

P6 卒業発表会(2024/2/27)

コーデットマスク法を用いた ガンマ線検出器の開発

上林暉
久連松良温

- **原理と解説**

- **実験**

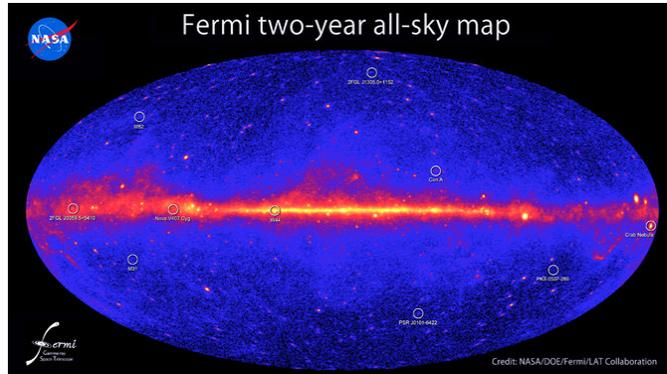
- 実験1 - 1MPPC素子での実験による回路設計
- 実験2 - 重心座標のイメージング実験
- 実験3 - 位置検出器の動作テスト

- **今後の課題**

- 位置検出器に関する考察
- マスクパターンについて

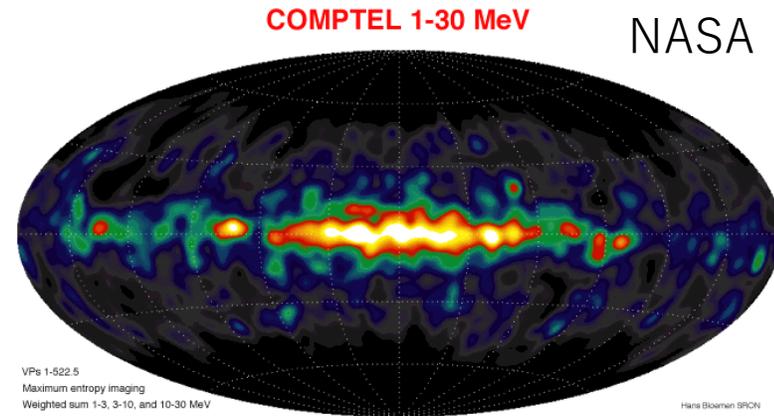
- **まとめ**

実験目的



GeV領域

<https://www.universetoday.com/88868/fermi-gamma-ray-observatory-harvests-cosmic-mysteries/>



MeV領域

<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/images/epo/gallery/skymaps/>

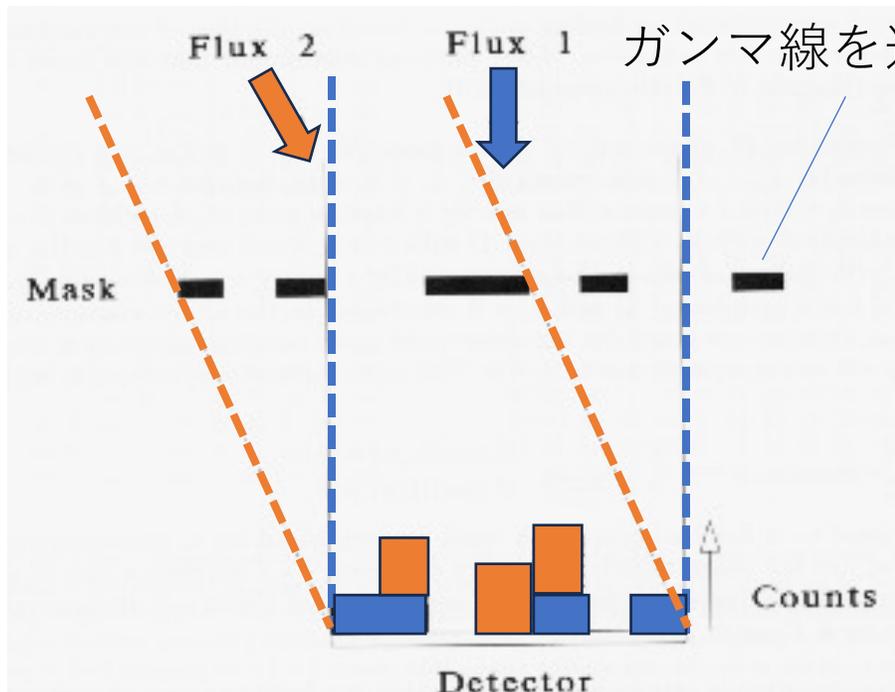
MeV γ 線領域

- 元素合成
- 電子陽電子対消滅線
- 粒子加速
- ...etc.

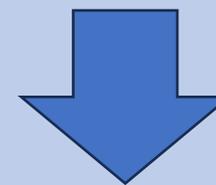
多様な天体現象を探る
新たなプローブ

MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)とGSO (Gd_2SiO_5) シンチレータを用いて、低エネルギー γ 線の到来方向を測定するコンパクトなサイズの検出器を作成する

原理と解説



検出器に投影されるマスクパターンの像



デコード

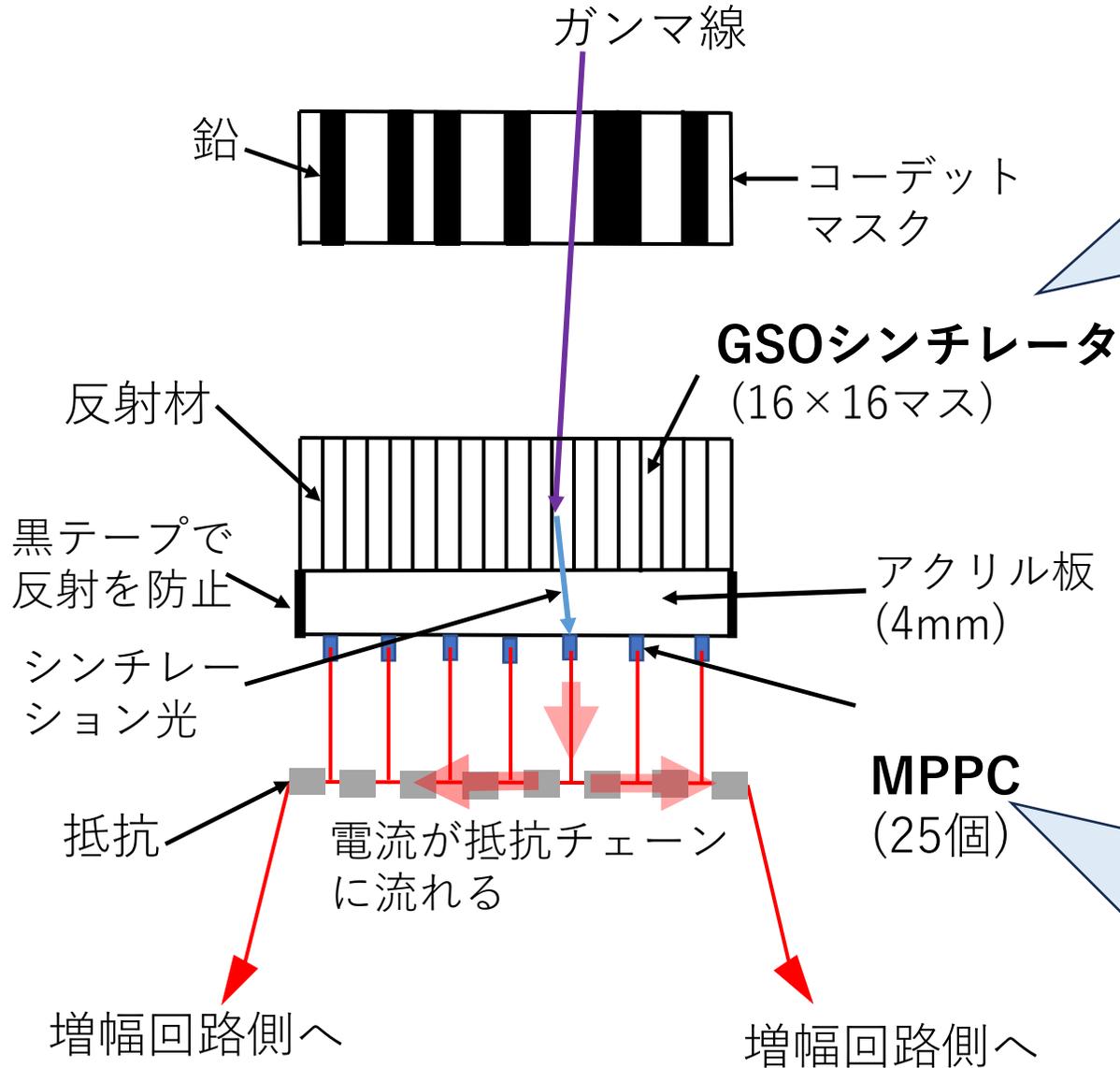
ガンマ線の到来方向がわかる

位置分解能を持った検出器

NASA Coded Aperture Imaging / Concept (nasa.gov)

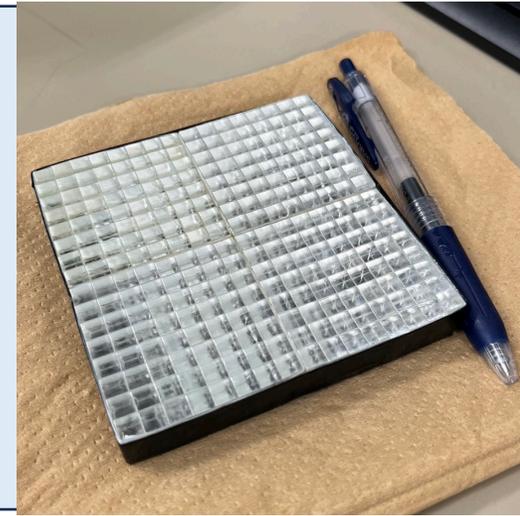
〔今回、放射線に対する安定性と実用性の観点から鉛を用いたマスクを作成したい〕

装置概略図



放射線を吸収して蛍光する蛍光体材料

- 発光波長の点でMPPCと相性がいい
- 潮解性がなく扱いやすい
- 発光量の点でGAGGに劣る



光子カウンティングできる半導体素子

- 低い動作電圧、持ち運びに適したサイズ
- 温度特性や増倍率の点でPMTに劣る



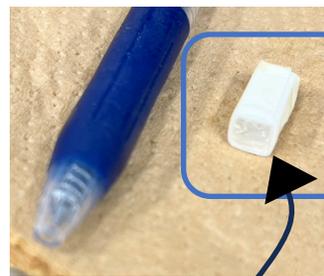
使用したMPPC : ---HAMAMATSU MPPC--- Type No. :S13360-3075CS

実験1

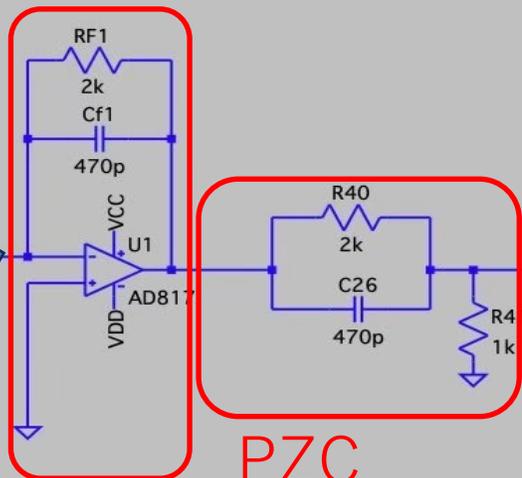
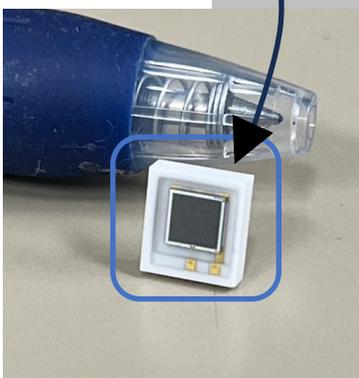
～1MPPC素子での実験による回路設計～

MPPC側

三次整形増幅アンプ側



1ピクセルの
シンチレータ
+
MPPC

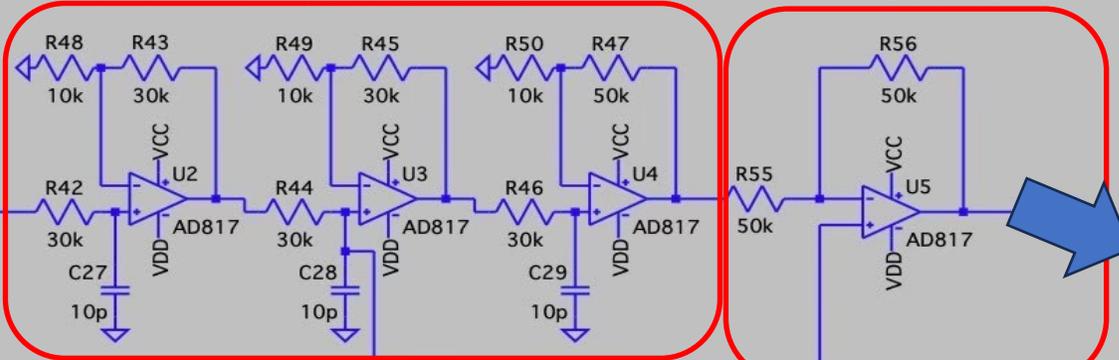


CSA
(Charge Sensitive Amplifier)

PZC
(Pole Zero Cancellation)

三次整形増幅回路

反転増幅回路



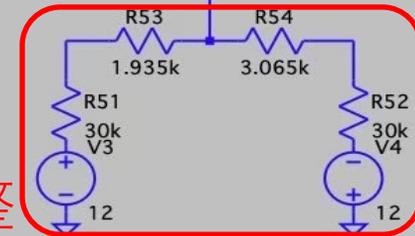
倍率:4

倍率:4

倍率:6

倍率:1

バイアス調整



MCA

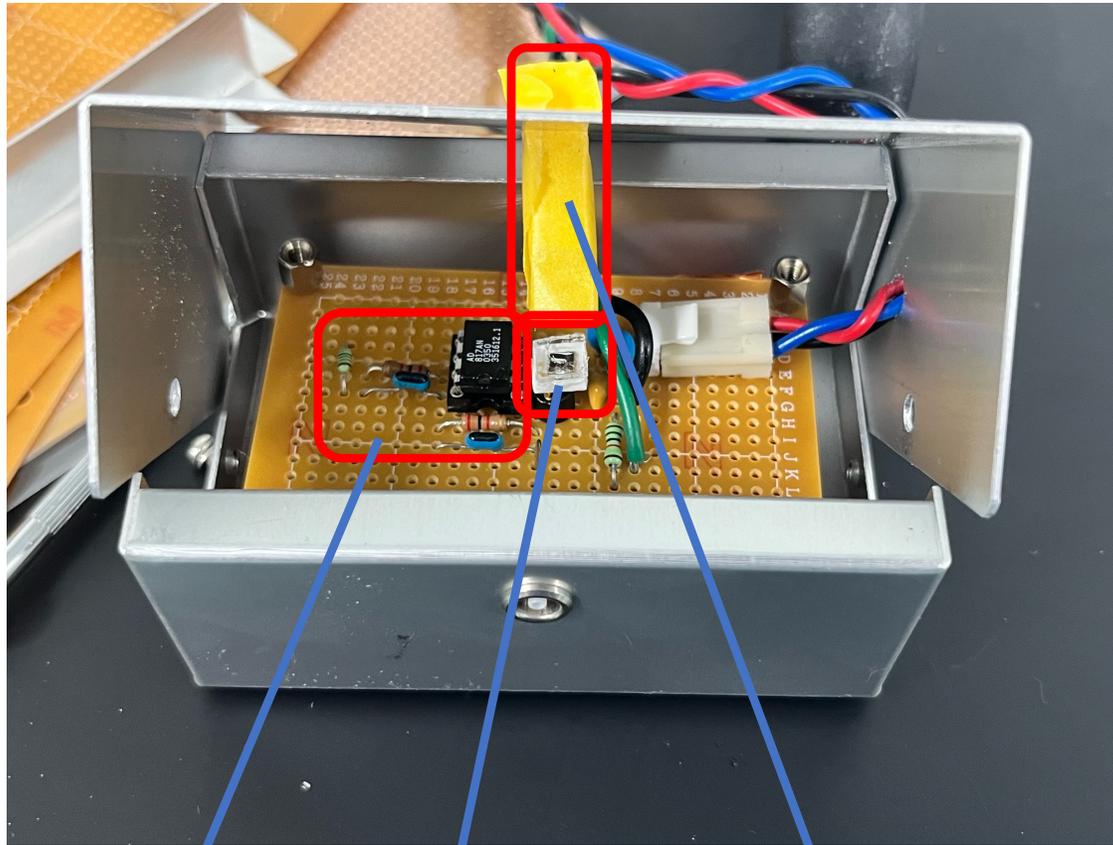
PCへ

- オペアンプ : AD817
- MCA(Multi Channel Analyzer) : MCA600(LAN対応) マルチチャンネルアナライザ MCS機能付き
- ±12V電源 : ケンウッド製 3出力電源 PW18-IT
- HV電源 : Matsusada P4LE 120-0.6

実験1の実際の回路基板

MPPC側

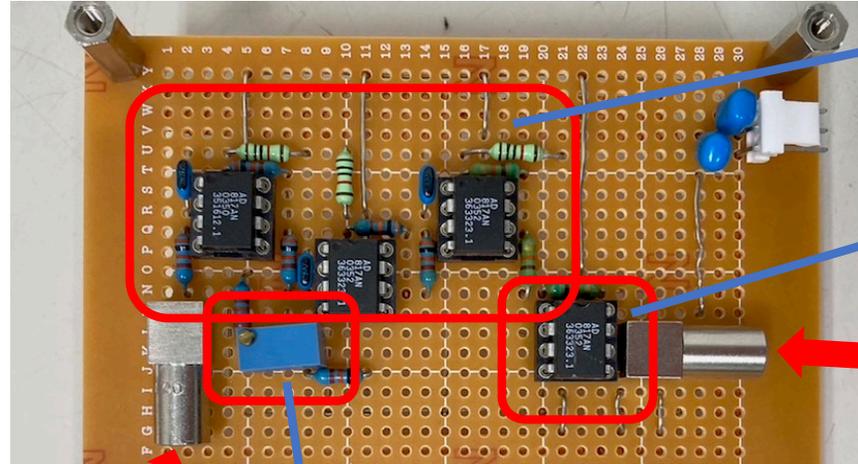
三次整形増幅アンプ側



CSA + PZC

MPPC

1ピクセルの
GSOシンチレータ



三次整形増幅回路

反転増幅回路

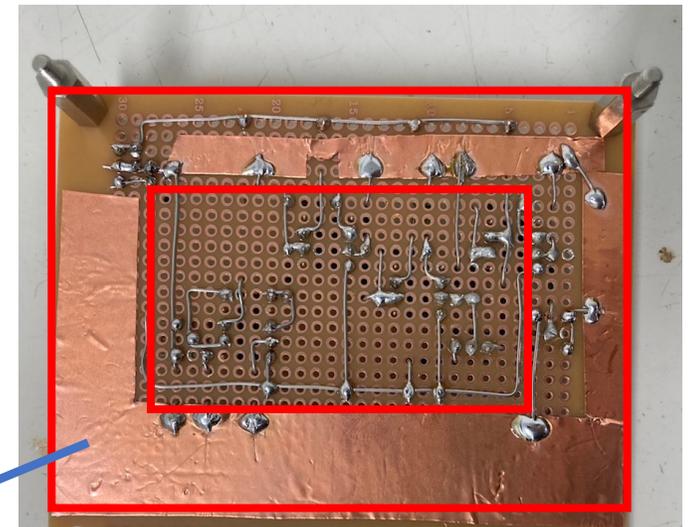
出力

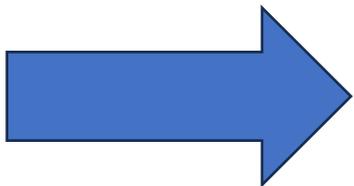
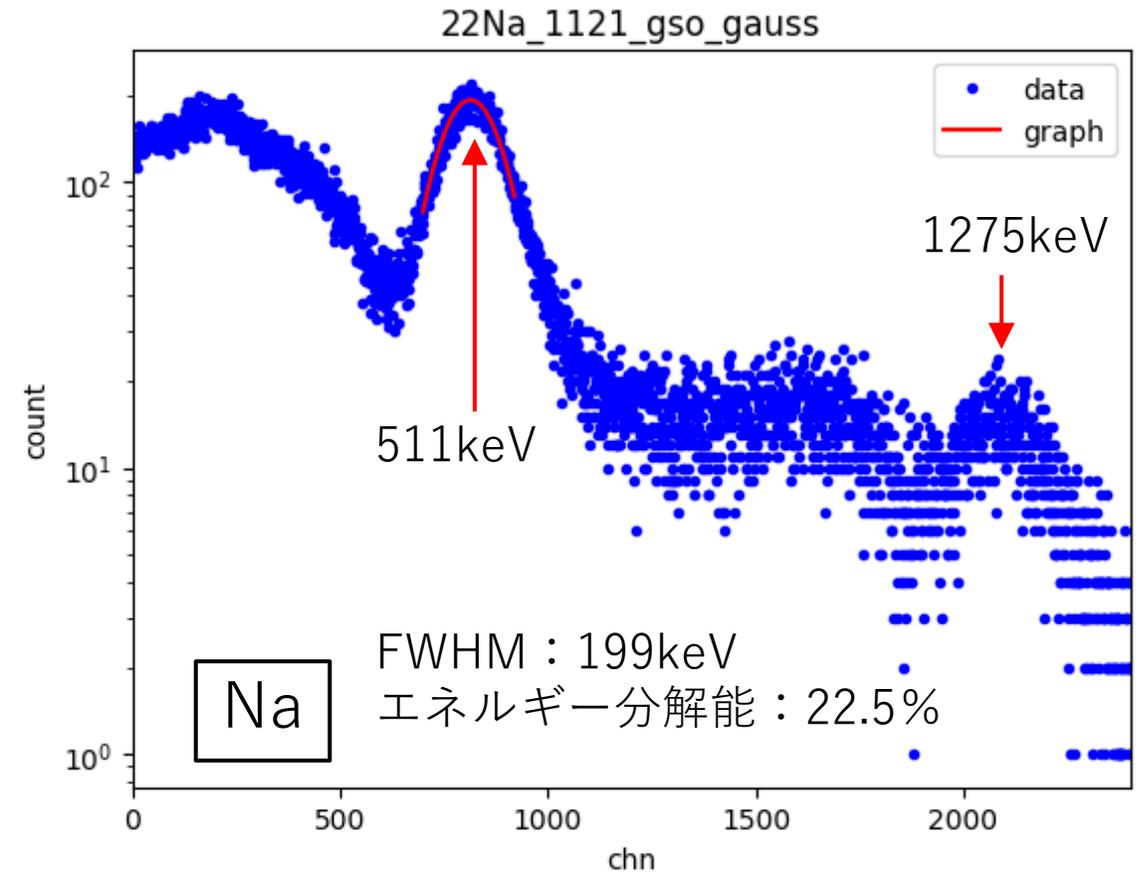
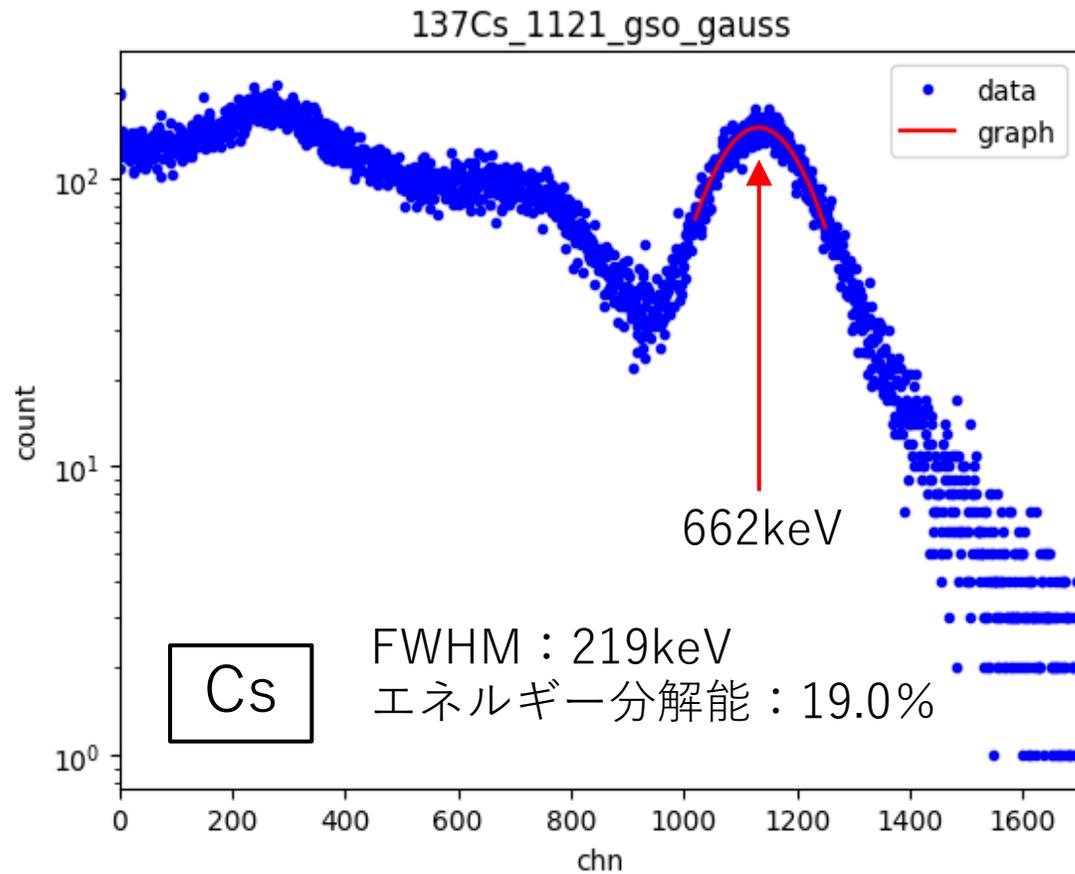
バイアス調整

入力

基盤の裏側

銅膜によるグラウンド



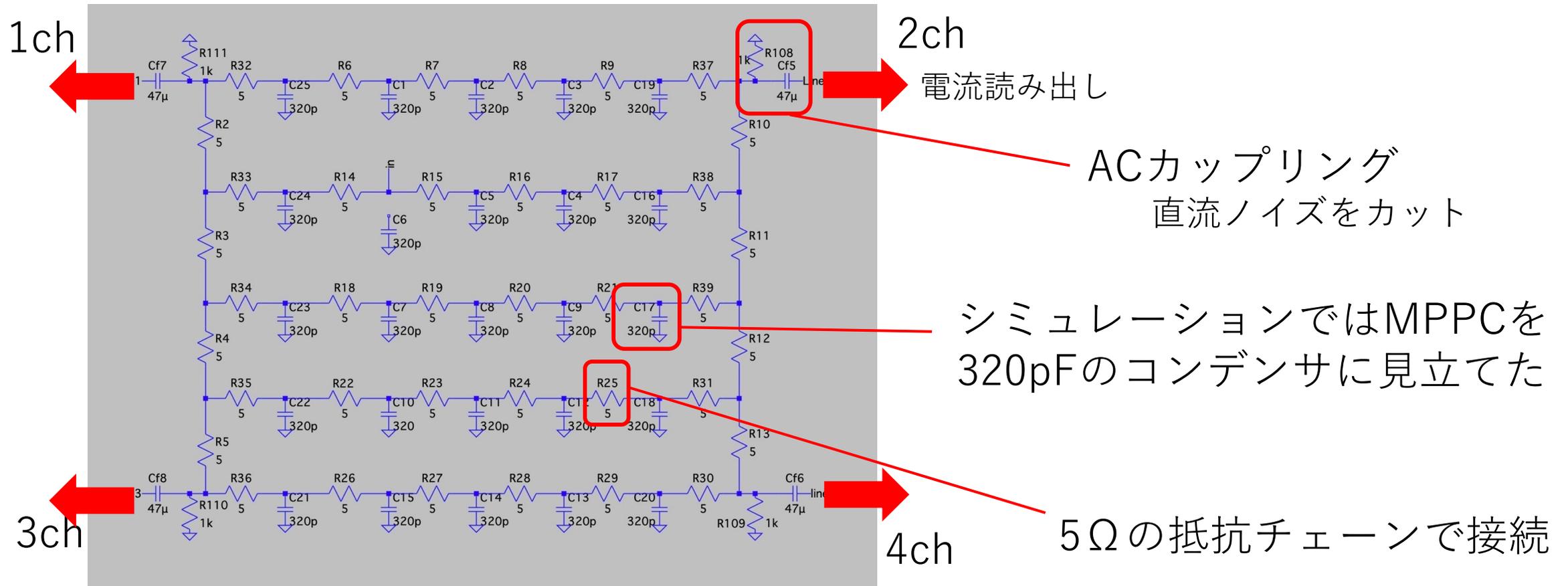


1から設計した回路が妥当であることを確認

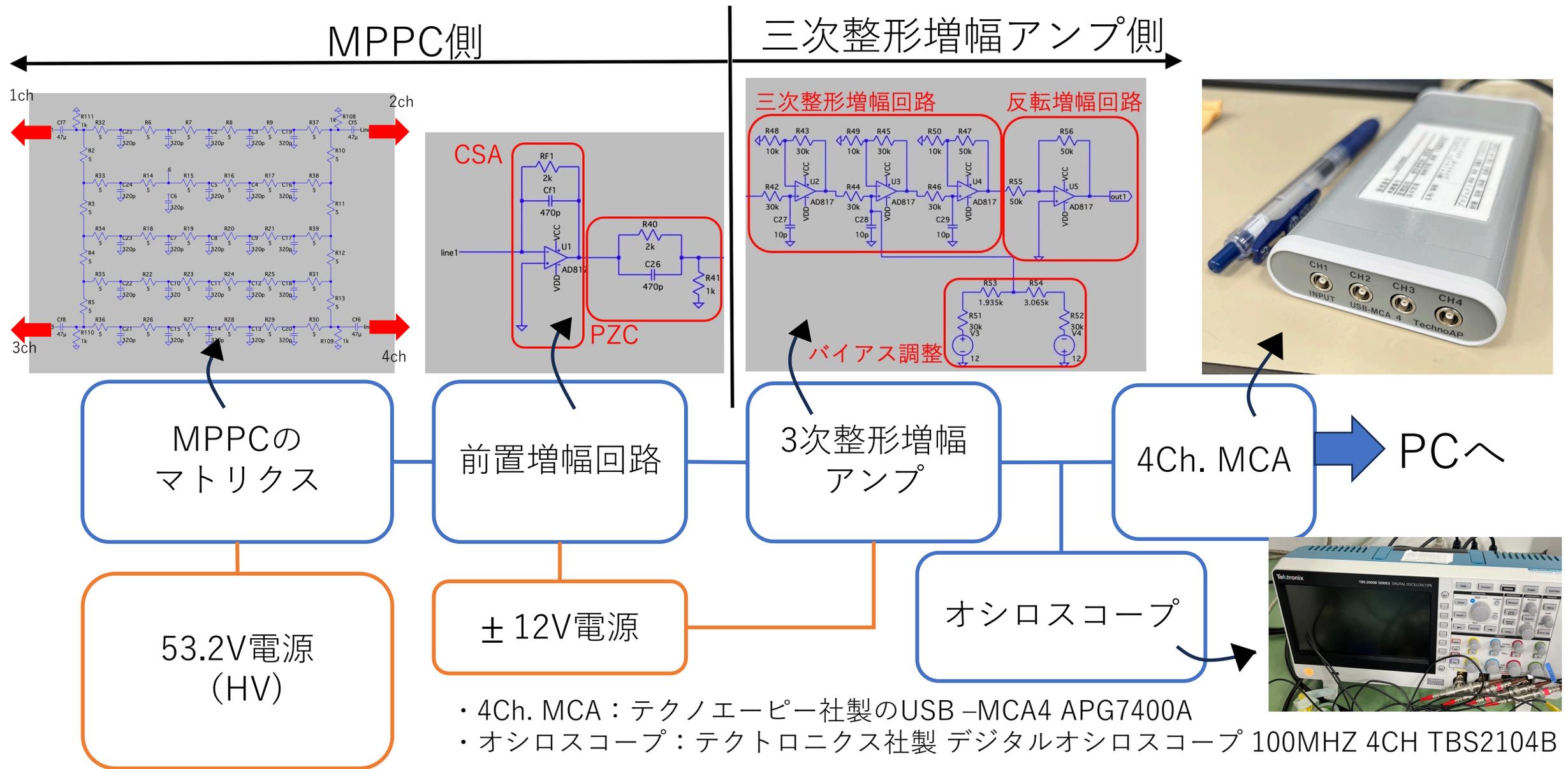
実験2

～重心座標のイメージング実験～

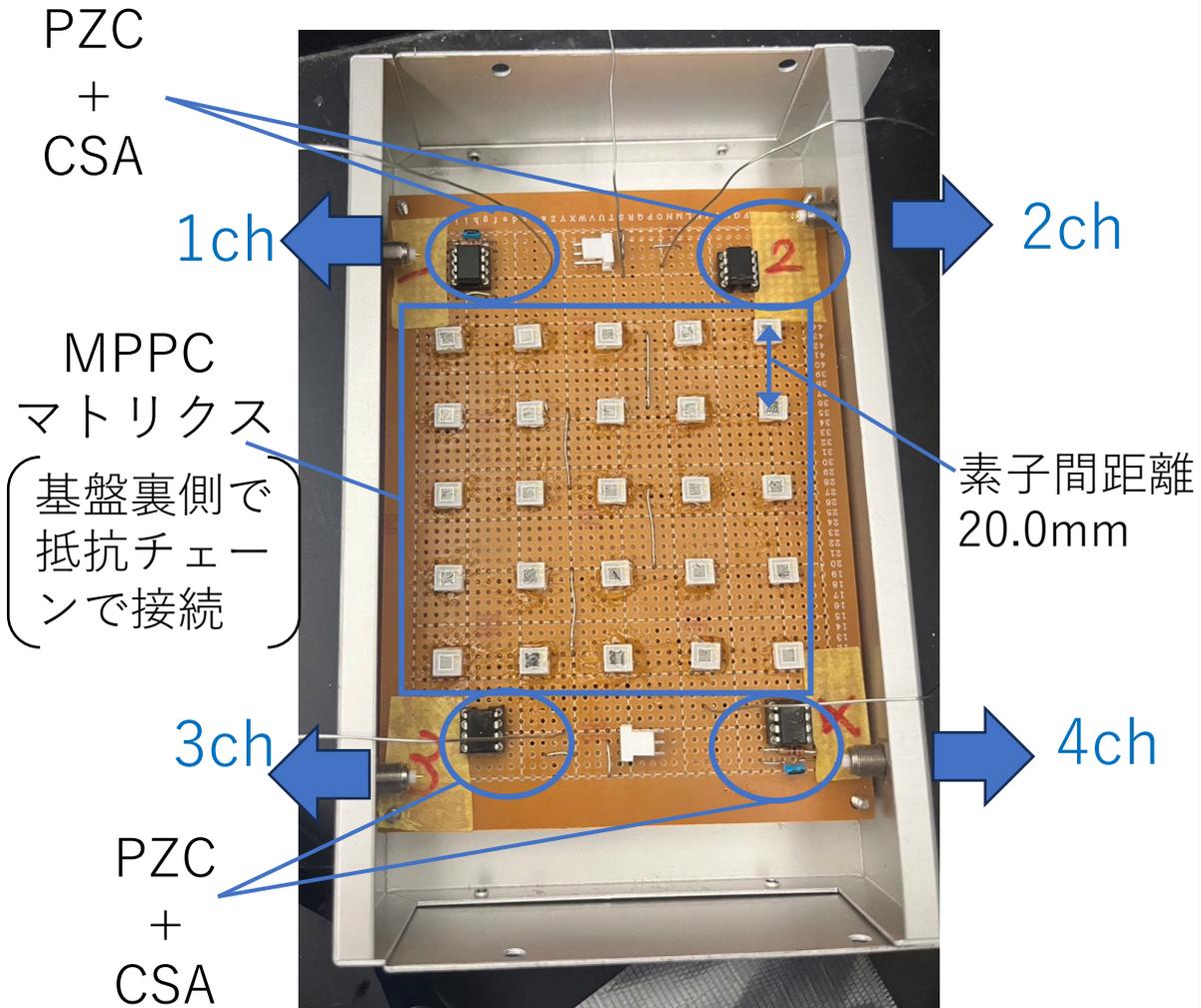
- ・マトリクスの4端から出力される電荷信号の偏りから重心位置を求め、そのイメージを作成する



実験2のセットアップ概要

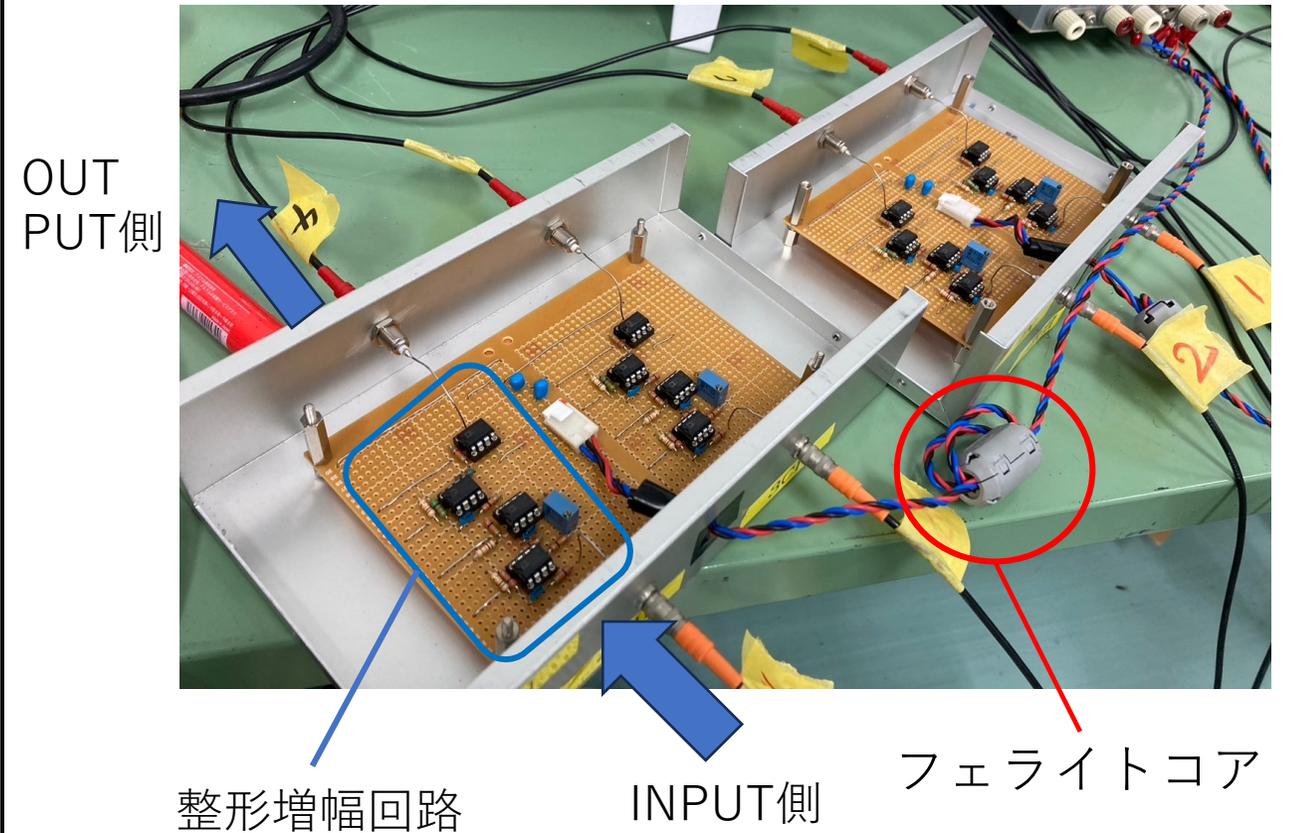


MPPC側



三次整形増幅アンプ側

(実験1で設計した回路を4つ作成)



1個のMPPCのみに1ピクセルのGSOシンチレータを置く

残りの24個のMPPCを黒テープで遮光

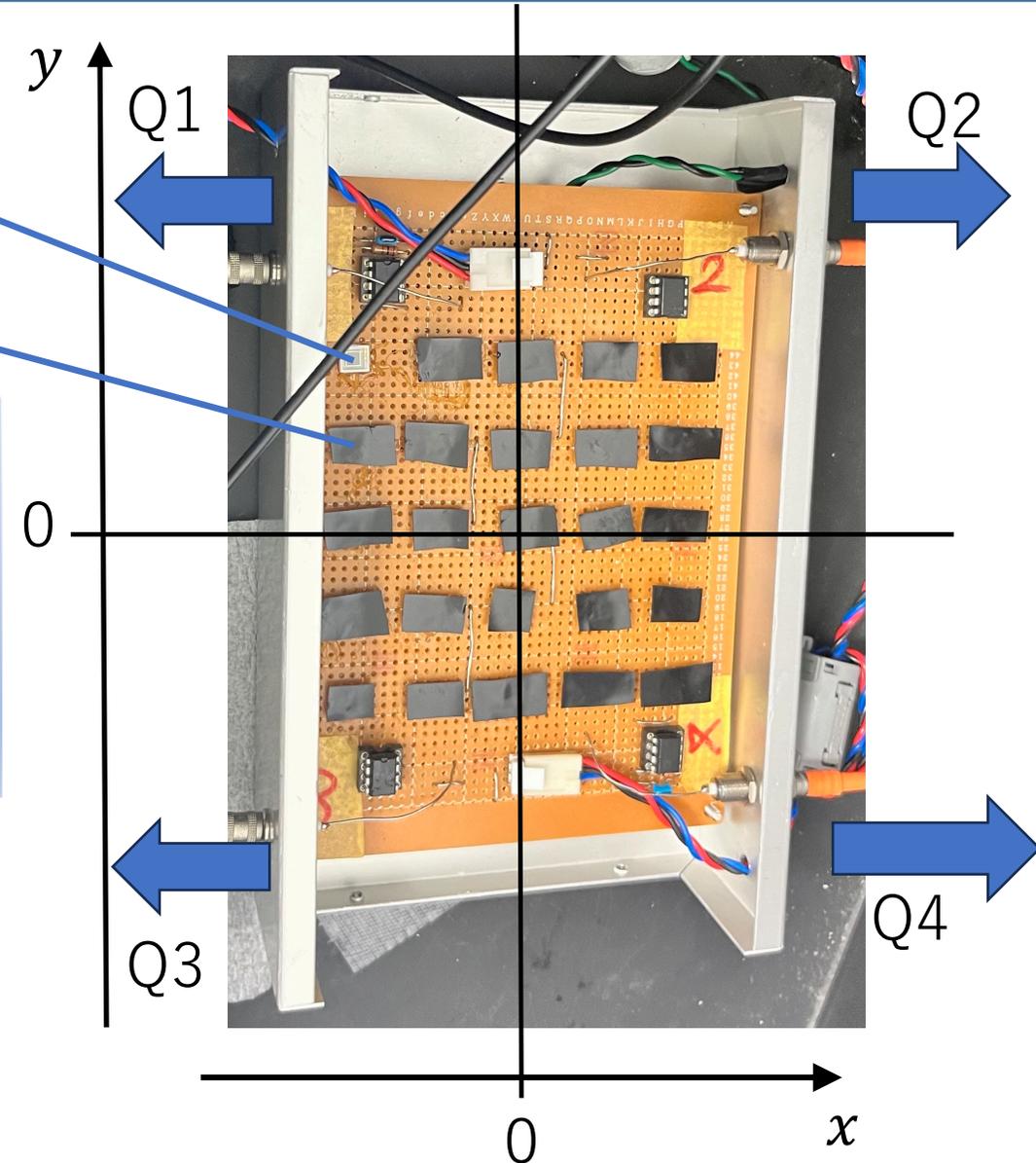
電荷重心座標の定義式

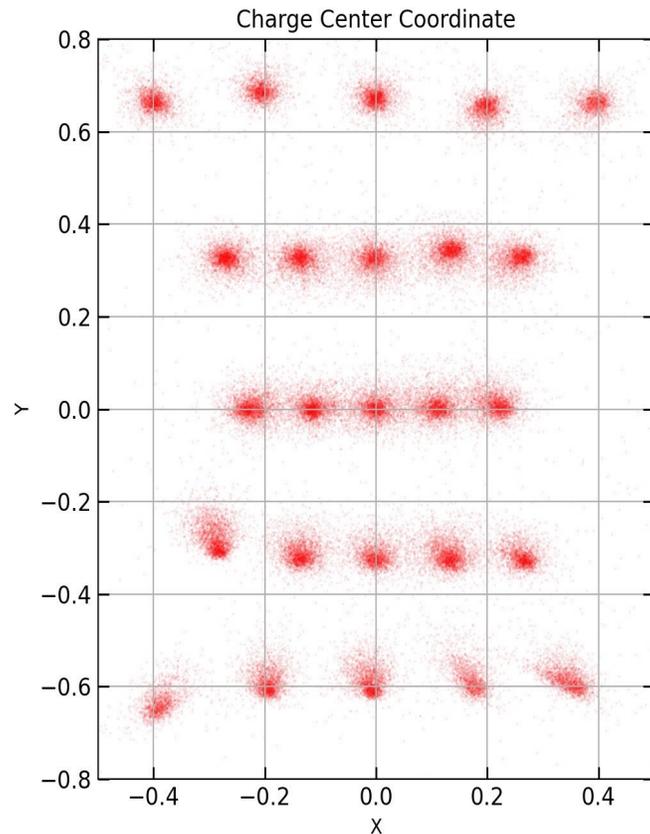
$$x = \frac{-Q_1 + Q_2 - Q_3 + Q_4}{Q_{total}}$$

$$y = \frac{Q_1 + Q_2 - Q_3 - Q_4}{Q_{total}}$$

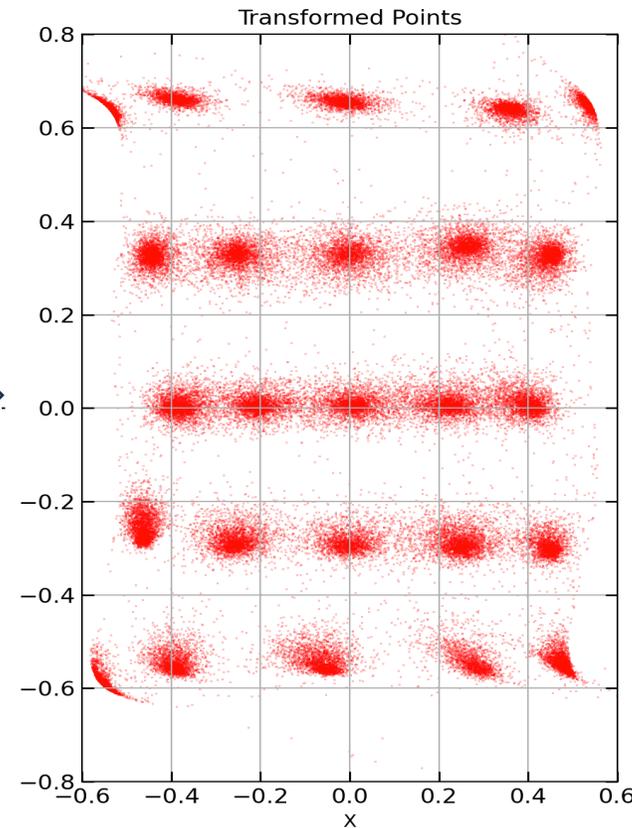
➡ 重心座標をプロットする実験を計25ピクセル分行う

- ・ 線源は137Cs
- ・ 4Ch. MCAのリストモードを用いる





変換写像 f, g を
用いて再構成



変換写像

$$\begin{cases} f(x, y) = \sum_{i=0}^{12} (a_i x^i + b_i y^i) \\ g(x, y) = \sum_{i=0}^{12} (c_i x^i + d_i y^i) \end{cases}$$

座標変換

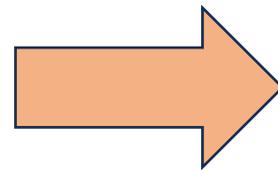
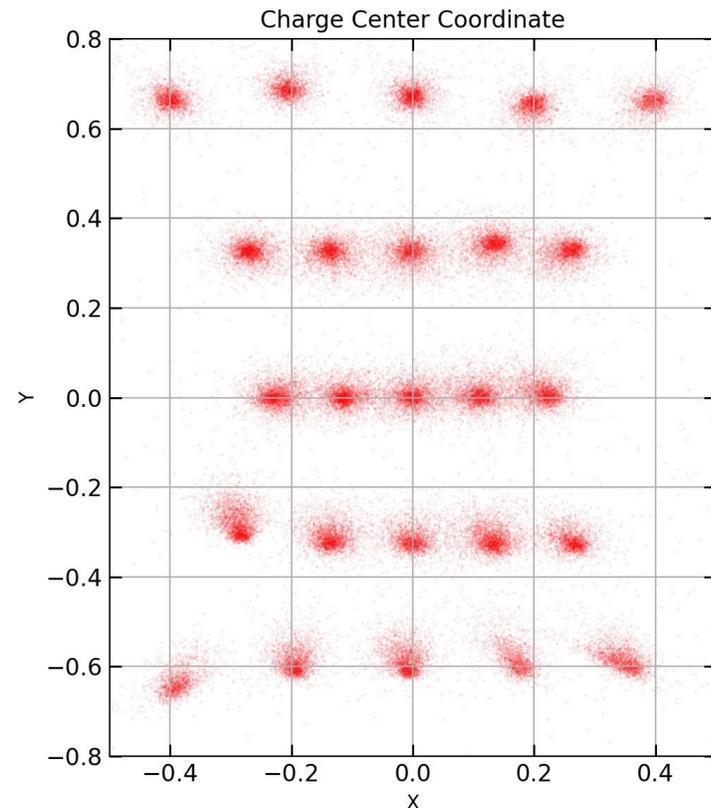
$$\begin{cases} X = f(x, y) \\ Y = g(x, y) \end{cases}$$

イメージから抽出した計25個のピークの座標に座標変換を行い、こちらが定めたターゲットとなる25個の座標にフィッティングすることで、変換写像の係数を決定

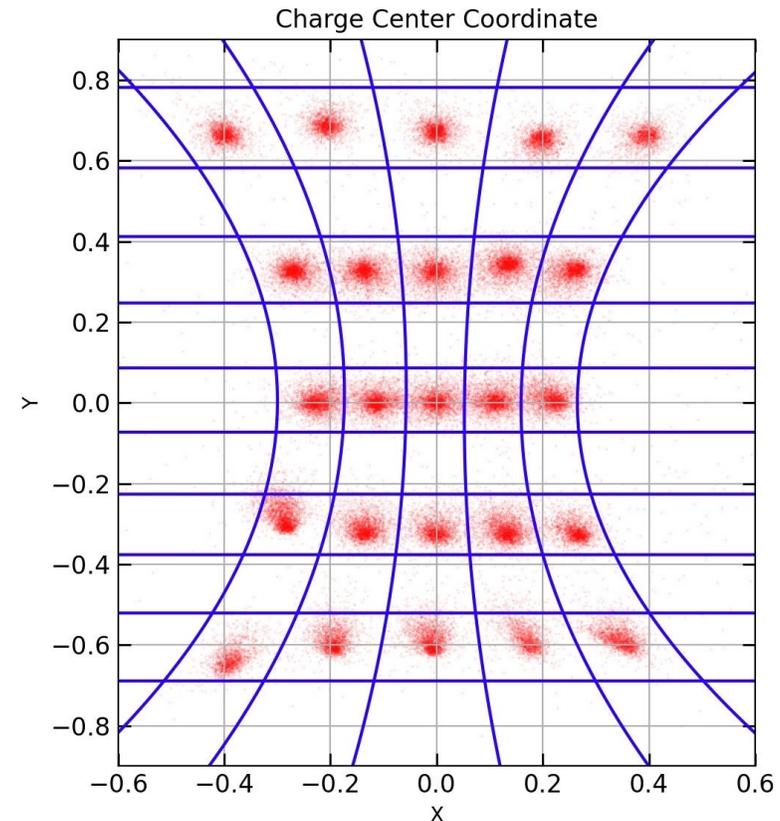
実験3

～位置検出器の動作テスト～

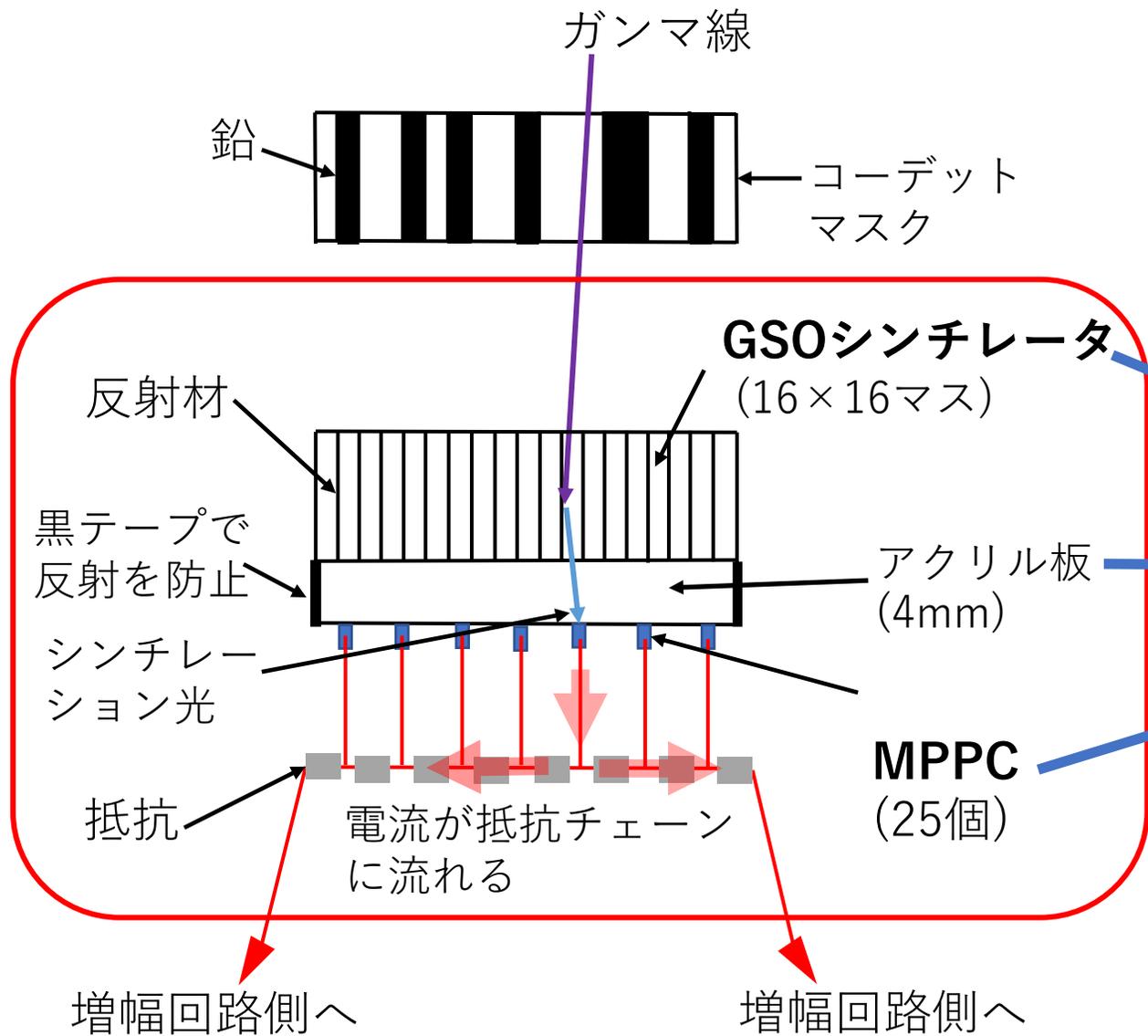
- 下のように検出器のピクセルの領域を分割
- 16×16 マスのシンチレータを用い、アクリル板でシンチレーション光を拡散させた場合に、各ピクセルがどのように機能するか確認する



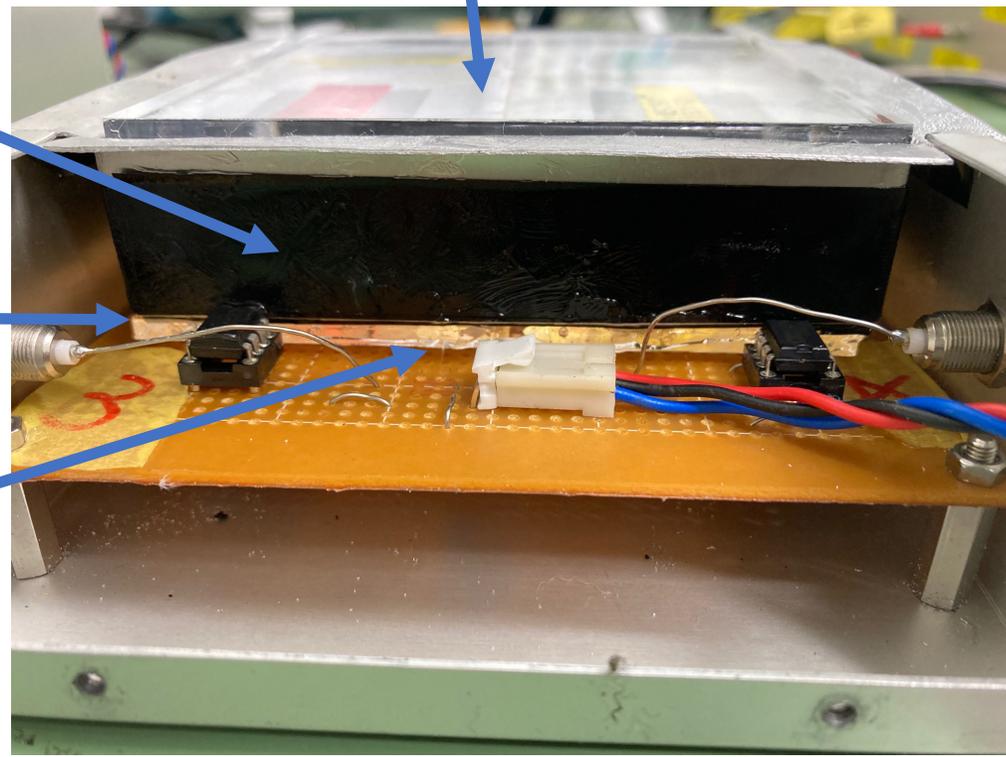
5x9に領域分け



自作検出器セットアップ



〔シンチレータを安定させるために、外箱の蓋とシンチレータの間にアクリル板を配置〕



実験3のセットアップ概要

直径：2mm

縦横：100mm

±12V電源

自作検出装置

HV

鉛で作った外壁

自作整形増幅アンプへ

〔アンプ以降のセットアップは実験2のものと同様〕

HV、±12V電源へ

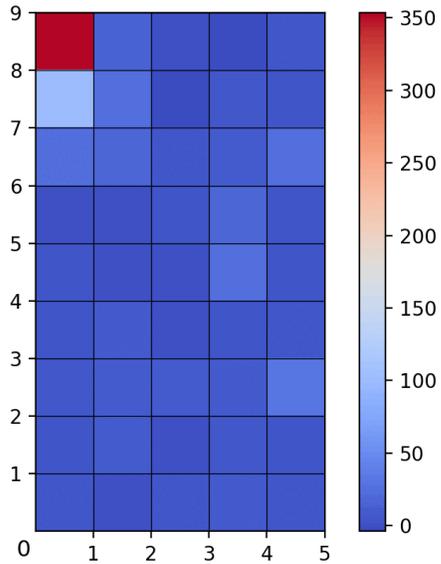
厚さ：70mm

内部を上から見た図

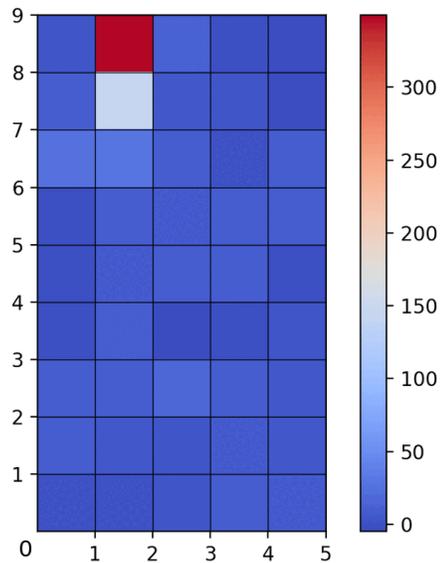
線源 (137Cs)

自作整形増幅アンプで使った±12V電源：KIKUSUI社製 PMR18-1.3TR

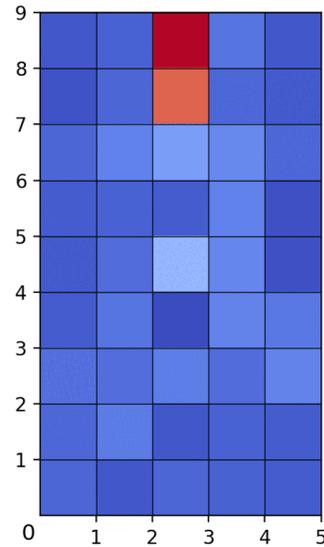
- ・ コリメータを用いて位置検出器の1ピクセルごとに γ 線を照射
- ・ 各ピクセルの30秒毎の検出イベント数でヒートマップを作成
(その際、環境ノイズのデータを差し引いて作成)



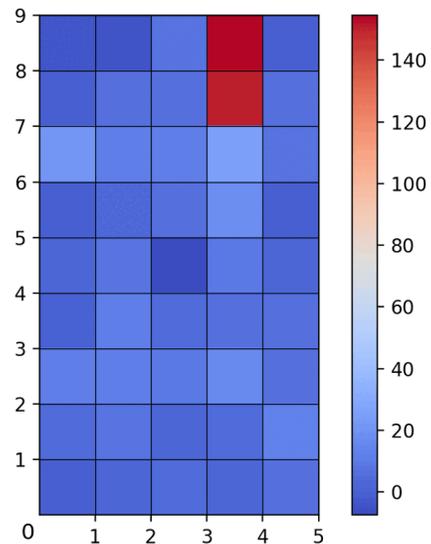
1列目の結果



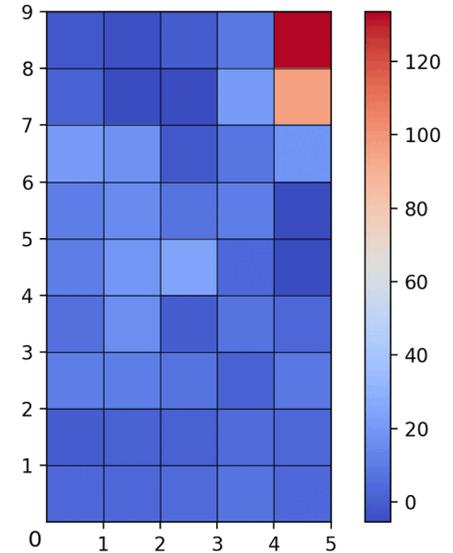
2列目の結果



3列目の結果

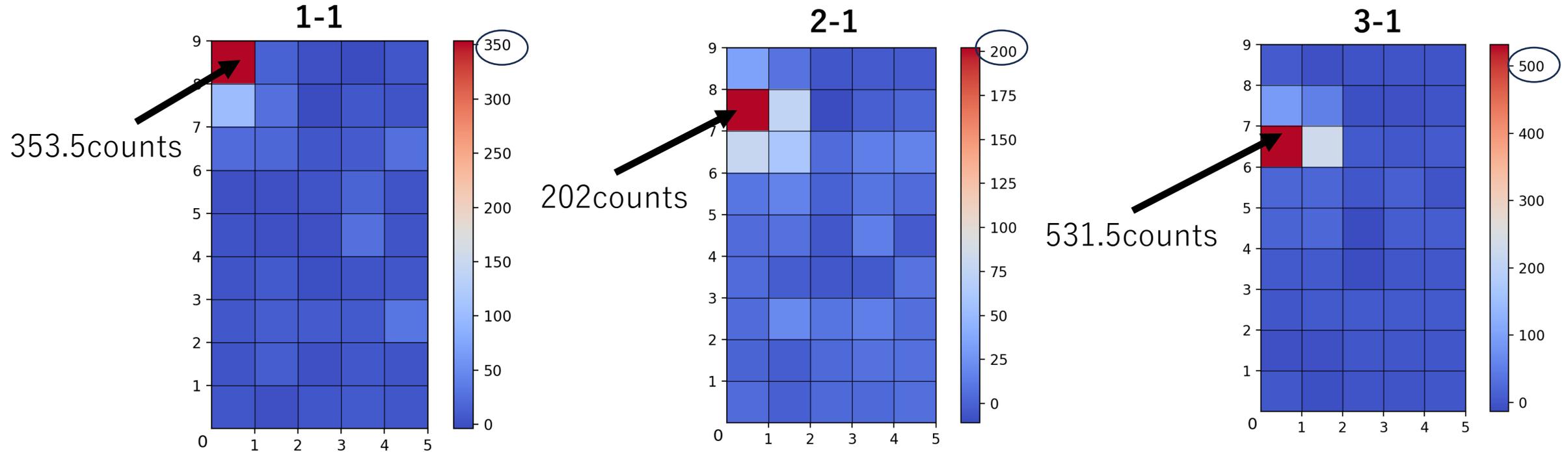


4列目の結果



5列目の結果

・ピクセルごとの検出イベント数に偏り



原因の考察

- ・ 降伏電圧がそれぞれ異なるMPPCに共通のHVをかけてしまっているため、オーバー電圧が大きくなるMPPCの検出イベント数が多くなる
- ・ 位置検出装置側のピクセルのうち、直下にMPPCを有するもの（奇数行）の方が、持たないもの（偶数行）より検出イベント数が多くなる

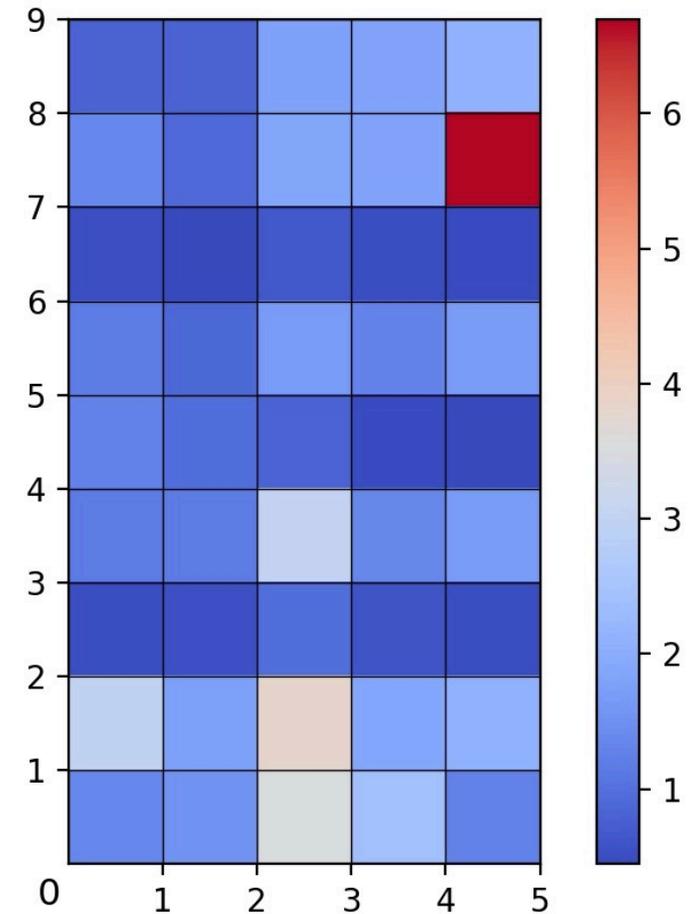
・ピクセルごとにカウント数を調整

- ・ヒートマップ上の各ピクセルごとに倍率を決め、そのピクセルのカウント数にかけることで全ピクセルの検出事象数が一定に見えるように調整

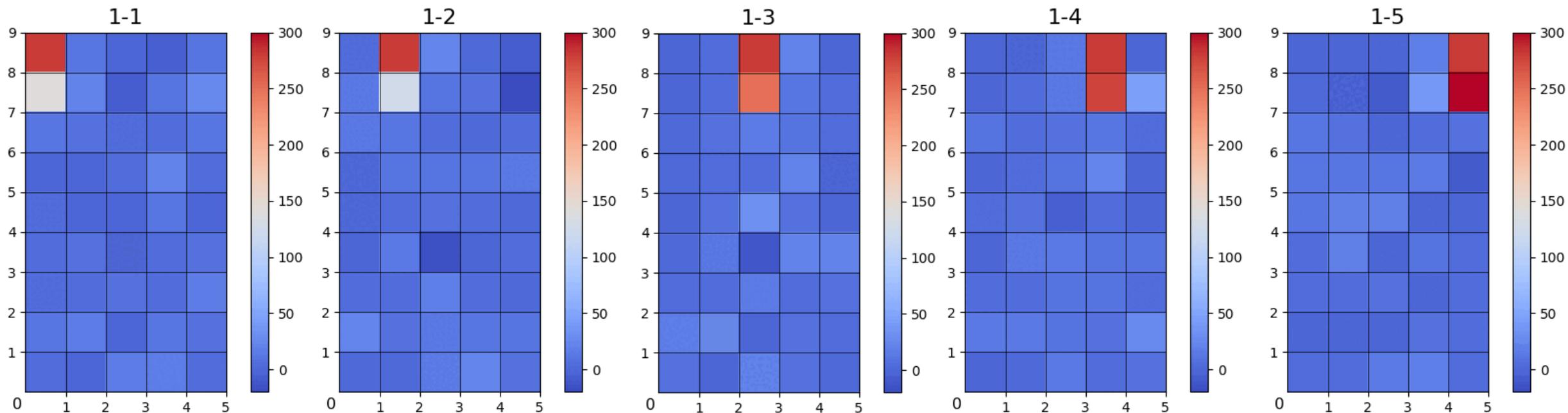
検出器上の*i-j*のピクセルに γ 線を照射した時のヒートマップ上の*i-j*のピクセルのカウント数を $a_{i,j}$ として、それら45個の平均値を a_{ave} とする

$$a_{ave} = \frac{\sum a_{i,j}}{45}$$

$$(i-j \text{ のピクセルの倍率}) = \frac{a_{ave}}{a_{i,j}}$$



各ピクセルにかける倍率のヒートマップ



今回行った修正方法では限界があり、新たな修正方法、
ないしは根本的な解決方法の模索が必要

今後の課題 ～位置検出器に関する考察～

今後行うべきこと

- ・ コリメータをある一定の長さごとに細かく動かし、**妥当な領域分けを再構成**する

装置の改善点の提案

- ・ 使用するMPPCは、**オーバー電圧の差が少なくなる**ように選ぶか、それが厳しそうであれば、各MPPCにかける**HVを個々に調整**できるように工夫する
- ・ MPPCの素子間にある不感領域を減らすために、MPPCを**隙間なく配置**する

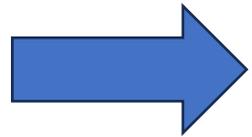
今後の課題

～マスクパターンについて～

マスクパターンの決定(**Uniformly Redundant Arrays**)

マスクパターンに要求されること

1. 検出器上に映るずれた影と光の方向とが1：1対応している
2. 信号対雑音比が最適



Cyclic difference setに基づくマスクパターンがよく合う

今回 9×5 のピクセル数の検出器に対して、最適なマスクパターンを考える
→ 7×5 (**twin prime sets**)を採用

$$D = \{0, 1, 3, 4, 7, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 21, 27, 28, 29, 33\}$$

引用元：Cyclic Difference Sets 著 Leonard D. Baumert

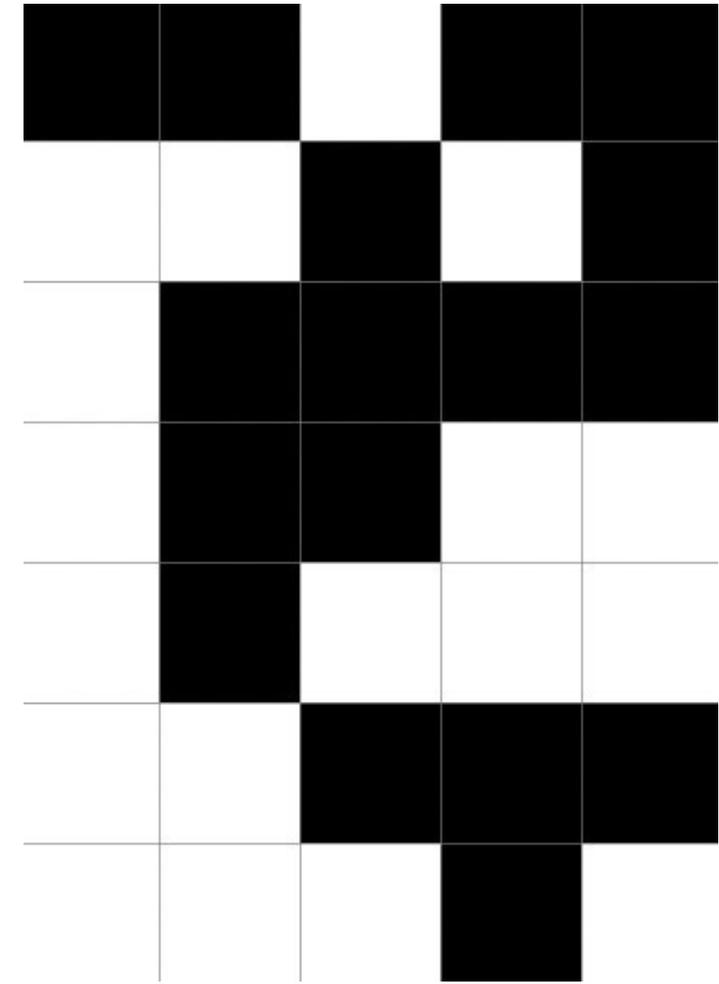
$$D = \{0,1,3,4,7,9,11,12,13,14,16,17,21,27,28,29,33\}$$

➡ 与えられたDに対して、二進列を決定

$$a_i = \{1,1,0,1,1,0,0,1,0,1,0,1,1,1,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,0,0,0,1,0\}$$

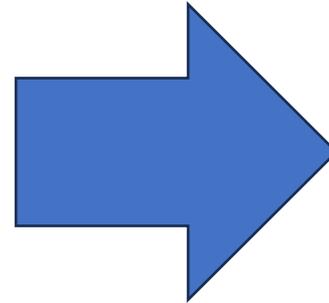
$a_i = 1$ で透明、 $a_i = 0$ で不透明として7×5のマスクパターンを設計。右図では黒い部分を透明、白い部分を不透明としている

右図のマスクパターンをベーシックパターンとして考える

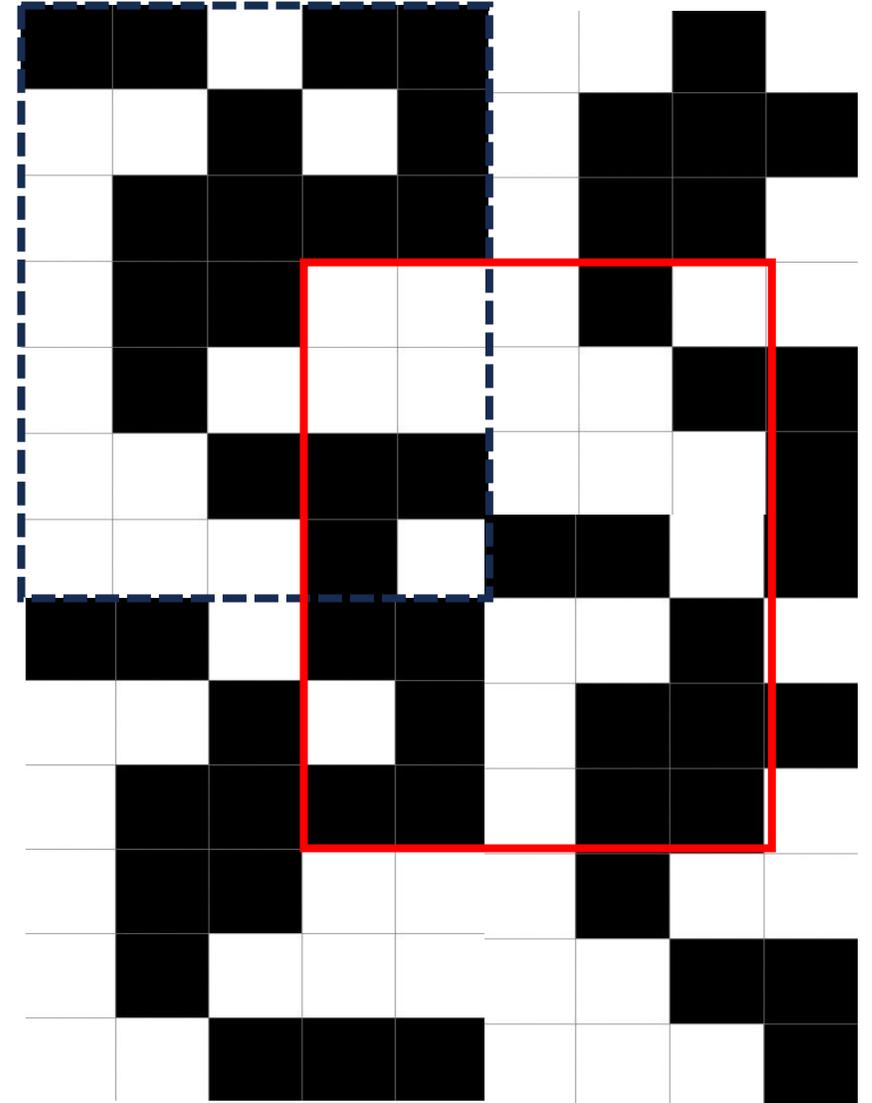


7×5のベーシックパターン

0	1	2	3	4	5	6	7	8
5	6	7	8	9	10	11	12	13
10	11	12	13	14	15	16	17	18
15	16	17	18	19	20	21	22	23
20	21	22	23	24	25	26	27	28
25	26	27	28	29	30	31	32	33
30	31	32	33	34	0	1	2	3
0	1	2	3	4	5	6	7	8
5	6	7	8	9	10	11	12	13
10	11	12	13	14	15	16	17	18
15	16	17	18	19	20	21	22	23
20	21	22	23	24	25	26	27	28
25	26	27	28	29	30	31	32	33

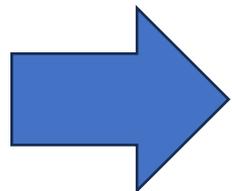


マスクパターンを作成

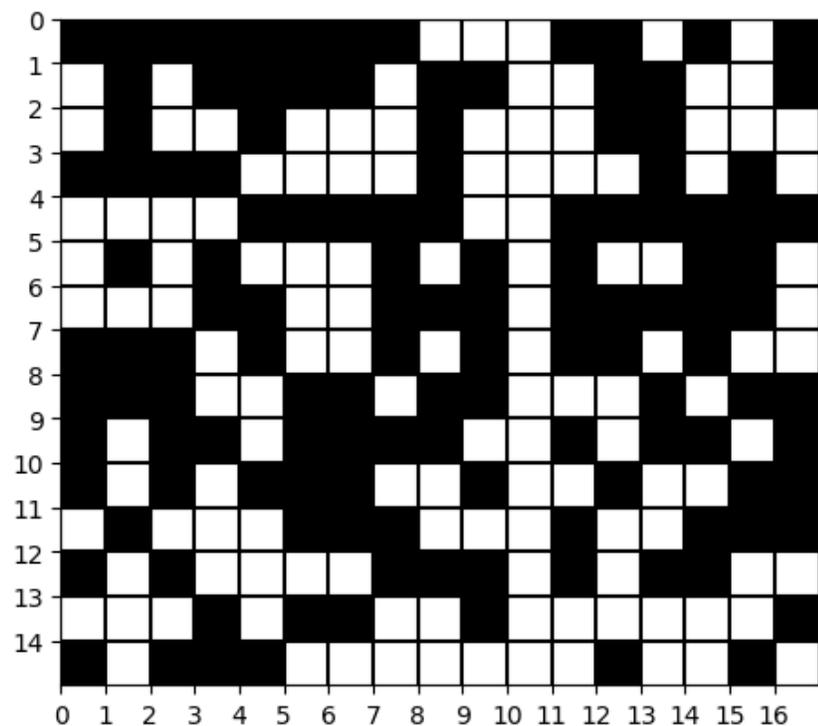


切り取られた7×5のパターンが
URAのcyclic shiftになるように配置

検出器のピクセル数がより多い場合（例：17×15）



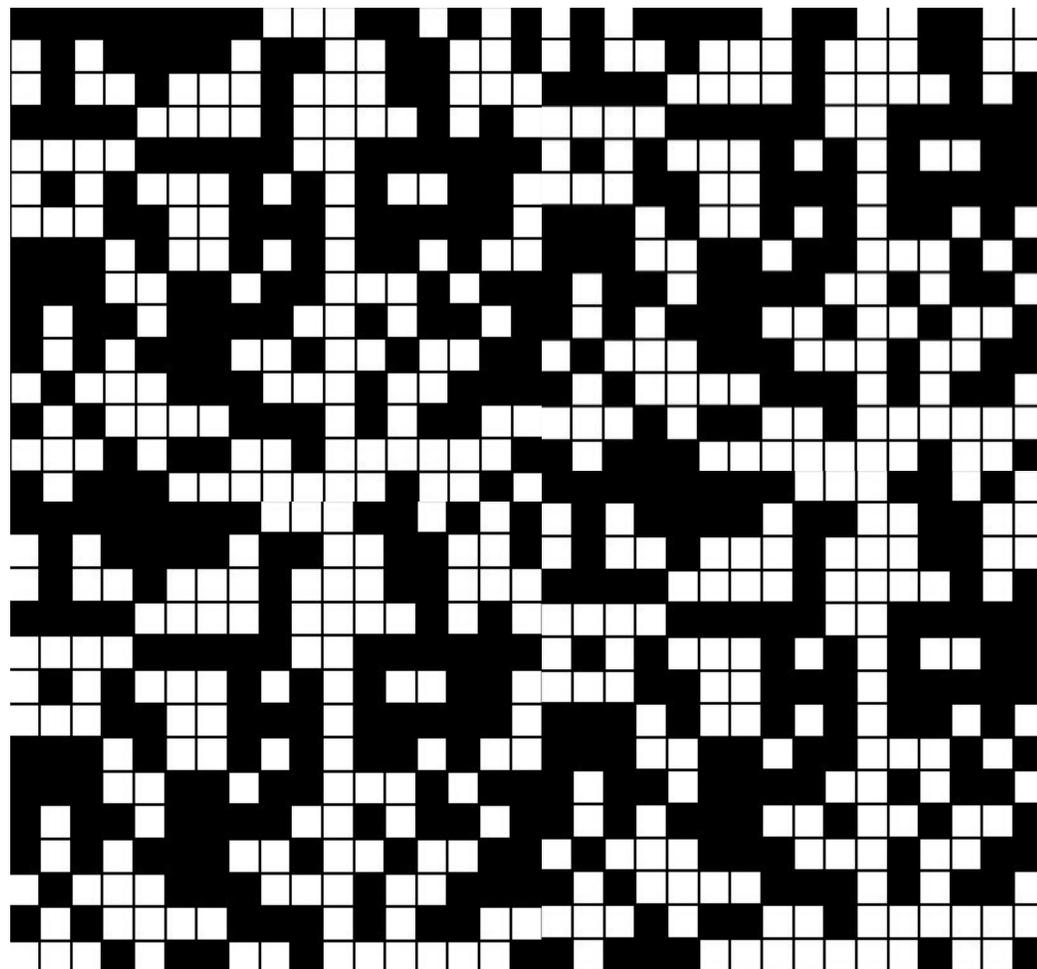
よりピクセル数の多いベーシックパターンを考えることができる。



ベーシックパターン



Cyclicにshift



- 9×5 ピクセルの位置検出器を作成した
→改善の余地あり
- マスクパターンの考案を行った
- 実際のマスク作成、デコードのプログラム作成には至らなかった

参考文献

- NASA Fermi two-year all-sky map
<https://www.universetoday.com/88868/fermi-gamma-ray-observatory-harvests-cosmic-mysteries/> (2024/02/27)
- HEASARC-NASA Gamma-Ray Sky Maps
<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/images/epo/gallery/skymaps/> (2024/02/26)
- Hamamatsu Photonics 技術資料/MPPC
https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/mppc_kapd9008j.pdf (2024/02/26)
- Analog Devices SPICEシミュレーションモデル/SPICE回路
<https://www.analog.com/jp/resources/simulation-models/spice-models.html> (2024/02/26)
- 株式会社テクノエーピー マルチチャンネルアナライザ USB-MCA4 APG7400A取扱説明書
https://techno-ap.com/img/man_apg7400a_1.3.0_j.pdf (2024/02/26)
- NASA Coded aperture camera imaging concept
[Coded Aperture Imaging / Concept \(nasa.gov\)](https://www.nasa.gov/coded-aperture-imaging-concept) (2024/02/26)
- 課題研究P6 Coded Aperture Imaging with Position-Sensitive Photomultiplier tube
http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/P6/2001/p6_coded_report.pdf (2024/02/26)
- Leonard D. Baumert 『Cyclic difference sets』 Springer 1971年、172ページ
- 日本アイソトープ協会 『アイソトープ手帳』 丸善出版 2002年、164ページ

最後に

御清聴ありがとうございました

謝辞

本卒業研究にあたり、高田淳史先生には終始的確な助言を頂き、本研究に大きな進展をもたらしてくださいました。

時にその助言によって、私たちの未熟さを自覚させられ落胆することもありましたが、それらは研究生活において重要な要素の1つであり、感謝の思いでいっぱいでもあります。

塚本博丈さんや穴澤萌衣さんを始め、宇宙線研究室の方々には常に刺激的な議論やサポートをいただきました。特に塚本さんには、TAの業務外のお願いや相談でも積極的にサポートしていただき、楽しく実験生活を送ることができました。本当にありがとうございました。

また、本実験2では、同研究室の小俣雄矢君に朝から重い鉛の移動を手伝っていただきました。ありがとうございました。