

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2008 ～ 2012

課題番号：20105003

研究課題名（和文） クォーク力学に基づく原子核構造

研究課題名（英文） Nuclear Structure based on Quark Dynamics

研究代表者

初田 哲男 (HATSUDA TETSUO)

東京大学・大学院理学系研究科・客員教授

研究者番号：20192700

研究成果の概要（和文）：原子核構造や高密度物質構造の解明の基礎となる核力を、格子量子色力学の第一原理計算から導出可能にする HAL QCD 法を確立した。超新星爆発時の有限温度核物質の状態方程式をクラスター変分法に基づいて導いた。また、高密度量子色力学の第一原理計算にむけてウィルソンフェルミオン行列式に対する簡約公式を導出した。量子少数粒子系計算においては、ガウス展開法を拡張し任意の 2 体相互作用をする 5 体系計算を可能にした。大次元ハミルトニアンを扱う必要のある原子核構造計算では、モンテカルロ殻模型を展開し、アルゴリズム改良による一桁近い計算速度の向上を達成すると同時に、エネルギー分散を用いた精密な外挿法を開発した。また、対相関も含んだ時間依存密度汎関数法のコード開発を行い、数桁の速度向上を達成するとともに、さまざまな原子核集団運動へ適用した。

研究成果の概要（英文）：To derive the nuclear force from first principle lattice quantum chromo dynamics (QCD) simulations, HAL QCD method was developed and established. The equation of state for asymmetric nuclear matter at finite temperature, which is the key input for describing the supernova explosion, was derived on the basis of the cluster variational method. Also, a reduction formula for the Wilson-fermion determinant necessary to study the phase structure of dense QCD was derived. The Gaussian expansion method for quantum few-body calculation was extended to five-body systems with arbitrary two-body interactions. The Monte Carlo shell model, which is powerful method to study the nuclear Hamiltonian with large dimension, was further developed by improving the numerical algorithm and by introducing a new extrapolation method on the basis of the energy variance. A new code of time-dependent density functional theory with particle paring was developed: It lead to a few orders of magnitude numerical speed-up and was applied to study various nuclear collective motions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2009 年度	22,600,000	6,780,000	29,380,000
2010 年度	21,800,000	6,540,000	28,340,000
2011 年度	21,800,000	6,540,000	28,340,000
2012 年度	21,800,000	6,540,000	28,340,000
総計	93,200,000	27,960,000	121,160,000

研究分野：ハドロン物理学

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：格子QCD、原子核構造、中性子星、ストレンジネス

### 1. 研究開始当初の背景

この計画研究開始(2008年)の数年前から、素粒子論と原子核論の分野において、真空と物質のクォーク構造の理解に向けた確実な進歩が生まれつつあった。素粒子論においては、クォークの真空偏極を考慮し、かつ現実的なクォーク質量での格子QCD計算(いわゆるフルQCD計算)が手の届く範囲に見えてきた。一方、原子核論においては、現実的核力や有効核力を用いた核子多体系の厳密計算が可能になってきた。これらの進展には、高速計算機の飛躍的な能力向上と新しい計算手法開発の両方が本質的な役割を果たしている。

さらに2007年には、原子核構造論の基礎でありながら、半世紀以上にわたり現象論的にしか取り扱えなかった核力を、超並列計算機を用いた格子QCD計算から理論的に導出する道が、本計画研究に属する研究者らにより拓かれた。計算科学の発展により計算可能な領域が拡大するだけでなく、これまで別々に研究されていた隣接する階層の物理が融合し統一的に研究できる可能性が日本の素粒子・原子核研究者の主要な貢献により拓けつつあるというのが、研究開始当初の背景である。

### 2. 研究の目的

上記の現状を踏まえ、格子QCDを用いた核力研究をさらに進展させて、フルQCD計算により、核力やバリオン間相互作用の全解明を目指すとともに、その結果に基いた大規模数値計算による原子核構造論、ハイパー核構造論、中性子星内部の高密度物質の構造論を系統的に展開するのが本計画研究「クォーク力学に基づく原子核構造」の目的である。

### 3. 研究の方法

(1) PACS-CS, T2K, BlueGeneなどで生成された大きな格子上のフルQCDゲージ配位を用い、格子QCD計算に基づく核力やハイペロン力を導出する。

(2) 現実的核力や現象論的ハイペロン力、格子QCDによるバリオン間力を用いた少数バリオン系の量子力学的精密計算を実行し、軽いハイパー核の構造やハイペロン物質の新しい側面を探る。

(3) 現実的核力や格子QCDによるバリオン間力を基礎に、クラスター変分法を用いて核物質状態方程式の計算を行い、中性子星や超新

星爆発等への応用に供する。また、高密度格子QCD計算の手法を探る。

(4) 現実的核力や格子QCDによるバリオン間力を基礎に構築した有効核力を用い、モンテカルロ殻模型計算を実行し、広い質量数にまたがる安定核や不安定核の精密計算を行う。

(5) 核子多体系精密計算の結果を用い、様々な核種やアイソトープについて基底状態や電磁-スピン-スピン・アイソスピン応答などを密度汎関数法で計算し、理論核データを構築する。さらに、これらの結果を超新星爆発時の元素合成過程へのインプットとする。

また、新学術領域研究内の他の計画研究との連携を、複数の計画研究にまたがる連携研究者を置くことで緊密にする。研究支援員

(PD)については、複数の研究テーマにまたがる優秀な若手の人材を配置し、上記研究遂行の流れを加速する。

### 4. 研究成果

(1) 格子QCDの基づくバリオン間相互作用

青木・石井・初田が提唱し、HAL QCD Collaborationが進めてきた、格子上でバリオンの相対波動関数を計算しバリオン間の相互作用を引きだす手法(HAL QCD法)を確立した。特に、(i)波動関数の部分波への分解を行うことで、さまざまなチャンネルでのバリオン間ポテンシャルを導出できることを示したこと、(ii)波動関数の虚時間依存性を活用することで、有限の虚時間のデータから信頼のおけるポテンシャルを導出できることを示したこと、(iii)多バリオンの相関関数を極めて効率よく計算するアルゴリズムを開発し、3体相互作用以上の核力を研究できる端緒を開いたことが今後につながる主要成果である。また、これらの手法を使い、バリオン間のテンソル力やスピン軌道力の導出、SU(3)極限でのバリオン間力およびH-ダイパリンの存在可能性の探求、ハイペロン-核子およびハイペロン-ハイペロン相互作用の導出、核子の3体力の導出、中間子-核子相互作用への拡張を行った。さらに、これらの成果を、“Lattice quantum chromodynamical approach to nuclear physics”, HAL QCD Collaboration (Prog. Theor. Exp. Phys. (2012) 01A105)に総合報告としてまとめた。

図1に示すのは、SU(3)フレーバー対称性がある場合の、 $^1S_0$ チャンネルでのバリオン間力のクォーク質量依存性を表している。

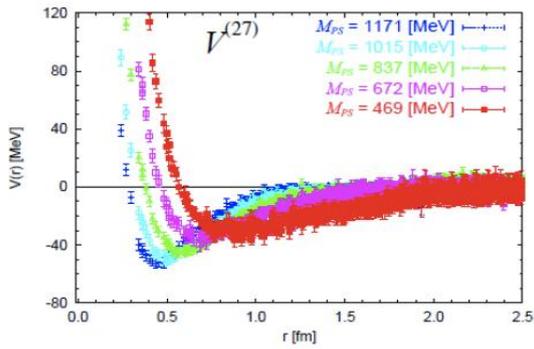


図 1

(2) 少数粒子系の量子力学的厳密計算

肥山らが中心となり開発してきたガウス展開法を、任意の相互作用（中心力、スピン軌道力、テンソル力、運動量依存力、など）を持ち、粒子転換（例えば、 $\Lambda N-\Sigma N$  や  $\Lambda \Lambda-\Xi N-\Sigma N$  など）がある場合について、束縛状態、共鳴状態、連続状態を含む 5 体系にまで拡張することに成功した。これをダブルハイパー核の問題に適用し、Hida-event と呼ばれる事象が、 $\Lambda\Lambda$   $^{11}\text{Be}$  の基底状態に対応することを明らかにした。（図 2 には、 $\Lambda\Lambda$   $^{11}\text{Be}$  に対する実験と理論の比較を示している。）また、少数量子系における荷電対称性の破れを考慮した精密準位計算を可能にした。さらにガウス展開法の基礎とその応用に関する総合報告をまとめた：

“Gaussian expansion method for few-body systems and its applications to atomic and nuclear physics”, E. Hiyama, (Prog. Theor. Exp. Phys. (2012) 01A204)

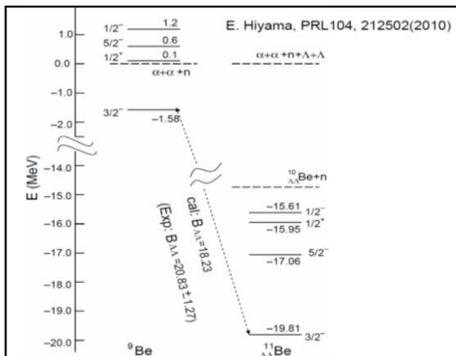


図 2

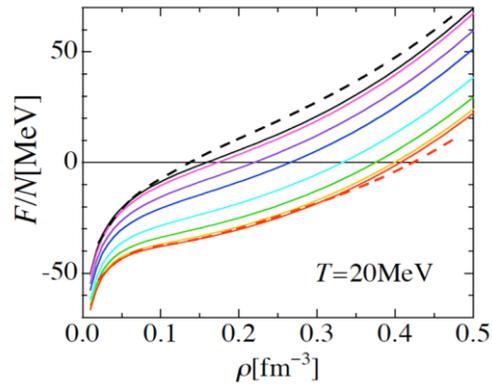
(3) 高密度 QCD

超新星爆発への応用に必要な数値テーブルの構築にむけて、鷹野らを中心として現実的核力とクラスター変分法を用いた有限温度での非対称核物質の状態方程式の研究を進展させた。（例として、非対称核物質の有限温度での自由エネルギーをバリオン密度の関数として与えたものを図 3 に示している。）一方で、高密度 QCD の相転移を格子 QCD により第一原理的に扱うために基礎研究として、中村らを中心有限化学ポテンシャル

でのウィルソフェルミオン行列式に関する簡約公式を導出し、フュガシティ展開を行って、複素化学ポテンシャルにおける Lee-Yang ゼロの分布が転移温度の前後で定性的に変化することを示した。

さらに、有限密度 QCD に対する格子ゲージ理論からのアプローチについての総合報告をまとめた：“Towards extremely dense matter on the lattice”, XQCD-J Collaboration, Prog. Theor. Exp. Phys. (2012) 01A103.

図 3



(4) モンテカルロ殻模型による原子核構造

大次元の原子核ハミルトニアン固有値や波動関数を数値的に求める手法として大塚らが進めてきたモンテカルロ殻模型をさらに発展させた。特に、(i) 計算アルゴリズムの改良により従来の 8 倍の計算速度を達成し、(ii) エネルギー分散を用いた外挿法による物理量の精密計算を可能にした。図 4 には、(ii) の外挿法を用いたエネルギー固有値の変化と実験データとの比較の一例が示されている。また、これらの方法を用いて、軽い原子核に関するコア無計算を実行することに成功するとともに、中縦隔については、中性子過剰核における殻構造の変化などの研究を可能にした。さらに、モンテカルロ殻模型の基礎と応用に関する総合報告をまとめた：“New-generation Monte Carlo shell model for the K computer era”, N. Shimizu et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2012) 01A205

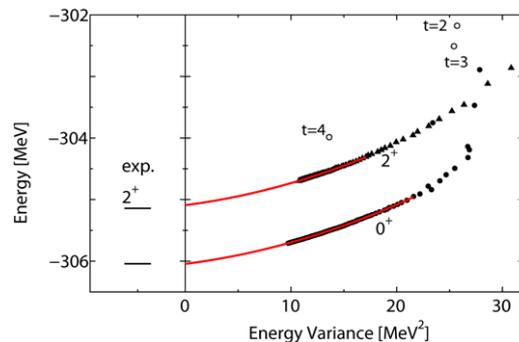


図 4

(5)時間依存密度汎関数法と原子核動力学  
中務、矢花らを中心に、対相関まで含んだ時間依存密度汎関数法の新たな数値計算コードを開発した。これにより、数値計算コストを数ケタ下げることが可能になり、複数の原子核形状の量子揺らぎによる共存現象はおとより、核分裂の微視的シミュレーションまでもが視野に入ってきた。また、エキゾチック原子核の典型的な励起モードであるピグミー共鳴についての、時間依存密度汎関数法計算により、ピグミー共鳴が中性子スキンの厚みや対称エネルギーの密度依存性に関して有用な情報源となりうることを示した。図5には、中性子数の増加に伴いピグミー共鳴が顕著に表れてくる様子が示されている。さらに、時間依存密度汎関数法の基礎と応用に関する総合報告をまとめた：

”Density functional approaches to collective phenomena in nuclei: Time-dependent density-functional theory for perturbative and non-perturbative nuclear dynamics”, T. Nakatsukasa, Prog. Theor. Exp. Phys. (2012) 01A207.

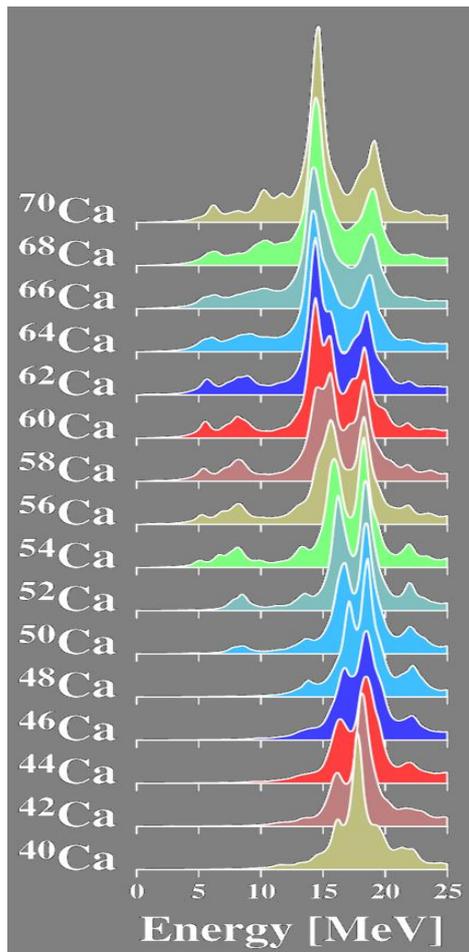


図5

## 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 24 件)

- 1) Lattice QCD approach to Nuclear Physics, HAL QCD Collaboration (Sinya Aoki et al.) 10.1093/ptep/pts010. PTEP 2012 (2012) 01A105. 査読有
- 2) Exploring Three-Nucleon Forces in Lattice QCD, HAL QCD Collaboration (S. Aoki et al.). Prog. Theor. Phys. 127 (2012) 723-738. 査読有
- 3) Shape transitions in exotic Si and S isotopes and tensor-force-driven Jahn-Teller effect, Yutaka Utsuno, Takaharu Otsuka, B. Alex Brown, Michio Honma, Takahiro Mizusaki, Noritaka Shimizu. 10.1103/PhysRevC. 86. 051301. Phys. Rev. C86 (2012) 051301. 査読有
- 4) New Generation of the Monte Carlo Shell Model for the K Computer Era, Noritaka Shimizu, Takashi Abe, Yusuke Tsunoda, Yutaka Utsuno, Tooru Yoshida, Takahiro Mizusaki, Michio Honma, Takaharu Otsuka. 10.1093/ptep/pts012. PTEP 2012 (2012) 01A205. 査読有
- 5) Benchmarks of the full configuration interaction, Monte Carlo shell model, and no-core full configuration methods T. Abe, P. Maris, T. Otsuka, N. Shimizu, Y. Utsuno, J.P. Vary. 10.1103/PhysRevC. 86. 054301. Phys. Rev. C86 (2012) 054301. 査読有
- 6) No-Core MCSM calculation for  $^{10}\text{Be}$  and  $^{12}\text{Be}$  low-lying spectra, Lang Liu, Takaharu Otsuka, Noritaka Shimizu, Yutaka Utsuno, Robert Roth. 10.1103/PhysRevC. 86. 014302. Phys. Rev. C86 (2012) 014302. 査読有
- 7) Density functional approaches to collective phenomena in nuclei: Time-dependent density-functional theory for perturbative and non-perturbative nuclear dynamics, Takashi Nakatsukasa. 10.1093/ptep/pts016. PTEP 2012 (2012) 01A207. 査読有
- 8) No-Core MCSM calculation for  $^{10}\text{Be}$  and  $^{12}\text{Be}$  low-lying spectra, Lang Liu, Takaharu Otsuka, Noritaka Shimizu, Yutaka Utsuno, Robert Roth. 10.1103/PhysRevC. 86. 014302. Phys. Rev. C86 (2012) 014302. 査読有

- 9) Towards extremely dense matter on the lattice,  
XQCD-J Collaboration (A. Nakamura et al.).  
10.1093/ptep/pts003.  
PTEP 2012 (2012) 01A103. 査読有
- 10) EoS of finite density QCD with Wilson fermions by Multi-Parameter Reweighting and Taylor expansion,  
Keitaro Nagata, Atsushi Nakamura.  
10.1007/JHEP04(2012)092.  
JHEP 1204 (2012) 092. 査読有
- 11) Gaussian expansion method for few-body systems and its applications to atomic and nuclear physics  
Emiko Hiyama.  
10.1093/ptep/pts015.  
PTEP 2012 (2012) 01A204. 査読有
- 12) Bound H-dibaryon in Flavor SU(3) Limit of Lattice QCD  
HAL QCD Collaboration (S. Aoki et al.).  
10.1103/PhysRevLett.106.162002.  
Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 162002. 査読有
- 13) Renormalization persistency of tensor force in nuclei,  
Naofumi Tsunoda, Takaharu Otsuka,  
Koshiroh Tsukiyama, Morten Hjorth-Jensen.  
10.1103/PhysRevC.84.059901.  
Phys. Rev. C84 (2011) 044322. 査読有
- 14) Imaginary Chemical Potential Approach for the Pseudo-Critical Line in the QCD Phase Diagram with Clover-Improved Wilson Fermions,  
Keitaro Nagata, Atsushi Nakamura.  
10.1103/PhysRevD.83.114507.  
Phys. Rev. D83 (2011) 114507. 査読有
- 15) Emergence of pygmy dipole resonances: Magic numbers and neutron skins  
Tsunenori Inakura, Takashi Nakatsukasa,  
Kazuhiro Yabana.  
10.1103/PhysRevC.84.021302.  
Phys. Rev. C84 (2011) 021302. 査読有
- 16) Finite amplitude method for the quasi-particle-random-phase approximation  
Paolo Avogadro, Takashi Nakatsukasa.  
10.1103/PhysRevC.84.014314.  
Phys. Rev. C84 (2011) 014314. 査読有
- 17) Graphical Method for Effective Interaction with a New Vertex Function  
K. Suzuki, R. Okamoto, H. Kumagai, S. Fujii.  
10.1103/PhysRevC.83.024304.  
Phys. Rev. C83 (2011) 024304. 査読有
- 18) Theoretical Foundation of the Nuclear Force in QCD and its applications to Central and Tensor Forces in Quenched Lattice QCD Simulations  
Sinya Aoki, Tetsuo Hatsuda, Noriyoshi Ishii.  
10.1143/PTP.123.89.  
Prog. Theor. Phys. 123 (2010) 89-128. 査読有
- 19) Novel features of nuclear forces and shell evolution in exotic nuclei  
Takaharu Otsuka, Toshio Suzuki, Michio Honma, Yutaka Utsuno, Naofumi Tsunoda,  
Koshiroh Tsukiyama, Morten Hjorth-Jensen.  
10.1103/PhysRevLett.104.012501.  
Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 012501. 査読有
- 20) Baryon-baryon interactions and hypernuclei  
Emiko Hiyama, Toshio Motoba, Thomas A. Rijken, Yasuo Yamamoto.  
10.1143/PTPS.185.1.  
Prog. Theor. Phys. Suppl. 185 (2010) 1-13. 査読有
- 21) Five-body cluster structure of double- $\Lambda$  hypernucleus  ${}^{\Lambda}_{\Lambda}\text{Be}$   
E. Hiyama, M. Kamimura, Y. Yamamoto, T. Motoba.  
10.1103/PhysRevLett.104.212502.  
Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 212502. 査読有
- 22) Wilson Fermion Determinant in Lattice QCD  
Keitaro Nagata, Atsushi Nakamura.  
10.1103/PhysRevD.82.094027.  
Phys. Rev. D82 (2010) 094027. 査読有
- 23) Ground-state and single-particle energies of nuclei around O-16, Ca-40, and Ni-56 from realistic nucleon-nucleon forces  
S. Fujii, R. Okamoto, K. Suzuki.  
10.1103/PhysRevLett.103.182501.  
Phys. Rev. Lett. 103 (2009) 182501. 査読有
- 24) Light Xi hypernuclei in four-body cluster models  
E. Hiyama, Y. Yamamoto, T. Motoba, Th. A. Rijken, M. Kamimura.  
10.1103/PhysRevC.78.054316.  
Phys. Rev. C78 (2008) 054316. 査読有

[学会発表] (計 3 件)

- 1) Strangeness Nuclear Physics from Lattice QCD, T. Hatsuda, HYP2012: 11th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (Barcelona, Spain, Oct. 1-5, 2012). 招待講演
- 2) Nuclear force and nuclear physics from lattice quantum chromodynamics, T. Hatsuda, Rutherford Centennial Conference on Nuclear Physics (2011 年 08 月 08 日～2011 年 08 月 12 日, Manchester, UK) 招待講演
- 3) Recent results in particle and nuclear physics from lattice QCD, T. Hatsuda, 19th International Conference on Particles and Nuclei (2011 年 07 月 24 日～2011 年 07 月 29 日, Cambridge, USA) 招待講演

[図書] (計 2 件)

- 1) クォークからハドロン・原子核へ, 初田哲男, 計算と宇宙(岩波講座計算科学 第2巻第4章)(岩波書店)(2012).
- 2) Lattice Nuclear Force, T. Hatsuda, in Festschrift for Gerry Brown (World Scientific, Singapore, 2011)

[その他]

ホームページ等

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/qana02/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者

大塚 孝治 (OTSUKA TAKAHARU)  
東京大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号: 20201379  
中村 純 (NAKAMURA ATSUSHI)  
広島大学・情報メディア教育センター・教授  
研究者番号: 30130876  
青木 慎也 (AOKI SINYA)  
筑波大学・数理物質科学研究科・教授  
研究者番号: 30192454  
中務 孝 (NAKATSUKASA TAKASHI)  
独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・准主任研究員  
研究者番号: 40333786  
藤井 新一郎 (FUJII SHINICHIRO)  
九州大学・高等教育開発推進センター・助教  
研究者番号: 90401166  
(H20-H21)

肥山 詠美子 (HIYAMA EMIKO)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・准主任研究員  
研究者番号: 10311359  
(H22-H24)

### (3) 連携研究者

清水 則孝 (SHIMIZU NORITAKA)  
東京大学・原子核科学研究センター・特任准教授  
研究者番号: 30419254  
佐々木 勝一 (SASAKI SHOICHI)  
東北大学・理学研究科・准教授  
研究者番号: 60332590  
矢花 一浩 (YABANA KAZUHIRO)  
筑波大学・数理物質科学系・教授  
研究者番号: 70192789  
鷹野 正利 (TAKANO MASATOSHI)  
早稲田大学・理工学術院・教授  
研究者番号: 00257198  
根村 英克 (NEMURA HIDEKATSU)  
筑波大学・計算科学研究センター・特任准教授  
研究者番号: 80391738  
鈴木 俊夫 (SUZUKI TOSHIO)  
日本大学・文理学部・教授  
研究者番号: 70139070  
石井 理修 (ISHII NORIYOSHI)  
筑波大学・計算科学研究センター・特任准教授  
研究者番号: 40360490  
藤井 新一郎 (FUJII SHINICHIRO)  
東京大学・大学院理学系研究科・特任准教授  
研究者番号: 90401166