

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01279

研究課題名（和文）電磁音波ハイブリッドによる反射型ワイヤレスセンサネットワークシステムの構築

研究課題名（英文）Construction of Reflective Wireless Sensor Network Systems with Electro-Magnetic Sound Wave Hybrid

研究代表者

石原 昇（Ishihara, Noboru）

東京工業大学・科学技術創成研究院・特任教授

研究者番号：20396641

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 32,800,000円

研究成果の概要（和文）：低電力のワイヤレスセンサネットワークの構築を目的として、RF信号反射を利用するセンサネットワークシステムの研究開発を行った。具体的には、低電力高感度な周波数変調反射型センサ端末回路を考案し、集積回路化により、従来の1000分の1以下の消費電力（8.4μW）で動作するセンサ端末を実現し、バッテリーレス動作やマルチセンシング動作も可能とするシステム構成も明らかにした。また、様々なセンサ（温度、pH、電圧、電流、傾斜、重さ、音など）との組合せによるワイヤレスセンシング実験を実施し、医療、農業、産業、家庭、オフィスなど様々な分野へのアプリケーション展開の可能性を確認、実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「物」が感じ（センサデバイス：IoT）、考え（人工知能：AI）、行動し（ロボット、車、ドローン）、人類の未来社会を支える技術革新が進行しているが、これらによる電力消費の増大は、低炭素化社会、低エネルギー社会を進める上で許されない。本研究成果は、低消費電力で半永久的に動作可能なワイヤレスセンサネットワークシステムに関するもので、AI処理に必要なビックデータを恒久的に収集可能とするシステム実現に向けた先端技術である。現在のワイヤレスセンシング技術を凌駕する可能性を秘めており学術的意義は高いと考える。

研究成果の概要（英文）：To construct a low-power wireless sensor network, the system that uses RF signal reflection was researched and developed. Specifically, (1) a high-sensitive frequency-modulated reflection sensor terminal circuit was investigated and fabricated as a monolithic integrated circuit. The circuit was operated with power supply of 8.4-μW; 1/1000 of the conventional circuit power. (2) The system configuration that enables batteryless operation and multi-sensing operation was also clarified and constructed. In addition, (3) wireless sensing experiments in combination with various sensors (temperature, pH, voltage, current, tilt, weight, sound, etc.) were done, thus it was clarified that the proposed system can be applied to various fields such as medical care, agriculture, industry, home, and office.

研究分野：通信インターフェース回路技術

キーワード：ワイヤレスセンサネットワーク 反射型通信 電磁音波ハイブリッド バッテリーレス センサ端末 弛張発振回路 ワイヤレス電力伝送 CMOS集積回路

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

IoT (Internet of Things: 様々な物や人がインターネットに接続される) 時代においては、情報を収集する小型のワイヤレスセンサ端末が様々な場所に数多く設置され、2020年には500億個のセンサが消費されると予想されている。このため、ワイヤレスセンサ端末のメンテナンスフリー化、バッテリーレス化、無給電化は不可欠であり、IoTの爆発的普及にむけた鍵となっている。しかし、WiFi、ZigBee、Bluetoothなどの無線通信モジュールの消費電力は、数十mW以上と大きく、振動や温度差、室内光などの環境発電デバイス(発電量: ~数十 $\mu$ Wレベル)によるエネルギーの自給自足化は困難な状況である。このため、エネルギーハーベスタの高効率化、無線通信モジュールの低消費電力化に向けた研究開発が進められているが、無線通信回路部(RF回路)の消費電力に関しては電波伝搬に必要な絶対エネルギーにより制限され、mW以下の低電力動作の実現は難しい状況である。

ここで情報センシングの原点を改めて考えた。我々は環境にある多くの情報を太陽光の反射信号を視覚で受けて取得している。環境の物や生物によりフィルタリングされた可視光成分を視覚で受けるセンシングシステムである。物や生物は太陽光反射に特別なエネルギーを必要としない。太陽光でなく電波で考えると、図1に示すように電波はインピーダンスの変化により反射が生じる。多くのセンサデバイスは、情報変化に応じてインピーダンスが変化する。センサデバイスに電波を照射すれば、インピーダンス変化に応じた反射信号が得られる。電波を反射させるだけであるので、特別なRF回路は不要となりセンサノードの消費電力のゼロ化が可能となる。実際はセンサデバイスのインピーダンス変化は小さいため増幅回路や変調回路等が必要になるが、エネルギーハングリーな高周波のRF回路は不要となるため、我々の試算では少なくとも1000分の1以下の消費電力(10 $\mu$ W以下)でセンサ端末を稼働させることが可能になると考えている。

承知の通り反射信号に情報を載せるシステムとしてはRFID技術が既に開発され、物品管理や乗り物の乗車パスなど短距離通信の認証システム技術として確立されているが、センサネットワークとしての応用展開については研究開発の途に着いた段階である。

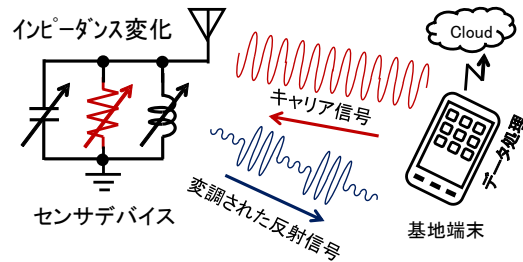


図1 信号反射によるセンシング

### 2. 研究の目的

本研究では、センサ端末のバッテリーレス化を可能とし、図2に示すような低電力のセンサネットワークの構築を可能とする電磁音波ハイブリッド型反射型センサネットワーク技術の創出を目指した。反射型センサ端末などのハードウェア技術、通信プロトコルなどのソフトウェア技術、アプリケーションレイヤ技術と物理デバイスレベルからシステムレベルまでの統合技術として完成させ、近未来センサネットワークの先導を狙った。

### 3. 研究の方法

センサ端末の低消費電力化を主軸に、以下の研究ステップにより物理の原理原則からシステム化までの体系化を目指した。

- (1) 電磁音波ハイブリッドによる空間の反射型センシング技術の検討: 反射型低電力センサ端末の水準としては、図3に示す3種類の構成が考えられるが、低消費電力性とセンシング感度とのトレードオフを考慮し、本研究ではアナログ変調型を主体に検討した。
- (2) システムを構成する物理デバイス(センサ端末)の設計、試作、評価: センサ端末の小型化、低コスト化を念頭にセンサインタフェース回路の集積回路化を実施した。

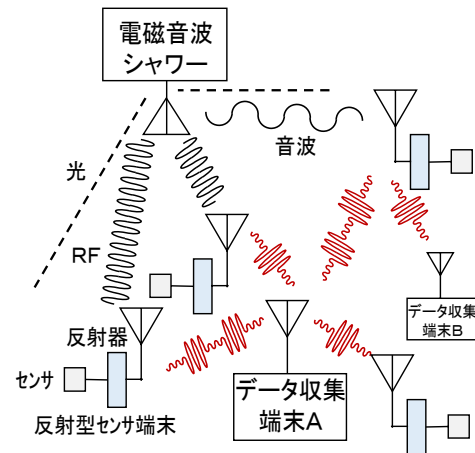


図2 電磁音波シャワーによる反射型ワイヤレスセンサネットワーク

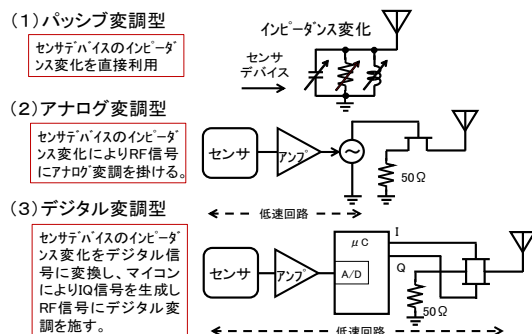


図3 反射型センサ端末の水準

(3) 反射型センサネットワークのシステム化：センサネットワークシステムとしての構築を目的として、電磁音波源、データ収集端末を含めたシステム（図2）としての構成法の検討を実施した。

(4) アプリケーション展開：具体的なセンサとの組合せにより、オフィス、医療現場、農業、工場、ヘルスケアなどへの応用展開の可能性評価を実施した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 電波利用による反射型センシング技術

まず、電波を反射するセンサ端末によるセンシング技術の有効性確認を実施した。市販部品により FM 変調型センサ端末回路（図3(2)）を試作し、920MHz の無線信号を照射し評価を行った。その結果、センサ信号に応じた反射信号を得ることに成功した。また回路の消費電力は 100 μW ほどで、従来のワイヤレスセンサ端末の 100 分の 1 以下の低電力動作の実現に成功し、低電力のワイヤレスセンシング技術として有効であることを確認した。

また、通信可能距離は反射信号レベルにより制限されることから、反射インピーダンスを変化させるスイッチング回路のインピーダンス変化量と反射信号レベルの関係を解析的に明らかにし、最適設計を行うための指針を得るとともに、5 m以上のワイヤレス通信（920MHz@24dBm）を実現できることを確認した。

##### (2) 低電力高機能ワイヤレスセンサ端末回路技術

反射型センサインタフェース回路では、従来の高周波の無線通信回路が不要で、回路は低速回路のみで実現できる。このため、先端的な集積回路技術は必要としないメリットが考えられる。そこで、低コストのレガシー集積回路技術を適用し、センサ端末のさらなる小型化、低電力動作化、高感度化を目指した。

##### ① 8.4 μW 動作のセンサ端末回路

図4に設計試作した 0.7μm CMOS 集積回路の構成とチップ写真を示す。回路は、RC 弛張発振回路をコアとし、抵抗型または容量型のセンサを接続し、センサのインピーダンスにより発振周波数を可変する周波数変調（FM）構成である。その FM 信号で、変調用 MOS トランジスタをスイッチングし、その出力インピーダンス変化により RF 信号を反射させる仕組みである。図5は、この IC を用いたセンサ端末モジュールとその動作を示すスペクトラム特性である。880 MHz の RF 信号を照射することによって、330 kHz 離調した反射信号（BS 信号）が得られていることが分かる。回路の消費電力は、8.4 μW で従来の端末回路技術に対して 1000 分の 1 以下の動作を実現し、センサ端末の低電力動作目標を達成した。

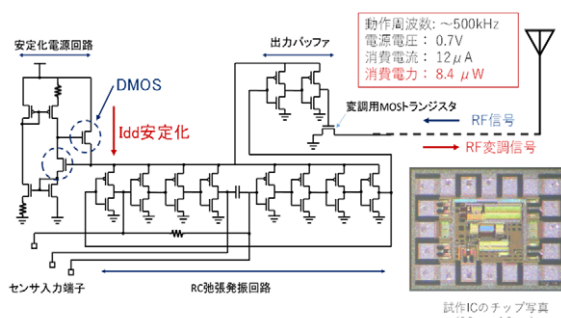


図4 センサインタフェース集積回路

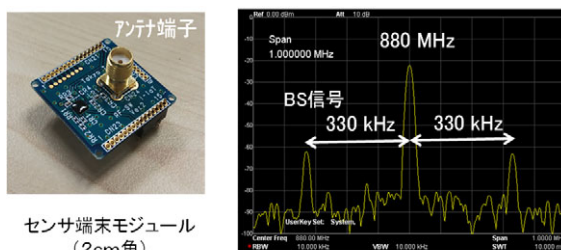


図5 センサ端末モジュールの RF 信号反射動作

##### ② ワイヤレスセンサ端末の高機能化

###### (a) バッテリーレス動作化

[小型太陽電池によるバッテリーレス動作実験] 10 mm x 25 mm の小型 4セル太陽電池（10 μA 出力@ 400 Lx 照度）を用いて室内光（照度約 500 Lx）での動作実験を行ない、バッテリーレスでの RF 信号反射によるセンシング動作を実現した。（図12の太陽電池モジュール写真を参照）

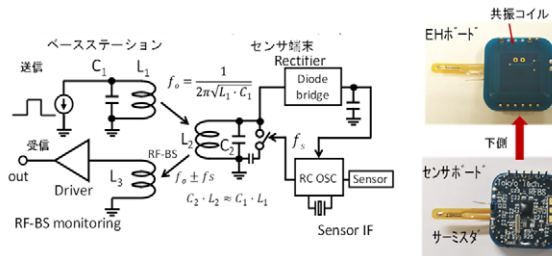


図6 電磁共鳴結合電力伝送による バッテリーレスセンシング

[電磁共鳴結合電力伝送によるバッテリーレス動作実験] 梱包荷物内などのブラインド環境のモニタリングを目的として、電磁波エネルギーを電源に活用するバッテリーレス構成の検討を行った。電磁波エネルギーとしては、高周波の RF 信号エネルギー伝送とコイルによる電磁共鳴結合による電力伝送が考えられるが、前者は高感度な大型アンテナが必要となることから、小型コイルによる後者の電力伝送方式を用いる構成が有効と判断し具体化した。図6にセンシングシステムの構成とセンサ端末モジュールの写真を示す。モジュールは、基板2枚のスタック構成で、1枚にはセンサインタフェース回路を、もう1枚には、共振コイルと整流回路からなる電源回路

を搭載している。サイズは、2 cm角である。信号反射によるセンシング動作は、センサ端末の共振コイルを短絡制御することにより実現している。5MHz 信号による電磁共鳴結合電力伝送実験を行った結果、バッテリーレスでの温度センシング動作の実現に成功した。

### (b) マルチセンシング動作化

図2に示したRF信号反射型センシングシステムでは、複数のセンサ端末の情報を同時取得できるが、各センサ端末は他と異なる周波数帯の信号を反射させる必要がある。バックスキュッタ信号周波数帯をセンサ端末ごとに設定できる構成を明らかにし、試作評価を行った。図7に集積回路化した回路構成を示す。水晶振動子の周波数、または、外部からの周波数信号入力により、反射信号周波数帯を端末ごとに設定することができる。6台のセンサ端末を用い500 kHz~1 MHzまでの範囲で、それぞれの周波数帯を100 kHz間隔に設定し、マルチセンシング動作実験を実施した結果、図7のスペクトラムに示すように、6つのセンサ端末情報の同時取得に成功した。また、マルチチャンネル数制限について、変調周波数帯域や高調波の影響などを考量したトレードオフ関係を解析的に明らかにした。

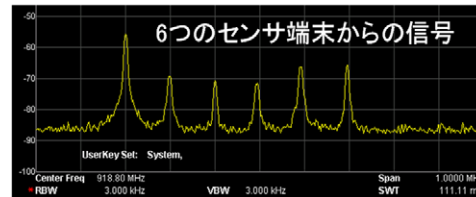
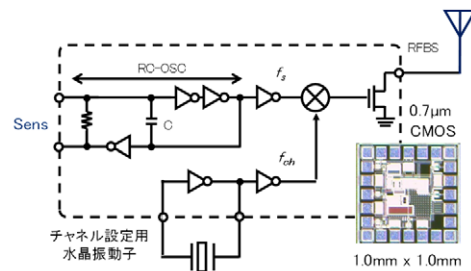


図7 周波数帯の設定が可能なセンサ端末回路とマルチセンシング動作時のスペクトラム

### (c) 高感度化

図4のFM変調構成では、センサの変化量に対して大きな周波数偏移が得られるように発振周波数帯を高く設定すれば、高感度化を実現できる。しかし、照射するRF信号に対する離調周波数も大きくなるため、周波数帯利用上好ましくない。そこで、図8に示す新たな差動構成を考案し、0.35 μm CMOS技術により集積回路化した。回路は高周波で発振する2つの発振回路を備え、1つはセンサに接続され他方は参照用として用いる。ミキサ回路で、それらの差周波数を反射信号の生成に用いることにより、離調周波数を大きくすることなく感度の改善を図ることができる。

図9は本構成によりプローブ型ワイヤレスpHセンサ(図11参照)への応用を検討した際に、pH感度について、図4の回路を用いた場合との比較結果を示したものである。pHセンサは電圧出力であるので、バリキャップにより電圧信号変化を容量変化に変換し図9のセンサ端子に接続している。従来の感度は、2 kHz/pH (@離調周波数450 kHz)であったが、図8の構成を採用することにより、約4倍の8.7 kHz/pH (@離調周波数150 kHz)の高感度化に成功した。但し、消費電力は、100 μWと増大するため、アプリケーションに応じて高感度化と低消費電力動作化のトレードオフを考慮する必要がある。

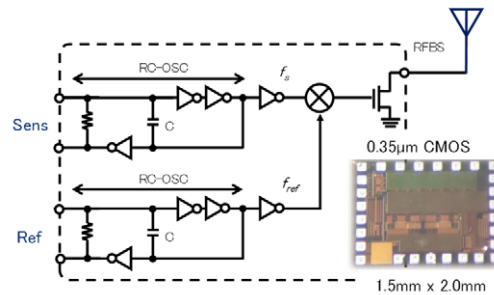


図8 高分解能動作が可能な差動構

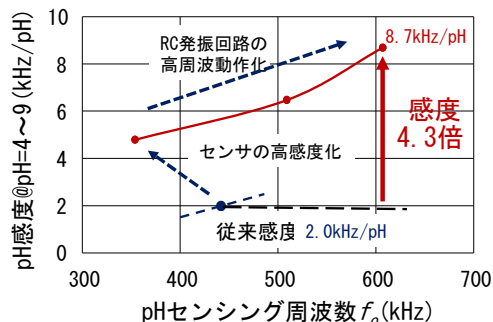


図9 ワイヤレスpHセンサの感度

### (3) 反射型センサネットワークのシステム化技術

低コスト化を念頭に既存技術の活用を進めた。電波源は、920 MHz帯のRFIDシステムの信号源を活用することにした。250 mWまでのRF信号の照射が可能で、利得0 dBiのアンテナを用いた場合、5m以上のワイヤレス通信が可能となる。反射信号からセンサ情報を収集する情報収集端末技術としてはソフトウェア無線技術の適用が有効であることを実験的に

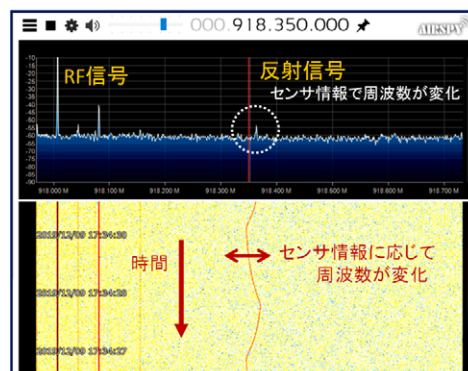


図10 ソフトウェア無線受信機によるセンシング

確認した。反射信号をソフトウェア無線受信機で受信することにより、センサ状態の変化を図10に示すような周波数スペクトラムの周波数変化として捉えることができる。ソフトウェア無線受信機は、廉価(数千円~数万円)のため、普及が期待できる。ソフトウェアの開発は、MATLAB/Simulinkの利用が便利で有効であることを確認したが、廉価なシステムとするためには、既存のフリーソフトの活用やオープンソースのプログラミング言語(Pythonなど)による無線信号処理を行うことにより、低コストでシステムを構築することができる。

表1 センサとの組合せ実験

パラメータ	使用センサ	実現感度@発振周波数帯	アプリケーション
温度	サーミスタ	7 kHz/°C @ 500 kHz	農業、オフィス等の環境モニタリング、人の健康管理
pH	Ir/IrOx pHセンサ	8.7 kHz/pH @ 150 kHz	
電圧	バリキャップ	25 kHz/V @ 350 kHz	設備、装置のモニタリング
AC電流	DC出力型電流コイル	25 kHz/A @ 100 kHz	
傾斜	加速度センサ	0.6 kHz/° @ 100 kHz	建築物のモニタリング等
重さ	抵抗型歪センサ	20 kHz/Kg @ 100 kHz	
音	MEMSマイク	音波変調確認 @ 130 kHz	

(4) アプリケーション展開

農場やオフィスなどの環境パラメータのモニタリング、工場設備や建築物などの監視、人の健康管理等への応用を目的として、様々なセンサとの組合せ実験を実施した。実施したセンサとの組合せ実験を表1に示す。

図11に、ワイヤレスpHセンシング実験の様子を示す。センサ端末回路は図9の回路を用いている。水溶液のpHが変化すると2つのスペクトラムの周波数差が変化する。pH変化に対する感度は、8.7 kHz/pHであった。分解能は、周波数のアラン分散特性を評価した結果、40 msの計測時間で、0.8 Hz (0.1 mpH) となることを明らかにした。pHセンサとしては十分な分解能である。また、通信可能距離は図12のダイポールアンテナを用いた場合、24dBmのRF信号照射により、5m以上の通信が可能であることを確認した。

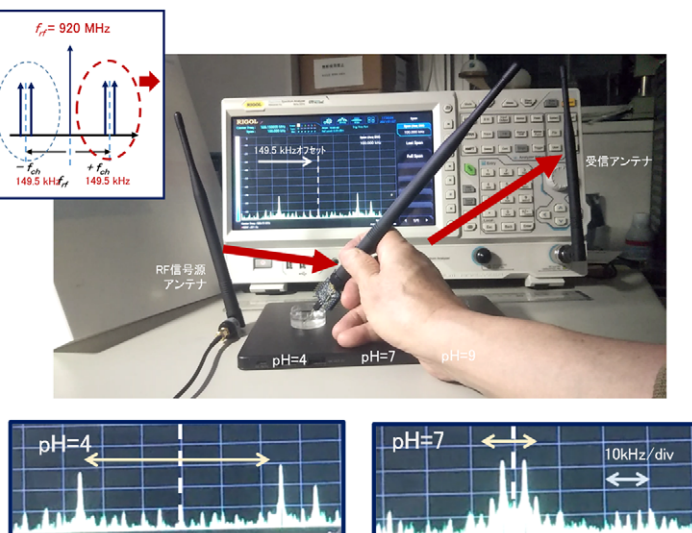


図11 ワイヤレスpHセンシング実験の様子

図12は電圧のワイヤレスモニタリング実験の様子を示している。電圧発生モジュールで2Vの三角波を発生させ、センサ端末モジュールで、その電圧変化を周波数変化に変換し、RFバックスキヤッタにより情報を受信モジュールへ送っている。スペクトラムの時間変化特性から分かるように電圧の変化波形に符合する周波数変化が得られている。なお、本実験でのセンサ端末は小型太陽電池による室内光(約500Lx)で動作しており、センサ端末には電源を供給していない。

(5) 研究成果のまとめ

以上より、RF信号反射動作を可能とする低消費電力のセンサ端末IC/モジュールを研究開発し、これを用いたセンシングシステム構成を明らかにした。さらに、その有効性を各種センサデバイスとの組合せ実験により確認、実証した。

これらの一連の成果により、信号反射型ワイヤレスセンサネットワークシステムの構成法、設計法を体系的に明らかにすることができ、本研究の目的を概ね達成することができた。

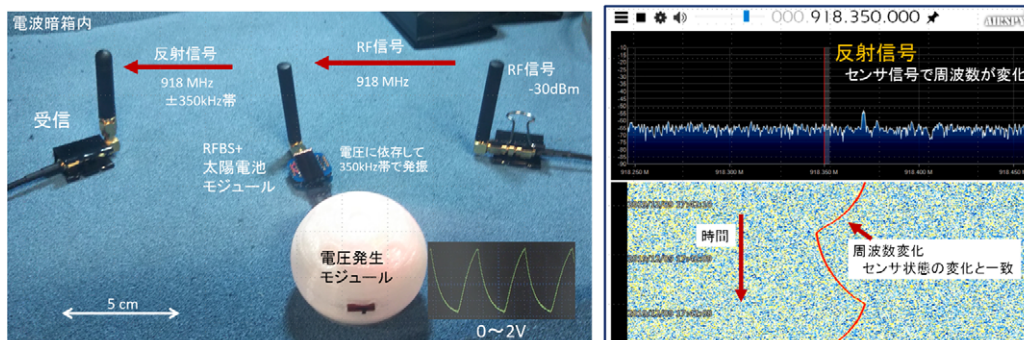


図12 ワイヤレス電圧センシング実験

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 ZiXuan LI, Chindanai RATANAPORNCHAROEN, Miyuki TABATA, Yuji MIYAHARA, Hiroyuki ITO, Noboru ISHIHARA
2. 発表標題 Battery-less Wireless Ir/IrOx pH Sensor Module using RF Resonant Electromagnetic Coupling
3. 学会等名 the 4th International Symposium on Biomedical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東京工業大学 未来産業技術研究所 伊藤研究室
2. 発表標題 IoT/AI時代に向けた低電圧・低電力RF CMOS集積回路/モジュールに関する研究開発
3. 学会等名 マイクロウェーブ展 (MWE2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊 伊織、石原 昇、伊藤 浩之
2. 発表標題 インピーダンス変換回路によるRF バックスキャタリング信号レベルの改善
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zixuan Li, Yifan Wang, Kaede Miyauchi, Noboru Ishihara, Hiroyuki Ito
2. 発表標題 Battery-less Wireless Sensor Module using RF Resonant Electromagnetic Coupling
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石原 昇
2. 発表標題 RFバックスキヤッタリングによるワイヤレスセンサ端末のバッテリーレス化への取り組み
3. 学会等名 インテリジェントIoTプラットフォームシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮内 楓、石原 昇、伊藤 浩之
2. 発表標題 バックスキヤッタリングによる低消費電力64QAM無線送信回路の設計法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 集積回路研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shodai MORITA, Ryo UMEOKA, Taichi TAGUCHI, Hiroyuki ITO, Noboru ISHIHARA
2. 発表標題 Low-Power Wireless Ir/IrOx pH Sensor Module using RF Backscattering
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Biomedical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石原 昇 (東京工業大学 未来産業技術研究所 伊藤研究室 代表)
2. 発表標題 IoT/AI時代に向けた低電圧・低電力RF CMOS集積回路/モジュールに関する研究開発
3. 学会等名 Microwave Workshop & Exhibition (MWE) 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮内 楓, 田口 泰地, 石川 洋介, 伊藤 浩之, 伊藤 浩之, 益 一哉, 石原 昇
2. 発表標題 RFバックスキヤッタリングによる低電力ワイヤレスセンサ端末モジュールの試作評価結果
3. 学会等名 2018年 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田口 泰地, 石川 洋介, 宮内 楓, 伊藤 浩之, 道正 志郎, 益 一哉, 石原 昇
2. 発表標題 RFバックスキヤッタリングによる低電力CMOSセンサインタフェース回路
3. 学会等名 2018年 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 ヨ ジョン, 伊藤 浩之, 石原 昇, 道正 志郎, 益 一哉
2. 発表標題 音波・電波ハイブリッドによる測距技術の基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 集積回路研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 無線センサおよびセンサネットワークシステム	発明者 石原昇、伊藤浩之、 道正志郎、益一哉	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018- 34546	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-



## 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	益 一哉  (Masu Kazuya)  (20157192)	東京工業大学・科学技術創成研究院・教授    (12608)	
連携研究者	道正 志郎  (Doshō Shiro)  (80636704)	東京工業大学・科学技術創成研究院・教授    (12608)	
連携研究者	伊藤 浩之  (Ito Hiroyuki)  (40451992)	東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授    (12608)	
連携研究者	山根 大輔  (Yamane Daisuke)  (70634096)	東京工業大学・科学技術創成研究院・助教    (12608)	

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

## 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関