

卒業論文

日立・高萩アンテナの RF 系の開発

2019 年度
(令和 1 年度)

茨城大学理学部理学科物理学コース
学籍番号 16S2024A 高橋 亮成

概要

現在、日立・高萩アンテナの一部である RF 系では現在 7.5GHz-9.5GHz 用のアンプが使用されている。しかし、メインターゲットであるメタノールメーザーの周波数は 6.7GHz であるため性能が保証されていない。そこで、現在使用しているアンプに比べて周波数の保証範囲がより広いアンプを新たに購入しリニアリティ保証範囲、ゲイン等の性能を調べ、その結果に対して、入力される信号のパワーを想定し、それぞれのアンプが使用に適しているか考察した。今後として、現在使用しているアンプを継続して使用することを検討、あるいは黒体放射に対してのみ新たに購入したアンプを使用することが挙げられる。

目次

1 背景・目的	3
2 素子・用語	4
3 アンプのリニアリティ測定	5
3.1 測定装置	
3.2 測定方法	
4 結果	10
5 考察	24
6 まとめ・今後	25
7 謝辞	26
8 参考文献	27

1 背景・目的

日立・高萩アンテナには、RF(Radio Frequency)系と IF(Intermediate Frequency)系があり、RF 系では高周波数帯、IF 系では中間周波数帯の信号を扱う。上地康仁氏による茨城大学理学部卒業論文（2018）では、IF 系の整備を目的として IF 帯のアンプの性能測定を行っているが、本研究では RF 系の整備を目的とする。

日立・高萩アンテナの RF 系では、7.5-9.5GHz 用のアンプを使用していたため茨城観測局のメインターゲットであるメタノールメーザーの周波数 6.7GHz においては、必ずしもアンプの性能が保証されていなかった。また、今後、観測周波数を 5-10 GHz に拡張する検討を始めている。そこで、今回新たに 2-10 GHz 用のアンプを購入し、現在使用しているアンプと置き換え可能かどうか、リニアリティ保証範囲、ゲインなどの性能の測定を行った。

2 素子・用語

RF 系にはアンプ、アッテネータ等の素子があり、アンプは信号のパワーを増幅する素子である。アンプの増幅率をゲイン（利得）と言い、デシベル(dB)を単位として測定する場合は式(1)のように表される。アッテネータは信号のパワーを減衰する素子である。日立・高萩アンテナでは RF 系において、黒体を入力する際、出力パワーを通常の空を観測した際の出力パワーとほぼ等しくするために 10dB のアッテネータを入れる。アンプを RF 系に使用するにあたって、まずアンプのリニアリティが確保されている入力パワーの範囲を正確に確認する必要がある、ここでのリニアリティというのは、アンプの入力パワーと出力パワーの線形性のことである。

$$\text{ゲイン}G(\text{dB}) = \text{出力信号強度}(\text{dBm}) - \text{入力信号強度}(\text{dBm}) \quad (1)$$

単位の dB（デシベル）は、比の値を対数表示したものである。dB の定義は以下のようになっている。P₁、P₂は 2 点の電力（信号のパワー）である。

$$\text{電力比}(\text{dB}) = 10\log_{10} \frac{P_2}{P_1} \quad (2)$$

3 アンプのリニアリティ測定

3.1 測定装置

今回、現在日立・高萩アンテナで使用しているアンプと、新たに購入した2つのアンプの合計3つのアンプのリニアリティ測定を行った。現在使用しているアンプを4973、新たに購入したアンプをno.1、no.2とした。アンプ4973はPLANAR社製のPE2-28-7R5G9R5G-2R5-10-12-SFF、アンプno.1とno.2はそれぞれR&K社製のLA0210G-3010-M、LA0210G-4010-Mである。以下がそれぞれのアンプの仕様をまとめた表である。

	現在使用中のアンプ 4973	今回購入したアンプ no.1	今回購入したアンプ no.2
会社名	PLANAR	R&K	R&K
製品名	PE2-28-7R5G9R5G -2R5-10-12-SFF	LA0210G-3010-M	LA0210G-4010-M
帯域	7.5-9.5GHz	2-10 GHz	2-10 GHz
ゲイン	28 dB	typ 29 dB, min 27 dB	typ 42 dB, min 38 dB
flatness	-	2 dB max	2.5 dB max
1dB compression level	10 dBm	10 dBm (min)	10 dBm (min)
NF	max 3 dB	typ 3 dB, max 4.2 dB	typ 3 dB, max 4 dB
input VSWR	2	1.5	1.5
output VSWR	2	1.5	1.5
今回測定したもの	S/N : PL4973/0842	S/N : B05223-05	S/N : B60553-03

表1 各アンプの仕様

表1に示した諸性能の意味は以下の通りである。

1dB compression level：アンプの入力パワーレベルが増大していくと出力が飽和していき入力パワーレベルと出力パワーレベルの間でリニアリティが保てなくなる。リニアな関係から1dB低くなったときの出力パワーレベル。

NF(Noise Figure)：アンプを通したときどの程度ノイズが悪化するかを示す。入力信号 S_i 、入力信号に対するノイズを N_i 、出力信号を S_o 、出力信号に対するノイズを N_o としたとき

$$NF = 10\log_{10}(S_i/N_i) - 10\log_{10}(S_o/N_o) \quad (3)$$

で表される。

VSWR(Voltage Standing Wave Ratio)：進行波とその一部が反射された反射波によって生じた定在波の電圧の最大の振幅と最小の振幅の比率。進行波が反射される割合を γ としたとき

$$VSWR = (1 + |\gamma|)/(1 - |\gamma|) \quad (4)$$

で表される。

測定には図2のような装置を用いた。図3が信号源として用いるアンプとなっており、図4がこれの電源である。発生した信号はRF系で使われる信号を想定しホワイトノイズとなっており、およそ2GHzから10GHzの信号を含んでいる。この信号源、可変アッテネータ、二分配器(図5)を順に接続する。分配された一方はpower meter channel Aに、他方は測定対象のアンプ(図6)を繋げ、power meter channel Bへと繋げる。測定対象のアンプの電源には可変電源(図7)を使用する。信号は可変アッテネータを通った後、二分配されているため、power meter channel Aへと伝送される信号のパワーと、アンプに入力される信号のパワーは同じである。したがって、power meter channel Aの数値からアンプへの入力パワー、power meter channel Bの数値からアンプの出力パワーを読み取ることができる。図8上部の装置を操作することで、可変アッテネータの減衰量を変化させることができる。

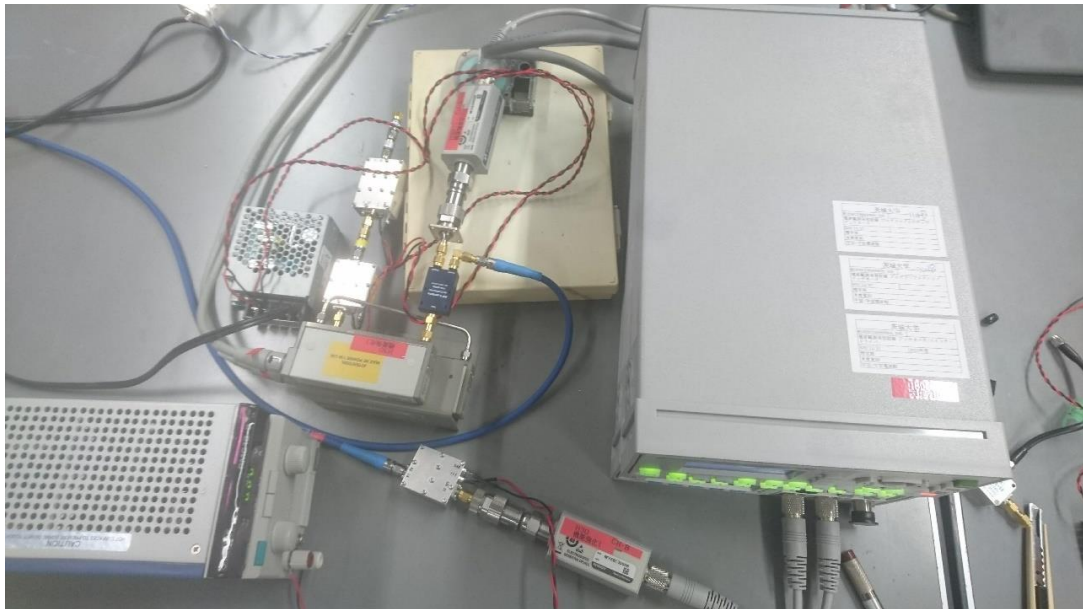


図1 測定装置の全体図



図2 信号源として用いるアンプ

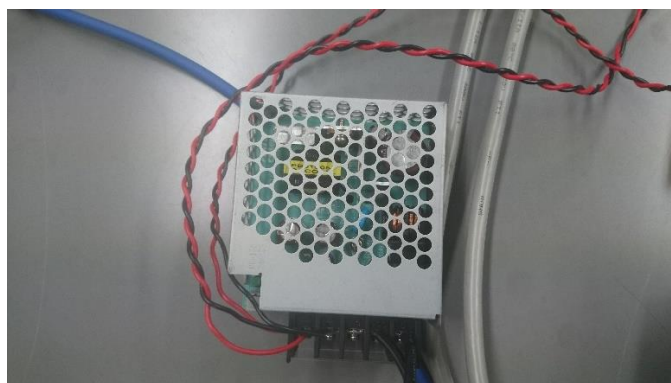


図3 信号源用の電源



図4 アッテネータ



図5 二分配器

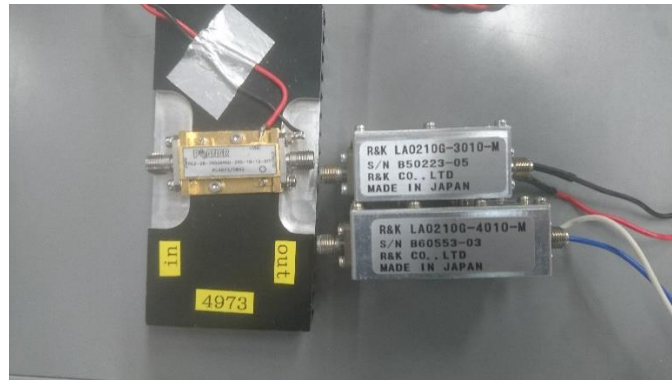


図6 測定対象のアンプ

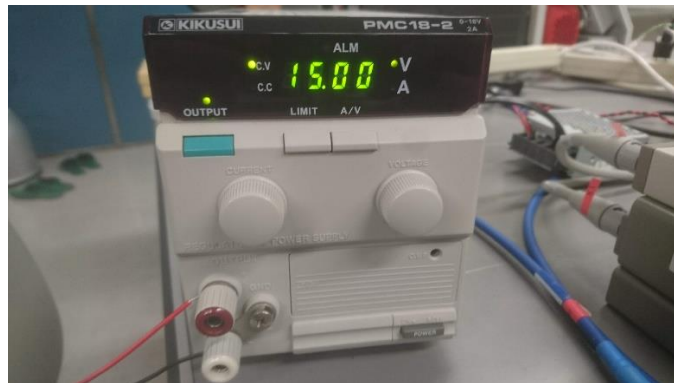


図7 測定対象のアンプ用の可変電源



図8 power meter（下）と可変アッテネータ（上）

3.2 測定方法

アッテネータで入力パワーを 1dB ずつ変化させて、power meter で入力パワー、出力パワーを読み取り、記録する。これを、電源電圧によってアンプの性能に変化があるかを確認するため、可変電源の値を 12V~15V まで変化させそれぞれの電源電圧で測定を繰り返す。power meter に繋がれている power sensor (図 9) は、 -70dBm から $+20\text{dBm}$ の範囲で使えるため、この範囲で信号強度を変化させる。数値を読み取った後、Excel でグラフを作成する。グラフは、横軸が入力パワー、縦軸が出力パワーのグラフと、横軸が入力パワー、縦軸がゲインのグラフの 2 つを作成する。そして、横軸が入力パワー、縦軸がゲインのグラフからリニアリティが確保される入力パワーの範囲を決める。一般に、アンプの入力パワーと出力信号パワーが線形である範囲を定めるときには、前述の 1dB compression level を用いる。しかし今回は、より高い精度で線型性を確保するために、横軸が入力パワー、縦軸がゲインのグラフで、ゲインが極大値から 0.2dB 変化するところまでの入力パワー範囲をアンプの使用推奨範囲とした。また、ゲインが 0.4dB 変化するところまでを使用可能範囲とした。横軸が入力パワー、縦軸がゲインのグラフで上に凸になっている付近で推奨・可能範囲を決める時は、ゲインの極大値からの変化を見て、下に凸になっている付近ではゲインの極小値からの変化を見た。

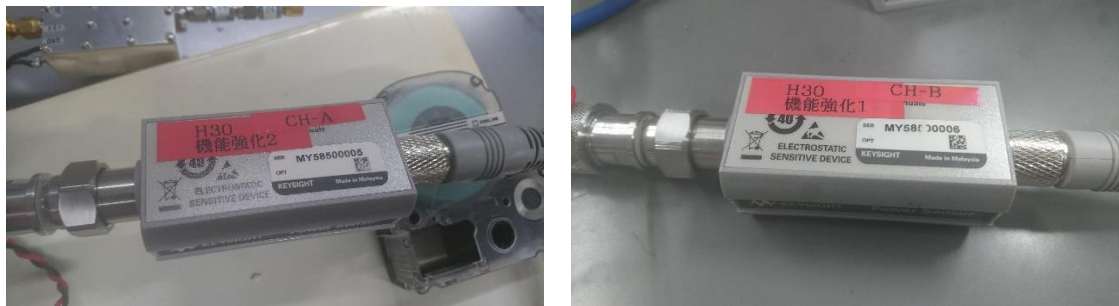


図 9 power sensor (左：channel A に接続、右：channel B に接続)

4 結果

今回、3 個のアンプで測定をし、それぞれで使用推奨範囲・可能範囲を調査した。以下にグラフ（図 10～46）、推奨範囲・可能範囲をまとめた表 2 を示す。横軸が入力パワー、縦軸がゲインのグラフにおいて、ゲインの極大値を「 $G_{\max}$ 」、極小値を「 $G_{\min}$ 」としている。入力パワー-ゲインの拡大グラフでは、ゲインが $G_{\max}$ （あるいは $G_{\min}$ ）から 0.4dB 変化する部分が確認できるように表示しており、赤色の線で示す範囲が使用推奨範囲（ $G_{\max}$ あるいは $G_{\min}$ から 0.2dB 変化する範囲）、灰色の線で示す範囲が使用可能範囲（ $G_{\max}$ あるいは $G_{\min}$ から 0.4dB 変化する範囲）となっている。

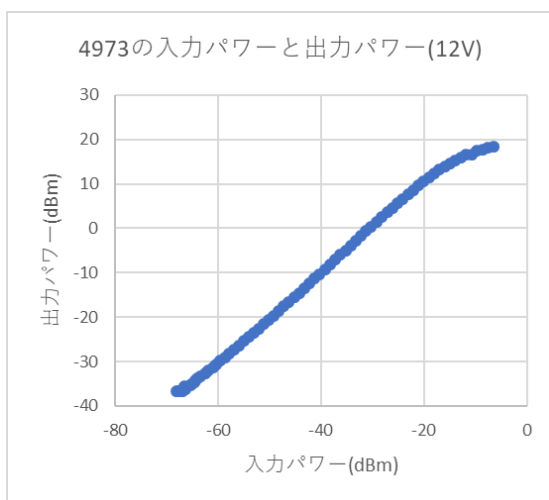


図 10

4973(12V)入力パワー-出力パワーのグラフ

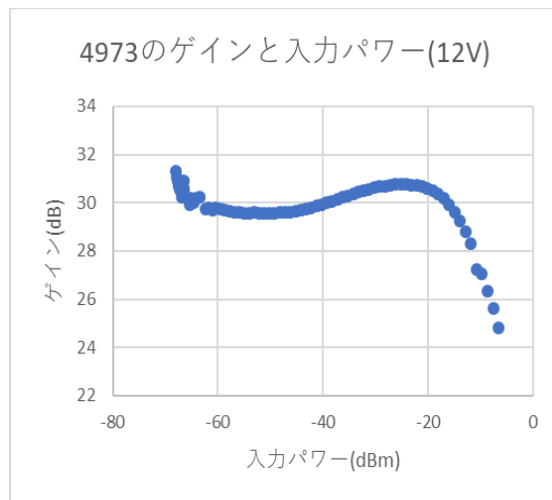


図 11

4973(12V)入力パワー-ゲインのグラフ

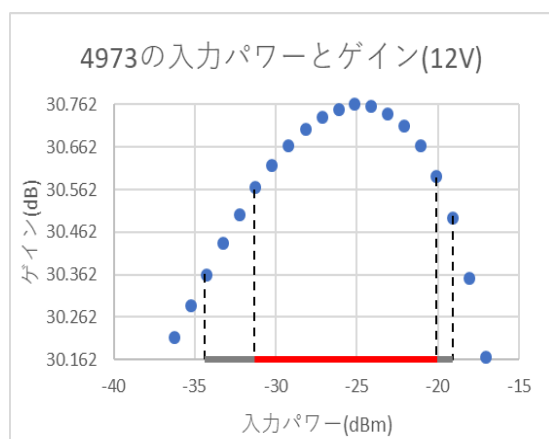


図 12

4973(12V)入力パワー-ゲインの拡大グラフ

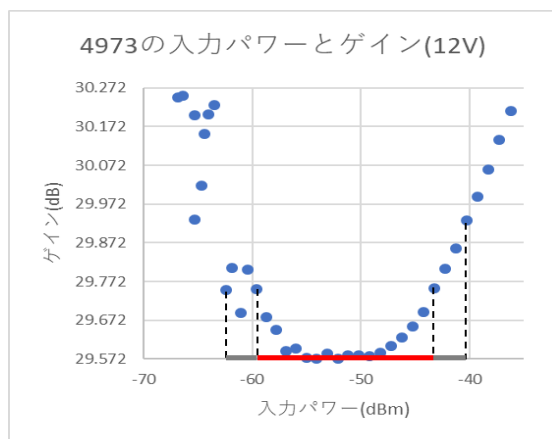


図 13

4973(12V)入力パワー-ゲインの拡大グラフ

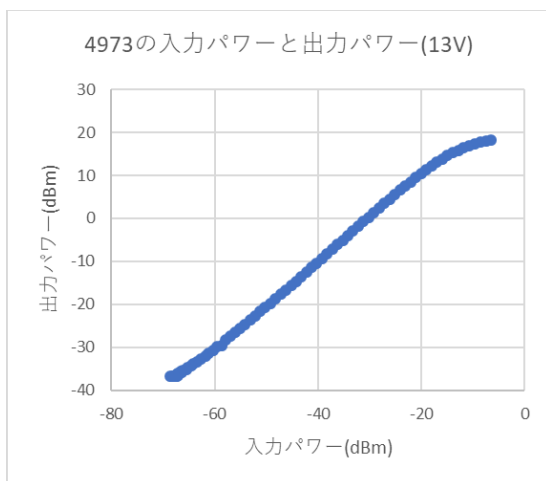


図 14

4973(13V)入力パワー-出力パワーのグラフ

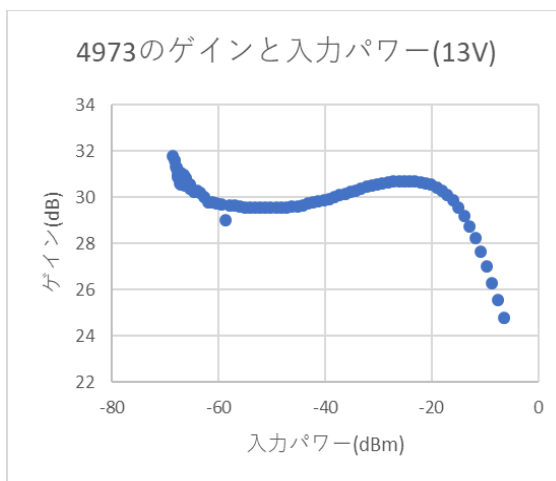


図 15

4973(13V)入力パワー-ゲインのグラフ

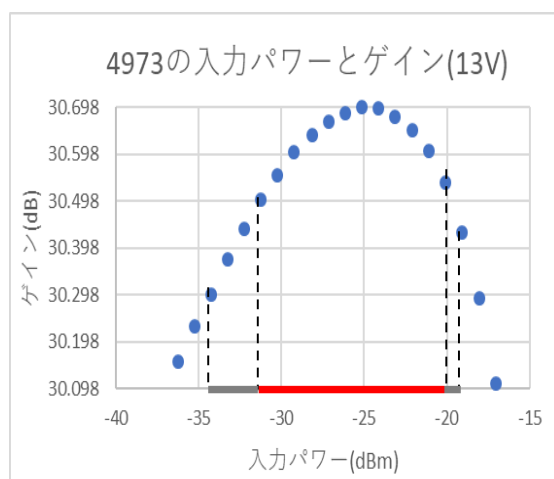


図 16

4973(13V)入力パワー-ゲインの拡大グラフ

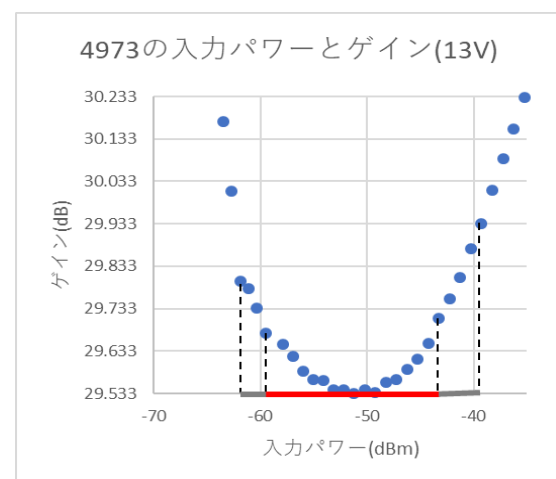


図 17

4973(13V)入力パワー-ゲインの拡大グラフ

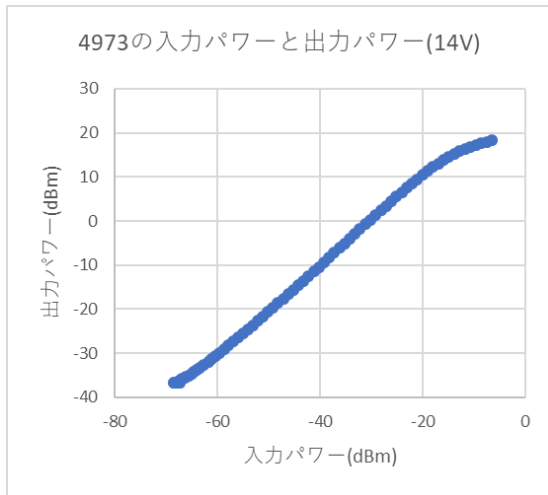


図 18

4973(14V)入力パワー-出力パワーのグラフ

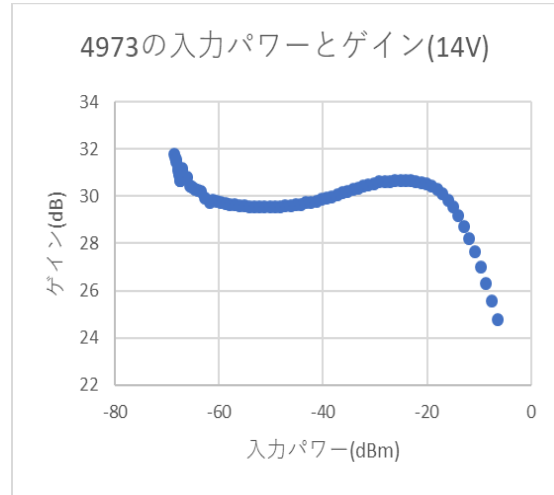


図 19

4973(14V)入力パワー-ゲインのグラフ

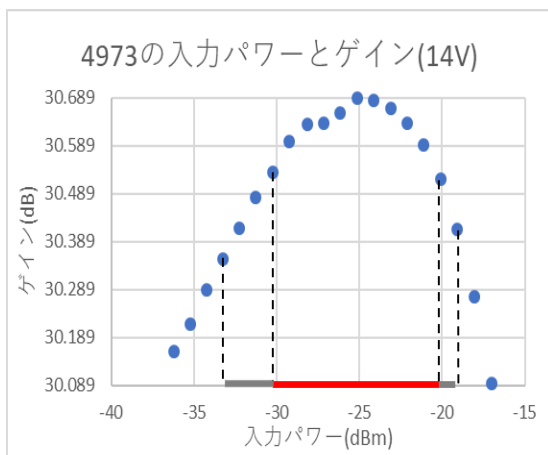


図 20

4973(14V)入力パワー-ゲインの拡大グラフ

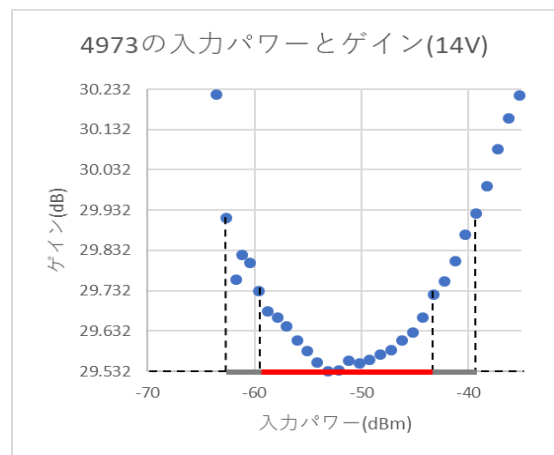


図 21

4973(14V)入力パワー-ゲインの拡大グラフ

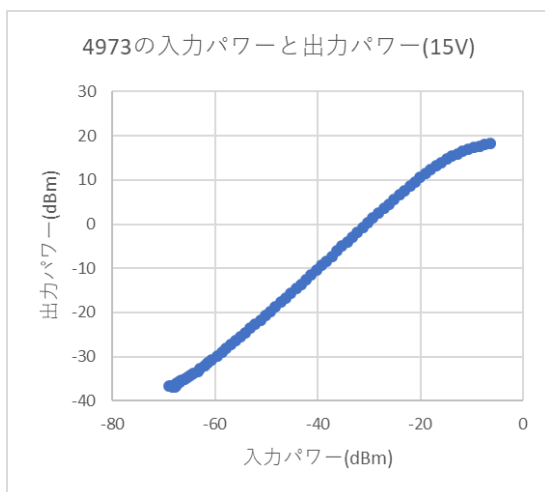


図 22

4973(15V)入力パワー-出力パワーのグラフ

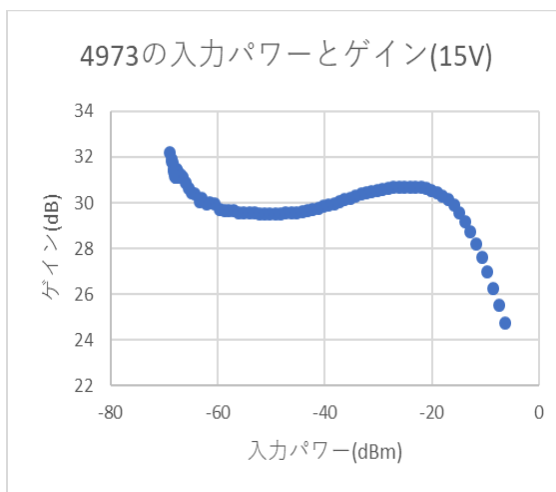


図 23

4973(15V)入力パワー-ゲインのグラフ

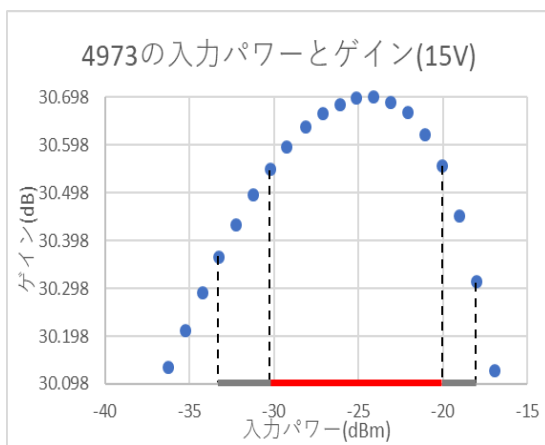


図 24

4973(15V)入力パワー-ゲインの拡大グラフ

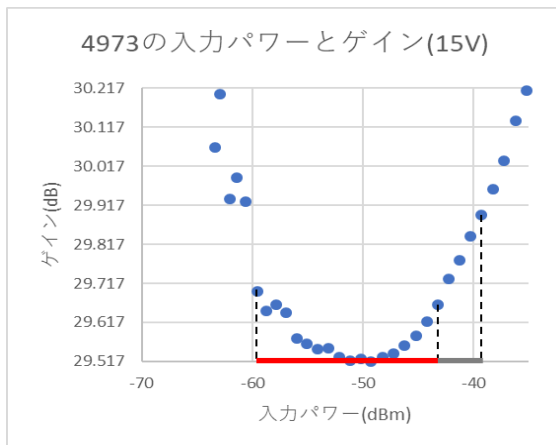


図 25

4973(15V)入力パワー-ゲインの拡大グラフ

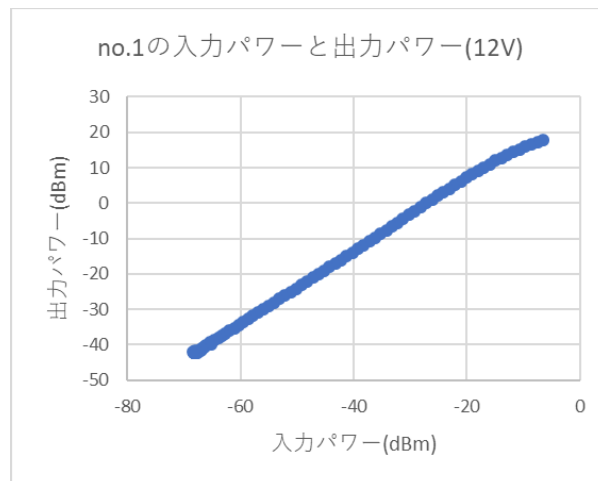


図 26 no.1(12V)入力パワー-出力パワーのグラフ

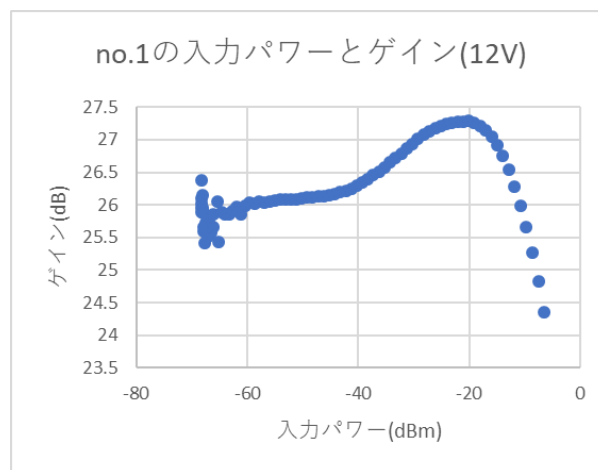


図 27 no.1(12V)入力パワー-ゲインのグラフ

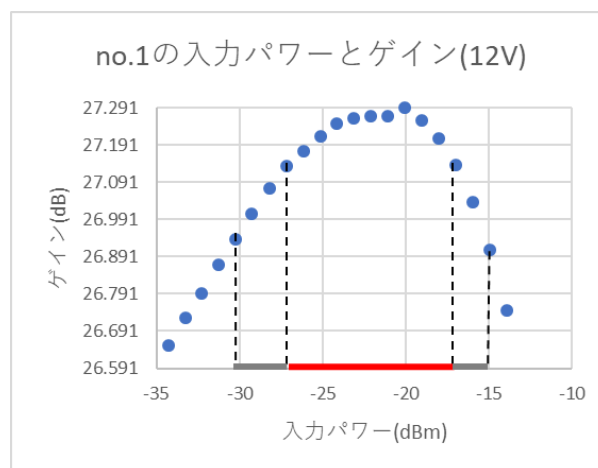


図 28 no.1(12V)入力パワー-ゲインの拡大グラフ

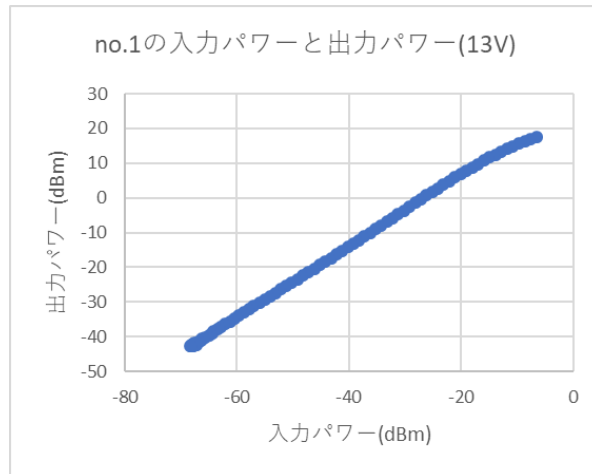


図 29 no.1(13V)入力パワー-出力パワーのグラフ

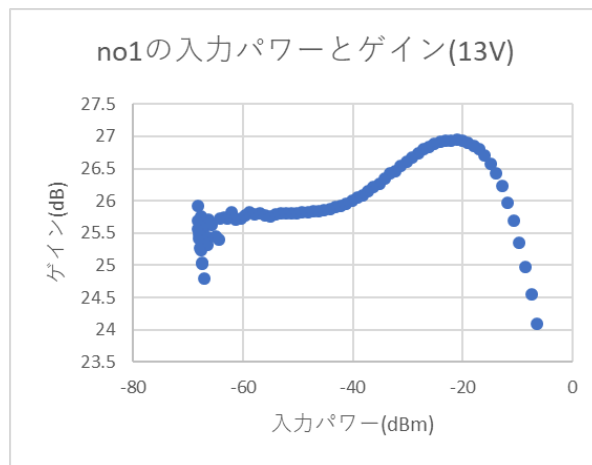


図 30 no.1(13V)入力パワー-ゲインのグラフ

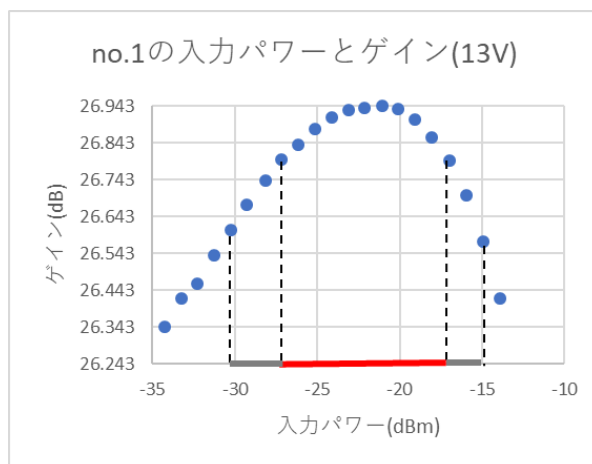


図 31 no.1(13V)入力パワー-ゲインの拡大グラフ

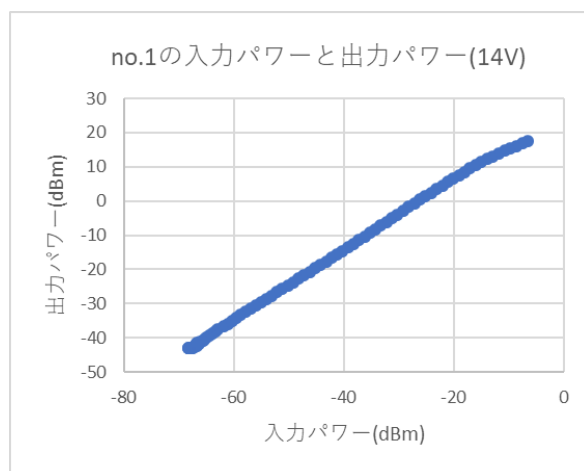


図 32 no.1(14V)入力パワー-出力パワーのグラフ

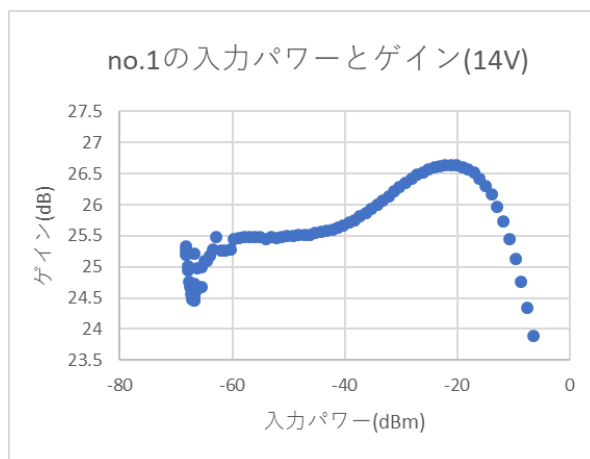


図 33 no.1(14V)入力パワー-ゲインのグラフ

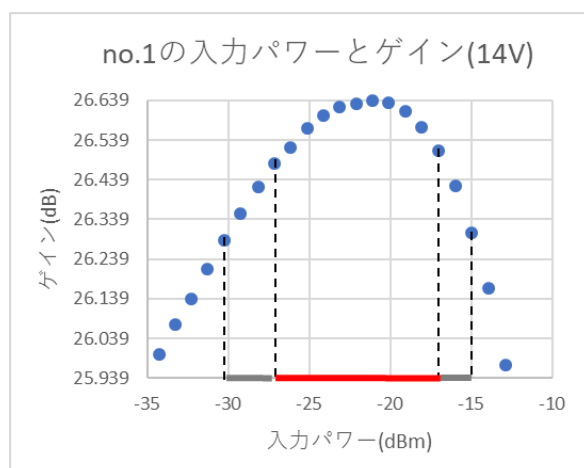


図 34 no.1(14V)入力パワー-ゲインの拡大グラフ

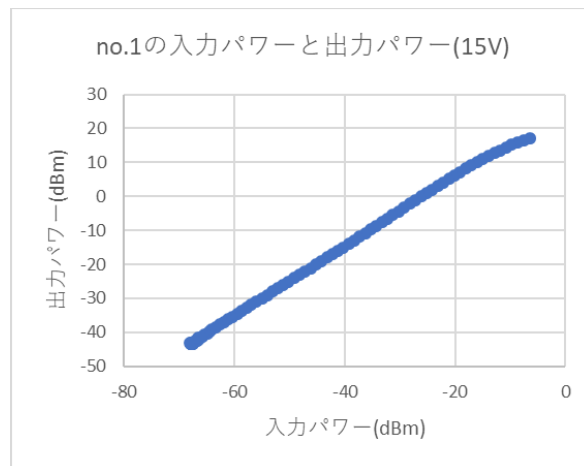


図 35 no.1(15V)入力パワー-出力パワーのグラフ

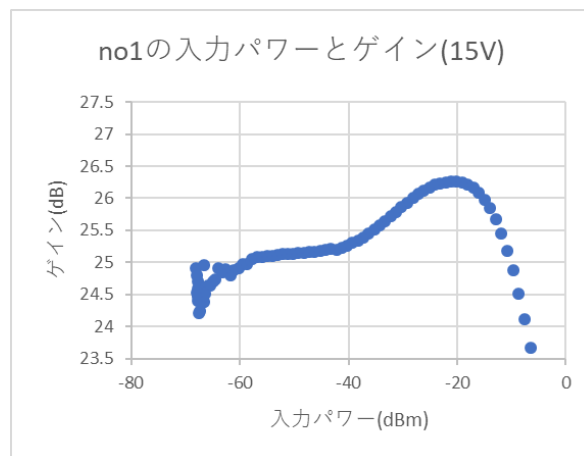


図 36 no.1(15V)入力パワー-ゲインのグラフ

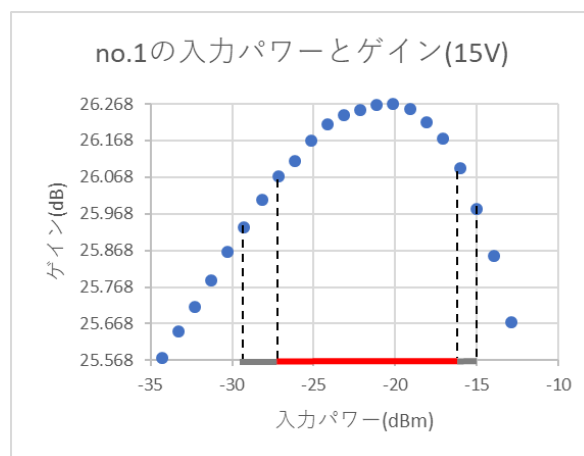


図 37 no.1(15V)入力パワー-ゲインの拡大グラフ

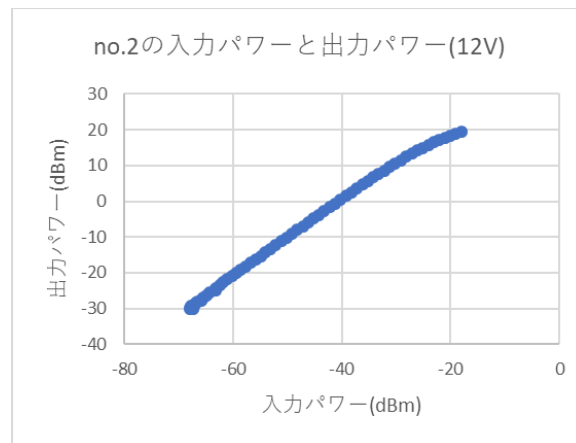


図 38 no.2(12V)入力パワー-出力パワーのグラフ

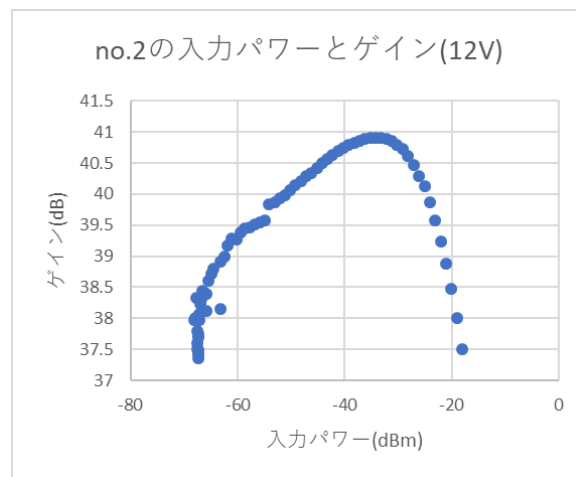


図 39 no.2(12V)入力パワー-ゲインのグラフ

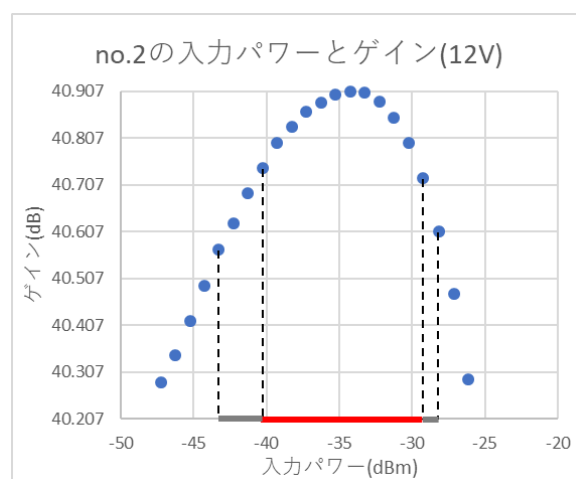


図 40 no.2(12V)入力パワー-ゲインの拡大グラフ

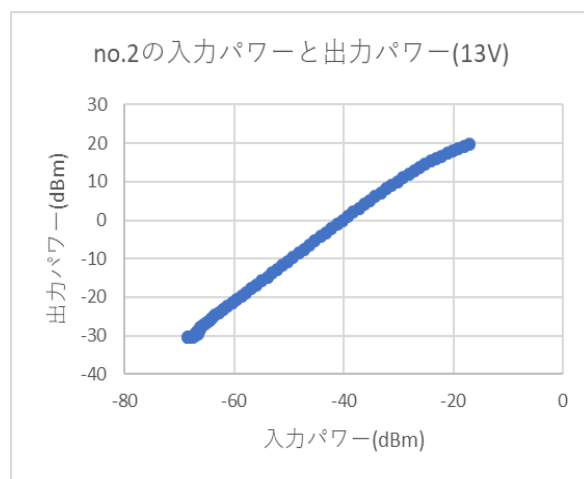


図 41 no.2(13V)入力パワー-出力パワーのグラフ

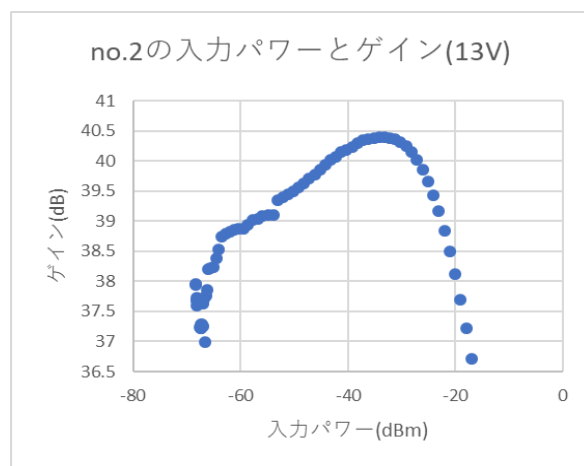


図 42 no.2(13V)入力パワー-ゲインのグラフ

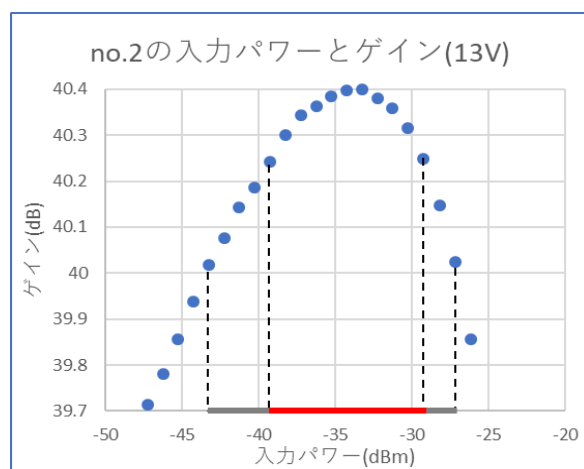


図 43 no.2(13V)入力パワー-ゲインの拡大グラフ

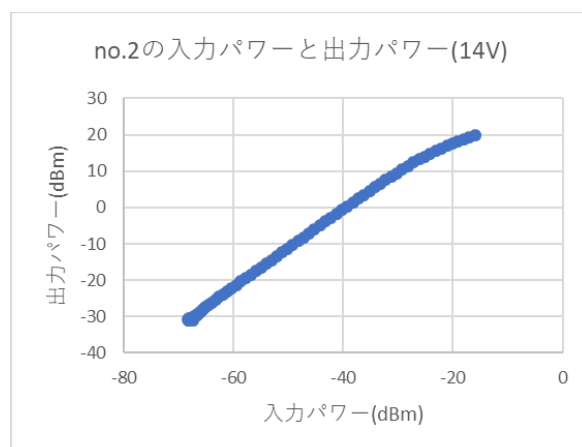


図 44 no.2(14V)入力パワー-出力パワーのグラフ

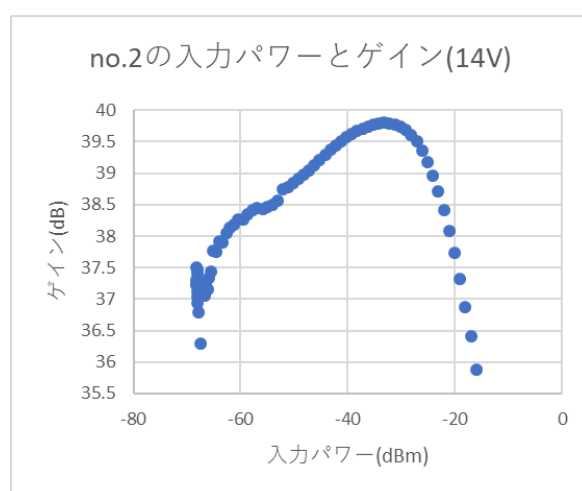


図 45 no.2(14V)入力パワー-ゲインのグラフ

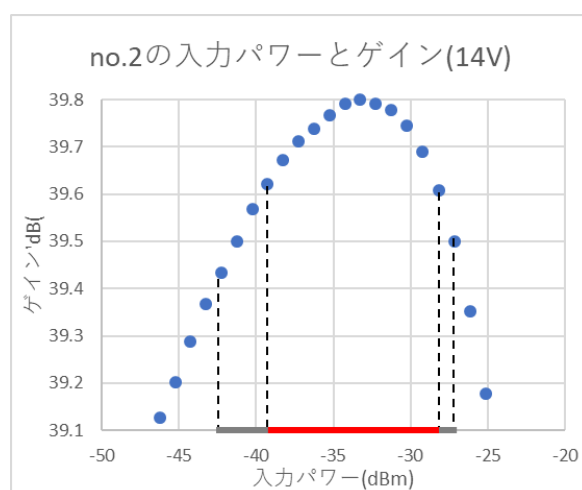


図 46 no.2(14V)入力パワー-ゲインの拡大グラフ

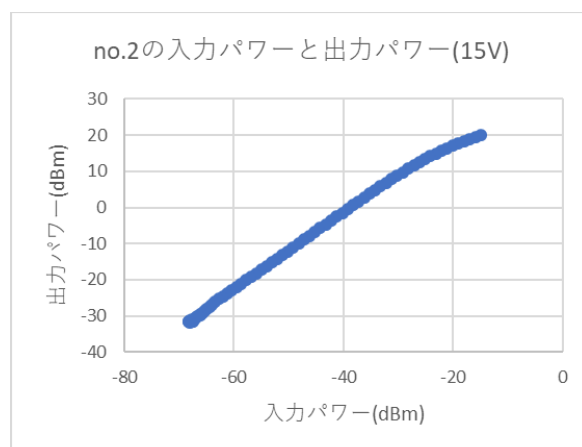


図 44 no.2(15V)入力パワー-出力パワーのグラフ

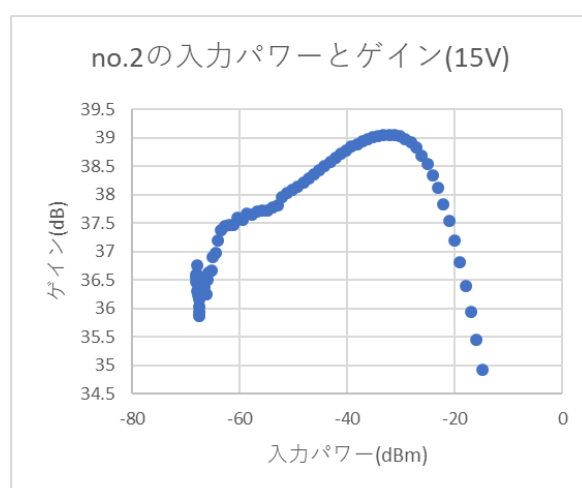


図 45 no.2(15V)入力パワー-ゲインのグラフ

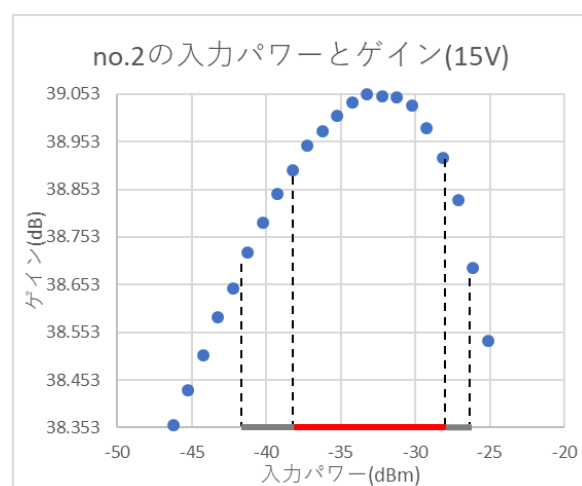


図 46 no.2(15V)入力パワー-ゲインの拡大グラフ

アンプ名	入力パワー推奨範囲 (Gmax)(dBm)	入力パワー推奨範囲 (Gmin)(dBm)	入力パワー可能範囲 (Gmax)(dBm)	入力パワー可能範囲 (Gmin)(dBm)	Gmaxの推奨範囲のゲイン /可能範囲のゲイン(dB)	Gminの推奨範囲のゲイン /可能範囲のゲイン(dB)
4973						
12V	-31.242~-20.083	-59.588~-43.248	-39.244~-19.065	-62.411~-40.250	30.662±0.1/30.562±0.2	29.672±0.1/29.772±0.2
13V	-31.261~-20.101	-59.537~-43.260	-34.265~-19.081	-61.854~-39.262	30.598±0.1/30.498±0.2	29.663±0.1/29.773±0.2
14V	-30.261~-20.098	-59.598~-43.262	-33.265~-19.08	-62.634~-39.277	30.589±0.1/30.489±0.2	29.632±0.1/29.732±0.2
15V	-30.229~-20.036	-59.573~-43.233	-33.235~-17.983	-59.573~-39.272	30.598±0.1/30.498±0.2	29.617±0.1/29.717±0.2
no.1						
12V	-27.155~-17.013	—	-30.278~-14.944	—	27.191±0.1/27.091±0.2	—
13V	-27.161~-17.011	—	-30.267~-14.946	—	26.843±0.1/26.743±0.2	—
14V	-27.144~-17.024	—	-30.258~-14.958	—	26.539±0.1/26.439±0.2	—
15V	-27.18~-16.021	—	-29.282~-14.981	—	26.168±0.1/26.068±0.2	—
no.2						
12V	-40.275~-29.256	—	-43.268~-28.157	—	40.807±0.1/40.707±0.2	—
13V	-39.279~-29.252	—	-43.254~-27.15	—	40.300±0.1/40.200±0.2	—
14V	-39.253~-28.153	—	-42.243~-27.15	—	39.700±0.1/39.600±0.2	—
15V	-38.25~-28.158	—	-41.248~-26.151	—	38.953±0.1/38.853±0.2	—

表 2 リニアリティ 測定結果まとめ

5 考察

想定する入力信号のパワー $P(W)$ は

$$P(W) = kTB \quad (5)$$

で求められる (k :ボルツマン定数(J/K)、 T :温度(K)、 B :帯域(Hz))。

黒体を見た時の温度を 300K、今回購入したアンプの帯域 2-10GHz から帯域を 8GHz として(5)に代入すると

$$P(W) = 1.38065 \times 10^{-23} \times 300 \times 8.0 \times 10^9 = 3.3 \times 10^{-11} (W)$$

単位を mW に直すと

$$P(mW) = 3.3 \times 10^{-8} (mW)$$

と求められる。

現在日立・高萩アンテナにおいては、信号が RF 系のアンプに到達する前に dewer (冷却器) 内部にあるゲイン 30dB から 40dB 程度のアンプを通るようになっている。また、黒体放射に対してアッテネータで 10dB 下げていることを考慮し単位を(dBm)とすると入力信号のパワー $D(dBm)$ は

$$D(dBm) = 10\log_{10}P(mW) - 10 + 30 \quad \text{から} \quad D(dBm) = 10\log_{10}P(mW) - 10 + 40$$

即ち、 $-54.797(dBm)$ から $-44.797(dBm)$ 程度となる。しかし、表 2 を確認すると、この入力信号のパワーの値では今回購入したアンプの入力パワー可能範囲内に入っていない。そこで、仮に黒体放射に対してアッテネータで 10dB 下げない場合を考慮すると、想定される入力信号の強度は、 $-44.797(dBm)$ から $-34.797(dBm)$ 程度となる。この値は no.2 のアンプの入力パワー可能範囲に近い値と言える。よって、RF 系において、今回購入した no.2 のアンプを使用し、アッテネータの位置を移動し、黒体放射に対して no.2 通過後に 10dB 下げること、黒体(300K)に対してはある程度適し得ると考えられる。

また、表 2 において現在使用している 4973 のアンプの測定結果に着目すると、アンプの仕様より、帯域は保証範囲外ではあるものの、想定する入力信号パワー $-44.797(dBm)$ から $-34.797(dBm)$ 程度に対して対応し得る性能であることが分かる。

6 まとめ・今後

RF 系に対して今後行える対応としては以下が挙げられる。

(1)今回購入した no.2 のアンプが黒体に対してはある程度対応し得るとはいえ、想定する入力信号のパワーに対して使用推奨範囲内に収まってはいないので、no.2 よりも弱い信号（ -50dBm 程度）を、リニアリティを保ったまま増幅できるアンプを用意し交換する。

(2)測定をした結果、4973 が予想以上に想定する入力パワーに対して適し得る性能であったため、今回購入した R&K 社ではなく、4973 を製造した PLANAR 社から帯域の保証範囲が 5-10GHz より広い製品を購入し導入する。

7 謝辞

本研究を行うにあたって、特に指導教諭である米倉覚則教授、百瀬宗武教授には様々な面で大変お世話になりました。相談すれば専門的なご指摘をいただけたことは勿論、時には学業より就職活動関連の事柄を優先することに理解を示してくださったこと、あくまで学生主体というスタンスで研究を進めさせていただけたことで自分にとって非常に通いやすい研究室となっていたと感じています。また、研究員の齋藤悠さんにも観測業務をお教えいただくところから研究に関する質問まで、大変お世話になりました。同研究室に所属する同期、先輩方にもお世話になりました。相談すれば過去の経験から助言をくださる先輩方の偉大な背中と自分と時を同じくして研究に励む同期の姿は僕の活力の源となりました。

周りの方々の様々な手助けのおかげでこうして研究・卒業論文の執筆ができました。本当にありがとうございました。

8 参考文献

- [1] 上地康仁 2018 年度学位論文（茨城大学 理学部理学科物理学コース）
- [2] 大島理穂 2018 年度修士論文（茨城大学大学院 理工学研究科）
- [3] 中井直正・坪井昌人・福井康雄『シリーズ現代の天文学 16 宇宙の観測Ⅱ-電波天文学』
日本評論社