

# CsI(Tl) シンチレータとマルチアノード光電子増倍管を用いた 硬 X 線撮像装置の性能測定

内山秀樹      小澤碧      坂井道成

2005/03/30

## 目次

1	概要と目的	2
2	原理	2
3	装置	3
3.1	シンチレータ	3
3.2	マルチアノード光電子増倍管	4
3.3	抵抗チェーン	5
4	方針と設定	6
4.1	実験方針	6
4.2	セットアップ	6
5	実験と結果	8
5.1	抵抗チェーン単体での性能評価	8
5.2	シンチレータ・光電子増倍管内部での光の広がりの評価	9
5.3	抵抗チェーン抵抗値による位置分解能の違い	12
5.4	位置分解能の評価	15
5.5	エネルギー分解能	18
6	まとめ	21
6.1	今回作成した硬 X 線撮像装置の性能	21
6.2	更なる位置分解能の向上のために	21
7	感想とお礼	23

## 1 概要と目的

2010年打ち上げ予定である日本の次世代X線観測衛星 NeXT(図1)は20keV以下の軟X線を CCD カメラで撮像観測する。CCD カメラは高い位置分解能を持つが、有感領域をあまり厚くすることができないため、高いエネルギーの硬 X 線は CCD を透過してしまい、観測することができない。そこでこの CCD を透過した硬 X 線 (20keV ~ 100keV) は別の装置で撮像を行う必要がある。シンチレータを用いた検出器であれば硬 X 線を止め得るだけの厚みを持たせることが出来るため上記の目的の撮像装置として望ましい。今回の実験では CsI(Tl) シンチレータとマルチアノード光電子増倍管を用いて硬 X 線撮像装置を作成し、その性能評価を行った。

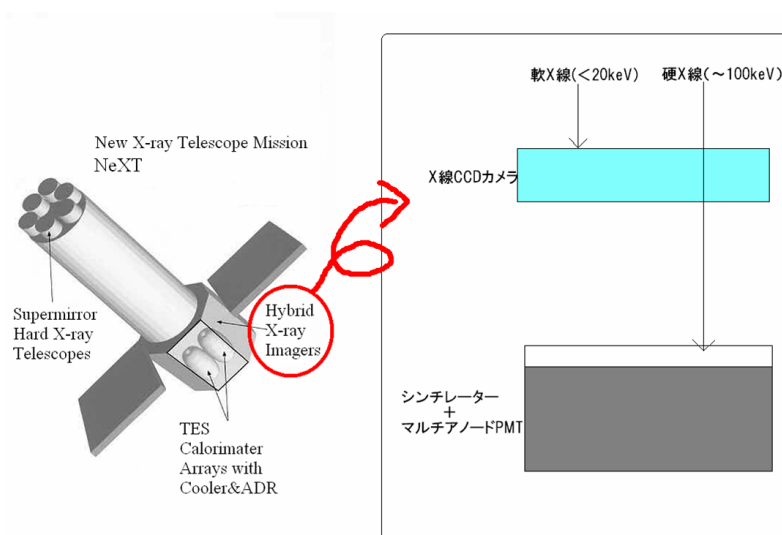


図1 次世代 X 線観測衛星 NeXT とその撮像装置

## 2 原理

シンチレータに硬 X 線が入射しシンチレータ内の電子が励起される。励起された電子が元の準位に戻る際、不純物により生じたエネルギー準位を通るため、光子が放出され、X 線は可視光に変換される。この際に放出される光子数は入射 X 線のエネルギーに比例する。シンチレータから出た光子は光電子増倍管の光電面で光電子に変換される。光電子は、増倍管内部で入射光子数に比例する数の電子に増幅される。最終的に光電子増倍管から入射した X 線のエネルギーに比例する量の電荷がアノード信号として出力される。

今回用いたマルチアノード光電子増倍管は光電子増倍管が縦横それぞれに 16 個並んだ構造をしており、それぞれがアノード出力を持っている。この 256 個の光電子増倍管の内、どの光電子増倍管からアノード出力があったかを知ることで位置検出を行う。

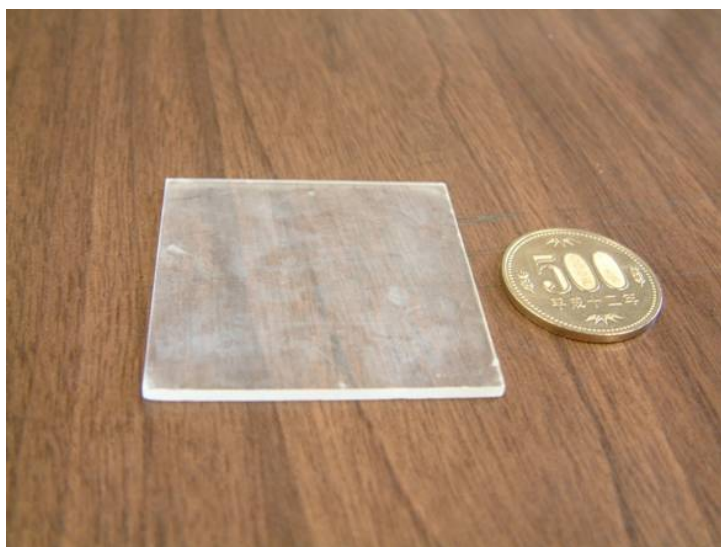


図2 一枚板 CsI(Tl) シンチレータ

### 3 装置

#### 3.1 シンチレータ

CsI(Tl) シンチレータを用いた (図 2)。縦横の大きさは光電子増倍管の有感領域が覆えるように 50mm × 50mm とした。厚みは 2mm とした。この厚さでは 100keV の硬 X 線に対する CsI(Tl) の阻止能が  $9.23 \times 10^3 \text{cm}^2/\text{g}$ 、密度  $4.51 \text{g}/\text{cm}^3$  であるため、100keV の硬 X 線は約 80% の確率で光電効果を起こす。 $\gamma$  線グループがシンチレータをピクセル化して用いているのとは異なり、シンチレータを一枚板のまま利用している。ピクセル化したほうが位置の分解能はよくなるのが予想されるにもかかわらず、一枚板で実験したのはシンチレータの厚みが 2mm と薄いため、シンチレータ内での光の広がりはそれほど大きくないと考えられることと、2mm の厚みのシンチレータをピクセル化するのは技術的にも難しいこと、仮にシンチレータをある程度厚くして実現できたとしても厚くなった分ノイズが多くなると考えられることによる。

以下に主な無機シンチレータの特性を述べる。

##### 1. NaI(Tl)

密度が  $3.67 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$  と高く、原子番号も大きいので大体積の結晶では非常に高い効率を持つガンマ線検出器となる。半導体検出器は優れたエネルギー分解能を示すが、大体積の検出器を必要とする実験では NaI(Tl) 検出器に勝るものは無い。410nm に発光スペクトルのピークがあり、その光変換効率は無機シンチレータの中でも最大である。欠点としては割れやすく温度勾配や熱ショックに弱い。また吸湿性があるので常時封じ切り型で使用する。NaI は微量なカリウムを含んでおり、放射線核種  $^{40}\text{K}$  によるバックグラウンド係数を示す。

##### 2. CsI(Tl)

NaI(Tl) よりも密度が高く ( $4.51 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ) 原子番号も大きいのでガンマ線の検出効率は高い。室温での光変換効率は NaI(Tl) の約 45% である。発光スペクトルは 420-600nm に伸びている。吸湿性が少なく、NaI よりは柔らかくであり激しいショックや加速度、振動、温度勾配、急激な温度変化にたえることができる。この性質から宇宙実験に適している。CsI は K を含んでいない。減衰時間は  $1\mu$  秒と他のシンチレータに比べて長い。

### 3.CsI(Na)

光変換効率は NaI(Tl) の 85% であり、発光スペクトルは 320-540nm に伸びている。少し吸湿性を示す。

### 4.CaF<sub>2</sub>(Eu)

原子番号が小さいのでガンマ線の検出効率は低く、ベータ粒子及び X 線の検出器として用いられる。溶解性が無く化学反応を起こしにくいので液体状同位元素の測定に適している。光変換率は NaI の約半分。発光スペクトルは 405-490nm。

### 5.BGO(ピスマスジャーマネート Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub>)

密度と実効原子番号が大きいので線減弱係数が大きく、残光時間は短い。吸湿性、へき開性が無く加工が容易であるなどの特徴を持つ。

以上の特徴を見ると、CsI(Tl) シンチレータを今回使用したのは、今後予定されている気球実験や、或いは宇宙環境において衝撃や振動に強く扱いやすいものが望まれるからである。

## 3.2 マルチアノード光電子増倍管

浜松ホトニクス社のマルチアノード光電子増倍管 H9500 を使用した (図 3)。構造は図 3 から分かるように光電子増倍管が縦横に 16 個ずつ、 $16 \times 16 = 256$  個並んだ構造しており、256 個のアノード出力とダイノード最終段出力を背面に持つ。大きさは  $52\text{mm} \times 52\text{mm} \times 39\text{mm}$  である。表面  $52\text{mm} \times 52\text{mm}$  の領域のうち、有感領域として使用可能なのは  $49\text{mm} \times 49\text{mm}$  である。1 つの増倍管の大きさは  $3.04\text{mm} \times 3.04\text{mm}$  である。各々のゲインは約 100 万倍であるが、最もよい増幅率の光電子増倍管 (以下  $3.04\text{mm} \times 3.04\text{mm}$  の 1 つの光電子増倍管のことを単にセルと呼ぶことにする。) と最も悪いところでは 5.5 倍の増幅率の差がある。ゲインマップを図 4 に示した。傾向としては中心付近には増幅率のよいセルが、端には悪いセルが多い。1000V の電圧をかけて使用する。

### 3.2.1 光電子増倍管の基本原理

光電子増倍管は可視光の入射パルスを  $10^{-9}$  秒以内に  $10^6$  倍以上も増幅する高速増幅器である。光電子増倍管は入口に光電陰極 (photocathode) 内側に数段のダイノード (dynode) を取り付け真空排気したガラス管である。シンチレータからの光子は光電子増倍管に入射して光電陰極を衝撃して電子を放出する。この光電子は増倍管内の電位差により第一ダイノードに導かれ、第一ダイノードに光電子が衝突することにより更に 2 次電子を放出する。このようにして数段のダイノードにより電子が増幅され最終的にアノード (陽極または収集電極) に集められる。今回実験で使用した光電子増倍管はこのアノード読み出し計 256 個と最終ダイノードをま



図3 マルチアノード光電子増倍管 H9500

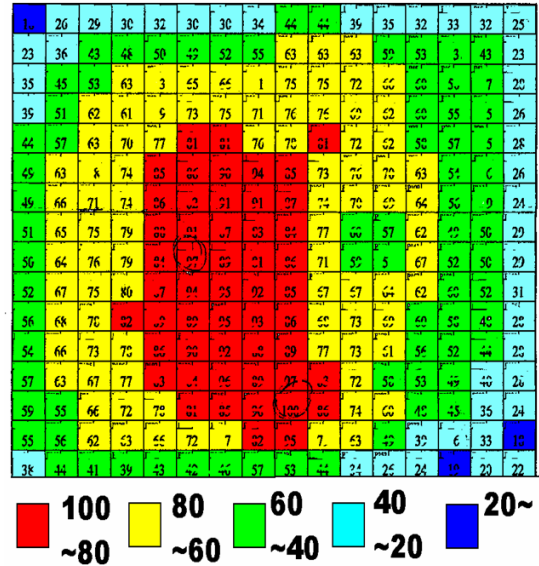


図4 マルチアノード PMT のゲインマップ

とめたものを読み出せるようになっている。

増倍管で十分考慮すべきこととして暗電流 (dark current) があげられる。暗電流は主に熱エネルギーが吸収された後、光電陰極から放出される電子からなる。この過程は熱イオン放出 (thermionic emission) と呼ばれ、直径 50mm の光電陰極は室温で毎秒  $10^5$  個の電子を暗電流として放出する。一般に光電陰極を冷却するとこの雑音源は 10 ~ 15 度当たり約 1/2 に減少する。

### 3.3 抵抗チェーン

マルチアノード光電子増倍管のアノード出力に回路図 図 5 の回路を接続し読み出しを減らした。このように読み出しを減らしたのは後続の回路 (プリアンプ、シェーパー、ADC など) の数を少なくし、回路の煩雑さを回避するためである。また、衛星・気球では使える電力に限りがあるため、あまり多くのアンプを積むことが出来ないことも考慮している。この回路は自作したものであり図 6 に写真を示した。

基本原理は同じ抵抗値の抵抗を多数連ねた 1 本のチェーンのとある点に電流が入ってきたとき、両端に流れる各々の電流はその点から両端の抵抗までの個数の逆比となることである。即ちこの流れてくる電流の比を取ることにより、どの点に電流が入ってきたかを (入射位置の情報を) 知ることが出来る。これが以下で位置分解能を知ることが出来る理由である。

この実験では 2 次元的位置情報を知るためにまず 16 列の PMT のアノード出力を縦につないだチェーンを 16 本作り、それを上、下おのおのつなげて 4 つの読み出しを作った。すなわち 256 点のアノード出力を 4 つの読み出しに減らし、この比を用いて重心演算を行うことにより位置情報を求めた。

重心演算は具体的には ADC の 4 つのチャンネルの出力を用いて、

$$\text{(横比)} = \frac{(\text{CH3} + \text{CH4}) - (\text{CH1} + \text{CH2})}{\text{CH1} + \text{CH2} + \text{CH3} + \text{CH4}} \quad \text{(縦比)} = \frac{(\text{CH1} + \text{CH4}) - (\text{CH2} + \text{CH3})}{\text{CH1} + \text{CH2} + \text{CH3} + \text{CH4}}$$

を計算した。上記の横比で表される方向を横方向、縦比で表される方向を縦方向と以後呼ぶ。

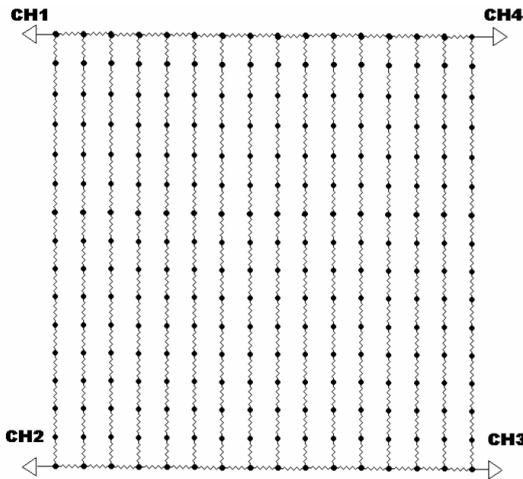


図5 抵抗チェーン回路図

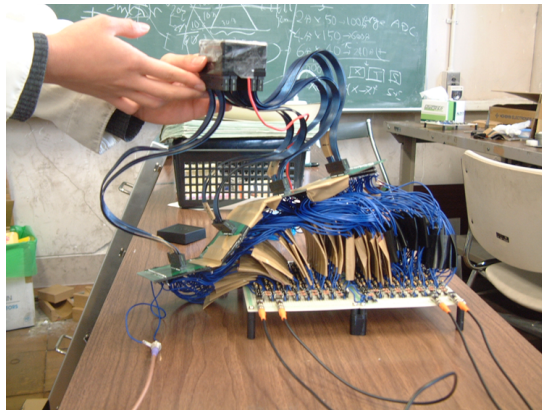


図6 抵抗チェーン

実際には ADC のチャンネル出力をそのまま用いて比を取らずに ADC の下駄 (ADC にアナログ信号を入力しなくてもゲート信号・変換開始信号を入れると出力される値) を引いた上で比を取った。

## 4 方針と設定

### 4.1 実験方針

今回使用したマルチアノード光電子増倍管は  $16 \times 16$  のセルを持つが以下の実験では図 7 に示した中心付近  $8 \times 8$  のピクセルを重視した。NeXT 衛星望遠鏡部の有効面積の角度依存性 (図 8) によると、硬 X 線の場合、光軸から  $3.5 \text{ arcmin}$  以上傾くと効率は 1 桁落ちる。一方増倍管のセルは  $3 \text{ mm}$  角、望遠鏡の焦点距離を  $12 \text{ m}$  とすると 4 セルの視野はおよそ  $3.5 \text{ arcmin}$  になる。よって端は望遠鏡による光子の効率が極端に落ちるので中心付近を優先して高い分解能を実現したいと考えたためである。(図 9)

実験の目標は実際作った検出装置の位置分解能とエネルギー分解能を調べることである。抵抗チェーンのみ、或いは光電子増倍管とシンチレータのみでの位置分解能評価を行い、それぞれの部分が位置分解能に及ぼす影響を調べた。また最適な抵抗値を見つけるために抵抗チェーンの抵抗値をいろいろ変えてみることも行った。

### 4.2 セットアップ

今回の実験のセットアップを図 10 に示した。マルチアノード光電子増倍管からの信号を抵抗チェーンを通し、読み出し数を減らした後、プリアンプ、シェーパーで増幅・整形しピークホールド型 ADC を用いてその大きさを測定した。ADC のゲート信号、及び変換開始信号はダイノード出力にスレスホールドをかけることで作った。スレスホールドのレベルは光電子増倍管の最もゲインの良いセルでダイノードのスペクトルをとり、そのスペクトルでからノイズの切れるレベルを調べ、設定した。マルチアノード光電子増倍管からの生の信号オシロスコープで見たものを図 11、プリアンプ・シェーパーを通して ADC に入る前の信号、ゲート信号、変換開始信号をオシロスコープで見たものを図 12 に示した。

Shaper はアノード出力に対しては豊伸電子の NO12-V、ダイノード出力に足してはクリアパルスの CP4417



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128
129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144
145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160
161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176
177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192
193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208
209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224
225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240
241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256

図7 中心付近8×8のピクセル

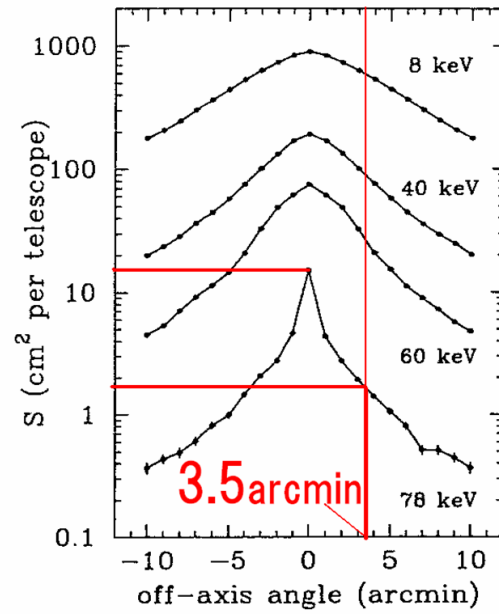


図8 NeXT 衛星望遠鏡の有効面積角度依存性

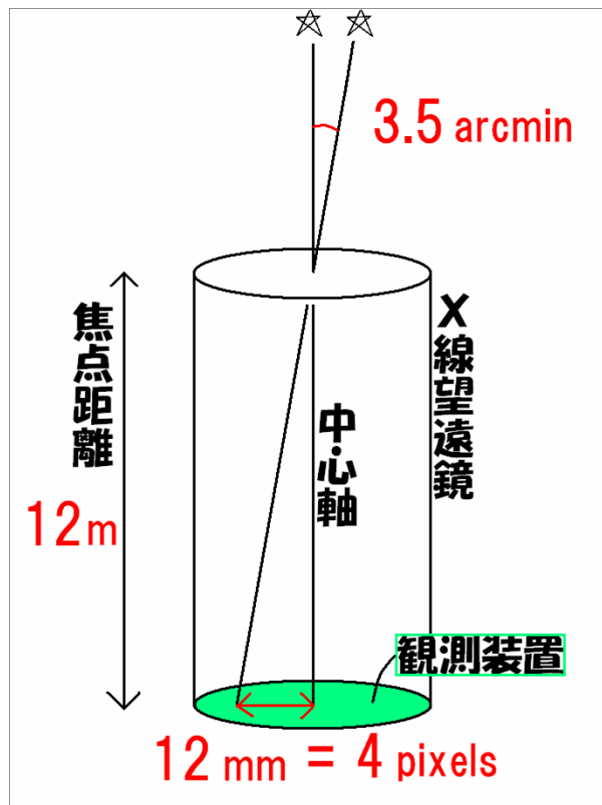


図9 NeXT 衛星望遠鏡の幾何的セットアップ

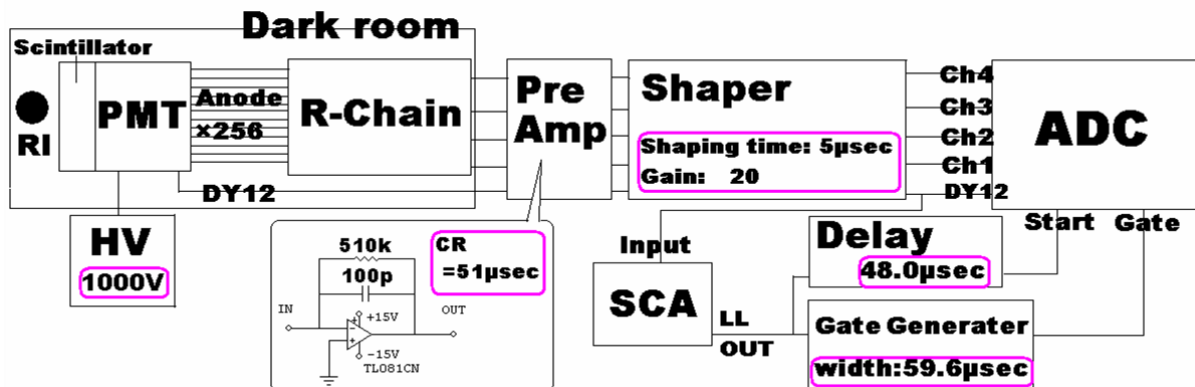


図 10 セットアップ

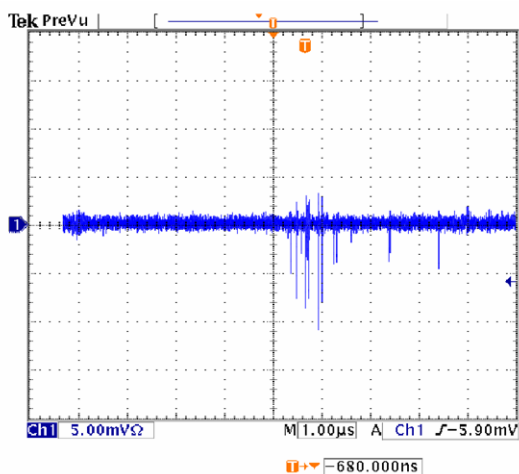


図 11 マルチアノード PMT の生の信号

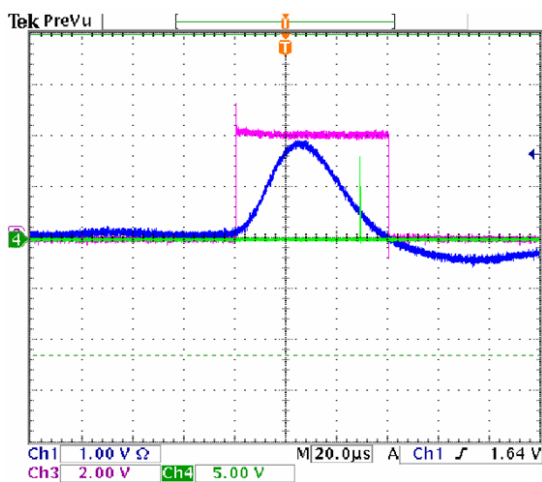


図 12 シェイパー後の信号、ゲート信号、変換開始信号

を用いた。SCA は ORTEC の 550A を用いた。Delay&GateGenerator は Techland の N-TM307 を用いた。ADC はピークホールド型でクリアパルスの CP1113A を用いた。ADC からは FANUC のボードコンピュータ VMIVME7750 を用いてデータ取得した。

## 5 実験と結果

### 5.1 抵抗チェーン単体での性能評価

#### 5.1.1 目的と方法

まず抵抗チェーンのみでの位置分解能を評価した。具体的には水銀パルスジェネレータでシンチレータ + 増倍管の出力に近い信号を作り、これを抵抗チェーンの 1 点に入力した。この際抵抗チェーンへの入力位置に因らず、CH1+CH2+CH3+CH4 の電荷量総和がだいたい一定となるように入力信号の波高を調節した。これは実際シンチレータと光電子増倍管をつけた時は抵抗チェーンに入ってくる電荷量は位置に因らないため、



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128
129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144
145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160
161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176
177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192
193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208
209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224
225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240
241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256

図 13 測定した全体の 1/4 のセル

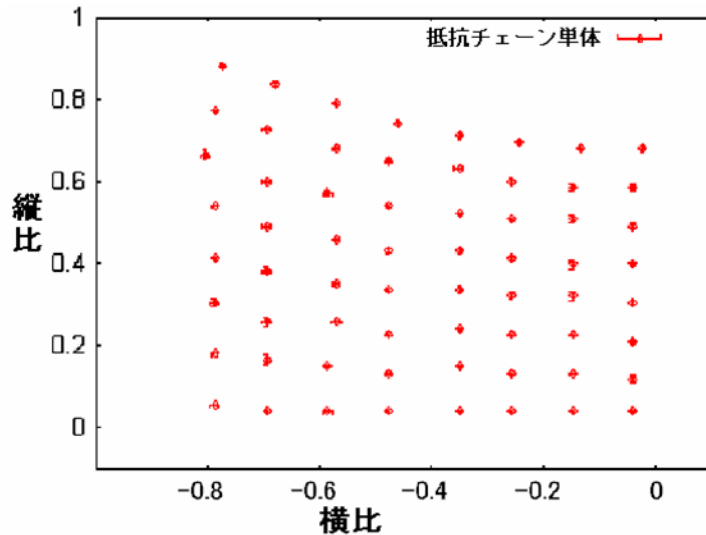


図 14 抵抗チェーン単体 結果

これと同じ状況にするためである。対称性から図 13 に当たる全体の 1/4 の位置で測定した。抵抗チェーンの抵抗は縦横ともに  $13k\Omega$  とした。

### 5.1.2 結果

結果は図 14 となった。抵抗チェーンの抵抗値は縦横ともに  $13k\Omega$  とした。図 14 の結果にはエラーがついてある。これを見ると抵抗チェーン単体では入射点周りに殆ど比の座標上での揺らぎは無く、抵抗チェーン単体では誤差は殆ど生じないことが確認できた。

## 5.2 シンチレータ・光電子増倍管内部での光の広がりの評価

### 5.2.1 目的と方法

抵抗チェーンをつけずに、シンチレータと光電子増倍管のみで測定を行い、位置分解能を調べた。ここでは一枚板シンチレータと  $3mm \times 3mm$  (1つのセルと同じサイズ) のピクセルシンチとの比較を行った。もし一枚板シンチレータ内での光の広がりが大きいならピクセルシンチレータとの間に位置分解能の差が見られるはずである。逆にも一枚板とピクセルに位置分解能の差が見られなかったとしたら、それはシンチレータ以上に光電子増倍管の光電面の表面ガラス内や内部構造でより光や光電子が広がっていることが考えられる。

方法としては一枚板シンチレータはある点に鉛でコリメートして線源  $^{57}\text{Co}$  からの X 線 ( $122\text{keV}$ ) を当てる。(ピクセルシンチでは同じ点にシンチを立てて X 線を当てる。) そしてその真下のセルのアノード出力を抵抗チェーンを通さず読み出す。(このセルの位置を距離 0 とする) その次にその横のセル (このセルの位置を距離 1 とする) のアノード出力を読み出す。このようにどんどん距離をずらして各点についてアノード出力によるスペクトルのデータを得る。このようにして得られた  $^{57}\text{Co}$  によるスペクトルのピークの中心チャンネルは光電子増倍管で増幅された光電子の数に比例している、つまり、そのセルに到達した光子の数に比例しているはずなのでこのピークのチャンネル数を知ることが出来ればそのセルに光子がどの程度やってきたかを知ることが出来る。今回使用したコリメータの大きさや幾何的なセットアップは図 15 に示した。

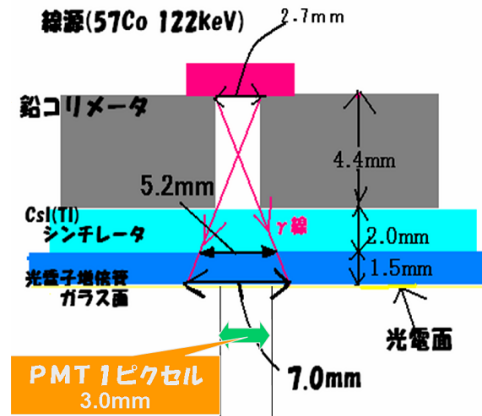


図 15 5.2.1 節の幾何的セットアップ

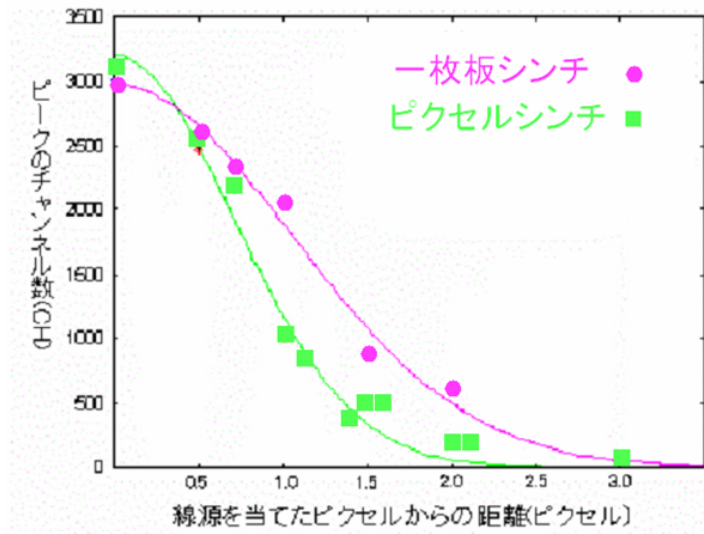


図 16 シンチレータ内の光の広がり

### 5.2.2 結果 1 エネルギースペクトルピークの移動からわかるシンチレータ内の広がり

横軸に線源を当てたセルからのセル数での距離、縦軸にエネルギースペクトルのピークのチャンネル数を示したのが図 16 である。これを見ると確かにピクセルシンチと一枚板シンチを比較するとピクセルシンチの方が広がり小さいが、ピクセルシンチでも予想した以上に広がっていることがわかった。理想的にはピクセルシンチ内の信号は全て真下のセルに入射し真下の読み出しからのみ出力信号が出るはずだがそうになっていないのは意外に光電子増倍管内での広がりが大きいことを示している。ピクセルシンチでも広がりが出ることについて光電子増倍管の構造として表面と光電面の間に 1.5mm のガラスがあるので光子はこのガラス内で広がる事が考えられる。また増倍管の内部構造として光電面から 1 次電子に変換された後にダイノード間の増幅の途中にも他のセルにこぼれてしまう電子が存在することも考えられる。

図 16 の広がりを正規分布でフィッティングした際の標準偏差は

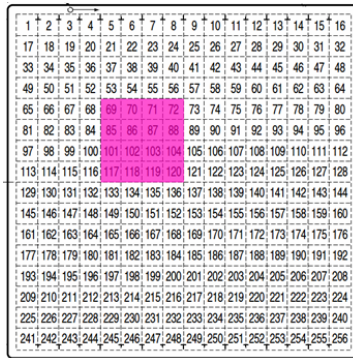


図 17 5.2.4 節で X 線を当てたピクセル

一枚板センチ 1.06  
ピクセルセンチ 0.71

であった。

### 5.2.3 位置分解能の評価方法

ある 1 点に線源をコリメートした場合、横比 - 縦比 - カウント数の 3 次元グラフは 3 次元ガウシアンに近い形になるであろう。これを最頻値を通る面で縦方向と横方向各々切ったものをガウシアンでフィッティングし、その標準偏差を求める。そして

$$(\text{位置分解能}(\%)) = \frac{\text{標準偏差}}{2 \text{ 点間距離 (セル単位)}} \times 100(\%)$$

にて位置分解能を定義する。

### 5.2.4 結果 2 抵抗チェーンをつけてとった比のグラフ

センチレータ内の光の広がりを実際位置分解能低下の原因となっているかを調べるため、先の設定に抵抗チェーン (縦横ともに 13kΩ) をつけて、ピクセルセンチ、一枚板センチ各々について図 17 の位置のピクセルに X 線をコリメートして当て、比を取った。結果は図 18,19 となり、5.2.3 節で定義した位置分解能を計算すると表 1 となった。

	縦方向分解能 (%)	横方向分解能 (%)
一枚板センチ	35.8	48.9
ピクセルセンチ	39.6	47.4

表 1 一枚板・ピクセルセンチの位置分解能

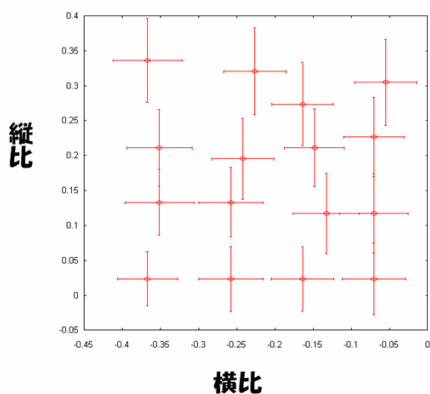


図 18 一枚板シンチレータ + 抵抗チェーン

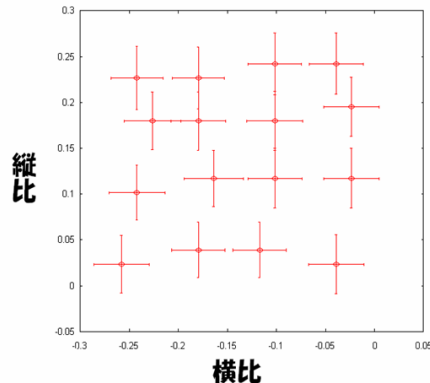


図 19 ピクセルシンチレータ + 抵抗チェーン

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128
129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144
145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160
161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176
177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192
193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208
209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224
225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240
241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256

図 20 中央領域 (赤)・端領域 (緑)

## 5.3 抵抗チェーン抵抗値による位置分解能の違い

### 5.3.1 目的と方法

抵抗チェーン抵抗値による位置分解能の違いに差が見られるかを調べるために縦と横の抵抗の抵抗値を様々に変えてみて最適なものを見つけようと試みた。先の実験と同じ 4.4mm 厚み, 2.7mm 穴直径の鉛を用いてあるセルに線源からの X 線をコリメートしてやり、シンチレータ、光電子増倍管、抵抗チェーンをつなげて比のグラフを取った。鉛の板を 1 点 1 点ずらしてその各々について比のグラフを取るわけだがここでは増倍管の左上 1/4 の 4 隅の点、及び 1 中心付近 1/4 (4×4 ピクセル) と左上 1/4 から上、左の 1 列を抜いた 3×3 (端付近) 領域について測定した。抵抗チェーンの抵抗の対称性からこの領域で測定すれば十分と考えたからである。(図 20) 以後この 3×3 端付近の領域を端領域、4×4 の中心付近の領域を中央領域と呼ぶことにする。そしてこの中心、端領域のそれぞれで 5.2.3 節の位置分解能の平均値を計算し、位置分解能を評価した。

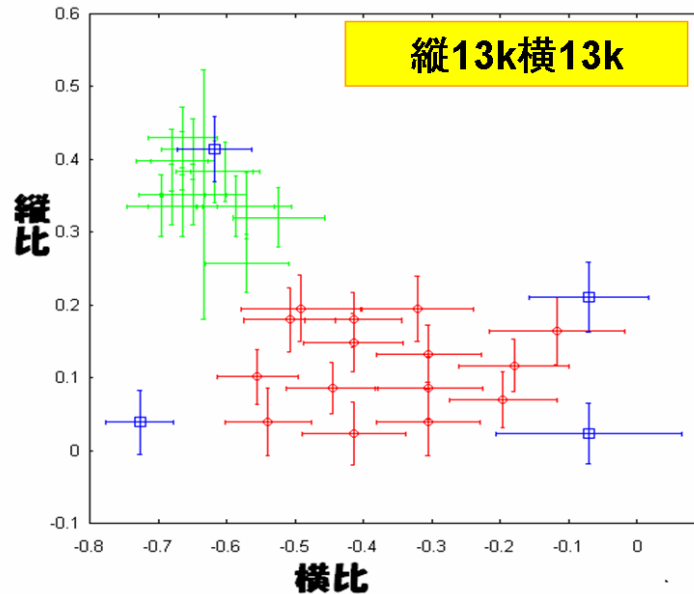


図 21 縦 13kΩ 横 13kΩ の結果

### 5.3.2 コリメートの方法

まず光電子増倍管に一枚板シンチレータを貼り付け、反射材で周りを覆った後、 $3 \times 3\text{mm}$  の格子を  $16 \times 16 = 256$  個書いた紙に 1 から 256 の番号をふった。そして増倍管のセルとこの紙の格子がずれないように注意深く貼り付けた。最初はジャッキ 2 台でスライド台を作成し 1 台には光電子増倍管を固定、もう 1 台には穴の開けた鉛を固定して、上下は定規を当てながらジャッキを上下させ、左右は定規で作成したレール上を動かして、定規の目盛 + 目で見た番号確認で狙ったセルにコリメートする方法をとった。しかしこの方法ではどうしても鉛と増倍管の間に  $5\text{mm}$  程度の間隙が生じてしまいコリメートの精度を悪くしてしまうことから途中から直接貼り付ける方法をとった。すなわち鉛に両面テープをくっつけて目で見ながら増倍管に張った格子とセル番号を書いた紙にぺたっと貼り付けて、番号があっているかを確認した。コリメートする場所を変えるときは 1 回ずつはがして、貼り付けるを繰り返した。なお手作業にて位置を合わせていたので  $1\text{mm}$  以下ではあるがこれに伴う位置の誤差はあるであろう。また紙の番号札と実際のセルは十分注意してはったつもりではあるが多少ずれており、そこから来る位置の誤差もあるかもしれないことを併記しておく。なお以下の実験結果は全て貼り付ける方法で取ったものである。

### 5.3.3 結果

まず縦、横ともに抵抗値  $13\text{k}\Omega$  の抵抗チェーンを用いたところ得られた比のグラフは図 21 のようであった。エラーは 5.2.3 節の方法で求めた標準偏差である。これを見ると縦方向の分解能が中心付近で極端に悪くなっていることが見て取れる。即ち比のグラフが中心付近で押しつぶされたような形になっている。この位置分解能は中心付近で縦 81.7% 横 39.6% であった。

縦方向が悪い理由として縦方向のチェーンへの電流流れ込みの効果が考えられる。つまり、理想的にはある点に入ってきた電荷は抵抗分割に従ってまず上下に流れ、それから左右に流れて最終的に 4 つの読み出

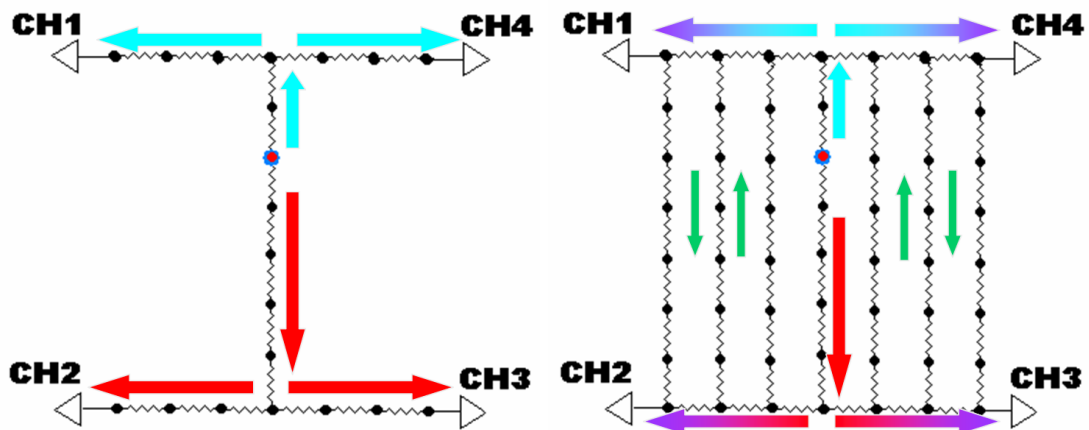


図 22 理想的な場合

図 23 現実には'流れ込み'が起きる

し口に到達する。(図 22) しかし実際には上下に行った後の電荷は左右のみならず他の縦の抵抗にも流れ込む。(図 23) 特に縦、横の抵抗値が同じ程度の大きさならこの縦に流れる電荷量が大きくなることが考えられる。我々はこの'流れ込み効果'が縦分解能を悪くする原因だと考えた。縦方向の位置は  $(CH1+CH2 \text{ の電荷量の和}) / (CH3+CH4 \text{ の電荷量の和})$  の比から測られる。しかし、このような縦方向の流れ込みがあると結局  $(CH1+CH2 \text{ の電荷量の和}) / (CH3+CH4 \text{ の電荷量の和})$  の比は 1 に近づいてしまい、縦方向の入射位置の情報は失われると考えられるためである。もし縦の抵抗値に比べて横の抵抗値がある程度以上小さければこの'流れ込み効果'は小さくなって縦方向の分解能もさして悪くならないことが予想される。そこでこの後縦 13kΩ の抵抗値に対して横 13kΩ, 1kΩ, 100Ω の抵抗値、縦 50kΩ に対して横 50kΩ, 5kΩ, 1kΩ で各々縦、横の位置分解能を求めた。

縦 13kΩ 横 1kΩ の抵抗チェーンの結果は図 24 となった。縦方向分解能は図 21 と比べると確かに良くなっている。中心領域、端領域でそれぞれ位置分解能を計算すると表 2, 3 となった。この結果を見ると縦方向の抵抗値に比べて横方向の抵抗値を小さくすると中心領域での縦方向位置分解能は確かに向上している。但し、端領域の位置分解能は抵抗値依存性の傾向はよく分からなかった。4.1 節で述べた方針に従って、試した抵抗値の中で最も中心領域の位置分解能のよい縦 13kΩ 横 1kΩ の抵抗チェーンを以後の実験で用いることにした。

抵抗値	横方向分解能 (%)	縦方向分解能 (%)
縦 13k 横 100	76.7	41.7
縦 13k 横 1k	39.6	47.4
縦 13k 横 13k	62.2	81.7
縦 50k 横 1k	57.4	52.8
縦 50k 横 5k	54.5	65.8
縦 50k 横 50k	58.0	62.2

表 2 抵抗値による位置分解能の違い (中心領域)



抵抗値	横方向分解能 (%)	縦方向分解能 (%)
縦 13k 横 1k	67.0	59.6
縦 13k 横 13k	69.2	79.1
縦 50k 横 1k	65.6	52.8
縦 50k 横 5k	54.5	65.8
縦 50k 横 50k	58.0	62.2

表 3 抵抗値による位置分解能の違い (端領域)

## 5.4 位置分解能の評価

### 5.4.1 目的と方法

縦 13kΩ 横 1kΩ の抵抗チェーン、一枚板シンチレータを用いた上で今回作成した硬 X 線撮像装置の位置分解能を調べた。線源は  $^{57}\text{Co}$ (122keV) を用い、あるセルに鉛でコリメートして X 線を当てた。但しここでは鉛コリメータとして今までのものよりもと 17.0mm と厚く (今までのものは 4.4mm) 穴の直径も 2.5mm とやや小さいものを用いた。(今までは 2.7mm) 図 25 に幾何的なセットアップを示した。この理由はコリメートの精度を上げて、コリメートによる位置分解能の低下を小さく抑えるためである。先に用いていた薄い鉛コリメータでは幾何的に考える PMT 光電面で光子が 7.0mm にひろがってしまい 1 つのセルの大きさが 3mm であることを考えるとコリメートの精度は十分でない。一方今回用いるものだと PMT 光電面での広がり は 3.5mm である。コリメータをより分厚く、穴を小さくすればコリメート精度はよりよくなるはずだがこのコリメータを用いた理由としては、あまり分厚いとカウントレートが下がってしまい相対的にノイズが増えること、位置

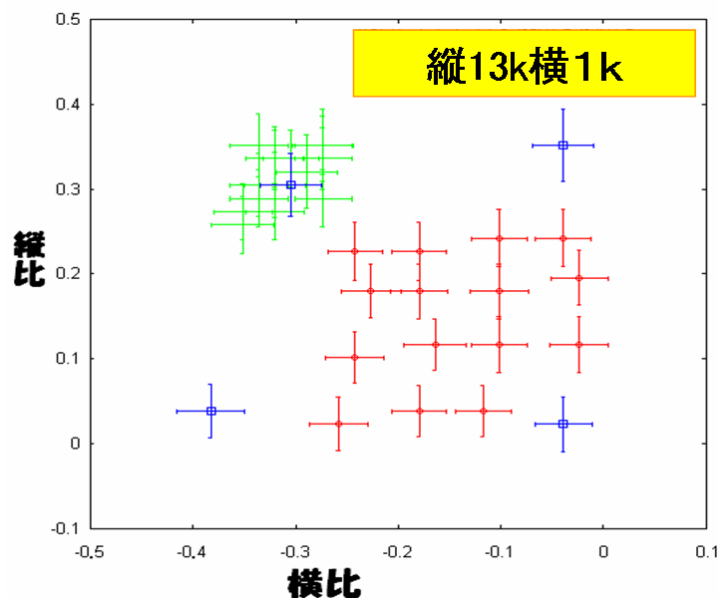


図 24 縦 13kΩ 横 1kΩ の結果

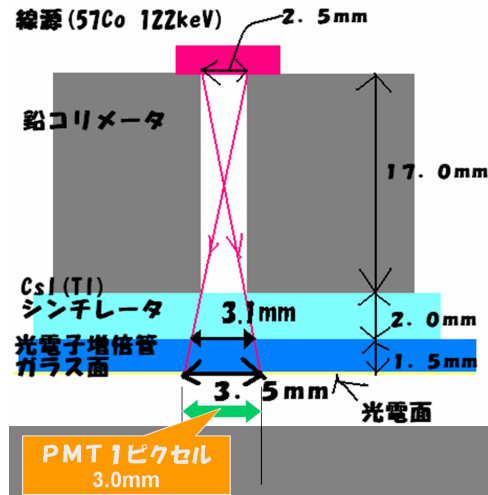


図 25 5.4 節の幾何的セットアップ

の確認が困難になること（増倍管の表面に格子状に番号を書いた紙を貼り付けて目で確認しながら両面テープで鉛と増倍管を貼り付けて固定し、再度確認のためレーザーで番号があつてるか覗き込む手法をとった。）技術的に厚い鉛に小さな穴を開けるのは困難であったことが挙げられる。

#### 5.4.2 結果

256 点全てのセルに 1 つ 1 つコリメートして X 線を当て得たエラーバー付きのデータをまとめて表示したのが図 26 である。端付近は中心付近に比べ密集してエラーバーの重なりが大きいので 2 点間の区別は困難である。このグラフが上下左右対象ではない理由としては増倍管のゲインによる影響が大きいと思われる。実際特に右下と左上がつぶれて見えるが、この領域の増倍率は特に小さい。（図 4 参照）

中心付近 8 × 8 部分の位置分解能は

横方向 43.0%

縦方向 48.9%

となった。これを PMT 有感面での長さでの分解能に直すと、半値全幅は

横 3.1mm

縦 3.4mm

となった。

端領域での位置分解能は

横方向 59.8%

縦方向 54.5%

となった。PMT 有感面での長さでの分解能に直すと、半値全幅は

横 4.3mm

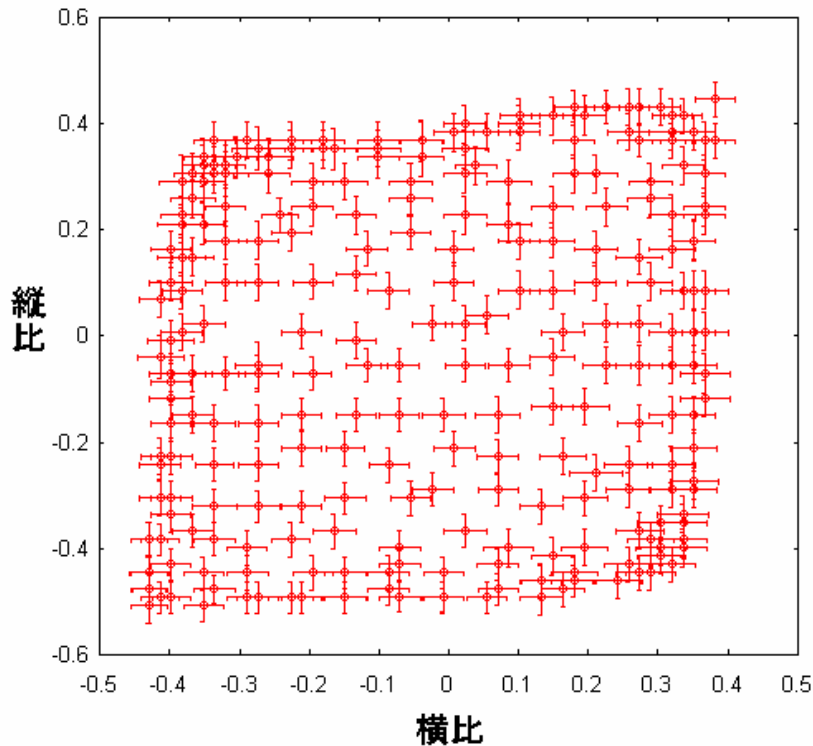


図 26 位置分解能 (256 点、抵抗チェーン縦 13k $\Omega$  横 1k $\Omega$ )

縦 3.9mm

となった。

#### 5.4.3 隣り合う 2 点が分解できるか調べる補助実験

上記の結果によると位置分解能はセルの大きさよりやや大きいのでし鉛に 2 つの穴を開けると、隣り合う 2 点は分解は難しいが、1 点飛ばしならきちんと 2 点として分解できることが予想される。そこで実際中心付近 2 点間の位置分解能が出ているか調べるために、鉛に穴を 2 つ隣り合い (間隔 3mm)、1 点飛ばし (間隔 6mm) にあけてきちんと分解されるかどうか調べた。

但し加工のしやすさを考えて鉛は 4.4mm 厚み、穴直径 2.4mm のものを用いた。コリメートしたのはいずれもゲインが 90 以上の中心付近のセルである。縦と横の分解能の違いも考えて両方のデータをとった。線源は  $^{57}\text{Co}$ (122keV) を用いた。隣り合ったセル、及び 1 点飛ばしのセルに入射した結果が図 27,28 及び、図 29,30 である。平面が縦比、横比に対応しており山が高いほどカウント数が大きい。これを見るとわかるようにやはり隣接 2 点では縦、横ともに分解は難しいが、1 点飛ばしだと両者とも分解は可能になる。

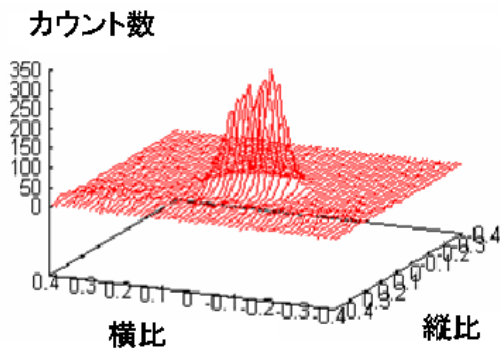


図 27 隣接 2 点横

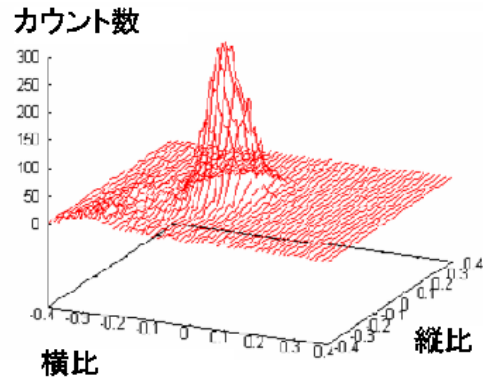


図 28 隣接 2 点縦

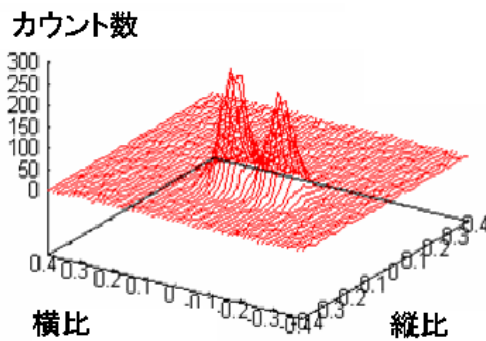


図 29 1 点飛ばし横

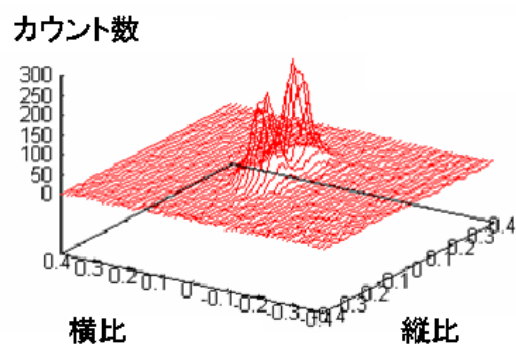


図 30 1 点飛ばし縦

## 5.5 エネルギー分解能

### 5.5.1 目的と方法

5.4 節と同じ設定にてこの検出装置でどの程度のエネルギー分解能が得られるか調べた。ここでエネルギー分解能を得るのに最終段のダイノードからの信号と、抵抗チェーンを通過した後の信号 4 つを足しあげた信号の 2 通りを用いて横軸チャンネル、縦軸カウント数のスペクトルを得て、どちらがエネルギー分解能がよくなるか評価した。以下前者で得られたスペクトルをダイノードスペクトル、後者をアノードスペクトルと呼ぶ。設定は位置分解能の 5.4 節と同じで、17mm 厚みの鉛で 1 点にコリメートしてスペクトルを得た。

### 5.5.2 結果 1 ダイノードスペクトルとアノードスペクトルのエネルギー分解能の違い

まずゲイン最大のセルに鉛の穴をあわせた。得た横軸チャンネルのグラフから、横軸エネルギーにするため  $^{133}\text{Ba}$ (80keV,356keV),  $^{109}\text{Cd}$ (88keV),  $^{57}\text{Co}$ (122keV) をもちいて較正を行った。この結果が図 31,32 である。較正曲線は

$$\text{ダイノード:}(\text{CH})=15.7(\pm 0.1)\times(\text{energy}[\text{keV}])+132.1(\pm 8.9)$$

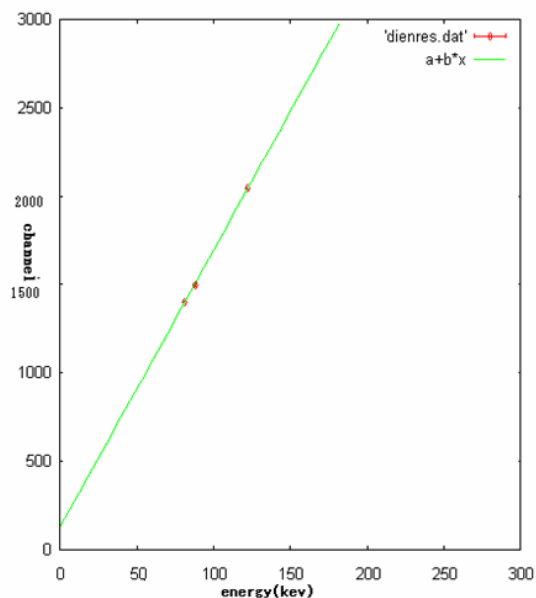


図 31 較正曲線 (ダイノード)

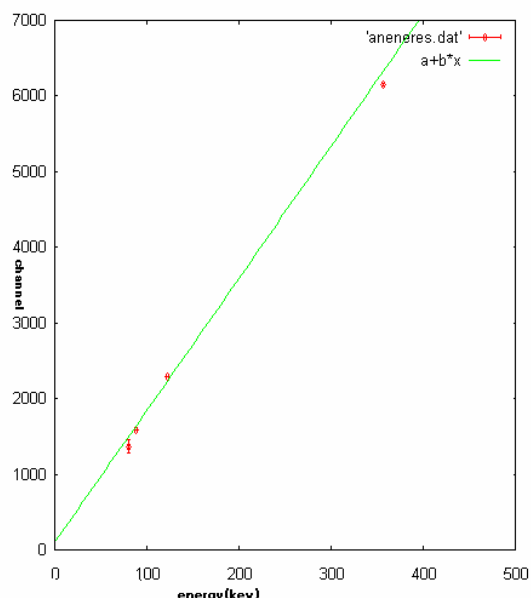


図 32 較正曲線 (アノード)

$$\text{アノード} : (\text{CH}) = 17.4 (\pm 1.1) \times (\text{energy} [\text{keV}]) + 111.4 (\pm 133.8)$$

となった。

較正曲線を用いて横軸エネルギーに直して得た  $^{57}\text{Co}$  のスペクトル図を 2 つ重ねたのが図 33 である。一見してわかるようにダイノードで得たものの方がよりシャープである。

定量的にも

ダイノードによるエネルギー分解能 7.8%

アノードによるエネルギー分解能 11.9%

であり、エネルギースペクトルを得る際にはダイノードから得たほうがよいことがわかった。

ダイノードから得たスペクトルのほうが分解能がよい理由としては、アノードによるスペクトルは抵抗チェーンを通過した後の 4 つのチャンネルからの出力をそれぞれ 4CH ADC で AD 変換した後、その 4 つの値を足し上げることで得るが、この 4CH ADC の 4 つのチャンネルの性能にばらつきがあることなどが考えられる。

### 5.5.3 結果 2 エネルギー分解能のエネルギー依存性

これもゲイン最大のピクセルにコリメートした結果である。上記の較正に用いた線源を用いてエネルギーによって分解能の違いがあるのかを調べたのが次表 4 である。

これを見ると今回測定した 80 ~ 350keV 程度の範囲ではエネルギーによって、そのエネルギー分解能に大きな差は認められなかった。

### 5.5.4 結果 3 エネルギー分解能のゲイン依存性

$^{57}\text{Co}$  (122keV) をゲインの異なるセルにコリメートして光電子増倍管の増幅率の違いによって分解能がどう変化するかを調べた。この結果は表である。なお PMT のゲインは最もゲインのよいセルの増幅率を 100 と

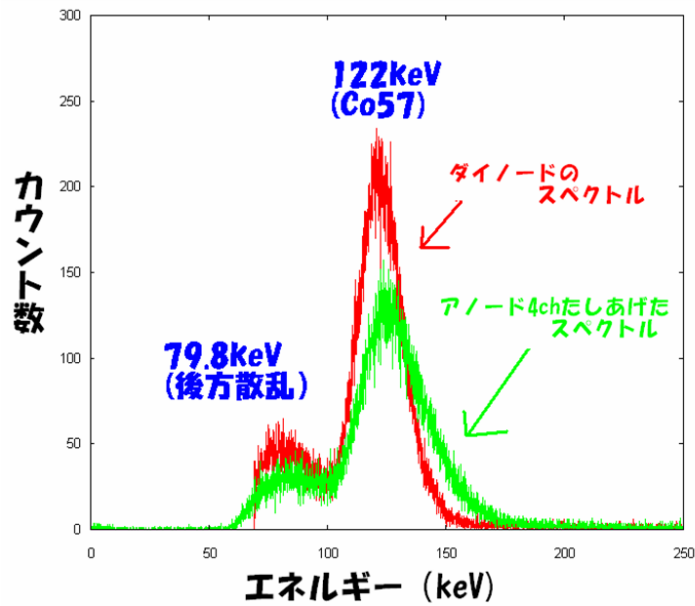


図 33 ダイノードとアノードのスペクトル比較

エネルギー (校正線源)	ダイノードのエネルギー分解能 (%)	アノード 4ch のエネルギー分解能 (%)
80keV (Ba133)	11.2	-
88keV (Cd107)	13	13.4
122keV (Co57)	7.8	11.9
356keV (Ba133)	-	12.4

表 4 エネルギー分解能のエネルギー依存性

して相対的にゲインを表 5 してある。(図 4 参照)

PMTgain	ダイノード分解能 (%)	アノード分解能 (%)
100	7.8	11.9
80	8.5	9.8
57	7.8	10.3
40	8.0	11.9

表 5 エネルギー分解能のゲイン依存性

これを見ると増幅率によってエネルギー分解能に大きな違いは認められなかった。



## 6 まとめ

### 6.1 今回作成した硬 X 線撮像装置の性能

以上の結果から今回作成した硬 X 線撮像装置の性能を評価すると表 6 になった。

位置分解能	横方向	3.1mm
	縦方向	3.4mm
角分解能	横方向	0.89arcmin
	縦方向	0.97arcmin
エネルギー分解能		9.5keV

表 6 今回作成した硬 X 線撮像装置の性能評価

ここで全ての分解能は半値全幅で評価した。エネルギー分解能は 122keV ゲインの最もよいセルに線源をコリメートした場合である。位置分解能をもとにして角度分解能を算出した際には焦点距離 12m の望遠鏡を用いた場合を考えた。計算は

横方向

$$\tan\theta(\text{rad}) = \frac{3.4 \times 10^{-3}(\text{m})}{12(\text{m})}$$

$$\theta = \arctan \frac{3.4 \times 10^{-3}(\text{m})}{12(\text{m})} \times \frac{360}{2\pi} \times 60(\text{arcmin}) = 0.97$$

縦方向

$$\tan\theta(\text{rad}) = \frac{3.1 \times 10^{-3}(\text{m})}{12(\text{m})}$$

$$\theta = \arctan \frac{3.1 \times 10^{-3}(\text{m})}{12(\text{m})} \times \frac{360}{2\pi} \times 60(\text{arcmin}) = 0.89$$

である。

### 6.2 更なる位置分解能の向上のために

今回作成した X 線撮像装置は位置分解能が半値全幅にして 3mm 程度、焦点距離 12m の X 線反射望遠鏡を用いると角度分解能にして 1 分角弱の性能をだすことがわかった。更にこの分解能をあげるために、抵抗チェーン、シンチレータ、光電子増倍管、の各々について考察してみる。

#### 6.2.1 抵抗チェーン

抵抗チェーン単体の実験では抵抗チェーンはそれのみでは位置分解能の低下に殆ど寄与しないという結果が出た。しかしながら抵抗チェーン抵抗値による位置分解能の違いの実験ではシンチレータをつけて測定すると抵抗の値によって分解能にかなり大きな差が見られることがわかった。今回の実験では時間の都合上、最適な抵抗値を見つける際変えた抵抗値も限られており、各々 1 回限りの測定で再現性は確かめられていない。今後更に最適な抵抗値を見つけるには以下の点に注意すべきだと考えられる。

まず横の抵抗値であるが、値は数 100Ω 以上とすべきだと考えられる。この理由は今回実験において横の抵抗値が 100Ω なら比のグラフが極端に中心付近に集まって横方向の分解能が悪くなる傾向が見られたからである。恐らく後続回路による抵抗チェーンの出力抵抗が数 100Ω 程度であることが予想され、それが原因であると考えられる。

次に縦の抵抗値であるが横と同程度であれば‘流れ込み効果’の影響が大きくなるため、抵抗値は横の 10 倍以上程度であることが望まれる。ただ、縦抵抗を大きくしすぎると、確信は無いが例えば今回の実験の縦 13kΩ 横 1kΩ と縦 50kΩ 横 5kΩ を比較すると前者のほうが分解能がよいことから、分解能の低下につながることを予想できる。よって縦抵抗の値は数 100Ω から数 10kΩ とするのがよいと思われる。

余談ではあるが中心付近のみならず端周辺も分解能を上げる方法としては横のチェーンの端 3 つ (全部で 12 個) をそのほかの横のチェーンに比べて大きくすると端付近の横方向の分解能はよくなることが確認できた。(ただし中心付近では逆に悪くなってしまう。) このようにして横端の抵抗値を大きくすると横分解能がよくなったので、縦両端の抵抗値を他の縦抵抗の抵抗値より大きくすれば縦方向の端の分解能もよくなるのではと考え上下端の縦の抵抗値を大きくした実験も行った。それらの結果の端部分と中心部分の分解能は表 7 のようになった。但し 13k1k は今回実験したチェーン (縦 13kΩ 横 1kΩ)、13k1k5k は横チェーン端の 12 個のみ 5kΩ としたものである 13k1k5k50k は更に上下 3 列の縦抵抗 (3×15 列 × 上下 2 個) も 50kΩ と置き換えたものである。

		13k1k	13k1k5k	13k1k5k50k
端領域 (3×3)	横方向位置分解能 (%)	83	58	55
	縦方向位置分解能 (%)	102	112	104
中心領域 (4×4)	横方向位置分解能 (%)	40	57	65
	縦方向位置分解能 (%)	47	43	51

表 7

端縦抵抗を大きくしてみても端付近縦分解能が大きくよくなることは無かった。一方端横抵抗を大きくすると周辺部の横分解能はそこそこよくなったが逆に中心付近は悪くなった。今回の実験の方針は中心付近を重視したので縦 13kΩ 横 1kΩ を用いたが、端部分まで有効に使いたいときはこのような工夫をするとよいと思われる。

なお今回 GND に 10kΩ10kΩ 抵抗のチェーン製作を依頼した。これは縦抵抗への‘流れ込み’のため分解能はよくなかったが、手作りのチェーンは抵抗の接触不良などにかなり悩まされたので (チェーンの抵抗値を測定前に図るとふらついたり一定値を示さないことが多かった。) 最適な抵抗値が決まれば業者に頼んで小型の抵抗チェーンを製作してもらうのが望ましいと思う。

### 6.2.2 シンチレータ

当初はピクセル化したほうが圧倒的に位置分解能がよくなるものと考えていたが、ピクセルシンチと 1 枚板シンチを比べても大きな変化はないようであった。3mm より小さいサイズにピクセル化すれば多少分解能は向上するであろう。ただ技術的にピクセル化するにはシンチレータの厚み自体をもっと厚くする必要があるであろう。

### 6.2.3 光電子増倍管

PMT には以下のような位置分解能低下の要因があると思われる。あるセルにのみシンチレーション光が入射しても、まず表面ガラス面から光電面にいたるまでに表面ガラスの厚みが 1.5mm ほどあるのでガラス内で光が広がってしまう。更に各セルのダイノード間にはしきりがないのでダイノード段での増幅の過程である程度の光電子が他のセルのダイノードにこぼれていくことがあるであろう。以上より増倍管の内部構造として表面ガラス面を出来るだけ薄くし、更にダイノード増幅過程でのセル間の区切りを作れば分解能は大幅によくなることが予想される。

光電子増倍管に高電圧をかけて十分時間がたってから測定すること、暗電流を抑えるために装置自体を十分冷却してから測定を行うことによっても暗電流が低下するため位置分解能は上昇し得ると考えられる。

今回の実験から考えると抵抗チェーンの抵抗値 (PMT 接続時)、PMT、シンチレータの順に位置分解能を決めていると考えられる。故に更なる位置分解能の向上を図るためにはこの順に改良していくのが適当だと思われる。

## 7 感想とお礼

信号が見えへ〜ん、と先行きがかなり不透明な状態から出発しました。本格的に実験に取り組み始めるまでに (というよりシンチレータからの信号がちゃんと見られるようになるまでに) かなり時間がかかりましたが軌道に乗ってからはぼこぼこ物事が進みました。3 人という (実験にははおおめの人数でしょうか?) 人数で実験を行ったので測定をローテーション制で行えるなど時間的に余裕の持てた反面、役割分担が固定化してしまうと自分担当でないところが全然上達しなかったです。私の場合プログラミングに殆どノータッチになってしまい少し悲しかったです。もっと積極的にやればよかったです。

実験自体はアイデアを出し合って工夫する過程が楽しかったです。たいいていのアイデアは結局うまくいかなかったりするけどたまにヒットのが出るとよっしゃ、とほくそえます。

後悔したのはせっかく GND の会社に抵抗チェーン作成の依頼をしたのに結局あまりよい分解能が得られなかったことです。でも業者さんとのやり取りの過程で多くのことを学ばせていただきました。回路の読み方、発注の仕方、段取り、回路の相場、えとせとらえとせとら。でも一番大きいのは、発注するときはよく考えてからやれ、ってことです。(すみませんすみません。) 抵抗の値 1 つとってももっと試行錯誤してからやれば (抵抗チェーンはせめて半面くらい自作していたら傾向は読みとれていたでしょう) 接触不良に毎回悩みながら 256 点のデータを取ったりせずにすみしました。

信号が見えなくて落ち込んでいた当初から毎日のようにお邪魔して様々なことを教えていただいた松本さん、はじめスタッフさん院生さん、本当に有難うございました。

小沢碧

お礼を述べさせていただきます。

まず、万事に渡って面倒を見ていただいた松本さん。「PMT が壊れたかもしれない」と情けない顔で何度伺ったことでしょう。身内さん、窪さんにも散々相談にのっていただきました。

VME を立ち上げて下さった谷村さん。VME のサンプルプログラムを下さった小野さん。P6 部屋に来るたびに何か助言を下さった西村さん。差し入れを下さったり、なんとなく P6 全体の姐さんぶりを発揮して下

さった岡田さん。このレポートを PDF に変換できないと泣きつかせて頂いた関谷さん。発表練習に付き合っ  
て下さった CR の全ての皆様。

GND との交渉にあたり、このレポートの殆ど全てを書いてくれた小澤さん。抵抗チェーンの設計・製作の  
大部分をこなし、その上プログラムもやり、解析プログラムに自意識まで与えてくれた坂井君。不幸にして私  
の妄想発言に深夜付き合う羽目に度々陥った他の P6 メンバー。

皆様本当にありがとうございました。

...最後に懺悔を。

実は私はこのレポートを踏み倒すつもりでいました。ごめんなさい。

内山秀樹

この実験では多くの方々に御世話になりました。松本さんをはじめとする宇宙線研究室の教員、院生の皆様には、  
最初から最後まで御指導いただきました。また、私が悪い意味でマイペース全開だったにもかかわらず実験が  
進行したのは、同じグループの小澤さん、内山君のおかげです。P6 の他のグループのメンバーには日々  
すすさんで行く心を癒していただきました。皆様、本当にありがとうございました。

また、この実験に出会えたことにも感謝します。この実験で電子回路の設計と製作、解析プログラムの作成  
などを行ったわけですが、これらによって単に技術が身についただけでなく、電子工作、プログラムに対する  
興味が湧きました。現在私がいる研究室(宇宙物理学教室)で、そのことが大変役に立っています。

では ASTRO-E2 の成功を祈って...

坂井道成