

2008 年度 卒業論文

USB 接続型 ADC を用いたデータ収集システムの構築の研究

神戸大学理学部物理学科  
粒子物理研究室  
0313103s  
井上 将尋

## 概要

今研究では、 $\mu$ -PIC のよりシンプルなデータ収集システム構築に向けて USB 接続型 ADC の性能評価とデータの実測を行った。

$\mu$ -PIC とはガス増幅を用いた粒子検出器である。Anode をピクセル状に配置することで Anode 近傍に非常に強い電場を発生させ、高い増幅率を可能にしている。現在の  $\mu$ -PIC のデータ収集システムでは CAMAC モジュールという少々大がかりなシステムを用い、PC の PCI ボードに設置された専用のインターフェースでデータを読み取っている。そのため、専用の PC でしかデータが取れない等の問題があった。この改善策として USB 接続型の ADC の導入が考えられた。

これにより、よりシンプルで汎用的なデータ収集システムを作ることができる。

本研究で用いた USB 接続型 ADC は、テクノランドコーポレーションにより新たに開発されたもので、この ADC には Windows マシン用のドライバが付属されており、今回はこのドライバを使用した。しかし、データの収集用プログラムなどは無く、通信用のソフトなどは自作する必要があり、そのためソフトを自作しそれを用いて測定を行った。

本研究では USB 接続型 ADC の性能実験として、ゲート入力信号の限界頻度の測定、PC へのデータ転送速度の測定、各チャンネルのキャリブレーション、 $\mu$ -PIC データの実測を行った。

## 目次

### 第1章 $\mu$ -PIC

- 1.1  $\mu$ -PIC とは . . . . . 1
- 1.2  $\mu$ -PIC の構造と動作原理 . . . . . 1
- 1.3  $\mu$ -PIC の優れた点 . . . . . 2

### 第2章 測定機器

- 2.1 ADC . . . . . 3
- 2.2 USB . . . . . 5
- 2.3 USB 接続型 ADC . . . . . 5
- 2.4  $\mu$ -PIC のデータ収集システム . . . . . 7
- 2.5 通信プログラム . . . . . 8

### 第3章 測定と測定結果

- 3.1 GATE 信号の入力頻度の限界の測定 . . . . . 9
- 3.2 PC へのデータ転送速度の測定 . . . . . 10
- 3.3 各チャンネルのキャリブレーション . . . . . 11
- 3.4 USB 接続型 ADC を用いた  $\mu$ -PIC データの実測 . . 12

### 第4章 考察

- 4.1 ADC の時間分解能 . . . . . 14
- 4.2 データ転送速度 . . . . . 14
- 4.3 ADC の精度 . . . . . 14

### 第5章 まとめと今後の課題 . . . . . 16

- 第6章 謝辞 . . . . . 17
- 参考文献 . . . . . 18

# 第1章 $\mu$ -PIC

## 1.1 $\mu$ -PIC とは

$\mu$ -PIC とは MicroPixelChamber の略でガス増幅を用いた粒子検出器の一種である。[1]その基板はプリント基板を作成の技術で作られており、大面積化、量産が可能。また Anode がピクセル状に配置されており高い増幅率を得られる等の特徴がある。

## 1.2 $\mu$ -PIC の構造と動作原理

### 構造

$\mu$ -PIC の基板には直径  $50\mu\text{m}$  の Anode が  $300\mu\text{m}$  の間隔でピクセル状に配置されており、その周りを直径  $240\mu\text{m}$  の Cathode が取り囲む形をしている(図 1.2.2)。Anode、Cathode には銅が用いられ表面はニッケルに覆われている。Anode、Cathode 間の絶縁部にはポリイミドが使われている。基板の上方には DriftPlane と呼ばれる電極があり負の電圧がかけられる。また、 $\mu$ -PIC 内部はアルゴンとエタンの混合ガスに満たされている(図 1.2.1)。この構造により、Anode から DriftPlane に向かう電場(ドリフト電場)ができ、Anode 近傍では強い電場を発生させることができる。

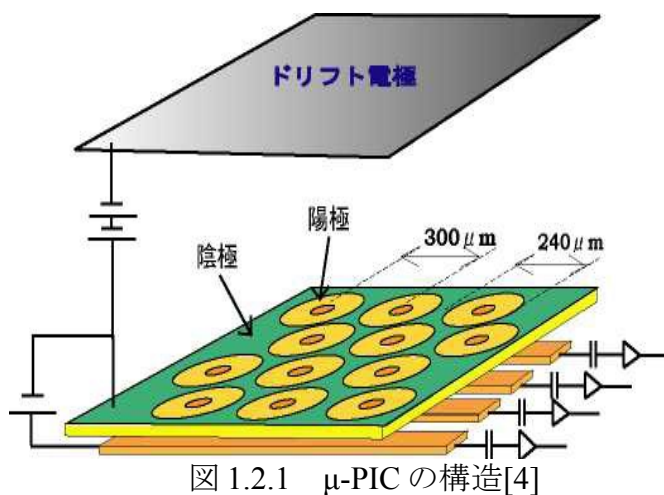


図 1.2.1  $\mu$ -PIC の構造[4]

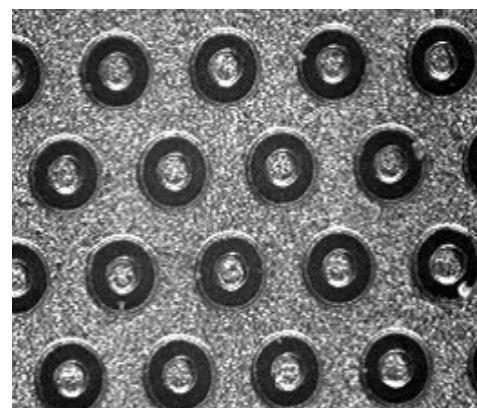


図 1.2.2  $\mu$ -PIC の基板構造[4]

## 動作原理

$\mu$ -PIC 内部に入射した粒子線は内部のガス分子との相互作用により電子と陽イオンのペアを生成する。生成された電子と陽イオンのペアはドリフト電場によって、電子は基板方向に、陽イオンは Drift Plane 方向に移動することになる。Anode 付近まで移動した電子は、その強い電場によって電子雪崩を発生させ増幅され Anode に吸収されて検出される。電子雪崩で発生した陽イオンは Cathode に吸収される。(図 1.2.3)

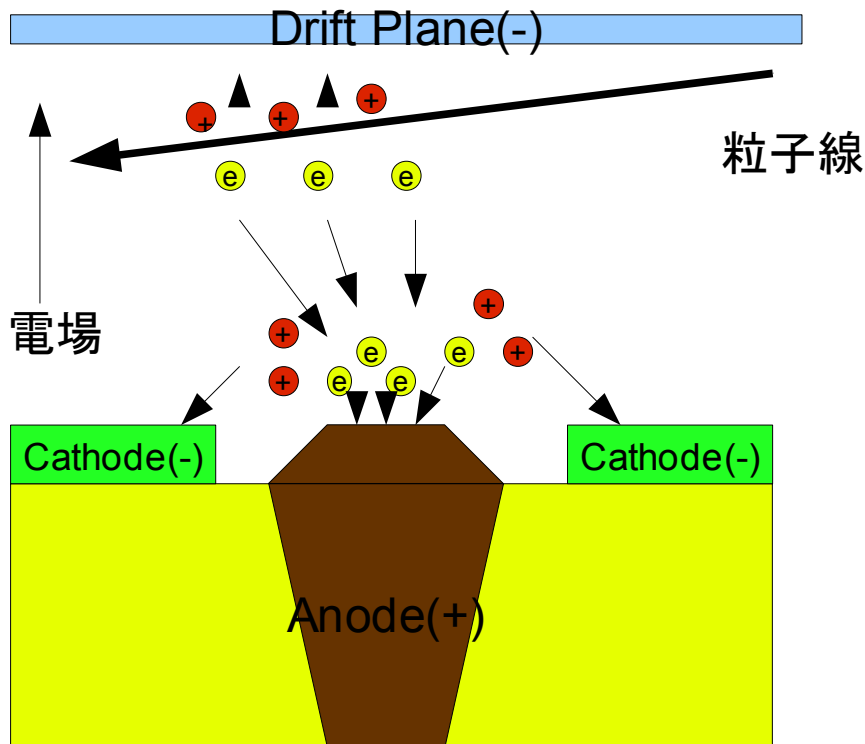


図 1.2.3  $\mu$ -PIC の動作原理

### 1.3 $\mu$ -PIC の優れた点

ここでは  $\mu$ -PIC の優れた点を述べる。

- ・ 大面積化、及び量産が容易

$\mu$ -PIC はプリント基板を製造する際に用いられる PCB 技術で作られている。そのため、大面積化や大量生産が比較的容易である。[2]

- ・ 高いガスゲイン

$\mu$ -PIC は Anode がピクセル状に基板上に配置されているため、ピクセル近傍では非常に強い電場をさせることができる。これにより高い増幅率を得ることができる。また、Cathode がリング状に Anode を取り囲んでいるため、放電現象に影響のある Cathode 近傍の電場を弱くすることができる。このことによって Anode に、より高い電圧を印加できるようになるので Anode 近傍の電場をより強くすることが可能となり、増幅率を高くすることができる。[2]

- ・ 放電損傷の影響が少ない

$\mu$ -PIC は Anode をピクセル状に配置しているので放電によって電極が破壊されても、その被害はピクセル 1 つのみで済む。[2]

## 第2章 測定機器

### 2.1 ADC

ADCとは Analog to Digital Converter の略でアナログ信号をデジタル信号に変換する装置である。μ-PICで検出された信号はこのADCによってデジタル化され、記録されることになる。ここでは主なADCの動作原理を3つとその特徴について紹介する。

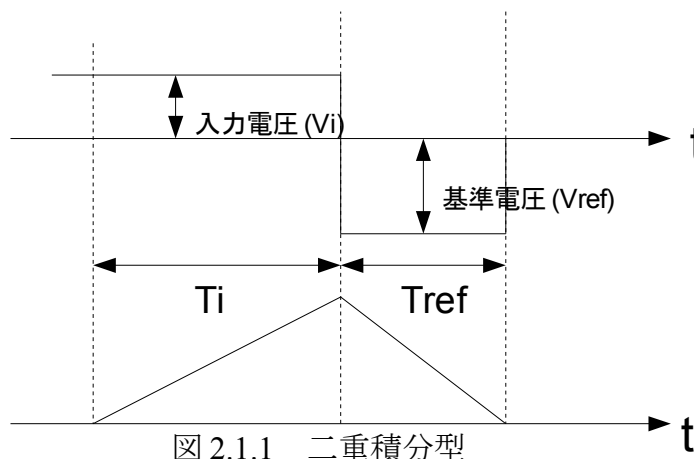
#### 二重積分型

図2.1.1で表すように入力電圧( $V_i$ )を一定時間( $T_i$ )積分した後、基準電圧( $V_{ref}$ )で逆積分を0になるまで行う。逆積分にかかる時間( $T_{ref}$ )を計ることにより値を求める。積分するためノイズに強く、比較的安価であるが、A-D変換時間は入力電圧に比例して長くなる。[3]

変換式は

$$V_i = \frac{V_{ref}}{T_i} \times T_{ref}$$

で表され、入力電圧は  $T_i$  と  $T_{ref}$  の比によって求められる。



## 逐次比較型

図 2.1.2 で表すように入力電圧( $V_i$ )とあらかじめ用意した基準電圧( $V_{ref}$ )の 1/2 と比較、入力電圧が大きければ  $B_1=1$  とし、小さければ  $B_1=0$  とする。入力電圧と  $V_{ref} \times (B_1/2 + 1/4)$  を比較し、入力電圧が大きければ  $B_2=1$ 、小さければ  $B_2=0$ 、というように比較を繰り返すことによって値を求めていく。[3]

回路構造が簡単で変換時間はデジタル出力のビット数で決まり一定であるが、入力電圧と比較する電圧を作る精度によって全体の精度が左右される。

今回、研究に用いた ADC はこのタイプの変換方式を採用している。

変換式は

$$V_i = V_{ref} \left( \frac{B_1}{2} + \frac{B_2}{2^2} + \frac{B_3}{2^3} + \dots + \frac{B_{n-1}}{2^{n-1}} + \frac{B_n}{2^n} \right)$$

で表される。ただし  $B_i = 0$  or  $1$ 、 $n$  は出力ビット数である。

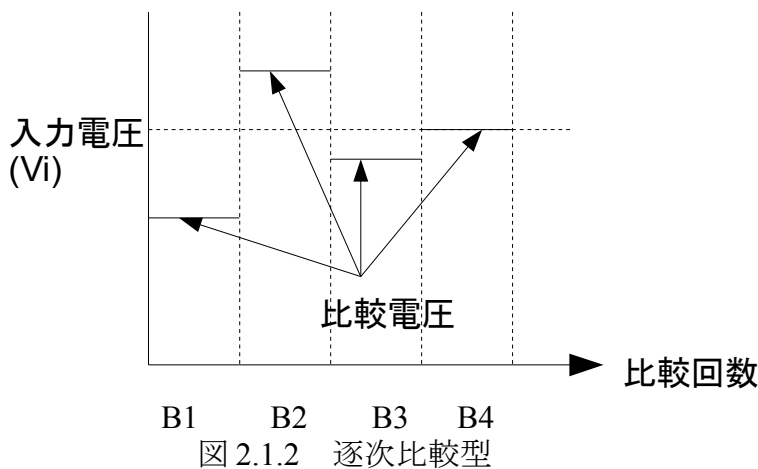


図 2.1.2 逐次比較型

## 並列比較型

出力ビット数を  $n$  とすると、図 2.1.3 で表すように基準電圧( $V_{ref}$ )を(2 の  $n$  乗)等分した電圧と入力電圧( $V_i$ )を一度に比較して値を得る。

A-D 変換速度は非常に速いが、 $n$  ビットの分解能を得るのに(2 の  $n$  乗-1)個の比較器が必要となり、回路規模が極端に大きくなる。[3]

変換式は

$$V_i = V_{ref} \left( \frac{B_1}{2} + \frac{B_2}{2^2} + \frac{B_3}{2^3} + \dots + \frac{B_{n-1}}{2^{n-1}} + \frac{B_n}{2^n} \right)$$

で表される。ただし  $B_i = 0$  or  $1$ 、 $n$  は出力ビット数である。

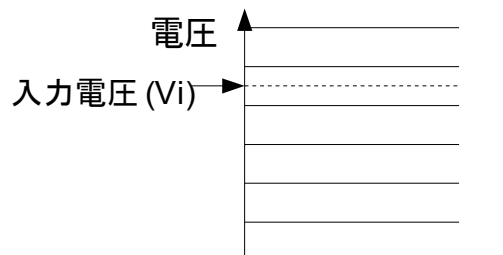


図 2.1.3 並列比較型

## 2.2 USB

USBとはUniversal Serial Busの略で、PCと外部機器をつなぐバス規格の一種で、現在ほとんどのPCに標準的に装備されている。USB2.0規格で480Mbpsの高速通信が可能で、PCの電源を入れたままで着脱が可能なプラグアンドプレイにも対応している。



図 2.2 USB 端子の写真

## 2.3 USB 接続型 ADC



図 2.3.1 USB 接続型 ADC(B-QV715 型)

### USB 接続型 ADC について

今回の研究で用いた USB 接続型の ADC はテクノランドコーポレーション社製の B-QV715 型であり、以下のような機能を持つ。

- 4CH の変換回路
- 入力された電荷を積分し、電圧として読み取り A-D 変換を行う。
- 50ns～3 $\mu$ s のゲート信号幅
- 12bit のデータ分解能
- 40000 イベントまでのデータを内部メモリに保存
- 保存されたデータは USB 経由で PC へ転送



### A-D 変換について

この USB 接続型 ADC は入力された電荷を積分して電圧として読み取る。

各 CH に入力された信号をゲート信号が ON になっている間だけ、電流積分する。それを電圧に変換して内部メモリに保存する。

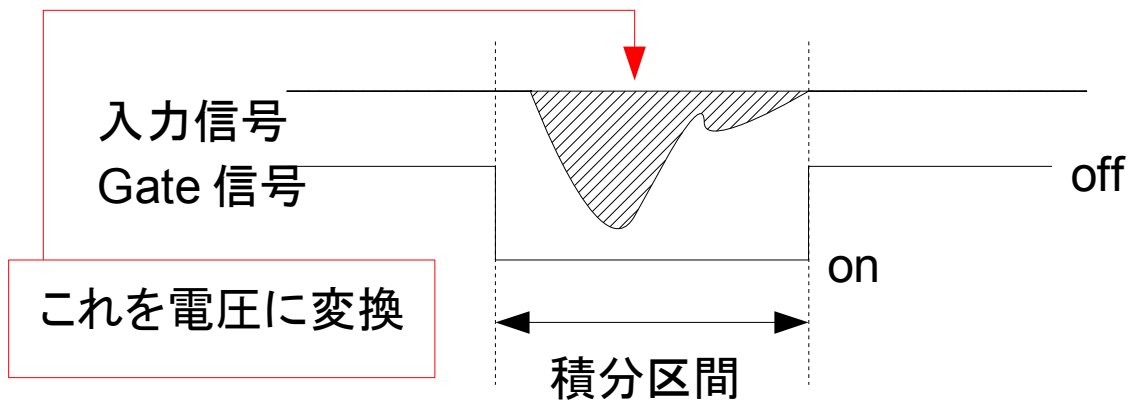


図 2.3.2 A-D 変換

$$V = IR$$

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

より

$$V = R \frac{dQ}{dt}$$

両辺を時間積分して

$$\int V dt = RQ$$

両辺を R で割って

$$Q = \frac{1}{R} \int V dt$$

となり、電荷と電圧の関係式が求められる。

## 2.4 $\mu$ -PIC のデータ収集システム

現在の  $\mu$ -PIC のデータ収集システムでは、まず  $\mu$ -PIC から出力された信号は AMP で増幅され、分配器で2つに分けられる。分配器からでた一つ目の信号は DISCRIMINATOR により、入力信号がある一定の値を超えたときだけ矩形波を出力する。この段階で値の小さいノイズはカットされる。その後、GATE GENERATOR により一定の時間幅の GATE 信号が生成され、ADC へ入力される。一方、分配器で分けられたもう一つの信号は 10 m のケーブルによって delay され ADC に送られる。ADC は入力信号を GATE 信号の出ている時間だけ積分し、デジタル化する。その後、CAMAC Controller を通じて PC へと渡し、データとして保存される。図 2.4.1 に信号の流れを示したブロック図、図 2.4.2 に実際の収集システムの写真を示す。

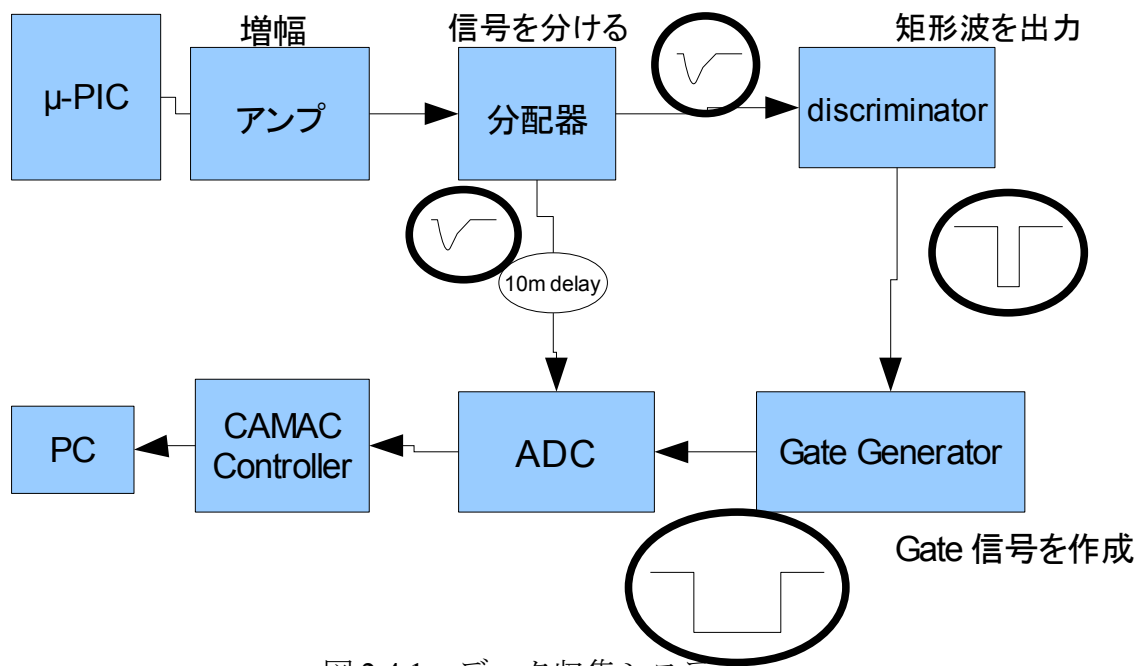


図 2.4.1 データ収集システム

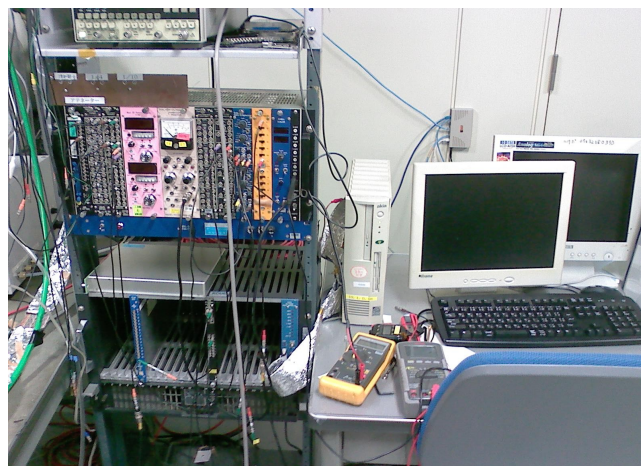


図 2.4.2 実際の収集システムの写真

## 2.5 通信プログラム

今回用いた USB 接続型 ADC には Windows 用のドライバが添付されているのみで、データ収集用のソフト等は用意されていなかった。このため、通信用のプログラムは自作しなければならなかった。

添付されていたドライバは、ADC 内部でインターフェイスを USB にするために用いられているチップの製造元である FTDI 社が配布している VCP(Virtual COM Port)ドライバといわれるもので、その名の通り PC に USB を仮想的な Communication Port として認識させるものである。これによって、USB を実質 COM ポートとして扱うことができる。今回の測定では、通信プログラムとして C 言語を用いて Win32API 関数を使い COM ポート用プログラムを作成し測定を行った。

PC と ADC の通信の様子を図 2.5 に示す。PC から ADC に測定回数の設定を送ると ADC から応答のメッセージが返ってくる。そして PC からの合図で ADC は測定を開始する。測定が終了すると、その旨を通知するメッセージが送られてくる。その後 PC からデータの要求を行い、データを取得するという流れになる。ADC から送られてくるデータはチャンネル番号とそのチャンネルの測定データをアスキー文字の文字列であり、測定データも 16 進数を表す文字(0~F)で送られてくる。そのため、今回作成したのプログラムではデータを 16 進数から 10 進数に変換し、ファイルへと書き込むようにした。

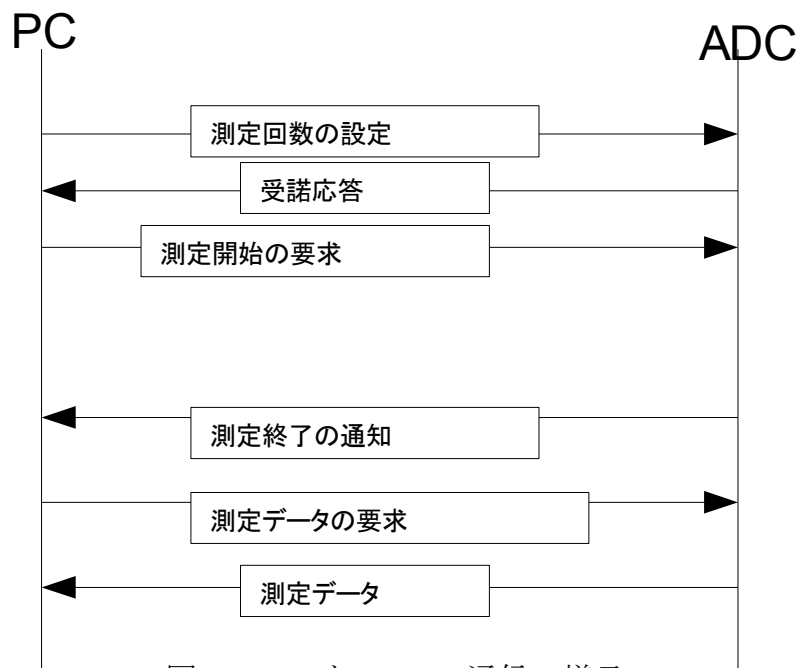


図 2.5 PC と ADC の通信の様子

### 第3章 測定と測定結果

#### 3.1 GATE 信号の入力頻度の限界の測定

ADC に送られる GATE 信号の周波数の上限を求める。

ADC の入力端子には何も接続せず、GATE 入力端子にはパルスジェネレータで発生させたテスト用の定周波数の GATE 信号を入力した。接続の様子を図 3.1.1 に示す。今回は ADC 内部のメモリにデータが保存されるまでの時間を計測した。

今回は 500Hz から 100Hz ずつ周波数を上げていき、1000 イベント測定するのにかかる時間を調べる。3.4kHz～3.7kHz は特に詳しく調べるため、10Hz ずつ変化させた。

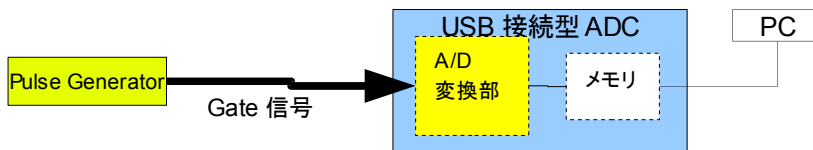


図 3.1.1 接続模式図

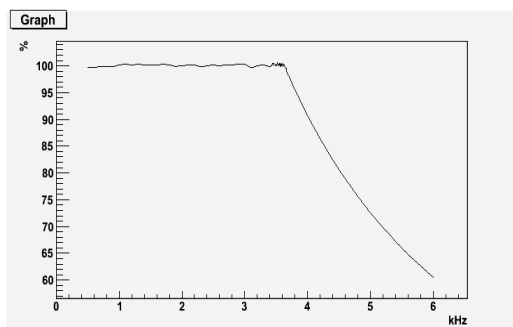


図 3.1.2 周波数とデータ収集率

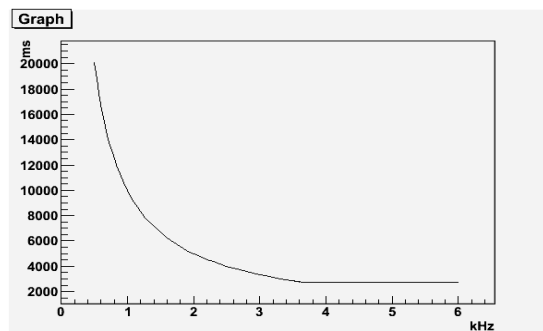


図 3.1.3 周波数と測定時間

測定結果のグラフを、図 3.1.2 に示す。横軸は GATE 信号の周波数、縦軸はデータの収集率である。ここで、データの収集率は

$$\text{データ収集率} = \frac{1000\text{event}}{\text{GATE信号周波数 (Hz)} \times \text{測定にかかった時間 (s)}} \times 100(\%)$$

で求めた。

図 3.1.2 からみて判るように入力レートが 3.6kHz 付近を超えたところから、データ収集率が急に落ち始めている。横軸に GATE 信号周波数、縦軸に測定にかかった時間に取り直したグラフを図 3.1.3 に示す。グラフから約 3.6kHz 以上の周波数では一定になっていることがわかる。

以上のことより、この USB 接続型 ADC の GATE 信号の入力頻度の限界は約 3.6kHz であることが判った。現在の CAMAC を用いたシステムでは、信号の測定頻度は 1kHz 程であるのでこの値は十分に改善されているものといえる。

### 3.2 PC へのデータ転送速度の測定

今回用いた USB 接続型 ADC は測定したデータを一時的に内部メモリに保存し、測定が終了した後、データが PC へと送られる仕組みとなっている。そこで、内部メモリから PC へのデータ転送の速度を測定してみた。ADC の入力端子には何も接続せず、パルスジェネレータでテスト用の GATE 信号を作り GATE 入力端子に接続する。接続の様子を図 3.2.1 に示す。測定回数を 10 回から 1000 回まで 10 回ずつ増やしていき、測定終了後、ADC 内部のメモリから PC にデータを送り終えるまでの時間を測定した。

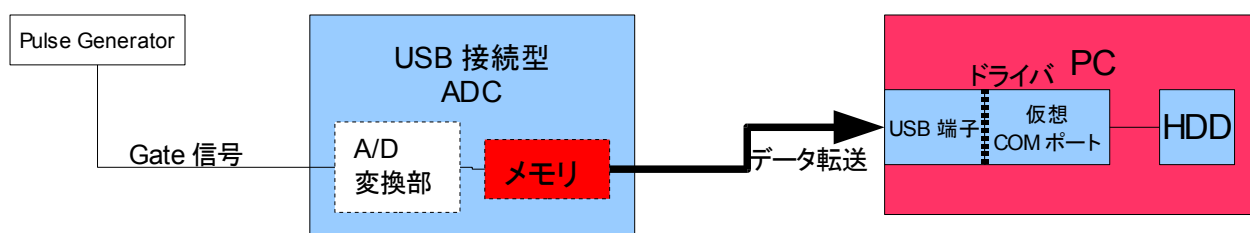


図 3.2.1 接続模式図

その結果を図 3.2.2 に示す。1 イベントあたり約 7.6ms も必要になったことがわかった。ADC からは測定結果が 1CH 当たり 6 文字のアスキー文字で送られてくるので、各文字のスタート、ストップビット、1 イベントで 4CH 分送られてくることを考えると、この ADC のデータ転送速度は、約 30kbps であることが判る。

USB2.0 規格の通信速度が 480Mbps であることを考えると非常に遅い。10000 分の 1 以下の速度である。

この原因として、ドライバの問題、ADC 内部のファームウェアの問題等が考えられる。ドライバの問題である場合の解決案として、異なるドライバでのテストも試みた。先ほどの測定で用いたドライバの配布元である FTDI 社が提供しているドライバはもう一つあり。そちらを用いた同様の測定も行った。このドライバは、デバイスを USB として直接通信するもので通信プログラム作成用のライブラリも一緒に配布されていたので、それを用いて先の測定用プログラムと同等のプログラムを作り測定した。

結果は通信速度はどちらのドライバを用いた場合も変わらず、約 30kbps 程しか出せなかった。以上より、この低速通信の原因は ADC 内部のファームウェアが問題であると考えられる。

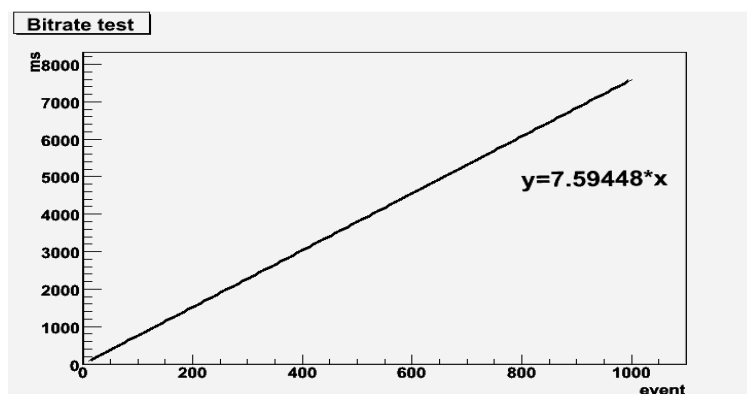


図 3.2.2 転送速度の測定結果

### 3.3 各チャンネルのキャリブレーション

ADCがある入力電荷量に対してどのような値を出力するのか調べるためにADC各チャンネルごとにキャリブレーションを行った。  
パルスジェネレータに1000[pF]のコンデンサを繋ぎ、矩形波を流し、同期をとったもう一台のパルスジェネレータでGATE信号を作りGATE入力端子に接続した。接続の様子を図3.3.1に示す。矩形波を出力するパルスジェネレータの出力電圧を50mV~450mVまで50mVずつ変化させ測定を行った。測定回数は1000回ずつでこれを各チャンネルごとに実行した。

ADCに入力される電荷量は  
入力電荷をQ[C]、コンデンサー容量C[F]、電圧V[V]とすると  
$$Q=CV$$

で計算される。

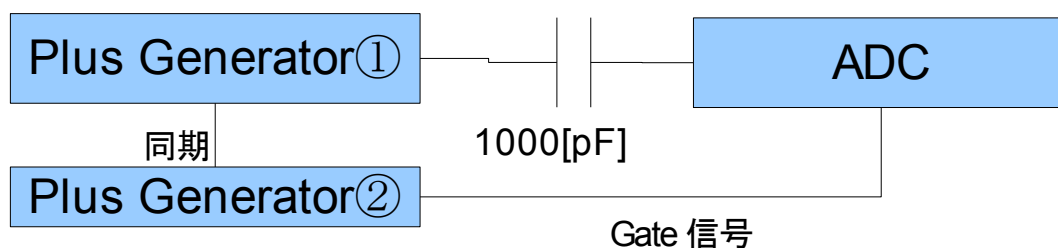
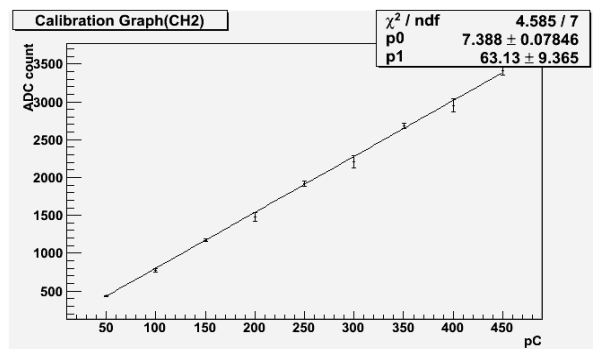
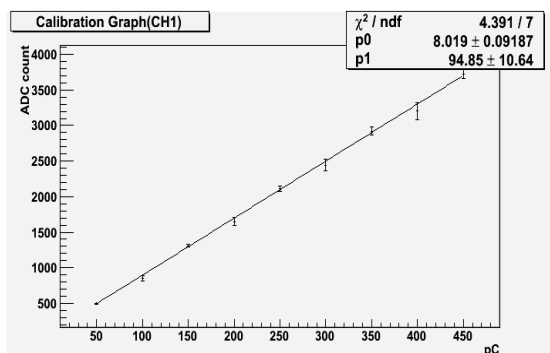
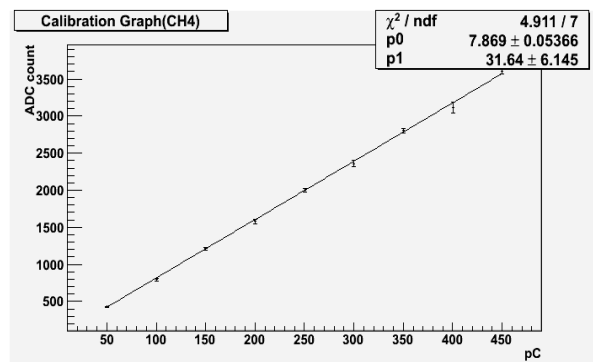
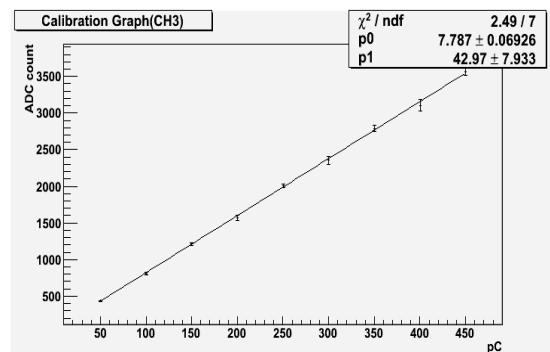


図 3.3.1 接続模式図



各チャンネルごとの測定結果を図3.3.2に示す。各グラフの横軸がADCに入力される電荷



量、縦軸がADCの出力値である。

b.CH2

c.CH3

a.CH1

d.CH4

図 3.3.2 各チャンネルの測定結果

グラフから判るように

$$\begin{aligned} \text{CH1} &: y = 8.019 x + 94.85 \\ \text{CH2} &: y = 7.388 x + 63.13 \\ \text{CH3} &: y = 7.787 x + 42.97 \\ \text{CH4} &: y = 7.869 x + 31.64 \end{aligned}$$

x : 入力電荷量  
y : ADC 出力値  
となった。

ADC 1count 当たり約 0.129[pC]である。

### 3.4 USB 接続型 ADC を用いた $\mu$ -PIC データの実測

実際に USB 接続型 ADC を  $\mu$ -PIC のデータ収集システムに組み込んで測定を行った。図 2.4.1 の ADC と CAMAC Controller の部分が USB 接続型 ADC に置き換わった形である。今回は 10000 イベント測定しヒストグラムを作成した。

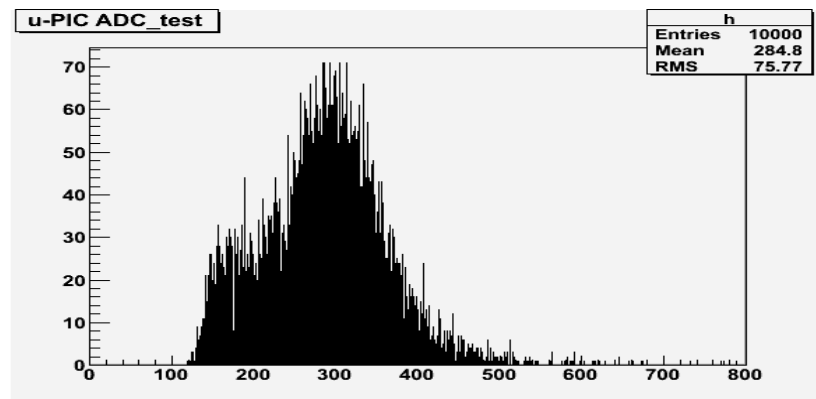
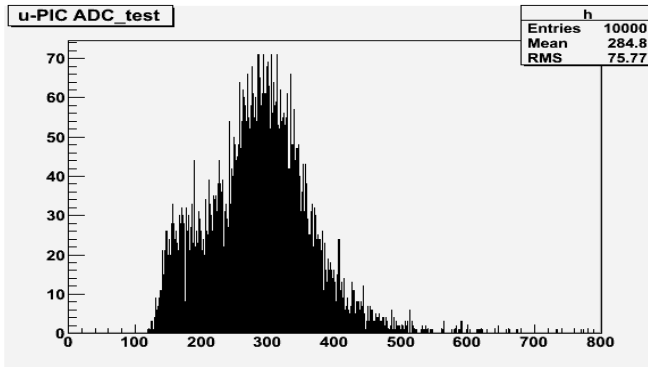


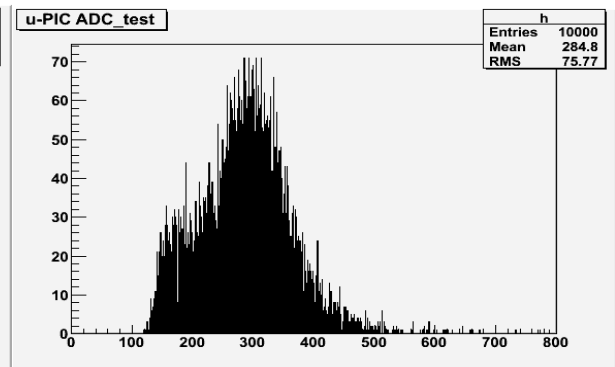
図 3.4.1 データの実測での結果のヒストグラム

作成したヒストグラムを図 3.4.1 に示す。ガウス分布は見えているようである。まだ AMP を含めたキャリブレーション等を行っていないため、この結果から増幅率等は計算することができない。

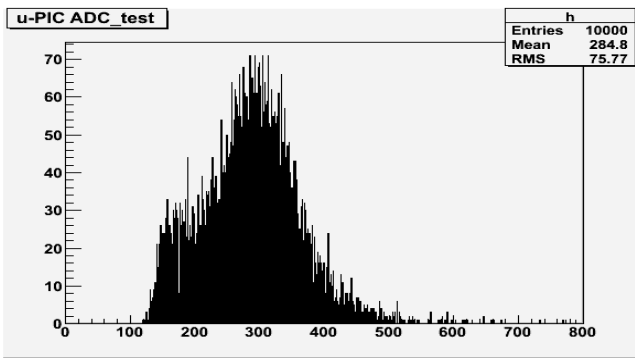
ヒストグラムをよく見てみると極端な凹凸が目立つように思われる。原因として、ADC の精度の問題が考えられる。そのためヒストグラムのビンの幅を増やしてみた。その結果が図 3.4.2 である。それぞれビン幅を 2、4、8、16、32、64 にしたものであるが幅を 32 にしたものの位まで凹凸が目立つ。



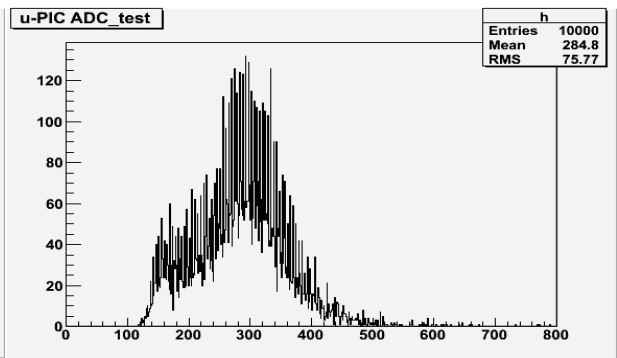
a. ビン幅 2



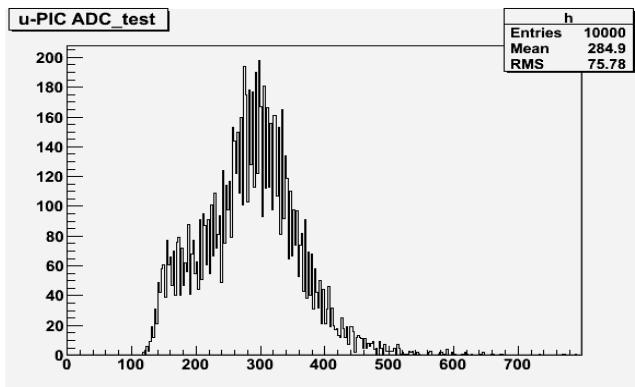
b. ビン幅 4



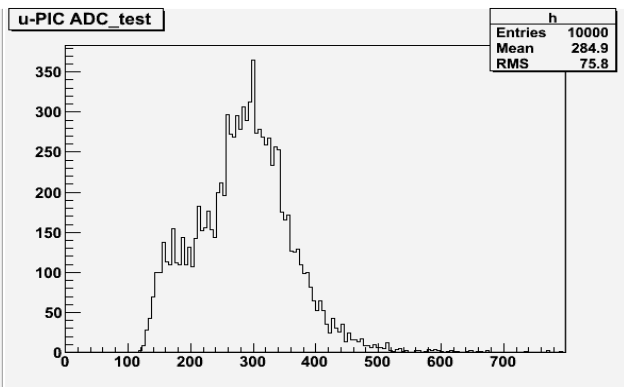
c. ビン幅 8



d. ビン幅 16



e. ビン幅 32



f. ビン幅 64

図 3.4.2 ビン幅を変更したヒストグラム



## 第4章 考察

### 4.1 ADCの時間分解能

GATE信号の入力頻度の限界の測定からわかるように約3.6kHzまで正常に測定することができる。現行のCAMACを用いたシステムでは、信号の測定頻度は1kHz程で行っているため、その値と比べると使用条件を十分満たしている。また、A-D変換方式に逐次比較型を用いているので、変換時間が入力された値によらず一定である。そのため、時間分解能は入力される信号にかかわらず変化しない。これらのことから、本研究に用いたUSB接続型ADCの時間分解能は $\mu$ -PICのデータ収集システムに組み込むためには十分な値であり、問題なく使用できるものと思われる。

### 4.2 データ転送速度

本研究に用いたUSB接続型ADCはインターフェイスがUSBであるにもかかわらず、転送速度は約30kbps程しか出ないことがわかった。この値はCOMポートの通信規格で定められた通信速度の38400bpsに由来するものと考えられ、USBを仮想的なCOMポートとして動作させていることに問題があると思われる。COMポートの通信速度の規格では最も速いもので921600bpsが用意されているが、今回使用したUSB接続型ADCでは38400bpsのモード以外では一切動作しなかった。それを改善させようと、別のドライバを使用して付属のライブラリでプログラムを組み直してみたが、その通信速度の設定もCOMポートの通信速度規格に依存しており、38400bpsの設定以外ではADCが動作しなかった。これらのことから、このADCの通信速度はADC内部のファームウェアで決定されていて外部からそれを変更することはできないと考えられる。このADCが一度の測定で内部メモリに保存できるイベント数は40000イベントで、この転送速度だと40000イベント転送するのに5分以上かかる計算になる。単発での測定であれば少々我慢すればよいだけであるが、長期間の連続した測定では使用できない。これは大きな問題のように思われる。

### 4.3 ADCの精度

図3.4.1のヒストグラムをよく見てみると極端な凹凸が目立つように思われる。本来であればもう少し滑らかに見えるはずのグラフもきれいには見えていない。この原因としては、ADCの精度の問題が考えられる。今回用いたADCは変換方式として逐次比較型を用いているが、入力電圧と比較される比較電圧が精度よく作られていないのではないだろうか。比較電圧が高い精度でつくられていないと、誤った値と入力電圧を比較することになり得る結果に誤差が生じ値の偏りが発生する。例えば、分解能1ビットの逐次比較型ADCで基準電圧を11、入力電圧を1から10まで1きざみで10回入力したとする。比較電圧が精度よく作られたとして5.5 (11/2) とすると出力される値は0が5回、1が5回のはずである(図4.3.a)。しかし、比較電圧が精度良く作られず6.5としてみよう。すると出力されるのは0が6回で、1が4回である(図4.3.b)。このように比較電圧が高い精度で作られていないと出力される値に大きな影響を及ぼす。

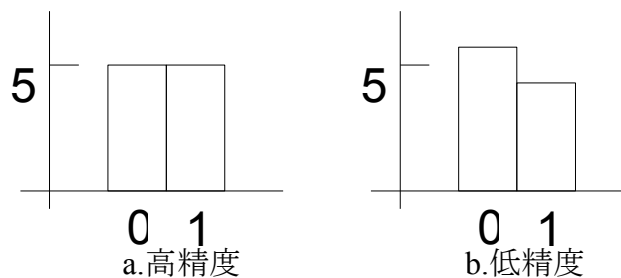


図4.3 分解能1ビットADCのヒストグラム

これを調べるためヒストグラムのビンの幅を増やしてみる。データの右端のビットを第0ビットとするとビンの幅1で凹凸が目立つなら第0ビットに問題が、幅2で目立つなら第1ビット、幅4で第2ビットと、どのビットに問題があるかわかるはずである。すると、幅を32にしたもの位まで凹凸が目立つ(図3.4.2)。このことから、第5ビットに問題があるように思われる。このADCはA-D変換に逐次比較型を用いているので基準電圧から比較する電圧(第5ビットなら基準電圧の1/128)を作る段階で誤差が生じているのではないかと考えられる。

## 第5章 まとめと今後の課題

### まとめ

今回の測定でUSB接続型ADCの性能と問題点を知ることができた。時間分解能については入力頻度約3.6kHzまで計測可能で問題ない。しかしデータ転送速度は予想していたよりも遥かに遅く約30kbpsであり、標準的なUSBの480Mbpsに遠く及ばず不満の残る結果となった。これはADC内部の問題であると思われ、それについての改善案も現状では思い浮かばない。実際に収集システムに組み込んだの実測も第5ビットの比較精度に問題がありそうで、やや疑問が残る結果となってしまった。以上のことから今回の研究ではUSB接続型ADCはすぐに $\mu$ -PICのデータ収集に使用できるという結果を得ることができなかった。今後も精度の検証などが必要である。

### 今後の課題

今後の課題としては

- ・計測精度の更なる検証
- ・AMPを含めたキャリブレーション
- ・linux用通信プログラムの作成

などが挙げられる。

## 第6章 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導、助言をいただきました指導教官である越智敦彦先生に深く深く感謝いたします。

また、研究生として至らない私をご指導下さいました粒子物理研究室の皆さん、特に  $\mu$ -PIC グループ、本間康浩先生をはじめ本間研究室の皆さんに心からお礼申し上げます。

本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] Atsuhiko Ochi, Tsutomu Nagayoshi, Satoshi Koishi, Toru Tanimori, Tomohumi Nagae, Mirei Nakamura. A new design of the gaseous imasing detector : Micro Pixel Chamber. Nucl.Inst.Meth ,A471,2001
- [2] 桂華 智裕. Micro Pixel Chamber( $\mu$ -PIC)の安定性向上と高増幅率化に向けた研究. Master's thesis, 神戸大学, 2007
- [3] 長橋 芳行. 「A-D/D-A 変換回路の設計」 CQ 出版社, 1980
- [4] 守谷 健司. マイクロピクセル検出器の電極間放電に伴うピクセル上堆積物の研究. Master's thesis, 神戸大学, 2007