

機関番号：37102

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008 ~ 2010

課題番号：20760251

研究課題名 (和文) アクティブRFIDを用いた屋内センサのための電波伝搬シミュレータの開発

研究課題名 (英文) Development of wave propagation simulator for indoor sensor with active RFID

研究代表者

松岡 剛志 (MATSUOKA TSUYOSHI)

九州産業大学・工学部・准教授

研究者番号：40325551

研究成果の概要 (和文)：

CIP法をベースとしてアクティブRFIDを用いた屋内センサのための電波伝搬シミュレータを開発した。CIP法のスキームに2次補間を組み合わせることで、計算精度向上を実現した。さらに誘電体、金属が混在する空間にも適用できる計算スキームに拡張した。次に屋内環境を模擬した誘電体、金属が混在する空間に対して行なった電波伝搬シミュレーション結果は実験結果と極めて良い一致を示した。

研究成果の概要 (英文)：

A simulator of electromagnetic wave propagation for active RFID system has been developed. The simulator is based on the CIP method improved by introducing the quadratic interpolation to multi-dimensional CIP scheme. The scheme has been modified to apply to the space with dielectrics and conductors. The simulations of 2D wave propagation in some building models have been performed and the numerical results are good agreement with those obtained by experimental studies for the same models.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：波動情報工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：電波伝搬実験、電波伝搬シミュレーション、媒質の電気定数

## 1. 研究開始当初の背景

アクティブ型RFIDに関する研究は、通信の参照モデルにおける上のレイヤ、つまり無線通信ができるという条件の下でのネットワークアプリケーションやそれらを利用したビジネスモデルが多い。しかし、実際のシステム構築においては、むしろ下のレイヤ、つまり電波伝搬環境や通信方式等の物理レイヤが重要となる。

RFIDによる通信の物理レイヤの要素は、

大きく a) 電波伝搬、b) アンテナ c) 通信方式の3つに分けられる。アンテナに関しては、リーダライタよりもRFIDタグのアンテナの開発が必要であり、等方指向性を持つ小型アンテナの研究・開発が進められている。通信方式は、通信システムでのサービスの内容や利用環境、電波法などを踏まえて決定される。一方、電波伝搬に関する研究は、数値シミュレーションと実験の両方からのアプローチがある。

数値シミュレーションは、計算対象をモデル化する際、実際に即したパラメータの選択が現実的に不可能である。また想定した環境で実験を行うことが出来ればよいが、費用や時間を考えると現実的ではない。従って、数値シミュレーションに実験的な要素を加味することができれば、より現実に即した電波伝搬環境を把握することができる。そしてそれが効率的な RFID システムの実現につながる。

## 2. 研究の目的

本研究は、アクティブ型 RFID システムを建物内に導入する際の基となる屋内電波伝搬環境シミュレータを開発する。開発するシミュレータには実験的要素を導入する。この課題を実現するために、以下の課題に取り組む。

- (1) コンクリート壁による電波の反射・透過特性を測定する。統計的な性質を調べるために複数のコンクリート壁について測定し、かつ温度や湿度が異なる環境でも測定を行う。
- (2) (1) の測定結果と同じモデルでのシミュレーション結果を比較し、コンクリート壁の電気定数（誘電率及び導電率）を推定し、コンクリートの誘電率と導電率の相関図を提案する。
- (3) 多次元電波伝搬問題で、完全導体を取り扱えるように CIP 法を改良する。
- (4) 建物の内部構造、通信速度、通信方式を設定できる屋内電波伝搬シミュレータを開発する。その際、屋内のコンクリートの電気定数は、(2) で求めた誘電率と導電率の相関図から決定され（実験的要素の導入）、場所によって異なった値を取るよう設定する。シミュレータ出力は、平均電界強度や BER 特性である。

## 3. 研究の方法

本研究は、アクティブ型 RFID システムを建物内に導入する際の基となる建物内電波伝搬環境を可視化できるシミュレータを開発することが目的である。そのために以下の方法で研究を進めた。シミュレータとなる解析方法としては、位相特性が優れている CIP 法を選択した。

- (1) 建物の主要構成媒質の電波の透過・反射特性から媒質の電気定数を評価する方法を提案し、実施する。
- (2) 誘電体および導体を含む空間に対して適用できるように CIP 法を拡張する。
- (3) CIP 法の位相特性を維持したまま、CIP 法の計算効率を向上させる。
- (4) 屋内モデルに対して計算機シミュレー

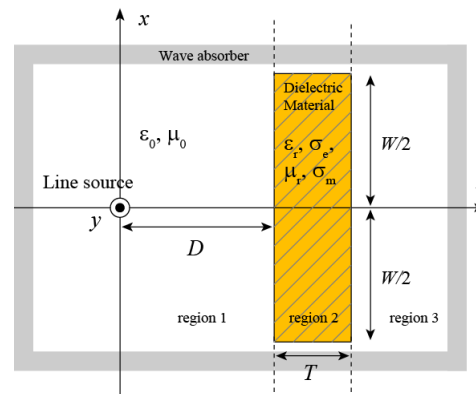
ションを行い、同じモデルに対して得られた実験結果と比較することによりシミュレータの有効性を確認する。

なお、解析および実験はシミュレータの有効性を確認するために 2 次元問題を対象とした。伝搬実験は、モデルを導体板で挟むことによりイメージ的に 2 次元空間を実現した。シミュレーションの 3 次元化は 2 次元解析を容易に拡張可能である。

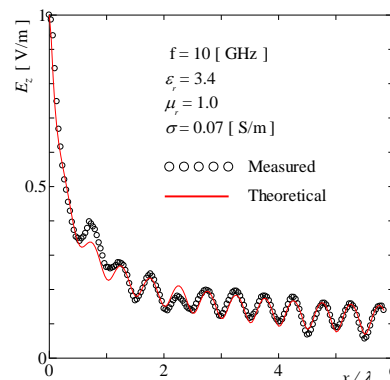
## 4. 研究成果

### (1) 物質の電気定数測定法の提案と評価

建造物図面から電波伝搬環境をシミュレータに反映させるためには、建造物の構成物の電気定数を的確に設定する必要がある。そのため、電波伝搬実験と理論解析から、電気定数を推定する方法について検討した。本研究では、円筒空間定在波を用いて電気定数測定法を提案し、その検証を行った。円筒空間定在波法は、線状波源からの放射波と媒質からの反射波から構成される空間定在波を測定することにより媒質の電気定数を推定する方法である。



(a) 問題構成図



(b) 空間定在波の実験値及び計算値

図 1 空間定在波による媒質の電気定数推定結果

図1 (a) に問題構成図を示す。波源と媒質との間に発生する円筒空間定在波は、媒質の電気定数によって変化することを利用する。媒質の電気定数である誘電率と導電率を変化させながら実験値と比較し、両者の差が最も小さくなった誘電率および導電率をその媒質の電気定数とする。図1 (b) に媒質を幅  $T=45\text{mm}$  のベークライトとした時の空間定在波の様子を示す。このとき理論値は比誘電率 3.4、導電率 0.07 と設定し計算した。この図より両者はよく一致しており、本測定法では、比誘電率 3.4、導電率 0.07 がベークライトの電気定数と評価された。比較のために同軸プローブ法による測定を行い、その結果、比誘電率が 3.72、導電率が 0.072 であった。本測定ではベークライトの側面、同軸プローブ法ではベークライトの表面を測定したため両者に若干の誤差が見受けられるが、ほぼ同じ結果が得られていると考えられる。また、幅の異なるベークライト、様々な幅の亚克力に対しても適用し、測定法の有効性を確認した。

## (2) CIP 法の拡張

導体が存在する空間の電波伝搬解析に

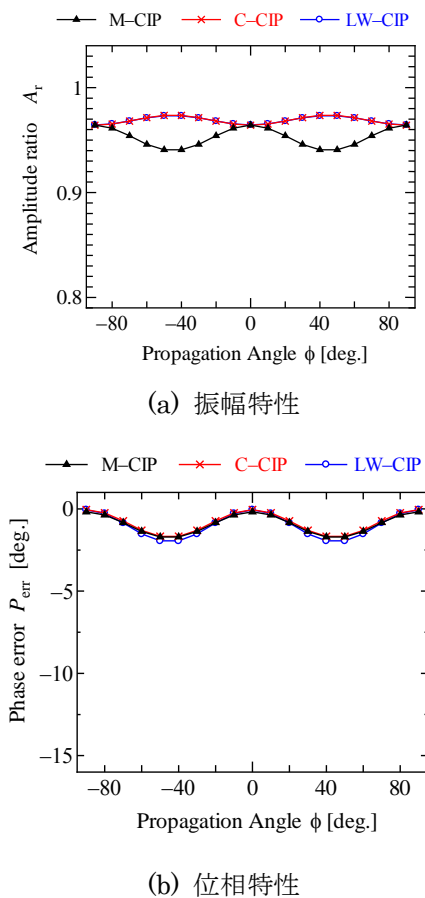


図2 各種 CIP 法の伝搬特性 ( $\Delta s$ : 空間刻み幅 $=\lambda/15$ 、伝搬距離  $10\lambda$ )

CIP 法を利用できるようにするため、CIP 法の計算において、導体表面上で設定する境界条件について検討した。本研究では、従来提案されている電磁界だけの条件に加えて、電磁界の空間微分値の条件も導入している。導入した境界条件を評価するために、導体角柱及びなめらかな曲線境界を有する導体円柱が存在する空間の電磁界分布を CIP 法で計算し、その結果を FDTD 法および理論解の結果と比較した。CIP 法の結果は、FDTD 法及び理論解と非常によく一致しており、導体が存在する空間での電波伝搬解析が可能となる境界条件を提案できた。

## (3) CIP 法の計算効率の向上

### ① 2次補間の導入とその有効性

CIP 法による多次元解析法はこれまでいくつか提案されている。その中で簡単に導入できる M 型 CIP 法、高精度だがメモリ使用量が多くなる C 型 CIP 法と呼ばれる方法がある。本研究では、メモリ量は M 型 CIP 法と同じにし、電磁界計算過程の一部において M 型 CIP 法では一次近似を用いている計算を、二次近似で計算する手法を提案した。この新しい計算手法を 2次元電波伝搬問題に適用し、電波伝搬特性を評価した。その結果、メモリ使用

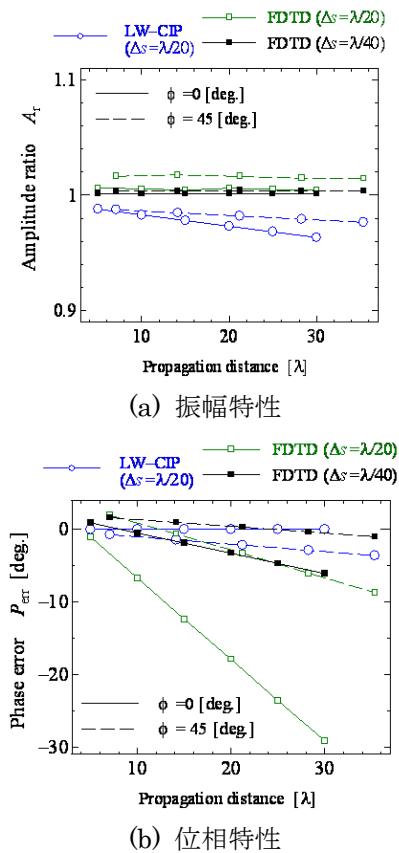


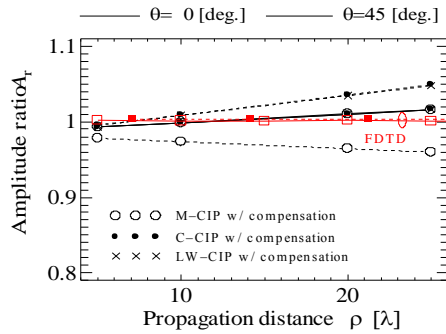
図3 CIP 法と FDTD 法の伝搬特性 ( $\Delta s$ : 空間刻み幅)

量は従来のM型CIP法と同等であるにも関わらず、かつCIP法固有の優れた位相特性はそのまま、振幅特性が改善された。その特性は高精度の計算ができるC型CIP法とほぼ同じ特性であった。その伝搬距離特性の結果を図2に示す。図においてLW-CIPが本研究で提案している計算手法である。

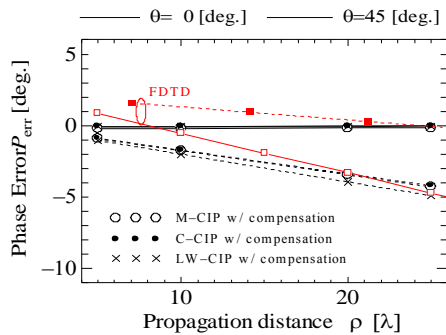
次に提案した手法を電磁界解析に広く利用されているFDTD法と比較した。図3は2次元電波伝搬解析における各計算手法の伝搬距離に対する振幅特性および位相特性を示している。図において $\phi$ はx軸からみた伝搬方向を示している。この結果よりCIP法と同程度の位相特性を従来のFDTD法で得るためには、空間刻み幅を1/2以下にする必要があることがわかる。しかしCIP法は振幅特性がやや悪いことが分かる。

### ②振幅特性の改善

位相特性をそのままに、振幅特性を改善する方法として、時間ステップごとに振幅補正をする簡易な手法を導入し、2次元問題に適用した。本研究で用いているCIP法による多次元解析は1次元解析を複数回実行することにより可能となる、方向分離法を用いているため、振幅補正項は1次元解析での分散特性より求めた。M型CIP法、C型CIP法、そして本研究で開発した2次補間と組み合わせたCIP法(LW-CIP法)に対して簡易振幅補正を適用し伝搬特性を計算した結果を



(a) 振幅特性



(b) 位相特性

図4 振幅補正の効果

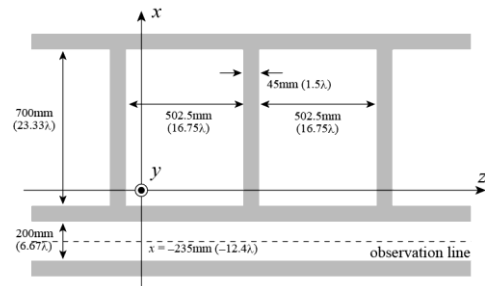
図4に示す。CIP法の位相特性の有効性は保ったままで(図4(b))、M型CIP法では振幅補正の効果が見られた。しかしC型CIP法、LW-CIP法では1次元のCIP法の分散特性の結果をそのまま用いると振幅過補正してしまうことが明らかになった。

### (4) 建物モデル内の電波伝搬解析

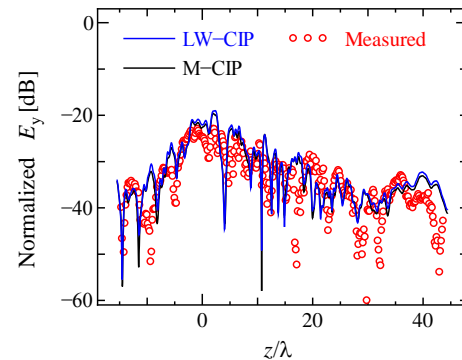
コンクリート建造物モデルを構築し、LW-CIP法を用いてそのモデル内の電波伝搬解析を行い、同じモデルで行った電波伝搬実験結果と比較した。電波伝搬シミュレーションにおいて、コンクリートは均質媒質として取り扱い、その電気定数はコンクリートの典型的な値である比誘電率 6.0、導電率 0.052 [S/m] を用いた。

#### ① コンクリート建造物

図5(a)は通路のあるコンクリート建造物内のモデルである。このモデルにおいて、座標原点に線状波源がある場合、LW-CIP法により電波伝搬解析して得られた通路上の電界強度分布を図5(b)に示す。図にはM型CIP法による結果及び縮小モデルを用いて行った実験結果も併せて掲載している。図よりLW-CIP法はM型CIP法よりもほんのわずかであるが振幅特性が改善していることがわかる。また実験結果と計算値と比較した結



(a) 解析モデル



(b) 通路上の電界強度分布

図5 コンクリート建造物モデルでの電波伝搬シミュレーション結果

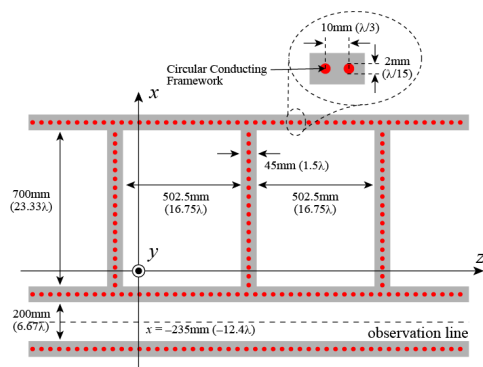
果、両方の CIP 法による結果は、実験結果を的確に説明していることがわかる。

## ② 金属骨材を含むコンクリート建造物

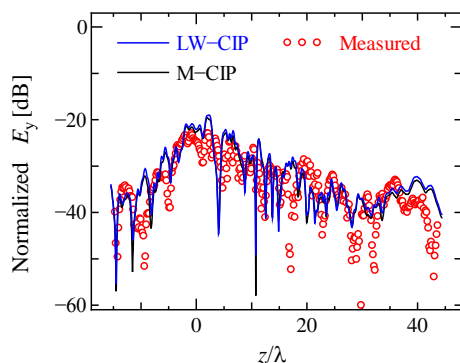
実際の建造物は鉄筋コンクリートを含む。金属骨材を含むコンクリート建造物モデルに対してもコンクリート建造物と同様に電波伝搬解析を行った。図 6 (a) に設定した建造物モデルを示す。このモデルにおいて線状波源が座標原点にあるときの、CIP 法による通路上の電界強度分布の計算値および電波伝搬実験の結果を比較したものを図 6 (b) に示す。図より LW-CIP 法の結果は、わずかに振幅特性が改善していること、両方の CIP 法の計算値は実験値とよく一致していることがわかる。よって LW-CIP 法は、金属骨材を含むコンクリート、つまり誘電体と金属を含む空間での電波伝搬の様子をシミュレートできることを示した。

現在開発したシミュレータは 2 次元解析限定ではあるが、電界強度分布を出力できるようになっている。

屋内モデルでの電波伝搬シミュレーションに関する研究は、スーパーコンピュータを用



(a) 解析モデル



(b) 通路上の電界強度分布

図 6 金属骨材を含むコンクリート建造物モデルでの電波伝搬シミュレーション結果

いた FDTD 法による大規模計算、そして FDTD 法とレイトレス法を組み合わせた手法が報告されている。また電磁界の高速計算に関しては、計算の並列化による手法、特に GPGPU を用いた手法が注目を集めている。そうした中、本研究のように実験と連携したシミュレータの開発を行なっている例は少ない。

今後は建築物の電気定数の不確定さを組み込んだシミュレータに拡張する予定である。さらにシミュレーションにおける計算誤差だけでなく、電気定数等の問題設定から生じるグリッドの粗さによるモデル誤差についての検討、GPGPU による高速化にも取り組む予定である。さらに将来の UWB 通信を想定し、広帯域パルス波に適用できるように拡張することも視野に入れている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Tsuyoshi Matsuoka, 2D Wave Propagation Characteristics of the CIP Method with Amplitude Error Compensation, Proc. 2010 International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications, 査読有, 2010
- ② Tsuyoshi Matsuoka, Mayumi Matsunaga and Toshiaki Matsunaga, A Measurement Method of Electrical Parameters of Dielectric Materials by Using Cylindrical Standing Waves, Proceedings of International Symposium on Antennas and Propagation, 査読有, vol. 1, 2009, pp. 584-587.
- ③ Tsuyoshi Matsuoka, Mayumi Matsunaga and Toshiaki Matsunaga, Electromagnetic Wave Propagation Analysis by Using the CIP Method and Quadratic Interpolation, Proc. 2009 IEEE AP-S International Symposium on Antennas and Propagation and 2009 USNC/URSI National Radio Science Meeting, 査読有, 2009.
- ④ Tsuyoshi Matsuoka, Mayumi Matsunaga and Toshiaki Matsunaga, Analysis of Wave Propagation in a Concrete Building Model by the CIP Method, Proceedings of International Symposium on Antennas and Propagation, 査読有, 2008, pp. 798-801.

[学会発表] (計 12 件)

- ① Tsuyoshi Matsuoka, Study on Amplitude

Error Compensation for 2D Wave Propagation Analysis by the Type-M CIP Method, 第 63 回電気関係学会九州支部連合大会, 九州産業大学 (福岡市), 2010 年 9 月 25 日

- ② 松岡 剛志、松永 真由美、松永 利明, 2 次補間と CIP 法を用いた建造物モデル内の電波伝搬解析, 電子情報通信学会総合大会, 東北大学 (仙台市), 2010 年 3 月 18 日
- ③ 松岡 剛志、松永 真由美、松永 利明, 2 次補間と CIP 法を用いた電磁波散乱解析, 映像情報メディア学会・放送技術研究会, 佐賀大学 (佐賀市), 2010 年 1 月 29 日
- ④ 松岡 剛志、松永 真由美、松永 利明, 雑音を含むデータを用いた円筒空間定在波による媒質定数推定, 第 62 回電気関係学会九州支部連合大会, 九州工業大学 (飯塚市), 2009 年 9 月 29 日
- ⑤ 鴛海達也、松岡剛志、松永真由美、松永利明, 円筒空間定在波を用いた媒質定数の測定, 電子情報通信学会・総合大会, 愛媛大学 (松山市), 2009 年 3 月 19 日
- ⑥ 松岡 剛志、松永 真由美、松永 利明, 金属骨材入りコンクリート建造物モデル内の CIP 法による電波伝搬解析, 電子情報通信学会・総合大会, 愛媛大学 (松山市), 2009 年 3 月 18 日
- ⑦ 松岡 剛志、松永 真由美、松永 利明, CIP を用いた曲線形通路を有する建物内での電波伝搬解析, 電子情報通信学会・アンテナ伝搬研究会, 福岡大学 (福岡市), 2009 年 1 月 23 日
- ⑧ 鴛海達也、松岡剛志、松永真由美、松永利明, 円筒空間定在波を用いた金属裏打ちした媒質の誘電率の測定, 映像情報メディア学会・放送技術研究会, 福岡大学 (福岡市), 2009 年 1 月 22 日
- ⑨ 松岡 剛志、松永 真由美、松永 利明, CIP 法と 2 次補間を利用した電波伝搬解析, 電子情報通信学会・マイクロ波研究会, 長崎大学 (長崎市), 2008 年 11 月 20 日
- ⑩ 鴛海達也、松岡剛志、松永真由美、松永利明, 円筒空間定在波および透過波を用いた媒質の誘電率の測定, 第 61 回電気関係学会九州支部連合大会, 大分大学 (大分市), 2008 年 9 月 24 日
- ⑪ 松岡 剛志、松永 真由美、松永 利明, CIP 法を用いた円柱導体がある空間での線状波源からの放射電磁界の計算, 第 61 回電気関係学会九州支部連合大会, 大分大学 (大分市), 2008 年 9 月 24 日
- ⑫ 松岡 剛志、松永 真由美、松永 利明, 角柱完全導体がある空間での線状波源による放射電界の CIP 法を用いた解析, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 明治大学 (川崎市), 2008 年 9 月 17 日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松岡 剛志 (MATSUOKA TSUYOSHI)  
九州産業大学・工学部・准教授  
研究者番号: 40325551