

電磁界シミュレーションによるRFIDタグの設計支援

Design Support for RFID Tags by Electromagnetic Field Simulation

小暮 裕明
H. Kogure
小暮技術士事務所
Kogure Consulting Engineers

あらまし: RFID タグで使われる主な周波数は、13.56MHz、900MHz 帯、2.45GHz などである。波長は 22m、33cm、12cm と異なるが、タグの外形寸法はいずれも 10cm を超えないため、アンテナの小型化が要求される。タグはさまざまな物体に貼り付けるため、アンテナは周囲環境の影響を受けやすい。電磁界シミュレーションは、予め実装状態を考慮し、効率的な RFID タグのアンテナ設計支援に有用であることを示す。

キーワード: RFID タグ、電磁界シミュレーション、アンテナ、LC 共振回路、SPICE サブサーキット、広帯域
Keywords: radio frequency identification tag、electromagnetic field simulation、antenna、lc resonant circuit、SPICE subcircuit、broad band

1 まえがき

13.56MHz と 2.45GHz の RFID タグ(Radio Frequency Identification tag)は無線 IC タグなどとも呼ばれ、国内で既に稼働しているが、スーパーマーケットで扱う多種の品物に貼り付けた実験では、それぞれの特徴が明らかになった。13.56 MHz は、缶などの金属部分に密着した場合以外は、通信距離の違いはあるものの、概ね代表的な品物で読みとれるという結果が得られた。一方 2.45GHz では、読みとれる品目数が 13.56MHz の 1/3 以下に留まり、ペットボトルや根菜といった、水分を含む品物に直に貼り付けた場合は、ほとんど読みとれなかった[1]。これらの中間にある 900MHz 帯は、通信距離をはるかに伸ばし、2.45GHz で顕著な水の影響も少ないという特徴があるが、貼り付ける物体の材質によっては、電磁的な結合による影響が顕著である。

RFID のアプリケーションは、製造段階で製品に貼り付けて、出荷、配送、販売に至る一連の業務のつながり(いわゆるサプライチェーン)を、IT 技術で一括管理するシステムが開発されている。またこれらの用途では、一般にタグの寸法は 10cm 程度を超えないため、アンテナの小型化が要求される。ここでは、電磁界シミュレーションソフトウェアを用い、予めさまざまな実装状態を考慮した、効率的な RFID のアンテナ設計を支援する方法を報告する。

2 13.56MHz のアンテナ設計手法

2.1 13.56MHz のアンテナ

国内では IC テレホンカードや JR の Suica、ICOCA などで 13.56MHz が使用され、既に実用化されている。波長は 22m 以上になるので、1/2 波長ダイポール・アンテナなどでは実現できない。これらの実装寸法は、波長に比べてはるかに小さく、RFID タグと同様、複数回巻きの微小コイルにより、近傍界の磁気結合を利用した通信システムが採用されている。

2.2 13.56MHz のシミュレーション

図 1 に電磁界シミュレーションソフトウェア[2][3]でモデリングした、6 回巻きコイルを示す。パターンはタグのシートに印刷で形成されるが、このモデルでは線幅と線間を 0.5mm とし、外形寸法を 41mm×77mm としている。

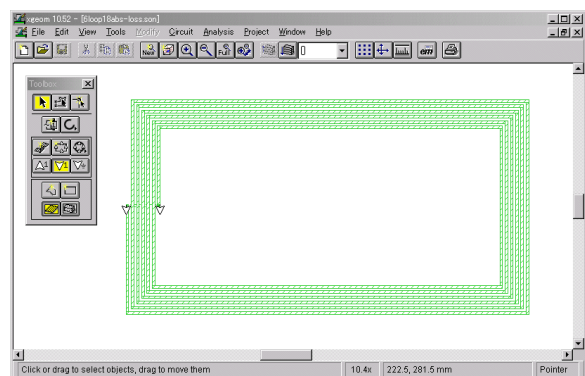


図1 6回巻きコイルのモデル(Level 0層の表示)

巻始めと巻終わりの端は via で別の層 (Sonnet の Level 1) につなげ、端子 (内部ポート: Port 1) を設定している。理想の動作状態では、コイルのインダクタンス L と、これに装荷するキャパシタンス C によって LC 共振回路を実現するため、はじめにコイルの L の値を知る必要がある。

図 2 は Sonnet の SPICE サブサーキットを合成する機能で得た出力例であるが、 $L = 4522\text{nH}$ となった。また $C = 1.1\text{pF}$ は線間の結合容量の合計を示すので、共振させるために装荷するキャパシタンスの計算は、この値を考慮する必要がある。

```
* Analysis frequencies: 13.3, 14.65 MHz
.subckt 6loop18abs-loss_3 1 GND
C_C1 1 GND 1.111432pf
L_L1 1 2 4521.847nh
R_RL1 2 GND 1.767433
.ends 6loop18abs-loss_3
```

図 2 Sonnet で合成した SPICE サブサーキット

共振周波数 $f_0 = 13.56\text{ MHz}$ のとき、 C の値は $C = 1/L(2\pi f_0)^2 = 30.5\text{pF}$ …… (1) になる。一般にタグの IC は、コイルを接続する端子から見込んだ並列等価キャパシタの値を公表している。例えばその値が 23.5pF のとき、装荷するキャパシタは 7pF であるが、コイルに存在する 1.1pF を考慮すれば、新たに必要となる装荷並列キャパシタは 5.9pF になる。

図 3 は IC の端子から見込んだ等価回路を含むタグ全体の回路をシミュレーションした結果で、Port 1 のインピーダンスを示す。リアクタンスは 13.56MHz で 0 になり、レジスタンスは、並列共振回路のため、高い値になっている。

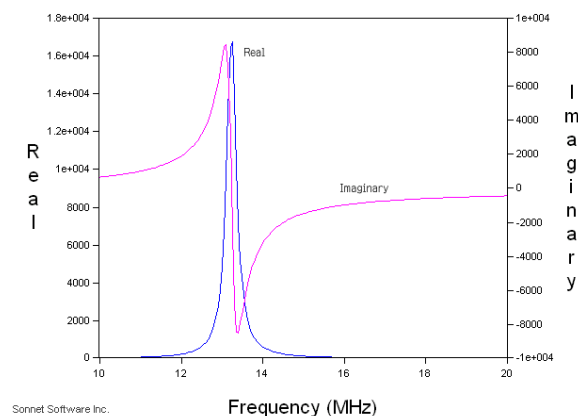


図 3 Port 1 のインピーダンス

3 900MHz のアンテナ設計手法

3.1 900MHz 帯のアンテナ

RFID タグシステムの周波数として、欧州では 868MHz 帯、米国では 915MHz 帯が既に使用されている。国内では 2005 年春をめどに、総務省が $950\sim 956\text{MHz}$ (あるいは $952\sim 954\text{MHz}$) を割り当てる予定である。このように 900MHz 帯といっても、離れた 3 つの帯域が許可されており、世界標準規格化は実現されなかった。このため、同一のタグで全ての周波数をカバーするためには、アンテナの広帯域化が求められる。

3.2 900MHz 帯のシミュレーション

理想的な $1/2$ 波長ダイポール・アンテナでは、エレメント長が約 16cm となる。タグを形成する誘電体層による若干の波長短縮効果を考慮しても、さらにアンテナの小型化が必要となる。

図 4 に電磁界シミュレーションソフトウェア [2] でモデリングした、 900MHz 帯アンテナの例を示す。実装寸法に収めるようにエレメントの両端を折り曲げ、タグのシートを形成する誘電体の厚さを 0.5mm とし、比誘電率を 4.9 、損失正接 ($\tan \delta$) を 0.001 でモデリングしている。

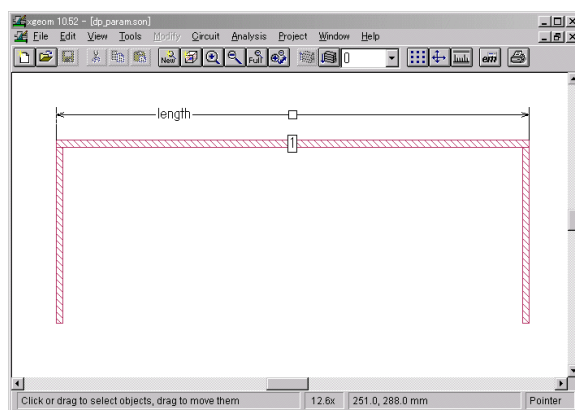


図 4 900MHz 帯折曲げダイポール・アンテナのモデル

折曲げた先端部の長さは 2.6cm で固定して、目的の周波数で共振するエレメント長を見出すために残りのエレメント長にパラメータを設定して、これを可変することで最適値を得た。

図 5 にシミュレーションで得た反射係数 S_{11} を示す。パラメータは、 $7\sim 9\text{cm}$ を 2mm ステップで可変したが、 952MHz で最適な寸法は 8.2cm となった。アンテナの全長は 13.4cm である。

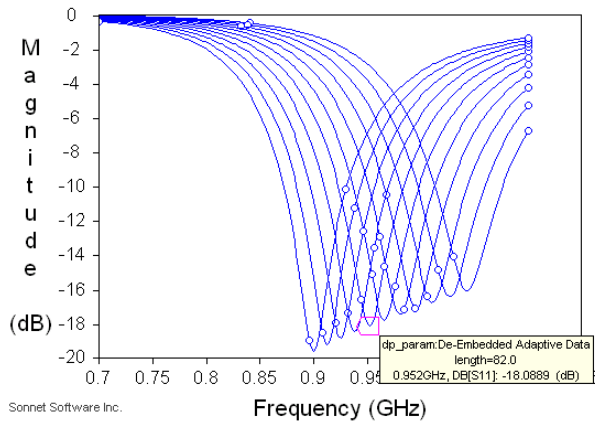


図5 折曲げダイポール・アンテナの S_{11} (return[dB])

3.3 広帯域化のシミュレーション

このアンテナのバンド幅は高々 50MHz (-10dB において)であり、国際的に使用されている周波数帯すべてをカバーできない。このため、図 6 に示すように、2つの異なる寸法のダイポール・アンテナを設計し、電磁界シミュレーションした。

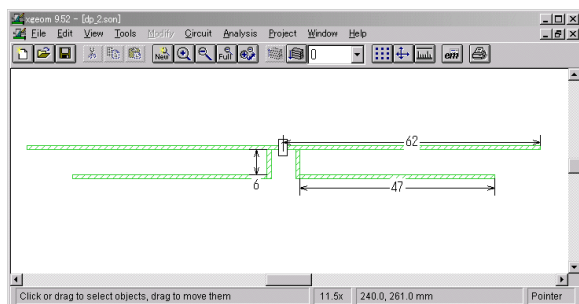


図6 デュアル・ダイポール・アンテナのモデル

図 7 に反射係数 S_{11} を示す。2つの周波数で、それぞれのエレメントが共振していることがわかるが、これらの中間にある周波数 1.08GHz で反射係数が大きくなり、広帯域化は図れなかった。

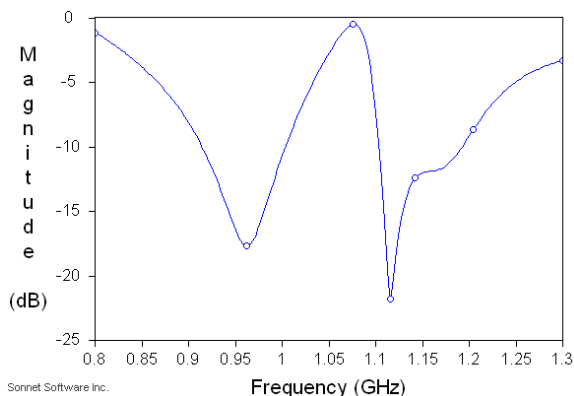


図7 デュアル・ダイポール・アンテナの S_{11} (return[dB])

図 8 は反射係数が大きくなった 1.08GHz における給電部付近の表面電流を示すが、この部分だけ電流が小さくなっていることがわかる。

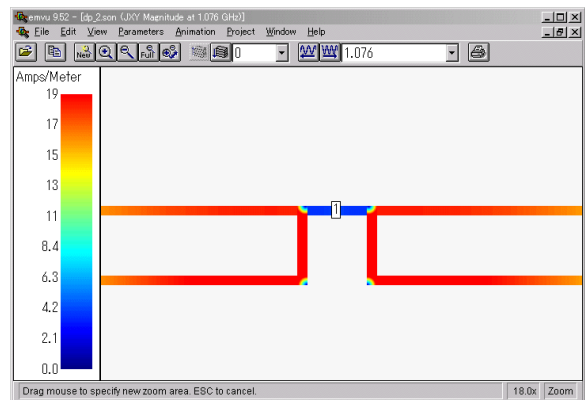


図8 給電部付近の表面電流分布

図 9 は入力インピーダンス (Z_{in}) を表示したグラフであるが、1.08GHz 付近で実数部が 600 Ω 以上ある。また 960MHz 付近と 1.12GHz 付近では、実数部が 50 Ω に近く、虚数部はほぼ 0 Ω になっている。このアンテナを 50 Ω 系の線路で給電する場合、1.08GHz 付近では実数部(レジスタンス)が高いため、インピーダンス整合がとれないことがわかる。

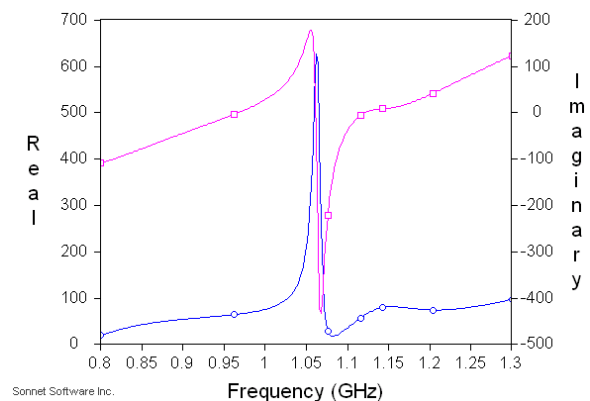


図9 デュアル・ダイポールの入力インピーダンス

3.4 広帯域化の実現

図 10 はL形に配置したエレメントで、給電点から水平方向へ延びたエレメントの全長は 8.4cm、折り曲げられたエレメントは 2.3cm ある。また短い方のエレメントは、垂直部が 1.8cm、水平部が 3.6cm ある。

このアンテナは図 11 に示すように、2つの周波数で共振点していることがわかる。また、これらの

中間の周波数では反射係数が-7dB 近くあり、広帯域で使えるアンテナになった。

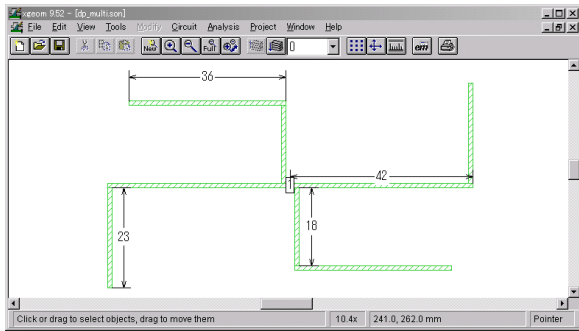


図 10 直交ダイポール・アンテナのモデル

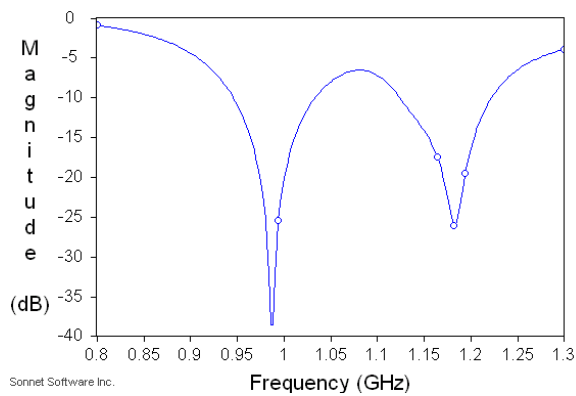


図 11 直交ダイポール・アンテナの S_{11} (return[dB])

写真 1 は米国 Matrics 社の RFID タグ[4]であるが、2 つの要素を直交することで、相互の電磁的結合の影響を低減していると考えられる。また、要素は単線ではなく、2 本の線を平行に配置している。幅の広い線路では、電流が両縁に沿って流れ、中央部に流れる電流は少なくなる。このような2本線による構造をもつことで、線幅を広げた効果を得ており、さらに広帯域化を図っていると考えられる。

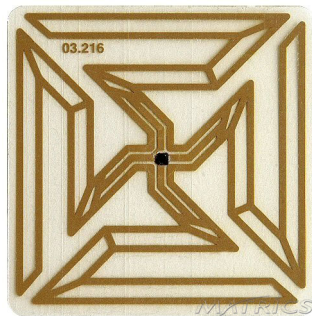


写真 1 米国 Matrics 社の RFID タグ(915MHz 用)

4 2.45GHz のアンテナ設計手法

4.1 2.45GHz 帯のアンテナ

1/2 波長ダイポール・アンテナは、エレメント長が約 6cm となるため、そのままタグの寸法以内の実装できる。一般にタグは金属物体に貼ることも想定されるため、ベタグラウンドを有するマイクロストリップ・アンテナ(パッチ・アンテナ)は、周囲の影響を受けにくいアンテナとして採用されている。

4.2 2.45GHz 帯のシミュレーション

図 12 は正方形のパッチ・アンテナを Full 3D 電磁界シミュレーションソフトウェア[5]でモデリングし、パッチとグラウンドの間に分布する電界ベクトルを表示している(透視図)。

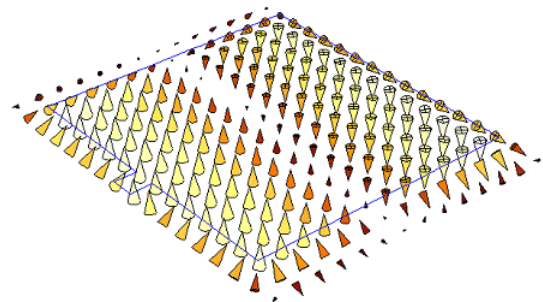


図 12 パッチとグラウンドの間に分布する電界

電界強度は中央部にゼロの領域があり、左右の縁が最大で、電界の向きは相反している。強い電界は両縁部から空間へ広がっており、これらの領域が電磁波の放射に最も寄与している。

図 13 にパッチ面上の表面電流分布を示す。

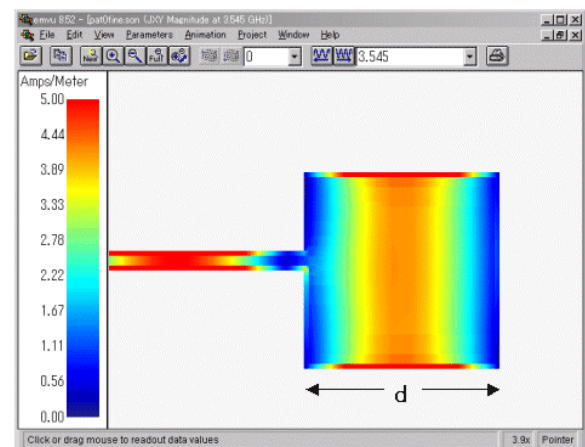


図 13 パッチ面上の表面電流分布

パッチの縁に沿って強い電流が認められるが、この寸法が 1/2 波長であるときに最大となる。このことから、このパッチ・アンテナの共振周波数は

$$f_0 = c / (2d \epsilon_r^{1/2}) \dots\dots\dots (2)$$

によって計算できる。ここに c は真空中の光(電磁波)の速度、 ϵ_r は誘電体の比誘電率である。電磁界はパッチとグラウンドの間に分布しており、波長短縮率を求めるための実効比誘電率には、材料の比誘電率をそのまま使用している。

4.3 IC チップ上に形成された微小アンテナ

図 14 はわずか 0.4mm 角の IC チップに内蔵されたアンテナ[6]であるが、2 項で示した微小コイルと同様に、近傍界の磁気結合を利用している。

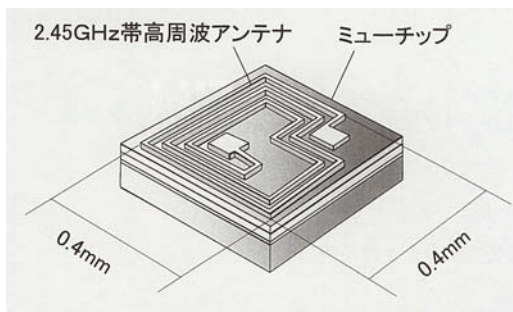


図 14 アンテナ(コイル)内蔵型ミューチップの外観

このように微細な RFID タグは、偽造防止のために紙幣に漉き込むことを前提に設計されたと考えられるが、2.45GHz においても、波長に比べて十分小さいアンテナを実装しなければならない場合は、コイルによる磁気結合が採用されている。

図 15 は 2 項と同様のシミュレーション・モデルによって得られた SPICE サブサーキットであるが、 $L = 3.5\text{nH}$ なので、共振のための C は、式(1)により、容易に求められる[7]。

```
* Analysis frequencies: 2420.0, 2660.0 MHz
.subckt SonData 1
L1 1 2 3.494169nh
RL1 2 0 1.883912
.ends SonData
```

図 15 Sonnet で合成した SPICE サブサーキット

5 周囲環境を含むシミュレーション

5.1 アンテナ近傍の金属の影響

図 16 は、図 10 のアンテナから 5cm 離れた位置に、20cm×10cm の銅板を置いたモデルである。タグのシート(厚さ 0.5mm、比誘電率 4.9)は表示していない。

図 17 は銅板がアンテナから 1cm 及び 5cm 離れている場合と、障害物がない場合(図 10)の S_{11}

を重ねて表示したグラフである。銅板が近づくに連れて S_{11} (反射係数)が大きくなるので、アンテナに加えた電力が放射されにくくなると考えられる。

タグは、リーダライタから送られた電磁エネルギーを受信することで IC が動作し、その後自らも信号を送信するシステムである。従ってアンテナは、送信・受信ともに使用されることになる。一般に電磁界シミュレーションでは、アンテナを励振したときの応答を得るため、送信アンテナとしての評価と考えられる。しかしアンテナの可逆性から、送信アンテナとして得た特性値を、受信時のそれとして適用している。

電磁界シミュレーションでリーダライタとタグを解析空間にモデリングし、例えば前者に Port 1、後者に Port 2 を設定すれば、S パラメータや Z パラメータによって、到達する電磁エネルギー量を評価できる(具体例は紙幅の都合で割愛する)。

このようにダイポール・アンテナは、自由空間では高性能だが、近傍の金属の影響を受けやすいことがわかった。アンテナのまわりの電界ベクトルは、その多くが近傍の金属板に向かうことを考えれば、空間に押し出されて放射に寄与する電磁エネルギー量が減ることも想像できる。

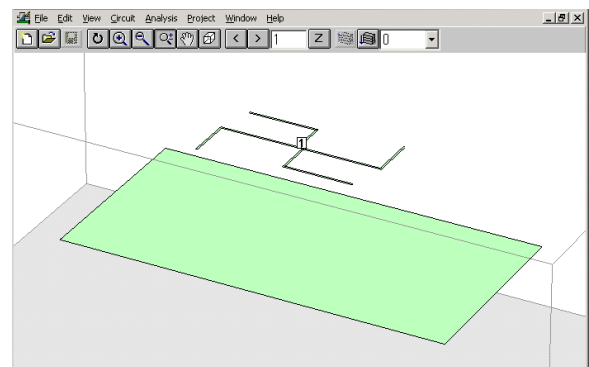


図 16 アンテナから 5cm の位置に銅板を置いたモデル

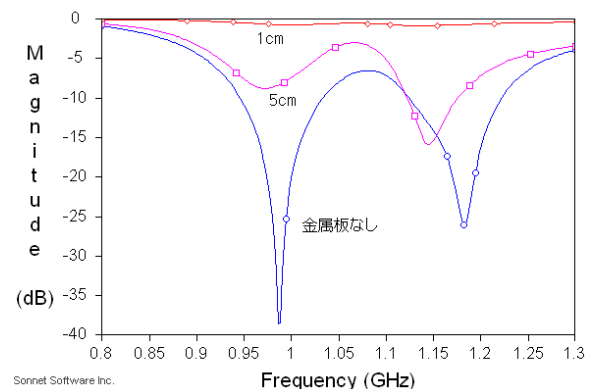


図 17 銅板の位置とアンテナの S_{11} の変化

5.2 アンテナ近傍の誘電体の影響

図 18 は厚さ 1mm のガラス板(比誘電率 7.0)の近

傍に、図 10 のアンテナを置いたときの S_{11} を重ねて表示したグラフである。

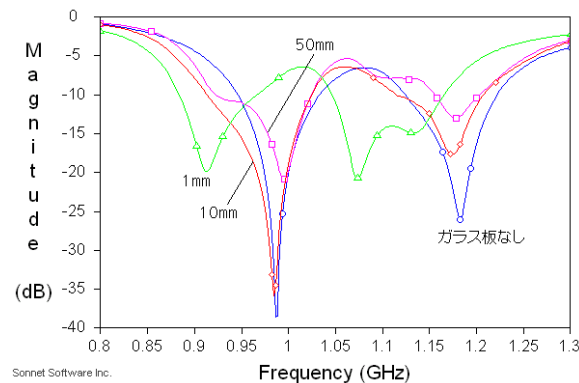


図 18 ガラス板の位置とアンテナの S_{11} の変化

ガラス板をアンテナに 5cm、1cm と近づけても大きな変化はみられなかった。しかし距離が 1mm になると、共振周波数は 100MHz ほど低い方へシフトした。人体も誘電体(例えば $\epsilon_r = 25$)としてモデリングできるが、アンテナを手で握った状態でも、やはり共振周波数が低くなる現象が起こることが考えられる。

このようにさまざまな周囲環境の変化を想定すれば、タグのアンテナはできる限り広帯域に設計しておいたほうがより安全といえる。また日・米・欧で少しずつ周波数が異なる 900MHz 帯の RFID タグは、広帯域化の設計により、一つのアンテナで3つのバンドをカバーすることが可能になる [8][9]。

6 まとめ

13.56MHz、900MHz 帯、2.45GHz と、異なる周波数を用いる RFID タグのアンテナ設計において、いずれも実装上の要求寸法である 10cm 程度に納めるためのアンテナの小型化技法を、電磁界シミュレーション・ソフトウェアを用いて検証する具体的な方法を示した。タグはさまざまな物体に貼り付けて使用することを前提としており、アンテナは周囲環境の影響を大きく受ける。電磁界シミュレーションは、アンテナ単体のみならず、予めさまざまな実装状態を含むモデリングが可能であり、効率的な RFID タグのアンテナ設計支援に有用であることを確認した。

参考文献

- [1] BYTE LAB, 「無線 IC タグはどこまで読めるか」, *日経バイト*, pp.72-83, Jun. 2004
- [2] 小暮裕明, 「電磁界シミュレータで学ぶ ワイヤレスの世界」, *CQ 出版社*, 2001 付属 CD-ROM に無償版の Sonnet Lite を収録。下記 Web から、最新版をダウンロードできる。 <http://www.sonnetsoftware.co.jp>
- [3] 小暮裕明, 「電磁界シミュレータで学ぶ 高周波の世界」, *CQ 出版社*, 1999 付属 CD-ROM に無償版の Sonnet Lite を収録。
- [4] 米国 Matrics 社の下記 Web より引用
<http://www.matrics.com/products/tags.shtml>
- [5] C. Christopoulos, "The Transmission-Line Modeling Method TLM", *IEEE PRESS IEEE 1995* TLM 法による Full 3D 電磁界シミュレータである Micro-Stripes を使用。 <http://www.microstripes.com>
- [6] 日立製作所のアンテナ内蔵型ムーチップの発表資料(下記 Web)より引用
http://www.kumikomi.net/article/news/2003/09/02_02.html
- [7] 小暮裕明, 「もう一度学ぶ電磁気学の世界, 連載第 3 回, マクスウェル登場」, *Design Wave Magazine*, *CQ 出版社*, pp.131-138, May. 2004
- [8] James C. Rautio "A Design Example of a 900MHz RFID Antenna", Sonnet Seminar 2004 at MWE 2004 Yokohama, 下記 Web から、pdf ファイルをダウンロードできる。
http://www.sonnetsoftware.co.jp/product/seminar/mwe2004/vgr_J.pdf
- [9] 小暮裕明, 「もう一度学ぶ電磁気学の世界, 連載第 10 回, 900MHz 帯 RFID タグのアンテナ」, *Design Wave Magazine*, *CQ 出版社*, Apr. 2005 掲載予定

連絡先

連絡先氏名	小暮 裕明
所属機関	小暮技術士事務所
所在地	〒145-0071 東京都大田区田園調布 5-37-5-303
電話番号	(03)5483-7047
FAX 番号	(03)5483-7048
E-mail	kogure@kcejp.com