

2006年10月5日

2006年10月25日改版

## 22GHz試験受信機による山口32m電波望遠鏡の試験受信

藤沢健太

### (1) はじめに

山口32m電波望遠鏡は、プロジェクト開始当初から22GHz観測を計画していた。しかし建設時(1979年)の記録では鏡面精度が約1mmであり、22GHz観測に耐えるかどうか疑問ともされていた。また給電部が8GHzに特化されているため、主鏡面の照射パターンが良くない可能性などが指摘されていた。

山口で本格的な観測を行う22GHz受信システムを構築する前に、試験受信機を製作して能率などの評価を行い、その結果をもとにして受信システムを設計するのが良いため、2005年度の国立天文台共同開発経費を利用して試験受信システムを製作した。その単体試験の結果は「22GHz単体試験 060730.doc」に報告されている。

システム雑音温度の値は約500Kと予想外に悪くその原因も不明であるが、試験観測には使えることが明らかにされたので、2006年10月5日に山口32mに設置して受信試験を行った。以下ではその内容と結果について報告する。

### (2) 作業

#### 2-1. 日時

例年、山口32mは夏の間はメタノール6.7GHz観測を行っている。今回の試験受信はメタノール6.7GHz観測システムから、通常の8GHz観測システムに移行する時期の間に挟んで行われている。作業は10月5日の10時30分から15時にかけて行われた。作業は藤沢、土居および前半のみ杉山が参加している。天気は曇りで、22GHzでは減衰が強く作用することが予想される。

#### 2-2. 作業

作業はまず6.7GHz→22GHz給電部の変更から開始した。どちらの給電部も比較的軽いため、作業は1時間程度で終了した。22GHz給電部は、4個のテーパ管、ポラライザ、アンプその他からなる。これを、大きいほうから3個のテーパ管を接続した状態でアンテナホーンに接続し、次に最小のテーパ管～初段アンプまで結合したパーツを接続、さらにアイソレータ～2段アンプを結合したパーツを接続した。アンプの出力は高周波用同軸ケーブル(金色)2本を接続して約10mの長さとして機器室のパワーメータ(アンリツ)に接続した。接続した試験受信機の様子を図1に示す。

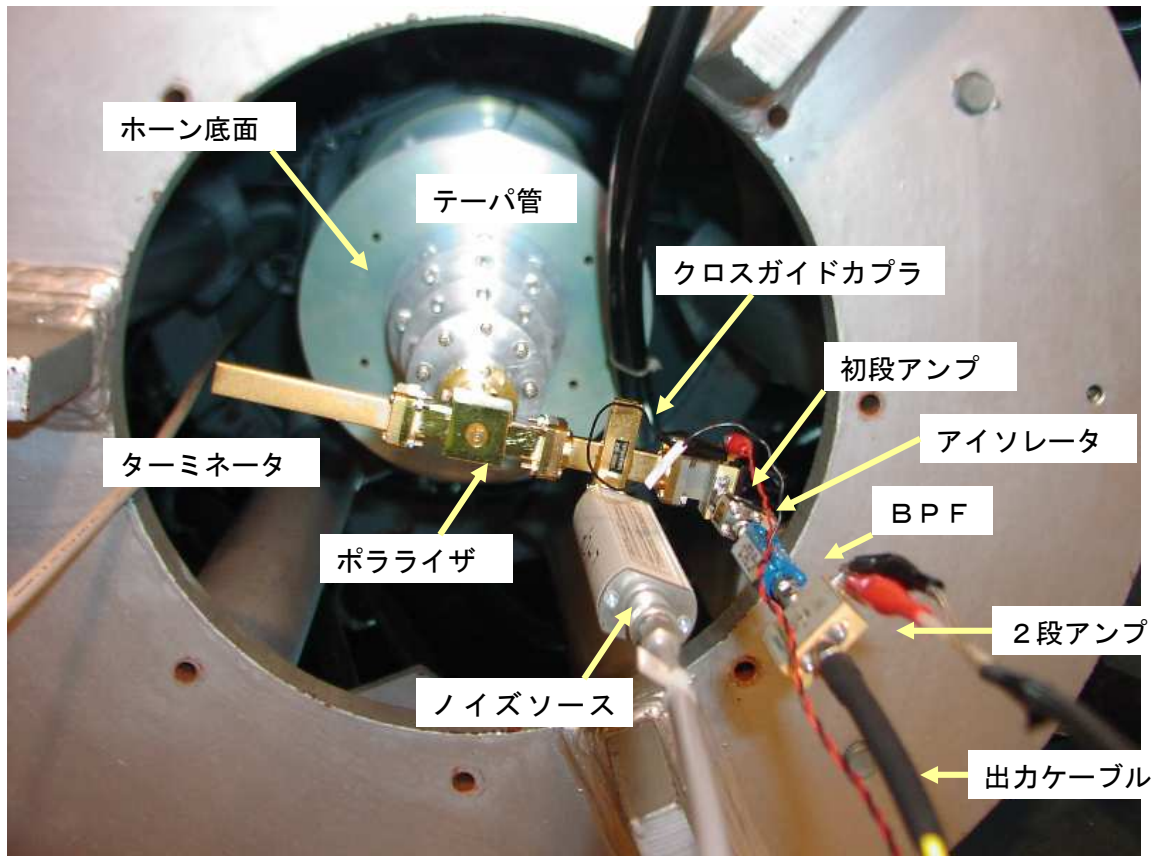


図1. 山口3.2mに接続した試験受信機  
 受信機はテーパ管を通じてホーン底面にぶら下がっている。

### 2-3. 電源供給

アンプには機器室に設置した低電圧電源から10Vを供給（ノイズソース用のCH2側の同軸ケーブルを電力線として使用した）し、またクロスガイドカプラにはノイズソース（アジレント346C=8GHzのLHCP（CH1）用）を接続した。アンプの電圧は当初、15Vの過大電圧を印加してしまったが、途中で気づいて10Vの適正電圧に修正した。流れていた電流はどちらの状態でも0.440A（2つのアンプの合計）だった。

### 2-4. ケーブルロス

電圧と電流が単体試験時の結果を再現したので、測定を開始した。パワーメータの測定パワーが約-54dBmときわめて小さく、アンプの電源をON/OFFしても測定値にほとんど変化が無いことから、ケーブルによる減衰が大きいと考えられた。そこで2本の金色ケーブルのうち下側の1本を低損失黄色ケーブル（単体試験時に使用したもの）に変更して再度測定を行ったところ、パワーメータで約-45dBmの受信パワー（帯域幅は22-23GHzの1GHz）を得た。ノイズソースのON/OFFで約1dBの差が出ており、一定の測定が行えることがわかった。それでもなおケーブルロスが重大であり、

特にスペアナの測定ではスペアナ自体のノイズが結果に影響すると考えられたため、パワーメータ・スペアナを足場の上に運び上げ、金色ケーブルを外して黄色ケーブルだけで測定を行った。パワーメータの値は約 $-27$  dBmとなり、ケーブルロスが強く作用している（約 $18$  dBの減衰）ことが明らかになった。今後の $22$  GHz試験で注意すべき点である。スペアナで測定中の状況を図2に示す。



図2. 足場上でのスペアナによる測定の様子  
黄色ケーブル1本だけを使った。W49Nのスペクトルが見えている。

受信が可能となったので、水メーザ天体W49Nの受信を試みた。以下、この小節では時系列に作業内容を記述する。ポインティング調整を行わず、ケーブルロスがある状態（足場に運び上げる前）で、仰角が $10$ 度程度では、 $0.2$  dB程度と極めて微弱ではあったが、受信に成功し、W49Nの複雑な構造を持つ水メーザスペクトルを確認できた。次にポインティング調整を行った。仰角、方位角に順次オフセットを設定しスペクトル強度がピークとなる位置を探した。その結果、方位角オフセットは $0$ 、仰角オフセットは $-0.9$ 分角の位置で受信強度最大となった。1分角程度のオフセットが存在するため、実際の観測ではポインティング・追尾システムの調整が必須である。ピークに対して2分角以上のオフセットでは受信強度が極めて弱くなった。このことはビームサイズが2分角より小さい（おそらく半値全幅が2分角程度）であることを示唆する。

ケーブル損失を抑えるために足場上で測定を行った結果、W49Nのスペクトルはノイズフロアから3 dBの高さに受信できた。図3に受信したスペクトルの図を示す。

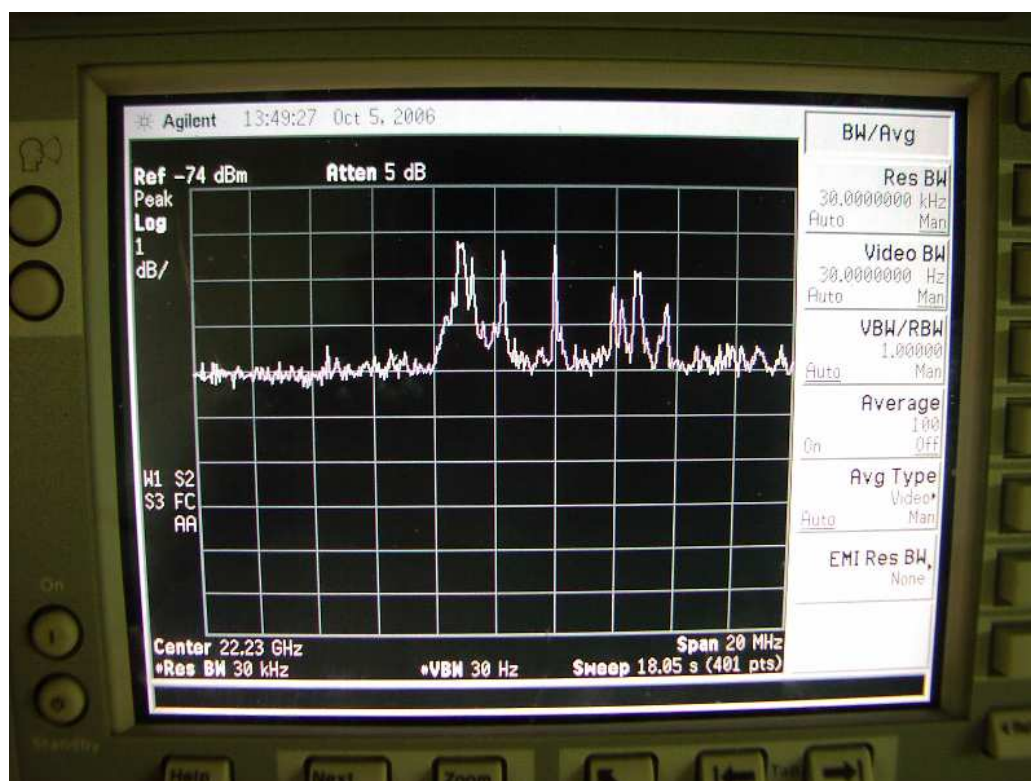


図3. W49Nのスペクトル

山口32mの22GHz初受信信号。CF=22.235GHz, RB=30kHz, Span=20MHz, 1dB/div.

次に信号ケーブルをパワーメータに接続し、システム雑音温度の測定を行った。測定の詳細は次の節で述べる。

### (3) システム雑音温度測定

#### 3-1. 測定

システム雑音温度測定にかかわる観測システムブロック図を図4に示す。試験受信機の校正部としてクロスガイドカプラがあり、ノイズソースが接続されている。カプラの結合度20dBには±0.5dB程度の誤差があると考えられる。この補正データも取得するため、測定にはR-Sky法とノイズ付加法を併用し、Sky、Sky+NS、R、R+NSの4通りについて測定を行った。アブソーバでホーン開口部を覆うことでR状態を実現した。R状態では、アンプゲインが変動しない限り同じ結果が得られると期待される。R状態の測定は2回行い、その後の測定は仰角を変えながらSkyおよびSky+NSで測定した。全ての測定値を表1に示す。

表 1. システム雑音温度測定結果

方位角 [° ]	仰角 [° ]	状態	パワー [dBm]
98	45	Sky	-26.977
		R	-25.248
		R+NS	-24.525
		R	-25.247
		Sky	-26.973
		Sky+NS	-25.923
		Sky	-26.944
	85	Sky	-27.154
		Sky+NS	-26.063
		Sky	-27.149
		R	-25.188
		R+NS	-24.466
		R	-25.188
		Sky	-27.175
240	30	Sky	-26.560
		Sky+NS	-25.563
	20	Sky	-26.221
		Sky+NS	-25.298
	15	Sky	-25.985
		Sky+NS	-25.105
	12	Sky	-25.824
		Sky+NS	-24.970
	10	Sky	-25.692
		Sky+NS	-24.867

### 3-2. システム雑音温度モデル

解析には次のモデルを用いた。大気の等価温度を  $T_{atm}$ 、大気の光学的厚みを  $\tau$ 、ビーム伝送系のロス係数を  $L_b$ 、給電部のロス係数を  $L_f$ 、カプラを通じて注入される雑音温度を  $T_{NS}$ 、受信機雑音温度を  $T_{RX}$ 、環境温度を  $T_{amb}$ 、アンプゲインを  $G$ 、受信パワーを  $P$  とする。また大気外には宇宙背景放射の 3 K が存在する。ビーム伝送・給電・受信部の反射は無視する。ロス係数  $L$  と光学的厚み  $\tau$  には  $L = e^{-\tau}$  の関係がある。図 4 の「Tsys def pnt」は、クロスガイドカプラの位置がシステム雑音温度の定義点であることを示す。

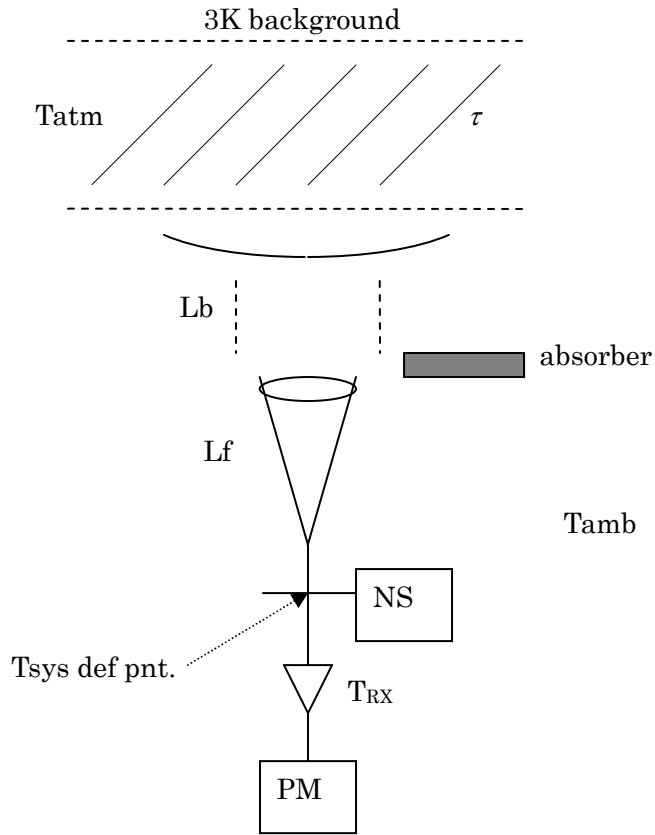


図4. システム雑音モデルの模式図

このモデルにおいて、ノイズソースをOFF、アブソーバをかぶせない状態 (Sky) でパワーメータ PM で測定される雑音パワー  $P_{sky}$  は

$$\begin{aligned}
 P_{sky} = G \{ & T_{RX} + T_{amb}(1 - L_f) \\
 & + T_{amb}(1 - L_b)L_f \\
 & + T_{amb}(1 - e^{-\tau})L_bL_f \\
 & + 3e^{-\tau}L_bL_f \}
 \end{aligned}$$

である。ここで  $T_{atm} = T_{amb}$  と仮定して展開し、さらに 3 K 背景放射を無視すると

$$\begin{aligned}
 P_{sky} &= G \{ T_{RX} + T_{amb}(1 - e^{-\tau}L_bL_f) \} \\
 &= GT_{sys}
 \end{aligned}$$

となる。なお、システム雑音温度は次の式で表される：

$$T_{sys} = T_{RX} + T_{amb}(1 - e^{-\tau} L_b L_f)$$

同様に、ノイズソースをON (S k y + N S)、アブソーバをかぶせた状態 (R)、アブソーバとノイズソース (R + N S) の各状態について測定されるパワーは次のとおりである。

$$\text{S k y} \quad P_{sky} = G\{T_{RX} + T_{amb}(1-L)\} \quad (1)$$

$$\text{S k y + N S} \quad P_{sky+NS} = G\{T_{RX} + T_{amb}(1-L) + T_{NS}\} \quad (2)$$

$$\text{R} \quad P_R = G\{T_{RX} + T_{amb}\} \quad (3)$$

$$\text{R + N S} \quad P_{R+NS} = G\{T_{RX} + T_{amb} + T_{NS}\} \quad (4)$$

ただしロス係数  $L \equiv e^{-\tau} L_b L_f$  を導入した。

これら4個の測定値からシステム雑音温度  $T_{sys}$  を計算する方法は以下の2通りである。

#### (A) R-S k y 法 (1, 3)

2個の測定値の比Yを

$$Y_1 \equiv \frac{P_R}{P_{sky}} = \frac{G\{T_{RX} + T_{amb}\}}{G\{T_{RX} + T_{amb}(1-L)\}}$$

これから

$$T_{sys}^* = \frac{T_{amb}}{Y_1 - 1} = T_{sys} L^{-1} \quad (5)$$

を得る。これは「大気の吸収量を含んだシステム雑音温度」と呼ばれるものである。システム雑音温度の定義点がクロスガイドカプラの位置であるため、大気以外のビーム伝送系・給電部のロスも含んでいる。

#### (B) N S 法 (1, 2)

2個の測定値の比Yを

$$Y_2 \equiv \frac{P_{sky+NS}}{P_{sky}} = \frac{G\{T_{RX} + T_{amb}(1-L) + T_{NS}\}}{G\{T_{RX} + T_{amb}(1-L)\}}$$

これから

$$T_{sys} = \frac{T_{NS}}{Y_2 - 1} \quad (6)$$

を得る。これは大気の吸収量を含んでいない。ノイズソースの雑音温度  $T_{NS}$  が既知であれば、(A) の結果とあわせてロス係数Lを知ることができる。

ノイズソースによる注入雑音温度  $T_{NS}$  は、ノイズソースの ENR（超過雑音比）とカプラの結合度  $C$  を用いて次の式で計算される。厳密には環境温度を知ることが必要だが、環境温度依存性は無視する。

$$T_{NS} = 290 \left( 10^{\frac{ENR}{10}} - 1 \right) C$$

今回の試験で用いたノイズソースの ENR は付録 A に示した。22.5 GHz では ENR = 14.38 dB、カプラの結合度は  $C = 0.01$  (20 dB) である。したがって  $T_{NS} = 85.3$  K を以下の解析で用いる。カプラの結合度が正確にわかっていないことから、10% 程度の誤差がある可能性がある。

R + NS の測定値を使うと、受信機雑音温度を以下の方法で知ることができる。

### (C) R-NS 法 (3、4)

2 個の測定値の比  $Y$  を

$$Y_3 \equiv \frac{P_{R+NS}}{P_R} = \frac{G\{T_{RX} + T_{amb} + T_{NS}\}}{G\{T_{RX} + T_{amb}\}}$$

これから

$$T_{RX} = \frac{T_{NS}}{Y_3 - 1} - T_{amb} \quad (7)$$

### 3-3. R を含む測定の結果

以下の解析では  $T_{amb} = 290$  K を仮定する。

R を含む測定は 2 回、仰角 = 45°、85° で行われている。さらに同じ状態で 2 回以上測定を行っている値がある。これらを平均してまとめた結果を表 2 に、測定結果から、式 (5) ~ (7) を用いて計算したシステム雑音温度に関するパラメータを表 3 に示す。

表 2. R を含む測定結果のまとめ

方位角 [°]	仰角 [°]	状態	パワー [dBm]
98	45	Sky	-26.964
		Sky+NS	-25.923
		R	-25.248
		R+NS	-24.525
	85	Sky	-27.154
		Sky+NS	-26.063
		R	-25.188
		R+NS	-24.466



表 3. R を含む測定値から得られるパラメータ

仰角 [°]	手法	計算値	結果
45 sec z = 1.414	R - S k y 法	$T_{\text{sys}}^*$	598 K
	N S 法	$T_{\text{sys}}$	315 K
	ロス係数	L	0.527
	R - N S 法	$T_{\text{RX}}$	181 K
85 sec z = 1	R - S k y 法	$T_{\text{sys}}^*$	505 K
	N S 法	$T_{\text{sys}}$	297 K
	ロス係数	L	0.588
	R - N S 法	$T_{\text{RX}}$	182 K

R - S k y で求めた  $T_{\text{sys}}^*$  に対して N S で求めた  $T_{\text{sys}}$  が 200 K 以上低い値となっている。ノイズソースの雑音温度は最大でも 10% 程度の誤差しかないため、これは真の値である。

受信システムの受信機雑音温度は、主に初段のアンプの NF によって決まる。ベガテクノロジーの検査成績書によると、アンプの NF は 22 GHz で 2.4 dB、23 GHz で 2.0 dB とされている。その中間の NF = 2.2 dB を採用すると、アンプの雑音温度は 191 K となる<sup>1</sup>。これは上記の  $T_{\text{RX}}$  測定値によく一致している。

R - S k y で測定したシステム雑音温度が高いのはビーム伝送系・給電部に大きな損失があることを示している。天頂で測定した結果は単体試験で得られた 495 K によく一致していることから、ロスは主に給電部で発生していると考えられる。

これらの結果を総合すると、受信機雑音温度は約 180 K、ロス係数は 0.5 ~ 0.6、ロスによる付加雑音が約 120 K、システム雑音温度は約 300 K、吸収係数を含めた雑音温度は約 500 K となる。

### 3-4. 天頂大気の光学的厚み

大気を平行平板と仮定すると、大気による吸収量は

$$L_{\text{atm}} = e^{-\tau_0 \sec z}$$

である。ここで  $z$  は天頂距離  $z = 90 - E1$  であり、 $\sec z = 1/\sin E1$  は大気を見通す長さに比例する値、 $\tau_0$  は天頂における光学的厚みである。異なる 2 つの仰角における  $L$  が得ら

<sup>1</sup> 雑音指数 (NF) と雑音温度の関係は次の式で表される： $T_{\text{AMP}} = 290 \left( 10^{\frac{\text{NF}}{10}} - 1 \right)$

れているので、これから  $\tau_0$  を計算できる。

$$L = e^{-\tau_0 \sec z} L_b L_f$$

より、

$$0.527 = e^{-\tau_0 1.414} L_b L_f$$

$$0.588 = e^{-\tau_0} L_b L_f$$

これから

$$\tau_0 = 0.264$$

$$L_b L_f = 0.765$$

を得る。 $L_b L_f = 0.765$  という低い値が、強くロスを起こしていることを示している。

### 3-5. R を含まない測定

測定の後半ではノイズソースだけで校正を行っている。 $T_{NS} = 85.3 \text{ K}$  を使ってシステム雑音温度を計算した結果を表 4 に、 $\sec z$  を横軸として、大気を含む・含まないシステム雑音温度の仰角依存性をそれぞれ図 5 に示す。大気を含むシステム雑音温度の計算には上で求めた  $\tau_0 = 0.264$  と  $L_b L_f = 0.765$  を使っている。大気を含むシステム雑音温度は  $\sec z = 3$  付近で既に  $1000 \text{ K}$  となり、損失が強く作用していることが明らかである。

表 4. NS 法によるシステム雑音温度と仰角依存性

仰角 [°]	sec z	T <sub>sys</sub> [K]	T <sub>sys</sub> * [K]
45	1.41	315	598
85	1	297	505
30	2	330	731
20	2.92	360	1017
15	3.86	380	1376
12	4.81	393	1829
10	5.76	408	2440

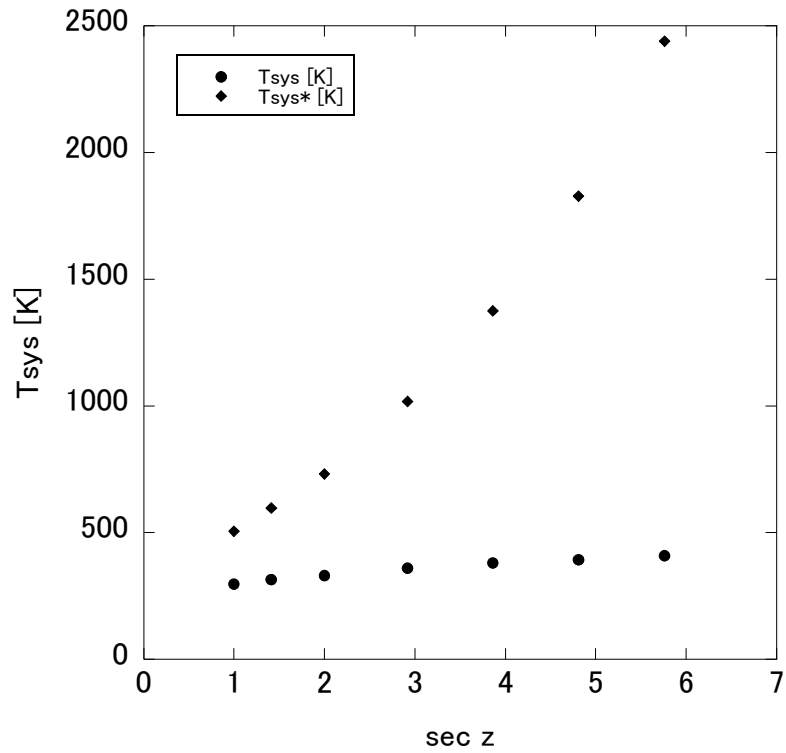


図5. システム雑音温度と仰角依存性

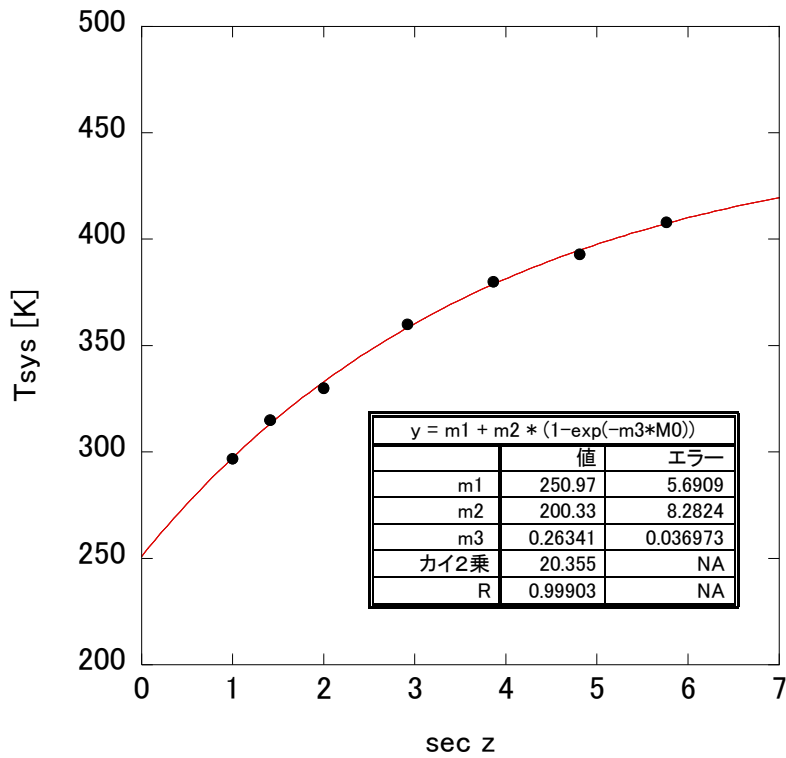


図6. システム雑音温度と当てはめ曲線

図6には大気を含まないシステム雑音温度をプロットし、あわせて大気を平行平板と仮定した場合のシステム雑音温度モデル

$$\begin{aligned}
 T_{sys} &= T_{RX} + T_{amb} (1 - e^{-\tau_0 \sec z} L_b L_f) \\
 &= T_{RX} + T_{amb} (1 - L_b L_f) + T_{amb} L_b L_f (1 - e^{-\tau_0 \sec z}) \\
 &= T'_{RX} + T'_{amb} (1 - e^{-\tau_0 \sec z})
 \end{aligned} \tag{8}$$

ただし

$$\begin{aligned}
 T'_{RX} &= T_{RX} + T_{amb} (1 - L_b L_f) \\
 T'_{amb} &= T_{amb} L_b L_f
 \end{aligned} \tag{9}$$

を当てはめた曲線を示す。当てはめの結果は次のとおりである。

$$\begin{aligned}
 T'_{RX} &= 250.97 \pm 5.69 \text{ [K]} \\
 T'_{amb} &= 200.33 \pm 8.28 \text{ [K]}
 \end{aligned}$$

一方、3.3および3.4で得られた受信機雑音温度  $T_{RX}=180 \text{ K}$ 、 $L_b L_f=0.765$ 、また  $T_{amb}=290 \text{ K}$  をもちいて (8) 式および (9) 式によって計算すると

$$\begin{aligned}
 T'_{RX} &= 248.15 \text{ [K]} \\
 T'_{amb} &= 221.85 \text{ [K]}
 \end{aligned}$$

となる。 $T'_{RX}$ は1%以下、 $T'_{amb}$ も10%の誤差で一致する結果を得た。

#### (4) 開口能率の推定

W49Nを観測した結果、仰角20度で約3dBのスペクトルが測定された。上で求めたシステム雑音温度から推定されるアンテナ温度  $T_a^*$  は約1000Kである。水メーザのカタログ (Valdettaro et al. 2001) にはW49Nのピークフラックス密度が30000 Jy と記載されている。フラックス密度とアンテナ温度から計算される開口能率は11%となる。これは極めて大まかな推定値であり、今後の目安程度と理解すべきである。

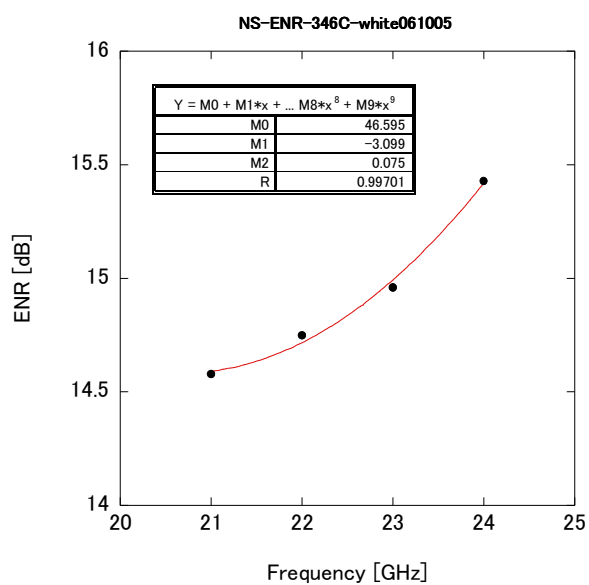
(以上)

付録A. 試験に使ったノイズソース346C

表A1. ノイズソース (アジレント346C) のENR

周波数 [GHz]	ENR [dB]
20	14.72
21	14.58
22	14.75
23	14.96
24	15.43

※8GHzのLHCP (CH1) 用、白



図A1. ENRの曲線