

TMU #61-B X線パルス取得実験 (2001年6月上旬)

広池 哲平

2001年7月12日

概要

カロリメータ素子 #62 を都立大希釈冷凍機にて冷却実験を行った。#62B を用いて X 線照射実験を行い、それと同時に #62C&D については $R - T$ 測定を行った。#62B は GND に落ちているために、SQUID が MEAS モードに入らず、測定にならなかった。また #62C も低温状態でも GND に落ちているため抵抗測定が不可能であった。#62D に関しては、低温にすると GND から浮き、抵抗測定が可能となった。そこで、#62D に X 線を照射するセットアップに変更をし、再度実験を行った。

その結果得られたスペクトルは、ピークを持つこともない程、パルスハイトが不揃いのものであった。どうやら TES が十分な熱化をする前に、熱が逃げてしまうようである。吸収体がどこか触れている、または、ビームの周辺がきちんと抜けていないのであろう。

1 #62 Parameter

カロリメータ #62 が、都立大に到着後常温にて測った抵抗値を表 1 に示す。抵抗値は IC ソケットの両端にて測っており、GND との抵抗値とは、パッドと IC ソケットの片方との抵抗値のことである。

No.	WSD #62				WSD #61			
名称	A	B	C	D	A	B	C	D
TES 抵抗値 [Ω]	∞	214.70	120.03	118.82	242.33	259.48	∞	∞
GND 間 [$k\Omega$]		62.05	276.5	69.5	∞	∞		

表 1: パッド上での抵抗値

2 実験 其之壱

2.1 セットアップ

#61 と #62 の違いは、吸収体としてのスズのメッキが前者はなされており、後者はなされていないことにある。常温での抵抗値をみると、#62B は #61 の抵抗値に良く似ていると言える。#62C-D に関しては、スズ箔がどこかで接しており、スズの抵抗値が見えているのだろうと推測される。現在のセットアップでは、2つの素子の抵抗値測定と、1つの素子の X 線照射実験が可能であるので、#61A-B と類似性のある #62B を X 線照射実験を行い、#62C-D を R-T 特性評価を行うこととした。

2.2 結果

低温にて、各素子と GND 間が開になることを期待しつつ冷却を行ったが、残念ながら #62B と C に関しては、GND に落ちており、X 線照射実験、抵抗値測定ともに不可能であった。唯一測定可能となったのは、#62D の抵抗値測定であった。測定 RENG を、 $2 \Omega - 20 \mu V$ ($10 \mu A$)、 $2 \Omega - 60 \mu V$ ($30 \mu A$)、 $200 m\Omega - 20 \mu V$ ($100 \mu A$) の組合せで測定した。AVS 温度を●で表し、LTC 温度を○で表している。結果を図 1 に示す。また、測定時の温度の関係を、横軸に AVS 温度、縦軸に LTC 温度として表したものを図 2 に示す。

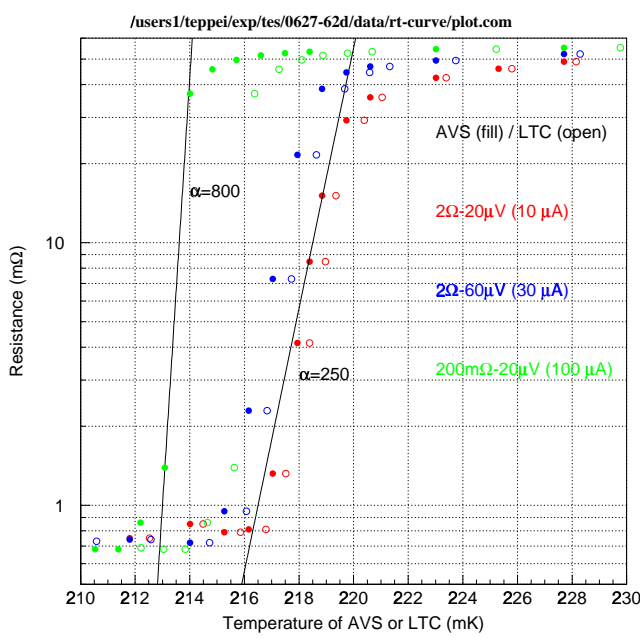


図 1: #62D $R - T$ Curve

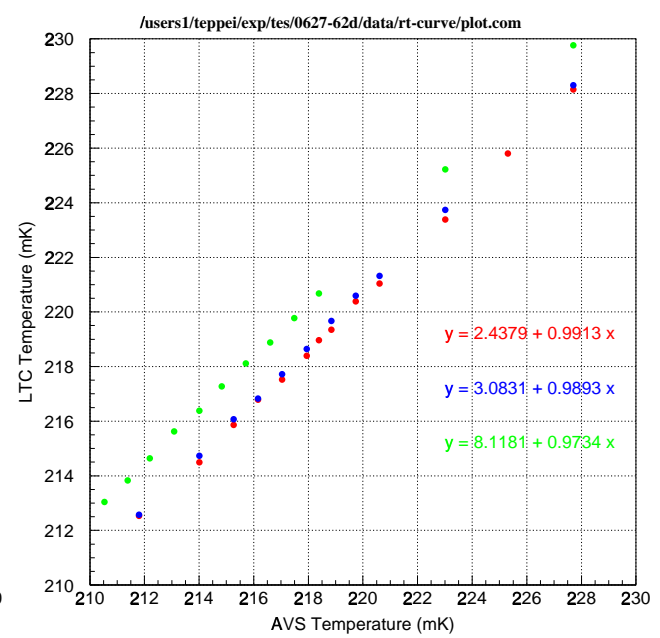


図 2: AVS 温度 vs. LTC 温度

2.3 考察

残念ながら #62B-C に関しては、カロリメータのビーム周りが十分に抜けていないか、またはスズ箔がどこかで接触しているかで、測定が不可能であった。測定のできた #62D に関して、以前に X 戦照射実験を行った素子 #61B を比較を行う。

2.3.1 $R - T$ Curve & α Value

まずは、#62D の $R - T$ 曲線を以下の様に『Femri 分布関数 × 一次関数 + オフセット』として、抵抗値を温度の関数として表す。

$$R = \frac{1}{e^{b(a-T)} + 1} \left(\frac{T}{c} + d \right) + e \quad (1)$$

温度を LTC 温度計の読みとして、測定レンジごとにそれぞれの測定からフィットした $a \sim e$ の値を表 2 に示す。比較のために #61B についての値も一緒に示す。ただし現在 #61B には手作業でスズ吸収体を取り付けてあるが、以下ででてくる値は、吸収体を取り付ける以前に測定したデータを用いている。 a は TES の超伝導転移温度 T_c を表してお

素子の名称	#62D		#61B	
	2 Ω - 20 μV	2 Ω - 60 μV	20 Ω - 20 μV	20 Ω - 60 μV
a	218.87	220.12	243.23	242.82
b	1.4222	1.1791	1.8354	1.9718
c	4.8042	4.5784	3.3376	5.4358
d	3.6320	7.8437×10^{-9}	13.752	41.644
e	0.29676	2.5848×10^{-8}	3.3695	4.4104

表 2: 関数としてフィットした際のパラメータ

り、 e はオフセット抵抗を表している。測定結果よりある測定点と、その前後の温度での測定値の、合計 3 点を通る

2次曲線を求めてやり、その真ん中の測定点での接線の傾き dR/dT を求め、

$$\alpha \equiv \frac{d \ln R}{d \ln T} = \frac{T}{R} \frac{dR}{dT} \quad (2)$$

として α をそれぞれの測定点で求めた。

$R-T$ プロットと合わせて、図3に示す。横軸は LTC 温度 (mK)、縦軸は TES の抵抗値 (m Ω) と α (無次元量) を重ねて示している。点線は $R-T$ 曲線を上の式でフィットしたものであり、実線はその式を用いて α を求めたものである。#61B に関する値についても同時に示す。WSD/MHI/KME にて製作された素子 #61、#62 は、膜厚や形状などは同一の規格となっており、唯一異なる点として、#62 に関してはマルチピクセルをにらんで、手作業による吸収体付けではなく、スズめっきで吸収体を形成していることである。膜厚が同じであることから、超伝導転移温度、残留抵抗、転移幅などのパラメータは類似していると推測される。測定結果を見る限り、素子 #61B と #62D とは、転移温度に多少の違いがあるものの、良く似ていることがわかる。

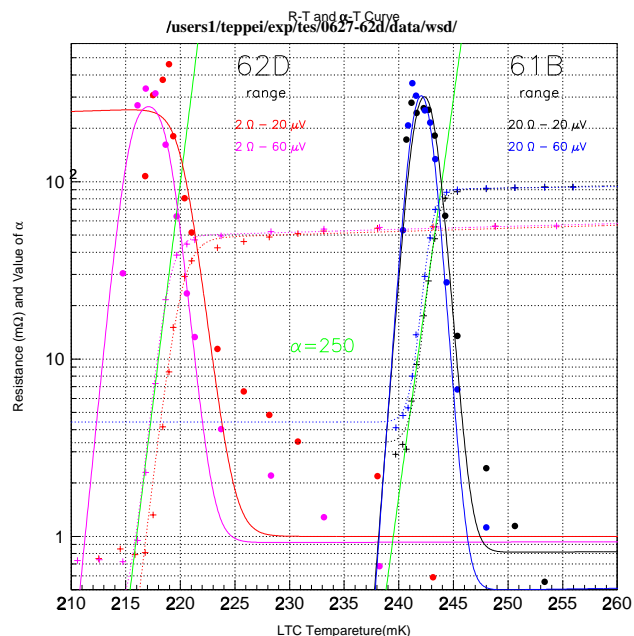


図3: $R-T$ Curve & α Value for #61B #62D

2.3.2 熱伝導度

#61B、#62Dの熱伝導度を比較してみる。熱伝導度 G には様々な関係式があるが、発熱量を P 、温度を T としてももとの定義式は

$$G \equiv \frac{dP}{dT} \quad (3)$$

のように書ける。この式に則して最も単純と思われる方法で求めてみる。測定レンジを変えることで、TESに流れる電流値を変更できるので、TESの抵抗値が残留抵抗値の半分 ($T = 1/2T_c$ の時の抵抗値) の時のTESの発熱量をそれぞれのレンジで求め、その発熱量の変化量を、超伝導転移温度の変化量で割って求める。計算には、上でフィットした $R-T$ の関数を用いている。計算に用いた値を表3に示す。これを比較してやると、#62Dは#61Bに比べて

素子の名称	#62D		#61B	
	2 Ω - 20 μ V	2 Ω - 60 μ V	20 Ω - 20 μ V	20 Ω - 60 μ V
転移温度 T_c [mK]	218.87	220.12	243.23	242.82
抵抗値 ($T = T_c$) [m Ω]	24.04	24.89	46.68	47.57
TESに流れる電流 [μ A]	10	30	1	3
発熱量 P [pW]	2.404	22.40	0.04668	0.4281
発熱量の変化量 ΔP [pW]	20.00		0.3814	
温度の変化量 ΔT [mK]	1.25		0.41	
熱伝導度 G [nW/K]	0.16		93	

表3: 熱伝導度を求める際の各パラメータ

50 倍以上も熱伝導度が良いことがわかる。カロリメータのピコ部分が十分には抜けていないのかもしれない懸念があるが、X 線照射実験を行うこととする。

2.3.3 エネルギー分解能の見積り

フェルミ関数を用いた $R-T$ 近似式から、カロリメータ #62D の素子のみで決まるエネルギー分解能を求める。 α の大きい極限で素子のみで決まるエネルギー分解能は、動作温度 T 、その温度での熱容量を C として、

$$\Delta E \sim 2.36 \sqrt{4k_B T^2 C \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{n+1}{2}}} \quad (4)$$

で表される。ここで n は物質による定数で、Si の場合は $n = 4$ として良い。熱容量 C は、カロリメータの熱容量とスズ箱のものとの和で表される。スズ箱のサイズを $1200 \mu\text{m} \times 1200 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ とすると、

$$C = 1.2 \times 10^{-11} \times T^3 + 5.33 \times 10^{-6} \times \exp\left(-\frac{286.56}{T}\right) \text{ [J/K]} \quad (5)$$

となる。これを代入することで、

$$\Delta E \sim 1.3706 \times 10^8 \times \sqrt{\frac{T^2}{\alpha} \left\{ 1.2 \times 10^{-11} T^3 + 5.33 \times 10^{-6} \exp\left(-\frac{286.56}{T}\right) \right\}} \text{ [eV]} \quad (6)$$

として温度の関数として求めることができる。例えば、#62D を 218.87 mK にて動作させたとすると、 $\Delta E \sim 1.06 \text{ [eV]}$ と見積もることができる。上の式と、フィットから求めた α の値を用いて、エネルギー分解能の温度依存性を見積もる。横軸を LTC の温度として、縦軸に TES 抵抗値、 α 、エネルギー分解能を示したものが図 4 である。

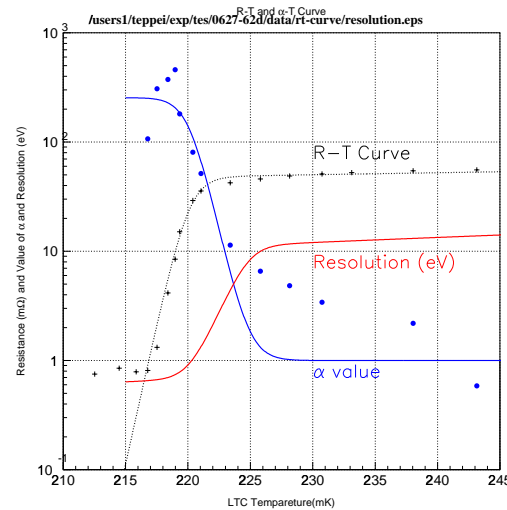


図 4: 素子のみで決まるエネルギー分解能

3 実験 其之弐

3.1 セットアップ

#62D を X 線照射実験用のセットアップにして、希釈冷凍機に組み込んだ。シャント抵抗は、He 温度で $R_s = 3.088 \text{ m}\Omega$ のものを用いた。しかし、後になって気付いたのだが、#62D は熱伝導度が良すぎるため、シャント抵抗の大きさはもっと大きいものでなくては、適切な ETF をかけてやるのが出来ないのである。実は、この方法で熱伝導度を計算する際、夜中(?) AM 4:00 まで実験を行いながら計算をしたため、計算ミス、ならびに #61B と #62D を取り違えて値を求めており、実際には不適切なシャント抵抗値を選んでしまったのである。

3.2 バイアス依存性

3.2.1 結果

熱浴温度 218 mK にセットし ETF 特性を取得した。シャント抵抗が適当な値ではないので、上手く ETF 特性が測定できなかった。ETF は電池 BOX の目盛を上から下げて行ったものと、下から上げて行ったものの二種類をとった。後者が低バイアスのみでの測定となっているものである。結果を図 5 に示す。また、ETF 特性測定時に、合わせてパルスホワイトスキャン、ノイズレベルスキャンを行ったのでそれも合わせて示す。熱浴温度 210 mK では、安定な動作をさせるのが難しく、ETF 特性などは測定不可能であった。

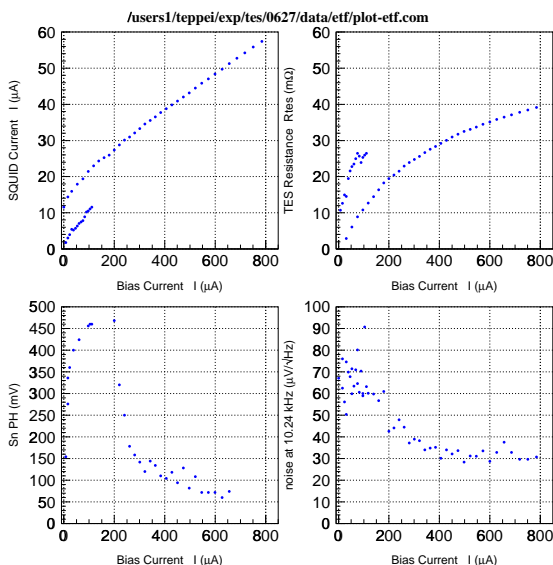


図 5: #62D バイアス依存性

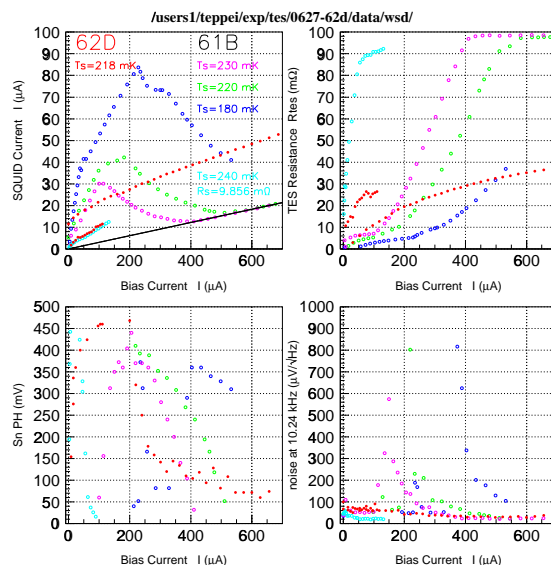


図 6: #61B との比較

3.2.2 考察

上記のようにシャント抵抗が小さすぎるために、熱浴温度を 210 mK にセットしたのだが、バイアスを最大限にかけたとしても TES の状態を常伝導まで持って行けなかった。このため ETF 特性からは何も言うことはできない。ノイズレベルに関しては、#61B のシャント抵抗 $R_s = 3.088 \text{ m}\Omega$ を用いた際の X 線照射実験時に見られたような、ある点に於いてノイズが非常に過多になる現象が見られたのだが、今回の実験では、同様な現象はみられなかった。図 6 では、ノイズのバイアス依存性を両素子について示している。● (Fill) は #62D を示しており、○ (Open) は #61B のものを示している。今回の実験では、ETF より有用な TES 抵抗値のバイアス依存性を求めることもできなかった。前回の様に TES の抵抗値がシャントとコンパラになる辺りで、ノイズの超過が起きているかどうか調べることはできなかった。また、#61B に於いては、動作温度と熱浴温度との差をある程度自由に変更できたのだが、今回の実験では動作温度と熱浴温度とは、数 mK しか差を設けることができなかつたため、比較することは不可能である。

3.3 X 線照射実験

#61D に Fe 線源からの X 線を照射し、出力を YOKOGAWA オシロスコープにてパルスカウントを溜めて、X 線スペクトルを取得した。測定をした熱浴温度と電池 BOX のバイアス目盛、取得したパルスカウントを表 4 に示す。

3.3.1 結果

測定結果を下の表 5 にまとめる。また、取得されたパルスなどを、図 7 ~ 図 10 に示す。

/ishisaki/tx/tes/010629/data/yokogawa/218mk250/avgpulse.qdp

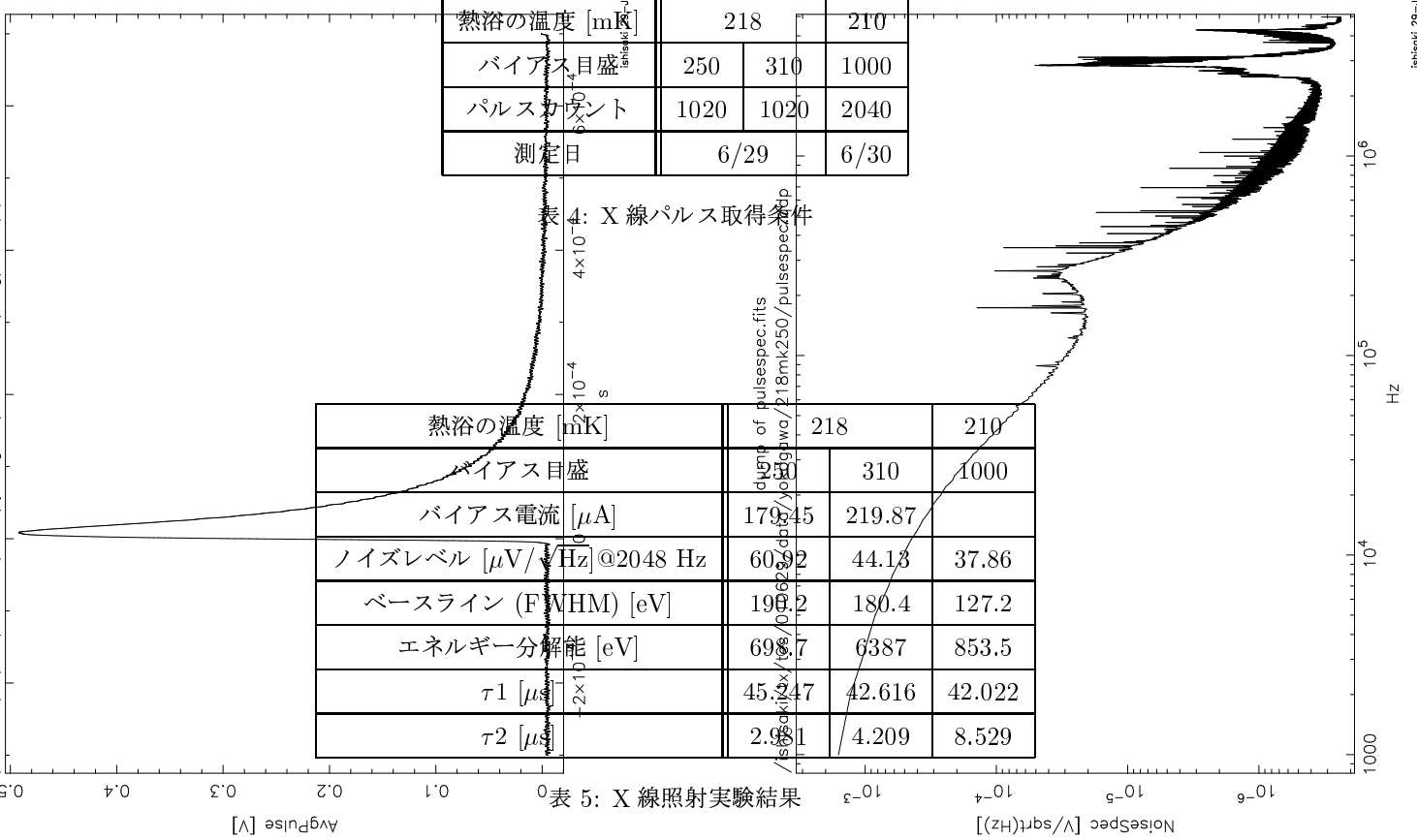


表 4: X 線パルス取得条件

熱浴の温度 [mK]	218	210	
バイアス目盛	310	1000	
バイアス電流 [μ A]	179.45	219.87	
ノイズレベル [μ V/ \sqrt Hz]@2048 Hz	60.92	44.13	37.86
ベースライン (FWHM) [eV]	199.2	180.4	127.2
エネルギー分解能 [eV]	698.7	6387	853.5
τ 1 [μ s]	45.47	42.616	42.022
τ 2 [μ s]	2.81	4.209	8.529

表 5: X 線照射実験結果

/ishisaki/tx/tes/010629/data/yokogawa/218mk250/noisespec.qdp

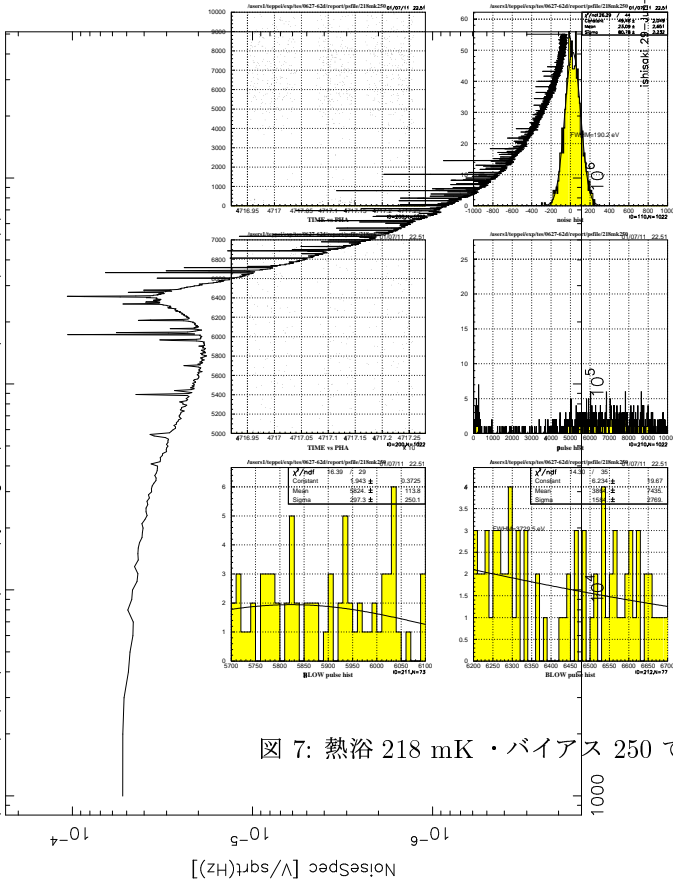
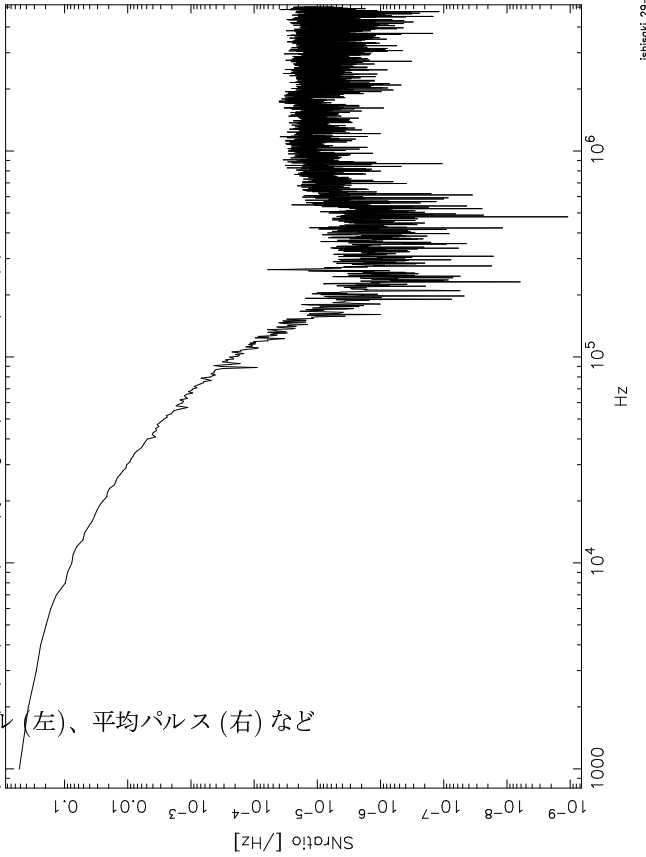


図 7: 熱浴 218 mK ・バイアス 250 でのスペクトル (左)、平均パルス (右) など

/ishisaki/tx/tes/010629/data/yokogawa/218mk250/sn.qdp



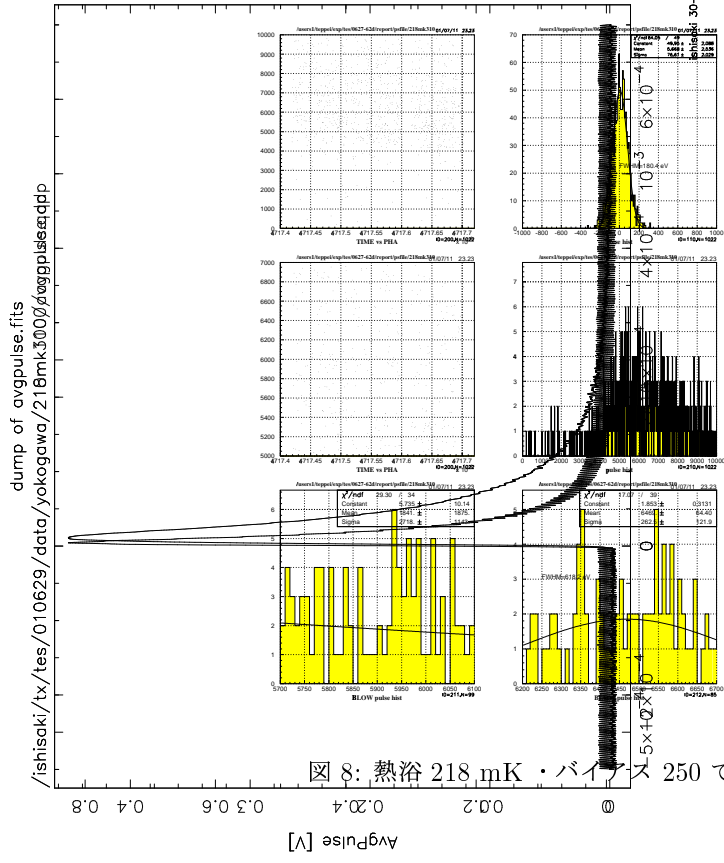


図 8: 熱浴 218 mK ・ バイアス 250 でのスペクトル (左), 平均パルス (右) など

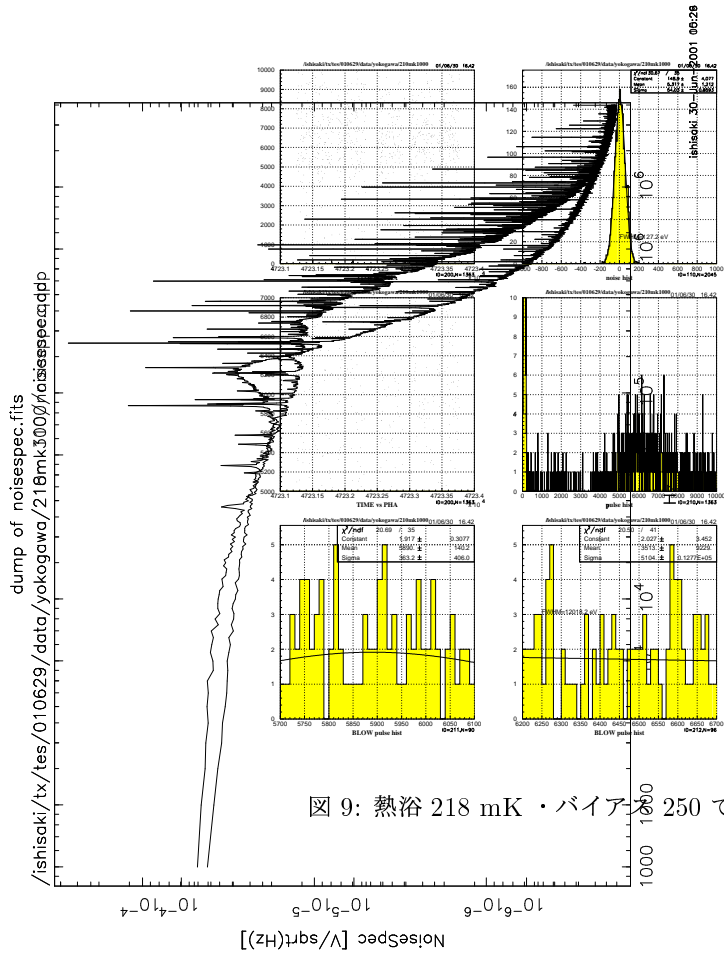
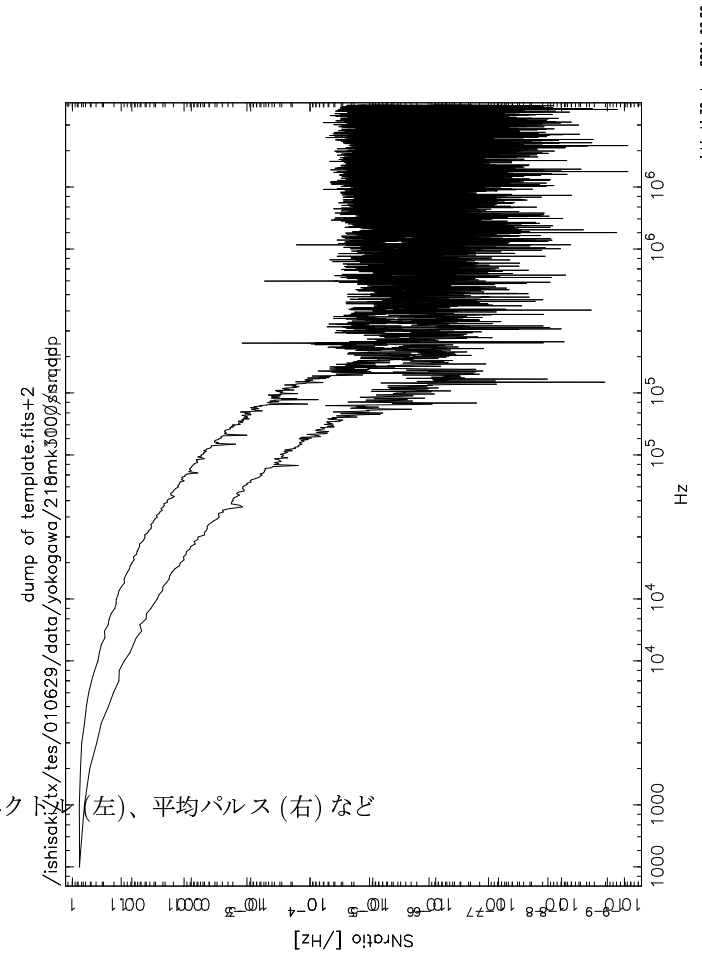
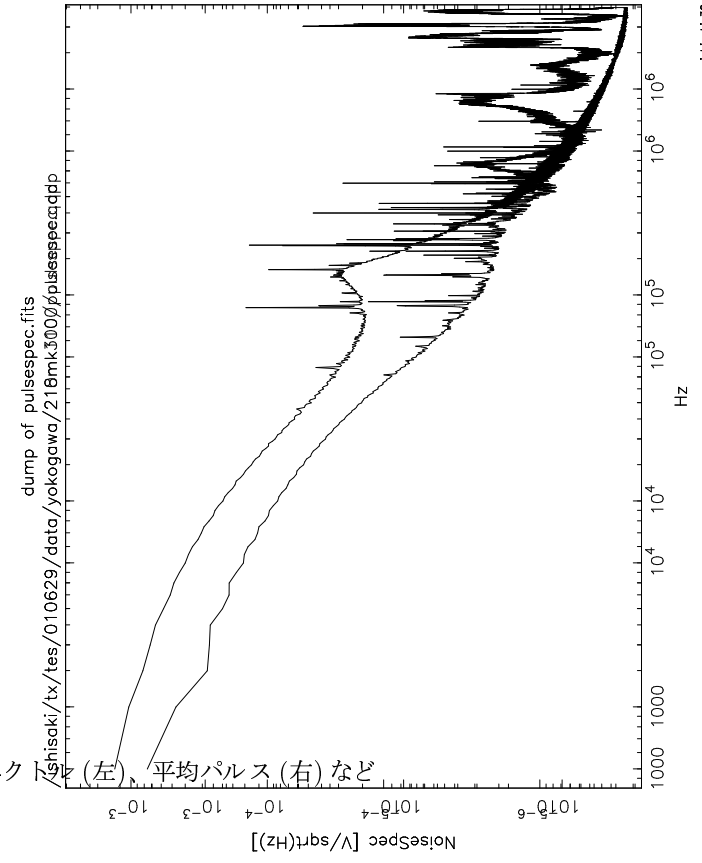


図 9: 熱浴 218 mK ・ バイアス 250 でのスペクトル (左), 平均パルス (右) など



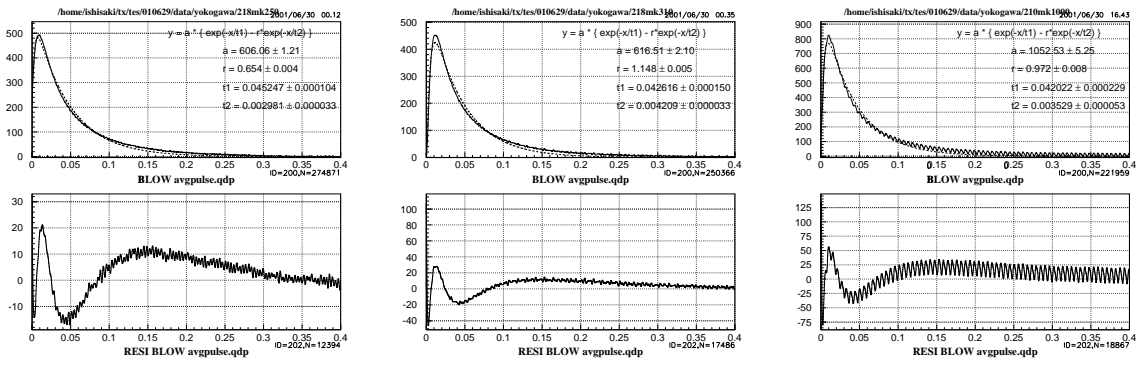


図 10: 平均パルスの Double Gaussian Fit

3.3.2 考察

得られたスペクトルを見る限り、ピークと呼べるものすらみられない。パルスハイトが殆ど揃っていないということから、TES が十分に熱化する前に熱が逃げていると考えることができる。考えられる可能性を二つ挙げる。

- レジストが残っておりビーム周りがきちんと抜けていない。
- スズ箔がマッシュルーム構造の石突き部分での一点接地となっておらず、傘の部分が基板に接している。

常温で #62 シリーズの抵抗値を基板上で測ったところ、全ての素子が GND に落ちていた。#61 シリーズに関しては、GND とは OPEN であったことから、原因はスズ箔にあるように思える。スズ箔が Si 基板上に接触しているために、GND に落ちていたのではないだろうか。そして低温に持って行ったときに、Si の電気伝導性が失われ、基板との電氣的接触がなくなったと考えられる。すると、電氣的には浮いているが、熱的な接触は残っている可能性は否めない。そのため、その接触部からの熱の流出が起き得るため、カロリメータが十分に熱化することが不可能であるので、入射 X 線に対し一定の温度上昇を示さないのだと考えられる。可能であれば、#62 の素子の断面などを詳しく観察し、何が原因で熱の流出が起きたのか調べたいとことである。また、#61B の測定に於いてある抵抗値になるとノイズが過多になるという現象がみられたが、それがこの素子でも起きるのかどうか調べてみたいと思う。