

本論

基礎物理研究室 盛武翔

平成 27 年 1 月 13 日

概要

本研究室に所属後、放射線計測用半導体検出器の評価実験を KEK (高エネルギー加速器研究機構) 計測器開発室と共同プロジェクトとして行ってきた。日常生活で最も身近な半導体検出器の例として、デジタルカメラの CCD イメージセンサーや CMOS イメージセンサーがある。放射線検出用半導体検出器はこれらのイメージセンサーの感度をさらにあげて、数エレクトロンの電荷を検出できることを目指して設計されている。そのような高感度のイメージセンサーを達成するためには、極めてノイズが少ない事が求められ、半導体検出器のノイズの一つとして、熱によるノイズ (熱ノイズ) がある。熱ノイズを評価するために、イメージセンサー内に温度計を組み込む計画が上がった。私はセンサー内部に搭載された温度計の評価研究を行っている。温度計の有効性が確認されれば、温度計を内蔵した半導体検出器が登場する。

目次

1	はじめに	6
1.1	半導体検出器や SOI 技術の用途	6
1.1.1	放射線検出用途	6
1.1.2	日常生活における SOI 技術	7
1.2	SOI 技術を用いた半導体検出器と研究動機	8
2	諸理論	9
2.1	SOI 技術のメリット	9
2.2	製造プロセスについて	12
2.3	製造プロセスがダイオード温度計にもたらす影響	13
2.4	製造プロセスの影響をなくす差動電圧型ダイオード	14
2.5	カレントミラー回路	16
3	評価実験	18
3.1	直線性の確認	18
3.1.1	実験準備	18
3.1.2	直線性の確認結果	19
3.1.3	直線性の確認の考察	21
3.2	KEK での直線性確認	22
3.2.1	実験方法と準備	22
3.2.2	測定結果	24
3.2.3	考察	26
3.3	FZn 型, CZn 型の比較@KEK	27
3.3.1	TEMPTEG の全体回路図	28
3.3.2	単純ダイオード型	28
3.3.3	差動ダイオード型	31
3.3.4	実験方法	31
3.3.5	測定結果	33
3.3.6	考察	37
3.3.7	差動ダイオード型評価実験	39
3.3.8	測定結果	39
3.3.9	差動ダイオード型温度計の考察	46
4	まとめ	47

目 次

1	SOI グループが開発を行っている半導体検出器の一つ	6
2	デジタルカメラの CMOS センサー	7
3	武田彩希氏が SOI ピクセル検出器で撮影した X 線画像 [2]	8
4	トランジスタの構造	9
5	浮遊容量のイメージ	10
6	インバーター回路の電力消費	10
7	サブスレッショルド電流に関わる容量	11
8	単結晶と多結晶	12
9	ダイオードに一定電流を流して温度計として動作させる	13
10	差動ダイオード温度計回路	14
11	N 型トランジスタを用いたカレントミラー回路例	16
12	P 型トランジスタを用いたカレントミラー回路例	16
13	カレントミラーを二つ組み合わせた回路	17
14	EDN JAPAN の web サイトにあった定電流回路 [5]	18
15	自作した定電流回路	18
16	アルミ製の蓋をしたセンサーの上に金属容器を置き温度を測った	19
17	結果のグラフ	19
18	FZn No.2 の結果のグラフ	20
19	FZn No.3 の結果のグラフ	20
20	FZn No.4 の結果のグラフ	21
21	実験のモデル図	22
22	電流源と電圧測定機器	23
23	内蔵ダイオード端子	23
24	CZn 型 TEG No.1 結果	24
25	CZn 型 TEG No.2 結果	24
26	CZn 型 TEG No.3 結果	25
27	CZn 型 TEG No.4 結果	25
28	ダイオード単体の温度特性 横軸は温度、縦軸は電圧	26
29	ダイオード 10 個並列接続時の温度特性 横軸は温度、縦軸は 電圧	27
30	TEMPTEG チップレイアウト、パッド番号、および各 TEG の位置	28
31	iotemp1 の回路図ドライブ電流範囲 10~100 μ A	29
32	iotemp1-4 の回路図ドライブ電流範囲 40~400 μ A	29
33	iotemp2 の回路図ドライブ電流範囲 10~100 μ A	30
34	iotemp2-4 の回路図ドライブ電流範囲 40~400 μ A	30
35	カレントミラー回路と差動ダイオード回路	31
36	TEMPTEG の単純ダイオード回路の測定	32

37	恒温槽内部の様子、チップの上に温度計を貼り付けた	32
38	iotemp1,10 μ A 測定結果	33
39	iotemp1,50 μ A 測定結果	33
40	iotemp1-4,40 μ A 測定結果	34
41	iotemp1-4,400 μ A 測定結果	34
42	iotemp2,2.5 μ A 測定結果	35
43	iotemp2,25 μ A 測定結果	35
44	iotemp2-4,10 μ A 測定結果	36
45	iotemp2-4,100 μ A 測定結果	36
46	iotemp1,Fitting 結果	37
47	iotemp1-4,Fitting 結果	37
48	iotemp2,Fitting 結果	38
49	iotemp2-4,Fitting 結果	38
50	測定風景	39

1 はじめに

まずはじめに、半導体検出器の用途や SOI(Silicon-On-Insulator) 技術を用いた半導体検出器の展望や、SOI 技術が身近にどの様に用いられているかについて紹介し、研究プロジェクトや研究の動機について述べる。

1.1 半導体検出器や SOI 技術の用途

1.1.1 放射線検出用途

高エネルギー実験や医療機器や X 線透過検査など放射線を検出する際に、SOI 技術を用いた半導体検出器とそのデータ収集システムが KEK (高エネルギー加速器研究機構) の計測器開発室と各大学からなるプロジェクトチーム (SOI グループ) が開発を行っている。

SOI 技術を用いた X 線イメージ検出器とデータ収集システムは、従来の X 線検出器に比べ、高精細・高速・高感度といった特徴をもつ。[1]

SOI 技術を用いた X 線イメージ検出器とデータ収集システムは SEABAS(SOI Evaluation Board with Si TCP/IP) という試験ボードと PC 等の計算器を Ethernet を介して、データ収集できるため、パソコンを用いて簡単にデータ取得でき、X 線解析や X 線異物検査、医療分野に広く活用できる。

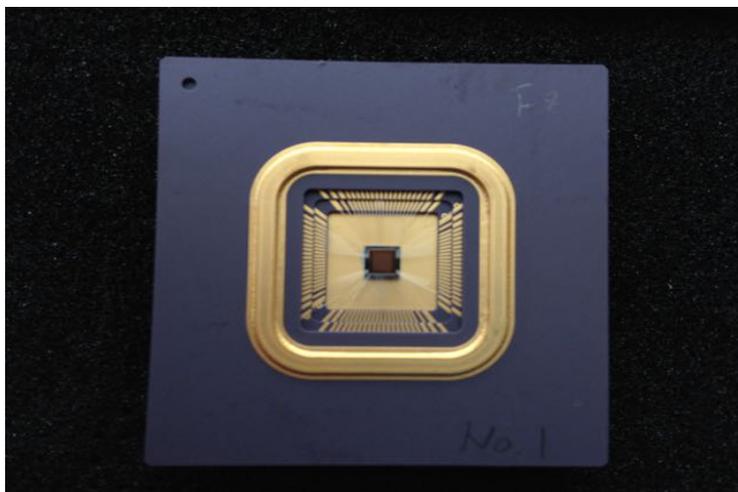


図 1: SOI グループが開発を行っている半導体検出器の一つ

1.1.2 日常生活における SOI 技術

情報通信機器の SOI 技術 SOI 技術は先述のような半導体検出器のみならず、情報通信機器の中核を占めているパソコンやスマートフォンなどの情報通信機器の中に利用されている CPU やメモリ、SSD(Solid State Drive) 等の各種半導体デバイスであり、情報通信機器の高速・大容量化を支えているのが SOI 技術である。SOI 技術を用いてトランジスタを微細化することで半導体デバイスは高速動作、省電力化が図られており、1970 年初頭には $10\mu\text{m}$ であった FET(Field Effect Transistor) のサイズも 2000 年には 100 分の 1 の 100nm まで小さくなっているが、その微細化の限界も $5\sim 10\text{nm}$ だとも言われている。

イメージセンサーとしての SOI 技術 イメージセンサーにおいては現在 CCD(Charge-Coupled Device) と CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) イメージセンサーがデジタルカメラやビデオカメラの受光素子として広く用いられている。

簡単に CCD と CMOS イメージセンサーの違いを述べておくと、CCD は



図 2: デジタルカメラの CMOS センサー

画素毎のイメージをバケツリレーのようにアナログ方式で読み出していくため読み出しに時間がかかるが、CMOS はデジタル方式で画素に縦横のアドレスを与えてデジタル方式で読み出すため、高速に読み出せる。CCD は受光素子とデジタル回路が分離されているため、ノイズが少ないが消費電力が大きい。SOI 技術を用いた CMOS センサーはデジタル回路を画像素子に組み込めるため、消費電力は小さい。という特徴があるが、最近では CMOS センサーの画像も CCD センサーに劣らない程になっている。

以上のような分野に SOI 技術は用いられており、CMOS センサーの消費電力が小さい事などから、京都大学では X 線衛星に搭載される宇宙 X 線観測用の SOI 技術を用いた SOI ピクセル検出器の開発を行っている。

1.2 SOI 技術を用いた半導体検出器と研究動機

2005 年より SOI グループが SOI 技術を用いた半導体検出器の開発を行っており、図 1 の様な TEG(Test Element Group) の設計、製造や、性能評価を行っており、2012 年度から私自身も SOI グループに属し、SOI ピクセル検出器の基本性能の評価等を行ってきた。

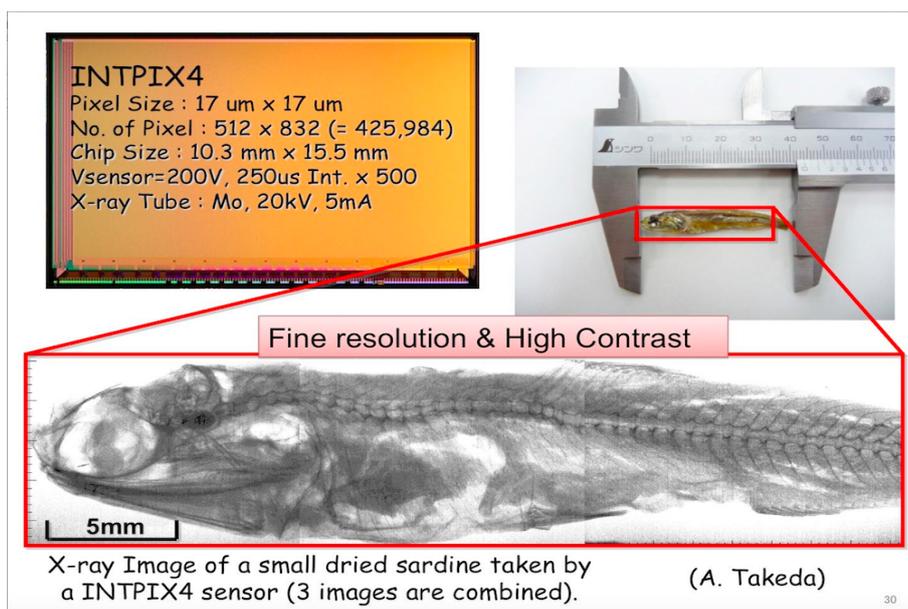


図 3: 武田彩希氏が SOI ピクセル検出器で撮影した X 線画像 [2]

その中で SOI グループの京都大学から、宇宙空間などの低温状況での動作を確認するため、センサーに温度計を組み込めないかというアイデアが上がり、昨年度よりセンサー内蔵のダイオード温度計の評価実験を行ってきた。始めは、既存の TEG に内蔵されていたダイオード単体の回路のテストを行なった。その結果、センサー内蔵ダイオードを温度計として利用の可能性が高まったため、様々なダイオード回路を内蔵した TEG が去年に作成され、その評価を現在も継続して行っている。

2 諸理論

本研究では、SOI 技術を用いたピクセルセンサーに搭載するダイオード温度計の評価を行っている。そのため、本研究に用いたダイオードには製造プロセスの違いが大きく関わってくる。本章では以下の三つの項目

- SOI 技術のメリット
- 製造プロセスについて
- 製造プロセスがダイオード温度計にもたらす影響
- 製造プロセスの影響をなくす差動ダイオード

について、紹介する。

2.1 SOI 技術のメリット

MOSFET MOSFET は n 型半導体と p 型半導体をしたの図のように組み合わせることで、ドレイン、ソース間の電流をベースの電源によって ON/OFF する半導体素子である。本論文でのトランジスタはこの MOSFET を指す。

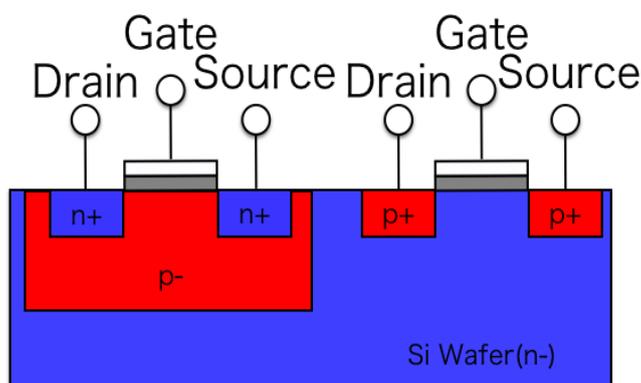


図 4: トランジスタの構造

SOI 技術 SOI(Silicon On Insulator) 技術とは、シリコンウエハの中に、 SiO_2 層をチャンネルの下やシリコンウエハ上に絶縁膜を形成させて、チャンネルとウエハ間や P 型半導体や n 型半導体の接合面に生じる浮遊容量を減らす効果を狙ったものである。

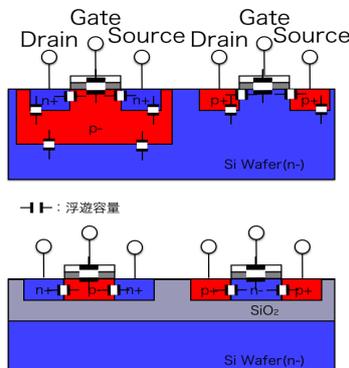


図 5: 浮遊容量のイメージ

このような浮遊容量はトランジスタの動作を遅くしたり、リーク電流 (絶縁されずに漏れ出す電流) が生じてしまう。最近の半導体デバイスの微細化に伴い、チップ上のトランジスタの数が増え、短時間に高速に計算ができるようになったが、これに伴い消費電力が増える事になる。消費電力を抑えるため省消費電力化が図られてきた。消費電力は電源電圧の二乗に比例するので、電源電圧の抑制は省消費電力化に大きな効果がある。

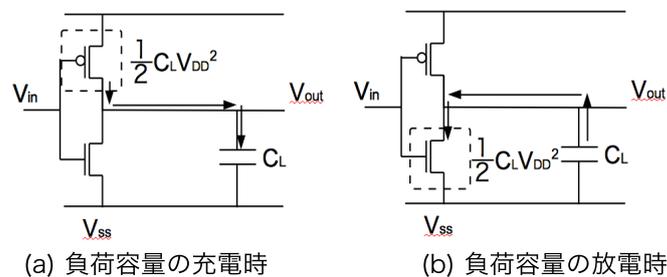


図 6: インバーター回路の電力消費

簡単な MOS トランジスタの組み合わせ回路であるインバーター回路を例にとると、集積回路の電力消費は、

- 論理演算時の出力電圧の変動に起因する電力消費
- 待ち受け時に消費される消費電力

があり、その消費電力の削減には負荷容量 C_L と電源電圧 V_{DD} の削減が効果的である。

リーク電流 (サブスレッショルド電流) これらの容量や電圧はデバイスの微細化によって、必然的に負荷容量は低減する。特に、待ち受け時に消費される電流はリーク電流の抑制と深く関わってくる。

待ち受け時、すなわちゲート電圧を閾値以下にしてトランジスタが OFF になっても、現実にはドレインからソースに向かったわずかに漏れ出す電流 (リーク電流) が流れる。

このリーク電流 (I_d) はサブスレッショルド電流といい、ゲート電圧に対してほぼ指数関数的に変化し、以下の式で与えられる。

$$I_d \propto 10^{-\frac{V_{gs}}{S}}$$

$$S = \left(\frac{d(\log_{10} I_d)}{dV_{gs}} \right)^{-1} \simeq \frac{2.3kT}{q} \left(1 + \frac{C_{cb} + C_{cs} + C_{cd}}{C_{gc}} \right) \quad (1)$$

で表され、およそ 50°C の温度上昇で 10 倍になる。(k は定数) したがって、リーク電流による消費電力の増大に伴う発熱を抑えないと、さらにリーク電流が増えるという悪循環になる。

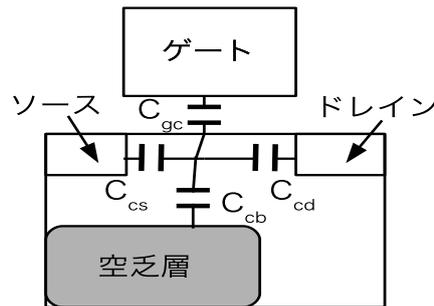


図 7: サブスレッショルド電流に関わる容量

センサー近傍の温度がわかると、温度に依存するリーク電流の測定に有利である。リーク電流の測定は、半導体を破壊しない電圧を測定する上で重要であり、半導体の特性を知る上で重要である。宇宙空間などできるだけシステムを統合して、電力消費を抑えたい場合などの外部から温度計を組み込めないような状況に有効である。

以上のことから、半導体検出器に温度計を搭載する案が上がった。

2.2 製造プロセスについて

今回、ダイオード内蔵 SOI イメージセンサーの評価実験では、二つの製造プロセスにより作られた SOI イメージセンサーを用いた。FZ 法 (浮遊帯溶融法 Floating Zone Melting 法) と CZ 法 (Czochralski 法)、それぞれの方法で作られた SOI イメージセンサーである。

これらは大型の単結晶シリコンを製造する技術であり、シリコンウエハに回路をエッチングする際に単結晶製造技術が重要となる。

単結晶 単結晶 (single crystal monocrystal) とは、結晶のどの位置であっても結晶軸の方向が変わらないものをいう。結晶軸とは x,y,z 軸の三次元軸の向きである。例えば、下の図 9 のような円柱型の結晶があったとする。左は結晶の向きが全て揃っているので、単結晶であるが、右は結晶の向きが中心の一つだけ上下方向にずれているので、単結晶ではない。

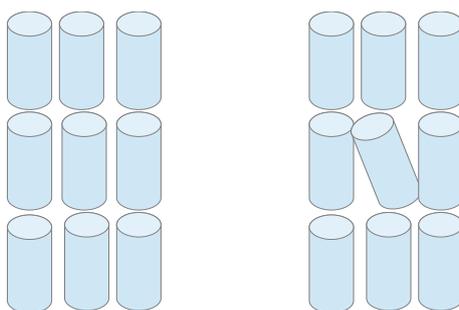


図 8: 単結晶と多結晶

このような結晶を多結晶 (Polycrystalline) という。多結晶は多数の微小な単結晶からなる構造である。このため、多結晶の物体は、互いに隣接する単結晶間に結晶粒界という界面が存在する。

界面近傍の分子は周囲を取り囲む同一種分子の総数が結晶内部より少なくなるため、同一種分子の相互作用で安定化されている内部の分子よりエネルギー的に不利な状態になる。つまり、結晶内部に比べて過剰の自由エネルギーを持つことになり、格子欠陥やストレスによるウエハの反りが生じる。以上のことから結晶の方向を揃えることはその結晶中に作成する素子の特性を精度よく制御することになる。このため、FZ 法と CZ 法で作られた SOI センサーのプロセスの違いによる、出来上がった各素子のばらつきについての比較が必要である。

2.3 製造プロセスがダイオード温度計にもたらす影響

下図のようにダイオードに順方向に一定電流 (I) を流すと、両端電圧 (V) は温度 (T) °C に比例した値になる。その時の電圧と温度の関係は、

$$V = V_B + \frac{kT}{nq} \times \ln \frac{I + I_s(T)}{I_s(T)} \quad (2)$$

で表される。この時の k はボルツマン定数、 V_B はシリコンのバンドギャップ電圧で 1.2(V)、 $I_s(T)$ は逆飽和電流であり、これは製造プロセスに依存した温度に比例した関数である。

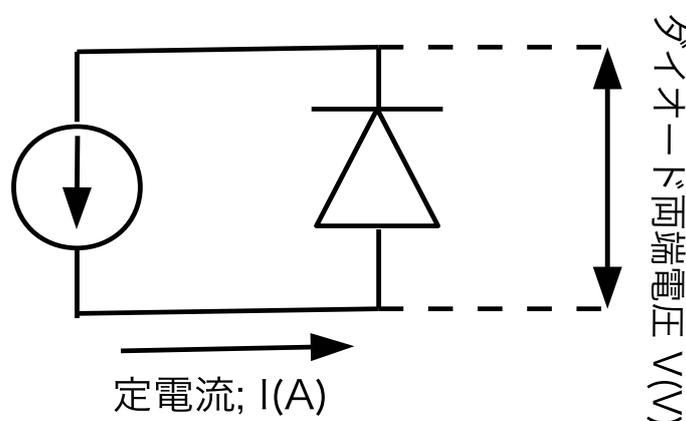


図 9: ダイオードに一定電流を流して温度計として動作させる

逆飽和電流 $I_s(T)$ は順方向電流 I に対して十分に小さい値であるが、温度が 10 度上がる毎に逆飽和電流は 2 倍になる。そしてこの振る舞いはダイオード温度計を使用する温度の範囲によって決まる。温度が 150[K] から 400[K]、即ち、摂氏-123 度から摂氏 127 度の範囲では、電圧は温度に対し、ほぼ線形となり、その温度勾配はおよそ -2mV/K から -2.3mV/K の範囲である。そして、不幸なことに逆飽和電流 $I_s(T)$ は温度に比例するだけでなく、製造過程での様々な要素が絡む。その為、ダイオード毎に逆飽和電流の値は変わってくる。ダイオード単体の温度計は最も安価にできるが、少なくとも 1 カ所から 2 カ所の点で、キャリブレーションを行う必要がある。たとえ、キャリブレーションしたとしても、非線形性やヒステリシスなどの不確かさを誤差 2[K] の幅で含む。[3]

2.4 製造プロセスの影響をなくす差動電圧型ダイオード

そこで、ダイオード温度センサーの特性を改善するために、二つの同じプロセスで製造されたダイオード二つに (温度の差が生じないように、同じチップに隣接されて内蔵される) 別々の電流源から、 I_1 と I_2 を与える必要がある。

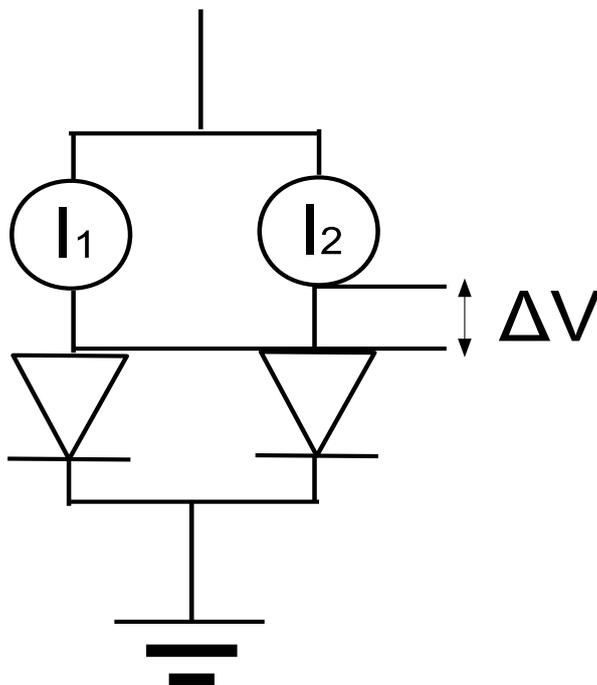


図 10: 差動ダイオード温度計回路

すると、これら二つのダイオードの電圧降下の差は、

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{kT}{nq} \times \ln \frac{I_1}{I_2} \quad (3)$$

で表され、ダイオードをまとめることで逆飽和電流に依存しなくなる。さらに、電圧の傾向 (温度係数) は単純な測定回路で測定することができる。[3]

ここで、電流 I_1 と I_2 は一定電流であるので、 $\frac{I_1}{I_2}$ は定数となり、

$$\Delta V = V_1 - V_2 = C \times T \quad (C \text{ は定数}) \quad (4)$$

となり、絶対零度で電位差が 0[V] となり、半導体プロセスに依存した項が打ち消され、測定前のキャリブレーションの必要がなくなる。

実際に電圧が温度に比例する条件は、二つの別々のダイオード (接続) に一定電流を流すか、ダイオード領域の電圧を全く同じにしておくことで、起きる。後者では、飽和電流の比はダイオード領域の電流と同じになる。式 3 は出力電圧が絶対温度に比例していることを示している。

温度計として、p-n 接合への順方向電流もまた活用されている。ダイオード接合に定電流が流れると、その電圧降下は

$$V = V_{th} \ln \frac{I_c}{I_s} = \frac{kT}{q} * \ln \left(\frac{I_c}{I_s} \right) \quad (5)$$

この式を微分すると、以下の式が得られる。

$$\frac{\delta V}{\delta T} = \frac{\delta V}{\delta T} * \ln \left(\frac{I_c}{I_s} \right) - \frac{V}{I_s} * \frac{\delta I_s}{\delta T} \quad (6)$$

飽和電流の値を

$$I_s \simeq bT^{4+m} \exp \left(-\frac{E_g}{kT} \right) \quad (7)$$

とし、m の値をおよそ-1.5 とすると、

$$\frac{\delta V}{\delta T} = \left[V - (4+m)V_{th} - \frac{E_g}{q} \right] * \frac{1}{T} \quad (8)$$

8 式は、わずかな温度変化を一定であるとしたダイオード (接続の) 順方向電圧の NTC(負の温度係数) である電圧降下を数量化したものである。NTC(負の温度係数) は PTC(正の温度係数) で表される熱源からの信号を保証することができる。式 3 と式 5 と式 6 から式 8 の等式を使うと基準入力電圧 (V_{ref}) は、

$$V_{ref} = \frac{E_g}{q} + (4+m) * V_{th} \quad (9)$$

である。

式 9 の有力な項は E_g で表される半導体のエネルギーバンドギャップ電位である。それゆえ、この近似が当てはまる基準電圧の全体をバンドギャップ基準電圧源という。[4]

2.5 カレントミラー回路

カレントミラー回路とは、電流 (Current) を写す (Mirror) する回路であり、一つの基準となる電流を複数にコピーできるので、LED(発光ダイオード)の動作回路によく用いられている。

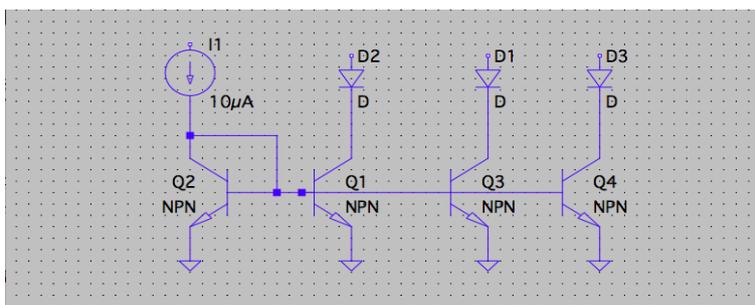


図 11: N 型トランジスタを用いたカレントミラー回路例

上の回路では、左端の Q2 のトランジスタにコピー元となる $10\mu\text{A}$ を流すと、D1,D2,D3 のダイオードに同じ $10\mu\text{A}$ の電流が流れる。

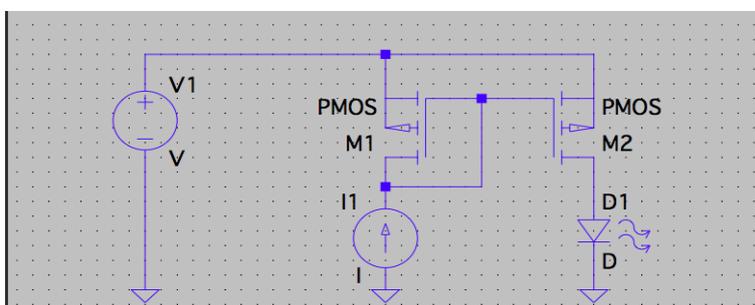


図 12: P 型トランジスタを用いたカレントミラー回路例

この回路でも、入力された電流が LED にコピーされる。P 型トランジスタの回路図を用いて動作原理を軽く述べる。M1,M2 のトランジスタは飽和領域で動作しているとき、トランジスタに流れる電流 (I) はゲート幅 (W)、チャンネル長 (L)、ゲートとソース間電圧 V_{gs} 、トランジスタのスレッシュホールド電圧 V_{th} を用いて、

$$I = k \left(\frac{W}{L} \right) (V_{gs} - V_{th})^2 \quad (10)$$

で表されるので、入力電流と出力電流の比は、同じトランジスタを用いれば、

$$\text{入力電流} : \text{出力電流} = \frac{W_{M1}}{L_{M1}} : \frac{W_{M1}}{L_{M1}} \quad (11)$$

で表される。通常、トランジスタのLの値は同じにして、W値の調整で入出力の電流比率を設定する。

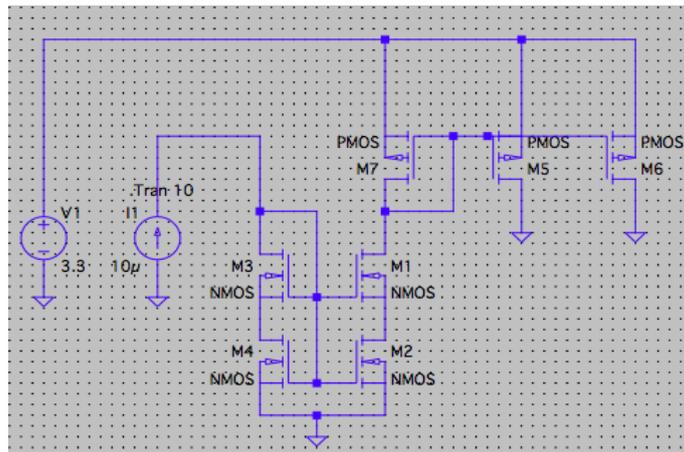


図 13: カレントミラーを二つ組み合わせた回路

NMOSで作られたカレントミラーとPMOSで作られたを組み合わせた回路。後述のTEMPTEGのカレントミラー回路もこの構成で出力電流の比を調整している。

3 評価実験

3.1 直線性の確認

3.1.1 実験準備

まず最初に、既存のダイオード単体評価用の TEG を受け取り、数 μA の電流を流してダイオード温度計の摂氏-50 度から摂氏 50 度における直線性を確認することになった。

本研究室には定電流を流せる電源がなかった為、数 V の直流電源 (Agilent E3646A) から $10\mu\text{A}$ 定電流電源を自作した。

三つ作成し、一番安定して動作した右端の基盤を使用した。

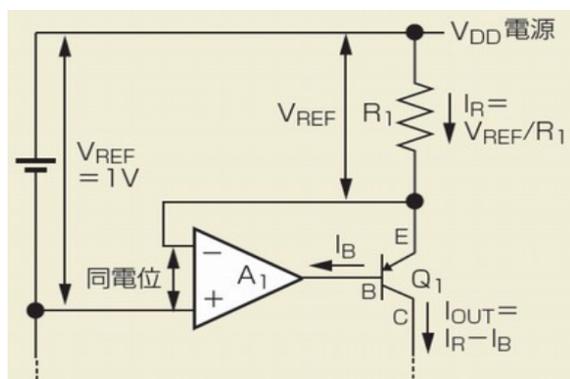


図 14: EDN JAPAN の web サイトにあった定電流回路 [5]

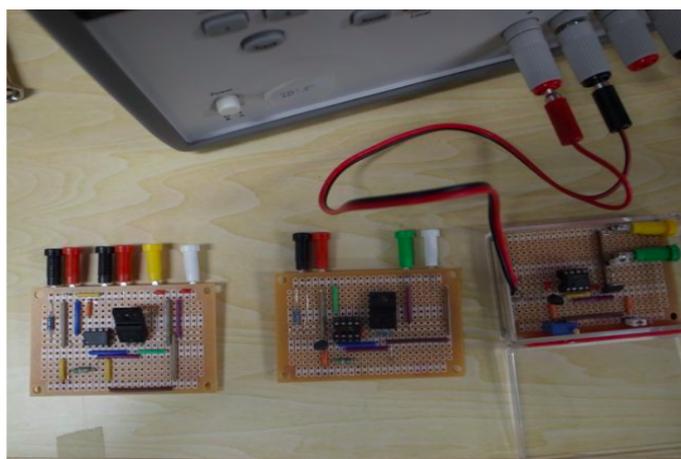


図 15: 自作した定電流回路

最初のこの電源の動作確認と、本研究室には結露対策が施された恒温槽がなかった為、お湯が室温 (25 度程度) で冷めていく様子をモニターできないかと実験を行った。あらかじめダイオードの破壊を防ぐため、数十 μA 程度の電流しか流さないようにと KEK の新井康夫教授から指導されていたので、TEG(FZn No.2) に $5\mu\text{A}$, $10\mu\text{A}$, $15\mu\text{A}$ の電流を流して実験した。ダイオードの電圧測定には KEITHLEY2000 を使い、お湯の温度はデジタル温度計をお湯につけて測った。

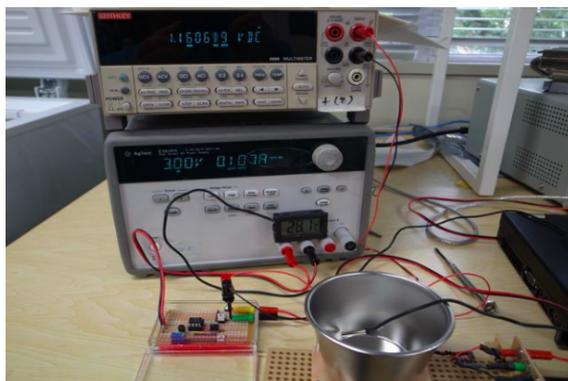


図 16: アルミ製の蓋をしたセンサーの上に金属容器を置き温度を測った

3.1.2 直線性の確認結果

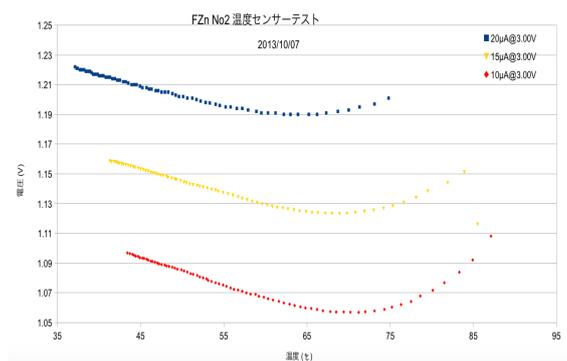


図 17: 結果のグラフ

20 秒毎に 30 分間データを取ったところ、センサーとお湯の温度が平衡になるまで 5 分程かかるが、その後は直線性が確認された。

また、 $5\mu\text{A}$, $10\mu\text{A}$, $15\mu\text{A}$ いずれの電流においても、直線性がでており電流の範囲として正しいことも確認された。以後、 $10\mu\text{A}$ の電流を用いて実験を進めた。翌日、本研究室にて、同じ実験を三つの TEG (FZn No.2, FZn No.3, FZn No.4) で行い、5分40秒経過以降のみのダイオードの電圧と温度との関係の直線性を確認した。

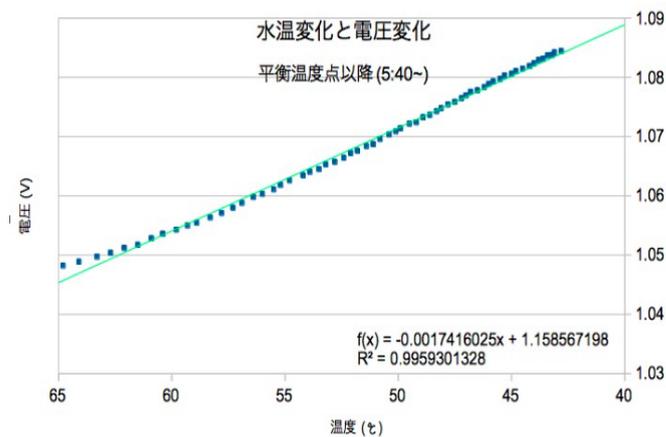


図 18: FZn No.2 の結果のグラフ

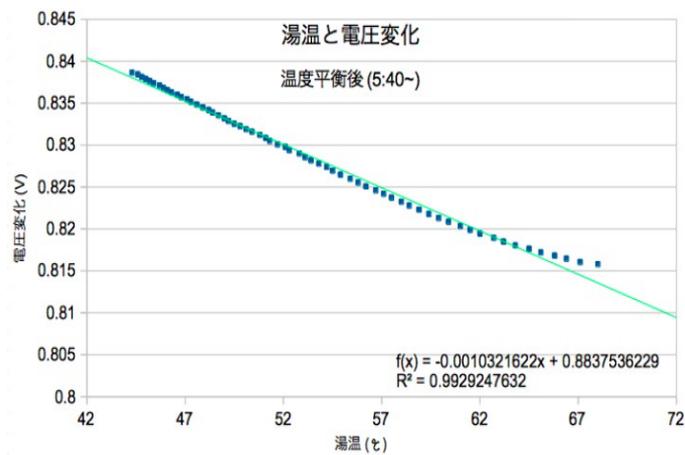


図 19: FZn No.3 の結果のグラフ

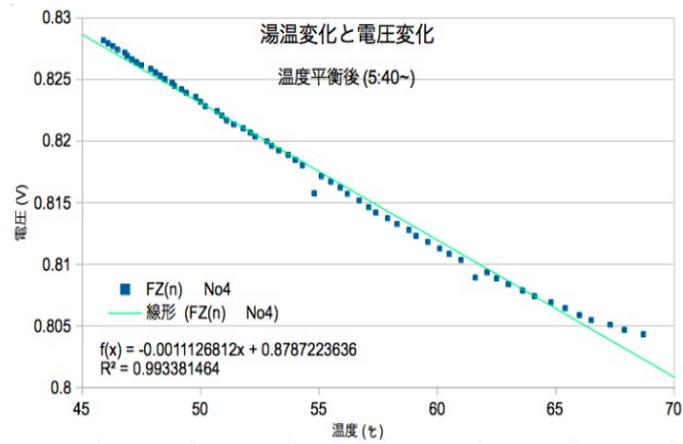


図 20: FZn No.4 の結果のグラフ

3.1.3 直線性の確認の考察

最初の FZn の No.2 の TEG チップの温度の軸が逆向きになっているが、三つの TEG チップで直線性が確認された。それぞれの近似式は以下のとおりである。

$$FZnNo.2; \quad Y[V] = 1.74 * X[^\circ C] + 1.16$$

$$FZnNo.3; \quad Y[V] = 1.03 * X[^\circ C] + 0.88$$

$$FZnNo.4; \quad Y[V] = 1.11 * X[^\circ C] + 0.88$$

No.2 の TEG チップが他の二つに比べて、大きくずれた原因はわからないが、直線性の確認はできた。

3.2 KEK での直線性確認

先述の本研究室での直線性の確認結果をミーティングで報告したところ、KEKにて恒温槽やソースメーター(高精度電流電圧源)を用いて実験をすることが決まった。

3.2.1 実験方法と準備

CZnのTEGチップに $10\mu\text{A}$ の定電流を流しながら恒温槽にセンサーを入れ、ダイオードの順方向電圧の温度依存性について調べた。

- 乾燥窒素充填の恒温槽で、温度範囲は $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ まで $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 毎に測定
- 電流源 SourceMeter(KEITHLEY2410)を用いて、 $10\mu\text{A}$ の定電流を順方向に流す
- TEGチップのダイオードの両端電圧は MultiMeter(KEITHLEY2410)のモニター電圧
- 温度はチップ近傍に「おんどとり(Pt100を用いた温度計)」を設置し、槽内を測定
- TEGチップ表面にも、LM50温度ICを貼り付けて、チップ表面の温度を測定した

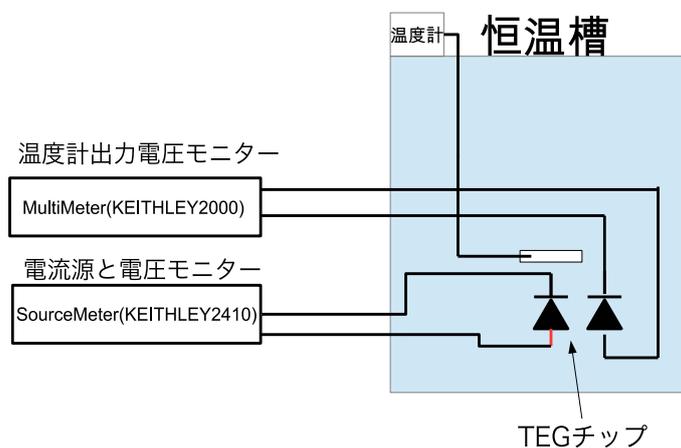


図 21: 実験のモデル図

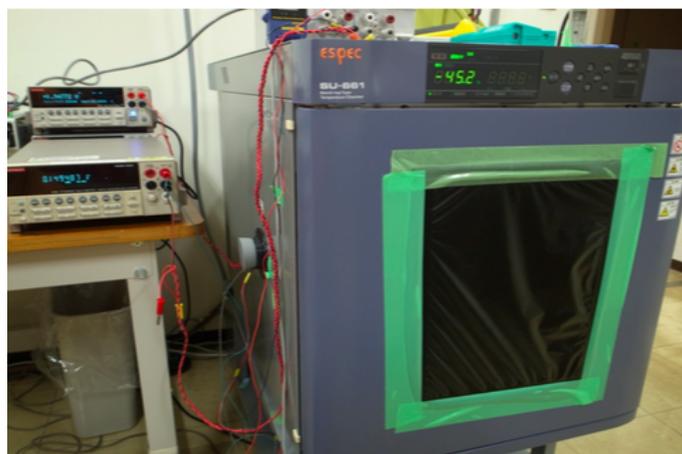


図 22: 電流源と電圧測定機器

実験に用いた恒温槽、定電流入力用の KEITHLEY2410SourceMeter や予備で用いた温度 IC の電圧測定用の 2000Multimeter。以後の実験にはこれらを用いて実験を行っている。

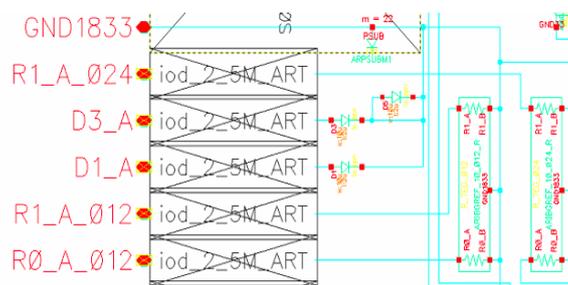


図 23: 内蔵ダイオード端子

恒温槽内部に置いた TEG チップの様子。本チップにはダイオード単体回路とダイオード 10 個が並列接続された回路があり、この二つの評価実験を行った。

3.2.2 測定結果

以下に評価実験を行った4つのTEGチップの結果を載せる。

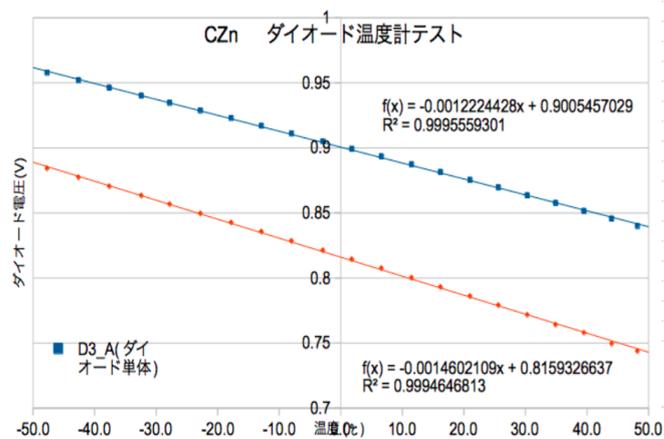


図 24: CZn 型 TEG No.1 結果

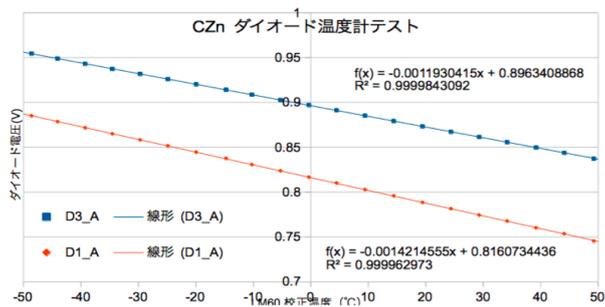


図 25: CZn 型 TEG No.2 結果

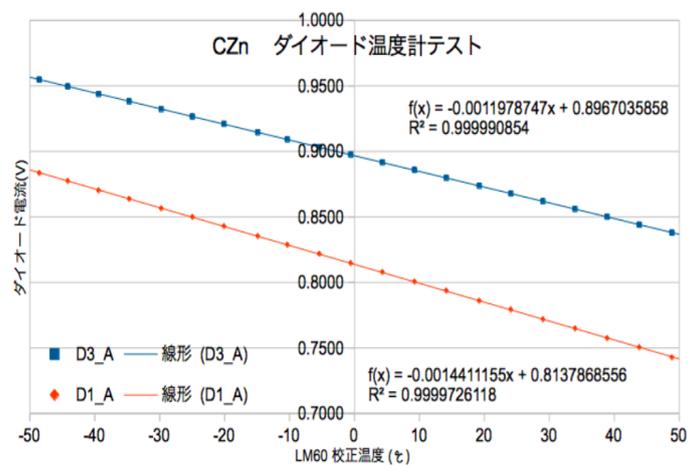


図 26: CZn 型 TEG No.3 結果

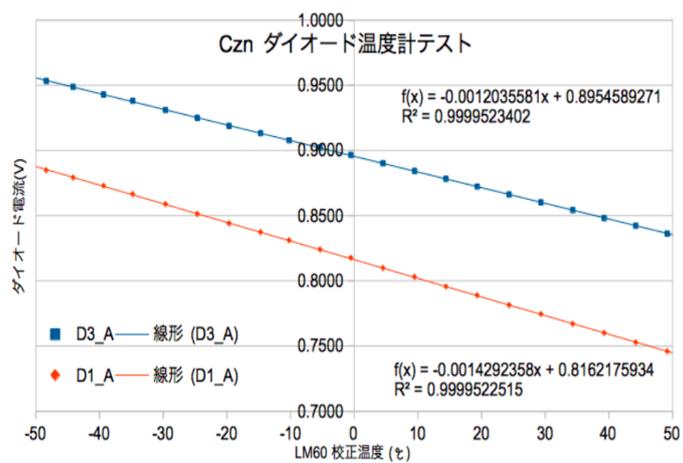


図 27: CZn 型 TEG No.4 結果

4つの TEG チップの温度係数は以下ようになった。

TEG No.	Pad No.	温度係数 (mV/°C)
No.1	D1 A	-1.46
No.1	D3 A	-1.22
No.2	D1 A	-1.42
No.2	D3 A	-1.19
No.3	D1 A	-1.44
No.3	D3 A	-1.20
No.4	D1 A	-1.43
No.4	D3 A	-1.12

3.2.3 考察

D1 A 端子はダイオード 10 個が並列接続されており、D3 A はダイオード単体である。各チップの D1 A 端子、つまりダイオード並列型は温度勾配がおおよそ 1.44(mV/°C)、D3 A 端子。すなわちダイオード単体型は温度勾配がおおよそ 1.18(mV/°C) であり、ダイオードの並列接続数により温度勾配が変わることがわかった。ダイオード単体とダイオード 10 個を並列接続した時の理想的なダイオード (製造プロセスや寄生抵抗を考慮しない) の温度特性を LTSPICE IV を用いて解析を行った。

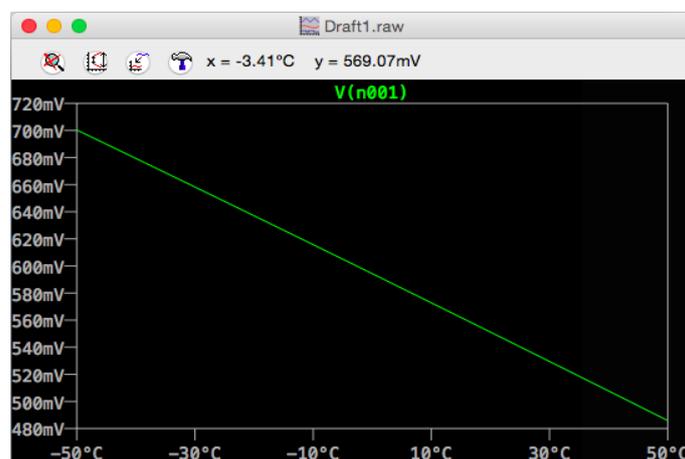


図 28: ダイオード単体の温度特性 横軸は温度、縦軸は電圧

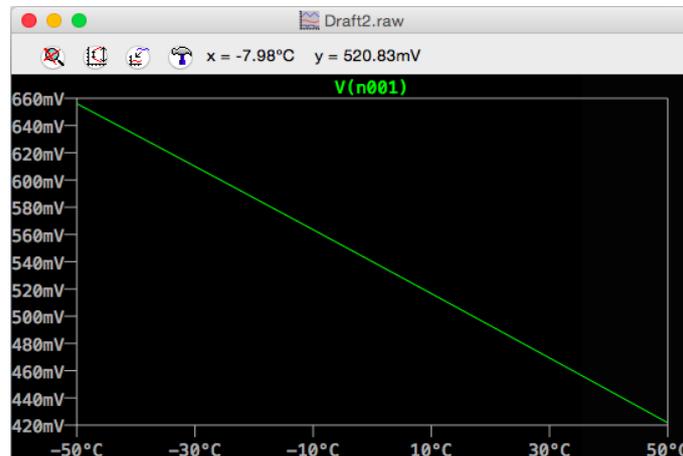


図 29: ダイオード 10 個並列接続時の温度特性 横軸は温度、縦軸は電圧

並列接続した場合、ダイオード一個あたりに流れる電流は電源電流をダイオード数で割った値になる。その為、ダイオード電圧は低くなり、温度勾配も低くなるのがシュミレーションからわかる。実験結果からもダイオードの電圧や温度勾配も並列型が下がっていることがわかる。同じ電源電流であるなら、複数のダイオードに接続すれば、温度センサーの面積を増やすことができ、センサーの広い領域を図ることができる。今回は KEK 滞在期間の都合から CZn 型 4 チップの測定のみが終わったことから FZn 型との比較は行えなかった。

3.3 FZn 型, CZn 型の比較@KEK

前節の KEK でのダイオード温度計の直線性の確認実験の報告を報告したところ、昨年 1 月に KEK の新井教授によりダイオード温度計専用の TEG チップを設計いただき、昨年 7 月に CZ 法と FZ 法の両ウエハによって製造された TEG チップが完成した。TEMPTEG という名前が付いている。本節では FZn 型チップ 2 個と CZn 型チップ 2 個を KEK にて評価実験した。

3.3.1 TEMPTEG の全体回路図

本節では、温度測定用にプロセスされた TEMPTEG の全体図と搭載されている回路を紹介する。チップ温度測定のため、単純ダイオード型と差動電圧

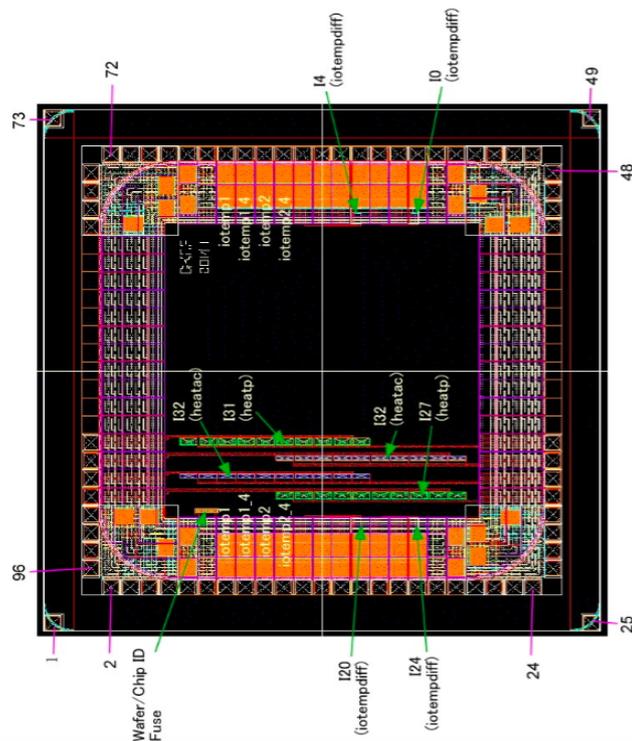


図 30: TEMPTEG チップレイアウト、パッド番号、および各 TEG の位置

型の二種類の温度センサーが内蔵されている。単純ダイオード型はダイオードの直並列数を変えたものも内蔵されている。先述した様に単純ダイオード型は、シンプルで測定も簡単だが、プロセス依存の項があり、キャリブレーションを行わないと正確な温度測定ができない可能性がある。一方で、差動電圧型は、プロセス依存項がキャンセルできるので、キャリブレーション無しでも使用できる可能性がある。

3.3.2 単純ダイオード型

単純ダイオード型は、ダイオードを直列や並列に接続し、ダイオード全体の両端電圧が温度と比例する値を持つ。ただし電流値とプロセスに依存した $I_s(T)$ があるので、正しい温度を得るためには構成が必要になるが、セ

ンサーチップ上で出力端子が占める領域は一つで済む。TEMPTEG には様々なダイオード回路のが搭載されており以下にその回路図を示す。

iotemp1; ダイオード単体温度センサー ダイオード一つにより構成される最もシンプルな回路である。

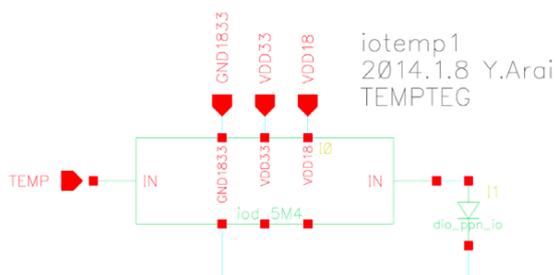


図 31: iotemp1 の回路図ドライブ電流範囲 10~100 μ A

iotemp1-4; ダイオード 4 個並列型温度センサー ダイオード 4 つを並列接続した回路である。

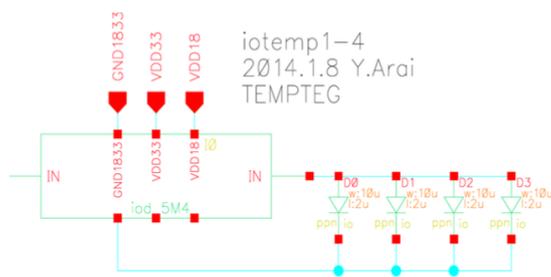


図 32: iotemp1-4 の回路図ドライブ電流範囲 40~400 μ A

iotemp2; ダイオード 4 個直列型温度センサー ダイオード 4 個を直列接続した回路である。

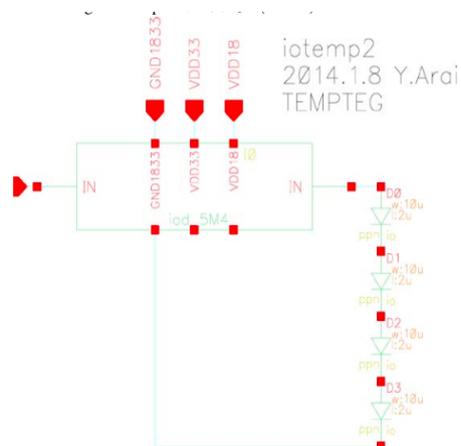


図 33: iotemp2 の回路図ドライブ電流範囲 10~100 μ A

iotemp2-4; ダイオード 4 個直列 4 並列型温度センサー ダイオード 16 個を 4x4 のマトリックス状に接続した回路である。

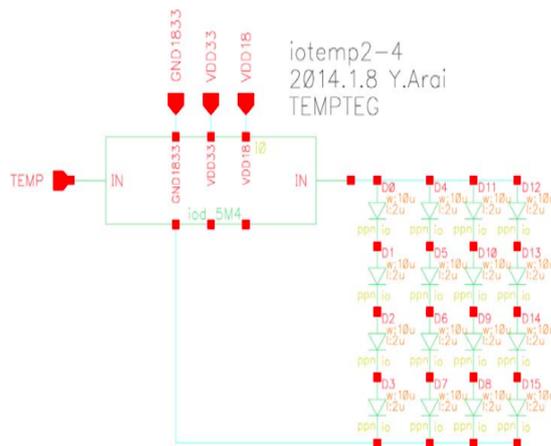


図 34: iotemp2-4 の回路図ドライブ電流範囲 40~400 μ A

- 単純ダイオード型の評価実験を CZn 型、FZn 型を 2 個ずつ測定
- -50℃から 50℃まで、10℃刻みで測定し、両端電圧と温度の関係を測定
- 電源電流は 10 段階でそれぞれ変化させた

TEG Circuit No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
iotemp1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
iotemp1-4	40	80	120	160	200	240	280	320	360	400
iotemp2	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0
iotemp2-4	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

3.3.5 測定結果

iotemp1 型 グラフの数の関係からすべての結果は載せていない。すべてのグラフは付録として掲載する。単純ダイオード 1 個型（電流電流;10 μ A～100 μ A）

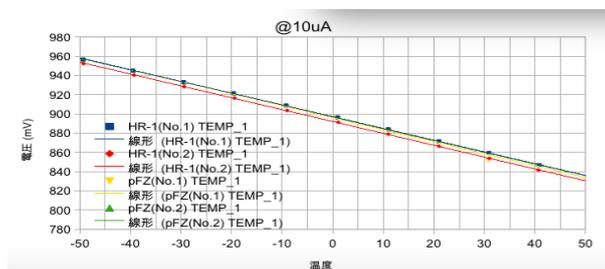


図 38: iotemp1,10 μ A 測定結果

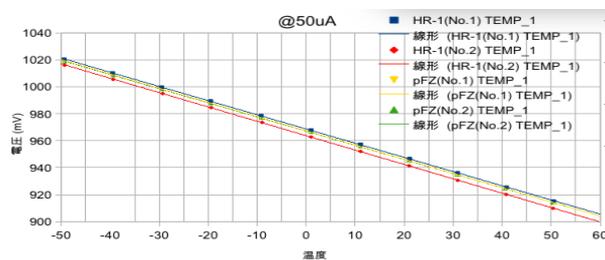


図 39: iotemp1,50 μ A 測定結果

iotemp1-4 型 グラフの数の関係からすべての結果は載せていない。すべてのグラフは付録として掲載する。単純ダイオード4個並列接続型（電流電流;40 μ A \sim 400 μ A）

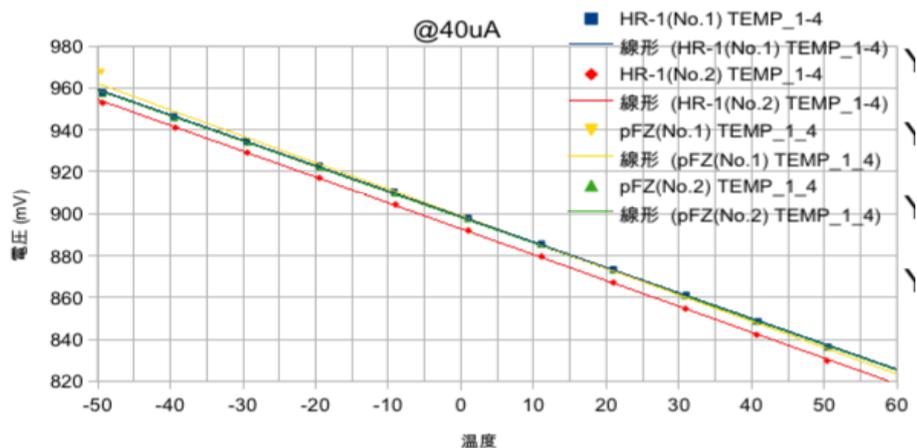


図 40: iotemp1-4,40 μ A 測定結果

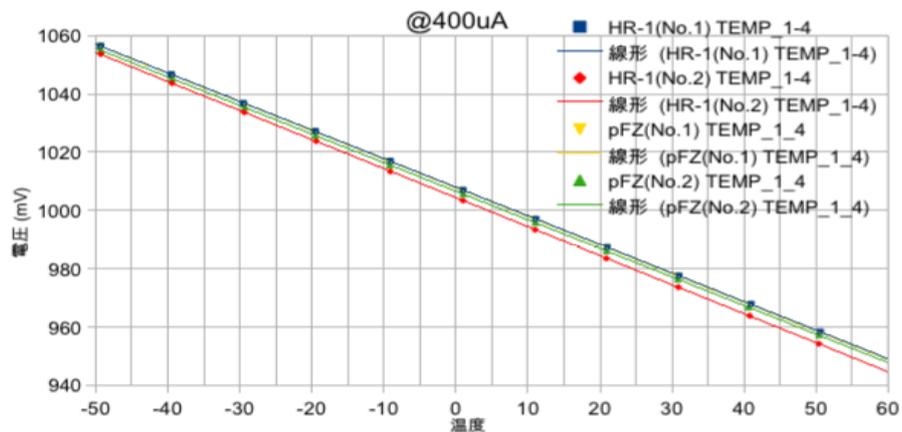


図 41: iotemp1-4,400 μ A 測定結果

iotemp2 型 グラフの数の関係からすべての結果は載せていない。すべてのグラフは付録として掲載する。単純ダイオード4個直列接続型（電流電流;2.5 μ A \sim 25 μ A）

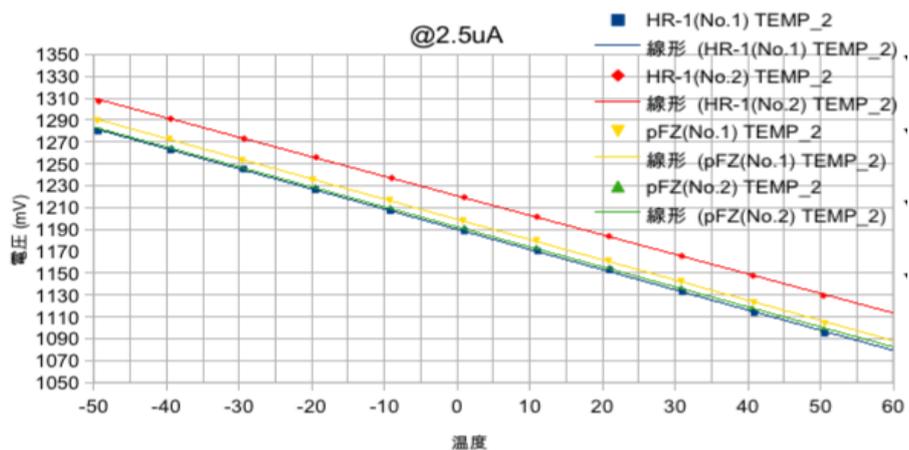


図 42: iotemp2,2.5 μ A 測定結果

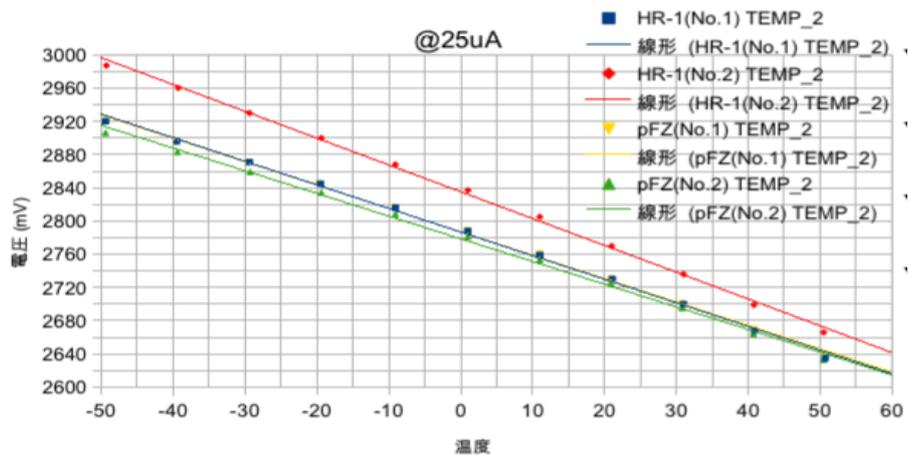


図 43: iotemp2,25 μ A 測定結果

iotemp2-4 型 グラフの数の関係からすべての結果は載せていない。すべてのグラフは付録として掲載する。単純ダイオード4個直列4並列接続型 (電流電流:10 μ A \sim 100 μ A)

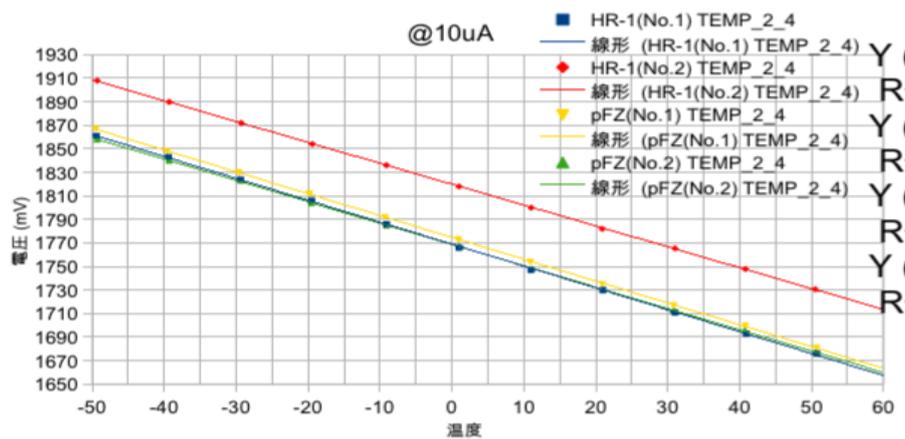


図 44: iotemp2-4,10 μ A 測定結果

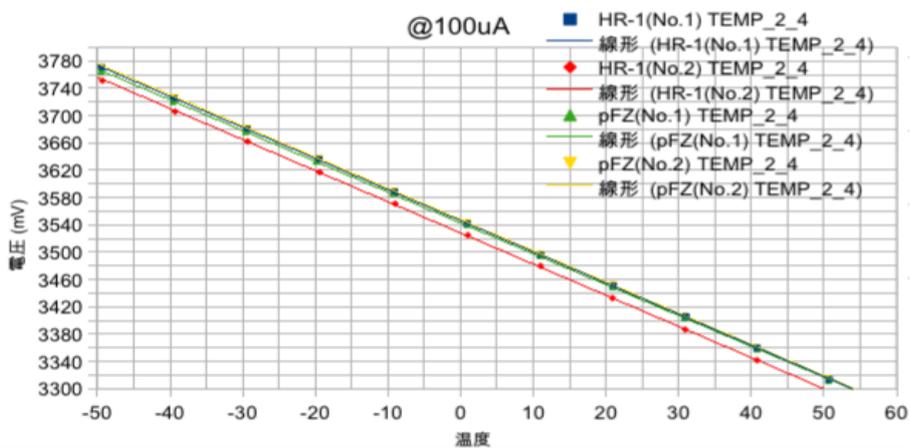


図 45: iotemp2-4,100 μ A 測定結果

3.3.6 考察

得られた結果を直線近似した Fitting 結果より、それぞれの回路の電源電流の値と温度勾配の関係をグラフ化し、さらに fitting を行った。ダイオードに一定の電流を流したときの両端電圧と電源電流と温度の関係は先述の通り、2式に従うので、Fitting 結果もこの関数に従うはずである。以下、Fitting 結果を載せる。

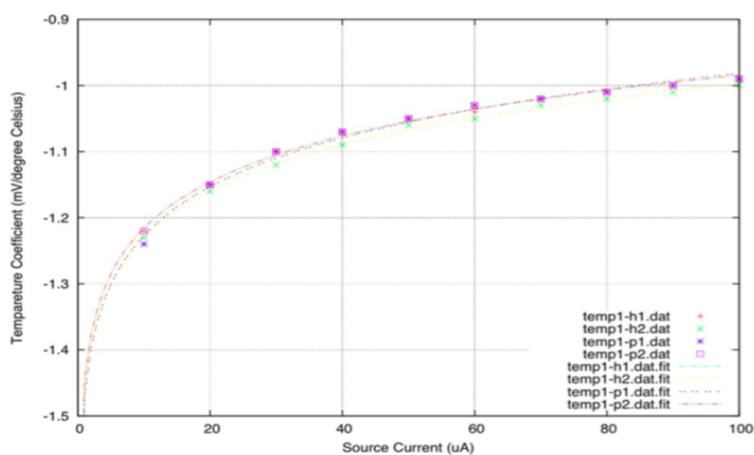


図 46: iotemp1,Fitting 結果

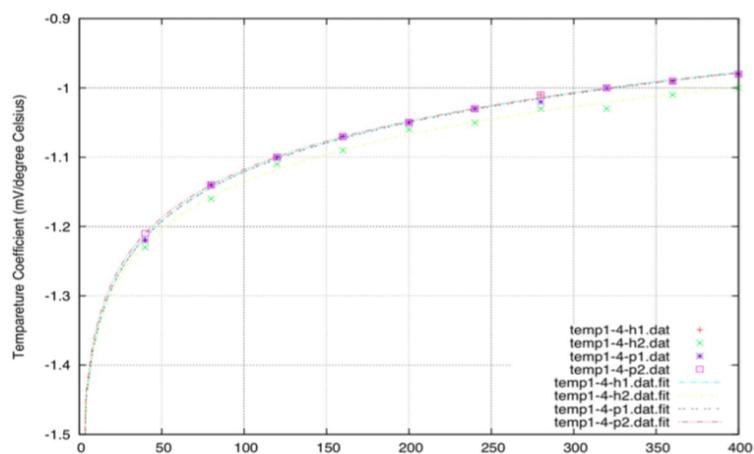


図 47: iotemp1-4,Fitting 結果

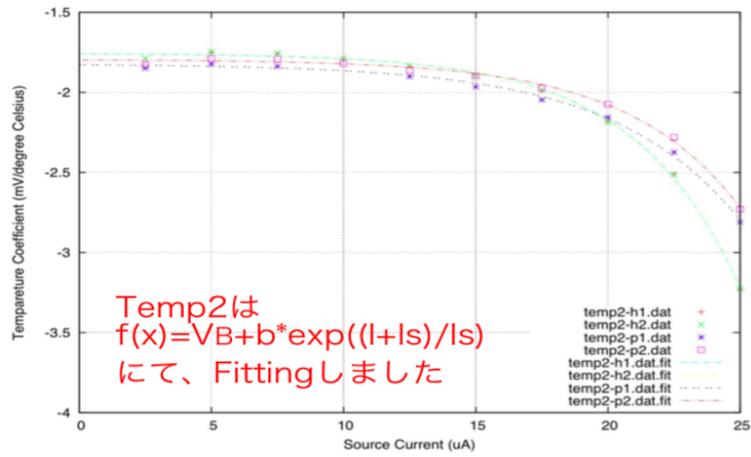


図 48: iotemp2,Fitting 結果

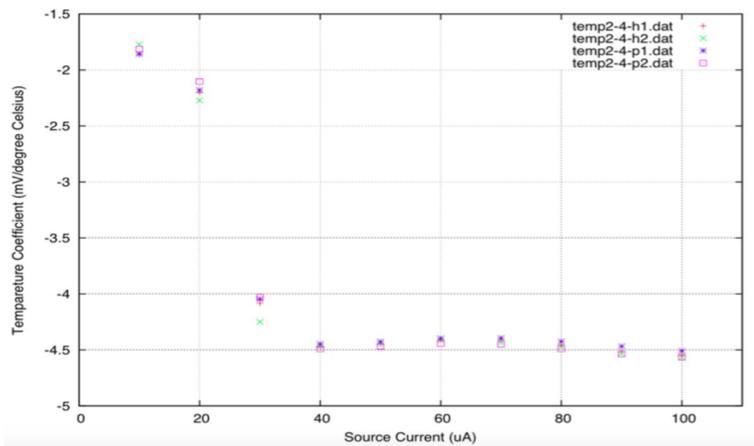


図 49: iotemp2-4,Fitting 結果

Fitting 結果から、ダイオード単体、あるいは4個を並列接続した場合は、2式に従うことが分かった。直列に4個接続した場合や4個超列接続を4並列接続した場合はこの結果に従わなかった。この原因については現在も継続して考察中である。

3.3.7 差動ダイオード型評価実験

続いて、昨年12月に差動ダイオード型温度計の評価実験を行った。図35のIIN端子に $2.5\mu\text{A}\sim 20\mu\text{A}$ の電流を $2.5\mu\text{A}$ 毎にソースメーターから供給して差動ダイオード温度系を駆動させた回路と、内部で 3.3V を $150\text{k}\Omega$ の抵抗で電流を制限した回路について、3チップの評価実験を行った。

差動ダイオード型ダイオード温度計は、図50のTEMP10,TEMP1端子の

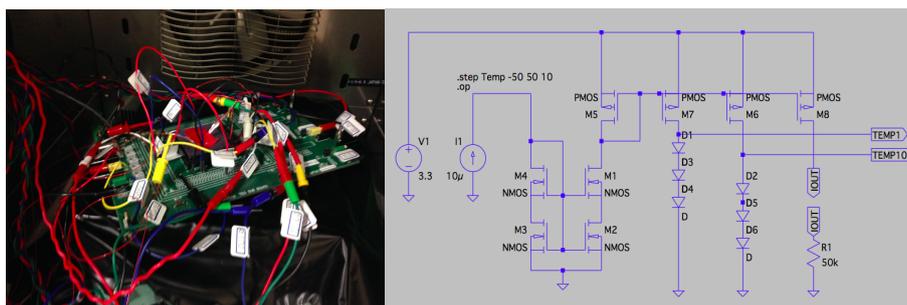


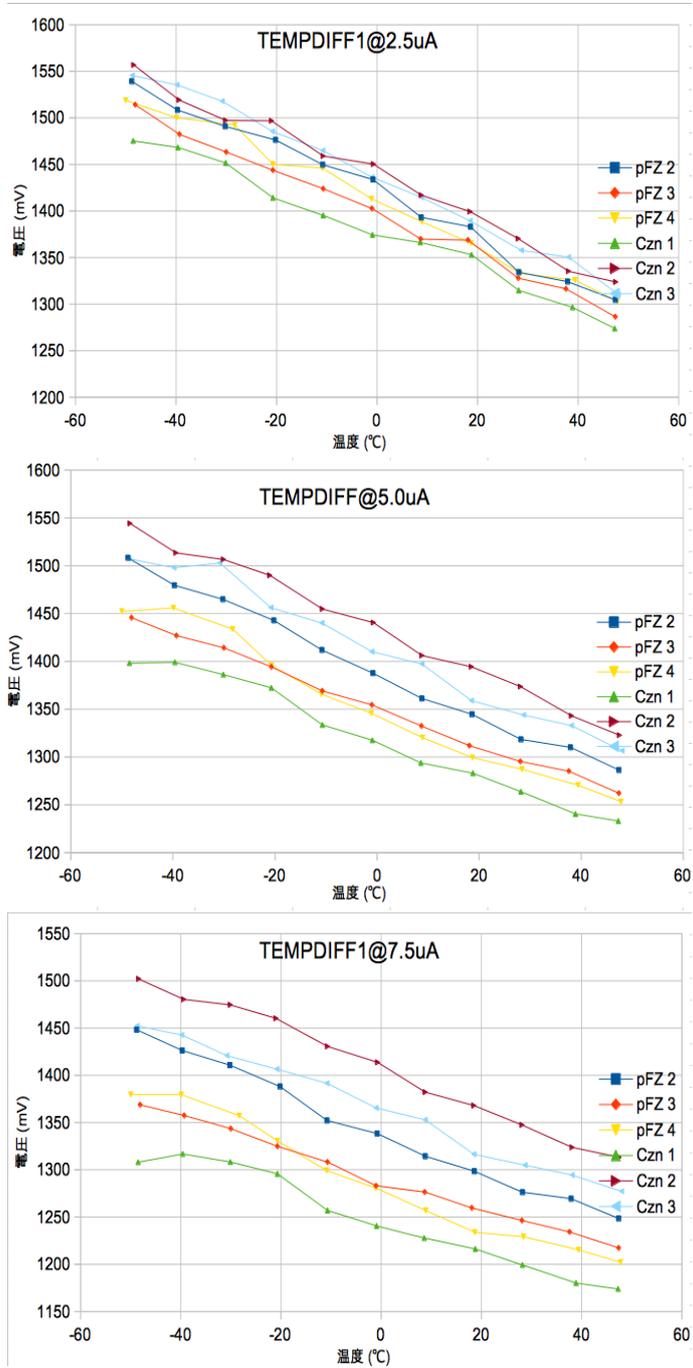
図 50: 測定風景

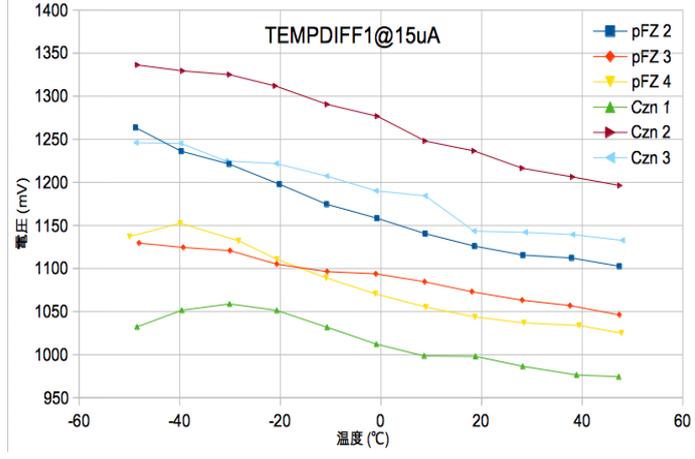
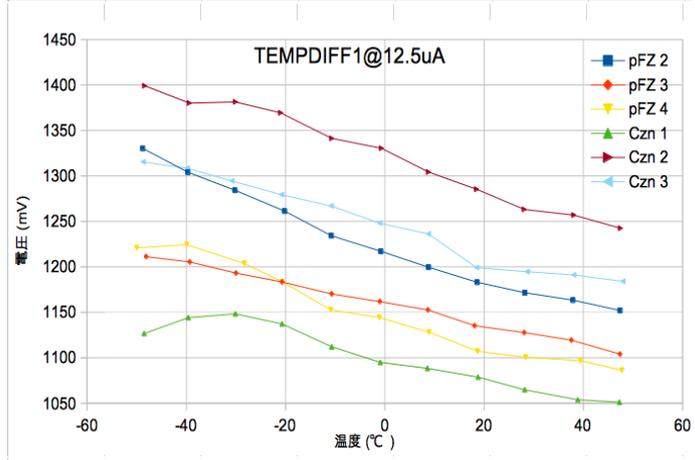
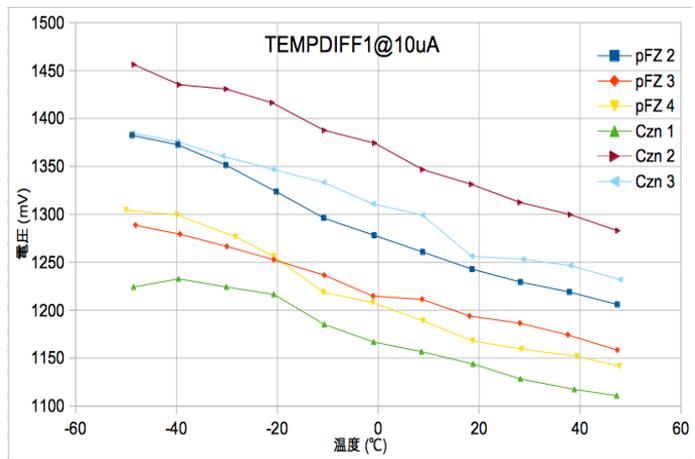
電位差を測定し用いる。先述の通り、同じダイオードに異なる電流を流すことでプロセス依存項を打ち消すことができる。

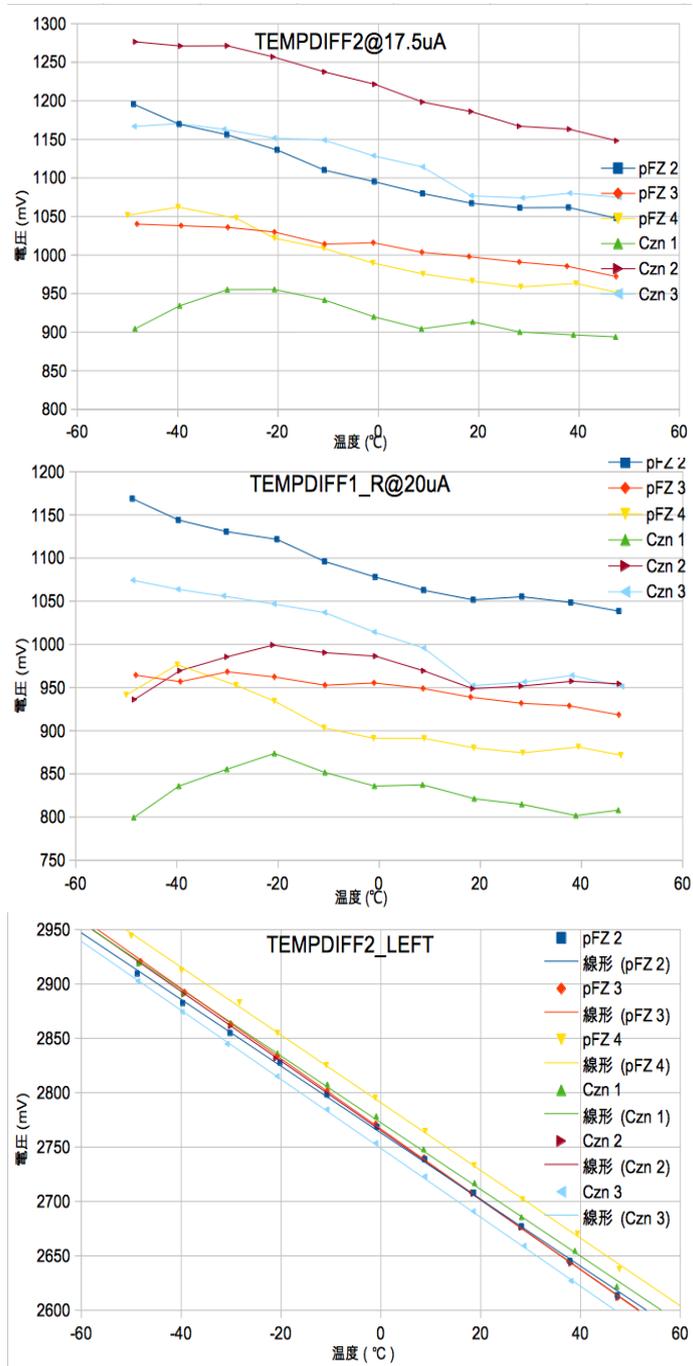
ダイオードに流れる電流の値は、図50のIOUT端子からTEMP10端子と同じ電流値をカレントミラー回路を用いてモニターした。流す電流は数 μA なので、SourceMeterの内部抵抗の影響から、 $50\text{k}\Omega$ の抵抗を接続し、電圧に変換したものを計算により求めた。(図50の回路図右下の抵抗の両端電圧)なお、TEMP10端子とTEMP1端子に流れる電流値はカレントミラー回路によって10:1に設定されている。測定方法は前節と同様にKEKにて窒素充填を行った恒温槽を用いて、 $-50\text{C}\sim 50\text{C}$ の温度範囲を 10C 毎に測定した。今回はチップの温度測定用に白金抵抗(Pt100)を4線方式で用い、校正テーブルで温度に変換して測定した。測定結果を次ページ以降に掲載する。

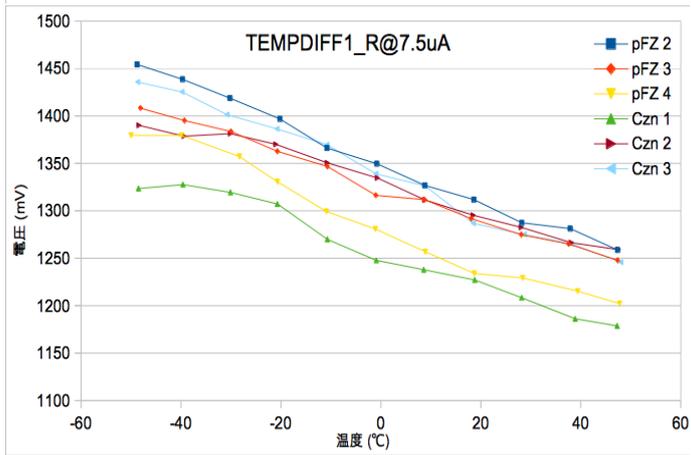
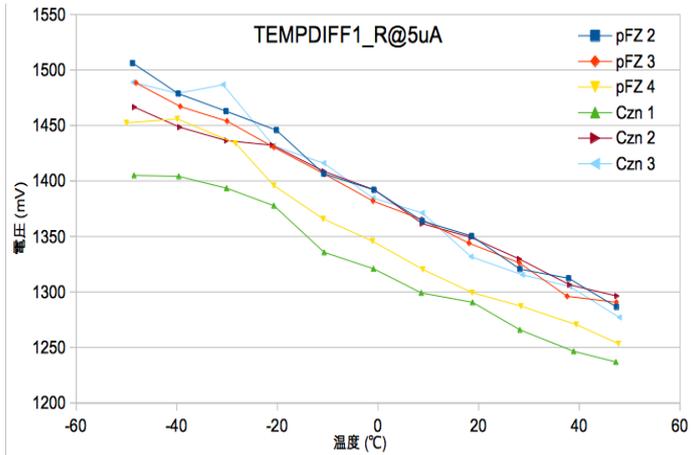
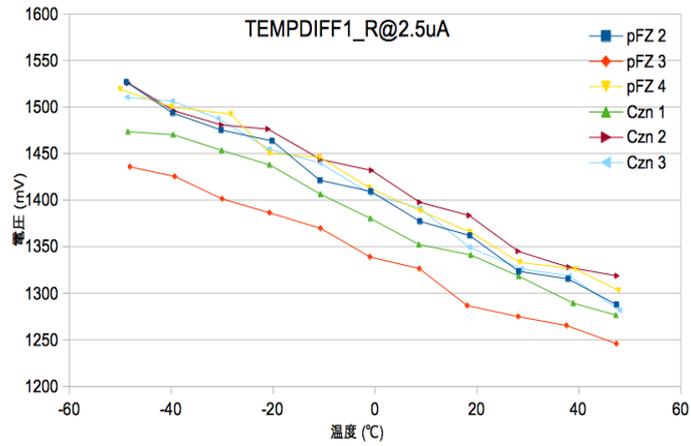
3.3.8 測定結果

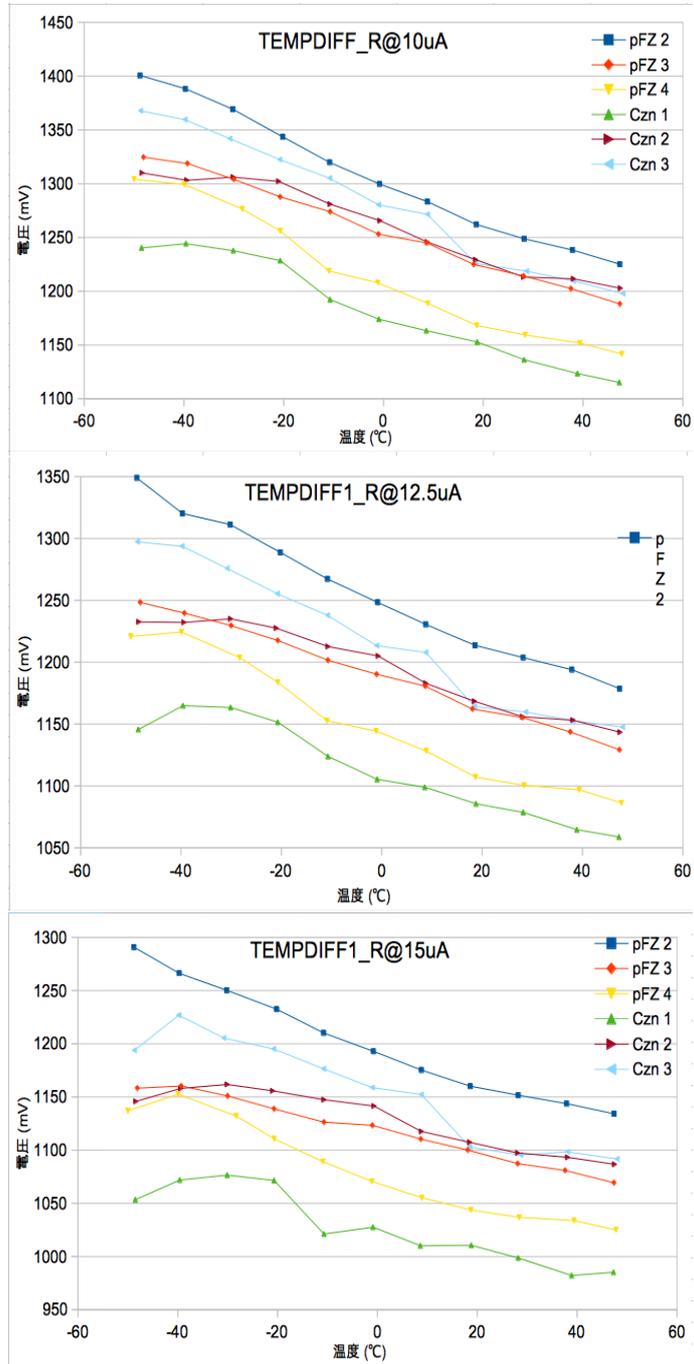
結果のグラフの電流値はSourceMeterの値であり、IOUTの値ではない。

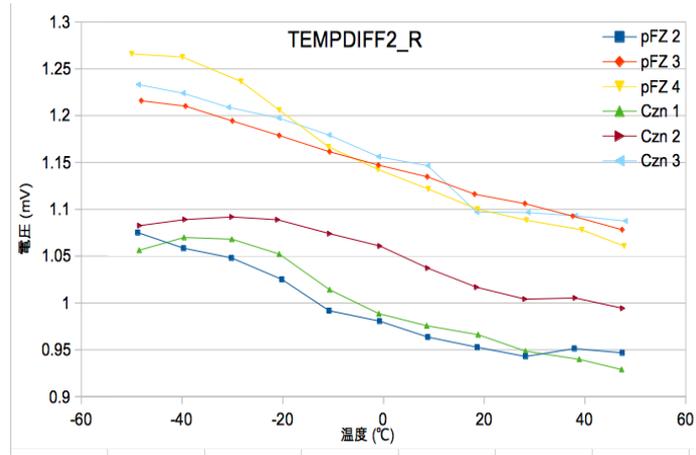
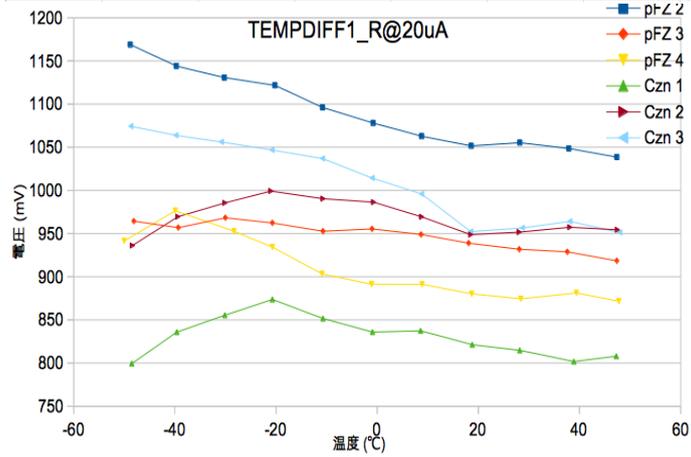
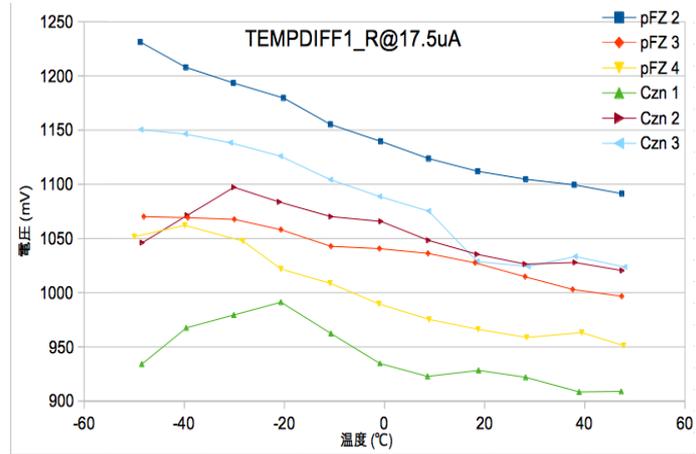












3.3.9 差動ダイオード型温度計の考察

今回の差動ダイオード型温度計の評価結果は予測された結果と異なった。ダイオード数個を直列接続したものに $10\mu\text{A}$ を流し両端電圧を測ると、先の単純ダイオード型の実験から 1V 程度である。 $1\mu\text{A}$ と $10\mu\text{A}$ を同じダイオードに流したときのそれぞれのダイオードの電圧と、その差 $TEMP10 - TEMP1$ を LTSPICE で理想的なダイオードで行った結果は以下のとおりである。



このように、電圧の差は数百ミリ V 程度であり、正の温度係数をとるはずである。比較的良好な直線性が得られた TEMPDIFF2L の結果は電圧がこれに対し非常に高くなっており、温度勾配も逆になっている。また、他の結果については直線性も悪い。唯一、TEMPDIFF2 の左側の回路のみが温度と電圧の比例関係が得られた。この原因は 2015 年 1 月時点では調査中である。配線を間違った可能性がない訳でもない。

4 まとめ

現時点では、単純ダイオード型の温度計回路と一つの差動ダイオード回路が良い直線性を示した。お借りしている TEMPTEG チップは FZ 型、CZ 型を合わせて 10 個ありすべての評価が終わっていない。しかし、ダイオード内蔵の可能性は示せたと考える。この先も時間の許す限り、評価実験を続けたいと考える。

謝辞

本研究にあたり高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の計測器開発室の新井康夫教授、三好敏喜助教授をはじめ、機構の研究員や技官の方々にはお忙しい中、非常にお世話になりました。時に、みなさんと食事に誘って頂いたり、作業でつまずいていないか気にかけてくださり、地道な評価実験でしたが根気よく進めることができました。皆様の研究活動がさらなる発展を遂げられることを願うばかりであると共に、厚く感謝の気持ちを申し上げます。ありがとうございました。

また、本研究室の高嶋隆一先生には、SOI グループでの研究活動を勧めていただき、自由に研究活動させて頂きました。ありがとうございました。それと研究室で長い時間を共にした現総合研究大学院博士課程の西村君をはじめとする友人の皆さん、附属環境教育センターと一緒に農作業した皆様のおかげで、楽しく研究活動を続けることができました。ありがとうございました。

最後に、皆様がそれぞれの分野で活躍されることを願います。ありがとうございました。

参考文献

- [1] KEK 測定器開発室 HP,<http://rd.kek.jp/project/soi/JSTproject.html>
- [2] KEK 測定器開発室 HP,<http://rd.kek.jp/project/soi/JST/niboshi.jpg>
- [3] Yasuo Arai,TEMPTEG USER'S Manual Appendix A
- [4] Yasuo Arai,Toshinobu Miyoshi et al,Bandgap Voltage Reference and Temperature Sensor in Novel SOI Technology.
- [5] センサー励起や回路バイアスに使える定電流源,<http://image.itmedia.co.jp/J/im/edn/articles/1204/05/>