

旋削加工用センシングツールへの無線給電を目指した基礎検討

Fundamental Study Aimed at Wireless Power Transfer for Sensing Tools in Turning

金森 拓海*
Takumi Kanamori

高野 豊久
Toyohisa Takano

山岸 傑
Suguru Yamagishi

桑山 一郎
Ichiro Kuwayama

坂井 尚貴
Naoki Sakai

伊東 健治
Kenji Itoh

当社では、旋削プロセス中の加工状態をモニタするセンシングツール（センサ搭載加工具）を開発している。現状のセンシングツールは電池で駆動しているため、電池交換の管理等が課題である。本研究では、電池の代わりに無線給電で駆動させることを目指し、加工具を模擬したアルミ筐体に内蔵した5.7GHz帯レクテナを設計評価した。送信電力30W、送受信間距離1,000mmとして無線給電の実験を行った結果、レクテナのDC出力電力0.45Wが得られ、センシングツールを駆動させるには十分な電力であることを確認した。

We are developing a sensing tool to monitor the state of the turning process. The current sensing tools are powered by batteries, which pose operational challenges such as battery replacement management. This study aims to drive the sensing tool using wireless power transfer instead of batteries. We designed and evaluated a rectenna operating in the 5.7 GHz band, integrated into an aluminum housing that simulates a cutting tool. In an experiment conducted with a transmission power of 30 W and a transmission distance of 1,000 mm, the rectenna yielded a DC output power of 0.45 W, confirming that this power is sufficient to operate the sensing tool.

キーワード：無線給電、レクテナ、電池レス、加工具、センシングツール

1. 緒 言

近年、あらゆる産業においてDX化が進んでおり、自動化や無人化のニーズが高まっている。機械加工の現場では、工作機械やその周辺機器に各種センサや通信機器を搭載して、データを収集し解析することで、加工状態を監視するシステムの構築が進められている。旋削加工具は加工点に最も近いところに位置しているため、センサを搭載することで、加工状態を精度良く監視することができる。

当社では、加工具の中でも加工点に最も近い刃先近傍に歪みセンサを組み込み、データを無線通信で工作機外に転送することで、加工中の旋削力が測定できるセンシングツール（センサ搭載加工具）を開発している（図1）^{(1),(2)}。具体的には、図2のように工作機内のタレット^{*1}にセンシングツールを設置し、工作機外の窓部に受信機を設置することで旋削力をモニタしている。しかし、このセンシングツールは電池で駆動しているため、電池切れの度に電池交換が必要となり、費用面・時間面でのコストがかかる。また、電池交換が行われるまでは加工ラインの稼働が止まるため、生産効率が低下するという大きな問題となる。そこで著者らはセンシングツールへの無線給電を検討している。

マイクロ波を用いた無線給電は遠方への給電が可能となるが、伝送効率が課題である⁽³⁾。伝送効率を高めるため、送信アンテナの高利得化やレクテナ^{*2}の高効率化が求められる。先行研究では、アンテナと整流器を直接整合させ、



図1 現行の旋削加工用センシングツール

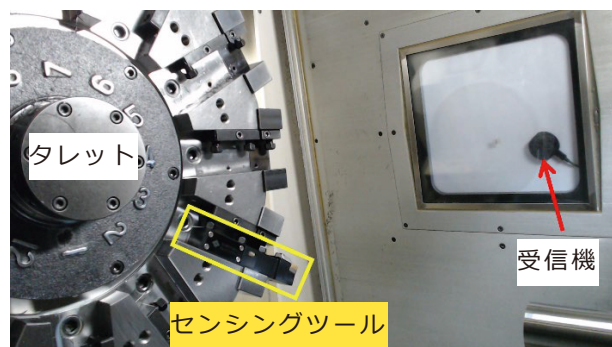


図2 工作機械に設置したセンシングツール

回路損失を抑制した高効率レクテナが多数報告されている^{(4)~(7)}。特に、パッチアンテナと整流器で構成されたレクテナ^{(6),(7)}は接地面が設けられているため、金属面上に設置しても性能は劣化しにくい。そのため、加工具等の金属筐体内への設置に適している。

本報告では、無線給電でのセンシングツール駆動実現の原理検証として、加工具を模擬したアルミ筐体に内蔵するレクテナを設計し、評価した結果について報告する。

2. 無線給電への要求性能

本稿で検討している無線給電システム⁽⁸⁾の構成を図3に示す。工作機械の窓部に送信機を設置し、センシングツールの電池ボックスにレクテナを設置することで、センサや無線通信／制御基板へ無線給電を行う。送信機からレクテナまでの距離は約1,000mmである。レクテナは現状の電池ボックスに収納することから17.5mm×41mm以下のサイズに設計する必要がある。また、センシングツールを駆動させるためには、レクテナの出力電力は0.1W以上が必要となる。

空間伝送型ワイヤレス電力伝送では、920MHz帯、2.4GHz帯、5.7GHz帯の3つの周波数帯の使用が認められている⁽³⁾。本稿では、送信電力が高く、また、周波数が高いことからアンテナ小型化に最も有利な5.7GHz帯を採用することとした。以上を踏まえ、本検討におけるレクテナの目標性能を表1に示す。

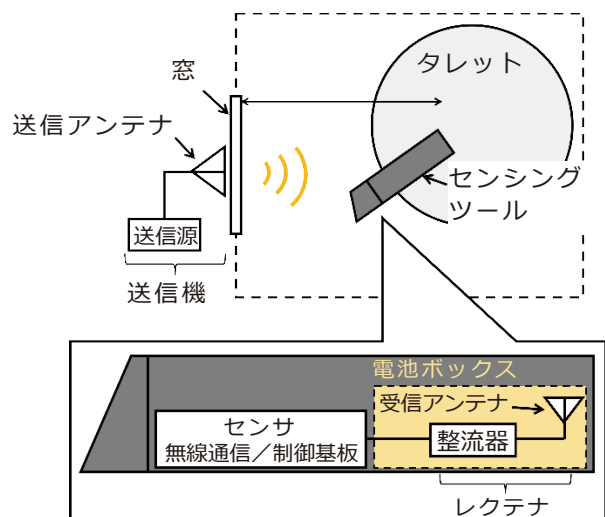


図3 無線給電システムの構成

表1 目標性能

レクテナ	サイズ	17.5mm×41mm以下
	出力	0.1W以上

3. レクテナ

先行研究^{(6),(7)}では、パッチアンテナと倍電圧整流器 MMIC^{*3}の組合せのレクテナが提案されている。アンテナと整流器を直接整合させることで高効率を実現し、整流器への入力電力が26.2dBm（約0.42W）の時、出力電力0.32W（整流効率76%）が得られており、今回検討している無線給電システムに適している。このことから本稿では、先行研究^{(6),(7)}で提案されているパッチアンテナと倍電圧整流器 MMIC で構成されたレクテナを採用した。

3-1 レクテナの構成

図4にレクテナの構成⁽⁸⁾を示す。アンテナの基板は(株)PILLAR社製のNPC-F260Aを、整流器にはWin Semiconductors社PD50-10の0.5μm GaAs E-pHEMT^{*4} Gated Anode Diode（GAD）^{*5}を使用している。図4（a）はアンテナの構成を表しており、基板表面の銅箔パターンで形成された正方形パッチアンテナで、パッチアンテナ内側に給電部を

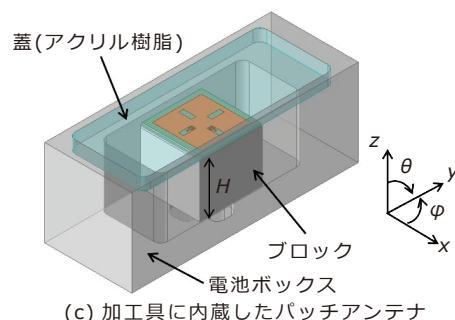
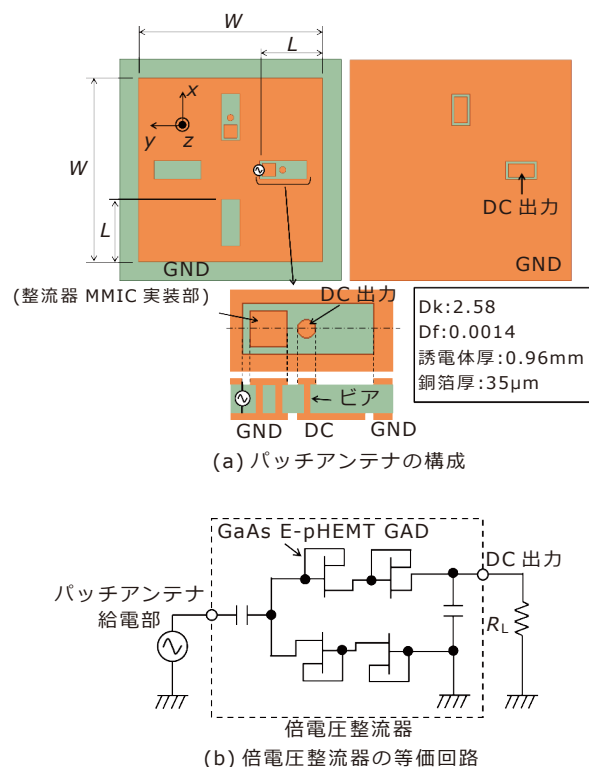


図4 レクテナの構成

設けている。給電部には整流器MMIC実装用の切り欠きが設けられており、基板裏面のGNDとビア接続された基板表面のGND上に整流器MMIC（図4（b））を実装する。パッチアンテナ上の電流分布を対称にするため対称位置にも切り欠きを配置している。なお、今回の検討は単一偏波であるため給電部は1箇所しか使用しないが、将来的には複偏波化の検討も行える構造としている。整流器MMICとパッチアンテナを直接整合させることで整合回路が不要となり、回路損失を低減している。上記構成のレクテナを図4（c）のような加工工具の電池ボックス部分を模擬したアルミ筐体に配置する。アンテナの裏面側にアルミブロックを配置し、アルミブロックの高さ H を調整することでアンテナと整流器のインピーダンス整合をとる。また、旋削時の切り屑や冷却液、油からレクテナを保護することを想定してアクリル製の蓋を設けている。

3-2 アンテナの設計

アンテナと整流器を直接整合させるためには、アンテナインピーダンスをいくつに設計すれば良いかを求める必要がある。アンテナインピーダンスの設計条件を求める計算モデルを図5に示す。パッチアンテナを抵抗 R_{ant} とインダクタ L_{ant} の並列回路とし、倍電圧整流器をボンディングワイヤ L_{bw} で接続する。整流器の後段には負荷抵抗 R_L を接続する。 L_{bw} の値はボンディングワイヤの径と長さから0.2nHと算出した。また、GaAs E-pHEMT GAD（ゲート幅 $W_g = 0.6\text{mm}$ ）のパラメータを表2に示す^{(6), (8)}。上記モデルで整流器の整流効率 η_{rec} が最大となるような R_{ant} 、 L_{ant} 、 P_{in} 、 R_L を探索することで、最適なアンテナインピーダンスを導出する。なお、整流効率 η_{rec} は $\eta_{rec} = P_{out}/P_{in}$ で定義している。回路シミュレータADSで解析した結果を図6に示す

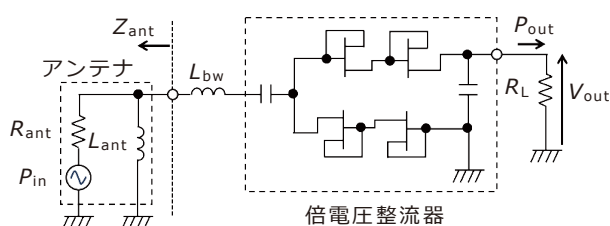


図5 アンテナインピーダンスを求める計算モデル

表2 GaAs E-pHEMT GADのパラメータ ($W_g = 0.6\text{mm}$)

Parameter	Symbol	Unit	Value
Saturation current	I_s	nA	7.1
Ideality factor	n		1.2
Series resistance	R_s	Ω	3.0
Breakdown voltage at 80 μA	V_{br}	V	13.7
Junction capacitance at 0V	C_{j0}	pF	0.21
Parasitic capacitor	C_d	pF	0.13
Series Inductor	L_s	nH	0.16

(R_L 、 P_{in} は最適化しており、 $R_L = 1.5\text{k}\Omega$ 、 $P_{in} = 26.7\text{dBm}$ である。)。図6は5.8GHzにおける整流効率の等高線図を表しており、 $R_{ant} = 200\Omega$ 、 $L_{ant} = 2.4\text{nH}$ のとき、整流効率が最大となる。上記の R_{ant} 、 L_{ant} の値より、アンテナインピーダンス Z_{ant} の設計条件は $Z_{ant} = 32 + j73\Omega$ と求めることができる。

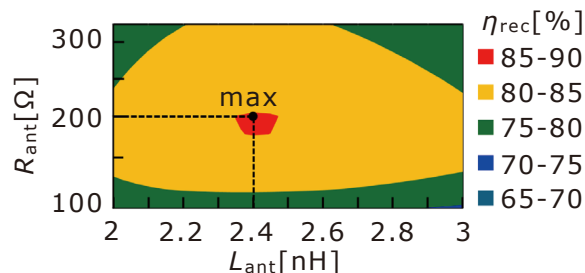


図6 R_{ant} 、 L_{ant} に対する整流効率 η_{rec} @5.8GHz

上記条件を満たすようにパッチ導体の幅 W 、切り欠き位置 L およびアルミブロックの高さ H を調整し、電磁界シミュレータHFSSで設計を行った。各寸法を変化させた時の Z_{ant} の軌跡を図7に示す。図7（a）より、 W を増加させるとレジスタンス、リアクタンスが増加し、ある値で共振した後、容量性となる。図7（b）より、 L を増加させるとレジスタンス、リアクタンスが減少していく。図7（c）よ

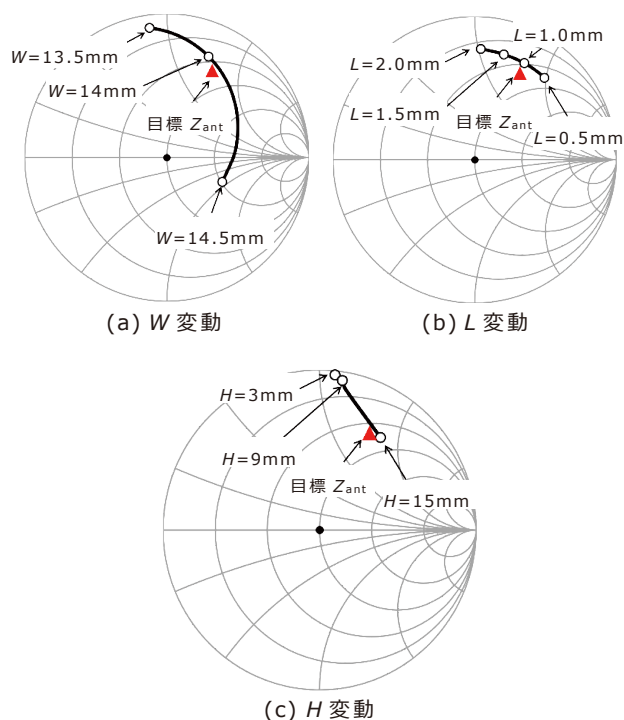


図7 各寸法に対するアンテナインピーダンスの軌跡

り、 H を増加させるとレジスタンス、リアクタンスが増加していく。これらの寸法を最適化し、 $W=14.1\text{mm}$ 、 $L=4.75\text{mm}$ 、 $H=15\text{mm}$ とした時の設計結果を図8に示す。周波数5.8GHzにおいて、 $Z_{\text{ant}}=34+j81\Omega$ となり、目標値に十分近い値となった。この時のアンテナ指向性を図9に示す。アンテナ利得は6.6dBiであり、3dBビーム幅はE面が62°、H面が92°と良好な特性の設計となっている。

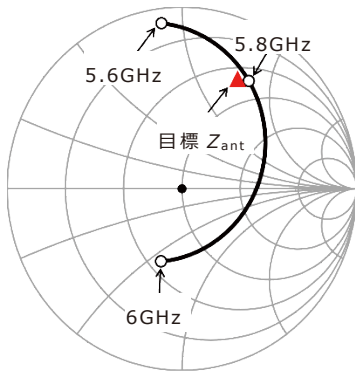


図8 寸法調整後のアンテナインピーダンス

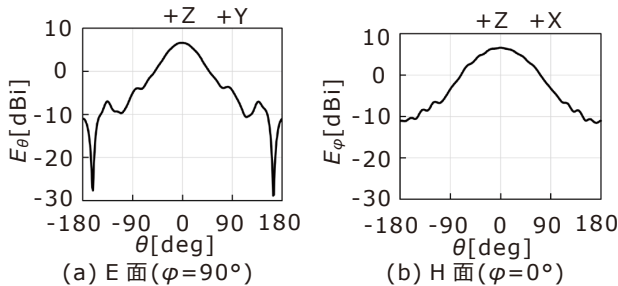


図9 加工具に内蔵したパッチアンテナのアンテナ指向性 @5.8GHz

3-3 レクテナの性能評価

試作した加工具内蔵レクテナを図10に示す。加工具の電池ボックス部分のみをアルミ筐体で模擬しており、実際の加工具と同一寸法となっている。また、防塵・防水のためにアクリル製の蓋を取り付けている。レクテナの外形寸法は17mm×17mmであり、加工具の電池ボックスに収まるサイズである。基板表面のGND上に整流器MMICを搭載し、整流器MMICと給電点、およびDC出力端子はボンディングワイヤで接続している。

次にレクテナの評価方法について述べる^{(6),(8)}。整流効率 η_{rec} の測定系を図11に示す。まず、図11(a)のように送信アンテナから300mm離れた位置に標準ダイポールアンテナを設置し、受信電力 P_{ref} を測定する。その後、標準ダイポールアンテナをレクテナに置き替え、出力電力 P_{out} を

測定する(図11(b))。このときの整流器への入力電力 P_{in} は $P_{\text{in}} = P_{\text{ref}} + (G_{\text{ant}} - G_{\text{ref}})$ より求めることができる。ここで、 G_{ant} はレクテナのアンテナ利得(解析値)、 G_{ref} は標準ダイポールアンテナのアンテナ利得である。

レクテナの周波数特性を図12、入出力特性を図13に示す。点線が測定値、実線がADSによる解析値である。測定結果と解析結果とで整流効率のピーク値をとる周波数が100MHz程度ずれているため、各条件でピーク値を取る周波数で比較を行った。 $f=5.7\text{GHz}$ 、 $P_{\text{in}}=27.8\text{dBm}$ 、 $R_L=1.7\text{k}\Omega$ のとき、 $\eta_{\text{rec}}=80.9\%$ 、 $V_{\text{out}}=28.8\text{V}$ であり、解析結果と概ね一致している。

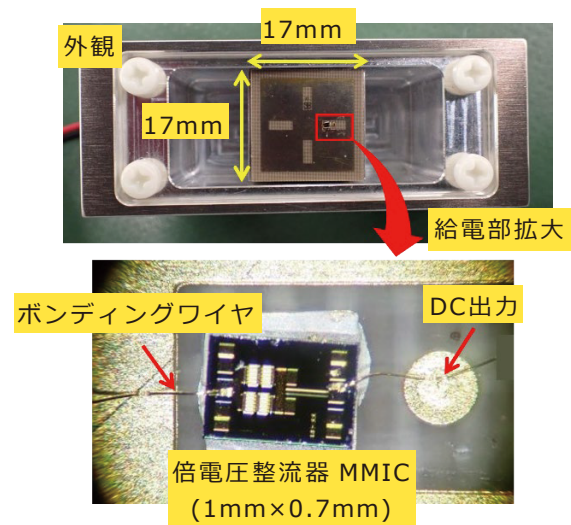
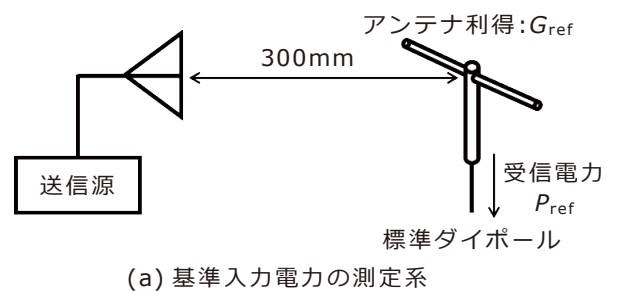
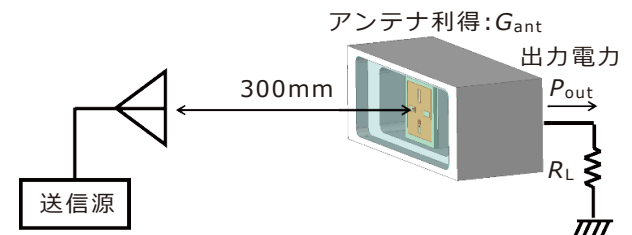


図10 試作したレクテナ



(a) 基準入力電力の測定系



(b) レクテナの測定系

図11 整流効率 η_{rec} の測定系

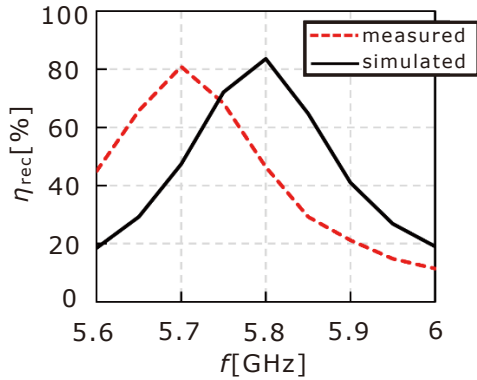
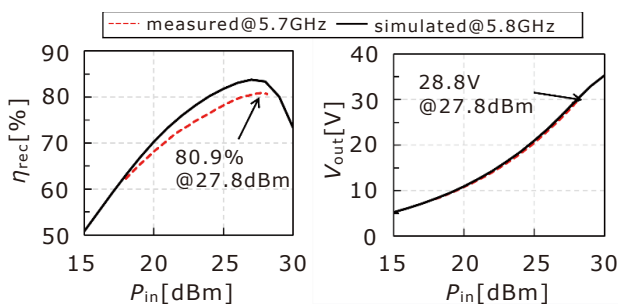
図12 レクテナの周波数特性 ($P_{in}=27.8\text{dBm}$ 、 $R_L=1.7\text{k}\Omega$)

図13 レクテナの入出力特性

4. 無線給電システムの評価

試作したレクテナを用いて無線給電システムの評価試験を行った。評価試験の様子を図14に示す。評価試験では、送信アンテナとして8×8導波管スロットアレーアンテナ（アンテナ利得23.3dBi）を用いる⁽⁸⁾。本アンテナは平面構造であることから工作機械の窓への設置も容易であるため、本システムに適している。また、本評価試験における測定系統図を図15に示す。SGからアンプにRF信号を入力し、方向性結合器を介してパワーメータで送信電力をモニタしながら送信アンテナに給電を行う。送信アンテナとレクテナの距離は1,000mm、送信周波数は5.7GHzである。レクテナの出力端子にはセンシングツールの疑似負荷として負荷抵抗 $R_L=1.7\text{k}\Omega$ を接続し、マルチメータで出力電圧 V_{out} を測定した。送信アンテナへの入力電力 P_{Tx} に対するレクテナの出力電力 P_{out} 、およびシステム効率 η_{total} を図16に示す。なお、 P_{out} 、 η_{total} はそれぞれ $P_{out}=V_{out}^2/R_L$ 、 $\eta_{total}=P_{out}/P_{Tx}$ で定義している。30Wを送信アンテナに入力した時、レクテナのDC出力電力0.45W、出力電圧27.6Vとなり、目標である0.1W以上の電力が得られている。この時のシステム効率は約1.5%である。センシングツールへ給電するためには降圧が必要となるが、DC/DCコンバータでの損失を考慮してもセンシングツールを駆動させるには十分な電力であることが確認できた。

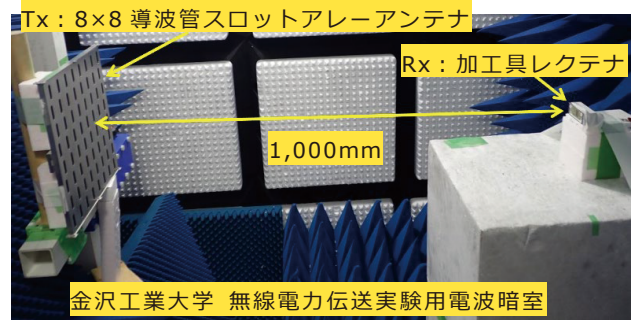


図14 無線給電システム評価の様子

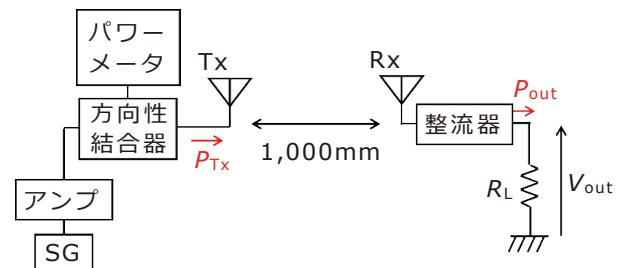
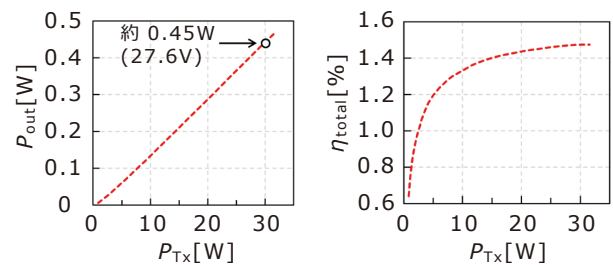


図15 測定系統図

図16 送信電力 P_{Tx} に対する出力電力 P_{out} 、システム効率 η_{total}

5. 結 言

本稿では、センシングツールへの無線給電を実現するための基礎検討を行った。加工具を模擬したアルミ筐体にレクテナを内蔵し、送受信間距離を1,000mmとして評価試験を行った結果、受電電力0.45Wが得られ、センシングツールへの給電方法として本無線給電システムは有効であることを確認した。

用語集

※1 タレット

複数個の工具を放射状に取り付けられる刃物台。

※2 レクテナ (Rectenna)

整流器付きアンテナ (Rectifying Antenna) の略称。
マイクロ波などの電波を直流電力に変換するデバイス。

※3 MMIC

Monolithic Microwave Integrated Circuitの略称。
トランジスタやダイオードなど複数の素子を、一つの半導体基板上で一体化させたマイクロ波集積回路のこと。

※4 GaAs E-pHEMT

ヒ化ガリウム (GaAs) の半導体プロセスで作製したエンハンスメント型 (Enhancement-type) の疑似格子整合高電子移動度トランジスタ (Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor) である。Si プロセスのトランジスタよりも高速で、高周波回路用途に適す。

※5 Gated Anode Diode (GAD)

ゲート端子とドレイン端子を接続したダイオード。

参考文献

- (1) 栗山裕介、香西孝司、原田真志、小池雄介、吉田高太、村上大介、「切削加工のDXを加速させるセンサ搭載切削工具」、住友電工テクニカルレビュー第206号、pp.10-15 (Jan. 2025)
- (2) 小池雄介、青木友弥、村上大介、「切削加工を見える化するセンサ搭載切削工具」、住友電工テクニカルレビュー第198号、pp.22-27 (Jan. 2021)
- (3) 「[空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの技術的条件]のうち「構内における空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの技術的条件」、総務省 情報通信審議会、諮問第2043号、pp.8 (2020)
- (4) K. Itoh, N. Sakai, K. Noguchi, "Highly Efficient High-Power Rectenna with the Diode on Antenna (DoA) Topology," IEICE Trans. on Electronics, vol.E105-C, no.10, pp.483-491 (Oct. 2022)
- (5) 村本佑樹、坂井尚貴、伊東健治、「インピーダンス変成微小ループアンテナを用いる920MHz帯レクテナ」、信学技報、vol.121、no.169、MW2021-37、pp.24-29 (Sep. 2021)
- (6) 高屋凌平、佐藤亮輔、古谷尚季、坂井尚貴、津留正臣、伊東健治、「DoA構成による円偏波対応5.8GHz帯レクテナ」、信学技報、vol.124、no.427、WPT2024-47、pp.43-47 (Mar. 2025)
- (7) 高屋凌平、古谷尚季、坂井尚貴、津留正臣、伊東健治、「円偏波対応5.8GHz帯レクテナ」、通信講演論文集1、no.B-20-14、pp.465 (Mar. 2025)
- (8) 金森拓海、高野豊久、山岸傑、桑山一郎、坂井尚貴、伊東健治、「旋削加工用センシングツールへの無線給電を目指した基礎検討」、信学技報、vol.125、no.319、WPT2025-53、pp.75-80 (Jan. 2026)

執筆者

金森 拓海* : 解析技術研究所



高野 豊久 : 解析技術研究所 グループ長



山岸 傑 : 解析技術研究所 主幹



桑山 一郎 : 解析技術研究所 主幹



坂井 尚貴 : 金沢工業大学 研究員
博士 (工学)



伊東 健治 : 金沢工業大学 教授
博士 (工学)



*主執筆者