

装置内混合特性と制御(1日目)

安全上の注意

- 1)注射器内に液体を入れて注入するときは、内部の圧力によって針が注射器本体から外れて飛び出すおそれがある(飛び出して目に入ると**失明**する可能性がある)。注射針の根本を指でつかんでから圧をかけること。
- 2)水道水およびレーザーが混入した水は電気を通すので、ぬれた手で電気機器にふれると感電するおそれがある。
- 3)終了時チェックリストがあるので、リーダーは各項目を確認してチェック印(レ)をつけ、署名する。

レポート提出先

メールにファイルを添付し担当教員(清水)宛

tshimizu@eng.niigata-u.ac.jp

に提出すること。なお、ノートのスキャン・PDF化等でファイルが大きくなることがあるので、メール添付の際には大きくても数MBに抑えるよう、解像度を適切に選択すること。

実験の目的と達成目標

目的

多段完全混合槽の滞留時間分布測定を通じて、装置内の流れ・混合特性を理解する。

達成目標

- 多段完全混合槽の滞留時間分布の理論値を計算できること。
- 理論値と実測値を比較して、実験の妥当性を論じることができること。

完全混合槽内トレーサー濃度変化の理論

連続的に流体が流入・流出する完全混合槽へトレーサーが濃度 C_{IN} で流入するときの、装置内トレーサー濃度 C の経時変化を与える微分方程式は平均滞留時間 τ を用いて次式となる(式の導出はテキストを見ること)。

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{C_{IN}(t) - C(t)}{\tau}$$

理論(1段完全混合槽)

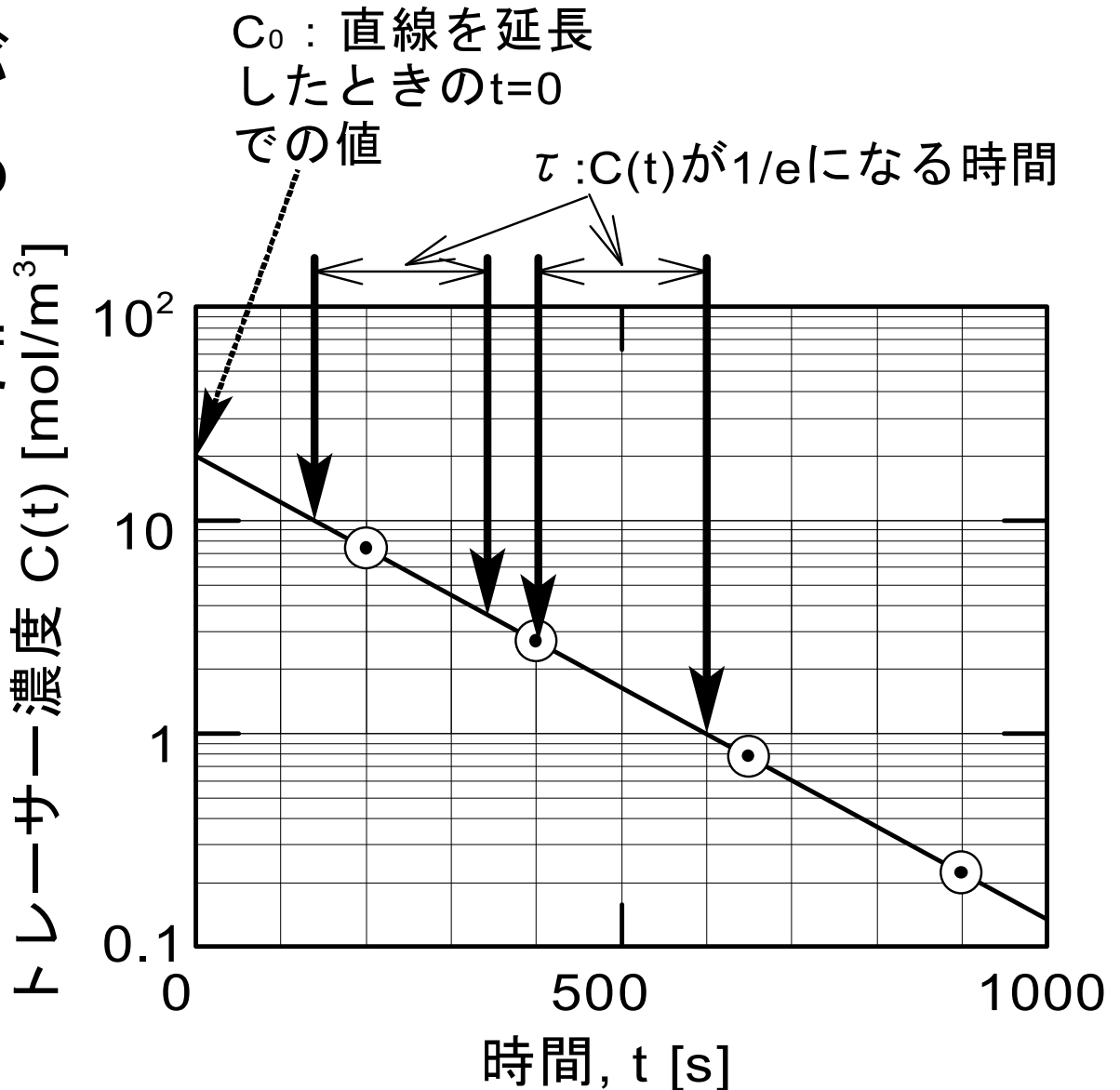
トレーサー流入がインパルス状である場合の、
装置内トレーサー濃度Cの経時変化

$$C(t) = C_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

$$\ln C(t) = \ln C_0 - \frac{t}{\tau}$$

理論(1段完全混合槽)

トレーサー流入がインパルス状である場合の、装置内トレーサー濃度 C の経時変化は、片対数プロットすると直線になる。 $C(t)$ が $1/e$ になる時間が τ である。



理論(多段完全混合槽)

n段の多段完全混合槽の滞留時間分布関数
(各段の滞留時間がすべて等しく τ である場合)

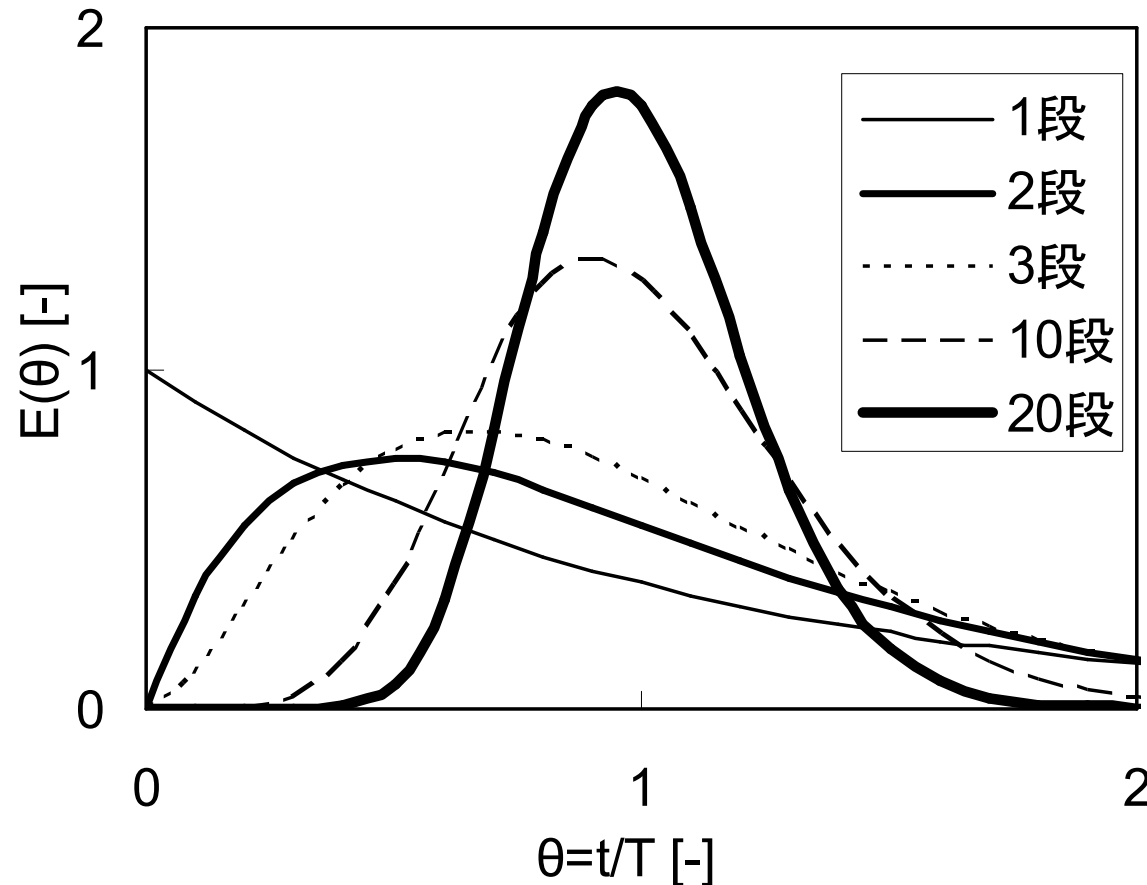
$$f(t) = \frac{t^{n-1}}{\tau^n (n-1)!} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

この式を $t=0 \sim \infty$ で積分すると1となる

理論(多段完全混合槽)

体積の総和を一定にしたまま、 n 段の多段完全混合槽に分割したときの滞留時間分布関数

→ 段数が増えるとプラグフローに近づく



理論値 $f(t)$ の例(3段かくはん槽)

3段完全混合槽で1段当たり滞留時間 $\tau=1s$ のときの $f(t)$ の理論値は以下の通りである。

t[s]	1段	2段	3段
0	1.000	0.000	0.000
0.1	0.905	0.090	0.005
0.2	0.819	0.164	0.016
0.3	0.741	0.222	0.033
0.4	0.670	0.268	0.054
0.5	0.607	0.303	0.076
0.6	0.549	0.329	0.099
0.7	0.497	0.348	0.122
0.8	0.449	0.359	0.144
0.9	0.407	0.366	0.165
1	0.368	0.368	0.184

t [s]	1段	2段	3段
1.1	0.333	0.366	0.201
1.2	0.301	0.361	0.217
1.3	0.273	0.354	0.230
1.4	0.247	0.345	0.242
1.5	0.223	0.335	0.251
1.6	0.202	0.323	0.258
1.7	0.183	0.311	0.264
1.8	0.165	0.298	0.268
1.9	0.150	0.284	0.270
2	0.135	0.271	0.271

理論値 $f(t)$ の例(3段かくはん槽)

任意の τ に対する $f(t)$ の理論値は $\tau=1s$ の場合の理論値から求められる。

時間は τ 倍

$\tau=1s$ に対する理論値				$\tau=60s$ に対する理論値			
t [s]	1段	2段	3段	t [s]	1段	2段	3段
0	1.000	0.000	0.000	0	0.01667	0.00000	0.00000
0.1	0.905	0.090	0.005	6	0.01508	0.00151	0.00008
0.2	0.819	0.164	0.016	12	0.01365	0.00273	0.00027
0.3	0.741	0.222	0.033	18	0.01235	0.00370	0.00056
0.4	0.670	0.268	0.054	24	0.01117	0.00447	0.00089
0.5	0.607	0.303	0.076	30	0.01011	0.00505	0.00126

$f(t)$ は $(1/\tau)$ 倍

理論値 $f(t)$ の例(20段完全混合槽)

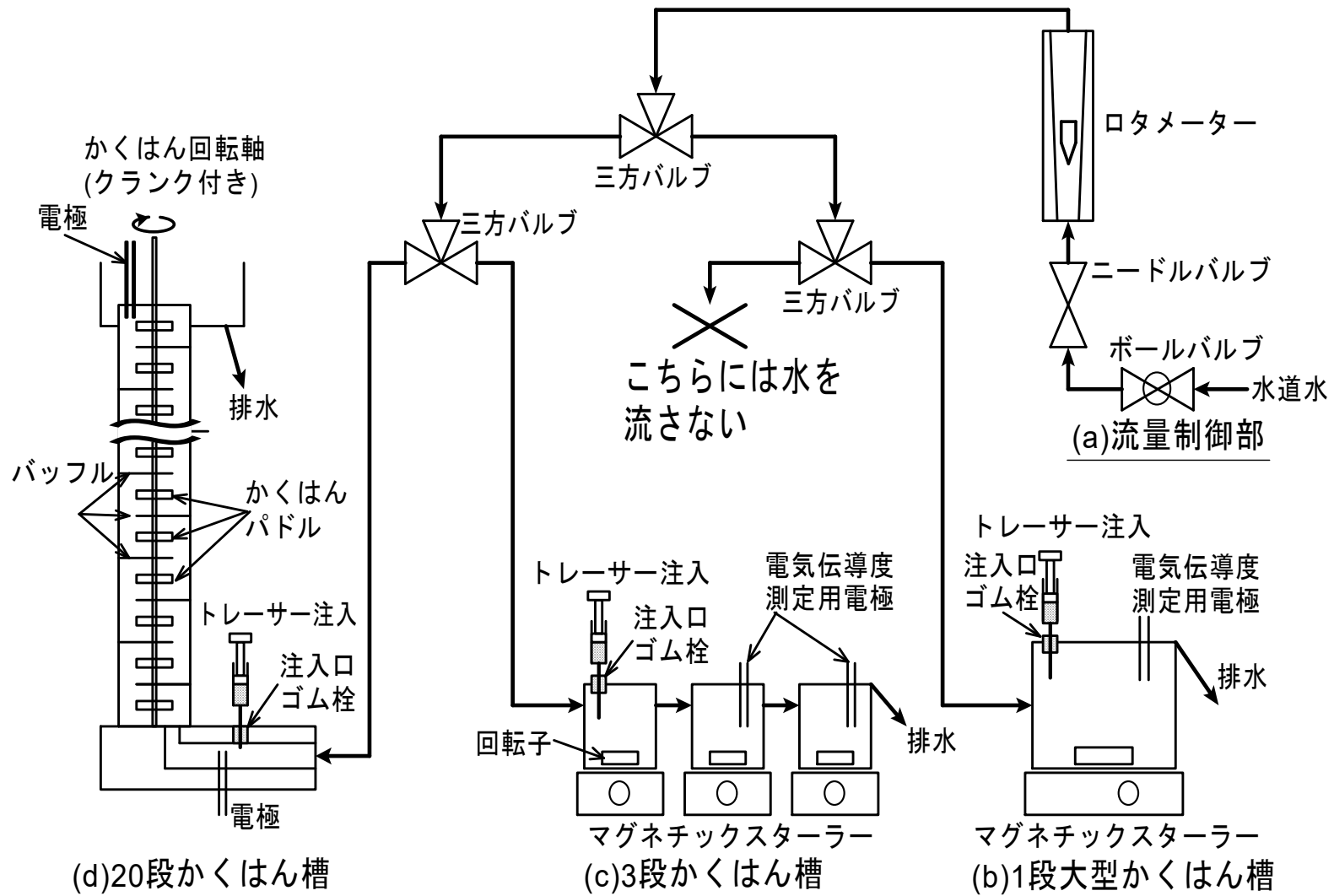
20段完全混合槽で 1段当たり滞留時間 $\tau=0.05\text{s}$ (全滞留時間=1s)のときの $f(t)$ の理論値は以下の通りである。

t [s]	f(t)
0.4	0.01
0.5	0.07
0.6	0.32
0.7	0.82
0.8	1.40
0.9	1.77
1	1.78

t [s]	f(t)
1.1	1.47
1.2	1.04
1.3	0.64
1.4	0.36
1.5	0.18
1.6	0.08
1.7	0.04

装置概略図

(a)流量制御、(b)大型1段かくはん槽、(c)3段かくはん槽、
(d)20段かくはん槽で構成される。



実験装置全体

装置全体像

トレーサー容器
(連続用)

流量制御部

1段大型かく
はん槽

水道水
バルブ

20段かく
はん槽

流路切替
バルブ

排出口
(水採取)

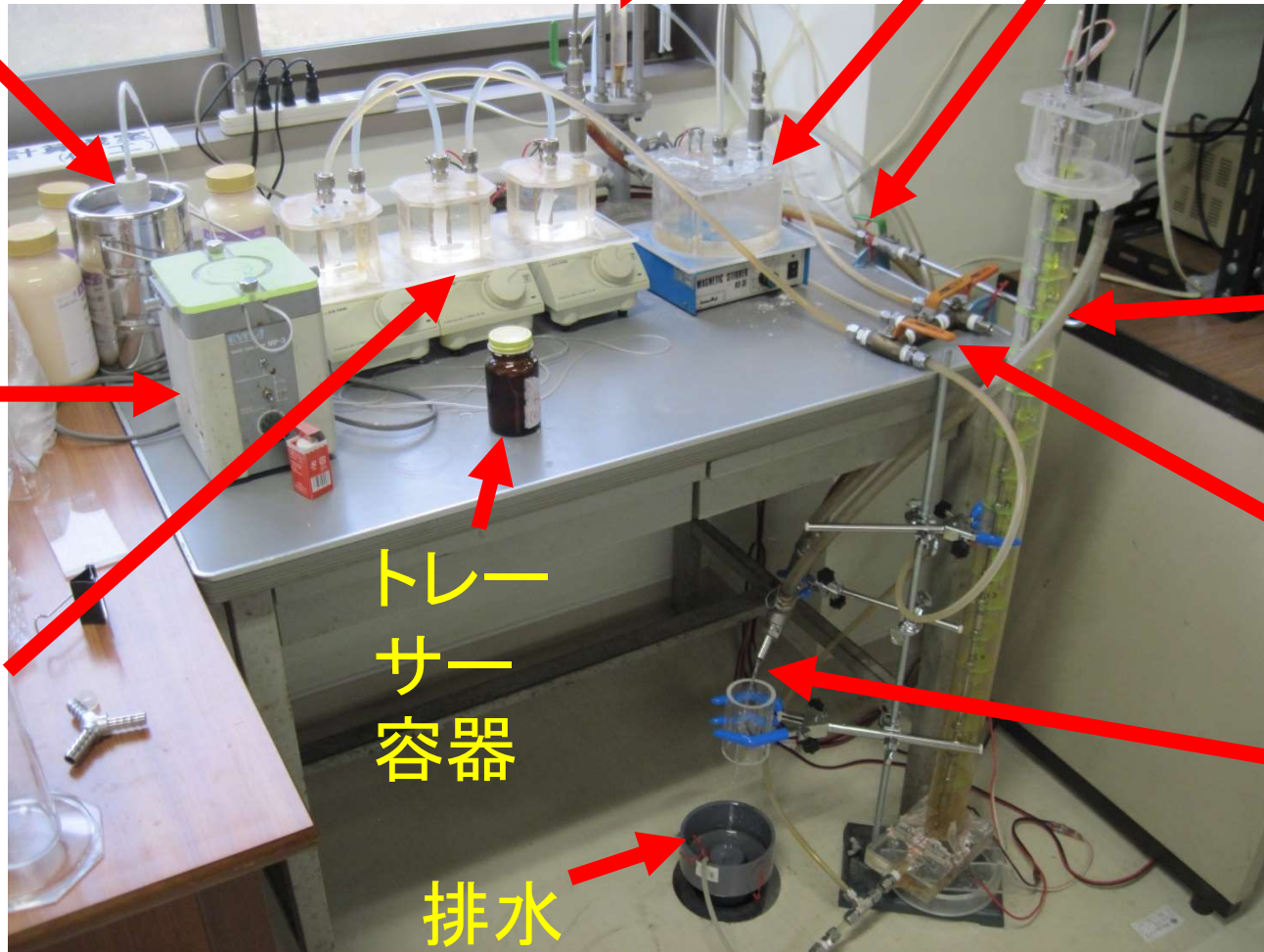
排水

送液
ポンプ

3段かく
はん槽

トレー
サー
容器

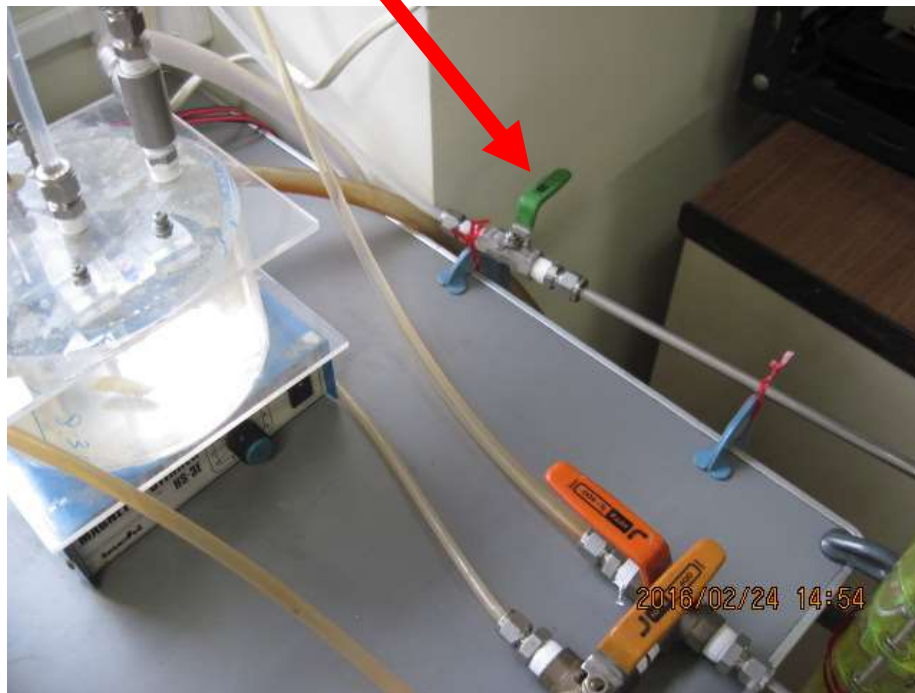
排水



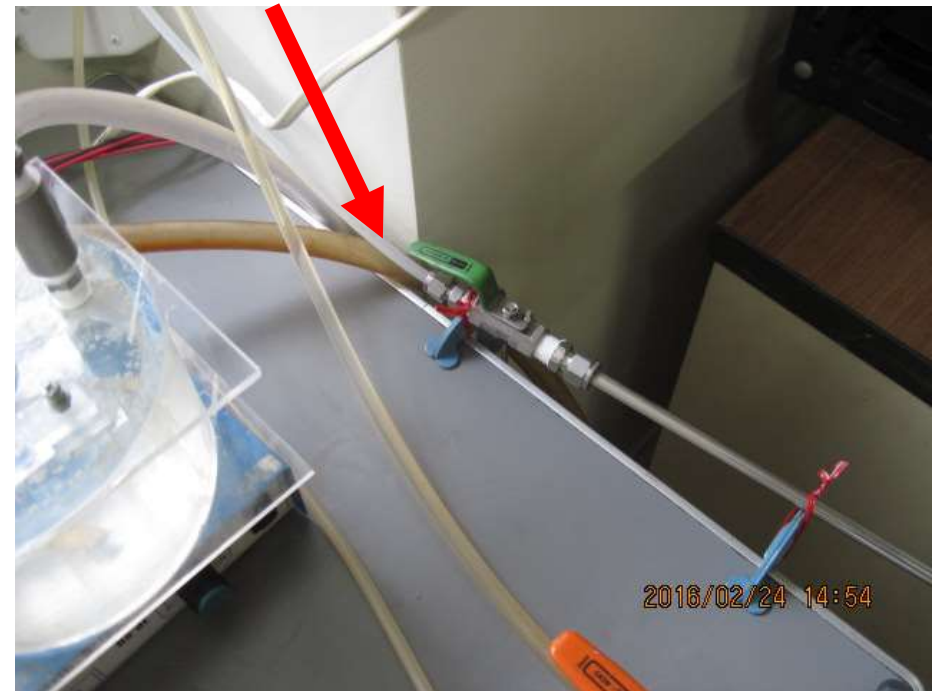
水道水バルブ

天井から水道がステンレス管で机のわきまで来ているので、バルブを開けて水が流れるようにする。

閉状態(ハンドルが管と垂直になっている)

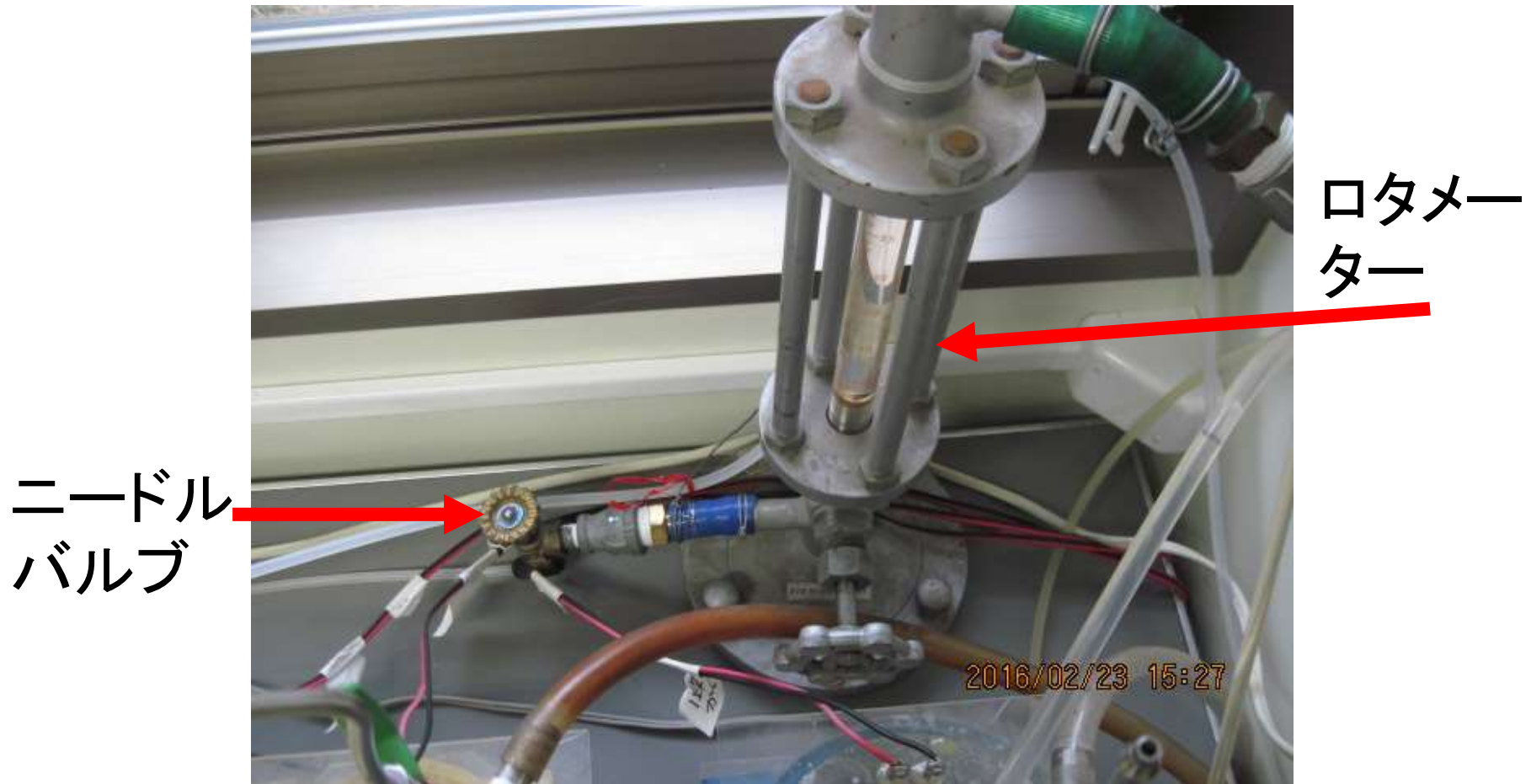


開状態(ハンドルが管と平行になっている)



実験方法(流量制御)

流量制御部では、ニードルバルブを調整して、水量を調整する。



実験方法(流量制御)

ロタメーターのフロート上面が目盛り0.5 L/min程度になるように水量をバルブで調節する。



実験途中でロタメーターのフロート位置が変わるようなら、後述の流量測定を再度行うこと。

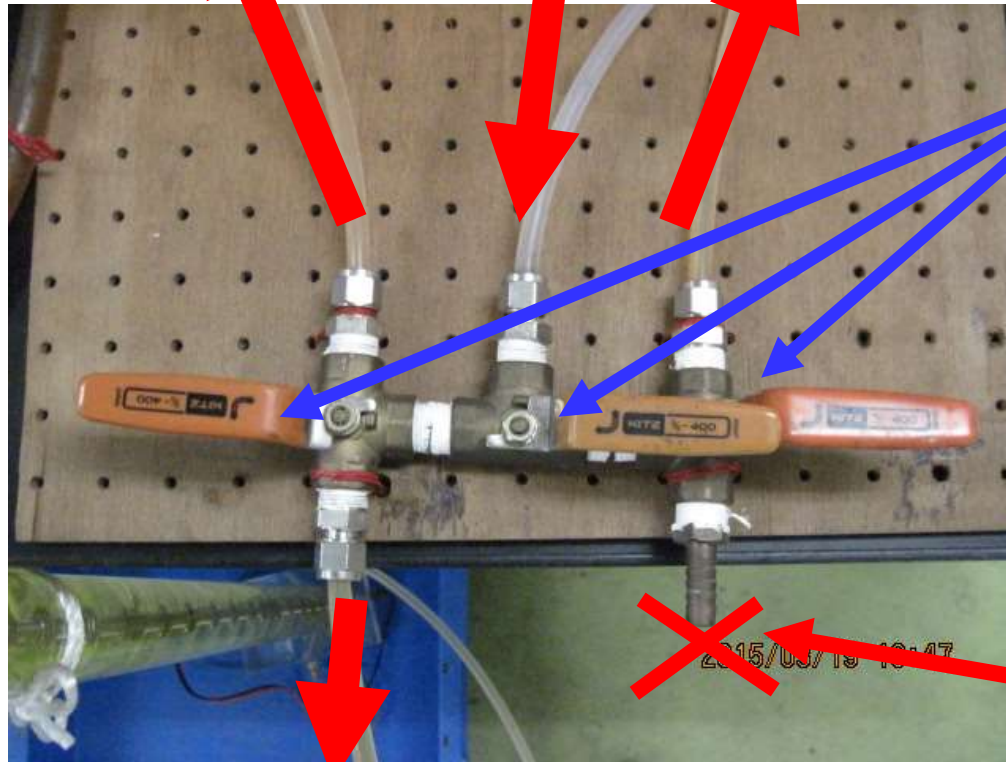
実験方法(流量制御)

3方バルブを選択したかくはん槽側へ切り替える。

3段かく
はん槽

流入

大型1段かく
はん槽



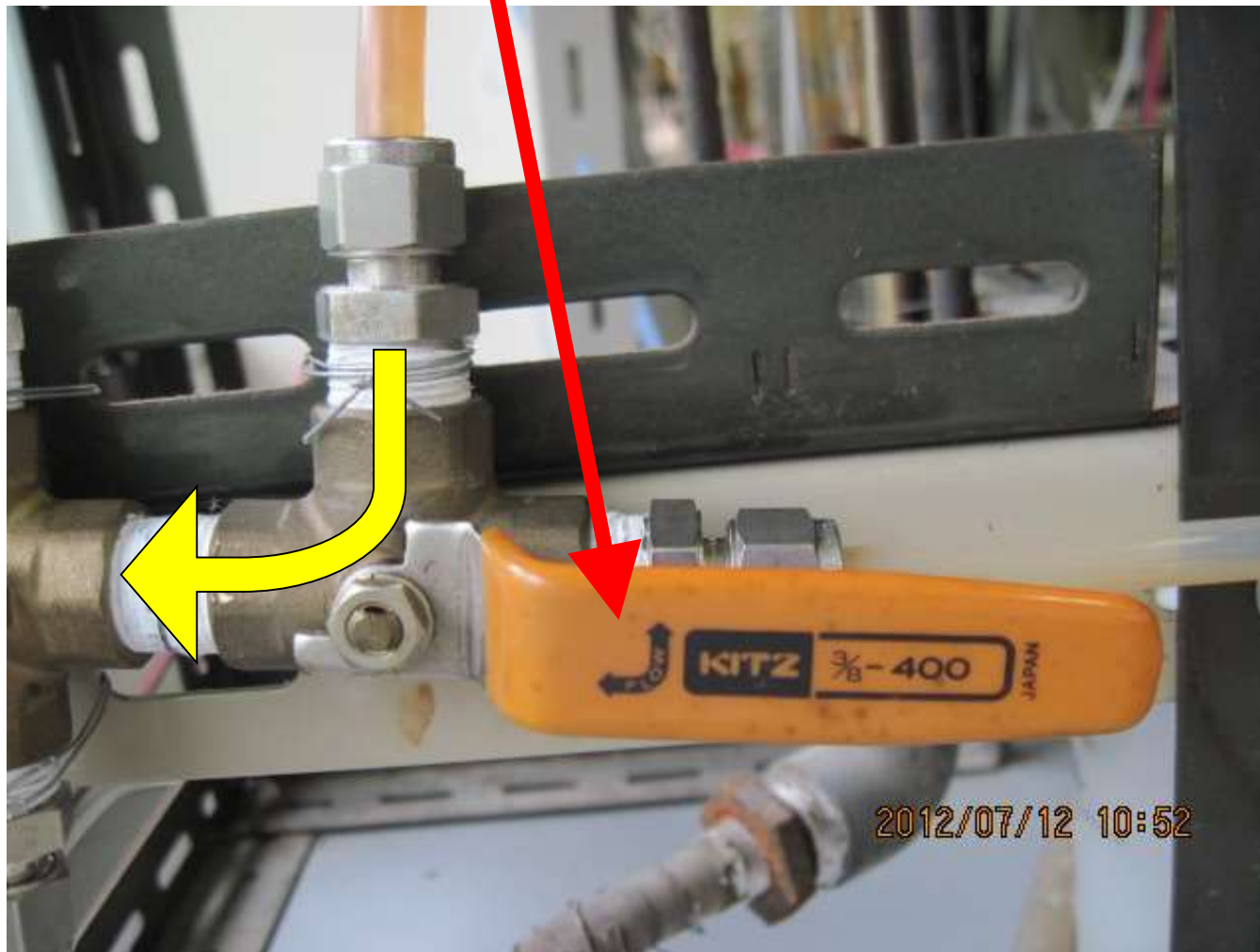
3方バルブ
(L字矢印の
向きに水が
流れる)

こちらには水
を流さない

20段かくはん槽

実験方法(流量制御)

3方バルブはハンドルに書かれているL字矢印の向きに水が流れる



実験方法(流量制御)

水排出口から水をメスシリンダーで採取して、採取量と採取の時間から流量を計算する。それぞれの装置の排出口で測定する。

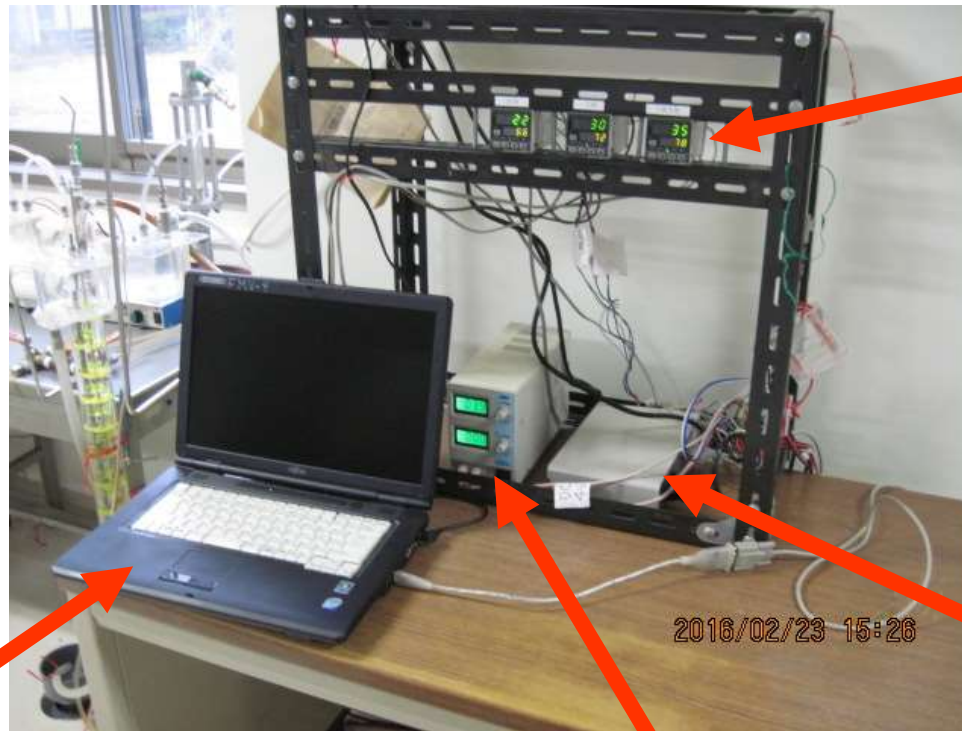


注意: 水道水ではロタメーターの流量指示値は目安であり、本実験で必要とする程度の正確さは得られない。

(流体がきわめて清浄でありフロートにごみがつかず、加えてロタメーターが正確に鉛直に設置できる場合にのみ、ある程度の正確さは期待できる)

計測用システム取り扱い方法

電気伝導度センサーの出力は、電圧出力として出てくるので、データ取り込み装置E830を使ってコンピュータにデータを取り込む。



電圧指示・
調節計(3台
並列)

電圧データ
読み取り装
置E830

PC

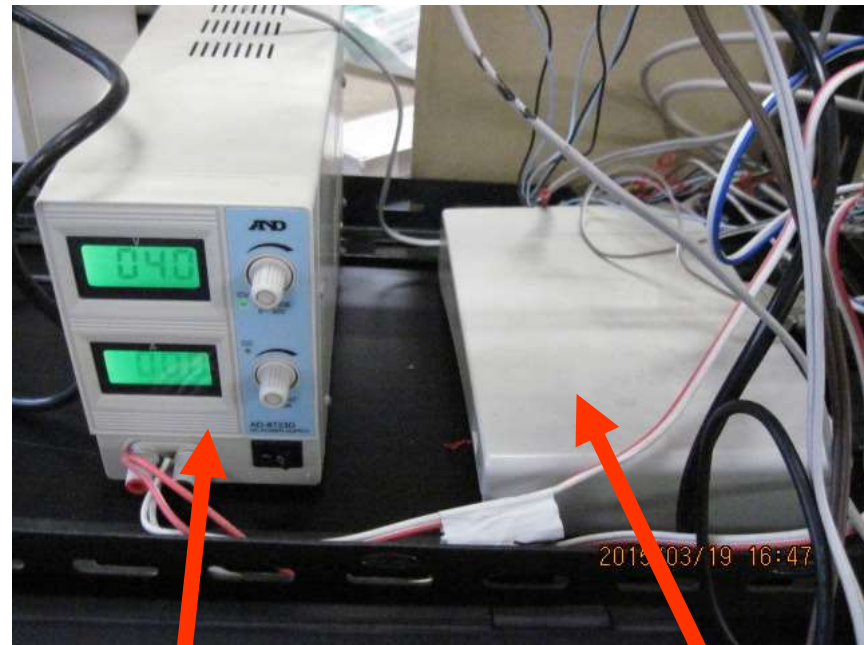
電気伝導度センサー
駆動用電源

計測用システム取り扱い方法

電気伝導度センサーの出力は、電圧出力として出てくるので、データ取り込み装置E830を使ってコンピュータにデータを取り込む。



PC (この背後に電源
とE830がある)



電気伝導度センサー
駆動用電源

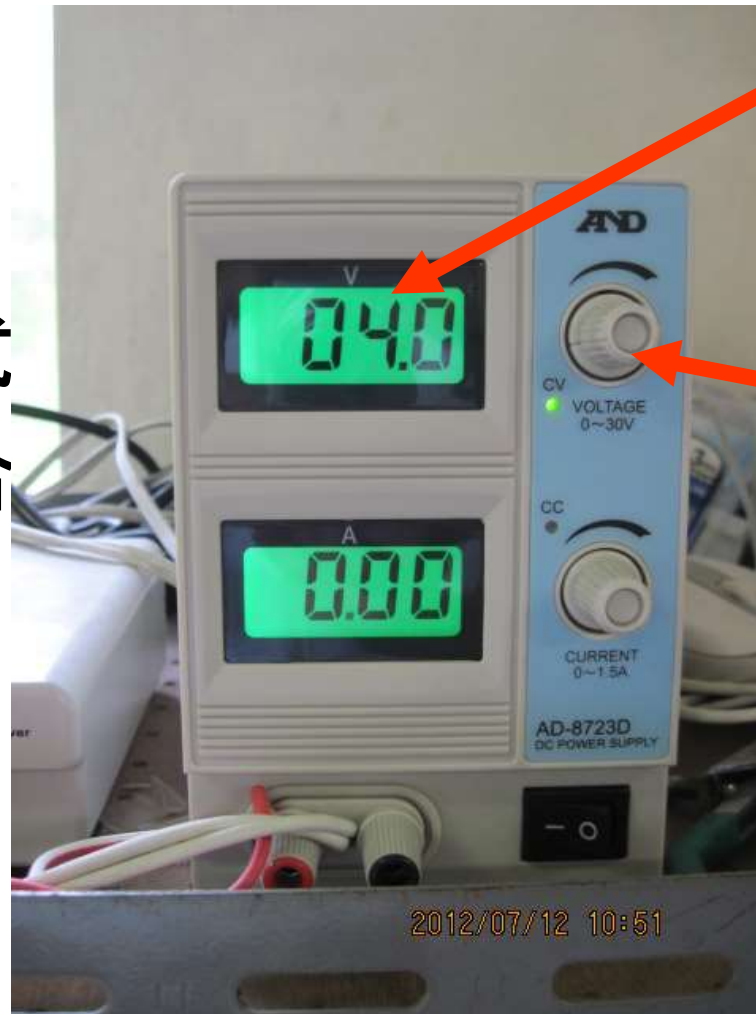
E830

計測用システム取り扱い方法

電気伝導度センサー駆動用電源をONとし、電圧を約4Vにする。

注

電源はアナログ式の物を用いる場合もある。



電圧計

電圧調節
つまみ

2012/07/12 10:51

計測用ソフトウェア取り扱い方法

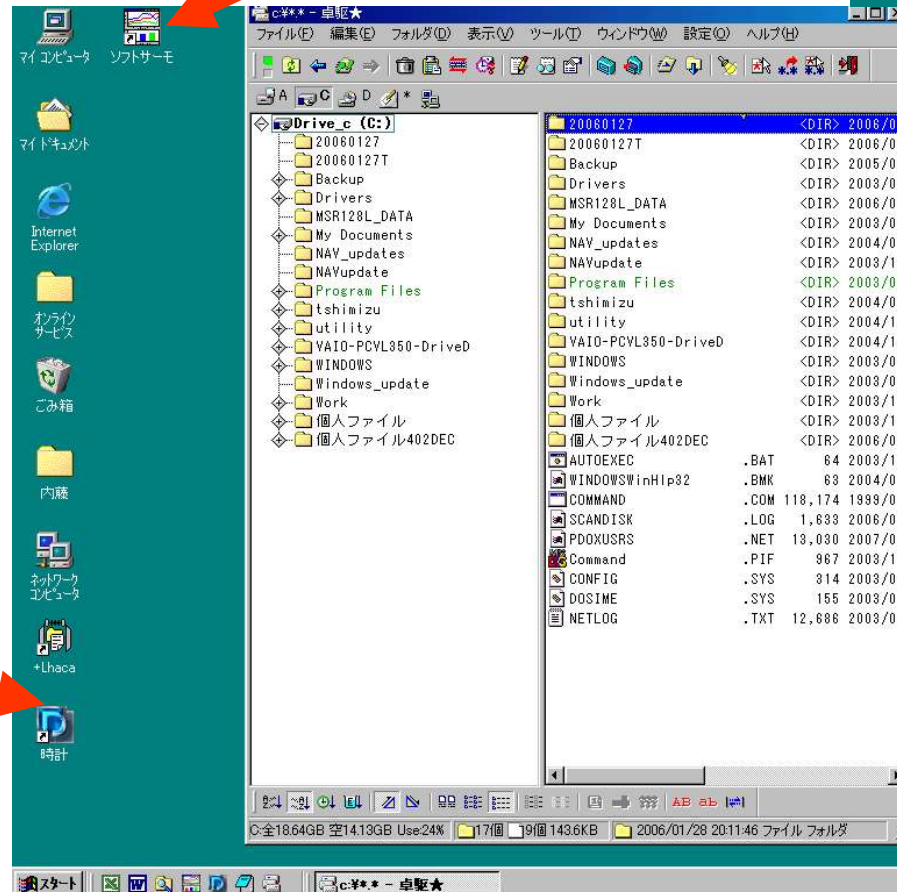
計測用ソフトウェア「ソフトサーモ」と時計を起動する。

起動時にセキュリティ警告が出るが、起動することを選択する。

ソフトサーモ



時計



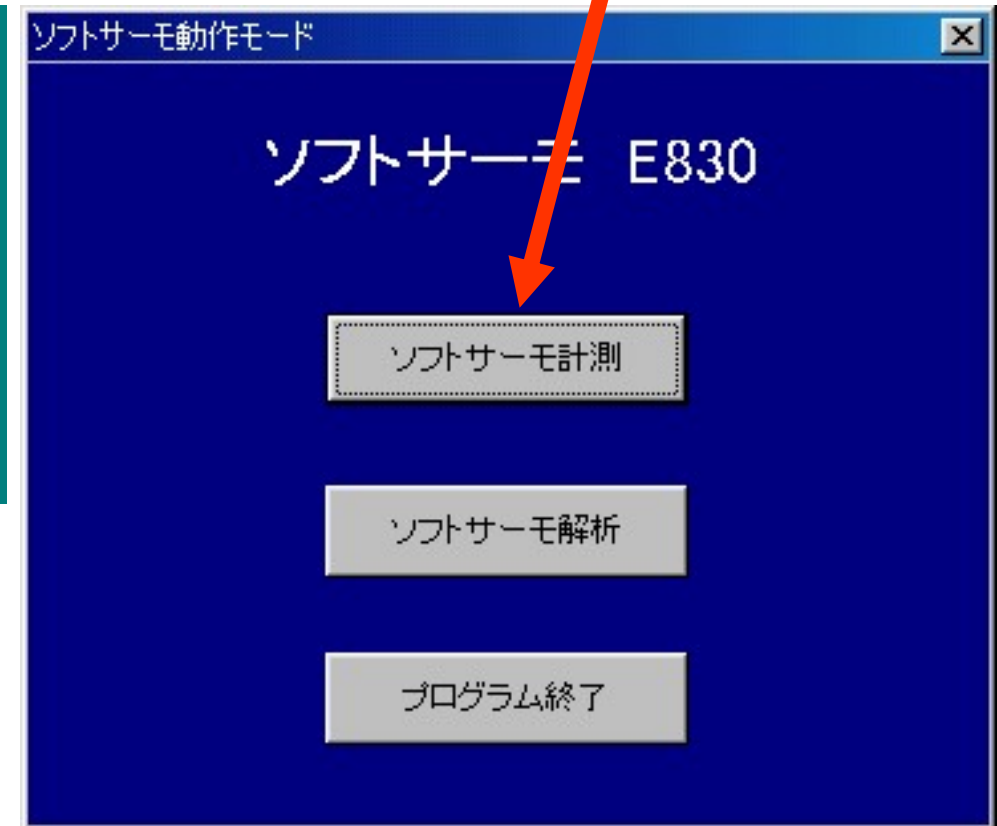
計測用ソフトウェア取り扱い方法

起動メッセージの後のメニューから「ソフトサーモ計測」を選ぶ

計測を選択



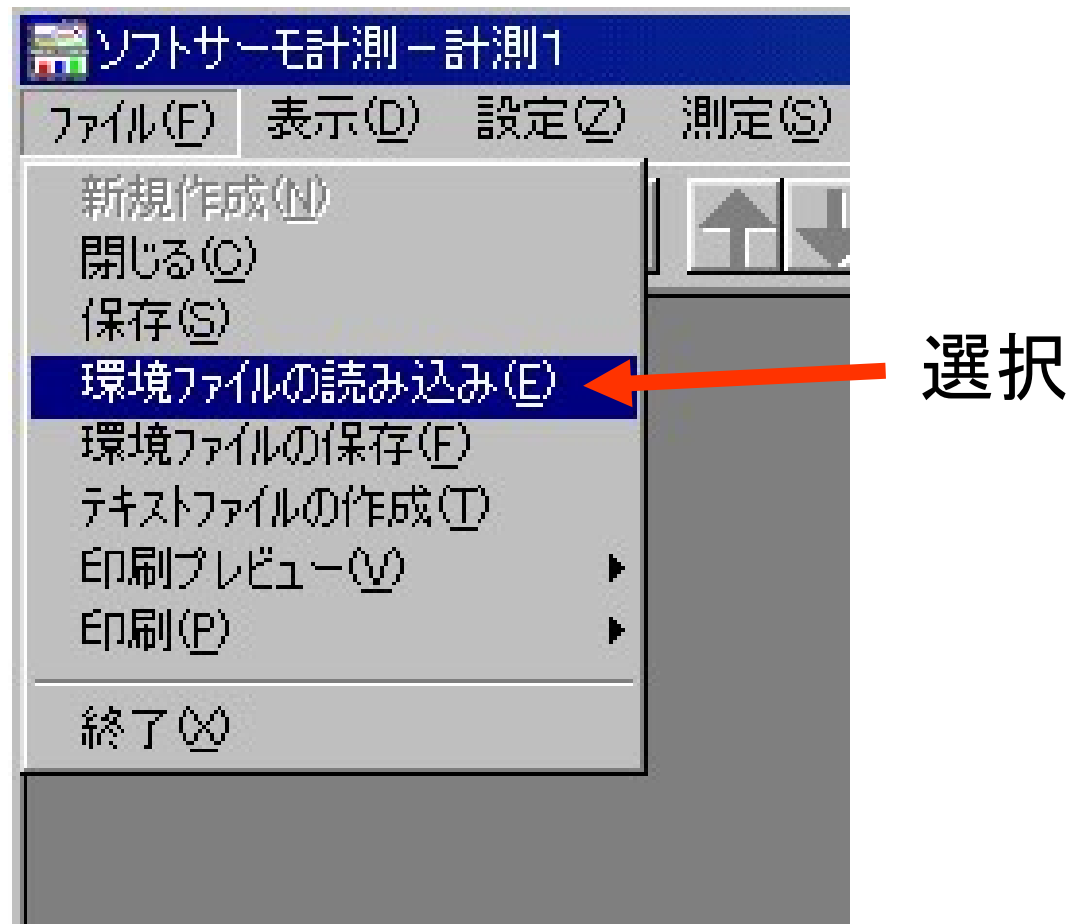
起動メッセージ



メニュー

計測用ソフトウェア取り扱い方法

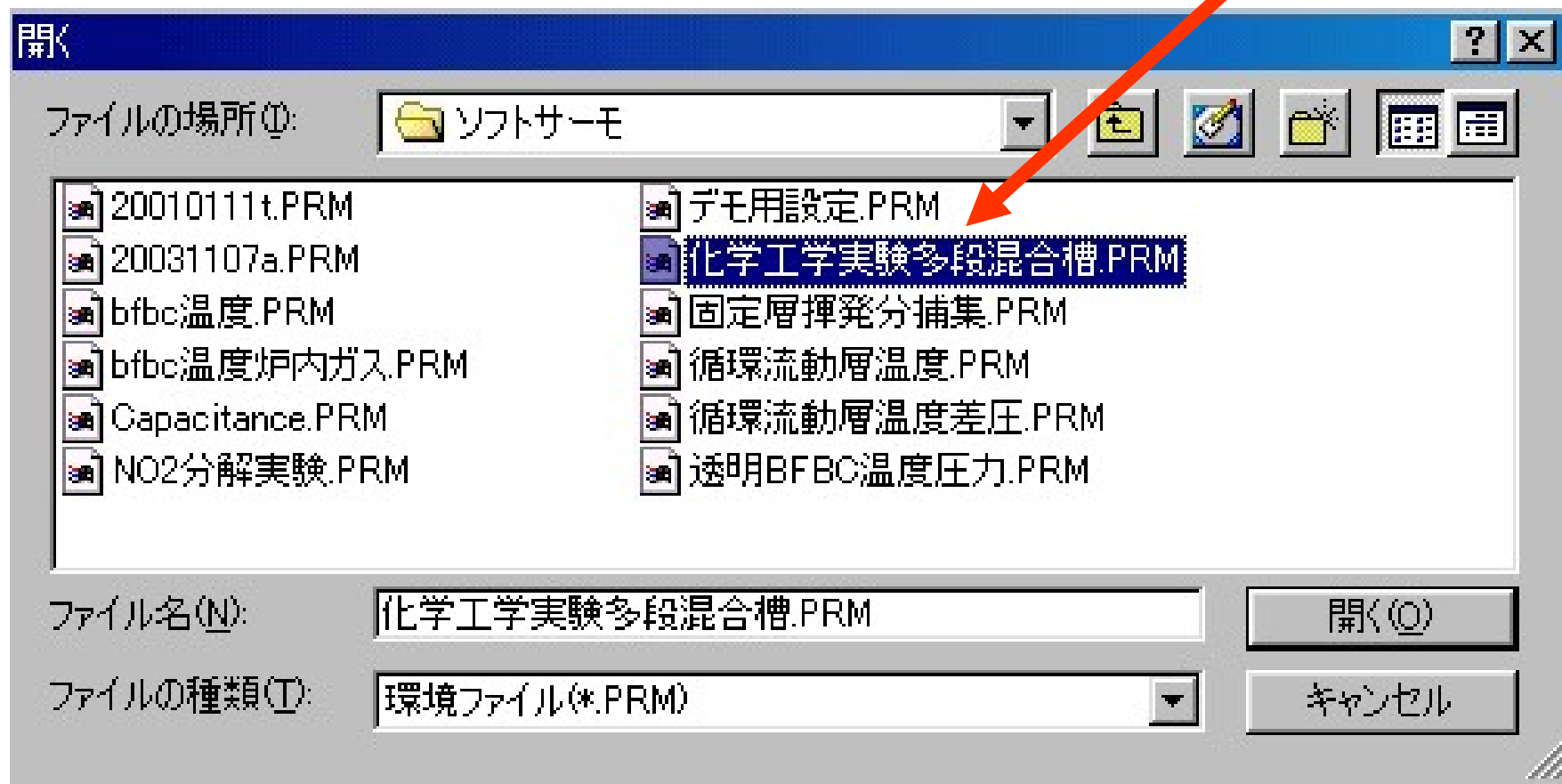
計測のウィンドウが開いたら、上のメニューから「ファイル」-「環境ファイルの読み込み」を選択



計測用ソフトウェア取り扱い方法

環境ファイルとして、「化学工学実験多段混合槽.PRM」を選択

選択



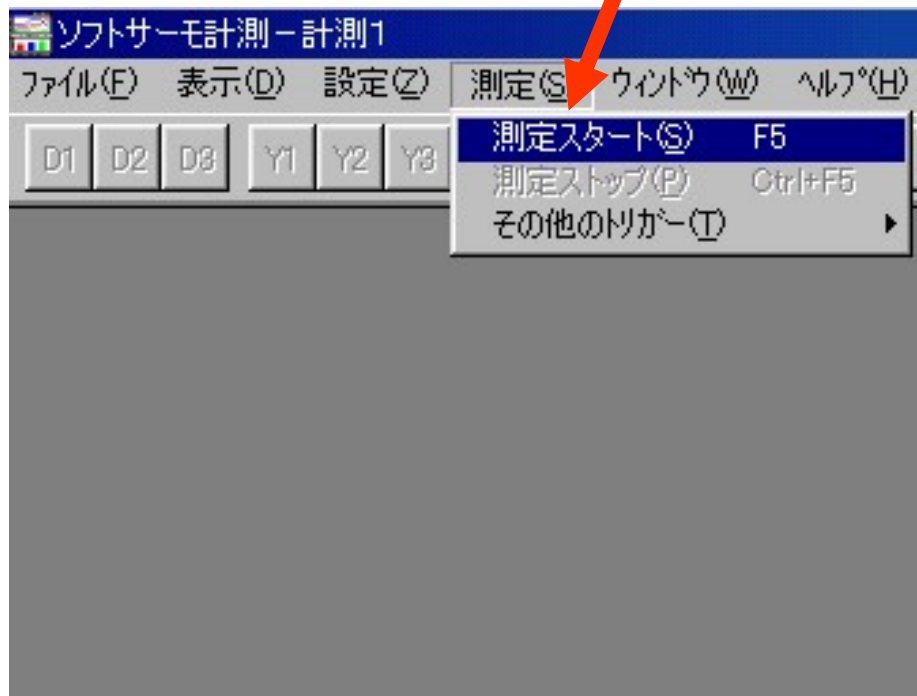
計測用ソフトウェア取り扱い方法

「測定」－「測定スタート」

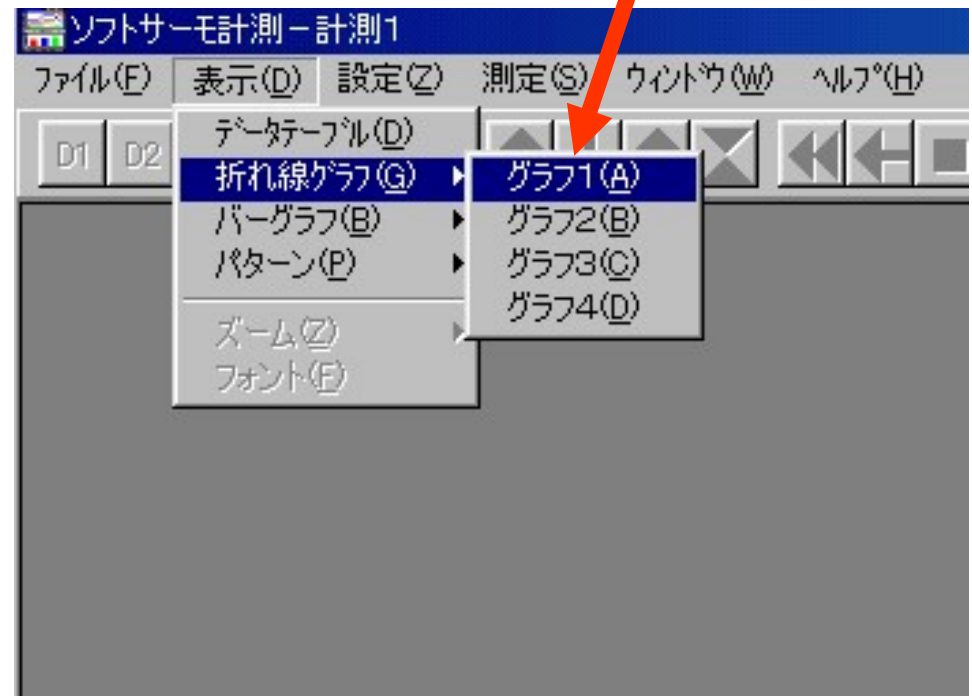
「表示」－「折れ線グラフ」－「グラフ1」

をそれぞれ選択（どちらが先でも良い）

選択

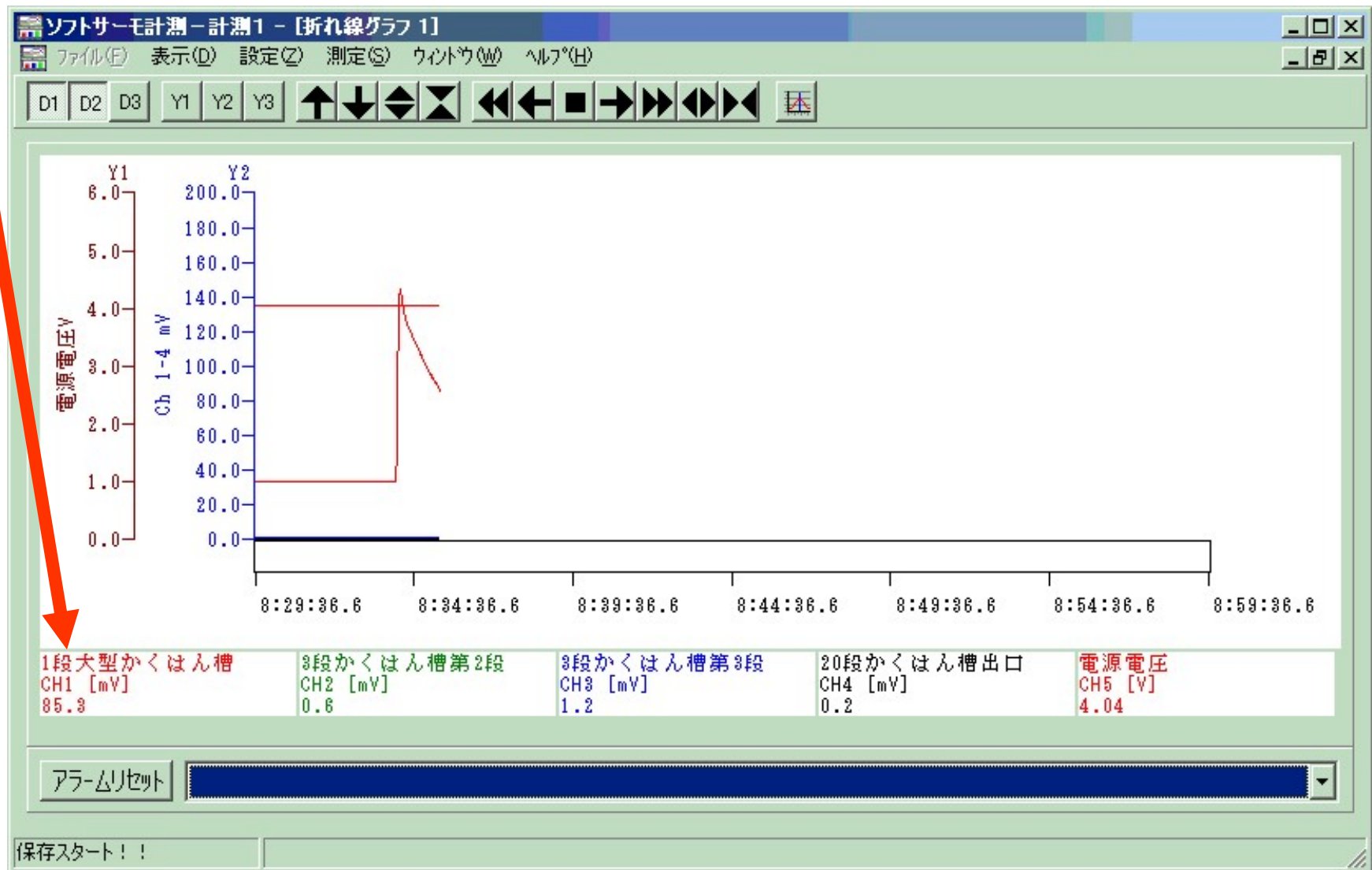


選択



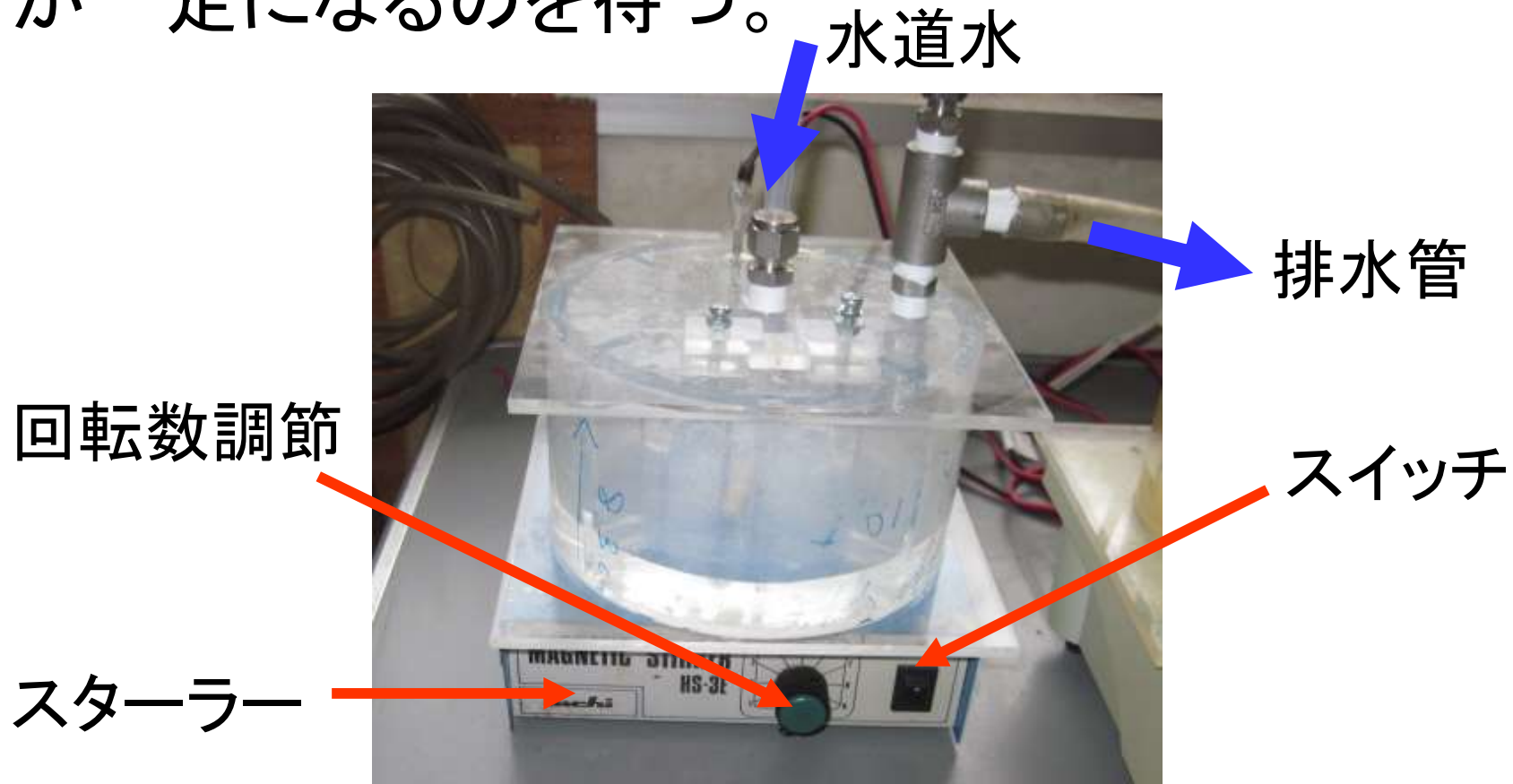
計測用ソフトウェア取り扱い方法

測定された電圧データがグラフの下に示される



実験方法(大型1段かくはん槽)

大型1段かくはん槽の下にあるマグネチックスターラーの電源を入れて、回転をONにして内部の水をかくはんする。電気伝導度計の出力電圧が一定になるのを待つ。

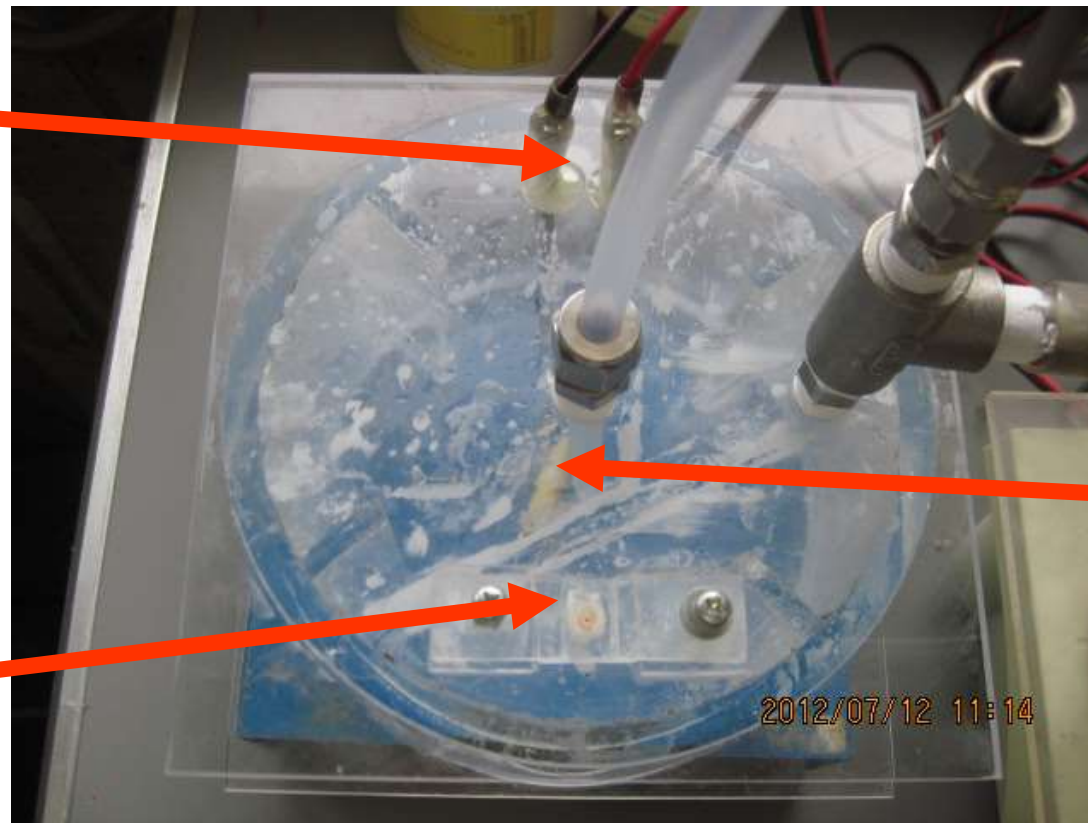


実験方法(大型1段かくはん槽)

注射器にトレーサー溶液を約2cc計り取り、大型1段かくはん槽の注入口ゴム栓を通してトレーサーを注入する。注入した時刻を $t=0$ とする。

電気伝導
度測定用
電極

注入口
ゴム栓



スターラー
回転子(実
験中は回転
している)

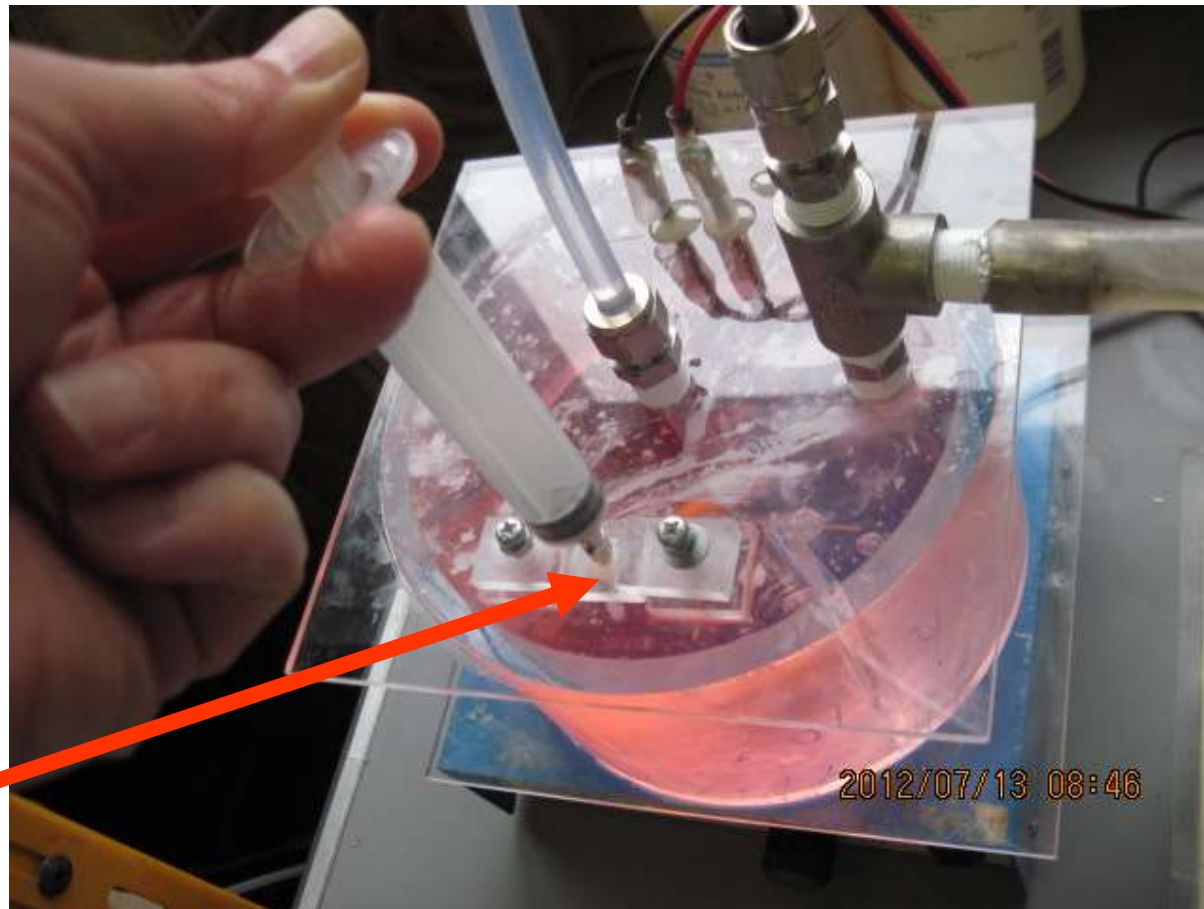
安全上の注意

注射器のピストンを動かすときは、**注射針の根本を手で押さえ**、針が外れて飛ばないようにする。内部に圧がかかって針が飛んだ場合、**目に入ると失明する**。



実験方法(大型1段かくはん槽)

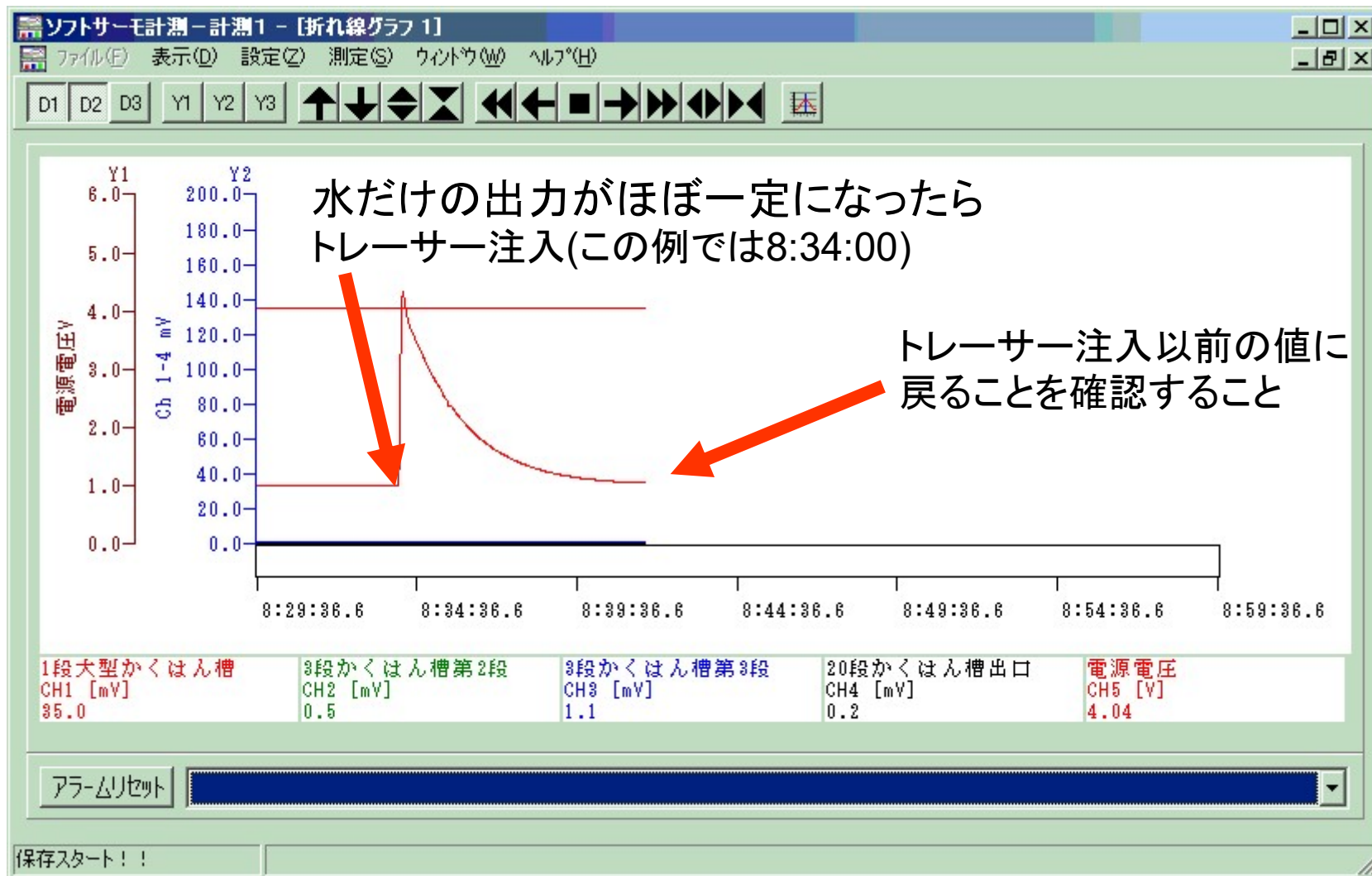
注射器にトレーサー溶液を約2cc計り取り、大型1段かくはん槽のゴム栓を通してトレーサーを注入する。注入した時刻を $t=0$ とする。



注入口
ゴム栓

実験方法(大型1段かくはん槽)

電気伝導度センサーの出力を記録して、出力がトレーサー注入以前の値になるまで記録を続ける(約15分かかる)。



計測用ソフトウェア取り扱い方法

「測定」－「測定ストップ」を選択するとダイアログ Boxが現れるので「はい」を選択する。

The image shows a software interface for a thermocouple measurement system. The main window is titled 'ソフトサーモ計測 - 計測1 - [折れ線グラフ]'. The menu bar includes 'ファイル(F)', '表示(D)', '設定(S)', '測定(S)', 'ウインドウ(W)', and 'ヘルプ(H)'. The '測定(S)' menu is open, showing options: '測定スタート(S) F5', '測定ストップ(P) Ctrl+F5', and 'その他のトリガー(T)'. A red arrow points to '測定ストップ(P)'. Below the menu is a control panel with buttons for 'D1', 'D2', 'D3', 'Y1', 'Y2', and 'Y3'. A graph shows two data series: 'Y1' with values 0.5 and 0.4, and 'Y2' with values 40.0 and 30.0. To the right, a '確認' (Confirmation) dialog box is displayed with the text: '測定ストップをすると、継続は不可能です。ストップして良いですか？' (When you stop the measurement, continuation is impossible. Is it okay to stop?). The dialog has two buttons: 'はい(Y)' (Yes) and 'いいえ(N)' (No). A red arrow points to the 'はい(Y)' button.

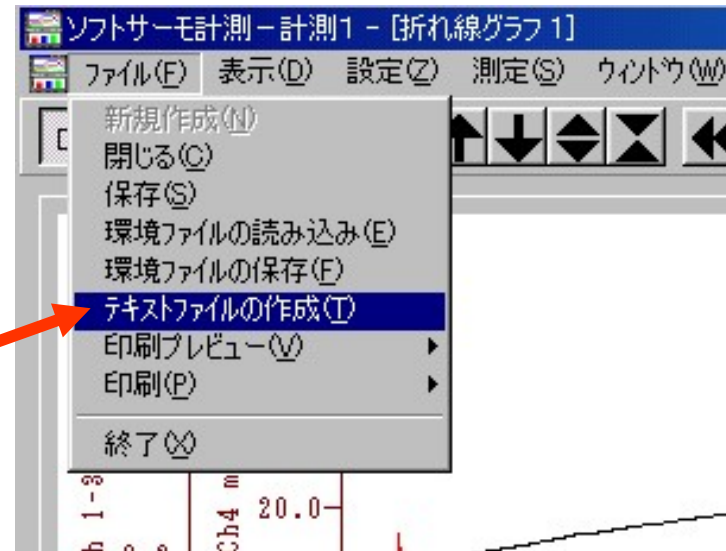
選択

「はい」を選択

計測用ソフトウェア取り扱い方法

測定データをCSV形式で保存する。

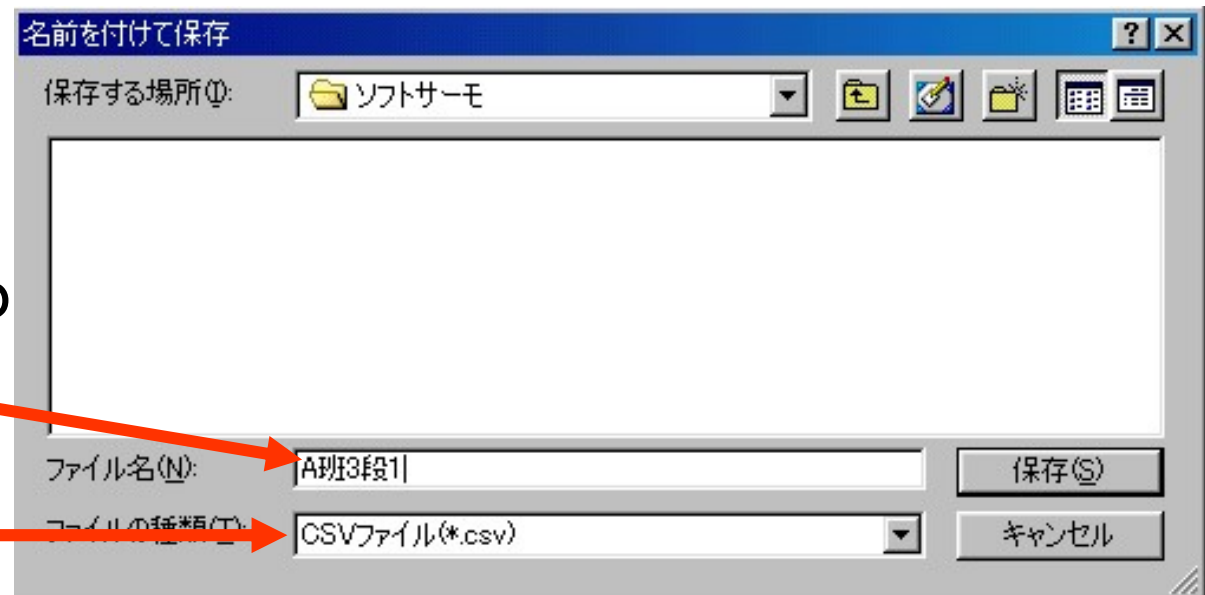
「ファイル」→「テキストファイルの作成」を選択



ダイアログBox が現れたら

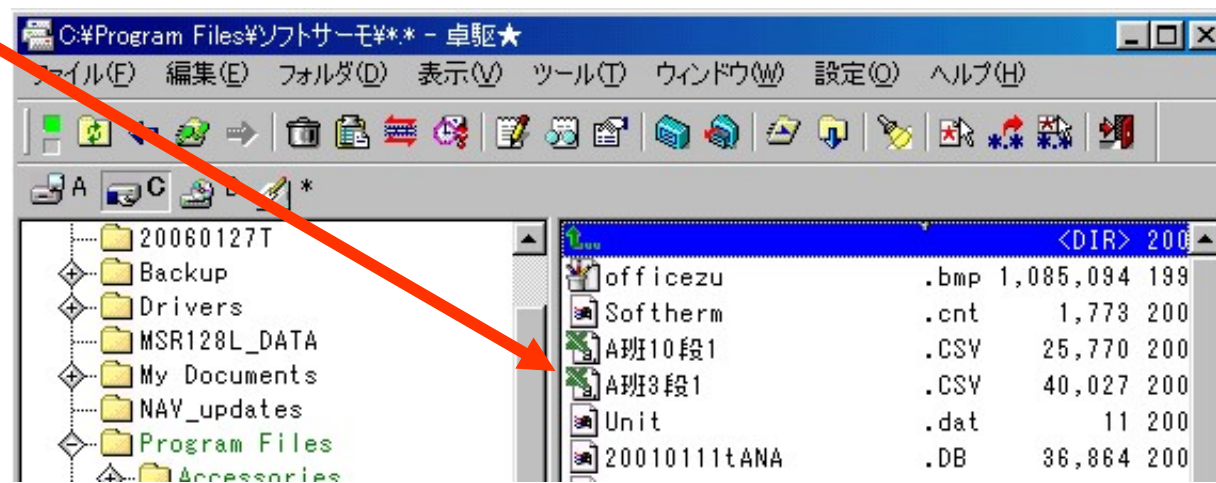
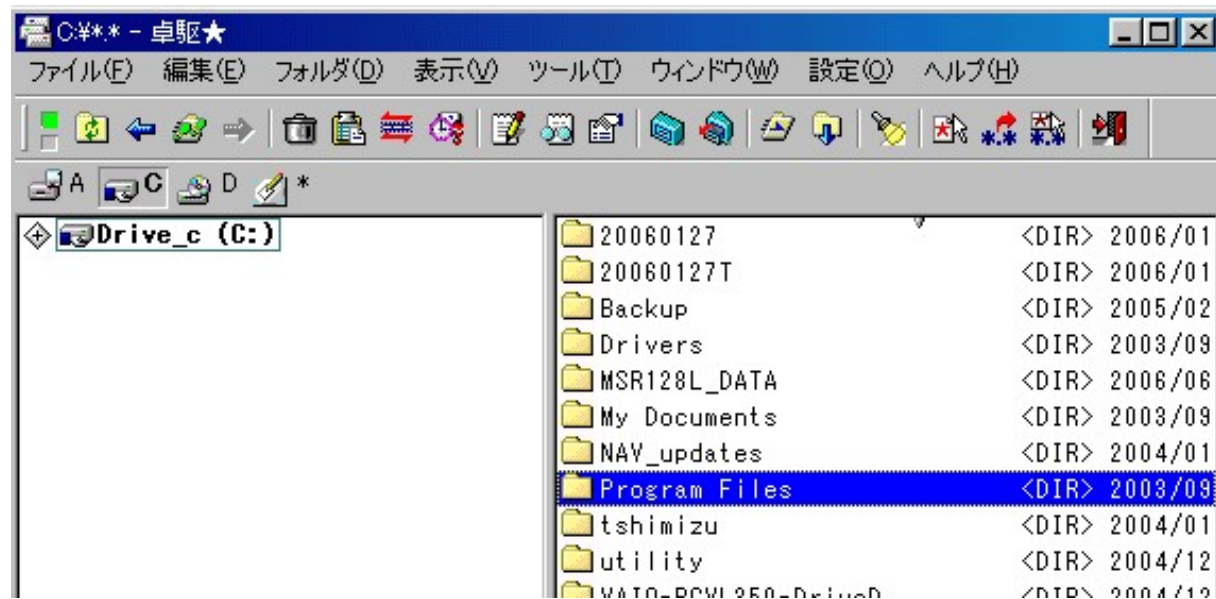
ファイル名を指定する
「A班1段.csv」等

CSV形式の選択



ファイルの確認

C:\Program filesの下の「ソフトサーモ」フォルダに自分が作ったデータファイルがあることを確認する。



PCによるデータ取得が困難な場合

電気伝導度センサーの出力をデジタル電圧指示計から読み取り、ノートに記録する。記録する時間間隔については、この指示書の中で後ほど指示する。

20段かく
はん槽

3段かくはん
槽第3段

大型1段かく
はん槽



PCによるデータ取得が困難な場合

出力をデジタル指示計の上段(緑色)指示値から10秒ごと読み取り、ノートに記録する。

データの整理、理論との比較は大型1段かくはん槽、3段かくはん槽第3段、20段かくはん槽について行う。

20段かくはん槽

3段かくはん槽第3段

大型1段かくはん槽



実験方法(3段かくはん槽)

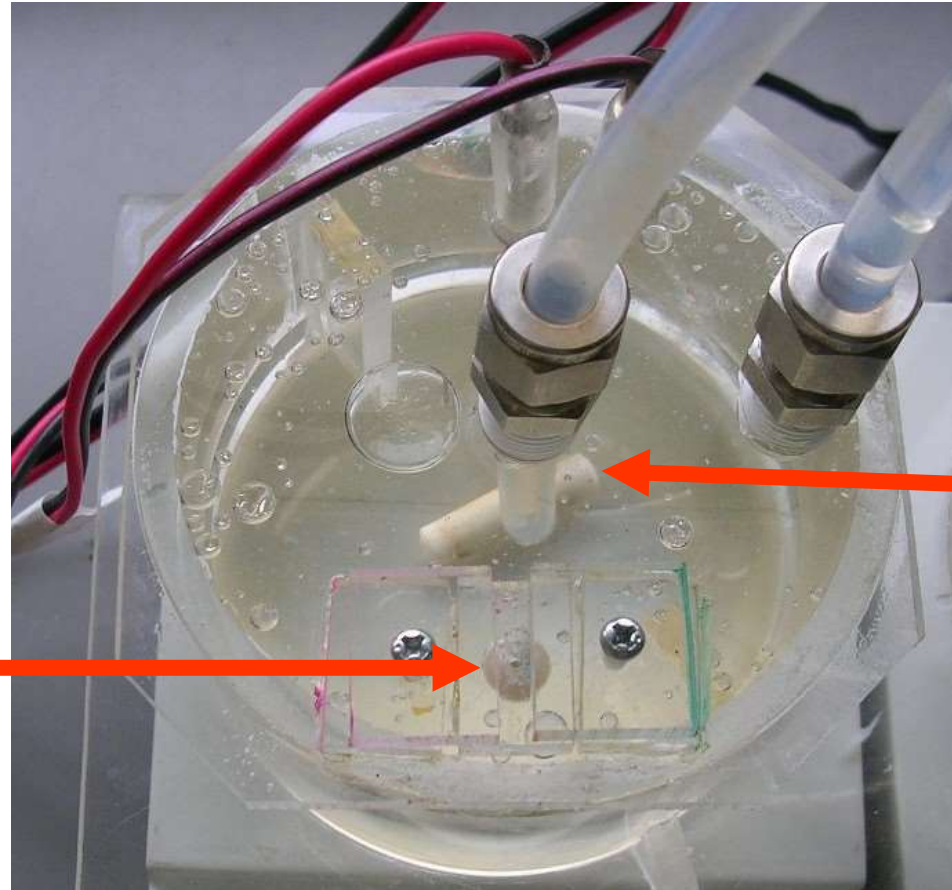
3段かくはん槽の下にあるマグネチックスターラーの電源を入れて、回転をONにして内部の水をかくはんする。電気伝導度計の出力電圧が一定になるのを待つ。



実験方法(3段かくはん槽)

注射器にトレーサー溶液を約1cc計り取り、3段かくはん槽第1段のゴム栓を通してトレーサーを注入する。注入した時刻を $t=0$ とする。

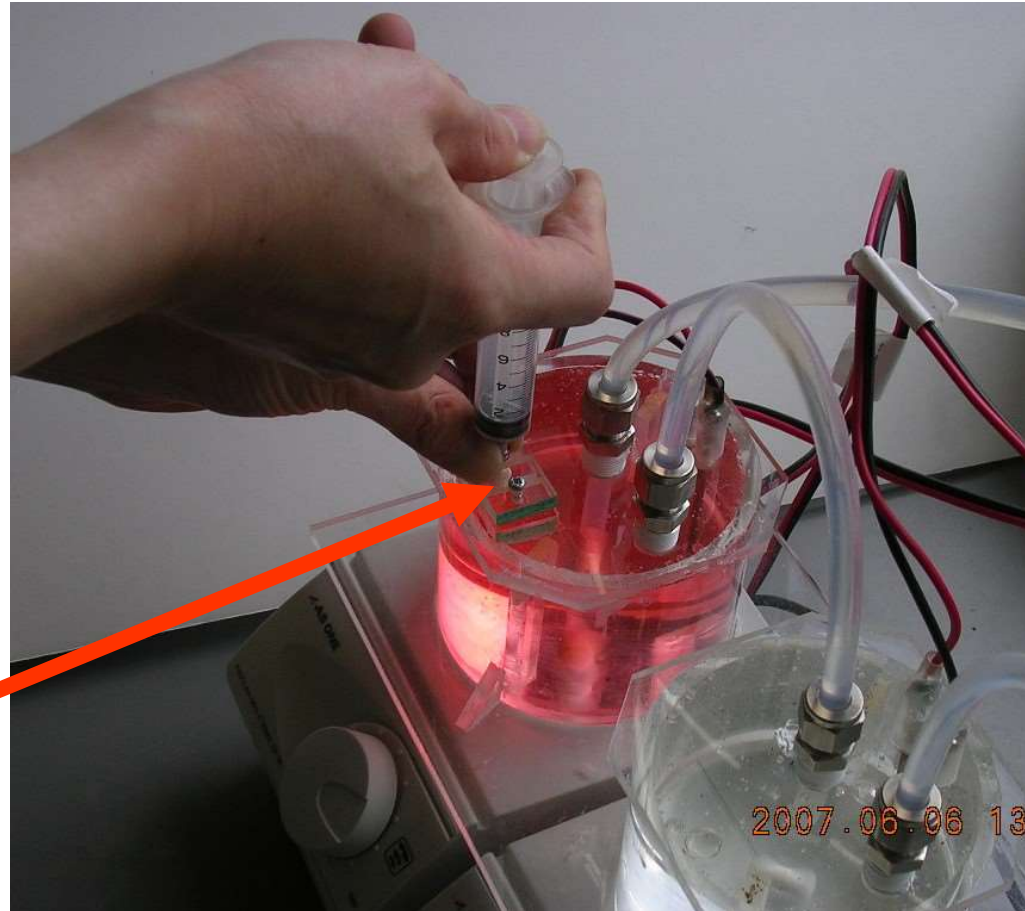
注入口
ゴム栓



スターラー
回転子(実
験中は回転
している)

実験方法(3段かくはん槽)

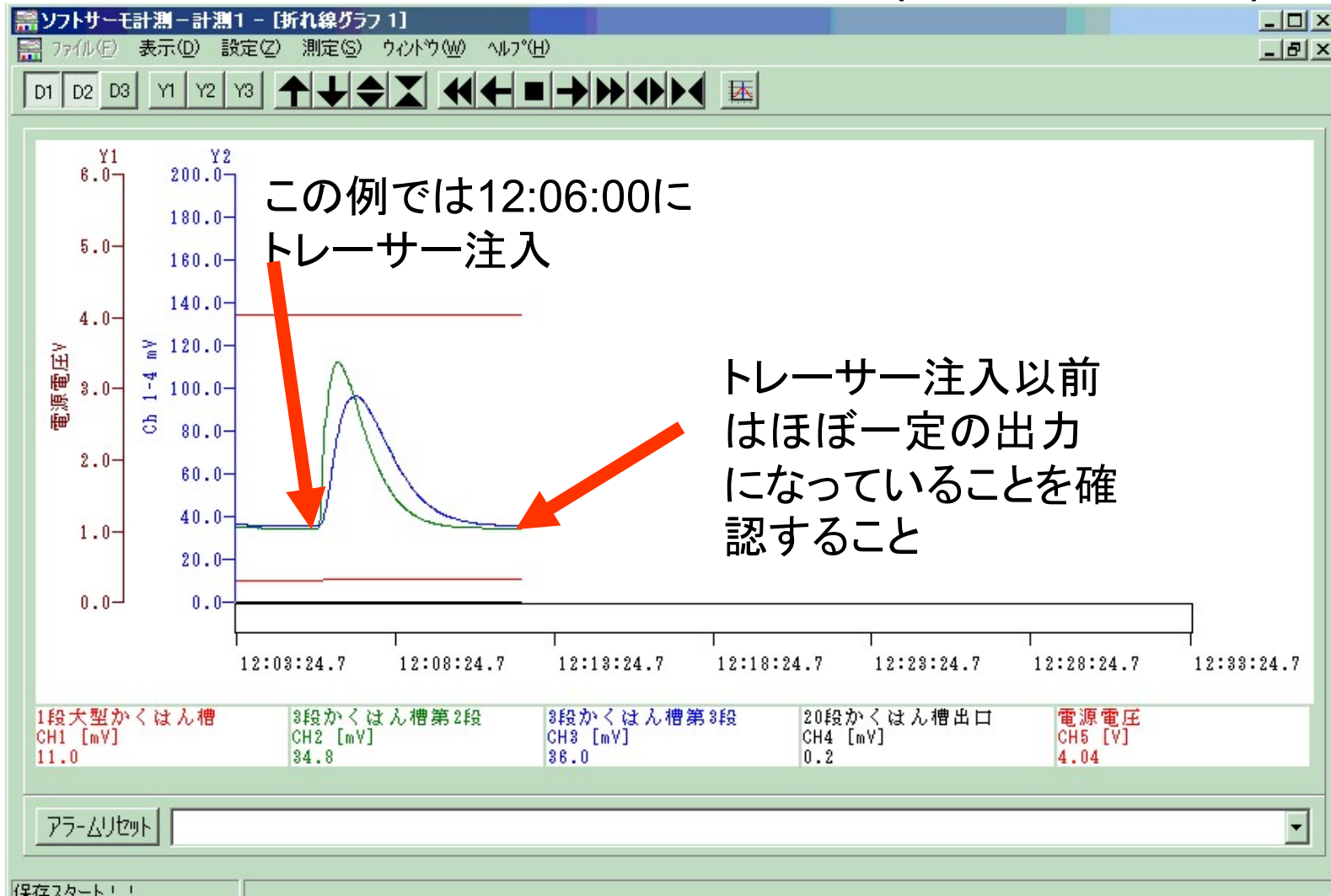
注射器にトレーサー溶液を約1cc計り取り、3段かくはん槽第1段のゴム栓を通してトレーサーを注入する。注入した時刻を $t=0$ とする。



注入口
ゴム栓

実験方法(3段かくはん槽)

電気伝導度センサーの出力を記録し、出力がトレーサー注入以前の値になるまで記録を続ける(約8分かかる)。



実験方法(20段かくはん槽)

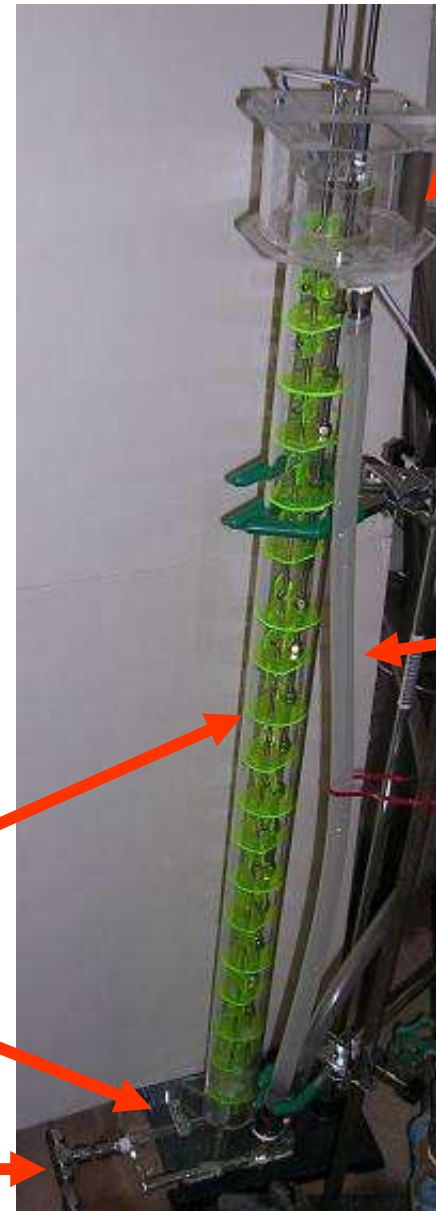
3方バルブを20段かくはん槽へ切り替える。回転メーターの指示値(水の流量)が変化している場合は、再度流量を測定する。

水は装置の下から入り、上向きに流れる。

20段かくはん槽本体

トレーサー注入口ゴム栓

水流入口

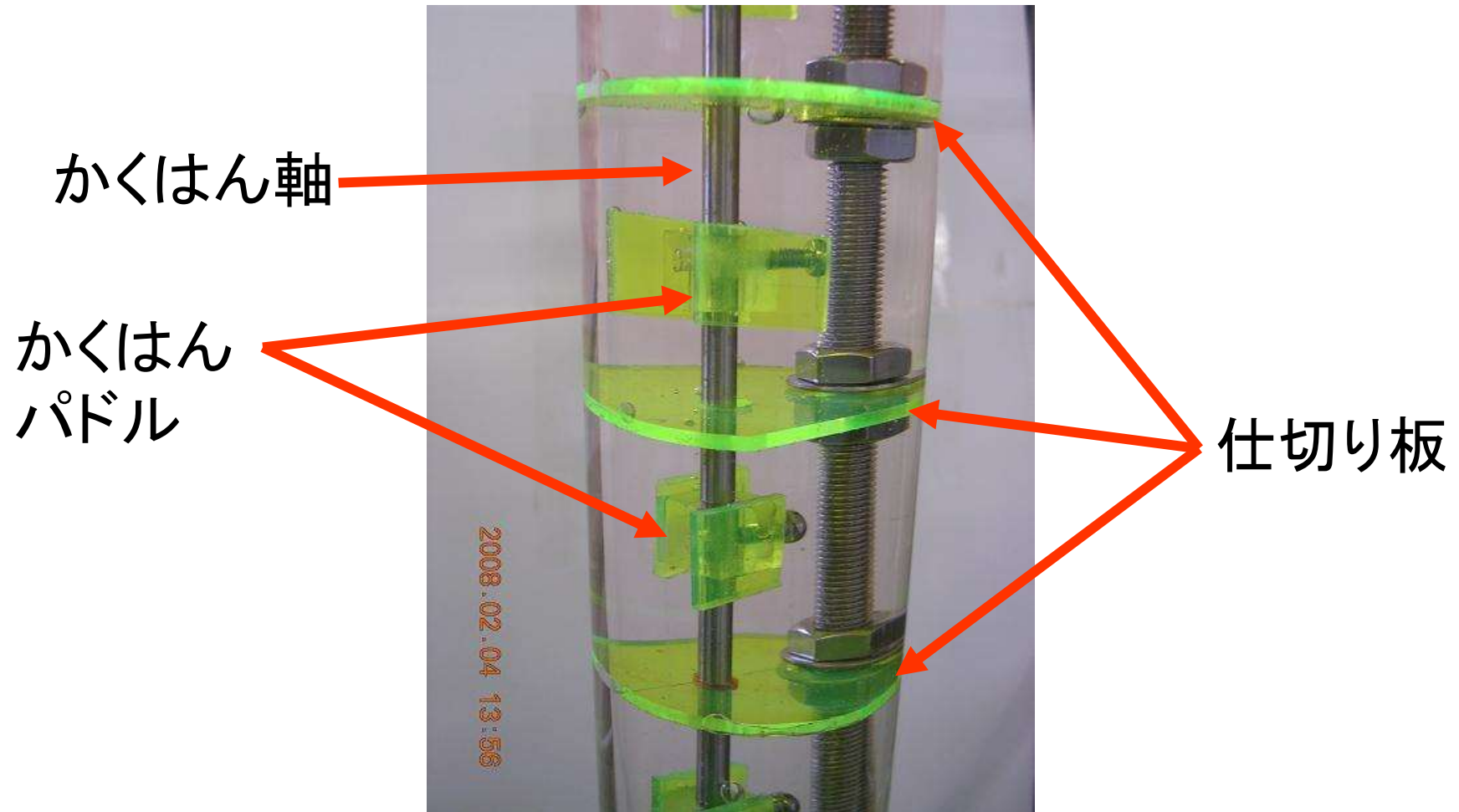


オーバー
フロー部

排水管

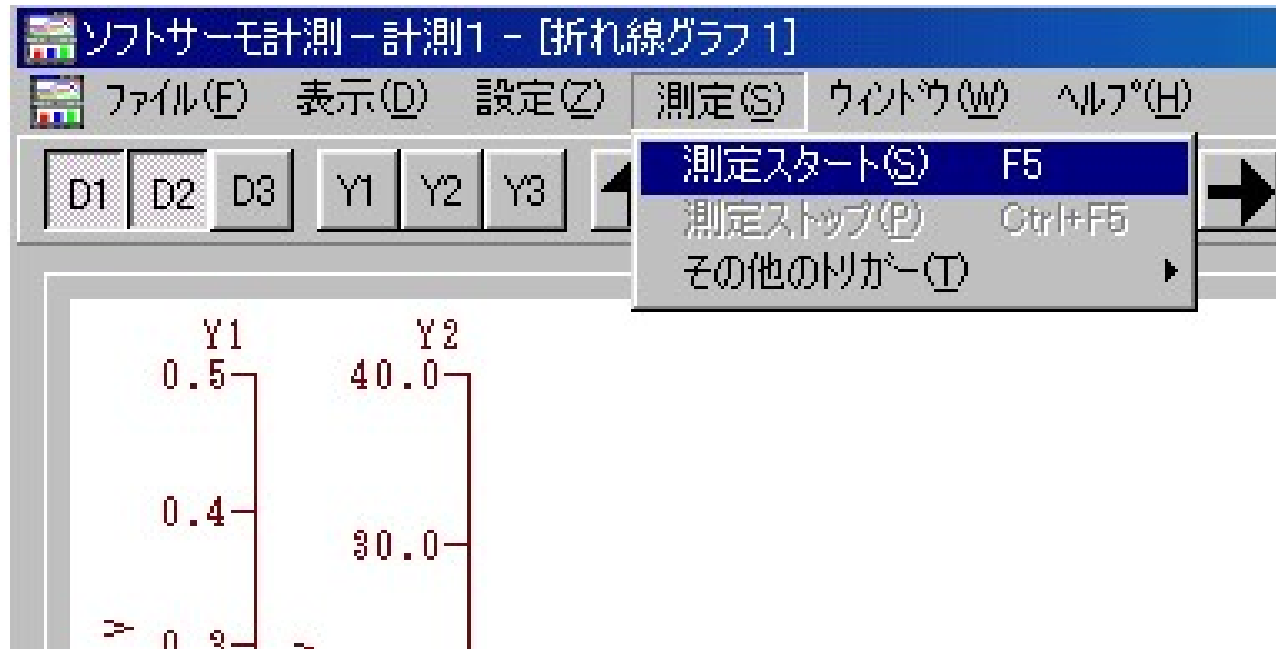
実験方法(20段かくはん槽)

20段かくはん槽の内部構造(詳細)

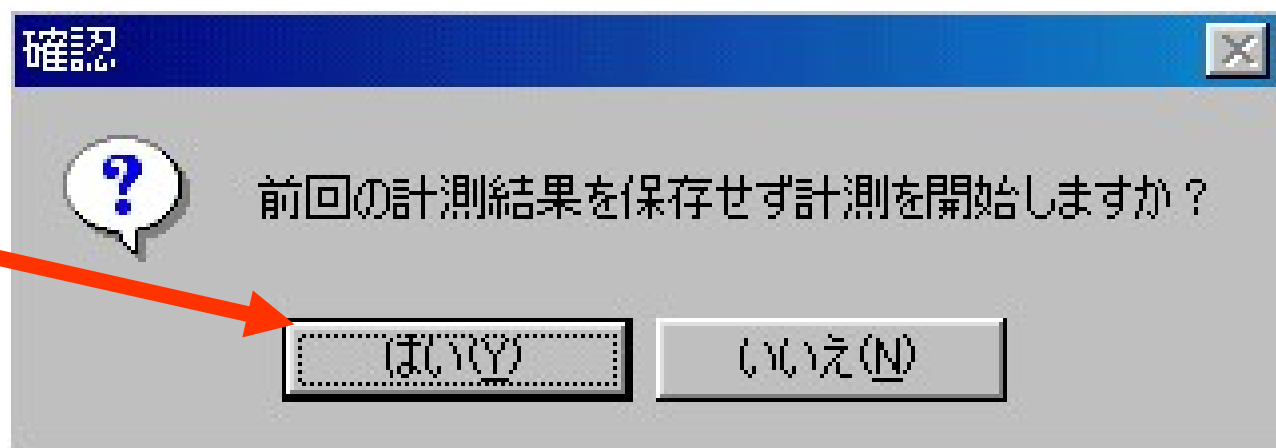


実験方法(20段かくはん槽)

「測定」→「測定スタート」を選択し、測定を開始する。ダイアログBoxで開始してよいかどうか聞くので、「はい」を選択する。



「はい」を選択

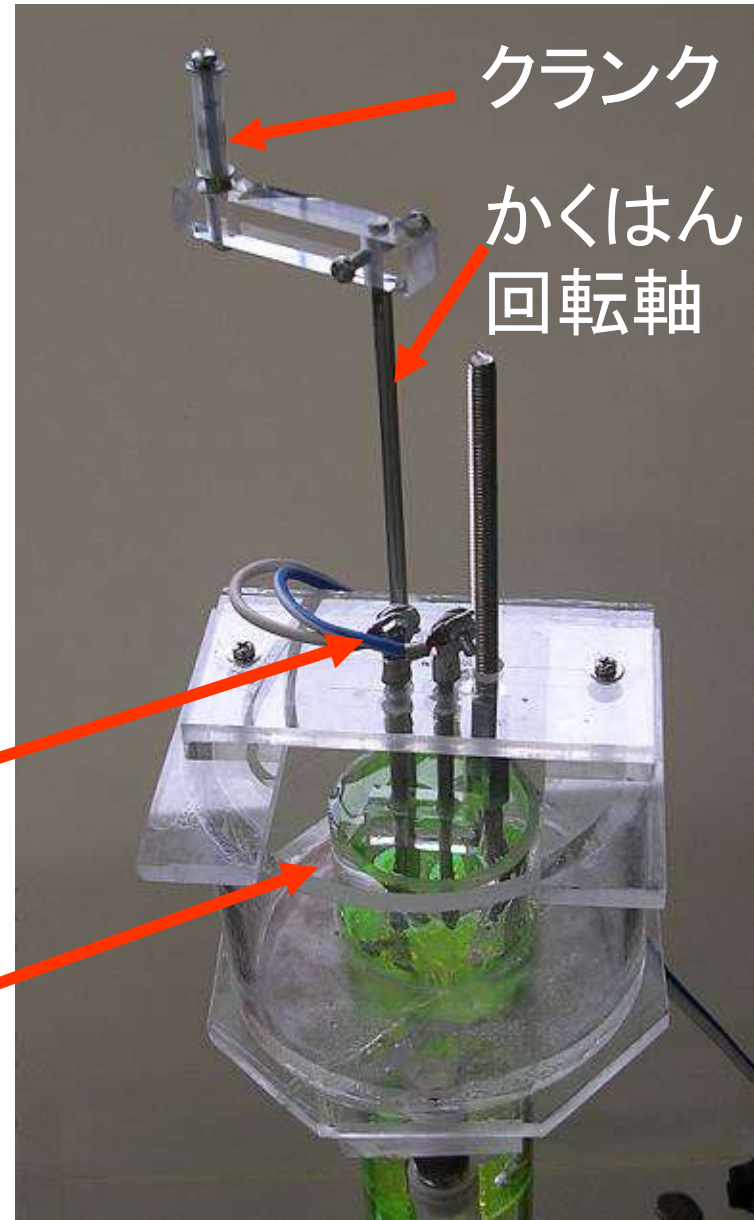


実験方法(20段かくはん槽)

電気伝導度計の出力電圧が一定になるのを待つ。電気伝導度計出力が一定になったらレーザー注入の用意をするとともに、クランクを手で回して(回転速度1~2回転/秒)内部をかくはんする。

電気伝導度
測定用電極

オーバー
フロー部

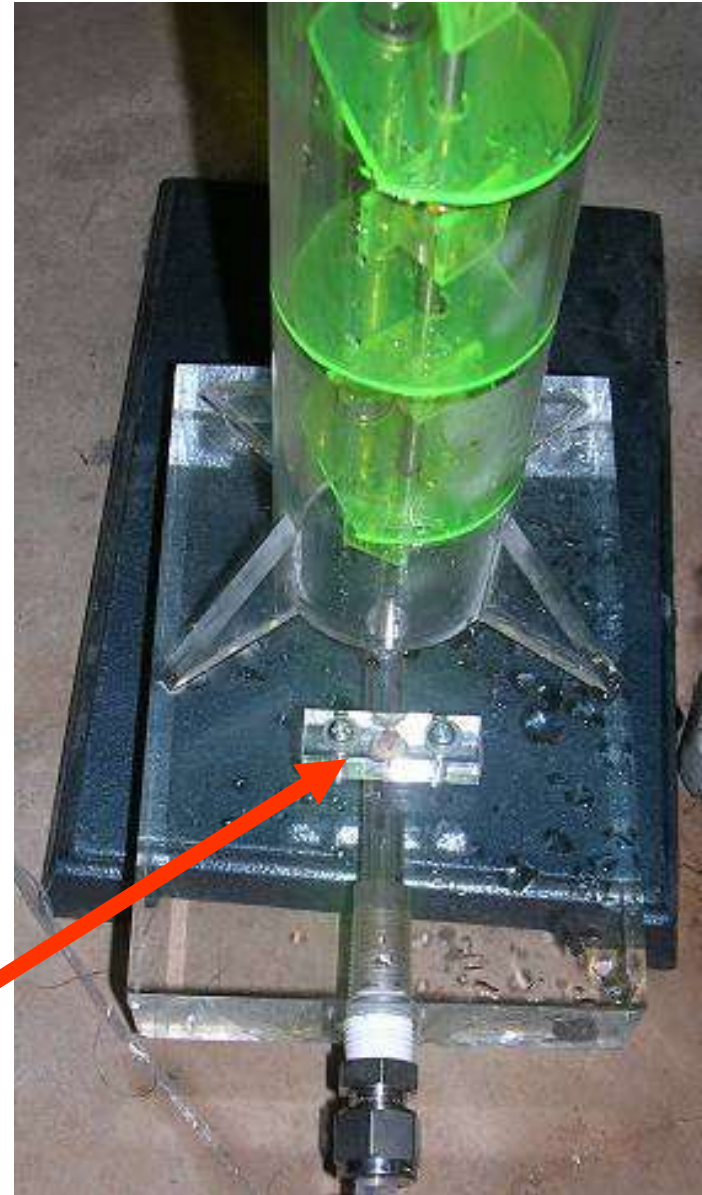


実験方法(20段かくはん槽)

注射器にトレーサー溶液を約1cc計り取り、20段かくはん槽の下のゴム栓を通してトレーサーを注入する。注入した時刻を $t=0$ とする。

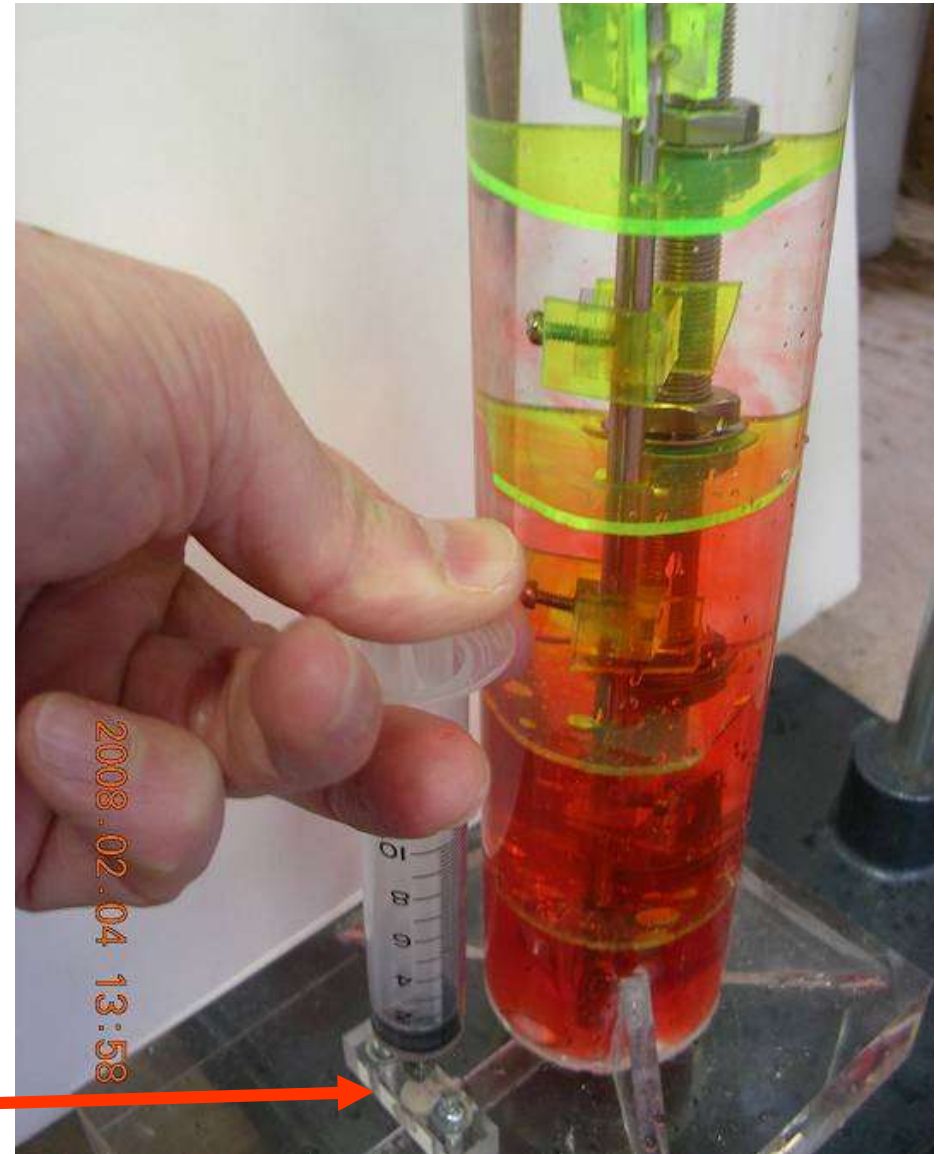
注射針の取り扱いに注意すること!

注入口ゴム栓



実験方法(20段かくはん槽)

注射器にトレーサー溶液を約1cc計り取り、20段かくはん槽の下のゴム栓を通してトレーサーを注入する。注入した時刻を $t=0$ とする。

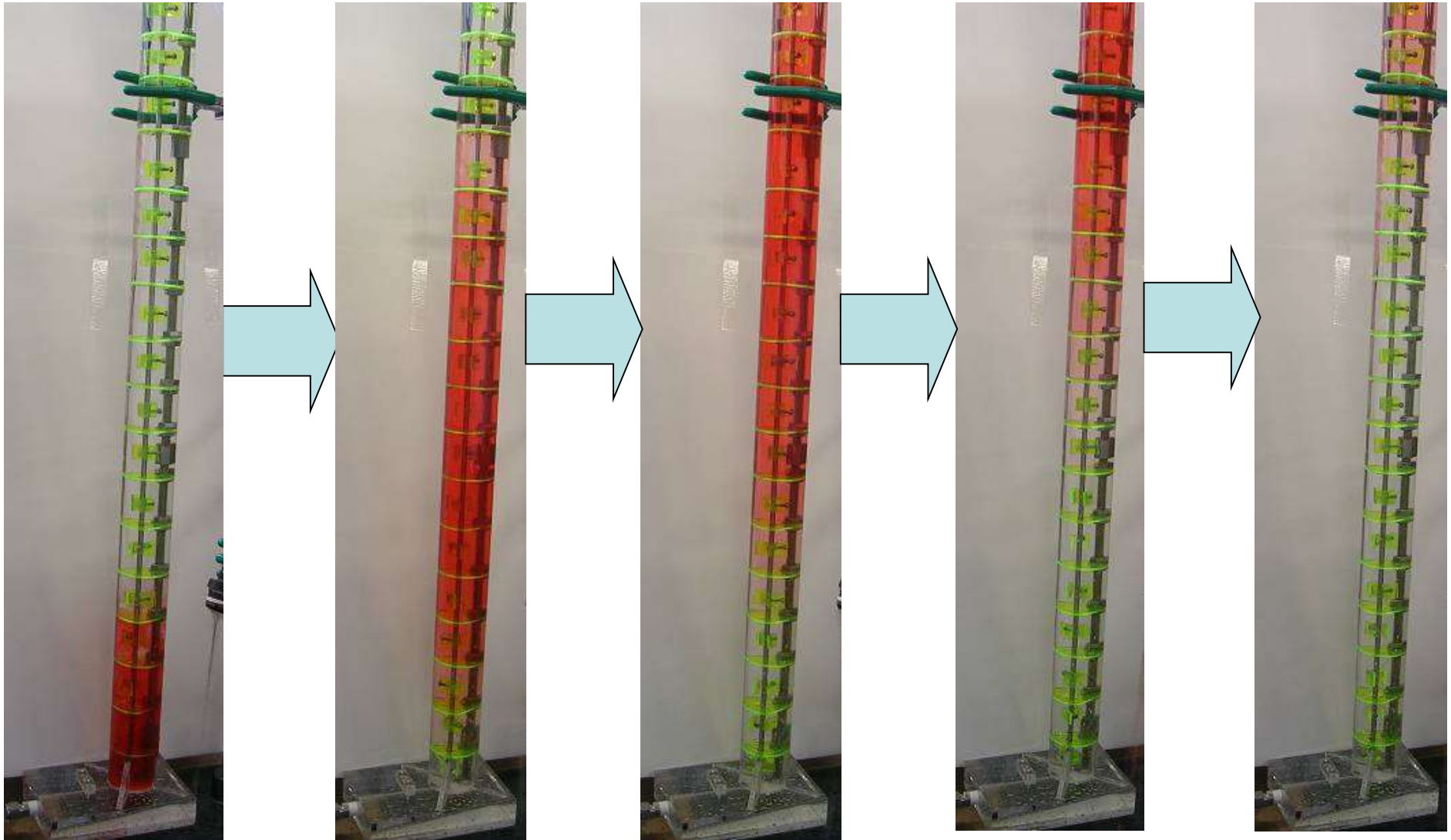


注入口ゴム栓



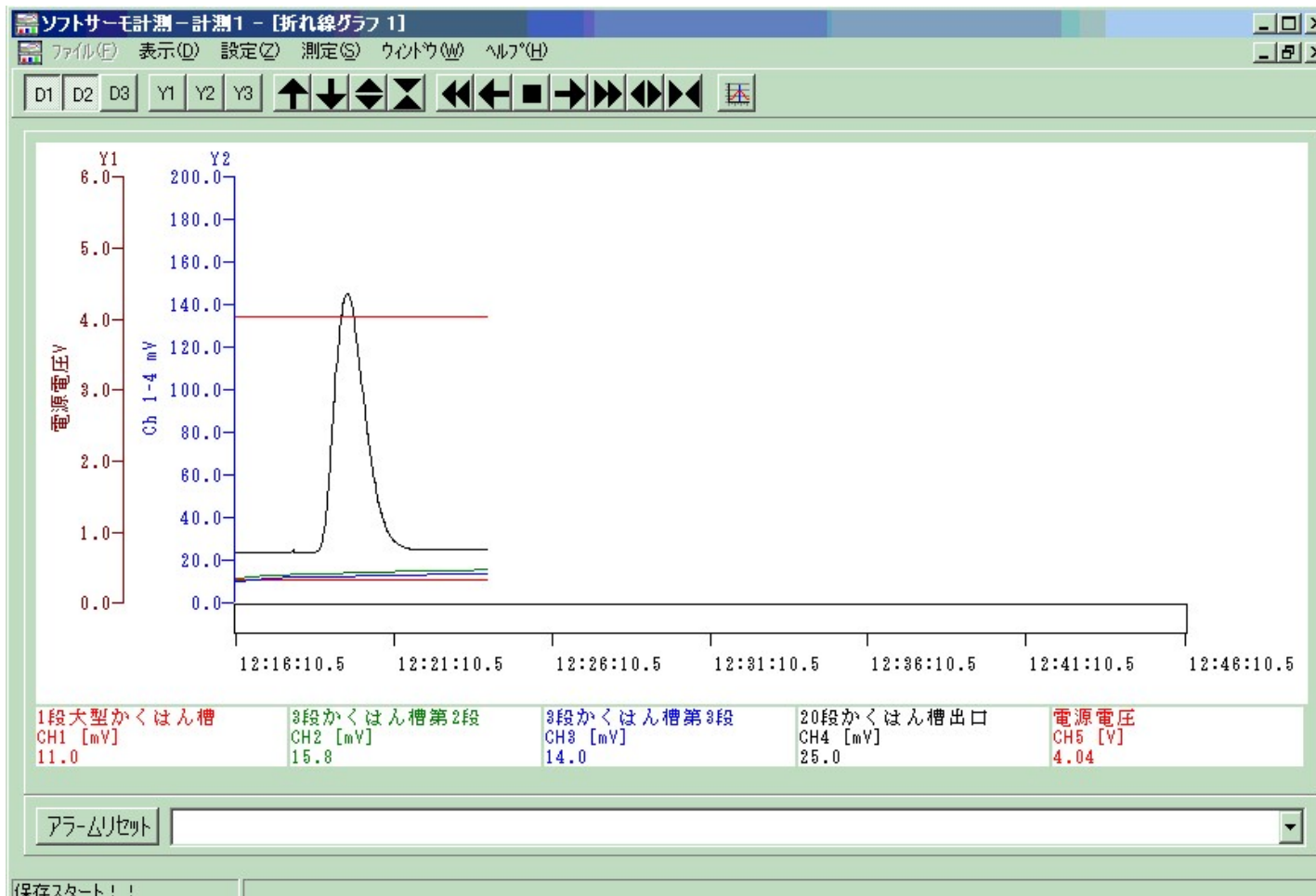
実験方法(20段かくはん槽)

トレーサー注入後の様子



実験方法(20段かくはん槽)

電気伝導度センサーの出力を記録し、出力がトレーサー注入以前の値になるまでかくはんと記録を続ける(約6分かかる)。出力が一定になったら測定ストップする。



実験方法(20段かくはん槽)

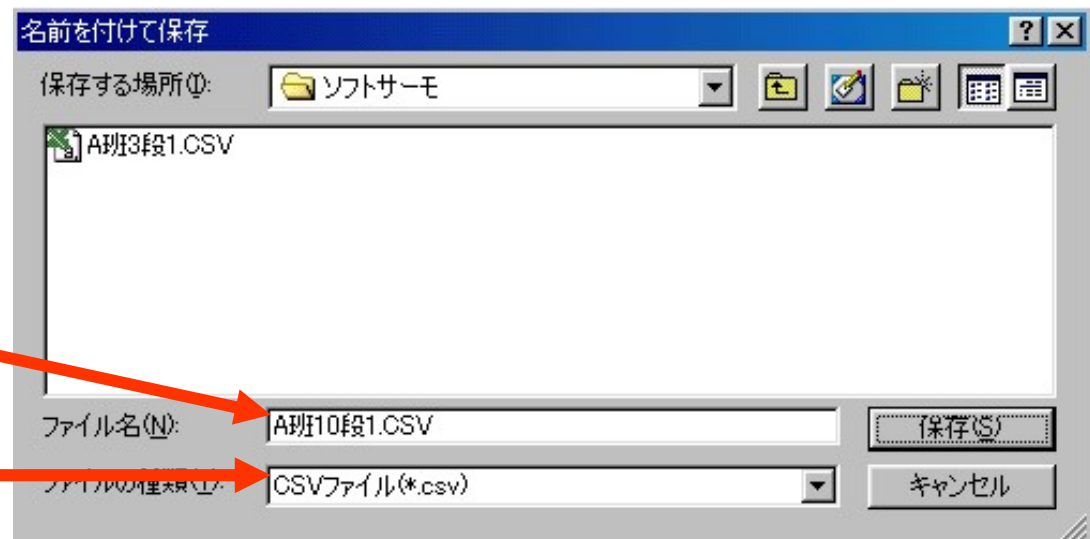
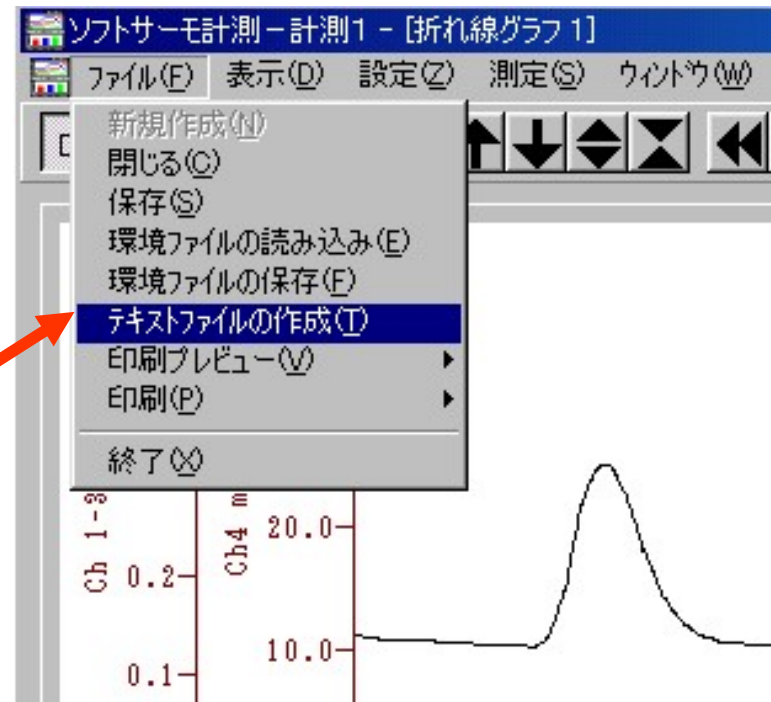
測定データを
CSV形式で保
存する。

「ファイル」ー「テキスト
ファイルの作成」を選択

ダイアログBox が現
れたら

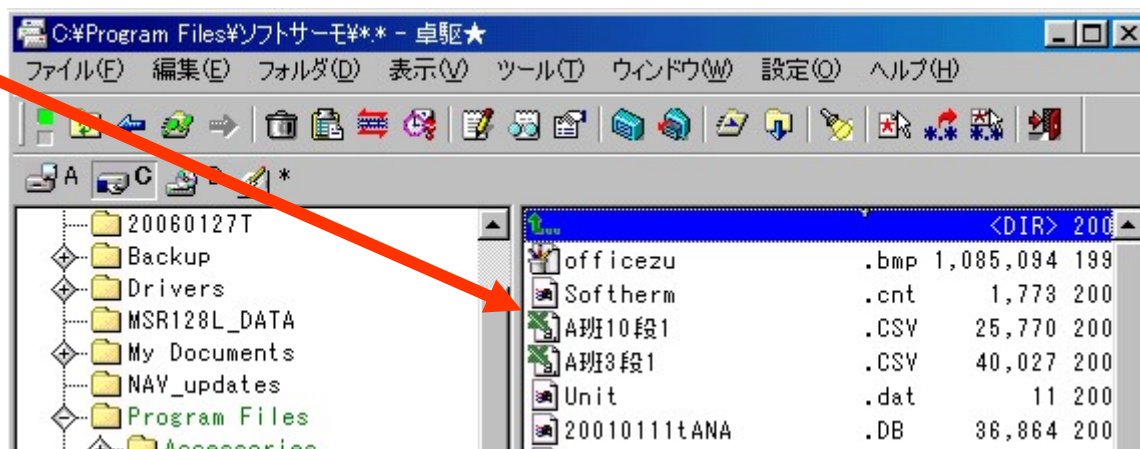
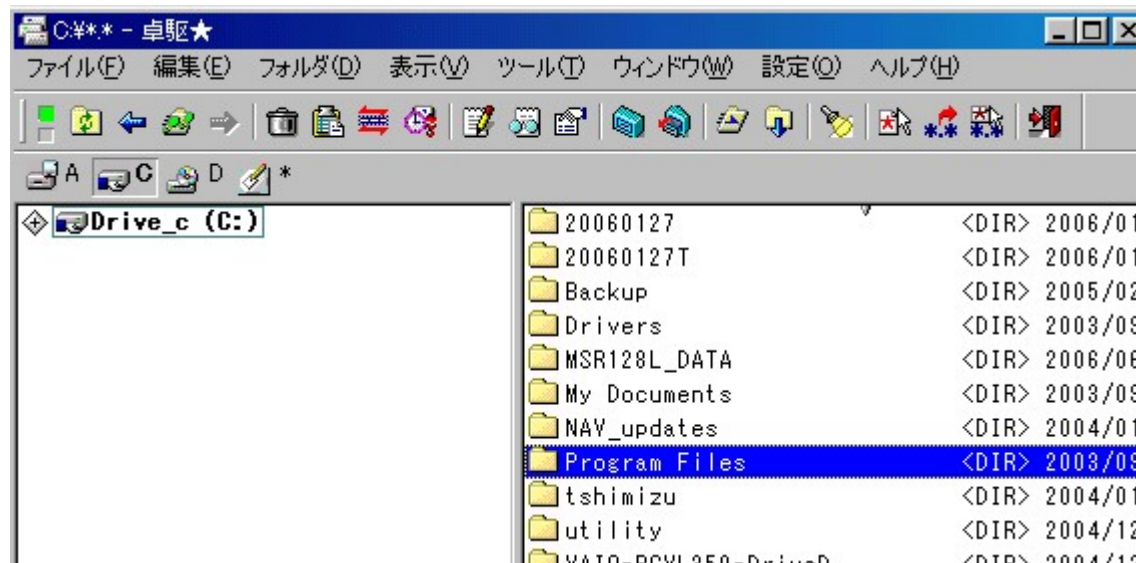
ファイル名を指定する
「A班20段1.csv」等

CSV形式の選択



ファイルの確認

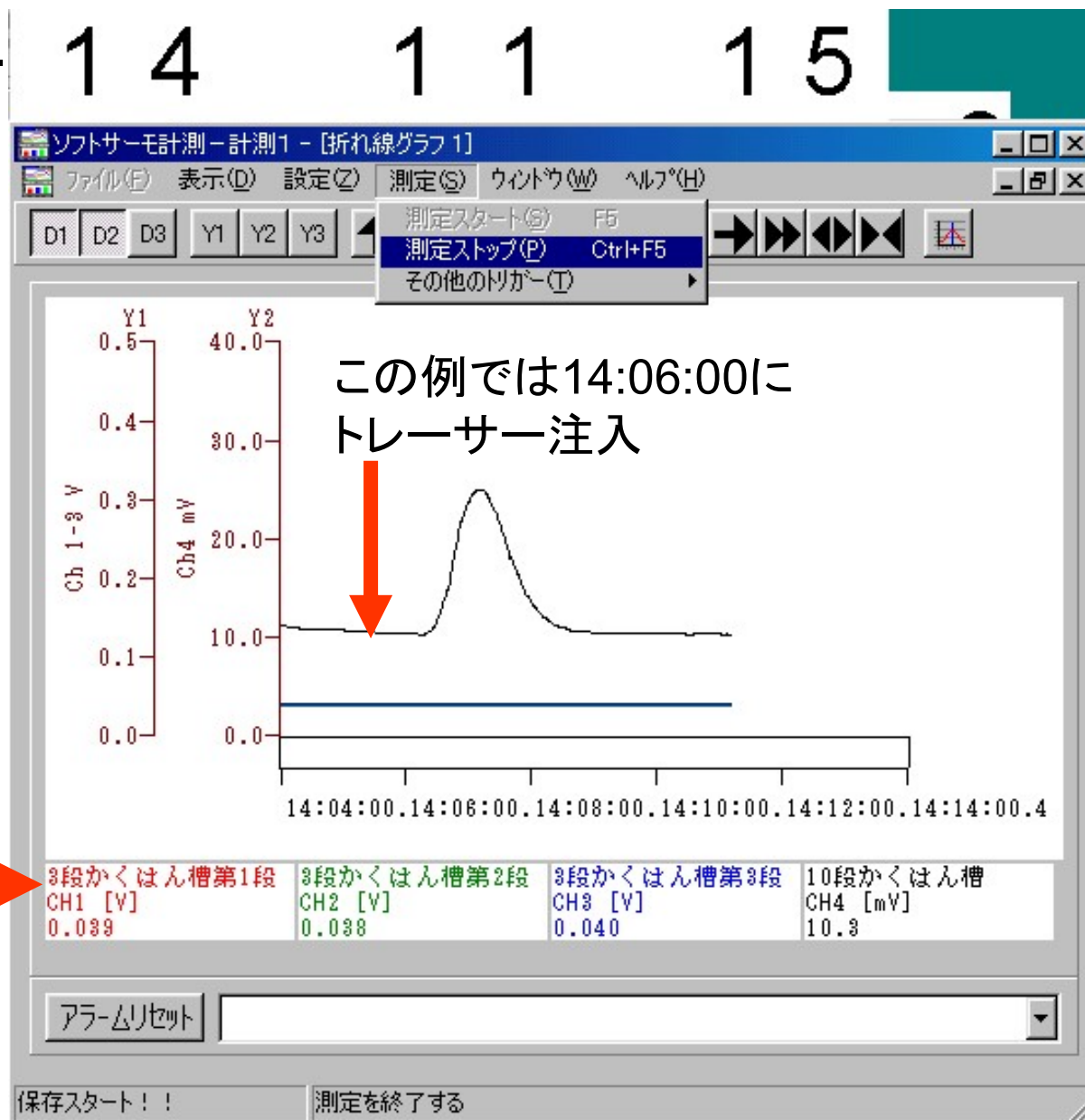
C:\¥Program filesの下の「ソフトサーモ」フォルダに自分が作ったデータファイルがあることを確認する。



PCによるデータ取得が困難な場合

電気伝導度センサーの出力電圧をデジタル電圧計から読み取り、10秒ごとに記録して、ノートに記録を続ける。ソフトサーモが動けば、下段の電圧データを読んでもよい。

ソフトサーモが動かせればここに示される値を読んでもよい



エクセルによるデータの処理

CSVファイルは、ファイルをダブルクリックするとエクセルで直接読み取れる。

B～E列は各チャンネルの電圧データ

A列は測定時刻

	A	B	C	D	E	F
1	測定条件					
2	データ保存	1				
3	移動平均機	OFF				
4	オートゼロ	OFF				
5	内部基準接	ON				
6	バーンアウト	ON				
7	CH毎の設定					
8	CH	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5
9	レンジ	2V	2V	2V	200mV	SKIP
10	保存種類	瞬時値	瞬時値	瞬時値	瞬時値	瞬時値
11	スケーリング	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
12	スケーリング	0	0	0	0	
13	スケーリング	100	100	100	100	
14	スケーリング	0	0	0	0	
15	スケーリング	100	100	100	100	
16	タグ	3段かくはん	3段かくはん	3段かくはん	10段かくはん	槽
17	単位	V	V	V	mV	
18	測定データ					
19	44:00.4	0.039	0.038	0.04	14.1	
20	44:01.4	0.039	0.038	0.04	14.1	
21	44:02.4	0.039	0.038	0.04	14.2	
22	44:03.4	0.039	0.038	0.04	14.2	
23	44:04.4	0.039	0.038	0.04	14.2	
24	44:05.4	0.039	0.038	0.04	14.2	
25	44:06.4	0.039	0.038	0.04	14.3	
26	44:07.4	0.039	0.038	0.04	14.3	
27	44:08.4	0.039	0.038	0.04	14.3	
28	44:09.4	0.039	0.038	0.04	14.4	

エクセルによるデータの処理

まず測定時刻の表示形式を変える

次にメニューから「書式」→「セル」を選択する

最初に測定時刻のデータを選択する



Microsoft Excel - A班3段1.OSV

ファイル(F) 編集(E) 表示(V) 挿入(I) 書式(O) ツール(T) データ(D) ウィンドウ(W)

セル(E)... Ctrl+1

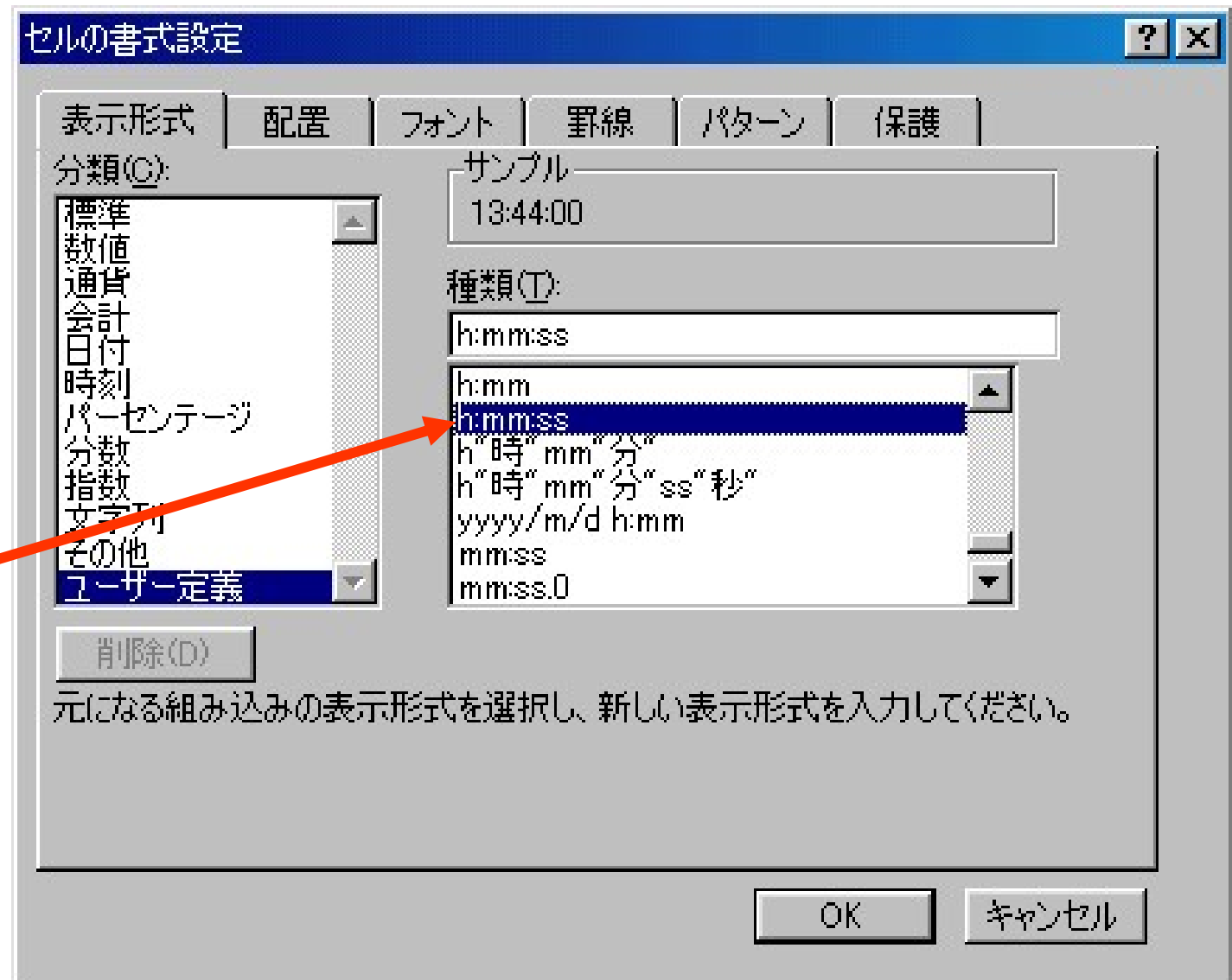
- 行(R)
- 列(C)
- シート(H)
- オートフォーマット(A)...
- 条件付き書式(D)...
- スタイル(S)...
- ふりがな(T)

	A	B	C	D	E	F
1	測定条件					
2	データ保存		1			
3	移動平均	OFF				
4	オートゼロ	OFF				
5	内部基準	ON				
6	バーンアウト	ON				
7	CH毎の設定					
8	CH	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5
9	レンジ	2V	2V	2V	200mV	SKIP
10	保存種類	瞬時値	瞬時値	瞬時値	瞬時値	瞬時値
11	スケーリング	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
12	スケーリング	0	0	0	0	
13	スケーリング	100	100	100	100	
14	スケーリング	0	0	0	0	
15	スケーリング	100	100	100	100	
16	タグ	3段かくはん	3段かくはん	3段かくはん	10段かくはん	槽
17	単位	V	V	V	mV	
18	測定データ					
19	44:00.4	0.039	0.038	0.04	14.1	
20	44:01.4	0.039	0.038	0.04	14.1	
21	44:02.4	0.039	0.038	0.04	14.2	
22	44:03.4	0.039	0.038	0.04	14.2	
23	44:04.4	0.039	0.038	0.04	14.2	
24	44:05.4	0.039	0.038	0.04	14.2	
25	44:06.4	0.039	0.038	0.04	14.3	
26	44:07.4	0.039	0.038	0.04	14.3	
27	44:08.4	0.039	0.038	0.04	14.3	
28	44:09.4	0.039	0.038	0.04	14.4	

エクセルによるデータの処理

測定時刻の表示形式をh:mm:ss(時:分:秒)にする。

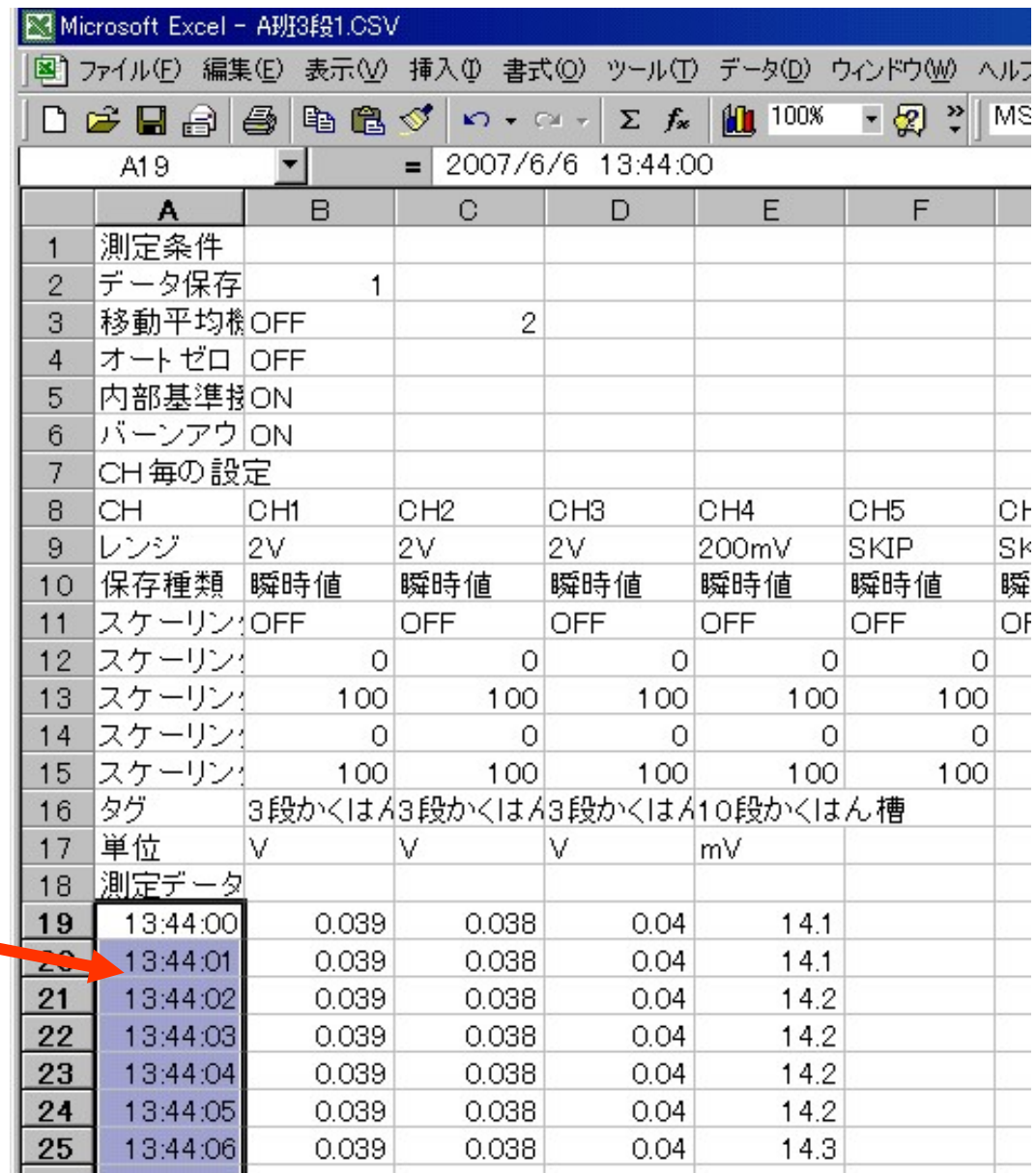
ダイアログ
Boxの「表示
形式」から
「時刻」の分
類の中の
「h:mm:ss」
を選択する



エクセルによるデータの処理

測定時刻の表示形式が変わったことを確認する。トレーサーを打ち込んだ時刻を探してデータを整理する。

h:mm:ss形式になったことを確認



Microsoft Excel - A班3段1.CSV

ファイル(F) 編集(E) 表示(V) 挿入(I) 書式(O) ツール(T) データ(D) ウィンドウ(W) ヘルプ(H)

A19 = 2007/6/6 13:44:00

	A	B	C	D	E	F	G
1	測定条件						
2	データ保存	1					
3	移動平均機	OFF	2				
4	オートゼロ	OFF					
5	内部基準接	ON					
6	バーンアウト	ON					
7	CH毎の設定						
8	CH	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6
9	レンジ	2V	2V	2V	200mV	SKIP	SKIP
10	保存種類	瞬時値	瞬時値	瞬時値	瞬時値	瞬時値	瞬時値
11	スケーリング	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
12	スケーリング	0	0	0	0	0	0
13	スケーリング	100	100	100	100	100	100
14	スケーリング	0	0	0	0	0	0
15	スケーリング	100	100	100	100	100	100
16	タグ	3段かくはん	3段かくはん	3段かくはん	10段かくはん	槽	
17	単位	V	V	V	mV		
18	測定データ						
19	13:44:00	0.039	0.038	0.04	14.1		
20	13:44:01	0.039	0.038	0.04	14.1		
21	13:44:02	0.039	0.038	0.04	14.2		
22	13:44:03	0.039	0.038	0.04	14.2		
23	13:44:04	0.039	0.038	0.04	14.2		
24	13:44:05	0.039	0.038	0.04	14.2		
25	13:44:06	0.039	0.038	0.04	14.3		

エクセルによるデータの処理

トレーサー注入前の水道水だけ流した場合の電気伝導度計出力との差を計算する。

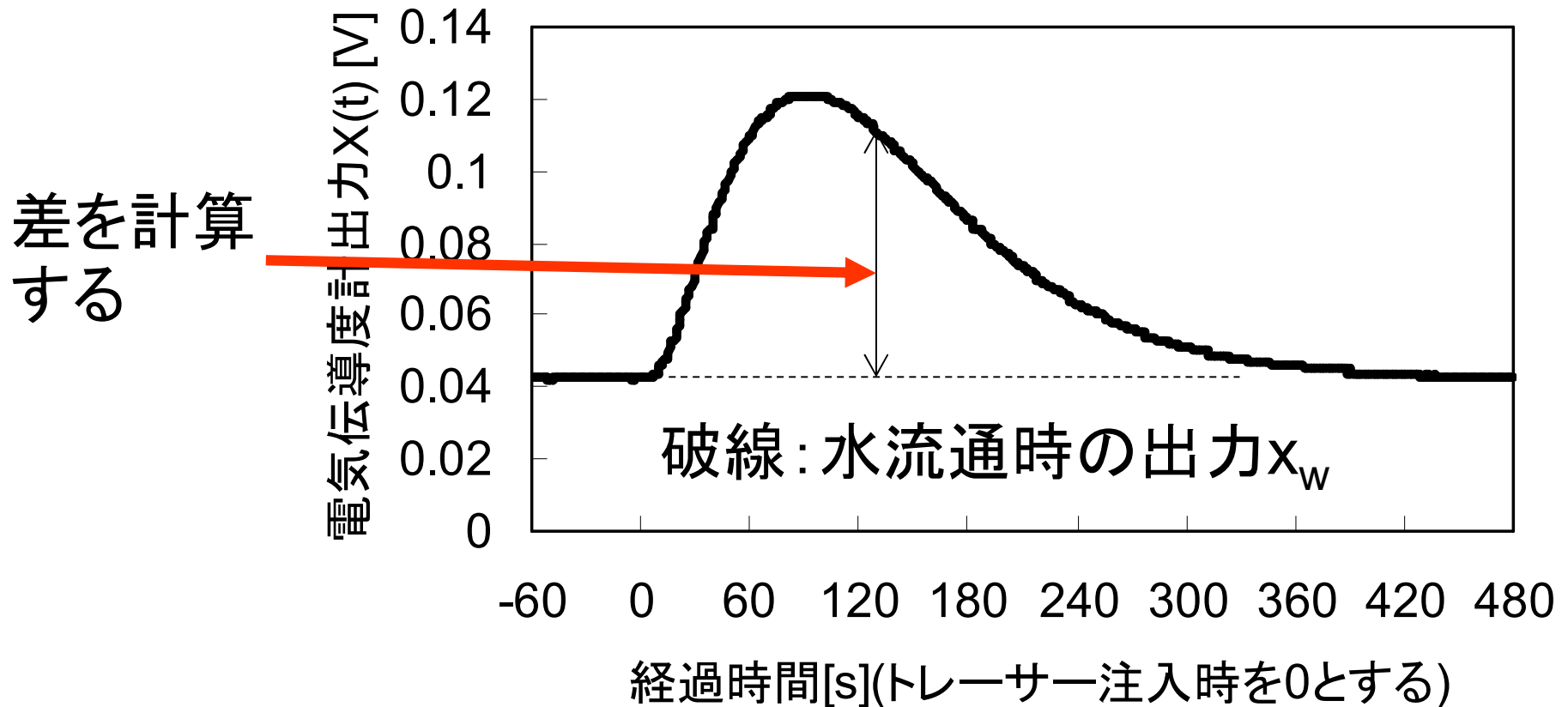
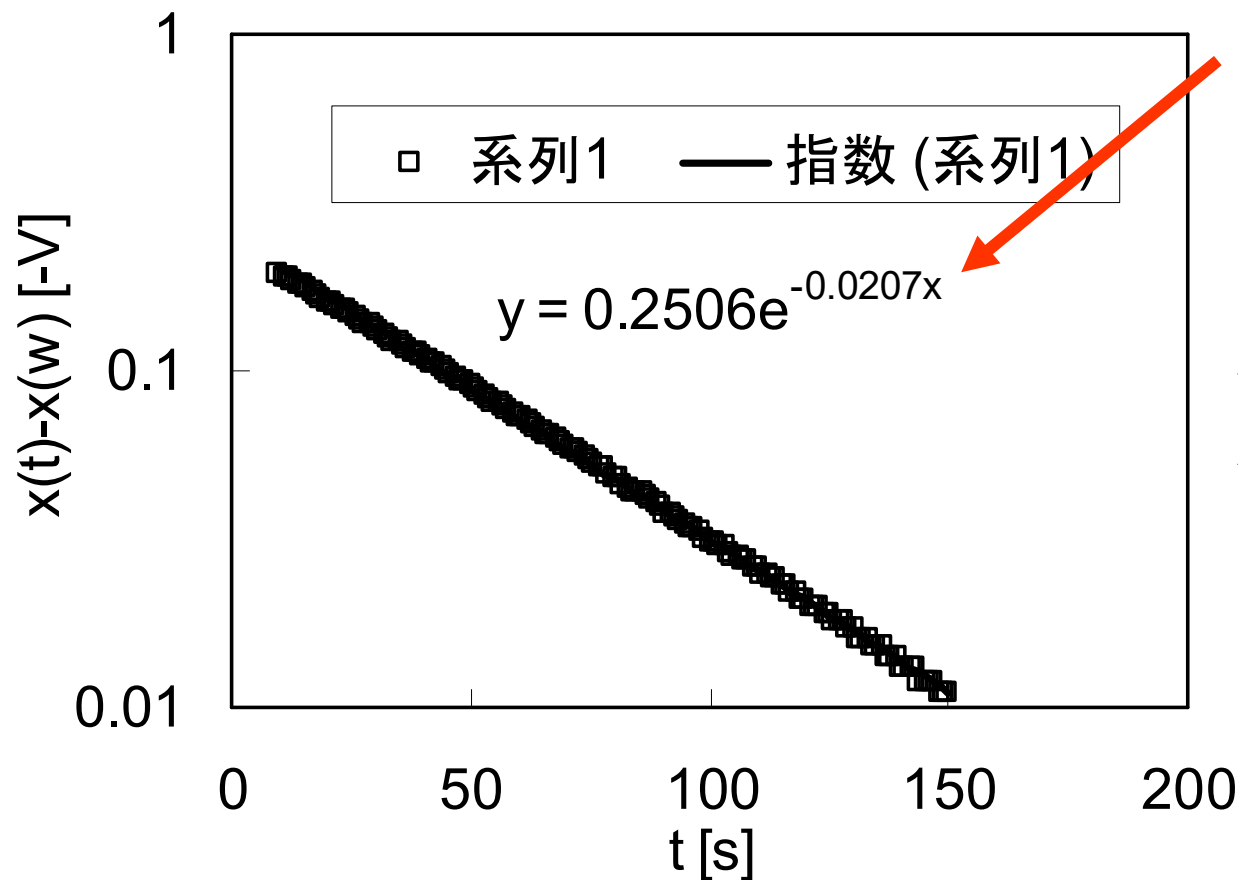


図1 3段かくはん槽第3段の電気伝導度計出力の経時変化

エクセルによるデータの処理

1段大型かくはん槽のデータを片対数プロットし、直線が描けることを確かめる。直線の傾きから時定数 τ_{exp} を求める。



エクセルのグラフにある近似式をそのまま使うと有効桁数が足りなくなる可能性があるがあるので、**使わないこと。**

エクセルによるデータの処理

3段かくはん槽第2段、第3段、および20段かくはん槽のデータは積分して面積を求める。

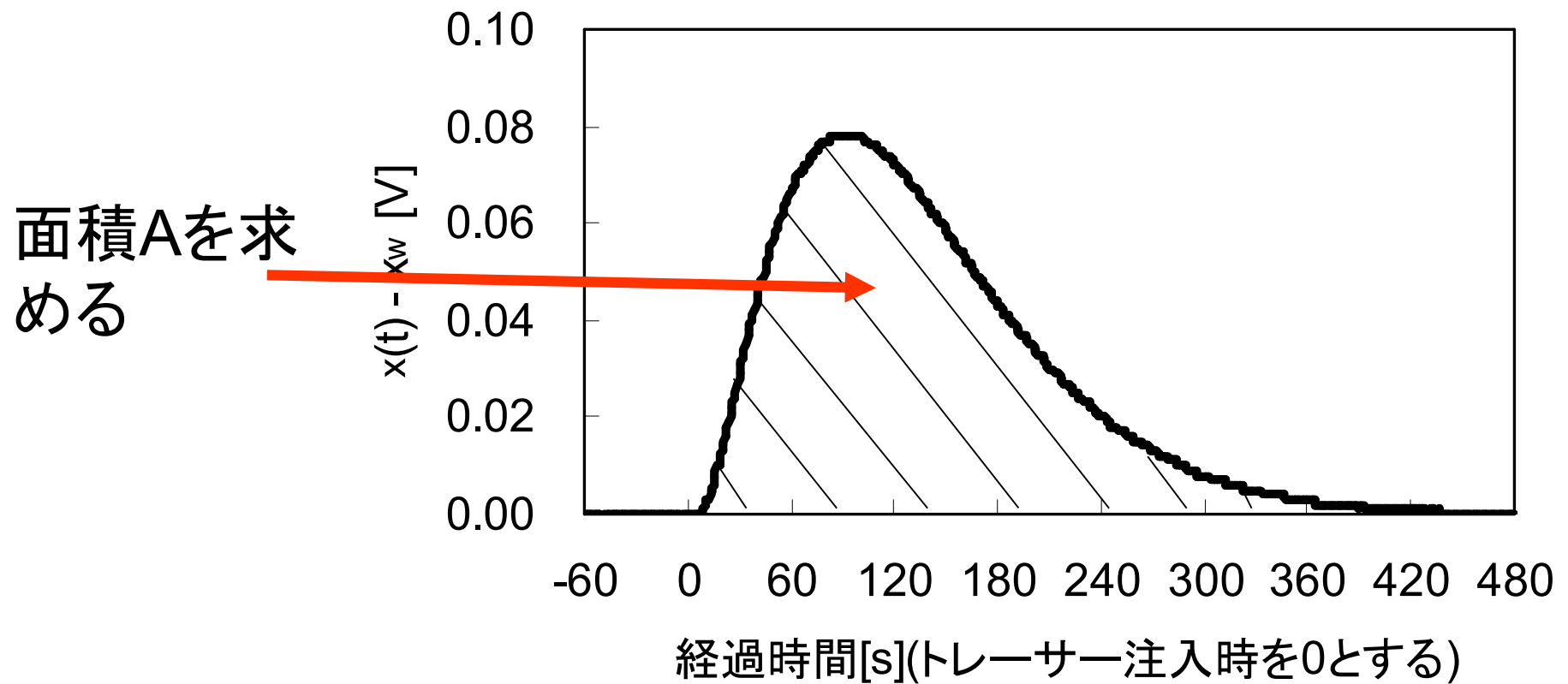


図2 3段かくはん槽第3段の $x(t) - x_w$ の経時変化

エクセルによるデータの処理

滞留時間分布の実測値 $y(t)=(x(t)-x_w)/A$ を求める。

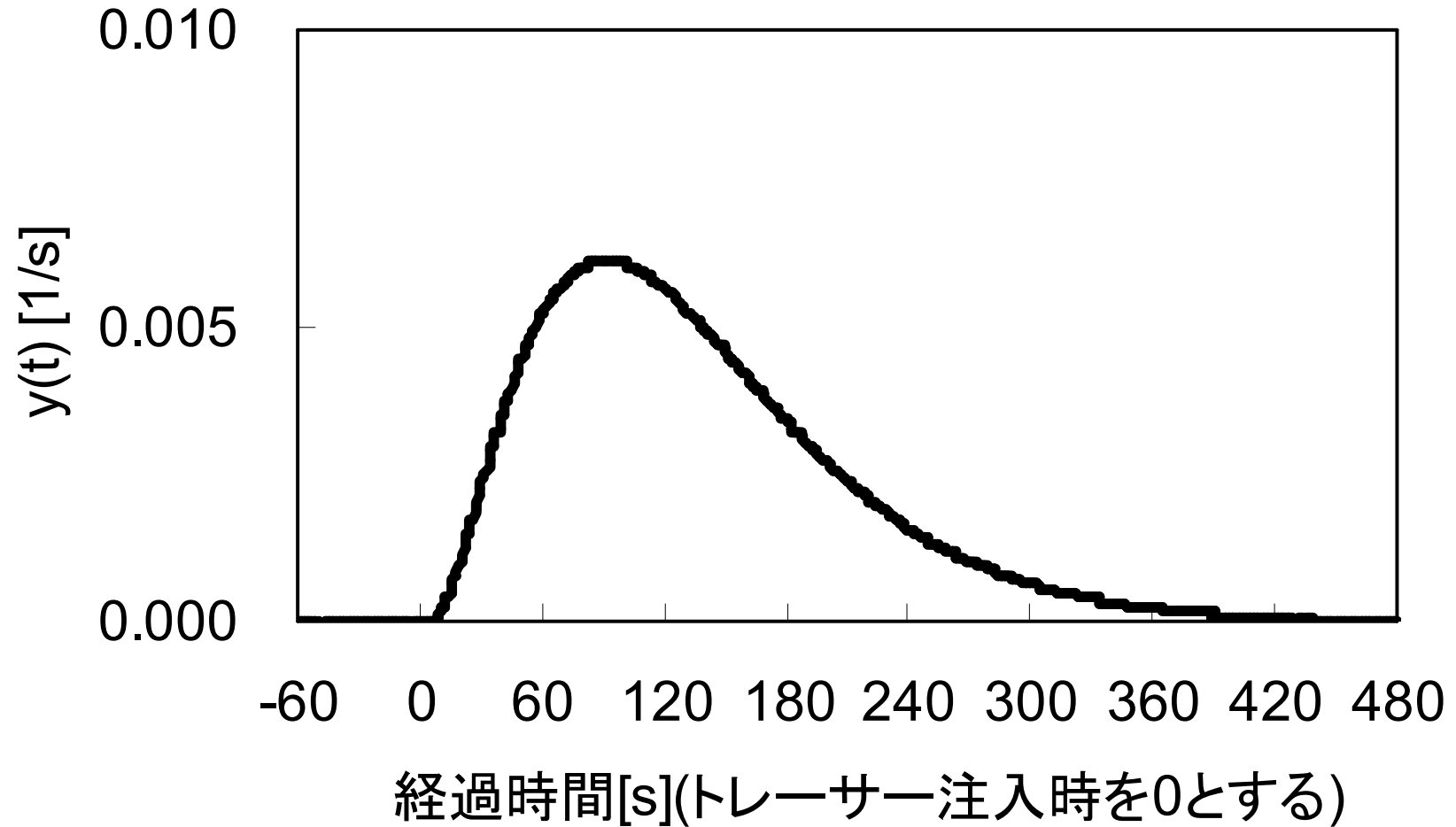
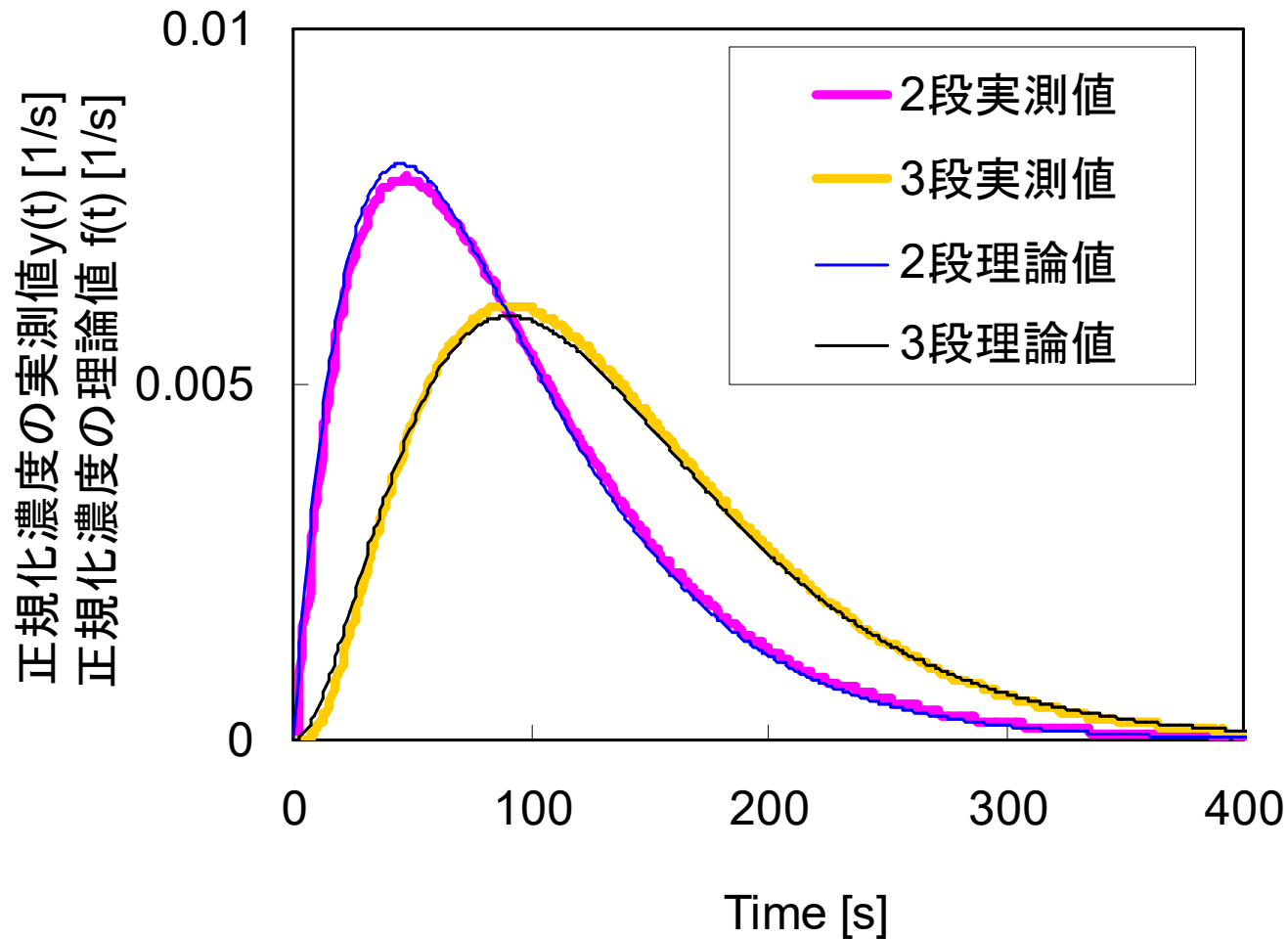


図3 3段かくはん槽第3段の滞留時間分布

実験結果の例(3段かくはん槽)

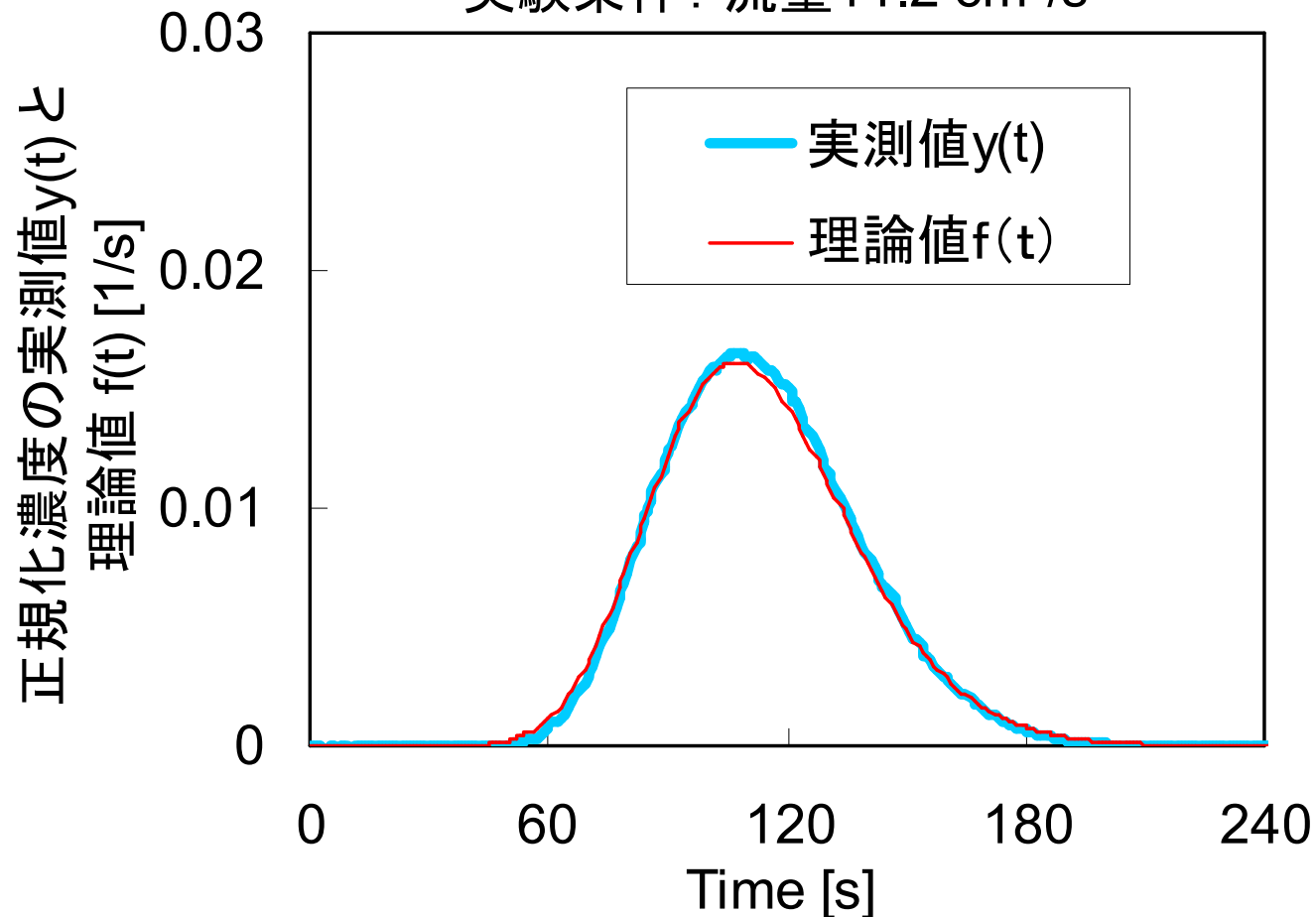
理論と実測の結果をグラフにして比較する。(レポートでは、線の色でなく、線の太さを変える、実測はキー(○,□等)、理論は線で描くなどして区別できるようにする。



実験結果の例(20段かくはん槽)

理論と実測の結果をグラフにして比較する。(レポートでは、線の色でなく、線の太さを変える、実測はキー(O,□等)、理論は線で描くなどして区別できるようにする。

実験条件：流量 $11.2 \text{ cm}^3/\text{s}$



レポートの様式について

授業用資料のあるWebサイトに

5.装置内混合特性と制御のレポート形式例(青い字の部分を自分の結果・考察などに書き直してから黒い字に変えて提出すること)(2024年度版)

と書いてあるところからWordファイルをダウンロードして、青い字の部分を自分が行った実験に即して書き直し、図などを貼りこんで作成する。表の形式なども、自分で行った実験に即して形・記入項目を変えてもよい。