

令和 6 年 5 月 9 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04177

研究課題名(和文) 持続可能インフラ監視プラットフォームの実現

研究課題名(英文) Sustainable infrastructure monitoring platform

研究代表者

金谷 晴一 (Kanaya, Haruichi)

九州大学・システム情報科学研究所・教授

研究者番号：40271077

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：平面アンテナと整流回路を一体型で実現したエネルギーハーベスティングシステムを構築した。試作したエネルギーハーベスティングシステムにセンサとBLE(Bluetooth lowenergy)モジュールを接続し、センシングの実験を行った。このシステムにリセットICを用いたウェイクアップ回路を追加使用することで、キャパシタの充電を待ってセンサとBLEモジュールをマニュアルで接続することを回避した。室内で天井に送信アンテナを配置する形での、より実用的な実証実験でセンサとBLEの持続的な動作に成功した。よって本科研費の計画通りに研究成果を得ることが出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

道路、鉄道、空港、エネルギー施設等のインフラ、及び巨大構造物等の社会基盤において、老朽化や点検不足が原因とされる事故・事例が社会的な大きな関心事となっている。今後の人口減の中で、無線センサ・ネットワークを用いたインフラのモニタリングが急務の課題である。また、エネルギー問題や省エネへの関心が高まっており、低環境負荷のエネルギー源が求められている。そこで注目されているのがエネルギーハーベスティングという技術であり、環境発電技術とも呼ばれている。電磁波を用いたエネルギーハーベスティング技術を開発することで、空間の電磁波をエネルギーとするバッテリー不要なIoTシステムが完成できる。

研究成果の概要(英文)：We have constructed an energy harvesting system that integrates a planar antenna and a rectifier circuit. We connected a sensor and a BLE (Bluetooth low energy) module to the prototype energy harvesting system and conducted a sensing experiment. By adding a wake-up circuit using a reset IC to this system, we avoided having to wait for the capacitor to charge with manually connecting the sensor and BLE module. In a more practical demonstration experiment in which a transmitting antenna was placed on the ceiling indoors, we succeeded in achieving sustained operation of the sensor and BLE. Therefore, we were able to obtain research results as planned with the Grant-in-Aid for Scientific Research.

研究分野：電子回路

キーワード：エネルギーハーベスティング 高周波 無線通信 平面アンテナ レクテナ バッテリレス

1. 研究開始当初の背景

道路、鉄道、空港、エネルギー施設等のインフラ、及び巨大構造物等の社会基盤において、老朽化や点検不足が原因とされる事故・事例が社会的な大きな関心事となっている。今後の人口減の中で、無線センサ・ネットワーク (IOT) を用いたインフラのモニタリングが急務の課題である。また、エネルギー問題や省エネへの関心が高まっており、低環境負荷のエネルギー源が求められている。そこで注目されているのがエネルギーハーベスティングという技術である。すなわち、周辺環境に偏在している未利用なエネルギーを収集し電力に変換する技術であり、環境発電技術とも呼ばれている。我々の身の回りには光、振動、圧力、熱、温度差など、使われずに捨てられているエネルギーが多く存在しており、これらを用いて発電しようという技術である。エネルギーハーベスティングで有力視されているエネルギー源の一つとして、無線通信用に用いられる電磁波 (マイクロ波) がある。しかし、収集される無線エネルギーは周辺環境に存在し、さらに放射電力は極めて微弱であるため (例: WiFi の場合、出力 = 10mW)、エネルギーハーベスティング回路への入力電力は非常に微弱である (例: 通信距離 10m にて、入力 = 10nW)。

2. 研究の目的

これまでの電磁波を利用した給電技術では発電量が数 μW にとどまっていたため、例えば、RFID タグシステム等に利用が限定されていた。その理由として、交流 - 直流変換回路 (昇圧整流回路) に多数のスイッチング用ダイオードとキャパシタを必要としていたからである。すなわち、微弱なマイクロ波帯においては各素子に内在する寄生抵抗による電力損失が相対的に大きくなり、高い昇圧効率が得られなかったためである。そこで、マイクロ波帯において電圧振幅のみを増大させることで、寄生素子による電圧減衰の影響を小さくできないかと考え、マイクロ波帯において電圧振幅のみを増大するための新たなインピーダンス整合回路を思い付いた。さらに、研究代表者が長年研究している高利得・広帯域平面アンテナの直後に本回路を直結し、伝送線路の損失も併せて減少させる。アンテナ、整合回路、昇圧整流回路を一体化設計し、センサ、及びデータ転送モジュールを実装することで、センサプラットフォームを構築する。最終的にセンサ、及び Bluetooth や Zigbee 等のデータ転送モジュールの駆動に必要な 2.5V の出力電圧、50mW の出力電力、及び 50m の電力伝送距離 (従来の 10 倍) を得ることを目的とする。本研究で実現する最終形態のイメージを図 1 に示す。

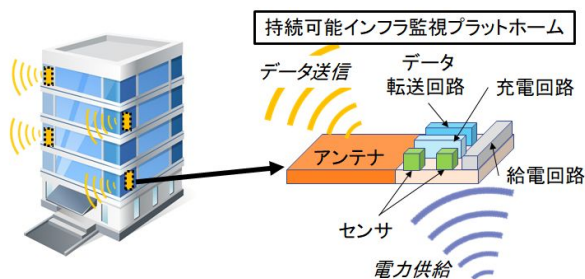


図 1. 最終形態のイメージ図

3. 研究の方法

本研究では、「持続可能インフラ監視プラットフォーム」を開発する。研究期間内に以下のことを実現する。

- (A) インピーダンス整合回路の開発: マイクロ波帯における振幅を共振によって増大させるため、型共振フィルタを応用したインピーダンス整合回路を開発する。ここでは申請者が提案した、整合回路の設計理論を応用する【特許第 4811807 号】。
- (B) 昇圧整流回路の開発: ダイオードとキャパシタによる“はしご型回路”により微弱電波を昇圧・整流する【Energy Harvesting Circuit on a One-Sided Directional Flexible Antenna”, H. Kanaya, S. Tsukamoto, T. Hirabaru, D. Kanemoto, R. K. Pokharel, K. Yoshida, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 23, (3), pp. 164-166, 2013】。さらに昇圧回路を多段化することで出力電圧の増幅を試みる。
- (C) 高利得・広帯域平面アンテナの開発: マイクロ波を高効率で受信可能な小型広帯域指向性アンテナを開発する【特許第 5213039 号】。
- (D) 一体化{(A) + (B) + (C)}: まず上記(A)と(B)を一体化し、プラットフォームのプロトタイプを作成する。さらに一体化した回路ブロックを複数用意し、直列接続することで直流出力電圧の増幅を行う。

4. 研究成果

倍電圧整流回路を図 2 に示す。倍電圧整流回路では交流入力電圧の振幅より大きい直流電圧を得られる。この回路の動作について説明する。まず、最初の交流入力 of の負の半周期で D_1 はオンとなり C_1 は入力の最大値 V_{peak} のエネルギーレベルまで充電され、その端子の電圧は V_{peak} となる。次に、正の半周期で D_2 がオンとなり、 C_2 も充電される。その結果、負荷抵抗が十分大きい場合、2 つのコンデンサが直列に接続される (各コンデンサには V_{peak} の電圧が保存される) ので、定常状態において C_2 の端子電圧は $2V_{peak}$ となる。すなわち、ダイオードの順方

向電圧を無視した場合、交流入力振幅の2倍の電圧が得られる。入出力波形を図3示す。しかし、コンデンサが直列に入るため、負荷抵抗が小さくなると出力電圧が急激に低下する。したがって、大電流を取り出すには不適である。この回路をn段接続すると出力電圧は $2nV_{peak}$ となり、高電圧の電流を得ることができる。これはコッククロフト・ウォルトン回路と呼ばれる。この回路とアンテナの間にインピーダンス整合回路を接続することで一体化を行う。

電磁界解析とSIPCEシミュレーションを統合して設計したレクテナ(アンテナ+整流回路)の回路図およびレイアウトを図4に示す。青線で囲まれた部分が図2の回路を8段接続したRF整流回路であり、緑線で囲まれた部分が本研究で設計した平面アンテナである。アンテナとRF整流回路をコネクタで接続せずに、一体化し同一基板上に配置することでコネクタによる損失を無くしている。

インピーダンス整合回路の各素子の値は $L1=1.6nH$ 、 $L2=75nH$ 、 $C1=0.3pF$ である。レクテナは整流回路がアンテナと一体となっているため、アンテナの特性インピーダンスと整合するように設計を行った。昇圧整流回路は整流素子として順方向電圧が小さいショットキーダイオード(SMS7630-005LF(SKYWORKS))を使用した。また、キャパシタ $C2$ は $100pF$ を使用した。

この8段の倍電圧整流回路を1セットとし、同じ回路を複数個繋げ、出力を合わせることでさらに大きな出力電圧が得られると考えた。回路に使用するキャパシタやダイオードの寄生抵抗による消費電力を考慮すると、さらに段数を増やすよりもこの構成の回路の方が有用であると考えられる。そこで8段の倍電圧整流回路を3セット繋げた回路を設計した。設計したアンテナは誘電率 $\epsilon_r=4.4$ 、厚さ $h=0.8mm$ 、誘電正接 $\tan \delta=0.02$ の単層FR4基板上にフライス盤(MITS株式会社の基板加工機)を使用して作製した。試作したレクテナを図5に示す。

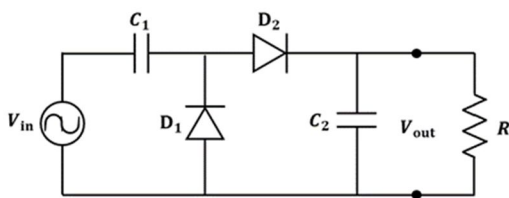


図2. 倍電圧整流回路

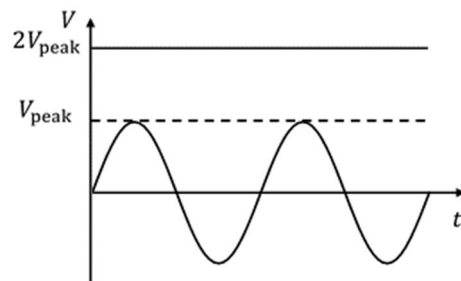


図3. 入出力電圧波形

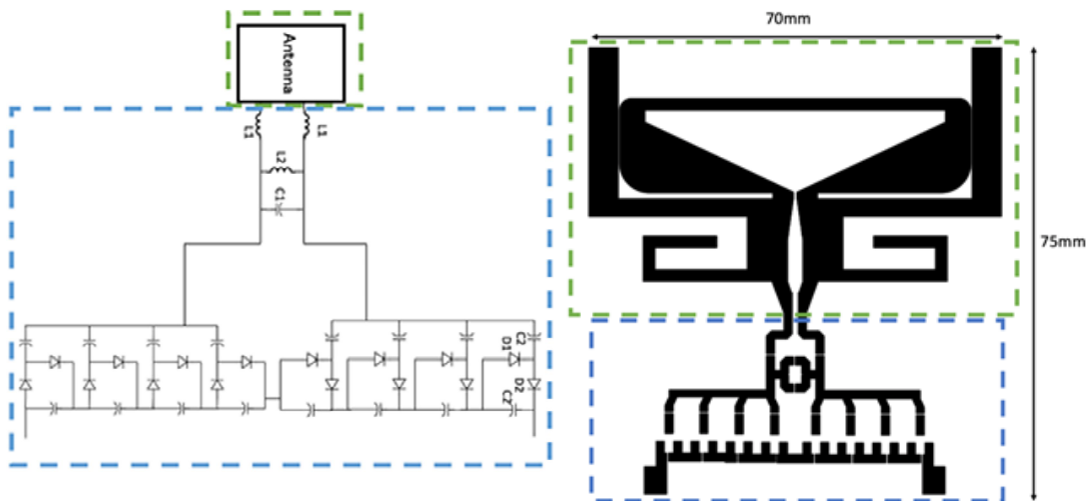


図4. レクテナの回路図およびレイアウト

送信用のアンテナにはアンテナ1とアンテナ2の2種類使用し、測定結果を比較した。アンテナ1は円偏波、アンテナ2は垂直偏波のアンテナである。それぞれ利得が9dBiであるが、アンテナ1は円偏波であるため、利得が3dBi減り、6dBiとなる。また、測定系において、受電側のセンサ・BLE(Bluetooth low energy)送信モジュールの前にリセットICを挿入している。リセットICによりキャパシタが充電されたらキャパシタとセンサ・BLEが接続される。これによりセンサ・BLEの接続をリセットICにより充電されたタイミングで通信を行う。天井に設置した平面アンテナと机の上に置いたレクテナの間の距離は1.65mである。図6に測定系の写真を示す。

図7はキャパシタ電圧の時間変化を示している。図7より、キャパシタが充電されるとリセットICによりセンサ・BLEと接続され、センサとBLEは動作し、電力を消費し電圧が低下して

いることが分かる。その際に通信が行われており、アンテナ 1、アンテナ 2 どちらもセンサ・BLE の持続的な駆動に成功していることが分かる。また、図 8 の PC の画面からも温湿度のデータが確認でき、センサと BLE の動作に成功していることが分かる。

5. まとめ

平面アンテナを送信アンテナに用いて EH システムを構築して行ったセンサ・BLE 実験について述べた。また、このシステムにはリセット IC を使用することで、キャパシタの充電を待ってセンサと BLE モジュールを接続する必要がなくなっている。室内で天井に平面アンテナを配置する形での、より実用的な実証実験でセンサと BLE の持続的な動作に成功した。よって本科研費の計画通りに研究成果を得ることが出来た。

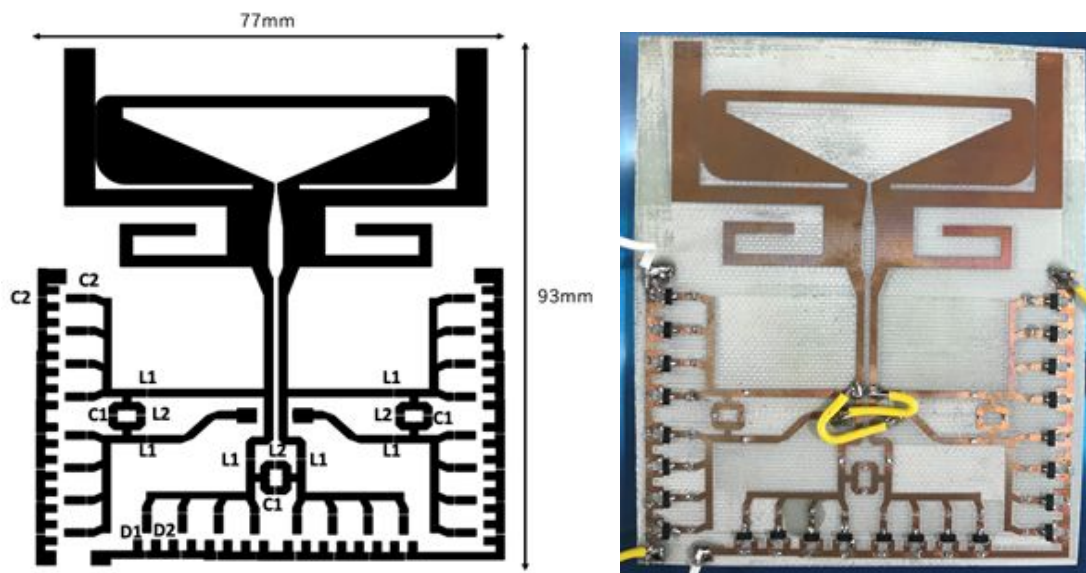


図 5. レイアウトおよび試作したレクテナ

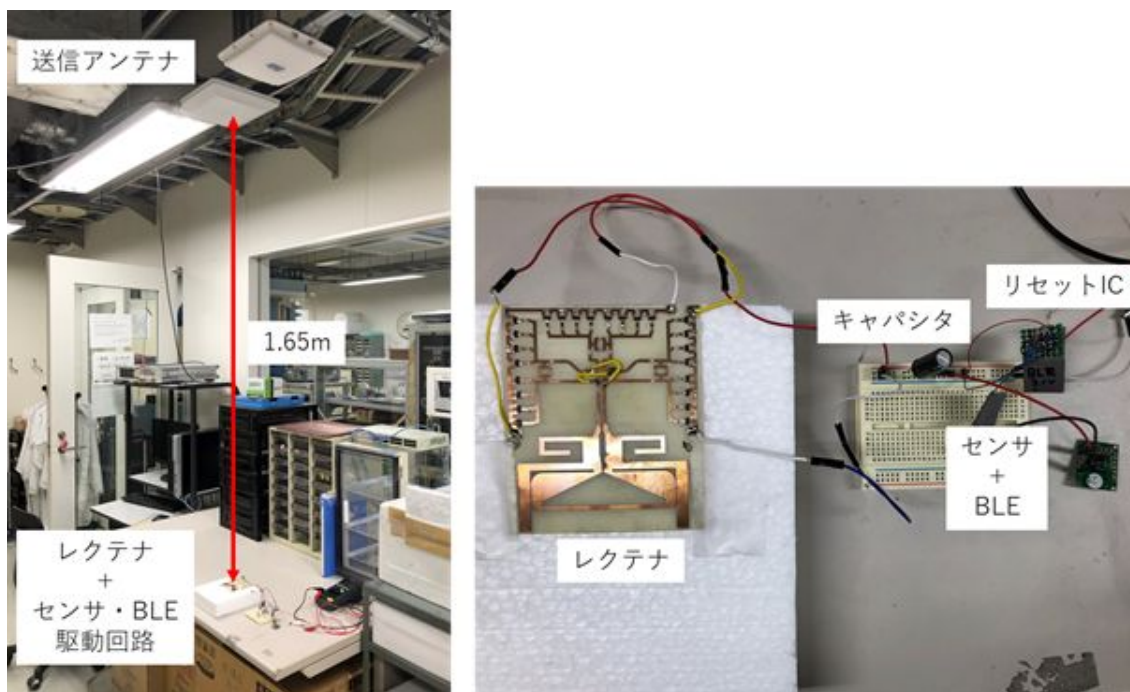


図 6. 測定系の全体写真とレクテナ、センサ及び BLE 通信回路

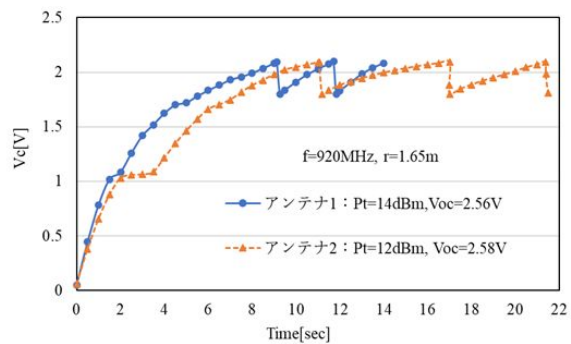


図 7. キャパシタの端子電圧の時間変化

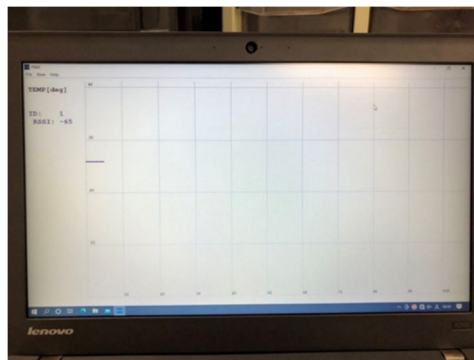


図 8. PC に転送された気温データの時間変化の様子

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Haruichi Kanaya	4. 巻 1
2. 論文標題 2.4/5 GHz Dual-Band Multilayer Slot Array Antenna	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting	6. 最初と最後の頁 2024-2025
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Che Ming, Kondo Kazuya, Kanaya Haruichi, Kato Kazutoshi	4. 巻 40
2. 論文標題 Arrayed Photomixers for THz Beam-Combining and Beam-Steering	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 6657 ~ 6665
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JLT.2022.3204113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tetsuya Sagawa, Ichiro Komaki, Yuki Okawa, Yasunari Kohashi, Haruichi Kanaya	4. 巻 1
2. 論文標題 Design of 2.4 GHz one-sided directional slot antenna with the main board	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. 24th IEEE Electronics Packaging Technology Conference	6. 最初と最後の頁 286-289
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shota Torigoe, Ryoma Hosaka, Mohamed M. Mansour, Osamu Takiguchi, Masaya Murakami, Haruichi Kanaya	4. 巻 1
2. 論文標題 Development of RF Energy Harvesting Circuit by Multistage and Multiple Connections	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. 24th IEEE Electronics Packaging Technology Conference	6. 最初と最後の頁 295-298
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Koto Miyahara, Takeshi Ishibashi, Kim Kong Tham, Kumar Goodwill, Haruichi Kanaya	4. 巻 1
2. 論文標題 One-sided directional slot antenna with magnetic film for 28 GHz application	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. 24th IEEE Electronics Packaging Technology Conference	6. 最初と最後の頁 325-328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Haruichi Kanaya, Osamu Takiguchi, Shunsuke Uto, Katsumi Shimomura	4. 巻 1
2. 論文標題 Battery Less Soil Moisture Sensors for Strawberry Seedlings	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. ICEP (International Conference on Electronics Packaging)	6. 最初と最後の頁 27-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masaya Murakami, Mohamed M. Mansour, Shota Torigoe, Shuya Yamamoto, Haruichi Kanaya	4. 巻 1
2. 論文標題 Development of Power Management System for RF Energy Harvester	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. ICEP (International Conference on Electronics Packaging)	6. 最初と最後の頁 33-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mohamed M. Mansour, Masaya Murakami, Shota Torigoe, Shuya Yamamoto, Haruichi Kanaya	4. 巻 1
2. 論文標題 Experimental Demonstration of Wireless Energy Harvesting for ZigBee Wireless Communication	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. ICEP (International Conference on Electronics Packaging)	6. 最初と最後の頁 149-150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ming Che, Haruichi Kanaya, and Kazutoshi Kato	4. 巻 29
2. 論文標題 Optically controlled THz power tuning based on interference at transmission line	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 20034-20044
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.423308	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mohamed M. Mansour, Shota Torigoe, Shuya Yamamoto and Haruichi Kanaya	4. 巻 10
2. 論文標題 Compact and Simple High-Efficient Dual-Band RF-DC Rectifier for Wireless Electromagnetic Energy Harvesting	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Electronics	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/electronics10151764	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 保坂亮磨、鳥越翔太、Goodwill Kmar、金谷晴一
2. 発表標題 コッククロフトウォルトン回路の多段化による無線エネルギーハーベスティング回路の開発
3. 学会等名 2022年度 (第75回) 電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新地茉央、竹上航平、Goodwill Kumar、金谷晴一
2. 発表標題 ベイズ最適化による900MHz 帯単方向指向性スロットアンテナの設計及び評価
3. 学会等名 2022年度 (第75回) 電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金谷晴一
2. 発表標題 THz帯オンチップアレイアンテナに関する研究
3. 学会等名 URSI-C委員会 第25期 第3回公開研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金谷晴一
2. 発表標題 無線エネルギー伝送技術の医療機器への応用
3. 学会等名 日本機械学会 第34回バイオエンジニアリング講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 亀野流, 中山裕文, 島岡隆行, 金谷晴一
2. 発表標題 廃棄物埋立地の環境モニタリングを目的としたIoTシステムの開発に関する基礎的研究
3. 学会等名 第33回 廃棄物資源循環学会 研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金谷晴一、多喜川良、加藤和利、浅野種正
2. 発表標題 テラヘルツ帯オンチップスロットアレイアンテナの開発
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金谷 晴一、滝口 収、高橋 秀之
2. 発表標題 耳標型無給電バイタルセンシングプラットフォーム
3. 学会等名 第31回マイクロエレクトロニクスシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮原鼓人、金谷晴一
2. 発表標題 磁性体薄膜を用いた28GHz帯単方向指向性スロットアンテナの設計及び評価
3. 学会等名 2021年度(第74回) 電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹上航平、金谷晴一、山本駿佑
2. 発表標題 ベイズ最適化による28GHz帯単方向スロットアンテナの設計
3. 学会等名 2021年度(第74回) 電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鳥越翔太、Mansour M. Mohamed、保坂亮磨、金谷晴一
2. 発表標題 倍電圧整流回路の多段化による無線エネルギーハーベスティング回路の開発
3. 学会等名 2021年度(第74回) 電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 管理システム	発明者 島岡 隆行、金谷 晴一、榊原 恒治、 佐藤 英夫	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-028932	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 片面放射アンテナおよび片面放射アンテナの製造方法	発明者 金谷 晴一、石川 晶、深川 秀午、烏 山 蓮	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-042976	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

Kanaya Labo https://yossvr0.ed.kyushu-u.ac.jp/
--

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------