

平成 2 5 年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「薄型広帯域電波吸収体の開発」

研究開発成果等報告書

平成 2 6 年 3 月

委託者 近畿経済産業局

委託先 公益財団法人新産業創造研究機構

目 次	頁
第 1 章 研究開発の概要	1
1－1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1－2 研究体制	4
1－3 成果概要	4
1－4 当該研究開発の連絡窓口	6
第 2 章 本文	7
2－1 シミュレーション用データベースの作成	7
2－1－1 概要	7
2－1－2 設計・試作	7
2－1－3 成果と課題	9
2－2 シミュレーションによる最適濃度勾配の検証	10
2－2－1 概要	10
2－2－2 シミュレーションプログラムの開発	10
2－2－3 成果と課題	12
2－3 有限要素法を用いた電磁界シミュレーションによる電波吸収機構の詳細説明	13
2－3－1 概要	13
2－3－2 建材用広帯域電波吸収体の開発	13
2－3－3 船舶レーダー偽像対策用電波吸収体の開発	15
2－3－4 成果と課題	18
2－4 電界ベクトル回転法による大判サイズ電波吸収体の特性評価	19
2－4－1 概要	19
2－4－2 建材用広帯域電波吸収体の測定	19
2－4－3 船舶レーダー偽像対策用電波吸収体の測定	20
2－4－4 外部機関での特性評価	20
2－4－5 成果と課題	21
2－5 最適樹脂と磁性粉を用いた均質樹脂成形体の作製	22
2－5－1 概要	22
2－5－2 遠心成形機の開発	22
2－5－3 電波吸収体の試作	23

2-5-4	成果と課題	24
2-6	均質樹脂成形体の密度勾配評価	25
2-6-1	概要	25
2-6-2	試作と計測	25
2-6-3	成果と課題	27
2-7	電波吸収性能の改良技術の開発	28
2-7-1	概要	28
2-7-2	マイクロバルーン混入成形体の試作と評価	28
2-7-3	反射板の三次元化による電波吸収特性の改善	29
2-7-4	吸収体表面の加工による電波吸収特性の改善	30
2-7-5	成果と課題	32
第3章	全体総括	33
3-1	各サブテーマの研究開発成果および今後の課題に関して	33
3-2	事業展開に関して	34

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究開発目的及び目標

近年、携帯電話をはじめとして情報社会化で多くの無線電波機器が使用され、電波環境は悪化が進んでおり、その対策として高機能・高性能の電波吸収体が求められている。従来の広帯域電波吸収体は大型で強度も十分でなかったが、樹脂内に厚み方向に密度を変化させた磁性体を配置する新方式の薄型・広帯域電波吸収体を開発した。本技術を基に電波暗室、暗箱向け、さらには電波吸収建材向けの、薄型・広帯域電波吸収材料を開発する。

具体的には以下の目標を設定する。

- (1) 電波暗室向け電波吸収体：吸収量は 30 MHz～20 GHz で-20dB～-30 dB 以上。
フェライトタイルとの併用によりハイブリット構造とし、トータルの厚みは 30 mm以下
- (2) 建材向け電波吸収体：吸収量は 1 GHz～10 GHz で-15 dB 以上。厚みはハーフインチ（標準の1インチ厚さ建材に組込むことを想定する）

上記目標達成のための開発サブテーマごとの開発内容を以下に記す。

- ① シミュレーション用データベースの作成（国立大学法人大阪大学、明興産業株式会社、長田電機株式会社）

遠心成形に適し、かつ、電波吸収体としても機能する材料の選択が必要となる。樹脂の候補としては、これまでの開発経験からウレタン系樹脂およびポリエチレン樹脂を主に検討する。成形過程における粘性も併せて評価することで、遠心成形に適した樹脂の絞込みを実施する。また、磁性粉については純鉄またはフェライト粉を使用する。これらの選択された材料について、磁性粉量を5重量%刻みで変化させた樹脂成形体を作製し、ベクトルネットワークアナライザを用いたSパラメータ法による誘電率・透磁率評価から、最適密度勾配をシミュレーションするためのデータベースを作成する。

- ② シミュレーションによる最適濃度勾配の検証（長田電機株式会社、国立大学法人大阪大学）

サブテーマ①で得られた誘電率・透磁率のデータベースを用いて、並列回路型モデルを適用することで電波吸収特性のシミュレーションを行なう。ここで、可変となるパラメータは各層の厚みとなるが、実際の遠心成形に適した密度勾配パターンが得られるように、各層の厚みに条件付けを加えてシミュレーションを行う。

- ③ 有限要素法を用いた電磁界シミュレーションによる電波吸収機構の詳細解明（国立大学法人大阪大学、長田電機株式会社）

サブテーマ②において電磁気の並列回路モデルを用いたシミュレーションから電波吸収

特性を計算することが出来るものの、上記モデルは分布定数回路の概念を用いたものであり、吸収の主要となるパラメータを完全に確定することが出来ない。すなわち、誘電もしくは磁性損失による電波の熱エネルギーへの変換が電波吸収体でおきる一次反射と二次反射との位相差によるキャンセルとのいずれが電波吸収に主に寄与するかを判断することが出来ない。分布定数回路の対となるのが集中定数回路であり、これは、キャパシタンスやインダクタンス、および抵抗成分が回路上のどこに存在するかが明らかとなっている概念である。そこで、濃度勾配電波吸収体の作動機構について、集中定数回路を組み込んだ電磁界シミュレータによる検討を行う。ここでは、マクスウェルの方程式を空間および時間領域の差分法を用いて解析する FDTD (Finite Difference Time Domain) 法を採用する。本シミュレーションによる結果をサブテーマ②のシミュレーションアルゴリズムにもフィードバックすることでさらなる電波吸収特性の改善を図る。

④ 電界ベクトル回転法による大判サイズ電波吸収体の特性評価（国立大学法人大阪大学、長田電機株式会社）

電波吸収能力の評価法として、従来のタイムドメイン法では、サンプル近傍の壁面や床などからの反射波が分離できないために測定の確度には不安が残る。本開発では、これらの問題を解決可能な電界ベクトル回転法による評価を実施する。本手法は、サンプルの位置を少しずつ変化させながらサンプルからの反射波のエネルギーを測定することで、サンプル以外からの反射波を分離できる。先ず、電波吸収能が既知のサンプルを用いて、ステップごとの移動距離ならびにトータルの移動ストローク距離の最適な測定条件出しを行なった後に、実際のサンプルにて評価を実施する。

⑤ 最適樹脂と磁性粉を用いた均質樹脂成形体の作製（明興産業株式会社）

電波吸収体の製造は、樹脂と磁性体を攪拌し、遠心成形機に投入することで行う。この回転の遠心力により、樹脂より重い磁性体が外周方向に偏ることにより、上記で設計した最適パターンに従った密度勾配を実現させる。所定の密度勾配を得るには、材料に対応した成形機の運転条件（温度や回転数など）の最適パラメータを決定し、それを実現する成形機を開発する必要があるが、そのほかにも攪拌や攪拌時に生ずる泡の除去（脱泡）等も作業の最適効率化には重要となり、遠心成形に関する統括的な装置・システムの開発を行う。

⑥ 均質樹脂成形体の密度勾配評価（明興産業株式会社）

試作した吸収体の密度勾配パターンが設計の数値と一致しているかどうか、サンプルを作製する毎に製造現場で迅速に評価できることが効率的な開発を行なう上で重要である。

そこで、樹脂内の磁性粉濃度を蛍光X線分析装置により評価する。本手法は濃度既知試料を用いて予め検量線を作成しておくことで、短時間で磁性粉に含まれる元素の濃度、すなわち、樹脂中の磁性粉濃度を評価することができ、サンプルの断面に対して深さ方向にライン分析を行なうことで、設計値と実際に作製したサンプルの密度勾配パターンについて比較することが可能となる。

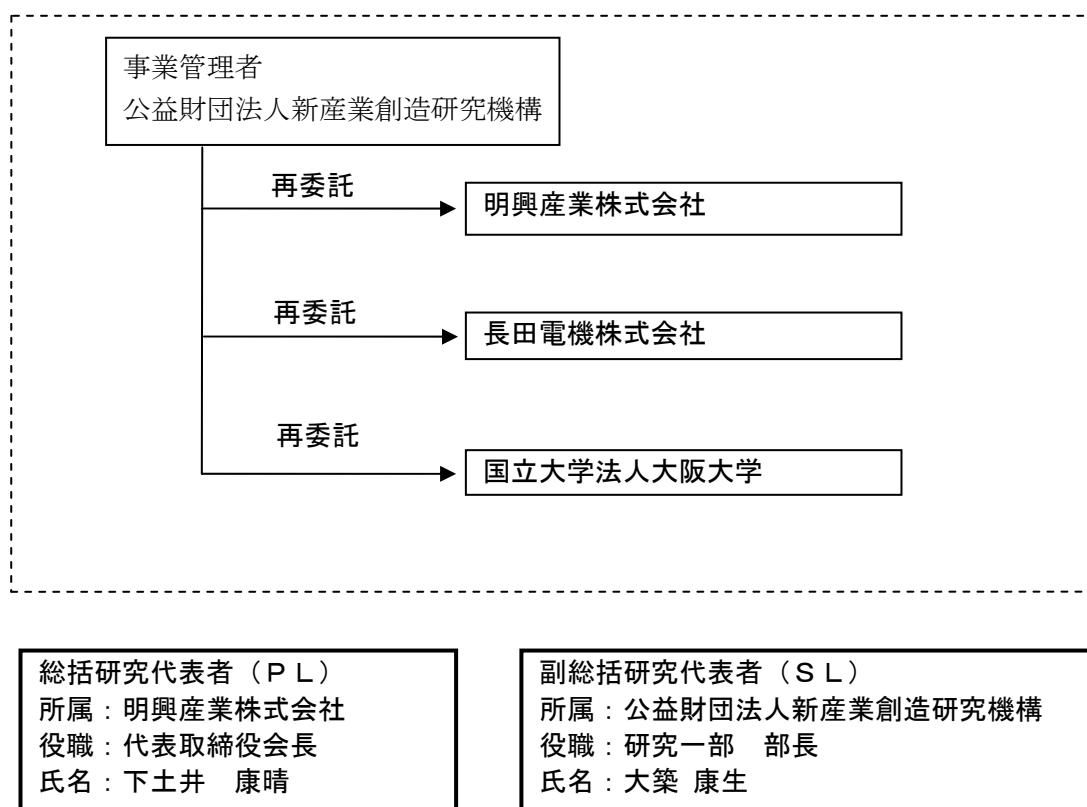
⑦ 電波吸収性能の改良技術の開発（国立大学法人大阪大学、明興産業株式会社）

電波吸収特性向上策として、マイクロバルーンのような内部に空気を含む粒子の濃度勾配型樹脂成形体を作製し、これを濃度勾配型磁性粉樹脂成形体の表面に積層することにより、空気から吸収体表面に電波が侵入する行程において連続的に特性インピーダンスを変化させるバッファー層の導入を検討する。さらに、サブテーマ③で実施する電磁界シミュレータを用いることで、これまでに実施してきた透かし型電波吸収体の穴あけ形状についても最適設計をすることが可能となり、吸収体への穴あけ加工に併せて、従来の平板型とは異なる形状の反射板を導入することで、吸収体内部での電波の多重反射を誘導し、さらなる特性の向上を検討する。

⑧ プロジェクトの管理・運営（公益財団法人新産業創造研究機構）

頻繁な情報交換や推進委員会の運営、日程や進捗状況の管理など、開発を効率的に行うための管理・運営を行う。

1－2 研究体制



3 成果概要

①シミュレーション用データベースの作成

OM 粉とウレタン系樹脂であるハイアド 1430 の組み合わせで作製した樹脂成形体について、誘電率と透磁率の周波数依存性を評価した結果、各磁性粉充填率の試料において誘電率、透磁率を近似曲線で表すことが可能となり、シミュレーション過程において、演算時間の大幅な削減が可能になった。今後の性能向上のためにはカーボン系材料の援用や、磁性損失の更なる増加には異種磁性粉をハイブリット化するなど、新規な技術導入が必要になるが、研究期間の制限でこれらの材料についてのデータベースを作製することが出来なかった。ただし、データベース自身の作成については、研究実施期間を通じて目標値を満足する結果を得ることができ、今後の電波吸収体の研究開発に大きく寄与するものとなった。

②シミュレーションによる最適濃度勾配の検証

樹脂成形体中の磁性粉の容積分率から材料定数をシミュレートし、これをデータベースとする電波吸収能の最適解を探索するプログラムを開発した。さらに、分布定数回路を用いた電波吸収特性のシミュレーションについて、樹脂成形体の誘電率、透磁率の周波数依存性を数式化したデ

ータベースを用いて最適な濃度勾配の探索を実施し、現時点で使用可能な材料において最高の電波吸収特性が得られる勾配パターンを見出すことに成功した。シミュレーション結果からも明らかなように、超広帯域において良好な電波吸収特性を得るためには、インピーダンスの緩やかな連続変化が必要であり、遠心成形のみで目標値を達成するには、発泡剤を使用するなど吸収体表面の低インピーダンス化が今後の課題と考える。

③有限要素法を用いた電磁界シミュレーションによる電波吸収機構の詳細説明

磁性粉と樹脂の混合物から遠心力により濃度勾配を有する成形体を得る方法では、低誘電率の樹脂を使用したとしても、空気のそれとは2倍近く大きな材料であり、吸収体表面での不要反射により、今回のプロジェクトで目標とする電波吸収特性を獲得することが困難であった。三次元電磁界シミュレーションは、分布定数回路モデルを用いた上記②のシミュレーションとは異なり、材料の形状がシミュレーション結果に反映される。今回の三次元電磁界シミュレーションでは、吸収体の三次元加工によりインピーダンスの緩やかな変化が可能となり、電波吸収特性が大幅に改善できることが確認された。この手法は、船舶レーダ偽像防止用電波吸収体にも適用可能であり、軽量化、高反射損失など本材料の更なる特性の改善も可能なものと期待している。

④電界ベクトル回転法による大判サイズ電波吸収体の特性評価

本プロジェクトの実施により、実験室レベルではあるが、市販の厚手広帯域電波吸収体の導入により反射損失特性評価時の電磁環境を整え、さらに、高精度にサンプルを移動させる治具を試作し、外部機関で計測した結果と概ね一致する評価システムを確立した。今後の開発時間の短縮、ならびに、開発コストの削減につながるものと評価される。

⑤最適樹脂と磁性粉を用いた均質樹脂成形体の作製

最適パラメータに応じて運転条件を詳細に設定できる2連ドラム式の遠心成形機を設計、製作した。その後、遠心成形機ドラム部の改造により、さらに厚いハーフインチの電波吸収体の作製が可能になった。また、冷却システムの追加により、サンプルの過熱防止と作製時間短縮が可能となった。

⑥均質樹脂成形体の密度勾配評価

作製したサンプルについて磁性粉濃度の評価を行うことによって、サンプル作製時の回転数、時間といった条件を考察することが出来た。しかしながら、蛍光X線分析装置を主とした密度勾配評価を行い、設計値と実際に作製したサンプルの密度勾配パターンの比較によって迅速なサンプルの選定については、検量線の基となる最適標準物質の探索及び蛍光X線分析装置の最適な測定条件を確立するに十分な条件を抽出するまでには至らなかった。

⑦電波吸収性能の改良技術の開発

樹脂の誘電率が空気とは異なることから、樹脂が濃縮された吸収体表面での電波の反射を完全に抑制することは不可能となる。そこで、空気を含有するマイクロバルーン等のフィラーを用いて、これにより空気類似の材料を作製し、電波が入射する吸収体表面での不要反射の抑制を検討した。有機系マイクロバルーンをウレタン樹脂に混合し、樹脂成形体中におけるマイクロバルーン濃度に連続的な勾配を設けた表面反射防止層を作製した。作製した反射防止層は 6 GHz 以上の帯域の電波については吸収特性の向上が認められたが、波長の大きな 6 GHz 以下の電波に対しては効果が認められなかった。

また、シミュレーションでは、樹脂成形体中の磁性粉濃度に最適な勾配を設けること、加えて、これに V 字型切り出しや穴あけ加工を行うことで、目標とする電波吸収特性が得られることがわかった。遠心成形において濃度勾配を支配するファクターは樹脂の粘性、硬化速度、磁性粉の大きさ、その分布に加えて、遠心力と遠心時間などの多数のファクターを含むものであるが、粒度分布が最も傾斜パターンに反映するものと見込まれる。今後は、粒度分布と形成される濃度勾配の関係を詳細に調べることで、シミュレーションから導かれる最適値に類似したサンプルの作製を目指したい。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

所属・役職： 公益財団法人新産業創造研究機構 研究一部 担当部長

氏名： 神田克己

電話： 078-306-6802

FAX： 078-306-6812

E-mail： kanda@niro.or.jp

第2章 本文

2-1 シミュレーション用データベースの作成

2-1-1 概要

遠心成形に適し、かつ、電波吸収体としても機能する材料の選択が必要となる。磁性粉については、最終的には、磁性として BASF 社の OM 粉、樹脂は平泉洋行製のハイアド 1430 の組み合わせを採用し、また、船舶用レーダ偽像防止用電波吸収体を意図して、フェライト粉とハイアド 1430 の組み合わせについてもシミュレーション用のデータベースを作成した。

これらの選択された材料から、材料定数と成形体密度から適切な刻みで設定した重量%において樹脂成形体を作製し、ベクトルネットワークアナライザを用いた S パラメータ法による誘電率・透磁率評価から、最適密度勾配をシミュレーションするためのデータベースを作成する。

2-1-2 設計・試作

2-1-2 (1) 設計方針

本事業で開発する電波吸収体は金属磁性粉を樹脂中に濃度勾配を設けて分散させたものである。その作動機構は空気の誘電率とできるだけ類似の性質を持つ樹脂の濃度を吸収体表面（電波の入射面）で濃縮することで、この界面での不要な電波の反射を抑制する。一方で、吸収体内部に侵入した電波は、磁性粉濃度が電波の入射方向に従って連続的に増加していることから、界面不整合による反射が低減されつつ、かつ、反射板近傍の磁界が最大となる点で、最も濃縮された磁性粉の損失により熱エネルギーに変換される。しかしながら、上記の満たす材料であれば、どのようなものでも使用することができるわけではなく、濃度勾配形成の駆動力となる遠心成形時における樹脂の硬化速度と磁性粉との混練を含めて濃度勾配の形成に必要な時間との関連や、樹脂と磁性粉との混合性、脱泡性の難易など多くの制限を受けるものとなる。

当初選定したポリウレタン OU-7 はコスト高の材料であることから、汎用のウレタン樹脂として平泉洋行のハイアド 1430 の使用を検討した。磁性粉にはカルボニル鉄粉（BASF 社 OM 粉）を選択した。また、電波吸収体における磁性粉が重量に大きく関与していることから、軽量化を意図してカルボニル鉄粉に代わりフェライト粉の使用も検討した。

2-1-2 (2) サンプル試作

データベース作成のために材料定数の測定を行う際に用いる小サンプルを、磁性粉率 5 重量%刻みで作製した。作製した小サンプルの一例を図 2-1.1 に示す。



図 2-1.1 APC7 測定用小サンプル

測定用の小サンプルはそれぞれ狙い通りの重量%に出来るだけ近似させる必要があるため、作製した小サンプルの重量と厚みを計測し、Excel の表計算により小サンプルの重量%を求め、複数作った小サンプルのうち、最も狙いの値に近かったものを採用した。

2-1-2 (3) 性能計測

ベクトルネットワークアナライザを用いた S パラメータ法による誘電率・透磁率を計測した。その結果の例として、樹脂にハイアド 1430 を選択し磁性粉に OM を選択しそれらを混合したものの材料定数の一例を図 2-1.2 に示す。

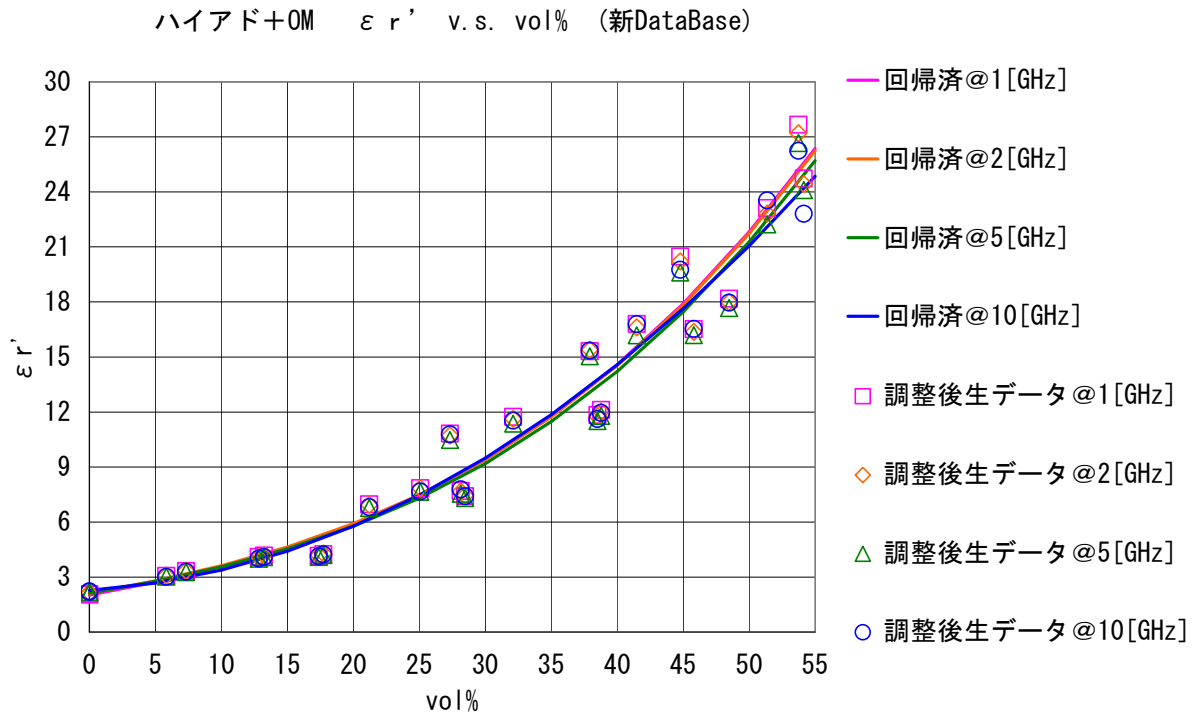


図 2-1.2 ハイアド樹脂と OM 磁性粉を混合した場合の材料定数の体積百分率特性 (ϵ_r' ;改)

2-1-3 成果と課題

OM 粉とハイアド 1430 樹脂の組み合わせで作製した樹脂成形体について、誘電率と透磁率の周波数依存性を評価した結果、各磁性粉充填率の試料において誘電率、透磁率を近似曲線で表すことが可能となり、シミュレーション過程において、演算時間の大幅な削減が可能になった。しかしながら、次節で後述するが、低粘性樹脂の選択、粒子形状、粒径分布を最適化した磁性粉を採用しても、遠心成形においては樹脂中における磁性粉の高濃度化は 50 vol%程度が限界であり、誘電損失の向上にはカーボン系材料の援用や、磁性損失の更なる増加には異種磁性粉をハイブリット化するなど、新規な技術導入が必要であることが明らかとなったものの、研究期間の制限でこれらの材料についてのデータベースを作製することが出来なかった。ただし、データベース自身の作成については、研究実施期間を通じて目標値を満足する結果を得ることができ、今後の電波吸収体の研究開発に大きく寄与するものと考ええる。

2-2 シミュレーションによる最適濃度勾配の検証

2-2-1 概要

2-1 で得られた誘電率・透磁率のデータベース(以降、材料定数データベースと呼ぶ)を用いて、並列回路型モデルを適用することで電波吸収特性のシミュレーションを行なう。ここで、可変となるパラメータは各層の厚みとなるが、実際の遠心成形に適した密度勾配パターンが得られるように、各層の厚みに条件付けを加えてシミュレーションを行なう。

まず、シミュレーションプログラムを作成し、試作条件を入力して試作した吸収体の性能とプログラム出力の整合を確認し、両者の誤差が±5%以内となるようにプログラムアルゴリズムの精密化を実施した。その後、使用する磁性粉および樹脂の成形体について、分布定数回路をモデルとしたシミュレーションを実施した。

2-2-2 シミュレーションプログラムの開発

上記の各材料定数データベースを用い、連続的な濃度勾配のついた電波吸収体を濃度が非連続ではあるが多層モデルとして規定し、その反射吸収特性がどうなるかを、シミュレーションし、その最適解を求めた。ここでは、空間を伝搬する平面電磁波に対応する解析が、伝送線理論で単純化できることから、平面波が複数の境界を通過する上記のようなモデルについても、その反射や透過の振る舞いを伝送線理論で記述できるものとし計算を実施している。

2-1 で得られた材料定数データベースの内、新材料(樹脂にハイアド 1430 を選択し磁性粉に OM を選択しそれらを混合したもの)を使用し、合計厚を 12.7mm 以下に制限して最大何 dB を吸収できるかを、最下層の磁性粉濃度制限を 50vol%と 55vol%で、コンピュータソフトウェア”Mathcad”を用いて 9 層モデルを構築し、シミュレーションした。詳細結果は省略するが、目標値は 1GHz～10GHz において-15dB であるところ、結果は目標からかなり離れてしまっている。

さらに、この新材料の建材用広帯域電波吸収体への適応性を見極める為、合計厚の制限を 25.4mm 以下に緩和して同条件でシミュレーションしたが、この場合も目標値とは未だ隔たりがある。他方、サンプル作成担当者からは「この新材料を使用して遠心成形方式で作成する場合の最下層の磁性粉濃度は 50vol%が限界」とのコメントがあった。

以上のことから、将来的にはその作成方法を模索することを考慮に入れた上で、磁性粉超高濃度を実現している市販電磁波抑制シート(TSS-Japan 社製 TSS-SORB-SS-1.0)をこの新材料に裏打ちして、目標値を実現することを検討することにした。

先ず 2-1 と同様、厚さ 1mm の TSS-SORB-SS-1.0 から APC7 同軸型サンプルホルダに収まるサンプルを作成し、その材料定数を Agilent の材料定数測定ソフトウェア 85071E を使い測定し、周波数軸で回帰曲線を求めた。

次にこの TSS-SORB-SS の材料定数を自由空間における電波吸収体のシミュレーションに適応させる為、TSS-SORB-SS-1.0 を 40cm×40cm にして自由空間にてその反射吸収特性を測定し、先で求めた材料定数回帰データから Mathcad にて単層モデルでシミュレーションし、両結果を比較したところ、APC7 同軸型サンプルホルダで測定した各材料定数を、大よそ誘電率を 1.5 倍、透磁率を 1.1 倍すればシミュレーション結果が実測値と合致することがわかった。

最後に目標を達成するべく、新材料部分を 9 層モデルにして Mathcad にて TSS-SORB-SS-1.0 を裏打ちした吸収体を、全厚 $\leq 12.7\text{mm}$ という制限を付けてシミュレーションした。そしてその濃度勾配を目標にサンプルを作成した。出来上がった実サンプルに TSS-SORB-SS-1.0 を裏打ちし、40cm×40cm にして自由空間にてその反射吸収特性を測定し、シミュレーション結果と比較した。結果を図 2-2.1～図 2-2.2 に示す。

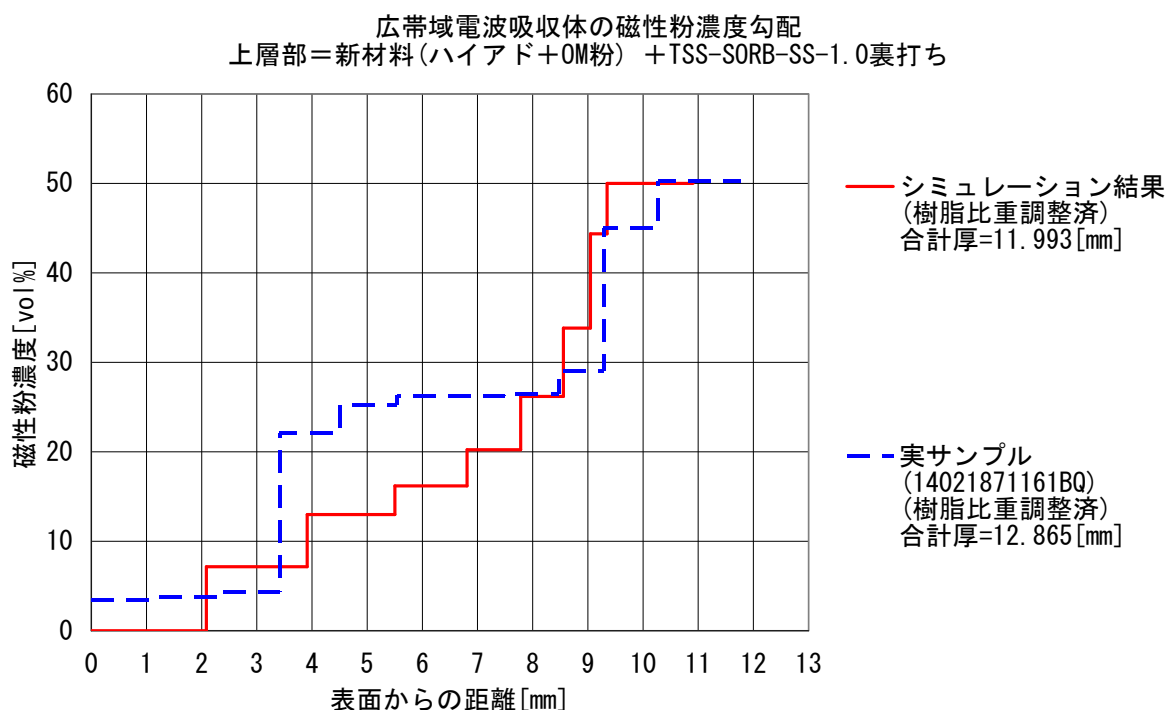


図 2-2.1 新材料を使用した広帯域電波吸収体最適解の磁性粉濃度勾配
(シミュレーション結果と実測結果)

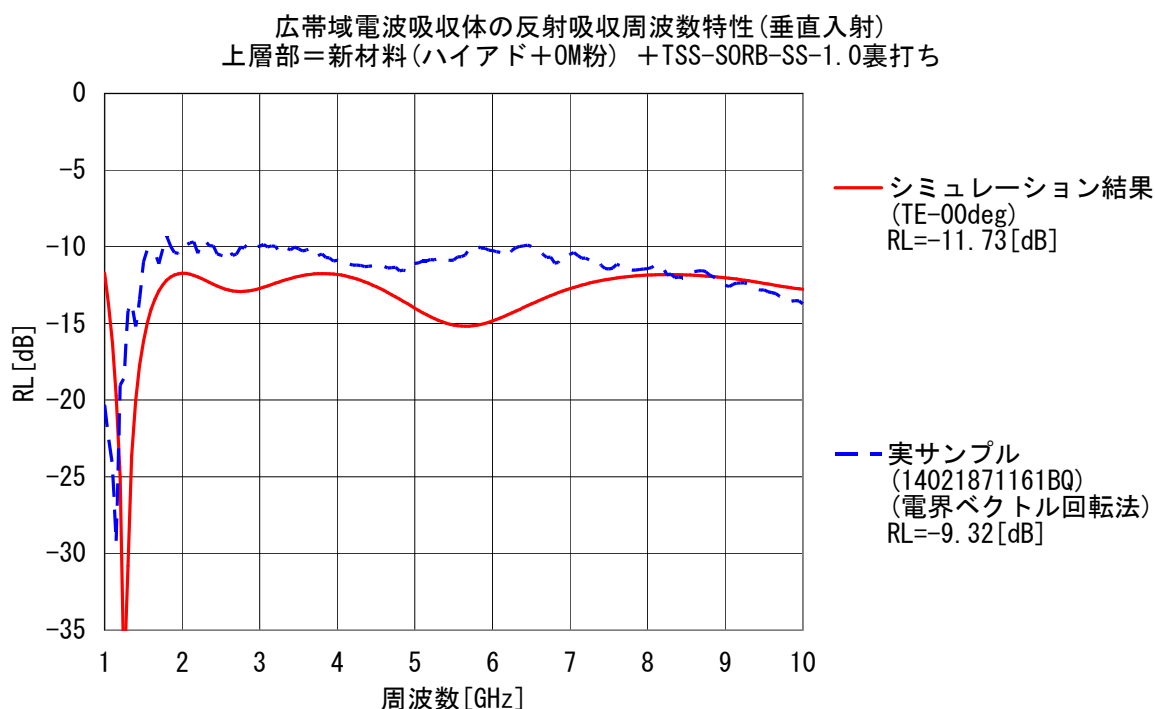


図 2-2.2 新材料を使用した広帯域電波吸収体最適解の反射吸収特性
(シミュレーション結果と実測結果)

図 2-2.2 において、実サンプルがシミュレーション結果よりその反射吸収特性が悪くなっているのは、濃度勾配が指定通り作成できなかった為と推測される。しかし、シミュレーション結果は目標である-15dB は達成していないものの近いところまで来ていることがわかる。そしてこれ以上の性能追及は難しいと予測されるので、2-3-2にて立体構造を工夫することで検討することにした。

2-2-3 成果と課題

分布定数回路を用いた電波吸収特性のシミュレーションについて、まず、アルゴリズムを完成させた。次に、樹脂成形体の誘電率、透磁率の周波数依存性を数式化したデータベースを用いて最適な濃度勾配の探索を実施し、現時点で使用可能な材料において最高の電波吸収特性が得られる勾配パターンを見出すことに成功した。シミュレーション結果からも明らかなように、超広帯域において良好な電波吸収特性を得るためには、インピーダンスの緩やかな連続変化が必要であり、遠心成形のみで目標値を達成するには、発泡剤を使用するなど吸収体表面の低インピーダンス化が今後の課題と考える。また、遠心成形による樹脂成形体中の磁性粉の高濃度化には限界があったため、電波吸収特性の更なる改善に市販の遠方界用電波吸収体を使用した。この材料の製造技術はハイテクのものではなく、内製や外注が可能なことから、実用的な性能向上策であると考えている。

2-3 有限要素法を用いた電磁界シミュレーションによる電波吸収機構の詳細説明

2-3-1 概要

2-2において電磁気の並列回路モデルを用いたシミュレーションから電波吸収特性を計算することが出来るものの、上記モデルは分布定数回路の概念を用いたものであり、吸収の主要となるパラメータを完全に確定することが出来ない。分布定数回路の対となるのが集中定数回路である。濃度勾配電波吸収体の作動機構について、集中定数回路を組み込んだ電磁界シミュレータによる検討を行なう。ここでは、マクスウェルの方程式を空間および時間領域の差分法を用いて解析する FDTD (Finite Difference Time Domain) 法を採用する。

三次元電磁界シミュレータにより自由空間法での電波吸収挙動を調査した。2-2の分布定数回路ではシミュレーションが不可な対象物、すなわち、穴あけ電波吸収体や反射防止層を積層した際の電波吸収特性について計算を行った。また、電波暗室等への利用を考えた場合、斜入射時の吸収特性も重要なファクターとなることから、該条件における自由空間でのシミュレーションも併せて実施した。いずれの場合においても、実サンプルとの吸収特性の比較を行い、その誤差を5%以内となるよう精密化できた。

2-3-2 建材用広帯域電波吸収体の開発

2-2-2より、単純に、濃度勾配を付けた新材料(ハイアド1430+OM粉)に市販電磁波抑制シート(TSS-SORB-SS-1.0)を裏打ちするだけでは目標値とする吸収性能を達成できないことが解った。ここではその立体形状を工夫することで吸収性能を向上させることを検討した。

先ず有限要素法を用いた電磁界シミュレーションソフトウェア(以降、三次元電磁界ソルバと呼ぶ)で計算しやすいようにする為、図2-2.1~図2-2.2に示したシミュレーションモデルの新材料部分を4層に簡素化して Mathcad にて最適化シミュレーションした。詳細は省略するが、4層モデルでも反射吸収量は9層モデルとそう変わりはないことが解った。よって三次元電磁界ソルバによる立体形状のシミュレーションするベースモデルをこの新材料4層+TSS-SORB-SS とすることにした。

立体形状を工夫するとしても、加工もしくは成形しやすさも考慮しなければならない。そこで格子状に溝を入れることを考え、溝の幅/深さ/本数を検討した。先ず、50mm 間隔に1本の溝の深さを変えて掘り、それらの反射吸収特性を三次元電磁界ソルバでシミュレーションしたところ、50mm 毎に溝を幅10mm 深さ2層目~3層目(=7.6mm~9.5mm)程度掘ると低周波数領域における吸収性能の悪化を抑えながら5GHz 以上における周波数帯域の吸収性能を向上させることが解った。次に溝の本数による変化を検討する為、50mm 毎に幅1mm の溝を10本掘るシミュレーションを行ったところ、溝を細かくする効果は確かに認められるが、元々溝を掘らない状態で最適化シミュレーションをしたモデルな為か、溝を掘るとどうしても3GHz 以下の低周波数領域における吸収性能の悪化が避けられない。そこで最後に上層部をそのままにして、裏打ちする市販電

磁波抑制シートの厚さ(TSS-SORB-SS の厚さラインナップは 0.25mm/0.5mm/1.0mm の3種類)を 2.0mm に増やしてシミュレーションした結果を図 2-3.1～図 2-3.2 に示す。

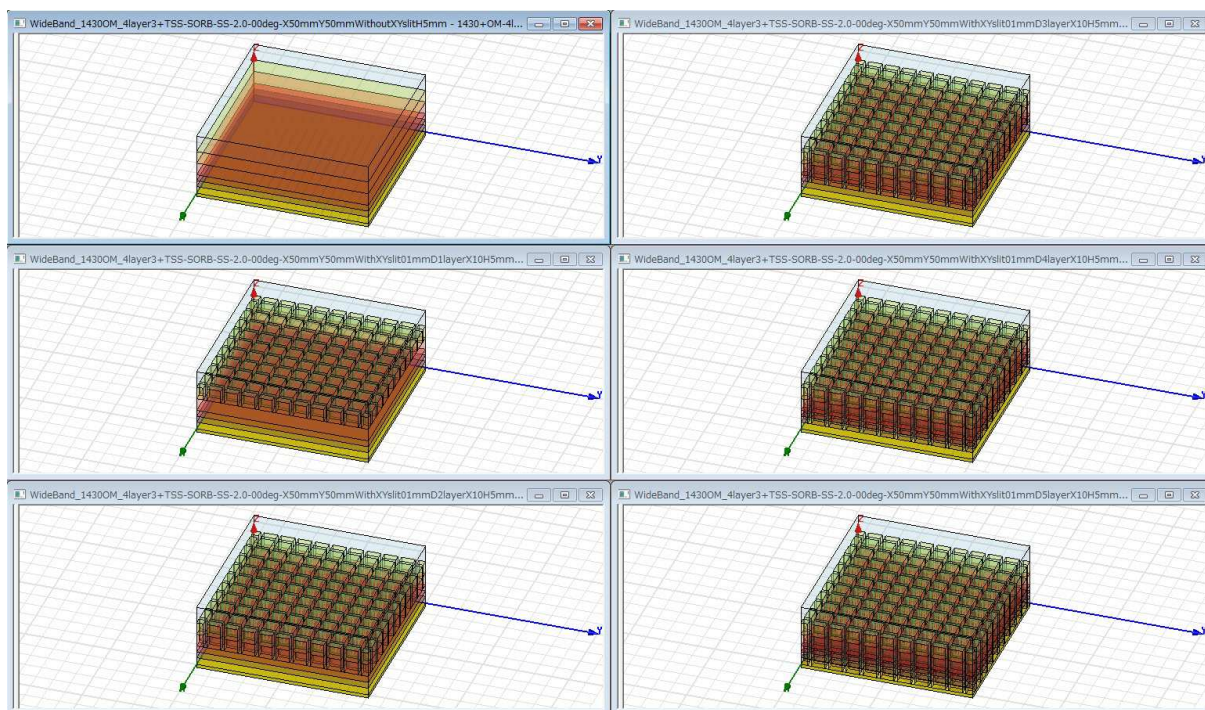


図 2-3.1 広帯域電波吸収体(新材料+市販電磁波抑制シート)の加工形状 #6

(XY 共に 10mm 毎に格子状溝, 幅 1mm, 深さ 0mm～最下層)

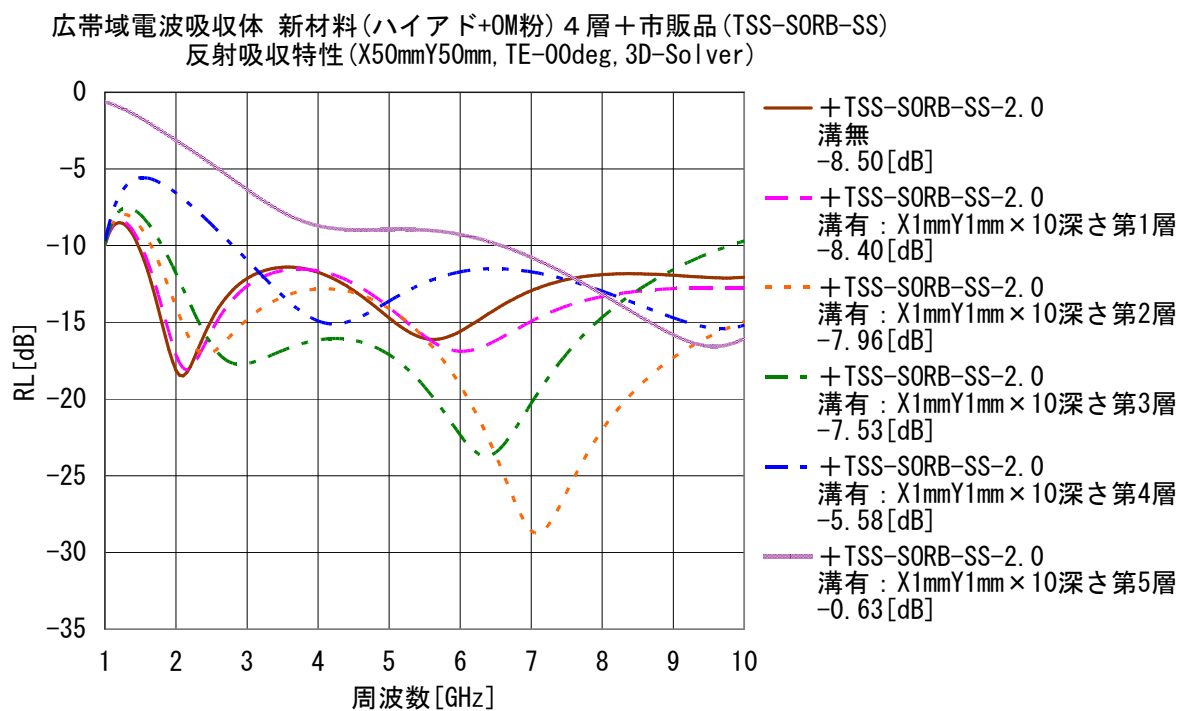


図 2-3.2 広帯域電波吸収体(新材料+市販電磁波抑制シート)の反射吸収特性(加工形状 #6)

以上から、高周波数領域においては溝を入れることによる吸収性能の改善効果は確かにあり、また溝の本数や幅・深さを調整することで最適解が得られることが解った。他方、溝を入れることで低周波数領域において吸収性能が悪化した為に目標である-15dB の達成には至っていない。これは元々溝を入れない状態で最適化された上層部と下層部を組合せた為であると考えられ、三次元電磁界ソルバによる最適化が可能であれば、目標を達成できる可能性が十分にあると思われる。

2-3-3 船舶レーダー偽像対策用電波吸収体の開発

本プロジェクトの成果の具体的適用候補例として、実証的な成果を生み出す為、現在得られている材料・データ・ノウハウを使って、特定用途向け電波吸収体の一つである船舶レーダーの偽像対策用電波吸収体を設計した。

船舶レーダーはその船体の最高点に設置できない場合、マスト等からの多重反射波を拾い『偽像』が発生し、問題となっている。また同様の問題は大型橋梁の下を航行する際等にも発生する。

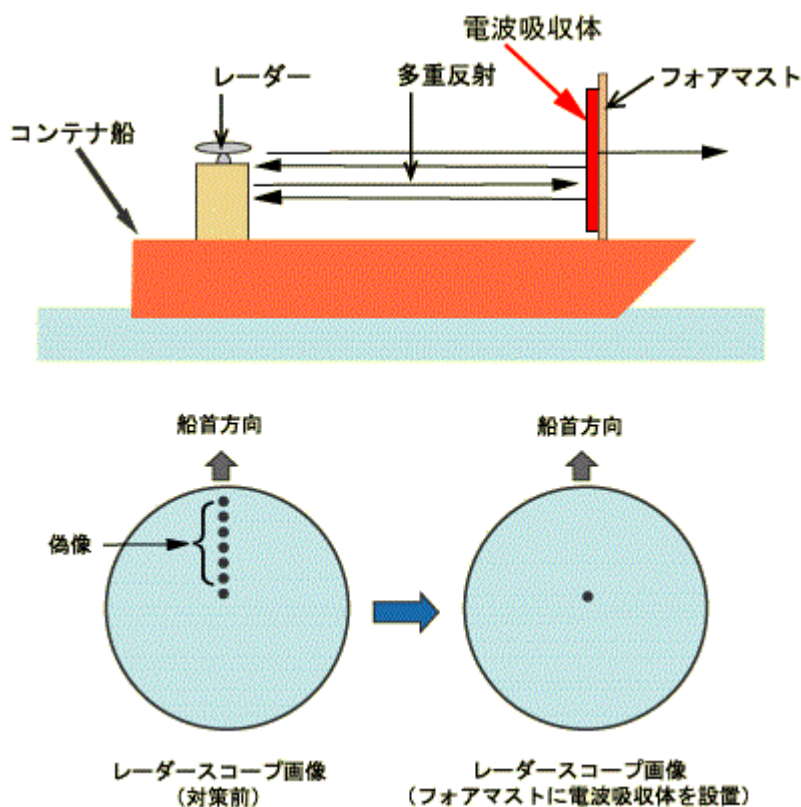


図 2-3.3 垂直入射時の偽像(東北化工(株)社のHPより転載)

そして船舶レーダーには主に以下の周波数帯が利用されている。

X-Band : 9.3GHz～9.5GHz、近距離&晴天用

S-Band : 2.9GHz～3.1GHz、遠距離&晴天雨天両用

この問題を解決する為に現在は電波吸収体が使われており、吸収性能が高く($\leq -20\text{dB}$)且つ装着作業性も高い吸収シートが求められ、1枚でX-Band/S-Band両対応のものは存在しない模様である。また、垂直入射時の吸収性能は高ければ高い程良く斜入射特性も重視される為、Mathcad よりも実的な斜入射反射吸収特性シミュレーションが可能な三次元電磁界ソルバがとても有効であると考えられる。

旧材料(OU-7+OM-C 粉)および新材料(ハイアド+OM 粉)について、濃度勾配をつけて両 Band 対応電波吸収体を Mathcad で4層モデルを構築し、対象周波数帯域における吸収量が最大となるよう最適化シミュレーションを行った。そして得られた濃度勾配最適値を三次元電磁界ソルバ上に構築し、斜入射特性をシミュレーションした。その結果、新材料の方が旧材料より若干ではあるが薄く且つ軽くできることが解った。また、船舶レーダー用吸収体に求められる吸収性能-20dBの実現は旧材料では難しく新材料では可能であることが解った。更に、三次元電磁界ソルバによる斜入射シミュレーション結果は Mathcad によるそれとは異なり、入射角が大きくなるにつれ Mathcad との差が大きくなった。

次にサンプルの試作であるが、新材料で行おうとしたところ、作成担当者から「作成のし易さから、最下層のみを新材料で作成し、上層部を全て旧材料で作成したい」という要望が出された。その為、混合モデルでシミュレーションすることとなり、更なるサンプル作成のし易さを検討する為、最下層は新材料 55vol%固定とし、上層部を旧材料1層(合計2層)/2層(合計3層)/3層(合計4層)の3パターンで先ず Mathcad にて最適化シミュレーションし、その濃度勾配を使って夫々を三次元電磁界ソルバで斜入射反射吸収特性をシミュレーションした。

その結果、2層は吸収性能が-20dB を実現できず、実サンプルの作成は3層モデル以上で行う必要があることが解った。また、4層モデルの方が吸収性能が高いが、垂直入射(TE-00deg と TM-00deg)だけでなく入射角が30deg(TE-30deg と TM-30deg)～45deg(TE-45deg と TM-45deg)辺りまで含めて検討すると、3層モデルでも十分高い吸収性能を実現している。よって実サンプルの試作は4層よりも作成が容易な3層で行うことにした。

作成されたサンプルは上層部・下層部ともに複数に分かれていたが、詳細は2-4-3で述べるとして、それらの内、よい特性を示したものを外部機関であるキーコム(株)へ持ち込み、斜入射特性を測定した。入射角度毎の測定結果とシミュレーション結果を比較したものの一部を図 2-3.4～図 2-3.5 に示す。

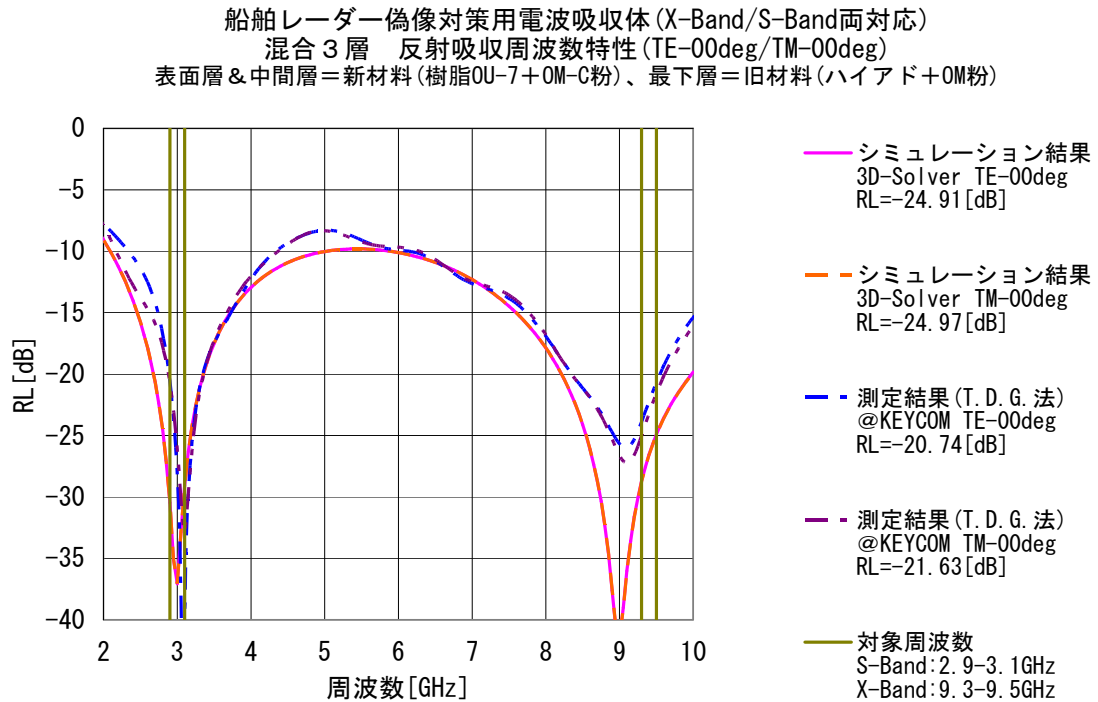


図 2-3.4 新材料と旧材料両方を使用した船舶レーダー用吸収体の斜入射反射吸収特性
 (混合 3 層, 三次元電磁界ソルバ シミュレーション結果と実測結果, TE-00deg と TM-00deg)

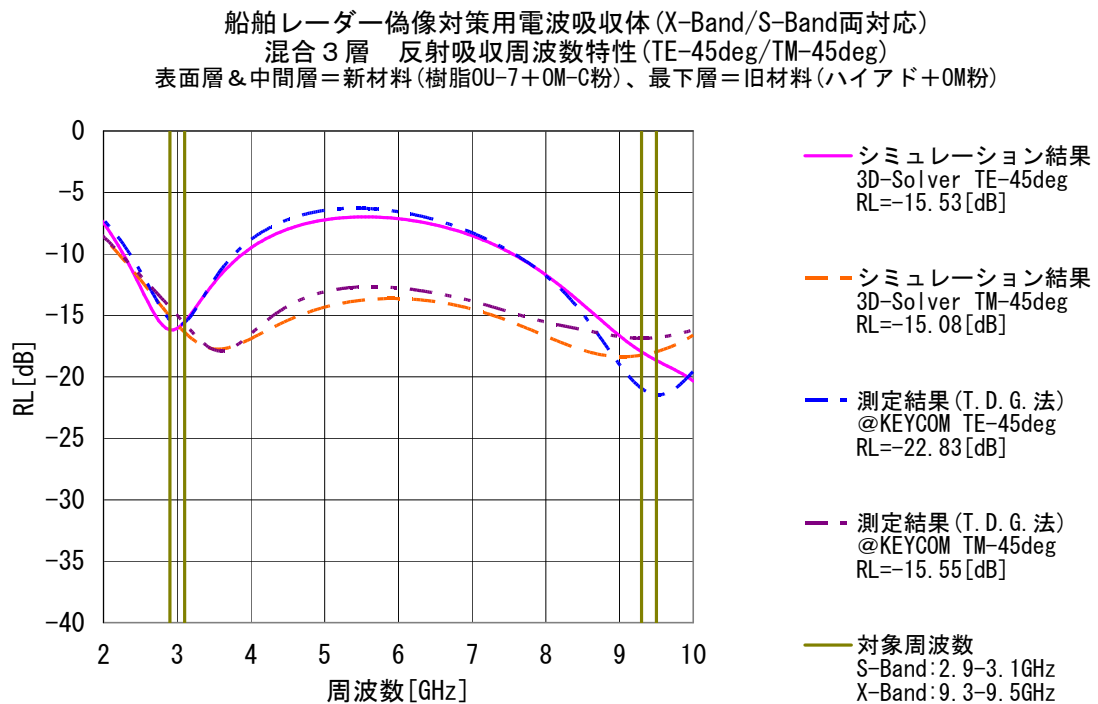


図 2-3.5 新材料と旧材料両方を使用した船舶レーダー用吸収体の斜入射反射吸収特性
 (混合 3 層, 三次元電磁界ソルバ シミュレーション結果と実測結果, TE-45deg と TM-45deg)

図 2-3.4～図 2-3.5 からシミュレーション結果と実測結果はよく合致していることが解る。これで垂直入射時及び斜入射時における電波吸収機構が解明できたと同時に、船舶レーダー偽像対策用電波吸収体の開発に一定の目処が立ち、特にその電波吸収性能においては、十分に実用レベルにある性能が得られたと言える。

2－3－4 成果と課題

前節で述べたように、磁性粉と樹脂の混合物から遠心力により濃度勾配を有する成形体を得る方法では、低誘電率の樹脂を使用したとしても、空気のそれとは 2 倍近く大きな材料であり、吸収体表面での不要反射により、今回のプロジェクトで目標とする電波吸収特性を獲得することが困難であった。三次元電磁界シミュレーションは、分布定数回路モデルを用いた前節のシミュレーションとは異なり、材料の形状がシミュレーション結果に反映される。今回の三次元電磁界シミュレーションでは、吸収体の三次元加工によりインピーダンスの緩やかな変化が可能となり、電波吸収特性が大幅に改善できることが確認された。この手法は、船舶レーダー偽像防止用電波吸収体にも適用可能であり、軽量化、高反射損失など本材料の更なる特性の改善も可能なものと期待している。

2-4 電界ベクトル回転法による大判サイズ電波吸収体の特性評価

2-4-1 概要

電波吸収能力の評価法として、従来のタイムドメイン法では、サンプル近傍の壁面や床などからの反射波が分離できないために測定の確度には不安が残る。本開発では、これらの問題を解決可能な電界ベクトル回転法による評価を実施する。本手法は、サンプルの位置を少しずつ変化させながらサンプルからの反射波のエネルギーを測定することで、サンプル以外からの反射波を分離できる。

まず、電界ベクトル回転法の計測ソフトウェアを開発し（図 2-4.1）、その後、2-1～3により設計・作製された電波吸収体についてその特性を評価した。

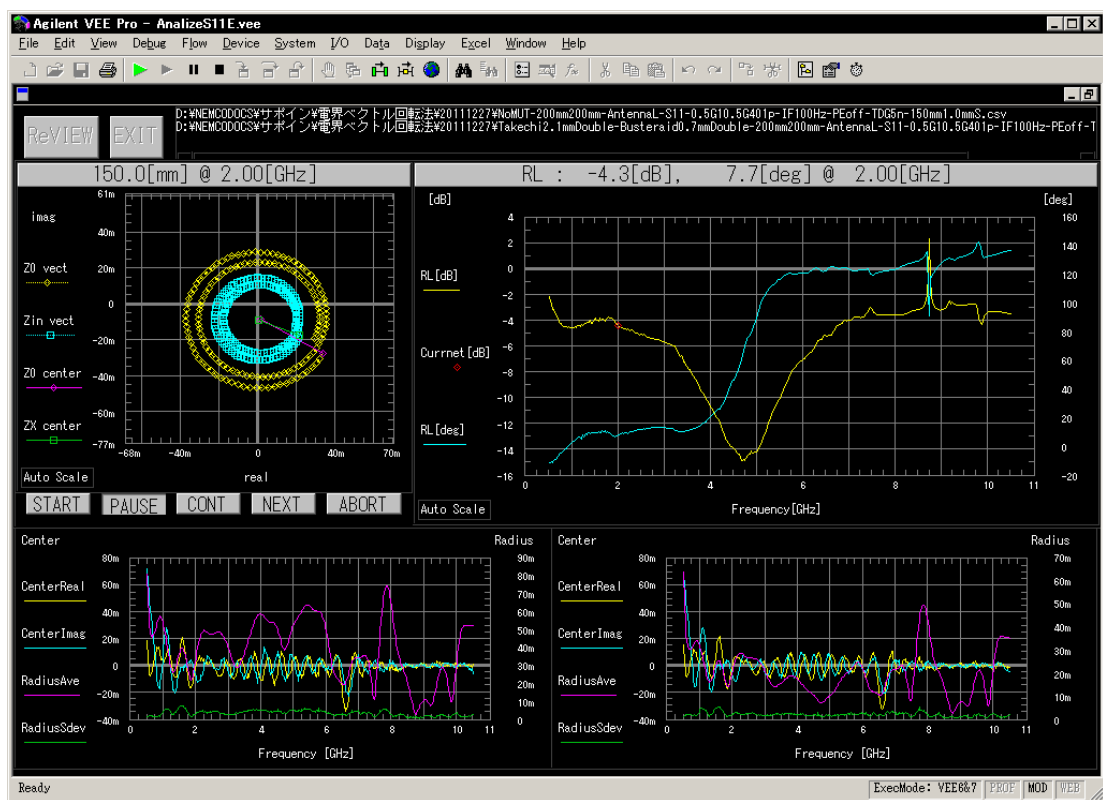


図 2-4.1 開発した電界ベクトル回転法の計測ソフトウェア

2-4-2 建材用広帯域電波吸収体の測定

新材料を使用し磁性粉濃度勾配をつけた大判サンプル(40cm×40cm)を作成し、大阪大学にて電界ベクトル回転法で垂直入射時の反射吸収特性を測定した。結果の一部を図 2-4.2 に示す。

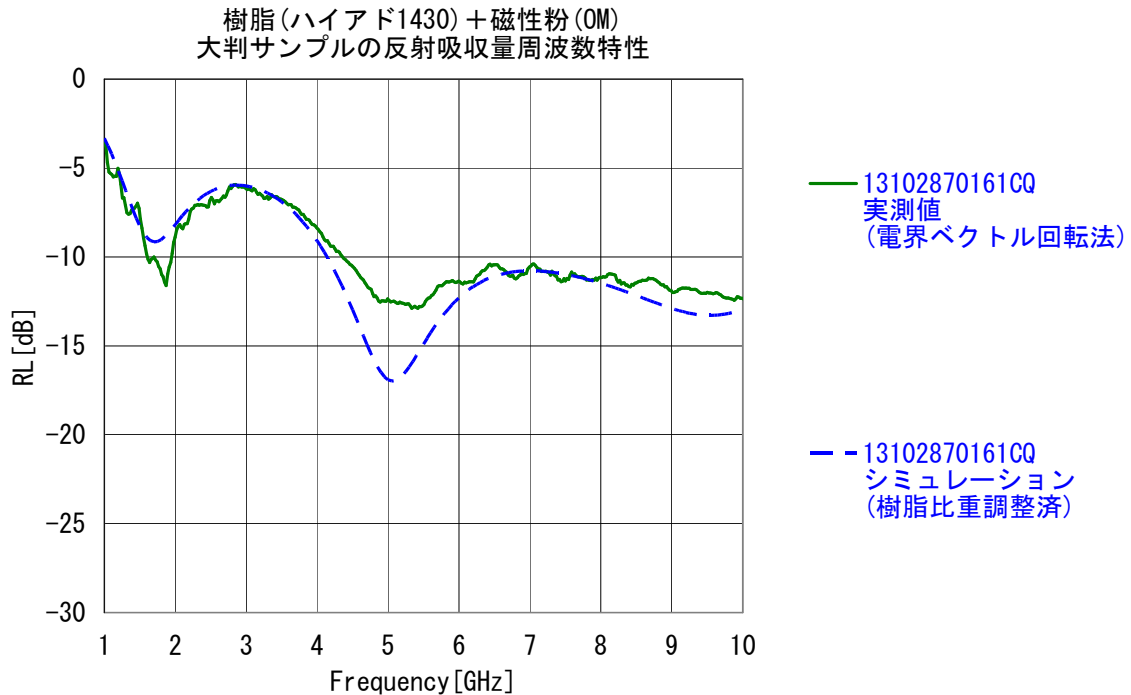


図 2-4.2 新材料使用広帯域電波吸収体の反射吸収特性
(実測値とシミュレーション結果, 13102870161CQ)

実測値とシミュレーション結果が合致していることがわかる。以上の結果から、2-1 で作成した材料定数データベースと、2-2 で作成したシミュレーションプログラムと本章 2-4 で作成した電界ベクトル回転法による測定は高い次元で整合性が取れていると言える。問題点としては、磁性粉濃度勾配の測定精度の向上が挙げられる。

2-4-3 船舶レーダー偽像対策用電波吸収体の測定

2-3-3 では船舶レーダー偽像対策用電波吸収体を混合 3 層モデルでシミュレーションし、サンプルを作成した。そのサンプルについて、大阪大学で実施した計測結果を図 2-4.3 に示す。(図では外部機関での計測結果と合わせて示している。) 上層部および下層部はどれもほぼシミュレーション通りであり、目標となる -20dB を概ね達成している。

2-4-4 外部機関での特性評価

電界ベクトル回転法での測定結果を検証する為と、2-3-3 で開発した船舶レーダー偽像対策用電波吸収体の斜入射反射吸収特性を確認する為に、2-4-3 で測定した同一サンプルを外部機関(キーコム(株))にて測定した。但し、キーコム(株)で測定する場合のサンプルサイズは 60cm×60cm となるので、実際に測定する場合は 2-4-3 のサンプルの吸収性能が良い組合せを

選んで 60cm×60cm にして行った。

この外部機関での測定結果の内の垂直入射特性と、大阪大学での実測値、及びシミュレーション結果を図 2-4.3 にまとめておく。

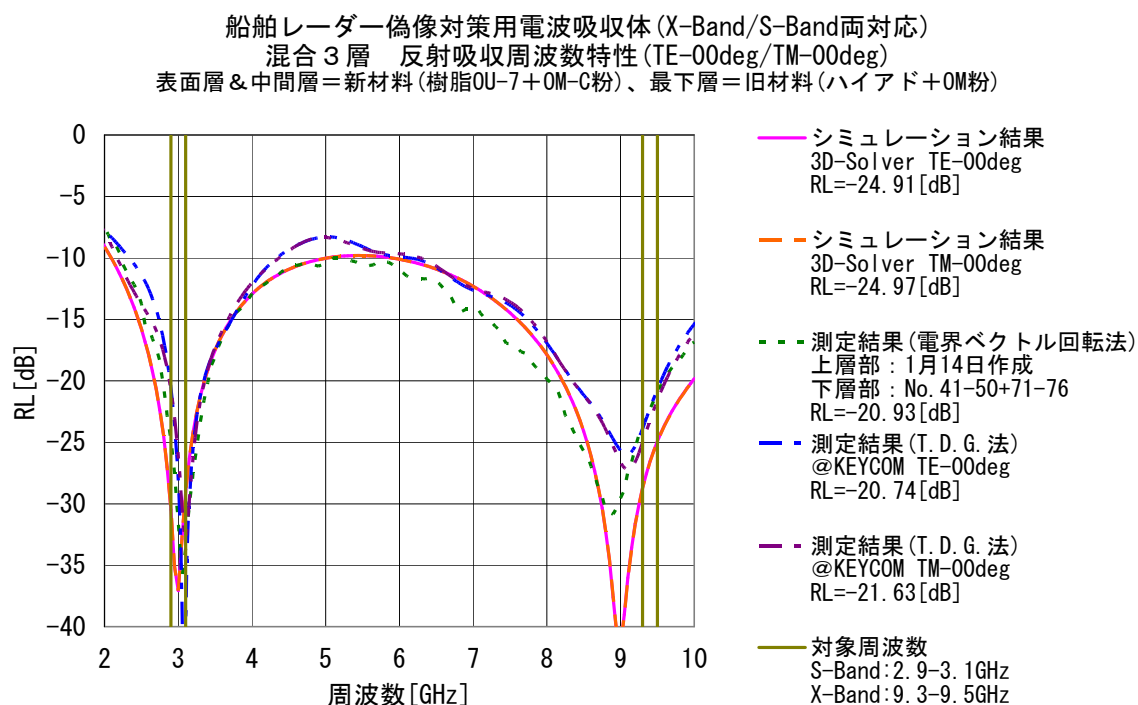


図 2-4.3 船舶レーダー用吸収体の垂直入射反射吸収特性
(シミュレーション結果と大阪大学での実測値、キーコム(株)での実測値)

図 2-4.3 から、実測値はシミュレーション結果には僅かながら及ばないものの、船舶レーダーの使用周波数帯域 X-Band/S-Band 両方で-20dB 以上の吸収性能を示しており、その性能は十分実用レベルにあることが解る。他方、大阪大学での電界ベクトル回転法による測定結果は外部機関における測定結果と高いレベルで整合性が取れている、と言える。

2-4-5 成果と課題

本プロジェクトの実施により、実験室レベルではあるが、市販の厚手広帯域電波吸収体の導入により反射損失特性評価時の電磁環境を整えたこと、さらに、高精度にサンプルを移動させる治具を試作したことで、外部機関で計測した結果と概ね一致する評価システムが確立された。サンプル特性の評価を外部委託することなく、開発チーム自らで実施可能なことから、今後の開発時間の短縮、ならびに、開発コストの削減につながるものと考ええる。

2-5 最適樹脂と磁性粉を用いた均質樹脂成形体の作製

2-5-1 概要

電波吸収体の製造は、樹脂と磁性体を攪拌し、遠心成形機に投入することで行う。この回転の遠心力により樹脂より重い磁性体が外周方向に偏り、密度勾配を実現させる。所定の密度勾配を得るには、材料に対応した成形機の運転条件（温度や回転数など）の最適パラメータを決定し、それを実現する成形機を開発する必要があるが、そのほかにも攪拌や攪拌時に生じる泡の除去（脱泡）なども作業の最適効率化には重要となり、遠心成形に関する統括的な装置・システムの開発を行う。

2-5-2 遠心成形機の開発

図 2-5.1 に、本事業で開発した遠心成形機を示す。作業効率の向上の為にドラムは2連式とした。オーブンの温度は 130 度、回転数は常時使用回転数 1300rpm にて運転可能、時間変化により各種設定条件を変化させることもでき、電波吸収体サンプルを作成する際に最適化出来るようになっている。



図 2-5.1 開発した遠心成形機

遠心成形機については、その後、1 インチ厚の大判サンプルを作製するため、成形機のドラムリングのつば高さを 3cm に改造した。また、製作工程を短縮するため、スポットクーラーの送風による冷却機能を追加した。

2-5-3 電波吸収体の試作

この遠心成形機を使用して、材料に適した成形機の運転状況及び、サンプルの各部分における密度変動を 10%以内に抑える安定した製法、温度や回転数などの重要な製作パラメータを把握した上で、電波吸収体を試作した。

2-5-3 (1) 広帯域用電波吸収体の試作

本事業の目的である、電波暗室向け電波吸収体 (30MHz~20MHz で-20 dB~-30 dB以上) および建材向け電波吸収体 (1GHz~10GHz で-15 dB以上) の試作を行った。

●樹脂ハイアド 1430+磁性粉 OM

新たにデータベースを作成した樹脂ハイアド 1430+OM 粉でサンプルの作製を行った。密度勾配データの一例は 2-6 均質樹脂成形体の密度勾配評価 にて記載する。

2-5-3 (2) 船舶レーダー偽像防止用電波吸収体の試作

●樹脂 OU-7+磁性粉 OM-C (表面層+中間層)

表面層~中間層は遠心成形機で作製を行った。まず中間層を作成後、取り出さずに表面層を上からコーティングする形で流し込んだ。

●樹脂ハイアド 1430+OM 粉 (最下層用高濃度シート)

最下層の磁性粉濃度は遠心成形機で実現することは困難であったため、最下層のみ別途作製を行った。樹脂ハイアド 1430+磁性粉 OM の混合物を未硬化の段階でプレスし、100×100 の高濃度シートとした。

2－5－4 成果と課題

最適パラメータに応じて運転条件を設定できる遠心成形機の開発は達成した。さらに、遠心成形機改造により、ハーフインチ厚みの電波吸収体の作製が可能となった。また、冷却機能の追加により、サンプルの作製時間短縮が可能となった。

上記の成果を得たものの、実施計画書に記載した目標である事業化及び量産化にはさらなる改良が求められる。また、2－5－3（2）で作製した船舶レーダー偽像対策用電波吸収体のように、最下層により濃度の高い磁性体シートが必要となる場合には更に製作工程の工夫が必要となる。

2-6 均質樹脂成形体の密度勾配評価

2-6-1 概要

試作した吸収体の密度勾配パターンが設計の数値として一致しているかどうか、サンプルを作製する毎に製造現場で迅速に評価できることが効率的な開発を行う上で重要である。そこで、樹脂内の磁性粉濃度を蛍光 X 線分析装置により評価する。本手法は濃度既知試料を用いて予め検量線を作成しておくことで、短時間で磁性粉に含まれる元素の濃度、すなわち、樹脂内の磁性粉濃度を評価することができ、サンプルの断面に対して深さ方向にライン分析を行うことで、設計値と実際に作製したサンプルの密度勾配パターンについて比較することが可能となる。

本研究では、濃度既知試料を測定し、実際の計測密度と分析装置との偏差が±5%以下になるよう補正関数を検討した。それを基に作成した検量線を用いて試作サンプルの密度分布の計測を試みた。さらに、試作サンプルの安定した測定結果を実現するため、検量線の基となる最適標準物質の探索、および蛍光 X 線分析装置の最適な測定条件を確立する。

2-6-2 試作と計測

2-6-2 (1) 蛍光 X 線分析および密度計測

蛍光 X 線分析、密度計測共に、2-1 シミュレーション用データベースの作成 および 2-5 最適樹脂と磁性粉を用いた均質樹脂成形体の作製 にて作製したサンプルを厚み方向に、各層ごとに切り出し、計測を行う。

蛍光 X 線分析は、図 2-6.2 に示す『X 線分析顕微鏡 XGT - 7200V』を用いて行った。密度計測としては、切り出したサンプルを厚み方向にスライスし、均一に整えた試料を用い、電子天秤による重量測定とマイクロメータによる厚み測定を行った。蛍光 X 線分析で計測した濃度勾配と、スライサーで各層ごとに切り出して計測した濃度勾配の比較を行った。一例を図 2-6.1 に示す。

密度測定結果（青）のグラフに近い形状となったが、検量線を元に求めた密度（赤）のほうが小さな値となっており、誤差が大きい結果となった。

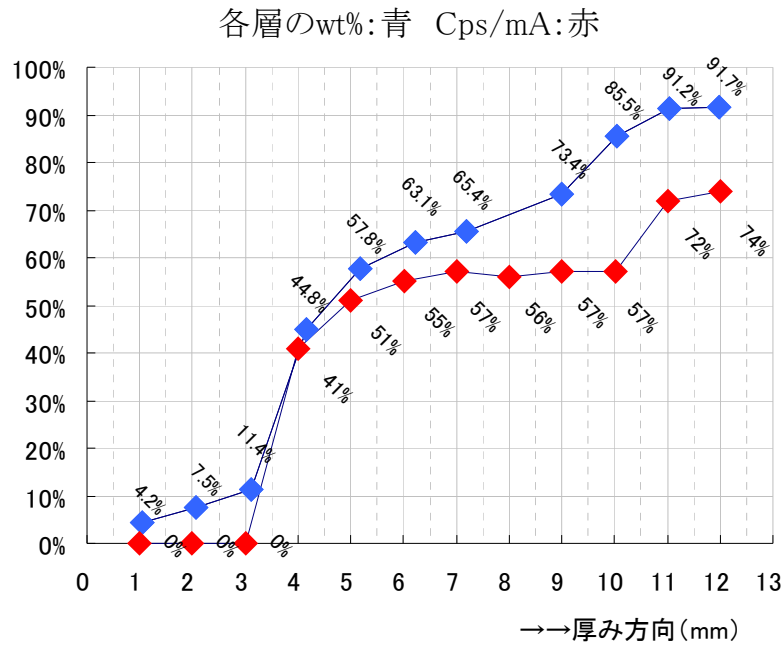


図 2-6.1 蛍光 X 線分析と密度測定結果の比較一例

2-6-2 (2) ハイアド 1430+OM 粉サンプル密度測定

2-5 最適樹脂と磁性粉を用いた均質樹脂成形体の作製 に記載したハイアド 1430+OM 粉サンプルについて、シミュレーションによって出された理想傾斜密度に近づけるべく、製作条件を変更して磁性粉の濃度勾配測定を作製したサンプルごとに行った。条件を変えて計測した中で、回転数 1900rpm 遠心時間 10 分で製作を行った結果を図 2-6.2 に示す。大まかな密度傾斜の形状は回転数できまり、それを時間で微調整するのが良い事がわかった。

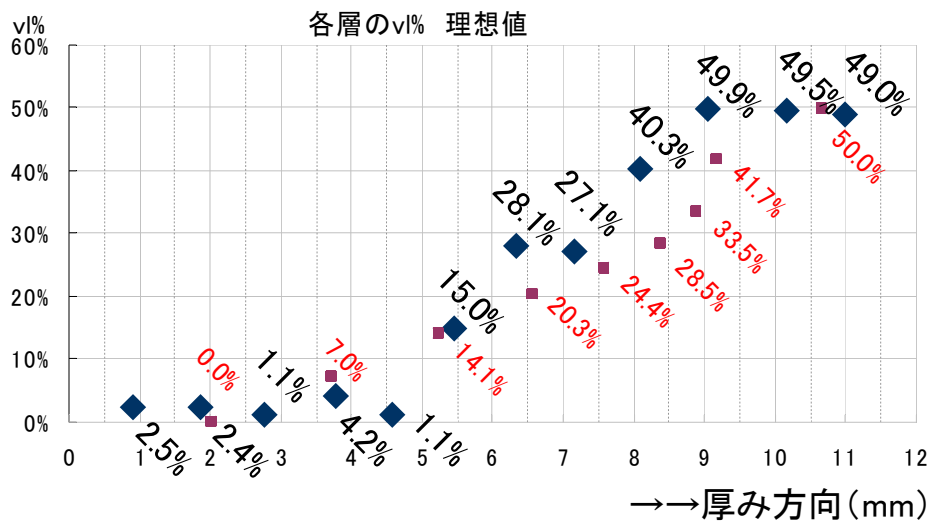


図 2-6.2 26 年 2 月 20 日作製サンプル含有磁性粉濃度勾配測定結果

2-6-2 (3) 船舶レーダー偽像対策用サンプル密度測定

●樹脂 OU-7+磁性粉 OM-C (表面層+中間層)

2-5 最適樹脂と磁性粉を用いた均質樹脂成形体の作製 に記載した樹脂 OU-7+磁性粉 OM-C (表面層+中間層) サンプルについて、密度測定を行った。数回の試作を経た後、表 2-6.1 のような測定結果となった。

表 2-6.1 1月14日作製サンプル測定結果

各層の密度傾斜の確認 OU-7 + OM-C 測定厚み=5.045mm							
層	X(mm)	a(mm)	サンプル (mm ³)	(g)	密度 (g/cm ³)	(wt%)	(vl%)
表面層+中層	1.0295	1.0295	206.8883	0.2652	1.28	36.513%	5.955%
中層 1	2.12	1.0905	219.1469	0.3601	1.64	53.194%	11.121%
中層 2	3.1765	1.0565	212.3142	0.3524	1.66	53.786%	11.358%
中層 3	4.112	0.9355	187.9981	0.3072	1.63	52.863%	10.990%
中層 4	5.1315	1.0195	204.8787	0.3552	1.73	56.284%	12.415%
	トータル	5.1315	1031.226	1.6401	1.59	51.231%	10.366%
	磁性粉 密度:	7.86		主剤密度:	0.865343		

中間層の濃度が目標である 10.302vol%=50.923wt%に近似したため、大阪大学および長田電機㈱に垂直入射特性の測定を依頼した。

●樹脂ハイアド 1430+OM 粉 (最下層用高濃度シート)

2-5 最適樹脂と磁性粉を用いた均質樹脂成形体の作製 に記載した樹脂ハイアド 1430+OM 粉 (最下層用高濃度シート) サンプルについて、密度測定を行った。1~100枚作製し、大阪大学および長田電機㈱に垂直入射特性の測定を依頼した。

2-6-3 成果と課題

作製したサンプルについて磁性粉濃度の評価を行うことによって、サンプル作製時の回転数、時間といった条件を考察することが出来た。蛍光 X 線分析については、濃度既知試料を測定し、実際の計測密度と分析装置との偏差を調査するための方法を確認した。

本事業では本来、蛍光 X 線分析装置を主とした密度勾配評価を行い、設計値と実際に作製したサンプルの密度勾配パターンの比較によって迅速なサンプルの選定を行う予定だったが、検量線の基となる最適標準物質の探索及び蛍光 X 線分析装置の最適な測定条件の確立を達成するまでには至らなかった。

2-7 電波吸収性能の改良技術の開発

2-7-1 概要

2-1 から 2-6 の要素技術で最適化された高度勾配型電波吸収体においても、樹脂の誘電率が空気とは異なることから、樹脂が濃縮された吸収体表面での電波の反射を完全に抑制することは不可能となる。従来の方法では、スパイク状のピラミッド型の吸収体とすることで、空気の特性に近いピラミッドの頂点から、ピラミッド底辺の樹脂のみの部分まで、連続的にインピーダンスを変化させることで電波の不要な反射を抑制している。本プロジェクトでは、遠心成形によりマイクロバルーンなどの空気を含有するフィラーの樹脂成形体中における濃度に連続勾配を設けることで、吸収体表面での不要反射の低減を試みたが、マイクロバルーン自体の誘電率が空気に比べてかなり大きいため、本手法を断念した。そこで、作製した濃度傾斜磁性粉含有樹脂成形体に加工を加えることや三次元形状の金属反射板を用いることで、電波吸収特性の改善を目指した。

2-7-2 マイクロバルーン混入成形体の試作と評価

マイクロバルーンとは数マイクロから数百マイクロの空気を含有する中空粒子のことであり、その外殻成分としてはガラスなどの無機系のものと、熱可塑性高分子を用いた有機系のものがある。前者は機械的特性に優れるものの真比重が大きく、後者はその逆であるなど一長一短があるため、本事業で使用するマイクロバルーンとしては両者とも検討することとし、無機系フライアッシュバルーンと有機系のプラスチックマイクロスフィアのサンプルを某社より提供いただき評価した。

まず、無機系のフライアッシュバルーンについては、遠心の回転数や時間、フィラーの充填率を変えて試作を行ったが、良好な濃度勾配が得られなかったために実験を中止した。

次に、熱可塑性高分子材料を膨張させたマイクロスフェアについて検討を行ったが、バルーンの外殻に使用されている高分子材料の誘電率の値が大きいため、マイクロバルーンの濃度を如何に高めても空気と類似の性質とはならず、この材料の組み合わせでは入射面における電波の反射が抑制できないことが明らかとなった。

2-7-3 反射板の三次元化による電波吸収特性の改善

三次元反射板として、加工・作製が容易な円錐型を採用し、電波吸収体に円筒形の穴を穿った後で反射板を埋め込むことを想定し、サンプル厚さ 1 インチの電波吸収体について、三次元電磁界シミュレータにより円錐の径、高さについて最適化を行った。シミュレーションでは円錐は材質を銅としているが、実際の製造においては、プラスチックの円錐にアルミ箔を貼り付けることで反射板とすることとした。

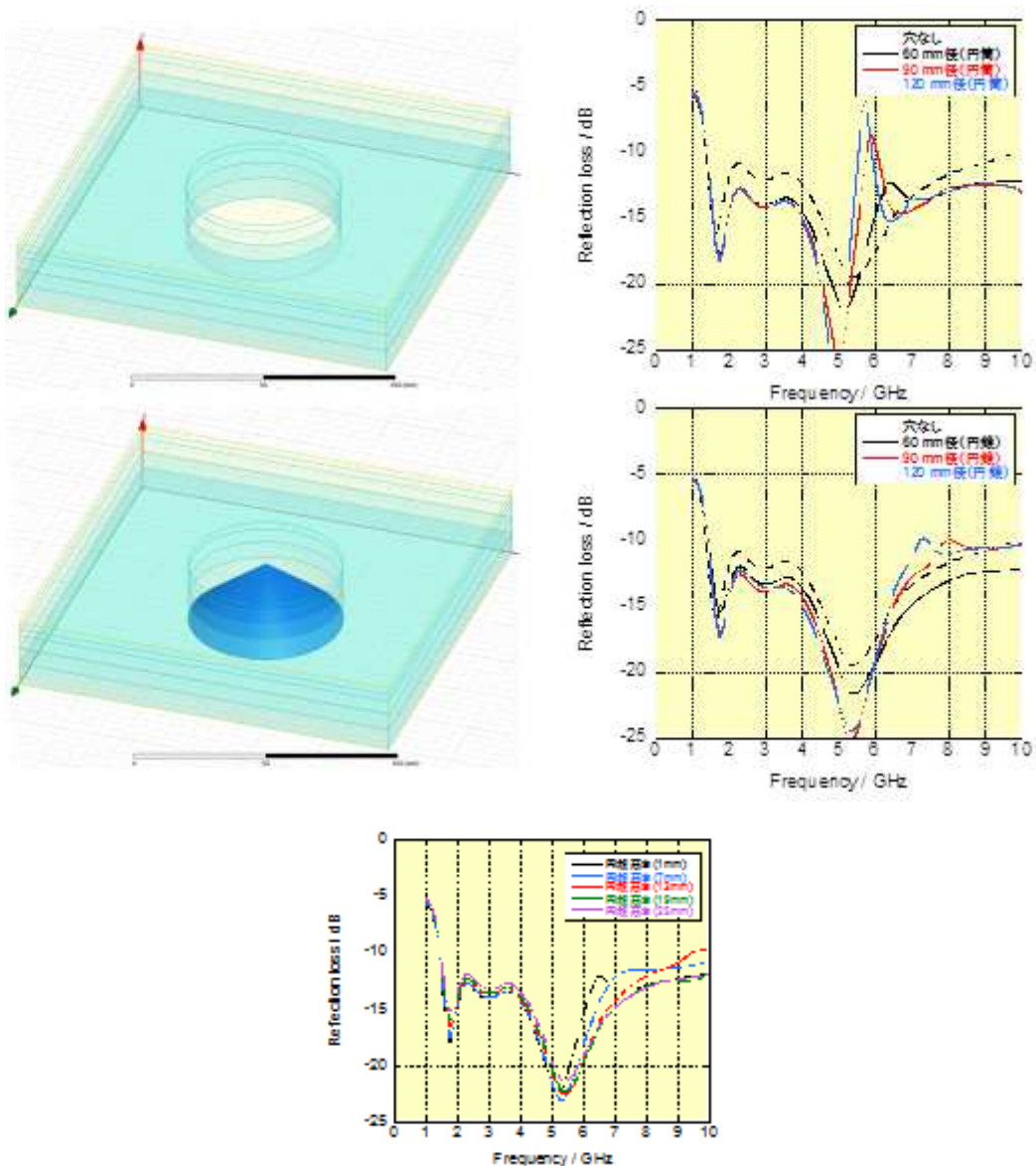


図 2-7.1 通常の平滑反射板（上）と円錐反射板（中）、および円錐の径 60 mm で高さを变化させた際（下）の電波吸収特性

図 2-7.1 は円錐反射板と従来のフラットな反射板を用いた場合の電波吸収特性を示したものである。ここでは、シミュレーションを簡略化するために 4 層構造のものを濃度傾斜材料に近似して計算している。

単純に電波吸収体に円筒形の穴を穿ただけでも、吸収体表面の見かけの誘電率が低下しインピーダンスが低減されることで、反射損失のベースラインが改善されることが分かった。円筒の穴に円錐反射板を挿入した電波吸収体で、電波吸収特性の更なる改善を試みたところ、円錐の高さが低い場合は円筒穴と同様の吸収特性を示すが、吸収体の厚さの 7 割程度の高さとすることで良好な特性が得られることを見出した。

この結果を基に、吸収体の厚さをプロジェクトの目標とするハーフインチとし、同様に円錐型反射板の電波吸収特性を調査した結果、吸収体が薄くなることで円錐の高さも併せて減少することになり、円錐が鈍角となるために吸収特性の改善効果が小さいことがわかった。これを改善するには、径の小さな穴を多数吸収体に穿ち、更に多数の円錐反射板を作製する必要があるため、工数の増加、コスト高などの理由から、本手法による吸収特性の改良を断念することとした。

2-7-4 吸収体表面の加工による電波吸収特性の改善

前述のとおり、電波吸収体表面のインピーダンスを空気のそれに近づけることで、電波吸収特性の改善が見込まれる。シミュレーションによって濃度勾配の最適化された組み合わせにおいて、吸収体表面の三次元加工による吸収特性の変化を、三次元電磁界シミュレータにより調査した。

ここでも、シミュレーションの時間を短縮させるために 5 層の積層構造で濃度傾斜電波吸収体を近似しており、磁性体濃度が最大となる層には、市販の電波吸収体（TSS ジャパン製）を使用している。電波吸収体表面から 4 層目まで V 字型（谷型）に縦横に切れ込みを入れた場合では、電波吸収特性の大幅な向上が認められた（図 2-7.2）。この加工パターンでは、表面層より空気の体積率を徐々に減少させることで、濃度傾斜による効果に加えて連続的にインピーダンスを変化させることが可能であり、その結果、表面での不要反射を抑制できたこと、さらに、吸収体内部に侵入した電波を効率よく熱エネルギーへ変換できたことに対応する。しかしながら、表面加工だけでは、3 GHz 付近での電波吸収特性の劣化を低減することが出来ないために、材料定数の大

きな最下層の材料に穴あけ加工を行い、これによる電波吸収特性の更なる改善を検討した。

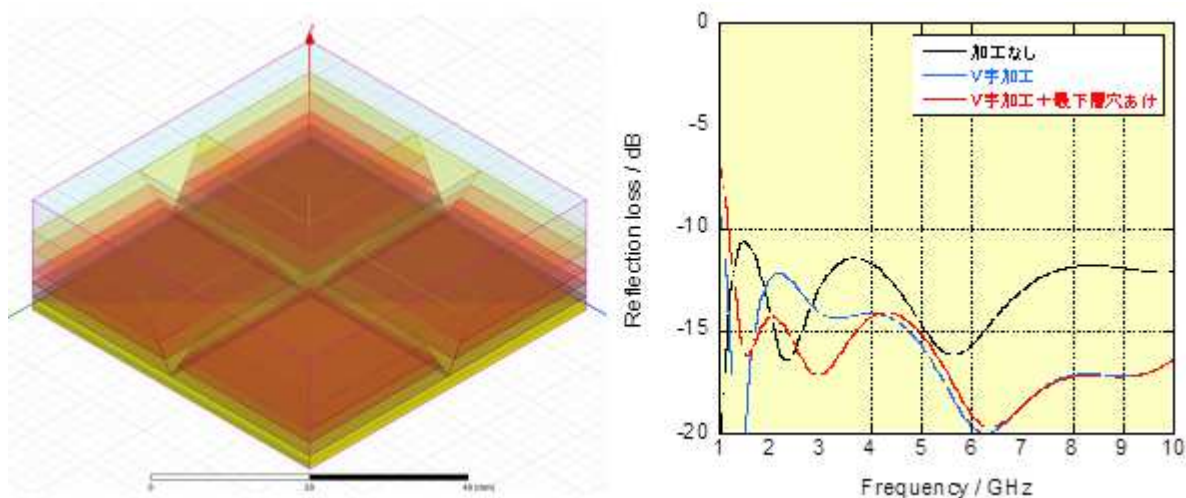


図 2-7.2 電波吸収体の加工有無による濃度勾配電波吸収体の反射損失特性の違い（計算）

種々の形状を調査した結果、ある形状のもので最も良好な特性が得られ、目標とする周波数帯域 1～10 GHz において、一部では-15 dB を満たさない周波数帯が存在するものの、ハーフインチ以下の厚さで概ね目標値を達成できることがわかった。

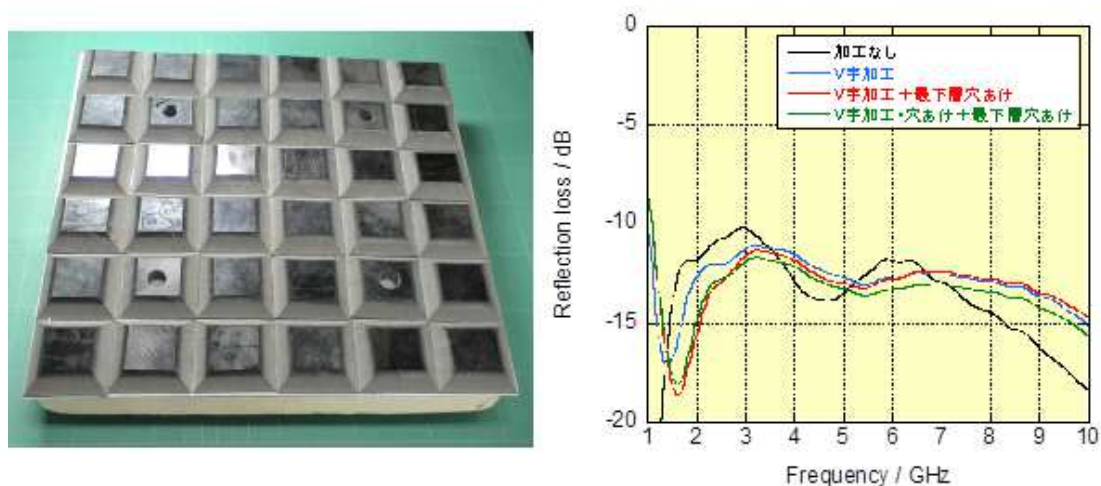


図 2-7.3 電波吸収体の加工有無による濃度勾配電波吸収体の反射損失特性の違い（実測）

次に、実際のサンプルを使用して、表面加工の効果ならびに最下層材料の穴あけ加工の効果を検証した。図 2-7.3 に示すように、濃度勾配樹脂成形体を 50 mm 角に加工した後、側面を 45 度の傾斜で削ることで、V 字型の切り出しと同等の構造を得た。このサンプルの S11 を計測した結果、電波吸収特性が改善されシミュレーションと同様の挙動が得られることを確認した。これに加え

て、最下層の TSS ジャパン製の電波吸収体にもある形状の加工を施したところ、これもシミュレーションの傾向と合致するが吸収特性の更なる向上が認められた。前述の円筒型穴あけのシミュレーションで得られた効果をここでも利用し、8 個の吸収体ブロック中央に穴を空けたところ、吸収特性はさらに改善され、概ね全帯域にわたりベースラインで-12 dB 程度の特性を示した。V 字型の角度や最下層の材料の選定等を詳細に最適化することで、電波吸収特性は更に改善可能なものと期待される。

2-7-5 成果と課題

ウレタン樹脂成形体中の磁性粉濃度に勾配を設けた電波吸収体では反射損失特性の改善に限界があることから、表面での反射防止層を付与するところで更なる特性の改善を検討した。有機系マイクロバルーンをウレタン樹脂に混合し、樹脂成形体中におけるマイクロバルーン濃度に連続的な勾配を設けた表面反射防止層を作製した。作製した反射防止層は 6 GHz 以上の帯域の電波については吸収特性の向上が認められたが、今回の遠心成形条件では、ウレタン樹脂もしくはマイクロバルーンの濃縮が難しいこと、さらに、マイクロバルーン自身の高い誘電率から、波長の大きな 6 GHz 以下の電波に対しては効果が認められなかった。

シミュレーションでは、樹脂成形体中の磁性粉濃度に最適な勾配を設けること、加えて、これに V 字型切り出しや穴あけ加工を行うことで、目標とする電波吸収特性が得られることがわかった。実際のサンプルにおいても、これらの加工により同様の挙動が見られたものの、濃度傾斜のパターンが最適パターンと一致していないことから、目標値を達成することが出来なかった。遠心成形において濃度勾配を支配するファクターは樹脂の粘性、硬化速度、磁性粉の大きさ、その分布に加えて、遠心力と遠心時間などの多数のファクターを含むものであるが、粒度分布が最も傾斜パターンに反映するものと見込まれる。今後は、粒度分布と形成される濃度勾配の関係を詳細に調べることで、シミュレーションから導かれる最適値に類似したサンプルの作製を目指したい。

第3章 全体総括

3-1 各サブテーマの研究開発成果および今後の課題に関して

3-1-1 シミュレーション用データベースの作成

複数の樹脂と磁性粉の組み合わせで電波吸収体のサンプルを作成し、誘電率と透磁率を測定して、最適密度勾配をシミュレーションするためのデータベースの作成を行った。基本的なデータの収録を実現したが、今後適用先の要求仕様や新たな性能の樹脂や磁性体の出現に際しては、別途サンプルを作成してデータベースを充実させる必要が出てくる可能性がある。

3-1-2 シミュレーションによる最適濃度勾配の検証

上記データベースを基に、分布定数回路を用いた電波吸収特性のシミュレーションシステムを開発した。また、要求仕様に対応した磁性粉の密度勾配設計を行い、実験結果とシミュレーション結果の対応が良くとれていることを確認した。シミュレーションにより、超広帯域において良好な電波吸収特性を得るためにはインピーダンスの緩やかな連続変化が必要であり、発泡剤を使用するなど吸収体表面の低インピーダンス化が今後の課題などの考察を得ることができた。

3-1-3 有限要素法を用いた電磁界シミュレーションによる電波吸収機構の詳細説明

上記のシミュレーションシステムで基本的な電波吸収体の設計はできるが、三次元的な形状の影響等を考慮するために三次元電磁界シミュレータ上で動作する立体モデルを開発し、材料設計を行った。これにより、吸収体の三次元加工によりインピーダンスの緩やかな変化が可能となり、電波吸収特性が大幅に改善できることが確認された。この手法は、船舶レーダー偽像防止用電波吸収体にも適用可能であり、軽量化、高反射損失など本材料の更なる特性の改善も可能になる。

3-1-4 電界ベクトル回転法による大判サイズ電波吸収体の特性評価

従来のタイムドメイン法では反射波の影響等を評価できないため、電界ベクトル法による評価システムを開発した。実験室レベルではあるが、市販の厚手広帯域電波吸収体の導入により反射損失特性評価時の電磁環境を整え、さらに、高精度にサンプルを移動させる治具を試作し、外部機関で計測した結果と概ね一致する評価システムを確立した。今後の開発時間の短縮、ならびに、開発コストの削減につながるものと評価される。

3-1-5 最適樹脂と磁性粉を用いた均質樹脂成形体の作製

遠心整形法で電波吸収体の製作を行うが、所望の密度勾配を作るための運転条件抽出の検討を行った。その検討を基に、厚み 1 インチの吸収体サンプル製造、より精度の高い温度管理や製造時間の短縮等の課題解決のための遠心成形機改造を行った。

3-1-6 均質樹脂成形体の密度勾配評価

試作したサンプルの密度勾配パターンと設計値との比較検討を行うため、磁性粉濃度の評価を行うことによって、サンプル作製時の回転数、時間といった条件抽出を行った。しかしながら、蛍光 X 線分析装置による評価については、検量線の基となる最適標準物質の探索及び蛍光 X 線分析装置の最適な測定条件を確立するに十分な条件を抽出するまでには至らなかった。

3-1-7 電波吸収性能の改良技術の開発

遠心成形法にプラスして、さらなる性能向上を実現する複数の方策を検討した。シミュレーションでは、樹脂成形体中の磁性粉濃度に最適な勾配を設けること、加えて、これに V 字型切り出しや穴あけ加工を行うことで、目標とする電波吸収特性が得られることがわかった。遠心成形において濃度勾配を支配するファクターは樹脂の粘性、硬化速度、磁性粉の大きさ、その分布に加えて、遠心力と遠心時間などの多数のファクターを含むものであるが、粒度分布が最も傾斜パターンに反映するものと見込まれる。

3-2 事業展開に関して

性能的には、当初目標のうち電波暗室向の性能は、全周波数領域で-20dB 以上という要求には低周波領域で実現はできなかった。シミュレーションで設計条件は出せるので、実現のためには磁性体の高濃度部の密度を上げることや、吸収体の 3 次元形状を工夫する等の対策が必要となる。一方、建材向けの性能は、ほぼ目標を達成している。

今後の事業化に向けて、川下企業とニーズの詳細検討を行った。提案当初は簡易型の電波暗室、または電波暗箱のニーズを見込んでいたが、需要が一巡していて新規の需要が小さいこと、ポータブルの電波暗箱は軽量を求められて磁性鉄粉を使用する本方式は不利であること等の理由から

事業性が薄いという結果が出ている。

建材向けでは重量及び価格がネックになっていて、今後は、安価な磁性粉や樹脂の採用などの検討を進める必要がある。

当初想定以外の適用先の検討を進めて、船舶のレーダーの偽像対策用が検討された。船舶用レーダーは2つの周波数があり、従来の吸収体では吸収領域が狭いため、2種類を用意するか、1種類だけの対策をするかと言う対応になるものを、本開発の吸収体では両周波数帯で同時に吸収特性を得ることができることから、適用の可能性が考えられる。

上記例のように、本吸収体の特長を生かした適用先を開発することが肝要であり、今後川下ニーズの抽出と提案の活動を進めて商品イメージを明確にし、それに合わせた吸収体の設計と試作を行っていく。