

24メートル球面鏡

赤羽 賢司*

1. 電波球面鏡の由来

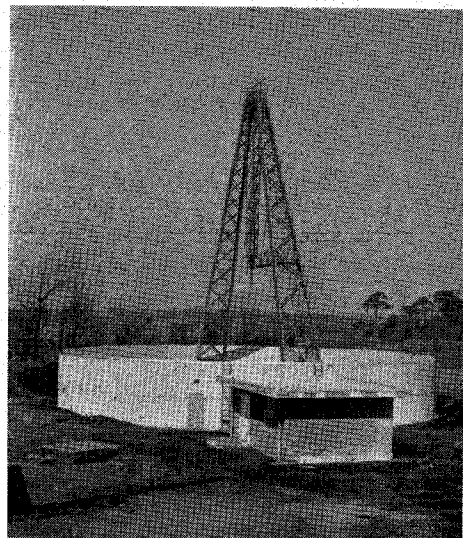
電波領域では球面鏡は今まで殆んど使用されていなかったが、反射鏡として用いる場合の原理と、可能性については古くから提案されている (Spencer, R.C., 1949). 1962~1963 年にかけて東京天文台で 1420 メガサイクルの水素線受信機を作る計画があり、そのアンテナとして球面鏡の実用性を調べて見ることにした。そしてこの程その球面鏡 (一次輻射器を除いて) ができ上がったので、その基本原理や、今後の方針などについて述べてみたい。

球面鏡を研究する基本的問題は、反射鏡を固定したままで、どの位まで視野を広げることができるかということである。現在通信や電波天文学に使用されているパラボラアンテナ ($D/F=2\sim 5$) では、大体パラボラのビーム幅 (分解能) の数倍程度の視野を持つに過ぎない。したがって普通のパラボラアンテナ (極端に焦点距離の長い場合を除いて) では、アンテナを固定すると全く空の一部しか見ることができない。そこでアンテナ固定という立場に立つときは、光学でのシュミットカメラの例にならって、反射鏡を球面にしたいという問題が生ずる。併しながらシュミットカメラの補正板に相当するものを、そのまま電波の球面鏡の前に作ることは原理的には可能であっても、費用や、材料の点からいってまず不可能であろう。

現在までに提案されたり、あるいは実験されたりしているものは、専ら球面鏡の焦点の近傍で近軸光線でない光線の収差を取り除こうというものである。このために焦点のまわりに第二次反射鏡を置いたり (Head, A.K., 1957), 光軸上に分布した受信アンテナを置いたり (Spencer, R.C., 1949, Love, A.W. 1962) している。米国コーネル大学でも直径 300m の大きな球面鏡を作る計画があり、やはり分布した受信点 (ラインフィード) を予定しているようである。併しながら模型実験では大体成功しているようであるが、大型のものでは実用に成功した例は殆んど聞かれないので、我々も多少不安の念がないわけではない。電波球面鏡の問題はなんといっても焦点近傍の受信装置にあるのであろう。

2. 電波球面鏡の原理

球面で反射された入射平面波を、焦点の付近の滑らかな曲面で再び反射させて、幾何光学的に一点に集めるこ



第1図 東京天文台に新設された 24 m 球面鏡

とができる。この場合各光線の光路長は等しく、つまり電気でいう位相が揃うことになり、反射面が球面であるため収差は除去される。これは Head などオーストラリアの人々が提案したものである。電波では一般に反射鏡によって像を作ることを目的としないから (作りたいができない) ただ一つの平面波を受信するために焦点のまわりはかなり大きな二次反射鏡を置くことは差支えない。計算の結果二次反射鏡の曲面はかなり複雑な函数となり、実際の製作上の難しさ、またそれを機械的に支持する問題なども考慮して、我々はまず最初に Spencer に始まるラインフィードのやり方を試みることにした。これからその原理について考察する。

(i) 抛物面としての近似

電波の領域では球面鏡の大きさが波長の 100 から 1000 倍程度であるから、光学の球面鏡とちがって、球面が抛物面反射鏡として近似される領域はかなり広い。これは電波の球面鏡の利点ともいえることである。半径 $2f$ の球面と、頂点における曲率半径が $2f$ である抛物面とよい接触をするはずであるが、この二つの面の間隙が波長の半分位になるまでは、球面での反射を抛物面による反射として近似することができる。簡単な計算によって、ゆるされる最大の口径を D とするとき

$$\frac{D}{2} \leq [4f\sqrt{f\lambda} - f\lambda]^{\frac{1}{2}}$$

が得られる。ここで λ は電波の波長である。例えば $f=10\text{ m}$, $\lambda=20\text{ cm}$ では $D \leq 14.6\text{ m}$, また $f=10\text{ m}$,

* 東京天文台

K. Akabane; 24 meter spherical reflector.

$\lambda=3\text{cm}$ では $D=9.4\text{m}$ などが得られる。この場合には従来のパラボラアンテナと同様な装置で球面鏡をフィード(照射)すればよいから、事柄は極めて容易である。実際東京天文台に新設された 24m 球面鏡について、波長 21cm 付近でこれを実験した。ラジオ星 Cyg A を受信した結果、球面鏡の指向幅約 1 度を得た。これは球面鏡が口径約 14m のパラボラアンテナとして働いたことになる。勿論サイドビームはかなり現われるが、焦点の所の輻射器自身の指向幅を工夫するだけでも、これらの悪い効果のある程度除去することができよう。

(ii) ラインフィードによる球面収差の除去

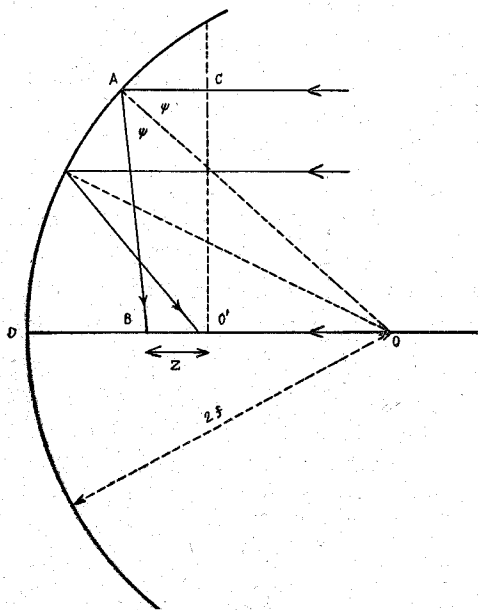
球面鏡の光軸上に多くの受信点を置き、入射平面波を各受信点で位相を合わせながら受信するようにすれば、原理的に球面収差を除去することができる。第2図を参照されたい。Oを中心とする球面を \widehat{AD} とし、O'を焦点とする。光軸に平行な光線 CA が、Aで反射して光軸とBで交わるとする。光線 OD は焦点 O' に到達するから、O' に置かれたアンテナと B に置かれたアンテナとで位相差

$$\frac{2\pi}{\lambda} \{2\overline{O'D} - (\overline{CA} + \overline{AB})\} \text{ ラジアン}$$

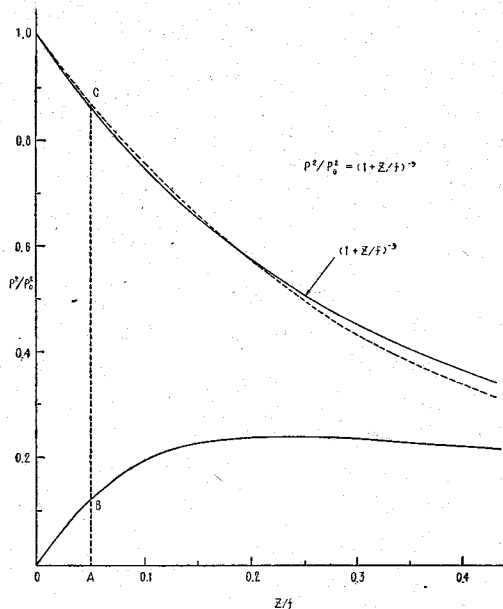
だけずらすようにして二つのアンテナを接続すればよい。

光軸上には B 点に相当するものが連続的にできるから、できるだけ多くのアンテナを並べるようにする。B 点の光路差は一般に

$$\Delta = 2\overline{O'D} - (\overline{CA} + \overline{AB}) = f \left\{ \frac{z}{f} \frac{1-z/f}{1+z/f} \right\}$$



第2図 球面による反射



第3図 光軸上の電波の強さ

とかかれる。ここで z は第2図の \overline{OB} である。A の大きさは f や z によるが、我々の考えているものでは大体波長の 10 倍位である。この場合 B 点に集まる電波の強さはまた z の関数となり、簡単のためには幾何学的に扱うならば電波の強さの分布は

$$p^2/p_0^2 = (1+z/f)^{-2}$$

となる。ここで p_0^2 および p^2 はそれぞれ焦点および B 点における電波の強さである。第3図にこれを示した。B 点附近の電波の強さをさらに細かく考えると、集まった電波は大体において二つの偏波成分に分かれている。一つは(大部分)入射波の偏波面と平行なもの、他の一つは光軸に平行なものである。第二の部分の電波の強さが第3図の曲線 OB でかかれる。つまり球面鏡を電波の領域で能率よく使用するためには光軸に平行な偏波成分も受信するにしなければならない(赤羽, 東京天文台報 13 巻, 1)。

電波の球面鏡の光軸上で収差を除去する原理は大体以上の通りであるが、これを実際に行なう場合にはまた種々の形式が提案されよう。Spencer などはスロットアンテナを、Love などは誘電体とスロットアンテナとを組合せたものに提案している。プエルトリコにできる口径 300m のものにもスロット付導波管を用いる計画と聞いている。我々は最初の段階として、スロット付導波管を計画し、現在試作中である。それは $0 < z/f < 0.2$ の間で光路差を補正しようとするものである。ただしフィードに導波管を使用する場合の共通な弱点は、光路差の補正がすべての波長にわたって同様にはいかないということである。つまり補正の操作自身に色収差のようなもの

のを持ってくることである。併しながら、電波の場合にそれ程波長領域を広げる必要がないときは、導波管による光路差の補正が許される。例えば我々が計画しているものは中心周波数 1420 Mc で、補正が充分よく行なわれる領域は、中心周波数の両側にそれぞれ 20 Mc 程度となっている。なお光軸上でラインフィードを行なうときの弱点をもう一つ述べて置く必要がある。それはフィード自身が必ず波長程度の太さを持つことである。このために球面鏡が対称に照射されなかったり、照射にムラができたりする。我々が現在までに実験した所によると、この問題は極めて重要で、また困った問題であることがわかった。つまり球面収差を完全に除去することは不可能に近く、ある程度の近似的な補正でがまんしなければならない。この点だけから考えると、Headらが提案しているように第二次反射鏡を使用するようになれば、問題はやや簡単になるかも知れない。

3. 球面鏡の構造

東京天文台に新しく作られた球面反射鏡は、最近の天文月報アルバムに紹介されている。昭和 38 年 3 月に竣工したものである。開口径が 24 m、面の曲率半径が 20 米の地上固定型である。反射面は初めはコンクリートにアルミニウム箔を貼る予定であったが、製作に要する費用や地質などの立地条件を再調査した結果、結局鉄骨と鉄板によって組立てられた。厚さ 2.3mm、広さ約 2 平方 m の鉄板を溶接して反射面を作った。反射面の曲率半径の測定は懸垂ロープによって行った。これは球面の中心に直径 8 耗の鋼索を固定し、その先端に重さ約 40 kg のおもりを付けたものである。ロープの重力によるタルミは計算値を信用することにした。また測定中は少なくとも 1 時間に 1 回は基準点による較正、およびロープのヨジレなどを補正した。中央の吊腕の先に、上に述べたフィードをマウントするわけである。そして吊腕を南北に 30 度ずつ回転することができる。併し反射鏡としての有効径が 24 m に近くとれるのは、厳密にいうと天頂付近だけで、天頂角 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 位ではかなり歪んだ指向特性になるのは止むを得ない。我々の希望としては、天頂付近で球面収差がうまく除去されることを充分確かめて、将来球面鏡の南北にさらに反射スクリーンを付加したい。それらがうまくゆけば、天頂角 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 位にわたっても、原理的には指向特性がそれ程くずれないはずである。第 1 図写真は完成直後の 24 m 球面鏡である。排水の問題とか、電気溶接による鉄板の歪みとか、実際にはいろいろと困った問題を経験した。

フィードについては現在周波数 1400 Mc 帯で矩形導波管を用いて試作をしている。その結果導波管の太さについての補正が重要であることが判った。見通しとしては、誘電体を導波管内に入れて、できる限り導波管の太

さを小さくすること、また導波管を正方形にする方がよいであろうことが明らかになった。導波管を正方形にすることは、将来偏波の観測にも関係することであり、早急に実現したいと考えている。

4. 観測の範囲

この球面鏡は波長 21 cm 水素線の観測研究のために設備された。したがって反射面はかなり目の粗い金属網でもよかったわけであるが、そのための経費を調査すると、アンテナ固定という限定に立つときは、あまり安くならず、鉄板にして骨の数を少なくする方が得策であることが判明した。鉄板を使用するときは、面の精度さえよくすれば原理的には波長 21 cm より短い波長でも使用することができる。そこで決められた費用で、できるだけ面の精度をよくすることを考えた。その結果が懸垂ロープによる面の検定であった。製作中は反射面上の約 400 点について曲率半径の測定を行なった。その結果曲率半径 20 m (気温約 10°C) に対して最大の偏差は 8 mm の程度であり、標準偏差は大体 $4 \sim 5$ mm であった。併しこれらの値は製作直後のことであり、土台や気温、日照などの問題で、長期にわたって球面の精度がどのように変化して行くかは、よく判らないことである。我々としてはそれらのことも、地面に固定する大型反射鏡に付随する一つの特性として、くわしく知りたいのである。もし面の精度が $4 \sim 5$ mm に維持されるならば、波長 3 cm 位までの観測が可能となる。したがって将来もし低雑音の受信機がよく開発されるならば、これらを 24 m 球面鏡にマウントすることによって、広い波長域にわたって宇宙電波の観測が行なわれるであろう。そのことを我々は念願している。

現在の所は波長 21 cm における球面鏡の指向特性を改良することが第一であり、これにパラメトリック低雑音受信機を装備し、水素線による銀河の観測を計画している。

現在計画している水素線用受信装置はオーストラリアやオランダで行なわれている多チャンネル方式である。これは水素線の形に対応する各点の強度を同時に記録できるものである。しかしながら能率のよい受信機は製作費がかかり、又それだけ製作時間もかかるわけである。現在は実験観測の意味で、中心周波数 1420.40 Mc で帯域幅 15 Kc の受信機を作り、これで銀河の午線通過を観測している。中心周波数を固定しているから水素線のどの部分が受信機にかかるか判らないが、銀河の通過頃アンテナの受信出力は約 100°K の増加を示し、これが水素原子によるものならば、諸文献の示す所と一致している。

ラインフィードとか、導波管とか電氣的な言葉がでてきて一寸判りにくい点もあったと思いますが、光学の類推で理解が頂けるように述べたつもりです。