

RFIDのリーダとタグのアンテナに関する研究 — 小売段階におけるトレーサビリティへの応用 —

2005MT022 林 杏耶 2005MT053 小林 千絵 2005MT132 吉川 啓介

指導教員 稲垣 直樹

1 はじめに

1.1 研究背景

RFID (Radio Frequency Identification) とは、無線 IC タグを対象となる人やものに取り付け、電磁界の誘導界または放射界を利用して通信し、対象物のデータの読み出し、書き込みを行うシステムである。

近年、食品事故や危険物の混入、食品偽装といった消費者の食品の安全性に対する信頼を揺るがす事件が多く起きており、食の安全・安心という言葉がよくいわれるようになった。食品に限らずあらゆるものにおいて安全に手に入れるためには、私たち消費者が買う前に商品の情報を十分に知り、選んでいく必要がある。

最近では商品の生産から加工、流通、販売までの各種履歴情報を保存し、確認することができるトレーサビリティが注目されている [1]。今まで物理的なものの個別識別にはバーコードや磁気カードが主に使われてきたが、情報量が多くまた偽造、複製が困難な IC タグの発展が期待されている。IC タグを用いて、ものと情報を一体化させ消費者に情報を提供していくことでユビキタス社会の実現が可能となる。

1.2 研究目的・方法

ユビキタス社会の実現に伴い、誰でも簡単に商品の情報を正確に確認することが求められる。

本研究では、図 1 のように身近な携帯電話をリーダとし、IC タグを取り付けた商品にかざすことで商品の履歴情報を読み取っていくことを検討する。また、周りに商品がある場合でも、正確に目標の商品のみの情報を読み取ることを研究の目的とする。

リーダとなる携帯電話に内蔵するアンテナと IC タグとなる商品に取り付けるアンテナを FEKO [2] を用いて設計する。はじめ、リーダとタグのアンテナを平行に向かい合わせ、距離 1cm まで近づけて周波数ごとに解析し比較する。また、商品が周りに複数個ある場合について検証をおこなう。実用化のためには、コンデンサを装荷することで共振をとり、アンテナの内部抵抗は 1Ω 以上、 50Ω 程度となる必要がある。RFID に用いることのできる ISO/IEC 規格内の周波数、125kHz、135kHz、13.56MHz、433.92MHz、950~956MHz、2.45GHz [3] で伝送効率と内部抵抗、コンデンサ値を比較していく。正確に情報を読み取るためにリーダとタグとの伝送効率を S-parameter の値を算出することにより求める。ただし、リーダの通信領域が乱れるため、タグを取り付ける商品は金属製のものを除く。

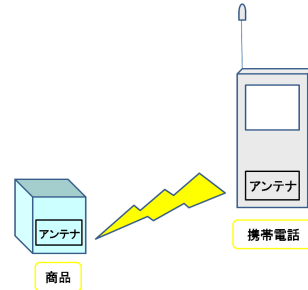


図 1 IC タグのついた商品とアンテナを内蔵した携帯電話

2 アンテナの設計

2.1 FEKO によるアンテナの設計

リーダ側のアンテナは、携帯電話に内蔵するため小型化が必要だがアンテナは大きいほど特性が良くなる。そのため内蔵できる最大の大きさを測定しアンテナモデルを設計する。リーダのアンテナは携帯電話を実測し、図 2 のように一辺 3.5cm、導体半径 0.05cm の正方形ループアンテナモデルを作成した。また、タグのアンテナは商品に貼り付けるため小型化が必要だが、小さすぎるとどこに貼ってあるのかを見つけにくくなる恐れがある。そのため、図 3 のように一辺 1.0cm、導体半径 0.0025cm の正方形ループアンテナモデルを作成した。

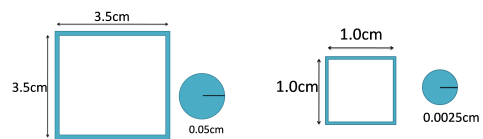


図 2 リーダ側のアンテナ

図 3 タグ側のアンテナ

2.2 リアクタンス理論解析

式 (1) は図 4 のようなコイルの相互インダクタンス M を求めるものである。この二つのコイルをコイルの導体半径まで近づけると自己インダクタンス L を求めることができる [4]。これを用いて設計したアンテナの自己インダクタンス L を求める。

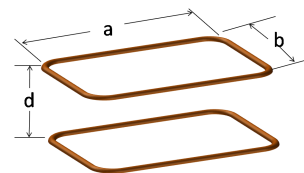


図 4 二つの平行な長方形コイル

$$L = \frac{\mu}{\pi} \left\{ a \log \frac{(a + \sqrt{a^2 + d^2}) \sqrt{b^2 + d^2}}{d(a + \sqrt{a^2 + b^2 + d^2})} + b \log \frac{(a + \sqrt{b^2 + d^2}) \sqrt{b^2 + d^2}}{d(a + \sqrt{a^2 + b^2 + d^2})} - 2\sqrt{a^2 + d^2} - 2\sqrt{b^2 + d^2} + 2\sqrt{a^2 + b^2 + d^2} + 2d \right\} \quad (1)$$

また、コイルは電流の変化を妨げる働きをし電流の時間変化に比例した逆起電力を作り出す。このときコイルのリアクタンス X は式 (2) により求めることができる。

$$X = \omega L \quad (2)$$

2.3 リアクタンス特性の比較

理論式を用いて求めた自己インダクタンス理論値は、リーダ側が $9.7685 \times 10^{-8} \Omega$ 、タグ側が $4.1759 \times 10^{-8} \Omega$ となった。

リアクタンス理論値と FEKO により算出したリアクタンス値を比較することで、FEKO によるアンテナ設計の妥当性の検証をおこなう。リーダのリアクタンス理論値は 8.3228Ω 、タグのリアクタンス理論値は 3.5579Ω となり、FEKO の解析結果はリーダ側が 8.8553Ω 、タグ側が 3.7113Ω となった。これにより、理論値と FEKO によって算出された値がほぼ一致することがわかった。

3 リーダとタグを向かい合わせ、周波数ごとに OPTFEKO を用いて解析

3.1 解析方法

リーダとタグを図 5 のように真上に平行となるように置く。また、2 つのアンテナは触れない限界まで近づけるため、距離を 1.0cm とする。タグの内部抵抗 r_2 を 10Ω に固定し、規格内の周波数においてリアクタンス値が 0 に近くなり、高い伝送効率を得られるようにリーダのアンテナの内部抵抗 r_1 とコンデンサ値 C_1, C_2 を OPTFEKO により最適化をおこなう。このときのリアクタンス値 X 、S-parameter S_{21} の値を求めた。

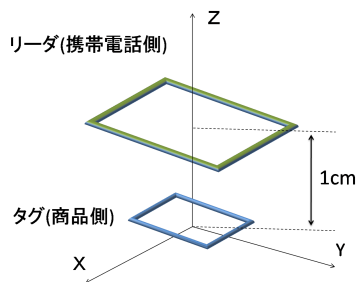


図5 2つのアンテナを1cm離し、平行に向かい合わせる

3.2 結果と考察

解析の結果を表1に示す。表より、125kHz、135kHzでは r_1 が小さすぎる値となり、また伝送効率もほぼ0%となった。13.56MHz、433.92MHz、953MHz、2.45GHzではリーダの内部抵抗が小さすぎたり大きすぎたりしたが、伝送効率は10%以上となった。

表1 向かい合わせたときの解析結果 [Ω]

周波数	$r_1[\Omega]$	$X[\Omega]$	$S_{21}[\text{dB}]$
125kHz	7.013×10^{-4}	-1.622×10^{-5}	-27.63
135kHz	2.871×10^{-3}	-9.495×10^{-6}	-32.96
13.56MHz	4.028×10^{-3}	1.218×10^{-4}	-0.0174
344.92MHz	5.411	0.127	-0.2757
953MHz	4.119×10^2	0.464	-2.014
2.45GHz	1.819×10^2	26.12	-8.848

4 周波数ごとにタグが周りに複数ある場合の伝送効率を検証

4.1 解析方法

次に、読み取りたい目標の商品の周囲にタグの付いた複数の商品を置き、それぞれタグについての伝送効率を求め周りのタグによる影響の検証をおこなう。読み取りたいタグのみの伝送効率が10%以上となり、その他のタグへの伝送効率は0%に近くなることを目的とする。

図6のように目標のタグの周囲に間隔 1.0cm で他のタグを置いた。目標のタグを port2 とし、周りのタグは順番に port3~10 とする。ただし125kHzと135kHzはタグが一つの場合でも高い伝送効率を得られなかったため検証から除く。

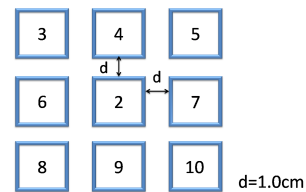


図6 複数個のタグ

4.2 解析結果と考察

13.56MHzで S_{21} は -0.9370dB となり伝送効率は約80%となり、他のタグでは伝送効率が0%~5%となった。しかし、433.92MHz、953MHz、2.45GHzでは、port2~port10すべてのタグへの伝送効率がほぼ0%となった。これにより、13.56MHz以外の周波数では周りにある他のタグの影響を受けやすくなることが分かった。今後は433.92MHz、950~956MHz、2.45GHzの3つの周波数は研究から除き、13.56MHzにおいてアンテナの大きさを改善し、さらにアンテナの向きや距離を変え研究を進めていく。

5 13.56MHz でアンテナの改善

5.1 アンテナの大きさの最適化

周波数 13.56MHz に固定し、共振のとれるコンデンサ値、高い伝送効率を満たす最適なアンテナの大きさを OPTFEKO を用いて求める。

リーダ側とタグ側をアンテナの大きさを同じにし、導体半径 0.05cm、リーダの内部抵抗 20Ω、タグの内部抵抗 10Ω としアンテナの大きさの最適値を求めた結果、アンテナの一辺の長さは 12.2596cm のときに最適となった。また S_{21} は -0.0003dB、伝送効率に換算するとほぼ 100% となった。しかし、一辺が 12cm 以上あり携帯電話に内蔵するには大きすぎる値となった。そのため、今後巻き数を増やすことでアンテナを小さくしていく。

5.2 アンテナの巻き数を増やすことで小型化

前節で求めた一重のループアンテナのアンテナ長を元に、巻き数を増やすことでスパイラルアンテナとし、アンテナの小型化を図る。スパイラルアンテナとは、ループアンテナに巻き数を増やした構造となっているものである。

このアンテナにおいて最適化をおこなった。その結果、リーダの内部抵抗 r_1 が 40.222Ω となり、タグの内部抵抗 r_2 の 10Ω に比べ大きい値となった。同じ大きさのアンテナの場合、内部抵抗値は近い値にすることが望まれるため、今後はタグの内部抵抗 r_2 を 15Ω にして研究を進める。導体半径は前章同様 0.05cm、アンテナの大きさを一辺 3.0cm、巻き数 4 とし図 7 のように設計した。

タグの内部抵抗を 15Ω とし、コンデンサ値 C_1, C_2 、リーダの内部抵抗 r_1 を OPTFEKO により最適化する。解析結果を表 2 に示す。

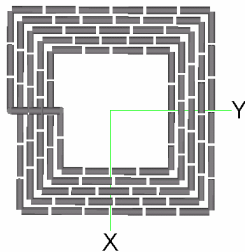


図 7 巻き数を 4 とし小型化したスパイラルアンテナ

5.3 タグが周囲に複数個ある場合

前節で作成した多重ループアンテナを用いて、周囲にタグが複数個ある場合での検証をおこなった。

リーダの内部抵抗 r_1 を前節で最適化した 19.602Ω、タグの内部抵抗 r_2 を 15Ω とし解析をおこなう。次に、第 4 章同様図 6 のように 1cm の間隔でタグのアンテナを置き、それぞれの S-parameter の値を算出し、周囲にあるタグへの伝送効率をもとめた。目標のタグを port2 とし、周りのタグは順番に port3 ~ 10 とする。

表 2 改善後の解析結果

	結果
C_1 [F]	1.7783×10^{-10}
C_2 [F]	1.7292×10^{-10}
r_1 [Ω]	19.602
r_2 [Ω]	15.0000
X [Ω]	-0.3437
S_{21} [dB]	-0.0004

解析の結果、 S_{21} は -0.1638dB となり、伝送効率は 90% 以上となった。それに対し、その他のタグでは S-parameter の値は -20dB 以下となり伝送効率はほぼ 0% となった。これにより目標となるタグ以外と通信をおこなう可能性は低いことが確認できた。

5.4 アンテナを覆う誘電体の影響を検証

実際にはリーダのアンテナは携帯電話の中に内蔵し、タグのアンテナは商品に張り付けるためプラスチックやポリエチレンで覆われている。そのためリーダ側のアンテナは比誘電率 $\epsilon_r = 2.5$ のプラスチックで覆い、タグ側のアンテナは比誘電率 $\epsilon_r = 2.3$ のポリエチレンで覆った。5.2 節で設計した誘電体で覆われていないアンテナの解析結果と、誘電体で覆ったアンテナの解析結果を比較し、誘電体の通信に与える影響について検証をおこなった。比較の結果を表 3 に示す。

表 3 より、誘電体に覆われている場合と覆われていない場合で、 S_{21} の値に違いは見られず、誘電体が通信に与える影響はないことがわかった。そのため今後は誘電体に覆われていない状態で解析を進めていく。

表 3 包装物の影響

	なし	あり
C_1 [F]	1.7783×10^{-10}	1.7783×10^{-10}
C_2 [F]	1.7292×10^{-10}	1.7292×10^{-10}
r_1 [Ω]	19.602	19.602
r_2 [Ω]	15.0000	15.0000
X [Ω]	-0.3437	-3.874
S_{21} [dB]	-0.0004	-0.0004

しかし、リアクタンスの値に少しの誤差がみられた。そこで、リアクタンス値を 0 に近づけ正確さを高めるため、誘電体に覆われた上程でリーダの内部抵抗を OPTFEKO により最適化しさらに改善した。

解析の結果を表 4 に示す。表よりリーダの内部抵抗は 19.593Ω、リアクタンス値 X は -0.0391Ω となり共振をとることができた。今後、リーダの内部抵抗は今回求めたものを用いて研究を進めていく。

表 4 改善後の解析結果 [Ω]

	結果
C_1 [F]	1.7784×10^{-10}
C_2 [F]	1.7188×10^{-10}
r_1 [Ω]	19.593
r_2 [Ω]	15.000
X [Ω]	-0.0391
S_{21} [dB]	-0.0007

6 リーダのアンテナの向きと距離を変える

6.1 解析方法

前章で改善したアンテナを用いてリーダー側のアンテナの向きと、リーダーとタグとの距離を変え解析を進める。図 8 のように Y 軸中心に φ の角度を変え回転させた場合と、図 9 のように X 軸中心に θ の角度を変え回転させた場合で検証をおこなった。Y 軸中心に回転される場合は、負の方向に回転させても正の方向と同じ結果が得られることが予想されるので負方向の結果は省略する。

アンテナは前章で改善したスパイラルアンテナを用いる。さらに、リーダーの内部抵抗を前節で最適化した r_1 を 19.593Ω とし、タグの内部抵抗 r_2 を 15Ω とした。

また、目標となるタグの他にも周りにタグのついた商品を置き、目標のタグを port2、周りのタグには順番に port3~10 とした。それぞれの伝送効率を算出し検証をおこなう。

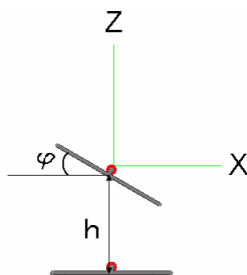


図 8 回転角度: φ

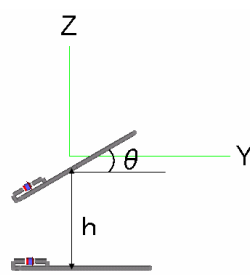


図 9 回転角度: θ

6.2 結果と考察

解析の結果、 $h = 1\text{cm}$ のとき、角度を変えても S_{21} の値は -0.17dB 程度となり伝送効率に換算すると 90% 以上となった。またその時の周りのタグの S-parameter はすべてが -20dB 以下となり、伝送効率に換算すると 0% に近くなった。

次に $h = 3\text{cm}$ にし角度は与えずアンテナを平行に向かい合わせたとき、 S_{21} の値は -10dB となり、伝送効率に換算すると約 10% となった。角度を 30° , 60° , 90° と大きくしていくと伝送効率は低くなっていく。また 90° の角度に向けると S_{21} の値は -40dB 程度、伝送効率が 0% となり通信が行えないことが確認された。さら

に $h = 4\text{cm}$ のとき、 3cm に比べ伝送効率は少しずつ低くなったが似た結果となった。

$h = 5\text{cm}$ としアンテナを平行に向かい合わせたときの S_{21} の値が 21.09dB 、伝送効率に換算すると 0% となった。これにより、 5cm まで離すと通信が行えないことが確認された。

7 まとめと今後の課題

本研究では、リーダーとなる携帯電話を IC タグの付いた商品にかざすことで、目標のタグの情報のみを正確に読み取ることを目的とした。規格 (ISO-18000) 内の 125kHz , 135kHz , 13.56MHz , 433.92MHz , $950 \sim 956\text{MHz}$, 2.45GHz の 6 つの周波数において、最適な周波数の検討をおこなった。

その結果 125kHz と 135kHz では周波数が小さすぎ、これらの波長に対して本研究で用いるアンテナが小さいためよい結果が得られなかった。また、 433.92MHz , $950 \sim 956\text{MHz}$, 2.45GHz では周波数が大きく通信距離が長くなる特徴があるため、リーダーのアンテナと周辺のアンテナが相互結合を起こしてしまうため目標のタグの情報を読み取ることができなかった。そのため本研究のような通信距離が $1\text{cm} \sim 5\text{cm}$ 程度、アンテナは小型である条件を満たすためには 13.56MHz が適していることが確認できた。

次に、 13.56MHz においてアンテナの改善をおこなった。小型化が必要なため、アンテナを 4 回巻き、一辺 3cm の正方形アンテナを設計した。さらに、リーダーの向きと、リーダーとタグとの距離を変え解析をおこなった。その結果、 5cm まで離すと目標となるタグの情報を読み取ることができなかった。しかし 1cm まで近づけると、角度が少しずれても周りのタグの情報を読み取ることもなく確実に目標のタグの情報を読み取ることができた。

今後の課題は、本研究で設計したリーダーとタグのアンテナは 3cm 正方となり、携帯電話に内蔵することやどんな商品にでも取り付けを考えるともまだまだ大きいといえる。そのため実用化にはさらに小型化が必要である。また、今回はタグを取り付ける商品から金属製品などの通信に影響を与えやすいものを除いたため、今後はどんな商品の場合でも正確に読み取れるよう研究する必要がある。

参考文献

- [1] 越塚登, 坂村健, “食の安全・安心を実現するためのユビキタスコンピューティング技術,” 電子情報通信学会誌, Vol.88, No.5, 2005, pp.349-354.
- [2] FEKO ホームページ, <http://www.feko.info/>.
- [3] Young Joong Yoon, “Antennas for RFID,” MOBILE ANTENNA SYSTEMS HANDBOOK, ARTECH HOUSE, Chapter 13, pp.589-618.
- [4] 社団法人 電気学会, 電気磁気学 (第二次改正版), オーム社, pp.267-268.