

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2014

課題番号：22246013

研究課題名(和文) ジョセフソン効果と量子ホール効果を基準とした熱力学温度測定技術の開発

研究課題名(英文) Development of thermodynamic temperature measurement technique based on Josephson effect and Quantum Hall effect

研究代表者

浦野 千春 (Chiharu, Urano)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：30356589

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,600,000円

研究成果の概要(和文)：産総研では量子電圧雑音源を用いて抵抗の熱雑音を精密に測定することにより、ボルツマン定数を求める技術の開発を行っている。量子電圧雑音源はジョセフソン任意波形発生器により構成され、その出力電圧の振幅はプランク定数 h 、電気素量 e 、クロック周波数 f 、および任意の数値係数で記述できる。この量子電圧雑音源を基準として水の三重点に置かれた抵抗の熱雑音を測定すれば、ナイキストの式からボルツマン定数を求めることができる。現時点では実験から求めた値と2010年CODATA値との間には $+(40 \pm 20)$ ppm程度のズレが見られている。ボルツマン定数再定義には不確かさを $1/20$ 以下にする必要がある。

研究成果の概要(英文)：We have been developing a Johnson noise thermometry system using quantum voltage noise source toward redefinition of the Boltzmann constant k . Johnson noise thermometry is based on Johnson-Nyquist Equation. Power spectrum density of a sensor resistor is measured with respect to power spectrum density of the quantum voltage noise source. The noise power of the quantum voltage noise source is expressed in terms of the Planck constant h , electric charge e , sampling frequency of a pulse pattern generator f , and a given numerical factor. k obtained in our measurements has offset of $+(40 \pm 20)$ ppm from the CODATA value. In order to contribute to redefinition of the Boltzmann constant, it is necessary to overcome this offset problem and reduce the uncertainty $1/20$ times smaller than the current value.

研究分野：電気標準

キーワード：熱雑音 ナイキストの式 量子電圧雑音源 ジョセフソン接合 ボルツマン定数 標準

1. 研究開始当初の背景

国際単位系 (SI) では、基本量の 1 つとして熱力学温度があり、「熱力学温度の単位、ケルビン¹は、水の三重点の熱力学温度の $1/273.16$ である。」と定義されている [1]。一方で、熱力学温度測定は容易ではなく、測定の不確かさも大きい²ため、実用上は、白金抵抗体の抵抗値の温度依存性を利用するなど、熱力学温度になるべく一致するように作られた 1990 年国際温度目盛 (ITS-90) が用いられている。国際度量衡委員会 (CIPM) は 2011 年を目途に SI の各基本量の定義を見直す方向で、熱力学温度はボルツマン定数 k_B の値を定める形での定義に変更される見込みである [2]。現行の定義と改訂後の定義との不一致が最小限となるよう、現在、多くの研究機関で各種の熱力学温度計を使用し現在の熱力学温度の定義から k_B を精密に測定する研究開発が行われている。また、熱力学温度と ITS-90 による温度との差異 ($T-T_{90}$) の再評価が重要な研究テーマと位置づけられている。

2. 研究の目的

本研究はナイキストの定理に基づいた世界最高レベルの精度を持つ熱力学温度計の開発を目的とする。現在、温度の基準として用いられている 1990 年国際温度目盛 (ITS-90) は、特定の物質の特性に依存した温度目盛となっている。このため、理想気体の状態方程式 ($pV=nRT$) のような普遍的な物理法則に基づいて定義される熱力学温度との間には差異が生じている。一方、物性物理のような研究分野では物理学に則った普遍的な温度である熱力学温度が必要となる。本研究では熱雑音のスペクトル密度 S_V 、抵抗値 R 、および熱力学温度 T の間に成り立つナイキストの定理 ($S_V=4k_BTR$) に基づく雑音温度計を開発する。電圧雑音スペクトル密度 S_V および感温素子の抵抗値 R を、高度化させたジョセフソン任意波形発生装置や量子化ホール抵抗標準装置を活用して測定し、ボルツマン定数 k_B を用いて、室温付近で 25ppm の高精度で熱力学温度 T および現行の温度目盛との差異 $T-T_{90}$ の測定を目指す。

3. 研究の方法

測定システムの開発

(1) ジョセフソン任意波形発生器の開発・最適化

これまでに開発した 1 チャンネルのジョセフソン任意波形発生器で $100\ \Omega$ の抵抗温度計の熱雑音の雑音電力と同程度の雑音電力の発生が達成されている。冷凍機を改良することによって現在問題のグラドループおよび 50 Hz の高調波を完全に除去し、精密測定が可能な状態にする。同時に、2

本の独立したジョセフソン接合素子を完全に同期して駆動できるように現在の 1 チャンネル出力のシステムを 2 チャンネルの出力が可能のように並列化する。これにより相関スペクトル測定に使用する 2 つのアンプ間の干渉を取り除く。並行して、パルスパターン発生器のメモリー長を増強する改造を行い、疑似的ホワイトノイズの電圧スペクトルにおける櫛の間隔を密にすることを図る。温度計の抵抗値が増大すると必要とされる雑音電力も増大する。それに合わせて集積度の大きいジョセフソン接合素子を開発する。

(2) 温度センサの開発

測定対象の温度場に挿入し、その内部の抵抗器から発生する雑音電圧を取り出すためのプローブ部分の開発を行う。具体的には、雑音信号レベルの向上と、交流抵抗・インピーダンスを交流抵抗標準により直接高精度な評価が可能となるように $10\ \text{k}\Omega$ のセンサを採用する。さらにプローブ内の伝送線路にかかる温度分布の交流特性に与える影響を容易に評価するためにプローブ構造をモジュール化する。また、プローブ内伝送線路の高周波対応策として、抵抗温度計にアクセスする全ての導線を同軸構造にすることによって 4 端子測定が可能になるように設計を大幅に変更する。

(3) 相関スペクトル測定装置の開発

熱雑音のスペクトルにおいて読み出し用の配線およびアンプのノイズやドリフトの影響を避けるために 2 系統に分けた入力信号の相関スペクトルを測定する。出発点としてはアンプ、デジタイザは全て市販品を組み合わせ構成する。抵抗温度計の熱雑音あるいはジョセフソン任意波形発生器の出力を低入力換算電圧雑音の作動プリアンプで 100 倍に増幅し、その後段のポストアンプでさらに 200 倍程度増幅する。2 つの系統の入力を 24 ビットのデジタイザで読み込みその内部でフィルタリング演算、クロススペクトルの計算を行う。抵抗温度計とジョセフソン任意波形発生器という 2 つの測定対象を切り替えるための広帯域スイッチも作製する。市販部品に問題がある場合はアンプ等を自作することも想定している。

(4) 試験温度場の製作および評価および $T-T_{90}$ の測定

$0-30^\circ\text{C}$ の温度域の試験温度場の開発を行う。この温度域で高安定な温度場を実現するためには、ヒータによる加熱と冷却機による冷却とを同時に行い、均衡させる制御が必要である。特に冷却機の発生する電氣的な雑音³が、JNT における雑音信号との電磁的な干渉を引き起こす可能性があり、注意を要する。そこで、低ノイズで、1 mK 以内の安定度を有

するような 0-30°C の温度域の試験温度場を開発・評価し、最終的に雑音温度計による熱力学温度測定および $T-T_{90}$ の測定に使用する。低ノイズ化の方策として、通常型の冷凍機の改良、またはペルチェ素子の高安定制御による冷却のいずれかを採用する。

(5) 交流抵抗標準の周波数範囲拡張

本研究のスペクトル測定で対象となる周波数帯の上限は 500 kHz 程度である。それに対し現行の交流抵抗標準の周波数の上限は 10 kHz である。このギャップを埋めるために交流抵抗標準の周波数範囲の拡張を行う。この拡張にはハードウェアの開発以外に不確かさ(精度)の評価も含まれる。さらに、抵抗温度計の交流特性測定専用の治具の開発も行う。量子化ホール抵抗標準素子の改良も行う。

4. 研究成果

(1) 開発した測定システムの構成

本研究で開発した測定システムの構成を図 1 に示す。測定システムは大きく分けて (1) 量子電圧雑音源 (QVNS)、(2) 抵抗温度計、(3) 相関スペクトル測定装置、からなる。上記 (1), (2), (3) はそれぞれ「3. 研究の方法」における (1), (2), (3) に対応している。(3) 相関スペクトル測定装置はサンプル切り替えスイッチ、増幅器 (Amp)、ローパスフィルタ (LPF)、A/D 変換器、および計算機から構成される。グラウンドループ除去のため、サンプル切り替えスイッチ、アンプ、A/D 変換器はバッテリー駆動であり、サンプル切り替えスイッチおよび A/D 変換器の計算機からの制御信号は全て光ファイバーを利用している。アンプ、LPF、A/D 変換器はそれぞれ 2 セットずつ用意されており、サンプル切り替えスイッチによって抵抗温度計あるいは QVNS からの信号の一方を選択し、その信号を 2 つのチャンネルで同時に測定する。2 つの測定チャンネルからのデータは計算機上でフーリエ変換されてオートスペクトルおよびクロススペクトルが計算される。クロススペクトルを長時間積算すると相関の無い信号は相殺さ

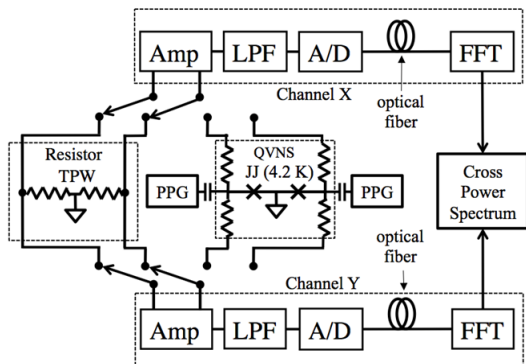


図1. 水の三重点(TPW)に置かれた抵抗温度計(Resistor)の熱力学温度を量子雑音電圧信号(QVNS)を基準として測定するジョセフソンノイズ温度計の測定システム。

れて 2 つのチャンネルに共通する信号成分が残ることになる。QVNS のスペクトルと抵抗温度計のスペクトルを交互に測定し、ノイズパワーの比を求めることにより増幅器のゲインを校正しながら抵抗温度計のスペクトルを精密に測定することができる。

QVNS のジョセフソン接合としては Nb/TiN/Nb からなる SNS 接合を採用した。図 2 に示すようにチップ内に同一デザインの 2 つの JJA が線対称に配置されている。それぞれのジョセフソン接合アレーにはコプレーナ導波路の信号線上に直列にジョセフソン接合が 4 つずつ配置されている。JA のチップの電圧読み取り線にはインダクタと抵抗器からなるローパスフィルタおよび読み取り線の時定数設定のための抵抗器が配置されている。

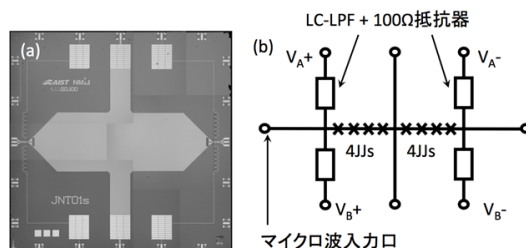


図2. 量子電圧雑音発生に用いるジョセフソン接合アレーの写真(a)とその等価回路(b)。LR-LPFはインダクタと抵抗器からなるローパスフィルタを表す。

QVNS で発生する発生する信号は振幅が等しい正弦波の奇数次高調波を足し合わせた信号を用いた。それぞれの高調波の位相は $-\pi$ から π の間の乱数である。振幅はこの擬似乱雑信号の実効値がナイキストの式で表される抵抗器の熱雑音と一致するように決められる。結果として、この波形を時間領域で観察すると、まさに抵抗の熱雑音と同じような乱雑な波形が観測され、周波数ドメインではピークパワーがそろった楕円のスペクトルとなる。この擬似的なホワイトノイズの数値的波形は計算機上で 2 次の $\Delta-\Sigma$ 変調により 2 進数ビットコードに変換される。この 2 進数ビットコードはパルスパターン発生器 (PPG) のメモリーにロードされる。擬似ノイズのトーンの間隔は PPG のクロック周波数とメモリー長によって決まる。クロック周波数は 10.000 GHz であり、メモリー長としては主に 104.8 Mbit を用いた。奇数次高調波のみを用いたため、トーンの間隔は約 95.4 Hz である。

本研究では QVNS として上記の方式以外に、超伝導デバイス上に擬似ノイズ発生回路を作りこんだ集積型量子電圧雑音源 IQVNS も用いた。この IQVNS と既存の QVNS のスペクトルを直接比較することにより QVNS の異常動作の有無を調べることが可能となった。

抵抗温度計は公称値 100 Ω の NiCr メタルフォイル抵抗器を 10 素子カスタムメイドした。水の三重点における抵抗値は 0.99907 Ω 程度であった。0°C 付近から 30°C の範囲で、温度係数は約 2~4 ppm/K であった。抵抗温度計

は水の三重点セル専用のプローブ先端の熱浴である銅ブロックに固定された。抵抗温度計プローブ先端の銅ブロックは水の三重点セルの、水面下約 20cm 付近の部分に配置されている。水圧による補正値は 0.1 ppm 程度である。抵抗値は 100 Ω の標準抵抗器との比測定により測定する。測定に用いた抵抗ブリッジの不確かさは 0.8 ppm である。標準抵抗器は量子化ホール抵抗を基準とした測定システムによって校正される。水の三重点 (273.16 K) にある抵抗温度計の雑音電圧は約 $1.228 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ である。

温度場としてはボルツマン定数評価用には水の三重点 (TPW) セルとそれを保温する容器を用意した (「3. 研究の方法(4)」に対応)。一方、Ga 温度定点の測定用には Ga 温度定点セルを用意した。TPW セルについては、抵抗温度プローブを挿入した状態で熱流入にともなう TPW セルインナーチューブ中の温度分布を評価し、抵抗温度プローブ中で用いる抵抗温度計の熱雑音読み取りケーブルによる熱流入による温度分布の影響が無視できる線材を選択した。

相関スペクトル測定装置中のアンプは TSSE 社製の SFDA3.2 を使用した。このアンプは入力段に入力換算電圧雑音密度が $0.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ の超低雑音の JFET を使用している。入力電気容量も小さく低雑音性ととも帯域の上でも最適化されている。増幅器のゲインは約 70dB であり、周波数依存性は 1dB の範囲で一致している。アンプと A/D 変換器の間にはエリアシング防止のため 11 次バターワースフィルターを挿入した。A/D 変換器には 48 タップのローパスフィルターが実装されており、解析に用いる帯域におけるエリアシングトーンの影響は 1 ppm 未満に抑えられる。A/D 変換器としてはナショナルインスツルメンツ社のデジタイザ PXI-5922 を使用した。A/D 変換器のサンプリング周波数はパルスパターン発生器と同様に GPS から供給される 10 MHz の参照信号に同期される。

(2) 測定結果

図 4(a) に抵抗温度計のスペクトルを示す。2 つの独立なチャンネルのオートパワースペクトルおよびクロスパワースペクトルは 1 kHz から 1 MHz 付近まで見えるフラットな部分がナイキストの式 $\langle V^2 \rangle = 4kTR\Delta f$ で表される熱雑音の周波数に依存しないパワースペクトルに対応している。この領域では周波数依存性が非常に小さいように見えているが、実際には電圧読み取りケーブルの影響、エリアシングフィルターの影響、および測定器の周波数依存性により周波数とともに緩やかに低下している。オートパワースペクトルはクロスパワースペクトルよりも大きくなっている。この差はそれぞれのチャンネルの増幅器そのもののノイズや電圧読み取り線の抵抗の熱雑音に起因する。1 MHz 付近からパワースペクトルの大きさは急激に減少して

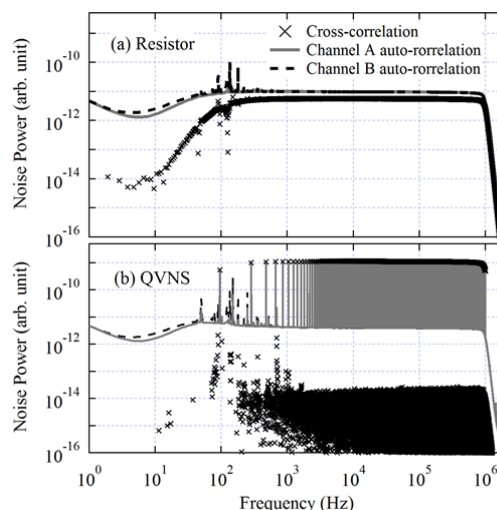


図3. 100 Ω の抵抗温度計の熱雑音のパワースペクトル(a)および量子電圧雑音源(QVNS)のパワースペクトル(b)。

いる。これは増幅器と A/D 変換器の間に挿入された 11 次のバターワースフィルターおよび A/D 変換器で自動的に適用される 48 次のデジタルフィルターの影響である。1 kHz 以下には主に商用周波数の高調波が見られる。

QVNS のスペクトルを図 4(b) に示す。QVNS の出力は基準信号となる擬似ホワイトノイズのトーンとオートパワースペクトルおよびクロスパワースペクトルのノイズフロアに分裂しているように見えている。QVNS のトーンは周波数ビン 100 個おき (約 95.4 Hz) に発生している。オートパワースペクトルのノイズフロアは増幅器の入力換算電圧雑音と読み取り線の抵抗によりリミットされるためにも正の値であり、これ以上積算時間を増やしても平均値としては変化せず、ばらつきが相殺されて線幅が減少していくように見える一方、クロスパワースペクトルのノイズフロアは正負均等に分布し、積算時間の増加とともに単調に低下していく。1kHz 以下の周波数領域では抵抗温度計と同様に、商用電源の高調波と正体不明の高調波が数本見られる。それ以上の周波数では合計約 140 時間の測定ではクロスパワースペクトルのノイズフロアには顕著な不要信号は見られていない。

当初の研究計画では高精度インピーダンス測定や交流抵抗標準の技術を利用・拡張してノイズパワーの周波数依存性の絶対値を求めることを計画していた。しかしながら、本研究で扱うような広い周波数帯域において信号読み取り線の周波数依存性を精密に求めることは極めて困難で絶望的に難しいことが判明した。信号読み取り線の周波数依存性を厳密に求める必要がない解析方法を採用した。

これまで述べてきた抵抗と QVNS の FFT の周波数のビン (0.954 Hz) を QVNS のトーンの間隔 (100 周波数ビン = 95.4 Hz) に取り直し、その大きい周波数ビンの抵抗の平均クロスパワースペクトル強度 (R_R) と QVNS の平均ク

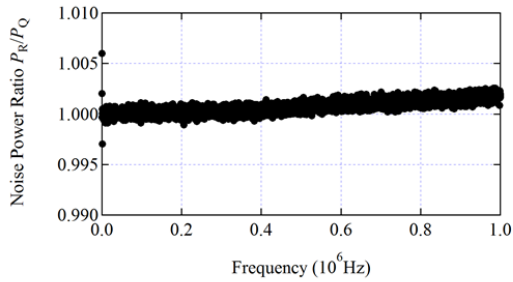


図4. 抵抗温度計の熱雑音のノイズパワー P_R と量子電圧雑音源QVNSのノイズパワー P_Q の比の周波数依存性。

ロスパワースペクトル強度 (P_Q) の比をプロットしたものが図 4 である。この比 P_R/P_Q の周波数依存性は抵抗温度計の信号読み取りケーブルの周波数特性と QVNS 用の信号読み取りケーブルの周波数特性の比に起因する。 P_R/P_Q の周波数依存性を周波数 f_0 から f_1 の範囲 (例えば $f_0=30$ kHz から $f_1=630$ kHz の範囲) で 2 次関数 $a_0+a_2f^2$ でフィットして周波数 $f=0$ における切片 a_0 の値を求めれば、ナイキストの式からボルツマン定数を求めることができる。周波数 f の 2 次の係数 a_2 は抵抗温度計の信号読み取りケーブルの周波数特性と QVNS 用の信号読み取りケーブルの周波数特性の比に対応するが、この部分はボルツマン定数の値には直接関係しない。

抵抗温度計と QVNS のノイズパワーはそれぞれ 1 チョップ 100 秒間ずつ積算される。2482 チョップのノイズ測定について、1 チョップごとに抵抗温度計のノイズパワーと QVNS のノイズパワーに対して、上で述べたノイズパワーの比の解析からボルツマン定数を求めた結果をまとめたのが図 5 である。2482 チョップのノイズ測定から求められたボルツマン定数の平均値と標準偏差 σ はそれぞれ 3.84×10^{-5} および 3.48×10^{-4} であった。 $\pm 3\sigma$ からはずれているデータの数 は 8 であり、2482 チョップのデータ数に対しては妥当な数である。また、全てのデータは $\pm 4\sigma$ の範囲に収まっており、装置のオーバーロード等は発生していないことがわかる。2482 チョップの平均値の標準偏差は 7.0×10^{-6} となる。

フィッティングに使う周波数帯域を変え

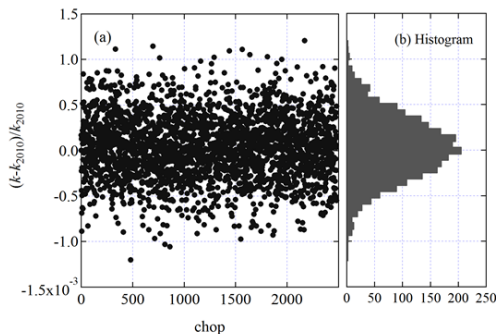


図5. ノイズ測定から求めたボルツマン定数と 2010年CODATA値との相対的なズレ(a)とその分布のヒストグラム(b)。

るとボルツマン定数と CODATA 値の相対的な差も標準偏差も変化する。後者はデータポイント数に単純にスケールした変化を示す。一方、前者はフィッティングバンド幅の変化を変化させると 40 ± 20 ppm 程度の範囲で変化する。この値は標準偏差 1σ ではカバーできない有意なオフセットといえる。このオフセット値は、本研究の目標とする不確かさである 25ppm の 2 倍程度であり、現状、研究計画の目標に到達しているとはいえない。このオフセットが本研究における最大の問題となっている。

当初、オフセット値は数百 ppm 程度であったが、不要信号による影響、クロストークによる影響、などさまざまな観点から検討を行い、問題を解決していった結果数十 ppm 程度まで落とすことができています。しかしながら、ボルツマン定数の再定義に貢献するためには、不確かさを現在の 1/20 程度まで落とす必要がある。

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 28 件)

- ① 山田隆宏、前澤正明、浦野千春、査読有、Physica C, 2015, 印刷中(ページ未定)、DOI:10.1016/j.physc.2015.02.046
- ② 山澤一彰、浦野千春、山田隆宏、堀江智弘、吉田俊介、山森弘毅、金子晋久、福山康弘、丸山道隆、堂前篤志、丹波純、桐生昭吾、査読有、Int. J. Thermodynamics (2014), 35, 985-998, DOI 10.1007/s10765-014-1719-9
- ③ 浦野千春、山田隆宏、山澤一彰、山森弘毅、金子晋久、福山康弘、丸山道隆、堂前篤志、丹波純、吉田俊介、桐生昭吾、査読無、信学技法、(2014), vol.114, no.147, SCE2014-29, 31-36
- ④ 金子晋久、丸山道隆、浦野千春、桐生昭吾、Jpn J Appl Phys, (2012) vol. 51, 010116-1-010116-7

[学会発表] (計 37 件)

- ① 浦野千春、吉田俊介、岡崎雄馬、山田隆宏、山澤一彰、山森弘毅、福山康弘、金子晋久、丸山道隆、堂前篤志、丹波純、桐生昭吾、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、2015 年 3 月 14 日、東海大学相模キャンパス (神奈川県)
- ② 浦野千春、山田隆宏、山澤一彰、山森弘毅、金子晋久、福山康弘、丸山道隆、堂前篤志、丹波純、吉田俊介、桐生昭吾、電子情報通信学会 超伝導エレクトロニクス研究会、招待講演、2014 年 7 月 23 日、機会振興会館 (東京都)
- ③ 山澤一彰、浦野千春、山田隆宏、堀江智弘、吉田俊介、山森弘毅、福山康弘、金子晋久、丸山道隆、堂前篤志、桐生昭吾、Symposium on Temperature and Thermal

Measurement in Industry and Science,
2013年10月14日、マリデア（ポルトガル）

- ④ 山田隆宏、浦野千春、堀江智弘、山澤一彰、山森弘毅、金子晋久、福山康弘、丸山道隆、堂前篤志、丹波純、桐生昭吾、
11th European Conference on Applied Superconductivity, 2013年9月17日、ジェノバ（イタリア）
- ⑤ 山澤一彰、浦野千春、山田隆宏、吉田俊介、山森弘毅、金子晋久、福山康弘、丸山道隆、堂前篤志、桐生昭吾、2013年応用物理学会秋季学術講演会、2013年9月16日、同志社大学京田辺キャンパス（京都府）

〔図書〕（計 0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0件）

○取得状況（計 0件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浦野 千春 (Chiharu Urano)

産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員
研究者番号：30356589

(2) 研究分担者

丸山 道隆 (Michitaka Maruyama)

産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員
研究者番号：30415947

(2) 研究分担者

金子 晋久 (Nobu-hisa Kaneko)

産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究科長
研究者番号：30371032

(2) 研究分担者

大江 武彦 (Takehiko Oe)

産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員
研究者番号：30443170

(2) 研究分担者

堂前 篤志 (Atsushi Domae)

産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員
研究者番号：20357552

(2) 研究分担者

福山 康弘 (Yasuhiro Fukuyama)

産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員
研究者番号：00357889

(2) 研究分担者

丹波 純 (Jun Tamba)

産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究科長
研究者番号：10357494

(2) 研究分担者

山澤 一彰 (Kazuaki Yamazawa)

産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究室長
研究者番号：30306873

(2) 研究分担者

桐生 昭吾 (Shogo Kiryu)

(平成22年-平成23年まで研究分担者)
東京都市大学・工学部生体医工学科・教授
研究者番号：00356908

(2) 研究分担者

山田 隆宏 (Takahiro Yamada)

産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・主任研究員
研究者番号：00377871
(平成25年度より研究分担者)

(3) 連携研究者

山森 弘毅 (Hirotake Yamamori)

産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・主任研究員
研究者番号：00358293