

Symposium (Oral) | Symposium : Frontier of flexible and stretchable electronics 2

📅 Mon. Sep 8, 2025 1:30 PM - 5:25 PM JST | Mon. Sep 8, 2025 4:30 AM - 8:25 AM UTC | 🏢 S201 (Lecture Hall South)

[8p-S201-1~11] Frontier of flexible and stretchable electronics 2

Tomoyuki Yokota(Univ. of Tokyo), Naoji Matsuhisa(The University of Tokyo)

1:30 PM - 2:00 PM JST | 4:30 AM - 5:00 AM UTC

[8p-S201-1] Organic Thin-film Semiconductor Crystals for Flexible Electronic Devices

○Jun Takeya^{1,2} (1.Univ. Tokyo, 2.Pi-Crystal)

2:00 PM - 2:30 PM JST | 5:00 AM - 5:30 AM UTC

[8p-S201-2] Hydrogel materials composed of molecular assemblies

○Masato Ikeda¹ (1.Gifu Univ.)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[8p-S201-3] Development of Elastomer Janus Thin Sheets with Different Adhesiveness on the Front and Back Sides

○Tatsuhiko Horii¹, Masashi Ishioka², Masaru Kotera², Toshinori Fujie¹ (1.Sci. Tokyo, 2.MORESCO Corp.)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[8p-S201-4] Development of Reversible Direct Bonding Techniques for Flexible Devices Enabling Easy Integration and Separation

○Masahito Takakuwa¹, Hao Liu¹, Toshihiro Ito¹, Takao Someya¹, Tomoyuki Yokota¹ (1.The University of Tokyo)

3:15 PM - 3:45 PM JST | 6:15 AM - 6:45 AM UTC

[8p-S201-5] Development of High-performance Tactile Sensing System with Digital Skin Devices

○Tomohito Sekine¹ (1.Yamagata Univ.)

3:45 PM - 4:15 PM JST | 6:45 AM - 7:15 AM UTC

[8p-S201-6] Stretchable electronic devices using origami/kirigami/kiri-origami structure

○Eiji Iwase¹ (1.Waseda Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[8p-S201-7] Fully invisible skin electrodes for facial electrophysiological monitoring

○Oikun Ryu¹, Soutaro Ito^{1,2}, Takeo Kato², Liren Wang^{1,2}, Yicheng Zhu¹, Severine De Mulatier¹, Hiroshi Arao³, Shugo Suwazono⁴, Hirotoshi Asano⁵, Yuanyuan Zhou^{1,2}, Hinata Mitomo^{1,2}, Huimin Gong¹, Ohga Nomura², Gakuto Kagawa², Natsumi Watanabe⁵, Mohammad H. Behfar⁶, Yusuke Sugano¹, Hidetoshi Takahashi², Makoto Asai⁷, Jiheong Kang⁸, Naoji Matsuhisa^{1,2} (1.RCAST UTokyo, 2.Keio Univ., 3.Taisho Univ., 4.Okinawa hosp., 5.Kogakuin Univ., 6.VTT, 7.KGRI, 8.Seoul National Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[8p-S201-8] Softness-perceptive e-skin

○Atsushi Nitta¹, Yoshiki Kondo¹, Haruki Nakamura¹, Naruhito Seimiya¹, Kuniharu Takei¹ (1.Hokkaido Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

4:45 PM - 5:00 PM JST | 7:45 AM - 8:00 AM UTC

[8p-S201-9] Development of a Wearable Triboelectric Throat Microphone Using Nanomesh

○(M1)Takuo Tachibana¹, Yusuke Ebihara¹, Kento Yamagishi¹, Tomoyuki Yokota¹, Takao Someya¹ (1.Tokyo Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[8p-S201-10] Self-Adhesive Electrodes on Abdominal Surface for Cyborg Insect Locomotion Control

○Shumpei Katayama^{1,2}, Keigo Ando^{1,2}, Sunghoon Lee¹, Zhi Jiang³, Xiaodong Chen³, Tomoyuki Yokota⁴, Hirotaka Sato³, Shinjiro Umezu², Kenjiro Fukuda¹, Takao Someya^{1,4} (1.RIKEN, 2.Waseda Univ., 3.NTU, 4.UTokyo)

5:15 PM - 5:25 PM JST | 8:15 AM - 8:25 AM UTC

[8p-S201-11] Closing address

○Naoji Matsuhisa¹ (1.RCAST/IIS, UTokyo)

有機半導体結晶薄膜とフレキシブルデバイス

Organic Thin-film Semiconductor Crystals for Flexible Electronic Devices

東大新領域¹, パイクリスタル² °竹谷 純一^{1,2}

Univ. of Tpkyo¹, Pi-Crystal Inc.², °Jun Takeya¹

E-mail: takeya@k.u-tokyo.ac.jp

本講演では、有機半導体分子を二次元配列させた結晶薄膜をベースとして、AC-DC 集積回路と高感度歪・振動センサーとへの展開について紹介する。半導体性能と構造安定性を両立する有機分子の例として、パイ共役有機分子アルキルジナフトベンゾジチオフェン(Cn-DNBDT)有機分子を設計・合成し、さらに、溶液のメニスカスを一方向に掃引することによって自発的に二次元単結晶に自己組織化させる手法を見出した[1]。このように自己集合した分子層有機単結晶膜は、単分子層かつサイズ無制限の究極の二次元性に加えて、半導体デバイス性能を決める電子移動度においても他の有機半導体材料を凌駕する [2]。また、電子フォノンカップリングが強いことが、フレキシブルな有機半導体の特徴であり、その結果、巨大な歪応答を示すことが明らかとなった。この結果は高感度の歪・振動センサーの開発に直結している[3]。

2000 年以前には、移動度が $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以下の有機半導体しか報告されておらず、有機半導体中では分子間の電子移動によって位相情報を失うホッピング伝導のみが可能であると理解されていた。これに対して、2003 年以降、 $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を超える移動度の有機単結晶トランジスタが報告され、ホール効果測定によって、位相情報を保持するコヒーレントなキャリアが、室温では分子をまたいで広がって非局在化しているバンド伝導が実現していることを明らかにした[4,5]。また、ごく最近になってイオン液体の電気二重層を用いて、量子井戸構造を有する有機半導体結晶に強い電界を加えることによって、 10^{14} cm^{-2} 級の高密度のキャリアが導入された二次元電子系も得られ、10 K 以下の低温に冷却した場合も、電気抵抗が減少する金属状態に転移していることが明らかになった[6]。このように、コヒーレントに広がった電子状態は、高いキャリア伝導性ととともに、半導体材料を実用に供するために、不可欠な安定性を保証する極めて有利な特性である。クリーンなコヒーレント電子系では、キャリア注入の際に生じる分子の酸化還元に対する不安定性を、多くの分子に分配することが可能となるからである。現在、1980 年代のシリコン半導体レベルの集積回路応用が有機単結晶半導体によって可能となり、フィルム型センサーのデータ処理回路や、プラスチックコンピュータのイノベーションが迫っている。

[1] J. Soeda, J. Takeya et al., Appl. Phys. Exp. 6, 076503 (2013).

[2] A. Yamamura, S. Watanabe, J. Takeya et al., Science Adv. 4, eaao5758 (2018).

[3] T. Kubo, J. Takeya et al., Nature Commun. 7, 11156 (2016).

[4] J. Takeya et. al., Jpn. J. Appl. Phys. 44, L1393 (2005).

[5] J. Takeya et. al., Phys. Rev. Lett. 98, 196804 (2007).

[6] N. Kasuya, S. Watanabe, J. Takeya et al., Nature Mater. 20, 1401 (2021).

分子集合体からなるハイドロゲル材料

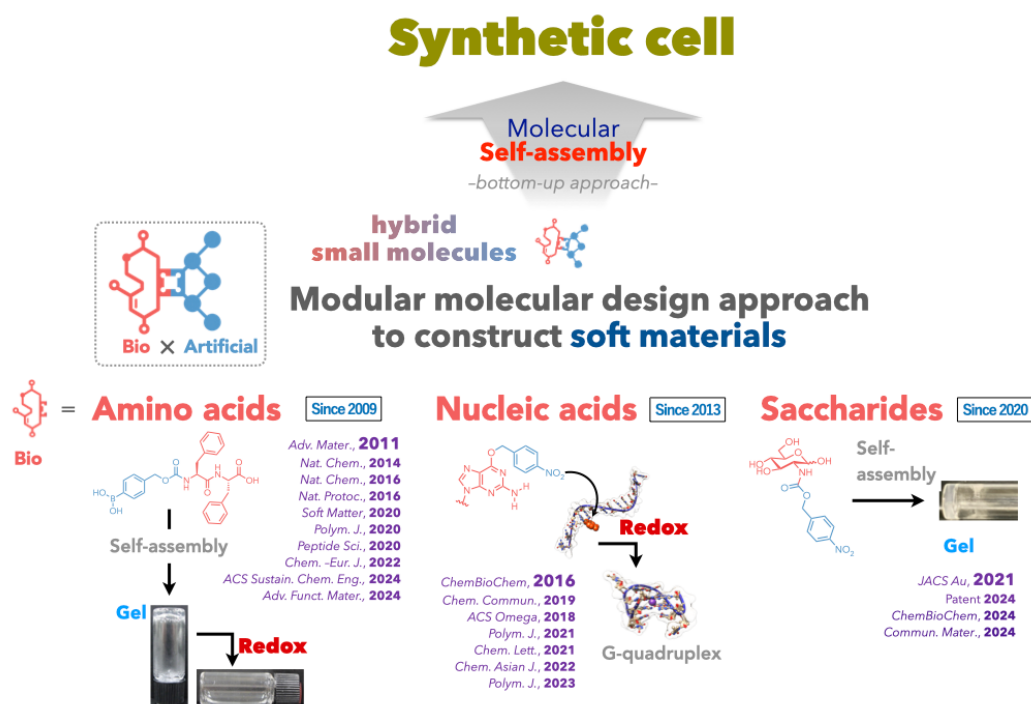
Hydrogel materials composed of molecular assemblies

岐阜大工 ○池田 将

Gifu Univ.

E-mail: ikeda.masato.n3@f.gifu-u.ac.jp

分子集合体は、構成分子間の分子間相互作用に基づいた自発的な分子集合によって構築されます。構成分子の分子集合力や、分子集合後の機能を調節できる分子パーツをモジュールとして扱い、複数の分子モジュールを論理的に組み合わせるハイブリッド型分子設計¹は、分子集合体からなる材料の合理的な開発と進化を可能にします。本発表では、生体分子であるペプチド²・核酸³・糖⁴を基本モジュールとして、化学反応性の人工分子モジュールをハイブリッドさせた分子が、分子集合することで得られるソフトマテリアルの刺激応答機能を紹介します。とりわけ水中で分子が繊維状に分子集合することで得られるヒドロゲル材料を中心に、複数の分子集合体の複合化によって人工細胞への進化を目指して進めている研究成果⁵を紹介します。



- (a) Ikeda M. *Polym. J.* **2019**, 51: 371–380. (b) Higashi SL, Shintani Y, Ikeda M. *Chem. Eur. J.* **2022**, 28: e202201103.
- (a) Ikeda M, Tanida T, Yoshii T, Hamachi I. *Adv. Mater.* **2011**, 23: 2819–2822. (b) Ikeda M, Tanida T, Yoshii T, Kurotani K, Onogi S, Urayama K, Hamachi I. *Nat. Chem.* **2014**, 6: 511–518. (c) Shigemitsu H, Fujisaku T, Onogi S, Yoshii T, Ikeda M, Hamachi I. *Nat. Protoc.* **2016**, 11: 1744–1756. (d) Shintani Y, Ohtomi T, Shibata A, Kitamura Y, Hirose KM, Suzuki KGN, Ikeda M. *Chem. Eur. J.* **2022**, 28: e202104421. (e) Shintani Y, Katagiri H, Ikeda M. *Adv. Funct. Mater.* **2024**, 34: e2312999.
- (a) Ikeda M, Kamimura M, Hayakawa Y, Shibata A, Kitade Y. *ChemBioChem* **2016**, 17: 1304–1307. (b) Banno A, Higashi S, Shibata A, Ikeda M. *Chem. Commun.* **2019**, 55: 1959–1962.
- (a) Higashi SL, Ikeda M. *JACS Au* **2021**, 1: 1639–1646. (b) Ali O, Okumura B, Shintani Y, Sugiura S, Shibata A, Higashi SL, Ikeda M. *ChemBioChem* **2024**, 25: e202400459. (c) Okumura B, Yamaguchi E, Komura N, Ohtomi T, Kawano S-i, Sato H, Katagiri H, Ando H, Ikeda M. *Commun. Mater.* **2024**, 5: 182.
- (a) Onogi S, Shigemitsu H, Yoshii T, Tanida T, Ikeda M, Kubota R, Hamachi I. *Nat. Chem.* **2016**, 8: 743–752. (b) Higashi SL, Shibata A, Kitamura Y, Hirose KM, Suzuki KGN, Matsuura K, Ikeda M. *Chem. Eur. J.* **2019**, 25: 11955–11962. (c) Higashi SL, Hirose KM, Suzuki KGN, Matsuura K, Ikeda M. *ACS Appl. Bio Mater.* **2020**, 3: 9082–9092. (d) Sugiura S, Shintani Y, Mori D, Higashi SL, Shibata A, Kitamura Y, Kawano S-i, Hirose KM, Suzuki KGN, Ikeda M. *Nanoscale* **2023**, 15: 1024–1031.

裏表で接着力の異なるエラストマーヤヌスシートの開発と評価

Development of Elastomer Janus Thin Sheets with Different Adhesiveness on the Front and Back Sides

科学大生命理工¹、(株) MORESCO² [○]堀井 辰衛¹、石岡 将史²、小寺 賢²、藤枝 俊宣¹

Sci. Tokyo¹、 MORESCO Corp.² [○]Tatsuhiko Horii¹, Masashi Ishioka², Masaru Kotera², Toshinori Fujie¹

E-mail: t_fujie@life.isct.ac.jp

【緒言】

近年、高分子薄膜から成る皮膚貼付型電子デバイスは、ヘルスケアや医療診断における長期的かつリアルタイムの生体信号モニタリングへの応用に関して大きな注目を集めている^[1,2]。膜厚が数百ナノメートル以下のポリマー超薄膜は、膜厚の三乗に比例する曲げ剛性が表皮よりも小さいため皮膚凹凸に追従しやすく、分子間力で皮膚に密着できる^[3]。このように、皮膚／フィルム界面における接着に関して数多く報告されてきたが、皮膚と接していない側、すなわち衣類等との接触が皮膚からの離れを引き起こす可能性についてはほとんど検討されていない。そこで我々は、高分子薄膜表面に微細な凹凸構造を導入し、接触対象物（例：衣類、身体）との接触面積を低減することで薄膜の裏表の密着性に差異を与えられると考えた。本研究では、ポリ（スチレン-ブタジエン-スチレン）エラストマー薄膜（SBS TF）に対し、エレクトロスピンニング（ES）法で SBS ナノファイバー不織布（SBS NT）を積層することで、片面に凹凸構造を持つ SBS ヤヌスシート（SBS JS）を作製し、TF と JS の密着性をタックセパレーション試験により評価した。

【実験】

JS の TF、NT にはそれぞれ $M_w \sim 140,000$ 、 $M_w \sim 120,000$ の SBS を用いた。 $M_w \sim 140,000$ の SBS をテトラヒドロフランへ溶解させることで 7 wt% の SBS 溶液を調製し、グラビアコート法を用いて SBS TF を作製した。この薄膜上に、ES 法にて $M_w \sim 120,000$ の SBS 溶液を用いて 1 時間紡糸し、NT 層を積層することで JS を作製した。5 N ロードセルを搭載した引張試験機（EZ-SX、島津製作所）を用いてタックセパレーション試験を行い、面積 1 cm^2 の皮膚モデル（BIOSKIN Plate P002-001#10, Beaulax Co., Ltd.）に TF や JS を約 10 mN の荷重で 30 min 接触させた後、歪み速度 10 mm s^{-1} で引き揚げたときの力 - 変位曲線を測定した。

【結果考察】

得られた SBS TF は無色透明なのに対し、JS は NT 層が積層されているため白くみえる（Fig. 1a, b）。また、触診式段差計を用いて算出した TF、JS の平均膜厚はそれぞれ $1.16 \mu\text{m}$ 、 $3.31 \mu\text{m}$ であった。タックセパレーション試験（Fig. 1c）より、初期の変位量において JS_TF side（JS の TF 側を皮膚モデルに接触）の力は TF only よりも大きく、約 27 mm でそれぞれ最大 162 、 111 mN cm^{-2} を示した。その後、皮膚モデルからの剥離が徐々に進行するとともに力は減少した。JS_NT side（NT 側を接触）は皮膚モデルへの密着性に乏しく、最大力は JS_TF side の約 $1/8$ であった。これは、NT 層の凹凸構造により皮膚モデルへの接触面積が減少したためと考えられる。興味深いことに、このときの曲線で囲われた面積から算出したエネルギー値において、JS_TF side（約 3.97 mJ cm^{-2} ）は TF only（約 2.60 mJ cm^{-2} ）の約 1.5 倍大きなエネルギー値を示した。さらに、TF の片面に導入したナノファイバー構造により、JS_NT side の皮膚モデルからの剥離に要したエネルギーは約 0.02 mJ cm^{-2} と JS_TF side の約 $1/200$ であった。当日は、分子量の異なる SBS TF の力学特性が密着性に与える影響についても議論する予定である。

【参考文献】

- [1] D.-H. Kim *et al.*, *Science*, vol. 333, no. 6044, pp. 838–843, Aug. 2011.
- [2] T. Sekitani *et al.*, *Nat. Commun.*, vol. 7, p. 11425, Apr. 2016.
- [3] N. Sato *et al.*, *Soft Matter*, vol. 12, no. 45, pp. 9202–9209, Nov. 2016.

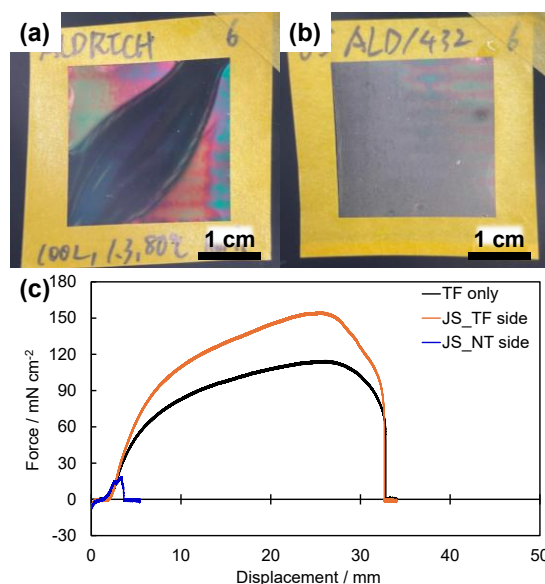


Figure 1. Photographs of (a) the SBS TF and (b) JS. (c) Force-Displacement curves of the SBS TF and JS during detachment from skin-model surface.

集積化と分離が容易なフレキシブルデバイス実現に向けた可逆的な直接接合技術の検討

Development of Reversible Direct Bonding Techniques for Flexible Devices Enabling Easy Integration and Separation

東京大学¹, [○]高桑 聖仁¹, Liu Hao¹, 伊藤 寿浩¹, 染谷 隆夫¹, 横田 知之¹

The University of Tokyo¹, [○]Masahito Takakuwa¹, Hao Liu¹, Toshihiro Ito¹, Takao Someya¹,
Tomoyuki Yokota¹

E-mail: takakuwa@ntech.t.u-tokyo.ac.jp

電子素子の膜厚を数ミクロンに抑える事で、皮膚の凹凸にも追従可能な柔軟性をもつ超薄型電子素子が開発されている。センサやディスプレイ、太陽電池等それらの柔軟な素子を集積化し、システムを構築する事で皮膚貼付け型の長期ヘルスケアモニタリングデバイス等の実現が期待されている。継続的な研究により素子単体性能は堅甲な電子素子に匹敵し、それに合わせ柔軟性を損なわない導電性接着剤フリーの直接接合技術などが開発されている。しかし薄型素子に使われる有機半導体材料や柔軟性向上のための封止層の薄膜化戦略は、素子の種類違いで有効寿命がばらつく現象を引き起こす。素子寿命が異なる複数素子の集積化デバイスの動作可能時間は、最も短い素子寿命の電子素子ユニットの動作可能時間と同値である。一方他の電子素子は動作可能なため、故障した電子素子を交換できれば、システムデバイスの動作寿命を延ばすことができ、環境負荷の観点や継続測定の観点から大きな利点となる。しかしながら、導電性接着剤や直接接合法など従来の柔軟素子用の集積化/接続技術は、一度接合すれば剥がれない不可逆的な接合で行われる。そのためシステムデバイスの一部の素子を交換する事はできず、構成素子の1つが壊れた瞬間システムデバイス全体を廃棄する必要があった。

本研究では、水蒸気プラズマ処理による化学結合と水滴下による化学結合の分断により、任意に接合/分離を制御できる新たな直接接合手法を開発した。電極間に接着層が無い場合、250 μm の突起に追従変形できる優れた柔軟性を保ちつつ、水滴下による瞬時の剥離が可能な新たな機能的な接続手法である。接合時には、水蒸気プラズマ処理をパリレン表面に施し表面改質する事で、大気中で活性化面を接触させ数秒以内に直接接合が発現する。また分離時には水を滴下する事で

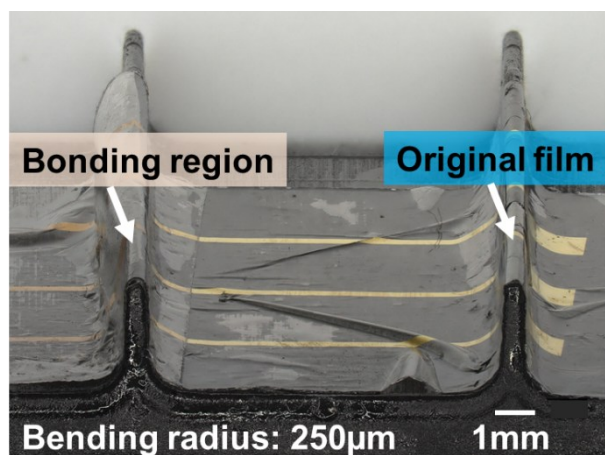


Figure 1. Conformability test of bonding region and original film region.

ポリマー間の化学結合が切断され剥離される。接合したサンプルに対し一定の引張力を印加した状態で接合部に水を滴下すると、急峻な接合力低下を示しサンプルは剥離した。その応答速度は1秒未満であり、迅速なサンプルの分離機能を達成した。一方、水を滴下しない条件ではパリレン薄膜の母材破壊が生じた。

この柔軟かつ可逆的な接合は、素子交換可能な柔軟デバイスに向けた実用的な集積化手法として期待される。

デジタルスキンデバイスによる高性能触覚検出の基礎と応用

Development of High-performance Tactile Sensing System with Digital Skin Devices

山大院有機, °関根智仁

Grad. School of Organic Materials Science, Yamagata Univ., Tomohito Sekine

E-mail: tomohito@yz.yamagata-u.ac.jp

ヒトの触覚機能を凌駕できるソフトでやわらかい高性能有機触覚センサは、触感覚を正確にデジタルデータ化できる。講演者は、これまでヒトと同等のソフト性をもつセンサデバイス（例えば圧力や温度など）の要素技術構築に欠かせない機能性材料群の開発について、物理化学的知見に基づいた特性評価を幅広く行ってきた（Fig. 1）^[1,2]。これにより、塗布／印刷プロセスを利活用した成膜性に優れる触覚センシングデバイスを実現し、ソフトロボットや義手などに展開可能なデジタルスキンデバイスの作製に成功している^[3,4]。さらに、近年の AI 技術の発展を背景に、申請者の有するセンシングデバイスと触覚ビッグデータ解析のための IT 融合も推進しており、ロボットが自動で触覚を判別し力覚制御できるシステムの構築にも取り組んでいる^[5,6]。

本講演では、高感度なソフトセンシングデバイスによるシステム形成を企図した有機複合材料の制御技術と、センサデバイスの特性について基礎・応用の両面から論ずる。特に、独自の誘電性複合材料や導電性高分子によるセンサの感度や信頼性について紹介する^[6]。これらの多様なデバイスの深化によって、触覚計測分野をはじめ生体モニタリングやロボティクス、物流など幅広い計測分野に対する将来的な社会実装が期待できる。当日は、作製したデジタルスキンデバイスをソフトロボットやウェアラブルセンサに応用し得られたデータについて、機械学習を活用して解析した実例についても議論する。

【謝辞】本研究の一部は、科研費 JP25K01190、文部科学省世界で活躍できる研究者戦略育成事業学際融合グローバル研究者育成東北イニシアティブ（TI-FRIS）、および UBE 学術振興財団の支援を受けています。また、本研究を進めるにあたり ARKEMA 株式会社の宮保淳博士、黄瞳博士、F. D. D. Santos 博士に多大な助言を賜りました。

【参考文献】

[1] Y. Watanabe et al., *Adv. Funct. Mater.*, **32**, 2107434 (2022). [2] T. Sekine et al., *Appl. Mater. Today*, **33**, 101877 (2023). [3] T. Sekine et al., *Small. Sci.*, **1**, 2100002 (2021). [4] T. Sekine et al., *Sci. Rep.*, **8**, 4442. (2018). [5] K. Nara et al., *Chem. Eng. J.*, **511**, 162180 (2025). [6] T. Yasuda et al., *Adv. Funct. Mater.*, **24**, 2402064 (2024).

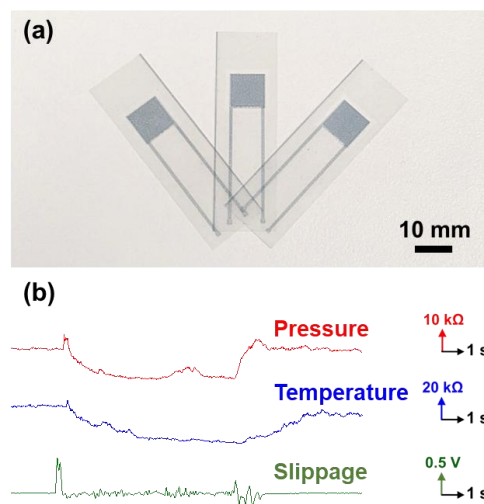


Fig.1 (a) Developed soft and flexible sensors. (b) Real-time signals detection of pressure, temperature, and slippage.

折り紙・切り紙・切り折り紙構造を用いた伸縮電子デバイス Stretchable electronic devices using origami/kirigami/kiri-origami structure

早大理工 ○岩瀬 英治

Waseda Univ. °Eiji Iwase

E-mail: iwase@waseda.jp

電子デバイスを曲げ伸ばし可能とする方法論として、「伸縮耐性を有する材料の開発」と「材料に伸縮耐性を求めない構造の工夫」の2つのアプローチがある。従来の硬い電子素子は、折り曲げたり引き延ばしたりすると破損しやすい一方で、有機材料などの伸縮耐性を有する材料より性能や安定性の面では良い場合が多くある。そのため、近年、折り紙・切り紙の構造を応用したフレキシブル電子デバイスが注目されている。折り目や切れ込みを活かして、材料や電子素子そのものは硬く壊れやすくても、構造によって全体を変形可能にするアプローチである。我々はこのような観点から、折り紙構造や切り紙構造を用いることで、金属や半導体など、曲げ耐性・伸縮耐性を有しないが良い電気的特性をもつ高性能な材料や素子を用いて、Fig. 1 に示すような伸縮変形可能な電子デバイスの研究を行っている^{[1]-[7]}。

一方で、折り紙構造や切り紙構造にも長所・短所が存在する。折り紙構造は、変形しない平板部を有するため硬くて壊れやすい電子部品を実装しやすい一方、自己折り畳みのような技術を用いても多数のユニットを折り上げるが困難な側面がある。また、切り紙構造は、構造全体の引っ張りにより多数のユニットを一括して展開するのは比較的容易である反面、平板部がないため硬くて壊れやすい電子部品の実装には向かないという側面がある。これに対し、我々は、切り紙構造に折り線を設けた「切り折り紙構造」と命名した構造により、電子部品を載せる平板部を持ちながら、構造全体を引き伸ばすことで多数のユニットの折り線を一括した折り上げが実現できる構造も提案している^[8]。



Fig. 1 Stretchable electronic devices using origami/kirigami/kiri-origami structure

- [1] Y. Iwata, E. Iwase, *Proc. of IEEE Int. Conf. on MEMS (MEMS2017)*, pp. 231-234 (2017).
- [2] K. Fukuie *et al.*, *Micromachines*, **9**, 315 (2018).
- [3] H. Taniyama, E. Iwase, *Micromachines*, **12**, 76 (2021).
- [4] A. Eda *et al.*, *Micromachines*, **13**, 907 (2022).
- [5] S. Terashima, E. Iwase, *Proc. of IEEE Int. Conf. on MEMS (MEMS2022)*, pp. 612-615 (2022).
- [6] Y. Sato *et al.*, *Micromachines*, **14**, 218 (2023).
- [7] Y. Sato, E. Iwase, *Advanced Intelligent Systems*, **5**, 2200445, (2023).
- [8] N. Nakamura, E. Iwase, *npj Flexible Electronics*, **9**, 51, (2025).

多点顔面電気信号計測のための見えない皮膚電極 Fully invisible skin electrodes for facial electrophysiological monitoring

東大先端研¹, 慶大理工², 正大人間³, 沖縄病院⁴, 工学院情報⁵, VTT⁶, KGRI⁷, ソウル大⁸
 ○劉 怡君¹, 伊藤 健太郎^{1,2}, 加藤 健郎², 王 立人^{1,2}, 朱 逸成¹, Séverine De Mulatier¹,
 荒生 弘史³, 諏訪園 秀吾⁴, 浅野 裕俊⁵, 周 元元^{1,2}, 三友 陽向^{1,2}, 龔 慧敏¹, 野村
 旺雅², 香川 学斗², 渡部 夏海⁵, Mohammad H. Behfar⁶, 菅野 裕介¹, 高橋 英俊²,
 浅井 誠⁷, Jiheong Kang⁸, 松久 直司^{1,2*}
 RCAST UTokyo¹, Keio Univ.³, Taisho Univ.⁵, Okinawa hosp.⁶, Kogakuin Univ., VTT⁷, KGRI⁸,
 Seoul National Univ.⁹, ○Yijun Liu¹, Soutaro Ito^{1,2}, Takeo Kato², Liren Wang^{1,2}, Yicheng Zhu¹,
 Séverine De Mulatier¹, Hiroshi Arao³, Shugo Suwazono⁴, Hirotoshi Asano⁵, Yuanyuan Zhou^{1,2},
 Hinata Mitomo^{1,2}, Huimin Gong¹, Ohga Nomura², Gakuto Kagawa², Natsumi Watanabe⁵,
 Mohammad H. Behfar⁶, Yusuke Sugano¹, Hidetoshi Takahashi², Makoto Asai⁷, Jiheong Kang⁸,
 Naoji Matsuhisa^{1,2*}
 E-mail: liu-yijun@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

顔面は脳波、眼電図などのヘルスケアやヒューマンコンピュータインターフェースを実現する上で重要な生体電気信号を様々に計測できる。これらの取得のためにゲル電極や、長期測定を可能にする伸縮性のドライ電極などが実現されてきた。しかし、現在報告されている生体電極は装着者の外見に大きな影響を与えてしまう。装着の事実が周囲にわかってしまうプライバシーの問題や、電極の装着を恥ずかしいと思ってしまう日常生活の中で電極を装着してもらえなくなってしまう問題がある。

そこで本研究では、装着しても視認が難しい皮膚電極を開発した(Fig. 1)。本電極は光拡散基材と伸縮性透明電極からなる。光拡散基材は伸縮性高分子の SEBS と酸化チタンナノ粒子を混合して作製した。酸化チタンなしの透明フィルムでは、皮膚表面で高いグロス(正反射)があるが、酸化チタンありでは皮膚本来の低い光沢度に加え、触感を再現することに成功した。さらに 200 nm の厚さのため、経皮の水蒸気蒸散を妨げないので、長時間装着しても不快感を引き起こさない。伸縮性透明電極には高透明度、高生体適合性、高伸縮性などの特性を有する銀ナノワイヤを使用した。作製された見えない皮膚電極は、官能試験により視認性・触感などがほとんどないことを確かめた。さらに、脳波計測を組み合わせた心理実験を行い、本電極の装着が被験者の心理に影響を与えないことを確認した。最後に開発した電極で眼電位、筋電位や脳電位などの生体信号を測定することに成功した。この見えない皮膚電極は装着者が他人に気づかれることなく、また自身も装着していることを意識することなく、日常生活における連続的な生体信号のモニタリングを可能にする。

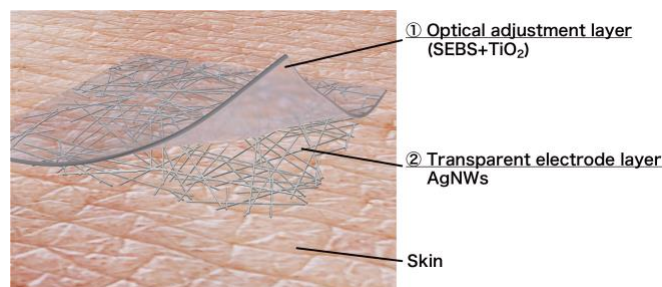


Fig.1: The structure of the invisible electrode

物体の柔らかさ検知を可能にする e-skin の開発

Softness-perceptive e-skin

北大情¹ ○新田敦之¹, 近藤芳樹¹, 中村悠希¹, 清宮徳人¹, 竹井邦晴¹

Hokkaido Univ.¹, ○Atsushi Nitta¹, Yoshiki Kondo¹, Haruki Nakamura¹, Naruhito Seimiya¹,

Kuniharu Takei¹

E-mail: nitsuta.atsushi.f0@elms.hokudai.ac.jp

【はじめに】近年フレキシブル基板上に様々なセンサを集積した電子皮膚 (e-skin) デバイスが注目され、ロボットの皮膚やウェアラブルデバイスへの応用が期待されている。その e-skin では、特に触覚圧力や温度といった人の皮膚機能を疑似する開発が盛んに行われている。一方、人の指先が感じる物体の柔らかさを検知するセンサ開発はあまり進んでいない。そこで柔らかさを検知する e-skin デバイスの実現に向け、本研究では圧力センサを集積した e-skin に、時系列変化の解析を得意とするリザーバーコンピューティング(RC)を導入することで、柔らかさ検知システムの開発を行ったので報告する。

【計測原理】デバイスは6つの圧力センサを一列に集積した構造を採用した。センサは、凹凸構造を有したカーボンブラック電極が、もう一方の電極に接触した際の接触抵抗から圧力値を計測する。e-skin は曲面上に設置し、接触する物体の柔らかさに応じて、6つの圧力センサの出力結果が異なることで、その圧力値と分布から柔らかさを抽出する。

【結果】まず圧力センサは、閾値以上の圧力印加において大きく抵抗が減少し、以降圧力値に応じて徐々に抵抗が減少することがわかった。また、本構造ではヒステリシスが小さいことも確認した。次に、異なる柔らかさ及び圧力を変化させた際の抵抗変化を計測した。本実験から物体の柔らかさに応じて物体の変形の仕方が

変化し、結果的にデバイス上の圧力分布が異なることを確認した。本結果をもとに、複数の実験を行うことで機械学習用のデータを収集し、RC 解析アルゴリズムの開発を行った。その結果、接触、柔らかさ検知でほぼ 0.9 を超える正答率、圧力検知で NMSE 平均 0.0564 の精度を実現した。次に e-skin を実際にロボットアームに装着し、掴んだ物体の柔らかさとセンサに加わる圧力を検知するデモを実施した(Fig.1)。結果、柔らかさ検知で 0.987 の正答率、圧力検知で NMSE 0.00371 の高精度検知に成功した。

【まとめ】柔らかさ検知のための RC 搭載 e-skin の開発を行った。センサの構造を工夫することで対象物の柔らかさと印加圧力を同時計測できることがわかった。さらに実際にロボットに適用した場合であっても高精度に検出可能であることがわかった。

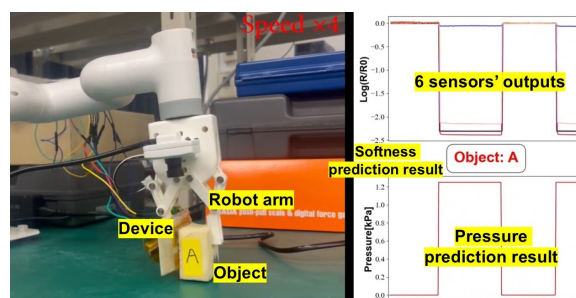


Fig. 1. Demonstration of sensor system on the robot arm.

The system detected applied pressure successfully.

【謝辞】本研究は基盤研究 A、JST ALCA NEXT、JST ASPIRE for Rising Scientists、村田学術振興財団の助成を受けたものである。

ナノメッシュを用いた摩擦帯電型ウェアラブル咽喉マイクの開発

Development of a Wearable Triboelectric Throat Microphone Using Nanomesh

東大院工¹, ○(M1) 立花 卓遠¹, 海老原 祐輔¹, 山岸 健人¹, 横田 知之¹, 染谷 隆夫¹

The Univ. of Tokyo¹, ○Takuo Tachibana¹, Yusuke Ebihara¹, Kento Yamagishi¹,

Tomoyuki Yokota¹, Takao Someya¹

E-mail: t-tachibana@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

エレクトロスピンニング法によって作製される直径数百 nm のファイバーからなるナノメッシュは、近年、フレキシブルデバイスの素材として注目を集めている。我々の研究グループでは、ナノメッシュを積層することで、低周波数帯域において高感度なナノメッシュマイクを開発し、心音等の生体音響センシングにおいてその有効性を示してきた [1]。一方で、生体音響の代表例である音声のセンシングには、より広い周波数帯域での応答が求められる。従来のナノメッシュマイクでは、共振周波数である 250 Hz 付近以外の感度が低く、音声センシングへの応用に課題があった。

本研究では、共振周波数を音声の基本周波数帯域である 150 Hz~250 Hz に調整することで、音声ピッチを選択的に検出可能な咽喉マイクを開発した。共振周波数の調整には、受音部の面積変更とナノメッシュ振動膜のファイバー密度制御という二つの手法が有効であることを明らかにした。開発したマイクは、ポリウレタン (PU) ナノメッシュ振動膜を、金 (Au) を真空蒸着した PU ナノメッシュ電極で挟んだ三層構造を有する (Fig. 1)。従来は圧電性を持つポリフッ化ビニリデン (PVDF) ナノメッシュを振動膜として使用していたが、本研究では振動膜にも PU ナノメッシュを採用することで、デバイス全体の高い柔軟性と伸縮性を実現した。

さらに、音響インピーダンスが人肌に近いシリコン材料の表面に本マイクを装着し、内部に伝播した音声信号をマイクで録音することに成功した (Fig. 2)。これは声帯で発せられた音が咽喉を通じて皮膚表面に伝わる状況を模したものであり、咽喉マイクとしての有効性を示している。加えて、COMSOL Multiphysics を用いて構築した、機械振動から電気信号への変換過程の物理モデルについても、当日紹介する予定である。

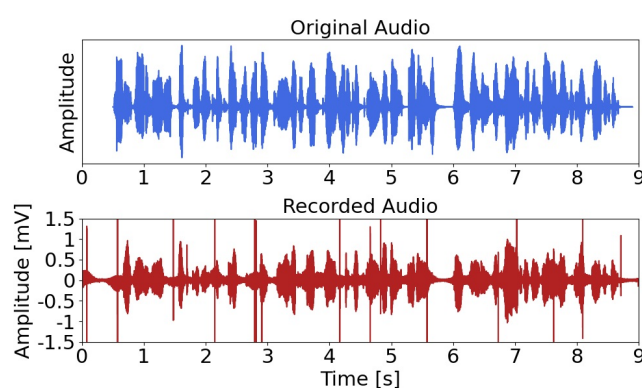
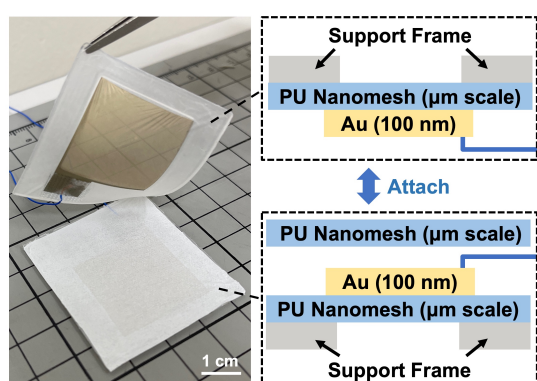


Fig. 1: Nanofiber-based microphone structure Fig. 2: Comparison of original and recorded waveforms

[1] M. O. G. Nayeem *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **117**, 7063 (2020).

腹部表面上自己接着性電極によるサイボーグ昆虫の運動制御

Self-Adhesive Electrodes on Abdominal Surface for Cyborg Insect Locomotion Control

理研¹, 早大², 南洋理工大³, 東大⁴ ○片山 俊平^{1,2}, 安藤 圭吾^{1,2}, 李 成薫¹, Jiang Zhi³,

Chen Xiaodong³, 横田 知之⁴, 佐藤 裕崇³, 梅津 信二郎², 福田 憲二郎¹, 染谷 隆夫^{1,4}

RIKEN¹, Waseda Univ.², NTU³, UTokyo⁴, [○]Shumpei Katayama^{1,2}, Keigo Ando^{1,2}, Sunghoon Lee¹, Zhi Jiang³, Xiaodong Chen³,

Tomoyuki Yokota⁴, Hiroataka Sato³, Shinjiro Umezur², Kenjiro Fukuda¹, Takao Someya^{1,4}

E-mail: shumpei.katayama@riken.jp

概要: サイボーグ昆虫は、環境モニタリングや災害救助など、広範な応用が期待される生物と機械が融合したシステムである。しかし従来の制御手法は昆虫の主要な感覚器官への刺激に依存するため、生理機能や運動能力への影響が懸念されていた。本研究では、超薄型で自己接着性を持つ電極を開発し、昆虫の腹部に直接かつ安定して装着する技術を確認した。また、腹部表面への電気刺激によって昆虫の運動を効果的に制御できる最適な刺激条件を明らかにした。これにより、主要な感覚器官に負荷をかけることなく、昆虫が持つ本来の優れた運動能力を有効に活用することができるサイボーグ昆虫システムを実現した(Fig. 1a)[1]。

実験方法及び結果: 本研究では、体長 4.5 cm 以上の成体のマダガスカルゴキブリ (*Gromphadorhina portentosa*)を用いた。運動制御のため、腹部に密着する最大約 4 μm 厚の体表面刺激コンポーネントを構築した。生体と上部の接着を担うスチレン-エチレン-ブチレン-スチレン (SEBS) 接着フィルム(1 μm 厚)、金/パリレン配線フィルム(約 2 μm 厚)、生体との電氣的なコンタクトを担う金/SEBS 電極フィルム(約 1 μm 厚)の 3 層で構成される。金/SEBS フィルムは、ポリマー表面から部分的に露出した金属粒子により自己接着性導電界面を形成する[2]。

コンポーネントの昆虫表面への接着は、エタノールの揮発プロセスを活用した手法で行った。この手法と電極フィルムの自己接着性により、接着された電極は市販電極と比較し約 160 倍の接着エネルギーと高い電氣的耐久性を持つ。また、SEBS 接着フィルムで昆虫表面上に形成された飛び石構造(昆虫腹部の可動性を維持するため、接着部と非接着部を交互に形成する)[3]は、従来のレジンベース接着剤使用時の導電性保持率約 33%と比較し、約 78%と高い安定性を達成した(Fig. 1b)。

昆虫の体表面刺激による運動制御性を検証するため、1~8 V、42 Hz、デューティ比 50%のバイポーラ矩形波を 2 秒間印加した。2 V 以下の電圧では誘起される旋回運動は平均 20° 未満であった。一方で 3 V 以上では有意な旋回が確認され、6 V では各方向へ平均 70° の旋回が誘起され、標準偏差が許容範囲内であることから最適な電圧であることが示唆される(Fig. 1c)。また、直進方向への加速運動も実証され、刺激なしでは障害物乗り越えるに 5.0 秒以上かかったのに対し、刺激時には 1.5 秒と効率的な乗り越えが達成された。

[1] *npj Flex. Electron.* **9**, 25 (2025). [2] *Nature* **614**, 456–462 (2023). [3] *npj Flex. Electron.* **6**, 78 (2022).

【謝辞】 JSPS 科研費(JP22K21343, JP23K26077), JST 未来社会創造事業(JPMJMI21I1), 理研大学院生リサーチ・アソシエイト

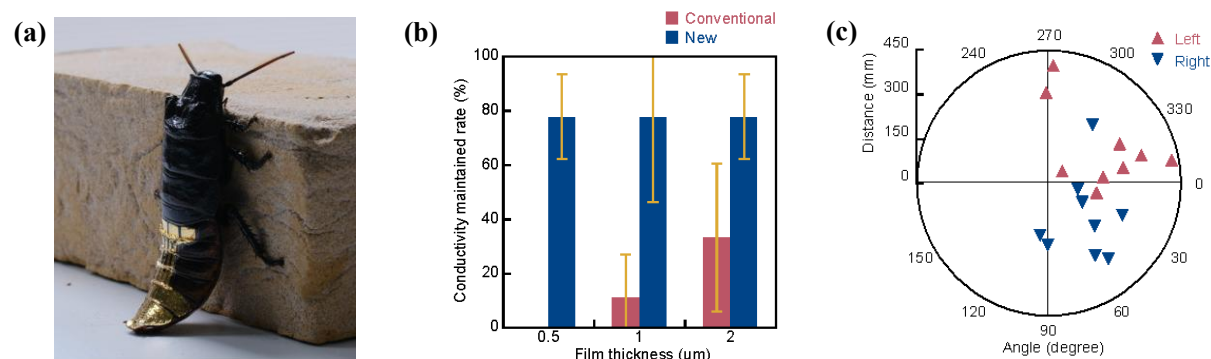


Fig. 1. Photograph of a cyborg insect with a body surface stimulation component. (b) Conductivity maintained rate by adhesive layer of wiring film attached to insect surface (Conventional: resin based, New: SEBS). (c) Polar graph of position transition from pre-stimulus to post-stimulus in 6V stimulation.