

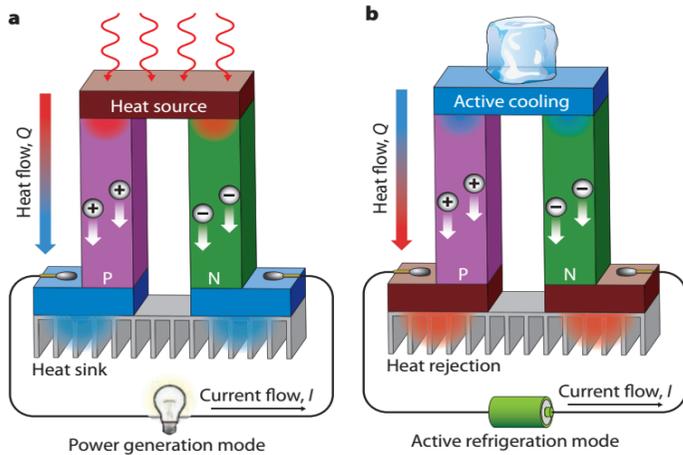
高性能ウェアラブル体温発電素子の 低コスト創製

断熱性メラミンスポンジの充填によって高出力と柔軟性を実現

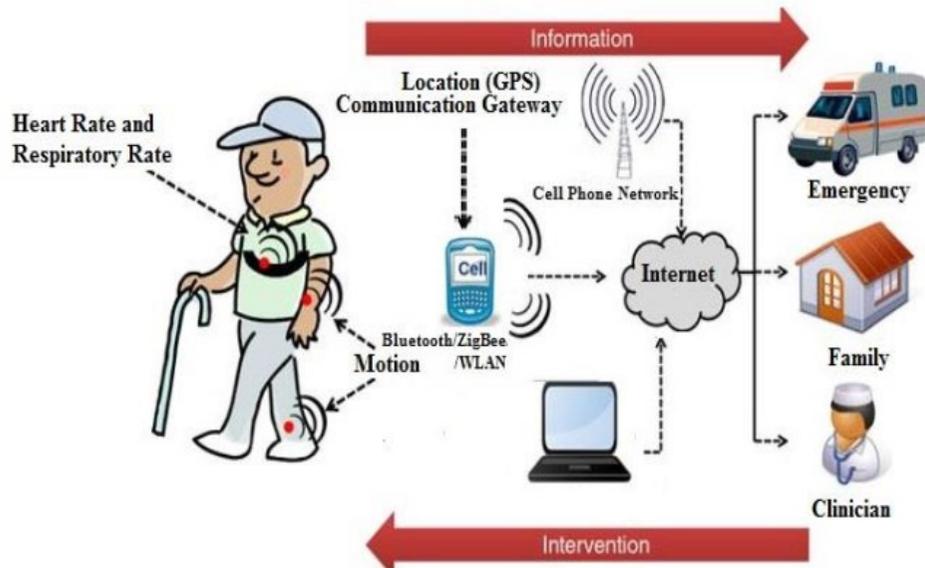
芝浦工業大学 工学部 材料工学科
教授 苗薔

2021年9月7日

熱電材料及びデバイスの紹介



発電及び冷却素子



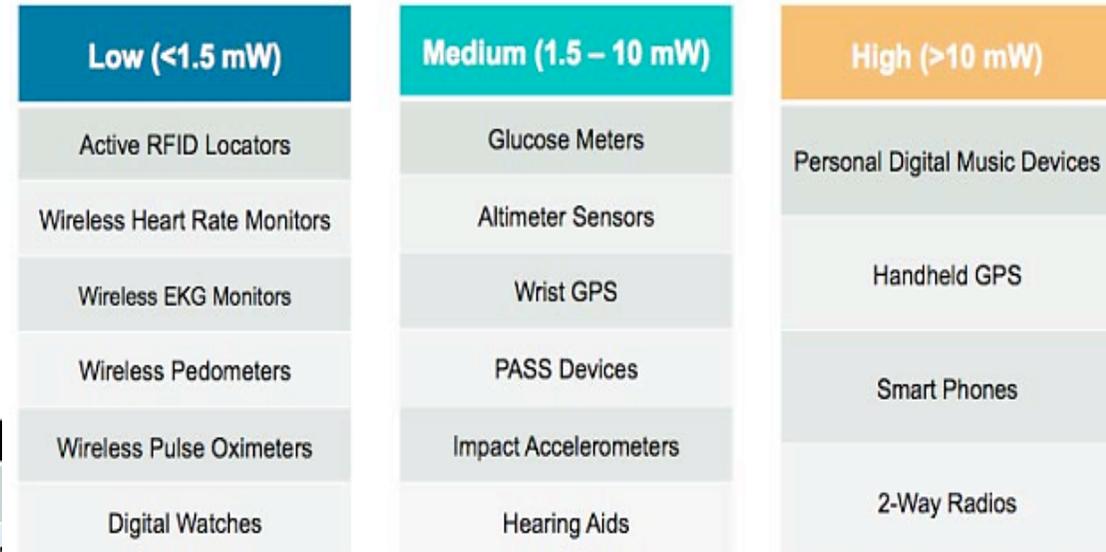
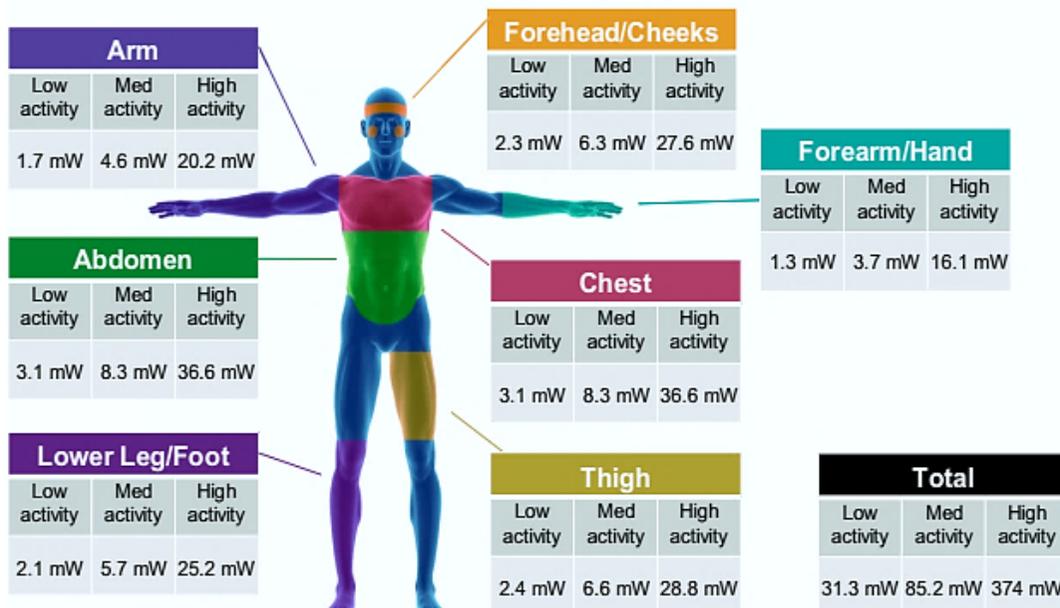
様々な着用電子デバイス



研究背景

人体各部分から提供できるエネルギー

Wearable micro device power



Stark I.In: Proceedings of the 2nd conference on wireless health- WH'11. ACM Press; 2011, p. 1.

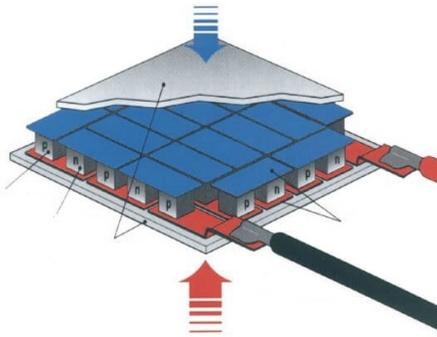
Francioso L, *et al* .. J Power Sources 2011;196:3239–43.

体の熱を利用して、熱電変換デバイス開発によって、人体着用・自発電式充電器可能である。

文献より、最近代表的な着用素子状態

Year and authors	Devices name, methods, and substrates	Materials		Numbers	R	ΔT	OCV	P_{max}	Size
		P-type	N-type						
2017, Beretta et al. [170]	Flexible TEG (inkjet printing method, 25 μm thick polyimide substrate)	PEDOT:PSS/Ag		8 thermocouples		5 K	OCV $\sim 50 \mu\text{V}$	$\sim 0.24 \text{ pW}$	Thermocouples thickness: 25 μm
2017, Rojas et al. [181]	Flexible and foldable standard paper based TE generator (micromachining and microfabrication method)	Sb_2Te_3	Bi_2Te_3	20 pairs	425 k Ω	75 K	OCV: 190.7 mV	$\sim 24 \text{ nW}$	
2017, Rojas et al. [181]	Flexible and foldable polyester fabric based TE generator (micromachining and microfabrication method)	Sb_2Te_3	Bi_2Te_3	20 pairs	$\sim 130 \text{ k}\Omega$	75 K		80 nW	
2017, Liu et al. [182]	Wearable TEG (Welded method, flexible printed circuit board substrate)	Bi_2Te_3 -based TE materials	Bi_2Te_3 -based TE materials	18 thermocouples	60 Ω	12 K	Output voltage: 48 mV	8.3 μW (0.67 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$) at $\Delta T = 11 \text{ K}$	Device size: 40 mm \times 30 mm
2017, Kim et al. [184]	Flexible TEG (screen printing method)	$\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$	$\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$	72 pairs		25.6 K	OCV: 693 mV	6.32 mW/cm 2	Device size: 40 mm \times 40 mm \times 0.8 mm
2017, Tian et al. [26]	Flexible TEG (deposited on PET substrate)	PEDOT:PSS films	TiS_2 /organic hybrid superlattice films	5 pairs	250 Ω	70 K	OCV: $\sim 33 \text{ mV}$	$\sim 0.9 \mu\text{W}$ (2.5 W/m 2)	Leg size: 5 mm \times 20 mm
2018, Wang et al. [194]	Flexible TEG (flexible plastic substrate)	SWNT/PEDOT:PSS	$\text{SnS}_2/\text{TiS}_2$	2 pairs	16.6 Ω	20 K		335 nW	Leg size: 10 mm \times 5 mm \times 5 μm
2017, Fang et al. [195]	Flexible rolled TEG (screen printing method, Kapton substrate)	PEDOT:PSS	Nickel	288 legs	350 Ω	65 K	OCV: 260 mV	46 μW	

Y. Du, et al. Applied Materials Today 12 (2018) 366–388



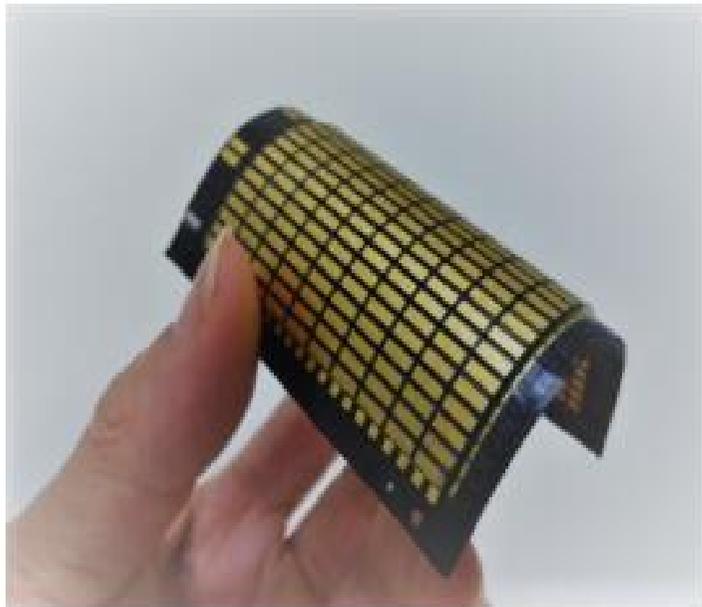
市場及び日本
特許より、代
表的な熱電モ
ジュール商品

カテゴリ	熱電 EH デバイス	熱電発電自立電源ユニット	熱電発電排熱回収ユニット
型式	KSGD-SNT KSGD-TRT	KSGU002 KSGU004	KSGU240
サイズ	W60 × D42 × H25 [mm] (KSGD-SNT) W100 × D100 × H30 [mm] (KSGD-TRT)	W95 × D115 × H90 [mm] (KSGU002) W150 × D148 × H81 [mm] (KSGU004) (いずれも取付部含まず)	W290 × D290 × H85 [mm] (取付部含まず)
重さ	約 0.1kg (KSGD-SNT) 約 0.3kg (KSGD-TRT)	約 1kg (KSGU002) 約 3kg (KSGU004)	約 12kg
定格発電量	—	2.5W (KSGU002) 4W (KSGU004)	240W
発信頻度	1~100 秒毎	—	—
使用可能温度	85℃以下	160~220℃ (KSGU002) 120~220℃ (KSGU004) (温度はベースプレート中心部温度、 下限温度は 1W 以上出力する温度)	受熱板センサー温度 250℃以下 (受熱板表面温度 300℃以下で、 水冷板に冷却水を通水する。)
備考	温度センサー内蔵(KSGD-SNT) 温度センサー外付 3ch(KSGD-TRT) 2.4GHz IEEE802.15.4 準拠 無線強度や発信頻度は、デバイス設 置面の温度と環境温度により変動す る。	USB 出力ポート付 オプション:吸熱フィン	熱源に応じて、受熱板の形態は異 なる。 受熱板に温度センサー内蔵。

注：K E L K社のHPより

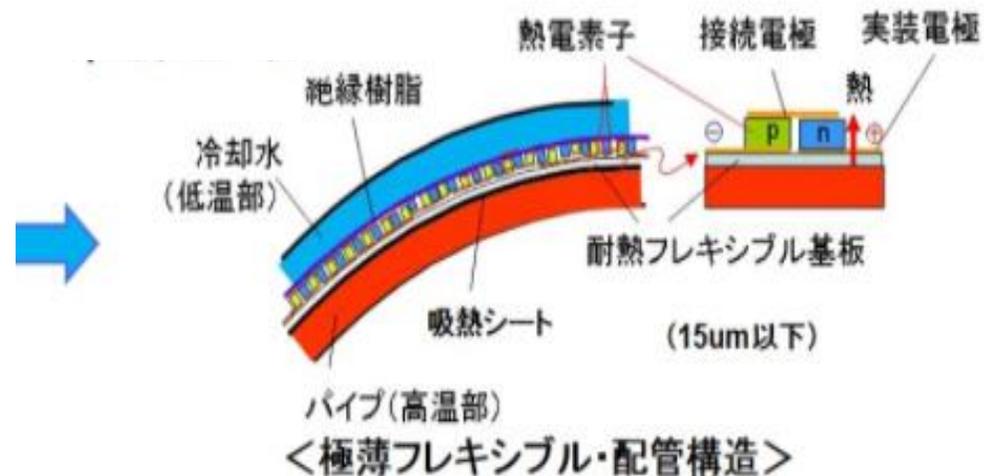
150-250度用フレキシブル熱電モジュール

株式会社E-Thermo熱電モジュール「フレキーナ®」 “M1シリーズ” & “M2シリーズ” 熱源パイプにフレキシブルに密着装着でき、高信頼性と低コストを実現した熱電モジュール（特許第5228160号）



M1シリーズ実物与具

<http://e-thermo.co.jp/product.html>



M1シリーズ構造図

150-250度温度範囲の仕様であるが、heat sinkには冷却水使っている。

従来技術とその問題点

1.熱電材料の問題。 熱電材料の性能が熱電素子の出力に一番影響する要因ですが、研究中のものが多く、実用化できていない。更に、柔軟性を有する熱電モジュールには現在2種類が知られているがいずれも以下の欠点から実用化出来ていない：①薄膜タイプでは面内方向に温度差を付けられないことと、熱電起電力がかなり低いこと、更にP型とN型を揃え両型をπ型熱電モジュール化できていない、及び② Bi_2Te_3 材料系は熱電性能は良いが、市販の人体装着・自発充電器では出力が小さく、柔軟性も劣るために人体装着時の心良さが無い欠点を持つ。

2.設計の問題。 従来モジュールでは熱起電力を高めるために、単位面積当たり、なるべく沢山熱電P型素子と N 型素子を受熱面にπ型に組み合わせたものを素子として充填する必要が有る。例えば、KLEK社の熱電モジュールでは、この問題点が解決出来ないのので、どうしてもモジュール重量は大きくなり、かつ高温の熱源（廃熱など）利用の場合しか使えません。

従来技術とその問題点

3.低温端冷却問題。 従来モジュールでは温度差を拡大するために、低温側heat sinkを使っている。例えば、株式会社E-Thermo熱電モジュール「フレキーナ[®]」は 150-250度温度範囲の仕様であるが、heat sinkには冷却水使っているので、どうしてもモジュール重量を重くし、その構成も複雑化する。

4.充填材料の問題。 従来モジュールでは π 型熱電素子の足（p型及びn型素子を二本の足（legs）に見立てる）の隙間を空気とする例が殆どで、偶に充填材料を使用しているとしても、PDMS等の熱伝導率が高い材料を使用しており、モジュール熱電性能が悪い。

新技術の特徴・従来技術との比較

1. **熱電材料の実用化問題解決**。熱電素子としては市販 Bi_2Te_3 材料系で、安価、熱電性能に優れ、熱起電力出力も安定している。
2. **設計の問題解決**。COLMOSL Simulationによる、コスト、重量、柔軟性、発電効率を総合的に考慮して、最適な Bi_2Te_3 熱電材料の並べる方法を設計した。

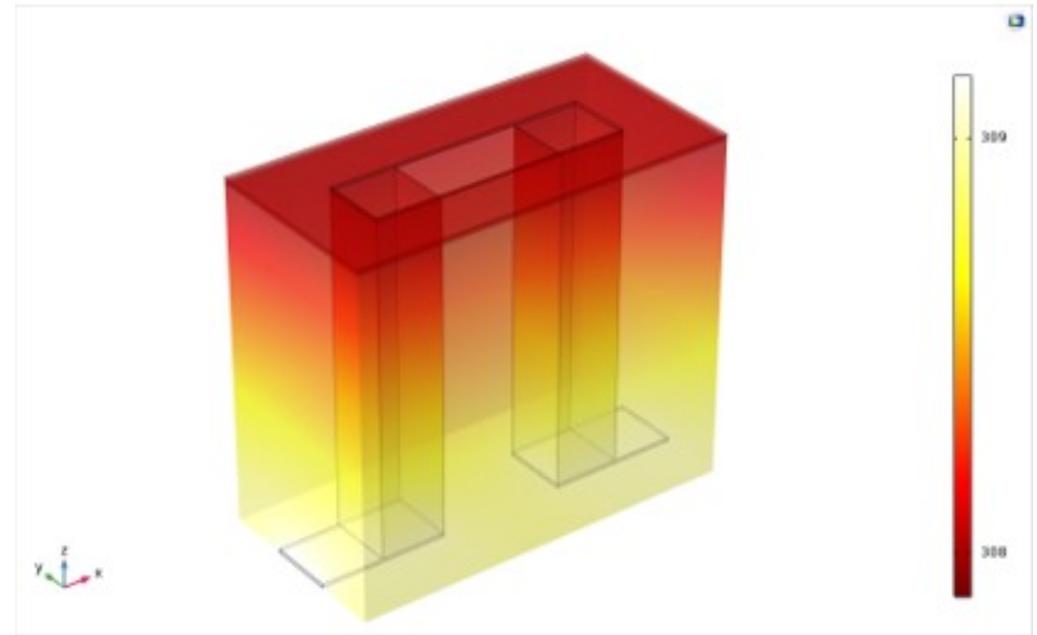
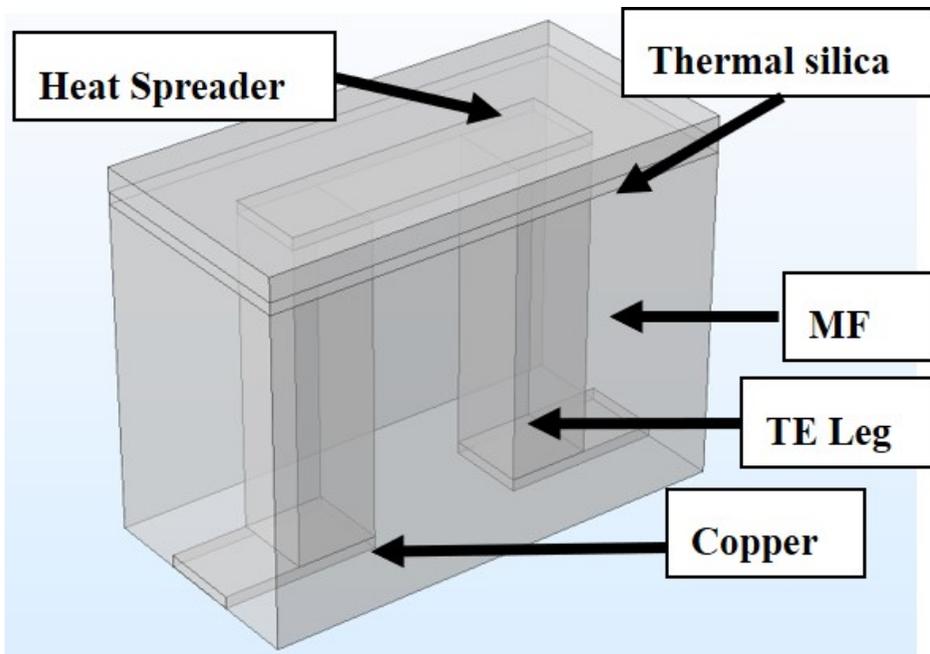
新技術の特徴・従来技術との比較

3. 充填材料の問題。 従来モジュールでは熱電legsの隙間に空気のものが多い、偶に充填材料があっても、例えば、PDMSの場合、熱伝導率が高く、結局モジュール能率を悪化させる。本発明ではMelamine foamを使用するところに新規性が有る。

4. 低温端冷却問題解決。 従来式の低温側では冷却水導入のために重いステンレスheat sinkを使用しているが、本発明では数種類heat spreaderを実験した。使用する地方による、冷却及びrebound性能を考えると、stainless foilが最良と言える。

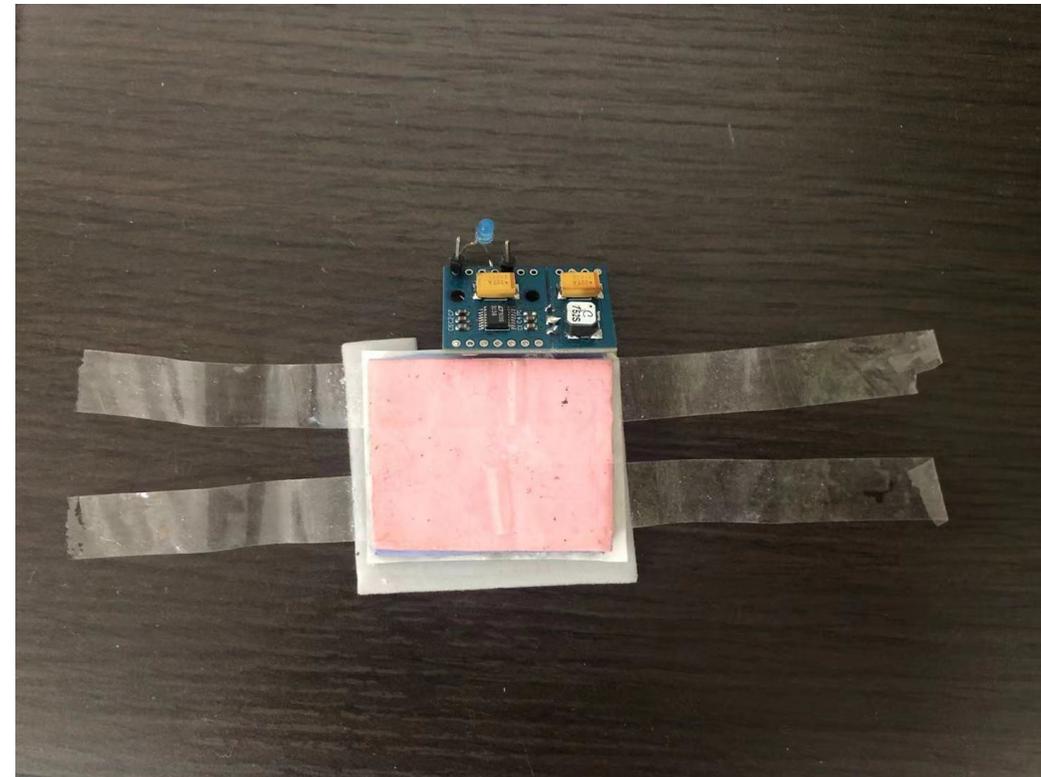
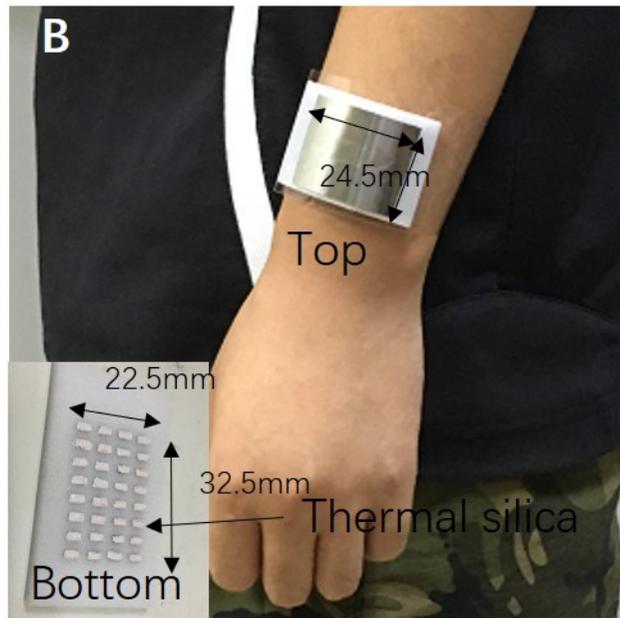
有限要素シミュレーションによる構造設計

Finite element simulation based on Comsol Multiphysics for structure design



新技術の特徴

本発明の実物及び優位性

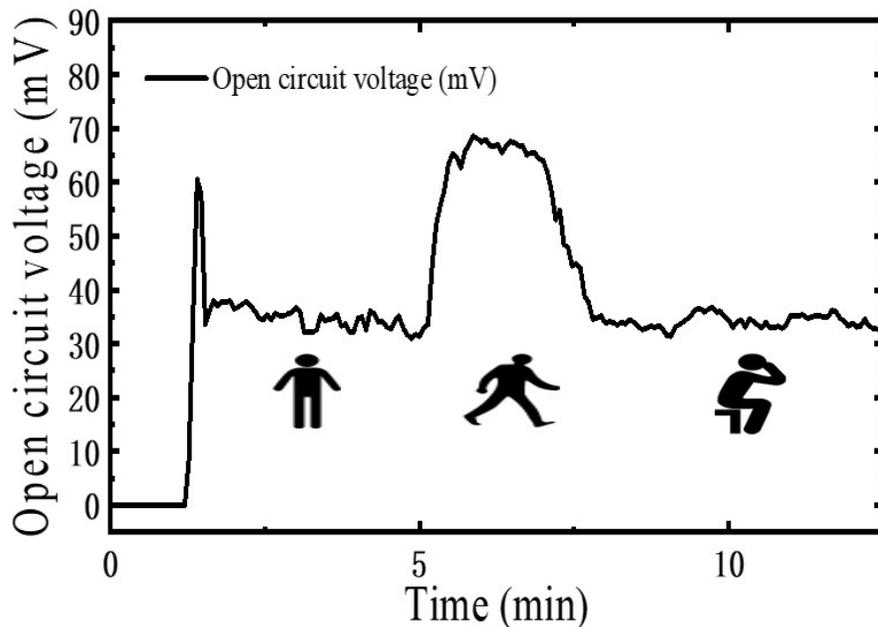
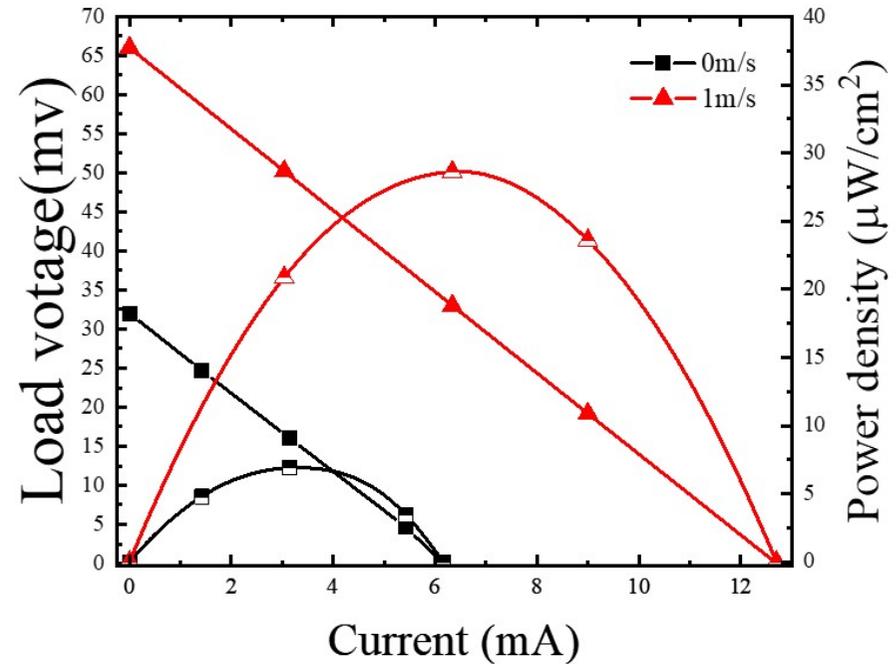
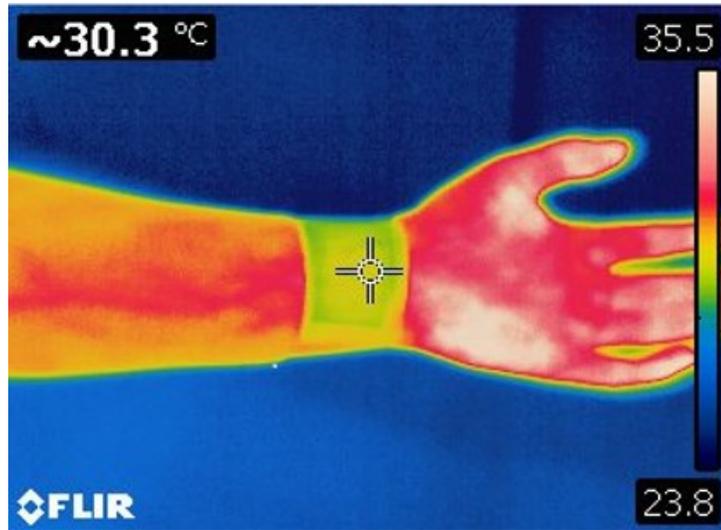


本発明の微熱発電素子の主なパラメータ:面積:3.61cm²;質量:1.75g;コスト:6.5ドル

優位性: 軽量、安価、快適な人体自発電充電器

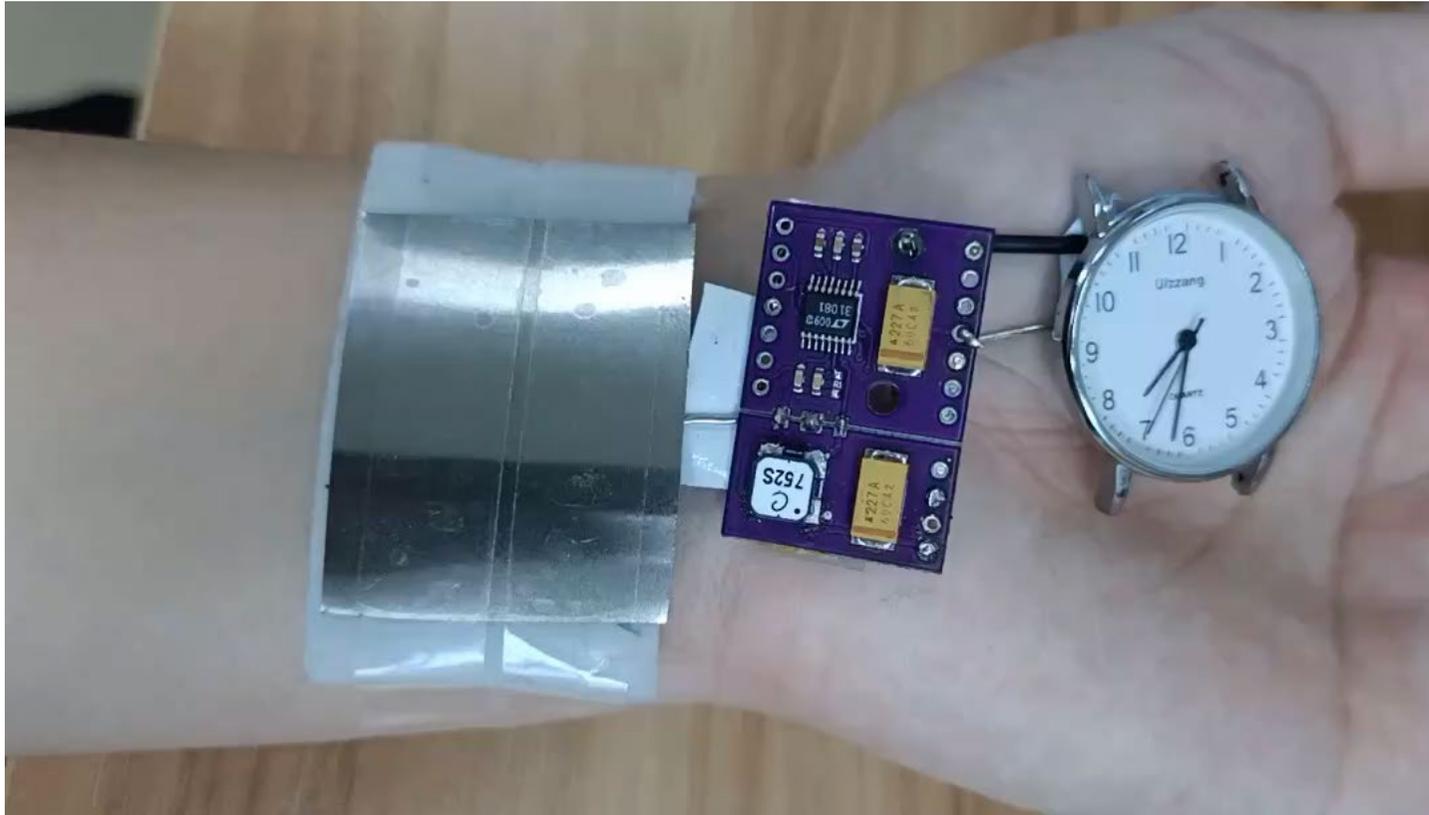
新技術の特徴

人体着用・微熱発電素子の出力データ



人体体温を熱源として、市販熱電素子と特別な充填材料を用い、工夫した電極設計等により、環境温度24度、(周辺空気速度 1 m/s)において、 $29 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ の熱起電力が得られ $30 \mu\text{W}$ のquartz時計を駆動出来ることを確認した。更に、着用するとき、人間の生活状況：立つ、走る、座るときの出力データも測定した。

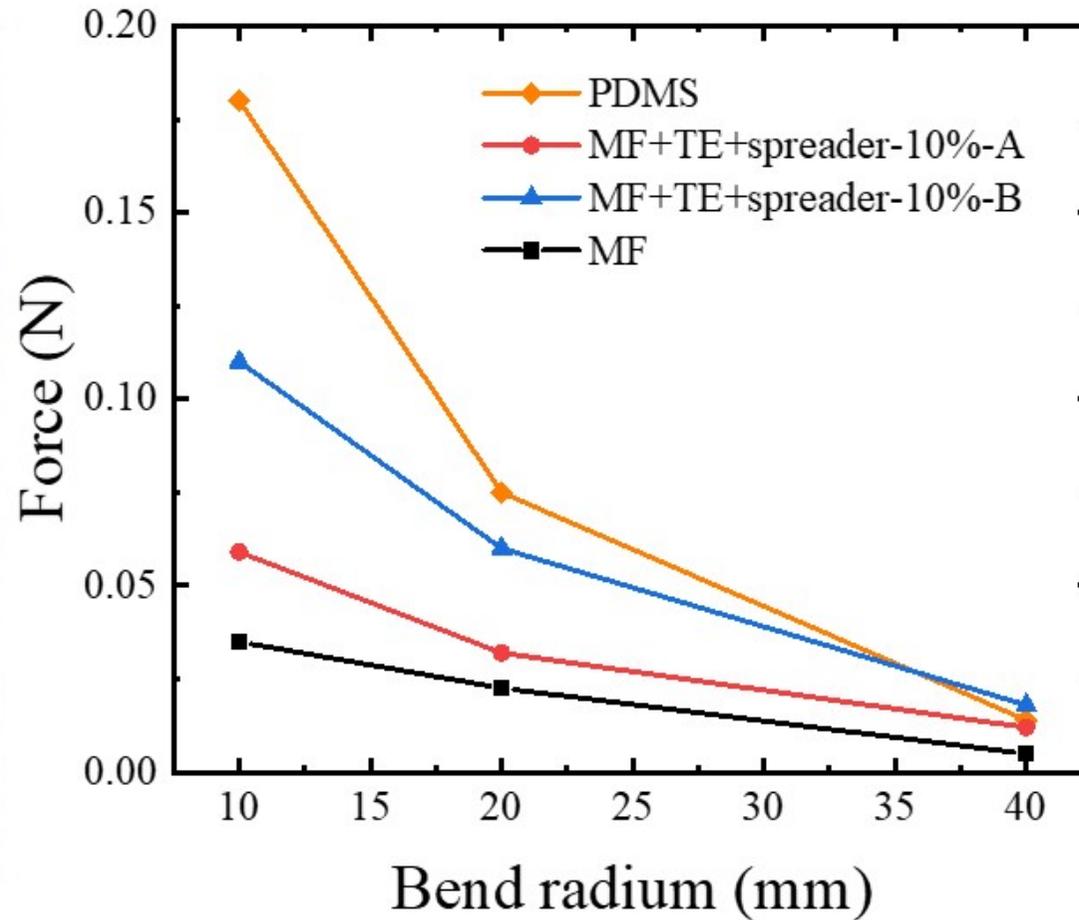
新技術の特徴：実際素子の動作



新技術の特徴

着用時快適性の評価（曲げ張力）

A



従来品に用いられるPDMSより柔軟性もがあり、曲げ張力が1/5程度

新技術の特徴

$$P_{m-avg} = \frac{P_{m-TEG}}{N * (\Delta T)^2}$$

Table 1. Comparison of P_{m-avg} of representative thin-film and bulk w-TEGs.

Materials	Structure of flexible TEG	P_{m-TEG} (μW)	P_{md} ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	ΔT (K)	N	P_{m-avg} ($\mu\text{W}/\text{K}^2$)	Practical application
CuAg ₄ Se ₃ ¹⁹	Thin-film	0.488	542	45	6	4.02E-05	/
Co NWs / PVDF ¹⁷	Thin-film	5.2	660	50	20	1.04E-04	/
C ₆₀ /TiS ₂ <u>nanosheet hybrid film</u> ²⁵	Thin-film	0.355	168	20	4	2.22E-04	/
Ag/Ag ₂ Se film ¹⁸	Thin-film	1.16	580	25	4	4.64E-04	/
carbon nanotube ²⁶	Thin-film	2.51	167	27.5	6	5.53E-04	/
Bi _{0.5} Sb _{1.5} Te ₃ / Bi ₂ Se _{0.5} Te _{2.5} ²⁰	Bulk	192.6	16.7	50	104	7.41E-04	powering an accelerometer
Bi _{0.5} Sb _{1.5} Te ₃ / Bi ₂ Se _{0.5} Te _{2.5} ²⁷	Bulk	23	4.75	17	48	1.66E-03	powering a LED
Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ / Bi₂Se_{0.3}Te_{2.7} ^{this work}	Bulk	54	7	10	64	8.47E-3	powering a quartz watch

新技術の特徴

我々のデバイスと代表的な文献値間、重要なパラメーターの比較

The output power density and bending radius of optimal f-TEG in this work and previous representative TEGs.

Fabrication method	Ambient (°C)	Power density ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)		Bending Radius (mm)	Reference
		Air velocity 0m/s	Air velocity 1m/s		
Reduce graphene oxide	15	0.012	--	--	42
Screen Printing	15	0.75	--	20	21
Bulk-PDMS-FPC	13	0.084	--	--	16
Bulk -FPC	25	0.4	--	--	40
Bulk-PDMS-FPC	25	0.526	--	--	22
Bulk-PDMS-LM	5	2.5	10	5	17
Bulk- polymer	25	2.28	5	--	
Bulk-PDMS	21	4.5	25	15	8
Bulk-PDMS-LM	21	5.2(AC resistance)	30(AC resistance)	8.5	18
Bulk-foam	24	7	29	8	This work

想定される用途

- 本技術の特徴を生かすためには、微小電源製造に適用することで低コスト、高性能のメリットが大きいと考えられる。
- 上記以外に、人体以外、他の熱源発電が得られることも期待される。
- また、達成されたInternet of Human (IOH)に着目すると、Li電池の延命やウェアラブルデバイスへ電力供給といった分野や用途に展開することも可能と思われる。

実用化に向けた課題

- 現在、腕に着用発電について時計とLED駆動できるが可能なところまで開発済み。しかし、他の応用環境の点が未解決である。
- 今後、会社設計目的商品について実験データを取得し、目的商品に適用していく場合の条件設定を行っていく。
- 実用化に向けて、充電する商品に合わせて、大量生産技術を確立する必要もあり。

企業への期待

- 未解決の応用商品については、既存の技術により克服できると考えている。
- 熱電素子の生産技術を持つ、企業との共同研究を希望。
- また、フレキシブル熱電素子を開発中の企業、半導体冷却分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 発電装置及び発電装置の製造方法
- 出願番号 : 特願2021-085310号
- 出願人 : 芝浦工業大学
- 発明者 : 苗薺

お問い合わせ先

芝浦工業大学

研究推進室 研究企画課

TEL 03-5859-7180

FAX 03-5859-7181

e-mail sangaku@ow.shibaura-it.ac.jp