

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業(第3次補正予算)

「高い電磁遮蔽性能と透明度を有する繊維製造のための  
織染加工技術の高度化開発」

研究開発成果等報告書

平成25年 3月

委託者 北海道経済産業局

委託先 公益財団法人函館地域産業振興財団

## 目次

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	3
1-3 成果概要	8
1-4 当該研究開発の連絡窓口	9
第2章 本論	10
2-1 電磁遮蔽機能に関する高機能化のための織染加工技術の高度化開発	10
2-1-1 極細線材の調達	10
2-1-2 織機、織条件の検討	11
2-2 新しい織染加工で製造した電磁遮蔽繊維を組み込んだ建材の高度化開発	12
2-2-1 遮蔽材設置窓フレームの開発	12
2-2-2 電波遮蔽室の設置法	13
2-3 基本物性値による電磁遮蔽性能の簡易予測・分析手法の開発	14
2-3-1 調査サンプルに関して	14
2-3-2 遮蔽材料素材の誘電率、透磁率と遮蔽性能	15
2-3-3 KEC法とDFFC法の測定データ	16
2-3-4 遮蔽素材と数値的評価	17
2-3-5 遮蔽材料素材の透明性の評価	18
2-4 電磁遮蔽建材の遮蔽性能及び透視性に関する測定及び評価手法の開発	19
2-4-1 低周波領域での電波遮蔽性能の測定・評価	19
2-4-2 高周波領域での電波遮蔽性能の測定・評価	20
2-4-3 電波遮蔽窓に設置した電磁遮蔽繊維材の遮蔽性能測定	21
最終章 全体総括	22

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### (1) 研究の目的

MRI は電磁遮蔽室の中に設置する必要があることから、検査室が閉鎖的な空間になっている。窓には電磁遮蔽繊維が使用されるが、①透明度が不十分、②遮蔽性能が安定しない、③対応できる周波数帯域が狭いという課題がある。電磁遮蔽繊維はMRI 室の他にも、生体検査室、プラズマディスプレイ、高速化する無線 LAN の混信・誤動作対策、航空機の操縦室など多岐に亘る分野で必要とされており、上記の3 課題を解決した新しい電磁遮蔽繊維を早期に実現可能にするための新しい織染加工技術が求められている。

従来日本国内及び世界で普及している SUS 製の電磁遮蔽繊維は、海外製が太い線径であるのに対し、日本製は細いのが特徴である。しかし、開口率が 65%程度と透視性が悪い。本研究開発では導電系/非導電系素材を使用することでコア材を従来の 1/3 以下に細くし開口率を 30%向上させた上で、対応周波数も 1 桁高い帯域までカバーできるよう、導電コーティングの素材及び多層染加工を新開発し、目標を達成することを目指した。

#### (2) 研究の概要

画像診断が普及している医療産業では、被験者(特に閉所恐怖症)の検査環境や医療従事者の労働環境に関し、閉塞感・圧迫感の低減が求められている。特に MRI 検査室は高度に電磁波を遮蔽する必要がある、窓部に使用されている電磁遮蔽繊維に課題がある。①透視性の向上、②安定して高性能な遮蔽性能、③装置の進化に合わせた広帯域の電磁波への対応を同時に実現するため、極細で高精細な繊維製造及び特殊コーティング技術を確立する。

#### (3) 実施内容及び目標

##### (a) 電磁遮蔽機能に関する高機能化のための織染加工技術の高度化開発

株式会社 Trees Network、独立行政法人 産業技術総合研究所、株式会社メデック、公立大学法人 公立はこだて未来大学

コア材の線径を従来の 1/3 以下、開口率 30%向上(90%以上)、対応周波数を 1 桁向上 (5MHz~数 GHz : 2 層で電磁遮蔽性能 100dB 以上) を目標とし、コア材の細線化とその織加工技術を開発すると共に、コーティング材の高機能化を図るための染加工技術の開発を目指した。株式会社 Trees Network は織染加工技術の開発(各素材の検討やサンプル試作)、ナノテク素材によるコア材・コーティング材の技術的検討、測定及びデータ分析をし、独立行政法人 産業技術総合研究所は測定システム的设计・構築、織染加工技術及びナノテク素材の基礎技術に関する検討をし、株式会社メデックは上記目標を達成する織染加工技術を反映させた製造手法及び装置の主要メカニズムに関する検討・設計を実施し、公立大学法人 公立はこだて未来大学は電磁遮蔽性能の測定、データ分析を実施した。

- (b) 新しい織染加工で製造した電磁遮蔽繊維を組み込んだ建材の高度化開発  
株式会社 Trees Network、株式会社メデック、公立大学法人 公立はこだて未来大学

1枚(従来の厚みの1/15)で遮蔽性能100dB以上を実現する電磁遮蔽ガラスと窓フレームの開発と、銅フィンガーに替わる電磁遮蔽繊維を使用した接続用材料と接続構造の開発を目標とした。株式会社 Trees Network は電磁遮蔽ガラス・フレーム・接合部材の設計と試作をし、株式会社メデックは電磁遮蔽フレームの設計と製作、コスト低減の検討、接合部材の試作をし公立大学法人 公立はこだて未来大学は測定・分析、データベースの構築を実施した。

- (c) 基本的物性値による電磁遮蔽性能の簡易予測・分析手法の開発  
株式会社 Trees Network、独立行政法人 産業技術総合研究所、公立大学法人 公立はこだて未来大学

複素数としての電気伝導度、誘電率、透磁率による分析を通してデータベースを構築し、理論計算プログラムを確立することで開発費用・時間を1/2以下にすることを目標とした。株式会社 Trees Network は各素材の物性値を測定し、独立行政法人 産業技術総合研究所は素材の物性値測定システムの設計・検討、シミュレーションを実施し、公立大学法人 公立はこだて未来大学は物性値から電磁遮蔽性能を対応付けるデータベースを製作した。

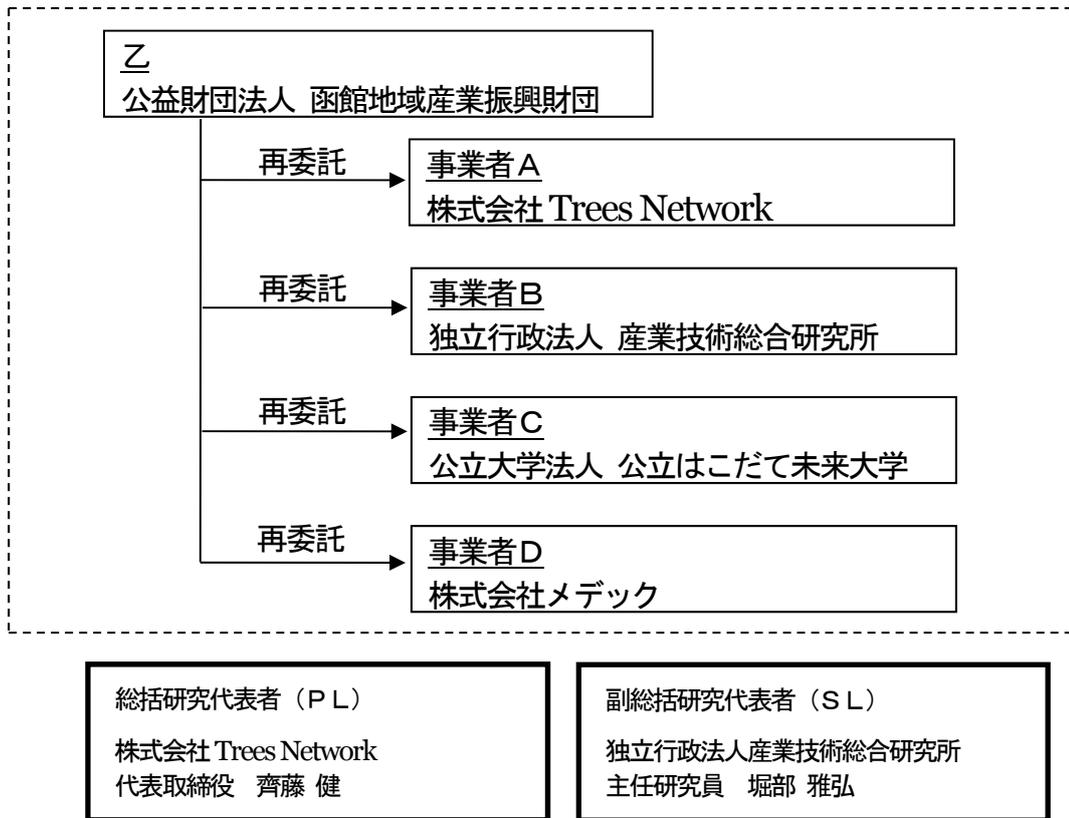
- (d) 電磁遮蔽建材の遮蔽性能及び透視性に関する測定及び評価手法の開発  
株式会社 Trees Network、独立行政法人 産業技術総合研究所、公立大学法人 公立はこだて未来大学

KEC法、DFFC法、MIL-STD 285により測定された電磁遮蔽性能測定値のデータベース構築とその分析結果抽出を目標として、素材や建材としての電磁遮蔽性能の測定及び評価手法を開発し、透視性と開口率との対比データベース、及び新しい性能評価法の確立を目標とした。株式会社 Trees Network は各種測定手法を比較・検討・実施し、独立行政法人 産業技術総合研究所は電磁遮蔽性能及び透視性に関する測定・評価方法を開発すると共に、測定手法による相違点を分析し、公立大学法人 公立はこだて未来大学は測定・分析、データベースを構築した。

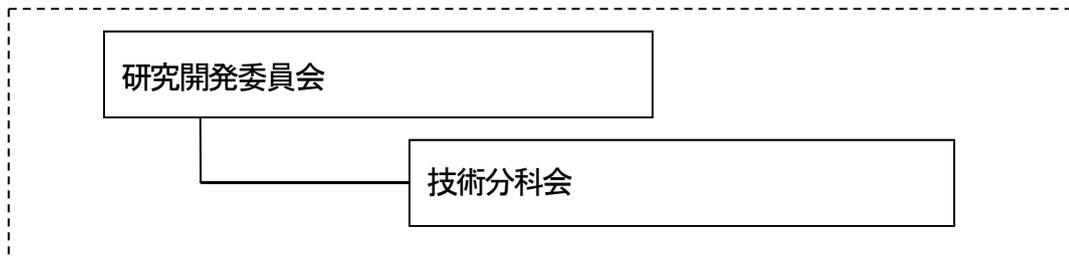
## 1-2 研究体制

### (1) 研究組織及び管理体制

#### ① 研究組織(全体)



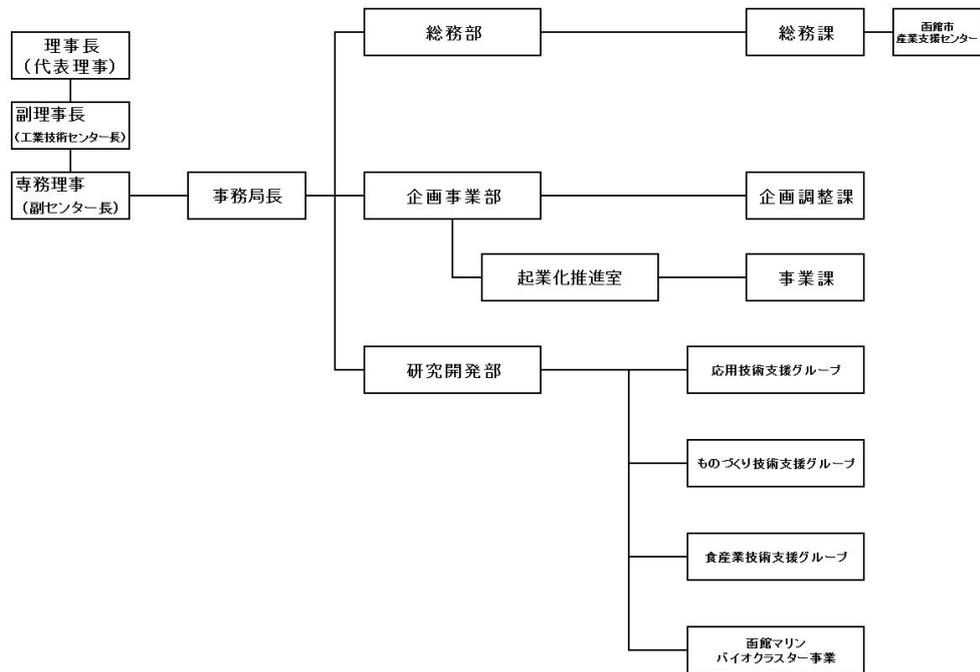
#### ② 研究開発委員会



## (2) 管理体制

### ① 事業管理者

[公益財団法人 函館地域産業振興財団]

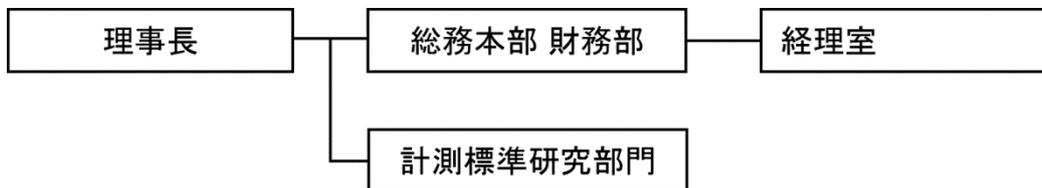


### ② 再委託先

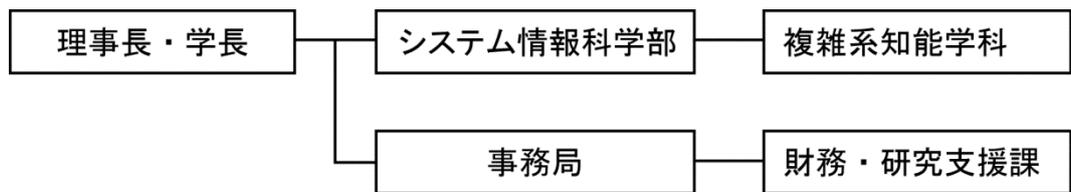
株式会社 Trees Network

代表取締役社長

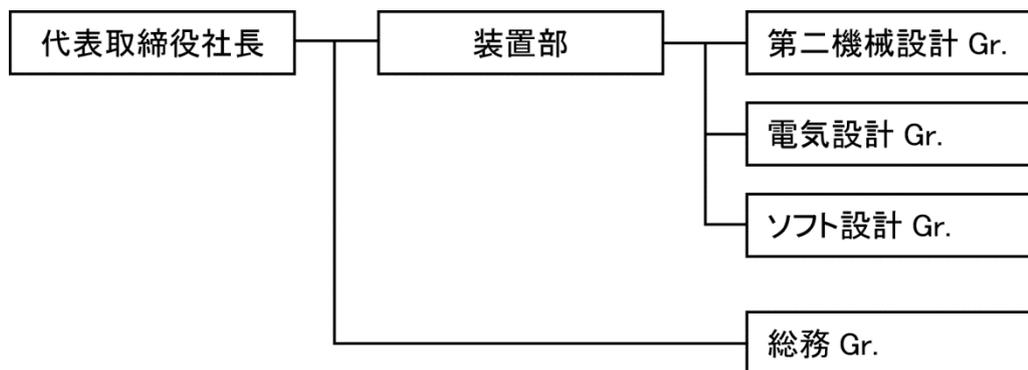
独立行政法人 産業技術総合研究所



公立大学法人 公立はこだて未来大学



株式会社メデック



(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】 公益財団法人 函館地域産業振興財団

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
吉野 博之	企画事業部 部長	⑤
宮原 則行	研究開発部 部長	⑤
高橋 幸悦	企画事業部 企画調整課長	⑤
杉崎 加奈子	企画事業部 企画調整課	⑤
岩船 奨	総務部 総務課長	⑤
木元 香	総務部 総務課	⑤

②研究員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
なし		

【再委託先】※研究員のみ

株式会社 Trees Network

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
齊藤 健	代表取締役	①, ②, ③, ④
山崎 芳樹	研究員	①, ②, ③, ④
佐藤 豪人	研究員	①, ②, ③, ④
轉法輪 阿弥子	研究員	①, ②, ③, ④
黒田 展子	研究員	①, ②, ③, ④

独立行政法人 産業技術総合研究所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
堀部 雅弘	計測標準研究部門 電磁波計測科 高周波標準研究室 主任研究員	①, ③, ④
黒川 悟	計測標準研究部門 電磁波計測科 電磁界標準研究室 研究室長	①, ③, ④
森岡 健司	電磁界標準研究室 主任研究員	①, ③, ④
石居 正典	電磁界標準研究室 研究員	①, ③, ④
飴谷 充隆	電磁界標準研究室 研究員	①, ③, ④

公立大学法人 公立はこだて未来大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
三上 貞芳	システム情報科学部 複雑系知能学科 教授	①, ②, ③, ④
長村 勝也	システム情報科学部 4年	①, ②, ③, ④
大御堂 尊	システム情報科学部 4年	①, ②, ③, ④

株式会社メテック

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
長野 大輝	営業技術 係長	①, ②
谷村 武史	第二機械設計Gr.	①, ②
木村 浩義	第二機械設計Gr.	①, ②
後藤 悠佑	電気設計Gr.	①, ②
上野 友也	ソフト設計Gr.	①, ②
蝦名 里美	ソフト設計Gr.	①, ②

(3) 経理担当者及び業務管理者

(事業管理者)

公益財団法人 函館地域産業振興財団

(経理担当者) 総務部	総務課長	岩船 奨
(業務管理者) 企画事業部	企画調整課長	高橋 幸悦

(再委託先)

株式会社 Trees Network

(経理担当者)	代表取締役	齊藤 健
(業務管理者)	代表取締役	齊藤 健

独立行政法人 産業技術総合研究所

(経理担当者) 財務部経理室	経理室長	山口洋二
(業務管理者) 計測標準研究部門	研究部門長	千葉光一

公立大学法人 公立はこだて未来大学

(経理担当者) 事務局	財務・研究支援課長	和久井 直也
(業務管理者) システム情報科学部 複雑系知能学科教授		三上 貞芳

株式会社メテック

(経理担当者) 総務 Gr.	Gr. 長	菅 龍彦
(業務管理者) 総務 Gr.		南 昌志

(4) アドバイザー

氏名	所属・役職
高原 太郎	東海大学 工学部 医用生体工学科 教授
滝川 均	Samsung C&T Corporation Engineering & Construction Group 技術顧問
Yoo Sungryoul	Samsung C&T Corporation Engineering & Construction Group Deputy General Manager
上野 賢一	独立行政法人 理化学研究所 脳科学総合研究センター 研究基盤センター 専門職研究員
春花 健児	独立行政法人 理化学研究所 脳科学総合研究センターガードナー研究ユニット テクニカルスタッフII
岩切 章人	シーメンス・ジャパン株式会社 ヘルスケアセンター マネージャー

(5) 実施期間

2012年3月1日～2013年3月29日

### 1-3 成果概要

本事業における4つサブテーマに対し、以下に、それぞれ成果の概要を示す。実施を計画していた内容に関しては全て完了し、技術的な高度化を達成し、十分な成果を得ることができた。

#### (1) 電磁遮蔽機能に関する高機能化のための織染加工技術の高度化開発

極細金属線の電磁遮蔽繊維製造技術に関し、従来の電磁遮蔽分野では限界であった線径 50 $\mu\text{m}$  の金属線の織加工技術に対し、約 1/3 以下である線径 16 $\mu\text{m}$  の織加工を達成した。また、開口率に関しても従来の 64.5%に対し、約 21%向上させた 77.9%を達成した。織り機に関しては特許調査やヒアリング調査などの技術調査や試し織りなどから高度化ポイントを抽出し、最終的には研究開発用自動織機をベースに改良図面を作成した。

特に極細金属線材は切断と永久変形が発生しやすいことから、紘(そうこう)、レピアヘッド、緯糸供給装置、送出装置と巻取装置、経糸のテンション制御、箆(おさ)、箆通しツールなど、合計 7 項目に関する改良を同時に実施する必要があることがわかった。また、金属素材の観点からも、14 種類の金属素材に関し、31 種類の極細金属線材(異なる線径を含む)を調査・調達し、技術的な検討を実施することで、各極細金属線材の引張強度と伸び率のデータなどを取得することができた。これらの知見をデータベースとしてまとめることで、体系的な理解を深めただけでなく、今後の更なる高度化に活用できるようにした。

#### (2) 新しい織染加工で製造した電磁遮蔽繊維を組込んだ建材の高度化開発

従来の電磁遮蔽ガラスの厚さ 150mm に対し、厚さ 12mm(従来の厚みの 1/13)を達成した。安定的に遮蔽性能 100dB 以上を実現する窓フレームの開発においては、銅フィンガーに替わる接続用材料として新たに特殊な形状のガスケットを使用することで、より安定的に 100dB を実現できる構造を設計・製作し、合計 4 件の特許を出願した。

#### (3) 基本的物性値による電磁遮蔽性能の簡易予測・分析手法の開発

42 種類の素材、53 種類のサンプルについて測定を実施し、線材やコーティング材としての金属の基本的物性値を把握した。その結果、従来は直流特性(0Hz)だけがメインの物性として扱われていたのに対し、10GHz までの高周波特性を含めた素材特性を把握した。

また、従来の SUS、銅など非磁性金属がメインだった遮蔽素材に対し、新たに磁性素材などの可能性を見出すことができた。誘電率・透磁率の測定方法に関しては静電容量法など有望な手法を見出し、基本的物性値と電磁遮蔽性能の直接的な関連性を把握しデータベースを構築すると共に、電磁界シミュレータを用いて数値的に評価した。

(4) 電磁遮蔽建材の遮蔽性能及び透視性に関する測定及び評価手法の開発

KEC 法, DFFC 法, MIL-STD 285 により測定された電磁遮蔽性能測定値のデータベース構築などを目標として実施した結果、従来測定していた 5MHz~200MHz に対し 10kHz~10GHz まで幅広く各素材の電磁遮蔽性能のデータを取得し、データベースを構築した。高周波領域では光ファイバ広帯域アンテナシステムを使用した新しい測定方法を提案し、電気情報通信学会で発表した。また、透明性に関しても従来の開口率計算に対し、可視光透過率を測定することで、より透明度の実用的かつ定量的な把握を達成した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(1) 事業管理機関の連絡窓口

所属	公益財団法人 函館地域産業振興財団
役職	課長
氏名	高橋 幸悦
電話	0138-34-2600
FAX	0138-34-2601
E-mail	ko_takahashi@techakodate.or.jp

(2) 事業実施機関の連絡窓口

(a) 統括研究代表者(PL)

所属	株式会社 Trees Network
役職	代表取締役
氏名	齊藤 健
電話	03-3263-9071
FAX	03-3263-9072
E-mail	takeshi-saito@trees-network.com

(b) 副統括研究代表者(SL)

所属	独立行政法人 産業技術総合研究所
役職	主任研究員
氏名	堀部 雅弘
電話	029-861-4294
FAX	029-861-4289
E-mail	masahiro-horibe@aist.go.jp

## 第2章 本論

### 2-1 電磁遮蔽機能に関する高機能化のための織染加工技術の高度化開発

#### 2-1-1 極細金属線材の調達

##### (1) 技術調査

高い透明度と高い電磁遮蔽性能を両立させるためには、金属の極細線材を粗く織ることによって開口率の高い繊維を形成するアプローチが最も直接的で技術的にもわかりやすい作業となる。極点な例で言えば、例えば韓国で標準となっている線径 340 $\mu\text{m}$ 、14mesh/inch、開口率 66.0%の電磁遮蔽繊維(糸の素材は SUS)は線径が太いため金属線自体を目視で確認できるが、透明度を上げるには第一に線径を細くするアプローチが必要となる。また、日本で標準となっている線径 50 $\mu\text{m}$ 、100mesh/inch、開口率 64.5%の電磁遮蔽繊維(糸の素材は SUS)は、線径は韓国製の約 1/7 と細いが開口率が低いため透視性が十分ではない。従って、細い糸で開口率を高くした電磁遮蔽繊維を目指す必要があるが、開口率が高くなると、遮蔽性能が劣化するため、可能な限り電磁遮蔽特性の良い金属素材を発掘することが重要である。同時に、金属線材は細いと切れやすいため、素材として細くても切れづらい種類を発掘することも重要となる。

今回は合計 14 種類の金属素材に関し、総計 31 種類の極細金属線材を調査・調達し、技術的な検討を重ねた。極細金属線材自体を製造することは、大掛かりな設備投資を伴う。従って、列挙した金属線材は全て外部より調達した。調査や調達の作業を進めるプロセスの中で、以下の事項が判明した。

- ①極細金属線材の調達は非常に困難
- ②極細金属線材の調達コストは高く、納期がかかる

そのような状況の中、合計 31 種類の極細金属線材を調達し、後述するように織加工に適した金属線材を抽出していった。

##### (2) 織加工に適した極細線材の条件

電気的特性(電磁遮蔽性能、誘電率、透磁率、電気伝導度など)とは別に、織加工に耐え得る機械的強度を前提に線径 30 $\mu\text{m}$  以下の極細金属線材を吟味するに際し、以下 6 つの観点がとても重要であることがわかった。

- ①線径
- ②金属の種類
- ③引張強度
- ④伸び率(ひずみ)
- ⑤永久変形への耐性
- ⑥線材表面の処理

## 2-1-2 織機、織条件の検討

上述した手織りの織機を使用した基本指標に関する検討結果を基に、本事業では機械織りを最終目標に据え、自動織機に関する技術的検討を実施した。

### (1) 技術調査

#### ① 技術調査結果の概要

##### (a) ヒアリング・視察調査

全体的には、本事業の技術的難易度の高さを裏付けるようなヒアリング結果となったが、調査のプロセスの中で得た実体験に基づく知見は技術を高度化するプロセスにおいては大変貴重なものであり、後述する成果へと結びつく原動力となった。

##### (b) 特許調査

本事業では、他社の技術動向や傾向を調査する目的で特許調査を実施した。電磁遮蔽に関連したキーワード検索にて特許を絞り、最終的に全 99 件(日本：19 件、海外：80 件)について詳細を分析した。

#### ② 技術的課題の整理

上述してきたように、本事業の目的を達成するためには、全ての工程において、以下 3 つの共通課題に整理される。

- ・ 織加工中に、金属線材が切れやすい
- ・ 織加工中に、金属線材に永久変形が発生しやすい
- ・ 織加工後に、金属線材(繊維)がバラけてしまう

従って、これら 3 つの共通課題に対し解決策を創出することが本事業の目標達成のために必要なことがわかった。

### (2) 自動織機の高度化

上述した技術的課題を克服し極細金属線材の織加工を実現するために、本事業における技術調査活動により発掘した研究開発用織機を基本モデルに据え検討を進めた。その結果、開口装置及び綜統(そうこう)枠、レピアヘッド、緯糸供給装置、送出装置と巻取装置、経糸のテンション制御、箆(おさ)、箆通しツールの 7 点に関する高度化が必要であることがわかり、極細金属線材の織加工を実施した結果、表-1 に示すような極細金属線の織加工に成功した。

表-1 織加工に成功した繊維の仕様

No.	素材	線径 [ $\mu\text{m}$ ]	密度 [mesh/inch]		開口率 [%]
			経糸	緯糸	
1	SUS316L	16	325	50	77.0
2				32	77.9

## 2-2 新しい織染加工で製造した電磁遮蔽繊維を組み込んだ建材の高度化開発

### 2-2-1 遮蔽材設置窓フレームの開発

本サブテーマでは、電磁遮蔽繊維を使用した電磁遮蔽建材として、電磁遮蔽ガラスを組み込む電磁遮蔽窓フレームを開発し、合計4件の特許を出願した。

#### (1) 従来型 窓フレームの課題分析

従来の電磁遮蔽繊維は切れやすいためガラス建材に組み込む際には四周を銅テープで補強していた。SUS製の窓フレームとの間はSUS網を巻きつけた特殊なシリコンチューブを間に挟む構造を採っているが、特別に設計したチューブを使用しているにもかかわらず、電気伝導性が安定せず、結果として100dB以上の高い電波シールド性能を安定して出せない課題があった。

#### (2) 実験用 電磁遮蔽素材取付フレーム

電波シールドルームへ実験用の電磁遮蔽素材を取り付けるため、実験専用(意匠性はここでは関係なし)の信頼性の高い取付治具を製作した。高い電気伝導性を確保するため、クランプを活用し、押し付け力も調節可能としている。壁を境に内外均等に力が加わるよう、クランプは内外両面に取り付けた。この構造的工夫により、十分な構造強度を確保できたと同時に、100dB以上の遮蔽性能を測定する際に電磁遮蔽繊維を2層取り付ける構造も満たすこととなった。

#### (3) 新構造の開発

##### ①銅フィンガー使用タイプ(2枚ガラス)

銅フィンガーは世界中で使用されている代表的な接合部材である。この銅フィンガーを使用した構造の電磁遮蔽窓フレームを設計・試作した。主要部品はガラスと銅フィンガーを取り付けるメインフレームと、フィンガーを固定するためのフィンガーブラケット及びフィンガー部を保護する外観カバーで構成し、従来構造より部品点数の低減を考慮した構成とした。

##### ②ガスケット使用タイプ(2枚ガラス)

電氣的接合を適切に行える部材を調査した結果、接合部材としてガスケットを使用し電気回路的にも工夫したシンプルな構造を検討した。取り付けられる部材も、電磁遮蔽ガラス建材だけでなく、電磁遮蔽繊維や電磁遮蔽フィルムなど平面状のものは何でも取り付けられるように工夫し、銅テープやチューブを仲介することなく、平面状遮蔽部材が窓フレームと可能な限り直接的かつシンプルに電気接続されるような構造とした。

##### ③ガスケット使用タイプ(1枚ガラス)

ガスケットを使用したフレームとして上記②のフレーム構造よりもフレーム厚さを薄く、かつ、1枚ガラスでも適用可能な電磁遮蔽ガラスを取り付けるメインフレームと電磁遮蔽繊維を受ける受け枠、繊維を押える押え枠、及び電磁遮蔽繊維押え枠を保護する外観カバーで構成し、従来構造より部品点数の削減を考慮した構成で設計した。

## 2-2-2 電波遮蔽室の設置法

100dB の電波遮蔽性能を目標とする透明電磁波遮蔽素材の評価を行うためには、高い遮蔽性能を持つ電波遮蔽室(シールドルーム)で電磁波遮蔽特性把握試験を行う必要がある。周囲を金属で覆うことにより、金属の外側へ電磁波が漏洩することがなく遮蔽することができる。また同時に、金属の外側から電磁波が浸入してくることも防ぐため、電磁波遮蔽は双方向に機能する。このような機能を高いレベルで実現するため、シールドルームは床面、天井面、壁面の所謂6面を金属で囲むことで建造される。

シールドルームにおいて、電磁波が漏洩しやすい、所謂シールドが弱い部分は、主にシールド建材の継ぎ目部やフィルター部、ドア部、開口部、通気口などである。そのため、例えば継ぎ目部は細心の注意を払って施工され、日本国内では一般的に半田付け工法やパネル工法が多く見受けられる。

本事業では、最も安定して高い性能を実現できる溶接工法で建造したものと同等の性能を実現できる特殊なパネル工法を用いたシールドルームを調達した。パネル工法は半田付け工法とは違い、高い遮蔽性能のシールド空間を一般多能工でも簡便に建造できる特徴を持つため、施工技術の差に左右されない安定な構法であると言える。

概略施工手順としては、まずシールドルームを電氣的に絶縁するため、床面の施工エリアに絶縁シートを敷設する。次に、絶縁シートの上に床パネルを設置する。パネル間の接合に関しては隣接するパネルとの接合部分にガスケットを挟み込む。

次に、床パネルをすべて接合した後に壁パネルを設置する。壁パネル同士の接合部分、床パネルと壁パネルが接する角部にも同じガスケットを設置する。壁面パネル接合後、天井パネルを設置する。今回建造したシールドルームのパネルには、シールドルームの入口部、電源供給する電源フィルター設置部、送信アンテナの制御信号の通信用のコントロールパネル、遮蔽サンプルを設置するアクセスパネル、天井の通気口の5つの特殊なパネルがある。これらのパネルは穴を開け、それぞれのパーツをビス打ち加工し作製されているがそれぞれの接合箇所には必ず電磁波の漏えいを防ぐためガスケットを用いている。

なお、シールドパネルの接合方法に関しては、パネルの端面をコの字型に形成し側面部分にあらかじめ複数の穴を開けておく。2枚のパネル間の接続には電氣的な空隙を埋めるためガスケットを用いる。一度プラスチックの固定具でガスケットをパネルへ仮止めした後、ガスケットを介して隣接する2枚のパネルをビス止め(本止め)する。特に電磁波が漏洩しやすい(電波シールドが弱くなりやすい)シールドルームの角部や、3枚のパネルがT字やL字型に接合する部位に関しては水平・垂直方向のガスケットをお互いに重ね合せてからパネルを接合する。なお、床パネルの接合部分にはゴミが入ったりして性能が劣化することを防ぐため、パネル接合部(線状)を絶縁テープで保護している。

## 2-3 基本物性値による電磁遮蔽性能の簡易予測・分析手法の開発

### 2-3-1 調査サンプルに関して

電磁波を遮蔽するためには、遮蔽材は効率的に電磁波を吸収・反射することが重要であり、特に前者は物質の導電率に強く影響され、値が大きいほど電磁遮蔽性能が高いと考えられている。

導電性を有する素材は酸化物、有機物、金属の各々にあるが、高いレベルの電磁波遮蔽性能には、金属素材を選択することが有効であると考えられる。金属の高い電気伝導度は金属の自由電子に寄るが、自由電子の存在は電波の周波数領域だけではなく、光の周波数領域でも吸収を生じさせる。そのため、本研究の目的である高い電磁波遮蔽性能と高い透明度を達成するために金属素材をメッシュ状に形成し光が通過できる開口部分を有する電磁遮蔽繊維素材の性能評価を行う。

電磁遮蔽性能を左右する要因としては、「材料そのものの電磁気的特性」と「材料の作製条件」の二つに大別できる。一般的には、電気伝導性の高い金属として銅や銀がよく知られており、従来の電磁遮蔽繊維素材は主に銅、銀をベースにした素材が多い。しかしながら、それ以外の金属素材と遮蔽性能の関係は不明な点が多く、各種金属材料で遮蔽性能を測定し特性を把握することは重要である。また、一般的な電磁遮蔽繊維素材の作製法には織加工、スパッタ法、プリント法など種々の方法があるが、いずれの方法も繊維素材の作製には相当な時間と労力を要する。更に、上述したそれぞれの方法について織りの送り速度、堆積速度、転写速度などの作製条件、焼きなましや焼鈍などの熱処理方法に代表されるプロセス条件によってシールド特性が変化することが予想される。

そこで本サブテーマでは電磁遮蔽繊維素材の特性を予測するために、電磁遮蔽繊維素材の元となる金属箔の物性・遮蔽性能の調査を実施した。調査を実施するに際し用いた箔の厚みは5~50 $\mu\text{m}$ 程度である。続いて、線径50~350 $\mu\text{m}$ の金属線材を用いて作製された金属金網の遮蔽評価を実施した。

表-2 に本事業で使用したサンプル例を示す。全部で42種類の素材、53種類のサンプルについて測定を実施した。

表-2 本事業で使用したサンプル例

No.	素材	厚み [ $\mu\text{m}$ ]
1	銅	10
2	銀	10
3	ニッケル	10
4	チタン	20
5	モリブデン	10
6	コバルト	10

## 2-3-2 遮蔽材料素材の誘電率、透磁率と遮蔽性能

電磁波遮蔽材の開発・選定の際に重要なパラメータとなるのが、材料の誘電率、透磁率および導電率である。また、電磁遮蔽性能の評価手法は複数種類が混在している。そこで、本事業で実施した方法について、下記に報告する。

### (1) 誘電率・透磁率の測定方法

#### ①伝送線路法(同軸・導波管法)

伝送線路の一部に材料を充填してベクトルネットワークアナライザにより、反射特性( $S_{11}$ )と伝送特性( $S_{21}$ )を測定し、その結果より誘電率および誘電損失、透磁率の実数部と虚数部を計算より求める。

#### ②フリースペース法(自由空間法)

伝送線路法と同様にベクトルネットワークアナライザで反射特性と伝送特性を測定し、それらより計算で求められる。伝送線は使わず、自由空間中に被評価材料を設置して、アンテナにより電磁波照射をおこなうため、伝送線路法では必要であった材料加工が不要となる。

#### ③共振法

空洞共振器内に材料を挿入し、共振周波数と共振ピークの半値幅の変化から誘電率と誘電損失を測定する。共振器内の電界が最も強い部分に材料を挿入する場合は誘電率を測定でき、磁界が最も強い部分に材料を挿入することで磁透率を測定することもできる。

### (2) 電磁波シールド材の評価法

#### ①MIL-STD-285

1956年に制定された米国軍規格(1997年廃止)であり、現在、日本国内における建築関連分野では、シールドルームの性能試験方法として最も多用されている。主にアンテナを用いた建築物の大きさに対応した材料の試験方法としても用いられ、電磁遮蔽素材やその取付治具・枠などの総合的なシールドルームの性能評価の最終段階での現場測定方法として採用される場合が多い。

#### ②KEC 法

一般社団法人 KEC 関西電子振興センターが開発したシールドルームの電磁波遮蔽効果を測定する方法であり、サイズが約  $20 \text{ cm}^2$  以上のシート状の材料であれば容易に電磁波遮蔽性能を評価することができる。主に  $1 \text{ GHz}$  以下の周波数で連続的に電磁波遮蔽効果の評価が可能であり、遮蔽特性の周波数依存性も同時に評価することが可能である。

#### ③DFFC 法

マイクロ波帯( $1 \sim 15 \text{ GHz}$ )における電磁シールド材の性能測定法では、ダイナミックレンジが不足するなどの課題があるが、DFFC(Dual Focus Flat Cavity : 2焦点型扁平空洞)法は、透過波を受信部に収束させることで、高ダイナミックレンジでの測定を可能としている。

### 2-3-3 KEC 法と DFFC 法の測定データ

#### (1) KEC 法による金属箔の測定結果

各素材を比較するため、図-1 の左側に 10 $\mu\text{m}$ 、20 $\mu\text{m}$ 、50 $\mu\text{m}$  と厚みを変えた SUS304 箔に関する KEC 法の測定結果を示す。横軸が周波数、縦軸が電界成分の電波遮蔽性能である。このような測定を各素材に対して実施することにより、各金属箔の電界成分及び磁界成分に関し、KEC 法を使用して電波遮蔽特性を把握していった。

厚さ 10 $\mu\text{m}$  の素材を比較すると、磁性金属に関して電磁波の電界成分・磁界成分ともに高い遮蔽性能を有することがわかった。また、同じ素材でも厚みを増していくと、特に低周波数帯域での遮蔽性能が向上していくことがわかった。しかし、例えば厚みを 10 $\mu\text{m}$  から 50 $\mu\text{m}$  へと 5 倍に増やしても、100MHz 付近で 11~13dB 程度の向上しかなく、素材の種類がいかに重要かが把握できた。

#### (2) KEC 法による金属繊維の測定結果

図-1 の右側に KEC 法による金属繊維の測定結果例を示す。様々な測定結果より、同種金属の場合、繊維のピッチが細くなるに連れて電磁波遮蔽性能が向上していくことを定量的に把握した。また、繊維を 1 枚用いた場合と 2 枚用いた場合の遮蔽性能の測定結果より、繊維を 2 枚用いた場合は、1 枚を用いた場合と比較して全周波数帯域において 2 倍近い遮蔽性能が実現されることが明らかとなった。

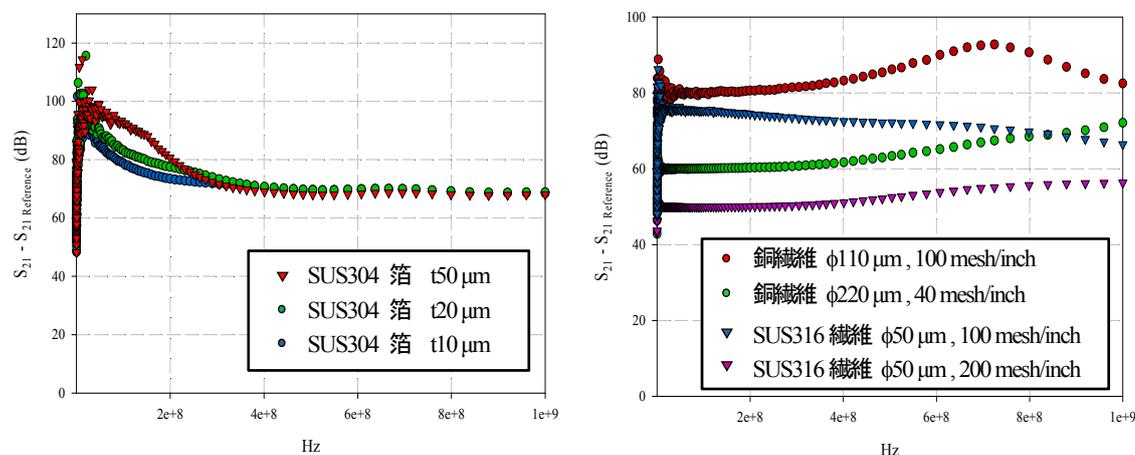


図-1 KEC 法による測定結果例

#### (2) DFFC 法による金属箔の測定結果

DFFC 法は 30 cm 程度の比較的横幅の長いサンプルが必要である。そのためサンプルの調達難易度が高かった。各材料の遮蔽性能は、KEC 法での測定結果と概ね同等な傾向があることがわかった。

## 2-3-4 遮蔽素材と数値的評価

### (1) ループアンテナが平行配置の場合

ループアンテナの面を平行に配置、すなわち、送受信アンテナを平行に配置した場合において、サンプル材を設置する窓枠の大きさに関する検討を計算機シミュレータにより実施した。ループアンテナの直径は 30 cm、アンテナ間距離は 60 cm、周波数は 100 kHz～30 MHz とした。

#### ① 計算による窓枠の大きさの検討

サンプル材を設置する窓枠の大きさが、30 cm×30 cm、50 cm×50 cm、80 cm×80 cm、1 m×1 m、1.5 m×1.5 m の 5 種類と窓枠が無い場合のアンテナ間の伝搬特性である透過 S パラメータ S<sub>21</sub> の計算を実施し、計算結果の比較を行った結果、窓枠の大きさがアンテナ伝搬特性の結果に影響を与えている事を定量的に把握した。例えば、1.5 m 四方の窓枠の場合、自由空間の場合と比較し 1.5 dB の差が生じており、本事業において実際に設置したシールドルームのサンプル測定用窓の大きさである 50 cm 四方では、15 dB の差が生じている事がわかった。

#### ② 電磁界シミュレータによるサンプル材の数値的評価

図-2 にループアンテナ並行設置の場合の計算モデルを示す。本事業のシールドルームの窓枠の大きさは 50 cm 四方であることから 50 cm 四方の窓枠にサンプル材が無い場合のアンテナ間の S<sub>21</sub> と窓枠内に 50 cm×50 cm×2 mm のフェライト板、ニッケル板、アルミ板のサンプル材を設置した場合のアンテナ間の S<sub>21</sub> を計算し、それらの結果からサンプル板材のシールド特性を計算した。

### (2) ループアンテナが同一平面内の場合

図-3 にループアンテナ同一平面設置の場合の計算モデルを示す。計算条件は上記(1)と同様に設定し、アンテナの向きだけを変えて計算を実施した。

以上の結果から、例えば、厚さ 2 mm のフェライト板に関しては、ループアンテナが平行配置の場合の電波遮蔽効果が 20 dB、ループアンテナが同一平面設置の場合の電磁遮蔽効果が 15 dB と計算され、双方に約 5 dB の差異が生じている事がわかった。

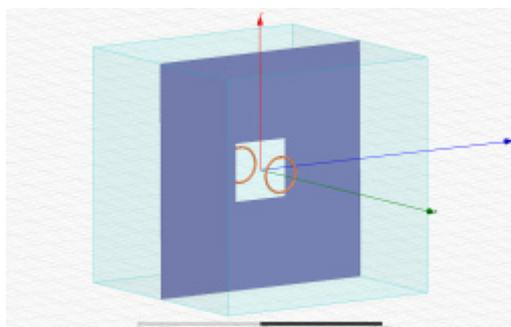


図-2 アンテナ平行配置の場合

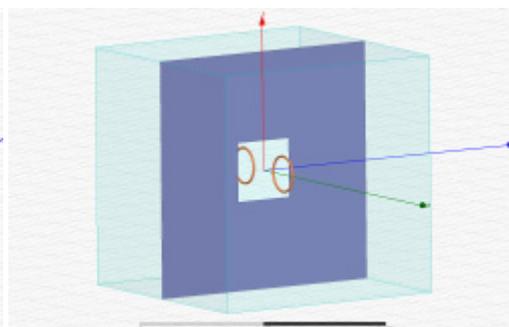


図-3 アンテナ同一平面配置の場合

### 2-3-5 遮蔽材料素材の透明性の評価

100dB という高い電波遮蔽性能を得るためには、通常、電磁遮蔽繊維が2層用いられており、繊維間の光干渉によりモアレが発生するため、開口率では表現できない透視性の劣化が目視で確認される。そのため本サブテーマでは、繊維の開口による透明性と、モアレによる視認度の低下を評価できるよう、分光的測定を実施した。

測定波長は可視光のスペクトル範囲の 370nm から 760nm までとした。なお、通常、素材の透明性の評価は測定サンプルに関して垂直入射をすることにより測定されるが、本事業では遮蔽素材の視認性を評価するため、装置内部を改良し、垂直入射だけではなく入射光に角度を付けて測定できるセットアップを行った。図-4 に可視光透過率の測定セットアップ写真を示す。測定角は入射角が 0 度から 80 度の範囲で測定を行った。

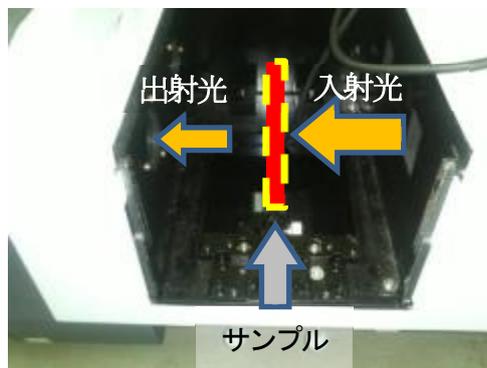


図-4 可視光透過率の測定セットアップ 写真

図-5 に例としてソーダガラスを回転させた時の透過率測定結果を示す。右側のグラフは横軸が波長、縦軸が回転角、色調が透過率を表している。赤いほど透過率が高く、青の色調になるに従い透過率が低いことを示している。この手法により、従来の開口率という計算で求めた透視性の指標に対し、より実用的で定量的な透明度の測定及び評価を可能とした。

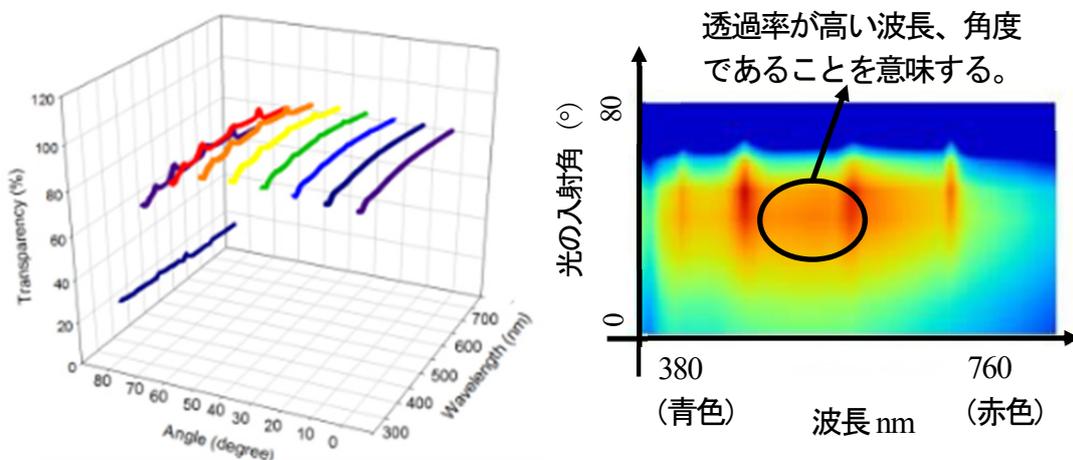


図-5 可視光透過率の測定結果例

## 2-4 電磁遮蔽建材の遮蔽性能及び透視性に関する測定及び評価手法の開発

### 2-4-1 低周波領域での電波遮蔽性能の測定・評価

#### (1) 測定システムの構築

低周波領域では、測定システムの感度不足を改善するために、パワーアンプを含んだ測定システムとなっている。そこで、システム全体のリニアリティーを確認する必要があるため、ネットワークアナライザの port 1 側(送信側)の可変アッテネータを変化させ、リニアリティーの確認を行った。

#### (2) 低周波帯域におけるシールドルームの遮蔽評価測定(アクセスパネル設置前)

測定を実施した結果、10 kHz~100 kHz では 70 dB~100 dB の遮蔽性能、100 kHz~1 MHz においては、100 dB~120 dB の遮蔽効果が得られている事が確認できた。

#### (3) 低周波帯域におけるシールドルームの遮蔽評価測定(アクセスパネル設置後)

測定を実施した結果、アクセスパネルの設置後も設置前とほぼ同様の遮蔽性能が得られている事がわかった。但し、ガasketを使用しないと十分な遮蔽性能を得ることができない事が明らかになった。

#### (4) シールドルームを用いたサンプルの遮蔽性能測定(低周波帯域)

シールドルームのアクセスパネル部分にサンプルを設置し、遮蔽評価測定を実施した。サンプルについては、PET 板に貼り付けた場合と貼り付けない場合の比較も実施した(PET 板にシールド効果がない事も確認)。

測定の結果、例えば PET 板にサンプルを貼った場合の方が、サンプル材の設置時の依れ防止になるため、再現性も比較的良いことを確認した。電磁遮蔽繊維素材(Cu, Cr コーティング)に関して測定を実施した結果から、例えば 68mesh/inch の素材は 90mesh/inch、や 132mesh/inch のサンプルよりも低い遮蔽性能であることが定量的に把握された。132mesh/inch についてはサンプルシート 2 層の場合についても測定を実施し、1 層の場合との比較実験も実施した。その結果、サンプルシートが 2 層の場合の方がシールド効果は高いが、測定結果では 2 倍のシールド効果までは得られなかった。また、低周波ほどシールド効果の差が小さくなる結果となった。



図-6 窓付きシールドルームを用いた電磁遮断素材の遮蔽性能測定の様子(左:平行配置、右:同一面配置)

## 2-4-2 高周波領域での電波遮蔽性能の測定・評価

### (1) シールドルームを用いない電磁波遮断建材の電磁波遮断性能評価

#### ① 新しく提案したシールド効果測定法の概要

シールド効果測定を実施する場合、一般的には測定に用いる測定器を電波暗室の外に設置して測定を実施するため、アンテナと測定器を接続する同軸ケーブルの長さによる減衰を考慮した測定系を用いなければならず、パワーアンプなどを用いた測定が実施される。本研究では、繊維状あるいはシート状の電波遮蔽素材の電波シールド効果測定を電波暗室内で実施することとして、送信アンテナシステムに光ファイバリンク広帯域アンテナシステムを用いることを検討した。

#### ② 上記①を活用した電波シールド効果測定システム全体の概要

大きさ  $0.9\text{ m} \times 1.8\text{ m}$  の被評価用電波遮蔽素材を  $0.9\text{ m} \times 1.8\text{ m} \times 0.5\text{ m}$  の発泡スチロールに貼り付け、その周りを電波吸収体を用いた  $1.8\text{ m} \times 1.8\text{ m}$  の電波吸収体対壁で電波遮蔽素材の外からの回り込みを抑制するセットアップとした。受信アンテナと送信アンテナは、床面から約  $1\text{ m}$  の高さにアンテナ間隔  $1.5\text{ m}$  で設置した。送信アンテナは被評価シートに水平方向平行に  $2\text{ m}$  の範囲を  $10\text{ cm}$  間隔で移動させ、各位置でネットワークアナライザを用いて  $S_{21}(\omega)$  を測定した。

### (2) シールドルームを用いた電波遮断建材の電磁波遮断性能評価

シールドルームに評価用サンプルを取り付けるための窓フレームを設置し、この窓からのみ電磁波が透過するシールドルームを用いて、電波遮蔽建材の電波シールド特性を測定により評価した。

図-7 に電磁遮蔽繊維の測定例(電磁遮蔽繊維が1層の場合)を示す。各サンプルとも、 $1\text{ GHz}$  以上(比較的、高周波領域)の周波数帯域においてシールドルームを用いない場合の評価結果と同様の結果を得ることができた。また、シールドルームの開口部を用いた電波遮断素材の電波シールド特性に関する測定結果は  $1\text{ GHz}$  以下(比較的、低周波領域)の周波数帯域での評価も可能であり、各種サンプルの測定を効率的に実施することで信頼度の高いデータを取得することが可能となった。

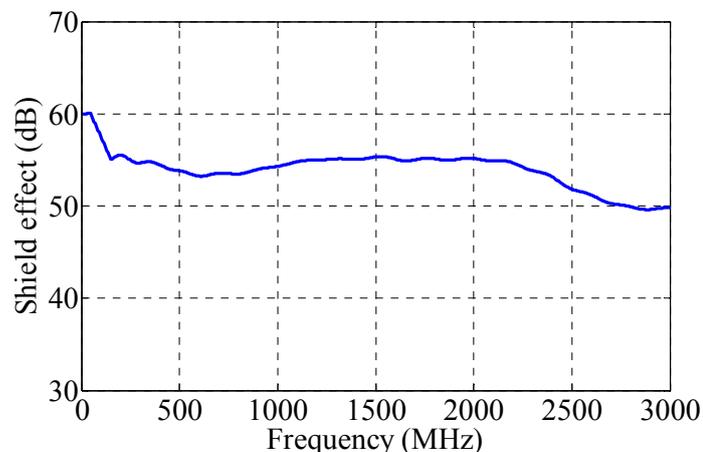


図-7 電波遮蔽繊維の測定例(1層の場合)

### 2-4-3 電磁遮蔽建材の遮蔽性能および透視性の評価データベースの開発

本事業において調査・開発した電波遮蔽素材に関し、電波遮蔽性能および光透過率(透視率)のデータを各種材料および構造の条件、各種測定条件にて多数取得したが、具体的に求める性能を満足する電磁遮蔽建材を選ぶためには、これらデータを対話的にグラフ等で視覚化する設計ツールが求められる。そこで、本事業で測定を実施した前述のデータすべてを関係データベースとして整理し、必要な設計条件に対応する素材および加工条件の選択や、性能間の関係などを自動検索し表示するデータベースを開発した。

図-8 に関係データベースの構造定義を示す。ここで示すような構造及び定義により、関係データベースとして構築し、一つのデータ対と、素材、構造や測定方法等のパラメータ、測定値とが結びつくように格納している。

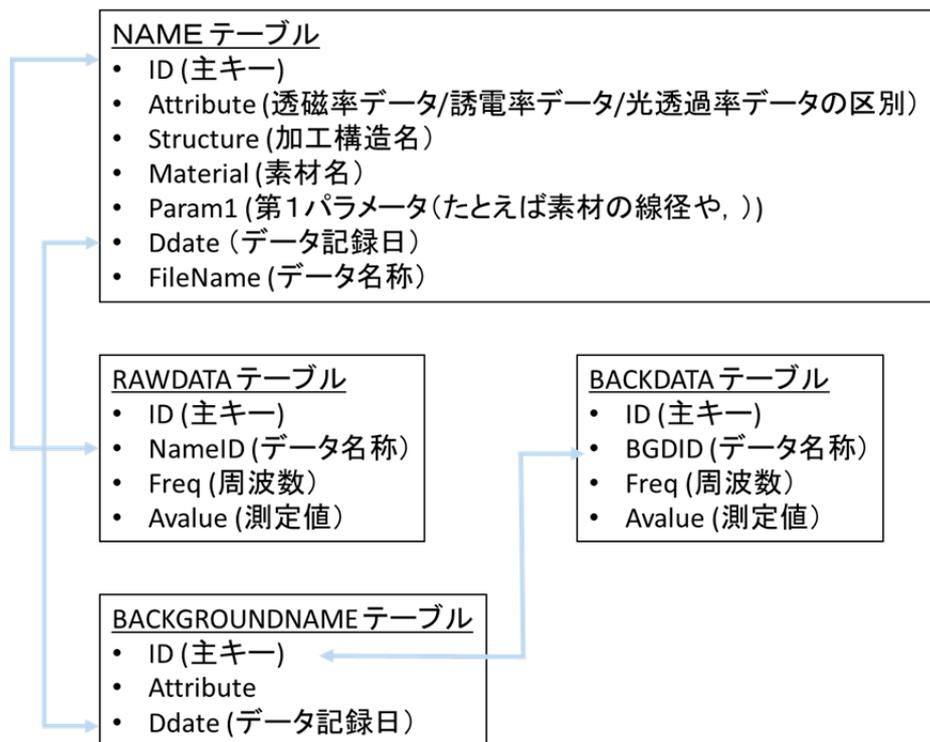


図-8 関係データベースの構造定義

このデータベースの構造やデータ定義は複雑なため、データベースの扱いを熟知しなくても利用できるように、データの問い合わせを対話的に行うインターフェースを開発した。このインターフェースはメニュー形式となっており、メニュー画面にて特定したい項目についてのみ値を入力・選択して指定し、表による出力、あるいはグラフによる出力を選ぶことで、それぞれの形式による出力(レポート)が表示される仕組みとした。本データベースにより、本事業にて取得したデータを今後も有効活用していくことが可能となった。

### 第3章 最終総括

本事業は、2013年3月29日をもって約1年間に亘る全ての工程を完了した。

高い電磁遮蔽性能と透明度を有する繊維製造のための織染加工技術の高度化開発のために、本事業では極細金属線材を織染加工することにより電磁遮蔽繊維を製造する技術的アプローチを採った。その結果、極細金属線の電磁遮蔽繊維製造技術に関し、従来の電磁遮蔽分野では限界であった線径50 $\mu\text{m}$ の金属線の織加工技術に対し、約1/3以下である線径16 $\mu\text{m}$ の織加工を達成した。また、開口率に関しても従来の64.5%に対し、約21%向上させた77.9%を達成した。また、電波遮蔽性能の測定及び評価方法についても、光ファイバ広帯域アンテナシステムを使用した新しい手法を提案し、電気情報通信学会で発表した。

その他にも、電磁遮蔽性能や透明度を向上させるための金属素材に関する様々なデータを取得しデータベース化することで、今後の更なる技術高度化の可能性も格段に広がった。そして本事業の研究プロセスの中で見つかった印刷技術による新しいアプローチは、極細金属線材による繊維製造の難易度鑑みれば、今後の更なる技術高度化を目指す際には、有望かつ大きな可能性を感じさせる方法・技術であると思われる。

電磁遮蔽素材は今後、海外市場も含め幅広い分野での活用が期待される。取り急ぎ医療MRI室の分野では、今後も益々安全・安心な検査環境が望まれており、本事業の研究成果の1日も早い市場への投入が期待されている。

技術改良の長い道のりは、小さな改良をコツコツと積み重ねていくことが肝要であり、決して終わりはない。今回与えていただいたチャンスは大変光栄なものであり、我々は、より良いものを市場へ出していくことによって、今後も世界に貢献していきたいと考えている。

最後に、本事業に対し多大なる貢献をしていただいた事業管理者及び再委託先のメンバー各位を始め、度重なる温かい激励をいただいた北海道経済産業局、函館市役所の皆様、快く貴重かつ有意義なご助言をいただいたアドバイザーの皆様へ、心より御礼を申し上げます。どうもありがとうございました。

以 上