
 研 究

アンテナの近傍界測定システムの開発とその応用

9. 平面近傍界測定による太陽炉鏡面精度の測定

有本 好徳*¹, 鈴木 良昭*¹, 大森 慎吾*², 飯田 尚志*³伊藤 猛男*⁴

(昭和63年3月30日受理)

DEVELOPMENT AND APPLICATIONS OF NEAR-FIELD
ANTENNA MEASUREMENT SYSTEM9. SURFACE ACCURACY MEASUREMENT FOR SOLAR FURNACE
MIRROR BY USING NFM TECHNIQUE

By

Yoshinori ARIMOTO, Yoshiaki SUZUKI, Shingo OMORI,
Takashi IIDA, and Takeo ITO

The space solar furnace is expected to give the experimental or industrial environment of vacuum, zero-g and high temperature. To develop the method to measure the surface accuracy after constructing or reactivating the mirror in space, a radio wave antenna measurement method, that is the near field measurement (NFM), is a promising approach, so the possibility of measurement is studied through a ground-based experiment. The experimental system and data processing using NFM technique are shown briefly and the following results are obtained after discussion of the experimental result :

- (1) The present precision of the method is less than $80 \mu\text{m}$.
- (2) Accurate positioning of the scanning probe and stability of the measurement system, including RF cables and receiver, are important for precise measurement.
- (3) Edge-diffraction affects the measurement accuracy in the 5 to 10λ region from the mirror edge.

1. はじめに

宇宙ステーションの上で太陽集光炉を組み立て、材料実験を行う計画が検討されているが、太陽炉反射鏡を無重力下で使用するために、組み立てたとき、または鏡面の再活性化を行ったときには、その場で鏡面精度を測定

する必要がある。当所では、昭和60、61年度科学技術振興調整費による「太陽集光加熱に関する研究」のうち「鏡面精度の測定に関する研究」を担当した。太陽炉の集光性能を確認するためには、反射鏡の鏡面を高い精度で測定する必要があるが、無重力下でマンピュレータ等を用いることを想定し、電波を用いた近傍界測定法を応用した測定技術の開発を行うための地上実験を最初に行うことにした。そこで、鏡面精度を求めるアルゴリズムを検証するために必要なソフトウェアを開発し、可能な限り既存の実験装置を活用して、検証実験を行った。

*1 宇宙通信部 宇宙技術研究室

*2 宇宙通信部 移動体通信研究室

*3 宇宙開発事業団

*4 通信技術部 通信装置研究室

本文では、電波による鏡面精度測定の方法、近傍界の測定データから鏡面の誤差を導くためのデータ処理を述べた後、実験結果の考察を行う。

2. 測定の方法

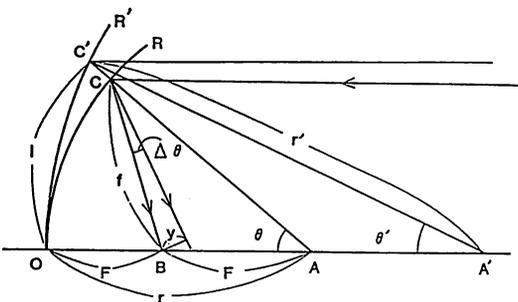
鏡面精度は、鏡面の全体的ゆがみを表す量であり、焦点のぼけ（広がり）に影響するものである。ただし、光学反射鏡の場合、振幅さえ重畳されれば良いので、光の波長オーダーの測定精度は不要である。このことを示すために、太陽集光炉の性能と鏡面精度との関係式を導出した。まず、集光炉の性能は焦点の広がり（面積）に反比例して低下するものとして、鏡面精度の劣化による焦点（面積）の広がりを評価した。太陽集光反射鏡として、第1図のような球面鏡を仮定し、球面Rが反射鏡の変形により球面R'になったとしたとき、焦点半径の広がりyは、

$$E\{y^2\} = \frac{\sigma^2}{2\pi\theta_m} \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_m} \theta^2 (5 - 4 \cos \theta) d\theta d\psi$$

ただし、 $E\{\cdot\}$ は期待値、 σ は鏡面精度、 θ_m は反射鏡の端における図の θ の角度とする。反射鏡の直径をD、焦点距離をFとすると、鏡面精度と太陽集光炉性能の関係は第2図のようになる。図から $100 \mu\text{m}$ 程度の鏡面精度を問題にすればよいことが分かる。したがって、測定精度としては $10 \mu\text{m}$ 程度であれば十分である⁽¹⁾。

通常、光あるいは電波で使用する反射鏡の鏡面精度測定にはセオドライト等を用いた三角測量による方法が行われている。しかしながら、宇宙基地上での組立・測定の可能性、太陽集光炉では光のコヒーレンスは必要なく $10 \mu\text{m}$ 程度の測定精度があれば集光炉としての性能を把握できることなどを考慮した結果、アンテナの近傍界測定法の応用⁽²⁾が適当と考えた。

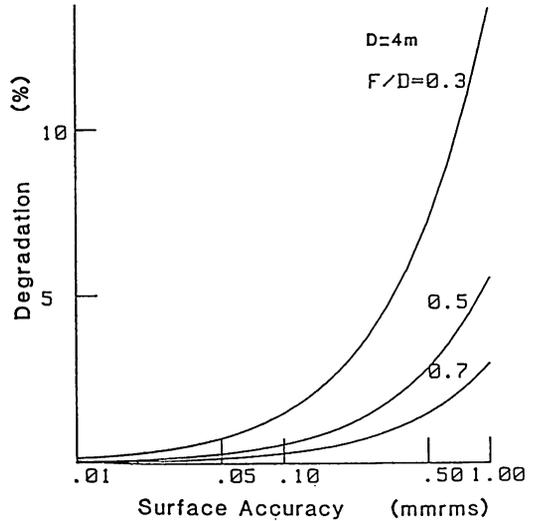
近傍界測定法にはいくつかの方法があるが、ここでは第3図に示すような平面近傍界測定システムを用いた。すなわち、反射鏡の焦点に一次放射器をおいてパラボラアンテナを構成し、近傍界のプロープ走査平面における電波の振幅位相分布を測定する。この際の走査間隔は測



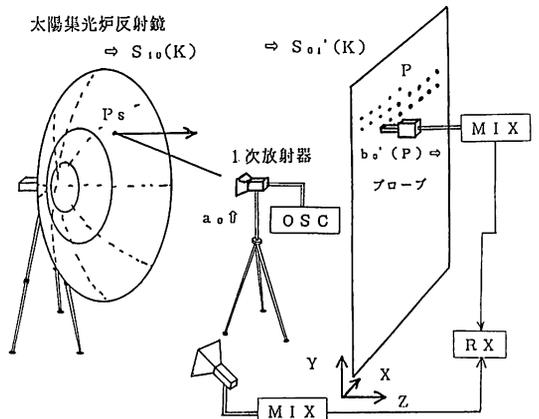
第1図 太陽集光反射鏡のモデル

定する電波の波長の1/2以下であれば必要な情報が得られる。また走査する範囲については、測定したいアンテナの指向性の範囲が、走査面とアンテナがつくるコーンの内側にくるように決めれば良いとされている。

このようにして得られた走査面上の振幅・位相データからフーリエ変換を用いて、平面波の複素振幅成分（平面波散乱行列）を求める。アンテナ特性の測定においては、この複素振幅成分から直接アンテナの遠方界特性（指向性）を求めるのが通例であるが、今回の測定では、さらに平面波散乱行列の性質を利用し、複素振幅・位相成分をフーリエ逆変換によってアンテナ開口面上の振幅・位相に変換し、位相パターンの理想的な値からの差を評価することによって鏡面精度を測定した。また、アンテナ測定の場合、一般的には二つの偏波面（例えば



第2図 鏡面精度と太陽集光炉性能の関係



(OSC: ミリ波帯発振器, RX: 受信器, MIX: ハーモニック・ミキサ)

第3図 実験装置の構成

垂直と水平)の成分を測定する必要があるが、今回はアンテナ開口面の位相パターンが測定できれば良いこと、1次放射器に小口径の矩形ホーンを用い、かつ反射鏡面が中心付近で深さ1.2cmの浅い球面であり偏波特性の劣化による影響が少ないことから、垂直偏波成分だけが存在するとして測定、データ処理を行った。

また、厳密にはアンテナ開口面ではなくアンテナ鏡面上での位相分布を比較する必要があるが³⁾、測定に用いた鏡面が浅く、大きな角度の散乱波(サイドローブ)の影響が無視できるので、アンテナ開口面の位相から鏡面精度を求めることにした。

3. データ処理

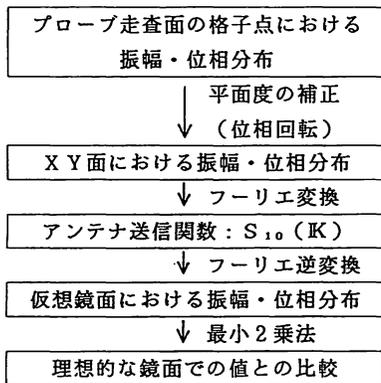
処理フローを第4図に示す。プローブ走査面の振幅・位相分布から平面波散乱行列($S_{10}'(K)$):図のアンテナ送信関数)を求めるには、次のようなフーリエ変換、およびプローブ特性の補正を行えば良い。

$$S_{10}(K) = \frac{1}{4\pi^2 a_0 F' \cdot S'_{01}(K)} \int b'_0(P) \cdot e^{jK \cdot P} dP$$

ここで、 K は平面波の伝搬方向を表す波数ベクトルで絶対値が $2\pi/\lambda$ で、 K_x, K_y, Z 方向の成分 γ の3つの成分を持つ。 F' はプローブ端面における不整合因子、 b'_0 はプローブ位置(P)における受信波、 a_0 は送信波の振幅を表す。 $S'_{01}(K)$ はプローブの受信特性であり、あらかじめ計算あるいは測定しておく。

この行列から、さらに次のフーリエ逆変換でアンテナ開口面上(P_s)における振幅・位相分布 c_0 が求められる。

$$c_0(P_s) = a_0 F' \int S'_{10}(K) \cdot e^{-jK \cdot P_s} dK$$



第4図 データ処理フロー

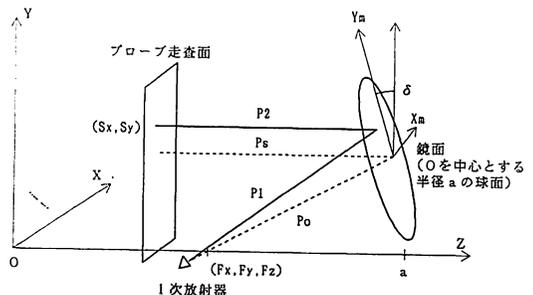
実際には、走査する格子点の間隔を波長の1/2程度以下に選び、サンプリング定理を用いて上の二つの積分を2次元FFT演算に置き換える。こうして得られた位相分布と、理想鏡面における位相分布とを比較することによって鏡面の変位を推定する。

測定にあたって考慮すべき誤差要因を第1表に示す。プローブ・スキャナの平面度が $120 \mu\text{m(p-p)}$ 程度⁴⁾であり、これが直接、鏡面の測定精度に影響する。ただし、この誤差の絶対値が測定電波の波長(1.14cm)の1/100程度と小さいこと、被測定アンテナと走査面とをアンテナの開口径の3倍以上離せば、走査面近傍における電波を平面波で近似したときの誤差が1/10以下になることの2点を考えあわせると、上記の平面度の測定値が仮にスキャナ固有のものであり再現性が保証されるならば、格子点におけるプローブ位置の平面からの偏差をあらかじめ測定しておき、位相回転によって平面度誤差による影響を打ち消すことにより理想的な平面(XY平面)における振幅位相分布を求めることができる。

また、1次放射器の取付位置誤差、鏡面の傾き等については、理想的な鏡面を仮定して開口面の位相分布を計算する際に、これらの値をパラメータとして考慮し、測

第1表 測定における誤差要因

- ◎1次放射器
 - ・鏡面照射パターン
 - ・取付位置の誤差
 - ・ブロッキング
- ◎プローブ
 - ・走査面の平面度
 - ・電気的特性
 - ・ケーブルの遅延変動
- ◎鏡面の端部からの散乱



—位相計算のパス,
 ---鏡面の中心を通るパス,
 開口面位相 = $(P_1 + P_2) - (P_0 + P_s)$, $P_2 = (2P_1 \cdot n)n - P_1$
 n = 鏡面に垂直な単位ベクトル,

推定パラメータ:
 一次放射器の位置 = (F_x, F_y, F_z)
 鏡面の傾き = δ

第5図 アンテナ開口面位相の計算モデル

定データから最小二乗法により推定することにした。今回の測定対象である球面鏡に対する計算モデルを第5図に示す。開口面の位相分布は、一次放射器の仮想中心から出た電波の幾何光学的な伝搬距離を計算することによって求めた。

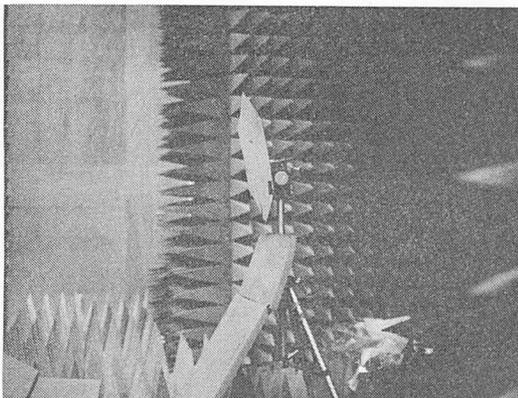
以上のような測定・データ処理を行った場合、最終的には鏡面の端部における散乱、あるいは1次放射器によるブロッキングが主要な誤差要因となる。ブロッキングの影響は、1次放射器をできるだけ小さくし、オフセット給電型式を用いることにより、ある程度軽減することができる。また、鏡面端部の散乱に対しては、有限の測定分解能を考慮すれば、走査面をある程度離して大きな散乱角の波をひろわないようにするといった対策が考えられる。

4. 測定システム

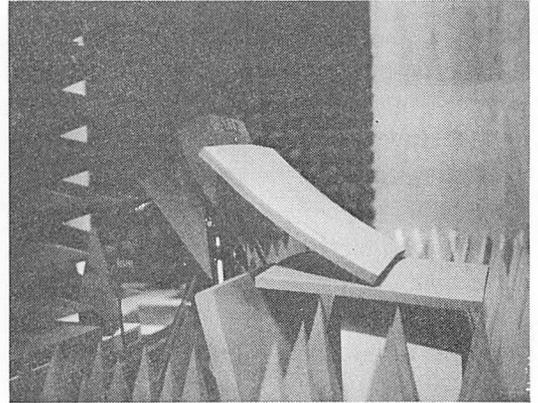
測定システムの構成は第3図に示したものと同様であるが、実際には図にあるような基準位相供給用のホーンアンテナを置かず、発振器の出力を20 dBの方向性結合器で分岐して受信器に供給した。また、一次放射器のブロッキングを避けるためオフセット給電とし、鏡面を下方に約7°傾けて設置した。鏡面の焦点距離が1.6 mあり、1次放射器の設置上の制約から、鏡面は走査面から約2 m離して設置した。鏡面及び1次放射器のまわりの電波吸収材の配置を第6図、第7図に示す。

実験パラメータを次の第2表にまとめて示す。10 μm の測定精度を得るためには、使用する電波の周波数として30 GHz前後が適している。プローブ、1次放射器には、ほぼ同じ特性を持った小開口のピラミッドホーンを用いた。

また、走査面の平面度及びプローブ、1次放射器の特性を把握するため、鏡面の測定に先だて、反射鏡の位置に1次放射器だけを置き鏡面の測定と同等の条件で測



第6図 反射鏡の設置状況



第7図 1次放射器の設置状況

第2表 実験パラメータ

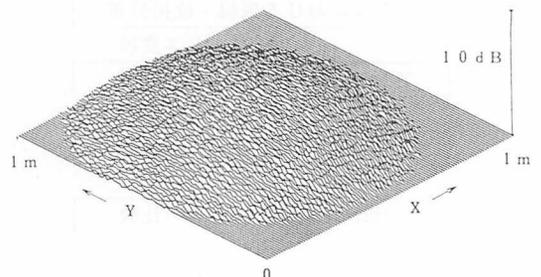
測定周波数	26.25 GHz
1次放射器	ピラミッドホーン(14×13 mm), 垂直偏波
測定プローブ	ピラミッドホーン(15×13 mm), 垂直偏波
走査間隔	5.7 mm(128×128)
走査速度	3000 mm/min
測定時間	1~1.5時間
測定鏡面	外径60 cmの六角形の球面鏡 (A: 鏡面精度7 μmrms , B: 鏡面精度不明)

定を行った。

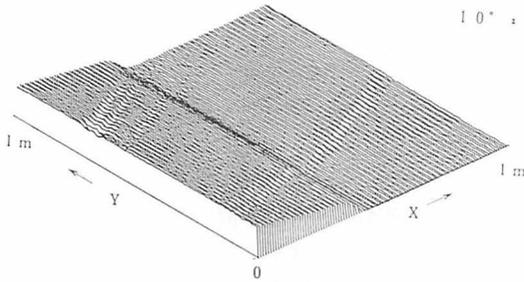
5. データ処理結果

測定に用いたプローブ及び1次放射器の指向特性を第8図に示す。この図から、プローブの指向特性はほとんど一様で、開口面の位相を求める今回の目的に対しては、この影響を考慮しなくても良いことが分かった。また、プローブ走査面の平面度を評価した結果を第9図に示す。これらは、第3図の鏡面の位置に1次放射器のホーンを置いて測定したものである。

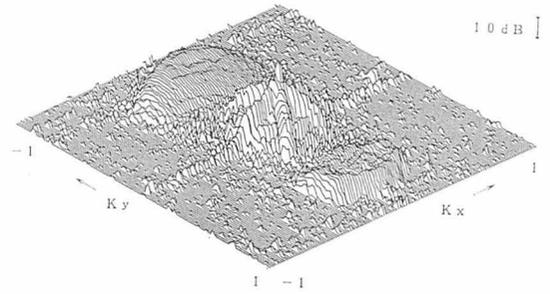
第9図では、80°程度の測定系の位相ドリフトが現れている。この大きなドリフトを除けば、走査面の平面度は良好(0.75° rms)で2で述べた平面度補正の必要は無かった。



第8図 プローブ及び1次放射器の指向特性



第9図 プローブ走査面の平面度



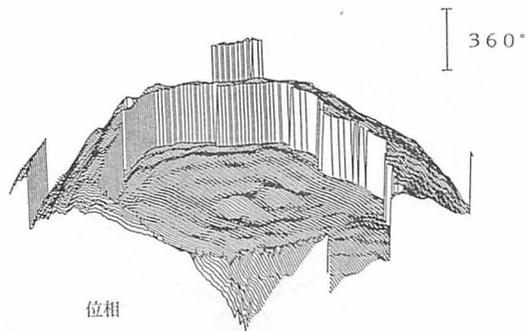
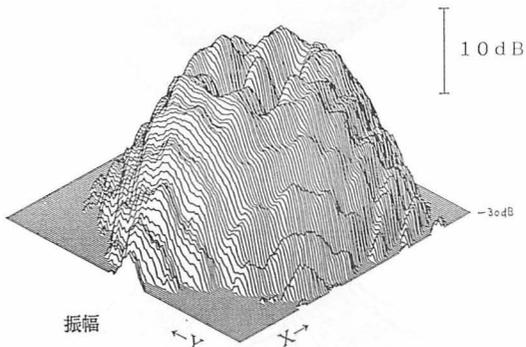
第11図 平面波散乱行列の振幅成分

次に鏡面を実際に設置して測定した結果を処理手順にそって示す。第10図に走査面上での振幅・位相分布を示す。走査面上では、鏡面のいろいろな場所からの散乱波が干渉して、複雑な振幅分布が現れるが、位相分布は比較的平坦になる。このことを利用して、1次放射器の位置を、X方向、Y方向のテスト走査を繰り返すことにより比較的簡単に調整することができた。

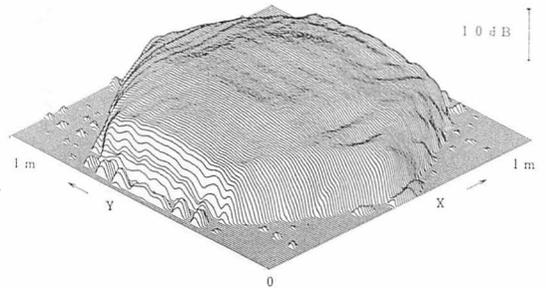
フーリエ変換後の平面波散乱行列の振幅成分を第11図に示す。図のX軸が水平方向のスキャン、Y方向が垂直方向のスキャンを示している。中心付近の鋭いピークが鏡面からの反射波であり、鏡面の六角形のエッジに対応した散乱波の分布が現れている。ピークの上に見えるのは室内の天井からの散乱波であり、ピークの下部に

は、室内の床からの散乱波及び1次放射器からの直接波が現れている。これらの散乱波の分布が広がっているのは、散乱波は走査面で一様に受信されるのでフーリエ変換の際に折り返し歪みを受けること、走査面の中心付近では鏡面からの電波との干渉によって散乱波が抑圧されることによるものである。

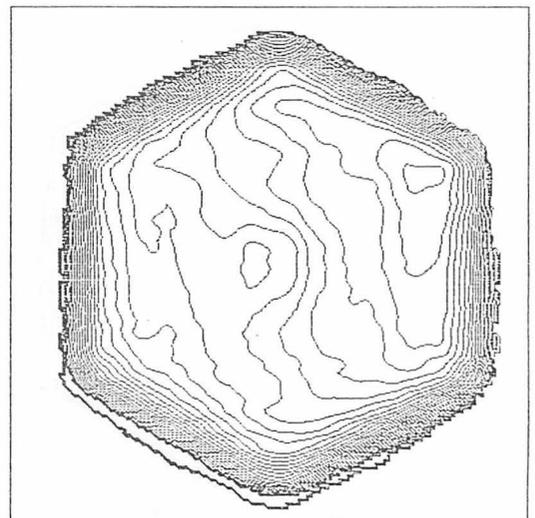
このような散乱波は測定精度を大きく悪化させるので、電波吸収材を用いて室内の反射波そのものを減少させるか、あるいはデータ処理において除去するといった



第10図 走査面上の振幅位相分布



第12図 アンテナ開口面の振幅分布



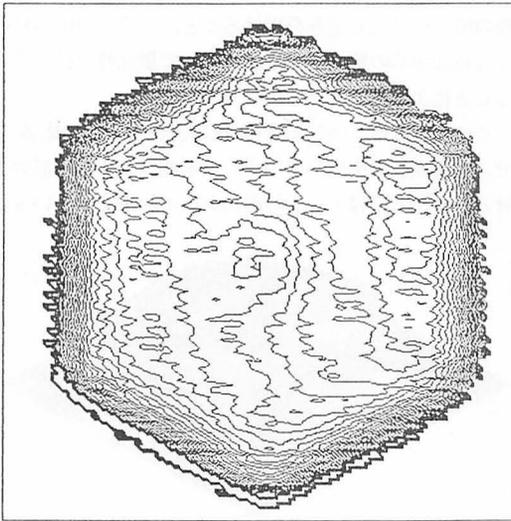
第13図 アンテナ開口面の位相分布

対策が必要となる。特に1次放射器からの直接波は本測定で用いたオフセット給電型式では大きな影響を及ぼすので、実験の際には1次放射器のまわりに多量の吸収材を置く必要があった。第11図の場合、散乱波と鏡面からの反射波とは明らかに区別できるので、中心付近の鏡面による成分のみを抜き出し、フーリエ逆変換によってアンテナ開口面上の振幅・位相パターンを求めることができた。

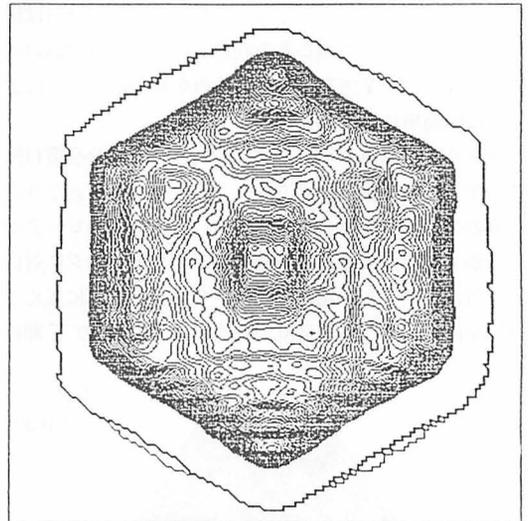
アンテナ開口面の振幅分布を第12図に示す。鏡面の六角形の外形がはっきり現れている。開口面上の位相分布を 10° 間隔の等高線で第13図に示す。参考までに上述した散乱波の除去を行わない場合の開口面位相分布を第14

図に示す。これらの開口面位相分布には、球面鏡による収差、1次放射器の設置誤差による位相分布等が含まれているので、これらをモデル化し、最小二乗近似によって鏡面誤差による成分だけを推定した。

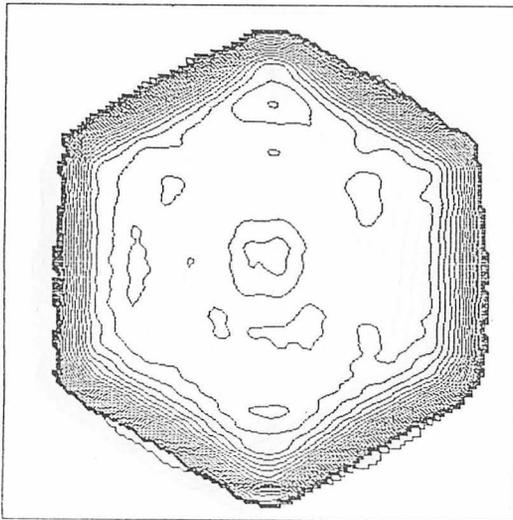
推定結果の位相分布を、振幅が -25 dB 以上の場合について、 10° ($160 \mu\text{m}$) おきの等高線で第15図に示す。実際の鏡面は図の等高線の間隔が舞っている中心付近に対応している。この鏡面に対応した部分をさらに 1° ($16 \mu\text{m}$) おきに表示したのが第16図である。鏡面の端部で等高線が密になっているがこれはエッジ散乱の影響である。また、縦横の縞模様が見られているが、これは走査範囲が十分広くないことによる（フーリエ変換の際



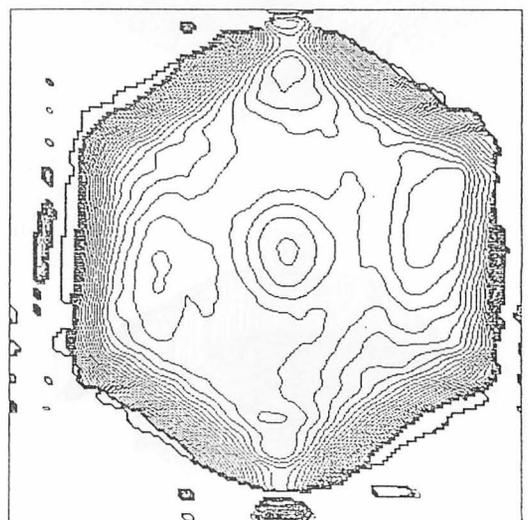
第14図 不要な散乱波を除去しない場合の位相分布



第16図 鏡面誤差の分布 (A型, $16 \mu\text{m}$ 間隔)



第15図 鏡面誤差の分布 (A型, $160 \mu\text{m}$ 間隔)



第17図 鏡面誤差の分布 (B型, $160 \mu\text{m}$ 間隔)

の) 折り返し歪みである。この測定で用いた鏡面は第2表のA型で、鏡面精度が機械的な方法によって $7\ \mu\text{m}$ (rms) と測定されているものであるが、電波による測定では中心から半径 20 cm の円内で $80\ \mu\text{m}$ (5° rms) 程度の鏡面誤差が検出された。次に、鏡面精度が相当悪いと思われるB型の鏡面について同様な処理を行った結果を第17図に示した。この場合には、中心付近に $640\ \mu\text{m}$ (40°) 程度の突起があるほか、鏡面全体についても歪みが大きく、鏡面誤差は $200\ \mu\text{m}$ (12° rms) となった。以上のような実験の結果、電波を用いた鏡面精度の測定においては、現状では測定精度 $80\ \mu\text{m}$ 程度、測定分解能 $16\ \mu\text{m}$ 以下が達成できることが分かった。

6. 考 察

この実験で明らかになった反射鏡の鏡面精度測定における平面近傍界測定法の原理的な特徴として次の項目があげられる。

- (1) 鏡面 (アンテナ) 口径の2乗に比例して測定時間が増加する。ただし、測定精度は口径には依存しない。
- (2) ケーブル、受信器等、測定系の位相安定度、プローブ走査面の平面度が精度向上には不可欠である。
- (3) 鏡面の端部からのエッジ散乱の影響が大きく、端部から5~10波長の範囲では鏡面誤差が精度よく求められない。端部が単純な形であれば、例えば GTD⁽⁵⁾ を計算モデルに導入することにより、散乱の影響を軽減できるものと考えられる。
- (4) 室内の散乱があっても、鏡面からの反射波と明確に分離できれば問題にならない。このためには、鏡面の近くに散乱体、あるいは反射体がこないように、吸収材の配置に注意する必要がある。
- (5) 1次放射器のアライメントは走査面での位相パターンを見てテスト走査を繰り返すことによって簡単に調整することができる。
- (6) データ処理に関しては、小型の計算機を用いても

128×128 個のデータ処理に要する実質的な時間は2~5分程度であり、十分実用になる。

また、目標とする $10\ \mu\text{m}$ 以下の測定精度を達成するためには、次のような対策が考えられる。

(1) 測定周波数を高くする。周波数に比例して鏡面誤差の検出感度が上がり、エッジ散乱の影響する範囲も狭くなる。

(2) 走査範囲を現状より2倍程度広くし、折り返し歪みを除く。ただし、この場合、測定時間が増加するので測定系のドリフトが問題になる。

(3) エッジ散乱の影響は端部に電波吸収材を貼り反射率を緩やかに落としてやればある程度緩和できる。

宇宙ステーション上で近傍界測定を行う場合には以上のような特徴を考慮する必要がある。最後に、実験にあたって多大なご協力を頂いた関係各位に感謝する。

参 考 文 献

- (1) 飯田, 大森, 鈴木, 有本; “宇宙用太陽集光装置における電波を用いた鏡面精度の測定について”, 昭和61年度信学総全六, 2642.
- (2) Yaghjian, A. D.; “An Overview of Near-Field Antenna Measurements”, IEEE trans. Antennas Propagat., Vol. AP-34, No. 1, Jan. 1986.
手代木扶; “アンテナの近傍界測定”, 信学誌, Vol. 62, No. 10, pp.1145-1153, 1979年10月.
- (3) Rahmat-Samii, Y.; “Surface diagnosis of large reflector antennas using microwave holographic metrology: An iterative approach”, Radio Sci., Vol. 19, No. 5, 1984.
- (4) 伊藤猛男, 他; “平面近傍界測定システムの構成”, 電波季 (本小特集)
- (5) Keller, J. B.; “Geometrical Theory of Diffraction”, J. Opt. Soc. Amer., Vol. 52, No. 2, Feb. 1962.

