

〔解説〕

標準アンテナ測定用アンテナサイト

ETL Open-Area Antenna Site for Standard Measurement

小見山 耕司 森岡 健浩 矢嶋 弘義
K.KOMIYAMA T.MORIOKA H.YAJIMA

An open-area antenna site for measurement standards was constructed in the second research center of the Agency of Industrial and Science Technology. It has a ground plane whose dimension is 50m by 30m. The ground plane is a large steel plate welded together from 120 small plates. The planarity is 6mm by twice standard deviation. It has a underground utility room, which accommodates antenna mast mechanism and measurement equipment. Antenna separation from 10m to 30m is available for the measurement. There is another underground room for measurement work separately located from the ground plane. All facilities were build underground except for two antenna masts to evade undesired electromagnetic scattering. The site attenuation characteristics were measured. They have small differences from theoretically estimated values.

§1 はじめに

EMC規制は、電気・電子機器からの不要放射電磁波の強度を規制するものである。規定された方法と設

備によって測定された放射雑音を規定値以下に制限する。具体的な測定法としては、グランドプレーン（導体板）の上に被測定機器を設置し、規定の距離だけ離れた位置に受信アンテナをおいて不要放射



Photo 1 ETL open-area site for antenna measurement and the circumstance around the ground plane in the AIST second research center. A white large rectangle is the ground plane. A smaller one at the upper and right hand side is the top of the underground measurement room. The nearest objects to the ground plane on the ground are three lines of trees at the right hand side. There is a road for automobile test-run at the opposite side. This photo is offered by Advanced Engineering Service

KEY WORDS : アンテナ測定、標準ダイポールアンテナ、オープンサイト、グランドプレーン

電磁波を受信する。この測定のために用いられるグラウンドプレーンを含む測定設備がオープンサイトである。電波測定のためには、屋内において測定できるように上下および周囲からの反射を抑えた電波暗室も用いられるが、長い波長領域では電波吸収材が大型化し、また伝播距離を長くとるために大規模な電波暗室が必要になる。現在の規制の中心となっている30MHz～1000MHzの周波数帯においては、野外で地表面のみグラウンドプレーンを用いたオープンサイトが用いられている。

一方、空間的な不要電磁界を測定するにはアンテナが必要であり、計測結果が規制の合否判定などに用いられるためアンテナそのものの感度が重要になる。電磁界を高精度に測定するためには同一の基準が必要であり、そのために標準アンテナを校正する測定技術やアンテナ校正用の基準アンテナ測定場が必要となる。当所では、平成10年12月から標準アンテナ測定用オープンサイトの建設を開始し、平成11年3月に完成した。本稿ではこのEMCアンテナ測定用オープンサイトについて、概念設計から建設、さらに完成後の特性を含めて紹介する。

§2 概念設計

オープンサイトの本体はグラウンドプレーンである。CISPRではEMC測定の間として、伝播方向に送

受信アンテナ間距離の2倍長の長軸、直交する方向に $\sqrt{3}$ 倍(1.73倍)長の短軸をもつ楕円を定め、この範囲内は電波の反射物を除外することを推奨しており、これをCISPR楕円とよぶ。送受アンテナ間距離を30mにとると60m×52mとなる。この範囲内では不明な反射散乱の原因となる自然裸地の地面がないように周囲の地面を整地し、平坦で大きなグラウンドプレーンを設ける。精密アンテナ測定ではグラウンドプレーンの端での回折や散乱を防ぐための接地をし、グラウンドプレーン周囲の広い範囲にわたって地上構造物を排除して広い伝播空間を確保する。このように造られたオープンサイトが各国にいくつか存在する。欧米諸国では60m×30mの大きさのグラウンドプレーンをレファレンスグラウンドプレーンとして使用しているところもいくつかあり、当所では、概念設計の当初からその中間値である60m×40mのグラウンドプレーンをめざして設計検討を行った。

Fig.1に示すように、建設場所はつくば市北部の工業技術院第2研究センター内である。車両用試走路に囲まれて全体が長円形状である。この研究センター敷地内の左部分には遊水池があり、空き地が多いため建設地の候補に挙げられたが、第2センターを建設した際に送電線が上空を横切らないように鉄塔を移設したため、この部分は周囲を送電線に囲まれる状況でありこの場所を断念し、建設場所として別に中央付近の進入路右側を選定した。

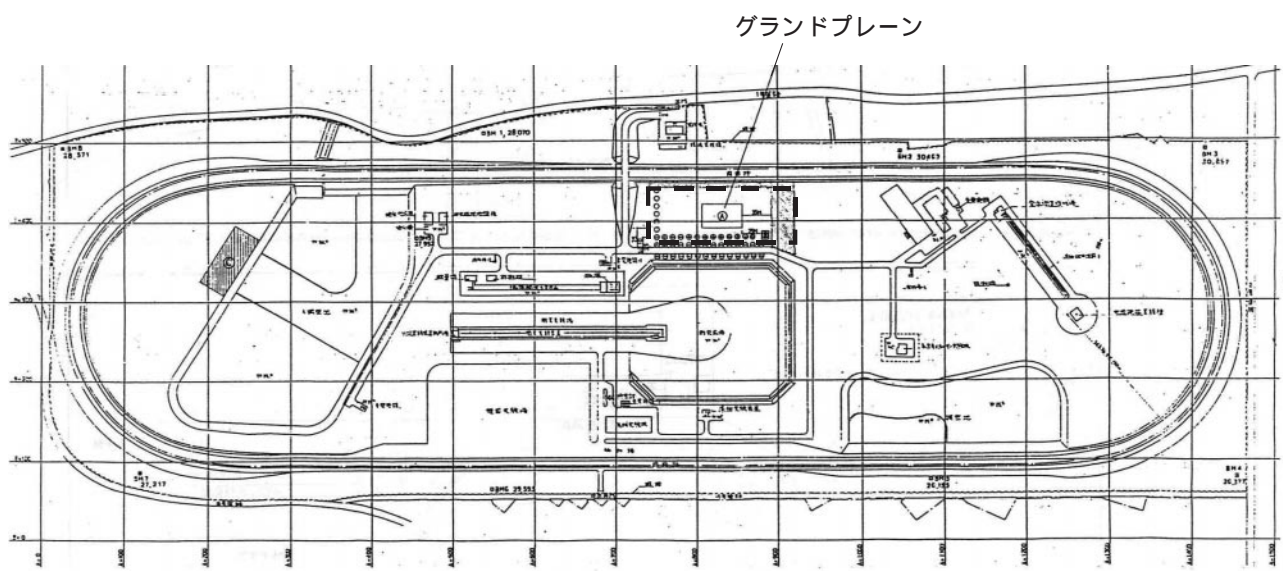


Fig.1 Open-area antenna site in the second AIST Research center

オープンサイトの本体は導体平板からなるグラウンドプレーンである。数10m規模の導体平板の平面度を保持するために、Table 1 に示すようないくつかの構造案が提案された。いずれも、電氣的に良好な反射特性を実現するためにグラウンドプレーンの材質には板状の鋼板を採用している。測定室は地上の散乱物体となるのを避けるため、地下に建設した。また、この地下測定室はグラウンドプレーンの地下に建設するのが空間の有効利用とサイトの利便性の点から望まれたが、数ヶ月の工期内に同時建設が不可能であったため、地下測定室を離して建設する必要があった。このため、グラウンドプレーン下にはアンテナマスト駆動部などを収納する小規模の地下ピットを設けている。案1のパイル構造、および、案2～案3で提案されているような土間にコンクリートをうち鋼板を用いてグラウンドプレーンを実現する方法は、いずれも費用の試算の段階では建設不可能であった。このため、倉庫や工場用建物など大規模家屋の屋根のために設計された既存のパネル構造を利用する案4が提案されたが、平面度の維持に難があり見送られた。この時点ではグラウンドプレーンの電氣的特性と平面度を重視し、鋼板の全溶接を採用する方針が決められたため、費用の点から可能な構造と大きさを検討し案5が参考案として提案された。しかし、ブロック敷設構造の平面度の保持とグラウンドプレーンそのものの大きさが不十分であるためこの案を見送り、最終的に土間コンクリート床に16mm鋼板の全

溶接の構造によりグラウンドプレーンを実現する方針が固まり、詳細設計に入った。全体設備の見直しを行い費用の見積もりを圧縮したが、それでも当初の方針である60m×40mの大きさが不可能であったためグラウンドプレーンの面積の縮小を余儀なくされ、目標より10mずつ縮小して次のような設備および建設の仕様を決定した。

- 1) グラウンドプレーン構造として16mm厚鉄板を用い、全溶接により50m×30mの大きさの1枚鋼板とする。
- 2) グラウンドプレーンの平坦度の目標値を±6mmで設計する。
- 3) グラウンドプレーン全周にステンレスのメッシュを取付け、地中埋設し接地を確保する。
- 4) 電磁波を反射しにくいFRP製アンテナマストを採用する。
- 5) 送信アンテナ用電動マスト駆動部は地下ピットを設けてグラウンドプレーン下に設置する。
- 6) 10m及び30mの送受アンテナ間距離を実現するための電動マスト移設構造を採用する。
- 7) 地上建造物による反射を回避するため、測定作業室を地下に建設する。
- 8) 地下測定室内から直接測定するためR F ケーブル配線を行うと同時に、地下測定室までの長ケーブルの減衰を考慮し、測定機器をグラウンドプレーン下のピット内に恒温槽に収納して設置

Table 1 Comparison of structures and construction techniques for ground plane

	案1	案2	案3	案4	案5
導体板	60m × 40m 12mm 鋼板 全溶接	60m × 40m 4.5mm 鋼板 パネル構造ガスケットねじ止め	60m × 40m 16mm 鋼板 全溶接	60m × 40m 1.6mm 鋼板 屋根構造のパネル	35m × 25m 鋼板 全溶接
基礎工法	パイル基礎 コンクリート床	土間コンクリート床	土間コンクリート床	土間コンクリート床	土間コンクリートブロック敷設
地下ピット	20m × 10m × 1.8m	20m × 10m × 1.8m	20m × 10m × 1.8m	20m × 10m × 1.8m	20m × 10m × 1.8m
費用	高価	高価	高価	可能	可能
熱変形等	導体板の熱膨張を端部開放により吸収	導体板の熱膨張をパネル間で吸収	導体板の熱膨張を端部開放により吸収	熱膨張対策なし	ブロック基礎による拡張性 導体板の熱膨張を端部開放により吸収

して測定室からコントロールできるような制御ケーブルを敷設する。

- 9) 電波の反射・散乱の原因となる周囲の雑木等を除去する。

§3 ETLグランドプレーンの構造

グランドプレーンと測定室の付近の配置図をFig.2に示す。建設予定地の区画のほぼ中央にグランドプレーンを配置し、その横に離れて地下測定室がある。自動車試走路との境には金属製フェンスがあったが、これを非金属のフェンスに交換した。さらにこのフェンスに沿って常緑樹の樹木が垣根状に植えられている。敷地内には落葉樹のプラタナスがまばらに植えられており、左側の敷地境界は研究センターへの進入道路のスロープがあり、右側は雑木林である。雑木林は地下測定室の近くまであったため30mだけ切り開き近接した障害物を除去した。敷地全体として幅180m、奥行き77mである。

グランドプレーン概念仕様に基づき詳細設計を行った。Fig.3にグランドプレーンの大きさや構造を示す。大きさ5m×2.5mで厚さ16mmの鋼板を6×20枚並べて溶接し、50m×30mのグランドプレーンを実現

している。グランドプレーンを支持する構造は平面度を維持するためにFig.4に示すような垂直断面構造をしている。この部分の工法は、まず、同面積規模のコンクリート土間を建設し、その上にボルトを立て、ボルトの上に磁器質タイルを接着してからボルトの回転により高さを調節する。タイルの上面での

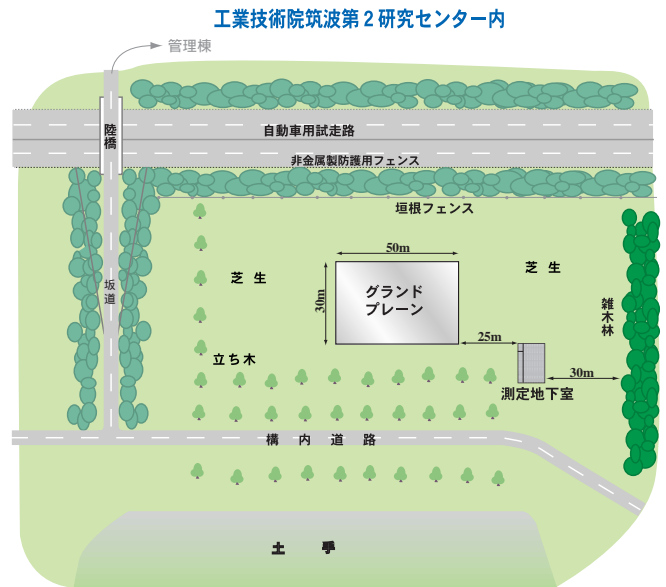


Fig.2 Circumstance of the ground plane

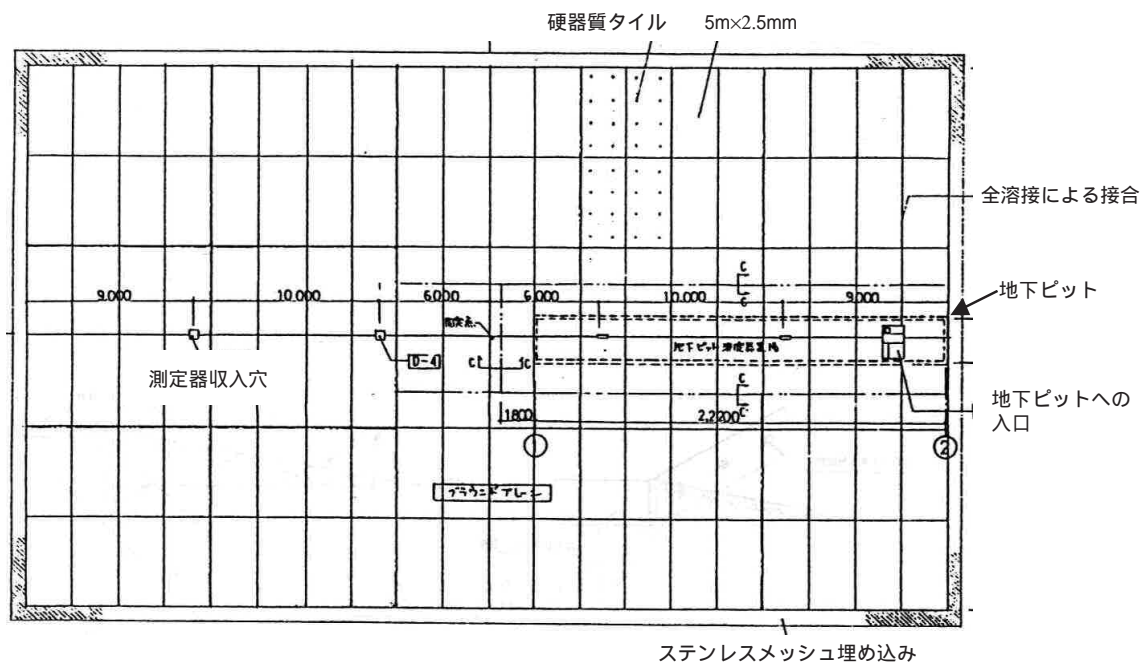


Fig.3 Structure of the ground plane of the antenna site

レベルを±1mmの精度にそろえた後、タイルのまわりを無収縮コンクリートで固めて支柱を作る。このコンクリート支柱は Fig.3 に示すように鋼板あたり 8 箇所をおき、鋼板の支えとしている。Fig.4 に示すような構造の960本のコンクリート柱により、溶接により接合した一枚の鋼板を支えていることになる。また、グランドプレーン中央部の1箇所のみ水平方向に固定し、温度の日変化や季節変化による熱膨張・収縮が生じる鋼板の水平移動をコンクリート支柱上のタイル上を滑らせて吸収する構造となっている。鋼板の周囲には 1m幅のステンレス金網を接合し、接地をとるために 45 度の角度をつけて地中に埋め込んでいる。

グランドプレーン下にはアンテナマスト駆動装置と測定器類を設置するための地下ピットと呼ばれる作業スペースが設けられている。地下ピットは Fig.3 の破線で示されているようにグランドプレーンの右半分の中央部に設けられた幅 2.5m の通路状の空間であり、右端の開閉板を持ち上げて入る。測定器は恒温槽に収納して使用し、地下ピットの熱制御用には

ダクトを設けて換気し、雨水などはポンプにより外部へ排水される。電動昇降機をもつアンテナマストは、地下ピットから上部に突き出す方式になっているので、アンテナマストを設置するための穴がグランドプレーンの中央部から約 6mと16mの位置にある。これらは送受アンテナ距離が10mと30mに対応しており、対となる送信アンテナマストはグランドプレーンの左半分の対称の位置に設置する。この送信アンテナマストは手動昇降機をもち、台座ごとグランドプレーン上に設置する。グランドプレーンの左部分には地下ピットはつくられていないが、送信アンテナマストの設置位置付近の送信アンテナから離すことなく、測定器を収納するための空間がグランドプレーン下に 2箇所設けられている。アンテナと測定器をつなぐ信号線や電源ケーブルは、地下ピットからこれら 2箇所の測定器収納穴まで別々に配管されている。

溶接された1枚のグランドプレーンの平面度は1m間隔で測定し評価された。測定点数は合計1500点である。Fig.5 に凹凸の平面分布を示す。左部分に線状の低い部分が多く見られるが、これは鋼板の溶接部分

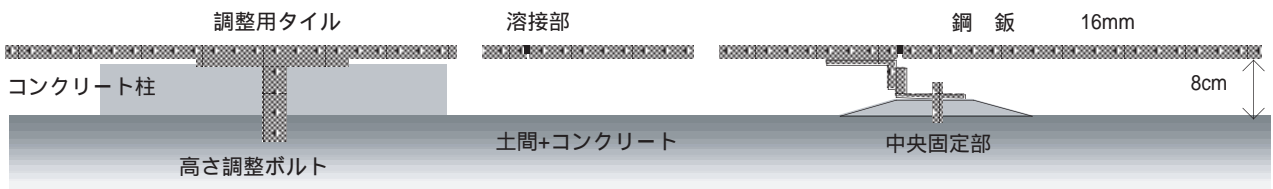


Fig.4 Structure of the ground plane (Vertical view). Mortar columns hold the steel plate.

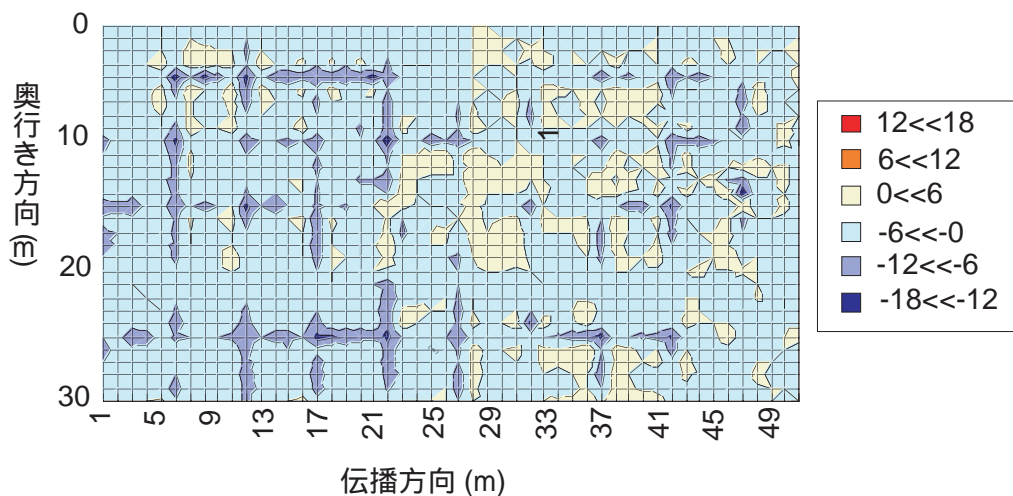


Fig.5 Distribution of the surface height of the ground plane

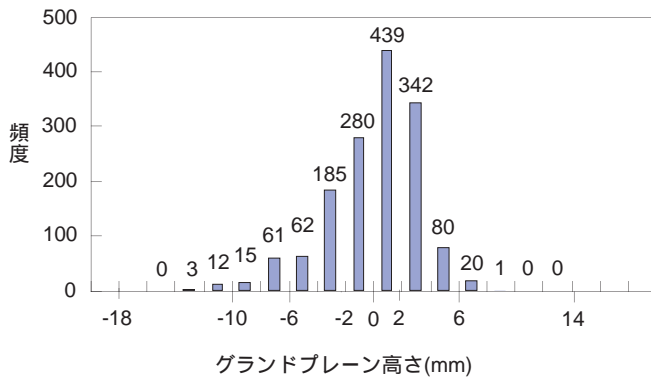


Fig.6 Histogram of the measured heights of the ground plane.
The height was measured at every one meter.

である。鋼鈹の溶接方法として、16mmの厚みの上部に開先をとり鋼鈹厚みのうち上部のみ溶接したことが原因であり、鋼鈹の伸びとともにその歪みが下方に広がったと推測される。鋼鈹の溶接工程において溶接前、溶接作業直後、歪み修正後の過程においてグランドプレーンの凹凸を測定し、その平面度を評価しながら作業を進めた。コンクリート支柱のタイルの上に鋼鈹を並べた溶接前ではすべての測定点の高さが $\pm 6\text{mm}$ の範囲に入っていることが確認された。すべての溶接を終了した直後にはその凹凸は $+25\text{mm}$ と -15mm に広がり、白色塗装後にも $\pm 15\text{mm}$ の凹凸が生じていたため、加熱・冷却の手法により主に凸部を修正し凹凸の最大幅をほぼ 20mm ($\pm 10\text{mm}$)に圧縮した。この時点での凹凸分布が Fig.5 に示されている。この分布に対応するグランドプレーンの高さヒストグラムを Fig.6 に示す。分布は対称ではなく下のほうに広がっているため平均面とヒストグラムのピークは一致しない。平均面からの偏位は 6mm を超える点が21点、 -6mm を下回る点が91点あり、92.5%以上が $\pm 6\text{mm}$ の範囲に入っている。凹凸の分布の標準偏差は 3.23mm であり、目標の平面精度の $\pm 6\text{mm}$ をほぼ2の基準で達成された。

§4 オープンサイトの機能とアンテナ測定

建設されたオープンサイトは、主に $30\text{MHz} \sim 1000\text{MHz}$ の周波数帯域においてアンテナの計測・校正を行う設備である。アンテナを特徴付ける特性には入力インピーダンスや指向性、利得などが挙げられ、いずれの測定においてもアンテナ以外に電波を反射する物

体が存在すると、その反射波が測定値に誤差を与えるので、アンテナ測定は周囲空間に全く反射物の存在しない自由空間で行われることが理想である。しかし、地上では地面があるため周囲に電波を反射する物体が全くない空間を実現することはきわめて困難である。このため、逆に地面に導体反射板を平面状に敷くことにより、理論により定量的に推定できる反射状態を作り出し、理論的な裏付けを得て高精度にアンテナ測定をする設備がオープンサイトである。理想的なグランドプレーンは無限大の広さが必要であるが、物理的な制約から有限な広さのグランドプレーンを用いている。また、理想的な反射状態を実現するためにグランドプレーンの平面性が重要であると同時に、周囲物体からの電波反射・散乱が測定の誤差となるために、グランドプレーンより上方にある物体をできる限り取り除く処置を行った。これにより、理想的には被測定アンテナ間の電波伝播は直接波とグランドプレーンでの反射波のみとみなすことができるので、理論的に定量的な評価が可能となる。このように送受信アンテナ間を理想的な直接伝播と完全反射伝播経路とみなし、この経路上で誤差の原因となる他の反射・散乱などの不要電波伝播を避けるために、当所のオープンサイトでは前述の条件に沿って設計・建設を行った。

測定室を地下室化し、地上には大型の電波反射物が突き出ないように配慮している。測定室の垂直構造を Fig.7 に示す。図の上部が地面のレベルである。雨水に配慮しわずかに 10cm だけ高く壁を持ち上げ、上部は金属メッシュネットを張って地面の連続性を保存している。地下室全体は $10.8\text{m} \times 8.4\text{m}$ の敷地面を有するが、 2.4m 幅の階段を含むため測定室そのものは $10.8\text{m} \times 6\text{m}$ である。階段部分は露天であるが、上部を金属ネットで被い電気的には平坦な構造を実現している。地下室の下は雨水の処理のためのピットを設け、ポンプにより外部に排水する。

グランドプレーンの下にも前述のように地下ピットを設けている。平面図と立面図を Fig.8 に示しているように、この地下ピットは細長い地下空間であり、電動昇降アンテナマスト駆動部のグランドプレーン下への収納と測定器の収納が主な用途である。マスト駆動部はアンテナ架台に乗っており、そのままレールの上を 10m 移動することにより、2箇所

の受信アンテナマスト設置位置間を移動できる。移動の際にはアンテナマスト自体は取り外してグランドプレーン上を運搬する。地下ピットへの入り口は、電波の反射を考慮しグランドプレーンの端部に設けており、逆に測定器収納のための恒温槽は最奥の送受アンテナマストの間に設置している。測定機器の地下ピット内設置は高い周波数帯における測定に際してケーブル損を少なく押さえることが目的である。測定機器およびアンテナマストコントローラは、インターフェイスクーブルを介して地下測定室から制御し、また、測定データを転送する。測定機器を地下測定室に設置して測定する目的により、RF同軸ケーブルを直接、アンテナから地下測定室まで配線している。この場合にはアンテナ昇降機の制御の

みインターフェイスを介して行うことになる。

アンテナ間伝播の精密計測のため伝播減衰測定にはネットワークアナライザを用い、送受アンテナ間の複素Sパラメータを測定する。オープンサイトでの実際のアンテナ測定手順は次のとおりである。グランドプレーン上のアンテナマストを用いて一定の高さに送信アンテナを設置し、信号を供給し電波を放射する。放射された電磁波を送信アンテナから一定距離離れて設置された受信アンテナで受信し、その信号の伝播減衰を測定する。送受アンテナに接続する信号ケーブルは、あらかじめ送受アンテナから外して直結し、送受アンテナと伝播空間の入らない減衰量を校正する。送受アンテナの端子に信号ケーブルを接続すると、送受信アンテナの特性と空間伝播

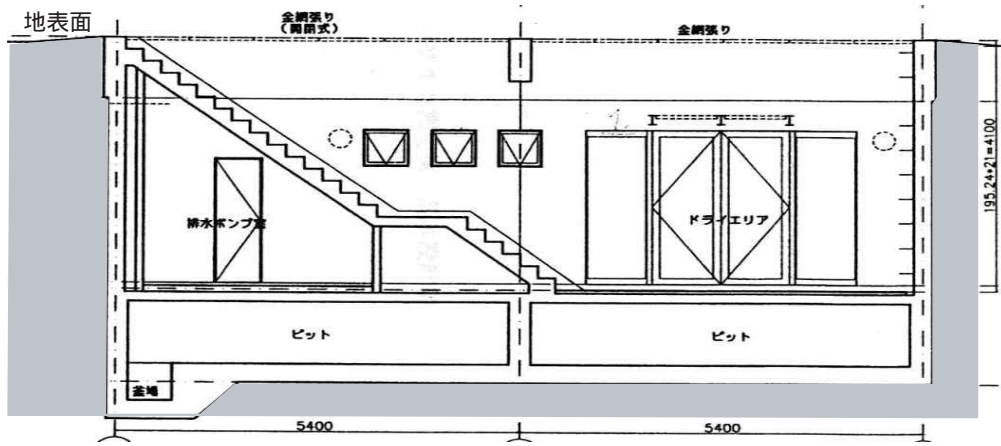


Fig.7 Structure of the underground measurement utility room(Vertical view)

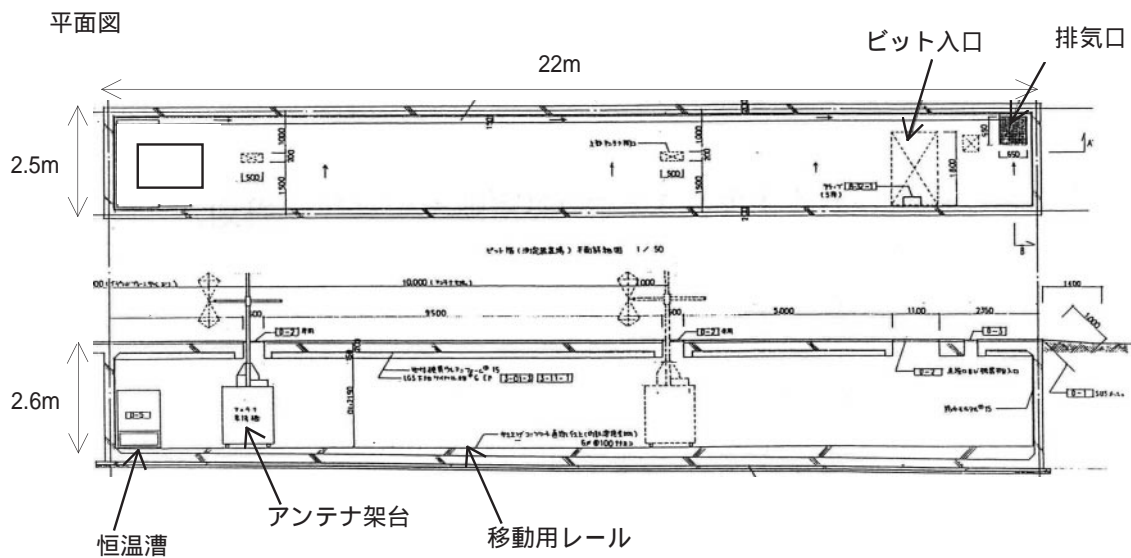


Fig.8 Structure of underground utility pit under the ground-plane (Horizontal and vertical views)

減衰を合わせて測定できる。周囲の電波環境を理想的とみなせばアンテナ間空間伝播による減衰を理論的に取り除き，残った減衰量が送受信アンテナ特性を統合した情報を含むことになる。

アンテナは空間電磁界と伝送回路とのインターフェイスであり，標準ダイポールアンテナの場合には空間電界と端子電圧を結びつけるアンテナ単体の特性として，アンテナを設置した空間の電界強度 E と出力電圧 V の比によって定義されたアンテナ係数 $AF (=E/V)$ が用いられる。上記のような送受アンテナ間の伝播計測からアンテナ単体の特性を抽出する方法として理想的な標準サイトでは3アンテナ法が用いられる。3アンテナ法はアンテナ係数の不明なアンテナ3本による3通りのアンテナの組合せを用いて伝播減衰測定を行うことにより，3元一次連立方程式をたて，未知数としてのアンテナ係数を解く手法である。このような方法により特性が明らかにされたアンテナがあれば，他のサイトにおいても被測定アン

テナと標準アンテナと置き換え測定をすることにより比較測定が可能になる。

オープンサイト全体の外観を Photo 2 に示す。写真の手前には地下測定室の表面金属メッシュが見える。中央の白色の部分が高く塗装されたグランドプレーンである。中央にはアンテナマストが2本あり，この状態はアンテナ間距離が10mの場合である。建設時期には枝のみであった左側の落葉樹木の葉が茂っている。送受アンテナに比較的近いため，季節変化による影響を評価することが必要となる。

§5 オープンサイトの特性測定

電総研オープンサイトのグランドプレーンの電波特性は，伸縮ダイポールアンテナを用い特定周波数（60MHz，180MHz，400MHz，600MHz）においてサイトアッテネーションを測定した。アンテナおよびマストは Fig.9 に示すように測定距離を10mに設置さ



Photo2 ETL Open area antenna site

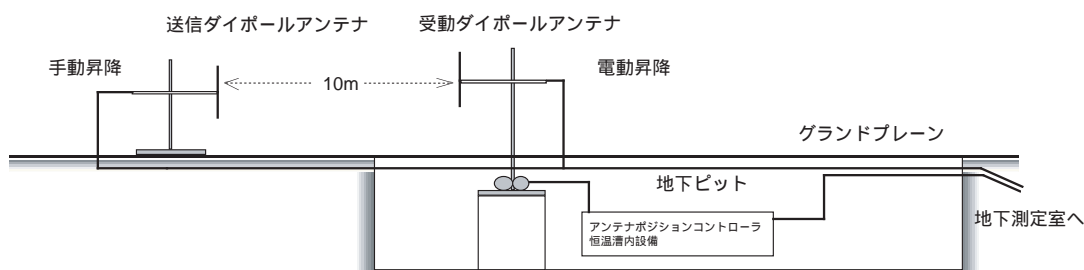


Fig.9 Function of the antenna site with antenna masts and underground pit. They are used for the measurement of site attenuation of standard dipole antennas.

れ、手動昇降アンテナマストを送信側に、電動昇降アンテナマストを受信側に設定した。前述のようにグランドプレーンの平面度を溶接直後の状態から修正して改善したが、その前後において同時にサイトアッテネーションを測定した。測定機器は当オープンサイト装備のネットワークアナライザ、および信号源とスペクトルアナライザを用いる2方法を実施した。グランドプレーンの修正前にはすべての測定機器を地下測定室に設置して行い、Fig.9のように地下ピット内にはアンテナコントローラのみが設置されている。グランドプレーンの改善後は、ネットワークアナライザシステムのみを用い、地下測定室に設置して長いRF同軸ケーブルを用いる場合と地下ピットの恒温槽内に設置する場合を比較した。測定結果の例として、ネットワークアナライザにより実施したVCCI規格とANSI規格による測定結果を、理論値からの偏差としてFig.10に示す。測定された規格化サイトアッテネーションは理論値からの偏差が水平偏波では0.3dB程度、垂直偏波では最大1.3dBと小さく、

グランドプレーンの平面度改善の前後ではわずかではあるが0.2~0.3dB程度の改善もみられた。測定機器の違いに関しては、 ± 0.1 dB程度の偏差内に収まる再現性のよいサイトアッテネーションが得られており、機器の設置場所に関しても問題となる差は見られなかった。

上記の特定周波数での測定以外にも広帯域サイトアッテネーションを測定した。Fig.11に測定結果を示す。(A)(B)は水平偏波で送信アンテナ高が2mの場合を、(C)(D)は垂直偏波で送信アンテナ高が1.5mの場合である。それぞれバイコニカルアンテナとログペリアンテナを用いて、300MHz付近を境に低周波数領域と高周波数領域の測定結果である。垂直偏波では細かい特性の変動が見られるが、Fig.10でも垂直偏波により大きな偏差と変動が見られることと同様に、アンテナ周囲のアンテナケーブルやグランドプレーン外の樹木、また、グランドプレーンの周辺部の影響が考えられ、更なる今後の詳細評価が必要であることがわかる。

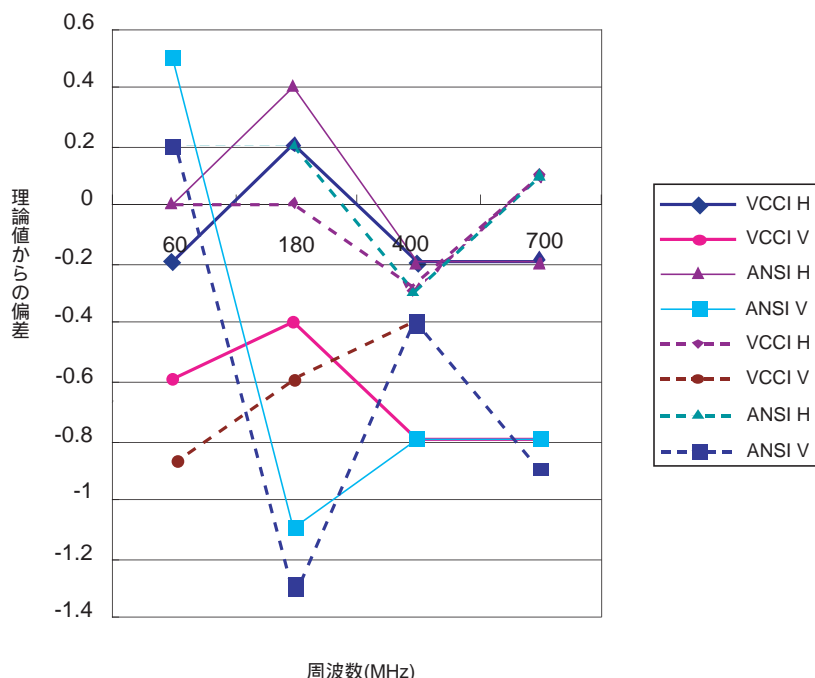
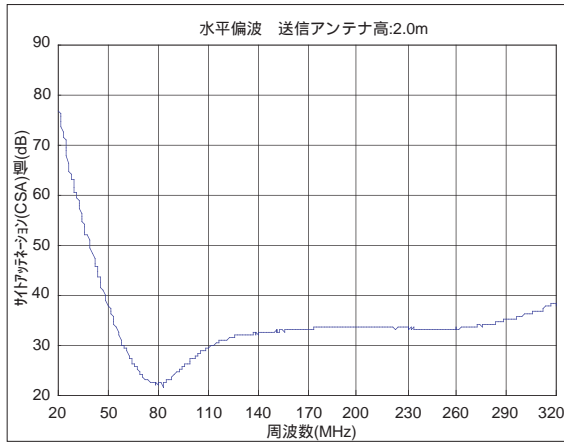
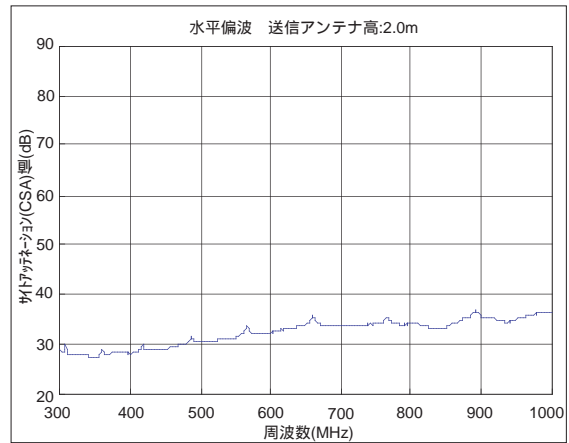


Fig.10 Measured normalized site attenuation of popular standard dipole antennas
Broken lines : before improvement of flatness (3/28)
Solid line : after Improvement (4/22)

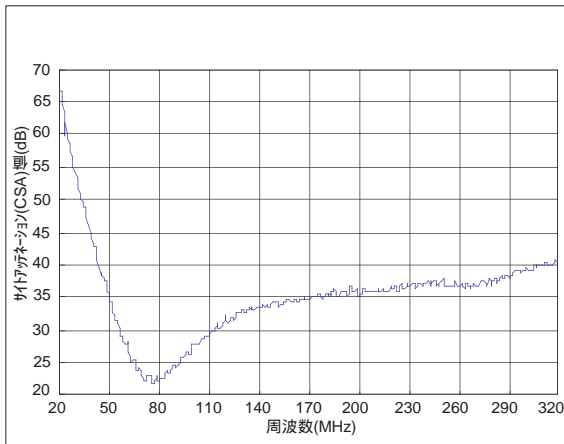


(A)

(Horizontal polarization)

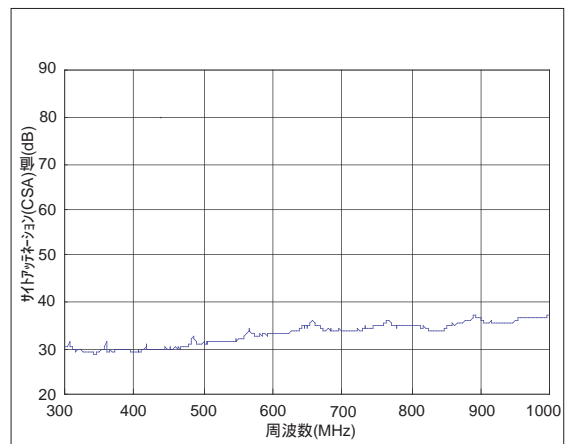


(B)



(C)

(Vertical polarization)



(D)

Fig.11 Wide-band site attenuation

§6 終わりに

理想的なアンテナ間の伝播経路は、送信アンテナから受信アンテナに到達する直接波とグランドプレーンによって反射され受信アンテナに到達する反射波が存在し、受信アンテナで観測される電磁界はこれらの合成界である。しかし、グランドプレーンの周囲による回折波、周囲構造物による散乱波、グランドプレーンの平面度の不足による理想的ではない反射波や熱膨張によるグランドプレーンの変形、風によるアンテナの揺れ、アンテナマストによる電磁波の反射、さらには放送波や通信用電波など外来電波等が混入するため、現実にはアンテナ間の伝播経路は理想状態からずれ、アンテナ測定には誤差が

生じる。これらの誤差要因に対処して得られる高精度測定技術によるアンテナ測定値と、アンテナ理論から得られる理想的なアンテナ特性が一致することが望ましく、今後のアンテナ標準の研究はこれを目指に行われる。

参考文献

- 1) 小見山, 他, “アンテナ測定用オープンサイト設備”, 電気学会 計測研究会 つくば 1999 IM-99-31
- 2) 森岡, 他, “オープンサイトにおけるダイポールアンテナの3アンテナ法測定”, 電気学会 計測研究会 つくば 1999 IM-99-30

(2000.1.31受付)