

機関番号：12601

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20740188

研究課題名 (和文) 強相関電子系における非平衡相転移および非平衡過程

研究課題名 (英文) Non-equilibrium phase transition in strongly correlated electron systems

研究代表者

岡 隆史 (OKA TAKASHI)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：50421847

研究成果の概要 (和文): 銅酸化物に代表される強相関電子系の非平衡現象を取り扱う手法開発、特に非平衡動的平均場理論のハバードモデルへの適用をおこなうとともに、新規物理現象を説明する理論を構築した。成果は原著論文10本、英語書籍1本、日本語解説2本にまとめた。

研究成果の概要 (英文): I developed new theoretical methods (non-equilibrium dynamical mean field theory) to treat non-equilibrium phenomena in strongly correlated electron systems. (10 original papers, 1 chapter of a book, 2 Japanese articles)

交付決定額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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：強相関系、非平衡現象

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 実験技術の進歩に伴い、光誘起金属絶縁体転移、電場による絶縁破壊現象などの非平衡相転移が遷移金属酸化物や有機導体などの強相関電子系において注目を集めていた。これらの相転移は電子分布が温度分布とは異なる特異的なものとなるため、有限温度相転移とは異なる新しい相転移現象が生じる可能性がある。また、レーザー光などの刺激によって電気伝導特性を劇的に変化させられる可能性があり、応用上の観点からも大変興味を持たれている。

(2) 強相関電子系の非平衡系での理論研究は研究手法が限定されていることもあり、平衡系と比較すると進展は遅かった。

## 2. 研究の目的

(1) 強相関電子系の非平衡現象を解析する上で最も重要なことは定量的に信頼できる計算手法を整備することである。これまでは時間依存密度行列繰り込み群が整備されていたが、相転移現象を取り扱う上では高次元系を取り扱える手法である動的平均場理論の非平衡系への拡張が最も重要である。

(2) モット絶縁体などの強相関絶縁体に電場をかけたときの非線形伝導や光誘起相転移現象の理論的な理解を目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 非平衡動的平均場理論をハバードモデルに対して適用するために実時間量子モンテ

カルロ法を開発する。

(2) 時間依存密度行列繰り込み群を用いた一元ハバードモデルにおける時間に依存した物理の研究。

(3) 厳密解による非平衡現象の解析。具体的にはベーテ仮説解に基づいたトンネル確率の計算をおこなう。

#### 4. 研究成果

(1) 光誘起ホール効果の発見：我々は円偏光のもとで Dirac 粒子がホール効果を発現する可能性を世界に先駆け発見した (Phys. Rev. B “Photovoltaic Hall effect in graphene”)。この光誘起ホール効果は既存のホール効果とは全く異なり非線形久保公式に基づき予言され、電子の獲得する非断熱ベリー位相 (Aharonov-Anandan 位相) によって理解できる。さらに、我々は実験によってこの現象を検証する方法についても提案を行った。

(2) 非平衡量子モンテカルロ法の開発：非平衡系において相図を決定する上で重要な役割をすると期待される非平衡動的平均場理論、特にその中核となる不純物モデルに対する量子モンテカルロ法の効率化について研究を行った。P. Werner (ETH), M. Eckstein (ETH), A. Millis (Columbia) との共同研究であり、結果は Phys. Rev. B “Diagrammatic Monte Carlo simulation of non-equilibrium systems” にて発表した。

(3) モット絶縁体における絶縁破壊の基礎理論の確立：強相関物質の非線形伝導現象を理解する上で最も重要な問題の一つが強電場中のキャリアの生成メカニズムである。我々は低温での絶縁破壊現象の主要なメカニズムとして多体 Schwinger-Landau-Zener 機構を提唱し、一元ハバードモデルにおいてベーテ仮説法を用いて量子トンネル確率の厳密な表式を与えた。これにより、電子相関の強い物質を用いたデバイス設計の基礎理論を確立できたといえる。なお、これはベーテ仮説法の非平衡現象への応用という点でも世界で初めての例である。この成果は PRB (“Non-Hermitian generalization of the Bethe-ansatz excited states and dielectric breakdown in the Hubbard model out of equilibrium”) にて発表した。

(4) 非平衡超伝導の FLEX+Keldysh 法による解析：我々はバイアス等によって非平衡状態にある強相関電子系の相転移現象を記述する手法として FLEX+Keldysh 法を開発し二つの電極と接合した二次元ハバードモデルに対して適用し、d-波超伝導および反強磁性が

バイアスによって制御できることを示した。今後は超伝導体中の準粒子分布を電極でコントロールすることによって超伝導転移温度を上昇させることができるのかを検証したが、バイアスの効果は転移温度を下げる方向に働くことが明らかになった。

#### 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 10 件)

① M. Eckstein, T. Oka, P. Werner, “Dielectric breakdown of Mott insulators in dynamical mean-field theory” 査読有, Phys. Rev. Lett. 105, 146404 (2010)

② T. Oka and H. Aoki, “Nonequilibrium magnetic and superconducting phases in the two-dimensional Hubbard model coupled to electrodes” 査読有, Phys. Rev. B 82, 0645160-1-064516-5 (2010)

③ T. Oka and H. Aoki, “Dielectric Breakdown in a Mott Insulator: Many-body Schwinger-Landau-Zener Mechanism studied with a Generalized Bethe Ansatz.” 査読有, Phys. Rev. B 81, 033103 (2010)

④ S. Endo, T. Oka and H. Aoki, “Realization of tight-binding photonic bands in metallophotonic waveguide networks with application to a flat band in kagome lattice” 査読有, Phys. Rev. B 81, 113104-1-4 (2010)

⑤ P. Werner, T. Oka, M. Eckstein, A. J. Millis, “Weak-coupling quantum Monte Carlo calculations on the Keldysh contour: theory and application to the current-voltage characteristics of the Anderson model” 査読有, Phys. Rev. B 81, 035108 (2010)

⑥ N. Tsuji, T. Oka and H. Aoki, “Nonequilibrium steady state in photoexcited correlated electrons with dissipation.” 査読有, Phys. Rev. Lett. 103, 047403 (2009)

⑦ T. Oka and H. Aoki, “Photovoltaic Hall effect in graphene.” 査読有, Phys. Rev. B 79, 081406 (R) (2009), selected in Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology, Erratum Phys. Rev. B 79, 169901 (2009)

⑧ P. Werner, T. Oka, A. J. Millis,  
“Diagrammatic Monte Carlo simulation of  
non-equilibrium systems.” 査読有, Phys.  
Rev. B 79, 035320 (2009)

⑨ T. Oka and H. Aoki, “Photo-induced  
Tomonaga-Luttinger-like liquid in a Mott  
insulator.” 査読有, Phys. Rev. B 78,  
241104 (R) (2008)

⑩ N. Tsuji, T. Oka and H. Aoki,  
“Correlated electron systems  
periodically driven out of equilibrium --  
Floquet + DMFT formalism.” 査読有, Phys.  
Rev. B 78, 235124 (2008)

[学会発表] (計 16 件)

① Takashi Oka and Hideo Aoki: Possible  
confinement phase in carbon-nanotubes and  
the extended massive Schwinger model, APS  
March Meeting March 24 2011, Dallas USA.

② Takashi Oka: Strong field physics in a  
strongly correlated system, DMQS2011,  
Feb14 2011 Tokyo Japan.

③ Takashi Oka: Strong field physics in a  
strongly correlated system, PIF2010, Nov.  
25 2010 Tsukuba, Japan.

④ Takashi Oka, and Hideo Aoki: All  
optical measurement proposed for the  
photovoltaic Hall effect, HMF19, Aug. 4  
2010 Fukuoka Japan.

⑤ Takashi Oka and Hideo Aoki: Mott  
insulators in strong electric fields  
studied by the generalized Bethe ansatz,  
APS March Meeting March 23 2010 Portland,  
USA.

⑥ Takashi Oka and Hideo Aoki:  
Non-equilibrium Superconducting  
Transition in Correlated Electron Systems,  
ISCOM09 September 15 2009 Niseko, Japan.

⑦ Takashi Oka and Hideo Aoki:  
Non-equilibrium superconductivity in a  
correlated electron system studied with  
the Keldysh+FLEX approach, 9th  
International Conference on Materials and  
Mechanisms of Superconductivity,  
September 9, 2009 Tokyo, Japan.

⑧ Takashi Oka, and Hideo Aoki:  
Photovoltaic Berry curvature in the

honeycomb lattice, ICM2009, July 27, 2009  
Karlsruhe, Germany.

⑨ Takashi Oka and Hideo Aoki:  
Photovoltaic Hall effect in Dirac systems  
--- application to graphene, APS March  
Meeting, March 18, 2009 Pittsburgh USA.

⑩ Takashi Oka and Hideo Aoki:  
Photovoltaic Hall effect and its  
topological origin, TOP009 July 13 2009  
Dresden, Germany.

⑪ Takashi Oka and Hideo Aoki:  
Photo-induced Hall effect in graphene ---  
effect of boundary types, Yamada  
Conference LXIII: PIPT 2008, Nov. 11,  
Osaka Japan, J. Phys.: Conf. Ser. 148,  
012061 (2009).

⑫ Takashi Oka and Hideo Aoki: Anomalous  
quantum materials in strong electric  
fields --- Mott insulator and graphene,  
Int. Symposium on Anomalous Quantum  
Materials, Nov. 10 2008 Tokyo Japan.

⑬ Takashi Oka and Hideo Aoki:  
Photo-induced metallic liquid in a  
one-dimensional Mott insulator in AC  
fields, LT25, August 9 2008 Amsterdam  
Netherlands, J. Phys.: Conf. Ser. 150,  
042152 (2009).

⑭ Takashi Oka and Hideo Aoki:  
Photo-induced Tomonaga-Luttinger-like  
liquid in a one-dimensional Mott insulator,  
Workshop on Topological Aspects of Solid  
State Physics, June 02-22 2008 Kyoto  
Japan.

招待講演:

⑮ 岡隆史, “強相関係光励起による物性制  
御とその展望” (日本物理学会「半導体のキ  
ャリアドーピングと光」 シンポジウム、岡  
山、 Mar 20 2010)

⑯ 岡隆史: 強電場中の一次元強相関電子系  
の非平衡現象と時間依存 DMRG (日本物理学会  
「密度行列繰り込み群 (DMRG) の新展開」 シ  
ンポジウム、熊本、 Sept 25 2009)

[図書] (計 3 件)

① 岡隆史, 青木秀夫: グラフェンのトポロ  
ジカルな性質とその光制御, 表面科学 日本  
表面科学会 32, 196-201 (2011)。

② 岡隆史, 青木秀夫: グラフェンにおける

光誘起ホール効果とカゴメ・フォトリック結晶における光の局在、光学 日本光学会誌 39, 445-452 (2010)。

③ T. Oka and H. Aoki, “Nonequilibrium Quantum Breakdown in a Strongly Correlated Electron System”, in “` Quantum and Semi-classical Percolation and Breakdown in Disordered Solids” edited by A.K. Sen, K.K. Bardhan, B.K. Chakrabarti, (Lecture Note in Physics Vol. 762, Springer-Verlag), (2008).

[その他]

ホームページ等

<http://cms.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~oka>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岡 隆史 (OKA TAKASHI)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：5 0 4 2 1 8 4 7