

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00771

研究課題名（和文）縦磁界効果を利用した大容量超伝導直流電力ケーブルの研究

研究課題名（英文）Study of high capacity superconducting DC power cable using longitudinal magnetic field effect

研究代表者

小田部 荘司 (Otabe, Edmund Soji)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：30231236

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 35,300,000円

研究成果の概要（和文）：磁界と電流は普通は垂直な関係にあるが、特殊な構造を作ると磁界と電流を平行にすることができ、これを縦磁界と呼ぶ。縦磁界の下での超伝導線材は、流せる最大の電流である臨界電流が向上する。この縦磁界効果を利用した超伝導電力ケーブルを開発した。これにより従来のケーブルよりも18%も臨界電流が高い直流13.1kAを通電することのできるケーブルの試作に成功した。また外直径が20mmの小型のケーブルを作り、交流電流を通電して、交流損失が従来型の2倍程度であることを実験的に確認し、数値計算でもその結果を裏付けた。これにより交流通電の可能性も示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導体を用いると抵抗ゼロで電力輸送を行なうことができる。その際に、流すことのできる最大の電流である臨界電流は高い方が、小型で省スペースなケーブルを作ることができる。縦磁界効果を使うと、使う線材は全く同じでも巻線の構造を変えるだけで、臨界電流を大きくすることができる。従ってより性能のいいケーブルを作ることができる。これをこの研究では設計、製作、通電試験まで行なって、実証をすることができた。今後、10年程度で超伝導電力ケーブルの附設が行なわれていくが、その際に実際に使われる技術となる可能性が高い。

研究成果の概要（英文）：Normally, magnetic fields and electric currents are perpendicular to each other, but by creating a special structure, they can be made parallel, which is called a longitudinal magnetic field. In a longitudinal magnetic field, the critical current, the maximum current that can flow, of superconducting wire is improved. A superconducting power cable has been developed that utilizes this longitudinal magnetic field effect. As a result, a prototype cable capable of carrying 13.1 kA DC, which has a critical current 18% higher than that of conventional cables, was successfully fabricated. A small cable with an outer diameter of 20 mm was also fabricated, and by passing an AC current through it, experimental confirmation was obtained that the AC loss was about twice that of conventional cables, the result that was supported by numerical calculations. This demonstrated the feasibility of passing AC current to the power cable.

研究分野：超伝導工学

キーワード：超伝導体 直流電力ケーブル 交流電力ケーブル 臨界電流 縦磁界効果

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超伝導電力ケーブルが再生可能エネルギーの平準化の期待から注目されている。実際に石狩市では 1.5 km におよぶ長さの超伝導電力ケーブルの実証試験がおこなわれた。最近では鉄道総合技術研究所が静岡県内の営業線での超伝導電力ケーブルの実証試験を行なうことも進めている。超伝導電力ケーブルの特徴は小型で大容量の電力輸送であり、性能は臨界電流で決定される。超伝導体には流すことのできる限界の電流値があり、それを臨界電流と呼ぶ。したがって、臨界電流が高い超伝導線材を用いることで、性能のいい超伝導電力ケーブルを作ることができる。そこで様々な研究が進められて臨界電流を大きくすることができるようになり、市販の高温酸化物超伝導体による線材が市販されるようになった。最近では核融合炉の超伝導マグネットの性能をこれらの線材により格段に向上できることから、線材の使用量が急激に増えてきている。一方で、線材の臨界電流を向上する方法として縦磁界効果を利用することが挙げられる。通常では磁界と電流は直交しているが、特別な構造を作ると磁界と電流を平行にすることができる。これを通常の横磁界に対して、縦磁界と呼ぶ。この縦磁界下では臨界電流が向上することが 1960 年代から知られていた。しかし電力ケーブルに使用するには、縦磁界をどのように実現できるかという問題があり、実用にならなかった。我々の研究グループでは、らせん構造を工夫することにより、縦磁界を発生することが可能であることを示して、縦磁界効果を利用する電力ケーブルを設計することができることを示した。後は実際に製作して、直流電流を通电して、従来の超伝導ケーブルを凌駕する性能を示すだけとなった。

2. 研究の目的

そこで今回の科研費基盤研究(A)では、多数の研究者と共同して実際に縦磁界効果を利用した超伝導電力ケーブルを試作し、実際に通电して従来ケーブルよりも性能が高いことを示す。

3. 研究の方法

(1) 設計

図 1 に縦磁界効果を利用した超伝導電力ケーブルの概要を示す。中心に強度を増すためのフォ

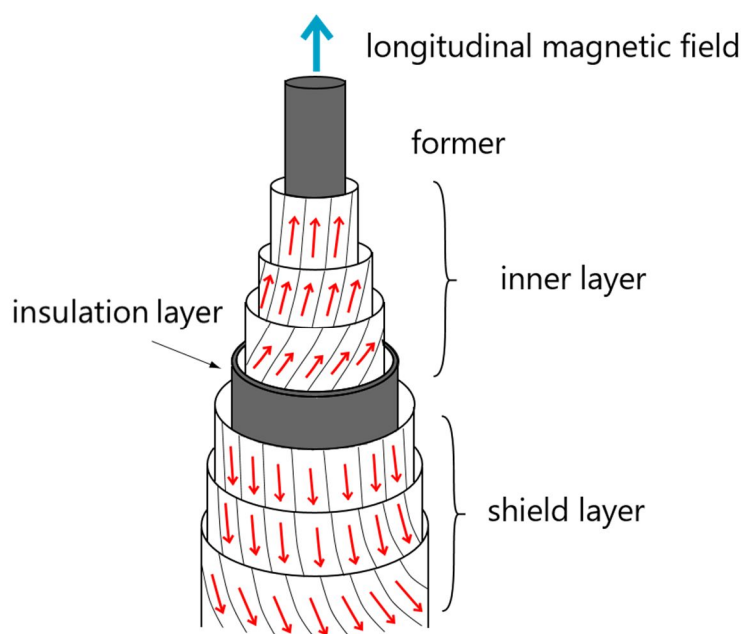


図 1 : 縦磁界効果を利用した超伝導電力ケーブルの外観

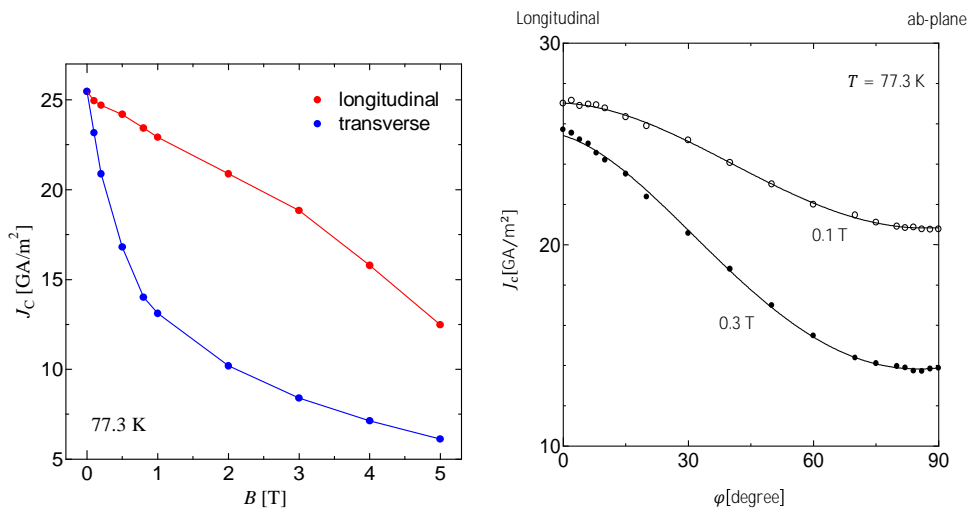


図 2：使用した超伝導テープの臨界電流特性。(a)磁界依存性と(b)角度依存性。

フォーマーがありその周りに酸化物超伝導体テープが配置されている。内層では角度をだんだん大きくするようにして同じ方向に巻いている。また絶縁層を挟んで、外挿でも同じ方向に巻いている。ここで矢印は電流が流れる方向を示している。この巻き方はこれまでの超伝導電力ケーブルでの巻き方と異なる。つまり従来型では互い違いになるように巻いていて、結果的にケーブルの軸方向に発生する縦磁界を打ち消すようにしている。これに対して同じ方向に巻くことで、ケーブルには長さ方向つまり縦磁界が印加されるようになる。この縦磁界によりテープの臨界電流が増加する。

最初に超伝導テープの臨界電流特性を調べる。超伝導テープは上海超電導で製作された。図 2 に使用した超伝導テープの臨界電流密度の磁界依存性と角度依存性を示している。角度が 0 度のときに縦磁界であり、90 度のときの横磁界に比べて臨界電流が高いことが分かる。この実験結果を近似式にして任意の角度の磁場がかかったときの臨界電流の値を知り、全体の超伝導電力ケーブルの設計を行なう。表 1 にケーブルの規格を示す。

(2)製作および試験

製作は中国の中天科技と広州電網によって行なわれた。また試験は広州電網で行なわれた。測定には直流四端子法を用いた。これは 1 万アンペアを越えるような電流を流しても超伝導ケーブルでは 1 μ V 程度の微小な電圧しか発生せず、高精度な測定が必要だからである。広州電網では結局 1 万 5000 アンペアを通电することができる直流電源を準備した。これは世界でも最大規模である。

表 1：電力ケーブルの規格

物品		超伝導テープ			
項目	元素	外層	臨界電流[A] (77 K, 自己磁場)	幅 [mm]	厚さ [mm]
諸元	YBa ₂ Cu ₃ O _x	銅	> 160 A	4.8 ± 0.1	0.23 ± 0.02
材料		フォーマー		絶縁層	
項目	外径 [mm]	長さ [m]	材料	厚さ [mm]	
諸元	35	2.0	PPLP	0.5	

4 . 研究成果

図 3 に超伝導ケーブルに 1 万アンペアを越える電流を通電したときの発生する電界を示している。通常は電界では 0.0001 V/m、つまり 1 cm あたりで 1 μ V の電圧が発生したところで超伝導体は抵抗状態に入るという解釈をして、臨界電流の値を決める。この測定の場合には臨界電流はだいたい 13,000 A であることがわかる。

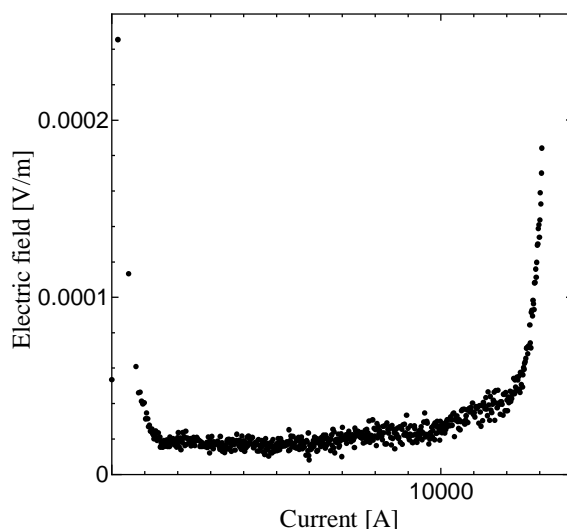


図 3 : 超伝導ケーブルの通電測定結果。

次に実験結果と理論で計算した設計値での臨界電流 I_c の比較を表 2 に示す。まず実験値と設計値がほぼ一致していることがわかる。このことから狙い通りの設計ができ、また狙い通りの製作ができることがわかる。そして縦磁界効果ケーブルと従来ケーブルの値を比較すると全ての条件で縦磁界効果ケーブルの方が高い臨界電流 I_c を得ていることがわかる。具体的には 18%ほど増加していることが分かる。

表 2 : 実験結果と計算結果での臨界電流 I_c の比較

ケーブルタイプ	測定方法	実験値		設計値	
		I_c [A]	テープ 1 枚あたりの I_c [A]	I_c [A]	テープ 1 枚あたりの I_c [A]
縦磁界効果ケーブル	内層のみ通電	12799	143.8	13057	146.7
	内層と外挿に通電	13150	147.7	13222	148.6
従来ケーブル	内層のみ通電	11251	137.2	11110	135.5
	内層と外挿に通電	11139	135.8	11110	135.5

まとめると本研究では、磁界と電流が平行になる縦磁界を作る縦磁界超伝導電力ケーブルを設計、製作して、通電試験を行なった。その結果、臨界電流は 13,000 A ほどにもなり、従来の超伝導電力ケーブルよりも性能のいいケーブルを作ることができた。今後、超伝導電力ケーブルは各地で実用化されて利用されることが期待されているが、今回の研究では巻き方を変えるだけで臨界電流を向上させることができ、性能の向上の方法として注目される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 S. Yu. Zanegin, V. V. Zubko, A. A. Nosov, S. S. Fetisov, E. S. Otabe, Y. Kinoshita, T. Akasaka	4. 巻 387
2. 論文標題 The possibility of increasing the direct current of HTSC cables due to the effect of the longitudinal magnetic field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cable and Wires (Russian)	6. 最初と最後の頁 19-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hidetaka Nakashima, Tatsuya Nakasaki, Tatsuhiro Tanaka, Yushi Kinoshita, Yuki Tanaka, Panart Khajornrungruang, Edmund Soji Otabe, Keisuke Suzuki	4. 巻 15
2. 論文標題 Study on Polishing Method Using Magnetic Levitation Tool in Superconductive-Assisted Machining	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 234-242
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/ijat.2021.p0503	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 -
1. 著者名 Tatsuya Nakasaki, Yushi Kinoshita, Panart Khajornrungruang, Edmund Soji Otabe, Keisuke Suzuki	4. 巻 15
2. 論文標題 Study on the SUAM Double Magnet System for Polishing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 503-511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/ijat.2021.p0234	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 -
1. 著者名 Rina Yonezuka, Yusei Hamada, Kazunori Kamiji, Edmund Soji Otabe, Yasunori Mawatari, Tetsuya Matsuno	4. 巻 1857
2. 論文標題 Time-Dependent Ginzburg-Landau Simulation of Critical Current Density Including z-axis Anisotropy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1857/1/012020	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsuno Tetsuya, Otabe Edmund Soji, Mawatari Yasunori	4. 巻 89
2. 論文標題 Explicit Integrators Based on a Bipartite Lattice and a Pair of Affine Transformations to Solve Quantum Equations with Gauge Fields	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 054006 ~ 054006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.054006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhang Ruizhe, Kinoshita Yushi, Otabe Edmund Soji, Akasaka Tomoyuki, Ishihara Atsushi, Tomita Masaru	4. 巻 577
2. 論文標題 Evaluation of critical current in junction of superconductors with crack using finite element method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physica C: Superconductivity and its Applications	6. 最初と最後の頁 1353733 ~ 1353733
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physc.2020.1353733	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kinoshita Y, Zhang R, Otabe E S, Suzuki K, Tanaka Y, Nakashima H, Nakasaki T	4. 巻 1590
2. 論文標題 Evaluation of superconductor assisted machining (SUAM) with superconducting coated conductors using the finite element method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012023 ~ 012023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1590/1/012023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yonenaka T, Muraoka T, Ichiki Y, Otabe E S, Tokunaga Y	4. 巻 1590
2. 論文標題 Estimation of Machine Parameters in Superconducting Transformer using Differential Evolution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012056 ~ 012056
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1590/1/012056	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計28件(うち招待講演 1件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 鐘 宇軒, 小田部 荘司, 赤坂 友幸, 石原 篤, 富田 優, 安谷 葵
2. 発表標題 FEMを用いた超伝導線材の接触抵抗の分布と角度を考慮した臨界電流特性の評価
3. 学会等名 2021年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩崎 慎也, 木下 雄士, 小田部 荘司, 中崎 達也, 鈴木 恵友
2. 発表標題 超伝導線材を用いた磁気浮上工具の有限要素法による電磁界解析
3. 学会等名 2021年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S.S. Fetisov, V.V. Zubko, S.Yu. Zanegin, V.S. Vysotsky, A.A. Nosov, E.S. Otabe, Y. Kinoshita, T. Akasaka
2. 発表標題 The feasibility design study and cold test of the first model the compact HTS cable with the longitudinal magnetic field effect
3. 学会等名 The 15th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Mawatari, Tenma Ueda, E. S. Otabe, Y. Higashi
2. 発表標題 Magnetic interference of the critical currents of crosstype Josephson junctions in oblique magnetic fields
3. 学会等名 The 15th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田天馬, 小田部荘司, 馬渡康徳
2. 発表標題 斜め磁場下での十字形ジョセフソン接合における電流分布
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 馬渡康徳, 上田天馬, 小田部荘司
2. 発表標題 ジョセフソン接合の磁気干渉における局所的電流注入の効果
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩崎慎也, 木下雄士, 小田部荘司, 中崎達也, 鈴木 恵友
2. 発表標題 超電導線材を用いた磁気浮上工具の性能向上に関する研究
3. 学会等名 2021年度(第74回)電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 有田拳, 上田天馬, 小田部荘司
2. 発表標題 超伝導体内の電界の時間変化を用いたリザーバーコンピューティングに関する研究
3. 学会等名 2021年度応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石井皓也, 岩崎慎也, 木下雄士, 小田部荘司, 中崎達也, 鈴木恵友
2. 発表標題 超伝導線材を用いた磁気浮上工具の性能向上に関する研究
3. 学会等名 2021年度応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田天馬, 小田部 荘司, 馬渡康徳
2. 発表標題 斜め磁場下の面状ジョセフソン接合における臨界電流の磁気干渉
3. 学会等名 第102回低温工学・超電導学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinya Iwasaki, Yushi Kinoshita, Edmund Soji Otabe, Tatsuya Nakasaki, Keisuke Suzuki
2. 発表標題 Study on performance improvement of superconductive-assisted machining (SUAM) with superconducting tapes
3. 学会等名 The 34th International Symposium on Superconductivity (ISS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuxuan Zhong, Edmund S Otabe, Tomoyuki Akasaka, Atsushi Ishihara, Masaru Tomita
2. 発表標題 Evaluation of Critical Current Characteristics with Contact Resistance and Angle of Superconducting Wire by using FEM
3. 学会等名 The 34th International Symposium on Superconductivity (ISS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名	Tomoyuki Akasaka, Atsushi Ishihara, Taiki Onji, Haruuni Yamamoto, Masaru Tomita, Yuxuan Zhong, Edmund Soji Otabe
2. 発表標題	Evaluation of the joint of superconducting tapes for railway feeder cable
3. 学会等名	The 34th International Symposium on Superconductivity (ISS2021) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Edmund Soji Otabe
2. 発表標題	Superconducting Technology for Applications --- A dream to connect every country ---
3. 学会等名	6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER, COMMUNICATION, CHEMICAL, MATERIALS AND ELECTRONIC ENGINEERING (IC4ME2-2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Ken Arita Edmund Soji Otabe, Tenma Ueda
2. 発表標題	Research on reservoir computing using time-varying electric fields in superconductors
3. 学会等名	The 3rd International Symposium on Neuromorphic AI Hardware (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	上田 天馬, 小田部 荘司, 馬渡 康德
2. 発表標題	平板状ジョセフソン接合の臨界電流における接合形状の効果
3. 学会等名	2022年応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名 米中 友浩, 小田部 荘司, 一木 悠人, 松下 照男, 木内 勝, 倪 宝栄, 胡 南南
2. 発表標題 磁界効果を用いた10kA級超電導直流ケーブルの設計
3. 学会等名 2020年度春季第99回 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 閻 洪, 小田部荘司, 川畑唯一, 米塚里奈, 松野哲也, 馬渡康徳
2. 発表標題 様々な磁界方向における超伝導線材中の3次元量子磁束構造のシミュレーション
3. 学会等名 2020年度(第73回)電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上田天馬, 木下雄士, 米中友浩, 一木悠人, 小田部荘司, 松下照男, 木内勝
2. 発表標題 縦磁界効果を用いた10kA級超伝導直流ケーブルの設計
3. 学会等名 2020年(令和2年度)応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川畑唯一, 閻洪, 小田部荘司, 松野哲也, 馬渡康徳
2. 発表標題 新たな陽的数値積分法を用いた2次元の超伝導体内の量子化磁束運動のシミュレーション
3. 学会等名 2020年(令和2年度)応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 閻 洪, 小田部 荘司, 川畑 唯一, 米塚 里奈, 馬渡 康德, 松野 哲也
2. 発表標題 様々な磁界方向における超電導線材中の3次元量子磁束構造のシミュレーション
3. 学会等名 2020年度秋季 第100回 低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hong Yan, Yuito Kawabata, Rina Yonezuka, Edmund Soji Otabe, Yasunori Mawatari, Tetsuya Matsuno
2. 発表標題 Simulation of three-dimensional quantized magnetic flux structure in superconducting wire in various magnetic field directions
3. 学会等名 The 33rd International Symposium on Superconductivity (ISS2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yushi Kinoshita, Tomohiro Yonenaka, Yuto Ichiki, Edmund Soji Otabe, Teruo Matsushita, Masaru Kiuchi
2. 発表標題 Design of 10 kA class superconducting DC cable using longitudinal magnetic field effect
3. 学会等名 The 33rd International Symposium on Superconductivity (ISS2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 閻 洪, 川畑 唯一, 小田部 荘司, 馬渡 康德, 松野 哲也
2. 発表標題 異方性を考慮した3次元量子磁束構造のシミュレーション
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上田 天馬, 川畑 唯一, 閻 洪, 小田部 荘司, 松野 哲也, 馬渡 康德
2. 発表標題 新たな陽的数値積分法を用いた2次元の超伝導体内の量子化磁束運動の可視化
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Rina Yonezuka, Yusei Hamada, Kazunori Kamiji, Edmund Soji Otabe, Yasunori Mawatari, Tetsuya Matsuno
2. 発表標題 TDGL Simulation of Critical Current Density introducing z axis Anisotropy z
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 YONEZUKA Rina, HAMADA Yusei, KAMIJI Kazunori, OTABE Soji, MAWATARI Yasunori, MATSUNO Tetsuya
2. 発表標題 Relationship Between z axis Anisotropy Strength z and Critical Current Density Jc Simulated by Using TDGL
3. 学会等名 10th ACASC/ 2nd Asian-ICMC/ CSSJ Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 米中 友浩, 小田部 荘司, 一木 悠人, 松下 照男, 木内 勝
2. 発表標題 縦磁界効果を用いた10kA級超伝導直流ケーブルの設計
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020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	倪 宝荣 (NI Borong) (10248536)	福岡工業大学・工学部・教授 (37112)	
研究 分担者	木内 勝 (KIUCHI Masaru) (90304758)	九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授 (17104)	

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			
中国	中国南方電網	上海超電導	中天科技	
ロシア連邦	All-Russian Sci. Res. Dev. Cable Inst.			