定を実施した。

本研究では以下の顕著な成果を得た。

- ・ GaNを安全に使いこなすための数学モデルを確立し、実験的に実証した。
- ・ 研究成果を応用し、商用車載用電源の試作機を先行開発した。

大気圧中と真空中の基板の温度分布の比較を実施し、高放熱と低ノイズを両立したパッケージや実装の検討が重要であることが明確となった。

イオンエンジン動作中の「はやぶさ2」（イメージ）



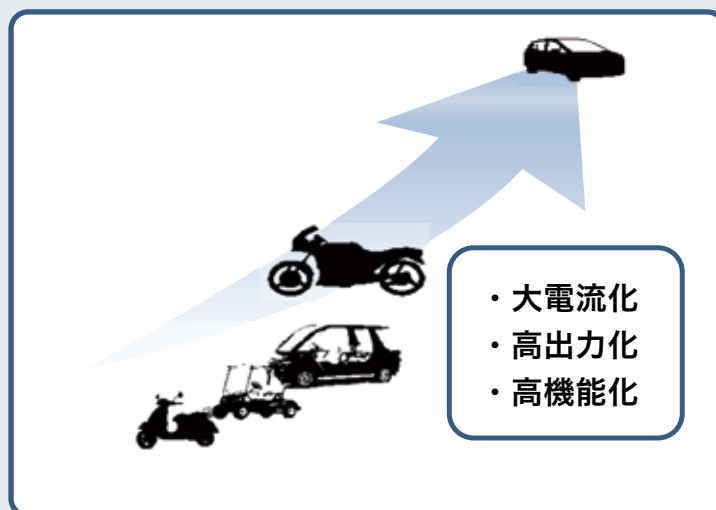
イオンエンジンは「電気推進」と呼ばれ、外部からの電力を推進力に利用することができる。軽量で高効率の電源は、宇宙機の軽量化ひいては高い加速度を実現することになる。



はやぶさ2
イオンエンジン用直流電源
(効率84%)

電源商用化イメージ

小型高効率電源を核とする電動化技術を磨き、小型モビリティ、二輪車両、四輪車両へと展開する。
(大電流化、高出力化、高機能化がキーとなる)



研究
テーマ名 超軽量電磁波遮蔽材料の開発

機関名：名古屋大学、山形大学、日本ゼオン株式会社、パナソニック株式会社

プロジェクト概要

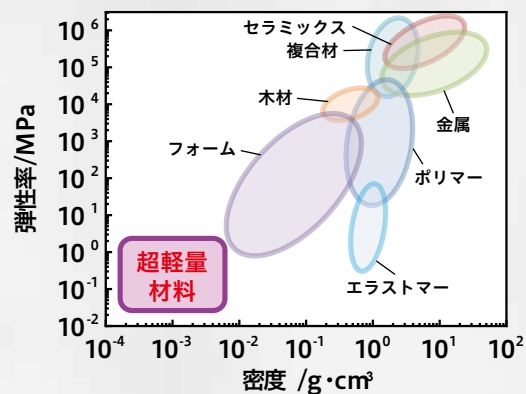
【目的】

宇宙機の重量低減に向けて、無線通信や給電のワイヤレス化が検討されている。これを実現するために、電磁適合性の確保が求められている。近年、CPUや無線通信速度の高速化、周波数帯域の拡大により、電磁適合性を確保するためには、高度な電磁波遮蔽技術が必要とされている。そこで本研究開発では、超軽量かつ優れた電磁波遮蔽特性を有する超軽量電磁波遮蔽材料の開発を目的としている。電磁波遮蔽特性を評価し最適化することで、宇宙機への応用を目指すと共に、5G時代に不可欠な電磁波遮蔽技術へと展開することを目的とする。

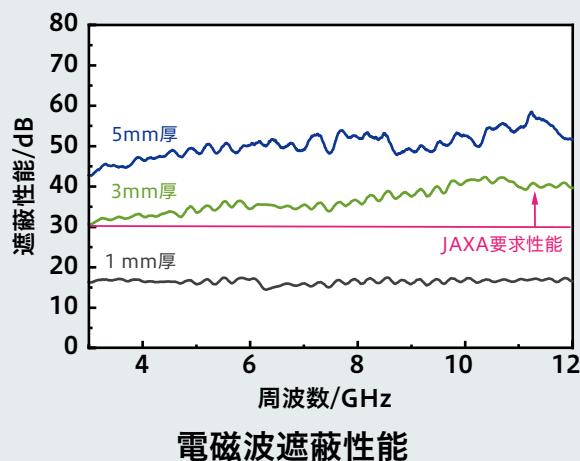
【成果】

カーボン材料をベースにした超軽量材料を作製し、3～12GHzの周波数において、厚さ3mmで30dB以上のシールド性能を示すことを明らかにした。また導電率を制御することで電磁波吸収材料も得られることが分かった。10GHzにおいて、入射角、偏波に依らず、おおむね10dB以上の吸収性能を確認した。さらに、10GHz～100GHzの高周波数帯においても、広い周波数帯で高い吸収性能を示し、最大で20dB以上の吸収性能が得られることを明らかにした。耐久性や量産性に関する課題も明確になり、改善に向けた道筋を示した。また、マーケティング活動を展開し、地上用途として軽量、電磁波遮蔽/吸収が活かせる航空・無線通信関連を有望として、事業化検討予定である。

超軽量材料



開発品



電磁波遮蔽性能

研究テーマ名 | MTJ/CMOS Hybrid 技術による待機電力不要システム研究、及びその耐環境性試験（宇宙用途向け）

機関名：東北大学

プロジェクト概要

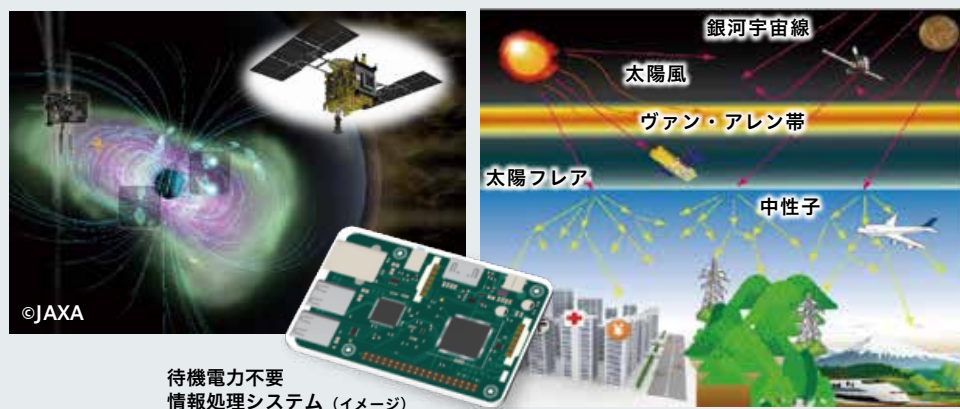
【目的】

宇宙探査において、月、火星以遠の探査には、エネルギー源となる太陽光が微弱な環境下で10年以上の長期ミッションが想定されるため、既存技術ではなしえない超低消費電力の電子システムが求められている。また、宇宙機の電子システムには、待機電力不要に加えて宇宙放射線耐性の両立が重要な課題となっている。本プロジェクトでは、スピントロニクス素子である磁気トンネル接合（MTJ）とCMOS技術を融合させたMTJ/CMOS Hybrid技術を用いて、待機電力不要システムを研究し、飛躍的な演算効率向上と桁違いの低消費電力化を実現する革新的半導体デバイス・集積回路の実現を目指す。

【成果】

MTJ/CMOS Hybrid型半導体チップが本来有する不揮発性と高速性に加えて、耐環境性を併せ持つ、電力を使用しない高集積回路の創出を目指して次の内容を実施した。

1. 耐環境性試験に向けたMTJ/CMOS Hybrid型半導体チップ評価基盤構築と評価用ウェハを提供した。東北大学CIESが保有する300mmプロセスラインを用いた高性能MTJデバイス技術、メモリセルアレイ回路設計技術、並びに異なるメモリ容量を有するチップ群を同一CMOSウェハ上に集積する技術開発を駆使してMTJサイズ50nmのMTJ/CMOS Hybrid型半導体チップを試作した評価用ウェハを提供した。
2. MTJ/CMOS Hybrid型半導体チップの耐環境性試験を実施した。東北大学CIESが開発する先端STT-MRAM集積回路を、JAXA等の評価設備を用いて耐環境性試験を行うためにJAXAが利用可能な放射線源発生装置への導入、および温度サイクル試験を可能とするTEGチップの開発およびCIESが保有する集積回路評価用プローバー用いた評価環境を構築した。
評価方法確立後に放射線照射試験および温度サイクル試験を実施して放射線耐性および温度サイクル耐性を評価し考察した。
3. MTJ/CMOS Hybrid型半導体チップの耐環境性試験後の不良解析を実施した。MTJ/CMOS Hybrid型半導体チップの耐環境性試験（放射線照射および温度サイクル）後の不良解析として、不良素子および良品素子の電気特性評価を行い、耐環境試験前後において両者の主要特性（R0,R1,MR比）に有意差は無いことを確認した。



待機電力不要
情報処理システム（イメージ）

従来技術の
課題

- 1 演算能力 vs. 消費電力不足
- 2 高温下での誤作動
- 3 放射線環境下での誤作動

MTJ/CMOS Hybrid技術による宇宙放射線耐性を有する待機電力不要情報処理システムの研究

研究
テーマ名

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

機関名：学校法人中央大学

プロジェクト概要

【目的】

長期滞在を想定した有人宇宙船におけるトイレシステムは、排せつ物の移送・集結技術に関して多くの問題を抱えている。これらの問題は、飛行機内や新幹線内のトイレをはじめとして、地上のトイレにおける問題とも共通項が多い。

本提案では、腸の運動を規範とした蠕動ポンプにより、省スペースかつ無水・少水型の排泄物運搬システムを開発する。さらに、本機能を発展させて、宇宙トイレの環境に適した無重力下・省スペース化・集結した排せつ物の固液分離機能・発酵分解要素との混合機能等を含めた革新的な排泄物集結処理システム開発の可能性についても検討する。

【内容】

提案者により開発された蠕動ポンプは、腸管の蠕動運動を規範とした多機能型ポンプであり、以下の特長を有している。

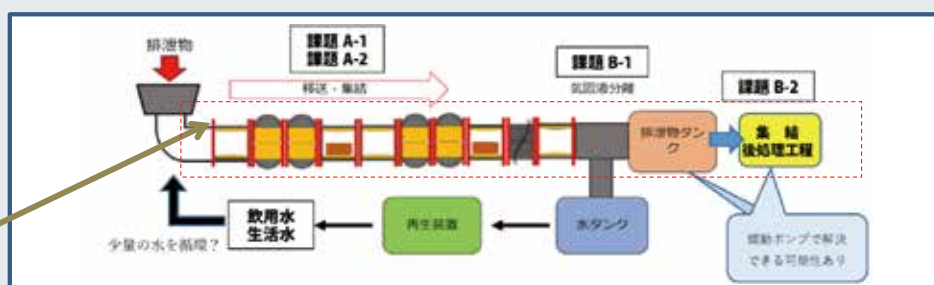
- ・高粘度固液混合スラリの搬送混合・固液分離が可能
- ・重力や搬送方向に依存することなく搬送可能
- ・低エネルギーで省スペース化が可能

したがって、蠕動ポンプは宇宙トイレのような無重力下、大量の水が使用できない環境、省スペース化等の要求を満たす排泄物集結・搬送システムとして適していると考えられる。

本契約期間内では、以下の内容について明らかにする。

- A 基礎研究課題：排泄物運搬に関する蠕動ポンプの開発
- A-1 蠕動ポンプによる効率的な排泄物の搬送技術の構築
 - A-2 弁機能の完全開閉機構と基礎特性評価
- B 発展研究課題：排泄物集結・処理システムの可能性検討
- B-1 固液分離手法の可能性検討
 - B-2 排泄物の後処理における蠕動ポンプの活用について

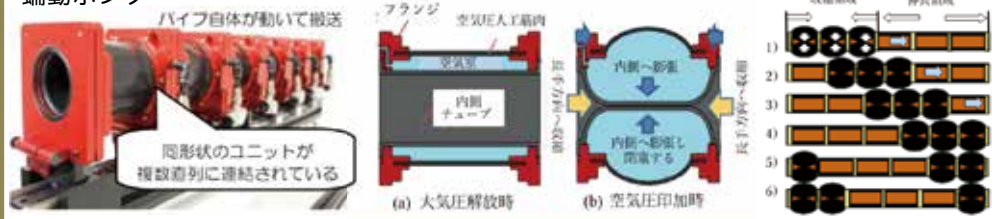
蠕動ポンプを用いた宇宙トイレシステムの構想図



蠕動ポンプの特長：
高粘度スラリの混合搬送可能・固液分離可能
低エネルギー・狭小空間設置可能
重力方向によらず搬送と混合が可能

蠕動ポンプによる
宇宙トイレシステムを
構築

蠕動ポンプ



研究テーマ名 艤装性に優れた液体水素貯蔵タンク等向けMLIの高性能化

機関名：栃木カネカ株式会社、株式会社カネカ、三菱重工業株式会社、大成建設株式会社

プロジェクト概要

【目的】

月面推薬プラントでは液体酸素・液体水素という極低温流体を貯蔵するタンクに対して、外部入熱を断熱する高性能な断熱材が必要となる。従来の真空環境で用いられる多層断熱材（MLI, Multilayer insulation）は、艤装状態（積層密度や端部処理）により断熱性能が大きく変化するという課題がある。

月面上の1/6G環境下においては、MLIの自重（圧縮力）による断熱性能の低下が想定され、この課題は地上の1G環境でも同様であり、断熱材で十分な断熱性能が得られれば、将来の水素輸送（水素運搬船・水素ローリー等）において有益となる。

本研究では、既存の断熱材の課題を克服する、高性能で軽量の断熱材の研究を実施する。

【内容】

①高断熱性能MLIの開発・性能評価

JAXAが開発している層間非接触型スペーサと、提案者が開発するMLI（熱針ラミネート型）について、それぞれの得意とする温度領域や適用部位を考慮した複合構成の検討を行う。

これにより、断熱性能、艤装性に優れ、軽量のMLIの実現を目指す。

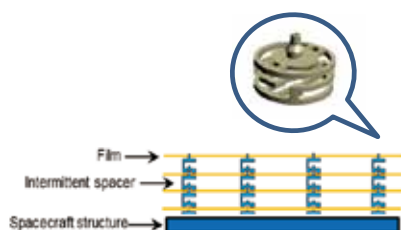
②液体水素貯蔵タンクを想定した施工方法の検討

月面推薬プラントで想定されるタンクの形状に合わせて、支持部、配管貫通部等を含め艤装性の評価及び課題の抽出を行う。

③月面居住空間を想定した断熱方法の検討

将来月面に建設予定の月面居住空間を構想・計画し、MLIの施工方法を検討する。

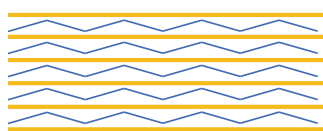
JAXA NICS-MLI



▲厚さ大、艤装性に制約あり

◎接触熱抵抗に依存せず性能の不確定性が小さい

地上技術のMLI (熱針ラミネート型)



◎薄くて軽い、艤装柔軟性高

▲接触熱抵抗に依存し圧縮に対する性能低下が起きやすい。



NICS-MLIと熱針ラミネート型MLIの複合構成検討・性能評価



月面推薬プラント
(イメージ)



水素運搬船
(イメージ)

先行技術

本研究

応用
(dual utilization)

研究
テーマ名

推奨液化エネルギーを低減する磁気冷凍技術の研究開発

機関名： 国立研究開発法人物質 材料研究機構、株式会社ispace、住友商事株式会社、高砂熱学工業株式会社

プロジェクト概要

【目的】

地上の水素エネルギー社会の実現に向けて、液体水素の製造・貯蔵に必要なエネルギーの低減が課題となっている。また、JAXAが策定した「日本の国際宇宙探査シナリオ（案）2019」では月面推奨生成プラントの実現に向けて、月面での液体水素と液体酸素の製造に必要な液化エネルギーの低減を課題として識別している。

一般にガスの液化には気体の圧縮膨張を利用した気体式冷凍機が用いられ、液化効率の上限は25%程度といわれている。これに対し磁気冷凍の理論効率は50%を超えるため、同量の液化ガスの生成に必要な消費電力をおよそ半減することが期待される。

本研究では磁気冷凍機の小型・軽量・効率化に取り組み、地上での磁気冷凍技術の事業化検討及び月面推奨生成プラントへの適用に向けた実現性検討に取り組む。

【内容】

①小型磁石システムの検討・試作

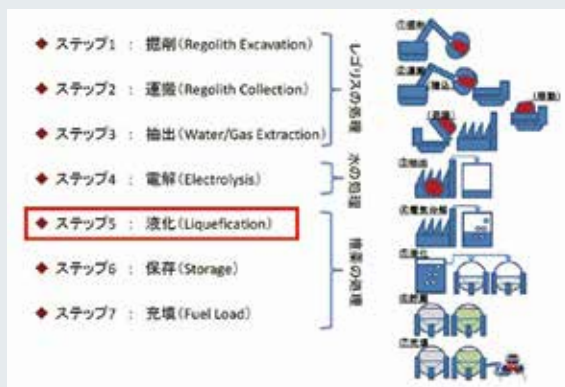
打上げコスト削減の観点で、宇宙用システムは極力小型かつ軽量である必要がある。本研究では磁気冷凍機の小型・軽量化に向けた磁石の検討と試作を行う。

②磁気冷凍機概念設計

月面での磁気冷凍による液体水素・液体酸素の製造の成立性を概念設計レベルで確認することを目的とし、月面推奨生成プラントへの適用を想定した磁気冷凍機概念設計と、それに基づいた磁気冷凍の性能評価を行う。概念設計には、月面プラントへの適用を想定した場合の気体式冷凍機との質量比較、並びに月面特有の低温環境等を利用した成立性検討を含む。

③地上での事業化検討

地上の水素エネルギー社会構想の観点より、小型ガス液化機の需要と市場を調査する。



月面での水資源利用のプロセス



月面基地のイメージ

研究テーマ名 | 高効率熱交換チューブとボイルオフガス/冷凍機ループによるタンク冷却システム

機関名：名古屋大学

プロジェクト概要

【目的】

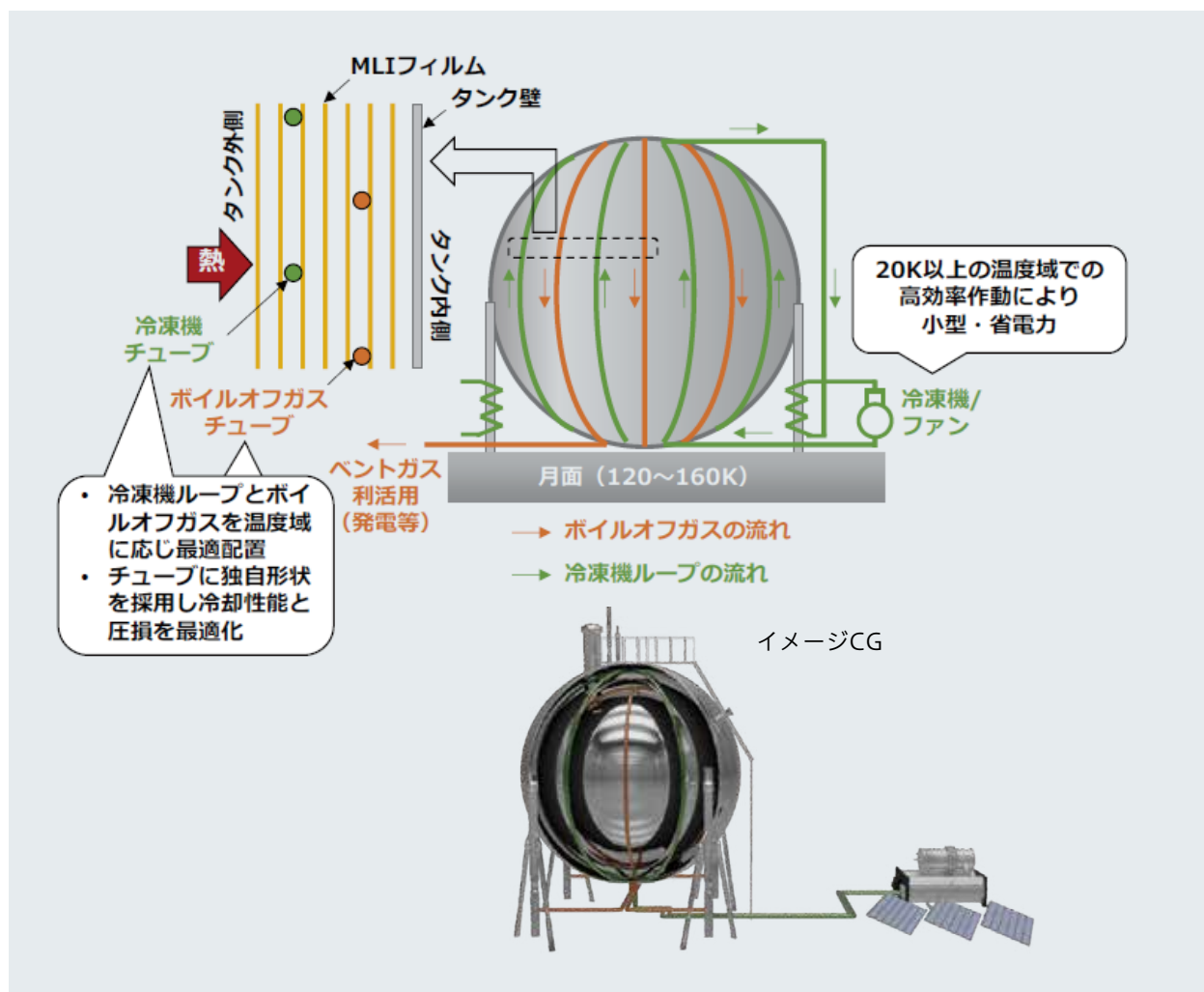
月面の推薬プラントで生成する液体酸素・液体水素は極低温流体であるため、貯蔵タンクの外部から熱が伝わると蒸発（ボイルオフ）が発生してしまう。

推薬貯蔵システム全体で効率的に蒸発量を低減させるためには、ボイルオフガスを有効活用することが考えられる。また、地上の水素社会においても、液体水素の蒸発を低減させる技術は必要とされる。

本研究課題は、極低温流体では避けられない周囲温度差によって生じる熱侵入を有効活用しつつ、高度な熱交換技術を採用した推薬貯蔵システムの全体の効率化を実現させる技術の研究を目指す。

【内容】

- ①ボイルオフガス・冷凍機を活用したタンク冷却システムの構成の検討
高熱交換効率の冷却チューブと冷凍機を用いたタンク冷却システムの構成を検討し、冷却チューブ等の構成要素への要求を設定。
- ②冷却チューブの要素モデル試験及び性能評価
冷却チューブに関する複数の供試体に対して冷媒を用いた熱交換性能評価を行い、熱交換性能・圧力損失・消費電力等のデータベースを作成する。
- ③タンク冷却システムのリファレンスモデルの検討
試験を通し構築したデータベースに基づき、実現可能なタンク冷却システムのリファレンスモデル案を検討する。



研究
テーマ名 液化水素流量計測技術の開発

機関名：岩谷産業株式会社、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

プロジェクト概要

【目的】

月面の水資源から製造される燃料は非常に貴重であるため、月面貯蔵タンクからロケット燃料タンクに送液する際の、オーバーフロー損失（燃料の流しすぎ）や蒸発損失を可能な限り低減する必要がある。

燃料の送液流量を正確に把握することで、最適なタイミングで燃料供給を停止し、ロケット燃料タンクのオーバーフローや目標値に対する過不足を防ぐことができる。

月面上の水素送液は気液二相状態で流動することが予想される。このような状態の液体水素の流量を精度よく計測する技術は未だ世の中に存在しない。

地上においても、液化水素ローリーからの小口配送等において、供給水素量を正確に把握しなくてはならないため、このような計測技術は必要となる。

本研究課題では、極低温・可燃性流体である液体水素に適用可能な気液二相流量計の実現を目指す。

【内容】

①気液二相流の流動状態把握

液化窒素の流通を可視化する装置を製作し、流動の向き（水平、鉛直）、流動条件を変化させて出現する流動状態マトリックスを作成する。

②ボイドメーターの試作と評価

気液二相流の割合を計測する手段として、静電容量式のボイドメーターを試作する。また、沸点の異なる2種の流体をそれぞれ流量制御しながら流通させることにより、任意のボイド率の二相流を作り出す試験装置を構築し、試作したボイドメーターの測定値との比較・評価を実施する。ボイドメーターの誤差 $\pm 10\%$ 以内（気泡流のみ）を目標とする。

③フィールド調査

液化水素の流量計測は、液化水素搭載型FCVの運用や液化水素運搬船からの荷卸しといった場面が必要となるが、それぞれにおいて流通条件が異なる。流通条件を調査し、流量計に求められる精度等を明らかにする。



研究テーマ名 薄膜ニッケル電気めっきを施した複合材による液体水素、液体酸素貯蔵系の軽量化

機関名：株式会社IST

プロジェクト概要

【目的】

地上の水素エネルギー社会の実現に向けて、液体水素貯蔵タンクの軽量化による輸送効率の向上が課題である。また、JAXAでは月面の含水レゴリスを用いて酸素及び水素を生成し、宇宙機の推進薬（燃料）として利用するための技術検討を進めており、推進薬の貯蔵タンクに従来の金属材料ではなく、より軽量の複合材等を適用することで月面までの輸送コストを削減する方策を検討している。

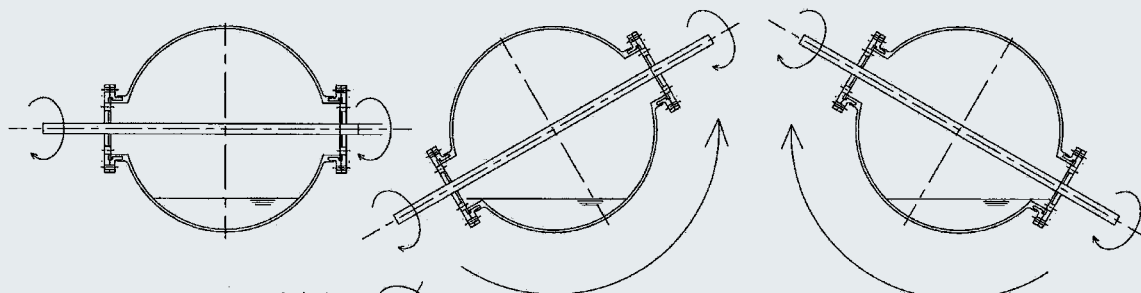
本研究の目的は、従来の金属タンクの三分の一の軽量化及び100%漏れの無いガスバリア性を持つ複合材タンクの製造を目標とし、小型BBMタンクを試作・評価し、上記の課題解決に資する研究成果を創出することである。なお、従来のタンク製造には専用の大型設備が必要となるが、本研究で取り組むタンク製造は、炭素繊維を樹脂で固めた複合材タンクを処理槽とし、内面にニッケル薄膜を成形してライナーを施工する手法であるため、生産設備の低コスト化、汎用性の向上を実現可能である。

【内容】

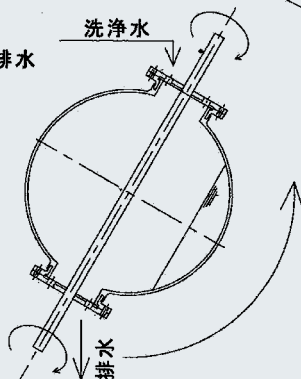
- ①CFRPテストピースの設計・製作・評価
 - ア）樹脂材料の選定及びエッチング液の仕様検討
 - イ）化学めっき及び電気めっきの条件検討
 - ウ）テストピース評価（引っ張り強度など）
 - エ）液体酸素適合性（発火の閾値）の確認
 - オ）ガス透過率計測
- ②小型BBMタンクの製作・ライナー施工・評価

選定したCFRPで小型BBMタンクを製作し、①で検討したエッチング及び各めっき条件で小型BBMタンクへニッケルライナーを施工する。また、製作した小型BBMタンクについて耐圧性等の評価を行う。
- ③タンク性能評価試験の簡素化検討

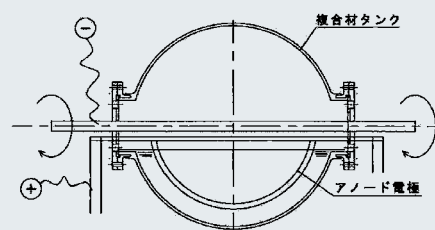
ガスバリア性、耐圧性等のタンク性能を従来より簡単に評価できる手法を検討する。

① エッチング処理、洗浄、無電解めっき処理工程
(本体を処理槽とすることで設備の簡易化を図る。)

② 処理液の排水



③ 炭素繊維複合材内面に薄膜電気ニッケルを施工 完成



株式会社 IST

研究テーマ名 | 高結晶性グラファイトを用いた熱輸送部材の開発

機関名：パナソニック株式会社

プロジェクト概要

【目的】

精密な電子機器や発熱密度の高い装置に用いられる金属筐体および、ヒートシンクやラジエーターなどの金属放熱部材や構造材の熱輸送性向上と軽量化を実現するため、高結晶性グラファイトを金属に内蔵した熱輸送部材の開発を行う。

現在用いられている構造材や放熱部材は、放熱性・重量のバランスを取るため、鉄や銅などを組合せた構造となっている。そこで、研究目標として、熱伝導率は少なくとも鉄（83 W/m・K）の3倍以上で、銅（394 W/m・K）を超える400 W/m・K以上を、かつ、比重は鉄（7.9 g/cm³）の半分程度である4 g/cm³以下を実現する熱輸送部材の開発を目指す。

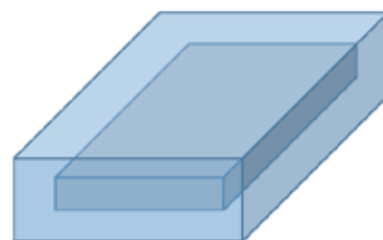
【内容】

- ① グラファイトと金属の接合性確認
グラファイトと金属を接合し、電子顕微鏡により接合面を観察し、密着できる金属の抽出を行う。
- ② グラファイトの金属内蔵部材化検討
グラファイトの形態・形状を確定し、金属でグラファイトを覆い、試験片を作製する。
- ③ グラファイト内蔵部材の性能評価
作製した試験片の特性を測定し評価する。また、宇宙空間での利用を想定した各種試験を実施し、耐性評価を行う。

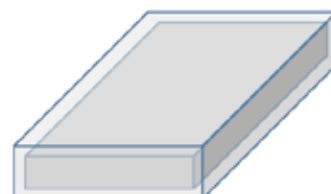
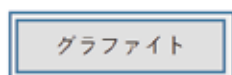
金属との複合化

グラファイト内蔵金属材料

- ① 3D造形を用いてグラファイトの周囲を金属樹脂混合粉末で被覆



- ② 焼成時に樹脂が揮発し金属が収縮するため、グラファイトと金属との空隙のない接合が実現



研究テーマ名 | 宇宙環境に適した高機能熱硬化性光学材料の最適化検証および関連光学部品の開発

機関名：吉川化成株式会社

プロジェクト概要

【目的】

宇宙機で使用される光学材料には、これまでガラス材が通常用いられてきている。これは、プラスチックのような高分子材料は放射線に対する耐性が小さく、宇宙環境で使用すると材料の黄変等で透過率が大幅に低下することが知られているためである（ガラス材の中でも、放射線耐性が十分な大きさを持たないものも多い）。

しかしながら、センサー技術の微細化により、宇宙機で使用されるカメラはレンズ部分が重量の支配的な要素となりつつある。宇宙機におけるカメラの軽量化が可能となれば、より多くのカメラを、より多くの宇宙機に搭載可能となりその意義は大きい。

上記を踏まえ、高機能熱硬化性光学材料を用いて、宇宙で使用可能な光学材料を開発することを目標とする。

【内容】

本研究開発においては、吉川化成株式会社が製作している『エスドリマー®』の技術を使用して、良好な放射線耐性を有する光学材料の開発を行う。

これらの、熱硬化性材料は、ガラスと比較して屈折率が同程度であり比重が半分以下であることから、光学レンズとしてガラス材からの置き換えを行うことができれば、レンズ重量を半分以下に低減することが可能である。また、同材料はガラス材と比較すると、レンズ材としての量産性に優れており、温度耐性にも優れていることから、今後の宇宙機に用いる光学材料としてのポテンシャルが高い。優れた性質を持つ同材料は、近年の自動車などに搭載されるカメラ用のレンズなど、事業化にも大きく期待される材料である。

	光学ガラス(BK7)	エスドリマー®
比重	2.51	1.18
屈折率	1.51	1.50～1.60 (設定可能)
表面硬度	6H	5H (熱硬化性光学材料では特出)
全光線透過率	91%	90%
耐熱温度	491℃	300℃ (リフローに対応)



研究テーマ名 | 可搬型大気圧プラズマ表面消毒装置の開発とその効果を簡便に目視判定する新しいバイオロジカルインジケータの提案

機関名：九州大学

プロジェクト概要

【目的】

様々な表面に付着した細菌やウイルスの殺菌・不活化を迅速に行うための新しい大気圧放電プラズマ表面消毒装置を開発し、その効果を簡単にモニタリングするための新しいバイオロジカルインジケータを提案する。様々な種類の表面を処理するために、化学薬品の添加なしに簡単に殺菌ができる大気圧プラズマを可搬型に改良する。それと同時に、殺菌・不活化を簡単かつ迅速に目視判定するための新しいバイオロジカルインジケータとして、DNA結合微粒子を使用した方法について検証する。この二つの組合せによって、簡便・迅速に様々な表面を殺菌・不活化処理しつつ、その効果をその場で確かめることができる手法を確立する。

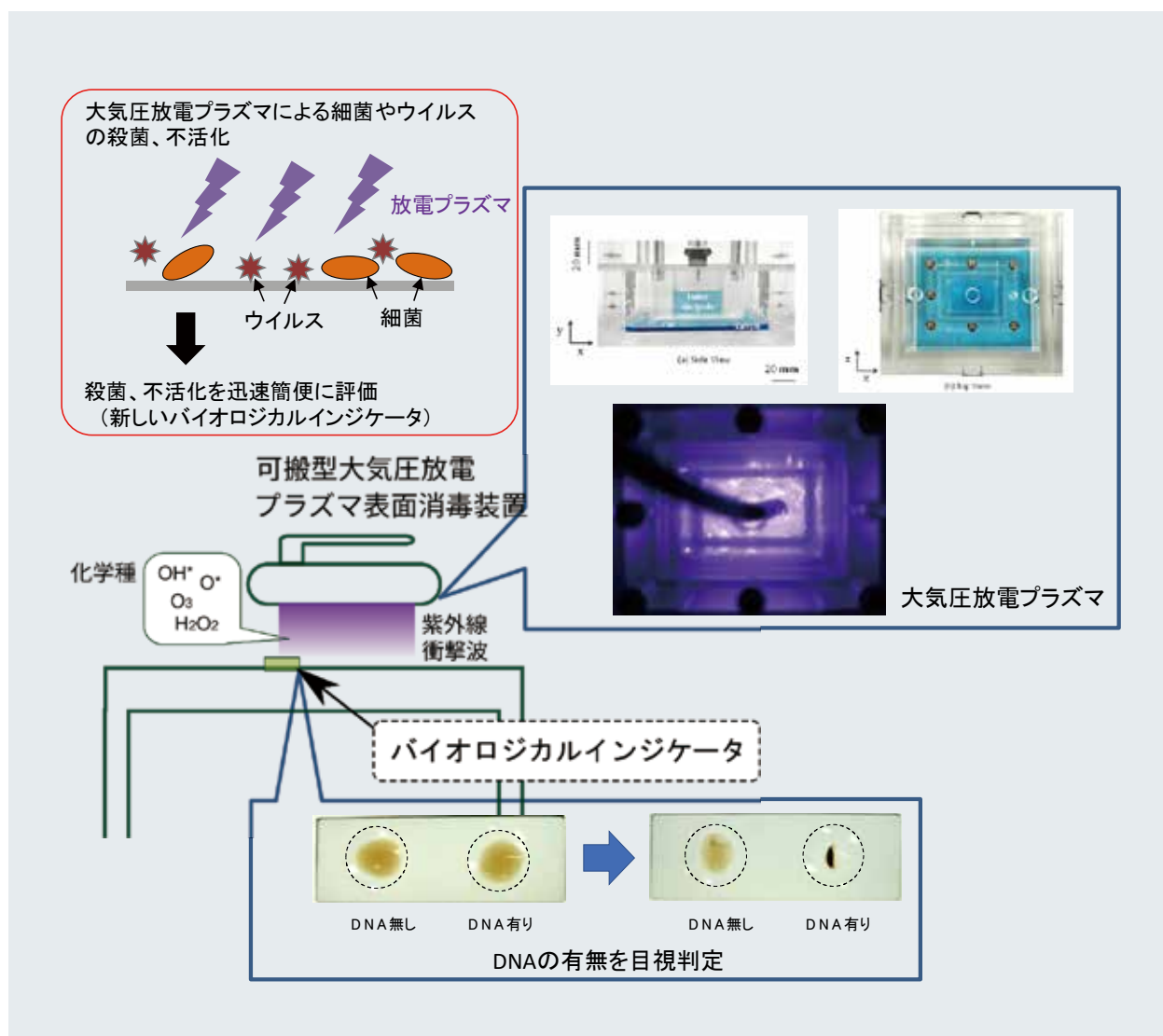
【内容】

可搬型大気圧プラズマ表面消毒装置の開発

様々な表面に付着した細菌やウイルスを対象とする大気圧放電プラズマを用いた殺菌、不活化装置の開発特に、可搬型で様々な表面の殺菌、不活化が可能な装置を目指す。

大気圧プラズマの消毒効果を評価するための新しいバイオロジカルインジケータの開発

放電プラズマによる殺菌や不活化を素早く評価するための新しいバイオロジカルインジケータを提案するDNA結合微粒子をバイオロジカルインジケータとし、放電プラズマによるDNA切断反応によって消毒効果を評価する。



研究テーマ名 | 人と環境に完全に安全無害な高速低温酸素プラズマ滅菌

機関名：株式会社ウドノ医機（実施代表機関）、国立大学法人九州大学、国立大学法人佐賀大学

プロジェクト概要

【目的】

今後の有人深宇宙探査では宇宙船内医療が不可欠であり、医療器材の滅菌を行う滅菌器が必要となる。また、宇宙船内環境を清浄に保つために船内の殺菌・防黴装置が必要である。一方、深宇宙探査では惑星保護の観点から、宇宙船の汚染レベルを低減するための滅菌や生物由来物質（DNA、タンパク質、アミノ酸等）の完全分解が可能な装置が要求されている。従来の滅菌法は高温や薬剤を用いており、宇宙空間での利用には制約が多い。

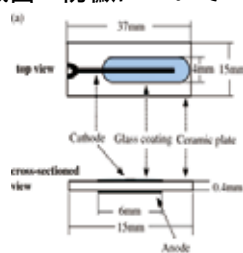
プラズマは低温でも反応性が高く、高エネルギーで寿命が短い（ミリ秒以下）ことから薬剤のような残留性がない。また、プラズマの原料ガスである酸素は空気から得ることから滅菌剤は不要であり、プラズマを生成するために必要なのは電気のみである。本研究では環境と人ともに無害な低温酸素プラズマを用いた滅菌法を提案し、各用途に応じたプラズマ滅菌器を開発することを目的としている。

【内容】

深宇宙探査に資する滅菌・防黴技術を確立するために必要な実験研究を行う。本技術を宇宙で利用することを想定して研究テーマを以下のように設定した。

1. 各種素材の酸素プラズマ適合性試験
プラスチックやゴム等の非耐熱・易分解性の各種素材や部材に関して、酸素プラズマ滅菌法が適合する素材を明らかにする。
2. 排ガスの無害性・安全性（ゼロエミッション）の確認
滅菌器から排出されるVOC等の濃度が、基準濃度以下であることを確認する。
3. 低压酸素プラズマによる長尺細管内部の滅菌特性
内径 2 mm、長さ 1 m の細管内の 10^6 個の菌芽胞を不活化する。
4. 大気圧プラズマ中の長寿命活性種による施設・設備滅菌
長寿命活性種により部屋空間内の滅菌を試みる。また宇宙機外部のプラズマ滅菌を検討する。

プラズマを用いた滅菌・防黴について



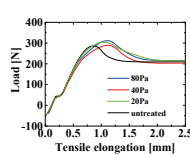
滅菌・防黴用プラズマ源
低压酸素プラズマ滅菌器(左)
および大気圧バリア放電装置(上)。

各種素材の酸素プラズマ適合性試験

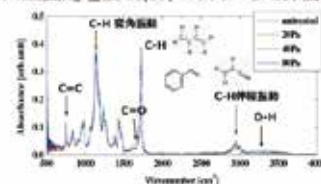


各種素材の試験片のダメージ評価
プラズマ滅菌処理後の素材へのダメージを評価する。

7号ダンベル試験片



引張り試験例



赤外吸収スペクトル

低压酸素プラズマによる長尺細管内部の滅菌特性



滅菌処理時間とチューブ長さの滅菌結果
(滅菌成功回数/試行回数)

3 プラズマ殺菌時間を変えた場合の大気圧
プラズマ照射好熱菌の増殖曲線

プラズマ中の長寿命活性種による施設・設備滅菌



室内殺菌・防黴実験レイアウト



プラズマを照射した糞カビ胞子
(右)からの培養の様子。



積層断熱材用素材の滅菌
積層断熱材素材のプラズマ滅菌
と素材適合性の調査。

部屋内の空間殺菌
プラズマ殺菌の様子(左上)と、
プラズマ処理前後のカビの様子(左下)

研究
テーマ名 沸騰連結効果の最大化 ～高効率水電解に向けて～

機関名：国立大学法人九州大学

プロジェクト概要

【目的】

図1でイメージするようにPEM型水電解に、沸騰を連結し、高効率、コンパクトな水素、酸素製造の技術を実現する。セル構成材料、運転条件を最適化して沸騰を電極上でおこし、沸騰気泡により、酸素生成反応を加速し、電解電圧を低減し、電解効率を向上する。詳細なメカニズム解明とともに、セル条件、運転条件を最適化し、沸騰連結しない場合の電解効率（現状90%程度）から10%向上を目指す。

【内容】

- ①可視化システムの構築と連結場の可視化(図2参照)：沸騰・電解の発泡点を合致させ、連結場を形成できることを確認する。
- ②可視化による同期性の検証：沸点付近の沸騰気泡の動的挙動と電解電圧変化が同期することを確認する。
- ③過電圧分離による沸騰連結効果発現箇所の特定：連結効果によりどの過電圧成分が低減するか明らかにする。
- ④連結効果による電圧低減を予測できる数学モデル構築：数学モデルで沸騰連結による電圧低減を再現させる。
- ⑤宇宙機における熱・エネルギー管理に関するシステム検討：本水電解技術を宇宙応用するにあたり宇宙機システムにおける熱源利用の可能性・有用性を明らかにする。
- ⑥電圧低減の最大化：セル構造や運転条件を最適化し、沸騰連結しない場合に対して、沸騰連結により電解効率10%向上を達成させる。

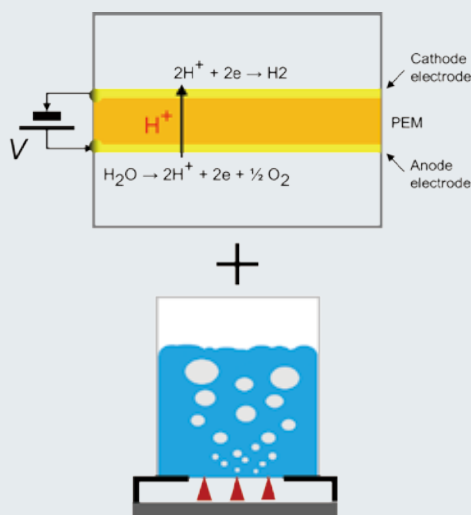


図1 PEM型水電解への沸騰の連結（イメージ）

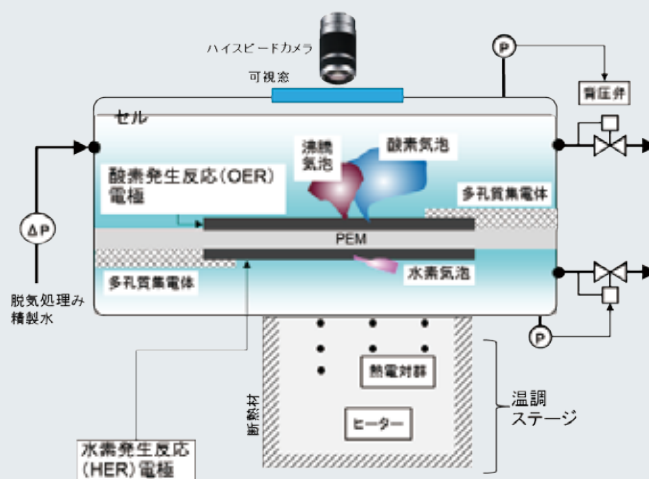


図2 沸騰連結触媒層の可視化システム

研究テーマ名 | 持続可能な防塵または除塵性能を有する機構または表面の研究

機関名：株式会社ニデック

プロジェクト概要

【目的】

月や小天体などの表層には、レゴリスと呼ばれる1mm以下の微粒子が存在する。天体への着陸や天体表面での活動時には、このレゴリスが宇宙機や探査ローバに付着または侵入し、動作不良を引き起こすことが知られている。例えば、アポロ16号の月面車では、熱制御材にレゴリスが付着したことによりオーバーヒートが起り、機械に性能不良が発生した。火星探査ローバでは、ダストが太陽電池上に堆積し、発電量が低下する事象が度々発生した。また小惑星探査機「はやぶさ2」においても、天体表面への着陸時に巻き上がったレゴリスが航法カメラのレンズや高度センサに付着し、受光強度が低下した。

天体表面で長期間持続的に活動するためには、太陽電池や熱制御材、センサ、軸受などが、レゴリスに対して防塵あるいは除塵性能を有する必要がある。

本研究では真空中において防塵・除塵能力を有する機構または表面の技術を開発する。地上では、太陽光発電パネルへのダストの堆積や、工場内のセンサへの微粒子の付着等、特殊な環境でのメンテナンスを省力化する用途への適用が期待される。

【内容】

本研究提案は、天体表面におけるレゴリス（表土）や、砂・ほこり等の付着を防止するためのコーティング技術の開発、および評価方法の実現を目指す。

メンテナンスの省力化やメンテナンスフリー化に向けた防塵効果を付与する技術について研究を行う。レゴリスや砂じん等に対しどの程度砂が付着するのかを評価する方法を検討し、評価試験機の作成と、評価方法の確立を行う。その評価方法を用いて、従来技術（ホコリ防止AR膜）と比較し、レゴリスの付着し難い防塵膜を検討する。

開発したコーティングの宇宙環境耐性を評価し、宇宙実証に向けた準備を進める。



月ダストはアポロミッションを通して、接触するすべての物体（ブーツ、手袋、宇宙服の足の部分、手にする道具類など）の表面をたちまちコートする（制御装置不具合、シール不具合）



開発する表面コーティングの例
帯電した絶縁体の付着が緩和されている。

【写真】ホコリ防止コーティングをする前（左）と塗布した後（右）のレンズ

研究テーマ名 | 月面洞窟内作業ロボットへの無線電力伝送に向けたGaN整流素子の適応検討

機関名：名古屋工業大学、株式会社メトロール

プロジェクト概要

【目的】

月面の洞窟内の探索（図1）では、作業（探索）ロボットを広範囲に展開する必要があり、そのロボットに対するエネルギー供給には、ケーブルが不要な無線電力伝送が有望である。さらに、探索用のロボットのサイズを小型（数cm～数10cm）であると想定すると、それに設置する無線電力機器には相応の小型化が求められることから、ミリ波の利用が必須である。

しかしながら、ミリ波での受電整流素子は、地上ですらアプリケーションがないために研究開発が活発には進められていないのが現状である。

そこで本研究課題では、ミリ波動作可能、かつ、探索ロボットへの給電に必要な電力性能ポテンシャルを有するGaN整流素子（図2）の適応可能性について、地上応用（工作機械内のタッチプローブセンサ（図4））も視野に入れながら、検証を行う。

【内容】

左記目的達成に向けて、以下の項目について研究開発を実施している。

- ①最先端無線電力伝送用デバイス技術
GaNを用いた整流素子のミリ波動作検討
- ②無線電力伝送技術の地上応用検討
市販整流素子の解析及び民生用タッチプローブセンサモジュールへの搭載検討
- ③アクティブ集積アンテナ（AIA）用モジュール
ワイヤレス通信と無線電力伝送用GaN整流素子のアクティブ集積化アンテナの実現性検討
- ④宇宙での無線電力伝送応用のシステムの検討
宇宙での無線電力伝送の1stターゲットシステム設定に向けた議論。今後の宇宙における無線電力伝送システムにおける送受電部の課題抽出。

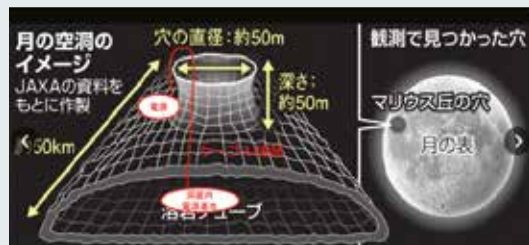


図1 月面洞窟内探索のイメージ

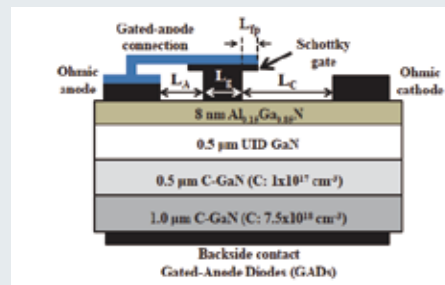


図2 ミリ波動作を検討しているGaN半導体を用いた受電整流素子の断面構造

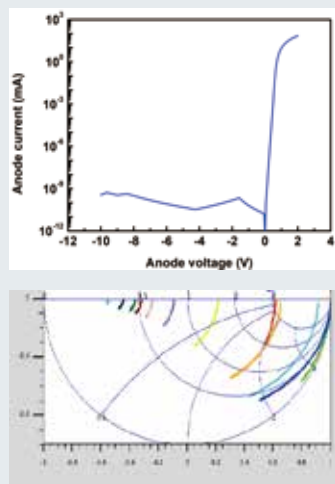


図3 図2の素子の直流および高周波特性シミュレーション（アノード電圧: 2～10 V）

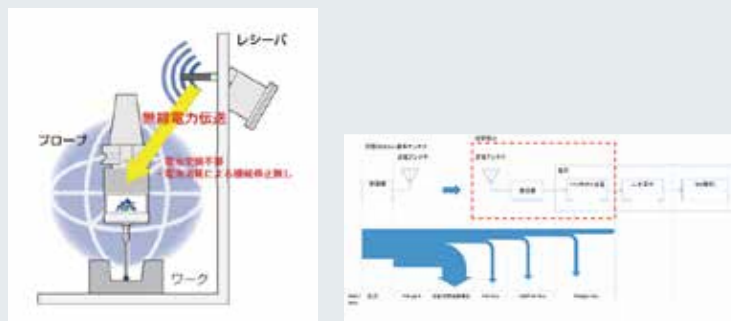


図4 工作機械内のタッチプローブセンサーへの無線給電のイメージとその実現に向けたエネルギーバジェット検討例

研究テーマ名 | 光エネルギーおよび省リソース「藻類・動物細胞共培養リサイクルシステム」による持続的な食糧・タンパク質の生産

機関名：東京女子医科大学、インテグリカルチャー株式会社

プロジェクト概要

【目的】

本研究では光合成能を持つ藻類と食糧・タンパク質源となる動物細胞を共培養し、光エネルギーにより食糧細胞を持続的に増幅できる系の構築を試みる。すなわち光エネルギーを駆動源として藻類が動物細胞に必要な酸素・栄養素やビタミン類を供給し、また動物細胞がそれらを利用し、藻類に必要な二酸化炭素・アンモニアなどを産生するという、省リソースかつコンパクトな食糧・タンパク質生産システムの確立を目指す。このリサイクル型共培養系の確立で太陽光あるいは室内灯の光エネルギーで藻類・動物細胞は増殖を続け、宇宙空間あるいは地上において持続的に安定した食糧用タンパク質の地産地消が可能となる。

【研究実施項目】

- ①共培養に最適な藻類・動物細胞の選択
- ②最適な藻類・動物細胞共培養系の樹立
- ③藻類が産生した栄養素・ビタミン類の効率的排出方法の樹立
- ④事業化を目指し最適な細胞タンパク質源作製条件の検討
- ⑤宇宙利用を想定したシステム検討

【成果】

藻類から動物細胞へ酸素供給が起こり、動物細胞のエネルギー代謝が嫌氣的代謝から好氣的代謝へ変化※することで、効率的に栄養素を利用できるようになった。さらに藻類が、動物細胞が排出するアンモニアを利用しアミノ酸合成をすることも確認された。さらに生化学的手法および最適化した藻類を用いることで、光エネルギーで藻類が合成したグルコース・アミノ酸・ビタミン等の栄養素を動物細胞に供給可能であることも示した。これらの結果は藻類と動物細胞の間で酸素・二酸化炭素・アンモニア・栄養素をリサイクルし得ることを示している（図1）。



図1. 藻類・動物細胞共培養リサイクルシステム

本共培養システムは宇宙での省リソース・省スペースでの食料生産システムにも応用可能であり、宇宙ステーションや月面基地での食料の地産地消の実現につながるものと期待される（図2）

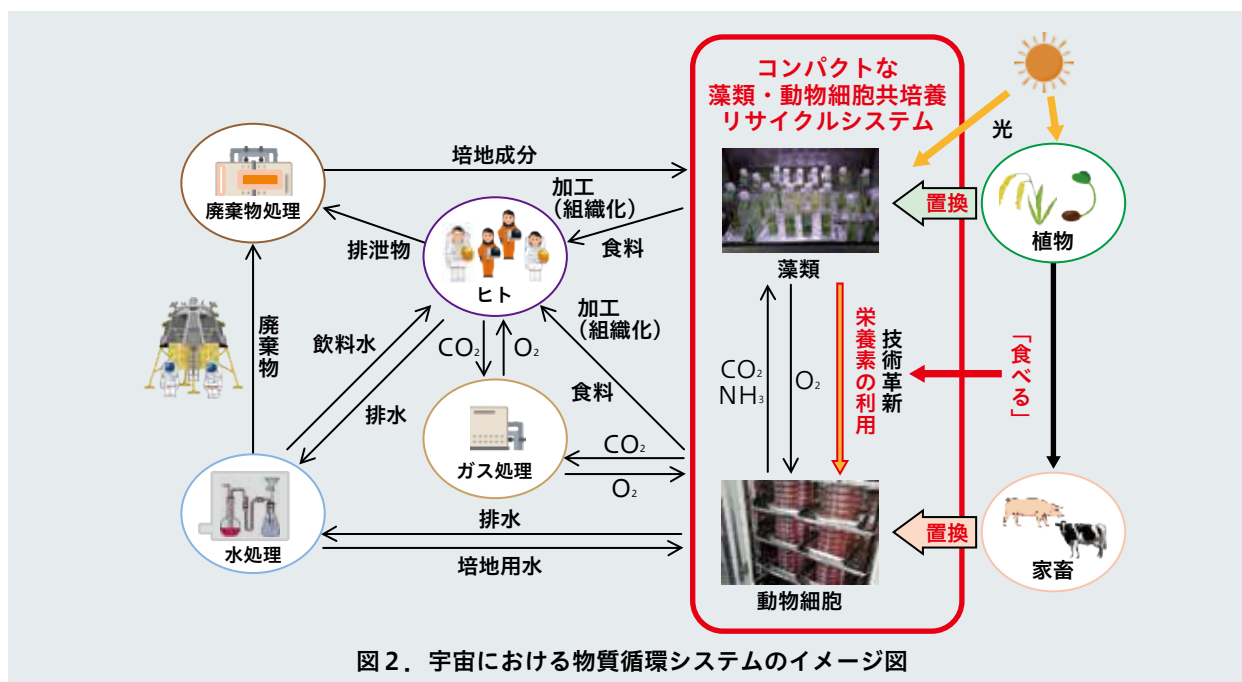


図2. 宇宙における物質循環システムのイメージ図

※酸素を利用しない嫌気呼吸では1モルのグルコースから2モルのATP（生物の生存に必要な生体のエネルギー通貨）が生産されるのに対し、好気呼吸では酸素を利用することでグルコースを二酸化炭素と水に完全分解し、約30モルのATPが生産される。

研究テーマ名 極低温環境における単結晶Cu-Al-Mn形状記憶合金の駆動特性

機関名：国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学、国立大学法人東北大学、学校法人日本大学

プロジェクト概要

【目的】

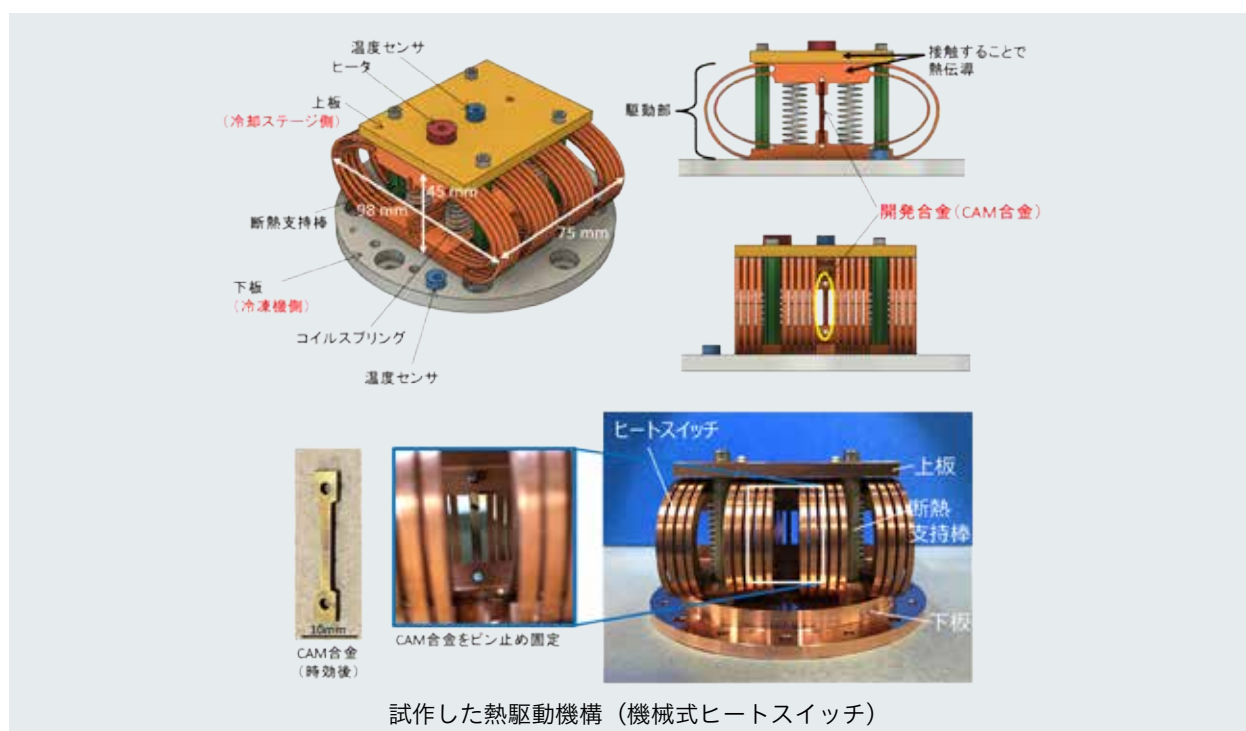
本研究では、単結晶Cu-Al-Mn形状記憶合金の極低温駆動の実現可能性を実証することを目的とする。具体的には、

1. 最低-240℃程度までの温度域における極低温駆動の実現可能性実証。
2. 最低-120℃程度までの極低温域における熱駆動機構の実現可能性実証。

本研究を通して極低温駆動の実現可能性を実証できれば、今後、極低温環境下で利用可能な軽量かつ大駆動エネルギーのアクチュエータ材料として、宇宙と地上の両方で様々な応用展開が可能になる。

【成果】

- ①月面の最低温度である-170℃近傍の形状記憶効果を得るため、高Mn組成域における変態温度の組成依存性を調査し、-170℃近傍で形状記憶効果を発現させるための最適組成を決定する。
- ②上記の組成における形状記憶効果について、一定荷重下で温度を変化させたときの変位を測定し、低温域における熱駆動型形状記憶効果を実証する。また、様々な荷重で試験を行い、応力と回復歪量の関係を調査し、形状記憶効果による極低温域駆動の基礎特性を明らかにする。
- ③様々な結晶方位を持つ合金棒を対象として、一定応力を与えて0℃から-120℃程度の低温域で温度を変化させた時の伸びの変化を調べる。また、各温度で超弾性特性を調べる実験を行い、合金の熱駆動特性の結晶方位依存性を調べる。
- ④ヒートスイッチへの応用を例にして、CAM合金と線形バネを並列に配置する熱駆動機構を試作し、最低-120℃程度の極低温域における駆動の実現性を実証を行う。極低温域では様々な要因で非線形性が発生することも考えられるため、これらの非線形の発生の有無の確認や要因の考察も検討する。



研究テーマ名 | 医学・宇宙応用を目指した超高解像3Dイメージング手法の開発

機関名：北海道大学、新潟大学

プロジェクト概要

【目的】

本研究は、月・火星の地中にデジタルに潜入・探査でき、地上においては医学分野に応用可能なイメージング技術の開発を目指している。具体的には、1) 破壊分析型トモグラフィ装置の超高分解能化、2) 大規模画像データの連続・安定的取得、3) 大規模並列コンピューティングによる画像解析手法の確立、4) 特殊加工実験による地中探査基礎技術開発、5) 特殊試料作成技術による医学イメージング分野への貢献を目標としている。

【成果】

本研究は、月・火星の地中にデジタルに潜入・探査でき、地上においては医学分野に応用可能なイメージング技術の開発を目指した(図)。研究の結果、まず、①トモグラフィ装置の高解像化と②約10TBにおよぶ大規模画像データの連続・安定的取得に成功した。これらの技術を隕石に応用して内部の可視化と3D化にも成功した。

本研究で得られる画像データは、大規模なものでありラボレベルの計算資源では解析することができない。そこで、スパコンを用いた大規模並列コンピューティングによるレンダリングパイプラインを開発し、③1兆ボクセルの可視化に成功した。最後に④宇宙応用を目指した無水状態での連続画像取得とレンダリングと④医学応用を目指した脳標本の細胞レベルでのイメージングも達成した。

研究成果



研究テーマ名 | 外皮と床が即時展開されるベースキャンプ(構造物)とその内部緑化空間の構築

機関名：東京大学、プランツラボラトリー株式会社、株式会社矢嶋

プロジェクト概要

【目的】

内気圧によって「外皮と床骨組」が「即時同時に」展開するベースキャンプ(構造物)を開発する。

過酷環境(月惑星、砂漠、熱帯、寒冷帯)探査に際して、最初の足掛かりとなるベースキャンプに求められるのは、「素早く」「大きな」「気密空間」を確保することです。たとえば、月面への乗り込みと同時に与圧された大空間が即時に確保できれば、その後のすべての作業はたいへん容易なものとなります。3Dプリントや地中埋設による構造物の準備を行うためにも、まずは拠点となるベースキャンプが必要です。

本プロジェクトでは、折り畳みと即時展開が可能な剛強で軽量の金属外皮、及び、その外皮と同時に展開する床骨組について、構造と展開機構を検討します。

関連して、ベースキャンプ内の狭隘な部分を緑化エリアとして有効活用するため、光環境や高密度配置などの栽培方法についても検討を行います。遠くない将来、月・惑星における長期滞在を目指す場合、水循環・空気再生・食糧循環などのために植物との共生を考えることが、ますます重要になると考えます。

【内容】

- I：外皮と床骨組を同時に折り畳む幾何学形状の検討
 - ・構造計算、シミュレーションとモックアップによる形状と展開機構を実施中。
 - ・S=1:10モックアップによる展開試験に成功
 - ・展開しても裂けない金属板の折り畳みに成功
 - ・スケールアップしたモックアップを作成中
- II：ディンプル加工による外皮軽量化等の検討
 - ・外皮金属板にディンプル加工を施すことによる外皮の軽量化と力学性能の改善について検証中。
 - ・ディンプル加工を施すことにより、外皮展開時の応力分布を制御し、飛び移り座屈を誘発することで展開時の挙動を制御できる目途を得た。
- III：狭隘部緑化のための光環境と植生密度の検討
 - ・内部緑化に関する建築空間計画を作成
 - ・紫外線の植物生育への影響、および、植物の高密度栽培と二酸化炭素吸収効率について検証中。

図1：形状の最適化

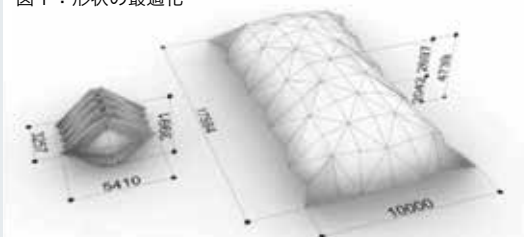


図2：内部緑化区間の検討



図3：部分モデル



図4：1/10モデル展開



図5：ディンプルによる剛性・強度と展開挙動の制御

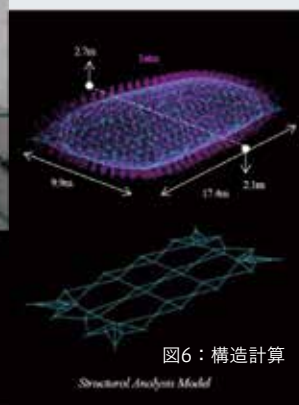
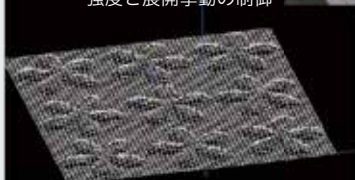


図6：構造計算

研究テーマ名 「アルミニウム-水」ハイブリッド燃焼を用いた推進系の開発

機関名：東北大学、東京大学、株式会社PaleBlue

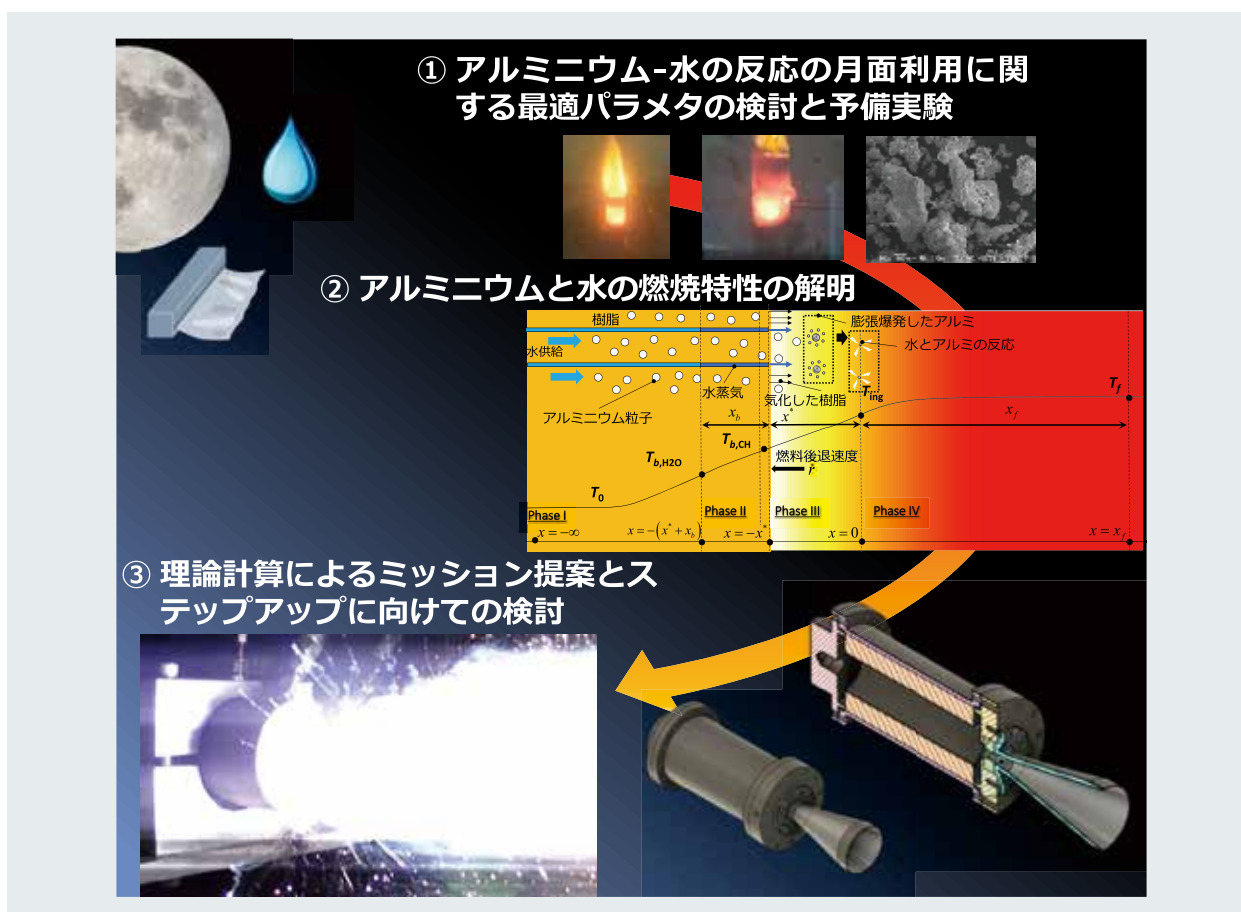
プロジェクト概要

【目的】

本研究では、月面上で採取可能なアルミニウムと水を推進剤としたハイブリッドロケット推進を新たに提唱する。従来から検討されてきた月面での推薬生成プラント構想では、月面のレゴリスから水を取得し、電気分解によって酸素および水素を取り出し液化することで、その場の資源を利用した液体酸素・液体水素ロケットの実現を目指している。こうした手法は燃焼効率の良いロケットエンジンを得ることができる反面、極低温の水素を扱う必要があるなど、プラントの実現に向けてはハードルがあった。本提案では、液体の水を酸化剤とし、レゴリスの中に存在し機材として多く使用するアルミニウムを燃料とした、アルミニウム-水ハイブリッドロケットを提案し、世界的に類のない革新的な推進系の開発を目指す。

【内容】

- ①アルミニウム-水の反応の月面利用に関する最適パラメタの検討と予備実験：
アルミニウム-水が、月面上の推薬になるように最適パラメタの検討を進める。燃料形状および酸化剤供給系を、先行研究結果をもとに最適値の検討を行う。
- ②アルミニウムと水の燃焼特性の解明：
燃焼開始条件を明らかにする。燃焼速度（燃料後退速度）を決定するパラメタを明らかにし、後退特性を明らかにする。
- ③理論計算によるミッション提案とステップアップに向けての検討：
燃料後退特性から理論計算を行い、ミッション提案を行う。



研究
テーマ名 全天球カメラの宇宙利用

機関名：株式会社リコー

プロジェクト概要

【目的】

全天球カメラを宇宙で利用するための耐宇宙環境性を評価し、実際に軌道上にて宇宙実証実験を行う。

近年、小型で360° 全天球の視野を持つカメラの技術が進歩し、小さなリソースで多くの視覚情報を得ることが可能となった。

宇宙探査イノベーションハブでは2015年当初、国内で最も小型な全天球カメラTHETA S™に着目し、宇宙ミッション、とりわけリソース制約の厳しい探査ミッションに利用できないか検討を始めた。大きさ約12cm程度、重さ約125gのカメラで全天球全ての視野の画像を撮れるのは非常に魅力的であった。

打ち上げロケットの耐振動性など、基礎的な耐環境性試験による評価を進め、2018年よりRICOHと共同研究に関する覚書を締結し、小型光通信技術軌道上実験装置（SOLISS）のモニタカメラとして軌道上実証するための共同開発を開始した。

本研究では、小型の全天球カメラTHETA S™を宇宙で利用するためのモデルに開発し、国際宇宙ステーションのi-SEEP上で軌道上実証することを目的とする。

【成果】

THETA S™を宇宙環境でも耐えられるように、筐体をアルミで新たに製作し、熱真空環境や宇宙線環境に強くするための方策を内部に施した。

振動試験、熱真空試験、耐宇宙線（放射線）試験を実施し、耐宇宙環境性を評価、国際宇宙ステーションの軌道で1年程度は耐えることができることを確認。宇宙用全天球カメラを開発した（図1）。

宇宙用全天球カメラはSOLISSのモニタカメラとして組み込まれ、2019年9月25日に「こうのとり8号機」にて打ち上げられ、9月28日に国際宇宙ステーションに届けられた。

翌10月より、日本実験モジュール「きぼう」の曝露部に取り付けられ、軌道上実験を開始。宇宙での全天球撮像に成功した（図2）。

2020年5月まで軌道上実験が続けられ、2021年2月に地球に帰還した。軌道上で撮り溜めた画像データを取り出し、こうのとり8号機をISSから切り離す瞬間など貴重なデータを取得することができた。

現在、将来ミッションに応用するために軌道上実証後の評価を行っている。



図1 宇宙用全天球カメラ
SOLISSのモニタカメラとして
組み付けられた状態

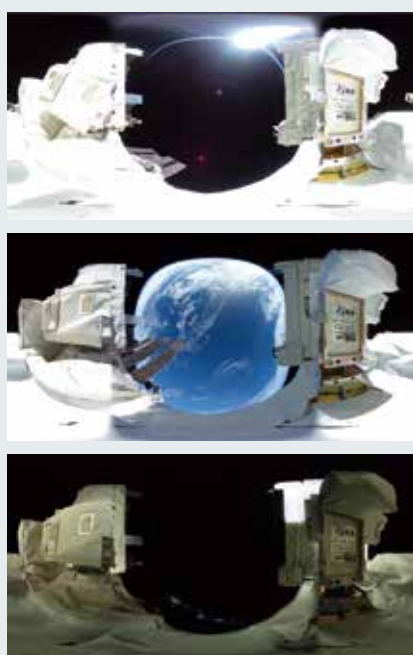


図2 軌道上で撮像した全天球画像例



図3 軌道上実証後のモニタカメラ

**研究
テーマ名** | 小型プラズマ源による真空下の除電技術の検証

機関名：春日電機株式会社

プロジェクト概要**【目的】**

宇宙探査では、月面や小惑星表面に存在するダスト（微粒子）が機器に付着すると故障や機器能力の低下を招くため、JAXAはダスト制御の一環として真空中での帯電問題を取り扱ってきた。また春日電機(株)では、真空プロセスを用いる産業機械において、製造品上で発生する真空中での帯電（放電やダスト付着を引き起こし、製品歩留まり低下の原因となる）を抑制するために、真空中で作動する除電器が求められた。

そこで、小惑星探査機「はやぶさ」、「はやぶさ2」のイオンエンジン技術を応用し、地上技術転用（スピノフ）として共同研究の成果のもと、春日電機が地上転用した「マイクロ波プラズマ除電処理システム」を開発した。

【内容】

JAXAは図1に示す「はやぶさ2」のイオンエンジン中和器に用いたマイクロ波プラズマ源を真空中での除電器として用いることを提案し、本プラズマ源の除電能力の評価を行うため、春日電機(株)と2017年8月に共同研究契約を締結した。

JAXAは小型プラズマ源の技術の提供と除電器に適したプラズマ源の開発を行い、春日電機は除電技術に関する知見と真空中での除電能力の測定技術の提供を行った。

本共同研究により、開発した除電器は、紫外線イオナイザーなどの従来の真空除電技術に対して100倍以上の速度で正または負に帯電した物体を除電できることを示した。この成果を用いて、春日電機は地上転用として図2に示すマイクロ波プラズマ除電処理システムを開発した。



図1 試験中のイオンエンジン中和器の写真



図2 春日電機(株)が開発したマイクロ波プラズマ除電処理システム

本除電技術は、マイクロ波プラズマ源を真空槽に設置し、生成したプラズマ中の正イオンまたは電子により帯電した物体を受動的に除電するものである。本プラズマ源は質量や大きさ、電力制限の厳しい宇宙機で用いるため、小型で高真空下でも動作することを特徴とする。また大気暴露に制限のなく取り扱いが容易なマイクロ波放電式プラズマ源を用いており、長時間作動させるイオンエンジンの特性上5万時間以上の動作試験をクリアしている。

今後JAXAでは本成果を用いて静電気による真空中でのダスト制御の研究を進める。

春日電機(株)では今後、国内外に高性能フィルム材の真空蒸着装置をはじめとした様々な高真空産業機器用の除電器として、本システムの販売を行う予定である。