

卒業論文

衛星放送用アンテナを用いた
電波望遠鏡の製作と太陽電波観測

2012 年度
(平成 23 年度)

茨城大学部理学部理学科

学際理学コース

09S6002T
安達 祐香

目次

1.はじめに	2
2.電波の物理的特性	3
3.電波望遠鏡	5
3.1 電波望遠鏡の構成	5
3.2 アンテナの受信電力と有効アンテナ開口面積	6
3.3 ビーム立体角と有効アンテナ開口面積の関係	7
3.4 アンテナ温度	8
4.太陽電波の観測	
4.1 観測手法	10
4.2 実験装置	10
4.3 チョッパー・ホイール法	11
4.4 観測結果	12
4.5 考察	16
4.6 まとめと課題	16
参考文献	

1.はじめに

電波望遠鏡とは、天体からくる電波を集光し、そこから天体に関する情報を抽出することのできる装置である。本研究では、衛星放送用アンテナを用いた小型電波望遠鏡を整備・製作することで電波望遠鏡の仕組みと電波の基礎を学ぶことを目的とした。また、この電波望遠鏡を用いて太陽電波の観測を行い、性能測定を行った。既存の正常に動作する電波望遠鏡と、新たに整備した電波望遠鏡の2台で同時に太陽電波を観測し、結果から得られる太陽の輝度温度を比較したところ、同日・同時刻に観測したデータであるにも関わらず、得られた輝度温度が大きく異なっている日があった。この実験結果から、整備した電波望遠鏡が正しく動作しているかを評価した。

2.電波の物理的特性

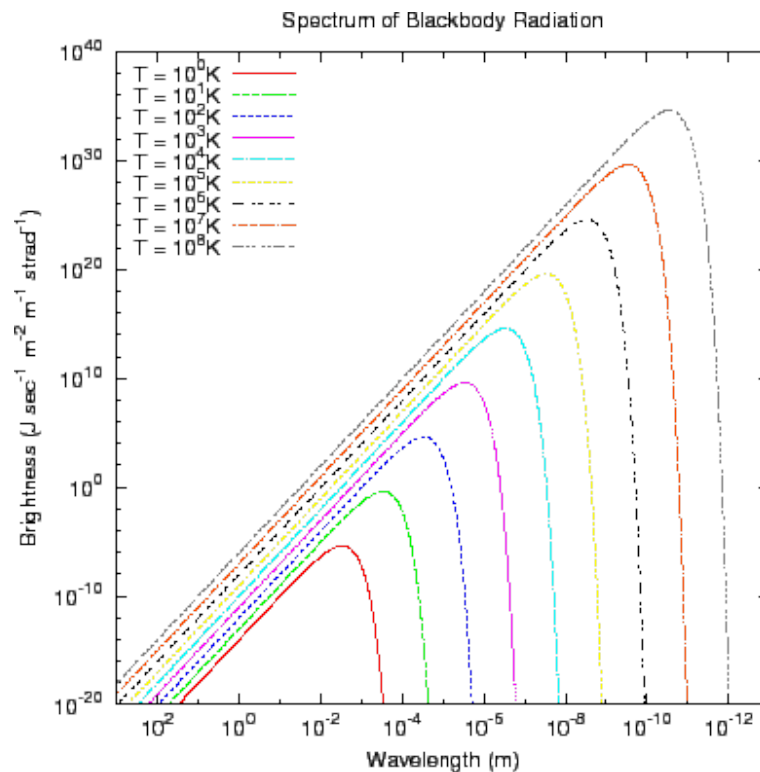
全ての物体は、主に温度で決まる電波を出している。あらゆる周波数の電磁波を完全に吸収する物体を黒体という。この黒体の輻射は温度によってどのように変化するかを以下で説明する。黒体輻射のスペクトルは、プランクの式で表わされる。 ν は周波数、 h はプランク定数、 k はボルツマン定数である。

$$B_{\nu}(T) = \frac{\frac{2h\nu^3}{c^2}}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}.$$

単位波長幅当たりで書き直すと、

$$B_{\lambda}(T) = \frac{\frac{2hc^2}{\lambda^2}}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}$$

となる。これをグラフに表すと次のようになる。縦軸が単位周波数における輝度 [$\text{J sec}^{-1} \text{m}^{-2} \text{m}^{-1} \text{strad}^{-1}$]、横軸が波長の長さ [m] である。



※<http://s3b.astro.ncu.edu.tw> より引用

このグラフより、温度が高くなるにつれてピークが波長の短い方に移り、かつ輝度が大きくなっていることが分かる。

- ・レイリー–ジーンズ近似

$h\nu/kT \ll 1$ のとき、 $B_\nu(T)$ は次のように表わされる。

$$B_\nu(T) \approx \frac{2\nu^2}{c^2} kT = \frac{2kT}{\lambda^2}.$$

- ・ウィーン近似

逆に、 $h\nu/kT \gg 1$ のときは

$$B_\nu(T) \approx \frac{2h\nu^3}{c^2} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)$$

となる。

黒体面が半空間に出すエネルギーフラックスはステファン–ボルツマンの法則より、

$$\int_0^\infty \pi B_\nu(T) d\nu = \sigma T^4$$

となる。ただし、 σ はステファン–ボルツマン定数と呼ばれ、

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.67 \times 10^{-8} [\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-4}]$$

である。

この式から、エネルギーフラックスは、温度の 4 乗に比例することが分かる。

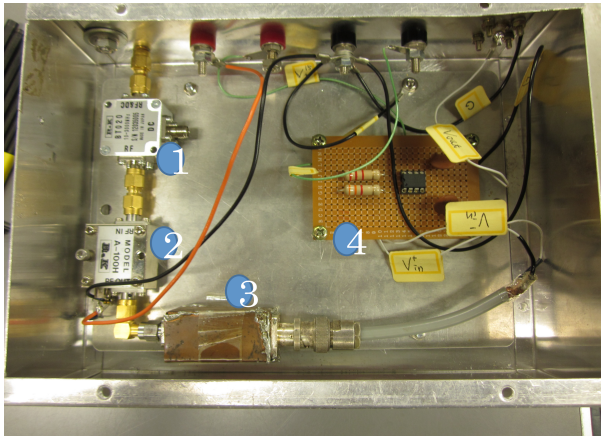
3.電波望遠鏡

3.1 電波望遠鏡の構成

電波望遠鏡は大きく分けてアンテナ、受信機、検波器または分光器、計算機によって構成されている。実験使用した電波望遠鏡は、家庭用 BS アンテナを利用した小型のものであるが、世界で稼働している主要な電波望遠鏡とほぼ同じ構成である。

(1) アンテナ・・・天体からの電波を集め、指向性を持たせる装置である。

(2) 受信機・・・天体からの高い周波数で微弱な信号を、容易に取り扱うことが出来る強度と周波数をもった信号に変換する働きがある。主に周波数変換機と増幅器によって構成されている。写真は実際に整備した受信機の内部である。



①バイアス T・・・受信機内にある 1.5GHz 帯アンプ、検波器、DC アンプを適切に動作させるために、これらに直流電圧を加える部品。

②1.5GHz 帯アンプ・・・もともとアンテナがとらえる周波数は 10GHz であるが、この受信機に入る前に 1.5GHz に周波数変換されている。このアンプは、その周波数変換された信号を増幅させる部品。

③検波器・・・入力された電波全体の強さに比例した信号を取り出す部品。

④DC アンプ・・・検波された数ミリボルトの信号を増幅させる部品。

これらのうち、バイアス T を取り換えることで 2 台の受信機を動かせるようにした。

(3) 検波器または分光器・・・天体からの電波のスペクトルには大きく分けて連続波と線スペクトルがある。連続波観測では、広い周波数の電波をそのまま 2 乗検波器で検波する。一方、分光観測では、分光器で天体の出す線スペクトルを受信する。一般的には、電波望遠鏡に電波分光計を接続することで、周波数成分が分解される。

3.2 アンテナの受信電力と有効アンテナ開口面積

アンテナにある方向から電波が到来する場合を考える。電波の到来方向に向いたアンテナの面積は $A\cos\theta[\text{m}^2]$ 、またその電波により運ばれる単位時間当たりのエネルギーはポインティングベクトル $S[\text{Wm}^{-2}]$ で表わすことが出来るので、そのアンテナに入射する電力 $W[\text{W}]$ は

$$W=SA\cos\theta$$

となる。電波望遠鏡では (θ, ϕ) の方向にある立体角 $\Omega[\text{sr}]$ のひろがりをもった天体からの電波がアンテナに入射することになる。また、実際の天体は一様に光っているわけではなく、天体方向から到来する電波の単位面積、単位周波数、単位立体角あたりの電力、すなわち天体の輝度は輝度分布 $B_v(\theta, \phi)[\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{Hz}^{-1}]$ を持つ。したがってその電波により運ばれる単位時間あたりのエネルギーは、天体方向でアンテナの全開口面積に対して積分するとアンテナに入射する周波数あたりの電力 $W_v[\text{WHz}^{-1}]$ になる。

$$W_v=A\iint_{\Omega} B_v(\theta, \phi)\cos\theta d\Omega$$

また、アンテナでは到来した電波が集められ、それが受信機（フロントエンド）で電気信号に変換されるが、一台の受信機は電波の持つ二つの偏波のうち1偏波しか原理的に受信できない。したがって、 (θ_0, ϕ_0) の方向にアンテナが向いたときに受信される電波の電力は

$$\begin{aligned} W_v(\theta_0, \phi_0) &= \frac{1}{2}A_e \iint_{4\pi} P_n(\theta - \theta_0, \phi - \phi_0) B_v(\theta, \phi) d\Omega \\ &= \frac{1}{2}A_e \iint_{4\pi} P_n(\theta - \theta_0, \phi - \phi_0) B_v(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi \end{aligned}$$

である。ただし、 A_e は天体からの信号を集光する際に有効に働く部分の面積（天体に向けたことにより、 $\cos\theta=1$ になる）で、これを有効アンテナ開口面積 $[\text{m}^2]$ と呼ぶ。これはアンテナの主ビームを電波の到来方向に向けたときに電波をさえぎる面積にあたる物理的アンテナ開口面積 $A_p[\text{m}^2]$ とは異なる。実際のアンテナの面精度や反射率などのためにこの A_p に到達する電波のすべてを受信できるわけではない。この二つの面積の比をアンテナ開口能率 η_A といい、

$$\eta_A \equiv \frac{A_e}{A_p}$$

で与えられる。

3.3 ビーム立体角と有効アンテナ開口面積の関係

温度 T の黒体でできた空洞の中にアンテナがあると考え。アンテナには抵抗 R が接続されているとする。レイリー-ジーンズの近似を仮定すると空洞の内側表面の輝度は一定であり $I_v = 2kT/\lambda^2$ である。したがって、全ビーム立体角 Ω_A 、有効アンテナ開口面積 A_e のアンテナで受信できる電力は

$$W_{v,in} = \frac{1}{2} I_v \Omega_A A_e = \frac{kT \Omega_A A_e}{\lambda^2}$$

である。 $1/2$ は 1 偏波のみが受信できることを表わす。また、アンテナにつながった抵抗から出力される雑音の電力はナイキストの法則から

$$W_{v,out} = kT$$

である。この電力がアンテナから放射されている。もし、この空洞内部がアンテナも含め熱力学平衡にあれば、詳細釣り合いが成立して $W_{v,in} = W_{v,out}$ になるはずである。したがって、

$$\frac{kT \Omega_A A_e}{\lambda^2} = kT$$

$$\Omega_A A_e = \lambda^2$$

となる。

3.4 アンテナ温度

輝度分布 $B_v(\theta, \phi)$ をもつ天体の方向 (θ_0, ϕ_0) に電力アンテナパターン $P_n(\theta, \phi)$ のアンテナが向いたときに受信される電力 $W_v(\theta_0, \phi_0)$ は以下のように表わされる。

$$\begin{aligned} W_v(\theta_0, \phi_0) &= \frac{1}{2} A_e \iint_{4\pi} P_n(\theta - \theta_0, \phi - \phi_0) B_v(\theta, \phi) d\Omega \\ &= \frac{1}{2} A_e \iint_{4\pi} P_n(\theta - \theta_0, \phi - \phi_0) B_v(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi \end{aligned} \quad (1)$$

この雑音電力にナイキストの法則をあてはめて

$$W_v(\theta_0, \phi_0) = k T_A(\theta_0, \phi_0)$$

と表現される。ここで、温度 T_A はアンテナ温度と呼ばれる。言い換えるとアンテナ温度は、アンテナから出力されるのと同じ周波数あたりの電力を出力する抵抗の温度と等しい。また、輝度分布 $B_v(\theta, \phi)$ を輝度温度の角度分布 $T_B(\theta, \phi)$ で表わすと、

$$B_v(\theta, \phi) = \frac{2k T_B(\theta, \phi)}{\lambda^2}$$

となる。これを(1)式に代入すると

$$T_A(\theta_0, \phi_0) = \frac{A_e}{\lambda^2} \iint_{4\pi} P_n(\theta - \theta_0, \phi - \phi_0) T_B(\theta, \phi) d\Omega$$

となる。これにビーム立体角と有効アンテナ開口面積の関係を使って整理すると、

$$T_A(\theta_0, \phi_0) = \frac{A_e}{\lambda^2} \iint_{4\pi} P_n(\theta - \theta_0, \phi - \phi_0) T_B(\theta, \phi) d\Omega / \iint_{4\pi} P_n(\theta, \phi) d\Omega$$

となる。

地上の電波望遠鏡は大気層（天頂での大気の光学的厚さを τ 、天頂からの角度を Z とする）を通して天体を観測し、望遠鏡も電波を損失しながら（望遠鏡の効率 η ）受信機に伝える。このため実際に観測されるアンテナ温度 T_A と大気圏外で観測される（すなわち大気の吸収が補正された）アンテナ温度 T_A^* には

$$T_A^* = \frac{T_A \exp(\tau \sec Z)}{\eta}$$

という関係がある。

天体の広がり Ω_{source} とビーム立体角 Ω_A の関係からアンテナ温度と輝度温度との関係は以下ようになる。

・ $\Omega_{\text{source}} \ll \Omega_A$ の場合

ビーム立体角 Ω_A より天体のひろがり Ω_{source} が小さい場合は

$$T_A^*(\theta_0, \phi_0) \simeq \frac{T_B \Omega_{\text{source}}}{\Omega_A} < \bar{T}_B$$

となる。このように天体の広がりとはビーム立体角との比だけアンテナ温度が真の天体温度

よりも小さく観測されることをビームダイリューションと呼ぶ。

・ $\Omega_{\text{source}} = \Omega_{\text{M}}$ の場合

天体の広がり主ビームとほぼ同じときは

$$T_A^*(\theta_0, \phi_0) \simeq \frac{\bar{T}_B \Omega_{\text{source}}}{\Omega_A} = \eta_{\text{M}} \bar{T}_B$$

となる。ただし、 η_{M} は主ビーム効率である。したがって、このような広がり天体ではアンテナ温度を観測することにより天体の輝度温度を推定することが出来る。しかし、この場合に求まる輝度温度がビーム内で平均化された輝度温度であることは注意すべきである。

・ $\Omega_A < \Omega_{\text{source}}$ の場合

大きく広がった天体の場合は厳密には以下の定義式

$$T_A^*(\theta, \phi) = \frac{A_e}{\lambda^2} \iint_{4\pi} P_n(\theta - \theta_0, \phi - \phi_0) T_B(\theta, \phi) d\Omega / \iint_{4\pi} P_n(\theta, \phi) d\Omega$$

をそのまま使うしかないが、近似的には前方散乱能率と呼ばれる η_{f} を導入して

$$T_A(\theta_0, \phi_0) \simeq \eta_{\text{f}} \bar{T}_B$$

と表わされる。

4. 太陽電波の観測

3 章までに記述した、電波天文学の基礎を踏まえた上で、BS アンテナを改造した小型電波望遠鏡を用いて、太陽電波観測を行った。

4.1 観測手法

(1)電波望遠鏡を屋外に移動し、設置する。

三脚による方向転換と赤緯軸を使った高度角の調節により、太陽を捕捉する。

(2)太陽を捉えたら、出力電圧を測定する。

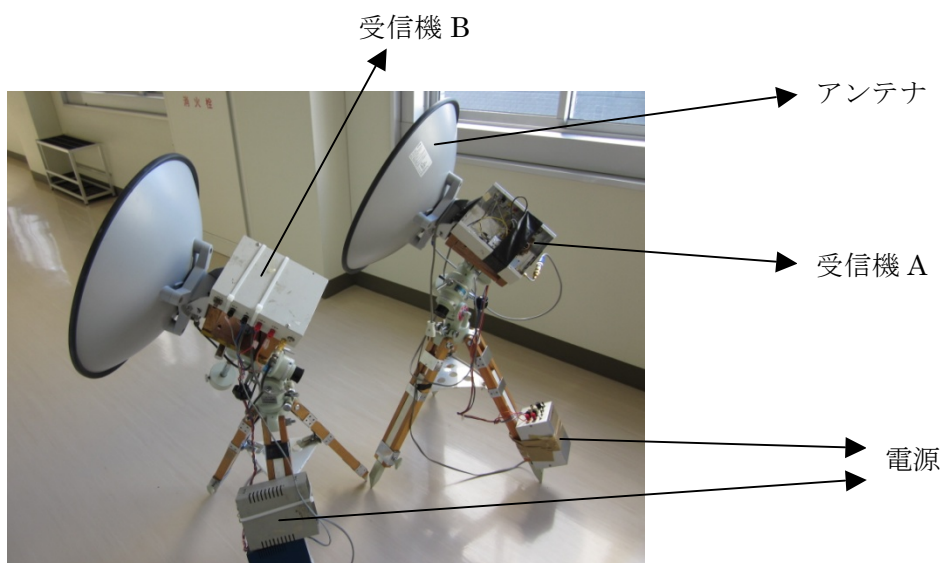
(3)フィードホーンの前に T_{amb} (=周辺の温度) の電波吸収体をかざした時の出力電圧を測定する。

(4)電波吸収体を外し、三脚を回転させ、太陽と同高度で反対方向の空に向ける。このときの出力電圧を測定する。

(5)得られた 3 つの出力電圧の値から、チョッパー・ホイール法を用いて太陽の輝度温度を計算する。

4.2 実験装置

アンテナで捉えられた 10GHz 帯の電波はアンプで増幅されたのちミキサに送られ、1.5GHz 帯のアンプで増幅されて検波器に送られる。信号が 2 乗検波された結果、入射電力に比例した電圧を出力する。この出力電圧はわずか数 mV であることに加えて、外来雑音に影響されやすいため、100 倍の DC アンプでさらに増幅したのち、同軸ケーブルによりデジタル電圧計に送られる。



4.3 チョッパー・ホイール法

この方法は、吸収体出力と Blank Sky 出力の比較から空の吸収量を見積もることで、地上から大気圏外にアンテナを出した時に受信できる真のアンテナ温度 T_A^* を求める方法である。

大気天頂での光学的厚みを τ , 太陽の温度を T_{sun} , 大気の温度を T_{atm} , 周辺の温度を T_{amb} とし、それぞれの出力電力を次のように表わせる。ただし、 G が増幅率、 B が受信周波数幅、 T_{RX} が雑音温度、 η がアンテナの*フィード効率を表わしている。各出力電力は次の式で表わされる。

①アンテナを太陽に向けたときの出力電力

$$P(\text{sun}) = GkB[T_{\text{RX}} + (1 - \eta)T_{\text{amb}} + \eta\{e^{-\tau}T_A^* + (1 - e^{-\tau})T_{\text{atm}}\}].$$

②アンテナを吸収体に向けたときの出力電力

$$P(T_{\text{amb}}) = GkB(T_{\text{RX}} + T_{\text{amb}}).$$

③アンテナを Blank Sky に向けたときの出力電力

$$P(\text{sky}) = GkB[T_{\text{RX}} + (1 - \eta)T_{\text{amb}} + \eta(1 - e^{-\tau})T_{\text{atm}}].$$

ここで、絶対温度にすると T_{atm} と T_{amb} の違いが 10% であるため、両者が等しいと仮定することが出来る。したがって、上の式は次のようになる。

$$P(\text{sun}) = GkB[T_{\text{RX}} + (1 - \eta)e^{-\tau}T_{\text{amb}} + \eta e^{-\tau}T_A^*],$$

$$P(T_{\text{amb}}) = GkB(T_{\text{RX}} + T_{\text{amb}}),$$

$$P(\text{sky}) = GkB[T_{\text{RX}} + (1 - \eta)e^{-\tau}T_{\text{amb}}].$$

これらの比をとり、変形することで

$$T_{\text{sun}}^* = T_{\text{atm}} \left(\frac{P_{\text{sun}} - P_{\text{sky}}}{P_{\text{R}} - P_{\text{sky}}} \right)$$

となる。この式から大気の吸収量を補正した太陽のアンテナ温度を求める事が出来る。しかし、このままだと太陽の広がり Ω_{sun} はアンテナのビームサイズ Ω_{beam} に比べて小さいため、本来の輝度温度よりも低い温度で出てしまう。これを補正するための式が次である。

$$T_{\text{sun}} = T_{\text{sun}}^* \left(\frac{\Omega_{\text{beam}}}{\Omega_{\text{sun}}} \right).$$

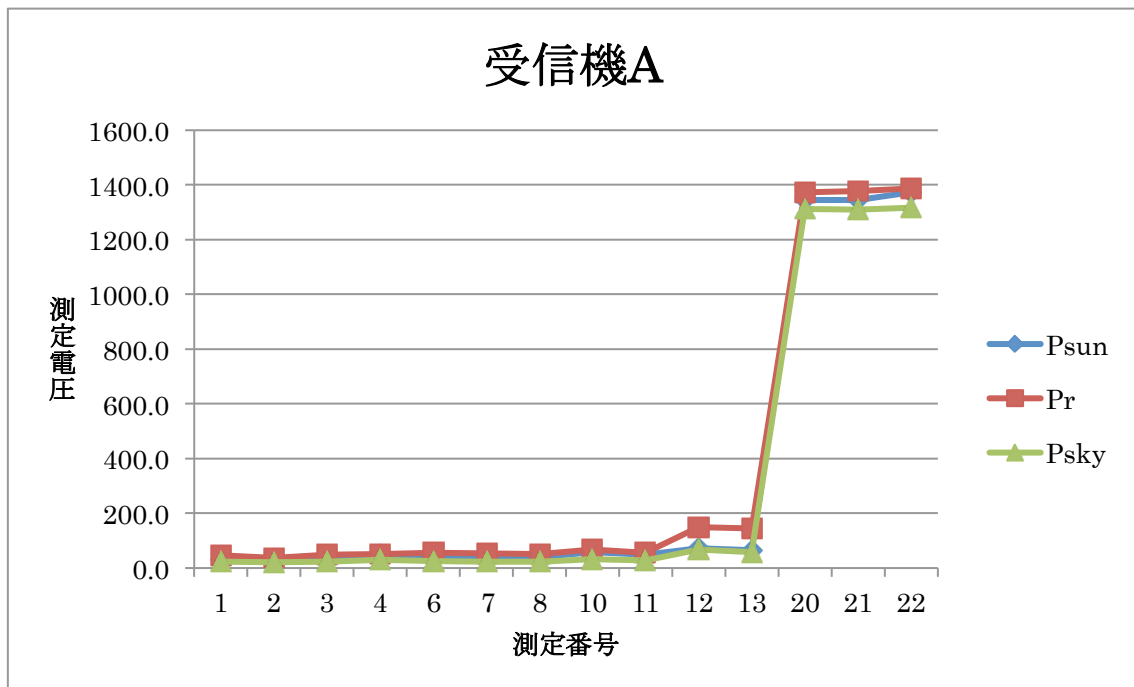
これにより、観測した $P_{\text{sun}}, P_{\text{R}}, P_{\text{sky}}$ の値から太陽の輝度温度を求めることが出来る。

※アンテナが空の方向を見る効率。

4.4 観測結果

次に示すのは、受信機 A で測定した $P_{\text{sun}}, P_{\text{R}}, P_{\text{sky}}$ の値の表とグラフである。
 グラフは縦軸が測定電圧(mV),横軸が測定番号である。

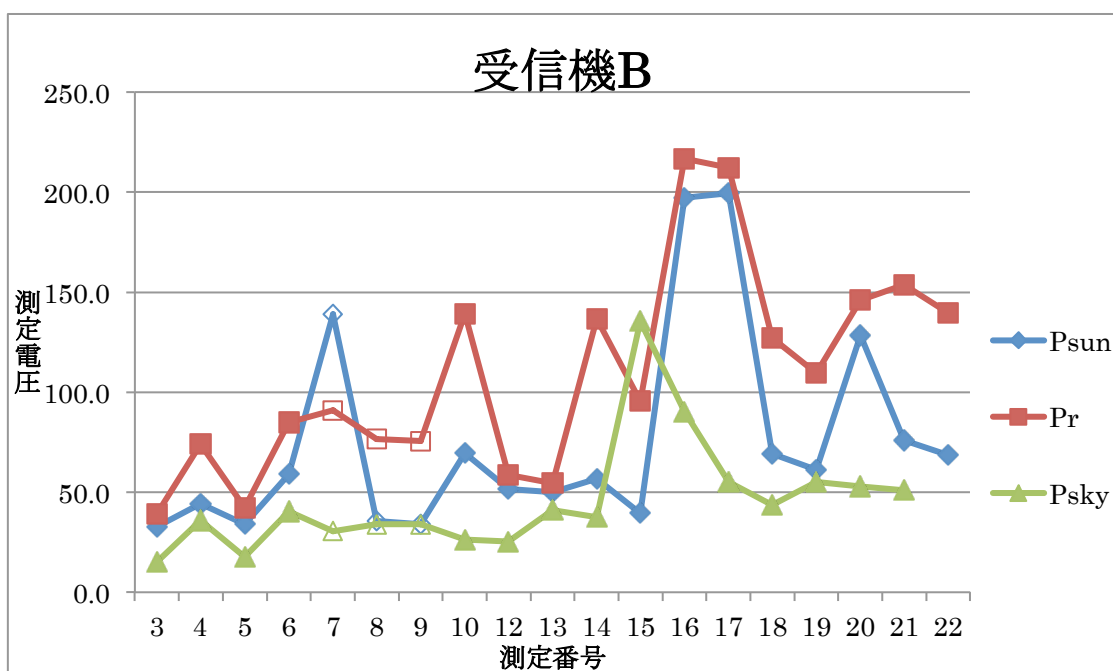
番号	実験日	気温	P_{SUN} (mV)	P_{R} (mV)	P_{SKY} (mV)
1	8月29日	311K	30.5	46.3	22.0
2	8月31日	305K	32.5	36.2	21.3
3	9月12日	305K	37.7	49.4	23.4
4	10月5日	303K	49.1	51.2	30.0
6	10月10日	299K	39.0	55.8	24.8
7	10月13日	300K	42.1	52.9	23.8
8			40.3	50.5	23.5
10	10月15日	301K	57.4	67.3	31.5
11			48.9	56.6	27.3
12	10月19日	301K	72.0	149.2	66.5
13			64.2	143.9	58.5
20	1月29日	292K	1345.0	1373.0	1312.0
21	1月30日	292K	1346.0	1377.0	1311.0
22	1月31日	291K	1374.0	1386.0	1317.0



測定番号 13 と 20 で大きく出力電圧の値が異なるが、 $P_{\text{sun}}, P_{\text{R}}, P_{\text{sky}}$ の値が同じように推移しているため、算出される太陽輝度温度の値に影響はなかった。

次に示すのは、受信機 B で測定した P_{sun} , P_{R} , P_{sky} の値の表とグラフである。
表の赤字の測定値は、正常に出力されていなかったときのデータである。

受信機B					
番号	実験日	気温	P_{SUN} (mV)	P_{R} (mV)	P_{SKY} (mV)
3	9月12日	305K	32.8	39.3	15.2
4	10月5日	303K	44.4	74.0	36.1
5			34.0	42.2	17.8
6	10月10日	299K	58.9	84.9	40.3
7	10月13日	300K	139.0	90.9	30.6
8			35.6	76.6	33.9
9			34.0	75.5	33.9
10	10月15日	301K	69.7	139.2	出力なし
12	10月19日	301K	51.6	58.6	26.2
13			50.0	54.5	25.5
14	10月25日	297K	56.7	136.8	41.1
15	10月26日	301K	39.4	95.6	37.5
16	1月7日	283K	197.2	216.7	135.5
17			199.5	212.2	90.3
18	1月16日	284K	69.2	127.2	55.1
19	1月17日	284K	61.3	109.5	43.5
20	1月29日	292K	128.5	146.2	55.0
21	1月30日	292K	75.9	153.6	52.8
22	1月31日	291K	68.5	139.8	51.1



受信機 B の出力電圧は受信機 A に比べて日によって値の変動が激しいが、受信機 A と同様、算出される太陽輝度温度には大きな影響がないため、正常に出力されていると判断した。

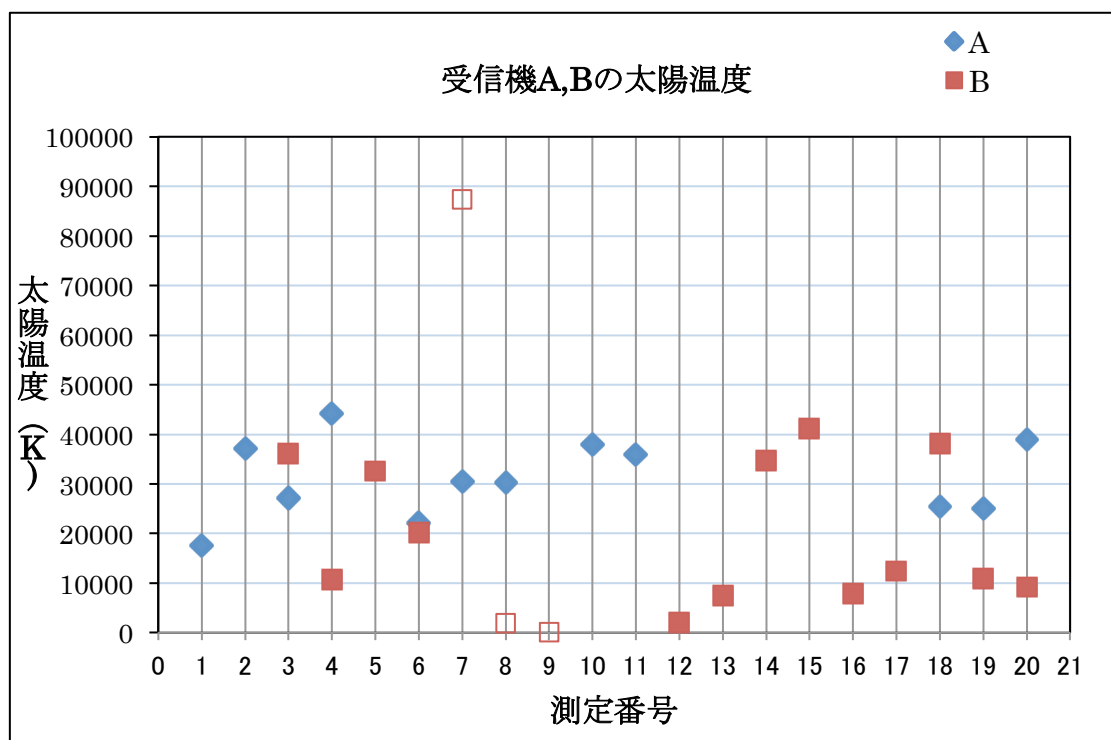
P_{sun} , P_{R} , P_{sky} 値の変動が見られる原因として、受信機内部の配線・接触の不具合、また、観測時にアンテナが捉えた空の範囲内に建物が入ってしまったことなどが考えられる。

以下に示すのは、得られた $P_{\text{sun}}, P_{\text{R}}, P_{\text{sky}}$ の値を用いて計算した太陽の輝度温度の表である。
赤字で示している値は、正常に出力されていなかったときのものである。

受信機A	実験日	気温	Tsun
1	8月29日	311	17624
2	8月31日	305	37140
3	9月12日	305	27175
4	10月5日(1)	303	44177
6	10月10日	299	22178
7	10月13日(1)	300	30569
8	10月13日(2)		30229
10	10月15日(1)	301	38002
11	10月15日(2)		35947
18	1月29日	292	25544
19	1月30日	292	25085
20	1月31日	291	38943
		平均	31051.08

受信機B	実験日	気温(K)	Tsun(K)
3	9月12日	305	36126
4	10月5日(1)	303	10798
5	10月5日(2)		32544
6	10月10日	299	20199
7	10月13日(1)	300	87383
8	10月13日(2)		1934
9	10月13日(3)		117
12	10月25日	296	1967.28
13	10月26日	301	7537
14	1月7日(1)	283	34836
15	1月7日(2)		41070
16	1月16日	284	7872
17	1月18日	284	12408.2
18	1月29日	292	38123
19	1月30日	292	10841
20	1月31日	291	9248
	平均 7,8,9を除く		21193.46

次に示すのは、受信機 A,B の太陽の輝度温度のグラフである。縦軸が太陽温度（K）、横軸が測定番号である。



グラフより、得られた太陽温度は 2 台ともおよそ $1.0 \times 10^4 \sim 5.0 \times 10^4 \text{K}$ の中に収まっていることが分かった。このアンテナで受信している 10GHz 近辺では、太陽面爆発が起こっていない時の輝度温度は $T_b \sim 10^4 \text{K}$ の黒体放射として近似できることが知られている。このことから、 $1.0 \times 10^4 \sim 5.0 \times 10^4 \text{K}$ のデータは一見確からしく見える。しかし、測定番号 7, 8, 9 は、同日の観測であるにも関わらず、値が大きく違っていた。受信機 B の 7 番の値が著しく大きいため、太陽フレアの影響による温度上昇も考えられるが、正常に観測できる受信機 A の同時刻での太陽温度は 30560K であったため、太陽フレアの影響である可能性は低いと考えられる。また、その後再度測定を試みたが、受信機 B は全く出力をしなくなった。したがって、受信機 B 内の問題であると仮定し、中をパワーメーターで詳しく調べてみたところ、1.5GHz 帯のアンプが正常に動作していないことが分かった。そこで、アンプを新しいものに取り換えたところ、正常に動作するようになった。

4.5 考察

受信機 A と受信機 B の測定の精度を確かめるには、それぞれの受信機での測定のゆらぎ量を評価する必要がある。そこで受信機 A, B (7, 8, 9 を除く) の立体角補正をする前のアンテナ温度の不偏分散を以下の式で求めた。

$$\Sigma[(\text{各測定データ}) - (\text{平均値})]^2 / (N - 1).$$

ただし、N はデータの個数である。

ここで、アンテナ温度を使用しているのは測定の誤差によるゆらぎのみを見るためである。この値の平方根をとり、標準偏差 σ を求めた。この標準偏差を求めることで、平均値からどのくらいの値のゆらぎがあるのかを確かめることができる。次の値が受信機 A, B の平均値 $\pm \sigma$ を求めたものである。

受信機 A 199.1 $\pm$ 43.1K

受信機 B 125.2 $\pm$ 86.9K

この結果から、受信機 B のゆらぎが相対的に大きいものの、ともに一致している部分があるため、測定誤差による値のばらつきを考慮した範囲内で両者は一致する結果を出していることが分かった。したがって、両者は測定誤差の範囲内で一致した結果を出していると評価した。

4.6 まとめと課題

今回の観測では、受信機 A, B はともに測定誤差の範囲内で正常に動作していると評価した。受信機内の配線・接触のわずかな不具合であっても、出力電圧に大きく影響することが観測からわかった。したがって、今後受信機を整備する場合はその点を考慮しなければならない。また、受信機 A, B の太陽の輝度温度の平均値に違いが出た原因として、天候条件や観測を行う時間を統一しなかったことや、アンテナが捉える空の中に建物が入ってしまったことなどが挙げられる。今後の観測ではそういった条件を統一する必要がある。

謝辞

指導教官である百瀬宗武先生には、電波天文学の基礎からご指導いただき、本論文を書き上げることが出来ました。また、米倉先生には電波望遠鏡について教えていただきました。先生方をはじめとする研究室の方々にご指導いただきましたこと、深く感謝申し上げます。

参考文献

- ・ シリーズ現代の天文学 宇宙の観測Ⅱ－電波天文学
- ・ Radiative Processes in Astrophysics
- ・ 宇宙物理基礎実験 実験書