

「マルチスケール・マルチフィジックス現象の統合シミュレーション」
平成 18 年度採択研究代表者

町田 昌彦

(独) 日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター
シミュレーション技術開発室室長研究主幹

超伝導新奇応用のための
マルチスケール・マルチフィジックスシミュレーションの基盤構築

1. 研究実施の概要

超伝導とは、20 世紀初めに発見された、人類がこれまでに目にしてきた最も劇的な量子現象の一つである。その産業応用への高い潜在的可能性は誰もが認めるところであるが、超伝導研究開発分野では現在、その基礎から応用まで解決すべき課題を抱えており、その積極的産業利用は未だ十分ではない。本研究実施者らは、それらの課題を解決し、未来の超伝導社会を切り拓くため、シミュレーションをツールとして、マイクロ・メゾ・マクロの異なる 3 つのスケール（あるいは必要に応じてそれらを統合し）で代表的課題を見定め、地球シミュレータクラスの超並列計算機を利用して課題解決の糸口を探ることとした。尚、本研究課題は平成 18 年度 10 月より各スケールでの研究に実績を有する 5 大学・2 研究機関の体制にて研究を開始し、平成 19 年度はそれらを整理統合し、4 大学・2 研究機関とした。20 年度の成果としては、まず、マイクロレベルの研究において、密度行列繰り込み群 (DMRG) 法と呼ばれる高精度な量子状態計算手法の準 2 次元化と共に動的 DMRG 法を開発した。また、閉じ込められた三角光学格子上的フェルミ原子系の量子状態を詳細に研究し、三角格子スピンモデルに特徴的な磁化プラトーと類似な現象が観測できることを明らかにした。今後は京速計算機利用を目標として更なる超大規模並列化（高速化を含む）を進めていく。更に、ボーズ凝縮した超流動体で起こることが期待されている異常トンネル効果や高温超伝導体及びフェルミ原子ガスにおいて共通に現れる擬ギャップの問題に取り組んだ。メゾレベルの研究については、高温超伝導体が固有に持つジョセフソン効果の量子効果を調べた他、電磁波発振特性を調べるため、ジョセフソン素子と環境の両方を同時にシミュレーションするコードを開発した。このコードについては、今後、京速計算機利用を目標に超並列化を進めていく。更に、グラフェンの超伝導近接効果、ナノ超伝導体の特異な性質についてのシミュレーション研究を行った。マクロレベルの研究については、時間依存ギンツブルク・ランダウ方程式のシミュレーションコードの高度化を進め、磁束ダイナミクスの研究において未解決の基礎物性（ホール効果、磁束格子ダイナミクス等）

の解明を目指して研究を行った。今後は超伝導輸送特性を支配する磁束量子ピン止めダイナミクスの研究を本格化させる。最後に、20年1月に鉄系化合物超伝導体が発見されたことを受け、その電子構造、超伝導対称性、磁束構造、ジョセフソン効果等についての理論研究についても推し進めたことを付記する。

2. 研究実施内容(文中にある参照番号は4.(1)に対応する)

超伝導とは、20世紀初めに発見された、人類がこれまでに目にしてきた最も劇的な量子現象の一つであり、その産業応用への高い潜在的可能性は誰もが認めるところである。しかしながら、其の発見以後、100年あまりも経過したにもかかわらず、その積極的産業利用は未だ十分に行われていない。これは超伝導機構や其の現象の理解が未だに進んでいない(例えば、高温超伝導体の高温超伝導発現機構については、未だ解決されていない問題が残る。また、ジョセフソン効果という最も基本的な現象においても、未だに解明されていない部分がある)ためであり、その性質を利用することで得られる圧倒的利便性が未だに理解されていないからである。本研究実施担当者らはこうした状況を打破すべく、様々な課題をシミュレーションにより解決することを目指して、マイクロ・メゾ・マクロの異なる3つのスケールで代表的課題を定め(問題に応じてはそれらの異なるスケールを統合して)、地球シミュレータクラスの超並列計算機を用いて大規模並列シミュレーションすることにより課題解決の糸口を探ることとした。尚、本研究課題は平成18年度10月より5大学・2研究機関の体制にて始動したが、19年度は一部改編して4大学・2研究機関とした。

20年度の具体的研究成果としては、まずマイクロレベルで、原子力機構・町田グループが19年度より進めてきた密度行列繰り込み群(DMRG)法と呼ばれる高精度な量子状態の計算手法の準2次元化を更に推し進め、動的DMRG法及び時間発展DMRG法の超並列化版を開発した。今後、高温超伝導機構研究等に広く用いられているハバード・モデルやハイゼンベルク・モデル、 t - J モデル等の代表的モデルの超並列シミュレーションを実現させ、原子ガスで実現する超流動[1.2]や高温で実現する超伝導[1.8]についての理解へ向けシミュレーション研究を進めた。その結果、光学格子上で反発しあう原子のガスが中央部でモット絶縁層と呼ばれるコア状態を作る場合、そのコア部分はハイゼンベルク・モデルと同等の振る舞いをする[1.1]一方、スピン状態の異なる粒子分布にインバランスを与えることで、磁場中のハイゼンベルク・モデルと共通の振る舞いが得られることを示した[1.1]。この結果は、光学格子上の原子ガスを用いることで相互作用するスピンモデルが示す未解決な問題にアプローチできることを示している。実際、同グループの奥村らは三角格子ハバード・モデルにおいて、磁場中の三角格子ハイゼンベルクモデルにおいて特徴的な磁化プラトー状態と同等の状態を見出した。また、20年度より、超伝導体の電子構造計算(即ち、バンド計算)にも着手し、20年1月に発表された鉄系高温超伝導体の電子構造において、従来のクーロン相互作用の補正を負とすることで、実験で観測される磁気モーメントを再現できることを明らかにしている[1.11]。更に、この計算結果を受け単純化したモデルに基づき、地球シミュレータ上で厳密対角化法を用いた超並列計算を行った結果、軌道間の相互作用が軌道内の相互作用を超えるようなケースにおいて、強い超伝導ペアが形成

されることを発見している。これが鉄系超伝導の発現機構に直接、関係するかどうかについては今後の研究を待たねばならないが、強い超伝導を実現するための新しいタイプの機構を発見したと位置づけられる。

慶応大・大橋グループは、光学格子中のフェルミ原子ガス超流動について研究を進め、超流動揺らぎ、電荷、スピン揺らぎの競合をコンシステントに扱いつつBCS-BECクロスオーバー全域で超流動転移温度を決定した[4.1]。この成果は、この分野の実験家にとって貴重な情報になると考えられる。また、ポーズ凝縮した超流動体で起こることが期待されている異常トンネル効果や高温超伝導体及びフェルミ原子ガスにおいて共通に現れる擬ギャップの問題にも着手し、原子ガスの強結合超流動に対する理解を深めた。

産総研・柳澤グループは、2次元ハバード・モデルに対し、量子モンテカルロ等の手法を適用し、コストリッツ・サウレス型の超伝導転移の可能性を探索した。今後は量子モンテカルロ対角化手法の超並列化を進める。

メゾレベルでの研究においては、原子力機構グループの町田らは、固有ジョセフソン効果において発熱の影響を調べ、発熱が新たな接合間結合を与えることを見出し、発振現象における AC ジョセフソン効果に対し、その新たな結合が同期効果をもたらす可能性があることを見出した[1.7]。この結果は即ち、発熱効果により、固有ジョセフソン接合の各接合同士が同期し、強い発振現象を示すことに他ならない。今後、この成果を発展させ、詳細に発熱の効果を精査する必要があるだろう[1.7]。同グループの林らは東大・加藤研究室と協力し、鉄系超伝導体の超伝導対称性のモデルを構築し、複数の(一見すると)相反するような実験結果を統一的に説明することに成功している[1.12]。また、東大・物性研の長谷川研究室が行った実験結果の解析に協力し、磁束コア周辺での状態密度の分布等を説明することに成功している[1.13]。この鉄系超伝導体に対して同グループの太田らはジョセフソン効果を解析し、複数の特異な振る舞いを見出している。

東北大・小山グループは、松本らが高温超伝導体固有ジョセフソン接合のシミュレーションを高度化し、3次元空間で基盤及びデバイスを含むシミュレーションを実現し、実験結果をほぼ再現できることを確認した[3.1, 3.3, 3.6, 3.7, 3.9, 3.10]。今後はこのシミュレーションを超並列化し、デバイス設計をシミュレーションにて行うべく研究開発を更に加速させる。

産総研・柳澤グループは、川畑らが高温超伝導体の固有ジョセフソン接合を始めとして様々なジョセフソン接合の量子効果についての理論研究を深化させた[6.9, 6.10, 6.11]。今後は、量子コンピューティングへ向けた理論研究[6.15]を加速させる。

秋田大・林グループは、グラフェンやナノチューブ等のナノ構造体の超伝導近接効果について、実験グループと密接な協力の下、理論及びシミュレーション研究を行い、メゾ系特有の現象解明を進めた[2.1, 2.2, 2.3]。

大阪府立大・加藤グループは、ナノ超伝導体の超伝導電子構造の特徴を明らかにするため、独自開発の有限要素法によるシミュレーションを適用し、転移温度のサイズ依存性や磁束構造のスペクトル等を明らかにした[5.1, 5.9]。また、d-ドットをデバイス化するためのシミュレーションを高度化し、半磁束を初めとして様々な電磁応答の様子を明らかにした[5.2, 5.6, 5.10]。

マクロスケールレベルでの超伝導体の電流輸送特性の研究では、原子力機構・町田グループ

の中井らが19年度に開発した時間依存のギンツブルク・ランダウ方程式の2次元シミュレーションコードを用い、磁束ピン止めによるホール効果の逆転現象を説明することに成功した。この現象は超伝導現象の研究分野において長らく未解決な問題として残っていたが、本シミュレーションの結果はその謎を鮮やかに解決した。また、格子フロー状態の変化を時間依存のギンツブルク・ランダウ方程式を基に初めて再現することに成功した。さらに、複数のバンドが関与する可能性のある鉄系化合物超伝導体の磁束ピン止め効果についても研究を進め、その特異な性質の一端を解明しつつある。これについては21年度も研究を継続し、体系化することを目指す。一方、本プロジェクトの重要テーマである磁束ピン止めの超並列シミュレーションコード開発に際しては、類似方程式である非線形シュレディンガー方程式の超大規模シミュレーションコード開発をほぼ完了し、量子渦糸乱流の解明を目指して地球シミュレータ上で大規模シミュレーションを行った。結果のまとめについては21年度に実施する。更に、ピン止めの3次元シミュレーションを実現させ、マルチスケールコード開発を目指す。

3. 研究実施体制

(1)「原子力機構・町田」グループ

①研究分担グループ長:町田 昌彦(日本原子力研究開発機構、室長(研究主幹))

②研究項目

(1)ミクロ(超伝導発現機構):

- 1)フェルミ原子ガスを通して見る室温超伝導の姿
- 2)2次元強相関電子系への超並列シミュレーションによるアプローチ

(2)メゾ(デバイス):

- 1)高温超伝導体・固有ジョセフソン接合
- 2)各種超伝導体を幾何学的に配置することで得られる新奇デバイス機能
- 3)超伝導放射線検出

(3)マクロ(線材):

- 1)磁束量子と複合欠陥とのマルチスケール・シミュレーション:

(2)「秋田大・林」グループ

①研究分担グループ長:林 正彦(東北大学大学院、准教授)

②研究項目

- ・微小超伝導系の電気伝導特性に関する理論解析とマルチスケールの理論構築
- ・ネットワーク及び層状ジョセフソン接合系における磁化特性と渦糸のダイナミクスに関する理論解析

(3)「東北大・小山」グループ

①研究分担グループ長:小山 富男(東北大学、助教)

②研究項目

- ・磁束ピン止めマルチスケール・シミュレーションの基礎理論構築

・固有ジョセフソン接合の量子論的位相ダイナミクス

(4)「慶応大・大橋」グループ

①研究分担グループ長:大橋 洋士(慶應義塾大学、准教授)

②研究項目

- ◎BCS-BEC クロスオーバー理論の超流動転移温度以下への拡張
- ◎BCS-BEC クロスオーバーにおける超流動粒子数・凝縮粒子数の研究
- ◎光学格子中におけるフェルミ、ボーズ原子ガス超流動を扱う理論の構築の着手
- ◎Bogoliubov mode の異常トンネル効果

(5)「大阪府立大・加藤」グループ

①研究分担グループ長:加藤 勝(大阪府立大学大学院、准教授)

②研究項目

- (1)ラチェット効果を調べるため、サブミクロンサイズの超伝導ネットワークにおける渦糸の運動を有限要素法を用いて現象論的 Ginzburg-Landau 方程式を解き、シミュレーションを行う。
- (2)d-dot と呼ぶ複数の種類の超伝導体を組み合わせた超伝導複合体における磁束運動の制御を、2成分の Ginzburg-Landau 方程式を有限要素法を用いて数値的に解き調べ、新しい論理回路の提案を行う。
- (3)異方的ナノサイズの超伝導体の超伝導対称性の形状依存性やエネルギーギャップ内の準粒子構造を微視的な Bogoliubov-deGennes 方程式を数値的に解くことで研究する。
- (4)微小な超伝導板において生じる巨大磁束に関して、そのまわりの準粒子構造を微視的な Bogoliubov-de Gennes 方程式を数値的に解くことで調べ、走査型トンネル分光の実験で観測できる可能性を示す。
- (5)現象論的な Ginzburg-Landau 方程式を数値的に解いて得られた超伝導ネットワークにおける磁束構造を、超伝導ネットワークを作成し、SQUID 顕微鏡で磁束を測定することで実証する。

(6)「産総研・柳澤」グループ

①研究分担グループ長:柳澤 孝(産業技術総合研究所、研究グループ長)

②研究項目

1. 2次元強相関係の超並列シミュレーションによる研究
2. 高温超伝導体固有ジョセフソン接合の研究

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

「原子力機構・町田」グループ」

1.1. M. Machida, M. Okumura, S. Yamada, T. Deguchi, Y. Ohashi, and H. Matsumoto, Phys.

- Rev. B **78**, 235117 (2008).
- 1.2. M. Machida, S. Yamada, M. Okumura, Y. Ohashi, and H. Matsumoto, "Stripe Formation in Repulsive 4-leg Hubbard Ladder: Directly-extended DMRG Studies", *Physica C* **468**, 1141 (2008).
 - 1.3. M. Machida, T. Kano, S. Yamada, M. Okumura, T. Imamura, and T. Koyama, "Quantum Synchronization Effects in Intrinsic Josephson Junctions", *Physica C* **468**, 689 (2008).
 - 1.4. M. Machida, S. Yamada, T. Kano, M. Okumura, T. Imamura, and T. Koyama, "Quantum Effects on Capacitively-coupled Intrinsic Josephson Junctions", *J. Phys. Chem. Solids* **69**, 3221 (2008).
 - 1.5. M. Machida, T. Kano, T. Koyama, M. Kato and T. Ishida, "Numerical Simulation for Non-equilibrium Superconducting Dynamics at the Transition Edge: Simulation for MgB2 Neutron Detector", *J. Low Temp. Phys.* 151 (2008) 58-63.
 - 1.6. M. Machida, T. Kano, T. Koyama, M. Kato and T. Ishida, "Numerical Experiments for Heat Diffusion and Related Non-equilibrium Superconducting Dynamics on MgB2 Neutron Detector", *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, **A600** (2009) 210-212.
 - 1.7. M. Machida, T. Koyama, and H. Matsumoto, "Synchronization Effects in Intrinsic Josephson Junctions by Non-equilibrium Heating", *J. Phys., Conf. Ser.* 129, 012027(2008).
 - 1.8. M. Machida, M. Okumura, and S. Yamada, "Stripe Formation in Fermionic Atoms on 2-D Optical Lattice: DMRG Studies for n -Leg Repulsive Hubbard Ladder", *J. Supercond. Novel Mag.* (accepted).
 - 1.9. S. Yamada, M. Machida, T. Kano, T. Imamura, and T. Koyama, "On-site Pairing interaction and Quantum Coherence in Strongly Correlated Systems", *Journal of Physics and Chemistry in Solids*, **69**, 3395-3397 (2008).
 - 1.10. S. Yamada, M. Okumura, M. Machida, Y. Ohashi, and H. Matsumoto, "Vortex Core Structure in Strongly-Correlated Superfluidity", *Physica C*, **468**, 1237-1240 (2008).
 - 1.11. H. Nakamura, N. Hayashi, N. Nakai, and M. Machida, "First-Principle Electronic Structure Calculations For Iron-Based Superconductors: An LSDA+U Study", *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** (2008) Suppl. C, 153.
 - 1.12. Y. Nagai and N. Hayashi, "Kramer-Pesch approximation for analyzing field-angle-resolved measurements made in unconventional superconductors: A calculation of the zero-energy density of states", *Phys. Rev. Lett.* **101**, 097001 (2008).
 - 1.13. T. Nishio, T. An, A. Nomura, K. Miyachi, T. Eguchi, H. Sakata, S. Lin, N. Hayashi, N. Nakai, M. Machida, and Y. Hasegawa, "Superconducting Pb island nanostructures studied by scanning tunneling microscopy and spectroscopy", *Phys. Rev. Lett.* **101**, 167001 (2008).
 - 1.14. Y. Nagai, N. Hayashi, N. Nakai, H. Nakamura, M. Okumura, and M. Machida, "Nuclear magnetic relaxation and superfluid density in Fe-pnictide superconductors: An anisotropic $\pm s$ -wave scenario", *New J. Phys.* **10**, 103026 (2008).
 - 1.15. N. Hayashi, C. Iniotakis, M. Machida, and M. Sigrist, "Josephson effect between conventional and Rashba superconductors", *Physica C* **468**, 844-847 (2008).

- 1.16.N. Hayashi, C. Iniotakis, M. Machida, and M. Sigrist, "Josephson effect between conventional and non-centrosymmetric superconductors", J. Phys. Chem. Solids **69**, 3225-3227 (2008).
- 1.17.K. Kobayashi, M. Mine, M. Okumura, and Y. Yamanaka, "Quantum field theoretical analysis on unstable behavior of Bose-Einstein condensates in optical lattices", Ann. Phys. **323**, 1247 (2008).
- 1.18.M. Okumura, S. Yamada, N. Taniguchi, and M. Machida, "Hole localization in doped one-dimensional Anderson-Hubbard Model", Phys. Rev. Lett. **101**, 016407 (2008).
- 1.19.M. Okumura, S. Yamada, and M. Machida, "DMRG Studies for 1-D Random Hubbard Chain Close to the Half-Filling", J. Phys. Chem. Solids **69**, 3324 (2008).
- 1.20.M. Okumura, S. Yamada, and M. Machida, "Hole localization in strongly-correlated and disordered systems: DMRG studies for 1-D and n-leg ladder random Hubbard models", Physica C **468**, 1241 (2008).
- 1.21.N. Nakai, N. Hayashi, and M. Machida, "Ginzburg-Landau simulation for a vortex around a columnar defect in a superconducting film", J. Phys. Chem. Solids **69**, 3301 (2008).
- 1.22.N. Nakai, N. Hayashi, and M. Machida, "Simulation studies for the vortex depinning dynamics around a columnar defect in superconductors", Physica C **468**, 1270 (2008).
- 1.23.M. Okumura, N. Nakai, H. Nakamura, N. Hayashi, S. Yamada, M. Machida, "Exact Diagonalization Studies on Two-Band Minimal Model for Iron-Based Superconductors", Physica C (accepted).
- 1.24.N. Nakai, N. Hayashi, and M. Machida, "Simulation study for the orientation of the driven vortex lattice in an amorphous superconductor," Physica C (accepted).
- 1.25.Y. Tanuma, N. Hayashi, Y. Tanaka, and A. A. Golubov, "Model for vortex-core tunneling spectroscopy of chiral p -wave superconductors via odd-frequency pairing states", Phys. Rev. Lett. **102**, 117003 (2009).

「秋田大・林」グループ

- 2.1. M. Yoneya, K. Kuboki and M. Hayashi, "Domain-wall structure of a classical Heisenberg ferromagnet on a Moebius strip", Physical Review B, 78 (2008) 064419.
- 2.2. Masahiko Hayashi, Hideo Yoshioka and Akinobu Kanda, "Superconducting proximity effect through graphene and graphite films ", Journal of Physics: Conference Series 109 (2008) 012014.
- 2.3. Motonari Suzuki, Masahiko Hayashi, Hiromichi Ebisawa, "Nonlinear dynamics and resistive transition in intrinsic Josephson junctions", Journal of Physics and Chemistry of Solids 69 (2008) 3253–3256.

「東北大・小山」グループ

- 3.1. H. Matsumoto, T. Koyama and M. Machida, "Electromagnetic Waves in Single- and Multi-Josephson Junctions", *Physica C* 468 (2008) 654-659.
- 3.2. T. Koyama and M. Machida, "Macroscopic Quantum Tunneling in a Stack of Capacitively-coupled Intrinsic Josephson Junctions", *Physica C* 468 (2008) 695-700.
- 3.3. H. Matsumoto, T. Koyama, M. Machida and M. Tachiki, "Theory of THz Emission from the Intrinsic Josephson Junctions" *Physica C* 468 (2008) 1899-1902.
- 3.5. T. Koyama and M. Machida "Macroscopic Quantum Effects in Intrinsic Josephson Junction Stacks", *Physica C* 468 (2008) 1913-1915.
- 3.6. T. Koyama, H. Matsumoto and M. Machida, "Emission of Terahertz Electromagnetic Wave in Intrinsic Josephson Junction Stacks", *J.Phys. Conference Series* 129 (2008) 012026/1-5.
- 3.7. H. Matsumoto, T. Koyama and M. Machida, "Numerical Simulations of THz Emission from Intrinsic Josephsons", *J.Phys. Conference Series* 129 (2008) 012028/1-4.
- 3.8. T. Koyama and M. Machida, "Effects of Capacitive Coupling on the Escape Rate in Intrinsic Josephson Junction Stacks", *J. Phys. Chem. Solid*, 69 (2008) 3232-3235.
- 3.9. M. Tachiki, S. Fukuya and T. Koyama, "Mechanism of Terahertz Electromagnetic Wave Emission from Intrinsic Josephson Junctions", *Phys. Rev. Lett.* 102 (2009) 127002.
- 3.10. T. Koyama, H. Matsumoto, M. Machida and K. Kadowaki, "In-phase electrodynamics and terahertz wave emission in extended intrinsic Josephson junctions", to be published in *Phys. Rev. B*.

「慶応大・大橋」グループ

- 4.1. H. Tamaki, K. Miyake and Y. Ohashi, "BCS-BEC crossover and effects of density fluctuations in a two-component Fermi gas described by the three-dimensional Hubbard model." *Phys. Rev. A.* **77** (2008) 063616(1-9).
- 4.2. S. Tsuchiya and Y. Ohashi, "Anomalous enhancement of quasiparticle current near a potential barrier in a Bose-Einstein condensate." *Phys. Rev. A* **78**, (2008) 013628(1-4).
- 4.3. Y. Ohashi and S. Tsuchiya, "Supercurrent behavior of low-energy Bogoliubov phonons and the anomalous tunneling effect in a Bose-Einstein condensate." *Phys. Rev. A* **78** (2008) 043601(1-10).
- 4.4. Y. Ohashi, "Tunneling properties of a bound pair of Fermi atoms in an optical lattice." *Phys. Rev. A* **78** (2008) 063617(1-9).
- 4.5. Y. Ohashi, "Molecular wavefunction and tunneling properties of a bound pair of Fermi atoms in an optical lattice." *J. Phys.: Conference Series*, in press.
- 4.6. S. Tsuchiya and Y. Ohashi, "Enhanced quasi-particle current of Bogoliubov phonons in a Bose-Einstein condensate." *J. Phys.:Conference Series*, in press.

「大阪府立大・加藤」グループ

- 5.1. Masaru Kato, Tomio Koyama, Masahiko Machida, Takekazu Ishida, "Novel anisotropic superconductivity in nano-structured superconductors", *Physica B* 403, (2008) 996-998.
- 5.2. M. Kato, O. Sato, M. Hayashi, H. Ebisawa, T. Koyama, M. Machida, T. Ishida, "Vortex dynamics in asymmetric superconducting networks", *Physica C* 468, (2008) 1249-1253.
- 5.3. O. Sato, M. Kato, "Phase transition and magnetization of superconducting networks in a magnetic field", *Physica C* 468, (2008)1333-1335.
- 5.4. Takekazu Ishida, Yoshiaki Matsushima, Makoto Shimizu, Masahiko Hayashi, Hiromichi Ebisawa, Osamu Sato, Masaru Kato, Tomio Koyama, Masahiko Machida, Kazuo Satoh, Tsutomu Yotsuya, "Periodic flux jump in superconducting Pb networks as consequence of the extended Little–Parks effect", *Physica C* 468, (2008) 576-580.
- 5.5. Osamu Sato, Masaru Kato, "A study of superconducting transition of network models of multiply connected superconductors", *Physica C* 468, (2008) 730-732.
- 5.6. S. Nakajima, M. Kato, M. Machida, T. Koyama, T. Ishida, F. Nori, "Time-dependent Ginzburg–Landau numerical simulation of logic gates using superconducting composite structure d-dots", *Physica C* 468, (2008) 1910-1912.
- 5.7. Y. Fujita, K. Arai, M. Nishikawa, K. Satoh, T. Yotsuya, H. Shimakage, S. Miki, Z. Wang, M. Machida, M. Kato, T. Ishida, "Nonequilibrium response of a meandered MgB2 sensor by the irradiation of a pulsed laser", *Physica C: Superconductivity*, 468, (2008) 1995-1997
- 5.8. Masaru Kato, Tomio Koyama, Masahiko Machida, Masahiko Hayashi, Hiromichi Ebisawa, Takekazu Ishida, "Electronic properties of nano-structured anisotropic superconductors", *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 69 (2008) 3286-3288
- 5.9. Hisataka Suematsu, Masaru Kato, Masahiko Machida, Tomio Koyama, Takekazu Ishida, "Novel structures in nanoscopic d-wave superconductors without external field", *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 69, (2008) 3385-3387.
- 5.10. Susumu Nakajima, Masaru Kato, Tomio Koyama, Masahiko Machida, Takekazu Ishida, F. Nori, "Simulation of logic gate using d-dot's", *Physica C: Superconductivity*, 468, (2008) 769-772

「産総研・柳澤」グループ

- 6.1. Takashi Yanagisawa, Mitake Miyazaki, Kunihiro Yamaji, "Incommensurate Antiferromagnetism coexisting with Superconductivity in the Two-Dimensional d-p Model", *Journal of the Physical Society of Japan* 78 (2009) 013706.
- 6.2. H. Kashiwaya, T. Matsumoto, H. Shibata, S. Kashiwaya, H. Eisaki, Y. Yoshida, S. Kawabata, and Y. Tanaka, "Switching Dynamics of BiSrCaCuO Intrinsic Josephson Junctions: Macroscopic Quantum Tunneling and Heat Effect", *Journal of the Physical Society of Japan* 77 (2008) 104708.
- 6.3. Y. Tanaka, D. Dhondiram, S. Parasharam, M. Shirage, K. Miyazawa, T. Yanagisawa, H. Kito and A. Iyo, "Magnetic Tunneling of Carrier Through Antiferromagnetic Domain",

- Journal of the Physical Society of Japan 77 (2008) 095002.
- 6.4. Takashi Yanagisawa, "Physics of the Hubbard Model and High-Temperature Superconductivity", Journal of Physics: Conference Series 108 (2008) 012010.
 - 6.5. K. Yamaji, T. Yanagisawa, M. Mitake, R. Kadono, "t'- and t"-dependence of the bulk-limit superconducting condensation energy of the 2D Hubbard Model", Physica C468 (2008) 1125.
 - 6.6. I. Hase and T. Yanagisawa, "Valence Skip Behavior in BaBiO₃ and TlS", Physica C 468 (2008) 1159.
 - 6.7. Takashi Yanagisawa, "Phase Diagram of the Three-Band Hubbard Model", Physica C 468 (2008) 1159.
 - 6.8. I. Hase and T. Yanagisawa, "Electronic States of Valence Skipping Compounds", Journal of Physics: Conference Series 108 (2008) 012011.
 - 6.9. S. Kawabata, Y. Asano, Y. Tanaka, S. Kashiwaya, and A. A. Golubov, "Cooper pair transport and macroscopic quantum dynamics in Josephson junctions through ferromagnetic insulators", Physica C 468 (2008) 701.
 - 6.10. H. Kashiwawa, T. Matsumoto, S. Kashiwaya, H. Shibata, H. Eisaki, Y. Yoshida, S. Kawabata, and Y. Tanaka, "Possible observation of energy level quantization in an intrinsic Josephson junction", Physica C 468 (2008) 1919.
 - 6.11. S. Kawabata, T. Kato, F. Lombardi, and T. Bauch, "Theory of two-dimensional macroscopic quantum tunneling in a Josephson junction coupled with an LC circuit", Journal of Physics: Conference Series, in press (200).
 - 6.12. I. Hase and T. Yanagisawa, "Electronic structure of LaFeOX and AFe₂X₂", Physica C, in press (2009).
 - 6.13. K. Yamaji, T. Yanagisawa, M. Miyazaki and R. Kadono, "System-Parameter Dependence of the Metallic Phase of Non-Doped 2D Hubbard Model", Physica C, in press (2009).
 - 6.14. T. Yanagisawa and I. Hase, "Superconductivity as a Kosterlitz-Thouless transition in the two-dimensional Hubbard model", Physica C, in press (2009).
 - 6.15. 川畑史朗, "量子コンピュータの基礎と最新研究動向", 自動車技術 Vol.62、No.5(2008)93.
 - 6.16. M. Miyazaki, K. Yamaji, T. Yanagisawa, R. Kadono, "Checkerboard States in the Two-Dimensional Hubbard Model with the Bi₂212-Type Band", Journal Physical Society of Japan 78 (2009).

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 0 件 (CREST 研究期間累積件数 : 0 件)