

平成21年 6月12日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18540335

研究課題名（和文）

ナノ構造における電子系量子凝縮相の微視的理論に基づく研究

研究課題名（英文）

Microscopic studies of electronic quantum condensed state in nano-structures

研究代表者

林 正彦 (HAYASHI MASAHIKO)

秋田大学・教育文化学部・准教授

研究者番号：60301040

研究成果の概要：

本研究は、電子を主体とする量子凝縮相のナノ構造における物性の解明を目指して、(1) 高温超伝導体に見られる超伝導2次元層の積層構造 (2) NbSe₃ 等のリング状微小結晶の電荷密度波秩序 (3) グラフェン等炭素系化合物と超伝導体の接合系に関して、微視的理論に基づく研究を展開し、新奇現象に関する知見を得た。また、走査型 SQUID 顕微鏡の画像解析技術についても研究を行い、新規技術の開発に成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
%##) 年度	1,200,000	0	1,200,000
%##* 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	660,000	4,060,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：トポロジカル結晶, 高温超伝導, 走査型 SQUID 顕微鏡, 位相欠陥, 多重ジョセフソン接合

1. 研究開始当初の背景

近年微細加工技術の進歩により可能になってきたサブミクロン～ナノ・メートルのスケールの構造体（ナノ構造体）に閉じこめられた電子系の量子凝縮相（超伝導や電荷密度波状態）が実現可能となった。電子の凝縮状態を記述する理論的な枠組みとしては、従来から Ginzburg-Landau (GL) 理論が知られている。しかしながら、この理論の基本的な仮

定は秩序変数の空間変化の特徴的なスケール（コヒーレンス長）が、系の大きさよりも十分小さく、さらに電子の非弾性散乱長（すなわち緩和長）よりも十分に長いことであった。ナノ構造体においては、ほとんどの場合、コヒーレンス長はもはや系の大きさよりも大きくなってしまふ。また、微小な系では非弾性散乱長も大きくできるため、緩和による電子系の平均化の効果も小さい。すなわち、電子の微視的・量子的

な効果が秩序変数のダイナミクスに効いてくるという、GL 理論の枠を超えた状況が実現している。このような、新しい状況を記述できる枠組み作りは理論に課された課題であった。また、SQUID 顕微鏡などナノスケールの系における実験的観測技術の進歩も従来技術では限界に来ており、何らかの工夫が求められていた。

2. 研究の目的

本課題の目的は、

(1) ナノ構造体の量子凝縮相を微視的な理論に基づいて取り扱うための理論的な枠組みを整備すること

(2) ナノスケールの系における SQUID 顕微鏡等観測技術の進歩への理論的な貢献が可能であるか検討することである。

(1) では、現在新規な理論的枠組みが求められている課題を選んだ。具体的には、①高温超伝導体における固有ジョセフソン接合のダイナミクス（特に、非線形効果が顕著であり数値的な手法を発展させる必要がある）② NbSe₃ などのリング結晶における電荷密度波秩序（準粒子などの非平衡分布が問題になる）③グラフェンと超伝導接合における近接効果（バンド構造による新奇な現象が期待できる）に関する研究を企画した。

(2) では、実験的な要請もあり、走査型 SQUID 顕微鏡における観測像の数値的手法に基づく高解像度化を目的として設定した。

3. 研究の方法

(1) の目的達成のために種々の理論、および数値シミュレーションの手法を用いた。①の解析は、主に非線形の GL 方程式を、非線形効果の出現に注意しつつ数値的に解くことによって行った。その際に、微視的理論との関係に注目し、固有ジョセフソン接合の層間結合の効果について注意を払った。また、数値的な計算にはワークステーションを用いた。②の解析は、GL 方程式および微視的理論に基づいて行った。特に、非平衡効果による準粒子のダイナミクスを取り入れる新しい枠組みの構築に注意を払った。③は、特にグラフェンの新奇なバンド構造に注意しつつ、微視的理論にもとづき研究を行った。

(2) の目的達成のためには、統計力学的な基礎理論を応用した数値的な画像処理の枠組みを構築し、ワークステーションを用いた数値的な計算によって研究を進めた。

4. 研究成果

(1) 多重ジョセフソン接合系のダイナミクスの数値シミュレーションに基づく研究

高温超伝導体に見られるような多重ジョセフソン接合系に関して、その各接合の位相差の時間発展を記述する微分方程式を数値的に解く事によって、定電流下および電流を変化させた場合などにおける発生電圧の振る舞いを明らかにした。特に、非線形方程式に特有のブリーザー・モードという解が、電圧の発生および超伝導状態から抵抗状態への遷移において重要な役割を果たしている事を見出し、日本物理学会および論文として発表した。

(2) リング状微小結晶の位相欠陥の分布および電荷密度波特性に関する研究

NbSe₃ 等のリング状のトポロジカル結晶における位相欠陥の分布を、線形弾性論の範囲内で考察し、リングの周長と厚さの関係によって、いくつかの位相欠陥分布の状態が可能である事を明らかにした。それによると、1 ミクロン以上の周長の結晶の場合、（数ナノ・メートルといった極端に薄い結晶を除き）位相欠陥はほぼ一様に分布する事が分かった。また、周長が1 ミクロン以下になると位相欠陥が動径方向の弾性的結合を壊してしまうような状況も実現する事が分かった。これらの結果は論文として発表した。

さらに、微視的な理論に基づき準粒子の非平衡分布を考慮した時間に依存する GL 方程式を導出し、滑り伝導下における電荷密度波のダイナミクスの数値シミュレーションを行った。

(3) グラフェン・超伝導接合系の理論的解析

グラフェンは近年新しい物性研究の対象として注目されているが、本研究では超伝導との接合系について、特に準粒子による近接効果の特性に着目して研究を行った。具体的には超伝導体の間に単層または多層のグラフェンを挟んで接合系を作ったときに、超伝導電極間に流れる超伝導電流の大きさを温度および接合間距離の関数として計算した。なお、計算には電子のミクロな自由度を記述できる温度グリーン関数法を用いた。その結果、単層の場合には近接効果の特性は常伝導金属の場合と定性的に変わらないが、2層系の場合には準粒子の干渉効果による振動が現れることが分かった。

(4) 走査型 SQUID 顕微鏡 (SSM) の画像解析

SSM の画像の高解像度化を目指して、画像処理の応用による解像度改善の可能性について研究を行った。本研究では、数値的なシ

ミュレーションを用いて、我々が従来から提案している方法の有効性を検証した。さらに、観測領域の周辺に磁場がゼロでない領域が存在する画像に逆変換を施すと、画像全体においてノイズが増強されてしまうという現象を確認した。この現象を克服するため画像境界で画素の不連続が出来ないように補外を行った後、逆変換を行う方法を開発した。これらの結果は日本物理学会において発表した。

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 14 件)

(1) “An Analysis to Improve Spatial Resolution of Scanning Superconducting Quantum Interference Device Microscope”, Masahiko Hayashi, Tohru Kaiwa, Hironichi Ebisawa, Yoshiaki Matsushima, Makoto Shimizu, Kazuo Satoh, Tsutomu Yotsuya, Takekazu Ishida,

Journal of the Korean Physical Society, 54 (2009) 303-307. 査読あり

(2) “Nonlinear dynamics and resistive transition in intrinsic Josephson Junctions”,

Motonari Suzuki, Masahiko Hayashi, Hironichi Ebisawa,

Journal of Physics and Chemistry of Solids 69 (2008) 3253-3256. 査読あり

(3) “Electronic properties of nano-structured anisotropic superconductors”, Masaru Kato, Tomio Koyama, Masahiko Machida, Masahiko Hayashi, Hironichi Ebisawa, Takekazu Ishida,

Journal of Physics and Chemistry of Solids 69 (2008) 3286-3288. 査読あり

(4) “Novel anisotropic superconductivity in nano-structured superconductors”,

Masaru Kato, Tomio Koyama, Masahiko Machida, Masahiko Hayashi, Hironichi Ebisawa, Takekazu Ishida,

Physica B 403 (2008) 996-998. 査読あり

(5) “Domain-wall structure of a classical Heisenberg ferromagnet on a Möbius strip”, Masanao Yoneya and Kazuhiro Kuboki and Masahiko Hayashi,

PHYSICAL REVIEW B 78, 064419 (2008). 査読あり

(6) “Superconducting proximity effect through graphene and graphite films”, Masahiko Hayashi, Hideo Yoshioka and Akinobu Kanda,

Journal of Physics: Conference Series 109 (2008) 012014. 査読あり

(7) “On mathematical methods to improve imaging of vortices using scanning superconducting quantum interferometer device (SQUID) microscope”,

Masahiko Hayashi, Tohru Kaiwa, Hironichi Ebisawa, Yoshiaki Matsushima, Makoto Shimizu, Kazuo Satoh, Tsutomu Yotsuya, Takekazu Ishida,

Physica C 468 (2008) 801-804. 査読あり

(8) “Periodic flux jump in superconducting Pb networks as consequence of the extended Little-Parks effect”,

T. Ishida, Y. Matsushima, M. Shimizu, M. Hayashi, H. Ebisawa, O. Sato, M. Kato, T. Koyama, M. Machida, K. Satoh, T. Yotsuya, Physica C 468 (2008) 576-580. 査読あり

(9) “Vortex dynamics in asymmetric superconducting networks”,

M. Kato, O. Sato, M. Hayashi, H. Ebisawa, T. Koyama, M. Machida, T. Ishida,

Physica C 468 (2008) 1249-1253. 査読あり

(10) “Vortex (particle) and antivortex (hole) doping”,

T. Ishida, M. Shimizu, Y. Matsushima, M. Hayashi, H. Ebisawa, O. Sato, M. Kato, K. Satoh, T. Yotsuya,

Physica C 460-462 (2007) 1226-1227. 査読あり

(11) “Nonlinear dynamics of intrinsic Josephson junctions under an applied current”,

M. Hayashi, M. Suzuki, J. Onuki, H. Ebisawa,

Physica C 463-465 (2007) 993-996. 査読あり

(12) “Mixed state of charge-density waves in ring-shaped single crystals”,

M. Hayashi, H. Ebisawa and K. Kuboki, PHYSICAL REVIEW B 76, 014303 (2007). 査読あり

(13) “Phase transition in superconducting network systems”,

M. Hayashi, H. Ebisawa,

Physica C 437-438 (2006) 93-95. 査読あり

(14) “Geometrically frustrated crystals: Elastic theory and dislocations”,

M. Hayashi, H. Ebisawa and K. Kuboki, Europhys. Lett., 76 (2006) 264-270. 査読あり

[学会発表] (計 16 件)

(1) 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25)
August 6-13, 2008 (RAI Convention Center,

Amsterdam, Netherlands)

M. Hayashi, H. Yoshioka, and A. Kanda

“Theory of Superconducting Proximity Effect in Graphite Films” (poster, PB-Tu97)

(2)同上, M. Hayashi, H. Ebisawa, M. Kato

“Numerical Studies on Fluctuations in Superconducting Nanostructures” (poster, PB-Tu132)

(3)American Physical Society, March Meeting, March 10-14, 2008 (New Orleans, Louisiana, USA)

M. Hayashi, H. Yoshioka, and A. Kanda

“Superconducting Proximity Effect in Graphite Films” (oral)

(4) “An Analysis to Improve Spatial Resolution of Scanning Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) Microscope”,

Masahiko Hayashi, Toru Kaiwa, Hiromichi Ebisawa, Yoshiaki Matsushima, Makoto Shimizu, Kazuo Satoh, Tsutomu Yotsuya and Takekazu Ishida,

The 10th Asia Pacific Physics Conference (APPC10), 2007年8月21日, POSTEC (Pohang, Korea)

(5) “Nonlinear effect of Intrinsic Josephson Junctions”,

Motonari Suzuki, Masahiko Hayashi, Hiromichi Ebisawa,

Spectroscopies of Novel Superconductors (SNS2007), 2007年8月23日, 国際センター(仙台)

(6) “On Mathematical Methods to Improve Imaging of Vortices using Scanning Superconducting Interferometer Device (SQUID) Microscope”,

Hiromichi Ebisawa, Masahiko Hayashi, Tohru Kaiwa, Yoshiaki Matsushima, Makoto Shimizu, Kazuo Satoh, Tsutomu Yotsuya, and Takekazu Ishida,

Joint ESF and JSPS Conference on Vortex Matter in Nanostructured Superconductors (VORTEX V), 2007年9月13日, Rhodes, Greece

(7) “Fluctuation and vortex physics in superconducting nanostructures”,

M. Hayashi and H. Ebisawa,

The 4th CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity: Critical Current (NVLS2007-CC), 2007年12月17日, 北九州国際会議場(北九州市小倉北区)

(8) Possibility of high resolution vortex imaging by scanning SQUID microscope”,

M. Hayashi, H. Ebisawa,

Nanoscale Superconductivity and Magnetism (NSM2006), 2006年7月6日,

Leuven, Belgium

(9) “SQUID顕微鏡におけるノイズと空間分解能に関する解析”, 海和徹、林正彦、海老澤丕道, 日本物理学会 2007年春季大会, 2007年3月18日, 鹿児島大学(鹿児島市)

(10) “NbSe₃, TaS₃などのリング結晶の結晶構造と電荷密度波秩序”, 林正彦、海老澤丕道、久保木一浩, 日本物理学会 2007年春季大会, 2007年3月18日, 鹿児島大学(鹿児島市)

(11) “固有ジョセフソン接合系におけるゆらぎと非線形効果”, 鈴木基也、林正彦、海老澤丕道, 日本物理学会 2007年春季大会, 2007年3月20日, 鹿児島大学(鹿児島市)

(12) “固有ジョセフソン接合系におけるゆらぎと抵抗転移”, 鈴木基也、林正彦、海老澤丕道, 日本物理学会第62回年次大会, 2007年9月21日, 北海道大学(札幌市)

(13) “SQUID顕微鏡におけるノイズと空間分解能に関する解析II”, 海和徹、林正彦、海老澤丕道、松島吉明、清水真、佐藤和郎、四谷任、石田武和, 日本物理学会第62回年次大会, 2007年9月21日, 北海道大学(札幌市)

(14) “SQUID顕微鏡におけるノイズ評価と画像修復”, 林正彦、海老澤丕道、清水真、安部泰司、松島吉明、佐藤和郎、四谷任、石田武和, 日本物理学会 2006年秋季大会, 2006年9月23日, 千葉大学(千葉市)

(15) “SQUID顕微鏡の画像解析について”, 林正彦、海老澤丕道、清水真、安部泰司、松島吉明、石田武和、佐藤和郎、四谷任. 第14回渦糸物理国内会議, 2006年12月18日, 登別(北海道)

(16) “ナノサイズの異方的超伝導体”, 加藤勝、小山富男、町田昌彦、林正彦、海老澤丕道、石田武和, 第14回渦糸物理国内会議, 2006年12月19日, 登別(北海道)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 正彦 (HAYASHI MASAHIKO)

秋田大学・教育文化学部・准教授

研究者番号: 60301040

(2) 研究分担者

海老澤 丕道 (EBISAWA HIROMICHI)

東北大学・教養教育院・総長特命教授

研究者番号: 90005439

瀧澤 剛 (TAKIZAWA TAKERU)

東北大学・大学院情報科学研究科・技術補佐員

研究者番号: 80361161