

「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多く抱えており、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するため、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研究機関としたが、21年度、大学機関を1つ追加し、5大学・2研究機関にて研究を行った。

21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超並列化と、その発展版である時間発展 DMRG 及び動的 DMRG コードを整備し、光学格子上のフェルミ原子ガスの非平衡状態の研究に着手した。今後は京速計算機利用を目標とし、非平衡量子状態のダイナミクスに対し、唯一適用可能な計算手法としての優位性を確立すべく、更なる超大規模並列化(高速化を含む)を進めていく。また、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計算を発展させ、系統的な計算結果を発表した。メゾレベルの研究においては、高温超伝導体からの電磁波発振特性をシミュレーションするコードを改良し、超並列化も進め、発振機構解明に至る糸口を見出した他、量子ダイナミクスにおいて、量子トンネル確率の増強効果など、応用上、重要な知見を得ることに成功した。また、最近、発見さ

れた鉄系超伝導体のジョセフソン効果を調べ、複数の新しい理論的知見を得ることに成功している。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継続させた。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を高度化させ、複数の超伝導ギャップが存在する超伝導体の磁束ダイナミクスの研究において、異なるギャップ値間の比と臨界電流値の関係を明らかにし、高い臨界電流値を得るために必要な微視的条件についての考察を行った。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研究を本格化させる。

## § 2. 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((独)日本原子力研究開発機構、室長(研究主幹))

② 研究項目

(1)マイクロ(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における擬ギャップ現象
- ・光学格子中のフェルミ原子ガスにおける新奇な秩序状態
- ・鉄系超伝導における交流ジョセフソン効果

(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)「大阪府立大・林」グループ

① 研究分担グループ長:林 伸彦(大阪府立大学、講師)

② 研究項目

- ・アンコンベンショナル超伝導体でのクーパー対称性および磁束・界面状態に関する研究

(7)「産総研・柳澤」グループ

① 研究分担グループ長:柳澤 孝((独)産業技術総合研究所、研究グループ長)

② 研究項目

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

### § 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(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、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進んでいない。これは超伝導発現機構や其の現象自体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、ジョセフソン効果や量子化磁束の運動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って解決することを目指し、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し、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、21年度は更に1つのグループを追加し、5 大学・2研究機関とした。

21年度の具体的研究成果としては、まずマイクロレベルで、原子力機構の山田・奥村らが 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計算手法の準2次元超並列版と動的 DMRG 法及び時間発展 DMRG 法の超並列化版を基に、光学格子上のフェルミ原子ガスの研究を展開した。特に、時間発展 DMRG 法を用いて、強相関非平衡系という、その他の手法では全くアプローチ不可能な系の計算に挑戦した。得られた非平衡緩和に対する粒子間の相互作用依存性[1.21]は興味深く、解析を進めている。

20 年度より、超伝導体の電子構造計算(第一原理計算)にも着手してきたが、21 年度は原子力機構・中村らが、鉄系高温超伝導体の圧力効果[1.5]、ペロブスカイト構造を持つ新たな物質群の特徴的電子構造[1.18]、そして、超伝導特性の結晶軸異方性を様々な鉄系高温超伝導体にて系統的に調べ[1.4]、ペロブスカイト構造を持つ物質群は固有ジョセフソン接合として、十分な機能を有していることを明らかにした[1.4]。もし、単結晶が育成されれば、デバイスとしての可能性が拡がり、応用への道が開ける。

慶応大・大橋グループは、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 20 年度に着手したが、21 年度、土屋らはその研究を大いに進展させた。まず、BCS-BEC クロスオーバー領域における強結合効果を転移温度以上で調べ、状態密度や 1 粒子スペクトル強度(図 1)への超流動揺らぎの影響をBCS-BEC クロスオーバー全域で解明することに成功した[4.4,4.5,4.6,4.7]。具体的には、物理量に擬ギャップ現象が現われる温度(擬ギャップ温度)を決定(図 2)し、状態密度から得られる擬ギャップ温度( $T^*$ )とスペクトル強度から得られる擬ギャップ温度( $T^{**}$ )が大きく異なることを明らかにした。この研究[4.4]における図 1は Physical Review A 誌の Kaleidoscope に選ばれている。

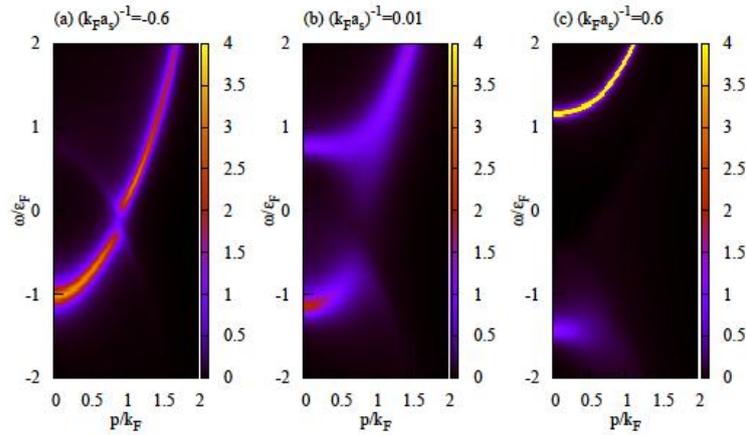


図1:BCS-BEC クロスオーバー領域における1粒子スペクトル強度の振る舞い[4.4]

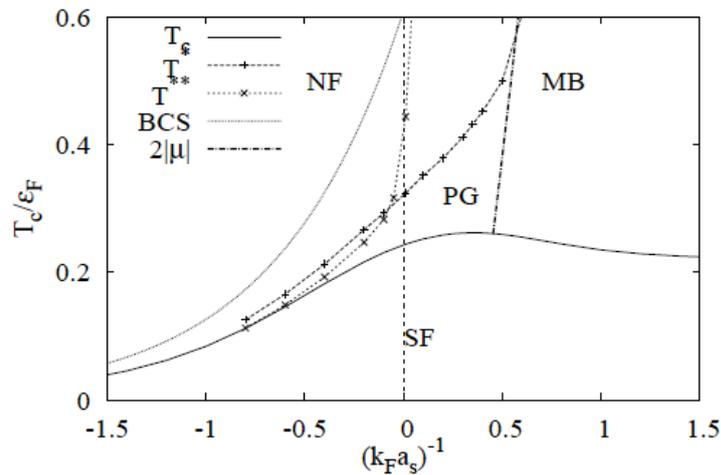


図2:フェルミ原子ガス相図における擬ギャップ領域(図中 PG)[4.4,4.5,4.6,4.7]

更に、光学格子中のフェルミ原子ガスにおいて、秩序パラメータがd波対称性を有するスピン密度波が存在する可能性を見出した[4.1]一方、近年発見された鉄系超伝導で有望視されている±s波超伝導を判定する方法として、交流ジョセフソン効果におけるリーデル異常を利用する方法を提案[4.2,4.8]し、ボソン超流動における異常トンネル効果における準粒子流の役割[4.3]の解明も行った。

産総研・柳澤グループは、川畑らが強磁性絶縁体を介したジョセフソン効果の研究を行い、LBCO などの強磁性酸化物において、 $\pi$ 接合が出現することを見出した[7.1, 7.3]。更に、強磁性絶縁体の膜厚を一層毎に変化させると 0 接合と $\pi$ 接合が交互に現れることを明らかにしている[7.5]。また、固有ジョセフソン接合における強結合効果についての解析を行い、実験で観測された異常な量子トンネル確率の増大の起源を明らかにした[7.2, 7.4]。また、柳澤らは高温超伝導体においてチェッカーボード状態が安定になることを、変分モンテカルロ法により示し、Bi 系にお

ける実験結果を説明できること示した[7.6]。鉄系超伝導体に対しては、同位体効果の理論式を提案し、実際に (Ba,K)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> における実験結果を説明できることを示した[7.8, 7.9]他、3バンドモデルを提案した[7.10]。更に、量子モンテカルロ法により、二次元ハバードモデルにおいて超伝導的コスタリッツ-サウレス転移が存在しうることを示し[7.11]、二次元ハバードモデルに超伝導相が存在することを明らかにした。

メゾレベルでの研究においては、原子力機構グループ・太田らは、鉄系超伝導体と通常の金属超伝導体を張り合わせて作るジョセフソン接合の理論[1.10]を構築し、二つの固有モード(一つはジョセフソンプラズマに相当し、既知のモードだが、もう一つは、この系に特有のジョセフソン・レグットモードと命名した)が存在することを示した[1.10]。また、多結晶体の臨界電流値の評価[1.9]、更に、ジョセフソン磁束サイズの異常な拡大などの効果[1.23]を次々と明らかにした。

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た。このシミュレーションにより試料表面近傍の電磁励起機構が解明された[3.1, 3.3, 3.4, 3.6, 3.7]ため、この結果を用いて、高効率の発振デバイスの設計が可能になることが期待できる。また、このシミュレーションの超並列化も実施し、今後は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。

秋田大・林グループは、グラフェンと超伝導体とのナノスケールの接合における電気伝導特性について、理論的解析を行い、単層および二層のグラフェンにおける超伝導近接効果の温度・接合距離依存性について明らかにした。特に、二層のグラフェンを介した近接効果では、臨界電流が温度および接合間距離に関して振動的な振る舞いを示す干渉効果の存在を明らかにした[2.2]。

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]。

大阪府立大・林グループは超伝導体に磁場を印加し、その印加方向を回転させた時の物理量の変動から、超伝導発現機構に関係した異方的クーパー対についての情報を得られるという仮説を立て、その理論解析を行った[6.1, 6.3]。特に、従来のドップラーシフト(DS)法とクラマー・ペッシュ近似的(KPA)法と比較し、後者(KPA)が前者(DS)の手法に対して、一般により小さな変動の振幅を与え、より実験値に近い結果を与えることを明らかにした。また、鉄系超伝導体のクーパー対の対称性を明らかにするため、それを検出可能とする一手段として、表面での電子状態の観測を例として、表面電子状態についての理論研究を行った。その結果として、表面状態密度のゼロエネルギー・ピークの出現条件を明らかにした [6.2, 6.4]。

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鉄系超伝導体(マルチバンド超伝導体)に適用し、磁束フローが起こり始めるフロー臨界電流値が異なるバンドのギャップ比に大きく依存することを明らかにした。この事実から、ギャップ

比が 1 に近いときほど、臨界電流密度が上昇すること等が判明し、どのようなタイプの鉄系超伝導体が産業応用に役立つかが予測できる。

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を行い、量子渦糸乱流の解析を行った。更に、ピン止めの 3 次元シミュレーションを実現させるべく、マルチスケール・コードの開発を引き続き目指すこととする。

## § 4. 成果発表等

### (4-1) 原著論文発表

#### ●論文詳細情報

#### 「原子力機構・町田」グループ

- 1.1. N. Nakai, N. Hayashi, M. Machida, “Simulation study for the orientation of the driven vortex lattice in an amorphous superconductor”, *Physica C*, **469**, 1106 (2009).
- 1.2. H. Nakamura, N. Hayashi, N. Nakai, M. Machida, “First-principle calculation for the phonon structure on iron-based superconductors”, *Physica C* **469**, 1024 (2009).
- 1.3. H. Nakamura, N. Hayashi, N. Nakai, M. Okumura, M. Machida, “First-principle electronic structure calculations for magnetic moment in iron-based superconductors: An LSDA + negative  $U$  study”, *Physica C* **469**, 908 (2009).
- 1.4. H. Nakamura, M. Machida, T. Koyama, N. Hamada, “First-Principles Study for the Anisotropy of Iron-Based Superconductors toward Power and Device Applications”, *Journal of the Physical Society of Japan*, **78**, 123712 (2009).
- 1.5. H. Nakamura, M. Machida, “First-principles calculations of the effect of pressure on the iron-based superconductor LaFeAsO”, *Physical Review B* **80**, 165111 (2009).
- 1.6. M. Okumura, S. Yamada, M. Machida, T. Sakai, “Polarization plateau in atomic Fermi gas loaded on three-leg triangular optical lattice”, *Physical Review A* **79**, 061602(R) (2009).
- 1.7. M. Okumura, S. Yamada, N. Taniguchi, M. Machida, “Magnetic localization in spin-polarized one-dimensional Anderson-Hubbard model”, *Physical Review B* **79**, 184417 (2009).
- 1.8. 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* **469**, 932 (2009).
- 1.9. Y. Ota, M. Machida, T. Koyama, “Inter-grain Josephson Currents in Multi-gap Superconductors: A Microscopic Origin of Low Inter-grain Critical Current and Its Recovery Potential in Iron-pnictide Materials”, *Journal of the Physical Society of Japan*, **78**,

- 103701 (2009).
- 1.10. Y. Ota, M. Machida, T. Koyama, H. Matsumoto, “Theory of Heterotic Superconducting-insulator-superconducting Josephson Junctions between Single- and Multi-gap Superconductors”, *Physical Review Letters*, **102**, 237003 (2009).
  - 1.11. S. Yamada, M. Okumura, M. Machida, Direct Extension of Density-Matrix Renormalization Group to Two-Dimensional Quantum Lattice Systems: Studies of Parallel Algorithm, Accuracy, and Performance, *Journal of the Physical Society of Japan*, **78**, (2009) 094004.
  - 1.12. 山田進, 今村俊幸, 町田昌彦, “マルチコアクラスタのネットワーク構造を考慮した並列密度行列繰り込み群法の通信手法 “、*日本計算工学会論文集 Vol.2009*、論文番号 20090015、(2009).
  - 1.13. N. Ishida, Y. Ota, Y. Yamamoto, “Generation and application of multi-path cat states of light”, *New Journal of Physics* **11**, 033007 (2009).
  - 1.14. T. Morinari, H. Nakamura, M. Machida, T. Tohyama, “Effect of Fermi Surface Topology on Inter-Layer Magnetoresistance in Layered Multiband Systems: Application to  $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ “, *Journal of the Physical Society of Japan*, **78**, 114702 (2009) 114702.
  - 1.15. R. Igarashi, M. Ogata, “Partial order of frustrated Potts model”, *Journal of Physics: Conference Series* **200**, 022019.
  - 1.16. H. Nakamura, M. Machida, “Highly Two-dimensional Electronic Structure and Strong Fermi-Surface Nesting of the Iron-Based Superconductor  $\text{Sr}_2\text{ScFePO}_3$ : A First-Principles Study”, *Journal of Physical Society of Japan* **79**, 013705 (2010).
  - 1.17. Y. Ota, M. Machida, T. Koyama, H. Matsumoto, “Theory for Josephson Vortex Structure in Josephson Junctions with Multiple Tunneling Channels: Vortex Enlargement as a Probe for  $\pm s$ -wave Superconductors”, *Physical Review B* **81**, 014502 (2010).
  - 1.18. T. Imamura, T. Kano, S. Yamada, M. Okumura, M. Machida, “High-Performance Quantum Simulation for Coupled Josephson Junctions on the Earth Simulator: A challenge to Schrödinger Equation on  $256^4$  Grids”, *International Journal of High Performance Computing* (accepted)
  - 1.19. M. Machida, Y. Nagai, Y. Ohta, N. Nakai, H. Nakamura, N. Hayashi, “Phenomenological Theory for  $\pm s$ -wave Superconducting States of Iron-based Superconductors”, *Physica C* (accepted).
  - 1.20. H. Nakamura, M. Machida, A.Q.R. Baron, T. Fukuda, S. Shamoto, “Magnetic structure and phonon spectra of iron-based superconductors: A first-principle study”, *Physica C* (accepted).
  - 1.21. H. Nakamura, M. Machida, “Pressure Effects on Iron-Based Superconductors: A First-Principles Study”, *Physica C* (accepted).

- 1.22. M. Okumura, H. Onishi, S. Yamada, M. Machida, “Dynamics of Attractively-Interacting Fermi Atoms in One-Dimensional Optical Lattices: Non-Equilibrium Simulations of Fermion Superfluidity”, *Physica C* (accepted).
- 1.23. M. Okumura, S. Yamada, M. Machida, “Density-matrix renormalization-group studies for one-dimensional polarized Anderson-Hubbard model”, *Physica C* (accepted).
- 1.24. Y. Ota, M. Machida, T. Koyama, H. Matsumoto, “Collective Modes and Josephson Vortices in a Heterotic Josephson junction between Single- and Two-gap Superconductors”, *Physica C* (accepted).
- 1.25. Y. Ota, M. Machida, T. Koyama, “Inter-grain Josephson Currents in Two-gap Superconductors”, *Physica C* (accepted).
- 1.26. Y. Nakamura, T. Sunaga, M. Mine, M. Okumura, Y. Yamanaka, “Derivation of non-Markovian transport equations for trapped cold atoms in nonequilibrium thermal field theory”, *Annals of Physics* (accepted).
- 1.27. Y. Nagai, N. Hayashi, M. Machida, “Surface-angle dependence of the tunneling spectroscopy in iron-based superconductors: sign-reversing s-wave scenarios”, *Physica C* (accepted).
- 1.28. Y. Ota, M. Machida, T. Koyama, and H. Matsumoto, “Anomalous Josephson vortex solutions in Josephson junctions with multiple tunneling channels”, *Physica C* (accepted).
- 1.29. N. Nakai, M. Machida, “Simulation study on the vortex penetration in the presence of the square antidot array”, *Physica C* (accepted).
- 1.30. N. Nakai, H. Nakamura, Y. Ota, Y. Nagai, N. Hayashi, M. Machida, “Small jump of specific heat and small gap in iron pnictide superconductors”, *Physica C* (accepted).

#### **「秋田大・林」グループ**

- 2.1. S. Hatsumi, A. Kanda, R. Furugen, Y. Ootuka, M. Hayashi, “Experimental determination of vortex configuration in a mesoscopic superconducting square with artificial pinning centers”, *Journal of Physics, Conference Series*, 150 (2009) 022024.
- 2.2. Masahiko Hayashi, Hideo Yoshioka and Akinobu Kanda, “Theoretical Study of Superconducting Proximity Effect in Single and Multi-layered Graphene”, *Physica C* (accepted)
- 2.3. Masahiko Hayashi, Hiromichi Ebisawa, “Topological Defect and Quasi-particle Dynamics in Charge Density Waves “, *Physica C* (accepted).

#### **「東北大・小山」グループ**

- 3.1. M. Tachiki, S. Fukuya and T. Koyama, “Mechanism of Terahertz Electromagnetic Wave Emission from Intrinsic Josephson Junctions”, *Phys. Rev. Lett.* 102 (2009) 127002/1-4.

- 3.2. T. Koyama, H. Matsumoto, M. Machida and K. Kadowaki, “In-Phase Electrodynamics and Terahertz Wave Emission in Extended Intrinsic Josephson Junctions”, *Phys. Rev. B* **79** (2009) 104522/1-12.
- 3.3. T. Koyama and M. Machida, “Macroscopic Quantum Effects in Capacitively- and Inductively-Coupled Intrinsic Josephson Junctions”, *J. Phys. Conf. Series* **150** (2009) 052127/1-4.
- 3.4. H. Matsumoto, T. Koyama, M. Machida and K. Kadowaki “THz Wave Emission from the Intrinsic Josephson Junctions of High T<sub>c</sub> Superconductors”, *J. Phys. Conf. Series* **150** (2009) 052156/1-4 .
- 3.5. T. Koyama, M. Machida and H. Matsumoto, “Plasma Excitations in the Superconducting State of Two-band Layered Superconductors”, *Physica C* **469** (2009) 1048-1051.
- 3.6. H. Matsumoto, T. Koyama and M. Machida, “Angular Dependence of Emitted THz Waves from In-plane Josephson Junction”, *Physica C* **469** (2009), 1600-1603.
- 3.7. T. Koyama, H. Matsumoto and M. Machida, “Numerical Simulation of THz Emission from High-T<sub>c</sub> Intrinsic Josephson Junctions”, *Physica C*, to be published.
- 3.8. T. Koyama, Y. Ota and M. Machida, “I-V Characteristics in multi-gap Intrinsic Josephson Junctions”, *Physica C*, to be published.
- 3.9. H. Matsumoto, T. Koyama and M. Machida, “Terahertz wave emission and phase motion in intrinsic Josephson junctions”, *Physica C*, to be published.

#### 「慶応大・大橋」グループ

- 4.1. H. Tamaki, K Miyake, and Y. Ohashi, “d-wave spin density wave state in the attractive Hubbard model with spin polarization,” *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** (2009) 073001 (1-4).
- 4.2. D. Inotani, and Y. Ohashi, “Identification of the + - wave pairing state in the iron-pnictide superconductors using the Riedel anomaly,” *Phys. Rev. A* **79** (2009) 224527 (1-5).
- 4.3. S. Tsuchiya, and Y. Ohashi, “Supercurrent induced by tunneling Bogoliubov excitations in a Bose-Einstein condensate,” *Phys. Rev. A* **79** (2009) 063619 (1-15).
- 4.4. S. Tsuchiya, R. Watanabe, and Y. Ohashi, “ Single-particle properties and pseudogap effects in the BCS-BEC crossover regime of an ultracold Fermi gas above T<sub>c</sub>,” *Phys. Rev. A* **80** (2009) 033613 (1-9).
- 4.5. S. Tsuchiya, R. Watanabe, and Y. Ohashi, “Pseudogap in Fermionic Density of States in the BCS-BEC Crossover of Atomic Fermi Gases,” *J. Low Temp. Phys.* **158** (2009) 28-35.
- 4.6. S. Tsuchiya, R. Watanabe, and Y. Ohashi, “Pseudogap behavior of atomic Fermi gas above T<sub>c</sub> in the BCS-BEC crossover,” *Physics C*, in press.
- 4.7. R. Watanabe, S. Tsuchiya, and Y. Ohashi, “Pairing fluctuations and pseudogap effects in the BCS-BEC crossover regime of a superfluid Fermi gas,” *Physics C*, in press.

- 4.8. D. Inotani, and Y. Ohashi, “Theoretical proposal of a method to identify the pairing symmetry of Fe-pnictide superconductors using ac-Josephson effect” Physics C, in press.

#### 「大阪府立大・加藤」グループ

- 5.1. H Suematsu, M Kato, T Ishida , “Critical temperature in nanoscopic superconductors ”, Journal of Physics: Conference Series, 150, 052250 (4pp) (2009).
- 5.2. M. Kato, Y. Niwa, K. Maki , “Quasi-particle spectrum around half-quantum vortices (HQVs) in triplet superconductors” Journal of Physics: Conference Series, 150, 052103 (4pp) (2009).
- 5.3. M. Kato, S. Tomita, K. Maki “Quasi-particle spectrum around a single vortex in gossamer superconductivity”, Journal of Physics: Conference Series, 150, 052102 (4pp) (2009).
- 5.4. S. Tomita, M. Kato, K. Maki , “Quasi-particle structure around a single vortex in high-Tc superconductors”, Physica C 469(2009)1074–1076
- 5.5. M. Kato, T. Koyama, M. Machida, T. Ishida, “Magnetic flux structures of composite superconducting structures with d- and s-waves superconductors (d-dots)”, Physica C 469 (2009) 1074–1076
- 5.6. “Quasi-particle excitations around a half-quantum vortex in p- and f- wave superconductors”, Y. Niwa, M. Kato, K. Maki, Physica C 469 (2009) 1077–1079
- 5.7. “Symmetric behavior of vortex states of superconducting networks in a magnetic field”, O. Sato, M. Kato, Physica C 469 (2009) 1110–1112
- 5.8. M. Kato Y. Iwamoto, O. Sato, “Vortex structures in disordered finite superconducting square networks under external magnetic field” Phys. Rev. B 80 (2009) 024510[5 pages]
- 5.9. Masaru Kato, Satoshi Tomita and Kazumi Maki, “Checkerboard-like bound states around a vortex in high-Tc cuprate superconductors”, J. Phys.: Conf. Ser. 200 (2009) 012081 (4pp).
- 5.10. Masaru Kato, Yoshiteru Iwamoto, Osamu Sato, “Nonlocal Effects in Finite Superconducting Networks”, Physica C, In Press.
- 5.11. Masaru Kato, Yoshiteru Iwamoto, Osamu Sato, “Vortex structures in nano-scaled superconducting networks” Physica C, In Press
- 5.12. T. Ishida, K. Arai, Y. Akita, M. Miyanari, Y. Minami, T. Yotsuya, M. Kato, K. Satoh, M. Uno, H. Shimakage, S. Miki, Z. Wang, “Scanning Laser Microscope for Imaging Nanostructured Superconductors”, Physica C, In Press

#### 「大阪府立大・林」グループ

- 6.1. Y. Nagai, N. Hayashi, Y. Kato, K. Yamauchi, and H. Harima, “Field angle dependence of the zero-energy density of states in unconventional superconductors: analysis of the borocarbide superconductor YNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C”, J. Phys.: Conf. Ser. **150**, 052177 (2009).

- 6.2. Y. Nagai and N. Hayashi, “Surface bound states in  $n$ -band systems with the quasiclassical approach”, Phys. Rev. B **79**, 224508 (2009).
- 6.3. N. Hayashi, Y. Nagai, and Y. Higashi, “Analysis of field-angle dependent specific heat in unconventional superconductors: a comparison between Doppler-shift method and Kramer-Pesch approximation”, Physica C, in press.
- 6.4. Y. Nagai, N. Hayashi, and M. Machida, “Surface-angle dependence of the tunneling spectroscopy in iron-based superconductors: sign-reversing  $s$ -wave scenarios”, Physica C, in press.

### 「産総研・柳澤」グループ

- 7.1. S. Kawabata, T. Bauch, and T. Kato, “Theory of two-dimensional macroscopic quantum tunneling in YBaCuO Josephson junctions coupled with an LC circuit”, Physical Review B **80** (2009) 174513.
- 7.2. S. Kawabata, and Y. Asano, “Numerical study of pi-junction using spin filtering barrier”, International Journal of Modern Physics B **23** (2009) 4320–4328.
- 7.3. S. Kawabata, T. Kato, F. Lombardi, and T. Bauch, “Two-dimensional macroscopic quantum dynamics in YBCO Josephson junctions”, International Journal of Modern Physics B **23** (2009) 4329–4337.
- 7.4. S. Kawabata, Y. Asano, Y. Tanaka, and S. Kashiwaya, “Effect of  $d$ - $f$  hybridization on the Josephson current through Eu-chalcogenides”, Physica C **469** (2009) 1621–1623.
- 7.5. H. Kashiwaya, T. Matsumoto, H. Shibata, H. Eisaki, Y. Yoshida, S. Kawabata, Y. Tanaka, and S. Kashiwaya, “Switching dynamics and MQT in Bi2201 intrinsic Josephson Junctions”, Physica C **469** (2009) 1593–1595.
- 7.6. M. Miyazaki, K. Yamaji, T. Yanagisawa, and R. Kadono, “Checkerboard States in the Two-Dimensional Hubbard Model with the Bi2212-Type Band”, Journal of the Physical Society of Japan **78** (2009) 043709.
- 7.7. I. Hase and T. Yanagisawa, “Band structure of  $\text{LaNiC}_2$ ”, Journal of the Physical Society of Japan **78** (2009) 084724.
- 7.8. T. Yanagisawa, K. Odagiri, I. Hase, K. Yamaji, P.G. Shirage, Y. Tanaka, A. Iyo and H. Eisaki, “Isotope effect in multi-channel attractive systems and inverse isotope effect in iron-based superconductors”, Journal of the Physical Society of Japan **78** (2009) 094718.
- 7.9. P.M. Shirage, K. Kihou, K. Miyazawa, C.-H. Lee, H. Kito, H. Eisaki, T. Yanasawa, Y. Tanaka, and A. Iyo, “Inverse Iron isotope effect on the transition temperature of the  $(\text{Ba,K})\text{Fe}_2\text{As}_2$  superconductor”, Physical Review Letters **103**

(2009) 257003.

7.10.K. Yamaji, T. Yanagisawa, M. Miyazaki and R. Kadono, “System–parameter dependence of the metallic phase of the non–doped 2D Hubbard model”, *Physica C469* (2009) 1037.

7.11.T. Yanagisawa and I. Hase, “Superconductivity as a Kosterlitz–Thouless transition in the two–dimensional Hubbard model”, *Physica C469* (2009) 1045.