

超高層煙突壁面の電波障害対策について

衛藤 裕一^{*} 佐々木 仁^{*}
福田 國男^{**} 玉飼 俊之^{**}

要 旨

当工事は、市街地に建つ清掃工場であり、その煙突の形状は、一辺の長さ 21mの三角形をしている。煙突の高さは地上 177.5mで、その表面は大型タイル打込みの P C f 板で仕上げられている。工事着工後、発注者より電波障害に対する対策を強く求められた。内容は、V H F、U H F（14ch、16ch）の両域の反射を対象とするという条件であった。対策を行うことによって工程の遅延は認められなかったため、当初の設計条件内で電波障害対策を講じなければならなかった。種々検討した結果、外筒重量内で電波障害対策を行い、また V H F、U H F の両域で対策を講じられるフェライトタイルを採用した。その結果、電波障害の問題もなく、工程内で無事完了することができた。ますます高層化する建物に於いて電波障害対策は避けて通れない課題であり、解決策の一例として報告する。

1. まえがき

当工事の煙突は 177.5m と高層であり計画当初より遮蔽及び反射による電波障害が予想されていた。特にテレビ電波の場合、比較的周波数が高く直進性があるため、建設した工作物・建物による反射や遮蔽によって、テレビ画面が二重三重に移るゴースト現象(受信障害)が発生し周辺区域に大きな問題を与える。今回は、東京タワーからのテレビ電波が煙突の一面に 32.5 度で入射し、南西側に反射することによって、最大幅約 380m、長さ約 6,400m の地域に反射障害が発生するとの予想が、環境アセスメントにより報告されていた。

発注者は、これらの予想される電波障害を、C A T V による有線方式で対策する方法を考えていた。しかし、再度調査を行ったところ、対象件数が当初より大幅に増加したため、施工的に電波障害対策を行うよう指示があった。

当煙突は、建築センターによる評価物件であり、評価時の設計条件を変更すると再度評価を受けなければならない。しかし煙突の施工が工程上非常にクリティカルなため既に取得した評価の設計条件内で電波障害対策を行う必要があった。また、テレビの周波数帯域は V H F (1ch ~ 12ch、90MHz ~ 222MHz)、U H F (13ch ~ 62ch、470MHz ~ 770MHz) の 2 種類があり、電波障害対策はどちらか一方の周波数帯域に対して行うことが一般的である。しかし、今回は V H F と U H F (14ch、16ch) の両周波数帯域に対して電波障害対策を行う必要があった。

2. 事前検討

発注者から提示された必要性能値は、100MHz 6dB 以上、200MHz 14dB 以上、500MHz 16dB 以上であり、V H F と U H F の両周波数帯域に渡っている。

これに対し、電波障害対策を電波吸収磁性体により行うこととしてフェライトタイル工法及びフェライトモルタル工法の検討を行った。

フェライトタイル工法は、フェライトタイルにより電波を吸収する工法で、一般に V H F、U H F 一方の領域の電波を吸収する工法として採用されている。しかし、今回の U H F の対象が 14ch、16ch (476 ~ 482MHz) と V H F の領域に近いフェライトタイル工法を対策工法の検討対象とした。

フェライトモルタルは、骨材として 5mm 以下のフェライト粉砕品をセメントに混入したものであり普通のモルタルと同程度の施工性と強度を有している。フェライトモルタル工法は、2層構造 (M g 系と M n 系の 2 種類のフェライトモルタル層) により V H F ~ U H F までの広帯域の吸収特性をもつ工法であるが、重量的に重いというデメリットがある。

原設計の表面仕上げ材は、結晶化硝子であり、重量が重く誘電率が大きいため、結晶化硝子より軽量で誘電率の小さい大型タイルも対策工法の検討対象とした。

工程的な制約から、再度建築センターの評価を受ける余裕がないため、評価取得時の設計条件を満足するように材料の重量的見地より検討を行った。フェライトの接地面ではフェライトまたはフェライトモルタル分により

荷重が増加するのでPCF板に軽量コンクリートを使用して軽量化する方法で以下のように検討を行った。

検討における評価時の荷重条件は以下の通りであり、材料の組み合わせによる荷重の集計表を表-1, 2に示す。

- A : 結晶化硝子 46Kg/m²
- B1 : PCF (厚さ t=80, 比重 =2.5)200Kg/ m²
- B2 : PCF (t=80, 比重 =2.0)160Kg/ m²
- B3 : PCF (t=80, 比重 =1.4)112Kg/ m²
- C : フェライトタイル (t=8, 比重 =5.1) 18Kg/ m²
- D : 反射筋等 10Kg/ m²
- E : 大型タイル 23Kg/ m²
- フェライトモルタル(t=30, 比重 =3.0)90Kg/ m²
- 原設計荷重 A+B1=246Kg/ m²

表-1 フェライトタイルの場合

Case	組み合わせ	荷重の合計	判定
1	A+B1+C+D	274	NG
2	A+B2+C+D	234	OK
3	F+B2+C+D	211	OK

表-2 フェライトモルタルの場合

Case	組み合わせ	荷重計	判定
4	A+B1+E+D	346	NG
5	A+B2+E+D	306	NG
6	A+B3+E+D	258	NG
7	F+B3+E+D	235	OK

表に示すようにCase 2, 3, 7が原設計の荷重条件を満たす結果となった。

Case 7は、比重 =1.4の超軽量コンクリートを使用しかつ大型タイルを使用したものであり、経済性の面で劣っている。そこで、Case 2及び3のフェライトタイルを使用した場合のシミュレーション検討を先行して行うこととした。

フェライトタイルの特徴と電波吸収体としての原理を簡単に述べる。フェライトは酸化鉄を主成分とする磁性体で一定の形状に成型後焼成して製造する。一般にタイル状に焼成されるのでフェライトタイルと呼ばれる。

その特徴は、電気を通じれば磁石になり、電気を切れば鉄の固まりに戻る。フェライトタイルは材質によりテレビ電波等の高い周波数帯では電磁を吸収し飽和すると熱で放射する性質を持っている。電波は波の一種であり、位相の異なる電波が合成されると相殺して小さくなり、同位相の電波が合成されると増幅するという干渉作用を起こす。フェライトタイルを使用した電波吸収体はこの

原理を巧みに利用したもので、1/4共振型電波吸収体と称されている。

このフェライトタイルを壁面に埋め込むことにより、送信アンテナから発せられた電波のエネルギーは建築物に当たる際に吸収されるため電波の反射障害を防止することができる。また極一部の電波は仕上げ表面で(フェライトタイルに至らず)先に反射される。この反射波に対しては、フェライトタイルを通過したエネルギーを、フェライトタイル裏面に設けた反射筋により反射させる。この時、位相反転の電波を返すように設計しお互いの電波エネルギーを干渉させて相殺させるのが電波吸収体の原理である。

1/4共振型電波吸収体の設計式を示す。

電波は、光速 (C=3×10⁸)で伝搬する。その真空中の波長(λ₀)と周波数(f)の関係は(1)式で与えられる。

$$\lambda_0 = C / f \quad \dots\dots\dots(1)$$

一方、電磁波は物質中を伝搬するときは、波長が短縮される性質を持っており、物質の誘電率をε_r、透磁率をμ_rとするとその物質中を伝搬するの波長(λ)と、真空中での波長(λ₀)との間には(2)式の関係が成立する。また(2)式に(1)式を代入して(3)式が得られる。

$$\lambda = \lambda_0 / (\epsilon_r \cdot \mu_r) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$= C / f (\epsilon_r \cdot \mu_r) \quad \dots\dots\dots(3)$$

(ε_r・μ_r)は波長短縮率と称し、フェライトタイルの場合、周波数100MHzにおいては約100である。

従って、100MHzの周波数がフェライトタイル中を伝搬した場合の波長は、次のような値となる。

$$\lambda_0 = 3m(\text{真空中})$$

$$= 3cm(\text{フェライトタイル中})$$

この場合に対応するフェライトタイルの厚さ(d)は、d = λ/4よりd = λ/4=3/4(cm)=7.5mmとなる。

この厚さのフェライトタイルを用意して、裏に反射筋を配置すれば100MHzに対する電波吸収体ができることとなる。

今回は、VHF、UHFと広い周波数帯域で吸収効果が必要である。しかし(1)式に従えば、波長は周波数に反比例して変化するため受信チャンネルを切り替える毎に吸収体の厚みを替えなければ対応できないこととなる。しかし、フェライトの透磁率は、「スネークの限界則」に従った周波数(fr)を越えると周波数に応じて、より小さな値を取るようになる。従って、(3)式からわかるようにfが大きくなるのに応じて、μ_rの値を小さくする制御ができれば、λの変動幅は緩和される。この法則をもとに、机上シミュレーションを行い、各因子の影響について確認を行った。

シミュレーションは、100MHzの反射損失を16dB程度

に固定し高周波側での広帯域性について行った。
得られた結果はいかの通りである。

シミュレーション結果

1) 反射筋のメッシュサイズ

横筋ピッチを 50mm 以下にすることにより広帯域となる。

2) フェライト裏面と反射横筋迄の距離

10~20mm とすることにより広帯域となる。

3) 磁界ギャップ率

フェライト接合部を研磨することにより広帯域となる。

4) 軽量コンクリートの硬化後の水分

水分を少なくすれば広帯域となる。

5) 電界ギャップ率とフェライト厚さ

電界ギャップ率 50%以下で広帯域となる。

6) 電界ギャップ部の材質

電界ギャップ部を空気（ウレタン）にすれば広帯域となる。

7) 外装材の種類

大型タイルにすれば広帯域となり結晶化硝子では、UHF域で 10dB 程度であった。

以上により表面仕上げ材を大型タイルに変更すれば所定の性能が得られると予想されるので、電波吸収パネル仮置き実験を行うこととした。

3. 電波吸収パネル仮置き実験

仮置き実験は、机上シミュレーションで得られた結果を基に、実際にその性能が発現するかの確認を行うとともにさらに性能を上げるためフェライトタイルの巾を変化させた場合の性能の違いを確認するためのものである。

実験内容は、図 - 1 に示したパネル通りの構造で以下の条件によりフェライトタイルの巾を変化させ、各周波数における反射損失を測定した。

表 - 3 に測定結果を示す。

机上シミュレーションより以下を条件とした。

- 1) 電波入射角：32.5 度
- 2) 外装材：大型タイル（t=13mm、誘電率 4.7）
- 3) フェライト：AB - 2 D 材、7mm、磁界方向連続
- 4) フェライトと反射横筋迄の距離：20mm
- 5) フェライトギャップ部：空気

実験場所：日立金属株式会社 EMC 技術室

日 時：1998 年 10 月 12 日

測定法：タイムドメイン法

目標性能値：100MHz・・・8 db 以上

200MHz・・・14dB 以上

500MHz・・・16dB 以上

パネルの構造

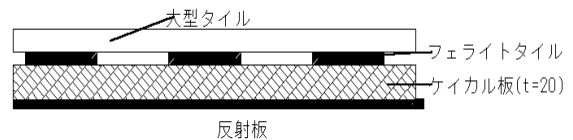


図 - 1 パネルの構造

パネルサイズ：4m（H）×3.2m（W）

表 - 3 測定結果

フェライト巾	100MHz	200MHz	500MHz
92mm	16.1dB	15.1dB	13.8dB
46mm	15.4dB	15.5dB	17.0dB
23mm	15.1dB	15.5dB	19.8dB

全て電界ギャップ率 50%としフェライトはそれぞれ等間隔に配置した。また今回は軽量コンクリートの代わりにケイカル板を用いて行った。

なお電界ギャップとは、フェライトタイル間の空きのことを差し、電界ギャップ率とは電界ギャップの全寸法をパネルの電界寸法で除したパーセントで、パネル中のフェライトタイルとの面積比率を示す。図 - 2 に各用語の相関関係を示す。

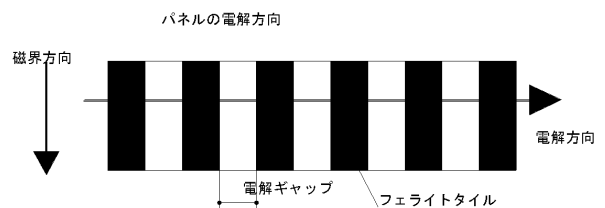


図 - 2 電界ギャップ

それぞれの実験結果を図 - 3 ~ 7 に示す。

すべて電界ギャップ率を 50%と固定し図 - 3 はフェライトタイルの巾を 92mm の等間隔に並べた結果であり、図 - 4 はフェライトタイル巾 46mm 等間隔、図 - 5 はフェライトタイル巾 23mm 等間隔の場合で、図 - 6 はフェライトタイルの巾を 92mm 等間隔で並べ仕上げ材の大型タイルを敷きこまなかった場合の結果であり、図 - 7 は反射板のみを測定した結果である。

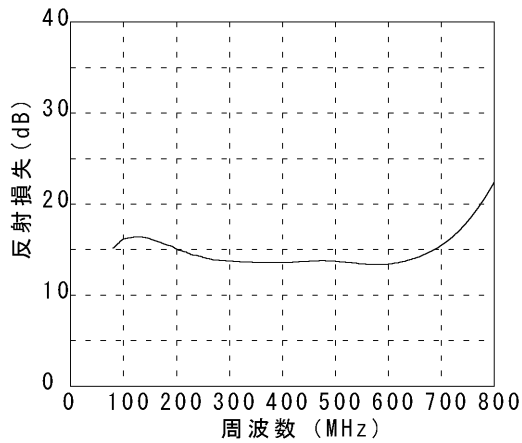


図 - 3 フェライトタイル巾9 2mm

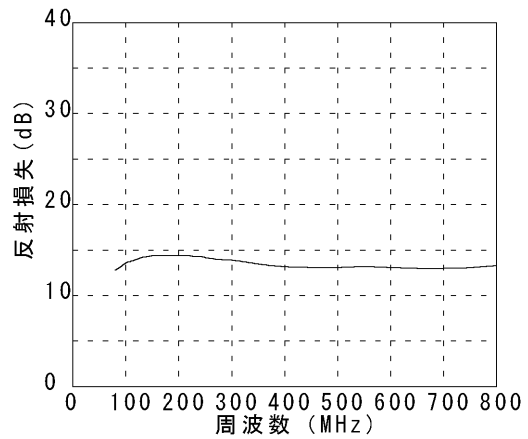


図 - 6 フェライトタイル巾92mm
大型タイル無し

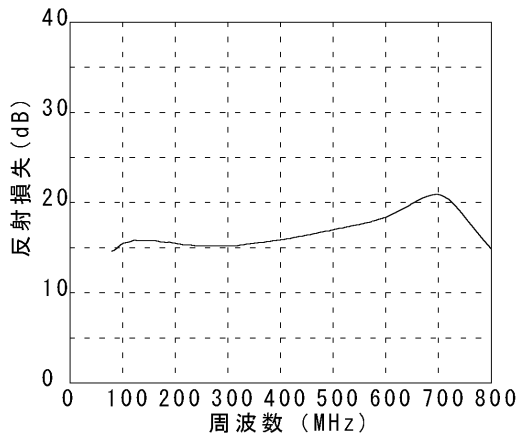


図 - 4 フェライトタイル巾4 6mm

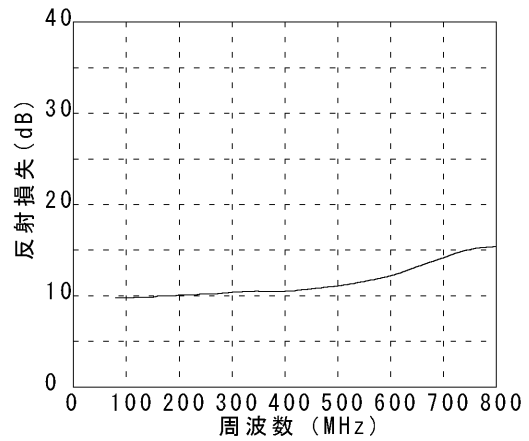


図 - 7 反射板のみ

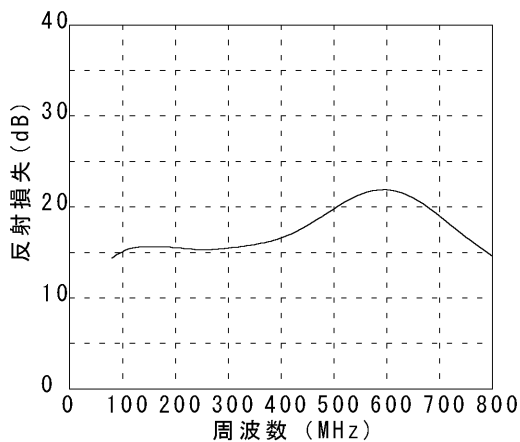


図 - 5 フェライトタイル巾2 3mm

以上により、当実験はケイカル板を代用したため、実際に軽量コンクリートで打設した場合硬化中の水分により、反射損失が低下する傾向があると予想されるが、目標性能に対し余裕があるため、目標性能を満足すると予想した。机上シミュレーションと仮置き実験の結果を基に標準パネルの条件及び予測性能特性は以下の通りとした。

- 大型タイル 13mm、裏面防水処理
- フェライト AB - 2 D材、厚さ 7mm
- 電界ギャップ 50% (フェライト巾 25mm)
- 磁界方向連続配列
- 反射筋まで距離 フェライトタイル裏面より 20mm
- 反射筋 横筋ピッチ 75mm
- 縦筋ピッチ 150 ~ 200mm

予測性能特性

100MHz 約 14dB

200MHz 約 14dB
480MHz 約 16dB

4. 標準パネルの製作

標準パネルは、電波障害対策工事に使用する電波吸収フェライトタイル打ち込みPCf板及び今後製作する実装PCf板の電波吸収性能を確認する際に使用するものである。

標準パネルのサイズは、基本的には1波長がカバーできることが必要で、その基本サイズは、6m×4mである。従って通常は6m×2mのパネルを2枚製作し平面に連ねて測定を行う。実装パネルサイズが5,986mm×2,688mmであるため、1枚では縦方向が若干不足するのでより正確さを出すため2枚製作することにした。

4.1 パネルの基本構造

パネルの基本構造は下図に示すとおり、

- 第一層：大型タイル
- 第二層：フェライトタイルと誘電体
- 第三層：軽量コンクリート
- 第四層：反射筋、構造筋(実際は第三層中となる)

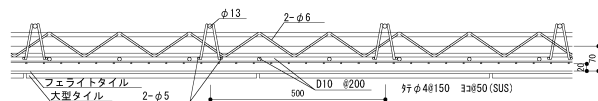


図 - 8 PCfパネル基本構造

反射損失性能仕様

発注者より示された 100MHz 6dB 以上、200MHz 14dB 以上、500MHz 16dB 以上の性能仕様を満足するように設計した。フェライトタイル配列を図に示したように設計を行った。

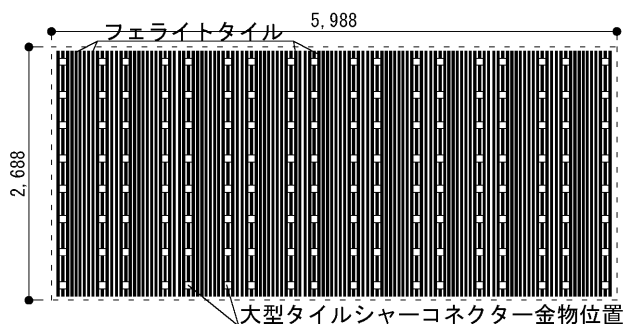


図 - 9 フェライトタイル配列図

4.2 標準パネル製作手順

標準パネルの作成フローは以下の通りとなる。

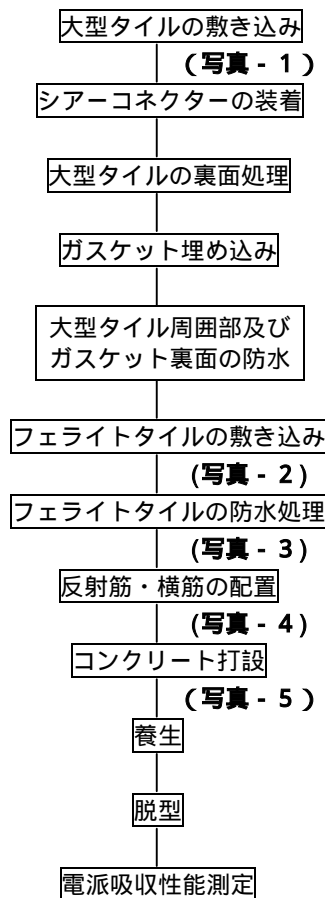


図 - 10 標準パネル作成フロー

大型タイルの敷き込み

大型タイルをガスケット(目地)巾を均等になるように敷き込む。

シヤーコネクタ-の装着

大型タイルとコンクリートを接合する金物を装着する。

大型タイルの裏面処理

フェライトは水分の影響で、性能が大きく左右されるのでPCf板取付後に水分がフェライト面に廻らないよう防水処理を行う。(一般部)

ガスケット埋め込み

大型タイル間の目地部にガスケットを埋め込む。

大型タイル周辺部及びガスケットの裏面の防水

ガスケット部及び大型タイルの周辺を上記の理由により防水を行う。

フェライトタイトルの敷き込み

作業効率を上げるため、6種類にユニット化したフェライトタイトルの敷き込みを行う。

フェライトタイトルの防水処理

フェライトタイトルの突合せ部、シアーコネクター枠のフェライトタイトルと大型タイトル突合せ部及びフェライトタイトルユニットの周囲と大型タイトルとの突合せ部の防水処理を行う。

反射筋・横筋の配置

反射筋は、ステンレスメッシュ筋(4)縦150mm横50mmピッチで、フェライトタイトルとの間隔を保持するためスペーサーブロックを使用した。



写真 - 3 フェライトタイトルの防水処理



写真 - 1 大型タイトル敷き込み状況

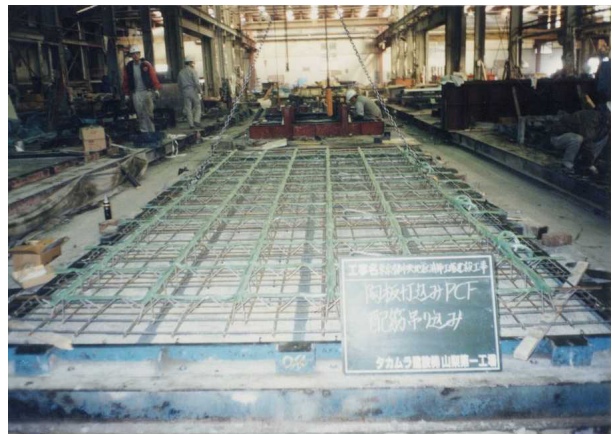


写真 - 4 反射筋・横筋の配置



写真 - 2 フェライトタイトル敷き込み状況



写真 - 5 コンクリート打設状況

5. 標準パネル性能測定(サイト)

標準パネル養生後、日立金属(株)EMC技術室に運び電波反射損失特性測定を行い、所定の性能を有することを確認した。サイトでの標準パネル性能測定は、PC製作工場において出荷前に実施する電波吸収性能測定用の装置が日立金属(株)のEMC技術室の装置と同一の諸元であり、また電波環境が性能測定に適していることの確認と実装するパネルが標準パネルと同等の性能を有することの確認を目的とした。

以下に標準パネル性能測定立会いの概要を示す。

検査日時：平成11年8月24日

検査場所：タカムラ建設(株) 山梨第一工場

測定基準：対象周波数 100MHz、200MHz、500MHz

電波入射角 32.5度(煙突面の入射角)

反射損失仕様 100MHz 6dB以上

200MHz 14dB以上

500MHz 16dB以上

(発注者より示された性能値)

測定検査数量：標準パネル 1枚

実装パネル 1枚

(標準パネルと同様に作製した実際に使用するパネル)

測定検査設備：測定設備は、電波吸収パネルの固定によるタイムドメイン法を用い自動計測器録画できるものとした。

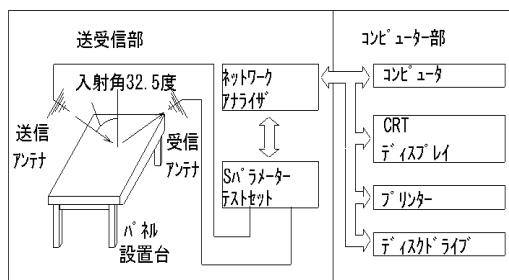


図-11 電波吸収パネルの測定検査設備系統図

表-4 検査測定用機材

ネットワークアナライザー	HP8753D(HP)
送信アンテナ	ログペリアンテナ
受信アンテナ	ログペリアンテナ

電波吸収パネルの測定性能は、まず電波吸収パネルの金属反射板にて80~1,000MHzの範囲の電波を801ポイントの等間隔で、送信アンテナより金属反射板にて照射し、金属反射板より反射した電波を受信アンテナで受信し、この反射波レベルをネットワークアナライザーで測定し

保管する。電波吸収パネルにおける反射レベルについても同様の方法で測定する。次に測定レベルデータを逆フーリエ変換により時間領域のデータに変換しゲーティング処理により電波吸収パネルからの反射波以外の不必要な信号を除去し、再度フーリエ変換を行い周波数領域データに変換することにより各測定周波数における反射波レベルを求める。

同様に、基準となる金属反射板からの各測定周波数における反射波レベルを求める。この金属反射板の反射損失を0dBとし、金属反射板と電波吸収パネルの反射波レベルの差を求めこれを電波吸収パネルの反射損失とする。このフローを以下に図示する。

周波数領域で測定を行う

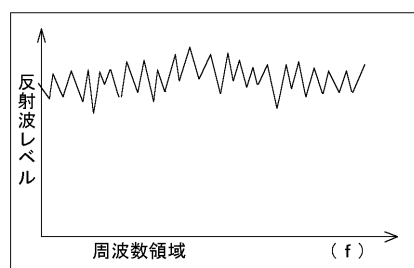


図-12 反射波レベルの測定

逆フーリエ変換し時間領域のデータに置き換える。

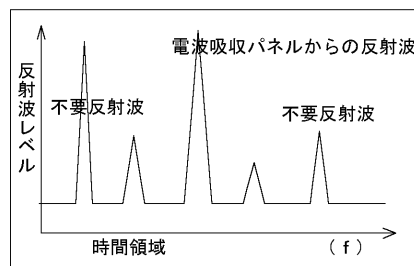


図-13 逆フーリエ変換

ゲーティングにより不要な信号を除去する

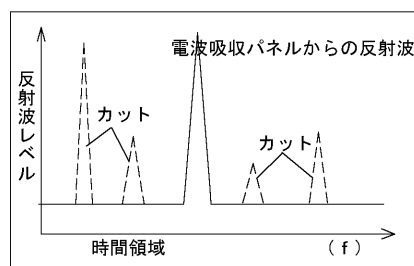


図-14 不要な反射波の除去

不要な反射波の除去を行った反射波レベルデータをフーリエ変換し、金属板の反射波レベルを基準として電波吸収パネルの反射損失特性を計算する。

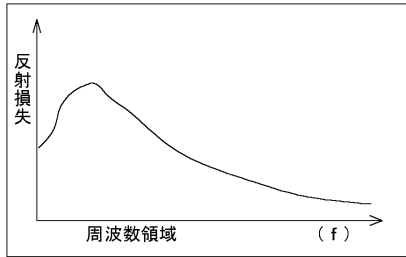


図 - 15 反射損失の周波数特性

立会い検査では、試験装置のアンテナ位置や電波入射角等の確認を手前から測定を行った。



写真 - 6 アンテナ間の位置確認状況

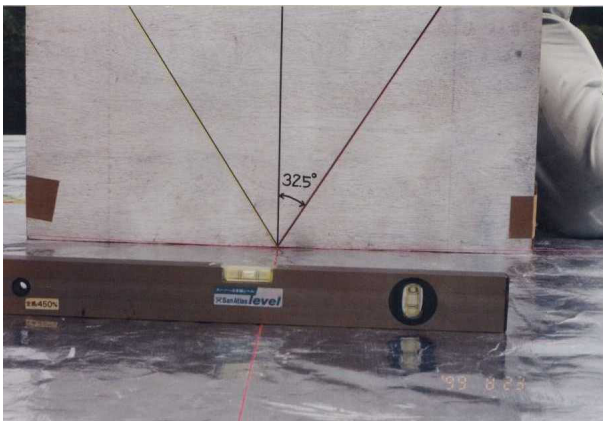


写真 - 7 電波入射角度の確認状況

次に測定サイトの概略図を示す

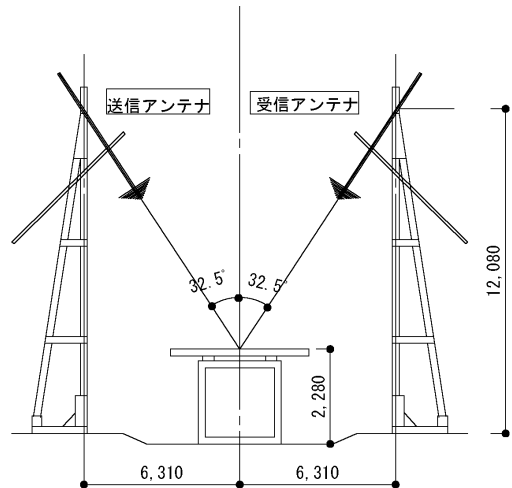


図 - 16 測定サイト概略図

5.1 性能測定結果

PC工場サイトで行った標準パネルの測定結果は、100MHz 12.5dB、200MHz 16.3dB、500MHz 21.3MHz と目標性能を満足するものであった。日立金属㈱EMC技術室での測定結果と比較すると表 - 5 のようになる。

表 - 5 性能測定結果

周波数 (MHz)	サイト (dB)	EMC (dB)	偏差 (dB)
80	11.6	11.3	0.30
90	12.1	11.9	0.20
100	12.5	12.4	0.10
110	12.9	12.9	0.00
120	13.3	13.3	0.00
130	13.7	13.8	-0.10
140	14.1	14.2	-0.10
150	14.5	14.6	-0.10
160	14.9	15.0	-0.10
170	15.2	15.3	-0.10
180	15.6	15.7	-0.10
190	15.9	16.0	-0.10
200	16.3	16.3	0.00
210	16.6	16.7	-0.10
220	16.9	17.0	-0.10
230	17.2	17.3	-0.10
240	17.5	17.6	-0.10
250	17.8	17.9	-0.10
300	19.2	19.4	-0.20
350	21.1	21.8	-0.70
400	24.1	24.7	-0.60
450	24.7	24.6	0.10
500	21.3	21.1	0.20
550	17.7	17.8	-0.10
600	14.7	14.9	-0.20
650	12.3	12.4	-0.10
700	10.3	10.2	0.10
750	8.7	8.6	0.10
800	7.5	7.5	0.00

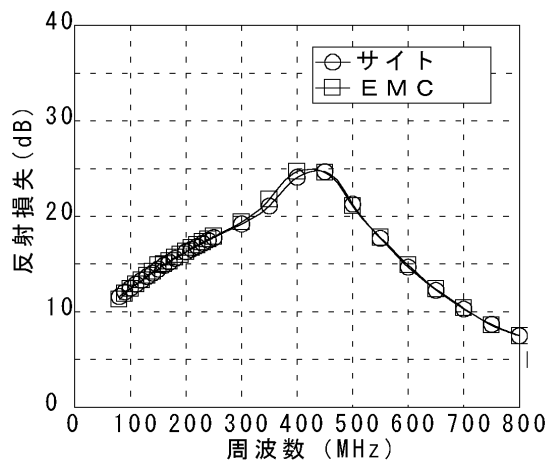


図 - 17 標準パネル反射損失特性(サイト、EMC)

標準パネルの反射損失特性は、日立金属(株)EMC技術室で計測したデータと相関がとれており、電波環境が性能測定に適していることを確認した。

また実装パネルについても同様の測定を行い以下の結果となった。

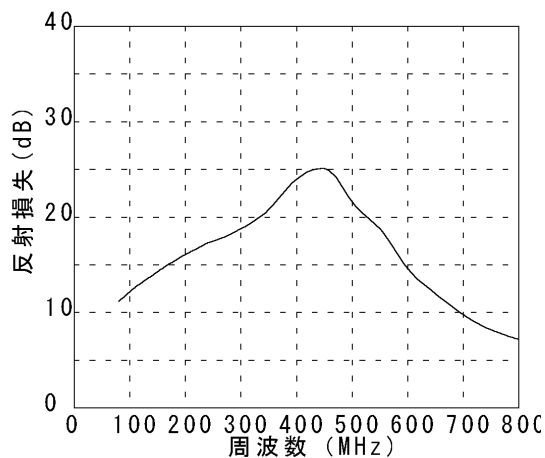


図 18 実装パネル反射損失特性

実装パネルも所定の性能を有し、標準パネルの反射損失特性曲線と比較し極近似している特性曲線であることを確認した。

今後製作する実装パネルに於いても全数計測とし、1回で計測する量を1ロットとて、1ロットの平均が所定性能値の1.1倍(安全率を10%とした。但し100MHz帯では、実験値を基に10MHzとした。)の値を満たし、かつ個々のパネルが所定性能値を越えるパネルを合格とした。

1ロットの平均値

100MHz 10dB、200MHz 15.4dB、500MHz 17.6dB 以上

個々のパネル値

100MHz 6dB、200MHz 14dB、500MHz 16dB 以上

これらの性能を満たさないものは廃棄し、その原因を追及しかつ適切な処置を行ってから次の製作にかかることにしたが、結果として不合格品は無かった。

サイトの測定機器は、標準パネルを測定することで、2ヶ月毎に校正を行い全数の測定を行った。

6 おわりに

今回の電波障害対策は、施工途中に発注者から提示を受け限られた時間と条件の中で検討を重ね、フェライトタイルを採用した一例である。その結果電波障害もなく工程内で無事終了した。また、末筆ながら関係各位に深く謝意を表します。