

公益財団法人矢崎科学技術振興記念財団
一般研究助成 成果報告書

公益財団法人矢崎科学技術振興記念財団
理事長 殿

研究助成期間終了にあたり、下記の通り成果を報告します。

2026 年 10 月 12 日

氏名 松久 直司

所属 東京大学 先端科学技術研究センター

職位 准教授

1. 申請研究の題目

リン系二次元材料によるハイドロゲルデバイス

2. 研究の目的

ホウ素やリンを用いた二次元材料は、高い電気特性と光デバイス特性を示すが、空気や水に触れるとすぐに酸化してしまう安定性の問題があった。申請者の研究室では、リチウムをドーピングしたリン系二次元ナノリボン材料の合成に成功しており、これが高い安定性を示すことを見いだしていた。

本研究では、このリン系二次元ナノリボン材料の構造と安定性の起源を明らかにするとともに、リン系ナノリボン材料をハイドロゲル中に均一分散した半導体ハイドロゲルデバイスを作製し、インプラントブル治療デバイスへの応用の基盤を築くことを目的とした。

3. 研究の内容

(1)リン系二次元ナノリボン材料の合成: 赤リンと水素化ホウ素リチウムを真空中で段階的に加熱し、リンとリチウムからなる結晶を合成した。これを溶媒中で超音波により剥離することで、幅約 84 nm、平均厚さ約 6 nm、長さ約 13 μm のリン系二次元ナノリボン材料を得た。

(2)構造の解明: 電子顕微鏡による原子レベルの観察、X 線回折、各種分光測定、第一原理計算を組み合わせることで構造を調べた。その結果、リン原子がかご状に結合した鎖とリチウム原子が、DNA のような二重らせんを形成する、これまで実験で確認されていなかった構造であることがわかった。

(3)安定性と光学特性の評価: 水、空気、強酸、高温の各条件にさらした後の構造を評価した。また、厚さ・温度・偏光によって光の吸収、発光、散乱の性質がどのように変わるかを測定した。

(4)ハイドロゲルの作製と評価: リン系ナノリボン材料をポリアクリル酸と炭酸カルシウムからなるハイドロゲル中に分散させ、ハイドロゲルの電気・機械特性、自己修復性、および光を熱に変換する性能(フォトサーマル効果)を評価した。

4. 研究の成果と結論、今後の課題

得られたリン系二次元ナノリボン材料は、水中に 30 日以上置いても、空気中で 225°Cまで加熱しても、さらに強酸(1 M 塩酸)に浸しても結晶構造が壊れず、空気中で 1 時間以内に劣化する従来の黒リンのナノリボンに比べて格段に安定であった。この安定性は、リチウムからリンへの電子移動による結合の強化、らせん同士の非共有結合的な相互作用、らせん形状による保護の三つの効果が組み合わさって生じることを、実験と計算の両面から明らかにした。また、厚さを変

えることでバンドギャップ(光を吸収・発光するエネルギー)を 2.13~1.78 eV の範囲で制御でき、偏光に強く依存した光学特性や、第二高調波発生といった非線形光学応答も示した。

このリン系ナノリボン材料をハイドロゲル中に分散させると、ナノリボン濃度 0~10 mg/mL の範囲で導電率が 1.01 S/m から 5.99 S/m へと約 6 倍に向上し、弾性率は約 7 倍になった。切断しても室温で自然に接合し、導電性も回復する自己修復性を示した。さらに、波長 940 nm の近赤外光(1 W/cm²)を照射すると、ナノリボンを含まないハイドロゲル(28.9℃)に対して 80.1℃まで温度が上昇し、530 nm の光では光熱変換効率 40.4%と、これまで報告された多くのナノ材料を上回る値を得た。加熱・冷却を繰り返しても性能は保たれた。

以上より、安定性が課題であったリン系低次元材料を、らせん構造によって安定化できることを示し、この材料を用いて自己修復性と高い光熱変換能を併せ持つハイドロゲルを実現した。本成果は Science Advances 誌に掲載された。

今後の課題は、ハイドロゲルデバイスの生分解性と生体適合性を詳しく評価し、動物を用いた埋込実験によって、皮下に埋込後、体外から近赤外光を照射して治療するがん治療デバイスとしての有効性を実証することである。

5. 成果の価値

5-1. 学術的価値

リン系低次元材料の安定性は材料系の本質的な問題であった。本研究は、理論的に予測されていたリンとリチウムの二重らせん構造を初めて実験で実現し、「らせん構造によって不安定な材料を安定化する」という新しい材料設計の指針を示した。さらに、二次元材料の多くがナノシート構造を示す中で、1次元性の高いナノリボン構造は報告が少なく、その光学特性や安定化機構を明らかにしたことは学術的に大きな意義がある。この指針は他の不安定な低次元材料にも応用できる可能性があり、材料科学、光学、さらには量子技術の分野にも波及効果がある。

5-2. 社会的価値

水中でも安定で、光を効率よく熱に変換できる柔らかいハイドロゲルは、生体を透過する近赤外光によるフォトサーマル効果を用いたがん治療デバイスや、生体イメージングへの応用が期待される。皮下に埋込後、体外から近赤外光を照射することで治療でき、取出のための手術も必要ないデバイスが実現すれば、患者の負担を大きく減らすことができ、医療応用上非常に重要である。

6. 研究成果

・「研究論文(原著)」

○ C. Hou†, H. Lu†, Y. Liu, Q. Wu, N. Jobsri, S. Liu, L. Wang, Q. Gao, J. Wu, B. Oh, R. Yanagisawa, X. Wu, M. Nomura, W. Guo*, N. Matsuhisa*, G. Tai*, "Phosphorus-lithium double-helix nanoribbons", Science Advances 11, eadz4766 (2025). (†共同第一著者、*責任著者)

・「国際会議発表」

○ C. Hou, G. Tai, W. Guo, N. Matsuhisa, "Phosphorus-lithium double-helix nanoribbons", The 4th Global Conference of Innovation Materials (GCIM2026), 2026 年 6 月

C. Hou, G. Tai, N. Matsuhisa, "Phosphorus-lithium double helix nanoribbons", The 8th Event of the Researchers Society for Flexible and Stretchable Electronics, 2025 年 5 月

N. Matsuhisa, "Sensors and Displays Conformable to Skin Wrinkles for Seamless Human-Machine Interaction", 2025 MRS Spring Meeting and Exhibit, Seattle, 2025 年 4 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Skin-conformable Displays and Sensors Using Soft and Stretchable Electronic Materials", SID Display Week 2025, 2025 年 5 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Ultrasoft electronic devices by stretchable conducting polymers", The 3rd Global Conference of Innovation Materials (GCIM2025), 2025 年 6 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Lecture on Stretchable Electronics", EURALIMMS2025, 2025 年 6 月 [招待]

N. Matsuhisa, "On-Skin Wearables: From Conformable to Unperceivable", Pacific Forum on Flexible Electronics (PacificFlex 2025), 2025 年 6 月 [招待]

N. Matsuhisa, "On-Skin Invisible Electronic Devices Using Stretchable and Transparent Materials", ICMAT 2025, 2025 年 7 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Skin conformable sensors and displays using stretchable optoelectronic materials", Optica Advanced Photonics Congress 2025, 2025 年 7 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Skin-conformable sensors and displays using stretchable polymer electronic materials", Conformable organic electronics: Advancing sensors, bioelectronics, and energy devices, Stanford University, 2025 年 8 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Skin-conformable sensors and displays using stretchable polymer electronic materials", Berkeley-Japan Joint Symposium, UC Berkeley, 2025 年 8 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Skin-conformable sensors and displays using stretchable polymer electronic materials", Terasaki Institute JST ASPIRE Symposium, 2025 年 8 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Skin-conformable sensors and displays using stretchable polymer electronic materials", Caltech JST ASPIRE Symposium on Flexible and Stretchable Electronics, 2025 年 8 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Skin-conformable sensors and displays using stretchable polymer electronic materials", US-Japan Mini Workshop on Emerging Electronics, UCSD, 2025 年 8 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Skin-conformable sensors and displays using stretchable polymer electronic materials", UCSB & ASPIRE FSE Workshop, UCSB, 2025 年 8 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Intrinsically Stretchable On-Skin Electronic Devices", International Meeting on Information Display (IMID 2025), 2025 年 8 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Skin-conformable sensors and displays using stretchable electronic materials", The 6th International Conference on Flexible Electronics, 2025 年 9 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Skin-conformable sensors and displays using stretchable electronic materials", Nanjing University (NJU) Soft Electronics Symposium 2025, 2025 年 9 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Skin-conformable sensors and displays using stretchable electronic materials", Wearable Bioelectronics Workshop, 2025 年 9 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Skin-conformable Displays and Sensors Using Soft and Stretchable Electronic Materials", ESCPI X LIMMS Workshop, Paris, 2025 年 10 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Skin-conformable Sensors and Displays by Soft Conducting Polymers", Photonics and Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2025), 2025 年 11 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Ultrasoft On-Skin Sensors by Stretchable Conducting Polymers", ICAE 2025, 2025 年 11 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Intrinsically Stretchable Self-Doped Conducting Polymers", Materials Research Society Fall Meeting and Exhibit 2025, Boston, 2025 年 12 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Skin-Conformable Sensors and Displays using Stretchable Electronic Materials", SNU-IIS UTokyo Workshop on Emerging Device Technologies, 2025 年 12 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Skin-Conformable Sensors and Displays by Soft Electronic Materials", The 7th International Conference on Manufacturing Process & Technology (ICMPT 2026), 2026 年 2 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Skin-conformable sensors and devices by stretchable electronic materials", Japan-Korea Joint Symposium on Next-Generation Implantable Biosensing Systems, 2026 年 2 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Intrinsically stretchable devices using soft electronic materials", LIMMS / IIS UTokyo - EPFL Workshop, 2026 年 3 月 [招待]

N. Matsuhisa, "On-skin semiconductor devices by stretchable electronic materials", 20th International TFT Conference 2026, 2026 年 3 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Soft Nanomaterials Designed for Functional Hydrogels", 2026 MRS Spring Meeting & Exhibit, 2026 年 4 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Unperceivable designs of on-skin wearable electronics", The 4th Global Conference of Innovation Materials (GCIM2026), 2026 年 6 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Unperceivable designs of on-skin wearable electronics", The 22nd International Symposium on the Physics of Semiconductors and Applications (ISPSA), 2026 年 7 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Skin-Conformable Sensors and Displays Using Stretchable Electronic Materials", The 33rd International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (AM-FPD26), 2026 年 7 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Photo-Patternable Stretchable Conducting Polymers for Skin-Conformable Sensor and Displays", The 24th International Nanotech Conference (NANO KOREA 2026), 2026 年 7 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Unperceivable designs of wearable electronics", Korea-Japan-China Global Young Connect Symposium on Flexible Bioelectronics and Biosensors, 2026 年 8 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Skin-conformable and unperceivable wearable electronic devices", 16th International Conference on Flexible and Printed Electronics (ICFPE 2026), 2026 年 8 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Soft and transparent bioelectronic interfaces", UTokyo-Cambridge Voices, Adaptive Soft Materials and Biointerfaces, 2026 年 9 月 [招待]

N. Matsuhisa, "Efficient and stable ion-electron mixed transport in self-doped conducting polymer", IUPAC-PSK50, 2026 年 10 月 [招待]

・「特許」

なし

・「受賞」

松久直司、日本学術振興会賞、日本学術振興会、2025 年度

・「マスコミ報道」

なし

以上