

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 25 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400367

研究課題名(和文) ナノ構造超伝導体における渦糸ダイナミクス

研究課題名(英文) Vortex dynamics in nano-structured superconductors

研究代表者

加藤 勝 (KATO, Masaru)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90204495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：ナノサイズの超伝導体中の渦糸格子の融解現象を、分子動力学法によって解析し、温度上昇とともに、渦糸の位置の広がりが急激に増加する温度領域があることを明らかにした。s波とd波の超伝導体の複合体において、半整数量子磁束の発生を阻害要因としての双晶境界が、半整数量子磁束の他に分数磁束を生み出すことを明らかにした。超伝導体/カイラル磁性体の2層構造において、磁束の分布が交互に磁束、半磁束が並ぶ構造が安定になることをしめした。ナノサイズの超伝導体の転移温度がサイズの減少とともに振動しながら増加することを、電子の離散的なエネルギー準位から説明し、不純物散乱によって、転移温度が段階的に減少することを示した。

研究成果の概要(英文)：Using the Molecular Dynamics method, vortex lattice melting in a nano-sized superconductor was studied. We found that the standard deviation of vortex positions for time average shows a sharp rising when temperature is increased. And this indicates melting of the vortex lattice. We found this melting temperature depends on number of vortices. Using the Ginzburg-Landau equations, we found that in a composite structure with d- and s-wave superconductors, the twin-boundary affects the spontaneous half-quantized magnetic flux and fractional magnetic fluxes appear ends of the twin-boundary. In a superconductor/chiral magnet double layer, magnetic flux and anti-magnetic flux appear alternatively. Increase of the transition temperature of nano-sized superconductor with decreasing the size, is explained by discrete energy level of confined superconducting electrons. And we show that using the Gor'kov equations, the impurity scattering causes stepwise decrease of the transition temperature.

研究分野：物性理論、特に超伝導理論

キーワード：渦糸ダイナミクス ナノ構造超伝導 ギンツブルグランダウ方程式 分子動力学法 半整数量子磁束
ゴルコフ方程式 有限要素法 カイラル磁性体

1. 研究開始当初の背景

超伝導体中の渦糸間の動力学の研究は、超伝導の応用において不可欠であり、古くから研究されて来ている。理論的に渦糸の動力学の研究は、渦糸が少数の場合には現象論であるギンツブルグランダウ方程式を用いたシミュレーションが行われているが、バルクの超伝導体中の渦糸運動は、非常に多くの渦糸を考えるため、主に**渦糸を質点として扱う分子動力学法**が行われてきた(文献1)。このとき、相互作用は渦糸まわりの超伝導電流によるローレンツ力が起源となる斥力である。

我々は、この古くから研究されて来た問題に対して、**渦糸運動に伴う熱の発生とその伝導**、および、速い渦糸の運動による**超伝導秩序変数の回復の遅れ**を取り入れ、この分子動力学法を拡張し、この分野の新しい局面を開拓してきている。さらに、渦糸の運動が速い場合に、渦糸が通過した場所で秩序変数が平衡値に緩和せず他の渦糸に引力が働くという**遅延効果**を取り入れたシミュレーションを開発中であった。

このような渦糸間の相互作用の研究は最近発展しており、Kopnin による渦糸が運動している時の**準粒子の寄与を取り入れた相互作用**や(文献2) 東工大・大熊グループの渦糸の動的格子の研究による**渦糸の運動に伴う渦糸まわりの秩序変数の緩和に伴う遅延的な渦糸間の相互作用**(文献3)(格子変形の遅延効果による電子間の引力相互作用に類似)Moshchalkov のグループの2バンドの超伝導体 MgB_2 における**渦糸間の相互作用が単純な反発力ではなく、近距離で反発力、長距離で引力**(文献4)という従来とは異なる相互作用が現れることが明らかになっている。さらに我々は、ナノ構造超伝導体において微視的な準粒子の効果を取り入れることで、渦糸間の相互作用が変化し、渦糸構造が現象論的な理論が预言するものとは異なることを明らかにし(文献5) 楢円座標と Mathieu 関数を用いた方法で、トリプレット超伝導体中の半整数渦糸の構造を調べた。(文献6)。

また、これまでにナノ構造の超伝導体に対して、有限サイズの超伝導ネットワーク中の磁束構造が得意な構造になることを調べ、総合報告にまとめた。(文献7)調銅酸化物高温超伝導体を代表とするd波超伝導体と従来のs波超伝導体を組み合わせると、半整数量子磁束が現れる現象を理論的に解析する方法を開発していた(文献8)。

さらに、以上の微視的理論に基づいた研究の過程で、ナノ構造の超伝導体では、転移温度が上昇すること現象を見出していた。

2. 研究の目的

このような最近の渦糸相互作用の発展と渦糸分子動力学法を合体させ、新しい渦糸ダイナミクスを構築し、従来型や新奇超

伝導体における渦糸ダイナミクスを解明すること、ナノ構造超伝導体でおきる渦糸構造を解明すること、さらにナノ構造超伝導体の転移温度の上昇を解明することを目的とした。

対象は以下の通りであった。

- (1) ナノ構造超伝導体中の渦糸の運動の分子動力学法による解析
ナノからメソサイズの銅酸化物高温超伝導体において、渦糸の格子の融解温度が磁場の大きさによって、振動することを、分子動力学法で解析する。
- (2) 超伝導体/カイラル磁性体二層構造における磁束構造
超伝導体と強磁性体との二層構造においては、強磁性体からの磁場が一様にかかり、自発的に渦糸が侵入するが、磁性体が強磁性体から磁気構造がヘリカル構造をとるカイラル磁性体の場合に、渦糸のピン留めによる超伝導体の臨界電流密度の上昇や、また特異な渦糸構造が期待される。
- (3) s波超伝導体とd波超伝導体を組み合わせた超伝導複合体における自発的磁束構造
半整数量子磁束が現れるこの組み合わせでは、実験においては、理論と反して、半整数量子磁束が現れにくい。これは、d波超伝導体として利用される銅酸化物超伝導体で特に YBCO の結晶では、多数の双晶境界が存在し、半整数量子磁束の発生を妨げていると思われる。このような、双晶境界がある場合の半整数量子磁束の発生の有無を調べる。
- (4) ナノサイズの超伝導体の転移温度上昇現象
これまでに、微視的な理論を用いて渦糸構造を調べてきたが、超伝導転移温度が上昇することを見出した。この現象を微視的な理論を用いて、その機構を探る。

3. 研究の方法

- (1) ナノ構造超伝導体中の渦糸の運動の分子動力学法による解析
これまで開発した分子動力学法による渦糸のシミュレーション法によって、ナノサイズの超伝導体に閉じ込められた渦糸の運動を低温から高温まで調べ、渦糸の数を変化させて、融解温度が変化することを調べる。
- (2) 超伝導体/カイラル磁性体二層構造における磁束構造
ヘリカルな磁場が印加される超伝導体の渦糸状態を、ギンツブルグランダウ方程式を有限要素法を用いて数値的に解く。
- (3) s波超伝導体とd波超伝導体を組み合わせた超伝導複合体における自発的磁束構造
超伝導のs波成分とd波成分を取り入れ

たギンツブルグランダウ方程式にd波超伝導体の双晶構造の変化を、超伝導電子の有効質量の異方性として取り入れそれを、有限要素法を用いて解く。

- (4) ナノサイズの超伝導体の転移温度上昇現象

超伝導の微視的理論であるゴルコフ方程式を、ナノサイズの超伝導体に適用し、超伝導転移温度を、超伝導秩序変数の空間変化を取り入れながら求める。さらに、不純物の効果をゴルコフ方程式に取り入れて、この転移温度上昇がどのように不純物によって影響を受けるかを調べる。

4. 研究成果

- (1) ナノ構造超伝導体中の渦系の運動の分子動力学法による解析

正方形の超伝導体に周期的境界条件を課した場合に、渦系の運動の様子を調べ、渦系の位置の時間平均の標準偏差をもとめ、融解温度を決定した。図1に示すように、渦系の位置の広がりは急激に大きくなり、融解温度が有限系でも特定できること、さらに融解温度が渦系の数に依存することを明らかにした。

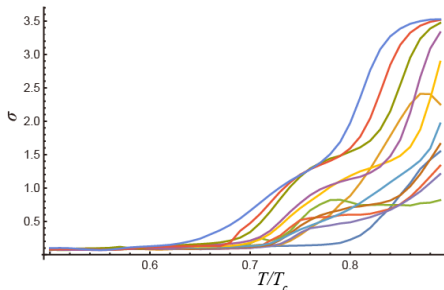


図1.3 3×3 の正方形の超伝導板中の渦系の位置の広がりの温度変化。

- (2) 超伝導体/カイラル磁性体二層構造における磁束構造

2次元の超伝導体にカイラル磁性体の磁場が垂直に印加された場合に、磁束構造を求めた。特に磁束と半磁束が交互に現れる構造が安定になることを示した。

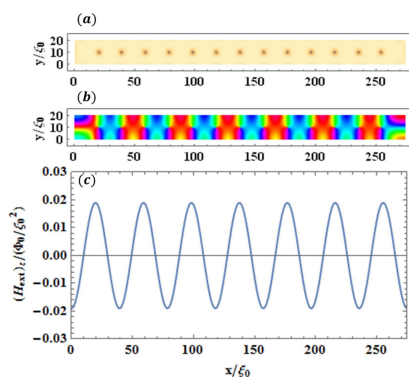


図2. ヘリカルな磁場が印加された2次元超伝導体中の磁束構造。渦系、半渦系が交互に現れている。

また、傾斜した磁場下では、磁束が引き伸ばされた形状になることを明らかにした。

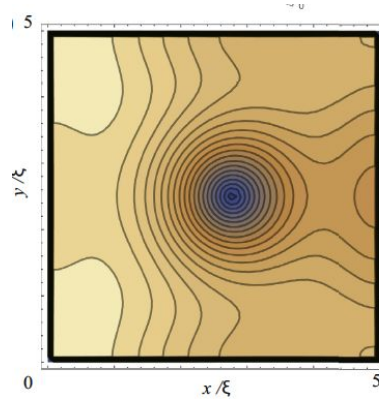


図3 傾斜した磁場下での渦系の構造。

- (3) s波超伝導体とd波超伝導体を組み合わせた超伝導複合体における自発的磁束構造

双晶境界を左下角に入れた正方形の超伝導複合体における半整数磁束は、d波超伝導体の辺と双晶境界の交わる2点で分数磁束を生み出すことを明らかにした。しかし、半整数磁束の発生を双晶境界だけで見出すことはないことを示した。

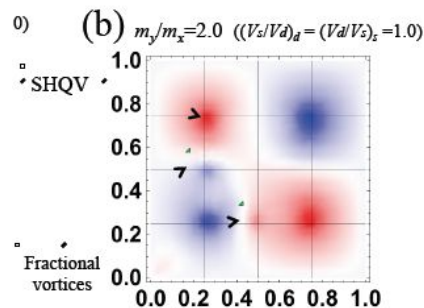


図4 s波とd波超伝導体を組み合わせた超伝導複合体に双晶境界を入れた場合の磁束分布。

- (4) ナノサイズの超伝導体の転移温度上昇

超伝導体の転移温度ゴルコフ方程式を用いて計算した。図5のように、超伝導体のサイズを小さくしていくと超伝導転移温度が振動しながら上昇することをしめした。その原因は、超伝導に関わる電子状態がサイズの減少とともに離散的に少なくなり、電子状態の数が減少すると、転移温度が下がり、電子状態の数が一定の時は、サイズの減少とともに転移温度が上昇することにあることを明らかにした。また、不純物の効果を、超伝導を形成する準粒子の散乱時間の形で取り入れることで、転移温度の計算に取り入れ、不純物散乱の効果は、転移温度を段階的に下げていく、ということを見出した。(図6)

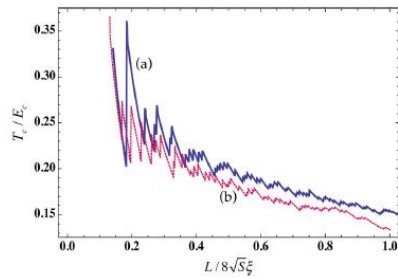


図 5. 正方形板と長方形板の超伝導転移温度のサイズ依存性。

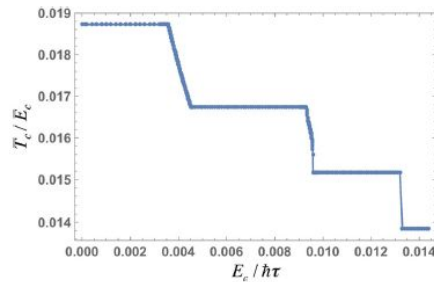


図 6. 正方形超伝導板の転移温度の不純物による散乱時間依存性。

<引用文献>

1. Reichardt, et al. Phys. Rev. B 81, 100506(R) (2010).
2. Kopnin, Rep. Prog. Phys. 65, 1633 (2002).
3. S. Okuma et al. Phys. Rev. B 83, 064520 (2011).
4. Moshchalkov et al. Phys. Rev. Lett. 102, 117001 (2009).
5. H. Suematsu, et al., J. Phys. Soc. Jpn., 79 (2010) 124704.
6. Y. Niwa, M. Kato, J. Phys. Soc. Jpn., 82 (2013) 034720.
7. M. Kato, O. Sato, Supercond. Sci. Technol., 26 033001(1-26) (2013).
8. M. Kato, T. Ishida, T. Koyama, M. Machida, "Superconductors - Materials, Properties and Applications", A. Gabovich ed. InTech (Croatia), 319-342 (2012).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 13件)

- (1) M. Kato, H. Kitago, Molecular Dynamics Simulation on Vortex Lattice Melting in Meso-scopic Superconductors, J. Phys. Conf. Ser., 査読有, in press.
- (2) S. Fukui, M. Kato, Y. Togawa, Vortex states in a superconductor under a helical magnetic field, J. Phys. Conf. Ser., 807 (2017) 052010(1-6),

DOI:10.1088/1742-6596/807/5/052010

- (3) N. Fujita, M. Kato, T. Ishida, Fractional vortices in a nano-scaled superconducting composite structure (d-dot) with a twin boundary. J. Phys. Conf. Ser., 807 (2017) 052014(1-6), DOI:10.1088/1742-6596/807/5/052014
- (4) S. Fukui, M. Kato, Y. Togawa, Effects of chiral helimagnets on vortex states in a superconductor, Supercond. Sci. Technol. 29, 査読有, (2016) 125008(1-8), DOI:10.1088/0953-2048/29/12/125008
- (5) M. Umeda, M. Kato. Size, Shape, and Impurity Effects on Transition Temperatures of Nanostructured Superconductors, IEEE Trans. Appl. Supercond. 査読有, 26 (2016) 8600104 (1-4), DOI:10.1109/TASC.2016.2548480
- (6) M. Kato, S. Fukui, O. Sato, Y. Togawa, Magnetic flux distributions in chiral helimagnet/superconductor bilayers, Physica C, 査読有, 533 (2017) 137-143, DOI: 10.1016/j.physc.2016.06.004
- (7) S. Fukui, M. Kato, Y. Togawa, Dependence of vortex states in superconductors on a chiral helimagnet and an applied magnetic field, Physica C, 査読有, 530 (2016) 51-54, DOI:10.1016/j.physc.2016.05.020
- (8) M. Kashiwagi, M. Kato, Odd-frequency Spin-triplet Superconductivity in Nano-sized Superconductors under a Magnetic Field: Effects of Phonons, Physics Procedia, 査読有, 81 (2016) 29-32, DOI:10.106/j.phypro.2016.04.103
- (9) N. Fujita, M. Kato, T. Ishida, Twin boundary effects on spontaneous half-quantized vortices in superconducting composite structures (d-dot's), Physica C, 査読有, 518, 44-46 (2015), DOI:10.1016/j.physc.2015.04.002
- (10) S. Fukui, M. Kato, Y. Togawa, Vortex Structure in Chiral Helimagnet /Superconductor Bilayer Structure, Physics Procedia, 査読有, 65, 85-88 (2015), DOI: 10.1016/j.phppro.2015.05.133
- (11) M. Kato, O. Sato, Extended Molecular Dynamics Methods for Vortex Dynamics in Nano-structured Superconductors, Physics Procedia, 査読有, 65, 81-84 (2015), DOI: 10.1016/j.phppro.2015.05.130
- (12) M. Kashiwagi, M. Kato, Spatial Dependence of Odd-frequency Spin-triplet Superconducting Order Parameter in Nano-sized s-wave Superconductors Under a Magnetic Field, Physics Procedia, 査読有, 65, 33-36 (2015), DOI: 10.1016/j.phppro.2015.05.105
- (13) M. Kato, and Y. Niwa Magnetic Flux Structures in Nano-Sized Multiband Superconductors, JPS Conference

〔学会発表〕(計 116 件)

- (1) N. Fujita, M. Kato, T. Ishida Shape dependence of occurrence conditions of spontaneous half-quantized vortices in d-dot, APS March Meeting, 2017 年 3 月 13-20 日, New Orleans (USA).
- (2) M. Umeda, M. Kato, O. Sato, Size, Shape and Impurity Effects on Superconducting critical temperature, APS March Meeting, 2017 年 3 月 13-20 日, New Orleans (USA).
- (3) M. Kato, M. Umeda, M. Kashiwagi, Numerical method for transition temperature and vortex states in nano-sized superconductors using the Eliashberg equation and the finite element method. (Invited), The 10th International Conference on Computational Physics January, 2017 年 1 月 16-20 日, Macao (China).
- (4) M. Umeda, M. Kato, O. Sato, Impurity effects on critical temperatures of nano-structured superconductors; Size and shape dependence, The 29th International Symposium on Superconductivity December, 2016 年 12 月 13-15 日, 東京国際フォーラム (東京都・千代田区).
- (5) N. Fujita, M. Kato, T. Ishida, Shape dependence of effects of twin boundaries on half-quantized vortices in d-dot, The 29th International Symposium on Superconductivity, 2016 年 12 月 13-15 日, 東京国際フォーラム (東京都・千代田区).
- (6) S. Fukui, M. Kato, Y. Togawa, Magnetic field dependence of most stable vortex states in the chiral helimagnet / superconductor bilayer system, The 29th International Symposium on Superconductivity December, 2016 年 12 月 13-15 日, 東京国際フォーラム (東京都・千代田区).
- (7) M. Kato, H. Kitago, Molecular Dynamics Simulation on Vortex Lattice Melting in Meso-scopc Superconductors, The 29th International Symposium on Superconductivity December, 2016 年 12 月 13-15 日, 東京国際フォーラム (東京都・千代田区).
- (8) O. Sato, M. Kato, A variety of vortex state solutions of Ginzburg-Landau equation on superconducting mesoscopic plates, The 29th International Symposium on Superconductivity December, 2016 年 12 月 13-15 日, 東京国際フォーラム (東京都・千代田区).
- (9) M. Umeda, M. Kato, Size dependences of impurity effects on critical temperatures and electronic structures of nano-structured superconductors, Spectroscopies in Novel Superconductors 2016 年 6 月 19-24 日, Stuttgart/Ludwigsburg (Germany).
- (10) N. Fujita, M. Kato, T. Ishida, Effects of twin boundary on stable and metastable states in nano-scaled superconducting composite structure (d-dot), Spectroscopies in Novel Superconductors 2016 年 6 月 19-24 日, Stuttgart/Ludwigsburg (Germany).
- (11) M. Kato, H. Kitago, Molecular Dynamics Simulation on Melting Transition of Vortex Matters. (Invited), 3rd. TOYOTA RIKEN International Workshop "Dynamics of Electron Vortex and Spin Vortex" 2016 年 6 月 1-3 日トヨタ産業技術記念館 (愛知県名古屋市)
- (12) N. Fujita, M. Kato, T. Ishida, Theoretical Study of Effects of Twin Boundary and Metastable States on Nano-scaled Superconducting Composite Structure (d-dot), International Conference on Strongly Correlated Electron Systems, 2016 年 5 月 8-13 日, Hangzhou (China).
- (13) S. Fukui, M. Kato, Y. Togawa, Vortex states in a superconductor under a helical magnetic field, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems, 2016 年 5 月 8-13 日, Hangzhou (China).
- (14) M. Kato, N. Yoneshima, O. Sato, Vortex Avalanches in Complex Structured Superconductors: A Numerical Study, The 28th International Symposium on Superconductivity (ISS2015), 2015 年 11 月 16-18 日, タワーホール船堀 (江戸川区・東京都).
- (15) O. Sato, M. Kato, Vortex States of Mesoscopic Plate in Gradient Magnetic Field, The 28th International Symposium on Superconductivity (ISS2015), 2015 年 11 月 16-18 日, タワーホール船堀 (江戸川区・東京都).
- (16) M. Umeda, M. Kato, O. Sato, Impurity Effects On Nano-Structured Superconductor, 2015 年 11 月 16-18 日, タワーホール船堀 (江戸川区・東京都).
- (17) S. Fukui, M. Kato, Y. Togawa, The Dependence of the Vortex State in the Superconductor on the Chiral Helimagnet and the Applied Magnetic Field, 2015 年 11 月 16-18 日, タワーホール船堀 (江戸川区・東京都).
- (18) N. Fujita, M. Kato, T. Ishida, Twin Boundary Effects on Spontaneous Half-quantized Vortices in Superconducting Composite Structures (d-dot's) II, 2015 年 11 月 16-18 日, タワーホール船堀 (江戸川区・東京都).
- (19) M. Kato, S. Fukui, O. Sato, Y. Togawa, Magnetic Flux Distributions in Chiral Helimagnet / Superconductor Bilayer Structures, 9th International Conference in

- School Format on Vortex Matter in Nanostructured Superconductors, 2015年9月12-15日, Rhodes (Greece).
- (20) M. Kato, O. Sato, Molecular Dynamics Method for Vortex Dynamics: Heat Generation and Quasi-particle recombination (Invited), 12th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2015), 2015年9月6-10日, Lyon (France).
- (21) N. Fujita, M. Kato, T. Ishida, Effects of Twin Boundary on Spontaneous Half-quantized Vortices in Superconducting Composite Structures (d-dot's), 12th European Conference on Applied Superconductivity, 2015年9月6-10日, Lyon (France).
- (22) M. Umeda, M. Kato, O. Sato, Impurity Effects on Transition Temperatures of Nano-Structured Superconductors, 12th European Conference on Applied Superconductivity, 2015年9月6-10日, Lyon (France).
- (23) M. Kato, and O. Sato, Effects of Heat Transport and Quasi-Particle Recombination on Dynamics of Vortices in Superconductors, American Physical Society March Meeting 2015, 2015年3月2-6日, San Antonio (USA).
- (24) M. Kato, and O. Sato, Modified molecular-dynamics method for vortex dynamics in nano-structured superconductors, The 9th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors, 2014年11月30日-12月3日, 京都大学 (京都府京都市).
- (25) N. Fujita, M. Kato, and T. Ishida, Twin Boundary Effects on Spontaneous Half-quantized Vortices in Superconducting Composite Structures (d-dot's) The 9th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors, 2014年11月30日-12月3日, 京都大学 (京都府京都市).
- (26) M. Umeda, M. Kato, and O. Sato, The Origin of Rise of Transition Temperature of Nano-structured Superconductors The 9th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors, 2014年11月30日-12月3日, 京都大学 (京都府京都市).
- (27) S. Fukui, M. Kato, and Y. Togawa, Vortex Structure in Chiral Helimagnet/Superconductor Bilayer Structure The 9th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors, 2014年11月30日-12月3日, 京都大学 (京都府京都市).
- (28) M. Kato, and O. Sato, Extended Molecular Methods for Vortex Dynamics in Nano-structured Superconductors, The 27th International Superconductivity Symposium (ISS2014), 2014年11月25-27日, タワーホール船堀 (江戸川区・東京都).
- (29) M. Umeda, and M. Kato, The Origin of Rise of Transition Temperature of Nano-structured Superconductors, The 27th International Superconductivity Symposium (ISS2014), 2014年11月25-27日, タワーホール船堀 (江戸川区・東京都).
- (30) S. Fukui, M. Kato, and Y. Togawa, Vortex Structure in Chiral Helimagnet/Superconductor Bilayer Structure, The 27th International Superconductivity Symposium (ISS2014), 2014年11月25-27日, タワーホール船堀 (江戸川区・東京都).
- (31) O. Sato, and M. Kato, Solutions of Vinzburg-Landau Equations for Three-dimensional Superconducting Networks in a Magnetic Field, The 27th International Superconductivity Symposium (ISS2014), 2014年11月25-27日, タワーホール船堀 (江戸川区・東京都).
- (32) N. Fujita, M. Kato, and T. Ishida, Twin Boundary Effects on Spontaneous Half-quantized Vortices in Superconducting Composite Structures (d-dot's), The 27th International Superconductivity Symposium (ISS2014), 2014年11月25-27日, タワーホール船堀 (江戸川区・東京都).
- 〔図書〕(計 1 件)
加藤勝 他全 4 3 名、裳華房、超伝導磁束状態の物理、2017、220-226
- 〔その他〕
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
加藤 勝 (KATO, Masaru)
大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：90204495
- (2) 研究分担者
佐藤 修 (SATO, Osamu)
大阪府立大学工業高等専門学校・総合工学システム科・准教授
研究者番号：60290764
- (4) 研究協力者
福井 暁文 (FUKUI, Saoto)
梅田 政樹 (UMEDA, Masaki)
藤田 憲生 (FUJITA, Norio)