

スリット状接続部で構成された電磁シールド室の  
遮へい性能設計技術に関する研究

平成 27 年 11 月

吉野 涼二



# 目 次

## 第 1 章 序論

1.1 研究の技術的な背景	1
1.2 電磁シールドの基本事項	3
1.3 研究の目的	5
1.4 論文の構成	12
第 1 章 参考文献	16

## 第 2 章 スリット状接続構造電磁シールド性能の定式化

2.1 検討の概要	17
2.2 スリット状開口およびスリット状接続構造からの電波漏洩性状について	18
2.3 スリット状開口の電波漏洩性状の把握	20
2.3.1 スリット状開口の電波漏洩性状測定	20
2.3.1.1 測定の概要	20
2.3.1.2 測定に使用した施設の概要	20
2.3.1.3 測定量	22
2.3.1.4 測定方法	23
2.3.1.5 測定条件	24
2.3.1.6 スリット状開口漏洩電波の測定結果	25
2.3.1.7 測定結果のまとめ	44
2.3.2 スリット状開口の透過電波減衰性状の数値解析による検証	45
2.3.2.1 数値解析の目的	45
2.3.2.2 解析手法の概要	45
2.3.2.3 解析条件	46
2.3.2.4 スリット状開口部モデルおよび対象周波数	46
2.3.2.5 解析結果および考察	46
2.3.3 まとめ	48
2.4 スリット状接続構造の電磁シールド性状の把握および性能推定方法の提案	49
2.4.1 測定目的	49
2.4.2 測定対象の概要	49
2.4.3 測定方法	50
2.4.4 測定条件	51
2.4.5 スリット状接続構造の電磁シールド性能測定結果	54
2.4.5.1 測定結果	54
2.4.5.2 「重ね合せ接続」「重ね貼り接続」「つば付き接続」の差異	65
2.4.5.3 材料間の導通状態の影響度	65
2.4.5.4 開口 P の影響度	67
2.4.5.5 材料間の重ね幅 h の影響度	69

2.4.5.6 全長Dの影響度	70
2.4.6 現実的なスリット状接続構造電磁シールド性能推定方法の提案	72
2.4.6.1 スリット状接続構造電磁シールド性能推定方法の流れ	72
2.4.6.2 SEの周波数特性について	73
2.4.6.3 全長Dによる補正	73
2.4.6.4 材料の導通状態による補正	74
2.4.6.5 隙間の程度による補正	75
2.4.6.6 スリット状接続構造のSE予測方法と計算例	76
2.4.7 まとめ	79
2.5 スリット状接続構造における電波透過時の位相回転に関する検討	79
2.5.1 検討の趣旨	79
2.5.2 実験の概要	80
2.5.3 実験結果	81
2.5.4 位相回転に関する解析的検討	86
2.6 本章のまとめ	88
第2章 参考文献	89

### 第3章 スリット状接続により構成された電磁シールド室の遮へい性能予測技術

3.1 検討の概要	93
3.2 従来の電磁シールド室性能予測技術の現実的な問題点とその解決法	93
3.3 虚像法解析の基本と電磁界解析およびスリット状接続からの電波透過現象への適用	95
3.4 スリット状接続部により構成される電磁シールド室の遮へい性能予測シミュレーションシステムの構成	97
3.5 新システムの予測精度検証	101
3.5.1 予測精度検証用モデルの設定	101
3.5.2 新システムにおける各種条件の設定について	103
3.5.3 従来の虚像法システムによる予測	104
3.5.4 予測値と実測値の比較結果	106
3.6 電磁シールドルームモデルによる予測例	114
3.7 本章のまとめ	116
第3章 参考文献	117

### 第4章 スリット状接続構造の電磁シールド性能向上化技術の開発

4.1 検討の目的	119
4.2 改良構造の概要	119
4.3 実験方法および条件	123
4.4 実験結果	124
4.4.1 導電性緩衝材挿入の効果	124
4.4.2 ワッシャー挿入の効果	125
4.4.3 材折り曲げの効果	125
4.4.4 材折り返しの効果	126

4.4.5	溝加工の効果	127
4.4.6	ステーブル材固定の効果	128
4.5	改良構造の効果比較	128
4.6	スリット状接続改良構造の実用化に関する検討	129
4.6.1	スリット状接続改良構造の実用化において検討すべき事項	129
4.6.2	性能確保への要点および類似の同様構造について	130
4.6.3	現場での施工における事前準備や施工方法について	131
4.6.4	実際に模した施工モデルに対する性能の検証	133
4.7	本章のまとめ	135
第4章	参考文献	136
第5章	結論	137



# 第1章 序論

## 1.1 研究の技術的な背景

電波は、マクスウェル (James Clerk Maxwell、英、1831～1879年) がその存在が予言し、ヘルツ (Heinrich Rudolf Hertz、独、1857～1894年) が発見した。さらに、マルコーニ (Guglielmo Marconi、伊、1874～1937年) が無線通信への利用に対する道を切り開いた。以降、現代社会においては大いにその恩恵を受け、高度情報化社会の基幹をなす最も重要な技術として、今日においても応用発展を続けている。

電波は、時間的に強度が変化する「電場 (電界)」あるいは「磁場 (磁界)」が空間に放出される時に広域に伝搬可能な波動として放射される。この時間変動する電場や磁場は、主に線状あるいは環状の導体を流れる電流により周囲空間に作り出される。効率的に電場や磁場を作り出すために発明されたものがアンテナである。このアンテナは、「電波を発信する」のみではなく、電波が導体周囲の空間に到来した時、当該導体内の電流が誘導されることで「電波を受信する」ことができる。従って、電波の送受信は、「送信アンテナ」と「受信アンテナ」が対として構成されることで成立する。この電波に何らかの方法で信号を畳み込む（「変調」と呼ぶ）ことで電波による通信や放送が成立する。

しかし、無線通信のように情報等の受け渡しのみだけでなく、上記のメカニズムにより、意図せずに電波を放射する、或いは受信する（してしまう）場合が存在する。この時、導体により受信し、導体内の電流となった信号が、電流や電圧により制御されたシステムの本래の機能を阻害した場合に、「電磁 (波) ノイズによる障害」として顕在化する。

真空管等を用いた頃のエレクトロニクス技術では、比較的高い電圧や大きな電流を用いてシステムとしての機能を発揮 (制御) させていた。しかし、複雑で高速な制御に対する技術的な要求 (社会ニーズ) の高まりに比例して、より微弱な信号による制御が必要となり、半導体を利用した集積回路が用いられるようになってきた。ここにおいて、本래の制御信号と外来のノイズとの強度差や、デジタル信号（「0」と「1」）の切り替えスイッチング時間と外来ノイズの周波数が近似すること等により、先の障害への対応がシステム開発、実用化において必須の技術となった。なお、微弱電流の利用の必要性は、導体 (配線) の抵抗による発熱への対策技術としての見地からも重要であった。この外来の電磁ノイズに

よる影響（誤動作、破損等）をEMC（Electromagnetic Compatibility：電磁環境両立性）問題と呼ぶ。

EMC問題は、基本的に電気、電子機器の技術的な問題として取り扱うことが多いが、多くの場合、それらのシステムは建築物や都市環境において複合的に設置、運用するため、これらの「建築的な空間」における対策を必要となる場合がある。

建築業界としてこれらの問題を認識し、具体的、系統的かつ専門技術的に対応し始めたのは約20～30年前頃からである。1982年に新聞社会面に掲載された記事として、「NC旋盤（自動化工作機械）の誤動作による作業員の事故死」<sup>1)</sup>がある。これらの事実をメディア等が広く公表することにより、不特定多数が初めて「デジタル化されたシステムの演算装置等に、不要な到来電波に起因する異常信号が混入し、結果としてその制御系の先にある各種システムの誤動作、不具合や破損につながる」という（一般人にとって）新しい環境問題を認識した。

これを契機として、電子、通信、制御機器等のEMI/EMS（Electromagnetic Interference：電磁妨害輻射規制、Electromagnetic Susceptibility：電磁妨害耐量）問題への対応が急ピッチで進展した。基本的な技術としては、これらの各種システムから外部への不要な電磁ノイズの放出の抑制を目的とした対策、およびシステム自身の耐電磁ノイズ性能の強化（イミュニティ技術）である。しかし、多くの場合、これらのシステムが単独で存在して他者に全く影響を及ぼさないことは非常に稀であり、多くの場合は他のシステムと電氣的（電源、通信）に繋がっている。従って、上記の問題の現実的な解決にはシステムが稼動する状態での現状認識、そして問題点の把握に基づく適切な対策が必要となった。ここで、これらの電磁ノイズや各種の電氣的な信号等を観測し、対策の効果を検証するために、「電磁シールド室（技術的な定義は後述する）」や「電波暗室（電波半無響室、電波完全無響室）」と呼ぶ、実験や研究開発用の特殊な電磁的制御空間の建設が必要となった。建築業界としての電磁環境技術との接点、および参入はここから始まる。多くの場合、当時の総合建設業者（ゼネコン）のスタンスは特殊空間を構築するための建屋を建設することであり、電磁シールドや電波吸収技術を自社で保有し、適用するということではなかった。しかしながら、デジタル技術の広範な普及によって、電波暗室のような特殊空間ではなく、一般的な施設に電磁シールドや電波吸収技術を適用するニーズが高まっていった。これによりゼネコンが自社技術として、そして建築物の建設という行為の一環としての電磁シールド、電波吸収技術を獲得することが課題となった。その具体的な特徴は、一般的な材料

や構法を用いて、いかに電磁シールドや電波吸収技術として合理的に、かつ経済的に計画し、構築するかであり、これは「特殊な構法の開発」ではなく「新しい要素を取り入れた環境対応技術の一般化」ということである。つまり、電磁シールド技術に関しては、この「一般的な材料や構法」の電磁シールド化、およびその性能の把握が、重要な要素技術として位置付けられた。そこで、本研究は、経済的な一般構法（後述の「スリット状接続構造」）で構築される電磁シールド室の性能予測方法の開発を課題とした。

## 1.2 電磁シールドの基本事項

以降の理解を深めるため、本節では電磁シールドの基本事項と本研究の対象について述べる。電磁シールドは、一般に、板状、箔状の導電性材料、或いは網目状の導体を用いて空間を隔離または囲うことで、当該材料により隔てられた両側の空間における電波の伝搬が阻止（低減）されることで成される。これは、電子機器では筐体に施されるが、建築的には室や建物そのものに施され、特にそれを「電磁シールド室（建物）」と呼ぶ。

電磁シールドの性能は、一般にシールド効果SE（Shielding Effectiveness、以降「シールド性能」と呼称）と呼ばれる数値を用いて表される。シールド材の性能評価も同様である。シールド性能は、基本的には電波がシールドを突き抜ける際の減衰量で定義される。

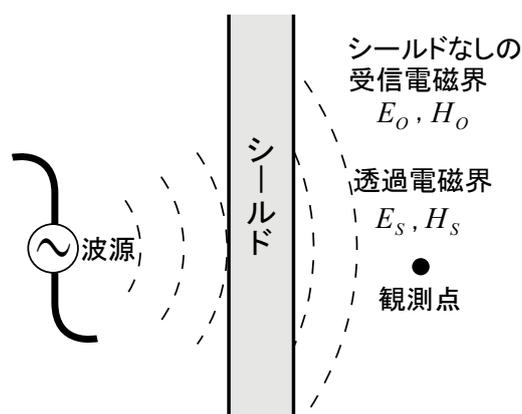


図1-1 シールド効果<sup>2)</sup>

図1-1に示すように、シールド材を設置していない状態での空間の一点の電界強度 $E_0$ または磁界強度 $H_0$ を基準とし、同材料を設置したときの同じ点での電界強度 $E_s$ 、磁界強度 $H_s$ の値

をもってシールド効果を把握する、即ち挿入損失量として式1-1、あるいは式1-2のように定義される。電界の比をとるか、磁界の比をとるかは、波源の種類等を考慮して適切な方を選ぶ。

$$SE = 20 \log_{10} \left( \frac{E_o}{E_s} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1-1)$$

$$SE = 20 \log_{10} \left( \frac{H_o}{H_s} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1-2)$$

電磁界のシールド性能は、遮へい材に照射される電磁界が近傍界か遠方界かによって異なる。近傍界と遠方界の境目は、概略、波源からの距離が $\lambda/2\pi$  ( $\lambda$ :波長)となる位置である。また、近傍界においても波源が微小ダイポールであるか微小ループ電流であるかによって、シールド性能は異なる。波源がダイポールである場合、近傍界は電界が支配的となり、そのときのシールド性能を「電界シールド性能」と呼ぶ。波源がループである場合、近傍界は磁界が支配的となり、そのときのシールド性能を「磁界シールド性能」と呼ぶ。また、遠方界のシールド性能を単に「シールド性能」または「平面波シールド性能」と呼ぶ。なお、遠方界では、電界と磁界は一定の比(インピーダンス)となるので、式1-1と式1-2は同一の値を示す。

本研究では、対象を「導電性材料の重ね合わせ接続(スリット状接続)」で構成される電磁シールド室や建物のシールド性能としている。これらの構造が適用される可能性が高い施設に求められる電磁シールド性能は、数十MHz以上の周波数域とされる場合が多い。上記の式「 $\lambda/2\pi$ 」に当てはめた場合、30MHzで波源より約1.6m以上の位置で遠方界となる。一般的な対象構造物(数m~数十m角程度)の寸法と周波数領域(波長)の関係から、本研究では「平面波シールド性能」に着目する。

導電性材料である銅(導電率 $5.8 \times 10^7 \text{S/m}$ 、 $50 \mu\text{m}$ 厚)の電磁シールド性能の例<sup>2)</sup>を図1-2に示す。同図では、近接界の電界シールド性能が $SE_E$ 、および磁界シールド性能が $SE_H$ 、平面波シールド性能が $SE_P$ で示されている。近接界における、波源から遮へい材までの距離は40mmである。図に示すように、これら3つのシールド性能は異なった値を示すことが分かる。本研究で対象となるのは図中の「 $SE_P$ :平面波シールド」である。本例では、平面波における最低シールド性能が約115dBとなっている。なお、鉄(導電率 $1.0 \times 10^7 \text{S/m}$ 、比透磁率1000、0.3mm厚)およびアルミ(導電率 $3.5 \times 10^7 \text{S/m}$ 、 $80 \mu\text{m}$ 厚)の最低シールド性能は約115dB、約114dBである。このように導電性材料(シールド材料)は自身として非常に高い性能を有し

ている。

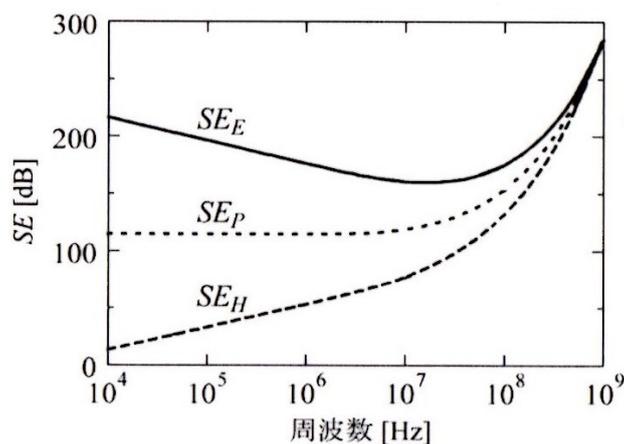


図1-2 銅の電磁シールド性能予測例<sup>2)</sup>

### 1.3 研究の目的

電磁シールド室に求められる電磁的な性能は、概念として「電波を室内に入れない（受動的シールド）」あるいは「電波を室外へ出さない（能動的シールド）」ことであり、電波暗室はこれに「室内で電波を反射させない（電波吸収）」という性能が付加される。

一般に、研究開発用のこれらの特殊な空間には電波に対して極めて高い遮へい性能が要求されるため、1～数mm程度の厚さの鉄板（腐蝕防止のため表面を亜鉛メッキしたものを一般的に用いる）を全溶接工法で組み合わせた仕様、或いは工場生産による鉄板製パネルを特殊な専用目地金物で連結する構法が主流であった。この構法の場合、溶接部や連結部を含めて、室を構成する壁、天井、床の各部位からの電波の漏洩は要求性能に対して殆ど問題とはならず、出入口の仕様や電源、通信等の設備系への対策が、技術的に注意を要する部位としての具体的な検討項目となっていた（性能上の弱点になる窓は設置されない）。

これらに引き続いて、一般の生活や業務の環境においても一部の施設においてEMC問題への対策が求められるようになってきた。その主な社会的要因として下記のことが挙げられる。

- (1) CPU搭載の機器の普及とそのEMI/EMSへの対策

- (2) 電磁氣的、電氣的な不要ノイズを放出するシステムの実用化、普及（インバータ、サイリスタバルブ、電気メス等）
- (3) 正常な動作に対して電磁氣的、電氣的なノイズの混入を嫌う機器の普及
- (4) 通信システムの無線化の進展、および同一施設における複数の無線システムの混在（チャンネル割当ての制限、同一周波数帯域における異なる通信の存在）
- (5) 各種情報の電子化の進展とその情報の漏洩防止
- (6) 盗聴問題の顕在化（不法機器の容易な入手）
- (7) 電磁的なテロ行為（電磁パルス等）の危険性の増加

上記のような問題点に対して、具体的な対策を要する主たる施設の例を以下に示す。なお、各施設例に示した項目番号は上記の各要因と対応させているため、一部の施設名称が重複して記載されている。

- (1) オフィス、データセンター
- (2) 電力周波数変換装置建屋、データセンター、手術室（電気メスの利用）
- (3) 医療施設の各種検査室/MRI室・脳波室・筋電計室、劇場/ホール/スタジオ
- (4) 医療施設/電子カルテ・テレメーター、オフィス、劇場/ホール、住宅（潜在的な問題）
- (5) 医療施設/電子カルテ・テレメーター、オフィス、データセンター、官公庁関連施設（防衛、外交等）
- (6) オフィス、会議室、役員室、データセンター、官公庁関連施設（防衛、外交等）、教育施設
- (7) データセンター、官公庁関連施設（防衛、外交等）

これらの施設の所要性能の概要を図1-3に示す。当該施設では、先述のような研究施設に対する高い遮へい性能を有する必要性は小さい。従って、所要性能を満足するのに十分なコストや施工性が重要視される。

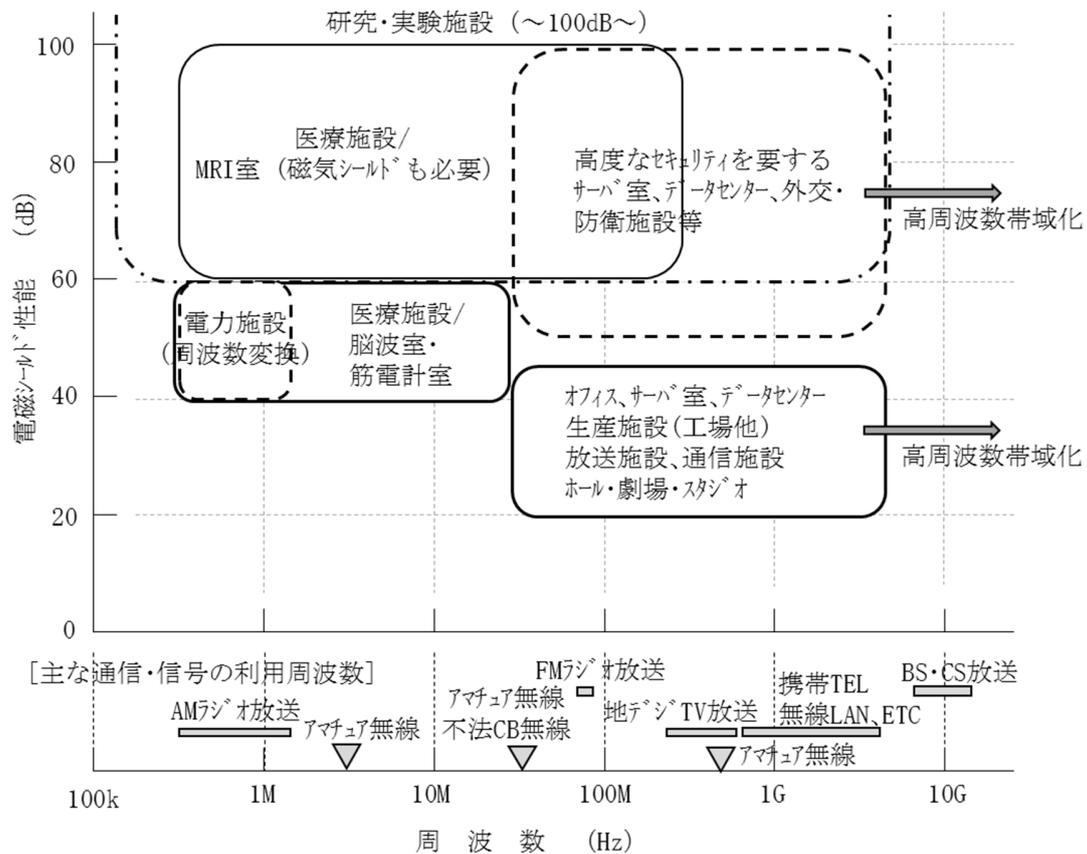


図1-3 代表的な電磁シールド施設の種類と所要性能、周波数帯域の概要

電子機器の筐体においては、寸法的な要因や、均質な工業生産を前提としていることから、技術的には比較的容易に所要性能を維持できる。しかし、建築空間では、現場での一品生産に起因する施工上の種々のばらつき、そして、建築空間を構成する多くの要素（壁、天井、床、建具、電気・空調・衛生設備等）や空間的な大きさに起因する多くの材料継ぎ目（接続部）の存在が、施工性、施工精度と性能確保（維持）の技術的問題を複雑にしている。従って、建築環境要素としての「電磁シールド技術」の特徴はここにある。

次に、これらの電磁シールド室の具体的な構成要素の概念図を図1-4に示す。電磁シールド室は一般的に「装置の設置・運用」や「人の在室、入退出」を基本とするため、装置や人間に対する安全性、快適性の確保が必須条件となる。従って、建築的な対応のみならず、電気（電源・通信・制御等）・空調・衛生等の各種設備に対する対応が必要となり、結果と

して電磁シールド室は全体に非常に複雑な要素から構成されることになる。さらに、一部のユニット化電磁シールドボックスを除いてこれらの建築物は工場による（均質な）量産品ではなく、（品質のばらつきが存在する）現地での一品生産が殆どであるため、その品質確保には入念な計画と多大な管理を必要とする。従って、これらの品質を満足させるためには、一定の基準に則した材料や構工法の設定、適切な性能設計、施工管理、性能測定等の各種検査の実施による品質の確保が重要となる。

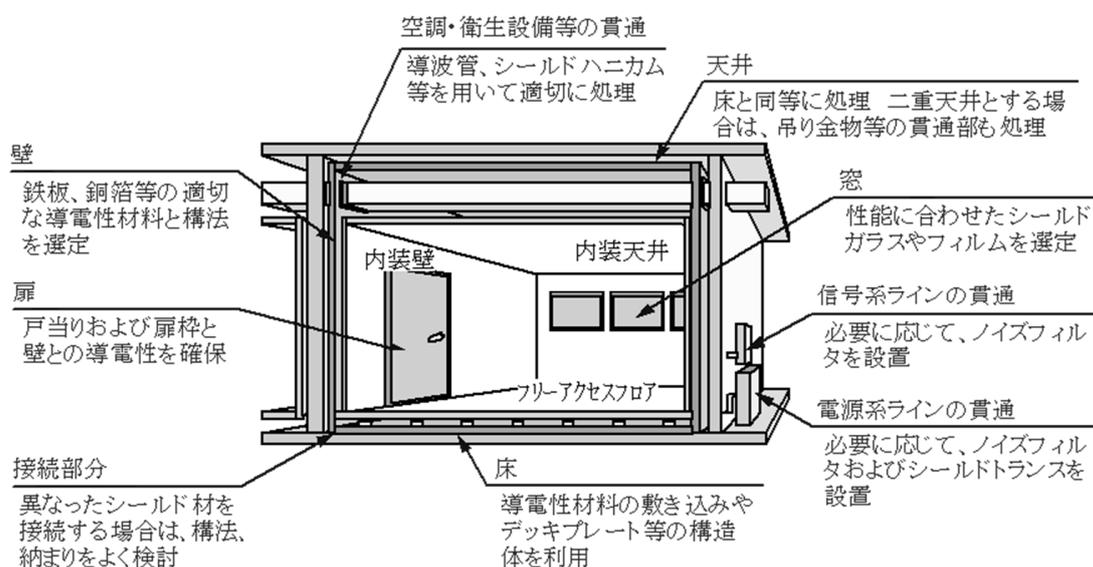


図1-4 電磁シールド室構成の概念（オフィスモデルとして）

より具体的に電磁シールド室の概要を説明するために、まず、電磁シールド室に使用される材料と構法の代表例を表1-1に示す。なお、同表には建築的な各部位への適用技術と電気設備システムへの対応技術を併せて記載した。同表に示す低～中～高の各性能レベルの設定は一般論であり、確立された規準等に準拠するものではない。

表1-1 電磁シールド室に用いられる主な材料、構法、性能の概要

電磁シールド性能	主な材料、仕様				
	壁、天井、床	窓	扉	設備(シールド貫通部)	材料、部位取り合い部の処理
20～40dB	銅箔、アルミ箔 銅網、ステンレス	シールドガラス、 シールドフィルム	スチール扉の転用	簡易な処理(金属 管内配線等)	半田、シールド テープ ステーブル、ビス、 ボルト(スリット状接続)
40～80dB	亜鉛メッキ鉄板 シールドパネル	高性能シールドガラス、 高性能シールドフィルム	専用シールド扉	シールドフィルタ シールドハニカム (空調口)	ビス、ボルト(スリット状接続) パネル専用目地金物
80dB～	亜鉛メッキ鉄板	設置せず	専用シールド扉	シールドフィルタ シールドハニカム (空調口)	溶接

同表に示すように建築物に利用される電磁シールド材料は「鉄板等の導電性板状材料」「金属製の箔材」「金属製のシート・布材」「金属金網材」「パネル材」等に分類され、素材として特に多くの種類の材料が用いられる訳ではない。従って、電磁シールド室としての基本的な性能値を決定する要因は、各材料自体の性能と、その接合方法であることが理解できるものと思われる。材料自体の性能は1.2節で述べたように非常に高いため、多くの場合、接合部の性能が電磁シールド室の性能を支配している。

基本的に、高性能電磁シールド室における材料の接続部は「線」あるいは「面」的に接合されるのが一般的である。具体的な方法としては「半田」「溶接」「特殊金物による機械的な連結」等がある。これに対して、低～中性能の電磁シールド室の場合は「点」あるいは「線」的に接合される場合が多く、施工の容易性や簡便性（コストを重視したうえでの施工精度の確保）から「ビス・釘・ステーブル止め」「導電性テープ（シールドテープ）接続」が適用されることが多い。ここで、導電性テープによる接続は最も簡便な方法の一つではあるが、テープ粘着層の導電性が低いこと、そして粘着層の劣化による剥離が懸念されるので、長期的な品質確保の観点から積極的に適用される方法ではなく、補助的に用いられることが多い。従って、多くの場合、長期間の性能維持を重視した「点的な固定」による接続方法が適用される。

これらのことから、電磁シールド室は建築構造的には「電磁シールド材料」「電磁シールド化された建具」「電磁シールド化された各種設備」と、これらを繋ぎ合わせる「接続構造」から成り立つことがわかる。

しかしながら、これまでの多くの技術開発は、個々の材料や建具等の単体での製品開発や性能把握が殆どであり、これらを繋ぐ技術については材料等に付随する技術として経験による知見や最低限の性能検証が行われたのみである。

ここまで示したように、電磁シールド室は一般に板状あるいは膜状電磁シールド材料や建具等により対象空間全体を覆うことで建築的に構成されており、そこには必ず「シールド材料の接続」が存在する。計測用、研究用施設等の高性能な電磁シールド空間の場合は、当該部位に対して半田や溶接による連続的な接続処理を行うのが一般的であるが、EMC対策用、各種無線通信環境の制御等を目的とする低～中性能の空間では、建設コストや工期を節約するため、より簡易ではあるが信頼性の高い構法を用いる。多くの場合、隣接する電磁シールド材料を一定の巾で重ね代をとり、ネジ、釘、ステーブル等の導電材により留め付ける方法（本研究では「スリット状接続」と呼称する）がとられ、そこが電磁シールド室の性能を維持するうえでの弱点となりやすいが、これらを系統的に研究した事例は存在しない。

本研究はこの点に着目し、「スリット状接続」を対象とした性能把握と性能設計方法の検討、およびこれらの施工方法を用いた電磁シールド室の性能予測技術、そして性能向上を目指した施工技術の検討を対象としたものである。

次に、スリット状接続の概要を図1-5に示す。同図はスリット状接続の仕様を示したものであるが、これらのうち「重ね合せ接続（一般名称ではない）」「重ね貼り接続（同左）」がその簡便性から最も多く適用される。「つば付き接続（同左）」も必要に応じて用いられることがあるが、事前加工を必要とする折り曲げ部が壁等の厚さへ影響するため前者に比してその適用頻度は小さい。本研究では、図1-5に示すこれらの「スリット状接続」構造を研究対象とした。

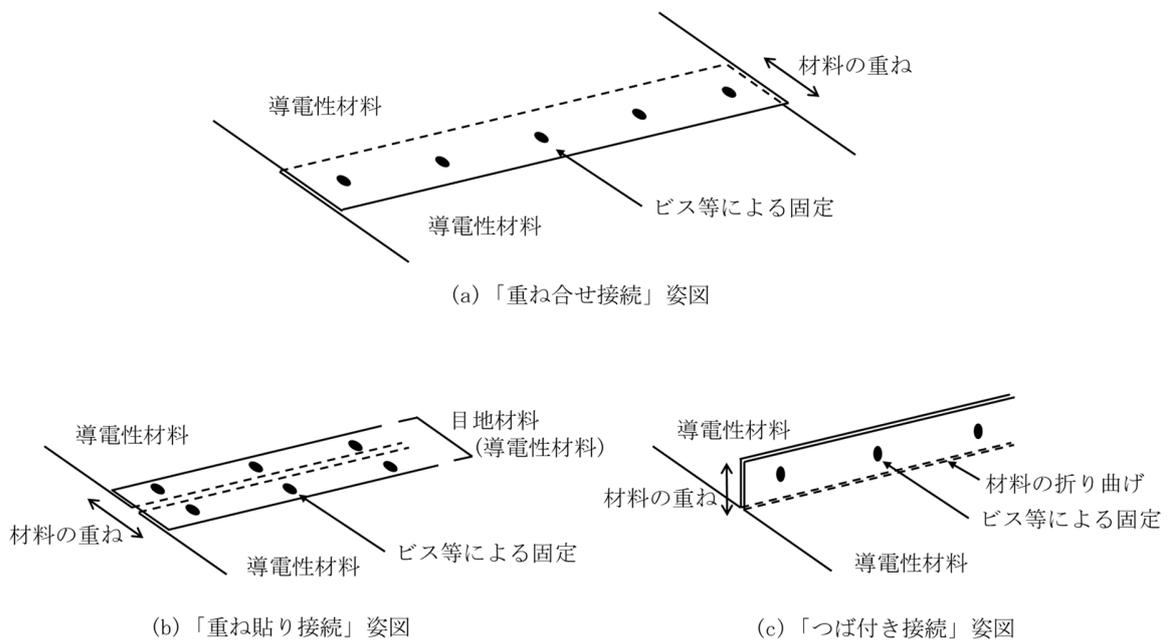


図1-5 電磁シールド室に用いられるスリット状接続構造の代表的事例

これまで示した事項に対して、現状では、その代表的な仕様、設計・施工上の注意点、および一部の特定条件での性能値が例示されるのみで<sup>3) ~9)</sup>、「スリット状接続」に対する電磁シールド性能設計の実際は、前記の文献等や担当者の個人的な経験に基づいて行われており、「スリット状接続の仕様」と「当該部位の電磁シールド性能値」に関する系統的な情報の把握や、これらの構造により構成された電磁シールド室を対象とした性能設計方法に関する適切な提案は殆どない。

また、現在の電磁シールド室の性能設計や仕様の設定は上記の「材料」と「構法」に対して各部位の仕様を計画し、施工しており、その検証を目的とした（竣工検査等の）性能測定も「電磁シールド空間」としての性能確認ではなく、各部位別の評価に留まっている。

これらのことから、電磁シールド室の適切な性能予測、設計技術に関する研究開発は技術的、及び経済性の確保のために急務であり、重要な課題であると考えます。

本研究では「1. 研究の背景」に示した現状と問題点の抽出から、電磁シールド材料間のスリット状接続を対象とした下記の各項目を主な検討課題とした。

(1) スリット状接続の電磁シールド性能に対する構成要素の影響度の把握と、性能予測方法の提案

(2) スリット状接続により構成された電磁シールド室内空間および周辺外部空間の性能予測シミュレーション技術の提案

(3) スリット状接続の電磁シールド性能向上を目的とした簡易的な改良技術の提案

上記の課題に対して、具体的な検討の進め方として概略下記の検討手順を設定した。

ステップ-1) スリット状接続の電磁シールド性能を決定する要因を明らかにし、性能値を定量的に把握する。

ステップ-2) 上記の結果を元に、スリット状接続の電磁シールド性能設計手法を提案する。

ステップ-3) スリット状接続により構成された電磁シールド室空間の性能予測方法の提案を行う。

ステップ-4) スリット状接続の電磁シールド性能向上化を目的とした簡易な改良施工技術を提案する。

## 1.4 論文の構成

本論文は以下の5章で構成されている。図1-6を参照されたい。

**第1章「序論」**では、研究の背景、研究目的、本論文の構成について示した。

研究の背景では、電磁シールド性能の基本概要を紹介し、建築物やその周辺での電波利用環境の実態と、それに基づく電磁シールド室の目的と必要性、用途、所要性能と対象となる周波数領域、電磁シールド室の建築的、設備的な構成要素、使用される材料とその構法について解説し、電磁シールド室の性能設計技術における現状とその問題点を明らかにした。これらの結果から、本研究における検討課題を抽出し、その具体的な検討目標を明らかにした。

**第2章「スリット状接続構造電磁シールド性能の定式化」**では、先ずスリット状接続を単純化したスリット開口モデルを対象として当該構造各要素の変更に伴う電磁シールド性能の推移の把握から、基本的な電磁シールド性能の基準化の手順、条件について明らかにした。続いて代表的かつ現実的な（実際に施工され得る）構造モデルを数種類設定し、これらの構造の各構成要素の電磁シールド性能への寄与度を定性、定量的に把握して定式化を行った。

**第3章「スリット状接続により構成された電磁シールド室の遮へい性能予測技術」**では、第2章で求めた性能定式化の結果を基本として、当該構造で構成される電磁シールド室を

対象とした室空間、および周辺外部空間の電磁環境予測技術を開発した。更に、スリット状接続を有する簡単な電磁シールド構造を実験室にて製作し、その実測値と前述のシミュレーション予測値の比較により、開発システムの妥当性について示した。性能の定式化に続く当該予測技術は、建築構造物に必要とされる「空間の持つ環境性能」を設計段階で把握するために必要であると判断し開発した。

**第4章「スリット状接続構造の電磁シールド性能向上化技術の開発」**では、当該構造の電磁シールド性能を向上させると思われる各種の接続部構造仕様を考案し、単純モデルを用いた測定によりその基本的な効果を検証した。その結果、最も効果が期待できる構造仕様に着目し、その構造の詳細仕様の変更に対する性能の推移に関する測定を行うことで、現実的かつ最も効果量が期待される構成条件を明らかにした。併せて、実際の現場での施工手順を想定した構造モデルを検討した。

**第5章「結論」**では、本論文により明らかになった成果について述べ、本研究の目的を達成したことを示した。さらに今後の課題、および展望について示した。



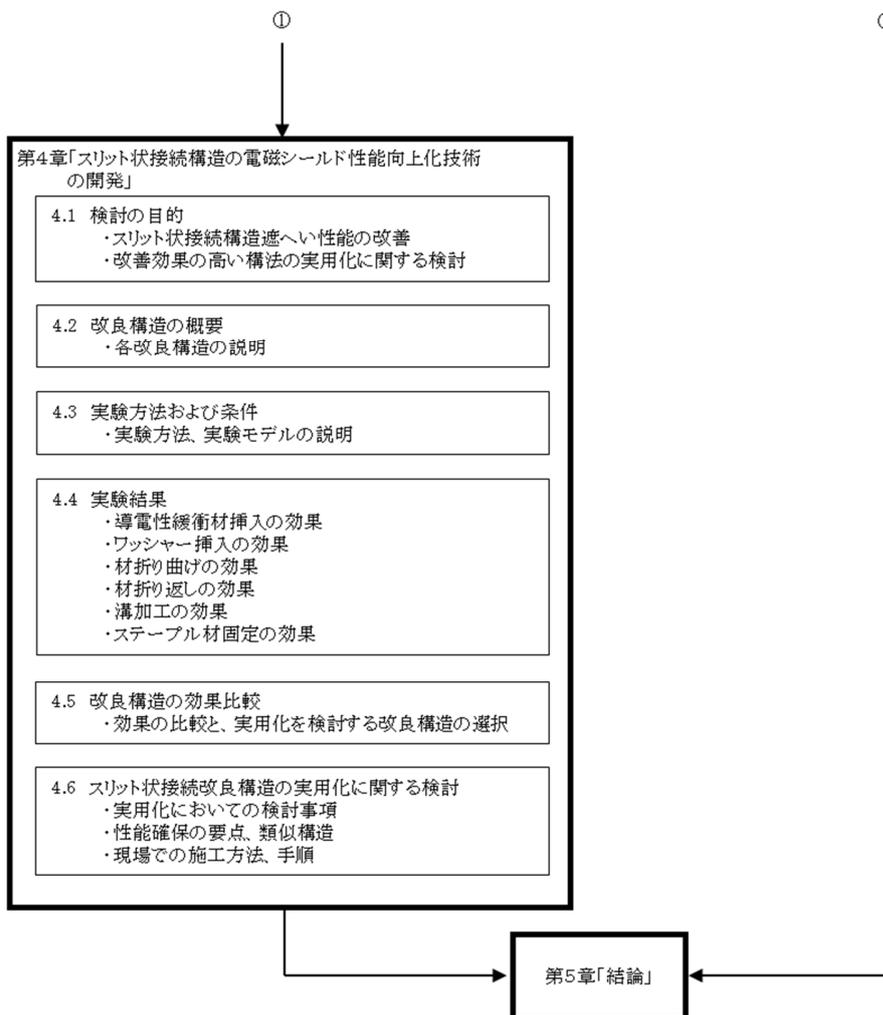


図1-6 論文の構成（つづき）

## [第1章 参考文献]

- 1) 赤尾保男：環境電磁工学の基礎、電子情報通信学会、1991年
- 2) 畠山賢一、蔦岡孝則、三枝健二：初めて学ぶ電磁遮へい講座、科学技術出版、2013年
- 3) 米田諭、白木康博、佐々木雄一、岡尚人、大橋英征：GHz超帯向け多段SIW共振器装荷電磁波シールド構造、電子情報通信学会技術研究報告、EMCJ2013-122, pp. 63-67, 2014年
- 4) 萱野良樹、渡部拓哉、井上浩：非対称な差動伝送線路へのシールド実装効果に関する一検討、電子情報通信学会技術研究報告、EMCJ2013-86, pp. 153-158, 2013年
- 5) 豊田啓孝、五百旗頭健吾、近藤幸一、吉田栄吉：オープンスタブと磁性膜から構成される損失を有する共振器型フィルタを用いた平行平板共振抑制、電子情報通信学会技術研究報告、EMCJ2013-14, pp. 25-30, 2013年
- 6) 村野公俊、小塚洋司：自律制御を目指した能動素子装荷型近傍界ノイズ抑制素子の基本特性、電子情報通信学会論文誌、Vol. J96-B, pp. 410-416, 2013年4月
- 7) Leland H. Hemming : Architectural Electromagnetic Shielding Handbook, IEEE Press, 1992.
- 8) Kenneth L. Kaiser : Electromagnetic Shielding, Taylor & Francis, 2005.
- 9) Richard B. Schulz, George C. Huang and Walter L. Williams : RF Shielding Design, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-10, No. 1, 1968.

## 第2章 スリット状接続構造電磁シールド性能の定式化

### 2.1 検討の概要

建築物の電磁シールドルームに適用されるスリット状接続構造の電磁シールド性能を定性・定量的に把握することを目的とする場合、数値解析による手法では、室空間のスケールに対して当該構造は非常に微細になってしまい、そのモデル化には大量の計算資源を必要とすることが想定される。加えて、構造による性能の変化を実験により把握する方がより実務的であると考えられることから、当検討では当該構造の実物モデルによる実験室実験を主体的に行い、必要に応じて数値解析による検証を実施することとした。

スリット状接続構造電磁シールド性能の定式化を進めるにあたり、その基礎検討として、スリット状接続構造の構成要素の性能値への影響度を把握するため、当該構造の単純化を行った。具体的には、まず薄膜状の電磁シールド材に「スリット状開口構造（開口幅数mm、全長数cm～数m程度の長方形開口）」を設け、「ネジ、釘、ステーブル等の導電材を等間隔に施工する」ことを想定して、同開口の長手方向を指定間隔で短冊状の導電材で短絡し、その時の当該構造の各部位から漏洩した電波強度の系統的な把握を行った。建築構造の多様性から、そこに設けられるスリット状接続構造の寸法等は多岐に渡る。従って、当スリット状開口においては、その全長、導電材による短絡の間隔を基本的な可変条件とした。併せて、開口幅も可変とした。引き続き、当「スリット状開口構造モデル」の数値解析を行い、本実験的検討の有効性を確認した。

次に、上記で得られた知見を基本として、スリット状接続構造の性能に影響すると思われる当該構造構成要素を基準とする各種パラメータとして「全長」「個々のスリット長」「スリット状接続構造を構成する両材料間の導通状態」「個々のスリットにおける開口（隙間）の状態」を設定し、それぞれの電磁シールド性能への影響度を把握した。この結果を用いてスリット状接続構造の電磁シールド性能推定式を導出した。

以上は、電波強度に対する検討である。ここで、「スリット状接続部により構成された電磁シールド室の空間的な遮へい性能の予測」を実施しようとする、電磁シ-

ルド室内の電磁界分布の把握が必要となり、それにはスリット状接続構造の透過による位相の変化の把握が必須となる。そこで、最後にスリット状接続構造に電波が入射し透過するときの位相変化について実験的に検討した。

## 2.2 スリット状開口およびスリット状接続構造からの電波漏洩性状について

スリット状接続構造は、スリット状開口に材料の重ね部分に相当する伝送路が付加された構造と見ることができる。この伝送路は、理想的には平行平板線路と見なせ、周波数依存性を有しない。したがって、スリット状接続構造電磁シールド性能の周波数依存性は、スリット状開口の特性が支配的であると考えられる。そこで、スリット状接続構造電磁シールド性能の定式化を進めるにあたり、図2-1に示すスリット（長方形開口、長辺 $d$ ×短辺 $h$ 、 $d \gg h$ ）単体の電波漏洩性状を把握しておく必要がある。長方形開口のシールド性能は、実験および解析的に検討が既に行われている<sup>1) 2)</sup>。前述のように、「 $d \gg h$ 」なる長方形開口の電波漏洩性状はスロットアンテナからの電波放射が基本となり、その最も放射効率が良くなる条件は、長方形開口の長辺 $d$ が $1/2$ 波長となる周波数、且つ、照射する電波の電界が長辺 $d$ に直交する方向の偏波の場合となる。従って、「 $d/\lambda = 0.5$ 」となる領域において、個々のスリット状開口の電磁シールド性能SEが最も低くなる。

「 $d/\lambda > 0.5$ 」となる領域では、開口面積だけ電波エネルギーが透過する。ただし、受信点の電波エネルギーは、電波の直進性を考慮すると、電波が直進して開口を透過して到達することから一定の値となる。従って、シールド効果は一定の値に収束すると考えられる。

これに対して、「 $d/\lambda < 0.5$ 」の領域では、開口面積分より少ない電波エネルギーしか透過しない。これは、この条件下では電波の照射によって開口部に分極が生じ、その分極が波源となって透過波となるためである<sup>1)</sup>。このときの長方形開口のシールド効果は、光速を $c$ 、角周波数を $\omega$ とすると、開口の正面方向、距離 $r$ の位置において次のように求められている<sup>2)</sup>。

$$SE = 20 \log_{10} \frac{\pi c^2 r}{\omega^2} \frac{\ln\left(1 + 0.66 \frac{d}{h}\right)}{0.132 d^3} = 20 \log_{10} \frac{r}{4\pi\lambda} \frac{\ln\left(1 + 0.66 \frac{d}{h}\right)}{0.132} - 60 \log_{10} \frac{d}{\lambda} \quad [\text{dB}] \quad (2-1)$$

すなわち、横軸がdの対数であると負の傾きを持つ一次直線で近似できると考えられる。

以上をまとめると、「長方形開口の電磁シールド性能」は図2-2のように表現される。このように「 $d/\lambda = 0.5$ 」を境にして、「 $d/\lambda > 0.5$ 」と「 $d/\lambda < 0.5$ 」の領域に分けて定式化をする必要があることがわかる。したがって、「スリット状開口長さd」を「波長 $\lambda$ 」によって基準化することが適切であると考えられた。なお、スリット状開口をスロットアンテナとして見た場合、照射電波の偏波は長方形開口方向に直交する場合、最も放射効率が良くなる。すなわち、漏洩電波が最も大きくなり、シールド性能として最悪条件となる。これらのことから、本論では、図2-1に示すようにこの照射電波の電界Eが長方形開口の長辺dに直交する偏波の場合のみを取り扱うこととする。

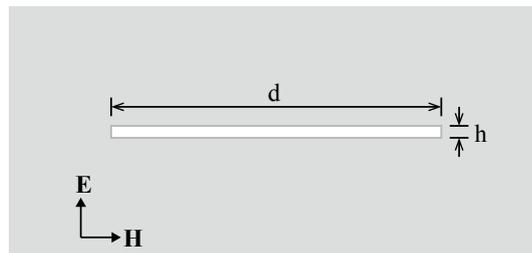


図2-1 長方形開口

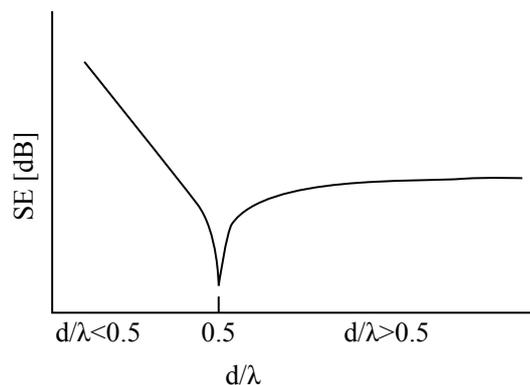


図2-2 スリット状開口を有する電磁シールド構造の基準化電磁シールド性能の周波数特性の予想

以降の各検討において、実験データの蓄積による上記の想定を検証を行うこととした。なお、図2-2に示す電磁シールド性能の周波数特性はあくまでスリット単体の性能の概略であり、実際の性能が上記のような傾向を示すと断定している訳ではない。

## 2.3 スリット状開口の電波漏洩性状の把握<sup>11) 13) 14) ~16) 27)</sup>

### 2.3.1 スリット状開口の電波漏洩性状測定

#### 2.3.1.1 測定の概要

銅箔と木製枠により板状に製作された導電材料にスリット状開口の各種条件検討用の試験体を構成し、実験用電磁シールド室の測定用開口面に設置した。当該試験体的一方に入射した電波の、裏面への漏洩性状（スリットに沿った方向のレベル分布、周波数特性）を測定した。

#### 2.3.1.2 測定に使用した施設の概要

測定は、電磁環境実験室<sup>3)</sup>にて実施した。施設の概要を図2-3～図2-5に示す。

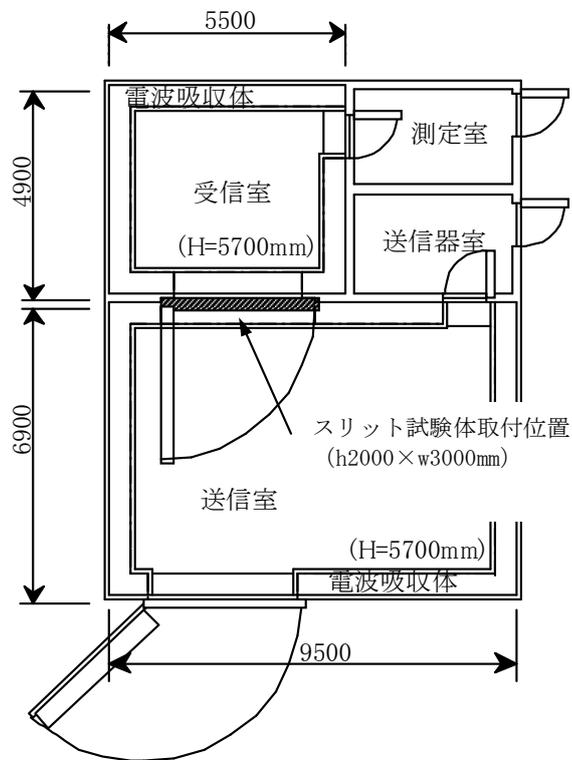
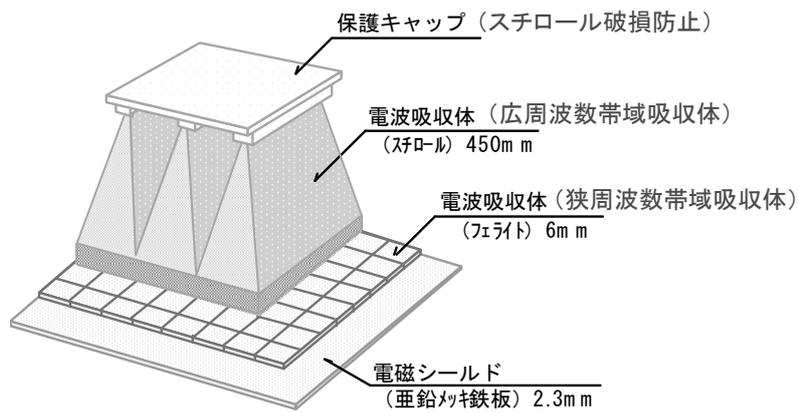


図2-3 電磁環境実験室（平面図、単位：mm）



実験室構成要素

図2-4 電磁シールドおよび電波吸収体の構造

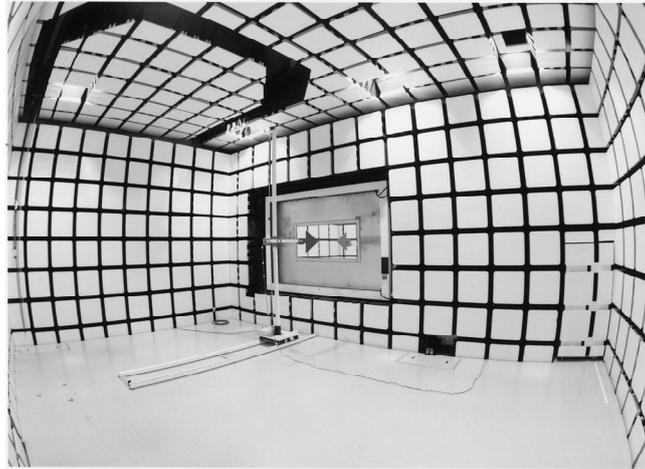


図2-5 電磁環境実験室内観

同実験室は二つの電波無響室（室の全壁面を電波吸収体で覆った構造）を連結させ、その連結部の隔壁に電磁シールド性能測定用の開口を設けたものである。今回の実験では、図中の電磁シールド性能測定用開口にスリット状構造を含む電磁シールド試験体を設置した。試験体設置時の有効開口は最大で幅3m、高さ2mである。また、本開口に十分な電磁シールド性能をもつ材料（鉄板等）を設置した場合の測定可能な電磁シールド性能は、対象とする周波数範囲において80～100dB以上であり、当測定には十分な性能を有していると判断できる。

なお、当測定では当該構造モデルからの漏洩電波の空間強度分布を把握するために、受信アンテナを移動して測定する必要がある。これに対して当実験室にはPC制御のアンテナ移動用台車（図2-5参照）を設置しており、精度（再現性）の高い受信位置の設定が可能である。

### 2.3.1.3 測定量

電磁環境実験室の送信室のみを用いて（スリット状開口構造を含む電磁シールド層が全く存在しない条件）、下記に示す方法および条件での受信電界強度レベル $L_1$  (dB $\mu$ V/m) と、当該各構造が試験体取付開口に設置された時の同一送信・受信点位置関係での受信電界強度レベル $L_2$  (dB $\mu$ V/m)を測定し、両者のレベル差（= $L_1 - L_2$ , dB）により電磁シールド性能SEを求めた。

#### 2.3.1.4 測定方法

電磁シールド性能測定は、日本建築学会電磁環境小委員会（当時）が2000年に提案した「材料の電磁シールド性能測定方法」<sup>4)</sup>に準拠して行った。当測定方法は、電磁シールド室の性能評価法として国内において最も一般的に利用されている「米国軍規格MIL-STD-285（1997年廃止）」<sup>5)</sup>に準拠して、材料や構造自体の電磁シールド性能を、適切な実験室を用いて測定する方法について規定したものである。

スリット状開口は長さを持つため、測定対象への入射電波を可能な限り遠方界（対象構造への入射波が一様となるような状態）に近い状態とする必要がある。そのため、図2-6に示すように、試験体取付開口に設置した試験体の中央部分において、面より垂直方向に3000mm離れた位置（試験体中央正面）に送信アンテナを固定して設置した。アンテナから放射された電波の遠方界と近傍界との境界となる距離は、「 $\lambda/2\pi$ 」となることが一般的に知られている<sup>5)</sup>。これに準拠すると、当測定では周波数16MHz以上の帯域において遠方界としての入射条件を満足していると判断される。

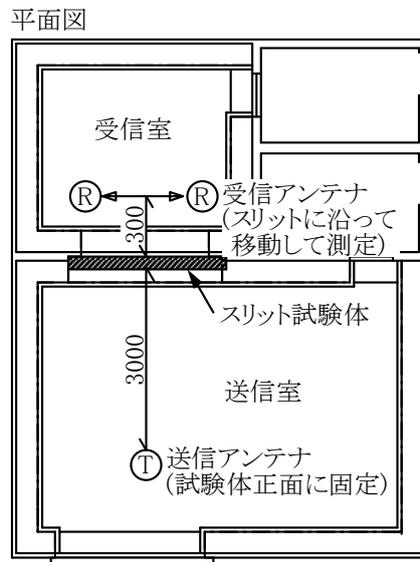


図2-6 電磁シールド性能測定時の送受信アンテナ設定概要（単位：mm）

また、図2-6の受信室内に受信アンテナ位置を示す。スリット状開口各部位毎の漏洩電波を測定するには、できるだけスリット部位に近接して受信した方が好ましい。なお、前述のMIL-STD-285では電磁シールド構造と受信アンテナとは約50mm以上離す、と規定されている。本測定に用いたアンテナは周波数帯域別に3種類が必要であり、それぞれ独自の外観形状を有している。従って、当測定では現実的かつ可能な限り試験体に近い位置として、試験体正面から透過側に300mmの位置を受信位置の基本とし、スリット状開口構造に沿って平行移動して、対象構造各部位からの漏洩電波の電界強度レベル分布を測定した。なお、測定に際する受信アンテナの移動間隔（受信レベル測定間隔）は最小8mmから可能であるが、測定精度と所要時間との兼ね合いから40mmとした。

#### 2.3.1.5 測定条件

スリット状開口試験体を正面から見た全体図を図2-7に、スリット状開口の詳細を図2-8に示す。横3m×縦2mの合板表面に銅箔（35 $\mu$ m厚、導電材による接続部は半田付け）を貼り付けた基板に横長のスリット状開口構造を製作した。

スリット状開口における可変要素は以下の通りである。

- ・ スリット状開口全長（横方向）：D（図2-7参照）
- ・ 全長Dを分割する「個々のスリット長」：d（図2-8参照、 $d \leq D$ ）
- ・ スリット状開口幅（縦方向）：h（図2-8参照）

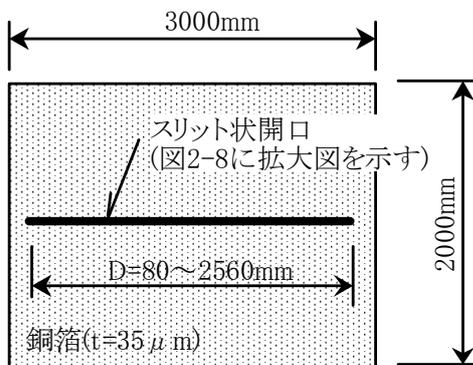
なお、上記の個々のスリット長dは、2.1節で述べた「ネジ、釘、ステーブル等の導電材を等間隔に設置する」ことを模している。

当測定において設定したスリット状開口構造の各条件は以下の通りである。

- ・ スリット状開口全長D=80mm、160mm、320mm、640mm、1280mm、2560mm
- ・ 個々のスリット長d=10mm、20mm、40mm、80mm、160mm、320mm、640mm、1280mm、2560mm、但し $d \leq D$
- ・ スリット開口幅h=1mm、2mm、4mm、但し「h=2mm」および「h=4mm」は「全長D=2560」のみ

測定対象周波数fは以下の通りとした。

- 周波数 $f=30\text{MHz}$ 、 $70\text{MHz}$ 、 $100\text{MHz}$ 、 $300\text{MHz}$ 、 $700\text{MHz}$ 、 $1\text{GHz}$ 、 $3\text{GHz}$ 、 $7\text{GHz}$ 、 $10\text{GHz}$ 、 $18\text{GHz}$



(試験体を正面から見た図)

図2-7 スリット状開口試験体全体図

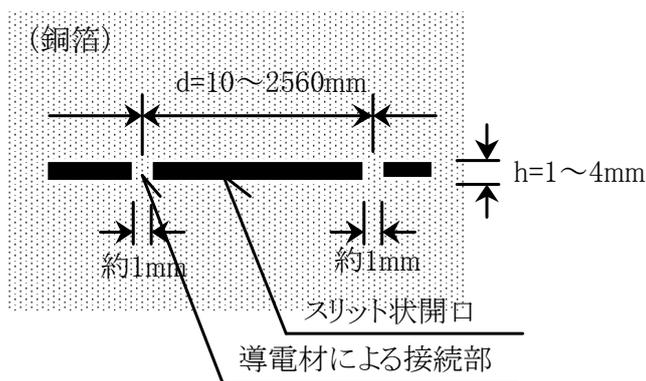


図2-8 スリット状開口詳細図

### 2.3.1.6 スリット状開口漏洩電波の測定結果

#### (1) 受信レベル及びレベル差分布

スリット状開口正面の受信側300mm点において、スリットの端部正面から反対側端部まで（横方向）40mm間隔にて測定した受信レベルおよびレベル差SEの分布性状の結果例を図2-9に示す。当データは「全長 $D=2560\text{mm}$ 、個々スリット長 $d=1280$ 、 $40\text{mm}$ 、開口幅 $h=1\text{mm}$ 、周波数 $f=100\text{M}$ 、 $1\text{G}$ 、 $10\text{GHz}$ 」での結果である。同図中の横軸ゼロ点は対象スリットの中心位置である。また、

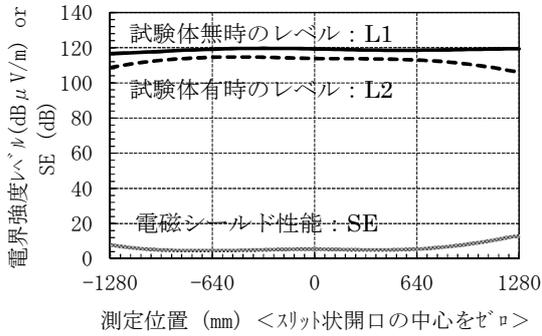
図2-9と同一条件におけるSE値の累積度数分布を図2-10に示す。なお、銅箔単体（スリット状開口等の電波漏洩構造がない場合）を試験体取付開口に設置した場合のSEは、それぞれ100MHzで139dB、1GHzで128dB以上、10GHzで87dB以上であることを実験的に把握しており、図2-9、図2-10に示すSEはスリット状開口からの漏洩現象が支配的であることを事前に確認している。

これらの結果から、以下のことが示された。

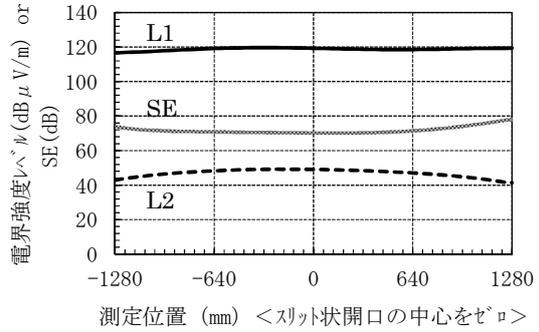
- ・ 図2-9(a)～(f)の各SEのレベル分布に見られるように、測定条件、測定箇所の違いにより、得られたSEは数dBから10dB以上も変動し、一定ではない。
- ・ 図2-9(a)と(d)、(b)と(e)、(c)と(f)に見るように、同一の周波数では測定箇所の移動によるSEの変動は数値（dB値）自体は異なるものの、ほぼ同様な増減傾向を示し、個々のスリットを構成するための電氣的な短絡位置の変化との関係は見出せない。
- ・ 低周波数域において、個々のスリット長dが小さくなるに従ってSEが上昇する傾向はあるが、高周波数域においてはこのような傾向は見出せない。

以上のことから、スリット状接続構造のSEを定性・定量的に検討するには、受信側測定箇所の移動による当該構造各部位の受信レベル分布性状の把握が必須であることがわかった。また、電磁シールド性能値の把握においては、一般的に「安全側の数値（ここでは低いSE値）」を対象とするのが好ましいと考えられるが、図2-9に示す測定部位毎のSE、及び図2-10のSEの累積度数分布からは、特に高い周波数帯域において、「安全側の数値」が特異的、限定的に得られたものである（曲線の傾きが緩い）ことが示されており、これらの値を当該構造のSE代表値として用いると過大評価になりすぎ、コスト等を踏まえた経済的な設計情報・技術としては問題がある。これに対して図2-10の累積度数50%付近の値はその勾配が急となり、これらを中心として多くのSE測定値が分布する傾向が見られる。従って、後述で検討する性能設計手法の提案に対する現実的な設計目標値の設定に対して、「累積度数50%値」、「算術平均値」および「エネルギー平均値」の適用が考えられる。本測定結果では、図2-10にみるように殆どの条件においてこの三者はほぼ±1dBの範囲

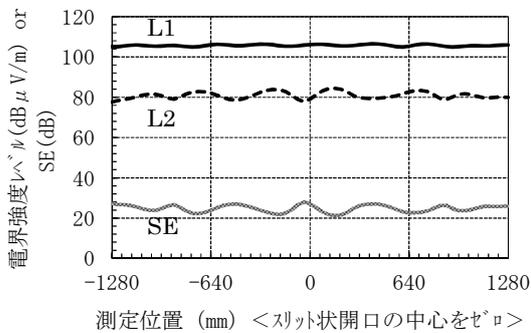
内に収まっている。従って、後述の検討において、各条件での測定値の代表として、それを求めるための「数値処理の簡便性を確保する」との観点から、レベル分布測定結果を用いた「算術平均値」を本検討におけるSE代表値として用いることに問題はないと判断した。



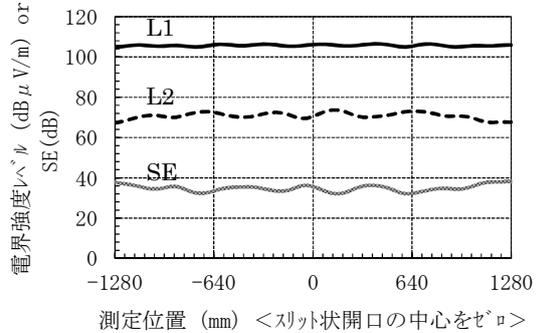
(a) スリット長 $d=1280$ mm、周波数 $f=100$ MHz



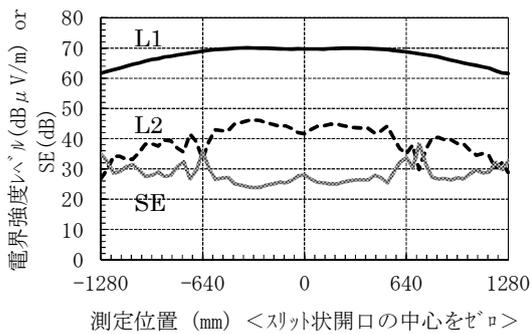
(d) スリット長 $d=40$ mm、周波数 $f=100$ MHz



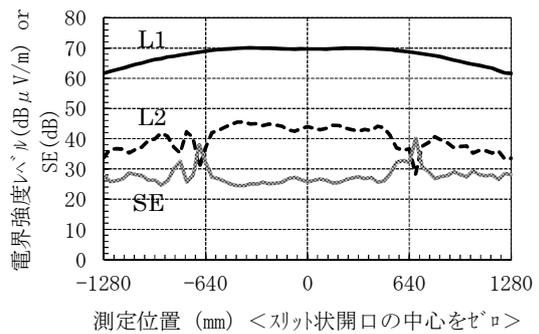
(b) スリット長 $d=1280$ mm、周波数 $f=1$ GHz



(e) スリット長 $d=40$ mm、周波数 $f=1$ GHz



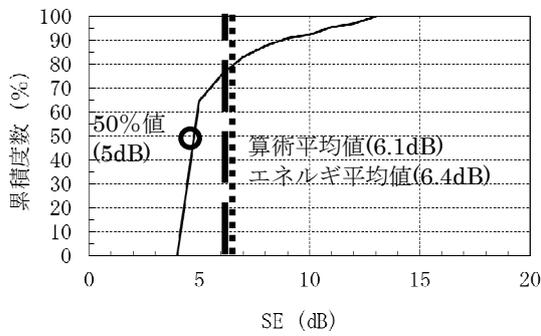
(c) スリット長 $d=1280$ mm、周波数 $f=10$ GHz



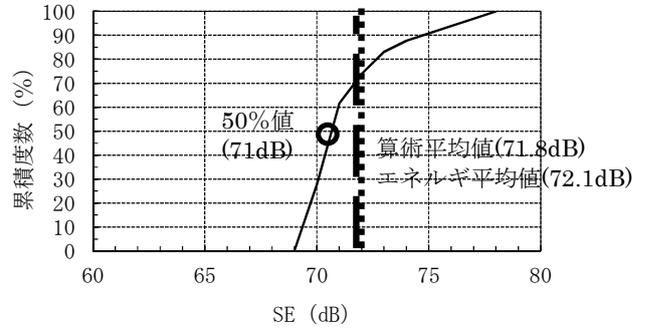
(f) スリット長 $d=40$ mm、周波数 $f=10$ GHz

図2-9 スリット状開口からの漏洩電波の電界強度レベル分布およびSE分布測定例  
(全長 $D=2560$ mm、開口幅 $h=1$ mm)

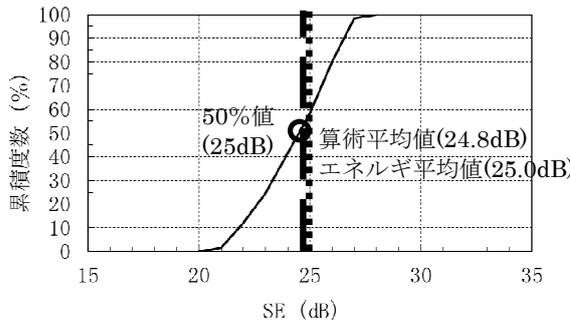
[凡例] ○ : 50%値、破線 : 算術平均値 点線 : エネルギー平均値



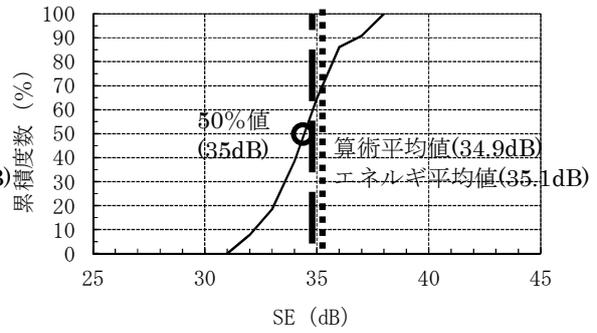
(a) スリット長d=1280mm、周波数f=100MHz



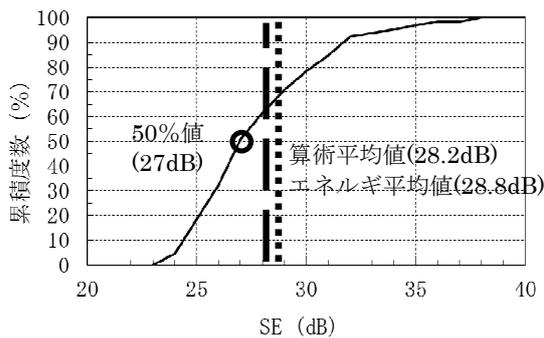
(d) スリット長d=40mm、周波数f=100MHz



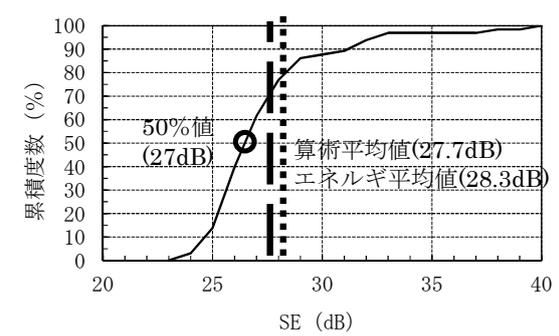
(b) スリット長d=1280mm、周波数f=1GHz



(e) スリット長d=40mm、周波数f=1GHz



(c) スリット長d=1280mm、周波数f=10GHz



(f) スリット長d=40mm、周波数f=10GHz

図2-10 SE値累積度数分布計算例 (全長D=2560mm、開口幅h=1mm)

## (2) スリット状開口による電波漏洩量の概要

条件別のSE周波数特性例を図2-11に示す。SEの周波数特性は全て「低周波数域においては周波数に反比例してSEが一様に低下してゆき、SEが20～30dB程度まで低下した後一定の値を示す、或いは緩やかに変化する」という傾向として捉えることができる。

## (3) 「個々のスリット長 $d$ / 波長 $\lambda$ 」による基準化

2.2節にも記述したように、スリット状開口は、一様な面状導電体に設けられた極端なアスペクト比を持つ長方形開口（ $a$ ：長辺、 $b$ ：短辺）をアンテナとして用いる「スロットアンテナ」とみなすことができる。その場合、最も放射・受信効率の良い（共振する）波長  $\lambda$  は「 $\lambda = 2a$ （ $\lambda / 2 = a$ ）」である。これは、前記の「SEが20～30dB程度まで低下する周波数 $f_r$ 」が「 $f_r[\text{MHz}] = 300 / \lambda [\text{m}] = 150 / a [\text{m}]$ 」であることを示唆している。

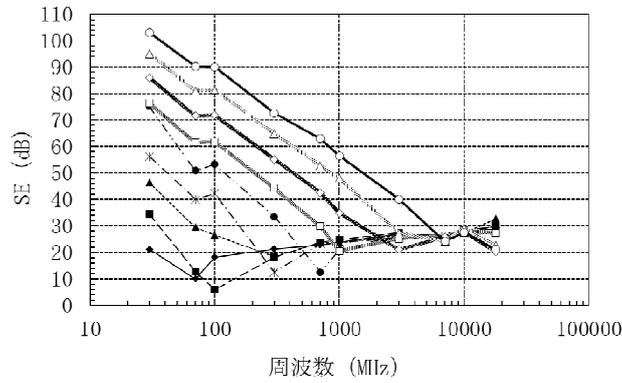
この考えに基づいて、図2-11の  $x$  軸(周波数軸)を「個々のスリット長  $d$  / 波長  $\lambda$ 」で基準化した結果を図2-12に示す。

この結果から、以下のことが示された。

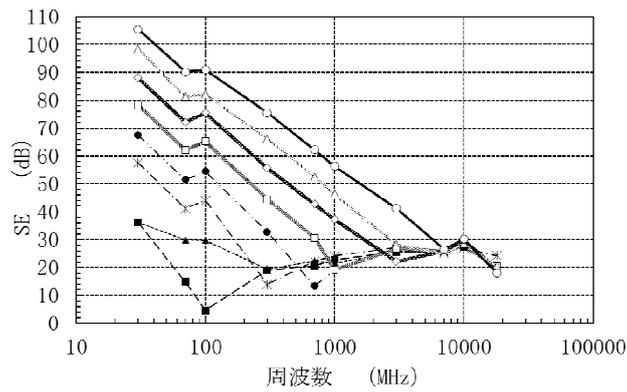
- ・ 図2-12の全ての条件において「個々のスリット長  $d$  / 波長  $\lambda$ 」への基準化により概略「 $d / \lambda = 0.5$ 」においてSEが一旦落ち込み、その後、ある一定値をとるという一般的な傾向が得られた。これにより、2.2節に示す特性を検証した。
- ・ ただし、図2-12(a)～(f)の「 $d / \lambda < 0.5$ 」の領域では、その傾きが全長 $D$ の違いにより異なっている傾向がわかる。この傾向は、2.2節では示されておらず、当該構造特有の特性である。
- ・ 図2-12(a)、(g)、(h)では、開口幅 $h$ の違いにより、「 $d / \lambda$ 」の値に関わらずSE値に差異が生じ、全体として、開口幅 $h$ の増加に伴いSE値が低減する傾向がみられる。これも、2.2節で示した特性と同一である。
- ・ 当基準化の手法を用いて当該構造のSEの傾向を把握するにあたり、基本的に「 $d / \lambda < 0.5$ 」と「 $d / \lambda > 0.5$ 」の領域においてそれぞれ、その性状を検討することが望ましいことがわかった。

[図2-11、図2-12凡例]

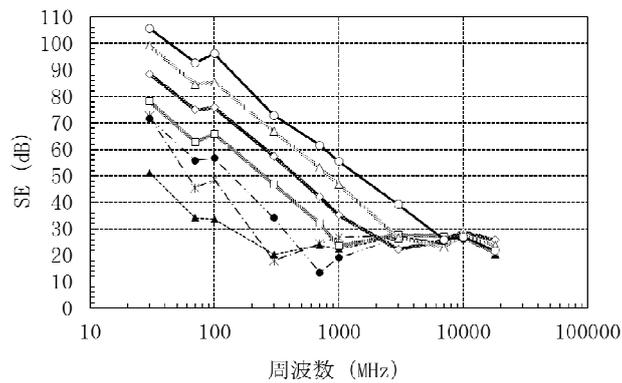
◆: d=2560mm、 ■: d=1280mm、 ▲: d=640mm、 \* : d=320mm、  
 ●: d=160mm、 □: d=80mm、 ◇: d=40mm、 △: d=20mm、 ○: d=10mm



(a) 全長 $D=2560\text{mm}$ 、開口幅 $h=1\text{mm}$

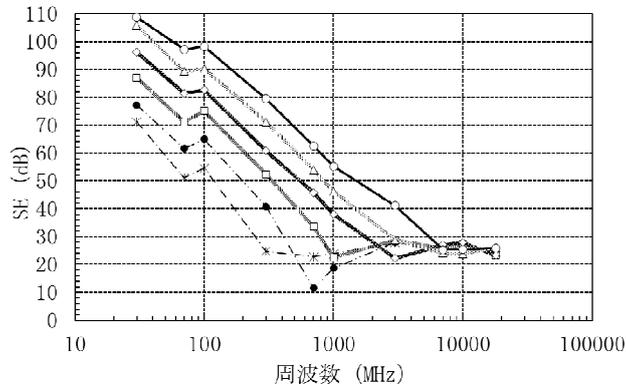


(b) 全長 $D=1280\text{mm}$ 、開口幅 $h=1\text{mm}$

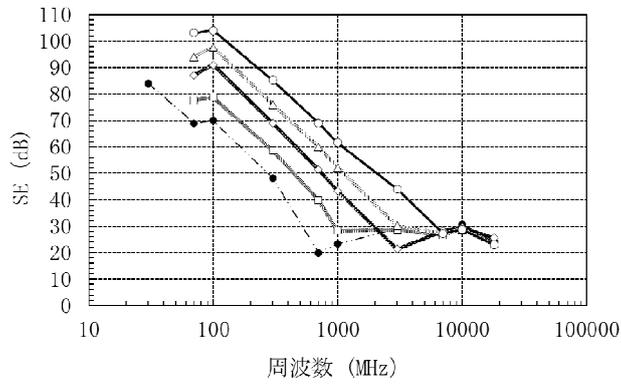


(c) 全長 $D=640\text{mm}$ 、開口幅 $h=1\text{mm}$

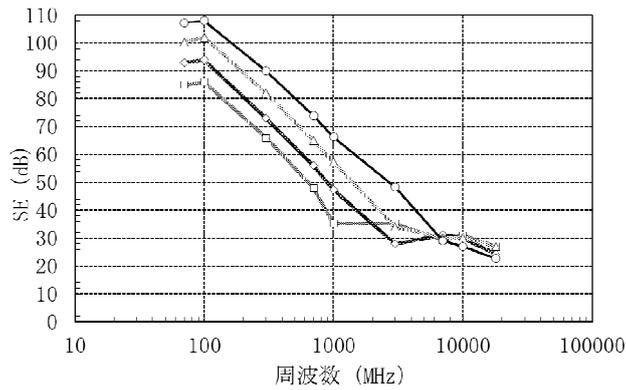
図2-11 スリット状開口のSE値周波数特性測定結果



(d) 全長D=320mm、開口幅h=1mm

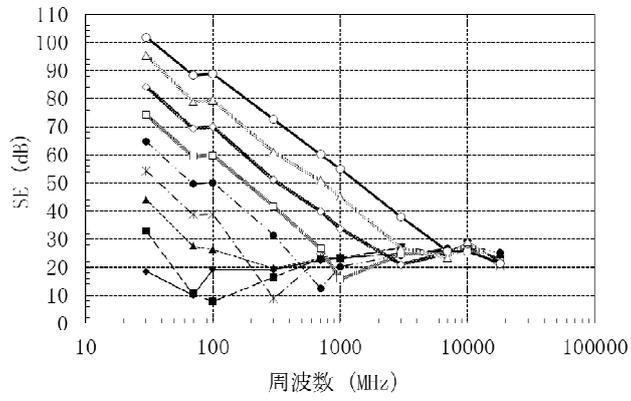


(e) 全長D=160mm、開口幅h=1mm

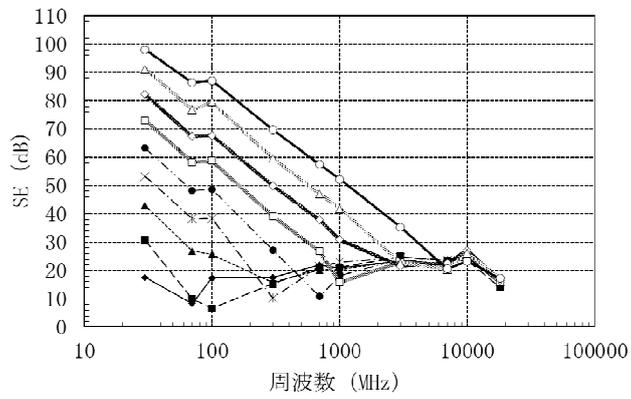


(f) 全長D=80mm、開口幅h=1mm

図2-11 スリット状開口のSE値周波数特性測定結果 (つづき)

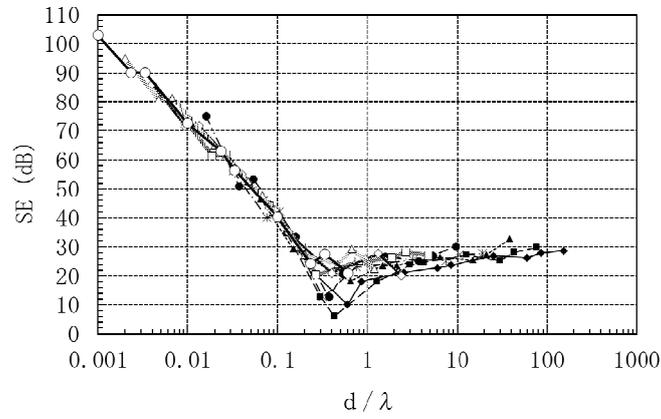


(g) 全長 $D=2560\text{mm}$ 、開口幅 $h=2\text{mm}$

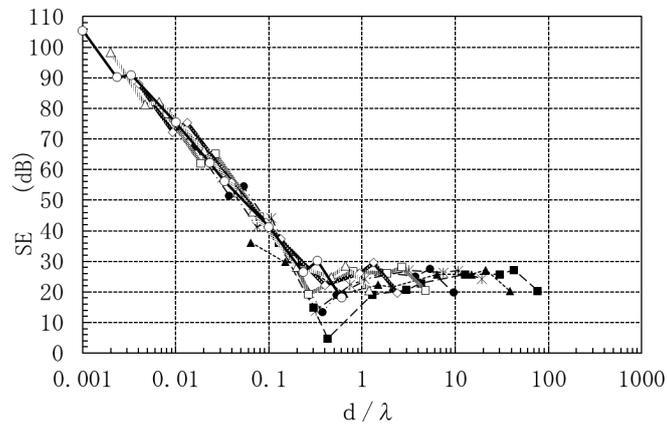


(h) 全長 $D=2560\text{mm}$ 、開口幅 $h=4\text{mm}$

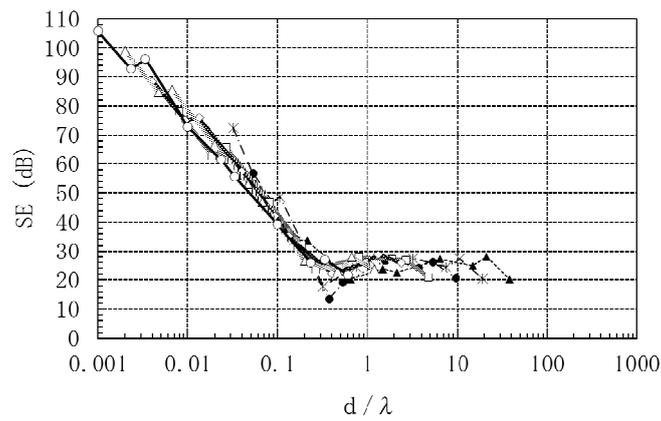
図2-11 スリット状開口のSE値周波数特性測定結果 (つづき)



(a) 全長D=2560mm、開口幅h=1mm

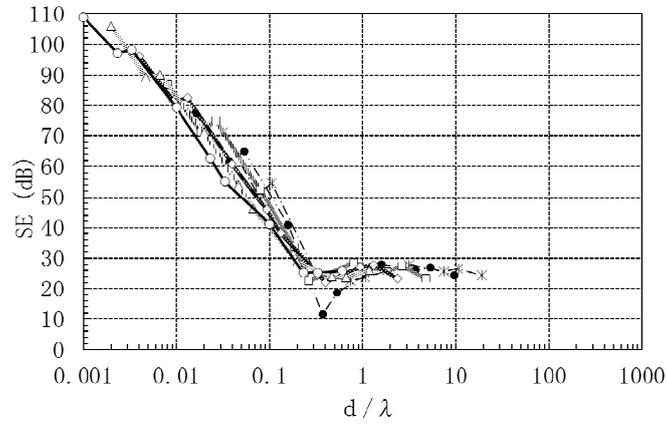


(b) 全長D=1280mm、開口幅h=1mm

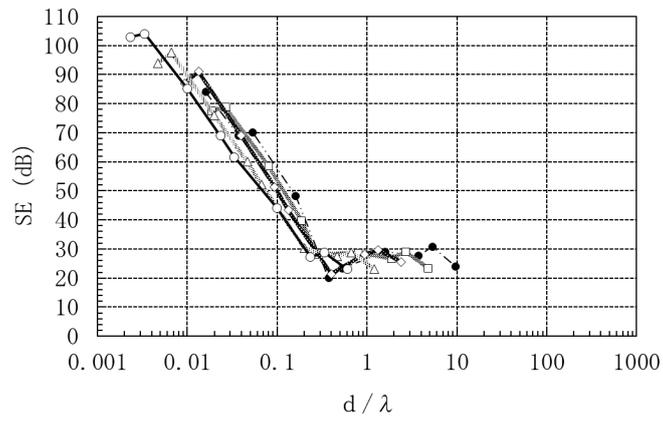


(c) 全長D=640mm、開口幅h=1mm

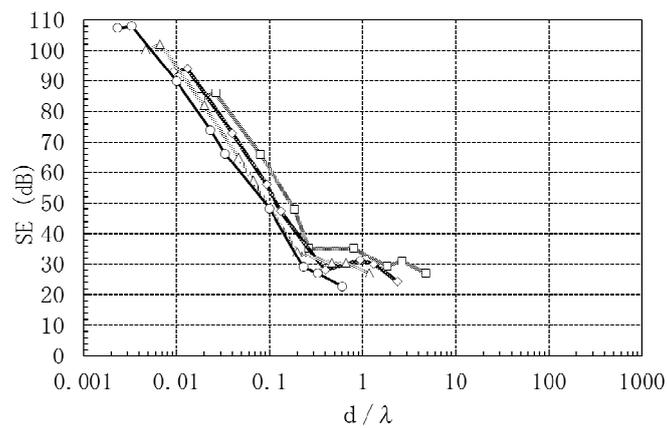
図2-12 スリット状開口の $d/\lambda$  正規化SE値周波数特性算出結果



(d) 全長D=320mm、開口幅h=1mm

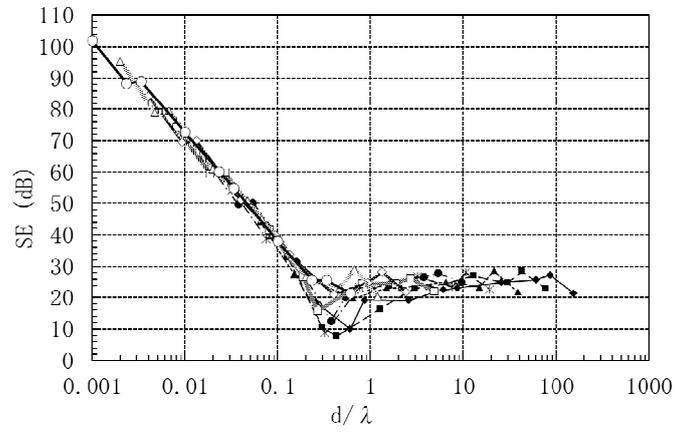


(e) 全長D=160mm、開口幅h=1mm

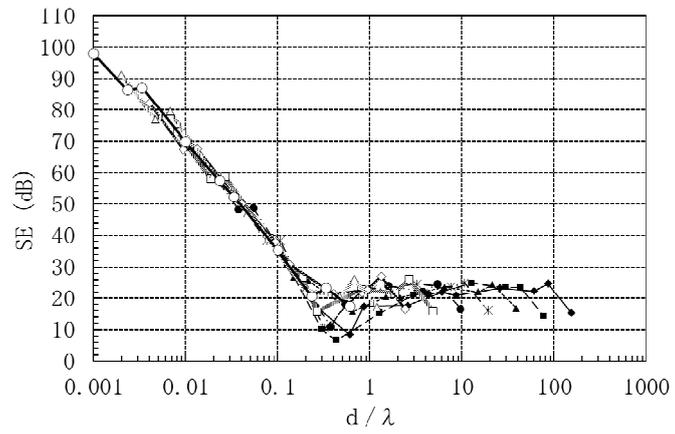


(f) 全長D=80mm、開口幅h=1mm

図2-12 スリット状開口の $d/\lambda$ 正規化SE値周波数特性算出結果 (つづき)



(g) 全長D=2560mm、開口幅h=2mm



(h) 全長D=2560mm、開口幅h=4mm

図2-12 スリット状開口の $d/\lambda$ 正規化SE値周波数特性算出結果 (つづき)

#### (4) 1次回帰曲線による近似

前記の傾向をより詳細に把握するため、2.2 節および上記の結果を基に、「 $d/\lambda < 0.5$ 」と「 $d/\lambda > 0.5$ 」の領域においてそれぞれ1次回帰曲線（x 軸を対数表示とした片対数軸として）を最小二乗法により求め、回帰結果を比較した結果を図 2-13 に示す。なお、各図中に、1 次回帰式、および相関係数 R を示す。相関係数は2つのデータ ( $X_i, Y_i$ ) 群に関連性があるか否かを示す指標であり、その値（絶対値）の意味は、「0.7> : 相関が強い」「0.4~0.7 : 中間の強さ」「0.2~0.4 : 弱い」「0.2< : ない」と一般的にいわれている（定義ではない）。さらに回帰の標準誤差 Se を求めた。標準誤差は「回帰式の誤差の標準偏差」であり、母集団が正規分布する場合、95% 信頼区間は「平均 $\pm 2 \times$ 標準誤差」となる。

この結果から、以下のことが示された。

- 全体として、「 $d/\lambda < 0.5$ 」の領域における相関係数は $-0.979 \sim -0.989$ となり、 $d/\lambda$ とSEとの間に負の強い相関を確認した。また、標準誤差も $3.644 \sim 5.414$ となり、回帰結果に対して大きなばらつきは認められなかった。回帰結果は、2.2節、図2-2の予想と同一であると判断した。
- 同様に、「 $d/\lambda > 0.5$ 」の領域における相関係数は $-0.155 \sim 0.606$ となり、 $d/\lambda$ とSEとは弱い～中間の相関となった。しかしながら、標準誤差は $2.360 \sim 4.042$ となり、回帰結果に対して大きなばらつきも認められなかった。回帰結果は、前記と同様に、2.2節、図2-2の予想と同一であるといえる。

#### (5) スリット状開口全長Dの変化による影響

スリット状開口全長 D の違いによる回帰結果を比較した結果を図 2-13 (a) ~ (f) に示す。この結果から、以下のことが示された。

- 図2-13 (a) ~ (f) の「 $d/\lambda < 0.5$ 」の領域において、全長Dの短縮化に比例して回帰式の負の傾き「係数 $a_1$ 」の絶対値が大きくなる傾向 ( $a_1 \approx -34.6$ )

→-39.1) が見られた。この傾向は2.2節では示されておらず、当該構造特有の特性である。これはスリット全長Dが増加するに従って個々のスリット（長さd）が多く形成されるが、これらが結合を起こすことによってシールド効果が低減していったものと推測した。

- ・ 同図の「 $d/\lambda > 0.5$ 」の領域では、どの条件とも「係数a2」「係数b2」とも顕著な差はなく、全長Dの短縮化によるSEへの強い影響は認められない。

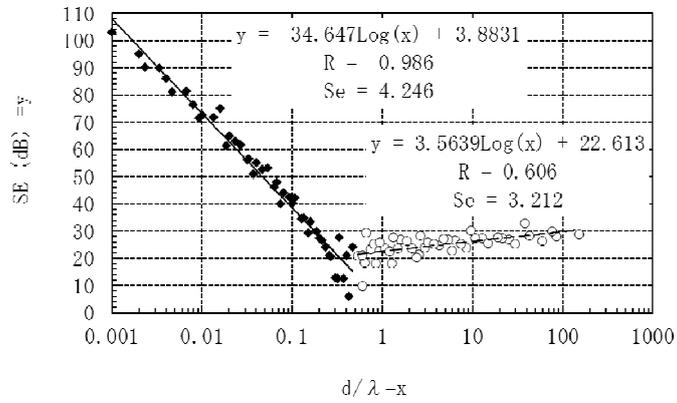
#### (6) スリット状開口幅hの変化による影響

前項と同様に、「 $d/\lambda < 0.5$ 」と「 $d/\lambda > 0.5$ 」の領域において求めた回帰曲線を、スリット状開口幅h=1、2、4mmの各条件の違いにより比較した結果を図2-13(a)、(g)、(h)に示す。

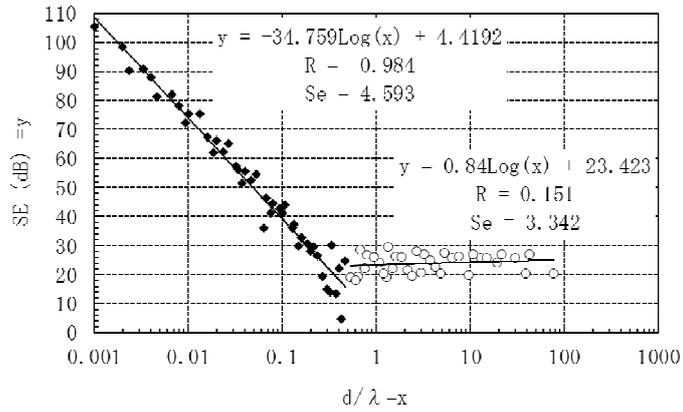
この結果から、以下のことが示された。

- ・ 図2-13(a)、(g)、(h)の「 $d/\lambda < 0.5$ 」の領域を比較すると、開口幅hの拡大化（1～2～4mm）に対して、回帰曲線の傾きは-34.647～-34.439～-33.979と僅かな変化となったが、y切片の値は3.8831～2.1432～0.9571と大きく低下しており、開口幅hの拡大化に比例してSEが低下する傾向、すなわち透過エネルギーの増加を把握した。
- ・ 「 $d/\lambda > 0.5$ 」の領域でも上記と同様の傾向を認めた。

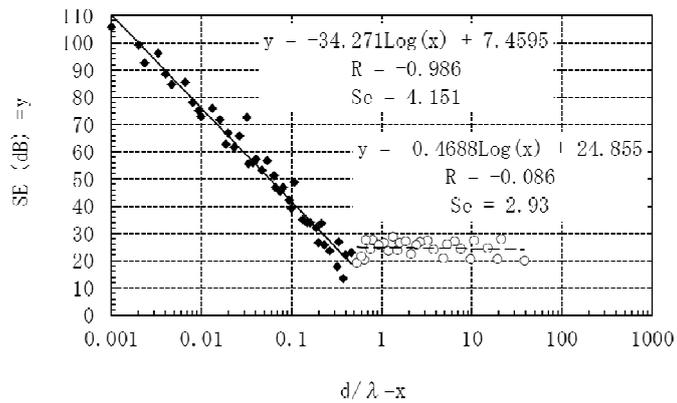
本検討により、スリット状開口からの電波漏洩は開口幅hの拡大に比例して多少SEが低下する傾向があることがわかり、2.2節の予想を確認した。



(a) 全長D=2560mm、開口幅h=1mm

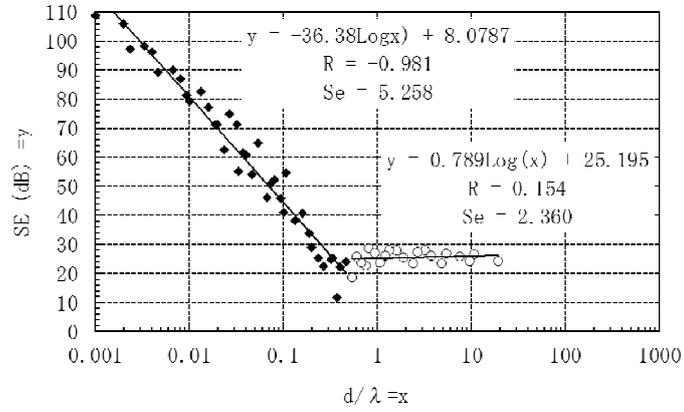


(b) 全長D=1280mm、開口幅h=1mm

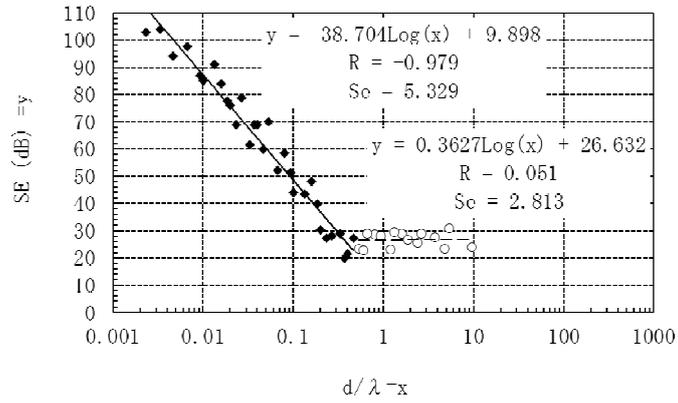


(c) 全長D=640mm、開口幅h=1mm

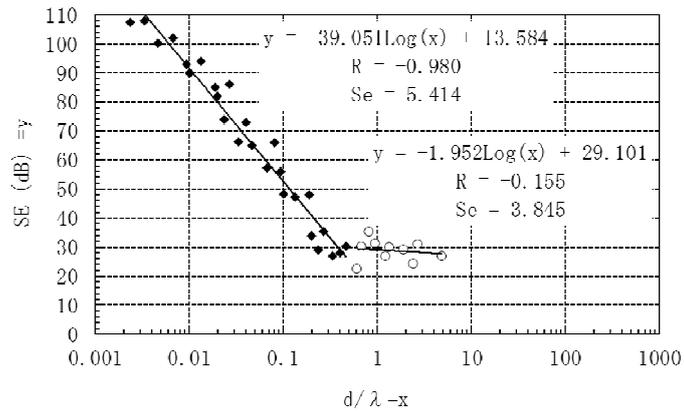
図2-13 スリット状開口の $d/\lambda$ 正規化SE値周波数特性に対する回帰結果



(d) 全長D=320mm、開口幅h=1mm

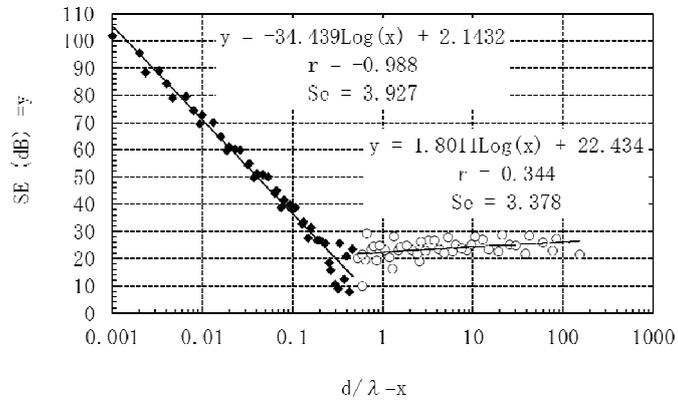


(e) 全長D=160mm、開口幅h=1mm

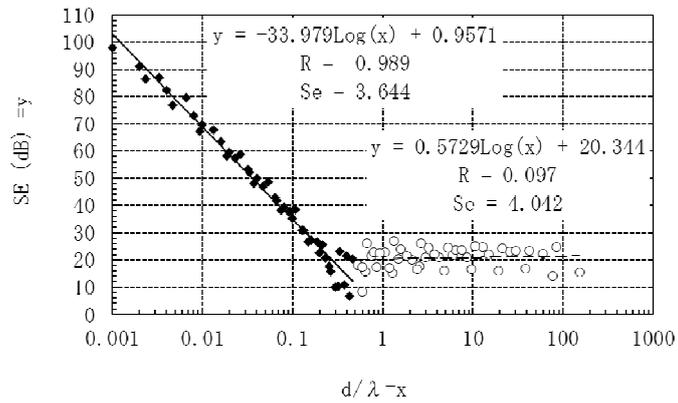


(f) 全長D=80mm、開口幅h=1mm

図2-13 スリット状開口の $d/\lambda$ 正規化SE値周波数特性に対する回帰結果 (つづき)



(g) 全長D=2560mm、開口幅h=2mm



(h) 全長D=2560mm、開口幅h=4mm

図2-13 スリット状開口の $d/\lambda$ 正規化SE値周波数特性に対する回帰結果 (つづき)

(7) スリット状開口構成要素のSE値への影響度について

図2-13により得られた各条件での回帰曲線

$$\text{「}d/\lambda < 0.5\text{」時：} y = a_1 * \log_{10}x + b_1$$

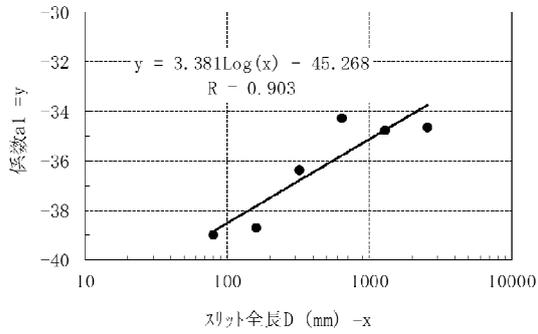
$$\text{「}d/\lambda > 0.5\text{」時：} y = a_2 * \log_{10}x + b_2$$

の係数 $a_1$ 、 $b_1$ 、 $a_2$ 、 $b_2$ 、スリット全長 $D$ 、および開口幅 $h$ との相関関係の把握を試みた。その結果を図2-14、図2-15に示す。

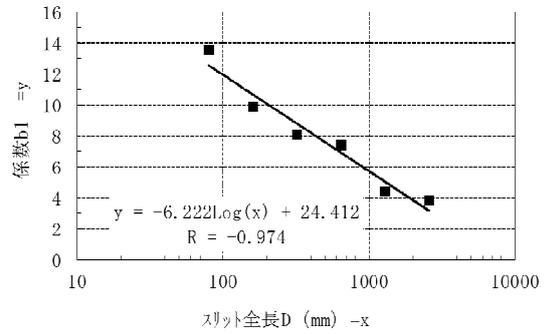
この結果から、以下のことが示された。

- ・ 図2-14より、相関係数 $R$ は絶対値で0.815～0.974となり各係数とスリット全長 $D$ との強い相関が認められた。
- ・ 図2-15より、データ数は少ないが相関係数 $R$ は絶対値で0.956～0.999となり各係数と開口幅 $h$ との強い相関が認められた。

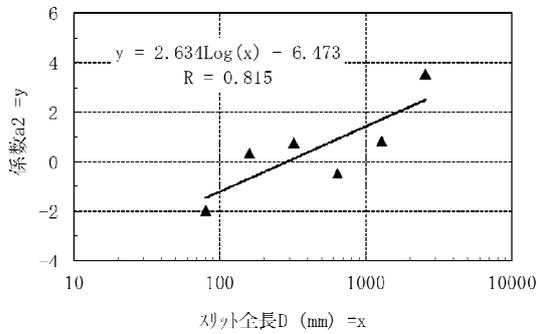
これらの結果から、SEに対するスリット全長 $D$ 、および開口幅 $h$ の変化による影響度を、一次回帰を用いて比較的精度良く予測することが可能であることが示された。



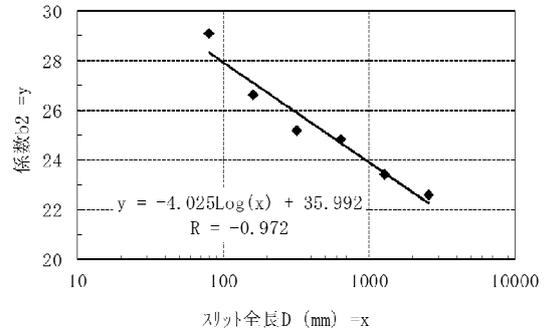
(a)  $d/\lambda < 0.5$  時、係数 $a_1$



(b)  $d/\lambda < 0.5$  時、係数 $b_1$

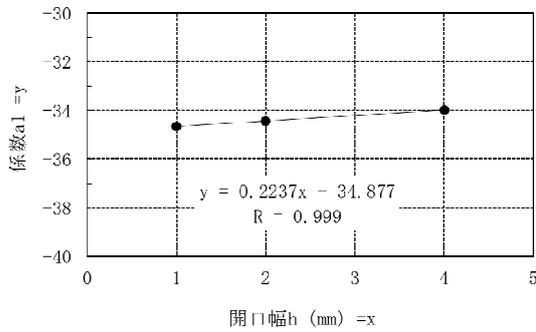


(c)  $d/\lambda > 0.5$  時、係数 $a_2$

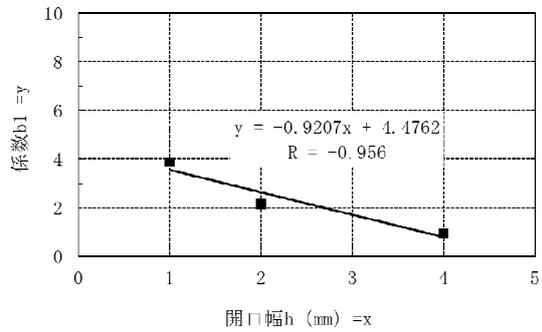


(d)  $d/\lambda > 0.5$  時、係数 $b_2$

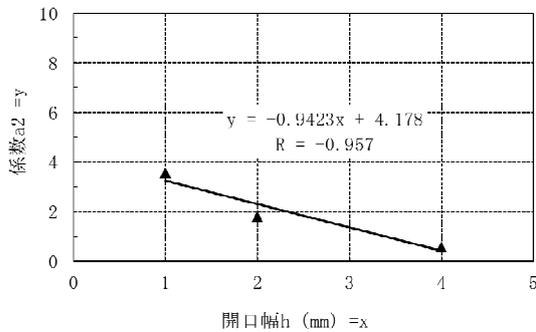
図2-14 スリット状開口の回帰曲線係数の相関に関する検討結果  
(スリット全長 $D$ の差異による相関)



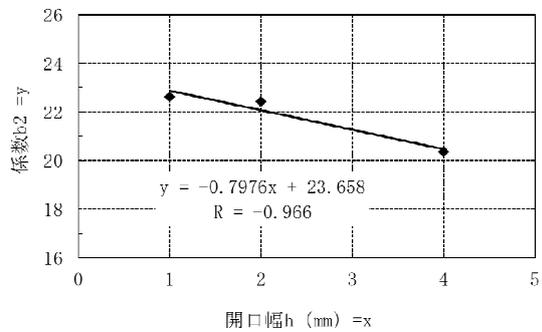
(a)  $d/\lambda < 0.5$  時、係数a1



(b)  $d/\lambda < 0.5$  時、係数b1



(c)  $d/\lambda > 0.5$  時、係数a2



(d)  $d/\lambda > 0.5$  時、係数b2

図2-15 スリット状開口の回帰曲線係数の相関に関する検討結果  
(開口幅hの差異による相関)

### 2.3.1.7 測定結果のまとめ

スリット状開口構造における電波漏洩性状に関する実験的検討の結果、以下のことが示された。

- (1) スリット状漏洩構造に沿った受信点の移動による個々のSE値に差異があり、対象構造の性能評価および基準化の検討においては、これらの代表値を用いる必要がある。その代表値として「各SEの平均値」が妥当である。
- (2) 各条件でのSEの周波数特性から、2.2節で予測したように「個々のスリット長d/波長 $\lambda$ 」にて正規化することで、SEの基準化が可能である。なお、「 $d/\lambda = 0.5$ 」を境としてその前後での周波数特性が大きく異なることは、2.2節で

の条件設定を確認できたと理解できる。

(3) SEは、「 $d/\lambda < 0.5$ 」の領域において対象構造の全長Dの影響を大きく受ける。「 $d/\lambda > 0.5$ 」の領域では条件毎にほぼ一定のSE値をとる（図2-14(c)のa2値が小さい）が、全長Dの増加に反比例してSE値が減少する（図2-14(d)のb2値とDとに相関が認められる）。

(4) SEは、「 $d/\lambda < 0.5$ 」および「 $d/\lambda > 0.5$ 」の両領域において対象構造の開口幅hによる影響を受ける。

(5) 後述の現実的な各種スリット状接続構造に対するSEの把握において、「 $d/\lambda$ 」による基準化を基本とした上記の各事項に着目したスリット各条件の設定が適切であると考えられる。

## 2.3.2 スリット状開口の透過電波減衰性状の数値解析による検証

### 2.3.2.1 数値解析の目的

本論文では、スリット状接続構造電磁シールド性能を実験的に把握し、その特性の検討を行っている。ここでは数値解析を行い、本実験的検討の有効性について検討した。

### 2.3.2.2 解析手法の概要

空間の電磁界解析にはFDTD (Finite Difference Time Domain) 法、モーメント法、レイトレース法などが一般的に用いられる。本検証においては、当該スリット状開口や、後述のスリット状接続モデルの構造的な構成（解析対象の形状や材料配置の自由度）を再現しやすく、そのモデル化も比較的容易であるという理由によりFDTD法を採用することとした。

FDTD法とは、Maxwellの微分方程式を差分化し、時間領域で解く方法である。同手法では、先ず波源と散乱体（シールド材や吸収材料）を囲むように解析領域を設定し、領域全体を微小直方体（セル）に分割する。次に、全セルに対してMaxwellの微分方程式、あるいはその積分形式を適用して定式化するが、その基本はYeeのアルゴリズム<sup>7)</sup>（時空間における差分、電磁界の時間配置、電磁界の空間配置）にある。

### 2.3.2.3 解析条件

解析における吸収境界条件には、最も一般的に用いられる「Murの1次」<sup>8)</sup>を用い、スリット状開口への入射条件は平面波とし、スリット状開口透過側300mm離れた位置での電界強度分布を求めた。なお、スリット上でのセル間隔は5mm×2mm（アスペクト比2.5）とした。

### 2.3.2.4 スリット状開口部モデルおよび対象周波数

解析用スリット開口モデルおよび対象周波数は以下の条件とした。

- ・ スリット全長  $D=2560\text{mm}$
- ・ 開口幅  $h=4\text{mm}$
- ・ 個々のスリット長  $d=2560、1280、640、320、160、80、40、20\text{mm}$
- ・ 対象周波数  $f=300\text{M}、700\text{M}、1\text{G}、3\text{GHz}$

なお、計算機資源の制約上、開口幅 ( $h=4\text{mm}$ ) の条件を対象としている。

### 2.3.2.5 解析結果および考察

図2-16にFDTD数値解析値と同一条件における前述の実験値を併せて示す。スリット状開口によるSE解析結果では、ある特定の $d/\lambda$ を境としてそれよりも小さい場合には急激にSEが上昇するが、大きい場合にはほぼ一定の値をとる結果が得られた。このように実験と解析の結果は良好に一致し、実験結果の妥当性が示され、本実験的検討の有効性が確認された。

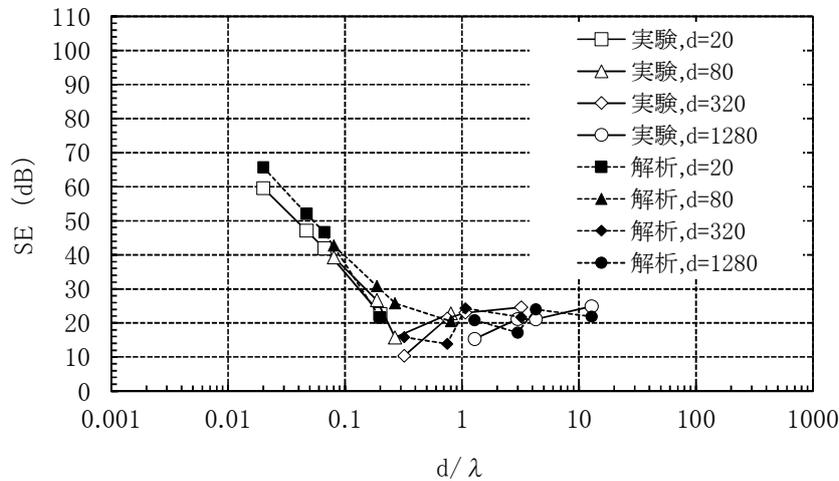


図2-16 スリット状開口の実験値と数値解析値との $d/\lambda$ 正規化SE値比較例  
(スリット全長 $D=2560\text{mm}$ 、開口幅 $h=4\text{mm}$ )

次に、スリット状開口から $300\text{mm}$ 離れた位置における透過波の電界強度分布解析の例を図2-17に示す。図中の横軸ゼロ点は対象スリットの中心位置であり、また、縦軸の電界強度は、送信平面波の電界強度を $1\text{V/m}$ とした場合の値である。

この結果から、以下のことが示された。

- 図2-17において、スリット状開口を間隔 $d$ で短絡した位置、例えば「個々のスリット $d=320\text{mm}$ 」時の解析位置「 $0\text{mm}$ 」「 $-320\text{mm}$ 」「 $-640\text{mm}$ 」「 $-960\text{mm}$ 」「 $-1280\text{mm}$ 」において電界強度が非常に微弱となっている。この結果から、短絡した箇所間を節目として電界強度の強弱が発生しており、「 $d/\lambda > 0.5$ 」となる「 $d=1280\text{mm}$ 」「 $d=320\text{mm}$ 」ではピーク値の大きな変化はなく、結果としてSEが変化しないことがわかった。
- これに対して「 $d/\lambda < 0.5$ 」となる「 $d=80\text{mm}$ 」「 $d=40\text{mm}$ 」ではスリット開口面積の減少により当該部位での電界強度が低下するために、SEが増加したと考えられる。

以上のように、本構造では個々のスリットが2.2節で述べた長方形開口と同様の振る舞いをしていることが確認された。

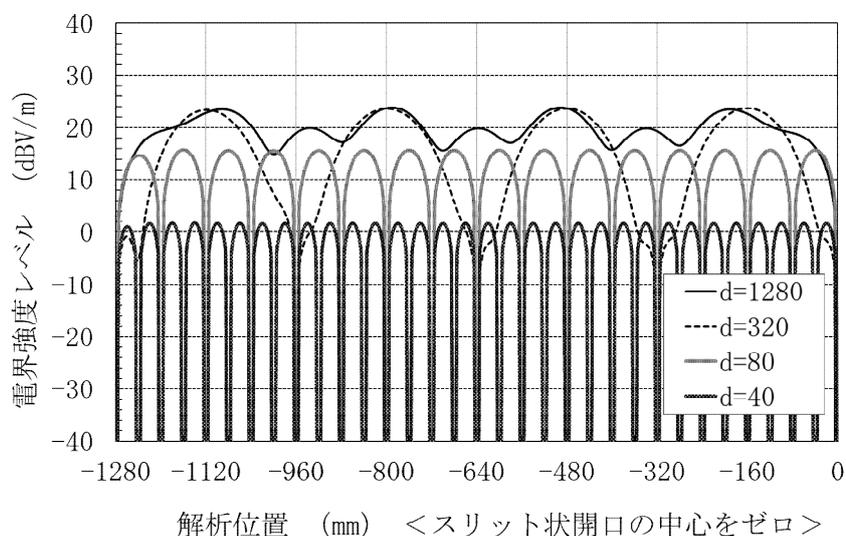


図2-17 スリット状開口の透過波電界強度レベル分布数値解析例  
(スリット全長 $D=2560\text{mm}$ 、開口幅 $h=4\text{mm}$ 、周波数 $f=1\text{GHz}$ )

### 2.3.3 まとめ

実験によるスリット状開口構造の電磁シールド性能SEの把握、およびその数値解析により、以下の結論を得た。

- 1) 実験で得られた特性は、スロットアンテナからの電波放射を基本とした2.2節の考えで説明し得ることを確認した。
- 2) スリット状開口構造のSEに影響する要因として、接続の全長 $D$ 、導体の短絡による個々のスリット長 $d$ 、開口幅 $h$  (スリット状接続構造における開口部の存在) が影響することがわかった。
- 3) さらに、これらの構造の性能値設計法提案のための測定結果の整理方法として、「 $d/\lambda$ 」による基準化が有効であることも示された。
- 4) 「 $d/\lambda < 0.5$ 」では「 $d/\lambda$ 」の増加に対してSEが反比例する相関が確認されたが、「 $d/\lambda > 0.5$ 」では「 $d/\lambda$ 」の増加に対してSEはほぼ一定の値となった。
- 5) FDTD法による数値解析結果は実験結果と良好に一致し、実験の有効性が確認された。よって、今後の検討では、実験結果を基に議論を進めることとした。これらの結果を基に、実用的なスリット状接続構造に対する電磁シールド性能の

把握をスリット状開口に対する測定に準拠して行うと共に、スリット接続構造の各種設定条件とSEとの相関関係を検証していくことが可能と判断した。

## 2.4 スリット状接続構造の電磁シールド性状の把握および性能推定方法の提案<sup>12)</sup>

15) 17) ~22) 28)

### 2.4.1 測定目的

前節において、基礎検討として、スリット状接続構造の構成要素の性能値への影響度を基本的に把握するため、当該構造の単純化（スリット状開口）を行い、当該構造における電波漏洩性状の実験的検証を実施した。

本測定では、実際の仕様に対するスリット状接続構造モデルを実験的に再現し、当該構造の構成要素「断面形状」「構造の全長」「材料の固定間隔」「材料の重ね幅」「重ね部の導通状態および開口状態」の各種条件の変化によるSEの差異を系統的に求め、その結果を基にSEの増減（周波数特性）に寄与する構成要素の把握とその程度を検証する。次に、この結果を基にSEに影響する当該構造構成要素とSEとの相関関係を検討することで、実験結果に基づいた当該構造のSE予測方法の提案を行う。

### 2.4.2 測定対象の概要

本検討で対象としたスリット状接続構造の概要を図2-18に示す。同図に示すような「重ね合せ接続」「重ね貼り接続」「つば付き接続」と呼称（一般名称ではない）される代表的構造モデル<sup>9) 10)</sup>を対象とした。スリット状接続構造のモデルを実験的に製作し、当該構造を構成する以下の要素、「スリット断面形状」「スリット全長」「個々のスリット長」「材料の重ね幅」「重ね部の導通状態」「重ね部の開口状態」のSEへの影響度を実験的に把握し、当該構造のSE予測手法を検討した。ここで「重ね部の開口」とは、材料品質や加工、施工精度等に起因して、結果として当該部位に開口状の隙間が開いてしまうことである。この現象は、実際の施工現場における重要な品質管理の一項目となっている。

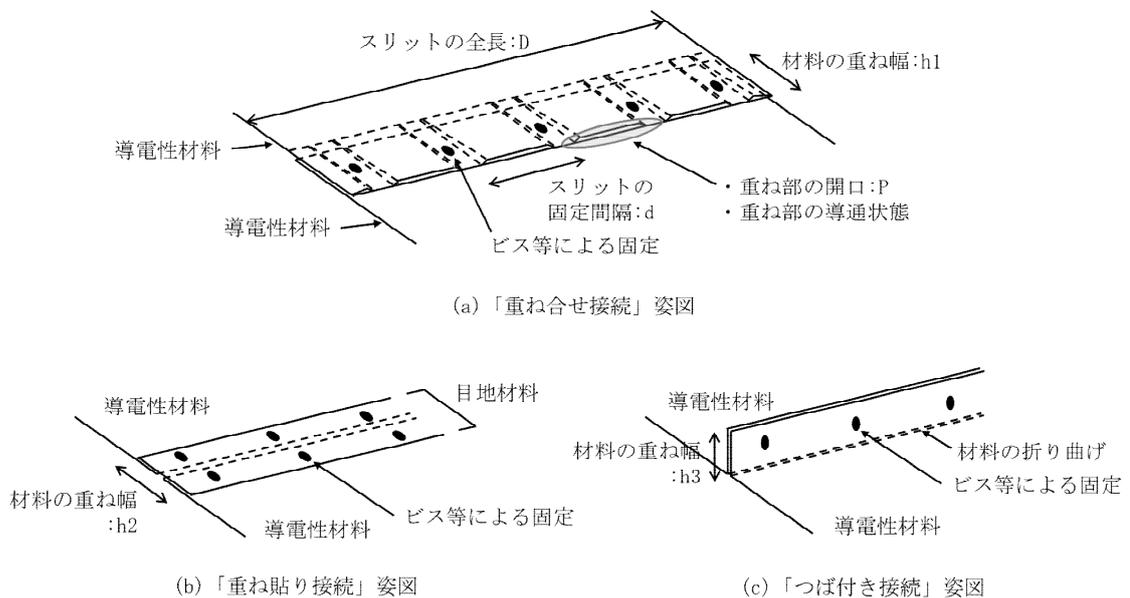


図2-18 スリット状接続構造の概要

### 2.4.3 測定方法

2.3.1.2と同様に、1壁面を共有する隣接した電波無響室2室の共有壁面に設けられた電磁シールド性能測定用開口にスリット状接続構造の各試験体を設置した。測定は、片方の室内で放射した試験用電波が試験体を透過した時の、もう一方の室への透過量を測定対象から一定の距離で当該構造に沿って受信アンテナを40mm間隔で移動する方法で行った(n個)。送信アンテナと試験体の距離は3000mm、試験体と受信アンテナの距離は300mmである。電磁シールド性能の測定方法<sup>4)</sup>(MIL-STD-285<sup>5)</sup>準拠も2.3.1.4と同一とした。対象となる電磁シールド層が存在しない状態での受信電界強度レベル $L1i$  ( $\text{dB}\mu\text{V/m}$ ,  $i=1\sim n$ )と、試験体が設置された時の同一送信・受信点位置関係での受信電界強度レベル $L2i$  ( $\text{dB}\mu\text{V/m}$ )を測定した。各 $L1i$ と $L2i$ のレベル差を電磁シールド性能 $SEi$  (dB)とし、各 $SEi$ の算術平均値を $SE$  ( $=\sum SEi/n$ )とした。なお、この $SE$ は各測定値の平均であり、これがスリット状接続構造からの透過量全体を表すものではない。測定施設平面、アンテナの配置、試験体の全体形状等の詳細情報は前掲の図2-3、図2-6、図2-7を参照されたい。

#### 2.4.4 測定条件

本研究で設定した試験体の詳細を図2-19および図2-20に、測定条件の一覧を表2-1に示す。当該接続構造を適用した電磁シールド室では、0.3mm厚程度、表面を亜鉛メッキ処理した鉄板を用いることが最も一般的であるので、本検討でも当該材料を用いて試験体を作成した。なお、「重ね部の開口状態」の影響をみるためには計画的（人為的）に開口部を作り出す必要性があることから、本条件のみ柔軟な素材である銅箔（35 $\mu$ m厚）を使用した。なお、鉄と銅は両者とも良好な導電体であるので、1.2節の図1-2の例にも示すように、素材としての電界および平面波領域での電磁シールド性能は非常に高く、スリット状接続構造を構成する上で材料の違いによるSEへの影響は殆どない。また、図2-20において重ね部開口状態を構成するために用いたプラスチック材は、その材質が塩化ビニルのため比誘電率を「2～3」程度と想定し、隙間を有するスリット状接続の透過減衰量に関する当該実験の予測精度に対して電氣的な問題はない。

各スリット状接続構造共通の測定条件を下記1)～6)に示す。

- 1) スリット状接続構造全長D： D=160mm、320mm、640mm、1280mm、2560mm（図2-18、表2-1参照）
- 2) 個々のスリット長d： d=10mm、20mm、40mm、80mm、160mm、320mm、640mm、1280mm、2560mm、但し  $d \leq D$ （図2-18、図2-19、図2-20参照）
- 3) 材料の重ね幅h： 重ね合せ接続 $h_1=25$ mm、50mm、100mm  
重ね貼り接続 $h_2=50$ 、100mm、つば付き接続 $h_3=50$ mm（図2-18、図2-19、図2-20、表2-1参照）
- 4) 対象周波数f： f=30MHz、70MHz、100MHz、300MHz、700MHz、1GHz、3GHz、7GHz、10GHz、18GHz
- 5) 重ね部導通状態の設定： 現実の重ね部の導通状態を実験的に再現する目的で、絶縁材を挿入して導通する面積を変化させてモデル化した。
  - ・「100%絶縁」はスリット構成全部位に絶縁用の上質白色紙（0.045mm厚）を挿入

- ・「70%絶縁」は接触面積の70%部分に絶縁材を挿入
- ・「導通」は絶縁材の挿入なし

とした（図2-19、図2-20、表2-1参照）。なお、中間的な導通状態を「70%絶縁」と定めた理由は、これまでの経験により、絶縁面積の割合を高くした方が現実に近いと考えられたこと、およびSEが低下する側の条件を把握することが重要と判断したためである。

- 6) 重ね部開口状態の設定P： P=0mm、1mm、2mm（図2-18、図2-19、図2-20、表2-1参照）。なお、「P=0mm」とはスリット状接続を構成する2枚のシールド材間に隙間が開かないように（注意して）施工した状態をいい、その時に材料間に全面に絶縁材を挿入した条件を「100%絶縁」と呼称した。

＜鉄板による試験体概要図＞

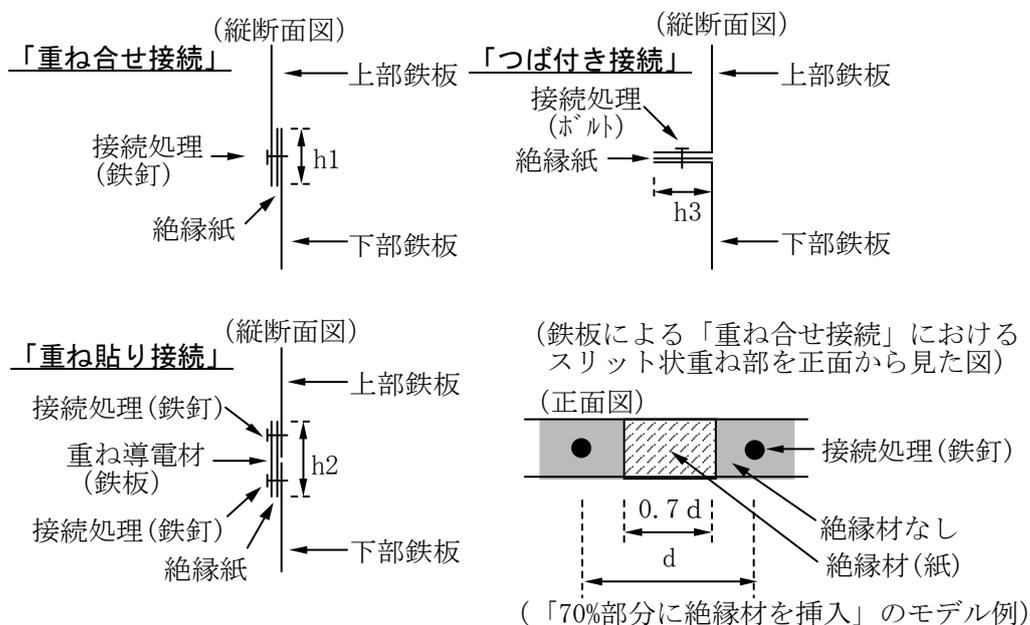


図2-19 スリット状接続構造試験体の概要 (鉄板)

＜銅箔による「重ね合せ接続」試験体概要図(隙間の影響度検討用に作成)＞

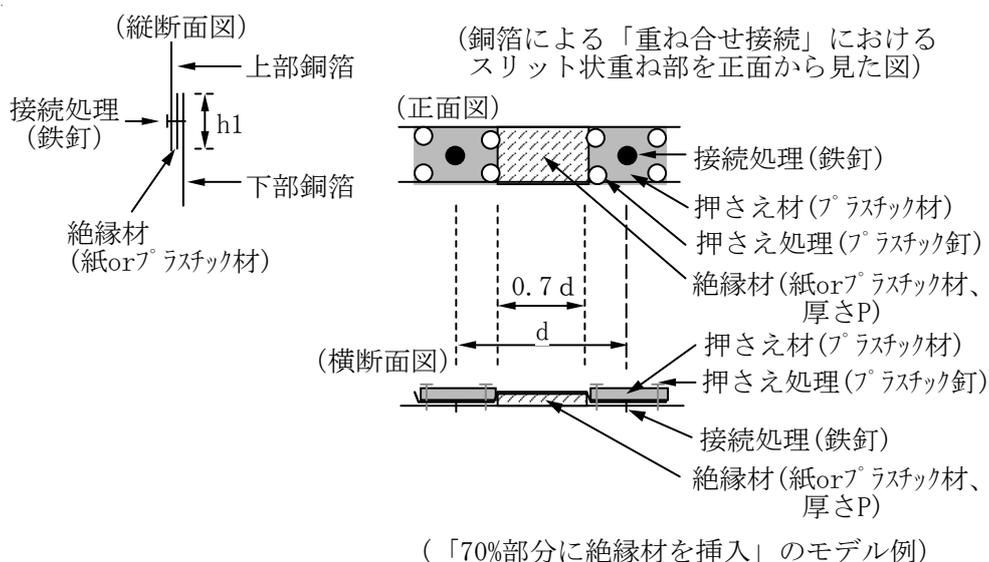


図2-20 スリット状接続構造試験体の概要 (銅箔)

表2-1 スリット状接続構造試験条件一覧

素材	スリット状 接続名称	スリット全長 D(mm)	重ね幅 h(mm)	開口 P(mm)	導通状態		
					導通	70%絶縁	100%絶縁
亜鉛メッキ鉄板 (0.3mm厚)	重ね合せ	160	h1=50	0	○	○	○
		320	h1=50	0	○	○	○
		640	h1=50	0	○	○	○
		1280	h1=50	0	○	○	○
		2560	h1=25	0	○	×	○
		2560	h1=50	0	○	○	○
		2560	h1=100	0	○	×	○
	重ね貼り	2560	h2=50	0	○	○	○
		2560	h2=100	0	○	×	○
	銅箔 (35 μ m厚)	つば付き 重ね合せ	2560	h3=50	0	○	○
2560			h1=50	0	○	○	○
2560			h1=50	1	■	○	○
		2560	h1=50	2	■	○	○

注意) 絶縁材として紙を挿入した場合の開口Pは「0(ゼロ)mm」とした

## 2.4.5 スリット状接続構造の電磁シールド性能測定結果

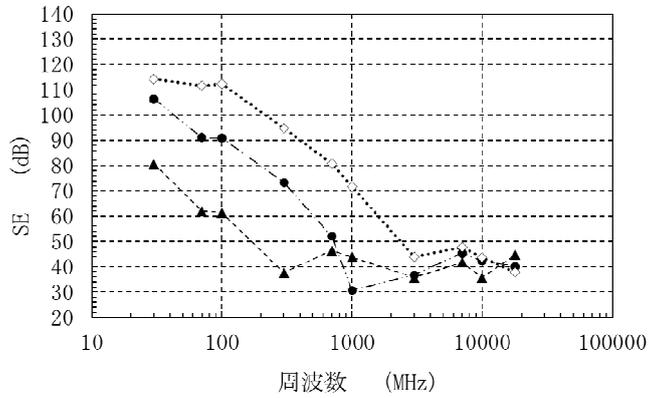
### 2.4.5.1 測定結果

2.3.1.6と同様に条件別にSEの周波数特性値を整理し、「 $d/\lambda$ 」にて基準化を行い、「 $d/\lambda = 0.5$ 」を分岐点としてその前後の領域（「 $d/\lambda < 0.5$ 」「 $d/\lambda > 0.5$ 」）における回帰曲線（「 $d/\lambda < 0.5$ 」： $y = a1 * \log_{10}x + b1$ 、「 $d/\lambda > 0.5$ 」： $y = a2 * \log_{10}x + b2$ ）をそれぞれ求めた。それらの結果の一部を図2-21～図2-23に示す。図2-23には、回帰式、相関係数R、および回帰の標準誤差Seを示す。

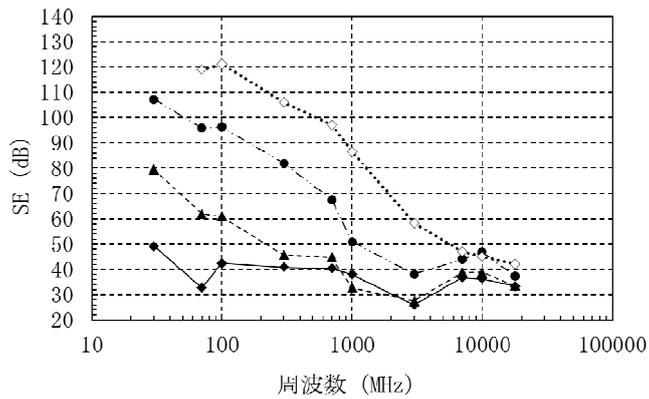
図2-23に示すように、全体として「 $d/\lambda < 0.5$ 」の領域における相関係数は-0.914～-0.982となり、 $d/\lambda$ とSEとの間に負の強い相関がみられた。また、標準誤差も4.281～9.586となり、回帰結果に対して極端なばらつきは認められなかった。回帰結果は、2.2節、図2-2の予想と同一である。同様に、「 $d/\lambda > 0.5$ 」の領域における相関係数は-0.547～0.401となり、 $d/\lambda$ とSEとは弱い～中間の相関となった。また、標準誤差も4.946～8.072となり、回帰結果に対して極端なばらつきも認められなかった。回帰結果は、前記と同様に、2.2節、図2-2の予想と同一である。

以上の結果に示すように、スリット状開口の場合と同様、「 $d/\lambda$ 」による基準化が可能である。以降、図2-23の回帰結果を基に考察を進める。

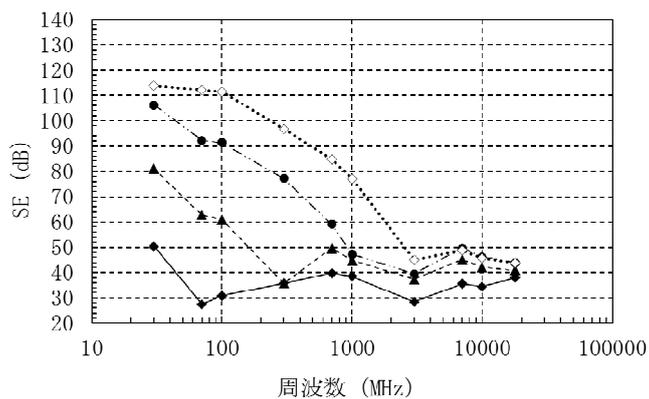
[図2-21、図2-22凡例] ◆: d=2560mm、▲: d=640mm、●: d=160mm、◇: d=40mm



(a) 鉄板、重ね合せ、全長D=640mm、重ね幅h1=50mm、開口P=0mm、70%絶縁

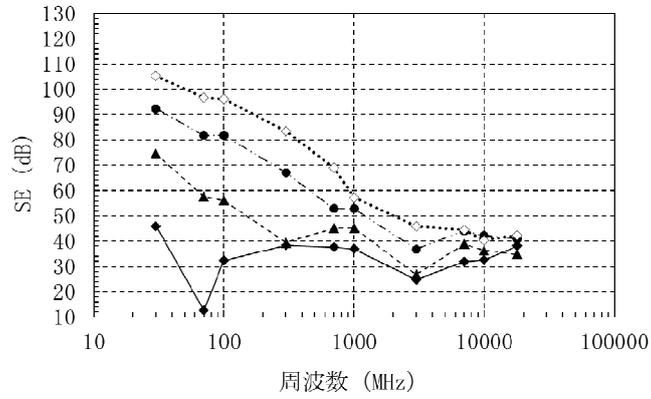


(b) 鉄板、重ね合せ、全長D=2560mm、重ね幅h1=50mm、開口P=0mm、導通

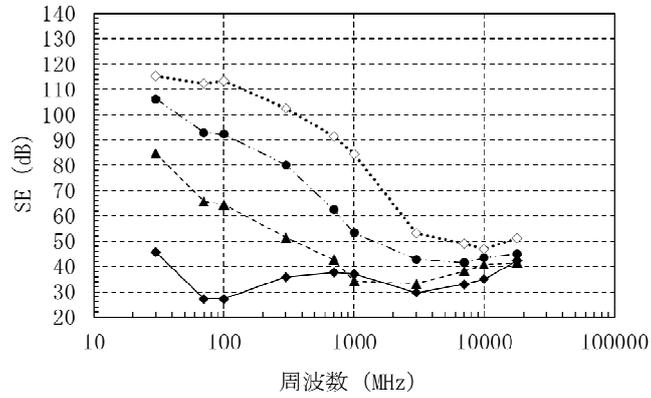


(c) 鉄板、重ね合せ、全長D=2560mm、重ね幅h1=50mm、開口P=0mm、70%絶縁

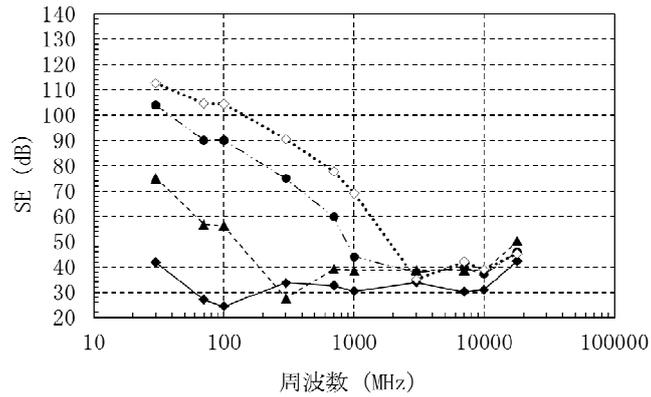
図2-21 スリット状接続構造のSE値周波数特性測定結果



(d) 鉄板、重ね合せ、全長D=2560mm、重ね幅h1=50mm、開口P=0mm、100%絶縁

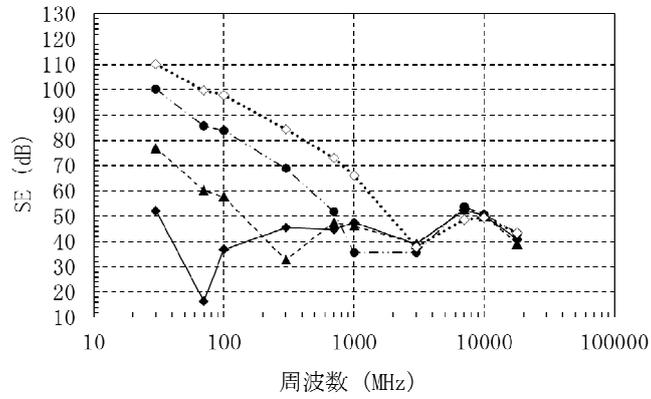


(e) 鉄板、重ね貼り、全長D=2560mm、重ね幅h2=50mm、開口P=0mm、導通

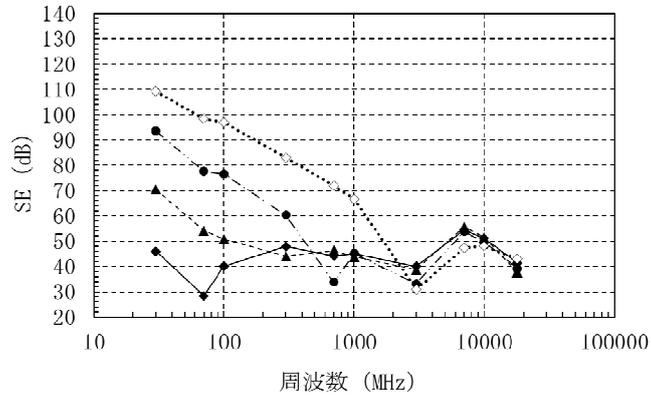


(f) 鉄板、重ね貼り、全長D=2560mm、重ね幅h2=50mm、開口P=0mm、70%絶縁

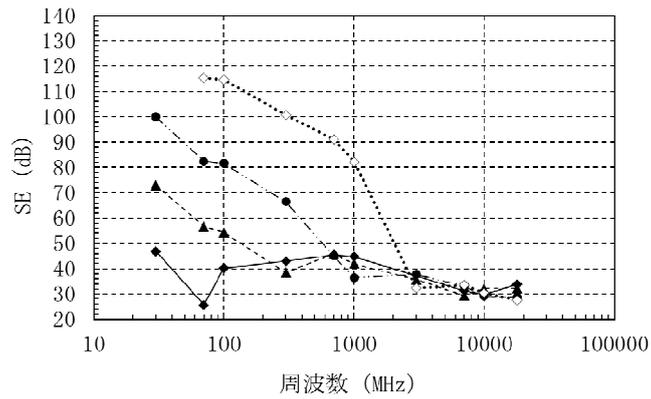
図2-21 スリット状接続構造のSE値周波数特性測定結果 (つづき)



(g) 鉄板、つば付き、全長D=2560mm、重ね幅h3=50mm、開口P=0mm、70%絶縁

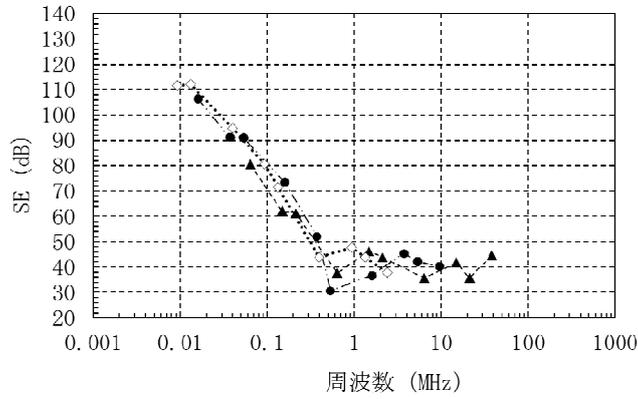


(h) 鉄板、つば付き、全長D=2560mm、重ね幅h3=50mm、開口P=0mm、100%絶縁

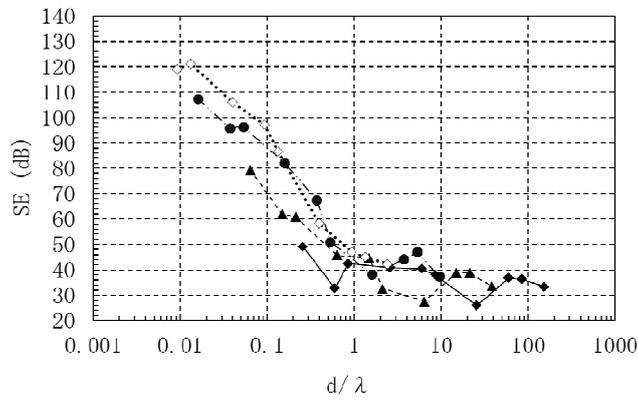


(i) 銅箔、重ね合せ、全長D=2560mm、重ね幅h1=50mm、開口P=2mm、70%絶縁

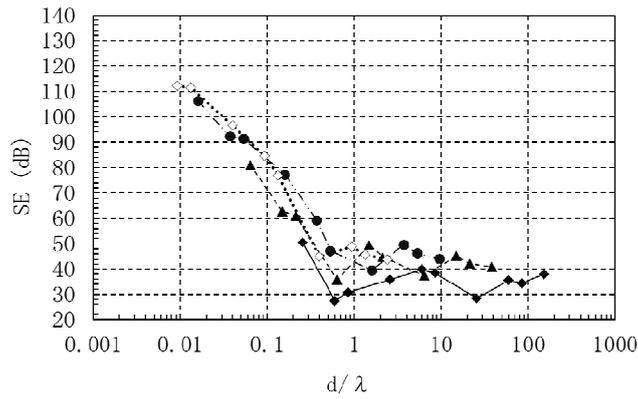
図2-21 スリット状接続構造のSE値周波数特性測定結果 (つづき)



(a) 鉄板、重ね合せ、全長D=640mm、重ね幅h1=50mm、開口P=0mm、70%絶縁

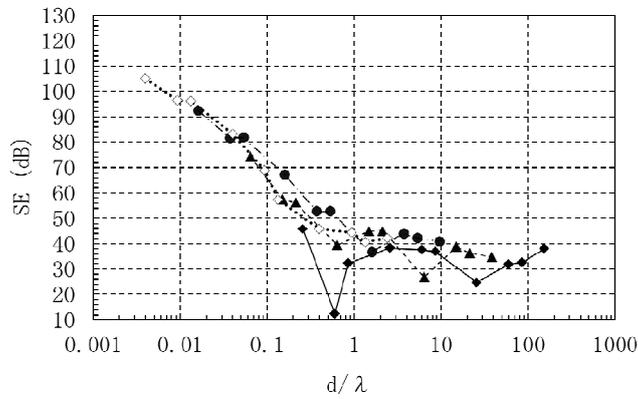


(b) 鉄板、重ね合せ、全長D=2560mm、重ね幅h1=50mm、開口P=0mm、導通

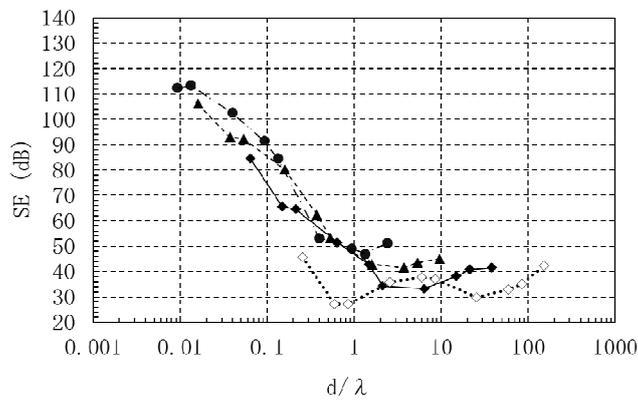


(c) 鉄板、重ね合せ、全長D=2560mm、重ね幅h1=50mm、開口P=0mm、70%絶縁

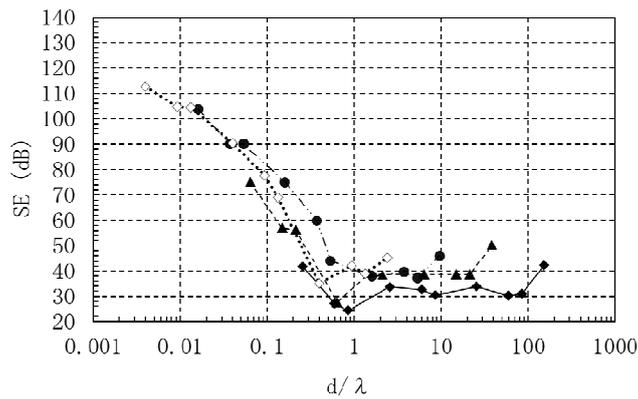
図2-22 スリット状接続構造のd/lambda 正規化SE値周波数特性算出結果



(d) 鉄板、重ね合せ、全長 $D=2560$ mm、重ね幅 $h_1=50$ mm、開口 $P=0$ mm、100%絶縁

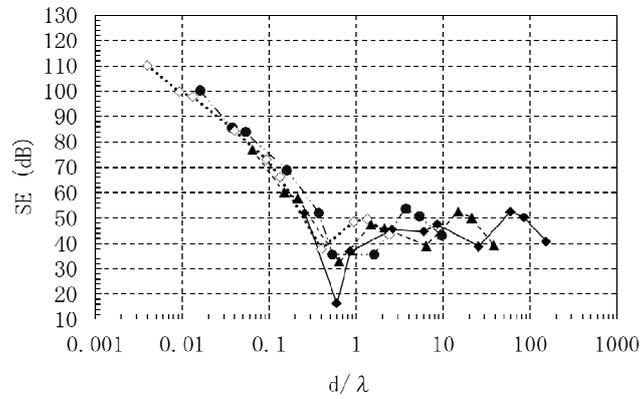


(e) 鉄板、重ね貼り、全長 $D=2560$ mm、重ね幅 $h_2=50$ mm、開口 $P=0$ mm、導通

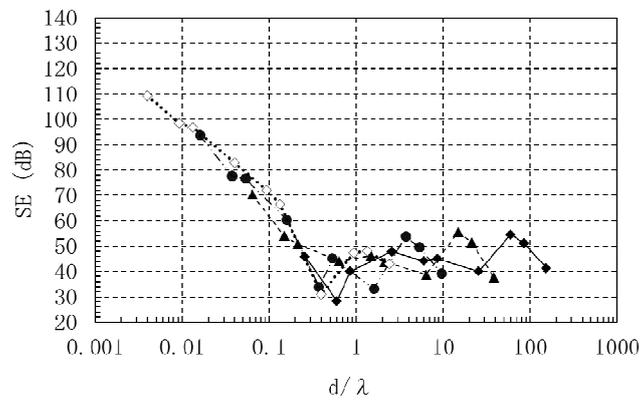


(f) 鉄板、重ね貼り、全長 $D=2560$ mm、重ね幅 $h_2=50$ mm、開口 $P=0$ mm、70%絶縁

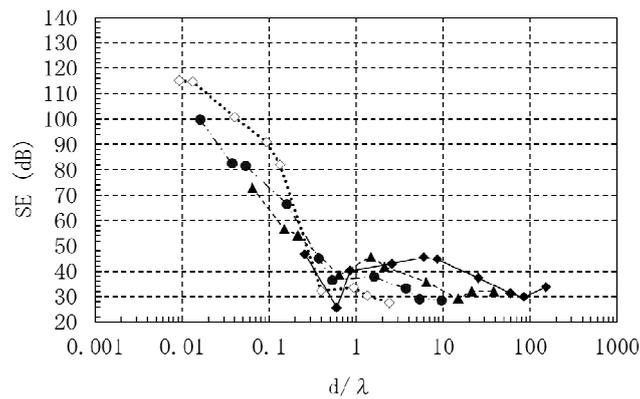
図2-22 スリット状接続構造の $d/\lambda$ 正規化SE値周波数特性算出結果 (つづき)



(g) 鉄板、つば付き、全長D=2560mm、重ね幅h3=50mm、開口P=0mm、70%絶縁

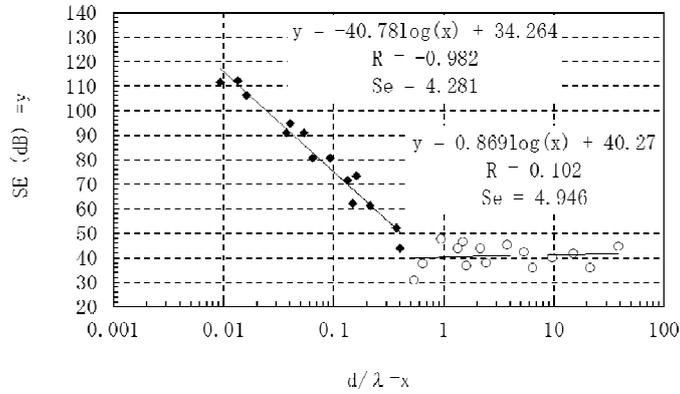


(h) 鉄板、つば付き、全長D=2560mm、重ね幅h3=50mm、開口P=0mm、100%絶縁

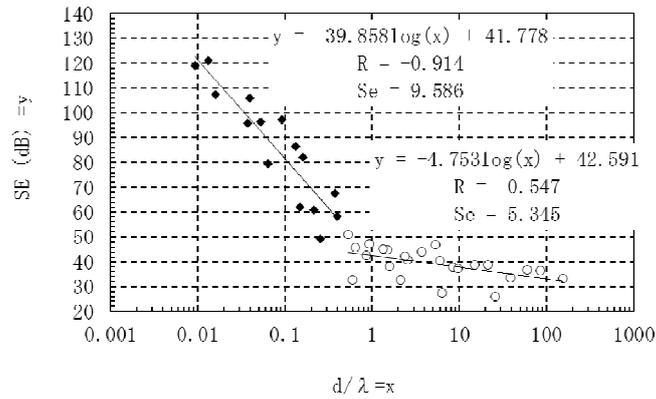


(i) 銅箔、重ね合せ、全長D=2560mm、重ね幅h1=50mm、開口P=2mm、70%絶縁

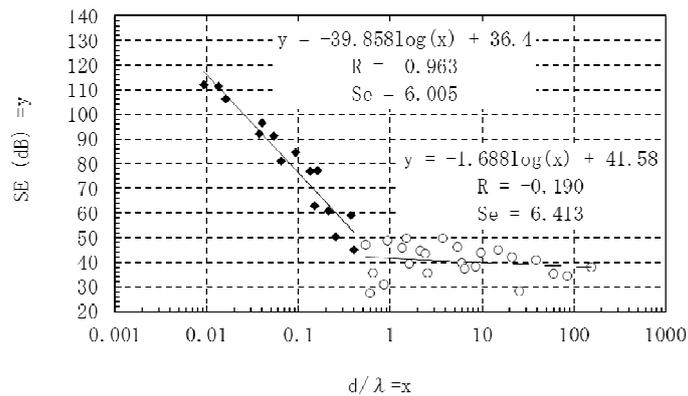
図2-22 スリット状接続構造の $d/\lambda$ 正規化SE値周波数特性算出結果 (つづき)



(a) 鉄板、重ね合せ、全長D=640mm、重ね幅h1=50mm、開口P=0mm、70%絶縁

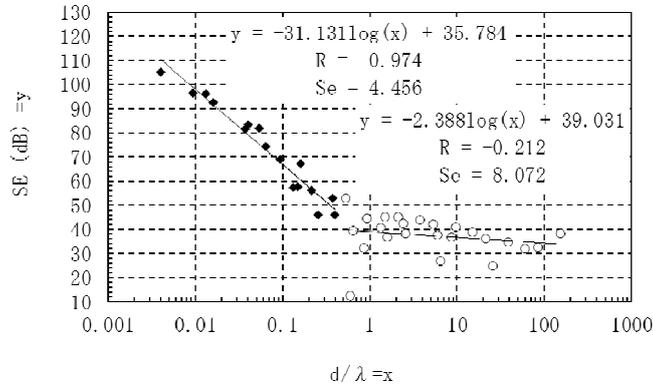


(b) 鉄板、重ね合せ、全長D=2560mm、重ね幅h1=50mm、開口P=0mm、導通

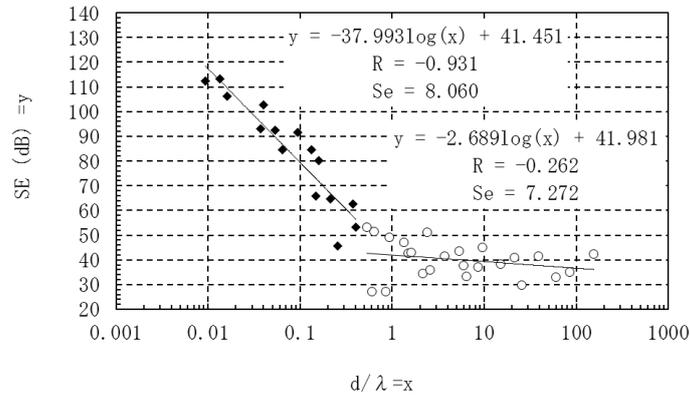


(c) 鉄板、重ね合せ、全長D=2560mm、重ね幅h1=50mm、開口P=0mm、70%絶縁

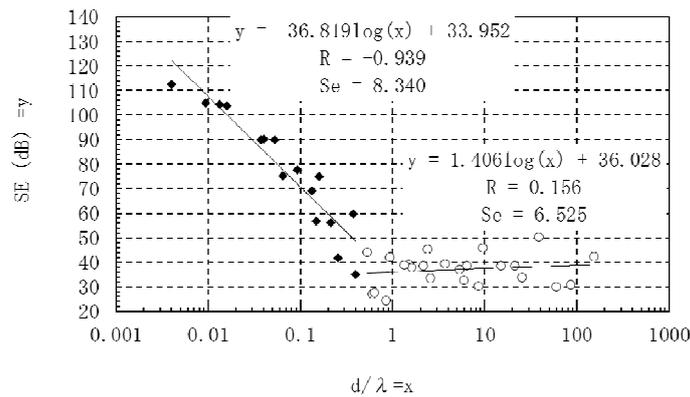
図2-23 スリット状接続構造の $d/\lambda$ 正規化SE値周波数特性に対する回帰結果



(d) 鉄板、重ね合せ、全長D=2560mm、重ね幅h1=50mm、開口P=0mm、100%絶縁

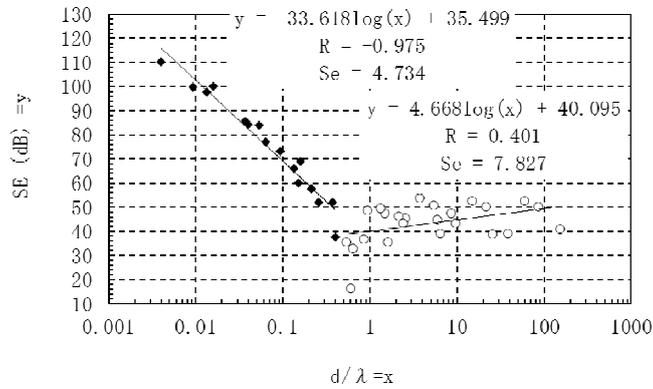


(e) 鉄板、重ね貼り、全長D=2560mm、重ね幅h2=50mm、開口P=0mm、導通

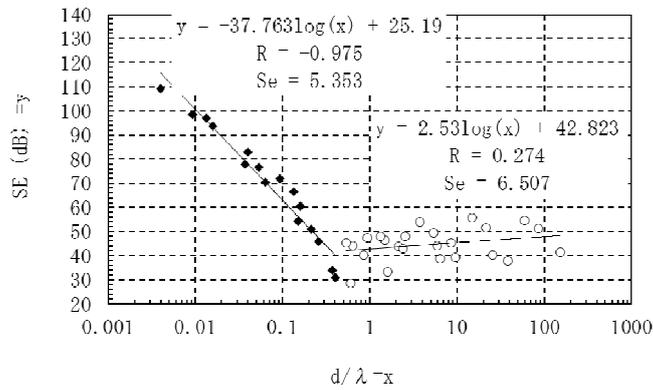


(f) 鉄板、重ね貼り、全長D=2560mm、重ね幅h2=50mm、開口P=0mm、70%絶縁

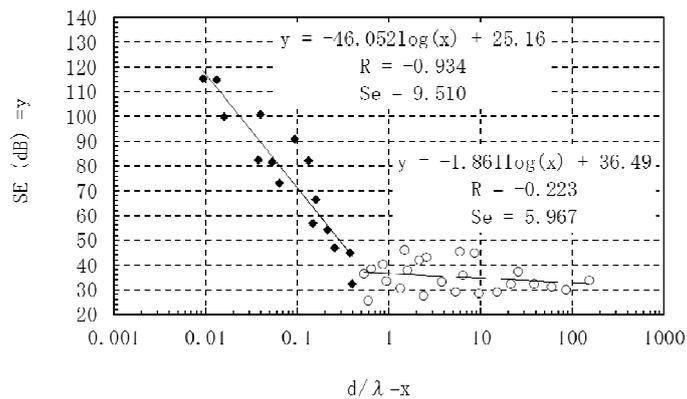
図2-23 スリット状接続構造のd/λ正規化SE値周波数特性に対する回帰結果(つづき)



(g) 鉄板、つば付き、全長D=2560mm、重ね幅h3=50mm、開口P=0mm、70%絶縁



(h) 鉄板、つば付き、全長D=2560mm、重ね幅h3=50mm、開口P=0mm、100%絶縁



(i) 銅箔、重ね合せ、全長D=2560mm、重ね幅h1=50mm、開口P=2mm、70%絶縁

図2-23 スリット状接続構造の $d/\lambda$ 正規化SE値周波数特性に対する回帰結果 (つづき)

#### 2.4.5.2 「重ね合せ接続」「重ね貼り接続」「つば付き接続」の差異

図2-24(a)～(d)に重ね幅50mmを基本とした各断面形状におけるSEを示す。なお、「重ね貼り接続」のみ「 $h_2=50\text{mm}$ 」と「 $h_2=100\text{mm}$ 」の両条件を示す。これは当該構造における「重ね幅50mm」の解釈が二通り考えられたためである。図2-24(b)と(c)をみると $h_2$ の違いによるSEに差異がほとんど認められない。この詳細については2.4.5.5で述べる。

図2-24(a)～(d)をみると、接続形状の差異にも係わらず、基本的に2.2節での仮定に則した傾向を示していることが確認できるとともに、「 $d/\lambda < 0.5$ 」の領域において、導通状態が同様であれば断面形状に係わらず同様なSEの傾向となり、これらの違いによる顕著な差異は認められなかった。また、「 $d/\lambda > 0.5$ 」の領域では回帰曲線の傾きに多少のばらつきはあるものの、いずれの断面形状であっても40dB前後の一定のSEを示した。これらの結果から、断面形状の違いによるSEの差異については特に考慮する必要はないと判断できる。なお、図2-24(d)中の「つば付き接続、導通状態」のみその他の条件とは明らかに異なるSEの傾向を示した。これは、同試験体の「つば」部分の製作において「正確な直角の折れ曲がり」を製作することが困難であり、結果として、ビスでの固定時に接続部の端部（つば先端または根元）が強く押し付けられたため、「スリット状の隙間」が構成出来なかったことによると考えられる。従って、以降の検討に対して当条件の結果は除外した。なお、実際の施工において、この状態が必ずしもこの傾向を示すということではなく、最悪の場合は他の構造と同様に「スリット状の隙間」となってしまうと考えられる。

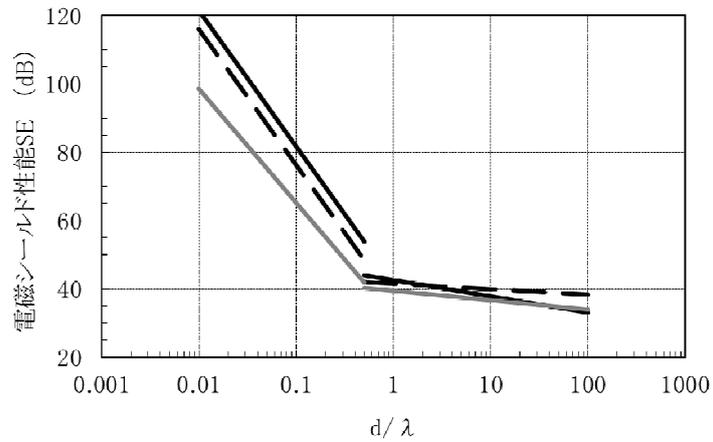
#### 2.4.5.3 材料間の導通状態の影響度

図2-24(a)～(d)に見るように、材料間の導通状態の差異にも係わらず、「つば付き接続、導通状態」を除いて、その他の条件では全て2.2節での仮定と同様の傾向を示すとともに、各試験体とも「 $d/\lambda < 0.5$ 」の領域において導通状態の程度に応じて、 $d/\lambda = 0.01$ で $SE=100\sim 120\text{dB}$ 、 $d/\lambda = 0.5$ 付近で $SE=40\sim 60\text{dB}$ 程度の違いが生じ、導通状態がこの領域のSEに影響を及ぼすことが示された。この時、回帰曲線の傾き $a_1$ はほぼ一定であり、 $y$ 切片( $b_1$ )のみ導

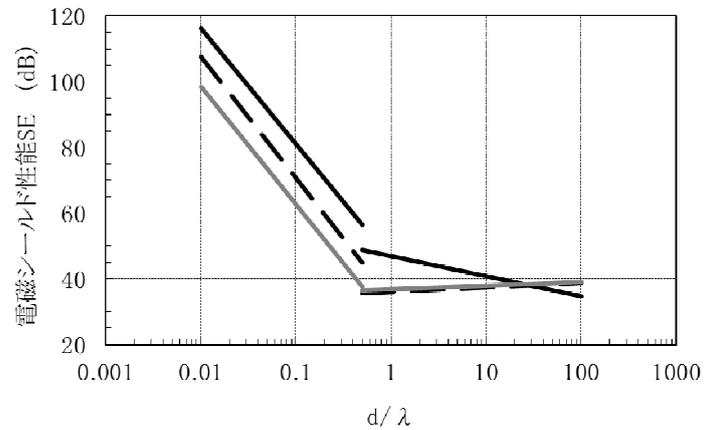
通状態により大きく変化した。

これに対して、「 $d/\lambda > 0.5$ 」の領域では、導通状態の差異によるSEの変化（a2、b2の変化）は認められなかった。

[図2-24凡例] 黒実線：導通、 黒破線：70%絶縁、 灰実線：100%絶縁

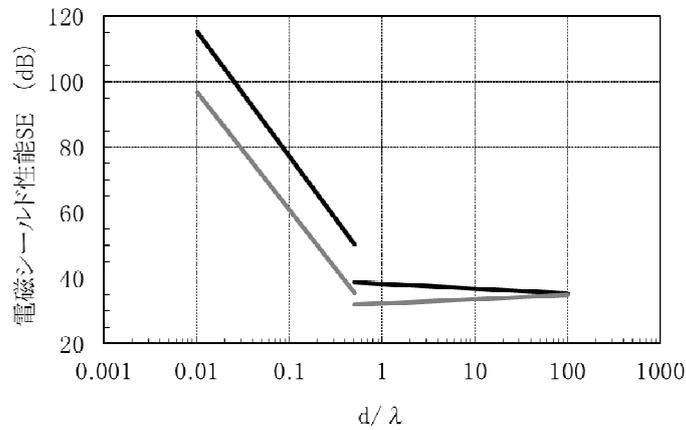


(a) 重ね合せ接続、 $D=2560\text{mm}$ 、 $h1=50\text{mm}$

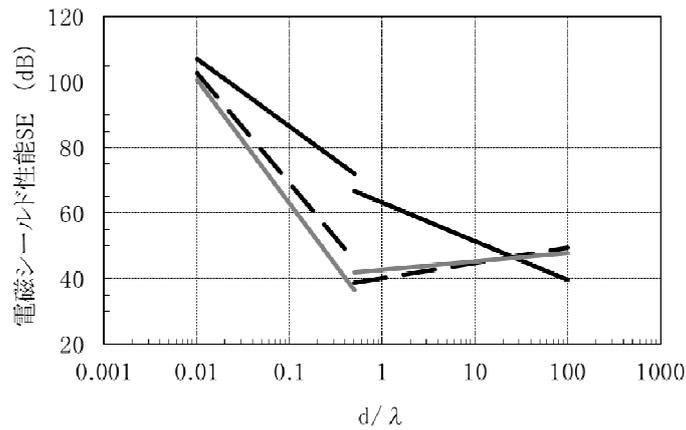


(b) 重ね貼り接続、 $D=2560\text{mm}$ 、 $h2=50\text{mm}$

図2-24 導通状態の影響度



(c) 重ね貼り接続、 $D=2560\text{mm}$ 、 $h_2=100\text{mm}$



(d) つば付き接続、 $D=2560\text{mm}$ 、 $h_3=50\text{mm}$

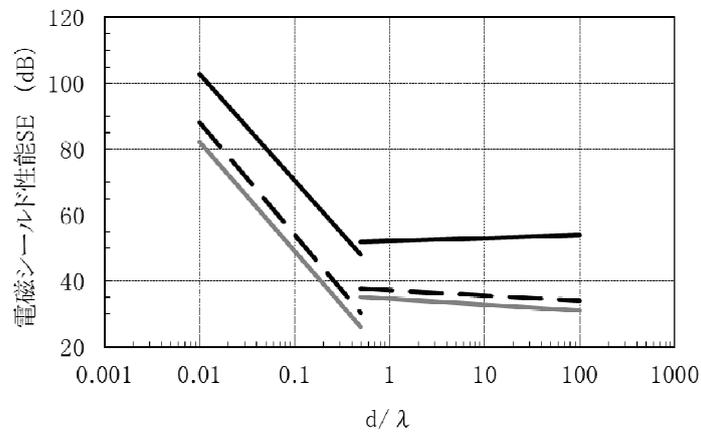
図2-24 導通状態の影響度 (つづき)

#### 2.4.5.4 開口Pの影響度

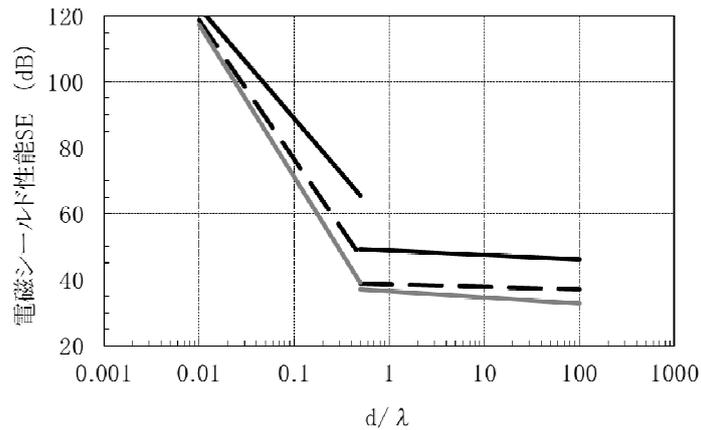
スリット状接続部において材料品質(材の撓みや歪み)や施工的な問題(施工精度)として発生する「開口部」の影響度をみるために、銅箔を用いて人為的に「隙間をもつ重ね合せ接続」を作成しその影響を検討した結果を図2-25(a)(b)に示す。これをみると、開口 $P=0\text{mm}\sim 2\text{mm}$ への拡大の影響は、「 $d/\lambda < 0.5$ 」および「 $d/\lambda > 0.5$ 」の両領域において最大20dB程度のSEの差異として示される。「 $d/\lambda < 0.5$ 」における回帰曲線の傾き $a_1$ 値は約-32.1~-33.8

とほぼ一定なのに対し、 $b_1$ 値は開口Pが大きくなるのに比して約38.1から約16.2へ減少し、隙間の拡大によるSEの低減効果が確認できる。この傾向は「 $d/\lambda > 0.5$ 」でも同様である（ $a_2 = -1.8 \sim 0.87$ 、 $b_2 = 52.1 \sim 34.7$ ）。開口Pは2.3節のスリット状開口の開口幅hに相当し、SEに対して2.3.1.6(6)で述べた同様の影響を及ぼしている。

[図2-25凡例] 黒実線：開口P=0mm、 黒破線：開口P=1mm、 灰実線：開口P=2mm



(a) 重ね合せ接続、D=2560mm、h1=50mm、100%絶縁



(b) 重ね合せ接続、D=2560mm、h1=50mm、70%絶縁

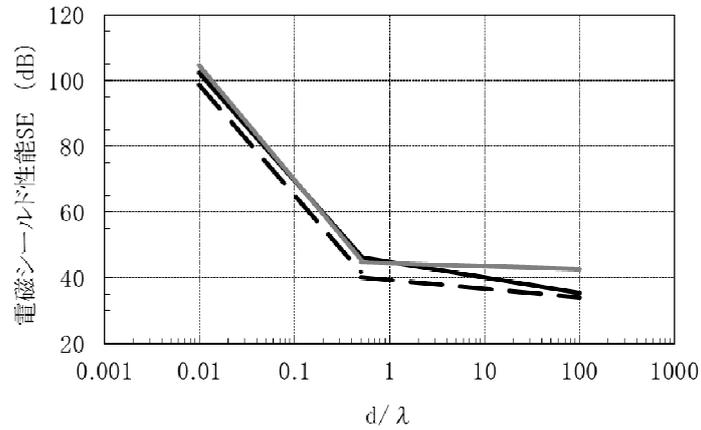
図2-25 スリット隙間の影響度

#### 2.4.5.5 材料間の重ね幅hの影響度

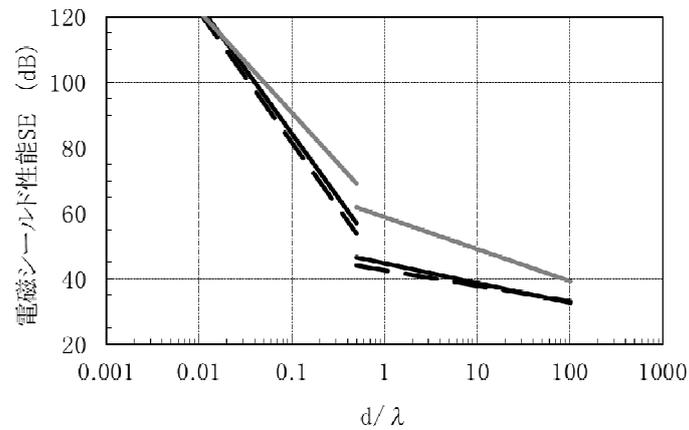
「重ね合せ接続」を対象として重ね幅h1の違いによるSEへの影響について図2-26(a)(b)に示す。これをみると、重ね幅の差異にも係わらず、全て2.2節での仮定と同様の傾向を示すとともに、重ね幅h1の違いによるSEへの顕著な変化は認められない。同様の結果は図2-24(b)(c)にもみられる。hをより極端に変化させた場合(h=25mm以下、または同100mm以上)はSEへの影響が見られる可能性はあるが、建築物の施工において一般的に採用されるであろうと思われる「重ね幅h=25~100mm程度」に限定すれば、この条件によるSEへの影響度は無視してよい。

2.2節で述べたようにスリット状接続構造では、短絡部を除いた材料の重ね部分は、理想的には平行平板の伝送線路と見ることができる。従って、重ね幅hは伝送線路長に相当するが、平行平板線路の伝搬減衰は無いことから上記が説明し得る。

[図2-26凡例] 黒実線：重ね幅h1=100mm、 黒破線：重ね幅h1=50mm、  
 灰実線：重ね幅h1=25mm



(a) 100%絶縁、D=2560mm



(b) 導通、D=2560mm

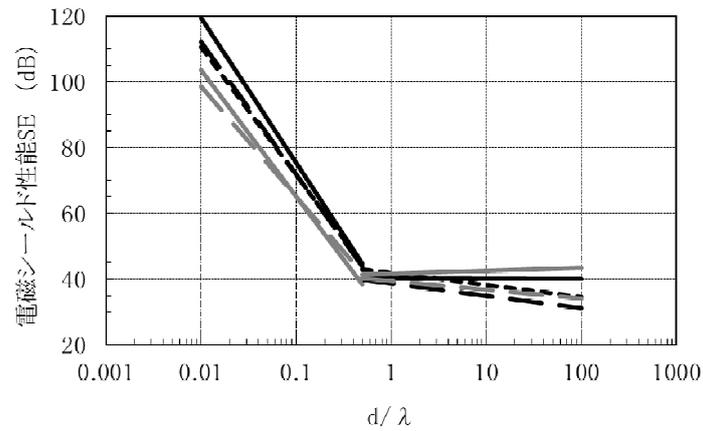
図2-26 スリット重ね幅の影響度

#### 2.4.5.6 全長Dの影響度

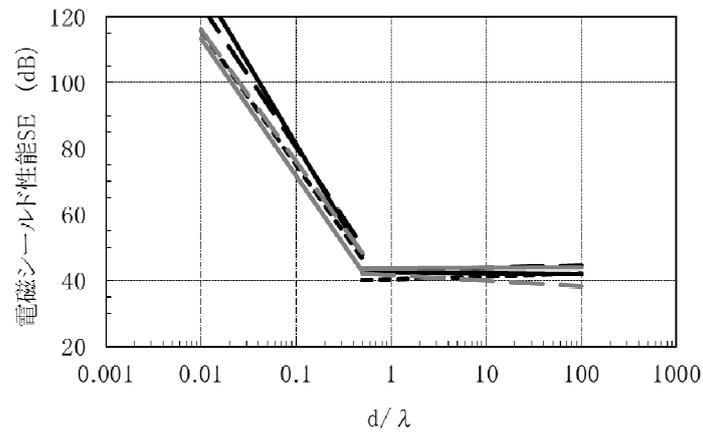
「重ね合せ接続」を対象として全長Dの違いによるSEへの影響について図2-27(a)～(c)に示す。これをみると、「 $d/\lambda < 0.5$ 」の領域において、全長Dの増加に反比例して回帰曲線の傾きa1が「約-46～-40」へ徐々に変化する傾向が把握された。それに対して「 $d/\lambda > 0.5$ 」の領域では回帰結果のばらつ

きはみられるものの全長Dとの相関は見られない。これは2.3.1.6(5)で述べた同様の影響である。

[図2-27凡例] 黒実線：全長D=160mm、 黒破線：全長D=320mm、 黒点線：全長D=640mm、  
 灰実線：全長D=1280mm、 灰破線：全長D=2560mm

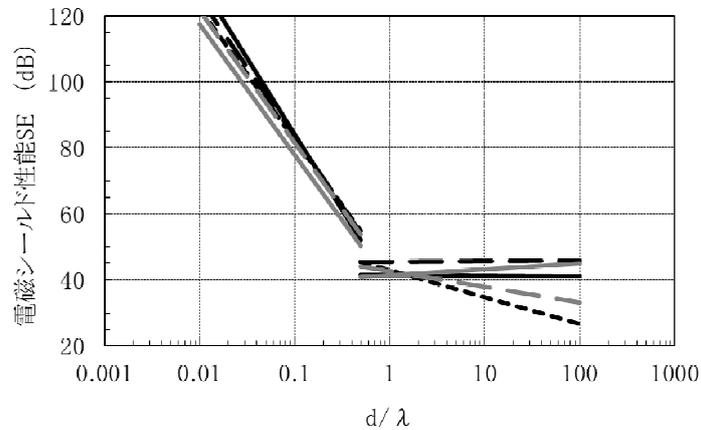


(a) 重ね合せ接続、重ね幅h1=50mm、100%絶縁



(b) 重ね合せ接続、重ね幅h1=50mm、70%絶縁

図2-27 スリット全長の影響度



(c) 重ね合せ接続、重ね幅 $h_1=50\text{mm}$ 、導通

図2-27 スリット全長の影響度 (つづき)

## 2.4.6 現実的なスリット状接続構造電磁シールド性能推定方法の提案

### 2.4.6.1 スリット状接続構造電磁シールド性能推定方法の流れ

以上の検討により、2.3.1.6 (7) に示したSEの回帰曲線を基本とした性能予測の考え方において、SEの増減へ強く影響するスリット状接続構造の構成要素は、

- ・当該構造の全長 (D)
- ・接続される材料間の導通・絶縁の状態
- ・当該構造施工時に発生する隙間の程度 (P)

である。

なお、当検討の結果、「重ね貼り接続」と、「導通状態」を除く「その他のつば付き接続」においても、「重ね合せ接続」に比して断面形状の違いによるSEの大きな差異は認められないので、「重ね合せ接続」と同一の条件設定でこれらのSEの推定が可能である。以下に、「重ね合せ接続」のデータを用いて、当該構造の電磁シールド性能予測方法の試案を示す。

#### 2.4.6.2 SEの周波数特性について

「 $d/\lambda < 0.5$ 」の領域ではSEと「 $d/\lambda$ 」とに相関（周波数特性）がみられ、これまでの検討で「全長」「導通状態」「隙間（開口）」に影響を受けることがわかった。

これに対して「 $d/\lambda > 0.5$ 」の領域では「 $d/\lambda$ 」の変化にSEは影響されない。さらに図2-24、図2-27にみられるように「全長」「導通状態」の差異にも影響を受けない。「 $d/\lambda > 0.5$ 」の領域における回帰曲線「 $y=a2*\log_{10}x+b2$ 」の係数 $a2$ は、多少のばらつきはあるものの殆ど一定のSE値となっており、2.2節で示したように、周波数特性を殆ど持たないと考えられるので、性能予測上は「 $a2=0$ （ゼロ）」と設定しても概ね差し支えない。従って、「 $d/\lambda > 0.5$ 」の領域での回帰曲線を「 $y=b2$ 」と簡略化でき、今回の測定条件における「隙間 $P=0\text{mm}$ 」時の $b2$ 平均値は「 $b2=43.7$ 」と算出される。

#### 2.4.6.3 全長Dによる補正

スリット状接続構造の全長DによるSEへの影響は、先に示したように「 $d/\lambda < 0.5$ 」の領域における回帰計算式「 $y=a1*\log_{10}x+b1$ 」の係数 $a1$ 値、すなわち「傾きの変化」として示される。実験した「100%部絶縁」「70%部絶縁」「全て導通」の全条件の係数 $a1$ と、全長Dの相関を求めた結果を図2-28に示す。また同図中に回帰式と相関係数 $r$ を示す。ここで、全長D（x軸）は電波の透過部位の大きさ（長さ）を示す値であるので、当該部位全体から放射される全エネルギー量として捉えることが妥当と考えられるため、全長D（x軸）は対数軸とした。同図より、回帰式「 $a1=6.641*\log_{10}D-59.3$ 」にて全長D(mm)の変化に対する係数 $a1$ の値が設定される。なお、相関係数 $|R|$ は「0.741」となり、自由度28（=標本数-2）における5%有意水準「0.361」を上回り「有意な相関がある」と判断される。

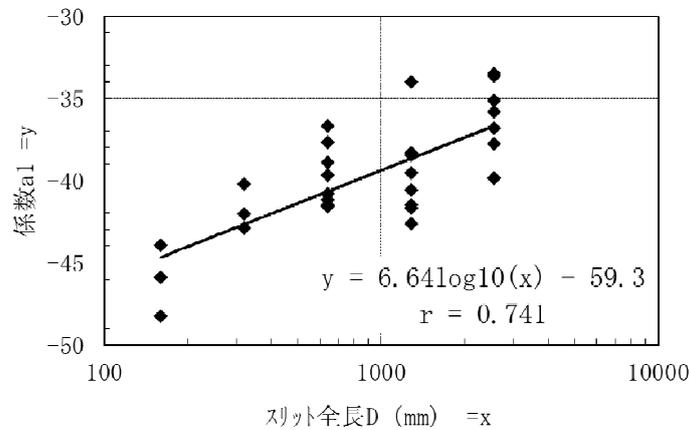


図2-28 スリット全長Dと係数a1の相関

#### 2.4.6.4 材料の導通状態による補正

スリット状接続構造の材料間導通状態によるSEへの影響は、「 $d/\lambda < 0.5$ 」の領域における回帰計算「 $y = a1 * \log_{10}x + b1$ 」の係数b1値、すなわち「y切片の変化」として示される。材料導通状態を示す「スリット状接続を構成している部位の材料間全接触面積に対する電氣的に絶縁状態と推定される面積率S(%)」と、係数b1の回帰結果を図2-29に示す。同結果から、回帰式「 $b1 = -0.146 * S + 43.0$ 」にて絶縁状態接触面積率S(%)に対する係数b1の値を得る。相関係数|R|は「0.902」となり、自由度8における5%有意水準「0.632」を上回り「有意な相関がある」と判断される。

なお、建築現場での施工で一般的にどのようなSの値をとるかについては更なる情報収集が必要である。しかし、性能設計上は「S=100」と置くことで、最悪条件でのb1値を得ることができる。これは、性能上「安全側の設計」を行うことを意味する。

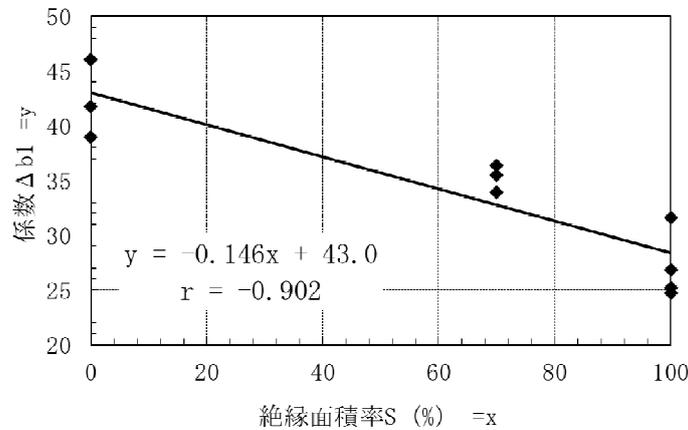


図2-29 スリット導通状態と係数b1の相関

#### 2.4.6.5 隙間の程度による補正

スリット状接続構造の隙間の程度によるSEへの影響は、「 $d/\lambda < 0.5$ 」の領域における回帰曲線「 $y=a1*\log_{10}x+b1$ 」の係数b1の変化量 $\Delta b12$ 、および「 $d/\lambda > 0.5$ 」の領域における回帰曲線「 $y=b2$ 」の係数b2の変化量 $\Delta b22$ として示される。開口P(mm)と $\Delta b12$ 、および $\Delta b22$ との相関をそれぞれ図2-30、図2-31に示す。これらの回帰計算から、「 $b12=-13.1*P-2.14$ 」および「 $\Delta b22=-7.44*P-1.70$ 」が求まる。相関係数|r|は「0.940」および「0.888」となり、自由度3における5%有意水準「0.878」を上回り「有意な相関がある」と判断される。なお、「P=0」の時、回帰式では、 $\Delta b12=-2.14$ 、 $\Delta b22=-1.70$ となっているが、本来は「P=0」に対する変化量を求めたものであるので、「P=0」の場合は「 $\Delta b12=\Delta b22=0$ 」と置くのが妥当である。

「隙間の程度」について、実際の施工時にどのような値が想定されるかについての既往の報告は存在しない。これまでの同様構造に対する現場での施工管理経験に基づくと、当該部位に起こり得る一般的な隙間量は「適切な施工管理が行われた状態で0~1mm程度」である。従って、理想的な施工が行われる場合は「P=0mm」、実際に起こり得る隙間の最大値として「P=1mm」、安全率をより高く設定する場合は「P=2mm」程度に設定して性能値を推定することが性能設計上好ましい。

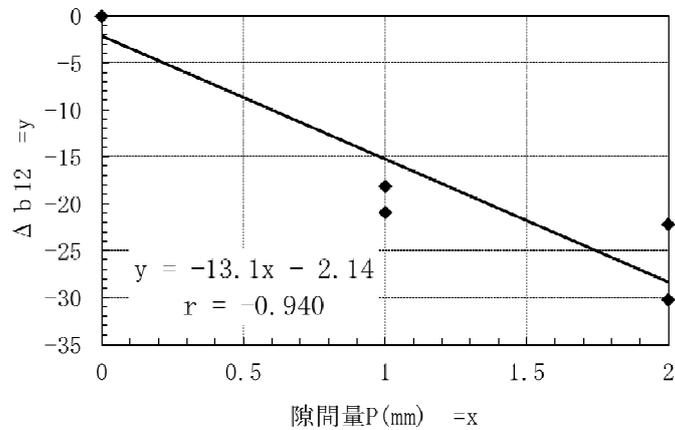


図2-30 スリット開口状態と係数 $\Delta b_{12}$ の相関

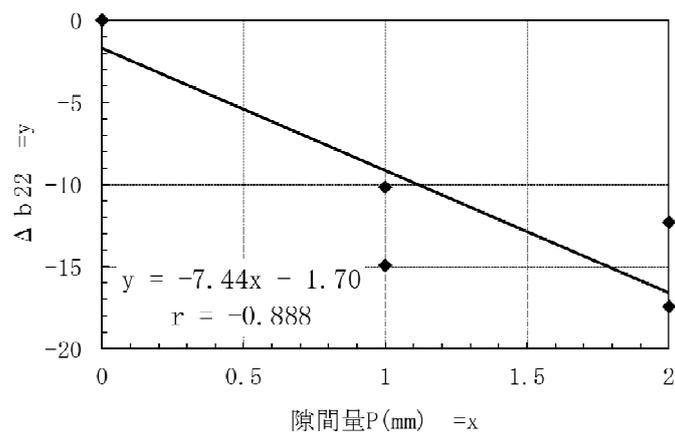


図2-31 スリット開口状態と係数 $\Delta b_{22}$ の相関

#### 2.4.6.6 スリット状接続構造のSE予測方法と計算例

上記の各検討結果を整理すると、表2-2に示す手順でSEを推定することができる。つまり、「 $d/\lambda < 0.5$ 」「 $d/\lambda > 0.5$ 」の領域別に、それぞれ表中の基本式(2-2)、(2-3)に対して全長、導通状態、隙間(開口)の影響度を加味してSE1(「 $d/\lambda < 0.5$ 」におけるSE)、SE2(「 $d/\lambda > 0.5$ 」におけるSE)を求める。

表2-2 スリット状接続構造SEの予測方法

(a)  $d/\lambda < 0.5$ の領域

領域 検討項目	$d/\lambda < 0.5$	備考
基本式	$SE1 = a1 * \log_{10}(d/\lambda) + (b1 + \Delta b12) \dots (2-2)$ ここで、SE1：電磁シールド性能(dB) a1：係数(傾き) d：スリットの固定間隔(mm) $\lambda$ ：波長(mm) b1：係数(y切片) $\Delta b12$ ：補正值(隙間の影響)	$\lambda = (3 * 10^5) / f$ ここで、 $\lambda$ ：波長(mm) f：周波数(MHz)
周波数特性	(周波数特性有り)	
全長	(図2-28より) $a1 = 6.641 * \log_{10} D - 59.3 \dots (2-3)$ ここで、D：全長(mm)	
導通状態	(図2-29より) $b1 = -0.146 * S + 43.0 \dots (2-4)$ ここで、S：重ね部の絶縁面積率(%)	実際のS値については不明。「S=100」と設定することで最も安全性の高い値となる。
隙間(開口)	(図2-30より) $\Delta b12 = -13.1 * P - 2.14 \dots (2-5)$ ここで、P：隙間量(mm)	「P=0」の時、 $\Delta b12 = \Delta b22 = 0$ とする。
SEの予測	式(2-2)へ、(2-3)(2-4)(2-5)にて求めた値を導入	

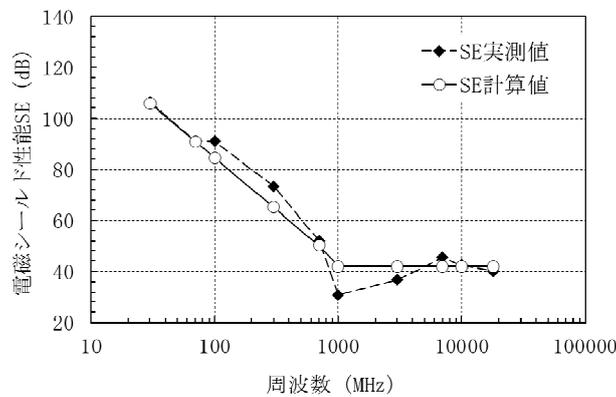
(b)  $d/\lambda > 0.5$ の領域

領域 検討項目	$d/\lambda > 0.5$	備考
基本式	$SE2 = a2 * \log_{10}(d/\lambda) + (b2 + \Delta b22) \dots (2-6)$ ここで、SE2：電磁シールド性能(dB) a2：係数(傾き) d：スリットの固定間隔(mm) $\lambda$ ：波長(mm) b2：係数(y切片) $\Delta b22$ ：補正值(隙間の影響)	$\lambda = (3 * 10^5) / f$ ここで、 $\lambda$ ：波長(mm) f：周波数(MHz)
周波数特性	周波数特性無し → $a2 = 0$ ∴ 式(2)を、 $SE2 = b2 + \Delta b22$ と簡略化 また、隙間量P=0mmの時に「 $b2 = 43.7$ 」より $SE2 = 43.7 + \Delta b22 \dots (2-7)$	
全長	(影響無し)	
導通状態	(影響無し)	
隙間(開口)	(図2-31より) $\Delta b22 = -7.44 * P - 1.70 \dots (2-8)$ ここで、P：隙間量(mm)	「P=0」の時、 $\Delta b12 = \Delta b22 = 0$ とする。
SEの予測	式(2-7)へ、(2-8)にて求めた値を導入	

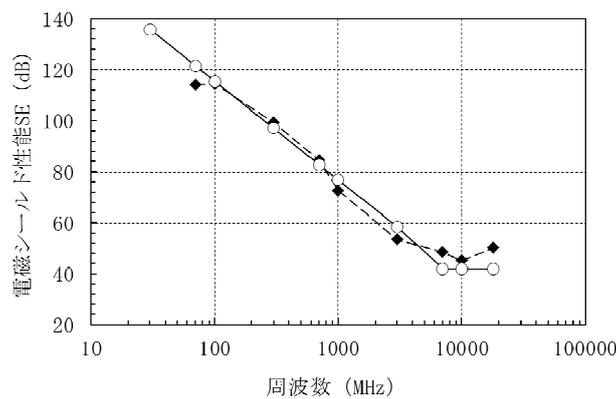
例として、下記条件でのSE予測と測定値との比較を試みる。

- 例1：全長D=640mm、重ね幅=50mm(予測に影響しない)、個々のスリット長d=160mm、絶縁面積比率S=70%、隙間P=0mm
- 例2：全長D=1280mm、重ね幅=50mm(予測に影響しない)、個々のスリット長d=40mm、絶縁面積比率S=00%、隙間P=0mm

その結果を図2-32(a)～(b)に示す。両者とも、測定値と予測値とは、周波数特性、SE値において良好な一致が見られ、当予測方法の適切性が確認された。



(a) 例1：重ね合せ接続、全長D=640mm、重ね幅h1=50mm、個々スリット長d=160mm、70%絶縁、隙間0mm



(b) 例2：重ね合せ接続、全長D=1280mm、重ね幅h1=50mm、個々スリット長d=40mm、導通、隙間0mm

図2-32 SE予測値と測定値の比較例 (つづき)

#### 2.4.7 まとめ

スリット状接続構造のSEの系統的な把握、およびその結果に基づくSE予測法に関する検討の結果、以下の結論を得た。

- 1) 「重ね合せ」「重ね貼り」「つば付き」の各断面形状の違いによるSEの差異は認められない。なお、「つば付き」の「導通状態」でのSEのみ、他の条件と異なる結果を示した。これは、その断面形状において接続部をビス止めることで接続部の端部が強く押し付けられることで「スリット状」とはならなかったためである。
- 2) スリット状接続時の両材料間の導通状態が、「 $d/\lambda < 0.5$ 」の領域においてSEの20dB程度の差異として影響することが示された。「 $d/\lambda > 0.5$ 」の領域ではこの様な差異は認められない。
- 3) スリット状接続時の両材料間の隙間の有無およびその程度が、「 $d/\lambda < 0.5$ 」および「 $d/\lambda > 0.5$ 」の領域においてSEの20dB程度の差異として影響する。
- 4) スリット状接続時の両材料の重ね幅 $h$ の違いは、建築物において最も適用される可能性の高い $h=25\sim 100\text{mm}$ の範囲においてSEへ影響しない。なお、 $h$ をより極端に増減させた場合の影響度は把握していない。
- 5) スリット状接続時の全長 $D$ の違いにより、「 $d/\lambda < 0.5$ 」の領域においてSEの差異として把握された。この場合、「 $d/\lambda$ 」値の減少に反比例してSEが上昇する度合い（回帰計算における「傾き」）の差として示された。
- 6) 2)～5)の結果を基に、「全長」「材料の導通状態」「隙間の程度」を可変事項としてSEの予測方法について提案し、予測結果と実測値との良好な相関を得た。

### 2.5 スリット状接続構造における電波透過時の位相回転に関する検討<sup>23)～26)</sup>

#### 2.5.1 検討の趣旨

第3章「スリット状接続により構築された電磁シールド室の遮へい性能予測技術」の開発に対して、当該部位での透過減衰量に加えて、電界位相変化量の性状を把握することが必要である。この位相変化量を把握することを目的とした実験的検討を行った。

図2-9に示す、スリット状開口に対する受信位置の変化に伴う受信レベルおよびレベル差SEの分布性状の結果例に見るように、スリット状構造では建築的な寸法の範囲ではほぼ一様と思われる透過減衰量を示す。これに対して、室空間を対象とした予測方法の検討において、対象になるとと思われる周波数域の波長 ( $f=30\text{MHz}\sim 1\text{GHz} \rightarrow \lambda =10\text{m}\sim 0.3\text{m}$ ) では、入射角度の変化による位相量への影響度を把握する必要がある。

## 2.5.2 実験の概要

実験の概要を図2-33に示す。実験は、2.3節と同一施設で行った。亜鉛メッキ鉄板製 (0.3mm厚) を用いて製作した「重ね合せ接続」の各パラメータは下記の通りである。現実の施工において最も一般的な仕様と考えられるスリット固定間隔、および重ね幅の条件に限定した。重ね部の導通状態は「導通」であり、絶縁材の挿入はしていない。また、対象周波数 $f$ は、300MHz、700MHz、1GHzとした。

- ・スリット全長 :  $D=2560\text{mm}$
- ・個々のスリット長 :  $d=160\text{mm}$ 、 $320\text{mm}$
- ・重ね幅 :  $h1=50\text{mm}$ 、 $75\text{mm}$ 、 $100\text{mm}$

図2-33に示すように、スリット状接続に対して、当該構造の中央点から3000mm離れた水平面内の地点より、入射角度をそれぞれ  $\theta =0^\circ$  (試験体正面からの入射)、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$  と発信位置を変化させて、垂直偏波にて設置したダイポールアンテナを用いて試験用電波を発信した。各入射角度において、スリット状接続の透過側近傍 (試験体表面より約30mmの距離) において、受信用微小ダイポールアンテナを垂直偏波としてスリットの正面に設置し、移動量2560mmにてその全長に沿って一定の速度で移動させながら、ネットワークアナライザを用いて位相量、振幅量を測定した。有効寸法H2000mm×W3000mm試験体を設置しない条件 (=基準値) においても同一の測定を実施し、両者の結果を比較して位相変化量を求めた。

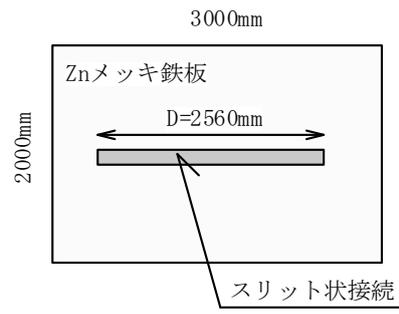
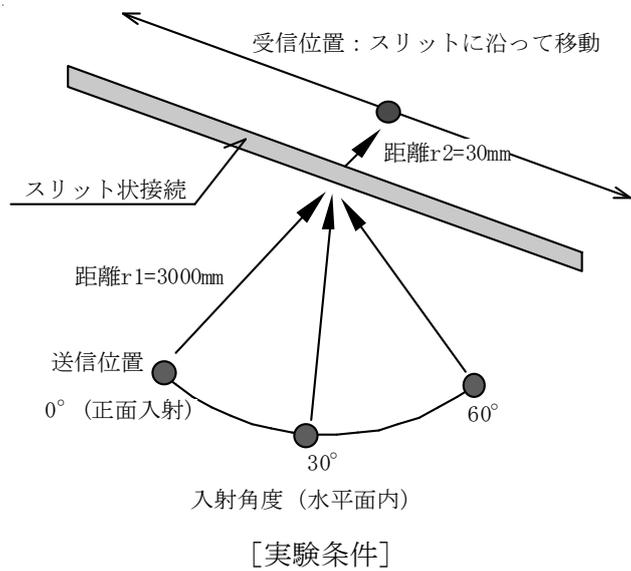
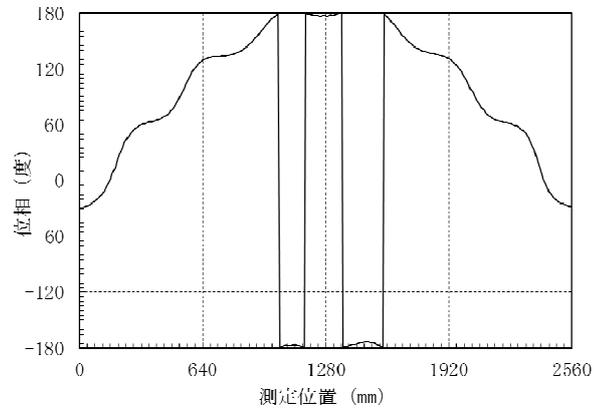


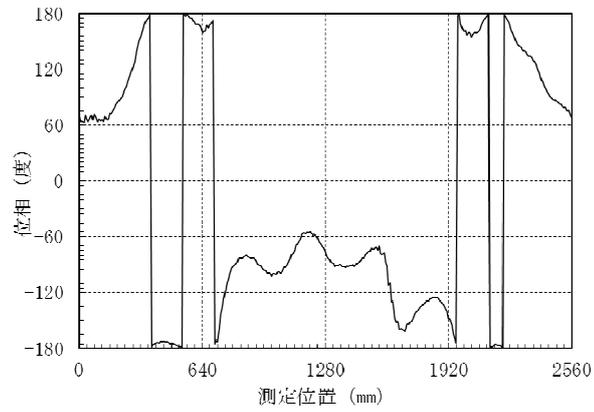
図2-33 スリット状接続における電界位相変化に関する実験の概要

### 2.5.3 実験結果

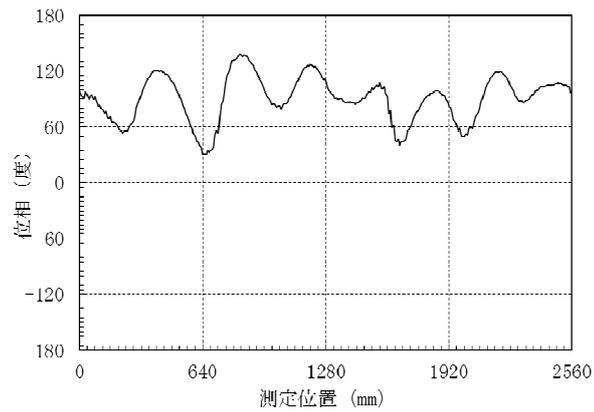
測定値の例を図2-34、図2-35に示す。なお、同図横軸の測定位置「0mm」は $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 入射における送信アンテナに近い側のスリット端、同様に「2560mm」は遠い側のスリット端を示す。



[基準値 (A) ]

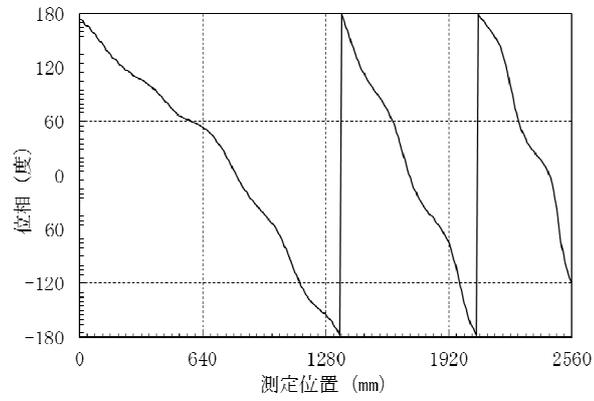


[測定値 (B) ]

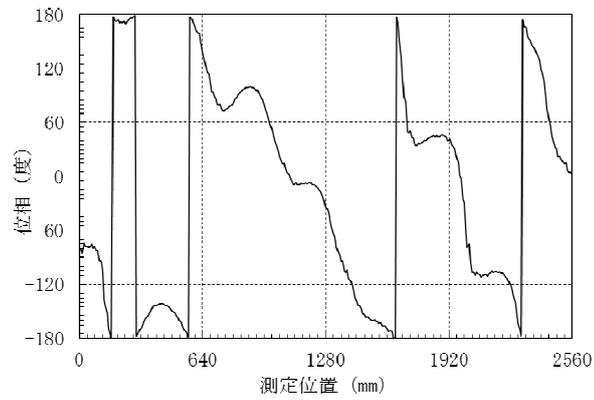


[位相変化 (=B-A) ]

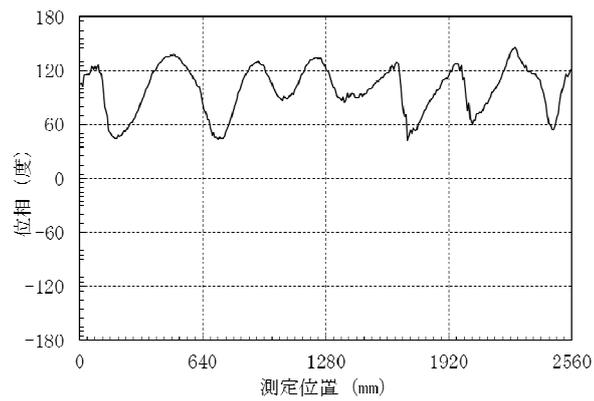
図2-34 スリット状接続での電波透過に対する位相変化  
( $d=160\text{mm}$ 、 $h_1=50\text{mm}$ 、 $f=700\text{MHz}$ 、入射角度 $0^\circ$ )



[基準値 (A) ]



[測定値 (B) ]



[位相変化 (=B-A) ]

図2-35 スリット状接続での電波透過に対する位相変化  
( $d=160\text{mm}$ 、 $h_1=50\text{mm}$ 、 $f=700\text{MHz}$ 、入射角度 $30^\circ$ )

なお、位相変化量に対する入射角度は、図2-36に示すように、受信アンテナ位置直前のスリットと送信点との位置関係から決定した。

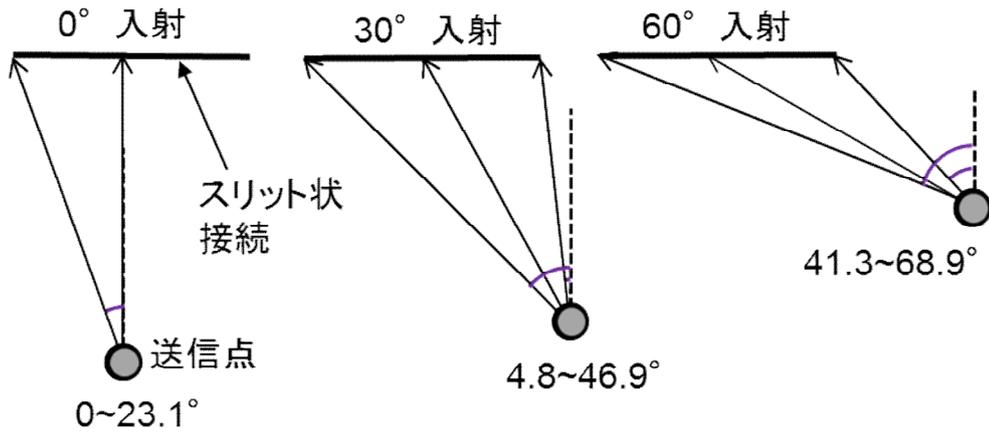
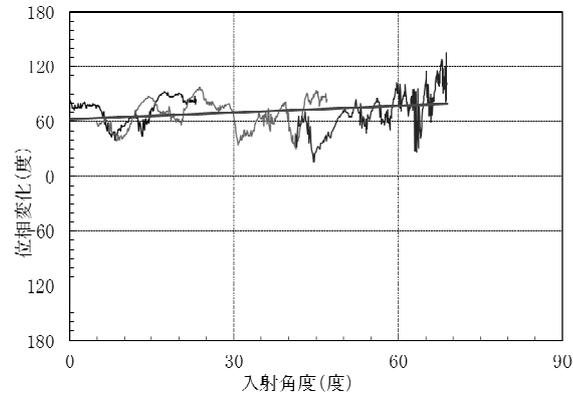
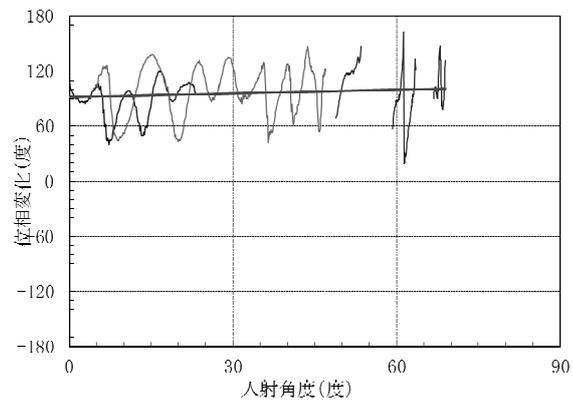


図2-36 スリットへの入射角度の設定

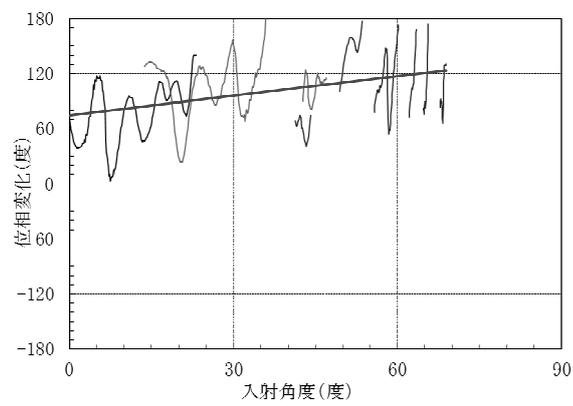
全ての条件において位相量を測定し、周波数別の位相変化量を求め、スリットへの入射角度と位相変化量の関係として整理した結果の例を図2-37に示す。同時に、図中に一次回帰曲線計算結果も示した。回帰を「一次」とした理由は、入射角度によって位相変化が生じるのは、個々のスリット長を固定した場合、重ね合わせ部を斜めに伝搬することによる伝搬路長の変化が主要因であると考えたことによる。



(a) 300MHz



(b) 700MHz



(c) 1GHz

図2-37 位相変化の入射角度特性 (d=160mm、h1=50mm)

## 2.5.4 位相回転量に関する解析的検討

次に、当該部位の電波透過性状の数値解析を、FDTD法により行った。全体を図2-38のようなモデルと考え、そのうちの「シールド材重ね部 $h$ 」、「スリット固定間隔 $d$ 」に対して、図2-39のようにモデル化する。従って、当解析では図2-38の断面図に示すような、電波の入射と透過における伝搬方向の（直角の）変化等による位相回転への影響は含まれていない。

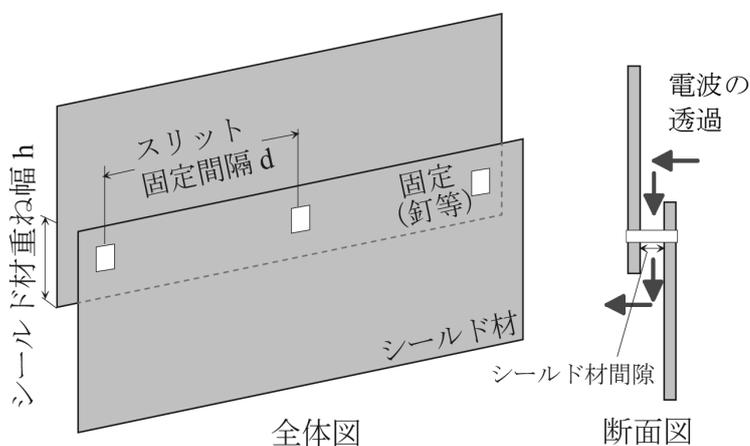


図2-38 スリット状接続構造全体のモデル化

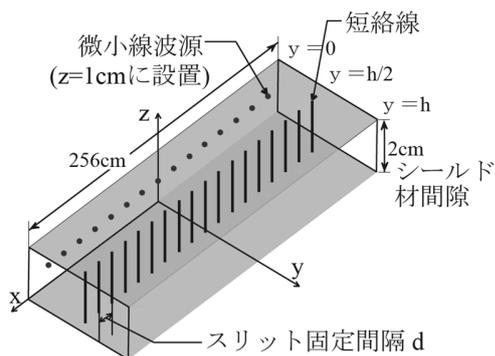


図2-39 スリット状接続部の解析モデル

図2-39に示すように、スリット状接続を構成する2枚の導体板を、 $xy$ 平面に平

行で $z=0\text{mm}$ および $20\text{mm}$ の位置にそれぞれ配置した。従って、 $z$ 軸方向が平行の導体板の隙間となり、本検討では計算機の性能上の制約から当該隙間を $20\text{mm}$ とした。本解析においては、スリット状接続内の電波伝搬特性が、シールド材間隙すなわち導体板間隔に依存しないことを確認している<sup>21)</sup>。スリット状接続の全長は $2560\text{mm}$ であり、 $y=0\text{mm}$ および $h\text{mm}$ の $xz$ 平面が電波の入射・透過方向となる。また、 $x=\pm 1280\text{mm}$ の $yz$ 平面はPML吸収境界面（Perfectly Matched Layer、解析境界に仮想的な吸収媒質を設置して入射波を減衰させる方法）とした。 $y=(h/2)\text{mm}$ に2枚の導体板を短絡する短絡線を間隔 $d\text{mm}$ で配置した。

当該構造への入射波として、 $y=0\text{mm}$ 、 $z=10\text{mm}$ の位置に $z$ 軸偏波の微小線波源を $x$ 軸方向に等間隔に63個配置した。各微小線波源の位相は全て同一（ $0^\circ$ 入射を模擬）とし、周波数は $700\text{MHz}$ とした。

スリット固定間隔 $d=160\text{mm}$ で固定、スリット重ね幅 $h=50\text{mm}$ 、 $76\text{mm}$ 、 $100\text{mm}$ としたときの、解析結果と実験結果を併せて図2-40に示す。

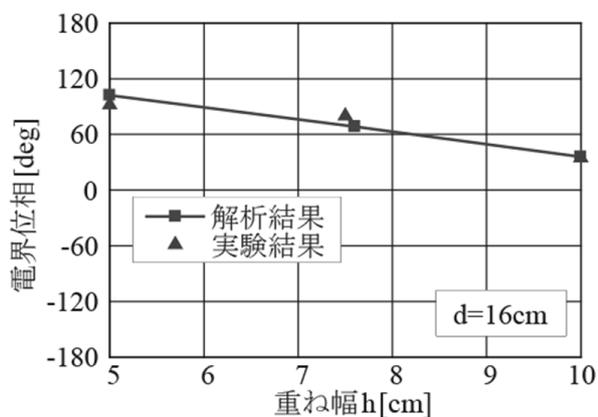


図2-40 位相変化（ $0^\circ$ 入射、重ね幅変化）

解析結果に一律「 $+31.3^\circ$ の補正」をかけることで、図2-40のように両者の傾向と値は一致する。重ね幅の変化に関わらず一律の補正をかけているので、位相量と重ね幅には、一定の相関があることが解析値と実験値の両者で示されている。なお、「 $+31.3^\circ$ の補正」は、先に示した電波の入射と透過における伝搬方向の（直角の）変化等による影響及び「スリット固定間隔 $d$ 」による影響と考えられ

る。

次に、スリット重ね幅 $h$ が50mm、76mm、100mmのそれぞれの場合について、スリット固定間隔 $d$ を8mm、16mm、32mmとしたときの結果を図2-41に示す（「+31.3°」の補正なし）。同図をみると、スリット重ね幅と短絡間隔の変化に比例して位相が変化することが示されており、電界位相変化はスリット固定間隔 $d$ およびスリット重ね幅 $h$ と相関があることが示された。

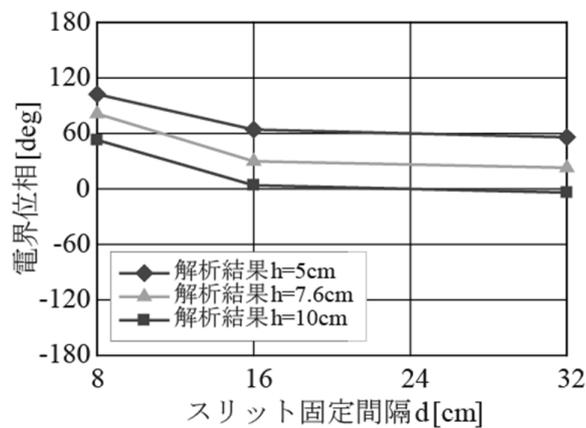


図2-41 位相変化 ( $0^\circ$  入射、スリット固定間隔変化)

これらの実験および解析的検討により、位相変化量はスリット固定間隔 $d_1$ 、重ね幅 $h_1$ 、周波数 $f$ の各影響を加味して求められることがわかり、この結果を基に、後述のシミュレーションシステムにおける、スリット状接続構造からの透過電波の追跡における位相回転量の基本的なデータとして入力した（スリット状接続部における「位相変化量」計算条件としてのデータ）。

## 2.6 本章のまとめ

本章では、スリット状接続構造の電磁シールド性能の定式化を進めるにあたり、まずその基礎検討として「スリット状開口構造」の電波漏洩性状（SE）をスロットアンテナからの電波放射としてその周波数特性（図2-2）を推定するとともに、スリット状開口モデルによる測定を行い、当該構造各構成要素のSEへの基本的な影響度とその周波数特

性を把握した。これを踏まえて、「スリット状接続構造」に対する測定における各種の必要な条件設定に関する知見を得た。また、「スリット状開口構造」に対するFDTD法による数値解析を行い、本実験的検討の有効性を確認した。これらの検討の結果、スロットアンテナからの電波放射による周波数特性の基本設定の適切性を把握した。

次に、上記で得られた知見を基本として、「スリット状接続構造」の性能に影響すると思われる当該構造構成要素を基準とする各種パラメータとして、「全長」「個々のスリット長」「スリット状接続構造を構成する両材料間の導通状態」「個々のスリットにおける開口（隙間）の状態」を設定し、それぞれの要素の電磁シールド性能への影響度を把握し、これらをパラメータとしたスリット状接続構造の電磁シールド性能推定式を導出し、当該予測式による予測結果と測定値との整合性を確認した。

最後にスリット状接続構造に電波が入射し透過するときの位相変化について実験的に検討した。これは、後述の「スリット状接続により構築された電磁シールド室の遮へい性能予測技術の開発」に対して、当該部位での透過減衰量に加えて、電界位相変化量を計算条件としてデータ入力することが必要となることによるものである。検討の結果、スリット状接続を透過する電波の位相変化量は、「スリット固定間隔」、「材料の重ね幅」、「周波数（波長）」の変化による影響を受けることが示された。このことは、解析的検討によっても示された。また、その回転量には、部位に入射し透過する際の伝搬方向の変化等も影響していることが推測された。

## [第2章 参考文献]

- 1) W. Wallyn, D. De Zutter, E. Laermans : Fast Shielding Effectiveness Prediction for Realistic Rectangular Enclosures, IEEE Trans. EMC, Vol. 45, No. 4, pp. 639-643, 2003.
- 2) 畠山賢一、蔦岡孝則、三枝健二：初めて学ぶ電磁遮へい講座、科学技術出版、2013年
- 3) 佐川祐一郎、宮崎弘志、吉野涼二：電磁環境実験室、大成建設技術研究所報、第30号、pp. 17-20、1997年
- 4) 影山健二：材料の電磁シールド性能測定法、日本建築学会電磁環境小委員会第4回シン

ポジウム資料、2001.11

- 5) MIL-STD-285 : Military Standard Attenuation Measurements for Enclosures、  
Electromagnetic Shielding、for Electronic Test Purposes、 Method of 1956
- 6) 例えば、清水康敬、杉浦行：「電磁妨害波の基本と対策」電子情報通信学会、1995年
- 7) K.S.Yee : Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving  
Maxwell' s Equations in Isotropic Media、IEEE Trans. Antennas Propagat.、14、4、  
pp. 302-307、1966.
- 8 ) G.Mur : Absorbing boundary conditions for the finite-difference  
approximation of the time-domain electromagnetic-field equation、IEEE Trans.  
Electromagnetic Compat.、 EMC-23、4、 pp. 377-382、1981
- 9) 荒木庸夫：電磁妨害と防止対策、p. 158、表5・5、東京電気大学出版社、1977年
- 10) 日本建築学会編：電磁環境と建築設計、pp. 39-40、丸善、2000年
- 11) 吉野涼二、堀内勝、末光一字、佐川祐一郎、三宅伸幸：スリット状接続構造の電磁シールド性能基準化に関する実験的検討 電磁シールド性能設計用資料としての整理方法について、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 1071-1072、1995年8月
- 12) 吉野涼二、永江浩、末光一字、佐川祐一郎：スリット状接続構造の電磁シールド性能基準化に関する実験的検討 その2 スリット状接続部構成要素と性能値との因果関係について、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 1053-1054、1997年9月
- 13) 吉野涼二、宮崎弘志：スリット状接続構造の電磁シールド性能基準化に関する実験的検討 その3 高周波数帯域における性能把握、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 1145-1146、2001年9月
- 14) 吉野涼二：スリット状接続構造の電磁シールド性能基準化に関する実験的検討 その4 スリット全長の違いによる差異、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 1079-1080、2003.9
- 15) 吉野涼二、井上勝夫、三枝健二：電磁シールド材料間の重ね合わせ接続部性能に関する研究 その1 スリットモデル及び重ね合わせモデルによる実験結果、日本大学理工学部学術講演会、pp. 256-257、2004年11月
- 16) 佐々木直、三枝健二、吉野涼二：電磁シールド材料間の重ね合わせ接続部性能に関する研究 その2 スリットモデルの解析結果、日本大学理工学部学術講演会、pp. 258-259、2004年11月
- 17) 吉野涼二、井上勝夫、三枝健二：スリット状接続構造の電磁シールド性能基準化に関

- する実験的検討 その5 重ね合わせ接続モデルによる検討、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 1121-1122、2005年9月
- 18) 吉野涼二、井上勝夫、三枝健二：電磁シールド材料間の重ね合わせ接続部性能に関する研究 その3 重ね合わせモデルにおけるスリット部設定条件の違いによる影響度について、日本大学理工学部学術講演会、pp. 382-383、2005年11月
- 19) 佐々木直、濱野克彦、三枝健二、吉野涼二：電磁シールド材料間の重ね合わせ接続部性能に関する研究 半経験的モデルを用いた基礎検討、日本大学理工学部学術講演会、pp. 1218-1219、2005年11月
- 20) 吉野涼二、井上勝夫、三枝健二：スリット状接続構造の電磁シールド性能基準化に関する実験的検討 その6 重ね合わせ接続モデル性能に対する材料間導通性能の影響度について、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 1001-1002、2006年9月
- 21) 吉野涼二、井上勝夫、三枝健二：スリット状接続構造の電磁シールド性能基準化に関する実験的検討 その7 接続部断面性状の違いによる性能値の差異について、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 537-538、2007年8月
- 22) 佐々木直、三枝健二、吉野涼二：電磁シールド材料間の重ね合わせ接続部性能に関する検討、電子情報通信学会総合大会、p. 409、2007年3月
- 23) 窪田亮、三枝健二、吉野涼二：電磁シールド材料間接合部性能に関する研究 重ね合わせ接合部透過後の電界位相変化の解析及び定式化、日本大学理工学部学術講演会、pp. 1051-1052、2010年11月
- 24) 窪田亮、三枝健二、吉野涼二：電磁シールド材料間接合部内の電波伝搬特性、電子情報通信学会ソサイエティ大会、p. 369、2011年8月
- 25) 吉野涼二、三枝健二、井上勝夫：電磁シールド材料間の重ね合わせ接続部性能に関する研究：その1 電波の透過による電界位相変化に関する実験結果の報告、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 553-554、2012年9月
- 26) 窪田亮、三枝健二、吉野涼二：電磁シールド材料間の重ね合わせ接続部性能に関する研究：その2 電波の透過による電界位相変化に関する解析的検討、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 555-556、2012年9月
- 27) 吉野涼二、井上勝夫、三枝健二：スリット状開口構造を対象とした漏洩電磁波の基本的性状の把握と数値解析による検討 板状電磁シールド材料間スリット状接続部の電磁シールド性能に関する研究 その1、日本建築学会環境系論文集 Vol. 73 No. 623、

pp. 123-129、2008年1月

- 28) 吉野涼二、井上勝夫、三枝健二：スリット状接続構造の電磁シールド性能に寄与する構造的要因と性能予測法に関する検討 板状電磁シールド材料間スリット状接続部の電磁シールド性能に関する研究 その2、日本建築学会環境系論文集 Vol. 73 No. 633、pp. 1255-1260、2008年11月

## 第3章 スリット状接続により構成された電磁シールド室の遮へい性能予測技術

### 3.1 検討の概要

第2章において、鉄板や銅箔等の板状・膜状の電磁シールド材料により全面を囲う電磁シールド室における電磁シールド材料間の接続構造のうち、材料間を一定量重ね、ネジ、釘、ステープル等の導電材により留め付ける構造（スリット状接続部構造）を対象として、スリット状接続部の全長、重ね幅、固定間隔、開口（材料の歪や施工精度等によってネジ等による固定間隔内において発生する隙間の程度）、導通状態等の変化による電磁シールド性能を定量化した。さらに、その結果を基に、スリット状接続部電磁シールド性能の予測計算方法を提案した。

引き続き本章では、「スリット状接続部により構成された電磁シールド室の空間的な遮へい性能の予測」を目的とした数値シミュレーションシステムの開発（以下、「新システム」と呼称）<sup>1) ~3)</sup> について述べる。加えて、その予測精度を検証するために、スリット状接続部モデルを設置した実験室における透過側電界分布の測定値と新システムによる予測値との比較、および従来の虚像法による予測値との精度検証を行う。さらに、当該構造を用いた電磁シールド室モデルを設定し、スリット状接続部からの電波透過追跡の有無による予測結果への影響度の計算を行い、新システムの有効性を検証する。

性能の定式化に続く当該予測技術は、建築構造物に必要とされる「空間の持つ環境性能」を設計段階で把握するために必要であると判断し開発した。

### 3.2 従来の電磁シールド室性能予測技術の現実的な問題点とその解決法

従来、三次元空間を対象とした電磁界数値解析に用いられる方法としては、FDTD法、境界要素法、モーメント法などの適用が多い。この電磁界解析における具体的な適用分野となっているのは、集積回路や電子機器の設計、通信用アンテナの設計、モバイルフォン利用時の人体への影響度（体温上昇等）に関する検討等である。これらのモ

デル化については、多様な形状や材質（物性）、過渡応答特性に現実的に対応できる三次元電磁界解析技術の適用が重要であった。

建築空間、材料、構造等を対象としたこれらの解析技術の適用に関する近年の事例報告としては、FDTD法による室内の電界強度分布予測における吸収境界条件に対するPML媒質の適用<sup>4)</sup>、FDTD法による建物内での無線LAN干渉特性の解析<sup>5)</sup>、境界要素法による電磁シールド材料の遮へい性能評価装置の電磁波シミュレーション解析<sup>6)</sup>、FDTD法を用いたMRI室用シールドサッシの性能に関する電磁環境シミュレーション<sup>7)</sup>等がある。FDTD法、境界要素法では、対象空間をメッシュ状に分割する。この時、対象周波数が高くなる（波長が短くなる）のに比例して、より微小な寸法（「波長 $\lambda$ /10」程度）による空間の分割が必要となるため、高速度で大記憶容量の演算装置を適用しない限り、実用的な解析が困難である。さらに、分割領域に空間とは異なる物性を持つ材料が含まれる場合では、材料の厚さと対象周波数（波長）との関係を適切に設定する必要性から、薄い材料を高い周波数領域で解析することに対して、演算速度の高速化や作業領域の確保が必須となる。

また、アンテナ等の解析に多用されるモーメント法を電磁シールド空間へ適用<sup>8)</sup>する場合、面状の電磁シールド材を細かいメッシュ状に分割して模擬する方法が一般的にとられるため、電磁的な閉鎖空間全体を対象とする場合、先の事例と同様の問題点を有している。

これに対して、建築的な大きさの空間（居室、フロア全体、建物全体等）、かつ、VHF帯以上の高周波数域を対象とする場合は、梁、柱や建具による表面の細かな出入りは存在するが、対象となる居室が基本的に矩形であり、そこで大きな面積を占める壁、天井、床の各構造物の寸法（数m～十数m角程度）が波長 $\lambda$ （300MHz～1GHzで1m～0.3m）の電波と比較して大きいため、遮へい物による回折効果（迂回伝搬）や凹凸による散乱効果よりは電波の直進性による影響度が顕著となるので、電波を光線的に発射（以下「レイ」と呼称）させて電磁シールド壁面等で正反射、或いはそのまま直進透過し、減衰するように捉える「虚像法（レイトレース法、鏡像法とも呼称）」の適用が、大きな計算資源を必要としないという点も含めて実用的であり、適切と判断した。

### 3.3 虚像法解析の基本と電磁界解析およびスリット状接続からの電波透過現象への適用

虚像法によるレイ追跡の概要を図3-1に、電波を対象とした場合の面による反射性状（透過の場合も同様）の概要を図3-2に示す。

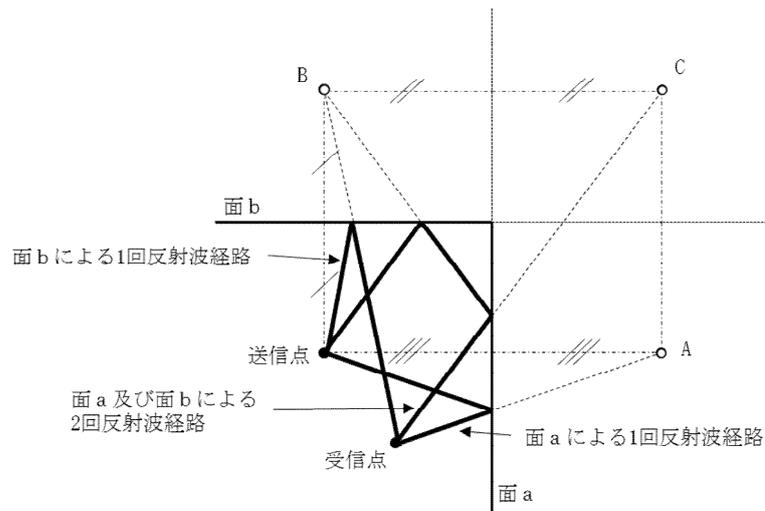


図3-1 虚像法の概念

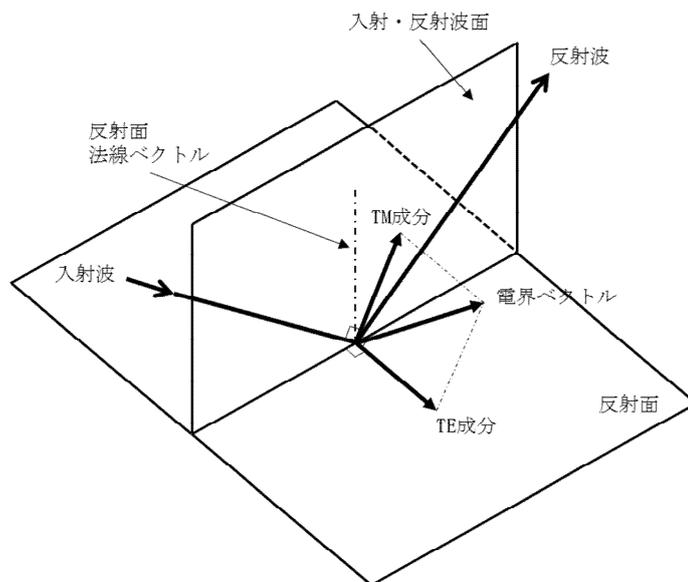


図3-2 電波に対する反射性状の考え方

図3-1に示すように、虚像法は反射面へ入射した入射波を、鏡による光の反射と同様に面によるレイの正反射を順次追跡する方法である。二つの反射面を想定した図3-1の例では、送信点から放たれたレイの面aにおける虚像A、同様に面bによる虚像Bを求め、虚像AおよびBと受信点を結ぶレイが対象面が存在する空間を通過する場合に、それぞれの「1回反射波」経路が成立する。更に、虚像Bと面aによる虚像Cを求め、虚像Cと受信点を結ぶレイが面の存在する空間を通過する場合に「2回反射波」経路が成立する。なお、透過波については、レイが面における所定の減衰効果を伴って方向変換せずに透過する。

これに加えて横波である電波の場合、図3-2に示すように、面での反射に際して、入射波が有する電界ベクトル（ポインティングベクトルに直交する電界の向きと大きさ）は、反射面と平行となる電界成分（TE成分）と、入射・反射波面に含まれる電界成分（TM成分）のそれぞれの反射減衰量と位相回転量を加味して正反射することになる。透過による減衰も同様である。

虚像法による従来の電波伝搬シミュレーション<sup>9)</sup>では、電磁シールド面の反射・透過箇所の電磁シールド構造が具体的にどのように構成されているかについては無視し、反射や透過部位が均質一様の電磁シールド性能、透過性能を有しているという前提によって成り立っている。しかしながら、現実の電磁シールド室の各面は、有限の寸法を有する個々の導電性材料と、それらを繋ぎ合わせる継ぎ目構造から構成されている。このとき、鉄板や銅箔を溶接や半田等によって（電氣的に）連続的に繋ぎ合わせる工法、或は材料としての性能が比較的低い金網を用いた場合（鉄網や銅網では網目状接続部で錆による経年劣化が起こる。現状では亜鉛メッキ鋼材による金網の利用が多い。）、材料に対する接続部での透過性能の低下は殆ど無視しても構わなくなり、従来の「任意の箇所における信号の透過追跡」による方法とした場合でも問題とはならないが、「スリット状接続部」により構成された構造の場合、一般的な鉄板、銅箔等の適用を想定すると、1.2節でも示したように材料の遮へい性能が約100dB以上であるのに対して、高周波数帯域におけるスリット状接続部の遮へい性能は30～40dB程度と、素材に対して明らかに低くなるため、素材の性能のみを対象とするのではなく、部分的な漏洩箇所となるスリット状接続部からの電波の透過性状を加味した予測の方が現実的であると判断できる。加えて、扉、窓、空調口、フィルター盤等の各部位と、壁

面等との取り合い部も、スリット状接続部の一種と考えることができ、同様の解析の適用が可能である。

一方、これまでの電磁シールド室の性能設計では、特記仕様等により設定される性能目標値をMIL-STD-285法等に準拠して、壁、床、天井、建具等の各部位の電磁シールド仕様を設定し、電磁シールド室施工完了後に、各部位がそれぞれ要求性能を満たしていることを確認する方法で行われている。しかし、この方法では、電磁シールド室の「空間として有する遮へい性能」を予測、確認することはできない。建築空間としての安心・安全性の確保、経済性を重視した施工技術の必要性等から、今後は部位性能のみだけではなく、空間としての性能評価技術が、設計、施工の各フェイズにおいて求められる方向に進むものと考えられる。

これらの状況を踏まえて、本研究では、電磁シールド室や建物の空間を対象とした性能設計において、虚像法による従来の電磁環境シミュレーションシステムを基本とし、スリット状接続部からの電波の透過による影響度を加えた、実用的な新システムを開発した。なお、新システムでは実物件への適用（主に基本計画や性能設計業務、現場での品質管理業務）を前提としているため、高速度で大容量の（そして高価な）計算資源の適用ではなく、一般的なPC環境において簡便に、迅速に運用できるものとした。

#### 3.4 スリット状接続部により構成される電磁シールド室の遮へい性能予測シミュレーションシステムの構成

新システムでは虚像法によるレイの追跡を基本とし、スリット状接続部からの漏洩透過現象を加味した追跡を可能としたことを特徴としている。新システムのレイ追跡方法の概要を図3-3に、計算フローを図3-4に示す。

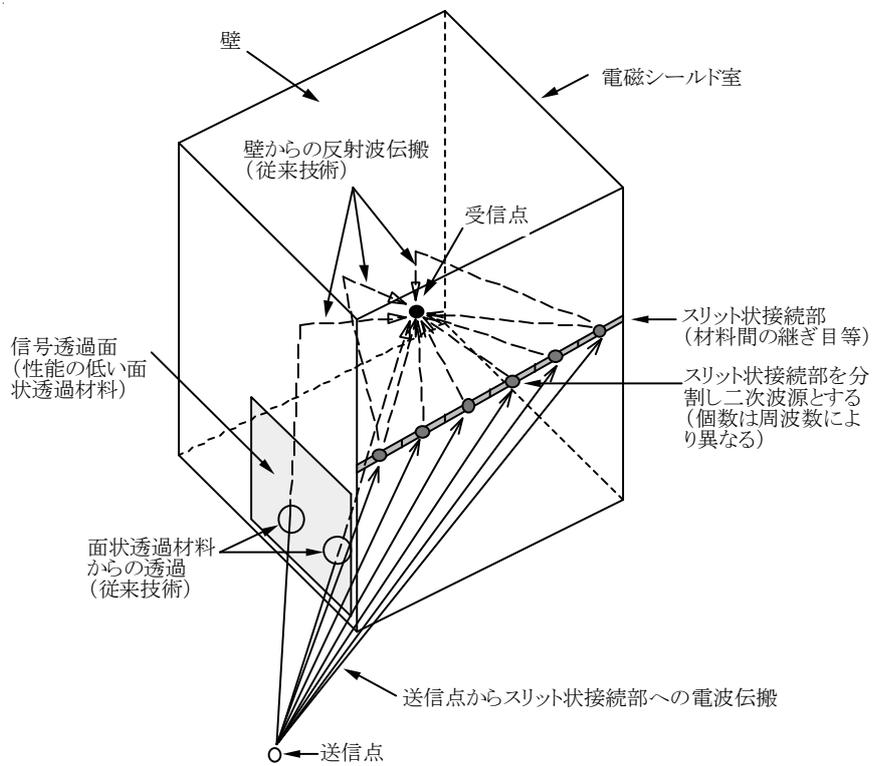


図3-3 シミュレーションにおけるレイ追跡方法の概要

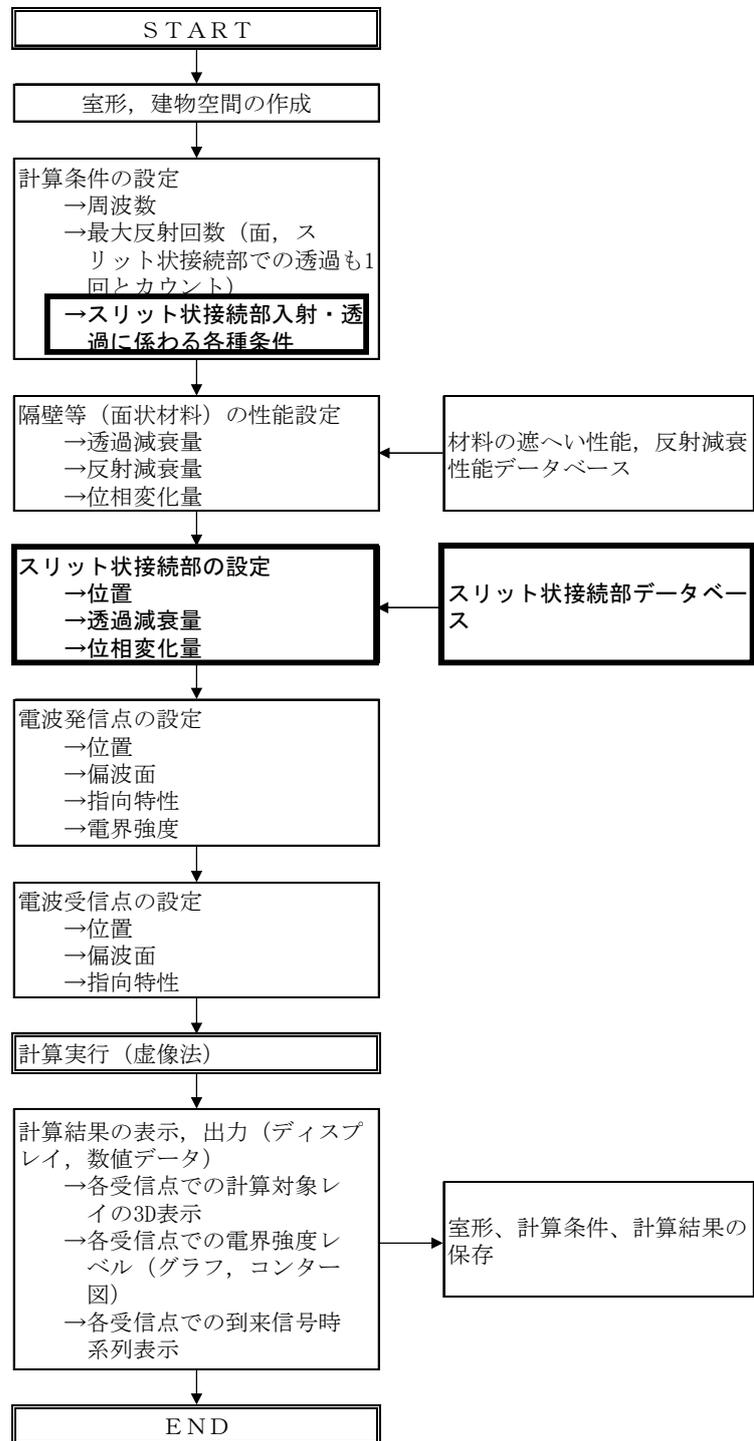


図3-4 シミュレーションシステムの計算フロー

図3-3では、正面向かって左側の面に「面状の透過部位」を、そして右側の面内に1ヶ所の「スリット状接続部」を例示している。「面状の透過部位」においては、従来の「電磁シールド材料における入射信号のポインティングベクトルを透過側のレイの進行方向（透過による電界強度レベルの減衰と位相回転を加味）」とする虚像法追跡を行う。それに加えて新システムでは、対象室壁面の任意の位置、向きに有限の線状のスリット状接続部を構成できることが特徴としている（材料や部位の継ぎ目、窓や扉枠等）。新システムでは、スリット状接続部において、以下に示す手法による「二次波源」を新たに設定し、各二次波源から受信点まで、虚像法にてレイの追跡を行う。なお、図3-3では室外から室内への電波透過を例としたが、新システムでは、室内から室外（隣室、屋外等）への透過に対する予測も同様に可能である。また、図3-4のフロー図に示す各設定・計算項目のうち、太線枠およびゴシック文字で表記された部分が、スリット状接続部からの電波透過追跡に係わる演算項目である。

新システムによる予測計算において必要となる基本的な技術情報は、以下の通りである。なお、空間の各種設定要素の位置、方向に関する情報は、三軸直交座標系（xyz軸）を基本としている。

- (イ) 対象構造物形状情報、および構造面内（壁、床、天井等）に設定されるスリット状接続部の位置情報
- (ロ) 電波発信点・受信点（計算対象点）に関する情報（位置、偏波面、指向性）
- (ハ) スリット状接続部を透過するレイに関する情報（指向特性、位相変化量）
- (ニ) 計算対象の周波数
- (ホ) 透過、反射に関わるレイ追跡条件の制限（追跡を行う「透過(1回のみ)+反射回数(複数回)」の最大値の設定）
- (ヘ) 各種電磁シールド材、建築構造物、スリット状接続部の電磁的特性に関する情報（透過減衰性能）

スリット状接続部における電波透過性状の追跡条件設定に対して、これまでの各種検討結果等から得られた知見に基づいて、以下の条件を設定した。

- (1) スリット状接続部へ入射し、減衰を伴って透過する電波は、電磁シールド材料の面内に線分にて設定したスリットの方向に対して直交する偏波成分のみとした。
- (2) スリット状接続部から透過側の空間へ放射される電波の偏波成分も、上記と同様とした。

- (3) スリット状接続部への入射電波は、当該構造から透過側の空間へ再放射される（二次波源）。ここで、「スリット状接続部に分布する二次波源の個数と位置」「入射電波のスリット状接続部への指向特性」をパラメータとして各二次波源の特性を決定した。この二次波源は、線状の磁流と考えて設定している。これまでの知見により、各スリット状接続部の（ビス等による）固定箇所数と二次波源の位置や個数には相関性はないことが把握されているので、スリット状接続部の全長と対象周波数の波長との関係から二次波源の個数、位置を設定した。
- (4) 二次波源から透過側へ再放射される電波の特性は、「スリット状接続部の透過減衰量」「透過に伴う位相変化量」「スリット状接続部のスリット方向を基準として設定される透過波の指向特性」の各設定条件に沿って設定した。なお、標準的なスリット状接続部での透過減衰量は、第2章・表2-2に準拠した。また、これ以外の透過特性を有するスリット状接続部（扉、窓や設備貫通部と電磁シールド構造の取り合い部から透過等）の適用を可能とするため、減衰量、位相量に関するデータベースを別途用意した。
- (5) 個々の二次波源から透過側空間内に設定した受信点への伝搬は、虚像法によるレイの追跡と同様とした。

### 3.5 新システムの予測精度検証

#### 3.5.1 予測精度検証用モデルの設定

新システムによる予測結果の精度を検証するため、電磁環境実験室<sup>10)</sup>を用いた実験を行い、予測値と実験値の比較を行った。予測および実験モデルとした電磁シールド室の概要を図3-5に、スリットモデルを図3-6に、実験用スリットモデル製作の概要を図3-7に示す。

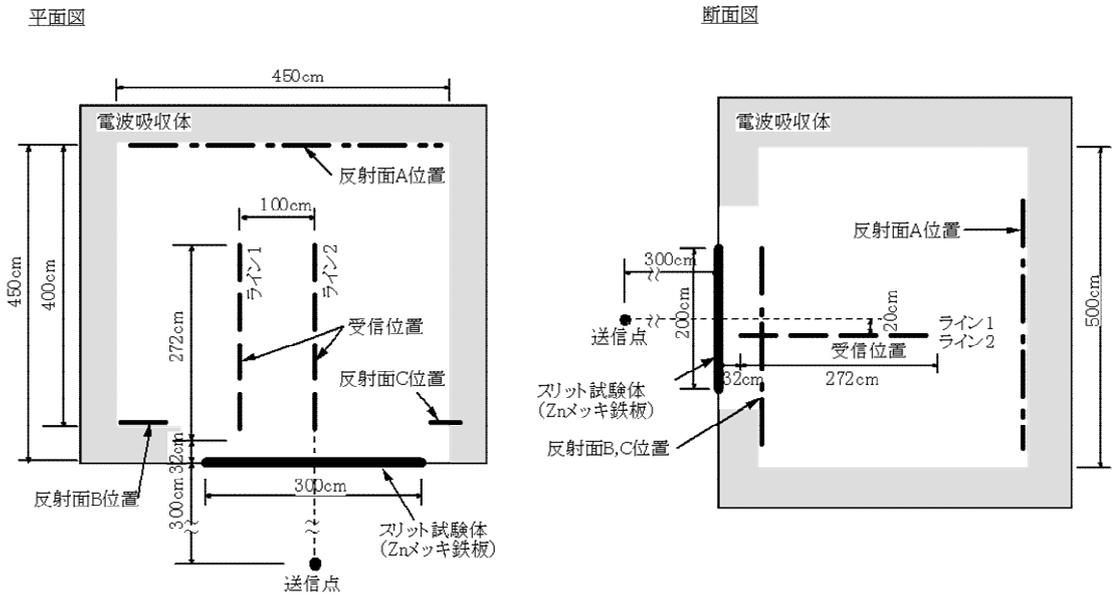


図3-5 スリット実験用シールド室の概要

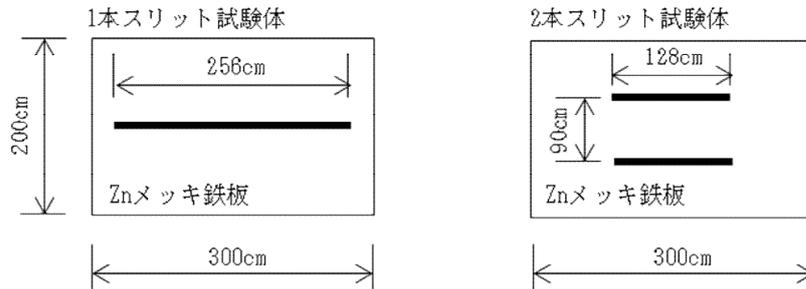


図3-6 スリットモデルの概要

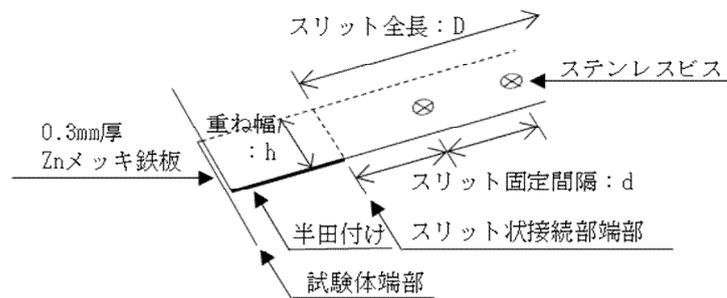


図3-7 スリットモデル製作概要

実験では、図3-5に示す実験室の壁面に設けられた高さ200cm×幅300cm寸法の電磁シールド性能測定用開口に、図3-6に示すスリット状接続部を構成した亜鉛メッキ鉄板（0.3mm厚）製の試験体を設置した。図3-7に示すように、実験用モデルにおけるスリット状接続部は2枚の鉄板を所定の全長、重ね幅、ビスピッチで固定する構造で構成したが、スリット端部から試験体端部までは、半田処理により電波の余分な透過を防止した。

スリット状接続部本数は、水平方向に1本および2本の場合の2条件とした。スリット状接続部試験体の設置用開口を除いて受信室内の各面には電波吸収体が設置してあるが、電磁シールド室を模擬するため、スリット状接続部試験体を設置した開口部周囲の壁と、それに対向する奥の壁面には、可能な範囲で銅箔による反射面（図3-5、反射面A～C）を設置した。スリット状接続部の仕様、測定条件を以下に示す。

- ・ スリット状接続概要： 1本スリットの場合「全長D=256cm」  
2本スリットの場合「全長D=128cm」、「スリット間隔90cm」  
で上下に平行して配置
- ・ スリット状接続部の固定間隔：d=16cm
- ・ 電磁シールド材料の重ね幅：h=5cm
- ・ 対象周波数：300MHz、700MHz
- ・ 送信点の位置：スリット状接続部正面の室外側（こちらの居室も電波暗室）中心から距離300cmの地点（固定点）
- ・ 受信点：送信点から見て受信室の奥行き方向に、スリット構成面からの距離を32cmから304cmまで4cm間隔で線状に配置し、スリット状接続部の正面位置（ライン2）とスリット状接続部の端部付近の位置（ライン1）を設定
- ・ 偏波面：垂直（スリット状接続部を水平方向に構成したため）
- ・ SEの取得方法：挿入損失法（基準測定は、「試験用開口に試験体を設置しない条件（高さ200cm×幅300cmの開口状態）」における値）  
新システムにおける対象空間の構成、計算条件は、上記のモデルと同一とした。

### 3.5.2 新システムにおける各種条件の設定について

予測計算を実施する前に、新システムにおける対象室内でのレイの反射回数の設定

に関する予備的な検討を行った。

新システムにおいて上記モデル程度の規模を想定した「反射面が対向する空間」を設定し、今回の条件に近い送受信点設定における最大反射回数の設定値を変化させて受信レベルの推移（虚像法では、受信点へ到来するレイが増えることで受信レベルが増加する傾向を示す）をみた。その結果、13回反射と14回反射との予測値との結果の最大差異が0.5dB以下まで収束したので、先ず「14回反射における予測結果」を規準値と設定し、計算資源上の制約（Windows PCの使用）から、今回の予測計算では、上記規準値に対して3dB以下の差異に収まる反射回数を把握した結果、「室内において最大6回の反射までのレイを追跡する」ことを許容される精度条件とした。

反射回数の設定に起因する許容誤差の範囲を3dBとした理由は以下のとおりである。電磁シールド室の性能設計は大凡5dBピッチで決定されるので、設計上容認される誤差は「±2.5dB」となる。従って、本性能予測においては、「3dB」までの誤差を許容した。

予測モデルと実験モデルの形状、寸法は同一とした。なお、予測計算における、「二次波源数設定」「各二次波源からの放射における位相変化量」「二次波源への入射・透過信号の指向特性」「スリット状接続部の絶縁面積率およびスリット隙間」の各設定は、文献1)～7)、9)、10)に示すスリット状接続構造の電磁シールド性能把握とその基準化に関するこれまでの検討結果から設定した。

### 3.5.3 従来の虚像法システムによる予測

上記に加え、新システムの有効性を検証することを目的として、以下の条件による従来の虚像法システムでの予測計算を行った。

図3-8左側に示すように、従来の虚像法ではスリット状接続構造（透過部位）が、送受信点間に求められるレイの線上にない限り認識されない。これに対して、同図右側に示すように、新システムでは、面状の透過に加えて、構成されたスリット状接続構造からの透過影響を加味することが可能となる。

虚像法での予測に際して、スリット試験体（高さ200cm×幅300cm）を、「一様な透過減衰性能を有した面状の透過面」として条件設定することが適切と考えた。現実には、スリット状接続部以外は、鉄板で全て覆われているので、スリット状接続部の透

過減衰量（予測値、測定値）をそのままの状態ですべて「面としての性能」に置き換えることには問題がある。そこで、実験用モデルでの測定時に実施した「面に沿った受信レベル分布測定データ」を活用し、この結果を用いて「面としての性能」とすることとした。

図3-9に示すように、まず「開口時」と「試験体設置時（1本スリット、および2本スリット）」の両条件における、試験体面（開口時は該当する部位）から受信側1mの距離での、試験体正面中央部から左右方向±1.2m（全長2.4m）、上下方向±1m（全長2m）の部位の（十字型の）連続的な受信レベル分布測定値を把握した。次に、受信点毎に「開口時」と「試験体設置時」の受信レベル差を算出し、さらにその差の平均値を求めた（この考え方では「1本スリット、300MHz」「同、700MHz」「2本スリット、300MHz」「同、700MHz」と、条件毎にそれぞれ個別の透過減衰量の設定を必要とし、実用には適さない）。

なお、「開口時」予測においては、スリット状接続部が存在しないため「新システム」と「虚像法」とは同一の結果となるので、虚像法での予測を実施していない。

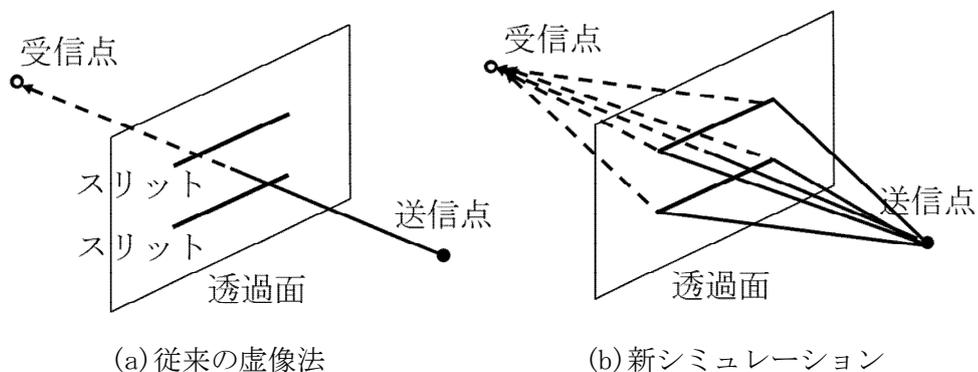


図3-8 スリット状接続構造を有する透過面に対するレイの追跡例

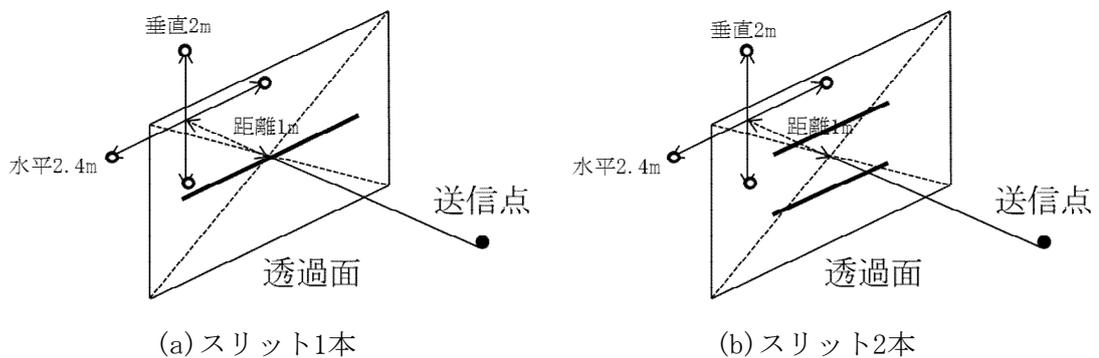


図3-9 スリット状接続構造を有する試験体に対する等価的なSE取得方法  
(試験体設置時の測定)

### 3.5.4 予測値と実測値の比較結果

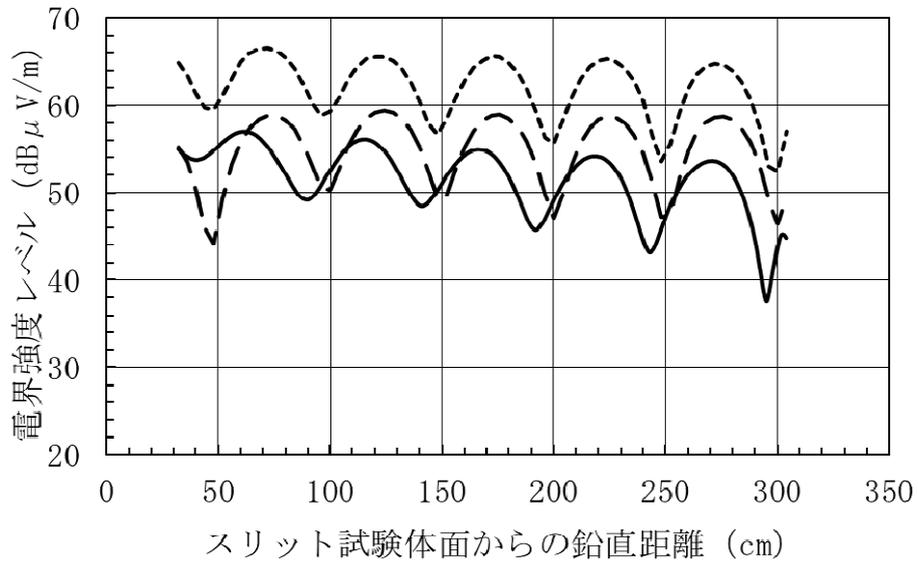
上記による測定値、新システム予測値、虚像法予測値を、スリット状接続部試験体に関する与条件（1本スリット、2本スリット、H2m×W3m開口時）、周波数、受信点ライン毎に比較した結果を図3-10(a)～図3-12(d)に示す。この結果から、下記のことが示される。

- (1) 各条件において、ライン1とライン2の新システム予測値と測定値とは、一部の条件において多少の差異が認められるが、概ね良好な対応関係を示したのに対して、虚像法測定値はこれらに対してやや異なる電界強度レベルを示す条件がみられ、新システムの有効性が示されたと考えられる。
- (2) 受信点別に新システム予測値と測定値を比較すると、直接波と反射波に起因するヌル（両者が逆位相となり電界強度が相殺される部位）、ピーク位置が多少異なる条件が存在した。原因は、実験時の各設定条件の精度（スリット状接続部、反射面、送受信アンテナの相対位置等）によるものと推定している。しかし、新システムの目的とする「電磁シールド室の空間的なレベル分布・SE性能把握」という面からは、受信点への到来電波の最大値の把握が重要と考えられる。この観点から、最大受信レベルは多くの受信点で5dB程度以内の差異に収まっており、実用上、許容できる予測精度が確保できている。
- (3) 上記と同様の結果は、高さ2m×幅3mの開口時でも得られた。開口時とスリット

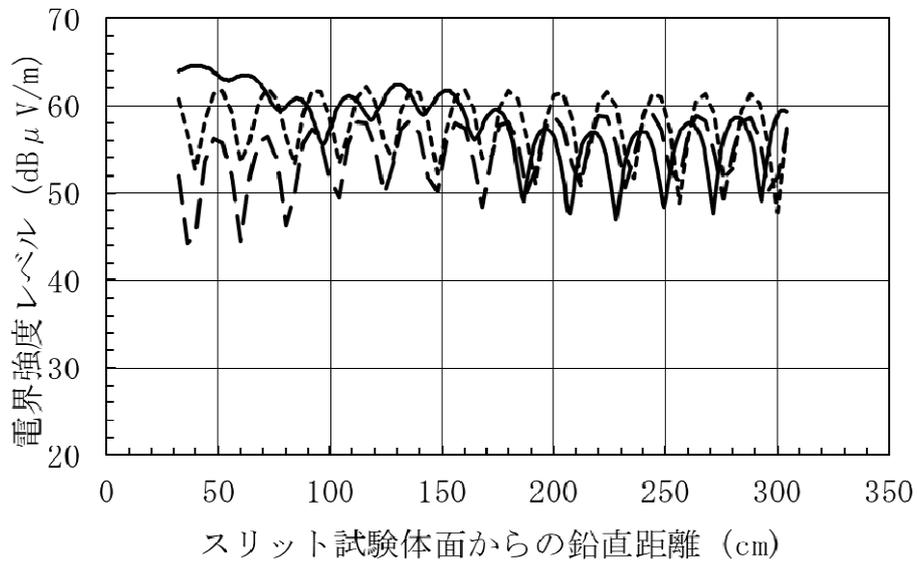
状接続部試験体設置時のレベル差を電磁シールド性能と考えると、スリット状接続部による電波の透過性状は、新システムにより良い精度で把握できる。

- (4) 従来の虚像法による予測値は、700MHzでは測定値に比較的近似する結果となったが、300MHzでは測定値に対して最大10dB程度の差異となり、大きく傾向が異なった。あらゆる条件のもとにおいても安定した予測精度を確保するという観点から、新システムの有効性が示された。

凡例) 実線：測定値 破線：新システム予測値 点線：虚像法予測値



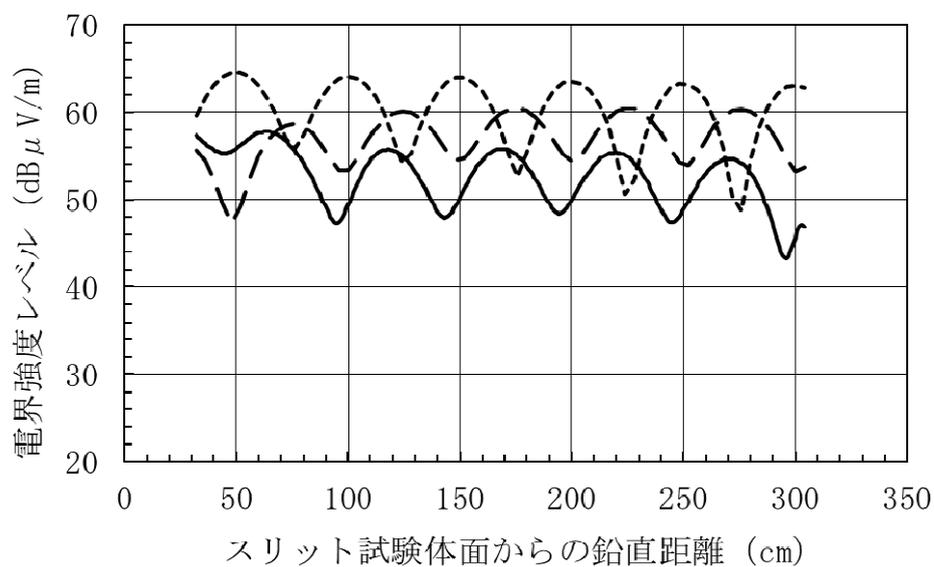
(a) ライン1・300MHz



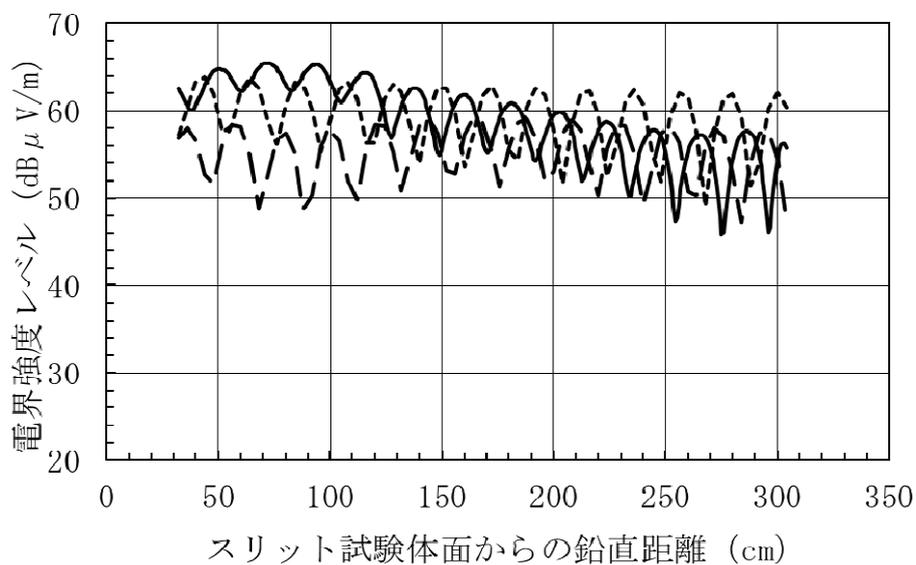
(b) ライン1・700MHz

図3-10 予測値と測定値の比較結果 (1本スリット時)

凡例) 実線：測定値 破線：新システム予測値 点線：虚像法予測値



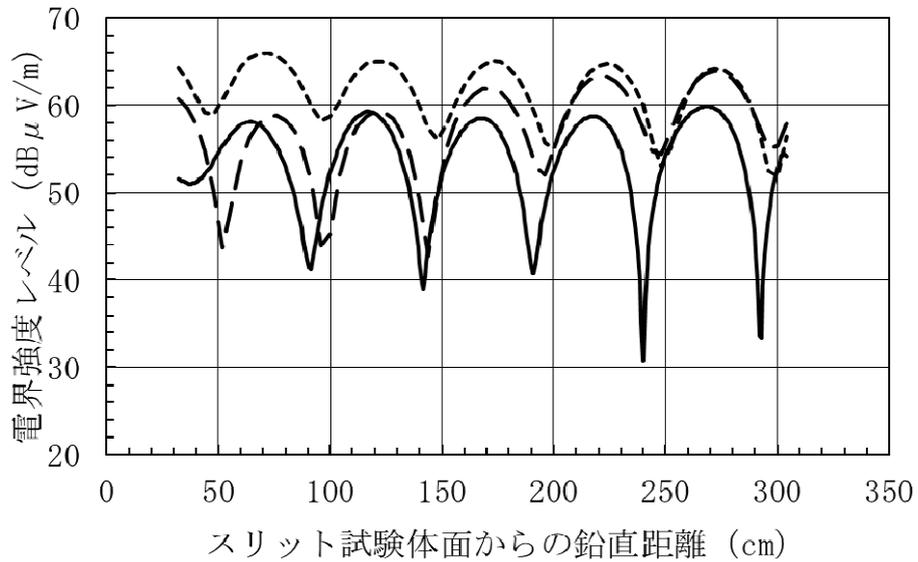
(c) ライン2・300MHz



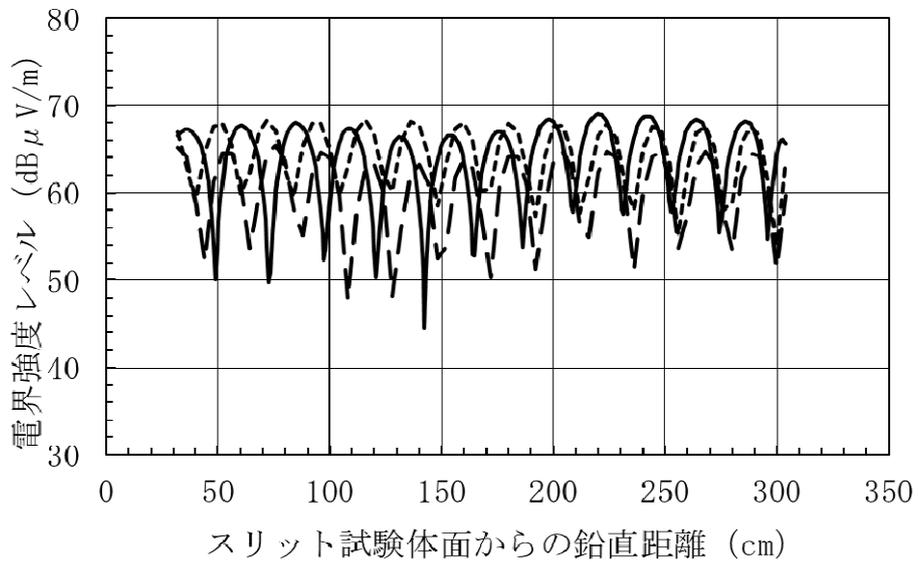
(d) ライン2・700MHz

図3-10 予測値と測定値の比較結果 (1本スリット時、つづき)

凡例) 実線：測定値 破線：新システム予測値 点線：虚像法予測値



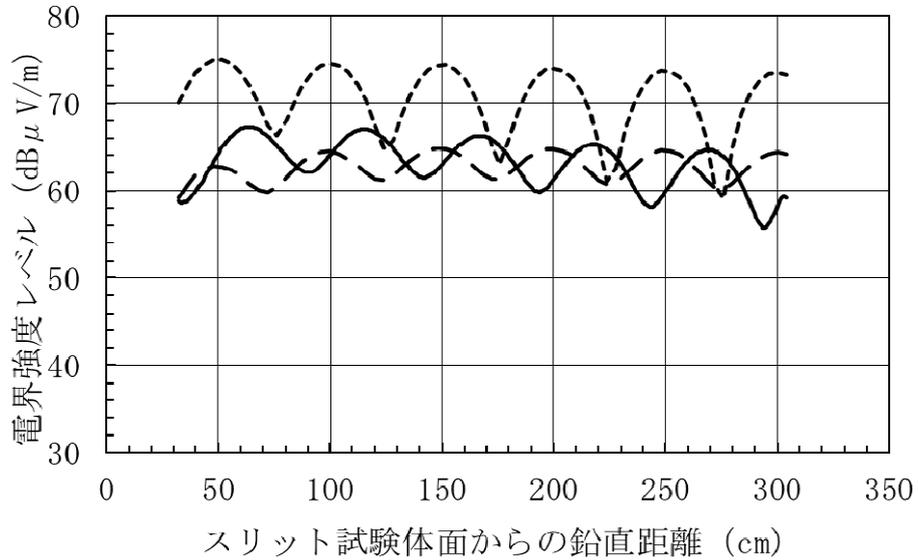
(a) ライン1・300MHz



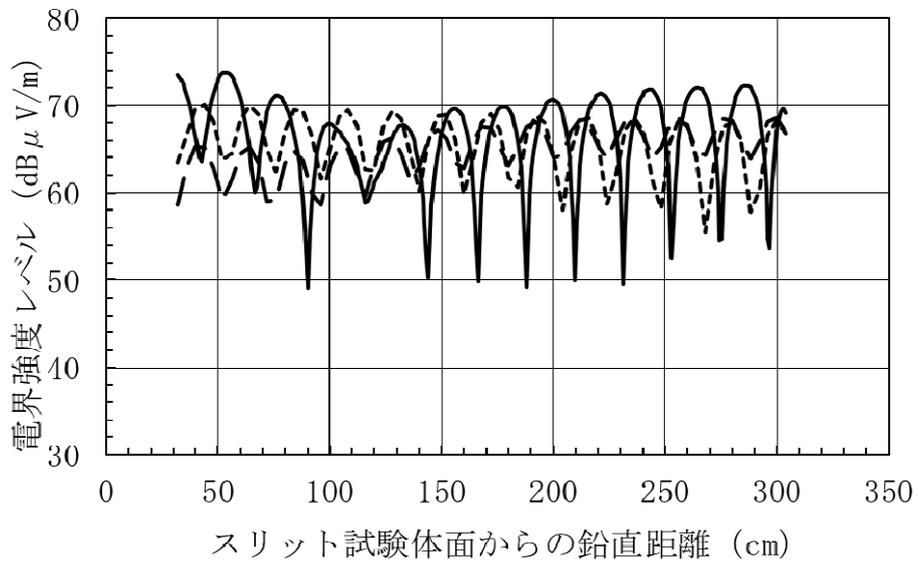
(b) ライン1・700MHz

図3-11 予測値と測定値の比較結果 (2本スリット時)

凡例) 実線：測定値 破線：新システム予測値 点線：虚像法予測値



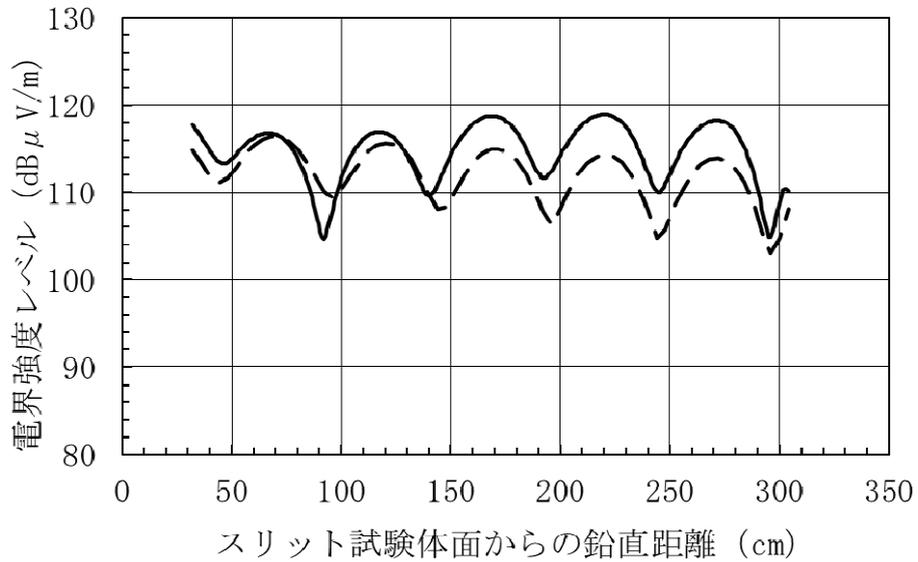
(c) ライン2・300MHz



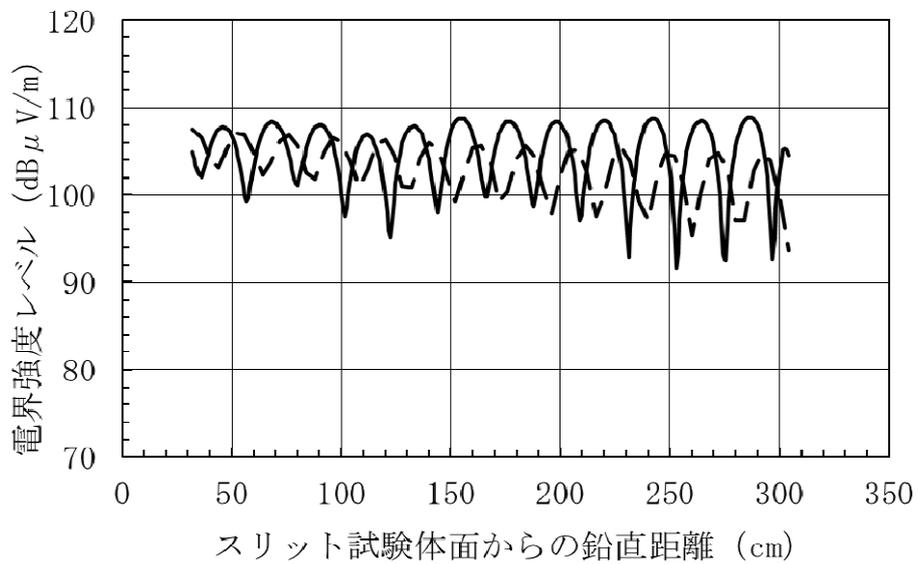
(d) ライン2・700MHz

図3-11 予測値と測定値の比較結果 (2本スリット時、つづき)

凡例) 実線：測定値 破線：新システム予測値



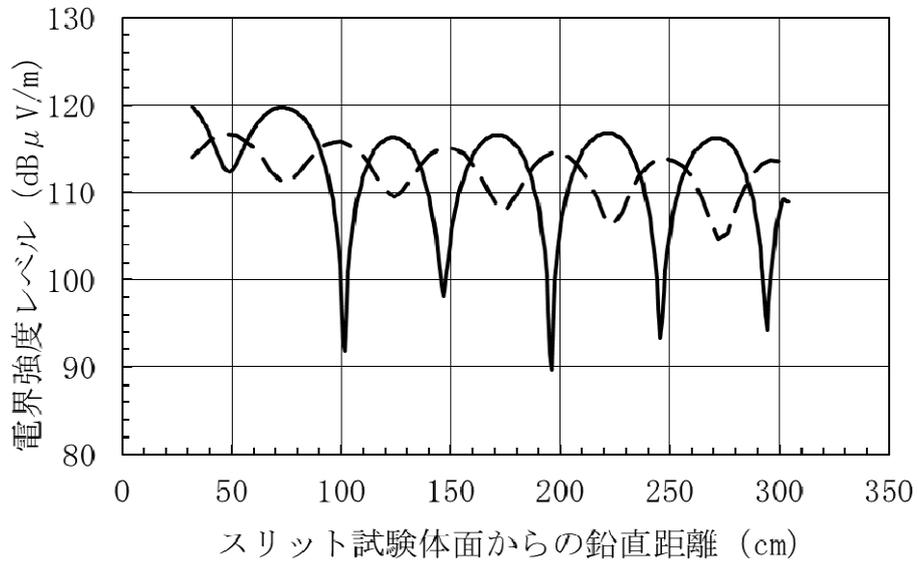
(a) ライン1・300MHz



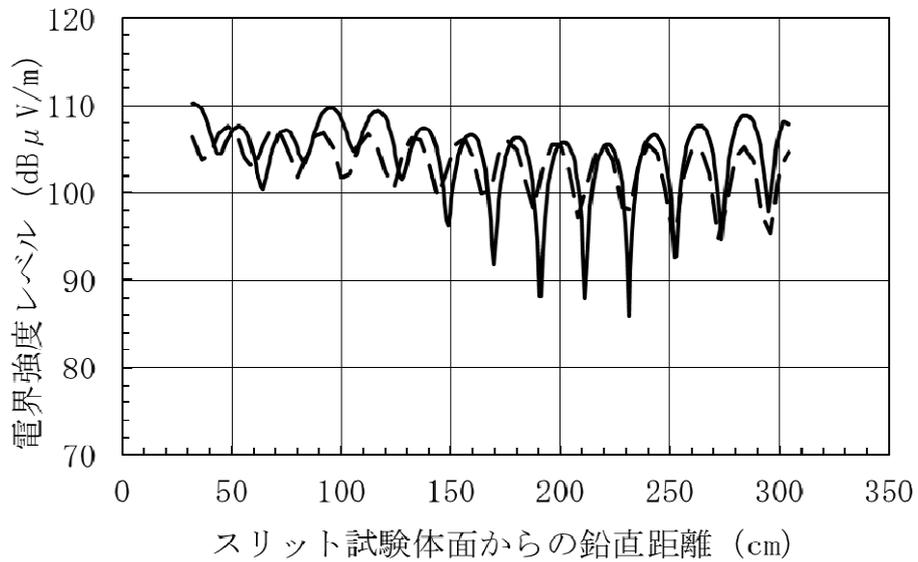
(b) ライン1・700MHz

図3-12 予測値と測定値の比較結果 (開口時)

凡例) 実線：測定値 破線：新システム予測値



(c) ライン2・300MHz



(d) ライン2・700MHz

図3-12 予測値と測定値の比較結果 (開口時、つづき)

### 3.6 電磁シールドルームモデルによる予測例

新システムと従来の虚像法を用いて、より現実に近い電磁シールドルームモデルにおいて、「スリット状接続部からの透過（減衰）信号追跡の有無」による室内の受信レベル分布予測結果への影響度に関する比較検討を行った。

対象モデルおよび予測時の設定条件を図3-13に示す。30～40dB程度のSEを有するモデルを想定し、対象室の壁の1面にSE=40dBの電磁シールド窓を置き、そこへ、窓面の正面より水平方向斜め30°からの入射角度で、距離約10000cm (=100m) の位置から700MHz、水平偏波の電波を送信させた。電波が入射する窓付き壁面と隣接する壁面（両面とも送信電波の直接波が入射する）に、90cmの間隔で垂直方向のスリット状接続部（長さ300cm、重ね幅5cm）を配置した。表2-2に示すスリット状接続部の電磁シールド性能予測方法では、各スリット状接続部は700MHzで約31dBの性能と求められる。モデルルーム室内への電波の透過は、「窓面のみ（条件Aと呼称）」および「窓面とスリット状接続部（条件Bと呼称）」の2条件とした。また、室内での最大反射回数は6回とし、受信点はxy平面上（水平面）に50cm間隔で、室内全体に渡りメッシュ状に配置した。なお、送信点からの電波強度は、モデルの外壁付近で約100dB $\mu$ V/mの強度で到来するレベルに出力を設定した。

「窓面のみの透過（条件A）」の予測結果を図3-14に、「窓面とスリット状接続部からの透過（条件B）」の予測結果を図3-15に示す。

これらの結果から、以下のことが示される。

- (1) 条件Aでは室内での電界強度レベル分布の平均値は約58dB $\mu$ V/mとなり、空間的にはSEが約42dBと推定されたのに対して、条件Bでは平均でレベル分布の平均値は67dB $\mu$ V/mとなり、約33dBのSEとなる。両者の差異は、後者がスリット状接続部からの影響度をも加味した予測であることであり、従来の虚像法に対して、新システムの適用が空間としてのSEを適切に評価している。
- (2) 室内でのレベル分布をみると、条件Aでは、窓面付近および透過電波が室内へそのまま直進する方向の受信点での電界強度が、他の部位に比して極端に高い値となるのに対して、条件Bでは、壁面に設けたスリット状接続部と電磁シールド窓からの透過による両者の影響が室内全体において適切に評価された分布性状となっている。

本検討により、壁面等に用いられる電磁シールド材料は基本的に非常に高いSEを有しているため、相対的にSEの低い電磁シールド窓等の部位に対して、スリット状接続部により構成された電磁シールド室の空間性能の予測や評価において、従来の虚像法が有する「材料接続部からの電波の漏洩を加味できない」という弱点を明確にするとともに、これらの問題を解消できる新システムの有効性が示された。

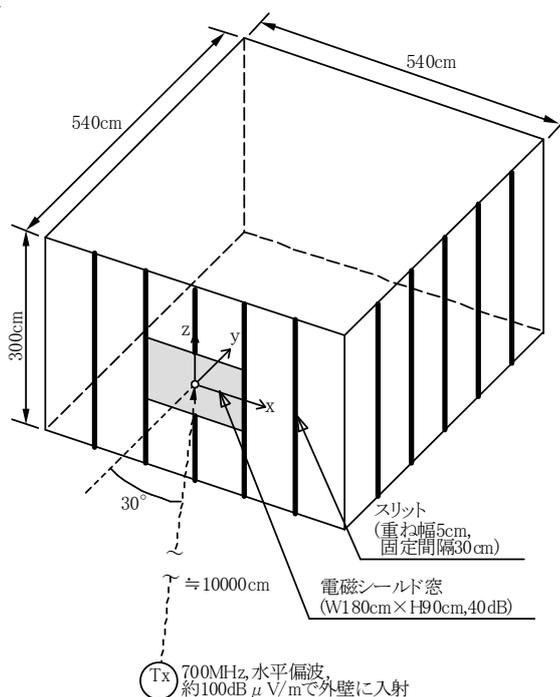


図3-13 電磁シールドモデルルームおよび計算条件の概要

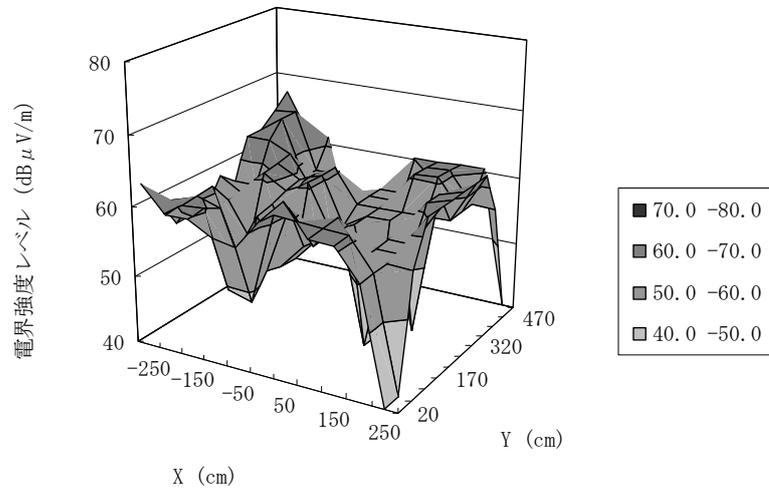


図3-14 「壁面のみ透過」時の電界強度レベル分布予測結果

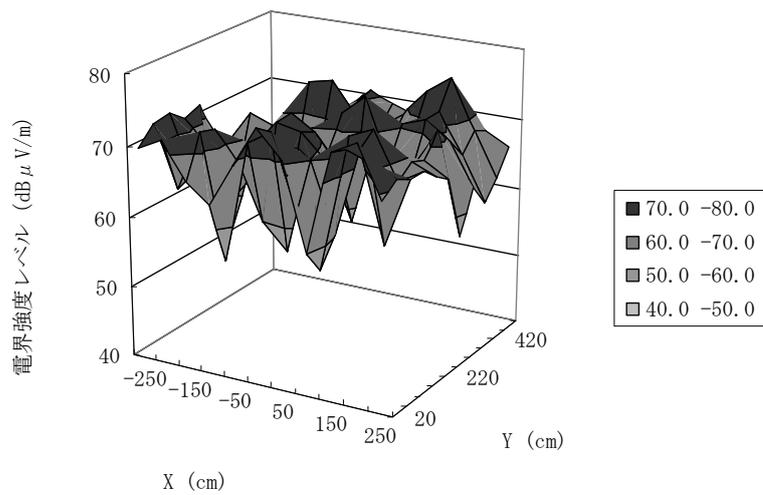


図3-15 「壁面とスリット状接続部」透過」時の電界強度レベル分布予測結果

### 3.7 本章のまとめ

スリット状接続部により構築された電磁シールド室の遮へい性能予測を目的とした新シミュレーションシステムを開発し、検証用モデルによる予測値と測定値による検

討、そしてスリット状接続部により構成されたより現実的な電磁シールド空間への新システムの適用例について検討した。本検討により、下記の知見、結果を得た。

- (1) 新システム予測値と実測値とは良好な整合性がみられ、適切な条件設定を行うことで、電磁シールド空間の遮へい性能予測法として高い精度が確保できる。
- (2) 新システムと従来の虚像法との比較においても、新システムが高い予測精度と実用性を有している。
- (3) スリット状接続部で構成された居室に到来する外来ノイズの、対象室内での電磁環境の予測において、新システムではスリット状接続部からの影響度を空間として適切に評価でき、従来の虚像法に対して、性能設計や評価における優位性が示された。

### [第3章 参考文献]

- 1) 吉野涼二、三枝健二、井上勝夫：スリット状接続構造により構築された電磁シールド室性能予測技術の開発、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 553-554、2010年9月
- 2) 吉野涼二、井上勝夫、三枝健二：スリット状接続部により構成された電磁シールド室性能予測システムの開発 板状電磁シールド材料間スリット状接続部の電磁シールド性能に関する研究 その3、日本建築学会環境系論文集第77巻第682号、pp. 949-955、2012年12月
- 3) 発明の名称：電磁シールド室の電磁シールド性能を特定する方法、特許第5318026号、発明者：吉野涼二・三枝健二、登録日：2013年7月19日
- 4) 笠井泰彰：PMLを用いたFD-TDによる室内の電界強度分布予測解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1067-1068、1997年9月
- 5) 高橋港一、宮崎保光：無線LANに関する建造物内における電磁干渉特性のFDTD法による解析、電子情報通信学会総合大会、pp. 711-712、2000年3月
- 6) 小磯賢智、濱口聡、水谷誠司：シールド材評価装置の電磁波シミュレーション解析、平成20年度三重県工業研究所研究報告、No. 33、pp. 44-47、2009年
- 7) 工藤孝人、花田英輔：MRI室用シールドサッシに関する電磁環境シミュレーション、平成22年度第3回医療・福祉における電磁環境研究会、pp. 13-15、2010年

- 8) 前田裕二、村川一雄、山根宏：建物レベルでの放射妨害波低減法の検討、電子情報通信学会信学技報、EMCJ94-66、pp. 39-46、1994年12月
- 9) 吉野涼二、澤田章：電波無響室・半無響室シミュレーションシステムの開発および検討、電子情報通信学会信学技報、EMCJ89-4、pp. 21-28、1989年4月
- 10) 佐川祐一郎、宮崎弘志、吉野涼二：電磁環境実験室、大成建設技術研究所報、第30号、pp. 17-20、1997年

## 第4章 スリット状接続構造の電磁シールド性能向上化技術の開発

### 4.1 検討の目的

第2章において、スリット状接続構造の電磁シールド性能SEの定性化を行い、SEが主に全長D、個々のスリット長dに影響を受け、その周波数特性を「 $d/\lambda$  (波長)」によって基準化することが可能であることを明らかにした。さらに、スリット状接続構造を構成する「重ねられた2枚の板状材料」間の導通性能、および材料の品質（素材の撓みや歪み）と施工精度に起因して生ずる「開口部（ビス止め間の隙間）」の状態がその性能値に影響することを示した。

本章では、上記の性能劣化要因である、スリット状接続構造接合部の品質の改善、すなわち遮へい性能の向上を目的とした、施工現場において適用可能と思われる改良構造案を複数考案し、各構造の効果<sup>1)</sup>、および改良効果の高い構造に対する実用化<sup>2)</sup>について検討した結果について述べる。

### 4.2 改良構造の概要

図4-1に各改良構造の断面概要を示す。2.4.5.2において「つば付き接続」が材料間の強い押しつけ効果によりスリット状接続になりにくいという結果が示されたように、SEの向上には「材料間の導通性能の確保」「隙間の低減、消滅」が有効であるとの知見から、これらの効果が得られると推定され、かつ現実的に施工現場において材料等の加工ができ、施工上も問題ないと思われる仕様1～仕様8を設定した。改良案の主な内容は下記の通りである。

- ・ ビスに対するワッシャーの挿入： 仕様1
- ・ 材の折り曲げ： 仕様2、仕様3
- ・ 材の折り返し： 仕様4
- ・ 溝加工： 仕様5、仕様6
- ・ 押さえ材としてのステーブル材の適用： 仕様7、仕様8

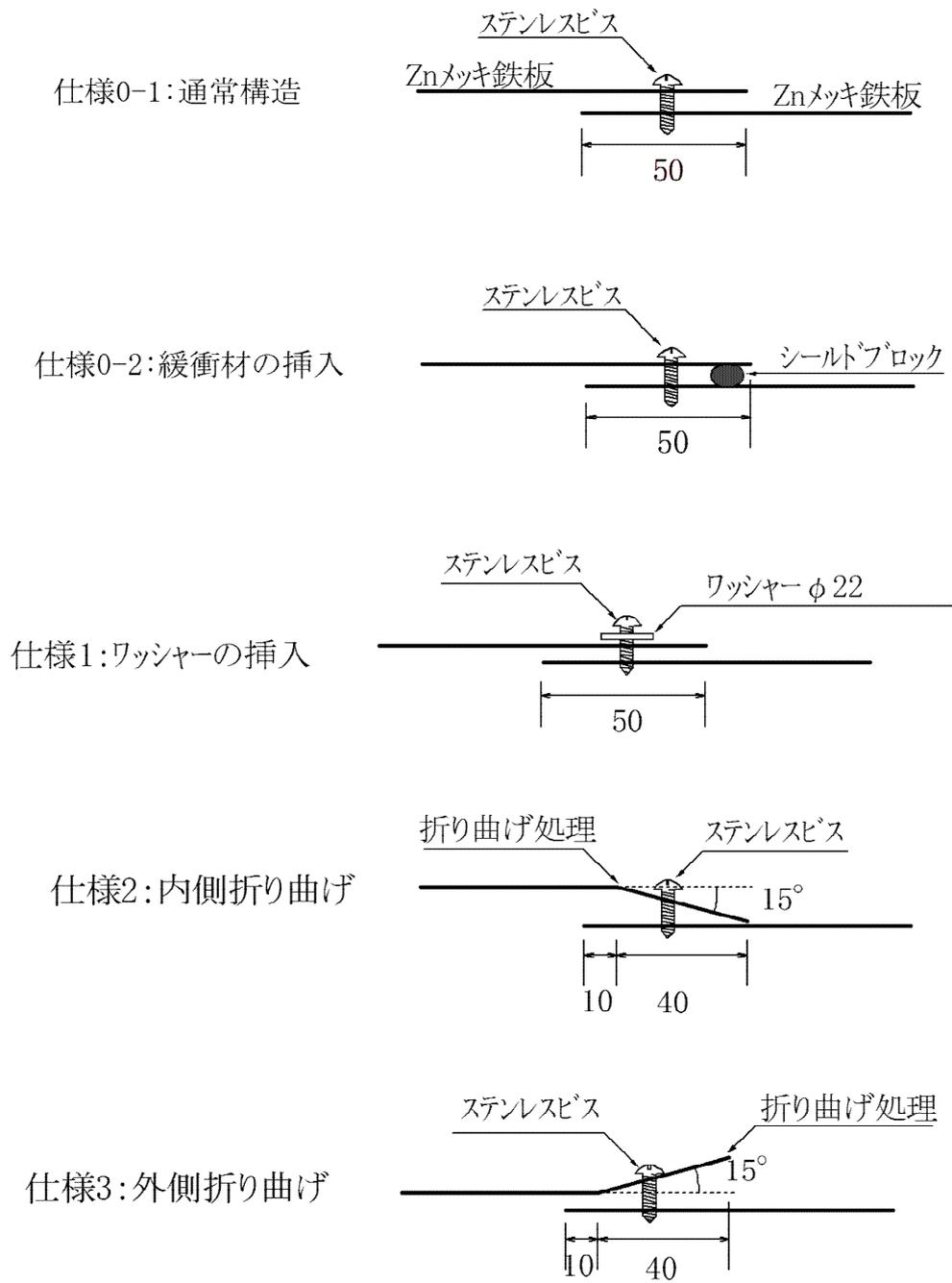
比較のため、特に断面形状等の工夫を加えない「仕様0-1：通常構造」、およびスリット状接続部に導電性の緩衝材を連続的に挿入する構造「仕様0-2：緩衝材の挿入」についても併せて測定した。導電性の緩衝材とは棒状や筒状のゴム材の周囲に、導電性の網材や繊維材を巻き付けたもの、あるいはゴム材自体に導電性を付与した材料であり、ここでは一般に「シールドブロック」と呼称されるものを使用し

ている。この「緩衝材の挿入」は現実に最も良く適用される改良方法ではあるが、施工時の緩衝材の安定的な保持や均一な押さえつけに細心の注意が必要であり、劣化や破損への対応（修理、交換等）は殆ど不可能な構造である。従って、本検討において当構造は参考資料として扱うこととした。なお、同一の改良構造であっても、複数の構成形態が考えられるものについては、仕様番号に枝番を付けて表示した。

仕様7、8の「ステーブル」とは、紙に「コ」の字形の針（Staple）を刺し通し、針先の部分を両側から平らに曲げて紙を綴じる文具（通称：ホチキス）と同様に、重ね合わされた建築材料を「コ」の字形の針で接続固定する（折り曲げは行わない）接合方法である。

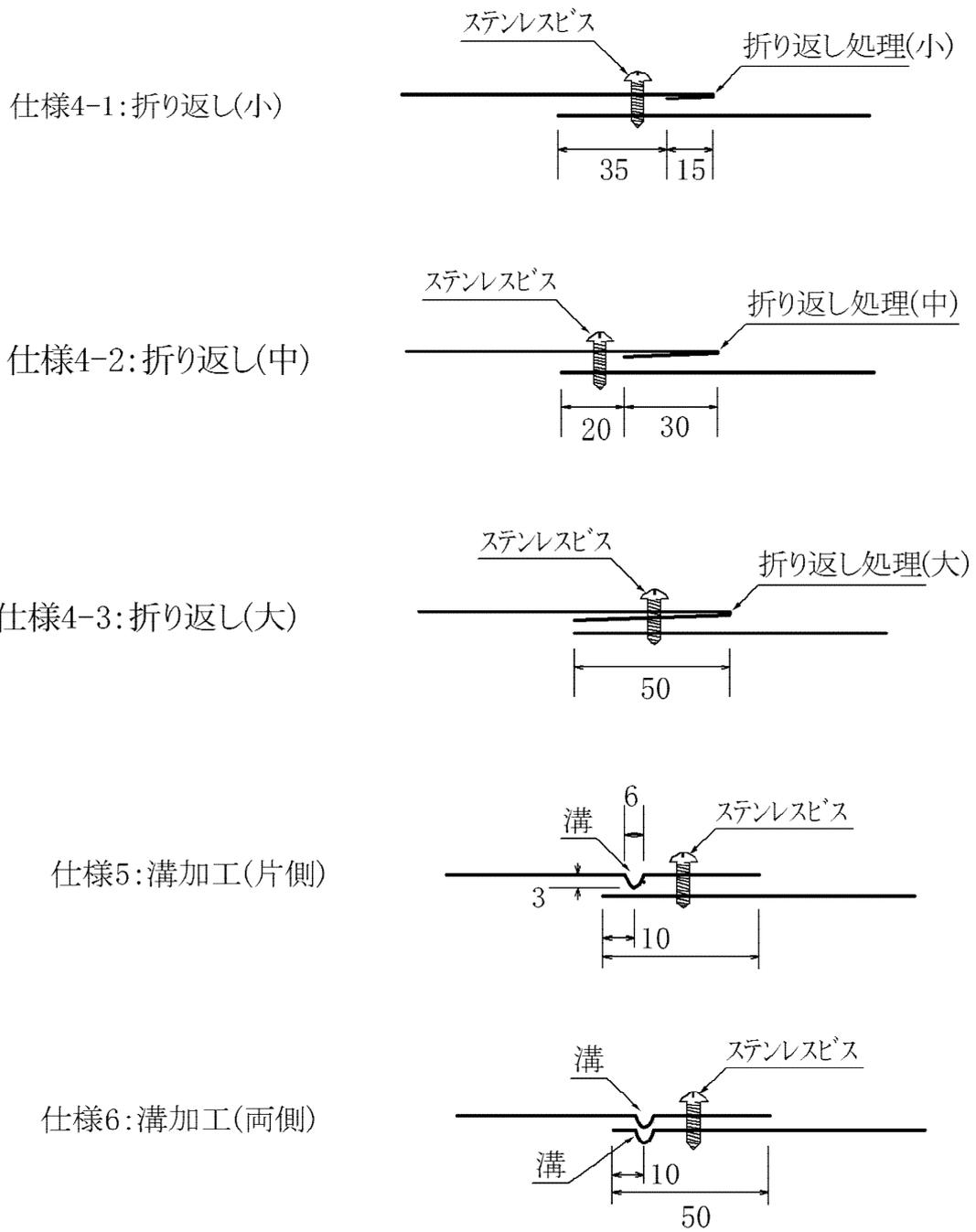
上記は本論文の検討対象であるスリット状接続構造のうち、「重ね合せ構造」の改良となる。「重ね貼り構造」については「重ね合せ構造」の応用として対応が可能であり、「つば付き構造」はやや特殊な断面構造（構造上必要となる「断面の厚さ」に起因して現場において適用される場合が限られる）に含まれるので、本検討の対象外とした。

図4-1の一部の構造においてスリット状接続部が「開口」のように開いているような表現は断面構造説明上のものであり、実際には「開口」が極力開かないように製作している。



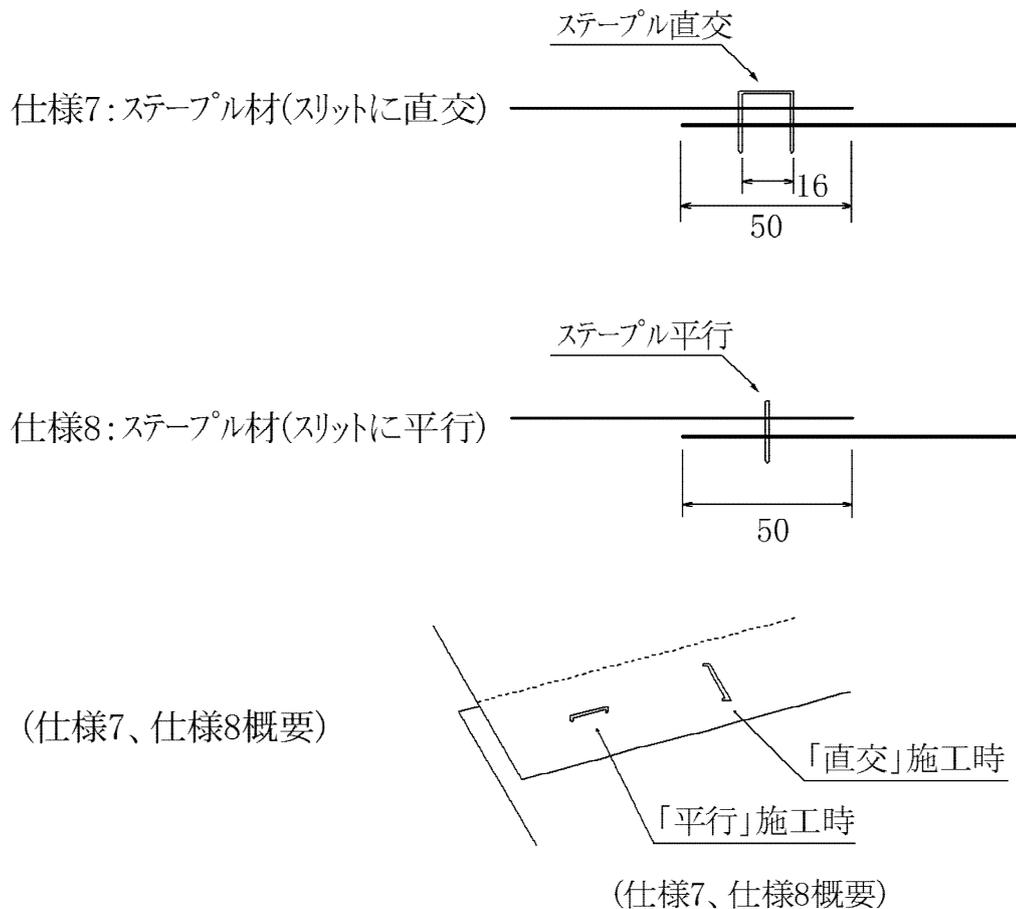
(断面加工寸法の単位：mm)

図4-1 スリット状接続改良構造の概要



(断面加工寸法の単位：mm)

図4-1 スリット状接続改良構造の概要 (つづき)



(断面加工寸法の単位：mm)

図4-1 スリット状接続改良構造の概要 (つづき)

### 4.3 実験方法および条件

第2章、第3章で使用した実験室<sup>3)</sup>の電磁シールド性能測定用開口に亜鉛メッキ鉄板(0.3mm厚)を設置し、図4-2に示すようにその中央部水平方向に全長 $D=640\text{mm}$ 、材料の重ね幅 $h=50\text{mm}$ の各スリットモデルを構成し、間隔 $d=80\text{mm}$ にてステンレスビスで短絡した。スリット状接続部におけるビス固定に対して、試験体の裏面全面には合板を敷設した。測定は、日本建築学会電磁環境小委員会が提案した「材料の電磁シールド性能測定方法」<sup>4)</sup>に準拠し、送信アンテナは試験体正面 $3000\text{mm}$ 点で固定させ、スリット状接続構造の透過側 $300\text{mm}$ の距離において、受信アンテナを $40\text{mm}$ ピッチで移動させながら受信レベル分布を計測した。基準値は、対象の試験体が無い状態で上記と同一の送信アンテナ位置、受信アンテナ位置および移動により把握した。図4-1において送信アンテナは下側(屋外側)、受信アンテナは上側(シールド室

内側)とした。実験室の開口部に直立して設置される試験体において、その水平方向にスリット状接続構造を構成したため偏波面は垂直とした。また、周波数は70M、100M、300M、700M、1G、3G、7G、10G、18GHzとした。受信アンテナの移動により得られた各SEのレベル変動データから各周波数毎の算術平均値を求め、SEの周波数特性値として整理した。なお、対象としたスリット状接続構造の「 $d/\lambda=0.5$ 」(=スロットアンテナとした場合の共振周波数)となる周波数は1875MHzである。

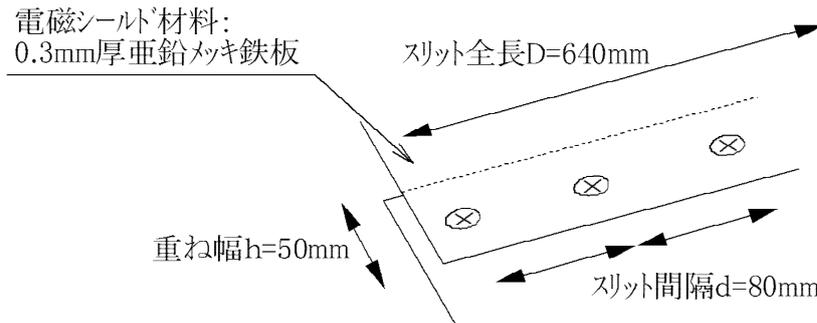


図4-2 スリット状接続改良構造試験体の概要 (スリット状接続部のみ表示)

## 4.4 実験結果

### 4.4.1 導電性緩衝材挿入の効果

「仕様0-1:通常構造」と「仕様0-2:緩衝材の挿入」のSE周波数特性の比較結果を図4-3に示す。以降の各検討において、「仕様0-1:通常構造」のSEを比較基準としてその改善効果を示す。なお、「仕様0-1」の実験は第2章に対して改めて実施しているが、SEは同章2.4.5.1で得た値と比較しても、ほぼ同一の結果が得られていることを確認している。

緩衝材の挿入により2dBから25dBの性能の向上(各周波数向上レベルの算術平均は11dB)がみられ、改善効果が確認できる。導電性緩衝材が2枚の鉄板間に柔軟に密着し、これはある程度の導通が確保されたことによる。

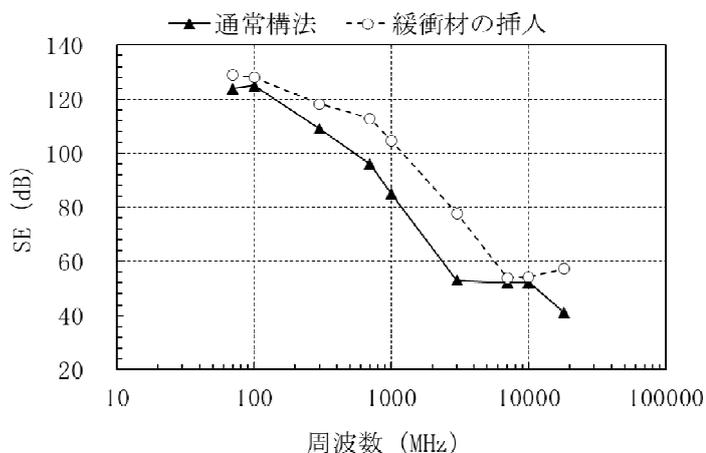


図4-3 SE周波数特性 (緩衝材挿入の効果)

#### 4.4.2 ワッシャー挿入の効果

「仕様1:ワッシャーの挿入」のSE周波数特性を図4-4に示す。ワッシャーの挿入により性能の向上は-2dB~14dB (平均3dB) となり、改善効果は非常に少ない。多少の改善効果は、ワッシャーの挿入によりビス周辺のより広い面積で押し付けられたことによる。

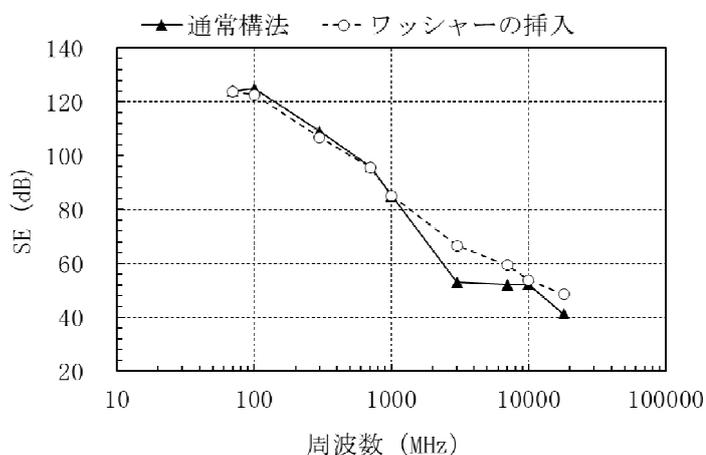


図4-4 SE周波数特性 (ワッシャー挿入の効果)

#### 4.4.3 材折り曲げの効果

「仕様2:内側折り曲げ」「仕様3:外側折り曲げ」のSE周波数特性を図4-5に示す。内側への折り曲げによる性能の向上は-1dB~14dB (平均6dB)、外側への折り曲げによる性能の向上は-18dB~-5dB (平均-12dB) となる。内側折り曲げで

は、当加工によりビスによる材料接触部の押さえつけ効果（隙間の低減）がある程度機能することによる効果である。これに対して、外側への折り曲げでは、材料接継部におけるビスによる材料の押さえつけ効果が殆ど機能せず、逆に材料接触部が減少しSEが低減している。

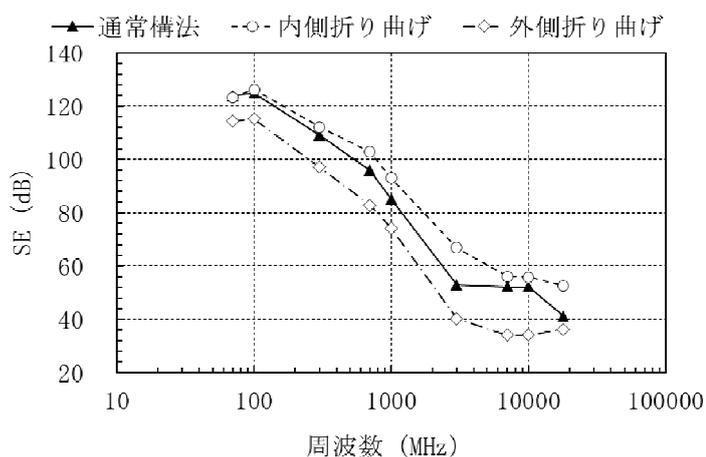


図4-5 SE周波数特性（材折り曲げの効果）

#### 4.4.4 材折り返しの効果

「仕様4-1:折り返し（小）」「仕様4-2:折り返し（中）」「仕様4-3:折り返し（大）」のSE周波数特性を図4-6に示す。「折り返し（小）」による性能の向上は13dB～39dB（平均22dB）、「同（中）」による性能の向上は-2dB～33dB（平均15dB）、「同（大）」による性能の向上は-10dB～-1dB（平均-6dB）となる。「折り返し（小）」により大きな改善効果がみられるが、「同（中）」、「同（大）」へ推移するに比してその効果は顕著に低下し、「同（大）」では逆に性能が低減した。同一思想の改善手法であっても、「スリット状接継構造」における「折り返し処理」の相対的な寸法（比）が、その効果に大きな影響を与えることが示された。

今回、詳細な条件設定を行った訳ではないので明確な理由を把握できないが、「折り返し（小）」と「同（中）」はビスによる折り返し部での押さえつけがてこの原理（支点、作用点、力点）により良好に発揮されたのに対して、「同（大）」は折り返し部がビスを跨いでいることから、折り返し面が最も大きい（＝材料間の接触面積）にも関わらず、この原理が機能しなかったと考える。

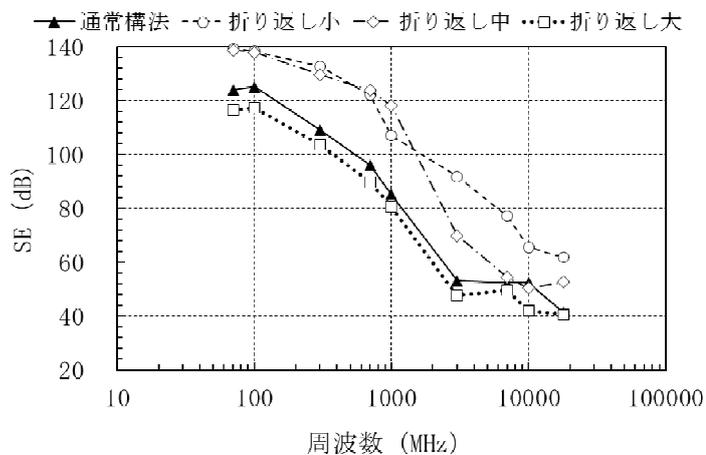


図4-6 SE周波数特性（材折り返しの効果）

#### 4.4.5 溝加工の効果

「仕様5:溝加工（片側）」「仕様6:溝加工（両側）」のSE周波数特性を図4-7に示す。「溝加工（片側）」による性能の向上は-3dB~18dB（平均8dB）、「同（両側）」による性能の向上は8dB~28dB（平均13dB）となる。「溝加工（両側）」により一定の改善効果がみられるが、「同（片側）」ではその効果は低下した。スリット状接続を形成する両側の材料の溝加工は、片側の溝加工に対して材料間の圧着力は弱いですが、溝加工部分が大きく確かな接触面積を確保すると予想され、結果として相対的に大きな遮へい効果を生んだ。

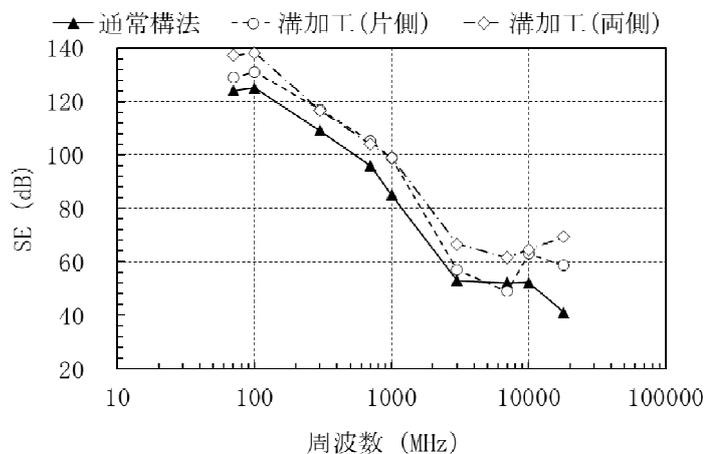


図4-7 SE周波数特性（溝加工の効果）

#### 4.4.6 ステープル材固定の効果

「仕様7:ステープル材（スリットに直交）」「仕様8:ステープル材（スリットに平行）」のSE周波数特性を図4-8に示す。「ステープル材（スリットに直交）」による性能の向上は-3dB~11dB（平均2dB）、「同（平行）」による性能の向上は6dB~23dB（平均12dB）となる。同じステープル材による固定であっても「スリットに平行」して固定することで、一定の改善効果がみられる。固定によるその周囲の導電性の確保は同程度と考えられるが、ステープル固有の「直線状の固定」方向がスリット状接続と同一となることで、遮へい効果が増したと考えられる。

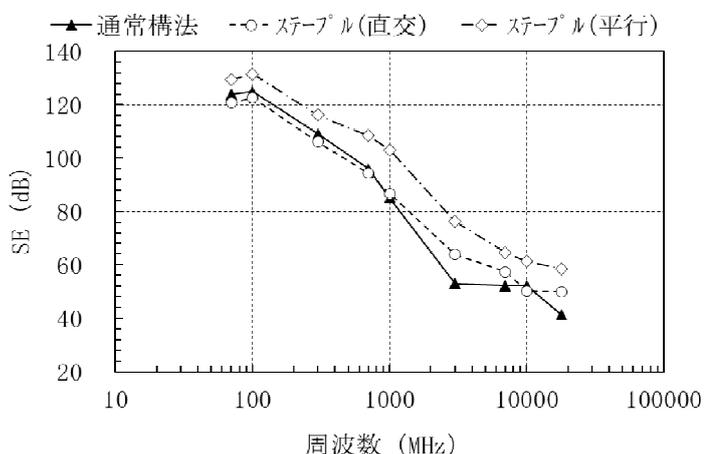


図4-8 SE周波数特性（ステープル材固定の効果）

#### 4.5 改良構造の効果比較

上記の各改良構造を検討した結果、以下の構造において良好な改善効果が認められた。

- ・ 仕様1：ワッシャーの挿入
- ・ 仕様2：内側折り曲げ
- ・ 仕様4-1：折り返し（小）
- ・ 仕様6：溝加工（両側）
- ・ 仕様8：ステープル材（スリットに平行）

これらの各改良構造のSE2を「通常構造」のSE1と比較した遮へい効果量 $\Delta$ SE (=SE2-SE1)の周波数特性結果を図4-9に示す。この結果から、下記のことが

示される。

- (1) 各仕様とも相対的に、1000MHz以下の周波数帯域よりも1000MHz以上の帯域の方がやや良好な遮へい効果となる。これは、低周波数域の性能の改善が高周波数域より困難であることを示しているが、一般に、低周波数域の方が高周波数域より本来のSEが高いので、それによる現実的な影響は小さい。
- (2) 各構造に対して各周波数の $\Delta$ SEの平均値を改良効果の尺度とした場合、「折り返し(小) ( $\Delta$ SE平均値: 22dB)」が最も改善効果が特に高く、それに「溝加工(両側) ( $\Delta$ SE平均値: 13dB)」「ステープル(平行) ( $\Delta$ SE平均値: 12dB)」が続く結果となった。

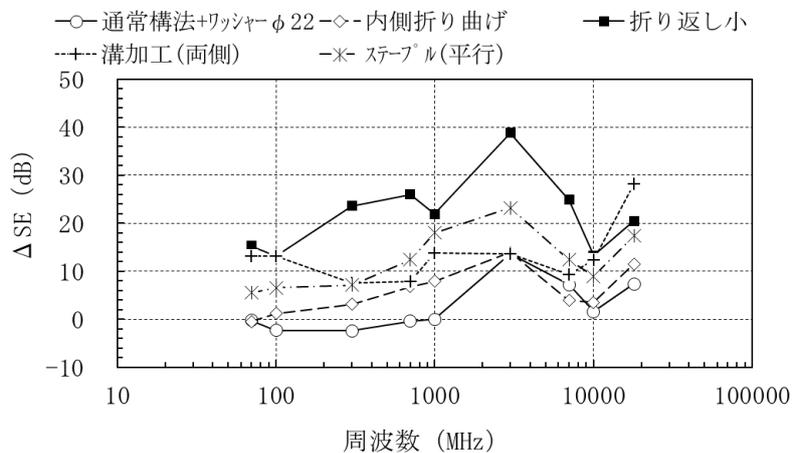


図4-9 主な構造の改善効果比較結果

## 4.6 スリット状接続改良構造の実用化に関する検討

### 4.6.1 スリット状接続改良構造の実用化において検討すべき事項

4.5節に示すように、「仕様4-1: 折り返し(小)」が性能上優れた改良構造であることがわかった。当構造の実用化に対して、以下の事項について明らかにする必要がある。

- ・ 性能確保に留意すべき事項、および同等の性能維持が予想される類似の(派生する)同様構造について
  - ・ 現場での施工における材料の準備(事前加工)や施工方法(手順)
- 以下に、これらの検討結果を示す。

#### 4.6.2 性能確保への要点および類似の同様構造について

改めて、検討対象とした改良構造の概要を図4-10に示す。同図に示すように、材端部を適切に「J字型」に折り曲げ、折り曲げ部に掛からない位置でビス（あるいは釘等）止めすることが性能向上の観点から重要である。さらに、隣接する部材との接続部における「油脂類や塗装等の排除」が施工管理上必要である。また、第2章にも示したように、接続する両材料が可能な限り密着することが必要であるため、最終的にビス等で両材料を固定する際に、折り曲げ部が「ばねのような圧縮に対する抵抗材（材料の圧着性確保および隙間の除去）」となることも重要である。

次に、当改良構造を用いた類似の構造について検討した結果を図4-11に示す。同図 (a) は、材端部をJ字状に曲げるのではなく、同様な形状の導電性板材（V字型アダプタと呼称）を設置する手法である。材料自体は、多くの場合約90cm幅のロール状の形態で供給される。この材料を施工現場等において、図4-10に示すように一様に折り返し加工することが困難な場合があると想像される。この解決方法として、別途、帯状の「V字型アダプタ」を製作し、接続部に設置、片方の板状材とビス等で一緒に、もう一方の材料に押さえつける方法が有効である。

また、図4-11(b)は、重ね貼り接続構造への適用例である。当該構造においては、帯状の目地材料が別途必要のため、この両端を折り曲げ加工することで適用が可能となる。なお、つば付き接続構造においては、一方の折り返し処理、または別途目地材の適用が困難なため、当該改良構造の適用は検討範囲から除外した。

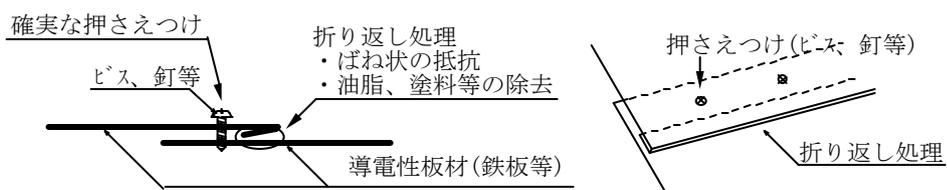
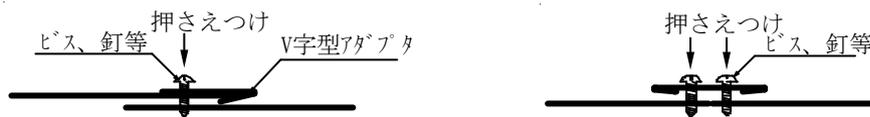


図4-10 スリット状接続改良構造



(a) 折り返し用V字アダプタの適用構造

(b) 重ね貼り接続構造への適用

図4-11 スリット状接続改良構造から派生する構造の例

### 4.6.3 現場での施工における事前準備や施工方法について

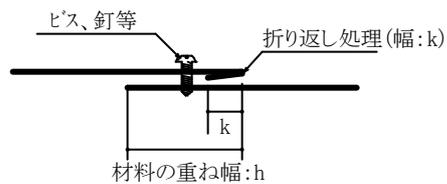
次に、現場施工への適用に対する問題点と、その解決方法について検討する。現場において、ロール状で供給される板状の電磁シールド材は、床面を除く壁、天井、柱、梁等においては長方形に整形された状態で施工される。この時、材料間接続のコーナー部では、通常3枚（T字型目地）、4枚（十字型目地）の材料が重ね合わされることになる。2枚の材料の接続部では問題ないが、3枚あるいは4枚のコーナー接続部では多重の重ね合せとなり、部分的にシールド層の厚さが増大するとともに、効果的な隙間の除去が困難となる。これを解決するためには、3～4枚の重なりが起るコーナー部における材料や施工方法の工夫が必要になる。これを解決することを目的とした材料の事前加工、および壁面等を対象とした施工手順について整理したものを図4-12に示す。

図4-12(a)に示すように、材料間の重ね幅を $h$ 、折り返し幅を $k$ とし、同図(b)に示すように長方形の材料の一部を指定の寸法にてカットし、さらに幅 $k$ にて事前に折り返す。なお、左上部のカット部の寸法は同図に示すように2種類存在する。

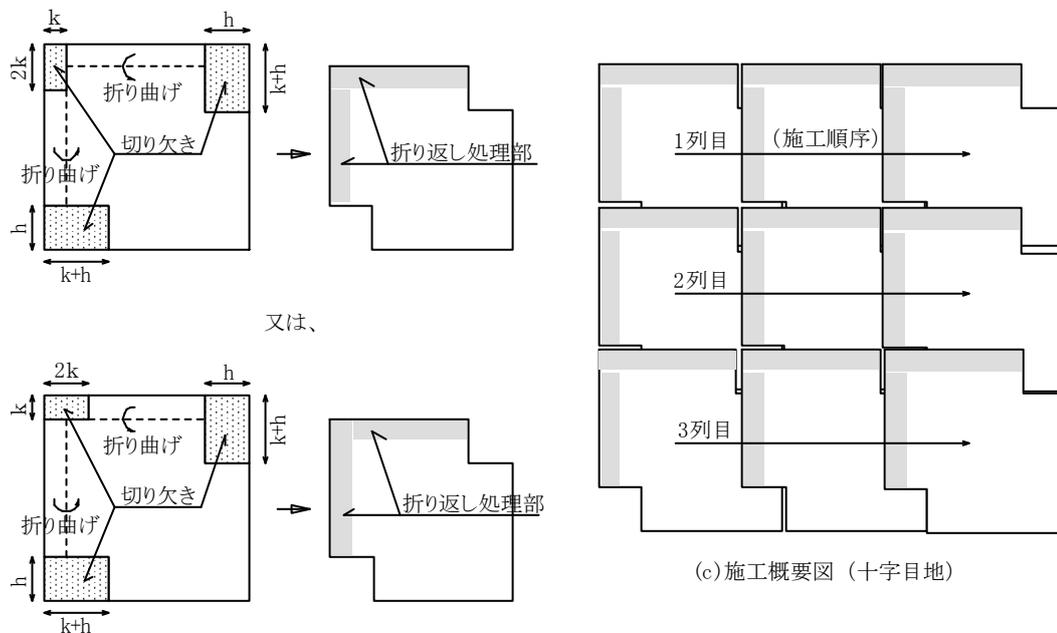
このように加工された材料を施工表面の左上から水平右方向に一列に施工し、この後一段下の列に移り、同様に施工する。以降、この手順を繰り返す。

この時、各板材の目地を碁盤の目状に施工する場合（十字型目地）は、同図(c)のようになるが、格段の板材をずらして施工する場合（T字型目地）は、2段目（および偶数段目）の板材を同図(d)に示すように全体寸法を調整したものを（寸法短縮版）事前に準備することになる。なお、各段の最も右側に施工される材料も、面の寸法に合わせて材料の寸法を調整する必要が生ずる。

施工の容易性からは十字型目地であるが、各目地の全長を短くし、各コーナー部で重なり合う板材の枚数を少なくすることは、性能確保の上で有利になることから、T字型目地の方が好ましい。

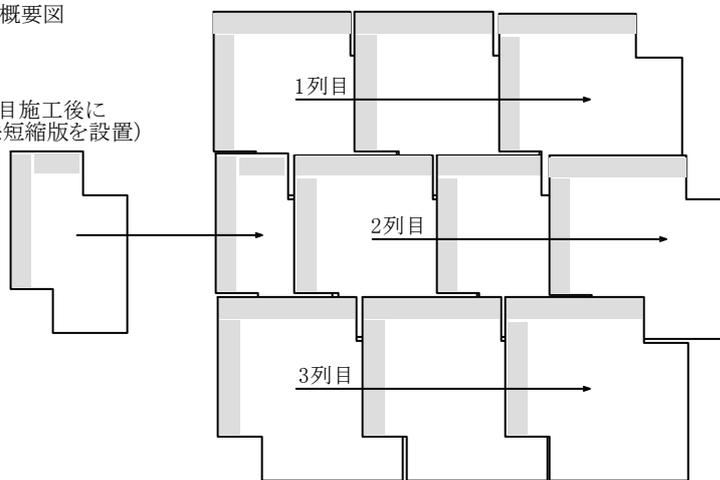


(a)スリット図断面図



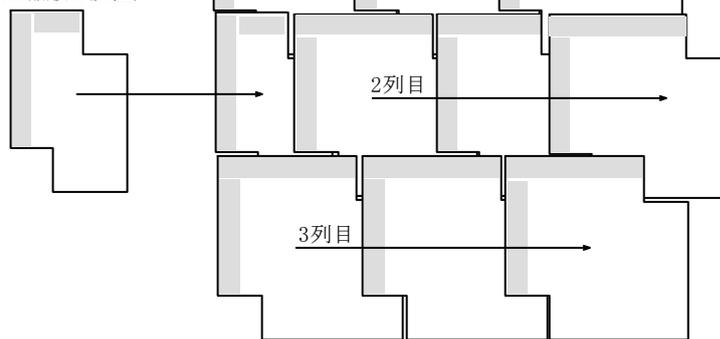
(b)材料製作概要図

(1列目施工後に寸法短縮版を設置)



(c)施工概要図 (十字目地)

(1列目施工後に寸法短縮版を設置)



(d)施工概要図 (T字目地)

図4-12 スリット状接続改良構造における目地構造の例

#### 4.6.4 実際を模した施工モデルに対する性能の検証

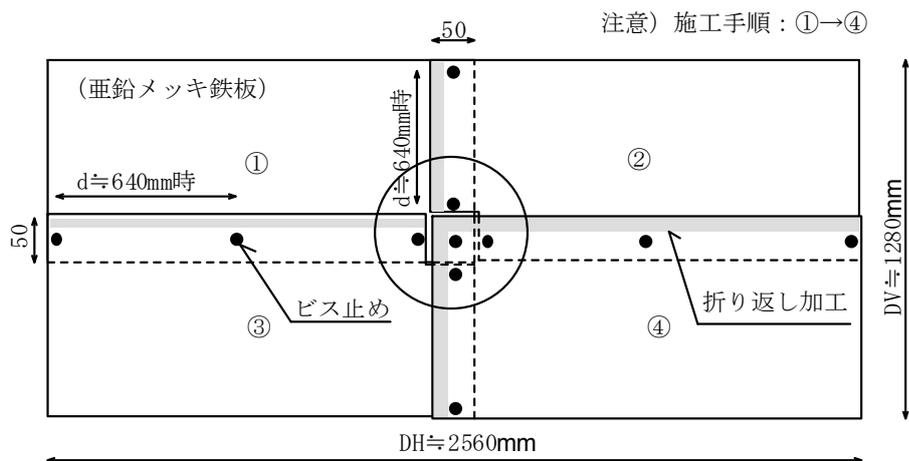
上記の検討に引き続き、より実際に近い施工モデルに対するSEの把握を試みた。図4-13に示すような、重ね合せスリット状接続構造の十字目地モデルを作成した。測定における条件を下記に示す。

- ・水平方向スリット全長DH≒2560mm
- ・垂直方向スリット全長DV≒1280mm
- ・個々のスリット長（スリットの固定間隔） $d$ ≒640mm、160mm、80mm、40mm
- ・折り返し部の長さ $k$ =15mm

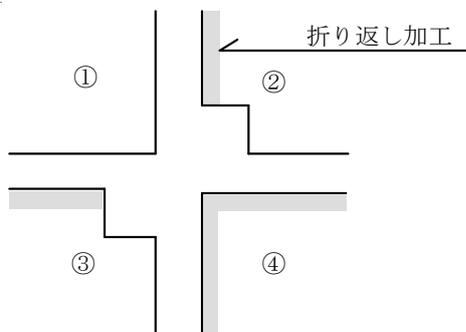
試験モデルには直交する目地が存在するため、測定対象偏波面は垂直および水平とした。測定は、2.3.1.4に示す方法とした。

個々のスリット長を変化させた場合のSEの差異を、対象としたスリットおよび偏波面別に整理し、図4-14に示す。これらの結果から、下記のことが示される。

- (1) スリット固定間隔 $d$ ≒80mmと比較すると、図4-6に示す「折り返し（小）」の測定値とほぼ同程度のSEを示した。十字目地構造部での性能低下は殆どみられなかった。
- (2) 「スリットの固定間隔 $d$ ≒40mm」「同80mm」が、10GHz付近まで60dB程度以上の高いSEを示す。固定間隔 $d$ ≒40～80mmでは殆どSEに差異はみられず、「固定間隔 $d$ ≒80mm」程度で、目地部分においても十分な圧着効果が期待できる。
- (3) 「 $d$ ≒160mm」では、1GHz付近まで60dB程度以上、10GHz付近で40dBのSEとなった。
- (4) 「 $d$ ≒640mm」では1GHz以上で30～40dB程度のSEとなり、折り返し構造においても十分な圧着効果は得られない。

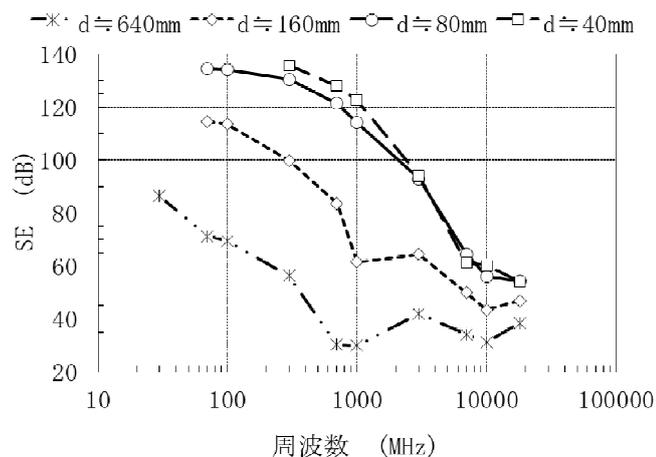


(a) 十字目地構造モデル試験体正面図 (d ≈ 640mm時)

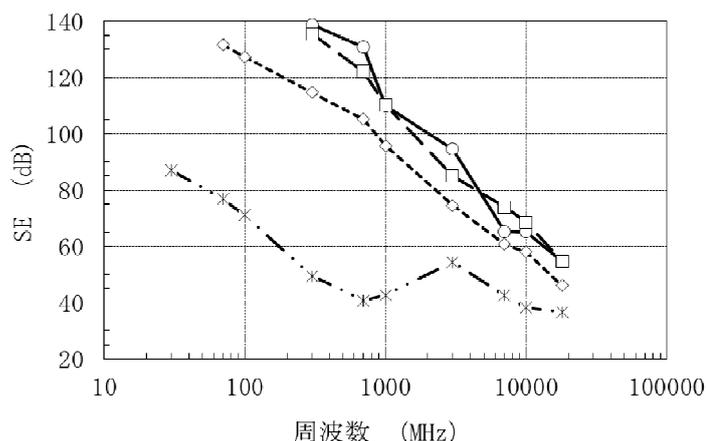


(b) 十字目地接続部における各材料の端部形状 (a図丸印部分)

図4-13 「折り返し構造」による十字目地試験体の概要



(a) 水平方向目地測定結果（垂直偏波）



(b) 垂直方向目地測定結果（水平偏波）

図4-14 折り返し構造十字目地試験体測定結果

#### 4.7 本章のまとめ

スリット状接続構造の電磁シールド性能の向上を目指した改良仕様に対する性能の検証実験を行い、そのうちの最も性能の向上が見込める構造を対象として、その実用化に関する検討を行った。本検討により、下記の知見、結果を得た。

- (1) 各改良構造を検討した結果、「ワッシャーの挿入 ( $\Delta SE=-2\sim 14\text{dB}$ )」「内側折り曲げ ( $\Delta SE=-1\sim 14\text{dB}$ )」「折り返し(小) ( $\Delta SE=13\sim 39\text{dB}$ )」「溝加工(両側) ( $\Delta SE=8\sim 28\text{dB}$ )」「ステーブル材(スリットに平行) ( $\Delta SE=6\sim 23\text{dB}$ )」

の構造において良好な改善効果が認められる。

- (2) 上記のうち、各構造の $\Delta$ SEの平均値を基準とすると、「折り返し(小) ( $\Delta$ SE平均値: 22dB)」が最も改善効果が特に高く、それに「溝加工(両側) ( $\Delta$ SE平均値: 13dB)」「ステープル(平行) ( $\Delta$ SE平均値: 12dB)」が続く結果となる。また、全体として、低い周波数帯域よりも高い帯域の方がやや良好な効果を示す。
- (3) 「折り返し(小)」構造に対する応用構造の検討を行い、重ね合せ接続における折り返し部に、別途V字アダプタを用いる方法、および重ね貼り構造への適用方法を見出した。
- (4) 「折り返し(小)」構造を実際の施工現場に展開するための手段として、長方形の板状材料の適切な事前準備(形状の加工と折り返し)、そしてこれを用いた現実的な施工方法を考案し、施工手順および施工管理上の注意点について把握した。
- (5) 「折り返し(小)」構造の十字目地部構造においても、一方向目地測定結果と同様のSEとなり、良好な性能を維持した。

## [第4章 参考文献]

- 1) 吉野涼二, 井上勝夫, 三枝健二: スリット状接続構造の電磁シールド性能基準化に関する実験的検討 その8 性能の向上化に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 617-618, 2008年9月
- 2) 吉野涼二: スリット状接続構造の電磁シールド性能向上化技術に関する検討、大成建設技術センター報、第41号、pp. 47-1~47-5、2008年
- 3) 佐川祐一郎、宮崎弘志、吉野涼二: 電磁環境実験室、大成建設技術研究所報、第30号、pp. 17-20、1997年
- 4) 影山健二: 材料の電磁シールド性能測定法、日本建築学会電磁環境小委員会第4回シンポジウム資料、2001年11月
- 5) 発明の名称: 電磁シールド材の接合構造、特許第5065959号、発明者: 吉野涼二、登録日: 2012年8月17日

## 第5章 結論

電磁シールド室は一般に長方形の板状あるいは膜状電磁シールド材料（亜鉛メッキ鉄板、銅箔、アルミ箔等）や建具等により対象空間全体を覆うことで建築的に構成されており、そこには必ず「シールド材料の接続」が存在する。計測用、研究用施設等の高性能な電磁シールド空間の場合は、当該部位に対して半田や溶接による連続的な接続処理を行うのが一般的であるが、EMC対策用、各種無線通信環境の制御等を目的とする低～中性能の空間では、建設コストや工期を節約するため、より簡易ではあるが信頼性の高い構法を用いる。多くの場合、隣接する電磁シールド材料を一定の幅で重ね代をとり、ネジ、釘、ステープル等の導電材により留め付ける方法（本論文では「スリット状接続」と呼称した）がとられる。そこが電磁シールド室の性能を維持するうえでの弱点となりやすいが、これらの構造と電磁シールド性能を系統的に研究した事例は殆どない。

本論文ではこの点に着目し、「スリット状接続」を対象とした性能把握と性能設計方法の検討、およびこれらの施工方法を用いた電磁シールド室の性能予測技術、そして性能向上を目指した施工技術の検討を対象とした。具体的には、電磁シールド材料間のスリット状接続を対象とした下記の各項目を主な検討課題とした。

- (1) スリット状接続の電磁シールド性能 (SE) に対する構成要素の影響度の把握と、性能予測方法の提案
- (2) スリット状接続により構成された電磁シールド室内空間および周辺外部空間の性能予測シミュレーション技術の提案
- (3) スリット状接続の電磁シールド性能向上を目的とした簡易的な改良技術の提案

この(1)について第2章、(2)について第3章、(3)について第4章で検討を行った。以下に各章の成果を記す。

**第1章**では、研究の技術的な背景として、環境電波ノイズによる問題の概要と、電気、電子機器への技術的な対応の概要、そして建設業界としての対応の必要性に基づく対策の実施状況について説明した。続いて、本論文を展開するに際して必要となる電磁シールド性能の基本事項と、各施設の電磁シールドの適用理由と一般的な性能、電磁シールド室構成の概念、個々の電磁シールド材料と性能値を例示することで、「スリット状接続構造」の適用理由とその条件について述べ、当該構造に対する性能設計上の問題点を明らかにした。

**第2章**では、スリット状接続構造電磁シールド性能の定式化を進めるにあたり、

その基礎検討として、先ずスリット状接続構造の構成要素の性能値への影響度を把握するため、当該構造を単純化した、開口幅数mm、全長数cm～数m程度の長方形開口が長手方向に約1mmの間隔（導電材で短絡している）で複数連なった「スリット状開口構造」に対する検討を行った。導電材の短絡部分は、「ネジ、釘、ステーブル等の導電材を等間隔に施工する」ことを想定している。検討では、その全長、導電材による短絡の間隔、開口幅を可変条件とし、各構造条件と電磁シールド性能（SE）の関係を把握した。また、FDTD法によるスリット状開口に対する数値解析を行い、実験結果の有効性を検討した。

これらの検討により下記の結果を得た。

- (1) 得られた透過特性は、スロットアンテナからの電波放射を基本とした考え方で説明し得る。
- (2) スリット状開口構造のSEに影響する要因として、接続の全長D、導体の短絡による個々のスリット状長d、開口幅h（スリット状接続構造における開口部の存在）が影響する。
- (3) これらの構造の性能値設計法提案のための測定結果の整理方法として、「 $d/\lambda$ （波長）」による基準化が有効である
- (4) 「 $d/\lambda < 0.5$ 」では「 $d/\lambda$ 」の増加に対してSEが反比例する相関が確認されたが、「 $d/\lambda > 0.5$ 」では「 $d/\lambda$ 」の増加に対してSEはほぼ一定の値となった。
- (5) FDTD法による数値解析結果は実験結果と良好に一致し、実験の有効性が確認された。よって、今後の検討では、実験結果を基に議論を進めることとした。

上記の結果に基づき、スリット状接続構造モデルを対象に、その性能に影響すると思われるパラメータとして「全長」「個々のスリット長」「スリット状接続構造を構成する両材料間の導通状態」「個々のスリットにおける開口（隙間）の状態」を設定し、それぞれのSEへの影響度を把握した。この結果を用いてスリット状接続構造の電磁シールド性能予測式を導出した。

これらの検討により、下記の結果を得た。

- (1) 「重ね合せ」「重ね貼り」「つば付き」の各断面形状（図2-18参照）の違いによるSEの差異は認められない。ただし、「つば付き接続、導通状態」では、ビスでの固定時に接続部の端部（つば先端または根元）が強く押し付けられたため、「スリット状の隙間」が構成出来ないことがわかった。
- (2) スリット状接続時の両材料間の導通状態が、「 $d/\lambda \leq 0.5$ 」の領域においてSEに影響する。

- (3) スリット状接続時の両材料間の隙間の有無およびその程度が、「 $d/\lambda \leq 0.5$ 」および「 $d/\lambda > 0.5$ 」の領域においてSEに影響する。
- (4) SEに対するスリット状接続時の両材料の重ね幅 $h$ の違いは、 $h=25\sim 100\text{mm}$ の範囲において認められない。
- (5) 全長 $D$ の違いにより、「 $d/\lambda \leq 0.5$ 」の領域においてSEの差異として把握された。
- (6) 上記(2)～(5)の結果を基に、SEの予測方法について提案(表2-2参照)し、予測結果と実測値との良好な相関を得た。

引き続き「スリット状接続部により構成された電磁シールド室の空間的な遮へい性能の予測」に必要となる、スリット状接続構造の透過による位相の変化について検討した。その結果、スリット状接続を透過する電波の位相変化量は、スリット固定間隔、材料の重ね幅、周波数(波長)の変化による影響を受けることが示された。このことは、解析的検討によっても示された。また、その回転量には、部位に入射し透過する際の伝搬方向の変化等も影響していることが推測された。

本検討結果は、スリット状接続構造のSEを定性定量的に把握でき、これに類する建築構造物の電磁シールド性能を予測し設計できる技術として有効であると考えられる。

**第3章**では、「スリット状接続部により構成された電磁シールド室の空間的な遮へい性能の予測」を目的とした数値シミュレーションシステムの開発(以下、新システム)について述べた。まず新システムの概要を述べ、次に、その予測精度を検証するために、スリット状接続部モデルに対する新システムによる予測値と実験値の比較、加えて従来の虚像法による予測値との検証を行った。さらに、当該構造による電磁シールド室モデルを設定し、スリット状接続部からの電波透過追跡の有無による予測結果への影響度の計算を行い、新システムの有効性を検証した。

これらの検討により、下記の結果を得た。

- (1) 新システム予測値と実測値とは良好な整合性がみられ、適切な条件設定を行うことで、電磁シールド空間の遮へい性能予測法として高い精度が確保できる。
- (2) 新システムと従来の虚像法との比較においても、新システムが高い予測精度と実用性を有している。
- (3) スリット状接続部で構成された居室に到来する外来ノイズの、対象室内での電磁環境の予測において、新システムではスリット状接続部からの影響度を空間として適切に評価できる。

第2章における構造としての遮へい性能の体系化に続き、本章の検討結果は、遮

へい空間としての実用的な性能予測、設計技術を導出できた点において有効であると考えられる。

第4章では、第2章で示した「つば付き接続、導通状態」が、材料間の高い圧着性能により「スリット状構造からの漏洩状態とはならない」という知見を基本として、スリット状接続構造の電磁シールド性能の向上化を目指した改良仕様（図4-1参照）に対する性能の検証実験を行い、そのうちの最も性能の向上化が見込める構造を対象として、その実用化に関する検討を行った。

これらの検討により、下記結果を得た。

- (1) ワッシャーの挿入、内側折り曲げ、折り返し（小）、溝加工（両側）、ステープル材（スリットに平行）の構造において良好な改善効果が認められた。このうち、折り返し（小）が最も高い改善効果を示した。
- (2) 折り返し（小）構造を実際の施工現場に展開するための手段として、長方形の板状材料の適切な事前加工、施工方法、手順および施工管理上の注意点を明らかにした。
- (3) 「折り返し（小）」の十字目地構造においても良好なSEを示した。

本検討では、スリット状接続の電磁シールド性能向上を目的とした簡易的な改良技術の提案と、その実用化に関する提案を行った。実用化構造は実際の施工現場への導入が可能であり、スリット状接続構造の改良構法として有効である。

以上、本論文では、現実的に多くの低～中程度の電磁シールド性能が必要とされる施設において用いられつつも明確にされていない「材料間のスリット状接続構造」の遮へい性能の把握に基づく定式化を行い、これを基に当該構造により構成される電磁シールド室空間の遮へい性能予測技術を開発した。さらに、当該構造の遮へい性能の向上化技術について検討し、効果的かつ現実的な改良構造を見出した。性能予測方法の体系化（定式化）、予測システムの開発、実用的な改良構造の提案は、対象となる建築物の計画、設計、施工の各分野のみならず、経済性（費用対効果）をも加味した技術である。

今後、当該技術の実用にあたっては、性能予測値と建設後の測定値との比較による現状の確認と問題点の把握、予測精度の向上に加え、電磁シールド室に一般的に設置されるシールド扉（扉枠と周辺の壁、扉枠とシールド扉本体）、シールド窓（窓枠と周辺の壁、窓枠とシールドガラス面）、換気口等の貫通部と、壁や天井等の電磁シールド面との取り合い部の性能把握による当該予測技術への導入による、より総合的な設計施工技術としての展開が必要である。

## 謝 辞

本論文は、筆者が大成建設株式会社技術センターおよび建築本部で行った研究を取りまとめたものです。

日本大学理工学部電子工学科三枝健二教授、同建築学科井上勝夫教授には、研究の開始当初から本論文の執筆および審査において、また、日本大学理工学部電気工学科山崎恒樹教授には本論文の審査において、それぞれ大変丁寧なご指導を賜りました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

当研究の推進と論文の執筆に対して、大成建設株式会社技術センター平松友孝博士（当時）、森川泰成博士、宮崎弘志氏（当時）、遠藤哲夫博士、加藤 崇氏、同社建築本部佐々木晴夫氏には、研究環境の整備とともに暖かい励まし、貴重なご助言を頂きました。各種の実験やシステム開発等に関わる長期の時間等を伴う本研究には、前提となる研究環境の整備が必須となります。この点に関してご理解、ご高配を頂いたことに対して厚く御礼申し上げます。

各種モデル実験の実施とそのデータの整理・分析において、株式会社環境調査事務所高田昭俊氏（当時）、同社藤崎哲史氏に、また、シミュレーションシステムの開発や予測精度の検証や向上に関して、株式会社システムアーキテクチャ代表取締役社長雪竹正治氏、同社小芝宏一氏、その他多くの方々にも多大なご協力を頂きました。これは、本研究の推進にはなくてはならない技術的要素であり、このご尽力に対して厚く御礼申し上げます。

恩師、徳山大学大竹義則元教授、日本大学木村 翔名誉教授は、筆者がこのような環境に身を置くことに対する、未知の課題を解決するための目標設定の考え方、課題達成への努力を喜びと感じ、技術者・研究者としてのあり方や道筋をさし示して下さいました。そのご指導に対して、尊敬と深い感謝の意を表します。

最後に、筆者を暖かく見守ってくれた父・友己（故人）、母・スミエ、義父・光田儀輔（故人）、義母・光子、長期にわたる研究の推進と本論文の執筆に対する一番の理解者であり、深い献身を示してくれた妻・泰子、そして筆者の精神的な支えとなっている長男・陽己とその妻・友子に対し、記して深く感謝の意を表します。

平成 28 年 4 月

吉野 涼二