

# 建設用仮設機材に用いられる大型金属管へ取り付けられた RF タグ用アンテナの動作原理検討

A Principle of Operation Study on RF Tag Antennas Placed on a Metallic Temporary  
Equipment for Construction

宮田 尚起<sup>1)</sup> 杉山 裕汰<sup>2)</sup>  
Naoki Miyata Yuta Sugiyama

**Abstract:** RFID is one of the most important industrial technologies for inventory management. However, there are several concerns with installing temporary equipment, because many of the equipments are made of metal. Conventional dipole antenna used for RFID loses transmission and reception capabilities. In previous research, it has been pointed out that one of the causes is the non-uniformity of the electric field intensity distribution around the equipment. Based on this, we're thought that there is a point where the magnetic field is further strengthened on the metal surface. So, this paper proposes a twisted-loop antenna used for equipment's metallic surface. In order to show the effectiveness of the antenna, this paper checked from three viewpoints. These viewpoints are frequency characteristics of the input impedance, directivity gain and distribution of current density. Before that, we checked the directional gain of the folded dipole antenna, which is one of the conventional technologies, for comparison with proposed antenna. First, We checked the frequency characteristics of the input impedance and showed that proposed antenna could be connected to the RFID IC. Second, we checked the directivity gain of the proposed antenna when the antenna is placed in the free space or on the metal plane which is wider than the antenna size. As the result, the directivity gain of proposed antenna placed on wide metal plane is more strengthened than placed in free space. And, directivity gain of propose antenna is more effectively than conventional antenna. Finally, the reasons why the proposed antenna showed good performance on metal surfaces was confirmed. The reasons were obtained by comparing the magnetic field go through the conventional antenna or the proposed antenna.

**Keywords:** Radio Frequency Identify, Metallic surface, Directivity Gain, Twisted Loop Antenna

## 1 はじめに

“もの”と“インターネット”をつなげる技術は, Internet of Things(IoT) 技術として注目を集め, 家電製品を始めとした様々な分野で導入され始めていることから, 今後もその需要は拡大すると予想されている [1]. IoT 技術には, 倉庫の在庫などをインターネットを介したサーバー内での管理するシステムも含まれるため, 畜産, 小売店, 飼育や医療などの, 大量の“もの”を扱う様々な業界においても, 管理技術としての IoT 技術に関心が非常に高い [2-4]. インターネットを介して“もの”を管理することを可能にするためには, 在庫

識別技術が非常に重要である. その技術の一例として Radio Frequency IDentify(RFID) が存在する [5, 6]. RFID は無線通信による識別システムであるため, 管理対象が移動体の場合においても非接触での管理が可能となることが大きな特徴である [7]. また, 一度に複数のタグから情報を取得することが可能 [8] である点も特徴の一つである.

ここで本論文では, 以上の特徴を持つ RFID による管理システムを導入した企業の例として, 仮設足場や脚立, 台車などの建築用仮設機材のリースを行っている企業の一例を扱う [9]. この企業では 1 種類の在庫を複数台まとめて管理しており, この管理に RFID を導入することで, 効率的に管理を行っている. しかし実際に RFID による在庫管理に取り組む中で, 読み取

<sup>1)</sup> 東京都立産業技術高等専門学校ものづくり工学科

<sup>2)</sup> 東京工業大学工学院電気電子系

り時における RF タグの平均的な認識率が 100% に満たない不具合が報告されている。この不具合に対して、この企業では伝搬環境が不適当であることがリーダーの識別に悪影響を及ぼしていると仮定し、電磁波シールドを設置するなどして解決を目指したが認識率 100% に達することはなかった。この結果に対して先行研究では、まず RF タグの適切な取り付け位置の検討を目的に、電磁界シミュレーションによる在庫近傍の電磁界分布の解析が行われた [10]。なお先行研究は、企業で最も保有台数の多い、アルミ製で全長 1m の円筒にポリプロピレン製で円盤型のリングアタッチメントが取り付けられた機材（以下、アルミ管）に焦点を当て取り組まれている。その結果として、リングアタッチメント近傍において電磁界強度の偏りが確認された。つまり取り付け位置の検討はリングアタッチメントの他、金属表面も含める必要がある。一方で現在使用している RF タグはダイポールアンテナによって送受信を行う一般的なタグであるため、金属表面への取り付けは適していない。そこで本研究では先行研究を踏まえて、搬出を想定した大型の金属管に対してその金属表面においても適切な利得によって送受信が可能となる RF タグ用アンテナの検討を目的とした。

本研究が定めた目的と同様に、金属近傍への装着を想定した RF タグ用アンテナはいくつか提案されている。それらの技術の一つに折返しループアンテナが挙げられる [11], [12]。この折返しループアンテナは、1 周のループアンテナの両端を折り返したループ構造を有している。しかしこのアンテナは、全長 90mm で柄の細い金属製の医療用ハサミに取り付け、その有効性を示した文献は存在するが、建築用機材などの大型に取り付けた場合の動作性を示す文献は発見されなかった。

以上を踏まえ本研究ではこれまでに、大型の金属体へ取り付けの際に利得が低下しない形状のアンテナとしてツイストループアンテナを提案した [13]。しかし先行研究では材料損失を含めた利得で有効性の確認が行われており、その動作原理が不明瞭であった。そこで本稿では導体や誘電体の損失を無視し、理想状態のツイストループアンテナを用いて、アンテナの形状による動作原理の確認を行う。

## 2 リース企業における現在の RFID の利用方法

本章では、建築機材のリースを行う企業における RFID の運用方法について改めて詳細を示す。RF タグの読み取りは、機材の識別が必要となる返却時、整備前、整備後、出荷前の工程で行われる。ただしこの

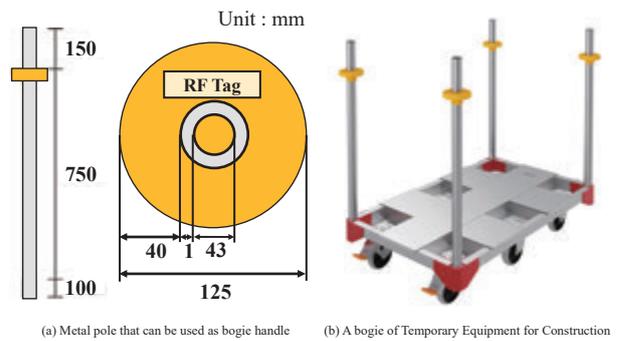


図 1 RF タグが取り付けられている台車と持ち手



図 2 整備工場での持ち手の管理方法

読み取りのタイミングにおいて機材は、運搬の勝手を考え複数台まとめて積み重ねられた状態である。そのためリーダー 1 機を用い、機材それぞれに取り付けられた RF タグを読み取ることになる。以上の状況下において作業員はまず、機材に対して単方向からリーダーによって電磁波を放射し、一括で読み取りを行う。次にこの状態での認識率は先述の通り 100% でないことが大半であるため、リーダーを一つ一つ RF タグに向けて残りのタグを探す形で読み取りが行われる。しかし以上の手法は低効率であるため、当手法の最初に行われる単一方向からの放射のみで 100% 読み取りが可能となる事を目的にそれを達成できる手法が要求される。

この目的を満足できる手法の検討を行う対象の製品を、図 1(a) に示す。図 1(a) に示した金属管は、図 1(b) に示す台車へ取り付ける持ち手である。この持ち手はアルミニウム製で、全長 1m で外径 45mm、内径 43mm の円筒状のものであり、ポリプロピレン製のリングが手ばさみ防止のユニットとして取り付けられている。そして RF タグは、ダイポールアンテナタイプの汎用型のものが用いられており、このユニットにとりつけられている。また、すべての在庫は整備工場に

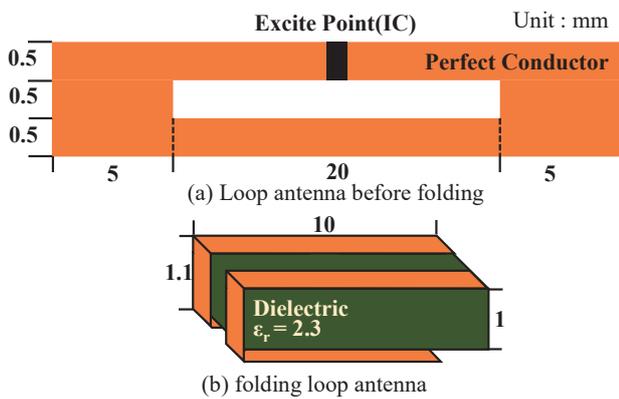
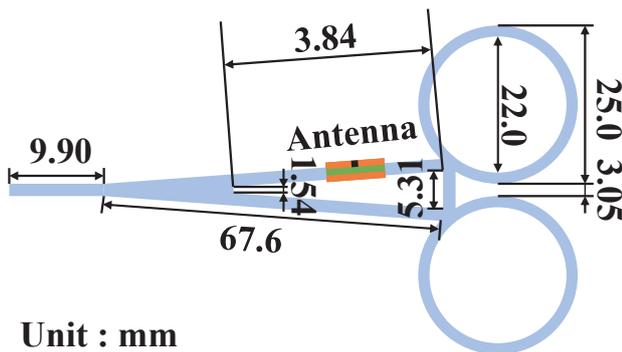


図3 折り返しダイポールアンテナの寸法



Unit : mm

図4 折り返しダイポールアンテナをハサミに取り付けた場合の取り付け位置

まとめて管理されており、このアルミ管についても例外ではなく、図2に示す形のようにまとめて管理されている。なお、図2は、100本の持ち手が積み重ねられている。

### 3 折り返しダイポールアンテナの指向性利得

金属近傍における電界利得の低下を考慮してRFタグ用アンテナの構造を検討した先行研究に、折り返しダイポールアンテナが存在する。なおこの折り返しダイポールアンテナは、アルミニウム製の外科手術用のハサミに取り付けることを想定し提案されたアンテナである。本章では従来技術である折り返しダイポールアンテナの諸特性をシミュレーションにより確認することによって、折り返しダイポールアンテナの利用可能性とその課題を明らかにする。

まず、折り返しダイポールアンテナの構造から述べる。折り返しダイポールアンテナの構造を図3に示す。図3に示した折り返しダイポールアンテナは、比誘電率  $\epsilon_r = 2.3$ 、誘電正接  $\tan \delta = 0$ 、厚みのない完全導体の導体を巻き付けた構造をしている。このことから、

一般的なダイポールアンテナと構成要素や、想定できる製造手法が似ているといえる。

そのため本稿ではこの折り返しダイポールアンテナを比較対象とし、指向性利得によって提案アンテナとの比較を行う。しかし、このアンテナの指向性利得が示された文献を発見できなかったため、構造を再現したアンテナで電磁界解析を改めて行った。なお電磁界解析には、Femtet Version 2020.0.2.48299(64bit, Copyright (C) 1999 Murata Manufacturing Co., LTD.)を使用した。

今回、アンテナ周辺的环境を2つ用意しそれぞれの場合における指向性利得を解析した。まず1つ目は、図4に示すとおり、ハサミを模倣したモデルにアンテナが配置された環境である。ただし、アンテナとハサミの間には取付器具を想定した1.5 mmの隙間がある。そして2つ目は、本研究で想定する金属管を想定し、無限に広い金属平面直上にアンテナを配置した環境である。これは、アンテナのサイズに対して金属管のサイズが十分に大きいとして、解析コストの削減を目的に等価的にこの空間を設定している。

以上の条件に加えて、アンテナの導体の厚みは無視し、920 MHzで動作させた場合の指向性利得を確認する。まず1つ目の条件である、折り返しダイポールアンテナをハサミの近傍に取り付けたときの指向性利得を図5に示す。図5より指向性利得は、 $\phi = 90 \text{ deg}$ 、 $\theta = 33 \text{ deg}$ のときに約2.70 dBiで最大となり、放射パターンもダイポールアンテナに類似した8の字形状となる。次に2つ目の条件である、折り返しダイポールアンテナを配置したときの指向性利得を確認する。ただし、アンテナと平面は電氣的に導通しておらず、平面から0.1 mm直上に配置されている。このときのアンテナの指向性利得を図6に示す。図6に示した指向性利得は $\phi = 0 \text{ deg}$ 、 $\theta = 0 \text{ deg}$ のとき-0.24 dBiで最大となる。

以上のことから、2つの環境における折り返しダイポールアンテナの指向性利得にはおよそ2.94 dBiの差が存在する事がわかる。つまり折り返しダイポールアンテナは、920 MHzの動作においてアンテナの寸法に対して十分大きい金属平面に設置する利用方法は適さないと考えられる。

## 4 ツイストループアンテナ

### 4.1 ツイストループアンテナの構造

前章にて、折り返しダイポールアンテナはアンテナの全長に対して十分に大きい金属の平面上に配置する場合に、指向性利得が低下することを確認した。そこ

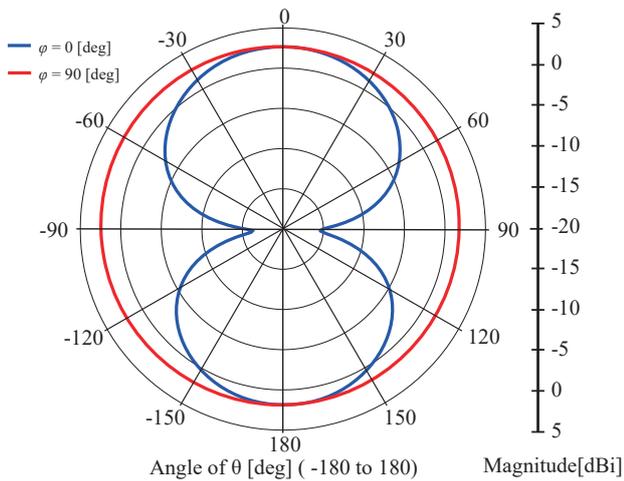


図5 折り返しダイポールアンテナをハサミに取り付けた場合の指向性利得

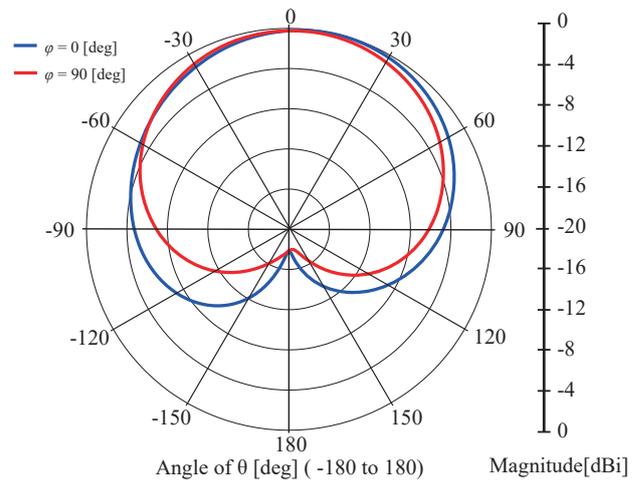


図6 金属平面直上に配置した場合の折り返しダイポールアンテナの指向性利得

で本章では、金属平面直上においても利得が低下しないアンテナとして提案された、ツイストループアンテナについて無損失における動作原理を確認する。

本稿で扱うツイストループアンテナについて、まず諸元を図7に示す。図7に示した諸元より、導体は厚みを持たない完全導体、誘電体は誘電正接  $\tan \delta = 0$ 、比誘電率  $\epsilon_r = 2.3$  とした。このことから、ツイストループアンテナは折り返しダイポールアンテナと同様に、一般的なダイポールアンテナと構成要素や想定できる製造手法が似ているといえ、生産性、製造コスト、検討時の再現性が良い。次にアンテナから誘電体を取り除き導体を展開した時の図を図8に示す。図8より、ツイストループアンテナの導体は銅箔の線路を2周巻き付けた構造であることがわかる。ここで線路の太さが部分的に変化しているのは、アンテナの入力インピーダンスを調整するためである。

#### 4.2 ツイストループアンテナの諸特性

次に4.1節で示した構造を有するツイストループアンテナを電磁界解析し、その入力インピーダンス及び指向性利得を確認する。まず、920 MHz にける入力インピーダンスを確認する。なおアンテナの入力インピーダンスの値は、今段階で使用する IC チップが選択されていないため式(1)に示す一般的な RF タグ用 IC チップの出力インピーダンス  $Z_{IC} = R_{IC} + jX_{IC}$  を参考 [14] に、その範囲に収まることのみを確認する。以上を踏まえて、図9に示す入力インピーダンスの周波数特性より 920 MHz における入力インピーダンスを確認する。図9に示した入力インピーダンスの周波数特性より、920 MHz における入力インピーダンスは  $Z_{in} = 8.00 + j387 \Omega$  であり、式(1)の範囲に収まるこ

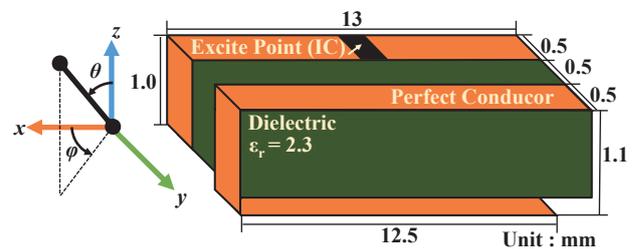


図7 ツイストループアンテナの諸元

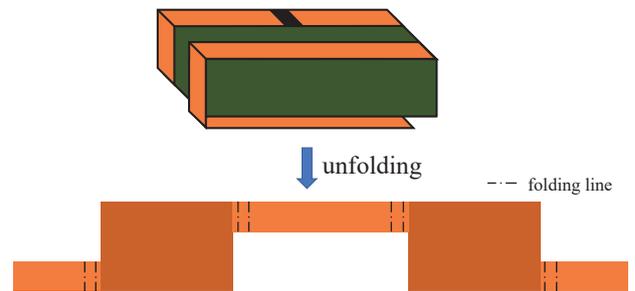


図8 ツイストループアンテナの構造

とがわかる。ゆえにこの構造を有するツイストループアンテナは RF タグ用のアンテナとして活用できると考えられる。

$$5 \leq R_{IC} \leq 50, \quad -2000 \leq X_{IC} \leq -5 \quad (1)$$

次にツイストループアンテナの指向性利得を確認する。今回、反射損失を抑えるために、ポートの内部インピーダンスは  $Z_{in} = 8.00 - j387 \Omega$  に設定し、920 MHz で動作させている。このときのアンテナの他に何もな空間における指向性利得を図10に示す。図10に示したツイストループアンテナ単体の指向性利得より、 $\phi = 90 \text{ deg}$ 、 $\theta = -168 \text{ deg}$  の向きに  $-4.14 \text{ dBi}$

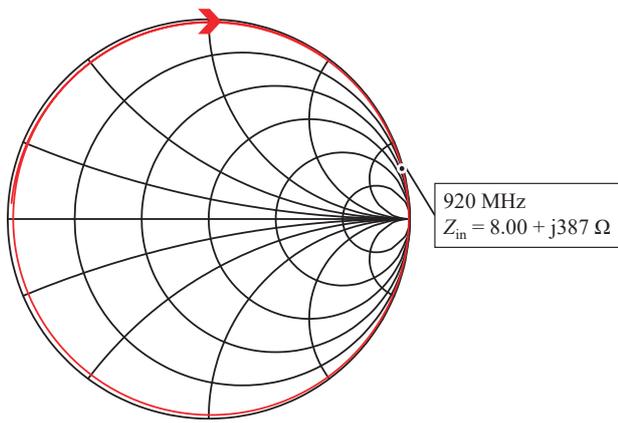


図9 ツイストループアンテナの入力インピーダンスの周波数特性

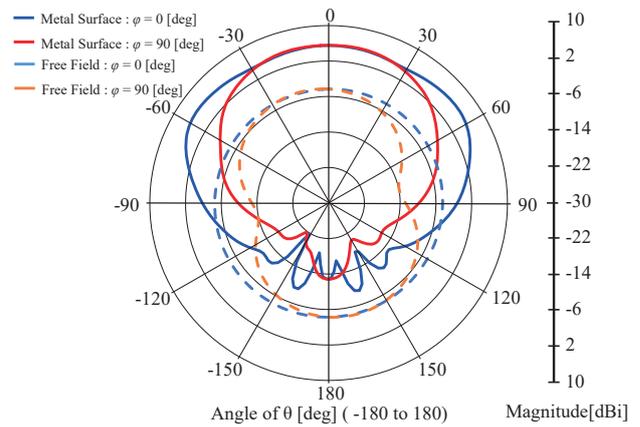


図11 ツイストループアンテナを金属平板直上に配置した場合の指向性利得

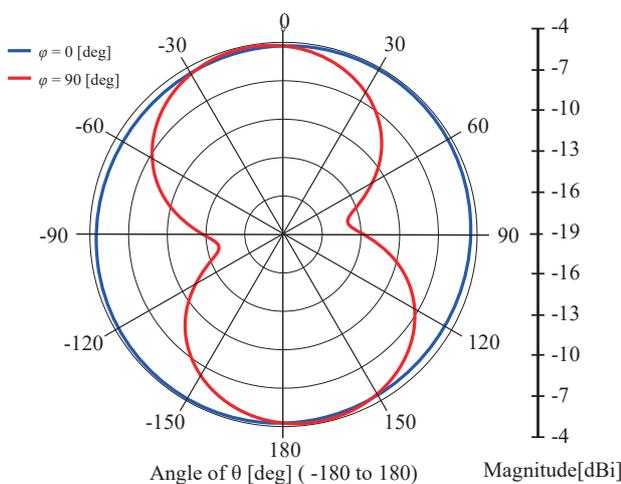


図10 ツイストループアンテナ単体での指向性利得

で利得の最大となる指向性を持つことがわかる。そしてこの利得の最大値を図5に示した折り返しダイポールアンテナの指向性利得の最大値 2.70 dBi ( $\phi = 90 \text{ deg}$ ,  $\theta = 33 \text{ deg}$ ) と比較すると、6.84 dBi 低い。このことから自由空間に配置されたツイストループアンテナは、理想的な空間に配置された折り返しダイポールアンテナよりも低くなる傾向にあることがわかる。続いて、ツイストループアンテナを金属平板直上に配置したときの指向性利得を図11に示す。なお整合を取るため、ポートの入力インピーダンスを  $Z_{in} = 0.022 - j256.859 \Omega$  に設定した。図11に示した指向性利得より、最大利得は 5.92 dBi ( $\phi = 0 \text{ deg}$ ,  $\theta = -54 \text{ deg}$ ) であり、図10で示した何も無い空間におけるツイストループアンテナよりも、10.06 dBi 高い。さらに、折り返しダイポールアンテナの場合の最大利得  $-0.24 \text{ dBi}$  と比較して 6.16 dBi ツイストループアンテナのほうが高い。以上のことから 920 MHz で動作させる場合に金

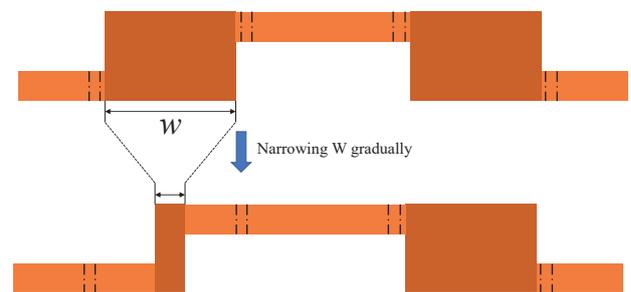


図12 ツイストループアンテナの平行平板

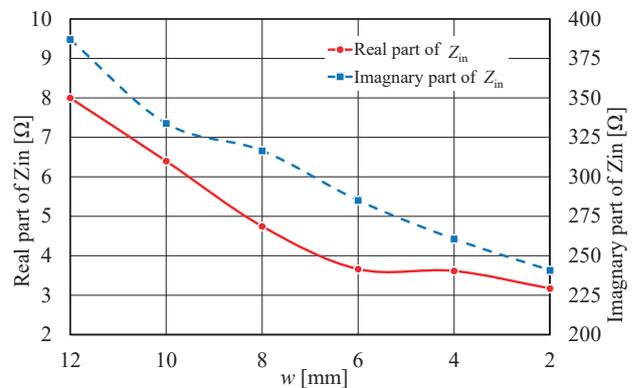


図13 ツイストループアンテナの線路幅  $w$  に対する 920 MHz における入力インピーダンスの変化

属表面直上という環境は、ツイストループアンテナにおいて適した環境であると言える。

最後にツイストループアンテナの構造と入力インピーダンスの関係を示す。図12に示すように、線幅の大きい部分においてその幅  $w$  を段々と変化させ、その変化に対するツイストループアンテナの入力インピーダンスの変化を  $w$  によるアンテナの入力インピーダンスの変化を図13に示す。図13に示した提案するアンテナの入力インピーダンスから、 $w$  が 12 mm か

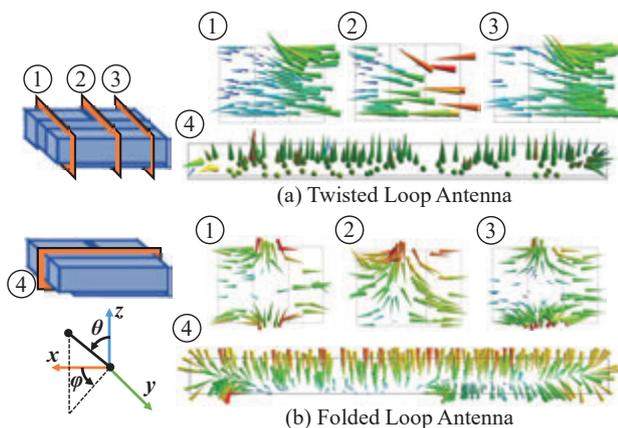


図 14 ツイストループアンテナの動作モードごとの磁界分布

ら 6 mm に変化するとき、レジスタンスが  $4.33 \Omega$  変化し、リアクタンスが  $102 \Omega$  変化する．このことから、アンテナの入力インピーダンスの調整を行うパラメータの一つとして線路幅  $w$  を扱うことができることがわかる．

#### 4.3 指向性利得が向上した要因の考察

本著ではこれまでに、動作周波数 920 MHz において金属平面直上に配置した場合、ツイストループアンテナの指向性利得は増加することを述べてきた．そこで本節では 2 つのアンテナの中心を流れる磁界分布の違いから、ツイストループアンテナが高い利得を示した要因を考察する．

920 MHz における 2 つのアンテナの中心を流れる磁界分布を図 14 に示す．図 14(a) に示したツイストループアンテナの磁界分布より、ツイストループアンテナを 920 MHz で動作させたときに磁界は  $y$  軸方向に沿ってベクトル場が同一方向に形成されていることがわかる．一方で、図 14(b) に示した折り返しダイポールアンテナの磁界分布より、折り返しダイポールアンテナを 920 MHz で動作させたときに磁界は導体の隙間から側面の両面へなだれ込むように形成されており、920 MHz で動作させたときに 2 つのアンテナから放射される磁界の放射パターンは異なることがわかる．特に、ツイストループアンテナは磁界アンテナの動作原理の放射パターンと近いパターンで放射しており、このことが金属平面直上に配置された場合の指向性利得が向上した要因の一つであることが考察できる．

## 5 まとめ

RFID による建設用仮設機材の管理を行うにあたり、適切なアンテナの設置方法の検討において金属近傍に

も配置されることを考慮することを可能とするために、金属表面近傍に配置できるアンテナの開発を目的としてツイストループアンテナを提案した．提案したツイストループアンテナについて、まず動作特性の比較対象として折り返しダイポールアンテナを設定しその指向性利得を求めた．次に、提案アンテナの入力インピーダンスの周波数特性および単体での指向性利得、金属平板上に配置したときの指向性利得を示し、折り返しダイポールアンテナの指向性利得と比較して指向性利得が向上していることを確認した．併せて、提案したツイストループアンテナは入力インピーダンスを変化させられる構造であることを確認した．最後に、2 つのアンテナの中心を流れる磁界分布を示し、ツイストループアンテナの磁界分布が原理的な磁界アンテナの磁界分布に近い分布であることから、金属平面直上における 2 つのアンテナの指向性利得が大きく変化した要因を考察した．以上により、提案したツイストループアンテナの有効性を確認した．今後は、ツイストループアンテナの偏波の調査及び負荷や厚みなどより実空間に近い環境における最適に動作するツイストループアンテナの設計の検討を行う．

## 謝辞

本研究は、ジー・オー・ピー株式会社の研究寄付助成を受けて行われた．ここに感謝の意を示す

## 参考文献

- [1] “第 1 部 5G が促すデジタル変革と新たな日常の構築,” 令和 2 年度版 情報通信白書, 総務省, pp.76-77, 2020
- [2] FAST RETAILING CO., LTD., “sustainability report,” 2018.
- [3] “RFID の基礎,” 第 12 回 JADA 基本技術者講習育成プレゼン, 一般社団法人 日本自動認識システム協会, <https://www.jaisa.or.jp/about/pdfs/20190329rev8.pdf>, 2019-3
- [4] 柏村文郎, “酪農における先端技術の現状と将来,” 北海道家畜管理研究会報, Vol.41, pp.40-43, 2006
- [5] 三次仁, “総論とパッシブ RFID 技術の動向,” 電気通信学会誌, 126 巻 8 号, pp.521-524, 2006.
- [6] John Flanagan, “A qualitative study of improving the operations strategy of logistics using radio frequency identification,” *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*, 2398-5364, 14, February, 2022
- [7] “非接触 IC カード用の次世代 FeliCa IC

- チップを開発,” ソニーグループ株式会社,  
<https://www.sony.com/ja/SonyInfo/News/Press/201106/11-066/>, 参照 Dec. 24,2022.
- [8] Information technology –Radio frequency identification for item management- Part6 : Parameters for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz General,ISO/IEC18000-6, 2013.
- [9] ジー・オー・ピー株式会社, “サイトトップ,”  
<https://www.gop.co.jp/>, GOP co., ltd., 参照 11.Nov.2021
- [10] 深瀬優介, 柴崎年彦, “FDID 法による導体円筒管近傍の IC タグの数値解析,” 信学技報, Vol.121, No.226, pp.1-6, 2021.
- [11] 高橋応明, “RFID タグ用アンテナの設計,” コロナ社, 2012.
- [12] 松村 崇 他, “鉤型医療器具への RFID アンテナの装着位置,” 2012 年電子情報通信学会総合大会, B-1-110, 2012.
- [13] 杉山裕汰, 宮田尚起, “建設用仮設機材に用いられる大型金属管の個体識別に向けた RFID タグ用アンテナの基礎検討,” 信学技報, vol. 121, no. 303, MW2021-102, pp. 103-108, 2021 年 12 月.
- [14] 高橋応明, “RFID タグ用アンテナ技術,” 通信ソサイエティマガジン, No.7, 冬号, pp.55-57, 2008.