
調 査

アンテナの近傍界測定システムの開発とその応用

1. アンテナ近傍界測定の実状と動向

手代木 扶*

(昭和63年3月30日受理)

DEVELOPMENT AND APPLICATIONS OF NEAR-FIELD ANTENNA MEASUREMENT SYSTEM

1. CURRENT STATE AND TRENDS OF NEAR-FIELD ANTENNA MEASUREMENTS

By

Tasuku TESHIROGI

This special issue integrates papers concerning the large planar near-field antenna measurement facility developed by the Communications Research Laboratory.

The opening paper reviews recent research and developments of near-field antenna measurements around the world. Advantages and disadvantages of near-field measurements, types of scanning, and a brief history of theoretical work and practical system developments including the CRL system are described.

Finally, future prospects for research and applications of near-field techniques are discussed.

1. アンテナ近傍界測定の特徴と発展の背景

電波の利用形態が高度化し、アンテナにも高い技術が導入されるようになると、アンテナの放射特性の測定にもそれに応じた高い精度が求められるようになる。

例えば今後の衛星通信においては周波数有効利用を図りながら大容量化を実現するため、マルチビームアンテナの導入が必須であるが、この場合には異なるビーム間で約 30 dB のレベル分離を確保するため低サイドローブ化が必要である。また、直交偏波共用をする場合には偏波分離度の高いアンテナを実現する必要がある。

一方、12 GHz 帯の衛星放送では非常に過密な世界的チャンネルプランが定められており、衛星側アンテナでは混信を避けるためサイドローブ -30 dB 以下、交差偏波が主軸方向で約 -40 dB と厳しい基準が CCIR で

推奨されている。

この他、レーダでも、グラウンドクラッタを抑制し、標的検出感度を上げるため、超低サイドローブアンテナを必要とするなど、通信用以外のアンテナの高度化要求も高まってきている。

このような低サイドローブ、低交差偏波のアンテナを実現するためには、まず、精度のよい測定ができなければならない、アンテナの研究と並んで新しい測定法の研究が重要性を持つようになってくる。

また、これから大きな市場に発展すると見られる移動通信の分野では、アンテナは移動体と一体として性能評価しないと意味がなくなることが多いため、これを可能にする試験法の開発が望まれる。

通常、アンテナの測定法としては被測定アンテナと測定用アンテナを十分な距離で対向させておこなう遠方界測定が普通である。しかし、アンテナが大きい場合は屋

* 通信技術部 通信装置研究室

外で行うことになるので、地面や周囲の反射が存在し、測定に誤差をもたらす。また、実際に必要な距離を確保できないことも多い。さらに、雨、雪、風等天候の影響で測定が制約を受けたり、伝搬条件の変化でアンテナ測定の精度が劣化するという問題もある。特に、日本の場合、都市近郊では、空間的及び電波的に理想的なアンテナの測定環境を確保することは容易でなく、アンテナの研究者や技術者の悩みの種になっている。

アンテナの近傍界測定 (NFM) は、アンテナの近傍の電界 (又は磁界) を測定し、厳密な電磁界理論に基づいてアンテナの遠方指向性や利得等を高精度で求めるものである^{(1),(2),(3)}。この方法は比較的小規模の電波無反射室内で大口径アンテナの測定ができることや、屋外測定のように周囲の影響を受けることなく、安定した精度の高い測定が行える等の利点を有する。第1表は遠方界測定と近傍界測定の比較をしたものである。これからわかるように近傍界測定法は、測定をコンパクトな空間に限定することにより、外的諸条件の影響を排除し、精度と信頼性の高い測定を可能にする方法であると言える。なお、広義の近傍界測定法には大きなオフセット反射鏡で平面波を作り、これを被測定アンテナに入射させて測定を行うコンパクトレンジや、対向するアンテナ間隔を近距離で変化させながら利得や偏波を測定し、無限遠における値を外挿する方法なども含まれようが、本文では近傍界走査により遠方特性を決定する狭義の近傍界測定に限定することにする。

近傍界測定法研究を基礎段階から一貫して行ってきたパイオニアは米国国立標準局 (NBS) とジョージア工科大 (GIT) である。両機関による近傍界理論の研究は1960年代前半に始まり、平面、円筒面、球面走査とも1970年代初めに厳密な理論体系がほぼ出来上がっている。

第1表 遠方界測定と近傍界測定の比較

	長 所	短 所
遠方界測定 (FFM)	測定が簡単 複雑な解析が不要	広い試験場が必要 地面や周囲の反射による影響 高い塔や建物が必要 電波伝搬の影響 天候の影響 他回線との電波干渉
近傍界測定 (NFM)	電波無反射室内で大口径アンテナの測定可能 天候、電波伝搬、電波干渉の影響を受けない クリーンルームで測定可能 アンテナの診断・解析に適 アンテナの秘密保持	システムが複雑 位相測定が必要 電波無反射室が必要 コンピュータが必要

基礎理論と並行して、システム実現の見通しを明るくしたのは、コンピュータ技術の発達と Cooley と Tukey による高速フーリエ変換 (FFT) の算法の発見⁽⁴⁾があったと思われる。FFT の論文が発表された1965年ごろは近傍界理論の研究が本格化した時期で、これにより大形アンテナの測定も現実的なものとなり、この分野の研究者を大いに勇気づけるものとなった。

このような技術的条件が着々と整えられていく中で、宇宙、航空、軍事の分野では1970年代に入ると、大形、多機能、高性能アンテナのニーズが高まり、これらのアンテナの精密測定、解析、診断の必要に迫られるようになってきた。NBS や GIT の研究の結果、これらの高度なアンテナの開発のツールとして、近傍界測定システムの有用性が次第に明らかになってきていたので、1970年代中盤から、米国、欧州の宇宙・航空関連の研究所や企業が競うように様々な近傍界測定システムを開発するようになっていった。

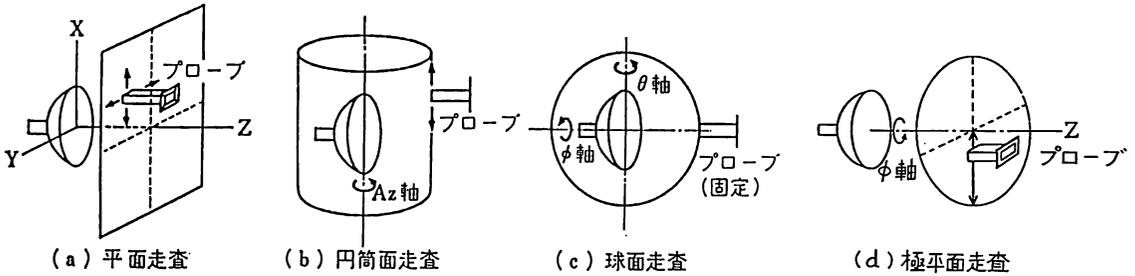
我が国では、筆者が1977年 NBS に留学後、近傍界測定法を紹介することによって、この新しい測定法が注目されるようになり⁽⁵⁾、1980年代中ごろから、当所、東芝、三菱電機等で近傍界測定システムの開発が始められるようになった。

本小特集では以下の論文で、当所が開発した平面近傍界測定システムとその性能、測定結果、及びこのシステムを用いた応用実験等を述べる。それに先立ち、本文では、近傍界測定研究開発の現状と動向について概説する。

2. 近傍界測定法の概要

近傍界走査によるアンテナ測定法には走査面の形状に応じて、第1図に示すように、直角平面走査 (通常、これを平面走査という)、円筒面走査、球面走査、極平面走査がある。それらには一長一短があり、どの方式を選定するかは、アンテナの種類や指向性、物理的大きさや重量、求めたい指向性の角度範囲、使用できるアンテナマウントや電波無反射室等に依存する。各走査方式は第2表に示すような利害得失を有しているから、それらを考慮して方式の選定をしなければならない。

近傍界測定ではどの方式でも、近傍界の振幅と位相のデータを必要なサンプリング間隔で取得し、そのデータを記録することと、そのデータから近傍界/遠方界変換の理論に基づいて計算すること、の二つの作業から成る。いずれの方式に対しても、近傍界/遠方界変換の基礎理論は確立している⁽⁵⁾。正確に遠方界指向性や利得を求めるには、プローブの指向性の影響を取り除く、いわゆる「プローブ補正」と呼ぶ処理が必要で、これが近傍



第1図 各種近傍界測定法

第2表 各種近傍界走査方式の比較

	直角平面走査	円筒面走査	球面走査	極平面走査
プローブの移動 アンテナの回転 スキャナの走査	2次元 なし X-Y	1次元 Az 軸回転 1方向 (Az 軸と平行)	なし 2軸 (Az, Roll 軸) 回転 不要	1次元 Az 軸回転 1方向 (Az 軸と直角)
機械的精度要求	スキャナの平面度 プローブの位置決め	Az 回転の角度分解能と確度 Az 回転軸と走査軸の平行度	アンテナ回転 2 軸の直交度 および交差度	Az 回転の角度分解能と確度 Az 軸と走査軸の直交度と交 差度
データ処理 (プローブ補正)	容易	やや難	難	難
特徴	アンテナ固定 指向性アンテナに適 アンテナの診断・解析可能 部分的電波無反射室でもよい トランケーション誤差あり 側方, 後方の指向性不可	側方, 後方の指向性が得られ る 汎用の Az 軸回転台使用可 ファンビームアンテナに適 Az 軸方向にトランクエーシ ョン誤差あり	プローブの移動不要 トランケーション誤差なし 全方向の指向性取得可 大型, 大重量アンテナや回転 で変形するアンテナには不 適	スキャナの走査範囲小 指向性アンテナに適 汎用の Az 軸回転台使用可 部分的電波無反射室でもよい トランケーション誤差あり 側方, 後方の指向性不可

界測定理論の重要な部分を占めている。

近傍界測定から遠方界特性を求める一般のプロセスは

(1) まず, 各走査方式の直交性を利用してプローブの受信出力の逆コンボリューションをとることにより, 被測定アンテナとプローブの結合積を求める。

(2) 結合積には被測定アンテナとプローブの送信, 受信特性を固有波動関数で展開したときの係数が積の形で含まれているから, プローブの係数を別途求めてこれで除して, 被測定アンテナの展開係数を決定する。

(3) その係数と固有波動関数を用いて, 級数ととして遠方界指向性や利得等を求める。

(2)で難しいのは, 結合積に含まれるプローブの受信特性はプローブの座標系でなく, 走査面の基準座標系 (アンテナの座標系) で表現しなければならないということである。平面走査以外ではこれがかかなり複雑な計算となる。ただし, 平面走査の場合には, プローブが常に一定の方向を向いているので, これがアンテナの中心付近にあるときと走査面の端にあるときとは, プローブの受信特性が大きく異なるためプローブ補正は必須であるのに対し, 球面走査ではプローブが常にアンテナ中心方向を向くので, 観測距離が大きき場合には, 補正は必ずしも必要ではない。極平面走査や円筒面走査では, 基本的に平面走査と同様のことが言える。

3. 研究・開発の経緯と現状

3.1 近傍界測定理論研究の推移

世界で最初にアンテナの近傍界測定を試みたのはオハイオ州立大の Richmond と Tice⁽⁶⁾ で, 1955年のことであった。彼らは通常の切り離し導波管の他, 点における電界を測るため誘電体を挿荷した小形切り離し導波管等を用いてマイクロ波アンテナの近傍界を測定し, これから計算した遠方界指向性を通常の遠方界測定で得られたデータと比較している。その後, このような近傍界測定から遠方界を求める試みがあちこちで行われたが, プローブ補正は行われていなかった。

プローブ補正の問題に最初に厳密解を与えたのは, Brown と Jull⁽⁷⁾ であった。ただし, 彼らが扱ったのは2次元円筒問題であり, 実際には円筒面走査ではなく円走査であった。

1963年, NBS の Kerns は3次元のプローブ補正問題に完全な解法を与えた⁽⁸⁾。彼はアンテナを空間に対し無限個の平面波入出力端子を持つ接合回路と考え, 平面波散乱行列法と呼ぶ手法を導入し, この問題を解くのに成功した。その後, この理論は“Plane-wave scattering matrix theory of antennas and antenna-antenna interactions”⁽⁹⁾ という著書にまとめられているが, こ

これは平面近傍界測定の設定版とも言えるものである。

NBS と共に初期のころから近傍界測定の研究を行ってきた GIT の Leach と Paris は1973年、プローブ補正を行った円筒面走査の理論を開発し、それをを用いて導波管スロットアレーの測定を行っている⁽¹⁰⁾。彼らの理論は散乱行列法でなく、ローレンツの可逆定理から出発するものであった。円筒面走査ではプローブ補正が複雑であるので、この点を改良するため、その後、Borgiotti がプローブ特性を平面波展開する方法⁽¹¹⁾、Yaghjian が波源散乱行列法⁽¹²⁾を用いた円筒面走査の理論を発表している。

球面走査の最初の理論は1970年、デンマーク工科大 (TUD) の Jensen⁽¹³⁾ によって発表されたが、これは実際の計算法ではなかった。その後、NBS の Wacker⁽¹⁴⁾ や Jensen⁽¹⁵⁾、Larsen⁽¹⁶⁾ 等欧州勢がプローブ補正の球面走査の理論を開発している。

その他、ジェット推進研究所 (JPL) の Rahmat-Samii 等が極平面システムを提案し、ヤコビ・ベッセル級数展開による理論を発表している⁽¹⁷⁾。

近傍界測定法では測定誤差の評価も実用上重要な課題である。平面走査については解析的誤差評価⁽¹⁸⁾や計算機シミュレーションによる結果⁽¹⁹⁾等が発表されているが、他の走査法については詳しい誤差解析は行われていない。

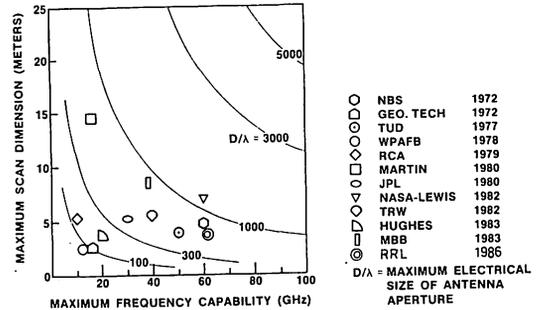
3.2 システムの開発

理論の研究と並行して、近傍界測定システムの開発と運用も進められた。プローブ補正を行った最初の測定は NBS が1965年に 47.7 GHz で、96波長のホーンアンテナを用いて行っている⁽²⁰⁾。このときのプローブを走査するスカナは旋盤のベッドを利用したもので、走査範囲は 2.5 m であった。NBS では1972年に走査範囲 4.5 m のボックスフレーム型の大形スカナを開発している。

一方、1968年ごろ近傍界測定の研究を開始した GIT も1970年代前半に平面・円筒面走査のシステムを完成させている⁽²¹⁾。

1970年代中盤に入ると、米国や欧州の研究所や企業を中心として、実用システムが次々開発されるようになった。ここ10年ほどの間に世界中で50以上の近傍界測定システムが建設されたようである。第2図にこれまで発表されているシステムのうち主要なものを示す。この中で TUD のシステムは球面走査方式、MBB (Messerschmitt-Bölkow-Blohm, 西ドイツ) のシステムは円筒面走査方式である。以下に特徴的なものについて記述する。

第3図に NBS の 4.5 m スカナを示す⁽²²⁾。スキ



第2図 世界の主要な近傍界測定施設とその能力

ャナに対向するアンテナ側にはモデルタワーと呼ぶマウントが用意しており、平面、円筒面、球面いずれの走査もできるようになっている。

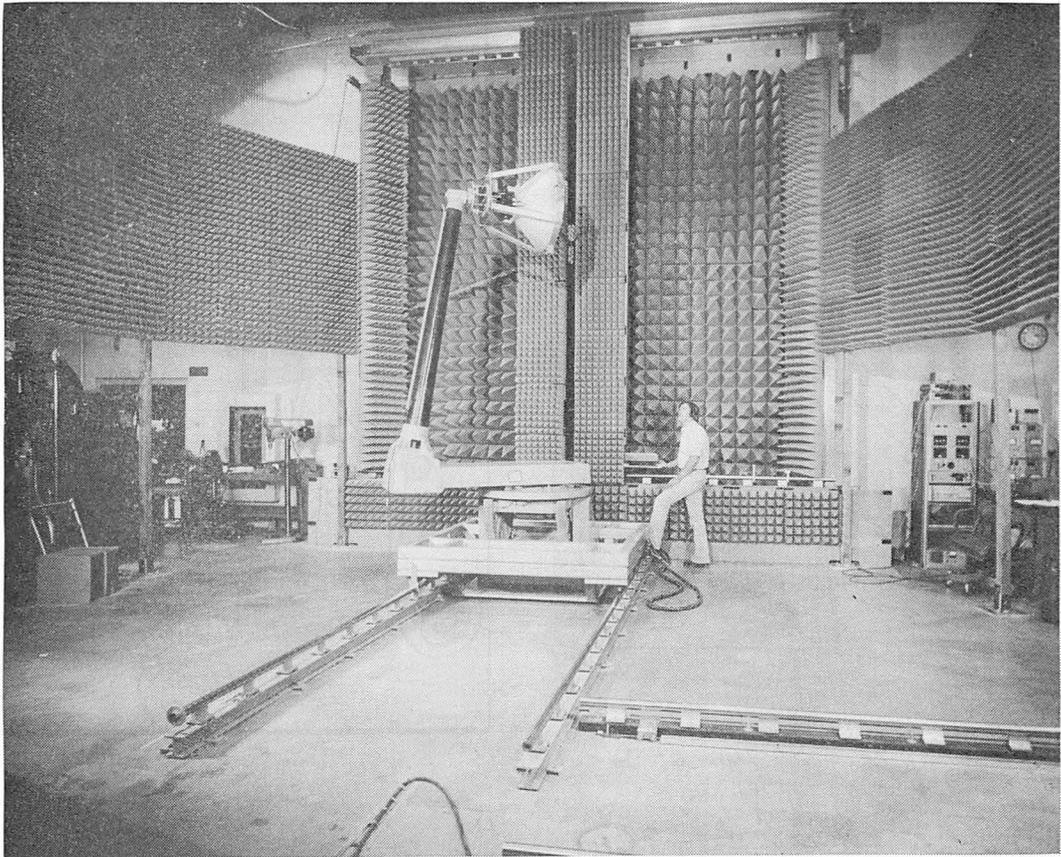
平面スカナで最大のもは Martin Marietta 社の 15 m 級のものであるが、これは第4図に示すように床にある1軸のレール上をアンテナが移動し、一方天井面にはそれと直交するレールがあり、プローブがその上を移動することにより平面走査する方式である⁽²³⁾。これを使って NASA が開発する 15 m のフープ・コラム型の宇宙用展開アンテナを試験する計画になっている。

JPL のシステムは第5図に示す極平面型で、比較的小さな電波無反射室内で大きなアンテナが測定できる⁽²⁴⁾。JPL ではいろいろな宇宙用アンテナの研究を行っているが、このシステムを最大限有効に活用している。

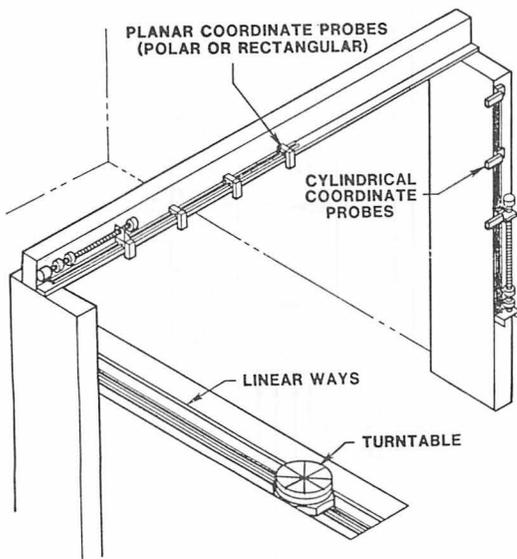
NASA のルイス研究センターでも宇宙用大形アンテナの開発のため平面走査システムを整備している。現在あるのは走査範囲 6.6 m の垂直スカナである。同センターでは将来の大形アンテナに備え、20 m 四方を走査できる水平走査方式のシステム整備を計画している⁽²⁵⁾。これは第6図に示すようにアンテナを上向きに設置し、プローブは天井面を2次元的に移動するシステムである。

その他、平面走査の例として、第7図に示すような移動型のスカナがある。これは Martin Marietta 社が開発したもので、空港に持ち込み航空機のノーズコーン中にあるレーダアンテナを測定するものである。

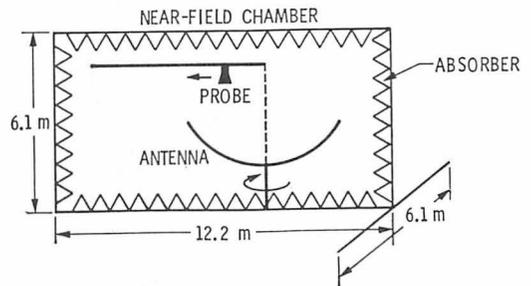
円筒面走査のみのシステムはそれ程多くないが、大形、大重量のアンテナに対して最も経済的とも言われている。西ドイツの MBB 社、英国の BAD (British Aerospace Dynamics) 社では円筒システムを開発している。第8図は BAD 社の円筒近傍界測定システムの構成である⁽²⁶⁾。球面走査では、比較的小形のアンテナに対しては汎用のロール/アジマス回転台が使用でき、特にスカナを必要とせず経済的であるため、Scien-



第3図 NBSの4.5m スキャナ



第4図 プロブ1軸移動型平面走査方式



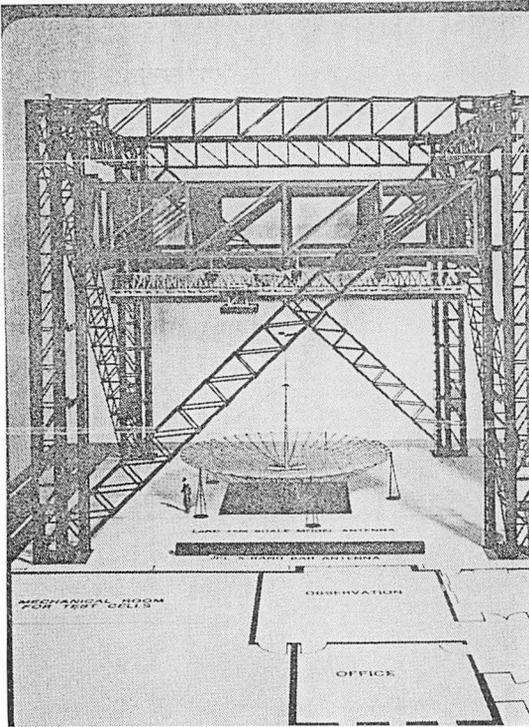
第5図 JPLの極平面走査システム

るようである。また、基礎段階から研究を行ってきたTUDはESA(欧州宇宙機関)と共同で大形の球面走査システムを開発した⁽²⁷⁾。第9図にこのシステムの構成を示す。

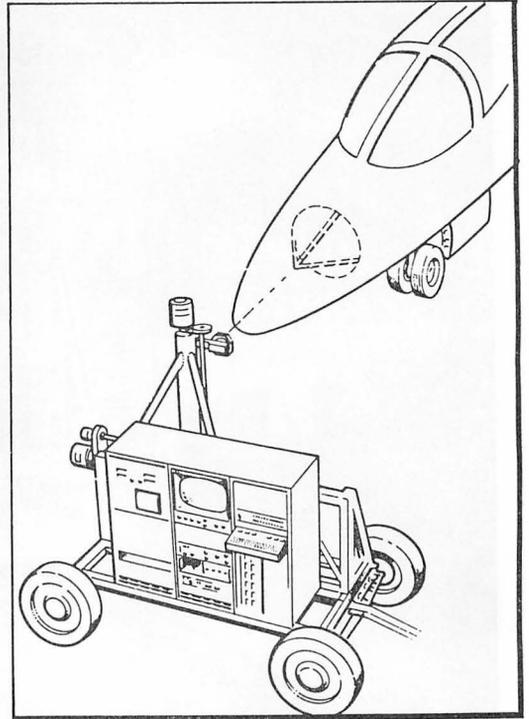
3.3 我が国の状況

我が国では、ビーム導波系の研究に関連して、近接領域の電磁界問題が研究されていたが⁽²⁸⁾、アンテナ測定に結びついた研究は、筆者が近傍界測定を紹介するまで行われていなかった。したがって、国内の研究は昭和54年以降になる。

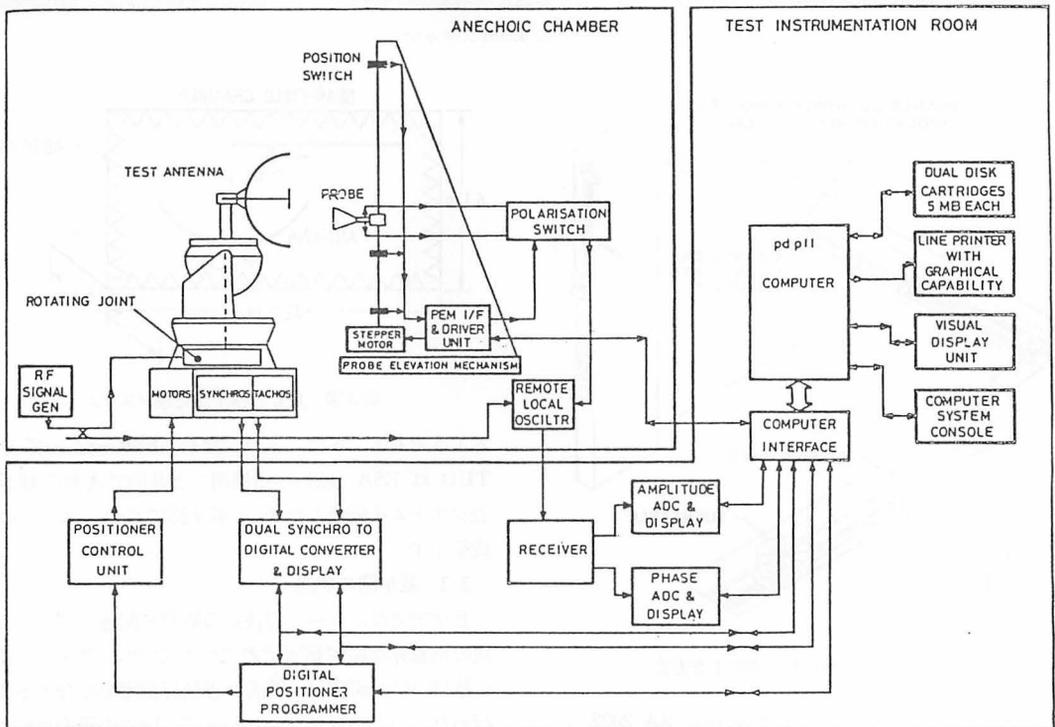
tific Atlanta 社ではソフトウェアも含め、SA 2022 システムとして市販しており、世界中でかなり使われてい



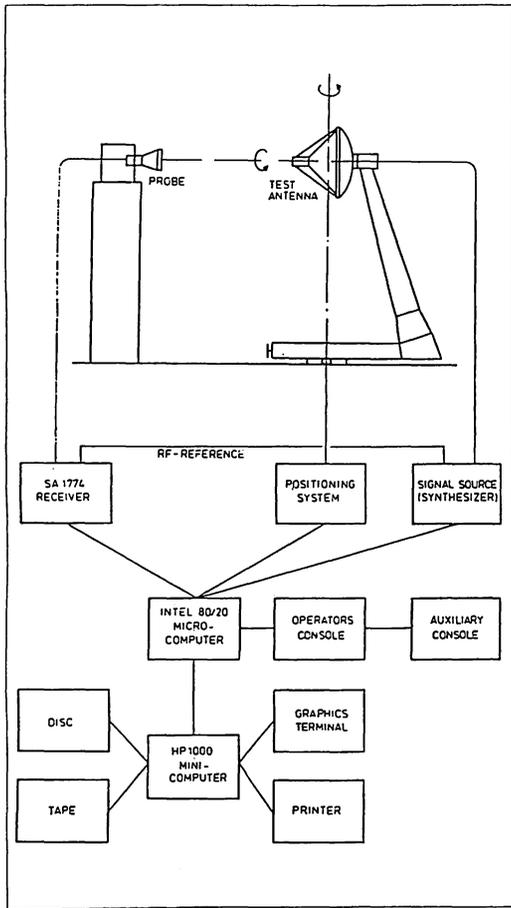
第6図 水平スキャナの平面走査システム
(NASA ルイス研究所の計画)



第7図 可搬型平面近傍界測定システム



第8図 同軸走査近傍界測定システムの例⁽²⁶⁾



第9図 球面走査近傍界測定システムの例⁽²⁷⁾

第3表はこれまでに我が国で発表された近傍界測定関連の論文をまとめたものである。発表は電波研、東芝、三菱電機の3機関に限られているが、S/A社の球面走査システムを購入したり自社開発したりして近傍界測定システムを利用している所もある。

東芝は昭和59年に1.5m四方のボックスフレーム型スキャナを持つ平面近傍界測定システムを開発し、1.6m×1mの楕円開口オフセットパラボラの近軸指向性を測定し、遠方指向性と比較している⁽²⁹⁾。

三菱電機は昭和61年に走査範囲1m×1mのタワー形スキャナを開発し、ホーンアンテナの開口分布を推定している⁽³⁰⁾。さらに、同社では合成開口レーダアンテナの測定も可能とするように現在、12m×8mの大形スキャナを開発中である。

当所では、昭和55年、「衛星用マルチビームアンテナの研究」のプロジェクトがスタートし、この中でアンテナの精密測定・解析のため、近傍界測定システムを開発する計画が立てられた。58年に所内アンケート調査を実

施し、この結果を参考にしてシステム設計を行った。59年度から平面走査システムの整備を開始し、2年間で電波無反射室の必要部分、スキャナ、測定機器類等のハードウェア及びシステム制御と近傍界/遠方界変換ソフトウェアの基本部分を完成させた。61年1月、4m×4mという我が国最大のスキャナが完成するとただちに、ソフトウェアの開発を開始し、2か月間でこれを完成、3月末までにプローブ補正を行った平面近傍界測定によるLバンド標準ホーンアンテナの指向性測定に成功した⁽³¹⁾。この結果を遠方界測定とのデータと比較し、プローブ補正の効果の大きいことを確認した。予算事情の厳しいときであったため、電波無反射室を完成させるのに、3年もかかるという悪戦苦闘が続いた。

その後、航空機搭載フェーズドアレー、衛星放送受信用アンテナはじめ各種アンテナの試験に使用する一方、指向性や利得測定の高精度化のための研究、鏡面精度の電波による測定などの応用研究も試みている。平面走査では広角指向性が得られないので、この欠点を補うため、現在、円筒面走査システムの開発に着手している。

4. 今後の展望

今後、衛星通信、地上の移動通信等無線通信の分野はもとより、リモートセンシングなど非通信分野での電波利用においてもより高度なアンテナが必要とされる。このようなアンテナの設計、試験、解析において、高精度で再現性に優れた近傍界測定システムは大きな威力を発揮するであろう。特に、我が国では土地問題や環境問題から今後多くの企業や研究機関がこのシステムを採用していくと予想されるが、精度と信頼性の高い測定法を開発することは国立研究機関である当所が大いに期待される所でもあり、強力にこの研究を推進する必要がある。

一方、アンテナの測定や診断だけでなく、これからはEMCや電波を用いた医療の分野等で直接、近傍電磁界を扱う場面が多くなると予想される。研究は対象を正確に測定することから始まるので、近傍界測定システムはこのような研究にも大いに寄与することができるであろうし、それがまた、近傍界測定の研究の発展を促すことにもなる。

所内外の研究者がこの新しいツールを十分に活用し、我が国のアンテナの研究開発や各種電波利用の実験研究が一段と進展することを願ってやまない。

おわりに、近傍界測定システムの開発に関しては所内外の多数の方々からご援助を頂いた。特に、昭和55年マルチビームアンテナのプロジェクト発足のとき、予算獲得に尽力された、当時の石田亨衛星通信部長、高橋耕三第三衛星通信研究室長、その後システム開発にご支援を

第3表 わが国の近傍界測定に関する研究発表(昭和54年~63年2月)

論 文 名	著 者	所 属	発 表 誌
アンテナの近傍界測定	手代木扶	電波研	信学誌62巻10号 (54.10)
近傍界電界測定におけるプローブ位置誤差補正法	岩崎, 三国	東芝	昭和58年信学全大 No. 773 (58.04)
平面走査型近傍電界測定装置	岩崎, 三国	東芝	昭和59年信学全大 No. 733 (59.03)
近傍電界測定装置の評価	岩崎, 三国	東芝	信学技報 A P 84-26 (59.06)
近傍界電界測定におけるプローブ位置誤差と遠方界指向性誤差との関係	岩崎, 三国	東芝	昭和59年信学光・電波部門全大 No. 61 (59.10)
アンテナの近傍界測定における有限走査範囲による誤差	堀, 伊藤, 手代木	電波研	昭和60年信学全大 No. 728 (60.03)
平面近傍界測定用大形スキャナの方式比較	手代木, 小室, 中條, 伊藤	電波研	昭和60年信学全大 No. 729 (60.63)
平面近傍界測定用ケーブルガイドアームの構成法	伊藤, 川瀬, 手代木	電波研	昭和60年信学全大 No. 730 (60.03)
アンテナの平面近傍界測定大形スキャナの構成法	伊藤, 川瀬, 堀, 手代木	電波研	信学技報 A P 85-17 (60.06)
近傍電界測定における測定誤差と遠方界指向性誤差との関係	岩崎, 三国	東芝	信学技報 A P 85-26 (60.07)
近傍界測定法によるホーンアンテナの開口分布の推定	蛭子井, 中原, 佐藤, 真野	三菱	昭和61年信学全大 No. 650 (61.03)
大形平面近傍界測定システムの開発 —測定システムの構成—	堀, 小室, 伊藤, 中條, 田中大久保, 手代木	電波研	昭和61年信学全大 No. 652 (61.03)
大形平面近傍界測定システムの開発 —4 mスキャナの機械的性能—	伊藤, 小室, 大久保, 堀, 手代木	電波研	昭和61年信学全大 No. 653 (61.03)
アンテナの近傍界測定システムの開発	手代木, 堀, 大久保, 伊藤, 小室	電波研	第70回電波研究発表会 (61.06)
アンテナ平面近傍界測定におけるプローブの影響とその補正	大久保, 堀, 伊藤, 手代木	電波研	信学技報 A P 86-37 (61.06)
平面近傍界測定によるアンテナ利得の測定	伊藤, 堀, 大久保, 手代木	電波研	昭和61年信学光・電波部門全大 No. 63 (61.09)
平面近傍界測定システムの開発 —指向性の精密測定—	手代木, 堀, 大久保, 伊藤, 小室	電波研	昭和61年信学光・電波部門全大 No. 64 (61.09)
近傍界測定技術を用いた衛星用メッシュ展開アンテナの鏡面精度測定	中條, 伊藤, 堀, 手代木	電波研	昭和61年信学光・電波部門全大 No. S3-8 (61.09)
近傍界測定技術を用いた衛星用メッシュ展開アンテナの鏡面精度測定	中條, 伊藤, 堀, 手代木	電波研	信学技報 A P 86-86 (61.10)
Development of a large near-field antenna measurement facility	Teshirogi, Hori, Okubo, Itoh	R R L	Denshi Tokyo No. 25 (IEEE Tokyo Section) (62.02)
アンテナの近傍界測定における周囲壁面からの反射の影響	堀, 伊藤, 手代木	電波研	昭和62年信学全大 No. 654 (62.03)
素子電界ベクトル回転法のフェーズドアレーアンテナへの応用	白松, 千葉, 堤, 折目, 真野片木	三菱	昭和62年信学全大 No. S8-5 (60.03)
アレーアンテナの自動調整/測定システム —近傍界測定による一貫した調整と測定—	奥村, 田中, 中村, 上野, 川端	東芝	昭和62年信学全大 No. S8-6 (62.03)
平面近傍界測定法によるアンテナの開口面分布の解析	大久保, 堀, 伊藤, 手代木	電波研	昭和62年信学全大 No. S8-7 (62.03)
A Measurement of surface accuracy of deployable mesh reflector by planar near-field scanning	Chujo, Itoh, Hori, Teshirogi	R R L	1987 IEEE AP-S Int. Symp. (Virginia) (62.06)
平面近傍界測定法によるアンテナの開口面分布の診断	大久保, 堀, 伊藤, 手代木	電波研	信学技報 A P 87-33 (62.06)

頂いた生島廣三郎, 中橋信弘両衛星通信部長(いずれも当時), 五十嵐隆現通信技術部長はじめ所内の関係各位, 並びにスキャナの開発に協力頂いた新日本工機㈱の関係の方々に御礼を申し上げる。

また, 我が国の近傍界測定の研究を立ち上げるうえで, 米国 NBS の Electromagnetic Fields Division, Antenna Systems Metrology Group の協りに負う所が大きい。同グループのリーダーである Dr. R. C. Baird はじめメンバー諸兄に誌上を借りて深甚なる謝意を表したい。

参 考 文 献

- (1) R. C. Johnson, H. A. Ecker, and J. S. Hollis; "Determination of far-field antenna pattern from near-field measurements", Proc. IEEE, 61, 12, pp.1668-1694, 1973.
- (2) A. C. Newell and M. L. Crawford; "Planar near-field measurements of high performance array antenna", NBSIR 74-380, July 1974.
- (3) 手代木扶; "アンテナの近傍界測定", 信学誌, 62, 10, pp.1145-1153, 昭和54年.

- (4) J. W. Cooley and J. W. Tukey ; "An algorithm for the machine computation of complex Fourier series", *Math. Comput.*, **19**, 4, pp.297-301, 1965.
- (5) A. D. Yaghjian ; "An overview of near-field antenna measurements", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **AP-34**, 1, pp.30-45, 1986.
- (6) J. H. Richmond and T. E. Tice ; "Probes for microwave near-field measurements", *IRE Trans. Microwave Theory and Techniques*, **MTT-3**, 1, pp. 32-34, 1955.
- (7) J. Brown and E. V. Jull ; "The prediction of aerial radiation patterns from near-field measurements", *Proc. IEE*, **108B**, 9, pp.635-644, 1961.
- (8) D. M. Kerns ; "Analytical techniques for the correction of near-field antenna measurements made with an arbitrary but known measuring antenna", *Abstract of URSI-IRE Meeting*, pp. 6-7, Washington, D. C., April-May 1963.
- (9) D. M. Kerns ; Plane-wave scattering-matrix theory of antennas and antenna-antenna interactions", *NBS Monograph 162*, June 1981.
- (10) W. M. Leach, Jr., and D. T. Paris ; "Probe-compensated near-field measurements on a cylinder", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **AP-21**, 4, pp. 435-445, 1973.
- (11) G. V. Borgiotti ; "Integral equation formulation for probe corrected farfield reconstruction from measurements on a cylinder", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **AP-26**, 4, pp.572-578, 1978.
- (12) A. D. Yaghjian ; "Near-field antenna measurements on a cylinder surface : A source scattering-matrix formulation", *NBS Tech. Note 696*, Sept. 1977.
- (13) F. Jensen ; "Electromagnetic near-field far-field correlations", Ph. D. dissertation, Tech. Univ. Denmark, 1970.
- (14) P. F. Wacker ; "Non-planar near-field measurements : Spherical scanning", *NBSIR 75-809*, June 1975.
- (15) F. Jensen ; "On the probe compensation for near-field measurements on a sphere", *Archive fur Elektronik und Ubertragungstechnik*, **29**, 7/8, pp.305-308, 1975.
- (16) F. H. Larsen ; "Probe correction of spherical near-field measurements", *Electron. Lett.*, **13**, 14, pp.393-395, 1977.
- (17) Y. Rahmat-Samii, V. Galindo-Isreal, and R. Mittra ; "A plane-polar approach for far-field construction from near-field measurements", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **AP-28**, 2, pp.216-230, 1980.
- (18) A. D. Yaghjian ; "Upper-bound errors in far-field antenna parameters determined from planar near-field measurements, Part I : Analysis", *NBS Tech. Note 667*, Oct. 1975.
- (19) A. C. Newell ; "Upper-bound errors in far-field antenna parameters determined from planar near-field measurements, Part II : Analysis and computer simulation", *NBS Short Course Notes*, July 1975.
- (20) R. C. Baird ; "Antenna measurements with arbitrary probes at arbitrary distances", *NBS Report 9229 (High Frequency and Microwave Field Strength Precision Measurement Seminar)*, 1966.
- (21) E. B. Joy, W. M. Leach, G. P. Rodrigue, and D. T. Paris ; "Application of probe-compensated near-field measurements", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **AP-26**, 3, pp.379-389, 1978.
- (22) P. F. Wacker ; "Advantages and disadvantages of planar, circular cylindrical, and spherical scanning and description of the NBS antenna scanning facilities", *ESA Workshop on antenna Testing Techniques*, *ESA SP-127*, pp.115-121, May 1977.
- (23) A. C. Newell ; "A survey of near-field testing methods for large aperture antennas and future trends", *NASA CP 2269 Part 2*, pp.877-897, 1983.
- (24) K. E. Woo, Y. Rahmat-Samii, and W. Imbriale ; "Large space antenna communications systems", *NASA CP 2269 Part 2*, pp.833-851, 1983.
- (25) C. L. Cuccia, T. G. Campbell, W. L. Pritchard, and J. Lydon ; Space-based antenna measurement system concepts for space station operation", *NASA CP 2368 Part 2*, pp.809-842, Dec. 1984.
- (26) Z. F. Voyner, B. Howe, A. D. Craig, J. Sheppard, and W. M. Kennerbey ; "Near-field probe-scanning antenna measurement facility", *Proc. 2nd Int. Conf. Antennas Propag.*, pp.278-282, April 1981.
- (27) J. E. Hansen ; "Spherical near-field testing of spacecraft antennas", *ESA J.*, **4**, 1, pp.89-102, 1980.

