

# アンテナ経由の機器内電磁干渉問題に対応した設計手法の開発

Development of Design Method for Intra Electromagnetic Compatibility Problem via Antenna

前川 智 哉 山 田 徹  
Tomoya Maekawa Toru Yamada

## 要 旨

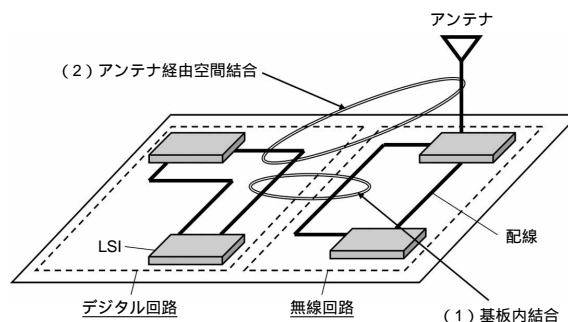
無線通信機器の自家中毒問題に対応した新たな設計手法を開発した。近年、デジタル回路で発生したノイズが機器自身のアンテナを経由して受信回路に混入し、受信感度が劣化する自家中毒問題が増加している。本問題を解決するためには、設計の初期段階でノイズ源となる部品の配置やアンテナ構造の違いによる受信感度への影響を定量化する設計手法の開発が必要となる。筆者らは、アンテナとノイズ源 個々の磁界分布に着目し、両者の磁界分布の相関から受信感度を定量化する設計手法を提案した。そして、本手法の妥当性について携帯電話を模擬した評価モデルを用いて検証し、その計算アルゴリズムを組み込んだノイズ解析ツール（PanCROSS）を開発した。さらに、本ツールを携帯電話設計へ適用し、受信感度の測定値と計算値との間に良好な一致が得られることを確認した。

## Abstract

A novel design method solving the "Intra EMC (Electromagnetic Compatibility) Problem" for mobile equipment has been developed. Recently, the noise generated from digital circuits leaks into the receiver circuit via the antenna, and this reduces the receiver sensitivity. To solve this problem, a new design method which quantifies the influence when the structure of antennas or the layout of noise source components changes is needed. We have developed a novel design method according to the correlation between the magnetic distributions of antenna and noise source and evaluated the validity of the proposed method using a TEG (Test Element Group) imitating a portable telephone. A noise analysis tool (PanCROSS) including the calculation algorithm was released. In addition, it was confirmed that a good correlation between calculated results and measured results was obtained using an actual portable telephone.

## 1. はじめに

近年、無線通信機器の高機能化・小型化に伴い、機器内で発生した微弱なノイズが受信回路に混入し、受信感度が劣化する問題が増加の一途をたどっている<sup>1)</sup>。本問題は、機器間で発生する従来のEMC (Electromagnetic Compatibility) 問題とは異なり、機器内部で発生する「自家中毒問題」、あるいは「イントラEMC問題」と呼ばれている。第1図に、自家中毒問題発生メカニズムを示す。無線通信機器は、ノイズの発生源となるデジタル回路とノイズを受ける無線回路から構成される。デジタル回路を構成するCPU、メモリや電源ICなどの部品はノイズ発生源となることから、これらの部品をノイズ源と呼ぶ。自家中毒問題の発生原因は、(1) 基板内結合と(2) アンテナ経由空間結合の2つに大別される。前者は、ノイズ源となる部品間をつなぐ配線間の電磁界結合によるものであり、市販されているEMI (Electromagnetic Interference) チェックツールなどを使えば容易に評価することができる。一方、後者は、ノイズ源からの放射ノイズがアンテナを経由した空間的な電磁界結合によるものであり、従来、ノイズ源の近傍電磁界分布を測定する方法や無線通信信号にノイズを重ねし、ビット誤り率を推定する方法<sup>1)</sup>などの検討が行われているが、経路となるアンテナ特性



第1図 機器内部の概略

Fig. 1 Outline in equipment

を考慮した評価を行うことができない。また、電磁界解析ソフトを用いてシミュレーションを行う場合、動作状態のノイズ源を模擬することが難しく、実際の機器では計算規模も大きくなるため実用的ではない。

一般に、機器などの開発工程は、設計の初期段階において部品配置や全体構造を設計する「構想設計」を行い、次に配線パターンなどを設計する「基板設計」を行う。しかし、受信回路に混入するノイズを事前に予測する設計手法は確立されていないため、現状の開発ではCut & Tryによる事後的なノイズ対策が中心となって開発期間が長期化し、対策コストの増大が深刻な問題となっている。し

たがって、自家中毒問題を根本的に解決するためには、設計の初期段階である構想設計でノイズ源となる部品の配置やアンテナ構造の違いによって受信感度を定量化する設計手法を開発する必要がある。

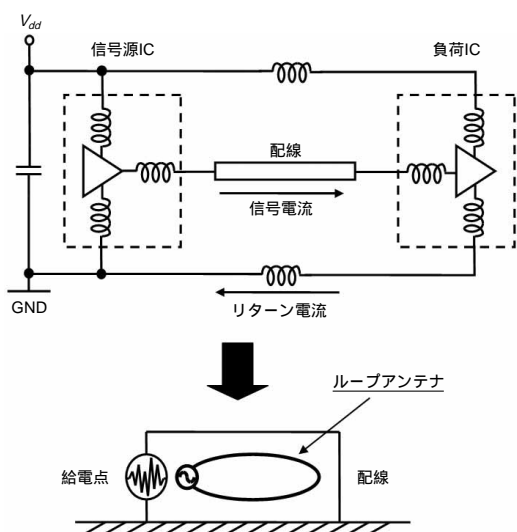
そこで、筆者らはアンテナ特性を考慮したノイズ源の最適配置場所を定量的に把握する設計手法を提案した。まず、ノイズ源をアンテナとして模擬し、無線通信アンテナとの2つのアンテナの電磁結合問題としてとらえた。すなわち、アンテナ間の結合特性の強弱と近傍磁界分布の重なり量が同じ変化傾向を有することに着目し、ノイズ源の最適配置場所を近傍磁界分布の重なり量から算出した相関係数を用いて評価することを試みた。そして、本手法の妥当性について携帯電話を模擬した評価モデルを用いて検証し、その計算アルゴリズムを組み込んだノイズ解析ツール（PanCROSS）を開発した。さらに、本ツールを携帯電話設計へ適用し、受信感度の測定値と計算値との間に良好な一致が得られることを確認したので報告する。

## 2. 磁界分布相関を用いた設計手法の開発

本章では、自家中毒問題を解決するための設計手法の導出について述べ、提案手法の妥当性について検証する。

### 2.1 新たな設計手法の提案<sup>2)</sup>

最初に、デジタル回路を放射ノイズの発生源となるアンテナとしてモデル化を行った。第2図に、ノイズ源のモデル化を示す。一般的なデジタル回路は信号源ICと負荷ICと2つのICを接続する配線から構成され、ICの動作によ



第2図 ノイズ源のモデル化  
Fig. 2 Modeling of noise source

り配線に信号電流が流れ、GNDにリターン電流が流れることから、ループアンテナとしてモデル化した。そして、無線通信アンテナとの2つのアンテナに関する電磁結合問題としてとらえた。

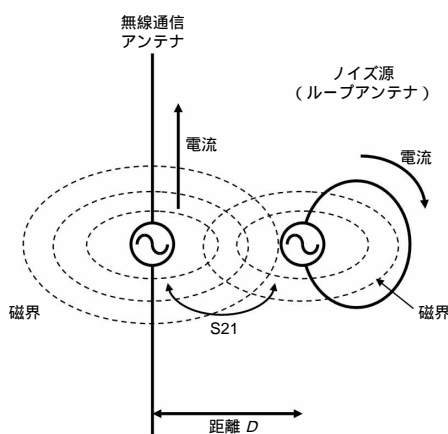
一般に、2つのアンテナの電磁結合問題は、アンテナの給電部にネットワークアナライザの各ポートを接続すれば結合特性（S21）として容易に測定することができる<sup>3)</sup>。しかし、ノイズ源には明示的な給電点が存在しないため、ノイズ源とアンテナ間の結合特性を測定することは困難となる。そこで、結合特性（S21）に代わる新たな指標が必要となることからアンテナの近傍磁界の重なりに着目した。

第3図に、磁界分布の様子を示す。第3図において、アンテナ間距離  $D$  が近い場合、電磁結合が強くなるとともに近傍磁界の重なりも多くなる。一方、距離  $D$  が遠い場合、電磁結合は弱くなるとともに近傍磁界の重なりも少なくなる。すなわち、電磁結合の強弱と近傍磁界の重なり度合いが同じ変化傾向となることから、近傍磁界の重なり度合いを定量化する指標として新たに相関係数を導入した。2つの可変量を  $(x, y)$  とすると、相関係数  $C$  は次式で定義される。

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \dots\dots\dots (1)$$

相関係数は -1から1を変化するパラメータであり、2つの量  $(x, y)$  の分布がまったく同じである場合には  $C = 1$  となり、2つの量  $(x, y)$  の分布の強弱が互いに正反対に分布する場合には  $C = -1$  となる。

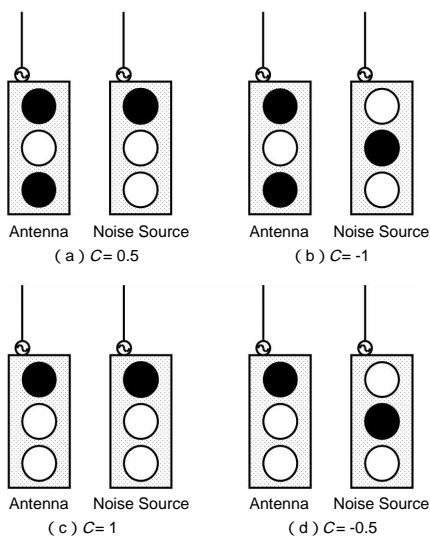
第4図に、磁界分布と相関係数の関係を示す。磁界分布はさまざまな形状が想定されるが、磁界分布と相関係数



第3図 磁界分布の様子  
Fig. 3 Schematic view of magnetic distributions

との関係を説明する単純化した4つの事例として、第4図に示すような磁界分布を考える。第4図において、は磁界分布の強い場所（ピーク）を、は磁界分布の弱い場所（ヌル）を示す。第4図(a),(b)はアンテナ磁界分布のピークが2つの場合、第4図(c),(d)はピークが1つの例である。なお、ノイズ源が存在しなければ自家中毒問題が発生しないことから、ノイズ磁界分布の強い場所（ピーク）にのみ着目すればよい。第4図(a)では、1つのノイズ源が2つのアンテナ磁界分布のピークの一方に配置していることから  $C=0.5$  となり、第4図(b)では、1つのノイズ源がアンテナ磁界分布のヌルと一致していることから  $C=-1$  となる。一方、第4図(c)では、1つのノイズ源が1つのアンテナ磁界分布のピークと一致していることから  $C=1$  となり、第4図(d)では、1つのノイズ源が2つのアンテナ磁界分布のヌルの一方に配置していることから  $C=-0.5$  となる。なお、第4図(a)および(d)において、ノイズ源の位置がの場合でも相関係数は同じ値となり、とくに第4図(d)の場合にはノイズ源の最適配置場所が複数存在することを示している。

第4図(a)のように、アンテナの磁界分布のピークの個数がノイズ磁界分布のピークの個数（通常、ノイズ源の個数と一致する）よりも多い場合、それぞれのピークが一致しても相関係数は1とはならない。同様に、第4図(d)のようにアンテナの磁界分布のヌルの個数がノイズ磁界分布のピークの個数よりも多い場合、アンテナ磁界分布のヌルとノイズ磁界分布のピークが一致しても相関係数は-1とはならない。このように、双方の磁界分布のピークとヌルの個数によって相関係数の取り得る最大値と



第4図 磁界分布と相関係数の関係

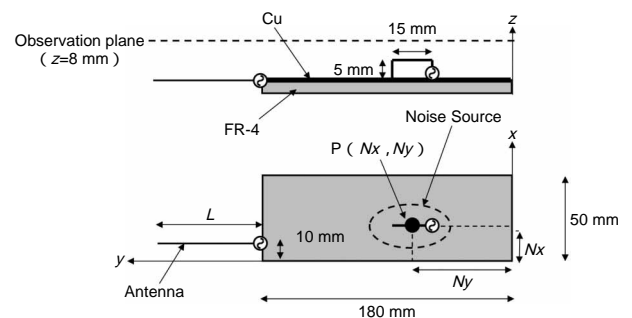
Fig. 4 Relationship between magnetic distribution and correlation coefficient

最小値は-1と1の間で変化する。

以上の検討より、相関係数が変化する範囲において、相関係数が小さくなるほどノイズ源の最適配置場所としてふさわしいことがわかる。

## 2.2 評価モデルを用いた検証

第5図に、提案手法の妥当性を検証した評価モデルの構成を示す。検証は、電磁界解析により行った。評価モデルは携帯電話を模擬したものであり、基板寸法を幅50 mm、長さ180 mmとし、基板上部にはモノポールアンテナが、基板中央にはノイズ源として模擬した長さ15 mm、高さ5 mmのループアンテナが配置されている。携帯電話に代表的な周波数である900 MHzで評価を行うために、アンテナの長さ  $L$  は900 MHzで共振するように  $L=83$  mm (1/4波長) とした。本検討では、ノイズ源を模擬したループアンテナの中心  $P(N_x, N_y)$  を可変パラメータとして検討を進めた。



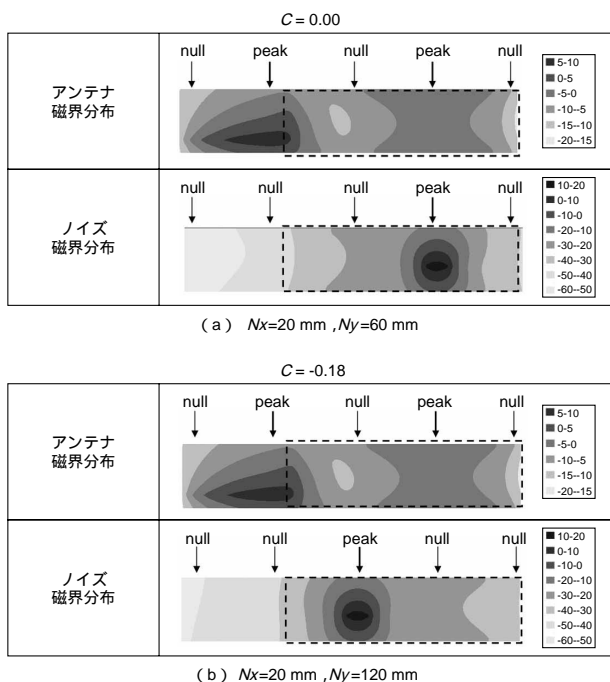
第5図 評価モデルの構成

Fig. 5 Outline of evaluation model

## 2.3 評価結果

第6図に、ノイズ源位置が異なる2つの例について磁界分布の変化を示す。第6図(a)は相関係数が大きな場合の例を、第6図(b)に相関係数が小さな場合の例をそれぞれ示す。アンテナ磁界分布はアンテナ素子周辺と基板中央部に強く分布している。これは、基板の長さが評価周波数の約半波長に相当し、電流分布が端部では最小、基板中央部では最大となるためである。相関係数の算出は、基板から高さ8 mmの観測面で基板およびアンテナ素子を含む範囲（幅50 mm × 長さ264 mm）において、2 mmピッチおきにノイズおよびアンテナ磁界強度を求め、各座標での各磁界分布の大きさをそれぞれ相関係数の定義式の  $(x, y)$  に代入することにより求めた。

第6図(a)では、アンテナ磁界分布の強い基板中央部にノイズ源が配置されているため相関係数が大きくなり、 $C=0$  となる。一方、第6図(b)では、アンテナ磁界分布



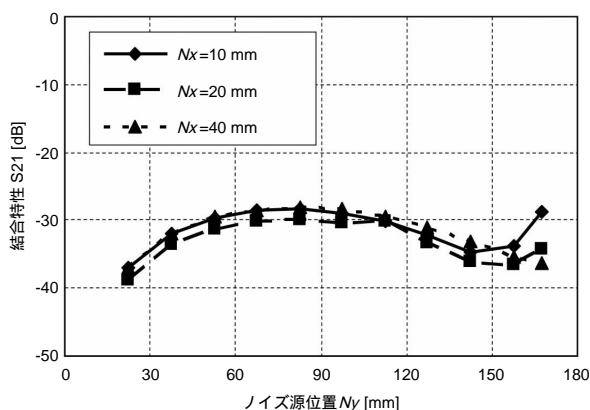
第6図 磁界分布  
Fig. 6 Magnetic distribution

の極小部分にノイズ源が配置されているため相関係数が小さくなり、 $C=-0.18$ となる。

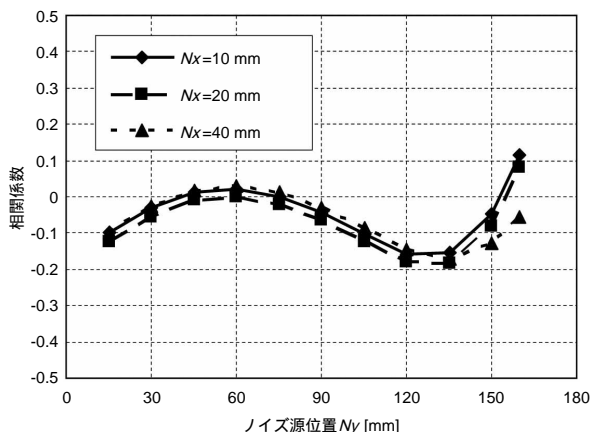
上記の結果を、第4図で述べた単純化した磁界分布と対応させて考察する。第6図に示したように、アンテナ磁界分布は2つのピークと3つのヌルが存在している。一方、ノイズ磁界分布のピークは1つである。すなわち、第6図(a)は、複数のアンテナ磁界のピークの内の1つにノイズ磁界のピークが一致している第4図(a)に対応している。一方、第6図(b)は、複数のアンテナ磁界のヌルの内の1つにノイズ磁界のピークが一致している第4図(d)に対応している。ここで、ノイズ磁界分布およびアンテナ磁界分布のピークとヌルの数の合計を5つとして第4図と同様の計算を行うと、第6図(a)では $C=0.61$ となり、第6図(b)では $C=-0.42$ となる。単純モデルの値と第5図に示す評価モデルから得られた値との差異は、評価モデルの磁界分布形状が、第4図で説明したような単純な形状ではなく、複雑な形状であり、相関係数を計算するためのポイント数が多いことに起因しているものと考えられる。

第7図に、ノイズ源の位置を変化させたときのノイズ源とアンテナ間の結合特性( $S_{21}$ )を示す。第8図は、2つの磁界分布から求めた相関係数である。第7図と第8図を比較すると、ノイズ源位置( $N_y$ )に対して結合係数( $S_{21}$ )と相関係数の傾向はよく一致しており、相関係数の最小値と結合特性( $S_{21}$ )の最小値が一致することがわかる。

上記の結果から、結合特性( $S_{21}$ )を求めることなく相



第7図 結合特性 ( $S_{21}$ )  
Fig. 7 Coupling characteristics ( $S_{21}$ )



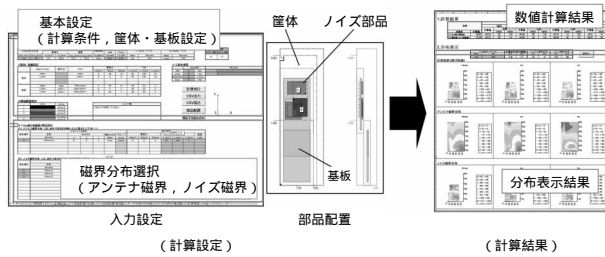
第8図 相関係数  
Fig. 8 Correlation coefficient

関係数を求めればノイズ源の最適配置が可能となる。また、事例ではノイズ源が1つの場合を示したが、複数のノイズ源が配置された場合であっても、ノイズ磁界分布を求めれば最適配置設計が可能となる。以上より、アンテナとノイズ源の磁界分布相関を用いたノイズ源の最適配置法の妥当性を明らかにした。

### 3. ノイズ解析手法のツール化

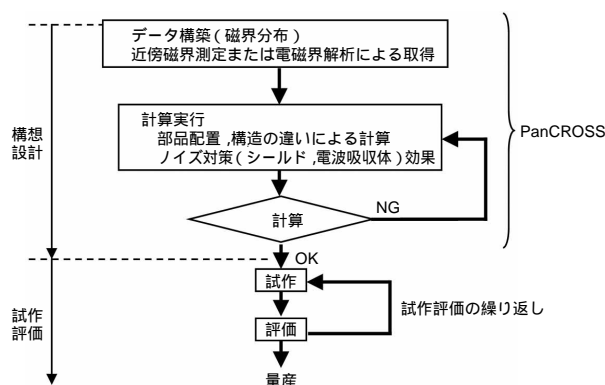
本章では、提案手法に基づく計算エンジンを組み込み、GUI環境およびデータ構築機能を盛り込んだツール(以下、PanCROSS)について述べる。第9図に、PanCROSSの概要を、第10図にPanCROSSを用いた設計フローをそれぞれ示す。第9図に示すように、PanCROSSはExcel<sup>®</sup>(注)

(注) 米国 Microsoft Corp. の米国及びその他の国における登録商標または商標



第9図 PanCROSSの概要

Fig. 9 Overview of "PanCROSS"



第10図 PanCROSSを用いた設計フロー

Fig. 10 Design flow using "PanCROSS"

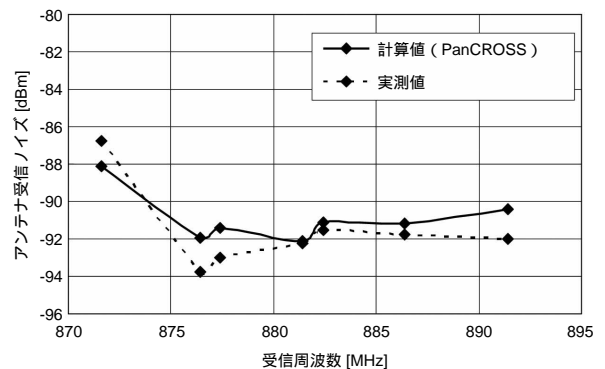
で作成しており、ユーザーが計算条件および筐体（きょうたい）・基板の形状を入力し、計算に使用するアンテナ磁界分布およびノイズ磁界分布を設定することにより計算できる。磁界分布は、第10図に示すようにPanCROSSでの計算実行前に準備する。たとえば、実測による準備の場合、ノイズ磁界分布は過去機種の種類部品や評価ボードに実装されたデバイスを測定し、アンテナ磁界分布は類似のアンテナ構成の過去機種を測定するなどの方法がある。なお、取得した磁界分布は設計資産活用の観点からデータベース化すれば、今後の設計効率向上にもつながる。その後、ノイズ源となる部品（ノイズ磁界分布）を配置し、アンテナの構造（アンテナ磁界分布）を設定し、計算を行い、受信感度を求める。また、PanCROSSでは、シールドや電波吸収体の効果を簡易的に考慮して計算することも可能である。そして、得られた値があらかじめ設定された閾（しきい）値を満足すれば試作に移行し、満足しなければ閾値を満足するまで計算を繰り返す。PanCROSSの1事例当たりの計算時間は約30秒のため、条件を変更して繰り返し計算することで最適な構造を短時間で抽出することができる。一般的な電磁界解析ソフトの場合、1事例当たり少なくとも数日～1週間程度かかる

ため、限られた設計期間内で最適構造を抽出することはできない。したがって、構想設計でPanCROSSを適用すれば1次試作の完成度が向上し、開発期間の短縮が期待できる。

#### 4. 携帯電話設計への適用事例

本章では、携帯電話開発においてPanCROSSを適用した結果について述べる。第11図に、アンテナ受信ノイズの実測値とPanCROSSによって得られた推定値の比較を示す。第11図において、横軸は受信周波数を、縦軸はアンテナ受信ノイズをそれぞれ示す。アンテナ受信ノイズはアンテナ給電点で検出されるノイズ量であり、ビット誤り率（Bit Error Rate）と相関を有する。両者の比較は、スライド型端末を用いて同一のアプリケーションを動作させ、900 MHz帯の各受信周波数にて行った。両者を比較すると最大2 dB程度の差があるが、構想設計では $\pm 3$  dB程度の範囲内で受信感度が推定できれば通常十分と考えられ、実測値も $\pm 1$  dB程度変動することを考慮すれば、実測値と計算値の傾向はよく一致していると言える。

以上の結果から、携帯電話開発の構想設計においてPanCROSSの有効性を実証することができた。



第11図 携帯電話設計への適用

Fig. 11 Application to design of portable telephone

#### 5. まとめ

本稿では、携帯機器の自家中毒問題に対応した新たな設計手法を開発し、提案手法の妥当性について携帯電話を模擬した評価モデルを用いて検証し、有効性を明らかにした。さらに、事業場の商品設計の現場で活用するために独自のアルゴリズムを組み込んだノイズ解析ツール（PanCROSS）を開発した。さらに、携帯電話開発へ適用し、受信感度との間に良好な相関を得られることを明らかにした。

近年、さまざまな機器の高機能化や地上波デジタル放送の普及により、携帯機器に無線機能が付加されるケースが増えている。これらの携帯機器などでは携帯電話と同様に多くの自家中毒問題を抱えていると考えられる。したがって、今回開発したノイズ解析ツール（PanCROSS）の展開を図っていくことにより、開発期間短縮および開発コスト削減に寄与できれば幸いである。

### 参考文献

- 1) 急増する機器内雑音無線性能を左右 日経エレクトロニクス 2007.6.18号, pp.79-86.
- 2) T. Maekawa, et al. : A method for optimal layout of noise sources using the correlation between the magnetic distribution of antenna and noise source. EMC'09/Kyoto IEICE, pp.289-292 (2009).
- 3) 小川晃一 他：ホイップと板状逆Fアンテナで構成された携帯電話用ダイバーシチアンテナの解析 電子情報通信学会論文誌B- J79-B- , No.12, pp.1003-1012.

### 著者紹介



前川智哉 Tomoya Maekawa  
PE技術開発室  
Printed Electronics & EMC Technology  
Development Office



山田 徹 Toru Yamada  
PE技術開発室  
Printed Electronics & EMC Technology  
Development Office