

# 簡単な電波望遠鏡による低周波電波天文学

## 2. 銀河電波の観測

前田 耕一郎\*

### 1. 銀河電波とは

一般に、電荷を持つ粒子が加速度運動を行うと電波が放射される。例えば、磁場の中を運動する電子を考えてみよう。電子の運動方向と磁場の方向の両方に直角方向に力（ローレンツの力）が常に働くので、電子は螺旋運動を行う。螺旋運動は加速度運動であるから、電子からは電波が放射される。特に、磁場の中を光速に近い速さで螺旋運動する高エネルギー電子からの放射は、シンクロトロン放射と呼ばれている。

銀河系の中には、超新星の爆発などにより加速された高エネルギー電子が多数存在する。このような高エネルギー電子は銀河磁場の中で螺旋運動しながらシンクロトロン放射として電波を放射している。地球は銀河系の中にあるので、地球へはどの方向からもこのような電波が到来している。当初は、地球外の宇宙空間から到来する雑音電波という意味で、宇宙雑音と呼ばれていた。しかし、マイクロ波において3Kの宇宙背景放射が発見された今では、銀河系内で発生していることを示して、銀河背景放射と呼ぶのが最も適当であろう。ここでは、簡単のために、我々の銀河内で発生している電波という意味で、単に銀河電波と呼ぶことにしたい。

地球から30MHz程度の周波数で観測すると、銀河電波は銀河面の方向（天の川に対応すると考えてよい）に沿って強く、また、銀河面の方向でも銀河中心方向に近づくほど強くなる。我々の目では電波を見ることはできないが、もし光と同じ感度と分解能で見ることができたとしたら空はどのように見えるだろう。30MHz付近における銀河電波の平均輝度温度は $10^4$ K程度であるから、空一面が明るく輝いている筈だ。中でも銀河面の方向に沿って一層明るい帯が走り、銀河中心に近づくにつれ輝きと幅を増す。そして、銀河中心方向は火の玉のようにまばゆく輝いていることだろう。光で見たよりも、はるかに活動的な銀河の姿かも知れない。

30MHz付近における銀河電波の観測を最初に取り上げることには、次のような理由がある。まず、天体電波としては強度が非常に高いので、簡単なアンテナで必ず受信できることである。HF帯でアマチュア無線家が、通信をしようと受信機のスイッチを入れたとしよう。このとき聞こえてくる背景雑音の半分以上は、アンテナを

通して入ってきた銀河電波による雑音である。アマチュア無線家は無意識のうちに、銀河からのメッセージを受け取っている。30MHz付近では受信機の雑音温度と銀河電波によるアンテナ温度が同程度となるので、アンテナからの信号と内部雑音の関係を理解するのに適している。銀河電波は背景として常に観測されるので、その性質を知っておくことは、カシオペアAなどの点状の電波源を観測する際にも有用である。前回述べたように、ジャンスキーによる銀河電波の発見から電波天文学は始まった。銀河電波の観測により、電波天文学の原点である銀河電波の発見を追体験することができる。観測と合わせて、ジャンスキーの書いた論文を読み、彼が銀河電波を同定するに至った経緯をたどってみると、より趣きの深い観測テーマになるだろう。

### 2. 簡単なダイポールアンテナ

簡単に自作できる半波長ダイポールアンテナを用いて銀河電波が観測できる。ダイは2を表し、2本の導体棒からなるアンテナをダイポールアンテナと呼ぶ。2本の導体棒の長さを合わせて半波長( $\lambda/2$ )の長さとなるとき、半波長ダイポールアンテナと呼ぶ。ちなみに、1本の導体棒よりなるアンテナは、モノポールアンテナと呼ばれる。アメリカの惑星探査機ボイジャーには、10mの長さのモノポールアンテナが2本、直交して取り付けられており、一般にはあまり知られていないが、これらのアンテナにより惑星電波天文観測が行われている。

図1に、私が30MHz( $\lambda=10$ m)用に作製した半波長ダイポールアンテナの実態図を示す。高周波電流は導体棒の表面近くのみを流れるので、普通、アンテナ材料として金属のパイプ（主に、軽量で腐食しにくいアルミパイプ）が使われる。アンテナ用パイプとして、外径17mm、肉厚1mmのアルミパイプ2本を用いた。波長 $\lambda$

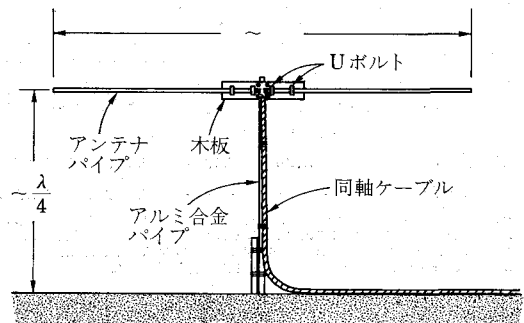


図1 半波長ダイポールアンテナの実態図

\* 兵庫医大 Koitiro Maeda: Low Frequency Radio Astronomy with Simple Radio Telescopes 2. Observations of the Galactic Background Radiation

の電波に共振するアンテナとするためには、パイプ 2 本を合わせた長さを  $\lambda/2$  より少し短くする必要がある。短縮率はパイプの太さに関係するが、外径 17 mm 程度のパイプの場合、約 3% である。したがって、各パイプの長さは、 $\lambda/4$  (2.5 m) より 3% だけ短縮し 2.43 m とした。アンテナは地上  $\lambda/4$  の高さに設置して、地面を反射板として利用する。このようにすると、後で述べるように、アンテナビーム（アンテナの感度のよい方向）を天頂方向に向けることができる。木板 (20 cm × 60 cm × 2 cm) と U ボルト 6 本を用いて、アンテナパイプとアルミ合金のパイプ (外径 25 mm, 肉厚 2 mm) を図 1 のように直交させて取り付け、アンテナパイプが東西方向を向くように設置した。また、アンテナパイプと U ボルトはビニールテープにより電氣的に絶縁した。アンテナ用の 2 本のパイプは数 mm 離して取り付け、一方のパイプに同軸ケーブル (5D-2V を使用した) の芯線を、他方のパイプには網状の外部導体をねじって線状にして取り付ける。アンテナパイプにドリルで穴を開け、取り付けには、ビス、ナット等を使用した。このようにして、作製されたダイポールアンテナは 30 MHz の電波に共振するのでアンテナのインピーダンスは純抵抗 (80~90 オーム) となるが、同軸ケーブルの 50 オームとは整合しないので、電力損失が起こる。しかし、銀河電波は非常に強いので、電力損失は気にしないでよい。また、平衡回路 (ダイポールアンテナ) と不平衡回路 (同軸ケーブル) を接続するためアンテナの左右のパイプを流れる電流に非対称性を生じ、アンテナの指向性に歪みができる。これを補正するためには、アンテナとケーブルの間にバラン (balun: balanced to unbalanced の略) を挿入する必要がある。しかし、ダイポールアンテナの場合、ビームの幅は広いので、バランを省略しても影響は小さいと考えられる。したがって、アンテナパイプに同軸ケーブルを直接取り付けるだけで十分実用的なアンテナとなる。

$\lambda/4$  後方に完全導体の平面反射板を持つ半波長ダイポールアンテナの指向性は理論的に計算できる。図 2 にその結果 (太線) を示す。図 2a は、アンテナパイプを含み反射板と直交する平面内の指向性を表し、図 2b はアンテナパイプに直交する平面内の指向性を示す。各図では、アンテナの有効面積の最大値を 1 とし、各方向の有効面積の相対値が極座標表示で示されている。このような図はアンテナパターンと呼ばれる。有効面積が最大値の 1/2 となる 2 方向 (点線) のなす角度でアンテナビームの半値幅が定義される。アンテナビームの半値幅は図 2a の場合は約 70°, 図 2b の場合は約 120° である。上で述べた自作のダイポールアンテナの指向性は、図 2 に示した指向性で近似できるものと考えられる。し

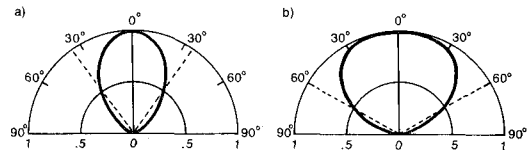


図 2  $\lambda/4$  後方に完全導体の平面反射板を持つ半波長ダイポールアンテナの指向性 (太線). a) 素子を含み反射板と直交する平面内のアンテナパターン. b) 素子と直交する平面内のアンテナパターン. 反射板に直角の方向からの角度に対して、有効面積の相対値が示されている。

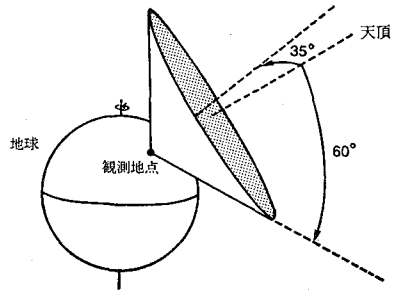


図 3 アンテナビームと観測地点の関係。地球の自転によりアンテナビームは回転する。

たがって、アンテナパイプを東西方向に向けて設置すると、天頂方向からの電波に対して有効面積が最大で、東西および南北方向のビーム幅が、それぞれ約 70° および約 120° のアンテナビームができることになる。図 3 に、観測地点に対するアンテナビームの方向を示す。影で示した部分を通して観測地点に入射する電波に対してアンテナは感度がよいことになる。

### 3. 銀河電波の恒星日変化

アンテナはアンテナビーム内の色々な方向からくる電波に感度を持つが、電波望遠鏡から最終的に取り出されるのは直流電圧という物理量のみである。色々な方向からくる電波により運ばれてくる電界の振動の合成されたものが観測されるだけである。図 3 のような指向性を持つアンテナで銀河電波の観測を行うと、電波望遠鏡の出力電圧はどのようなものになるだろう。上で述べたように、銀河電波は銀河面の方向で、また銀河中心に近づくほど強く (すなわち、輝度温度が高く) なる。地球の自転とともにアンテナビームは回転するので、アンテナビームに入る空の領域は刻々変化する。アンテナビームと銀河面および銀河中心の関係を考えるために、アンテナビームを空に投影して考えてみよう。図 3 のアンテナビームを空に投影すると図 4 の太線で示すような楕円形で近似できる。図 4 には、恒星時が 14~22 時の銀河面 (点線) および銀河中心 (黒丸) の方向も示されている。アンテナビームを示す楕円内に輝度温度の高い領域が入ると、電波望遠鏡の出力は大きくなる。例えば、図 4 に

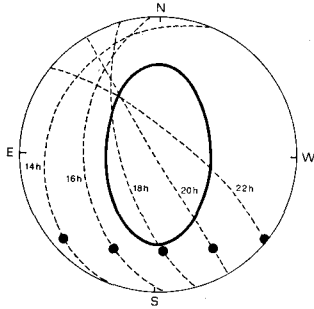


図4 アンテナビームの方向と銀河面および銀河中心方向の関係。円の中心が天頂方向に当たる。太線の楕円形はビーム方向を空に投影したものである。各点線および点線上の黒丸は対応する恒星時における銀河面および銀河中心の方向を示す。

において、14時には銀河面はアンテナビームの外にあるが、18時にはアンテナビーム内を通過している。また、14時より18時の方が銀河中心の方向はアンテナビームに近い。したがって、電波望遠鏡の出力は、18時の方が14時より大きくなる筈である。アンテナビームは銀河系の中を1恒星日で1回転するので、銀河電波による電波望遠鏡の出力は恒星日変化を示すことになる。

#### 4. 恒星日変化の観測方法

7月号で紹介した、通信型受信機を用いた簡単な電波望遠鏡により観測を行う。通信型受信機はAM受信にセットし、帯域幅はWIDE(5kHz程度)とする。通信型受信機、付加回路およびペンレコーダを接続し、7月号で述べた方法により受信系のチェックを行う。適当な場所に設置したダイポールアンテナと受信機を同軸ケーブルにより接続する。受信機のRFゲインを最大にし、AFゲインは中程度にする。受信機にはアンテナからの信号を弱めるためのアッテネータ(減衰器、-20dB程度)が付いているので、アッテネータをONにする。このようにするとアンテナからの信号をほとんど遮断することになる(ただし、強い混信電波は漏れ込んでくる)。この状態で、受信機およびペンレコーダを働かせると、受信機の内部雑音によりペンが振れるので、その振幅が、3~4cm程度となるようにペンレコーダの感度を調節し、適当な紙送りスピード(~30cm/h)で書かせる。しばらく書かせた後、アッテネータをOFFにすると、ペンの振幅が増加するのでしばらく書かせる。ペンが一定のレベルを描き始めたら、振幅の増加分が銀河電波による出力成分と考えてよい。私がテスト観測に用いた受信機NRD-525の場合、銀河電波によるペンの振幅は内部雑音によるペンの振幅と同程度であった。また、出力電圧は、RFゲインを最大としたとき、約1ボルトであった。昼間は混信の影響を受ける可能性

が強いので、この実験は夜間に行い、まず確実に銀河電波を捕らえるのが賢明である。銀河電波を受信できることが確認できたら、銀河電波の恒星日変化の観測を行う。RFゲインを最大とし、AFゲインを適当なレベルに固定して、受信機のゲインを一定にする。銀河電波による振幅が数cmとなるように、ペンレコーダの感度を調整した後、紙送りスピードを可能な限り遅くして連続記録をとる。その際、ペンレコーダのトラブルに注意する。

図5は、周波数29.98MHzでの観測例である。最初、30.00MHzで観測を始めたが、時々、通信信号のような混信が認められたので、周波数を少し低くして29.98MHzとした。図5において、ゆっくりとレベルが変化し、日本標準時で0時頃にピークに達しているのが銀河電波である。地方恒星時(観測地点における恒星時)では19時頃、つまり天の川が天頂近くを通過する時刻に当たる。図5の昼間の部分の混信(スパイクの集合のように見える)は、ほとんどが人工雑音電波による混信である。通信や放送の混信と違って、このような混信は多少周波数をずらしても逃れることはできない。図5の場合には、昼間も銀河レベルの変化を追うことができるが、人工雑音電波の混信のために昼間は銀河レベルが見えにくくなることもある。しかし、夜間であれば、近くによほど強い混信源がない限り銀河レベルは観測できると考えてよい。

銀河電波は、地球の電離層を通過する際、吸収を受ける。図5の日本標準時10時頃に見られるレベルの低下(矢印)は、太陽フレアからのX線により電離層の電離状態が変化したために起こった、一時的な吸収量の増加を表している。この現象については太陽の観測のところで詳しく述べたい。

銀河電波による電波望遠鏡の出力の変化は地方恒星時に固定されている。地方恒星時は、日本標準時に対して1日約4分の割合で進むので、銀河電波がピークとなる時刻(日本標準時)は毎日約4分だけ早まる筈である。1988年6月から8月にかけての連続記録から、各日の日本標準時におけるピーク時刻を読み取り、プロットした結果を図6に示す。図5に見られるように、幅の広いなだらかなピークであるため、ピーク時刻の測定には、比較的大きな不確定(10~30分)が付きまとうのはやむを得ない。また、電離層の状態の変化や天候によるアンテナの特性の変化等もピーク時刻の測定に影響することがある。しかし、1~2カ月にわたって記録をとれば、ピーク時刻の変化は、はっきりと認められる。図6の右上がりの点線は、それぞれの地方恒星時に対応する。観測されたピーク時刻の変化に最もよく合う地方恒星時は18時50分であった。

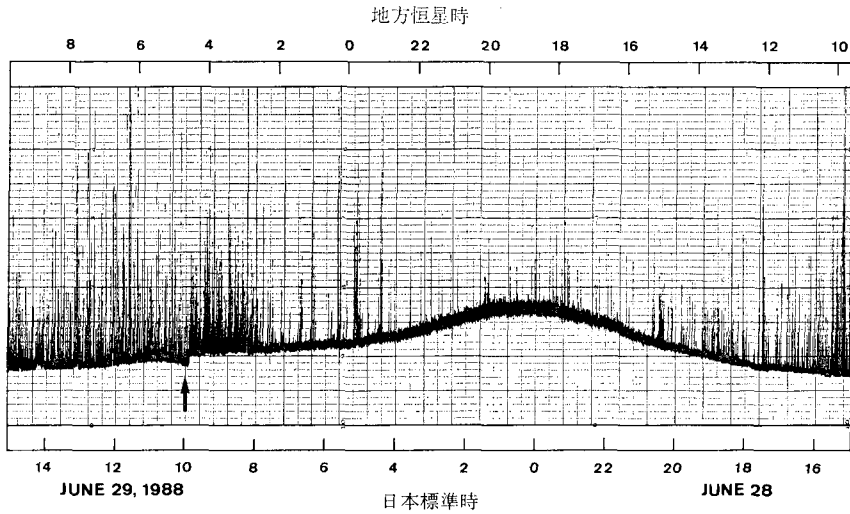


図 5 ダイポールアンテナによる銀河電波の観測。観測周波数は 29.98 MHz である。ゆっくりとレベルが変化し、日本標準時 0 時頃にピークに達しているのが銀河電波である。日本標準時 10 時頃に見られる一時的なレベル低下 (矢印) は太陽フレアと関連している。

日本標準時

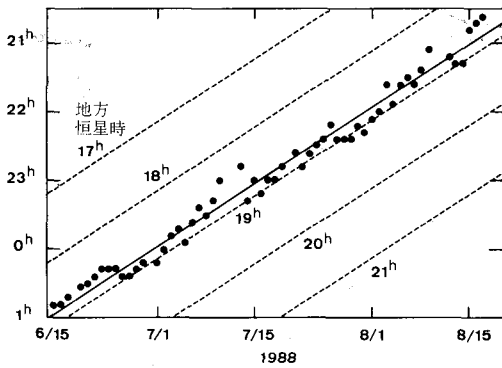


図 6 銀河電波恒星日変化カーブのピーク時刻 (日本標準時) の変化。点線は、各地方恒星時に対応する変化を表す。実線は観測に最もよく合う直線である。

### 5. 銀河電波のマッピング

アンテナビームを空の色々な方向に向けて観測を行い、その結果を寄せ集めて強度分布図を作成することをマッピングと呼ぶ。3素子八木アンテナを用いて銀河電波のマッピングを行った。八木アンテナとは、テレビのアンテナのようなタイプのアンテナである。日本の八木・宇田両博士により考案されたので正確には八木・宇田アンテナと呼ばれる。八木アンテナの有用性は、最初、外国において認められ、その後、日本でも広く使われるようになった。受信素子の長さは半波長程度で、30 MHz の場合約 5 m となり、テレビのアンテナと比べてはるかに長くなる。3素子八木アンテナの場合、受信素子の前方に導波器と呼ばれる素子を、後方に反射器の役割をする素子を取り付け、全体として前方に指向性をつ

ける。3素子八木アンテナのビーム幅は  $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$  程度と考えられる。28 MHz のアマチュアバンド用に市販されている3素子八木アンテナを相似的に短縮して 30 MHz 用のアンテナとして用いた。短縮の割合は、 $28/30 = 0.93$  であるので、約 7% である。市販の八木アンテナにはバランスが付いている。また、アンテナのインピーダンスは、一般に、50 オームに調整されている。アマチュア無線通信の場合、アンテナは水平に取り付けて使われるのが普通だが、マッピングを行うためには、色々な角度に傾けられるようにする必要がある。木の支柱を立て、図 7 に示すように、天頂から南へ子午面内で傾けられるように取り付けた。地面が反射板の役割をするので、アンテナの傾きが大きくなるとアンテナビームは変形される。しかし、ビームの形を測定するのは実際上困難であるので、ビームの中心軸はブーム (素子を取り付けられているパイプ) の方向と一致していると仮定した。後で述べるように、観測結果は、この仮定がそれほど悪くないことを示している。観測は次の要領で行った。データをとる方向は、天頂角 (ブームと天頂方向のなす角) が  $0^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}$  とした。観測地点の緯度は約  $35^{\circ}$  であるので、赤緯に直すとそれぞれ  $35^{\circ}, 20^{\circ}, 5^{\circ}, -10^{\circ}, -25^{\circ}$  に対応する。観測は、銀河中心の南中時刻をはさんで約 5 時間 (地方恒星時で 15 時から 20 時) にわたって 20 分毎に行った。29.98 MHz での記録例を図 8 に示す。記録の整理は次のように行う。各方向について、内部雑音レベルからの振れ幅を読み取る。振れ幅は、アンテナから受信機に供給される電力にほぼ比例している。横軸を赤経、縦軸を赤緯とした面に測定した振れ幅を書き込む (図 9)。図 9 において

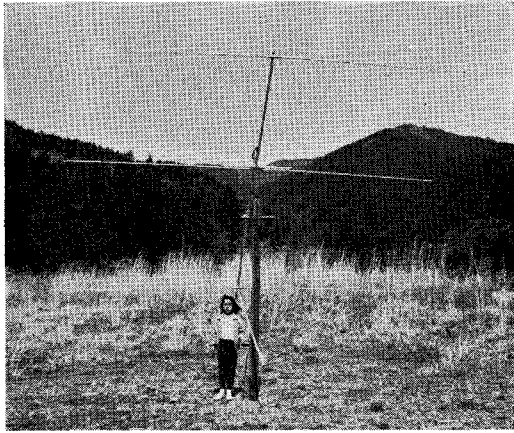


図7 銀河電波のマッピングに用いた3素子八木アンテナ。木の支柱に写真のように取り付け、傾けられるようにした。

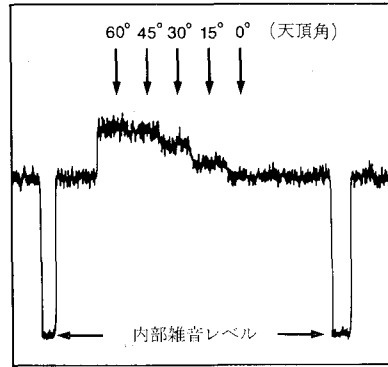


図8 マッピング観測の記録例

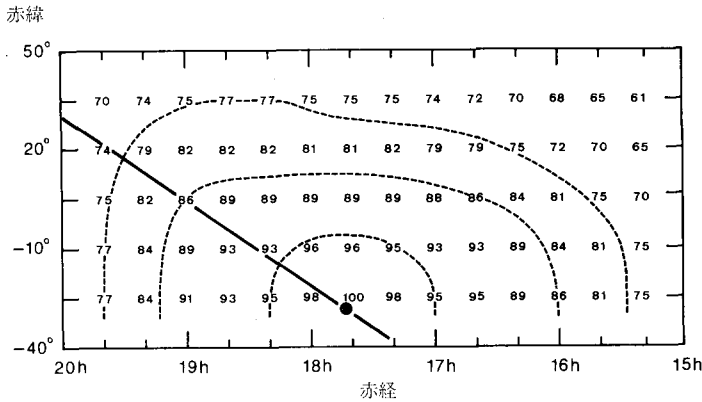
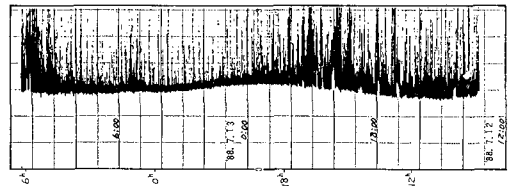


図9 3素子八木アンテナによる観測 (29.98 MHz) から求めた銀河電波の強度分布図。点線のカーブは等強度線を表す。実線と黒丸は、それぞれ銀河面および銀河中心の方向を示す。

▼ 図10 横浜こども科学館において、天頂方向に向けた3素子八木アンテナで観測された銀河電波の恒星日変化 (渡辺秀夫氏提供)。観測周波数は、30.01 MHzである。記録紙上に示されているのは日本標準時、下端に示されているのは地方恒星時である。



は、振れ幅は最大値を 100 として相対値で示されている。図9の3本の曲線(点線)は、振れ幅の等しい点を結んだものである。図9には銀河面(実線)と銀河中心(黒丸)も示されている。ビーム幅の広い(つまり、空間分解能が悪い)アンテナによるマッピングであるので、細かい構造まで分解することはできないが、銀河中心の方向で銀河電波が強くなっていることを確認することはできる。

6. 観測場所

私が観測を行った場所は、木星電波観測用のステーションを置いている三重県柘植町である。都市部から離れ、山に囲まれた場所で、混信は比較的少ない。他の場所ではどうであろうか。図10は、横浜こども科学館で、天頂方向に向けた3素子八木アンテナにより観測された銀河電波の恒星日変化である。横浜こども科学館は市街地よりやや離れてはいるが、すぐ近くを高圧送電線が通っているなど、必ずしも観測条件がよいとは言えない場所にある。したがって、常によい記録が取れるとは限らないようであるが、図10のように銀河電波の恒星日変

化を捕らえた記録も得られている。混信がかなりあっても、最小レベルをたどれば、銀河電波の恒星日変化は見ることができる。大阪市の中心部にある大阪教育大学でも、銀河電波は観測されている。大阪教育大学の録記では、夜間の混信が意外に少なく、夜間であれば、都市部でも銀河電波の観測はできるとの印象を持った。もう都会では見ることができなくなった天の川だが、電波では見ることができる。興味を持たれた読者の方々が、色々な場所で銀河電波の観測を試みられるよう期待したい。

次回は、簡単な電波望遠鏡による太陽の観測について述べる。