

---

# scknzw 実施報告書 2000-2005

平成18年1月31日

---

## 研究組織

鈴木恒雄 (代表) : 金沢大学/理研  
石黒克也 : 金沢大学/理研  
出渕 卓 : 金沢大学/理研/BNL  
市江博子 : Humboldt U. → 金沢大学/東京工業大学  
伊藤祥一 : 金沢大学 → 長野工業高等専門学校  
北原俊一 : 十文字学園女子大学  
駒 佳明 : 金沢大学 → MPI → DESY  
関戸 暢 : 金沢大学/理研  
中村宜文 : 金沢大学/理研 → DESY  
橋本耕一 : 金沢大学 → 金沢大学/理研/BNL → 金沢大学  
森 祥寛 : 金沢大学  
矢澤建明 : 金城短期大学

共同研究組織 [DIK collaboration]

DESY/ZIB (G. Schierholz, H. Stueben)

IHEP/IHEP (M. Polikarpov, A. Veselov, V. Bornyakov, M. Chernodub, F. Gubarev)

## 研究テーマ

クォーク閉じ込め及びカイラル対称性の自発的破れの機構の解明

## 研究の成果と総説

これまでの素粒子研究において、量子色力学 (QCD, Quantum Chromo Dynamics) は、強い相互作用を記述し、さまざまなハドロン現象を支配する理論であると考えられている。それは量子色力学が漸近自由性という性質を持ち、高エネルギー領域では結合定数は小さくなり、摂動論での解析が可能で量子色力学の高エネルギー領域における解析結果と、高エネルギーのハドロンの振る舞いがよく一致しているからである。しかし、低エネルギー領域では、クォークの閉じ込めをはじめとしてハドロンに関する実験結果は豊富にあるものの、結合定数が大きくなるため摂動論を使うことができず、QCD から直接これらの現象を理解することは大変困難で

ある。しかしながら、クォーク（カラー）の閉じこめ問題やカイラル対称性の自発的破れの問題を解明することは、近年の高エネルギー実験、初期宇宙の理解などに必要不可欠である。

我々はモンテ・カルロ法を用い、SR8000稼動初期にはそれまでの研究をふまえて、pure SU(2) QCD、pure SU(3) QCD、および3次元 Georgi-Glashow モデルにおける閉じ込め機構（真空構造）についての研究を行った。pure SU(2) QCD ではその時点までに得られていた QCD の赤外有効理論であるモノポール有効作用を用いて、弦張力などの物理量の評価を行った。また同様の手法を pure SU(3) QCD に拡張した。さらに3次元 Georgi-Glashow モデルにおいては、Polyakov によるモノポール（インスタントン）を用いた希ガス近似における閉じ込めの解析的証明を数値的に検証した。

また、2つの動的フェルミオンの入った格子 QCD シミュレーションでクォーク閉じ込め機構とカイラル対称性の自発的破れの機構をトポロジカルな自由度に着目して調べた。その結果、有限温度系で、ポテンシャルのフィットを行い、ストリングテンション、有効クォーク質量、遮蔽距離などを得た。また、フラックスチューブの解析を行い、バリオンが Y 型の結合をしているということがわかった。さらに、相転移の次数を仮定し、高い精度で連続極限・カイラル極限における（擬）相転移温度を決定した。相転移の次数については、さらなる解析が必要である。

## 各年度ごと研究の成果

### 2000 年度

前年度までに得られた SU(2) QCD の有効モノポール作用を用いて物理量の評価を行った。具体的には各々の物理量に対する完全演算子を構成し、弦張力、グルーボール質量の値を有効モノポール作用と等価なストリングモデルによる強結合展開を使って解析的に計算し、得られた結果が SU(2) QCD における値をほぼ再現していることを確かめた。

また、有効モノポール作用の考え方を SU(3) QCD の場合に拡張し、拘束付きのモノポールカレント 3 本を含めた有効モノポール作用を決定した。得られたモノポール作用に SU(2) QCD の場合に用いた完全演算子の手法を適用し、クォーク・反クォーク間の静的ポテンシャル、弦張力、グルーボール質量などの値を計算した。

さらに SU(2) QCD において、アーベリアンドミナンスおよびモノポールドミナンスのゲージ（非）依存性について考察した。stochastic ゲージ固定の方法を用い、最大可換ゲージ（ゲージ固定パラメータ  $\alpha = 0$ ）とゲージ固定しない場合（ $\alpha = \infty$ ）の中間的なゲージ固定（ $0 < \alpha < \infty$ ）を行ったところ、 $\alpha$  の幅広い領域で弦張力に対するアーベリアンドミナンスとモノポールドミナンスが成立していることが確かめられた。

また、3次元 Georgi-Glashow モデルにおける閉じ込め機構の解明に向けての研究も行った。3次元 Georgi-Glashow モデルには 'tHooft-Polyakov モノポール（インスタントン）が存在し、Polyakov はモノポール（インスタントン）を希ガス近似することにより閉じ込め相が存在することを解析的に示したが、この解析的にわかっていることと格子上でアーベリアン射影を行うことにより得られるモノポール（インスタントン）作用とを比較した。

具体的には、London 極限  $\lambda \rightarrow \infty$  の 3次元格子 Georgi-Glashow モデルにおけるインスタントンを DeGrand-Toussaint の定義を用いて計算するという方法で、ユニタリゲージおよび最大可換ゲージの 2つのゲージ条件を課すことにより詳細に調べた。その結果は、Polyakov が古典的な解析的手段で得たインスタントンの希ガス近似の結果をよく再現するものであった。特に

赤外領域における Coulomb 項の係数は、ユニタリゲージおよび最大可換ゲージともに同じ繰り込みフローにのることがわかった。

この結果は Polyakov が希ガス近似のもとで示した 3次元 Georgi-Glashow モデルの閉じ込め描像を数値的に検証したもので、大変興味深い。

## 2001 年度

----- DIK 国際共同研究開始 -----

テストランを  $16^3 \times 8$  の格子で行った。ゲージ結合定数 ( $\beta$ )、ホッピングパラメーター ( $\kappa$ ) に対する acceptance ratio を調べた。そして、効率よくコンフィギュレーションを生成するため、acceptance ratio が約 70% になるようなハイブリッド・モンテ・カルロ法のパラメータ ( $n\tau$ ) を探した。8node job においては平均 2.4GFlops/node 効率を示した。

## 2002 年度

テストランを  $24^3 \times 10$  の格子で行った。16node job においては平均 2.9GFlops/node 効率を示した。 $16^3 \times 8$  でコンフィギュレーションの生成を開始した。MA ゲージ固定を行い、ポリアコフループに対するアーベリアン・モノポールの寄与を調べた。Full QCD でもアーベリアン・モノポールドミナンスがあることが分かった。アーベリアン・モノポールポリアコフループはシグナルが良く、少ないコンフィギュレーションながらおよその相転移点を見つけることが出来た。

## 2003 年度

計算精度を高めるために引き続き  $16^3 \times 8$  の生成を行った。また有限サイズ効果を調べるために  $24^3 \times 8$ 、連続極限への外挿を行うためにさらに格子間隔の小さい  $24^3 \times 10$  格子のコンフィギュレーションの生成を開始した。

相転移付近での有限サイズ効果は数%でほとんど無視できることを確かめた。閉じこめ相でクォークポテンシャル (図 1) を測りストリングブレーキングを観測した。得られたポテンシャルは次のような関数でよくフィットされる。

$$\left\langle \frac{1}{3} \sum_a P^a(\vec{x}) \cdot \frac{1}{3} \sum_a P^{\dagger,a}(\vec{y}) \right\rangle = e^{-(V_0 + V_{\text{string}}(r,T))/T} + e^{-2E(T)/T}$$

string potential  $V_{\text{string}}$  :

$$\begin{aligned} V_{\text{string}}(r, T) &= -\frac{1}{r} \left( \alpha - \frac{1}{6} \arctan(2rT) \right) \\ &\quad + \left( \sigma(T) + \frac{2T^2}{3} \arctan \frac{1}{2rT} \right) r + \frac{T}{2} \ln(1 + 4r^2 T^2) \\ \alpha &\equiv \alpha_{\text{Gao}} = \pi/12 - \arctan(2rT)/6 \end{aligned}$$

有効クォーク質量,  $m(T)$  :  $E(T) = V_0/2 + m(T)$

また、アーベリアン・モノポールの寄与のポテンシャルを測定し、ノンアーベリアン・アーベリアン・モノポールそれぞれの寄与の温度に対するストリングテンション (図 2)、スクリーニングレングス、有効クォーク質量 (図 3) などを求めた。

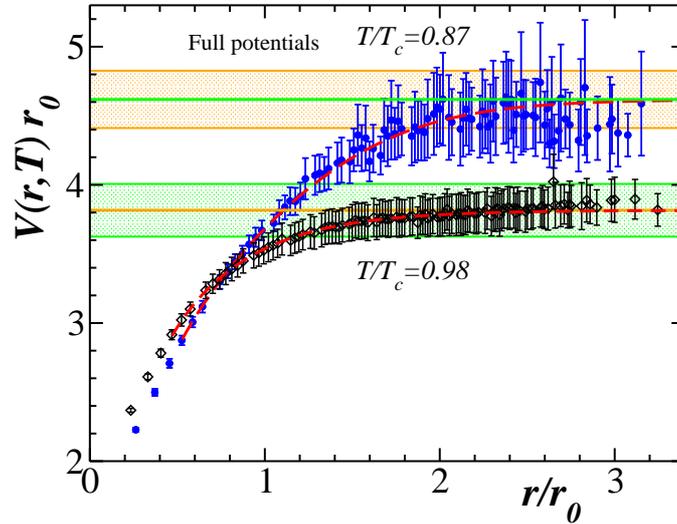


図 1: メソンのクォークポテンシャル

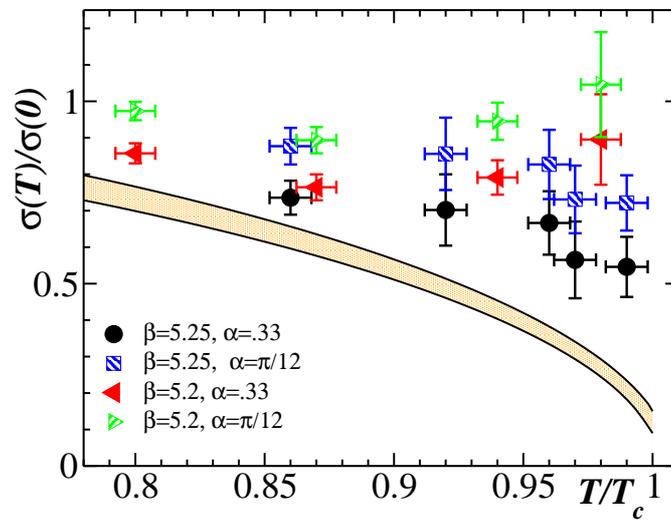


図 2: ノンアーベリアンストリングテンションの温度依存性

さらにメソンのフラックスチューブを測ることで、メソン間の距離を徐々に離していくとストリングが切れる様子を見ることが出来た (図 4)。

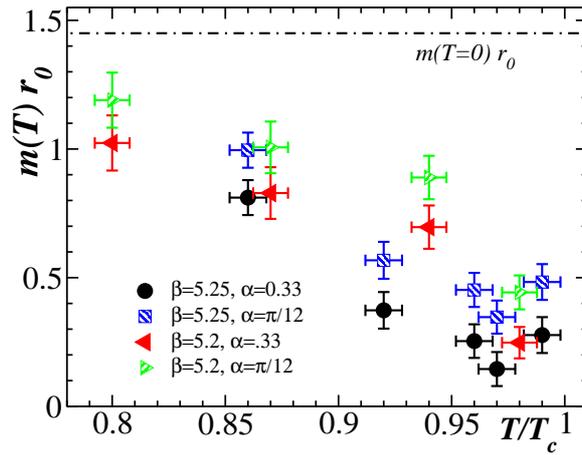


図 3: クォーク有効質量の温度依存性

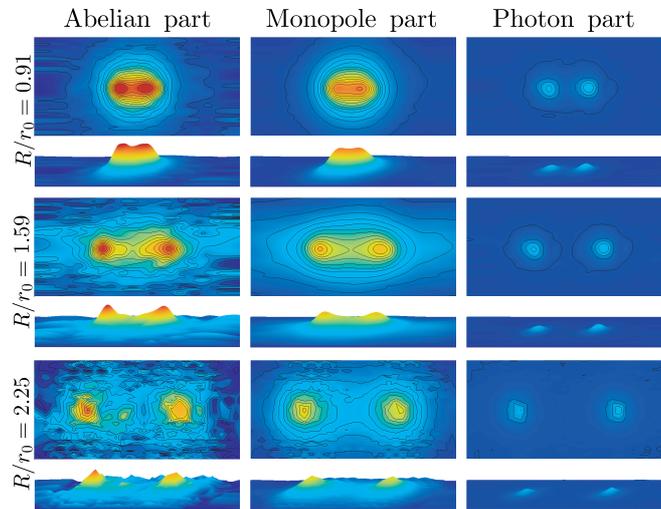


図 4: アーベリアン、モノポール、フォトンポリアコフープを用いたときの作用密度を使ったフラックスチューブのプロファイルの距離依存性

## 2004 年度

計算精度を高めるために引き続き  $16^3 \times 8$ 、 $24^3 \times 10$  格子のコンフィギュレーションの生成を行った。

得られたコンフィギュレーションを用いてバリオンのフラックスチューブを測り、それが Y 型であることが分かった (図 5)。3 クォークポテンシャルを測定し (図 6)、いくつかのモデルでフィットした。

これまでの結果をもとに連続極限・カイラル極限へ相転移温度の外挿をした。

ユニバーサリティーの議論から、カイラル極限付近の有限温度 QCD は有効シグマモデルによって記述されると予想される。このことから、カイラル極限では 2 フレーバー QCD の相転移の次数は、UA(1) 対称性を壊す結合定数の強さによって決まる。この効果が無視できる場合、相転移は 2 次であり、三次元の O(4) ハイゼンベルク・モデルと同じ臨界指数であると予想できる。Bielefeld のグループと CP-PACS コラボレーションはそれまでの研究結果から O(4) スケー

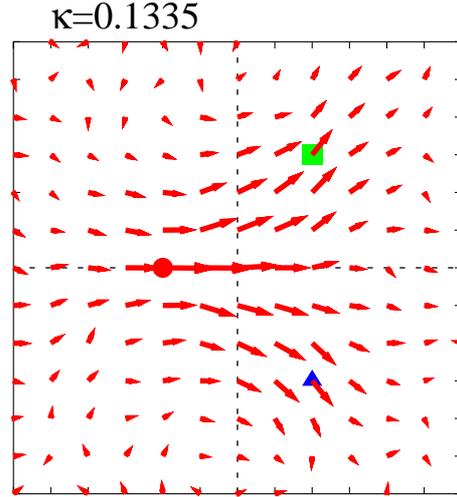


図 5: モノポールポリアコフープで測定したバリオンフラックス (電場) のプロファイル。

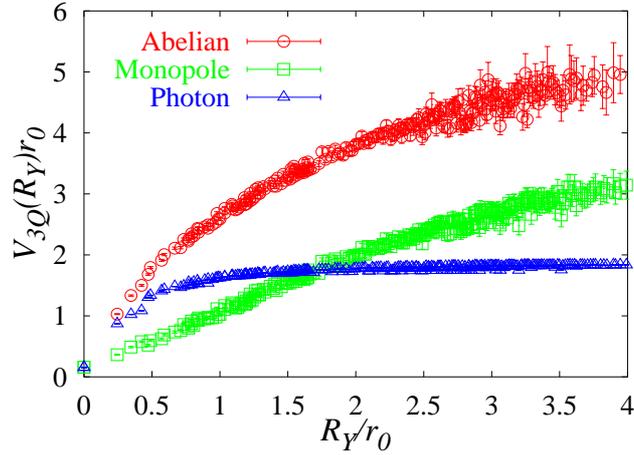


図 6:  $T/T_c = 0.94$  における 3 クォークポテンシャル。

リングを仮定してカイラル極限へ外挿を行った。しかし、最近イタリアのグループが空間方向のサイズを大きくしてスケーリングを調べたところ  $O(4)$  スケーリングではないというデータを示した。従って、我々は、1次相転移・2次相転移それぞれの場合について、連続及びカイラル極限の臨界温度を精度良く求めた。2次相転移を仮定した場合には、

$$T_c^{m_q, a \rightarrow 0} = 174(8) \text{ MeV}$$

となり、他のグループのカイラル極限のみを取った値と近い値であった。1次相転移を仮定した場合には、

$$T_c^{m_q, a \rightarrow 0} = 201(12) \text{ MeV}$$

となった。

2フレーバー QCD がどのような相転移をするかについてはまだはっきりしておらず、現在も研究中である。

## 2005 年度

計算精度を高めるために引き続き  $24^3 \times 10$  格子のコンフィギュレーションの生成を行った。  
得られたデータを相転移の次数を 2 次と仮定して、2 つのタイプ (ベア質量・擬スカラー質量) の外挿式を用いて外挿した。

TYPE1:

$$T_c r_0 = (T_c r_0)^{m_q, a \rightarrow 0} + C_a (a/r_0)^2 + C_q \left( \frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\kappa_c} \right)^{\frac{1}{\beta\delta}}$$

TYPE2:

$$T_c r_0 = (T_c r_0)^{m_q, a \rightarrow 0} + C_a (a/r_0)^2 + C_q (m_{ps})^{\frac{2}{\beta\delta}}$$

$T_c r_0$	$a/r_0$	$1/\kappa - 1/\kappa_c$	$m_{ps}$	$L_t$	$\beta$
0.501(5)	0.200(2)	0.040(4)	1.58(6)	10(DIK)	5.2
0.539(5)	0.232(3)	0.094(4)	2.25(4)	8(DIK)	5.2
0.551(5)	0.227(2)	0.123(4)	2.61(4)	8(DIK)	5.25
0.57(2)	0.290(9)	0.174(12)	2.74(5)	6(E-H)	5.2

$1/\beta\delta$	$(T_c r_0)^{m_q, a \rightarrow 0}$	$C_a$	$C_q$	$\chi^2/dof$	TYPE
0.54	0.439(7)	0.1(2)	0.33(3)	0.09	1
0.54	0.420(7)	0.5(1)	0.036(2)	0.04	2

温度に直すと

$$\text{TYPE1 fitting: } T_c = 173.2(2.7)\text{MeV}$$

$$\text{TYPE2 fitting: } T_c = 165.7(2.7)\text{MeV}$$

となる。データ数が 4 点しかなく自由度が 1 なので、 $\chi^2/dof$  がかなり小さくなった。また、TYPE1 と TYPE2 のフィットがあっていないため、さらに小さいクォーク質量、格子間隔のデータが必要である。

相転移の次数も仮定したため、さらにデータを増やして詳しく調べる必要がある。

## 研究発表リスト

### 学術雑誌

- *Finite temperature QCD with two flavors of nonperturbatively improved Wilson fermions*  
V.G. Bornyakov, M.N. Chernodub, H. Ichie, Y. Koma, Y. Mori, Y. Nakamura, M.I. Polikarpov, G. Schierholz, A.A. Slavnov, H. Stüben, T. Suzuki, P.V. Uvarov, A.I. Veselov  
Phys.Rev.D71:114504(2005)
- *Profiles of the broken string in two-flavor QCD below and above the finite temperature transition*  
V.G. Bornyakov, M.N. Chernodub, H. Ichie, Y. Koma, Y. Mori, M.I. Polikarpov, G. Schierholz, H. Stüben, T. Suzuki  
Prog.Theor.Phys.112:307-324,2004
- *Baryonic flux in quenched and two flavor dynamical QCD*  
V.G. Bornyakov, H. Ichie, Y. Mori, D. Pleiter, M.I. Polikarpov, G. Schierholz, T. Streuer, H. Stüben, T. Suzuki  
Phys.Rev.D70:054506,2004
- *Dynamics of monopoles and flux tubes in two flavor dynamical QCD*  
V.G. Bornyakov, H. Ichie, Y. Koma, Y. Mori, Y. Nakamura, D. Pleiter, M.I. Polikarpov, G. Schierholz, T. Streuer, H. Stüben, T. Suzuki  
Phys.Rev.D70:074511,2004
- *Lattice instanton action of 3D SU(2) Georgi-Glashow model*  
T. Yazawa and T. Suzuki  
JHEP 0104(2001)026

### 国際会議等のプロシーディング

- *An Almost Perfect Lattice Action for infrared QCD :*  
T. Suzuki  
hep-lat/0007036  
Published in \*Guangzhou 2000, Non-perturbative methods and lattice QCD\* 28-36 : the proceedings of International Workshop on Non-Perturbative Methods and Lattice QCD, Guangzhou, China, 15-21 May 2000.
- *On the dynamics of color magnetic monopoles in full QCD*  
V. Bornyakov, H. Ichie, S. Kitahara, Y. Koma, Y. Mori, Y. Nakamura, M. Polikarpov, G. Schierholz, T. Streuer, H. Stüben, T. Suzuki

Nucl.Phys.Proc.Suppl.106:634-642,2002  
hep-lat/0111042

- *Thermodynamics and heavy quark potential in  $N_f=2$  dynamical QCD*  
V. Bornyakov, Y. Nakamura, M. Chernodub, Y. Koma, Y. Mori, M. Polikarpov, G. Schierholz, A. Slavnov, H. Stuben, T. Suzuki, P. Uvarov, A. Veselov  
Nucl.Phys.Proc.Suppl.119:703-708,2003  
hep-lat/0209157
- *The profile of the broken string in the confined and deconfined phase in full QCD*  
V. Bornyakov, H. Ichie, Y. Koma, Y. Mori, Y. Nakamura, M. Polikarpov, G. Schierholz, T. Streuer, T. Suzuki  
Nucl.Phys.Proc.Suppl.119:712-714,2003  
hep-lat/0212023
- *Heavy quark potential in lattice QCD at finite temperature*  
V. Bornyakov, M. Chernodub, Y. Koma, Y. Mori, Y. Nakamura, M. Polikarpov, G. Schierholz, D. Sigaev, A. Slavnov, H. Stüben, T. Suzuki, P. Uvarov, A. Veselov  
Gargnano 2002, Quark confinement and the hadron spectrum 294-296  
hep-lat/0301002
- *Finite temperature phase transition in lattice QCD with  $N_f=2$  nonperturbatively improved Wilson fermions at  $N_t=8$*   
Y. Mori, V. Bornyakov, M. Chernodub, Y. Koma, Y. Nakamura, M. Polikarpov, G. Schierholz, D. Sigaev, A. Slavnov, H. Stüben, T. Suzuki, P. Uvarov, A. Veselov  
Nucl.Phys.A721:930-933,2003  
hep-lat/0301003
- *Finite temperature phase transition in full QCD with  $N_f = 2$  flavors of clover fermions at  $N_t = 8$  and  $10$*   
Y. Nakamura, V. Bornyakov, M.N. Chernodub, Y. Koma, Y. Mori, M.I. Polikarpov, G. Schierholz, A. Slavnov, H. Stuben, T. Suzuki, P. Uvarov, A.I. Veselov  
Nucl.Phys.Proc.Suppl.129:733-735,2004  
hep-lat/0309144
- *Structure of the baryonic flux tube in  $N_f = 2$  lattice QCD at finite temperature*  
Y. Mori, V. Bornyakov, H. Ichie, Y. Koma, M. Polikarpov, G. Schierholz, H. Stuben, T. Suzuki  
Nucl.Phys.Proc.Suppl.129:742-744,2004

hep-lat/0309176

- *Finite temperature QCD with two flavors of dynamical quarks on  $24^3 \times 10$  lattice*  
Y. Nakamura, V.G. Bornyakov, M.N. Chernodub, Y. Mori, S.M. Morozov, M.I. Polikarpov, G. Schierholz, A.A. Slavnov, H. Stuben, T. Suzuki  
Nucl.Phys.Proc.Suppl.140:535-537(2005)
- *Finite temperature QCD with two flavors of dynamical quarks on  $24^3 \times 10$  lattice*  
Y. Nakamura, V.G. Bornyakov, M.N. Chernodub, Y. Mori, S.M. Morozov, M.I. Polikarpov, G. Schierholz, A.A. Slavnov, H. Stuben, T. Suzuki  
AIP Conf.Proc.756:242-244,2005  
hep-lat/0409153
- *Critical temperature in QCD with two flavors of dynamical quarks*  
V.G. Bornyakov, M.N. Chernodub, Y. Mori, S.M. Morozov, Y. Nakamura, M.I. Polikarpov, G. Schierholz, A.A. Slavnov, H. Stuben, T. Suzuki  
PoS LAT2005 (2005) 157  
hep-lat/0509122

## 口頭発表

- Workshop at RCNP, Osaka University, Osaka, Japan, Apr 2002  
Finite Temperature Phase Transition with  $N_f = 2$  Nonperturbatively Improved Fermion Action  
Y. Nakamura, DIK Collaboration
- The XX International Symposium on Lattice Field Theory, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA, Jun 2002  
The profile of the broken string in the confined and deconfined phase in full QCD  
V. Bornyakov, H. Ichie, Y. Koma, Y. Mori, Y. Nakamura, M. Polikarpov, G. Schierholz, T. Streuer, T. Suzuki
- The XX International Symposium on Lattice Field Theory, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA, Jun 2002  
Finite temperature phase transition with  $N_f = 2$  nonperturbatively improved Wilson fermions at  $N_t = 8$   
V. Bornyakov, Y. Nakamura, M. Chernodub, Y. Koma, Y. Mori, M. Polikarpov, G. Schierholz, A. Slavnov, H. Stuben, T. Suzuki, P. Uvarov, A. Veselov

- Quark Confinement and the Hadron Spectrum V 2002, Gargnano, Italy, 10-14 Sep 2002  
Heavy quark potential in lattice QCD at finite temperature  
V. Borneyakov, M. Chernodub, Y. Koma, Y. Mori, Y. Nakamura, M. Polikarpov, G. Schierholz, D. Sigaev, A. Slavnov, H. Stuben, T. Suzuki, P. Uvarov, A. Veselov
- YITP Workshop, "Progress in Particle Physics", Kyoto University, Kyoto, Japan, Jul 2002  
Finite Temperature Phase Transition with Nonperturbatively Improved Fermion Action  
Y. Nakamura, DIK Collaboration
- JPS Workshop, Rikkyo University, Tokyo, Japan, 13-16 Sep 2002  
Finite Temperature Phase Transition with  $N_f = 2$  Nonperturbatively Improved Fermion Action  
Y. Nakamura, DIK Collaboration
- JPS Workshop, Rikkyo University, Tokyo, Japan, 13-16 Sep 2002  
Flux tube profiles and QCD vacuum in finite temperature Full QCD with  $N_f = 2$   
Y. Mori, DIK Collaboration
- JPS Workshop, Tohoku Gakuin University, Miyagi, Japan, 28-31 Mar 2003  
Finite Temperature Lattice QCD with  $N_f = 2$  Nonperturbatively Improved Clover Fermion Action  
Y. Nakamura, DIK Collaboration
- The XXI International Symposium on Lattice Field Theory, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, 14-19 Jul 2003  
Finite Temperature phase transition in full QCD with  $N_f = 2$  Clover Fermions at  $L_t = 8, 10$   
Y. Nakamura, V. Borneyakov, M.N. Chernodub, Y. Koma, Y. Mori, M.I. Polikarpov, G. Schierholz, A. Slavnov, H. Stuben, T. Suzuki, P. Uvarov, A.I. Veselov
- The XXI International Symposium on Lattice Field Theory, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, 14-19 Jul 2003  
Structure of the baryonic flux tube in  $N_f = 2$  lattice QCD at finite temperature  
Y. Mori, V. Borneyakov, H. Ichie, Y. Koma, M. Polikarpov, G. Schierholz, H. Stuben, T. Suzuki
- JPS Workshop, Miyazaki World Convention Center, Miyazaki, Japan, 9-12 Sep 2003  
Finite Temperature Lattice QCD with  $N_f = 2$  Clover Fermion

Y. Nakamura, DIK Collaboration

- JPS Workshop, Miyazaki World Convention Center, Miyazaki, Japan, 9-12 Sep 2003  
Study of the Baryonic flux tube structure  
Y. Mori, DIK Collaboration
- JPS Workshop, Kyusyu University, Fukuoka, Japan, 27-30 Mar 2004  
Phase transition at finite temperature and monopoles  
Y. Nakamura, DIK Collaboration
- JPS Workshop, Kyusyu University, Fukuoka, Japan, 27-30 Mar 2004  
Profiles of the broken string in two-flavor QCD below and above the finite temperature transition  
Y. Mori, DIK Collaboration
- The XXII International Symposium on Lattice Field Theory, Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, IL, USA, 21-26 Jun 2004  
Finite temperature QCD with two flavors of dynamical quarks on  $24^3 \times 10$  lattice  
Y. Nakamura, V.G. Bornyakov, M.N. Chernodub, Y. Mori, S.M. Morozov, M.I. Polikarpov, G. Schierholz, A.A. Slavnov, H. Stuben, T. Suzuki
- Quark confinement and the hadron spectrum VI 2004, Sardinia, Italy, 21-25 Sep 2004  
Finite temperature QCD with two flavors of dynamical quarks on  $24^3 \times 10$  lattice  
Y. Nakamura, V.G. Bornyakov, M.N. Chernodub, Y. Mori, S.M. Morozov, M.I. Polikarpov, G. Schierholz, A.A. Slavnov, H. Stuben, T. Suzuki
- The XXIII International Symposium on Lattice Field Theory, School of Mathematics, Trinity College, Dublin, 25-30 Jul 2005  
Critical temperature in QCD with two flavors of dynamical quarks  
Y. Nakamura, V.G. Bornyakov, M.N. Chernodub, Y. Mori, S.M. Morozov, M.I. Polikarpov, G. Schierholz, A.A. Slavnov, H. Stuben, T. Suzuki