

## BS アンテナを利用した小型電波望遠鏡教具による部分日食の電波観測

松本 欣也\*

### Radio Observation of Partial Solar Eclipse by using Educational Portable Radio Telescope consists of BS Antenna

by

Kinya MATSUMOTO

(Received: 19 OCTOBER 2009, Accepted: 22 FEBRUARY 2010)

#### Abstract

The purpose of this study was to obtain useful finding for educational opportunity of astronomy and radio wave engineering. Therefore, we constructed simple automatic observation system that installed angle and pressure sensor in CARAVAN-35 on the market, and observed radio power strength of partial solar eclipse (PSE) in Kumamoto on July 22, 2009. We also observed it on the day before and after the phenomenon. According to the corrected data, time variation of radio strength showed good agreement compared with the degree of obscuration. Additionally, physical values such as atmospheric optical depth, temperature of radio source and receiver were able to be obtained. We propose radio observation of PSE as a good teaching opportunity that understands the difference of the characteristic of visible and radio through an actual astronomical phenomenon.

Key Word: Partial solar eclipse, Radio observation, BS antenna, Educational opportunity

#### 1. はじめに

##### 1.1 研究の概要

2009年7月22日に熊本で観測された部分日食における電波強度の変化を、BSアンテナを利用したSHF帯の小型電波望遠鏡教具CARAVAN-35<sup>1)</sup>を用いて観測した。本観測は、初中等および大学初年度の教育で利用可能な電波および天文学に関する動機づけ教材を開発する目的で実施した。直径35cmという電波天文分野では超小型のパラボラアンテナを用いて、部分日食時の電波強度の変化がどの程度検出できるのか、また観測を成功させる要因は何かについての知見を得ることが目的である。

##### 1.2 電波天文学 (科学) を支える人材の育成

Karl Guthe Janskyにより宇宙由来の電波が発見されて以来、電波天文学は急速な発展を遂げ天体物理学上の多くの知見をもたらした。電波天文学は、理学と工学、すなわち天体物理学と電波および通信工学を融合して新しい知見を生み出す総合科学の側面が強く、電子産業界を牽引してきた日本が技術面での先導的な貢献をなす分野である。現在、我が国の電波天文学は、宇宙空間に口径8mの電波望遠鏡を展開するVSOP(現在は完了しVSOP-2を検討中)、電波による精密な位置天文

学を行うVERA、月周回衛星の精密測位を行うRISE、国際協力による次世代ミリ波/サブミリ波電波望遠鏡としてのALMAなどの多数の計画が進行し、これらを支える人材の育成が課題である。

これらの人材の主な供給源は理学部であるが、工学部および生命系学部を含めた幅広い陣容の発掘が今後の発展を左右すると考えている。その一助として、本論文は初中等および大学初年度で利用可能な教材としての部分日食の電波観測をテーマとした。

##### 1.3 電波天文教材と部分日食

通常、天体からの電波は極めて微弱であり、電波天文学に簡易に触れる教具は実現が困難であった。しかし、BSアンテナを用いた種々の研究<sup>2)~7)</sup>が行われ、現在はCARAVAN-35の入手が可能になっている。しかし、BSアンテナを用いた小型電波望遠鏡によって部分日食を観測した例は報告されていない。

日食ではない通常の太陽電波の観測からは、いわゆる静かな太陽と荒れた太陽の観測が可能であるが、静かな太陽は変化が少なく、変化の大きな荒れた太陽は稀な現象で予測が困難である。これに対し、部分日食は予測が可能で、かつ皆既日食よりも発生頻度が高く、数時間で変動するため動機づけ教材として利用できる可能性が

\* 産業工学部電子知能システム工学科准教授

高い。熊本で観測可能な次回以降の部分日食には、2010年1月15日（食分0.571、17時33分、日没で途中まで）および2012年5月21日（食分0.932、7時24.2分）がある<sup>8)</sup>。

## 2. 観測方法

### 2.1 観測日および観測地

観測の日時と場所を Table 1 にまとめた。日食の当日だけではなく、前後日の観測を行った。気象条件については、3章の観測結果において述べる。

Table 1 Observation date, time and location

観測日	7月21日	前日（試験観測1）
2009年	7月22日	部分日食の当日
	7月23日	翌日（試験観測2）
観測場所	熊本市（東海大学熊本キャンパス新1号館屋上；経度 E130.74 [deg]、緯度 N32.81 [deg]、高度 50 [m]）	

### 2.2 観測システム

観測システムの構成を Fig. 1 に示す。NICT が開発しエレクトロデザイン社が販売している小型電波望遠鏡教具 CARAVAN-35 (Fig. 1 の破線部) が主要装置でありこれにアンテナの方位角と仰角を測定するセンサモジュール (Fig. 1 の sensor module、株パイテック TDS01 V を搭載) を付加した。このセンサモジュールは、気圧センサも内蔵している。

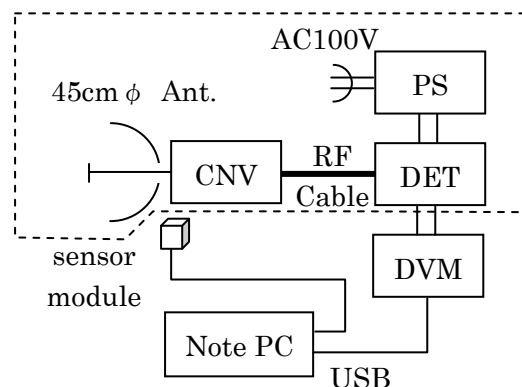


Fig. 1 Composition of the observation system

太陽電波強度を測定する方法を説明する。太陽電波 (11.7~12.0GHz、右旋円偏波) は直径 35cm の BS 放送受信用パラボラアンテナ (TDK(株)製 BS-TA352、利得 31.5dBi) の反射器で集光され一次放射器で電気信号に変換された後にコンバータ部 (CNV) で低雑音増幅と周波数変換が行われる。帯域幅 300MHz の中間周波数 (1035.98~1331.50MHz) が、マイクロ波検波増幅ユニット RFD-1500 (Fig. 1 の DET、入力周波数 0.15~2.5GHz) へ入力され電力に比例した電圧信号が得られる。この電圧を適切な時間間隔で自動記録する。したがって、

Fig. 1 は単純なマイクロ波放射計と同等である。使用した高周波ケーブル (MASPRO 製 S-5C-FB) は、特性インピーダンス 75Ω で F 型コネクタを有していた。DET の出力は電波強度に比例した 0~3V の直流電圧であり PC に取り込み可能なデジタル電圧計 (DVM、三和電気計器(株)製 PC20 および PC Link) で計測して USB インタフェース経由で PC に記録した。センサモジュールも別の USB ポートを使って同時に記録した。ここで PS は電源を表している。

観測システムの実際の様子を Fig. 2 に示す。毎回の設置を容易にし、悪天候にも迅速に対応するため、計測器類を1つにまとめ地面からの距離をとり AC 電源を1本化した。また、防水シートで覆う対策を講じた。センサモジュールの設置場所は、パラボラアンテナ背面部 (矢印) とした。

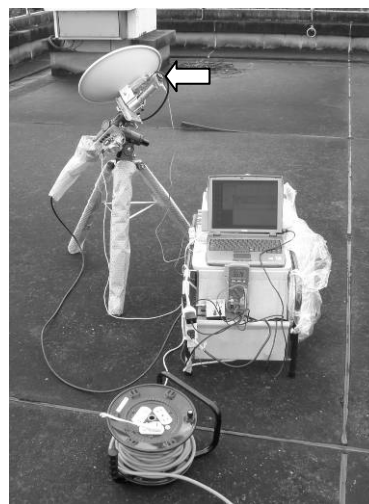


Fig. 2 Snapshot of actual observation system

観測の際に、パラボラアンテナを太陽に指向させ (pointing)、日周運動を追尾させる (tracking) 必要がある。追尾には赤道儀を導入し、ステップモータ1台を用いた追尾制御装置を製作した。追尾の確認については、赤経目盛を利用して研究室内で6時間程度の追尾試験を2度行った。なお、この実験はパラボラアンテナを実際に搭載した状態で行なった。6時間程度の追尾に問題は見られなかったが、恒星を利用した追尾実験は行っていないので、小さな誤差や短時間の変動が発生する可能性はある。また、赤道儀を用いた追尾を確実にするためには、赤道儀を水平に設置し極軸を天の北極に正確にあわせる必要があるが、日食現象は昼間に発生するので、移動設置型の本システムでは理想的な設置角度からのずれが避けられなかった。

太陽への指向を確認するには、太陽を中心として赤経および赤緯方向に走査して電波強度を測定する、いわゆる五点法観測が確実な手段である。しかし、追尾中の五

点法は制御が複雑であり、今回はより簡易な方法として太陽方向を向いたときにパラボラアンテナの一次放射器の影が消える現象を利用した簡易な指向確認方法を用いた。追尾停止中の五点法による強度の確認は、指向ずれの影響を測定するため最終日に実施した。

### 2.3 記録内容

USB インタフェース経由で記録した DVM とセンサモジュールの記録項目と測定の間隔を、各々 Table 2 と Table 3 に示す。センサモジュールには 3 軸加速度センサ (計測分解能 0.01[G])、3 軸磁気抵抗(MR)型地磁気センサ (計測分解能 0.1[μT]) およびピエゾ型気圧センサ (計測分解能 0.1[hPa]) が内蔵されており、モジュール内の CPU によって角度情報に変換されて PC へ転送される。PC には変換前のデータも記録した。

Table 2 Recording items of DVM

記録項目	時刻、電圧値、単位
時間間隔	0.35 [sec]

Table 3 Recording items of sensor module

記録項目	時刻、地磁気 3 成分、方位角 (azimuth)、加速度 3 成分、ひねり角(roll)、あおり角度(pitch)、気圧、相対高度
時間間隔	0.094 [sec]

## 3. 観測結果

### 3.1 前日の観測結果

対照実験を行うため、前日の同時刻の太陽電波強度の観測を試みた。前日の観測には、設置および観測作業の効率化の目的もあった。前日の熊本における気象 (午前 7 時) は、南西の風、曇り時々雨、降水確率 70% (6~12 時) であった。雷注意報が発表されていたので学生による屋上での作業は禁止した。午前 8 時には、時折晴れ間がある曇天で、降雨はなかったが強風であった。教員が行った準備作業を以下にまとめる。

- (1) 観測機器の配置と配線、防水シートの確認
- (2) 赤道儀の水平確認 (水準器を使用)
- (3) 自動記録を開始 (DVM、センサモジュール)
- (4) 大気電波強度の測定 (南、仰角 0.45,90[deg])
- (5) 赤道儀の極軸合わせ (方位磁石、仰角目盛)
- (6) 太陽の電波強度の測定 (簡易な指向確認)
- (7) 自動追尾を開始 (自動記録は(3)で開始済)

以上の設定作業を終えて 9 時 23 分から自動記録の状態に入ったが、9 時 58 分に天候が急激に悪化し強風を伴う豪雨となった。停滞していた梅雨前線が活性化し局地的な豪雨で、センサモジュールの気圧センサに急激

な気圧の低下が記録された (Fig. 3)。3 日間のうち急激な気圧変化を記録したのは前日のみであった。

太陽電波観測に悪天候がどのような影響を与えるかを記録するため、防水シートで覆った機材による自動観測を継続した。太陽光による影が得られなかったため 10 時以降は指向確認の無いデータとなった。

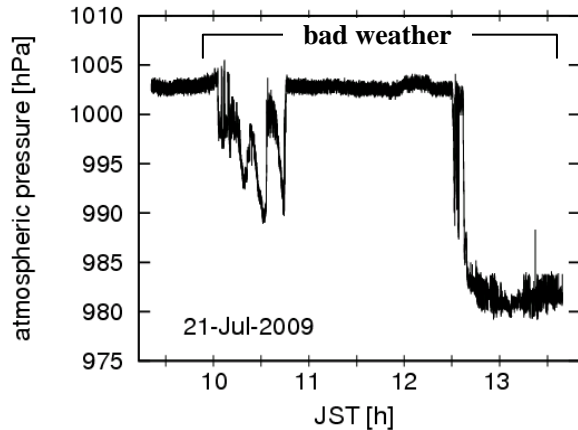


Fig. 3 Output data from pressure sensor on July 21, 2009

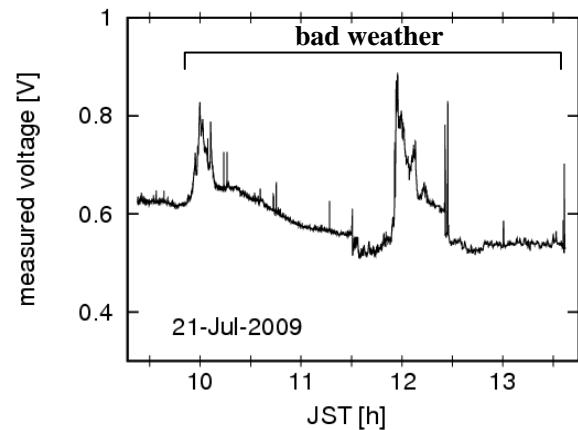


Fig. 4 Radio strength toward sun direction on July 21, 2009

悪天候下での太陽電波強度の計測結果を Fig. 4 に示す。準備作業中に行った簡易な指向確認による太陽電波強度の計測電圧は 0.635 [V] であった。追尾が完全であれば、計測電圧に変化は表れない。10 時までの計測電圧はこの特性を示したが、その後は大きな変動を示した。静かな太陽からは放射されない 0.8 [V] 近辺の数値が 2 回記録されているが、これは気圧変化と相関があり太陽からの放射ではない。急激な気圧低下の直前に発生した豪雨により周囲が水滴に囲まれたこと、またパラボラ面の防水シートに水が溜まったことの両方の影響である。

対照実験として利用が可能な前日のデータは 9 時 58 分までのデータとなったが、悪条件下の太陽電波観測データの変化の様子は初めての報告である。天候が安定していた 9 時 30 分までの太陽電波強度の観測データを Fig. 5 に示す。パルス状のデータは計測システムの問題 (強

風による指向ずれ、自然および人工雑音の混入等)と考えられる。理想的には時刻によらず固定となるべきであるが、緩やかな減少傾向が観測された。

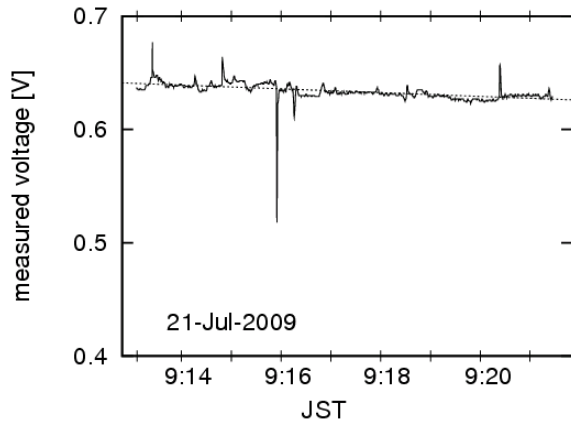


Fig. 5 Radio strength in good weather on July 21, 2009

緩やかな減少傾向をモデル化するため、式(1)で直線近似を行った (Fig. 5 の破線)。ここで、 $t$  は観測開始からの経過時間 [h] である。

$$V_{fit}(t) = -0.1029 t + 0.6407 \quad (1)$$

緩やかに減少する理由は、設置および追尾のずれが追尾時間の増大につれて徐々に拡大していく指向誤差の影響であると考えている。

### 3.2 当日の観測結果

熊本における部分日食の進行状況は、開始が9時37分50秒、食の最大が10時57分04秒で食分 $\gamma=0.922$ 、終了が12時19分32秒であった<sup>8)</sup>。当日の天候は良好で、気圧センサの出力は安定していた (Fig. 6)。

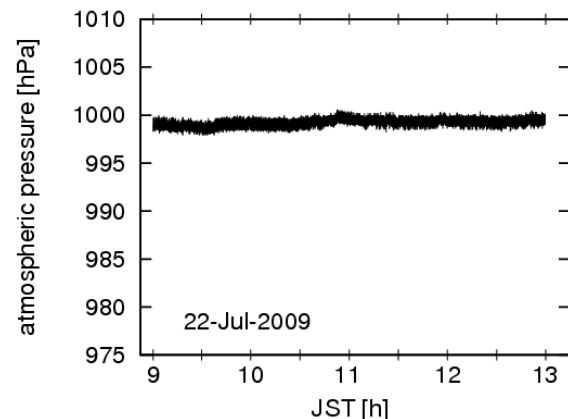


Fig. 6 Output data from pressure sensor on July 21, 2009

Fig. 6には、食分に相関をもつ微弱な気圧変化が記録されているように見えるが、測定誤差の範囲内であり本稿ではこの現象については解析しない。

日食時の太陽電波強度の計測データを Fig. 7 に示す。日食時の太陽電波強度は、大まかには食分の変化と逆の変化をする傾向を示している。しかし、9~10時および

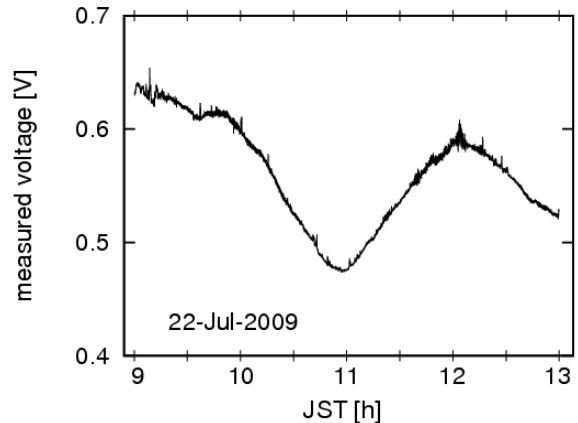


Fig. 7 Radio strength toward sun direction on July 22, 2009

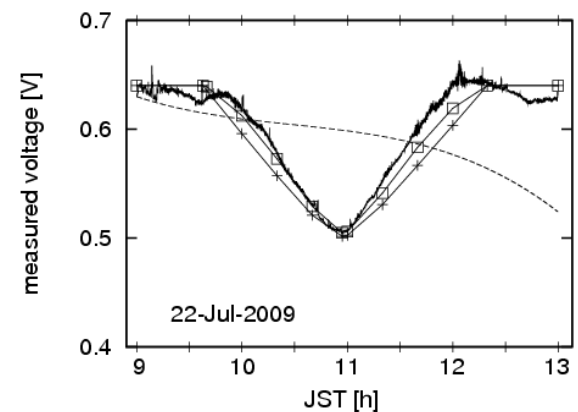


Fig. 8 Modified radio strength of the partial solar eclipse on July 22, 2009 in Kumamoto at 12GHz

12~13 時に見られる緩やかな電圧の減少傾向が影響して、物理的な情報が得られない。この傾向は Fig. 5 と同じ問題の存在を示しており、単純な一次式で除去を試みたが除去しきれなかった。そこで前後の時間帯の傾向に相当する2個の一次式 $V_L(t)$  および $V_R(t)$  を、時間の推移に応じて $1-a^2:a^2$  (ただし $a=[0,1]$ ) の割合で混合する式(2)を用いて除去した。減少傾向 $V_{fit}(t)$  を Fig. 8 の破線で示す。

$$V_{fit}(t) = V_L(t) \left\{ 1 - \left( \frac{t}{4} \right)^2 \right\} + V_R(t) \left( \frac{t}{4} \right)^2 \quad (2)$$

$$\text{ここで、} \begin{cases} V_L(t) = -0.032 t + 0.630 \\ V_R(t) = -0.086 t + 0.868 \end{cases}$$

$V_{fit}(t)$  を仮定し、式(3)によって観測データ $V_{obs}(t)$  の修正を行った。修正後のデータ $V_{mod}(t)$  を Fig. 8 の実線で示す。これにより、右下がりの傾向が補正できた。

$$V_{mod}(t) = V_{obs}(t) - V_{fit}(t) + 0.630 \quad (3)$$

日食の進行状況と比較するため食分 $\gamma$ に応じた変化の様子を Fig. 8 に折れ線 (+ および □印) で加えた。 $\gamma$  の計算値は文献<sup>8)</sup>から引用した。+印は、 $1-\gamma$  に比例した量 $V_{do}(\gamma)$  を式(4)によって計算したもののだが、食分の定義は太陽と月の角距離に基づくため電波強度と比

較できない。

$$V_{do}(t) = 0.630 - 0.2(1-\gamma) \quad (4)$$

そこで、隠蔽されない光球の面積 $V_{do2}(\gamma)$ を計算して□印で示した。 $V_{do2}(\gamma)$ の計算には、簡単化のために太陽と月の視直径を同一とした計算式を用いた。補正後の電波観測データ $v_{mod}(t)$ は食分から計算した面積の変化 $V_{do2}(\gamma)$ とよい相関を示した。このことは、部分日食における12GHz帯の太陽電波強度の観測が目視によって直感的に得られる結果と比較しやすく、わかりやすい教材としての利用価値があることを示している。



Fig. 9 Projected image of partial solar eclipse on the ground

Fig. 9 は、関連する情報として付記するもので、食の最大時に小さな穴（直径1mm程）を通して地面に投影した部分日食の像である。像の場所を指で指し示している。このデータは、デジタルカメラで安全に取得できる観測データであり、動機づけ教材として部分日食の電波観測を行うときに記録するデータとして有用である。

### 3.3 翌日の観測結果

翌日の天候は良好であった (Fig. 10) が、バランスウェイトと三脚の接触によって自動追尾が停止した。そのため、電波強度データ (Fig. 11) は10時付近で最低となった。以後の激しい変動は、手動による追尾の影響を示している。気圧センサの出力が一部途絶えているのは13時30分から再開した時間帯において、五点法による指向確認、大気の光学的深さ、および太陽の輝度温度の測定を行ったためである。

指向ずれにより電波強度がどの程度弱まるか調べるため赤道儀の赤経および赤緯目盛環の最小目盛を利用して五点法による電波強度観測を行った。五点法は、指向中心とそれを囲む上下左右4点の合計5点の電波強度を観測する方法である。しかし、使用した目盛環の最小間隔がビームの半値幅より大きかったため、有効な測定データを得られなかった。影を利用した簡易な指向調整を行った記録から、一次放射器の影を利用した簡易な指向調整方法では2% (0.014[V]) 程度ピーク値が減少する可能性があることがわかった。

地上の電波望遠鏡による全放射電力の測定は大気中の水蒸気による減衰を受けるので、大気の光学的深さを

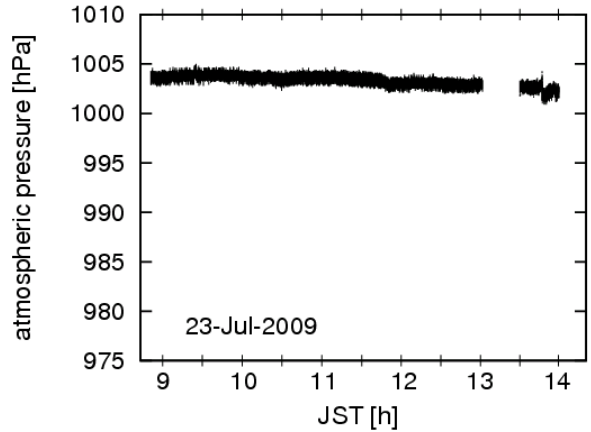


Fig. 10 Output data from pressure sensor on July 23, 2009

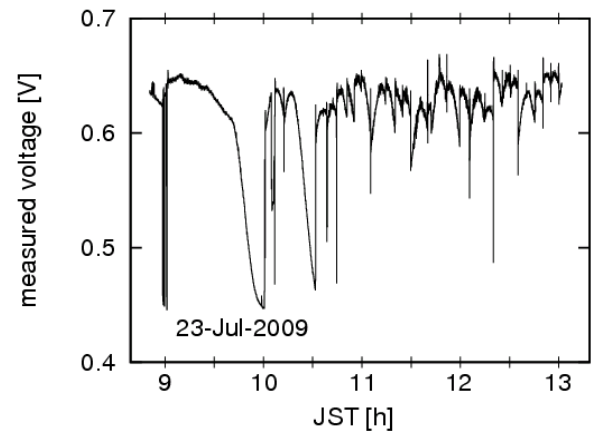


Fig. 11 Radio strength toward sun direction on July 23, 2009

測定できる。大気だけを様々な仰角で観測した場合、大気によるアンテナ温度は天頂方向で $\tau_0 T_{sky}$  ( $Z=0$ )であるのに対して、低仰角の $T_{sky}$ は式(5)に従って変化する。したがって、受信電力 $P_{sky}$ は低仰角ほど強く観測される。本システムの場合、電力も温度も電圧に比例するため、便宜上、これらを混在して扱う。ここで、 $\tau_0$ は天頂方向での大気の光学的深さ、 $Z$ は天頂から指向方向への角度（天頂距離）、 $T_{rx}$ は受信機雑音をアンテナ温度に換算した値、 $k$ は換算のための比例定数である。

$$T_{sky} = T_{sky}(Z=0) \tau_0 \sec Z \quad (5)$$

$$P_{sky} = k(T_{sky} + T_{rx}) \quad (6)$$

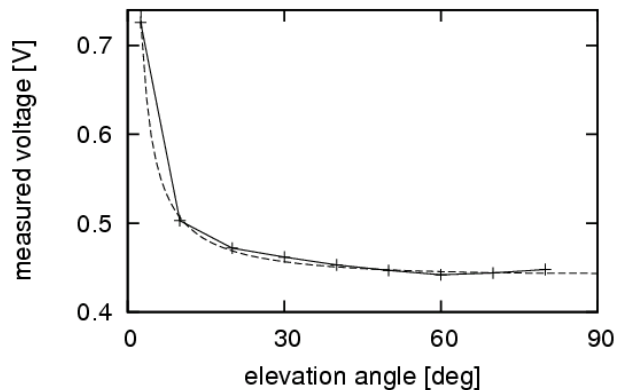


Fig. 12 Atmospheric radio power v.s. elevation angle



大気のみを様々な仰角で観測した結果を Fig. 12 の実線で示す。破線は、式(5)および式(6)でモデルフィットを行った結果で、 $T_{sky}(Z=0)=0.444$  [V]、 $T_{rx}=0.430$  [V] および  $\tau_0=0.03$  を用いた。

太陽の輝度温度の測定は、温度 30[°C]の電波吸収体をパラボラアンテナの直前に置いて計測した電圧  $T_{hot} + T_{rx} = 0.87$  [V] および、天頂に向けた場合の計測値  $\tau_0 T_{sky}(Z=0) + T_{rx} = 0.43$  [V] の差  $T_{hot} - \tau_0 T_{sky}(Z=0) = 0.44$  [V] であり、これが 303[K]の黒体放射を行う電波吸収体と、3[K]の黒体放射を行う天頂との差を与えるので電圧を温度に換算することができる。これにより、 $T_{rx} = 293$  [K] を得た。また、典型的な太陽電波の計測電圧が  $T_a + T_{rx} = 0.65$  [V] なので、太陽電波のアンテナ温度  $T_a = 0.22$  [V] = 152 [K] となる。太陽の視直径  $\theta_{sun} = 0.5$  [deg] がパラボラアンテナの主ビーム幅  $\theta_a \approx \lambda / D = 4.0$  [deg] に比べて小さな広がりしかもたないので、下式により 12GHz における太陽の輝度温度  $T_B$  は、

$$T_B = T_a \frac{\Omega_a}{\Omega_{sun}} = T_a \left( \frac{\theta_a}{\theta_{sun}} \right)^2 \quad (7)$$

$$= 9700 \text{ [K]}$$

となり、彩層の輝度温度 7000~10000[K] とよい一致を示す結果を得た。

### 3.4 センサモジュールによる角度検出について

#### 3.4.1 方位角センサ

センサモジュールで取得した方位角 (azimuth) のデータを示す。当日のデータ (Fig. 13 中) は分散が少なく良好だが、前日のデータ (Fig. 13 上) は悪天候の影響があり、翌日のデータ (Fig. 13 下) は 9 時 40 分あたりに自動追尾の停止による影響が見られる。

良好な計測データ (Fig. 13 中) においても、予測値 (破線) からの偏差が大きく実用的でない結果を得た。方位角センサは地磁気 3 成分から方位を判定しているので、伏角のずれと近辺の磁気源の存在により異常な結果を与える。金属製の赤道儀とパラボラアンテナ固定具により生じた磁場が観測データを乱した原因であると考えている。

#### 3.4.2 仰角センサ

センサモジュールで取得した仰角 (pitch angle) のデータを示す。仰角センサは、鉛直方向の重力加速度を基準にしているので、方位角センサと異なり正常なデータを出した。ただし、予報値 (破線) に対して 5[deg] のオフセットが見られた。これは、センサの取付け角度の誤差であると考えている。

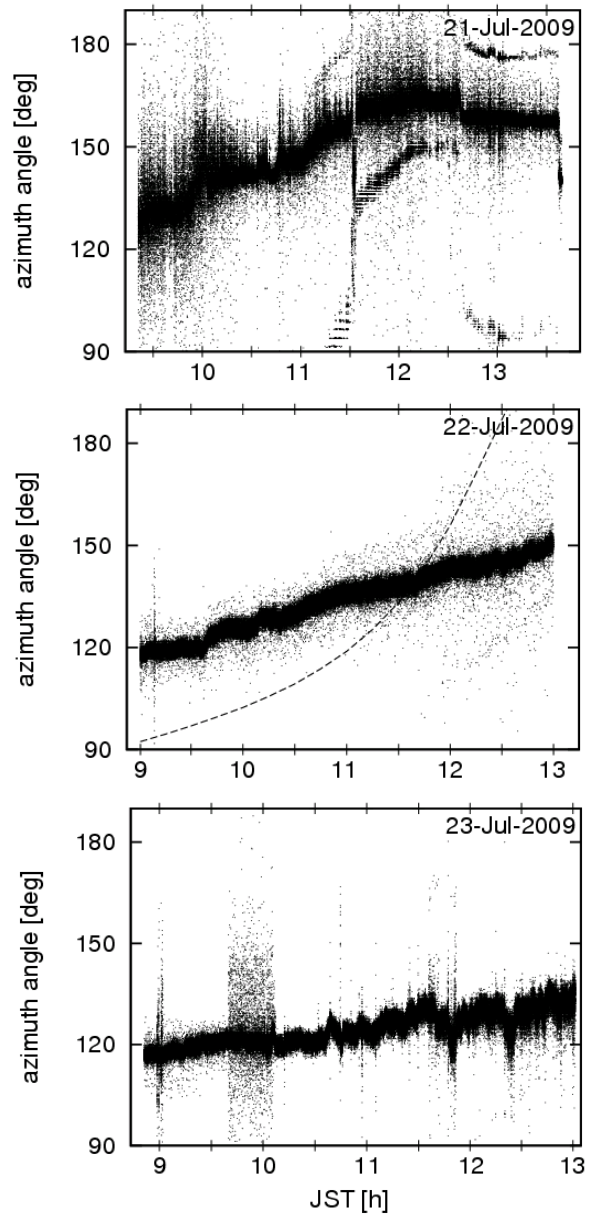


Fig. 13 Output data from azimuth angle sensor  
(Top: 21-Jul-2009, Mid.:22-Jul-2009, Bottom: 23-Jul-2009)

Fig. 14 は、日食後の正午過ぎまで追尾を行ったため太陽の南中を捉えている。熊本で観測したため、日本標準時の正午より遅い南中が記録データから読み取れる。各観測日ごとの様子については、前日のデータ (図 14 上) には強風によるアンテナの指向変化とセンサが外れた影響が見られる。翌日のデータ (図 14 下) は、当日のデータ (図 14 中) と類似しているが、9 時 40 分頃に発生した追尾装置の停止による影響が観察できる。

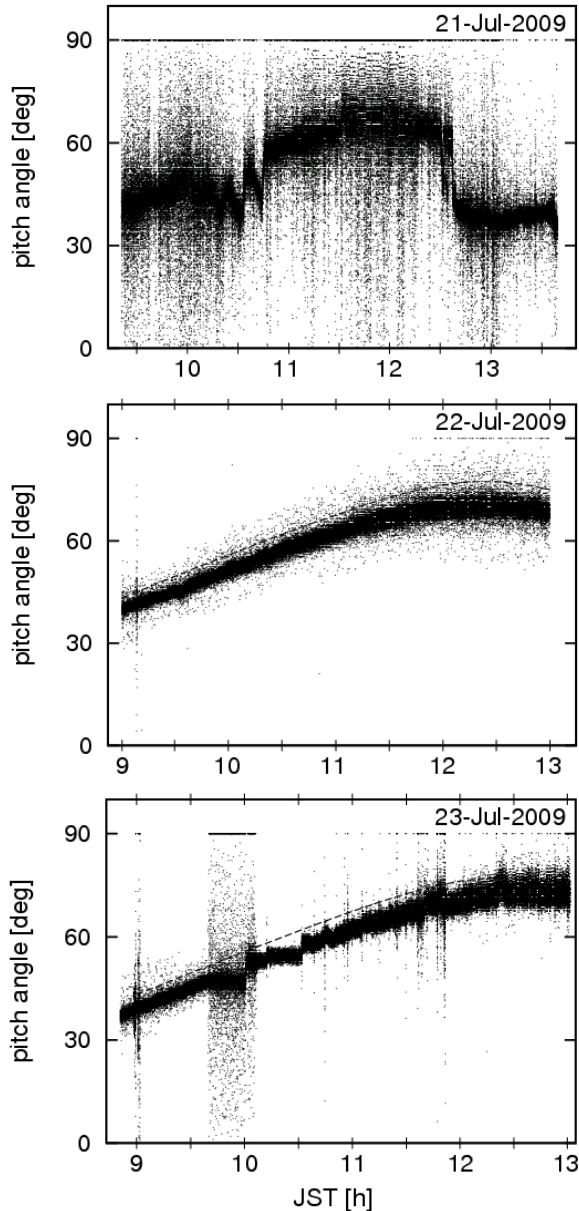


Fig. 14 Output data from pitch angle sensor

(Top: 21-Jul-2009, Mid.:22-Jul-2009, Bottom: 23-Jul-2009)

#### 4. まとめ

本研究では、小型の教具では観測が困難な電波天文学の動機付け教材を開発するため、部分日食の電波観測を実施した。当日は気象条件がよく、設置ずれに起因する強度低下を後処理で補正することにより、部分日食の食分の変化とよい相関をもつ電波観測結果を得た (Fig. 8)。

翌日の観測から、一次放射器の影を利用した簡易な指向確認では、影をなくした状態でも指向ずれが発生して強度が2%低下するデータを得た。加えて、観測周波数12 [GHz]における天頂方向の大気の光学的深さが0.03、アンテナ温度に換算した受信機雑音温度が293[K]、太陽の輝度温度9700[K]であったことが明らかとなった。

得られた太陽の輝度温度は、観測周波数における放射域とよい一致を示した。

CARAVAN-35 を用いて部分日食による電波強度の変化が捉えられ物理量も測定できたデータは初めての結果であり、小型電波望遠鏡教具を使った電波天文学の教材としての提案を行う。観測を試行する際の注意事項として、移動式の赤道儀では設置角度のずれが結果に大きく影響すること、方位角センサが機能しない可能性があること、悪天候下では観測が困難であることが挙げられ、各々について実際のデータを用いて影響を報告した。

謝辞 研究室の荒木謙一君には、観測およびシステム構築の補助をしていただきました。感謝いたします。

#### 引用文献

- 1) J. Nakajima: CARAVAN-35, Small Radio Telescope Package Released, IVS NICT Tech. Dev. Center News, 24, (2004), p.23.
- 2) 工藤 順次: BS アンテナで見た太陽電波, 天文月報, 87(4), (1994), pp.155-158.
- 3) 池田 秀昭: BS アンテナによる太陽観測と学習への適応, 日本天文学会 1994 年秋季年会, (1994).
- 4) 渡辺 進武, 川上 紳一: 2004 年 10 月 14 日の部分日食の観測を取り入れた中学校理科授業の実践: 天体望遠鏡(スピカ)による観測と出前授業による動機づけ, 岐阜大学教育学部研究報告. 自然科学, 29, (2005), pp.21-25.
- 5) 尾久土 正己, 佐藤 奈穂子, 藤沢 健太, 富田 晃彦, 石塚 互, 佐藤 敏行, 塩川 貴之, 近多 健輔, 雪谷 俊之, 半田 利弘: 中性水素 21cm 輝線用の小型電波望遠鏡の製作と高校での天の川の観測実習, 地学教育, 60(5), (2007), pp.171-178.
- 6) 當村 一郎, 東 智彰: BS アンテナによる 12GHz 太陽電波放射と H $\alpha$  線太陽像の同時観測(学術研究), 大阪府立工業高等専門学校研究紀要, 40, (2006), pp.11-20.
- 7) 時政 典孝: BS アンテナ電波望遠鏡で7/22 部分日食を観察しよう (特集:2009 日食), 天文教育, 21(3), 98, (2009), pp.7-9.
- 8) 国立天文台: 暦計算室日食各地予報, [http://www.nao.ac.jp/koyomi/koyomix/eclipse\\_s.html](http://www.nao.ac.jp/koyomi/koyomix/eclipse_s.html) (2009 年 9 月現在)
- 9) 甲斐敬造: 電波天文, 恒星社厚生閣, 1982, p.107.

