

清水建設技術研究所サイバー実験棟の電磁シールド性能評価

—竣工から22年が経過した電磁シールド施設の経年変化の追跡調査—

横井 佐代子 白石 理人 山根 俊博

(技術研究所)

(技術研究所)

(技術研究所)

Performance of Electromagnetic Shield of the Cyber Laboratory in Institute of Technology, Shimizu Corporation

—Secular change of an electromagnetic shield facility in 22 years from the building's completion—

Sayoko Yokoi, Michihito Shiraishi and Toshihiro Yamane

清水建設株式会社技術研究所サイバー実験棟は、2020年で竣工してから22年になる。経年変化に伴う性能低下が予想されたため、現在の電磁シールド性能と竣工当時の性能との違いを挿入損失法によって評価した。その結果、電磁シールド性能は、最大80dB劣化していた。扉枠の酸化している箇所の錆を落とし、扉の開閉が正しく行えるよう丁番の歪みを修繕した結果、竣工時の水準に改善された。電波暗室は特殊施設である特性上、経年変化を追跡できる棟数が限られる。今回の調査では、電波暗室の設計計画、および修繕計画の参考となる貴重なデータをとることができた。

The Cyber Laboratory in Institute of Technology, Shimizu Corporation is used in 22 years, from the building's completion in 1998 to 2020. Since the deterioration of its equipment due to secular change is expected, the current electromagnetic shield performance was evaluated in comparison with the performance at the time of building completion using the insertion loss method. It was found that the electromagnetic shield performance was degraded by about 80 dB. As a result of removing rust from the oxidized part of the door frame and repairing the distortion of the hinge so that the door can be opened and closed correctly, the performance at the time of building completion was improved.

1.はじめに

清水建設技術研究所サイバー実験棟は、1998年に竣工し2020年で22年目になる。当実験棟は、1990年代から将来にわたって無線通信技術を基盤とする情報化社会が到来することを見込んで設置された、建物に關係する電波環境の実験を行う施設である。本施設は、開口部を有する壁で仕切られた実験室2室と計測室で構成され、電磁シールド性能は周波数100kHzから60GHzに対してそれぞれ100dB、60dBとなっている¹⁾。

理想的な電波の実験空間とは、注目する実験系を継ぎ目のない良導体で囲い、その良導体から一点接地することで、実験系を外部の電波の影響から切り離せる空間のことである。さらに、良導体の内部に電波吸収体を貼りつめることで、反射波の影響がない空間にすることもできる。実際には、部屋の壁・床・天井に良導体の板を敷き詰め、室内に実験系を運び入れるための出入口、排気口な

どを作るため、継ぎ目や隙間はできる。この隙間からの電波の漏洩を電気的・空間的に制御する能力のことを電磁シールド性能といい、その技術のことを電磁シールド施工という。電磁シールド性能は、使用する目的（電子機器・材料関連施設、病院、医薬研究施設、放送通信施設、一般建築物、その他）に応じて決定されるが、性能値が高くなるほど、対象とする周波数が高くなるほど、施設が大型化するほど高度な施工技術が必要になる。それは、空間的に広範囲に「隙間の管理」を厳しく行う技術が必要になるからである²⁾。

当社実験棟内の電波暗室は、これらの理論を参考に電磁シールド施工され、部屋の内側にグリッド型とピラミッド型の電波吸収体を貼りつめた仕様になっている。日本建築学会電磁環境小委員会の電磁シールド材料・施工マニュアル作成サブワーキンググループの調査（1997年調べ）によれば、当時存在した電波暗室（FCC3m法）6件の対象とする周波数は0.01MHz～1GHz、電磁シール

ド性能は80–115dBとある³⁾。当社の電波暗室は、それに比べて対象とする周波数が1桁大きく、さらに100dBの性能を実現したことが優れた点であったと言える。また、計測室は、部屋内部で電波を発信することなく反射の影響を考慮する必要がないので、電磁シールド施工のみの仕様となっている。電磁シールド性能60dBは、窓のある部屋としては高性能であるとして、竣工当時はセールスポイントの一つであった。

また、竣工した後は経年変化に対するメンテナンス(=電磁シールド施設の時間的「隙間の管理」)が必要になる。電磁シールド性能が低下する原因として、日常使用の不注意や経年による部材の性質の変化(金属の酸化など)、増改築などで人為的不注意によって発生したシールド層の破損、地震やほかの振動などの外力による破損・損傷が指摘されている²⁾。特に出入り口の扉に施された良導体の酸化や破損は、経年変化に加え、施設の使用頻度に応じて劣化が加速するので修繕のポイントになっている。よって、当施設においてもその点に注意し、計測と修繕を行った。

2. 調査

2.1 概要

目的：サイバー実験棟の電波暗室と計測室の電磁シールド性能の評価

期間：2019年9月24日–27日

場所：清水建設技術研究所サイバー実験棟

電波暗室1、電波暗室2、計測室(図-1)

手順：

- (1) 現在の電磁シールド性能の計測
- (2) 施設の修繕
- (3) 修繕後の電磁シールド性能の計測
- (4) 竣工時の計測と手順(1)と(3)を比較して、21年間の経年変化と修繕の効果を評価する

2.2 電磁シールド性能の計測法

計測点：竣工時に計測した場所(図-2(a))

周波数：100k, 1M, 30M, 101M, 401M, 1G, 2G, 3.7G, 4.5G, 18G, 28G, 30G, 39GHz

(竣工時に計測した周波数を参考にした。)

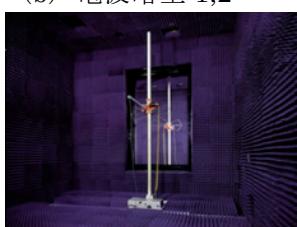
また、60GHzは計測しなかった。)

偏波：垂直・水平(100kHz, 1MHzの水平偏波についてはロッドアンテナの設置の都合により計測しなかった。)

(a) 外観



(b) 電波暗室1,2



(c) 計測室



図-1 サイバー実験棟¹⁾

方法：挿入損失法²⁾による評価

(図-2(b)、図-2(c)、表-1)

シールド性能 L は、次式より算出した。

$$L[\text{dB}] = L1[\text{dBm}] - L2[\text{dBm}]$$

ここで $L1$ ：基準値、 $L2$ ：測定値とする。

なお、コネクターパネル、シールドパネル、窓は、可動部位はないことから、修繕は行わず扉の調整のみ計測した。

2.3 修繕

文献^{2)–4)}で指摘されている修繕のポイント、目視による判断、計測結果(2.1概要手順(1))等から総合的に考え、以下の5項目を実施した。特に記載がない限り、電波暗室2部屋、計測室を対象とした。

- ・扉の丁番の調整
- ・扉枠の研磨による錆落とし
- ・扉のベリリュームフィンガーの交換
- ・電波暗室1の剥離した電波吸収体の交換
- ・電波暗室2の扉の電波吸収体の交換

3. 結果

3.1 電磁シールド性能の測定

電波暗室1(計測点①)、電波暗室2(計測点②)、

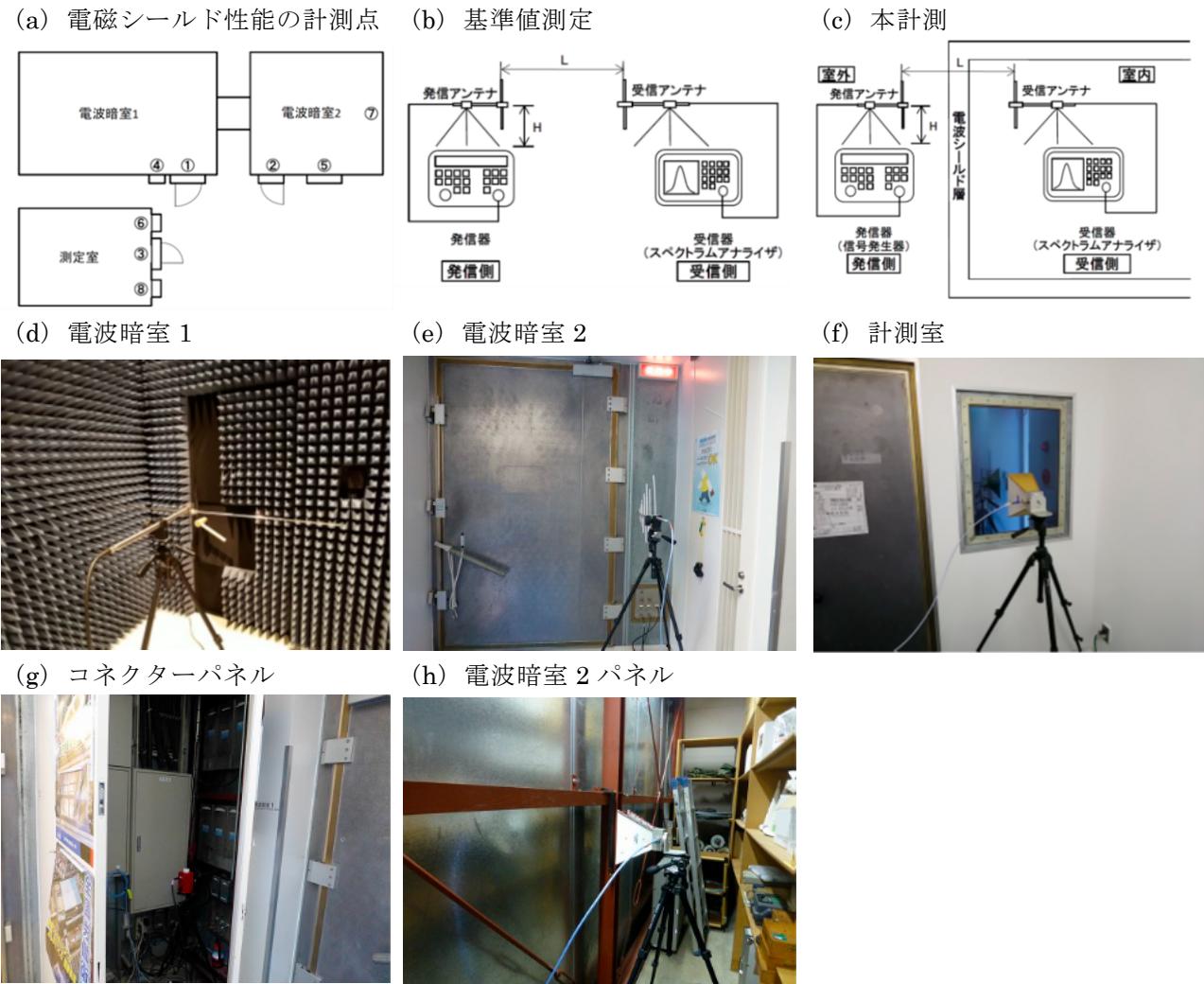


図-2 電磁シールド性能の計測

計測室（計測点③）における電磁シールド性能の測定結果を図-3に示す（青丸：1998年（竣工時）、緑丸：2019年（修繕前）、赤丸：2019年（修繕後））。これより、電波暗室1のシールド性能は、21年間で最大81.3dB（101MHz 水平偏波）低下していたが、修繕によって35dB向上した（1998年に133.3dBだったのが、2019年には52dBになり、修繕によって87dBになった（図-3(b)）。400MHz-2GHz（垂直偏波・水平偏波共に）では、経年変化によって20-80dB低下していたのが、修繕によって最大35dB向上し、最終的に1GHz以上では、概ね100dBになったことが分かる。

電波暗室2では、最大59.5dB（101MHz 垂直偏波）の劣化がみられた。400MHz-2GHz（垂直偏波・水平偏波共に）では、15-60dB低下していた。修繕によって最大35dBの性能の向上がみられ、最終的に修繕後の電磁シールド性能は1GHz以上では、概ね100dBになった。

計測室は、21年間で最大85.3dB（401MHz 垂直偏波、図-3(e)）劣化していた。しかし、修繕によって51dBの改善があり、測定場所の中で最も修繕の効果がみられた。400MHz-2GHzでは、20-80dB低下していた。修繕によって最大51dBの性能の向上がみられた。

総じて、修繕前には一部の周波数で竣工時の性能を下回り（図-3 緑丸）、修繕の後に竣工時の性能に概ね回復した（図-3 赤丸）。この傾向は、測定場所に関わらず、垂直偏波においても、水平偏波においても同じだった。

3.2 扉付近以外の附帯設備

コネクターパネルの計測結果を図-4（電波暗室1：計測点④、電波暗室2：計測点⑤、計測室：計測点⑥）、その他の計測結果を図-5（シールドパネル：計測点⑦、計測室の窓：計測点⑧）に示す。

表-1 使用測定器一覧

周波数[Hz]	発信器	送信アンテナ	受信アンテナ	受信器
100k ～ 1M	信号発生器 N9310A(KEYSIGHT) パワーアンプ RP10W350 (EMCシステムズ)	ロッドアンテナ 3303(EMCO)	ロッドアンテナ 3303(EMCO)	スペクトラムアナライザ N9340B (KEYSIGHT)
30M ～ 101M	信号発生器 N9310A(KEYSIGHT) パワーアンプ RP10W350 (EMCシステムズ)	ダイポールアンテナ VHA9103 (Schwarzbeck)	ダイポールアンテナ VHA9103 (Schwarzbeck)	スペクトラムアナライザ N9340B (KEYSIGHT)
401M	信号発生器 SMB100A (ROHDE&SCHWARZ) パワーアンプ VGA-0140GM(VGA)	ログペリアンテナ UHALP9108A (Schwarzbeck)	ログペリアンテナ UHALP9108A (Schwarzbeck)	スペクトラムアナライザ FSL6 (ROHDE&SCHWARZ) プリアンプ MH648H (ANRITSU)
1G ～ 2G	信号発生器 SMB100A (ROHDE&SCHWARZ) パワーアンプ VGA-0140GM(VGA)	ログペリアンテナ UHALP9108A (Schwarzbeck)	ログペリアンテナ UHALP9108A (Schwarzbeck)	スペクトラムアナライザ FSL6 (ROHDE&SCHWARZ) プリアンプ HP-8449B(HP)
3.7G ～ 18G	信号発生器 N5183A (KEYSIGHT) パワーアンプ HP-8349B(HP)	ダブルリッジド ガイドアンテナ 3115 (EMCO)	ダブルリッジド ガイドアンテナ 3115 (EMCO)	スペクトラムアナライザ E4407B (KEYSIGHT) プリアンプ HP-8449B(HP)
28G ～ 39G	信号発生器 SMB100A (ROHDE&SCHWARZ) パワーアンプ VGA-0140GM(VGA)	ホーンアンテナ V637(narda)	ホーンアンテナ V637(narda)	スペクトラムアナライザ N9010B-Op544 (KEYSIGHT) プリアンプ VGA-0140-2(VGA)

コネクターパネルのシールド性能の経年変化の最大値（1998年（竣工時）と2019年（修繕後）のシールド性能の差）は、電波暗室1で43.2dB（100kHz 垂直偏波、図-4(a)）、電波暗室2では42.8dB（100kHz 垂直偏波、図-4(c)）、計測室では41.7dB（101MHz 垂直偏波、図-4(e)）であり、経年変化はしているものの、その低下の幅は扉よりも少なかった。同様に、シールドパネル、および計測室の窓では、それぞれ最大42.8dB（100MHz 垂直偏波、図-5(a)）、37.9dB（1GHz 垂直偏波、図-5(c)）のシールド性能の低下があったが、それ以外の周波

数での性能の低下幅は20dB以下であり、扉よりも経年変化が軽微だった。

3.3 サイバー実験棟の修繕

- 2.3 修繕に挙げた5項目の様子を図-6に示す。
- ・丁番の調整の結果、扉の開閉を正常に行えるようになった（図-6(a)）
- ・電波暗室と計測室の扉枠を研磨した（研磨をやりすぎて扉と扉枠の間に隙間ができないよう注意した）
- ・框の吸収体を新しくした（図-6(b)）

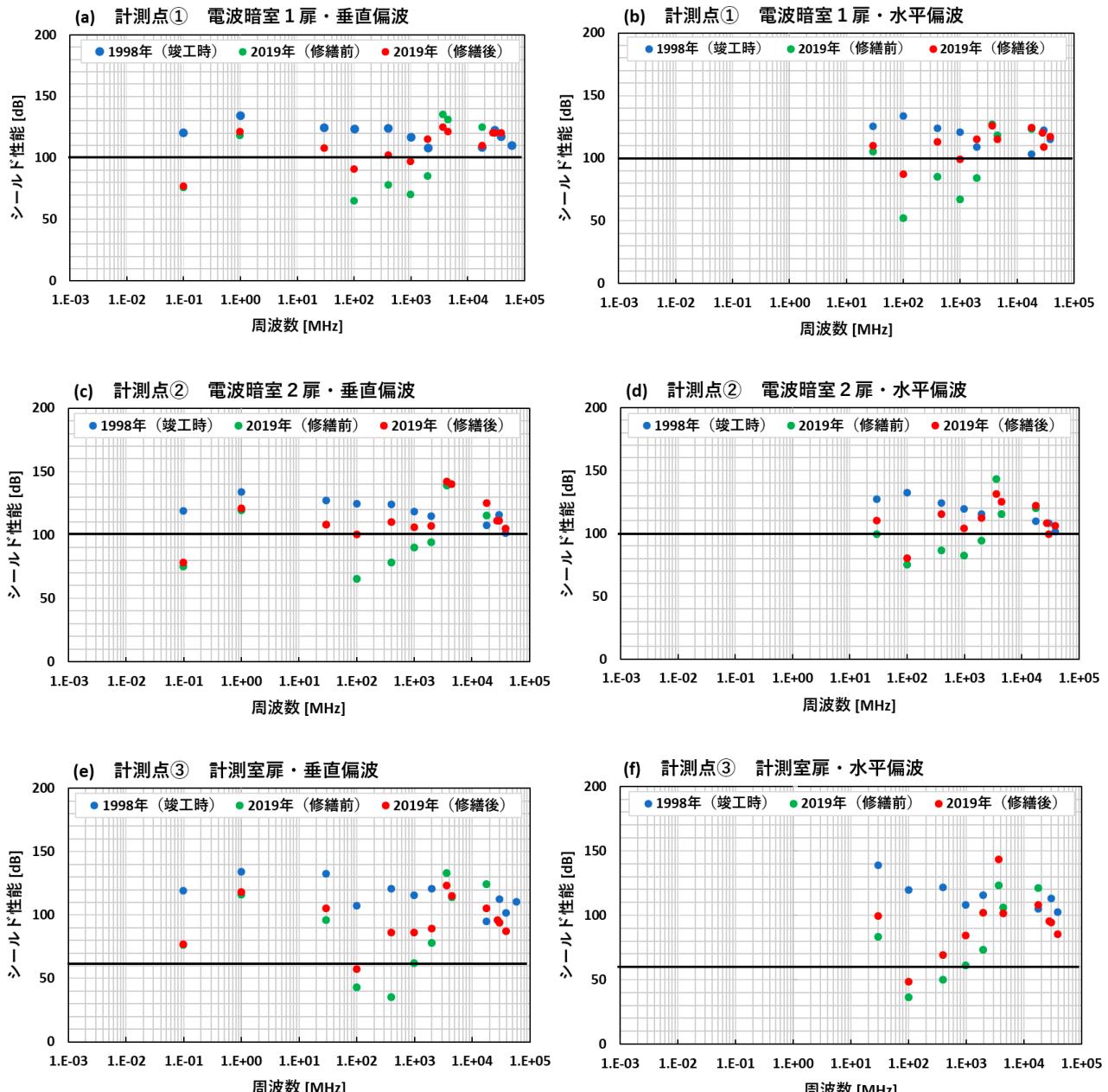


図-3 電磁シールド性能の測定結果（扉付近）

- ・破損していた箇所のベリリュームフィンガーとガスケットを新品に交換した（図-6(c)）
- ・扉側のナイフソケットの鋒を研磨した・電波暗室の天井の排気口周辺の電波吸収体が剥離していたので、新品に交換した（図-6(d)）

4. 考察

4.1 電磁シールド性能

当社電波暗室と計測室の電磁シールド性能は、経年変化によって低下していたこと、その性能は修繕によってある程度の回復が可能であること、しかし

完全には元の性能には戻らないことが明らかになった。その結果、現在の電波暗室の性能は、100kHz以外の周波数においては、概ね 100dB 以上、計測室は概ね 60dB 以上になり、竣工時の目標性能を概ね満足することを確認した。また、2.3 修繕で示した修繕を行ったところ、100kHz 以外の周波数において電磁シールド性能の回復がみられたことは、長年の使用による扉の丁番の歪み（空間的隙間）と、扉と扉枠の召し合せ部における電磁シールド部材の酸化（電気的隙間）や破損が電磁シールド性能の低下の一因であったことを意味する。加えて、自然地震や当社研究所敷地内の加震実験などでサイバー実験

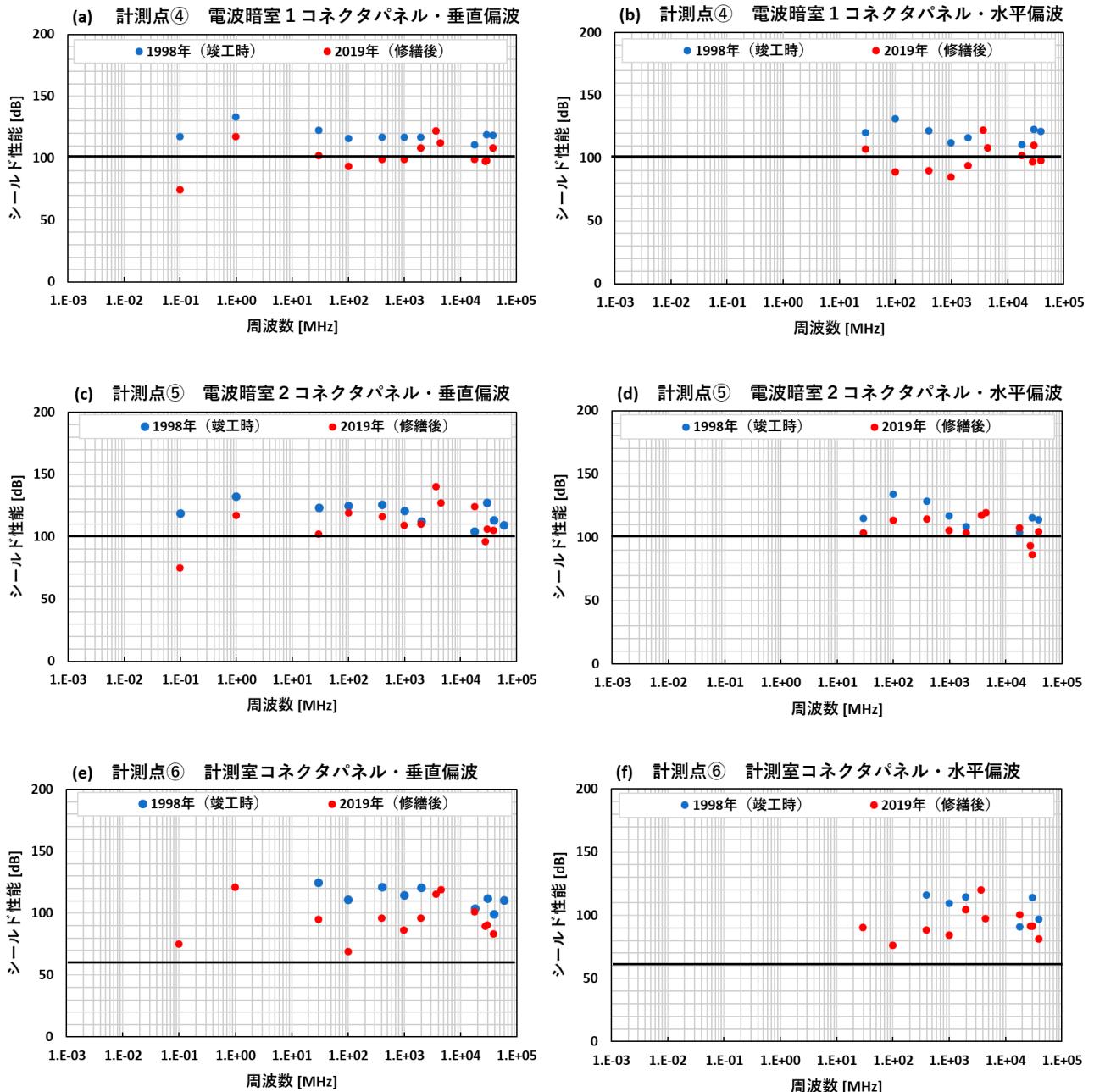


図-4 電磁シールド性能の測定結果（コネクターパネル）

棟が揺れたことも扉の丁番のゆがみを生じさせた可能性がある。電磁シールド施設の扉は隙間の管理の要点であることを思い出すと、今回、扉の修繕のみでシールド性能がある程度回復したということは、当施設は一般論²⁾通りの劣化を起こしていたということでもある。

今回は、電磁シールド性能の回復を優先し、電気的隙間と空間的隙間を同時に修繕した。よって、どちらが性能の低下に大きく寄与していたかを判断することはできない。今後、今回と同様の調査を行う場合には、空間的隙間の修繕の後と、電気的隙間の

修繕の後のそれぞれでシールド性能の計測を行うなどの工夫によって、劣化の原因も考察できるようにしていきたい。

今回の調査で明らかになった性能の低下が、他の施設と比べて軽度なのか重度なのか定量的に評価しようとしたができなかった。それは、著者らが知る限りは、一般化するほど網羅的な調査が報告されていないこと、およびケーススタディとして報告されている3件の調査^{5), 6)}も10年間の経年変化に関する性能計測のために、20年程度経過した当社施設とは比較できないためである。ある意味、これまで報告さ

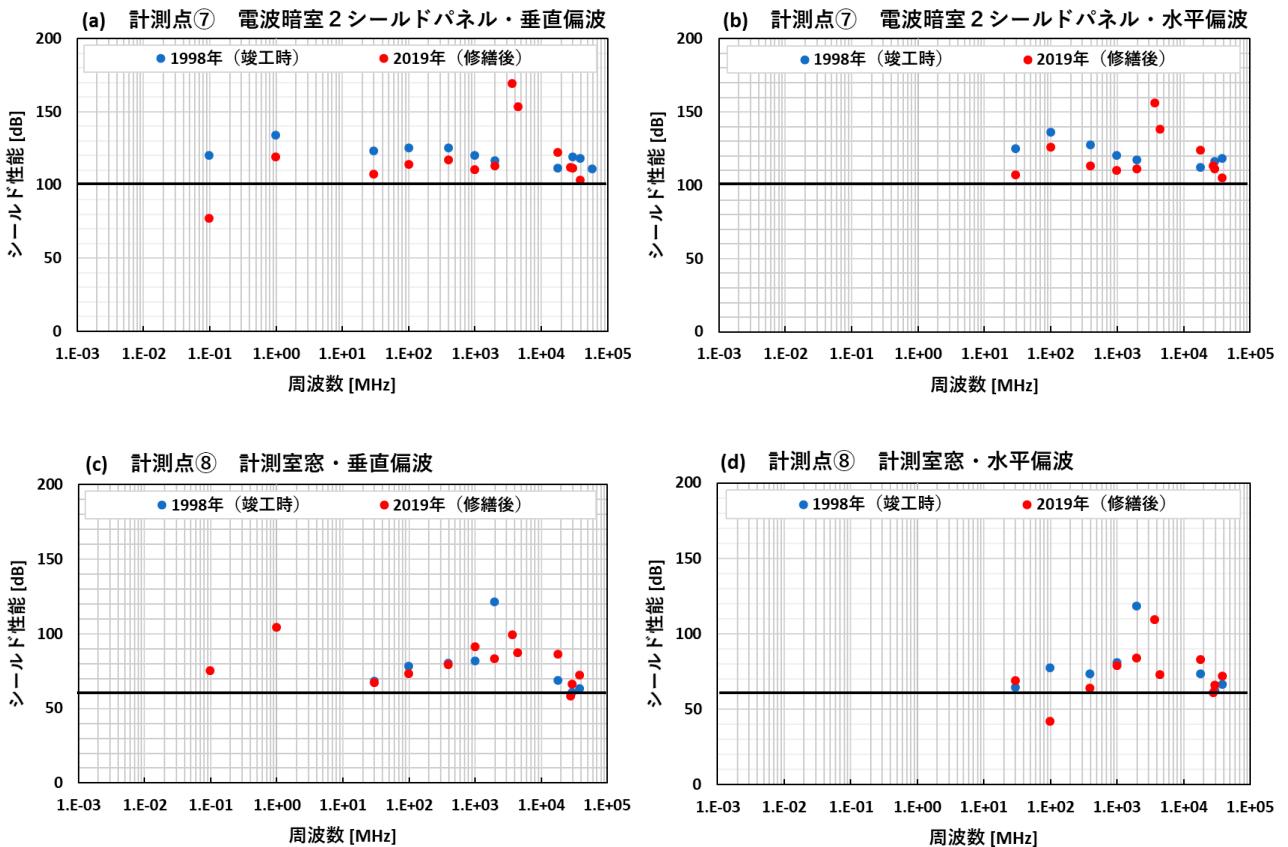


図-5 電磁シールド性能の測定結果(シールドパネル・窓)

れていない長期間の経年変化に関する貴重なデータを取得することができたと考える。

4.2 その他の経年変化

電波暗室の臭いと計測室の壁・床・天井（フィルター）のカビが散見された。これらは、気密性の高い電磁シールド施設であればどこでも起こりうる問題と考えられる。各部屋に対し、以下のような対策を行った。

電波暗室は、カビとは異なる臭いだったため成分分析を行った。臭いの主成分はピラミッド型の電波吸収体をグリッド型の電波吸収体に貼りついている接着剤と考えられた。発生量から考えると人体に害を及ぼすほどではないため、除去はしないこととした。計測室は、部屋の壁紙の張替えとフィルターの吸引によるカビ除去を行った。その結果、不快感はなくなり、1年が経過した2020年の現在もカビの発生は抑えられている。

これらは電磁シールド性能に直接影響することではないが、間接的には影響する。修繕後の環境維持として、カビと臭いの対策には換気による乾燥が有効と考えられるが、扉を開放すると扉の歪みが生じ、

扉と扉枠の接触箇所のかみ合わせの悪さによる導通性の不具合と、空間的隙間を発生させる。つまり、居住空間の快適性を追求すると、隙間の管理に影響を与えかねない。現在は、扉を開放した状態を保たなければいけない時には、扉の下に“支え”を入れている。この支えが扉の重さを受け止め、丁番の歪みを防ぐと同時に、ドアストッパーの役割も果たし、換気も両立させている。この対策で、居住空間の快適性とシールド性能の劣化を完全に解決するとは考えないが、劣化のスピードを遅くすることはできるのではないかと考え、実施していくことにした。

4.3 今後の課題と展開

今後も定期的に電磁シールドの性能評価を行うことが課題と考えている。それによって、①健全な実験環境を維持し実験結果の品質を保証すること、②電磁シールド施設の一生（経年変化）を追跡することになり、施設管理や施工方法の改良につながる。

展開先としては、①既存の電磁シールド施工に対するメンテナンスの提案、②新規シールド施工に対する品質保証、③学術知見として学会などで情報提供を図ること等が考えられる。



図-6 修繕の様子

5. 結論

挿入損失法によって周波数 100kHz から 18GHz を計測した。その結果、電磁シールド性能は、計測室の扉付近で最大 85.3dB (400MHz) 劣化していた。電波暗室は、2 室とも約 80dB (100MHz) 劣化していた。劣化の原因は、扉枠の酸化による導通性の不具合、丁番の歪みによって扉枠と扉にできた隙間からの電磁波の漏れと考えられたので、扉枠の酸化している箇所の錆を落とし、扉の開閉が正しく行えるよう丁番の歪みを修繕した。その結果、修繕後の電波暗室のシールド性能は、どの周波数においても概ね 100dB、計測室は概ね 60dB となり、竣工時の性能の水準に改善された。一般に、電磁シールド室の出入口は電波漏洩の高い箇所として電磁シールド施工の注意するべき箇所とされている。本調査の結果は、この一般論に従うものであり、その原因が扉の丁番の歪みや扉枠の酸化によって生じるものであることが示された。また、電波暗室は特殊施設である特性上、経年変化を追跡できる棟数が限られる。その意味でも今回は、電波暗室の設計計画、および修繕計画の参考となる貴重なデータをとることができた。

<参考文献>

- 1) 清水建設技術研究所：サイバー実験棟（パンフレット）
- 2) (社)日本建築学会：電磁環境と建築設計－初めての設計者のために－, 2000
- 3) (社)日本建築学会：建築における電磁シールド材料と施工, 2003
- 4) (社)日本建築学会：建築物の現場における電磁シールド性能測定法基準・同解説, 2017
- 5) 木村健一, 田代英太, 遠藤利明：“電磁シールド性能の経年劣化に関する検討”，日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.541-542, 2012
- 6) 小熊直樹, 木村健一, 田代英太, 安藤一宏, 鈴木宏和：“電磁シールド性能の経年劣化に関する検討 その 2 ～簡易電磁シールド室の経年劣化に関する検討～”，日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.591-592, 2014