

電磁シールドの数値解析と評価技術に関する研究

著者	吉村 慶之
著者別名	Yoshimura, Yoshiyuki
雑誌名	博士学位論文要旨 論文内容の要旨および論文審査結果の要旨 / 金沢大学大学院自然科学研究科
巻	平成15年12月
ページ	351-358
発行年	2003-12-01
URL	http://hdl.handle.net/2297/16575

氏名	吉村慶之
生年月日	
本籍	石川県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第581号
学位授与の日付	2003年3月25日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	電磁シールドの数値解析と評価技術に関する研究
論文審査委員(主査)	長野 勇(研究科・教授)
論文審査委員(副査)	西川 清(工学部・教授) 村本健一郎(工学部・教授) 八木谷 聡(研究科・助教授) 笠原 禎也(工学部・助教授)

学位論文要旨

Abstract

Electromagnetic (EM) shielding is popularly used to suppress EM wave. To reduce effectively the EM wave using shielding material, we have to know the characteristics of the EM field theoretically. TEM, TE and TM mode waves are usually used for the estimation of EM shielding or absorption by a material. However the EM wave is actually incident on the material with arbitrarily polarization and incident angle. In this study, the EM shielding and absorption by a multi-layered material are estimated theoretically on the basis of Maxwell's equations. And we theoretically analyze the EM field in the vicinity of multi-layered materials with either a magnetic or an electric dipole source using a Sommerfeld integral. Our theoretical formulas are numerically calculated to investigate shielding effectiveness (SE) and Poynting flux. It suggests that SE is improved by an air gap between the two shields. Next, to analyze the shielding mechanism, we calculate Poynting flux radiated from a dipole source in the vicinity of shielding materials and inside them. The EM wave with the shield is attracted by the shielding materials, and SE depends on energy flow along the shielding material.

For the effective suppression of the EM wave including a complicated enclosure or a human body, it is desirable to solve for the EM wave propagation by using the FDTD numerical analysis. It is important to know the electric parameters of the shielding material for numerical analysis. On the basis of above calculation, we develop a "shielding box" for measuring the SE with little error. We propose a method to estimate unknown electric parameters of shielding materials by using the SE measurement system and the numerical calculation. Next, in order to prevent cardiac pacemakers from malfunctioning caused by EM wave, we have to use a shielding material to decrease the EM

wave intensity. We introduce the transmission coefficient into the FDTD method. This realizes three-dimensional numerical analysis of a thin shielding material as a method to solve the EM wave transmission problem, which has been conventionally considered difficult.

1. まえがき

電子情報通信機器の発展に伴い、これらの機器から放射される電磁波が周辺機器へ誤動作などの悪影響を引き起こすことがあり、あらゆる分野でこの電磁的悪影響が懸念されている。そこで、産業界では電磁波を放射しにくく、受けにくい、すなわち電磁両立性 (EMC: Electromagnetic Compatibility) を備えた機器の開発が行われるようになってきている。また、EMC は、規格によって規制値が定められており、メーカーはこれに適合するため、電波無響室などで測定し対策を行わなければならない。この EMC 対策として、電磁シールド材による電磁波遮蔽、回路パターンの変更、各種対策部品の挿入、ケーブルの引き回しの変更など各種対策法が挙げられる。

本研究では、EMC 対策の中でも電磁波伝搬を考慮したシールド技術について各種考察を行うこととする。近年の電子機器の小型、軽量化に伴い、シールド材も軽量、薄型化が望まれており、プラスチック製の板材や、繊維材に金属メッキを施した多層シールド材料が市販されるようになってきている。一般に、シールド性能を向上させるためには、シールド材の厚みを増すか、導電率を高くすることによって達成される。多層媒質でもシールド性能を向上させるためには、基本的には前述の手法と同様であるが、多層化によって得られる効果も無視できない。そこで、多層で構成されたシールド材のシールド性能を理論的に導出し、シールド材近傍における電磁波伝搬機構を解明することを目的とする。また、従来のシールド効果の測定はテストピースによる測定値であり、シールド効果の解析解はシールド材が無限に大きなものと仮定して計算を行ってきた。そこで、3 次元的な構造をしたシールドモデルの性能を、時間領域差分 (FDTD: Finite Difference Time Domain) 法による数値解析により導出する。

2. 平面波が多層媒質に任意偏波で斜入射した場合の電磁シールド

不要電磁波からの情報漏洩や電磁波障害は、波源から十分遠方領域とみなせる平面波として考察できる場合がある。平面波問題は伝送線路論を引用し理論展開することが多いが、Maxwell の方程式を用いて電磁場論的な解析を解釈しなければ、電圧と電界、電流と磁界など変数の対応に関して適用を誤ることがある。ここでは、Maxwell の方程式を用いるこ

とにより、任意偏波の平面波が斜入射で多層媒質に入射した場合の反射係数と透過係数を、近似や省略を用いなくて厳密に導出した。

任意偏波の電磁波が多層媒質へ、入射角 θ_0^i 、入射面が xz 面である場合の座標系を図 1 に示す。また、同図のように電界 E が y 軸より ϕ 回転した任意偏波を仮定する。ここで、本論文では ϕ を偏波角ということとする。任意偏波を扱う場合、偏波面を TE モードと TM モードに分解して解析を進め、最終的に両モードをベクトル合成することにより解が得られる。実際には各層ごとで未知数を含んだ電磁界を定義し、層と層との境界において電磁界の接線成分が等しいとする境界条件を満足させることにより未知数を求める。

解析モデルとして、 $\lambda/4$ 型電波吸収体 (377 Ω の抵抗皮膜+スペーサ (波長/4 厚) +0.01mm

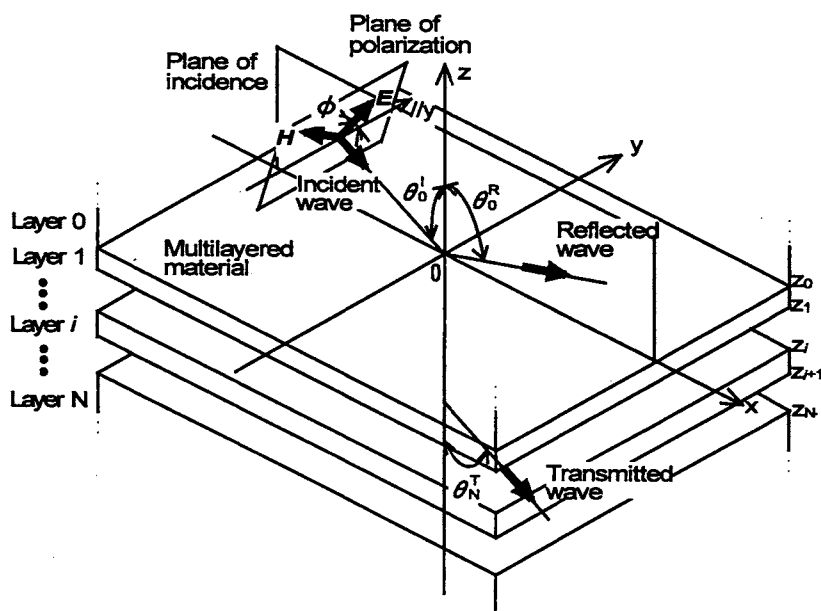


図 1: 平板状多層媒質に平面波が入射した場合の座標系

厚の Al 板の 3 層構造) を仮定した。解析した結果、 θ_0^i を大きくするにしたがい、吸収性能 (反射係数で評価) は悪化しており、さらに θ_0^i を大きくすると、徐々に TM 波の方が、性能が良くなることがわかった。これは、TE 波に比べ、TM 波には Brewster 角が存在し、材料内部へ電磁波が入りやすくなるためと考えられる。ただし、 $\lambda/4$ 型電波吸収体では、実用範囲として考えられる $R=20\text{dB}$ で $\theta=30^\circ$ 程度となり、それ以上の角度からの入射波には適さないことがわかった。次に、シールド効果 (透過係数の逆数で評価) は、 θ を大きくすると最大で約 60dB 低下しており、TE モード近辺の ϕ でのみシールド効果は向上することが確認できた。これは、上述のように、TM モードには Brewster 角があり、透過係数が大きくなるためと考えられる。したがって、任意偏波による斜入射問題でのシールド効

果はTMモードが支配的となっていると推察できる。

次に、 $\theta_0=45^\circ$ で斜入射した場合、 $z=1\text{m}$ の地点における反射波の偏波角 ϕ' に関する時間推移を求めた。その結果を図2に示す。 $\phi=0^\circ$ であるTEモードでは、反射波は $\phi'=0^\circ$, 及び $\phi'=180^\circ$ となっており直線偏波であることがわかる。また、 $\phi=90^\circ$ であるTMモードでは、反射波は $\phi'=90^\circ$, 及び $\phi'=90^\circ$ となっており、TEモードと同様に直線偏波となっている。しかしながら、 $\phi=45^\circ$ では、反射波の偏波角は時間とともに連続的に変化しており、楕円偏波となっていることがわかる。これは、 $\lambda/4$ 型電波吸収体に、任意偏波で斜入射した電磁波は、まず、①抵抗被膜で反射したものと、これを透過し、次に、②金属

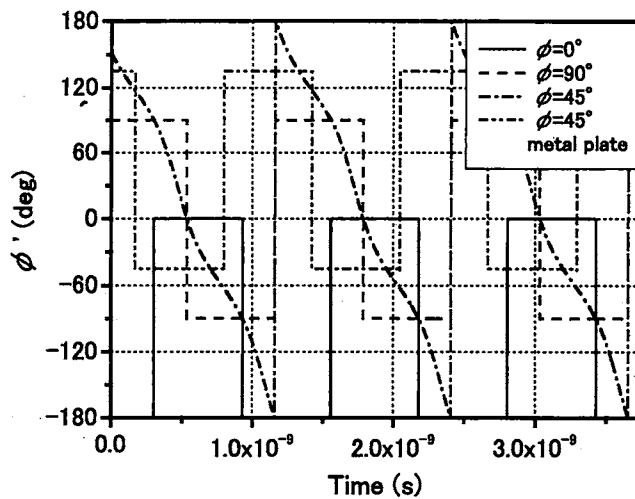


図2: 斜入射による反射波の偏波

板で反射して戻ってきたものとの合成波が全体としての反射波となって現れてくる。これらの2つの反射波には位相差が生じるため、結果として合成波は楕円偏波となって現れてくるものと考えられる。参考のため、同図より、同じ多層材料でも2枚の金属板で構成されたモデル(2点鎖線)では、1枚目の金属板で入射波のほとんどが反射するため、2枚目からの反射の影響は全く見られず、直線偏波となっていることが観察できる。

3. ダイポール波源近傍に設置された多層媒質による電磁シールド

ダイポール波源の近傍に設置された多層媒質によるシールド効果を求めるため、球面波を円筒波の積分で表示する Sommerfeld 積分表示式(1)を用いて解析を行った。

$$\frac{e^{-jkR}}{R} = \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{\lambda-k}} J_0(\lambda r) e^{-\sqrt{\lambda-k}z} \lambda d\lambda \quad (1)$$

ここで、 k は波数、 R は波源からの距離、 J_0 は第0次第1種ベッセル関数、 λ は

積分定数, r は半径方向距離である.

なお, 波源として, 磁気, 及び電気ダイポールを想定し, 波源の軸方向が多層媒質に対して垂直, または水平に向いている場合の解析を行った. 測定器のダイナミックレンジが小さいため, シールド効果が低い磁気シールド効果について実測を行い, 解析値と比較検討をした結果, 垂直, 水平ともに良く一致しており, 本解析手法の妥当性が検証できた.

次に, シールドのメカニズムを明らかにするために, ダイポール波源から放射された電力流の時間平均値 (平均ポインティングベクトル) が, シールド材の設置 ($z=0$ の地点) により, どのように変化するかを求めた. 図3に磁気ダイポール波源から放射された電力流を示す. シールド材がない場合, すなわち波源単体では放射された電力流は放射状に広がることは知られているが, シールド材がある場合は, シールド材に電磁波が引き寄せられ, そして, x 方向に流れ, 電力を消費することによって, 電磁波が遮蔽されている様子が観察できる. また, シールド材に空隙を設けた場合は, 空隙内で電力流がわずかではあるが x 方向に向きを変えている. したがって, 磁気ダイポールと同一軸 (z 軸) 上にある観測点でシールド効果を評価する際はその点での電力流が弱められるため, 多層構造の場合は, シールド効果が向上するものと推察できる.

4. 電磁界解析による電磁シールド効果評価器の設計と電気定数の推定

磁気ダイポール波源が多層媒質に囲まれて設置された場合の電磁界を, Sommerfeld 積分表示式を用いて求め, シールド効果の測定誤差が少なくなるような評価器 (シールドボックス) の設計, 試作を行った.

シールド効果は, 通常, シールドボックス内部にシールド材を設置して測定され, 観測

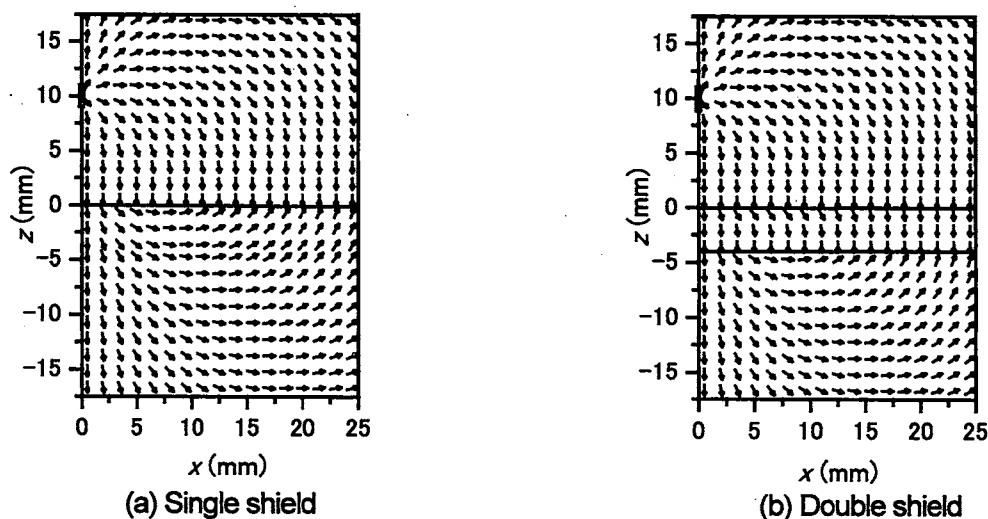


図3: 磁気ダイポール波源からの電力流の変化

点の位置によっては、ボックス壁面からの反射波の影響が無視できなくなる。そこで、ボックス壁面からの反射波がシールド効果に与える影響を調べ、その影響が少なくなるような設計を行うこととした。その結果、観測点が波源より離れる、すなわちボックス壁面に近づくにしたがって、シールドボックス壁面からの反射波の影響が現れ、誤差が増大していくことがわかった。また、送受信間距離が、観測点とシールドボックス壁面までの距離

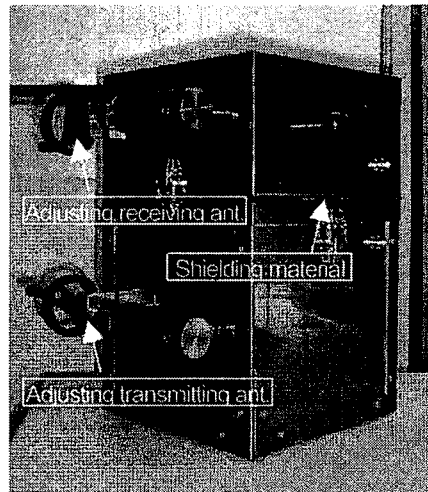


図 4: 試作したシールド効果評価器

より十分に短ければ、壁面からの反射波、及び回り込みの影響は無視できることが確認できた。そして、これらの結果をもとに、測定誤差が少ないと考えられる波源と観測点位置との距離 d を、20~100mm まで可変できるシールドボックスの試作を行った (図 4)。本評価器を用いて Cu, Al, Fe 材についてシールド効果を測定した結果、 $d=20\text{mm}$ の場合で 1.5dB, $d=100\text{mm}$ の場合で 2.5dB 以内で計算値と測定値は一致しており、本評価法の有効性が検証できた。

次に、ここで開発した Sommerfeld 積分表示式を用いた電磁界解析法とシールドボックス評価器を用いて、シールド効果に電磁界解析結果を反復計算によりフィッティングさせることによって、シールド材の電気定数を推定した。推定には、精度がよい $d=20\text{mm}$ とした。その結果、Al 材について、便覧等では比誘電率 $\epsilon_r=1$, 比透磁率 $\mu_r=1$, 導電率 $\sigma=3.64 \times 10^7$ であるのに対し、 $\epsilon_r=1.0$, $\mu_r=1.0$, 導電率 $\sigma=3.6 \times 10^7$ という推定結果となり、電気定数推定法の確立を行うことができた。

5. FDTD 法によるシールド材の電磁シールド効果の解析

ここまでのシールド材の評価法は、シールド材が無限に大きなものと仮定して解析を行

ってきた。しかしながら、実際の機器の筐体や、シールド衣料等は3次元的な形状をしており、開口の影響等をFDTD法による3次元的な数値解析を行うことによって、材質やその形状を設計することが重要である。そこで、電磁波が任意方向から多層材料に入射した場合の透過係数をFDTD解析のシールド境界に導入することにより、従来から困難とされていた薄板シールド材の3次元的な電磁波透過問題に対する数値解析を可能にした。

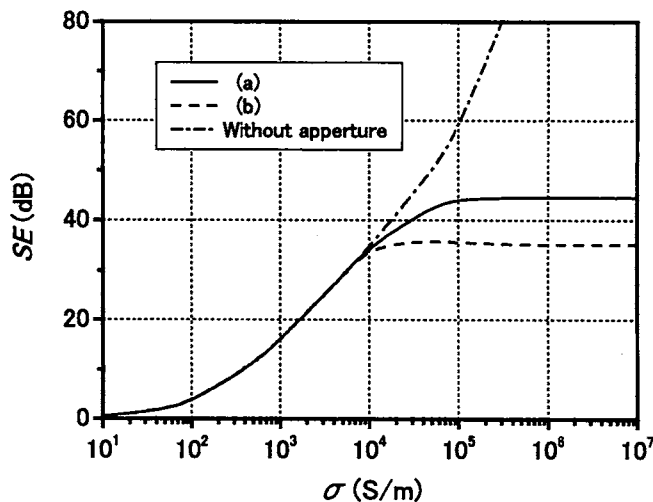


図5: 導電率を変更した場合のシールド効果

解析にあたり、心臓ペースメーカ装着者を模擬した矩形ファントムモデルを想定し、シールド衣料による電磁波のシールド効果を解析した。その結果、本数値解析結果は、実験結果とよく一致しており、今回提案したFDTD数値解析手法の有用性が確認できた。次に、シールド衣料の開口の影響を調べた。シールド衣料として、(a)首部、及び腰部に開口があるものと、(b)ファントム前面のみシールド衣料を装着したものの2種類を想定した。通常、無限に大きなシールド材によるシールド効果は、導電率 σ を大きくするにしたがってシールド効果は高くなる傾向にある。しかしながら、図5に示すように、開口がある場合は、導電率を大きくしてもシールド効果が変化しない地点が存在する。理由として、この地点近辺までは導電率が低いため電磁波がシールド材を透過しやすくなっており、これを過ぎると透過波よりも開口部から回り込んでくる電磁波の電界強度が強くなるためと考えられる。同図の開口を設定していないモデルでは、このような地点は存在せず、導電率が大きくなるとともにシールド効果も高くなっており、開口がシールド効果を悪化させていることが裏付けられる。なお、開口部が大きいほどこの影響が著しいことは明らかである。以上の結果より、シールド衣料など開口を有する電磁シールド製品において、シールド効果を向上させるために導電率を大きくしても性能は高まらないばかりか、材料自体が過剰品質となることを示した。

6. むすび

本研究では、電磁波による電子機器、工作機械、医療機器などの誤動作防止用として使用されるシールド材に関する性能評価を、波源が十分に遠方とみなせる平面波問題から、波源が近傍に設置されており、その波源が磁気、あるいは電気ダイポールの場合について理論解析的に考察を行った。また、この理論解析をもとに薄板シールド材の電気定数を推定する手法を提案し、数値解析に利用することを可能とした。次に、従来では、数値解析に薄板シールド材を導入することは困難であったが、シールド材の透過係数を導入することにより3次元的な電磁シールドモデルに対するFDTD法による数値解析法を開発し、そのシールド性能評価を可能とした。

今後の課題として、本研究による電磁界の理論的検討では、シールド材の性能に主眼をおいて考察を進めてきた。しかしながら、本解析手法は多層媒質内部の電磁波伝搬機構が理論的に解析できるため、電磁波による地下探査や電離層の電磁波伝搬機構の解明に用いることが可能である。また、FDTD法による数値解析では対象とするシールドモデルを矩形として検討を行ってきたが、本手法は、より複雑な3次元モデルへの適用も可能であり、機器の筐体などへの適用も十分可能である。

学位論文審査結果の要旨

平成15年1月30日に第1回学位論文審査委員会を開催、2月6日に口頭発表、その後第2回審査委員会を開催し、慎重審議の結果、以下の通り判定した。なお、口頭発表における質疑を最終試験に代えるものとした。

近年、不要電磁波による医療機器や産業機器の誤動作が問題になっている。その対策として、不要電磁波を遮蔽（シールド）する材料を用いて機器を保護する方法が取られている。そこで本論文では、電磁波波源とシールド材との距離が遠方（平面波近似）と近傍の場合を分け、シールド効果を理論的に検討した。この結果、材料に入射する偏波や入射角によりシールド特性が大きく変わることや、材料間に空隙を設けることでシールド効果が向上することが分かった。またそれを応用してシールド特性の実測値から薄膜シールド材の電気定数を推定する手法を開発した。一方、任意の3次元形状のシールド材に対するシールド特性をFDTD（有限差分時間領域）法を用いて数値計算する手法を開発した。これは心臓ペースメーカーの誤動作防止用シールド衣服の製作に応用され、ファントム（模擬人体）実験の結果FDTD解析と測定が一致し、本手法の正当性が示された。

この研究成果は、これまで任意形状の3次元薄膜シールド材のシールド効果の計算が困難であったことを可能にしたことと同時に、薄膜シールド材の電気定数の測定法も開発したことで、電磁波シールド分野（EMC業界）において多大な貢献をするものと期待される。

以上の内容から、本論文は博士（工学）に値するものと判定した。