

形状記憶合金アクチュエータを使用した磁気力計測器の開発

Development of magnetic force measuring instrument with a shape memory alloy actuator

佐保 典英, 小野 瑞絵 (クライオイン)
 SAHO Norihide, ONO Mizue (LLC CRYOIGN)
 E-mail : norihide_saho@ybb.ne.jp

1. はじめに

近年、急速な進展を示す再生医療分野において、軟骨や骨の再生医療の研究が進められている[1]。膝関節の軟骨の治療では、MRI 等で使用される造影剤の鉄の微粒子を培養された患者自身の幹細胞内に導入し、強磁場を発生する磁石を使ってこの磁性幹細胞を患部に導き、再生治療する臨床研究が治療試験で進められている。現状では、磁石の磁界内で磁性幹細胞の注入部位から誘導先への細胞の軌跡を、内視鏡等で確認して試験が行なわれている。しかし、多数のデータを整理する場合、磁気力の重要なファクターである磁気力係数を定量的に把握し、治療効果を比較検討することが重要になる。

本報告では、磁場中に配置した磁気センサーを、安価な形状記憶合金の線材を使用して移動位置制御するアクチュエータ構造[2]を提案し、2点間の磁束密度を短時間に計測して磁気力を数値化する基礎的計測方法を検討する。

2. 磁気力係数計測方法

磁気力 F_m [N] の計算式を(1)式に示す。体積が V [m³] の磁性粒子が置かれた磁場空間の磁束密度を B とすると、磁気力 F_m は、磁束密度 B [T] と磁気勾配 ΔB [T/m] の積値(以下、磁気力係数 f_m [T²/m] と記す)に比例する。ここで、 χ は磁化率[-]、 μ_0 は真空透磁率[N/A²]である。

$$F_m = V \cdot \chi \cdot B \cdot \Delta B / \mu_0$$

$$= V \cdot \chi \cdot f_m / \mu_0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

磁気力係数 f_m の計測は、磁石から距離 L_a 離れた磁場空間内の距離 δL 間の2点 a、b の磁束密度 B_a 、 B_b を磁気センサーで計測し、その差分を δL で除して磁気勾配 ΔB_{ab} を算出し、前記 B_a 、 B_b の平均値 B_{ab} との積値で算出する。

本研究では、図1の構成図に示すように、伸縮機能を有する形状記憶合金線材を用いたアクチュエータの先端に1個の磁気センサーを固定し、乾電池による数Vの直流電源のON/OFFで形状記憶合金線材を伸縮変形させ、この伸縮力で磁気センサーを一軸方向に往復移動させる。この伸縮機能と所定の δL を構造的に確保したアクチュエータで磁気センサーを短時間で移動させ、移動前後の B_a 、 B_b を計測し f_m を算出した。

3. 計測結果

表面最高磁束密度約 0.5 T のネオジウム磁石 (サイズ 10 mm 立方) の磁場中に配置された、アクチュエータと磁気センサーの仕様を表1に示し、図1に試作形状記憶合金アクチュエータの構造図を示す。磁気センサーを固定したセンサー支持台と形状記憶合金線材は、ナイロン繊維およびシリコンゴム製の緩衝リングを介して連結されている。ここで、Ti-Ni 系の繊維状の形状記憶合金線材(トキ・コーポレーション(株)製の直径は 50 μ m で、通電によるジュール熱で温度が 70~80°C を超えると全長の約 4% 縮み、支持台を図中 z 軸方向に移動させ、上下の拘束板の間隙で実移動距離 δL を担保する。その後、電源オフによる放熱で温度が低下し、形状記憶合金線材は加熱前の長さに伸び、弾性体の復元力で支持台は元の位置に戻る。

形状記憶合金線材への通電 (2.4 VDC) によるセンサー支持台の実移動距離 δL を、最小目盛 1 μ m のダイヤルゲージで計測した結果、平均 280 μ m であった。

磁石表面から垂直 z 方向距離 L_a における、測定結果を表2に示す。 $L_a=2.7$ mm での B_{ab} は 253.2 mT で、 f_m は 22.61 T²/m であった。また、 $L_a=42.7$ mm では $B_{ab}=1.637$ mT、 $f_m=7.78 \times 10^{-4}$ T²/m で、 B_a 、 B_b の差分は 0.13 mT で磁気センサーの分解能に比べ十分大きくとれ、 ΔB_{ab} の精度は十分高い。この f_m は、水平なアルミニウム板上に静置させた直径 3 mm の鉄球が、磁気力で転がり始める f_m 値 5.8×10^{-3} T²/m[3] よりも小さい磁気力域であり、磁性物の磁気吸引限界を十分計測可能である。本構造によれば ΔB_{ab} が磁気センサーの 0 点シフトの影響を受けないので、精度良く f_m を算出できる。本計測技術により、磁気力によるスパナ等の磁気吸引事故の危険度を定量的に検知し、警報を発する携帯型の保安安全機器を提供できる。

4. まとめ

本研究によれば、低電圧で駆動する形状記憶合金線材を用いたアクチュエータで1個の磁気センサーを移動させ、磁場中の2点間の磁束密度を計測して磁気力係数を算出できるので、安価で、小型軽量で、駆動振動が無い高精度の携帯型磁気力計測器を提供できる。

Table 1 Specifications of the shape memory alloy actuator and a magnetic sensor.

Actuator	Amount of displacement (μ m)	Power source (VDC)	Diameter of S.M.A fiber (μ m)	Fiber tensile strength (N)
	280	2.4	50	1.96
Sensor	Type of sensor	Size of sensor (mm)	Analytical Ability (Measuring Range) (mT)	
	Hall element	4(W)×1.2(t)	0.01(0~300), 0.1(1~999)	

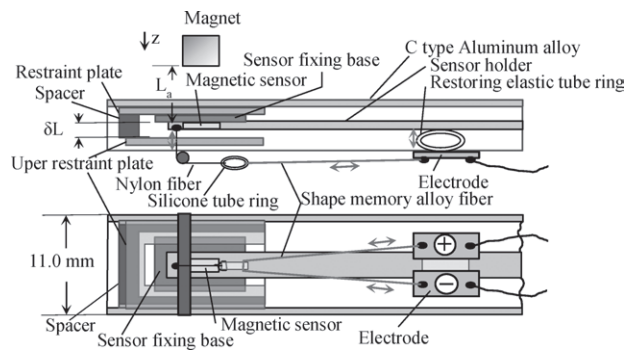


Fig. 1 Illustration of the shape memory alloy actuator.

Table 2 Experimental results.

L_a (mm)	B_{ab} (mT)	ΔB_{ab} (T/m)	f_m (T ² /m)
2.7	253.2	89.30	22.61
12.7	11.90	42.50	5.06
42.7	1.637	0.475	7.78×10^{-4}

参考文献

1. Y. Ikuta, et al. : The Journal of Japanese Orthopaedic Surgical Society, Vol.91, No.1 (2017) pp.9-13
2. M. Ono : Japanese Patent Application No. 2016-238042 (2016)
3. N. Saho, M. Ono : Abstracts of CSJ Conference, Vol. 93 (2016) p. 64

HTS-SQUID のラット心磁図への適用と 逆問題解析を用いた高血圧性左心室肥大の検出 Detection of high blood pressure left ventricular hypertrophy using inverse problem analysis to rat's magnetocardiogram by HTS-SQUID system

石山 敦土, 塚本 裕斗(早大); 小野 弓絵(明大); 廿日出 好(近大); 南沢 享(東京慈恵医大)
 ISHIYAMA Atsushi, TSUKAMOTO Yuto (Waseda Univ.); ONO Yumie (Meiji Univ.);
 HATUKADE Yoshimi (Kinki Univ.); MINAMISAWA Susumu (The Jikei Univ. School of Medicine)
 E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

我々は小動物の心磁図計測に適した HTS-SQUID 生体磁気計測システムを開発した[1]。そしてラットの胸部周辺 16 点の心磁図(MCG)計測を行い、MCG の変化と心疾患との関連性を明らかにするための検討を行っている。本研究では、まず高血圧性の左心室肥大を引き起こすモデルラットを作製し、MCG を継続的に計測した。そしてその計測結果から心筋興奮波面を求め（電流ダイポール推定）、病態の進行との関係性を評価したので報告する。

2. 左心室肥大モデルラット心磁図計測

8%食塩添加飼料を与えることで高血圧、左心室肥大、心不全を引き起こす食塩感受性高血圧モデルラット (DAHLラット) と食塩抵抗性ラット (CTRLラット) 各3匹を対象として、週に1回ずつ6週間にわたって胸部16点 (6mm間隔) のMCG計測を行った。得られたMCGデータに対し約1000回の加算平均を行い、その後、独立成分分析 (JADEおよびSOBI) を適用することでノイズ除去を行った。さらに、逆問題解析に基づく電流ダイポール推定を行い (Fig.1)、S波における電流ダイポールの角度 (Fig.2) の変化に着目して評価を行った (Fig.3)。

Fig.3から、CTRLラットでは電流ダイポールの角度の変化が小さいのに対して、DAHLラットでは角度が時間の変化と共に正の方向へと推移する傾向が見られる (図中太矢印)。これは左室肥大によって線維化が生じ、それにより興奮伝導異常が引き起こされているためと考えられる。線維化により心筋と心筋の間の繊維が増加し、心筋同士の結合を分離させてしまう[2]。その結果興奮伝導経路を遮断するような異常をきたす。ここでは、Image Processing and Analysis in JAVA (ImageJ)を用いた画像解析を行い、DAHLラットにてコラーゲン線維の増加、つまり線維化が進んでいることを定量的に確認した。この時のMasson染色画像 (Fig.4) における心筋細胞面積に対するコラーゲン線維面積の割合を求めた結果、DAHLラットの心臓の重量がCTRLラットに対して有意に増加していることがわかった。

3. まとめ

HTS-SQUIDは、LTS-SQUIDと比較すると感度が劣るが、ラットMCGの測定データに独立成分分析を適用することによりノイズを除去することで高いS/Nを得ることができた。S波区間の電流ダイポールの角度の変化を観測することで左心室肥大によって生じる心機能の変化を捉えることができた。また、MCG計測と並行して行った心エコー検査より早期に異常を検出できた個体もあった。

参考文献

[1] 日向野、石山他「小動物用心磁図計測への HTS-SQUID の適用」第 90 回秋季低温工学・超電導学会講演概要集 p.78(2014)
 [2] H. Honjo, et al“Gap junction remodeling in hypertrophied left ventricles of aortic-banded rats: prevention by angiotensin II type 1 receptor blockade,” J. Moll. Cell. Cardiol, vol. 33, no. 2, pp. 219-231, 2001.

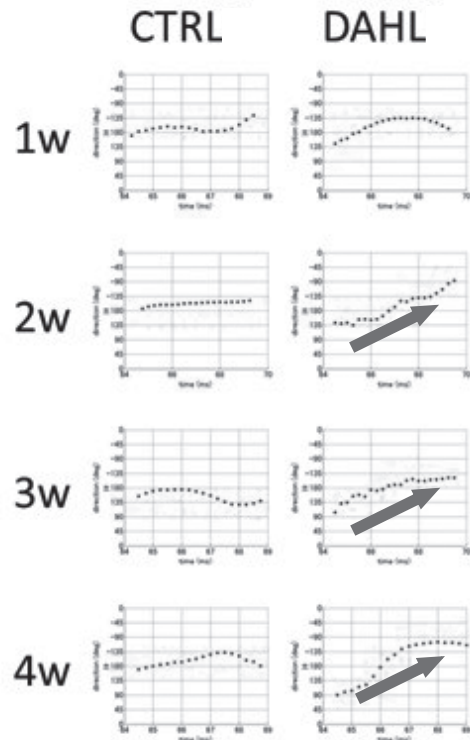
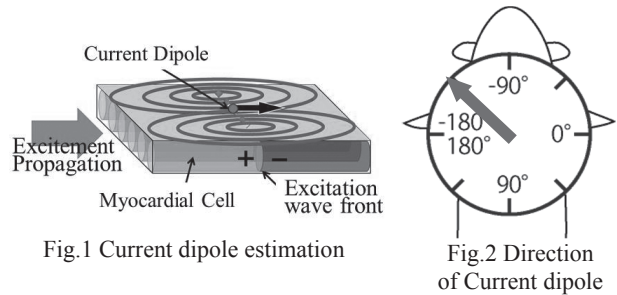


Fig.3 Direction of analyzed current dipoles in during S periods

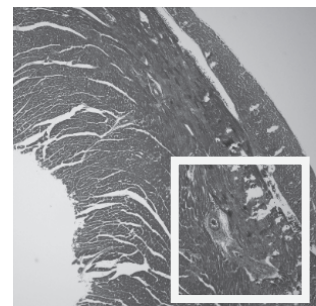


Fig.4 Image of Masson dyeing cell

$\text{Fe}_{1-x}\text{M}_x\text{Te}_{0.8}\text{S}_{0.2}$ (M=Mn, Co, Ni) の Fe サイト置換効果

Effects of Mn, Co and Ni doping in $\text{FeTe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$ superconductor

阿部 峰也, 亀卦川 尚子, 菊地 あかり(一関高専)

ABE Takaya, KIKEGAWA Takako, KIKUTI Akari (National Institute of Technology, Ichinoseki College)
dahlia129.ta@gmail.com

1. はじめに

多くの鉄系超伝導体の母物質は反強磁性金属であり、母物質に対して不純物置換を行うことで反強磁性長距離秩序が抑制され超伝導が発現する。不純物置換によってどのように超伝導状態に至るのか調べることは、鉄系超伝導体の発現メカニズムを理解するうえで非常に重要である。

また、鉄系超伝導体は多彩な結晶構造を持っている。 $\text{FeTe}_{1-y}\text{S}_y$ は 11 系と称され、Fe-(Te,S) から成る伝導層のみで構成される単純な構造をとるが、層間または層内に過剰鉄を含む傾向がある。このような特徴を持つ 11 系における Fe サイト置換効果についての研究はあまりなされていない。

2. 研究目的

本研究では、鉄系超伝導体 $\text{FeTe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$ の Fe サイトに対して 3d 遷移金属である Mn, Co, Ni を置換することで、超伝導特性がどのように影響を受けるか明らかにする。また、XRD を用いて結晶格子長の置換による変化を調べる。

3. 実験方法

TeS を出発原料とし、Fe, Te に Mn, Co または Ni を加えて、固相反応法により多結晶試料を作製する。

Mn の添加量は $x = 0.02, 0.08$ とし、Co, Ni は $x = 0.01, 0.02, 0.05, 0.08, 0.10$ の 5 種類とした。電気抵抗率は PPMS (Physical Property Measurement System) を用いて 2~300K の範囲で測定し、結晶格子長は XRD によって得られた X 線回折パターンから cellcal を使用して算出した。

4. 実験結果及び考察

図 1-(a), (b), (c) に Mn, Co, Ni を添加した時の電気抵抗率の温度変化を示す。Mn を添加すると、室温近傍の電気抵抗率は増加する。これに対して、Co, Ni 添加では、ともに添加量の増加とともに電気抵抗率は低下している。また、Mn, Co, Ni のどの元素の添加によっても、超伝導転移は抑えられ、Ni 添加量 $x = 0.05$ 以上では 6K 近傍での電気抵抗の落ち込みすら観測されなくなる。

Fe サイトが Co または Ni で置換すると、すでに過剰鉄の存在によって供給されている電子に加えてさらに電子をドープすることになり、その結果超伝導転移ははより強く抑えられたと考えられる。Fe の代わりに Mn を添加することはホールドープ

に対応するが、これによって過剰鉄の効果が抑制され超伝導性が回復するということはなく、Co, Ni 添加と同様に添加量の増加に従って、超伝導性を示さなくなった。

Co や Ni の添加によって常伝導状態の電気抵抗率が低下し、より金属的になるのは、 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ における研究[1]と同じ傾向であり、添加によって超伝導転移が抑えられる点も同様である。また、Mn 添加に関しては、超伝導 FeSe に Fe を添加しても Fe サイトを置換する効果はなく、新たな不純物相が形成されるという報告がある[2]

講演では、同じ 11 系である FeSe に関するこれらの結果と比較して、 $\text{FeTe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$ における Mn, Co, Ni 添加効果を検討する。

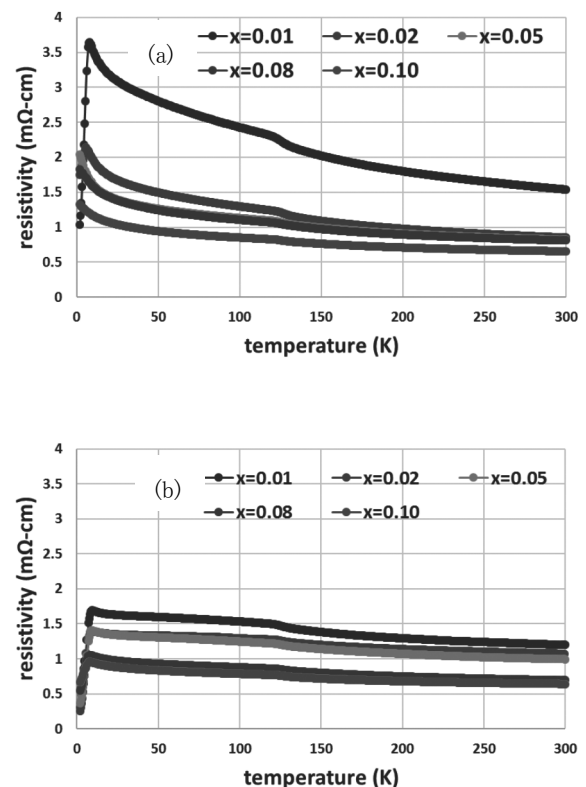


Fig. 1. Temperature dependence of electrical resistivity for the $\text{Fe}_{1-x}\text{M}_x\text{Te}_{0.8}\text{S}_{0.2}$ ($x = 0.01, 0.02, 0.05, 0.08, 0.1$) with (a) M = Co and (b) M = Ni.

参考文献

- [1] R. Shipra et. al., Physica C 470 (2010) 528-532
- [2] Kapi E. Ingle et. al., Mater. Res. Express 3 (2016) 12600

Y₂O₃/YBa₂Cu₃O_y+BaSnO₃ 擬似多層膜の磁束ピンニング特性

Flux pinning properties of Y₂O₃/YBa₂Cu₃O_y+BaSnO₃ multilayered films

入江 将大, 古城 大輔, 佐藤 蒼珠, 末吉 哲郎, 藤吉 孝則 (熊本大学)

IRIE Masahiro, KOJO Daisuke, SATO Soju, SHUEYOSHI Tetsuro, FUJIYOSHI Takanori (Kumamoto Univ.)

E-mail: irie@st.cs.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導体を実用化するためには、磁場中での臨界電流密度 J_c の向上ならびに J_c の異方性の改善が必要であり、これらを達成する方法の一つとして人工ピンの導入がある。一般的に、1次元ピンを超伝導体内の c 軸に平行に導入すると c 軸方向の J_c が向上するのに対し、3次元ピンを超伝導体内に均一に導入すると全磁場角度方向において J_c が向上する。そこで、1次元ピンと3次元ピンを組み合わせたハイブリッド磁束ピンニングによる幅広い磁場角度方向での J_c の向上が試みられている[1]。

本研究では、擬似多層膜法を用い、1層当たりのY₂O₃の導入量とその空間的分布を最適化した後、1次元ピンとしてBaSnO₃(BSO)を導入することによりハイブリッド構造を持つYBa₂Cu₃O_y(YBCO)薄膜を作製し、磁場中での J_c の向上および J_c の異方性の改善を試みた。

2. 実験方法

測定に用いた全ての擬似多層膜はPLD法を用いてSrTiO₃(100)基板上に作製した。使用したKrFエキシマレーザーの繰り返し周波数は5Hz、基板温度755°C、酸素分圧300mTorrの雰囲気中で成膜を行った。擬似多層膜の作製はターゲット交換法を用いて行い、成膜の際はYBCO層を堆積した後、ターゲットをY₂O₃ターゲットに交換して m 回パルスレーザーを照射した。これを n 回繰り返すことにより作製した試料をM-(m, n)と定義する。今回、Y₂O₃の最適な導入量とその空間的分布を調査するために、YBCO層の総堆積パルス数は3000パルス、Y₂O₃ターゲットへのトータルレーザー照射回数は200パルスに固定して試料を作製した。

またY₂O₃の導入量とその空間的分布を最適化した後、BaSnO₃(BSO)を3vol.%導入した混合ターゲットを使用し、1次元ピンのみを導入したYBCO+BSOおよびBSOとY₂O₃を導入したY₂O₃/YBCO+BSO擬似多層膜を作製した。作製した試料は堆積後500°Cで30分間アニールを行った。Table.1に各試料のY₂O₃の1層当たりのパルス数(m)、層数(n)そして臨界温度 T_c を示す。

超伝導特性の測定には直流四端子法を用い、 J_c は電界基準 $E_c=1\mu\text{V}/\text{cm}$ となる電流密度で定義した。また、 J_c の磁場角度依存性では、電流と常に垂直となるように磁場を印加し、磁場と c 軸のなす角度を θ として測定を行った。

3. 実験結果及び検討

Fig.1に温度 $T=77\text{K}$ 、磁場 $B=1\text{T}$ における作製した試料の J_c の磁場角度依存性(J_c - θ 特性)を示す。Fig.1(a)に示すように、Y₂O₃を導入した試料はpureYBCOと比較して全磁場角度方向で高い J_c を示した。また、Y₂O₃の一層当たりの導入量(m)が高くなるにつれ ab 面方向($\theta=90^\circ$)の J_c は向上した。これは、1層当たりのY₂O₃の導入量を高くしたことにより、Y₂O₃が面に近い形態で導入されたためだと考える。今回の結果から、広い磁場角度において最も高い J_c を示したM-(3, 66)がY₂O₃の最適な導入形態だと考えられる。

Fig.1(b)に示すように、1次元ピンとしてBSOを導入したYBCO+BSOおよびY₂O₃/YBCO+BSOはともに c 軸ピークを示

した。なお、Y₂O₃/YBCO+BSOはY₂O₃を1層当たり3パルス導入し、66層で作製している。これらピークは、YBCO内にナノロッドとして導入されたBSOに起因するものと考えられる。また、Y₂O₃/YBCO+BSOはYBCO+BSOと比較して全磁場角度方向で高い J_c を示した。これはY₂O₃ナノ粒子による3次元ピンの効果であると考えられる。

以上の結果から、1次元ピンとしてBSO、3次元ピンとしてY₂O₃を超伝導体内に導入したハイブリッド磁束ピンニングは効果的であることが分かった。しかしながら、Fig.1(b)に示すように、 $\theta=60^\circ$ 近傍の中間磁場領域における J_c のさらなる向上が必要である。

Table.1 Specification of samples

Sample	m	n	T_c
pureYBCO	-	-	89.2
M-(5, 40)	5	40	89.6
M-(3, 66)	3	66	89.8
M-(2, 100)	2	100	90.0
YBCO+BSO	-	-	87.6
Y ₂ O ₃ /YBCO+BSO	3	66	88.2

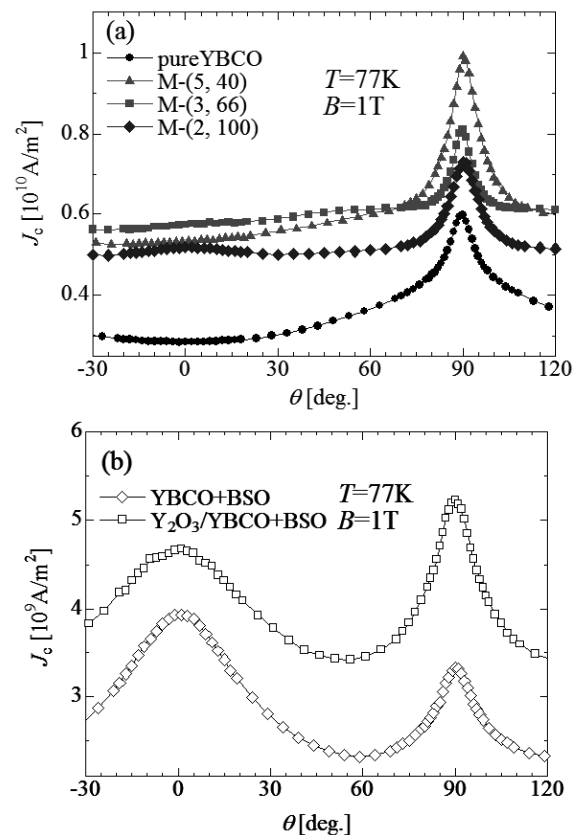


Fig.1 Angular dependences of J_c at $T=77\text{K}$ and $B=1\text{T}$

参考文献

[1] A. K. Jha *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 28 (2015) 114004

短絡事故時の HTS テープ線材の磁場及び電流密度分布

Magnetic field and current density profiles of HTS tape at overcritical current operation

ビヤトキン ウラジミール (SuperOx, Japan); タロウリ モハメド, 孫建 司, イワノフ ユーリ, 山口 作太郎 (中部大);
シシユキン オレグ (Karazin Kharkov National University); 小田部 エドモンド 荘 (九工大)

VYATKIN Vladimir (SuperOx, Japan); TALLOULI Mohamed, Sun Juan, Ivanov Yuri, YAMAGUCHI Satarou (Chubu University);
Shyshkin Oleg (Karazin Kharkov National University); Otabe Edmund Soji (Kyushu Institute of Technology)

E-mail: v.vyatkin@isc.chubu.ac.jp

1. Introduction

The investigation of superconducting fault current limiters (SFCL) is important to avoid the cable damage in any urgent case when the current amplitude multiple increases. One of the methods of current limiters is the HTS coil in the current circuit with subsequently connected HTS coil [1, 2].

The present work investigates the action of current pulse with and without HTS coil connected in the electrical circuit and the distribution of the residual magnetic fields and currents in the HTS tape after current pulse. This investigation is useful to understand the principle of the current limiting with HTS coils and the criteria of restarting current.

2. Experiment

The hall probe measured the magnetic field distribution near HTS tape after current pulse shown in the Fig. 1. The current source receive the signal of 900 A pulse duration of 5 ms and than after 5 ms send the permanent current 100A. This measurement was performed for two cases. First - without additional HTS coil. Second with HTS coil which eliminates the 900A

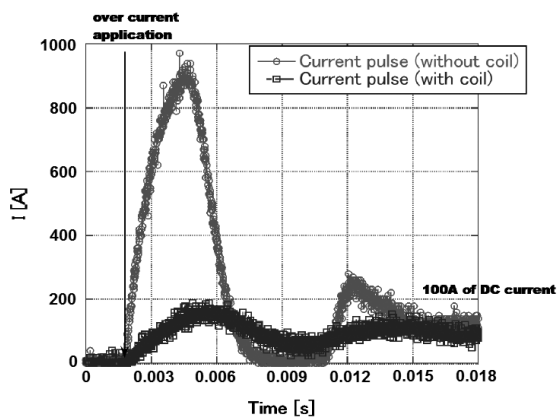


Fig. 1. The time dependence of current in the circuit in case of presence and absence HTS coil.

3. Results

The measurements of magnetic field in the width of the tape were performed into the distribution of magnetic field in the width of the tape. The distribution of current density in the width of HTS tape during the transport 100 A DC shown in Fig. 2. The case of transport current 0A shown in Fig. 3.

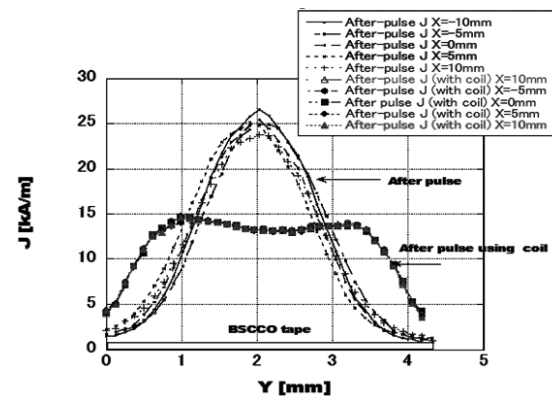


Fig. 2. Current distribution after pulse with and without coil when transport current 100 A.

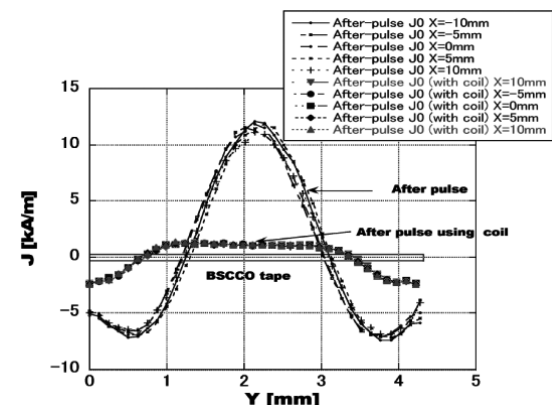


Fig. 3. Current distribution after pulse with and without coil when transport current 0 A.

4. Conclusion

The investigation of the residual magnetic field distribution after current pulse on the HTS tape was performed. The amplitude of the current pulse was eliminated by the superconducting coil. This experiment demonstrates that HTS coil can be the effective SFCL to eliminate the over-current pulse and hence to protect the electric circuit.

It was found that the residual magnetic field after large amplitude current pulse without HTS coil is larger and residual current is larger than one in case of lower amplitude current pulse with HTS coil.

References

1. M. Tallouli, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25.3** (2015) #8000704.
2. O.A. Shyshkin, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26.3** (2016): #9000404.

通電波形が交流通電損失特性に及ぼす影響についての実験的評価

Experimental investigation of influence of waveform on transport current loss in HTS tape

小川 純, 杵淵 修造, 青山 峻, 福井 聡, 岡 徹雄(新潟大学)
 OGAWA Jun, KINEBUCHI Shuzo, AOYAMA Shun, FUKUI Satoshi, OKA Tetsuo (Niigata University)
 E-mail: ogawa@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

交流電力機器では様々な運転条件が予想され、超電導線にはパルス波形など様々な電流波形で通電されることが予想される。そのため、電流波形が超伝導線の交流損失に及ぼす影響を知ることは重要であり、交流損失特性を知ることにより交流超伝導電力機器の設計に反映できる指標をつくるのが可能となる。そこで、熱電対による温度上昇から損失を導出する熱的測定的法を用いて異なる波形の電流を通電した条件における交流損失の測定を行うことで、電流波形が交流損失特性に及ぼす影響について調査を実施した。

2. 実験方法

本実験で通電した電流波形は Fig. 1 に示すように正弦波、三角波、正弦波の振幅の上下をカットした飽和正弦波でカット率が 20% および 50% の波形、正弦波ではあるが一サイクル中にインターバルを持つ CF 制御正弦波(CF=2)の 5 種類を用いた。測定する際の統一条件として 5 つの波形は波高値を等しい値とした。

熱的測定法では交流損失による温度上昇を基準に損失を導出するため、測定区間に発泡スチロールで断熱処理を施し、線材表面に絶縁処理を施した熱電対を配置した。実験の手順として、予め直流通電によるジュール損失と温度上昇の関係から構成表を作成した。運転条件として、30 秒間通電し、180 秒冷却する行程を 20 回繰り返し 30 秒における温度上昇の平均値を測定値とした。通電電流の波形を変えて繰り返し実験を行い、交流損失発生時の温度上昇の値から構成表をもちい損失を導出した。

評価した高温超伝導線材は、マルチフィラメント構造の Bi2223/Ag 線材と、薄膜構造である YBCO 線材を使用した。それぞれの線材の臨界電流値は Bi2223/Ag 線材が 164.0A、YBCO 線材が 179.4A であった。

3. 実験結果及び検討

Bi2223/Ag 線材と YBCO 線材に、電流の波高値がそれぞれの臨界電流値の 80% の電流を通電し、周波数の値を 30~90Hz で 15Hz ごとに変化させて交流通電損失を測定した。Fig. 2 に Bi2223/Ag 線と YBCO 線の一サイクル当たりの通電損失の周波数特性の測定結果を示す。損失は飽和正弦波 50%、飽和正弦波 20%、正弦波、CF 制御正弦波、三角波の順で大きく、三角波と飽和正弦波 50% では 2 倍ほどの差があることが示されている。また、Bi 線の場合には、周波数の増加に従い損失が減少していることがわかる。一般的に、超伝導線の通電損失は低周波であればヒステリシス損失が支配的であることが知られている。従って、通電した波形は波高値が同じであれば、各波形の損失の値は等しくなることが予想される。しかし本研究で示した結果は波形により損失の値が異なる結果となった。

この損失特性は高温超伝導線の n 値によるものと考えられる。臨界状態モデルでは n 値は ∞ であるのに対し、実際の超伝導線材の n 値は ∞ ではない。本研究で使用した超伝導線材の n 値は Bi2223/Ag 線材が 18、YBCO 線材が 39

であり、波形による損失特性の違いは n 値の影響と考えられる。

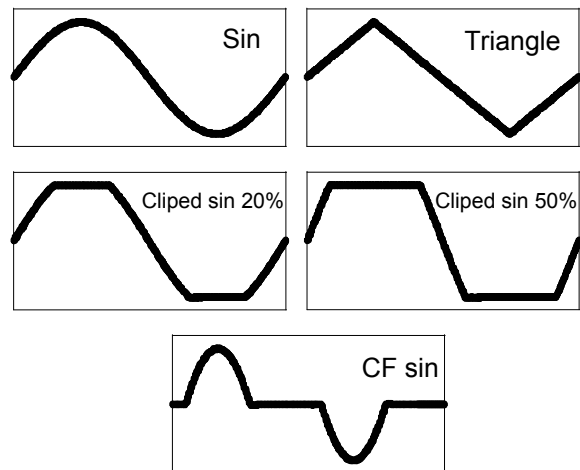


Fig. 1 Waveform of transport current

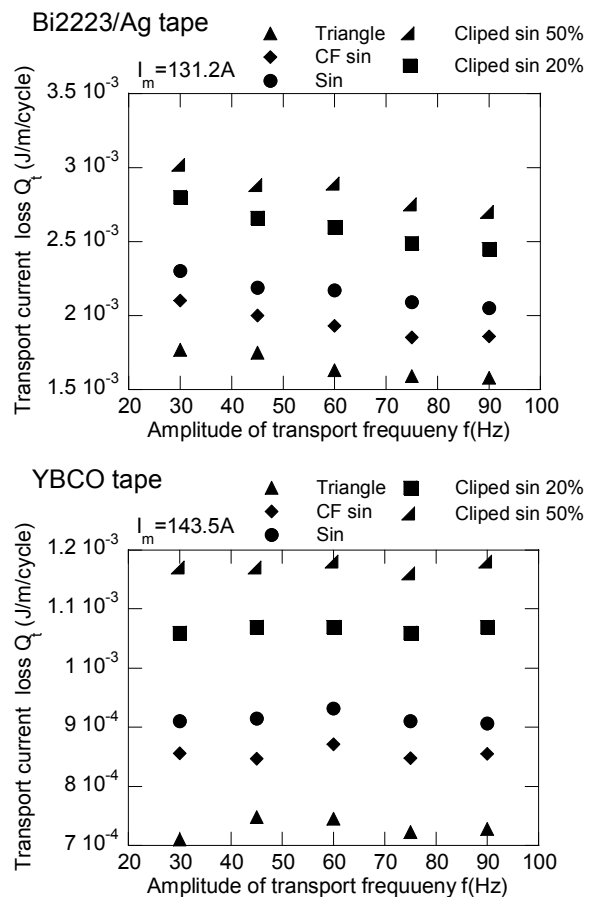


Fig. 2 AC transport current loss frequency dependence on waveforms in Bi2223/Ag and YBCO tapes

活性粉末を使用した ex situ 法 MgB₂ 線材の最適加熱処理温度

Optimized heat treatment temperature for ex situ processed MgB₂ tapes using reactive filling powder

藤井 宏樹, 石戸谷 章, 伊藤 真二, 北口 仁 (NIMS)
 FUJII Hiroki, ISHITOYA Akira, ITO Shinji, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)
 E-mail: fujii.hiroki@nims.go.jp

1. 序

ex situ 法 MgB₂ 線材に於いて、4.2K での臨界電流密度 (J_c) 特性を改善するための最適加熱処理温度 (T_{opt}) は、市販 MgB₂ 粉末を充填粉として用いると 900°C 以上であり、in situ 法や IMD 法線材のそれと比べて 200°C 以上高い。一方、粉碎処理した MgB₂ 粉を用いた ex situ 法線材では、 T_{opt} は 850 – 950°C であり、250rpm の回転数で 2 h 粉碎処理した粉末では、850°C で 1 h の加熱処理が施されている[1]。以前、更に高回転数の 500rpm で粉碎処理を施すと、 T_{opt} の一層の低下が起こることを報告したが[2]、本研究では、線材試料の作製工程中の雰囲気注意到を払いながら、種々の条件で粉碎した MgB₂ 粉末を用いて線材試料を作製し、 T_{opt} との関係を調べた。

2. 実験

所定量の市販 MgB₂ 粉を WC 製容器に入れ、回転数 350 及び 500rpm で種々の時間粉碎処理した。これらの粉末を充填粉として PIT 法で Fe シース線材を作製し、Ar ガス気流中で 1 h 加熱処理して評価を行った。この最終加熱処理まで、粉碎粉末及び線材試料は酸素濃度 1ppm 以下の Ar ガス雰囲気中で取り扱い、保管し、極力大気に触れないようにした。一方、幾つかの線材試料については、加熱処理前に所定の時間故意に大気に曝した。こうして得られた試料の組織や超伝導特性の評価を行った。

3. 結果と考察

Fig.1 に、350 及び 500rpm で種々の時間粉碎した充填粉を使用して作製した線材試料の 4.2K、10T 及び 12T での J_c 値を加熱処理温度に対して示す。350rpm では、粉碎処理時間が長いほど T_{opt} は低下し、10 h では 800°C 程度であったが、50 h 以上では 730°C 程度となった。また、500rpm では更に低下し、10 – 15h の粉碎で 700°C 程度となった。これらの温度は、以前報告した温度よりも 50°C 程度低下しているが[2]、線材試料の作製工程中の雰囲気改善のためだと思われる。

回転数が高い程及び粉碎時間が長い程、即ち粉碎エネルギーが大きい程、 T_{opt} を越えて加熱処理すると J_c 特性の劣化が顕著となった。種々の温度で加熱処理した粉碎粉末の XRD から、この劣化はコア層中の異相が増加したためであると考えられ、高エネルギー粉碎によって充填粉の活性度が増大したことに関連しているものと思われる。

Fig. 2 に種々の温度で加熱処理した大気曝露試料の 4.2K、10T での J_c 値を示す。曝露時間が長い程、 J_c 特性の劣化は激しくなり、 T_{opt} は概ね高温にシフトした。曝露試料の焼結後の XRD を測定すると、MgO の回折ピークが増大しており、汚染によって異相が増加して J_c 特性が劣化したものと考えられる。また、 T_{opt} の高温側へのシフトは、結晶粒の表面が汚染され、焼結に要するエネルギーが高くなったためだと考えられる。また、これらの結果は、汚染によって J_c 特性が劣化するばかりでなく、 T_{opt} のシフトも起こるので、再現性の高い結果を得るためには活性粉末の取り扱いに細心の注意を払う必要があることを示唆するものである。

高エネルギー粉碎した粉末を用いて作製した試料の適切な取り扱いによる T_{opt} の低下は、コア層とシース材との反応や異相の生成の抑制に繋がり、 J_c 特性の一層の改善に有効であると考えられる。

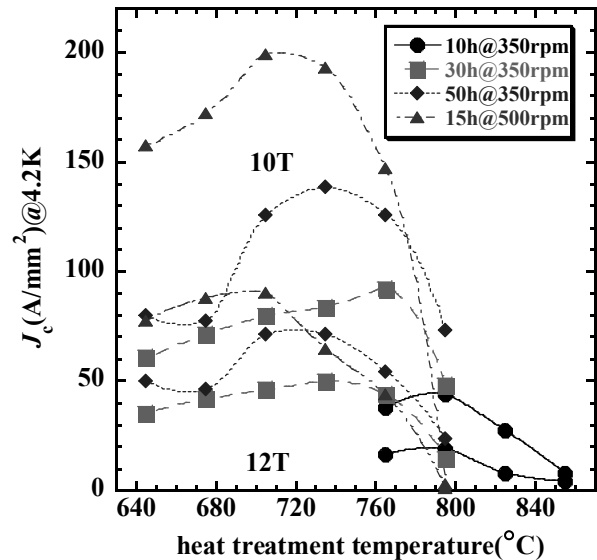


Fig. 1. J_c values at 4.2 K in 10 and 12 T as a function of heat treatment temperature for the tapes using MgB₂ powders milled at 350 or 500 rpm for 10 – 50 h. The measurements were performed in a magnetic field applied parallel to the tape surface.

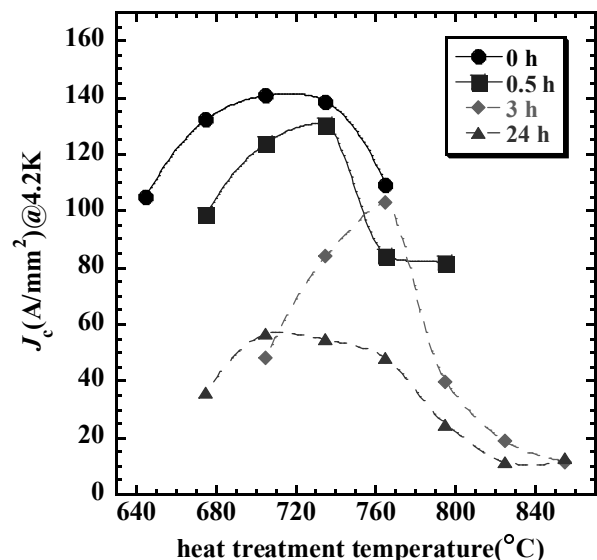


Fig. 2. J_c values at 4.2 K in 10 T as a function of heat treatment temperature for the tapes using MgB₂ powders milled at 500 rpm. The tapes were exposed to air for up to 24 h before heat treatment. The measurements were performed in a magnetic field applied parallel to the tape surface.

参考文献

1. A. Kario, et al.: Supercond. Sci. Technol. 24 (2011) p.075011.
2. H. Fujii, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 93 (2016) p.102.

石狩の1km超伝導直流送電システムの断熱二重管の真空排気について

Vacuum pumping of 1 km long HTS DC power transmission system in Ishikari

イワノフ ユーリ, 渡邊 裕文, 筑本 知子, 高野 廣久, 山口 作太郎(中部大);
石山 功太郎, 大石 前次(千代田化工); 渡部 充彦, 増田 孝人(住友電工)

IVANOV Yury, WATANABE Hirofumi, CHIKUMOTO Noriko, TAKANO Hirohisa, YAMAGUCHI Satarou (Chubu University);
ISHIYAMA Kotaro, OISHI Zenji (Chiyoda Corp.); WATANABE Michihiko, MASUDA Takato (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)
E-mail: ivanov@isc.chubu.ac.jp

1. Introduction

Application of superconductors for power transmission over long distances is not possible without using high-performance multilayer thermal insulation (MLI) whose quality depends significantly on the degree of vacuum. Design of the insulation used in Ishikari Project (Japan) allows us to maintain vacuum even when the vacuum pumps are separated by a distance of a few kilometers. Present study was undertaken to determine the way to achieve pumping length of at least 10 km long.

2. Experimental set up

The evacuated space of 1 km long HTS DC Line no. 2 consists of several isolated evacuated volumes, namely, terminals A and B, three sections of the cryogenic pipe (475 m, 137 m, and 379 m long) connected by the vacuum conduits, and two couplings, as shown in Fig. 1. Vacuum pumping of cryogenic pipe was carried out through ports located at the pipe ends. Therefore, the section no. II can be pumped only through the vacuum conduits possessing low conductance.

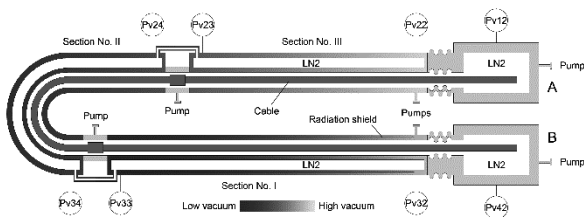


Fig. 1. Vacuum system of Line no. 2.

The outer pipe of large diameter supports high conductance and enough pumping speed. Longest section (no. I) of the cryogenic pipe is supplied with radiation shield being in thermal contact with the return pipe. This structure provides excellent thermal insulation of the cable pipe. Sections no. II and III are designed without radiation shield for the sake of comparison (see Fig. 2). The vacuum space was purged with dry carbon dioxide (CO_2) before pumping.

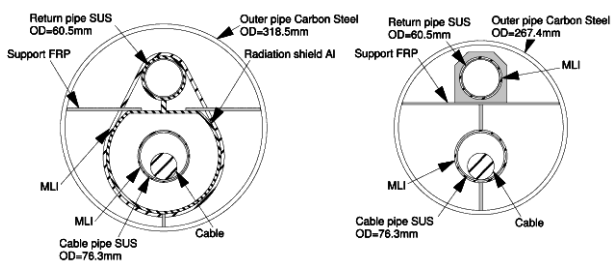


Fig. 2. Thermal insulation of two types used in Ishikari Project: with (left) and without (right) radiation screen.

Cold cathode Pirani gauges (acc. $\pm 30\%$) measured vacuum level in several points of the system. The pipe conductivity

and outgassing rate were evaluated using data obtained under different pumping conditions, namely during both-sides pumping and one-side pumping alternately from A and B sides.

3. Results

The issue of maintaining a proper vacuum level in MLI of the long line is of great interest. It was found that daily temperature variations strongly affect the variations in the vacuum level that changes approximately 3–4 times when the average temperature of outer pipe changes by 35 K. Therefore, lowering the temperature of the outer pipe is an important way of optimization of the thermal insulation.

The vacuum level distributions (averaged for the nighttime) along cryogenic pipe in the cases of one-side and both-sides pumping are presented in Fig. 3. The fact that the maximum allowable pressure at which satisfactory level of insulation still provided is 10^{-2} Pa can give grounds for estimating the achievable pumping length.

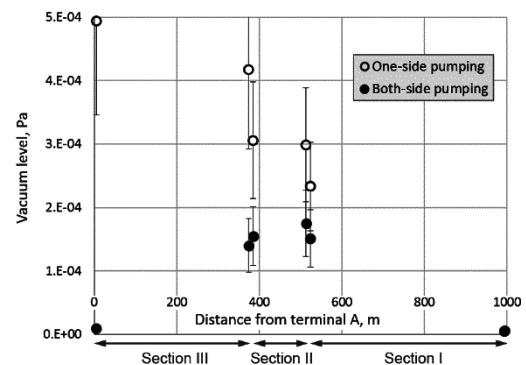


Fig. 3. Vacuum level in different points of cryogenic pipe (nighttime) during one-side and both-sides pumping.

The leakage rate can be found from the change in the vacuum level when the pumps are switched off at approximately constant temperature. The experiment was carried out twice with durations of 1 and 18 hours. Since the vacuum level increase was close to linear, we were able to calculate that in the case of emergency shutdown of the pumps the level of vacuum will reach 10^{-3} Pa in about 16 hours and 10^{-2} Pa in about 8 days.

References

- H. Watanabe et al.: *Physics Procedia* **67** (2015) 239–244
- H. Watanabe et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **27** (2017) #5400205

Acknowledgement

This abstract is based on results obtained from a project subsidized by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).

路線、運行条件の異なる直流電気鉄道き電系への超電導ケーブルの導入効果

Effect of introducing superconducting power cables into power feeding systems of DC electric railways having different lines and operation conditions

赤堀 貴広, 寺尾 悠, 大崎 博之(東大); 富田 優(鉄道総研)

AKAHORI Takahiro, TERAU Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (University of Tokyo); TOMITA Masaru (RTRI)

E-mail: akahori@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. 背景・目的

直流き電鉄道は交流き電鉄道と比べて車両コストや絶縁距離が小さいため、運転頻度の高い線区や地下鉄などで多く用いられている。[1]直流き電鉄道はき電線電圧 20 kV 以上が実現される交流き電鉄道と比べて 1500 V と低電圧なため、き電線の電気抵抗により大きいときには 3 kA もの大電流が流れる。加速車が集中すると変電所の負荷が増大し、き電線電圧が降下してしまう。また、電車には電動機を発電機として用いることによって制動力を得る回生ブレーキが備え付けられているが、電力回生時に回生車の付近に加速車がなければ回生電力を消費しきれずに回生失効が起きてしまい、エネルギー損失や機械ブレーキの磨耗につながる。

これらの課題に対する対策のひとつとして超電導ケーブルの導入が考えられる。超電導ケーブルは直流において低損失ため、各国で研究がなされている。Fig.1 のように変電所の出力母線を超電導ケーブルで接続することによって、各変電所の出力電力を平滑化する、超電導ケーブルを経由してある回生車の生じた回生電力を遠方の加速車に送ることによって回生率を向上する、電圧降下の大きい変電所に他の変電所や回生車から給電することで電圧降下を抑制する、といった効果が期待できる。[2]

本研究の目的は直流き電鉄道への超電導ケーブル導入における「電圧降下抑止効果」、「回生率向上効果」、「変電所負荷平滑化効果」を検討するため、駅位置・変電所の位置や数、電車の本数、超電導ケーブルの接続状況が異なる路線について比較検討を行うことである。解析はき電系を模擬した電気回路モデルによって行い、解析には数値計算ソフトウェア MATLAB を使用する。

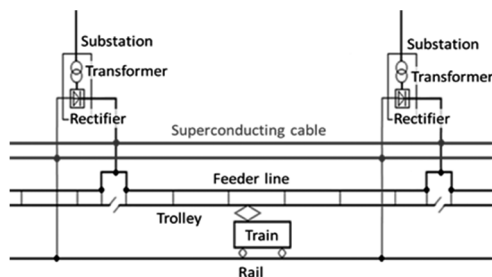


Fig.1 Application of superconducting cables to a DC rail way feeding system

2. 導入効果の解析

路線の違いによる超電導ケーブル導入効果の比較のために「駅・変電所の数・位置」、「電車の編成・本数」、「路線形状」の異なる路線に対して、超電導ケーブルの有無を加えて解析を行った。また、電車本数の違いのみに着目するため、路線は変電所:10、駅:29、環状線のものを用いて電車本数のみを変えた解析も行った。また、停車時間のずれによって電車のエネルギーバランスも変わり、結果に影響を及ぼすため、停車時間のずれによる影響を小さくするために停車時間にランダムなずれを生じさせて複数回解析を行い、最頻値を取った。

Fig.2より、車両1編成当たりの重量が大きい路線や変電所1基あたりの負担する電車本数が多い Model B のような路線

のほうが加速車の集中などによる偏りが大きくなるため変電所最大出力低減効果が大きくなる。線分状の路線(straight)は環状線(loop)より超電導ケーブル導入時の回生率向上効果や変電所最大出力電力低減効果が高い。これは線分状の路線では環状線と異なり路線端同士での電車の回生電力のやり取りや変電所負荷の分担ができず、変電所負荷や電車の回生・消費エネルギーのバランスが崩れやすいためと考えられる。

電車本数が増えるほど変電所最大出力電力、回生率ともに大きくなる傾向が見える。この原因は電車本数が増加すると回生車の近傍に加速車が存在しやすくなり、また、変電所1基当たりが負担するエネルギーが大きくなるためと考えられる。Fig.3より、回生率向上効果はある程度電車本数が増え、超電導ケーブルなしでも回生率が高くなると小さくなるが、それ以外では電車のエネルギーバランスによるところが大きいように思える。変電所最大出力電力低減効果は電車本数が多いほうが大きくなる傾向にあるが、電車本数が増えると変電所1基当たりの負荷が大きくなる反面、電車のエネルギーバランスは良くなるので電車本数がある程度多くなると変電所最大出力電力低減効果の増加は小さくなるような傾向も見える。

本研究の一部は科学技術振興機構(JST)の産学イノベーション加速事業[戦略的イノベーション創出推進]の支援によって行われた。

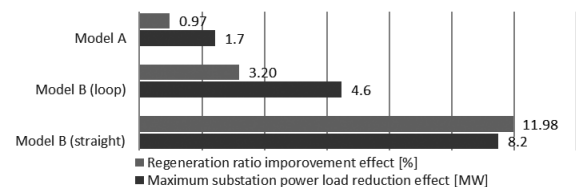


Fig.2 Regeneration ratio improvement effect and maximum substation power load reduction effect of 3 models

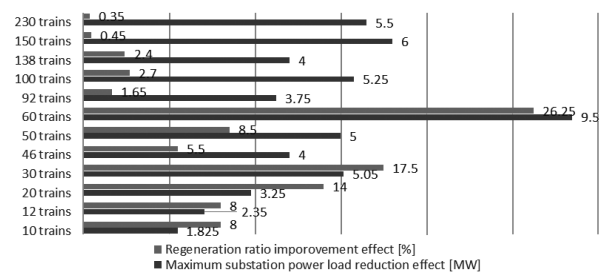


Fig.3 Regeneration ratio improvement effect and maximum substation power load reduction effect of different number of trains

参考文献

- 持永芳文. 電気鉄道技術入門. : オーム社, 2008.
- 富田優. 鉄道用超伝導ケーブルシステムの開発. : TEION KOGAKU(J. Cryo. Super. Soc. Jpn.)Vol. 48 No. 11, 2013.

熱的解析に基づく直流鉄道き電系用超電導ケーブルの導入条件の検討

Discussion on requirements for introducing superconducting power cables into DC electric railway feeding systems based on thermal analysis

方 是也, 寺尾 悠, 大崎 博之(東大); 富田 優(鉄道総研)

FANG Shiye, TERAU Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo); TOMITA Masaru (RTRI)

E-mail: fisty@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

直流電気鉄道のき電系で課題となっている電圧低下や回生失効への対策および変電所負荷の平準化のために、直流超電導ケーブルの導入が期待されている。超電導ケーブルの実用的導入のためには、ケーブルの長尺化が重要であり、ケーブルの温度分布を検討する必要がある。本研究では、熱的解析によって各種条件における超電導ケーブルの導入可能距離と、それに対する曲げの影響について明らかにした。

2. 超電導ケーブルの構造と熱解析モデル

本研究では Go-Return 型の冷却方式を採用した超電導ケーブルを想定し、両端に冷凍機を設置することにより、70K 一定で冷媒が送り出されるものとする。冷媒流路としては、Fig. 1 に示されるような流路構造を想定し、断熱管の内側までをモデル化している。熱源は外部からの侵入熱と圧力損失による発熱のみを考えた。Table 1 に示すように、圧力損失の低減のために流路断面積を変化させた 4 種類の構造(Case 1、Case 2、Case 3、Case 4)を考え、それらについて解析を行った。

3. 解析結果

ケーブル内の冷媒温度が 77K 以下に抑えられた時のケーブル長さの最大値を最長導入可能距離と定義し、例として 4.2 km のケーブルにおける各構造の冷媒温度分布を Fig. 2 に示す。液体窒素を送り出すためのポンプ圧の上限が 0.5MPa と 1MPa を想定した場合、各構造についての最長導入可能距離を Fig. 3 に示している。

ケーブルの曲げにより、外部からの侵入熱は増大する。Fig. 4 は曲げ部の侵入熱を定常状態の 5 倍に設定し、曲げ部の位置 (A: 中心部、B: 中心部から 500m、C: 中心部から 1000m、D: 中心部から 1500m) と長さ (0 から 800m まで) を変化させた場合の冷媒最高温度の結果を示している。侵入熱上昇部がケーブル中心にある場合、冷媒温度に多少の上昇(100m の幅に対し 1K 程度)がみられるが、侵入熱上昇部が中心に離れるにつれ、影響が薄れていくことが分かった。

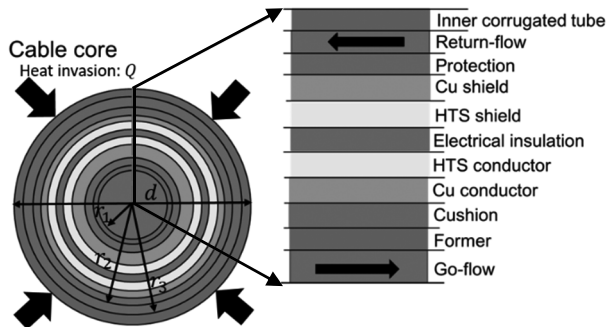


Fig 1. Structure of the superconducting cable model.

Table 1. Parameter of the superconducting cable

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
r_1 (mm)	23.0	30.2	36.5	42.6
r_2 (mm)	35.5	41.5	47.3	53.0
r_3 (mm)	48.0	58.5	68.5	78.5
d (mm)	139	160	180	200
Q (W/m)	1.0	1.0	1.0	1.0

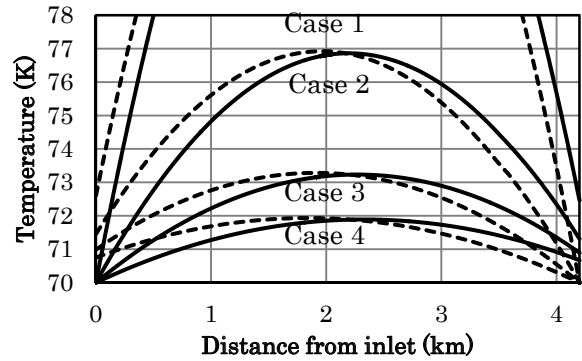


Fig. 2. Temperature distribution of 4.2 km long superconducting cables. The solid lines are the go-flow and the dashed lines are the return-flow.

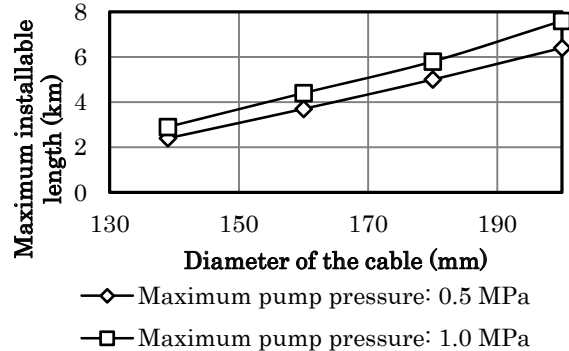


Fig. 3. Maximum installable cable length.

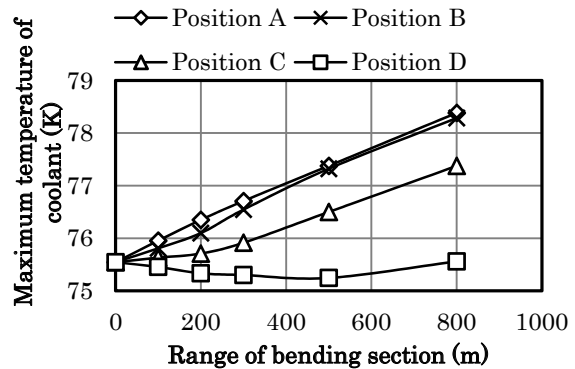


Fig. 4. Influence of bending section on coolant temperature.

4. まとめ

本研究では超電導ケーブルの流路構造とポンプ圧による導入距離の変化と曲げ部侵入熱上昇の影響に関する解析を行った。

本研究の一部は科学技術振興機構(JST)の産学イノベーション加速事業[戦略的イノベーション創出推進]の支援によって行われた。

参考文献

1. H. Ohsaki, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.25, No.3 (2015)

超電導き電ケーブルの敷設技術 Laying techniques of superconducting feeder cables

富田 優, 鈴木 賢次, 福本 祐介, 荒井 勇気, 石原 篤, 赤坂 友幸, 小林 祐介, 恩地 太紀(鉄道総研)
TOMITA Masaru, SUZUKI Kenji, FUKUMOTO Yusuke, ARAI Yuuki, ISHIHARA Atsushi, AKASAKA Tomoyuki,
KOBAYASHI Yusuke, ONJI Taiki (Railway Technical Research Institute)
E-mail: tomita@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道き電システムに超電導技術を適用することで、回生効率の向上、電力損失の低減、変電所間の負荷平準化や電圧降下の低減による変電所の集約化、電圧補償や電食の抑制など様々な効果が期待できる。鉄道総研では、直流電気鉄道の電力システムの合理化および省エネルギー化を目的として、鉄道用超電導き電ケーブルの開発を進めている^[1-3]。本講演ではこれまで実施した鉄道用超電導き電ケーブルの敷設技術について報告する。

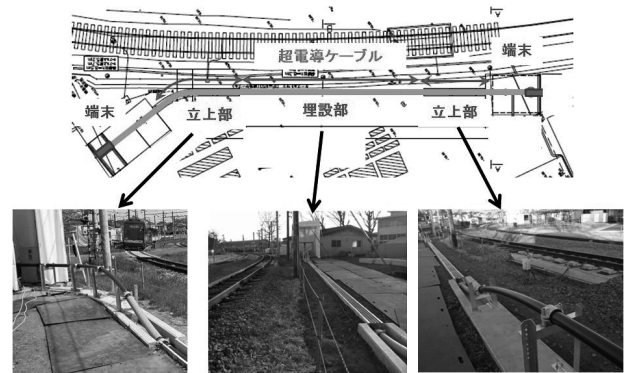


Fig.1 Schematic of superconducting feeder cable.

2. 超電導き電ケーブルの敷設技術

超電導ケーブルは冷却に伴い約 0.3%の熱収縮を起こすため、その対策は必要不可欠である。代表的な対策としては、オフセット、スネーク、端末移動、端末固定などが挙げられる。

Fig.1 に構内試験線に敷設した検証用超電導き電ケーブルの外観を示す。端末は固定し、ロードセルを設置することで、超電導ケーブルにかかる張力を計測できるようにしてある。Fig.2, 3 に超電導ケーブルをクリート固定した場合と、固定しない場合で、超電導ケーブルに発生する張力を測定した結果を示す。クリート固定した場合には、最大張力は約 700 kgf であったが、クリートを外すことで 200 kgf 以下まで低減でき、さらに最適化を図ることにより最終的にはほぼ張力がかからない状態にすることに成功した。

当日は他の敷設技術についても報告する予定である。

3. 謝辞

本研究は、国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST) の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」における研究課題「次世代鉄道システムを創る超伝導ノバージョン」の支援を受けて進めたものである。

参考文献

- [1] M. Tomita *et al.*, *Abstracts of CSJ Conference* **80** (2009) 181.
- [2] M. Tomita *et al.*, *Energy* **122** (2017) 579-587.
- [3] *Nature* **542** (2017) 275.

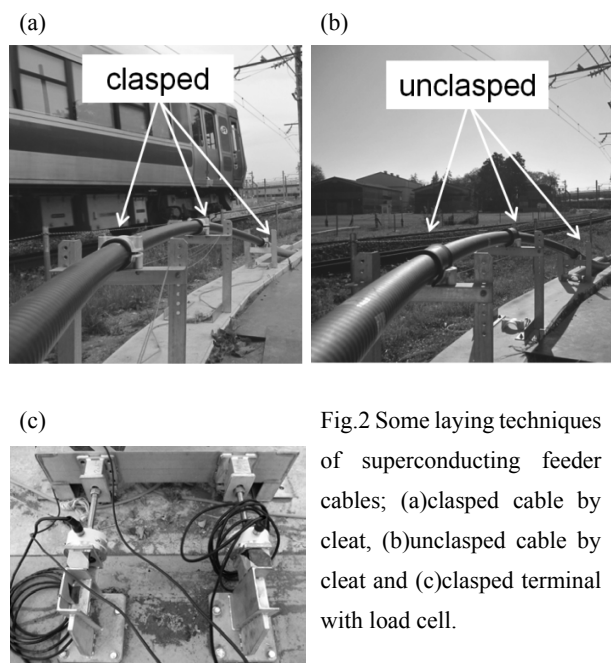


Fig.2 Some laying techniques of superconducting feeder cables; (a)clapsed cable by cleat, (b)unclapsed cable by cleat and (c)clapsed terminal with load cell.

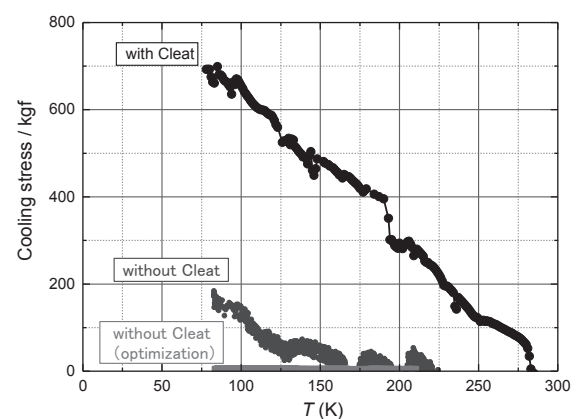


Fig.3 Cooling stress of superconducting feeder cables as a function of temperature.

MgB₂ ケーブルを用いたパンケーキコイルの開発 Development of prototype pancake coil using MgB₂ cable

恩地 太紀, 石原 篤, 小林 祐介, 赤坂 友幸, 荒井 有気, 福本 祐介, 富田 優(鉄道総研);
水野 伸哉, 谷貝 剛(上智大); 平野 直樹(中部電力); 新富 孝和(KEK); 濱島 高太郎(前川製作所)
ONJI Taiki, ISHIHARA Atsushi, KOBAYASHI Yusuke, AKASAKA Tomoyuki, ARAI Yuuki, FUKUMOTO Yusuke,
TOMITA Masaru (RTRI); MIZUNO Shinya, YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.); HIRANO Naoki (Chubu Electric Power);
SHINTOMI Takakazu (KEK); HAMAJIMA Takataro (Mayekawa MFG)
E-mail: ai@rtri.or.jp

1. はじめに

MgB₂ は、金属系超電導体最高の約 40 K の T_c をもち、各種コイルへの応用が検討されている。我々のグループでは、伝導冷却による数 10 kJ 級の超電導電力貯蔵システム (SMES) の開発を目指し[1, 2], MgB₂ 線材を用いたパンケーキコイルの設計、製作を行っている。

本研究では、Hyper Tech 社の熱処理前の MgB₂ 超電導素線を用い、撚線加工により導体作製、Wind & React (W&R) 方式でのパンケーキコイルの製作、ならびに特性評価を行ったので報告する。

2. 実験方法

MgB₂ 導体は MgB₂ 超電導素線 8 本と同径の Cu 線 4 本を Cu のコアに巻き付け、幅 5.06 mm、厚み 2.86 mm になるように撚り線加工を施して作製した。なお使用した MgB₂ 超電導素線は Hyper Tech 製のものであり、直径 0.07 mm のフィラメントが 30 本、撚りピッチ 300 mm で同軸 2 層で撚られた直径 0.83 mm の未熱処理線である。パンケーキコイルは W&R 方式で製作し、MgB₂ 導体を内径 200 mm、外径 269 mm に加工した後に、熱処理を行い、最後に樹脂含侵を施した。

作製したパンケーキコイルは冷凍機による伝導冷却で 20 K まで冷却し、超電導マグネットを用いて外部磁場を印加した状態で通電試験を行った。

3. 結果と考察

製作したパンケーキコイルを Fig.1 に示す。このパンケーキコイルを銅治具に取り付け、冷凍機による伝導冷却を実施した。初期冷却曲線を Fig.2 に示すが、約 16 時間で 20 K 以下まで冷却することに成功した。

当日は、パンケーキコイルの詳細や、通電電流値の外部磁場依存性についても報告する予定である。

4. 結論

MgB₂ の撚り線導体を用いてパンケーキコイルを製作したところ、設計通りの通電電流値を得ることができた。今後はより実機に近いコイルの製作を進めていく予定である。

謝辞

本研究は国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発

(ALCA) の助成を受けて実施した。

参考文献

- [1] T. Hamajima *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **22** (2012) 5701704.
[2] T. Shintomi *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **22** (2012) 5701604.

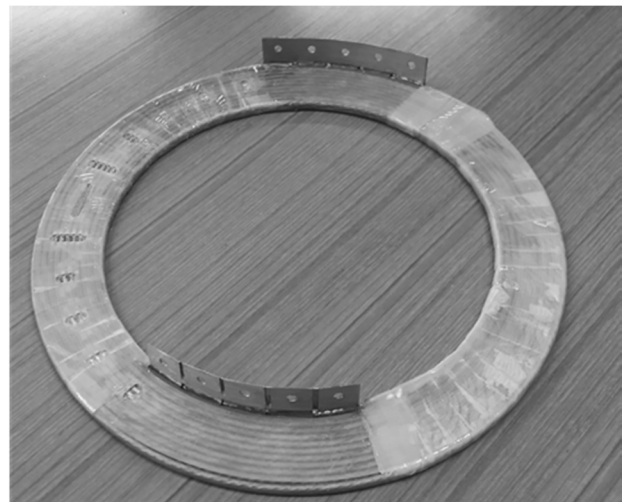


Fig.1 Appearance of a prototype pancake using MgB₂ cable.

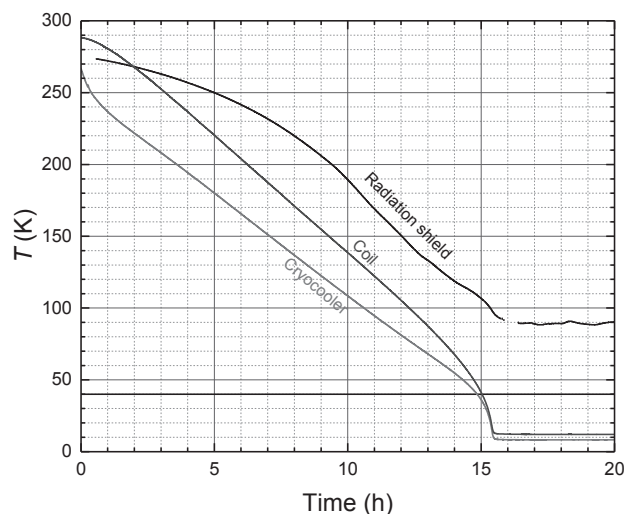


Fig.2 Change in temperature of a prototype pancake during initial cool-down.

磁気分離を利用した嫌気性生物処理による低炭素、創エネルギー水処理プロセス

Low carbon and energy creation water treatment process by anaerobic biological treatment using magnetic separation

江田 慎吾, 酒井 保藏, 荷方 稔之, 六本木 美紀 (宇都宮大)
EDA Shingo, SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki, ROPPONGI Miki (Utsunomiya Univ.)
E-mail: sakai@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、消化汚泥がマグネタイトを吸着し磁気分離できることを利用し、高濃度微生物による高速メタン発酵の可能性を検討した。高濃度化することで、汚泥の自己分解と増殖速度がバランスし、消化汚泥の引き抜きなしで運転できると考えた。ベンチスケール実験の結果、流入有機物の64%をメタンガスに変換できた。反応速度が中温メタン発酵の10倍以上となった。マグネタイト回収率は99.998%を示した。

水処理方法の一つである嫌気性生物処理は、水処理電力の半分以上を占めるといわれる曝気動力を必要としない。さらに有機物を分解する際にメタンガスを生成しエネルギーとして利用できることから、低炭素かつ創エネルギー水処理プロセスとして知られている。一方で好気性生物処理と比較すると反応速度が遅いという欠点があり、現在最も普及している活性汚泥法の10倍以上の処理時間を必要とする[1]。

メタン発酵に関わる嫌気性微生物がマグネタイトを吸着し磁気分離できることを見出した。磁気分離により、反応槽内の汚泥を高濃度化でき、高速処理が可能となると考えた。従来のメタン発酵法の低炭素、創エネルギー水処理プロセスの利点を生かしつつ、高速化によって高効率の水処理プロセスに発展させることができると考えられた。さらに汚泥の自己分解と増殖の速度がバランスし、消化汚泥の引き抜きなしで運転も期待できる。本研究では、磁気分離による汚泥の高濃度化、メタン発酵の高効率化をベンチスケール実験により検討した。

2. 実験方法

本実験のベンチスケール実験装置を Fig.1 に示した。6L の反応槽内に市水再生センターで採取した消化汚泥と磁性粉を入れ、磁化消化汚泥とした。汚泥は、回転する磁石ドラム(直径97 mm、長さ100 mm、表面最大磁束密度80 mT、6 mm ピッチの多極プラスチック磁石を巻いたもの)に引き寄せられる。スクレーパーにより反応槽内に戻され、処理水のみが流出する構造である。反応槽内の温度は、中温メタン発酵の最適温度 36~38°C[2]を保った。生成ガスは、水上置換法で回収した。模擬排水は、有機物としてポリペプトンとグルコースを重量濃度比1:1で含み、必要な無機栄養塩類を添加したものを用いた。この模擬排水を水理学的滞留時間(HRT)1日で流

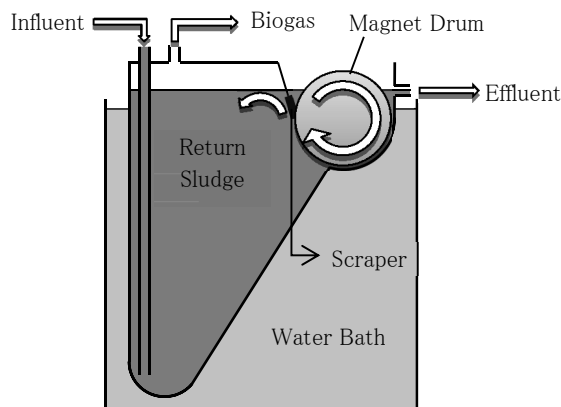


Fig.1 Bench Scale Apparatus

入させた。ポリペプトンとグルコースの濃度を変えることによって、Table 1 に示すように負荷を変えて実験した。本実験では、MLVSS、流入水及び流出水の全有機炭素(TOC)、回収ガス量、流出水中のマグネタイト濃度、浮遊物質(SS)濃度、濁度を測定し評価した。回収ガス中のメタンガス濃度は、Geotech 社製 BIOGAS5000 を用いて測定した。

3. 結果

流入水と流出水の TOC 測定値及び TOC 除去率、生成ガス量を Table 1 に示した。

Load	TOC (mg·L ⁻¹)			Biogas (L)
	Influent	Effluent	Removal	
Low	355	74	79%	2.8
High	710	131	81%	4.8

低負荷条件のとき、流入水の79%の有機物を処理していることが示された。一般的なメタン発酵法における除去率が60~90%[1]であり、良好な除去率を示した。本実験ではHRTを1日と設定している。一般的な中温メタン発酵法は10~30日であることから10倍以上の高速処理を達成できた。回収ガス中のメタン成分が77%を占めたことから、除去された有機物の64%がメタンガスに変換できたことがわかった。また、流出水のマグネタイト濃度は定量限界値(0.2 mg)を下回ったことから、マグネタイトの回収率は99.998%で、マグネタイトの追加は必要ないことが分かった。

高負荷条件では、流入水の81%の有機物を処理し、低負荷条件と同様の高い除去率を示した。この条件では負荷が2倍になっており、さらに効率よく有機物の分解反応が進行していたと考えられる。有機物の処理量は増えているが、生成ガスは低負荷条件時よりも低い回収率であった。このとき除去された有機物の50%がメタンガスに変換できたことがわかった。有機物が汚泥の増殖に消費され、ガス生成反応に使用される有機物が減少したと考えられる。また、流出水のマグネタイト濃度は最大1 mg/Lであり、回収率は99.996%で、同様にマグネタイトの追加は必要ないことが分かった。

4. 結論

磁気分離により汚泥を高濃度化し、処理速度が10倍以上にした高速処理が可能になった。ベンチスケール実験で磁気分離を利用した嫌気性微生物処理は、従来法よりも高効率化できる低炭素、創エネルギー水処理プロセスとして期待できる。

参考文献

1. 公害防止の技術と法規編集委員会, 新・公害防止の技術と法規 2016 水質編, (2016)p.078
2. 公害防止の技術と法規編集委員会, 新・公害防止の技術と法規 2016 水質編, (2016)p.081

磁気分離を応用した非焼却汚泥処理技術による温室効果ガス削減の可能性

Possibility of greenhouse gas reduction by non-incineration sludge treatment technology applying magnetic separation

石井 将志, 酒井 保蔵, 荷方 稔之, 六本木 美紀(宇都宮大)
 ISHII Masashi, SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki, ROPPONGI Miki (Utsunomiya Univ.)
 E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

下水汚泥処理だけで我が国の温室効果ガス排出量の0.13%を占めると報告されている[1]。本研究では、磁気分離を応用し、現行プロセスから排出される余剰汚泥を非焼却処理することで温室効果ガスの排出量削減を目指す。湿式酸化処理を検討したところ、活性汚泥法の曝気槽と同容積の湿式汚泥処理槽を用いることで活性汚泥からの余剰汚泥をすべて処理できることが示された。

下水や有機排水処理に広く用いられる活性汚泥法は、下水処理だけでも、7500万t(97%含水率)/yもの汚泥が発生し、汚泥焼却に伴う燃料の使用や N_2O の発生により CO_2 換算で157万t/yの温室効果ガスを排出していると報告されている [1]。磁化活性汚泥法は余剰汚泥を大幅削減することで根本的な汚泥処理からの温室効果ガス削減が期待できるが、現行プロセスから排出される余剰汚泥由来の温室効果ガス削減の解決策とはならない。余剰汚泥を磁気分離により高濃度化し、湿式酸化処理することで、余剰汚泥由来の温室効果ガスの削減を目指した。また、余剰汚泥を磁気分離することで、脱水や乾燥プロセスを低炭素化し、微生物による酸化処理と組み合わせた温室効果ガスの削減プロセスを検討した。

2. 実験方法

Fig.1に示す、有効容積5Lの磁化活性汚泥法標準実験装置を湿式汚泥処理槽として用いた。Run 1では湿式汚泥処理槽内の初期MLVSSを6,000 mg/Lとし、1 L/minで間欠曝気(曝気30 min 曝気停止30 min)を行った。Run 2では初期MLVSS、曝気量をRun 1の2倍にし、12,000 mg/L、2 L/minとした。実験は、室温で水道水を水理学的滞留時間(HRT)1日で連続供給し、湿式汚泥処理槽内の汚泥濃度経時変化を測定した。また、流出水における全有機炭素(TOC)、全窒素(TN)、懸濁物質(SS)、溶存酸素(DO)の濃度変化も測定した。

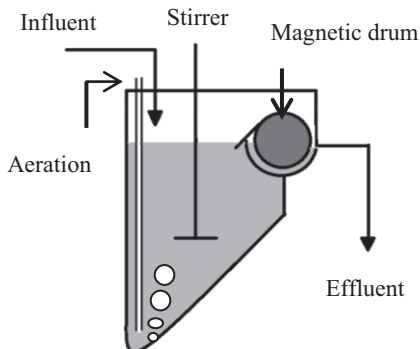


Fig.1. Experimental apparatus of MAS process

3. 結果と考察

結果をFig.2, Table.1に示す、余剰汚泥はRan 1では $191 \text{ mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$ 、Ran 2では $194 \text{ mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$ 減少し、点線で示したフィッティングの結果から自己消化率はRan 1 $b=0.06 \text{ d}^{-1}$ 、Ran 2 $b=0.03 \text{ d}^{-1}$ と見積もられた。この自己消化率は通常の汚泥の値の範囲内であるといえる。汚泥処理槽から

の流出水中のSS、TNの平均値は環境省の定める一律排出基準(SS 150 mg/L, TN 60mg/L)を大きく下回った。

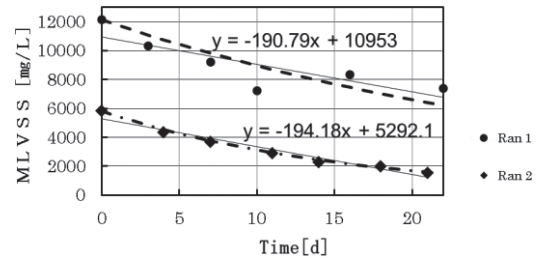


Fig.2. Change in MLVSS

Table.1. Effluent

	SS [mg/L]	TOC [mg/L]	TN [mg/L]
Ran 1	11.4	7.6	18.6
Ran 2	54.3	12.9	11.7

汚泥の高濃度化は自己消化率の低下を引き起こし、処理効率を低下させた。さらに曝気量も増加させる必要があり非焼却処理による曝気動力が低炭素化を相殺させる可能性がある。従って湿式汚泥処理槽内の汚泥はRan 1が適しているといえる。

ここでMLSS 2,000 mg/Lの活性汚泥1Lから発生する400 mg/d相当の余剰汚泥を処理するために必要なRan 1の処理槽の容積を考える。本研究では、有機物を添加していないことから汚泥減少量は $\Delta S = -bSa$ 、 ΔS : 汚泥減少量($\text{mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$)、 b : 汚泥の自己消化率(d^{-1})、 Sa : 湿式汚泥処理槽内の汚泥濃度(mg/L)と表される。Ran 1で得られた自己消化率から、 $Sa=6,000 \text{ mg/L}$ のとき、 $\Delta S=360 \text{ mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$ となる。従って仮定した400 mg/dの余剰汚泥を処理するためには約1Lの処理槽が必要である。つまり活性汚泥法から発生した余剰汚泥を処理するためには活性汚泥法の曝気槽と同容積の湿式汚泥処理槽が必要だといえる。

汚泥処理槽からの流出水に含まれていた測定物質の大部分は自己消化により生じたものと考えられ、磁性粉はほとんど含まれていなかったため、磁性粉のクローズドシステム化が保たれているといえる。

4. まとめ

磁気分離を応用した湿式汚泥処理法の有用性が示されたが、さらなる処理効率の向上には、改良が必要だといえる。本研究から、磁気分離を応用した非焼却処理によって、現行プロセスから排出される温室効果ガスの排出量削減の可能性が示唆された。さらに、磁気分離はさまざまな非焼却汚泥処理技術に応用できると考えられ、それらの温室効果ガス削減プロセスも含め検討していく。

参考文献

1. Ministry of the Environment • Ministry of Land, Infrastructure and Transport: Global Warming Countermeasure Manual on Sewerage (2015.3) p.60-62

磁気分離による可搬型池水浄化プロセス

Mobile water purification process for turbid pond by magnetic separation

小林 拓美, 酒井 保藏, 荒井 遥, 荷方 稔之, 六本木 美紀 (宇都宮大)

KOBAYASHI Takumi, SAKAI Yasuzo, ARAI Haruka, NIKATA Toshiyuki, ROPPONGI Miki (Utsunomiya Univ.)

E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

現在利用されている水処理法の凝集分離法は、大きな沈降槽が必要、汚泥処理の負担が大きい、などの課題がある。一方で凝集磁気分離法を用いると、プロセスの小型化や、高濃度の分離汚泥が得られると期待される。本実験では、磁気分離を用いた、コンパクトかつ汚泥回収が容易な可搬型の池水浄化プロセスの開発を目指した。最適条件を調査し、その条件でSS除去率などを検討したところ、可搬型池水浄化プロセスとしての実用性が認められた。

一般に水中の懸濁物質の処理には、凝集沈降分離法が用いられている。しかし、最終沈降池が大きい装置が大型になる、分離汚泥の脱水・濃縮が必要で汚泥処理の負担が大きいなどの問題がある。一方、凝集磁気分離法では、凝集時に磁性粉を添加し、強磁性ブロックを形成して磁気分離する。このプロセスを磁気シーティングという。磁性粉として多用される四酸化三鉄(マグネタイト)は、自然界に多く存在する砂鉄と同成分で安全性が高く、水に不溶で化学的に安定である。マグネタイトは、近年価格が数年前の約 1/5 となったため、以前よりもコストを抑えられるようになった。また、凝集磁気分離法のメリットとしては、最終沈降池が不要のため、装置の小型化が可能で、汚泥の脱水・濃縮に磁気分離が利用できることなどがある。本研究では、上記のメリットを踏まえ、凝集磁気分離法を用いた可搬型池水浄化システムの実用性を検討した。

2. 実験方法

実験には、藻類の増殖により汚濁が進行している学内の池水を用いた。凝集磁気分離法に最適な pH、凝集剤(ポリ塩化アルミニウム)の添加量を実験により調査した。その後、最適条件下で永久磁石を内蔵した回転ドラム型磁気分離装置 (NEOMAX エンジニアリング(株) NCS-4)を用いて、凝集磁気分離を行った。装置図を Fig.1 に示した。磁石ドラム表面の最大磁束密度は、0.4 T であり、スクレーパーを押し付けることによって、汚泥と水が分離されるようになっている。磁性粉の添加量と流量を変化させながら実験を行い、磁性粉の最適添加量を調査した。流出水の濁度、流量と SS の関係、汚泥の含水率の測定を行った。また、汚泥含水率の向上のため、磁気ドラムに不織布を押し当て、濃縮・脱水を行った。得られた結果をもとに、凝集沈降分離との比較を行った。

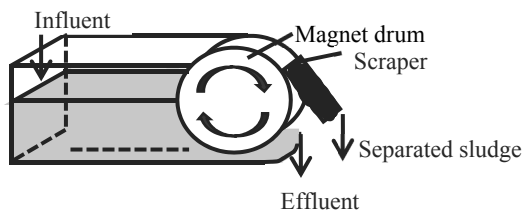


Fig.1 Coagulation-magnetic separation apparatus

3. 結果と考察

凝集剤の最適 pH と添加量を実験により求めた結果、pH 8、PAC10 mg/L であった。この最適条件下で磁性粉の添加量を変えて調査したところ、磁性粉 100 mg/L、流量 40 L/h のとき

最も SS の除去率が高かった。これより、最適条件は pH 8、PAC10 mg/L、磁性粉 100 mg/L となった。

本実験で用いた凝集磁気分離装置の懸濁液滞留時間は 40 L/h のとき約 3 分である。凝集沈降分離プロセスにおける沈降槽の滞留時間を 30 分とすると、約 10 倍の速さで分離できることが分かった。したがって磁気分離は、沈降分離に必要な沈降池を約 1/10 の大きさの磁気分離装置に変換することができ、装置の大幅なコンパクト化が示された。

また、汚泥の量を凝集沈降分離法と比較したところ、凝集沈降分離汚泥の含水率は約 99 % であるのに対し、凝集磁気分離汚泥では約 92 % であり、約 1/8 にまで汚泥の量は減少した。さらに磁石ドラムに不織布を押し当てたところ、含水率は約 82 % まで向上した。凝集沈降分離法と比較すると、約 1/18 の汚泥の量となった。(Fig.2)

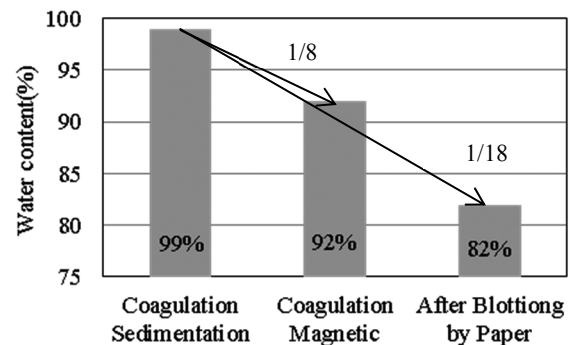


Fig.2 Water Content of Sludge

乾燥重量で 100 kg の汚泥が発生すると仮定する。凝集沈降分離法では 10 t の分離汚泥となる。一方、凝集磁気分離法では 0.83 t の分離汚泥となる。凝集沈降汚泥をさらに減容するには、脱水機が必要であり可搬型プロセスとして大がかりなものとなると思われる。凝集磁気分離法には、分離汚泥処理のための汚泥濃縮装置が不要であり、汚泥処理の負担を大幅に軽減できることが分かった。SS 除去率は、凝集沈降分離法と同等の結果が得られている。凝集磁気分離法は、汚泥処理の負担の軽減、装置の小型化という面において、大きな利点があることがいえる。

コスト面の検討をすると、凝集剤として PAC を用いた場合、約 10 mg-AL/L という少量で抑えることが可能である。PAC 原液を 80 円/kg、マグネタイト 100 円/kg とすると、200 m³ の池を浄化するのにかかる費用は約 26 円/m³ である。

4. まとめ

凝集磁気分離法は、懸濁液の分離時間が非常に短くなることにより、装置の大幅なコンパクト化が示された。また、分離と同時に汚泥濃縮を行え、高濃度の分離汚泥が得られることが示された。これにより、容易に汚泥を回収することができ、現場で処理せず、装置とともに持ち帰ることが可能となった。そのため、可搬型の池水浄化システムとしての実用の可能性が示された。

超伝導変圧器と超伝導ケーブルの限流協調に関する検討(3)

Investigation of cooperation of the current limiting of superconducting transformers and superconducting cables (3)

中村 文弥, 徳地 貴行, 吉田 幸市, 三浦 峻, 岩熊 成卓(九州大学); 富岡 章, 今野 雅之(富士電機); 足立 和久(昭和電線)

NAKAMURA Fumiya, TOKUCHI Takayuki, YOSHIDA Kouichi, MIURA Shun, IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.);

TOMIOKA Akira, KONNO Masayuki (Fuji Electric Co. Ltd.); ADACHI Kazuhisa (SWCC);

Mail: nakamura-f@sc.kyushu-u.ac.jp

1. まえがき

REBa₂Cu₃O_y(REBCO)超伝導巻線の特性を活かし、落雷時に発生する突発的な事故電流を抑制する機能つまり限流機能を変圧器及びケーブルに付加することが可能である。

我々の研究グループでは、ケーブルの温度分布を考慮し、突発短絡後の温度、電流値をそれぞれ臨界温度以下、定格電流の3倍程度に抑制すること、またケーブル長ごとに最適な線材設計を明らかにすることを最終目標としている。そこで本研究では、ケーブルの温度分布を考慮し、ケーブル及び変圧器の電流値及び温度のケーブル長依存性を明らかにすることを目的とした。これらの結果よりケーブル長に対する最適な銅の厚さ及び臨界電流値を提案する予定である。

2. 変圧器およびケーブルの概念設計、初期設定

Table.1 にケーブルの諸元を示す。ケーブル半径26.75[mm]、ケーブルに1A流れた時の磁束密度3.67[μ T/A]の超伝導線材を24本円筒状に並べ、ケーブルとして構成し変圧器の二次巻線側に接続した。

Table.2 に変圧器の諸元を示す。安定化材のAgの厚さを18[μ m]、Cuの厚さを50[μ m]とした。

初期設定として、ケーブルの始端を66Kとし、始端から終端に1km近づく毎に1K温度上昇するものとした。

変圧器及びケーブルともにREBCO線材を想定した。

3. 数値解析

有限要素法解析ソフトANSYSにより磁場解析を行い、突発短絡時の過大電流に対する超伝導変圧器及びケーブルの応答特性を解析した。本解析では、ケーブル長(0.1km~6km)をパラメータとし、短絡から0.2秒後までの数値解析を行った。

4. 解析結果

Fig.1 に短絡から0.2秒後までに一次巻線に流れる電流値を示している。ケーブル長が4kmの時、ケーブルの持つインダクタンス及びフラックスフロー抵抗が2kmの時より大きくなり、短絡直後の電流値が小さくなっている。また短絡から0.2秒後の電流値ではケーブル長が4kmの時の方が大きくなっているが、常伝導に転移した割合が比較的低下しているためだと考えられる。詳細な検討結果は当日報告する。

Table.1 Parameter of a superconducting cable

Superconductive wire	REBCO tape
Voltage	6.9kV
Current	1673A
B	3.67 μ T/A
Ic	4400A

Table.2 Parameter of a 20MVA superconducting transformer

Phase	3 ϕ
Capacity	20MVA
Superconductive wire	REBCO tape
Voltage(Prim./Sec.)	66kV/6.9kV
Current(Prim./Sec.)	175A/1673A
Frequency	60Hz
Conductor(Prim./Sec.)	3parallel/24parallel
%IZ	15%
B	1.4T
Ic(Prim./Sec.)	420A/4500A

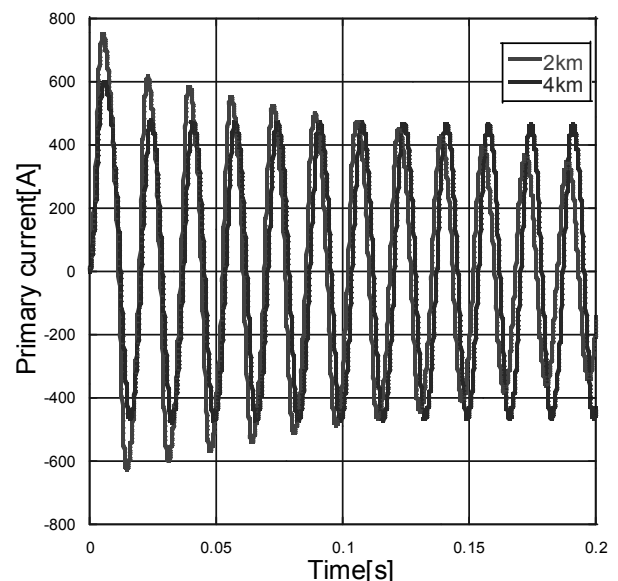


Fig.1 Primary current 0.2s after the short circuit

超電導ケーブルを導入した直流電気鉄道き電系向け超電導限流器の電磁的および熱的設計

Electromagnetic and Thermal Design of Superconducting Fault Current Limiters for DC Electric Railway Feeding Systems using Superconducting Cables

銭 可植, 郭 卓然, 寺尾 悠, 大崎 博之(東大); 富田 優(鉄道総研)

QIAN Kezhen, GUO Zhuoran, TERAU Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo); TOMITA Masaru (RTRI)

E-mail: qiankezhen@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

現在日本の電気鉄道は直流き電系が広く採用されている中、直流電圧の低さによる送電時の損失、回生失効による回生ブレーキ動作の不確実性、そしてこれらに起因する電力利用効率の低下などの課題を抱えている。これに対し、き電線と並行に超電導直流ケーブルの導入が検討され、電力回生率の向上、き電系損失の低減、変電所の有効利用といったメリットが示される一方、き電系に短絡などの事故が発生する場合、大きな事故電流が流れる恐れがある。万が一、直流遮断器等の保護システムの動作が失敗した場合、超電導ケーブルを含むき電設備の安全性が脅かされることが考えられる。[1] そこで、本研究ではき電系の信頼性と安全性向上のために、超電導ケーブルと直列に超電導限流器の設置を検討している。そしてシンプルでコンパクトな構造から抵抗型限流器を有力候補として検討し、MATLAB/Simulink での電磁的・熱的解析を用いてメインな設計パラメータによる限流能力への影響を考察し、想定した直流鉄道き電系を対象に超電導限流器の基本設計を行った。

2. 抵抗型超電導限流器の設計パラメータ考察

本研究では超電導限流器(以下、限流器)は Fig.1(a)のように超電導コイルとシャント抵抗で構成される。超電導コイルは限流素子として動作し、大電流応用に適する並列ソレノイド型無誘導巻き構造を採用しインダクタンス成分を削減する。一方、シャント抵抗は限流動作時超電導コイルの保護としてホットスポットの発生を防ぐため、並列に設置される。

限流器の基本設計において、メインの設計パラメータは超電導コイルを構成する超電導線材の並列数(限流器の臨界電流 I_c)と1本ごとの長さ、そしてシャント抵抗値の3つとなる。この3つのパラメータが限流器の限流能力にどのような影響を与えるかを考察するために、試験回路を設定してシミュレーション解析を行った。結論として、①限流器の臨界電流 I_c は事故電流のピーク値と正相関を示したが、動作時超電導コイルの温度上昇にはほぼ影響しない; ②超電導線材長は事故電流ピーク値にほぼ無影響だが、長いほど動作時超電導コイルの温度上昇が大きく抑えられる; ③シャント抵抗値は小さいほど、分流効果により超電導コイルの温度上昇が小さいが、事故電流が大きくなることが分かった。

3. 設計方法と設計例

限流器の基本設計にあたって、まず想定したき電系の定常電流、保護対象の超電導ケーブルの臨界電流と許容できる最大事故電流によって限流器の臨界電流 I_c を決める。次に事故の継続時間を1sと想定し、超電導コイルの最大温度が300K以下であることを条件に、最短な超電導線材長を検討する。最後に事故電流の大きさと超電導コイル温度への影響を考慮し、最大可能なシャント抵抗値を決定する。

Fig.1(b)のような直流電気鉄道き電系を想定し、一例として超電導ケーブルの臨界電流が15kAの場合の設計結果をTable.1に示す。Fig.2とFig.3に限流器の設置による事故電流の変化と限流器の温度と発生抵抗を示す。最大事故電流は約半分以下まで抑えられ、同時に超電導コイルの温度上昇が設定した許容温度以下であることが分かる。

Table. 1 Design results of SFCL

Critical current	12 [kA]
Superconducting wire length	120 [m]
Shunt resistor	0.7 [Ω]

本研究の一部は科学技術振興機構(JST)の産学イノベーション加速事業[戦略的イノベーション創出推進]の支援によって行われた。

参考文献

1. K. Qian, et al. "Fault current analysis of DC electric railway feeding systems using Superconducting Power Cables", 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2014), DSIH3-17, October 2014.

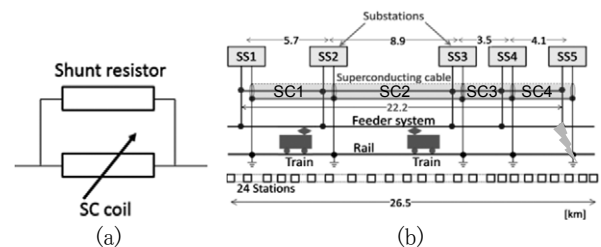


Fig. 1 (a) Equivalent circuit of resistive type SFCL; (b) overview of the target electric railway feeding system.

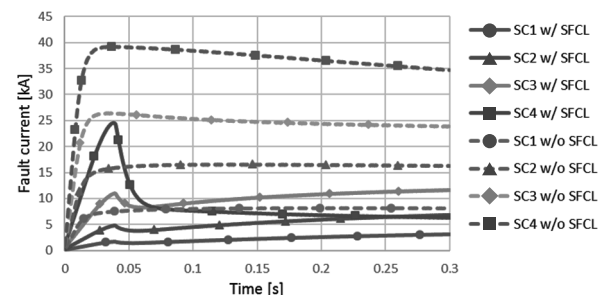


Fig. 2 Fault currents through each superconducting power cable (SC) with/without SFCL.

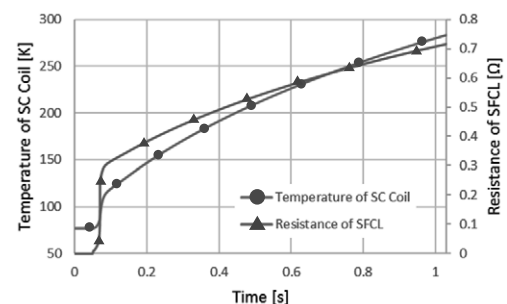


Fig. 3 Temperature of SC coil and resistance of SFCL.

縦方向推進システム用高温超伝導リニアスイッチトリラクタンスモータの 推力特性解析

Thrust characteristic analysis of HTS linear switched reluctance motor for vertical propulsion system

平山 斉, 川畑 秋馬(鹿児島大)

HIRAYAMA Tadashi, KAWABATA Shuma (Kagoshima University)

E-mail: hirayama@eee.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

高さが数百メートルを超えるビルでは、リニアモータで駆動されるエレベータが有効であり、近年実用化されてきている。これまで、リニアスイッチトリラクタンスモータ(LSRM)のエレベータへの応用が検討されたが、出力に対する銅損の割合が非常に大きいという問題があった。そこで本研究では、損失低減に加え、推力増加を目的として、エレベータ用 LSRM に高温超伝導線材を用いた高温超伝導 LSRM (HTS-LSRM) を提案する。本発表では最初の取り組みとして、解析によりエレベータ用 HTS-LSRM の推力特性を算出し、従来の LSRM との比較を行い、HTS-LSRM の優位性について検討する。

2. エレベータ用 LSRM の基本構造

Fig. 1 にエレベータ用として提案された LSRM [1] の概形図を示す。実際のエレベータでは、図に示した LSRM を縦に立てて使用する。可動子は鉄心にレール形状のコイルが巻線された 4 相の一次巻線を持ち、二次側である固定子は突極構造をもつ鉄心のみからなる。エアギャップ長は 1 mm、鉄心積厚は 400 mm である。可動子は継鉄をもたないため質量を低減でき、また単位質量あたりの推力が大きいといった特長をもつ。提案する HTS-LSRM では、一次巻線に HTS コイルを用い、可動子の鉄心を非磁性体とする。

3. 解析モデル

HTS-LSRM の解析モデルは、可動子の鉄心部分を空気として作成した。高温超伝導線材には、性能評価のために線材幅 4 mm、厚さ 0.1 mm、77 K 自己磁場中の臨界電流が 110 A の SuperPower 製 SCS4050 を使用した。可動子コイルの巻数は、鉄心に銅線が巻線された従来の LSRM では 1 極あたり 420 ターンであり、このときの導線の占積率は 60% である。HTS-LSRM では、1 極あたり 420、650、860 ターンの 3 通りで解析を行った。それぞれの占積率は 29%、45%、60% である。

4. 解析結果

まず、HTS-LSRM の一つの相に一定電流を流したときの磁場分布を算出し、HTS コイルに印可される垂直磁束密度の最大値を求め、HTS コイルのロードラインを作成した。Fig. 2 に HTS コイルのロードラインの算出結果および使用した YBCO 線材の I_c-B 特性を示す。図より、420、650、860 ターンの HTS コイルをもつそれぞれの HTS-LSRM の臨界電流値は 72、63、57 A となった。

Fig. 3 (a) に従来の LSRM、Fig. 3 (b) に巻数が 420 ターンの HTS-LSRM の磁束線の計算結果を示す。HTS-LSRM では可動子に鉄心をもたないためコイル領域に侵入する磁束が多くなるが、従来の LSRM の磁束線と比較しても推力を発生するのに特に問題のない磁束線の分布が得られることがわかる。

Fig. 4 に、静推力-可動子位置特性の計算結果を示す。従来の LSRM では定格電流の 8A、HTS-LSRM では先に求めた臨界電流値の 50% の電流を与えた。図より、従来の LSRM の最大推力は 2600 N 程度であり、巻数が同じ 420 ターンの HTS-LSRM では 2100 N 程度となり若干推力が低くなるが、こ

れは占積率が 30% もない場合の結果である。HTS コイルの占積率が 45% である 650 ターンでは 3900 N 程度となり従来の 1.5 倍、占積率が 60% である 860 ターンでは 5500 N 程度となり従来の 2.1 倍になる。従来の LSRM では、可動子を 24 台用いてエレベータの 1 つのかごを動かすが、HTS-LSRM を用いることで必要な可動子の台数を減らすことができ、駆動部分の重量が軽くなった分だけ搬送重量を増やすことができる。詳細な検討結果については当日報告する。

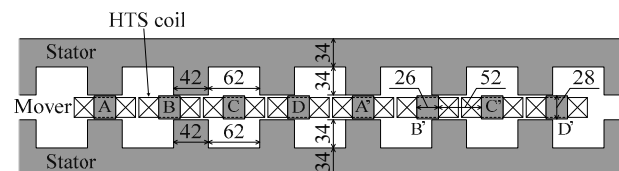


Fig. 1. Structure diagram of LSRM for driving elevator.

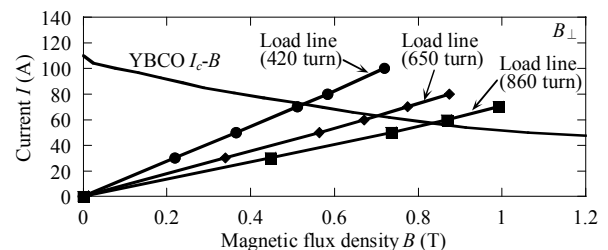


Fig. 2. I_c-B characteristic of YBCO tape conductor and load lines of HTS coils.

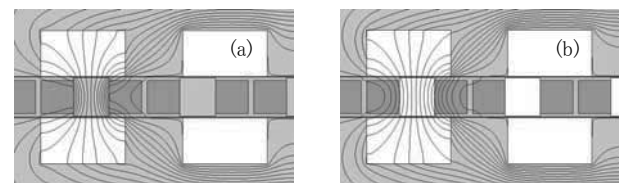


Fig. 3. Numerical results of magnetic flux lines.
(a) Conventional LSRM. (b) HTS-LSRM (420turn).

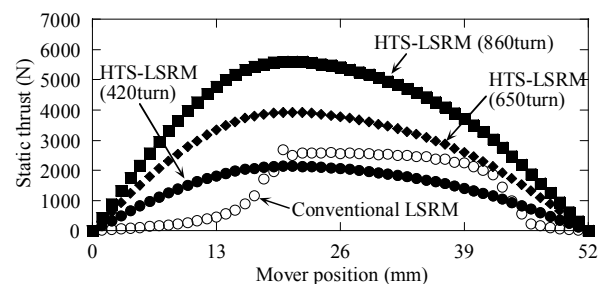


Fig. 4. Numerical results of static thrust characteristics.

参考文献

- H. S. Lim, et al.: IEEE Trans. Ind. Elec., Vol. 55, No. 2 (2008) pp.534-542