

エネルギーの有効活用を目指した環境発電に関する研究

(電磁波ノイズの回収と蓄電に関する技術開発)

電子情報科 主任研究員 中 川 豪

IoT 機器の急速な普及に伴いあらゆる場所にセンサデバイスが設置され、情報の収集と演算、データの無線送信が行われている。これら IoT センサデバイスの電源として、環境発電技術が注目されている。代表的な環境発電のエネルギー源として光^[1]・振動^[2]・熱^[3]・電磁波^[4]等が挙げられるが、電磁波エネルギーによる環境発電は他のエネルギー源に比べ発電量が 1/100～1/10 と少ないという問題があった。そこで本研究では、屋内で稼働する電気・電子機器（民生機器、産業機器）から放出されている不要な電磁波ノイズに着目し、これをエネルギー源とした電磁波ノイズ発電技術について検討した。MHz 帯域の放射ノイズ計測によるノイズ源の調査、アンテナ形状の検討及び作製、設計・試作した昇圧整流回路の機能検証を行い、開発した発電ユニットのノイズ抑制用途への応用可能性について検証し、その有効性を確認できた。

1. 緒言

持続可能な社会の実現に向け、環境発電（エネルギーハーベスティング）が注目されている。ここでいう環境発電とは、身の回りに薄く広く存在している微小なエネルギーを収穫し、微弱な電力に変換して有効利用する技術であり、送電網（系統電力）から分離した、電池を代替する持続的電源といえる。近年の IoT 機器の急速な普及に伴い、住宅や工場、商業施設、インフラ（道路、橋など）、農場などありとあらゆる場所にセンサデバイスが設置され、ワイヤレスセンサネットワークを構築して情報の収集と演算、データの無線送信が行われている。これら IoT センサデバイスの電源には一般的にボタン電池などが使われているが、センサデバイスが置かれている周囲の環境には捨てられて無駄になっている様々なエネルギーが存在している。これらの環境エネルギーから電力を取り出すことができれば、エネルギー的に自立したデバイスとして、長期間にわたりメンテナンスせずに使用することが可能になる。このように環境発電は IoT 分野と相性が良く、大量の一次電池廃棄に伴う環境負荷を低減できるだけでなく、本来は捨てられていたエネルギーを有効に活用することで間接的な省エネや省資源の実現にも貢献しうる高付加価値なエネルギー源として、今後欠かすことのできない重要な技術であるといえる。

代表的な環境発電のエネルギー源として、光（室内光）・振動（応力）・熱、電磁波等が挙げられる。現状、光をエネルギー源とした環境発電が最大のシェアを占めているが、一方で、電磁波エネルギーによる環境

発電は他のエネルギー源に比べて発電能力が 1/100～1/10 と少なく、実用化は 2030 年頃という予測^[5]がある。また、現在実施されている環境電波発電の研究開発は、そのほとんどが携帯電話や TV 放送、Wi-Fi 用の電波をエネルギー源としたものである。

2. 実験内容

本研究では、屋内で稼働する電気・電子機器（民生機器、産業機器）から放出されている不要な電磁波ノイズに着目し、これら MHz 帯域の放射ノイズを新たなエネルギー源とした電磁波ノイズ発電ユニットの開発を行う（図1）。研究項目は以下のとおりである。①エネルギー源となる電磁波ノイズについて、周波数範囲とノイズレベルを調査する。②電磁波ノイズを効率的に回収できるアンテナ形状について検討する。③回収した電磁波エネルギーを蓄電するため、昇圧整流回路を設計・試作し、機能評価を行う。④発電ユニットをノイズ抑制用途に応用展開するための検証を行う。

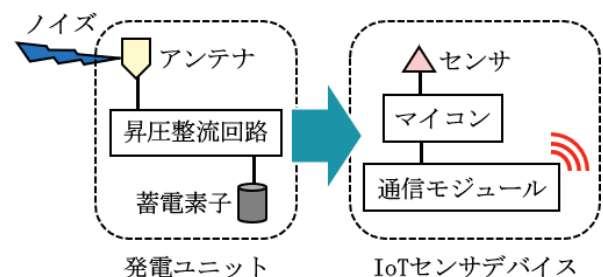


図1 環境電波発電ユニットの模式図

3. ノイズ源の調査

まずはノイズ源の調査として、当センターに設置されている様々な電気・電子機器を対象に、稼働中に発生している不要な電磁波ノイズを計測した。スペクトラムアナライザを用い、0.1 MHz～960 MHz の周波数範囲において、連成解析システム（CAE シミュレーションシステム）のノイズ測定を行った結果を一例として図2に示す。図2の縦軸は雑音電圧（dB μ V）、横軸は周波数（MHz）であり、図中の(a)はホイップアンテナ、(b)はロッドアンテナ（20 cm）を用いて同時に測定した結果^[6]を示している。測定対象機器から 30 cm の距離に各アンテナを設置し、測定時間を 10 分としてピークホールド測定を行った。図2より、連成解析システム（計器校正室）では781.9 MHz で70.6 dB μ V の雑音電圧（最大ピーク値）が計測されている。

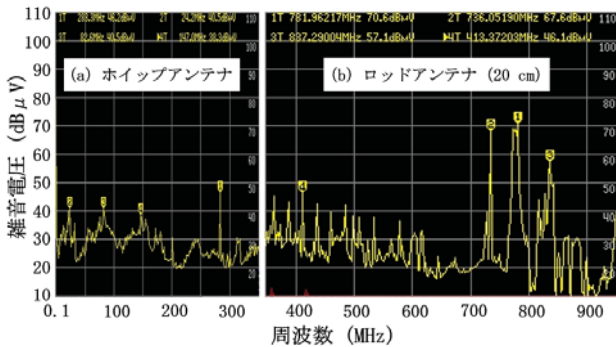


図2 連成解析システムにおけるノイズ測定結果

ノイズ測定を実施した電気・電子機器のうち、稼働率が高い開放設備機器や長時間運転している計算機器などについて、雑音電圧の最大ピーク値とその周波数を表1にまとめた。表1より AGV（無人搬送車）において最も大きな雑音電圧（836.3 MHz で最大ピーク値：83.6 dB μ V）が計測されているが、これは当センター研究員による開発機であり筐体を取り付けていない。筐体によるシールド効果がなく、電磁波ノイズが空間に放射されやすくなっていることから参考測定とした。以上より AGV を除く複数の電気・電子機器において 720 MHz～840 MHz の周波数帯域で 70 dB μ V～80 dB μ V 程度の電磁波ノイズが発生していることを確認できた。これらを電力に換算すると、0.2 μ W～2.0 μ W（AGV：4.0 μ W）に相当するノイズレベルである。また、測定対象機器が停止している状態で各室内のノイズ測定を行ったところ、280 MHz、780 MHz、840 MHz 近傍では常にノイズが発生していた。これらは屋

表1 ノイズ測定結果

測定対象機器	雑音電圧の最大ピーク値	周波数
振動試験装置	80.6 dB μ V	720.2 MHz
連成解析システム （計器校正室）	70.6 dB μ V	781.9 MHz
連成解析システム （機械設計研究室）	70.1 dB μ V	835.7 MHz
三次元造形装置	74.6 dB μ V	837.4 MHz
機械学習用 PC	57.6 dB μ V	733.1 MHz
AGV（※参考）	83.6 dB μ V	836.3 MHz
超低温恒温恒湿器	57.6 dB μ V	835.3 MHz
冷熱衝撃試験装置	63.6 dB μ V	836.4 MHz

外の無線電波によるものと推察されるが、いずれも雑音電圧は 30 dB μ V～40 dB μ V であった。

4. アンテナの作製

令和5年度に平面アンテナを試作してノイズ計測を実施^[7]したが、ノイズ源の調査結果（表1）をもとにターゲットとする周波数範囲を 720 MHz～840 MHz とし、平面アンテナの構造について詳細に検討した。FR-4 ラミネート基板（裏面：銅張、比誘電率：4.7）を用いて作製した平面アンテナの外観を図3に示す。片面をマスキングし、電磁波シールド用の導電性塗料をスプレー塗布することでアンテナ開口部を形成しているが、基板に貫通孔を形成して裏面から配線する構造とした。基板裏面をアース電極（GND）としている。

まずは放射ノイズを効率的に回収するため、アンテナの共振周波数で同調するように LC 共振回路の定数検討を行った。共振周波数 f_o は式1で表される。

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

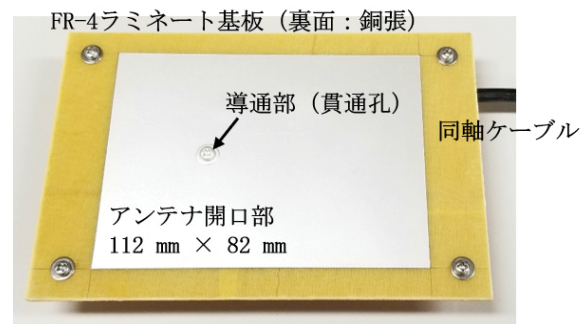


図3 作製した平面アンテナ

LC 共振回路として使用するコンデンサ容量を変化させ、ノイズ計測を実施した結果を図4 (a)に示す。使用したコンデンサ容量は10 pF、22 pF、33 pF、47 pF、68 pFであるが、33 pFのときに最大感度が得られていることが分かる。作製した平面アンテナは共振周波数が800 MHzになるよう設計しているため、式1より共振回路に必要なコイルのインダクタンスは1.2 nHとなる。共振コンデンサには、チップコンデンサではなくリード付のセラミックコンデンサを用いており、リード線にはインダクタンスが存在する。リード線の線径は0.5 mmであるため、線長を2.84 mmに調整した場合にインダクタンスは1.2 nHとなり、これを共振回路として使用することにした。

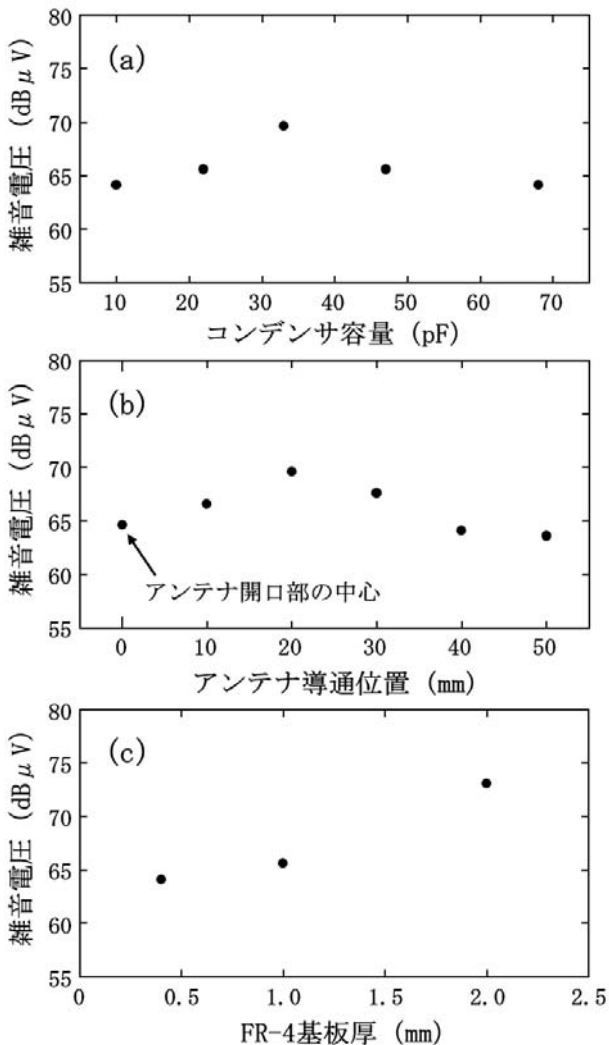


図4 (a) 共振回路におけるコンデンサ容量の検討、
(b) 平面アンテナにおける導通位置の最適化、
(c) 基板厚さの検討

次にインピーダンス調整のため、アンテナ開口部（ノイズ受信電極）における導通位置の最適化を行った。開口部の中心点を基準として、長手方向に10 mm間隔で導通部（貫通孔）を形成したアンテナを作製し、同一のノイズ源（周波数：800 MHz）に対し同時にノイズ測定した結果を図4 (b)に示す。これより、アンテナの導通位置を中心点から長手方向に20 mm離れた点で最大感度が得られていることが分かる。

最後に誘電体基板の厚さについて検討した。0.4 mm、1.0 mm、2.0 mmと厚さの異なるFR-4 ラミネート基板を用いて平面アンテナを作製し、同一のノイズ源（周波数：800 MHz）に対し同時にノイズ測定した結果を図4 (c)に示す。これより、基板の厚さ増加に伴い感度が上昇しているのが分かる。

以上の検討結果を踏まえ、図3に示したとおりFR-4 ラミネート基板（基板厚：2.0 mm、裏面：銅張、比誘電率：4.7）を用いて平面アンテナを作製した。アンテナ導通部（貫通孔）はアンテナ開口部の中心点から長手方向に20 mm離して形成している。共振周波数を800 MHzとし、基板の厚さや比誘電率を考慮して、アンテナ開口部を112 mm×82 mmに設定している。

図5 (a)に、作製した平面アンテナのVSWR（電圧定在波比）をネットワークアナライザを用いて測定した結果を示す。図5 (a)の縦軸はVSWR、横軸は周波数である。VSWRは高周波が通過する際の反射の度合いを示す数値で、反射係数を ρ とすると式2で表される。反射が存在しない場合（ $\rho=0$ ）にはVSWR=1となる。即ち、VSWRが大きいとアンテナの受信効率が劣化すると言える。

$$VSWR = \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|} \quad (2)$$

図5 (a)より、作製した平面アンテナではターゲットとした周波数800 MHzを中心に、770 MHz～830 MHzの周波数範囲においてVSWRが1.5以下の良好な特性が得られた。作製した平面アンテナを用い、350 MHz～960 MHzの周波数範囲において、事務処理用デスクトップPCのノイズ測定を行った結果を図5 (b)に示す。図5 (b)の縦軸は雑音電圧 (dB μV)、横軸は周波数 (MHz)である。アンテナの受信電極を測定対象物であるPCに対向させて配置し、測定時間を10分としてピークホールド測定を行った。図5 (b)より、デスクトップPCでは798.4 MHzで73.1 dB μVの雑音電圧（最大ピーク値）が計測された。

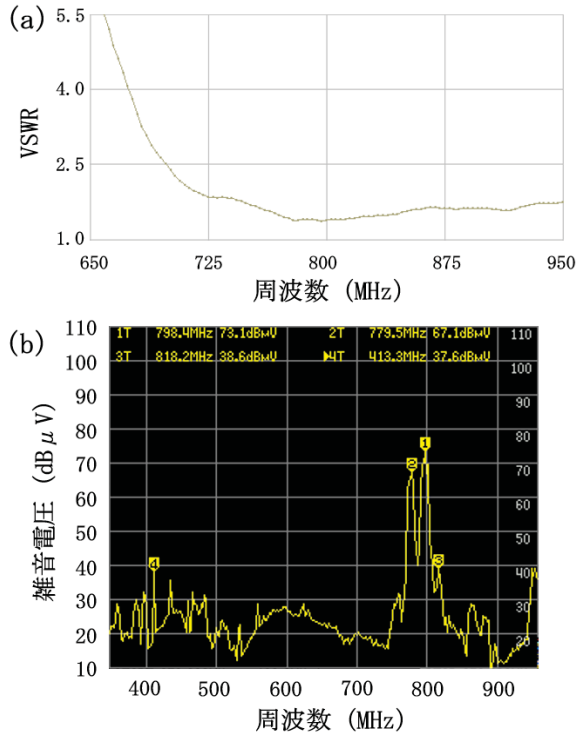


図5 (a)作製した平面アンテナのVSWR、(b)事務処理用デスクトップPCにおけるノイズ測定結果

5. 昇圧整流回路の設計、試作、性能評価

アンテナで回収した放射ノイズの電磁波エネルギーを蓄電するため、昇圧整流回路を設計・試作し、機能評価を行った。試作した昇圧整流回路の回路図を図6(a)に、外観を図6(b)に示す。図6(a)より、ダイオード2個とコンデンサ2個で1段(N=1)の回路を構成している。入力に交流電圧(ピーク値: V_p)が印加されると、入力電圧の正負の反転に応じてダイオードを通しコンデンサが充電される。 C_1 は D_1 を通して最大で V_p まで充電され、入力電圧が反転すると D_2 を通して前段の C_1 に充電された分と入力電圧分が充電されるため、 C_2 にかかる電圧は $2V_p$ となる。その後は入力電圧が反転するたびに前段のコンデンサから各ダイオードを通して次段のコンデンサが充電されるため、 C_2 以降のコンデンサにかかる電圧はいずれも $2V_p$ となる。その結果、回路がN段の場合、出力とGNDの間にはN個のコンデンサが直列に接続されているため、無負荷での出力電圧 V_o は入力電圧のピーク値 V_p の2倍に段数Nをかけた値となり、式3で表される。

$$V_o = 2NV_p \quad (3)$$

図6(b)より、試作した昇圧整流回路は5段(N=5)であり、ダイオードの順方向電圧は0.28 V、コンデン

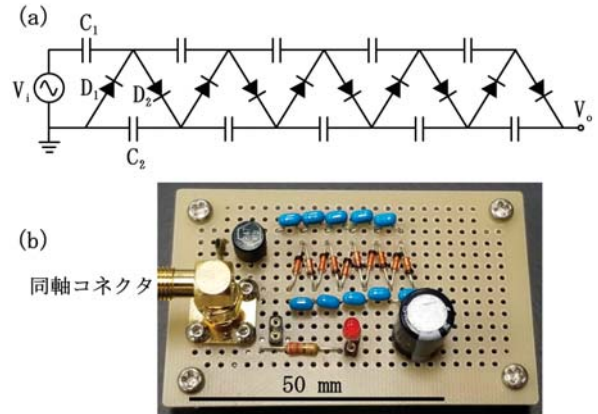


図6 昇圧整流回路の(a)回路図と(b)作製した回路の外観

サの容量は100 nFとした。出力部には330 μFの電解コンデンサを蓄電用に接続し、LEDライトあるいは負荷抵抗を切り替えできるようにピン接続している。

試作した昇圧整流回路の特性を図7に示す。図7の縦軸は出力電圧(V)、横軸は回路の段数Nであり、周波数20 MHzの正弦波(ピーク電圧 $V_p=0.20$ V~0.50 V)を入力して出力電圧を測定したものである。図7より、入力のピーク電圧が0.30 V以上(ダイオードの順方向電圧以上)の場合は、回路の段数Nの増加に伴い出力電圧が線形に増加しており、ほぼ設計通りに昇圧できていることが確認できた。一方、入力のピーク電圧がダイオードの順方向電圧より低い場合にも、設計値の約半分ほどの出力電圧しか得られていないが、昇圧動作を確認できている。低電圧で起動する昇圧整流回路を作製するため、順方向電圧の低いラジオ検波用ゲルマニウムダイオードを用いているが、順方向電圧以下の領域で流れる順方向漏れ電流により昇圧できたと考えられる。また、 $V_p=0.15$ Vまで下げると昇圧動作は確認できなかった。

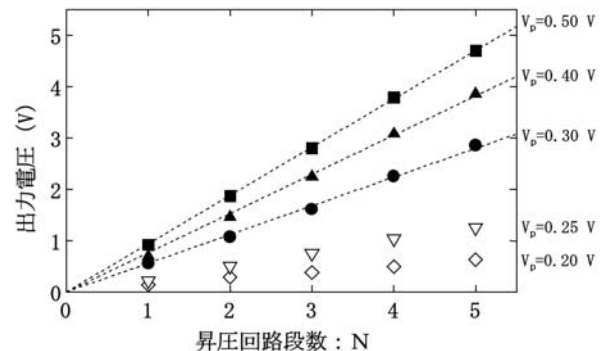


図7 昇圧整流回路の評価結果

6. ノイズ抑制効果の検証

作製した図3の平面アンテナと図6(b)の昇圧整流回路を特性インピーダンス: $50\ \Omega$ の同軸ケーブルで接続し、電磁波ノイズ発電ユニットとして放射ノイズの回収実験を行ったが、LED ライトを点灯させるまでには至らなかった。本研究では、屋内で稼働する電気・電子機器から放射される不要な電磁波ノイズを新たなエネルギー源として提案したが、結果として発電能力は最大でも数 μW 相当であり、環境発電ユニットとしての実用化を考慮すると発電能力が一桁から二桁不足していた。

また、電磁波ノイズをエネルギー源とした環境発電ユニットの先行開発事例が、2023年9月7日にプレスリリース^[8]された。ノイズ源となる電気・電子機器等の金属部をアンテナの一部として活用することで、モジュールの小型化に成功している。収穫対象のノイズ周波数を数 Hz~100 MHz とし、伝導ノイズを主なエネルギー源としている点が本研究とは異なる。しかしながら、数 10 μW ~数 10 mW もの電力収穫が可能で、IoT 機器への安定的な電力供給を実現している。これらを踏まえ、本研究で開発した発電ユニットの応用例として、当初想定していたノイズ抑制用途への展開に方針転換し、その効果について最後に検証した。

開発した発電ユニットを電気・電子機器に内蔵し、機器の筐体内部で放射ノイズを回収することにより、電気・電子機器から空間に放出される不要な電磁波ノイズを抑制するものである。実験に使用したデスクトップPCの筐体内部の様子を図8(a)に示す。筐体側面パネルを外すと、主なノイズ源となるマザーボードが確認できる。発電ユニットは、平面アンテナ受信電極がマザーボードに対向するように配置した。発電ユニットを設置可能な筐体内部の空間は、幅 160 mm、高さ 120 mm、奥行き 70 mm 程度であった。平面アンテナの外形は 150 mm×100 mm で基板厚は 2.0 mm、配線や治具等の突起物を含めた高さは 25 mm 以下であり問題なく設置できた。平面アンテナと同軸ケーブルで接続した昇圧整流回路は、基板外形が 72 mm×45 mm、コネクタ等の突起物を含めた高さは 35 mm 以下であり、図8(a)で確認できるファンの下部空間に設置した。

当センター保有の小型電波暗室(3 m 法準拠の対策試験を実施可能)における EMI (放射エミッション) 計測の様子を図8(b)に示す。壁と天井の5面に電波吸収体を設置した暗室内において、測定対象としたデスクトップPCから放射される電磁波ノイズを計測す

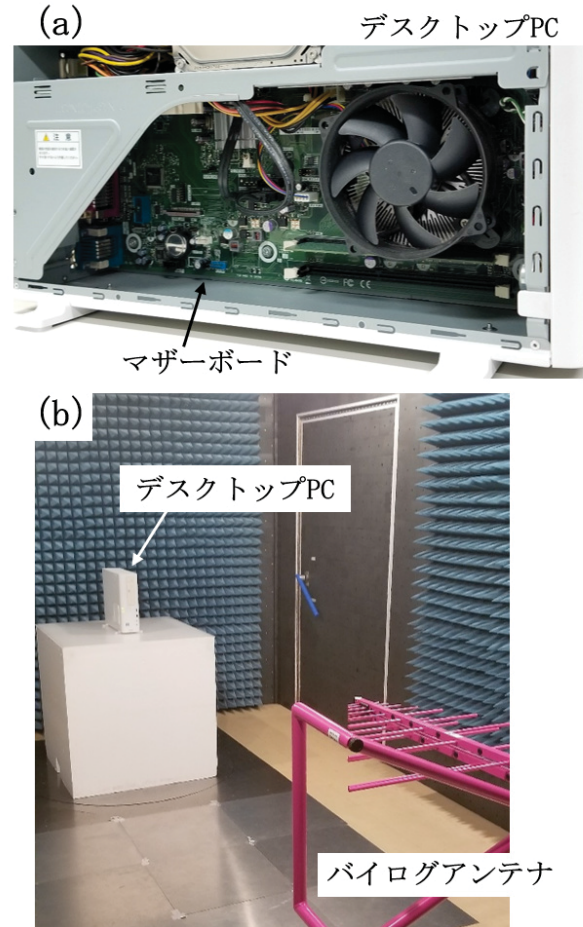


図8 ノイズ抑制効果の検証実験(a)測定対象としたデスクトップPCの筐体内部、(b)EMI 計測

る。測定周波数が MHz 帯域 (30 MHz~1000 MHz) で測定対象物が卓上機器であるため、暗室床面は GND プレーンとなっており、直接波と床面反射波を含めたノイズ測定となる。直径 1.2 m のターンテーブル上に高さ 80 cm の発泡スチロール製試料台があり、ここに測定対象物を設置して AC100 V 電源はターンテーブル中央部から確保している。MHz 帯域のノイズ計測では図8(b)右下のバイログアンテナを使用し、測定対象物との距離を 3 m 確保している。バイログアンテナの稼働領域は 1.0 m~1.5 m で、計測中はアンテナが 90 度回転し水平及び垂直方向のノイズ計測を行う。

EMI 計測結果を図9(a)~(c)にそれぞれ示す。図9の縦軸は放射妨害電界強度 ($\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$)、横軸は周波数 (MHz) である。図9(a)はPCのみの計測結果で、図中の青線が水平方向、緑線が垂直方向の放射ノイズである。また、赤線はマルチメディア機器のエミッション規格 (CISPR32) であり、class-B は住宅環境における QP (準尖頭値) の限度値を表している。図9の計測結

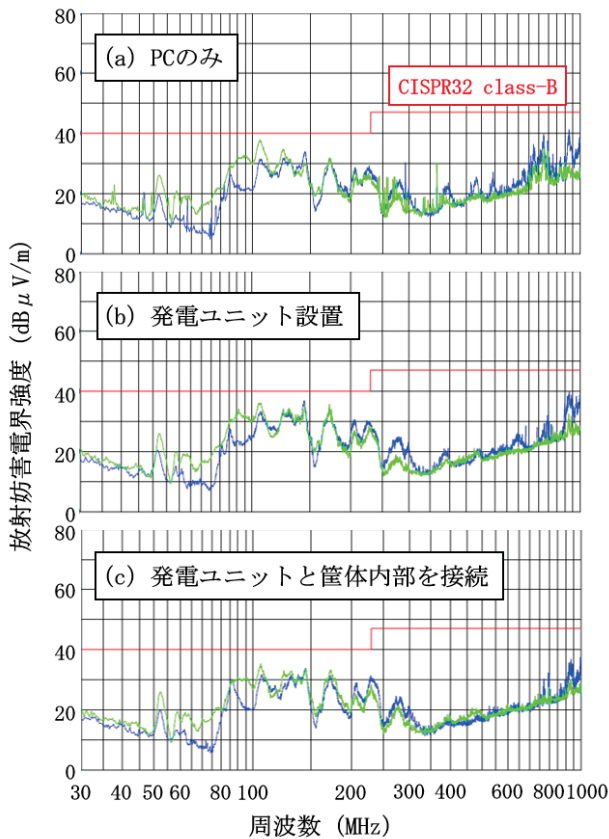


図9 EMI 計測結果の比較(a)PC のみ、(b)発電ユニットを内蔵、(c)発電ユニットを内蔵し、アンテナ導通部を筐体内部と電氣的に接続

果はいずれもピーク測定の波形であるため、ピーク値がQP 限度値（赤線）を超えていなければQP 評価を実施する必要はない。図9 (a)より、測定対象としたPCでは、75 MHz～350 MHzの周波数範囲で周期的なノイズが発生している。また、700 MHz～1000 MHzでも同様に大きなノイズが発生している。次に、PCの筐体内部に発電ユニットを設置してEMI 計測した結果を図9 (b)に示している。図9の(a)と(b)を比較したところ、250 MHz～900 MHzにおいて、放射ノイズの抑制効果を確認できる。特に700 MHz～850 MHzの周波数範囲においては、ノイズ抑制効果が顕著に現れている。

図9 (c)は、筐体内に設置した発電ユニットのアンテナを筐体と電氣的に接続してEMI 計測した結果である。これは筐体をアンテナの一部として利用した結果であるが、図9の(b)と(c)を比較したところ、350 MHz～1000 MHzの周波数範囲において更なるノイズ抑制効果を確認できた。これより、開発した電磁波ノイズ発電ユニットを電気・電子機器に内蔵することで、ノイズ抑制用途への応用可能性を示すことができた。

7. 結言

不要な電磁波ノイズをエネルギー源とした発電技術について研究を行った。当センターで稼働している様々な電気・電子機器の放射ノイズ (MHz 帯域) を計測・調査し、ターゲットとする周波数範囲を720 MHz～840 MHzに決定した。次に平面アンテナの構造について詳細に検討し、作製した平面アンテナと低電圧動作が可能な昇圧整流回路で構成される電磁波ノイズ発電ユニットを開発した。放射ノイズの回収実験から、数 μW 相当の発電能力しか得られておらず、環境発電のエネルギー源として実用化は困難と判断した。そこで開発した発電ユニットを電気・電子機器に内蔵し、筐体内において放射ノイズを回収する方式でノイズ抑制用途への応用可能性を検証し、その有効性を確認することができた。今後は、放射ノイズの回収効率を上げるためにアンテナの改良を行い、ノイズ抑制効果の検証を進めていきたい。

参考文献

- [1] 瀬川浩司：有機系太陽電池を利用した環境発電と蓄電の新技术、化学工学 Vol. 84, No. 6, pp. 263-265, 2020.
- [2] 神野伊策：振動エネルギーによる環境発電（振動発電）、表面技術 Vol. 67, No. 7, pp. 348-352, 2016.
- [3] 一般社団法人 日本熱電学会、ロードマップ、<https://thermoelectrics.jp/roadmap.html>, Accessed 2023.
- [4] 篠原真毅：電波エネルギーによる環境発電（レクテナ）、表面技術 Vol. 67, No. 7, pp. 353-356, 2016.
- [5] 日経産業新聞、「エネルギーハーベスティング」携帯電話で発電、2020. 2. 14.
- [6] 中川豪：長崎県工業技術センター研究報告、No. 52, pp. 27-29, 2023.
- [7] 中川豪：長崎県工業技術センター研究報告、No. 53, pp. 37-39, 2024.
- [8] ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社：電磁波ノイズエネルギーから高効率に電力を生成するエナジーハーベスティング（環境発電）用のモジュールを開発、<https://www.sony-semicon.com/ja/news/2023/2023090701.html>, Accessed 2024.