

初学者にもわかる 920MHz 帯低電力レクテナ設計 Design Methodology on 920 MHz Band Low Power Rectennas for Beginners

坂井 尚貴[†] 伊東 健治[†]
Naoki SAKAI[†] and Kenji ITOH[†]

[†] 金沢工業大学
Kanazawa Institute of Technology

概要

920MHz 帯における空間伝送型ワイヤレス電力伝送(WPT)システムに用いる低電力レクテナの設計手順を解説する。本講演では現在、最も普及が進んでいる 920MHz 帯における WPT システムに着目し、そのシステムに用いる低電力レクテナの具体的な設計手順を設計事例をもとに解説する。

はじめにレクテナの設計目標を決め、レクテナの構成やダイオードの選定を行う。左図は本講義で使用するレクテナの構成である。整流素子には日清紡マイクロデバイス社の低閾値 GaAs E-pHEMT Gated Anode Diode (GAD) pair を用いる。これは文献[1]で報告した高効率高ダイナミックレンジ整流器 MMIC に用いた GAD をパッケージ化したものである。つぎに高周波回路解析ソフト(Pathwave ADS)や電磁界解析ソフト(Pathwave EM Pro)を使用しての、アンテナインピーダンスの設計やアンテナレイアウトの設計を行う。そして、レクテナの試作およびそれを評価するための Over The Air (OTA)測定について説明する。最後に試作した 920MHz 帯レクテナの評価結果と、それをを用いた WPT システムについて、適用例を紹介する。右図は試作したレクテナの外観写真とその整流効率性能を示したグラフである。

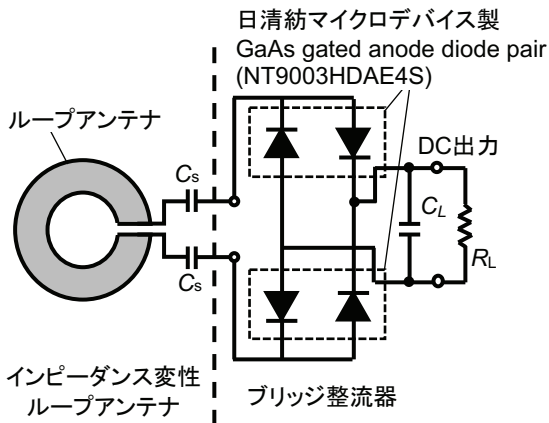


図 920MHz 帯レクテナの構成

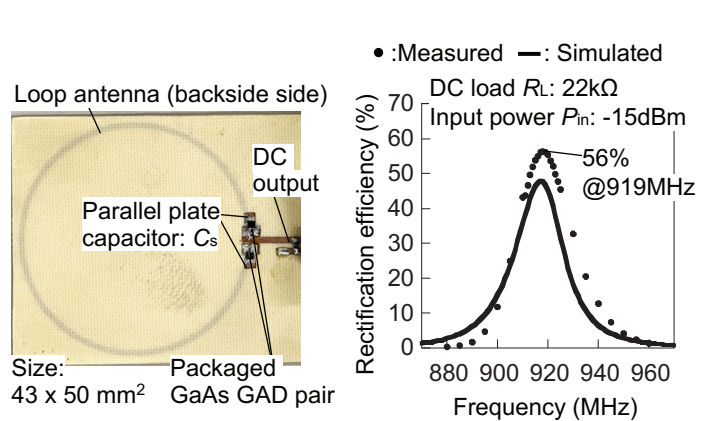


図 試作レクテナの外観と整流効率の測定結果

Abstract

In this workshop, a design methodology of a 920 MHz band low power rectenna for wireless power transmission (WPT) systems. First, the design goal of the rectenna is defined. Then, the rectenna topology and the diode are selected to satisfy the design goal. Next, the antenna impedance and layout are designed for a highly efficient rectenna using RF simulators. Lastly, evaluation results with Over-the-Air measurement (OTA) of the 920 MHz band rectenna is demonstrated.

[1] T. Hirase, N. Sakai, K. Itoh et al., "High Dynamic Range 920 MHz Band Low Power Rectenna With Low Threshold Voltage GaAs GADs," 2024 IEEE WPTCE, Kyoto, Japan, 2024, pp. 865-868.

初学者にもわかる920MHz帯低電力レクテナ設計

Design Methodology on 920MHz Band Low Power Rectennas for Beginners

坂井 尚貴[†] 伊東 健治[†]

Naoki SAKAI[†] and Kenji ITOH[†]

[†]金沢工業大学

Kanazawa Institute of Technology

naoki.sakai@neptune.kanazawa-it.ac.jp

目次

920MHz帯空間伝送型WPTシステムの現状

設計手順1) フリスの伝達公式を用いた920MHz帯無線電力伝送の回線設計

設計手順2) 920MHz帯レクテナの構成

設計手順3) 整流用ダイオードの選定

設計手順4) アンテナインピーダンスの設計

設計手順5) アンテナレイアウトの設計

設計手順6) 920MHz帯レクテナの試作

設計手順7) レクテナ性能評価のためのOver The Air (OTA)測定システム

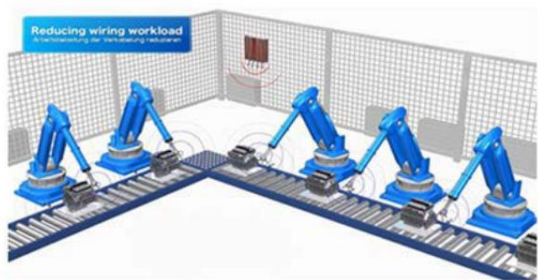
設計手順8) 920MHz帯レクテナの評価結果

920MHz帯レクテナを用いた特定小電力無線送電システムの応用

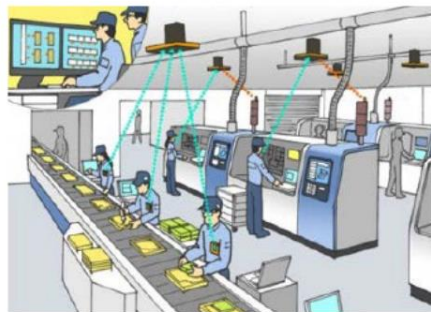
1 研究背景 — 920MHz帯を使用したWPTシステムの現行制度(第1ステップ) [1]—

920MHz帯の空間伝送型WPTシステムは、工場やオフィスなどで利用されているセンサーなどの電池交換が容易ではないデバイスの電源(数 μ W~数mW級)としての利用が期待。

空間伝送型WPTシステムの免許制度は、工場のラインに新たに設置したり、設置場所を変更する度に、WPT開局の開設申請・運用調整を実施



ロボット可動部のセンサ (工場)



製品や動線管理 (工場)



健康管理・見守り (介護現場)

920MHz帯の空間伝送型WPTシステムの想定利用シーン[1]

現行制度の課題

- 一般家電製品に組み込む製品では、免許制度での導入はハードルが高い。(例:冷蔵庫内などの家電製品)
- 移動する車両内で利用したい。(例:物流トラックのコンテナ内センサへの給電)
- 障害検出時など常時接触が困難な環境でモニターセンサを設置したい。(例:高圧分電盤内でのセンサ利用)

→免許の不要化が求められている。

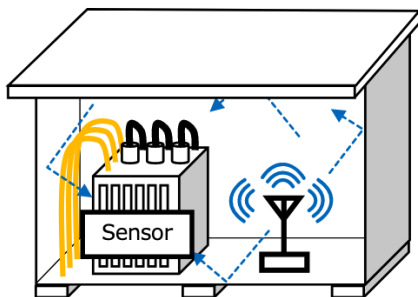
1 研究背景 —特定小電力型WPTシステム(第2ステップ)[2]—

特定の免許・資格が不要な**特定小電力型WPTシステム**に着目

【特定小電力型WPTシステムの狙いと利用イメージ】

- 家庭・オフィス・公共空間などで利用ユーザーにWPTを利用しているという認識が無く手軽に運用する。
- 移動場所の制限を無くし、物流貨物や一般シェア自転車などのセンサへの利用。
- 機械設備・インフラ設備、物流モニタリング、家庭・オフィスなど、必要な時期や場所を特定せずに利用する。

インフラ・生産設備



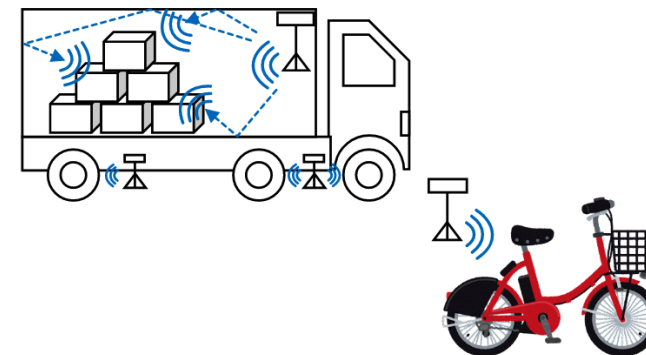
- 電池交換困難なセンサデバイスへの給電において、送電機の複数設置、即時運用、柔軟な構成変更を可能とする
- 閉空間・反射環境の特性を利用して高効率に給電を行う

家庭・オフィス・公共



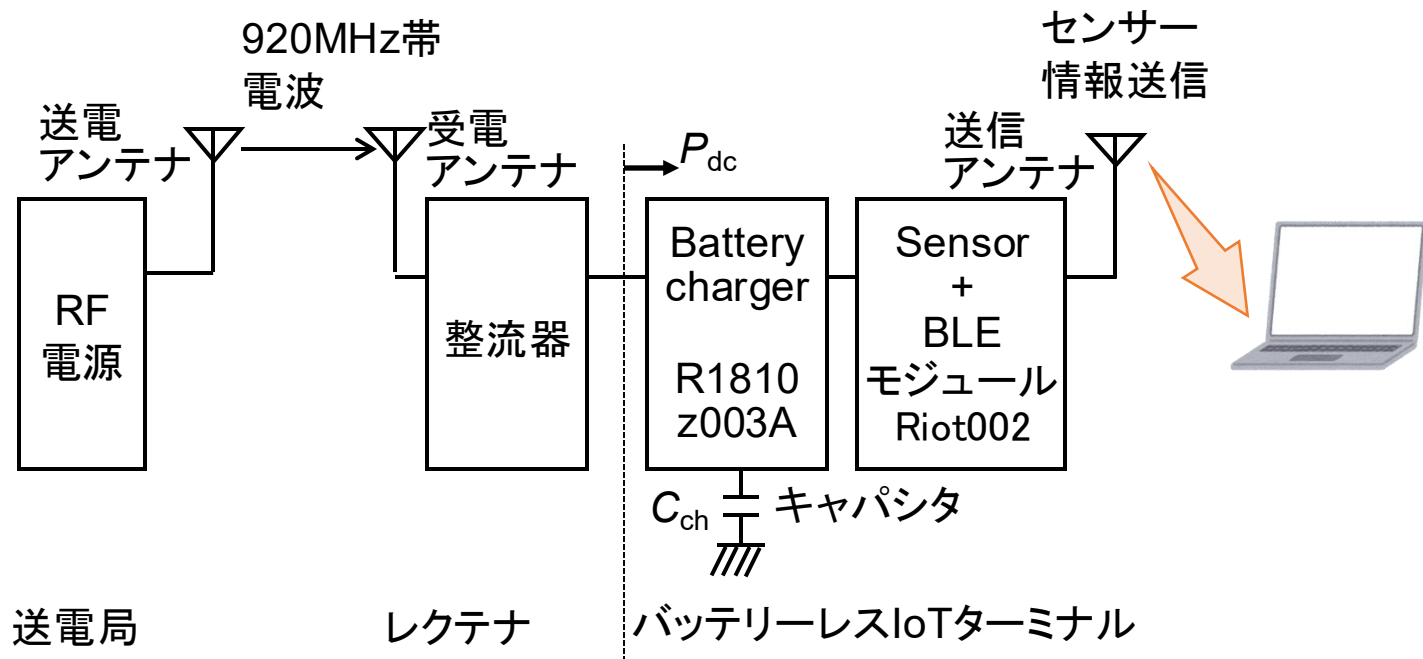
- 1m未満といった比較的短距離において小型デバイスへの給電を行う
- 免許不要化することにより、導入ハードルを下げ普及を促進する

物流・移動体



- 物流トラック内や冷蔵コンテナ内のセンシング等、移動体内外における給電を可能とする

特定小電力型WPTシステムの技術的条件



920MHz帯レクテナを用いるバッテリーレスIoTターミナルの構成例

特定小電力WPTシステムの概要[2]

周波数: 918.0 MHz及び**919.2 MHz**
空中線電力: 250 mW (24 dBm)以下
空中線利得: 3 dBi 以下
偏波: 円偏波

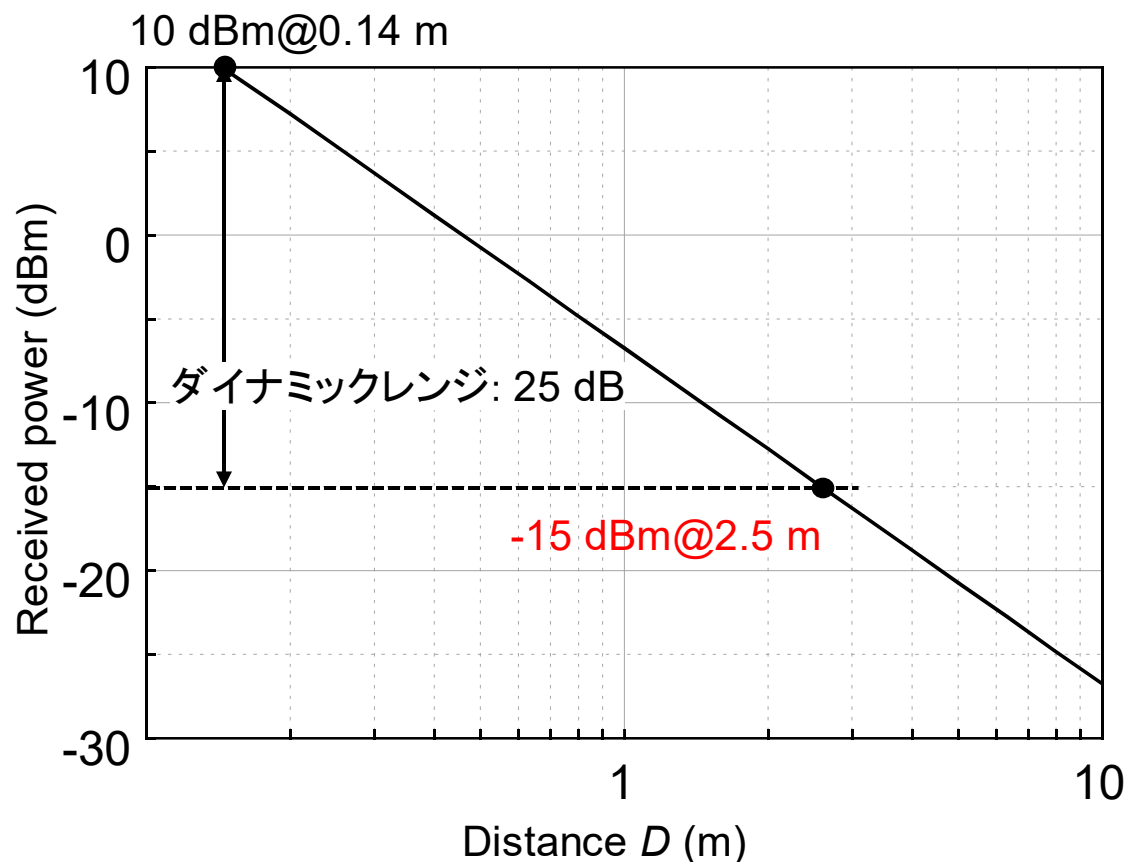
受電レクテナおよびIoT端末の概要[3]

受電アンテナ利得: 1.0 dBi (ループアンテナ)
偏波: 直線偏波
整流回路の推定効率: 30%
IoT端末が1minの間欠動作するのに必要な直流電力: -20 dBm

[2] 陸上無線通信委員会報告(案)―「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「920MHz帯空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの屋外利用等に係る技術的条件」―, 公示日2025年8月23日

[3] 遁所雄大, 平瀬大暉, 小林章伸, 町田翔太郎, 坂井尚貴, 伊東健治, “未来の暮らしを支える無線電力伝送技術 ~ 特定小電力無線局による920MHz帯空間伝送型無線電力伝送実験と応用提案 ~,” 信学技報, vol. 124, no. 427, pp. 87–90, Mar. 2025.

設計手順1 フリスの伝達公式を用いた920MHz帯無線電力伝送の回線設計



特定小電力WPTシステムの概要[2]

周波数: 918.0 MHz及び**919.2 MHz**

空中線電力: 250 mW (24 dBm)

送電アンテナ利得: 0 dBi

偏波: 直線偏波 (円偏波アンテナ3dBiを直線偏波で利用)

受電レクテナおよびIoT端末の概要[3]

受電アンテナ利得: 1.0 dBi (ループアンテナ)

整流回路の推定効率: 30%

IoT端末が1minの間欠動作するのに必要な直流電力: -20 dBm

レクテナの整流効率を50%と仮定し、2dBiほどマージンをもたせる。

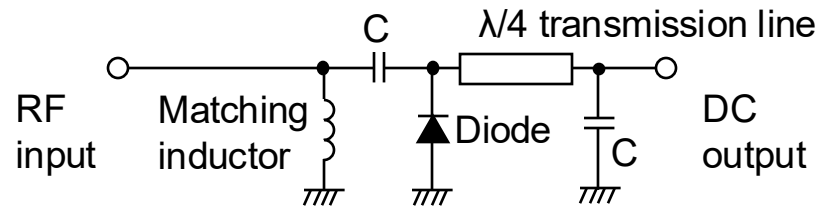
→**レクテナに必要な最小受電電力:-15 dBm**

サービスエリアが最大となるよう、最小受電電力-15dBmで整流効率が最大となるレクテナを設計

[2] 陸上無線通信委員会報告(案)―「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「920MHz帯空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの屋外利用等に係る技術的条件」―, 公示日2025年8月23日

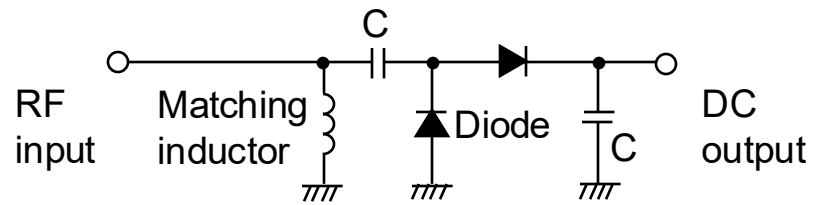
[3] 遁所雄大, 平瀬大暉, 小林章伸, 町田翔太郎, 坂井尚貴, 伊東健治, “未来の暮らしを支える無線電力伝送技術 ~ 特定小電力無線局による920MHz帯空間伝送型無線電力伝送実験と応用提案 ~,” 信学技報, vol. 124, no. 427, pp. 87–90, Mar. 2025.

設計手順2 920MHz帯レクテナの構成 — ①整流回路のトポロジー[4]の選定 —



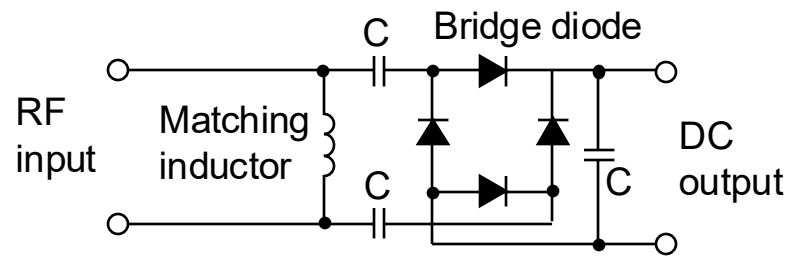
シングルシャント整流器

- ・大半の整流器で採用
- ・ディスクリート半導体向き。集積化不向き(1/4波長線路)
- ・不平衡回路
- ➔モノポール、パッチなどのアンテナへ接続



倍電圧整流器

- ・偶数次はダイオードペア+平滑Cで短絡。全波整流
- ・集積化に適す。
- ・高電圧を出力
- ・不平衡回路、平衡回路、両方可能
- ➔モノポール、パッチ、ダイポール系、ループ系のアンテナへ接続



ブリッジ整流器

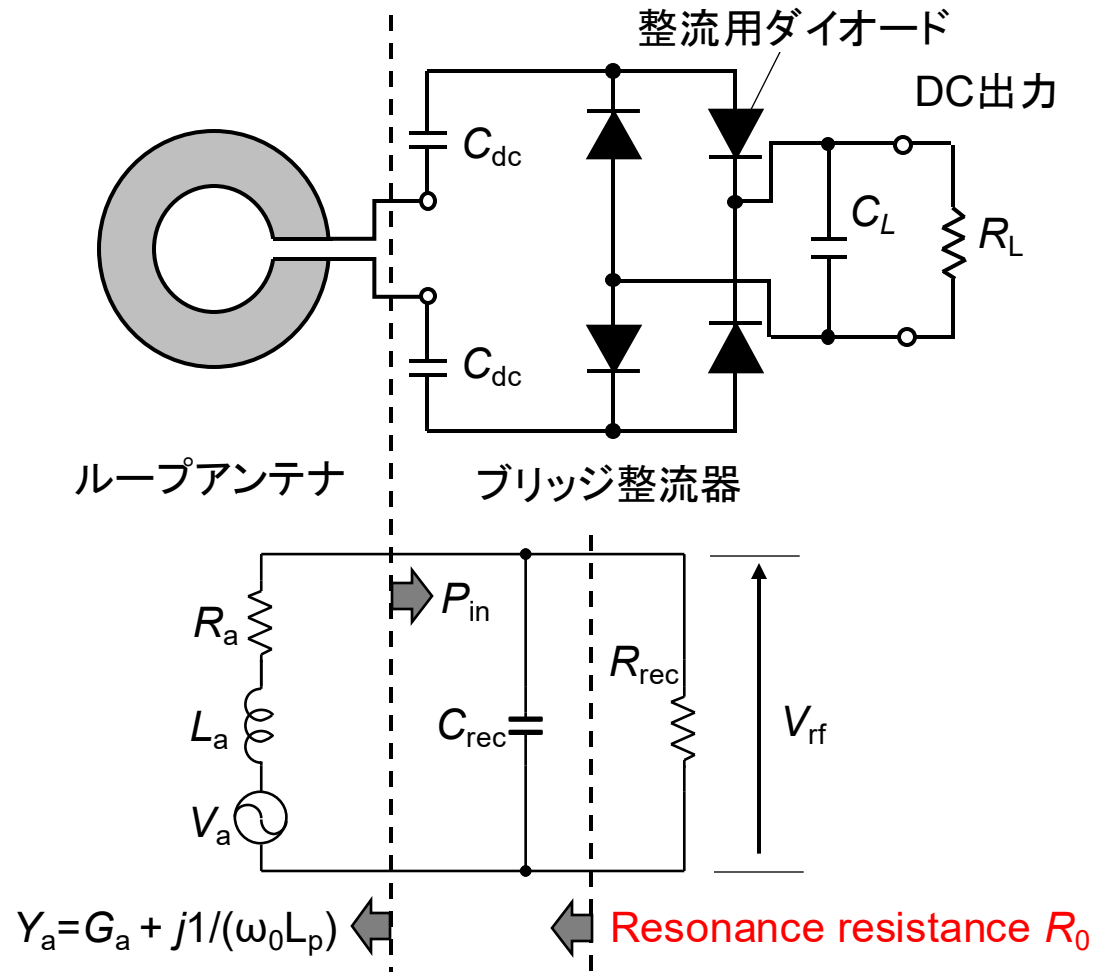
- ・偶数次はブリッジ+平滑Cで短絡。全波整流
- ・集積化に適す。
- ・平衡回路
- ➔ダイポール系、ループ系のアンテナへ接続

回路寸法が小型であることと、試作が容易であることからブリッジ整流器を選択

設計手順2 920MHz帯レクテナの構成 —②アンテナの選定—

微小な入力電力でブリッジ整流器を整流動作させるには、高アンテナインピーダンスによる高入力電圧の実現が重要

→ 高共振インピーダンス R_0 を実現するループアンテナ[5]を選択



ループアンテナを用いるレクテナの共振周波数での等価回路

共振インピーダンス $R_0 = \frac{1}{G_a} \approx \frac{(\omega_0 L_a)^2}{R_a}$

共振角周波数 $\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{L_a C_{rec}}}$

ループアンテナのインダクタンス $L_a = \frac{1}{\omega_0^2 C_{rec}}$

共振時の端子間電圧 $V_{rf} \approx 2\sqrt{2R_0 P_{in}}$

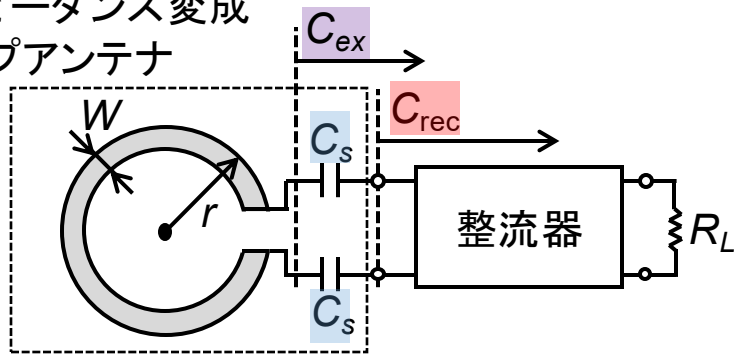
- 整流器ICの入力容量 C_{rec} とループアンテナのインダクタンス L_a を共振.
- 共振インピーダンス R_0 を高める → 高 V_{rf}
- 高 R_0 条件 → 高インダクタンス L_a , 低放射抵抗 R_a

[5] S. Tsujita, N. Sakai, K. Itoh and S. Tsuchimoto, "920MHz band high sensitive rectenna with a small loop antenna," 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 2019, pp. 1274-1276.

設計手順2 920MHz帯レクテナの構成 ー②アンテナの選定ー

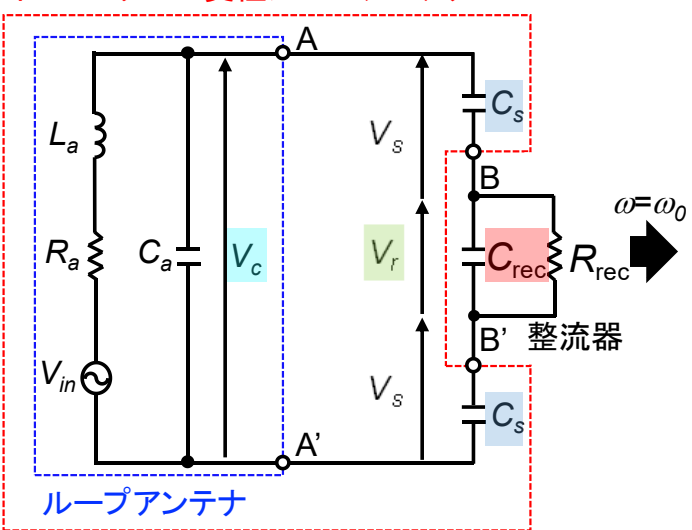
整流回路が求めるアンテナインピーダンス R_0 は12k Ω に対し、ループアンテナを小型化すると共振インピーダンス R_0 は12k Ω より大
 → R_0 を低インピーダンスに変成する、インピーダンス変性ループアンテナ[6]を選択

インピーダンス変性
ループアンテナ



レクテナの構成

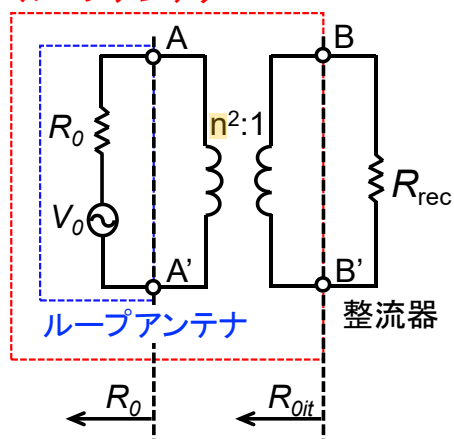
インピーダンス変性ループアンテナ



RF等価回路

インピーダンス変成比: n^2

インピーダンス変性
ループアンテナ



✓ C_s, C_r の合成容量 C_{ex}

$$C_{ex} \leq C_r$$

✓ 整流器の端子電圧 V_r

$$V_r = V_c/n$$

✓ 共振角周波数 ω_0

$$\omega_0 = [L_a \cdot (C_a + C_r/n)]^{-0.5}$$

✓ 共振インピーダンス R_{0it}

$$R_{0it} = (\omega_0 L_a)^2 / (n^2 R_a) = R_0/n^2$$

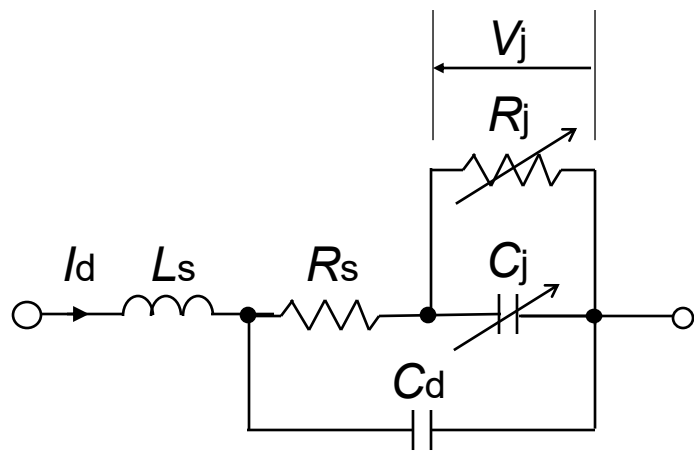
共振時のRF電圧 V_c は、キャパシタ C_s で $1/n$ に分圧される。

→共振インピーダンス R_0 が $1/n^2$ に変成される。

→小形な高インピーダンスループアンテナをsub-mW級の受電に適用可能

設計手順3 ダイオードの選定

微小電力整流回路用のディスクリートSi SBDと
日清紡マイクロデバイスと共同開発したGaAs GADのダイオードパラメータ



ダイオードの等価回路モデル

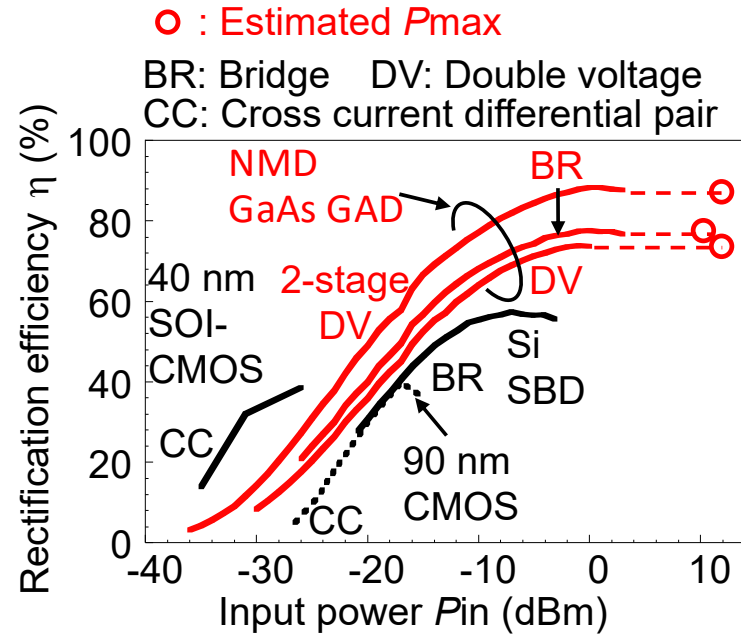
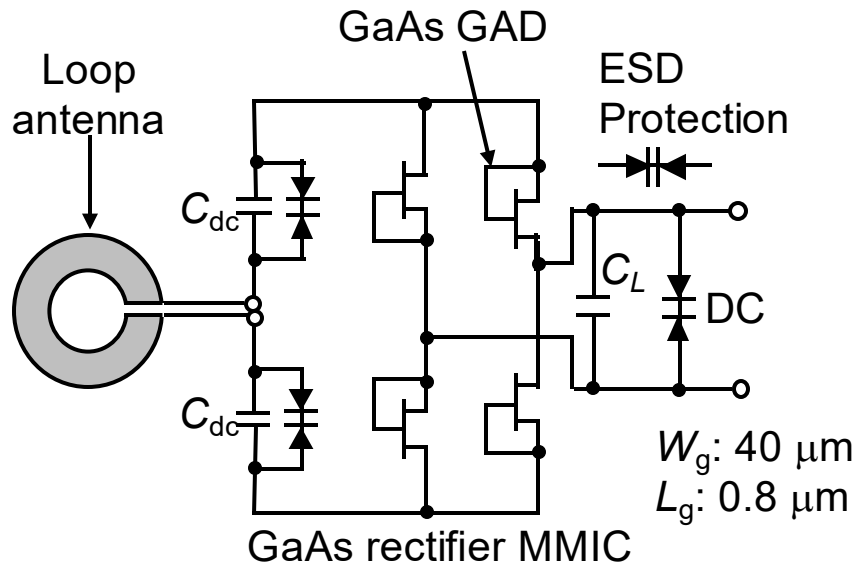
パラメータ	単位	Skyworks Si SBD SMS7621	Skyworks Si SBD SMS7630	日清紡マイクロデバイス GaAs GAD [7] NT9003HDAE4S
飽和電流: I_s	μA	0.04	5.0	0.52
エミッション係数: n		1.05	1.05	1.545
直列抵抗: R_s	Ω	12	20	53.2
フォワード電圧: V_f [3] ($I_d=0.1\text{mA}$)	V	0.21	0.08	0.2
逆方向漏洩電流: I_r [3] ($V_d=-2\text{V}$)	μA	-	-	1.0
ブレークダウン電圧: V_{br}	V	3 @10μA	2@100μA	20@100μA
ゼロバイアス接合容量: C_{j0}	fF	100	140	22.5
寄生容量: C_d	fF	150	160	60
容量の総和: $C_t=C_{j0}+C_d$	fF	250	300	82.5
接合係数: m		0.35	0.4	0.5
接合電位: V_ϕ	mV	0.51	0.34	0.339
最大電流値: I_{max}	mA	50	50	20
直列インダクタ: L_s	nH	-	-	0
カットオフ周波数: $f_c=1/(2\pi R_s C_t)$	GHz	53	27	36

- 低 V_f → 低電力整流動作
- 高 V_{br} → 大電力整流動作
- 低 C_t → 高共振インピーダンス

広いダイナミックレンジかつ高い整流効率の整流器が期待できる日清紡マイクロデバイスGaAs GADを選択

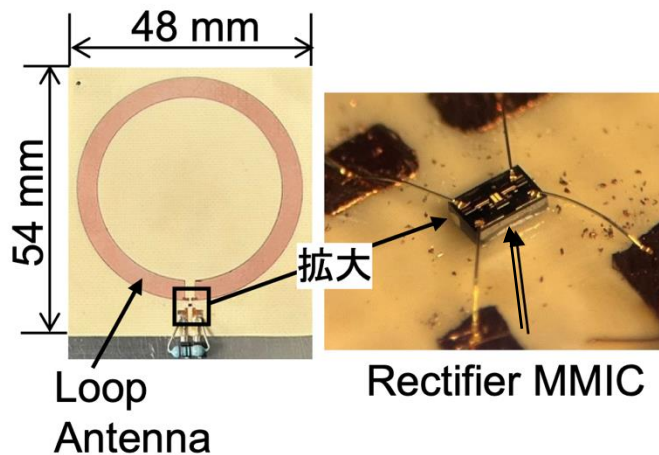
[7] T. Hirase et al., "High Dynamic Range 920 MHz Band Low Power Rectenna With Low Threshold Voltage GaAs GADs," in 2024 IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo (WPTCE), May 2024, pp. 865–868.

参考資料: 日清紡マイクロデバイス製造のGaAs MMICを用いる920MHz帯レクテナ [7]



本発表でのGaAs GADは文献[7]のMMICで用いたGADを、個別半導体としてパッケージ化したものである。

GaAs GADのデータシートおよび入手のための問い合わせ先は当日のスライドで記載予定



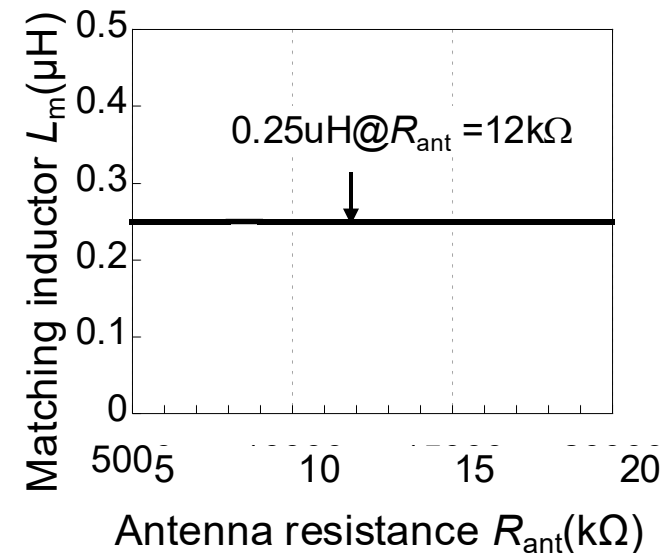
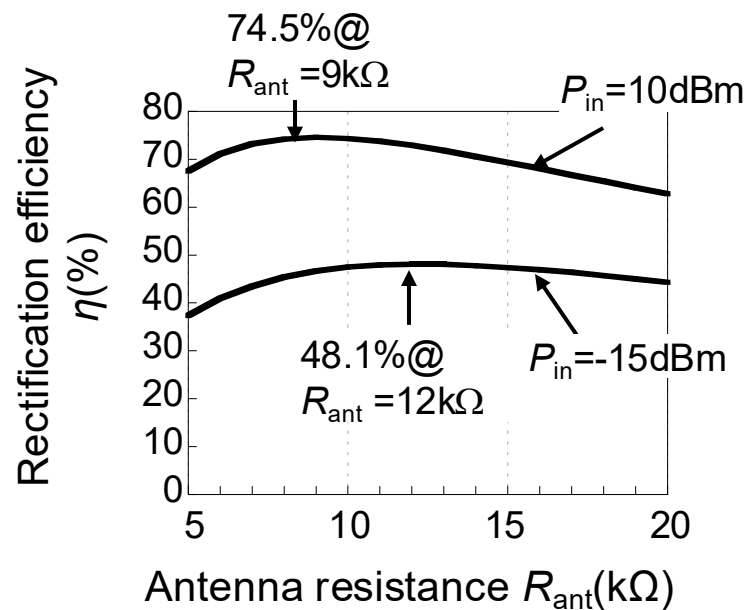
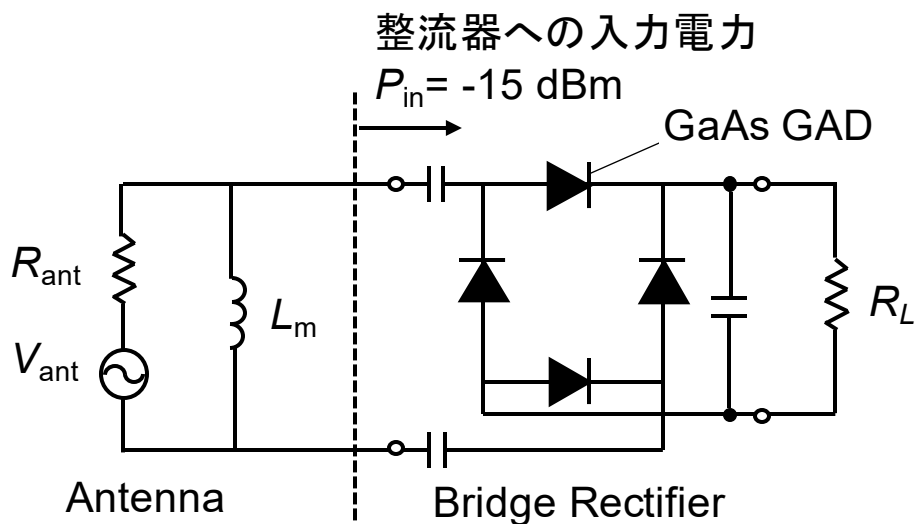
920MHz帯レクテナの構成と写真

設計手順4 アンテナインピーダンスの設計

ブリッジ整流器を高効率動作させるアンテナインピーダンスを設計

設計手順

各 R_{ant} に対し、整流効率 η が最大となるよう、整合用インダクタ L_m とDC負荷抵抗 R_L を最適化
整流効率の計算は回路解析ソフトKeysight ADSの Harmonic Balance Method を使用



アンテナインピーダンス $R_{ant} = 12 \text{ k}\Omega$ 、整合用インダクタ $L_m = 0.25 \mu\text{H}$ の時、最大整流効率48.1% @ $P_{in} = -15 \text{ dBm}$

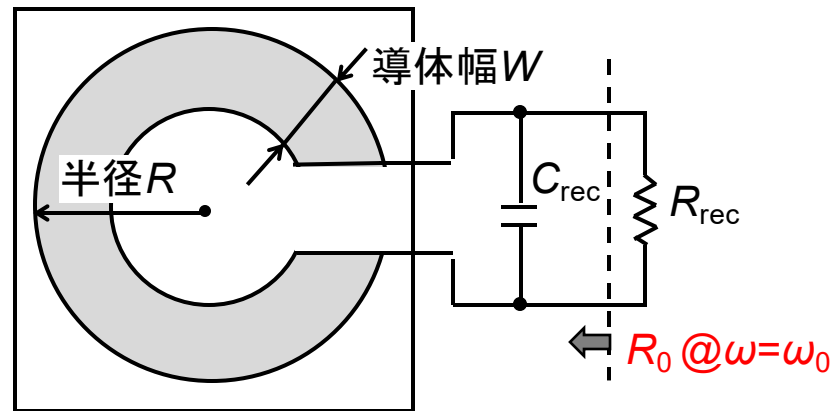
設計手順5 アンテナレイアウトの設計 — ループアンテナの場合 —

共振インピーダンス $R_0=12\text{ k}\Omega$ となるようループアンテナの寸法を設計

設計手順

各導体幅 W に対し、整合用インダクタ $L_m=0.25\mu\text{H}$ となるよう半径 R を調整。

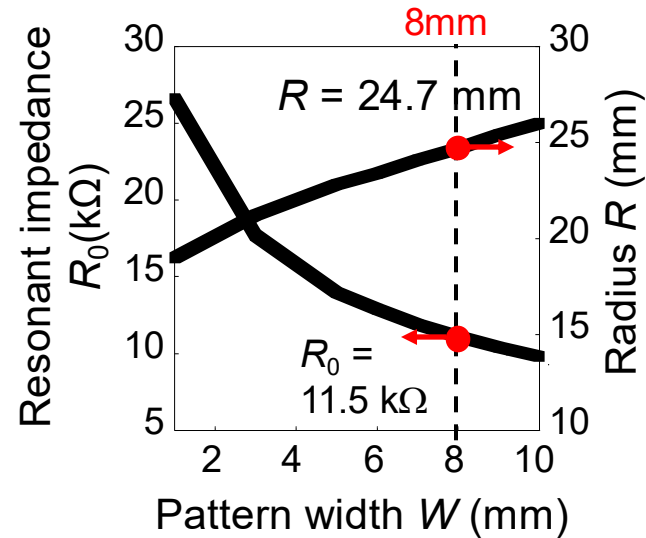
アンテナインピーダンスの計算は電磁界解析ソフトKeysight EM Proの Finite Element Method を使用



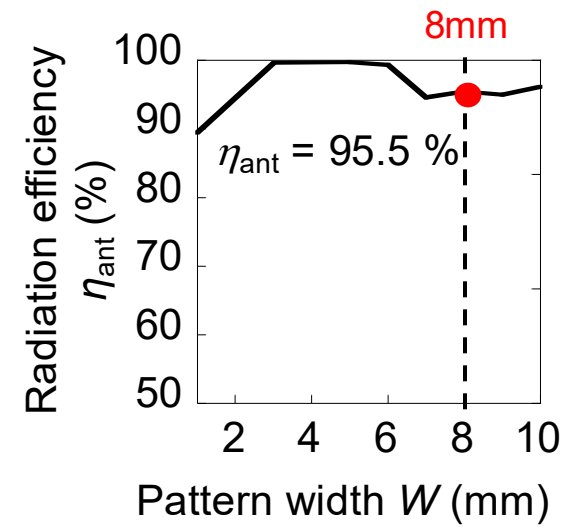
Substrate: MEGTRON 7

ϵ_r : 3.4, $\tan\delta$: 0.0015
導体厚: $18\mu\text{m}$
基板厚: 0.2mm

ループアンテナレイアウト



共振インピーダンス R_{ant}

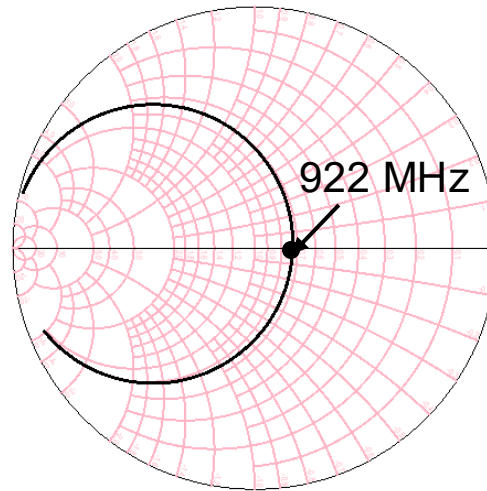
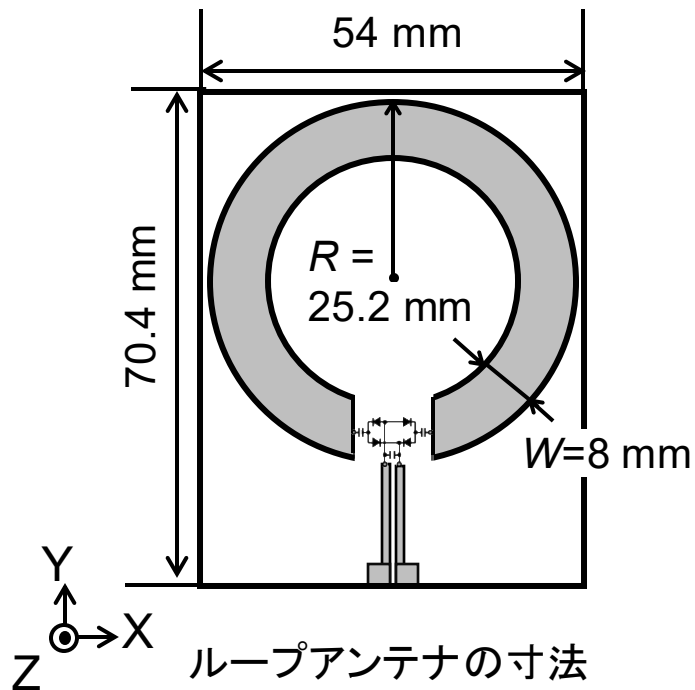


アンテナの放射効率

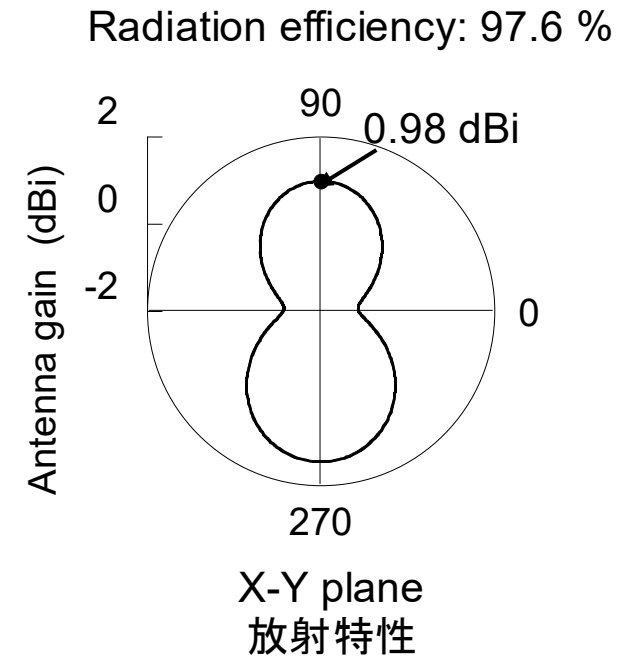
導体幅 $W=8\text{ mm}$, $R=24.7\text{ mm}$ のとき、共振インピーダンス $R_0=11.5\text{ k}\Omega$ を実現

設計手順5 アンテナレイアウトの設計 — ループアンテナの場合 —

設計したアンテナの電気性能



アンテナアドミタンス



導体幅 W : 8mm

アンテナ半径 r : 25.2mm のとき

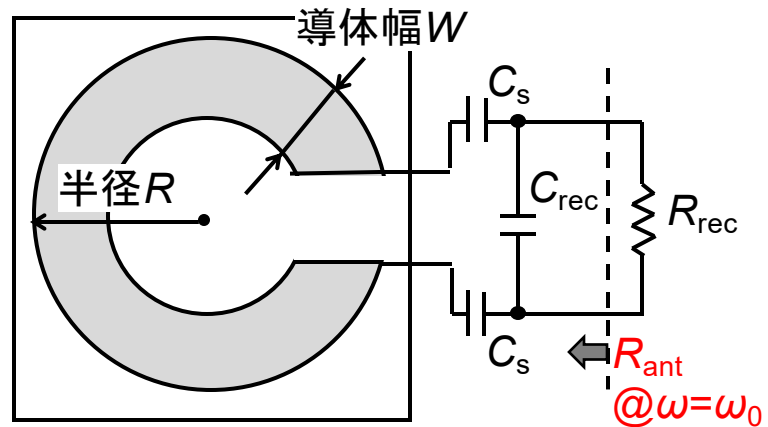
- 共振インピーダンス R_0 : 11.1k Ω
- アンテナインダクタンス L_m : 0.25 μ H

- アンテナサイズは 70.4mm x 52.4mm
- 放射効率 97.6%, アンテナ利得 0.98dBi

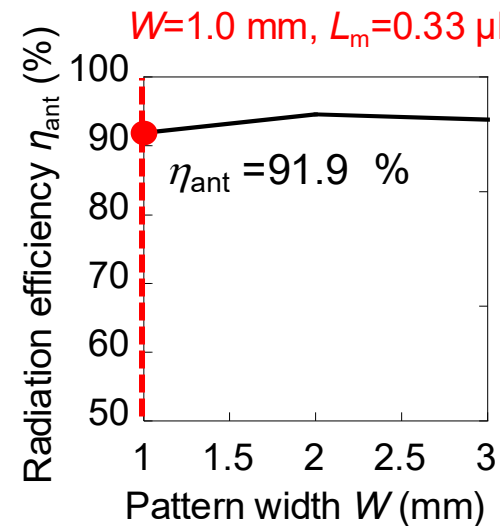
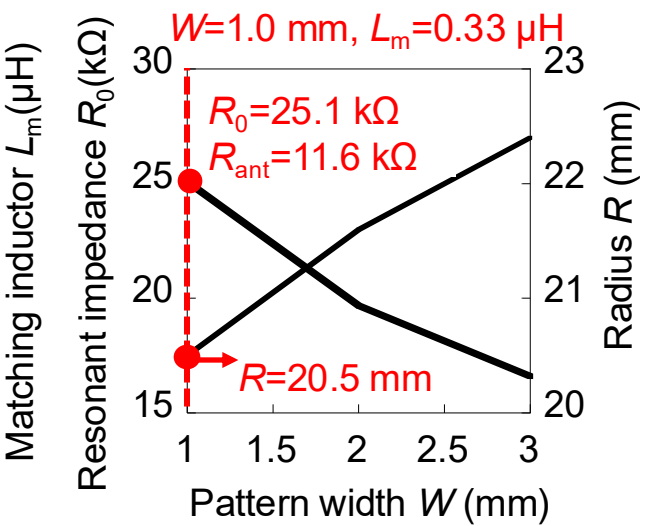
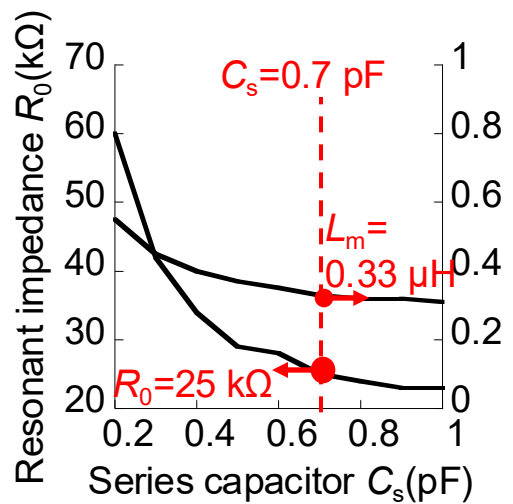
設計手順5 アンテナレイアウトの設計 — インピーダンス変成ループアンテナの場合 —

共振インピーダンス $R_{ant}=12\text{ k}\Omega$ となるようインピーダンス変成ループアンテナの寸法を設計

- 設計手順**
- ①直列容量 C_s に対し、ループアンテナの整合用インダクタ L_m を算出。
 そして、インピーダンス変成比 n^2 と $R_{ant}=12\text{ k}\Omega$ から、ループアンテナで設計する変成前の共振インピーダンス R_0 を算出。
 - ②各導体幅 W に対し、①で求めた L_m となるようループ半径 R を調整。そして、①で求めた R_0 となる導体幅 W を導出。
 - ③各直列容量 C_s で①と②を実施し、ループアンテナ寸法が小型かつ高放射効率となるインピーダンス変成ループアンテナを設計
 アンテナインピーダンスの計算は電磁界解析ソフトKeysight EM Proの Finite Element Method を使用



Substrate: MEGTRON 7
 ϵ_r : 3.4, $\tan\delta$: 0.0015
 導体厚: 18 μm
 基板厚: 0.2mm



インピーダンス変成前共振インピーダンス R_0

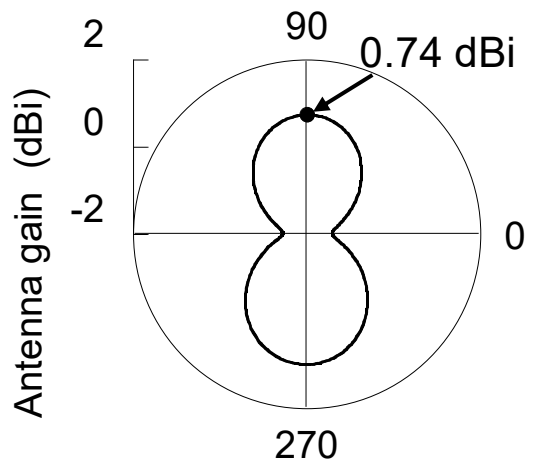
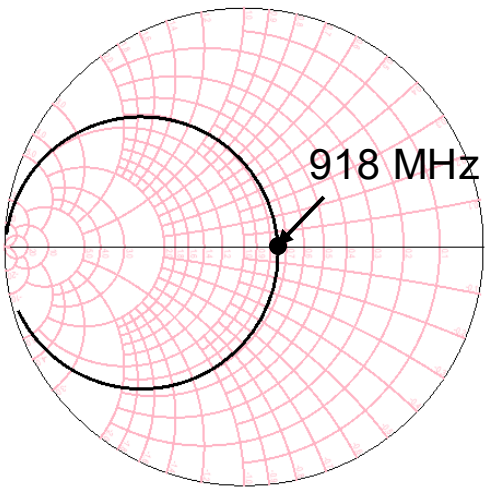
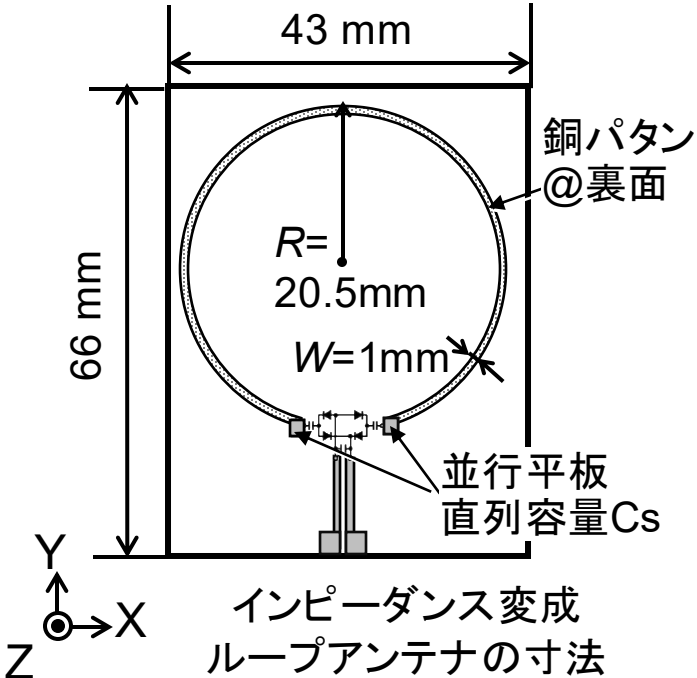
アンテナ放射効率

ループアンテナレイアウト

導体幅 $W=1\text{ mm}$ 、 $R=20.5\text{ mm}$ 、 $C_s=0.7\text{ pF}$ のとき、共振インピーダンス $R_{ant}=11.6\text{ k}\Omega$ を実現

設計手順5 アンテナレイアウトの設計 — インピーダンス変成ループアンテナの場合 —

設計したアンテナの電気性能



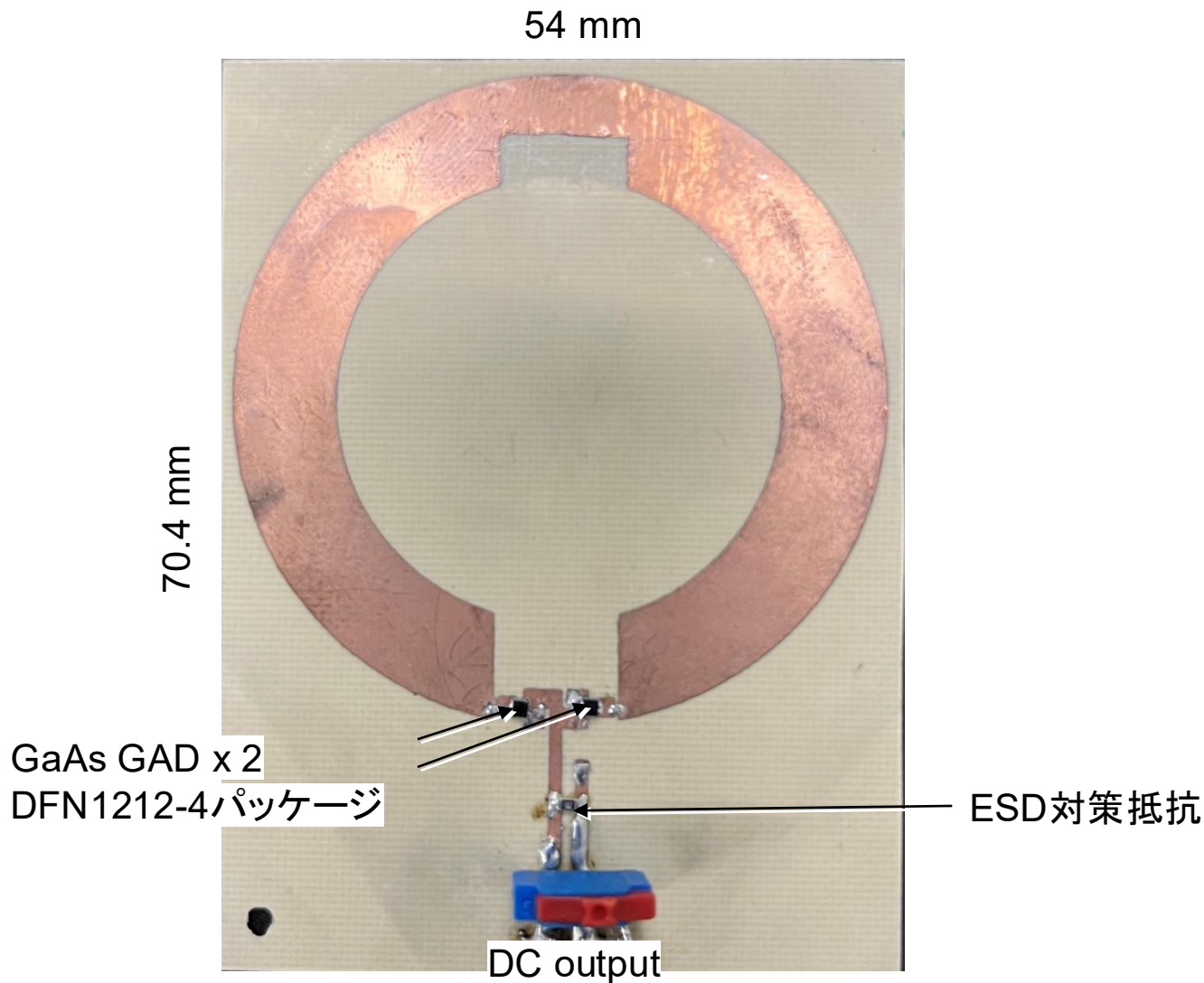
導体幅 W : 1mm、アンテナ半径 r : 20.5mmのとき

- 共振インピーダンス R_0 : 25.1k Ω
- アンテナインダクタンス L_m : 0.33 μ H

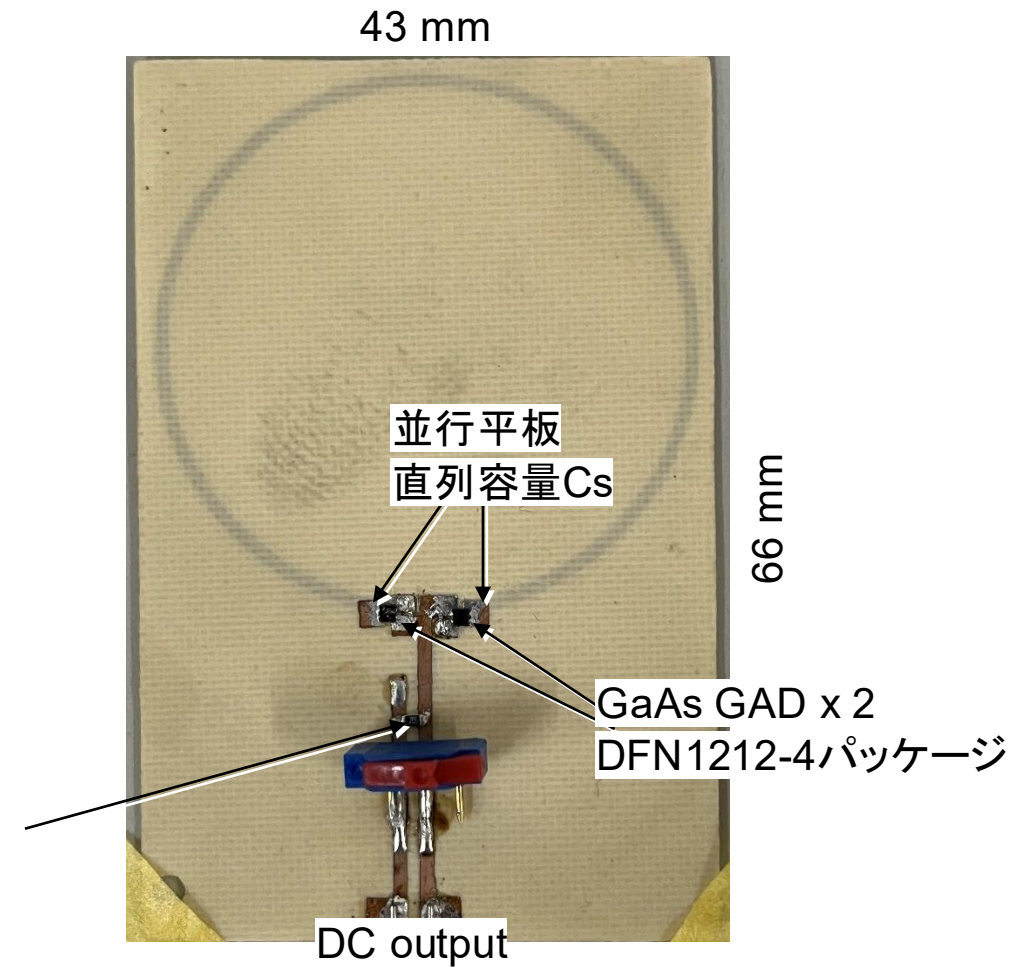
直列容量 C_s は基板両面の銅パタンによる並行平板コンデンサにより実現

- アンテナサイズは66mm x 43mm
- 放射効率88.2%, アンテナ利得0.74dBi

設計手順6 920MHz帯レクテナの試作

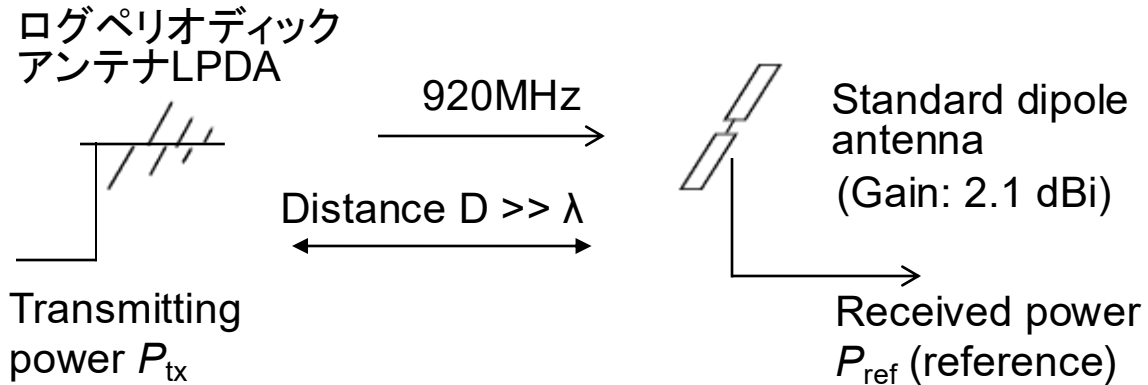


ループアンテナを用いた920MHz帯レクテナの写真

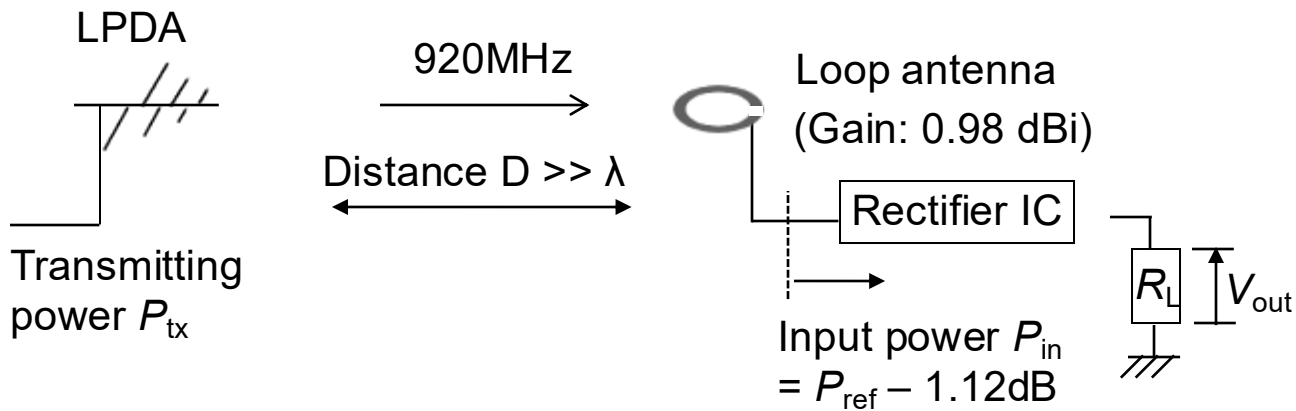


インピーダンス変成ループアンテナを用いた
920MHz帯レクテナの写真

設計手順7 レクテナ性能評価のためのOver The Air (OTA)測定システム



① 基準電力の測定系



② レクテナの整流効率の測定系

測定手順

測定系①

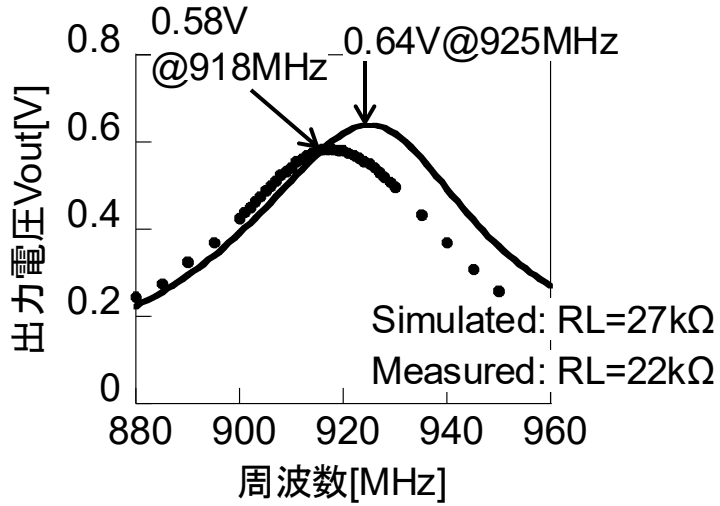
送電電力 P_{tx} に対する
標準ダイポールアンテナでの受電電力 P_{ref} を測定。

測定系②

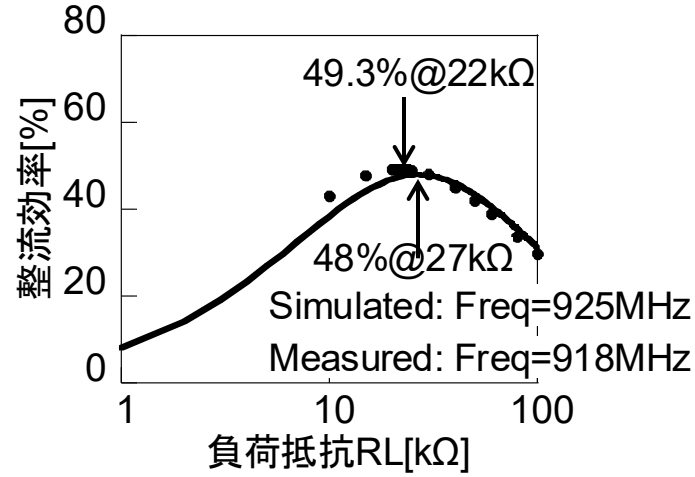
1. 標準ダイポールアンテナと同じ位置にレクテナを配置。
2. 測定系①と同じ送電電力 P_{tx} に対し、レクテナ出力電圧 V_{out} 測定。出力電圧 V_{out} と R_L から、出力電力 P_{out} を算出
3. 標準ダイポールアンテナとループアンテナの利得差から整流器への入力電力 P_{in} を推定
4. 整流効率 $\eta = P_{in}/P_{out}$ を算出。

設計手順8 ループアンテナを用いた920MHz帯レクテナの評価結果

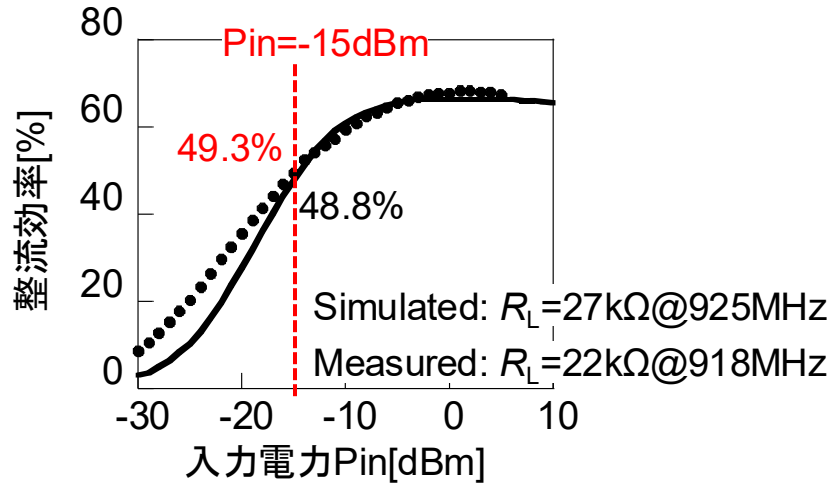
— Simulated ● Measured



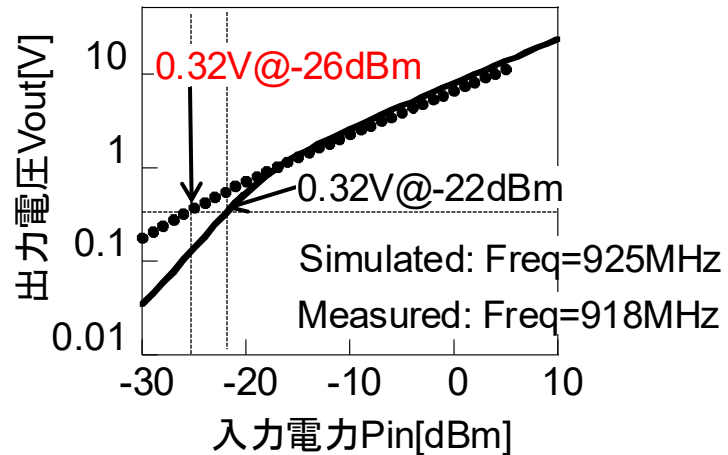
周波数特性(入力電力Pin=-15dBm)



負荷特性(Pin=-15dBm)



入力電力Pinに対する整流効率



感度特性($R_L=Open$)

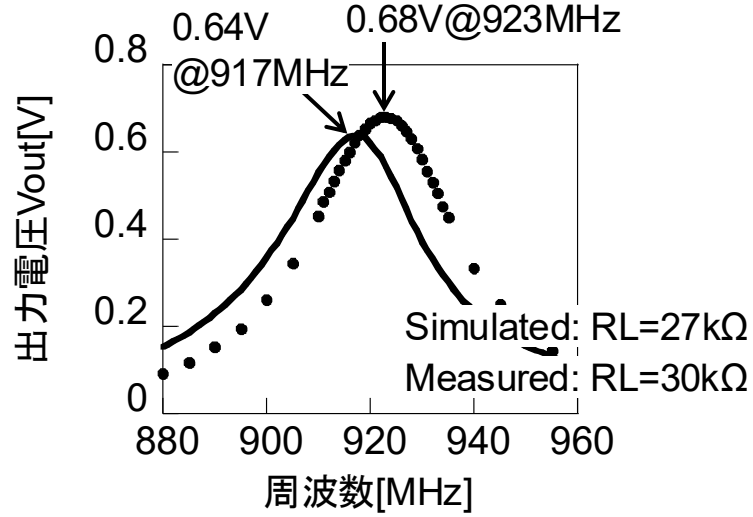
入力電力 $P_{in} = -15dBm$ のとき整流効率 η は49.3%

IoT端末の最小起動電圧0.3Vで規定される
感度点は-26dBm@0.32V

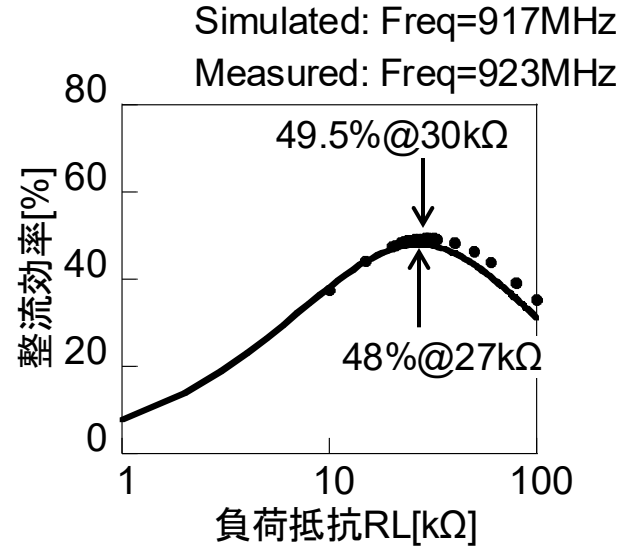
設計手順8 インピーダンス変成ループアンテナを用いた920MHz帯レクテナの評価結果

— Simulated

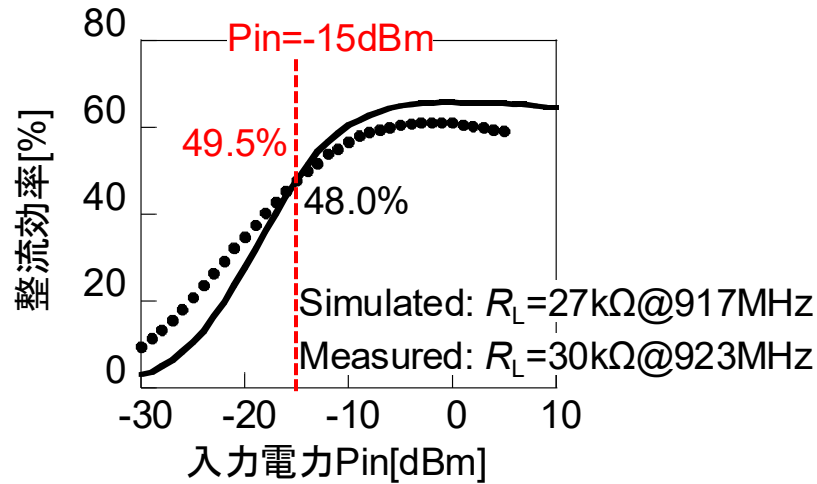
● Measured



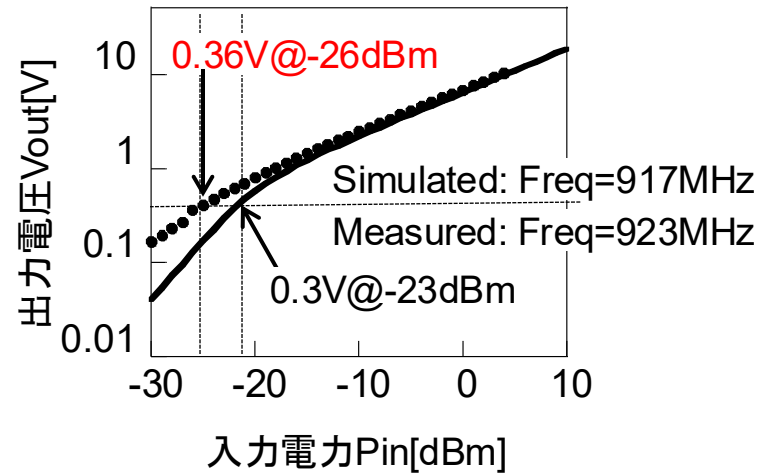
周波数特性(入力電力 $P_{in}=-15dBm$)



負荷特性 ($P_{in}=-15dBm$)



入力電力 P_{in} に対する整流効率



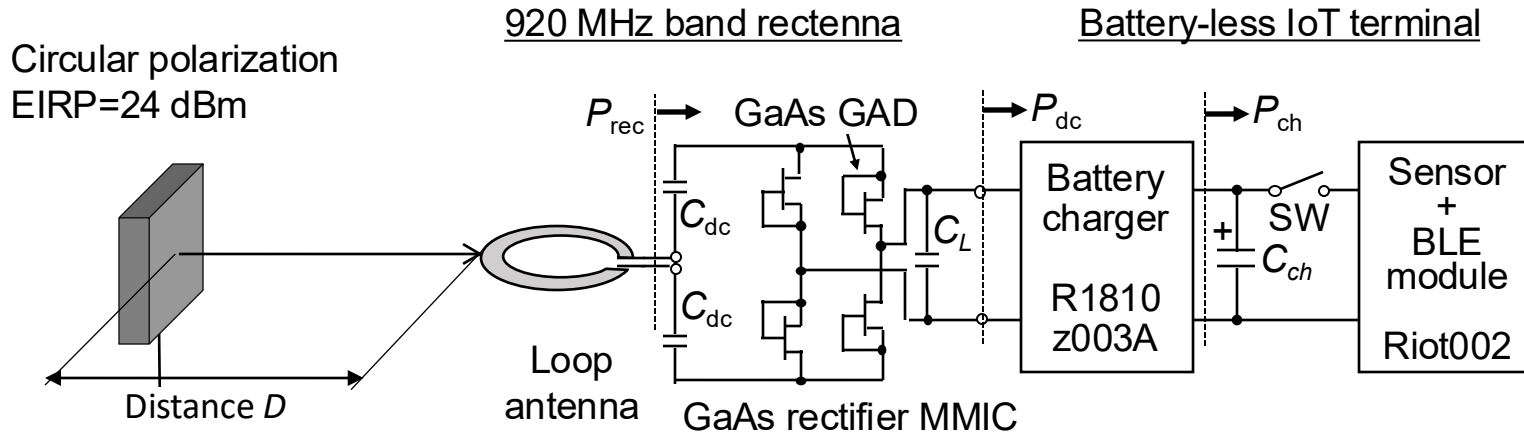
感度特性 ($R_L=Open$)

入力電力 $P_{in} = -15dBm$ のとき 整流効率 η は 49.5%

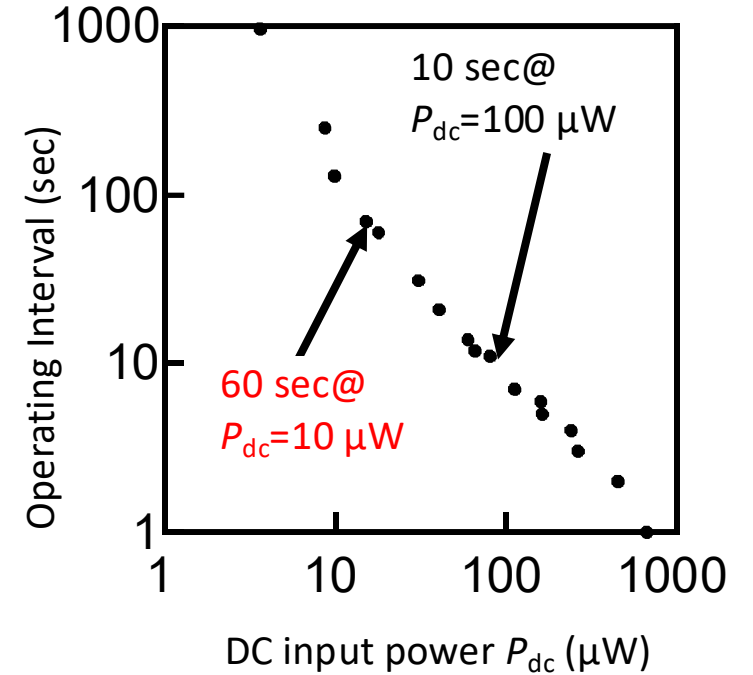
IoT 端末の最小起動電圧 0.3V で規定される
感度点は -26dBm @ 0.32V

→ ループアンテナを用いたレクテナと同等の性能

920MHz帯レクテナを用いた特定小電力無線送電システムの応用

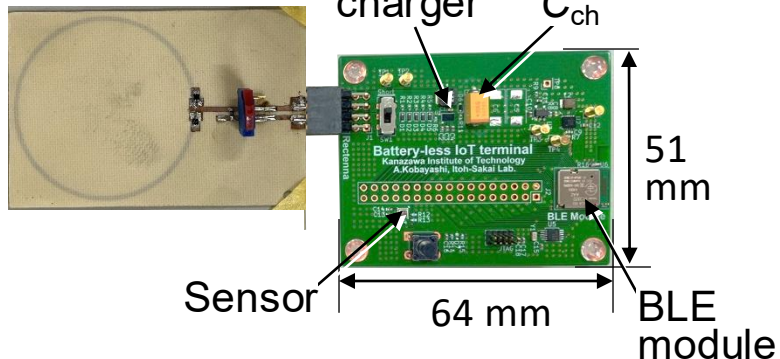


特定小電力マイクロ波送電システムのブロック図



充電回路への入力電力に対するIoT端末の間欠動作間隔[8]

インピーダンス変成
ループアンテナ



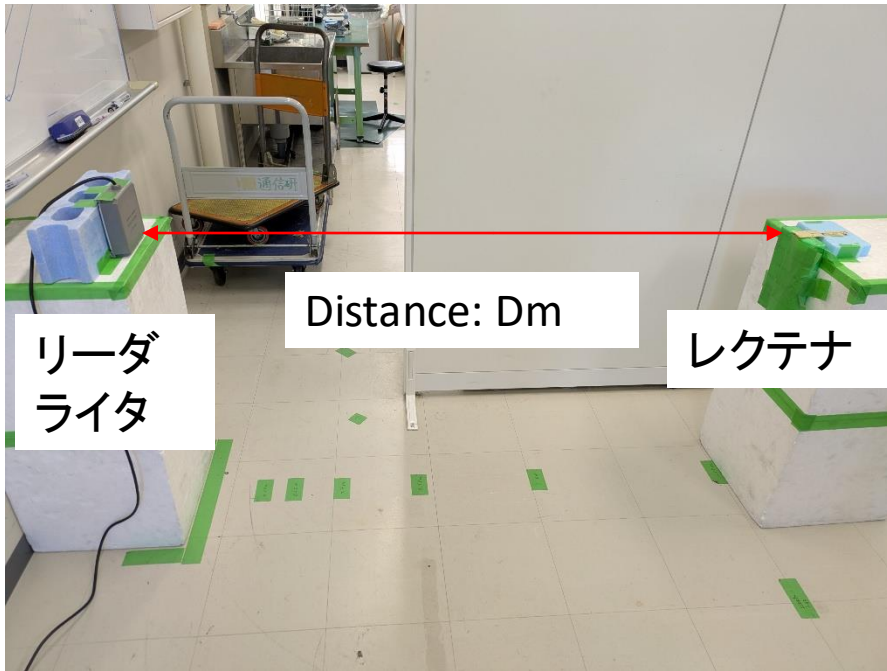
試作した受電システムの外観写真

バッテリーレスIoT端末の性能

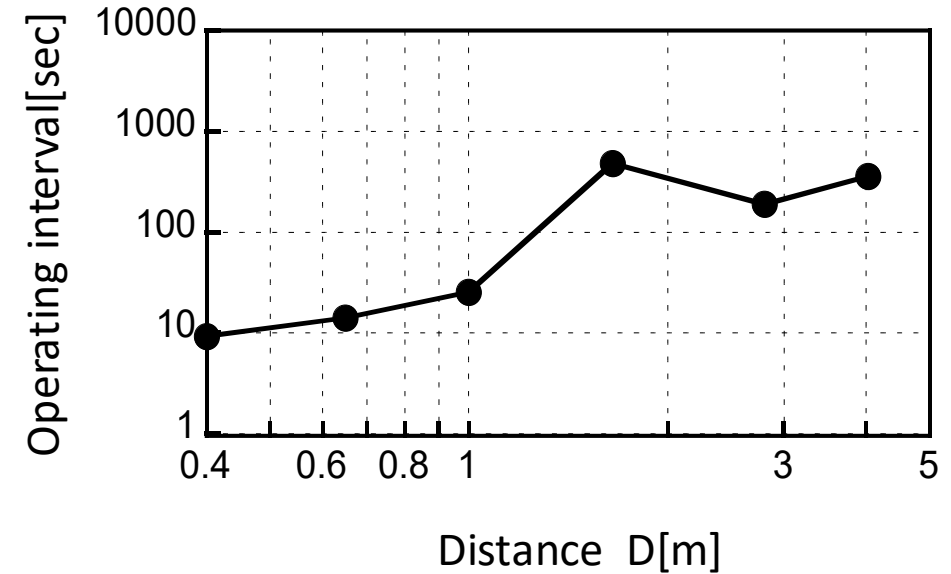
- ・60秒間隔で間欠動作
→ 充電回路への入力電力 $P_{dc}=10\mu W$ が必要
- ・10秒間隔で間欠動作
→ 充電回路への入力電力 $P_{dc}=100\mu W$ が必要

[8] 小林章伸, 遁所雄大, 野口啓介, 坂井尚貴, 伊東健治, “ワイヤループアンテナを用いる28GHz帯GaAsレクテナアレー,” 信学技報, vol. 124, no. 201, WPT2024-23, pp. 44-49, 2024年10月.

920MHz帯レクテナを用いた特定小電力無線送電システムの応用



大学室内での特定小電力マイクロ波送電システム実証実験



送電距離に対する間欠動作間隔

特定小電力条件下で最大送電距離4mでバッテリーレスIoT端末の間欠動作を確認

10. 文献および著者紹介

- [1]“920MHz帯空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの屋外利用等に係る検討の背景について”, 情報通信審議会 情報通信技術分科会 陸上無線通信委員会空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム作業班(第11回), 2025年4月9日
- [2] 陸上無線通信委員会報告(案)—「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「920MHz帯空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの屋外利用等に係る技術的条件」—, 公示日2025年8月23日
- [3] 遁所雄大, 平瀬大暉, 小林章伸, 町田翔太郎, 坂井尚貴, 伊東健治, “未来の暮らしを支える無線電力伝送技術 ~ 特定小電力無線局による920MHz帯空間伝送型無線電力伝送実験と応用提案 ~,” 信学技報, vol. 124, no. 427, pp. 87–90, Mar. 2025.
- [4] K. Itoh, N. Sakai and 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. (Free access)
- [5] S. Tsujita, N. Sakai, K. Itoh and S. Tsuchimoto, “920MHz band high sensitive rectenna with a small loop antenna,” 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 2019, pp. 1274-1276.
- [6] Y. Muramoto, N. Sakai and K. Itoh, “A 920 MHz band rectenna with the impedance transformed small loop antenna (IT-SLA),” 2022 Wireless Power Week (WPW), Bordeaux, France, 2022, pp. 400-403.
- [7] T. Hirase et al., “High Dynamic Range 920 MHz Band Low Power Rectenna With Low Threshold Voltage GaAs GADs,” in 2024 IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo (WPTCE), May 2024, pp. 865–868.
- [8] 小林章伸, 遁所雄大, 野口啓介, 坂井尚貴, 伊東健治, “ワイヤ・ループアンテナを用いる28GHz帯GaAsレクテナアレー,” 信学技報, vol. 124, no. 201, WPT2024–23, pp. 44–49, 2024年10月.

- 坂井 尚貴 金沢工業大学 EOE応用研究センター 研究員, naoki.sakai@neptune.kanazawa-it.ac.jp
- 伊東 健治 金沢工業大学 工学部 電子情報システム工学科 教授, itoh.kenji@neptune.kanazawa-it.ac.jp

