

電波望遠鏡用フィルムレンズアンテナの開発

氏原 秀 樹

〈総研大天文科学専攻 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail : ujihara@hal.mtk.nao.ac.jp

電波望遠鏡で集光に使われているパラボラ鏡は、大口径になるほど製作が難しくなる。日射による熱変形、重力、風圧荷重に対して、鏡面精度を使用波長の1/8の精度に保つのは、口径100 mにもなると相当困難である。口径10 mでも波長の短いサブミリ波になると難しい。そのような困難に対する一つの解決策として「フィルムレンズアンテナ」を研究してきた。長らく「21世紀の」、「夢の」、といった形容詞がついていたが、21世紀がやってきて、夢は現実になりつつある。ようやく具体的な姿の見てきた電波望遠鏡用「フィルムレンズアンテナ」の動作原理と開発状況を報告する。

1. はじめに

天文学者の望遠鏡の性能向上への要求はつきない。これには分解能と感度の二つへの要求がある¹。電波の場合、高分解能は遠く離れた望遠鏡どおしで干渉計をくむことで達成できる。現在では干渉計の一素子として、電波天文衛星「はるか」をつかい、地上の望遠鏡と合わせて口径3万km相当の角分解能を得ることもできる。感度については、望遠鏡の大口径化、面精度の向上、受信/増幅器、伝送系の改良などで向上できる。このうち、大口径化は集光面積を増やすという、もっとも直接的な手段だ。しかし、反射鏡の大口径化はそろそろ技術的な限界に近づいている。その限界を打ち破るための一つのアイデアがレンズアンテナである。

地上のアンテナは大きくても100 m程度²、「はるか」はたった8 mである。干渉計の感度は干渉計を組むアンテナペアの口径積に比例するので、衛星のアンテナの大口径化も地上側の大口径化も有用だが、どちらにしても容易なことではない。

2. 電波望遠鏡の大口径化への挑戦

2.1 鏡とレンズ:面精度と位相誤差

大口径化を阻む主因は鏡面精度が保てないことだ。アレシボ電波望遠鏡のような主鏡の向きが変えられないものを除けば、口径100 m程度のパラボラまではなんとか作り上げてきた。鏡面は風や重力、望遠鏡の姿勢によって複雑に歪み、大きな構造では温度分布を一様に保つのも難しく、日射によっても変形する。鏡面誤差の影響は短波長になるほど深刻である。

鏡面の形状は、天体からの電波が鏡面を経由し、焦点に達したときの位相が揃うように決められる。誤差があれば位相が揃わず、焦点での波の振幅和が減少し、受信電力は下がる。面誤差の増大や透過率、反射率の減少による受信電力の低下は、理想的な集光器で口径が小さくなったことに相当するので、理想的な集光器との受信電力の比を開口能率という言葉で表現する。

さて、重量物を精度良くつくるのは難しいから、軽くて精度に厳しくないものが大口径望遠鏡の主鏡に好ましい。その点で、反射光学系は屈折系よりも不利である。反射光学系では面の凸凹の誤差

¹ 「観測時間をもっとよこせ」というものもあるが...

² NRAO, 100m Greenbank Telescope

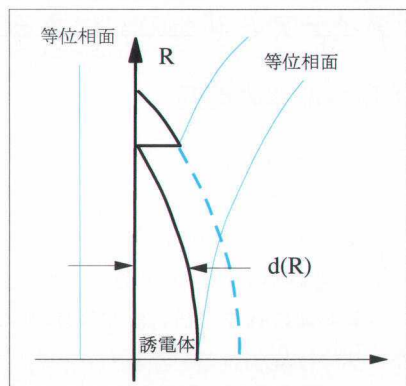


図1：誘電体フレネルレンズの断面

は光路長の誤差に倍になって跳ね返る。光路長誤差を波長で割ったものが位相誤差で、これを開口能率に大きく響かない程度（例えば、位相で90度）にしたければ、1/8波長の鏡面精度が必要である。レンズの場合、面の数は二倍だが、同じ位相精度を達成するのに必要な面精度は緩い。なぜなら誘電体の比誘電率を ϵ_r 、波長を λ とすると、厚みが dz 増えた時の位相の変化は $dz \frac{\sqrt{\epsilon_r - 1}}{\lambda}$ であるから、比誘電率が4より小さければ厚み誤差に対して鏡

より鈍くなる。実際問題として、比誘電率が大きなものは、反射率が高く透過率が悪いのでレンズの素材には好まれないから、おおむねレンズの方が面の凸凹には強い。また、面の傾きの誤差は入射角が小さければ $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}$ 程度であるが、これは誘電体への入射と出射で逆数になるのでほぼキャンセルされる。したがって、面誤差にはレンズの方が強い。ところが、大口径になるほどレンズは厚くなり、透過損失が増え、重くもなる。この点を改善しなければ、レンズで望遠鏡の大口径化は図れない。

2. 2 フレネルレンズと人工誘電体

レンズを薄くするには、フレネルレンズにすればよい。これは図1のような断面を持つもので、波長の整数倍の光路長差相当の誘電体の厚みを削ったものである。電波が焦点に達した時に、位相は合うが遅延時間までは合わない。このため使用帯域が制限されるが、レンズは軽くできる。

これをさらに薄くできるだろうか？レンズの厚みの役割は、誘電体中と周囲の媒質の位相速度の差で、レンズ半径方向にうまく伝播遅延差（光路長差）を作ることである。波の周期を T とすると

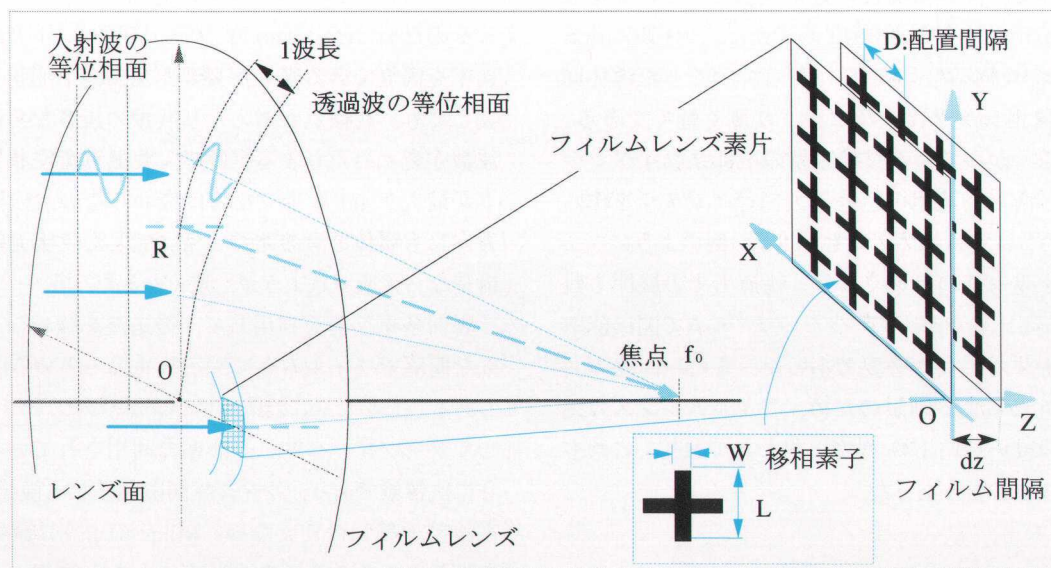


図2：フィルムレンズの構造。誘電体のかわりに、半径方向に位相シフト量が変わるよう設計した数種類のレンズ素片を並べてフレネルレンズを構成する。

フレネルレンズは半径方向の厚みの変化で透過波にTから0の遅延時間差を与えているが、これは360度から0度、あるいは+180度から-180度の位相差と等価である。位相をずらすのなら、波長程度の大きさの導体を伝播経路上に並べればよい(図2)。さいわいなことに電波の波長は数mmから数10cmだから、実現は容易である。この方式のレンズは、誘電体中のマイクロな双極子のかわりに巨視的なサイズの導体を用いるため、人工誘電体レンズとよばれる。

2. 3 フィルムレンズのアイデア

Milenは長短二種類の長さの合計七本の導体棒を伝播軸にそって並べることで、人工誘電体レンズをつくった¹⁾。この導体棒は長さがほぼ半波長であり、入射波に共振する回路となっている。レンズ半径方向に長短の棒の本数の比率を変えて、位相シフト量が-180度から+180度まで変化するようにしてある。これの開口能率は40%程度であった。100%にならないのは位相シフトの精度が良くないこともあるが、主な原因は人工誘電体の透過率が悪いことにある。

しかし、国立天文台の近田義広は、これを電波望遠鏡用に使うことをもくろんだ²⁾。フィルム基盤上にエッチング、あるいは蒸着でつくった導体回路を位相シフタにすれば、より薄く軽くできる。これをつかって安価な可搬型の干渉系素子アンテナや、衛星搭載用の超軽量大口径アンテナを作れるだろう。そうはいってもMilenの例のようにフィルムを重ねるのは重くなり、軌道上での展開も難しくなる。したがって、少ないフィルムで開口能率を向上する工夫が必要であった。また、回路の共振特性から来る制限のため、フィルムレンズの比帯域はせいぜい1%程度と思われており、これも改善する必要があった。

3. アイデアを「もの」にする

3. 1 開口能率の問題

位相シフトフィルム一枚でレンズをつくった場合³⁾、開口能率が20%程度にしかならない。共振による位相シフトは90度までであり、位相シフトが大きいと透過率が減少し共振点では0となる。フレネルレンズに必要な±180度の位相シフトに足りない部分は位相誤差となる。

開口能率の悪さを口径の増大で補うのも手だが、これはフレネルレンズでは好ましくない。フレネルレンズでは光路長が一定ではなく、半径の増加関数である(図1)。レンズの最大の光路長差を波長で割ったものをフレネル次数といい、これが大きいものは集光可能な帯域が狭くなる。短波長になるか、大口径になるほど次数は増えるので、不必要に口径を大きくしてはいけない。したがって、レンズ素片の透過率をあげ、また、素片の位相シフト量分布も理想的なフレネルレンズに近づけて、レンズの開口能率をあげる必要がある。

3. 2 解決のためのアイデア

そのためには±180度までの位相シフトと高透過率を両立できる素片が必要だが、素子形状を工夫しても、共振点が増えたり共振の鋭さや共振周波数が変わったりするだけで、共振点で位相シフトが最大±90度までなのは変わらない。伝播軸方向にも導体を導波路のように配した三次元的な構造なら達成できようが、重くなるだろう。

層間多重反射を利用して、透過波を強め合うような間隔でフィルムを二、三枚重ねるという方法もある。しかし、この構成はバンドパスフィルタとしてファブリーペロー干渉系で利用されているように狭帯域であり、フィルム間隔誤差にも敏感で、電波望遠鏡には使えない。Milneのように誘電体を模して、そこそこの透過率で大きな位相シフトを得ようと多数のフィルムを積み重ねる戦術しか

ないのだろうか？

そんなことはない。実は、先述の多重反射の計算には、異なるフィルム上の共振回路間での相互インピーダンスを考慮していない。フィルム間隔が波長以上であれば、この近似は正しいが、波長より近い間隔では正しくない。二枚のフィルムの間隔を近づけていくと、多層膜間干渉の透過特性から、一枚のフィルムの透過特性に漸化するの、相互インピーダンスが強くなるからだ。この領域に突破口がある、と考えて数値的に調べることにした。

4. 計算法の開発と数値実験

4.1 数値実験のまえに

孤立した半波長ダイポールアンテナ上の電流分布ですら、解析的に「正確に」解くのは難しい。今回のように他との相互結合があれば、さらにややこしい。

しかし、計算機の性能は向上してるので、数値計算は行いやすくなっている。実際に測定するのに比べると、数値実験には外乱がなく再現性がよい、系を乱さずに測定ができる、といった利点がある。なにより、実験予算がなくてもそこそこの計算機さえあれば、ある程度の解が得られるのが嬉しい。

しかし数値計算にも誤差がある。なぜなら、計算機の能力は有限であるので、計算モデルには主要な効果しか採り入れられない。その取捨選択や、計算モデル自体が現実に即してないと、結果はまさに机上の空論となる。また、現実世界のアナログ量を計算機上ではデジタルで扱うから、離散化、量子化誤差が発生する。これらは有効桁数を増し、計算刻み幅を細かくすれば小さくなるが、それだけ計算に時間を要するようになる。

たとえば、明日の天気を数値予報するのに結果が明後日に出るコードなど、誰も使わない。かといって、今日中に結果が出ても予報値が明後日の方を向いては意味がない。実際に実験するよりも短時間で信頼できる結果が出る計算コードが必要なのは当然である。

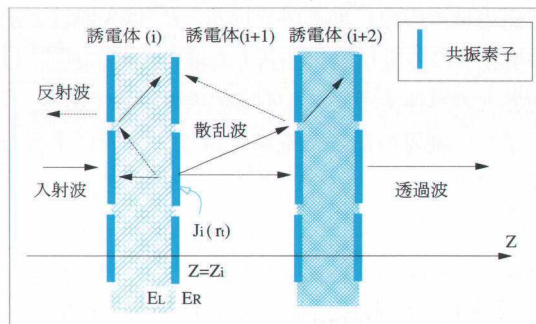


図3：レンズ素片計算モデルの断面

4.2 計算法の開発

野辺山の周波数選択膜⁴⁾が、レンズ素片に似た構造だが、基盤と導体は一層づつしかない。その計算法⁵⁾を改良して、レンズ素片のような多層膜/導体を扱えるようにした。またクロスダイポール以外にも、パッチやループなど、任意形状の回路にも対応できるようにしたいので、柔軟で見通し良くプログラムを書けるC++で書いた³⁾。計算法の詳細は博士論文⁴⁾に譲って、ここでは概略を述べよう。

導体の純抵抗成分や誘電体の吸収は小さく、計算で取り扱うには煩雑であるので、計算モデルから省いた。これらは波の振幅の大きさには効くが、共振点の「数」は変えず、定性的な特性への影響はない。また、簡略化のために各境界面は平行とする(図3)。フィルム面方向には一定の導体配置周期のよる周期境界とする。

導体の抵抗を無視したので、 $z=z_j$ の境界面の導体上では電場の総和が0という境界条件があるから、

$$E_i^{in} + \sum_{j=0}^N E_{ij}^{dipole} \equiv 0, (j = 0, 1, \dots, N) \dots (式1)$$

³⁾理由(1)Fortranよりも科学技術計算向き。実数と同じ演算子で「数式を書くように」複素数やベクトル、行列の四則演算が書ける。この「多重定義」機能のおかげで、プログラムが見やすくなり、開発効率も上がる。理由(2)性能の良いフリーのコンパイラgcc/egcsが、LinuxなどのフリーのOSについてくる。多くの(正しい意味での)ハッカーのおかげで性能も向上している。PCも安く、高性能になったので、同額でワークステーションと商用Fortranを買うよりは速くて快適。

⁴⁾執筆中

電磁場はその源に応じて分ける。\$E^{in}\$ は入射波とその境界での多重反射，屈折した波の総和，\$E^{dipole}\$ は境界上の導体素子がつくる電磁場の総和である。

また，境界の前後で電場と磁場の境界に平行な成分について，

$$E(r_t)_j^L = E(r_t)_j^R \quad \dots(\text{式 } 2)$$

$$H(r_t)_j^L = H(r_t)_j^R - J_j(r_t) \quad \dots(\text{式 } 3)$$

の境界条件が成立する（添字 L が前，R が後）。\$J(r)\$ は導体上に流れる電流である。また，空間のインピーダンスの逆数を \$Y(z)\$ として，\$E(r) = H(r) / Y(r)\$ とかける。これらは線形であり，電磁場の各モード，各成分で成立する。電場はさらに伝播方向毎の成分に分けられる。

$$E^i(r_t, z) = \sum_{mpq} E_{mpq}^i = \sum_{mpq} A_{mpq}^i e^{-ir_t k_{t,mpq}^i} e^{-iz k_z^i, mpq} + \sum_{mpq} B_{mpq}^i e^{-ir_t k_{t,mpq}^i} e^{iz k_z^i, mpq}$$

周期的な導体配置による電場は，Floquet mode を基底にして展開できる。展開基底の波数は，\$(D_x, D_y)\$ を素子配置間隔，\$(p, q)\$ を整数の組として，\$(p2\pi/D_x, q2\pi/D_y), k_z = \sqrt{|k|^2 - |k_{t,mpq}|^2}\$ である。\$k_z\$ が実のものが伝播モード，虚のものがエバネッセント波である。前者は放射場すなわち，透過／反射波，グレーディングローブに相当する。後者は \$z\$ 方向に指数関数的に減衰する場で，誘導場に相当する。なお，\$m\$ は TE, TM モードである。

伝播モード同様に，境界前後の場の強度比としてエネルギーを遠方まで運ばないエバネッセントモードに対しても透過率と反射率を定義でき，これらで多層膜中の電場が表現できる。境界は平行なので \$(m, p, q)\$ の異なる波は混じらず，透過率／反射率はモード \$(m, p, q)\$ 毎に一意に決まるので，境界 \$z = z_{i+0}\$ での，そこより「奥」にある全ての境界による合成反射率 (R)，透過率 (T) は，

$$T_{i,i+1}^{mpq} \equiv \frac{A_{i+1,R}^{mpq}}{A_{i,R}^{mpq}} = \frac{2Y^i e^{-ik_z^i, mpq} d^i}{Y^i (1 + R_{i+1,i+2}^{mpq} + Y^{i+1} (1 - R_{i+1,i+2}^{mpq}))}$$

$$R_{i,i+1}^{mpq} \equiv \frac{A_{i,R}^{mpq}}{B_{i,R}^{mpq}} = \frac{1 - R_{i+1,i+2}^{mpq}}{1 + R_{i+1,i+2}^{mpq}} e^{-2ik_z^i, mpq} d^i$$

一方，導体上の電流分布も適当な基底を用いて，\$J_i(r_t) = \sum^n C_{i,n} h_{i,n}(r_t)\$ と展開できる。この電流による電場は式 (2), (3) から，\$J_i(r_t) = E(r_t)_j^R / Y_j^R - E(r_t)_j^L / Y_j^L\$ と書けるが，これに Floquet 基底をかけて格子の面積で積分すると，直交性から電場の方向成分毎の式になる。

$$\tilde{h}_{i,n}(r_t) \equiv \int_S h_{i,n}(r_t) e^{-ir_t k_{t,mpq}} d^2 r_t \text{ として,}$$

$$\tilde{J}_{i,mpq}^* = \sum^n C_{i,n} (\tilde{h}_{i,n}^{mpq})^* = ((1 + R_{i,i+1}) A_i^R)_{mpq} \frac{S}{Y_j^R} - ((1 + R_{i,i-1}) B_i^L)_{mpq} \frac{S}{Y_j^L}$$

また，式 (2) から，境界の前後で多重反射した電場の関係は，\$E_{i,mpq}^R = ((1 + R_{i,i+1}) A_i^R)_{mpq} \equiv E_{i,mpq}^L = ((1 + R_{i,i-1}) B_i^L)_{mpq}\$ となる。レンズ素子の計算では，導体がある境界が複数あり，境界間の誘電率は層毎に異なっても良いとした。半透明な「合わせ鏡」で複雑だが，合成反射率，透過率を使って，境界 \$z = z_i\$ の電場のうち境界 \$z = z_i\$ の電流が源であるものは次のような形に書ける。

$$E_{i,mpq}^R = \frac{1}{S} \sum^n C_{i,n} \sum_{mpq} (\tilde{h}_{i,n}^{mpq})^* \times \left[\frac{((1 + R_{i,i+1}) Y_j^R}{((1 + R_{i,i+1}))} - \frac{((1 + R_{i,i-1}) Y_j^L}{((1 + R_{i,i-1}))} \right]$$

境界 \$z = z_k\$ の導体が境界 \$z = z_i\$ に作る電場は，\$E_{i,mpq}^R = \prod_{j=k}^{j=i} T_{j-1,mpq}^R E_{j-1,mpq}^R\$ と書ける。電流基底とそれがつくる電場の比のなかに相互インピーダンスが入っている。電場の各成分が基底毎の電流強度と入射電場で書けたので，これらを式 (1) に代入すれば，

$$\sum_{m=0,1}^{p=q=0} (E_{in})_{i,mpq}^R + \sum_{mpq} (E_{dipole})_{i,mpq}^R = \sum_{m=0,1}^{p=q=0} (E_{in})_{i,mpq}^R + \sum_{n=0}^{N-1} \sum^n C_{i,n} \left[\sum_{mpq} (\tilde{h}_{i,n}^{mpq})^* Z_{i,n}^{mpq} \right] \equiv 0$$

という形の電流の展開係数 $C_{i,n}$ についての連立一次方程式が得られる。これを解いて入射電場 $E_{i,n}$ が励起した電流分布からの放射場 E_{dipole} がきまる。これを入射波の透過成分と足し合わせて、最終的な透過波の振幅と位相が求まる。

この問題は定常外場で励振された電流の定常状態を求めているので、予想できるなら電流の展開には「正解に近い」形状の基底を用いると効率がよい。すなわち、少ない項数で精度良く求まる。ダイポールであれば、余弦関数である。しかし複雑な形状の素子ではそうもいかないので、単純に区分定値関数で導体領域を分割し、分割数を増やして計算機の「力」で解く。こちらは誤差の収束がわかりやすく、測定値との比較もしやすい。

今回の方法は、連立一次方程式を解くために、基底の数が増えると著しく時間がかかる。しかし、衝撃波のような非線形性はなく、特定の周波数の波に対して完全吸収境界をつくるのは簡単なので、複雑な形状を解析するなら、有限差分法で Maxwell 方程式を解き直接シミュレートしたほうが良いだろう。

4. 3 数値実験の結果

このコードを使って、導体の寸法や配置間隔、膜間距離等のパラメータを変えて計算した結果、大きな位相シフトと高い透過率が得られるフィルムの配置が存在することがわかった。それを利用したフレネルレンズの開口能率を計算すると、開口能率も 50% に届きそうであるとの見通しが得られた⁶⁾。

5. 試作レンズ素片の測定実験

数値実験でよい見通しが出たが、自分でつくったコードなだけに、実測とどれだけ合うかは気にかかる。「装置は実際に動いてこそ」であるから、試作をして確認する必要がある。

そこで、共振回路としてもっとも簡単な半波長ダイポールを並べた 70 cm 平方のレンズ素片フィ

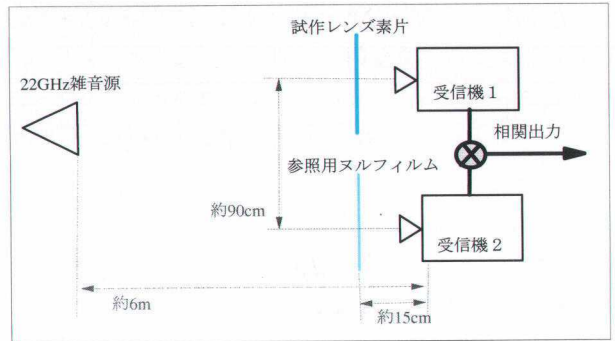


図 4：試作レンズ素片測定系の構成略図

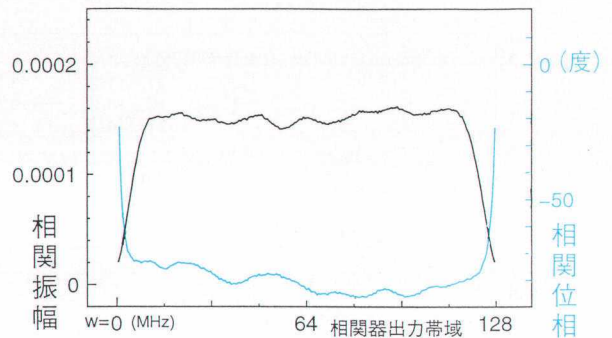


図 5：受信機 1 にレンズ素片をかざしたときの相関器出力： $S(w)_1$ の振幅と位相

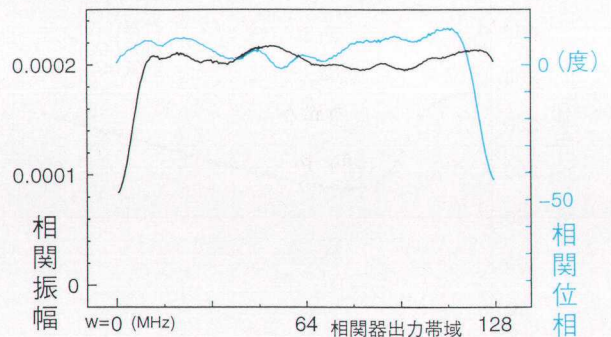


図 6：受信機 1 にレンズ素片をかざさないときの相関器出力： $S(w)_0$ の振幅と位相

表1 試作フィルム素片の仕様

素片番号	ダイポール長/幅/配置間隔 (L)/(W)/(D)
1	1.1 / 0.2 / 1.2
2	1.0 / 0.2 / 1.2
3	0.9 / 0.2 / 1.2
4	0.8 / 0.2 / 1.2
5	0.9 / 0.2 / 1.1
6	0.8 / 0.2 / 1.1

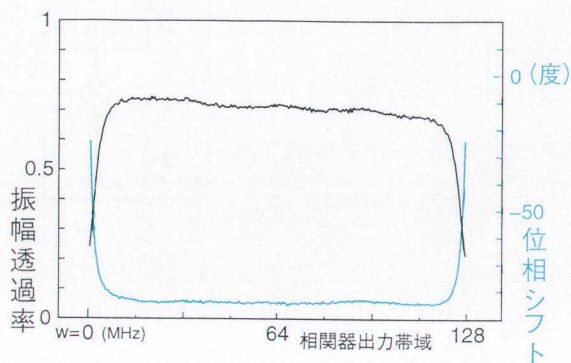


図7: レンズ素片の透過率: $\text{abs} \left(\frac{S(w)_i}{S(w)_o} \right)$ と
位相シフト量: $\text{arg} \left(\frac{S(w)_i}{S(w)_o} \right)$

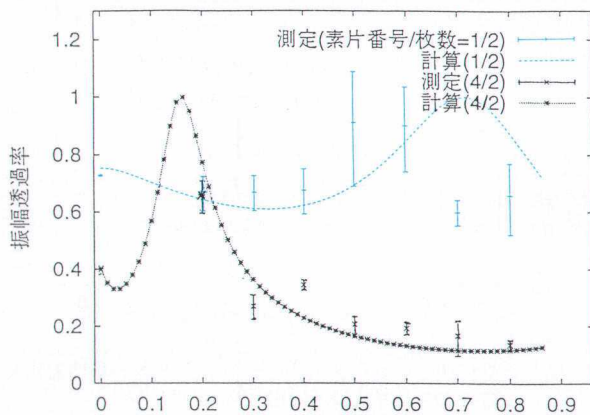


図8: 試作素片の透過特性(横軸はフィルム間隔)

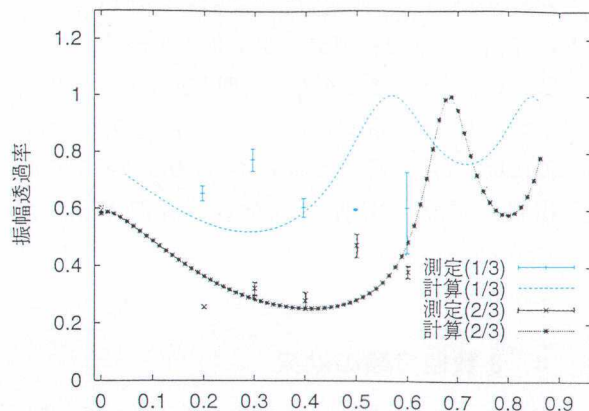


図10: 試作素片の透過特性(横軸はフィルム間隔)

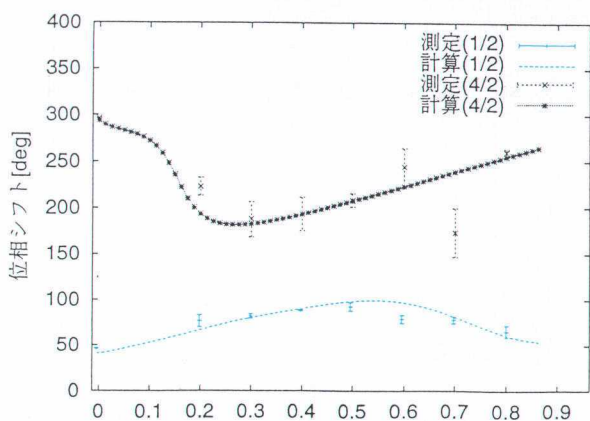


図9: 試作素片の位相特性(横軸はフィルム間隔)

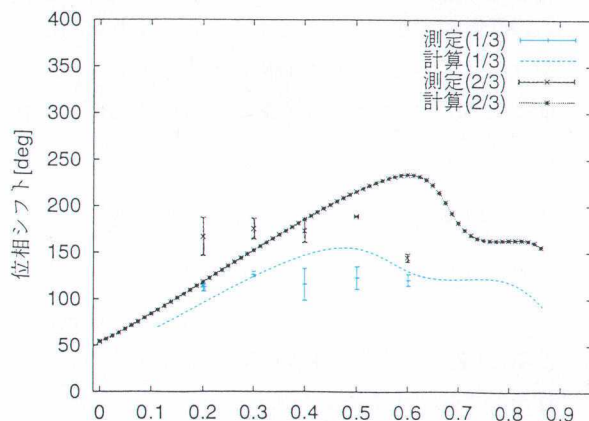


図11: 試作素片の位相特性(横軸はフィルム間隔)

ルムを製作し、その透過率と位相シフトの測定を行った。測定装置はVERAプロジェクトの2ビームアンテナ用受信機がうってつけであり、厳しいスケジュールの中で借用させていただいた。測定系の構成は図4のようになっている。受信機2には、導体なしの参照用フィルム（ヌルフィルム）をかざし、受信機1には測定試料のレンズ素片をかざす。共通の送信源から電波を二つの受信機で受信し、その複素相関を得る（図5）。それと受信機1に試料をかざさないときのもの（図6）との比をとって、受信機系の周波数特性をキャンセルして、素片の透過率と位相シフトを得る（図7）。

測定周波数を広く変化させて周波数特性を得ることはできないが、表1のようにダイポールの長さと配置間隔を変えた6種類の試作素片をつくり、二枚重ねにしたフィルムの間隔を変えながら、透過率と位相シフトをはかって計算と比較した。結果の一部を図8から図11に挙げるが、この計算コードは十分に設計に使えること、数値実験で見つけたレンズに適した構成が現実にあることを検証できた⁷⁾。（なお、図、表中の長さの単位は22 GHzの半波長が「1」である。）

素片は基盤がポリイミド（厚 50μ ）で薄く、透過損失はほとんどない。導電部は銅（ 35μ ）で、その電気抵抗は共振を鈍くするセンスである。計算パラメータとしての素子幅を広くしても共振は鈍くなるので、フィルム一枚のみの測定値から計算パラメータを決め、二、三枚を重ねた時の計算をした。測定値のバラツキが大きいのは、予算の都合でフィルム間のスペーサが十分配置できず、また、スペーサを手で貼り替えて間隔を変える仕様なので、フィルムの面精度も平行度も悪くなっていたためである。重ねる枚数が増えたり、間隔が広がると結果のずれも大きくなる。フィルムの面精度や平行度に1-2 mm程度の誤差はありながらも計算とはそこそこ合っている。

6. フィルムレンズの性能評価

このレンズは、位相をずらす導体の並べ方次第でレンズ面形状を曲面にも平面にもできる。透過波に所要の位相差を与えるのは面の形状ではなく、位相シフトの共振特性だからだ。その結果、フィルムレンズは通常の鏡やレンズと違い、位相誤差と面誤差はほぼ独立で、面誤差の位相誤差への影響は鈍くなる。

素片レベルでのデータが得られたので、レンズとしての性能が計算できる。測定データから選んで、 -180 度から $+180$ 度の位相シフトを5段階で近似するフレネルレンズを構成して、これの開口能率を計算すると、50%程度であった。膜の変形に対しては、面に垂直方向に10波長程度変形しても集光でき、面誤差にも強いことが確認できた。

比帯域幅はフレネル構造の帯域と位相シフトの共振特性でできる。前者が支配的だが、同じ口径ではF比が大きいか、長波長であれば軽減される。懸念されていた位相シフトによる帯域制限は大きくない。レンズの許容位相誤差はかなり大きく、数十度の誤差でも集光するので、比帯域10%は達成可能である。伝送系の現状が1 Gbps程度であることも考えるとフィルムレンズは十分に使い物になる。

7. フィルムレンズの衛星デザイン

近田が提案した当初は、口径1 kmの電波天文衛星という壮大なプランであった。フィルムはペラペラであるから、名実ともに「大風呂敷」である。将来はそのよう巨大なものも打ち上げられるのかも知れないが、当座の目標としては「はるか」の次として、口径20 mクラスを想定している（図14（=表紙2）参照）。

これまでの結果から考察すると、この「大風呂敷」を畳む必要はない。打ち上げロケットに積み込むときに畳むのを除けば、あとは広げることだけを考えれば良い。フィルムレンズは平面でもよいので、パラボラよりは展開も支持も楽である。

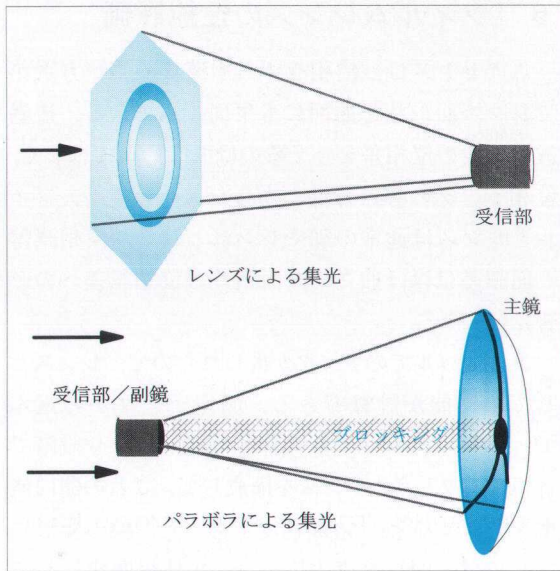


図 12：副鏡やステーによるブロッキング（回折の影響は描いていない）

観測周波数については、現状の「はるか」の展開メッシュアンテナではせいぜい 22 GHz、次期 VSOP-2 では他の展開パラボラも検討されているが、43 GHz だと 1 mm くらいの鏡面精度が必要になり、金属線の網目であれ、蒸着フィルムであれ、パラボラで達成するのはなかなか難しい。フィルムレンズアンテナであれば、同等の展開精度で 86 GHz 帯でも集光できる。また、メッシュアンテナは高周波になるほど網目が細くなる。フィルムレンズも導体素子が小さくなるが、透過で使うので、導体の隙間が不可欠である。しかも、レンズの位相シフト 0 の部分は何もない。太陽光圧による姿勢の擾乱をおさえるのには鏡より有利ではなからうか。「はるか」のような、主鏡の中心に受信機が位置するセンターパラボラでは、副鏡の陰（ブロッキング（図 12））のため、開口能率が落ちる。これを避けてオフセットパラボラにすると、偏波特性はやや悪くなり、衛星の重量バランスも悪くなる。その点、レンズは透過式であるため、かなりすなおなデザインにでき、主焦点で受信してもブロッキング損失はない。ただし、実用に際しては多周波化と受信部

の設計が未解決である。

スペクトルの形を決めるには、三周波程度の受信をしたい。口径 1 km なら、単周波でも集光力だけを売り物にできるかも知れないが、20 m 程度の現実路線ではそうもいかない。しかし、フレネル構造は、設計周波数の整数倍の周波数に対してもフレネル構造であるから、二、三周波程度の同時受信は可能である。移相素子さえデザインすれば、比帯域 10% 程度で 22 GHz、43 GHz、86 GHz といった三周波同時集光が可能だ。今回の例のような半波長ダイポールの場合、周波数が倍も離ればほとんど共振しないから、それぞれの周波数用の素子をフィルム上にうまく配置すれば実現可能（図 15（=表紙 2）参照）で、その特性の数値計算はできる⁵⁾。単周波アンテナの次の課題と考えている。

受信部については色収差の問題がある。周波数毎の焦点の分布が広く、一度に全部を受信するのは難しい。どうせ受信後は分光するのだから、焦点ですでに分光済みのももよいという見方もあるが、周波数毎に多数の受信機を焦点に並べたり、受信機を移動させるのは煩雑である。口径や焦点距離という設計条件に合わせて、レンズに最適なものを研究していきたい。

8. 現時点のまとめと今後の展開

数値実験で開口能率向上の可能性が得られたフィルムレンズアンテナは、試作素片の測定でそのアイデアの検証を行い、ようやく集光実験へと向かうことができる段階に来たところだ。

フィルムレンズには、これまで述べてきたような、鏡にはない利点があるが、制約もある。帯域や受信部の設計などの課題があるが、研究に着手した当初は「そもそも電波望遠鏡用として実用的な性能にできるかどうか」という根本的な問題があった。が、21 世紀

⁵⁾ 素子を多くしたり、複雑にしたりすると、数台の計算機で分散処理しても計算に数時間かかるが。

⁶⁾ もちろん、楽しいことばかりじゃないけど、設計どおりに装置が動いたとき、データがとれたときの喜びは、なにものにもかえがたいものである。

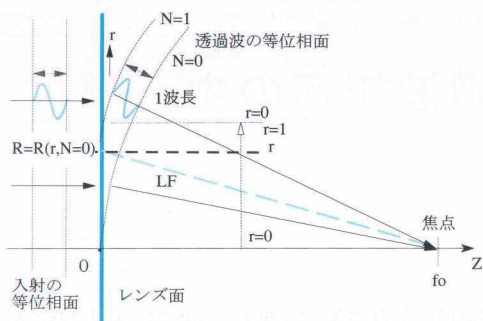


図 13：フィルムレンズ.. 焦点に達したときに波の位相が合うように、例えばレンズ面上に表2のような素片を並べる。

表 2 試作素片によるレンズの構成例

素片の 番号/枚数	フィルムの 間隔 (dz)	振幅透過率, 位相シフト	使用半径位置 $R = R(r, N)$
膜無し	0	1.0, 0度	$r=0$ to 0.35
1/2 枚	0.5	0.9, 90度	0.35 to 0.55
1/3 枚	0.3	0.8, 130度	0.55 to 0.65
2/3 枚	0.5	0.5, 180度	0.65 to 0.7
4/2 枚	0.2	0.65, -140度	0.7 to 1.0

素片の位置する位置を r 、フレネル次数を $N (=0,1,2,...)$ とすると、レンズ上で素片のおかれる半径 R は次のような位置になる。 $R^2 + f_0^2 = (f_0 + (r + N)\lambda)^2 \dots$ (図 13 参照)。

を目前にそれは解決され、実用をめざせる段階にきた。

私自身にとっては、誰もつくったことのない装置の実現のためのアイデアをだし、シミュレーションコードを開発し、実際の試作測定といった開発過程が全部を経験でき、非常に楽しかった⁶。

さて、20年近く前から近田の広げてきた大風呂敷、口径 1 km のレンズアンテナにも、多少は現実味を感じていただけたらどうか？ 1 km にはまだまだだが、今年度は口径 1 m で 22 GHz 用のレンズ、次は 86 GHz のレンズで集光実験を行なう予定である。

9. 謝辞

この研究を進めるにあたって、実験、測定について有益な助言をいただいた国立天文台の川口則幸氏、ゼミの先輩の井口 聖氏、測定装置を使わせていただいた VERA チームに感謝する。そのほか、協力していただいた大勢の方々、現指導教官の近田義広氏を紹介してくれたうえ、実験も手伝っていただいた名古屋大の中平勝子氏にも感謝する。

学生の自主性を重んじる近田氏には、どれだけ感謝をすればよいかかわからない。21世紀最初の初夢ではフィルムレンズ搭載の電波天文衛星が飛んでいるのをごらんになってるかもしれないが（それともメ切に間に合ってホッとする夢かな？）、それが正夢になるまで、地道に問題を片付けながらやっていきましょう。

参考文献

- 1) Milne, R., 1982, "Dipole Array Lens Antenna", IEEE Trans. Ant. & Prop., AP-30, 4, 704-712
- 2) Yoshihiro CHIKADA, 1985, "Millimeter wave gigantic radio telescope by lens antenna", Proc. ISAP, pp. 959-962
- 3) 豊増伸治, 修士論文 (1994), 豊橋技術科学大学 "次世代超大口徑電波望遠鏡への第一歩 開発にむけて—プロトタイプ製作と検証"
- 4) 入交芳久, 鷹野敏明, 西尾正則, 柴崎清登, 鯉目信三, 中島 弘, 1997, "野辺山電波ヘリオグラフ用周波数選択膜型副鏡の試作", 信学技報, MW, 91-58, pp. 31-35
- 5) James P. Montgomery, 1975 "Scattering by an infinite periodic array of thin conductors on a dielectric sheet", IEEE Trans. Antennas. Propagat. vol. AP-23, pp. 70-75
- 6) 氏原秀樹, 近田義広, 1998, 「電波望遠鏡のためのレンズアンテナ」電子情報通信学会誌 Vol. J81-B-II, pp. 1145-1148
- 7) 氏原秀樹, 近田義広, 中平勝子, 「大口徑電波望遠鏡用フィルムレンズ試作片の特性測定」電子情報通信学会誌, accepted

Development of Film Lens Antennas for radio telescopes

Hideki, UJIHARA

The Graduate University for Advanced Studies

Abstract: Construction of a large aperture mirror (100m @ millimeter waves, 10m @ submillimeter waves) is difficult, because the mirror is distorted by its weight, wind load, non-uniform distribution of temperature. The Film Lens Antennas, introduced here, are developed as "breakthrough" collecting devices for large aperture radio telescopes.