

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：82626

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23527

研究課題名(和文)量子メトロロジートライアングルにおける差電圧トラッキング

研究課題名(英文)Difference voltage tracking in quantum metrology triangle

研究代表者

松丸 大樹 (Matsumaru, Daiki)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員

研究者番号：30849146

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：量子力学的に独立に生成した電流・電圧・抵抗の各物理量を、オームの法則に基づいて相互に検証する実験を量子メトロロジートライアングル実験という。本研究では、差電圧測定を行う電圧計に生じるゲインエラー(入力に対する出力のずれ)に着目し、差電圧の動的なトラッキングによる測定不確かさの低減を目指している。この機構の導入によるノイズ振幅の低減効果をシミュレーションするとともに、配線の最適化を行うことで希釈冷凍機中に実装された電圧標準素子の安定動作を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子メトロロジートライアングルの検証は、量子力学によって導かれた法則がどの程度精確に実現しているかを相互に検証するものであり、基にした現象の確かさを見極める稀有な研究と言える。また、本研究における動的なトラッキングは、これまでになかったリアルタイムのフィードバック補正を可能にするものであり、量子メトロロジートライアングル実験のみならず、微小電圧計測の高精度化・測定回数の低減などにも寄与することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：The experiment, which confirms physical quantities: current, voltage and resistance, which are generated quantum mechanically individually, each other based on ohm's law is called "Quantum-Metrology-Triangle experiments". In this study, we focus on a gain error (a gap between input and output), which derives at a voltmeter conducting difference-voltage measurements. We aim a reduction of a measurement uncertainty by active tracking of difference-voltage. We conducted a simulation of a noise amplitude reduction effect of implementing this tracking method and confirmed stable operation of a voltage standard device by optimizations of wiring at a dilution refrigerator.

研究分野：電気標準

キーワード：電圧標準 ジョセフソン効果 超伝導体 精密測定 オームの法則 SI単位 熱伝導 低温

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、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

国際単位系(SI)の改定により、電流の単位 A(アンペア)が電気素量  $e$  を不確かさのない値と定めることによって定義された。この新しい定義に基づいて実現される電流と、電圧及び抵抗を独立に、量子力学的に実現し、オームの法則を介して検証する量子メトロロジートライアングル(Quantum Metrology Triangle: QMT)の研究が世界中で盛んに行われている。従来は、ジョセフソン効果によって電圧を、量子ホール効果によって抵抗を量子力学的に決定し、その値が電気標準として用いられてきた。一方、次世代の電流の実現方法として上記の新しい定義を実現可能な単一電子ポンプという手法が注目され、本研究室においても他の機関と協力しながらこの新しい量子電流標準の確立と QMT の検証を目指し、研究を進めている。実際に QMT を検証する場合、単一電子ポンプ素子で生成した電流を量子ホール抵抗標準素子流した際の電圧降下を、ジョセフソン効果電圧標準素子から発生させた電圧と比較する。これまでの研究で、QMT の検証を行うためには、単一電子ポンプの開発に加えて差電圧測定の高精度化が重要であることが明らかになった。

### 2. 研究の目的

本研究では、世界最高レベルの量子メトロロジートライアングル実験の実現のため、差電圧測定の高精度化に取り組む。有限の大きさの差電圧を測定する場合、電圧計のゲインエラー(入力に対する出力のずれ)に起因した不確かさが生じる。この差電圧はノイズや熱起電力の揺らぎなどによって生じ、差電圧が大きくなるほどゲインエラーの影響は大きくなる。本研究では、差電圧の動的なトラッキングとそれを補償するためのフィードバック機構を導入し、ゲインエラーに起因した不確かさの低減を目指す。最終的には 7 桁以上の精度での測定を目標としている。

### 3. 研究の方法

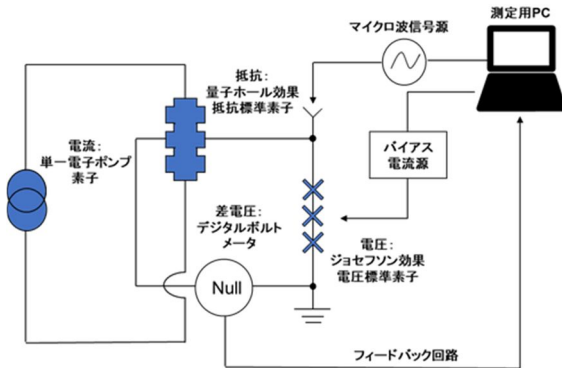
本研究では、差電圧のトラッキングを行うフィードバック機構の構築を行う。図 1 に量子メトロロジートライアングルの検証を行う実験系を示す。ジョセフソン効果電圧標準素子による電圧の生成には、バイアス電流源からの直流電流とマイクロ波信号源からの交流電流が必要となる。デジタルポルトメータで読み取った差電圧の値を測定用 PC にフィードバックし、マイクロ波信号源からの出力を差電圧が 0 になるように調整することで測定器によるゲインエラーの影響を低減する[1]。

### 4. 研究成果

#### (1) 差電圧トラッキング速度の検討

測定する差電圧に含まれるノイズの 1 つに、周波数に反比例してパワーが大きくなる  $1/f$  ノイズが挙げられる。差電圧トラッキングによってその影響を低減することを考えた場合、1 回のトラッキングにかかる遅延時間によってその低減効果が異なってくる。そこで、このトラッキングの実行にかかる遅延時間の見積もりと、マイクロ波の周波数変化にかかる遅延時間の実測を行った。表 1 に、見積もられた遅延時間の一覧を示す。電圧測定における積分時間と、周波数スイッチにかかる遅延時間の寄与が合計時間の 9 割以上を占め、およそ 33 Hz のトラッキング速度が見積もられた[2]。

表 1 見積もられた遅延時間の一覧。



要因	遅延時間
1. コマンド送り(仕様値)	0.014 ms
2. コマンド読み取り(仕様値)	0.010 ms
3. 積分時間(1 PLC, 仕様値)	20 ms
4. メモリ読み取り(仕様値)	0.010 ms
5. コマンド返送(仕様値)	0.014 ms
6. コマンド送り(仕様値)	0.014 ms
7. 周波数スイッチ(実測値)	10 ms
合計時間	30 ms
対応したトラッキング速度	33 Hz

図 1. フィードバック機構を有した量子メトロロジートライアングルの測定系。

## (2) 差電圧トラッキングのシミュレーション

見積もられたトラッキング速度を基に、差電圧トラッキングによる、ノイズ振幅の低減効果について計算機シミュレーションを行った。ノイズとして  $1/f$  ノイズを含むランダムノイズを仮定し、それより周波数の小さい領域で  $1/f$  ノイズが支配的になるコーナー周波数との関係を調べた。図 2 に、コーナー周波数が 50 Hz の時のノイズ振幅の変化を示す。コーナー周波数 10 Hz から 70 Hz の範囲では、ノイズ振幅が 8 割以上低減することが見積もられた[3]。

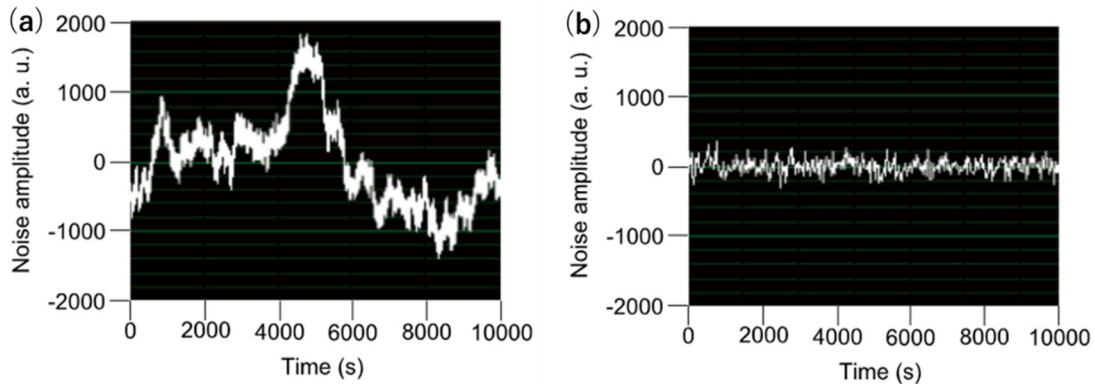


図 2. (a)元のノイズ波形。(b)トラッキング後の波形。

## (3) ジョセフソン効果を用いた電圧生成における配線の最適化

本研究の開始当初の目的は、冷凍機実装されたジョセフソン素子の駆動において「フィードバック機構」を導入し、量子メトロロジートライアングル実験を高精度化することであったが、実験を進めるに従い、ジョセフソン素子の素子実装において解決すべき新たな課題が見つかったため、最終年度は当初の計画を変更し、「ジョセフソン素子の冷凍機実装における熱効果の最適化」に注力して実験に取り組んだ。具体的には、冷凍機中でジョセフソン素子からの電圧発生を試みたところ、マイクロ波の入射後に温度が上昇し、超伝導体の臨界温度を超えて測定ができなくなる現象が見られた。これは、冷凍機の 4 K ステージにおける冷却能力を超える、当初想定した以上の発熱が生じたことを示しており、熱設計の修正が必要と判断した。4 K ステージの冷凍能力は 1.3 W と見積もられ、その内 0.7 W が希釈冷凍機システムと量子ホール効果に用いるマグネットに用いられること、量子ホール抵抗素子と単電子ポンプ素子の駆動に 0.2 W 必要になることを考慮すると、ジョセフソン素子実装に由来する発熱及び熱流入を 0.4 W 以内とする必要がある。そこで、上記条件を満たすための熱設計の見直しと最適化に取り組んだ[4]。

配線の候補となる線材の物性値から、それぞれの材料を用いた際の熱流入量とジュール熱を求め、最も熱負荷の小さい組み合わせで配線を行った。図 3(a)に、公称電圧約 68 mV の場合におけるジョセフソン電圧標準の電流-電圧特性を示す。バイアス電流が 8 mA から 10 mA 未満の範囲で良好な量子化電圧ステップが得られることが確認できた。この測定中の素子温度の安定度は、 $\pm 30$  mK 以内であった。図 3(b)にプロットされた点は、ステップ上の各点における測定値を基に、以下の式で求められた相対値となっている。

$$\frac{|\text{公称電圧} - \text{測定値}|}{\text{公称電圧}}$$

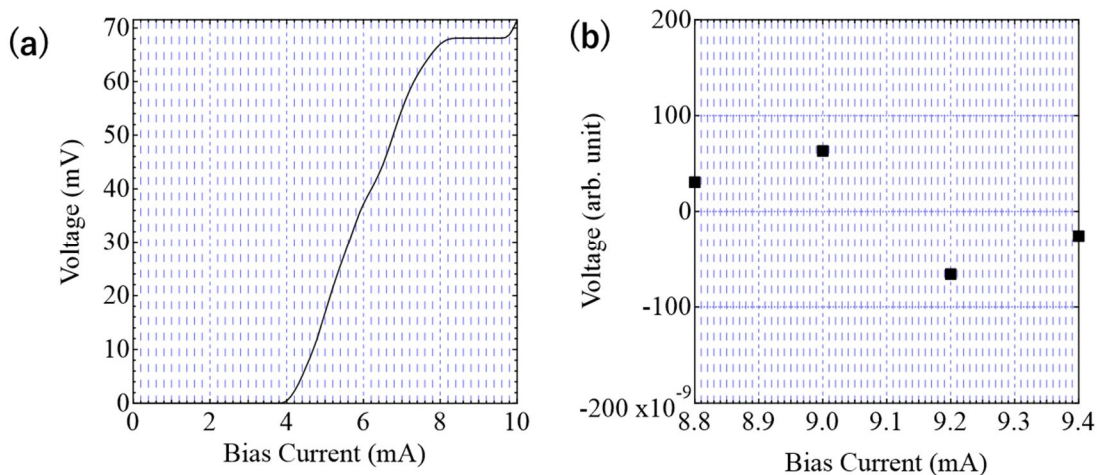


図 3. (a)ジョセフソン効果電圧標準の I-V カーブ。(b)電圧ステップにおける積算結果。

なお、1回の電圧測定における積分時間は2秒とし、繰り返し回数は100回とした。その結果、測定値は相対値で $\pm 100 \times 10^{-9}$ の間に収まっており、7桁以上の精度で安定した量子化電圧の生成を確認できた。

<引用文献>

[1] D Matsumaru, J Zhengsen, M Maruyama and N-H Kaneko 2020 A Voltage-Tracking Scheme for Quantum-Metrology-Triangle Experiments *2020 Conf. on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2020) (IEEE)* (<https://doi.org/10.1109/CPEM49742.2020.9191858>)

[2] 松丸大樹, 賈正森, 丸山道隆, 金子晋久 2020 量子メトロロジートライアングルに向けた差電圧トラッキング速度の検討 *2020年電子情報通信学会総合大会予稿集 C-8 17*

[3] 松丸大樹, 賈正森, 丸山道隆, 金子晋久 2020 量子メトロロジートライアングルにおける差電圧トラッキングのシミュレーション *第67回応用物理学会春季学術講演会予稿集 13p-B407 4*

[4] J Zhengsen, 松丸大樹, 丸山道隆, 金子晋久 2020 Thermal Design of the PJVS Module for QMT Measurement *2020年電子情報通信学会総合大会予稿集 C-8 18*

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 松丸 大樹, Jia Zhengsen, 丸山 道隆, 金子 晋久	4. 巻 13p-B407
2. 論文標題 量子メトロロジートライアングルにおける差電圧トラッキングのシミュレーション	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第67回応用物理学会春季学術講演会予稿集	6. 最初と最後の頁 4-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 松丸 大樹, Jia Zhengsen, 丸山 道隆, 金子 晋久	4. 巻 C-8
2. 論文標題 量子メトロロジートライアングルにおける差電圧トラッキング速度の検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020年電子情報通信学会総合大会予稿集	6. 最初と最後の頁 17-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Jia Zhengsen, 松丸 大樹, 丸山 道隆, 金子 晋久	4. 巻 C-8
2. 論文標題 Thermal Design of the PJVS Module for QMT Measurement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020年電子情報通信学会総合大会予稿集	6. 最初と最後の頁 18-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Matsumaru Daiki, Zhengsen Jia, Maruyama Michitaka, Kaneko Nobu-Hisa	4. 巻 1
2. 論文標題 A Voltage-tracking scheme for Quantum-Metrology-Triangle Experiments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 CPEM Digest	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CPEM49742.2020.9191858	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 松丸 大樹, 丸山 道隆, 金子 晋久
2. 発表標題 量子メトロロジートライアングルにおける差電圧トラッキング
3. 学会等名 2019年度 計量標準総合センター成果発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松丸 大樹, Jia Zhengsen, 丸山 道隆, 金子 晋久
2. 発表標題 量子メトロロジートライアングルにおける差電圧トラッキングのシミュレーション
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松丸 大樹, Jia Zhengsen, 丸山 道隆, 金子 晋久
2. 発表標題 量子メトロロジートライアングルに向けた差電圧トラッキング速度の検討
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jia Zhengsen, 松丸 大樹, 丸山 道隆, 金子 晋久
2. 発表標題 Thermal Design of the PJVS Module for QMT Measurement
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daiki Matsumaru, Zhengsen Jia, Michitaka Maruyama and Nobu-Hisa Kaneko
2. 発表標題 Voltage Tracking in Quantum-Metrology-Triangle Measurement
3. 学会等名 2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松丸 大樹、中村 秀司、丸山 道隆、金子 晋久
2. 発表標題 フィードバック機構を用いた量子メトロロジートライアングル実験の高精度化
3. 学会等名 2020年度 計量標準総合センター成果発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
中国	中国計量科学研究院		