

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05113

研究課題名(和文)集積型量子電圧雑音源を用いたジョンソン雑音温度計による熱力学温度の精密測定

研究課題名(英文)Precise Measurement of Thermodynamic Temperature Based on Johnson Noise Thermometry Using Integrated Quantum Voltage Noise Source

研究代表者

浦野 千春 (Urano, Chiharu)

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・研究グループ長

研究者番号：30356589

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：ジョンソン雑音温度計測システムの基準信号源である集積型量子電圧雑音源の出力信号のパワースペクトル密度を可変にできるように設計の一部を改良した。この結果、室温に置いた電子回路から集積型量子電圧雑音源素子上のレジスタの値を書き換えることにより広い温度範囲での熱力学温度測定の基準信号源として用いることができることを実験により確認した。  
また、集積型量子電圧雑音源を基準としたジョンソン雑音温度計測システムによってガリウム定点セルを用いてガリウムの融点の熱力学温度を精密に測定し、1990年国際温度目盛との差を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の科学技術の進展に伴い、実用的なITS-90と普遍的な熱力学温度値との差異が明らかになりつつある。熱力学温度と実用される目盛との乖離は科学として不自然であるため、基礎データを蓄積した上でこれらが一致する方向への改訂を提案すべきである。本提案によるこれらの課題の解決は、科学・産業の基盤である精密温度計測の高度化、将来的には、本システムを発展させて、熱力学温度を実用的に測定できる温度計の開発につながると考えている。

研究成果の概要(英文)：A part of the design of an integrated quantum voltage noise source IQVNS is improved so that the power spectrum density of the output signal of IQVNS which is the reference signal source of the Johnson noise temperature measurement system, can be changed. As a result, it was confirmed by experiments that IQVNS can be used as a reference signal source for thermodynamic temperature measurement in a wide temperature range by rewriting the value of the register on the IQVNS from an electronic circuit placed at room temperature.

We measured the thermodynamic temperature of the melting point of gallium using a Johnson noise thermometer based on IQVNS and evaluated the difference from the value of 1990 international temperature scale.

研究分野：物理標準

キーワード：熱力学温度 熱雑音 ナイキストの関係 ジョセフソン効果 量子電圧雑音源

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

熱力学温度の測定は、時間と労力がかかり、容易でないことから、通常の温度測定では、熱力学温度の最良近似として国際的に採択されている 1990 年国際温度目盛 (ITS-90) が利用されている。ITS-90 は物質の三重点や金属の凝固点などを利用した温度定点 (定義定点) の温度値を国際協約として定義し、所定の方法で温度定点の間を補間することで実現されている。しかし、近年の科学技術の進展に伴い、実用的な ITS-90 ( $T_{90}$ ) と普遍的な熱力学温度値 ( $T$ ) との差異があることが分かってきている。また、基礎物理定数  $k$  に基づく定義の変更に伴い、 $k$  の測定により開発されてきた測定システムを活用して熱力学温度を高精度、かつ、広い温度範囲に測定し、実用的な ITS-90 との差 ( $T-T_{90}$ ) を再評価する機運が高まっている。

### 2. 研究の目的

集積型量子電圧雑音源を基準としたジョンソン雑音温度計測システムによって熱力学温度の精密測定を行い、1990 年国際温度目盛との差を明らかにすることを目指す。具体的には、パワースペクトル密度を自由に調整することが可能なプログラマブル集積型量子電圧雑音源を開発する。各温度領域に最適化した抵抗プローブの開発も行う。これらの要素技術を組み込んだジョンソン雑音温度計測システムを利用して、温度定点 (ガリウムなど) の熱力学温度測定に挑戦する。

### 3. 研究の方法

ジョンソン雑音温度計測法は抵抗体内の自由電子の不規則な熱振動 (ブラウン運動) によって生じる雑音電圧  $V$  (電圧の揺らぎ) が温度に比例するという、いわゆるナイキストの関係

$$S_V = 4kTR$$

( $S_V$ : 電圧のパワースペクトル密度、 $k$ : ボルツマン定数、 $T$ : 熱力学温度、 $R$ : 抵抗値) を利用した温度計測法である。近年の雑音温度計では、測定値の絶対値を担保するためにジョセフソン接合を用いた量子電圧雑音源 (Quantum Voltage Noise Source, QVNS) を基準信号源として採用している。ジョセフソン接合とは超伝導体と超伝導体で非超伝導体を挟んだ構造のトンネル接合デバイスである。ジョセフソン接合は、電流パルスを入力すると磁束の量子化により超伝導電極間に  $h/2e$  の整数倍の電圧パルスを発生する。このため、擬似乱数で変調された電流パルス列を入力すれば、出力電圧の振幅が  $h/2e$  の分解能で制御された擬似白色雑音 ( $S_V$  が周波数に依存せず一定) を発生することができる。量子電圧雑音源で発生した基準信号のパワースペクトル密度と、抵抗器の熱雑音のパワースペクトル密度を交互に測定して比較することにより、ナイキストの式から熱力学温度を求めることができる。

産総研ではこれまで、量子電圧雑音発生に必要な全ての回路要素を一つの素子上に集積した、集積型量子電圧雑音源 (Integrated Quantum Voltage Noise Source, IQVNS) を開発してきた。IQVNS は分周器、擬似雑音系列発生器、パルス数増倍器、デマルチプレクサ、磁気結合型電圧増倍器の 5 つの超伝導単一磁束量子 (SFQ) 要素回路から構成される。これまでに開発した IQVNS は、パルス数増倍器の増倍率が固定されているため、擬似雑音出力のパワースペクトル密度も固定されていた。本研究では、パルス数増倍器を改良し、外部からのデジタル制御による増倍率可変機能をもたせることでパワースペクトル密度を可変にする研究に取り組む。また、制御線経由の電気的雑音の混入の防止が大きな課題であり、光電気変換回路の導入等を検討する。

白金抵抗温度計による測定などで利用する温度定点セルでは、温度安定のため、温度定点セルの温度を細かく制御している。雑音温度計測で測定する雑音電圧の信号は、抵抗温度計による温度計測で利用する電気信号と比較して圧倒的に小さく、かつ、広い周波数帯域で測定を行う必要がある。このため、通常温度定点セルを用いると、温度制御回路の出す不要信号により不確かさが増大してしまう可能性が高い。このため、プログラマブル IQVNS の設計と並行して、ジョンソン雑音温度計測に特化したガリウム温度定点セルの開発を行う。また、温度定点に合わせた抵抗温度プローブを、ボルツマン定数  $k$  の測定で開発した水の三重点用プローブをベースに開発する。さらに雑音低減のため、全ての測定システムをシールドルームに入れる計画である。ガリウム融解点における熱力学温度  $T$  の精密測定を行い、ITS-90 ( $T_{90}$ ) との差 ( $T-T_{90}$ ) を評価する。

### 4. 研究成果

#### (1) ガリウムの融点の熱力学温度を雑音温度測定

ガリウムの融点の熱力学温度を雑音温度計測により精密に測定するために、電磁シールドルームを実験室内に作製し、計測システム全体を低雑音環境に収容した。また、市販のガリウム温度定点の低雑音化に取り組んだ。さらにガリウム温度定点セルにおけるガリウムの融点の熱力学温度を雑音温度計により測定した。また、同じガリウム定点セルのガリウムの融点を、ITS-90 とトレーサブルな産総研の国家標準である白金温度計において精密に評価した。その他、ガリウム定点セル内の温度分布や、融点温度の経時変化の測定など不確かさ評価に必要な測定を行った。ガリウム融点における抵抗温度計のパワースペクトル密度と IQVNS のパワースペクトル密度の比の周波数依存性を赤池情報量基準を用いて解析し、ガリウム融点の熱力学温度を不確かさと共に求めた。雑音温度計により求めたガリウム融点の熱力学温度と ITS-90 に基づいて求めた温度の差は 9.4 mK であった。不確かさは 13.6 mK であり、ITS-90 で定義されている値と

ンシステントであることを示した。この研究成果は 精密電気計測に関する国際会議である 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018、パリ、フランス)において発表した。

#### (2) プログラマブル集積型 IQVNS の動作検証

出力信号のパワースペクトル密度を可変にできるように集積型量子電圧雑音源素子の設計の一部を改良し、室温に置いた電子回路から集積型量子電圧雑音源素子上のレジスタの値を書き換えることにより、広い温度範囲での熱力学温度測定の基準信号源として用いることができることを実験により確認した。その他、不要電気雑音による影響を除去するための、光エレクトロニクスを用いた量子電圧雑音信号の発生に関する研究を行った。これらの研究結果について、超伝導エレクトロニクスに関する国際会議 (ISEC 2019, ISS 2019) にて報告を行った。

#### (3) ボルツマン定数の測定

国際単位系 SI は 2018 年に国際度量衡総会で改定が決議され、2019 年には利用が開始された。新しい国際単位系ではボルツマン定数は現在定義値として扱われている光速と同様に定義値となる。このため温度測定の基準であるボルツマン定数という極めて重要な基礎物理定数の決定に、客観的検証を高い精度で与えることが求められていた。我々はジョンソン雑音温度計測法によりボルツマン定数の測定を行ない、他の独立な測定方法(気体定数や誘電率の精密測定など)と 10 ppm の精度で整合することを確認した。この研究により超伝導科学技術賞を受賞した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Chiharu Urano ; Kazuaki Yamazawa ; Nobu-Hisa Kaneko	4. 巻 -
2. 論文標題 Measurement of Melting Point of Gallium by Johnson Noise Thermometer Using Integrated Quantum Voltage Noise Source	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Digest of 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/CPEM.2018.8501236	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 -

1. 著者名 C. Urano, K. Yamazawa and N-H Kaneko	4. 巻 54
2. 論文標題 Measurement of the Boltzmann constant by Johnson noise thermometry using a superconducting integrated circuit	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Metrologia	6. 最初と最後の頁 847-855
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1681-7575/aa7cdd	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 C. Urano, Yamada T, Maezawa M, Yamazawa K and Kaneko N-H	4. 巻 66
2. 論文標題 Measuring the Boltzmann's constant using superconducting integrated circuit	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements	6. 最初と最後の頁 1323-1328
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIM.2016.2637598	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Chiharu Urano ; Kazuaki Yamazawa ; Nobu-Hisa Kaneko
2. 発表標題 Measurement of Melting Point of Gallium by Johnson Noise Thermometer Using Integrated Quantum Voltage Noise Source
3. 学会等名 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 C. Urano, K. Yamazawa, N-H. Kaneko
2. 発表標題 Uncertainty analysis of the Boltzmann constant measured by Johnson noise thermometry using superconducting integrated circuit
3. 学会等名 30th International Symposium on Superconductivity 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017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
研究 分担者	山田 隆宏  (Yamada Takahiro)  (00377871)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員    (82626)	
研究 分担者	中野 享  (Nakano Tohru)  (20357643)	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・研究グループ長    (82626)	