フレキシブルデバイスを用いたウェアラブルセンサ

横田　知之

東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻

講演概要：

有機エレクトロニクスは、有機材料自身の柔らかさや有機分子ならではの特異的な機能を生かすことで、生体・医療向けのデバイス応用が注目を集めている。我々の研究室では、特に有機エレクトロニクスを極限まで薄膜化することで、生体表面へ追従するフレキシブルセンサの開発に取り組んでいる。本講演では、1 μm という薄膜基板上に形成した様々な柔らかい集積回路や発光素子、有機太陽電池に関する技術紹介を行うとともに、ヘルスケア向け応用に関する進捗についても紹介する。

講師略歴

2008 年 3 月　東京大学工学部物理工学科卒業
2010 年 3 月　東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻修士課程修了
2013 年 3 月　東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了
2013 年 4 月
東京大学大学院工学系研究科 電気系工学専攻 特任助教
2016 年 4 月
東京大学工学系研究科 電気系工学専攻 講師
2019 年 7 月～2019 年 12 月
Google X 客員研究員
2019 年 6 月～現在
東京大学工学系研究科 電気系工学専攻 准教授

第3回使えるセンサシンポジウム

フレキシブルデバイスを用いたウェアラブルセンサ

東京大学大学院工学系研究科

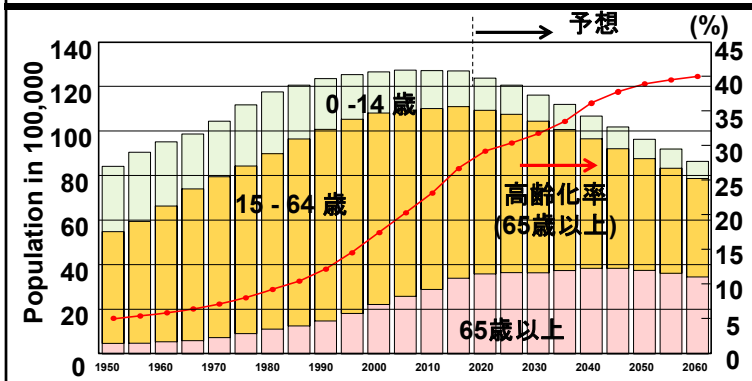
横田 知之

イノベーション創出へのビジョン

いつでも、どこでも、誰もが簡単に、正確に生体情報をモニタリングできる技術によって、安心・安全で快適な社会を築く。

長期間にわたる生体情報計測

超高齢社会の到来



日本の高齢化

超高齢社会：2007年

高齢化率　28.4%　(2019年)

世界の超高齢　(Moody' s)

13ヵ国　(2020年まで)

34ヵ国　(2030年まで)

出典　：平成28年版高齢社会白書（概要版）　内閣府・国立社会保障・人口問題研究所資料
http://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/index-w.html

皮膚から測れる生体情報

電気信号

脳波：発作、てんかん、頭部外傷、めまい、頭痛、脳腫瘍、睡眠障害

心電：循環器疾患

筋電：神経筋疾患、運動制御、運動学

化学信号

グルコース：糖尿病

乳酸：筋肉疲労

ナトリウムイオン：脱水症状

塩化イオン：嚢胞性線維症

物理信号

歪み：体動、呼吸数

圧力：眼圧、血圧、心拍

温度：体温

光：脈波、血管位置、血圧、血中酸素濃度、

音：心音、嚥下、声

ウエアラブルデバイスの用途の広がり

乳幼児向け

- 体温・呼吸
- 病気の早期診断

健常者向け

- 健康管理
- 運動における活動量
- エンターテインメント

高齢者向け

- 体調モニタ
- 嚥下状態検出
- 早期検診

病気のモニタリング

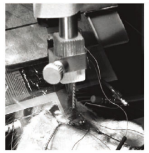
- 睡眠障害
- 生活習慣病
- 血糖値常時モニタ
- ストレス検出

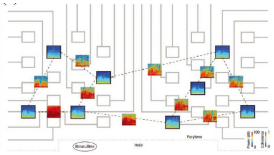
産業分野への応用

- 居眠り運転防止
- 音声による作業者支援
- 健康管理

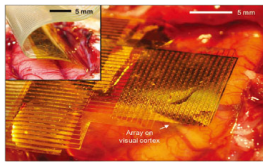
フレキシブルデバイスの生体・医療用応用

フレキシブル電極





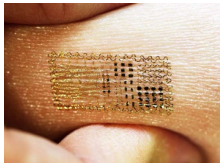
George G. Malliaras, et al, Adv. Mater., 23, H268 (2011).



J. Viventi, J. A. Rogers et al, Nature Neuroscience, 14, 1599 (2011).

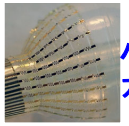
高感度圧力センサ表皮電子デバイス

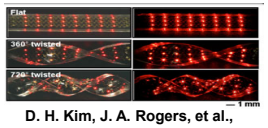
S.C.B. Mannsfeld, Z. Bao, et al., Nature Materials (2010).



D. H. Kim, J. A. Rogers, et al., Science 333, 6044 (2011).

バルーンカテーテル

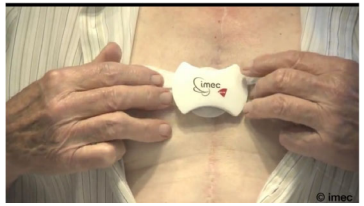




D. H. Kim, J. A. Rogers, et al., Nature Materials 10, 316 (2011).

絆創膏型　心電計測システム

Proceedings of the 2nd Conference on Wireless Health, 15 (2011).



IMEC & Holst Center:

心電信号をBluetoothでデーター転送

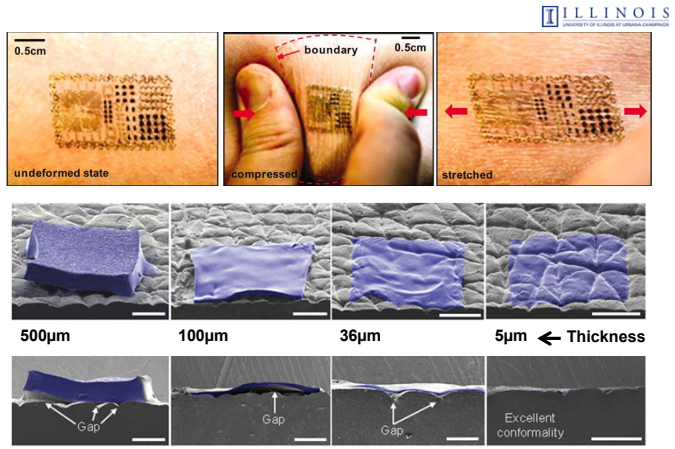
バイタル・コネクト
&オムロン ヘルスケア

In 2014

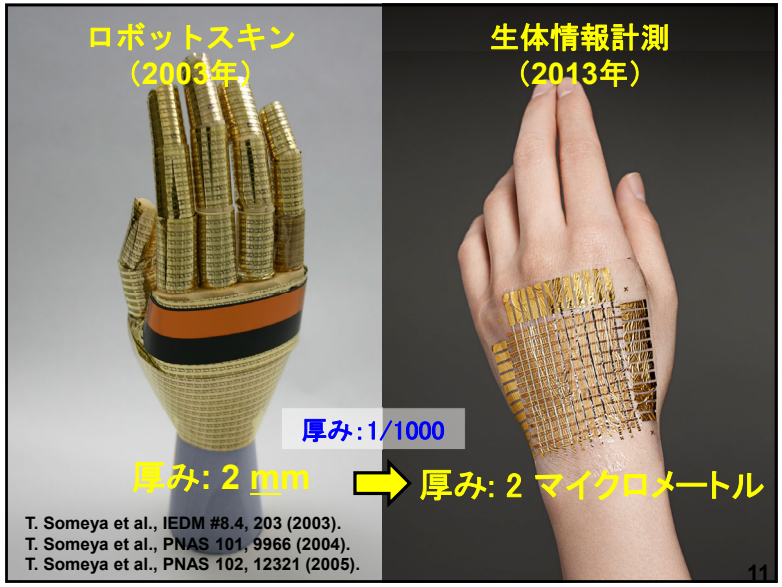
John A Rogers教授の極薄センサ

Dae-Hyeong Kim, John A. Rogers, et al., Science 333, 838 (2011).

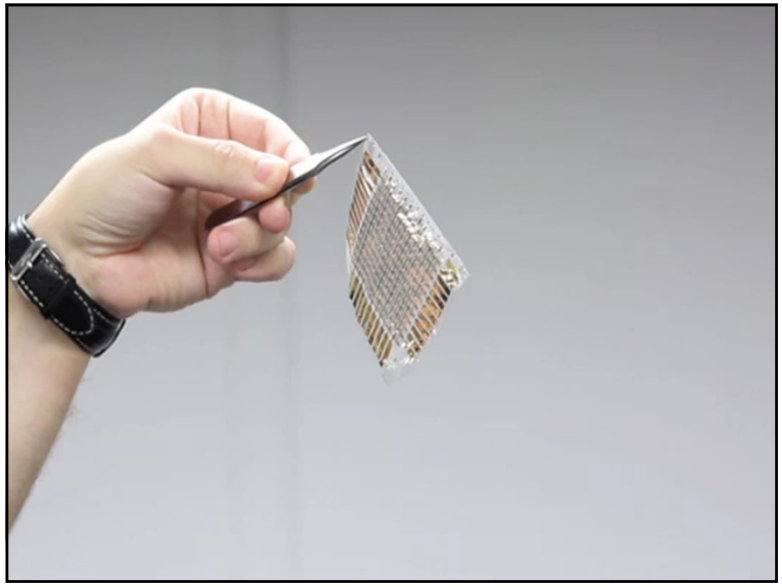
表皮電子センサ



Dae-Hyeong Kim, John A. Rogers, et al., Science 333, 838 (2011).



スキンエレクトロニクス

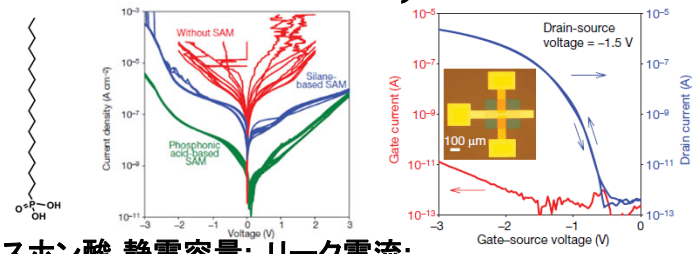


自己組織化単分子膜(SAM)

- 高い静電容量:~700 nF/cm^2
- 溶液プロセス
- 低温プロセス: ~100 ºC
- 均質な膜形成

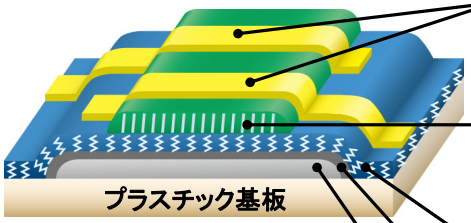
大面積フレキシブル エレクトロニクス

Sekitani et al., *Science* 326,1 516(2010).
Sekitani *Nature Mater.*2896 (2010).
Ishida et al., *ISSCC* (2009).

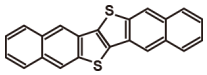


ホスホン酸 静電容量: リーク電流:
700 nF/cm^2 3 μA/cm^2@ 3 V Klauk et al., *Nature*, 445, 745 (2007).

有機トランジスタの構造

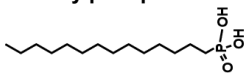


DNTT



T. Yamamoto et al., *J. Am. Chem. Soc.* 129, 2224 (2007).

n-tetradecylphosphonic acid



K. Fukuda et al., *APL*, 96, 203301 (2009).

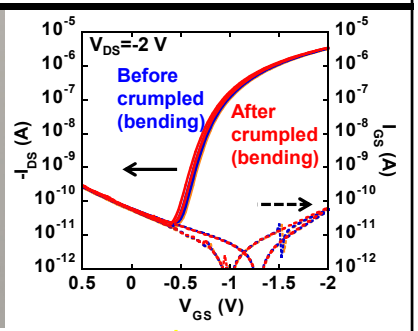
ソース･ドレイン電極
金: 100 nm

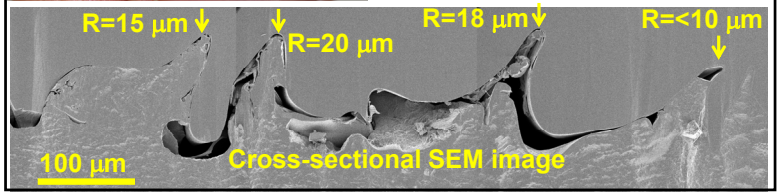
有機半導体
DNTT: 30 nm

絶縁膜
SAMs: ~2 nm
phosphonic acids (C=14)
AlO_x : 5~20 nm
陽極酸化 or 酸素プラズマ

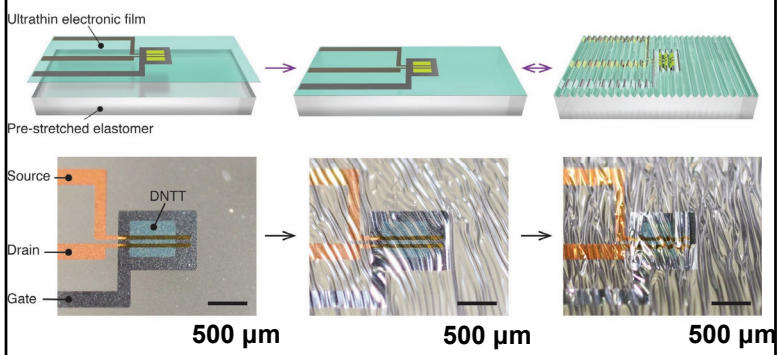
ゲート電極
Aluminum: ~20 nm

機械的特性



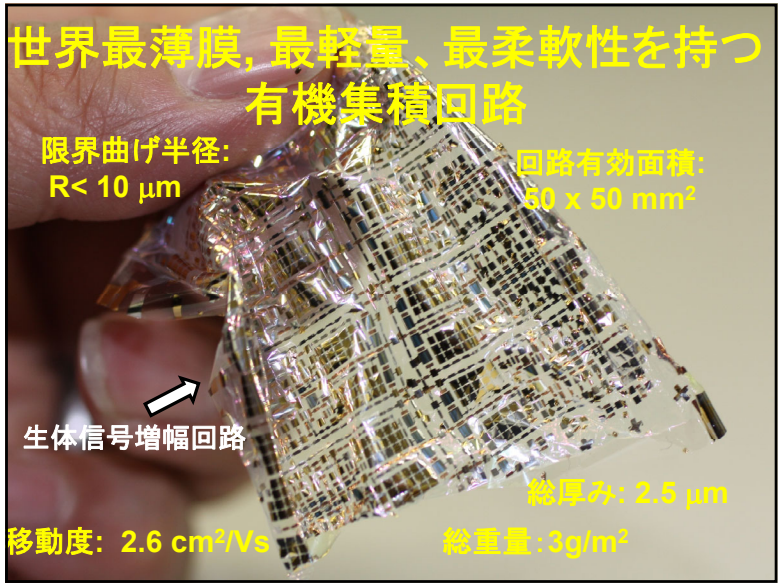


ストレッチャブルデバイス

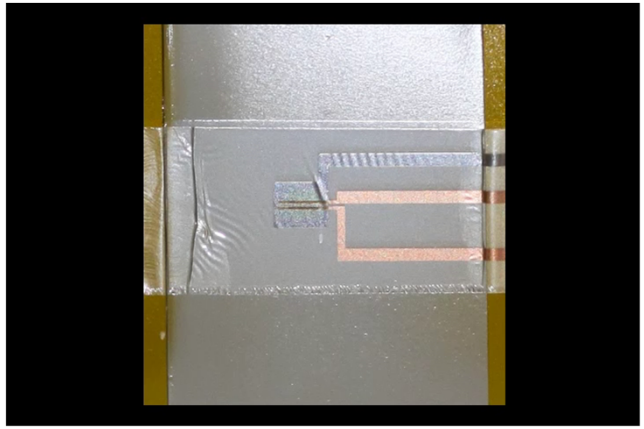


ゴム基板上に貼ることで、ストレッチャブルデバイスを実現

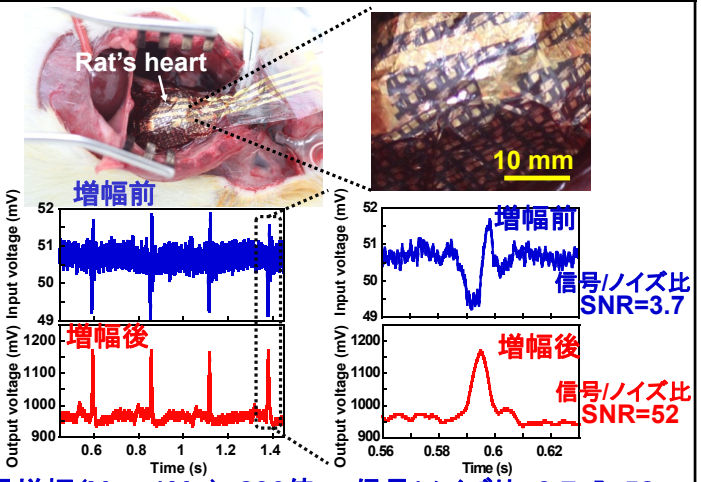
世界最薄膜, 最軽量、最柔軟性を持つ有機集積回路



伸縮性試験の様子

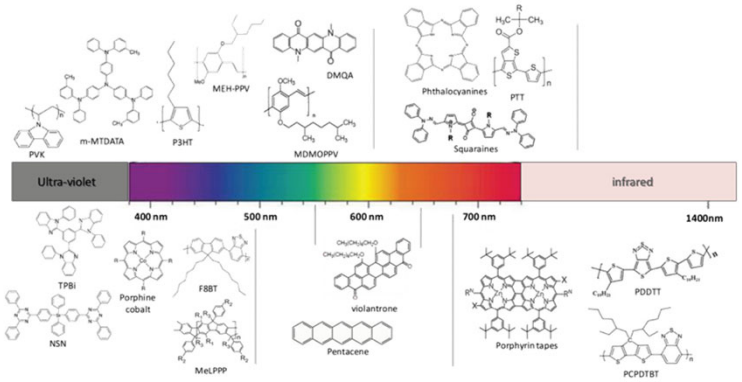


有機アンプによる微弱生体信号の増幅



信号増幅(V_{OUT} / V_{IN}):230倍、 信号/ノイズ比:3.7 ➔ 52

有機材料

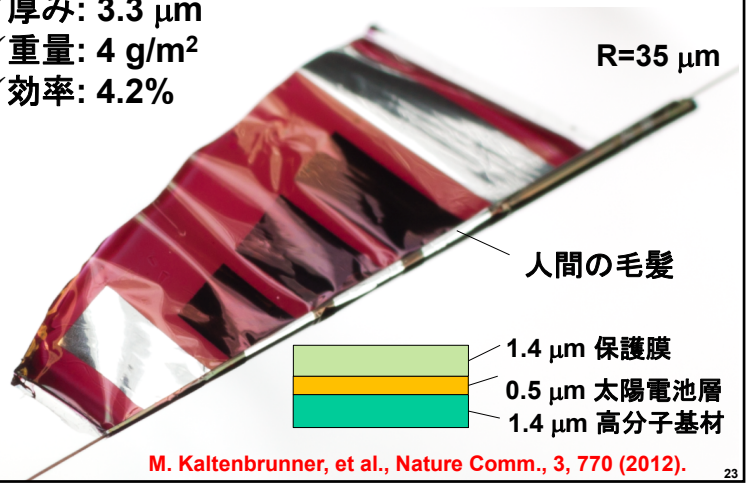


Kang-Jun Baeg *et al., Adv. Mater.* (2013)

材料によって、吸収・発光波長などを調整可能

世界最軽量有機太陽電池

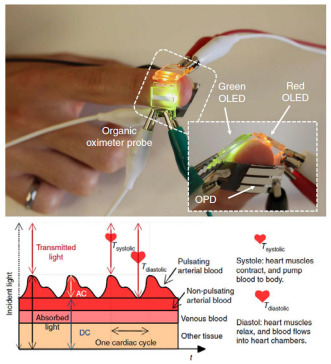
✓厚み: 3.3 μm
✓重量: 4 g/m²
✓効率: 4.2%



M. Kaltenbrunner, et al., Nature Comm., 3, 770 (2012).

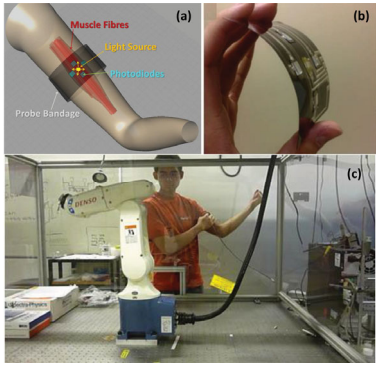
有機光デバイスを用いたセンサ

血中酸素濃度計



C. M. Lochner, et al., Nature Comm 5, 5745 (2014).

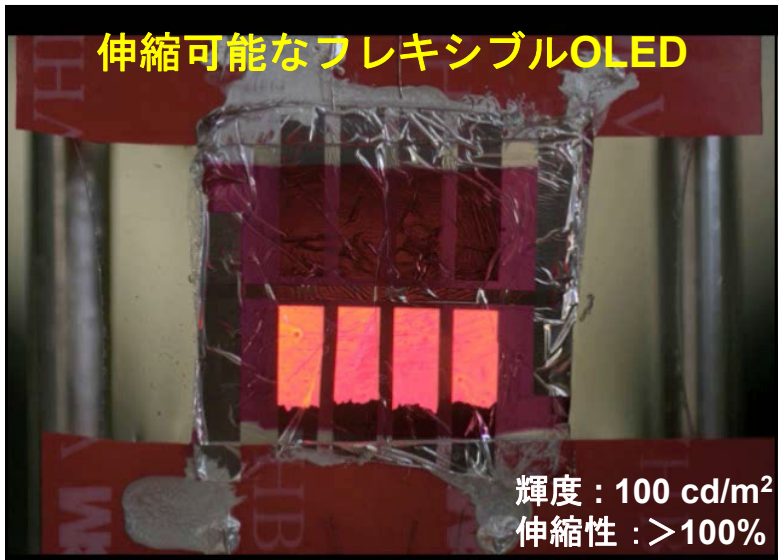
筋肉収縮検知センサ



A. K. Bansal, et al., Adv. Mater. (2014).
DOI: 10.1002/adma.201403560

非侵襲に生体信号を検知可能

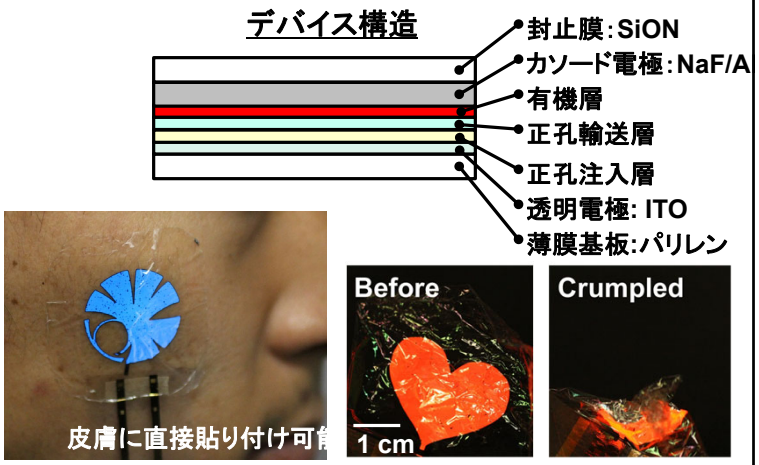
伸縮可能なフレキシブルOLED



輝度：100 cd/m²
伸縮性 ：＞100%

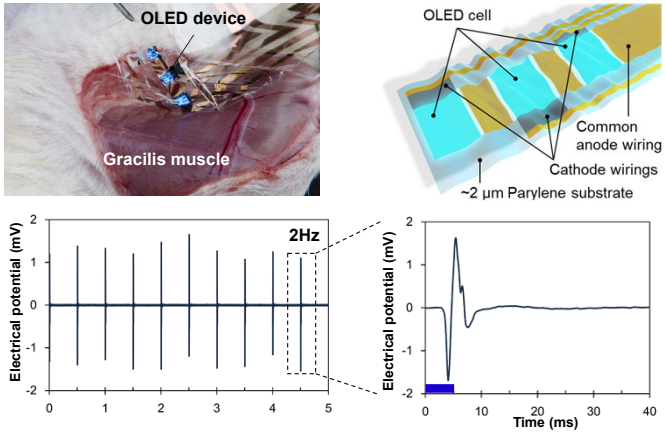
M. S. White. et al.. Nature Photonics 7. 811 (2013)

大気安定なウルトラフレキシブルOLED



T. Yokota, et al., Science Advances, 2, e1501856 (2016).

薄膜OLEDを用いた光刺激

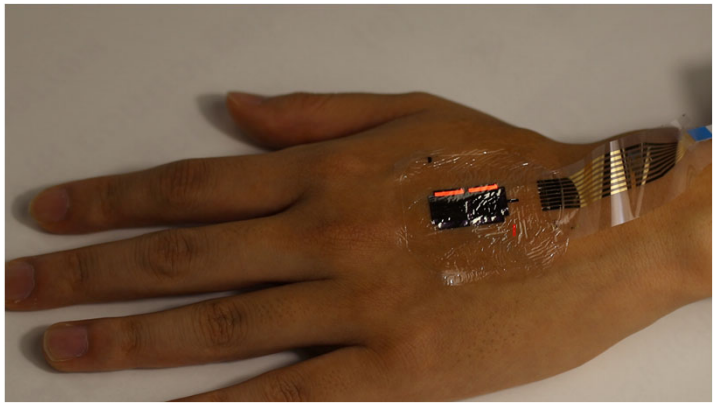


D. Kim et. al Proc Natl Acad Sci U S A. 117, 21138 (2020).

薄膜OLEDを用いた神経の光刺激に成功

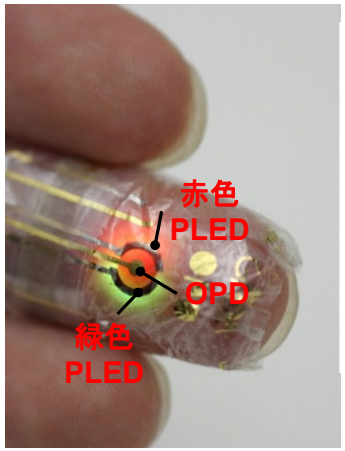
27

皮膚に貼りつけた７セグディスプレイ

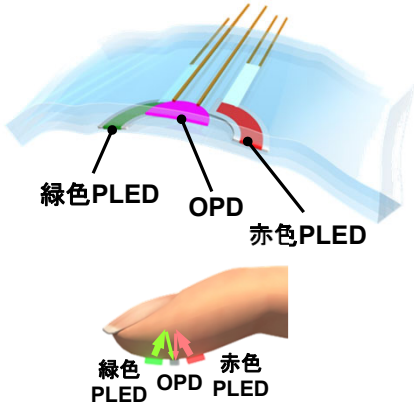


皮膚の上で、数字とアルファベットを表示

超柔軟血中酸素濃度計

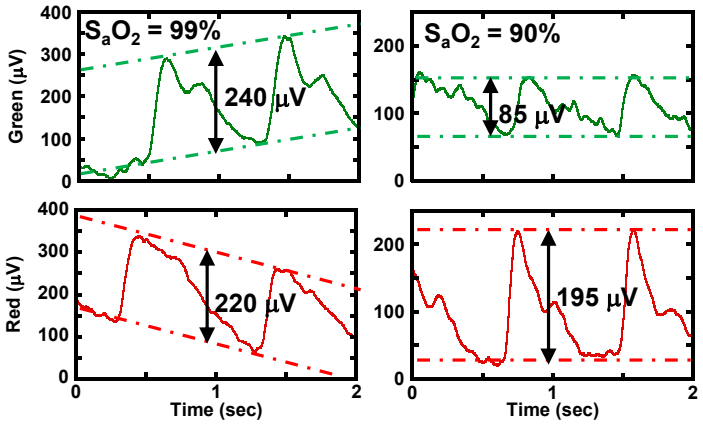


デバイス構造図



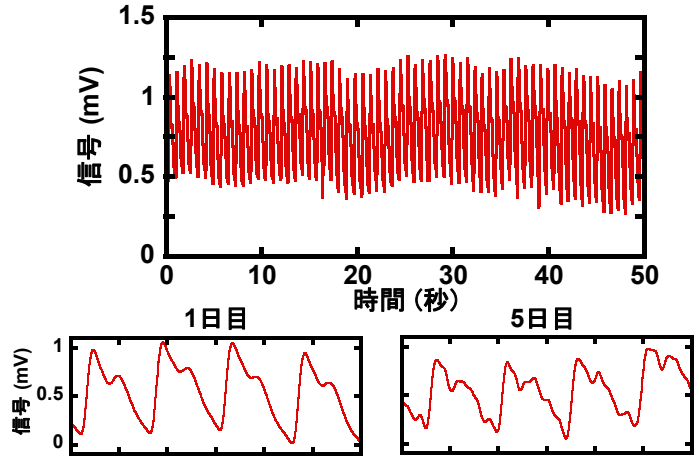
3層のレイヤーを集積化することで実現

超柔軟血中酸素濃度計



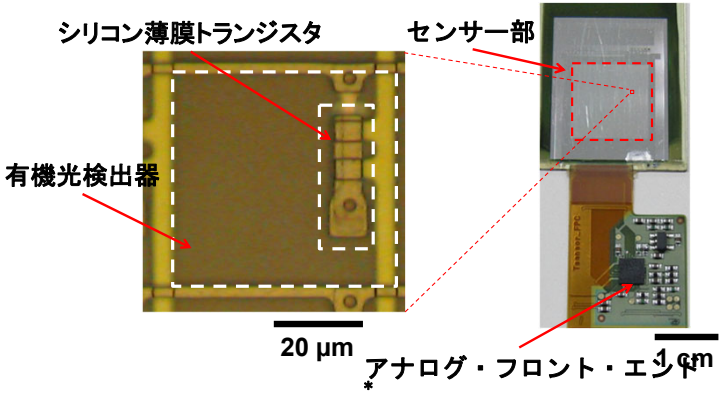
血中酸素濃度の計測

脈拍の安定測定



5日間、脈拍の安定測定に成功

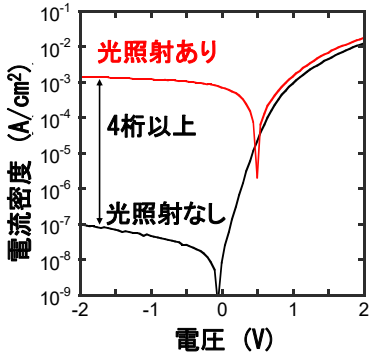
シート型イメージセンサーの構造

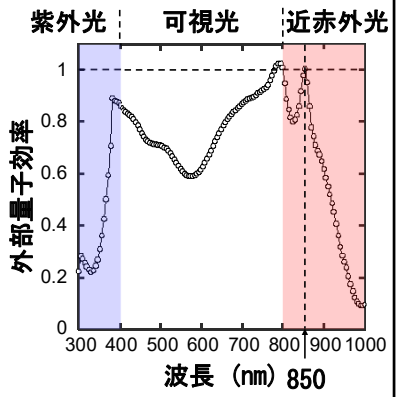


シリコン薄膜トランジスタと有機光検出器の集積化

*アナログ・フロント・エンド：センサー の信号を読み取るための半

イメージセンサーの近赤外光応答性



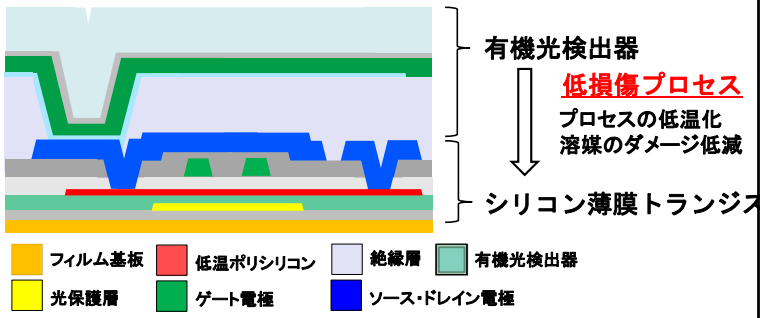


低い暗電流により
オンオフ比：4桁以上

850 nmに高い光応答性
外部量子効率：約 1

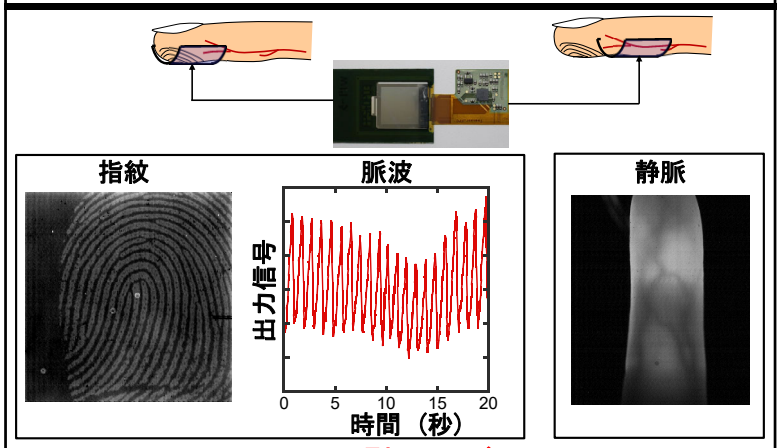
イメージセンサーの断面構造

シート型イメージセンサーの断面図



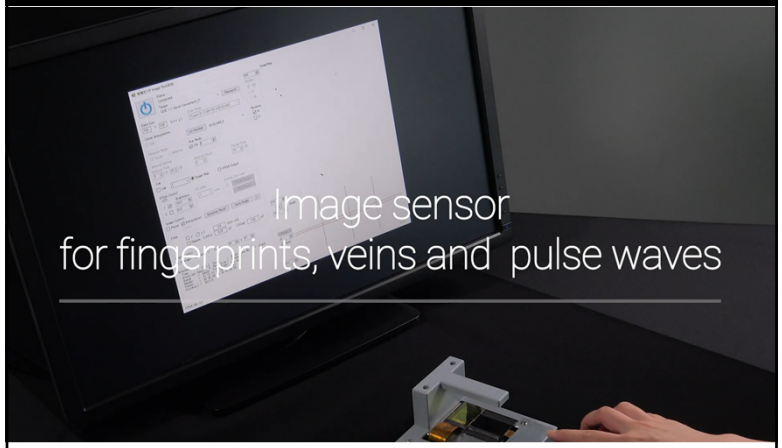
高効率の有機光検出器と高速のシリコン薄膜トランジス
低損傷プロセスで世界で初めて集積化

生体イメージング (指紋・脈波・静脈)



同一のシート型イメージセンサーで
指紋と静脈の撮像、脈波の計測が可能

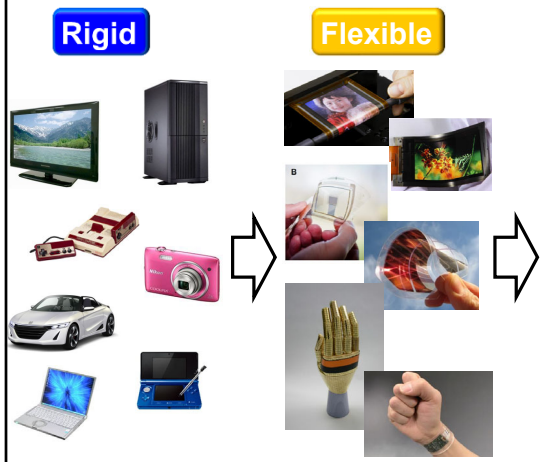
イメージセンサのデモ動画



皮膚貼り付け型ナノメッシュ電極

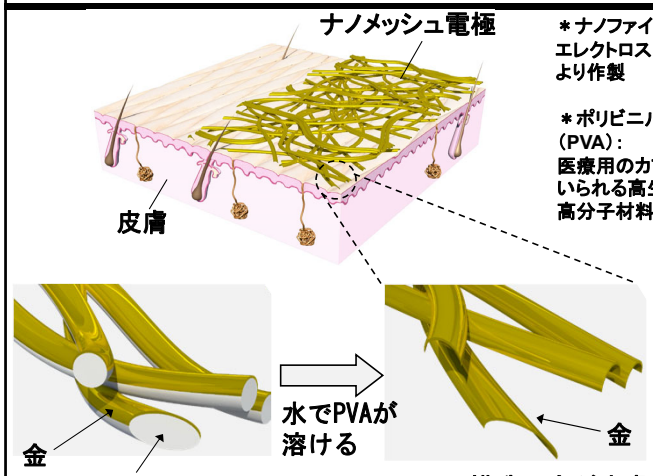
39

次世代のエレクトロニクス



What is next?

ナノメッシュ電極の貼り付け方法

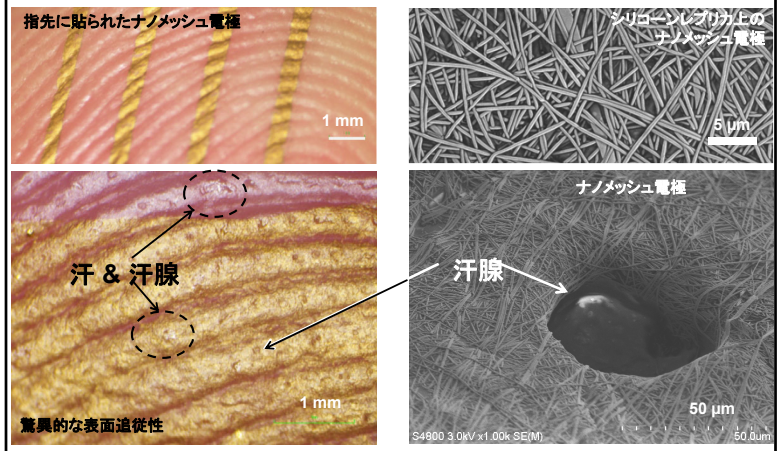


＊ナノファイバー:
エレクトロスピニング法により作製

＊ポリビニルアルコール（PVA）:
医療用のカプセルにも用いられる高生体適合性の高分子材料

PVAナノファイバー＊　ナノメッシュ構造の金が皮膚に貼り付く

指に形成されたナノメッシュ電極



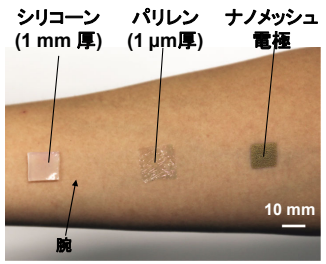
水蒸気透過性の比較

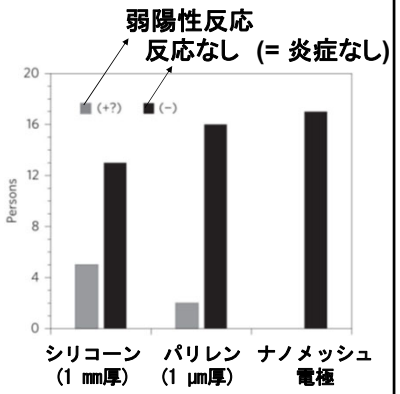
材料	水蒸気透過性	
	%	mg/h
＜リファレンス＞ ボトル瓶 開放	100	5.8
ナノメッシュ	96.5	5.6
シリコーン （10 μm厚）	77.5	4.5
PET （1 μm厚）	4.6	0.27

✓ナノメッシュが他材料に比べて高い水蒸気透過性を達成

ナノメッシュ電極の生体適合性評価

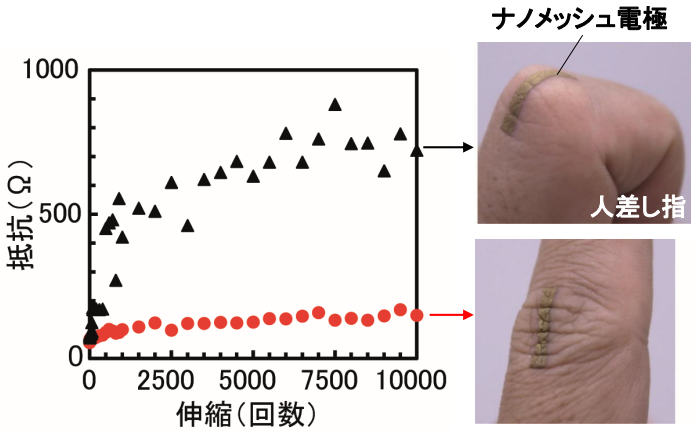
3種類のサンプルを腕に貼り付け
1週間連続





皮膚刺激試験：腕に各材料を1週間貼り付けた後、装着部の皮膚症状を、皮膚科専門医二人が国際基準に準じて判定した。

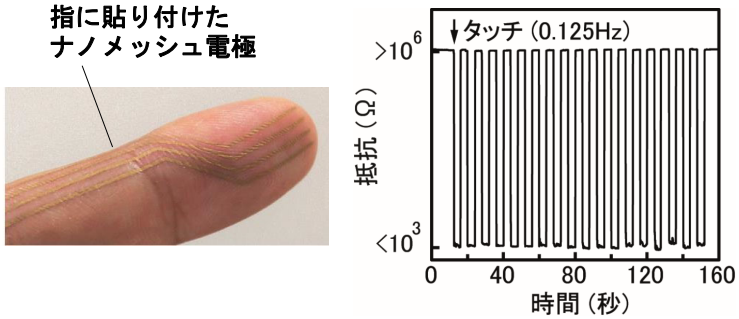
装着したナノメッシュ電極の伸縮性試験



✓ 1万回の伸縮でも断線することなく抵抗値を維持

応用例１

■タッチセンサ：金属に触れたり、離したりしたときの抵抗値を計測



✓ 他に、温度や圧力センサと組み合わせて計測した

45

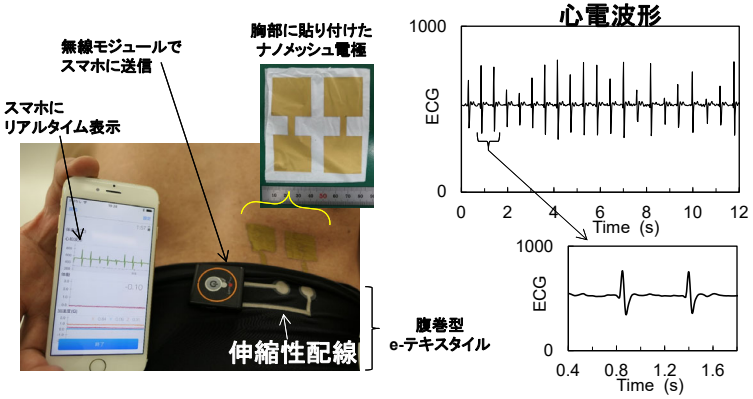
応用例２

■バイタルセンシング：腕にナノメッシュ電極を貼り付けて筋電位を計測

✓ 一般的に用いられるゲル電極と遜色がなく計測できた

46

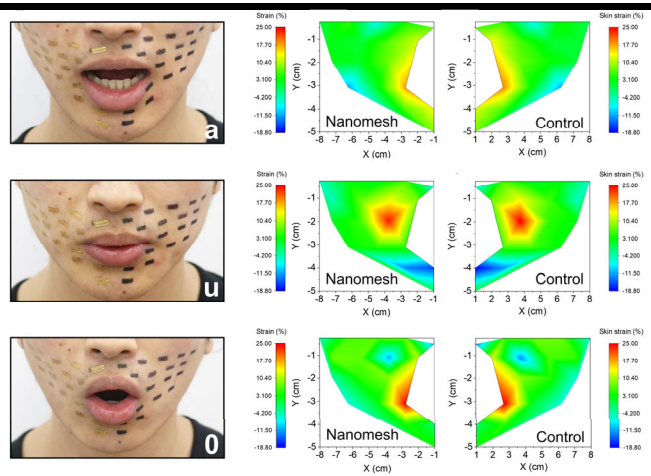
ナノメッシュ電極による心電波形計測



47

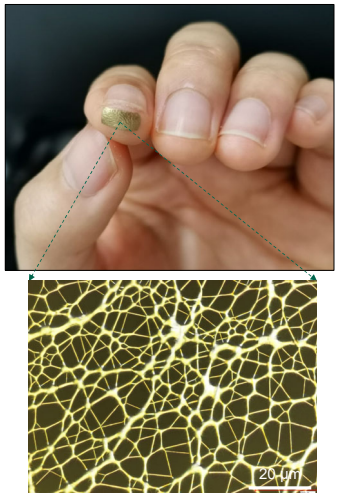
48

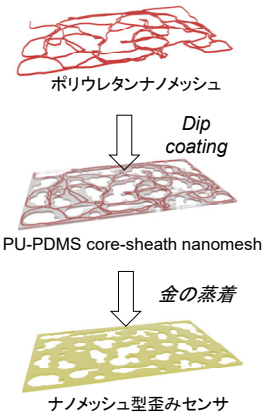
顔の歪みのマッピング



顔の動きに影響を与えずに歪のマッピングに成功

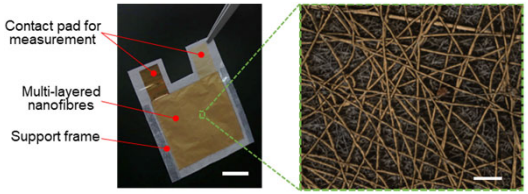
皮膚の動きに干渉しないひずみセンサ

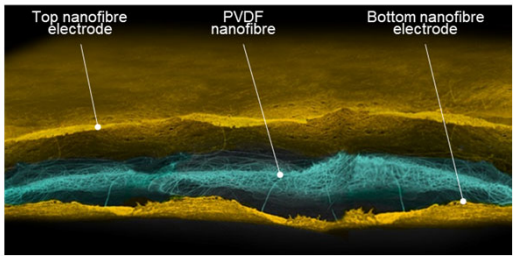




Y. Wang et. al Science Advances, 6 eabb7043 (2020)

ナノメッシュ型音響センサ



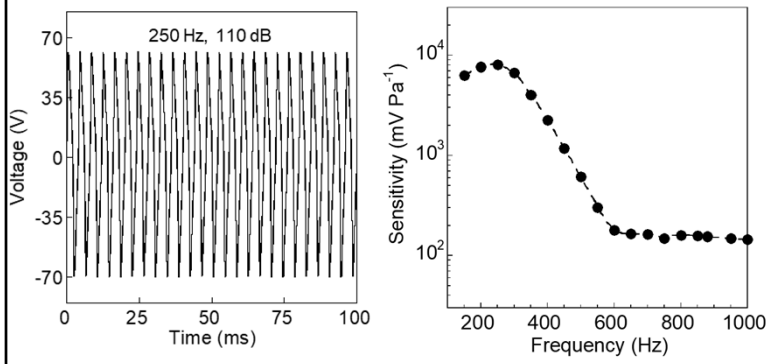


M.O.G. Nayeem et. al Proc Natl Acad Sci U S A. 117, 7063 (2020).

52

音響センサの電気特性

出力電圧　　周波数特性



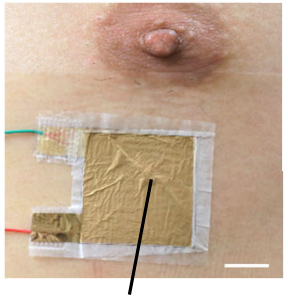
世界最高感度(10050 mV/Pa)を実現

53

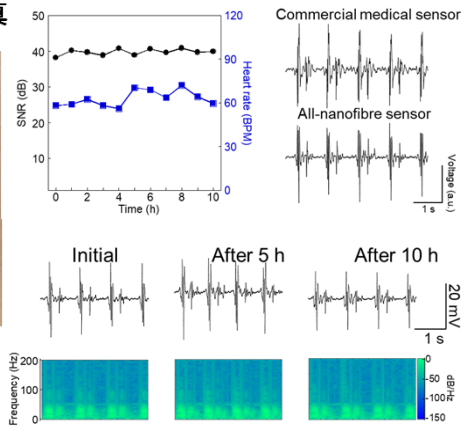
学際共同研究

心音の長期計測

皮膚に貼ったデバイス写真



ナノファイバー型
音響センサ



10時間以上の長期連続計測に成功

54

まとめ

ウルトラフレキシブル有機トランジスタの作製

- 低電圧駆動・高歩留まり：5 V以下、100%
- タクティルセンサへの応用
- 有機増幅回路への応用：生体信号の増幅

フレキシブルイメージセンサの開発

- 高解像度と高速動作を実現
- 指紋や静脈の撮像に成功

通気性のあるスキンセンサの開発

- 心電図の測定
- 心音・顔の歪みの測定