

5.装置内混合特性と制御(2023年)

本実験の達成目標

- 多段完全混合槽の滞留時間分布を理論的に計算し、実測値と比較できること。
- フィードバック制御では対象によって制御の容易さが違うことを説明できること。
- 途中に設けられたチェックポイントを行うことで、データの整理や理論計算の妥当性を自分で評価できること。

<http://tshimizu.eng.niigata-u.ac.jp/jyugyou.htm>にある予習資料を読み、実験ノートを作成すること。

本実験の構成

本実験は2日間で行い、第1日目に「装置内混合特性」、第2日目に「制御」を行う。

本実験における実験班リーダーの役割

実験前に班員に予習をさせ、予習ノートを書かせる(注意：予習が不十分な者が1名でもいたら、予習ができるまで実験をさせない)。実験における役割分担を決める。終了時の後片付けチェックリストがあるので、各項目を確認してチェック印(レ)をつけ、日付を記入し、最後に署名する。

実験において発生する廃棄物とその処理

本実験で使用する試薬類は、 Na_2SO_4 と食用色素である。 Na_2SO_4 は入浴剤の成分であり、毒性・環境影響は極めて低い。廃水はそのまま下水に廃棄する。

レポート作成上の注意

レポートの「実験装置と実験方法」の章は、予習内容を実験ノートに書き、予習部分をスキャンしてPDF化して提出することで代替してもよい(手書き予習内容のPDFの提出は必須である)。実験結果の整理、考察については、Wordファイルでの提出も認める。図・表は文章との対応がわかりやすいようにWordファイルの中に貼り付けることが望ましい。なお、図・表は、Excelファイルでの提出も認めるが、そのときはシート1枚の中に図番号・表番号の順番にまとめておくこと。

第1日目 装置内混合特性

1.目的

流通型反応装置の滞留時間分布は、反応率等に影響する重要な特性である。流通型流れを理想化したものには、完全混合槽と押し出し流れがある。完全混合槽では、流入した物質が瞬間的に混合され、装置内のどの場所でも濃度が均一である。押し出し流れは装置内の流れ方向に流体の混合拡散がない。両者の中間に多段完全混合槽流れがある。本実験は、装置内の滞留時間分布特性を理解することが目的である。実験では、直列多段かくはん槽を3種類用い、それぞれトレーサーをインパルス入力して滞留時間分布を測定し、多段完全混合槽の滞留時間分布の理論値と比較する。

2. 多段完全混合槽の動特性の理論

2.1 完全混合槽(1段)へトレーサーを供給したときの濃度変化を与える微分方程式

内容積 V [m^3]の完全混合槽に、一定の体積流量 F [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] で水が連続的に流入・流出することを考える。流入水中のトレーサー濃度が時間 t [s]の関数 $C_{\text{IN}}(t)$ [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$]で

与えられるとき，完全混合槽内のトレーサー濃度 $C(t)$ [$\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$] の時間変化を表す微分方程式は次式となる。

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{\{C_{IN}(t) - C(t)\}F}{V} = \frac{C_{IN}(t) - C(t)}{\tau} \quad (1.1)$$

ここで平均滞留時間 $\tau = V/F$ は時間[s]の次元を持ち，時定数とも呼ばれる。

2.2 完全混合槽(1段)へトレーサーをインパルス入力した場合の出力経時変化

入力 $C_{IN}(t)$ が $t=0$ でインパルス変化する場合を考える。すなわち，時刻 $t=0$ でトレーサーが槽に瞬時に投入されて初期濃度 C_0 になり， $t>0$ ではトレーサーの流入が無くなるとする($C_{IN}(t)=0$)。この時，式1.1を初期濃度 C_0 の条件で解いて次式を得る。

$$\frac{dC(t)}{dt} = -\frac{C(t)}{\tau} \quad (1.2)$$

$$C(t) = C_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1.3)$$

両辺の対数をとると式1.4を得る。

$$\ln C(t) = \ln C_0 - \frac{t}{\tau} \quad (1.4)$$

片対数グラフ用紙の等間隔目盛り軸に時間 t を取り，対数目盛り軸に $C(t)$ をとると，直線関係が得られる(図1.1)。

ある時間 t_1 において濃度 $C(t_1)$ であるとき，そこから時間 τ が経過した後の時間における濃度 $C(t_1+\tau)$ は $C(t_1)/e$ になる。逆に，ある濃度 $C(t_1)$ になる時間 t_1 を決めて，そこから濃度が $1/e$ になった時間 t_2 ，すなわち $C(t_2)=C(t_1)/e$ になる時間を求めると， $\tau = t_2 - t_1$ となる。

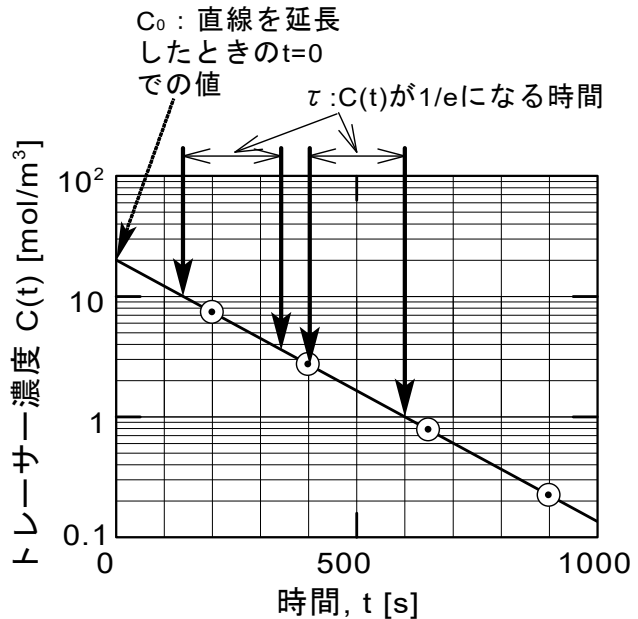


図1.1 完全混合槽へのトレーサー注入後のトレーサー濃度の経時変化の模式図

2.3 多段完全混合槽の第1段にトレーサーをインパルス入力した場合の出力経時変化

同じ容積を持った完全混合槽を n 段直列に接続し， $t=0$ ですべての段の中のトレーサー濃度が0の初期条件で，第1段にトレーサーを $t=0$ でインパルス入力することを考える。 n 段目完全混合槽出口でのトレーサー濃度を $C_n(t)$ とする。 $t=0\sim\infty$ までの $C_n(t)$ の積分値で $C_n(t)$ を正規化したものを $f(t)$ とする。

$$f(t) = \frac{C_n(t)}{\int_0^{\infty} C_n(t) dt} \quad (1.5)$$

$f(t)$ は完全混合槽一段あたりの平均滞留時間 τ を使って次の式で与えられる。

$$f(t) = \frac{t^{n-1}}{\tau^n (n-1)!} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1.6)$$

図1.2は平均滞留時間の総和 $T=n\tau$ を一定にして段数を変えたときの滞留時間分布曲線を示す。ここで θ は時間 t を平均滞留時間の総和 $n\tau$ で正規化したもの($\theta = t/(n\tau) = t/T$)である。図1.2に示すように，段数を増すと $E(\theta)$ のピーク幅が狭くなる。

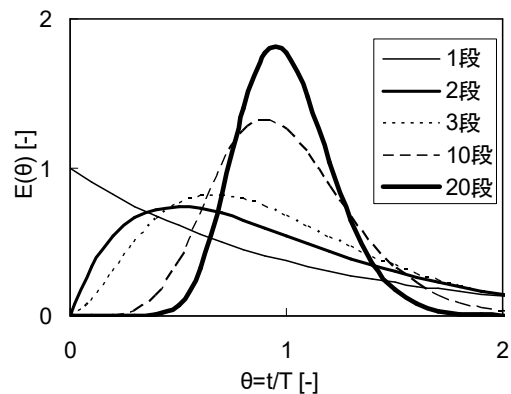


図1.2 多段完全混合槽の滞留時間分布曲線の理論値

3.実験

3.1 実験装置

実験装置(図1.3)は、(a)流量制御部、(b)1段大型かくはん槽、(c)3段かくはん槽、(d)20段かくはん槽の、4つの部分に分かれている。流量制御部では、ニードルバルブで水道水の流量を制御し、ロタメーター(テーパー付きガラス管の中にフロートが入っているもの)で流量をモニターできるようなっている。ここで一定の流量に制御された水は、三方バルブを通じて1段かくはん槽、3段かくはん槽または20段かくはん槽、流量測定用出口のいずれかへ流入する。三方バルブを切り替え、水を流す装置を選択する。それぞれの装置からの排水は、それぞれの排水管から下水へ排出される。

1段大型かくはん槽は、内容積 $V=1.23 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ である。3段かくはん槽は、内容積 V が等しく $0.40 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ であるかくはん槽を3個直列に接続したものである。1段大型かくはん槽と3段かくはん槽はそれぞれ、マグネチックスターラーで内部の水をかくはんする。20段かくはん槽は、内径 $4.4 \times 10^{-2} \text{ m}$ 、長さ 0.92 m の円筒の中を、厚さ 2 mm のバッフル板でほぼ等体積に20分割したものであり、全内容積は $1.27 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ である。内部には、かくはんパドル付き回転軸があり、手で回転軸を回して内部の水をかくはんする。いずれのかくはん槽にも、注射器でトレーサーを注入するためのゴム栓が付いている。

トレーサーには硫酸ナトリウム水溶液を用い、電気伝導率が硫酸ナトリウム濃度に比例すると仮定して、 4.0 V の直流電圧を印加し^{注1}、流れる電流を測定することで濃度に比例した出力を得る。1段大型かくはん槽と、3段かくはん槽の第2段と第3段、ならびに20段かくはん槽の第20段には、そのための電極が設置されている。

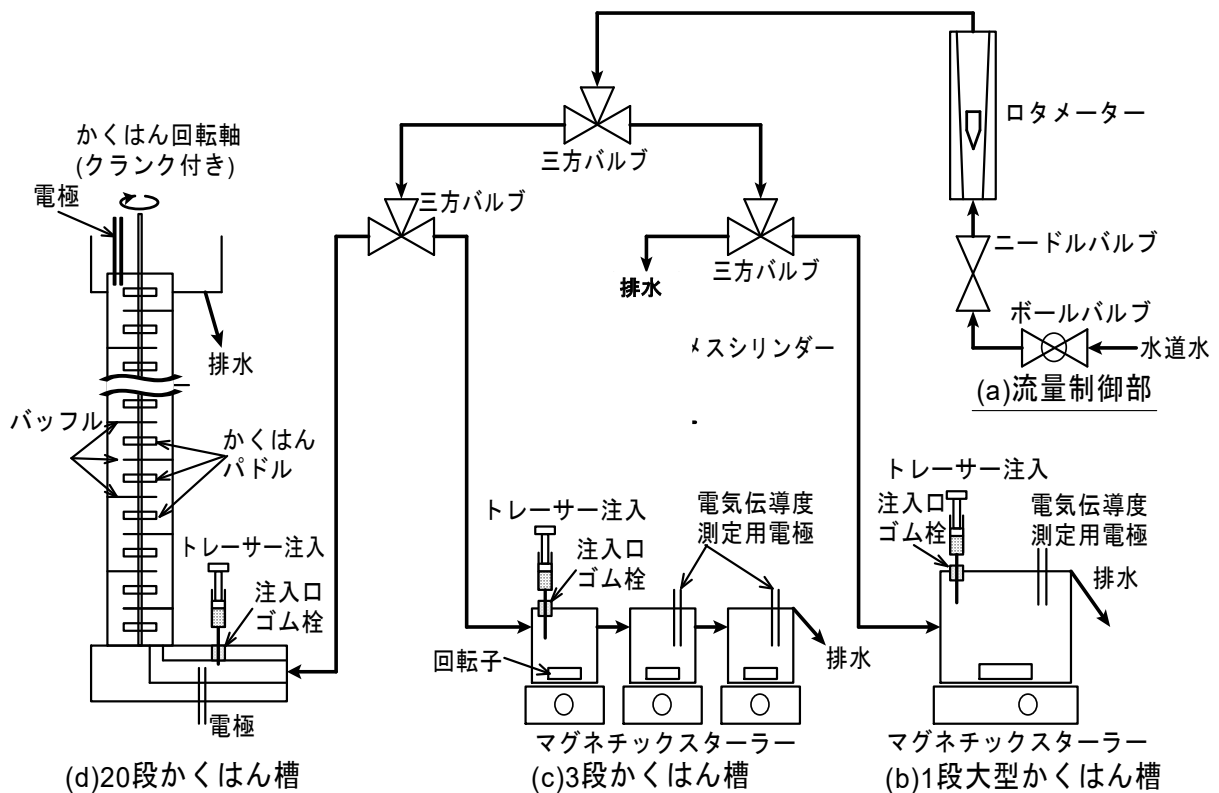


図1.3 実験装置概略図(改良のため三方バルブとかくはん槽の接続の順番を変える場合がある。)

注1 通常は交流電圧を印加して分極を防ぐが、本実験のように十分にかくはんされていて、かつ、電気分解による塩素など有害ガスの発生が起こらない系でのみ、この方法が使える。

3.2 実験方法

3.2.1 水の流量の測定

三方バルブが1段大型かくはん槽の方に切り替わっていること、排水配管の出口がすべて排水のための水受けの上に来ていることを確認する。水道の元栓(図1.3のボールバルブの上流にある)を開けてから、ボールバルブをゆっくりと開ける。ニードルバルブを調整し、ロタメーターのフロートの上面が目盛0.4 L/min程度になるようにする。ロタメーターの指示が安定したら、水をメスシリンダーに採取し、採取された水の体積と採取した時間を測定し、(水の体積)/(採取時間)から水の体積流量 F [m³/s]を求める。採取する時間は、流量の測定精度が出るように、メスシリンダーの最大測定可能量の7割以上となるように試行錯誤的に定める。水の採取を3回繰り返して水の体積流量の平均値を求める。結果を次の表形式でまとめる。

表〇〇 水の体積流量の測定結果

	採取体積 [cm ³]	採取に要した時間[s]	体積流量[m ³ /s]
1回目			
2回目			
3回目			

3.2.2 1段大型かくはん槽のインパルス応答

マグネチックスターラーをONにして、水をかくはんする。まず、水道水だけを流通したときの電気伝導度計出力を求める。水道水には不純物が含まれているので、電圧を印加すると電流がわずかではあるが流れる。水道水の供給を開始してしばらくは水道配管・かくはん槽内に蓄積した不純物が流れ出すので、電気伝導度計の出力が安定するのを待つ。電気伝導度計出力が安定したときの出力を記録し、これを x_w とする。次に、注射器に硫酸ナトリウム水溶液を約2 cc取り、注入口ゴム栓に注射針を挿して、トレーサーを短時間のうちに内部に注入する。内部に注入した時点を $t=0$ とする。電気伝導度計の出力の経時変化を測定する。出力がトレーサー注入前とほぼ同じになったら(約15分後)、計測を終了する。水道水だけの場合の電気伝導度計出力 x_w とトレーサーを入れて t [s]経過したときの電気伝導度計出力 $x(t)$ の差 $x(t) - x_w$ が、トレーサーによる電気伝導度の変化を示し、トレーサー濃度に比例するものとする。

3.2.3 3段かくはん槽のインパルス応答

三方バルブを切り替え、3段かくはん槽に水を供給する。マグネチックスターラーで3段かくはん槽内部の水をかくはんする。電気伝導度計の出力が安定したら、水道水だけの場合の電気伝導度出力 x_w を記録する。注射器にトレーサーを約2 cc取り、1段目の注入口ゴム栓に注射針を挿して、トレーサーを内部に注入する。内部に注入した時点を $t=0$ とし、第2段ならびに第3段の電気伝導度計の出力電圧 $x(t)$ を測定する。出力がトレーサー注入前とほぼ同じになったら(約12分後)、計測を終了する。

3.2.4 20段かくはん槽のインパルス応答

三方バルブを20段かくはん槽側へ切り替え、電気伝導度計の出力が安定したら水道水だけの場合の電気伝導度出力 x_w を記録する。トレーサー注入直前からかくはんパドル回転軸を手で1秒間に1~2回転の速度で回して溶液をかくはんする。注射器にトレーサーを約2 cc取り、注入口ゴム栓からトレーサーを注入する。トレーサーを注入した時点を $t=0$ とし、電気伝導度計の出力の経時変化を測定する。出力がトレーサー注入前とほぼ同じになったら(約8分後)、計測とかくはんを終了する。

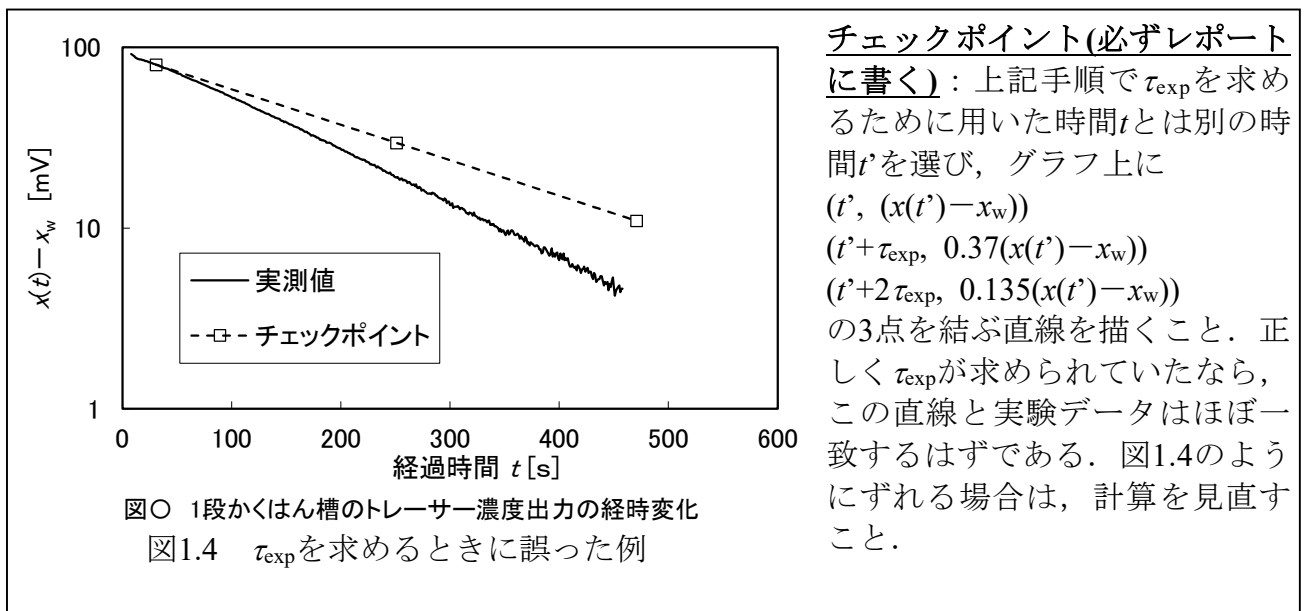
4.データの整理

トレーサーを注入する前の水道水だけを流した状態での電圧出力を x_w ，注入後の出力を $x(t)$ とする． $x(t)$ と x_w の差 $(x(t)-x_w)$ は，トレーサーによる水の電気伝導度の変化であり，これがトレーサー濃度に比例すると仮定してデータ整理を行う．

4.1 1段大型かくはん槽のデータの整理

理論2.2で示した手順に従い平均滞留時間の実測値を求める．片対数グラフ用紙の対数軸に $(x(t)-x_w)$ を，等間隔軸に時間 t をとって図1.1のようにグラフを描く．用いるデータの範囲は，電圧計の読み取り桁数などの誤差要因を考慮して決める．データがほぼ直線になるかどうかを確かめ， $(x(t)-x_w)$ がある値からその値の $1/e(=0.37)$ 倍になるのにかかる時間を求め，平均滞留時間の実測値 τ_{exp} とする．実測値 τ_{exp} と，流量と体積から求めた平均滞留時間の理論値 $\tau=V/F$ との相対差 $Error$ を次式で求める．

$$Error = \frac{\tau_{exp} - \tau}{\tau} \quad (1.7)$$



4.2 3段かくはん槽の第2段，第3段ならびに20段かくはん槽のデータの整理

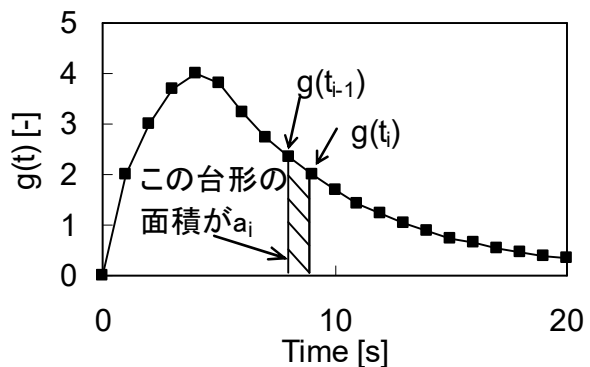
実験で得られた $g(t) = x(t) - x_w$ を次の手順で積分し，ピーク面積を求める．この実験では一定の時間間隔 $\Delta t_{int}=1$ sで測定した値 $g(t_1), g(t_2), g(t_3)...$ が得られている．このとき， $t=0 \sim t_i$ までの $g(t)$ の積分値 A_i は図1.4の台形積分を用いて次式で与えられる．

$$A_i = \left\{ \frac{1}{2}g(t_0) + g(t_1) + g(t_2) + \dots + g(t_{i-1}) + \frac{1}{2}g(t_i) \right\} \Delta t_{int} \quad (1.8)$$

トレーサーを注入してからトレーサーが完全に排出されて $x(t) - x_w$ がほぼゼロに戻るまで，積分を続け積分値 $A[V \cdot s]$ を得る． $x(t) - x_w$ を積分値 A で除したものが滞留時間分布関数の実測値である $y(t) [1/s]$ になる．

$$y(t) = \frac{x(t) - x_w}{A} \quad (1.9)$$

3段かくはん槽の第2段，第3段ならびに20段かくはん槽のデータを整理し，それぞれ別の方眼グラフ用紙に t と $y(t)$ の関係を描く．



5.考察 (考察課題5.1～5.2は必須である. 5.3は必須ではない.)

5.1 多段かくはん槽の滞留時間分布の理論との比較(解析解による方法) (必須課題)

2段, 3段, 20段のそれぞれの滞留時間分布について, 流量と体積から求めた1段あたりの平均滞留時間の理論値 τ を式1.6に代入して $f(t)$ を計算する. それぞれの計算結果は, 方眼グラフ用紙の横軸に t を縦軸に $f(t)$ をとって滞留時間分布曲線として描く.

このグラフは, それぞれの段の実測値と同じ図中に描くことで, 目で見て理論と実測を比較できるようにする. グラフでは, 実測と理論の区別をつけて描く. 計算する t の間隔は20秒でよい. $(t, f(t))$ を滑らかな曲線で結び, 滞留時間分布曲線の理論線とする. なお, $19V=1.22 \times 10^{17}$ である. レポートには, 代表的な t として, $y(t)$ が最大になったときの t における $f(t)$ の計算結果を, 2段, 3段, 20段のそれぞれの場合で求め, 下のような表にまとめる.

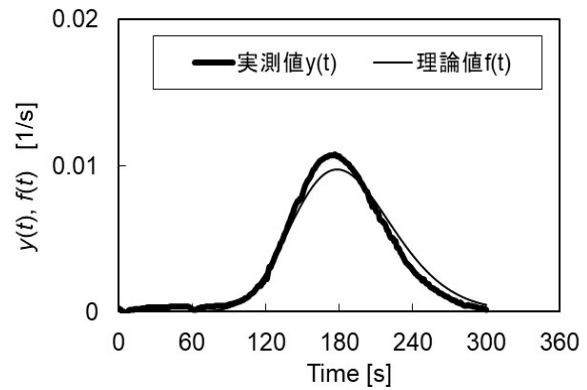


図1.6 理論と実測の比較の例(20段)

表〇〇 $f(t)$ の計算例

	1段あたり平均滞留時間[s]	$y(t)$ が最大になったときの t [s]	$y(t)$ の最大値 [1/s]	$f(t)$ の計算値[1/s]
2段				
3段				
20段				

チェックポイント(必ずレポートに書く)

滞留時間分布関数 $y(t)$, $f(t)$ は, 積分すると1になる. 図1.7に示すようなピークの面積の概略値は, ピーク高さ(値がピーク値の1/2になる時間の幅)の積で与えられることが知られている. グラフを描いて, ピーク高さと半値幅を図から読み取り, (ピーク高さ)×(半値幅)が1に近くなることを確認せよ(1との差は大きくても0.15を超えることは無いはずである). 結果は下のような表にまとめること.

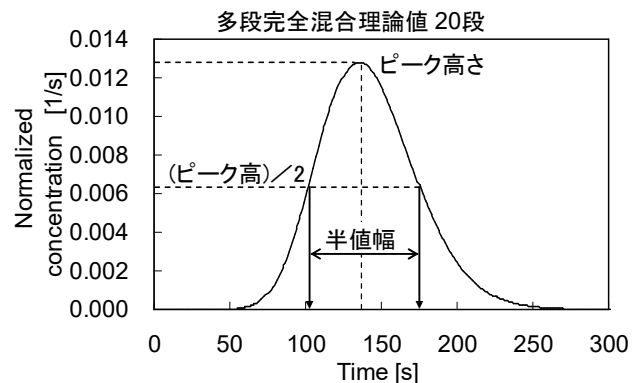


図1.7 ピーク面積の近似値の求め方の例

表〇〇 ピーク面積の概略計算

	$y(t)$ の最大値[1/s]	$y(t)$ の半値幅 t [s]	$y(t)$ のピーク面積[-]	$f(t)$ の最大値[1/s]	$f(t)$ の半値幅 t [s]	$f(t)$ のピーク面積[-]
2段						
3段						
20段						

5.2 設計課題 (必須課題)

反応装置として, 1段完全混合槽反応器を用いる場合と, 多段完全混合槽反応器を用いる場合とで, それぞれの反応成績を予想したい. 本実験の第1日目では, 体積の

総和がほぼ等しい3種類の多段かくはん槽に同一流量の水を流してそれぞれの滞留時間分布を求めた。もし、体積の総和が等しく、段数だけが異なる多段かくはん槽を用いて同一供給流量で反応を行うとしたら、1段大型かくはん槽、3段かくはん槽、20段かくはん槽のうちのどれの反応率が一番高くなるであろうか、それぞれの装置での反応率を計算で求めよ。なお、計算を簡単にするため、次の仮定を用いること。

- 体積の総和は1段、3段、20段のいずれも $1.20 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ で同じである。
- 多段の場合は各段が同じ体積になるように分割する。
- 流量は実際に測定した値を用いる。
- 反応は一次反応で、反応速度定数は $k=2.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ とする。
- 完全混合槽で一次反応を行う場合での1段あたり未反応率は、1段あたり滞留時間を τ とすると、 $(1+k\tau)^{-1}$ である。この完全混合槽を n 段直列につなげた場合は、総括の未反応率は $(1+k\tau)^{-n}$ となる。

結果は下の表の形式でまとめる。

表〇〇 多段完全混合槽列で一次反応をした場合の反応率の計算

	流量 [m ³ /s]	1段あたり滞 留時間 τ [s]	$k\tau$ [-]	総括の未反 応率[-]	総括の反応 率[-]
1段					
3段					
20段					

5.3 【上級コース】(この部分は義務ではないが、能力のある者は挑戦すると良い)

体積が等しい多段完全混合槽列の $f(t)$ について、式1.10の t_p (平均滞留時間の総和 T と等しい)と式1.11の分散 σ_p^2 、ならびに段数 n の間に式1.12の関係がある。

$$t_p = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (1.10)$$

$$\sigma_p^2 = \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt - t_p^2 \quad (1.11)$$

$$n = \frac{t_p^2}{\sigma_p^2} \quad (1.12)$$

実験結果 $y(t)$ も、それぞれ下記のとおり計算し、実際の段数と比較する。

$$t_{exp} = \int_0^{\infty} t y(t) dt \quad (1.13)$$

$$\sigma_{exp}^2 = \int_0^{\infty} t^2 y(t) dt - t_{exp}^2 \quad (1.14)$$

$$n_{exp} = \frac{t_{exp}^2}{\sigma_{exp}^2} \quad (1.15)$$

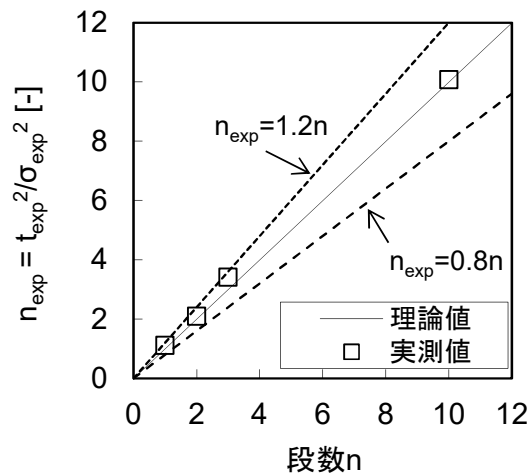


図 1.8 多段かくはん槽の段数 n と $n_{exp} = t_{exp}^2 / \sigma_{exp}^2$ の関係(記入例)

式1.13, 1.14に示す積分は、数値的に $ty(t)$, $t^2y(t)$ を計算し、それぞれ台形近似で面積を足す方法で計算ができる。なお、比較するときには、例えば図1.8に示すように、横軸に段数 n 、縦軸に n_{exp} をとってプロットし、理論値($n = n_{exp}$)を表す直線や偏差のある場合の直線($n_{exp} = an$)を描くと、偏差がどの程度であるか視覚的にわかりやすい。

第2日目 制御

1.目的

反応装置，プロセスの制御にとって，制御器を用いた自動制御は欠かす事のできないものになっている．プラント制御にはPID，オン-オフ制御など各種のフィードバック式制御法が適用されている．フィードバック式制御では，プラントの状況を計測し，現在あるいは過去の状況を用いてプラントの制御操作をする．しかし，計測・制御は必ず計測器やプロセス自体の応答特性(遅れ，時定数)の影響を受ける．この実験では，プロセスの応答特性によって制御性(目標とする値からのふれ幅)がどう変化するかを調べることを目的とする．ここでは，制御方式として最も簡単なオン-オフ制御を対象とする．制御対象の例として，多段かくはん槽に水を流通させた中に電解質溶液を供給し，かくはん槽内の電気伝導度を所定の値に保つように制御する実験を行う．また，かくはん槽にサインカーブで近似できる周期的入力が入った場合の出力変化についても，理論と実測の比較を行う．

2.理論

2.1オン-オフ制御

オン-オフ制御は，制御の中で最も簡単な制御法であり，制御される変数(例えば温度)が設定値(目標とする値)より低ければ操作機器(例えばヒーター)をオン(あるいはオフ)にし，高ければオフ(オン)にする制御方法である．通常では図2.1のように目標値付近に不感帯を設け，制御変数が増加するときには目標値よりわずかに高くなったところでオフ(オン)にし，減少するときには目標値よりわずかに低くなったところでオン(オフ)にするといったヒステリシス^{注2}を持たせる．不感帯が狭いと目標値付近でオンとオフが頻繁に切り替わり制御系の機械・電気製品類に負担をかける^{注3}．一方，不感帯が広すぎると，制御変数が大きく変動する．不感帯の大きさは，制御変数に要求される変動幅によって決められる．

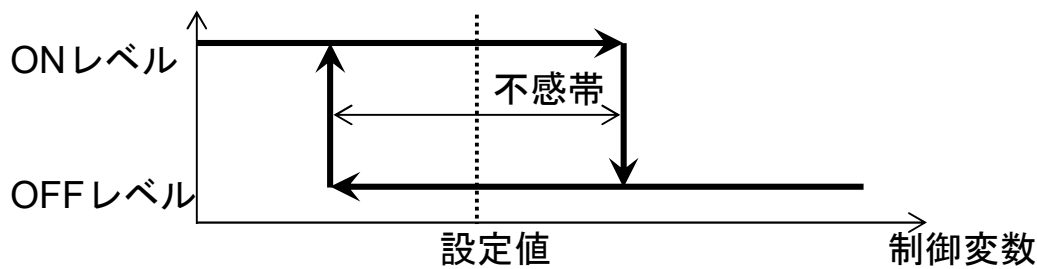


図2.1 オン-オフ制御の動作(加熱操作など，制御変数>設定値でオフにする場合)

2.2 制御対象の応答特性と制御のしやすさ，ならびに多段かくはん槽の応答特性

フィードバック制御は，制御変数を計測して，それと設定値の差を用いて制御操作を行う．制御対象の応答特性によって制御のしやすさが異なる．応答特性を表す指標として，時定数と無駄時間がある．時定数については，第1日目の実験のテキスト

^{注2} 図2.1の矢印に示すように，行きと帰りでは異なる経路を経由すること．

^{注3} モーター，ヒーター，電球等の電気製品は，スイッチをオンにした瞬間に定常時に流れる電流の数倍の電流が流れる(「突入電流」と呼ぶ)ものが多い．突入電流が頻繁に流れると電線などに予想以上に負荷が多くかかる．また，リレースイッチをオンからオフにすると放電が起こり，接点付近で発熱したり，電磁的ノイズを発生させ周囲の機器に影響を与える．

トで既に説明した．無駄時間は，操作をしてからその結果が見え始めるまでにかかる時間である．例えば，プラグフロー(滞留時間 L)と完全混合槽(平均滞留時間 τ)を直列につないだ流れ(図2.2)にトレーサーをインパルスで注入することを考える．プラグフロー入口に入ったトレーサーは時間 L 経過した後に完全混合槽に到達し，到達時点で完全混合槽で瞬時に均一混合し，徐々に流出する．したがって，完全混合槽出口でのトレーサー濃度は図2.2に示すように，完全混合槽のインパルス応答を時間 L だけ遅らせたものになる．制御では，この遅れ L を無駄時間と呼ぶ．フィードバック制御では，無駄時間 L が大きくなるほど制御が難しくなり，場合によっては制御系が不安定になることもあることが知られている．一方，無駄時間がない1段完全混合槽の場合，時定数 τ が大きくなって不安定にはなりにくいことが知られている．

本実験では，制御対象は，1日目の実験で用いた1段大型かくはん槽，3段かくはん槽と20段かくはん槽を用いる．ここにトレーサーを供給したときのかくはん槽内濃度の応答特性については，1日目の実験で説した．個々のかくはん槽は時間遅れがほとんどゼロである．しかし，かくはん槽の段数を増加させると，見かけ上は無駄時間が現れるようになる(すなわちプラグフローに近くなる)．段数が増えることが制御特性に及ぼす影響を実験で明らかにすることを，この実験の目的とする．

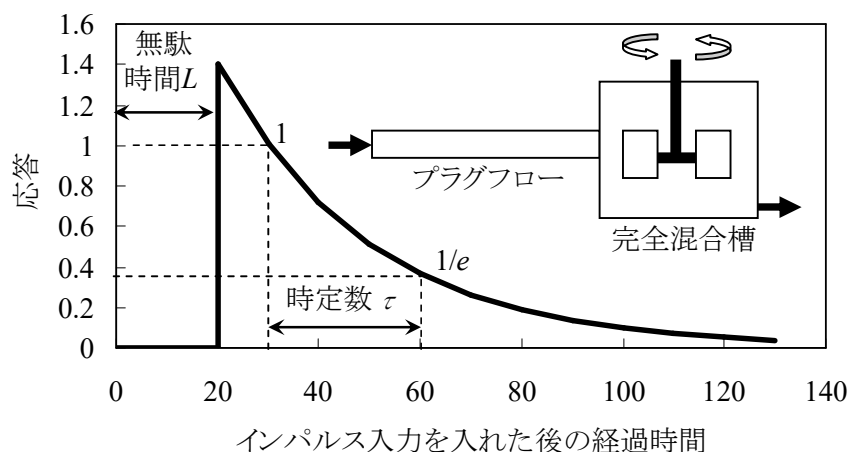


図2.2 プラグフロー(滞留時間 L)と完全混合槽(平均滞留時間 τ)を直列につないだ流れへのトレーサーインパルス応答の例(縦軸は任意)． $L=20$ ， $\tau=30$ とした場合．

3.実験

3.1 制御対象

図2.3に制御実験装置図(流量制御部は省略)を示す．流量制御部から一定の流量に制御された水が，1段大型かくはん槽，3段かくはん槽，20段かくはん槽のいずれかに流入・流出する．1段大型かくはん槽，3段かくはん槽の第3段目，20段かくはん槽第20段目に設置された電気伝導度測定出力は，それぞれのオン-オフ制御器(指示器付)に送られる．制御器では，理論で説明したように設定値より電気伝導度出力が高ければオフ，電気伝導度出力が低ければオンになるようにリレーを動かす．このリレーの動きは，交流100 Vの電圧の出力としてコネクタに現れる．電解質溶液(トレーサー)を連続的に供給できるポンプの電源をこのリレーからの出力とすることで，電気伝導度出力が設定値より低ければポンプが動作して電解質溶液が供給されてかくはん槽内電気伝導度が高くなって電気伝導度出力が上昇し，電気伝導度出力が設定値より高くなればポンプがオフになって装置内電解質濃度が減って電気伝導度出力が減少するようになる．

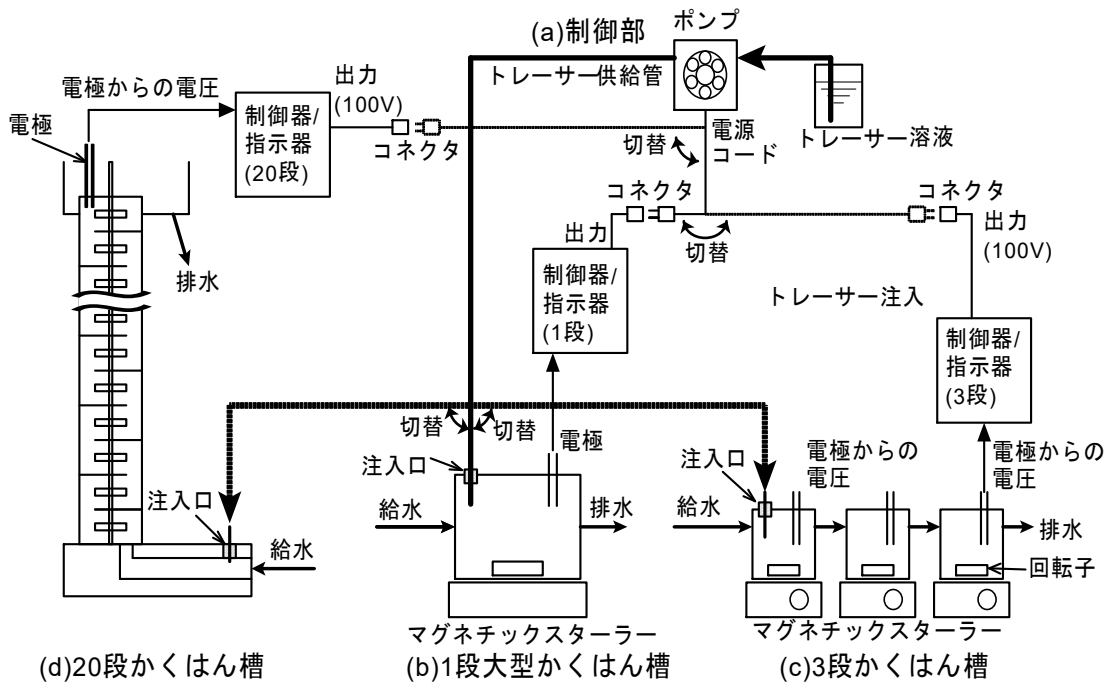


図2.3 制御実験装置図(流量制御部は省略)

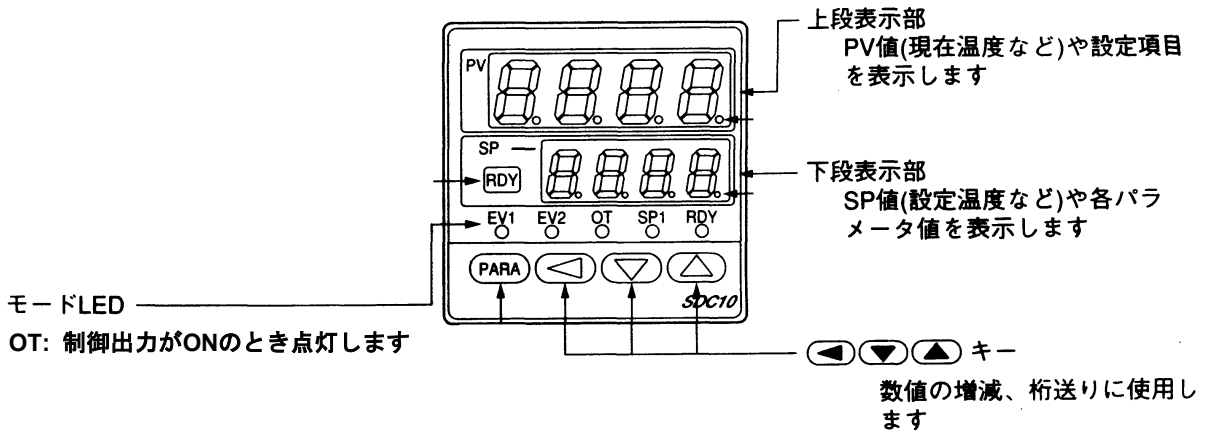


図2.4 オン-オフ制御器(SDC10)制御パネル

3.2 オン-オフ制御器

かくはん槽の電気伝導度測定用電極から出る電圧を制御変数として制御を行う。オン-オフ制御器には(株)山武(現アズビル株式会社)製SDC10を用いる。制御器正面パネルを図2.4に示す。数字の表示は、上段の緑の数字が現在の制御変数の値、下段の黄色の数字が設定値を、それぞれ表す。現在の設定では、電圧がmV単位で指示されるようになっている。設定値の増加(上向き三角▲)と減少(下向き三角▼)のボタン、設定する桁を選択する桁左移動(左向き◀)のボタンがあり、それを押すことで設定値をmV単位で定める。リレーはこの制御器に内蔵されており、制御器についているコンセントに負荷(ポンプ等)を接続すると電圧100Vで負荷容量100Wまでのオンとオフを制御できる。現在の設定では、不感帯は設定値±1mVに設定されている。

3.3 流量調整

流量が0.4 L/min程度になるようにニードルバルブを調整する。水出口で水をメスシリンダーに採取し、採取された水の体積と採取時間を測定し、(水の体積)/(採取時間)から水の体積流量[m³/s]を求める。結果を次の表形式でまとめる。

表〇〇 水の体積流量の測定結果

	採取体積 [cm ³]	採取に要した時間[s]	体積流量[m ³ /s]
1回目			
2回目			
3回目			

3.4 1段大型かくはん槽の制御

3.4.1 制御スケールの設定

0%出力(トレーサー供給無し)と100%連続出力(トレーサー供給をオンにしたまま)の計測器出力を測定する。まず、水を1段大型かくはん槽に流通させ、スターラーでかくはんし、電気伝導度センサー出力が安定したら出力を記録し x_0 とする。次に、トレーサー供給ポンプから出ている配管の先端についている注射針を1段大型かくはん槽のトレーサー注入口にさし込む。ポンプの電源を通常100Vコンセントとし、ポンプのスイッチをオンにしてトレーサーである電解質溶液を1段大型かくはん槽へ最大流量で連続供給し、ほぼ一定の出力が得られたときの出力を100%出力 x_{100} とする。

3.4.2 1段大型かくはん槽出力の制御

1段大型かくはん槽用制御器の設定値 x_{SP} を $(x_0 + x_{100})/2$ とする。ポンプの電源を1段大型かくはん槽用制御器の出力コネクタに接続し、ポンプのスイッチをオンにして電解質溶液を最大流量で供給する。電気伝導度出力に応じて制御器のオンとオフが切り替わるので、電気伝導度出力は図2.5に示すような設定値の上下に変動幅を持ったものとなる。出力が定常的に振動するようになったら、最大値ならびに最小値をそれぞれ3点以上読み取り、最大値の平均 x_{MAX} と最小値の平均 x_{MIN} を求める。出力変動幅の相対値 X_{VAR} を次式で計算する。

$$X_{VAR} = \frac{x_{MAX} - x_{MIN}}{x_{100} - x_0} \quad (2.1)$$

3.5 3段かくはん槽の制御

3.5.1 制御スケールの設定

内部をスターラーでかくはんし、3.4.1と同様に水道水を流通させ、安定したときの出力を x_0 とする。次に、ポンプから出ている配管の注射針を3段かくはん槽の第1段目の注入口にさし込む。トレーサーを最大流量で供給して、安定したときの出力を x_{100} とする。

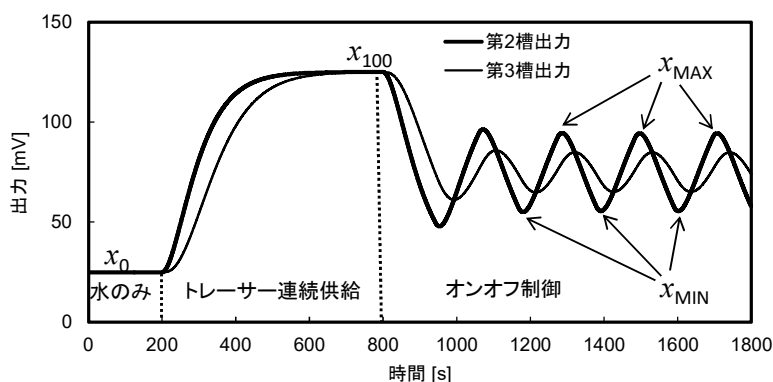


図2.5 制御実験出力の模式図(3段かくはん槽の場合)
(注：第2槽と第3槽で x_0 と x_{100} はそれぞれ異なった値を通常取る。)

3.5.2 3段かくはん槽第3段出力の制御

3段かくはん槽第3段用制御器の設定値 x_{SP} を $(x_0 + x_{100})/2$ とする。ポンプの電源をかくはん槽第3段用制御器の出力コネクタに接続し、電解質溶液を3.5.1と最大流量で供給する。3.4.2と同様に出力変動幅の相対値 X_{VAR} を求める。

3.6 20段かくはん槽の制御(ここではかくはんしなくても良い)

3.6.1 制御スケールの設定

20段かくはん槽に水道水を流通させ、安定したときの出力を記録し x_0 とする。次に、ポンプから出ている配管の先端の注射針を20段かくはん槽入口のトレーサー注入口にさし込む。トレーサーを最大流量で供給して、安定したときの出力を x_{100} とする。

3.6.2 20段かくはん槽の制御

20段かくはん槽用制御器の設定値 x_{SP} を $(x_0 + x_{100})/2$ とする。ポンプの電源を20段かくはん槽用制御器の出力コネクタに接続し、電解質溶液を3.6.1と同じ流量で供給する。出力が定常的に振動するようになったら、最大値ならびに最小値をそれぞれ3点以上読み取り、最大値の平均 x_{MAX} と最小値の平均 x_{MIN} を求め、出力変動幅の相対値 X_{VAR} を式(2.1)で計算する。

3.7 データの整理

1段大型かくはん槽、3段かくはん槽第3段ならびに20段かくはん槽の制御結果を下の表の形式でまとめる。

表〇〇 制御実験結果のまとめ

	1段大型かくはん槽	3段かくはん槽第2段	3段かくはん槽第3段	20段かくはん槽
0%出力 x_0 [mV]				
100%出力 x_{100} [mV]				
設定値 x_{SP} [mV]				
x_{MAX} [mV]				
x_{MIN} [mV]				
X_{VAR} [-]				

4.考察 (考察課題4.1~4.3はいずれも必須である。4.4は必須ではない。)

4.1 同程度の合計容積を持ったかくはん槽列の槽の数と制御特性の関係(必須課題)

無駄時間要素が最も大きい20段かくはん槽と、無駄時間要素がほぼゼロの1段大型かくはん槽、その中間の無駄時間要素を持つ3段かくはん槽第3段で、出力変動幅の相対値の大小関係を実験結果に基づいて答えよ。

4.2 デザイン課題(必須課題)

出口での測定結果に基づいて入口での反応物の供給速度を変えて出口濃度を制御するような反応器を作る場合について考察する。1段かくはん槽~多段かくはん槽~プラグフローの中で、2日目考察課題4.1と1日目の考察課題5.2の結果を踏まえた上で、それぞれの反応器の利点、欠点を考察せよ。

4.3 周期的入力(サインカーブ入力)に対する応答の理論と実測の比較(必須課題)

3段かくはん槽の第3段出力による制御が定常になると、図2.6に示すように、第2段出力変動もほぼサインカーブになるので、その周期 T_V [s]と角周波数 ω [rad/s]を求めよ。角周波数は変動周期から次式で与えられる。

$$\omega = 2\pi/T_V \quad (2.2)$$

第2段出口(=第3段入口)と第3段出口の変動(正規化したもの)の振幅をそれぞれ B_2, B_3 とすると, 第3段での平均滞留時間 τ と B_3/B_2 の関係は, 理論的には次式となる.

$$\frac{B_3}{B_2} = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} \quad (2.3)$$

角周波数 ω の実測値と1段あたり平均滞留時間(3.3で求めた水の体積流量から求めたもの)から式2.3で予測された B_3/B_2 の理論値を求めよ.

振幅 B は, それぞれの槽で定常的に変動している状態での最大値の平均 x_{MAX} と最小値の平均 x_{MIN} を $x_{100} - x_0$ で正規化して1/2倍したものである.

$$B = \frac{x_{MAX} - x_{MIN}}{2(x_{100} - x_0)} \quad (2.4)$$

B_3/B_2 の実測値を求めよ. なお, 振幅 B は X_{VAR} の1/2になる(式(2.1)と式(2.4)をみること). 以上の手順で求めた実測値を理論値と比較せよ.

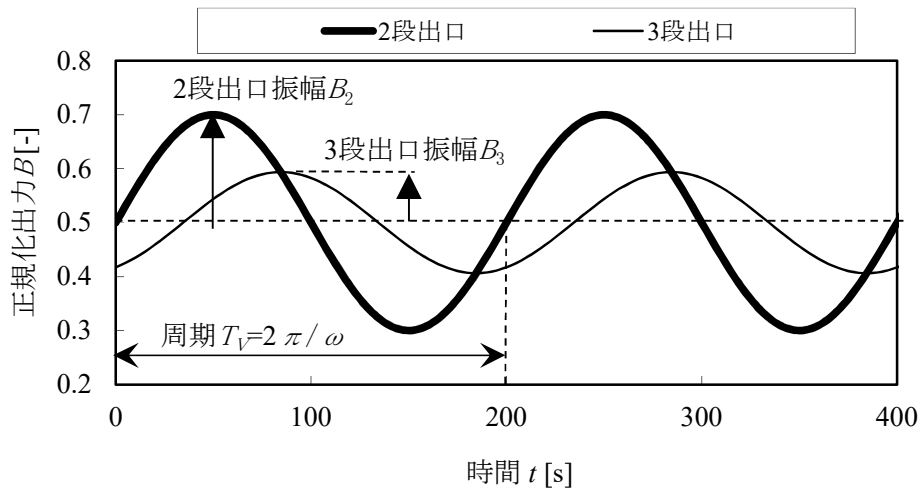




図2.6 3段かくはん槽の第2段, 第3段の正規化出力変動の例

表〇〇 周期的入力に対する応答の理論と実測の比較

変動周期 [s]	T_V	角周波数 [rad/s]	ω	1段あたり平均 滞留時間 τ [s]	B_3/B_2 の理論 値[-]	B_3/B_2 の実測 値 [-]

4.4 第2段出力(=第3段入力)がサインカーブ入力に近い形になることの説明(必須課題ではないが能力のある者はチャレンジすること)

3段かくはん槽で第1段に流入するトレーサの入力波形は, オンとオフの切り替えであるため, 矩形波()の形でありサインカーブ()のような滑らかな曲線ではない. この入口波形が第1段, 第2段を通過した後に, ほぼ滑らかなサインカーブに近似して取り扱えるようになる理由を説明せよ.

参考書: 「PID制御の基礎と応用」(山本重彦, 加藤尚武著, 朝倉書店)

参考資料: 「プロセス制御」Webサイト

(<http://tshimizu.eng.niigata-u.ac.jp/jyugyou3/process1.htm>)