

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「微小エネルギーを利用した革新的な  
環境発電技術の創出」  
研究課題「スーパーステーパートランジスタによる  
レクテナと圧電トランスの融合による  
RF エネルギーハーベスティング技術の実用化」

## 研究終了報告書

研究期間 2020年4月～2023年3月

研究代表者：石橋 孝一郎  
(電気通信大学  
大学院情報理工学研究科 教授)

## §1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

本研究はスーパースティープトランジスタによるレクテナと圧電トランスの融合による RF エネルギーハーベスティング技術の実用化を目指した。実用化を促進する技術として大きく(C-1) 周波数高選択 WuR、(C-2) Sub uW 低電力応用システム、(C-3) 1uW 超 RFEH モジュールの3つの開発項目をあげて開発した。

各研究グループの主分担として、電通大グループは RFEH を電源として活用するための低電力応用システムの開発、金沢工大グループは SSFET、メタマテアンテナの開発と RFEH システムフロント・エンドの設計、早稲田大学グループは RFEH 応用向け及び BS 通信応用向け圧電素子の研究、名古屋工業大学グループは RFEH 応用向けアンテナの研究をそれぞれ担当した。

第1年次 2020 年度では、実用化に必要な要素技術の研究を進める一方、12 社の協力企業によるアドバイザ委員会を立ち上げて要素技術の目標仕様の見直しを行った。特に RFEH の目標発電電力として、入力電力を大きくしながら 100uW の高出力を目指すこととした。

要素技術の開発においては各研究グループが独自に研究を進めた。

金沢工大では、SSFET の  $V_f < 50\text{mV}$  動作を目指した構造解析を進める一方、新構造 Dual-gate 型 SSFET を開発してボディ電圧の低電圧化を図った。100uW 超のレクテナ出力を目指して、アレイ型のメタマテアンテナの検討を開始した。圧電トランスの開発では、量産化に対応できる大面積化圧電体/非圧電体の多層構造の圧電トランスを実現した。また、Wake up Receiver に適した uLoop アンテナとして等方性  $\Omega$  ループアンテナの開発に着手した。

第2年次の 2021 年度では、要素技術開発を完成させる一方、実用化を目指した統合試作に着手した。RFEH と WPT(Wireless Power Transfer)に関し、5 社の企業と、実用化を視野にいたれた共同研究を開始した。統合試作では、(C-2) Sub uW 低電力応用システムの開発を開始した。

#### (C-2) Sub uW 低電力応用システム研究成果

- IoT において必ず CPU を必要とするため、32kHz で 1uW 以下で動作する 8bit CPU を開発した。
- 100uW 以下の低電力で動作する IoT センサとして Beat Sensor を開発した。
- Beat Sensor には、新たに開発した EH に適した高効率 DCDC 変換方式も開発して搭載した。
- 1uW 以下の低電力で動作するセンサとして、バックスキヤッタ Sensor Tag を開発した。Sub uW で動作する通信方式として圧電 Delay 素子を活用した Ambient Back Scatter Communication (AmBC)通信方式を開発し、Back Scatter 通信の高速化の可能性を示した。

第3年次の 2022 年度は、統合試作を完成させて技術目標を達成した。

企業化に関して、RFEH/WPT 技術や圧電膜製造に関して、共同研究を実施している企業の数合計11 社となり、共同研究体制で RFEH 技術の実用化をにらんだ試作を開始するという当初の目標は達成された。技術目標の達成状況は以下のとおりである。

#### (C-1) の WuR の開発研究成果。

- 金沢工大において、Dual Loop Antenna と 40nm SOI CMOS 技術を用いた Cross Couple Rectifier からなる WuR を開発し、350MHz 帯において感度-51dBm の Wu 信号を生成することのできる 100mV の DC 電圧を発生できることを確認した。
- 名古屋工大では、 $\Omega$  ループアンテナを用いたレクテナで 351MHz の特定小電力トランシーバーの RF 電力で Wu 信号を発生及び LED を点灯できることを示し、CEATEC の展示に活用した。
- 電通大において、Dickson 疑似バラン回路を用いた Sub GHz 向け WuRx を開発、65nm

CMOS 技術で試作評価し、995MHz で感度-46.5dBm で、コリレータによるマッチング動作も含めた Wu 信号の生成を確認した。

#### (C-3) 1uW 超 RFEH モジュール研究成果

- ・金沢工大において、共同研究先への技術移転用レクテナリファレンス設計技術を確立した。
- ・920MHz 帯向けのレファレンス設計では、主に微小ループアンテナと SBD の高精度モデルを提供する。共同研究企業7社に対する技術移転に活用されている。
- ・金沢工大のアレイ型メタマテリアルアンテナと電通大のトランジスタ整流器を組み合わせたレクテナを開発し、2.4GHz 用レクテナでは-10dBm の RF 入力(標準ダイポールアンテナ測定基準)に対し、DC 130~240uW の出力電力が観測され、100uW 超の発電目標を達成した。

なお、量産性の高い大面積 BAW トランス構造の開発で 4 社の企業と継続的に共同研究を進めている。

また、期間中の原著論文 99 件、著作物 15 件、国内外の招待講演 24 件を含む発表 278 件、知財出願 13 件、ワークショップ等 4 件と多くの発表成果を達成し、RFEH 分野において顕著な発表成果となった。

## (2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

### 1. Super Steep FET の開発と RF 整流特性確認(井田次郎)

概要:

H 応用でも不可欠な極低電力集積回路の基本素子候補として“PN-Body Tied SOI-FET”と命名した Super Steep FET を継続研究した。NMOS/PMOS とも Subthreshold Slope(SS) <1meV/dec を 5-6 桁の電流域で確認し、さらに、CMOS インバータ実測でも驚くべき直角の伝達特性とデルタ関数のようなゲイン特性を確認した。トンネル FET 等の他の候補が苦戦する中、一番理想に近い Steep デバイス特性を確認している。整流応用でも、10mV の微小振幅の整流を確認し、さらに、レクテナ・シミュレーションにて 80%@-30dBm の高効率予測、さらには、シミュレーション同等の RF 整流も実証した。これらは、35 件の論文、国際学会に採択され、さらには、機関誌「応用物理」2022 年 3 月号の表紙にも採用され注目されている。

### 2. Bulk 圧電素子の提案、開発、モデリング及び応用展開(柳谷隆彦)

概要:

スマートフォン向けの周波数フィルター(BAW フィルター)に実用化されている窒化アルミニウム(AIN)圧電薄膜材料にイッテルビウム(Yb)を添加することで、AIN 圧電薄膜の電気機械結合係数が最大約 1.4 倍増加することを発見しました。さらに、理論計算により電気機械結合係数の向上に関するメカニズムを解明し、新規圧電材料の探索に有用な指針を示した。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

### 1. メタマテリアルアンテナと RFEH システム設計技術開発(伊東健治、牧野滋、石川亮)

概要:

RF から DC 電力に高効率変換を行うレクテナの設計技術を開発した。高インピーダンスメタマテリアルアンテナ、整流デバイスの RFEH 向け精密モデリング、CC(Cross Current)整流回路、トランジスタ整流回路等の設計技術により、920MHz, 2.4GHz の周波数領域 -30 ~ -10 dBm の RF 電力領域それぞれ現時点で最高の効率を達成した。本技術の実用化を目指し、7 社の企業と共同研究が進行中である。

## 2. RFEH 低電力応用システム(石橋孝一郎、範公可、石橋功至)

### 概要:

RFEH により得られる  $\mu\text{W}$  級の電力で動作する低電力応用システムを開発した。極低電力 Wake up Receiver(WuRx), LoRa を用いた Beat センサ、温度センサTAG, Sub  $\mu\text{W}$  CPU、Ambient Back Scatter (AmBC) 通信技術等を開発した。

## 3. 等方性 $\Omega$ アンテナの開発(平山裕)

### 概要:

ウェイクアップレシーバー (WuR) 用の等方性平面アンテナを開発した。WuR の設置姿勢・電波の到来方向によらず、安定した受信が可能となる。351MHz 帯で動作し、クレジットカードサイズに小型化した。室内における実験で、単純なループアンテナに比べて1V以上の受信電圧が得られる確率が40ポイント向上することを確認した。本技術のスマート工場における実用化をめざし、民間企業と共同研究が進行中である。

### <代表的な論文>

#### 1. Shota Ishiguro, Jiro Ida, Takayuki Mori, and Koichiro Ishibashi, Transfer Characteristics of CMOS Inverter using "Steep SS PN-Body Tied SOI-FET" 2021 International Symposium on VLSI Technology, Systems and Applications (VLSI-TSA), T3-5, pp1-2

##### 概要:

実証した NMOS/PMOS の Super steep SSFET を使い CMOS インバータを設計し試作評価した結果を報告した。驚くべき直角の伝達特性とデルタ関数のようなゲイン特性を確認した。これは 0.1V を切る極低電圧でも回路動作の可能性を示唆する。Steep デバイスでの CMOS インバータ伝達特性の実測結果はこれが世界初と認識している。

#### 2. J. Jia and T. Yanagitani, "Origin of Enhanced Electromechanical Coupling in (Yb,Al)N Nitride Alloys," Phys. Rev. Appl., vol.16, no. 4, 044009 (2021)

##### 概要:

スマートフォン向けの周波数フィルター(BAW フィルター)に実用化されている窒化アルミニウム (AlN) 圧電薄膜材料にイッテルビウム (Yb) を添加することで、AlN 圧電薄膜の電気機械結合係数が最大約 1.4 倍増加することを発見した。さらに、理論計算により電気機械結合係数の向上に関するメカニズムを解明し、新規圧電材料の探索に有用な指針を示した。今後、広帯域の BAW フィルターに応用するなど、大容量データ通信が重要な社会に貢献することが期待される。

#### 3. Nobuhiko Yasumaru, Naoki Sakai, Kenji Itoh, Toshiki Tamura, Shigeru Makino, "920MHz Band High Sensitive Rectenna with the High Impedance Folded Dipole Antenna on the Artificial Magnetic Conductor Substrate," 2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium, pp.1070-1072, Th1E-5, 2020

##### 概要:

人工磁壁基板上に高インピーダンスアンテナを設置したメタマテリアル型のレクテナにより、920MHz の周波数帯域で従来にない高効率 RF エネルギー変換を実現できることを明らかにした。

## § 2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 電気通信大学グループ

主たる共同研究者: 石橋 孝一郎 (電気通信大学大学院情報理工学研究科 教授)

研究項目

- RFEH で動作する IoT センサと EH 電源回路の研究 (石橋孝一郎)
- RFEH で動作する Sub uW CPU の研究 (範公司)
- 安価で高出力レクテナに適したトランジスタ整流回路の研究 (石川亮)
- Back Scatter RF 通信技術の高速化の検討 (石橋功至)

#### ② 金沢工業大学グループ

主たる共同研究者: 井田 次郎 (金沢工業大学工学部 教授)

研究項目

- RFEH 向け SSFET の開発と SSFET CMOS 技術 (井田次郎)
- 小型高効率メタマテリアルアンテナの開発と RF/DC 合成の検討 (牧野滋)
- RFEH システムフロント・エンドの設計と RFEH 実用化に向けた企業との協業 (伊東健治)

#### ③ 早稲田大学グループ

主たる共同研究者: 柳谷 隆彦 (早稲田大学理工学術院 教授)

研究項目

- RFEH 応用向け及び BS 通信応用向け圧電素子の研究

#### ④ 名古屋工業大学グループ

主たる共同研究者: 平山 裕 (名古屋工業大学大学院工学研究科 准教授)

研究項目

- RFEH 応用向けアンテナの研究

### (2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

#### NICT ASEAN IVO 2020

2020 年度に本 RFEH で実施した研究テーマと人脈を発展させ、ベトナムハノイにあるレキドン工科大学 (Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam) を中心にして 4 か国からなる国際研究チームを組織し、NICT ASEAN IVO の研究を実施した。

Project Title: “An Energy Efficient, Self Sustainable, and Long Range IoT System for Drought Monitoring and Early Warning“

参加者

Xuan Nam Tran, Hoang Van Phuc, Luong Duy Manh, Nguyen Van Trung, Nguyen Quoc Dinh, Nguyen Thuy Linh (LQDTU, Vietnam)

Koichiro Ishibashi (UEC, Japan), Jiro Ida (KIT, Japan)

Kosin Chamnongthai (KMUTT, Thailand), Taworn Benjanarasuth (KMUTL, Thailand)

Bui Du Duong (NAWAPI, Vietnam), Dao Van Lan Malardalen Uni., Sweden)

Dao Thanh Toan (UTC, Truong Trung Kien (FUV, Vietnam)