

新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする  
次世代フォトニクスの基盤技術  
2017年度採択研究代表者

2019年度 実績報告書
-----------------

福田 大治

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

単一光子スペクトル計測によるイメージング技術開発と  
細胞機能ヴィジュアルライザの創成

## § 1. 研究成果の概要

単一光子スペクトル計測によるイメージングを実現するための要素技術開発と、細胞機能ヴィジュアライザを構成する高精度細胞識別アルゴリズムの構築について、2019年度は以下の研究を実施しました。

単一光子スペクトル計測の要素技術開発では、超伝導転移端センサ( TES)のアレイ化デバイスとその信号読出し回路であるマイクロ波マルチプレクシングデバイス(MW-Mux)の開発に取り組みました。アレイ化した光子測定素子の開発では、TESを平面上に3×3素子配列したデバイスを試作し、複数素子を超伝導転移端領域中で動作させることで光子信号の同時読出しに取り組んでいます。その結果、応答信号波形からデバイスの入射強度に応じたPoisson分布に従う光子数分布が観測され、光子数識別と分光能力を併せ持ったアレイ化デバイスの実現に初めて成功しました。また、隣接するピクセル間のクロストークも40 dB以上の良好な特性が得られ、各素子が熱的な影響を受けずに独立して動作することも確認しています。MW-Muxの開発では、昨年度開発した低雑音デバイスの結果をもとに、光TESをMW-Muxと組み合わせて、光子入射によるTESの高速な電流変化を、MW-Muxによって信号読出する実証実験に取り組みました。その結果、応答時定数200 ns以下となるTESの信号波形を良好なエネルギー分解能で読み出すことに世界で初めて成功しました。これらの成果は、顕微鏡に搭載する単一光子スペクトル計測用撮像デバイスの実現に向けて、大きな前進となる結果です。また、TESの波長分解能の向上には、光子検出メカニズムの解明が必須ですが、その手掛かりを与える複素インピーダンス測定法の広帯域化にも取り組んでいます。このインピーダンス法では、周波数帯域が100 kHz以上となると伝送線路の寄生インダクタンス等の問題により、TESの温度感度や電流感度などの物理パラメータを精度良く求めることが難しいという問題がありました。そこで、高周波数領域でのTESの複素インピーダンス測定の精度を高めるため、冷凍機内伝送線路の周波数特性の改善に取り組みました。その結果、周波数50 MHzに至るまで伝送線路の伝達関数は理論式とほぼ一致し、周波数特性の大幅な改善に成功しました。これにより、TESの物理パラメータを高精度に抽出することが可能になり、TESの理論エネルギー分解能や光子検出モデルをより正確に求めることが可能となりました。

また、これらの単一光子分光スペクトル計測に適した共焦点顕微鏡の開発にも取り組んでいます。TESの超低雑音かつ光子数識別能力を生かし、長時間露光下でも暗計数にほとんど影響されることなく、出現頻度の低い近赤外蛍光の検出を実証することに成功しました。また、高精度細胞識別アルゴリズムの構築では、今までは種レベルの識別だったものを、変異株や生理状態が異なる細胞を識別可能なアルゴリズムの開発に取り組みました。自家蛍光を生じる細胞からのスペクトルに基づいた分類モデル及び次元縮約分析を行なうことで、確度の高い細胞識別を実証することに成功しました。

### 【代表的な原著論文】

1. Toshio Konno, Sachiko Takasu, Kaori Hattori and Daiji Fukuda, “Development of an Optical Transition-Edge Sensor Array”, *J. Low Temp. Phys.*, vol. **199**, pp.22-33, (2020).
2. Naoki Nakada, Kaori Hattori, Yuki Nakashima, Fuminori Hirayama, Ryo Yamamoto, Hirotake

- Yamamori, Satoshi Kohjiro, Akira Sato, Hiroyuki Takahashi, Daiji Fukuda, “Microwave SQUID Multiplexer for Readout of Optical Transition Edge Sensor Array,” *J. Low Temp. Phys.*, vol. **199**, pp. 206–211, (2020).
3. Ryo Kobayashi, Kaori Hattori, Shuichiro Inoue, and Daiji Fukuda, “Development of a Fast Response Titanium–Gold Bilayer Optical TES With an Optical Fiber Self–Alignment Structure,” *IEEE Appl. Supercond.*, vol. **29**, no. 5, 2101105, (2019).

## § 2. 研究実施体制

### (1) 福田グループ

- ① 研究代表者: 福田 大治 (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)
- ② 研究項目
  - ・単一光子スペクトル測定装置による生物蛍光発光スペクトルの測定
  - ・超広帯域かつ高波長分解能をもつ超伝導光検出技術の開発
  - ・単一光子スペクトル素子の集積化技術の開発
  - ・集積化超伝導光検出素子及び超伝導多重回路チップが搭載可能な無冷媒希釈冷凍機開発

### (2) 野村グループ

- ① 主たる共同研究者: 野村 暢彦 (筑波大学生命環境系 教授)
- ② 研究項目
  - ・単一光子分光スペクトル測定装置を蛍光検出器とした生物対応共焦点顕微鏡の制作
  - ・単一光子分光スペクトル測定法を利用した高精度細胞識別アルゴリズムの構築

### (3) 山森グループ

- ① 主たる共同研究者: 山森 弘毅  
(産業技術総合研究所エレクトロニクス・製造領域 研究グループ長)
- ② 研究項目
  - ・読出し回路の低雑音化1
  - ・読出し回路の低雑音化2
  - ・読出し回路の高速化
  - ・9素子アレイ用読出し回路開発