

# スマート工場用 920MHz 帯 全方向性多重折り返し板状逆 F アンテナの検討

M2020SC004 武藤哉汰

指導教員：藤井勝之

## 1 はじめに

近年、我が国では多くの工場に無線システムが導入されており、今後も製造現場での IoT の活用は拡大していくと考えられる。現在は設備管理や工程の可視化にあたり、従来よりも低消費電力、広いカバーエリア、低コストを可能とする LPWA (Low Power Wide Area) の活用が期待されている。LPWA には免許を必要としない、特定小電力無線局の一つである 920MHz 帯が用いられており、主にセンサによるデータ収集に活用される [1]。

工場には製造ライン等レイアウトの変更や新規製造機器の導入により、無線環境が変化するという特徴がある。そのため固定的な無線システムの運用には限界がある [2]。加えて、新規に導入されるドローンや危険な場所に配置されるセンサ等、水平方向だけでなく垂直方向との通信も求められると予想する。そこでどこにでも取り付けられ、全方向との通信を可能とするアンテナが必要となる。過去に移動体通信端末にも用いられる代表的な小形アンテナの一つ、板状逆 F アンテナ (PIFA : Planer Inverted-F Antenna) の小形化に、放射素子の折り返しが提案されたが全方向性についての議論をしていない [3,4]。本研究ではスマート工場用アンテナとして 920MHz 帯全方向性多重折り返し板状逆 F アンテナ (MFPIFA : Multiple Folded Planer Inverted-F Antenna) を用いることを提案する。更に実使用時を想定し、アンテナ周囲の環境による放射特性の変化を評価する。

## 2 シミュレーションモデルの構築

### 2.1 多重折り返し板状逆 F アンテナの構造

設計した 920MHz 帯 MFPIFA の CAD モデルを図 1 に示す。35mm × 20mm × 5mm の直方体の地板に放射素子を設置している。78.5mm × 20mm の放射素子は先行研究と同じく、開口部で地板と並行に内部に折り返す構造をとっている。折り返し後の放射素子の外寸法 (上面から見た素子の長辺) は 30mm である。放射素子の形状を対称にすることで、水平面の放射の対称化を図った。そのため高さ 5mm、幅 5mm の短絡部は放射素子端部の中央に設け、給電部は短絡部から 1mm としている。

### 2.2 比較対象とするアンテナ

MFPIFA の評価にあたり、2 種類の 920MHz 帯 PIFA との比較する。設計したアンテナをそれぞれ図 2(a), (b) に示す。図 2(a) は放射素子を一边 50mm の正方形の平板とする平面グラウンドに設置された PIFA である。地板は

一边 160mm の有限地板とした。以下このアンテナを基準 PIFA と呼称する。

図 2(b) に示すのは MFPIFA のベースとなる直方体地板に搭載した PIFA だ。素子の外寸法は 71mm であり、短絡と給電部の距離は 2mm とした。また、外寸法が MFPIFA の地板よりも大きいため、地板の長辺は 80mm としている。両アンテナとも MFPIFA と同じくアンテナ高は 5mm とし、高さと同幅の短絡を有している。これらのモデルは FDTD (Finite Difference Time-Domain) 法の電磁界シミュレーター XFDTD (ver.7.9.1.3) で解析を行う。

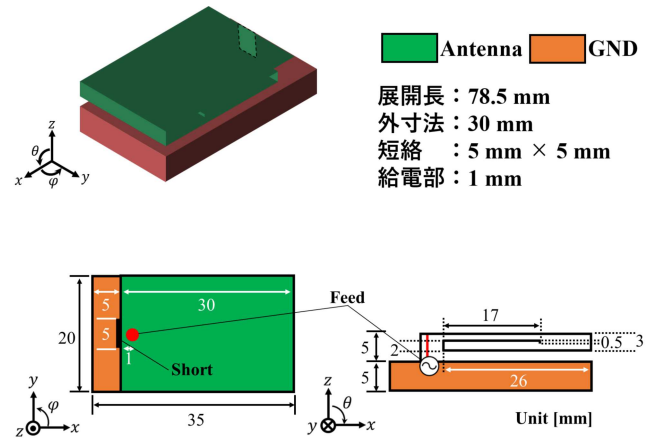


図 1 MFPIFA の構造

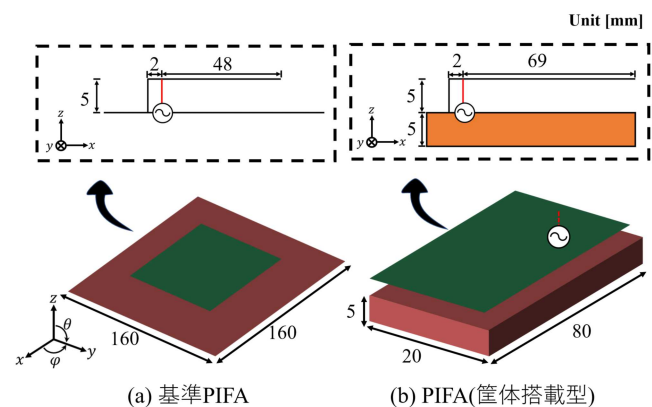


図 2 比較に用いるアンテナモデル

### 2.3 シミュレーション結果

MFPIFA は筐体搭載型の PIFA を比較すると、約 57.7% 放射素子の体積を小さくすることができた。しかし図 3 の反射係数  $S_{11}$  が示すように、 $S_{11} \leq -10\text{dB}$  となる周波数

レンジは 0.88MHz と他 2 種の PIFA と比べ狭帯域となっ  
てしまった。

図 4(a), (b) に  $z-x$  平面および  $x-y$  平面の放射指向  
性を示す.  $z-x$  平面のグラフから, 基準 PIFA はアンテ  
ナ下方 ( $\theta = 160^\circ$  付近) への放射が著しく弱くなるのに対  
し MFPIFA, 筐体搭載型 PIFA は上下偏りなく放射してい  
ることが確認できる. 一方  $x-y$  平面では 2 種の PIFA が  
無指向性であるのに対し, MFPIFA は側面 ( $\phi = 90^\circ, 270^\circ$   
付近) の利得が正面方向と比べやや低い. しかし, ゲイン  
偏差は 4.64dB で 5dB 以内を得られているため, MFPIFA  
の放射は  $x-y$  平面も等方性を有していると言える [5].  
垂直, 水平両面の放射指向性が無指向性であることから  
MFPIFA は全方向性のアンテナであると主張する.

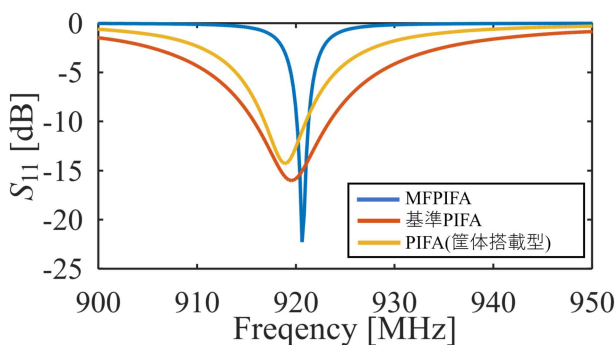


図 3 MFPIFA の  $S_{11}$

表 1 アンテナ特性の比較

種類	帯域幅 [MHz]	水平面ゲイン偏差 [dB]
基準 PIFA	7.48	0.85
PIFA(筐体搭載型)	3.96	0.24
MFPIFA	0.88	4.64

### 3 周囲環境による MFPIFA の特性変化

折返し構造であっても垂直面, 水平面ともに無指向性で  
あることはわかったが, 工場での使用時想定される近接し  
た従事者や機器によりアンテナの放射特性は変化する. そ  
こで人が保持している状態での MFPIFA の放射特性を確  
認する.

#### 3.1 保持状態での解析

人体近傍での解析には, 日本の成人男性の平均体型を有  
する, NICT のリアル数値人体モデルを用いた [6]. 人体  
モデルは図 5 のように右手を差し出す姿勢をとらせ, 手の  
ひら上に MFPIFA を配置した [7]. この際, アンテナを囲  
うカバーの厚みを考慮し, アンテナと手のひらを最小 1mm  
離している.

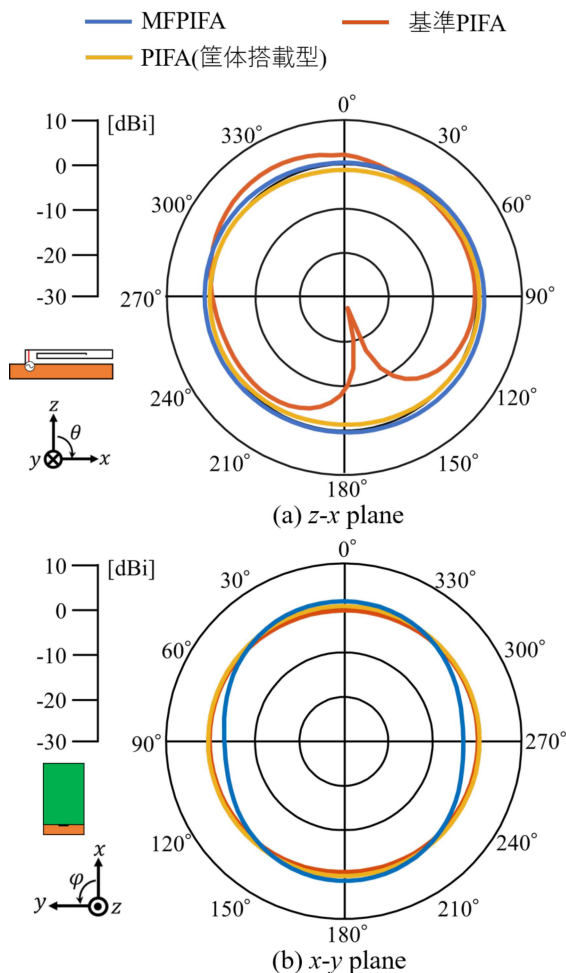


図 4 MFPIFA の放射指向性

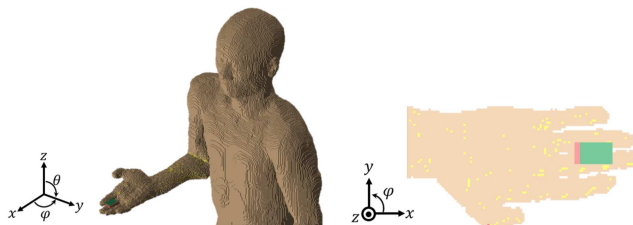


図 5 リアル数値人体モデル [6,7]

#### 3.2 シミュレーション結果

人体近傍における MFPIFA の  $S_{11}$  を図 6 に示す. MF-  
PIFA は狭帯域であるため, アンテナ周辺の環境変化に伴  
う周波数のシフトにより, 人体近傍では 920MHz 帯で不整  
合となった. そこで給電部に図 7 の整合回路を組み込むこ  
とで, インピーダンス整合を取った.

図 8(a), (b) に  $z-x$  平面および  $x-y$  平面の放射指向  
性を示す. 人体近傍の MFPIFA は  $z-x$  平面より, アン  
テナから見て人体の存在する  $\theta = 180^\circ \sim 300^\circ$  は利得が大  
きく低下している. 一方,  $\theta = 0^\circ \sim 120^\circ$  の人体上方から正  
面方向にかけてはアンテナ単体時とほとんど差異がない.

また、 $x-y$  平面においても同じく  $\phi = 90^\circ \sim 180^\circ$  にかけて利得の低下が顕著である。これらのことから保持状態の時、進行方向と同方向のデバイスとの通信は可能だと考えられる。

有能電力  $P_{av}$  の内訳を図 9 に示すことでアンテナの損失を評価する。 $P_r$ ,  $P_h$ ,  $P_m$  はそれぞれ放射電力, 吸収損, 不整合損としている。整合回路搭載時, 人体近傍ではおよそ 60% の電力が人体に吸収される。この吸収損により, 人体方向の利得が低下したと考える。

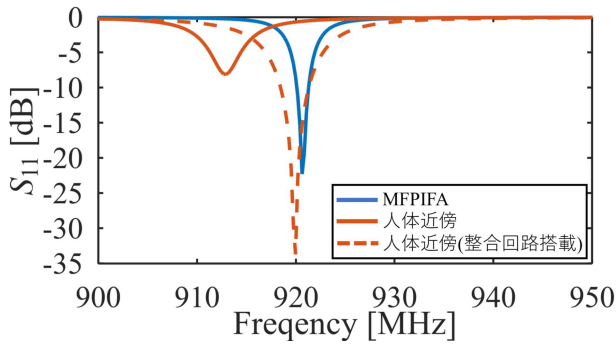


図 6 人体近傍の  $S_{11}$

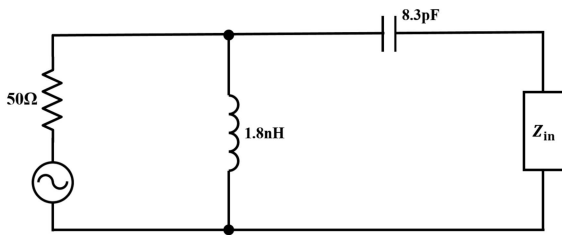


図 7 人体近傍時の整合回路

## 4 理論的境界値との比較

### 4.1 アンテナの下限 $Q$ 値

$Q$  値という小形アンテナの評価項目がある。 $Q$  値とは放射および損失電力に対する蓄電電力の割合であり, アンテナは  $Q$  値が小さいことが求められる。そのためには蓄電電力が小さく, 放射電力の大きくなければならない。

$Q$  値とアンテナサイズとの関係は L. J. Chu によって示されている [8]。図 10 のようにアンテナ全体を包む, 半径  $a$  [m] の最小球を用い, 球体内に蓄積されたエネルギーを導出することで下限  $Q$  値を算出できる [9]。下限  $Q$  値は式 (1), (2) で表される。端数  $k$  は波長  $\lambda(c/f_0)$  に反比例する値であり, 整合周波数  $f_0$  [Hz] と光速  $c = 3 \times 10^8$  m/s から求めることができる。

$$Q = \frac{1 + 2(ka)^2}{(ka)^3 \{1 + (ka)^2\}} \quad (1)$$

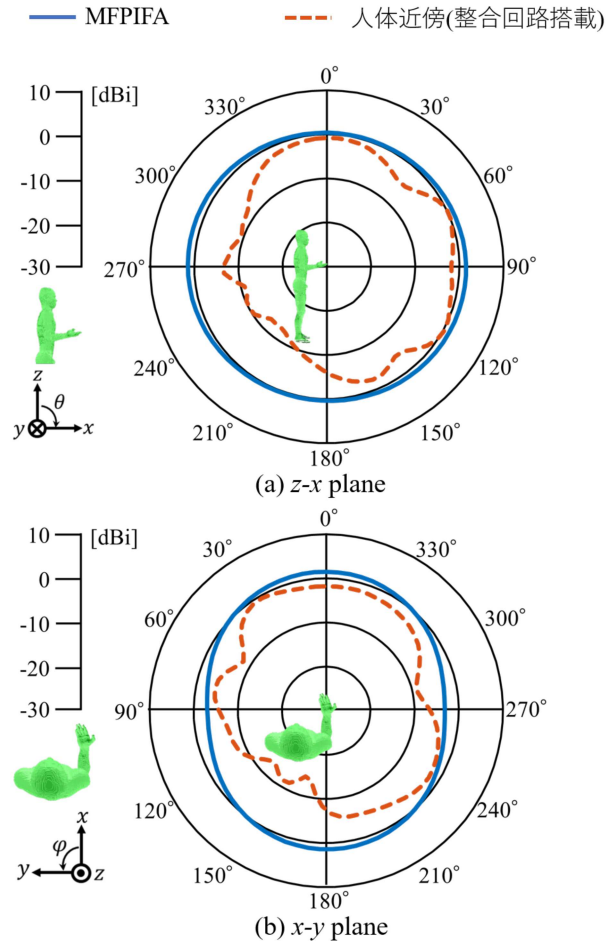


図 8 人体近傍の放射指向性

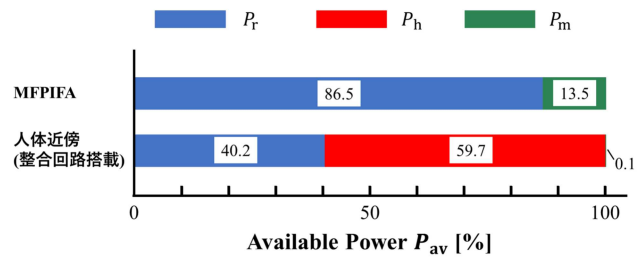


図 9 有能電力の内訳

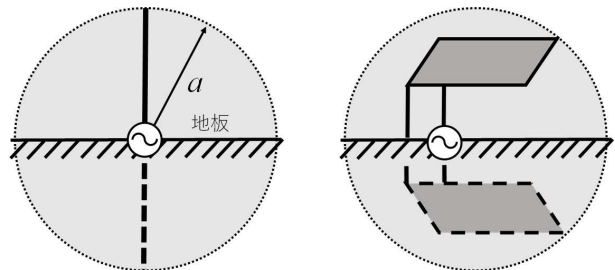


図 10 アンテナを囲う球

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f_0}{c} \quad (2)$$

下限  $Q$  値は特定の寸法におけるアンテナ  $Q$  の最小値である。そのため実際のアンテナ  $Q$  値,  $Q_A$  がこれを下回ることはない。

$Q_A$  は以下の式で表される。  $f_+ - f_-$  は反射係数  $S_{11}$  が -10dB を下回る周波数レンジである。

$$Q_A = \frac{f_0}{f_+ - f_-} \quad (3)$$

上記式から算出される  $Q$ ,  $Q_A$  が近ければ理論的境界に近い小形化ができていけると言える。そのためこれらと比較することで効率よく小形化しているか判断する。

#### 4.2 設計したアンテナの評価

評価対象としたアンテナの下限  $Q$  値およびアンテナ  $Q$  をまとめたものを表 2, 図 11 に示す。

表 2 アンテナ  $Q$  の評価結果

種類	a [mm]	ka	下限 $Q$ 値	アンテナ $Q$
基準 PIFA	35.70	0.69	4.06	122.87
PIFA(筐体搭載型)	37.22	0.72	3.64	231.92
MFPIFA	18.71	0.36	23.84	1044.99

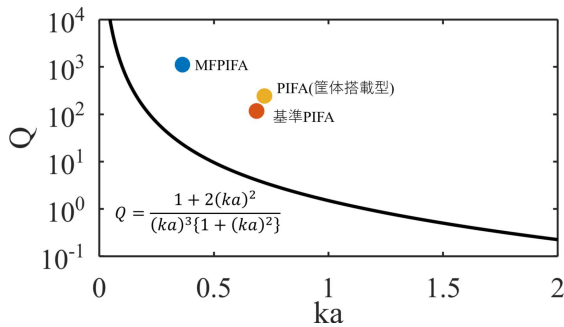


図 11 下限  $Q$  値との比較

電気的小形アンテナの定義は  $ka \leq 0.5$  を満たすアンテナであるとされている。そのためアンテナサイズ  $ka = 0.36$  の MFPIFA は電気的小形を十分満たしていると言える。一方で、設計したアンテナは下限  $Q$  値と近い値を得ることができなかった。特定のサイズにおける小形アンテナの最低  $Q$  値は、球の容積を最大限利用する螺旋状の放射素子であれば取り得るとされているが折り返しアンテナは姿勢が低く、球におけるアンテナが占める体積が小さい。その為、理論的境界値に近づけることは難しいと考えられる。

#### 5 おわりに

本稿では、工場用無線システムの全方向性アンテナとして、折り返しによる放射素子の小形化を図った PIFA を

提案した。アンテナサイズは折り返し前の PIFA と比べ 57.7% の小形化を実現した。加えて、 $x-y$  平面においてはアンテナ側面方向への放射が正面と比べ低くなるものの全方向性を満たしており、人体近接時でも進行方向との通信が可能であることを確認した。

しかし、折り返しにより MFPIFA は正方形素子、筐体搭載の PIFA と比べそれぞれ 88.2%, 77.8% 狭帯域化してしまった。狭帯域では人、モノの近接時中心周波数がずれてしまうため、工場のアプリケーションとしての柔軟な対応が困難である。また、狭帯域であるため物理的、電気的小形な設計であっても  $Q$  値は下限と比べ大きくなった。そのため広帯域化にあたり、漏洩電流を考慮した地板設計、折り返しの最適化が今後の課題と言える。

#### 参考文献

- [1] 総務省, “LPWA に関する無線システムの動向について,” 総務省, [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000543715.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000543715.pdf), 参照 Jan.5 2022.
- [2] 総務省, “製造現場におけるローカル 5 G 等の導入ガイドライン,” 総務省, [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000760634.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000760634.pdf), 参照 Nov. 20 2021
- [3] 鈴木洋佑, 登坂展与, 吉田朋子, 稲垣直樹, “多重折り返し板状逆 F アンテナ,” 2006 信学ソ大, vol.2006, no. 通信 1, pp.140, Mar 2006.
- [4] K. Muto, K. Fujii and Y. Okumura, “Evaluation of a 429 MHz Band Multiple Folded Planar Inverted-F Antenna Near the Human Body,” 2020 IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), 2020, pp. 855-856, Dec. 2020.
- [5] 須郷剛裕, 西清次, 新井宏之, 堀端研志, “車載用広帯域アンテナの開発,” 2015 信学総大, vol.2015, no.1, pp.80, Feb. 2015.
- [6] 長岡智明, 櫻井清子, 国枝悦夫, 渡辺聡一, 本間寛之, 鈴木保, 河合光正, 酒本勝之, 小川 幸次, 此川公紀, 久保田勝巳, 金鳳洙, 多氣昌生, 山中幸雄, 渡辺敏, “日本人成人男女の平均体型を有する全身数値モデルの開発,” 生体医工学, vol.40, no.4, pp.239-246, 2002.
- [7] T. Nagaoka, S. Watanabe, “Postured voxel-based human models for electromagnetic dosimetry,” Physics in Medicine and Biology, vol.53, no.24, pp.7047-7061, 2008.
- [8] L. J. Chu, “Physical limitations of omni-directional antennas,” J. Appl. Phys. , vol.19, no.64, pp.1163-1175, Dec. 1948.
- [9] J. S. McLean, “A re-examination of the fundamental limits on the radiation Q of electrically small antennas,” IEEE Trans. Antennas Propag. , vol.44, no.5, pp.672-676, May 1996.