

TES 型 X 線マイクロカロリメータの AM 変調による 信号多重化の実証

山本亮 (東京大学, ISAS/JAXA)

平成 24 年 8 月 31 日

概要

我々は次世代小型衛星 DIOS の実現を目指して観測機器の開発を行っている。DIOS の目的は広い視野で銀河間物質からの輝線放射を観測することで宇宙のバリオンの多くを占めるダークバリオンを直接観測し、その空間分布を求めることである。そのためには数 eV というエネルギー分解能を実現できる超伝導遷移端 (TES) を用いた X 線マイクロカロリメータを 256 素子以上を並べて読み出す必要がある。TES は極低温で動作させるため多素子化する場合、一素子一読み出しだと低温ステージへの配線が膨大な量となり、それによる流入熱が問題になる。つまり複数素子の読み出しを考えると、信号多重化による同時読み出しは必須課題であると言える。我々は各 TES を異なる高周波 (1MHz 以上) の交流で駆動し変調をかけ、それらの信号を加算することで信号多重化を実現する周波数分割方式による読み出し回路の開発を行ってきた。私は異なる周波数で交流駆動するための LC フィルタ、TES の微弱な信号をノイズに負けずに読み出すためのシールドボックスなどを自作することで、TES の MHz 帯での交流駆動を実現し、同時に二素子からの X 線信号を読み出すことに成功した。読み出し回路の動作実証に成功した事は TES のアレイ化実現にむけて大きな発展が期待される結果であるといえる。

目次

1	本研究の目的	2
2	信号多重化の原理	2
2.1	複数の TES カロリメータの読み出し方法	2
2.2	SQUID 電流計	4
2.3	BBFB 回路	4
3	実験セットアップ	4
4	実験結果	6
4.1	LC filter の動作確認	6
4.2	TES カロリメータの MHz 帯交流駆動	6
4.3	2 素子同時交流駆動	8
5	まとめ	8
	参考文献	8

1 本研究の目的

我々はDIOS(Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) 衛星の実現を目指して観測機器の開発を行っている [2]。DIOS 衛星の目的は広い視野で中高温銀河間物質 WHIM(Warm/Hot Intergalactic Medium) からの輝線放射 (0.5 keV) を直接観測し、その空間分布を求める事にある。そのために我々はエネルギー分解能の優れた分光検出器である X 線マイクロカロリメータの開発を行っている。X 線マイクロカロリメータとは X 線光子のエネルギーを素子の温度上昇として計測する分光器であり、我々の研究グループではその温度計に超伝導遷移端温度計 TES(Transition Edge Sensor) を用いた TES 型 X 線マイクロカロリメータ (以下、TES カロリメータ) の研究開発を進めている。

現在我々のグループが作成した TES カロリメータでは、5.9 keV の X 線に対して 2.8 eV というエネルギー分解能を達成している [1]。また、DIOS では WHIM の空間分布を求めるために TES カロリメータでの撮像、つまり TES カロリメータのアレイ化が必要である。アレイ化の課題の一つは素子製作であり、現在までに 256 素子の TES カロリメータ、積層配線を用いた 400 素子の TES カロリメータを作成してきた。もう一つのアレイ化の課題として挙げられるのは、複数の TES カロリメータの信号を読み出す回路系の開発である。TES カロリメータは極低温 (~ 100 mK) で動作させるため、一素子一読み出したと低温部への配線が膨大な数となり、それによる流入熱が大きな問題となる。そこで一素子一読み出しではなく、複数素子を一つの読み出し系で読み出す、低温下での信号多重化が必須となる。しかし、我々の研究グループではこれまでに信号多重化回路を用いて TES カロリメータの動作を行うに至っていなかった。そこで本実験では初めて信号多重化回路を用いて TES カロリメータの駆動を行った。

2 信号多重化の原理

2.1 複数の TES カロリメータの読み出し方法

TES カロリメータは図 1 の左に示す様に、定電圧バイアスで動作させる。TES カロリメータに X 線が入射すると、TES の抵抗値は (a) の様にパルス状の変化を示す。それに伴い TES を流れる電流の変化、つまり電流計で測定される電流は (b) の様な抵抗変化とは逆向きのパルスになる。このパルスの高さ、形を測定することで入射 X 線光子のエネルギーを決定する。この電流計には超伝導量子干渉計 SQUID(Superconducting QUantum Interference Device) を用いる。SQUID についての説明は 2.2 で述べる。

この方法で信号多重化すると、図 1 の右図の等価回路になる。しかし、この方法だとどの TES カロリメータに X 線光子が入射しても TES の抵抗変化から電流計で測定される電流は同じ形になってしまい、どの TES カロリメータからの信号か区別することができない。

そこで我々は周波数分割方式 FDM(Frequency Division Multiplexing) を用いた信号多重化を行っている。TES カロリメータの信号、つまり TES の抵抗変化はだいたい 10 kHz 程度である。そこで、それよりも十分に早い周波数 (\sim MHz 以上) の交流電圧を TES にかける。すると、TES を流れる電流は図 2 の左に示すように振幅変調をうける。これを室温回路で復調することによって TES の信号を読み出すことができる。

各 TES に狙った周波数の交流をかけるために LC 共振を用いた、LC bandpass filter を使用する (図 2 の右)。L,C の値を変え、各 TES に直列につないだ LC filter の共振点を変える。またこの LC filter は他の TES からのノイズの回りこみも防ぐ。

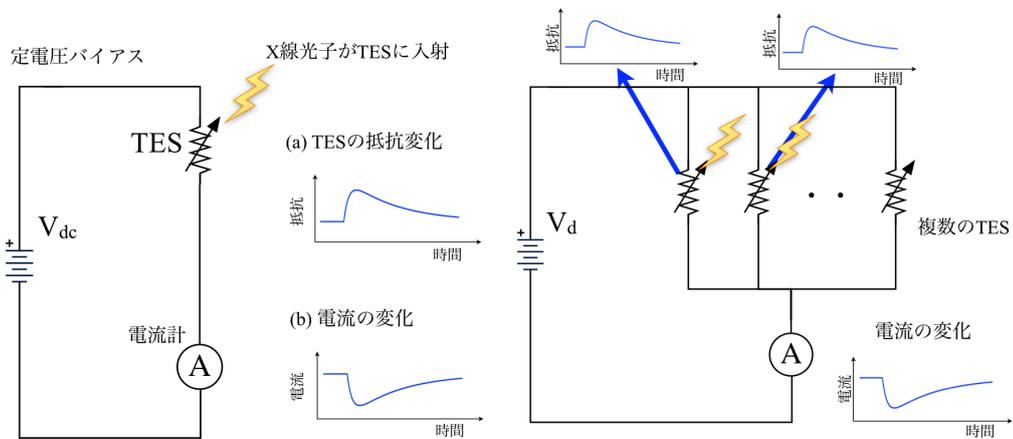


図 1: TES カロリメータの直流駆動による読み出し方法の概念図。左の図が TES カロリメータを定電圧バイアスで動作させる場合の等価回路。(a) が X 線光子が TES カロリメータに入射した場合の TES の抵抗変化、(b) が TES を流れる電流の変化を示している。右の図が直流駆動で複数の TES カロリメータを並べた場合の等価回路。この方法だと電流計の電流値を測定してもどの TES カロリメータに X 線光子が入射したか判断することができない。

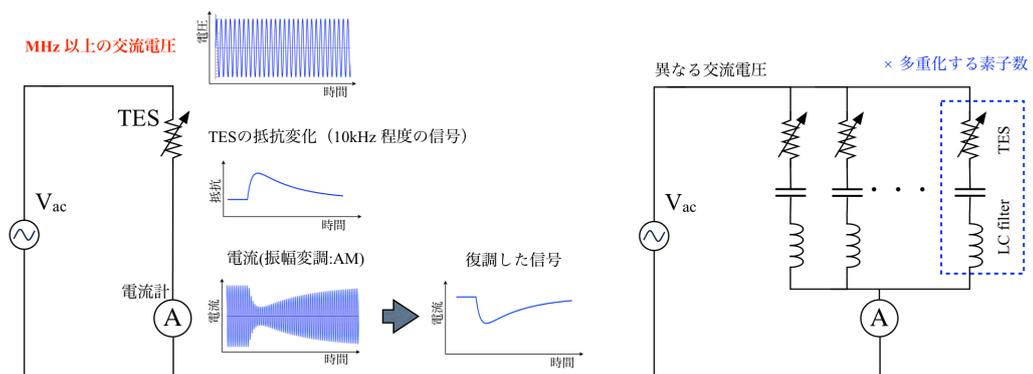


図 2: TES カロリメータの交流駆動による読み出し方法の概念図。左の図が TES カロリメータを MHz 帯交流バイアスで駆動させる場合の一素子についての概念図。MHz 帯の交流で動作させることで、TES を流れる電流は振幅変調を受け、それを室温回路で復調することで TES のパルスを読み出す。右の図が複数の TES カロリメータを並べた場合の等価回路図。各 TES に異なる周波数の交流電圧をかけるため、LC bandpass filter を用いる。

2.2 SQUID 電流計

TES の電流変化を読み出すには、SQUID 電流計を用いる。超伝導量子干渉計 SQUID とは磁束の変化を電圧の変化として読み出す磁束検出器である。TES とコイルとを直列につなぎ、そのコイルと SQUID を繋ぐことによって TES の電流変化を読み出す。

しかし、SQUID のデメリットとしてその応答が線形で無いことが挙げられる。これを広い入力に対して応答の線形性を確保するため、通常は負のフィードバック下で動作させる (図 3)。この動作方式は SQUID を貫く磁束が一定に保たれるようにフィードバックをかけることから、磁束固定ループ FLL (Flux-Locked Loop) と呼ばれる。

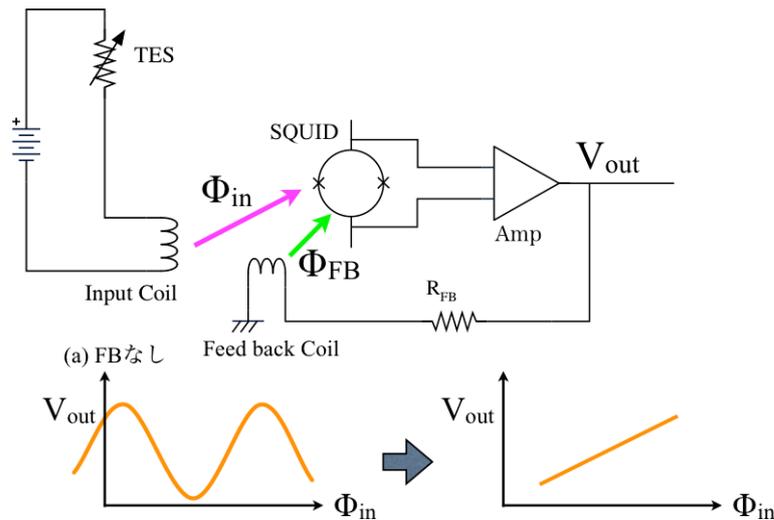


図 3: 磁束固定ループ (FLL) の概念図。SQUID にフィードバック (FB) がかかっていないときの出力電圧の入力磁束依存性が (a) のグラフ。これでは応答が線形でなく電流計として使用できない。そこで等価回路図の様に室温部アンプ (Amp) から FB をかける (FLL 中で動作させる) ことで、図 (b) の様な応答となる。

2.3 BBFB 回路

TES カロリメータの信号は周波数空間では数 kHz 程度なので、信号を区別するためには各素子の駆動周波数を 100 kHz 以上離す必要があり、例えば 8 素子の多重化であれば 1MHz の交流で駆動しなければならない。また、2.2 より TES カロリメータを読み出す SQUID は FLL 下で動作させる必要があり、MHz 帯の交流で駆動させる場合低温ステージと室温回路の配線による位相遅れが問題となり、安定して動作させることができない。そこで、我々は変調された信号を一度復調し位相の遅れを補償した後、再変調した信号をフィードバックするアナログベースバンドフィードバック BBFB(Base Band FeedBack) 方式による駆動回路を設計、開発した (図 4)。

今回、我々は TES カロリメータを異なる周波数で交流駆動するための LC filter、SQUID の微弱な信号をノイズに負けずに読み出すためのシールドボックスなどを作成し、BBFB 回路を用いて複数素子の X 線照射実験を行った。

3 実験セットアップ

本実験のセットアップを図 5 に示す。

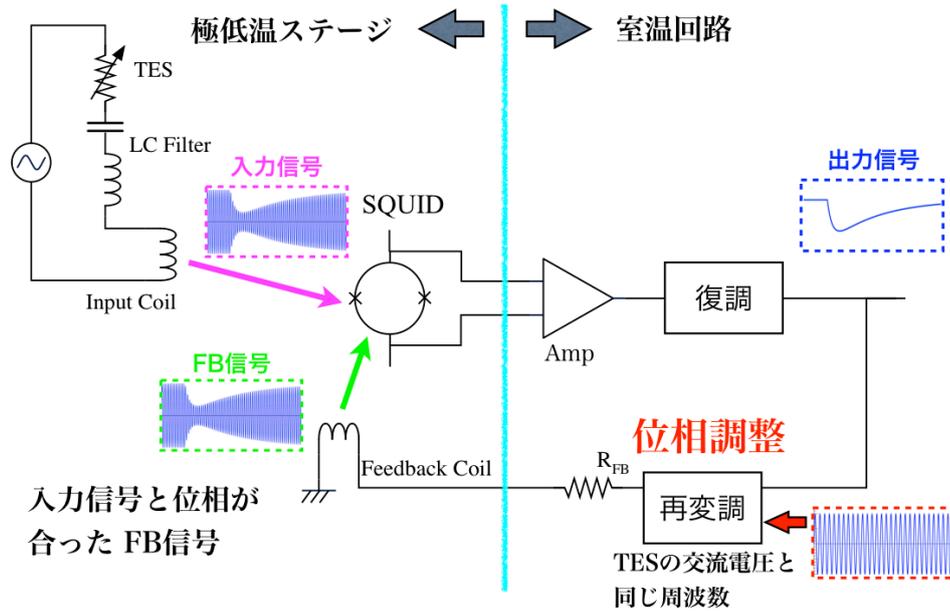


図 4: BBFB 回路の模式図。MHz 帯の交流で変調された信号が SQUID に入力され、室温回路で復調、再変調しフィードバックをかける。再変調部分で位相の補償をすることで、MHz 帯交流の駆動でも安定して動作することが出来る。

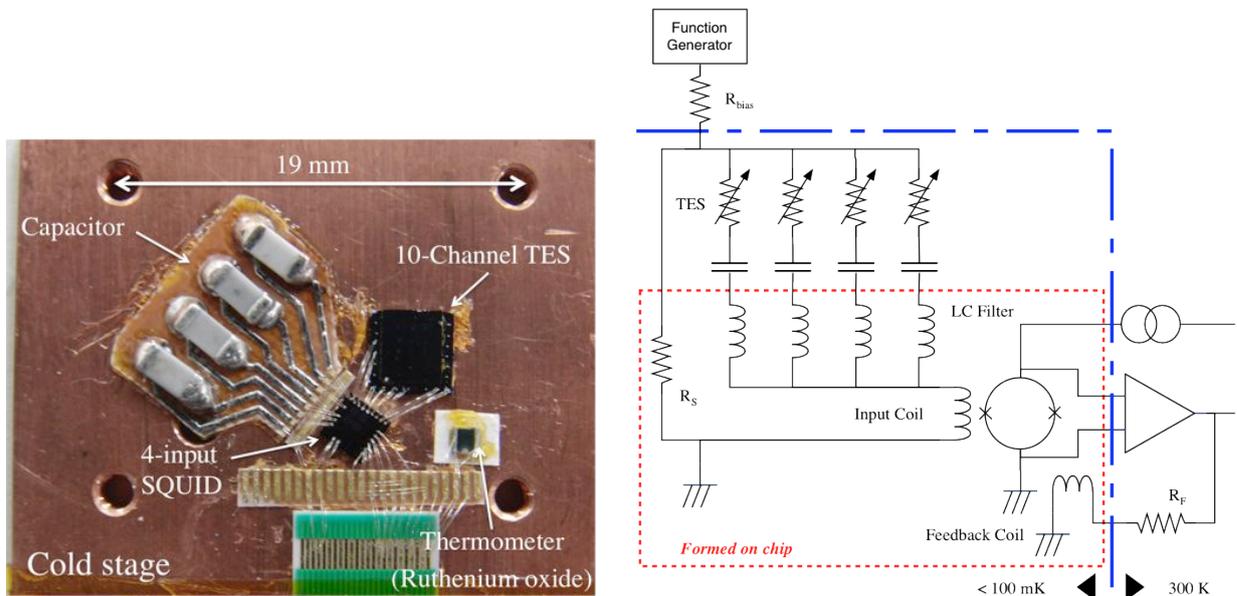


図 5: 左図が Cold Stage マウント図。右図がその等価回路。右図の赤い点線で囲っている部分は SQUID 上に形成されている。

本実験で使用した TES の基板サイズは $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ で、各チャンネルについて開口部が $220 \mu\text{m} \times 220 \mu\text{m}$ のシリコンコリメーターがついている。10 channel の内から 4 つ選び測定した。TES の上部に ^{55}Fe 線源を付けた。

SQUID は我々のグループが設計した 4 入力電流加算型 SQUID を使用した。SQUID チップ上に LC フィルタ用の超伝導コイル (設計値で 500 nH 程度) がある。

LC filter を SQUID 基板上の超伝導コイルとチップコンデンサを用いて作成した。図 5 に示す通り、チップコンデンサはシール基板に半田付けしてあり、シール基板の配線もでき得る限り半田をなめる様にしてある。これは半田が $\sim 10 \text{ K}$ 程度で超伝導になるので、LC filter の残留抵抗成分を減らす工夫である。LC filter で使用したチップコンデンサは、室温領域で静電容量の温度依存性が小さい C0G 誘電体のキャパシタである、村田製作所 GRM31C5C1E473JA01L(47 nF)、GRM3195C1H223JA01D(22 nF)、GRM31C5C1E104JA01L(10 nF)、GRM3195C1H682JA01D(6.8 nF) を使用した。LC filter の設計値を表 1 に示す。共振周波数 f_C は L の値を設計値の 500 nH として計算した。これから便宜上、それぞれのフィルタの回路全部を含めて CH1 \sim 4 と呼ぶ。

表 1: TES チャンネルと LC フィルタの設計値

CH #	TES channel #	C [nF]	f_C [MHz] ($L=500 \text{ nH}$)
1	2	47	1.038
2	10	22	1.518
3	9	10	2.251
4	5	6.8	2.730

また、本実験では極低温環境をつくるのに住友重機械工業株式会社製の断熱消磁冷凍機 (SHI-ADR) を用いた。この冷凍機は極低温ステージの容量が大きく、また最低到達温度が $\sim 50 \text{ mK}$ 以下であり 100 mK 以下の保持時間も長く温度揺らぎも小さい。

4 実験結果

4.1 LC filter の動作確認

最初に作成した LC filter が設計値通りに動作しているかを確認する。cold stage を 100 mK に冷却し、TES を超伝導状態にし測定する。input coil 側に 1~3 MHz の正弦波信号を入力し、BBFB 回路を用いて測定周波数毎に復調器、再変調器の位相を調整しフィードバックをかける。測定結果を図 6 に示す。表 1 から、共振周波数の設計値と測定値との差は 1.3% 以下であることが分かる。また帯域幅は 10~15 kHz 程度であり、非常に性能が良い filter を作る事ができたと言える。

4.2 TES カロリメータの MHz 帯交流駆動

熱浴温度 100 mK で ^{55}Fe 線源からの X 線パルスの取得を行なった。CH1 \sim CH4 の四つについてそれぞれの共振周波数の正弦波で駆動して、パルスを取得した。CH1 の結果を図 7 に示す。図 7 はオシロスコープの画面コピーであり、CH1 で駆動した時の結果である。復調された X 線信号と、再変調されたフィードバック信号を確認することができる。これにより、単素子の TES カロリメータの MHz 帯交流駆動に初めて成功した。

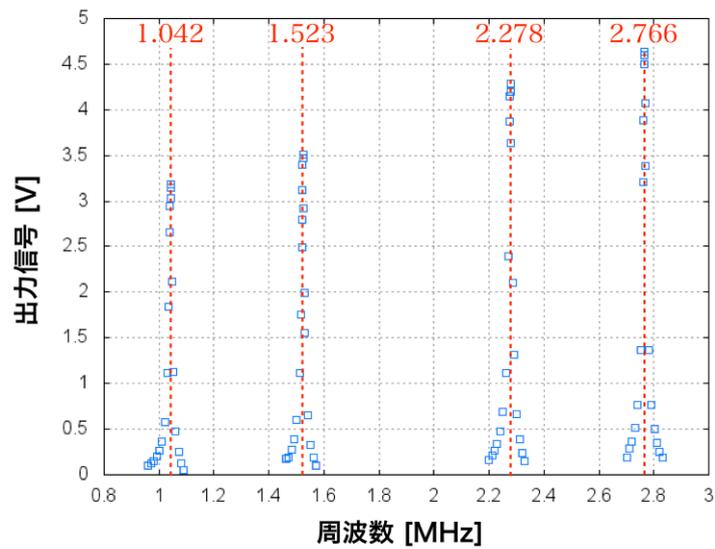


図 6: LC filter の動作確認実験結果。それぞれ四つの共振点を確認することができ、これは設計値と一致する結果を得ることができた。

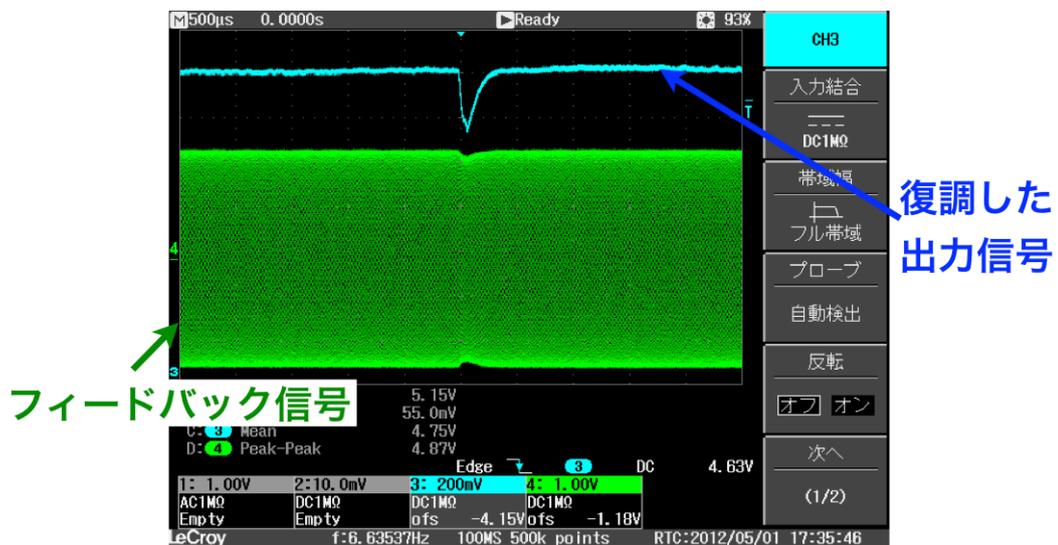


図 7: TES カロリメータの MHz 交流駆動結果。CH1 で駆動したときのオシロスコープの画面コピーである。復調、再変調された信号を確認することができる。

4.3 2素子同時交流駆動

単素子駆動の時と同様、熱浴温度 100 mK で CH1 と CH2 の同時駆動を行った。CH1 と CH2 の共振周波数の正弦波で駆動して、同時にパルスを取得した。その結果の一例を図 8 に示す。CH1、CH2 共に X 線パルスを取得する事に成功した。これにより、二素子同時交流駆動での X 線信号の取得に初めて成功した。

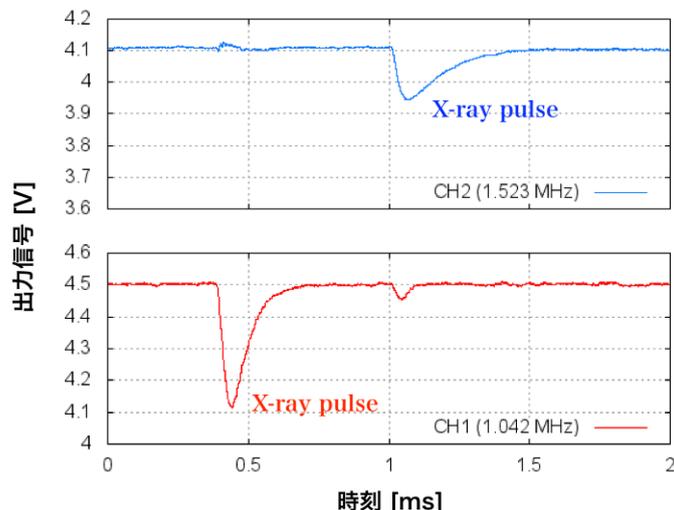


図 8: TES カロリメータの MHz 交流駆動結果 その 2。CH1 と CH2 で同時交流駆動した結果である。0.6 ms 間に二つの X 線パルスを検出している。また、X 線が入射していない方のチャンネルにクロストークが出ているのも確認できる。

5 まとめ

- LC filter の設計値と同様の動作を確認した。
- MHz 帯交流駆動で TES カロリメータの X 線信号を読み出すことに成功した。
- 二素子の同時交流駆動にも成功した。

以上のことから信号多重化の読み出し回路、つまり BBFB 回路の原理実証に成功した。まだ多くの課題はあるが、これらの結果はこれから複数素子の多重化に向けた大きな成果であると言える。

参考文献

- [1] H. Akamatsu, Y. Abe, K. Ishikawa, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, Y. Takei, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, R. Maeda, Betty Young, Blas Cabrera, and Aaron Miller. Impedance measurement and excess-noise behavior of a TiAu bilayer TES calorimeter. *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1185, pp. 195–198, 2009.
- [2] T Ohashi, Y Ishisaki, Y Ezoe, and S Sasaki. DIOS - the diffuse intergalactic oxygen surveyor: status and prospects. *Proceedings of SPIE*, Vol. 7732, pp. 1–9, 2010.