

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 9 月 26 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25871198

研究課題名(和文)超伝導ナノ構造を用いた量子電流標準の研究

研究課題名(英文)Research on quantum current standards with superconducting nano-structure

研究代表者

中村 秀司 (Shuji, Nakamura)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：70613991

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は単電子デバイスを用いた微小電流標準の実現である。本研究では、「超伝導ナノ構造を用いた単電子ポンプによる定電流発生」、「新奇デバイス開発」、「高速微小電流測定技術の開発」の3つの研究を行った。具体的には定電流発生に関して「SINISターンスタイルを用いた単電子ポンプの磁場による安定化」、「SINISターンスタイルの並列駆動、高周波駆動による電流の増幅」を行った。また新奇デバイス開発に関して「微粒子ナノギャップを用いた単電子トランジスタの作製」、「2DEGを用いた並列単電子ポンプ素子の開発」を行った。最後に「マイクロ波反射・透過測定を用いた実時間単電子検出」のための計測技術の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：Realization of a quantum current standard is studied with single electron devices. In this research, we mainly achieve three results; "Electric current generation with a superconducting device", "a new type of single electron devices" and "RF-reflective and transmissive detection of single electron device".

First, we succeeded to stabilize superconducting single electron pumping with magnetic fields. To enlarge the pumping current value, parallel and high frequency operation of the devices are also realized. Second, we fabricated single electron device using nano-particle and two dimensional electron gas system. Finally, to detect the error of pumping, we launched the single electron detection setup in a dilution refrigerator.

研究分野：物性物理

キーワード：単一電子素子 電流標準 超伝導 マイクロ波

### 1. 研究開始当初の背景

科学研究活動を行うにあたって計測の定量性は、実験結果の普遍性、再現性を担保するためにも欠かすことのできないものである。またこれまでの科学研究は実験と理論との比較に上り発展してきた経緯があり、定量的な実験結果の評価がその理論の正当性を示す重要な要因となっていることからその重要性を理解することができる。一方で産業活動、経済活動を行う上でも計測の定量性は重要な要素である。例えば他国で測定した1メートルと自国で測定した1メートルが異なれば、他国と自国の商品を組み合わせることができなくなり輸出入等の取引に大きな弊害を与えることは想像に難くない。

このような計測の定量性、普遍性は「標準(standard)」とよばれる「基準」を基に様々な物理量に対応する“単位”を実現することで担保されている。この単位系は国際単系(SI)と呼ばれ、7つの基本単位を中心に構成されている。

7つの基本単位の一つである電流は、電気測定の要となる物理量であり、多くの研究活動、産業活動に用いられている。特に近年アトアンペア( $10^{-18}$  A)からナノアンペア( $10^{-9}$  A)程度の超微小な電流計測が半導体デバイス・絶縁評価、環境測定、生体計測において求められるようになってきた。このような微小電流計測の必要性が迫られる中その測定の正当性・信頼性を担保する微小電流標準は1ナノアンペアで3桁程度の精度しか有しておらず微小電流標準の実現と定量的な微小電流計測技術の実現が待たれている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、単電子デバイスを用いた微小電流標準の実現である。これまで電流の基準は量子ホール効果を基準とする抵抗標準とジョセフソン効果を基準とする電圧標準をオームの法則を介することで実現されてきた。しかしながら上記手法によって実現される電流はミリアンペア程度で最小の不確かさを持ち、アトアンペアからナノアンペアといった電流では十分小さな不確かさを実現することが難しい。本研究では、電流が単位時間の電子の流れであることに着目し、一秒間に流れる電子の個数を正確に制御することで微小電流の標準を実現することを目的としている。これにより放射線・ガス等の検出器、生体計測等で重要性の増している微小な電流の定量的な測定を可能にする。また単電子素子を用いて電子を一粒ずつ数え上げることで微小電流を計測する計測技術を確立する。

### 3. 研究の方法

本研究では、単電子素子として超伝導体/絶縁体/常伝導金属/絶縁体/超伝導体接合による単電子トランジスタ(SINIS ターンスタイル)を用いる。この SINIS ターンスタイル

は2007年にAalto大学のJukka Pekolaグループによって実現されたもので現在電流標準を実現する素子として注目されており、現状4桁の不確かさと100 pA程度の電流発生に成功している。この SINIS ターンスタイルの不確かさの要因としては現在「超伝導・常伝導界面におけるアンドレエフ反射」「超伝導体中に誘起させた準粒子のリーク」が主なものとして考えられており、これを解決すべく研究が行われている。本研究では、超伝導体中に渦糸を誘起することで超伝導体中の準粒子を減少させることに取り組む。また量子電流標準を実現するため、微粒子、半導体二次元電子系を用いた新奇単電子ポンプデバイスの開発を行う。また同時に発生した電流の実時間測定を行い、単電子転送エラーを検出することによって不確かさの低減を図る。

### 4. 研究成果

本研究では、大きく分けて「超伝導ナノ構造を用いた単電子ポンプによる定電流発生」「新奇デバイス開発」「高速微小電流測定技術の開発」の3つの研究を行った。具体的には定電流発生に関しては「SINIS ターンスタイルを用いた単電子ポンプの磁場による安定化」「SINIS ターンスタイルの並列駆動による電流値の逡倍」「SINIS ターンスタイルの高周波駆動」を行った。また新奇デバイス開発に関して「微粒子ナノギャップを用いた単一電子トランジスタの作製」「半導体二次元電子系を用いた並列単電子ポンプ素子の開発」を行った。最後に高速微小電流測定技術の開発に関しては「マイクロ波反射・透過測定を用いた実時間単電子検出」のための計測技術の開発を行った。以下に詳細を述べる。

#### (1) SINIS ターンスタイルを用いた単一電子ポンプの磁場による安定化

SINIS ターンスタイルを用いた単電子ポンプにおいては、超伝導体中に誘起された準粒子がそのエラーの要因となることが指摘されている。これを防ぐためこれまで「超伝導電極形状の最適化」や「準粒子トラップ」などが提案されてきた。本研究では我々は、磁場によって誘起される渦糸に着目して研究を行った。SINIS ターンスタイルの超伝導電極として用いられるAl薄膜は、第二種超伝導体としてふ

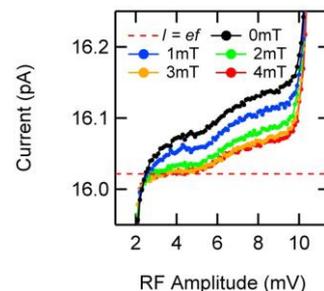


図1. SINIS ターンスタイルの磁場依存性

るまうため面直磁場印加に伴って超伝導電極中に渦糸が出現する。この渦糸中では超伝導体のペアポテンシャルがバルクの超伝導体に比べて減少しているため準粒子は渦糸にトラップされる。これによって超伝導体中の準粒子の密度が低下し準粒子による余剰電流が抑制される。図1は実験結果であり、磁場印加とともに余剰電流が減少しており数 mT 程度の磁場で準粒子の影響を低減できることを示した。また発生電流の不確かさ評価を行いおよそ4桁程度の精度で電流を発生させることができることを示した。(図2)

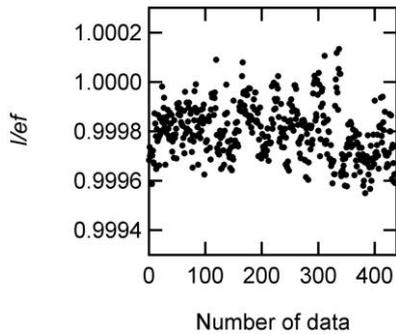


図2. 発生電流の不確かさ

### (2) SINIS ターンスタイルの並列駆動と高周波駆動

単電子ポンプによって発生した電流は、素電荷と周波数（一秒当たりの電子の個数）によって決まる。実用的な電流標準の実現には不確かさの改善だけではなく、発生電流の増幅も重要な課題である。我々は、2つの手法によって発生電流の増加に取り組んだ。まず素子の並列化（図3）によって電流の通倍を行った。図4は実験結果であり11素子が一つのチップ上に実装されており、一つ一つの素子を順番に駆動させていくことで11倍の電流発生に成功した。

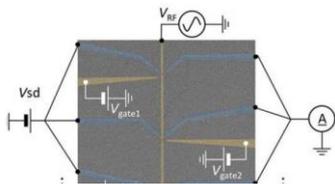


図3. 並列化した素子

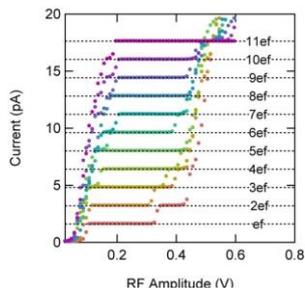


図4. 並列化した素子による電流発生

また同時に素子のトンネル抵抗を最適化することで素子の駆動周波数の改善を行い、1 GHz 程度の周波数まで動作周波数を増加できることを示した（図5）これらの成果により素子の並列化と高周波駆動に筋道をつけ電流標準の実現に向けて歩を進めた。

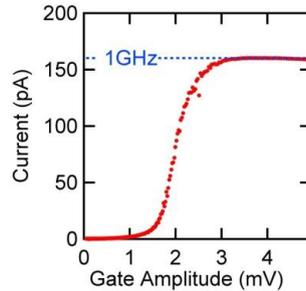
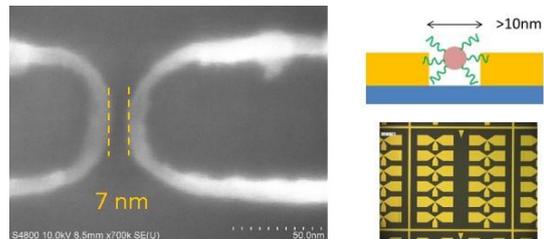


図5. 素子の高周波駆動

### (3) 新奇デバイスの開発

単電子ポンプによる定電流発生において素子の幾何学的な大きさによってほぼ決定される静電エネルギーはその不確かさに大きな影響を与える。電流標準実現に向けて静電エネルギーのより大きな素子の作製をおこなった。具体的には「微粒子ナノギャップを用いた単一電子トランジスタの作製」「半導体二次元電子系を用いた並列単電子ポンプ素子の開発」を行った（図6、図7）。現状、単電子転送には成功していないが今後研究を進めより小さな不確かさを持つ単電子ポンプ素子の実現に向けて研究を行っていく。



SEM image of nanogap

図6 微粒子と超伝導ナノギャップを用いた単電子ポンプ素子

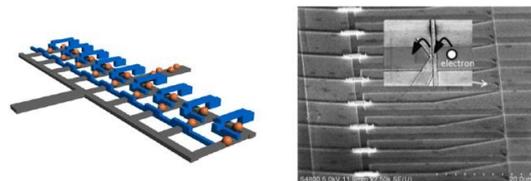


図7 GaAs 半導体二次元電子系を用いた単電子ポンプ素子

(4) マイクロ波反射・透過測定を用いた  
実時間単電子検出

単電子ポンプによる定電流発生のエラー検出とその物理的な起源の解明のためにマイクロ波反射・透過測定を用いた実時間単電子検出をおこなった。具体的には、希釈冷凍機中に方向性結合機、LC 共鳴回路、極低温アンプを組み込んだ。高周波信号を外部から引加しその反射、もしくは透過強度をホモダイナミック検波することでデバイスの実時間でのインピーダンス変化を検出した。図 8 はデバイスのインピーダンス変化を実時間で測定したもので 100 ns~1 us 程度のインピーダンス変化を測定することに成功した。

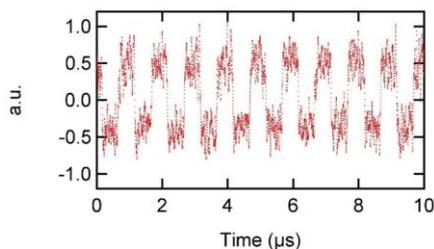


図 8. 反射強度の実時間測定結果

今後は単電子ポンプ、実時間単電子検出、FPGA 等を用いたフィードバック制御 (図 9) によって単電子ポンプの不確かさを低減とそのエラー要因解明を行う予定である。

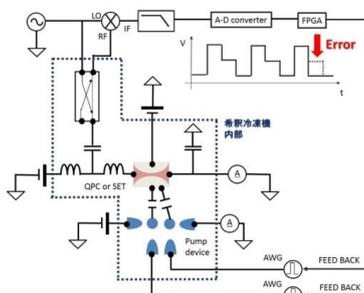


図 9. 単電子ポンプのエラー検出とエラー  
のフィードバック制御

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 9 件)

1. N. H. Kaneko, S. Nakamura, Y. Okazaki  
"A review of Quantum Current Standards"  
Review of Measurement Science and  
Technology 27, 032001 (2016) 査読：有

2. S. Nakamura, Yu. A. Pashkin, J-S tsai  
and N-H. Kaneko

"Single-electron pumping by parallel  
SINIS turnstiles for quantum current  
standard"

IEEE Instrumentation and Measurement 64,  
1696 (2015) 査読：有

3. S. Nakamura, Yu. A. Pashkin, J-S. Tsai  
and N-H Kaneko

"Temperature dependence of  
Single-Electron Pumping using a SINIS  
Turnstile"

Physica C 504, 93 (2014) 査読：有

4. Yoshitaka Nishihara, Shuji Nakamura,  
Kensuke Kobayashi, Teruo Ono, Makoto Kohda,  
and Junsaku Nitta

"Shot noise at the quantum point contact  
in InGaAs heterostructure"

AIP Conference Proceedings 1566, 311  
(2013) 査読：有

5. K. Chida, M. Hashisaka, Y. Yamauchi, S.  
Nakamura, T. Arakawa, T. Machida, K.  
Kobayashi, and T. Ono

"Bias voltage dependence of the electron  
spin depolarization in quantum wires in  
the quantum Hall regime detected by the  
resistively detected NMR"

AIP Conference Proceedings 1566, 279  
(2013) 査読：有

6. 中村秀司

"量子電流標準と微小電流計測の可能性"

計測標準と計量管理 Vol.65 No.2, 79-83  
(2015) 査読：なし

7. 中村秀司

"量子電流標準を目指して"

電子情報通信学会誌 vol 98, No 10, 911 -  
916 (2015) (2015) 査読：なし

8. 中村秀司、Yu. A. Pashkin, J-S. Tsai,  
金子晋久

"SINIS ターンスタイル素子を用いた単電子  
ポンプ：量子電流標準実現に向けて"

電子情報通信学会技術研究報告, 113, 1  
(2014) 査読：なし

9. 中村秀司

"電流標準の現状と展望"

産総研計量標準報告, 8, 4, 439 (2013)  
査読：あり

[学会発表] (計 21 件)

1. Shuji Nakamura and Nobu-hisa Kaneko  
"Three electrical quantities and their  
quantum mechanical representation"

EMN Quantum Meeting, Thai, Phuket 2016/04  
(invite)

2. Shuji Nakamura, Yuri Pashkin, Jaw Tsai, Nobu-hisa Kaneko  
 "Recent progress on the researches toward the quantum current standard in NMIJ"  
 EURAMET TCEM Sub-committee on DC & Quantum Metrology Meeting, Switzerland Bern, 2015/06 (invite)
3. S. Nakamura, Yu. A. Pashkin, J-S Tsai, N-H. Kaneko,  
 "Researches on the quantum current standards"  
 Asian Pacific Metrology Program, Korea Dejon, 2014/09
4. S. Nakamura, Yu. A. Pashkin, J-S Tsai, N-H. Kaneko,  
 "SINIS turnstile for quantum current standards"  
 Conference on Precision Electromagnetic Measurement, Rio de Janeiro, 2014/08
5. S. Nakamura, Yu. A. Pashkin, J-S Tsai, N-H. Kaneko,  
 "Temperature and magnetic field dependence of a single electron pump"  
 FIRST International Symposium on Topological Quantum Technology, Tokyo, 2014/01
6. Shuji Nakamura, Yuri Pashkin, Jaw-Shen Tsai and Nobuhisa Kaneko  
 "Magnetic Field Stabilization of a SINIS single electron pump"  
 The International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT2013), Kanagawa, 2013/11.
7. Shuji Nakamura, Yuri Pashkin, Jaw-Shen Tsai and Nobuhisa Kaneko  
 "Single Electron Pumping By using a SINIS Turnstile"  
 20th International Symposium on Superconductivity, Tokyo, 2013/11.
8. Shuji Nakamura, Yuri Pashkin, Jaw-Shen Tsai and Nobuhisa Kaneko  
 "Quantum Current Standard based on a Superconducting device",  
 the 3rd Summer School on Semiconductor / Super-conducting Quantum Coherence Effects and Quantum Information, Nasu, 2013/09
9. Shuji Nakamura  
 "Single electron pump towards a quantum current standard"  
 The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy, Nara, 2013/04
10. "SINIS ターンスタイルに与える近接効果の影響"  
中村秀司 Y. Pashkin I. Khaymovich, 岡崎雄馬、J. Pekola, J. Tsai, 金子晋久 日本物理学会 東北学院大学 2016/03
11. "熱雑音を用いた位相依存準粒子ジョセフソン効果の検証"  
中村秀司、岡崎雄馬、金子晋久、日本物理学会 関西大学 2015/09/18
12. "超伝導デバイスを用いた量子計測標準"  
中村秀司、浦野千春、丸山道隆、金子晋久 理研産総研ワークショップ 2015/06/01
13. "NMIJ における量子電流標準実現に向けた取り組み"  
中村秀司、第 23 回 日本NC S L I 技術フォーラム、東京都大田区産業プラザP i O (東京都)、2014/11/15
14. "磁場で誘起された渦糸による SINIS 単電子ポンプの安定化"  
中村秀司, Yuri Pashkin, 蔡兆申, 金子晋久, 日本物理学会 秋季大会 中部大学 (名古屋)、2014/09/09
15. 並列化した非断熱量子ポンプによる定電流発生,  
中村 秀司、金子 晋久, 日本物理学会, 中部大学 愛知県、2014/09/09
16. SINIS ターンスタイルを用いた単電子ポンプの磁場および温度依存性,  
中村 秀司、金子 晋久, 第 69 回物理学会年次大会, 東海大学、神奈川県、2014/03/28
17. SINIS ターンスタイルを用いた電流標準の研究  
中村 秀司、金子 晋久, NMIJ 成果発表会, つくば 産総研、2014/01/24
18. SINIS ターンスタイル素子を用いた単電子ポンプ  
中村 秀司、金子 晋久, 超伝導エレクトロニクス研究会, 東京 機械振興会館、2014/01/23
19. 超伝導リードと常伝導アイランドを持つターンスタイル素子による定電流生成 II  
中村 秀司、金子 晋久, 日本物理学会, 徳島大学、2013/09/25
20. 超伝導リードと常伝導アイランドを持つターンスタイル素子による定電流生成  
中村秀司, Yuri Pashkin, 蔡兆申, 金子晋久、日本物理学会、広島大学 (広島)、2013/03/26

21. 単電子ポンプによる電流標準の研究、  
中村秀司、NMI J 成果発表会、産業技術総合研究所（つくば）、2013/01/25

〔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

<https://www.sites.google.com/site/shujinakamuraai/>

[https://unit.aist.go.jp/ripm/qelec-std/e2\\_00.html](https://unit.aist.go.jp/ripm/qelec-std/e2_00.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 秀司 (Shuji Nakamura)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：706139991

### (2) 研究分担者

なし ( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

なし ( )

研究者番号：