

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05320

研究課題名(和文) 格子計算による核子および中間子からの新物理探索

研究課題名(英文) Lattice computation with nucleon and meson for new physics

研究代表者

青木 保道 (Aoki, Yasumichi)

国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究センター・チームリーダー

研究者番号：20292500

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：基礎物理法則をスーパーコンピュータ上でシミュレートして得られた極微の世界の真空サンプルを用い、実験と対比させる「物理量」をまたスパコンで計算する。この「計算」を効率よく行う手法を問題に応じて取捨選択、さらには新規開発して、陽子寿命の特定に必要な物理量の計算精度を向上させた。また、同様にヒッグス粒子を素粒子では無く複合粒子とする理論が、実験で決定した質量を再現しうる可能性を探った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

極微の世界の物理法則はヒッグス粒子の発見で完成した標準模型が最も成功を収めているが説明できない物理現象も存在する。標準模型を超える物理法則の可能性を探ることで、この宇宙の真理に迫ることが、素粒子物理学の最大のテーマである。本課題ではスーパーコンピュータを用いる手法の改良で、この真理の探求に二つの異なる方向：一つは標準模型中の量子色力学から、もう一つは新法則候補である量子色力学の類似理論の直接シミュレーションから切り込み、スパコンの計算の効率化に寄与する成果を得ることに成功した。

研究成果の概要(英文)：Using the vacuum ensemble of the microscopic world generated using a fundamental physics law on a supercomputer, yet another computation of physical quantities on a supercomputer is necessary. By carefully selecting the method and/or by developing a new method of the "computation" to make full use of the ensemble, a precision determination of the parameter necessary for proton lifetime estimate was made possible. The same strategy yielded a test of the composite Higgs model where the Higgs particle is not an elementary particle of the standard model but expressed as a composite of a new fermion and an antifermion.

研究分野：数値的手法による素粒子理論、特に格子量子色力学

キーワード：新物理探索 中間子 核子 格子ゲージ理論 陽子崩壊 複合ヒッグス模型 暗黒物質 非摂動くりこみ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

LHC 実験でヒッグス粒子が発見されたことにより、素粒子標準模型の最後のピースが埋まった。一方、標準模型のヒッグス部分に内在する不自然さや、標準模型では説明できていない、物質優勢宇宙の形成、暗黒物質の存在等の観測事象は、標準模型を超える新物理法則によって自然に記述できるとの期待がある。LHC アップグレード後のラン 2 や、SuperKamiokande とその後継であり計画段階の HyperKamiokande による陽子崩壊観測実験などで、新物理の発現が期待されるなかで、それら実験の結果から、新物理候補理論の検証を行うための理論計算の重要性が高まっている。特に QCD や新奇な強結合ゲージ理論から導かれるものについて、計算が困難であるために手つかずであったものや、数値計算の精度が十分高くなくそれに由来した誤差の影響により、十分な検証が行われていないケースがあった。この状況を打破するための非摂動計算の高度化が求められている。

2. 研究の目的

素粒子標準模型がほぼ完璧にあまたの実験事象を説明していることは、新物理、すなわち標準模型を超える物理が存在したとして、その効果を見るためには実験-理論の精度向上が不可欠であることを示している。ここでは素粒子標準模型を超える新物理法則の探索に狙いを定め、QCD と QCD 類似理論における核子、中間子をプローブとする物理過程で、新法則と実験とを結びつける物理量の高精度計算を、第一原理である格子ゲージ理論の数値解析により行う。これまで計算が困難であったもの、一層の高精度化が必要な物理量を特に取り扱う。

3. 研究の方法

本課題では、核子、中間子をプローブとした過程における新物理探索に、関連する物理量の格子計算により大きな寄与を与えることを目的としている。高精度で計算するための手法を構成し最新の QCD および QCD 類似理論の真空配位に適用する。それにより、新物理法則の絞り込みやパラメータ制限に供することを狙いとしている。

高精度計算に寄与しうる方法として、本課題では 対称性を利用した分散縮小法の活用、AMA (All Mode Averaging)、 変分法と相関行列の応用、 Yang-Mills 勾配流の応用 のうち、各問題にふさわしいものを採用しチューニングを行う。

4. 研究成果

(1) 陽子崩壊行列要素及び関連する非摂動くりこみ

新物理の決定的証拠となる陽子崩壊事象をとらえようとする観測実験により寿命の下限の更新が進んでいる。本課題では、観測実験の結果から新物理候補理論の制限を行う橋渡しとなる陽子崩壊 QCD 行列要素の高精度化に取り組んだ。この QCD 行列要素は、格子 QCD に基づく大規模数値計算が唯一の定量的評価になるが、これまでの計算では統計精度に改良の余地があり、さらに、非物理的設定からの外挿による潜在的な系統誤差が大きい懸念があった。

AMA (All-Mode Averaging) 法の試験適用では：低エネルギーモードと、並進対称性に基づく相関を利用した不完全解を適度に組み合わせることの有効性の確認をまず行った。これまでで最も精度の高い計算で用いられた、ドメインウォールフェルミオンの基本統計サンプルを用い、AMA により統計誤差の格段の縮小が実現できることを確認した。現実の ud クォーク質量より重い点の数値計算結果であり、物理予言にはカイラル外挿が必要になるが、統計誤差の縮小は、その他の系統誤差推定の改善も導き、誤差全体を半減させることにつながった (引用文献[1])。

さらに、この技術を物理点直上格子真空配位を用いた計算に応用した。用いた配位は 2 種類で、どちらもフレーバー数 $N_f=2+1$ であるが、一つは a) PACS collaboration による、改良された Wilson フェルミオン作用を用いたもので、主に 64^4 格子体積を、一部体積効果研究のために 96^4 体積を用いている。もう一つは b) RBC/UKQCD collaboration によるドメインウォールフェルミオン作用を用いたもので、体積は $24^3 \times 64$ である。空間サイズは、a) 5.4fm (一部 8.1fm)、b) 4.8fm である。b) はこれまで陽子崩壊行列要素の様々な手法(特にカイラル対称性を利用した非摂動くりこみ手法)を開発してきたドメインウォールフェルミオンによるものであるが、物理点クォークでの 5 次元(カイラル対称性を高度に実現するために仮想的に 1 次元上げた手法を用いる)高負荷計算の代償として、格子間隔を大きく取らざるを得なくなり、結果として離散化誤差の増大の懸念が生じる。a) はカイラル対称性を仮定できないため、非摂動くりこみの新しい開発が必要になり、さらに、b) とは異なる離散化誤差の原因となり得る。一方で計算コストが比較的小さく、格子間隔を小さくできる。このように二つの異なる計算手法による結果には、起源の異なる離散化誤差が一般に含まれているため、相補的な役割が期待できる。

これらの計算の途中結果は[4]および[5]に出版されており、以下の知見を得た。まず、物理点直上でも AMA の有効性が確認できた。さらに、[1]のカイラル外挿を伴う結果と、カイラル外挿が不要である[4][5]の結果は無矛盾であることが分かった。[1]のカイラル外挿については、クォーク質量に対して素朴な多項式を用いているが、それは、カイラル極限に近づけば、いずれ破綻する。特に、最近のカイラルバッグ有効模型から、この破綻の影響が大きく、素朴な多項式を用いた外挿では、真の値を大きく外す可能性が指摘されていた。物理点直上計算で得られた新しい結果は、少なくとも物理点まではそのような破綻は起こらない(物理点よりさらにカイラル極

限に漸近した場合には破綻の可能性は残されている)ことを強く示唆しており、ひいては、これまでの結果を用いた、新物理理論の棄却に対する影響は大きくないことを示している点で重要である。

a) Wilson フェルミオンでは、陽子崩壊を誘導する 3 クォーク演算子の非摂動くりこみ手法の開発を行い、その結果によりこれまでのカイラル外挿による結果と絶対値による比較が可能となった。非摂動くりこみは、複合演算子に現れる紫外発散を摂動論的な近似によらずに除去し、物理的な崩壊振幅を求めるために必要不可欠な手続である。この際、赤外領域で出現するカイラル対称性の自発的破れなどの余計な情報を効率よく除去し、結果として系統誤差の削減に大きく寄与する手法を開発した。これは、ドメインウォールフェルミオンで双一次や、4 クォーク演算子の非摂動くりこみとして開発された RI/SMOM スキームの、陽子崩壊演算子くりこみへの初めての応用となる。非例外条件(Weinberg による)を満たす流入運動量、特に、双一次演算子の二つのクォーク外線と演算子、都合 3 つの運動量の絶対値を等しく取る、symmetric subtraction point の自然な拡張で、3 クォーク演算子のくりこみに必要な、3 クォーク及び双一次頂点関数に登場する全ての運動量が非例外条件を満たすように構成する。ここでは、この新しいくりこみスキームを Wilson フェルミオンへ適用したが、形式の骨格自体はフェルミオン定式化によらないため、ドメインウォールフェルミオンへの適用も進めている。また、カイラル対称性の仮定できないウィルソンフェルミオンの場合のくりこみ手法は陽子崩壊のみならず、核子のスカラー、テンソル電荷の計算にも応用し([6])、系統誤差の縮小に導いた。

(2) 複合ヒッグス模型構築にむけた多フレーバー QCD

新物理法則の候補となる強結合ゲージ理論(Large-Nf QCD)の解析では、8 フレーバー QCD 理論の格子計算を行い、その理論でヒッグス粒子の候補となるフレーバー一重項スカラー()の質量等の計算を行った。ここでは は新素粒子であるフェルミオンとその反粒子の複合粒子として記述される。標準模型の QCD から作られる の計算は格子 QCD の難問として知られており、その原因の一つに統計精度を出すのが困難な量であることが挙げられる。基本的にフレーバー数を増やしただけの 8 フレーバー理論での計算でも同様な困難が予想された。ここでは使用する格子作用の対称性によるワード高橋恒等式を用いた分散縮小法を取り入れることにより、シグナルを得ることに成功した。結果として、通常 の QCD では考えられない低質量が実現されていることが確認できた。8 フレーバー QCD は、その結合定数がエネルギーの関数としてゆっくり変化する性質があり、そのため近似的なスケール不変性が生じ、結果として、通常 の QCD とは異なる特異なスペクトルが実現している可能性が指摘されている。実験で確認されたヒッグス粒子の質量は 125GeV と、一般的に複合模型で実現するには相当小さいが、得られた結果はその実現可能性を示唆し、期待が持たれる。この模型からはさらに、暗黒物質候補となるテクニオン、暗黒物質の理論パラメータとして重要なディラトン崩壊定数等の結果を導出し、 やその他の複合粒子のスペクトルの結果と共に出版した([2])。

標準模型中の QCD ではフレーバー一重項擬スカラー の計算も困難な問題の一つである。 は QCD のフレーバー(対角)対称性が量子効果として破れることにより、非一重項であるパイオン(擬南部-ゴールドストーンボソン)とは対照的に重くなる性質がある。標準模型の は様々な要因からパイオンと の中間付近の質量をとる。 / 質量比は 2(標準模型)である。8 フレーバー理論の はどうだろうか。我々の結果が示すのは、 / 質量比は標準模型に比較して、格段に大きくなることである。これはフレーバー数の増大と共に、コンフォーマル相に近づくことから生じる近似的スケール不変性の出現と同時に量子異常の効果も増大するという、新規な動力学の発現とも捉えられるが、更なる深い理解は今後の課題である。これらの結果の途中経過は[3]に出版されている。

Large-Nf QCD では、現象論的に重要な Peskin-Takeuchi S パラメータの計算も進めている。ここでは、有限体積効果の制御が主要課題であることが分かってきた。従前の別グループの計算で、カイラル極限での S パラメータの減少はサイズ効果を見ていたためだった可能性がある。ここでは、複数の体積を用いて系統的に体積効果を見積もとると共に、関連するチャンネルの複合粒子スペクトルに現れるサイズ効果との整合正を追跡した。また、従来のフーリエ変換後の真空偏極関数から導出する方法に加え、時間相関関数のモーメントから求める方法も新たに取り入れ、導出法による系統誤差の評価も行い、最終的な値の導出を試みた。さらに、後者の方法の応用として、ベクトルと軸性ベクトルに結合する軽い複合粒子単独の寄与も計算でき S パラメータのスペクトル分解の評価に用いている。この一連の計算の副産物として、テクニベクター、軸性ベクターの崩壊定数の測定も行い、それぞれ現象論的な考察を与えた。これらの結果を纏めて出版準備中である。

(3) 重いフレーバー物理

LHCb や Belle2 実験で測定される B メソンの崩壊・混合は小林-益川行列の過制限やユニタリ性の検証から標準模型のほころびを探るための重要なプロセスである。この際、格子 QCD による B メソンの行列要素の精密計算が必要になる。当課題では実際の計算は行わなかったが、現在までに行われている最新の計算結果の精査を行い、重要な行列要素の平均を導出し、FLAG(Flavor Lattice Averaging Group) report のセクションとして出版した([7])。

(4) 高精度計算に寄与する手法の評価及び課題

本課題では 対称性を利用した分散縮小法の活用、AMA (All Mode Averaging)、変分法と相関行列の応用、Yang-Mills 勾配流の応用 のうち、各問題にふさわしいものを採用しチューニングを行うとした。ここではそれぞれの評価と今後の課題をまとめる。

対称性を利用した分散縮小法

特に統計精度を出すのが困難な Large-Nf QCD のフレーバー重項スカラー測定で真価を發揮した。ワード高橋恒等式により、一つの格子真空配位上で空間サンプルの最大限の利用を可能とすることがエッセンスである。また、S パラメタやベクトル、軸性ベクトルの崩壊定数の測定にも関連するワード高橋恒等式を用いており、統計揺らぎを押さえる効果を自動的に含んでいると考えられる。これは、当該恒等式が各配位で成立するため、恒等式を破る揺らぎが自然に抑制されることによる。これらの手法は、通常の QCD では、暗黙裏に使われていることもあるが、そのメカニズムが上で述べたように、場の理論の基本恒等式に立脚しているため、QCD 類似理論でも有効である事が期待され、実際にそれが確かめられたことになる。

AMA (All Mode Averaging)

陽子崩壊行列要素の誤差縮小に決定的に重要な役割を果たした。この物理量に留まらず、ハドロンの相関関数を用いた各種物理量の誤差縮小に寄与しうると考えられる。

変分法と相関行列の応用

この技術は、当課題では未開発に終わった。複合粒子の状態を抜き出すためにユークリッド時間に対する指数関数依存を用いる。通常最もエネルギーが低い状態以外の寄与が無視できる程度の時間間隔のデータを用いることになる。しかし、特に Large-Nf QCD の新奇な動力学の理解に必要なフレーバー重項はノイズの漸近的増大が甚だしく、このため上記の技術を用いてもなお精度向上に限界があった。現在の精度でも定性的な議論には供するだけの結果を残せたが、この技術開発が成功すれば、低エネルギーのいくつかの状態を、ノイズの小さい短時間相関関数から抜き出すことが可能となる。これにより、精密な定量解析が可能になることからブレークスルーが期待できる。Wilson やドメインウォールフェルミオンでは、すでに実用化されているこの技術であるが、Large-Nf QCD で用いているスタッガードフェルミオンでは、必ずパリティパートナーが符号振動で混合することによる困難が未解決である。これは今後の課題として記録しておく。

Yang-Mills 勾配流の応用

通常の QCD でも様々な応用で成功を収めている技術であるが、QCD 類似理論である Large-Nf QCD でもその有効性が確認できた。当課題では、特にフレーバー重項擬スカラー(通常の QCD では χ)質量の測定で顕著な成果を上げた。また、QCD と同様、勾配流から定義する精密スケール t_0 は Large-Nf QCD でも同様に有用であることが確認された。さらに、Yang-Mills 勾配流を用いた同モデルの幾何学的性質と動力学との関連を理解するための研究にも寄与している。

<引用文献>

- [1] Y. Aoki, T. Izubuchi, E. Shintani, A. Soni, “Improved lattice computation of proton decay matrix elements”, Phys. Rev. D96 (2017) 014506.
- [2] Y. Aoki et al (LatKMI collaboration), “Light flavor-singlet scalars and walking signals in Nf=8 QCD on the lattice”, Phys. Rev. D96 (2017) 014508.
- [3] Y. Aoki et al (LatKMI collaboration), “Flavor-singlet spectrum in multi-flavor QCD”, EPJ Web of Conferences 175 (2018) 08023.
- [4] J-S. Yoo, Y. Aoki, T. Izubuchi, S. Syritsyn, “Proton decay matrix element on lattice at physical pion mass”, PoS(LATTICE2018) (2019) 187.
- [5] Y. Aoki, Y. Kuramashi, E. Shintani, N. Tsukamoto, “Proton decay matrix elements with physical quark masses”, PoS(LATTICE2019) (2020) 141.
- [6] N. Tsukamoto, Y. Aoki, K.I. Ishikawa, Y. Kuramashi, E. Shintani, S. Sasaki, T. Yamazaki, “Nucleon isovector couplings from 2+1 flavor lattice QCD at the physical point”, PoS(LATTICE2019) (2020) 132.
- [7] S. Aoki, Y. Aoki et al, “FLAG Review 2019: Flavor Lattice Averaging Group”, Eur. Phys. J. C80(2020) 2.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Aoki S., Aoki Y., et al	4. 巻 80
2. 論文標題 FLAG Review 2019	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-019-7354-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Yoo Jun-sik, Aoki Yasumichi, Izubuchi Taku, Syritsyn Sergey	4. 巻 LATTICE2018
2. 論文標題 Proton decay matrix element on lattice at physical pion mass	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.334.0187	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Y. Aoki, Y. Kuramashi, E. Shintani, N. Tsukamoto	4. 巻 LATTICE2019
2. 論文標題 Proton decay matrix elements with physical quark masses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) to be determined	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 N. Tsukamoto, Y. Aoki, K.I. Ishikawa, Y. Kuramashi, E. Shintani, S. Sasaki and T. Yamazaki	4. 巻 LATTICE2019
2. 論文標題 Nucleon isovector couplings from 2+1 flavor lattice QCD at the physical point	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) to be determined	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Aoki Yasumichi, Izubuchi Taku, Shintani Eigo, Soni Amarjit	4. 巻 96
2. 論文標題 Improved lattice computation of proton decay matrix elements	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 014506-1 ~ 18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.014506	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Aoki Yasumichi, Aoyama Tatsumi, Bennett Ed, Kurachi Masafumi, Maskawa Toshihide, Miura Kohtaroh, Nagai Kei-ichi, Ohki Hiroshi, Rinaldi Enrico, Shibata Akihiro, Yamawaki Koichi, Yamazaki Takeshi, LatKMI Collaboration	4. 巻 96
2. 論文標題 Light flavor-singlet scalars and walking signals in Nf=8 QCD on the lattice	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 014508-1 ~ 57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.014508	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Aoki Yasumichi, Aoyama Tatsumi, Bennett Ed, Kurachi Masafumi, Maskawa Toshihide, Miura Kohtaroh, Nagai Kei-ichi, Ohki Hiroshi, Rinaldi Enrico, Shibata Akihiro, Yamawaki Koichi, Yamazaki Takeshi	4. 巻 175
2. 論文標題 Flavor-singlet spectrum in multi-flavor QCD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 08023-1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201817508023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Yasumichi Aoki
2. 発表標題 Proton decay matrix elements with physical quark masses
3. 学会等名 37th International Symposium on Lattice Field Theory (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木保道
2. 発表標題 物理点直上の陽子崩壊行列要素
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasumichi Aoki
2. 発表標題 Proton decay matrix elements with physical quark masses
3. 学会等名 Fugaku QCD coding workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木保道
2. 発表標題 Proton decay matrix elements with physical quark masses
3. 学会等名 シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasumichi Aoki
2. 発表標題 Lattice QCD and hadron structure
3. 学会等名 XXVI International Workshop on Deep Inelastic Scattering and Related Subjects (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasumichi Aoki
2. 発表標題 Lattice QCD: topics in finite temperature and proton decay
3. 学会等名 RBRC Scientific Review Committee (SRC) Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木保道
2. 発表標題 Spectral properties and S parameter of Nf=8 QCD
3. 学会等名 Brookhaven Forum 2017: In Search of New Paradigms (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 青木保道、山崎剛
2. 発表標題 素粒子質量起源の理論探索
3. 学会等名 第4回「京」を中心とするHPCIシステム利用課題成果報告会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 青木保道
2. 発表標題 Flavor singlet mesons in QCD with varying number of flavors
3. 学会等名 34th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 青木保道
2. 発表標題 Flavor singlet mesons in QCD with varying number of flavors
3. 学会等名 Japanese-German Seminar 2016 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 青木保道
2. 発表標題 素粒子質量起源の理論探索
3. 学会等名 第3回「京」を中心とするHPCIシステム利用課題成果報告会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	山崎 剛 (Yamazaki Takeshi)		
研究協力者	出淵 卓 (Izubuchi Taku)		
研究協力者	大木 洋 (Ohki Hiroshi)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	三浦 光太郎 (Miura Kohtaroh)		
研究協力者	リナルディー エンリコ (Rinaldi Enrico)		
研究協力者	新谷 栄悟 (Shintani Eigo)		