

クォーク 4 個から成る「純粋テトラクォーク」

—加速器実験で見えた新粒子をスーパーコンピュータ「富岳」で解明—

概要

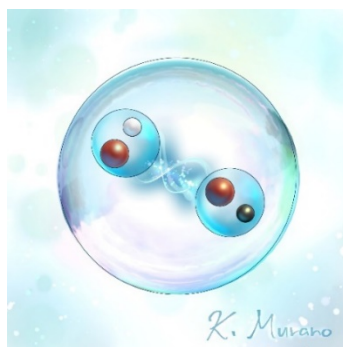
理化学研究所（理研）数理創造プログラムの土井琢身専任研究員、初田哲男プログラムディレクター、リユー・ヤン研修生（研究当時）、京都大学基礎物理学研究所の青木慎也教授、大阪大学感染症総合教育研究拠点の池田陽一教授らの国際共同研究グループは、クォーク^[1]4 個から成る純粋テトラクォーク状態 T_{cc} ^[2]の性質を理論的に解明しました。

本研究成果は、素粒子クォークがどのように組み合わせられた状態が物質として存在できるのかという、現代物理学の根源的問題の解明に貢献すると期待されます。

クォークは物質の基本構成要素となる素粒子です。これまで、クォーク 2 個から成る中間子、3 個から成るバリオンが実験で観測されてきました。クォーク 4 個、5 個、…といったそれ以外の組み合わせの状態が存在するかは長年の謎でした。しかし、2022 年に LHCb^[3]加速器実験で発見された T_{cc} 状態は、純粋にクォーク 4 個から構成されるテトラクォーク状態と考えられており、その性質の解明が求められていました。

今回、国際共同研究グループは、 T_{cc} についてクォークの基礎理論である量子色力学（QCD）^[4]に基づいた理論研究を行いました。スーパーコンピュータ「富岳」^[5]を用いた大規模数値シミュレーションの結果、 T_{cc} の構成要素として D 中間子^[6]と D^* 中間子^[6]の間に強い引力が働くことを明らかにし、この二つの中間子が結びつくことでテトラクォーク状態 T_{cc} が形成されることを解明しました。

本研究は、科学雑誌『*Physical Review Letters*』オンライン版（10 月 16 日付）に Editors' Suggestion（特に重要かつ興味深い論文）として掲載されました。



純粋テトラクォーク T_{cc} のイメージ図

背景

物質がどのように素粒子から構成されるのか、どのような物質が存在し得るのかという問いは、物理学の最も根源的な問題の一つです。身の回りの物質を構成する原子核は、究極的にはクォークという素粒子から構成されることが分かっており、クォーク 3 個でバリオン（陽子や中性子）と呼ばれる粒子を構成し、バリオンが複数個集まって原子核となります。また、バリオン同士を結びつける引力は、湯川秀樹博士が 1935 年にその存在を予言したパイ（ π ）中間子^[6]と呼ばれる粒子に起因しており、中間子はクォーク 2 個で構成されます。

このようなクォーク複合体は総称して「ハドロン^[7]」と呼ばれ、現在までに約 400 種類もの状態が知られています。それらは、いずれもクォーク 2 個の中間子、3 個のバリオンに分類されてきました。しかし、クォーク 4 個（テトラクォーク）や 5 個（ペンタクォーク）など、それ以外の組み合わせからなる新奇なハドロン^[7]が存在するかどうかは明らかでなく、素粒子・原子核物理学における長年の謎でした。

この状況は近年の加速器実験により大きく変わりつつあり、チャームと呼ばれる重いクォークを含む新奇なハドロンの候補が相次いで発見されています。中でも 2022 年に欧州原子核研究機構（CERN）の LHC^[3]加速器を用いた LHCb 実験で報告された T_{cc} 状態は、チャーム 2 個と反アップ、反ダウン各 1 個の計 4 個のクォークから構成されると考えられており、クォーク 2 個、3 個では決して説明できない純粋テトラクォーク状態の初めての例として大きな注目を集めています。

このような状態がなぜ存在するのかを理論的に解明するには、クォークの基礎理論である量子色力学（QCD）に基づいた研究が必要です。しかし、QCD を紙と鉛筆による計算だけで解くことは、理論物理学の最先端手法をもってしても困難です。この問題は格子量子色力学（格子 QCD）^[8]と呼ばれる手法によって解決され、大規模数値シミュレーションによる QCD の直接計算が可能になりました。さらに、2007 年に石井、青木、初田によって提唱された HAL QCD 法^{[9]注 1)}によって、格子 QCD を用いてハドロンの間に働く力を決定することが可能になり、QCD から新奇なハドロンを解明する道筋が開かれました。共同研究グループでは LHCb 実験に先立つ 2014 年に、 T_{cc} について世界初の格子 QCD 計算を行い、 T_{cc} を構成する粒子間に強い引力が働くことを予言していました^{注 2)}。しかし、当時は計算機性能の不足から、現実世界のシミュレーション^[10]は困難であり、実際に T_{cc} 状態が存在するかどうかは未解明な状況にありました。

注 1) N. Ishii, S. Aoki and T. Hatsuda, “Nuclear Force from Lattice QCD” *Physical Review Letters*, vol. 99, p.022001, 2007.

注 2) Y. Ikeda *et al.* (HAL QCD Collaboration), “Charmed tetraquarks T_{cc} and T_{cs} from dynamical lattice QCD simulations” *Physics Letters B*, vol. 729, pp.85-90, 2014.

研究手法と成果

共同研究グループは、 T_{cc} 状態が、D 中間子（チャーム 1 個と反アップ（もしくは反ダウン）1 個）と D^* 中間子（チャーム 1 個と反ダウン（もしくは反アッ

ブ) 1 個) の状態に分割できることに着目し、この二つの中間子の中に働く力を格子 QCD で計算しました。

格子 QCD 計算は二つのステップから成ります。クォークがない状態で QCD がどのような性質を持つかを計算する部分と、その状態に (T_{cc} に対応する 4 個の) クォークを付け加えた場合にどのような現象が起きるかを計算する部分です。最初のステップについては、一世代前のスーパーコンピュータ「京」^[5] を用いてすでに共同研究グループが大規模計算を完了していました。2 番目のステップについても大規模な数値計算が必要で、これはスーパーコンピュータ「富岳」の能力を用いることで計算ができるようになりました。「京」から「富岳」へとつながるスーパーコンピュータ (スパコン) の発展を最大限に活用することで、これまで不可能だった、「ほぼ現実世界」に対応する状況 (パイ中間子質量 146 メガ電子ボルト (MeV、100 万電子ボルト、1MeV は約 1.8×10^{-30} kg)) での T_{cc} のシミュレーションを、世界で初めて行いました。

この結果、D 中間子と D^* 中間子の間には、互いに引き合う力が働くことが分かりました (図 1)。特に、距離が遠いときには、二つのパイ中間子が D 中間子と D^* 中間子の間を飛び交って引力が働くことも分かりました。陽子、中性子の間では、距離が遠いときには一つのパイ中間子が飛び交って引力が働き束縛状態が構成されることが湯川博士の理論で知られており、今回の結果は湯川理論の新たな拡張ともいえる結果となっています。

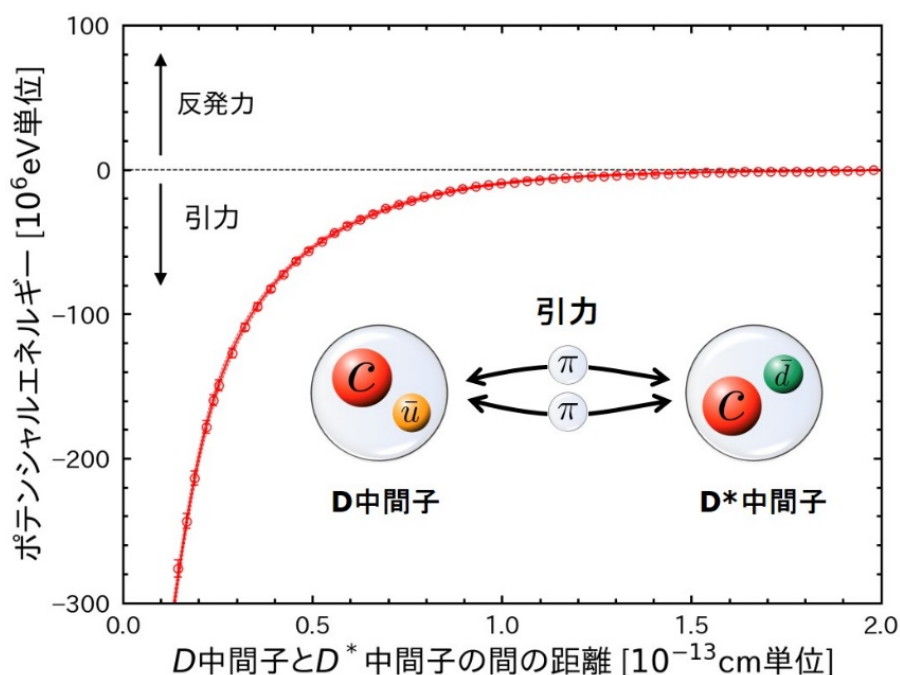


図 1 スーパーコンピュータ「富岳」で計算された D 中間子と D^* 中間子の中に働く力

クォークの運動を記述する量子色力学 (QCD) をスパコンで解くことによって、D 中間子 (チャームと反アップ) と D^* 中間子 (チャームと反ダウン) の間に引力が働くことが分かった。距離が遠い領域では、二つのパイ (π) 中間子が D 中間子と D^* 中間子の間を飛び交うことで引力をもたらしている。

シミュレーションで得られた引力を基に D 中間子、D*中間子がどのように振る舞うかを計算すると、2 中間子が仮想的に結合するバーチャル状態^[11]が作られることが分かりました。さらに、「ほぼ現実世界」(パイ中間子質量 146MeV)における計算結果を基に、「現実世界そのもの」(パイ中間子質量 135MeV)でどうなるかを近似的に計算すると、D、D*の 2 中間子は、バーチャル状態から、真に結合した束縛状態^[11]へと変化することが分かりました。これは LHCb 実験で発見された T_{cc} 束縛状態と対応すると考えられます (図 2)。また、得られた D 中間子と D*中間子に働く力に基づいて、加速器実験において T_{cc} 状態が生成される頻度を理論的に計算すると、LHCb の実験データと非常に近い結果を得ることができました (図 3)。

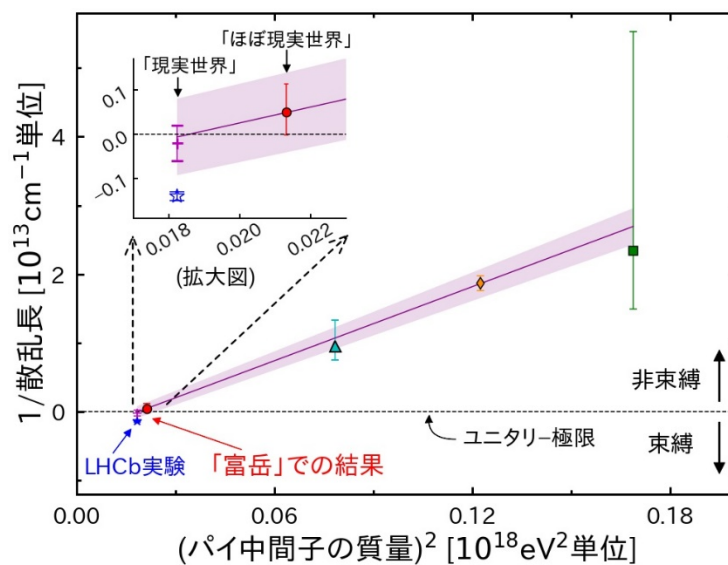


図 2 格子 QCD 計算で得られた T_{cc} 状態を結び付ける引力の強さ

横軸は、格子 QCD 計算で用いられたパイ中間子質量の自乗 (2 乗) であり、右側から左側に行くほど現実世界により近い状況に対応する。縦軸は、散乱長の逆数であり、上側から下側に行くほど D 中間子、D*中間子間の引力が強いことを示す。T_{cc} 束縛状態が存在するかどうかの境界線はユニタリ極限と呼ばれる。一番右側の緑の点が 2014 年に共同研究グループが行った世界初の T_{cc} 計算結果。中間の橙、青緑の 2 点は他グループによる 2022 年の結果。左端近くの赤色の点が「富岳」を用いた今回の成果で、世界初の「ほぼ現実世界」での計算である。ユニタリ極限ぎりぎりのバーチャル状態の存在が予言される。拡大図における左側の赤紫の+点が「現実世界そのもの」でどうなるかを近似的に予言した結果。ユニタリ極限を示す線をわずかに下側に超えて T_{cc} 束縛状態が存在することを示しており、青の点で示された LHCb 実験の結果をほぼ説明できている。

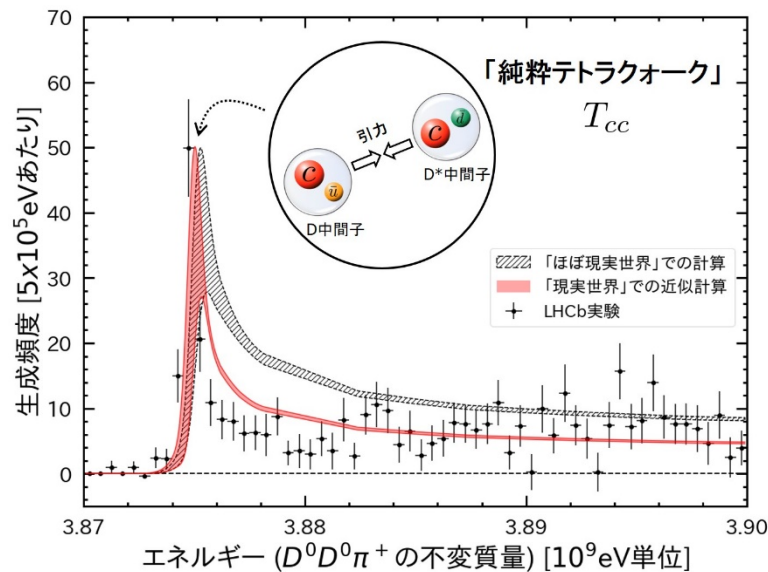


図3 加速器実験において T_{cc} 状態が生成される頻度

横軸は加速器実験で観測される $D^0D^0\pi^+$ のエネルギー。縦軸は各エネルギーで T_{cc} 状態が生成される頻度を示す。今回得られた「ほぼ現実世界」における計算結果を用いると黒のバンドとなり、LHCb の実験データ（黒点）とおおよそ類似の振る舞いを示す。さらに「現実世界そのもの」に対応する近似計算をすると赤のバンドとなり、実験データをほぼ説明できる。中央上部の図は、今回の研究で明らかになった T_{cc} 状態の内部構造。

これらの結果により、 T_{cc} 状態は、D 中間子と D^* 中間子が互いに引き合う力によりぎりぎり束縛する、あたかも分子的な状態として存在していることを、QCD から明らかにすることができました。

今後の期待

本成果により、クォーク 4 個から成る純粋テトラクォーク状態 T_{cc} の性質を解明することができました。またこの成果は、新奇なハドロンを量子色力学に基づいて統一的に解明する第一歩ともなるものです。

今回の計算では、スーパーコンピュータ「京」で得られた成果と、「富岳」で新たに行った T_{cc} 状態の計算を組み合わせることで、「ほぼ現実世界」に対応する状況での結果を得ることに成功しました。今後は「現実世界そのもの」の状況において近似なく格子 QCD 計算を行うことが重要となります。すでに「富岳」を用いて計算を進めており、今後の成果が期待されます。

本研究で用いた手法は汎用的なものです。チャームクォークを含む状態に加えて、より重いボトムクォークを含む状態についての研究を進めることにより、クォーク 4 個、5 個、6 個、…といったさまざまな状態における新粒子の探索を進めていく予定です。これにより、クォークはどのように組み合わせたり、どのような状態が物質として存在し得るのかという謎に対し、素粒子理論に基づく根源的な解明が進むものと考えています。

論文情報

<タイトル>

Doubly Charmed Tetraquark T_{cc}^+ from Lattice QCD near Physical Point

<著者名>

Yan Lyu, Sinya Aoki, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Yoichi Ikeda and Jie Meng

<雑誌>

Physical Review Letters

<DOI>

[10.1103/PhysRevLett.131.161901](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.161901)

補足説明

[1] クォーク

物質を構成する最も基本的な素粒子。質量の軽い順に、アップ (u)、ダウン (d)、ストレンジ (s)、チャーム (c)、ボトム (b)、トップ (t) の 6 種類があり、それぞれが 3 種類のカラー (赤、緑、青) を持つ。またこれら計 18 種類のクォークのそれぞれに対応する反クォークが存在する。このうちアップ、ダウンクォークは核子の約 300 分の 1 の質量を持つ軽いクォークで、チャームクォークは核子の約 1.4 倍の質量を持つ重いクォークであり、それらの組み合わせから多彩な粒子が形成されると考えられている。

[2] 純粋テトラクォーク状態 T_{cc}

テトラ (tetra) とはギリシャ語で「四つの」という意味であり、テトラクォーク状態とはクォーク 4 個から成る複合体をいう。このうち T_{cc} は、チャーム (c) 2 個 (および反アップ、反ダウン各 1 個で計 4 個) を含むテトラクォーク状態のことである。一般に同じ種類のクォークと反クォークは一對で消滅できるため、テトラクォーク状態の候補のほとんどはクォーク 2 個の状態と混合してしまうが、 T_{cc} はそのような対消滅が起こり得ずクォーク数が決して 4 個未満にならないことから、純粋テトラクォーク状態とも呼ばれる。なお、 T_{cc} はティー・シー・シーと読む。

[3] LHCb、LHC

LHC は、欧州原子核研究機構 (CERN) に設置されている大型ハドロン衝突型加速器 (Large Hadron Collider) の略称であり、全周 27km となる世界最大の衝突型円形加速器。主に ATLAS、CMS、ALICE、LHCb 実験が行われている。このうち LHCb 実験は重いクォークを含む状態の実験に適しており、素粒子標準理論の検証や新奇な粒子 (新奇なハドロン) の探索に強みを持つ。

[4] 量子色力学 (QCD)

量子色力学は、原子核を構成するクォークとその間に働く強い相互作用を媒介するグルーオンが従う物理法則であり、素粒子の標準理論の一部である。南部陽一郎博士 (2008 年ノーベル物理学賞受賞) が 1966 年にその原型を提唱した。量子色力学によれば、クォークは単体で存在できず、常に数個のクォークが集まって複合体 (ハドロン) を作ると考えられている。QCD は quantum chromodynamics の略。

[5] スーパーコンピュータ「富岳」、スーパーコンピュータ「京」

「富岳」は、社会的・科学的課題の解決で日本の成長に貢献し、世界をリードする成果を生み出すことを目的とし、電力性能、計算性能、ユーザーの利便性・使い勝手の良さ、画期的な成果創出、ビッグデータや AI の加速機能の総合力において世界最高レベルのスーパーコンピュータ。2021 年 3 月に共用開始し、計算速度は約 442 ペタフロップス。「京」は、「富岳」の前世代のスーパーコンピュータ。2012～19 年に共用運用され、その計算速度約 11 ペタフロップスは、当時世界最高レベルの性能であった。ペタフロップスは計算性能の単位で、毎秒 1,000 兆回の浮動小数点演算ができることを表す。

[6] D 中間子、D*中間子、パイ (π) 中間子

中間子はクォーク 1 個と反クォーク 1 個から構成される粒子であり、D 中間子は D^0 中間子 (チャームと反アップ) と D^+ 中間子 (チャームと反ダウン) の総称である。 D^+ 中間子も同様に D^{*0} 中間子 (チャームと反アップ) と D^{*+} 中間子 (チャームと反ダウン) の総称であるが、D 中間子はスピン (粒子が持つ角運動量) と呼ばれる量が 0 であるのに対し、 D^* 中間子はスピンが 1 であるという違いがある。パイ (π) 中間子は湯川秀樹博士 (1949 年ノーベル物理学賞受賞) が 1935 年にその存在を予言した粒子であり、 π^+ 中間子 (アップと反ダウン)、 π^0 中間子 (アップと反アップ、もしくはダウンと反ダウン)、 π^- 中間子 (ダウンと反アップ) の総称である。

[7] ハドロンの、新奇的なハドロンの

複数のクォークが結合してできる粒子を総称してハドロンと呼ぶ。通常はクォーク 2 個 (正確にはクォーク 1 個と反クォーク 1 個の計 2 個) から構成される中間子、クォーク 3 個から構成されるバリオンに分類される。それ以外の構成 (クォーク 4 個、5 個、…など) から成る粒子は新奇的なハドロンと呼ばれ、その存否は長年の謎であった。

[8] 格子量子色力学 (格子 QCD)

量子色力学を、時間と空間を 4 次元の格子状グリッドで置き換えて定式化する理論。ケネス・ウィルソン博士 (1982 年ノーベル物理学賞受賞) によって提唱された。モンテカルロ法などを使った大規模数値シミュレーションに適しており、量子色力学を近似なく計算できる。

[9] HAL QCD 法

格子量子色力学を用いることにより、ハドロンの間に働く力を量子色力学 (QCD) から直接計算する理論手法。2007 年に石井理修 (現大阪大学核物理研究センター准教授)、青木慎也 (現京都大学基礎物理学研究所所長)、初田哲男 (現理研数理創造プログラムプログラムディレクター) により提唱された。その後、これら 3 人を含む共同研究グループ「HAL QCD Collaboration」によって、さらなる発展研究が行われている。HAL QCD Collaboration は Hadrons to Atomic nuclei from Lattice QCD Collaboration の略称であり、Lattice QCD は格子量子色力学を指す。

[10] 現実世界のシミュレーション

量子色力学に基づくシミュレーションは、パイ中間子の質量で特徴付けられ、その質量が大きいほど容易に計算ができる。現実世界でのパイ中間子の質量は、約 135 メガ電子ボルト (MeV、100 万電子ボルト、1MeV は約 1.8×10^{-30} kg) である (相対性理論によりエネルギーと質量は等価であるため、光速 $c=1$ とする自然単位系において

MeV は質量の単位ともなる)。しかし、これまでの研究ではスーパーコンピュータの性能の限界から、その質量が数倍以上大きい、現実から離れた状況での計算しかできなかった。一方、今回のスーパーコンピュータ「富岳」を用いたシミュレーションでは、パイ中間子の質量を 146MeV で計算することが可能となり、ほぼ現実世界と対応する状況での計算を実現した。

[11] パーチャル状態、束縛状態

二つの粒子の間に働く引力が十分強いとき、2 粒子は結合して束縛状態と呼ばれる新しい状態を作る。束縛状態が生まれるかどうかぎりぎりの境目はユニタリー極限と呼ばれる。束縛しないときも、ユニタリー極限に近いほどの強い引力があれば、パーチャル状態と呼ばれる仮想的状態が存在することがある。なお、2 粒子間に働く力は散乱長と呼ばれるパラメータで特徴付けることができ、ユニタリー極限は散乱長が発散する状況に対応する。

国際共同研究グループ

理化学研究所 数理創造プログラム

専任研究員	土井琢身	(ドイ・タクミ)
プログラムディレクター	初田哲男	(ハツダ・テツオ)
研修生 (研究当時)	リユー・ヤン	(Yan LYU)

京都大学 基礎物理学研究所

教授	青木慎也	(アオキ・シンヤ)
----	------	-----------

大阪大学 感染症総合教育研究拠点

教授	池田陽一	(イケダ・ヨウイチ)
----	------	------------

北京大学 (中国) 物理学院

教授	メン・ジエ	(Jie MENG)
----	-------	------------

研究支援

本研究は、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費補助金基盤研究 (S) 「クォークから中性子星へ: QCD の挑戦 (研究代表者: 初田哲男)」「QCD から解き明かす重クォークエキゾチック粒子の謎 (研究代表者: 土井琢身)」、同新学術領域研究 (研究領域提案型) 「第一原理計算から明らかにする階層構造の発現機構 (研究代表者: 肥山詠美子)」、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム「シミュレーションで探る基礎科学: 素粒子の基本法則から元素の生成まで (課題責任者: 橋本省二)」「シミュレーションでせまる基礎科学: 量子新時代へのアプローチ (課題責任者: 橋本省二)」、計算基礎科学連携拠点 (JICFuS) による助成を受けて行われました。

発表者

<発表者>

理化学研究所 数理創造プログラム

専任研究員	土井琢身	(ドイ・タクミ)
-------	------	----------

プログラムディレクター 初田哲男 (ハツダ・テツオ)
研修生 (研究当時) リュー・ヤン (Yan LYU)

京都大学 基礎物理学研究所
教授 青木慎也 (アオキ・シンヤ)

大阪大学 感染症総合教育研究拠点
教授 池田陽一 (イケダ・ヨウイチ)



土井琢身



初田哲男



リュー・ヤン
