

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 27 日現在

機関番号：37301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540482

研究課題名(和文) ミクロな分子とマクロな固体での反磁性超電流の関連性の解明と室温超伝導実現への応用

研究課題名(英文) Relationships between the micro- and macroscopic supercurrents and their applications towards room temperature superconductivity

研究代表者

加藤 貴 (KATO, Takashi)

長崎総合科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10399214

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円、(間接経費) 1,110,000円

研究成果の概要(和文)：最近、ドイツ、ライプチヒ大で水中攪拌グラファイトの室温超伝導発現の兆候が報告された。この物質の室温超伝導発現は我々のグループにより2008年に理論予測されていた。この現象は我々が提唱した理論で説明出来る事を改めて示した。また、一方で、一分子内ベンゼン内でクーパー対発見の報告が、スイス、Paul Scherrer研究所、アメリカ、ウィスコンシン大からあった。この現象は、我々が2007以降、提案していたメカニズムで説明出来ることを示した。上記、2つの研究を組み合わせ、固体室温超伝導は「夢」ではなく「後、1歩の工夫で届く範疇」にまでくるところまで進展させた。

研究成果の概要(英文)： The reasonable mechanism of the occurrence of high-temperature superconductivity in the graphite powder treated by water or exposed to the hydrogen plasma, discovered by Esquinazi et al. (Germany) in 2012, is discussed on the basis of recent experimental and our previous theoretical researches from 2008. On the other hand, the experimental results for the photoemission energy of Cooper pairs from aromatic hydrocarbons such as benzene, naphthalene, and anthracene, recently reported by Wehlitz et al. (Switzerland and USA) in 2012, are rationalized, on the basis of recent experimental and our previous theoretical researches from 2007.

By considering these two studies, the guiding principles towards relative amount of superconducting material in these materials and towards high temperature superconductivity, are also suggested.

研究分野：生物物理 化学物理

科研費の分科・細目：化学物理

キーワード：室温超伝導 ベンゼン分子内クーパー対 分子性超伝導 分数電荷 状態密度 電子-フォノン相互作用
場の量子化 ボース粒子

1. 研究開始当初の背景

分子振動と電子状態のカップリング(振電相互作用及び電子-フォノン相互作用)は現代の物理学、化学はもちろん生物学の分野でも最も重要な研究対象の一つである。我々はナノ物質での振電相互作用を考察し、特異な電子・光物性の理論的説明、予測を幅広く行なってきた。振電相互作用結合定数を正確に見積もるのは実験的にはもちろん理論的にも非常に困難であるが、我々がその手法(以後、本報告書では MOVIC 法と記す)を独自に開発して、その計算精度が非常に高いことが当時既に実験的に証明されていた。これら一連の研究で我々は、2002年に picene モノアニオンの 10 K 程度、coronene モノアニオンの 8 K 程度での超伝導性発現を予測していた。一方で、2010年に K_3 picene で 18 及び 7 K、 K_3 coronene でも 7 K の超伝導転移温度を持つという報告があり、我々の理論的予測とほぼ一致している。このように実験報告の前に理論先行で超伝導転移温度を正確に適中させた研究は、世界でも初めてで我々の理論先行型研究は高温超伝導実現に向けて斬新で有効であると期待されていた。さらに化学物理分野で最重要問題であったが最近まで解決の糸口が見つからなかった問題である「ベンゼン分子等の反磁性環電流発現機構」を提唱し、それらが「ミクロでの室温超伝導」である可能性を示し、一般にパイエルス転移とはミクロ領域での超伝導的な反磁性環電流の局在化であることを示した。また 1973 年 A. J. Heeger(現アメリカ、カリフォルニア大学サンタバーバラ校)らが発見した TTF-TCNQ 等、1 次元電子系で広く観測される「オームの法則に従わない電気伝導現象」の発現機構を提唱した。基礎的な物理量である「振電相互作用」の MOVIC 法による計算を利用した研究は学術的に役立つことは言うまでもなく、さらに「反磁性環電流発現機構の解明」や「オームの法則に従わない電気伝導現象の解明」の研究上のアイデアも、トンネル効果を利用した高機能性デバイスの開発に直接応用できると期待された。

しかし、一方で、本研究に関連して、固体室温超伝導は未だに実現されていなかった。いわゆる従来の超伝導である「マクロな超伝導に関する研究」を精力的に行なっている物理学者は、「ミクロな分子反磁性環電流」にはあまり注意を払っていなかった。一方で、化学者は、固体物理学の視点からはこの問題に取り組んで来なかった。このような化学と物理学との間の乖離が、固体室温超伝導未発見の理由であると思われる。従って我々は、化学者が主に興味を持っている問題に対し物理学のアプローチをとるという学際的な研究を遂行し固体室温超伝導実現を目指した。世界中の研究者は、直接実用化に繋がるという理由で、電子対が不安定なマクロな固体の中で宝探しの様に室温超伝導体を探してきた。我々も長年このような伝統的な方針

で研究を行ってきた、その中で超伝導性発現発見の 8 年前の 2002 年に picene や coronene の超伝導転移温度の正しい理論予想を実現した。さらに我々は 2007 年以降、他の研究者と全く異なる新規な独自のアプローチで「ベンゼン分子内のクーパー対生成、さらにはダイヤモンド等、カーボン物質の室温超伝導発現可能性」を予測してきた。

このように本研究は伝統的なアプローチと我々独自の全く斬新なアプローチの両面から比較検討しながら行っていくのが特徴であり、独創的な点であった。

このような背景の基で、更なる実験技術の進歩により、以前は不可能であった物質の超伝導性発現が幅広く期待しつつ、発見前に予測するという理論先行型研究手法を、岡山大の実験共同研究者との共同のもとでさらに続けていった。

2. 研究の目的

本研究では、単一分子レベル、ナノサイズレベル、ポリマーにおける以下に示す特異な電子・光物性の本質を理論物理学・化学の視点から解明することを目的に研究を行った。特に振電相互作用の考察をするという、従来からのオーソドックスな研究手法を用いるとともに、全く別の角度から斬新な方針で研究を行ない、室温超伝導実現を目的とする研究を行なうという多角的な研究を行った。

(1) 振電相互作用の考察によるコンダクタンスや超伝導性等の電子物性の研究

従来の知見に基づき、単一分子レベルからナノサイズ、固体に至るまで様々なサイズの物質における振電相互作用を考察し、コンダクタンス、超伝導性等の電子物性に関する研究を行った。特にどのような振動モードに由来する振電相互作用が、電荷移動及びコンダクタンスや超伝導性に重要な働きをするかについて考察することを目的に研究を行った。また我々は、従来の BCS 理論の知見に基づき、ナノサイズ分子性結晶固体における光励起超伝導性発現の可能性について世界で初めて提案したが、単一分子においても可能なのかについてさらに徹底して研究を続けていき、固体における新たな高温超伝導体設計指針を提案し、さらに高機能デバイス設計指針を提案することを目的とする研究を行った。

(2) ミクロな反磁性環電流とマクロな従来の超伝導の普遍的解釈ができる統一理論の構築

「マクロなレベルの従来の低温超伝導性」は BCS 理論によって理解でき、「ミクロなレベルでの室温超伝導」である反磁性環電流は近年我々が提唱した理論で理解できるが、これら 2 つの現象を統一的に解釈ができる、より普遍的な理論を構築することを目的に研究を行った。またこの統一理論を基に、マクロなレベルでの室温超伝導実現に繋がる理論設計を行った。

(3) 反磁性環電流のトンネル効果を利用した室温超伝導実現への理論設計提案

前述したように、ミクロな領域では室温超伝導の性質の実現も可能である。このようなミクロ領域での優れた物性を何とかバルクで取り出し、新規のエレクトロニクスに応用できないか探索し、室温超伝導等、高機能デバイス実現を目的とした理論設計を行った。例えば1973年、A. J. Heegerらが低温で「TTF-TCNQでのオームの法則に従わない電気伝導現象」を発見したがこの現象発現の理由は未だに完全には解明されていなかった。これに対し、我々は反磁性環電流の知見を用い、本現象発現の理由は、パイエルス転移によって各ユニットに閉じ込められた超伝導的な反磁性環電流が、臨界電圧以上で隣接ユニット間においてトンネル効果を起こすからであると説明した。これらの知見を室温で応用すれば、マクロで室温超伝導発現を実現できるものと期待されるので理論設計を行った。

3. 研究の方法

比較的サイズの小さな物質には、我々自身が開発してきた振電相互作用結合定数や、重要な振動モードの振動数を見積もるプログラムであるMOVIC法を使用して振電相互作用を解析した。サイズが大きな物質に関しては電子相関効果を充分に取り入れた新たな計算方法の開発を試みた。これらの計算で求めた振電相互作用結合定数により、様々なサイズ、構造の物質におけるコンダクタンス、超伝導性等を考察し、特異な電子・光物性を考察した。一方で「バルクの低温超伝導」である従来の固体の超伝導と、「ミクロレベルの室温超伝導」とも言えるミクロの芳香族炭化水素等の反磁性環電流を統一的に説明できる「超伝導統一理論」を構築した。またミクロレベルでの優れた物性を何とかバルクで取り出せないか探索し、例えば、室温におけるミクロレベルの反磁性環電流をトンネル効果によってマクロな領域に取り出せるような高機能デバイスを考案し、マクロでの室温超伝導実現を目指した理論設計を行った。

サイズが非常に大きな固体、金属の場合は電子状態、振動状態は連続的であるが、サイズが小さな単一分子においては、電子状態、振動状態が不連続であるために極めて特異な選択則に従って特定の振動モードが特定の電子のみと相互作用する。そのため、サイズの小さな単一分子においてはこれまで観測されなかったような特異な電子・光物性が発見されるものと期待される。またナノサイズ単一分子鎖においてはサイズの小さい単一分子的性質とサイズの大きい固体的性質が競合する系であり、これまでは観測されなかったような特異な電子・光物性発現が期待されるのでその可能性について探索する。このことを踏まえ、小さな単一分子レベルか

らナノサイズレベルにおける諸物性を、主として振電相互作用の観点から考察した。

(1) 振電相互作用の解析

単一分子鎖の諸物性を考察する上で不可欠な振電相互作用の解析をMOVIC法を用いて行った。この物理量を求めるには「(1)分子の最安定化構造を求める(2)最安定化構造のもとで振動解析を行なう(3)振動モードのベクトルの方向に沿って原子核を少しずつ変位させていきその都度分子軌道等のエネルギーの一点計算を行なう(4)横軸に原子核の変位量、縦軸にエネルギーをプロットし、原点(原子核の変位量がゼロの点)における接線の傾きを求める(5)この傾きから振電相互作用の強さを見積もる」という作業を行った。

(2) 振電相互作用の解析によるコンダクタンス、超伝導性の考察

(1)での計算結果に基づき、振電相互作用の解析による、単一分子レベルにおけるコンダクタンス、超伝導性の考察を行った。具体的には、振電相互作用の性質がどのように単一分子レベルのコンダクタンスの性質と相関しているか、またどのような特殊な振動モードがコンダクタンスや超伝導性に重要な働きをしているかについて解析、考察した。

4. 研究成果

分子振動と電子状態のカップリング(振電相互作用及び電子-フォノン(e-ph)相互作用)の解析により、高温超伝導実現に向けた理論先行型の研究を行った。特に、ピセン、フェナントレン、ジベンゾペンタセンといったグラフェンにおける超伝導性を考察し、正しい理論説明を行った。本研究に関連して2編のNature誌で、我々の論文がまとめとして長文で引用され、高温超伝導実現に向け重要な手掛かりになると紹介された。さらに我々の理論研究が2010年~2013年に日本経済新聞に5回に亘り記事として掲載され、また日本セラミックス協会刊行の雑誌「セラミックス」への記事の寄稿も依頼された。しかし、近年まで室温超伝導発現の兆しは全くなく、e-ph相互作用由来の室温超伝導発現は非常に困難であると考えられてきた。一方でミクロレベルの室温超伝導とも言える「ベンゼン分子等の反磁性環電流」の発現機構を提唱するとともに、ミクロにおける優れた性質をマクロで実現するという方針で固体室温超伝導設計を提案した。その後、2012年、R. Wehltz教授(スイス、Paul Scherrer研究所、アメリカ、ウィスコンシン大)らの研究グループから、単一分子ベンゼン内でのクーパー対生成発見の報告があったが、この実験結果により、クーロン力でクーパー対が生成されるという我々の仮説をうまく実証出来る。さらに、この研究を通じて我々は「アルカンやダイヤモンド等、カーボン物質の室温超伝導発現可能性($T_c \sim 10^4$ K)」を予測した。そして2012年、P. Esquinazi教授(ドイツ、ライプツィヒ大)らにより、マイクロメーターのオーダーであ

るが水中攪拌グラファイトが室温超伝導発現($T_c \sim 10^4$ K)の兆候を示す実験報告があった。この現象は我々の提唱した理論で説明出来る。これらの室温超伝導に関連した理論研究の信頼性は大変高く、実験で検証されたことのみならず、近年我々の図が、3回に亘り学術誌の表紙を飾った。つまり、室温超伝導実現は2012年末までは実験面からは全く何の手掛かりもない「夢」という状況であったが、2007年以降の我々の理論予測と2012年以降の発見により「後一步の工夫で手が届く範疇」にまで来ていると実感出来るような研究成果を実現した。しかし、これまで報告された超伝導の収率やサイズは極めて小さく、実用化出来るレベルには至っていない。従って室温・高温超伝導発現とその実用化を目指した研究を今後目指す。

「マクロな低温超伝導」と「ミクロな室温超伝導」を統一的に解釈出来る統一理論をもとに室温・高温超伝導実現を目指し、「一分子ベンゼン中にクーパ対(ボース粒子)が存在する」という、我々が提唱している理論の正当性を広く定着させることが出来れば、化学、物理学の今までの常識が覆り、教科書を書き換え、新規なエレクトロニクス分野が立ち上がる程の学術的意義があると期待している。一方で、本研究に関連したエレクトロニクスがもたらす社会的な意義についてであるが、昨今、電力に関わるエネルギー問題や環境問題が、様々な意味で新たな局面に直面している。その中で、特に超伝導は電気抵抗ゼロさらには完全反磁性(マイスナー効果)という特異な物性を有するために様々な応用が期待出来る。一方で現在、マクロな超伝導は低温でしか現れず、広い実用化が妨げられている。本研究の方針に従ってマクロな室温・高温超伝導が実現出来れば、上記の特異な物性が高温で実現され、産業での超伝導の役割は現在よりも飛躍的に増大し、経済面、環境面双方に貢献し、社会的に大きな影響を及ぼすと期待される。

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22件)(査読有)

T. Kato, “The mechanism of the forming of Cooper pairs in aromatic hydrocarbons” *Physica C*, in press.

T. Kato, “Vibronic interactions and their role in the formation of Cooper pairs in superconductivity” *Jahn-Teller Conference 2014*, August 2014, Graz, Austria.

T. Kato, “New interpretation of the role of vibronic interactions in superconductivity” *Jahn-Teller Conference 2014*, August 2014, Graz, Austria.

T. Kato, “Guiding principle towards room-temperature superconductivity” *Nano Science & Technologies*, October, 2014, Qingdao,

China.

T. Kato, “The forming of a Cooper pair in benzene molecule” *Nano Science & Technologies*, October, 2014, Qingdao, China.

T. Kato, “The Formation of Cooper Pairs and Their Role in Nondissipative Diamagnetic Currents in the Micro- and Macro-Scopic Sized Graphene Materials; Towards High-Temperature Superconductivity” *Micro nano Devices, Structure and Computing Systems (MNDSCS) 2014*, March 2014, Singapore (論文のprefaceで最もinnovativeな論文として研究内容を紹介される).

T. Kato, “Vibronic Interactions in Fractionally Charged Hydrocarbons” *J. Phys. Chem. C*, 117, 17211-17224 (2013).

T. Kato, “New Interpretation of the role of electron-phonon interactions in electron pairing in superconductivity” *Synth. Met.*, 181, 45-51 (2013) (表紙を飾る図に採択される).

H. Okazaki, T. Jabuchi, T. Wakita, T. Kato, Y. Muraoka, T. Yokoya, “Evidence for metallic states in potassium-intercalated picene film on graphite” *Phys. Rev. B*, in press.

T. Kato, “Vibronic Interactions and Possible High-Temperature Superconductivity in Aromatic Hydrocarbons; A Theoretical Study” *Nano Science & Technologies*, September, 2013, Xi’an, China.

T. Kato, “Hypothetical Room-Temperature Superconductivity in Perfect Pure Diamonds” *Nano Science & Technologies*, September, 2013, Xi’an, China.

T. Kambe, T. Kato, and Y. Kubozono et al. “Synthesis and physical properties of metal doped picene solids” *Phys. Rev. B*, 86, 214507 (2012). HIGHLIGHTED ARTICLE

T. Kato, “Electron-phonon Interactions and Superconductivity in Nano-Sized Graphene-Like Molecular Systems” *Nano Science & Technologies*, October, 2012, Qingdao, China.

T. Kato, “Dependence of Electron-Phonon Interactions on Doped Carriers in the Negatively Fractionally Charged Polyacene Molecular Crystals” *J. Phys. Chem. C*, 115, 21383-21389 (2011).

T. Kato, T. Kambe, and Y. Kubozono “Strong Intramolecular Electron-Phonon Coupling in Negatively Charged Aromatic Superconductor Picene” *Phys. Rev. Lett.*, 107, 077001 (2011).

T. Kato, “New method of accurate estimation of the electron-phonon coupling constants in fractionally charged incommensurate electronic states in molecular systems” *J. Chem. Phys.*, 135, 024103 (2011).

T. Kato, “The role of phonon- and photon-coupled interactions in electron pairing in solid state materials” *Synth. Met.*, 161, 2113-2123 (2011).

T. Kato, “Non-Ohmic current-voltage

characteristics in the positively charged tetrathiafulvalene (TTF) molecular crystals” Synth. Met., 161, 704-712 (2011). (表紙を飾る図に採択される).

T. Kubozono, T. Kato, and T. Aoki, “Metal-intercalated aromatic hydrocarbons: a new class of carbon-based superconductors” Phys. Chem. Chem. Phys., 161, 16476-16493 (2011).

T. Kato, “The effect of vibronic interaction on electronic properties and diamagnetic currents in the neutral H₂ molecules” The Jahn-Teller effects, Springer (2011).

(21) T. Kato, “The Role of Electron-Phonon Interactions in Electron Pairing in Solid State Materials” International Conference of New Science Created by Materials with Nano Spaces: from Fundamentals to Applications, Sendai, Japan (2011).

(22) T. Kato, “Electron-Phonon Interactions and Superconductivity in the Negatively Charged Phenanthrene and Picene” International Conference of New Science Created by Materials with Nano Spaces: from Fundamentals to Applications, Sendai, Japan (2011).

[学会発表](計16件)

T. Kato, “The Formation of Cooper Pairs and Their Role in Nondissipative Diamagnetic Currents in the Micro- and Macro-Scopic Sized Graphene Materials; Towards High-Temperature Superconductivity” Micro nano Devices, Structure and Computing Systems (MNDSCS) 2014, March 1, 2014, Singapore (論文のprefaceで最もinnovativeな発表として研究内容を紹介される)(invited).

T. Kato, “Supercurrents in Micro- and Microscopic Sized Superconductivity” 奈良先端科学技術大学院大学セミナー 2013年6月17日 奈良先端科学技術大学院大学(生駒).

T. Kato, 「物性物理学の最前線: 室温超伝導実現に向けて」, 長崎総合科学大学公開講演会、2013年12月7日 長崎総合科学大学(長崎).

T. Kato, 「グラフェン等カーボン物質における反磁性環電流発現機構の解明: 固体室温超伝導の実現に向けて」第7回物性科学領域横断研究会 凝縮系科学の最前線 2013年12月1日 東京大学(東京).

T. Kato, 「電子-フォノン相互作用とグラフェン型分子性結晶固体における超伝導に関する理論的研究」第7回物性科学領域横断研究会 凝縮系科学の最前線 2013年12月1日 東京大学(東京).

T. Kato, “Vibronic Interactions and Possible High-Temperature Superconductivity in Aromatic Hydrocarbons; A Theoretical Study” Nano Science & Technologies, September 27, 2013, Xi’an, China (invited).

T. Kato, “Hypothetical Room-Temperature Superconductivity in Perfect Pure Diamonds”

Nano Science & Technologies, September 27, 2013, Xi’an, China (invited).

T. Kato, “Electron-phonon Interactions and Superconductivity in Nano-Sized Graphene-Like Molecular Systems” Nano Science & Technologies, October 27, 2012, Qingdao, China (invited).

T. Kato, 「ミクロな反磁性環電流と振電相互作用及び対称性の破れとの関連性に関する理論的研究」第6回物性科学領域横断研究会 凝縮系科学の最前線 2012年11月27日 東京大学(東京).

T. Kato, 「芳香族炭化水素分子系における振電相互作用と超伝導性に関する理論的研究」第6回物性科学領域横断研究会 凝縮系科学の最前線 2012年11月27日 東京大学(東京).

T. Kato, “Unified Theory of the Role of Vibronic Interactions in Micro- and Microscopic Sized Superconductivity” 奈良先端科学技術大学院大学セミナー 2012年11月30日 奈良先端科学技術大学院大学(生駒).

T. Kato, “Estimation of Electron-Phonon Coupling Constants in Molecular Crystals: Towards High-Temperature Superconductivity”, Kyoto University (Kyoto, Japan) December 22, 2011.

T. Kato, “The Role of Electron-Phonon Interactions in Electron Pairing in Solid State Materials” International Conference of New Science Created by Materials with Nano Spaces: from Fundamentals to Applications, Sendai, Japan, November 24 (2011).

T. Kato, “Electron-Phonon Interactions and Superconductivity in the Negatively Charged Phenanthrene and Picene” International Conference of New Science Created by Materials with Nano Spaces: from Fundamentals to Applications, Sendai, Japan, November 24 (2011).

T. Kato, 「振電相互作用と超伝導性発現機構に関する理論的研究」, 北海道大学大学セミナー、2011年12月12日 北海道大学(札幌).

T. Kato, “Estimation of Electron-Phonon Coupling Constants in Molecular Crystals: Towards High-Temperature Superconductivity” University of Paris (Paris, France) September 22, 2011.

[図書](計1件)

T. Kato, 「室温超伝導実現に向けた理論設計」, セラミックス、日本セラミックス協会刊行、2014年2月号, 1ページ.

[その他]

ホームページ等

日本セラミックス協会刊行の雑誌「セラミックス」への記事の寄稿を依頼された。「加藤貴「室温超伝導実現に向けた理論設計」, セラミックス、2014年2月号」.

「一電子がフェルミ粒子のみではなく時

としてボース粒子としても振る舞う可能性を説明する図」(“New Interpretation of the role of electron-phonon interactions in electron pairing in superconductivity” Synth. Met., 181, 45-51 (2013))が Synthetic Metals (Elsevier)の表紙を飾る図に選出される。

「零下 35 度で超電導可能: 石油の炭素分子活用」という題目で日本経済新聞(2013 年 8 月 19 日)に掲載される。

「液体窒素で超電導に」という題目で日本経済新聞(2011 年 11 月 7 日)に掲載される。

「[超電導]発見 100 年目を「実用化元年に」という題目で日本経済新聞(2011 年 1 月 14 日)に掲載される。

「産業への応用に光明」という題目で日本経済新聞(2010 年 11 月 22 日)に掲載される。加藤貴の理論予測と岡山大学の久保園芳博教授の実験研究に関し、「実際に合成できれば、長足の進歩だ。ノーベル賞級の成果に発展する可能性も秘めている。」と紹介された。

「より高温で超電導も」という題目で日本経済新聞(2010 年 11 月 18 日)に掲載される。

「オームの法則に従わない TTF-TCNQ の電圧-電流特性の発現機構を解明する図」(“Non-Ohmic current-voltage characteristics in the positively charged tetrathiafulvalene (TTF) molecular crystals” Synth. Met., 161, 704-712 (2011))が Synthetic Metals (Elsevier)の表紙を飾る図に選出される。

6. 研究組織

(1)研究代表者

加藤貴 (KATO, Takashi)

長崎総合科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 10399214

(3)連携研究者

久保園芳博 (KUBOZONO, Yoshihiro)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号: 80221935

神戸高志 (KAMBE, Takashi)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号: 00277386

横谷尚睦 (YOKOYA, Takayoshi)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号: 90311646