

先端国際共同研究推進事業

2023 年度採択

次世代のための ASPIRE

マテリアル分野

2023 年～2024 年度

年次報告書（公開版）

研究課題名	フレキシブル・ストレッチャブルエレクトロニクスに関する包括的研究
日本側研究代表者	松久 直司 東京大学 准教授
相手側研究代表者	・ Martin Kaltenbrunner, Professor, Johannes Kepler University LINZ ・ Kari Rönkä, Vice President, VTT Technical Research Centre of Finland ・ Christopher Synatschke, Group Leader, Max Planck Institute for Polymer Research ・ Gianni Ciofani, Principal Investigator/Coordinator, Italian Institute of Technology ・ George Malliaras, Prince Philip Professor, University of Cambridge ・ Kevin Plaxco, Professor, University of California Santa Barbara ・ Thuc-Quyen Nguyen, Professor, University of California ・ Zhenan Bao, K.K. Lee Professor, Department of Chemical Engineering, Stanford University
研究期間	2024 年 2 月 1 日～2027 年 3 月 31 日

1. 研究成果の概要

① 研究構想にかかる成果

<実施したこと>

多岐にわたる研究計画のそれぞれにおいて人的交流を本格的に開始した。将来的な ASPIRE での連携を見据えた共同研究もいくつか始め、論文文化に至った。

より具体的には、ヨハネスケプラー大学との共同研究では、生分解性の基板上に有機エレクトロニクスを作製する技術の開発に取り組んだ。有機発光素子において、生分解性の基板上で動作することを確認できた。現在は、本技術の再現性の確認を行うとともに、デバイス特性の評価と改善に取り組んでいる。VTT との共同研究により、超柔軟基材上にオール印刷で伸縮性フォトディテクタを製造することに成功した。マックスプランク研究所に修士課程学生を派遣し、先方から博士課程学生を招聘した。ピロガロールをビルディングブロックとする自立ナノ薄膜を新規に電解重合にて合成し、現在詳細な構造解析と各種物性評価を進めている。イタリア技術研究所との共同研究では、博士課程学生を招聘し、プリントエレクトロニクスを活用した臓器チップのセンサ化に取り組んだ。ケンブリッジ大との共同研究により、5 S/cm もの高い導電性、1000%を超える高い伸長性を示す導電性ハイドロゲル材料を開発し、蛍光顕微鏡観察によりその高性能のメカニズムを明らかにした。UCSB との共同研究では、フレキシブル有機太陽電池の安定性改善に関する研究に取り組んだ。劣化機構の詳細な評価手法を習得し、さらに、高い安定性を示す素子構造についての初期検討を行った。現在は、フレキシブルなデバイスで上記の評価手法・構造が適応可能かについての評価をしている。さらに、ウェアラブル可能な電気化学アプタマーセンサの開発に取り組んだ。インクジェット印刷にて作製した電極では表面積が増加するため高い応答性能を示すことを見出した。現在は、ウェアラブル化に向けて、汗との交差性を評価している。新たにメルボルン大学とも共同研究を始め、2 次元半導体を用いたフレキシブル光センサの共同開発を実施してきた。本実験により 2 次元半導体に歪みと異なる波長の光を印加することでセンサ出力が変化することがわかった。現在は本原理をセンサとして発展させるためのデバイス開発を行っている。

<得られた成果>

それぞれの共同研究について国際共著論文の執筆に向けてデータ取りを進めている。ケンブリッジ大との共同研究により開発した導電性ハイドロゲル材料は、2025 年度に *Advanced Materials* 誌に論文掲載された。UCSB との取り組みの一部は日本化学会第 105 春季年会で発表した。さらに ASPIRE のネットワークを拡張する活動の一環で *Nature Communications* 誌、*Nature Energy* 誌などのトップジャーナルに論文掲載することができた。一連の活動が評価され、松久は令和 6 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞し、竹井は令和 6 年度日本学術振興会賞を受賞した。さらに学生 2 名が国際学会で Best Presentation Award を受賞した。

② 国際頭脳循環の促進にかかる成果

<実施したこと>

5 名の学生を派遣した。一部、元々 3 ヶ月の滞在予定だったものを 6 ヶ月に延長することでより実りのある滞在とすることができた。さらに ASPIRE のネットワークを増強するため、5 月には大阪大学でデルフト工科大学の教員を招聘してのシンポジウム、秋の応用物理学会ではフレキシブル・ストレッチャブルエレクトロニクスのフロンティアと題しシンポジウム、2025 年 3 月にはケンブリッジ大の教授 3 名を招聘してのシンポジウムを開催した。さらに 2026 年度の国際学会でのシンポジウム提案をおこない、受理されている。

<得られた成果>

人的交流により、研究開始時点で交流のあった研究機関との協力関係が強固になった。さらに複数回開催したシンポジウムにより、国内・国外で新しい研究者ネットワークの構築に成功した。今後 ASPIRE での研究連携先の更なる拡大と研究の発展が見込まれる。

2. 研究実施体制

研究テーマ	中心となる研究者氏名	所属機関・部署・役職名
研究テーマ1 伸縮性半導体デバイスの材料・物理・印刷製造	松久 直司 Zhenan Bao George Malliaras Kari Rönkä	東京大学・先端科学技術研究センター・准教授 Stanford University・Chemical Engineering・Professor University of Cambridge・Electrical Engineering・Professor VTT Technical Research Centre of Finland・Sensing Solutions research area・Vice President
研究テーマ2 FSEデバイスの長期埋め込みに向けた基盤技術開発	藤枝 俊宣 Kevin Plaxco Christopher Synatschke Gianni Ciofani	東京工業大学・生命理工学院・准教授 UCSB・Department of Chemistry & Biochemistry・Professor Max Planck Institute for Polymer Research・Department Synthesis of Macromolecules・Group Leader Italian Institute of Technology・Principal Investigator/Coordinator
研究テーマ3 フレキシブル太陽電池およびフォトディテクタの長期動作の劣化機構の解明	福田 憲二郎 Thuc-Quyen Nguyen	理化学研究所・開拓研究本部・専任研究員 UCSB・Department of Chemistry & Biochemistry・professor
研究テーマ4 サステナブルFSE材料を用いた使い捨てフレキシブルセンサの開発	横田 知之 Martin Kaltenbrunner	東京大学・工学系研究科・准教授 Johannes Kepler University LINZ・Soft Matter Physics and LIT, Soft Materials Lab・professor
研究テーマ5 FSE材料の集積化によるマルチモ	竹井 邦晴 James Bullock Wei Gao	北海道大学・情報科学研究院・教授 The University of Melbourne・assistant professor

ーダルヘルスケア デバイスの開発		California Institute of Technology ・ Medical Engineering・professor
---------------------	--	---

3. 代表的な業績（原著論文、プレスリリース、表彰など）

<原著論文>

- [1] Jiachen Wang, Yuto Ochiai, Niannian Wu, Kiyohiro Adachi, Daishi Inoue, Daisuke Hashizume, Desheng Kong, Naoji Matsuhisa, Tomoyuki Yokota, Qiang Wu, Wei Ma, Lulu Sun, Sixing Xiong, Baocai Du, Wenqing Wang, Chih-Jen Shih, Keisuke Tajima, Takuzo Aida, Kenjiro Fukuda* & Takao Someya*, "Intrinsically stretchable organic photovoltaics by redistributing strain to PEDOT:PSS with enhanced stretchability and interfacial adhesion", *Nature Communications* **15**, 4902 (2024).
- [2] Kenjiro Fukuda*, Lulu Sun, Baocai Du, Masahito Takakuwa, Jiachen Wang, Takao Someya, Lluís F. Marsal, Yinhua Zhou, Yiwang Chen, Hongzheng Chen, S. Ravi P. Silva, Derya Baran, Luigi A. Castriotta, Thomas M. Brown, Changduk Yang, Weiwei Li, Anita W. Y. Ho-Baillie, Thomas Österberg, Nitin P. Padture, Karen Forberich, Christoph J. Brabec, Osbel Almora*, "A bending test protocol for characterizing the mechanical performance of flexible photovoltaics", *Nature Energy* **9**, 1335-1343 (2024).
- [3] Lulu Sun, Kenjiro Fukuda*, Ruiqi Guo, Luigi A. Castriotta, Karen Forberich, Yinhua Zhou, Takao Someya, Christoph J. Brabec, Osbel Almora*, "A Flexible Photovoltaic Fatigue Factor for Quantification of Mechanical Device Performance", *Advanced Functional Materials*, doi:10.1002/adfm.202422706.

・表彰

- [1] 松久直司、令和6年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞
- [2] 竹井邦晴、令和6年度日本学術振興会賞