

高温超伝導線材を用いた惑星間導電テザー推進システムの推力検証実験

○柴田大輔, 松井信, 山極芳樹 (静岡大学)

1. 目的および背景

現在, 宇宙輸送に使用される推進方法は化学推進と非化学推進に大別される. 推進に化学反応を用いる化学推進は, 推力が高いという利点を持つため地球からの打ち上げミッションには適しているが, 比推力が低いため推進剤質量が増大しペイロード質量が大きく制限されてしまう. また, 高比推力である電気推進でさえ, 外惑星探査などの長期間のミッションとなると推進剤質量でペイロード質量が制限されてしまう. そこで, このような問題を解決するために推進剤を使用しない次世代の推進システムがいくつか研究されている. 本研究室ではこのような新しい推進システムの一つとして, エレクトロダイナミックテザー(EDT)と超伝導コイルを組み合わせた Mag-Tether¹⁾の研究を進めている.

EDT は, 導電性のワイヤまたはテープに電流を流し, 地球磁場との干渉でローレンツ力を発生させることで推進剤なしの推進が可能 (図 1)^{2), 3)} で, 軌道変換, 宇宙デブリ除去, 宇宙構造物の軌道維持, 発電等多くの応用が考えられ, 将来の宇宙開発において大変有益な技術である.

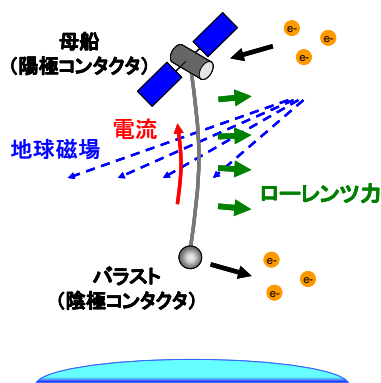


図1 エレクトロダイナミックテザーの作動原理

この技術を長期ミッションである惑星間輸送に対応したシステムに応用しようと考案されたのが Mag-Tether である.

昨年度までの Mag-Tether の推力検証実験の研究結果として, 磁場コイルの代替として永久磁石を使用した解析と実験を行い, 実験値が解析値より二桁も小さくなる⁴⁾, また超伝導コイルを模擬するために

永久磁石を磁気シールドで覆った実験を行い, 微小ではあるが磁気シールドの効果により推力が増加すること⁵⁾, 実験値が解析値より二桁も小さくなるのは, 実験値が永久磁石の磁場が円電流によって発生しており, 結局常伝導コイルと同様に, 永久磁石中の円電流と, テザー電流により発生する磁場が干渉し, ローレンツ力が相殺されている可能性がある⁴⁾と考えられる.

本研究では実験室レベルでの取扱いが容易な高温超伝導線材を用いて, 新規的宇宙輸送システムとして新たに提案する Mag-Tether について, 推力検証実験を行い, その推進原理の解明を目的とする.

2. Mag-Tether について

2.1 Mag-Tether の構造

Mag-Tether の概略図を図 2 に示す. Mag-Tether は母船に搭載した超伝導コイル, 導電性のテザー, テザー両端部のプラズマコンタクトから構成される. 超伝導コイルの材質は YBCO を想定する. これは高温超伝導体材料であり, 高い電流密度が期待できる. また, 惑星間使用においてはテザーの直線形状を保つための有効な重力勾配が存在しないので, テザー構造は内部にアルミニウム箔の導電性テープを貼り付けた剛体の CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)の中空管を用いる. さらに, テザーに電流を流すため, 周辺プラズマから電子を収集, 放出させテザーとプラズマとの間で電子の交換を行うプラズマコンタクトをテザー両端に取り付ける. 陽極コンタクトでは電子を収集し, 陰極コンタクトでは電子を放出する.

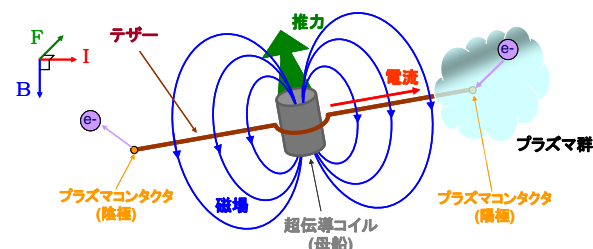


図2 Mag-Tether 概略図

2.2 Mag-Tether の推進原理

Mag-Tether の作動原理は EDT と基本的には同じである. EDT は地球磁場とテザーに流れる電流との相

相互作用によって発生するローレンツ力を推力としている。しかし、惑星間磁場は地球磁場に比べて微小であるため、Mag-Tether は母船に搭載した超伝導コイルによって強い磁場を生成し、それにより推力を発生させている。コイルとテザー間に発生する力については、コイルによって作られる磁場とテザー電流により発生するローレンツ力(図3)とテザー電流によって作られる磁場とコイル電流によるローレンツ力(図4)を考える必要がある。

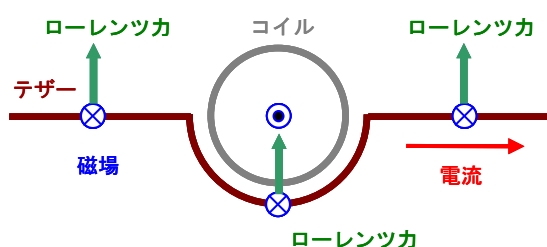


図3 コイル磁場とテザー電流との相互作用によるローレンツ力

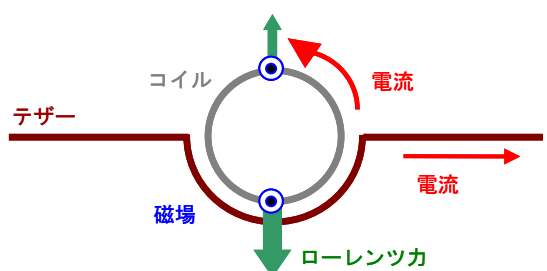


図4 テザー電流による磁場とコイル電流との相互作用によるローレンツ力

通常は両者が互いに打ち消しあい推力は生じないが、超伝導コイルを使用することで、外部磁場がコイルに作用しないという完全反磁性（マイスナー効果）⁶⁾により後者のローレンツ力は生じないので一方の推力発生が可能と考えられる。

3. 実験装置

3.1 高温超伝導線材

本研究で用いた超伝導線材は住友電気工業株式会社の製品であるビスマス系超伝導線材(DI-BSCCO)を用いた。今回、この線材を採用した理由としては、ビスマス系線材の方がイットリウム系線材に比べ、臨界温度が高いという点と、加工が容易であり、現在量産化技術が整っているという点である。

使用する超伝導線材の外観を図5、超伝導線材の仕様を表1に示す。



図5 DI-BSCCO

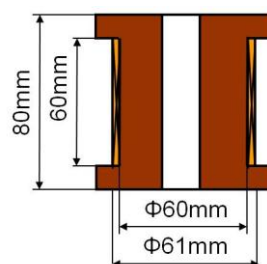
表1 本研究で用いた DI-BSCCO の諸元

Type HT(CA50)	
平均幅	4.5±0.3mm
平均厚さ	0.36±0.04mm
ラミネーション材料	銅合金
単長	10m
臨界電流(77K, 自己磁場)	140A
許容引張り張力(RT)*	280N
許容引張り強度(77K)*	250MPa
許容引張り歪み(77K)*	0.3%
許容両曲げ直径(RT)*	60mm

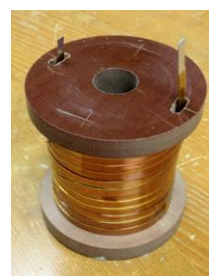
* 臨界電流の95%に低下するレベル

3.2 超伝導コイル

今回表1で示した線材をコイルの巻き芯にフェノール樹脂を使用し、今回、コイル形状について、1層12巻き(12ターン)の円筒型コイルと、19層(19ターン)の円盤型コイルの3種類を製作した。図6と図7にそれぞれのコイルの形状と寸法を示す。



(a) 1層12巻き



(b) コイル外観図

図6 円筒型コイル

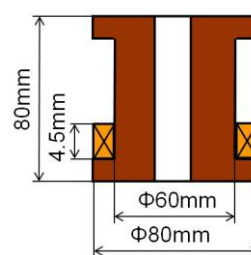


図7 円盤型コイル

3.3 振り子型ステージ

本研究で使用した推力測定装置の概略図を図 8 に示す。

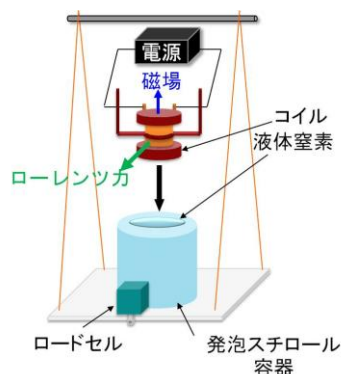


図 8 推力測定装置概略図

本研究では振り子型の実験装置により推力を測定した。一方向の推力を測定するため、ブランコのように二点で吊り下げ、推力を測定した。

3.4 実験条件

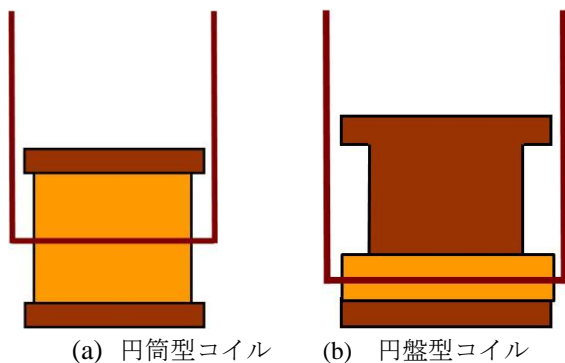
実験諸元を表 2, 3 に示す。Mag-Tether の構成は、コイルとテザーを図 9 のように配置して模擬する。

表 2 コイル緒元

	円筒型 コイル	円盤型 コイル
内径 [mm]	60	60
外径 [mm]	61	80
巻き幅 [mm]	60	4.5
電流 [A]	0~40	0~40

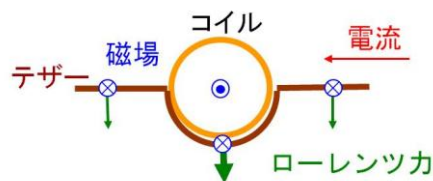
表 3 テザー緒元

材料	銅線
抵抗 [Ω m]	1.7×10^{-8}
直径 [mm]	1.6
電流 [A]	10, 20, 30



(a) 円筒型コイル

(b) 円盤型コイル



(c) 上から見た配置

図 9 Mag-Tether モデル構成

4. 実験結果

4.1 超伝導線材冷却実験

超伝導線材 (DI-BSCCO) を液体窒素冷却した場合の抵抗値を測定した。比較のため、銅線も同様の実験を行った。それぞれ長さ 100mm の線材に 10A の電流を流したときの電圧値を測定し、抵抗値を求めることにした。電流を流し始めてから 20 秒後に液体窒素に漬け、それから 60 秒後に冷却を停止させ、その後の電圧値も測定した。図 10 に横軸に時間、縦軸に電圧をとったグラフを示す。

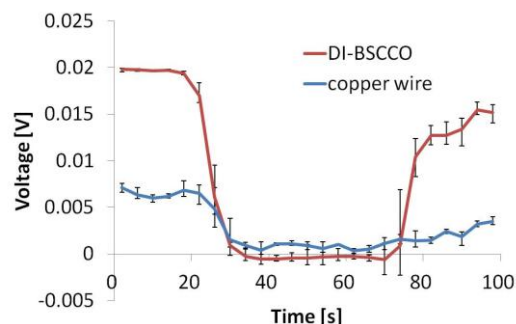


図 10 線材冷却実験

銅線と比較し、DI-BSCCO は断面積が小さいので電流を流し始めたときは、銅線よりも抵抗値が大きくなるが、液体窒素で冷却すると抵抗がほぼ 0 になった。銅線も抵抗は小さくなるが、0 になることはなかった。このことから液体窒素冷却で線材は超伝導状態になっていることが確認できた。

4.2 Mag-Tether モデル推力検証実験

超伝導コイルにテザーを配置し、Mag-Tether モデルの推力検証実験を行った。

4.2.1 円筒型コイル

1 層 12 巻きの円筒型コイルを用いて推力検証実験を行った。超伝導状態と常伝導状態、それぞれの推

力値を比較した．コイルの電流値を 20~40A，テザーの電流値を 0~30A まで変更して実験を行った．図 6.8 に結果を示す．

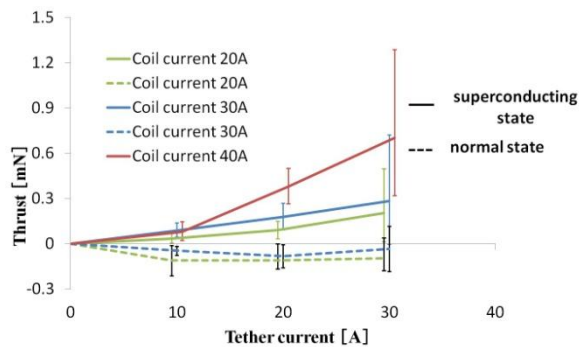


図 11 円筒型コイル実験結果

縦軸の正方向が推進原理と同一方向（テザーが生じるローレンツ力の方向）の推力値となり，負の方向が推進原理と反対方向（コイルが生じるローレンツ力の方向）となる．実線で示したグラフが超伝導状態，点線で示したグラフが常伝導状態の結果である．この結果から，液体窒素冷却を行い超伝導状態になったコイルでは推進原理と同一方向に推力が発生することが明らかとなった．常伝導状態のときは推進原理と反対方向，またはほとんど推力が検出されない結果になった．

4.2.2 円盤型コイル

19 層の円盤型コイルを用いて推力検証実験を行った．超伝導状態と常伝導状態，それぞれの推力値を比較した．コイルの電流値を 20~40A，テザーの電流値を 0~30A まで変更して実験を行った．図 12 に結果を示す．

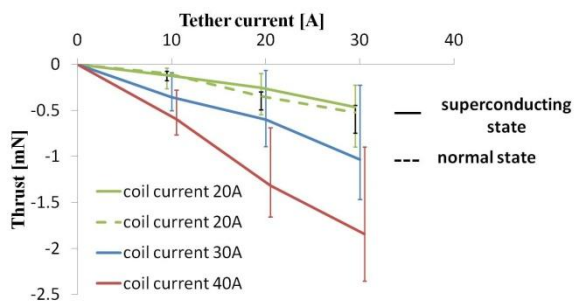


図 12 円盤型コイル実験結果

円盤型コイルでは超伝導状態，常伝導状態ともに推進原理とは反対方向に推力が検出された．またコイル電流 20A の結果を比較すると，どちらもほぼ同

程度の値となっていることがわかる．

5. 実験値と解析値の比較

Mag-Tether モデルで発生する推力の実験値と解析値の比較を示す．

5.1 解析方法

コイルとテザーの磁場測定を行い，その結果を用いて理論値を算出する．磁場 B と電流 I との相互作用によって発生するローレンツ力 F をフレミングの左手の法則により

$$\mathbf{F} = \int d\mathbf{l} \cdot (\mathbf{I} \times \mathbf{B})$$

で求めた．

コイルから発生する磁場とテザーに流れる電流との相互作用によって，テザーに生じるローレンツ力を求めた．ここで，コイルから発生した磁場は，半円部では同等の値として考えられるが，テザー直線部分に作る磁場は $B = B_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^3$ に比例して減衰するため，幅 1mm のテザー電流が受ける磁場は同値であると近時してローレンツ力を算出した．解析モデルを図 13 に示す．

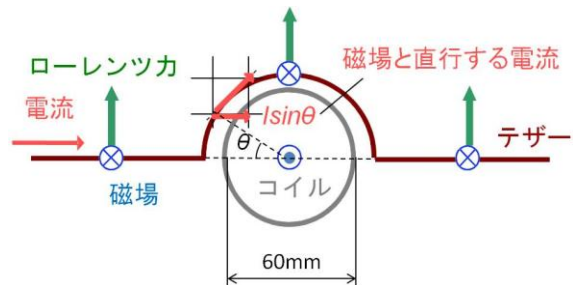


図 13 テザーのローレンツ力解析モデル

テザーに生じるローレンツ力と同様に，テザーから発生する磁場とコイルに流れる電流との相互作用によって，コイルに生じるローレンツ力を求めた．解析モデルを図 14 に示す．

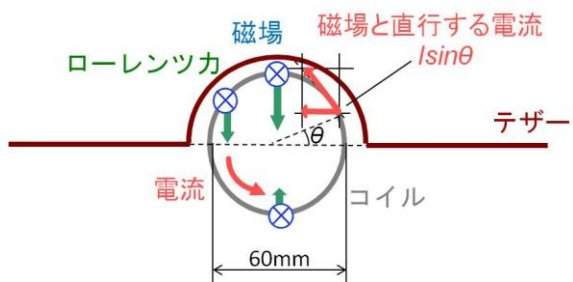


図 14 コイルのローレンツ力解析モデル

5.2 解析結果

テザーとコイルに生じるローレンツ力の計算結果と実験で得られた推力値を比較した。表 7.3 にその結果を示す。

表 4 実験値と解析値の比較

	円筒型 (1 層 12 巻)	円盤型 (19 層)
テザーの ローレンツ力 [mN]	6.1	34.2
コイルの ローレンツ力 [mN]	-6.3	-35.5
常伝導状態の 理論推力 [mN]	-0.2	-1.3
実験値 [mN]	0.3	-1
磁場遮蔽率 [%]	8	1

表 4 ではテザーのローレンツ力が生じる方向を正とし、コイルのローレンツ力が生じる方向を負として表した。またコイルがすべて常伝導状態になっているときの理論推力をテザーとコイルのローレンツ力の差によって求めた。この値と実験値を比較し、液体窒素冷却時にコイルがどの程度、磁場遮蔽を行っているかを求めた。

円盤型コイルではコイルのローレンツ力の方が大きくなり、実験においてもコイルのローレンツ力の方向に推力が発生している。ここでも、常伝導状態の理論推力よりは少し小さな値となっており、1%程度の磁場遮蔽が起きているのではないかと考えられる。

一方、円筒型コイルにおいて、計算値ではコイルのローレンツ力の方がテザーのローレンツ力より大きい。実験値ではテザーのローレンツ力方向に推力が検出された。これは円筒型コイルでマイスナー効果により、磁場遮蔽を行うことができ、テザーによる推力を得ることができたと考えられる。この形状でも完全な磁場遮蔽は行われず、計算値の 8%程度の磁場遮蔽しかできていないと考えられる。

6. 考察

今回、どちらのコイル形状においても、十分な磁場遮蔽が行われなかった。この原因として、線材が部分的に常伝導状態になっていることが考えられる。超伝導線材において外部磁場や熱の流入などのじょう乱により線材の一部が発熱し常伝導状態になる。⁷⁾

すると熱は線材長手方向に熱伝導していく。そのとき発熱部に隣り合う線材では分流といって、電流の一部が安定化母材である銀合金に流れ、超伝導フィラメントと銀合金の両方に流れることになる。線材温度は発熱部から離れていくにしたがって、冷媒に熱伝達することにより下がり、線材は超伝導状態に戻る。このような現象が今回の線材中でも起こっていたことが考えられる。

また円盤型コイルの方が円筒型コイルに比べ磁場遮蔽率が低かった原因としては、線材がテープ形状であり、隣り合う線材の接触面積が円盤型の方が大きいことや冷媒への熱伝達が起きにくく、線材温度が下がりにくかったことが考えられる。

もうひとつの原因として超伝導線材内の磁場の振る舞いについて評価できていなかった点が挙げられる。超伝導体は磁場が印加されるとマイスナー効果により磁場を遮蔽する。さらに強い磁場を印加すると高温超伝導体では不純物などに磁束が侵入してくる。そして部分的な反磁性を示す混合状態となる。超伝導体に磁束が侵入し、電流が流れるとその磁束にローレンツ力が生じるが、高温超伝導体ではピン止め効果により磁束の動きを妨げることができる。本来ならばこのピン止め効果により線材、すなわちコイルにローレンツ力は生じないはずだが、今回の実験においてピン止め効果が十分に機能していなかったことが考えられる。今回の実験・解析においてはこのピン止め力を評価することができなかった。

7. 結論

本研究では超伝導コイルを用いた Mag-Tether システムの推進原理の解明を目指し、実験室レベルでの取扱いが容易なビスマス系高温超伝導線材のコイルを利用した模擬 Mag-Tether を作成し、コイル形状等をパラメータとして推力検証実験を行った。

円筒型コイルにおいて推進原理と同一方向に推力を検出することができたが、推力値の実験値は解析値に比べ、1 桁ほど低い結果となった。

円盤型コイルでは推進原理とは反対方向に推力が検出された。この原因として、コイルが部分的に常伝導状態になっていたことにより、完全な磁場遮蔽が行われなかったことが推測できる。

テザーとコイルのローレンツ力の計算値と実験値を比較し、円筒型コイルで 8%、円盤型コイルで 1%の磁場遮蔽が生じていると考えられる。

以上のような実験結果と推力の解析結果より、超伝導コイルを利用することで、Mag-Tether が本来発

生するであろう推力が生じていることが定性的に確認できたが、定量的に理論値に近い推力を得るためには超伝導コイルの完全な磁場遮蔽を実現する必要があることが明らかとなった。

8. 今後の課題

本研究の結果と考察をもとに、今後取り組むべき課題を以下に示す。

液体窒素冷却では液体窒素が常に沸騰している状態となり、推力測定値に誤差が生じやすくなるので、冷凍機を用いた推力検証実験を行えば、より正確な推力値が得られると考える。

コイルの熱解析を行い、コイルの発熱状態を調査し、発熱が起こりにくいコイル形状を考察することが必要であると考ええる。また京都大学において Mag-Sail に使用するイットリウム系超伝導コイルの解析的研究を行っているので共同で研究を行うことが望ましいと考える。

Mag-Tether の推進原理の検証を行うためにはマイスナー効果とともにピン止め効果を考察していく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) Yamagiwa.Y, Watanabe.S, Kotanagi.K “Innovative Interplanetary Transportation System Using Electrodynamic Tether and Magnetic Coil (Mag-Tether)” ISTS,2006,b-46, 2006.
- 2) Cosmo, M. L. and Lorenzini, E. C.: *Tethers in Space Handbook—Third Edition*, Prepared for NASA MSFC by Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, MA, 1997.
- 3) 山極芳樹, 竹ヶ原春貴, 小境正也, 大西健夫, 田原弘一: エレクトロダイナミックテザー, 日本航空宇宙学会誌, **52** (2004), pp.101-108.
- 4) 原和宏: 「テザーと磁場コイルを用いた惑星間輸送システムの推力特性に関する実験的研究」 静岡大学卒業論文, 2008.
- 5) 高木暁生: 「Mag-Tether 推力検証実験」 静岡大学卒業論文, 2009.
- 6) 大沼俊朗: “超伝導電磁気学”, コロナ社, 1995.
- 7) 仁田旦三: 「超電導エネルギー工学」, オーム社, 2006.