

卒業研究

天体電波望遠鏡の開発

宇宙粒子研究室

学籍番号 10760178

氏名 福永 健司

目次

- 1 はじめに
- 2 目的
- 3 原理
 - 3.1 電磁波とは
 - 3.2 電波とは
 - 3.3 電波の窓
 - 3.4 電波の発生
 - 3.5 太陽電波とは
 - 3.6 電波銀河とは
 - 3.7 太陽電波の観測
 - 3.8 BS 放送受信用アンテナ
 - 3.9 BS アンテナの特性
 - 3.10 BS アンテナの分解能と半値幅
 - 3.11 BS 電波望遠鏡観測を行う上での注意点
 - 3.12 3m口径パラボナアンテナ
 - 3.13 3m口径パラボナアンテナの特徴
 - 3.14 マイクロ波検波器増幅ユニット(RFD - 1500)
 - 3.15 デジタルマルチメータ (PC5000)
 - 3.16 PC Link Plus
 - 3.17 特性直線
- 4 実験方法
 - 4.1 実験装置図
 - 4.2 装置原理
 - 4.3 実験器具の改良
 - 4.4 実験手順
- 5 結果
- 6 結論
- 7 参考文献
- 8 謝辞

§ 1、はじめに

ラジオ、テレビから携帯電話まで、電波は生活で広く利用されている。しかし、目に見えないので感覚的にとらえにくく、同じ電磁波の仲間である光などに比べて理解しにくい面がある。

現在、衛星放送は広く普及していて、放送衛星（BS：Broadcasting Satellite）からの電波を受信するための機器が比較的安価で手に入る。しかも性能は非常に優れている。衛星放送の電波は波長が2.5cm（周波数12GHz）のマイクロ波である。波長が短いので、直径数10cmのパラボラアンテナでもかなり鋭い指向性（ビーム幅 $\sim 4^\circ$ ）を持つ。12GHz付近で太陽は強い電波源であり、衛星放送受信用の機器によって太陽から熱的に放射される電波や太陽面爆発と関連して突発的に発生する強い電波が観測できる。また、BS放送受信用の機器を用いて、宇宙背景放射を検出する試みなども行われている。BS放送受信用の機器を用いた電波受信装置を以下では、BS電波望遠鏡と呼ぶ。

§ 2、目的

私は本研究で、パラボラアンテナを用いて太陽電波と強い宇宙電波源がアンテナビームを通過する様子を観測する。また、パラボラアンテナを固定し太陽電波と宇宙電波源を連続観測する。太陽電波が太陽のどこから放射されているのかを算出する。

本研究の観測を行うにあたり、指向性と分解能を伸ばし、精度の高い電波源を観測するために3m口径のアンテナを組み立てる。そして、観測をよりスムーズにより確実にするための環境を整える。という事を目的としました

§ 3、原理

3.1 電磁波とは

電磁波とは電界と磁界が組み合わさったものです。電界と磁界の性質上、電界は磁界を生み、磁界は電界を生みます。夫々周期的に変動し生まれる事によっ

て横波となって伝播し、電磁波となるのです。

3.2 電波とは

電波は我々の生活の中にも多く使われていることに気付く。例えば、テレビ、ラジオ、携帯電話でメールや電話をするのにも音や映像を電波に乗せて情報を伝達している。

電波というのは、電磁波の一種である。電磁波というのは真空中・物質内を伝わる波動（波）を指し、電波のほかに紫外線・赤外線なども含まれる。

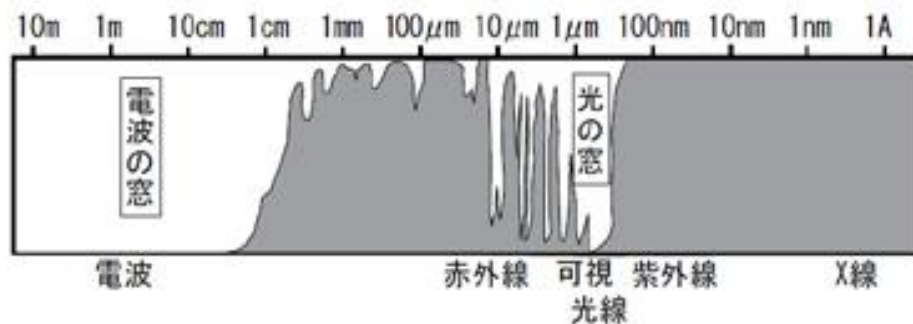
電磁波（電波）とは、電場・磁場（電気と磁気）を互いに直角の方向に振動しながら、真空中・空气中・物体中を移動する波のことをいう。もちろん目には見えないし触れることもできない。その伝わる速さは秒速約 30 万 km で、光と同じ速さの光速に値する。

3.3 電波の窓

宇宙からやってくる電磁波の大部分は、地球の大気を通り抜ける間に吸収されてしまい、地上に届くのはごく限られた波長域のものだけになる。地上から宇宙を観測できる電磁波としては、波長 1mm から 30m 付近の電波と、300nm から 1000nm 付近の可視光線がある。地球大気に対して透明な電磁波の波長域を「大気の窓」という。大気の窓とは、大気による吸収の影響を受けずに地表に到達しやすい波長領域のことである。

大気の窓を通過する波長の主なものには、可視光線や赤外線(近赤外線)、一部の電波などがある。天文台からの天体観測や、気象衛星からの地表の観測などでは、光学望遠鏡や電波望遠鏡を使用することによって大気の窓を利用し、観測を行っている。逆に X 線やガンマ線など、大気の窓を通らない波長は、地表から効率的に計測することができない。

ちなみに、地球は表面から宇宙空間に向かってエネルギーを放射しており、赤外線などによりほとんどのエネルギーが大気の窓を通じて放出されている。このとき、二酸化炭素は熱放射のための大気の窓をふさぐ効果があるため、地球温暖化現象の要因となっている。



3.4 電波の発生

アンテナに高周波電流が流れると電場が激しく変化し周りに磁場が発生し、その磁場によってまた電場が発生する。これが繰り返され空間に飛び出した物が電波の正体ある。電波は物質（媒体）が無くても伝わっていく。このほかにも電波の発生する仕組みはいくつかあるが、電球や太陽が光を放つ仕組みと同じ「熱的放射（黒体放射）」について考えていく。黒体（光を反射しない黒色の物体）を加熱していくと、黒体は温度上昇とともに、「暗赤→赤→オレンジ→黄→白→青」と色を変化させていく。このとき、その温度に見合った強さと波長の電磁波を放つ。（赤い星は温度が低く、青い星は温度が高いのと同じである）つまり、すべての発熱体からは多かれ少なかれ電波を放っているということである。当然私たちの体も約 36°C（約 300K）の体温に相当する電波を発している。この電波をアンテナで受信、ブースターで増幅した後、テスターで電圧に変えてその強さを調べる。

Planck が導いて公式により、温度 T の黒体における単位面積・単位周波数あたりのエネルギー密度 $u(T)$ は

$$u_\nu(T)d\nu = \frac{8\pi}{c^3} \frac{h\nu^3}{\exp(h\nu/k_B T) - 1} d\nu$$

と書けます。

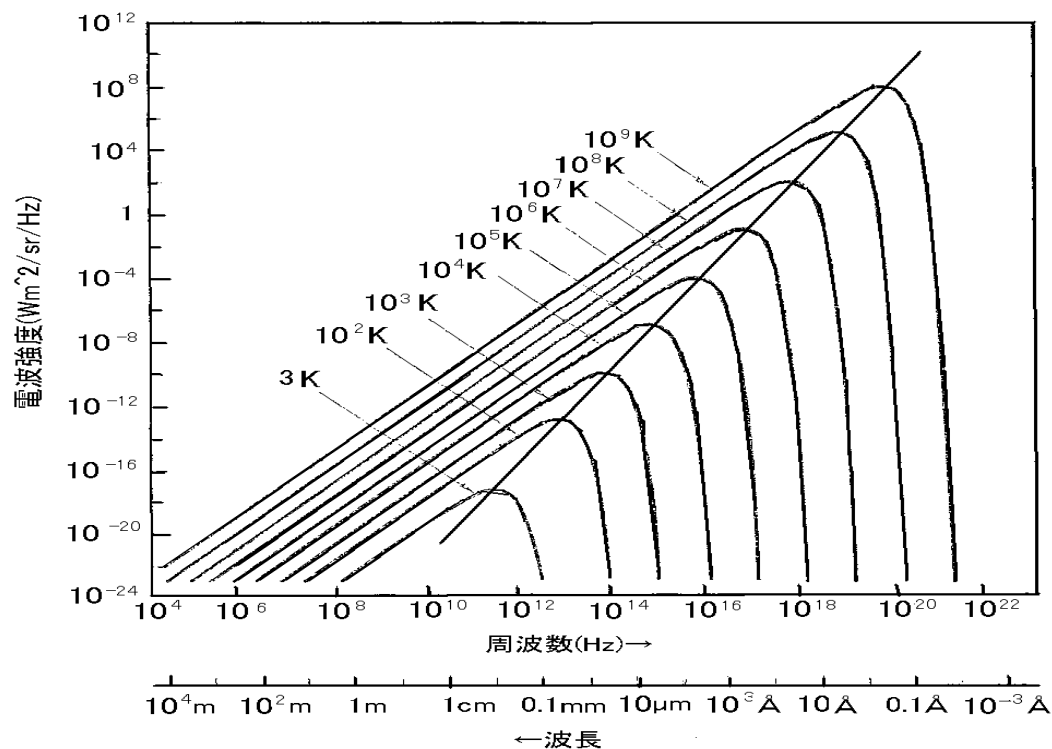
ここで、 h は Planck 定数、 k_B は Boltzmann 定数です。この式を単位時間・単位立体核あたりに放出される電磁波の $I_\nu(T)$ に書き直すと、

$$I_\nu(T) = \frac{c}{4\pi} u_\nu(T) d\nu$$

$$I_\nu(T) = \frac{2h\nu}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/k_B T)} d\nu$$

となります。

これによって、黒体の温度 T と電波の周波数 ν から電磁波強度 I_ν が一意的に定まること、また逆に放出される電磁波の強度 I_ν 、周波数 ν から黒体の温度 T が一意的に求まることが分かります。この電磁波強度を温度ごとに表したものが図です。



さて、電磁波の周波数 ν が低く、また温度 T が高ければ、 $h\nu \ll k_B T$ として、黒体輻射の強度の式は

$$I_\nu(T) = \frac{2kT}{c^2} \nu^2$$

と、近似できます。これは、 $h \rightarrow 0$ の極限における Rayleigh-Jeans の法則に他なりません。大部分の電波天文学の領域では、周波数が低いので、この近似は成立すると考えて構いません。

非熱的電波について

超新星残骸や電波銀河、クエーサーなどにおいて、天体の活動的な現象に伴った高エネルギー電子によっても、電波は発生します。その代表的なものがシンクロトロン放射です。

電磁場がある空間を電子が運動すると、ローレンツ力により電子は円運動をします。このとき、電子が放出する電場の強度は、円軌道の動径方向に一番強くなります。

電子の速度を光速に近づけると、放出されるエネルギーの大部分は動径方向のきわめて狭い幅の中に放出します。あるエネルギー E を持つ1個の電子によるシンクロトロン放射強度の周波数分布は図のようになり、

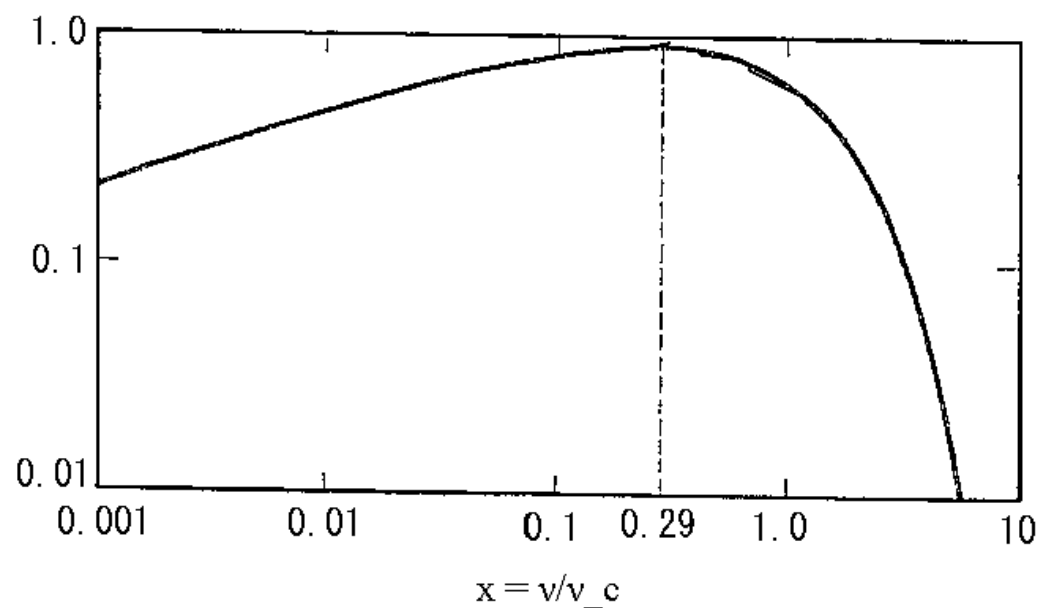
$$\nu_m = 4.66 B_{\perp} E^2 [\text{MHz}]$$

にピークを持ちます。ただし、単位は $B_{\perp}$ [μ ガウス]、 E [GeV] です。

実際の電波源は、多くの高エネルギー電子が集まって電波を放出しています。すると、

- シンクロトロン自己吸収…シンクロトロン放射した電波が、同じ領域の他の電子に吸収される現象。電波銀河やクエーサーに多い。
- 逆コンプトン効果…高エネルギーの電子が電磁波(フォトン)に衝突し、それを跳ね飛ばす現象。密度の低い非熱的電波源に起こる。

このような現象が起こるので、図のようにはいかず、途中で折れ曲がった形のスペクトルになってしまいます。スペクトルの傾きが複数回変わることも多くあるので、逆にこのスペクトルの形から、観測天体の性質を推測することが非常に重要なこととなります。



3.5 太陽電波とは

太陽からくる電波にはいろいろな波長があり、到達する様子は太陽の活動状況によっても非常に変わります。波長によって発生源の温度が違うことがわかっています。波長 1 m では 1 0 0 万度、3 0 c m では 1 0 万度、1 c m では 1 万度

波長の長い電波は太陽をかこむ彩層やコロナ（電離したガス）によって吸収されてしまいます。長い波長の電波が観測されたとすれば、それはコロナの外側付近から出たものだといえます。その発生源が高温であるというのは、コロナの外側付近が高温であることを意味します。

黒点が多くなって太陽活動が活発になると黒点付近から強い電波が、また、特にフレアが発生すると強烈な電波が発生します。その時の電波の波長は、はじめは短く、だんだん長い波長に移っていきます。電波の発生源が低いところからだんだん高いところへ移っていくことを意味します。

3.6 電波銀河とは

電波源の形状により、コンパクトのものと広がったものがある。

コンパクト電波源は電波放射が銀河中心コアから集中している。広がりのある電波銀河には、銀河の外側の空間からやってくる電波が加わり、むしろ銀河本

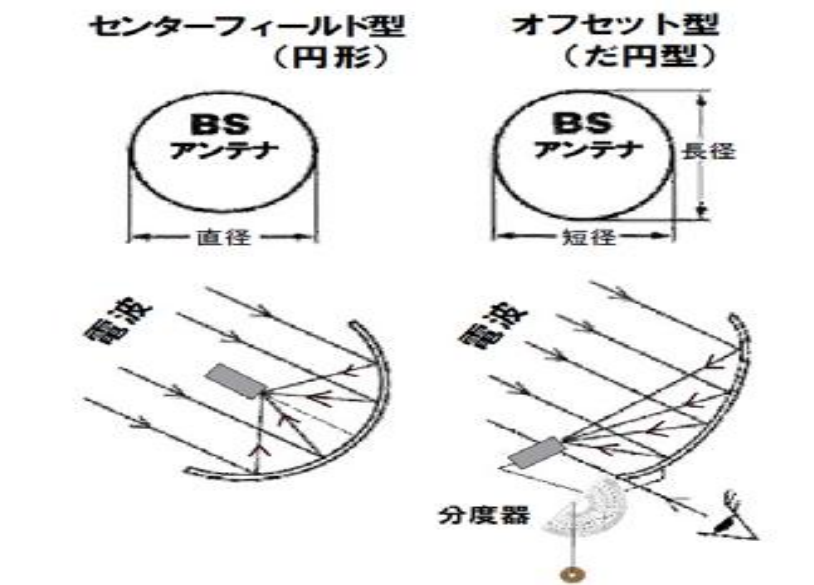
体からのものは減っている。コアの部分から荷電粒子のジェットが噴き出すと広がった放射部分が増していく。そのプロセスは解明されていないが、ブラックホールが原動力となっているらしい。ジェットが銀河間空間へ注ぎ込まれると全ての銀河同士の空間を満たす膨大な銀河間ガスと衝突する。ジェットのエネルギー供給が銀河間ガスによる巨大なローブ状構造を形成する。そこからは、大量の電波が放射され、その大きさは数百万光年にも及んでいる。

3.7 太陽電波の観測

地球のまわりには数多くの人工衛星がまわっている。特に静止衛星は、赤道上空約 36,000km の高度を、地球の自転と同じ周期で地球を周回している。このため地上からは、空のある一点に静止しているかのように見える。このような性質から、放送衛星・通信衛星・気象衛星などに用いられている。現在、日本もいくつかの静止衛星を打ち上げていて、例として『ひまわり』や BS 放送衛星などがある。

3.8 BS 放送受信用アンテナ

BS アンテナはパラボラアンテナともいい、その反射面は放物面（パラボラ）となっている。パラボラアンテナには、図のようにセンターフィールド型とオフセット型の 2 種類があり、主流はオフセット型である。オフセット型は設置面積を小さくしたり、反射面を遮断することがないため有効であるが、パラボラ面の仰角を決定しにくい欠点がある。このため、アンテナがどの高さに向いているかを分かるようにしておく必要がある。そのためには、アンテナを垂直に立てたとき、どの高度から来る電波を受信しているかを測定しておく必要がある。アンテナの種類によって多少の違いはあるが、およそ、上方 30 度からの電波を受けることになる。



3,9 BS アンテナの特性

45cm 形 BS・110 度 CS アンテナ『DSA-456』(DX ANTENNA 社製)

受信周波数	11.71 ~ 12.75 GHz
偏波特性	右旋円偏波
アンテナ有効径	45 cm
コンバーター出力周波数	1032 ~ 2072 MHz
利得	アンテナ 33.8 dB
	コンバー 48 ~ 60 dB
ター	
本体重量	1.6 kg

3,10 BS アンテナの分解能と半値幅

BS アンテナがどの程度の視野を観測しているかを知るために、アンテナの分解能 α を知る必要がある。観測波長 λ [m]、アンテナの口径 D [m] とすると、分解能 α は

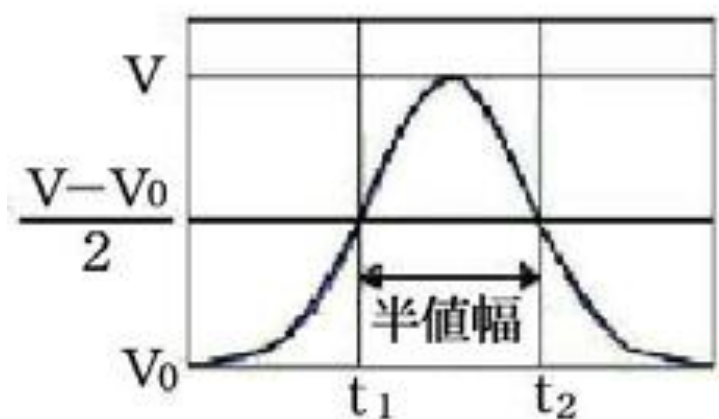
$$\alpha = 180 \lambda / \pi D \cdots \cdots (1)$$

から求めることができる。

今回実験に使用する BS アンテナの場合
アンテナの口径 $D \cdots 0.45\text{m}$ 観測波長 $\cdots 0.025\text{m}$ より
分解能 α は 3.2° となる。

この分解能は、観測からも求められる。観測では「電波を受信している時の最大値と受信していないときの値との中間値以上になっている時間（半値幅）」を測定することで求められる。

具体的には図の t_1 と t_2 の時刻を求め、この時間 $t_2 - t_1$ に地球が何度自転するかで求める。



3.11 BS 電波望遠鏡観測を行う上での注意点

（右回り偏波）

市販されているテレビ放送受信用アンテナを使っているので、右回り偏波といって電波の進む方向に右回り（時計回り）に回りながら波打つ電波をより強く受信するようになっている。そのため太陽から放射される電波が左回りが強かった場合は、BS 電波望遠鏡で受信できる電波は弱くなる。

（人工衛星からの電波）

地球のまわりには数多くの人工衛星がまわっている。特に静止衛星は、赤道上空約 $36,000\text{km}$ の高度を地球の自転と同じ周期で地球を周回している。このため、地上からは、空のある一点に静止しているかのように見える。

3月と10月には太陽が地球の赤道面上空を通るため、太陽を追いかけて観測しているつもりが、たくさんの人工衛星からの電波を受信してしまう。そのためこの時期の太陽の観測が不可能になる。

3,12 3m 口径パラボナアンテナ



3,13 3m 口径パラボナアンテナの特徴

受信周波数	4.2 ~ 12.2 GHz
偏波特性	右旋円偏波
アンテナ有効径	300 cm
コンバーター出力周波数	1032 ~ 2072 MHz
利得	アンテナ 48.2 ~ 40.3 dBi
	コンバー 48 ~ 60 dB
ター	
本体重量	60 kg

3,14 マイクロ波検波増幅ユニット（RFD-1500）

ELECTRODESIGN CORPORATION



- BS パラボラ、RFD-1500 ユニット、デジタル電圧計（DVM）と組み合わせ小型の電波望遠鏡を構成することができる。RFD-1500 の出力電圧を PC で取得すれば、電波望遠鏡の基礎的なペンレコーダ観測を実現できる。
- パラボラへの電源供給、マイクロ波 IF 増幅、分岐、検波、直流増幅の利得調整がこの装置のみででき、簡単に観測や実演を行える。
- 太陽電波の観測受信、天体からの電波放射やアンテナ特性、アンテナ温度などをデジタル電圧計（DVM）で測定実験するセットである。
- CS アンテナや、他周波数のプリアンプに併せ、マイクロ波放射や微小電力検波への応用が可能である。

RFD-1500 仕様一覧

周波数範囲	0.15 GHz — 2.5 GHz
入力、分岐 RF 出力	−8 dBm ∼ −40 dBm
入力レベル	バナナジャック
出力コネクタ	0.01 ∼ 3.00 V
出力電圧	65×85×25 mm
形状 WDH	DC 15 V
電源	DC アダプタ、出力ケーブル

各部の名称と働き

RF INPUT :BS パラボラアンテナからの信号を入力する F 型端子。
パラボラ用の電源電圧が重畳されている。

RF OUTPUT : 入力信号を約+15dB 増幅し分岐した出力。
 DC OUTPUT : 検波直流増幅した電圧を出力する端子。
 GAIN ADJ : 直流アンプ部の利得調整を行う。
 DC + 15 V : +15V を供給する電源端子。BS パラボラへの電源もこの端子から供給される。

3,15 デジタルマルチメータ『PC5000』（三和電気計器株式会社製）

パソコン接続型（PC—LINK）

0.03%基本確度

高絶縁・高圧力

真の実効値測定（AC／AC+DC）



50000&500000 カウント(DCV／Hz のみ)

0.01Ω 分解能

AC／DC 0.01mV 分解能

周波数／ロジック周波数測定

周波数 0.0001Hz 分解能

dBm 測定(20 種類のインピーダンス選択)

3,16 PC Link Plus（三和電気計器株式会社製）

三和電器オリジナルソフトウェア『PC Link Plus』は、SANWA デジタルマルチメータの PC シリーズをパソコンに接続して、DMM から出力されたデータを取得するためのデータ取り込み専用ソフトウェアである。操作画面上にはリアルタイムでグラフが表示されるため測定値の変動を簡単に確認することができる。また、測定値は CSV 形式のファイルで保存されるため、Excel 等の表計算ソフトウェアで直接読み込んで、データの加工や印刷などが可能である。

3,17 特性直線

アンテナから取り出される単位周波数あたりの電力は $kT_a[\text{WHz}^{-1}]$ と表現できる。ただし、 k はボルツマン定数で、 $T_a [\text{K}]$ をアンテナ温度と呼ぶ。アンテナビームの立体角に比べて十分に広がった温度 $T [\text{K}]$ の黒体を観測すると、

$$T_a = T \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (2)$$

となる。黒体でなくても 12GHz での輝度が温度 $T [\text{K}]$ の黒体と同じであれば、式 (2) が成立する。

アンテナを空に向けると、宇宙背景放射 (約 3K の黒体放射) に大気の大気熱放射 2K 程度が加わって $T_a = 5\text{K}$ 程度となる。また、部屋の壁にアンテナを向けると、壁の温度が $T_w (^\circ\text{C})$ の場合、近似的に、

$$T_a = T_w + 273.2 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (3)$$

になると考えられる。

アンテナからの信号は受信装置内で発生する雑音とともに増幅される。アンテナ温度と同様に受信装置内の雑音を等価温度 $T_i [\text{K}]$ で表すことにする。検波器が 2 乗特性を持つとすると、検波出力の直流電圧 $V [\text{K}]$ と $T_a [\text{K}] + T_i [\text{K}]$ は比例関係にあると考えられる。それは電界の 2 乗が電力に比例するからである。したがって、 C を定数として、

$$T_a = CV - T_i \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4)$$

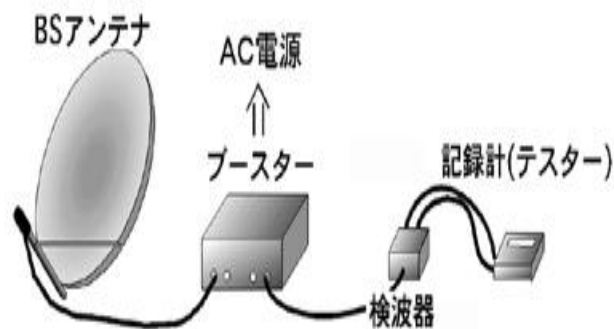
の形で書ける。後で述べるが、測定結果はこの関係が近似的に成立していることを示している。

式 (4) で表わされる直線を特性直線と呼ぶことにする。

§ 4、実験方法

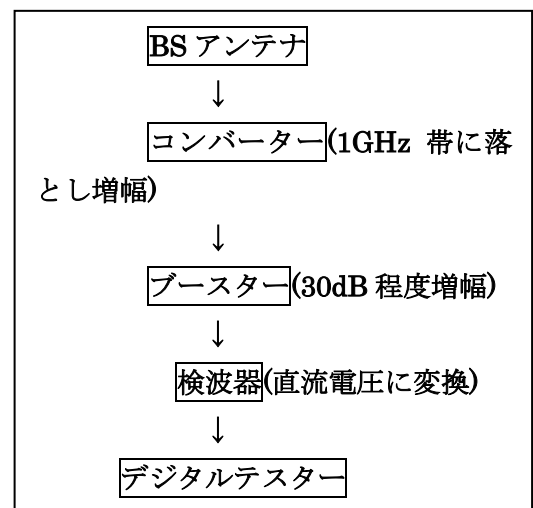


4.1 実験装置図



アンテナビームを太陽に向けるために

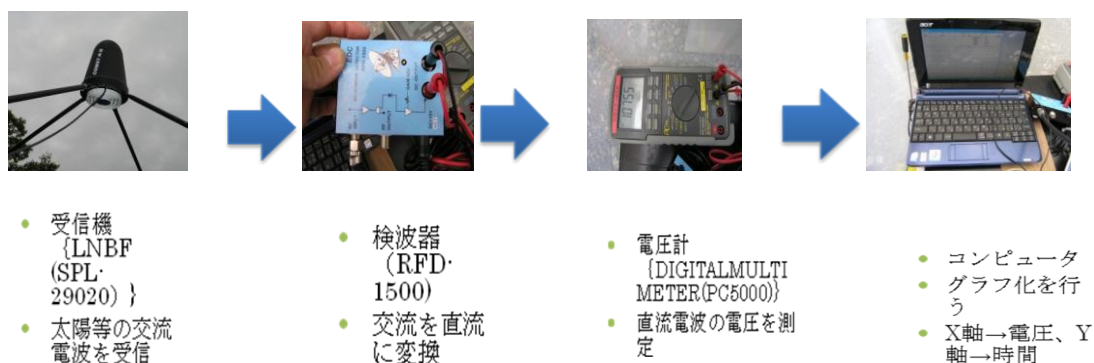
OHP 用シートを幅 1cm 以下で長さ 10cm 程度の短冊状に切ったものを 2 枚用意して、1 枚をアンテナの長軸方向に沿わせて、セロテープで端を軽くとめる。それに直角で十字になるように、もう 1 枚の短冊状の OHP シートをセロテープでとめる。このようにすると、OHP シートで反射された太陽光によってコンバーターの入力面に明るい太陽の像ができる。その太陽の像



をコンバーターの入力面の中心に合わせればアンテナは太陽の方向を向く。

4.2 装置原理

BS 電波望遠鏡は電波の強度を測定するラジオメーターと呼ばれるもので、アンテナで受信された 12GHz 帯（帯域幅 300 MHz）の信号を、周波数コンバーターで 1GHz 帯に落とし増幅する。共同受信用ブースターは、コンバーターから出力された 1GHz 帯の中間周波数信号をさらに 30dB 程度増幅する。また、ブースターは同軸ケーブルを通してコンバーター直流電圧 15V を供給する電源の役割もする。ここまでは交流信号であるが、この交流信号を、ダイオードで整流して直流電圧にするのが検波器の役割である。そして、この直流電圧をテスターで測定する。



4.3 実験手順

- ① 太陽や BS 衛星のない空に向けて電波強度を数回測定する。
- ② アンテナを太陽に向け、電波強度の最大値を記録したら、電波強度が空の電波強度に等しくなるまで西側にアンテナを振って固定する。以後 1 分ごとに電波強度を記録し、太陽がアンテナ視野内を通過し、電波強度が再び小さくなるまで測定する。
- ③ 電波吸収体（壁）にアンテナを向けて、電波強度を測定する。なお、このときに電波吸収体の温度を測定しておく。

4.4 太陽電波観測

BS アンテナを太陽に向け、強度電波が最大値になるように調整していく。電波強度の最大値のところで、BS アンテナを固定する。

4.5 宇宙電波観測

1. ステラナビゲータ Ver. 8 を用いて、宇宙電波源がある方位角、高度を調べる。
2. 調べた方位角、高度に BS アンテナを合わせ、固定する。

4.6 実験環境の改善

装置類の持ち運びの為に軽量化や衝撃等から保護するために、クリアボックス内にパソコン等の装置類を入れることにした。

保護ケース内に装置を入れた際、熱がこもりシステムに異常をきたす場合も考えられるため、排熱の方法を検討する。

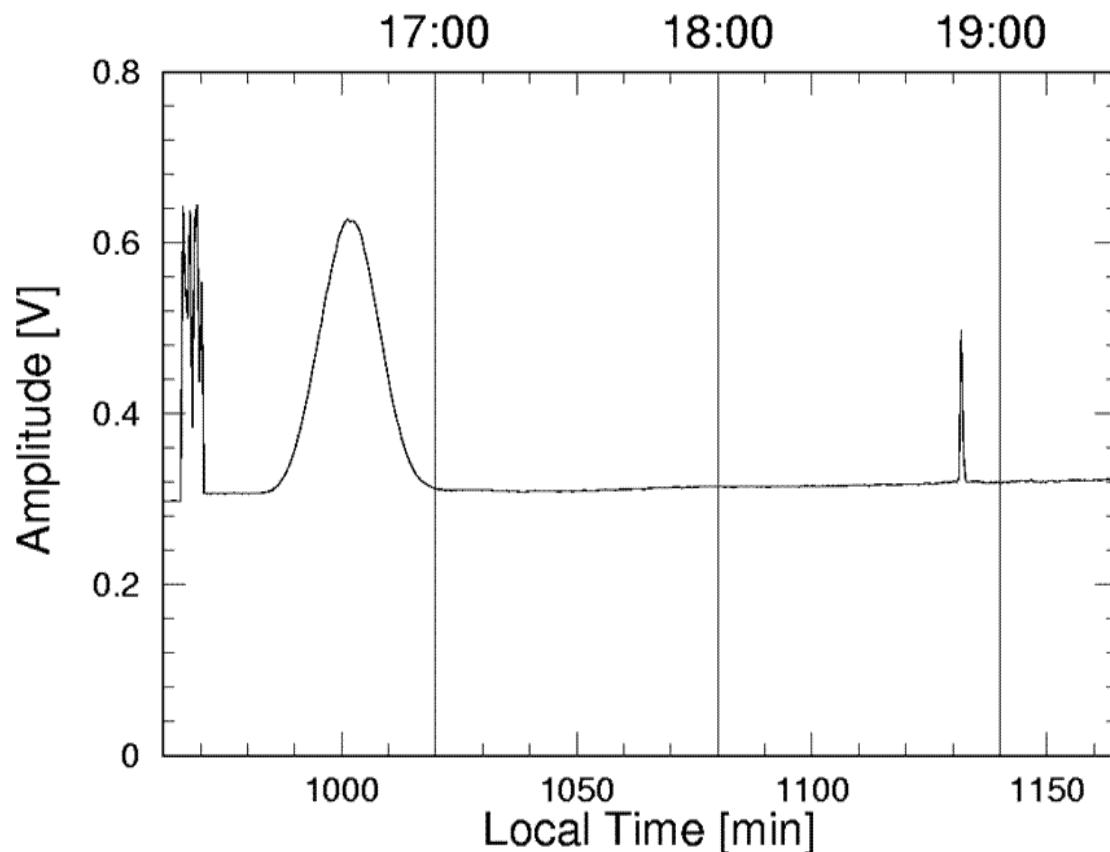
保護ケース内の小型化を行うために、AC 電源の簡易化を行いました。その結果、格段に整備ができコンピュータから排出される熱量が減りました。

また、保護ケース内を屋外に設置するために風雨、直射日光、湿度等の影響も考えて保護ケースごと覆ってしまうテントを作成した。また、その時の外気と保護ケース内の温度を測定し、観測に支障をきたさないかを調べた。



§ 5、結果

5.1 0.45m口径アンテナによる観測結果



観測を試験的に行った。観測開始直ぐのグラフは設置中のアンテナの前に居たために荒れている。そして、放物線が表示されたことにより、太陽を捉えることに成功したと推測される。最後の突起は人が通過したためである。

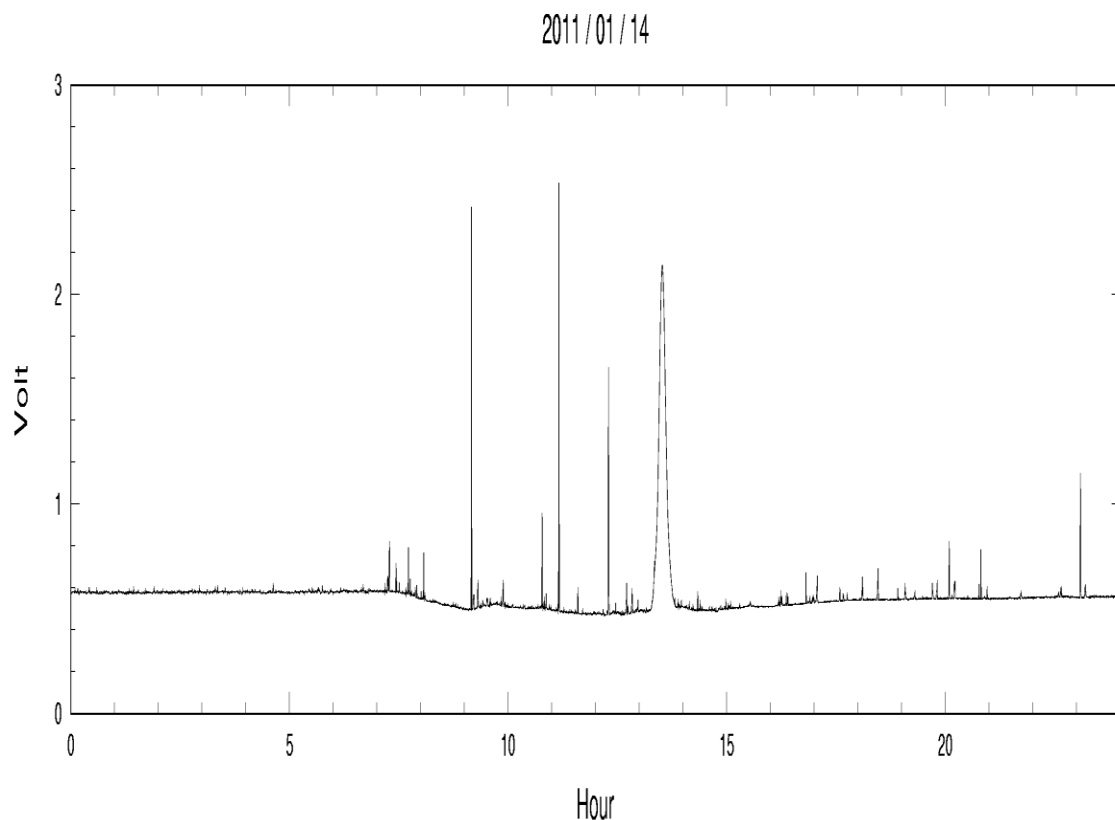
電圧値は、まず上昇し、ピークになった後に減少している。このカーブはガウス曲線で良く近似される。太陽がピークから外れると一定値 (30mV) を示すが、これが空のレベルである。太陽のピーク値は 78mV で、空の成分を差し引くと、太陽成分のピーク値は 48mV になる。また、太陽成分がピーク値からピーク値の 1/2 に落ちるまでの時間は約 7.5 分である。

5.2 アンテナのビーム幅

理科年表によると太陽の赤緯は -23° であったから、太陽の角速度は毎時 $15^\circ \times \cos 23^\circ = 13.8^\circ$ で近似できる。アンテナビームの半値幅に相当する時間

は約 15 分であるから、これを角度に直すと 3.5° になる。太陽は点ではなく、 0.5° 程度の広がりを持っているので、実際のビームの半値幅は 3.5° より小さくなる。アンテナの口径から出した分解能 α は 3.2° であったので、測定精度を考えると期待通りといえる。

5.3 3m パラボナアンテナによる観測結果



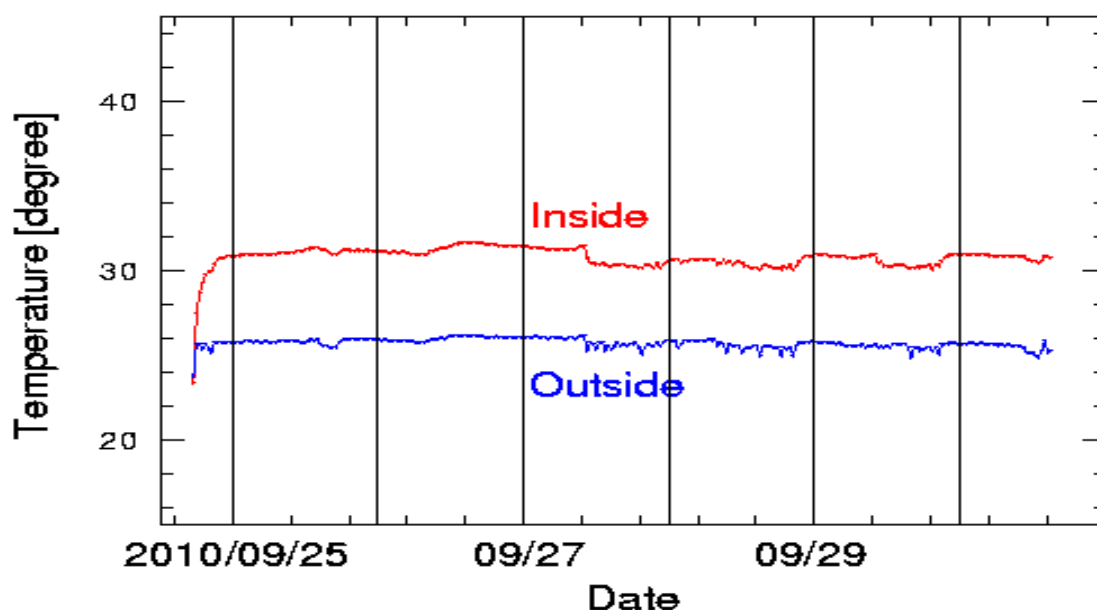
上図の観測グラフは 2010 年 11 月 24 日の結果です。アンテナの経口は 1.4 度で観測時間は 9.6 分です。また、上記のグラフの X 軸は電圧で Y 軸は時間です。実際の観測は 2011.11/21~11/29 の連続観測にてデータを採取しました。太陽の南中時刻をステラナビゲータ ver.8 で調べ、時刻の 10 分前に測定場所である西校舎横に設置した電波望遠鏡の近くに待機し直ぐ方角に向ける準備を開始する。南中時刻に望遠鏡を太陽に向け、デジタルテスターの電圧を見ながら合わせる。目測で、電圧が最高値を示した方角に電波望遠鏡を固定し、パソコン等の装置が正常に作動しているか確認をした後、装置類をテント内に納めて走らせます。パソコンには 30 分毎のデータがグラフ化され表示されます。約 1 週間走らせて最も太陽電波のデータが顕著に表示されたのが 11/24 でした。BS 電波望遠鏡で

観測した値と非常に近似したグラフが3 m口径のパラボラアンテナでも観測できました。観測時間は太陽の南中時刻である 11 時 58 分にグラフの最高値を観測した。グラフの結果から太陽の電波を観測できたと判断した。

5.4 保護ケース内の温度

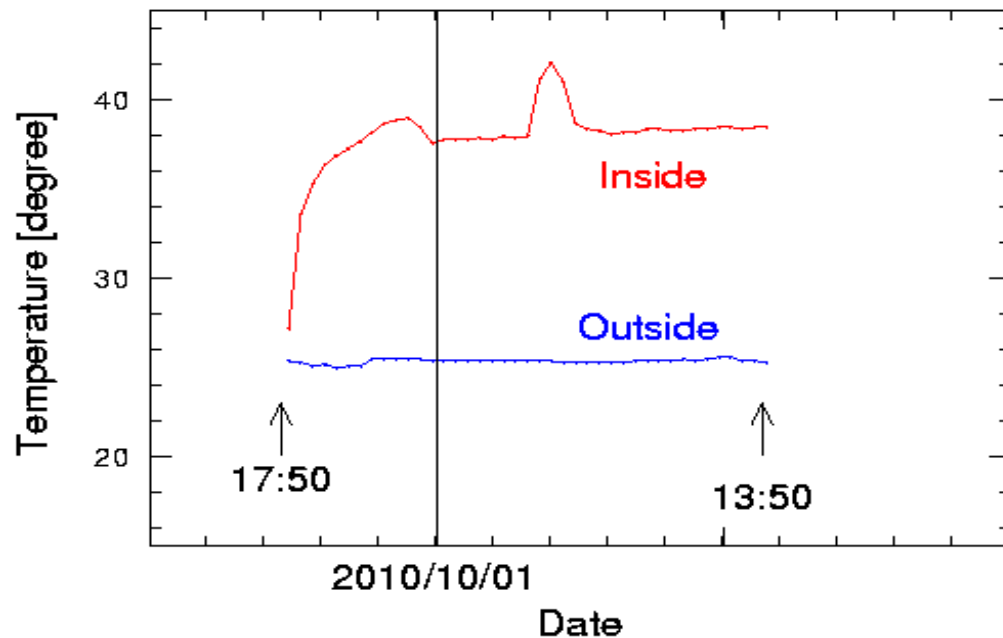
今回初めて装置を屋外に設置するため、様々なアイデアを考え出すと共に装置の設置環境を順次調査してきました。その中で熱の問題をととても重視して調べました。ここでのグラフは **inside** (赤字) で保護ケース内温度を表し、**outside** (青字) で保護ケース外の温度を表している。

(室内にて1)



グラフは 2010/9/24~10/1 までの約一週間温度観測した結果である。保護ケースの中に装置を乱雑に置いて蓋をしめて観測した。観測場所は西校舎の室内の一室である。装置の中には一番熱を排出する AC アダプタが含まれていたにも関わらず 30 度前後と安定している。この温度であれば連続観測の為に装置を起動し続けることは可能であると判断できる。

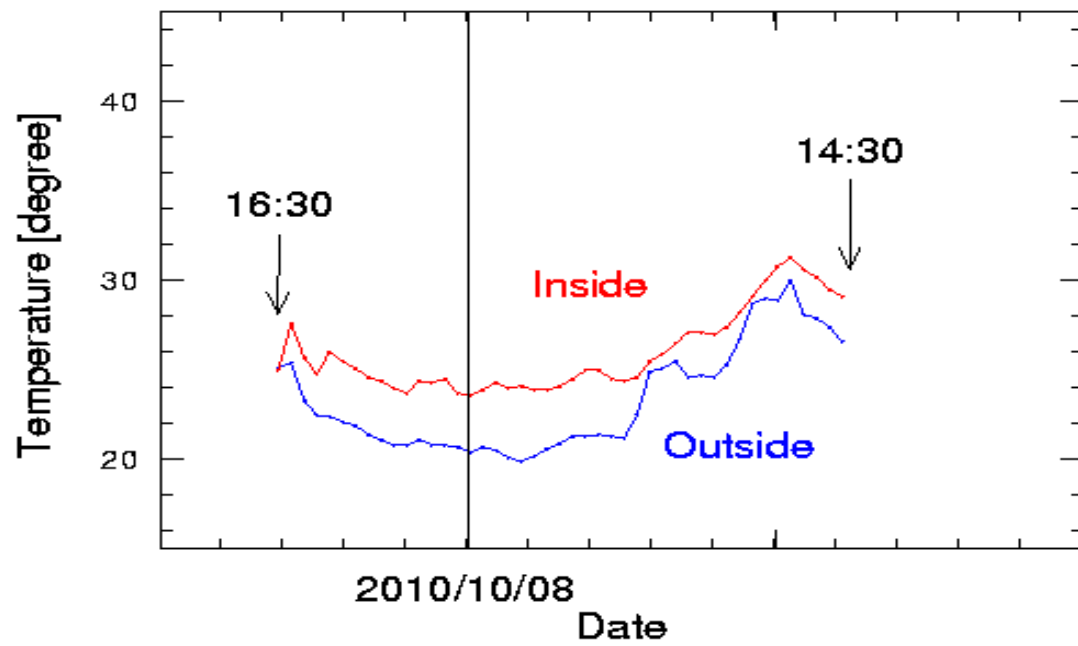
(室内にて 2)



グラフは 2010/9/30~10/01 の間で 17:50~13:50 までの 20 時間を観測した。今回の観測では銀紙で太陽光を反射させ、断熱するのが目的です。しかし、保護ケース内の温度が 40 度を越えたためこれ以上の観測は装置に負荷を与え観測に支障をきたす可能性があったので断念した。このような結果になった原因はやはり銀紙にある。銀紙を保護ケース内にいれて装置を包みこむ考えだった。しかし、装置から発せられる熱が銀紙の中で籠り排熱できずこのような結果になった。明け方に最高値に達した理由はコンピュータの何らかのソフトがインストール

ールを開始しさらに熱を排出したからだと考えられる。今回の結果から銀紙を保護ケース内にいれて連続観測することは非常に適していないと判断した。

(屋外にて)



グラフは屋外である西校舎横に保護ケース内に装置類を配置し、その保護ケースをテント内に設置した時のグラフです。保護ケースに排熱の穴を 2 か所開け、さらに AC アダプタを取り除き小型化と軽量化に成功した。更にケースの底に木の底板を置いたことで装置を水平に並べる事ができ整理し効率が上がった。ケース内の温度が装置に負荷を与えない温度であるか確認するため、実際に太陽電波の観測を行いながら、同時にケース内とケース外の温度を測定した。2010、10/7～10/8 に観測した結果では、ケース内の温度の最大値が 30 度、最低値が 24 度、そして平均値が 28 度であった。観測値の結果から、設置環境は観測に適していると判断できた。

§ 6、結論

太陽からの電波に対してアンテナ温度 173.3K を得たが、このアンテナ温度は実際の太陽の温度を表さない。それはアンテナビームの広がり比べて太陽はずっと小さいからである。フラックス密度 $S[\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}]$ 、アンテナの有効面積 $A_e[\text{m}^2]$ とアンテナ温度の間には、

$$kTa=SA_e/2 \cdots (5)$$

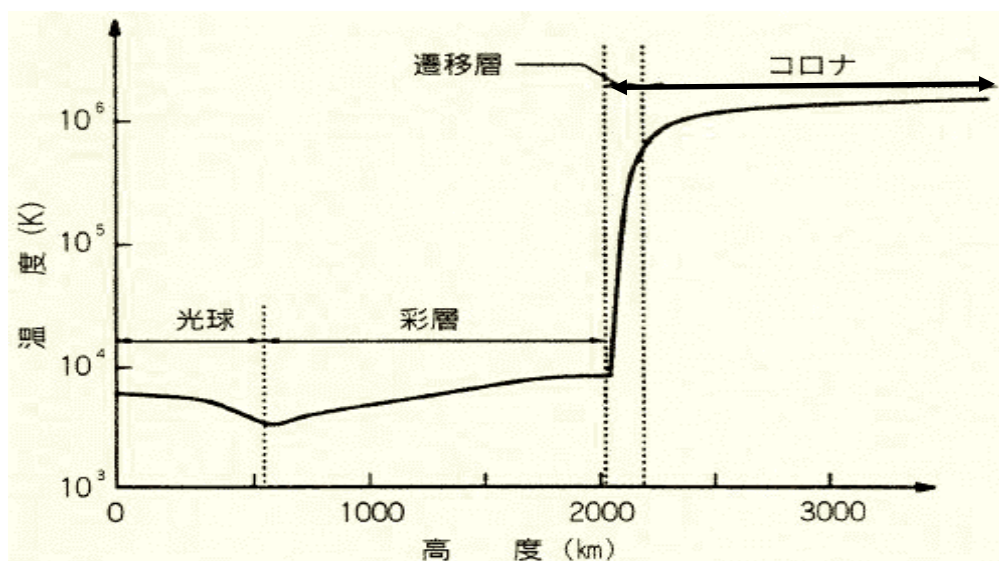
なる関係がある。右辺の分母の 2 は、BS アンテナの場合、右回り円偏波成分のみを受信するのでフラックス密度の 2 分の 1 が受信電力に寄与するからである。アンテナの利得の標準値として 33.8dB とある。これは、このアンテナの有効面積が無指向性アンテナの有効面積の $10^{3.38}$ 倍、すなわち 2.4×10^3 倍であることを示す。無指向性アンテナの有効面積は $\lambda^2/4\pi$ であるから、 $\lambda=2.5\text{cm}$ として計算すると $5.0 \times 10^{-5}\text{m}^2$ である。したがって、このアンテナの有効面積は、 $A_e=1.2 \times 10^{-1}\text{m}^2$ である。式 (5) に A_e としてこの値を入れ、測定から得たアンテナ温度を用いると $S=4.8 \times 10^{-20}\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ を得る。

太陽電波の教科書によると、波長 2.5cm でのフラックス密度は太陽焦点発動によって変化するが、 $2 \sim 5 \times 10^{-20}\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ の程度である。したがって、ここで得たフラックス密度 S は、妥当な値といえると考えられ、アンテナ温度と出力電圧の直線性を仮定すると、期待される範囲に入っているといえる。

太陽は巨大なガス球であり、外装部は温度構造を持っている。可視光で観測される太陽面を光球と呼ぶが、光球面の温度は約 6000K である。光球からさらに外層へは、温度 4200K 程度と極小になる層を経て 10^6K のコロナへつながる。この間、数 1000km 程度である。波長によって見通せる距離が異なるので、電波でも光球を見ているとは限らない。12GHz で観測される層の温度 $T_b[\text{K}]$ 、地球から見た太陽の立体角を Ω_s とすると、放射式としてレイリー・ジーンズの式が使えるので、

$$S=(2kT_b/\lambda^2) \cdot \Omega_s \cdots (6)$$

である。角半径を光球と同じ 0.27° 程度と考えて立体角を計算し、式(6)を用いると、上で得た S から $T_b=1.6 \times 10^4\text{K}$ であった。



図より $T_b = 1.6 \times 10^4 \text{ K}$ はコロナ底部の温度に当たる。したがって、波長 2.5 cm の電波では、主にコロナ底部からの放射が観測されていると考えられる。

§ 7、参考文献

- 1) 前田 耕一郎 『BS アンテナを用いた電波実験』大学の物理教育 1999-3号
- 2) 西尾 正則 月刊天文ガイド別冊 Vol.5 (1996)
- 3) IYA2009 (20) Fujii ryuji
(<http://www.astro-hs.net/sun/sun2008-4.pdf#search='IYA2009 20'>)
- 4) マイクロ波検波増幅ユニット 『RFD-1500』 (エレクトロデザイン株式会社)
(<http://www.edcjp.jp/>)
- 5) デジタルマルチメータ 『PC5000』 (三和電気計器株式会社)
PC Link Plus (三和電気計器株式会社)
(<http://www.sanwa-meter.co.jp/japan/product/dmm/pc5000.htm>)
- 6) 理科年表 平成 20 年版

§ 8、謝辞

本研究を行うにあたり様々なご指導をして下さいました。山本 常夏准教授、梶野 文義教授、村木 綏教授には、心から感謝申し上げます。

そして、諸先輩方並びに四回生の皆様方に、多大なる御力添えをしていただき誠にありがとうございました。