

## A2 実験で使われる装置に関する基礎知識

2002 / 05 / 27

T. Nomura / N. Sasao

参考文献：W. R. Leo, “Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments”

### I. オシロスコープ 信号を見るときの基本

オシロスコープは電気信号の処理を行う時の第一歩である。どんな信号が来ているのかを見ることなしには話は始まらない。オシロスコープは時間毎の電圧測定器だと考えればよく、ある時間スコープ内の電圧変化を表示する、つまり信号の波形をみる道具である。まずは正しく波形を入力することが重要で、その次に刻々と変化する信号のどこからどこまでの時間について表示するかを設定する必要がある。近年、多く使われるデジタルオシロスコープの特徴とともに、順に説明していく。

#### 1. 信号に関する一般知識

##### (1) 信号の種類

信号には直流信号、交流信号がある。直流信号は電圧に時間変化のない信号である。交流信号は時間とともに電圧が変化するもので、波形と呼ぶ場合はこちらが想定されている。交流信号は一般に様々な周波数をもつ信号の重ね合わせになっている。(フーリエ変換をすれば時間の関数を周波数の関数に変換できる。)電気信号を扱う上では周波数は重要な意味を持つ。例えば、容量  $C$  のコンデンサのインピーダンスは  $1/j\omega C$  となるというように、周波数によって反応が異なる場合が多い。

##### (2) 伝送線

信号を伝える伝送線(いわゆるケーブル)の目的は、情報を失うことなく一方から多方の端に信号を伝えることであるが、前項で触れたように信号にはゼロから無限大の周波数成分が含まれ、それに応じて伝播媒質の電気特性が変化するため、一般には信号は歪みを起こされてしまう。そこでできるだけ周波数特性のよい伝送線を用いる必要があり、素粒子・原子核実験では導波管のように信号を伝播する、同軸ケーブルが広く用いられている。この演習では RG58 (BNC コネクタ付) と RG174 (LEMO コネクタ

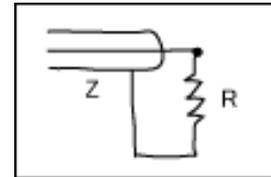


付) という 2 種類の信号用ケーブルと RG59 (SHV コネクタ付) という直流高電圧用ケーブルが用意されている。

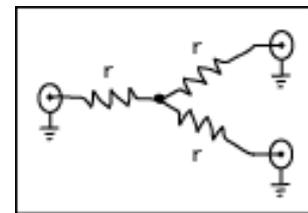
### (3) 特性インピーダンス

ケーブル中での位相を含めた電圧と電流の比を特性インピーダンスという。あたかも通常の抵抗と同じように表されているが意味は異なっており、信号の伝播に伴って現れる量である。(例えばケーブル両端をテスターで測っても得られない。) 信号伝送において重要な点は、伝送路中にインピーダンスの異なる境界があると、そこでは信号の反射(逆方向への伝播)が起こるということである。ちょうど光の進行における屈折率の役割に似ている。したがって、伝播している信号から見たインピーダンスが一様になるように接続しないと、信号情報が正しく伝わらないことになる。前項で例示したような素粒子・原子核実験で使われている同軸ケーブルは、特性インピーダンス  $50\Omega$  のものがよく使われている。

(問題) インピーダンス  $Z$  のケーブルの終端がインピーダンス  $R$  で止められた場合、反射係数はいくらになるか?



(問題) 実験では一つの信号を二つの信号に分けてそれぞれ処理したい場合がある。このような信号分割器はスプリッターと呼ばれ、図のような構造をしている。 $50\Omega$  のケーブルを接続して使う場合、どの端子から見てもインピーダンスが整合する ( $50\Omega$  に見える) ためには抵抗値  $r$  をいくらにすればよいか?



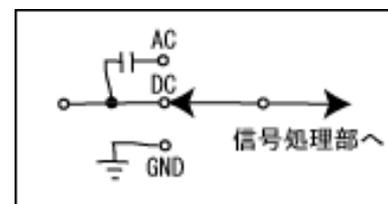
## 2. オシロスコープの信号入力

### (1) オシロスコープ入力でのインピーダンス整合

オシロスコープの入力インピーダンスは、電圧測定器(いわゆるテスター)の類推で考えればわかるように、 $1M\Omega$  などの非常に大きな値である。ここに特性インピーダンス  $50\Omega$  のケーブルを通して信号を入力すると、入射と同位相で振幅 100% の反射波が重ね合わされるため、信号の大きさが 2 倍に見える。正しい信号を見るには、信号経路と並列に  $50\Omega$  の抵抗を入れる必要がある。入力インピーダンスを切り替えられるオシロスコープ入力の場合には、 $50\Omega$  を選択することで同等の結果が得られる。

### (2) 入力での結合

入力端子と入力信号処理回路をつなぐ箇所には 3 種類の結合方法が用意されている。



DC 結合はその名のとおりに直接つなぐ方法である。AC 結合はコンデンサを通してつなぐ、つまり、直流成分を落として交流成分だけを取り出す方法であり、例えば大きなオフセット電圧の上に小さな信号が乗っている場合に使われる。GND は処理回路の入力を接地する方法で、オシロスコープ上でのゼロ点を知るために使われる。

### (3) 処理可能な入力信号周波数 (やや高級)

オシロスコープの入力段や増幅段のふるまいは、信号波形を形成する周波数成分によって異なり、正常に動作する限界周波数が存在している。例えば、100MHz までの能力を持つオシロスコープに階段関数的な信号を入力したとしよう。このオシロスコープでは、周期 10ns の正弦波より高速に変化する成分は正しく表示されないことになり、信号の立ち上がりは緩やかに見えてしまう。(「100MHz オシロスコープ」などと呼ぶ場合の周波数は、振幅減衰が 3dB になる値を示しており、対応する立ち上がり時間の限界は約 3.5ns となる。) したがって、限界周波数に近い周波数成分を持つ高速な信号を見る場合には、この問題による寄与を考慮する必要がある。

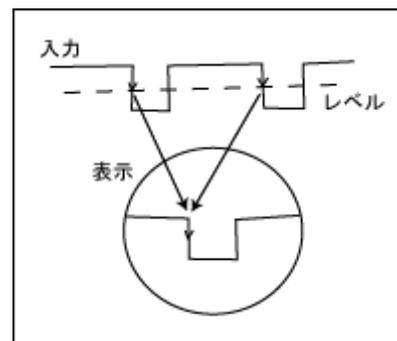
## 3. トリガー

### (1) 信号表示の同期

不定期に繰り返し入力される信号をオシロスコープで見ることを考えてみよう。オシロスコープの入力信号処理回路は、信号が来たかどうかとは関係なく、逐次、信号の処理をすればよいが、それを画面に表示する時には、見たい信号が入力されたタイミングに合わせてきっかけを与えてやる必要がある。その同期信号を作る役割を担っているのがトリガー部分である。

### (2) 同期信号発生の条件

同期信号を発生させる方法の基本は、ある電圧レベルを設定しておき、信号電圧がそれを越えた時に同期信号を出すというものである。オシロスコープでは、レベルの設定とそこを横切るときの波形スロープ



の選択ができるので、レベルをまたいで振動する信号に対して電圧増加時（または減少時）だけ同期信号を発生する。

トリガー発生条件のモードとしては、この条件を満たしたときのみ同期信号を発生するノーマルモードの他に、フリーランニングをするオートモードが選択できる。（オートモードでも、信号が来ている場合はノーマルモードと同じタイミングで同期信号を出す。）

### (3) トリガー信号のソース

トリガー信号を発生するためのソース信号は、入力信号自身、他の入力チャンネルへの入力信号、電源ライン信号などが選択できる。通常は自分自身で同期をすればよいが、例えば、入力信号に多くのノイズ信号が含まれていて、他の信号と同時に来ているものだけが見たい信号である場合は、第二の方法が便利である。

## 4. デジタルオシロスコープの特徴

### (1) サンプリング能力

デジタルオシロスコープは入力された信号電圧を逐次デジタル変換して表示するものである。デジタル化するために必要な時間は有限なので、ある時間間隔以下の情報は得られない。サンプリングレートが 2.5Gs/s であるオシロスコープでは、0.4ns に 1 回の割合で電圧測定できる能力を持つ。

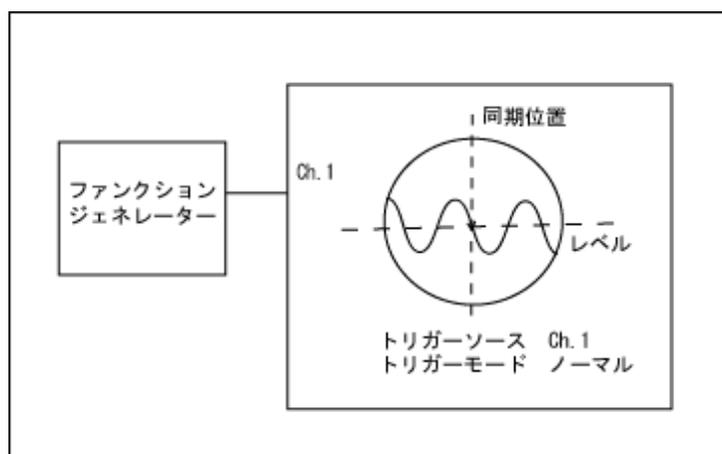
### (2) グリッチ

デジタルオシロスコープは、時間レンジに応じてサンプリングの時間間隔を変えており、長い時間レンジになれば間隔が広がる。これにより、オシロスコープ自身のサンプリング能力では見えるはずの信号がサンプリング間に埋もれて欠損してしまう現象が起こるので注意が必要である。

## 5. 練習

### (1) ファンクションジェネレータからの信号を見てみよう。

- サイン波の表示
- トリガー極性が正の場合と負の場合
- しきい値を変えるとどうなるか



## II. 検出器 粒子の通過を知る

A2 実験では荷電粒子及びガンマ線の検出をするための検出器が用いられる。基本構造は、荷電粒子（観測したいもの自身、あるいはガンマ線と物質との反応による二次粒子）のエネルギー損失を光に変えるシンチレーターと、光を電気信号に変える光電子増倍管から構成されたものを使う。

### 1. シンチレーター

荷電粒子が検出器を通過すると、検出器物質との相互作用によりエネルギー損失を起こす。損失したエネルギーは物質に与えられるわけだが、シンチレーターはそのエネルギーにほぼ比例するシンチレーション発光をするため、粒子の通過がわかるだけでなく、エネルギー測定が可能となる。シンチレーターは、その材質により異なった特徴を持ち、用途に応じて選ぶ。

#### (1) 有機シンチレーター

（例）プラスチックシンチレーター

- 高速（時定数 数 ns）
- 原子番号が小さい（基本は C と H）
- 加工性に優れる
- 安い

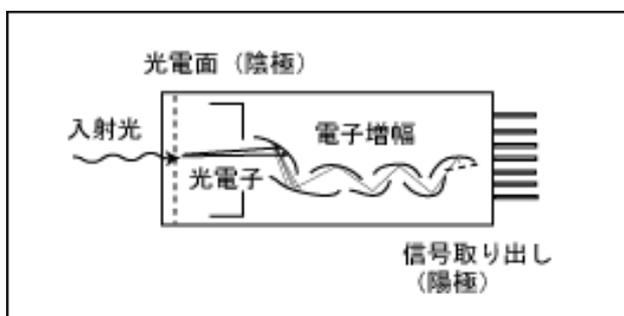
#### (2) 無機シンチレーター

（例）NaI(Tl)結晶シンチレーター

- 比較的遅い発光（時定数 500ns）
- 高密度、高原子番号（Z）なので、阻止能が高い
- 高いZのため、ガンマ線検出効率が高い
- 扱いに注意が必要なものが多い（潮解性、ひび割れ）

### 2. 光電子増倍管

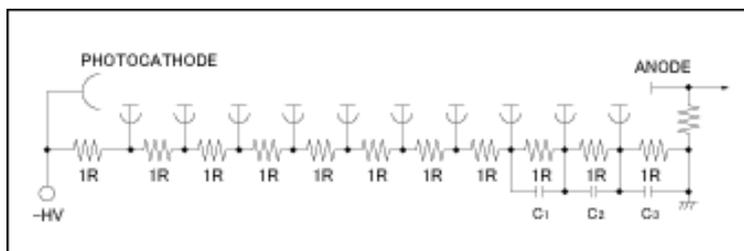
光電子増倍管はシンチレーターなどの光を電気信号に変換する装置である。光が入射されると、まず陰極で光電効果を起こして電子に変換される。光電子は電場により加速されながら次の電極（ダイノード）に集められ、電極物質と衝突して複数の二次電子を生成する。この要領で陽極に到達するまでの数段のダイノードで電子増倍を繰り返し、増幅された信号を陽極から得る。光



電子増倍管の種類に依るが、陰極印加電圧-2 kV で  $10^7$  程度の増幅率が得られる。(詳しくは例えば浜松ホトニクスなどのカタログを見よう。)

光電子増倍管に電圧をかける方法は、「ベース」と呼ばれる抵抗分割回路によって行われ、高電圧端子だけに電圧を印加すれば各電極に適当な電圧がかかる。

(問題)図は負の高電圧をかける場合のベースの例だが、電場の方向が同じになるようにすれば正の高電圧を使



ってもよいはずである。その場合、どのようなベース回路にすればよいか？

### 3. A2 実験で使う検出器

#### (1) コンプトン散乱体としてのプラスチックシンチレーター

コンプトン散乱後の電子に対して感度をもち、かつ、同時計測をおこないやすい高速のプラスチックシンチレーターを用いる。実験時には、散乱電子のエネルギー(すなわちシンチレーターに落とされるエネルギー)をよく考え、信号の大きさを調整すること。

#### (2) 光子検出器としての NaI(Tl)結晶シンチレーター

散乱後の光子の全エネルギーを測定するために、ガンマ線検出に適した無機シンチレーターNaI(Tl)結晶を使う。A2 では結晶をアルミ容器に密封した上で光電子増倍管と接着済みのモジュールを用いる。このモジュールに関しては、けっして光電子増倍管をはずしてはいけない。

### 4. 練習

#### (1) 光電子増倍管の信号を見よう

光電子増倍管だけの信号を見よう。信号の大きさ、時間幅などに注意しよう。外部光を十分に遮蔽できていない(光漏れ)とどうなるか？

#### (2) プラスチックシンチレーターの信号を見よう

光電子増倍管の光電面にプラスチックシンチレーターをつけ、ベータ線源やガンマ線源からの粒子をあてて信号を見てみよう。信号の大きさ、時間幅に注意しよう。光漏れがないように十分に光遮蔽をすること。

#### (3) NaI(Tl)結晶シンチレーターの信号を見よう

一体型モジュールに  $^{22}\text{Na}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  などのガンマ線源をあてて信号を見てみよう。時間幅に注意しよう。

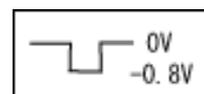
### III. NIM 規格回路モジュール 論理信号を扱う回路モジュール

NIM 規格とは、回路モジュールの機械的・電氣的仕様を規定している規格であり、素粒子・原子核実験で広範に使われている。これらは、NIM ピンと呼ばれるスロット付の箱に装着することで、背面の電源供給ピンや制御信号ピンとモジュールを接続し、動作させることができる。ここでは NIM 規格での論理信号の定義と、A2 実験で使うモジュールの例をあげて説明する。

詳細は Leo の 12 章を参照。

#### 1. 論理信号規格

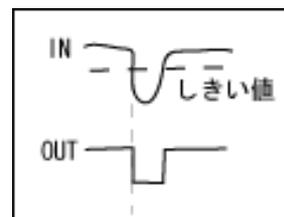
状態	電流	50	終端時電圧
1 (YES)	-16mA		-0.8V
0 (NO)	0mA		0V



#### 2. モジュールの例

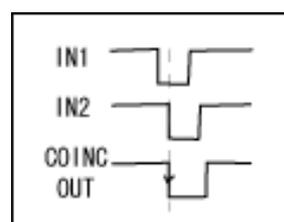
##### (1) ディスクリミネータ

アナログ入力信号の大きさがあるしきい値以上の場合に論理信号を出力する。例えば、シンチレータ + 光電子増倍管からの信号を入力することで、シンチレータがある量以上の発光をした場合（すなわちシンチレータを粒子が通過し、ある量以上のエネルギー損失をした場合）を選び出して論理信号を出力することができる。



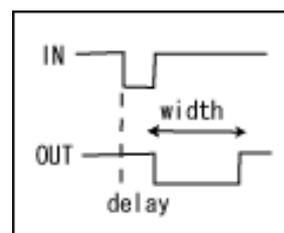
##### (2) コインシデンス

複数の入力論理信号が同時である場合に論理信号を出力する。例えば、2つのシンチレータ + 光電子増倍管を用意し、それらの信号をディスクリミネータ経由でコインシデンス回路に入力すれば、同時に2つの粒子がそれぞれの検出器に捉えられて信号を出した事象だけを選び出して論理信号を出力することになる。



##### (3) ゲートジェネレータ

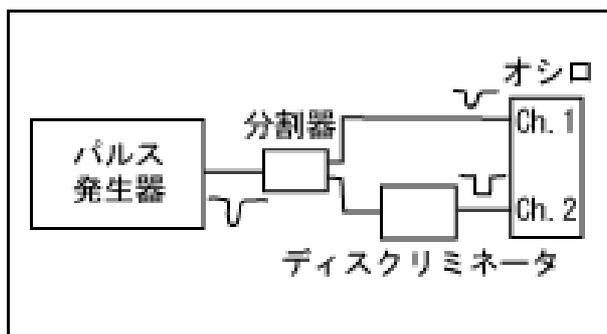
入力論理信号に対し、設定した遅延時間後に設定した幅を持つ論理信号を出力する。比較的大きな遅延時間 (delay) や幅 (width) を実現したい場合に使用する。



### 3. 練習

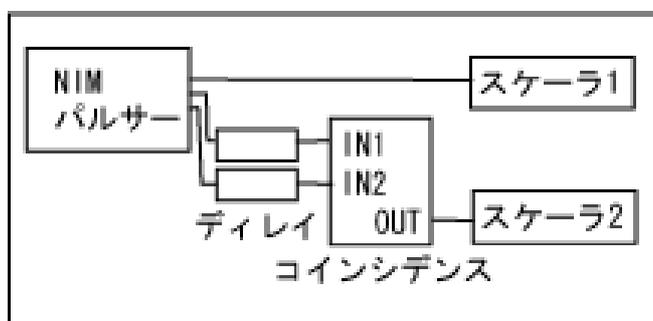
#### (1) ディスクリミネータの動作

パルスジェネレータからの信号をディスクリミネータに入力し、出力信号を見てみよう。入力信号の電圧を変えてみて、出力の有無を確認しよう。しきい値や幅の調整ネジを回して見て、出力がどう変わるか確認しよう。



#### (2) コインシデンス

NIM パルサーの信号を二つに分け、各々ディレイモジュールを通した後にコインシデンスに入力し、出力を見よう。ディレイ値を変えていって、時間差がいくらになるまで出力が出ているか、スケーラ2と1の比を見ることで確認しよう。



#### IV. CAMAC 規格回路 コンピュータコントロール回路

CAMAC 規格とは、コンピュータコントロールできるモジュール群の一つの規格であり、素粒子・原子核実験でよく使われている。背面にカードコネクタで接続されるバスを持つ箱（クレート）の中にモジュールを挿入し、バスを通じてコマンドやデータのやりとりを行う。また各モジュールへの電源もバスから供給される。クレートは右端にある一つのコントロールスロットと 24 の通常スロットを持っている。詳細は Leo の 18 章を参照。

##### 1. 覚えておくべきコントロール信号

###### (1) アドレス (N、A)

N はステーション番号（スロット番号）を表す。コントロールスロットには N=1 ~ 24 の通常スロットに応じたバスがあり、各通常スロットと直結している。A はサブアドレスを表し、各スロットに挿入されたモジュールの内部でのチャンネルを示している。サブアドレスのラインは全スロット共通のバスライン 4 ビット分（A1、A2、A4、A8）からなり、N 信号と同時に発行することで、特定のモジュールのサブアドレスを指定する。

###### (2) 状態 (X、B、Q)

X はコマンドのアクセプトを、B はビジーを表す。Q はデータ準備完了を表すなどに用いられる。これらは全スロット共通のバスラインである。

###### (3) 割り込み (L)

L は各スロットからの割り込み信号をコントロールスロットに直結して伝えるものである。この割り込み信号を LAM (Look At Me) 信号と呼ぶ。

###### (4) コマンド (F)

F は各スロットに挿入されたモジュールに対するコマンド（ファンクション）を表し、全スロット共通の 5 ビットラインで制御される。よく使われるファンクションをリストしておく。0 ~ 7 は読み出しのコマンド、16 ~ 23 は書き込みのコマンド、8 ~ 15、24 ~ 31 はコントロールコマンドである。

番号	機能
0	Read
8	Test LAM
9	Clear

###### (5) データバス (R、W)

通常スロットには 24 ビットずつのリード (R)、ライト (W) ラインがあり、データのやりとりを行う。前項のコマンドに応じて、読み出しコマンドの時は R ラインを、書き込みコマンドの時は W ラインを使う。コントロールコマンドの時はどちらも使われなくて、Q ラインが使われる。

###### (6) その他

クレート全体の初期化 **Z**、禁止 **I**、クリア **C** などの制御信号のほか、通信のタイミングを司るストローク信号 **S1**、**S2** などがある。

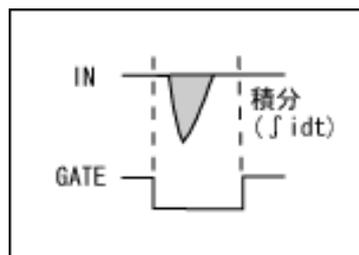
## 2. モジュールの例

### (1) クレートコントローラー

クレートコントローラーはコンピュータとの通信とクレート内のモジュールの制御を行う。クレート右端のコントロールスロットとその隣の通常スロットの2幅を使う構成になっている。コンピュータ側からのコマンドをクレート内のモジュールに伝え、モジュールからデータを読み出したり、モジュールへデータを書き込んだりする。(したがってコントロールスロットだけでなく、R/W ラインを持つ通常スロットとの2幅を使う必要がある。) コンピュータとの通信は、フラットケーブルを通し、コンピュータの拡張スロットに挿入されたインターフェイスに接続して行っている。

### (2) 荷電積分型アナログ デジタル変換器 (ADC)

アナログ信号をある時間間隔だけ積分して荷電情報に直し、それをデジタル情報化して得るモジュールである。積分時間間隔はゲート信号入力の幅で決められる。このデータは信号の大きさを数値化したものであるから、ひいては例えばシンチレータでの発光量、



あるいはエネルギー損失量に比例するものである。したがって、このデータの分布がエネルギー分布に対応する。実験ではエネルギーのわかった較正ポイント(例えば放射線源からの単一エネルギーの粒子線やその光子に対するコンプトン端など)と比較することで、データからエネルギーに烧きなおす換算係数を得られる。

## V. 計算機 データ収集、解析、レポート書き

計算機は CAMAC を用いたデータ収集に利用するほか、取ったデータの相関をみたり、ヒストグラムとして表示したり、統計処理、フィッティングなどの計算をしたりなど、実験をする上では欠かせない要素である。また、レポートを書いたりするときのワードプロセッシングでも活躍する。ここでは A2 実験で必要なものに関して簡単に触れておく。但し、エディタの使い方など非常に基本的なことはすでに知っているものとして、ここでは説明しない。

### 1. データ収集

前項の CAMAC のところで述べたように、実験計測データはコンピュータ上に取り込むことができ、そこで蓄積され解析を行う。データ収集 (DAQ) プログラムは C 言語で記述された簡単なサンプルを用意するので、必要に応じて修正して使う。基礎的な C 言語の知識と CAMAC の知識があれば十分である。プログラムの都合上、オペレーティングシステムは Linux を使用している。

### 2. 解析

収集したデータを処理する方法は様々であり、例えば解析プログラムを作るもよし、GNUPLOT などのプロットツールを使うもよし、各人の慣れた方法で行ってもらえばよい。但し、例えばフィッティングで得られた数字、誤差などが何を意味するのか、しっかり理解したうえで利用することが重要である。

### 3. レポート書き

エディットやワードプロセッシングについても、各人の好みの道具を使ってもらえばよい。図やプロットの作成も同様である。建前としては手書きでもかまわないが、最終的に Postscript または PDF ファイルとして電子化されていることが望ましいので、コンピュータを使って書くことになるだろう。

### 4. 情報発信 (実際の方針は未定)

実験レポート同様、A2 の Web ページを作って、自分たちの実験に関する情報を発信することを考えてほしい。今後 A2 実験をする人たちやこれから課題演習を選ぼうとしている 1、2 回生の人たちの参考として閲覧してもらえることを想定している。自分たちの行っている実験について他の人たちに発表する機会の一つとして、また、Web ページを作る練習として、チャレンジしてほしい。(但し、学内ネットワークの運用ポリシーとマッチしないので、A2 演習室にあるコンピュータ上にサーバーを立ち上げることはできない可能性が高い。)