

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656582

研究課題名（和文） 放射線誘起超伝導の探究

研究課題名（英文） Study on Irradiation-induced Superconductivity

研究代表者

越水 正典 (KOSHIMIZU MASANORI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40374962

研究成果の概要（和文）：X線照射下で、高温超伝導体の超伝導転移温度が上昇することを見出した。実験対象としたのは、Y-Ba-Cu-O 系および Gd-Ba-Cu-O 系の銅酸化物系高温超伝導体であり、最大で 15 K 程度の超伝導転移温度上昇を観測した。この結果は、これまでに観測されてきた光によるキャリアドーピングと同様の機構によると考えられる。しかしながら、物質中へより深く侵入可能な放射線での超伝導特性向上は、バルク材への応用の観点から、非常に有用であるといえる。

研究成果の概要（英文）：We have found rise in critical temperature, as much as 15 K, in high-temperature oxide superconductors under X-ray irradiation. The mechanism of the rise is considered to be similar to that of photo-doping. Because penetration depth of ionizing radiation is much larger than visible photons, this technique can be applied to improving the properties of bulk superconductors.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|-------|-----------|---------|-----------|
| 交付決定額 | 2,300,000 | 690,000 | 2,990,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：超伝導、放射線照射、キャリアドーピング

1. 研究開始当初の背景

申請者はこれまでに、多様な材料における放射線照射効果を探求してきた。最近では、強相関電子系酸化物における特異的な放射線照射効果の探究を進めており、それを契機として、本研究での、超伝導体における放射線による電子励起効果の探究という研究課題を着想した。

国内外において、電極からの、あるいは光励起による、外部からのキャリアドーピングによ

る超伝導転移温度の上昇は、超伝導体の研究者からの注目を集めつつある。それに対し、放射線によるキャリアドーピングは、これまでに研究例がない。放射線の利用には、次頁②で述べるように、光や電極からのキャリア注入と比較すると、いくつかの大きな利点がある。これらの点から、本研究が高い独自性を持ち、成果を挙げた際に大きなインパクトが期待されるといえる。

放射線を用いた超伝導体へのキャリアドーピングは、世界で初めての試みとなる。光照射

を用いた手法や、電場の印加された多層膜構造の界面を通じた電荷移動によるキャリア注入は、これまでも行われてきた。しかし、放射線照射は、これらの手法を大幅に上回る利点を有している。また、放射線照射と、材料特性とを組み合わせることにより、一方のキャリアのみを選択的にドーピングを試みる。具体的には、一方のキャリアのみを捕獲する欠陥の導入や、n型あるいはp型の半導体材料との多層膜構造での界面を通じた電荷移動により、キャリアドーピングを実現する。類似の手法はそれぞれ、光照射および電場印加による超伝導特性改善において利用されている。これらの試みは、材料特性の精緻な制御が必要であり、困難ではあるものの、チャレンジに値する研究課題であると考えられる。

超伝導体に対する光照射を用いたキャリアドーピングについて、これまでに十例程度が報告されている。そこでは、超伝導転移温度が10 Kほど上昇した観測結果も報告されている。即ち、外部からのキャリアドーピングによる研究例は、光照射によるものが先行している。しかし、放射線照射による超伝導発現や転移温度上昇が実現すれば、光照射による手法に対して、以下の利点が達成されることになる。

(1) 光照射では、表面近傍の数百 nm～数 μ mの領域のみでキャリアが生成する。電極からのキャリア注入では、より浅い領域にのみキャリアが注入されると予想される。一方、放射線照射では、X線照射では数十 μ m以上、 γ 線照射では数 cm～数十 cmの深さまででキャリアが生成する。即ち、バルク材料へのキャリアドーピングでは、放射線照射が圧倒的に適している。

(2) 光励起の場合には、一光子の吸収に対応した励起状態のみが生成する。一方、放射線では、電離や内殻励起もが生成し、その後、それらのエネルギーが価電子励起状態形成へと費やされる。そのため、一光子許容遷移による励起状態のみでなく、多様な電子励起状態が生成し、それらの生成による超伝導現象の発現も期待される。

上記の利点を活用し、本研究では、超伝導特性改善の手段としての放射線照射技術を確立する。これは、超伝導特性改善技術として非常に独自性の高いものである。なおかつ、本研究が成功すれば、それは放射線工学と超伝導の両分野における新たな研究展開を拓くものである。

2. 研究の目的

本研究で明らかにするのは、次の3点である。

(1) 放射線照射によるキャリアドーピングにより、どのような超伝導特性をもつ物質で、超伝導転移温度の向上や超伝導の発現が誘起されるのか。

特性改善が可能な系と不可能な系とに大別し、それらの材料の超伝導特性やその他の特性との相関を解明する。例えば、電子あるいはホールによる超伝導が生じる材料や、異なる酸素欠陥濃度の材料などを対象とした研究を進める。

(2) 超伝導転移温度の上昇の定量的な解析

超伝導転移温度の上昇が、試料のどのような特性と相関があるのかを、少なくとも現象論的に議論する。多くの物質で超伝導転移温度の上昇が観測されれば、既存のモデルとの比較・検討を行うことにより、超伝導転移温度の上昇を予見可能なモデルの提示を行う。

(3) 光照射効果とのどのような差異があるのか

申請者自身による、あるいは既に報告されている光照射による超伝導特性の改善との定量的比較を行う。これにより、放射線特有の効果の抽出を行い、その特有の効果に關与する電子励起状態の議論を進める。

3. 研究の方法

主に10 K以上の超伝導転移温度を有する物質群を対象とし、超伝導状態あるいは常伝導状態においてX線を照射し、電気抵抗率の温度依存性を測定した。対象とするのは、各種の銅酸化物とした。対象とする化合物組成の変化などにより、超伝導特性をはじめとする物質特性を変化させた試料を対象とし、X線照射を行った。また、光照射効果についても同様の測定系にて評価を行い、X線照射効果との定量的な比較を行った。これら一連の実験により、放射線照射による超伝導特性の改善が、物質のどのような特性と関連するものであるのかを明らかにした。さらに、光と放射線の効果を比較することにより、超伝導特性改善に寄与する電子励起状態の議論を行った。

具体的には、作製した試料に対し、X線照射前後で、電気抵抗率の温度依存性を測定した。照射するX線は、Cu管球を用いて発生する、主にCuのK α 線である。また、光照射下での伝導特性変化も観測した。X線照射前後

での抵抗率の温度依存性を比較し、超伝導特性に対する放射線照射効果を解析した。多様な材料に対する放射線照射効果を観測することにより、この放射線照射効果と、キャリア濃度や超伝導特性などの物質特性との相関を得た。

4. 研究成果

図1, 2にそれぞれ多結晶体 YBCO, GdBCO の, X線照射の有無による抵抗の温度依存性のグラフを示す。

まず, YBCO のX線照射なしの抵抗の温度依存性に注目すると, ある温度以下になると抵抗が急激に0に変化するという既報のデータと同様の挙動を示した。Tcは, YBCO①で66 K, YBCO②で76 K, YBCO③で70K, YBCO④で57 Kとなった。REBa₂Cu₃O_y系の超伝導体はTcと格子定数に關係性があるので, 今回測定したTcとc軸の格子定数を比較したが, 既報のデータと同様の關係性は見られなかった。今回は作製した試料数が少なかったため, 酸素量をうまく調整しきれなかったと考える。

GdBCO のX線照射なしでの抵抗の温度依存性に着目すると, YBCOと比較して抵抗が0に変化する過程がブロードであった。ここから, GdBCOの方がより不均一性が高いと考えられる。Tcは32 Kであった。

次に, X線照射下での抵抗の温度依存性に着目すると, X線照射なしでの時のグラフを平行移動したものとなっていた。Tcは, YBCO①で80 K, YBCO②で76 K, YBCO③で79K, YBCO④で61 K, GdBCOで50 Kとなり, YBCO②を除いてすべての試料でX線照射によりTcが上昇していた。YBCO②は今回作製した試料中で最もTcが高い試料だったので, Tcが75 K付近以上のYBCOにはX線の効果がないと考えられるが, Tcが75 K付近以上の試料を他に作製していないので, この考察には更なる実験が必要である。

X線照射によるTcの上昇幅は, YBCO①で15 K, YBCO②で0 K, YBCO③で9K, YBCO④で2 K, GdBCOで18 Kであった。この結果を, 既報の光照射によるTc上昇のデータと比較する。まず, 光照射によるTc上昇は, CuO₂面からCuO鎖の酸素空孔への電子のトラップによる, CuO₂面の正孔数の増大によるものである。よって, 光照射なしでのTcの低い試料でCuO鎖の酸素空孔が多いので, Tc上昇の効果が大きいと報告されている[19]。しかし, 今回の実験では, YBCOは, 照射なしでのTcが高い方が, X線照射によるTc上昇幅が大きかったのに対し, GdBCOは, 照射なしでのTcが低い場合でも, X線照射によるTc上昇幅が大きかった。ここから, X線照射による

Tc上昇の効果が, X線照射なしのTcと明確な相関がないことが分かる。そのため, X線と光では, Tc上昇効果の要因が異なることが確認できた。

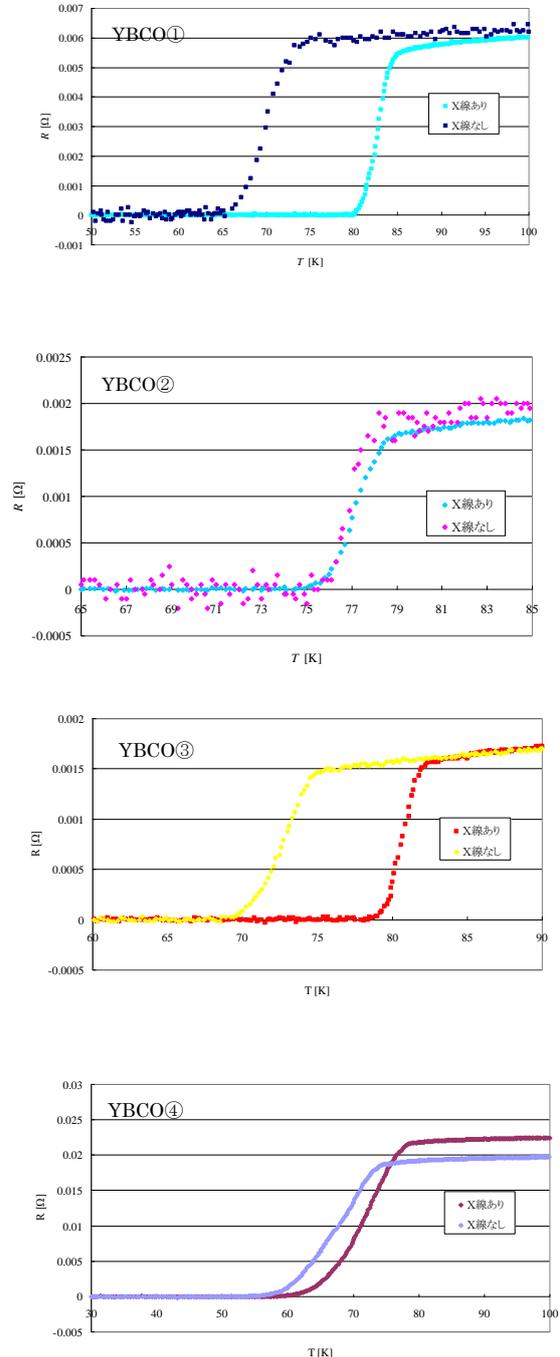


図1 YBCO のX線照射下および照射しない場合の抵抗の温度依存性

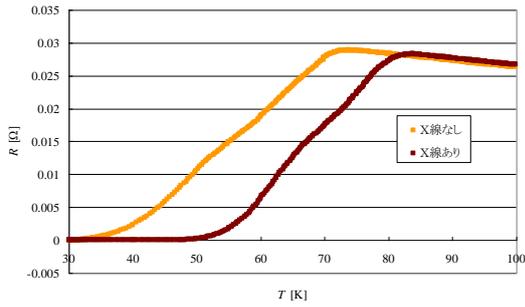


図2 GdBCO のX線照射下および照射しない場合の抵抗の温度依存性

東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：40374962

(2) 研究分担者 ()

研究者番号：

(3) 連携研究者 ()

研究者番号：

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0件)

[学会発表] (計0件)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

越水 正典 (KOSHIMIZU MASANORI)