

レンズ・アンテナの電波天文学・測地学への応用

—反射鏡の限界を破る—

白鳥 裕¹, 入交 芳久¹, 越石 英樹¹, 崔 容碩¹
 阪本 成一¹, 半田 利弘², 近田 義広³, 浮田 信治³
 面高 俊宏⁴, 平野 尚美⁵, 松本 欣也⁶, 宮脇 亮介⁷

1. <東京大学理学部 〒113 東京都文京区本郷7-3-1> 2. <東京大学理学部 〒181 東京都三鷹市大沢2-21-1> 3. <国立天文台野辺山宇宙電波観測所 〒384-13 長野県南佐久郡南牧村> 4. <鹿児島大学教養部 〒890 鹿児島市郡元1-21-3> 5. <一橋大学地学研究室 〒186 東京都国立市中2-1> 6. <電気通信大学電気通信学部 〒182 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1> 7. <福岡教育大学教育学部 〒811-41 福岡県宗像市赤間729>

従来の反射鏡式の電波望遠鏡で超大口径のアンテナを作ろうとすると、サイズ・コストの限界がある。ここで紹介するレンズ・アンテナは、こうした限界を打ち破る方策として考えられたアンテナである。電波の位相を調整することで結像する本格的なレンズは、1 km におよぶ超大口径望遠鏡や、全国各地の電波天文学研究グループに専用の望遠鏡を実現する大きな可能性を与えてくれる。こうした優れた将来性と、その前段階として実際にフレネル・ゾーン・プレート・レンズを試作した際の体験を紹介する。

1. はじめに

皆さん、レンズ・アンテナって知っていますか？

実はレンズ・アンテナは、一般の人にはなじみがないけれど、アンテナ工学の教科書には必ず載っているものなのです。これだけを聞くと「なーんだ」と思う人がいるかも知れませんが、電波天文学・測地学に応用しようなんて今まで誰も思いつかなかったことなのです。では、どうして、レンズ・アンテナなどと言うものを作ろうとしたかお話ししましょう。いま電波天文学では干渉計や超長基線干渉計(VLBI)を用いて、分解能はどんどん良くなりつつあります。しかし、それらは強い電波源しか見ることができません。しかも、干渉

計用の比較的小型の反射式望遠鏡でも一台数億円もかかります。弱い電波源を見るためには、受信機の感度を上げるか、望遠鏡の集光力を上げるしか方法がないのです。受信機の感度はかなり限界に近づいていて、この先良くなっても数十倍です。集光力を上げようとしても、ミリ波観測用の反射式望遠鏡では、口径数十 m クラスを作るのが限界で、しかもそれでさえ一台が数十億円もかかります。つまり、反射鏡を使っている限り、集光力やコストには限界があるわけです。我々は、レンズ・アンテナを使って、そんな反射鏡の集光力やコストの限界を打ち破ろう(ミリ波で1 km 級の望遠鏡を作ろう)としています。

まずは、我々の作ろうとしているレンズ・アンテナの原理から Chikada¹⁾に沿って、説明していきます。

Y. Shiratori et al.: Lense Antennas for Astronomy and Geodesy

—Beyond Limits of Reflectors—

2. 何故、レンズ・アンテナなの？

センチ波よりも短い領域での電波望遠鏡は主として、反射鏡アンテナが用いられています。

では、その反射鏡アンテナに比べてレンズ・アンテナはどこが優れているのでしょうか。

よいアンテナには次の2点が必要とされます。

- (1) 正しく焦点に電波が集まる(集光能率が良い)
 - (2) 正しく目的の方向に向く(指向精度が良い)
- このことを念頭においた上で、反射鏡とレンズがどう違うのかを見ていきましょう。

まず、ふつうの反射鏡アンテナの場合を考えてみましょう。図1の上のように、焦点距離をFとします。重力などの影響で理想的な放物面が変形

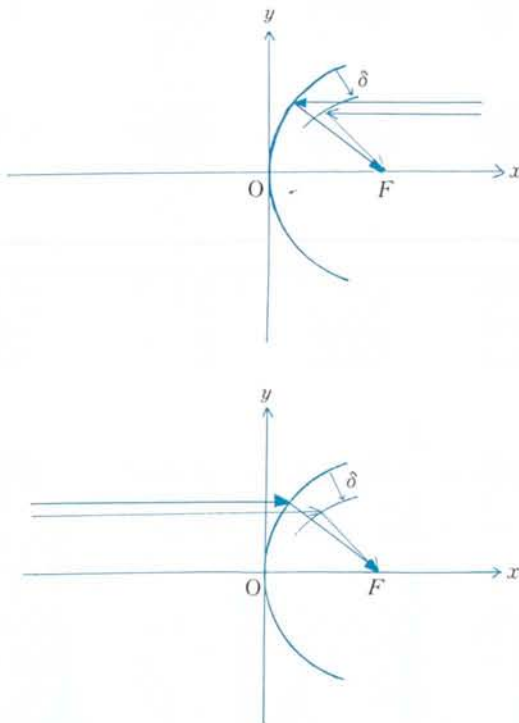


図1 放物面反射鏡(上)と放物面レンズ(下)
 反射鏡では変形δの約2倍の光路長変化が出てしまうが、レンズでは光路長変化はほとんど無い。Fは焦点

して、ズレδを生じたとします。この変形δによる光路長の変化Δは、大体δの2倍すなわち

$$\Delta = -2\delta / \sqrt{1+x/F} = o(\delta^1)$$

です。ここで、xは変形δが起こった鏡面上の位置の光軸方向の座標、Fは焦点距離です。o(δ¹)はδの1乗に比例することを表します。鏡の効率を50%程度以上に保つには、

$$\delta_{rms} < \lambda / 20$$

すなわち、面の凹凸は観測波長の1/20位以下でないと入ってきた電波を正確に焦点に集められないわけです。さらに指向精度について考えてみます。自動車のバックミラーの向きを正しく合わせないと後ろが見えないように、鏡の場合は鏡の傾きの狂いの2倍が指向誤差になります。このように、鏡の場合は面の凹凸や傾きを抑えて、3次元的にしっかり支えてやらなければなりません。

ではレンズの場合はどうでしょうか。仮にレンズは非常に薄く、かつレンズの各部分の「厚み」はレンズの変形があっても変化しないと考えておきます。つまり、フィルムのような薄い膜にレンズの働きをさせることができたとします。またレンズの形としては図1の下のように放物面の物と考えます。そうすると、レンズ面に垂直なズレδに対して、光路長の変化Δは、

$$\Delta = \frac{x}{2(x+F)^2} \delta^2 = o(\delta^2)$$

すなわち光路長の変化Δは、変形δの2次に比例し、δの1次にはよらないのです。実は、レンズの形が放物面でない場合は、δの1次の項が出てきてしまうのですが、その場合でもδの1次の係数はとても小さいので、ここではレンズ形状は放物面として考えていきます。

変形の影響が小さいと言うのは次のような場合を考えれば直感的にも理解することができます。すなわち、fナンバ(=D/F;口径比)が無限に

大きいなら（レンズの入射側，出射側どちらも平行光束なら）レンズ面に垂直な変形がどんなに大きくても焦点からみた光路長に変化はないわけです。反射鏡の場合はこうはいきません。しっかり 2δ の光路長変化が出てしまいます。レンズの場合，面の誤差でアンテナの効率が半分以下にならないための条件は

$$\delta_{ms} < \sqrt{3D\lambda f^2/40}$$

（レンズの形状が放物面の場合）

となります。たとえば，波長 $\lambda = 2.6 \text{ mm}$ の CO（一酸化炭素）を観測する口径 $D = 400 \text{ m}$ の望遠鏡を考えてみましょう。f ナンバを 1 とすると許容される面誤差 δ_{ms} は 28 cm ，なんと波長の百倍です。これなら望遠鏡の構造は堅いものである必要はなく，風でバタバタしているテントのような物でもよいはずす。

指向精度はどうでしょうか，レンズの場合，1 次近似の範囲では指向方向はレンズの中心とフィード（電波を受けるところ）を結んだ線で決まります。この線に対してレンズが傾いても指向方向は変わりません。これは皆さんがかけている眼鏡を傾けても見える方向が変わらないことで確かめることができます。前述の 400 m CO 望遠鏡の場合，許される傾きのグラグラは角度の 10 分（1/6 度），ビーム幅の百倍もあります。

このように反射鏡アンテナに比べて，工作精度があまり要求されないわけですから，同じ口径の望遠鏡を作った場合，レンズ・アンテナの方が作り易く・安く・軽いものが作れます。

ここまでの話では，レンズの「厚み」の影響を考えていませんでした。しかし，実際のレンズには厚みがあり，実際に厚みのあるレンズを作るなら当然厚みの工作精度や狂いが問題となるはずす。ではどうすれば，このような問題のないレンズを作ることができるのでしょうか。

3. 遅延レンズと位相レンズ

ガラスの中では光の速さが空気中よりもわずかに遅くなります。ふつうの光学レンズでは，ガラスの厚みに比例して，光を遅延させることを利用して光を集めます。焦点からみると，レンズと焦点間の光路差を含めた遅延量がどの光路でも等しくなるようになっています。つまり，レンズ面上の遅延量分布によって結像する「遅延レンズ」となっているわけです。焦点距離を固定したまま，口径を大きくすると（即ち f ナンバを小さくすると）レンズ中央部の厚みは厚くなってきます。厚くなればそれだけ損失も増えますし，重くなって支えの構造も大変になります。

光学レンズは，厚みの変化で光路差を変えていたわけですが，光路差／波長は位相であることを考えれば，いっそのこと位相量の変化で電波を屈折させられるのではないのでしょうか。ちょうど，電波干渉計と同じように位相をあわせることで集光する「位相レンズ」という方式が考えられます。

Milne²⁾は長さをうまく選んだダイポールをレンズ面上にたくさん並べることで，このような位相レンズを実現する方法を考案しました。図 2 の

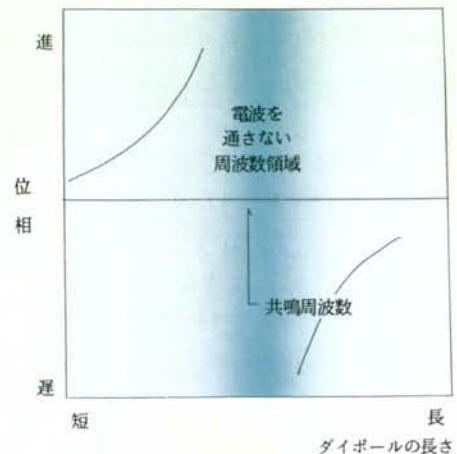


図 2 ダイポールの位相シフト特性

ように、ダイポールはその長さがちょうど半波長に当たる電波に対して共振します。その共振周波数の両側ではダイポールはそれぞれ電気回路におけるコイルまたはコンデンサのように、電波の位相を進めたり遅らせたりする働きがあります。そこでレンズ面の上で位相を進めたいところには目的周波数の半波長よりも短いダイポールを、遅らせたいところには長めのダイポールを置けば電波を焦点に集めることができます。ダイポールは単なる金属の棒ですから電波を通す膜あるいは板の上に、金属片を張り付けるか導電インクで印刷すれば簡単に作ることができるでしょう。きちんとしたレンズにするにはもう少し厳密な計算が要りますが、とにかくこうして薄いフィルム・レンズができあがります。位相をずらすパターンは、ダイポールの他にもいろいろ考えられますが、原理的にはこれと同じことです。

ここまでの話から明らかなように、位相レンズは遅延量で合わせるレンズとは異なって、特定の周波数に対してしかうまく働きませんから、その受信バンドは有限です。このため、次のような欠点があります。

- (1) 観測可能周波数が狭い (比帯域で 10% 位)。
- (2) 今のところ 2 つ以上の異なる周波数を同時に観測することは困難である。

これらは、屈折系であるために生じる色収差と併せて研究の余地があることがらです。

4. レンズ・アンテナ奮闘記

我々は、レンズ・アンテナ第 1 号機として、野辺山宇宙電波観測所の特別公開用にフレネル・ゾーン・プレート・レンズを作りました。フレネル・ゾーン・プレート・レンズとは、図 3 の上段のように、誘電体の上に同心円状に導電体 (電波に対して不透明) を貼った物です。本来、ダイポールを並べた位相レンズでは中段のように連続的に位相を合わせます。微妙に移相量を調整する前述のようなやり方は、それなりの計算と、それに合わ

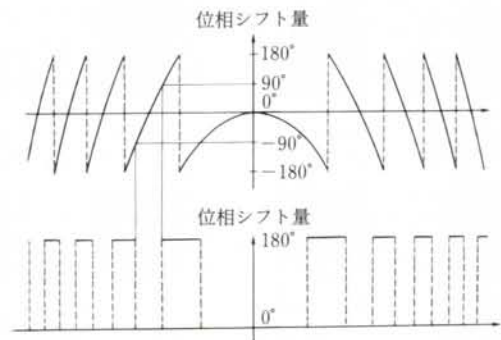
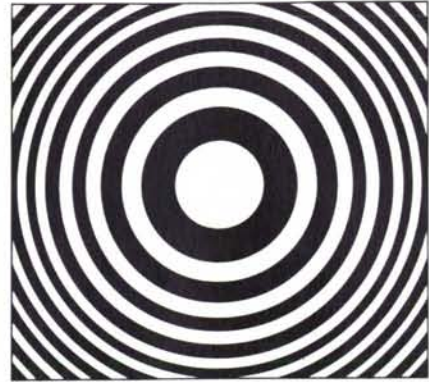


図 3 上段 フレネル・ゾーン・プレート・レンズ。黒は電波に対して不透明、白は電波に対して透明。
中段 理想的な位相レンズでの位相シフト量。
下段 180°単位で丸めた場合の位相シフト量。
(フレネル・ゾーン・プレート・レンズは、0°または180°どちらかを電波に対して不透明にしたもの)

せてダイポールを精密に配置する必要があります。今回は簡単に作ってみようということで、移相量を 180°を単位に丸めて (四捨五入して) しまいました。それが下段です。さらに 180°位相シフトも面倒だからと、下段の移相 0°または 180°側どちらかを電波に対して不透明にして、焦点で強め合う位相の電波だけを集めることにしました。これがフレネル・ゾーン・プレート・レンズです。すなわち、フレネル・ゾーン・プレート・レンズも、一種の位相レンズと考えることができます。フレネル・ゾーン・プレート・レンズの製作は

簡単で、アクリル板全体にアルミ粘着テープを貼りつけ、予め計算しておいた同心円状にカッターで切込みをいれて、剥していくという方法をとりました。この製作に要した時間は約3時間、製作費は8900円（東急ハンズでアクリル板6800円＋アルミ粘着テープ2100円）でした。こうしてできたものは、凹凸は1cm位はざらにあるかなりひどい1.1m×1mのレンズでしたが、それでも衛星放送は受信できました。

ホーンと受信機は市販のBSアンテナのを流用しました。市販のBSアンテナは衛星からの右まわり偏波を鏡面で反射させて、左まわり偏波に変換して受信しています。そのため、BSアンテナのホーン部分の改造を行ない、右まわり偏波を直接受信できるようにしました。具体的には、BSアンテナのホーンの部分を開けて中の誘電体を90°回すという作業を行ないました。この作業をするためには、最近のBSアンテナに多い一体型では不向きなので、分解できるマスプロ電工のアンテナを使いました。

レンズ・アンテナの架台は市販の光学望遠鏡用の赤道儀の部分を取用しました。レンズの支持部と、それを赤道儀に取り付けるための接続部はアルミ板で作りました。

こうして作ったフレネル・ゾーン・プレート・レンズのアンテナ・パターンを測ってみました。ビームサイズは半値幅で0.8°、ビームの形はきれいであるということがわかりました。また、光軸に対してレンズ面を20°位傾けても受信レベルが、余り下がらないこともわかりました。アンテナ能率は約25%でした。これはフレネル・ゾーン・プレート・レンズでは電波を通す部分の面積が半分位しかないことと、移相量を180°を単位に丸めているために、理論的な場合でもアンテナ能率が約30%であることを考えると、非常に良い値であると言えます。

こうしてできた物は、位相レンズとしては非常に簡単なものですが、いい加減な工作でもできる

ことがわかり、我々は大いに勇気づけられました。

5. 未来に広がるレンズ・アンテナ

我々が今回試作した物は、フレネル・ゾーン・プレート・レンズという最も簡単なレンズ・アンテナですが、これを足がかりに次はダイポールを使った本格的なレンズ・アンテナを作りたいと考えています。

レンズ・アンテナは反射鏡に比べて工作精度がゆるくて簡単に作れる・安い・軽いという長所があります。このため、従来の反射鏡アンテナでの限界を打ち破るようなアンテナが作れる可能性があります。我々は、このレンズ・アンテナの将来への展望を2つ考えています。それはこのようなものです。

(1) 工作精度がそれほど要らなくて、しかも安い点を活かして、コストパフォーマンスの良い中小望遠鏡を作ろう。それを使って、汎用の大型望遠鏡では難しかった独創的な観測をやろう。

(2) 工作精度がそれほど要らなくて、しかも軽い点を活かして、従来の反射鏡アンテナの限界を越えた超大型望遠鏡を作ろう。それによって、従来の電波天文学の限界を越えた天文学を切り拓こう。

(1)の具体的計画としては、まず4m級の測地VLBI用の望遠鏡を作ろうと考えています。何故、先に天文用ではなく測地用かというと、測地VLBIでは強い電波源を利用できるため、小口径の望遠鏡でも十分実用に耐えるからです。

現在の測地には、GPSという方式とVLBIという方式があります。しかし、GPSには、1000km以上の基線を決めにくいという欠点があります。何故、GPSが1000km以上の基線を決めにくいかというと、あまり基線が長くなると、衛星の位置の不確かさが効いてしまうためです。これに対して、VLBIでは原理的にはどんな長さの基線でも決めることができるのですが、決めたい基線のところに望遠鏡があるとは限りません。これまで

は望遠鏡が高価だったために、あちこちに置くことは経済的に困難だったのです。重量が大きく、鏡面などを精密に調整しておく必要があるため、容易には持ち運ぶこともできませんでした。でも、今や私たちは、廉価で軽い望遠鏡を作れる方法を知っています。そう、レンズ・アンテナです。我々は、レンズ・アンテナの軽く安く作れる特徴を活かして、4 m 級の可搬型の望遠鏡をたくさん作りたいと考えています。レンズ・アンテナなら、それほど組立精度を必要としないため、再組立が容易です。バン程度の自動車に乗せてどこへでも運んでいけ、しかも半日で組み立てられる、こんなシステムを作りたいと考えています。そうすれば、いつでもどこでも測地観測をすることができます。そして、再来年位にその1号機を作りたいと考えています。

測地観測用4 m 鏡の次は15~30 m 級の中口径望遠鏡を作りたいと考えています。これは、名大の4 m 鏡や東大の60 cm 鏡のように、大型汎用鏡では難しい長期観測やサーベイ観測など独創性あふれる観測に使って行きたいと考えています。

では、(2)はどうでしょうか？我々は口径1 km 級の望遠鏡を宇宙空間に上げたいと考えています。現在のロケットを用いると、反射鏡ではせい

ぜい10 m 級のアンテナを打ち上げるのが技術的に精一杯なのですが、レンズ・アンテナにすれば軽くて構造精度が厳しくないのを活かして、いつきに直径で100倍、集光面積で1万倍の物を上げられる可能性がでてきます。ちょうどそれは、図4のようなものです。これは、マッピング速度では野辺山ミリ波干渉計の次期望遠鏡(LMA)に及ばないものの、それに匹敵する分解能で集光力は300倍あります。これで、LMAでもできない淡い天体をどんどん観測していきたいと考えています。これは単一鏡としては世界一の集光力を持つ望遠鏡になるでしょう。さらにこの大集光力を活かしてVLBIをすれば、観測できる天体が格段に増えることでしょう。

6. おわりに

どうです？少しは、レンズ・アンテナについて理解していただけたでしょうか？

我々、野辺山宇宙電波観測所を中心としたレンズ・アンテナ・グループは、現在はまだ1 mの小さな望遠鏡を作っただけですが、でも夢はその1000倍(集光力は 10^6 倍)も大きな1 km級望遠鏡を作ることを目指しています。21世紀の電波天文学、特に大望遠鏡による高分解能・大集光力観測を切り拓いていくのはレンズ方式です。

参 考 文 献

- (1) Chikada, Y., Proc. International Symp. Antennas and Propagation, p. 959, 1985.
- (2) Milne, R., IEEE Trans. Antenna and Propagation, AP-30, p. 704, 1982.



図4 巨大フィルムレンズ望遠鏡の概念図。支持機構は省いてある