別紙2

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「高性能磁気シールド装置用磁性材料の熱処理技術開発」

研究開発成果等報告書

平成25年 3月

- 委託者 関東経済産業局
- 委託先 タマティーエルオー株式会社

目 次	
-----	--

第1章	⑥ 研究開発の概要	
1.1	研究開発の背景・研究目的および目標	1
1.2	研究体制	1
1.3	成果概要	4
1.4	当該研究開発の連絡窓口	7
第2章	6 磁気シールドモジュールの生産性改善	
2.1	熱処理による磁気特性改善効果の再検証	10
2.2	ラミネート加工法の再検討	16
2.3	まとめ	19
第3章	章 SQUID センサを用いた磁気シールド性能の評価	
3.1	評価用小型シールドボックス	20
3.2	微弱磁場計測装置(SQUID センサ)	21
3.3	測定条件	22
3.4	測定結果	22
3.5	追加評価	24
3.6	まとめ	27
第4章	章 磁気シールド補強装置の MSR への適用	
4.1	既設 MSR の性能評価	29
4.2	磁気シールドルームへの応用1	33
4.3	磁気シールドルームへの応用2	35
4.4	磁気シールドルームへの応用3	38
4.5	まとめ	41
第5章	『 MSR 性能評価のための磁界解析条件の検討	
5.1	モデリングの検討	43
5.2	パーマロイ製 MSR の磁界解析	45
5.3	パーマロイ層とアモルファス層から構成される2層 MSR の磁界解析	47
5.4	まとめ	49
第6章	到一総括	
6.1	研究開発の成果	50
6.2	研究開発後の課題	51
		01

第1章 研究開発の概要

1.1 研究開発の背景・研究目的および目標

生体磁気計測装置や、半導体用電子ビーム描画装置など磁気ノイズをきらう装置にとって磁気 シールド装置/磁気シールドルーム(以下 MSR)は必須不可欠な装置であり、これらの構成材料 には非常に高価なパーマロイと呼ばれる鉄・ニッケル合金が使われてきた。

また、これら生体磁気計測装置や半導体電子ビーム描画装置の性能を向上させるためには、より高い磁気シールド性能が要求され、パーマロイシートの多層化・肉厚化(使用量の増加)によって磁気シールド性能を上げてきた結果、MSR は非常に高額な重量物となり、装置普及にとって大きな障害となってきた。

本委託業務では、コバルト系アモルファスのシートを用いて、軽量かつ低コストで、なおかつ高 性能な磁気シールド材を開発し、MSR に活用することを目的とする。

1.2 研究体制

1.2.1) 研究組織



1.2.2) 管理体制

1) 事業管理機関



2) 再委託先

【株式会社オータマ】



【国立大学法人九州大学】



1.2.3) 研究員氏名

1)株式会社オータマ

氏名	所 属 ・ 役 職	実施内容(番号)
榊原 満	技術部技術課 チーフエンジニア	1 2 3
武藤 暁	技術部技術課 課長代理	1 2 3
奥田 学	技術部技術課	1 2 3
松山 真也	製造部熱処理課	1 2

2) 国立大学法人九州大学

氏 名	所 属 ・ 役 職	実施内容(番号)
笹田 一郎	大学院 融合創造理工学部門 教授	③ - 4)
研究補助員A	大学院 笹田研究室	③ - 4)
研究補助員B	同上	③ - 4)

3) 協力者(研究開発推進委員会:委員)

氏名	所 属 ・ 役 職	備考
榊原 満	株式会社オータマ 技術部 技術課 チーフエンジニア	PL
笹田 一郎	九州大学大学院 大学院総合理工学研究院 融合創造理工学部門 教授	SL
武藤 暁	株式会社オータマ 技術部 技術課 課長代理	
奥田 学	株式会社オータマ 技術部 技術課 主任	
本目 精吾	(株)エリオニクス 代表取締役会長 (在東京)	アドバイザー
横田 克己	(株)エリオニクス 開発技術部 部長	アドバイザー
足立 善昭	金沢工業大学 先端電子技術応用研究所 准教授 (在東京)	アドバイザー
風見 邦夫	横河電機株式会社 研究開発本部 MEG プロジェクト部 課長(在金沢)	アドバイザー
井深 丹	タマティーエルオー株式会社 代表取締役社長	
壬生 捷利	タマティーエルオー株式会社 産学官連携事業部 調査専門員	

1.3 成果概要

この目標に当たっては素材の磁気特性を高めるための熱処理技術を開発することと、薄い金属 箔を用いてどのように磁気シールド空間を構成するかという具体的手法を開発することが非常に重 要なテーマとなっている。

平成 22 年度の研究成果として、コバルト系アモルファスを熱処理によって改質し、従来材に比 べ 2 倍以上の性能(比透磁率 200,000)を、また磁気シェイキング技術の応用によって比透磁率 500,000 以上という高い磁気特性を引き出すことができた。

また、平成23年度には、様々なサイズのMSRに対応するための手法として500×500mmの 磁気シールドモジュールを試作、大型平面構造体として完成させるための連結構造を検討、 3m×3mの大型磁気シールドパネルの設計および試作を行い、本技術を用いて大型平面構造体 の実現が可能であることを示した。

本年度は、まず平成 23 年度の追加研究として磁気シールドモジュール作製技術の改良を行った。アモルファスの破損による歩留まりの低下や、モジュール性能の個体差などが問題点として明らかとなったため、磁気シールドモジュールの作製工程の改善策として、脆化しない熱処理の再検討を行うとともに、ラミネート加工の方法についても再検討し効率的に製作可能な方法を示した。

また本年度は事業化に向けた製品化プロセスの妥当性検証が大きな課題である。その一つとして、新技術を用いた小型磁気シールドボックスを製作し、実際に生体磁気計測で用いられる SQUID センサにて磁気シールド性能評価を行った。これにより、高度な磁気シールド性能が要求 される生体磁気計測向け磁気シールドルームの実用化に向け、課題を洗い出すことができた。

製品化検証のもう一つの手段として、実際に 2.5×2.0×2.5m の磁気シールド空間を作ることで最 終的な目標である MSR への応用を試みた。具体的には、株式会社オータマですでに設備してい たパーマロイ製 MSR を利用し、その室内に磁気シェイキング機能付きアモルファス層、アルミ層、 磁気シェイキングなしのアモルファス層を段階的に施工し、各段階における磁気シールド性能を測 定することで、新技術が効果的に作用していることを証明すると共に詳細なデータを取得した。

本年度における具体的な実施内容と成果の概要を以下に示す。

① 磁気シールドモジュールの生産性改善

1) 熱処理による磁気特性改善効果の再検証(実施:株式会社オータマ)

平成23年度の試験片による評価ではコバルト系アモルファスの磁気特性を目標値まで高めることに成功した。しかし、高温で熱処理した場合には脆化してしまいモジュール作製の段階で破損が 多く発生した。このため本年度は再検討の項目として表1.1に示すように磁気特性と熱処理条件の 関係を詳細に再度調査した。

a.磁気特性:	インピーダンス透磁率		_
b.熱処理条件:	保持温度 260-500℃	保持時間 15-120min	_

表 1.1 調査項目

2) ラミネート加工方法の再検討(実施:株式会社オータマ)

平成 23 年度はアモルファスリボンを用いて磁気シールドモジュールを製作する方法として、既存の生産技術を利用し効率的な生産が可能となるラミネート加工を採用し、表 1.2 に示すようなラミネート加工における課題の抽出を行った。今年度は、モジュールの製作方法を効率化し、より現実的な製作方法を示すことに注力した。

表 1.2 モジュール製作の課題

1) アモルファスの積層密度を上げるため積	層後の加圧工程を導入する
2) ラミネート加工品の積層方法を効率化す	る
3) ラミネート加工の巻き取り段階でアモルフ	アスリボンを破壊させない仕組みを検討する

② SQUID センサを用いた磁気シールド性能評価

1) SQUID センサ用磁気シールドボックスの作製(実施:株式会社オータマ)

本事業では生体磁気計測用装置の磁気シールドに応用できる新技術を目的の一つとしており、 SQUID センサによる微弱な磁界に対する磁気シールド効果を評価する必要がある。

金沢工業大学にて所有している動物実験用の小型 SQUID センサを用いて磁気シールド性能 評価をするため、専用の磁気シールドボックスを設計製作した。このとき従来技術との比較評価の ため表 1.3 に示す 2 種類のボックスを作製した。

表 1.3 評価用ボックス

1) コバルト系アモルファス層の2層シールドボックス	
2) パーマロイ2層シールドボックス(従来技術)	

2) 磁気シールドボックスの評価(実施:金沢工業大学)

株式会社オータマで所有している磁界センサはフラックスゲート方式であり、最少分解能が 0.1n T である。磁界センサにおいてフラックスゲートセンサ方式よりも分解能の優れた方式は実質的に SQUID センサのみであるが、一般的な測定器とは異なり、液体ヘリウムを用いて超伝導状態を維 持しながら微弱な信号を処理するための大がかりな機構を有する装置である。

金沢工業大学先端電子技術応用研究所、足立准教授らのグループでは SQUID センサを用い 生体から発生する磁気を計測することにより非侵襲性検査方法の開発を進めている。

同研究グループでは現在、動物実験用の小型 SQUID センサを所有しているが、容易に移動で きる装置ではなく操作には専門の技術者が必要である。オータマにて製作した磁気シールドボック スを SQUID センサの設置場所に持ち込み、表 1.4 に示す条件での評価を依頼した。

1) 印加磁界周波数	0.1 - 1000Hz
2) 評価対象	コバルト系アモルファス層の2層シールドボックス
	パーマロイ2層シールドボックス
3) 評価位置	各シールドボックス中心から64mm 上部の位置

表 1.4 評価条件

③ 磁気シールド補強装置の MSR への適用

1) 磁気シールドルームへの応用1(実施:株式会社オータマ)

株式会社オータマで所有しているパーマロイ製 MSR に、新技術であるコバルト系アモルファス を用いて磁気シールド層を追加し、磁気シールド性能の補強を行った。

第一段階として表 1.5 の条件にて磁気シェイキングを用いた磁気シールド層を追加し、パーマロ イ層との2層シールドルームに対し、磁気シールド効果を表 1.6 の条件にて評価した。

表 1.5 追加磁気シールド層の条件 1

磁気シールド材料	コバルト系アモルファス(磁気シェイキングあり)
積層枚数	23µm のアモルファス 8 層
モジュールの平面連結	パーマロイ帯による連結
モジュールの立体連結	パーマロイアングルによる連結

表 1.6 評価条件

10µT (peak to peak)
0.5 - 1000Hz
MSR 中心
2 層磁気シールドルーム

このとき磁気シェイキングの電流条件を変化させ磁気シールド効果の最も高い条件を探った。また、磁気シェイキングの電流周波数と同期した磁気ノイズについて、MSR 内部における分布を測定した。

2) 磁気シールドルームへの応用2(実施:株式会社オータマ)

生体磁気計測装置用の MSR ではパーマロイの多層構造に加えてアルミ層を加えることで電波 シールドを備えることが一般的である。また、アルミ層が十分に厚いとき、パーマロイ層との積層に よって数 Hz 以下の低い周波数の磁界変動にも有効であることが知られていることから、MSR に表 1.7 に示すようなアルミ層を追加した。

磁気シェイキングの電流条件を変化させ表 1.7 の条件にて磁気シールド効果を評価し、また磁 気シェイキングの電流周波数と同期した磁気ノイズについて、MSR 内部における分布を測定し、 アルミ層の効果を確認した。

材料	アルミ 板厚 5mm
モジュールの平面連結	アルミ帯による連結
モジュールの立体連結	アルミアングルによる連結

表 1.7 追加磁気シールド層の条件 2

3) 磁気シールドルームへの応用3 (実施:株式会社オータマ)

磁気シールド補強として最後に表 1.8 に示すような、高温で熱処理したコバルト系アモルファスの層を追加し表 1.6 の条件にて磁気シールド効果を評価した。

磁気シールド材料	コバルト系アモルファス(磁気シェイキングなし)
積層枚数	23µm のアモルファス 8 層
モジュールの平面連結	パーマロイ帯による連結
モジュールの立体連結	パーマロイアングルによる連結

表 1.8 追加磁気シールド層の条件 3

4) MSR 性能設計のための磁界解析条件の検討(実施:国立大学法人九州大学)

本研究成果を製品化する際には多種多様な形状あるいは要求性能の案件に対して性能設計を行わなければならない。

磁気シールド製品の性能設計では磁界解析が非常に有効であるが、計算結果が実測データと 一致するためにはモデル条件や磁性体の物性値など各種条件を調整し合わせこむことが必要で ある。

株式会社オータマが所有するパーマロイ製MSRの磁気シールド性能の実測データと磁界解析 結果が一致するようモデル条件および磁性体の物性値を調整し、現実のデータをよりよく表現でき る解析条件を求めた。

また、パーマロイ層とアモルファス磁気シェイキング層の2層についても実測データと解 析結果が一致するように条件を調整し性能予測技術を開発した。

1.4 当該研究開発の連絡窓口

タマティーエルオー株式会社 第2オフイス

東京都羽村市羽東1丁目14番11号 西武信用金庫 羽村ビル2階

- 担当者 山県 通昭
- 電話 042-570-7240
- FAX 042-570-7241
- E-Mail <u>yamagata@tama-tlo.com</u>

第2章 磁気シールドモジュール

近年、人の脳が発する微少な磁気を観察し脳機能を解明しようとする最先端の医療検査装置 や、電子ビームにより微細な回路パターンを描画する半導体デバイス用電子ビーム描画装置な どの精密機械の高度化要求に伴って、磁気シールドに求められる性能は高まる一方である。

磁気シールドは電波や音波のシールドのように反射や吸収によって対象物を保護するのでは なく、図 2.1 に示すように磁気ノイズから守りたい装置を、磁気特性の高い材料で囲うことにより磁 気の流れを磁性材料内にバイパスさせて、内部空間を守るものである。



図 2.1 磁気シールドのイメージ

ここで磁気シールドの材料として、従来材(パーマロイ)より磁気特性の優れた Co系アモルファ スを用い、磁気シールドの重量やコストの削減、あるいは高い磁気シールド効果の要求に応える ことが本研究の根幹である。

しかし、従来材であるパーマロイを単純に Co 系アモルファスで置き換えることは難しく、MSR の材料として用いるには下記 2 点の問題を解決していく必要があった。

1) 本質的に、磁気シールド用途に調整されておらず、磁気特性を改質する必要がある

2) 非常に薄い板厚(20~30µm)の材料であり自分自身の形状を保持する剛性がない

「アモルファス」は「クリスタル」と対をなす言葉で「非晶質」を意味する。つまり結晶構造を持た ない物質であり、結晶のような原子の規則的配列ではなく、無秩序に原子が分布した構造の物 質である。非晶質を作り出すためには溶解した材料を秒速数万℃という速さで冷却する必要があ り、非常に薄い状態でしか製造ができず、幅に関しても現在のところ最大でも100mmの素材し か製造されていない。

また、軟磁性材料としての優れた性質を磁気シールドにも応用できることは知られているが、現 実的にはその応用例は限定的であり、特に大型の磁気シールドルームの基本材料として実用化 された例は聞かれない。これは世の中に流通するアモルファスが本来トランスなどの磁芯用に性 質を調整されており、磁気シールド用途に調整された形状・磁気特性のアモルファスを入手する ことができないことも要因の一つである。

したがって、本研究の平成22年度には、Co系アモルファスを磁気シールド用に改質する熱処 理技術を開発し、また平成23年度には薄いリボン状のCo系アモルファスを効果的にレイアウト しMSRを構成するコンセプトで、その最小単位としての磁気シールドモジュールを開発した。

同じく平成 23 年度には、500×500mmの大きさの磁気シールドモジュールを連結して 3×3mの大きな磁気シールド壁を製作する際、モジュール 36 枚を作製する工程で効率化を図るため、 ラミネート装置を用いて熱処理済みアモルファスリボンを両面テープ上に連続的に貼り付けた。

このときに示すように、アモルファスが破損することによって効率が低下し、また材料の損失も 多いため、製品化する際に大きな問題となることが指摘された。

そこで、平成24年度は、まずこのモジュール作製上の問題点について取組課題として追加研究を行った。この問題点を回避するための方法として主に図2.2に示すように脆化させない熱処理方法の再検討と、脆化した材料を効果的にモジュールに加工する方法の検討を行った。



写真 2.1 ラミネート加工



図 2.2 問題点と取組み課題

- 2.1 熱処理による磁気特性改善効果の再検証
 - 2.1.1) 再検証の背景と目的

本研究に用いた Co系アモルファスの仕様を表 2.1 および表 2.2 に示す。

		ж ш. т / с			1	
成分	Co	Fe	Mo	Nb	Si	В
原子比	69	4	3	1	16	7

表 2.1 アモルファス合金の成分比率

表 2.2 アモルファス合金の特性

キュリー温度	$225~^\circ\!\mathrm{C}$
比重	7.86 g/cm^3
結晶化温度	$530~^\circ C$
飽和磁束密度	$0.55 \mathrm{T}$

平成22年度には上記のCo系アモルファスを熱処理で改質する技術を開発し、従来材を超える良好な結果を得た。

図 2.3 に示すように、熱処理温度(キープ温度)を上げていくと、ある温度までは磁気特性(透磁率)が上昇していき、それ以上で結晶化が始まるため急激に劣化してしまう特徴を持っている。 従って高い磁気特性を求める場合、この結晶化温度未満で熱処理することになるが、高い温 度で熱処理することは同時に材料の加工性を損なうことになる。



図 2.3 キープ温度と磁気特性

Co系アモルファスを、キープ温度を変えて熱処理すると磁気特性と同時に脆化の度合いが違う試験片ができる。

この試験片をU字に折り曲げた状態で、徐々に破壊するまでU字を狭く押しつぶしていくこと で脆化の度合いを評価すると、図2.4に示したようにある温度を境に、完全に折り曲げても破壊し ない領域と、破壊する領域とに鮮明に分かれることが分かっている。



図 2.4 キープ温度と脆化

ここで、図中の指標 ε は破壊時の最大ひずみである。写真 2.2、写真 2.3 に示すように、定盤と ハイトゲージの間に厚さtの試験片を U 字に曲げて挟み、この定盤とハイトゲージの間隔 L を測 定する。 ε は L と t から式 (4.1)を用いて算出する。

ここで、ε=1は密着曲げであることを示しており試験片を完全に折り曲げても破壊しない状態である。

$$\varepsilon = \frac{t}{L - t} \qquad \cdots \qquad (2.1)$$



写真 2.2 最大ひずみの評価に用いたハイトゲージ



写真 2.3 最大ひずみ評価の概略

本年度は、Co系アモルファスの透磁率を最大に引き出しつつ、脆化をさせない熱処理条件を 探すことを目的とした。

つまり、図 2.5 に示す模式図で、左側のグラフのように、透磁率のピークが脆化(ε<1)している 領域にあるのが平成 23 年度までの研究結果であったが、右のグラフのように透磁率のピークを 破壊しない領域に入るための熱処理条件を探ったものである。



図 2.5 脆化領域のシフト

2.1.2) 熱処理方法

本年度は、キープ温度とキープ時間を変化させ、磁気特性と脆化のボーダーラインがどのよう に変化するかを検証した。特に、キープ時間を変えることによって脆化のボーダーラインを低温 域に留められるかどうかに注目した。

実験に用いた熱処理炉は平成22年度にアモルファス専用に開発した熱処理炉(写真2.4)で ある。写真2.5は炉内部に5本の熱電対を挿入し温度分布を実測したときの様子であり、キープ 温度を500℃にした場合の結果、キープに入った時点でワークゾーン内が±2.5℃以内という高 い均熱性能を持っている。

この熱処理炉の円筒状の内部にトレイを設置し、コバルト系アモルファスの試験片をのせ熱処理を行った。



写真2.4 専用加熱炉の外観



写真 2.5 テスト運転の様子

試験片の熱処理条件を表 2.3 に示す。

衣 4.3 杰处理采件				
項目	条件			
炉内雰囲気	水素ガス(真空置換)			
キープ温度	240~500°C			
昇温速度	500°C/hr			
キープ時間	15,60,120min			

表 2.3 熱処理条件

2.1.3) 磁気特性と脆化の結果

磁気特性の評価として本研究ではインピーダンス透磁率 µz を指標とした。磁界の周期的な変動に対する透磁率であり、磁気シールド材料として実効的に性能に影響する特性である。

また、都市雑音として磁気シールドの対象磁気ノイズとして挙げられるのが、車などの磁性体の移動に伴う変動や電車の給電電流に伴う緩やかな変動磁界であることから、この都市雑音を3 Hz にて模擬した。

実際の計測としては、図 2.6 に示す回路に一次側から周波数 3Hz、0.004A/m の磁界を与えたときのインピーダンス透磁率を、一次電流、二次電圧を測定し式(2.2)によって算出した。 ここで、熱処理実験に用いた試験片の仕様を表 2.4 に示す。



図 2.6 インピーダンス透磁率回路

$$\mu z = \frac{V_2}{A} \cdot \frac{l_m}{N_1 N_2} \cdot \frac{1}{2\pi f I_1} \cdot \frac{1}{\mu_0} \qquad \dots \qquad (2.2)$$

ただし、

μz: インピーダンス透磁率

V2:2次開放電圧

A: 平均断面積(m2)

 l_m : 平均磁路長(m)

N1:1次巻線回数(回)

N₂: 2 次巻線回数(回)

f: 周波数(Hz)

 $I_1: 1$ 次電流(Arms)

µ0:真空の透磁率(H/m)

サイズ	内径 33mm 外径 45mm 高さ9mm		
形状	トロイダル状(巻取りによる積層)		
平均断面積	6×10^{-5} m ²		
平均磁路長	0.113m		
重量	48g		
卷線回数	1次50回、2次50回		

表 2.4 試験片の仕様

それぞれの熱処理条件におけるインピーダンス透磁率の結果を図 2.7 に、破壊時の最大ひずみの結果を図 2.8 に示す。

これらの結果から、キープ時間を15分から60分にしたとき、20℃程度低い温度で同等の透磁 率が得られることが分かる。また脆化のボーダーラインに関しても15分から60分にしたとき、 20℃程度低くなっている。キープ時間を60分から120分にした場合もほぼ同様の結果となって いる。

つまり、キープ時間の変化で磁気特性と脆化のボーダーラインは同じ動きを示すため、図 2.5 に示したような脆化の領域をシフトさせることができないことが明らかとなった。

今回実験した条件内においては、磁気特性の改善は常に脆化を伴っており、両者は比例関係にあると考えられる。



図 2.7 熱処理温度と磁気特性



図 2.8 熱処理温度と脆化

2.2 ラミネート加工法の再検討

平成23年度の研究において、磁気シールドモジュールの磁気シールド性能と、製品化した場合の施工性を考慮し、磁気シェイキングを応用する場合と応用しない場合のいずれに於いても、図2.9に示すレイアウトを基本とした。



図 2.9 磁気シールドモジュールに最適なアモルファスリボンのレイアウト

このアモルファスリボンのレイアウトにて磁気シールドモジュールを構成し、接着などによって、 アモルファスリボン同士が固定されているとき、6mm角の穴が等間隔にあけられたパンチングメ タルの様に扱うことができる。したがって、アモルファスに直接穴あけ加工をすることなく、ビスなど の止め穴や、磁気シェイキングのコイルを通す穴を設けることができるため脆化したアモルファス を製品化するためには非常に有効である。

平成23年度の試作では両面テープの上に一定間隔で熱処理済みのアモルファスリボンを貼り 付けていく方法(写真2.6)を選択したが、この工程で脆化したアモルファスが破損してしまい、多 くのロスを生じた。



写真2.6 両面テープとアモルファスリボンのラミネート加工

連続的に4本のリボンを一定間隔でラミネートするには、一本一本にテンションをかけ巻き取っていかなければならず、リボンの歪みや巻き取り・巻送りの直線精度の調整具合によってアモルファスに過度の力が加わったことが破損の原因と推測される。

ラミネート装置の改良については将来的に生産装置開発をテーマに行うべきである。今回の研 究では装置ではなく、工程の見直しと簡易な製造方法の検討によって改良を試みた。 改良のポイントは下記の3点である。

- 1) 4列同時のラミネートをやめ、1 列ずつの取り扱いとする。
- 2) 低粘着の接着剤で仮止めしながら8列×8層レイアップする。
- 3) 開口部分をハトメによって固定する。

改良による工程の違いを表 2.5、表 2.6 に示す。また、試作サンプルを写真 2.7 に示す。 この改良の利点は下記の通りである。

- 1) 脆化したアモルファスに過度の負荷をかけずレイアップ工程まで行えるため破損の頻度は 非常に低くなる。
- 2) レイアップにてずれが生じた場合でも、粘着力の弱い接着剤で仮止めしているため破損せ ず修正が可能である。
- 3) ハトメはリボン同士の留め具になると同時に強度補強になるため、このハトメ穴を利用して アモルファスを破損させずにビス止めすることができる。

表 2.5 磁気シールドモジュールの製造工程(H23 年度)

工程1	50mm 幅のリボン 100m を 1 単位として熱処理
工程 2	100m 分のリボンを 6mm 間隔で両面テープ(基材+接着剤=50µm)の 上にラミネート
工程 3	100m のラミネート済み品を 500mm 長さにカットし、一層分の定尺シート に加工
工程 4	構造材に定尺シートを張り付け。1枚(層)ごとに90度回転させ8枚積層
工程 5	磁気シェイキング用コイルの敷設(シェイキングの場合のみ)
	表 2.6 磁気シールドモジュールの製造工程(改良工程)
工程1	50mm 幅のリボン 100m を 1 単位として熱処理
工程 2	100m 分のリボン上に低粘着の接着剤をラミネート
工程 3	100m のラミネート済み品を 500mm 長さにカット
工程 4	8 列×8 層にレイアップしハトメ処理
工程 5	磁気シェイキング用コイルの敷設(シェイキングの場合のみ)



写真 2.7 試作サンプル

2.3 まとめ

Co系アモルファスを脆化させることなく特性の改質を試みたが、現在の熱処理装置にて対応可能な条件内では、磁気特性の改質と脆化の傾向を別々にコントロールするに至らなかった。 ただし、脆化した Co系アモルファスを扱うことを前提に、材料の破損を避けた磁気シールドモジュールの製造方法を示した。 第3章 SQUID センサを用いた磁気シールド性能の評価

新技術を用いた磁気シールドボックスと従来技術を用いた磁気シールドボックスについて性能 評価を行った。性能評価試験は、金沢工業大学先端電子技術応用研究所が有する超電導量子 干渉素子を応用した微弱磁場計測装置と外部磁場印加用コイルを用いて行った。

3.1 評価用小型シールドボックス

比較評価のために試作した2台の磁気シールドボックスは、どちらも3層構造で、内側2層が 磁気シールド層で、最外層がアルミの電磁シールド層となっており、前面の片開きの扉で内部に アクセスできるようになっている。

アモルファス磁性体材料製の磁気シールドボックスは外側の磁気シールド層(最外層から数えて2層目)にのみ、励振(シェイキング)のための電線が敷設されている。図 3.1 は磁気シールド ボックスの全体図、断面図を示したもので、図 3.2 は寸法と座標系の向きを示したものである。



図 3.1 磁気シールドボックスの全体図と断面図



図 3.2 磁気シールドボックスの寸法と座標系の向き

低温容器の先端部の長さが 230.7 mm であるのに対して、シールドボックスの上面から最内層中心までの高さの差が 294.5 mm であるため、正確には中心から64 mm 程度上方の位置の磁場を計測することになる。

3.2 微弱磁場計測装置(SQUID センサ)

評価試験に使用した微弱磁場計測装置は、金沢工業大学先端電子技術応用研究所にて開発した小動物生体磁場計測装置(M. Miyamoto et al, Journal of Physics: Conference Series 97(2008), 012258)をベースとして一部に変更を加えたものである。図 3.3 左に今回使用した微弱磁場計測装置の低温容器の模式図を示す。低温容器本体となる円筒状の液体ヘリウム溜めの底面から、直径35 mmの円筒状のセンサ実装部が突き出たような構造を持つ。シールドボックスの評価試験を行うにあたって、図 3.3 右に示すような3 軸の SQUID 磁束計を実装できるようなプローブを新たに設計・作成した。



図 3.3 (左) 低温容器模式図 (右) 3 軸 SQUID 磁束計

シールドボックス上面にセンサ実装部が挿入できるような貫通孔をあらかじめ作り込んであり、 図 3.4 のように低温容器本体をシールド上面に設置することによって、3 軸 SQUID 磁束計がシ ールドボックスのほぼ中央に配置されるようになっている。シールドボックス上の低温容器本体は ステンレス製で外来の電磁ノイズを軽減する効果を持つ。一方、センサ実装部は磁場計測を妨 げないようにグラスファイバー樹脂製となっている。

SQUID 磁束計は磁束伝達型の低温 SQUID 磁束計で、2 段積分器型(帯域通過型)の FL L 回路により駆動されている(Y. Adachi et al., IEEE Trans Applied Supercond, 17(200 7), 3867-3873)。電子回路、低温容器も含めた計測システム全体での磁場分解能は 50 fT/Hz ^{1/2}で、磁場感度は 15 nT/V である。



3.3 計測条件

シールドボックスとコイルを図 3.5 に示すように配置し、x、y、z 方向に磁場を印加し、それぞれの場合の遮蔽率の計測を行った。外部磁場印加用のコイルにはいずれの場合も、周波数 0.1 Hzから2 kHz、強度約 1mApp の電流を印加し、遮蔽率の周波数依存性を求めた。

コイルには直列に 100 Ω の抵抗を接続しており、抵抗の両端の電圧を周波数応答分析装置 の ch1 に入力することにより電流値を換算できるようになっている。この電流によってシールドボッ クス中心に生じる磁場強度を計算すると、コイル 2 つを用いた水平方向 (x、y 方向)の場合で約 2 1 nT_{pp}、コイル 1 つで垂直方向に印加する場合では約 3.5 nT_{pp}となる。

アモルファス磁性体材料については、シェイキングコイルに電流を流さない場合と流した場合 について、それぞれ同じ計測を行った。コイルに流す電流はファンクションジェネレータ(エヌエフ DF1906)でサイン波を生成し、出力を直接シェイキングコイルに接続して印加した。シェイキング の周波数は 80 Hz、電流強度は 40 mA_{pp}(ファンクションジェネレータの電圧設定値で 1 Vrm s)とした。SQUID 磁束計は FLL にて駆動され、出力信号には遮断周波数 2 kHz の低域通過 フィルタを適用し、ゲイン 25 倍の増幅器を介して周波数応答分析装置の ch2 に入力した。した がって増幅後の実質的な SQUID 磁束計の感度は 0.6 nT/V となる。



図 3.5 コイルとシールドボックスの位置関係

3.4 測定結果

アモルファス磁性体材料製(シェイキングあり、シェイキングなし)、パーマロイ製について、x、y、 zのそれぞれの方向から磁場を印加した場合について個別に遮蔽率を計測した結果を以下に示 す。また、外部磁場 10 Hz に対する遮蔽率を表 3.1 にまとめた。



遮蔽率@10 Hz	Bx[dB]	By[dB]	Bz[dB]
アモルファス(シェイキングなし)	-45.9	-46.2	-44.0
アモルファス(シェイキングあり)	-50.2	-50.5	-48.9
パーマロイ	-59.2	-59.0	-54.3

表 3.1 外部磁場 10Hz の場合の遮蔽率

図 3.6~図 3.8 および表 3.1 に示すように、アモルファス磁性体材料製(シェイキングなし)、 アモルファス磁性体材料製(シェイキングあり)、パーマロイ製の順に遮蔽率が高くなる。各場合と も、1~10 Hz でもっとも遮蔽率が低く比較的フラットな周波数特性を示し、1 Hz 以下あるいは1 0 Hz 以上では遮蔽率が向上する。

60 Hz に見られるピークは商用電源からの磁気的な雑音の影響で、図 3.7 の 80 Hz および 160 Hz のピークはシェイキングの漏れ磁場の影響であると見られる。

3.5 追加評価

3.5.1) 漏れ磁場の影響

アモルファス磁性体をシェイキングした場合の漏れ磁場の影響について評価を行った。 図 3.9 は外部磁場を印加しない場合の各 SQUID センサ信号の時間波形である。上がシェイ キングなしの場合、下がシェイキングありの場合である。ch0、ch1、ch2 はそれぞれ x、y、z 方向 のセンサに相当する。



図 3.9 アモルファス磁性体材料製シールドボックス遮蔽率評時の SQUID信号の時間波形

シェイキングなしの場合は商用電源由来の60 Hzの磁気ノイズがドミナントに見られるが、シェ イキングありの場合は、シェイキングの漏れ磁場がドミナントになる。その大きさは数100 pTppか ら1 nTppのオーダーである。図 3.10 は図 3.9 を高速フーリエ変換し、周波数領域でプロットし たものである。左がシェイキングなしの場合、右がシェイキングありの場合である。

シェイキングありの場合、遮蔽率向上により 60 Hz のピークはやや小さくなっているものの、漏 れ磁場の影響で 80 Hz とその高調波の周波数に多数のピークが見受けられる。これらの漏れ磁 場は脳磁や心磁などの生体磁場信号と帯域が重畳するため、大きな問題となると予想される。



図 3.10 アモルファス磁性体材料製シールドボックス遮蔽率評価時の SQUID信号の周波数領域でのプロット

3.5.2) シェイキング周波数1 kHzの場合の遮蔽率の電流強度依存性

シェイキング周波数が 80 Hz の場合、生体磁場計測への漏れ磁場の影響が無視できない。 そこで、シェイキング周波数を 80 Hz から生体磁場の帯域よりも比較的高い 1kHz に変更し、再 度、遮蔽率の評価を試みた。適切な電流強度を調べるためにまず、電流強度を 13 mApp(ファ ンクションジェネレータの電圧設定値で 1 Vrms)、40 mApp(同 3 Vrms)、100 mAppの 3 通 りに変えて評価した。なお、ファンクションジェネレータの電流容量を越えたため、電流強度 100 mAppの場合についてのみ、ファンクションジェネレータの出力をハンドメイドの電流増幅器で増 幅しコイルに印加した。測定時間短縮のため、y 方向から磁場を印加した場合の y 方向センサの 信号のみ吟味した(つまり式(1)の Gx および Gz を便宜上、ゼロとして遮蔽率を計算した)。

図 3.11、表 3.1 にその結果を示す。参考のために、シェイキングなしの場合と80 Hz でシェ イキングした場合についてもプロットした。



図 3.11 シェイキング周波数1 kHzの場合の遮蔽率(y 方向磁場/y 方向センサ)

表 3.2 外部磁場 10 Hz の場合の遮蔽率

周波数	なし	80Hz	1kHz/13mA	1kHz/40mA	1kHz/100mA
遮蔽率[dB]	-46.1	-50.6	-47.6	-48.6	-51.8

図 3.11、表 3.2 の結果より、シェイキング周波数を1 kHz として、80 Hz の場合に匹敵する 遮蔽率を得るには、電流強度を40 mA_{pp}~100 mA_{pp}とする必要があることがわかった。

3.5.3) シェイキング1kHzの場合の雑音特性

シェイキング周波数1 kHz で、外部磁場を印加しないときの雑音を周波数領域でプロットした ものが図 3.12 である。左が電流強度を40 mAppとした場合、右が電流強度を100 mAppとした 場合である。

図 3.12 シェイキング1 kHz の場合の雑音

図 3.12からわかるように、電流強度 40 mAppの場合は1 kHz 以下の帯域ではシェイキング なしの場合(図 3.12 左)とほぼ等しい。一方で、電流強度 100 mAppの場合はとくに x 方向、z 方向のセンサでノイズフロアが顕著に上昇し、1 kHz とその高調波のピークも電流強度比以上 に増加している。このノイズの増加は 100 mAppの電流を印加するために付加したハンドメイドの 電流増幅器の雑音が原因と考えられる。このように電流強度を 100 mAppとすることによって、遮 蔽率の向上が図れるが、一方で低ノイズの電流増幅器が必須となる。今回、ファンクションジェネ レータ単体で歪みなく印加できる電流は 40 mAppが限界だったため、次に続く遮蔽率はシェイ キング電流強度 40 mAppとして計測した。

3.5.4) シェイキング1kHzの場合の遮蔽率

3.3 節で示した計測条件と同じ条件で、シェイキング周波数1 kHz、電流強度 40 mApp の場合の遮蔽率を評価した。y 方向(水平方向)とz 方向(垂直方向)の2 通りの外部磁場を印加し、x、y、z 方向のすべてのセンサの出力(Gx、Gy、Gz)を用いて遮蔽率を求めた。

図 3.13 に水平方向の磁場に対する遮蔽率を、図 3.14 に鉛直方向の磁場に対する遮蔽率を プロットした。また、参考のために、シェイキングなしの場合、80 Hz でシェイキングした場合および 1kHz でシェイキングした場合の、外部磁場 10Hz に対する遮蔽率を表 3.3 に示す。

	• • • • • • • • • • • •		
	なし[dB]	80 Hz [dB]	1 kHz [dB]
水平方向(By)	-46.1	-48.8	-50.3
垂直方向(Bz)	-44.0	-46.9	-48.6

表	33	外部磁場	10Hz	の場合の	遮蔽率
4	0.0		10114		

なお、可聴域周波数でシェイキングした場合、機械的振動による音響雑音の発生が懸念され ていたが、シールドボックス外部では問題になるような音は聞こえなかった。シールドボックス内 部の音響計測は今後の課題とする。

3.6 まとめ

3.4節で示したように、遮蔽率はパーマロイ製が最も高く約60dBに達する。アモルファス磁性 体材料製はシェイキングを行うことにより、遮蔽率の向上が4.3~4.9dBほど向上するが、約50d B程度にとどまる。つまり、パーマロイ製の方が高いという結果になった。この理由の解明につい ては今後の課題となるが、アモルファス磁性体材料製の場合、壁を構成している各モジュール間 の磁気的な結合が十分でない可能性もある。

シェイキング時の漏れ磁場の影響は、SQUID による生体磁場計測にとって無視できない。生体磁場信号と重畳する帯域でシェイキングを行った場合、シェイキングの周波数とその高調波による雑音が大きな問題となることが予想される。対象となる帯域よりも高い帯域でシェイキングを行うことが必須である。

第4章 磁気シールド補強装置の MSR への適用

株式会社オータマに設備されている従来技術を用いて作られた磁気シールドルームに対し、 その室内側に新技術のシールド層を追加し磁気シールド補強効果を評価した。従来技術(パー マロイ)によるシールド層の内側に、まず最初に磁気シェイキングを施したアモルファスの層を構 築した。次にシェイキング層からはシェイキングノイズが発生するという欠点があるため、この内側 にアルミニウムの層を作りノイズ対策とし、最後にシェイキングをしないアモルファスの層を構築す るという3層を追加した。性能の検証として各段階で磁気シールド性能の補強効果を評価した。

- 4.1 既設 MSR の性能評価(リファレンス)
- 4.1.1) 既存 MSR の構造

既設 MSR は表 4.1 に示すようにパネル工法で6面体を構成した室内に、このパネルを下地としてパーマロイ板を施工したものである。

形状を図 4.に示す。

項目	仕様
基本構造	パネル工法(断熱パネルを用いた恒温チャンバ)
磁性材料	パーマロイ PC グレード(JIS C 2531) 板厚 0.8mm
寸法(室内)	2980×2470×2880mm

表 4.1 既設 MSR の概要

4.1.2) 性能測定方法

MSR の磁気シールド性能評価は、コイルによる磁界印加法にて行った。

ファンクションジェネレータで発生させた信号をパワーアンプによって増幅し、この電流を磁界 発生コイルに与えることによって磁界を発生させ、またこのとき MSR 中心にあたる位置で磁界を 測定してシールド効果を評価した。使用機器を表 4.2 に示す。

磁界発生コイルは図 4.2 に示すように MSR が設置される前に実験建屋の壁・床面などに支持 させて敷設している。

初めに MSR の無い状態で発生磁界のリファレンスデータ Boを MSR 中心にあたる位置で測定し、その後 MSR を移設して磁界を印加した時の漏洩磁界 Biを MSR 中心位置で測定した。 ここでは Bo、Biから次式で求められる磁気シールド係数 SFを MSR 性能評価の指標とした。

SF= Bo/Bi \cdots (4.1)

磁気シールド係数は周波数や印加磁界の強度によって変化するため、実験では表 4.3 に示す ように周波数や磁界強度を変えてそれぞれのシールド係数を求めた。

磁界発生コイル	15 ターン
	幅方向発生用コイル :4500×4000mm 離隔 5200mm
	奥行方向発生用コイル:4000×5200mm 離隔 4500mm
	鉛直方向発生用コイル:4500×5200mm 離隔 4000mm
電源	NF 回路ファンクションジェネレータ
	NF 回路パワーアンプ 4505
磁界測定器	測定器:FM-3500

表 4.2 使用機器

表 4.3 印加磁界の条件

項目	内容
周波数特性試験	周波数 0.5,1,2,5,10,20,55,100,200,500,1000Hz 電流値固定
磁界強度特性試験	0.5,1,2,5,10,20µTpp 周波数 1Hz

図 4.2 磁界発生コイル

4.1.3) 既設 MSR のシールド性能

発生磁界のリファレンスデータを MSR 中心にあたる位置で測定し、電流値と発生磁界との関係を確認した。

始めに 1Hz にて 10 μTpp となるように電流値を調整した。電流値を固定として周波数を変化 させた時の磁界強度との関係を図 4.3 に示す。

コイルからの発生磁界は実験棟建屋の鉄骨やシャッターの影響により、周波数が高くなるほど 小さくなっていることが分かる。周波数特性は本来、磁界強度を一定に保ち周波数を変化させな ければならないが、今回は電流値を可変する際の人為的なミスを避けるため、電流値一定で特 性を評価した。

次に、表 4.3 に示した条件にてパーマロイ1 層の MSR の磁気シールド性能を MSR 中心で 評価した。

図 4.4 に周波数変化に対するシールド係数の変化を、図 4.5 に磁界強度の変化に対するシールド係数の変化を示す。

既存 MSR は特に大きな開口や形状の特異性がないため、周波数特性ならびに磁界強度特性としては従来技術の MSR として妥当な結果を示している。

図 4.3 周波数と発生磁界(リファレンス)

図 4.4 パーマロイ1 層 MSR の周波数特性

図 4.5 パーマロイ1層 MSR の磁界強度特性

4.2 磁気シールドルームへの応用1

既設 MSR に、新技術であるコバルト系アモルファスのシェイキング層を追加し、磁気シールド 性能を評価した。

4.2.1) モジュール工法

一般的に磁気シールドルームは磁性体で6面を構成するものであり、磁性材料は下地となるフレームやパネルにビスやボルトなどで機械的に留められるのが基本である。

しかし、コバルト系アモルファスのような細いリボン状の金属箔では下地に直接貼り付けていく ことは非効率であり、脆化した材料が破壊されるという問題もある。

したがって第2章で示したように、平成23年度から今年度にかけて、いったんコバルト系アモルファスをモジュール化することにより上記のような問題に解決策を示した。

本実験では昨年度までの研究成果を基に図 4.6 に示すようなモジュール工法によって、コバルト系アモルファスを用いた層(表 4.4)を構築した。

図 4.6 モジュール工法

磁気シールド材料	コバルト系アモルファス(磁気シェイキングあり)		
モジュールの平面的連結方法	パーマロイ帯による連結		
コーナー連結方法	パーマロイアングルによる連結		
内寸	幅 2500 奥行 2000 高さ 2500mm		

表 4.4 追加磁気シールド層の条件

シェイキング技術を応用しモジュールを施工した MSR 室内を写真 4.1 に示す。

モジュール化により大きな問題が生じることなく施工を完了した。床面はモジュールに直接荷 重がかかってしまうと破損が懸念されるため、モジュールを貫通し下地にて内層床の荷重を支え る工夫を施している。

写真 4.1 モジュールを施工した MSR 室内

4.2.2) 磁気シェイキング層を追加した MSR のシールド性能

磁気シェイキング層を追加した2層 MSR について、表 4.3 の条件で磁界を印加し性能を MS R 中心で評価した。結果を図 4.7、図 4.8 に示す。

実線で示しているのがパーマロイ1層のシールド効果であり、これに対して新技術のシェイキ ング層を追加した場合が破線で示されている。周波数に依らず3~4倍程度に向上しており良好 な結果を得た。

図 4.7 シェイキング層を追加した MSR の周波数特性

図 4.8 シェイキング層を追加した MSR の磁界強度特性

4.3 磁気シールドルームへの応用2

既設 MSR に、シェイキング層およびアルミ層を追加し、磁気シールド性能を評価した。

4.3.1) アルミ層を追加した MSR のシールド性能

シェイキング層を施工後、離隔を設け木製フレームとベニヤによりアルミ施工用に下地を構築 し、そこに純アルミ板(板厚3mm)を施工した。アルミ層完成後の室内有効寸法は幅2300、奥行 1800、高さ2300mmである。

表 4.3 の条件で磁界を印加した場合の結果を図 4.9、図 4.10 に示す。

生体磁気計測装置用の MSR ではパーマロイの多層構造に加えてアルミ層を加えることで電 波シールドを備えることが一般的で、渦電流効果によって周波数が高いほどシールド係数が上 がっていく特徴がある。

今回アルミ層を追加した目的は、シェイキング層の欠点であるシェイキングノイズの除去である。

図 4.9 から分かるように、5Hz 未満の磁気シールド効果についてはアルミ追加前後でほぼ変化していないが、磁気シェイキングの周波数帯 80Hz では十分な効果を発揮していることが分かる。

実験MSR性能特性ー外乱磁界の周波数とシールド係数 10000 ••••••1層(X方向) •••▲•• 1層(Y方向) ■・・1層(Z方向) - 2層(X方向) 1000 - 2層(Y方向) ■ 2層(Z方向) 3層(X方向) -3層(Y方向) シールド 100 -----3層(Z方向) 係数 1層·PC層 2層:PC層+シェイキング層 3層:PC層+シェイキング層+AL層 X:幅 Y:奥行 Z:鉛直 \$11111 \$1111 \$1111 \$1111 \$1111 \$1111 \$1111 \$1111 \$1111 \$1111 \$1111 \$1111 10 (試験条件) 外乱周波数:10 µTpp シェイキング周波数:80 Hz シェイキング電流:100 mA 測定位置:MSR中心 1 0.1 10 100 1000 周波数 Hz

また、1Hz ではほとんど効果を発揮できないため図 4.10 では変化が非常に小さい。

図 4.9 アルミ層を追加した MSR の周波数特性

図 4.10 アルミ層を追加した MSR の磁界強度特性

4.3.2) MSR 室内におけるシェイキングノイズの分布

シェイキングノイズに関してMSR 室内での分布測定を行い、アルミ層の効果をノイズ分布の観 点から評価した。

分布の測定位置は図に示すように MSR 中心高さの平面断面に対して 1/4 の領域とし、 200mm 間隔のマトリックス上に設定した。

図 4.11 シェイキングノイズの分布測定位置

図 4.12、図 4.13 に示すようにアルミ層の設置後、壁面付近においては 10nT を超える部分も あるが、平均 1/4.7 に低減されている。

図 4.12 アルミ層施工前のシェイキングノイズ

図 4.13 アルミ層施工後のシェイキングノイズ

4.4 磁気シールドルームへの応用3

既設 MSR に、シェイキング層、アルミ層およびシェイキングを応用しないコバルト系アモルファ ス層を追加し、磁気シールド性能を評価した。

4.4.1) 既存 MSR と3 層の追加シールド

コバルト系アモルファス層施工後の形状を図 4.14 に示す。

各層の扉については、既存のパーマロイ層は従来の開き戸方式となっているが、追加施工した3層については支持構造の強度問題から着脱式の簡易扉とした。(写真 4.2)

図 4.14 追加施工後の MSR 形状

写真 4.2 追加施工後のドア形状

4.4.2) コバルト系アモルファス層を追加した MSR のシールド性能

表 4.3 の条件で磁界を印加した場合の結果を図 4.15、図 4.16 に示す。

周波数の高い領域ではアルミの効果で性能が向上しているが、5Hz 以下の性能向上は新技術によるものである。パーマロイのみの MSR 性能と比較し 6~7 倍となっていることが分かる。

図 4.15 コバルト系アモルファス層を追加した MSR の周波数特性

図 4.16 コバルト系アモルファス層を追加した MSR の磁界強度特性

4.5 まとめ

従来技術で作られた既設 MSR に、新技術で作られたシールド層(性能補強装置)を組み合わせ、磁気シールド性能を評価した。これにより、研究成果を実際に MSR の大きさに施工した場合でも、その性能を発揮できることを証明した。また達成目標の一つである「既存 MSR の遮蔽性能を5倍以上」をクリアすることができた。

今回の実験ではシェイキング周波数を80Hzとしたが、より高い周波数帯を選択することでSQ UID 磁束計に与える影響を軽減することが可能である。

アルミ層は原理的に周波数が高くなるほど効果が高くなり、また板厚を薄くすることができると 考えられることから、今後は対象装置に応じたシェイキング周波数の選択と、材料選定について も技術開発していく必要がある。 第5章 MSR 性能評価のための磁界解析条件の検討

ユーザーが要求する多種多様な仕様(形状、性能)を満たす MSR 製品を短期間で開発・設計するためには、コンピュータシミュレーションが有用である。

本章では磁界解析技術を援用したシミュレーション結果について述べる。MSR の構成要素を 形状・材質を図 5.1 に、電磁気特性を表 5.1 に示す。

実測値が得られている下記2種の MSR について 3 次元磁界解析を行い、シールド性能について計算値と実測値を比較評価した。

1) パーマロイ製 MSR

2) パーマロイ層とアモルファス磁気シェイキング層の2層から構成されるMSR

図 5.2 に検討プロセスを示す。

図 5.1 磁気シールドルームの構成要素

材質	(1)パーマロイ層	②シェイキング層 (アモルファス)	③アルミニウム層	⑤アモルファス層	
幅方向 (m	n)	2930	2500	2314	2284	
奥行方向(m	n)	2420	2000	1814	1784	
鉛直方向 (m	n)	2845	2500	2314	2284	
厚さ (m:	n)	0.8	0.18	2.0	0.18	
電磁気特性						
比透磁率(注)	30000	シェイキング無 9000 シェイキング有 75000	1	9000	
抵抗率(Ω・n	ı)	60*10-8	140*10-8	$2.7^{*}10^{-8}$	140*10-8	
導電率 (S/m)	$1.7^{*}10^{6}$	$7.1^{*}10^{5}$	$3.7^{*}10^{7}$	$7.1^{*}10^{5}$	

表 5.1 材質·形状·電磁気特性

注: 比透磁率はモデリング手法の検討用に仮に設定した値

図 5.2 検討プロセス

5.1 モデリングの検討

有限要素を用いる磁界解析手法では、解析対象領域を有限要素(メッシュ)に分割する必要 があるが、MSR 特有の下記の課題があるため考慮が必要である。

- 1) MSR に一様な外部磁界を与える必要があり、MSR を中心に配置した広範囲の領域を解 析対象にする必要がある。
- 2) シールドの厚さが、極薄である。

通常の手法で解析すると、上記課題のため、要素数が膨大となり、実用的な解析が困難となる。 そのためモデリングには工夫を要する。本節では、磁気シールド性能を、実用的な計算時間でか つ高精度に算定可能なモデリングについて検討した。

5.1.1) 外部磁界の設定

MSR に幅方向(x 方向)に外部磁界を与える場合の境界条件を図 5.3 に示す。a,b,c,d 面に 表面電流(suface current)を与えることで外部磁界の印加を模擬する。

surface current = Bext $/ \mu_0$

Bext(T):外部磁界

μ₀(H/m):真空の透磁率(4π*10⁻⁷)

磁束がe面から流入しf面から流出するので、e,f面には"perfect magneteic conductor "を 設定することによって磁束の向きが整えられ、領域内に並行磁界を模擬することができる。

図 5.3 境界条件(外部磁界)の設定

5.1.2) 解析領域の最小化

計算量を低減する場合、電磁界現象の対称性を利用する方法がある。ここでは上下、左右、手前と奥が対象として、解析領域を1/8に縮小した(図 5.4)。

次に MSR 中心部の磁束密度に影響を与えない範囲でなるべく解析領域を小さくすることを検 討した。図 5.5 に示すように幅方向の境界の長さを変えて計算した結果、境界の長さを 6m に設 定すれば MSR 中心部の磁束密度をほぼ精確に計算できることがわかった(表 5.1)。

図 5.4 解析領域の最小化(対象性利用) せん。 境界領域の最小化

図 5.エラー! ブックマークが定義されていま

	1	2	3
幅方向境界 (m)	6.0	10.0	20.0
MSR 中心磁束密度(µT)	0.0377	0.0359	0.0360
Ratio (.vs.3)	1.05	1.00	-

表 5.2 幅方向境界長さと MSR 中心磁束密度

5.1.3) 極薄板(シールド層)の取扱い

境界領域 6m に対して、パーマロイ層、コバルト系アモルファス(シェイキング)層の厚さはそれ ぞれ 0.8mm、0.2mmと極めて薄いため、長さに関するアスペクト比が非常に大きく、通常の手法 では要素分割が不可能である。

使用する磁界解析ソフト COMSOL は"magnetic shielding"という薄板を厚さのない面として 取り扱える機能を有している。本機能の有効性および計算精度を確認するために、薄板の厚さを 5mm に設定し、通常の手法と本機能を用いて計算した(図 5.5)。計算結果を表 5.3 に示す。

"magnetic shielding"を用いることにより、解析精度を保持したままで、通常の手法に比べ、 要素数は約 1/10 に、計算時間は 1/15 になっている。

薄板の取扱い	要素数	自由度数	計算時間(s)	MSR 中心 磁束密度(T)	
normal	3,962,607	25,182,442	5488	2.00E-07	
magnetic shieldinng	395,752	2,538,922	337	1.99E-07	

表 5.3 計算結果

図 5.5 超薄板の取扱い

5.2 パーマロイ製 MSR の磁界解析

5.1 節で検討したモデリングの手法を用いて MSR のシールド性能を計算した。 幅方向(x 方向)、奥行方向(y 方向)、鉛直方向(z 方向)にそれぞれ外部磁界 5µT を与え、 パーマロイの比透磁率を変化させ 3 次元磁界解析を行った。図 5.6a は磁束密度分布と磁束密 度のアロー図である。図 5.7b は MSR 中心部の磁束密度・比透磁率、またはシールド比・比透磁率を示す。

なおシールド係数 SF は(4.1)式で算出される値である。

また図にある設計値は、次式を用い算出した。

SF= 1+0.48*(2・µ・t)/L ・・・・(5.1) L:辺の長さ µ:シールド材の比透磁率

t:シールド材の板厚 SF:シールド係数

ここでLは幅方向、奥行方向、鉛直方向のそれぞれの長さを用いた。

(5.1)式は理想的な立方体形状の1層 MSR のシールド係数である。ここで用いる比透磁率は施工方法や施工現場環境を考慮して磁気シールド業者それぞれが独自の経験的ノウハウや実績をベースに決定している設計用の数値である。

本節では磁界解析の妥当性を検証するため設計値と磁界解析結果との比較を行った。

エラー! 参照元が見つかりません。7bに示すように1層 MSR のシールド比については磁界解 析値と設計値はほぼ一致し、解析結果の妥当性が確認できた。

また今回、解析値を実測データに合わせこむことで実効的なシールド材料の比透磁率を3680 0~41000であると推定できた。

次節で検討するコバルト系アモルファスとパーマロイの複合MSRの解析を行う場合、パーマロ イ部分に関しては最外層であるため印加磁界が今回の解析と同じ条件となる。従ってパーマロイ の物性としてこの比透磁率を用いることとした。

図 5.6a 磁界解析結果(パーマロイ製 MSR) 磁束密度分布とアロー図

図 5.7b 磁界解析結果(パーマロイ製 MSR)

5.3 パーマロイ層とアモルファス層から構成される2層 MSR の磁界解析

5.2節と同様の3次元磁界解析を実施した。なおパーマロイ層の比透磁率は36800~41000 と推定したが単一の値として扱うため37000に固定し、アモルファス層の比透磁率のみを変化さ せ MSR 内部の漏洩磁界およびシールド係数を計算した。

またシェイキング電流(80Hz,100mA)を流した場合、本来は交流解析を実施する必要がある が、極薄板要素("magnetic shielding")が周波数応答解析に対応していないため、今回は直 流解析を行った。

ここでも、解析結果の妥当性を判断するため設計値との比較を行った。理想的な立方体の場合として、一般に2層構造のMSR に適用されている次式を用いた。

S= 1+S1+S2+S1・S2・V12 ····(5.3) Si=0.8*(µi・ti)/Li V12=1-(L1/L2)3 i=1,2 i=1 :シェイキング層 i=2 : パーマロイ層 結果を図 5.8a、図 5.8b に示す。

図 5.8b 磁界解析結果(2 層 MSR)

比透磁率に対するシールド係数は、パーマロイ1層の MSR の場合に比べ設計値と計算値の 差異は大きくなっているが、傾向は同じとなっており計算結果は妥当であると判断した。 この結果からアモルファスの実効的な比透磁率は、シェイキングなしの時 22500~31000、シェイキングを行った時 140000~150000 との推定値を得た。

5.4 まとめ

パーマロイ層から構成されるMSR および内部にアモルファス層(シェイキング層)を組込んだ2 層 MSR について3次元磁界解析を行い、シールド性能について設計値と計算値を比較評価し 解析の妥当性を判断した。シールド材の比透磁率とシールド係数の関係については、従来用い られている設計手法から算出した値とほぼ同一の結果が得られたことから、MSR設計へ磁界解 析技術を適用する有効性を確認できた。

したがって、ここで得られたモデリングの手法とパーマロイおよびアモルファスの比透磁率の推定値を用いることで、未知の形状のMSR に対してシールド係数を推定することができるようになったこととなる。

ただし、この手法は今後、多くの実験・実測と解析、比較検証等データを蓄積し精度を高め信 頼性の裏付けをしなければならない。 第6章 総括

- 6.1 研究開発の成果(平成 22~24 年度)
 - 6.1.1) 平成 22 年度の成果
 - 磁気シェイキングなしの場合についてコバルト系アモルファスの評価法を確立するとともに、精密な温度制御にて熱処理可能な装置を整備することよって熱処理温度と磁気特性の関連性を明らかにすることができた。また磁気特性の目標値をクリアすることができた。
 - 2) コバルト系アモルファスに磁気シェイキングを適用した場合の性能評価を行うため、シェイキン グノイズに影響されない測定法を確立し、その運用性、結果の妥当性を示した。また、自動化シ ステムを開発し、再現性の良い測定を可能にした。
 - 3) 本研究の最終段階で実証試験を目指す、パーマロイとコバルト系アモルファスのハイブリッド磁気シールドルームの性能を、磁界解析によって試算し、基本的な設計思想を得た。
 - 4) 熱処理によってコバルト系アモルファスが脆くなり、変形の許容や加工上の問題で製品化に制約が生じるとの知見を得た。
 - 6.1.2) 平成 23 年度の成果
 - 磁界中熱処理によって角型比が調整可能であることを示し、年度の目標としてあげていた角型 比95%を達成することができた。ただし、正確に角型比をコントロールするためには均一な磁界 を特定方向に印加する技術が必要であることが分かった。また、コバルト系アモルファスは熱処 理によって脆化することが問題となるが、磁界印加によって脆化が進行するような結果は認めら れなかった。
 - 2) 磁気シールドユニットの中核となる磁気シールドモジュールについて具体的な構造・加工方法 を示した。また、磁気シールドモジュールの拡張方法を示しユニット化する方法を示した。
 - 3) 磁気シェイキングを応用した磁気シールドモジュールを連結しユニット化していくとき、連結部に おいても磁気シェイキングの効果が保たれる効果的なコイル敷設方法を磁界解析と試作によっ て開発した。また、この方法を権利化するため特許出願を行った。
 - 4) 大型化した場合でも磁気シェイキングがドライブ可能であることを確認すると共に、大型化する際に生じる問題点を抽出した。また、大型化により地磁気が集中するため磁気シールドユニット中央部では性能が低下することが分かった。
 - 6.1.3) 平成24年度の成果
 - 1) 熱処理条件(保持温度、保持時間)と磁気特性および脆化の程度との関連性を再検証した。その結果、磁気特性の向上は脆化を常に伴うことを確認した。
 - 2) アモルファスのモジュール化方法を再検討し、具体的手法を示した。

- 3) SQUID 磁束計による磁気シールド性能評価を行い、従来技術との比較を行うことで新技術のメ リットデ・メリットを浮き彫りにした。これによって実用化する際に問題となる点を確認し、その回避 手段に関してのアイディアを得た。
- 4) 従来技術で作られた既設 MSR に、新技術で作られたシールド性能補強装置を組み合わせ、 実際の MSR として性能を評価した。これにより、達成目標の一つである「既存 MSR の遮蔽性能 を5 倍以上」をクリアした。
- 5) 実際の MSR に応用した場合に問題となる磁気シェイキングノイズの解決方法としてアルミニウ ム層が有効であることを、内部のノイズ分布測定にて証明した。
- 6) 新技術を製品化するため、コンピューター上で磁気シールド性能を予測する方法を検討した。 その結果、本研究で得られた実測結果をコンピューター上でよく再現できるようになり、今後いろいろな形状に対して要求性能を満たす材料厚さや、磁気特性を事前に検討する際の裏付けデータを得た。
- 6.2 研究開発後の課題
 - 6.2.1) 性能劣化問題の解決

コバルト系アモルファス、および磁気シェイキング技術を用いて作製した小型磁気シールド ボックスが、SQUID センサによる性能検証の結果、従来技術よりも劣る結果となった原因を究 明する必要がある。

6.2.2) 応用分野の検討

本研究では MSR 以外への応用を検討するに至らなかったが、本来は軽量化・高性能化・ 低コスト化の応用先は多数存在するはずである。磁気シールド部品やコア用途など、新技術 の適用を広範囲に調査する必要がある。

6.2.3) 生産技術の検討

モジュールを製作する際の積層工程を機械化するため、脆化した素材を破壊せずに自動 化する技術を検討する必要がある。

6.2.4) 導入·施工実績

半導体製造装置の MSR などは高い信頼性が求められ、納入実績のないことが障壁となる。 このため扉部分や開口部の補強といった部分的な応用で実績作りが必要となる。

6.3 事業化に向けた展望

研究が終了した来年度から、本格的な製品化のスタートである。株式会社オータマにて、自社 テーマとして研究開発を続ける計画であり、本事業終了後からの製品化・事業化の具体的な活 動は下記の通りである。 6.3.1) 機械設備の購入(平成 25 年度)

九州大学で検討した磁界解析をオータマにて行うため、同じソフトウェア(COMSOL)を導入 する。同じ環境・手法で磁気シールド製品の性能予測を継続して行っていき解析値の信頼性・ 健全性を向上させていく。

また、本事業で取得した機械装置である熱処理装置、磁気シールド補強装置などの所有権移 転が終わり次第、関東経済産業局(会計課)との交渉を始め、オータマにて購入する。

6.3.2) 補完研究(平成 25 年度)

コバルト系アモルファス、および磁気シェイキング技術を用いて作製した小型磁気シールドボ ックスについて、層ごとに分解評価を行い、どの部分で特性劣化が生じているかを調査する。 MSR の扉やダクトなどへの部分的な応用を目指し、試作と評価を行い従来技術との比較デ ータを取集する。

6.3.3) 製品化の実績作り(平成 25 年~)

株式会社オータマでは年間 5~10 基の MSR を受注しており、平成 25 年度もすでに 10 基 に迫る受注見込みがある。しかし、これらの多くは半導体製造装置用であり、磁気シールド性能 だけにとどまらずパーティクルの問題(発塵、不純物の発生)や安全性に関して信頼性が重視さ れるため、実績のない新技術は採用される見込みが非常に低い。

一方で、研究用途での MSR やサイズダウンした磁気シールド(ケース)などでは、重量や価格の低減、あるいは高性能化が重要視されることが多く新技術が適した案件が存在する。その中でも最も新技術が有効に働くと考えられる扉および開口部補強への部分的な適用を進め、来年度中に従来技術とのハイブリッドにて実績作りを目指す。

また近年、既存 MSR の改造案件も増えていることから、性能アップを目的とした改造案件に 関して、室内への補強シールド層として適応することも期待される。部分的な適応や、従来技術 とのハイブリッドといった実績をもとに、生体磁気計測装置用、あるいは半導体製造装置用 MSR の分野において、従来技術から新技術に置き換えを図っていきたいと考えている。

