

## 1 実験条件

実験日時 2010（平成 22）年 10 月 14 日木曜日 午後 1 時～午後 3 時半

天気 晴

気圧・気温・湿度 省略

## 2 実験目的

$\gamma$  線の計測における微小信号増幅から波高分布測定までの一連のパルス信号処理の方法を習得する。またパルス信号処理で用いる各種機器の使用方法を学ぶ。応用としてランダムパルス信号のパイルアップ現象について考察する。

## 3 実験内容

### 3.1 実験 1：オシロスコープによるパルス信号の波形観察

CdTe 検出器から出力された数 mV 程度の微小電圧信号を、前置増幅器及び比例増幅器で増幅・波形整形しオシロスコープで観察する。

### 3.2 実験 2：シングルチャンネルアナライザー（SCA）による波高分布の計測

様々な波高値を持つパルス信号を、波高値ごとに分けて計数を計測できるシングルチャンネルアナライザーを用いて測定し、計数率-電圧値についての波高分布グラフを作成する。

### 3.3 実験 3：パイルアップ効果

時間的にランダムに発生するパルス信号が極端に多いとき、信号同士が重ね合わさって元の波形を見出してしまうパイルアップ現象が起こる。これをファンクションジェネレーターで作った周期的矩形パルス信号を重ねさせることで擬似的に再現し、パイルアップの条件が変わることで信号計測にどう影響するのか考察する。

## 4 実験装置と手順

- デジタルオシロスコープ
- シングルチャンネルアナライザー
- カウンタ（PC）
- CdTe 検出器（前置増幅器内蔵）
- 比例増幅器
- BNC ケーブル・コネクタ
- 表計算ソフト
- 実験テキスト・筆記用具

#### 4.1 実験 1：オシロスコープによるパルス信号の波形観察

1. 検出器の出力とオシロスコープの入力をつないだ。
2. オシロスコープでトリガー、電圧軸、時間軸を調節し波形を表示した。
3. 波形表示を静止させ、パルス信号の形と波高値、及びパルス幅を読み取った。

#### 4.2 実験 2：シングルチャンネルアナライザー（SCA）による波高分布の計測

1. 実験装置を図 1 のように組み立てた。
2. SCA のダイヤルで、Lower LEVEL を 0.2V に、Window を 0.1V に設定した。
3. PC で 20 秒間カウンタのモニタを行い、計数を記録し表計算ソフトに入力した。
4. 同様の動作を Lower LEVEL の 0.1V 刻みで行い、極端に計数が少なくなった 2.8V まで記録した。
5. 表計算ソフトで横軸を Lower LEVEL の値（電圧値）縦軸を計数率 (cps) としてヒストグラム（度数分布）を作成した。

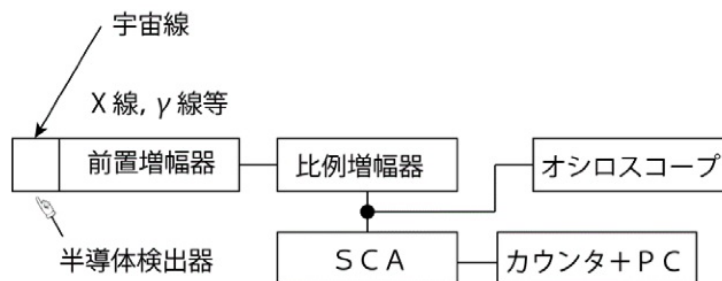


図 1 実験回路図

#### 4.3 実験 3：パイルアップ効果

1. 前節の実験回路の検出器側にファンクションジェネレーターを接続した。
2. 周波数 30kHz (duty 30 %)、波高値 1.5 V 程度、パルス幅 10  $\mu$ s の矩形波パルスが発生させ、0.2V から 4.2V まで 0.1V 刻みで波高分布を測定した（実験 3-1）。
3. 矩形波パルスの波高値（電圧値）を 3V に変更して、2V から 5.7V まで 0.1V 刻みで波高分布を測定した（実験 3-2）。
4. さらに矩形波パルスの周波数を 15kHz (duty15 %)、波高値を 1.5V に戻して 2V から 4V までの波高分布を測定した（実験 3-3）。

## 5 実験データ

### 5.1 実験 1：オシロスコープによるパルス信号の波形観察

実験結果を図 2 に示す。

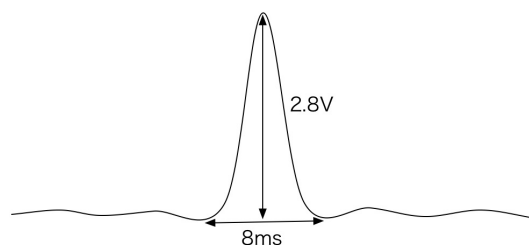


図 2 実験 1 結果

### 5.2 実験 2：シングルチャンネルアナライザー（SCA）による波高分布の計測

実験結果を表 1 に示す。

表 1 実験 2 結果

電圧[V]	計数	計数率[cps]
0.2	360	18
0.3	642	32
0.4	1724	86
0.5	2526	126
0.6	3365	168
0.7	1878	94
0.8	930	47
0.9	560	28
1	673	34
1.1	367	18
1.2	457	23
1.3	511	26
1.4	483	24
1.5	298	15
1.6	291	15
1.7	457	23
1.8	568	28
1.9	783	39
2	1089	54
2.1	1539	77
2.2	2641	132
2.3	4587	229
2.4	3266	163
2.5	386	19
2.6	19	1
2.7	13	1
2.8	9	0

### 5.3 パイルアップ効果

実験結果を表 2・3・4 に示す。

表 2 実験 3-1 結果

電圧[V]	計数	計数率[cps]
0.2	245	12
0.3	319	16
0.4	978	49
0.5	1542	77
0.6	2182	109
0.7	1358	68
0.8	622	31
0.9	380	19
1	473	24
1.1	54258	2713
1.2	704679	35234
1.3	148578	7429
1.4	1880	94
1.5	993	50
1.6	968	48
1.7	1354	68
1.8	1527	76
1.9	1787	89
2	1453	73
2.1	1366	68
2.2	2006	100
2.3	3389	169
2.4	3084	154
2.5	596	30
2.6	324	16
2.7	304	15
2.8	247	12
2.9	239	12
3	272	14
3.1	330	17
3.2	416	21
3.3	451	23
3.4	643	32
3.5	1112	56
3.6	1639	82
3.7	709	35
3.8	55	3
3.9	3	0
4	14	1
4.1	5	0
4.2	7	0

表 3 実験 3-2 結果

電圧[V]	計数	計数率[cps]
2	580	29
2.1	766	38
2.2	1062	53
2.3	1979	99
2.4	3346	167
2.5	1871	94
2.6	129	6
2.7	381	19
2.8	249328	12466
2.9	611827	30591
3	29666	1483
3.1	897	45
3.2	811	41
3.3	1015	51
3.4	1147	57
3.5	1289	64
3.6	1113	56
3.7	583	29
3.8	375	19
3.9	351	18
4	287	14
4.1	292	15
4.2	301	15
4.3	297	15
4.4	275	14
4.5	226	11
4.6	247	12
4.7	263	13
4.8	365	18
4.9	453	23
5	588	29
5.1	816	41
5.2	1508	75
5.3	1193	60
5.4	154	8
5.5	10	1
5.6	5	0
5.7	5	0

表 4 実験 3-3 結果

電圧[V]	計数	計数率[cps]
2	1288	64.4
2.1	1438	71.9
2.2	2502	125.1
2.3	4310	215.5
2.4	2388	119.4
2.5	350	17.5
2.6	159	7.95
2.7	136	6.8
2.8	111	5.55
2.9	133	6.65
3	155	7.75
3.1	195	9.75
3.2	232	11.6
3.3	268	13.4
3.4	373	18.65
3.5	584	29.2
3.6	702	35.1
3.7	178	8.9
3.8	13	0.65
3.9	8	0.4
4	2	0.1

## 6 計算データ

実験データより単位時間あたりの計数、すなわち計数率 (単位: cps) を以下の数式で計算した。

$$\text{計数率} = \frac{\text{計数}}{20} \quad (1)$$

表 1~4 の右欄にそれぞれの計数率の計算結果を記した。

## 7 波高分布のグラフと誤差評価

実験で得られた計数はランダムに発せられた  $\gamma$  線をカウントしたものであるため、誤差を含んでいると考えられる。統計的に起こる確率が小さく一定であるような事象にはポアソン分布を用いることができる。平均計数率を  $m$  とすれば、標準偏差  $\sigma$  は

$$\sigma = \sqrt{m} \quad (2)$$

と表される。よって波高分布のグラフで各電圧における誤差は、式 2 で計算した  $\pm\sigma$  の値を用いればよい。以上を踏まえて表 1~4 から電圧値と計数率の波高分布のグラフを描いたところ、図 3~6 のようになった。

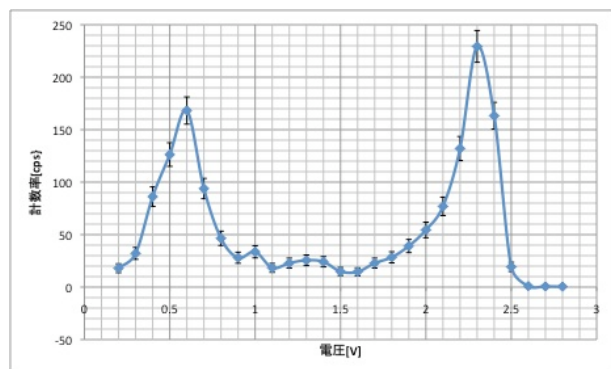


図 3 実験 2 波高分布

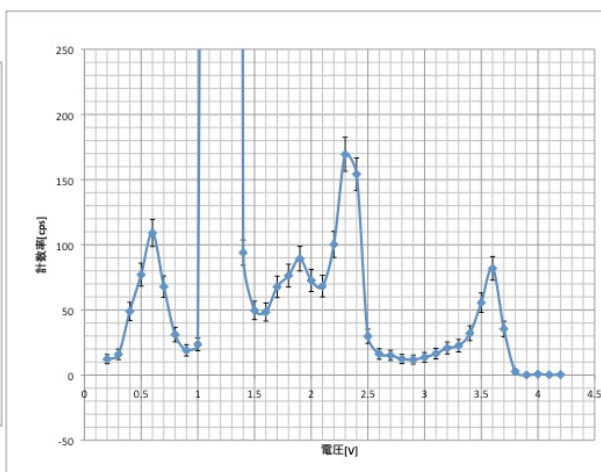


図 4 実験 3-1 波高分布

## 8 パイルアップ実験にて得られたピーク部の変化のまとめ

純粋な測定信号の波高分布を示した図 3 を見ると、0.6V 付近と 2.3V 付近でピークが見られる。これと図 4 を比べると、1.5V のパルスを加えた実験 3-1 では、元々の測定信号による 0.6V 付近と 2.3V 付近のピークのほかに、パルスの電源電圧に近い 1.2V 付近で極度に大きなピークが、また測定信号にパルスの電源電圧を足し合わせた 1.9V・3.6V 付近でもピークが見られる。これが波高分布を乱すパイルアップであると考えられる。ファンクションジェネレーターでは電源電圧を 1.5V としたが、実験回路のインピーダンスの影響で検出回路には実質 1.2V 程度がかかっていたと考えられる。元々のピークの大きさは 110~170cps、パイルアップの大きさは 80~90cps であり、信号計測に大きな支障が出ていることが分かる。

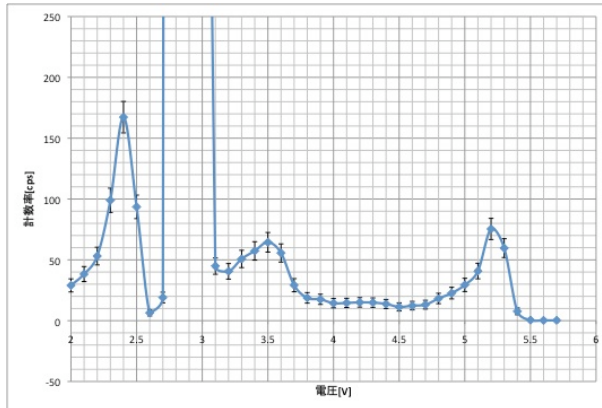


図5 実験 3-2 波高分布

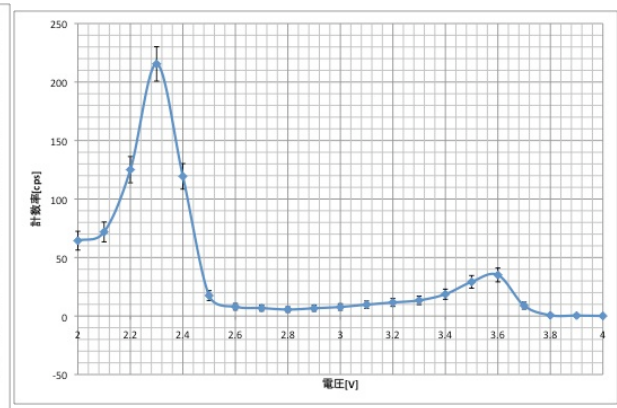


図6 実験 3-3 波高分布

次に図5と比較する。実験3-2ではパルスの電源電圧を3Vに上げたため、元々の測定信号による2.3Vのピークのほかに、電源電圧付近の2.9V、パイルアップと考えられる3.5V・5.2Vのピークが見られる。元の測定信号で0.6Vにあったピークの一部が3.5Vに、2.3Vにあったピークが5.2Vに反映されていると考えられる。元々のピークの大きさは170cps、パイルアップの大きさは70cps程度であるので、実験3-1と同様に信号計測の障害になっていることが分かる。

最後に図6と比べる。2.3V付近に見える大きさ215cpsのピークは元々の測定信号と考えられる。電源電圧を1.5Vに、duty比を実験3-1の半分に設定したため、図4と同様3.6V付近にパイルアップが見られるが、ピークの大きさが40cpsに減少している。これはduty比が下がったことによってパイルアップが起こる確率が下がったためと考えられる。パイルアップが小さくなったため、実験3-1・2よりも純粋な測定信号を補足しやすくなっていることが分かる。

## 9 検討課題の考察と実験結果のまとめ

### 9.1 研究課題

1. 実験3-2でパルスの電源電圧を3Vに上げたことで、元々の測定信号が重畳され、実験2で見られていたピークがそれぞれ最大3V増加し、高波高領域にまでピークが及ぶようになったと考えられる。測定信号がパルス信号に綺麗に重なった場合は元信号波高値+3Vの波形が得られるが、時間的にずれて重なった場合は単純な和にならず、微小ながらも横軸方向に広がった波高が観測できる。
2. 実験2より元々の測定信号に見られるピークは0.6Vで1787カウント、2.3Vで4587カウントである。このうち2.3Vのピークに着目すると、実験3-1ではパイルアップが3.6Vに見られ、計数は1639カウントである。よってパイルアップ率は

$$\frac{1639}{4587} = 0.3574 \quad (3)$$

となる。一方実験3-3では3.6Vにおける計数が702であるのでパイルアップ率は

$$\frac{702}{4587} = 0.1530 \quad (4)$$

となる。すなわちパルス信号の周波数が30kHzから15kHzへ50%減少した時、パイルアップ率は43%も減少し、実験値を説明できないことが分かる。7%の誤差は他の要因に起因すると考えられる。

3. パイルアップによって生じた波高がブロードなピークを持つのは、必ずしも測定信号とパルス信号が時間的にぴったり重畳せず、波高値が単純な和にならないためと考えられる。元々のピークが鋭いとしても、パルス幅が広ければそれと重なりあった波も広がりを持つことになる。よって、重なり合うパルス信号の幅がパイルアップのピークの形を決めていると考えられる。
4. 実験書のとおりシミュレーションを行った結果を次に示す。

まず、指数関数  $0.5^t$  で表されるパルス波が入射したと仮定する。ただし時間  $t=0[\mu\text{s}]$  に波高 1、 $t=10[\mu\text{s}]$  で波高は 0 になるとする。続いて波形は同じで時間軸に対して  $0\sim 20[\mu\text{s}]$  ずれた遅延パルス信号をランダムに入射させた。2つの隣り合うパルス波が  $4[\mu\text{s}]$  以内にあるとき、パイルアップが生じたとして2つの波高の和を計算するプロセスを遅延波 15 本に対して繰り返し行なった。シミュレーション結果 5 回分を図 7～16 に示す。

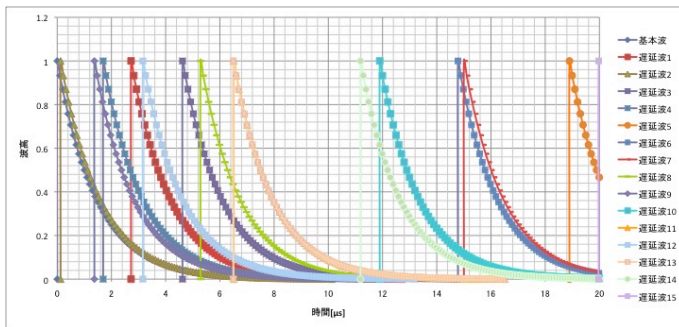


図 7 シミュレーション 1 回目：パルス波形

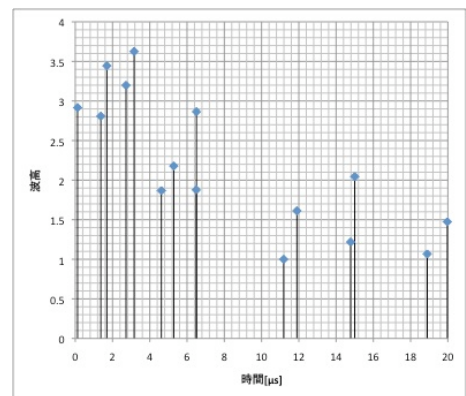


図 8 シミュレーション 1 回目：パイルアップ波高分布

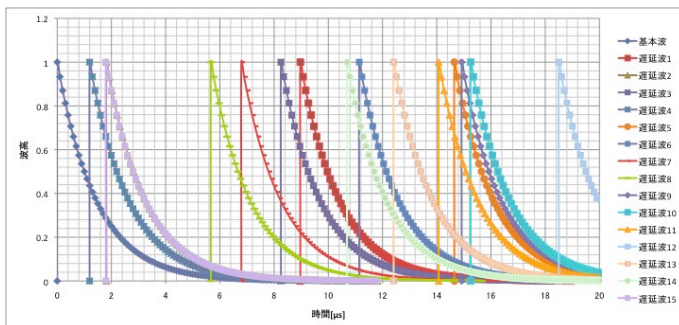


図 9 シミュレーション 2 回目：パルス波形

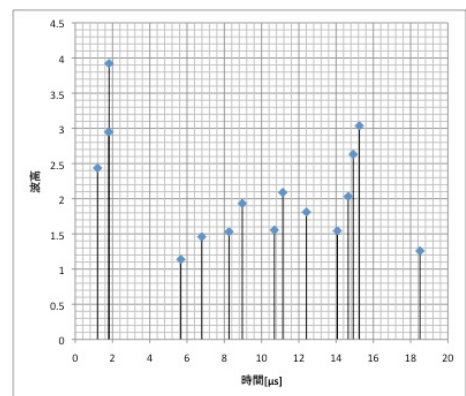


図 10 シミュレーション 2 回目：パイルアップ波高分布

シミュレーション結果より、パイルアップはパルス波形が密集している時間領域ほど多く見られることが分かった。 $20[\mu\text{s}]$  の間に 16 本のパルスが入射した場合の平均パイルアップ波高は 2 で、最小 1 から最大 4.5 程度までの波高が観察された。もし短時間により多くのパルスが入射した場合は、パイルアップ回数・波高共に大幅に増加すると予測できる。また、パイルアップが立つ位置は全くランダムであり



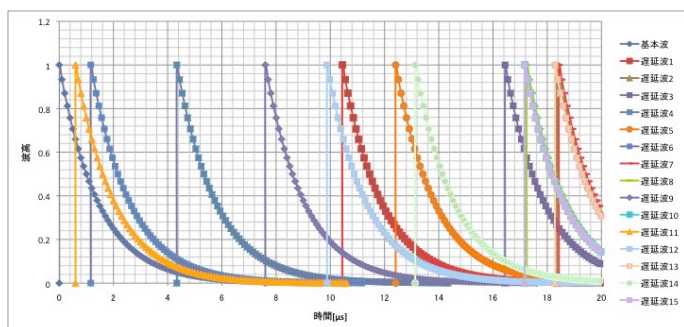


図 11 シミュレーション 3 回目：パルス波形

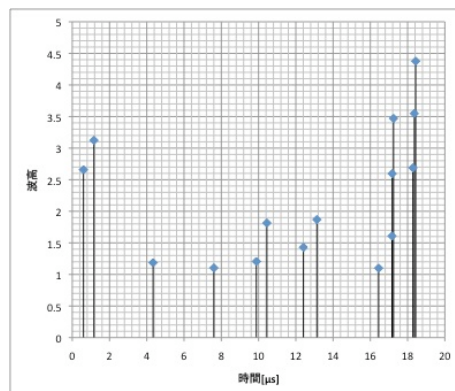


図 12 シミュレーション 3 回目：パイルアップ波高分布

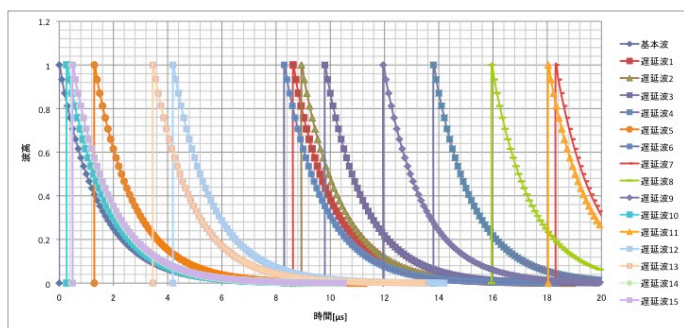


図 13 シミュレーション 4 回目：パルス波形

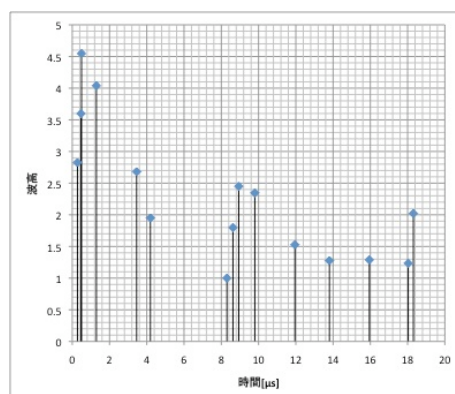


図 14 シミュレーション 4 回目：パイルアップ波高分布

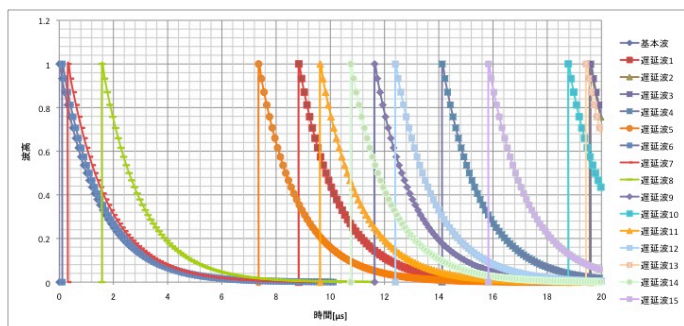


図 15 シミュレーション 5 回目：パルス波形

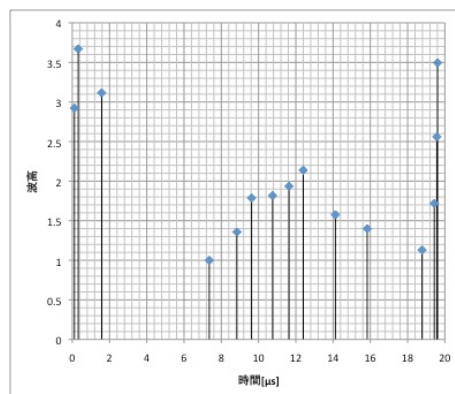


図 16 シミュレーション 5 回目：パイルアップ波高分布



予想がつかないことが分かった。放射線計測のようなランダムパルスが発生する場合は注意が必要である。

## 9.2 実験結果のまとめ

1. 微小信号計測には入力となる検出器、増幅を行うアンプ部分、入力信号の波高値ごとに計数をカウントする SCA、波形を観察するオシロスコープを用いる。SCA の Windows 幅を順次変化させることで、波高分布のグラフを作成することができ、ピークから検出した電磁波の特性を知ることができる。
2. 時間的にランダムに発生するパルス信号に他のパルス信号が重ね合わさるとパイルアップ現象が発生する。これは重ね合わさる信号が時間的に近く、パルス幅が広い時に顕著であり、場合によっては信号計測の妨げとなる。

## 10 調査課題

1. パイルアップの影響を減らす方法としては、フィルタを用いて測定信号の周波数を小さくし、パイルアップが起こる確立を減らすことが有効である。また、信号の波高値を下げればピークが広がることを防ぐことができると考えられる。  
また、計測を複数回行うことでより真値に近い平均計数を得ることができ、正確に波高分析ができると考えられる。
2. パイルアップ現象は測定信号のパルスが近づきすぎてしまうために発生するので、単位時間あたりに発生するパルス数がパイルアップ現象の特性を決めていると考えられる。ある時間内の計数が多ければ多いほどパルスの重ね合わせが起こる確立が高くなり、測定障害になると推測される。  
同時に、信号のパルス幅も重要な要因である。パルス幅が大きいほど隣り合うパルスが重なり合う確立が上がり、波高値が変化すると考えられる。
3. 計数率  $y$  は

$$\text{計数率 } y = \frac{\text{計数 } x}{\text{測定時間 } t} \quad (5)$$

で求められる。計数がポアソン分布をする時を考えると、標準偏差  $\sigma_x$  は

$$\sigma_x = \sqrt{x} \quad (6)$$

と表される。測定時間に誤差がないと仮定すれば、誤差伝搬の法則より計数率の平均値  $\bar{y}$  及び標準偏差  $\sigma_{\bar{y}}$  は

$$\bar{y} = \frac{\bar{x}}{t} \quad (7)$$

$$\sigma_{\bar{y}} = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2} = \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{t^2}} = \frac{\sqrt{x}}{t} \quad (8)$$

と評価できる。よって誤差は式 8 で表される。

4. 半導体検出器はエネルギー分解能が良く、検出した放射線のエネルギーに対応した位置に波高ピークを示す。すなわち、波高分析で計数率－ピーク電圧のグラフを作成したが、電圧はその放射線の持つエネルギーと等価で、計数率はその時の放射線の強度と等価である。よって、ピークが見られた電圧をエネ

ルギーに換算すれば、測定した放射線の持つエネルギーが分かり、放射線の種類・核種を知ることができる。

5. 放射線を使った医療機器について述べる。PET とは positron emission tomography の略で、日本語ではポジトロン断層法と訳される。人体中に陽電子を放出する化合物を投与すると、体内で  $\beta$  崩壊し陽電子 1 個を放出する。この陽電子が体内に多数存在する水分子電子などと衝突すると、電子の持っていたエネルギーが光子、すなわち  $\gamma$  線となって放出される。このガンマ線を検出すれば体内で活発に起こっている任意の現象を捉えることができる。応用として脳活動や癌診断に用いられている。

人体中に投与する化合物を放射線トレーサーと呼ぶが、治療で使われているトレーサーの核種の半減期は一般的に数分から数十分単位であり、PET で検出できる時間が限られるという問題が残っている。そのため、今後は長半減期を持つトレーサーを開発することが求められている。

一方、BNCT とは Boron Neutron CaptureTherapy の略で、ホウ素中性子捕捉療法と訳される。主に脳腫瘍を治療するための方法で、腫瘍細胞にほう素を取り込ませ、外部から中性子を送り込むことで核反応を起こし、その際発生する  $\alpha$  線で目的の細胞を選択的に破壊することができる。理論的には正常な細胞を傷つけず狙った悪性細胞のみを治療することができるので、脳神経の治療への応用が期待されている。

問題点としては、患者に照射する中性子を作ることができる場所が限られており、現段階では患者がわざわざ原子炉使節に赴いて治療を受ける必要がある。そのため、さらなる普及のためには病院内に設置できる中性子源用小型加速器の開発が急がれている。

## 11 謝辞

最後になったが、実験に協力してくれた班員の 6 人と、丁寧に指導して下さいった先生方・TA の方々に感謝申し上げたい。

## 12 参考文献

- 実験テキスト「微小信号測定」
- 「大阪大学物理学実験 2008」大阪大学物理教育研究会編 学術図書出版社 第 2 版第 1 刷 第 2 編
- 「放射線計測の理論と演習 上下巻」ニコラス ツルファニデイス 現代工学社 第 2 版
- 「半導体検出器の原理と応用」  
<http://www.rada.or.jp/database/home4/normal/ht-docs/member/synopsis/040303.html>
- 「Wikipedia」<http://ja.wikipedia.org/wiki/>
- 「BNCT」<http://www.m-clinic.jp/bnct.htm>
- 「BNCT 療法 解説のページ」<http://www.jnc.ne.jp/ffid0000/explanation.html>
- 「L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 2<sub>ε</sub> 美文書作成入門 改訂第 4 版」奥村晴彦著 技術評論社 第 4 版第 6 刷

以上