

2 種の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

○内山 直紀, 松井 信, 山極 芳樹(静岡大学大学院)

1. 緒言

1.1 研究背景

近年, 宇宙開発を目的とした研究対象は木星や土星以後の深宇宙にまで向けられている。外惑星探査などの超長期間ミッションでは推進剤が膨大となり, ペイロード質量が大きく制限されてしまう。そこで近年, この問題を解決する為に推進剤を必要としない推進システムが研究されている。本研究では推進剤を必要としない Electrodynamic Tether(EDT)システムを惑星間輸送に応用する為, EDT と磁場コイルを組み合わせた“Mag-Tether”システム¹⁾を提案し研究している。

先行研究において超伝導コイルを用いて実験及び解析が行われた。それにより液体窒素冷却時は推進原理と同一方向に推力を検出することができたが, 解析値よりも 1 桁小さい値であった²⁾。この問題点としては Bi 系超伝導線材の磁場特性やリード線等からの入熱による常伝導化, 磁束量子のデピニングによる部分的常伝導化などが考えられる。

1.2 研究目的

本研究では実験室レベルで Mag-Tether システムを構築し, 推力の計測を行い, 推力発生原理を解明することを目的とする。本稿ではコイル巻軸用ボビンを改良し冷却効率の改善を行うことで, リード線及び超伝導コイルの発熱による常伝導化を防ぐことを提案する。また, 超伝導線材を従来の BSCCO から ReBCO に変更することで, 超伝導線材の特性に依存する影響を明らかにする。

2. Mag-Tether システムについて

2.1 EDT システムと Mag-Tether システム

EDT システムは推進剤を用いない推進システムで, 地球近傍での運用が想定されている³⁾。また, デブリ除去システムとしての利用が期待されている。EDT システムは導電性のテザーに電流を流し, 地球磁場との干渉によるローレンツ力を発生させることで推進剤を用いずに推進が可能システムである。EDT システムの概要を図 1 に示す。この技術を超長期間ミッションである惑星間輸送に応用しようと考案されたのが Mag-Tether システムである。EDT システムは地球磁場が弱くなる高高度での運用や非常に微小な磁場しか存在しない惑星間⁴⁾での運用では有効な推力を得ることができない。そこで, Mag-Tether システムでは母船に磁場コイルを搭載し, その磁場とテザー電流との干渉によるローレンツ力を用いて推進する。Mag-Tether システムの概要を図 2 に示す。Mag-Tether システムは母船に搭載された磁場発生用のコイル, 周囲のプラズマと電子の授受を行うプラズマコンタクタ, 導電性のテザーから構成される。磁場コイルとしては大電流を流すことで大きな磁場を得ることができる超伝導コイルを使用する。また, 超伝導コイルを使用することでマイスナー効果により一方向推力を得ることができる。詳細は次節で述べる。

2.2 Mag-Tether システムの推力発生原理

Mag-Tether システムは磁場と電流の干渉によるローレンツ力を推力として用いる。コイルとテザーを組み合わせる

と発生すると考えられるローレンツ力が 2 種類存在する。それぞれを図 3 に示す。1 つはコイルが生成する磁場とテザーに流れる電流との相互作用によるローレンツ力である(図 3 左)。もう 1 つはテザーに流れる電流が生成する磁場とコイルに流れる電流の相互作用によるローレンツ力である(図 3 右)。常伝導コイルを用いると両者が互いに打消し合い推力は極僅かにしか発生しない。前節で述べた通り, 超伝導に特有な性質であるマイスナー効果を利用する為, 磁場コイルとして超伝導コイルを用いる。マイスナー効果とは超伝導体が外部磁場を弾く完全反磁性を示す現象である。この性質によりテザー電流による磁場は超伝導コイルには作用せず後者のローレンツ力は発生しない為, 一方向の推力のみが得られる。従って, Mag-Tether システムは微小磁場空間においても推進が可能である。

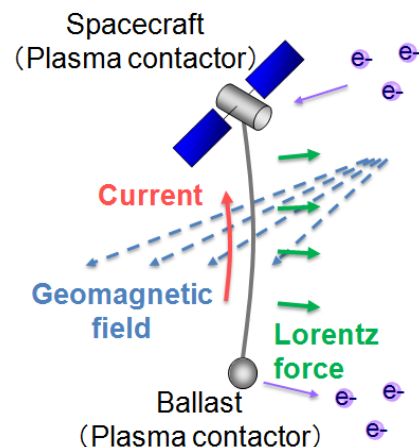


Fig. 1 Conceptual figure of electrodynamic tether system.

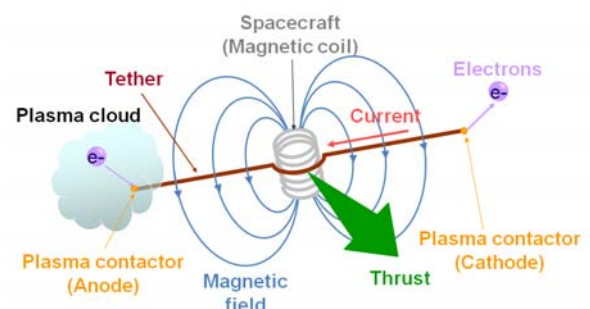


Fig. 2 Concept of the operation of Mag-Tether system.

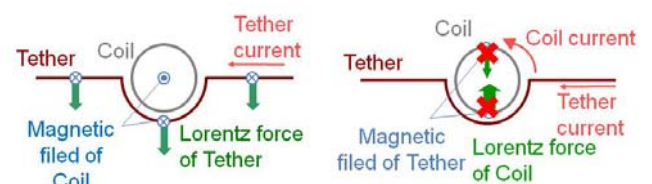


Fig. 3 Propulsion principle of Mag-Tether system.

3. 実験装置及び実験条件

3.1 超伝導線材

超伝導体とは 1911 年に発見された、低温で電気抵抗が零になる(完全導電性)等の性質を有する金属、あるいはその化合物である⁵⁾。超伝導体であれば同時にマイスナー効果も示す。超伝導体を用いて作製されたテープ状の導体を超伝導線材と呼ぶ。

本研究において用いる超伝導体は、液体窒素中で超伝導状態を示すことを条件とし、臨界温度が 77K 以上である高温超伝導体を使用する。臨界温度が 77K 以上の高温超伝導線材としては銅酸化物超伝導体が知られ、ビスマス(Bi)系超伝導体の $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (BSCCO, Bi2223)や Bi2122, $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (ReBCO, Re123, Re は希土類元素 Rare earth)等がある⁶⁾。先行研究では、量産化技術が整っており安価な Bi2223 超伝導線材を使用した。住友電気工業株式会社より DI-BSCCO(Type HT, 住友電工製)を購入し、超伝導コイルを製作した。また、DI-BSCCO の外観を図 4 に、仕様を表 1 に示す。ここに、表 1 中の I_c は臨界電流値を示し、RT は常温(Room Temperature)を示す。また、各値は臨界電流の 95% に低下するレベルの値である。本稿では新たに ReBCCO の中から古河産業株式会社より 2G HTS Wire(Type SCS4050-AP, SuperPower Inc. 製)を購入し BSCCO との比較実験に用いた。外観を図 5 に、仕様を表 2 に示す。BSCCO は量産化技術が確立されており安価で販売されているが磁場特性が悪く、一方、ReBCO は量産化技術が未発達で高価であるが磁場特性に優れていることが報告されている。

3.2 巻軸用ボビン

本研究においては 2 種類の巻軸用ボビンを用いた。超伝導線材を巻くための巻軸は、液体窒素冷却に耐えられる材質を使用しなければならない。本研究では、フェノール樹脂製のボビンを使用する。BSCCO 超伝導線材の許容両曲げ直径が 60mm である為、外径 $\phi 80\text{mm}$ × 内径 $\phi 60\text{mm}$ × 高さ 80mm のボビンを製作した。こちらは先行研究にて用いられた。また、先行研究の問題点を解決する為、新たなボビンを使用する。線材の冷却効率を高める為、巻き軸に幅 10mm × 高さ 60mm のスリットを 8 本入れたものを製作した。それぞれの外観を図 6 (a)及び(b)に示す。

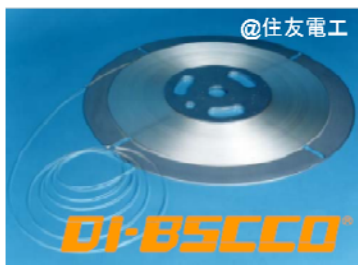


Fig. 4 Photograph of DI-BSCCO

Table 1 Specifications of DI-BSCCO tapes.

Specifications of DI-BSCCO Type HT(CA50)	
Average Width	4.5±0.3mm
Average Thickness	0.36±0.04mm
Reinforced Material	Copper Alloy(50 μm)
Length	10m
I_c (77K, Self Field)	140A
Critical Wire Tension(RT)	280N
Critical Tensile Strength(77K)	250MPa
Critical Tensile Strain(77K)	0.30%
Critical Double Bend Diameter(RT)	60mm



Fig. 5 Photograph of 2G HTS WIRE

Table 2 Specifications of 2G HTS WIRE

Specifications of 2G HTS Wire SCS4050-AP	
Average Width	4.00mm
Average Thickness	0.092mm
Stabilizer	Copper (40 μm)
Substrate	Hastelloy(50 μm)
Length	10m
I_c (77K, Self Field)	119A
Critical Tensile Strength(77K)	700MPa
Critical Tensile Strain(77K)	0.45%
Critical Double Bend Diameter(RT)	11mm



(a) Coil bobbin in previous study.



(b) Coil bobbin in this study(with 8 slits).

Fig. 6 Photographs of coil bobbin.

3.3 実験条件

本研究では、1 層 12 巻の円筒型コイルと、19 層の円盤型のコイルを用い、また、コイルに用いる超伝導線材は DI-BSCCO と 2G HTS WIRE とした。製作したコイルに銅線で製作したテザーを取付ける。2 種類のコイルとテザーの配置図を図 7 に示す。左が円筒型コイル、右が円盤型コイルである。液体窒素冷却の為、外径 $\phi 140\text{mm}$ × 内径 $\phi 80\text{mm}$ × 高さ 200mm の発泡スチロール容器内にコイルを設置した。発泡スチロール容器を振り子式ステージに乗せ、ステージの一端にロードセルを接触させ推力を計測した。実験装置の概略図を図 8 に示す。コイル及びテザーに流す電流はそれぞれ 20A, 30A, 40A と 0A, 10A, 20A, 30A とする。実験条件を表 3 に示す。液体窒素は常温で激しく沸騰している。その振動が推力測定に及ぼす影響を小さくする為、液体窒素に気体ヘリウムを注入し沸騰を抑制した⁷⁾状態で推力を計測している。

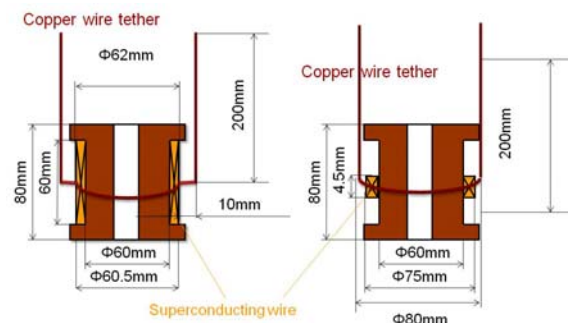


Fig. 7 Bobbin scales and arrangements of tether.

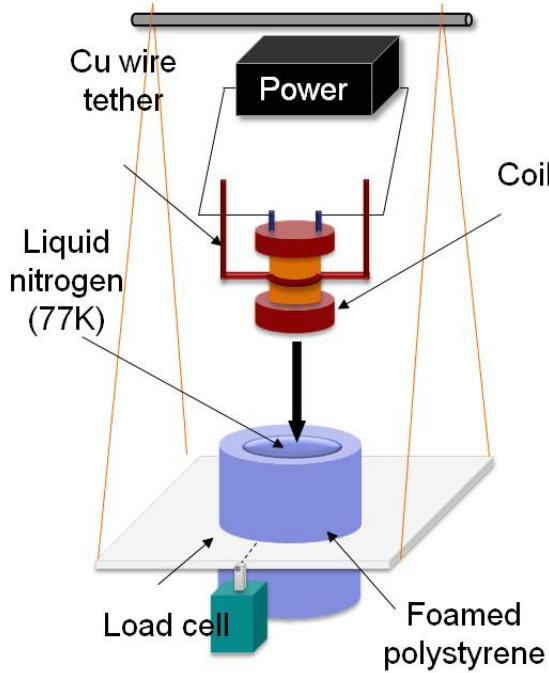


Fig. 7 Schematic diagram of experiment system.

Table 3 Experimental condition.

	Cylindrical coil	Discal coil
Layer number of coil	1	19
Total turn number of coil	12	19
Coil inner diameter [mm]	60	
Coil outer diameter [mm]	61	74
Coil height [mm]	54	4.5
Coil current [A]	20, 30, 40	
Tether current [A]	0, 10, 20, 30	

4. 推力検証実験

4.1 冷却面積の増大に依る影響

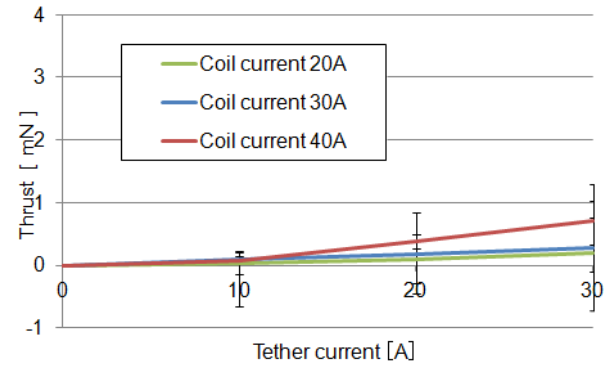
まず、DI-BSSCO を用いて新しく製作したボビンでの実験を行った。

4.1.1 1層12巻(円筒型)コイル

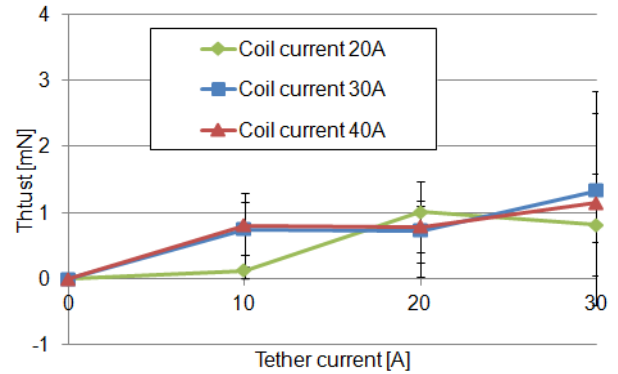
1層12巻の円筒型コイルにおいて、コイル及びテザーの電流を変化させ推力値を計測した。図8(a)に先行研究におけるコイルに流した電流を変化させたときの推力計測値、図8(b)に本研究における同じく推力計測値を示す。縦軸に計測した推力値、横軸にテザーに流した電流を示す。推力は正の向きを推進原理と同じ向きとする。各凡例はコイルに流した電流を20A,30A,40Aと変更したものである。ボビンの改良により先行研究の約2倍の推力値が得られた。

4.1.2 19層(円盤型)コイル

19層の円盤型コイルにおいて、コイル及びテザーの電流を変化させ推力値を計測した。図9(a)に先行研究におけるコイルに流した電流を変化させたときの推力計測値、図9(b)に本研究における推力計測値を示す。縦軸に計測した推力値、横軸にテザーに流した電流値を示す。推力は正の向きを推進原理と同じ向きとする。各凡例はコイルに流した電流を20A,30A,40Aと変更したものである。先行研究と比して、負方向推力が減少していることが分かる。

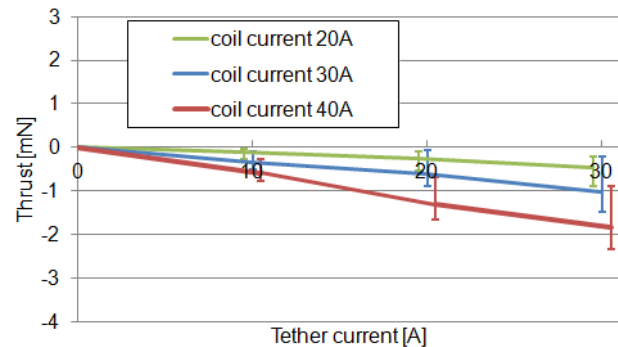


(a) In previous study. (using bobbin without slits.)

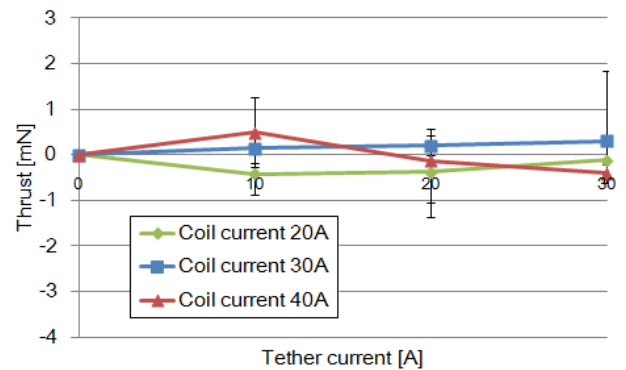


(b) In this study. (using new bobbin with slits.)

Fig. 8 Thrust values of cylindrical coil.



(a) In previous study. (using bobbin without slits.)



(b) In this study. (using new bobbin with slits.)

Fig. 9 Thrust values of discal coil.

4.2 超伝導線材の変更に依る影響

続いて、2G HTS WIRE を用いてコイルを製作し、実験結果を比較した。ポビンには新しく製作したスリット入りのポビンを用いている。

4.2.1 1層12巻(円筒型)コイル

1層12巻の円筒型コイルにおいて、図10(a)に本研究におけるコイルに流した電流を変化させたときの推力計測値を示す。縦軸に計測した推力値、横軸にテザーに流した電流を示す。推力は正の向きを推進原理と同じ向きとする。各凡例はコイルに流した電流を20A,30A,40Aと変更したものである。DI-BSCCOを用いた図9(a)と比較すると、推力についてはあまり変化が無いことが確認できる。

4.2.2 19層(円盤型)コイル

19層の円盤型コイルにおいて、図10(b)に本研究におけるコイルに流した電流を変化させたときの推力計測値を示す。縦軸に計測した推力値、横軸にテザーに流した電流を示す。推力は正の向きを推進原理と同じ向きとする。各凡例はコイルに流した電流を20A,30A,40Aと変更したものである。DI-BSCCOを用いた図10(a)と比較すると、推力についてはあまり変化が無いことが確認できる。

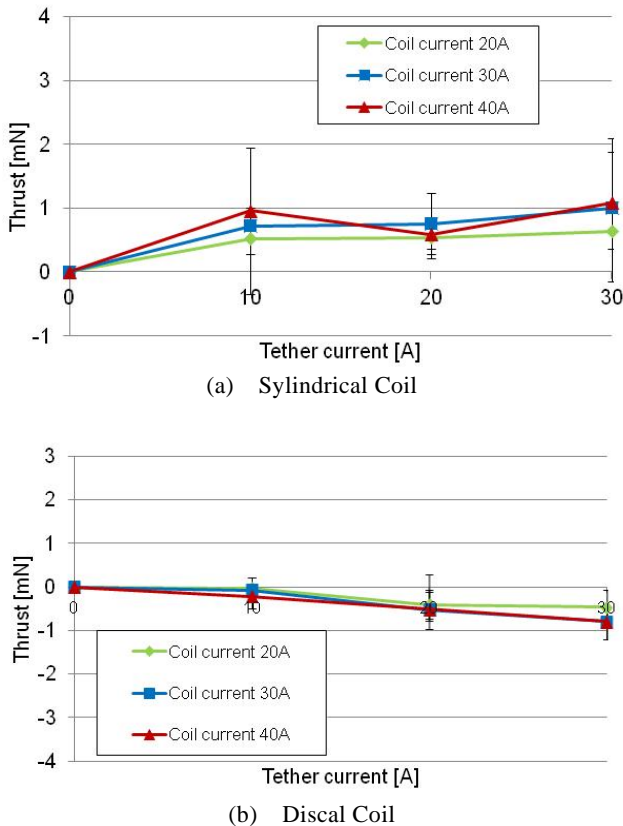


Fig. 10 Thrust values when 2G HTS WIRE apply for coils.

5. 考察

5.1 磁場測定と理論推力値

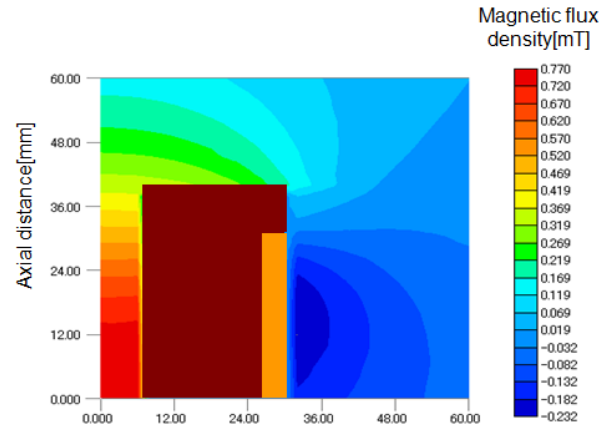
理論推力値を求める為、作製したコイルに1Aの電流を流し磁場測定を行った。磁場の大きさは温度には依存しない為、常温で測定した。1層12巻円筒型コイル磁場分布を図11に示す。19層円盤型コイルについても同様に計測を行った。式(1)のビオ・サバルの法則から磁場は電流に比例して大きくなる事が分かる。従って、20倍、30倍、40倍とすることで各電流値における磁場の大きさが求められる。

$$dB = \frac{\mu_0 I ds \times r}{4\pi |r|^3} \quad (1)$$

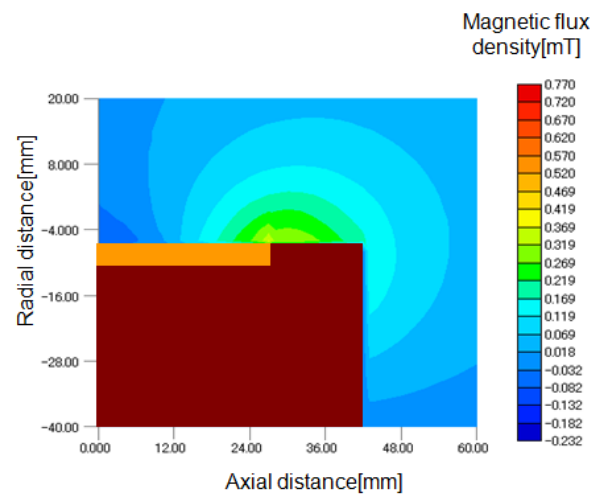
ここに、 \mathbf{B} は磁束密度[T]、 μ_0 は真空透磁率[N/A²]、 I は電流[A]、 s は電流路、 r は位置ベクトルを示す。求めた磁場の大きさとテザーに流れる電流値よりローレンツ力を算出し理論値とする。ローレンツ力は式(2)により求められる。

$$\mathbf{F} = \int dl \cdot (\mathbf{I}_T \times \mathbf{B}) \quad (2)$$

ここに、 \mathbf{F} はローレンツ力[N]、 l はテザーの長さ[m]、 \mathbf{I}_T はテザーに流れる電流[A]を示す。コイル電流30A、テザー電流30Aとした時の理論値と計測値の比較を表4に示す。



(a) Axial magnetic flux density.



(b) Radial magnetic field density.

Fig. 11 Magnetic field of cylindrical coil (1A).

Table 4 Comparison of theoretical thrust with experimental thrust.

		Cylindrical coil	Discal coil
HTS tape	Theoretical thrust [mN]	6.1	34.2
DI-BSCCO	Experimental thrust in previous study [mN]	0.3	-1.0
	Experimental thrust with new bobbin [mN]	1.3	-0.9
2G HTS WIRE	Experimental thrust with new bobbin [mN]	1.0	-0.8

5.2 冷却効率の評価と推力に与える影響

本稿において超伝導コイルの冷却効率の改善を行った。本節では、冷却効率を液体窒素と超伝導コイルの接触面積により評価する。表5に2種類のコイルの体積及び表面積、冷却面積を示す。スリットを入れたボビンを用いることで円筒型コイルにおいては約1.4倍の冷却面積の増大、円盤型コイルにおいては約1.7倍の冷却面積の増大を達成できた。冷却面積の増大量の違いから、円筒型コイルにおいては推力が増大し、円筒型コイルでは推力の増大が確認できないという、推力測定結果の違いに至ったのではないかと考える。

本研究で用いた高温超伝導体は第二種超伝導体に分類され、ある程度の磁場侵入を許すことで臨界電流値を向上させている⁸⁾。従って、冷却下で超伝導状態を示しても超伝導体内部には超伝導状態の領域と常伝導状態の領域とが混在している混合状態と呼ばれる状態にある。温度上昇に伴って常伝導状態の領域が大きくなっていき最終的には臨界温度においてクエンチ(常伝導転移)が発生し、超伝導状態が破れることが分かっている。本研究においては、冷却効率の向上により超伝導の領域を大きくする事ができた為、マイスナー効果の影響がより大きく表れ、推力が増加したのではないかと考える。

5.3 超伝導線材のピン止め効果と異方性

本研究で用いた第二種超伝導はピン止め効果と呼ばれる第二種超伝導に特有の現象を利用することで臨界温度が向上させている⁹⁾。超伝導体に外部磁場が印加された際、超伝導体内部に量子化された磁束(磁束量子, fluxoid)が侵入する。電流を流した時、理想的な超伝導体であれば磁束量子がローレンツ力を受け動いてしまう為、電界が発生し超伝導状態が崩壊する。しかし、第二種超伝導には超伝導体内の欠陥や不純物(ピンニングセンター)が存在し、そこに磁束量子がトラップされ動かなくなる為、抵抗は生じない。この現象をピン止め効果という。これにより外部磁場がある程度大きくなって超伝導内部に抵抗が発生せず、大きな電流を通電可能である。ピン止め効果の模式図を図12に示す。さらに大きな電流あるいは大きな外部磁場を印加するとローレンツ力がピン止め力を超え、磁束量子が動いてしまい(デピンニング)、抵抗が発生し次第に常伝導化してしまう。連続的にデピンニングが発生することをフラックスジャンプ、常伝導転移をクエンチと呼ぶ。また、超伝導線材の構造から超伝導線材においては印加される外部磁場の方向によってデピンニングの発生程度が変化することが分かっている¹⁰⁾。一般に、超伝導線材の広い面に垂直な方向の磁場に対しては臨界磁場が小さく、他の2軸に関しては臨界磁場が大きい。

本研究において超伝導コイルは平巻きコイルにしている為、コイルの上面及び下面にはコイルが生成した磁場が線材の広い面に対して垂直に作用している。従って、コイルの上面及び下面ではデピンニングがより発生しやすくなっており、この部分で常伝導化、発熱している可能性が高い。円盤型コイルにおいては円筒型コイルに比べ生成される磁場が大きくなること、生成された磁場が超伝導線材の広い面に作用することにより臨界電流が大きく低下し、常伝導化している可能性があるのではないかと考えられる。超伝導線材はコイルにすることで自己磁場の影響を強く受け、臨界電流が低下することが報告されている¹¹⁾。従って、40A以下の電流でクエンチもしくはフラックスジャンプを発生させてしまっている可能性も考えられる。

5.5 超伝導コイルの電圧測定

推力測定の結果の妥当性の評価を行う。本研究において用いた超伝導コイルが超伝導状態を示しているのか、また、冷却効率の改善によって超伝導領域の拡大が出来ているのかを明らかにする為、各電流値において電圧測定を行った。測定された電圧値より抵抗値を算出した。先行研究において100mmの超伝導線材(DI-BSCCO)と銅線において常温と液体窒素中での電圧値の比較が行われており、液体窒素中でDI-BSCCOが超伝導状態を示すことが確認されている。電圧測定より算出した抵抗値を図13に示す。未冷却時(常温)の抵抗値は円筒型コイルで64mΩ、円盤型コイルで93mΩとなった。冷却状態(液体窒素中)ではどちらのコイルにおいてもおよそ1mΩ以下の値となった。また、冷却効率の改善により抵抗値も減少していることが確認できた。しかし、円筒型コイルにおいては0.2mΩ程度であったのに対し、円盤型コイルでは1mΩから0.6mΩと比較的大きい値になっている。円盤型コイルにおいては超伝導領域が非常に小さくなっている、あるいはクエンチしてしまっているのではないかと考えられる。液体窒素中での銅線の抵抗は2mΩ程度であった。

5.5 DI-BSCCO と 2G HTS WIRE の差異

DI-BSCCO と 2G HTS WIRE の2種類の超伝導線材を用いて推力検証実験を行ったが、線材に依存する明らかな影響は認められなかった。3.1節にてBSCCOとReBCOについて簡単に述べたが大きくは磁場特性が異なっている^{12, 13)}。また、BSCCOは均一な長尺線材の量産化技術が確立されており、一方、ReBCOは量産化技術が未発達で長尺化する際に特性にばらつきが生じることが報告されている¹¹⁾。その為、ReBCOに関しては線材特性のばらつきに依り臨界電流値が低下しており、マイスナー効果を十分に得られなかったのではないかと考えられる。

Table 5 Cooling efficiency.

	Cylindrical coil	Discal coil
Coil volume [mm ³]	3686	6463
Coil surface [mm ²]	20616	4762
Cooling surface (with previous bobbin) [mm ²]	10301	2478
Cooling surface (with new bobbin) [mm ²]	14621	4274
Increasing rate of cooling surface	1.42	1.72

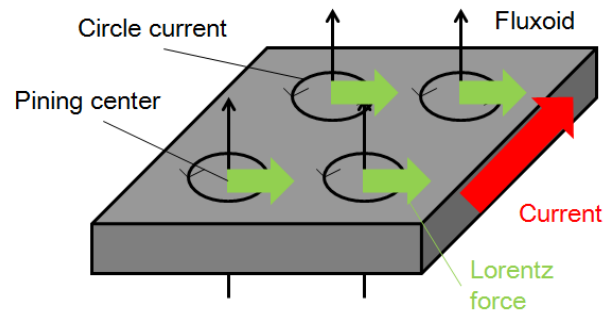


Fig. 12 Mechanism of flux pinning and depinning.

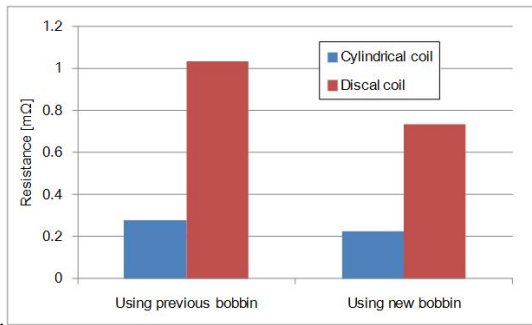


Fig. 14 Measurement of resistance.

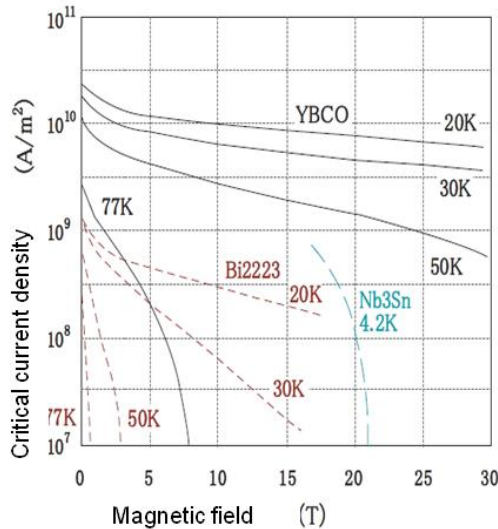


Fig. 15 Current properties under magnetic field.¹³⁾

6. 結言

先行研究における課題を解決する為、冷却面積が大きなボビンを用いて超伝導コイルを作成し、Mag-Tetherシステムを構築、推力測定を行った。円筒型コイルにおいて得られた推力値は先行研究の約2倍であり、冷却効率が推力値に影響を与えることが確認できた。従って、過去の研究においては冷却が不十分であり、冷却効率の改善によって更に推力を増加できる可能性があることが確認できた。一方で、円盤型コイルでは負方向推力の減少が確認できたものの、依然として推進原理と同方向の推力は得られていない。

また、Bi系に換えてRe系の超伝導線材を用いてコイルシステムを製作し、推力検証実験を行った。磁場特性の向上を図ったが線材特性のばらつきに依る性能劣化の影響の方が大きく、推力の増大には至らなかった。従って、現在ではより安価なBi系線材をMag-Tetherシステムのコイルシステムに利用することが望ましい。

7. 今後の課題

本研究を通して、今後の課題を見出した。

1 つは実験装置の改良である。液体窒素の沸騰により計測推力の誤差が大きい為、冷凍機を用いることが望ましいと考えられる。温度をより下げるという面でも冷凍機が望ましい。

また、ReBCO線材の長手方向の線材特性のばらつきについて定量的な評価を行う必要がある。それにより、Mag-Tetherシステムのコイルシステムに用いる高温超伝導線材としてBSCCOとReBCOのどちらが望ましいのか

明らかにする事が出来る。

さらに、第二種超伝導体では混合状態という複雑な状態にある為、マイスナー効果及びピン止め効果や磁束量子のようなミクロな現象による超伝導、あるいは推力発生機構への影響を考察することも必要であると考えられる。

また、Magnetic Sailシステムの研究において行われているような超伝導コイルの磁場を考慮した電流電圧特性や、デピンングによる発熱等に関する解析¹⁴⁾も行うことでより推力発生機構が解明されると考えられる。

8. 参考文献

- 1) Y. Yamagiwa, S. Watanabe, K. Kotanagi, "Innovative Interplanetary Transportation System Using Electrodynamic Tether and Magnetic Coil (Mag-Tether)," ISTS2006, b-46, 2006.
- 2) 柴田大輔, 「高温超伝導線材を用いた Mag-tether システムの推力検証実験」, 平成 24 年度修士論文, 2013
- 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, 第 52 巻, 第 603 号, pp. 101-108, 2004.
- 4) I. Kiyomoto, et al., "Cosmological Magnetic Field: A Fossil of Density Perturbations in the Early Universe," Science vol. 311, pp.827- 829, 2006.
- 5) 大沼俊朗, 「超伝導電磁気学」, コロナ社, 1995.
- 6) 山香英三 他, 「高温超伝導入門」, オーム社, 1989
- 7) S. Takayoshi, W. Kokuyama, H. Fukuyama, "The boiling suppression of liquid nitrogen," Cryogenics 49 pp.221-223, 2009.
- 8) 山香英三, 太刀川恭治, 一ノ瀬昇, 「高温超伝導入門」, オーム社, 1989.
- 9) 仁田且三, 「超電導エネルギー工学」, オーム社, 2006
- 10) T. Nakamura, S. Tsuchiya, A. Hoshino, I. Muta and M. Yamaguchi, "Angular dependence of E-J characteristics dissipative properties in Bi-2223/Ag tape," Superconductor science and technology 15, pp.230-235, 2002.
- 11) 長崎陽, 中村武恒, 小山友一, 船木一幸, 小嶋浩嗣, 山川宏, 「磁気セイル搭載に向けた高温超伝導コイルの熱・通電モデルの構築」, 第 55 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2011-4219, 2011.
- 12) 加藤武志, 藤上純, 小林慎一, 山崎浩平, 綾井直樹, 藤野剛三, 上野栄作, 菊地昌志, 山出哲, 林和彦, 佐藤謙一, 「革新的ビスマス系高温超伝導線 (DI-BSCCO) の開発」, SEI テクニカルレビュー 第 168 号, pp.19-22, 2006.
- 13) 小方正文, 水野克俊, 「世界の高温超伝導線材の現状」, 鉄道総研報告書, Vol. 25, No. 3, pp. 53-56, 2011.
- 14) Y. Nagasaki, T. Nakamura, I. Funaki, Y. Ashida, and H. Yamakawa, "Conceptual Design of YBCO Coil With Large Magnetic Moment for Magnetic Sail Spacecraft," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 23, no. 3, 4603405, 2013.