



非平衡で強相関物質の超伝導が強まるという原理を提唱  
-熱平衡では到達できない強い超伝導をレーザー照射により実現する方法  
を、スーパーコンピュータを駆使して発見-

1. 発表者：

井戸 康太（東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 博士課程3年生）

大越 孝洋（東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 特任助教）

今田 正俊（東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授）

2. 発表のポイント：

- ◆平衡状態では達成することができないほど大きな超伝導性を持つ状態を強いレーザー照射によって動的に安定化させる方法を理論的に提案しました。
- ◆スーパーコンピュータを駆使した大規模数値解析により、強いレーザー照射によって電子間に働く引力を強めると同時に、超伝導性を弱めてしまう電子の空間分布が不均一な状態を回避できることを示しました。
- ◆今回発見した、光による超伝導増強の新しい実現法に刺激され、超伝導転移温度を光によって制御する研究やそのデバイス応用への展開がより活発になっていくことが期待されます。

3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻の井戸康太大学院生、大越孝洋特任助教および今田正俊教授の研究グループは、強いレーザー光を電子間相互作用の強い物質（強相関物質）へ照射することで、その物質における超伝導性が熱平衡系では達成することができないほど増大することを、スーパーコンピュータを駆使した理論的な考察により見出しました。

物性物理学の夢の一つとして、室温領域における超伝導の実現が挙げられます。これまでの常圧下での最高転移温度  $T_c$  は、銅酸化物で実現された約-140℃でした。転移温度を室温領域まで上げようとこれまで数多くの実験がなされてきましたが、常圧下での  $T_c$  はここ数十年でほとんど変化していません。この足踏みを打破するために、近年、レーザー照射などの非平衡過程(注1)を利用して転移温度を制御しようという試みが精力的に行われています。

本研究では、標準的な強相関電子系における光照射ダイナミクスの理論模型に対する解析を電子間に働く相互作用を高精度に取り扱うことのできる最新の数値計算手法に基

づいて行いました。その結果、本研究グループは、平衡状態において超伝導を抑制してしまう電荷不均一状態を回避して、顕著な超伝導をもつ動的に安定な状態を光照射によって実現できることを示しました。この結果は、相関電子物質での光による室温超伝導の将来の実現へ向けて新たな局面を切り開く成果と言えます。

本研究成果は、米国の科学雑誌「Science Advances」のオンライン版（米国東部時間：8月18日付）に掲載されます。

#### 4. 発表内容：

##### ① 研究の背景

1911年、物質の温度を非常に低い温度（典型的には $-260^{\circ}\text{C}$ 以下）まで下げていくと電気抵抗が突然ゼロになる現象が発見されました。この現象のことを超伝導といいます。超伝導状態は抵抗を持たないため電気を流しても熱が発生しません。そのため、超伝導になる温度（転移温度）を室温領域まで高くすることができれば、超伝導物質によるエネルギー損失のない電力輸送やデバイスに基づいた超省エネルギー社会を形成することが可能となります。

こうした背景から、転移温度を上げる研究は世界中で数多くなされてきました。初めての発見から50年以上もの間、転移温度は大きく変化しませんでした。1986年の銅酸化物高温超伝導体の発見を皮切りに、続々と高い転移温度を持つ物質が発見され、大気圧下での最高転移温度は約 $-140^{\circ}\text{C}$ にまで達しました。高温超伝導体における超伝導発現のメカニズムには未だ多くの謎が残されていますが、他の超伝導体と同様、高温超伝導体においても2つの電子がペアを組んで運動していることがわかっています。ペアを組むためには電子間に有効的に引力が働くことが必要です。しかし本来電子間には強い電気的な反発力が働いています。多くの研究では、電子に働くこの強い反発力が何らかの仕組みによって引力に転換されているのであろうと推測されています。では、より高温での超伝導体を実現するためには、転換された引力を強くすればよいのかというところではありません。強すぎる引力は電子を一箇所に集めたがる傾向を持つため、電子の空間分布が大きいところと小さいところに分かれてしまう不均一状態を形成してしまい、これによって超伝導が抑制されます。そのため、より高温での超伝導体を実現するためには、不均一状態を作らないようにしながら引力を制御し強めることが重要です。

一方、光レーザーを利用した非平衡下において転移温度を制御しようという試みも精力的に行われてきています。近年、ドイツの研究グループが、光をある銅酸化物にあてて平衡系では達成できない格子構造を実現させたことにより、短時間ではあるものの、室温領域において超伝導的な性質が現れるという興味深い実験を報告しました。この研究は、非

平衡性を積極的に利用することで室温超伝導を実現するという可能性を指摘しています。

## ② 成果の内容

本研究では、相関電子系において、非平衡性を利用した新たな超伝導増強の可能性を提示することを目指しました。本研究グループは、銅酸化物群に対する最も単純な理論模型での電子ダイナミクスについて、電子間相互作用の効果を精度よく取り込める数値計算手法を開発し、それを用いた数値シミュレーションを実行しました。特に、相互作用の強さが超伝導と電子の不均一状態の発現にどのように関わっているか、そしてこれらを光によって制御することはできるのか、という点に注目して研究を行いました。これまでも平衡系において同様の観点からの研究がなされ、高温超伝導体における超伝導の発現が不均一状態と密接に関わっていることが指摘されてきました。本研究ではまず、光を照射する前の平衡下で、超伝導と不均一性が相互作用の強さにどう依存するのか詳しく調べました(図 1)。その結果、先行研究で分かっていたように電子の空間分布が一樣な状態では相互作用を強めていくと急激に超伝導が増大することを確認しました。しかしながら、今回の計算から、この強い超伝導状態は超伝導が抑えられた不均一状態よりもエネルギーが高いことが分かりました。この結果は、仮に転換された引力の強い物質を作成できたとしても、結局は電子が不均一になり超伝導が抑制されることを意味します。

では、動的に相互作用を強くした場合はどうでしょうか？強い光を物質に照射すると電子間の相互作用が相対的に強くなる、ということが先行研究で指摘されています。つまり動的に相互作用を相対的に強めることができるわけです。本研究グループは、この非平衡効果によって相互作用の強さを制御した場合、超伝導と不均一性がどのように時間発展するかをシミュレーションしました(図 2)。その結果、平衡系で相互作用を大きくした時の振る舞いと異なり、強い光照射により、すぐに不均一状態に落ち込むことなく、超伝導が増大することを見出しました。この現象は、光による電子の加速が、静的に固まった不均一状態を破壊する一方、光による引力の増大が電子のペア形成に効く、という複合的な効果によって起きたものと考えられます。

## ③ 今後の展望

これまでの高温超伝導に関する研究では、熱平衡の下でどのように転移温度を上げればよいか、ということが主に考えられてきました。本研究は、熱平衡下で超伝導を抑制してしまう電子の不均一性を光照射によって回避し、強い超伝導を達成できることを数値シミュレーションによって示しました。今後、本研究で得た理論的予言を実験でも実

証することが望まれます。さらに、どのような光を照射すれば物質の状態を制御する事が出来るかという指針をシミュレーションから得る研究だけでなく、これに基づいた新規光デバイス応用への発展にも、はずみがつくことが期待されます。

本研究は、日本学術振興会及び文部科学省の科学研究費補助金 (No.22104010, No.22340090, No.16H06345)、HPCI 戦略プログラム (SPIRE)、 計算物質科学イニシアティブ (CMSI)、次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成 (CDMSI)、統合物質科学リーダー養成プログラム (MERIT) および理化学研究所計算科学研究機構のスーパーコンピュータ「京」HPCI システム利用研究課題 (課題番号: hp130007, hp140215, hp150211, hp160201, hp170263) の助成を受け行われました。

## 5. 発表雑誌 :

雑誌名 : 「Science Advances」 (オンライン版 (米国東部時間) : 8月18日 (金))

URL : <http://advances.sciencemag.org/content/3/8/e1700718>

論文タイトル : Correlation-induced superconductivity dynamically stabilized and enhanced by strong laser irradiation

著者 : Kota Ido, Takahiro Ohgoe, and Masatoshi Imada\*

DOI 番号 : 10.1126/sciadv.1700718

## 6. 問い合わせ先 :

東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻

教授 今田 正俊 (いまだ まさとし) :

<報道担当>

東京大学 大学院工学系研究科 広報室

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

## 7. 用語解説 :

(注1) 平衡と非平衡: ある系が外部から物質やエネルギーのやり取りを行っておらず、時間的に変化しない状態のことを熱平衡状態と呼ぶ。一方、非平衡状態では、光などのエネルギーや物質などが外界から対象に与えられたり、外界に放出されたりするため、様々な物理量が時間的に変化したり流れが生じ、熱平衡では実現できない状態が実現可能ではないかという期待で、精力的な研究が始まっている。

## 8. 添付資料 :

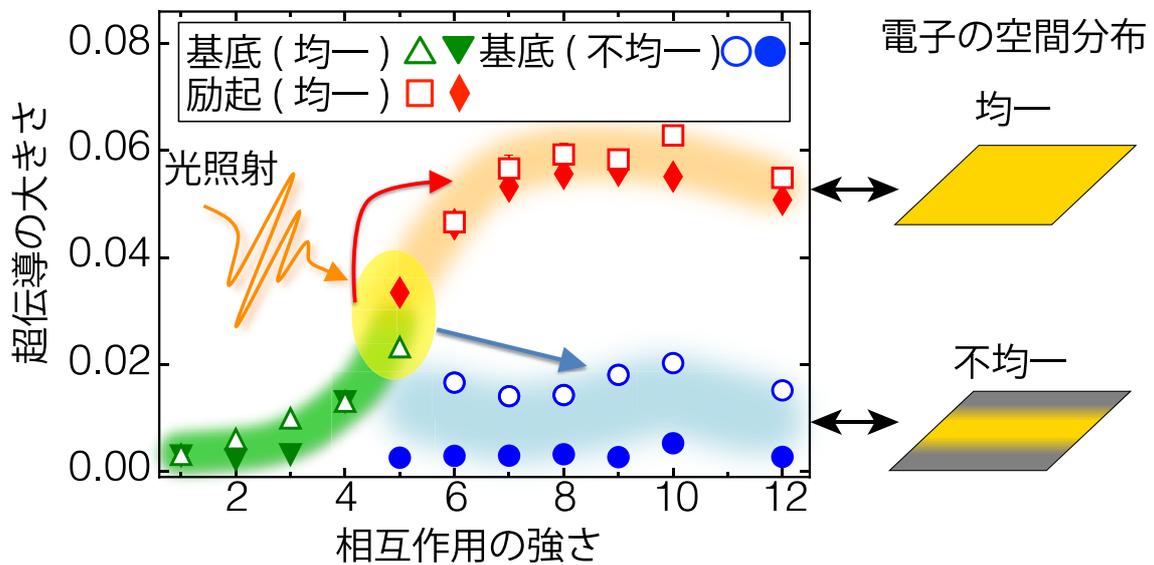


図1：超伝導の大きさと相互作用の強さの関係図

白抜きと塗りつぶされた印はそれぞれ2種類の異なる大きさの系での数値シミュレーション結果を表している。塗りつぶされた印のほうが大きな系でのシミュレーションであり、現実に近い。電子の空間分布が均一に保たれるのであれば、超伝導の大きさは左下（緑）の領域から右上（赤）の領域へ到達することができる。しかしながら、相互作用がある程度大きいと右下の領域の不均一状態のほうが右上の領域の均一状態よりもエネルギー的に安定である。そのため、ある物質が真ん中の楕円（黄色）で示されている領域の相互作用の強さを持つとした時、たとえ平衡下で相互作用を大きく出来ても右下に伸びている矢印に従って移動し超伝導は大きくならない。今回の研究では、光照射によって相互作用を大きくすると、右下に伸びる矢印のように不均一状態にすぐに落ち込むことなく右上の領域に到達できることを示した。

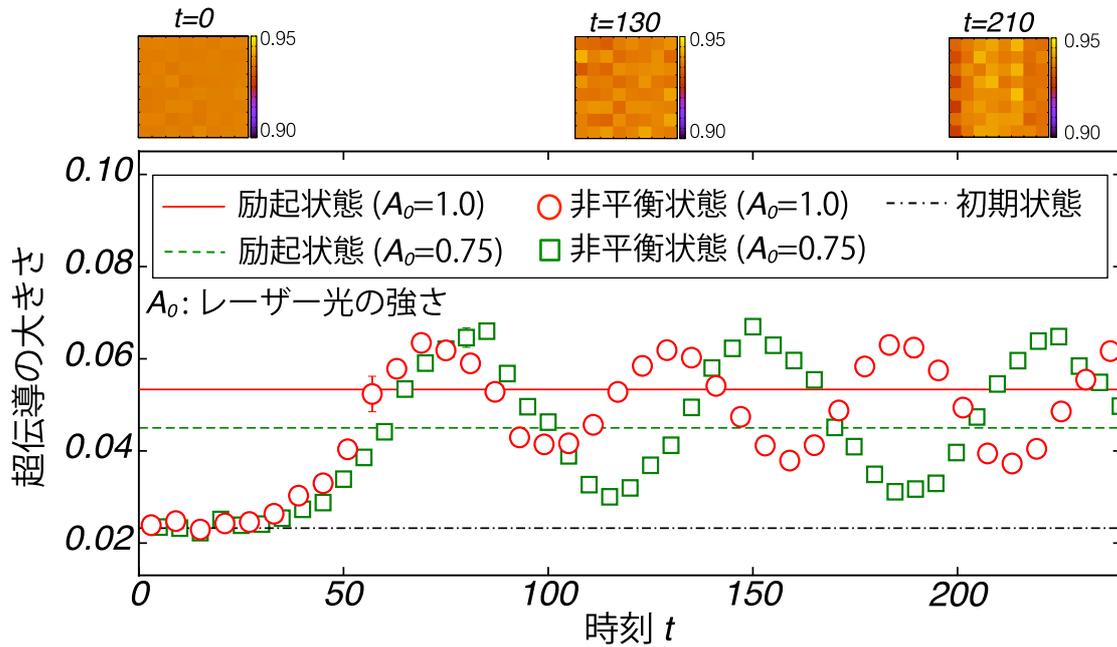


図 2：レーザー照射された系における超伝導の大きさと電子空間分布の時間依存性  
 真中の実線と破線は、レーザーによって有効的に強められた相互作用が仮に静的に実現したと仮定するときの均一励起状態における超伝導の大きさを示している。実際には熱平衡ではこの均一励起状態は実現できない。このシミュレーション結果から、レーザー照射によって、超伝導秩序は増大されるが電子の不均一性は大きくなっていない状態（熱平衡では実現できない状態）が動的に実現していることがわかる。超伝導の大きさを時間平均した値が、熱平衡状態では達成する事の出来ない電荷均一な励起状態の値（実線や破線）によく一致している。なお超伝導の大きさが時間に依存して振動する現象はヒッグス振動と呼ばれる。