

# 研究終了報告書

## 「ユビキタスな面状センサアレイによるIoTシステム構築」

研究期間: 2021年10月～2024年3月

研究者: 高橋 亮

### 1. 研究のねらい



図1:本研究の狙い。人体スケールのテキスタイル型コイルを用いて、全身の色々な所にあるバッテリーレスな無線センサコイルを長時間駆動する。

日常空間の至る所には、ヒトやモノ、空間と密接に関わる色々な「面」が存在する。例えば、空間を遮る壁や床、人体を守る服、モノを置く机などである。これらの面はリアル空間においては構造という役割がある一方で、サイバー空間では機能が存在しない。そこで、様々な面へ感圧素子・電極・コイルなどのセンサをアレイ状に内蔵し、面上のヒトやモノなどの状態・位置を把握できる機能的な面を構築したい。例えば、壁や床、家具などへ電極アレイを内蔵して、部屋内の電子機器などの状態・位置を把握し、服へコイルアレイを内蔵して、生体計測センサ(NFC タグなど)による健康管理や行動認識などをを目指す。

壁や床などの硬い平面へセンサアレイを組み込む研究は多くある一方で、服やソファカバーなど柔らかい曲面へセンサアレイを組み込む研究は少ない。伸縮性デバイスの登場により、曲げや伸びに丈夫なセンサを服などへ装着できるようになった。しかし、1)センサを駆動するために重く嵩張る電池や配線を皮膚や服へ搭載する必要があり、2)アンテナやコイルなどの無線リーダは電磁氣的にヒトと干渉するため、衣類全面に配置できない。故に現状の服型センシングは数個のセンサを狭い箇所で短時間駆動するのが限界である。そこで図1で示すように、衣類全面をカバーできる、ヒトに安全なテキスタイル状のリーダコイルを開発して、無線給電・通信により全身の色々な所にあるセンサコイルをバッテリーレス化した状態で駆動することを目指す。全身にセンサを配置し長時間駆動できるようになれば、ヒトの周りで高性能かつ半永続的な「全身分散コンピュ

ーティング」が期待できる。

## 2. 研究成果

### (1) 概要

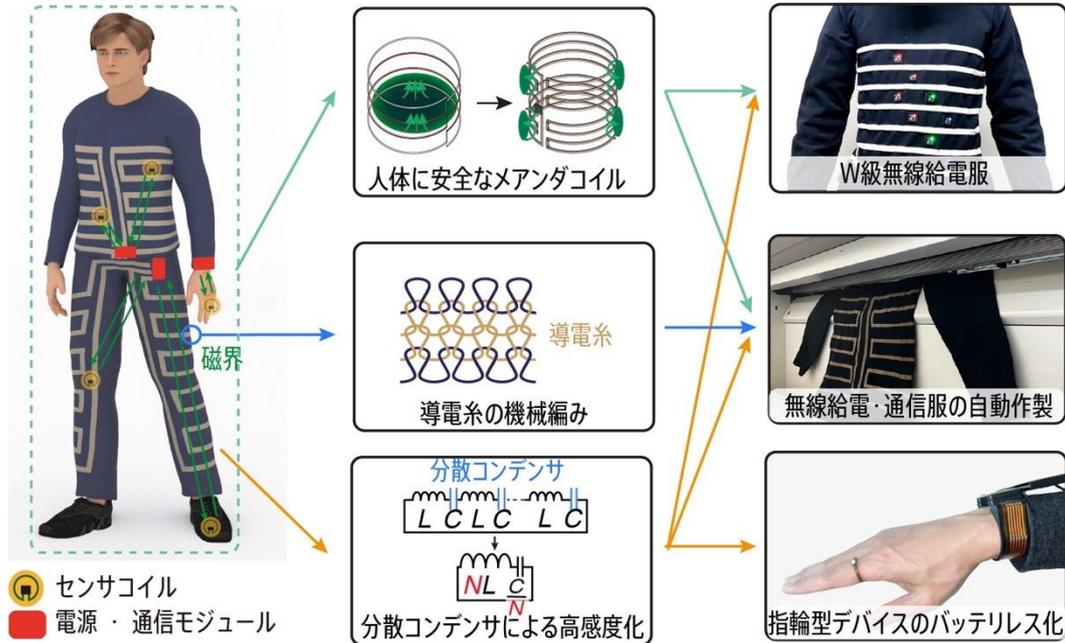


図 2: これまでの成果の概要。W 級無線給電用服型コイル[1]。自動編み機による mW 級無線給電・通信用服型コイル[2]。高感度な指輪型バッテリーレスセンサコイル。

ACT-X では、メアンダコイルと導電糸の機械編みなどを用い、ヒトに安全な人体スケールの無線給電・通信用服の実現とその作製自動化まで実現した。さらに、分散コンデンサにより指輪型デバイスのバッテリーレス化に成功した(図 2)。

### (2) 詳細

#### 研究テーマ A「W 級無線給電服」

まず、無線センサのバッテリーレス化に向け、衣類全面をカバーしてもヒトに安全な無線給電ができるテキスタイルコイルを目指した。コイルはアンテナなどに比べ、人体との電磁氣的干渉が比較的小さい近傍磁界を用いるため、ヒトの周りで高効率に無線給電できる。しかし、コイルサイズを大きくすると人体内部まで磁界が浸透し、給電効率の低下と人体との干渉が避けられない。そこで、数巻毎に巻く方向を変えることで皮膚近傍のみに強い磁界を閉じ込める「メアンダコイル」と複数の共振用コンデンサを用いて高い周波数で共振コイルを実装する「分散コンデンサ」とにより、衣類全面で W 級 (33 W) の無線給電が安全かつ効率的に (DC-to-DC: 25%) できる服型コイルを実現した(図 3a)。

メアンダコイルは、一般的な渦巻きコイルと異なり、コイル中心の強い磁界を打ち消しながら配線付近のみに強い磁界を閉じ込めるため、人体内部とほぼ電磁氣的に干渉せずに衣類(皮

膚)近傍の受電コイルへ安全にW級の電力を伝送できる(図 3b)。さらに分散コンデンサは、高い周波数でも短い波長の影響を受けずに大きな共振コイルを実現できるため、コイルの給電性能 Q 値を約 20 倍向上でき、自身の 0.3%程度(=16cm<sup>2</sup>/6000cm<sup>2</sup>)のサイズしか占めない受電コイルへの給電効率を約 8 倍向上させた。

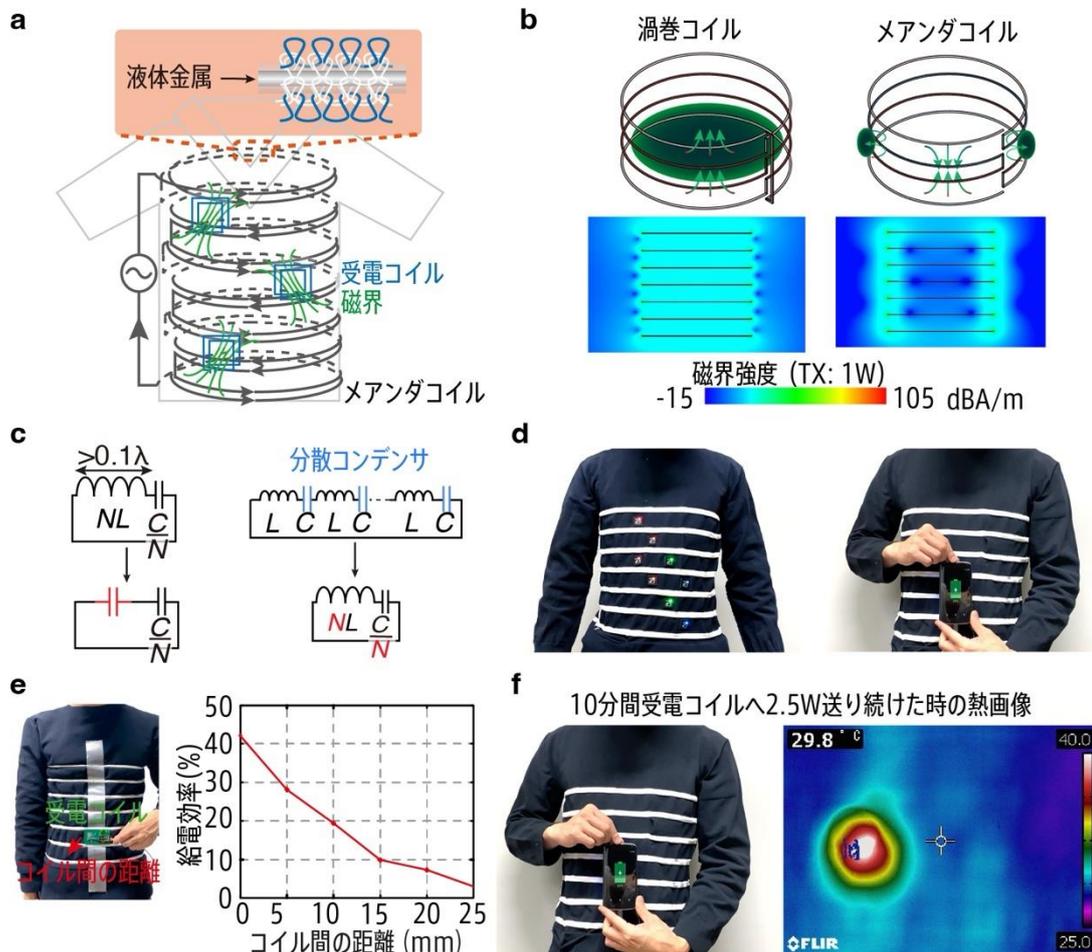


図 3: W 級無線給電服の概要。(a)システムの概要。(b)メアンダコイルの概要。(c)分散コンデンサの概要。(d)W 級無線給電服の応用例。(e)メアンダコイルと受電コイルの距離に対する給電効率の評価。(f)10 分間受電コイルへ 2.5W 送り続けた時の熱画像。受電コイルのみが最大 4.8°Cが上昇。

従来のコイルは人体と干渉するため、全身の 5%の範囲のみをカバーした送電コイルで最大数 mW の電力を同程度の受電コイルへ給電する程度しかできない。一方で、メアンダコイルは、全身の 70%の範囲をカバーしながら、16 cm<sup>2</sup>の受電コイルへ 2.5 W の電力を 25%の効率で安全に給電できた(図 3d)。そのため、10,000 mAh の市販のモバイルバッテリーを通して、10-100 mAh クラスのバッテリーレスなセンサアレイ(スマート衣服など)を数日から数週間駆動できる。実験の結果、衣類近傍の 2.5 cm 以内までしか無線給電できないこと(図 3e)と熱伝導の良い液体金属入りシリコンチューブでコイルを巻くことで 2.5 W の無線給電時にメアンダコイルの温度がほぼ上昇しないことを確かめた(図 3f)。

本研究成果は、ヒューマンコンピュータインタラクション(HCI)に関するトップカンファレンスで

ある ACM CHI 2022 で **Best Paper Award** (全投稿論文の上位 1%) を受賞 [1]、HCI に関する国内ワークショップ WISS 2022 で最優秀論文賞を受賞 (全採択論文のトップ)。

### 研究テーマ B「mW 級無線給電・通信服」

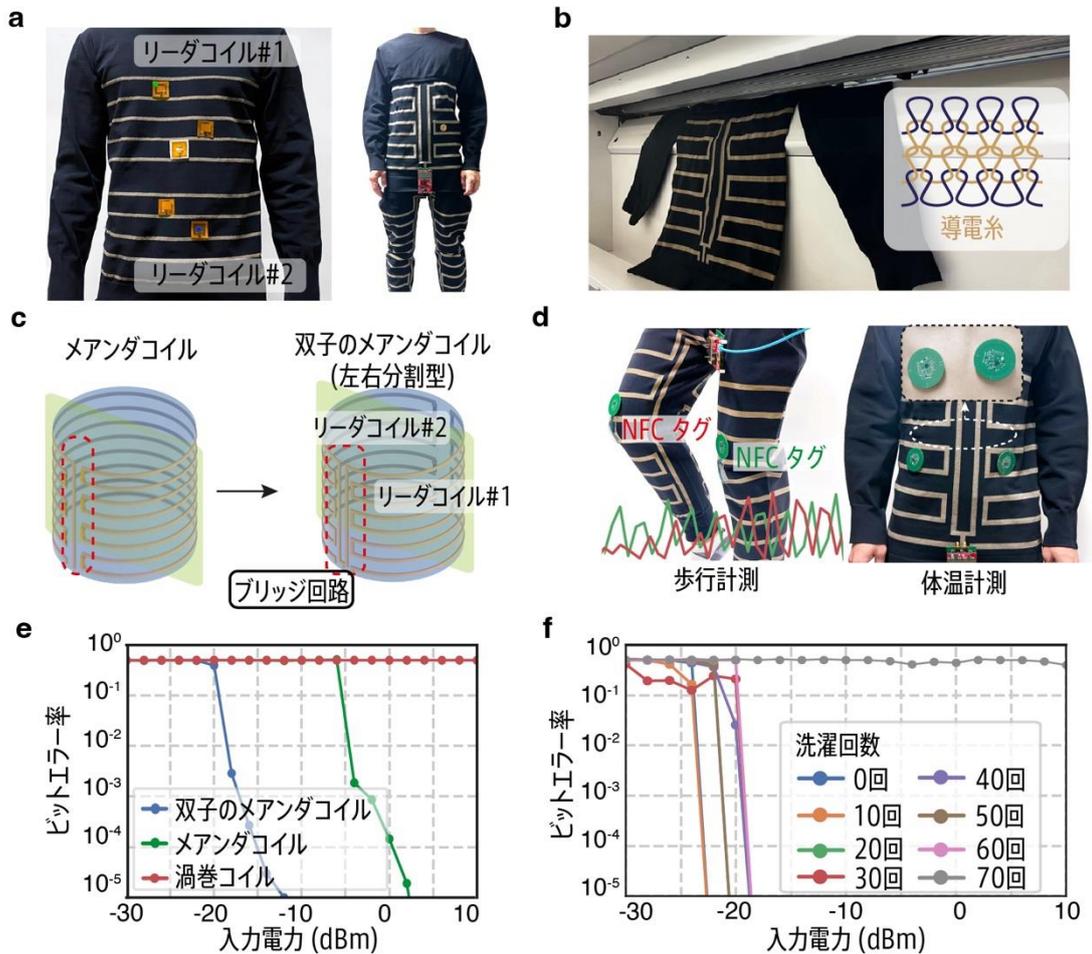


図 4: mW 級無線給電・通信服の概要。(a) プロトタイプ概要と (b) 導電糸の機械編みによる自動作製の写真。(c) 双子のメアンダコイルの概要。(d) NFC タグを用いた歩行・体温計測。(e) 送信電力と (f) 洗濯回数に対するビットエラー率。

次に、研究テーマ A を発展させ、衣類全面で mW 級の無線給電と通信ができる服型コイルを開発した (図 4a)。<sup>[1]</sup>ではコイルパターン用の液体金属入りチューブを服に手で内蔵する必要があるが、導電糸と産業用編み機を用いて自動でコイルパターンを衣類へ内蔵できるようにし、服型コイルの大量作製を簡単にした (図 4b)。さらに、人体スケールのメアンダコイルを2つの同一のメアンダコイルに分割し、ブリッジ回路に繋げることで、ユーザの動きによるコイルの変形に頑強なインピーダンス整合をとることができる「双子のメアンダコイル」を開発した<sup>[2]</sup> (図 4c)。これは、片方のコイルがリーダーコイルとして機能しながら、同時にもう片方のコイルとインピーダンス整合をとるためのリファレンス素子として機能できる。

提案する双子のメアンダコイルと近距離無線通信 (NFC) を組み合わせることで、mW 級のバ

バッテリーレスな生体計測・行動認識用センサコイル(NFC タグ)を複数、200 mW 以下の低消費電力で連続して駆動できることを示した(図 4d)。また、双子のメアンダコイルは、従来の渦巻コイルやメアンダコイルと比べ、10 dB(1/10)程度消費電力の低い無線通信ができる(図 4e)。さらに、洗濯に対しても、衣類の通信性能を維持できる(図 4f)。

本研究成果は ACM Ubicomp 2022 で **Outstanding Student Award**(HCI 分野の博士学生の中で上位 4 名)、テレコムシステム技術学生賞最優秀賞、2022 年度山下記念研究賞などを受賞。特許出願を終え、NFC の評価を含め論文誌へ投稿中。

### 研究テーマ C「バッテリーレスな指輪型デバイス」

投稿中のため非公開。

### 3. 今後の展開



図 6: 今後の展望のイメージ。日常空間にある色々なテキスタイルを無線給電・通信できるテキスタイルへ変え、「全身分散コンピューティング」のエコシステムを構築したい。

今後の展望としては、まず2-3年かけて、作製した無線給電・通信服をソファやベッド、カバンなど他のテキスタイル製品へ拡張し、服やリストバンドだけではカバーできない領域を埋める(図 6)。これにより、身体の好きな場所にセンサを自由に配置し、常に安定して駆動することで、「全身分散コンピューティング」のエネルギーが途切れることのないエコシステムを構築したい。そして、ヒトが意識せずとも負担なく生体計測や行動認識が自律的に行えるようにする。このような環境下では、誰もが公平に、病気の早期発見や進行の抑制、健康状態の維持を可能になり、フィットネスレベルやパフォーマンスを向上させるためのパーソナライズされたフィードバックを得ることができる。ある程度社会実装の目処が立ったら、テキスタイル関連の企業と連携しながら、従来のテキスタイルの品質を損なわずに、既存のテキスタイル作製工程の中で無線給電・通信機能を埋め込む方法を模索したい。最終的には、ユビキタスなテキスタイル型無線給電・通信プラットフォームを作りたい。

#### 4. 自己評価

当初は硬い面から柔らかい面を含め、色々な面に無線給電・通信機能を組み込む予定だったが、JST ACT-X の期間が2年半であることを踏まえ、特にセンサアレイを内蔵するのが難しい衣類へ焦点を当て研究を進めた。その結果、人体表面の約 70%を占める範囲をカバーできるような人体スケールの無線給電・通信システムの実現が達成でき、ヒトの周りへセンサアレイを簡単に実装でき、十分に満足している。

これらの成果は、国内外で 5 つの著名な賞を受賞するに至った。また、Meta への海外インターンも経験でき、若手からシニアまでの海外研究者との親密なネットワークを構築できた。さらに、サイトビジットや領域会議などを通して、MEMS から大規模センサアレイ、アクチュエータなど多種多様な最先端のハードウェア研究に触れることができた。

ハードウェア研究では、分野が離れるほど実際の苦労や、どこに性能の限界があるのかを理解するのは難しくなる。しかし、異分野融合・連携によりインパクトのある成果が生まれやすいというジレンマもある。JST ACT-X「強靱化ハードウェア」では、実際にデモを体験し、色々な研究者と密に交流できたため、自身のハードウェア知識をより強靱にする貴重な機会になった。

#### 5. 主な研究成果リスト

##### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 3 件

1. R. Takahashi, W. Yukita, T. Yokota, T. Someya, Y. Kawahara, ‘‘Meander Coil++: A Body-scale Wireless Power Transmission Using Safe-to-body and Energy-efficient Transmitter Coil’’, ACM CHI, 2022, No. 390, pp. 1–12.

衣類(皮膚)近傍のみに強い磁界を閉じ込めるメアンダコイルと、損失の小さな液体金属入りチューブを用いて、衣類全面で安全かつ高効率に W 級の無線給電ができる服を実現。

2. R. Takahashi, W. Yukita, T. Takuya, T. Yokota, T. Someya, Y. Kawahara, ‘‘Twin Meander Coil: Sensitive Readout of Battery-free On-body Wireless Sensors Using Body-scale Meander Coils’’, ACM IMWUT, 2021, No. 179, pp. 1–21.

1 で提案したメアンダコイルを導電糸の機械編みで実装できるようにすることで、無線給電・

通信が可能な衣類を高速かつ自動で作製できるようにした。

3. R. Takahashi, W. Yukita, T. Yokota, T. Someya, Y. Kawahara, ‘Meander Coil++: A Body-scale Wireless Power Transmission Using Safe-to-body and Energy-efficient Transmitter Coil’, ACM CHI, 2022, No. 390, pp. 1-12.

1 をジャーナル化したもの。

## (2) 特許出願

研究期間全出願件数: 2 件(特許公開前のものも含む)

1	発 明 者	高橋亮、川原主博、笹谷拓也
	発 明 の 名 称	ウェアラブルセンシング装置
	出 願 人	国立大学法人 東京大学
	出 願 日	2022 年 2 月 16 日
	出 願 番 号	特願 2022-022054
	概 要	双子のメアンダコイルの構造とセンシング手法の特許。

## (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. ACM CHI 2022 Best Paper Award
2. ACM Ubicomp 2022 Gaetano Borriello Outstanding Student Award Runner up
3. WISS 2022 最優秀論文賞
4. 情報処理学会 2022 年度山下記念研究賞
5. テレコムシステム技術学生賞 最優秀賞
6. [招待公演] Y. Kawahara, and R. Takahashi, Best of CHI, ACM Siggraph Asia, 2022