

画像検出用積分型位置敏感比例計数管の開発

武藤, 彰英 / MUTO, Akie

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

49

(発行年 / Year)

1999-03-24

(学位授与番号 / Degree Number)

32675甲第79号

(学位授与年月日 / Date of Granted)

1999-03-24

(学位名 / Degree Name)

博士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

(URL)

<https://doi.org/10.11501/3167998>



画像検出用積分型位置敏感比例計数管の開発

法政大学大学院 工学研究科

システム工学専攻 博士課程

武藤 彰英

画像検出用積分型位置敏感比例計数管の開発

法政大学大学院 工学研究科

システム工学専攻 博士課程

武藤 彰英

目次

1	序論	1
2	積分型位置敏感比例計数管	5
1	位置検出器	5
2	位置敏感比例計数管	7
2.1	位置敏感比例計数管	7
2.2	電荷分割方式PSPCの検出原理	7
2.3	電荷分割PSPCの信号処理	8
3	積分型位置敏感比例計数管	9
3.1	CIPSPCの開発	9
3.2	CIPSPCの検出原理	9
3.3	CIPSPCの特徴	10
3	開発した計測システム	15
1	開発した計測システムの概要	15
2	開発した計測システムの仕様	16
3	計測システムの信号処理回路	18
3.1	信号処理回路の概要	18
3.2	アナログマルチプレクサ	18
4	開発した検出器	25
1	開発した検出器の概要	25
1.1	開発した検出器の共通仕様	25
2	Type1検出器	27

2.1	Type1 検出器の仕様	27
2.2	Type1 検出器の諸特性	27
3	Type2 検出器	29
3.1	Type2 検出器の仕様	29
3.2	Type2 検出器の諸特性	29
4	CIPSPC の特徴	31
5	画像検出実験	43
1	Type1 検出器による画像検出結果	43
1.1	自由落下するハサミの画像検出	43
1.2	検出した画像の2値化処理	44
1.3	ワイヤの検出	44
2	Type2 検出器による画像検出結果	46
2.1	自由落下するハサミの画像検出	46
2.2	ワイヤの検出	46
3	CIPSPC の画像検出器としての特徴	48
6	放射光における小角散乱実験	59
1	放射光実験施設における実験	59
1.1	CIPSPC 使用の意義	59
1.2	試作器の仕様	59
2	P10 ガスを使用したカエルの筋肉の静的小角散乱実験	61
2.1	実験条件	61
2.2	実験結果と考察	61
3	Xe ガスを使用したカエルの筋肉の静的小角散乱実験	62
3.1	実験条件	62
3.2	実験結果と考察	62
4	Xe ガスを使用したエアロジルの静的小角散乱実験	63
4.1	実験条件	63
4.2	実験結果と考察	63
5	Xe ガスを使用したカエルの筋肉の動的小角散乱実験	64

5.1	実験結果と考察	64
6	ラットの尾のコラーゲンの静的小角散乱実験	65
6.1	実験条件	65
6.2	実験結果と考察	65
7	結び	75
付録 1	Type2 検出器で得られた自由落下するハサミの画像	77

List of Figures

Figure 2.1	位置敏感比例計数管のブロック図	12
Figure 2.2	積分型位置敏感比例計数管のブロック図	12
Figure 2.3	検出器の外観	13
Figure 3.1	計測システムのブロック図	21
Figure 3.2	積分型と計数型を同時実現する接続方法	22
Figure 3.3	信号処理回路の詳細	23
Figure 4.1	Type1 検出器の概略図	33
Figure 4.2	Type1 検出器と周辺回路のブロックモデル	33
Figure 4.3	Type1 検出器のガス増幅率	34
Figure 4.4	幅の細いスリット (0.45mm) を通過させて得られた像	34
Figure 4.5	幅を細いスリット (0.45mm) を通過させた場合の計数特性	35
Figure 4.6	幅を広いスリット (80mm) を通過させた場合の計数特性	35
Figure 4.7	線型計数領域での測定像	36
Figure 4.8	飽和領域での測定像	36
Figure 4.9	Type2 検出器の概略図	37
Figure 4.10	Type2 検出器と周辺回路のブロックモデル	37
Figure 4.11	Type2 検出器のガス増幅率	38
Figure 4.12	入射位置による収集効率	38
Figure 4.13	Type2 検出器の計数特性	39
Figure 4.14	Type2 検出器の線型計数領域における計数特性	39
Figure 4.15	X線管からの広角入射による像 (線型領域)	40
Figure 4.16	X線管からの広角入射による像 (飽和領域)	40
Figure 4.17	物体を置いた状態での像 (線型領域)	41
Figure 4.18	物体を置いた状態での像 (飽和領域)	41
Figure 5.1	検知物体のない画像のヒストグラム	50
Figure 5.2	ハサミ検知を検知した画像のヒストグラム	50
Figure 5.3	Type1 検出器による自由落下するハサミの画像	51

Figure 5.4	自由落下分を補正したハサミの画像	51
Figure 5.5	しきい値: 1500 (ハサミの形状)	52
Figure 5.6	しきい値: 500 (ハサミの金属部分)	52
Figure 5.7	しきい値: 1800 (形状が強調された部分)	53
Figure 5.8	Type1 検出器より得られたワイヤを被検体とした像: 管電流 2mA, 測定時間 250ms	53
Figure 5.9	Type1 検出器より得られたワイヤを被検体とした像: 管電流 20mA, 測定時間 1ms	54
Figure 5.10	Type1 検出器より得られたワイヤを被検体とした像: 管電流 20mA, 測定時間 250ms	54
Figure 5.11	Type1 検出器より得られた管電流 2mA の条件におけるワイヤを被検体とした画像	55
Figure 5.12	Type1 検出器より得られた管電流 20mA の条件におけるワイヤを被検体とした画像	55
Figure 5.13	Type2 検出器による自由落下するハサミの画像	56
Figure 5.14	金属部分を示す画像	56
Figure 5.15	強調部分を示す画像	57
Figure 5.16	4種類のワイヤを検出した像: 6.5×10^2 cps/mm ² , 250ms	57
Figure 5.17	4種類のワイヤを検出した像: 1.8×10^7 cps/mm ² , 1ms	58
Figure 5.18	4種類のワイヤを検出した像: 1.8×10^7 cps/mm ² , 250ms	58
Figure 6.1	カエルの筋肉を被検体として得られた像: P10 ガス (HV:1.9kV)	68
Figure 6.2	カエルの筋肉を被検体として得られた像: Xe ガス (HV:1.9kV)	68
Figure 6.3	カエルの筋肉を被検体として得られた像: Xe ガス (HV:2.0kV)	69
Figure 6.4	カエルの筋肉を被検体として得られた像: Xe ガス (HV:2.1kV)	69
Figure 6.5	エアロジルの散乱像 (飽和領域): Xe ガス (HV:2.1kV)	70
Figure 6.6	エアロジルの散乱像: Xe ガス (HV:2.1kV)	70
Figure 6.7	動的小角散乱実験 (5回の刺激): Xe ガス (HV:2.1kV)	71
Figure 6.8	動的小角散乱実験 (142ch 187ch): Xe ガス (HV:2.1kV)	71
Figure 6.9	動的小角散乱像 (1回の刺激)	72
Figure 6.10	ラットの尾のコラーゲンの散乱像	72

Figure 6.11	積分型による散乱像	73
Figure 6.12	電荷分割方式による測定像	73
Figure A1.1	自由落下するハサミの画像1	78
Figure A1.2	画像1の金属部分を抽出した画像	78
Figure A1.3	画像1の輪郭が強調されたことを示す画像	79
Figure A1.4	自由落下するハサミの画像2	79
Figure A1.5	画像2の金属部分を抽出した画像	80
Figure A1.6	画像2の輪郭が強調されたことを示す画像	80

List of Tables

Table 2.1	位置検出型検出器の分類	5
Table 3.1	計測システムの仕様	16
Table 4.1	Type1, Type2 検出器の仕様	25
Table 6.1	試作検出器の仕様	60
Table 6.2	検出器の仕様	65

第1章 序論

近年、PL法の施行に伴い、異物検出の分野において画像検出が行えるシステムの必要性が増してきている。物体の移動速度が既知である場合や自由落下する物体の画像検出には、必ずしも2次元検出器を用いる必要はなく、時分割測定が可能な1次元位置検出器 (Position Sensitive Detector ; PSD) で対応可能である。また、異物検出では、金属性の混入物のみを発見したい場合がある。この場合、光を主体とする検出方法よりも、X線を用いるのが一般的である。

X線透過画像を得る産業用CTやイメージ検出では、電離箱、半導体検出器といった検出器が使われている。本論文では、高速にX線透過画像を得る検出器の一つとして積分型位置敏感比例計数管 (Charge-Integrating Position-Sensitive Proportional Counter ; CIPSPC) を提案する。CIPSPCは、X線領域に有感感度を持つ1次元のPSDである。10keV程度のX線での利用を目的として開発され、比例計数管でガス増幅を利用しているため、1次電離から得たイオンの数千倍の電荷を検出器から得ることができる。被検体の密度や厚さによっては、電離箱よりも低エネルギー、低強度 (数) のX線で高速に透過画像の検出ができる。

Type1, Type 2の二つのCIPSPCを製作し、この二つの検出器を用いてCIPSPCの画像検出器としての評価を行った。有感長は共に128mmであり、この有感部分を320chに分けている。320chを、検出器後段の専用に開発した信号処理回路により、最高1msで読み出すことができる。連続した読み出しでは、最大250回の読み出し結果を記録することができ、320×250画素の画像を得ることができる。

画像検出用途における性能評価実験として、自由落下するハサミの画像検出実験を行った。得られた画像を処理することで、ハサミの形状及び、材質の弁別が可能であるかを調べた。さらに、針などの異物検出への応用の可能性を探るため、直径を変えたワイヤを検出する実験も行った。本論文では、以上の実験により高速X線透過画像検出器としてのCIPSPCの開発結果について述べている。

また、高エネルギー物理学研究機構放射光実験施設においてCIPSPCを用いた小角散乱実験を行った。被検体としてカエルの筋肉、エアロジル、ラットの尾のコラーゲンをを用いている。CIPSPCは、測定原理より明らかなように時分割測定に適している。この特徴を生かしカエルの筋肉を被検体とした実験では、電気的刺激を与え筋肉を動かし、その様子を時分割測定する動的な小角散乱実験を行った。ラットの尾のコラーゲンを被検体として行った実験では、積分型での測定の他に計数型である電荷分割方式での測定も行った。以上の実験結果として得られた、放射光を光源とする動的な小角散乱実験結果やCIPSPCの特徴についても述べる。

参考文献

[1] 岩井喜典・斎藤雄督・今里愁一 編著：“医用画像診断装置”，コロナ社

第3章 積分型位置敏感比例計数管

1. 位置検出器

位置検出器は、入射粒子の位置を検出する装置である。位置検出器の種類は、検出原理によって大きく異なる。本論文では、位置検出器として、積分型位置敏感比例計数管を用いる。積分型位置敏感比例計数管は、入射粒子の位置を検出する装置である。積分型位置敏感比例計数管は、入射粒子の位置を検出する装置である。積分型位置敏感比例計数管は、入射粒子の位置を検出する装置である。

積分型位置敏感比例計数管は、入射粒子の位置を検出する装置である。積分型位置敏感比例計数管は、入射粒子の位置を検出する装置である。積分型位置敏感比例計数管は、入射粒子の位置を検出する装置である。

積分型位置敏感比例計数管は、入射粒子の位置を検出する装置である。積分型位置敏感比例計数管は、入射粒子の位置を検出する装置である。積分型位置敏感比例計数管は、入射粒子の位置を検出する装置である。

図 3.1 積分型位置敏感比例計数管の構造

項目	説明
構造	積分型位置敏感比例計数管の構造は、入射粒子の位置を検出する装置である。
原理	積分型位置敏感比例計数管の原理は、入射粒子の位置を検出する装置である。
特徴	積分型位置敏感比例計数管の特徴は、入射粒子の位置を検出する装置である。

第2章 積分型位置敏感比例計数管

1 位置検出器

位置検出器は、X線の入射位置を検出し、位置的に入射するX線の強度を調べる検出器である。科学技術分野ではX線回折実験やX線小角散乱回折実験等の材料分析に広く使用されている。天文観測においては、X線電波観測用に人工衛星に搭載されて使用されている例もある。

また、産業用としては、工業においては非破壊検査等に利用されている。空港等における手荷物検査がそれである。

X線の位置検出の方法は、1個1個を処理するパルス計数型と一定時間に来るX線の強度を積分して計数する積分型の二つに分類できる。代表的なX線領域における位置検出型検出器の分類をTable 2.1に示す。

Table 2.1 位置検出型検出器の分類

計数方式	1次元	2次元
パルス計数型	電荷分割方式位置敏感比例計数管	2次元位置敏感比例計数管 マイクロストリップ
	ディレイライン方式位置敏感比例計数管 1次元半導体検出器	
積分型	積分型位置敏感比例計数管	X線フィルム イメージングプレート X線テレビ

パルス計数型の特徴として低計数領域における検出において感度が高いことが上げられる。

一方，積分型の特徴としては以下のことがあげられる。位置検出における位置分解能に優れている。高計数領域における位置検出に対応できる。

2 位置敏感比例計数管

2.1 位置敏感比例計数管

位置敏感比例計数管は，大きく大別して位置検出の方法から電荷分割方式とディレイライン方式の二つに分けることができる。また，電荷分割方式であっても，アノード線にインピーダンスを持った方式(アノード読み出し方式)，カソード側にインピーダンスを持たせた方式(カソード読み出し方式)，カソード側の形状を工夫してキャパシタンス容量を変えたバックギャモン方式といった方式など，様々な読み出し方式がある。

2.2 電荷分割方式PSPCの検出原理

アノード読み出しの電荷分割方式PSPCの検出器部分の概略をFigure 2.1に示す。カウンタガスを充填した検出器のウィンドウからX線が入射すると，アノード付近でガス増幅を起こす。ガス増幅によって生まれた電荷 Q は，抵抗値を持ったアノードを通して両側に分かれる。分かれた電荷 Q_A と Q_B はプリアンプで積分され，それぞれ電圧 V_A ， V_B に変換される。検出器の有効長を l ，有効長に対してのFigure 2.1に示す入射位置を x としたとき，以下の関係式が成り立つ。

$$Q = Q_A + Q_B \quad (2.2.1)$$

$$Q_A = \frac{l-x}{l}Q \quad (2.2.2)$$

$$Q_B = \frac{x}{l}Q \quad (2.2.3)$$

$$V_A \propto Q_A \quad (2.2.4)$$

$$V_B \propto Q_B \quad (2.2.5)$$

ここで，

$$\frac{V_A}{V_A + V_B} = \frac{\frac{l-x}{l}Q}{\frac{l-x}{l}Q + \frac{x}{l}Q} \quad (2.2.6)$$

とした関係についての x について整理すると，

$$x = \frac{V_B}{V_A + V_B}l \quad (2.2.7)$$

とした結果を得ることができる。

(2.2.7)式より、 l が既知であれば V_A と V_B から x を特定できることがわかる。

2.3 電荷分割PSPCの信号処理

実際の電荷分割PSPCでは、プリアンプからの出力信号である V_A と V_B をメインアンプ等で整形し、(2.2.7)式にもとづいて演算して位置検出を行う。

アナログ演算で行う場合は、この整形した V_A と V_B を(2.2.7)式にもとづいて演算を行い演算結果をA/D変換器でデジタル信号に変換する。得られた値が位置検出結果となる。

デジタル演算で行う場合は、整形した V_A と V_B をA/D変換器でデジタル信号に変換する。その変換結果を(2.2.7)式にもとづいてデジタル演算することで、位置検出結果を得ることができる。

現在、電荷分割PSPCでは、デジタル信号処理を行うのが一般的である。

3 積分型位置敏感比例計数管

3.1 CIPSPCの開発

高エネルギー物理学研究機構の放射光実験施設に代表されるように、それまでX線の光源であったX線管よりも単色(エネルギースペクトルが均一)で強力(X線の発生数)な放射光がX線光源として利用できるようになった。CIPSPCは放射光での利用を目的に開発された検出器であり、1981年にプロタイプが発表された積分型の位置検出器である。特に動的X線小角散乱実験用としての利用を目的とされた。1984年には実用器が試作された。その実用器をもとに行った、かえるの筋肉の時分割測定実験などの実験結果が報告されている。

近年のアナログマルチプレクサやA/D変換器等のエレクトロニクスデバイスの向上は著しく、1994年から再び開発をすることになった。開発当初の実用器では時分割測定の最小時間分解能は20ms程度であったが、今回発表する検出器においては1msまで向上するに至っている。

3.2 CIPSPCの検出原理

CIPSPCの概略をFigure 2.2に示す。また、検出器の外観をFigure 2.3に示す。検出器に希ガスを主成分とするカウンタガスを流し、アノード線には高電圧を印可する。ガス中をX線が通過すると気体原子を電離し、電子とイオンの対が生ずる。この1次電離で生じた電子が強い電場によって加速されて、さらに、気体原子を電離する。このような電離がねずみ算的に生じて電子が増殖し、いわゆるガス増幅を起こす。このガス増幅によって生じる電荷を利用して位置検出を行う。

検出器は、多数のカソードストリップで構成されるマルチカソードを有する。カソードストリップには、それぞれコンデンサがついている。ガス増幅によって生じた電荷は、カソードストリップを通してコンデンサに蓄積される。コンデンサに蓄積している電荷を、アナログマルチプレクサを介し周期的に読出す。読み出した電荷は、1つのプリアンプによって積分され、電圧に変換される。プリアンプからの出力を V_0 、電荷吸収係数を k 、1つの入射X線による1次電離から発生したイオン量を q 、ガス増幅率を A 、1つのカソードストリップで吸収するX線強度を I 、プリア

ンプの静電容量を C_f 、アナログマルチプレクサの読み出し周期を T とすると、

$$V_o = \frac{kqAIT}{C_f} \quad (2.3.1)$$

となる。カソードストリップ毎にこの走査を行い、単位時間に入射した X 線の位置検出とその計数を行う。問題となるのは、アナログマルチプレクサとプリアンプで用いられているアナログスイッチの暗電流である。これらは、あらかじめバックグラウンドとして測定し、測定データから差し引くことで対応する。また、後述のように、ガス増幅率 A は高計数率領域では低下するので、出力 V_o の X 線強度に対する比例性が悪くなる。

3.3 CIPSPC の特徴

CIPSPC の検出原理から以下の特徴をもつ PSD であることが言える。

- (1) X 線強度は (2.3.1) 式により電圧情報として求められる。したがって、アノード電圧、静電容量、読み出し周期を調整することで X 線入射強度に柔軟に対応できる。
- (2) 積分処理されるため、計数型の信号処理回路のようなデッドタイムがなく、強い強度の場合にも適用できる。
- (3) 固定したマルチカソードから計数結果を読み出す方式のため、位置検出特性が安定している。
- (4) 時分割測定に適している。

参考文献

- [1] 加藤貞幸 著：“放射線計測”，培風館
- [2] 木村逸郎 訳 グレン F. ノル 著：“放射線計測ハンドブック”，日刊工業新聞社
- [3] K.Hasegawa, K.Mochiki and A.Sekiguchi, IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol.NS-28, No.4(1981)3660-3664.
- [4] K.Mochiki and K.Hasegawa, Nuclear Instruments and Methods in Phys.Res., A234(1985)593-601.
- [5] K.Hasegawa, K.Mochiki, M.Koike, Y.Satow, H.Hashizume and Y.Iitaka, Nuclear Instruments and Methods in Phys.Res., A252(1986)158-168.



図 2.3.1 CIPSPC の検出原理図

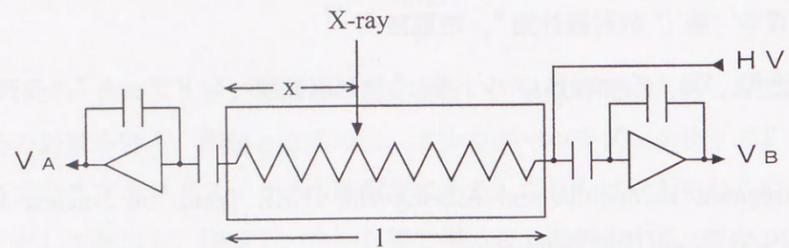


Figure 2.1 位置敏感比例計数管のブロック図

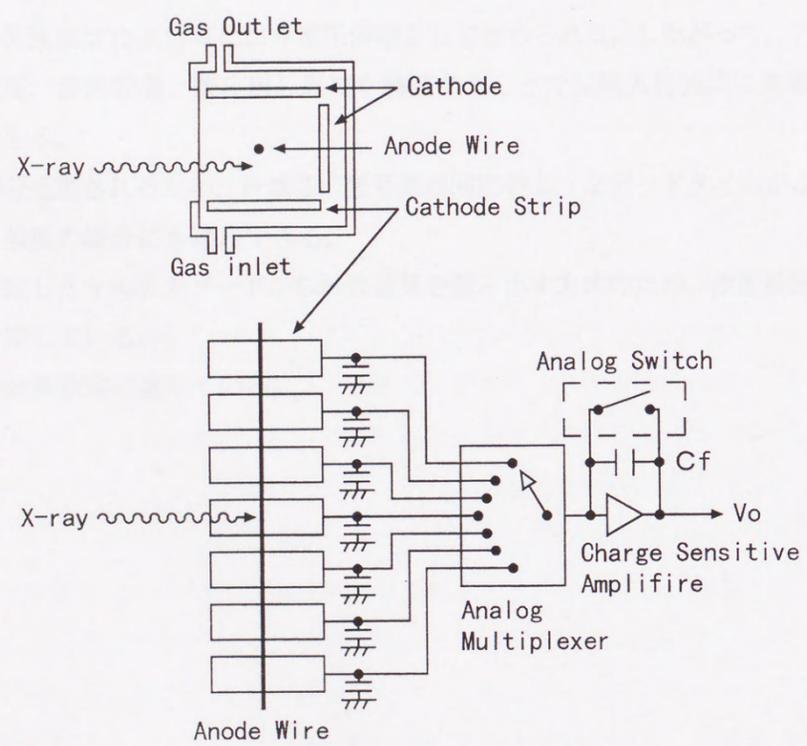


Figure 2.2 積分型位置敏感比例計数管のブロック図

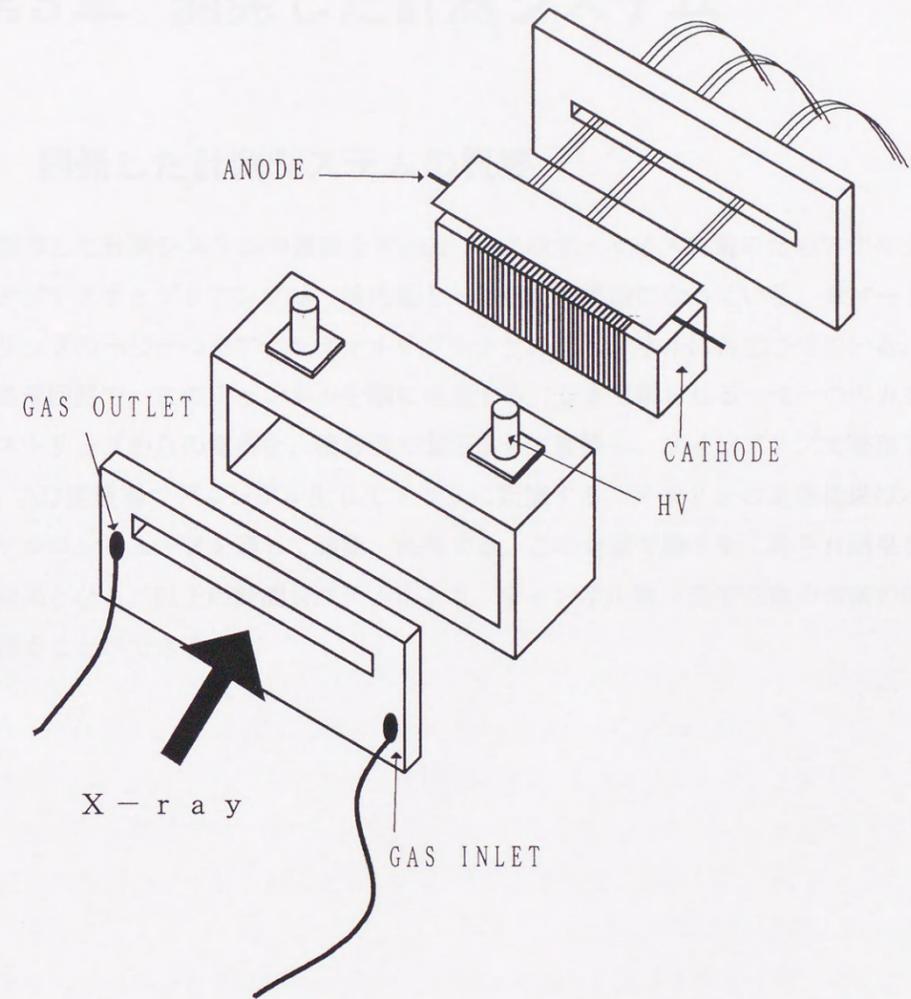


Figure 2.3 検出器の外観

第3章 開発した計測システム

1 開発した計測システムの概要

製作した計測システムの概要を Figure 3.1 に示す。ノイズ対策のためアナログマルチプレクサとプリアンプは、検出器と一体化した構造になっている。カソードストリップの一つ一つをアナログマルチプレクサのチャンネルに対応させている。信号処理回路で、このチャンネルを順に走査する。走査で得られる一つ一つのカソードストリップからの電荷を、積分器で電圧信号に変換し、メインアンプで整形した後、AD変換器でデジタル化してメモリに記憶する。メモリ上の走査結果はパーソナルコンピュータを通して確認、保存する。この走査で繰り返し得られ結果が測定結果となる。以上の計測システムにより、チャンネル数×走査回数画素の画像を得ることができる。

2 開発した計測システムの仕様

開発した計測システムの主要な仕様を Table 3.1 に示す。

Table 3.1 計測システムの仕様

チャンネル数	320ch(最大 360ch)
検出有効長	128mm
最小時間分解能	1ms
最大走査回数	250回
A/D変換器変換分解能	12bit

今回開発した検出器の仕様からチャンネル数は320chとなっているが、信号処理回路としては一回の走査において最大360chまでのチャンネルの走査が可能となっている。後述の今回開発した二つの検出器の有効長は共に128mmである。最小時間分解能は、最大360chのチャンネルを走査し、得られた360chのデータをA/D変換器で変換してメモリに記憶させるのにかかる時間である。一つのカソードの積分時間でもある。一つのチャンネル(カソード)の読みだし自体は、 $2\mu\text{s}$ で行っている。

以上の計測システムより、 320×250 画素の画像を得ることができる。A/D変換器の変換分解能は12bitではあるが、アナログマルチプレクサの暗電流等をバックグラウンドとして差し引いたり、後述する強調部分の余裕を持たせるため画素の階調は12bit(4095階調)よりは少なくなる。

また、本計測システムは画像を最大16回足し合わせる機能を有している。この機能は動的小角散乱実験等において短時間に繰り返し実験が必要な場合に有効な機能である。

計測システムは、パーソナルコンピュータからのスタート、外部入力信号によるスタートが可能になっている。外部入力信号によるスタートができるため、自由落下するハサミの画像の検出実験や、かえるの筋肉の動的小角散乱実験等に本計測システムの使用を可能にしている。

また、後述するType1検出器はFigure 3.2で示す接続をすることで、計数型での計測も可能な構成とした。

3 計測システムの信号処理回路

3.1 信号処理回路の概要

CIPSPC用に専用に開発した信号処理回路のブロック図をFigure 3.3に示す。計測システムの信号処理回路は、Multiplexer&ChargeAmpUnit, MultiplexersControllerUnit, ADC&MemoryUnitの3つのUNITに分けることができる。

Multiplexer&ChargeAmpUnitは検出器と一体化した筐体ないに納められている。最大6枚のボードである。一つのボードには16chアナログマルチプレクサICが4つ実装されている。アナログマルチプレクサICの電源ピン隣のチャンネルは、電源ピンからのリーク電流が大きいため使用していない。よって一枚のボードで60チャンネル、60枚のカソードストリップの選択が可能となっている。電荷積分の主要部分である電荷積分器もこのボードに実装されている。客ボードに実装されているが、一つのボードの電荷積分器のみを使用している。

MultiplexersControllerUnitは、Multiplexer&ChargeAmpUnitに対しては最大6枚のボードを制御するユニットであり、ADC&MemoryUnitに対しては走査したアナログデータを中継する役割をおっている。MultiplexersControllerUnitとADC&MemoryUnitは、ケーブル接続で5m程度離れた配置が可能である。

ADC&MemoryUnitは、全体の制御や、A/D変換器による収集データのデジタル化、データの保持を行うユニットである。データやスタート信号をパーソナルコンピュータとやり取りするI/Oもここに実装されている。

3.2 アナログマルチプレクサ

従来、CIPSPCにおいて入力保護回路無しのアナログマルチプレクサを使用するのは難しかった。ガス増幅を起こさせるためにアノード・グランド間に高電界が必要である。また、出力ゲインを必要とするときアノードには高電圧を印可する必要がある。こういった状況では、放電も起こりやすい。ひとたび放電が起こると、入力保護回路無しのアナログマルチプレクサは壊れてしまう。この対策のために、従来のCIPSPには、入力保護回路付きの製品を使わなくてはならなかった。ただし、保護回路付きの製品は、ON抵抗が1kΩと大きく、スイッチングスピードも遅いという難点があった。

今回開発した計測システムでは、アナログマルチプレクサにアナログ・デバイゼズ社製ADG406を使用している。ESD対策(静電気対策)がなされた製品である。以前使用していた入力保護回路付きのアナログマルチプレクサに比べ、ON抵抗が低く、速い読みとりができるので、1msのスキャンが可能となった。入力保護回路がないにもかかわらず、今回報告する実験の中で放電等でこのICが壊れる例は一度もなかった。



参考文献

- [1] 武藤彰英 長谷川賢一：“積分型位置敏感比例計数管と画像検出への応用”計測自動制御学会論文集 Vol.35, No1(1999)46-51
- [2] 武藤彰英 長谷川賢一：“非破壊検査用積分型位置敏感比例計数管の開発”放射線 Vol.24, No4(1998)93-100
- [3] 長谷川賢一 著：“パルス計測”，コロナ社

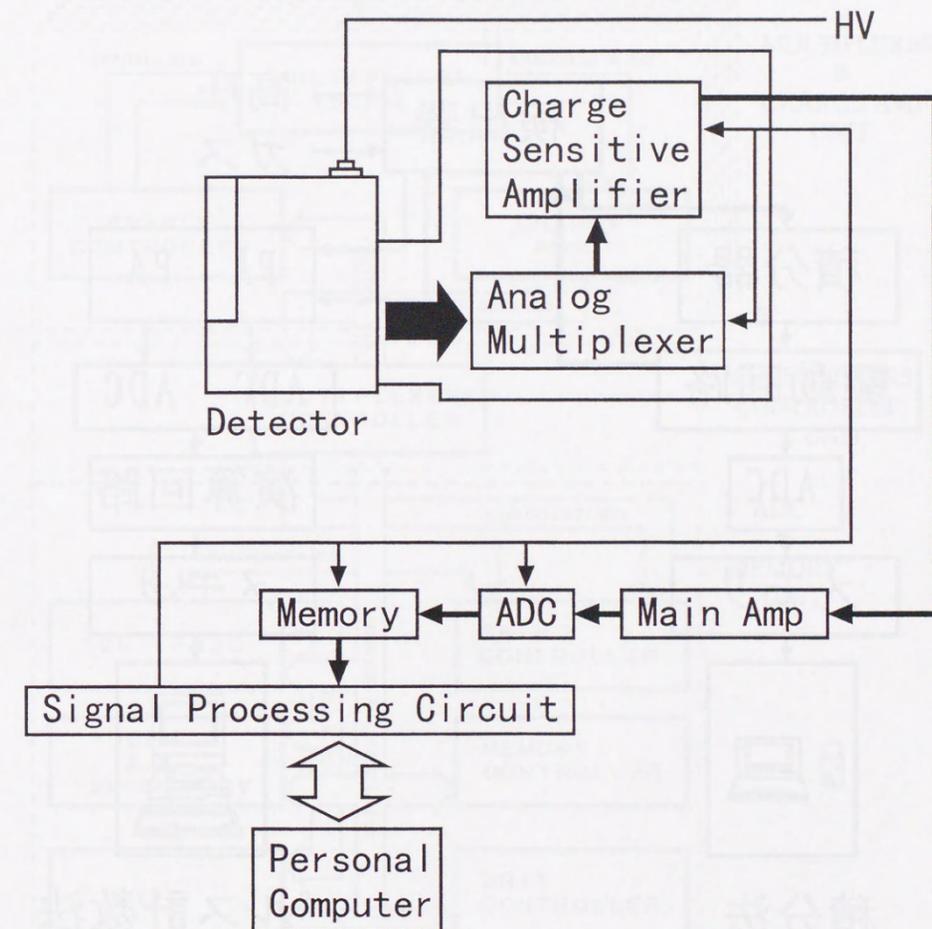


Figure 3.1 計測システムのブロック図

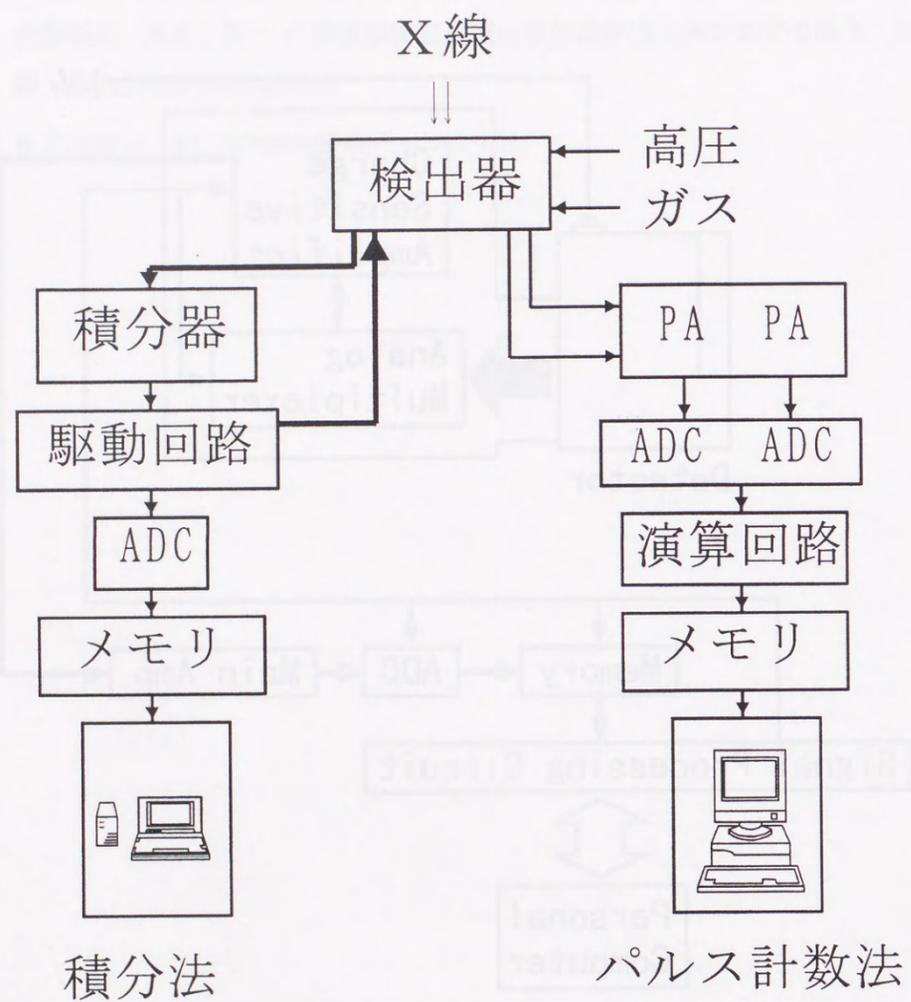


Figure 3.2 積分型と計数型を同時実現する接続方法

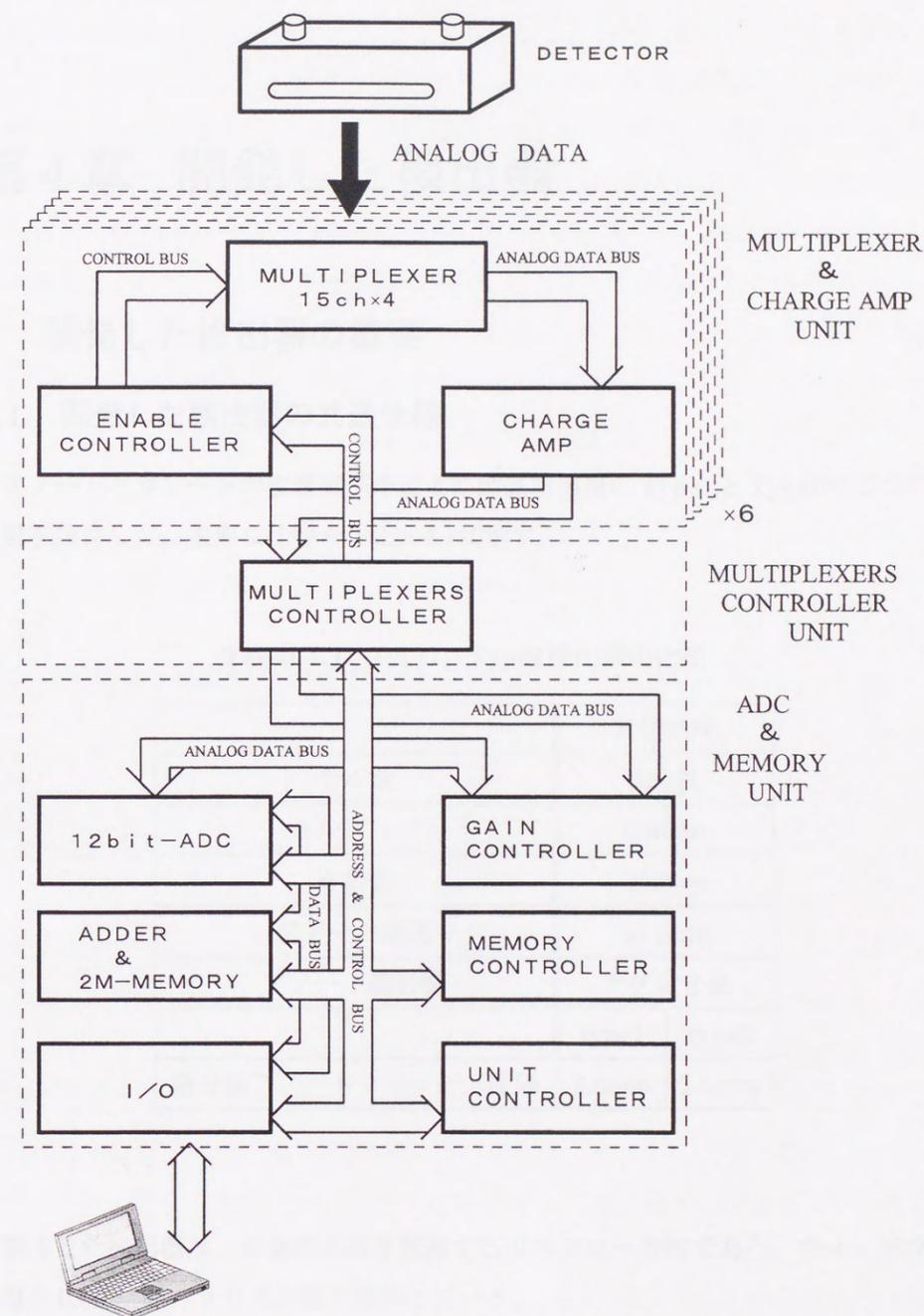


Figure 3.3 信号処理回路の詳細

第4章 開発した検出器

1 開発した検出器の概要

1.1 開発した検出器の共通仕様

アノードとカソードの位置関係を変えた画像検出用の Type1 と Type2 の2つの検出器を製作した。主要な仕様を Table 4.1 に示す。

Table 4.1 Type1, Type2 検出器の仕様

	共通仕様	
セル数	320 枚	
セルピッチ	0.4mm	
有効長	128mm	
アノード線径	55 $\mu\text{m}\phi$	
アノード線材質	チタン合金	
	type1	type2
積分型アノード・カソード間隔	2.5mm	1.5mm

製作した検出器は、少量のガスを補給するガスフロー方式である。ウィンドウには厚さ 0.5mm のベリリウム板を使用している。

積分側のマルチカソードは、0.3mm の真鍮板とプラスチックの絶縁板を組み合わせ接着したものである。カソードストリップのピッチは 0.4mm である。この表面を研磨することにより平坦度の高いカソード面を得られる。

アノード線に用いた $55\mu\text{m}\phi$ の Ti 合金線は釣り糸として販売されているもので、強い力で張ることができる。強い力で張ることができるため、張りが保たれガス増幅率が一樣になり、高電圧をかけてもアノード線が引き寄せられることがないので、高い感度の一樣性が得られている。アノード線には、このワイヤを2本用いている。

Y 軸方向から入射する X 線に対して位置検出を行う。検出空間の Y 軸方向の奥行きは、20mm である。

2 Type1 検出器

2.1 Type1 検出器の仕様

製作した Type1 検出器の概要を Figure 4.1 に示す。また、信号処理回路も含めたブロック図を Figure 4.2 に示す。Type1 検出器には、CIPSPC として位置検出を行う積分法の他に、入射する1つ1つの X 線に対して処理を行う電荷分割法でも位置検出が可能な構成とした。X 線は Figure 4.1(a) の Y 軸方向から入射する。CIPSPC で用いるカソードストリップの対面は電荷分割型 PSPC のカソードストリップとなっている。積分法と電荷分割法の位置検出を同時に実現させているため、アノードとカソードストリップの間隔を Figure 4.1(b) で示す位置関係にした。積分法で用いるカソードストリップとアノードワイヤとの間隔は 2.5mm である。また、計数法でのカソードストリップとアノードワイヤとの間隔は 7.5mm である。これは、積分側のカソードでの電荷収集の効率を上げたいためである。

2.2 Type1 検出器の諸特性

本検出器は、アノード側から信号を読み出した場合、比例計数管として動作する。アノード側から測定した検出器のガス増幅率を Figure 4.3 に示す。アノードに印可する電圧を 1600V から 50V ずつ 1900V まで変化させて測定を行った。

アノード側から検出器の検出効率を測定した。検出効率は 28.6% であった。アノードに印可する電圧を変化させても、検出効率に変化はなかった。

0.5mm×0.45mm のスリットを通過させた X 線を検出器の有効長 128mm の中央に入射して、有感面に 0.45mm の幅の X 線が入射したときの計数特性を測定した。アノードに印可する電圧は 1600V とした。X 線管の管電流を変化させた。X 線の発生数は管電流に比例する。測定時間は 250ms である。Figure 4.4 で示す像が得られる。1つのチャンネルの計数特性を Figure 4.5 に示す。X 軸は検出効率をもとにした計数すべき X 線のカウント数である。Y 軸は低計数率領域での変換効率を用いて出力電圧を計数値に変換した積分法の計数結果である。計数すべき1秒間のカウント数を n 。積分法で測定された計数率を M 、検出器の不感時間を $\tau = 2.4\mu\text{s}$ としたとき、

$$M = \frac{n}{1 + n\tau} \quad (4.2.1)$$

に従った。(4.2.1)式は放射線検出器の不感時間から起こる計数の数え落としを補正するのに用いられる式である。この検出器では、ガス増幅率が高計数率領域での空間電荷効果の発生で低下するので、計数特性が変化するが、計数結果をこの(4.2.1)式で補正できる。この式から M/n が90%に低下する n を求めると、 5×10^4 cps/ch になることがわかった。また、この入射状況におけるピークの半値幅は、線形ではかれる範囲では3ch(1.2mm)であり、非線形領域では4ch(1.6mm)であった。

0.5mm×80mmのスリットを通過させたX線を検出器の有効長128mmの中央に入射して、有効長の広い範囲にX線が入射したときの計数特性を測定した。測定時間は250msである。80mmの幅で入射したX線の位置検出結果が得られた。中央の1つのチャンネルにおける計数結果をFigure 4.6に示す。この特性は、 τ を変化させても(4.2.1)式に従わなかった。原因として、広範囲にわたる空間電荷効果によって、(4.2.1)式では補正しきれないと考えられる。同様に、比例性が悪くなり、計数率が90%に下がる計数率は n で表示すると、 1.7×10^4 cps/ch になった。

狭い範囲と広い範囲に同時にX線を入射したときの測定像を得るため、幅20mmの中心に0.45mmの方形口を持つ遮蔽物を有感面の前面に置いて、広角(0.5mm×80mm)にX線を入射して測定を行った。Figure 4.7とFigure 4.8に得られた測定像を示す。測定時間は250msである。Figure 4.7は、線形で測定できる計数範囲以下でX線が入射したときの測定像である。Figure 4.8は、線形で測定できる計数範囲以上での測定像である。線形で測定できる計数範囲以上のX線が入射すると、Figure 4.8で示すように、幅広く入射させたときの出力は飽和し、細い入射ビームでのピーク値に対する比が線形領域での比より小さくなる。また、幅広入射のときは中央が下がり、結果としてエッジが上がるようになる。これは、X線の入射の状況により、チャンネルごとの計数特性がFigure 4.6の斜線で示す領域S内で変化するためである。

3 Type2 検出器

3.1 Type2 検出器の仕様

Type2 検出器は、Type1 検出器の実験結果の検討を経て改良したものである。Figure 4.9に概要を示す。また、信号処理回路も含めたブロック図をFigure 4.10に示す。Type1の検出器の評価からアノードとカソードの位置関係を変更し、位置分解能と計数効率の改善を試みた。また、計数型電荷分割法の機能は省略している。

3.2 Type2 検出器の諸特性

本検出器はアノードから信号を読み出すことができ、パルス計数の比例計数管としても動作する。Type2 検出器について、カウンタガスにP10ガス(Ar90%, CH₄10%)を使用した場合のガス増幅率をCuターゲットのX線管からのダイレクトビームを用いて測定した。測定結果をFigure 4.11に示す。Cuの特性X線エネルギーは8keVである。検出器内のガス圧は1気圧とした。アノードに印可する電圧を1200Vから1700Vまで変化させて測定を行った。アノード側から検出器の検出効率を測定したが、アノード電圧が1400Vのとき、検出効率は23%であった。アノードに印可する電圧を変えても検出効率はほとんど変化しなかった。

以下の実験は、カウンタガスにP10を使用し、アノード電圧を1400Vにして行っている。

Type2 検出器について、Figure 4.9(a)のZ軸の入射位置による積分型のカソードでの電荷収集の違いを測定した。検出器の有感面の直前に、0.5mm(Z軸方向)の幅でX線が入射するようにスリットを置き、X線ビームの入射数を一定にするため、0.5mmずつ検出器をずらして測定を行った。Type2 検出器についての測定結果をFigure 4.12(a)に示す。アノード線の位置をZ軸の原点として、積分型のマルチカソードを正方向とし、他のカソードを負方向としている。電荷収集が最大の入射位置を1とし、各測定点での結果を比率で示している。

狭い範囲(X軸方向, 0.45mm)でX線が入射した場合と広い範囲(75mm)で入射した場合の計数特性を調べた。Z軸方向の幅は、0.5mmとし、Figure 4.12(a)で示す収集が多い位置に入射して、管電流を変化させると同時にCu板を置いて、X線の強度を変えて測定を行った。X線管と検出器の有感面との距離は32cmである。1msの測

定時間で連続250回測定し、チャンネル毎に足し合わせた1つのチャンネルにおける出力結果をFigure 4.13に示す。Figure 4.13はX軸は検出効率を用いて計数すべきX線のカウント数を計数率に換算した値であり、Y軸は出力電圧を計数値を変換した積分法の計数結果である。

狭い範囲(0.45mm)の計数特性は、CIPSPCで測定した計数率をM cps/ch、計数すべきカウント数を計数率で表したものをn cps/ch、検出器の不感時間を $t=1.85 \mu s$ としたとき、(4.2.1)式に従った。検出器に入射するX線が狭い範囲の場合、(4.2.1)式で補正できると言える。M/nが90%のとき、nは 6×10^4 cps/chであった。また、この入射状況におけるピークの半値幅は、線形ではかかれる範囲では2ch(0.8mm)であり、非線形領域では3ch(1.2mm)であった。

広い範囲(75mm)においてM/nが90%までの範囲は、 2×10^4 cps/chであった。また、その特性は、(4.2.1)式には従わなかった。原因として、広範囲にわたる空間電荷効果によって、(4.2.1)式では補正しきれないということが考えられる。

ここで、広い範囲(75mm)における低計数率領域での計数特性をFigure 4.14に示す。低計数率領域での特性は、直線性が良く、その計数特性は狭い範囲(0.45mm)における計数特性と一致し、入射幅に依存していない。

4 CIPSPCの特徴

Type2検出器では、Type1検出器よりもマルチカソード・アノードの間隔を2.5mmから1.5mmに狭めたことにより、ガス増幅特性、細いX線を入射した場合の半値幅、線形で実験が行える計数特性範囲の増加が確認された。ガス増幅特性の改善は、よりX線が少ない低計数率領域で実験が行えることを示している。細いX線を入射した場合の半値幅の改善や、線形で実験が行える計数特性範囲の増加は、X線回折実験において重要である。

Type1, Type2の二つの検出器の基礎特性からわかる特徴として、高計数率領域では、Figure 4.6, Figure 4.13の領域Sで示されるX線の入射状況の違いによる計数特性の変化がある。ここでその違いが明確にわかる例として、低計数率領域におけるX線の入射で得られる像をFigure 4.15, Figure 4.17に示し、それらに対応した高計数率領域における像をFigure 4.16, Figure 4.18に示す。管電流をかえることでX線の発生数を変えた以外は同じ測定条件でありながら、明らかに違った像になっている。

このFigure 4.16, Figure 4.18にみられるX線の入射幅による計数特性の変化は、X線回折実験に使用する場合、回折像が正しく得ることができないため好ましくない。よって、X線回折実験等では、Figure 4.14で示すような線形での測定を実験的に確認された計数率領域で実験を行わなくてはならない。

しかし、被検体の画像を得る場合や、2値化等による特徴抽出においては、むしろ、物体の輪郭外を強調する現象といえる。Figure 4.16で示す像では、X線管の放射による立体角が飽和によってうち消されている。また、Figure 4.18では、被検体の輪郭外が強調されている。

参考文献

- [1] 武藤彰英 長谷川賢一：“積分型位置敏感比例計数管と画像検出への応用”計測自動制御学会論文集 Vol.35, No1(1999)46-51
- [2] 武藤彰英 長谷川賢一：“非破壊検査用積分型位置敏感比例計数管の開発”放射線 Vol.24, No4(1998)93-100

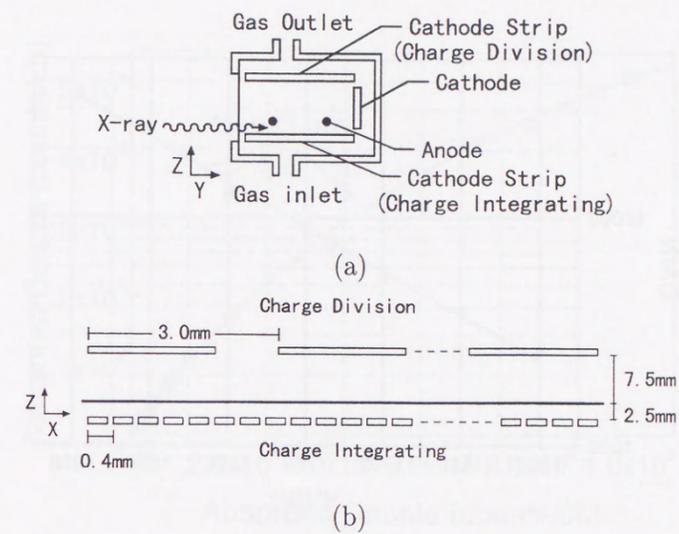


Figure 4.1 Type1 検出器の概略図

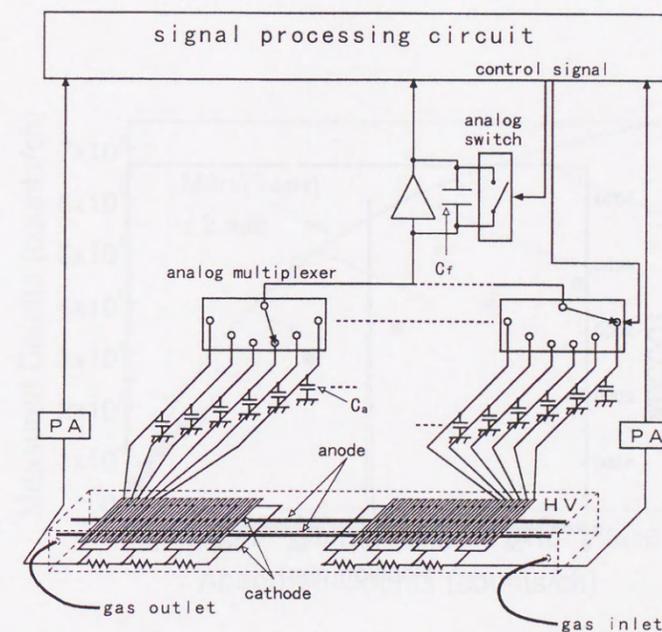


Figure 4.2 Type1 検出器と周辺回路のブロックモデル

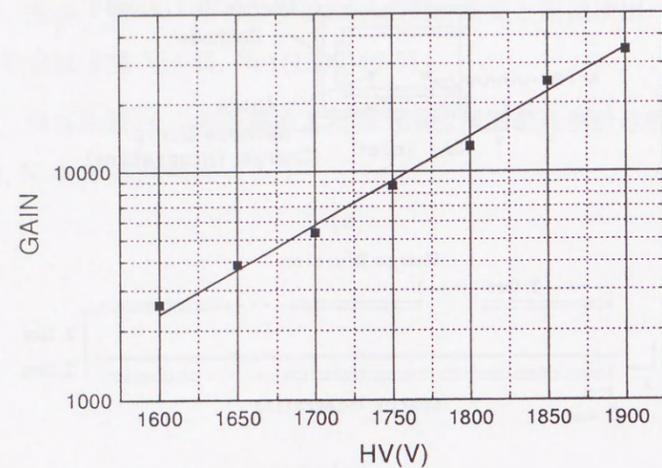


Figure 4.3 Type1 検出器のガス増幅率

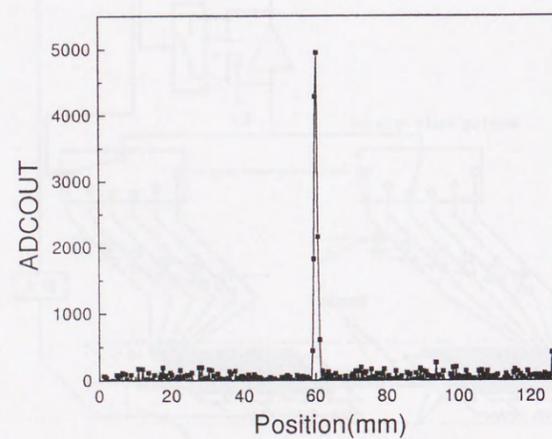


Figure 4.4 幅の細いスリット(0.45mm)を通過させて得られた像

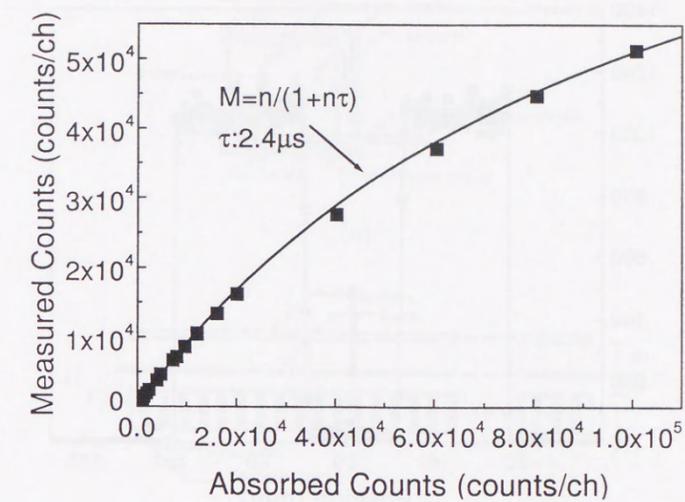


Figure 4.5 幅を細いスリット(0.45mm)を通過させた場合の計数特性

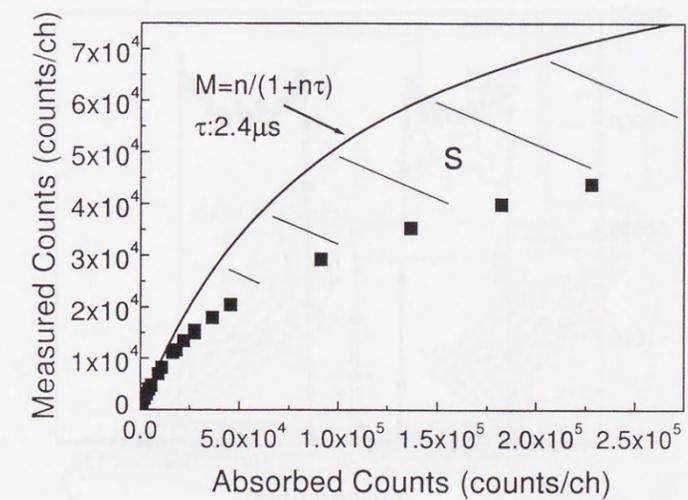


Figure 4.6 幅を広いスリット(80mm)を通過させた場合の計数特性

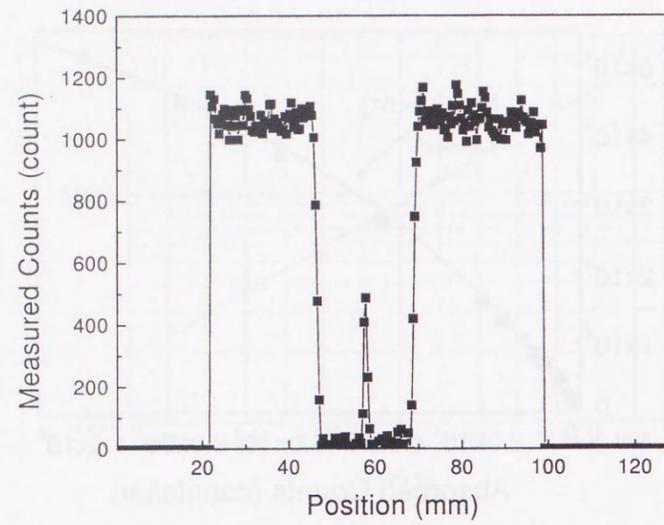


Figure 4.7 線型計数領域での測定像

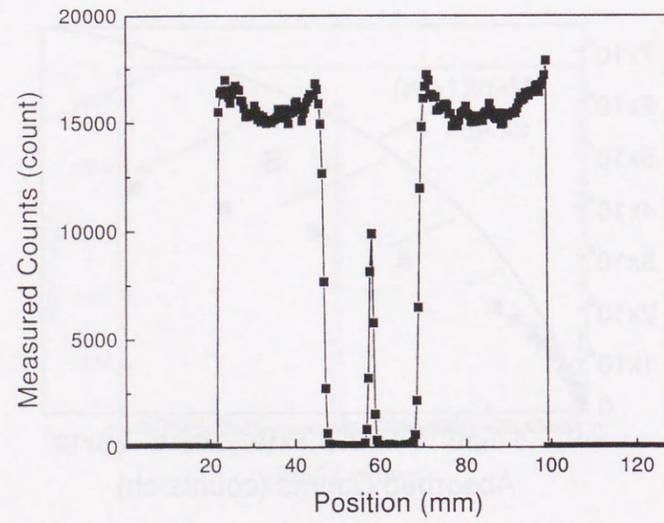
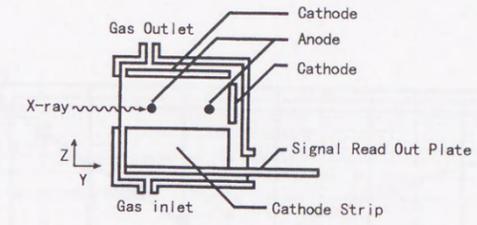
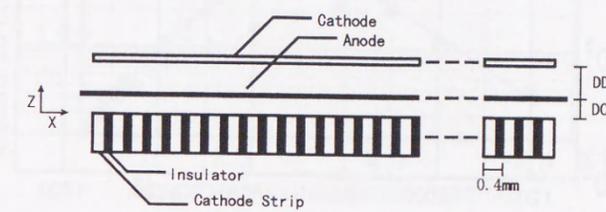


Figure 4.8 線型領域での測定像



(a)



(b)

Figure 4.9 Type2検出器の概略図

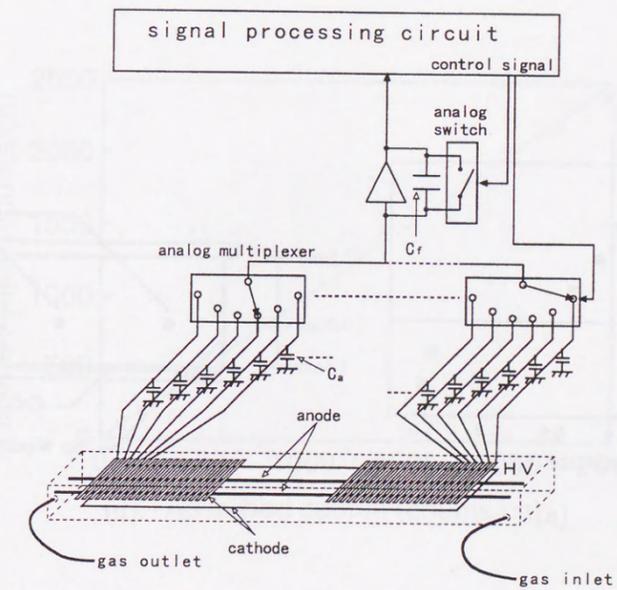


Figure 4.10 Type2検出器と周辺回路のブロックモデル

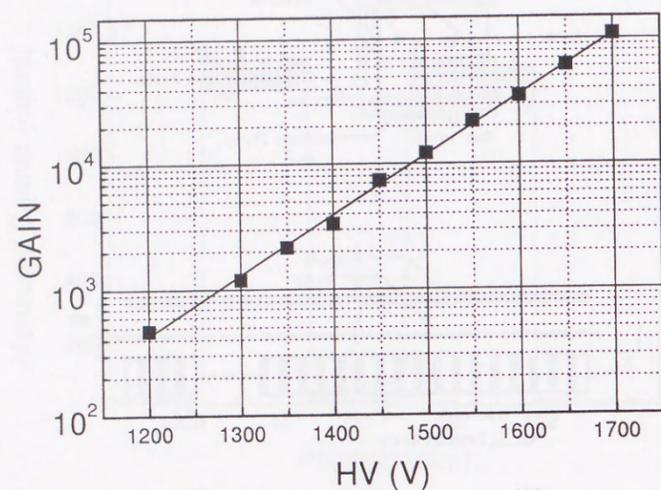


Figure 4.11 Type2検出器のガス増幅率

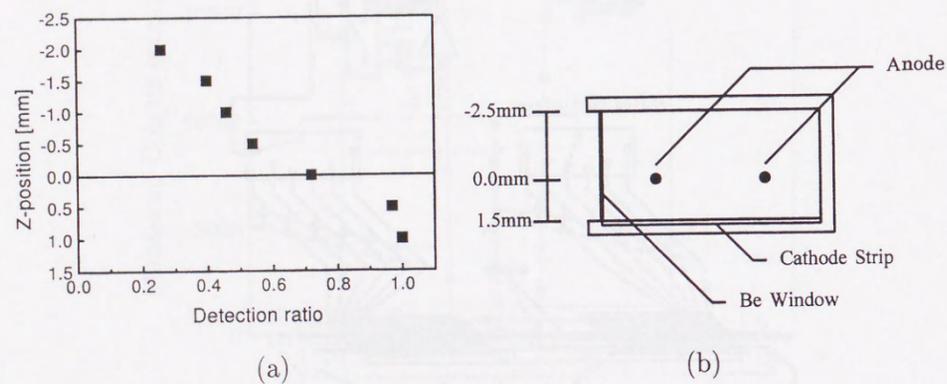


Figure 4.12 入射位置による収集効率

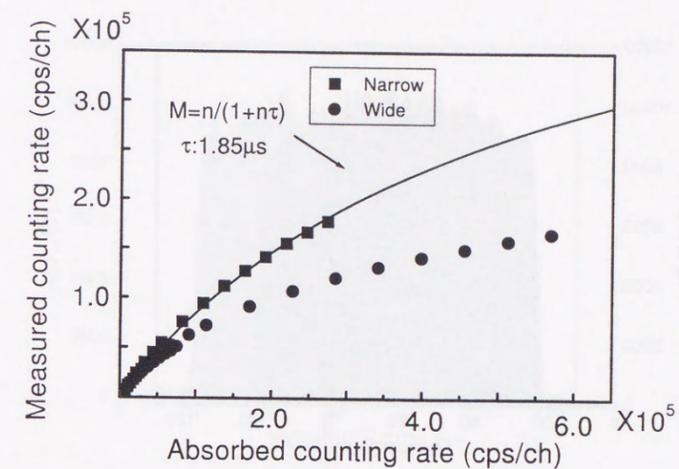


Figure 4.13 Type2検出器の計数特性

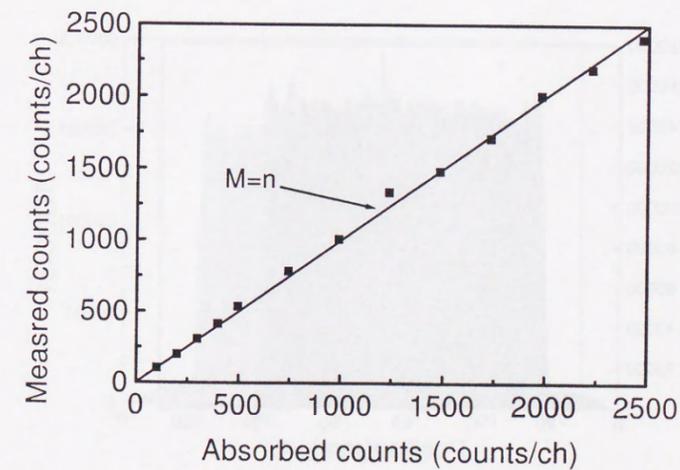


Figure 4.14 Type2検出器の線型計数領域における計数特性

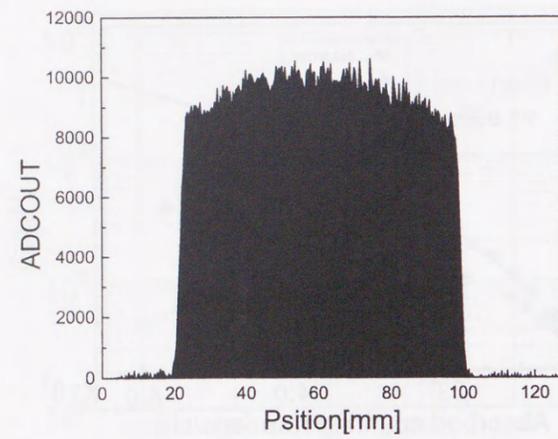


Figure 4.15 X線管からの広角入射による像 (線型領域)

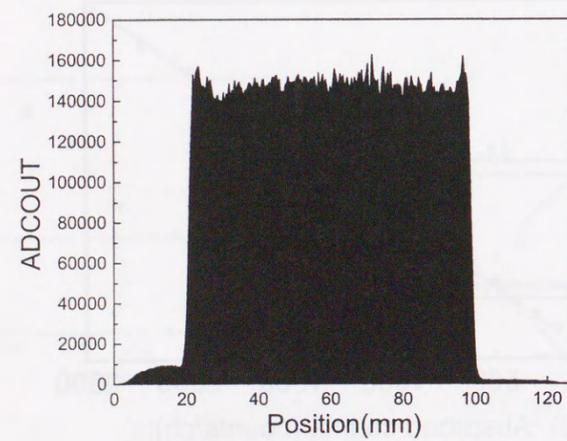


Figure 4.16 X線管からの広角入射による像 (飽和領域)

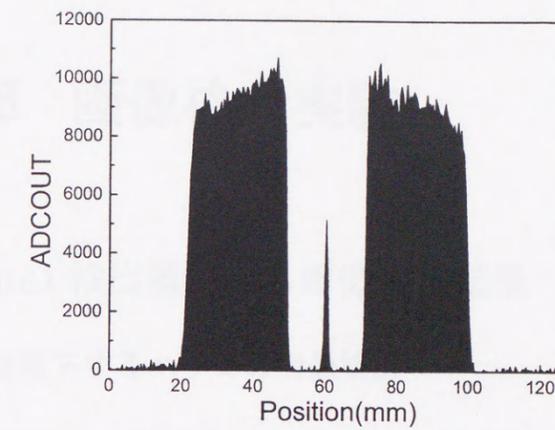


Figure 4.17 物体を置いた状態での像 (線型領域)

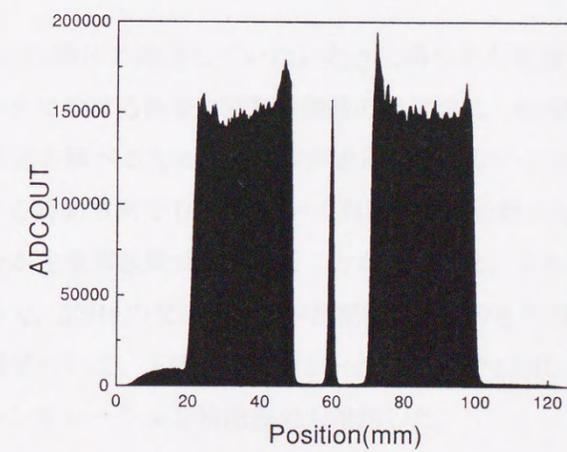


Figure 4.18 物体を置いた状態での像 (飽和領域)

第5章 画像検出実験

1 Type1 検出器による画像検出結果

1.1 自由落下するハサミの画像検出

X線透過画像の検出実験を行った。1ラインの走査時間を1msとして、320ch×250lineの画像を得ることとした。測定された画像から、バックグラウンドを差し引き、さらにX線管からの放射による立体角とチャンネル毎の固有な感度の違いを補正した。得られた画像の正規化は行っていない。検出器のアノードに印可する電圧は1900Vとした。X線管の出力は最小の管電流2mA、管電圧20kVである。X線回折装置の遮蔽空間内で実験を行うため、有効長128mmの中心に80mmの幅でX線を入射している。

Figure 5.1に物体の通過していないときに得られた画像の階調のヒストグラムを示す。ピークにおける画像の階調の階級の半値幅は、66階調にわたっている。この広がりの原因を調べるために、物体が通過していないときに得られた画像の1つのチャンネルを時間方向でDFTを用いて周波数解析を行った。その結果、直流成分以外で100Hzが主要周波数成分であることが分かった。これはX線管と計測システムの電源の中で、50Hzの交流電源を平滑整流したものを利用しているためである。使用したX線管について、X線の発生数が一定数以上で100Hzで周期的に揺らいでいることを、シンチレーション検出器でも確認した。

被検体は全長150mmのハサミとした。柄を下にして、検出器の有感面から30mm離し、40mm上から落下させた。X線管と有感面の距離は320mmである。Figure 5.3に得られた画像を示す。Figure 5.2は、Figure 5.3に示す画像の階調のヒストグラムである。

1.2 検出した画像の2値化処理

自由落下による速度の違いを補正した画像をFigure 5.4に示す。ハサミの原形と一致する。

次に、ヒストグラムFigure 5.1, Figure 5.2を使って、Figure 5.4の画像を2値化した。

Figure 5.1のピークを基に画像の階調値のしきい値を1500として、Figure 5.4の2値化を行った。結果をFigure 5.5に示す。ハサミの原形と一致する。

Figure 5.5の画像の階調値のしきい値を500としてFigure 5.4の2値化を行った。結果をFigure 5.6に示す。ハサミの金属部分である。

Figure 5.1を基に画像の階調値のしきい値を1800としてFigure 5.4の2値化を行った。結果をFigure 5.7に示す。ハサミの輪郭の外側部分が強調されている。

Figure 5.1を基にしてしきい値を決めれば、容易に、どのような形状のものが通過したかを、Figure 5.5で示すように、2値画像化できる。

被検体として使用したハサミはプラスチックと金属で構成されている。Figure 5.6はハサミの金属部分である。

Figure 5.7で示すように、被検体の外側部分の計数が高くなるのが、CIPSPCを用いたX線透過画像における特徴である。Figure 5.1のピーク右側部分では見られない裾を、Figure 5.2の最大ピークでは見ることができる。このことから、高速で移動する被検体においても、X線の入射幅による計数特性の変化が起こっていることがわかる。

1.3 ワイヤの検出

針などの細い被検体の検出が可能であるか調べるため、直径0.3mmの金属ワイヤを被検体として、1次元像を得る実験を行った。検出器のアノードに印可する電圧は1600Vとした。X線の強度、測定時間を変化させて実験を行った。検出器の前面に置かれた0.5×80mmのスリットの中心にワイヤを縦に張り付け、広角にX線を入射した。なお、X線源から検出器有感面までの距離は30cmである。実験結果をFigure 5.8, Figure 5.9, Figure 5.10に示す。

Figure 5.8は、X線管の管電流を2mAとし、測定時間を250msとした。1msでの走査結果を250回足し合わせている。

Figure 5.9は、X線管の管電流を20mAとし、測定時間を1msとした。

Figure 5.10は、X線管の管電流を20mAとし、測定時間を250msとした。1msでの走査結果を250回足し合わせている。

2mA, 250msの測定条件の像と20mA, 250msの測定条件の像から、直径0.3mmのワイヤの検出は可能であるといえる。特に、20mA, 250msの測定条件の像からは、ワイヤの両隣のチャンネルの計数が1%程度多かった。CIPSPC固有の入射幅による計数特性の変化が、直径0.3mmのワイヤの測定でも起こることがわかる。

20mA, 1msの測定像では、X線の発生揺らぎが約5%あるにもかかわらず、検出できている。320×250pixelの画像としても、十分、検出可能であった。2mA, 1msの測定条件でも実験を行ったが、X線の発生揺らぎが大きく、検出可能な像は得られなかった。

Figure 5.11とFigure 5.12に、X軸を時間、Y軸を入射位置、画素の濃淡をADCOUNTとして得た画像を示す。Figure 5.11は、2mA, 1msの測定条件における画像であり、Figure 5.12は、20mA, 1msの測定条件における画像である。2mA, 1msの測定条件でも画像とした場合は、目視でワイヤと判断できる程度の画像である。また、20mA, 1msの測定条件での画像は、2mA, 1msの測定条件の画像よりもより鮮明にワイヤと判断できる画像と言える。

2 Type2 検出器による画像検出結果

2.1 自由落下するハサミの画像検出

CIPSPCが画像検出器としての有効であるかを評価するため、自由落下するハサミの画像検出実験を行った。Z軸方向のウィンドウ幅は、5.0mmとした。実際にはFigure 4.12で示すように、2.0mmの幅で75%の計数を行っているので、Z軸方向の有効計数幅は、2mm程度と言える。1ラインの走査時間を1msとして、320ch × 250lineの画像を得ることにした。X線管の出力は最小の管電流2mA、管電圧20kVとした。検出器には、 3.8×10^6 cps/mm²でX線の入射を行っている。得られた画像をFigure 5.13に示す。

被検体であるハサミの全長は135mmで、全長の記録時間は95msである。柄の部分を下にして落下させた。記録始めである柄の部分の端は、0.96mm/msであり、最後のハサミの先端でのスピードは、1.9mm/msであった。ADCより得られた出力からバックグラウンド分を差し引き、得られた値を画素値として表した画像がFigure 5.13である。Figure 5.14, Figure 5.15は、画素値を区切ることによって得られた画像である。画像Figure 5.13はハサミの全体像であり、Figure 5.14はハサミの金属部分である。また、Figure 5.15は、ハサミの周辺が強調されている部分である。Figure 5.13, Figure 5.15での背景が縞模様になっているのはX線源の電源の100HzリップルによるX線強度の変動で、さらに良好な画像を得るにはX線源の電源を改造する必要がある。

2.2 ワイヤの検出

Type2 検出器を用いて、直径が0.6mm, 0.5mm, 0.4mm, 0.3mmのワイヤの検出実験を行った。X線強度や測定時間を変えた測定結果をFigure 5.16, Figure 5.17, Figure 5.18に示す。Figure 5.16, Figure 5.17, Figure 5.18は、ともに左から0.6mm, 0.5mm, 0.4mm, 0.3mmの像である。Z軸方向の幅は、0.5mmとし、Figure 4.12で示す収集が多い所で行った。Y軸には、X線強度に対応したADCの出力値を使用し、バックグラウンド分を差し引いている。

Figure 5.16は250msの測定時間で、検出器に 6.5×10^2 cps/mm²のX線の入射を行っている。Figure 5.17は250msで 1.8×10^7 cps/mm²である。Figure 5.17は、Figure 5.18

における、1msの測定時間の測定像である。入射数によっては、1ms測定でも連続像として表示すれば、ノイズの平均化が行え、0.3mmのワイヤでも検出可能である。

Figure 5.16, Figure 5.17, Figure 5.18のいずれにも共通することとして、直径0.6mm, 0.5mm, 0.4mm, 0.3mmのワイヤの識別が可能であることがあげられる。凹の窪みがの深さが、明らかにワイヤの直径に比例して深くなっている。

3 CIPSPCの画像検出器としての特徴

CIPSPCは、半導体検出器と違って、専用の製造装置を必要としない。その構造は簡易であり、製作は容易でそのコストも低い。ストリップカソードを増やしたり、間隔を広げることで有効長を長くすることは可能である。また、本研究ではガスフロー方式を採用しているが、ガス密封方式の検出器も製作可能である。

交流電源の周波数に同期して測定を行えば、補正により Figure 5.1のピークの半値幅は狭くできる。より2値化がしやすい画像が得られると思われる。

CIPSPCを高計数率領域で用いてX線透過画像の検出を行うと、X線の入射幅による計数特性の変化から、被検体の輪郭外の計数が多くなる。この特徴は、2値化等の処理で得られる被検体の原形画像には、影響しないと考えられる。

8keVのX線は、1mmの厚さの水であれば、36%透過する。ポリエチレンであれば、1mmで70%、5mmで17%が透過する。金属においては、アルミでさえ1mmの厚さであれば、ほぼ透過しない。Figure 5.6, Figure 5.14で示すハサミの金属部分のみの画像を得ることができた。被検体によってX線のエネルギーやアノードに印可する電圧を調整することで、大きさによっては、簡易な物質の選別は可能といえる。

また、カソードストリップのピッチと同程度の径のワイヤを識別できる。

参考文献

- [1] 武藤彰英 長谷川賢一：“積分型位置敏感比例計数管と画像検出への応用”計測自動制御学会論文集 Vol.35, No1(1999)46-51
- [2] 武藤彰英 長谷川賢一：“非破壊検査用積分型位置敏感比例計数管の開発”放射線 Vol.24, No4(1998)93-100

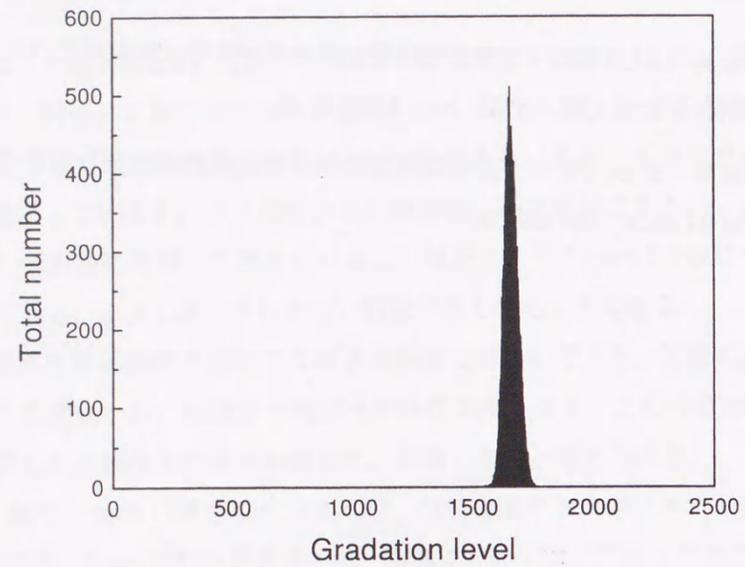


Figure 5.1 検知物体のない画像のヒストグラム

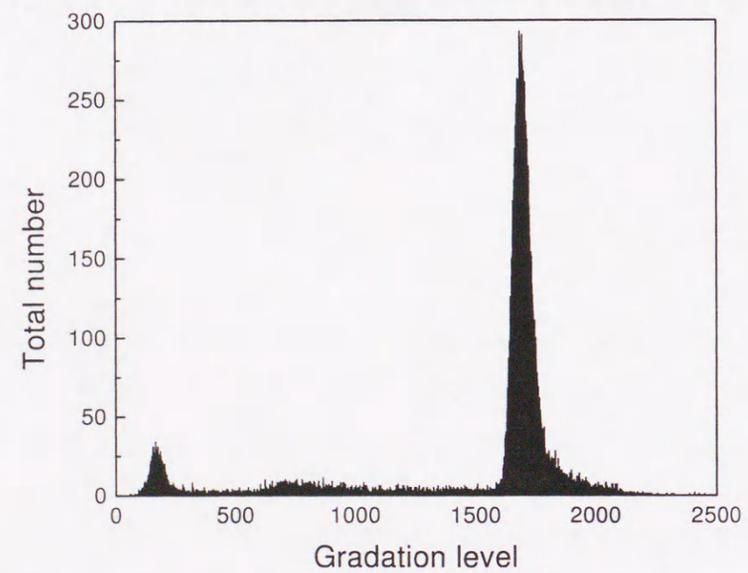


Figure 5.2 ハサミ検知を検知した画像のヒストグラム

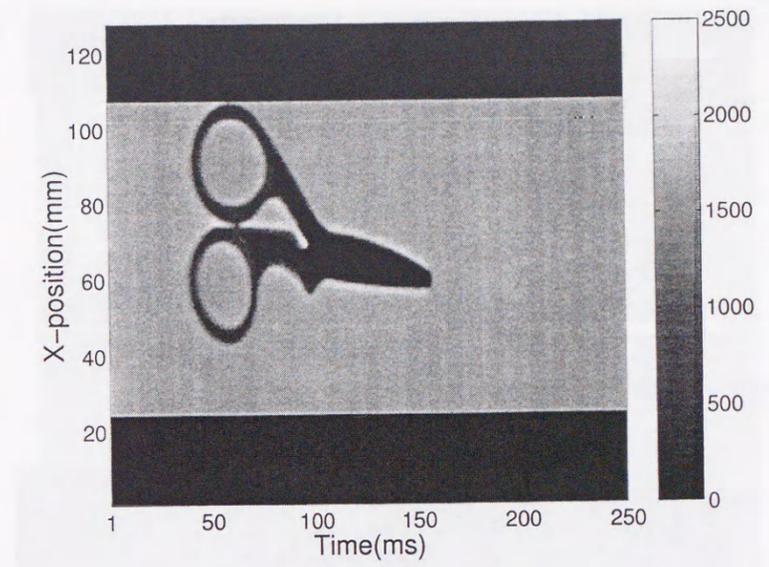


Figure 5.3 Type1 検出器による自由落下するハサミの画像

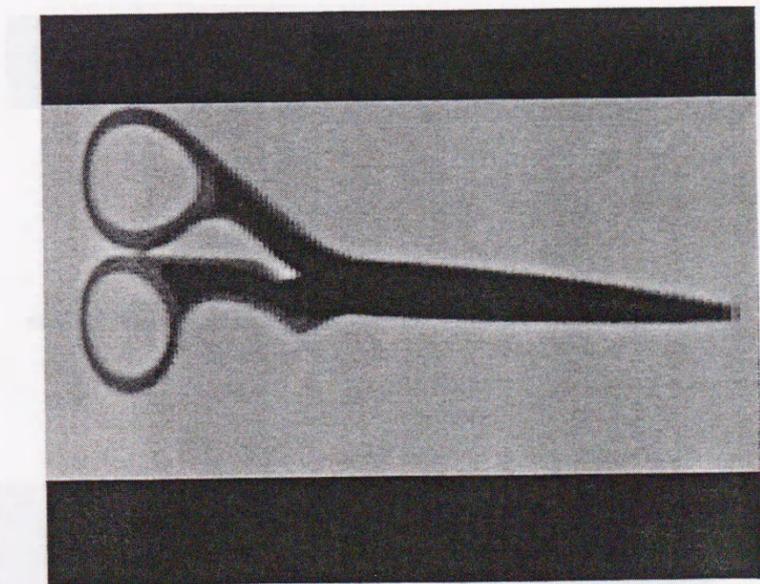


Figure 5.4 自由落下分を補正したハサミの画像

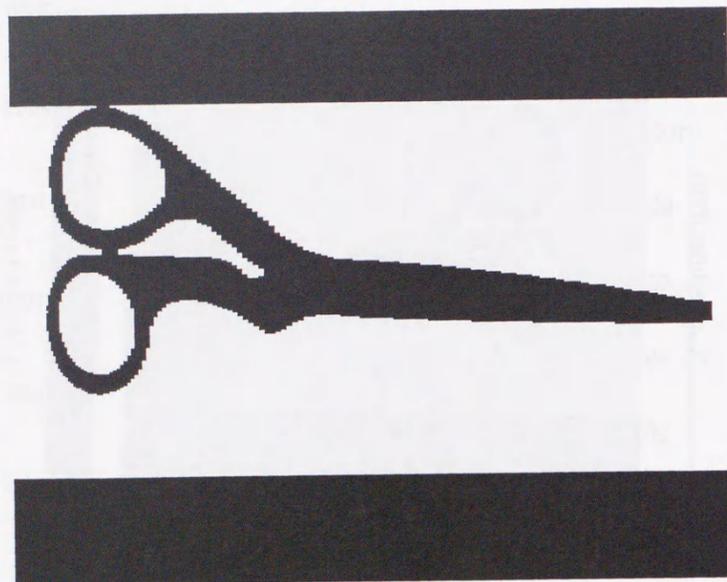


Figure 5.5 しきい値 : 1500 (ハサミの形状)

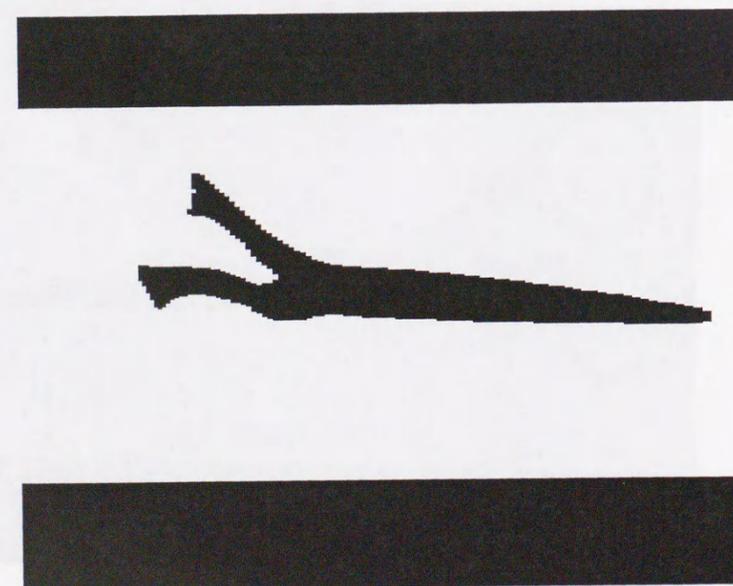


Figure 5.6 しきい値 : 500 (ハサミの金属部分)

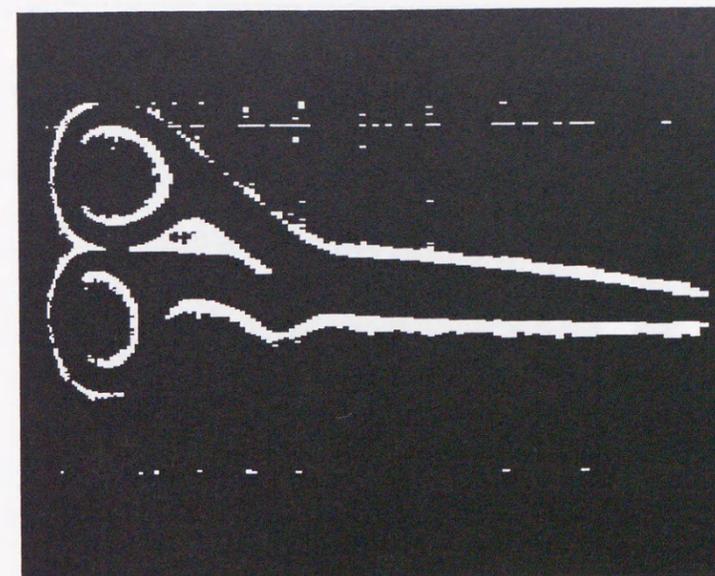


Figure 5.7 しきい値 : 1800 (形状が強調された部分)

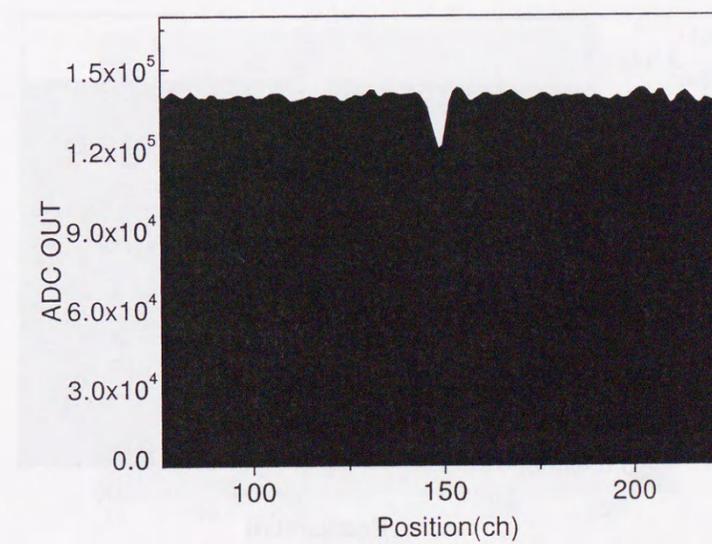


Figure 5.8 Type1 検出器より得られたワイヤを被検体とした像 : 管電流 2mA, 測定時間 250ms

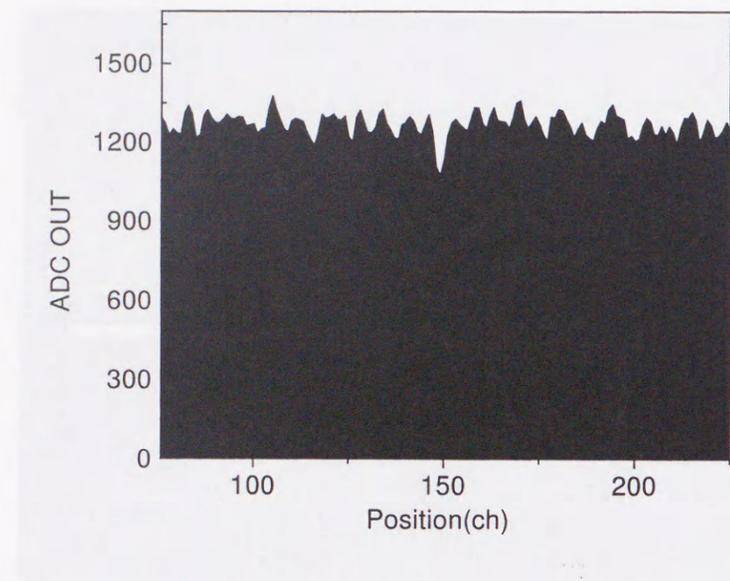


Figure 5.9 Type1 検出器より得られたワイヤを被検体とした像：管電流 20mA, 測定時間 1ms

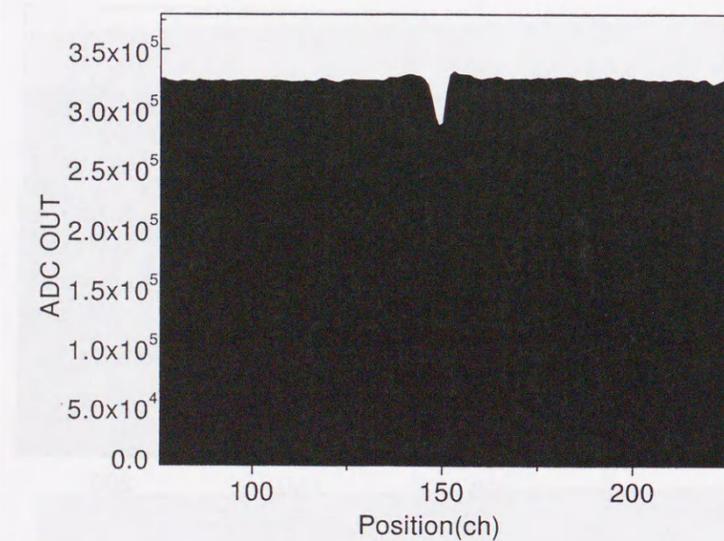


Figure 5.10 Type1 検出器より得られたワイヤを被検体とした像：管電流 20mA, 測定時間 250ms

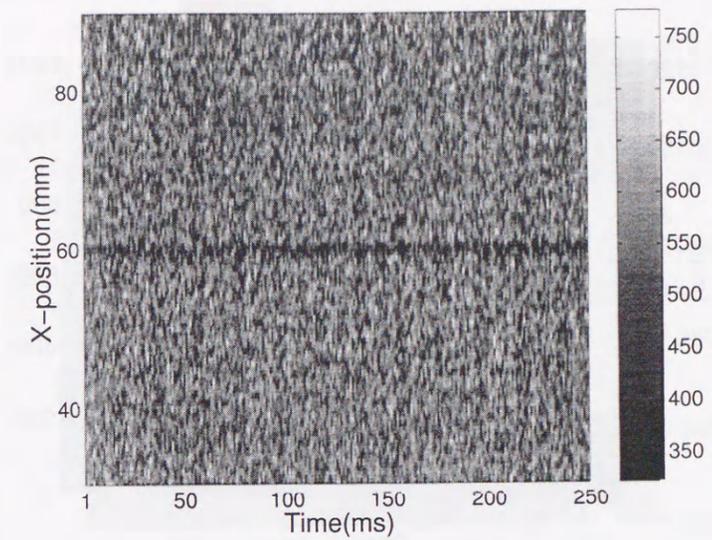


Figure 5.11 Type1 検出器より得られた管電流 2mA の条件におけるワイヤを被検体とした画像

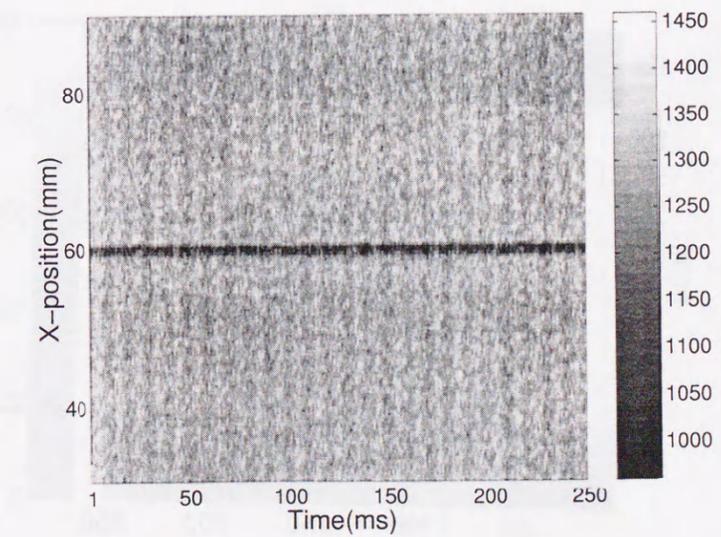


Figure 5.12 Type1 検出器より得られた管電流 20mA の条件によるワイヤを被検体とした画像

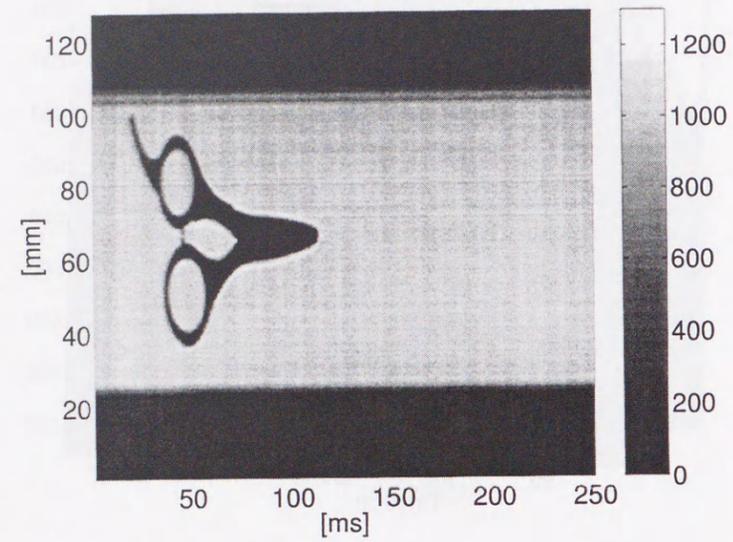


Figure 5.13 Type2検出器による自由落下するハサミの画像

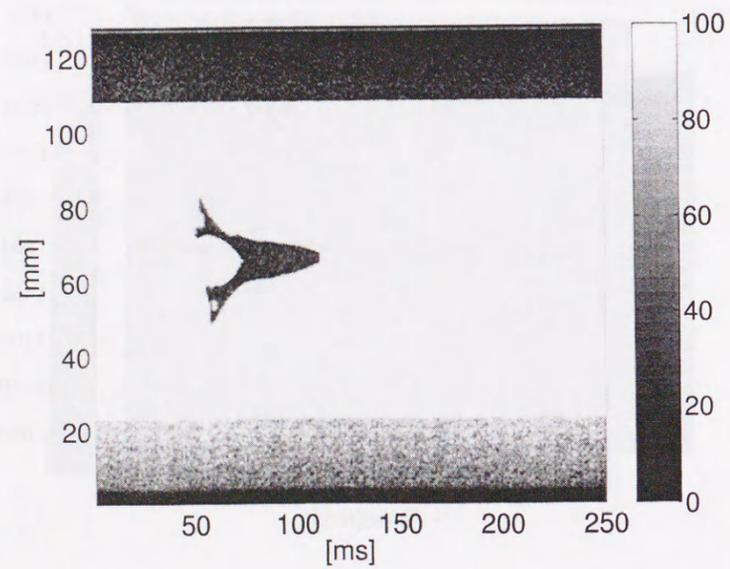


Figure 5.14 金属部分を示す画像

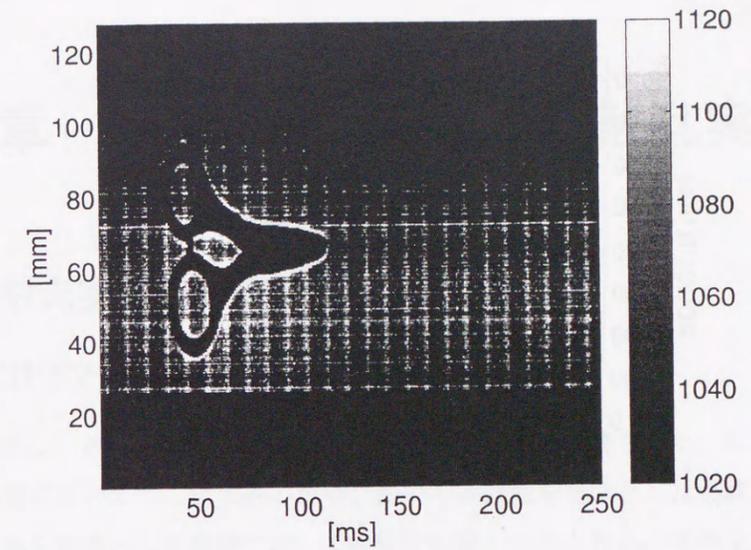
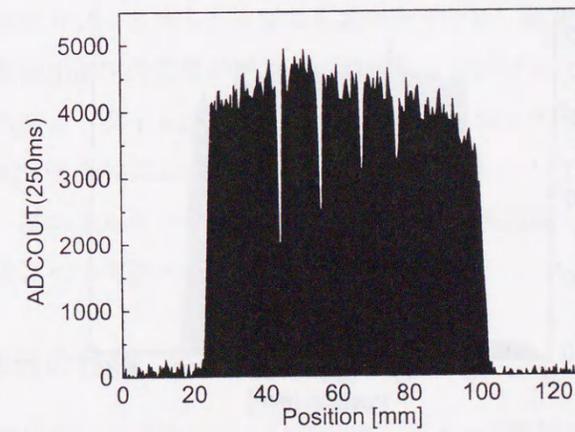


Figure 5.15 強調部分を示す画像

Figure 5.16 4種類のワイヤを検出した像 : $6.5 \times 10^2 \text{cps/mm}^2$, 250ms

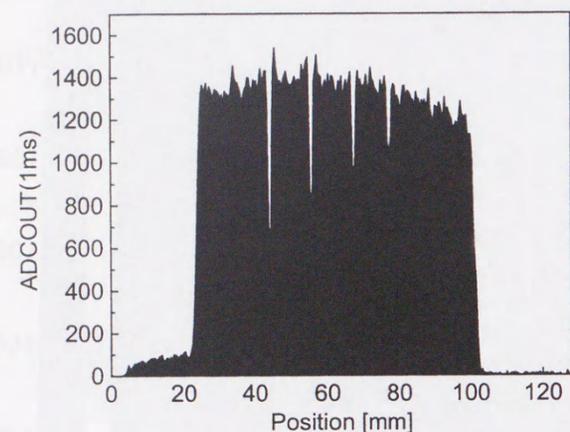


Figure 5.17 4種類のワイヤを検出した像： 1.8×10^7 cps/mm²，1ms

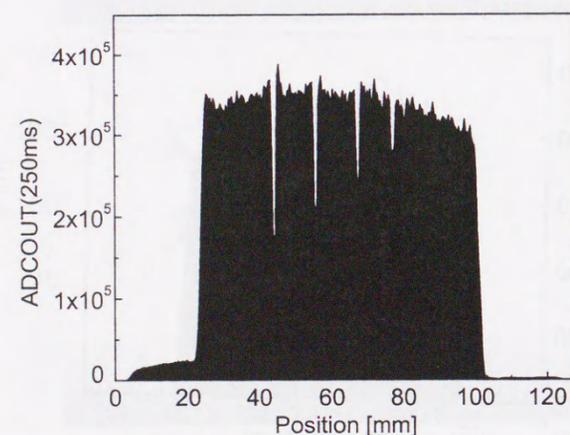


Figure 5.18 4種類のワイヤを検出した像： 1.8×10^7 cps/mm²，250ms

第6章 放射光における小角散乱実験

1 放射光実験施設における実験

1.1 CIPSPC使用の意義

CIPSPCは、放射光実験施設等における検出器として開発された。本検出器を開発する過程においても、試作器の段階において放射光を光源とした実験を行っている。放射光を光源とした実験では、X線管を光源とするよりも、単色なX線で実験を行うことができる。これは、ガス増幅によって生じた電荷を、カソードストリップを通して積分するCIPSPCにとっては、適したX線光源であるといえる。また、放射光を光源とした場合、X管では生ずる電源の交流に依存するX線発生揺らぎが無い。

CIPSPCは、その測定原理からも明らかなように、時分割測定に適している。また、固定されたカソードストリップから読み出すため、電荷分割PCPC等の検出器よりも、位置検出測定の精度が絶対的であることがあげられる。さらに、信号処理回路におけるデッドタイムがないため、計数法を主体とするPSPCよりも検出器全体X線が入射する条件においては、より高計数領域においての実験に対応できる。

本章では、高エネルギー物理学研究機構放射光実験施設ビームライン15Aで行った、実験結果について述べる。

1.2 試作器の仕様

試作した検出器の仕様をTable 6.1に示す。アノード線は2本使用している。

Type1 検出器の同様に、電荷分割型PSPCの機能も合わせ持った検出器の構造である。電荷分割型で使用する側のカソードとアノードとの距離は、7.5mmとなっている。実験では、アノード線を中心にZ軸方向に対して5mmの幅のスリットを置いて

測定を行った。カウンタガスは、P10ガスとXeを主体とするガス(Xe90%, CO₂%)の2種類で行った。計測システムの信号処理回路は、前章で述べた同じものを使用している。

Table 6.1 試作検出器の仕様

セル数	320枚
セルピッチ	0.4mm
有効長	128mm
アノード線径	20 $\mu\text{m}\phi$
アノード線材質	金メッキタングステン線
積分型アノード・カソード間隔	2.5mm

2 P10ガスを使用したカエルの筋肉の静的な小角散乱実験

2.1 実験条件

被検体は、静止したカエルの筋肉である。被検体と検出器の間には、ビームラインからのダイレクトビームの入射を防ぐために5mm幅のバックストップを置いている。

カウンタガスにはP10ガスを使用している。検出器のアノードに印可した電圧は1900Vである。X線のエネルギーは8keVとした。

測定時間は、1msの測定を連続的に250回行い足し合わせ250msとした。

2.2 実験結果と考察

実験結果をFigure 6.1に実験結果を示す。Figure 6.1に示す様に、小角散乱像を得られた。ある程度の幅を持った散乱が重なりあっているために、裾を引いた像となっているが、ある程度はその後の解析により分解が可能である。

3 Xeガスを使用したカエルの筋肉の静的な小角散乱実験

3.1 実験条件

P10ガスをカウンタガスとして使用するよりも、Xeを主体とするガスを使用する方が、位置分解能特性が良い。ただし、XeガスはP10ガスよりも高価である。カエル筋肉の小角散乱実験においても、測定位置を変えながらP10ガスで測定位置を決め、その後Xeガスで実験を行うことにした。

被検体は、静止したカエルの筋肉である。被検体と検出器の間には、ビームラインからのダイレクトビームの入射を防ぐために5mm幅のバックストップを置いている。

検出器のアノードに印可する電圧を、1900V、2000V、2100Vと変えて実験を行った。X線のエネルギーは8keVとした。

測定時間は、1msの測定を連続的に250回行い足し合わせ250msとした。

3.2 実験結果と考察

アノードに印可した高圧を1900V、2000V、2100Vとした実験結果をFigure 6.2, Figure 6.3, Figure 6.4に示す。

印可電圧の違いでガス増幅率が異なる。2100Vの実験結果であるFigure 6.4が最適であると考えられる。P10ガスで得た被検体を同じくするFigure 6.1で示す散乱像よりも、Figure 6.4で示す散乱像の散乱像の方が位置分解能特性においてよりよい結果を得ることができたといえる。

4 Xeガスを使用したエアロジルの静的な小角散乱実験

4.1 実験条件

被検体をエアロジルとして小角散乱実験を行った。エアロジルは均一材質であるため、小角散乱実験を行った場合、なだらかに減少する像を得ることができる。被検体と検出器の間には、ビームラインからのダイレクトビームの入射を防ぐために5mm幅のバックストップを置いている。

カウンタガスにはXeを主成分とするガスを使用している。検出器に印可した電圧は共に2100Vである。

測定位置を同じくした2回の実験を行い、後半の実験では検出器有感面の直前にアッテネータを置き、X線の強度を前半の実験の10分の1にした。測定時間は、1msの測定を連続的に250回行い足し合わせ250msとした。

4.2 実験結果と考察

実験結果をFigure 6.5, Figure 6.6に実験結果を示す。Figure 6.5の散乱像はX線の入射量が多く飽和してしまっている。Figure 6.6の散乱像は、Figure 6.5に示す散乱像よりも適正な状態でX線を入射したといえる。バックストップで、ダイレクトビームの入射を不正でいる部分がFigure 6.5で示す散乱像では上昇してしまっている。これは、空間電荷効果が検出器全体に影響を及ぼしているためであると考えられる。

5 Xe ガスを使用したカエルの筋肉の動的な小角散乱実験

被検体をカエルの筋肉として動的な小角散乱実験を行った。解剖したカエルの筋肉の筋肉の足の部分である。このカエルの筋肉に電極を刺し、その電極から電気的な刺激を与えることで筋肉の動きを再現できる。この現象の小角散乱像を時分割で得ることは、筋肉の動きのメカニズムを解明するうえで意義のある実験である。

実験で重要な問題として、生体を被検体とするために、レントゲンで使用するX線のエネルギー(数十keV)よりも低いことが望ましい。また、強度もできうる限り少ないことが望ましい。

電氣的に刺激を与えた場合、筋肉の動きには再現性があるため、時分割測定によって得ることができる画像を、電氣的刺激に同期させることにより重ね合わせることができる特徴がある。また、従来研究においては、X線強度等の関係から重ね合わせなくてはならなかった。

本実験では、従来研究と同様に電氣的刺激に同期させハードウェア的に結果を重ね合わせる実験と、1回の刺激のみの実験を行った。

被検体と検出器の間には、ビームラインからのダイレクトビームの入射を防ぐために5mm幅のバックストップを置いている。

カウンタガスにはXeを主成分とするガスを使用している。検出器に印可した電圧は共に2100Vである。X線のエネルギーは8keVとした。

1msの測定時間で、連続的に250回の測定を行い、散乱像を得ることにした。

5.1 実験結果と考察

5回の刺激を重ね合わせることで得られた時分割測定結果をFigure 6.7に示す。X軸は時間軸であり、Y軸はXの入射位置である。画素の濃淡が、X線強度に対応したA/D変換器の出力結果である。50ms付近で、強度が変化している部分があることがわかる。

Figure 6.8は、変化が顕著であった入射位置の違う2つのチャンネル(142ch, 187ch)の実験結果を示す。筋肉が動くことで、散乱像が変化している様子がわかる。

Figure 6.9に1回の刺激によることによって得られた測定結果である。S/NはFigure 6.7よりも劣るものの、筋肉が動くことで散乱像が変化している様子を確認することができている。

6 ラットの尾のコラーゲンの静的な小角散乱実験

6.1 実験条件

本研究で示す検出器と平行して、Table 6.2に示す検出器も試作した。アノード線にカーボンファイバを用いることで積分型の他に、アノード読みとり方式の電荷分割方式PSPCの機能も合わせ持っている。アノードの直径は、数 μm 程度である。

Table 6.2 検出器の仕様

セル数	256枚
セルピッチ	0.5mm
有効長	128mm
アノード線材質	カーボンファイバ
積分型アノード・カソード間隔	2.5mm

この検出器を用いて、積分型と計数型の実験を行った。被検体にはラットの尾のコラーゲンである。幾つもの散乱したピークをもった散乱像を得ることができる。

カウンタガスにはXeを主成分とするガスを使用している。X線のエネルギーは8keVとした。

積分型の測定時間は、10msで測定結果を10回行い足し合わせ、100msとしている。電荷分割方式では、被検体と検出器の間にアッテネータを置きX線の強度を10分の1とし、測定時間は10sである。

6.2 実験結果と考察

Figure 6.10に積分型で得ることができた実験結果を示す。散乱の低いピークを観測する関係で、飽和したピークもある。Figure 6.11は、スケールを変えたものである。

Figure 6.12は、電荷分割方式で得ることができた散乱像である。

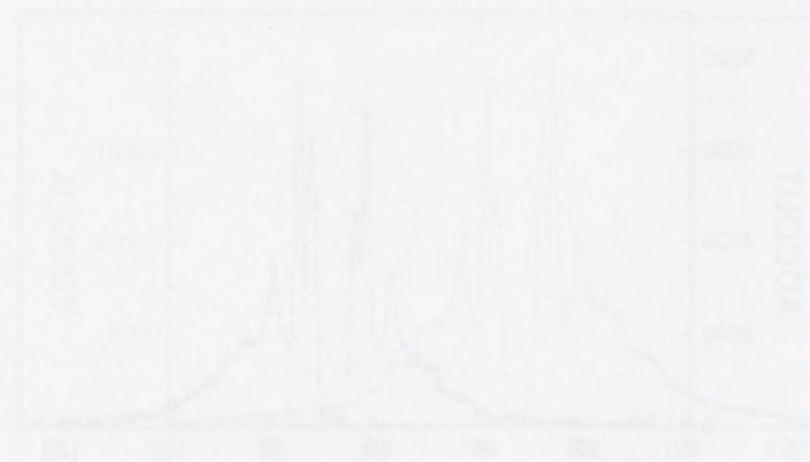
Figure 6.11とFigure 6.12の比較すると、積分型での測定が、位置分解能特性もよく、より多くのピークを観測していることがわかる。

測定時間も短く、電荷分割方式よりも効率的に実験が行えるといえる結果を得た。

ただし、このカーボンファイバをアノード線とした方法では、高計数領域での使用を繰り返すと、カーボンファイバのダメージが大きいことがわかった。また、チタン合金線も使用したが、直径の一樣性に問題があった。画像検出用CIPSPCでは、これらのことを踏まえチタン合金線を使用してる。

参考文献

- [1] A. Mutoh, K. Hasegawa, N. Yagi and Y. Asano: "Charge-Integrating Position-Sensitive Proportional Counter" KEK Proceedings, 97-8, RADIATION DETECTORS AND THEIR USES(1997)151-155
- [2] 御橋廣真 著: "筋肉の動きを探る", 丸善株式会社
- [3] 菊田惺志 著: "X線回折・散乱技術", 東京大学出版会
- [4] K. HASEGAWA, A. MUTOH, N. YAGI and Y. ASANO "Charge-Integrating Position-Sensitive Proportional Counter" PHTON FACTORY ACTIVITY REPORT, #14(1996)349



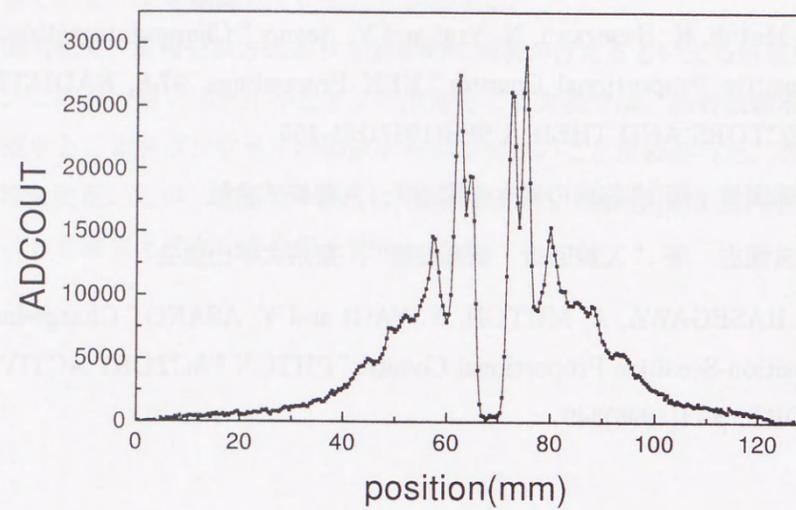


Figure 6.1 カエルの筋肉を被検体として得られた像 : P10 ガス (HV:1.9kV)

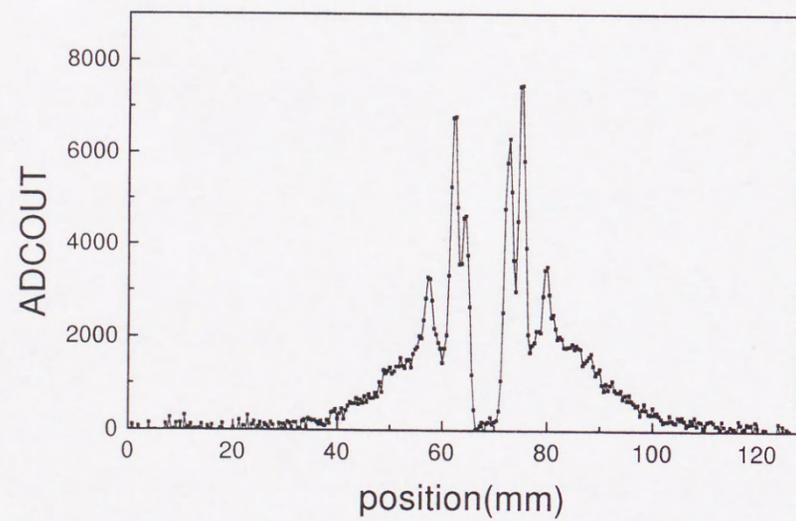


Figure 6.2 カエルの筋肉を被検体として得られた像 : Xe ガス (HV:1.9kV)

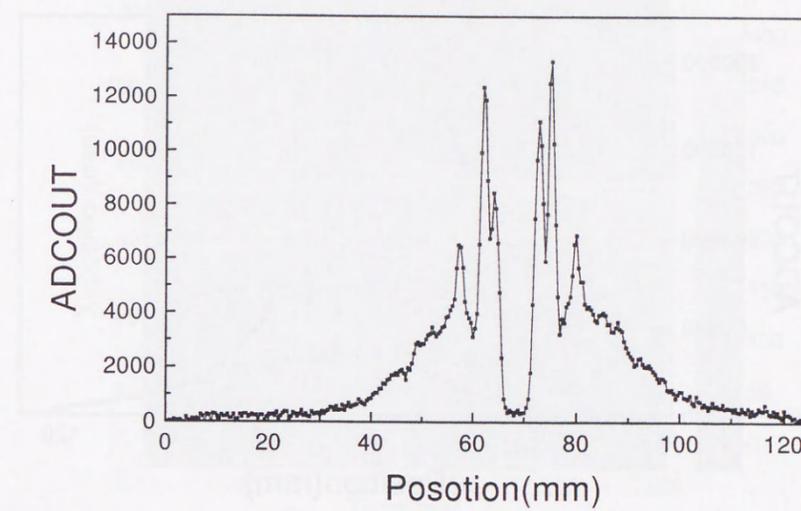


Figure 6.3 カエルの筋肉を被検体として得られた像 : Xe ガス (HV:2.0kV)

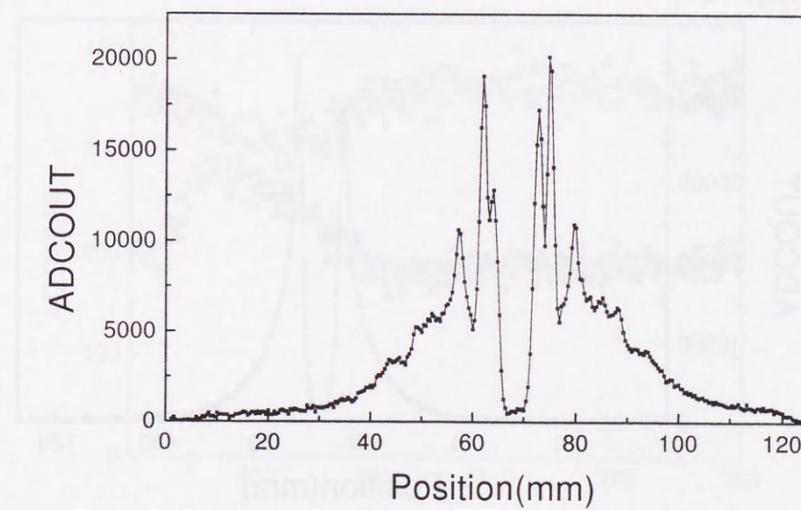


Figure 6.4 カエルの筋肉を被検体として得られた像 : Xe ガス (HV:2.1kV)

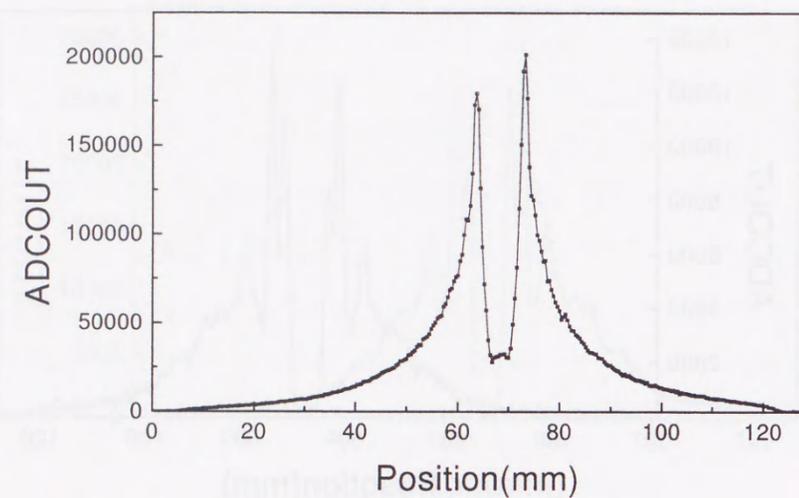


Figure 6.5 エアロジルの散乱像 (飽和状領域) : Xeガス (HV:2.1kV)

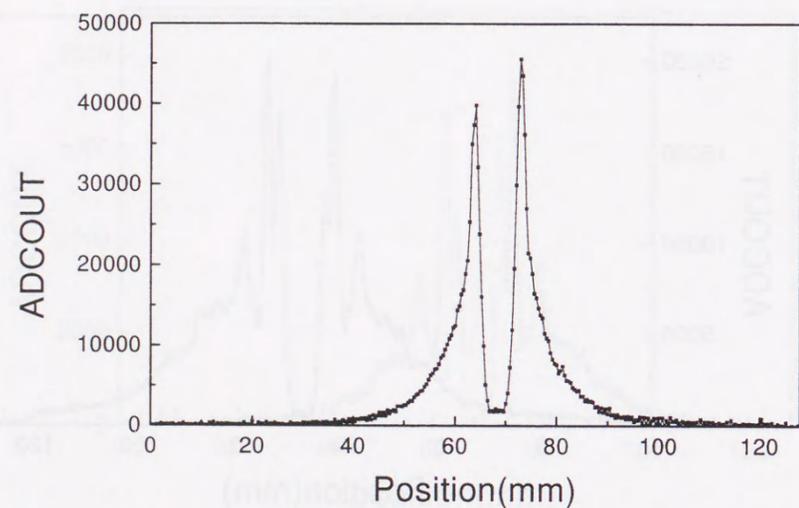


Figure 6.6 エアロジルの散乱像 : Xeガス (HV:2.1kV)

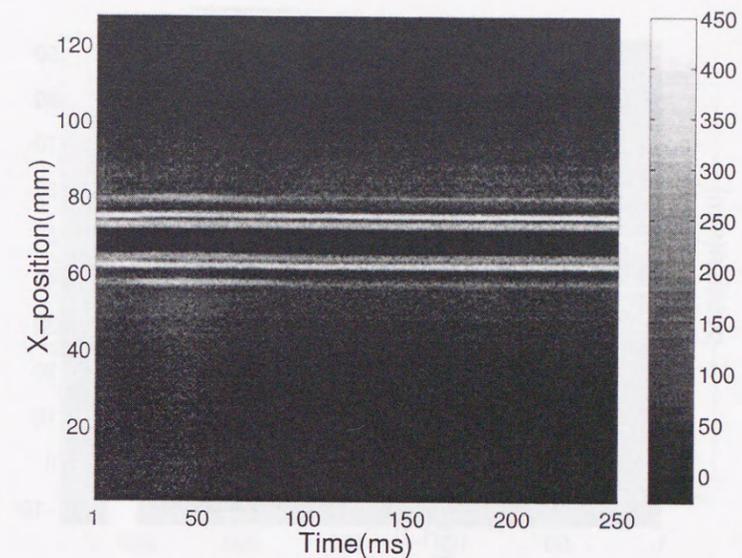


Figure 6.7 動的小角散乱実験 (5回の刺激) : Xeガス (HV:2.1kV)

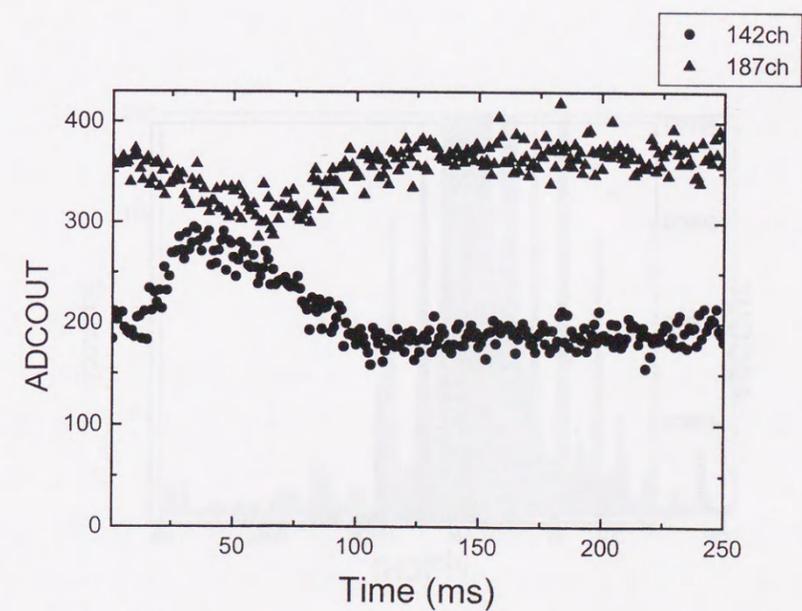


Figure 6.8 動的小角散乱実験 (142ch 187ch) : Xeガス (HV:2.1kV)

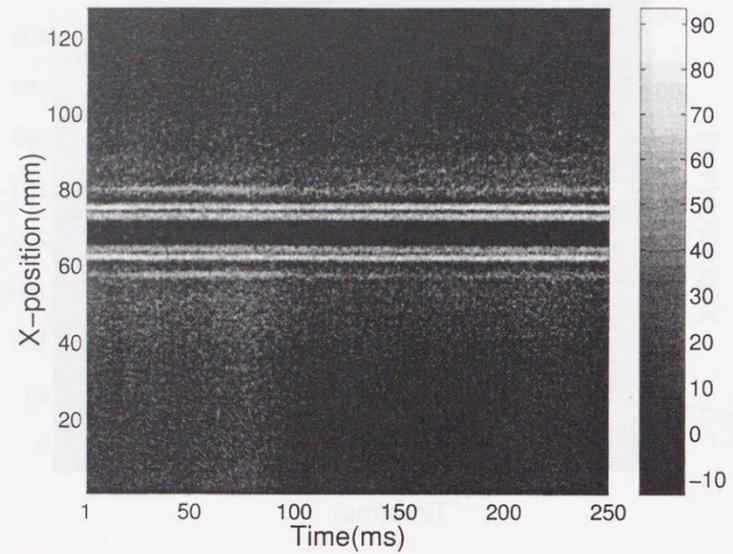


Figure 6.9 動的小角散乱像(1回の刺激)

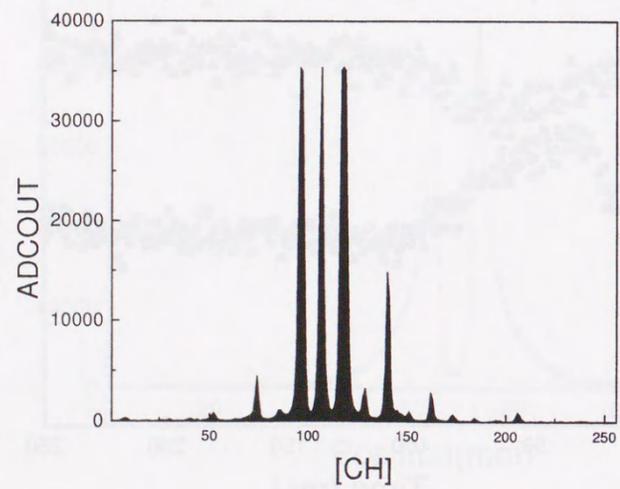


Figure 6.10 ラットの尾の子コラーゲンの散乱像

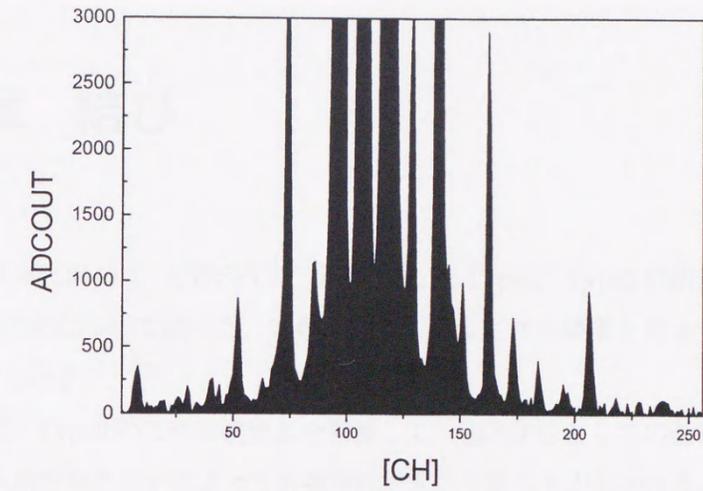


Figure 6.11 積分型による散乱像

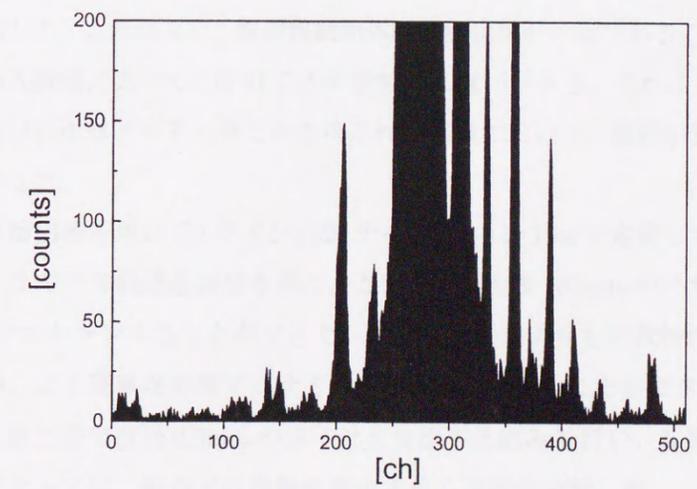


Figure 6.12 電荷分割方式に測定像

第7章 結び

2章から6章において、CIPSPCとして開発したType1, Type2検出器の基礎特性と画像検出結果について述べた。本研究で明らかにされた事項を列挙すると以下のことが上げられる。

- (1) Type1, Type2の二つの検出器を開発して、CIPSPCとしての基礎特性を調べた。入射状況の違いによって計数特性が変化することがわかった。Type2検出器では、アノードとカソードの間隔を狭めることで計数特性の改善が確認された。
- (2) Type1検出器を用いて1ライン(320チャンネル)を1msで走査して、自由落下するハサミのX線透過画像を得た。この画像は全長150mmのハサミの全長を100msでスキャンしたもので、それから補正と2値化処理によりハサミの特徴を抽出した。これにより、高速移動物体の画像検出が可能であることを示した。
- (3) X線の入射幅によってCIPSPCの計数特性に違いがある。これにより、静止物体、及び自由落下するハサミから得られた画像において、輪郭が強調されることを示した。
- (4) Type2検出器を用いて1ライン(320チャンネル)を1msで走査して、自由落下するハサミのX線透過画像を得た。この画像は全長135mmのハサミの全長を95msでスキャンすることができた。Type1検出器よりも計数特性が改善されたため、より簡単な処理でハサミの特徴の抽出を行うことができた。
- (5) Type1検出器で直径0.3mmのワイヤを検出する試みを行い、X線強度・測定時間によっては、針などの異物を検出できる可能性を示した。
- (6) Type2検出器で直径0.6mm, 0.5mm, 0.4mm, 0.3mmのワイヤの検出を行い、その弁別が可能であることを示した。また、Type1検出器よりも位置分解能が改善されていることも確認できた。

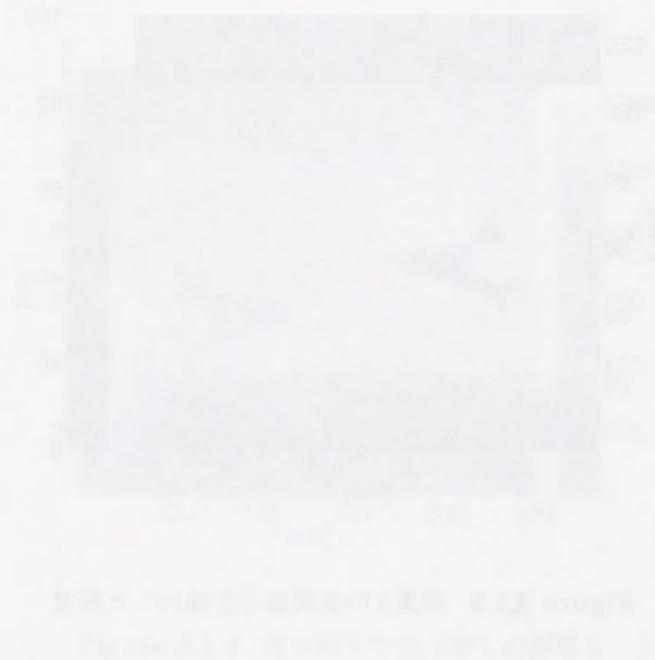
7章においてCIPSPCを用いて放射光実験施設においておこなった実験について述べた。実験で明らかにされた事項を列挙すると以下のことが上げられる。

- (1) P10ガス, Xeガスをを用いてカエルの筋肉の静的小角散乱実験を行った。CIPSPCを用いて小角散乱実験を行う場合, カウンタガスとしてXeガスをを用いたほうが, P10ガスよりも位置分解能特性が良いことがわかった。
- (2) エアロゾルの静的小角散乱実験を行った。X線が強力な場合, 空間電荷効果等が検出器全体にわたっておこり, 適正な散乱像とはならないことがわかった。
- (3) Xeガスをを用いてカエルの筋肉の動的小角散乱実験を行った。カエルの筋肉に与える5回の電氣的刺激に同期させ時分割測定を行った。刺激によってカエルの筋肉が動いた様子を示す, 時間分解能1msの時分割散乱像を得た。
- (4) 従来研究では強度的には得ることが難しかった, 1回の刺激のみの時分割散乱像において, カエルの筋肉の動いた様子を示す, 散乱像を得ることができた。
- (5) カーボンファイバをアノードとする, 積分型と計数型(電荷分割方式)の機能を合わせ持った検出器で, ラットの尾のコラーゲン被検体として静的小角散乱実験を行った。得られた像を比較することで, 積分型での測定の方が電荷分割方式での測定よりも位置分解能特性においてよりよい結果を得ることができた。また, X線の強度が強い場合でも, 電荷分割方式と比較してCIPSPCの位置測定の絶対性を示すことができた。

以上より, CIPSPCは画像検出に適した特性を有しているといえる。形状測定や異物検出などの分野で, 製造コストを低く抑さえ高速に簡易な検出を行いたい場合, 十分利用できるといえる。

付録1 Type2 検出器で得られた自由落下するハサミの画像

Type2検出器で自由落下するハサミの画像の取得実験を, 論文で示した実験の他に2回行った。ハサミの表裏を変えて実験を行った。再現性があることを示すために得られた画像を, Figure A1.1, Figure A1.4に示す。また, 金属部分の抽出を行った画像を, Figure A1.2, Figure A1.5に示し, 輪郭が強調されていることを示す画像を, Figure A1.2, Figure A1.5に示す。



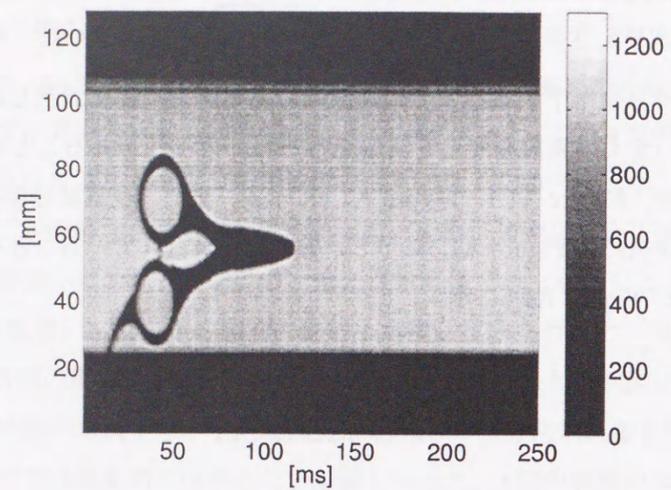


Figure A1.1 自由落下するハサミの画像1

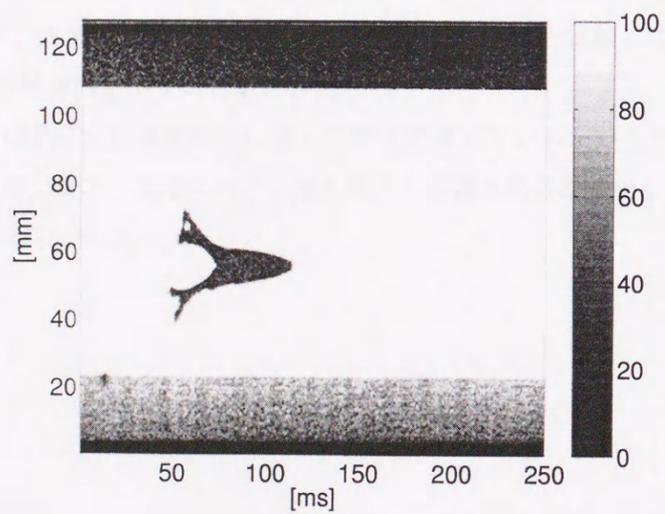


Figure A1.2 画像1の金属部分を抽出した画像

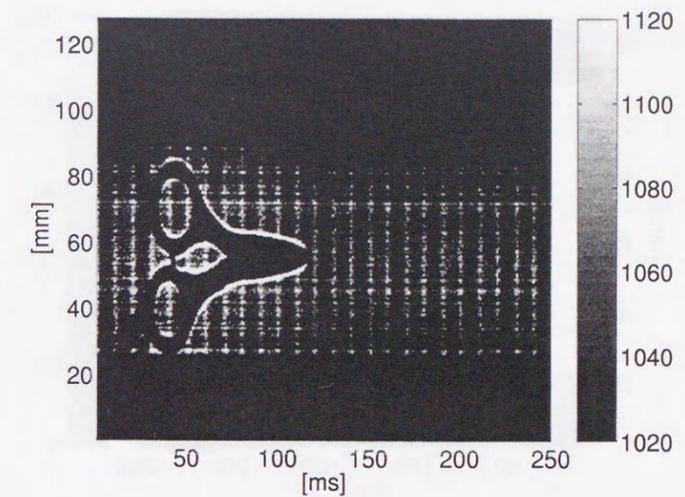


Figure A1.3 画像1の輪郭が強調されたことを示す画像

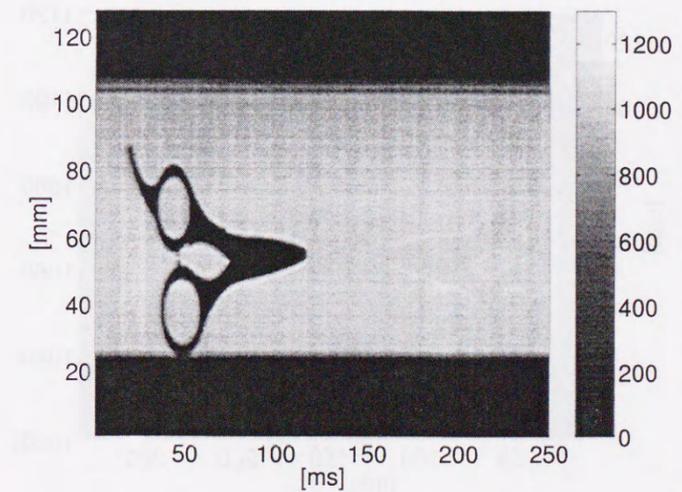


Figure A1.4 自由落下するハサミの画像2

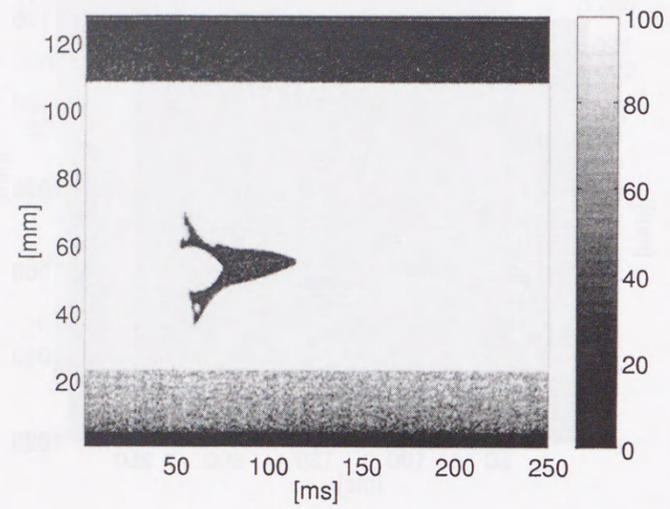


Figure A1.5 画像2の金属部分を抽出した画像

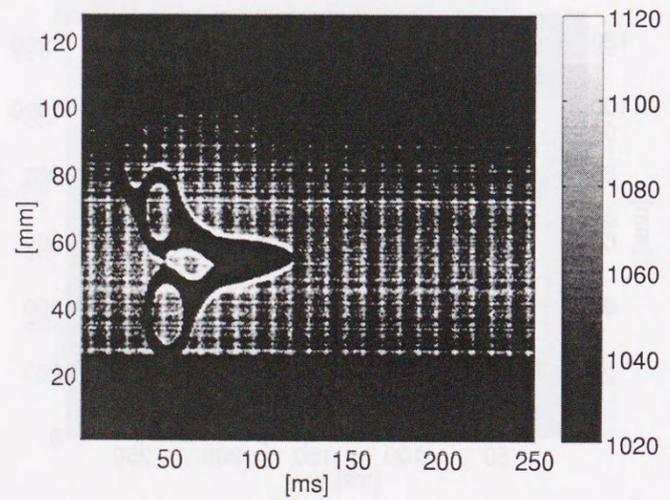


Figure A1.6 画像2の輪郭が強調されたことを示す画像

謝辞

本研究を進めるにあたり貴重なご指導をいただきました法政大学教授長谷川賢一先生に心より感謝申し上げます。

本論文を審査して頂いた北森俊之教授、森下巖教授、渡辺嘉二郎教授に心より感謝申し上げます。

本学在籍中、笹野睦雄先生、松田修三先生、秋山喬二先生、高橋朋一博士、西澤眞一博士には大変お世話になりました。この場をお借りしまして御礼申し上げます。

最後に、私を支えてくれた両親に、心から感謝致します。

画像検出用積分型位置敏感比例計数管の開発
2000年4月30日 初版発行
著者・発行者 武藤 彰英

2000 Akie Muto, Printed in Japan





0003.jp2	目次 / p1
0007.jp2	1 序論 / p1
0009.jp2	2 積分型位置敏感比例計数管 / p5
0009.jp2	1 位置検出器 / p5
0010.jp2	2 位置敏感比例計数管 / p7
0011.jp2	3 積分型位置敏感比例計数管 / p9
0014.jp2	3 開発した計測システム / p15
0014.jp2	1 開発した計測システムの概要 / p15
0015.jp2	2 開発した計測システムの仕様 / p16
0016.jp2	3 計測システムの信号処理回路 / p18
0019.jp2	4 開発した検出器 / p25
0019.jp2	1 開発した検出器の概要 / p25
0020.jp2	2 Type1検出器 / p27
0021.jp2	3 Type2検出器 / p29
0022.jp2	4 CIPSPCの特徴 / p31
0028.jp2	5 画像検出実験 / p43
0028.jp2	1 Type1検出器による画像検出結果 / p43
0030.jp2	2 Type2検出器による画像検出結果 / p46
0031.jp2	3 CIPSPCの画像検出器としての特徴 / p48
0036.jp2	6 放射光における小角散乱実験 / p59
0036.jp2	1 放射光実験施設における実験 / p59
0037.jp2	2 P10ガスを使用したカエルの筋肉の静的な小角散乱実験 / p61
0038.jp2	3 Xeガスを使用したカエルの筋肉の静的な小角散乱実験 / p62
0038.jp2	4 Xeガスを使用したエアロジルの静的な小角散乱実験 / p63
0039.jp2	5 Xeガスを使用したカエルの筋肉の動的な小角散乱実験 / p64
0039.jp2	6 ラットの尾のコラーゲンの静的な小角散乱実験 / p65
0044.jp2	7 結び / p75
0045.jp2	付録1 Type2検出器で得られた自由落下するハサミの画像 / p77