

無線電力伝送用受電レクテナ (アンテナと回路の融合技術)

金沢工業大学 工学部 電気電子工学科
教授 伊東健治

令和3年2月25日

マイクロ波での無線電力伝送の動向

無線電力伝送技術

- ・電磁誘導方式(kHz): コイルで誘起される磁場を利用

伝送距離: mm~cm

- ・共鳴送電方式(MHz): 共振器間の結合

伝送距離: cm~m、

- ・電磁波方式(GHz): 電磁波による伝送(今回の説明対象システム)

伝送距離: 回線設計により遠距離も(成層圏、宇宙)

→スマートフォン、工場内のセンサーへの非接触給電

バッテリーフリーの保守用センサー(屋内)、ドローンなど(屋外)

総務省にて「空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム」として制度化予定

- ・第1ステップ(屋内: 制度化作業中)、第2ステップ(屋外)
- ・周波数: 920MHz(RFID), 2.4GHz(ISM帯, WiFi)、5.7GHz(ISM帯, WiFi)

金沢工業大学での無線電力伝送への取り組み

主に、受電用のレクテナ(アンテナ+整流器:電波を受信し、直流を出力)の高効率化を研究。

1. 大電力伝送用2.4GHz~24GHz帯受電レクテナ(受電電力:1W~10Wクラス)

- ・ドローンなどの移動体、工業設備などでの非接触給電
- ・内閣府SIP「IoE社会のエネルギーシステム」で研究(研究代表:名大 天野教授)
- ・回路機能を実現したアンテナと半導体の直接接続技術により究極の高効率化(世界トップ)
- ・製品化でネックとなる整流用半導体としてGaAs 整流器IC(WIN Semiconductor社)を開発済

2. エネルギーハーベスティング用受電レクテナ(受電電力:nW~mWクラス)

- ・IoTや保守用センサ類のバッテリーレス化。RFIDの高性能化(動作距離延伸)。
- ・JST CREST「Super SteepトランジスタとMeta MaterialアンテナによるnW級環境RF発電技術の創出」で研究(研究代表:電通大 石橋教授)
- ・1k Ω を超える高インピーダンスアンテナの実現による究極の高感度化(世界トップ)
- ・製品化でネックとなる整流用半導体としてSOI-CMOS 整流器IC(Global Foundry社)を開発済

先鋭的な電波研究を支える日本有数の研究環境



無線電力伝送に関わる研究者(出身企業):

教授 伊東健治 無線電力伝送・RF回路(三菱電機)

研究員 坂井尚貴 無線電力伝送

共同研究者

教授 牧野滋 メタマテリアルアンテナ (三菱電機)

教授 野口啓介 小型アンテナ

[主要設備]

- ・大型電波暗室: 1、小型電波暗室: 2
- ・無線電力伝送用電波暗室: 1
- ・ミリ波までの主要測定機器(ネットワークアナライザ他),
- ・大電力波源(200W, 2.4GHz, 5.8GHz)
- ・集積回路組み立て用ダイボンド、ワイヤボンド設備
- ・ADS, CADENCE, EM-PRO, FEKOなどの設計環境を保有

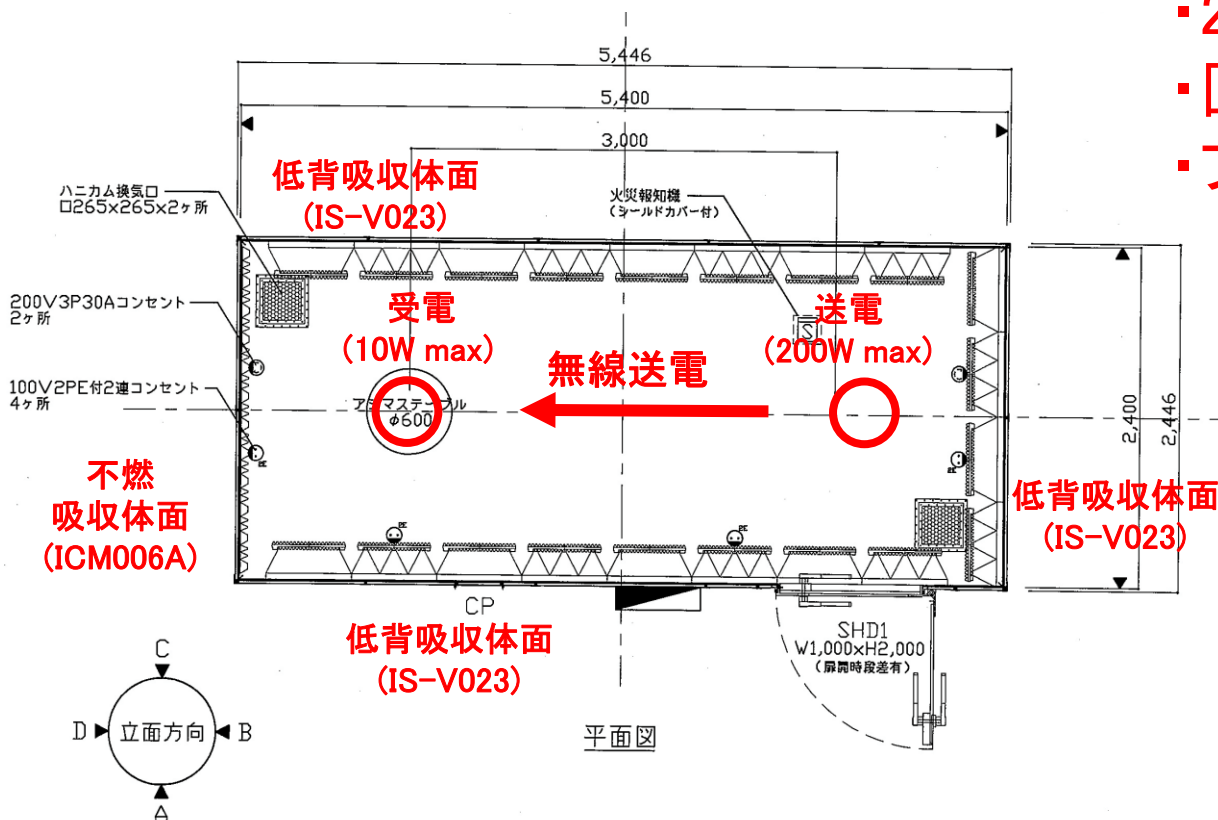


教育としての研究:

先鋭的な研究課題に取り組むなかで、学生は理論検討・
シミュレーション・製作・検証・改善・論文発表のサイクルを経験。

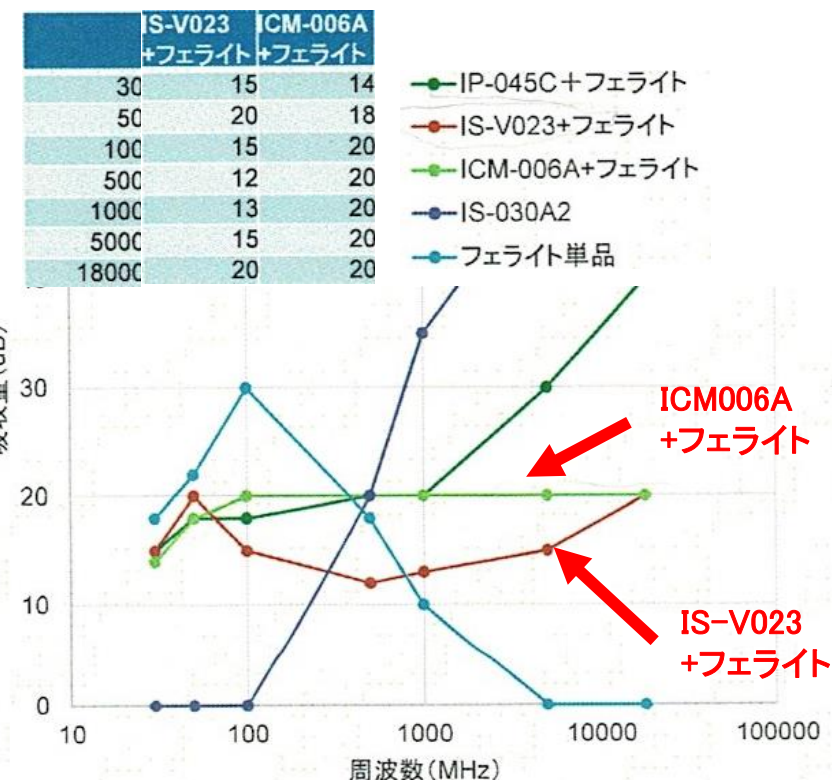
無線伝送実験用電波暗室の概要(2019年5月竣工)

- ・2.4GHz、5.8GHzの200W増幅器導入
- ・回転台あり
- ・フェライトにより30MHz以上で対応



No3	ターンテーブル側妻壁吸収体	天井、側壁、床吸収体	ターンテーブル側妻壁吸収体の耐電力	暗室重量
1	ICM-006A+フェライト	IS-V023+フェライト	50mW/cm ² 以上	5.4 t

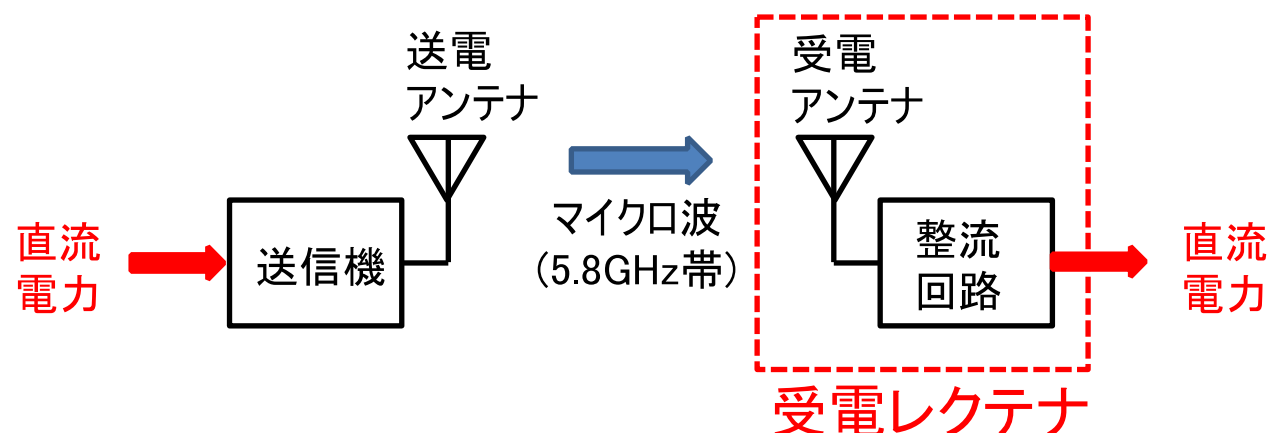
200W@5.8GHz, ANT利得20dBでの
電力密度18mW/cm²



吸収特性

1. 大電力伝送用受電レクテナ

受電レクテナの役割と研究の狙い



受電レクテナ: 長距離の無線電力伝送に適するマイクロ波伝送の受電素子

- ・受電アンテナと整流回路からなる。**マイクロ波電力を直流電力に変換。**
- ・多数のレクテナを配置し、所望電力を得る:

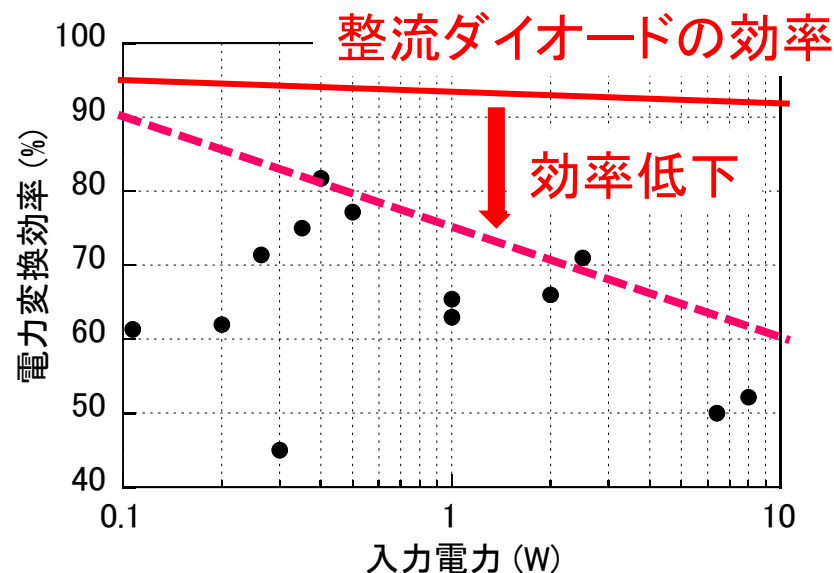
[例] **1W**受電レクテナ × 電力効率**70%** × **100素子** = 70W

研究の狙い: 受電レクテナの**大電力化・高効率化**

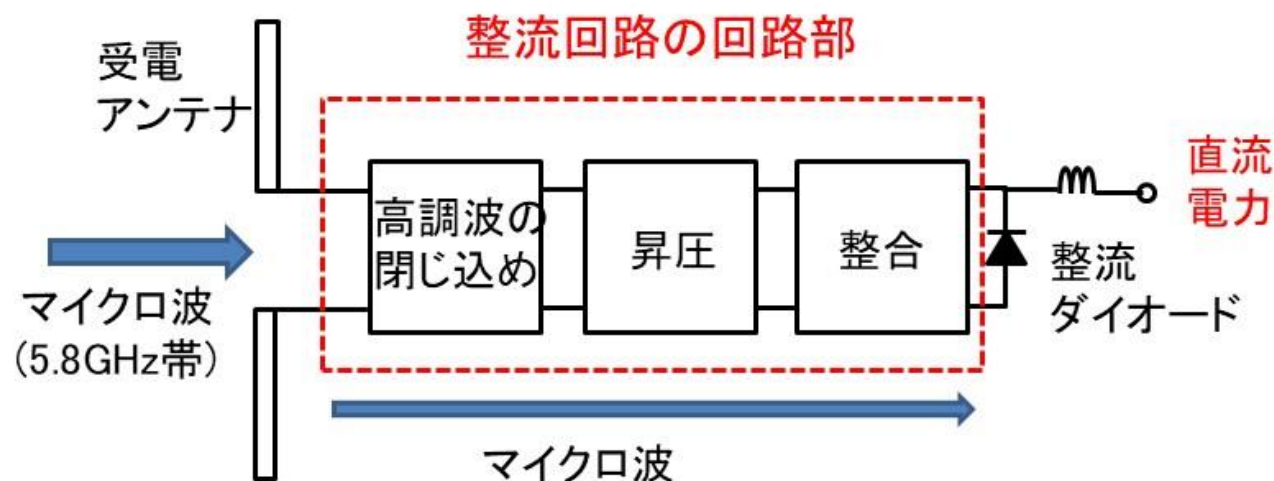
[例] **5W**受電レクテナ × 電力効率**80%** × **18素子** = 72W

➔ 受電システムの小型・軽量化、低コスト化、定消費電力化。

従来の受電レクテナの問題点(効率低下要因)

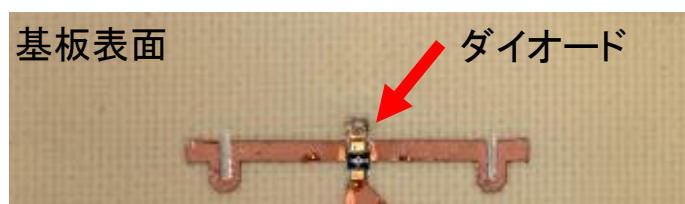
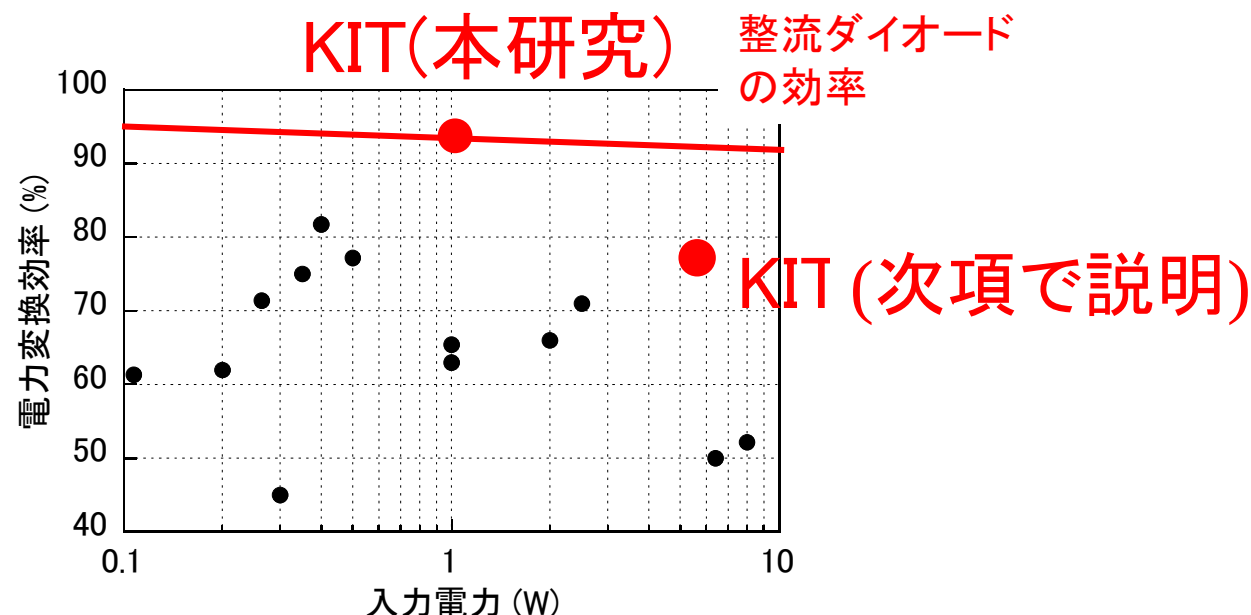
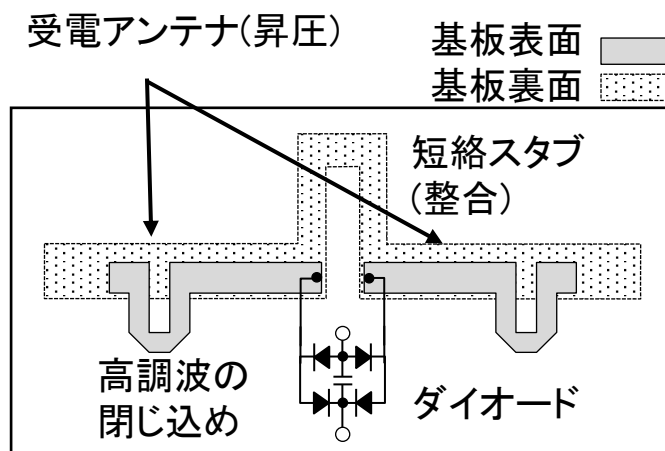


整流回路の電力変換効率



- (1) 整流回路の電力変換効率は、整流ダイオードの効率よりも低下。大電力であるほど顕著。
この効率低下は、「整流回路の回路部」の損失に起因。
- (2) 高調波の閉じ込め、昇圧、整合などの機能を有する回路部により、アンテナからのマイクロ波電力を整流用ダイオードに印加。しかし回路の損失によりダイオードに届く前に減衰し効率が低下します。
- (3) 今回、この「整流回路の回路部」を不要とし、受電アンテナに整流ダイオードを直接接続。
「整流回路の回路部」の損失を抑制し、高効率化。

本研究(高効率化技術)による5.7GHz帯受電レクテナ



直流出力

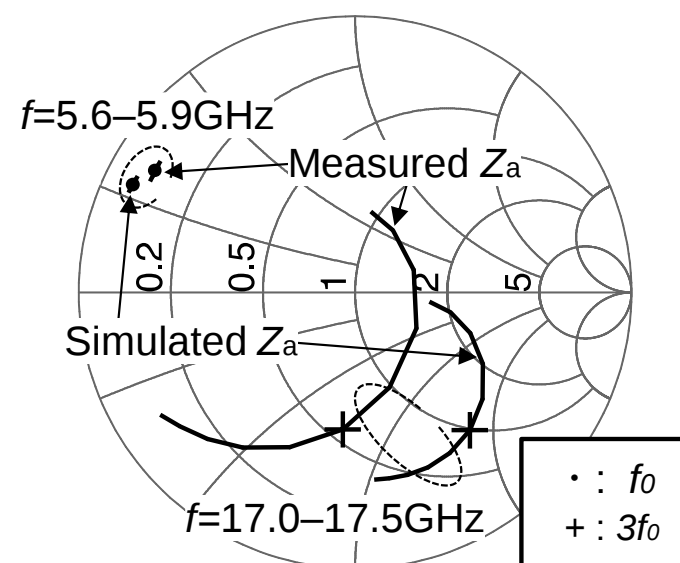
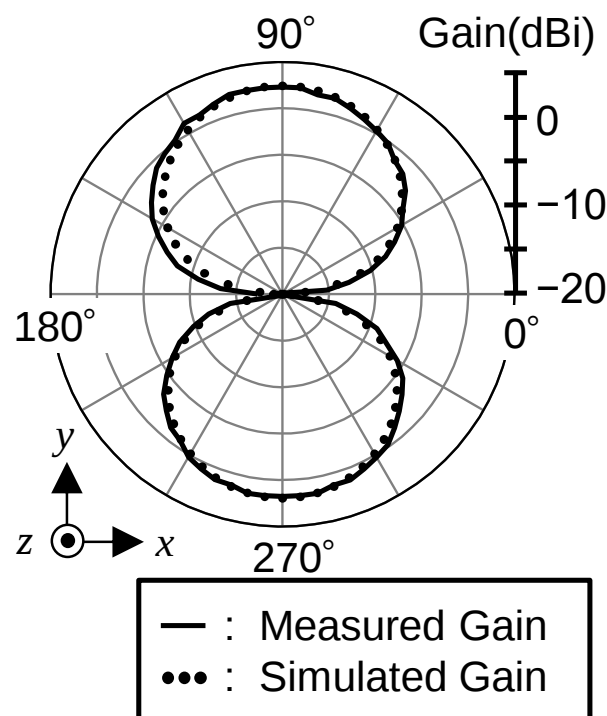


直流出力

受電レクテナの構成と写真
(大きさ: 32mm x 11mm)

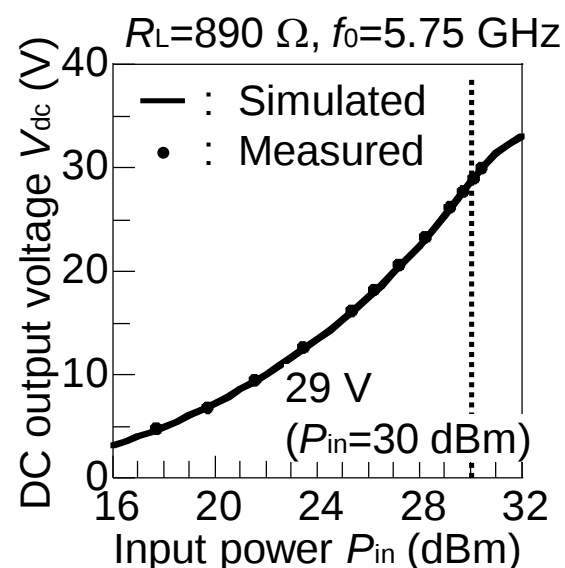
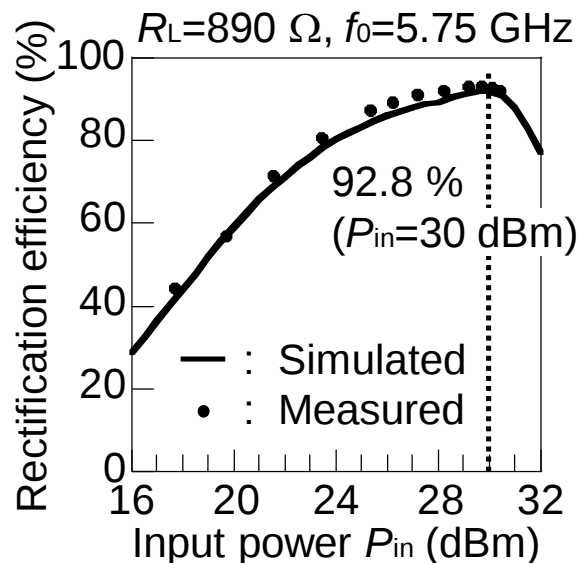
- (1) 新たな構造の受電アンテナにより「整流回路の回路部」の機能を実装。アンテナ効率の劣化は2%未満。受電アンテナに整流ダイオードを直接接続。回路損失を抑制。
- (2) マイクロ波電力1W入力時92.8%の電力変換効率を実現。世界トップ性能。回路損なしの整流ダイオードの効率を実現。
- (3) アンテナと回路を一体化することで部品点数を究極まで削減
→ 後述の整流器ICとの組み合わせで2点

主要データ(5.7GHz帯受電レクテナ)

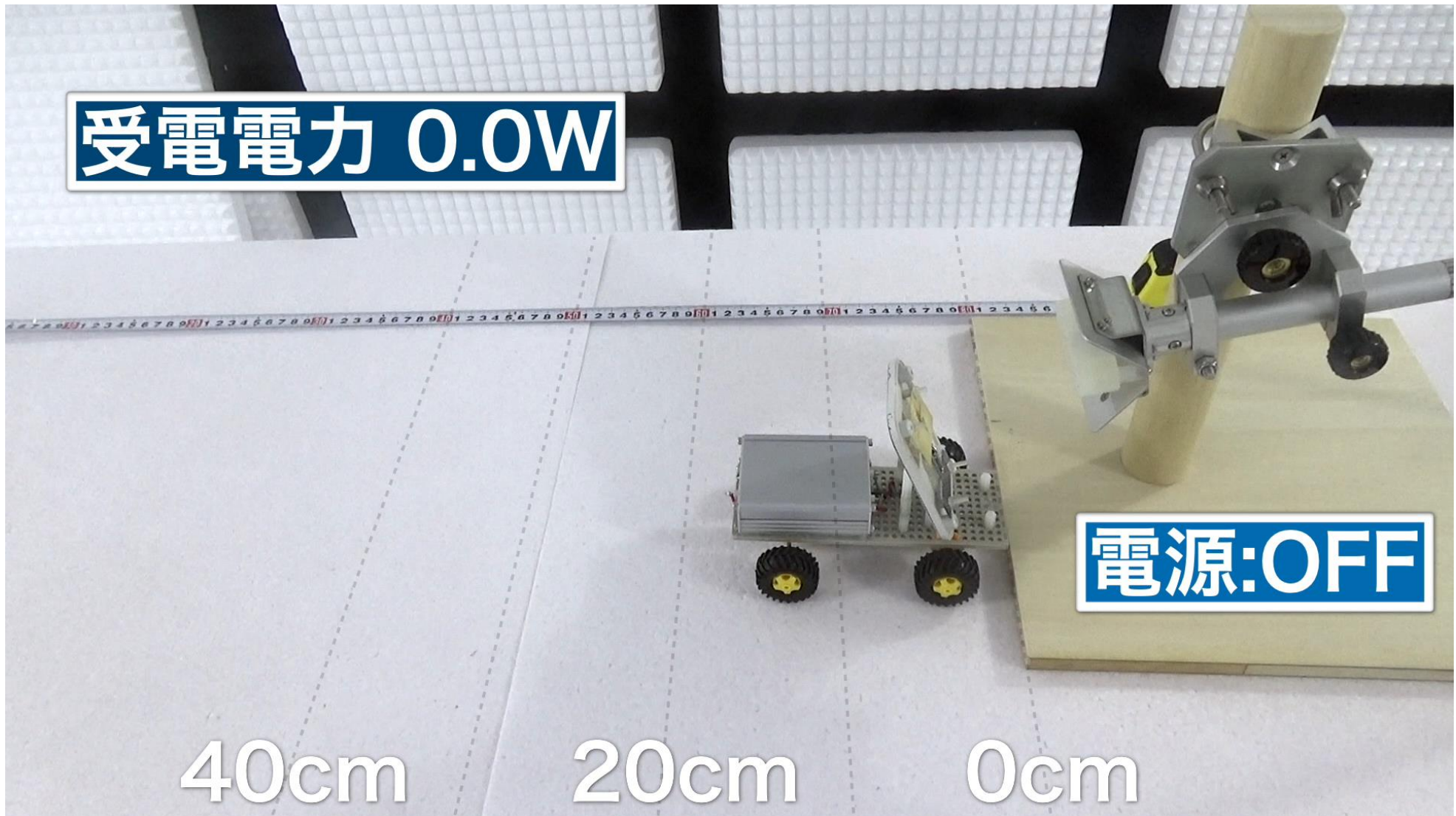


Normalized impedance: $500\ \Omega$
Fundamental frequency f_0 : 5.75 GHz

- ・アンテナ利得: 2.3 dBi
- ・アンテナ効率: 96.9%
- ・回路機能実装にともなうアンテナ効率低下量: 2%未満
- ・アンテナインピーダンス:
整合、高調波処理機能実現



- ・整流器へ1W入力時に
整流効率: 92.8%
出力電圧: 29V

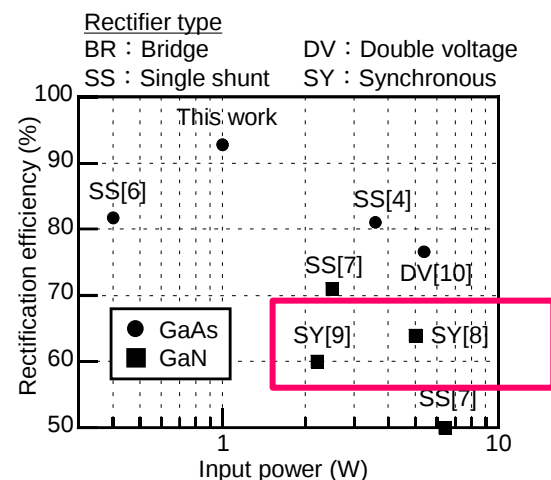
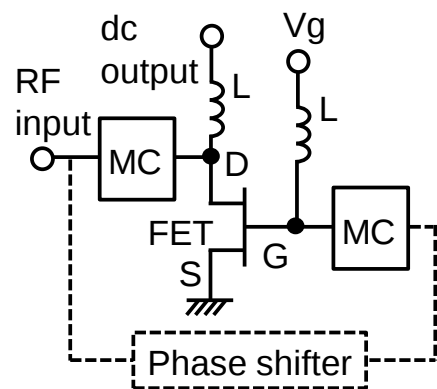


5.8GHz帯受電レクテナを用いるミニ4駆走行デモ

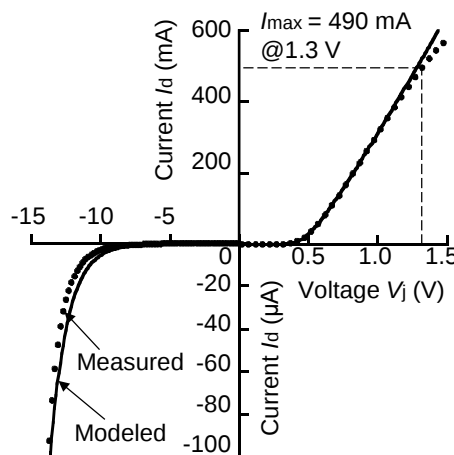
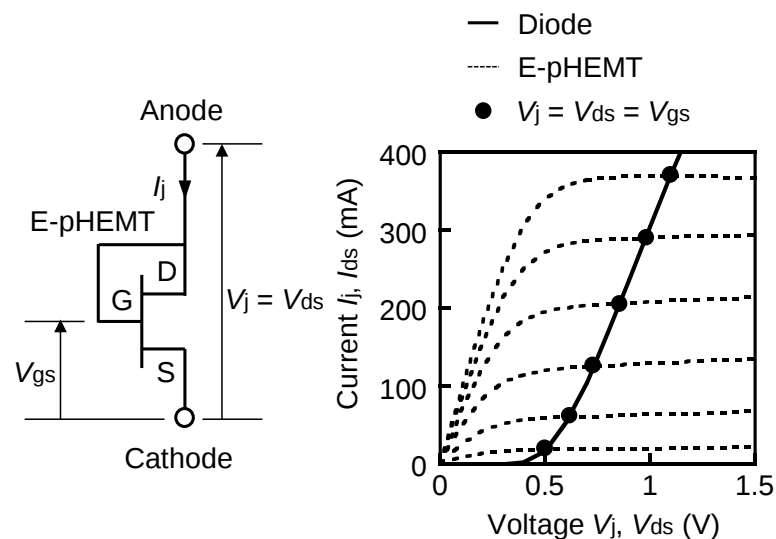
[実用化での最大の課題] 整流用半導体の調達

W級整流器に適用可能な市販ダイオード→なし

従来の代替案: GaAs/GaN FET増幅器構成による同期型整流器→大型, 低効率



新たな代替案: E-pHEMTによるGated anode diode (マイクロ波領域では初の発表)

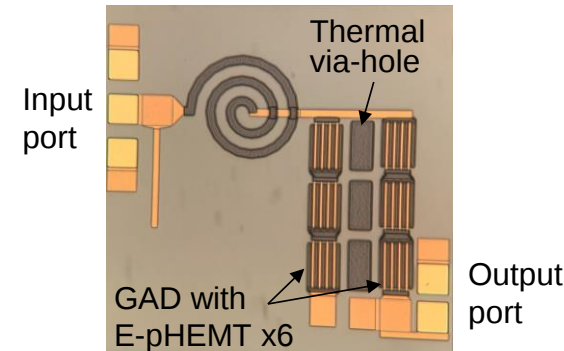
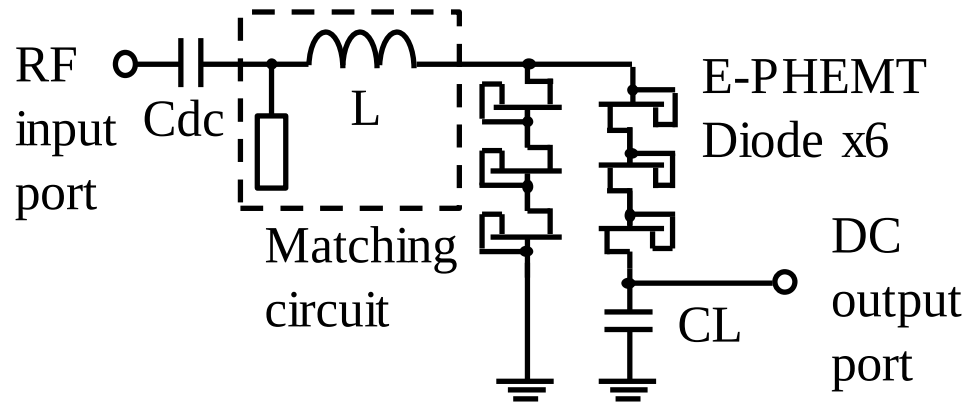


	Si-SBD (HSMS282P)	GaAs-SBD	GAD with E-pHEMT (This paper)
f_c	30 GHz	334 GHz	253 GHz
V_{br} (100 μ A)	22.4 V	28 V	13.7 V
I_{max}	107 mA/pF	564 mA/pF	1170 mA/pF

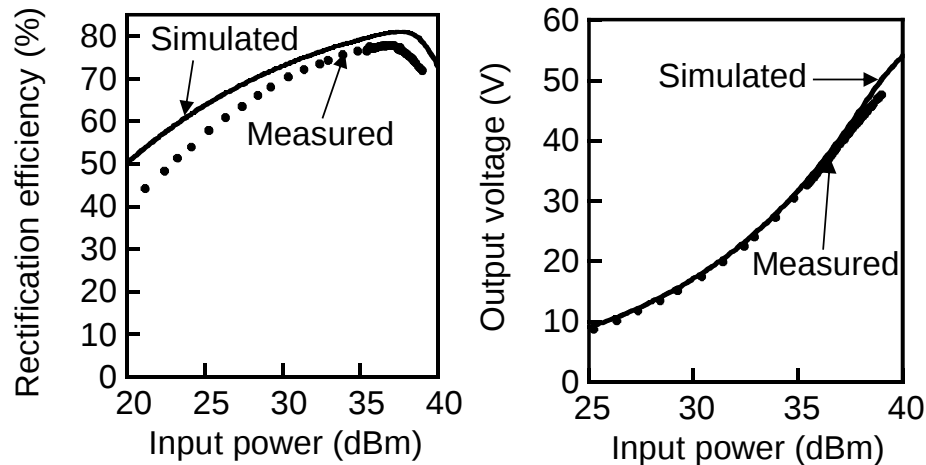
小信号用FETを使用

- ・高周波特性はGaAs SBD同等
- ・ブレークダウン電圧は劣るが, 大電流動作に適する.

5.7GHz帯5W整流器IC



整合回路含め
1mm角に集積化



・5.1 W入力時に整流効率77.9%,出力電圧39.8V
(トップ性能)

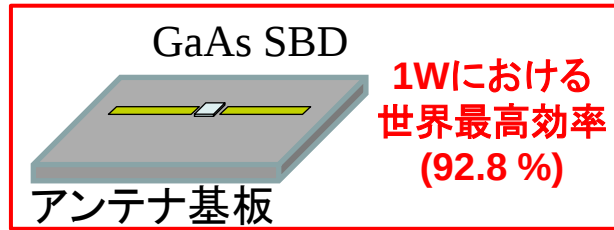
・整合回路損失を除くと85%程度

==>アンテナへとダイオードの直接接続構成評価中



ブリッジダイオードチップ

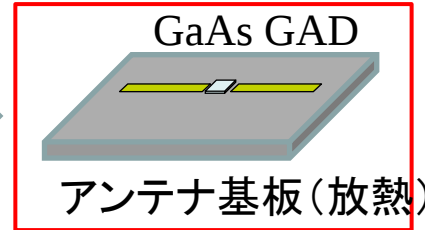
GaAs SBD (VB=25V)



2020年度上期: 1 W 92.8%

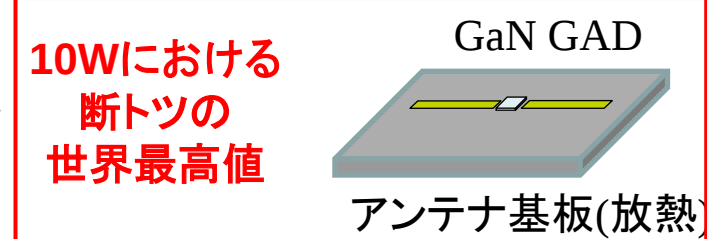
早期実用化が可能な研究成果

GaAs GAD (VB=13V)

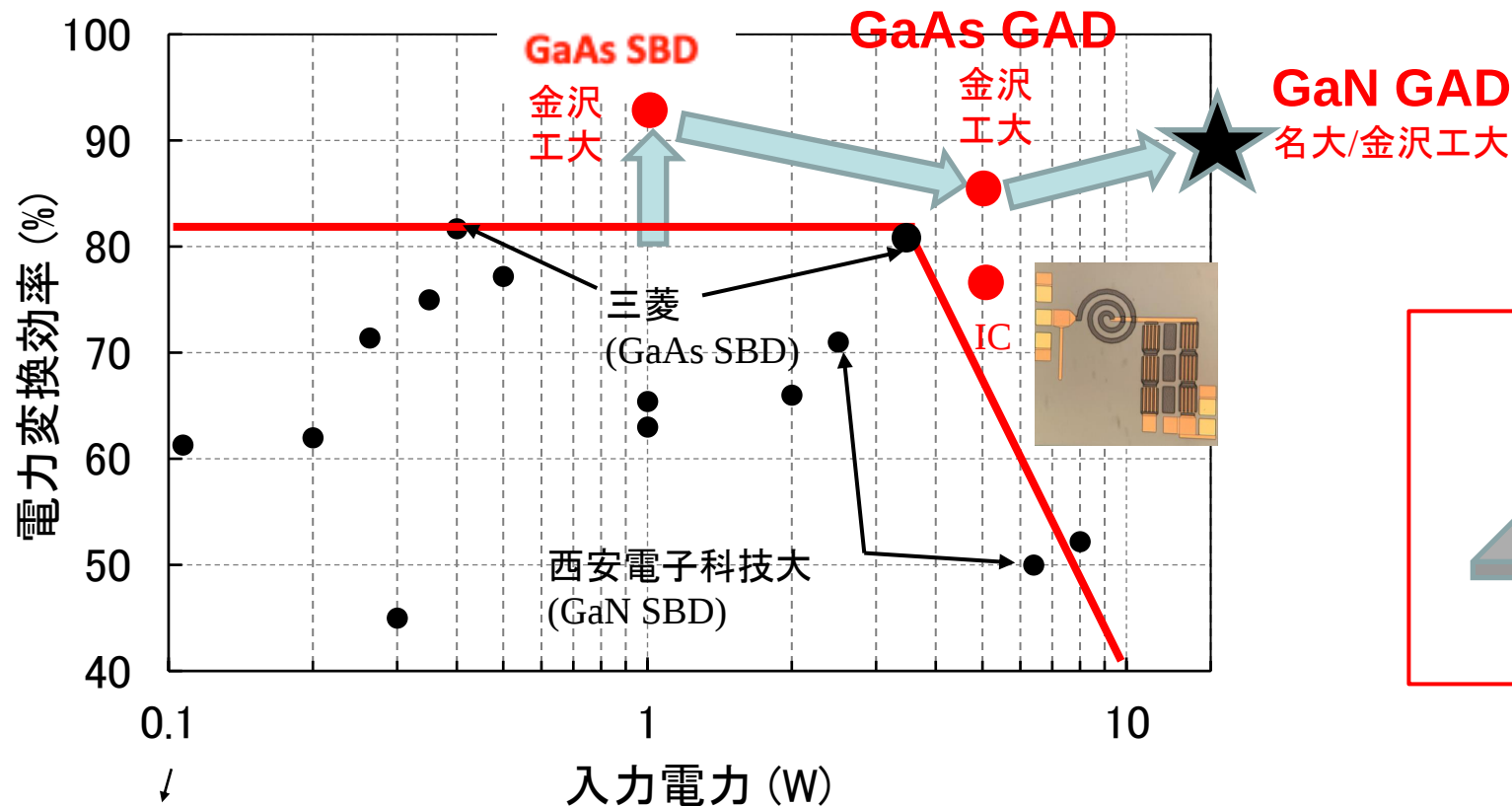


2020年度下期: 5 W, 85%

GaN GAD (VB=100V)

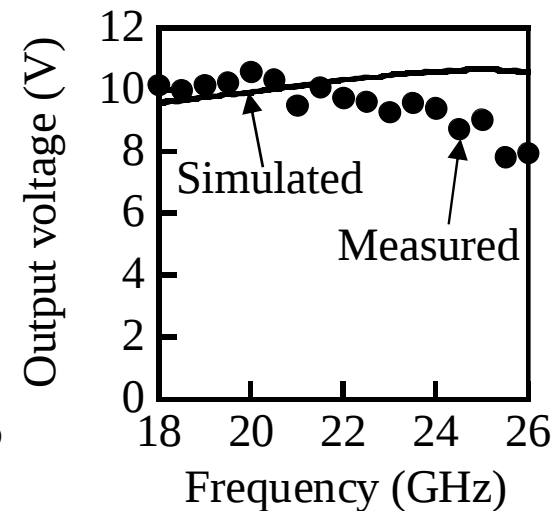
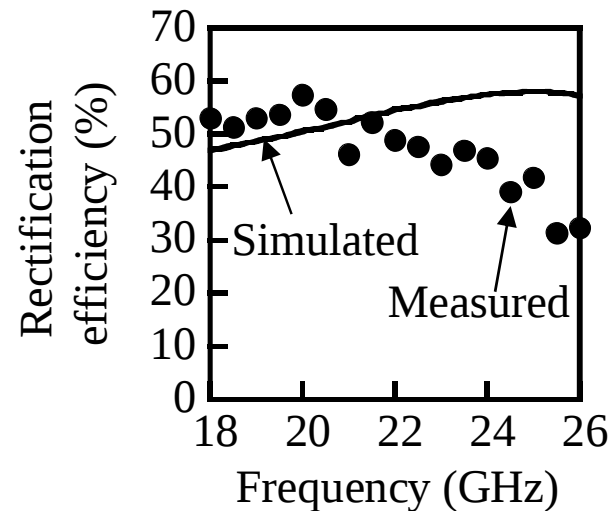
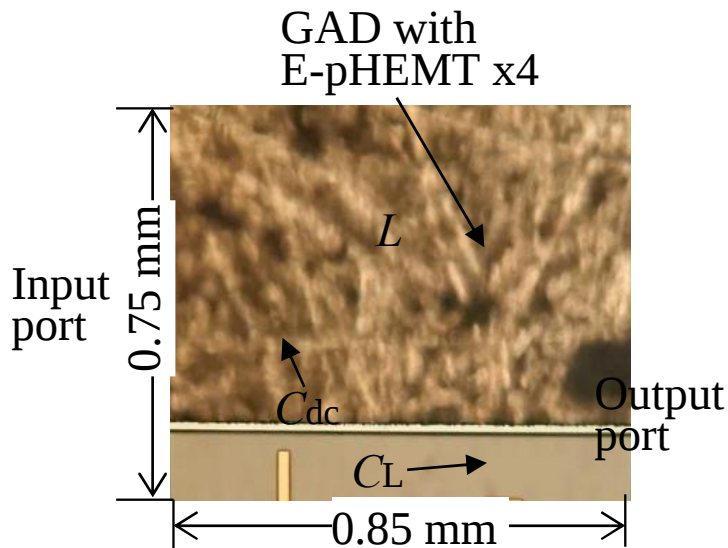
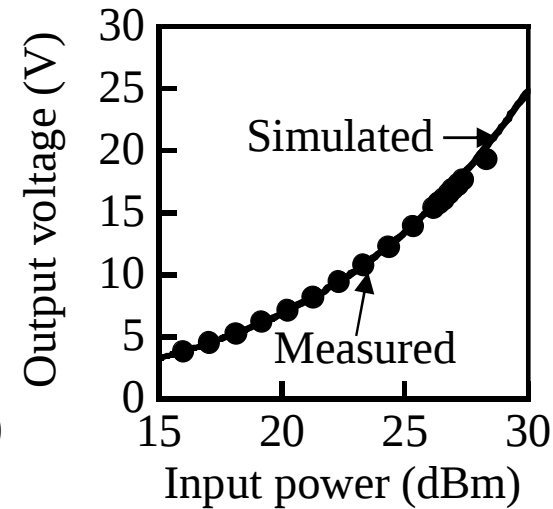
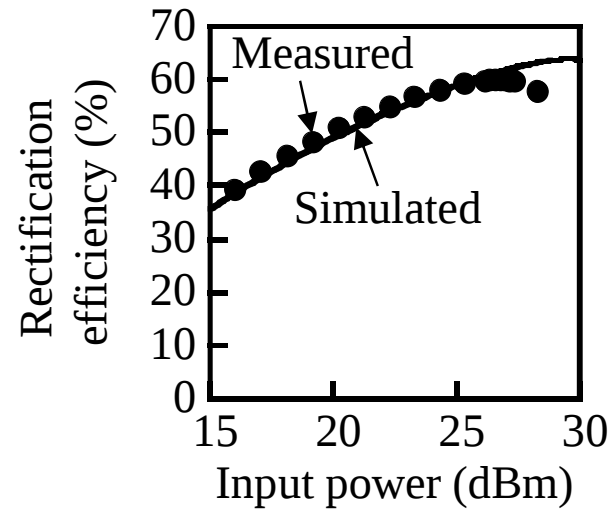
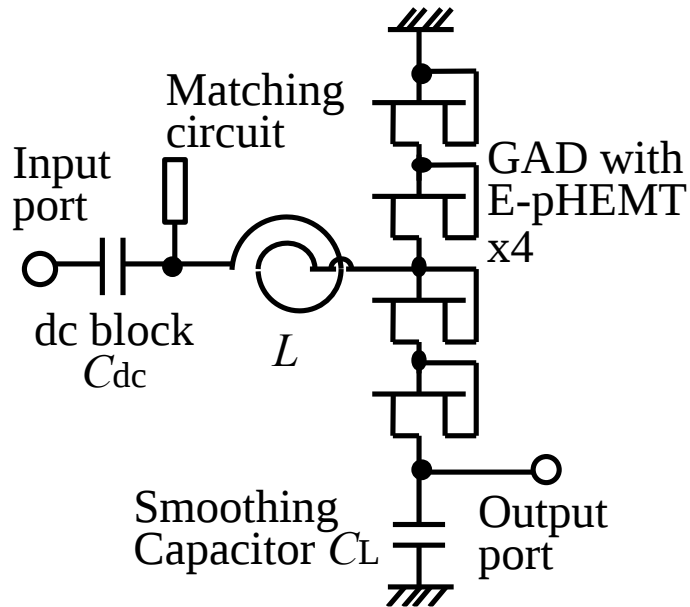


2022年度: 10 W, 85%



Gated Anode Diode(GAD)を用いる20GHz帯整流器IC

- ・空間伝送損失を抑制するためには、アンテナの高利得化が可能なミリ波が有利。
- ・周波数としてはISM帯(24GHz)、5G(28GHz帯)が候補。
- ・20GHzにおいて入力電力 26.8dBm (0.48W)のとき整流効率 60.1%, 出力電圧 16.6V を得た。



2. エネルギーハーベスティング用受電レクテナ － JST CREST他での成果

特長: 1k Ω を超える高インピーダンスアンテナの実現による究極の高感度化(世界トップ)

折り返しダイポールアンテナ

微小ループアンテナ

メタマテリアル技術による薄型化高インピーダンスアンテナ

整流素子: 市販SBD(μ W $\sim$ mW動作), SOI-CMOS IC(nW $\sim$ μ W動作)

(1) AM放送波用1MHz帯受電レクテナ

- ループアンテナ(370k Ω) + 市販SBD / SOI-CMOS IC (nW動作)

(2) DTV用500MHz帯受電レクテナ

- 折り返しダイポールアンテナ(2k Ω) + 市販SBD(μ W動作, 全chカバー)

(3) RFID用920MHz帯受電レクテナ

- 折り返しダイポールアンテナ(2k Ω) + 市販SBD(μ W $\sim$ mW動作)
- 双ループアンテナ(2k Ω) + 市販SBDSBD(μ W $\sim$ mW動作)
- 微小ループアンテナ(27k Ω) + SOI-CMOS ICSBD(sub- μ W動作)
- AMC基板上的折り返しダイポールアンテナ(20k Ω) + SOI-CMOS IC (厚さ4mm, sub- μ W動作)

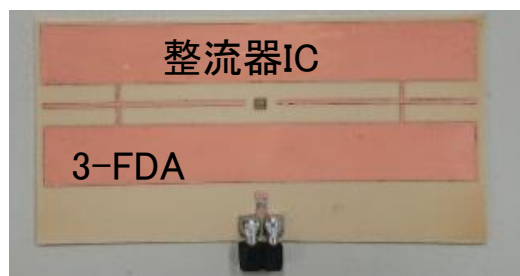
(4) WiFi用2.4GHz帯受電レクテナ

- 3導体折り返しダイポールアンテナ(10k Ω) + SOI-CMOS IC (sub- μ W動作)
- AMC基板上的折り返しダイポールアンテナ(10k Ω) + SOI-CMOS IC (厚さ4mm, sub- μ W動作)

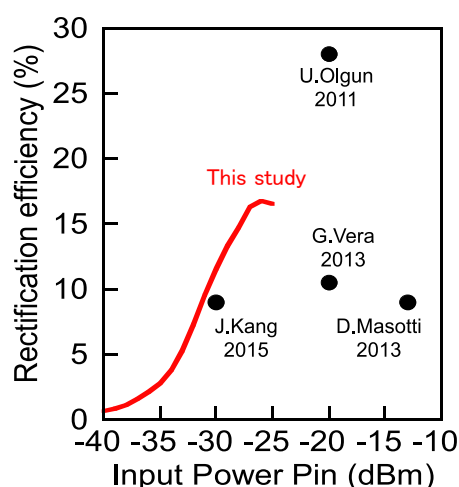
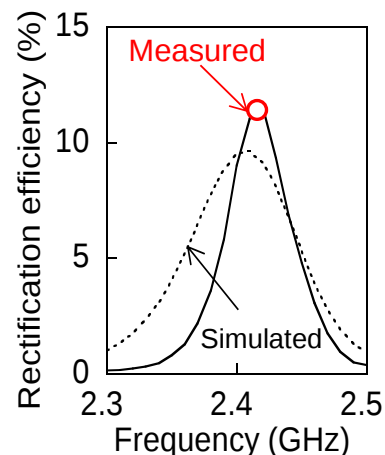
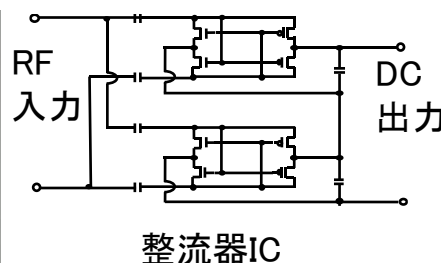
40nm SOI-CMOS 整流器ICを開発し、これを用い2.4GHz帯および920MHz帯レクテナを開発。高インピーダンスアンテナによりトップ性能を実現。サブ μ Wでの動作確認。

2.4GHz帯レクテナ S.Tsuchimoto, et.al., WPTC2019

3導体折り返しダイポールアンテナ(3-FDA)で10k Ω の高インピーダンス実現。誘導性とし整流器チップを直接整合。2.4GHz帯レクテナとしてトップ性能。



寸法: 52mm X 26mm

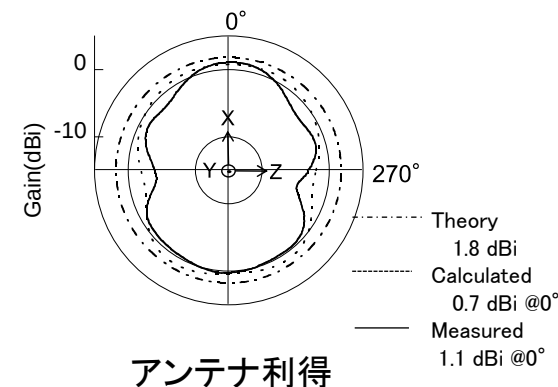
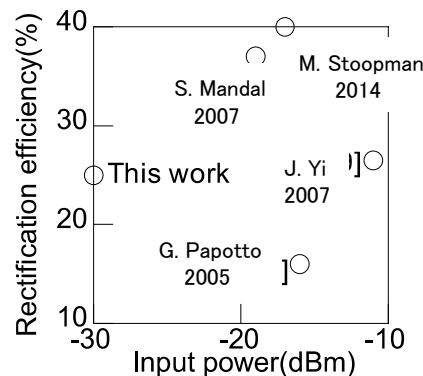
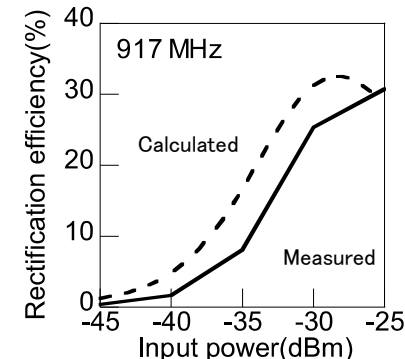
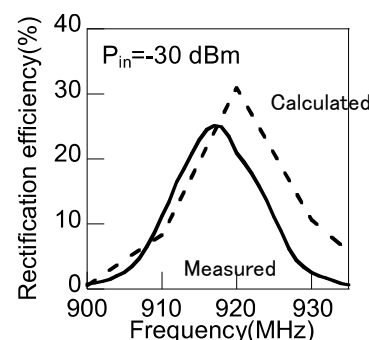
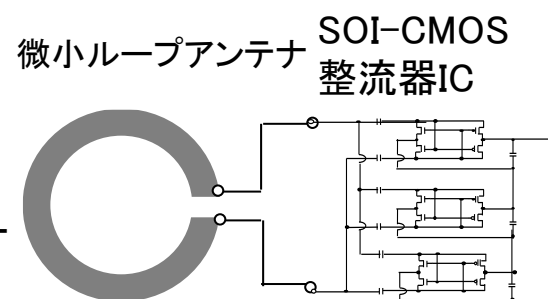


920MHz帯レクテナ S.Tsujita, et.al., APMC2019

微小ループアンテナと整流器ICを直接接続、26k Ω の共振インピーダンスを実現し、高感度化。サブ μ W領域での動作を確認。920MHz帯レクテナとしてトップ性能。



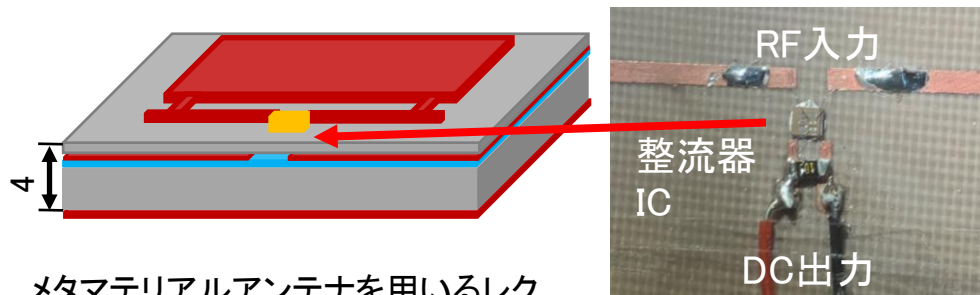
寸法: 46mm X 40mm



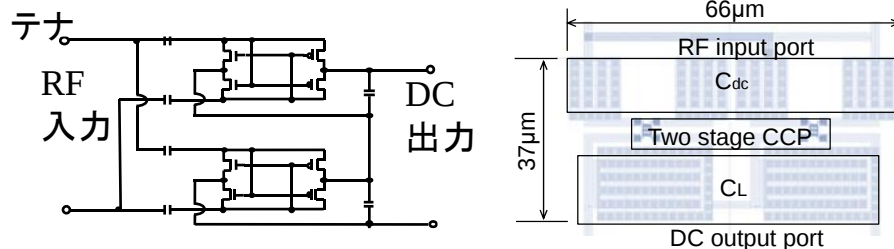
メタマテリアルアンテナを用いる高感度レクテナ

誘導性インピーダンスとした高インピーダンス・メタマテリアルアンテナと40nm SOI-CMOS 整流器ICにより2.4GHz帯および920MHz帯レクテナを開発。高効率特性を確認。金属板上での高効率動作も実証。

920MHz
帯
レクテナ



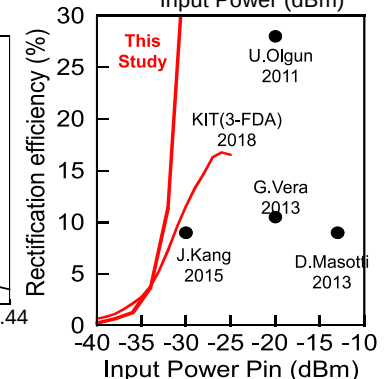
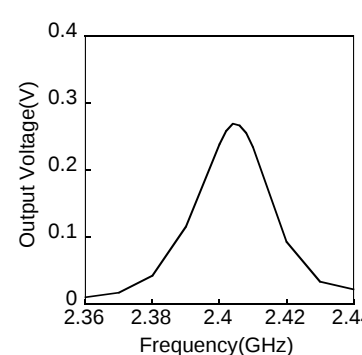
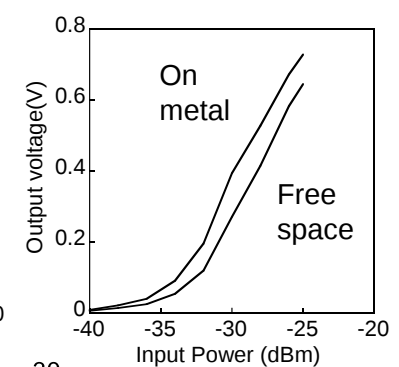
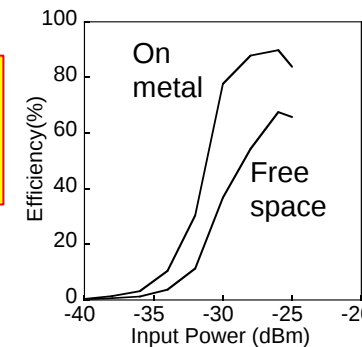
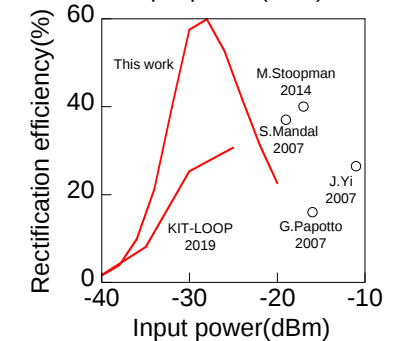
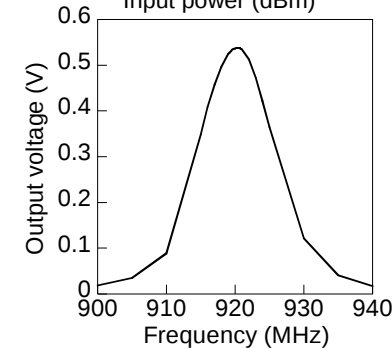
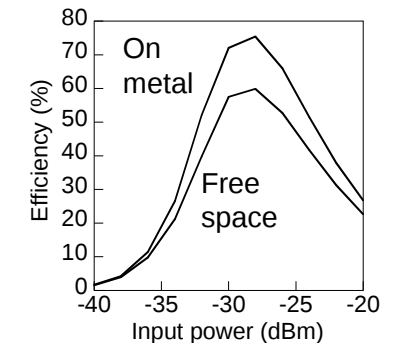
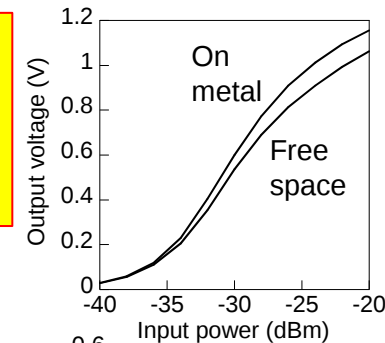
メタマテリアルアンテナを用いるレクテナ



SOI-CMOS整流器IC(2段)とレイアウト(PAD除く)

周波数	900MHz	2.4GHz
大きさ	122mm X50mm	43mm X30mm
インピーダンス	16k Ω	10k Ω
ANT利得@自由空間	1.9dBi	3.5dBi
@金属板上	3.2dBi	6.6dBi
SOI-CMOS整流器IC	3段	2段
出力電圧@自由空間	0.54V@-30dBm	0.27V@-30dBm
@金属板上	0.60V@-30dBm	0.39V@-30dBm
効率@自由空間	53%@-30dBm	37%@-30dBm
@金属板上	72%@-30dBm	78%@-30dBm

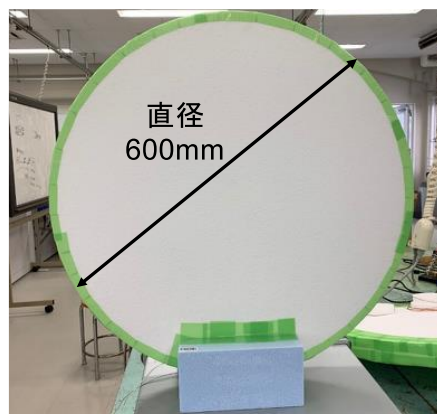
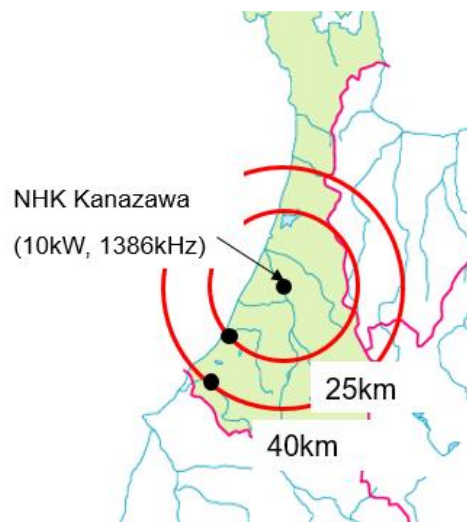
2.4GHz帯
レクテナ



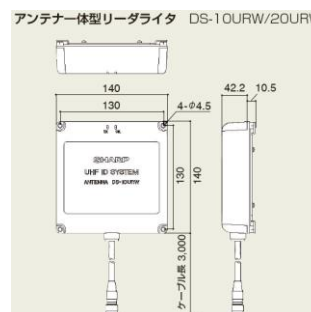
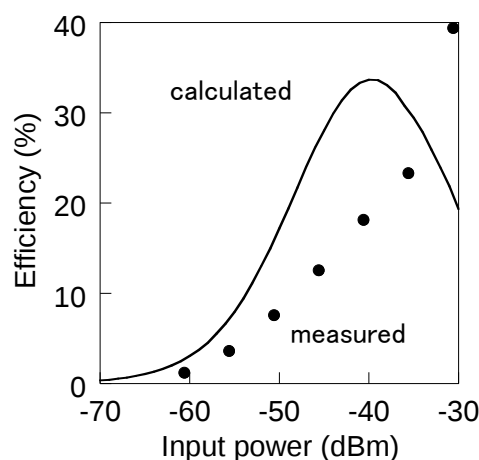
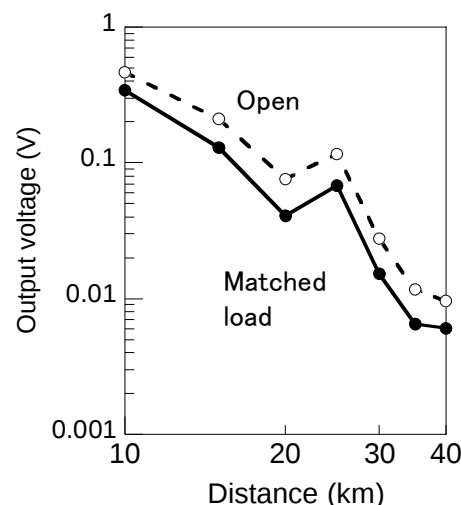
環境RF信号からの発電実験

金沢で共振インピーダンス $330k\Omega$ のループアンテナとSOI-CMOS整流器ICを用いたAMラジオ放送波から発電。関東(NHK, 500kW)での平野部全域での動作に相当。

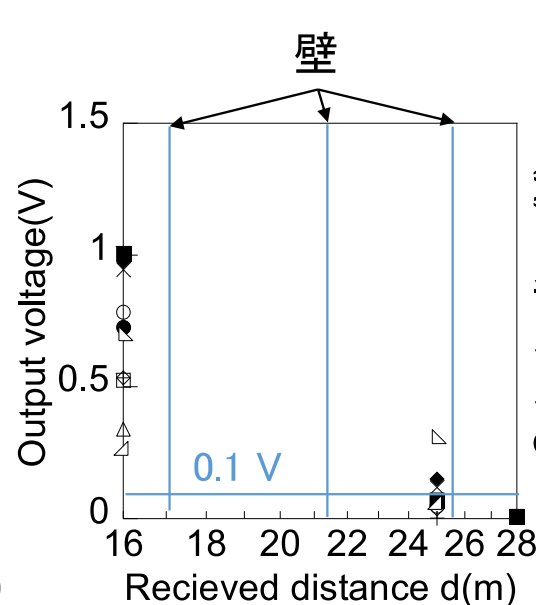
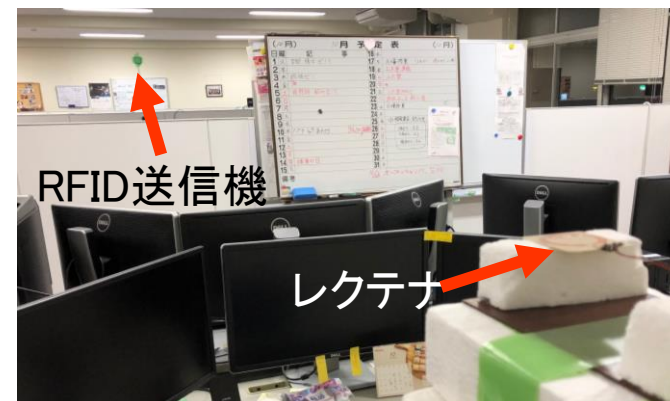
RFID送信機(1W, 920MHz)からの室内発電。壁を挟んだ25mの距離で発電。またメタマテリアルレクテナでは金属板上での発電を確認。



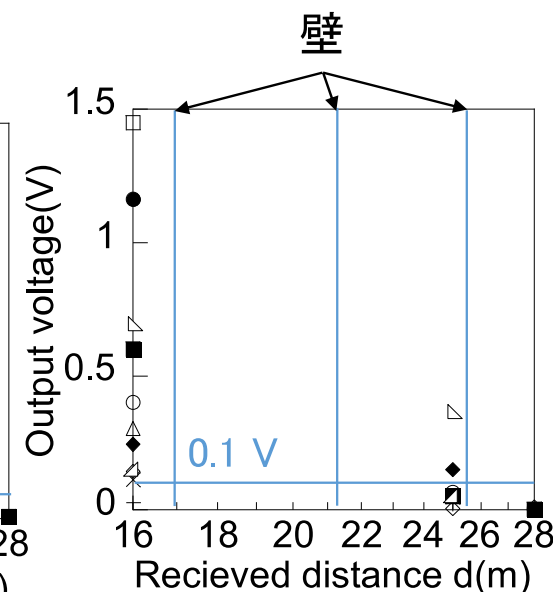
ループアンテナ 正面
(19ターン)



RFID送信機



メタマテリアル・レクテナ
(自由空間)



メタマテリアル・レクテナ
(金属板上)

実用化に向けた課題：法制化

- 総務省にて「空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム」として制度化予定。法制化時期に合わせたシステム検討。
- 周波数：920MHz(RFID), 2.4GHz(ISM帯), 5.7GHz(ISM帯)
- 第1ステップ(屋内：制度化作業中)、第2ステップ(屋外)
- 法制化が不要な非放射のシステムでの利用の検討
(例：電子レンジなど高周波加熱装置への付加)

企業への期待

- 早期の社会実装に向けたシステム化。
- 様々な応用が考えられるなかで、送電、受電での電源系含めたシステム化が可能な企業との研究を期待。
- 電力伝送チップセットとしての商流を期待する企業についてはIC化。弊学の技術でreference designを構築可能。

本技術に関する知的財産権

レクテナ装置 (未公開特許出願) NEW 新技術説明会

国内特許コード	P210017375
整理番号	PA31-165-1
掲載日	2021年1月8日
出願番号	特願2020-137485
出願日	令和2年8月17日(2020.8.17)
優先権データ	特願2020-008813 (2020.1.23) JP
発明者	伊東 健治 野口 啓介 坂井 尚貴 麦谷 彰彦
出願人	学校法人金沢工業大学
発明の名称	レクテナ装置 (未公開特許出願) NEW 新技術説明会

産学連携の経歴

- 2009年-2021年 企業と共同研究実施
(合計6社から受託、現在4社、3社検討中)
- 2016年- JST CREST(微弱電力受電)
- 2018年- 内閣府SIP(大電力受電)

伊東健治 略歴

1983年3月 同志社大学 工学部 電子工学科 卒業

1983年4月 三菱電機株式会社入社(情報電子研究所 配属)

1997年3月 東北大学 工学研究科 後期博士課程 修了, 博士(工学)

1997年10月 情報技術総合研究所から通信システム統括事業部へ異動

2003年10月 モバイルターミナル製作所 第一技術部長

2009年9月 金沢工業大学工学部 教授

学会活動、受賞:

[IEEE]

2002-present Technical Program Committee Member of IEEE MTT-S International Symposium

2004-2008 Associate Editor of IEEE Trans. MTT

2006-2008, 2010, 2012-2014 IEEE MTT-S elected ADCOM member

2014 IEEE MTT-S N. Walter Cox Award

2017 IEEE FELLOW

[日本学術会議]

2008-2010 日本学術会議URSI-C委員長

[電子情報通信学会]

2014 和文論文特集号「大学発マイクロ波論文特集号」編集委員長

General chair of Thailand Japan MicroWave 2014 (TJMW2014, 信学会エレクトロニックスサエティ マイクロ波研究会主催)

2015 General chair of Vietnam Japan MicroWave 2015 (VJMW2015, 信学会エレクトロニックスサエティ マイクロ波研究会主催)

2017 General chair of Vietnam Japan MicroWave 2017 (VJMW2017, 信学会エレクトロニックスサエティ マイクロ波研究会主催)

受賞: 関東地方発明表彰発明奨励賞 2件, 近畿地方発明表彰発明奨励賞, 第50回オーム技術賞

著書「モバイル通信の無線回路技術」(電子情報通信学会, 共著)、無線通信の基礎技術(オーム社、共著)、マイクロ波伝送・回路デバイスの基礎(オーム社、共著)

お問い合わせ先

金沢工業大学

産学連携局 産学連携東京分室

TEL 03 - 5777 - 1964

FAX 03 - 5777 - 1965

e-mail iuctky@mlist.kanazawa-it.ac.jp