

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：56101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04233

研究課題名(和文) 高専発 超電導磁気ギア搭載 宇宙用掘削ドリルの基礎研究開発

研究課題名(英文) Fundamental Research and Development of Double Reversing Drill using Superconducting Magnetic Gear

研究代表者

原野 智哉 (HARANO, TOMOKI)

阿南工業高等専門学校・創造技術工学科・教授

研究者番号：20332067

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：減速比3、直径100mmの軸方向磁場磁気歯車を用いて、宇宙環境への適用可能性を実証するため、 -48°C 、 0.1Pa の低温低真空環境下において伝達トルク $0.5\sim 2.0\text{Nm}$ 、回転速度 $400\sim 1400\text{rpm}$ で動力伝達性能実験を実施した。伝達トルク 20Nm 以上の大きい場合であれば、伝達効率は 60% 程度が得られることが判明したが、低温真空環境下においては、磁気歯車を支持する軸受の摩擦損失や磁石中の渦電流による発熱による伝達効率の低下が懸念されることが分かった。また、軸方向磁場磁気歯車の隔壁および2重反転機構を活用した、総重量 8.5kg の2重反転掘削ドリルの試作が完成した。今後、掘削性能を検証予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人口増加とともに地球上の資源不足が懸念され、人類の発展において宇宙開発が必須不可欠になりつつある。月面には地球資源の3000年分があるとされており、その豊富なFe, Ni, Al, 氷をはじめHelium2の資源は、開発国の所有物となる。また、火星探査や火星移住計画を推進する上で、中継基地と考えられる月面の資源開発は必要不可欠となっている。月面にはレゴリスと呼ばれる微細な砂が多数あり、これらが多種多様な設備機械に故障やトラブルを生じるとされており、宇宙環境に直接曝露せず動力伝達できる機構が必要不可欠となっている。以上の観点から、磁気歯車を搭載した2重反転掘削ドリルの研究開発は将来重要な役割を担う。

研究成果の概要(英文)：Using an axial magnetic gear with a reduction ratio of 3 and a diameter of 100 mm, we tested the transmission torque of $0.5\sim 2.0\text{ Nm}$ and the rotation speed in a low-temperature, low-vacuum environment of -48°C and 0.1 Pa to demonstrate the applicability to the space environment. A power transmission performance experiment was conducted at $400\sim 1400\text{ rpm}$. It was found that a transmission efficiency of about 60% can be obtained when the transmission torque is 20 Nm or higher. It was found that there was a concern about a decrease in transmission efficiency due to heat generation. In addition, a prototype of a double-rotating excavation drill with a total weight of 8.5 kg was completed using the partition wall of the axial magnetic gear and the double-rotating mechanism. We plan to verify the excavation performance in the future.

研究分野：機械要素設計

キーワード：月面開発 掘削ドリル 磁気歯車 2重反転 非接触 メンテナンスフリー 超伝導

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 地球上の資源枯渇・地球温暖化などにみられる環境問題など地球における人類の生存については、有限性が明確になりつつある。新たな資源・環境を求めるためには、月や火星などの地球外惑星に居住範囲を拡大し、月や火星の豊富な資源を活用して人類が生存していくことが必要不可欠である。その際、研究用の実験ハブは地球からの物資輸送により確保はできたととしても、居住惑星における資源を掘削して自給自足ができなければならない。地球からの物資の輸送は数千万円/kg であり、国家プロジェクトから民間ビジネス産業ベースに落とし込み宇宙への移民を推進するには、地産地消を実施していく必要がある。

(2) 月への都市計画に見られるように、JAXA 宇宙探査イノベーションハブが立ち上がり産学官連携による技術的課題を解決する試みがスタートしている。4つの「住む」「建てる」「作る」「探る」というキーワードの下、都市計画プロジェクトとして多くの基盤技術を成す必要があるが、「建てる」テーマの中心を成し、最重要課題ともいえる「軽量掘削システムの開発」課題は未着手のままである。地盤調査レベルの掘削機（アースオーガ）については立命館大学と日特建設（株）が着手しているが、実際の掘削では月面の地中の低温真空環境において高トルクが発揮できる動力伝達装置：超電導材料を用いた磁気ギアを搭載した2重反転ドリルの開発が不可欠と考える。

2. 研究の目的

研究チームが開発せんとする超電導磁気歯車を搭載した2重反転ドリルは、地上のネオジウム磁石の10倍の磁力を発揮する超電導磁石を用い、同軸上で2段以上の減速機能を持たせることで、2重反転ドリルを1個のモータで回転させると同時に、レゴリス（ダスト）の侵入を防ぐ防塵機能（非接触隔壁構造）と過負荷トルクが発生した場合にトルクリミッター機能の付加が可能で、かつ潤滑が不要のため、機械的損傷を低減できメンテナンスフリーであり、直径100mmで100Nm以上の高トルクを実現する。なお、月面の夜間温度は -170°C で、超電導材料が磁力をほぼ維持できる限界の温度であり、夜間であれば月面でも掘削可能であり、地中温度はさらに低いことが予想されるため、超電導磁気歯車は機能すると考えている。

3. 研究の方法

上述の研究目的を達成するため、以下の3つの基礎実用研究を実施した。

(1) 大気中における地上最強のネオジウム磁石 N45 を用いた直径100mmの磁気歯車を用いて、大気中において減速比1/3（図1）における回転速度、伝達トルク、伝達効率を過渡応答磁場解析シミュレーションと実験の双方から明らかにする。目標伝達トルクを1Nmとした。また、低温真空下（目標 -170°C 以下かつ 10^{-4}Pa 以下）の真空低温チャンバー内において、図2に示す新たに開発した磁気歯車の固定磁石円盤を冷却タワーに固定し、中間磁性媒体円盤を被駆動出力軸とし、性能試験を実施する。作業用ローバー内から掘削ドリル操作イメージである。

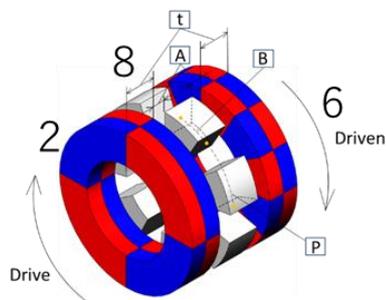


図1 減速比 1/3 磁気ギア

(2) 冷却タワーに設置した磁気歯車の固定磁石円盤を超電導材料に変更し着磁コイルにより着磁し、中間磁性媒体の被駆動出力特性を実験する。また、駆動・被駆動磁石円盤と中間磁性媒体を低温真空チャンバー内に配置して、冷却タワー軸を回転させ、駆動特性を実験する。さらに、高温超電導バルクの磁気コイルによる着磁方法を確立する。（目標伝達トルク 10Nm とした。）

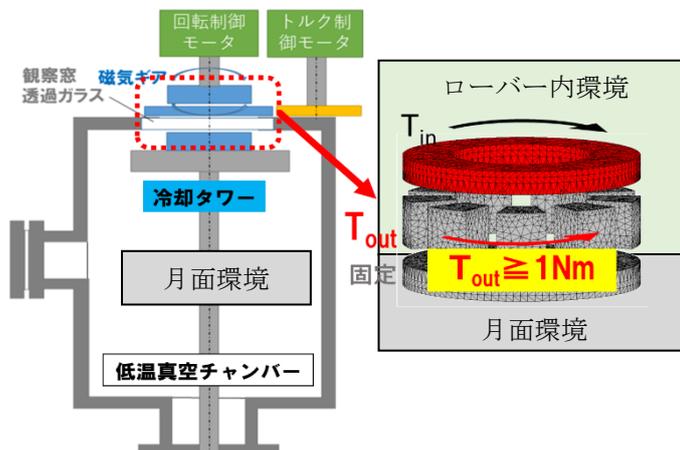


図2 磁気ギアの初期実験スキーム

(3) ネオジウム磁石による磁気歯車を採用した2重反転ドリルの設計検討と試作および掘削評価を実施する。

4. 研究成果

(1) 軸方向磁場磁気ギアの宇宙環境動力伝達評価

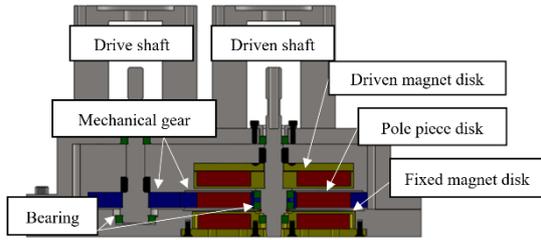


図3 試験装置概略

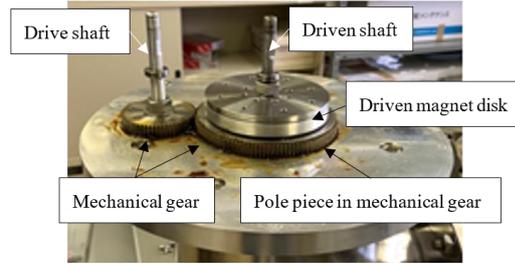


図4 試験装置内の磁気ギア構成

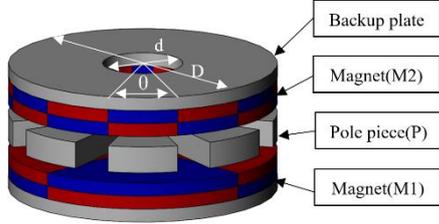


図5 磁気ギアの部品構成

Table 1 Dimensions and material of magnetic gear parts

Parts (Suffix)	Material	θ deg	t mm	d mm	D mm	Quantity
Magnet (M1)	N45	90	10	30	100	4
Magnet (M2)	(Nd-Fe-B)	30				12
Pole piece (P)	SS400	360	5			8
Backup plate						2

図3に本研究で開発した並行軸磁気歯車試験機を示す。宇宙環境への適用を低温真空チャンバー内に片側磁石円板を配置し、宇宙船内あるいはローバー内から磁気アクチュエータとして、動力伝達実験を行うことを想定し開発された。可能性実験段階のため、チャンバー内の磁石は固定されている。並行軸磁気歯車試験機では、駆動軸から磁気歯車を構成する従動軸への伝達を従来の機械式歯車を介する必要がある。図4に低温真空チャンバーとの接続状態および試験機内の磁気ギアの外観を示す。低温真空チャンバーは真空度0.1Pa、低温-170℃まで冷却性能を有する。本研究では、試験機設置状態において、真空度0.1Paかつ-48℃まで冷却可能であった。図5は磁気ギアの構成、表1は構成部品の寸法・材質および個数を示す。図6に実験結果を示す。伝達トルクが増加すると伝達効率は増加し、回転数を増加させると伝達効率が減少している。伝達トルクを増加させると伝達効率が減少する原因は、伝達トルクに含まれる歯車損失の割合が伝達動力の増加に伴い減少するからである。回転数の変化による伝達効率の変化が小さい理由は、伝達トルクに渦電流損失が一定の割合で含まれるためである。また、最大伝達効率は-48℃では負荷トルク2.0Nm、回転速度125rpmの条件で約32%であり、20℃で負荷トルク2.0Nm、回転速度1250rpmの条件の伝達効率は約43%であった。ネオジム磁石の温度特性から低温になれば磁束密度が増加し、伝達性能が向上するが、本試験では伝達効率の増加は見られず、温度低下により伝達効率は10%程度減少した。グリース潤滑による機械式歯車のみを用いたかみ合い損失試験を実施したが、常温とほぼ同じであった。機械式歯車を用いたかみ合い損失試験では、2つの磁石円板(M1およびM2)は装着されず、磁石円板M2が回転するベアリングの損失は含まれない。温度による機械式歯車の伝達効率への影響はなかったため、ベアリングの摩擦抵抗が低温環境下で増加し伝達効率が低下したと考えられる。磁気歯車は低温真空環境でも利用可能であるが、その他の摺動回転部品の低温真空環境による影響を考慮する必要がある。

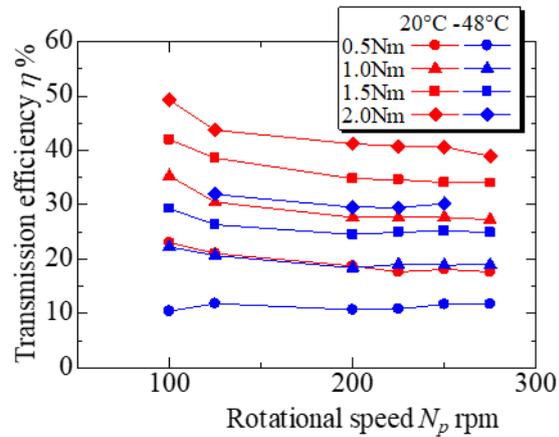


図6 実験結果

(2) 磁気ギアへの超電導磁石の導入検討

図7に本研究で使用した高温超電導バルク体（以下、バルク体と称する）を示す。組成は $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$ 70.9wt%, $\text{Gd}_2\text{BaCuO}_{5.0}$ 19.2wt%, Ag 9.4wt%, Pt 0.5wt%であり、臨界温度は-180℃である。直径は $\Phi 60\text{mm}$ （補強のためのステンレスリングを除く）であり、熔融法によって作成された。バルク体を十分に強力な磁石をして活用するためには着磁プロセスが重要であり、静磁場着磁法とパルス磁場着磁法の2つの手法が一般的である。本研究では、掘削機内部に配置されたバルク体の着磁が想定されるため、静磁場着磁と比較して着磁に必要な装置が小型となるパルス磁場によるバルク体の着磁を検討している。

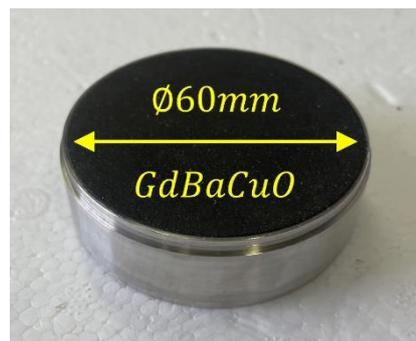


図7 高温超電導バルク体

図8に設計したパルス磁場発生回路の回路図と回路シミュレータによる解析結果を示す。バルク体の着磁に用いるパルス磁場は倍電圧整流回路によって昇圧された電荷を複数のキャパシタによって構成したキャパシタバンクに充電した後、着磁コイルへ放電することで発生する。着磁コイルはΦ2mmの銅線を用いた渦巻型コイルであり、650uHのインダクタンスを持つ。LT spiceによるパルス磁場発生回路の解析結果から、充電電圧600Vにて最大2300A程度の電流(=約3Tの最大磁場)が流れ込むことが想定されている。解析結果から、パルス磁場発生回路の最大充電電圧を1kVに定めることで、最大磁場5T程度の強磁場によるパルス着磁試験の準備を行い、磁気ギア内部に搭載されたバルク体を想定したパルス磁場着磁試験の実施に移る。

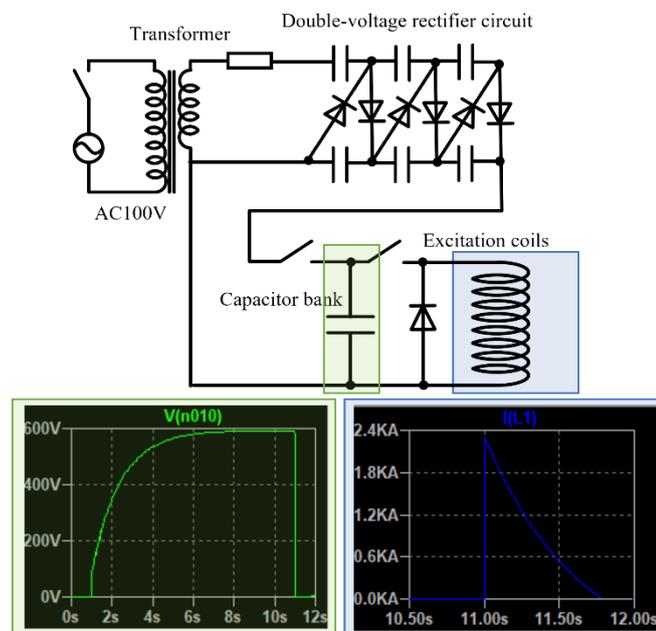


図8 パルス磁場発生回路とシミュレーション結果

(3)ネオジム磁石による磁気ギア搭載2重反転ドリルの設計・試作および静的掘削能力評価
 項目(1)で用いた減速比1/3の磁気ギアを搭載可能な2重反転ドリルの設計試作を2回行った。設計要件は表2に示す通りで、目標掘削トルク6.5Nm,最大回転数600rpm,最大掘削量3kg/min,重量10kg以下,費用50万円以下とした。設計試作を2回繰り返して、改良された2重反転ドリルを図9に示す。最終重量8.5kgの2重反転ドリルのプロトタイプが試作完了している。しかし、過渡応答磁場解析結果から、本2重反転ドリルの場合、駆動部内部から図5磁気ギア中のMagnet1と同様の磁石円板を用いて隔壁動力伝達をシミュレーションしたが、動力伝達が円滑にできない結果が得られている。現在、駆動部内の動力伝達用磁石円板を通常のSS400円板に変更してシミュレーションしたところ、通常の2重反転挙動が得られている。また、掘削ブレード直径の大きい上部ドリルの振れが大きいなどまだ改善すべき設計課題がある。今後、これらの点を検討し、設計試作上の問題点を解決後、磁石をドリル内部に装着して動的な掘削性能試験を実施する予定である。

なお、月面上のレゴリスで静的掘削トルクの測定は実施できていないが、図9に示すように本校内砂場を利用した静的掘削トルクを測定した結果、いずれも2Nm未満を示しており、十分な掘削性能が発揮できると考えている。また、砂場の砂の粒径は617.3μmで、レゴリス模擬土の粒径57.18μmより大きく、月面模擬土の静的掘削トルクは砂場より小さい値を示す傾向にあるため、2Nm以下のトルクを示したことは、磁気ギア搭載2重反転掘削ドリルが十分機能すると期待される。

Table2 Design requirement

Torque	6.5Nm
Rotational speed	600rpm
Excavation volume	3kg/min (600rpm)
Size	φ200mm×1000mm
Weight	10kg
Cost	¥500,000

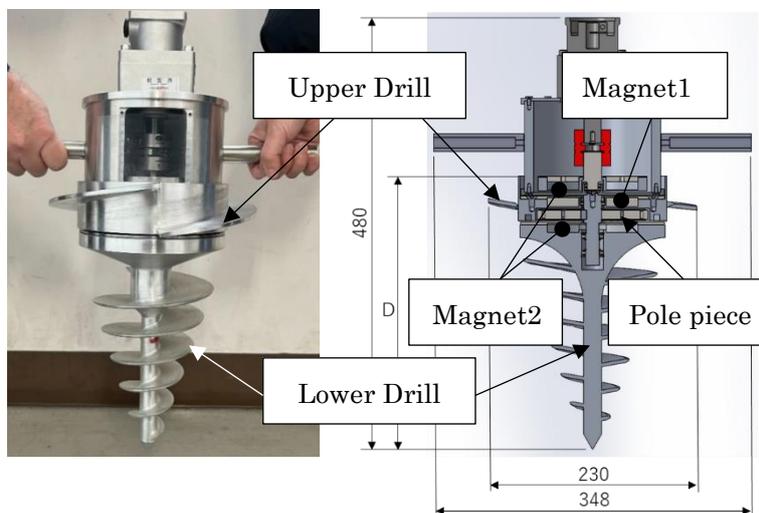


図9 試作改良された2重反転掘削ドリル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 原野智哉, 山田祐輝, 川畑成之, 田中淑晴, 柳沢修実	4. 巻 57
2. 論文標題 板磁石を利用した非接触リニア駆動機構の設計開発（第2報, 減速比1/6~1/2 における伝達性能に及ぼす中間磁性媒体形状の影響）	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 設計工学	6. 最初と最後の頁 307-316
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14953/jjsde.2021.2935	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 原野智哉・岡田莉右・田中淑晴・小谷明・綿崎将大・山口康太
2. 発表標題 軸方向磁気歯車における動力伝達性能に及ぼす減速比の影響
3. 学会等名 日本設計工学会2022年度四国支部研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩月勇樹・田中淑晴・原野智哉・小谷明・綿崎将大・山口康太
2. 発表標題 磁気歯車を用いた直動ジョイントの特性調査
3. 学会等名 SICE中部支部シンポジウム&若手研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原野智哉・宮野凜太郎・柳田倫伸・田中淑晴・小谷明・柳沢修実・綿崎将大
2. 発表標題 軸方向磁場による磁気歯車の動力伝達性能
3. 学会等名 日本設計工学会2022年春季大会研究発表講演会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原野智哉・柳田倫伸・高島雄太・田中淑晴・小谷明・柳沢修実・綿崎将大
2. 発表標題 軸方向磁場磁気歯車の動力伝達性能に及ぼす減速比および筐体材料の影響
3. 学会等名 日本設計工学会2022年春季大会研究発表講演会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩月勇樹・田中淑晴・原野智哉・小谷明・綿崎将大
2. 発表標題 磁石列の対向配置におけるトルクの違い
3. 学会等名 第27回高専シンポジウムオンライン
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 國分正吾・田中淑晴・原野智哉・小谷明・柳沢修実・綿崎将大
2. 発表標題 リニア磁気歯車の増速機への援用時における課題
3. 学会等名 SICE中部支部シンポジウム&若手研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原野智哉・島田史也・田中淑晴・小谷明・柳沢修実・綿崎将大
2. 発表標題 直交磁気歯車間の隔壁物体が伝達角度誤差に及ぼす影響
3. 学会等名 日本設計工学会2021年度 春季大会研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原野智哉, 高島雄太, 田中淑晴, 柳沢修実, 綿崎将大
2. 発表標題 軸方向磁場による磁気歯車の動力伝達性能
3. 学会等名 日本設計工学会四国支部 2020年度研究発表講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	綿崎 将大 (WATASAKI SHODAI) (50791125)	広島商船高等専門学校・その他部局等・講師 (55402)	
研究分担者	田中 淑晴 (TANAKA TOSHIHARU) (70455137)	豊田工業高等専門学校・機械工学科・准教授 (53901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------