

## 広視野フェーズド・アレイ電波望遠鏡の試作 (II)

大師堂経明<sup>†</sup>・岡 律夫<sup>\*</sup>・大川 徹<sup>\*\*</sup>・丸山 忠<sup>\*</sup>  
横山哲弘<sup>\*</sup>・長根 潔<sup>††</sup>・平林 久<sup>††</sup>

### デジタル化

各素子アンテナからの信号を係数としてフーリエ変換を行い、像を得る方法には各種のアナログ的、及びデジタル的方法がある。そのうち、信号を A/D 変換してデジタルに高速フーリエ変換 (FFT) を行う方式が最も現実的である。野辺山宇宙電波観測所の近田氏等は分光観測用に広帯域、高分解能のデジタル・フィルターを開発している。CMOS ゲート・アレイを使用して、低消費電力で高速の FFT プロセッサが完成しつつあり、この方式がフェーズド・アレイにも使えることを教えて下さった。分光観測では時間軸に沿って蓄積したデータをフーリエ変換するが、フェーズド・アレイ等の干渉計では空間軸に沿ってサンプルしたデータをフーリエ変換する。その様子を見てみよう。

まず一次元の天空を考え点源が 1 個、 $\theta$  方向にのみある場合を考える。天空の輝度分布を  $T_b(\varphi)$  とすると

$$T_b(\varphi) = T_{b0} \delta(\varphi - \theta)$$

であり、電界強度は

$$E(\varphi) = \sqrt{T_b(\varphi)}$$

である。これを等間隔に並んだ素子アンテナで観測する様子を図 9 に示す。 $\theta$  方向から入射した波長  $\lambda$  の電波 (単色波) は、大地に

$$\lambda_x = \frac{\lambda}{\sin \theta}$$

の波長で電界の正弦的变化を生じさせる。その縞は

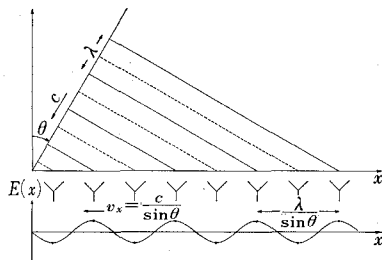


図 9  $\theta$  方向からの平面波は大地に  $\lambda_x = \frac{\lambda}{\sin \theta}$  の波長の波を走らせる。素子アンテナの組により  $\lambda_x$  を観測して、電波源の  $\theta$  方向を知ることができる。

$$v_x = \frac{c}{\sin \theta}$$

の速度で移動する。これは光速  $c$  より大きい、位相速度であるから相対論とは無矛盾しない。同一時刻に各素子の位置における電界強度  $E(x)$  を図 9 の・印のように測定する。これを使って大地にできた縞の波長  $\lambda_x$  が求まる。 $\lambda$  は分っているので、先程の式を使うと  $\theta$  が求まる。つまり電波源の方向が分る。 $\theta$  の精度は  $\lambda_x$  の測定精度で決まり、それは各素子の位置における  $E(x)$  の測定の時刻精度で決まる。なぜなら時刻に  $\delta\tau$  の誤差があると、 $\lambda_x$  に  $v_x \delta\tau$  の誤差が発生する。これによって引き起こされる  $\theta$  の誤差  $\delta\theta$  は  $\delta\tau$  に比例するからである。

$E(x)$  から波長  $\lambda_x$  の正弦波成分の振幅を求める方法がフーリエ分解である。いまの場合点源が 1 つだったので、発生した波は正弦波 1 つであった。 $\theta$  が小さければ  $\lambda_x$  は大きい。細かい所を見る目的の VLBI では、大きな  $\lambda_x$  を測定できるような基線を長くとる。我々の広視野フェーズド・アレイではその逆になる。

視野の中に電波源が幾つも散在し、強度も色々だったらどうなるだろうか？ 各電波源はそれぞれの方向  $\theta$  とその強度に応じた縞を大地に作る。 $\theta$  の小さい電波源は大きな  $\lambda_x$  の縞をつくり、電波源の強度が大きければ縞の振幅が大きくなる。 $x$  軸に沿った素子アンテナが受ける電界強度の分布  $E(x)$  は、これらの正弦波の重ね合わせである。前回 (I)、レンズの機能として入射電磁波を到来方向ごとに仕分けして乾板上の対応点に集める話をした。今回はその話を乾板上でなく、レンズ面上 (大地上) で見ている。フーリエ光学という  $x, y$  像平面と  $u, v$  レンズ面の違いである。到来方向ごとに異なる波長  $\lambda_x$  の正弦波を大地に作り出しており、観測量はその重ね合わせとしての  $E(x)$  である。これを各正弦波にフーリエ分解すれば、到来方向ごとの仕分けをしたことになる。得られたそれぞれの正弦波 (フーリエ成分) の振幅の 2 乗が対応する方向の電波強度である。

このフーリエ分解はバンド幅 10~100 MHz の特別の FFT プロセッサで実行する。FFT のパタフライ演算 1 つ 1 つに対応させた演算素子をつくり、2 次元のフーリエ変換を行う。64x64 素子の実用機における概念を図 10 に示す。2 次元フーリエ変換の  $x$  方向と  $y$  方向は独立なのでそれぞれ別々にやっつかまわない。最終段に

<sup>†</sup> 早大教育 Tsuneaki Daishido; <sup>\*</sup> 日立コンピューター EG Ritsuo Oka, Tadashi Maruyama, Tetsuhiro Yokoyama; <sup>\*\*</sup> 富士通 Tohru Ohkawa; <sup>††</sup> 東京天文台 Kiyoshi Nagane, Hisashi Hirabayashi: A Test Telescope for The Phased Array Telescope with Large Field of View (II)

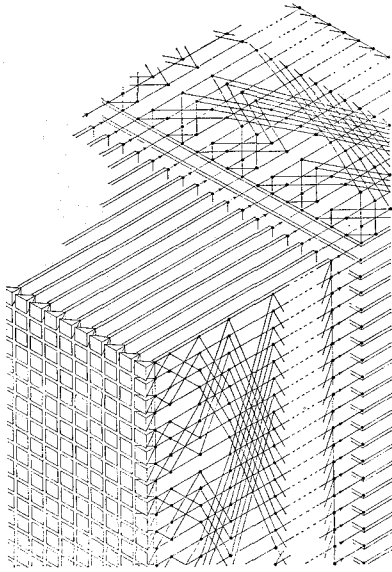


図 10 64×64=4096 素子広視野フェーズド・アレイ電波望遠鏡における 2 次元 FFT.

は 4096 方向からの電波の電圧振幅が出力され、それを 2 乗して強度分布を得る。

現在 8 素子の試作機のデジタル化を検討している。A/D 変換器は 100 MHz を越えるスピードのものが出てきた。乗算器は輸入品と肩を並べる国産品が登場した。デジタル化テストの条件はそろっている。早い機会に FFT プロセッサの試作を行いたいと思う。

### 感 度

4096 素子の実用機では 20 分間の積分で 200 mJy の感度を持つと述べた。ここでは受信機が多数ある場合の感度について 3 つの問題を考えよう。① 4096 個もの多数の受信機を使用すると、受信機雑音が大きくなって感度が下がることは無いだろうか？ あるいは素子数を増すと、全開口面積が同じでも感度は逆に向上するのではないか。② 各素子からの信号を FFT 方式で処理する場合と、コリレータ方式で処理する場合とで感度に大きな違いが発生するであろうか。③ 同じフーリエ成分を多数とることになって無駄だから、素子アンテナを抜け落ちなく並べるフィールド・アパチャーはやめて必要最小限の素子をランダムに配列するだけでよいのではないか。

こういった疑問が起きるかもしれない。これらは、いずれも実際によくたずねられる問題である。結論を先に述べると、① 受信機を多数使用することによって感度が下がることは無く、全開口面積に比例して良くなる。② FFT 方式とコリレータ方式では小さいファクターを除いて感度に差は無く、乗算器の数は FFT 方式がはるかに少なくてすむ。③ 開口面上で素子アンテナを間引き

て、フーリエ成分の冗長度を減ずることはできるが、その分感度は下がってしまう。また図 10 から分るように FFT 方式はフィールド・アパチャーでなければ実現できない。

これらの結論は、雑音電圧が従う重ね合わせの法則と、コヒーレントな信号の重ね合わせの法則とが異なることからでてくる。いまアンテナ素子数を  $n$ 、受信機のシステム雑音温度を  $T_{sys}$ 、電波源がホーン・アンテナ 1 個に発生するアンテナ温度を  $T_A$  とする。 $T_{sys}$  や  $T_A$  はそれぞれ受信機自体の発生する雑音電波のパワーと、電波源からの電波のパワーを受信機の入力に換算したものである。実は電波源としての天体からの電波も長い時間にわたって見ると雑音性であるが、各素子アンテナにはコヒーレントに入ってくる点がミソである。FFT はベクトル・マトリックスと数学的に等価なので、その場合の  $S/N$  (信号/雑音) 比を求める。各受信機は 2 乗平均で見て  $\sqrt{T_{sys}}$  の雑音電圧を、時々刻々独立に発生している。つまり 1 次元ブラウン運動の到達点としての電圧を毎時刻ごとに示す。従って、 $n$  素子からの合成電圧は  $\sqrt{n} \cdot \sqrt{T_{sys}}$  であり、パワーは  $nT_{sys}$  となる。一方電波源が各受信機に発生する電圧はやはり雑音性で、その振幅は  $\sqrt{T_A}$  であるが、それらは独立では無く互いに位相関係が保たれている。これらの雑音電圧は位相をそろえて合成されるので、合成電圧は  $n\sqrt{T_A}$  で、パワーは  $n^2T_A$  となる。このことから電波源からの雑音電波のパワーと受信機雑音のパワーの比は  $nT_A/T_{sys}$  となる。 $nT_A$  は全開口面積に比例するので、結局それに比例して感度は良くなり ① が示された。② については、1 対の素子が持つ感度を求め、 $n$  個の素子の全ての組み合わせ、つまり  $\frac{n(n-1)}{2}$  倍の観測時間をかけたとして  $S/N$  比を求めることにより示される。これらの結論から ③ は明らかである。結局広視野フェーズド・アレイの感度は、点源に対しては同一開口面積を持つ単一パラボラの感度に等しく、同時に  $N=4096$  点を観測できることからパラボラ・アンテナ 4096 台分の働きを 1 台で行うことが分る。

### 8 素子試作機の建設

1979 年の夏に予算が決まり、半年で完成させる必要があった。まず受信機をどうするかが問題となった。海外のメーカーのものを検討したが、4 台買うとそれだけで予算は無くなってしまふ。必要な数は 8 台である。それに納期が心配であった。

我国では放送衛星から各家庭に直接テレビジョン放送を行う計画があって、数社がその受信機を開発している。その中で、ソニー厚木工場の沖田利通氏の SHF グループが私共の無理難題に耳を傾けて下さった。「電波天文用の受信機は始めてです。低雑音とのことですが、300 K

まではいくでしょう。GaAs FET もうちで作っています。DC+12V をかければそれで働きます。IF 端子を共用すれば楽でしょう。……」モチはモチ屋にというわけで、5ヶ月後に RF 周波数 10.6 GHz, バンド幅 100 MHz, 雑音温度 300 K の MIC 受信機を手にすることができた(図 11)。IF 端子の共用案は「ローカル入力端子に間違っつないで、ミキサを焼きそうな人間がいる。……」という内部意見が出てとり止めになった。

受信機はホーン・アンテナに直結する(図 12)。だから受信機の外箱とホーンの金属は同じにしなければならない。異種金属が接して雨に降られると、あっという間に電蝕を起すのである。こういう点にも放送衛星用屋外受信実験の経験が生かされた。先端技術といえども経験の蓄積がものをいう。要所要所の判断においては、それまで培った経験にもとづく判断基準の体系が試される。実験室レベルで高い性能を示すだけではだめで、実際の環境においても高い性能を持続できなければならない。試作機の 8 台の受信機は初期調整の後 1982 年夏まで、2年以上にわたって順調に働いた。4096 台の受信機を使う実用機においては、年間 1 万台のうち 1 台以上の確率で故障しては観測ができなくなる。故障した場合でも、差し換えるだけで済むようなモジュールにしておく必要があるだろう。

前回 (I) に写真で示したパトラー・マトリックスは日本通信機、サンケン(株)が担当した。アルミナ基板の上にプリントした遅延線の幾何学的長さや電気長が必ずしも比例してくれない事等があって、何度か作り直す大変な作業であったが、うまく 8 本のビームを出すことに成功した。

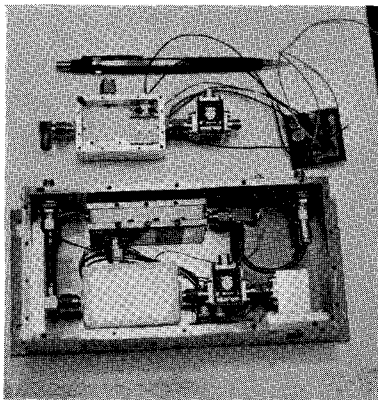


図 11 8素子フェーズド・アレイ試作機のフロントエンド。右下が導波管同軸変換器。その先にホーンを付ける(図 12)。左隣の黒いのはアイソレータ、次がマイクロ波集積回路(MIC)。内部は図 15 に示す。左から 9.6 GHz のローカル信号が入り、1.05 GHz の IF 信号は上側に出て IF アンプで増幅される。シャープペンシルの下はふたを開いた MIC。

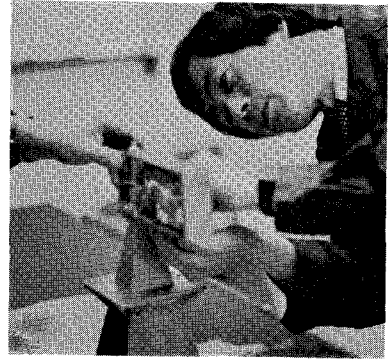


図 12 完成した受信機をホーンに取り付ける。ソニー厚木工場にて。

ホーン・アンテナと赤道儀は法月技研に作っていただいた。1979 年秋に焼津に伺ったとき、赤道儀は庭のすみの工場で組み立てられていた。ホーンの配置と設置箇所の相談を始めると、法月さんは庭へ出て地面にけがき針で図面をかき始めた。「5 mm 厚のアルミをこんな風に折り曲げて、そこにホーンを並べたらと思うのだが、どうかに。……」これが設計図の全てである。かくして最新のペーパーレス・オフィスから誕生した赤道儀は入試明けの 3 月 17 日早稲田大学 6 号館屋上に設置された。「太陽を追いかけて見てくれるかに。ずれていだから、それを記録しておいてくれたら、今度来たとき極軸を直せるから……」ところがずれない。電波望遠鏡の架台を 200 台以上作った経験と技術の重みを改めて感じたのである。

### 観測・位相調整・台風 10 号

この試作機は技術テストが主な目的であるが、低雑音受信機を使っているので太陽の電波バーストを受けることができる(図 13)。黒点の上空で磁場のエネルギーが解放されて、荷電粒子が加速を受け、バーストを起す。この現象は銀河系内の Cyg X-3 や、系外のキューサー等におけるバースト現象のミニチュア版でもある。図 14 は太陽バーストの観測例である。定期観測を始めて

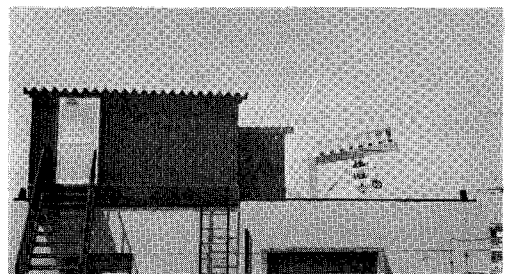


図 13 太陽バーストをモニタ中の広視野フェーズド・アレイ。観測中はスライディング・ルーフを左側に寄せる。背後の建物は池袋サンシャイン。

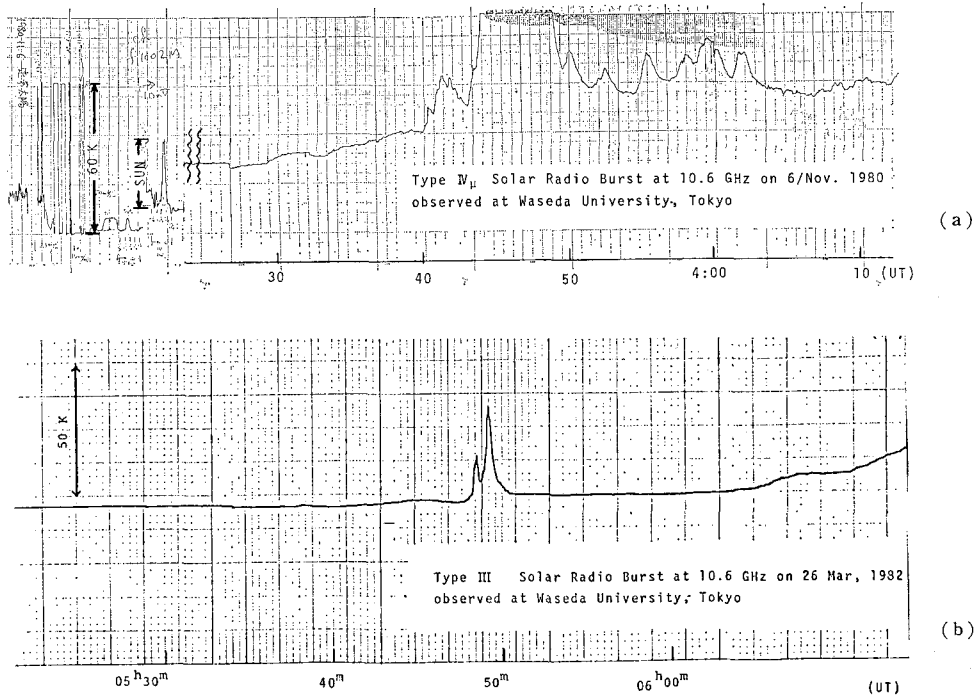


図 14 (a) 1980年11月6日に受かった大規模な太陽バースト。3<sup>h</sup>40<sup>m</sup> UT に始まったが、すぐにレコーダーは振り切れてしまった。後に準周期的な小バースト群が続く。SMM により X線、γ線の大きなバーストも観測されている。(b) 1982年3月26日の太陽バースト。

まもなくペンレコーダーがするすると動き、ガチャンと音をたてて振り切れた。最大級のバーストで、NASAの人工衛星は同時に出たガンマ線、X線のバーストをとらえた。

全ての受信機が正常に作動するようになって、位相調整を行った。バトラー・マトリックスに入る直前で、位相をそろえるのである。それには望遠鏡に向って10 GHzの電波を出してやらねばならない。しかし、そんな発振器は高くとも買えない。四方八方手をつくした後、秋葉原でドップラー・レーダー用の発振器を9千円で売っている広告を一人が見つけた。自転車飛ばして、30分後には位相調整を始めることができた。ふと数年前、オーストラリアの電波天文学者との話を思い出した。オーストラリアの電波天文台で、ある電子部品が故障した。アメリカに修理に出したら半年かかった。日本はその点めぐまれていて、うらやましい、と。彼がこの話を聞いたら何というだろうか。

私学で実験を行うのはたしかに大変である。しかし消極的になることは無い。「夏は暑くていやだな、冬は寒くてつらいな」という人と「いよいよ夏だ、海へ山へ。冬はスキーだ」という人では人生の楽しさが違うだろう。ヨーロッパの研究者達の中には、我国にくらべてずいぶん分乏しい予算で優れた研究をやっている人も多い。日

本は恵まれている面もある。

さて望遠鏡が順調に動き始めたある日、E教育学部長(当時)が屋上まで上ってこられた。「ホー、屋根が動いて開く。サンダー・バードみたいですね。電波望遠鏡なのにオワンのようなのが付いてないんですね。」「ハイ、反射させずに、ホーンで直接電波を集めます。」「ああ、この雨量計のようなので集めるのですか。」「……この時、何か悪い予感がした。……そして2年後1982年8月1日、台風10号で止めが甘かった屋根が移動し文字通り雨量計になり、受信機が水をかぶってしまった。しかし幸い2ヶ月で元通りに復旧した。完全にやられたと思ったマイクロ波集積回路は何の影響も受けていなかった。

### マイクロ波集積回路・高速デジタル素子

この2つの分野における最近の著しい進歩により、実用機実現の技術的基盤は整いつつある。大量の受信機やデジタル素子を使う場合にその信頼性が重要なことは先に述べた。広視野フェーズド・アレイ電波望遠鏡を建設する場合、通常の望遠鏡と違う建設方針をとる必要があるだろう。それは①素子レベルの開発は行わない、②できるだけ民生品を使う。③同一品種を大量に使い、種類は減らす。これらによって、①メンテナンスやバックアップが楽になり、②高い信頼性を得るこ

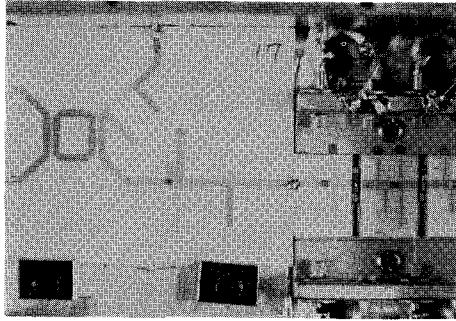


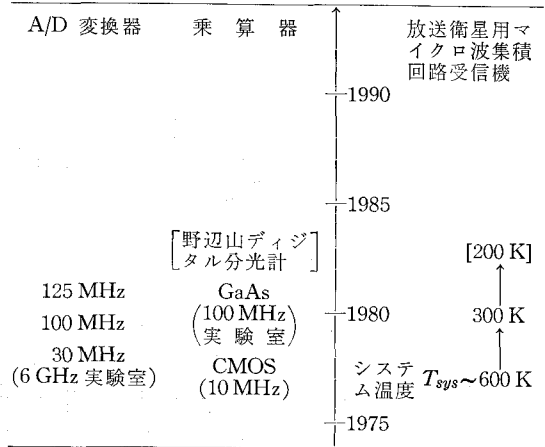
図 15 マイクロ波集積回路 (MIC) で構成した初段増幅器とミキサ。GaAs FET を使用し、雑音温度は常温で 300 K。8 台のばらつきは非常に少ない。

とができ、③ コストを下げるができる。

1981年8月ワシントン DC で行われた国際電波連合総会 (URSI) に、8 素子試作機の報告をした。上のような話をし、「放送衛星用のマイクロ波集積回路がその目的に合う。Low Noise, Low Cost, High Reliability」と強調した。日米半導体摩擦の事があってか、アメリカ人は複雑な顔をしていたが、ボン 100 mφ 鏡のウィルピンスキー所長やアルバカーキの IAU シンポジウムで会ったシュクロフスキーが、おもしろいアイデアだとほめてくれた。

表 1 に実用機建設のキーパーツの進歩をかかげた。技術的には 1985 年には着手できると考えてよいだろう。世界のどこかで、すでにこんな望遠鏡を作っているの

表 1 マイクロ波集積回路・高速デジタル素子技術の進歩——広視野フェーズド・アレイ (64×64) はいっから建設可能か——



はないか。会議で話すまではそんな不安があったが、それは杞憂だった。困難は山程あるだろうが、まずはデジタル化を第 2 歩目として、一歩一歩進んで行こう。

本試作機による観測は早稲田大学特定課題研究 (1981, 1982 年度) の補助を受けて行われている。前回 (I) の 348 頁中程に誤植があります。「今回 88 素子」→「今回の 8 素子」

雑報

Nova Sagittarii 1982 (1982 年いて座新星)

倉敷天文台の本田実氏は 1982 年 10 月 4 日 10 時 29 分 ~ 10 時 32 分 (世界時) に撮影したフィルム上で、約 9 等級の新星状天体の像を発見して東京天文台へ連絡して来られた。東京天文台で調査したところ該当する既知の天体が無く、観測のための条件もよくないので、国際天文学連合天文電報中央局に確認依頼のための連絡をした。その結果、南アフリカのケープタウンのマックとカウシンスによって確認された。本田氏が口径 25 cm, F4.2 のカメラで撮影したフィルムを東京天文台で測定して次の位置を得た。

赤経 =  $18^{\text{h}}31^{\text{m}}32^{\text{s}}.95$  赤緯 =  $-26^{\circ}28'25''.1$   
(1950.0)

なお、本田氏からの、その後の連絡によると 10 月 4 日から 7 日までは約 9 等で 11 日には 8.3 等に上昇し、その後 18 日には 8 等台、20 日には 10 等級に近くなっていた由である。ちなみに、本田氏にとってこの新星は 8 個目にあたる。(香西洋樹)

新刊紹介

「日本天文名所旧跡案内」

松村 巧 著

(B6 版, 126 ページ, 1982 年 9 月刊)

1981 年春に発行された「天文名所旧跡案内」の続編。自費出版、限定 400 部。「まえがき」には、「……天文活動の参考、旅行等で天文の名所旧跡を訪ずれる案内書、とでも使用していただければ……」とする。(編集部)

☆ ☆

☆ ☆ ☆