

汎用プラスチック極細繊維膜からなる 発電型圧力センサ



京都工芸繊維大学 繊維学系

助教 石井 佑弥

- 自己紹介
- 新技術の概要
- 研究背景①～②
- 新技術の内容①～⑪
- 新技術の特徴, 想定される用途
- 実用化に向けた課題, 企業への期待
- 本技術に関する知的財産権
- お問い合わせ先

自己紹介

石井 佑弥（イシイ ユウヤ）

現職：国立大学法人京都工芸繊維大学 繊維学系 助教



[学歴]

- 1983年9月 福岡県うきは市生まれ
- 2003年4月 京都大学工学部電気電子工学科
～2007年3月
- 2007年4月 北陸先端科学技術大学院大学マテリアルサイエンス研究科
～2012年3月 博士課程前期・後期 博士(マテリアルサイエンス) 取得

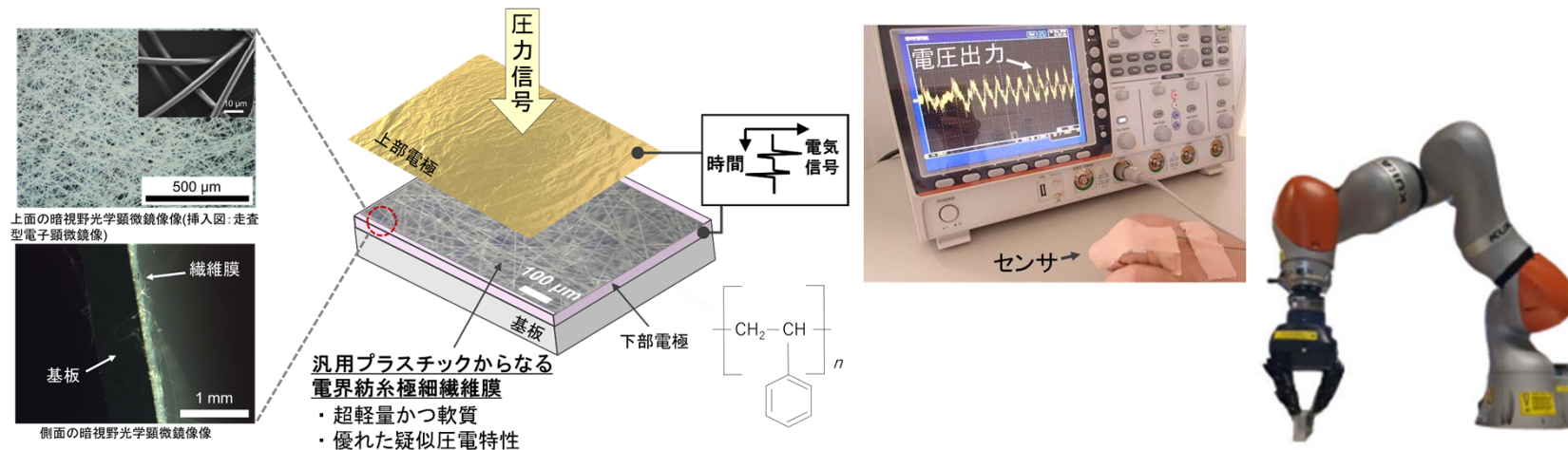
[職歴]

- 2009年～2012年 日本学術振興会特別研究員(DC1)
- 2012年4月 豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系 助教
～2018年1月
- 2018年2月 京都工芸繊維大学
～2018年3月 大学戦略推進機構系グローバルエクセレンス 助教
- 2019年6月 シンガポール国立大学, 客員研究員
～2019年11月
- 2018年4月～現在 京都工芸繊維大学 繊維学系 助教
- 2018年2月～現在 文部科学省卓越研究員事業 卓越研究員



スマートテキスタイル研究室ホームページ: <http://www.fibro.kit.ac.jp/lab/ishii/index.html>

- ・ フィルムでは圧電性を示さない安価な汎用プラスチックからなる電界紡糸極細繊維膜を用いた極軽量かつフレキシブルな発電型圧力センサを開発
- ・ 当該繊維膜の製造には、ポーリングなどの後処理を要しないため、製造工程の省工程化や省エネルギー化が期待される



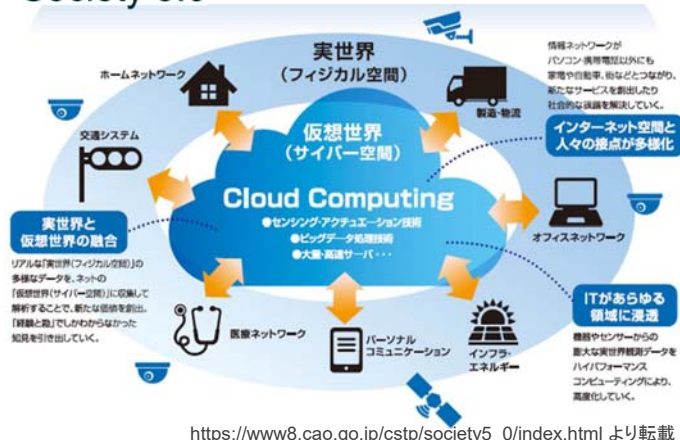
T.S. Ramadoss et al. *Nanomaterials*, **11**, 1320 (2021)

研究背景①: センサへの需要と従来技術との比較



京都工芸繊維大学
KYOTO INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Internet of Things (IoT)
Society 5.0

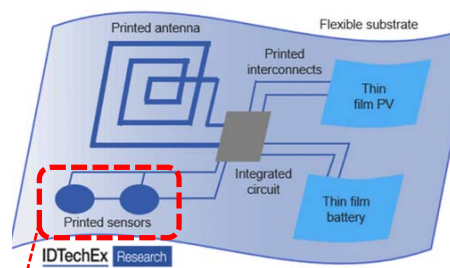


- 膨大量のセンサ回路が必要

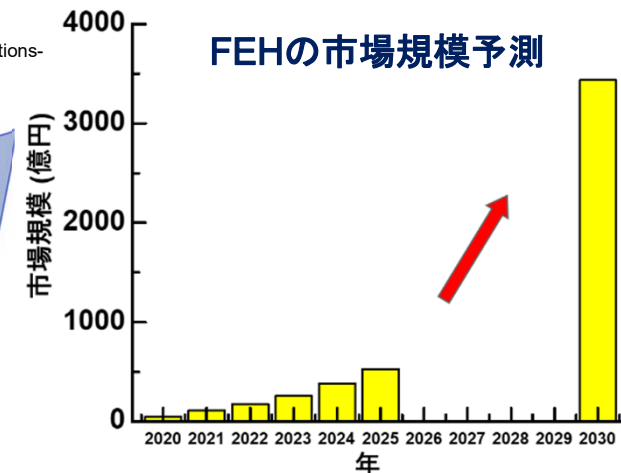
フレキシブルなセンサ回路:
フレキシブル・ハイブリッド・エレクトロニクス(FHE)

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings

IDTechEx社: <https://www.idtechex.com/ja/research-report/flexible-hybrid-electronics-2020-2030-applications-challenges-innovations-and-forecasts/732> より転載



- 無給電動作もしくは超低消費電力のセンサが必須



IDTechEx社, 「フレキシブル・ハイブリッド・エレクトロニクス 2020-2030年: 用途, 課題, イノベーションおよび見通し」, 2020年9月) (1US\$ = 104円として計算)

代表的な圧電材料 (無給電動作が可能なセンサ材料)

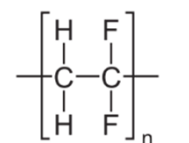
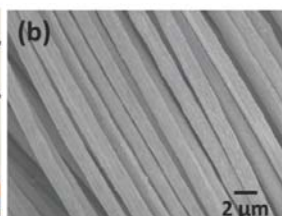
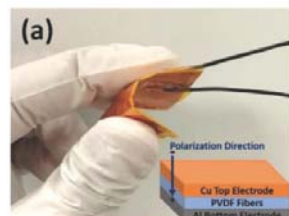
	代表的な材料	動作メカニズム	圧電定数 [pC/N or pm/V]	ヤング率, E [Pa]	フレキシブル, 軽量, 柔らかさ	材料の価格	後処理
セラミックス系 フィルム	PZT	分極	100—700	50 G ≤ E ≤ 150 G	△	○	ポーリング
ポリマーフィルム (圧電ポリマー)	PVDF, P(VDF-TrFE), PLLA	分極, 光学活性型	≤ 53	1 G ≤ E ≤ 30 G	○	△	ポーリング, 加熱延伸
多孔性ポリマー エレクトレット	PP	強誘電エレクトレット	≤ 1400	250 k ≤ E ≤ 10 M	○	◎	ポーリング
電界紡糸ファイバ (圧電ポリマー)	PVDF, P(VDF-TrFE), PLLA	分極, 摩擦帯電	≤ 1065	230 M ≤ E ≤ 500 M	◎	△	基本的に不要
電界紡糸ファイバ (非圧電ポリマー)	ポリスチレン	???	???	???	◎	◎	不要

- 圧電ポリマー以外の電界紡糸ファイバ膜の圧電特性の検討事例はなかった

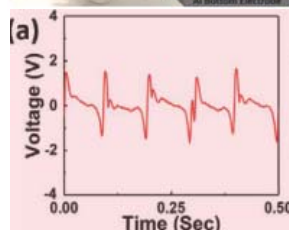
研究背景②: 先行例との比較

先行例

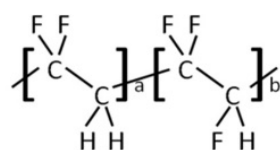
フィルムでも圧電性を示す圧電ポリマー



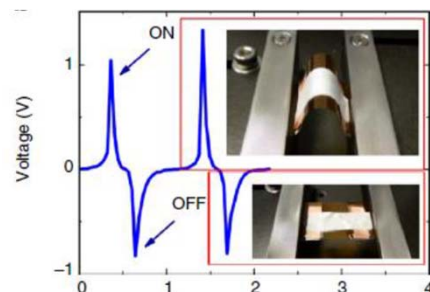
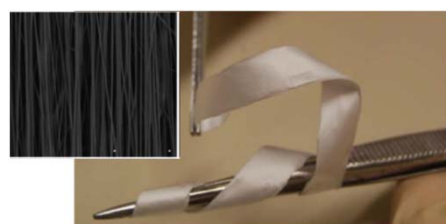
Poly(vinylidene fluoride) (PVDF)



Y.M. Yousry et al.
Adv. Func. Mater.
30, 1910592 (2020)



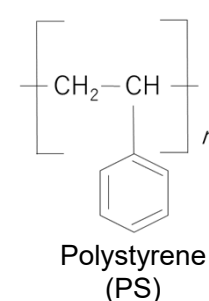
Poly(vinylidene fluoride-co-trifluoroethylene)
[PVDF-TrFE]



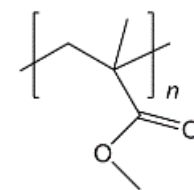
L.Persano et al. *Nat. Commun.* **4**, 1633 (2013)

本研究

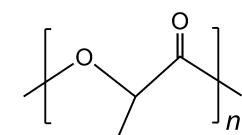
フィルムでは圧電性を示さない**非圧電ポリマー**



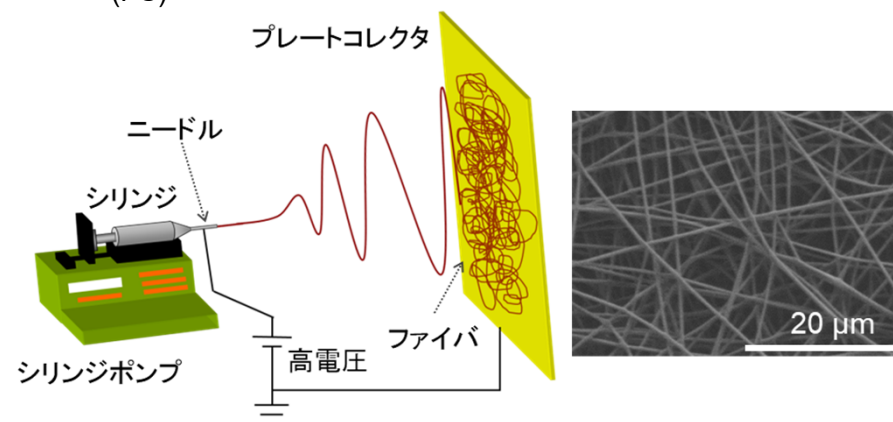
Polystyrene (PS)



Poly(methyl methacrylate) (PMMA)



Poly(DL-lactic acid) (PDLLA)



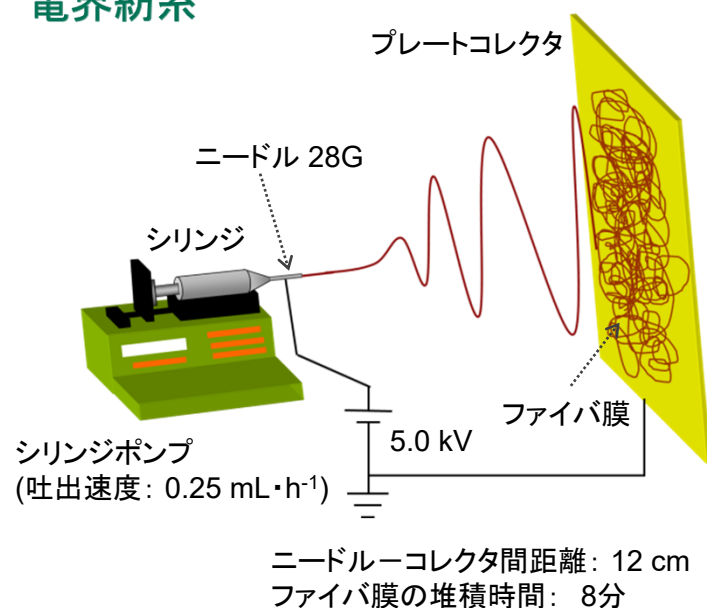
非圧電ポリマーからなる電界紡糸極細繊維膜の疑似圧電特性を発見(世界初)

新技術の内容①: 材料およびファイバ膜の作製条件

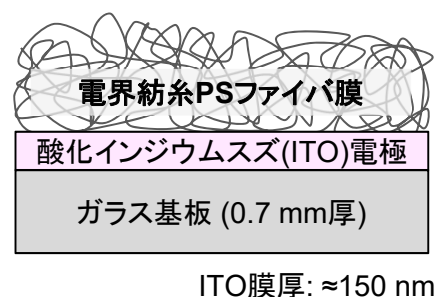
材料 Atactic polystyrene (PS; $M_w \approx 280,000$, Sigma Aldrich)

試料溶液 30 wt% aPS in *N,N*-dimethylformamide (DMF)

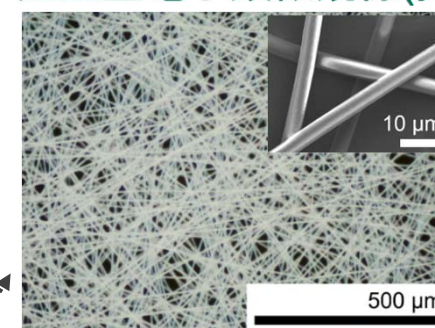
電界紡糸



サンプル概説図(断面)

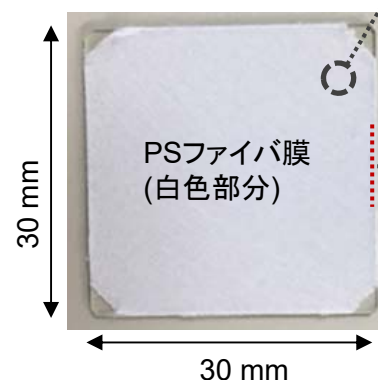


上面の光学顕微鏡像(暗視野) 走査型電子顕微鏡像(挿入図)

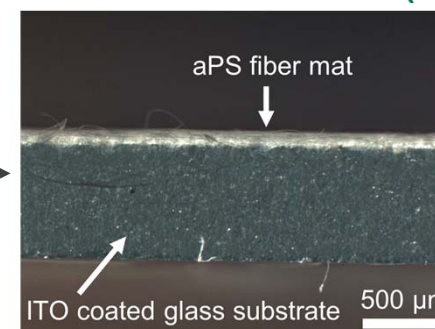


平均直径: $3.88 \pm 0.12 \mu\text{m}$

サンプルの外観



断面の光学顕微鏡像(暗視野)



平均膜厚 $\approx 130 \mu\text{m}$

新技術の内容②: 疑似正圧電特性

評価方法

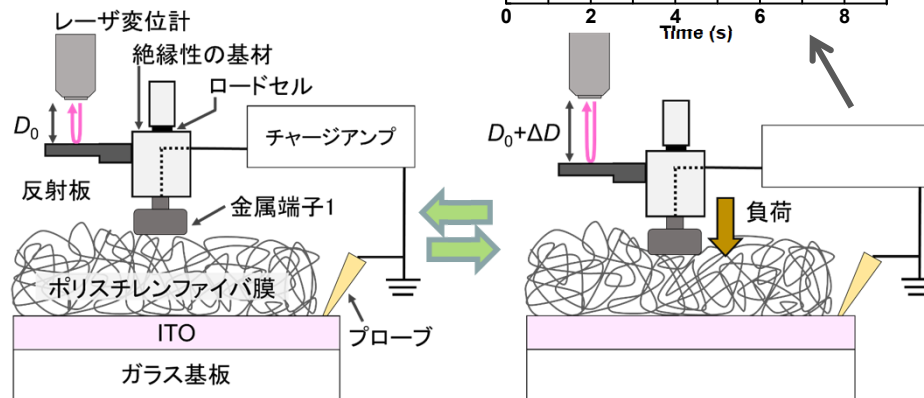
圧電特性評価装置
(PF-02B, リードテクノ株式会社)

[測定条件]

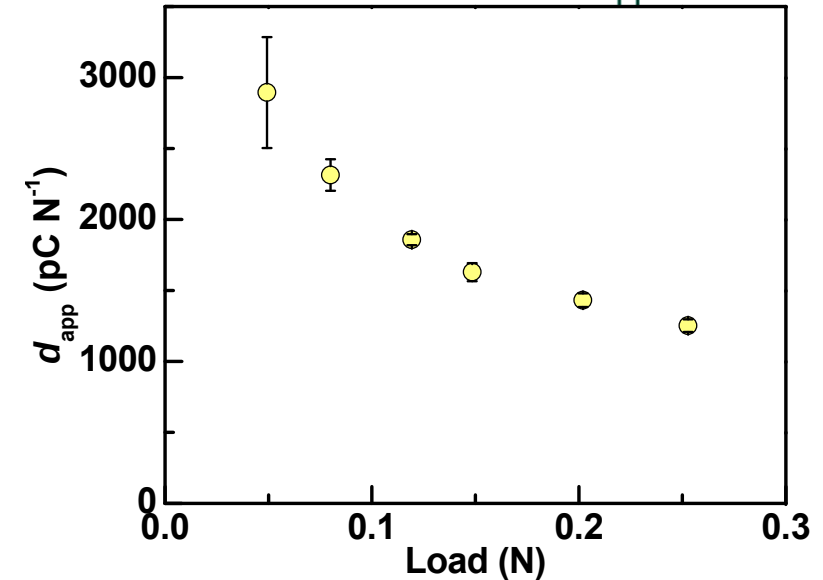
プレロード: 0.01 N

測定周期: 2.9 s,

金属端子の直径: 8 mm



異なる負荷を印加したときの見かけの圧電定数(d_{app})



- 非圧電ポリマーからなる電界紡糸ファイバ膜が疑似正圧電挙動を発現
⇒ 圧力センサやエネルギーハーベスタへ応用可能
- 高度の見かけの圧電定数 d_{app} :
1250–2890 pC/N (印加負荷: 0.05–0.25 N)

Cf. Film(PLLA, PVDF, or PVDF-TrFE): d_{33} , d_{31} , or $d_{14} \leq 40$ pC/N^{*}, PZT film: $d_{33} < 100$ –700 pC/N^{*}

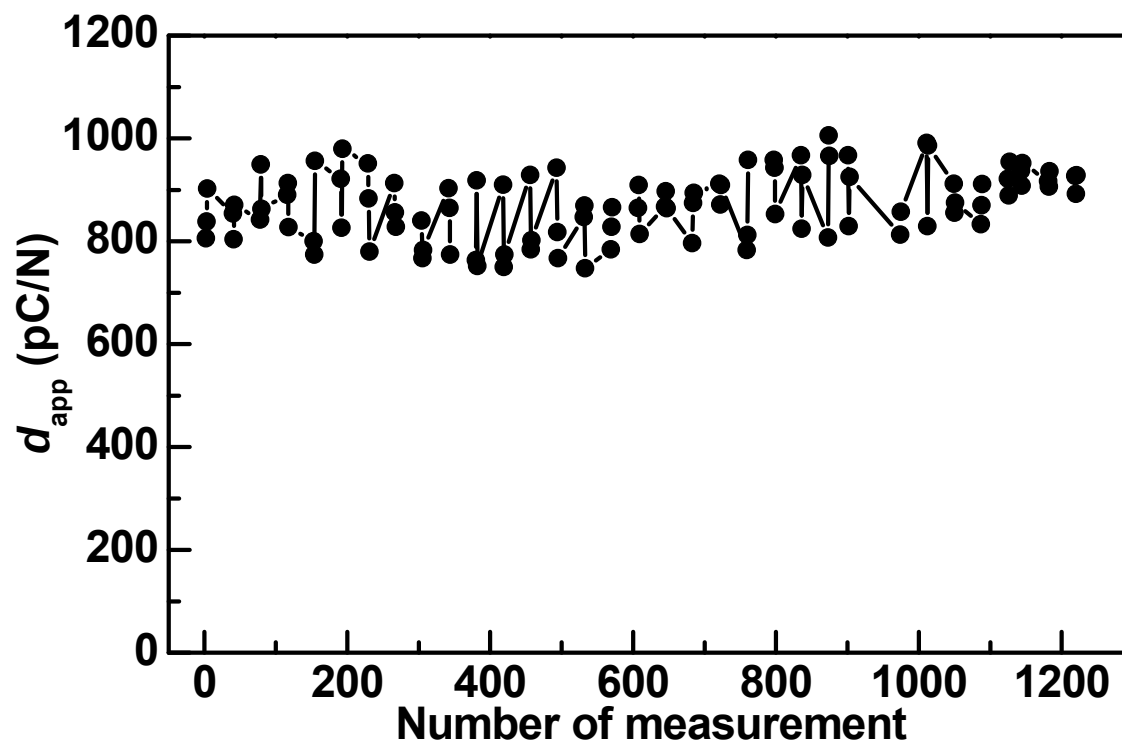
^{*} H. Wu et al. Adv. Mater. 28 9881 (2016). K Omote et al. J. Appl. Phys. 81 2760 (1997). K. Imoto et al. Jpn. J. Appl. Phys. 48 09KE06 (2009).

Y. Ishii et al. *Smart Mater. Struct.* **28**, 08LT02 (2019).

Y. Ishii et al. *Macromol. Rapid Commun.* **41**, 2000218 (2020).

新技術の内容③: 繰り返し測定の実験結果

繰り返し負荷を印加したときの見かけの圧電 d 定数(d_{app})



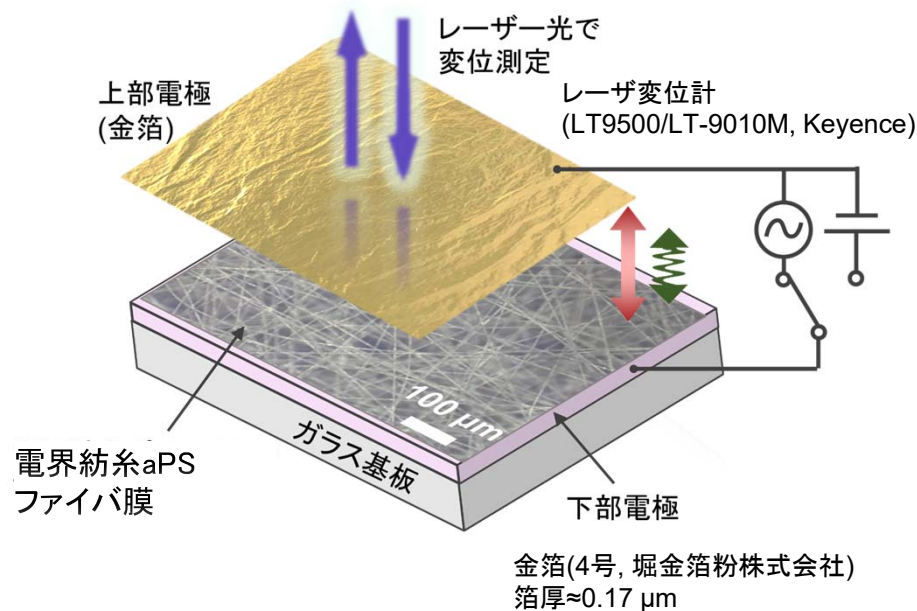
測定条件

- Preload: 0.01 N
- 繰り返し印加負荷: 0.15 N
- 負荷の印加周期: 約2.9 s
- 総測定時間: 約68分
- 温度: 23.8—24.9 °C
- 相対湿度: 37.8—38.5 %
- 端子の直径: 8 mm

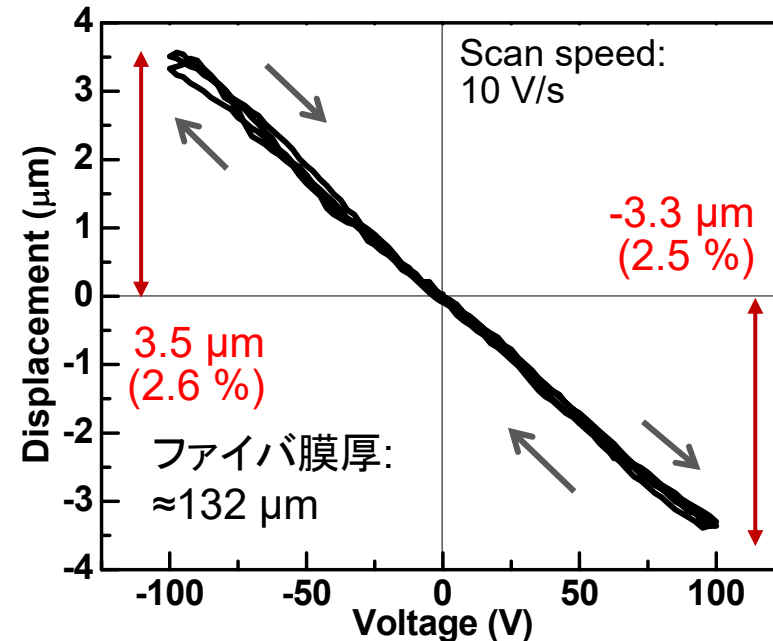
約1200回の繰り返し測定では顕著な d_{app} の減少は確認出来なかった

新技術の内容④: 疑似逆圧電特性

評価方法



膜厚変化量の印加電圧依存性



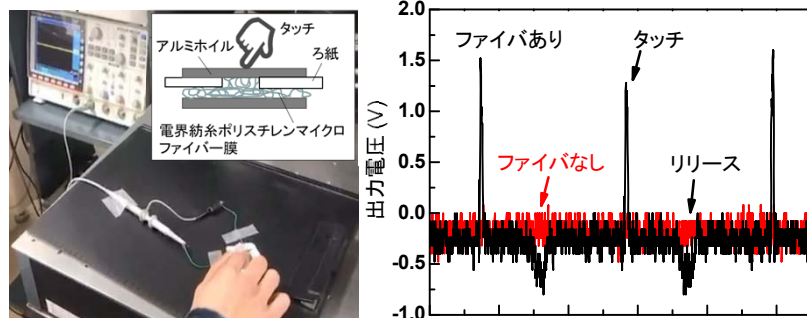
- 非圧電ポリマーからなる電界紡糸ファイバ膜が疑似逆圧電挙動を発現
⇒ 安価な汎用ポリマーなど材料選択の範囲が拡大
- 非常に高い見かけの圧電 d 定数(d_{app}):
 $\approx 32,000 \text{ pm/V}$ (PS)¹, $\approx 8,500 \text{ pm/V}$ (PMMA)², $\approx 8,500 \text{ pm/V}$ (PDLLA)

Cf. Film(PLLA, PVDF, or PVDF-TrFE): d_{33} , d_{31} , or $d_{14} \leq 40 \text{ pC/N}^*$, PZT film: $d_{33} < 100 - 700 \text{ pC/N}^*$

^{*} H. Wu et al. *Adv. Mater.* **28**, 9881 (2016). K Omote et al. *J. Appl. Phys.* **81**, 2760 (1997). K. Imoto et al. *Jpn. J. Appl. Phys.* **48** 09KE06 (2009).

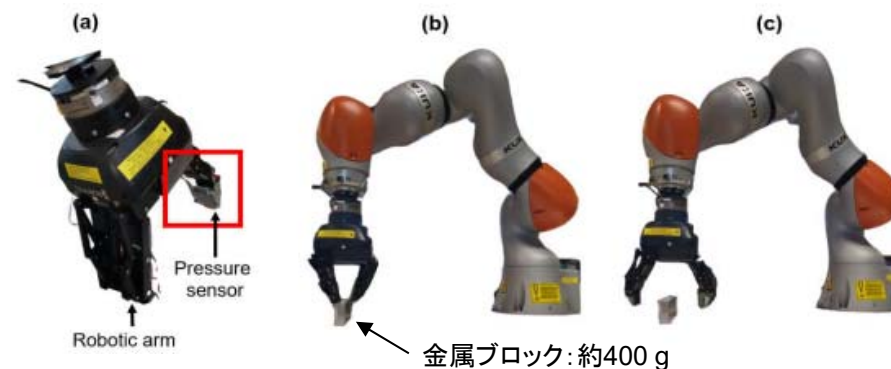
新技術の内容⑤: 応用展開例

タッチ動作のセンシング



石井佑弥, “エレクトロスプレー／スピニング法とその応用—材料合成・成形・加工技術—(第II編第17章 汎用ポリマーからなる電界紡糸極細ファイバー膜が示す疑似圧電特性)”, シーエムシー出版, 2021年3月

ロボットアーム用センサ



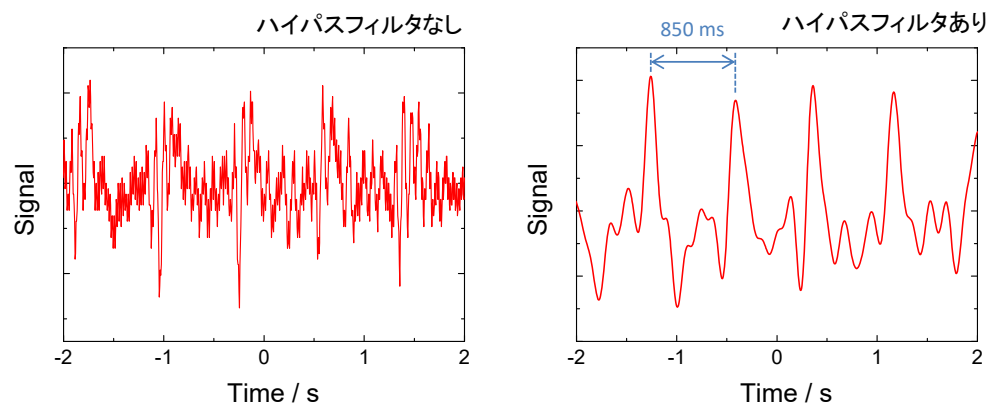
T.S. Ramadoss et al. *Nanomaterials*, 11, 1320 (2021)

指の動きのセンシング



石井佑弥, “エレクトロスプレー／スピニング法とその応用—材料合成・成形・加工技術—(第II編第17章 汎用ポリマーからなる電界紡糸極細ファイバー膜が示す疑似圧電特性)”, シーエムシー出版, 2021年3月

心拍検出



石井佑弥他, “アクチュエータの新材料, 駆動制御, 最新応用技術(第8章5節光導波性を示すポリマサブミクロンファイバを用いた新しいアクチュエータ)”, 技術情報協会, 2017年3月

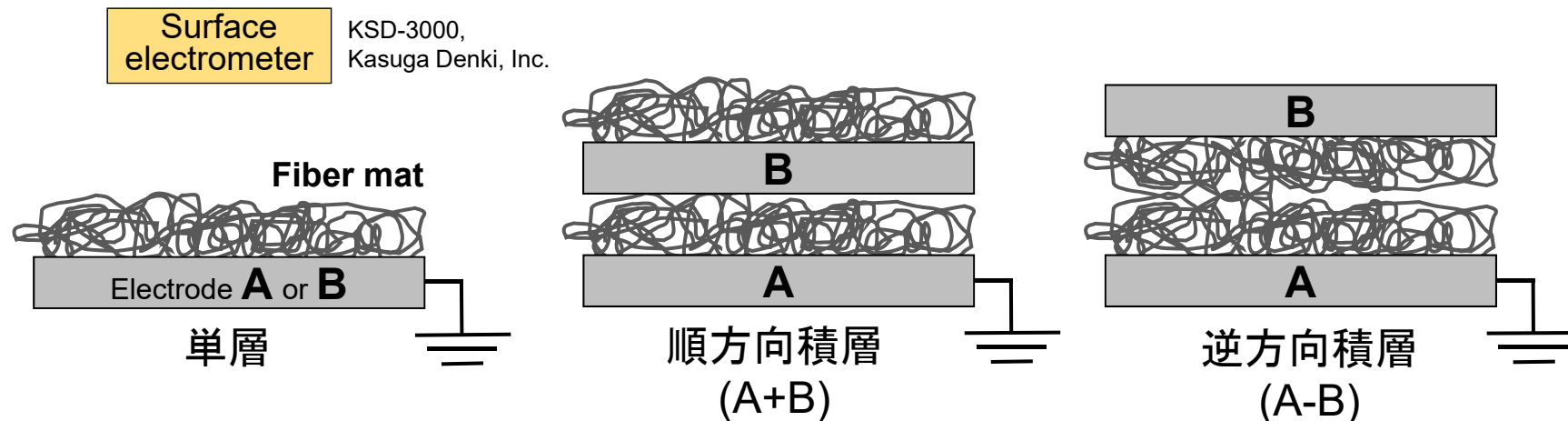
新技術の内容⑥:なぜ疑似圧電特性を示すのか?



京都工芸繊維大学
KYOTO INSTITUTE OF TECHNOLOGY

異なる積層方向で積層したファイバ膜の表面電位の測定

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings

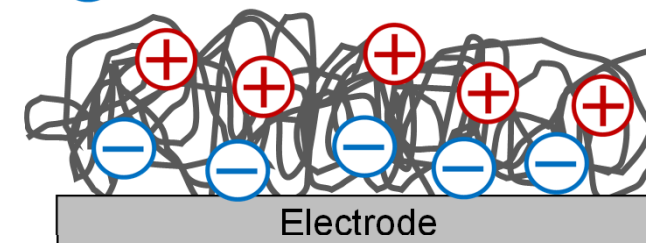


各積層方向のときの表面電位

	表面電位 (V)		
	PS	PMMA	PDLLA
単層 A	412	404	135
単層 B	398	400	151
順方向積層 (A+B)	519	608	219
逆方向積層 (A-B)	14	4	4

両極性電荷担持モデル

⊕ 正電荷
⊖ 負電荷



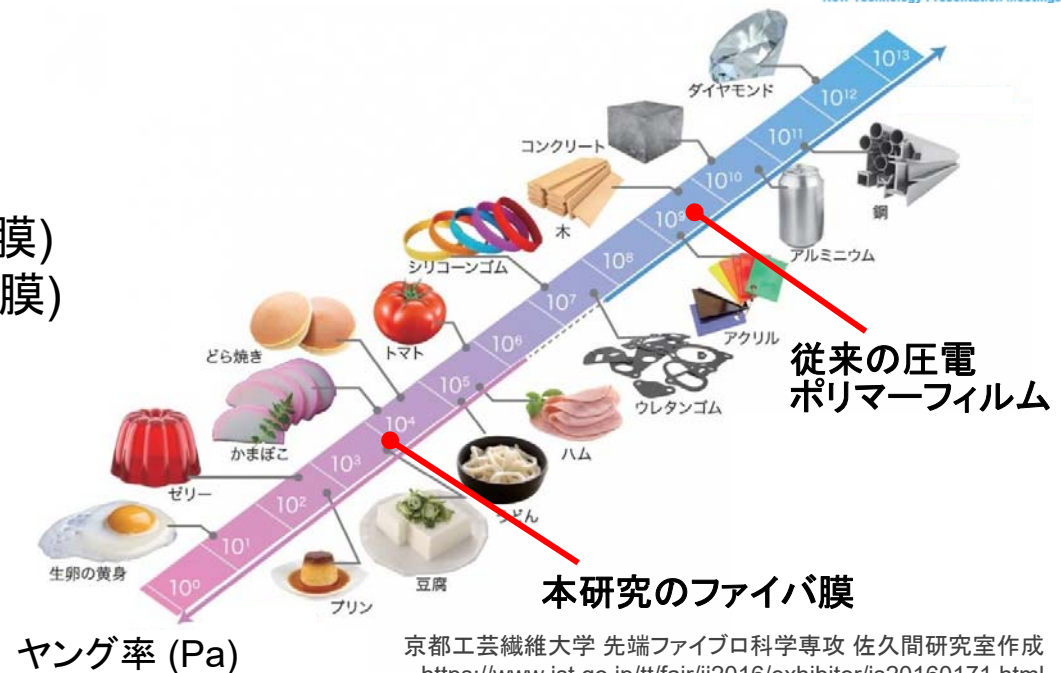
- 偏った両極性の電荷を担持した特異なファイバ膜の帯電状態
↑ 疑似圧電挙動を示した原因

新技術の内容⑦:なぜ高い d_{app} を示すのか？

- 各ファイバ膜のヤング率:
 $\approx 6.40 \text{ kPa}$ (PSファイバ膜)
 $\approx 13.3 \text{ kPa}$ (PMMAファイバ膜)
 $\approx 15.7 \text{ kPa}$ (PDLLAファイバ膜)

Cf. 約10 GPa [P(VDF-TrFE)]*
 約5 GPa (PLLA) *

* 田實佳郎監修 '高分子圧電材料と無機圧電セラミックスの基礎から応用' シーエムシー出版 (2014).



京都工芸繊維大学 先端ファイブ科学専攻 佐久間研究室作成
<https://www.jst.go.jp/tt/fair/ij2016/exhibitor/js20160171.html>

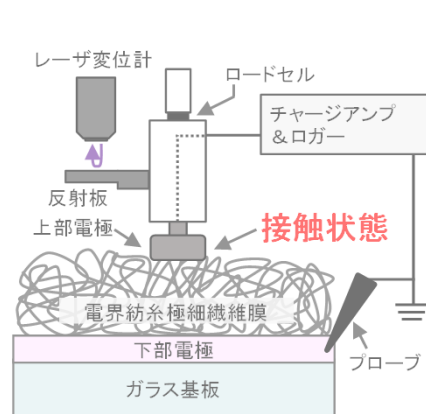
	PS	PMMA	PDLLA	多孔性ポリマーエレクトレットフィルム*
ファイバ膜の膜厚(T) [μm]	120.7 $\pm$ 18.6	54.8 $\pm$ 8.7	3.9 $\pm$ 0.2	70
実効的な表面電荷密度 (σ_{eff}) の概算値 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	51	86	250	860

*M. Paajanen et al. *IEEE T. Dielect. El. In.* **8**, 629 (2001).

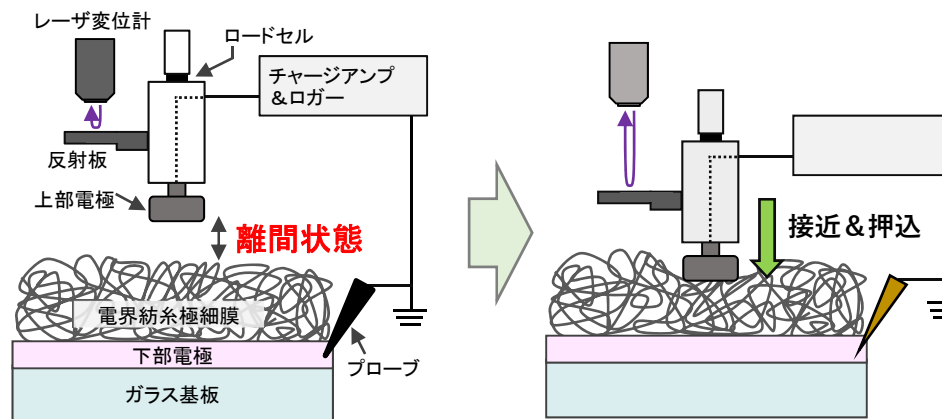
- 非常にやわらかい性質と良好な帯電が高い d_{app} が得られた原因

新技術の内容⑧: 電極離間構造での発電

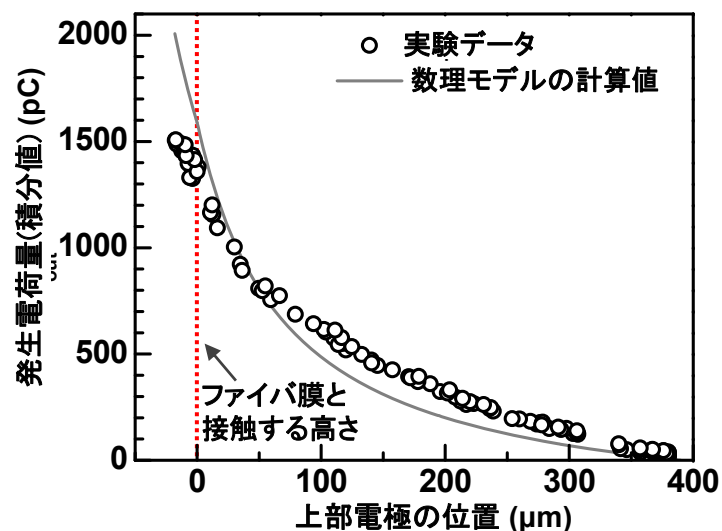
これまでの測定



新しい測定



端子高さと発生電荷量の関係



- 上部電極が離間した状態でも発電
- 離間構造の方がより多くの発電量
↑ エレクトレット + 疑似正圧電
- 繊維膜が非常にやわらかいため接触感がない

新技術の内容⑨:新構造の離間型圧力センサ I



京都工芸繊維大学
KYOTO INSTITUTE OF TECHNOLOGY

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings

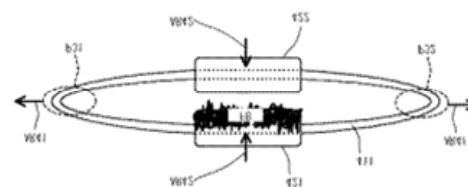
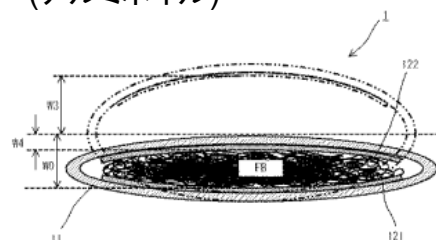
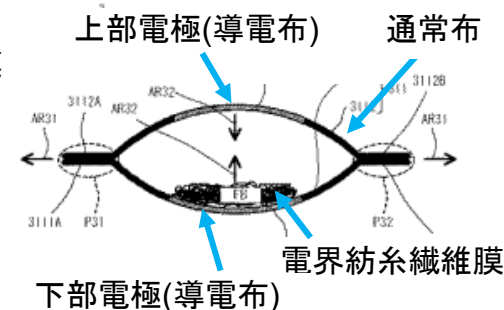
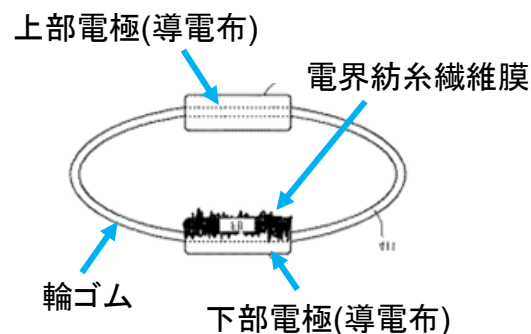
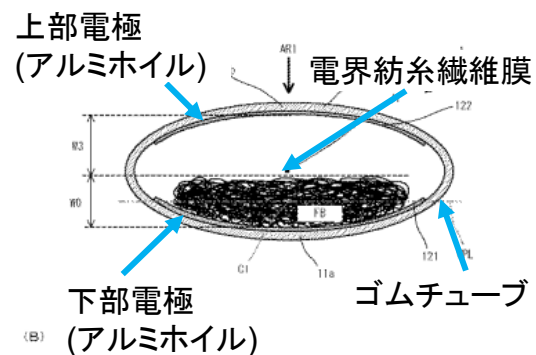
ゴムチューブ型



輪ゴム+導電布型



通常布+導電布型



特願2019-072448

- 上部電極が離間した構造で発電型圧力センシング

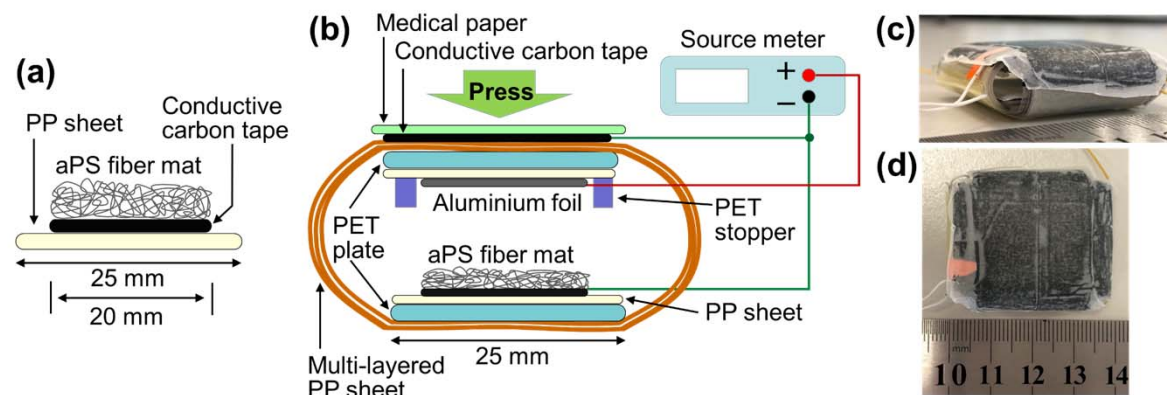
新技術の内容⑩:新構造の離間型圧力センサⅡ



京都工芸繊維大学
KYOTO INSTITUTE OF TECHNOLOGY

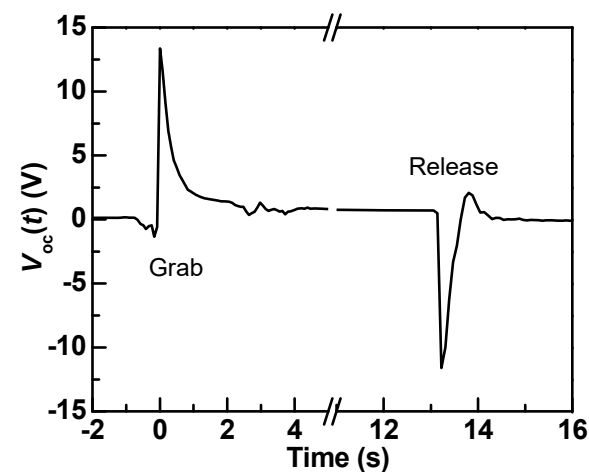
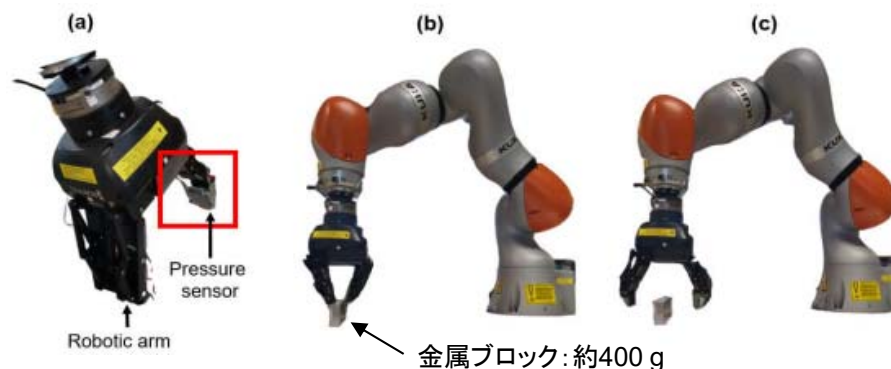
新技術説明会
New Technology Presentation Meetings

プラスチックシート型



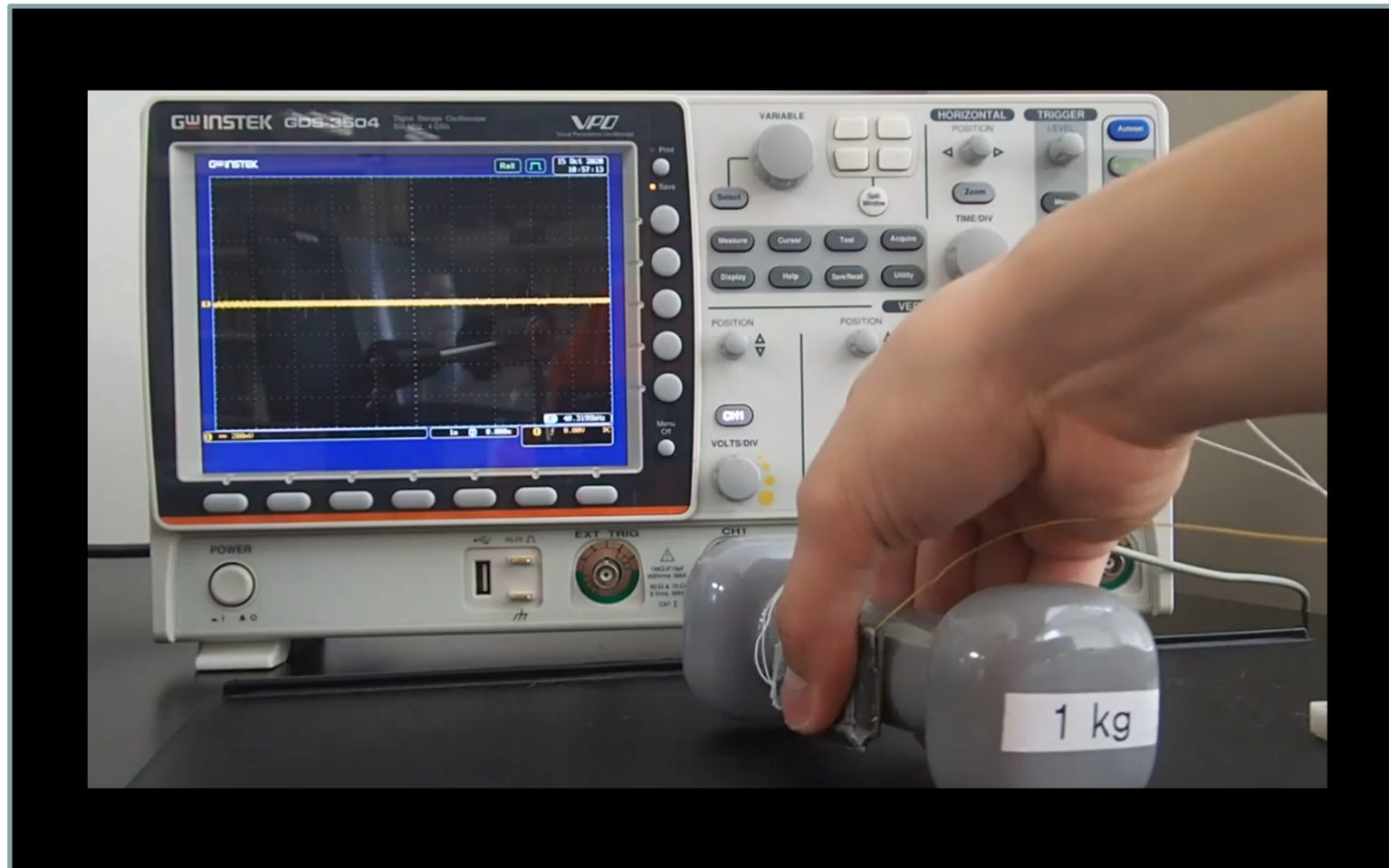
T.S. Ramadoss et al. *Nanomaterials*,
11, 1320 (2021).

ロボットアーム用センサ



- 適用可能な圧力範囲を制御可能
【例】負荷の上限値: (従来)<0.30 N (新構造)≈5 N

新技術の内容⑪:リアルタイム応答が可能

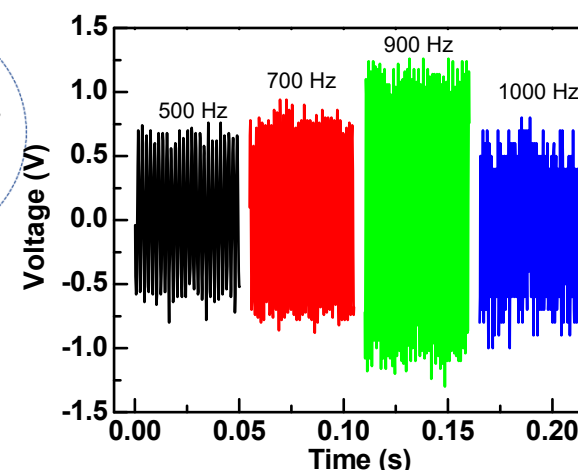
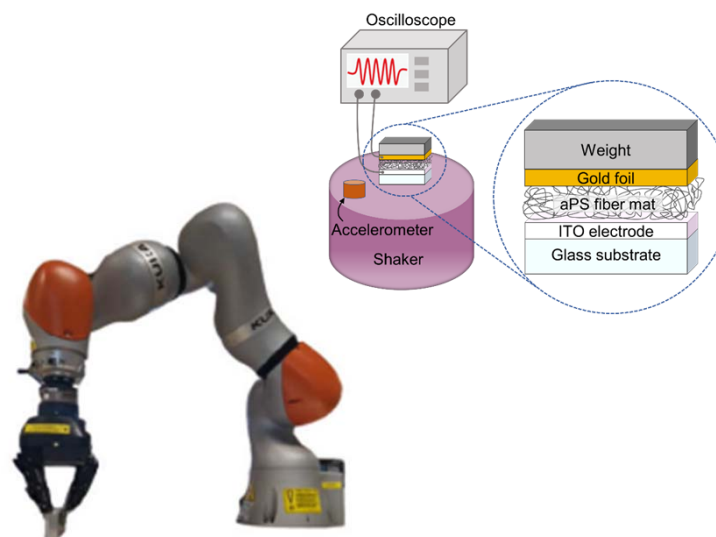
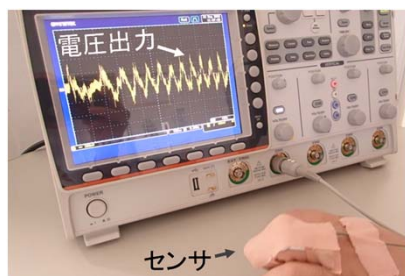


- 優れた応答速度
- 作製1年半後でも圧力センシング動作を確認

- 安価な汎用プラスチックの極細繊維エレクトレット膜からなる発電型圧力センサ
- 電界紡糸のワンステップで当該極細繊維エレクトレット膜の作製が可能
- 極軽量かつフレキシブルな発電型圧力センサや発電素子を開発可能

想定される用途

- ヒトや動物などの生体に装着する極軽量フレキシブルな圧力センサ
- ソフトロボットに搭載する極軽量フレキシブルな圧力センサ
- 振動発電する極軽量フレキシブルな発電素子



T.S. Ramadoss et al. *Nanomaterials*, **11**, 1320 (2021)

Y. Ishii et al. *Macromol. Rapid Commun.* **41**, 2000218 (2020).

- 湿度耐性と熱耐性の向上(必要な場合)
- プロセスコストの低減
- 具体的な製品を見据えたセンサ構造の開発
- 具体的な製品への実装

- パッケージングと封止構造の開発(必要な場合)
- 量産化とプロセスコストの低減
- 具体的な製品を見据えたセンサ構造の開発
- 具体的な製品への実装

発明の名称: 発電素子および発電素子の製造方法

- 出願番号: 特願2019-072448 (特開2020-170813)
- 出願人: 国立大学法人京都工芸繊維大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所
- 発明者: 石井 佑弥、延島 大樹、植村 聖

お問い合わせ先

京都工芸繊維大学

産学公連携推進センター 知的財産戦略室
(研究推進・産学連携課 知的財産係)

tel. 075-724-7039 / fax. 075-724-7030

e-mail chizai@kit.ac.jp

<https://www.liaison.kit.ac.jp/index.php>