

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2005～2008

課題番号：17340066

研究課題名（和文） 有限温度・有限密度QCDの非摂動的な研究

研究課題名（英文） Non-perturbative study of QCD at finite temperatures and densities

研究代表者

金谷 和至 (KANAYA KAZUYUKI)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授

研究者番号：80214443

研究成果の概要：クォーク系の有限温度・有限密度における性質を、ウィルソン型格子クォークを使った格子 QCD の数値シミュレーションによって研究した。 $N_f=2$  QCD の場合に、ウィルソン型格子クォークによる有限密度状態方程式や重クォーク対自由エネルギーを初めて計算し、クォーク密度が高くなると相転移点の揺らぎが大きくなることなどを示した。また、有限温度・有限密度 QCD 研究で要求される膨大な計算コストを縮小させるために『固定格子間隔アプローチ』を提案し、状態方程式の新しい非摂動的な計算方法として『T-integral 法』を開発した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	3,000,000	0	3,000,000
2006年度	3,800,000	0	3,800,000
2007年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2008年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
総計	14,200,000	2,220,000	16,420,000

研究分野：素粒子物理学（理論）

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：量子色力学、クォーク、格子ゲージ理論、有限温度、有限密度、クォーク・グルオン・プラズマ、相転移、状態方程式

## 1. 研究開始当初の背景

クォークは通常、陽子、中性子などのハドロンに閉じこめられているが、約 1 兆度以上の超高温では溶け出して、クォーク・グルオン・プラズマ(QGP)状態と呼ばれる、人類がかつて経験したことのない物質相に転移すると考えられている。この相転移の解明は宇宙の初期進化や物質創成を理解する上で重要であるその実験的検証に向けた高エネルギーハドロン衝突実験が進められている。複雑な重イオン衝突実験データから、QGP 生成の明確な証拠とその熱力学特性を引き出すためには、QGP の物性に関する量子色力学(QCD)の第一原理からの理論的予言が不可

欠である。QGP の性質が精密に理解されると、初期宇宙におけるクォーク物質の進化を定量的に追うことが可能になり、物質創成のメカニズムも解明できると期待される。

格子 QCD では、クォークをどの格子フェルミオンで記述するかで離散化誤差の性質が大きく異なる。従来、計算が楽なスタガード型格子クォークを用いた研究が主に行われてきたが、連続極限で現実世界を再現する理論的保証が無く、また、現在の粗い格子では大きな格子化誤差が存在する。特に、 $N_f=2$  QCD の有限温度相転移で理論的に期待されている、 $O(4)$ ユニバーサリティーが全く再現されていない。他方、ウィルソン型クォー

クでは、金谷らの研究(1997-2000)により、 $O(4)$ ユニバーサリティーが正しく再現されることが示されている。

## 2. 研究の目的

本研究プロジェクトは、高温・高密度におけるクォーク物質の特性を、QCDの第一原理から理論的に解明することを目的とする。格子クォークとしては、これまで十分調べられていないウィルソン型格子クォークを用いる。ウィルソン型クォークはスタaggerド型より多くの計算量を要求するが、粗い格子でも $O(4)$ スピン系とのユニバーサリティーが再現されていることから、相転移点近傍の性質に関して格子化誤差がスタaggerド型よりコントロールされていると考えられる。ウィルソン型クォークの結果をスタaggerド型クォークの結果と比較することにより、格子化による系統誤差を精密に議論できるようになる可能性がある。

また、相転移温度近傍からLHCで到達される超高温域までクォーク物質の性質を組織的に研究することをめざして、有限温度・有限密度計算のための技術開発も同時に進める。こうした系統的で定量的な研究により、LHCで生成される高精度データでQGPの詳細な解析を行うことが初めて可能になるだろうと考えている。

## 3. 研究の方法

ウィルソン型クォークによる有限温度QCDの研究は世界的に見ても筑波のCP-PACSグループの系統的研究(2001)以降ほとんど行われておらず、また、有限密度QCDの研究もウィルソン型クォークでは行われていなかった。そのため、第一段階として、CP-PACSグループにより有限温度の相図が既に詳細に調べられている $N_f=2$  QCDの場合に、ウィルソン型クォークとして最初の有限密度QCD研究を実行した。格子作用は、CP-PACSグループが採用した、改良されたウィルソン型クォーク作用と岩崎ゲージ作用を組み合わせたものを用いた。有限密度量の計算には、化学ポテンシャルに関するテーラー展開法を用いた。

また、ウィルソン型クォークで動的sクォークも含む $N_f=2+1$  QCDを研究しようとするときに特に問題となる計算時間の多さに対処するために、より効率的な計算方法の開発にも取り組んだ。

## 4. 研究成果

### (1) 有限密度 $N_f=2$ QCDの研究

$N_f=2$  QCDの場合に、ウィルソン型クォークとして最初の有限密度研究を行った。クォーク質量がゼロでない場合、 $N_f=2$  QCDは有限温度で、真正の相転移ではなくクロスオー

バーを示すことがわかっている。

クォーク数密度揺らぎやアイソスピン数密度揺らぎ等の物理量の化学ポテンシャルに関する微分係数を、化学ポテンシャル=0での高温相側で計算した。これらの微分係数をテーラー展開に代入すれば、有限化学ポテンシャル(有限密度)における物理量を評価できる。

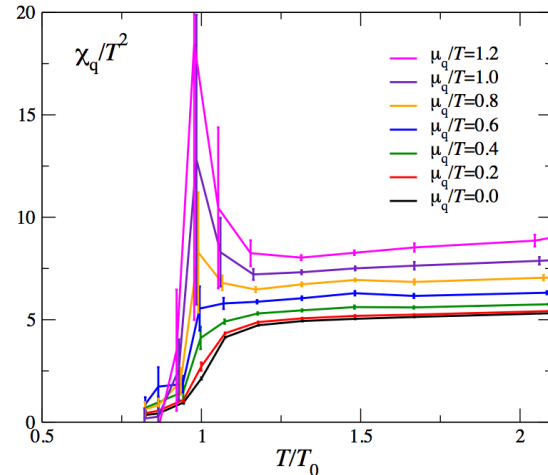


図1 クォーク数密度揺らぎ

図1に、従来のテーラー展開法に加えて、有限密度の複素位相部分をガウス関数で近似してreweighting法を用いる新しい手法による改良計算を行った場合のクォーク数密度揺らぎの結果を示す。 $T_0$ は、化学ポテンシャル=0での疑似相転移点である。化学ポテンシャルが大きくなるにつれて、疑似相転移点での特異性が強くなっている。これは、化学ポテンシャルがもう少し大きくなるとクロスオーバーが相転移に変わるだろうという有効模型の予言と一致し、スタaggerド型クォークによる先行研究の結果とも一致する。他方、アイソスピン数密度揺らぎは強い特異性を示さない。これは、後者については、アイソ3重項中間子が有限クォーク質量で重くなるために、解析的であるという、理論的期待と一致する。

### (2) $N_f=2$ QCDにおける、重クォーク対自由エネルギーとデバイ遮蔽の研究

重クォーク対自由エネルギー(重クォークポテンシャル)や、QGP相でのデバイ遮蔽は、現象論的QGP研究で重要である。(1)で生成した $N_f=2$  QCD配位を用いて、ウィルソン型クォークとしてはじめてこれらの量の系統的研究を行った。様々なカラー・チャンネルの重クォーク対自由エネルギーが、化学ポテンシャル=0(密度ゼロ)の高温相で温度と距離によりどの様に変化するかを系統的に調べ、カラー8重項チャンネルのクォーク・反クォーク間とカラー6重項チャンネルとのクォーク・クォーク間は斥力だが、カラ

一重項チャンネルのクォーク・反クォーク間と3\*重項チャンネルのクォーク・クォーク間は高温相でも引力であることを示した(図2参照)。さらに、疑似相転移温度の2倍程度以上の高温では、クォーク間ポテンシャルにおけるチャンネルの違いは摂動最低次から予想される全体のカシミア係数に吸収可能で、チャンネルによらず同じパラメータを持つ遮蔽されたクーロン型ポテンシャルでよく記述できることを示した。結果として得られた有効クーロン係数や有効デバイ質量は3次元有効理論の摂動から予想される振る舞いをしている。

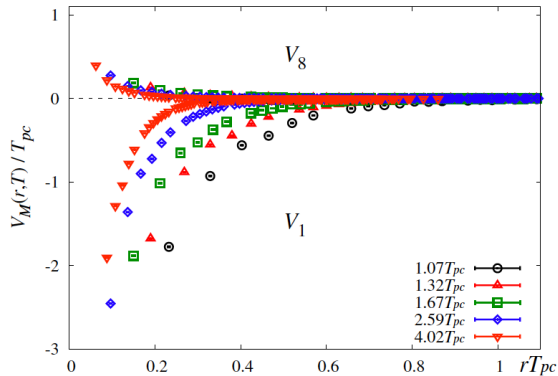


図2 重クォーク対自由エネルギー

さらに、Euclid 時間反転と荷電共役対称性を考えることによって、磁氣的、および電氣的デバイ遮蔽質量の両方を導出することができる。その結果、有限温度摂動論からの予想通り、磁氣的遮蔽質量が電氣的遮蔽質量より大きい事などを示した。さらに両者の質量比が AdS/CFT 対応から予想されている値に良く一致する事などを議論した。

さらに、テーラー展開法を使って、有限密度における重クォーク対自由エネルギーを計算し、化学ポテンシャルの最低次では、密度上昇とともに、クォーク・反クォーク間相互作用は弱くなるが、クォーク・クォーク間相互作用は強くなることを示した。

### (3) T-integral 法の開発

最終目標である  $N_f=2+1$  QCD での有限温度・有限密度研究は、極めて多くの計算時間を要求する。従来の固定格子サイズ( $N_t$ )で計算する方法では、ゼロ温度格子のシミュレーションを大量に要求し、それが全体の計算コストの大きな部分を占めている。我々は、それを大きく削減する方法として、『固定格子間隔アプローチ』を提案した。この方法では、従来の熱力学量の計算と異なり、ゲージ結合定数ではなく、時間方向の格子サイズによって温度を変える。くりこみのために要求されるゼロ温度シミュレーションを全ての温度の計算で共通にすることが出来、また、国際格子 QCD データ・グリッド(ILDG)などによ

り公開されているゼロ温度配位のメリットを最大限に使うことが出来るので、ゼロ温度に要求されていた計算コストを大きく削減することが出来る。

しかし、従来の状態方程式の非摂動的評価法である積分法は、固定格子間隔では用いることが出来ない。そこで我々は、固定格子間隔アプローチで状態方程式を計算するために、新しい非摂動的評価法である『T-integral 法』を開発した。これは、ある熱力学関係式を使って、状態方程式(圧力)をトレースアノマリーの温度積分としてあらわす方法である。我々はこのアイデアを、まずクエンチ近似 QCD でテストした。

固定格子間隔アプローチを使って、いくつかの格子間隔や空間方向格子サイズでトレースアノマリーを計算した結果、固定格子間隔アプローチにより、格子間隔や格子サイズに対する依存性が小さな、信頼性の高い計算が可能であることを見いだした。また、従来の固定格子サイズによる大規模計算の結果とも良く一致した。

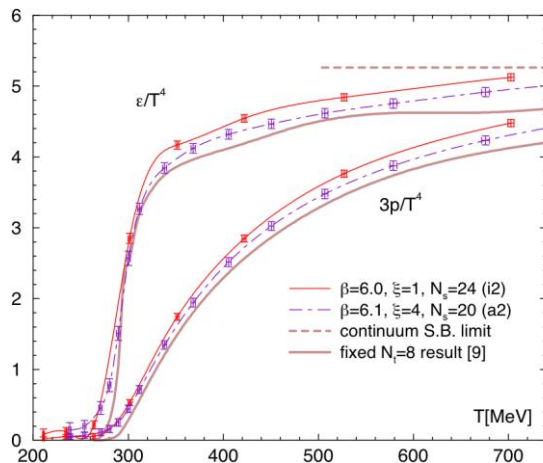


図3 クエンチ近似 QCD の状態方程式

図3はそれを温度積分して求められる状態方程式の結果である。これも、従来の固定格子サイズによる大規模計算の結果( $N_t=8$ , 紫色の線)をほぼ再現しており、新しいアプローチの有効性を示している。さらに、等方格子(i2)の場合だけでなく非等方格子(a2)の場合についても計算を行い、固定格子間隔アプローチで問題となる可能性がある有限な温度解像度の影響を調べ、それが十分制御可能であることを示した。クエンチ近似 QCD による試験結果は、論文として公表済みである。

T-integral 法は、従来の積分法と相補的で、高温極限の計算には適していないが、従来の方法で格子化誤差が出やすい相転移点近傍で精度の良い計算を行える可能性がある。現在、固定格子間隔で  $N_f=2+1$  QCD の有限温度配位を生成しており、その成果の一部は国際会議でも発表した。

(4) チャーモニウム消失温度の研究

チャーモニウムと反チャーモニウムクォークの束縛状態であるチャーモニウム(特に  $J/\psi$ ,  $\chi_c$ ,  $\psi'$  状態など)が、QGP 相中でクォークの閉じ込めが破れて散乱状態としてバラバラになってしまう「チャーモニウム消失」に関する定量的な研究を実行した。チャーモニウムの消失温度は重イオン衝突実験で QGP 生成を示す重要なシグナルの一つである「 $J/\psi$  抑制」のシナリオを議論する上で本質的な情報である。

我々は、対角化の方法を用いて S 状態と P 状態の基底状態と励起状態に対する有効質量及び波動関数を計算し、有効質量の空間方向境界条件依存性及び波動関数の空間分布を調べることでチャーモニウムの消失の有無を確かめた。また、特に P 状態には不必要な定数モードの効果が大きく寄与していることが指摘されており、この影響を取り除いた解析を行った。クエンチ近似でのシミュレーションの結果、少なくとも臨界温度の 2.3 倍の温度まで、どの方法によっても 1S、2S、1P、2P 状態のチャーモニウムが消失することが確認できなかった。これは最大エントロピー法による先行研究で議論されている消失温度より高温までこれらのチャーモニウムが維持される可能性を示唆しており、更なる検証が要求されている。

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) H. Ohno, T. Umeda and K. Kanaya, "Search for the Charmonia Dissociation in Lattice QCD", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 36, ref. 064027 (2009), 査読有り
- (2) H. Ohno, T. Umeda, K. Kanaya, "Search for the Charmonium Dissociation Temperature with Variational Analysis in Lattice QCD", PoS (LATTICE 2008), ref.203, pp.1-7 (2009), 査読有り
- (3) Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, N. Ukita, T. Umeda, "Magnetic and electric screening masses from Polyakov-loop correlations", PoS (LATTICE 2008), ref.194, pp.1-7 (2009), 査読有り
- (4) S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, Y. Maezawa, N. Ukita, T. Umeda, "Equation of state at finite density in two-flavor QCD with improved Wilson quarks", PoS (LATTICE 2008), ref.189, pp.1-7 (2009), 査読有り
- (5) T. Umeda, S. Ejiri, S. Aoki, T. Hatsuda, K.

Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno, "Thermodynamics of SU(3) gauge theory at fixed lattice spacing", PoS (LATTICE 2008), ref.174, pp.1-7 (2009), 査読有り

- (6) T. Umeda, S. Ejiri, S. Aoki, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno, "Fixed scale approach to equation of state in lattice QCD", Phys. Rev. D79, ref.051501, pp.1-5 (2009), 査読有り
- (7) T. Umeda, H. Ohno, and K. Kanaya, "Charmonium dissociation temperatures in lattice QCD with a finite volume technique", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 35, ref.104157, pp.1-5 (2008), 査読有り
- (8) Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, N. Ukita, T. Umeda, "Thermodynamics and heavy-quark free energies at finite temperature and density with two flavors of improved Wilson quarks", PoS (LATTICE 2007), ref.207, pp.1-7 (2007), 査読有り
- (9) Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya and N. Ukita, "Thermodynamics of two-flavor lattice QCD with an improved Wilson quark action at non-zero temperature and density", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 34, 651-654 (2007), 査読有り
- (10) Y. Maezawa, N. Ukita, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, "Heavy-Quark Free Energy, Debye Mass, and Spatial String Tension at Finite Temperature in Two Flavor Lattice QCD with Wilson Quark Action", Phys. Rev. D75, ref.074501, pp.1-23 (2007), 査読有り
- (11) N. Ukita, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, Y. Maezawa, S. Aoki, K. Kanaya, "Finite temperature phase transition of two-flavor QCD with an improved Wilson quark action", PoS (LATTICE 2006), ref.150, pp.1-7 (2006), 査読有り
- (12) Y. Maezawa, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, N. Ukita, S. Aoki, K. Kanaya, "Static quark free energies at finite temperature with two flavors of improved Wilson quarks", PoS (LATTICE 2006), ref.141, pp.1-7 (2006), 査読有り
- (13) S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, Y. Maezawa, N. Ukita, S. Aoki, K. Kanaya, "Equation of state for two-flavor QCD with an improved Wilson quark action at non-zero chemical potential", PoS (LATTICE 2006), ref.132, pp.1-7 (2006), 査読有り

[学会発表] (計 53 件)

- (1) K. Kanaya 「Fixed scale approach to the equation of state on the lattice」, The 21st

- International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2009) (Knoxville, TN, USA, Mar.30-Apr.4, 2009)
- (2) Y. Maezawa 「Free Energies of Heavy Quarks in Full-QCD Lattice Simulations with Wilson-Type Quark Action」, The 21st International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2009) (Knoxville, TN, USA, Mar.30-Apr.4, 2009)
  - (3) S. Ejiri 「Equation of state at finite density in lattice QCD with Wilson-type quarks」, International Workshop "Tools for finite density QCD" (Bielefeld, Germany, Nov. 19-21, 2008)
  - (4) T. Umeda 「QCD Thermodynamics at fixed lattice scale」, The 2nd Asian Triangle Heavy Ion Conference (ATHIC 2008) (Tsukuba, Japan, Oct. 13-15, 2008)
  - (5) K. Kanaya 「Lattice studies of QCD at finite temperature and finite density」, The 2nd Asian Triangle Heavy Ion Conference (ATHIC 2008) (Tsukuba, Japan, Oct. 13-15, 2008)
  - (6) H. Ohno, T. Umeda and K. Kanaya 「Search for the charmonia dissociation temperatures in lattice QCD」, International Conference on Strangeness in Quark Matter 2008 (SQM2008) (Tsinghua Univ., Beijing, China, Oct.6-10, 2008)
  - (7) S. Ejiri 「Recent progress in lattice QCD at finite density」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2008) (Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19, 2008)
  - (8) Y. Maezawa 「Magnetic and electric screening masses from Polyakov-loop correlations」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2008) (Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19, 2008)
  - (9) H. Ohno 「Search for the Charmonium Dissociation Temperature with Variational Analysis in Lattice QCD」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2008) (Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19, 2008)
  - (10) T. Umeda 「Thermodynamics of SU(3) gauge theory at fixed lattice spacing」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2008) (Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19, 2008)
  - (11) K. Kanaya 「Equation of state at finite density in two-flavor QCD with improved Wilson quarks」, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2008) (Williamsburg, Virginia, USA, July 14-19, 2008)
  - (12) T. Umeda 「Charmonium Wave Functions at Finite Temperature from Lattice QCD Calculations」, RIKEN-BNL Research Center Workshop on "Understanding QGP through Spectral Functions and Euclidean Correlators" (BNL, Upton, USA, Apr.23-25, 2008)
  - (13) Y. Maezawa 「Debye and Magnetic Masses in Full QCD Simulations and Comparison to AdS/CFT」, RIKEN-BNL Research Center Workshop on "Understanding QGP through Spectral Functions and Euclidean Correlators" (BNL, Upton, USA, Apr.23-25, 2008)
  - (14) Y. Maezawa 「Magnetic and electric screening mass in two-flavors of lattice QCD simulations」, YITP International Symposium "Fundamental Problems in Hot and/or Dense QCD" (NFQCD2008) (YITP, Kyoto, Japan, Mar. 3-6, 2008)
  - (15) T. Umeda 「Charmonium dissociation temperatures in lattice QCD with a finite volume technique」, The 20th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2008) (Jaipur, India, Feb. 9, 2008)
  - (16) Y. Maezawa 「Thermodynamics of QCD in lattice simulation with improved Wilson quark action at finite temperature and density」, QCD in extreme conditions (INFN Frascati, Rome, Italy, Aug. 6-8, 2007)
  - (17) T. Umeda 「Study of constant mode in charmonium correlators in hot QCD」, QCD in extreme conditions (INFN Frascati, Rome, Italy, August 6-8, 2007)
  - (18) S. Ejiri 「On the critical endpoint in QCD at non-zero temperature and density」, QCD in extreme conditions (INFN Frascati, Rome, Italy, Aug. 6-8, 2007)
  - (19) Y. Maezawa 「Thermodynamics and heavy-quark free energies at finite temperature and density with two flavors of improved Wilson quarks」, The XXV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2007) (Regensburg, Germany, July 30-Aug. 4, 2007)
  - (20) S. Ejiri 「Study of the critical point in lattice QCD at high temperature and density」, The XXV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2007) (Regensburg, Germany, July 30-Aug. 4, 2007)
  - (21) T. Umeda 「Study of constant mode in charmonium correlators at finite



- temperature」, The XXV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2007) (Regensburg, Germany, July 30-August 4, 2007)
- (22) Y. Maezawa 「Thermodynamics and heavy quark free energies at finite temperature and density in lattice QCD simulations」, Nagoya Mini- Workshop "Chiral Symmetry in hot and/or dense matter" (Nagoya, Japan, June 25-27, 2007)
- (23) Y. Maezawa 「Heavy-quark free energy and Debye screening effect at finite temperature and density in lattice QCD simulations」, International Nuclear Physics Conference (Tokyo, Japan, June 3-8, 2007)
- (24) Y. Maezawa 「Magnetic and electric screening mass in two-flavors of lattice QCD simulations」, Fundamental Problems in Hot and/or Dense QCD (NFQCD2008) (YITP, Kyoto, Japan, Mar. 3-6, 2007)
- (25) Y. Maezawa 「Static quark potentials at finite temperature in full QCD lattice simulations」, Yukawa International Seminar "New Frontiers in QCD" (YKIS 2006) (Yukawa Institute, Kyoto, Japan, Nov. 20-Dec.8, 2006)
- (26) S. Ejiri 「Lattice QCD Thermodynamics with Wilson quarks」, Yukawa International Seminar "New Frontiers in QCD" (YKIS 2006) (Yukawa Institute, Kyoto, Japan, Nov. 20-Dec.8, 2006)
- (27) Y. Maezawa 「Thermodynamics of two-flavor lattice QCD with an improved Wilson quark action at non-zero temperature and density」, The 19th International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2006) (Shanghai, China, Nov. 14-20, 2006)
- (28) Y. Maezawa 「Static quark free energies at finite temperature in full QCD lattice simulations」, The 19th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2006) (Shanghai, China, Nov. 14-20, 2006)
- (29) S. Ejiri 「QCD thermodynamics with Two Flavors of Wilson Quarks」, RIKEN-BNL Workshop "QCD in Extreme Conditions" (Brookhaven National Laboratory, NY, USA, July 31-Aug. 2, 2006)
- (30) Y. Maezawa 「Heavy Quark Potentials in Full QCD Lattice Simulations at Finite Temperature」, RIKEN-BNL Workshop "QCD in Extreme Conditions" (Brookhaven National Laboratory, NY, USA, July 31-Aug. 2, 2006)
- (31) Y. Maezawa 「Static quark free energies at finite temperature with two flavors of improved Wilson quarks」, The XXIV International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2006) (Tucson, Arizona, USA, July 23-28, 2006)
- (32) S. Ejiri 「Equation of state for two-flavor QCD with an improved Wilson quark action at non-zero chemical potential」, The XXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2006) (Tucson, Arizona, USA, July 23-28, 2006)
- (33) N. Ukita 「Finite temperature phase transition of two-flavor QCD with an improved Wilson quark action」, The XXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2006) (Tucson, Arizona, USA, July 23-28, 2006)
- (34) Y. Maezawa 「Heavy quark potentials in full QCD lattice simulations at finite temperature」, Frontiers in the Physics of Quark-Gluon Plasma (RIKEN, Wako, Japan, July 7-8, 2006)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

金谷 和至 (KANAYA KAZUYUKI)  
筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授  
研究者番号：80214443

### (2)研究分担者

宇川 彰 (UKAWA AKIRA)  
筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授  
研究者番号：10143538

青木 慎也 (AOKI SINYA)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授  
研究者番号：30192454

早川(吉江) 友照 (HAYAKAWA (YOSHIE) TOMOTERU)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・准教授  
研究者番号：40183991

### (3)連携研究者

初田 哲男 (HATSUDA TETSUO)  
東京大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号：20192700

大川 正典 (OKAWA MASANORI)

広島大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：00168874

中村 純 (NAKAMURA ATSUSHI)

広島大学・情報メディア教育研究センター・教授  
研究者番号：30130875