

# 太陽バースト観測用 35 GHz 偏波計

沢 正樹・関口英昭・中島 弘

The 35 GHz Polarimeter for Solar Burst Observations

by

M. Sawa, H. Sekiguchi, and H. Nakajima

(昭和 59 年 6 月 28 日受理)

## 1. はじめに

野辺山太陽電波観測所に新設された 35 GHz 偏波計は、太陽全面を常時監視して、バーストの強度および偏波を測定する装置である。波長 8 mm というミリ波帯での観測では、地球大気での電波吸収の影響が厳しく、とくに天候の変化による透過度の変化がバーストの測定を困難なものにする。これを避けるため、特別の工夫を導入した。本論文では、この工夫、装置の概略、および観測結果から調べたこの工夫の成功の程度はいかほどか、について報告する。

マイクロ波およびミリ波の領域で太陽バーストのスペクトルを精度よく測定することは、バースト源での高エネルギー電子・磁場についての情報を得るために重要である。しかし、ミリ波領域においては、バーストに比べて「静かな太陽」の成分が大きく、後者が地球大気中で時間的に変動する大きな吸収を受けるため、バースト成分の検出はきわめて困難となる。したがって、例外的な大きなバーストを除くと、これまでのミリ波でのバースト観測は、大口径アンテナを用いての太陽の一部分の観測として行われるか、もしくは干渉計での観測であった。これらの場合には「静かな太陽」は、その一部分だけが観測されているだけであるので、地球大気の影響はそれほど厳しくなくなる。但し、いつ、どこで起こるかの予想が困難なバーストに対しては、視野の狭い大口径アンテナでの観測は効率の良いものではなく、ドリフト・スキャン型の干渉計では時間分解能に難点がある。我々のグループでは、太陽全面を視野に入れる小口径のアンテナを用いての、ミリ波領域で

のバースト観測装置の可能性を検討してきた。その結果、2種類の方法が考案された。このうちの一つは、80 GHz 強度計として具体化された<sup>1)</sup>が、35 GHz 偏波計ではもう一つの方式、すなわち、アンテナの口径を適当に選ぶことによって地球大気での減衰量を大気からの電波放射で補って「静かな太陽」成分のふらつきを軽減する方式、を採用した。

以下、第2章では、この方式の考えかた・装置の概要を述べ、第3章では観測データから得られたこの方式の評価を論ずる。

## 2. 装置の基本設計および概要

### 1) アンテナ系

地球大気を通して太陽からの電波を観測する時のアンテナ等価温度  $T_A$  は、

$$T_A = e^{-\tau}(T_Q + T_B) + (1 - e^{-\tau})T_C \quad (1)$$

となる。ここで、 $T_Q$ 、 $T_B$  は、各々、大気がないとした場合の「静かな太陽」およびバーストのアンテナ等価温度、 $T_C$  は大気の温度、 $\tau$  は大気の視線方向の光学的厚さである。この式の第一項および第二項は太陽および大気からの電波放射の寄与分である。仮にバーストが起こっている場合を考えても、通常のバーストでは  $T_B \ll T_Q$  であり、 $T_B$  は無視することができるので、以下この項は考えない。大気吸収による減衰率（大気の透過度）を  $\eta$  とすると、 $\eta = e^{-\tau}$  であるから、 $\eta$  の変化  $\Delta\eta$  による  $T_A$  の変化量  $\Delta T_A$  は、

$$\Delta T_A = \Delta\eta(T_Q - T_C) \quad (2)$$

となる。つまり、(1) 式の第一項と第二項の変化量は打ち消し合う傾向がある。

(2) 式の右辺をゼロにすることを考えてみよう。 $T_C$  は大気の温度であるから、通常の条件下では、およそ 300 K であろう。一方、アンテナ等価温度は、天体の電波フラックス  $F$  とアンテナ口径から、次の式で定まる；

$$2kT_A = F \cdot \pi(D/2)^2 \cdot (\text{アンテナ効率}) \quad (3)$$

ここで  $k$  はボルツマン定数で、電波源の大きさはアンテナのビーム幅より小さいと仮定した。(3) 式を使えば、 $T_A$  を 300 K とするアンテナ口径を求めることができる。

さて、以上から 35 GHz での太陽観測の実際を考察してみる。これまでに、33.9 GHz および 36 GHz での「静かな太陽」のフラックス値の観測データが報告されている<sup>2)</sup>ので、ここではその値を内挿することで、35 GHz における  $F$  の値として 2450 太陽電波フラックス単位 (solar flux unit;  $1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ ; 以下 sfu と記す) を使うことにする。アンテナ効率は一般的に 0.5 程度である。すると、(3) 式より、アンテナ口径  $D$  を約

30 cm とすることで、 $T_A \approx 300 \text{ K}$  となる。この時、アンテナの指向性（ビーム半値幅）は、 $\lambda/D=0.028$ 、つまり約  $1.6^\circ$  で、太陽の視直径  $32'$  よりかなり大きい。

仮に、アンテナ口径を「太陽全面視野」の条件の下で最大としてみよう。この時、アンテナ口径は 90 cm、 $T_A$  は約 3000 K となる。大気吸収の問題がなければ、信号対雑音比はこの設計が最良となる。しかし、これでは  $4\eta=0.1$  で「静かな太陽」のフラックスの約 8% (200 sfu) のふらつきが生じてしまう。これは平均的なバーストのフラックス値よりも大きい。これではよほど天候が安定している時以外はバーストの観測ができない。

一方、 $D=30 \text{ cm}$ 、 $T_A \approx 300 \text{ K}$  を採用すれば、(2) 式より、 $4\eta$  の変化では見掛け上、出力の変化は起きないこととなる。 $(T_A - T_C)$  を 30 K 以下にしておけば、 $4\eta=0.1$  でも「静かな太陽」の 1% (25 sfu) 程度のふらつきとなり、かなり雲の多い天候でも弱いバーストの検出が可能となる。

以上のような考察から、我々は、直径 30 cm のアンテナを採用した。アンテナ系はカセ

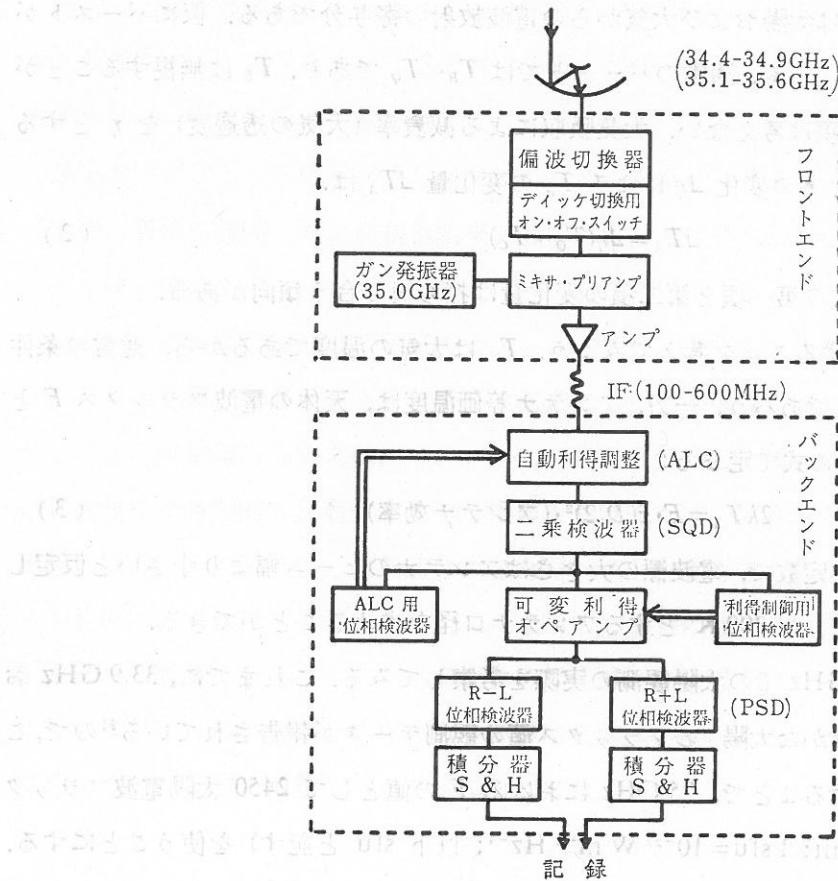


図 1 受信機のブロック・ダイアグラム (概略図)

グレン方式で、主鏡は焦点距離 120 mm の放物面鏡、副鏡は口径 55.2 mm の双曲面鏡とした。アンテナは 80 GHz 強度計と一諸にひとつの赤道儀式架台の上に載せたので、80GHz 強度計の論文<sup>1)</sup>の図 3 を参照していただきたい。

## 2) 受信機系

受信機は通常のディック切り換え方式のものである。ブロック図を図 1 に示す。装置の諸元は次の通り。

観測周波数	34.4~34.9 GHz および 35.1~35.6 GHz
(帯域幅	1 GHz)
フロント・エンド雑音指数	7 dB
(等価雑音温度	1200 K)
偏波出力	R+L とよび R-L
偏波切り換え周波数	640 Hz
ディック変調周波数	1.28 kHz
サンプル・ホールド出力	0.1 秒毎に両偏波出力

フロント・エンドでは、ミキサ・プリアンプにダブル・サイドバンドの広帯域・低雑音ミキサ(雑音指数 4 dB)を採用した。ローカル周波数は 35.0 GHz, IF 周波数は 100-600 MHz である。バック・エンドでは、受信機出力の安定化を図るため、ALC (自動利得調整)回路をいれてある。この ALC は、ディック変調用オン・オフ・スイッチがオフ側(つまり常温参照信号の側)に倒れた時の二乗波出力のみを取り出す PSD (位相検波)出力が一定になるように働く。また、最終の出力のダイナミック・レンジを拡げるため、二乗検波出力の直後に可変利得のオペ・アンプが挿入してあるが、これの制御のために利得の低い PSD 回路が別に用意されている。これは、35 GHz のようなミリ波領域では「静かな太陽」成分が大きく、RF や IF 部では大きなダイナミック・レンジを必要としないことを利用したもので、通常の自動減衰器の代わりにするものである。

なお、受信機の最小検出アンテナ等価温度  $\Delta T_{\min}$  は、

$$\Delta T_{\min} = 5 \times 2(T_R + T_A) / (\text{帯域幅} \times \text{積分時間})^{1/2} \quad (4)$$

となる ( $T_R$  は受信機の等価雑音温度; 1200 K) ので、積分時間 0.1 秒で約 1.5 K となる。これは最小検出フラックス値にすると、約 12 sfu に相当する。(4)式では、ふらつきの標準偏差の 5 倍をもって最小検出量を定義している。右辺の 2 番目の定数 2 は、ディック方式の採用に伴うものである。)

### 3. 装置の性能の評価

35 GHz 偏波計は 1983 年 5 月に完成し、以後、試験観測を経てルーチン観測に移った。既に 1 年有余の観測データが集まっているので、実際の観測結果から「大気からの電波放射で太陽からの電波の大気による減衰分を補う」という方式の可否について論ずることが可能となった。本章では、大気吸収の影響の大きさ、およびパーストのフラックス値の測定精度について述べる。

#### 1) 大気透過度の天頂角による変化

アンテナを太陽から外せば (以下、スカイの測定と呼ぶ)、(1) 式は、

$$T_A = (1 - \eta) T_c \quad (5)$$

となる。したがって、 $T_A$  より  $\eta$  の値を求めることができる。

図 2 は、アンテナを天頂角  $0^\circ$  から  $60^\circ$  まで傾けた時のスカイの  $T_A$  の測定結果を示したものである。この測定は快晴の日を選んで、1984 年 5 月 22 日の夕方に行った。図の縦軸は  $T_A$  であるが、これの絶対値を求めるため、次のような手続きを使った (35 GHz 偏波計には  $T_A$  の絶対測定を可能とする参照点は 300 K の一点しかなく、縦軸のスケールが決まらない; 図 1 参照)。吸収に効く地球大気は、厚さがせいぜい 10 km 程度であろうから、平行層状大気構造と考えてよい。すると、 $\tau$  の天頂角に対する依存性は sec 関数で表されることになり、したがって、

$$T_A = [1 - \exp(-\tau_0 \sec \theta)] \cdot T_c \quad (6)$$

であるから ( $\theta$  は天頂角)、これと図 2 の測定結果を比較して、 $\eta_0$  (天頂角  $0^\circ$  の時の  $\eta$ ) = 0.89 および図 2 の縦軸右側のスケールが求められる。

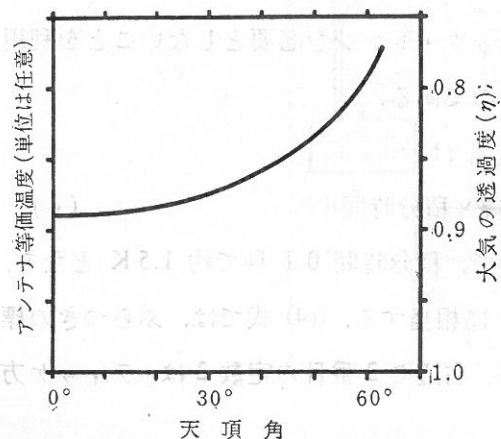


図 2 スカイのアンテナ等価温度の天頂角による変化。地球大気からの放射はアンテナの天頂角とともに増大する。縦軸右側にこの変化から推定した大気透過度  $\eta$  の値を示してある

太陽バースト観測用 35 GHz 偏波計

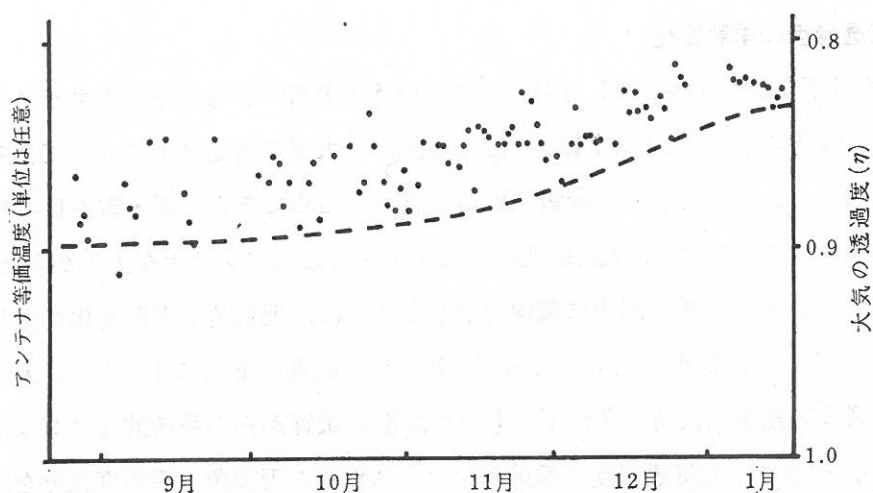


図 3 スカイのアンテナ等価温度の季節変化. スカイの場所は太陽の北  $3^\circ$  にとってあるため, 天頂角の季節変化を反映した変化 (破線) が見られる. バラツキは一日毎の天候の変化によると思われる. 縦軸右側に大気の透過度  $\eta$  の推定値が示してある

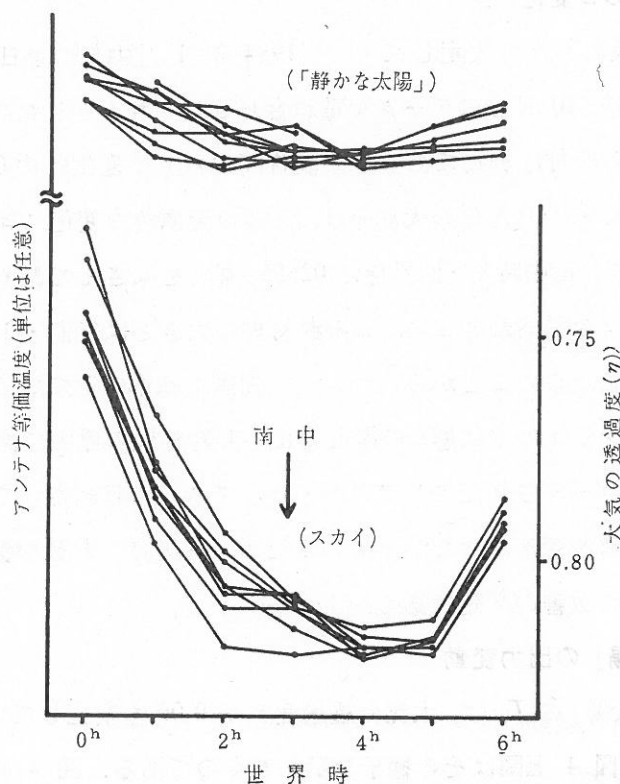


図 4 スカイのアンテナ等価温度の日変化 (下図) と「静かな太陽」のアンテナ等価温度の日変化 (上図). 太陽の高度の時間変化によって大気の透過度  $\eta$  (下図の縦軸右側) が変わっても「静かな太陽」の出力はあまり変わらない. 大気からの放射で補っているからである. なお, 両図の縦軸は同じスケールである

## 2) 大気透過度の季節変化

1983年8月下旬から1984年1月中旬までの約5ヶ月間の、毎日正午のスカイの $T_A$ の測定結果を、図3に示す。ただし、図の右側の縦軸は、大気透過度 $\eta$ で示してある。この時期を選んだのは、梅雨時および降雪の影響を避けるためである。雨・雪の日のデータは除いてある。スカイの測定は、太陽観測中に毎正午時ごとにアンテナを太陽から北へ約 $3^\circ$ ふって行われる。その結果、図中に破線で示したように、天頂角の季節変化が生じる。この破線は、図2より、推定したものである。破線が実測点の下側にくるのは、天候の影響であろう(図2の結果は快晴の条件下のものである)。破線からの系統的なズレはほとんど見られない。つまり、大気透過度の季節変化は、スカイの天頂角の季節変化分を除けば、それほど大きくないのであろう。破線の上方での $\eta$ のバラツキは、夏期で約0.06、冬期には約0.03程度で、冬期の方がやや小さくなっている。これは、気温が低くなるため、空気中の水蒸気の上限が小さくなるためと思われる。

## 3) 大気透過度の日変化

図4下図は、比較的天候が安定していた1984年1月中旬の毎日・毎正時のスカイの $T_A$ の測定結果を、約10日分のデータを重ね合わせてプロットしたものである(右側の縦軸には $\eta$ のスケールが付け加えてある)。観測時間中の $\eta$ の変化は約0.09、日毎のバラツキは約0.03であった。 $\eta$ の日変化の大部分は、太陽の天頂角の変化に伴うものであるはずなのに、予想に反して、南中時刻(世界時で02<sup>h</sup>55<sup>m</sup>頃)をはさんで顕著な非対称性が見られる。1年間のデータを調べたところ、この非対称の大きさは午前・午後の気温差と相関していることが判った。このことから、ディック変調で基準としている常温雑音源(実はオン・オフ・スイッチのオフの状態)の温度変化が非対称性の原因であると思われる。雑音源は、温度コントロールされたプリアンプ・ボックス内に収納されているが、外気に露出しているホーン・導波管部につながっているため、外気温の影響を受けるのであろう。今後、確証を得た上で改善の予定である。

## 4) 「静かな太陽」の出力変動

一方、「静かな太陽」の $T_A$ は、大気透過度 $\eta$ が0.09も変化しているのに、ほんの僅かしか変わらない。図4上図はその様子を示したものである。図4の二つの図は、同一の $T_A$ のスケールでプロットしてある。

$T_A$ の一日の変化量は、フラックス換算でおよそ50 sfuで、仮に $T_A \gg 300\text{ K}$ とした場合の計算値250 sfuよりかなり小さくなっている。短時間での変化量はさらに小さいので、

バーストの発生を識別し易くなっていることは間違いない。

#### 5) バーストのフラックスの決定精度

バーストのフラックス値の決定は、次のような手続きで行う。毎正時にアンテナは自動的にスカイの測定を行うので、バーストの発生が確認された場合、近くのスカイの値との差を読み取って、

$$T_A'(\text{バースト時}) = \eta(T_Q + T_B) \quad (7)$$

$$T_A'(\text{バースト前}) = \eta(T_Q) \quad (8)$$

が得られ、(8) 式の出力が 2450 sfu に相当するとして、両出力の比からバーストのフラックス値を評価する。η の値そのものはバーストのフラックス値に直接の影響を及ぼさないことに注意して頂きたい。

この決定精度であるが、誤差の原因としては、①スカイ、バースト時、バースト前の三点での η の値の違い、②各点での  $T_A$  の読み取り精度、の二つが考えられる。②は、出力レベルのフラツキによって決まるが、実測の結果、大気の安定な場合で約 5 sfu 程度、曇っている時で約 10 sfu 程度であった。雨の降っている場合、ないしは厚い雲（例えば雷雲のような）がある時には、フラツキの程度はずっと大きくなる。他方、①については、評価は困難であるが、図 4 下図に見られるように η の時間変化は 1 時間程度ではあまり大きくないので（雨・厚い雲の存在する時を除く）、バーストのフラックス値に約 5% 程度の誤差を与えるにとどまるものと思われる。η の値としてバーストの両側のスカイからの内挿値を用いれば、もう少し小さく押えることが可能であろう。降雨時・厚い雲の存在する時には、バーストのフラックスを正しく決定することはほとんど不可能である。これらの時には、η の時間変化はしばしばとても速く、またアンテナのホーンについた水滴がアンテナ効率そのものを変動させてしまう。

#### 6) 初期の観測結果

バーストの観測例を紹介することで、この装置が比較的うまく働いていることを示しておく。

1983 年 5 月から 1984 年 5 月までに、約 40 個のバーストが観測された。バーストと識別されたもののうち最も小さなバーストは 10 sfu 程度のもので、100 sfu 以下のものが約半数を占めている。

1984 年 4 月 7 日のバーストのタイム・プロフィールを、17 GHz および 80 GHz とともに、図 5 に示した。このバーストのピーク・フラックスは、35 GHz では約 80 (±10) sfu



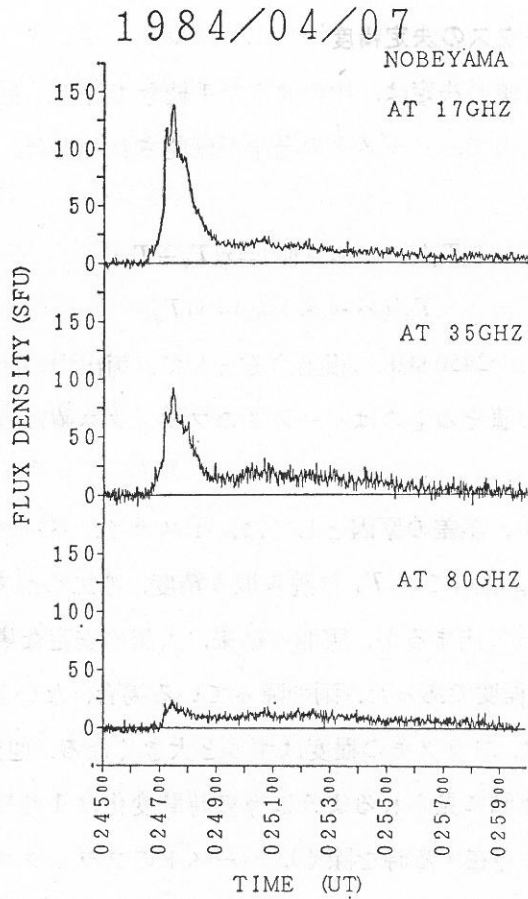


図 5

であるが、3 周波の全てでほぼ同程度の観測精度が達成されていることがわかる。これは天候が比較的良好な場合の例であるが、前述のとおり、降雨・降雪時を除いてほとんど観測が可能である。

#### 4. ま と め

アンテナ口径を適当に選ぶことによって観測の障害となる地球大気の影響を軽減し、バーストの強度・偏波を精度よく観測しようとした所期の目的はほぼ達成され、35 GHz で約 10 sfu 程度の微弱なバーストの検出が可能となった。この結果、80 GHz 強度計とともに働くことで、今後はマイクロ波バーストのミリ波帯域での時間変動・スペクトルが求められることとなった。両装置とも弱いバーストの検出が可能なので、たくさんのバーストを受けて活躍することが期待される。

## 太陽バースト観測用 35 GHz 偏波計

本装置の設計および調整にたいし、多くの助言・指導をいただいた甲斐敬造・小杉健郎両氏、また製作にあたり協力をいただいた野辺山太陽電波観測所の技官の皆様感謝する。本装置は、文部省科学研究費補助金 (No. 57103004) からの援助によって製作されたものである。

### 参考文献

- 1) 関口英昭, 中島 弘, 篠原徳之, 川島 進, 塩見靖彦: 1984, 太陽バースト観測用 80 GHz 強度計, 東京天文台報, **20**, 327-341.
- 2) Kuseski, R. A. and Swanson, P. N.: 1976, 'The Solar Brightness Temperature at Millimeter wavelengths', *Solar Phys.* **48**, 41.