

令和元年6月24日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06319

研究課題名（和文）接合垂直磁界への超伝導トンネル電流の履歴現象の測定と新デバイスへの応用

研究課題名（英文）Measurement of hysteresis of superconducting tunnel current upon perpendicular magnetic field and application to new devices

研究代表者

中山 明芳（Nakayama, Akiyoshi）

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：90183524

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,000,000円

研究成果の概要（和文）：この研究ではニオブウムを超伝導電極、アルミニウム酸化膜をトンネル酸化膜とするトンネル型の超伝導素子を作製している。垂直磁界を接合面に加えて、超伝導接合電流の面垂直および水平磁界への依存性特性を詳しく調べた。垂直磁界への依存性は複雑で、履歴現象を伴うことも見いだした。垂直磁界を加えた後では、接合電流の水平磁界依存性も通常のフラウンホーファー型依存性からずれた特性になることも見いだした。垂直磁界を交番で加えることによる超伝導電流の復活にも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導集積回路では、シリコンデバイスに置き換わる可能性があり、高速なスイッチングで注目されている。

しかし超伝導集積回路への不要磁束の捕獲による超伝導電流の現象が問題となっている。本研究により、垂直磁界を交番で加えることにより、一度減少した超伝導電流の復活がおこなえることがわかり、超伝導集積回路の問題点のひとつを解決する手だてが得られた。

また、履歴現象があるということは、同じバイアス電流下で [0] と [1] の2状態が存在することになり、新しい記憶素子、論理素子への応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We have fabricated niobium/aluminum-oxide/niobium tunnel type superconducting junctions. By applying perpendicular magnetic field to the junction plane, modulation characteristics of the junction current have been studied. The dependence of junction current upon perpendicular magnetic field has hysteresis. After applying the perpendicular magnetic field, the dependence of junction current on the parallel magnetic field differs from a normal Fraunhofer dependence. Superconducting current have also been recovered by applying the alternate perpendicular magnetic field.

研究分野：超伝導電子デバイス

キーワード：超伝導 ジョセフソン効果 磁界特性 垂直磁界依存性 履歴現象

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1)超伝導体/酸化膜/超伝導体のサンドイッチ構造では、電流が流れてもその値がある臨界値 I_c 以下のときは、両超伝導体間に電圧が現れない。このとき、両超伝導体それぞれの超伝導のオーダーパラメータとそれらの位相を考えると、電圧ゼロで流れる電流は、両電極のゲージ不変な位相差の \sin 関数の形である。このような極めて薄い酸化膜を2枚の超伝導体電極で挟んだ構造は、超伝導トンネル接合もしくはジョセフソン接合と呼ばれる。

(2)研究者の中山と阿部はこれまで、直流スパッタリング法で作成したニオブウム(Nb)薄膜を上下の超伝導体電極とする、サンドイッチ構造の Nb/AlOx/Nb トンネル素子を製作してきた。この構造はニオブウム金属を超伝導電極とし、アルミニウム酸化膜をトンネルバリアとして使用している。極めて薄い酸化膜を2枚の超伝導体電極で挟んだサンドイッチ構造は、超伝導トンネル接合となる。電子波は片側の電極から極めて薄い酸化膜を透過し、逆側の電極に到達できることより、「トンネル効果」と呼ばれる現象が観測される。このトンネル効果により電流が流れても、両電極間に電圧が生じず、ある臨界値 I_c まで超伝導電流が流れることになる。この臨界値 I_c を越えると、2枚の超伝導体電極間には電圧が生じる。超伝導トンネル接合は、外部磁界に極めて敏感であり、高感度な磁束計として使われている。本研究で展開される、超伝導接合の電気的特性の磁界依存性を調べるのに、1次元方向だけでなく、2次元、3次元で外部磁界を走査することは、我々のみがおこなっている独創的な方法である。この研究では接合電流 I_c の垂直磁界依存性の履歴現象を調べる。超伝導集積回路では、不要磁束による超伝導電流の現象が問題となるが、本研究により、一度減少した超伝導電流の復活がおこなえる。

2. 研究の目的

本研究ではニオブウム金属(Nb)を超伝導体にもつ超伝導トンネル素子及び超伝導量子干渉計を製作し、液体ヘリウム温度(絶対温度 4.2K)で非線形の電気的特性(電流 I-電圧 V 特性)を測定する。

(1) Nb/Al-AlOx/Nb 構造のジョセフソン接合の接合面に平行に二方向から外部磁界(H_x, H_y)を印加してジョセフソン電流の変調を行い、ジョセフソン電流の二次元磁界変調特性を測定する。本研究では、この Nb/Al-AlOx/Nb 構造の超伝導2端子サンドイッチ構造に垂直に磁界 H_z を加えたときの、超伝導電流の履歴現象を詳しく調べることを目的とする。

(2) 接合面に垂直に垂直磁界 H_z を加えた場合は、 I_c - H_z 特性がとても複雑である。超伝導電流 I_c の垂直磁界への依存性が多くの場合に履歴現象を持つことを利用し、何らかの雑音、温度上昇により一度小さくなってしまった超伝導電流 I_c の復活も試みる。

3. 研究の方法

本研究で使う超伝導接合はサンドイッチ構造のトンネル接合である。素子製作のために、マグネトロンスパッタリング装置を使った。ニオブウム堆積用チャンバー内でシリコン基板上にまず下部超伝導電極用ニオブウム薄膜を堆積する。その後、アルミニウム堆積用チャンバーに移動し、アルミニウム薄膜を堆積する。次に酸化室まで試料台を戻して、純酸素中30分間酸化して、アルミニウム薄膜の表面にトンネル酸化膜を形成する。その後上部ニオブウム薄膜を堆積して上部の超伝導電極として、サンドイッチ構造にする。接合形状は溶液中の陽極酸化法により厚い酸化膜を接合周囲に形成することで決定する。正方形接合、長方形接合等を製作した。

磁界特性測定装置として、円形コイル[ヘルムホルツコイル]を3対使い、 H_x, H_y, H_z 方向の外部磁界を生成する。 GPIB 制御された直流電源によりコイルに電流を流すと、その電流に比例して磁界が生じる。プログラムファイルであらかじめ設定したアルゴリズムにより、外部磁界を正確に生成し、デジタルオシロスコープで電流-電圧特性を計測することが可能となる。

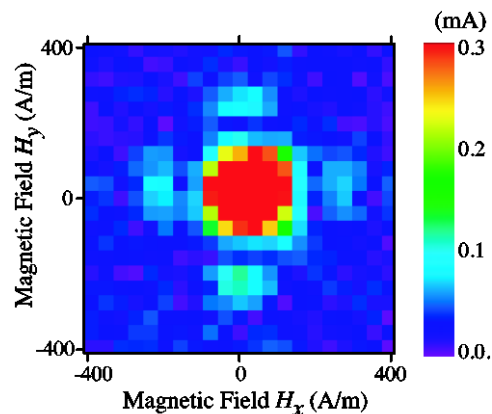


図1 初期状態の I_c -(H_x, H_y)特性

プログラムファイルであらかじめ設定したアルゴリズムにより、外部磁界を正確に生成し、デジタルオシロスコープで電流-電圧特性を計測することが可能となる。

4. 研究成果

本研究では正方形形状の超伝導接合について詳しく調べた。超伝導接合の接合面に平行に磁界ベクトル $H(H_x, H_y)$ の外部磁界を加えたとき、接合内の電磁界のベクトルポテンシャル A および接合トンネル電流密度 j の空間分布は、外部から加えた磁界ベクトル $H(H_x, H_y)$ の向きと垂直な向きに空間変調する。

図1には、磁界を接合面に平行に加えたときの接合電流の磁界依存性の測定結果を示す。図1は垂直磁界を加える前の初期状態での磁界依存性である。この初期状態では、2方向にいわゆるブラウンホフパターン $\sin(aH_x)/H_x, \sin(aH_y)/H_y$ の依存性を示すことになる (a は定数)。

次に接合面に垂直に磁界を加えて、この垂直磁界に対する接合電流の磁界特性を詳しく調べた。接合電流は接合面に平行な磁界成分には履歴を持たず、垂直磁界に対しては履歴を有する。垂直磁界をノコギリ歯状の時間波形で正負の向きに加え、その最大値を徐々に大きくしていった。このとき得られた履歴を有する I_c - H_z 特性を図2に示す。図2の I_c - H_z 特性は H_z の値に対して履歴を有し、垂直磁界 H_z を増加した時と減少させた時では I_c の値が異なるので、図2の特性において、矢印で垂直磁界 H_z を変えた向きを表す。最大振幅が (iii) ± 3000 A/m の場合を例に詳しく説明すると、まず、垂直磁界 H_z は0から始めて $+3000$ A/m に増やし、その後、0に戻し、次に -3000 A/m まで負方向に垂直磁界を加える。

接合電流 I_c の垂直磁界 H_z 依存性の特徴を次にまとめる。(1)接合電流は接合面に垂直な磁界 H_z に対しては履歴を有する。今回測定した接合においては、 H_z の絶対値を増やす過程でなく、減らす過程において超伝導電流 I_c は最大値を取った。(2)垂直な磁界 H_z の値を固定して、接合面に平行な磁界を ± 3000 A/m 以下で走査しても、履歴現象は示さない。接合電流は接合面に平行な磁界成分 (H_x, H_y) に対しては履歴を持たない。(3)図8に示す I_c の H_z に対する履歴特性の各時点に於いて、それぞれ I_c - (H_x, H_y) 特性が対応すると考えることができる。(4)さらに、各時点に於ける I_c - (H_x, H_y) 特性をその時点での接合周りの磁束捕獲を表すものと捉えることができる。(5)いわゆる磁性体の M-H 特性でのマイナーループと同様に、 I_c - (H_x, H_y) 特性の垂直磁界 H_z 依存性にも、マイナーループの考えをさせることも分かった。すなわち、垂直な磁界 H_z の増加させる場合と、減少させる場合の両方の場合ともに、測定途中で垂直磁界 H_z の大きさを少し前の時点の H_z の値に戻せば、この少し前の時点の H_z の I_c - (H_x, H_y) 特性が再現できる。

外部垂直磁界 H_z を減らす中間点で、外部磁界の水平成分 H_x, H_y を $-400 < H_x < 400$ A/m, $-400 < H_y < 400$ A/m の範囲で走査し、 I_c - (H_x, H_y) 特性を測定した。図3は垂直磁界 H_z を最大 8000 (A/m) 加えたときのもので、(a)は正の最大値 $H_z = 8000$ (A/m) のときで、最大値 8000 A/m から (b)5800, (c)5300, (d)4800 A/m と減らす途中の I_c - (H_x, H_y) 特性と、次に H_z を負方向に -8000 A/m 加えて (e)-8000, (f)-5800, (g)-5300, (h)-4800 A/m と H_z の絶対値を減らす途中での I_c - (H_x, H_y) 特性である。図3ではメインピークの領域は4角でなく3角形である。各時点の接合周辺の磁束分布がこの I_c - (H_x, H_y) 特性と対応していると解釈できる。

磁束線の向きさえ変えれば、負方向の(e)(f)(g)(h)での磁束線分布は、正方向の(a)(b)(c)(d)とほぼ同

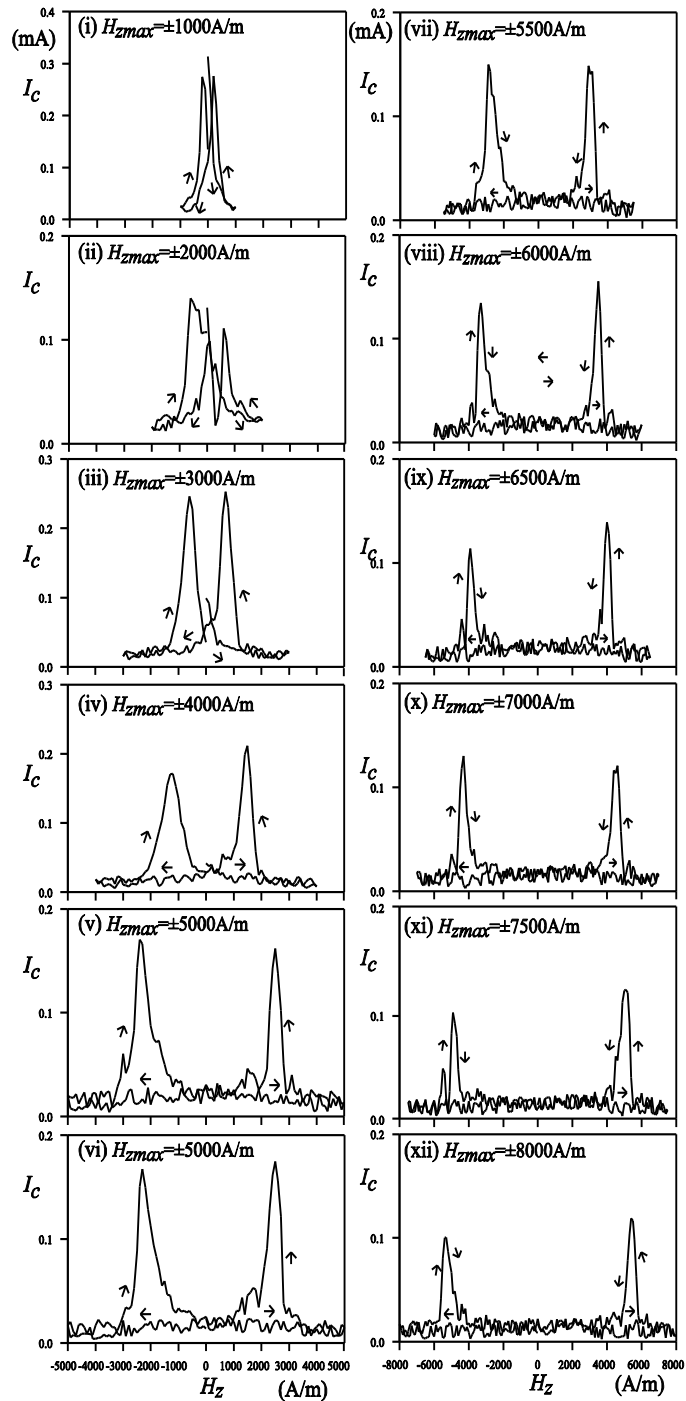


図2 超伝導電流 I_c の垂直磁界 H_z に対する履歴特性

じであると考えられて、負方向の(e)(f)(g)(h)での I_c -(H_x - H_y)特性は、正方向の(a)(b)(c)(d)での I_c -(H_x - H_y)特性より、3軸の向きを(H_x , H_y , H_z)から(- H_x , - H_y , - H_z)へと変えることによりほぼ得られる。

接合の近くにヘルムホルツコイルを置き H_z を正負で交番に変えることにより、一度減少した超伝導電流の I_c の値を復活させることも試みた。 I_c の復活は、確率的であり、大きく復活するのは2割強の割合であった。

以上まとめると、超伝導接合を流れる超伝導ジョセフソン電流 I_c の、接合面に平行な H_x - H_y 成分、垂直な H_z 成分に対する依存性を調べた。

(1) ジョセフソン電流 I_c の接合面に平行な H_x - H_y 成分依存性は、履歴を持たない。一方で垂直成分 H_z 依存性は、複雑な履歴現象を有することを見つけた。測定した超伝導接合では、垂直磁界 H_z を減少する過程で I_c は最大の値をとった。(2)垂直磁界を加える前の I_c -(H_x - H_y)特製は H_x 成分 H_y 成分へのフラウンホーファーパターン依存性を示す。

(3)垂直磁界を加えた後の I_c -(H_x - H_y)は H_x 成分 H_y 成分へのフラウンホーファーパターン依存性を示さず、 I_c -(H_x - H_y)特性のメインの領域は3角形の形であった。

(4)垂直磁界 H_z にをプラスマイナスに増加させていくことにより、 I_c -(H_x - H_y)特性において、このメイン領域が(H_x - H_y)平面上を移動することも確認した。

(5) I_c -(H_x - H_y)の垂直磁界 H_z 依存性が履歴現象を示すことを利用し、垂直磁界 H_z を正負交代で加え、その最大値を徐々に大きくしていくことができた。

〔引用文献〕図は発表論文の雑誌論文 2)より引用した。

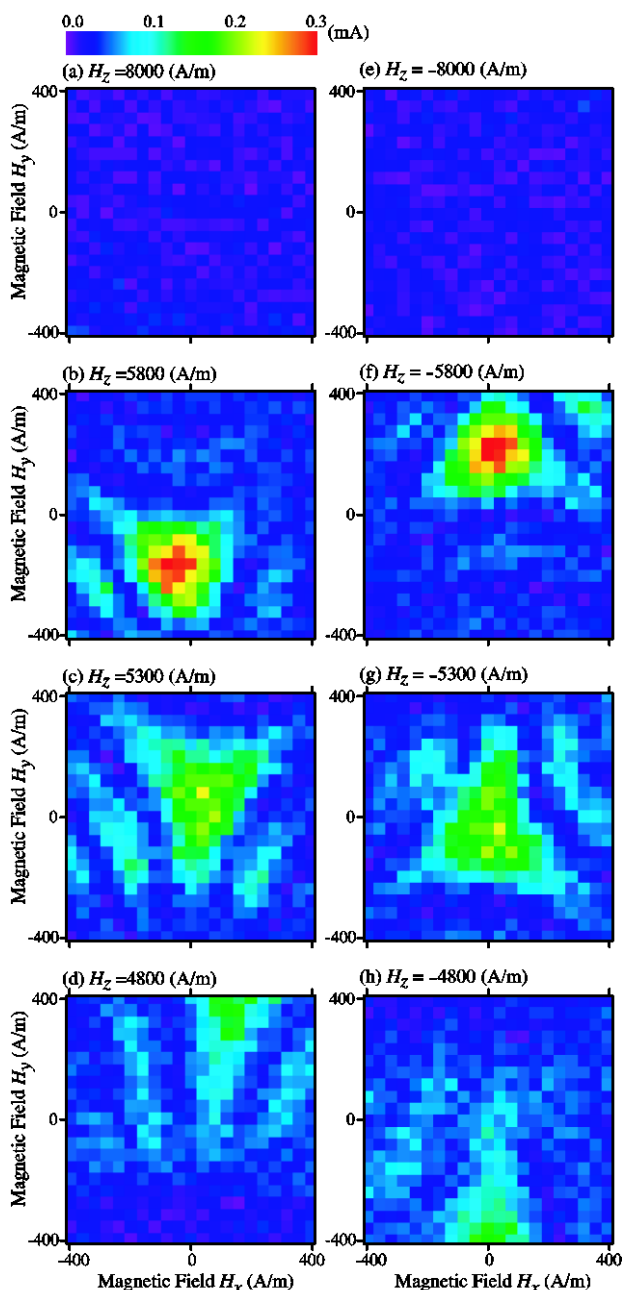


図3 H_z を ± 8000 A/m加えた後の I_c -(H_x - H_y)特性

5. 主な発表論文等

1) A. Suzuki, A. Nakayama, S. Abe and N. Watanabe, “Restoration of the Josephson Current by Applying a Vertical Magnetic Field” IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, 28, 1200105 (2018).DOI: 10.1109/TASC.2018.2796596

2) Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Norimichi Watanabe, “Deviation From Fraunhofer-Type Modulation of Josephson Current Through Niobium Tunnel Junctions by Applying Vertical Magnetic Field”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 26, 1100606 (2016).DOI: 10.1109/TASC.2016.2537147

〔学会発表〕(計 13 件) 国際会議発表

1) A. S. Ebana, A. Nakayama, K. Kobayashi, T. Hikosaka, N. Watanabe and S. Abe “Modulation of a Josephson current through a Josephson junction with different shapes by two-dimensional scan of the external magnetic fields” 13th International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials, NANO-100 (Poland, 2018.9).

2) K. Kobayashi, A. Nakayama, A. S. Ebana, T. Hikosaka, N. Watanabe and S. Abe “Influence of the Al thickness of Nb/Al-AlOx/Nb Josephson junction on the current-voltage characteristics and two-dimensional magnetic field dependence of a Josephson junction” 13th International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials, NANO-99 (Poland, 2018.9).

3) T. Hikosaka, A. Nakayama, A. S. Ebana, K. Kobayashi, N. Watanabe and S. Abe “Influence of the thickness of the base Nb layer in a Josephson junction on flux trapping” 13th International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials, NANO-98 (Poland, 2018.9).

- 4) A. Nakayama, A. S. Eban and N. Watanabe “Estimation of Pinhole Junction Position in Superconducting Quantum Interference Device Structure from Two-dimensional Magnetic Field Dependence of Josephson Current” 13th International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials, NANO-189 (Poland, 2018.9).
 - 5) N. Watanabe, A. Nakayama, A. S. Eban, K. Kobayashi, T. Hikosaka and S. Abe “Modulation characteristics of a Josephson current through a superconducting tunnel junction by applying the parallel magnetic field (Hx, Hy) and perpendicular magnetic field Hz” 13th International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials, NANO-97 (Poland, 2018.9).
 - 6) K. Kobayashi, A. Nakayama, A. S. Eban, T. Hikosaka, N. Watanabe and S. Abe “Influence of the Al thickness of Nb/Al-AlOx/Nb Josephson junction on two-dimensional magnetic field dependence of Josephson current” The 14th International Workshop of High-Temperature Superconductors in High Frequency Field, P.10 (山形, 2018.6)
 - 7) A. S. Eban, A. Nakayama, K. Kobayashi, T. Hikosaka, N. Watanabe and S. Abe “Two-dimensional magnetic field dependence of a Josephson current through a Josephson junction with different shapes” The 14th International Workshop of High-Temperature Superconductors in High Frequency Field, P.8 (山形, 2018.6)
 - 8) N. Watanabe, A. Nakayama, A. S. Eban, K. Kobayashi, T. Hikosaka and S. Abe “Modulation characteristics of Josephson current through a Nb/Al-AlOx/Nb Josephson junction by applying the parallel magnetic field (Hx, Hy) and perpendicular magnetic field Hz” The 14th International Workshop of High-Temperature Superconductors in High Frequency Field, P.7 (山形, 2018.6)
 - 9) T. Hikosaka, A. Nakayama, A. S. Eban, K. Kobayashi, N. Watanabe and S. Abe “Influence of the thickness of the base Nb layer on flux trapping in the Nb superconducting film around the Josephson junction” The 14th International Workshop of High-Temperature Superconductors in High Frequency Field, P.1 (山形, 2018.6)
 - 10) A. Suzuki, A. Nakayama, S. Abe and N. Watanabe, “Restoration of the Josephson Current by Applying a Vertical Magnetic Field” 13th European Conference on Applied Superconductivity, Geneva, Switzerland (2017.9)
 - 11) N. Watanabe, S. Abe and A. Nakayama, “Modulation Characteristics of a Josephson Current through a Nb Tunnel Junction by a Parallel Magnetic Field and a Perpendicular Magnetic Field” 13th European Conference on Applied Superconductivity, Geneva, Switzerland (2017.9).
- 国内学会発表
- 1) 渡邊 騎通, 江花 昭哉, 小林 一樹, 彦坂 卓哉, 鈴木 敦之, 阿部 晋, 中山 明芳 “垂直磁界印加時におけるジョセフソン電流の二次元磁界変調特性” 電子情報通信学会技術研究報告. SCE, 超伝導エレクトロニクス 117(428), 1-5 (東京, 2018.1).
 - 2) 鈴木 敦之, 阿部 晋, 中山 明芳, “外部磁界によるジョセフソン電流の磁界変調特性” 2016年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-8-9
〔その他〕 ホームページ(神奈川大学大学院)
<http://www.gen.kanagawa-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究分担者

中山 明芳 (NAKAYAMA Akiyoshi)

神奈川大学・工学部・教授 研究者番号：90183524

(2)研究分担者

阿部 晋 (ABE Susumu)

神奈川大学・工学部・准教授(現在：非常勤講師)

研究者番号：10333147

穴田哲夫 (ANADA Tetsuo) 神奈川大学・工学部・名誉教授

研究者番号：20260987

※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。