

航空機搭載用超電導ケーブルの小型電極の開発

Development of Small Superconductivity Cable Terminal for Airplane

金山 諄志
Atsushi KANAYAMA

塩原 敬
Kei SHIOHARA

佐藤 迪夫
Michio SATO

中西 達尚
Tatsuhisa NAKANISHI

高橋 保夫
Yasuo TAKAHASHI

青木 裕治
Yuji AOKI

三堂 信博
Nobuhiro MIDO

足立 和久
Kazuhisa ADACHI

和泉 輝郎*
Teruo Izumi

岩熊 成卓**
Masataka IWAKUMA

航空機業界においても二酸化炭素排出削減が強く求められている。これまで我々は航空機向け超電導推進システム向けとして、大容量で軽量の線材積層型超電導ケーブルを開発してきた。この論文では開発の課題の一つである線材積層型超電導ケーブルの端子構造を検討した。積層線材を1箇所接続する構造では線材と端子の接続面積が少ないため、積層ケーブルの臨界電流の実測値が構成線材の臨界電流値の総和に対して40~60%しか流れないことが確認された。我々が開発したスリット型電極により、超電導線材と電極の接続面積が増え通電特性が向上した。

There is also a strong need to reduce carbon dioxide emissions in the aircraft industry. To date, we have developed large-capacity, lightweight wire-stacked superconducting cables for use in superconducting propulsion systems for aircraft. In this paper, we investigated the terminal structure of a wire-stacked superconducting cable. In a structure in which the wire-stacked superconducting cable is connected in one place, the connection area between the wire and the terminal is small, so the actual measured critical current of the laminated cable is only 40 to 60% of the total critical current value of the constituent wires. By developing new terminals with some slits, we have increased the connection area between the wire and the terminal to improve the current-carrying properties.

1. はじめに

近年、世界的に地球温暖化が進み、温室効果ガスである二酸化炭素(CO₂)などの排出削減が強く求められている。航空機業界においては、国際航空運送協会(International Air Transportation Association : IATA)や国際民間航空機関(International Civil Aviation Organization : ICAO)が、CO₂排出量を2050年までに実質ゼロとする目標を掲げている^{1), 2)}。

航空機の需要は年々増加する傾向であり、2021年に比べて2041年には旅客機は倍増することが予想される³⁾。この需要の増加に対するCO₂排出量削減の方法として既存技術、運航方法やインフラの改善がある。また、次世代技術としてSAF(Sustainable Aviation Fuel)などのバイオ燃

料が注目されている。しかしながら、CO₂排出量を実質ゼロとするためには新たな技術革新が必要であり、その一つとして超電導技術を用いた航空機システムの電動化がある^{4), 5)}。

我々は図1に示すように発電機、モーター、ケーブルのすべてに超電導技術を用いた航空機推進システムを提案している。航空機の電動化で求められていることは、大容量かつ軽量である出力密度(kW/kg)の向上が必要である。これまで我々は、超電導推進システムのケーブル開発を行い、積層型超電導ケーブルの開発を行ってきた。積層型超電導ケーブルは図2に示すように超電導線材を複数積層したケーブルで、当社がこれまで開発してきた三相同軸型超電導ケーブルに比べて、コンパクトかつ大容量、軽量である⁶⁾。ケーブルシステムとしてのもう一つの開発要素として端末がある。航空機応用に向けて安定して電流を流すために積層型超電導ケーブルに適した小型端末構造(電極)

* 国立研開発法人 産業技術総合研究所

** 九州大学

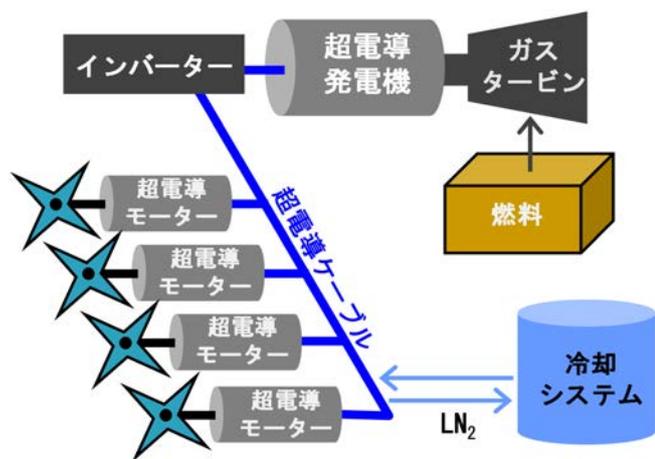


図1 次世代超電導推進システムの概略図

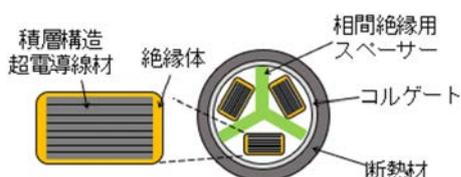


図2 積層型超電導ケーブルの概略図

を開発する必要がある。積層型超電導ケーブルの末端構造として積層した線材を扇状に広げて電流の流し込む面積を確保する方法が報告されている⁷⁾。しかし、この方法では末端部分が大きくなり航空機に応用するにはより小型の末端が求められることから、積層型超電導ケーブルに適した小型末端構造に適する電極構造について検討、開発を行ったので報告する。

2. 電極作製と評価方法

2.1 積層型超電導ケーブルと電極の取り付け

積層型超電導ケーブルの構造は、図2に示すように超電導線材を複数積層した構造となっている。使用した線材は、図3に示すように安定化層としてAg層とCu層を形成した線材である。超電導層は、人工ピンとしてBaZrO₃(BZO)を選択し、BZOナノ粒子導入Y_{0.77}Gd_{0.23}Ba₂Cu₃O_y((Y,Gd)BCO+BZO)である^{5), 8)}。使用した(Y,Gd)BCO+BZO線材の諸元を表1に示す。

図4に積層させた線材を電極にはんだにて接続した場合の概略図を示す。ここで、はんだは超電導線材の特性劣化を防ぐために低融点のはんだを選択した。電極に挿入した長さを接続長(L)とした。

表1 (Y,Gd)BCO+BZO線材の諸元

臨界電流 (I_c) @ 77 K, self-field	100 ~ 150 A
線材幅	4.2 mm
安定化層 (Cu, Ag)	50 μ m
線材厚さ	0.25 mm

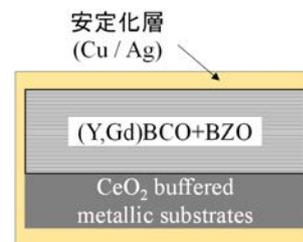


図3 (Y,Gd)BCO+BZO線材の断面概略図

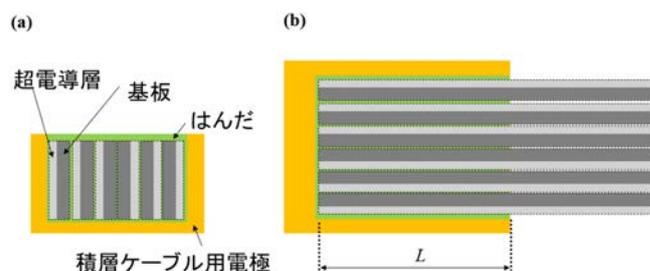


図4 積層型超電導ケーブルと電極との接続概略図

2.2 超電導ケーブル直流通電試験

積層超電導ケーブルの直流通電試験回路図を図5に示す。電圧端子は接続部を含む超電導線ケーブルすべての電圧を確認するために積層ケーブル端部に取り付けた。積層超電導ケーブルの線材本数(n)は、 $n = 2 \sim 30$ 本、接続長 $L = 30$ mm, 150 mmの条件で作製した。作製した試料は液体窒素(77 K)が充填されたオープンバス中に浸漬し、直流四端子法にて評価した。電流-電圧特性を計測し、発生電圧が電界基準(1 μ V/cm)に達したところを臨界電流(critical current: I_c)と定義した。



図5 電極を付けた積層型超電導ケーブル通電試験の概要

3. 積層型超電導ケーブル対応した電極構造

3.1 積層一体型電極

超電導線材の積層枚数を増加させた場合の線材枚数nと積層型超電導ケーブルの I_c (I_c^{stack})値との関係を確認した。図6(a)に77 Kにおける $L = 30$ mmと150mmでのnに対する I_c^{stack} の関係を示す。図に示すようにnを増加させると I_c^{stack} 値も増加することがわかる。しかしながら、 $L =$

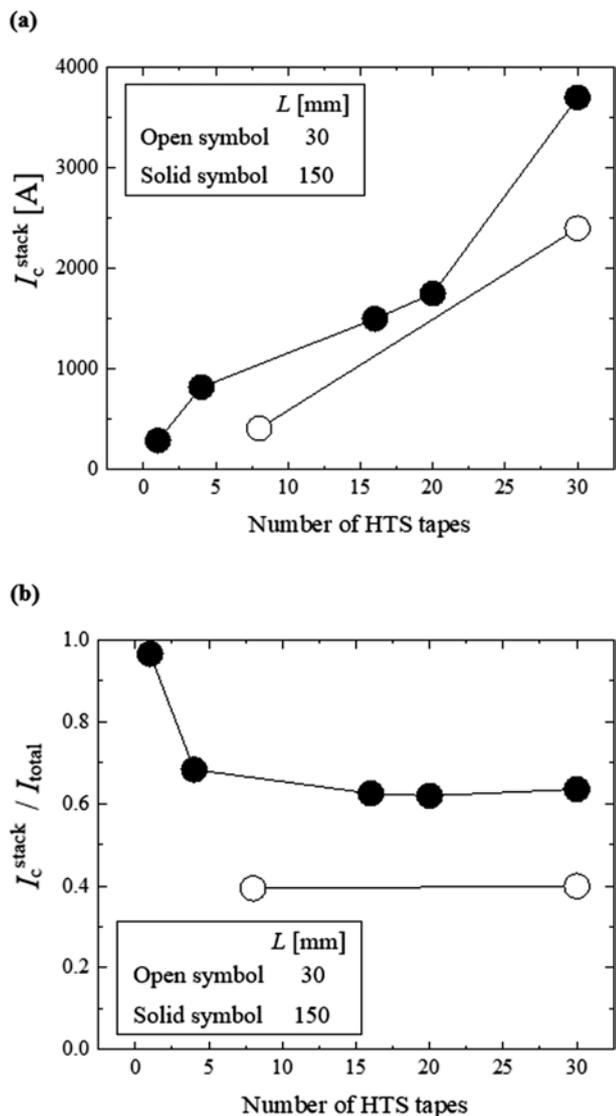


図6 線材枚数 n に対する (a) I_c^{stack} , (b) $I_c^{\text{stack}} / I_{\text{total}}$

30 mm は 150 mm に比べていずれの n に対して I_c^{stack} 値が低いことが分かる。

次に、線材の I_c 値から算出した積層超電導ケーブルの合計電流値 ($I_{\text{total}} = I_c \times n$) で I_c^{stack} 値を規格化した値を図6 (b) に示す。図より、 $n = 8$ 以上では、 $L = 150$ mm で $I_c^{\text{stack}} / I_{\text{total}}$ は約 0.6、 $L = 30$ mm で $I_c^{\text{stack}} / I_{\text{total}}$ は約 0.4 である。いずれも I_{total} 値に対して 40 ~ 60% 減少していることが分かる。

以上のことより、積層一体型電極では接続長を確保することが必要であることが分かる。しかしながら、 $L = 150$ mm においても I_{total} 値に対して約 40% 減少と大きく乖離している。この原因の一つとして自己磁場による影響を考えた。次項にて自己磁場の影響について考察した。

3.2 自己磁場による影響

一般的に、磁場の増加に伴い超電導線材は I_c 値が低下する。積層型超電導ケーブルの場合には I_c^{stack} 値が増加する

につれて自己磁場が増加し、この時発生した磁場によって超電導線材の I_c 値が低下する。そこで、自己磁場による積層型超電導ケーブルの通電特性への影響について考えた。積層超電導ケーブルでの発生磁場を下記の式より計算した^{9), 10)}。

$$H_x = -\frac{I}{8\pi ab} \left\{ \begin{aligned} & \frac{x+a}{2} \ln \frac{(x+a)^2 + (y+b)^2}{(x+a)^2 + (y-b)^2} - \frac{x-a}{2} \ln \frac{(x-a)^2 + (y+b)^2}{(x-a)^2 + (y-b)^2} \\ & + (y+b) \left(\arctan \frac{(x+a)}{(y+b)} - \arctan \frac{(x-a)}{(y+b)} \right) \\ & - (y-b) \left(\arctan \frac{(x+a)}{(y-b)} - \arctan \frac{(x-a)}{(y-b)} \right) \end{aligned} \right\}$$

$$H_y = \frac{I}{8\pi ab} \left\{ \begin{aligned} & \frac{y+b}{2} \ln \frac{(x+a)^2 + (y+b)^2}{(x-a)^2 + (y+b)^2} - \frac{y-b}{2} \ln \frac{(y-b)^2 + (x+a)^2}{(y-b)^2 + (x-a)^2} \\ & + (x+a) \left(\arctan \frac{(y+b)}{(x+a)} - \arctan \frac{(y-b)}{(x+a)} \right) \\ & - (x-a) \left(\arctan \frac{(y+b)}{(x-a)} - \arctan \frac{(y-b)}{(x-a)} \right) \end{aligned} \right\}$$

また、図7に積層型超電導ケーブルにおける磁場計算モデルを示す。ここで、 H_x と H_y はそれぞれ超電導線材表面に対して平行成分と垂直成分の磁場強度、 $2a$ は超電導線材の幅方向、 $2b$ は n 枚線材を積層した時の膜厚方向、 x と y は点 P における座標、 I は積層型超電導ケーブルの断面全体に様な電流が流れると仮定した値である。図のモデルの対称性より、 $0 \leq x \leq 2a$, $0 \leq y \leq 2b$ の範囲で計算する。 $n = 16$ 枚、 $a = 2.1$ mm、 $b = 2$ mm の条件で計算した結果、 H_x 及び H_y の最大値は $H_x = 0.124$ T、 $H_y = 0.167$ T であった。超電導線材は、磁場中 I_c 値において磁場印加角度依存性を有しており、線材表面に対して垂直磁場で磁場中 I_c 値が最小になる。そこで、垂直成分における今回使用する超電導線材の I_c 値の磁場依存性を確認した。図8に YGdBCO+BZO 線材の垂直磁場 ($B \parallel c$) における I_c 値の依存性を示す。0.167 T の時、磁場印加のない場合に比べて約 18% 減少していることが確認できる。この結果より、積層一体型電極を用いた積層型超電導ケーブルの I_{total} 値に対する乖離は、自己磁場の影響だけではないと考えられる。

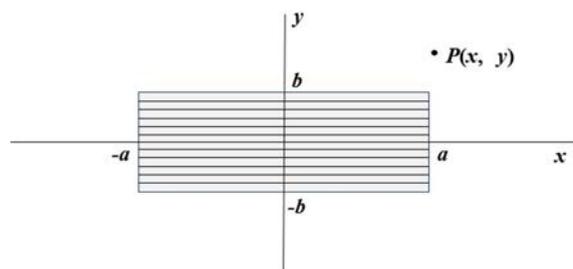


図7 積層型超電導ケーブルの磁場計算モデル

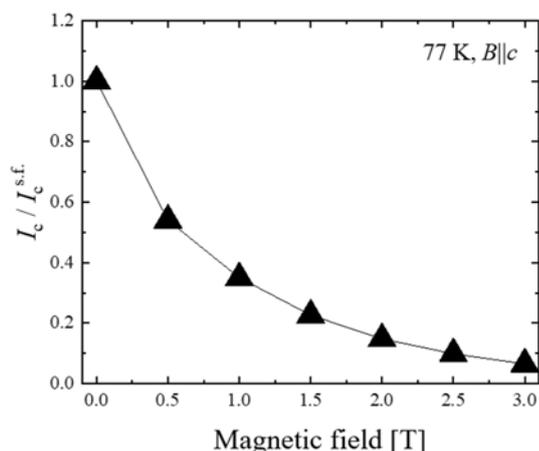


図8 (Y,Gd) BCO+BZO 線材の磁場に対する規格化 I_c

3.3 スリット型電極構造

積層型超電導ケーブルの場合、最外層の線材は超電導層が電極に面しており十分な接続面積が確保できていると考えられる。一方、それ以外の線材は線材の側面から超電導層に電流が流れるため接続面積が不十分だと考えられる。これより接続面積が不十分であることが積層型超電導ケーブルの I_{total} との乖離の要因と考えた。

そこで接続面積を確保するためにスリット型電極構造を検討した。図9にスリット構造を採用した電極構造を示す。図に示すように、積層一体型電極と比較してスリット構造を採用することですべての線材表面が電極に面する構造となる。今回は、接続長 $L = 30$ mm にて $n = 15$ 枚の線材をスリットに挿入、はんだにて接続し、従来の電極構造を有する積層型超電導ケーブルと同様の評価を行った。測定結果より、積層型超電導ケーブルの I_c^{stack} 値は 1650 A であった。この時の I_{total} 値は、1800 A ($n = 15$, $I_c = 120$ A @ 77 K, self-field) であり、 I_c^{stack} 値は I_{total} 値に比べて約 9% 低下であることが確認できた。この値に対して 3.2 項での自己磁場による影響を考慮すると H_y の最大の値は約 0.125 T となり、線材の磁場依存より約 15% 減少低下することが分かる。最大の自己磁場が積層導体に一様に印加される訳ではないので、スリット型電極を用いた超電導ケーブルの I_c 値において I_{total} 値からの低下は自己磁場による影響と説明することが可能である。スリット型電極を採用することで、線材と電極間の接続面積が確保され、通電特性が改善されたと考えられる。

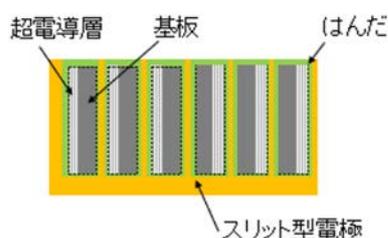


図9 スリット型電極の概略図

4. まとめ

本稿では、積層型超電導ケーブルに適した小型端末構造に適する電極構造について検討・開発について報告した。積層導体を電極の1か所に接続すると、超電導ケーブルの I_c^{stack} 値が I_{total} 値に対して 40~60% 低下することが確認された。この現象は線材の自己磁場による I_c 値の低下だけでは説明をすることができず、線材と電極の接続面積の不十分さからなる線材への電流の流し込みに原因があると考えた。

一方、スリットを設けた電極を用いた15枚積層の超電導ケーブルでは I_c^{stack} 値の I_{total} 値に対する低下が約 9% であった。線材の自己磁場の影響は最大約 15% の低下と計算されるので、この低下は線材の自己磁場による影響と考えられる。

スリット型電極を採用することで線材と電極間の接続面積が確保され、通電特性は改善されたと考える。航空機搭載に向けたスリット型電極を用いた超電導ケーブルの開発が期待される。

謝 辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP15005) の結果得られたものです。

参考文献

- 1) International Air Transport Association, 2021, "Net-Zero Carbon Emission by 2050," [Online]. Available: <https://www.iata.org/en/pressroom/pressroom-archive/2021-releases/2021-10-04-03/>.
- 2) International Civil Aviation Organization, 2022, "States adopt net-zero 2050 global aspirational goal for international flight operations," [Online]. Available: <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/States-adopts-netzero-2050-aspirational-goal-for-international-flight-operations.aspx>.
- 3) 一般財団法人 日本航空機開発協会, 2022, "民間航空機に関する市場予測 2022-2041."
- 4) H. Sasa et al., "Experimental Evaluation of 1 kW-class Prototype REBCO Fully Superconducting Synchronous Motor Cooled by Subcooled Liquid Nitrogen for E-Aircraft" IEEE Trans. Appl. Supercond. 31 (2021) 5.
- 5) T. Izumi, et al.: "Development of Superconducting Cable and Coated Conductors for Airplane Electric Propulsion System," IEEE Trans. Appl. Supercond. 31 (2023) 5.
- 6) 塩原敬他, 「超電導を用いた航空機用高効率・高出力電気推進システム - 超電導ケーブルの開発 -」, 昭和電線レビュー Vol. 68 P5-9
- 7) M. Takayasu et al., "Present Status and Recent Developments of the Twisted Stacked-Tape Cable Conductor," IEEE Trans. Appl. Supercond. 26 (2016) 2.
- 8) M. Sato, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 104 (2022) p. 20.

- 9) M. Takayasu et al., "Cabling Method for High Current Conductors Made of HTS Tape," IEEE Trans. Appl. Supercond. 21 (2010) 3.
- 10) S. Chikazumi, Physics of Magnetism, New York: John Wiley and Sons, Inc., 1964

SWCC (株)
金山 諄志 (かなやま あつし)
新領域開発センター 超電導システム課
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)
塩原 敬 (しおはら けい)
新領域開発センター 超電導システム課
博士 (工学)
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)
佐藤 迪夫 (さとう みちお)
新領域開発センター 超電導システム課
博士 (工学)
超電導線材の研究・開発に従事

SWCC (株)
中西 達尚 (なかにし たつひさ)
新領域開発センター 超電導システム課
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)
高橋 保夫 (たかはし やすお)
新領域開発センター 超電導システム課
超電導線材の研究・開発に従事

SWCC (株)
青木 裕治 (あおき ゆうじ)
新領域開発センター 超電導システム課
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)
三堂 信博 (みどう のぶひろ)
新領域開発センター 超電導システム課
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)
足立 和久 (あだち かずひさ)
新領域開発センター 超電導システム課
課長
博士 (工学)
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

産業技術総合研究所
和泉 輝郎 (いずみ てるお)
省エネルギー研究部門
主任研究員
工学博士
超電導線材の研究・開発に従事

九州大学
岩熊 成卓 (いわくま まさたか)
先進電気推進飛行体研究センター
センター長
工学博士
超電導電力機器の研究・開発に従事