

機械工学実験1 制御工学 2014年度版 v2r2

機械工学科
機械制御システム研究室
配布可能版

本資料は機械工学実験1の理解のために利用することを可能とする。

本日の進め方

本日の実験にあたって

- 実験時間は3～5限一杯。
 - 計算作業や実験ごとに時間を決めて確保.
 - 落ち着きじっくり取り組みを.
- 課題は途中でその都度出題. その場で記述を.
 - その場で観察した現象を記録し, 考え, 仕上げることも重要.
 - 実験後の調査, 思索したことの追加も大いに歓迎.

- 授業で未だ扱っていない内容の実験.
 - 習っていないからよく分からないと決めつけてしまわないようにしましょう.
 - 説明から今学び, 学んだことを実験に反映し, すぐにレポートにしていきましょう.
 - 実験を理解するための計算も行いますので, とにかくやってみることにしましょう.

資料について

1. 機械工学実験1
テキスト

2. 配布資料

3. PPTスライド

- PPTスライド資料は以下のURLにPDFがあります。

[http://www.isc.meiji.ac.jp/~mcelab/kikai_jikken1/
kikai_jikken1_j.htm](http://www.isc.meiji.ac.jp/~mcelab/kikai_jikken1/kikai_jikken1_j.htm)

考察の着眼点

実験時

結果(事実)

- 実験条件の影響
- 設定した変数(パラメータ)の影響・効果

結果(事実)に基づく考察

- 想した結果との比較(予測シミュレーションを行った場合)
- 実験方法間の違いの比較
- 結果についての妥当性(失敗や芳しくないことも)

事実や観察に基づく推論

- 予実験環境や装置の状態について(直接測定していなかったが観察できたことなど)

持ち帰り

- 結果等を正確に整理しグラフ等を作成
- 結果や実験全体を振り返って理解
- 文献等を調査して関連する情報(手法, 理論, 知見)を獲得し, 実験結果を再評価
- 実験を通して理解した知見に基づく応用
- 今後につながるであろう展望を思索し, 実験を通しての目的と問題点を再評価

本日の実験のステップ

内容	関連する課題	時間
1 制御とは何か？	[課題1]	13:00～13:40
2 制御対象の特性を知る	[課題2～4]	13:45～15:15
3 思い通りに動かす制御系を作る	[課題5～6]	15:15～16:15
4 制御系の設計・調整と特性改善	[課題7～8]	16:15～17:20
5 まとめ	[課題9～10]	17:20～17:50

1. 制御とは何か
2. 制御対象を知る
3. 制御系を作る
4. 制御系の設計・改善

課題1に関係します.

人間や道具によるタスクの実行

人間の望む機能を実現できることが最終目標

- 体力(動力)
 - 人間の筋力を動力源として利用
- 技能
 - 人間の手の器用さ, 道具の特性を把握し, これらを利用して作業
- 知能
 - 人間による認識, 判別, 計画, 判断, 実行, 調整

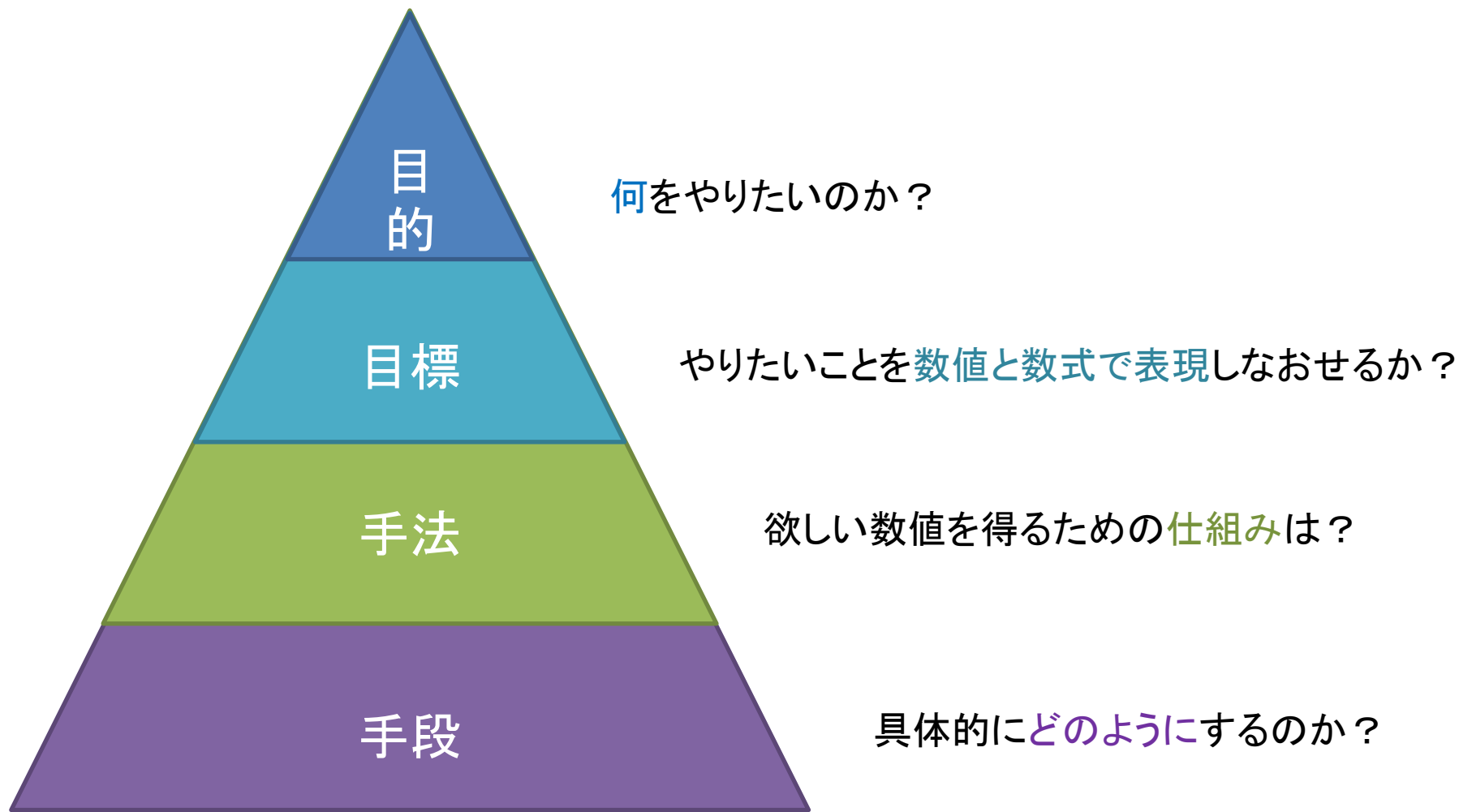
装置の**手動操作**の世界

専門職による操作らしい？

知能と技能が必要？

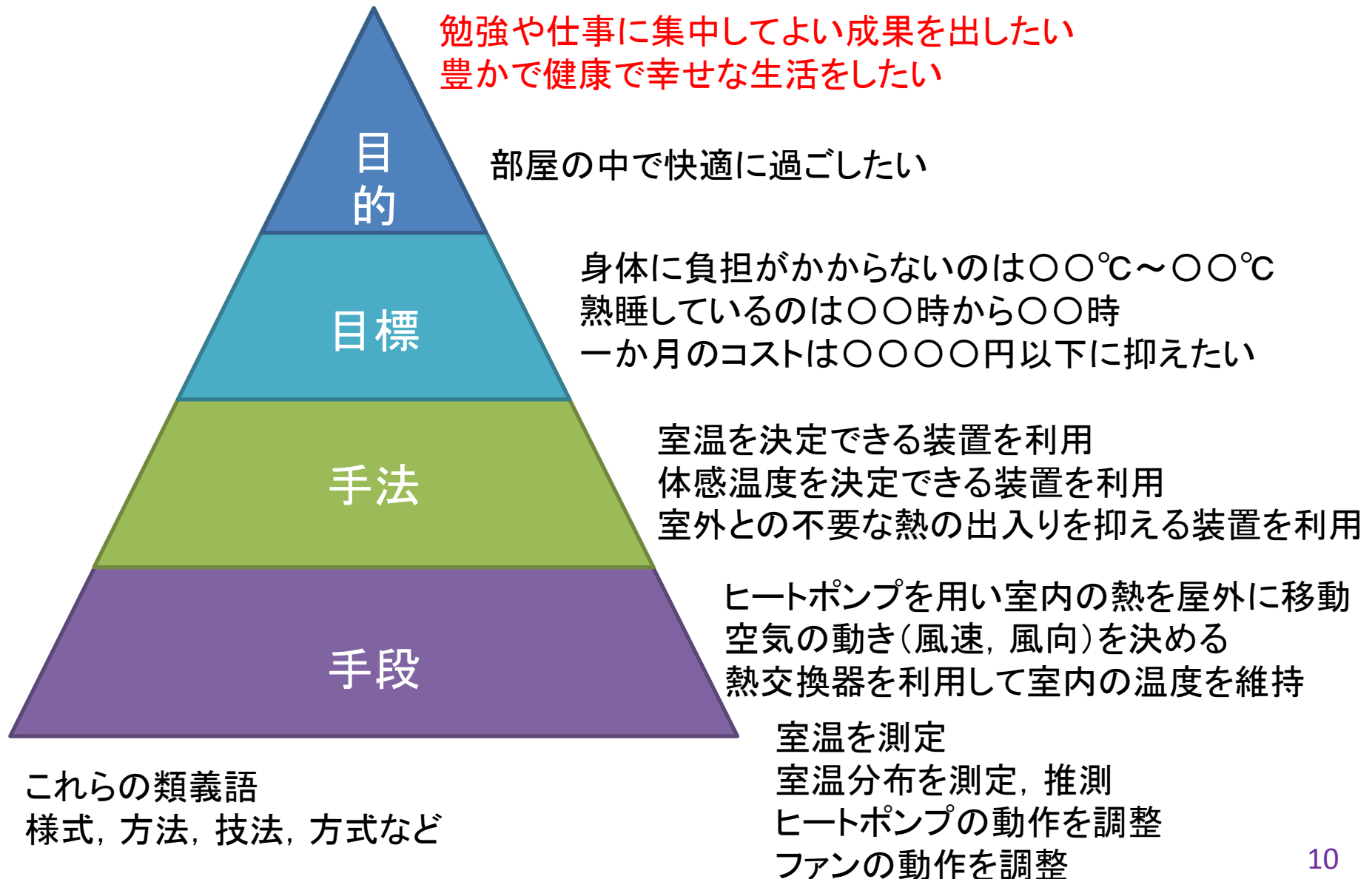
設置時，点検時，非常時など

制御の考え方(概念)

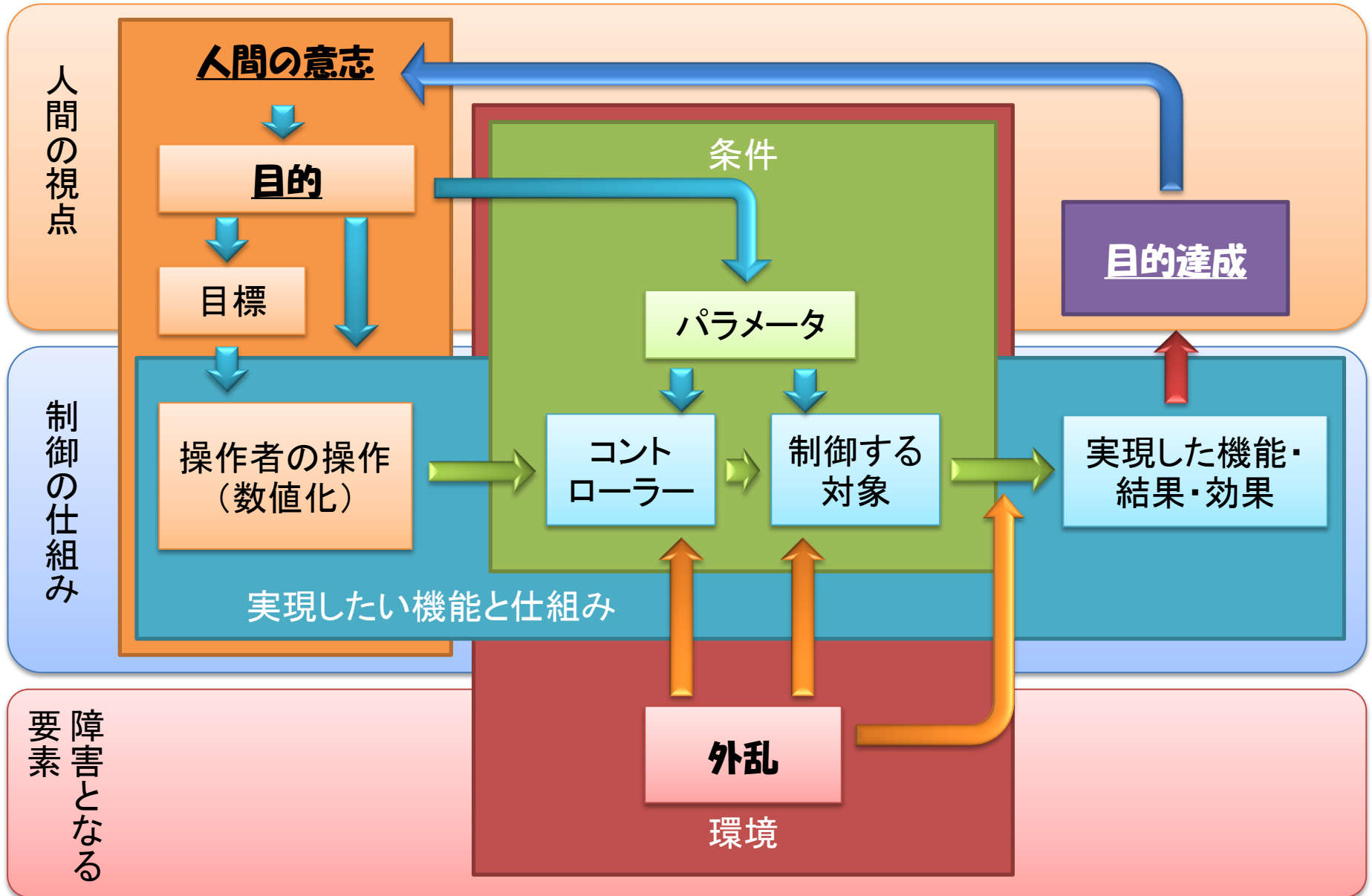


これらの類義語
様式, 方法, 技法, 方式など

制御の考え方(具体例)



制御の考え方



制御のいろいろ

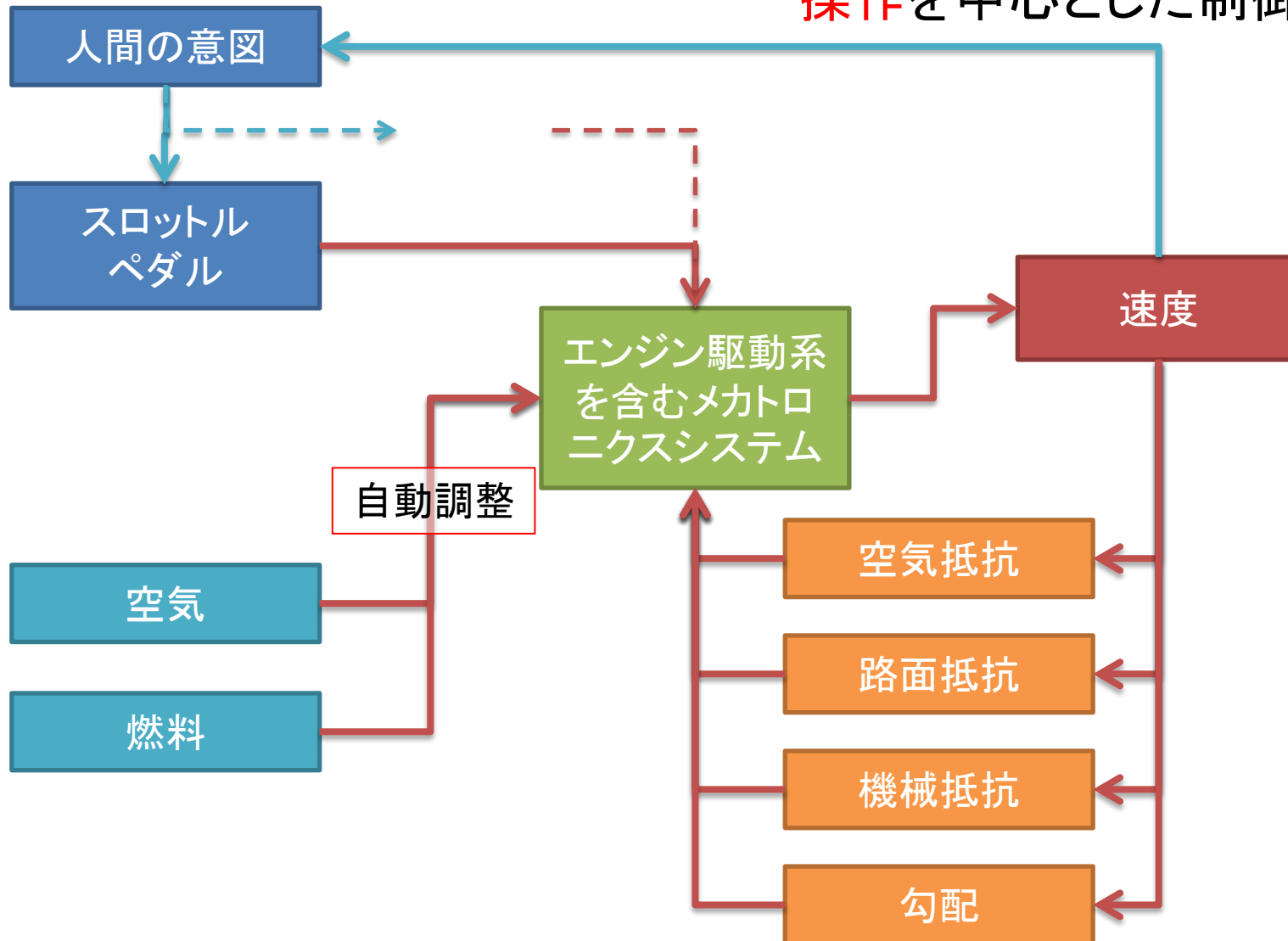
制御法	操作	自動制御	自律制御
役割	機能拡大	支援	代行
目的決定 (意志)	操作者	操作者	操作者
目標設定 (行動原理)	操作者	操作者	制御系
判断	操作者	制御系	制御系
動作・調整	制御系	制御系	制御系
例(乗り物)			

制御のいろいろ

制御法	(遠隔)操作	自動制御	自律制御
役割	機能拡大	支援	代行
目的決定 (意志)	操作者	操作者	操作者
目標設定 (行動原理)	操作者	操作者	制御系
判断	操作者	制御系	制御系
動作・調整	制御系	制御系	制御系
例(乗り物以外)			

制御の面から自動車を考える

操作を中心とした制御システム



歩行ロボット

知能を持ち, 状態を認識しながら自ら
行動を決定し判断する制御システム

ASIMO

PETMAN and Atlas

Big Dog and Wild Cat₁₅

歩行ロボット動画

← Wild Cat

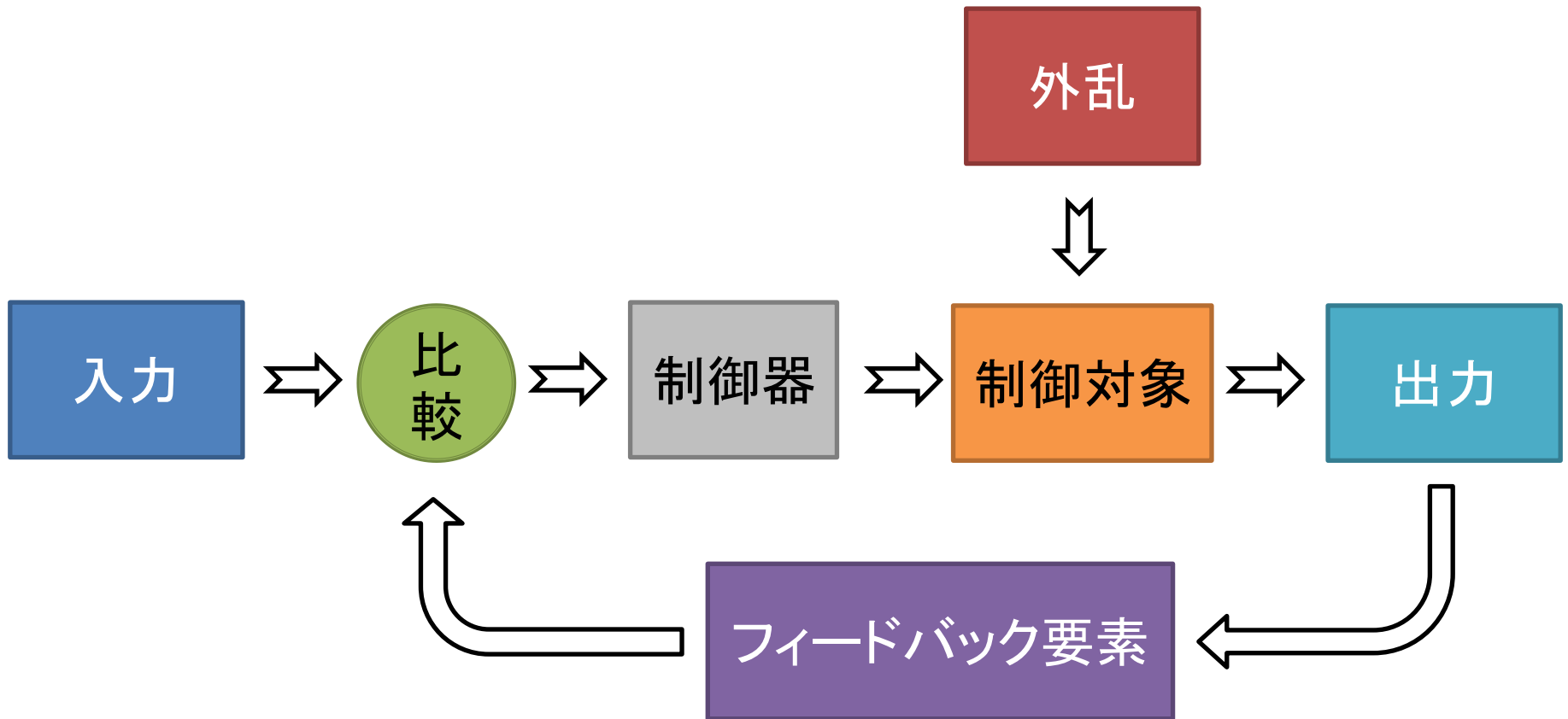
<https://www.youtube.com/watch?v=wE3fmFTtP9g&list=UU7vVhkEfw4nOGp8TyDk7RcQ>

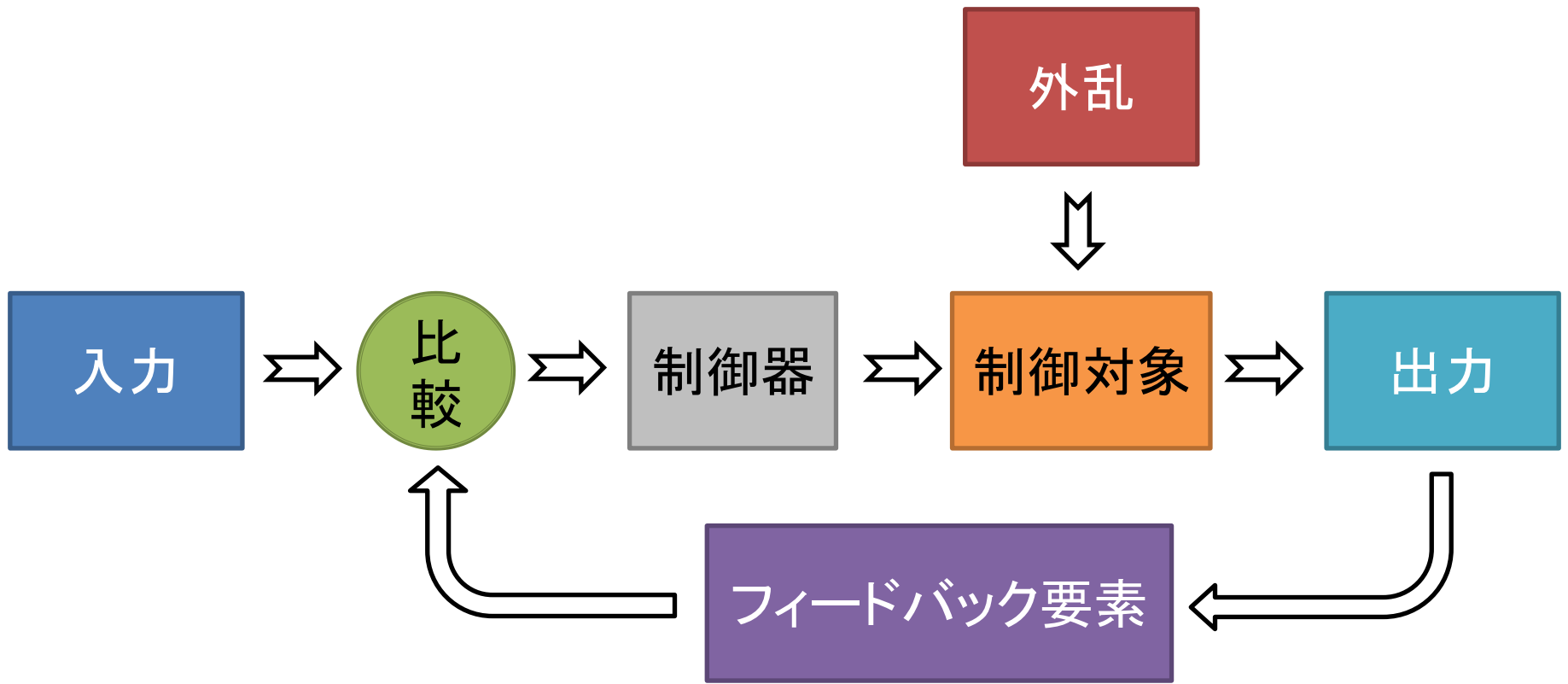
<https://www.youtube.com/watch?v=tFrjrgBV8K0&list=UU7vVhkEfw4nOGp8TyDk7RcQ&index=4>

Petman →

基本的な制御系の概念

制御の基本となる自動制御





制御とは何か

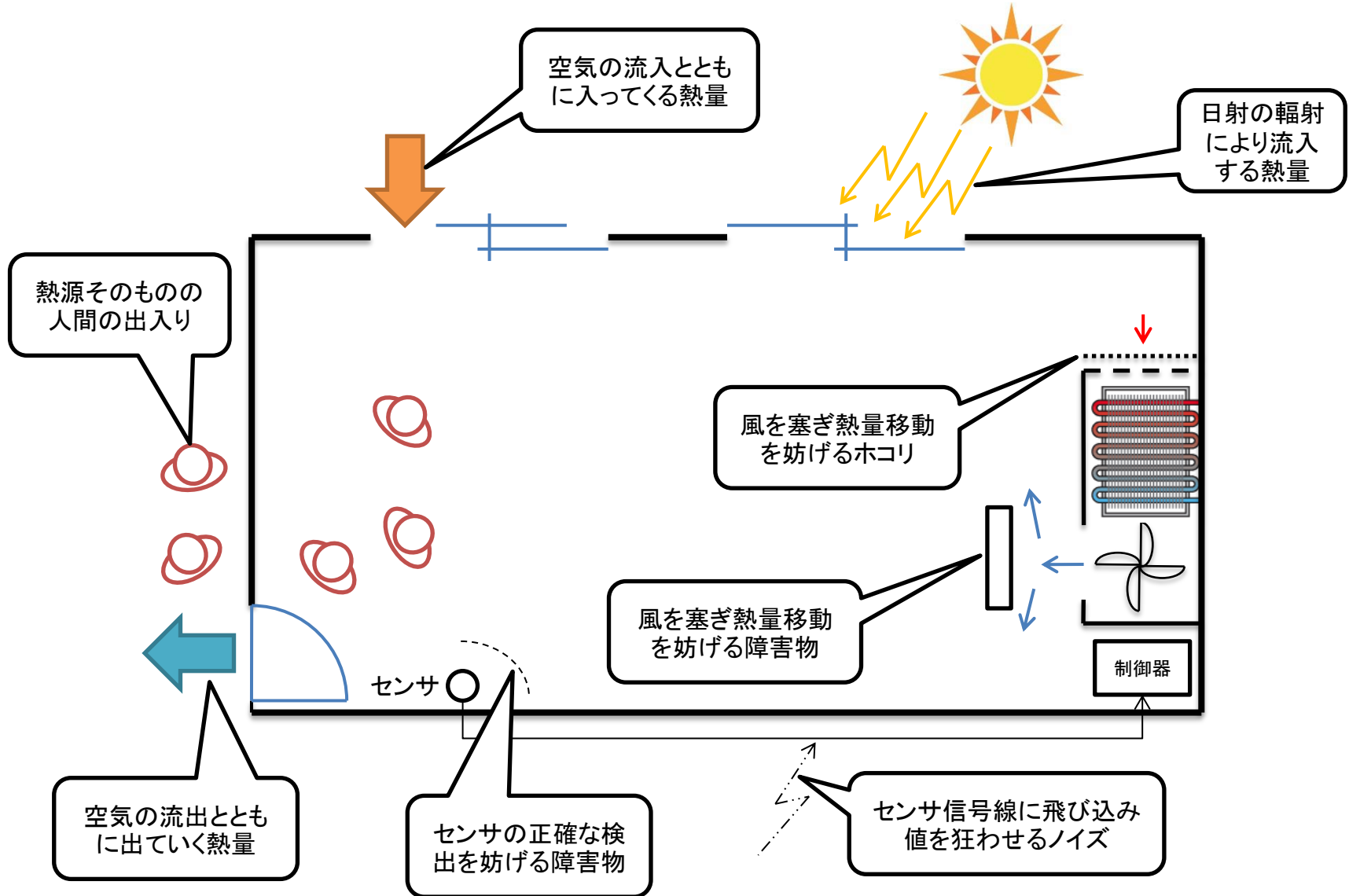
外乱とは？

外乱とは？

外乱の影響	原因	起きる問題
入力	<ul style="list-style-type: none"> 入力信号へのノイズ飛来 入力装置の特性劣化(センサなど) 	<ul style="list-style-type: none"> 指令値が変動し応答誤差. 特性変化や故障.
制御対象	<ul style="list-style-type: none"> 制御対象へのノイズ飛来 制御対象の時系列の特性変化 	<ul style="list-style-type: none"> 特性変化による応答変化. 特性変化不明による結果未保証.
出力	<ul style="list-style-type: none"> 負荷変動による出力値への影響 動作環境の変化 	<ul style="list-style-type: none"> 通常起きる問題. この影響の軽減が制御の主な目的.
フィードバック要素	<ul style="list-style-type: none"> センサへのノイズ飛来 センサの時系列の特性変化 	<ul style="list-style-type: none"> センサ特性が変化し故障. 把握できる仕組みがないと応答は大きな誤差を発生し、大変危険.

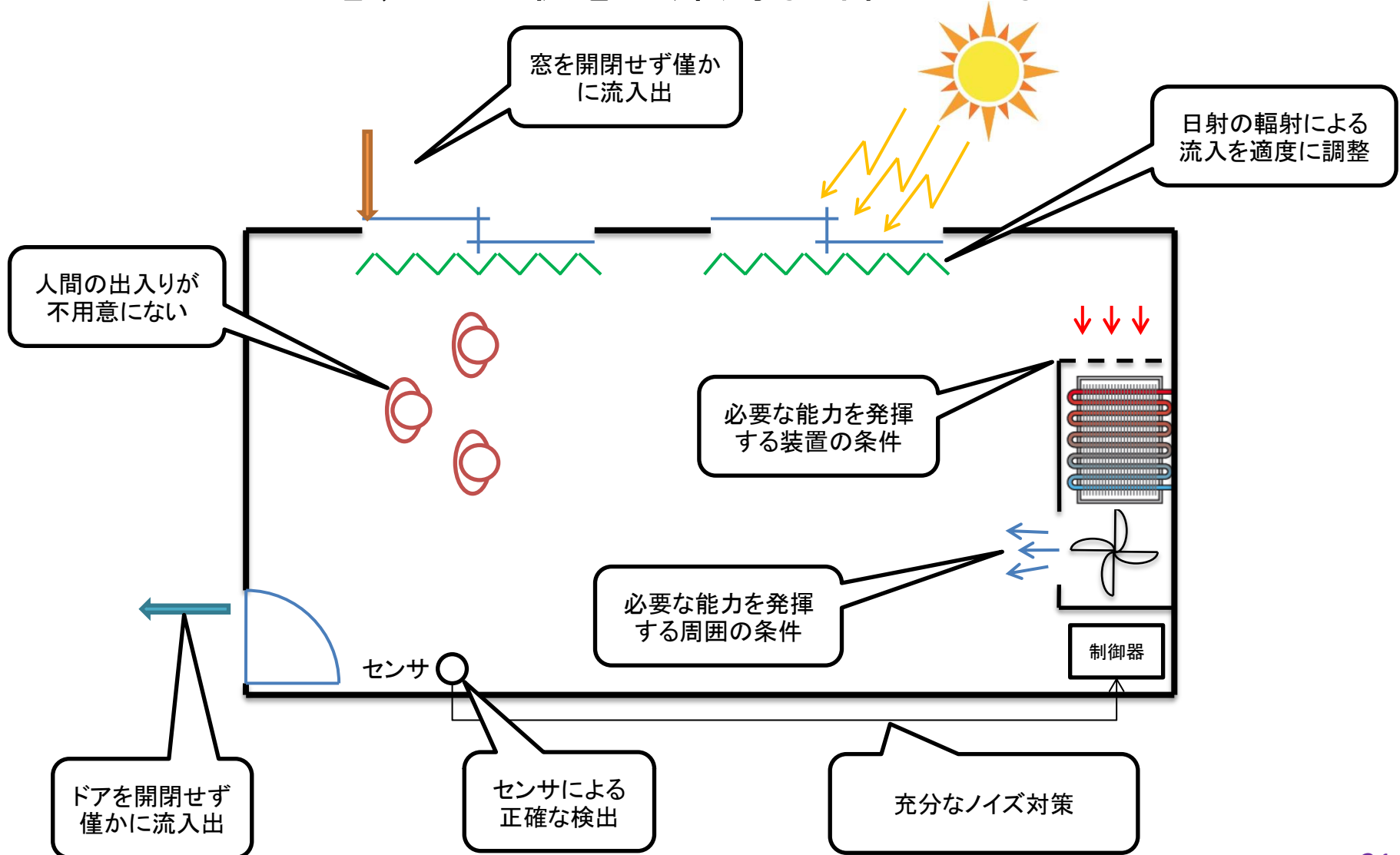
- 想定した対象の応答を阻害するのが外乱
- 外乱の影響を抑制するのが制御の重要な役割
- しかしながら、外乱の影響は深刻、想定外の結果を引き起こす

室温調整にとっての外乱はどれか？



室温調整にとってのよい状態

想定内の状態→深刻な外乱ではない



保つ制御, 操る制御

プロセス制御

- 欲しい状態を維持し続ける制御
 - 狙い通りの出力を得る
 - 応答が安定して変動しない
 - 外乱が加わっても確実に復旧

室温を保つ

化学反応速度を保つ

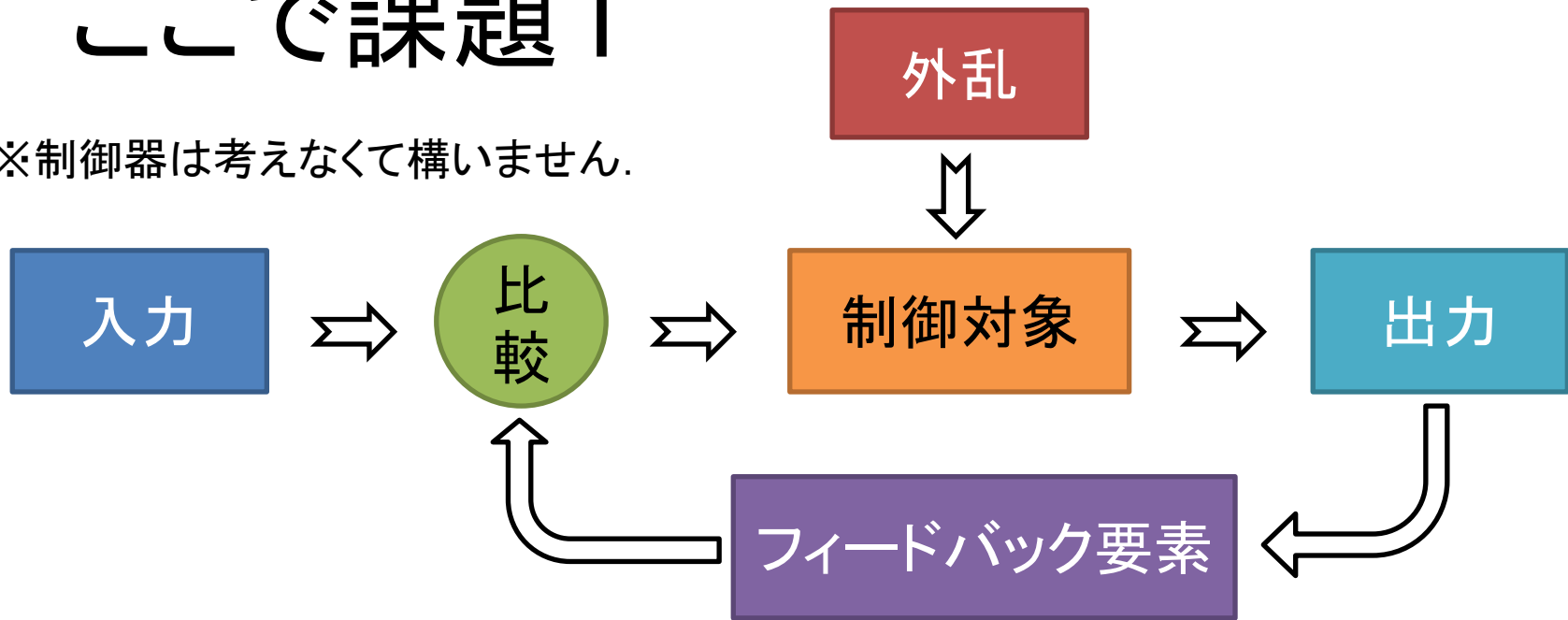
サーボ制御

- 思い通りに操り, 変化に追従させる制御
 - 狙い通りの変化に応じた出力を得る
 - 応答が安定して滑らか
 - 外乱が加わっても確実に補完して狙いの変化

手先を軌道に合わせて動かす

ここで課題1

※制御器は考えなくて構いません。



- 正しい答えを書く必要はありません。
- 周囲の人々と討論しながら考えてみましょう。
- 2例以上挙げることも良いと思います。
- 今の段階で想像する「制御」の仕組みを持つものを考えましょう。
- 分量はレポート用紙半分～1枚くらい？
- 鉛筆書きで充分です。
- 授業中の分はペン入れの必要ありません。

書くとよいもの

制御の目的, 何をしたいか
制御の効果, どのようにするか
制御の手段, 上記の各要素

1. 制御とは何か
- 2. 制御対象を知る**
3. 制御系を作る
4. 制御系の設計・改善

課題2～4と実験1に関係します。

制御モデル

$$m \frac{d^2}{dt^2} x + c \frac{d}{dt} x + kx + \alpha \left(\frac{d}{dt} x \right)^3 = f$$

1. 微分方程式

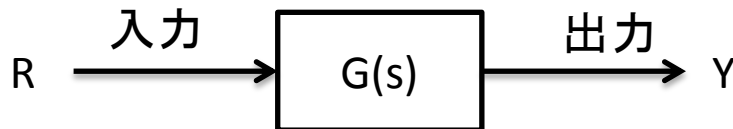
- 運動方程式など
- 時間変化の関係を表す

2. 近似

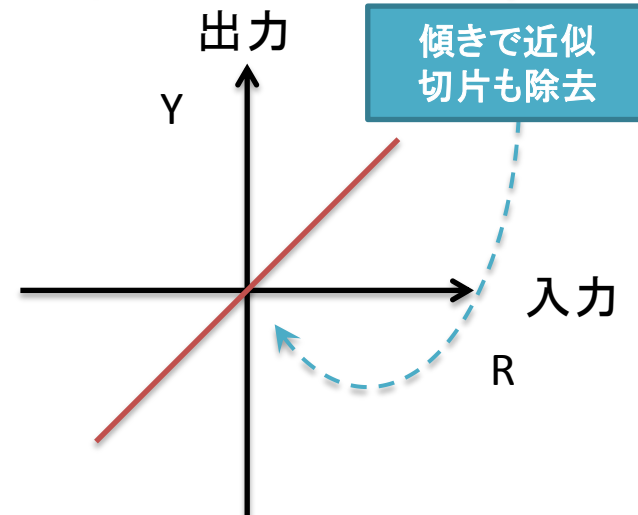
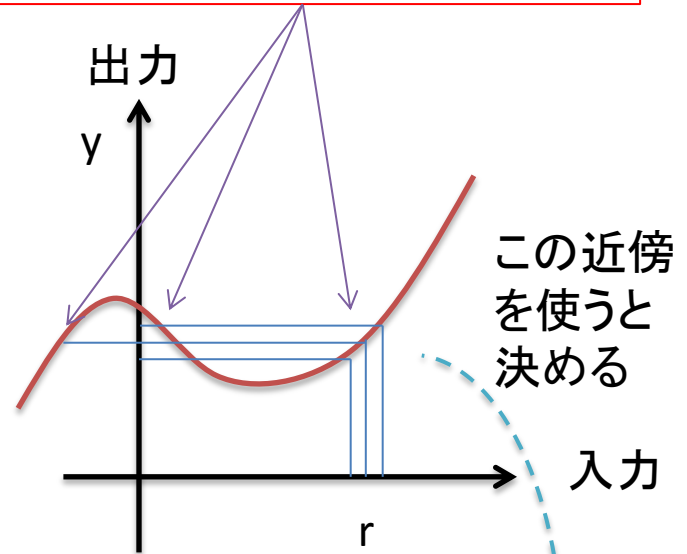
- 制御したい範囲(条件) ※を決定
- 制御可能な方程式に変換

3. 伝達関数

- 指令値に対する応答の関係



解が3つあっては制御できない



※主に扱う中心の状態(釣り合い)を平衡状態といい、制御則を決める基本

制御モデルの決め方

方法1

- **実際に動作**, 計測してパラメータの値を得る

方法2

- 選択した対象の**既存の制御モデルに当てはめ**
- **仕様書の値を用い**,
- 足りない分を実測してパラメータの値を得る

利用できる知見を**的確に**選択する
発想も工学的に重要

ラプラス変換

$$F(s) = L\{f(t)\} = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt$$

重解, 特殊解 (右辺が0ではない) が存在する
ような複雑な微分方程式が楽に解ける

1. 初期値に注意しておけば, 微分方程式を明快な代数方程式として解くことができるので簡単に解ける
2. 式の形から制御特性を見出しやすい

初期条件とラプラス変換表を使って簡単に解ける

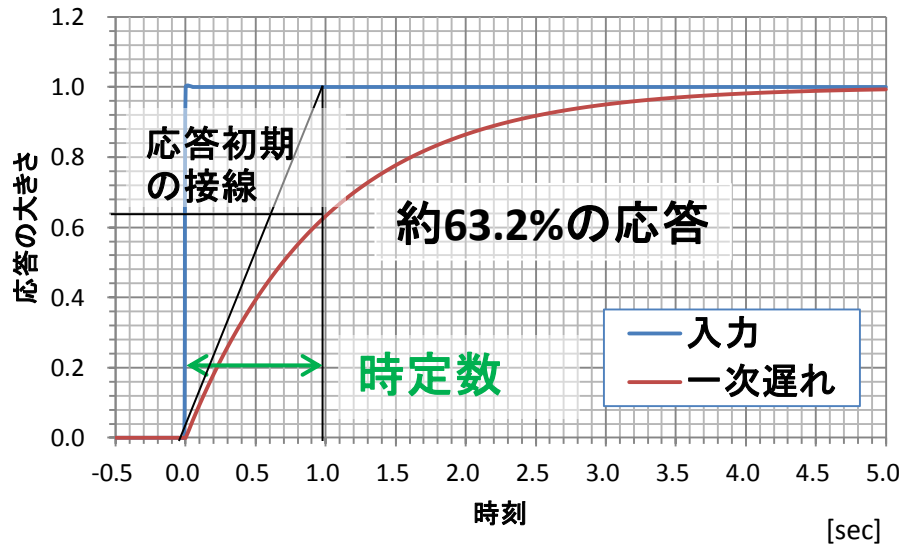
(参考)ラプラス変換表

計算手順

1. 時間に関する関数についてラプラス変換する
2. 必要な演算を行う
3. ラプラス逆変換により時間に関する関数に戻す

変換した式のパターンで
応答の概形が分かる.

一次遅れの応答



$$y(t) = K(1 - e^{-\frac{t}{T}})u(t)$$

ラプラス変換した伝達関数

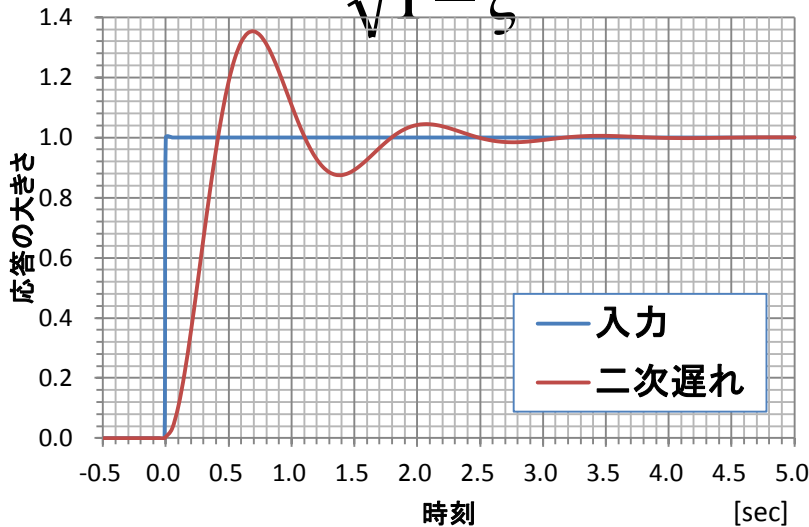
$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1}$$

ここが1次であり、遅れて応答するから1次遅れ

- 入力に加わった後
 - 初めは素早く応答
 - 時間が経つにつれて徐々になだらかに応答
 - 十分に時間が経つにつれ目標値に漸近

二次遅れの応答

$$y(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \left\{ \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t - \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right) \right\} u(t)$$



ラプラス変換した伝達関数

$$G(s) = K \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

ここが2次であり、遅れて応答するから2次遅れ

- 入力に加わった後
 - 初めは素早く応答
 - 振動的に変化しながら目標値に向かう (ζによる)
 - 十分に時間が経つにつれ目標値に漸近

振動系をラプラス変換してみる

おなじみの運動方程式

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + c \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = f(t)$$

変形, 整理すると

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \frac{c}{m} \frac{dx(t)}{dt} + \frac{k}{m} x(t) = \frac{1}{m} f(t)$$
$$\frac{c}{m} = 2\zeta\omega_n \quad \frac{k}{m} = \omega_n^2$$



ラプラス変換後

$$s^2 X(s) + 2\zeta\omega_n s X(s) + \omega_n^2 X(s) = \frac{1}{m} F(s)$$

変形, 整理すると

$$X(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \frac{1}{\omega_n^2 m} F(s)$$
$$\frac{1}{\omega_n^2 m} = K \quad KF(s) = U(s)$$

2次遅れ系

$$X(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} KU(s)$$

係数の次元解析は忘れずに

$$K = \frac{1}{\omega_n^2 m} = \frac{1}{k} \quad \frac{1}{[N/m]} = [m/N]$$

(DCブラシ付き)モータのコントロール

実物を触ってみてください。軸を回してみてください。

物理量	応用対象	センサ
回転角	ロボットアームの関節角	回転角センサ (ポテンシオメータ, ロータリーエンコーダ, レゾルバ)
角速度	車両の速度, 設備の運転状態	角速度センサ (タコジェネレータ, ロータリーエンコーダ, レゾルバ), 電子ガバナ (回転速度を推測)
トルク	柔らかい制御	トルクセンサ
角加速度	飛行機, ヒューマノイドの姿勢制御	外付けのジャイロ
ジャーク	自律ヘリコプタの軌道制御, 姿勢制御 エレベータや鉄道の乗り心地改善	演算によって算出

(参考)ヘリコプタの自律飛行制御

1990年頃の常識:スーパーコンピュータでもヘリコプタの完全な姿勢制御・自律制御は極めて困難

センサ性能向上

マイコンレベルで自立安定制御

画像処理での位置決め制御

スマートフォンのコマンドですら制御可能

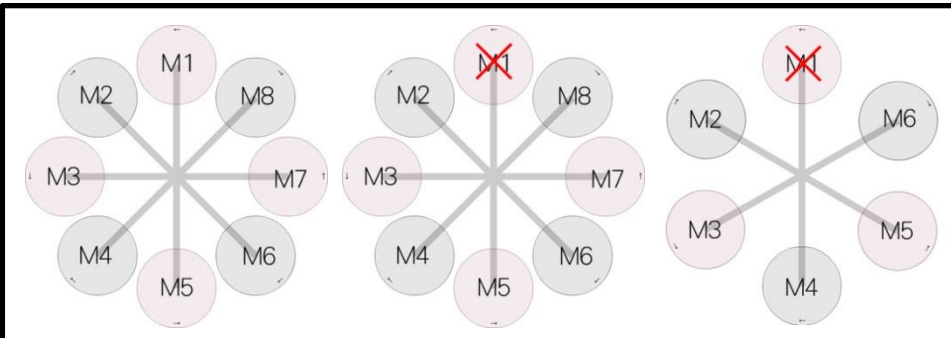
制御則の研究

自律制御とアクロバット飛行可能な運動制御(ジャーク)

日本でも既に5-6年前
空撮用オクタコプター
は作られていた

(参考)

Amazon's "Prime Air" Oct-copter

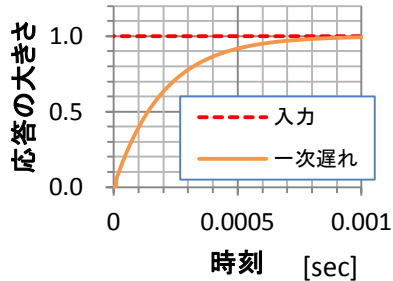


ブラシ付きDCモータの構造

ブラシ付きDCモータの特性を決める要素

電機子の電気特性

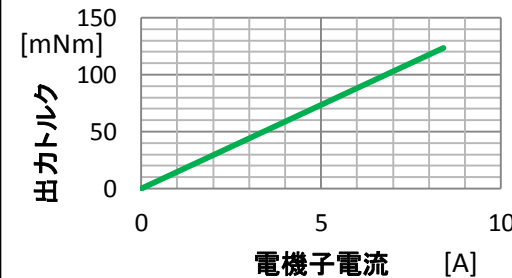
- 抵抗 R とインダクタンス L の特性を持つ
- 電圧 E が掛かったとき電流 I はすぐには上がらない(一次遅れの応答)



磁気回路の特性

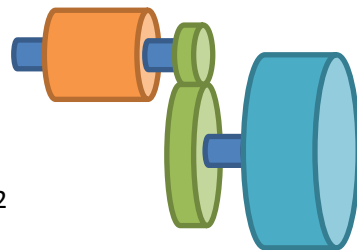
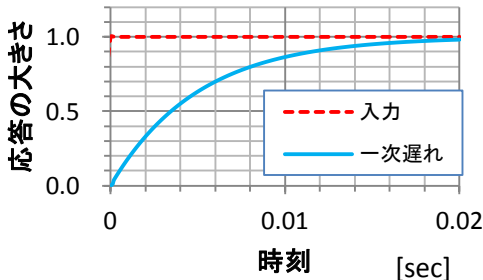
フレミング左手の法則

- 磁気回路の性能(精度, 磁力, コギング)により単位電流あたりの発生トルクが決まる。(即座に反応する: 比例)



モータの機械特性

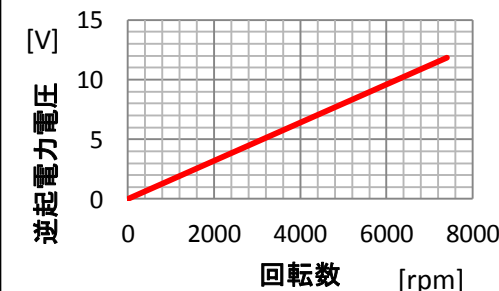
- イナーシャ(ロータ, ギア, 負荷回転体), 粘性抵抗 B (軸受各部, 空気)から構成
- 電磁トルク T を受けたとき回転数は徐々に上昇(一次遅れの応答)



逆起電力

フレミング右手の法則

- コイルの巻数や極数, 磁気回路により単位角速度あたりの発生電圧 E_G が決まる。(即座に反応する: 比例)
- 電圧 E_G は電圧 E を妨げる(差)

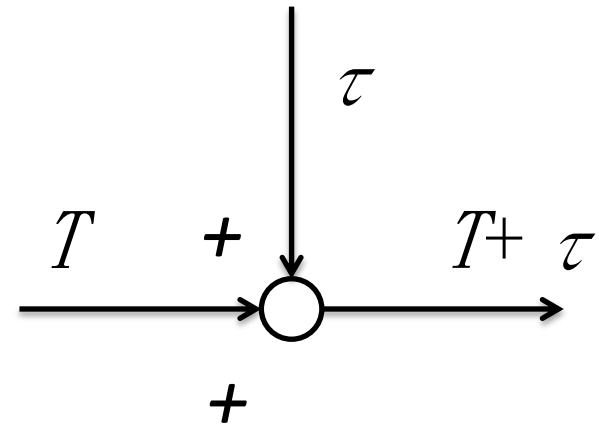


外乱の加わり方

1. 想定外の外部の要因により**制御の平衡状態を乱す要素**
2. 初期状態から**制御系の特性(定数)が変化すること(制御モデル誤差)**



狙い通りの制御ができず、
欲しい機能が実現できない

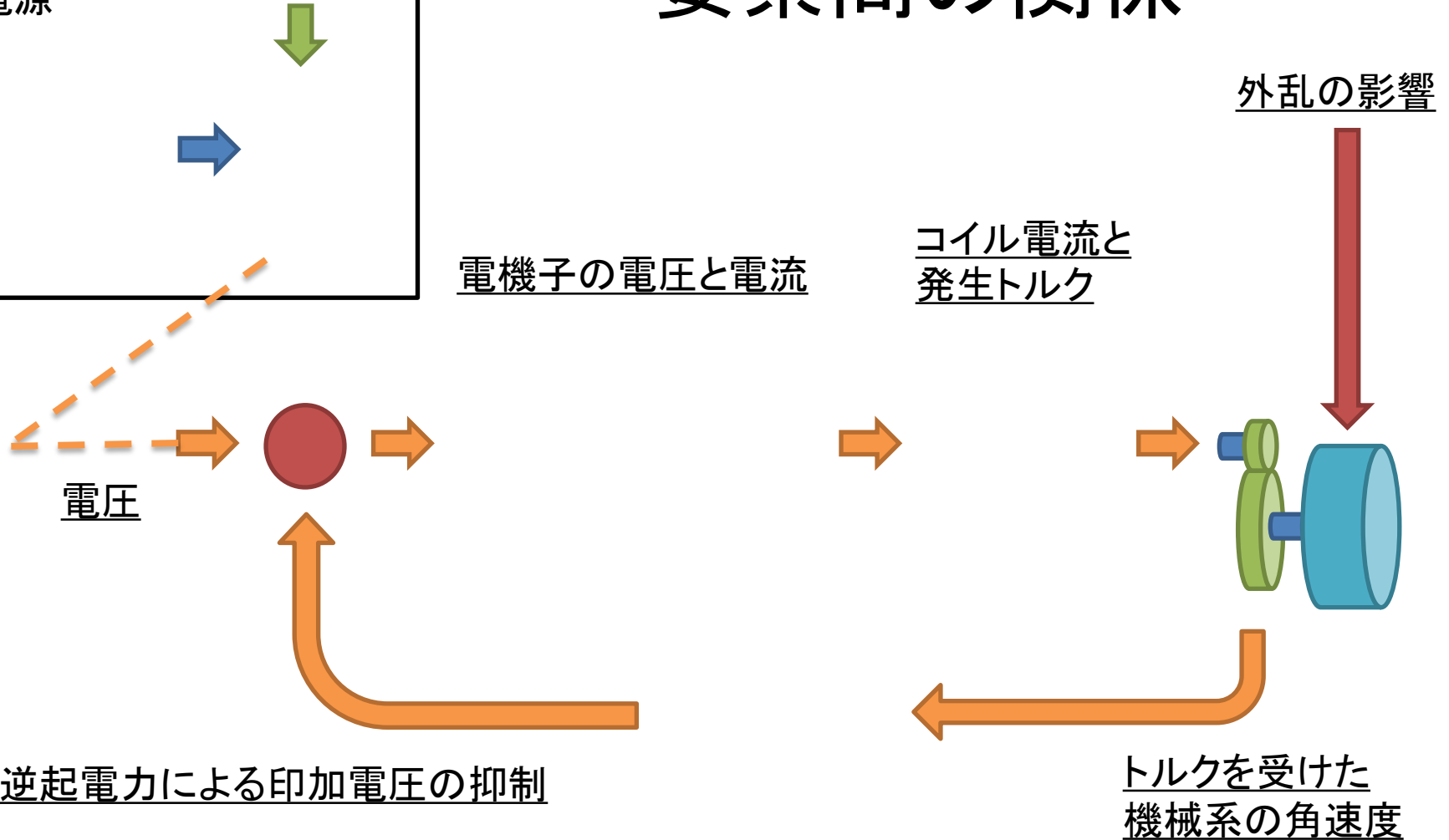


今日の実験では、
外乱にはトルクを加える

実機

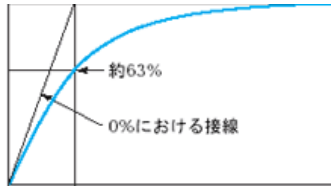
- コントローラ
- ドライバ
- 電源

モータ特性を決める 要素間の関係



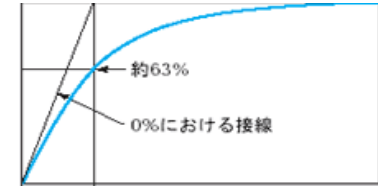
モータ特性まとめ

電圧に対する回転数の応答

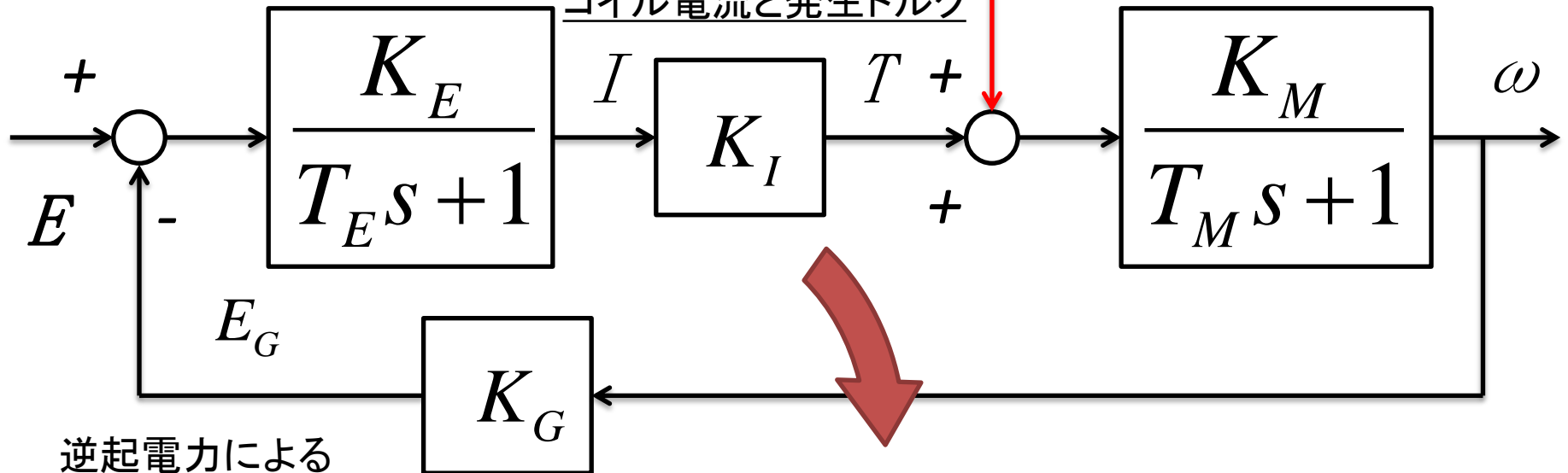


電機子の電圧と電流

回転数ではなく
トルクに対しての外乱



トルクを受けた
機械系の角速度



逆起電力による
印加電圧の抑制

例) $T = K_I I$

入力に伝達関数を
かけたものが出力

各要素の特性をラプラス変換
→ ブロック線図にまとめて表記
代数演算可能

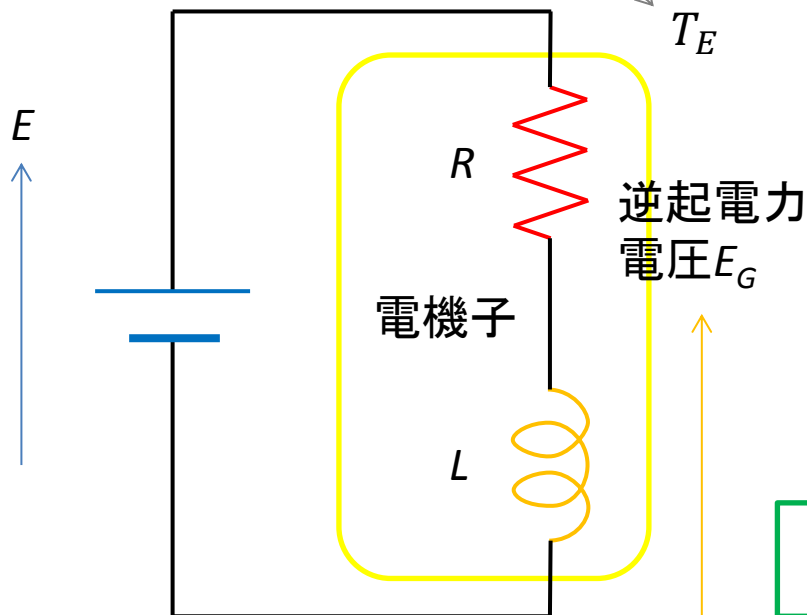
モータの微分方程式とラプラス変換

モータ電気回路の方程式

$$RI(t) + L \frac{d}{dt} I(t) = E - E_G$$

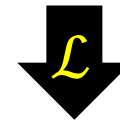


$$I(s) = \frac{1}{Ls + R} (E - E_G) = \frac{\overset{K_E}{1/R}}{\underset{T_E}{L/R}s + 1} (E - E_G)$$

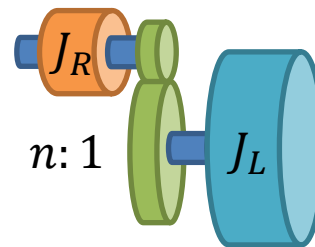


モータ機構の運動方程式

$$J \frac{d^2}{dt^2} \theta(t) + b \frac{d}{dt} \theta(t) = T + \tau_{dis}$$



$$\omega(s) = \frac{1}{Js + b} (T + \tau_{dis}) = \frac{\overset{T_M}{1/b}}{\underset{K_M}{J/b}s + 1} (T + \tau_{dis})$$

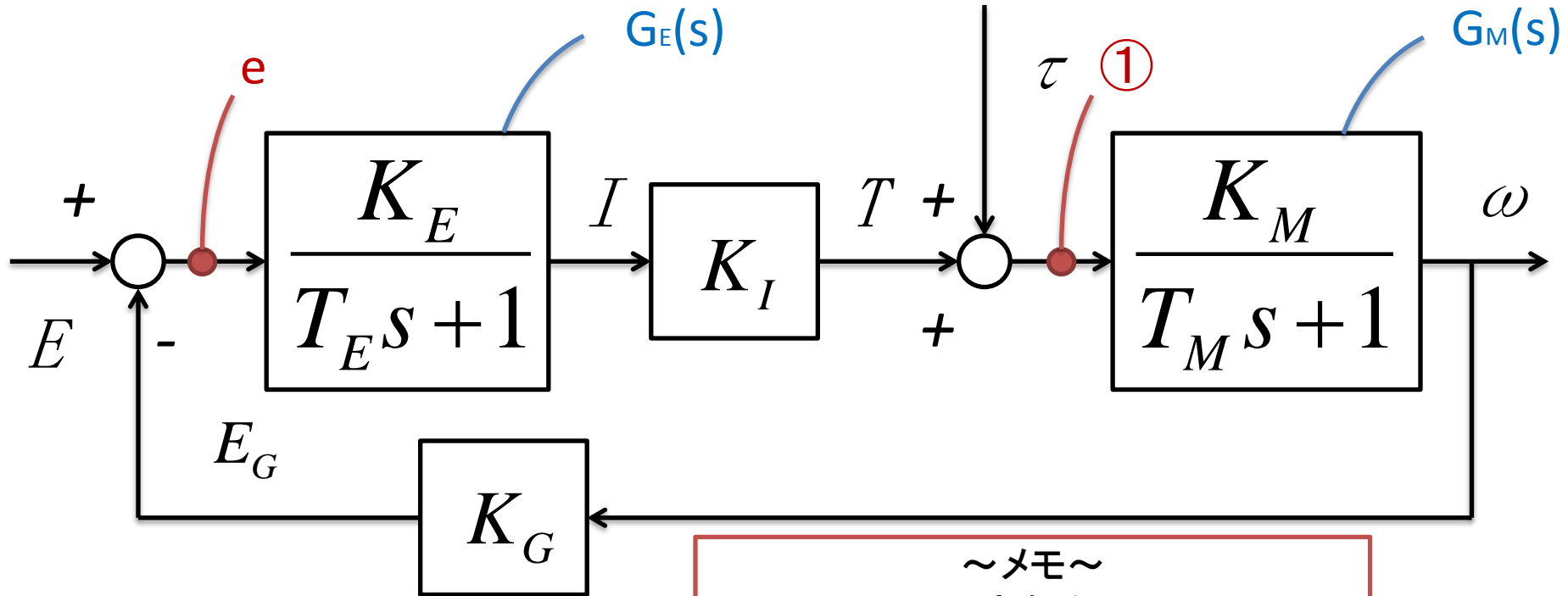


$$J = J_R + \frac{J_L}{n^2}$$

電気系も機械系も1次遅れ

ここで課題2

目的: 入出力の関係を式で示す.



連立する方程式

$$\begin{aligned} e &= E - E_G \\ \textcircled{1} &= T + \tau \\ E_G &= K_G \omega \\ T &= K_I G_E(s) e \\ \omega &= G_M(s) \textcircled{1} \end{aligned}$$

～メモ～

以下の変数を用いる

$$K_G, E, G_E(s), K_I, \tau, G_M(s), \omega$$

中間式を以下のように置き,

$$G_E(s) = \quad G_M(s) =$$

以下の式を求める.

$$\omega = ? E + ? \tau$$

余裕があれば, 中間式を代入.

モータ伝達関数

$$\omega(s) = \frac{G_E(s)K_I G_M(s)}{1 + G_E(s)K_I G_M(s)K_G} E + \frac{G_M(s)}{1 + G_E(s)K_I G_M(s)K_G} \tau$$

$$G_E(s) = \frac{K_E}{T_E s + 1}$$

$$G_M(s) = \frac{K_M}{T_M s + 1}$$

入力と外乱の伝達関数の違いを
見ておいてください。

伝達関数を代入すると

実は2次遅れ系

$$\omega(s) = \frac{K_E K_I K_M}{T_E T_M s^2 + (T_E + T_M)s + 1 + K_E K_I K_M K_G} E + \frac{K_M}{T_E T_M s^2 + (T_E + T_M)s + 1 + K_E K_I K_M K_G} \tau$$

モータの実例を考える

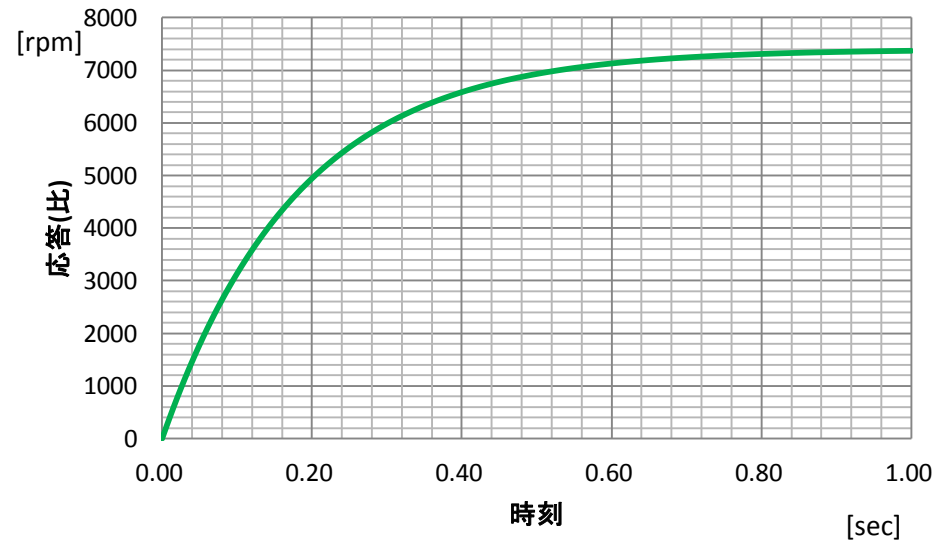
モータのスペックから算出したパラメータ

KE	0.714	A/V
KI	0.0147	Nm/A
KM	6230	rad/s/Nm
KG	0.0153	V/(rad/s)
TE	0.0000857	sec
TM	0.00000291	sec



2次遅れ(振動系と同じ)
としてのパラメータ

ω_n	253	rad/s
ζ	23.0	1



モータの応答シミュレーション

これはどう見ても
1次遅れの応答に
そっくりではないか？

モータのパラメータ代入

モータ電気回路の方程式

$$I(s) = \frac{1}{Ls + R} (E - E_G) = \frac{\frac{1}{R}}{\frac{L}{R}s + 1} (E - E_G)$$

$\begin{matrix} \nearrow K_E \\ \searrow G_E \end{matrix}$
 $\begin{matrix} \nearrow T_E \\ \searrow T_E \end{matrix}$

L	電機子インダクタンス	mH
R	電機子抵抗	Ω
J	慣性モーメント	Kgm^2
b	粘性係数	$\text{Nm}/(\text{rad}/\text{s})$

モータ機構の運動方程式

$$J = J_R + \frac{J_L}{n^2}$$

$$\omega(s) = \frac{1}{Js + b} (T + \tau_{dis}) = \frac{\frac{1}{b}}{\frac{J}{b}s + 1} (T + \tau_{dis})$$

$\begin{matrix} \nearrow T_M \\ \searrow G_M \end{matrix}$
 $\begin{matrix} \nearrow K_M \\ \searrow K_M \end{matrix}$

$$\omega(s) = \frac{\frac{1}{K_G}}{\frac{LJ}{K_I K_G} s^2 + \frac{RJ + Lb}{K_I K_G} s + \frac{Rb}{K_I K_G} + 1} E + \frac{\frac{Ls + R}{K_I} \frac{1}{K_G}}{\frac{LJ}{K_I K_G} s^2 + \frac{RJ + Lb}{K_I K_G} s + \frac{Rb}{K_I K_G} + 1} \tau$$

$$\frac{RJ}{K_I K_G} = T_m \quad \text{機械的時定数 (モータの回路の特性も含む)}$$

$$\omega(s) = \frac{\frac{1}{K_G}}{T_E T_m s^2 + \left(T_m + \frac{Lb}{K_I K_G}\right) s + \frac{Rb}{K_I K_G} + 1} E + \frac{\frac{Ls + R}{K_I} \frac{1}{K_G}}{T_E T_m s^2 + \left(T_m + \frac{Lb}{K_I K_G}\right) s + \frac{Rb}{K_I K_G} + 1} \tau$$

		具体例	単位	考慮する点
L	電機子インダクタンス	0.12	mH	L ≪ R, L → 小
R	電機子抵抗	1.4	Ω	
J	慣性モーメント	0.0000291	Kgm ²	
b	粘性係数	?	Nm/(rad/s)	測りにくい, b → 小



$$Lb \rightarrow 0 \quad T_E \ll T_M$$

$$\frac{Rb}{K_I K_G} \rightarrow 0 \quad T_E \ll T_m$$

式の簡素化

式変形のため

$$\cong \frac{\frac{1}{K_G}}{T_E T_m s^2 + T_m s + 1} E + \frac{\frac{Ls + R}{K_I} \frac{1}{K_G}}{T_E T_m s^2 + T_m s + 1} \tau$$

$$\cong \frac{\frac{1}{K_G}}{T_E T_m s^2 + (T_E + T_m) s + 1} E + \frac{\frac{Ls + R}{K_I} \frac{1}{K_G}}{T_E T_m s^2 + (T_E + T_m) s + 1} \tau$$

$$= \frac{1}{K_G} \frac{1}{T_E s + 1} \frac{1}{T_m s + 1} E + \frac{Ls + R}{K_I} \frac{1}{K_G} \frac{1}{T_E s + 1} \frac{1}{T_m s + 1} \tau$$

$$\approx \frac{1}{K_G} \frac{1}{T_m s + 1} E + \frac{Ls + R}{K_I} \frac{1}{K_G} \frac{1}{T_m s + 1} \tau$$

機構要素の影響が大半

モータの実例を考える

$$\omega(s) \approx \frac{1}{K_G} \frac{1}{T_m s + 1} E + \frac{R}{K_I K_G} \frac{1}{T_m s + 1} \tau$$

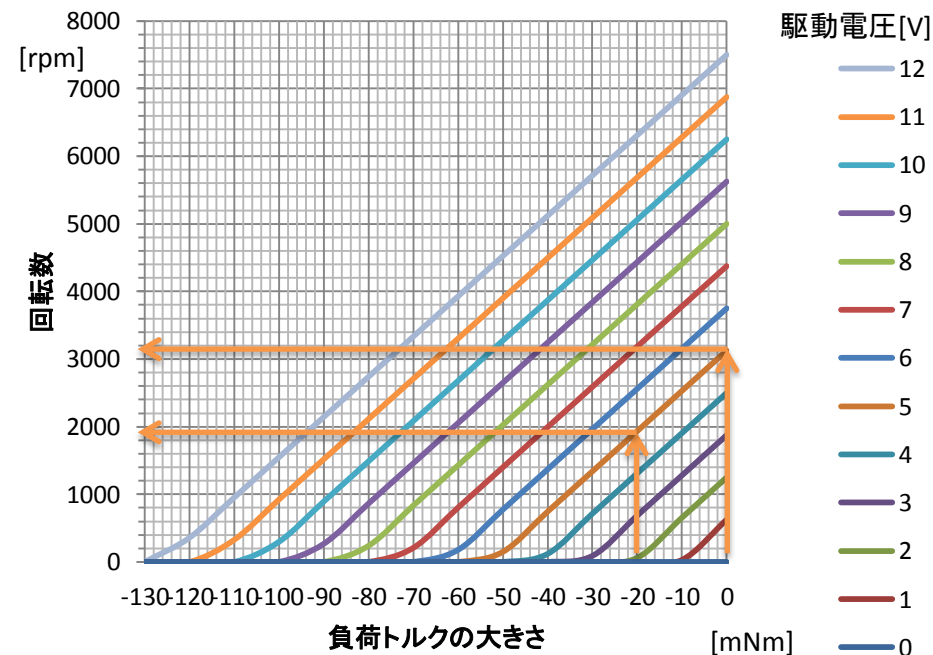
		具体例	単位
L	電機子インダクタンス	0.120	mH
R	電機子抵抗	1.40	Ω
J	慣性モーメント	0.0000291	Kgm ²
KI	トルク定数	14.7	mNm/A
KG	誘起電圧定数	1.60	V/1000rpm
Tm	機械的時定数	17.0	msec

	具体例	単位
最大トルク	117.6	mNm
最大駆動電圧	12	V
無負荷最大回転数	7400	rpm

$$\omega(t) \approx \frac{1}{K_G} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}}\right) E + \frac{R}{K_I K_G} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}}\right) \tau$$

$$= 625 \left(1 - e^{-\frac{t}{0.017}}\right) E + 59.5 \left(1 - e^{-\frac{t}{0.017}}\right) \tau$$

[rpm/V] [V] [rpm/mNm] [mNm]



5V駆動時は、最大トルクの15%
の負荷で回転数は40%落ちる

モータのモデリング精度

目的を考える, 演算精度と演算速度のバランスを考える必要がある

やたらと精密な動力学・制御モデルを作ってしまうと...

古い例(10年前)

電気特性, 動力学特性, 摩擦などの非線形要素を細かく設定した上で, 歩行ロボット動かすシミュレータ

Pentium4 / 500MHzシングルコア(しかなかった)クラスで単純な歩行動作10秒のシミュレーションに5~6時間かかる.

Core i7: 3.5GHz Quad core(8thread)なら15分位で計算できるかも?



実時間で動力学シミュレーションを行いながら, 結果と指令値(軌道計画)と現在の観測値(応答)を比較しながら制御すると高度な制御を行うことができる.

目的を良く考えて精度にこだわらなければ...

電気回路の特性は極めて早い応答, 逆起電力も含んだモデルとして考えても, 大した誤差はない

モータに加える電圧 E を入力とし, モータ回転数 ω を出力として, 単なる一次遅れのモデルだと考えても良い.

課題2で折角モータの伝達関数を算出したのですが・・・

要求仕様

- 誤差の要求は厳しくない(数%あっても問題ない)
- 実時間で制御を行う必要性



- 制御モデルは簡潔であることが必要
- 課題2の制御モデルより更に簡潔なモデルを利用

- 一度、精密なモデルを作る
- 目的に立ち返り、何を重視するのか考え直す
→ 工学的に有効な考え方

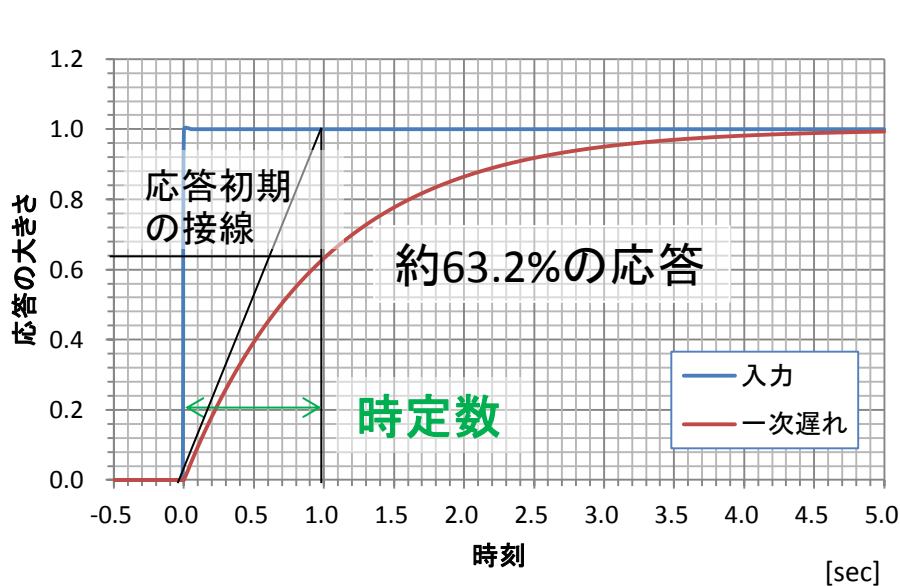
モデルを簡素化したときに 忘れてはいけないこと

- 簡素化できる理由
 - 実時間で制御する必要性が優先
 - 制御の精度に対しては誤差を許容
- 簡素化した理由
 - モータの実際の応答が1次遅れ
 - 電気回路の時定数が十分に小さい性質
- ゲイン係数Kの中身
 - 中身が変わった訳ではない
 - 係数ごとに単位(単位なしは[1])を併せて確認

$$K = K_e K_t K_m$$

$$[rpm / V] = [A / V] [Nm / A] [rpm / Nm]$$

一次遅れの系のパラメータ

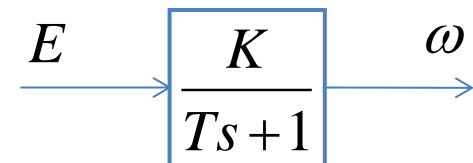


$$y(t) = K(1 - e^{-\frac{t}{T}})u(t)$$

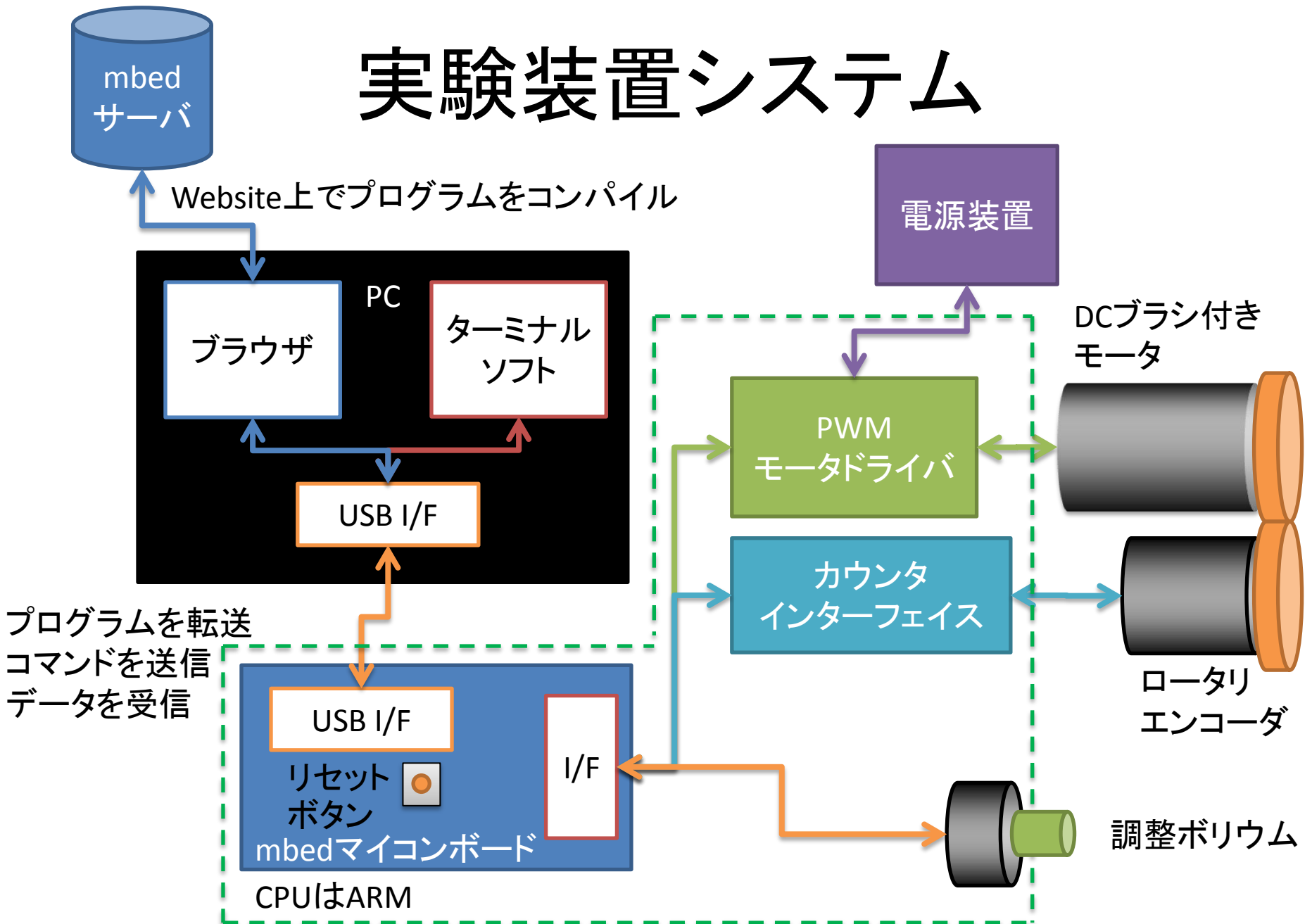
ラプラス変換した伝達関数

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1}$$

- T : 時定数 ($1 - (1/e) \doteq 63.2\%$ になるまでの時間)
- K : ゲイン係数
- $4 \sim 5T$: 整定時間

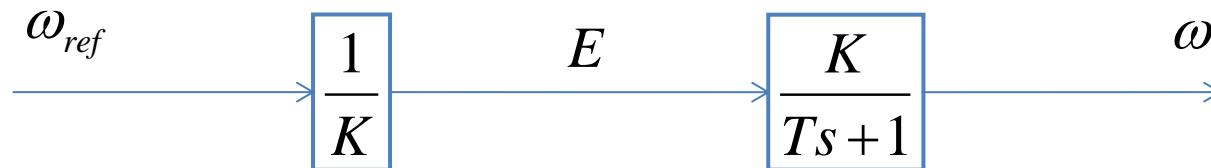


実験装置システム

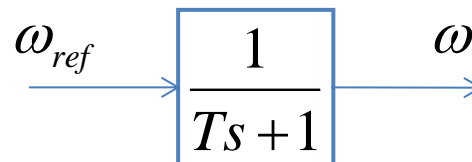


ゲイン係数Kの扱い

- ゲイン係数は電圧と回転数の関係を示す. 単位は[rpm/V]
例) 1Vで1000rpmになるモータであれば $K=1000$ [rpm/V]
- 実験装置では, 回転数を直接指定できるようにしてあるので, 以下のような工夫がなされている.



結果的には

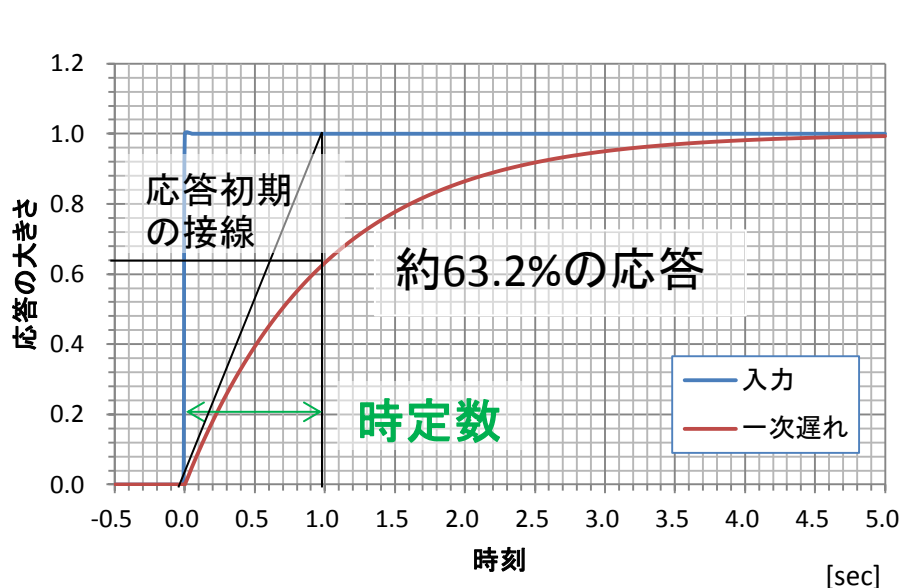


ではKが消えているが, 計算上は意識しておくことが必要.

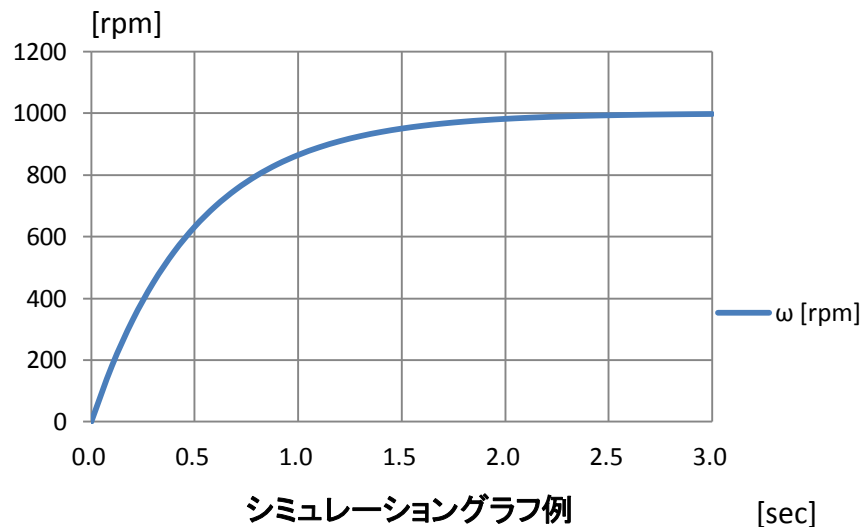
ここで実験1 モータの「素」の特性を知る

課題3～4

モータのそのものの特性を測定→パラメータを同定→制御モデルを決定



$$y(t) = K(1 - e^{-\frac{t}{T}})u(t)$$



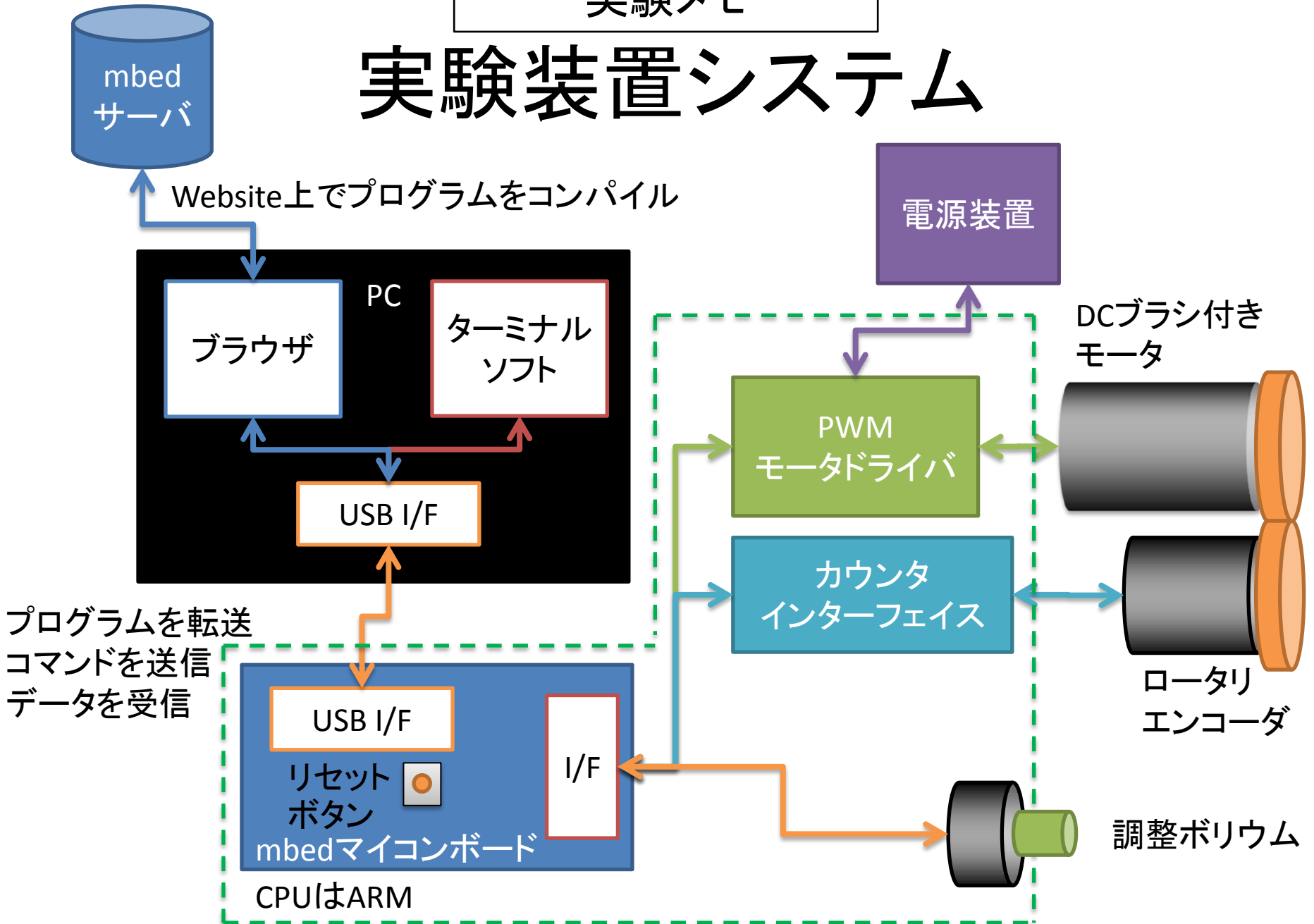
T: 時定数 (1 - (1/e) ≒ 63.2% になるまでの時間)

K: ゲイン係数=1に実験プログラム内で調整

4～5T: 整定時間

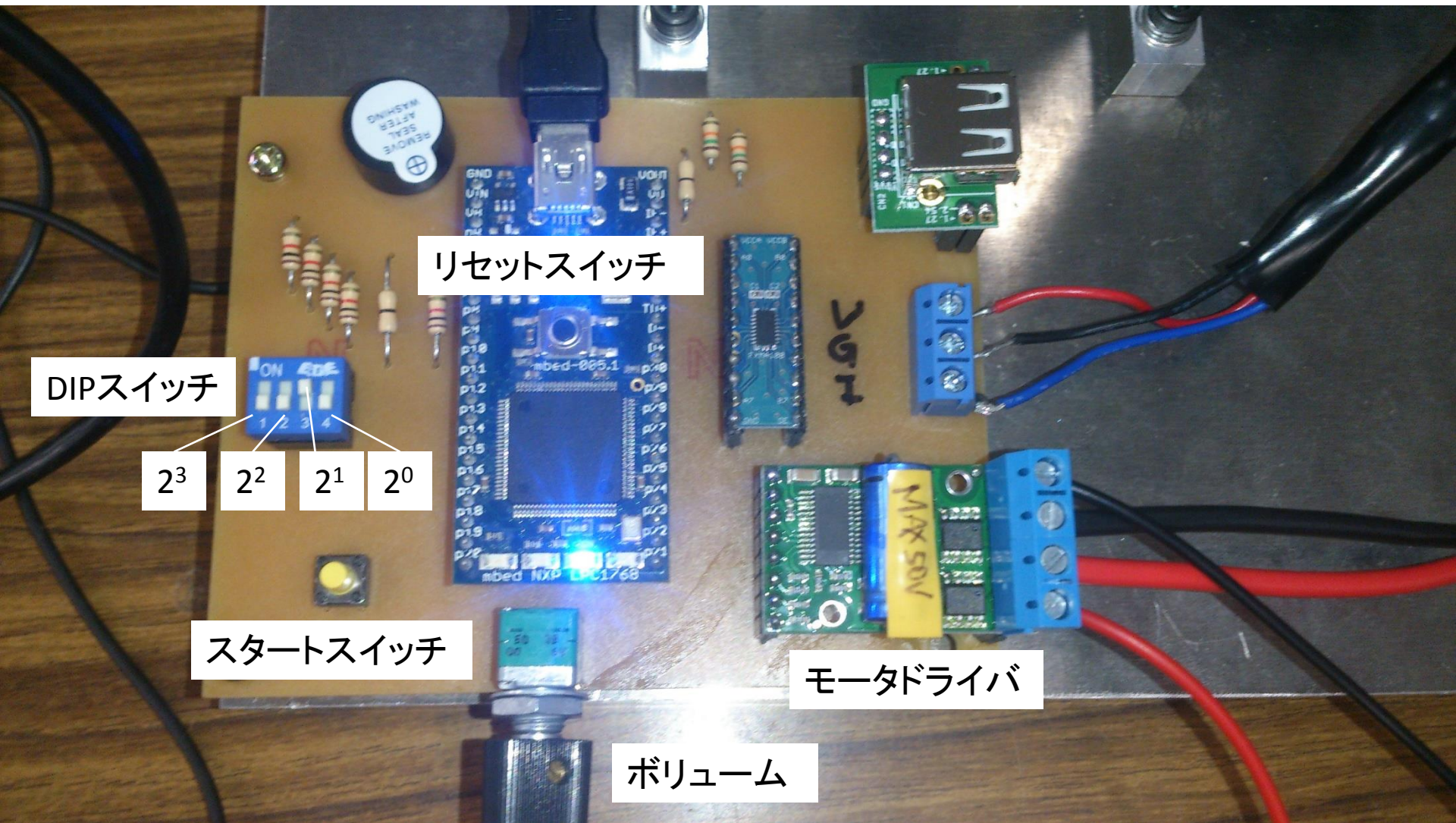
実際の応答と求めたパラメータを上記の式に代入したグラフを比較してみよう

実験装置システム



実験メモ

実験装置の回路周辺



リセットスイッチ

DIPスイッチ

2^3

2^2

2^1

2^0

スタートスイッチ

モータドライバ

ボリューム

課題3と4について

- 無駄時間Lは求める必要はありません。
(僅少で難しい.)
- 係数Kについては回転数/モータ電源電圧
- 時定数Tは応答が63.2%に達した時間から求めてください。
- Tを理論式に代入し, tを適当な刻みで変化させ, Excelでグラフを作成してください。
入力値は右記電圧値。
- 説明と考察は必ず書いてください。

(参考)

事実: 現象そのもの, 実験結果そのもの

観察: 努めて客観的立場からの現象・状態の記録

考察: 客観的事実(実験値)を基に論理的に得た知見(ほぼ事実を説明)

推論: 客観的事実(実験値)と自らの知見から導出される結論や新たな情報

予測: 従来知見を基に考え得る未知の事象への解釈(考察を伴うことで妥当性向上)

推測: 従来知見を基に考え得る既知の事象への解釈(考察を伴うことで妥当性向上)

解釈・想像: 自らの知見による主観に基づく考え(実験時の状態など未測定事象)

感想: 主観による意見, 情緒的な表現. 事実そのものにはほとんど言及していない。

モータ	駆動電圧	出力	起動トルク
タミヤモータ	7.2 V	63.2 W	196 mNm
マブチモータ	24 V	137W	388 mNm
シチズンモータ	12 V	14.6 W	118 mNm
マクソンモータ	48 V(30V, 24V)	150W	2560 mNm

$$y(t) = K \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) u(t)$$

1. 制御とは何か
2. 制御対象を知る
- 3. 制御系を作る**
4. 制御系の設計・改善

課題5～6に関係.

モータを電圧だけで制御できる？

1. 1次遅れの応答であることは分かっている
 - 応答は $y(t) = K(1 - e^{-\frac{t}{T}})u(t)$ で間違いない
2. 電圧と回転数の関係は分かった

制御は完璧ではないか？

でもそんなことはない。

何故か？

外乱の影響を受けることが目に見えている。

$$\omega(s) = \frac{\frac{K_E K_I K_M}{1 + K_E K_I K_M K_G}}{\frac{T_M}{1 + K_E K_I K_M K_G} s + 1} E + \frac{\frac{K_M}{1 + K_E K_I K_M K_G}}{\frac{T_M}{1 + K_E K_I K_M K_G} s + 1} \tau$$

オープンループ制御系

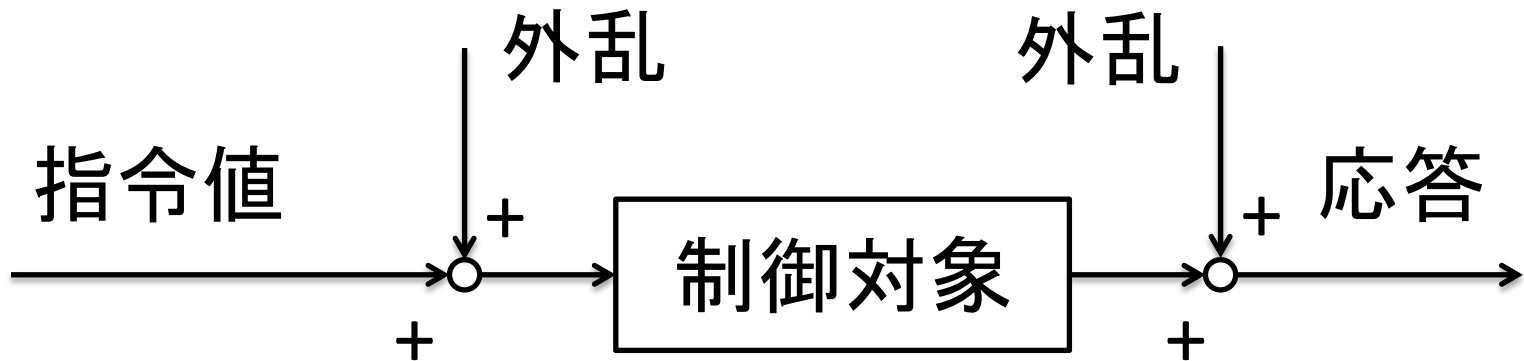


利用できる条件

1. 入力(指令値)に対する出力(応答)の関係が一意に決まる
2. 制御対象の特性が変わらない
3. 外乱の影響が**僅少**か、**深刻でない**と判断可能な場合

応答に一意性・
再現性がある

オープンループ制御系で起こる問題

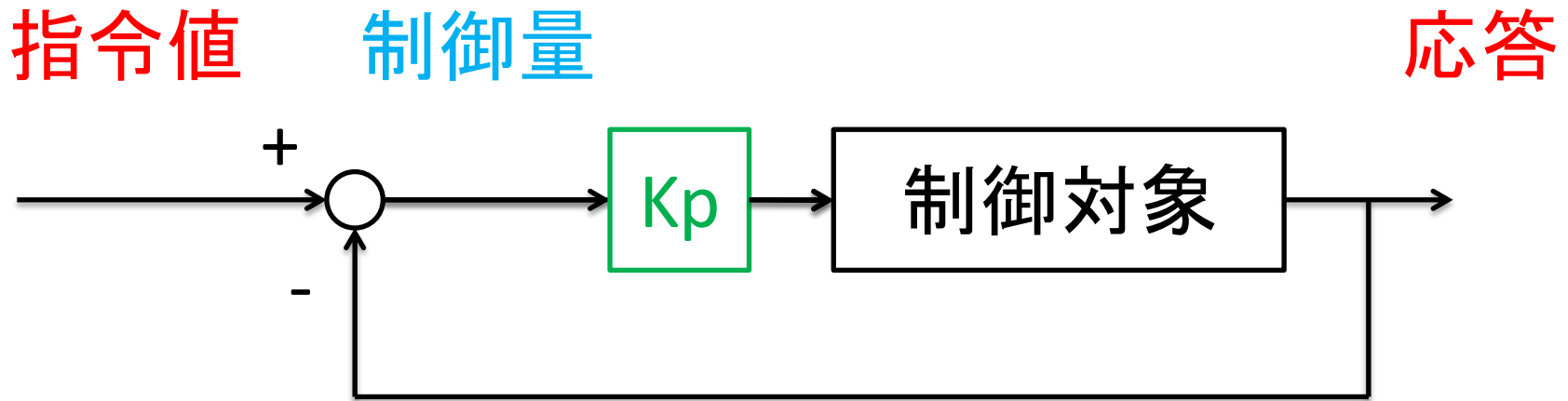


- 外乱が加わってしまうと応答が変化
- 影響を取り除く手段がない

制御対象の素の特性を利用する方法
必ずしも完全ではない制御法

単純フィードバック制御系

(比例フィードバック制御系)

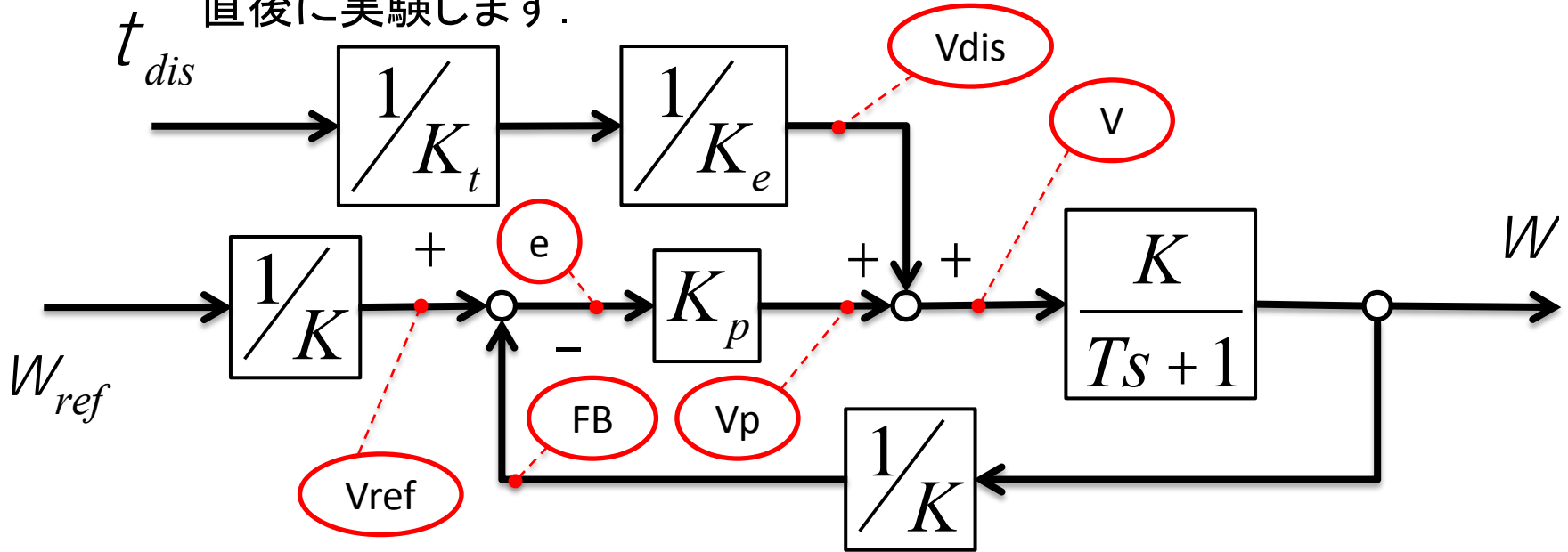


- 外乱の影響で応答が変わる場合
 - 応答(出力)と指令値(入力)を比較
 - 入力ー出力 → **偏差**を**制御量**として修正に利用

ここで課題5

レポートにはもとの伝達関数と比べてどのように変化したか示しておくこと

直後に実験します。



ヒント) 連立させる式

$$V_{ref} = \frac{1}{K} W_{ref}$$

$$e = V_{ref} - FB$$

$$V_p = K_p e$$

$$FB = \frac{1}{K} W$$

$$V_{dis} = \frac{1}{K_e} \frac{1}{K_t} \tau_{dis}$$

$$V = V_p + V_{dis}$$

$$W = \frac{K}{Ts+1} V$$

求める式の形

$$W = ??? \frac{W_{ref}}{K} + ??? \frac{t_{dis}}{K_t K_e}$$

または $K = K_e K_t K_m$ を利用して

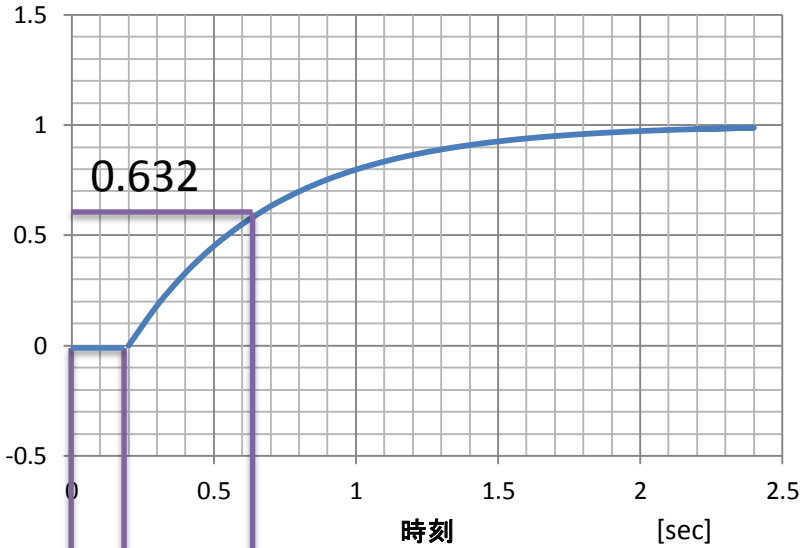
$$W = ??? \frac{W_{ref}}{K} + ??? \frac{t_{dis}}{K_t K_e} = ??? W_{ref} + ??? t_{dis}$$

ここで実験2・1

課題6 フィードバック制御系の理解とゲイン
(感度)の調整

制御系感度調整実験メモ

$$y(t) = ?(1 - e^{-\frac{t}{T}})$$



T: 時定数 (1-(1/e) ≒ 63.2%になるまでの時間)
 K: ゲイン係数
 4~5T: 整定時間

1次遅れ: 時定数Tを計測

無駄時間: 初期に全く応答しない時間Lを計測

手法	比例ゲインKp
Ziegler and Nichols	$\frac{T}{L}$
Chien, Hrones and Reswick	$\frac{0.3(0.7)T}{L}$
Cohen and Coon	$\frac{T}{L} + \frac{1}{3TR}$

	比例ゲイン	
	Kp	
	減少	増加
立上がり時間	長	短
行過ぎ量	小	大
整定時間	要調整	

$$G(s) = \frac{\frac{K_p K}{Ts + 1}}{1 + \frac{K_p K}{Ts + 1} \frac{1}{K}} = \frac{\frac{K_p K}{1 + K_p}}{\frac{T}{1 + K_p} s + 1}$$

1. 制御とは何か
2. 制御対象を知る
3. 制御系を作る
- 4. 制御系の設計・改善**

課題7～8に關係.

実験2.1を通しての疑問

思い通り応答にならなかった？

1次遅れ系に比例フィードバック制御を掛けた式を見てみよう

$$W(s) = \frac{\frac{K_p}{1+K_p} K}{\frac{1}{1+K_p} Ts + 1} \frac{W_{ref}}{K} + \frac{\frac{1}{1+K_p} K}{\frac{1}{1+K_p} Ts + 1} \frac{t_{dis}}{K_t K_e}$$

ここで $K = K_e K_t K_m$ を利用して

$$W(s) = \frac{\frac{K_p}{1+K_p}}{\frac{1}{1+K_p} Ts + 1} W_{ref} + \frac{\frac{1}{1+K_p}}{\frac{1}{1+K_p} Ts + 1} K_m t_{dis}$$

Kpの値によって指令値と外乱に対する感度を変えることができそう

Kpの値によって元の時定数より時定数を短くできそう

Kpの値によって収束時の応答が変化しそう

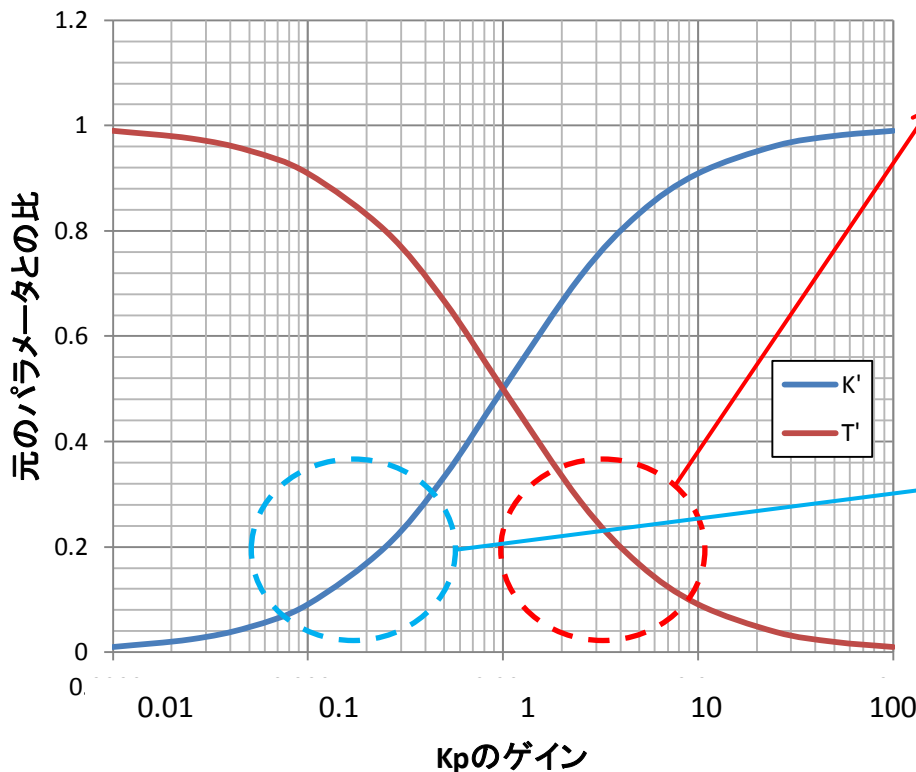
外乱は機械系の特性に依存しそう

外乱を無視して 比例フィードバック系を考えてみよう

$$G(s) = \frac{\frac{K_p K}{Ts + 1}}{1 + \frac{K_p K}{Ts + 1} \frac{1}{K}} = \frac{\frac{K_p K}{1 + K_p}}{\frac{T}{1 + K_p} s + 1} = \frac{K'}{T' s + 1}$$

例

10Vで10000rpmのモータの場合
K=1000[rpm/V]となる



Kpを上げると応答が速くなる時定数が1/5(元の5倍速く収束)の実システムが本当に実現できるだろうか？
やるとしたら、一時的に10倍位のゲイン(電圧)をかけることになる。

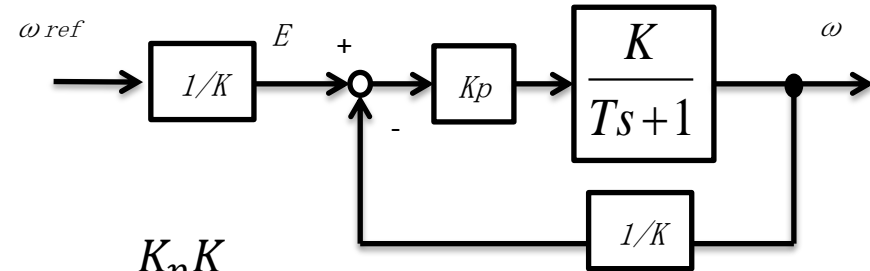
Kpを下げると現実的な時定数(90%でちょっと速い)になるが、応答が1/5に下がった実システムが果たして役立つだろうか？

単純な比例フィードバックだけではダメな気がしないだろうか？

単純比例フィードバック制御の問題

- 定常偏差(ズレ)が生じる。

これがあるので制御器, 制御対象の感度(ゲイン)が低いと誤差が増える



$$G_c(s) = \frac{K_p K}{Ts + 1} \left(1 + \frac{K_p}{Ts + 1} \right)$$

フィードバックを掛けない

$$\omega(t) = K_p K (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \omega_{ref}$$

フィードバックを掛けた



$$\omega(t) = \frac{K_p}{1 + K_p} K (2次) \omega_{ref}$$

- 外乱あるいはモデル化していない要素の影響が大きくて, 欲しい応答にならない。

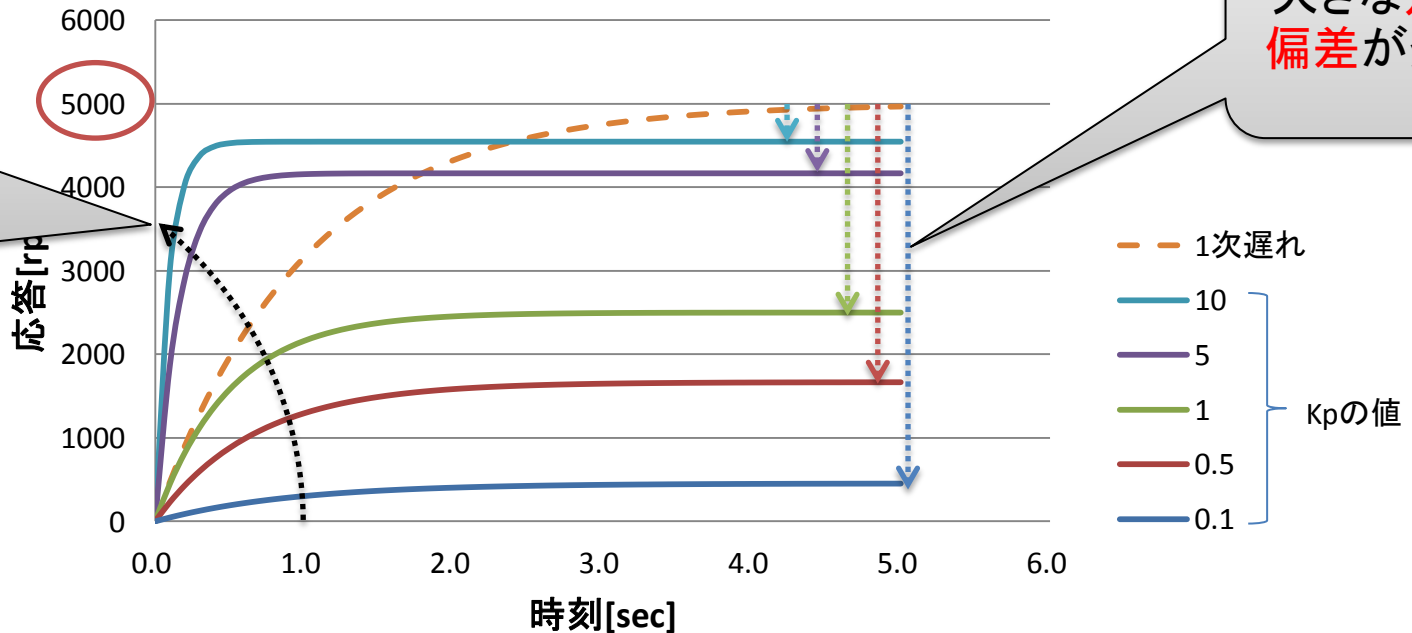
フィードバックの仕組みを用いても必ずしも欲しい応答特性であるとは限らない

比例フィードバック制御した時の応答

例

10Vで10000rpmのモータの場合 $K=1000[\text{rpm/V}]$ となる

Kpを変化させたときのフィードバック制御系の応答: 入力5V

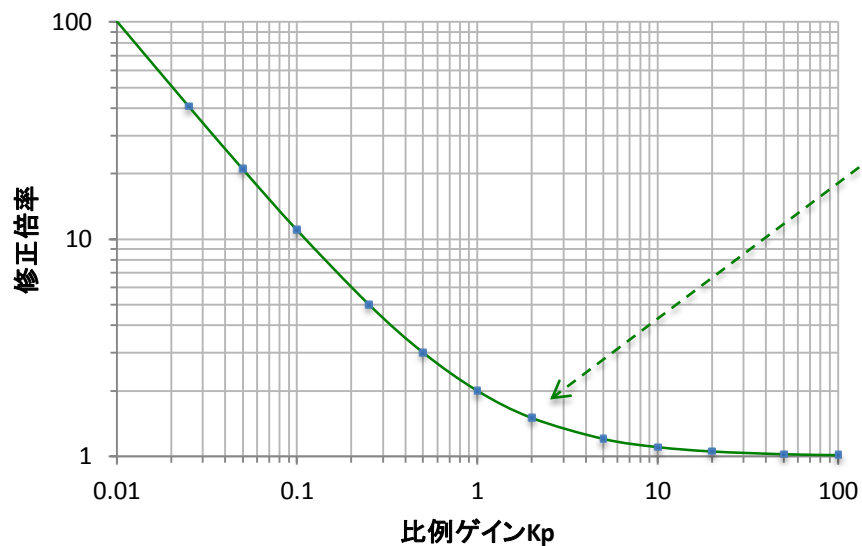
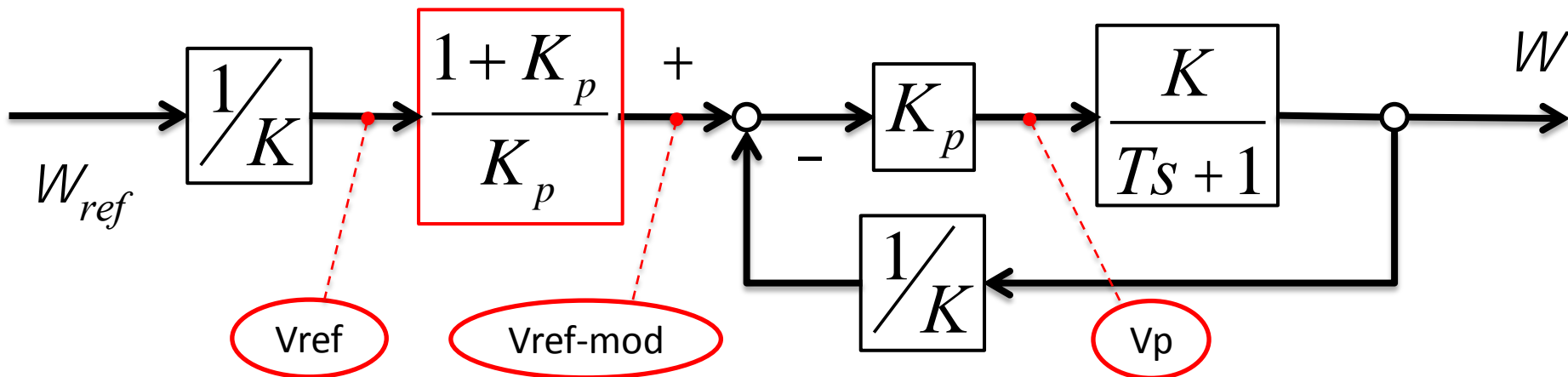


期待したい応答

$K=1000[\text{rpm/V}]$, $T=1.0[\text{sec}]$ のモータで
 入力 $u=5[\text{V}]$ ではオープンループ制御
 で時定数 $1[\text{sec}]$, 定常応答 $5000[\text{rpm}]$
 となるがこれより改善された応答

Kp	0.1	0.5	1	5	10
K'	90.9	333	500	833	909
T'	0.909	0.667	0.500	0.167	0.0909

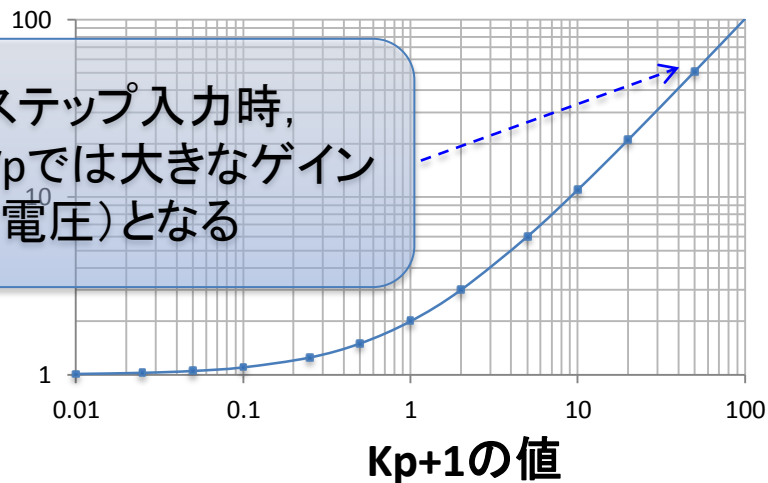
定常偏差を見越した修正



比例ゲインと修正倍率

$K_p=1.0$ ではゲインが半分になるのでその分を修正して2倍しておく。

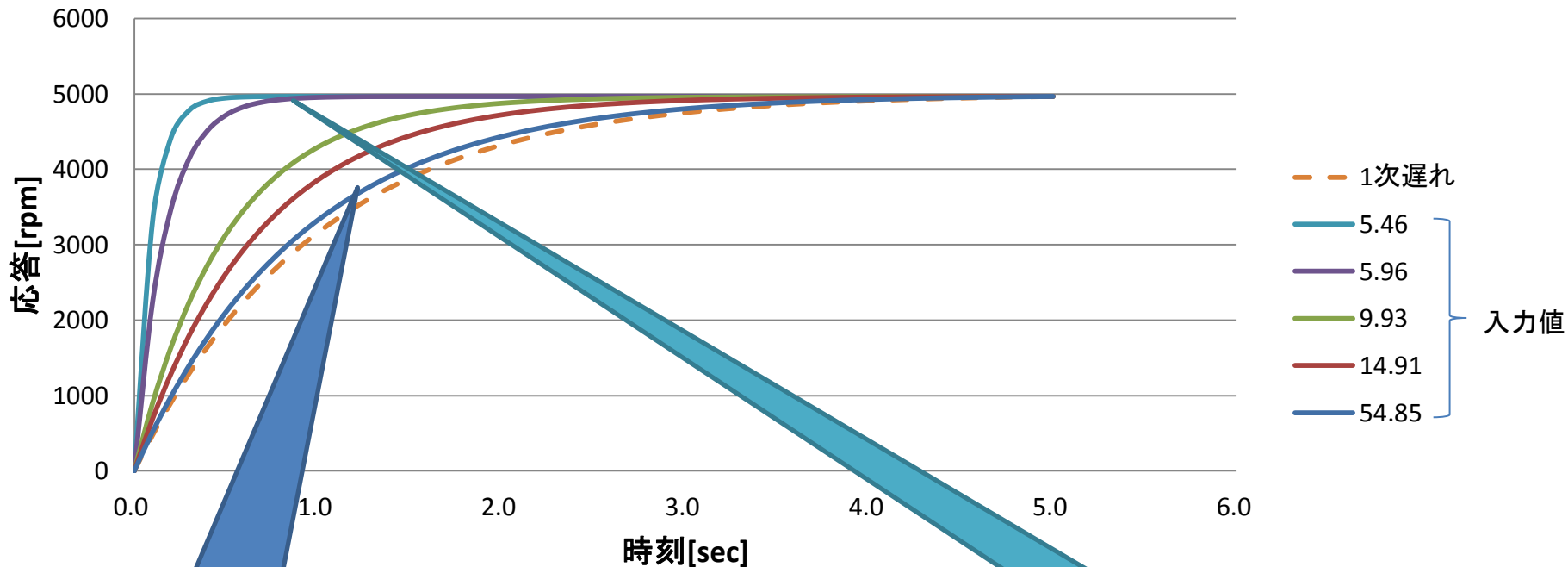
ステップ入力時、 V_p では大きなゲイン(電圧)となる



Kp+1の値

入力値で定常応答の調整を試みる

定常偏差を見越した入力を加えたときのフィードバック制御系の応答



Kp	0.0001	0.0005	0.001	0.005	0.01
u' [V]	54.9	14.9	9.93	5.96	5.46
補正比	11.0	3.00	2.00	1.20	1.10
T' / T	0.909	0.667	0.500	0.167	0.0909

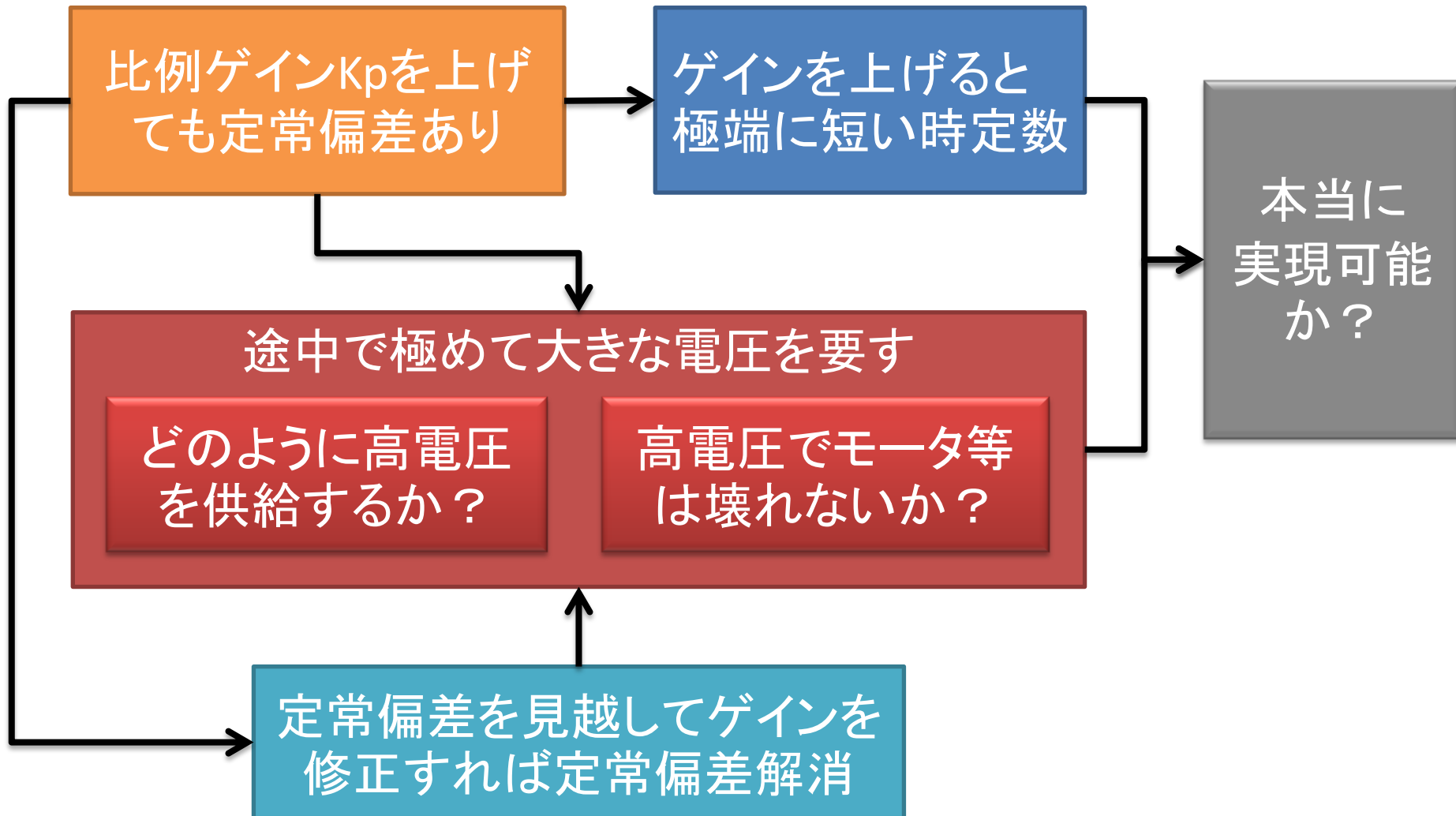
制御器ゲイン
小さ過ぎ
大きな入力を要し、
応答特性改善僅か

フィードバックの効果が薄い

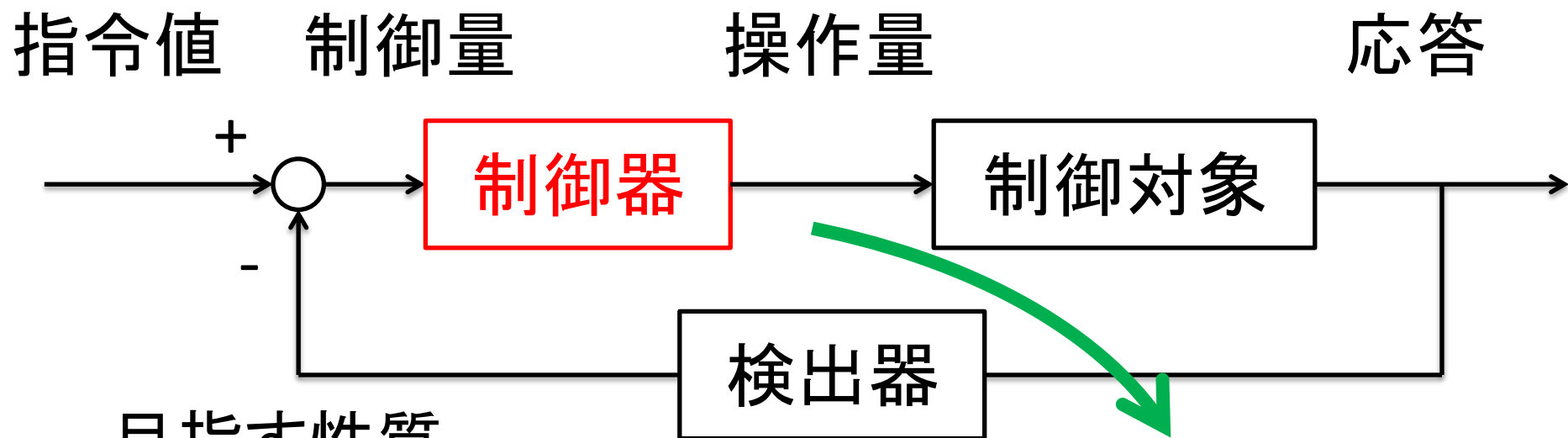
制御器ゲインを
大きくすると
通常の入力で、
応答特性改善

もともとの入力値は5V

問題点のまとめ



フィードバック制御系の設計



目指す性質

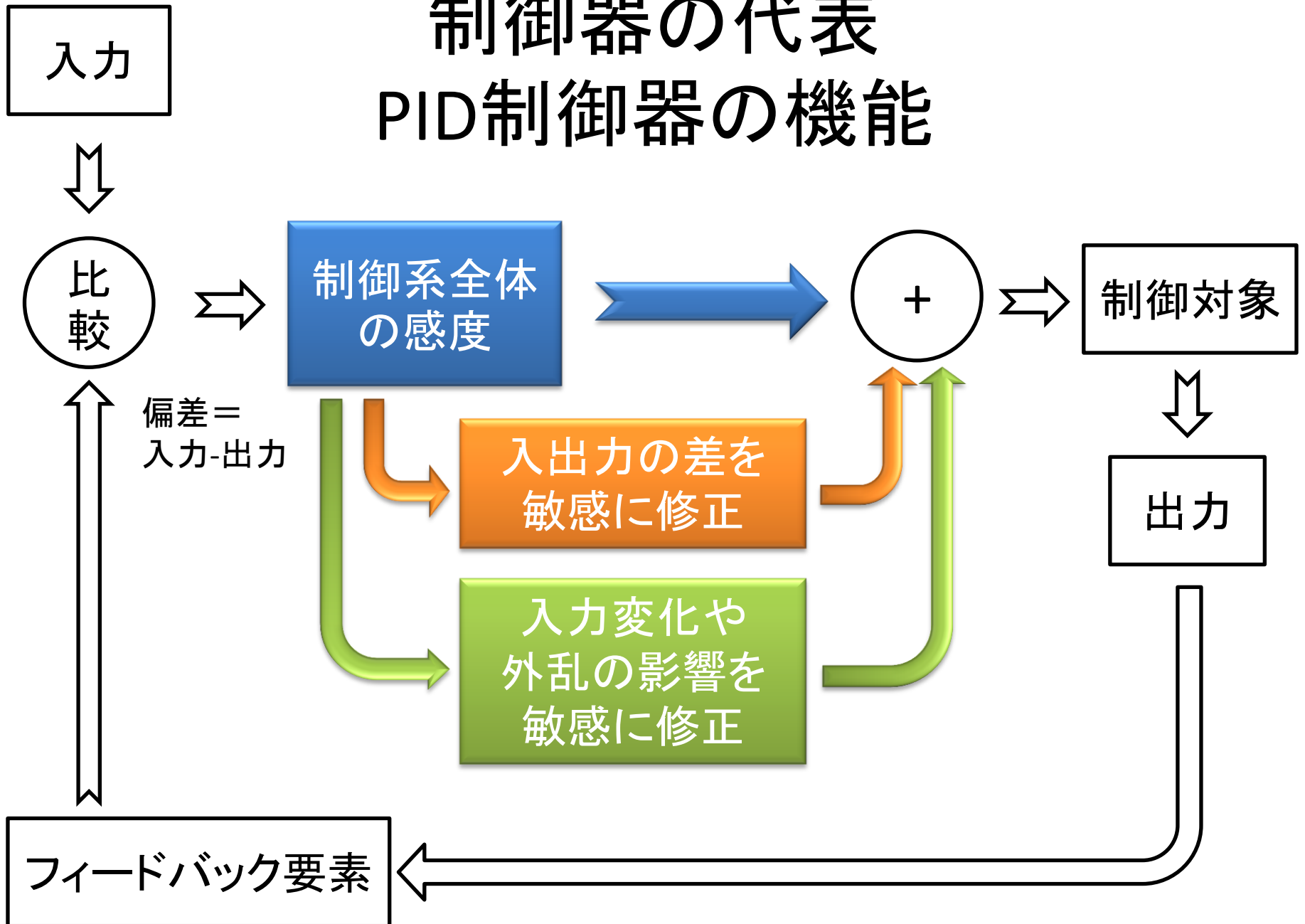
- 安定した(振動しない)応答
- 必要な範囲の高速な応答
- 変化する目標値への追従性向上
- 外乱の影響の抑制



- 制御対象の特性変動による影響の抑制

制御器の代表

PID制御器の機能



PID各要素について言い換えると

	比例(P)要素	積分(I)要素	微分(D)要素
名前の由来 修正対象	偏差に比例 現在の偏差	偏差の積分に比例 偏差の蓄積(過去)	偏差の微分に比例 偏差の変化(未来)
機能は？	基本的な感度	偏差をなくす	指令値に追従
何に敏感か？	<ul style="list-style-type: none"> 偏差そのもの 外乱の影響 	<ul style="list-style-type: none"> 残っている偏差 実モデルと制御モデルの誤差 外乱の影響 	<ul style="list-style-type: none"> 指令値の変化(偏差の変化) 外乱の影響
敏感な周波数特性	全帯域	低周波帯域	高周波帯域
働きを強めると？	<ul style="list-style-type: none"> 高速な応答 偏差の減少 安定性減少 	<ul style="list-style-type: none"> 定常偏差解消 行き過ぎの増加 安定性減少 	<ul style="list-style-type: none"> 高速な追従性 滑らかな収束(偏差の変化を抑制) 行き過ぎの抑制 安定性減少
扱いにくい点は？	<ul style="list-style-type: none"> 定常偏差解消せず 	<ul style="list-style-type: none"> 行き過ぎが発生 収束に時間が掛かる 変化に対して限界 	<ul style="list-style-type: none"> 定常偏差解消せず 高速外乱(ノイズ)の影響大

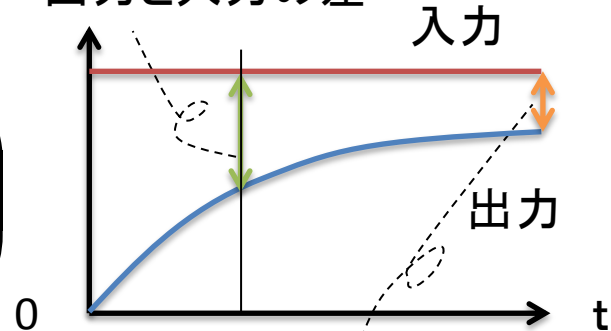
PIDコントローラ

機能面での説明

$$G_C(s) = \left(K_P + K_I \frac{1}{s} + K_D s \right)$$

$$= K_P + \frac{K_P}{T_I s} + K_P T_D s$$

<偏差>
ある時刻の
出力と入力の差

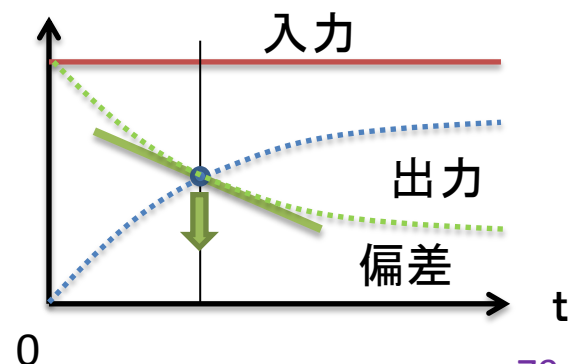
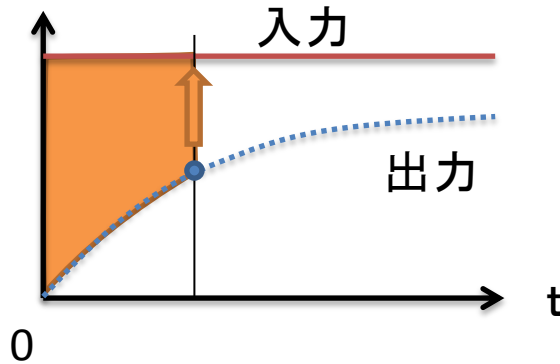
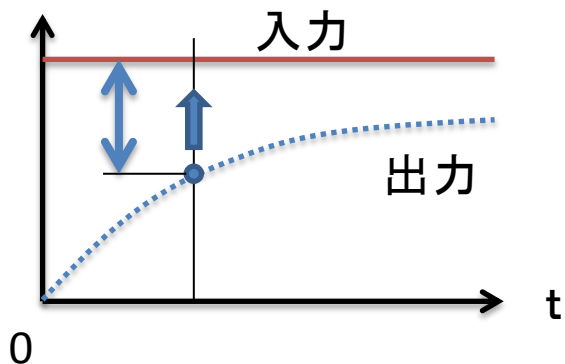


<定常偏差>
ずっと残る
出力と入力の差

比例要素
現在の偏差を減らす

積分要素
偏差の蓄積を減らす

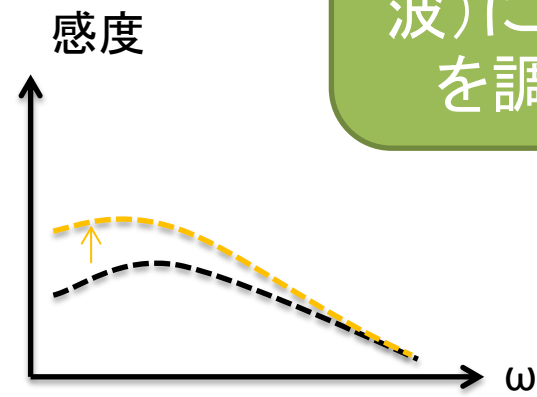
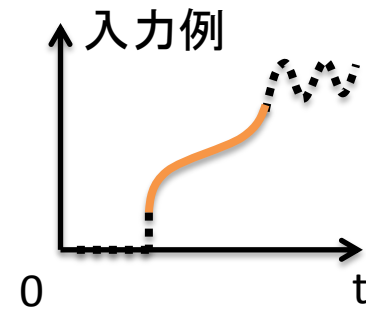
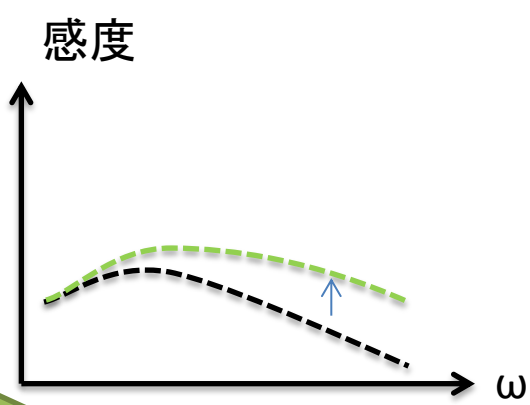
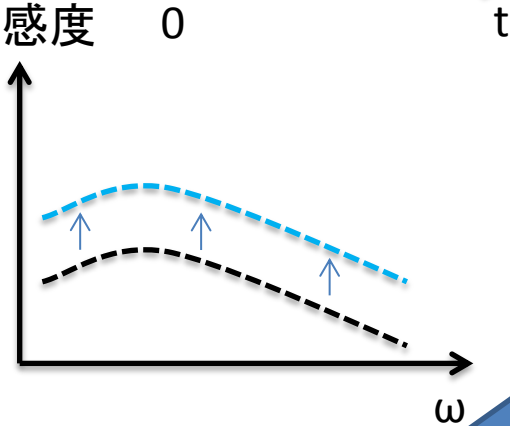
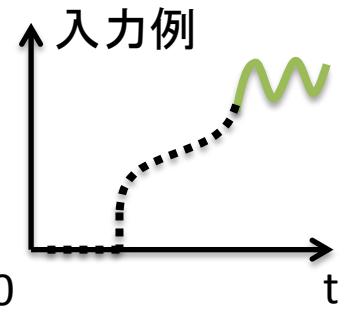
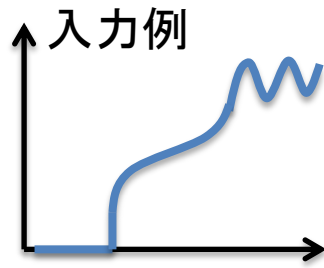
微分要素
偏差の変化を減らす



PIDコントローラ

周波数特性での説明

$$G_C(s) = \left(K_P + K_I \frac{1}{s} + K_D s \right)$$
$$= K_P + \frac{K_P}{T_I s} + K_P T_D s$$



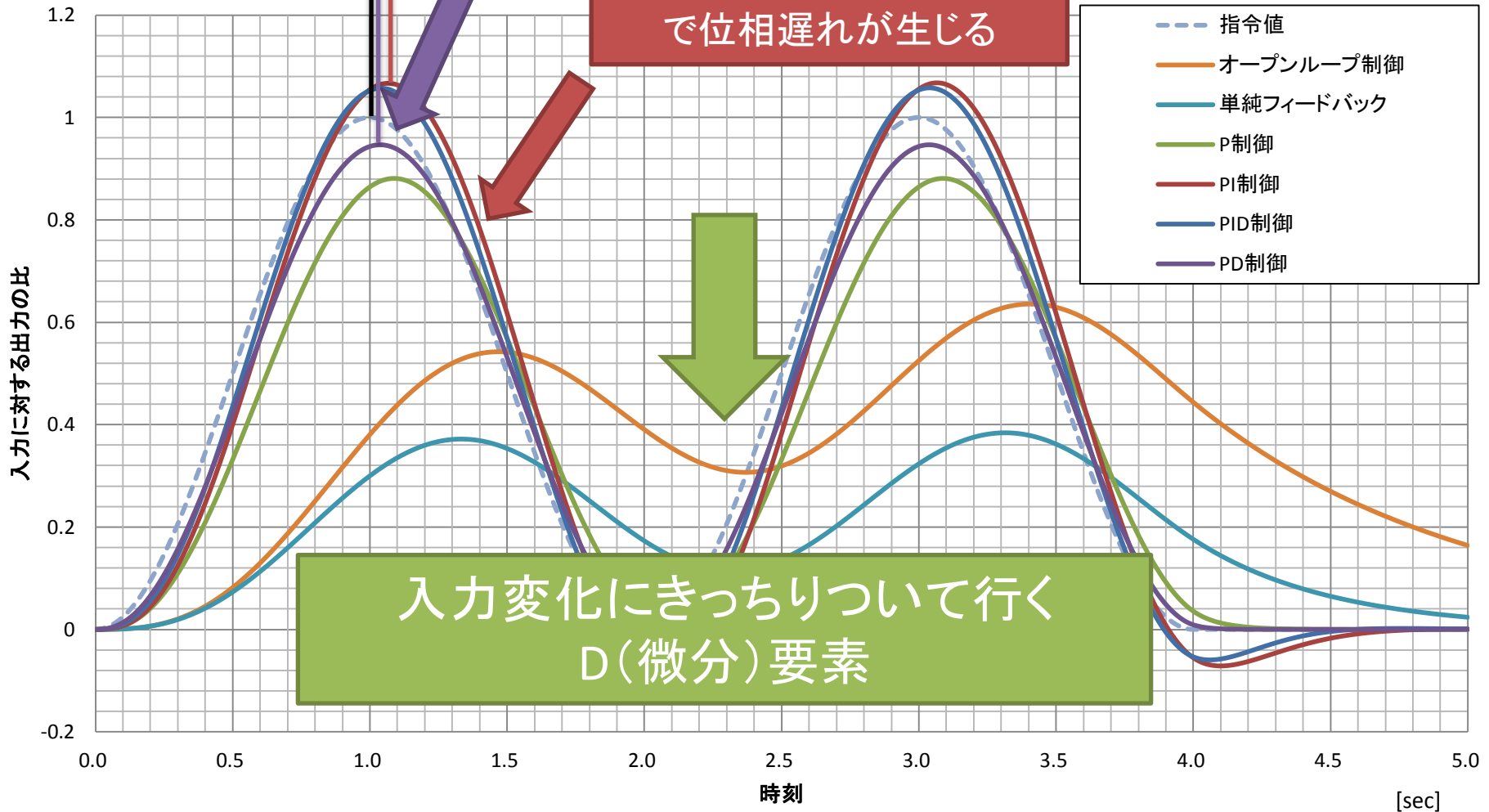
比例要素
制御系全体の感度を調整する要素

積分要素
ゆっくりした入力変化(低周波)に追従する感度を調整する要素

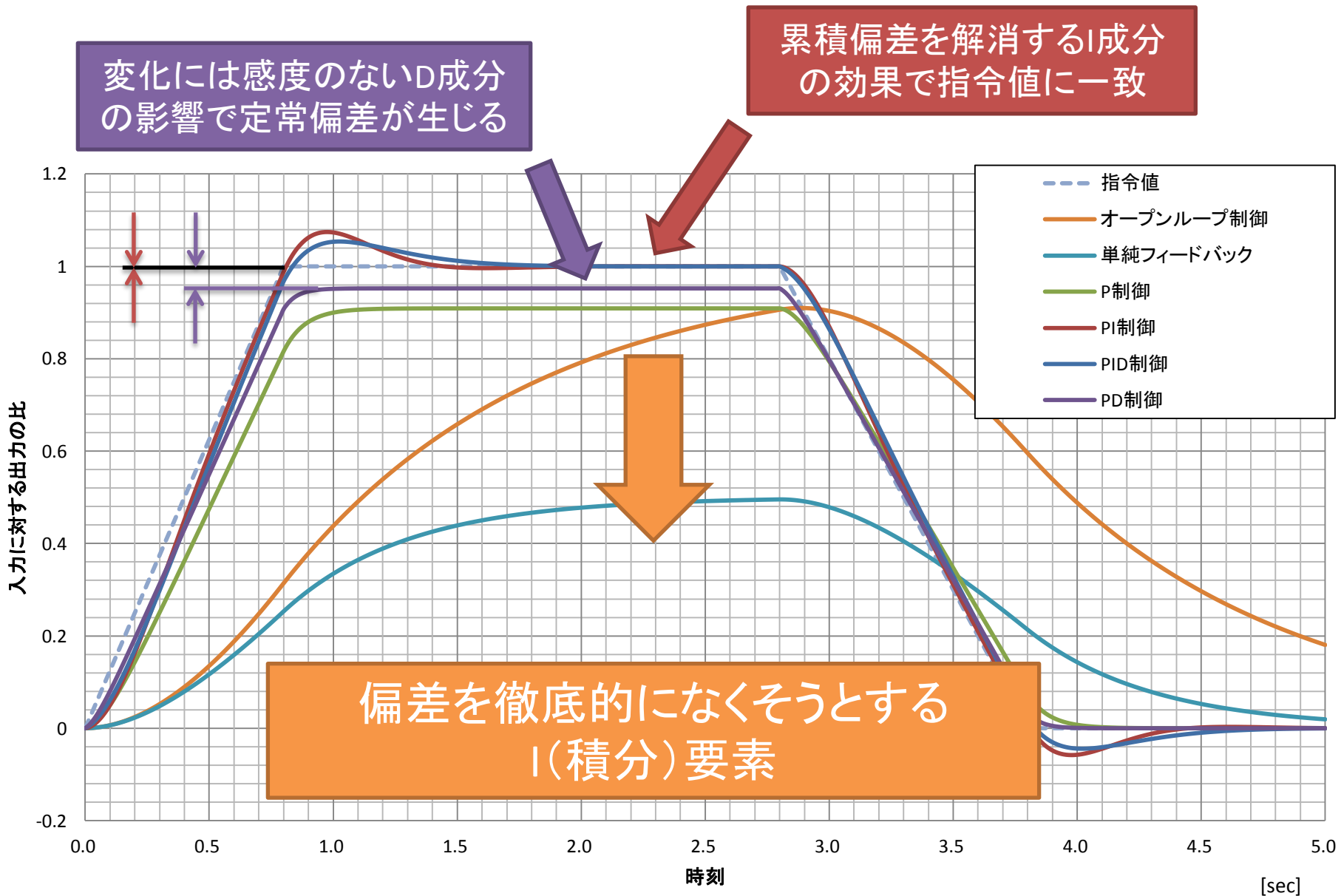
微分要素
速い入力変化(高周波)に追従する感度を調整する要素

速応性に優れるD成分の
効果で位相遅れが少ない

速応性に劣るI成分の影響
で位相遅れが生じる



2周期の正弦波に対する各制御方式の応答の比較

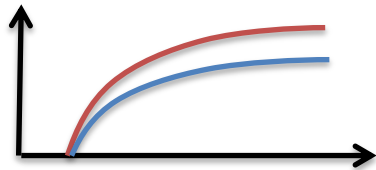


台形指令値に対する各制御方式の応答の比較

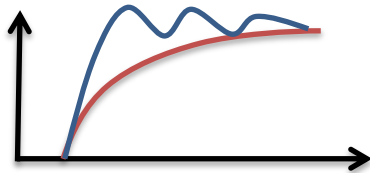
実験2.1では

思った通りの応答にならなかった

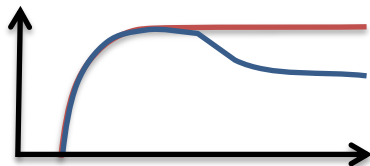
入力(目標)値に応答が達しない。



K_p の値によって挙動が乱れる

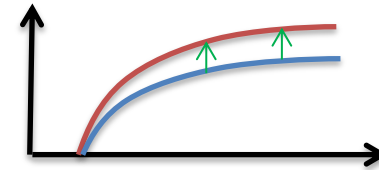


負荷に外乱が加わると
応答がずれたままついてこない

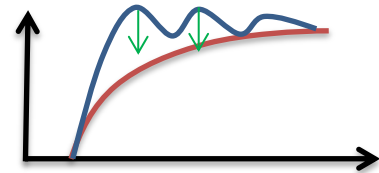


どのようにしたいのか？

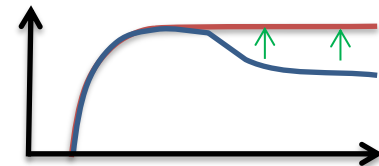
定常偏差をなくしたい



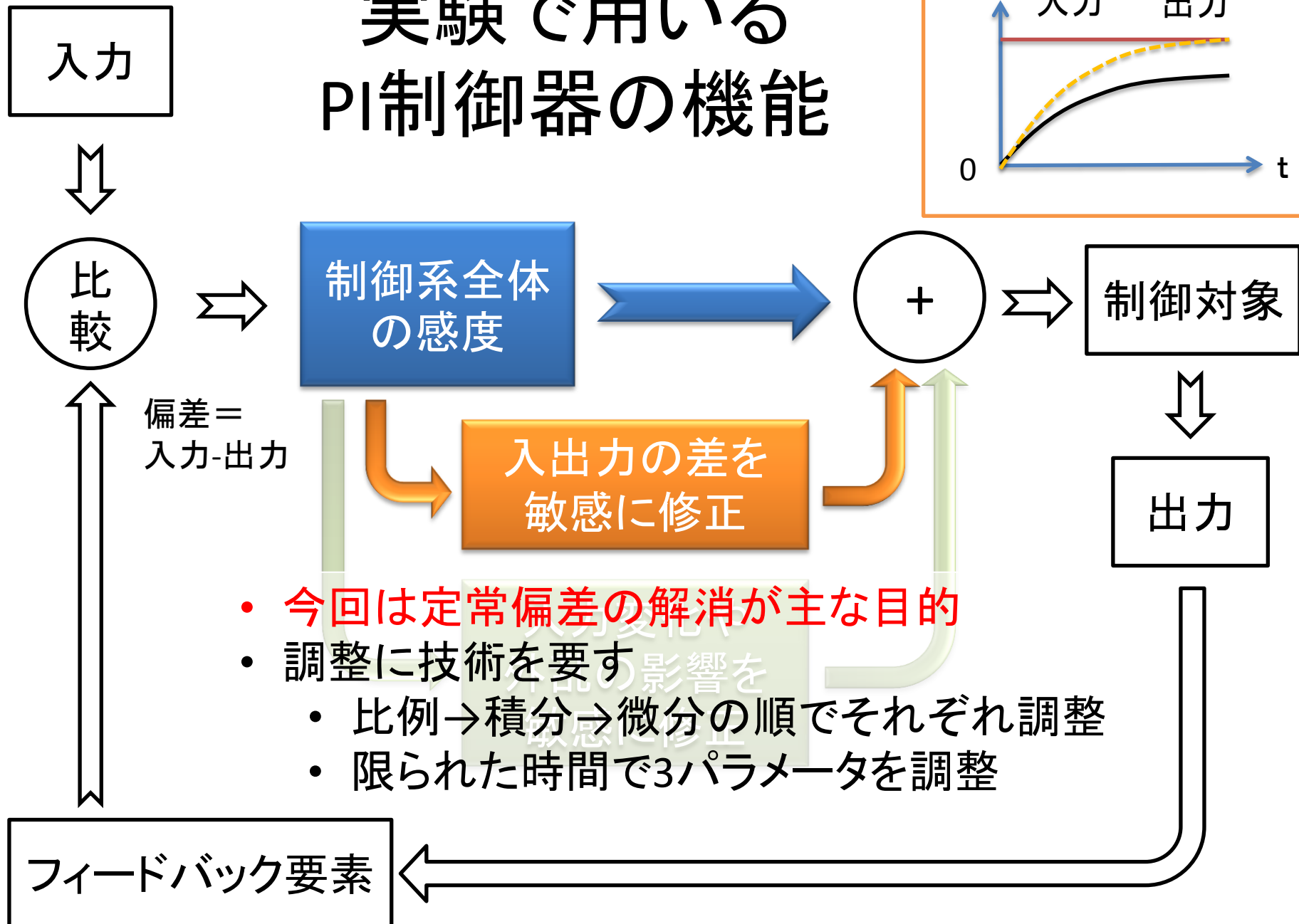
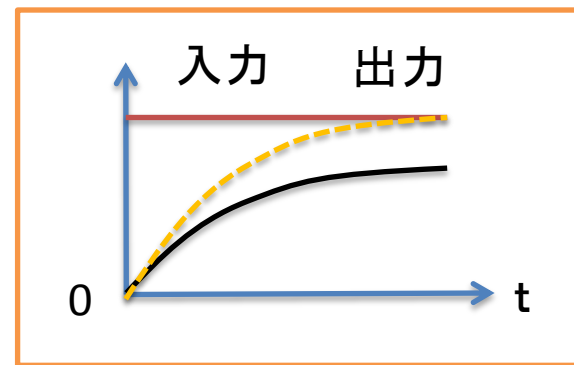
滑らかな挙動にしたい



外乱が加わっても回復させたい
外乱がなくなったらすぐに回復させたい



実験で用いる PI制御器の機能

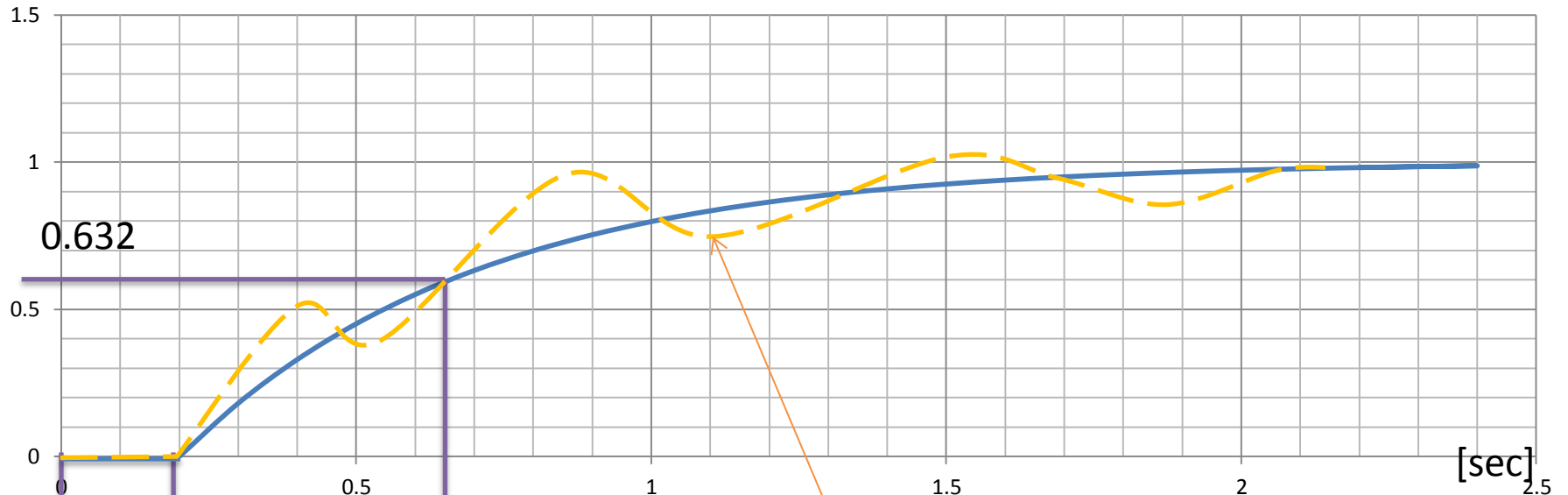


- **今回は定常偏差の解消が主な目的**
- 調整に技術を要す
 - 比例→積分→微分の順でそれぞれ調整
 - 限られた時間で3パラメータを調整

制御系の調整法： ステップ応答法

ステップ応答から制御器を設計

無駄時間 + 1次遅れの系を前提



高次系などはこの応答から外れることもあるが、傾向から近い値を算出して設計(再調整の必要性は基本)

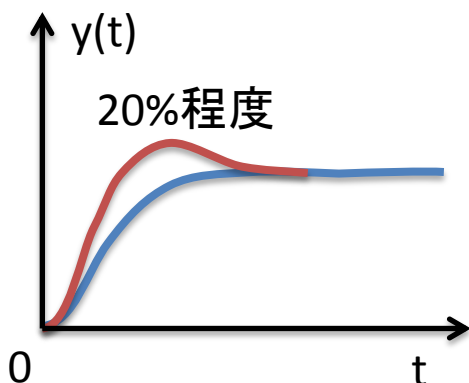
→ 1次遅れ: 時定数Tを計測
→ 無駄時間: 初期に全く応答しない時間Lを計測

本日の実験では

- ステップ応答法を
基に試行錯誤して
調整する

制御器	比例ゲインKp		積分時間TI	微分時間TD
P	1/(RL)	T/L	-	-
PI	0.9/(RL)	0.9T/L	3.33L	-
PID	1.2/(RL)	1.2T/L	2L	0.5L

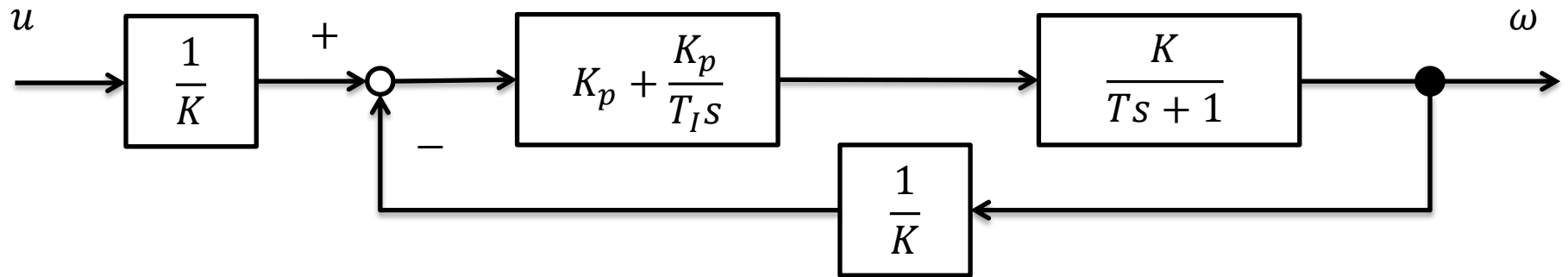
PI制御を掛けると2次遅れの
の応答となる



	制御器	比例ゲインKp		積分時間TI	微分時間TD
行き過ぎなし	P	0.3/(RL)	0.3T/L	-	-
	PI	0.35/(RL)	0.35T/L	1.2T	-
	PID	0.6/(RL)	0.6T/L	T	0.5L
行き過ぎ20%	P	0.7/(RL)	0.7T/L	-	-
	PI	0.6/(RL)	0.6T/L	T	-
	PID	0.95/(RL)	0.95T/L	1.35T	0.47L

制御器	比例ゲインKp	積分時間TI	微分時間TD
P	$1/(RL) + 1/(3TR)$	-	-
PD	$5/(4RL) + 1/(6TR)$	-	$(6L - 2(L^2/T))/(22 + 3(L/T))$
PI	$9/(10RL) + 1/(12TR)$	$(30L + 3(L^2/T))/(9 + 20(L/T))$	-
PID	$4/(3RL) + 1/(4TR)$	$(32L + 6(L^2/T))/(13 + 8(L/T))$	$4L/(11 + 2(L/T))$

PI制御を掛けると2次遅れの 応答となるのは何故か？



$$\omega(s) = \frac{\left(K_p + \frac{K_p}{T_I s}\right) \frac{K}{Ts + 1} \omega_{ref}(s)}{1 + \left(K_p + \frac{K_p}{T_I s}\right) \frac{K}{Ts + 1} \frac{1}{K}} = \frac{\frac{K_p K}{T} s + \frac{K_p K}{T_I T} \omega_{ref}(s)}{s^2 + \frac{1 + K_p}{T} s + \frac{K_p}{T_I T} K} \omega_{ref}(s)$$

$$= \frac{KT_I \omega_n^2 s + K \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \frac{\omega_{ref}(s)}{K} = \frac{T_I \omega_n^2 s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \omega_{ref}(s)$$

PI制御による応答

指令値を大きさ Ω_{ref} のステップ入力とすると

$$W(s) = \frac{T_I W_n^2 s + W_n^2}{s^2 + 2Z W_n s + W_n^2} \frac{W_{ref}}{s}$$

$$= \frac{W_n^2}{s^2 + 2Z W_n s + W_n^2} T_I W_{ref} + \frac{W_n^2}{s^2 + 2Z W_n s + W_n^2} \frac{1}{s} W_{ref}$$

$$W_n = \sqrt{\frac{K_p}{T_I}} \sqrt{\frac{1}{T}}$$

$$Z = \frac{1}{2} \frac{1 + K_p}{\sqrt{T}} \frac{1}{\sqrt{\frac{K_p}{T_I}}}$$

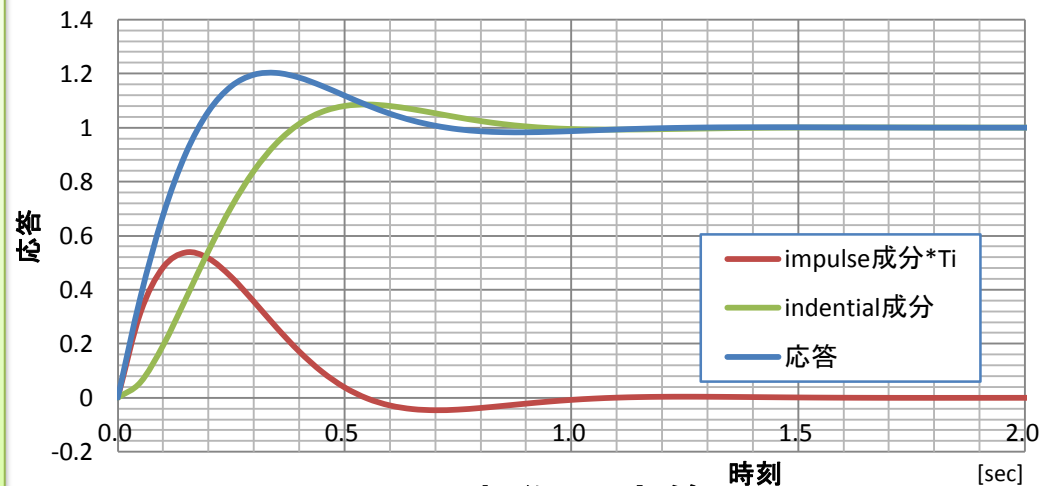
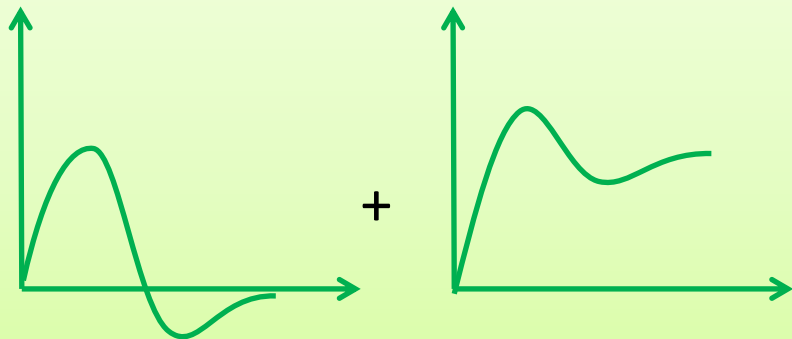
2次遅れのインパルス応答

2次遅れのステップ応答

応答グラフの概形

インパルス応答

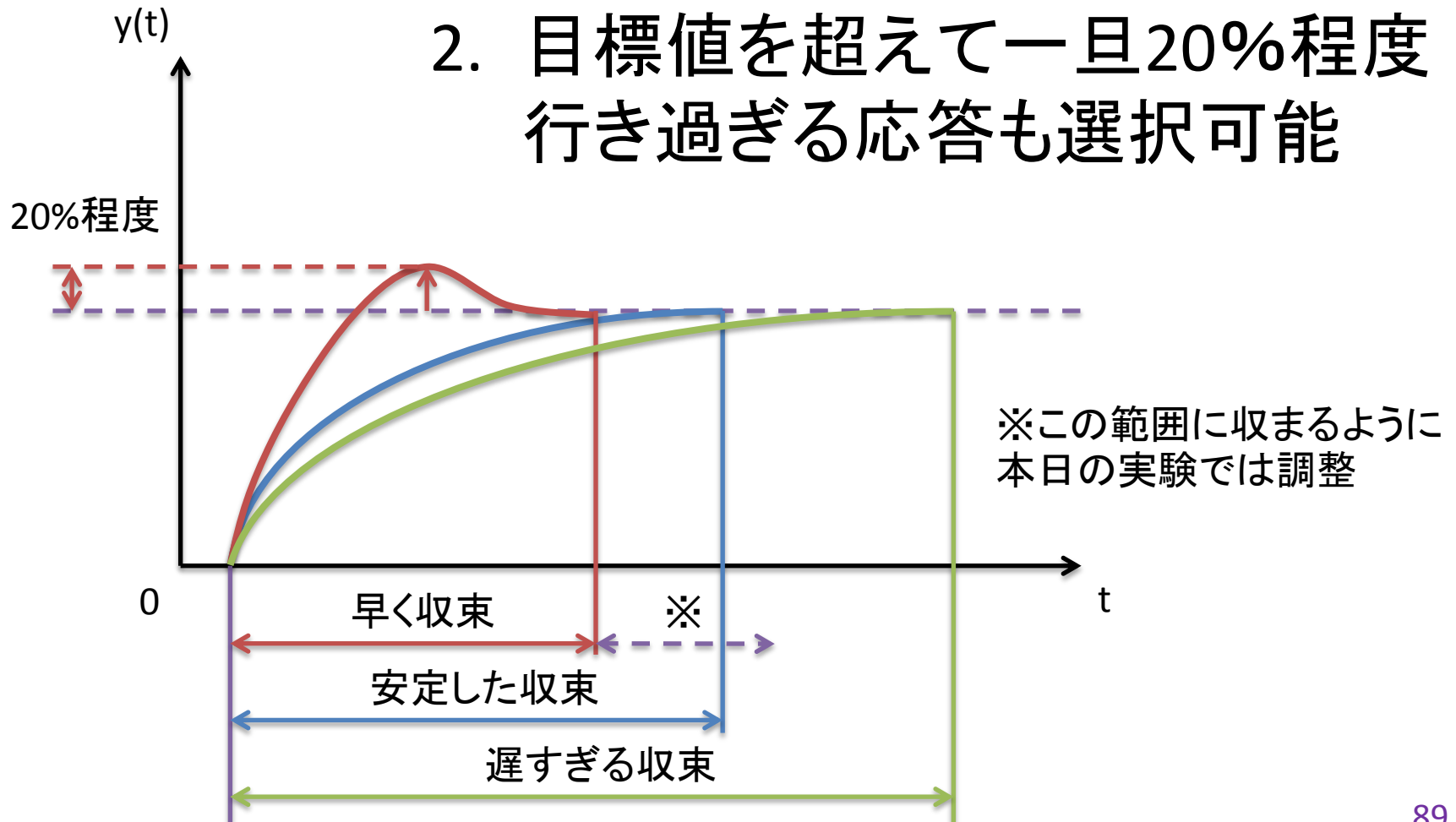
ステップ応答



PI制御の応答

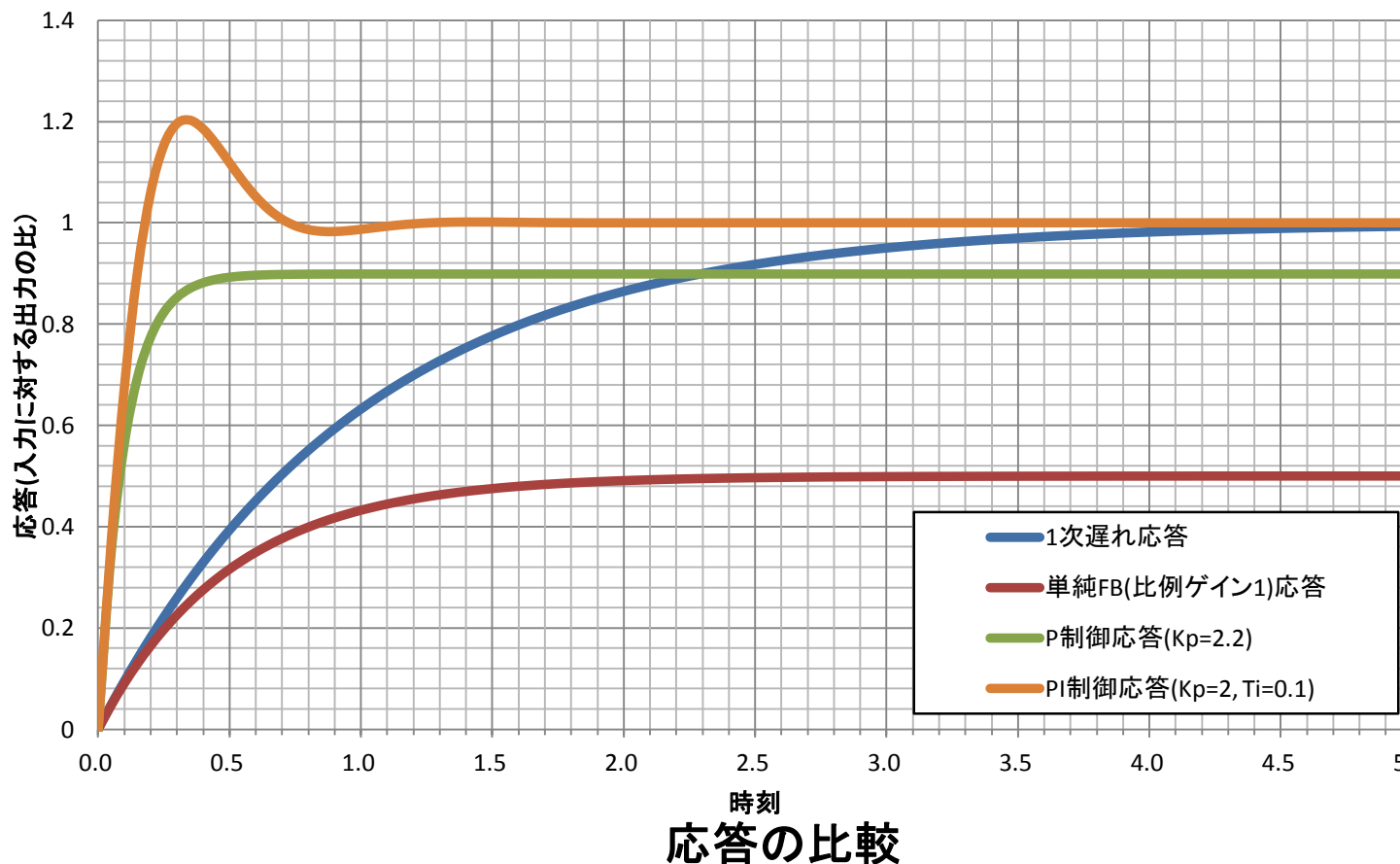
行き過ぎ(オーバーシュート)

1. 基本は一次遅れの応答の範囲
2. 目標値を超えて一旦20%程度行き過ぎる応答も選択可能



制御器の調整は簡単ではない

自身で計測してから設計したパラメータ通りの調整をしても
上手いいかないことが普通にかかることを体験して欲しい。



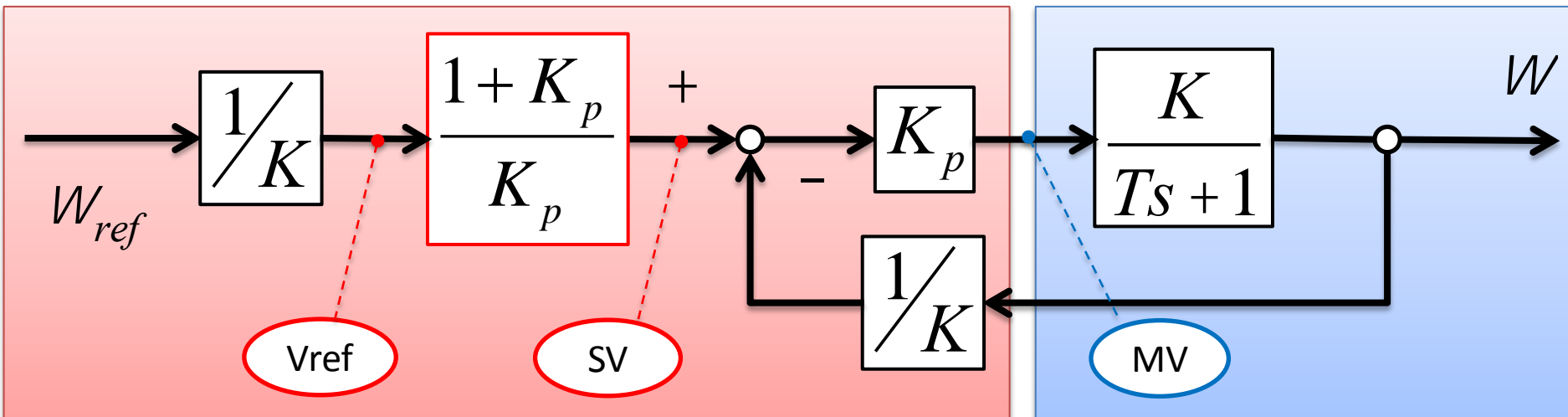
制御対象
遅い応答
外乱に対応不可

単純フィードバック
過大な定常偏差
応答も遅い

P制御では
速応性は改善
定常偏差が残る

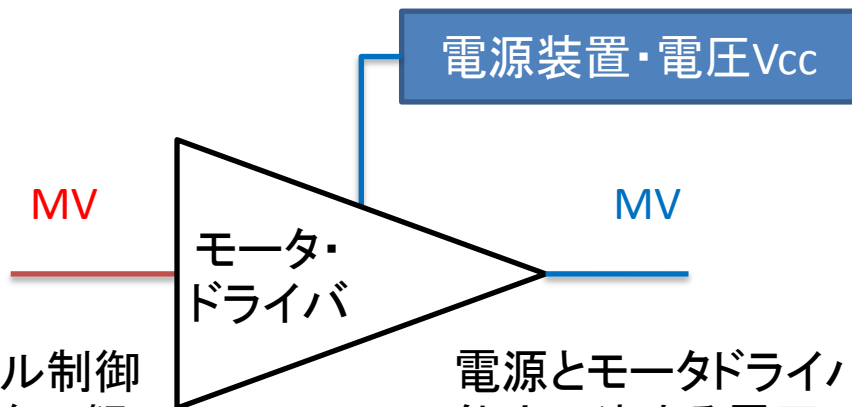
PI制御では
定常偏差解消
行き過ぎが発生

制御モデルと実システム



PCやマイコンなどデジタル系の中での演算

回路や機構などアナログ系



デジタル制御系の演算の解

電源とモータドライバの能力で決まる電圧

$$MV = MV?$$

V_{cc} が充分に高く、モータドライバの駆動性能が高い

$$MV_p = MV$$

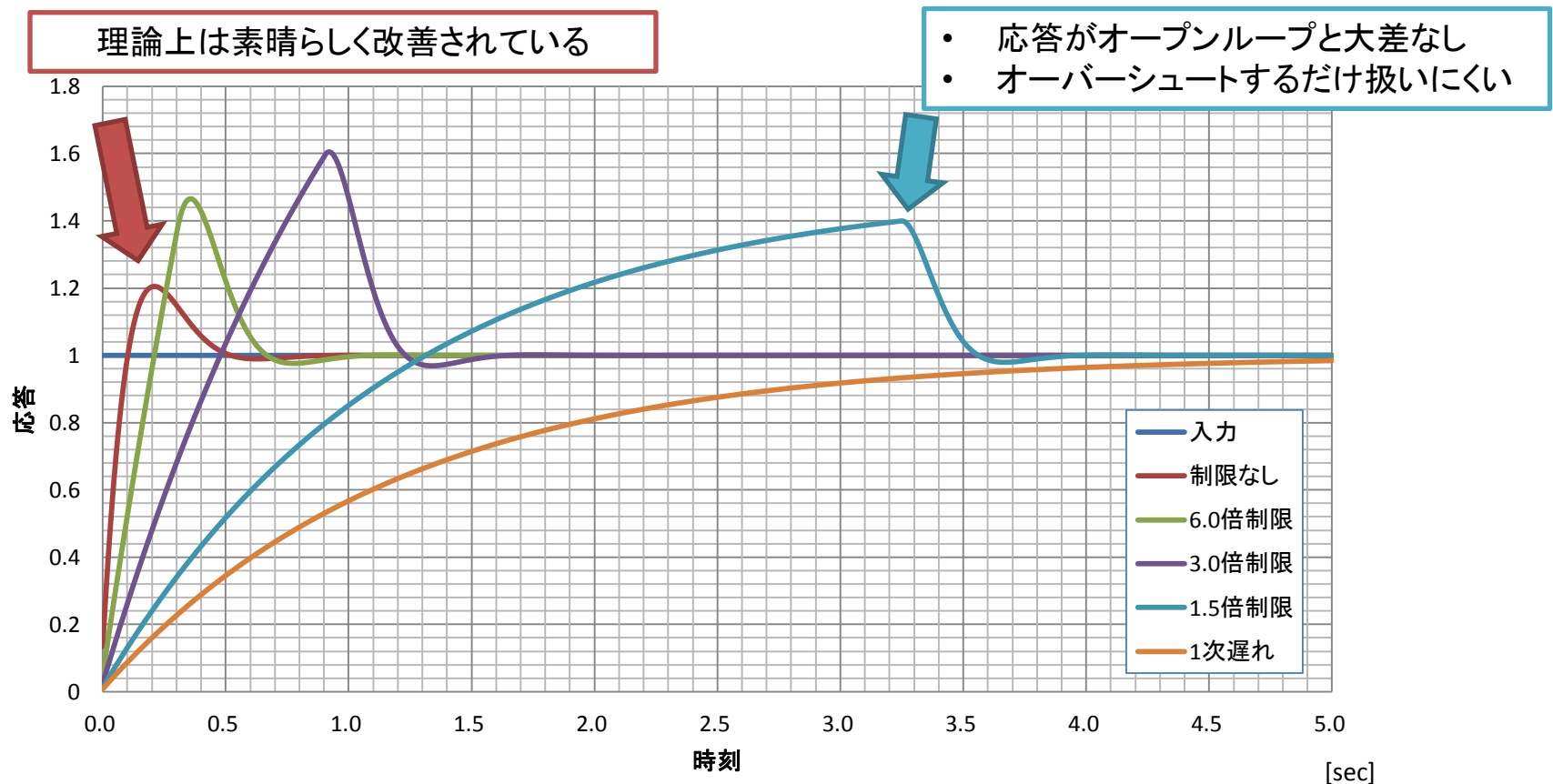
となる

V_{cc} に余裕がなく、モータドライバの駆動性能が低い

$$MV > MV$$

となってしまう

シミュレーション例 制御法:PI制御, 設定パラメータ:同一



電源やモータドライバの供給能力に制限がある場合の応答

制御理論に基づいたはずのシミュレーションを行っても、
実システムはモデルに則った動作をするとは限らない

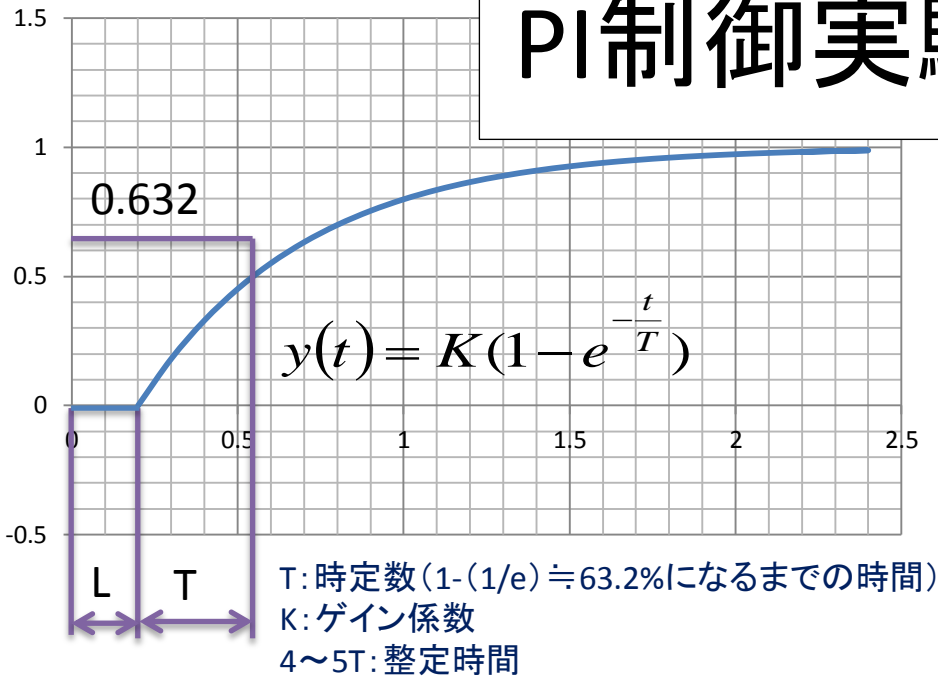
実システムの特性も、定性的、定量的、理論的に理解しておこう。

ここで実験2・2

課題7 制御器の設計

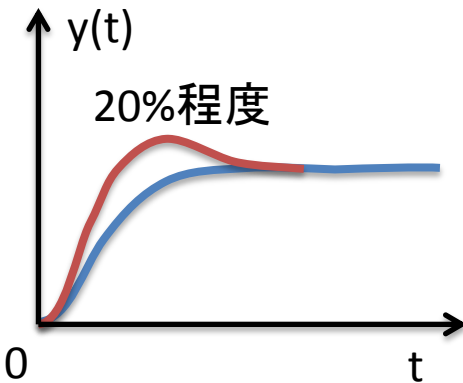
課題8 外乱へのロバスト性または単純
フィードバックとの比較

PI制御実験メモ1/3



	比例ゲイン		積分時間	
	K_p		T_i	
	減少	増加	増大	減少
立上がり時間	長	短	やや長	やや短
行過ぎ量	小	大	小	大
整定時間	要調整		要調整	

手法	比例ゲイン K_p	積分時間 T_i
Ziegler and Nichols	$\frac{0.9T}{L}$	$3.33L$
Chien, Hrones and Reswick	$\frac{0.35(0.6)T}{L}$	$1.2(1.0)T$ または $\frac{0.35(0.6)}{0.6(0.7)}T$
Cohen and Coon	$\frac{0.9}{RL} + \frac{1}{12TR}$	$\frac{30TL + 3L^2}{9T + 20L}$



緑文字は20%オーバーシュートを許容

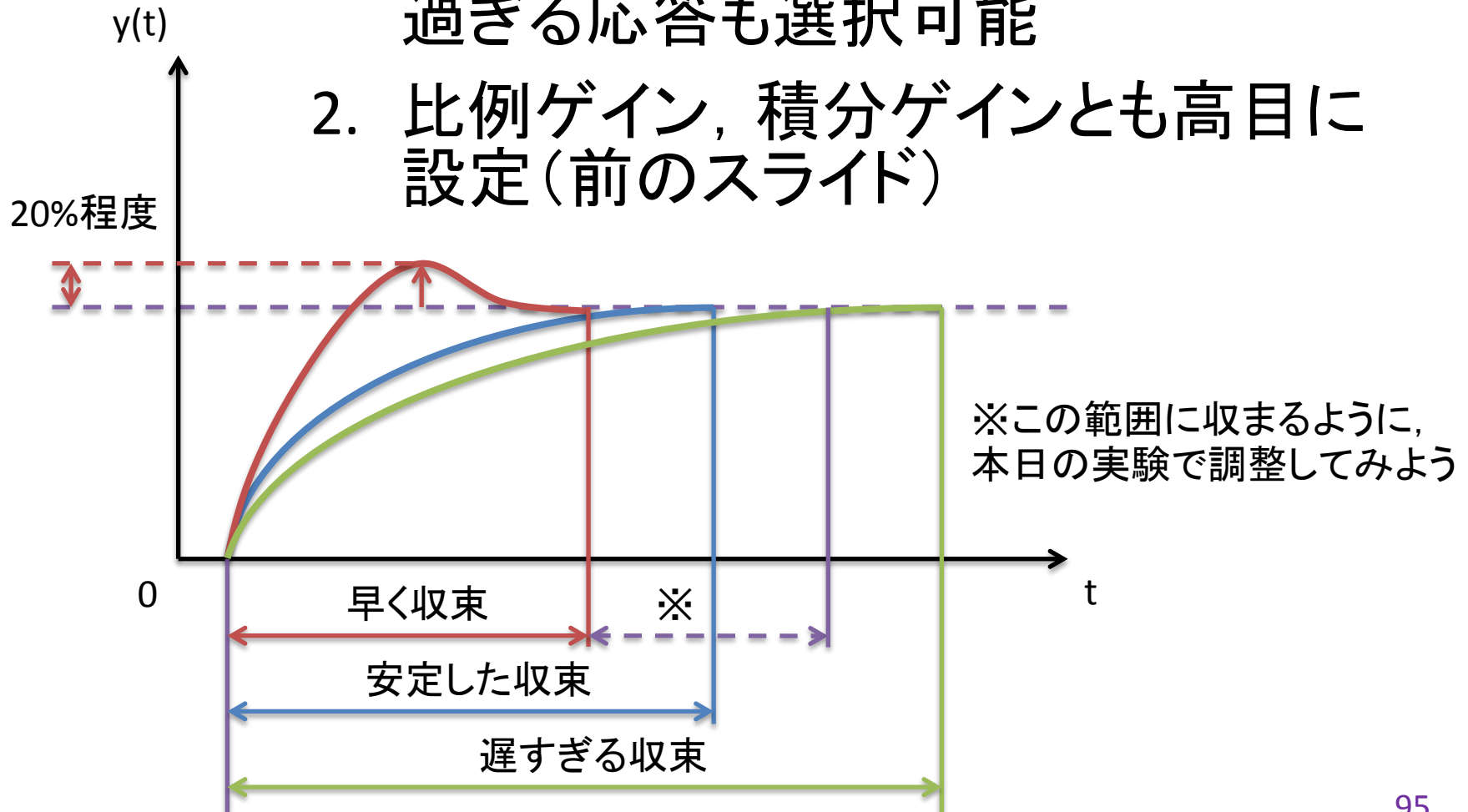
K_p , K_i として調整する際、連動する。

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = K_p + \frac{K_p}{T_i s} = K_p + \frac{K_i}{s}$$

PI制御により1次遅れの
特性の制御対象の応答
が2次遅れに変化してい
る点にも注目

PI制御実験メモ2/3

1. 目標値を超えて一旦20%程度行き過ぎる応答も選択可能
2. 比例ゲイン, 積分ゲインとも高目に設定(前のスライド)

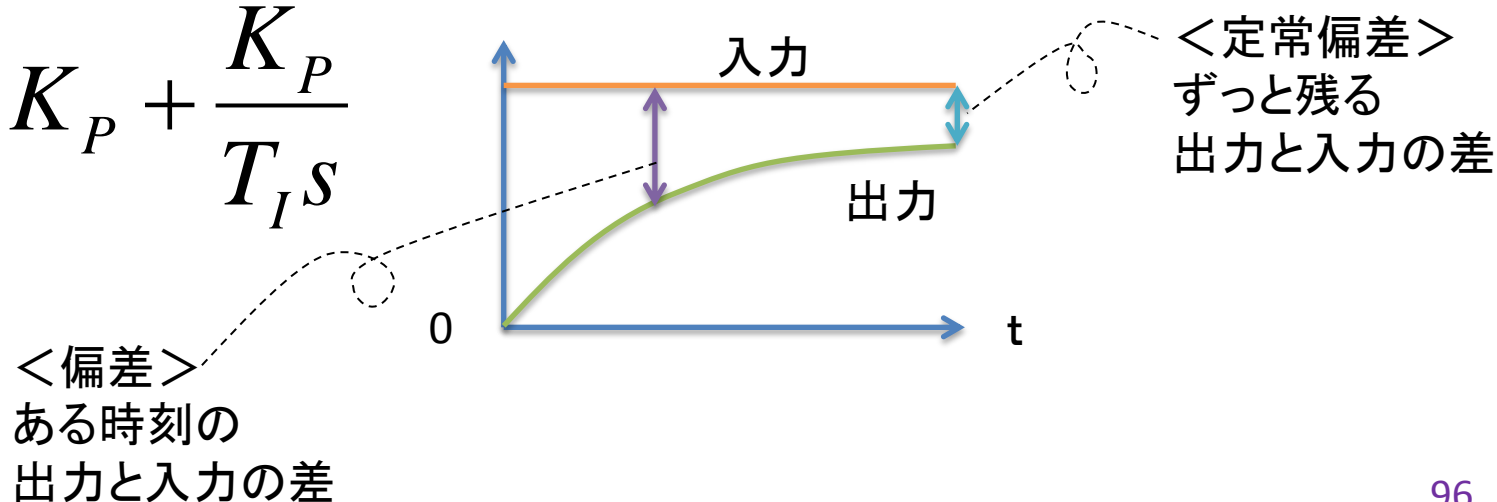


PI制御実験メモ3/3

制御器の各要素の働き

PID各要素		小さくすると	大きくすると
比例要素	パラメータ	Kpを小さく	Kpを大きく
	特性変化	<ul style="list-style-type: none"> 定常偏差が大きくなる 応答が緩やかになる 系の安定性が向上 	<ul style="list-style-type: none"> 定常偏差が小さくなる 応答が素早くなる 系の安定性が減少
積分要素	パラメータ	Tiを長く	Tiを短く
	特性変化	<ul style="list-style-type: none"> 定常偏差解消が遅くなる 行き過ぎ量が少なくなる 系の安定性が向上 	<ul style="list-style-type: none"> 定常偏差解消が速くなる 行き過ぎ量が大きくなる 系の安定性が減少

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_P}{T_I s}$$



5. 実験後のまとめ・解説

本日の実験全体の理解と
課題9課題10のために

実験を通しての疑問

今日の実験では何をやったのか？

本日の振り返り

	実験・作業	対応する課題
1	制御を考える, 議論する	課題1
2	モータの伝達関数(モデル)を作る	課題2
3	実験1: 制御対象の特性を知る	課題3~4
4	比例フィードバック制御の伝達関数を求める	課題5
5	実験2・1: 比例フィードバック制御の問題点を理解する	課題6
6	実験2・2: PI制御で制御特性を改善する	課題7~8



- 制御工学1
- 制御工学2の前半の内容を含んでいる

実験を通しての疑問

制御とは何をするのか？
制御理論の価値とは何か？

モータの制御器の調整の意義

目的

- モータ特性と負荷特性のマッチング

手段

- 元々のモータの特性を変換して目的を実現するのが制御器の役割

効果

- 時定数を調整(追従性)
- 出力特性を調整

高性能モータに対して	汎用モータに対して
高すぎる出力を抑える	-
高すぎる速応性を抑える	-
-	弱い出力に対し摩擦等の外乱の影響を抑える

目的(使い道)に応じた
特性のモータを選定した

上で制御をかけるのが効果的なメカトロニクス系の設計法

制御とは抑制して御する(思い通りに動かす)という意味通り

- 素の対象に仕組みを用いて思い通りの特性にはできる
- それ以上のことができるわけではない

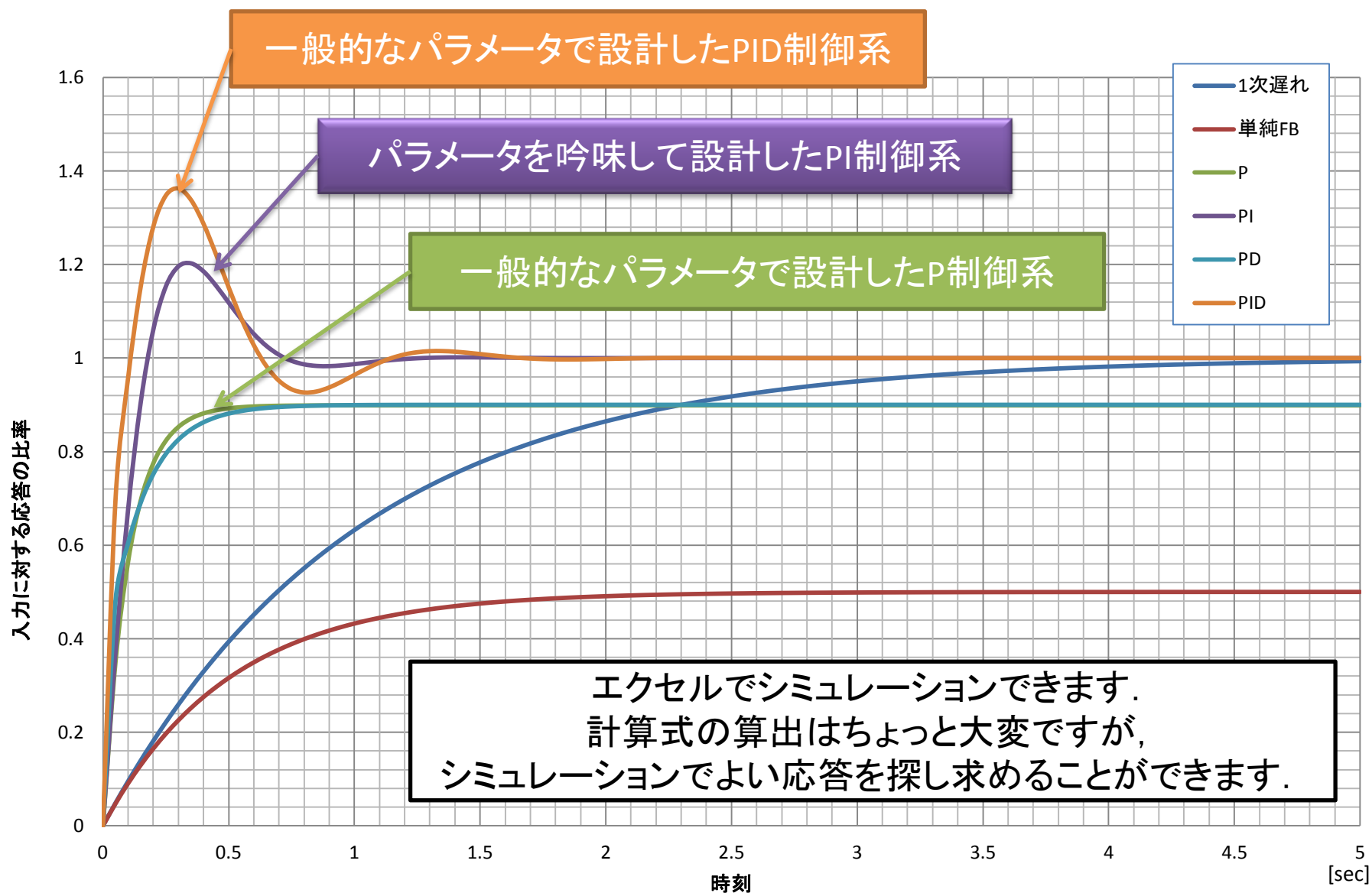
理論を考える理由

	理論	調整
構想時	制御系の機能のデザイン 仕様検討	
設計時	パラメータ・条件の計算 シミュレーションで予測	計測・パラメータ同定
設置・ 運用時	制御系応答の妥当性確認	理論値と実動作の相違解消 パラメータ合わせ込み
不具合 発生時	原因の推測 現象の解明	実動作計測

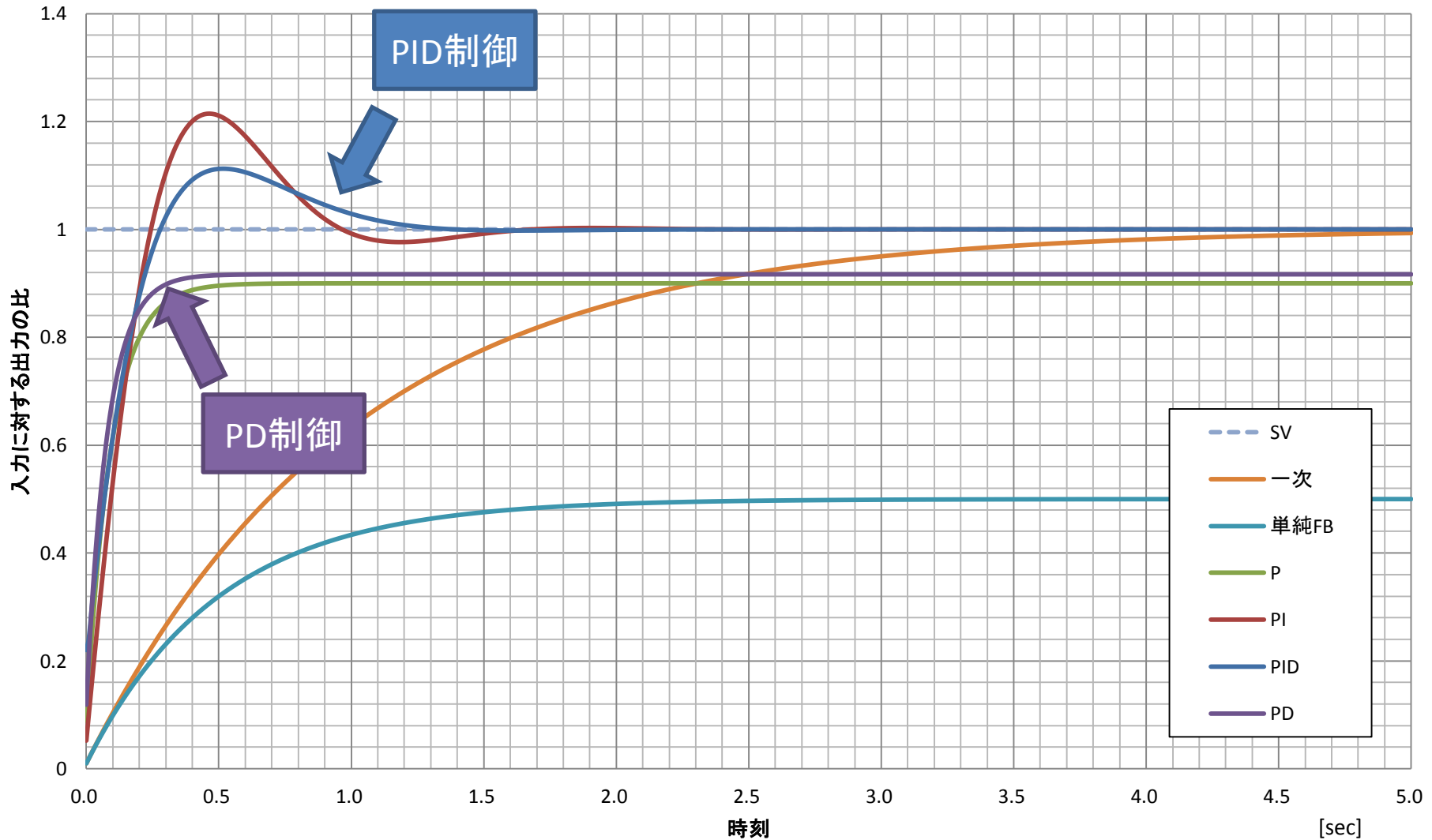
パラメータ調整(チューニング)だけでも仕事をした気になれる。(理由は手間がかかるから)

理論通りの応答になるとは限らない

PI制御でもしっかり調整すると

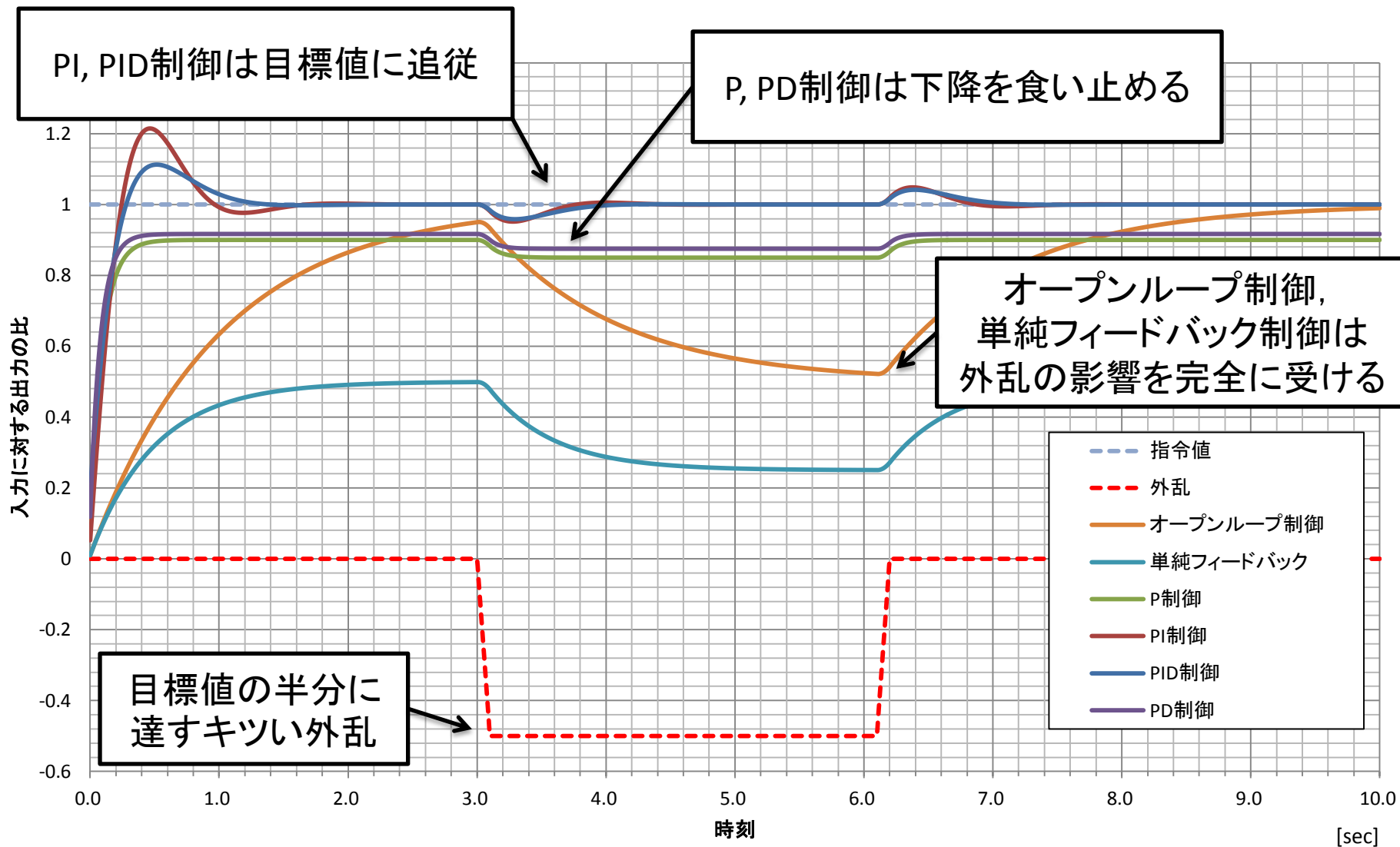


更に理論を考え、 シミュレータを使って根気よく調整すると



各制御方式の応答の比較

制御の極意！外乱に対する応答



外乱に対する各制御方式の応答の比較

実験を通しての疑問

**モータの種類と使い分けはどうする
のか？**

モータのスペックと価格

実験機のモータ			RS-540SH		RS-755VC (3765)		C-326401		RE40	
停動(起動)	mNm	A	196	70.0	388	13.7	118	8.40	2560	42.4
無負荷	rpm	A	23400	2.40	7408	0.439	7400	0.140	7590	0.0686
最大効率時 (定格)	W	1	63.2	0.72	137	0.66	14.6	0.72	150	0.91
	rpm	A	19740	13.0	6050	10.4	5850	1.85	7000	3.17
	mNm		30.6		130		24.5		187	
駆動電圧	V		7.2		24		12		48	
重量	g		160		336		260		480	
価格	円		1,000		3,000		20,000		80,000	
出力重量比	W/g		0.395		0.408		0.0562		0.313	
トルク重量比	mNm/g		1.23		1.15		0.452		5.33	
トルク感度	mNm/A		2.80		28.2		14.0		60.4	
	mNm/VA		0.389		1.18		1.17		1.26	

トルク感度の良し悪しは駆動電圧を揃えないと比較の意味を成さない

自ら条件を揃えるための指標を作る

関係なさそうなスペックと価格

実験機のモータ			RS-540SH		RS-755VC(3765)		C-326401		RE40	
停動(起動)	mNm	A	196	70	387.6	13.7	117.6	8.40	2560	42.4
		VA		504		330		101		2040
無負荷	rpm	A	23400	2.40	7408	0.439	7400	0.14	7590	0.0686
		VA		17.3		10.5		1.68		3.30
最大効率時 (定格)	W	1	63.2	0.72	137	0.66	14.6	0.72	150	0.91
	rpm	A	19740	13.0	6050	10.4	5850	1.85	7000	3.17
	mNm		30.6		130		24.5		187	
駆動電圧	V		7.2		24		12		48	
重量	g		160		336		260		480	
価格	円		1,000		3,000		20,000		80,000	
出力重量比	W/g		0.395		0.408		0.0562		0.313	
トルク重量比	mNm/g		1.23		1.15		0.452		5.33	
トルク感度	mNm/A		2.80		28.2		14.0		60.4	
	mNm/VA		0.389		1.18		1.17		1.26	

パワーなどのスペックだけでは語れなさそうな
価格と関係がありそうな特性

モータのコストパフォーマンス

実験機のモータ			RS-540SH		RS-755VC (3765)		C-326401		RE40	
停動(起動)	mNm	A	196	70.0	388	13.74	118	8.40	2560	42.4
無負荷	rpm	A	23400	2.40	7408	0.439	7400	0.14	7590	0.0686
最大効率時 (定格)	W	1	63.2	0.72	137	0.66	14.6	0.72	150	0.91
	rpm	A	19740	13.0	6050	10.4	5850	1.85	7000	3.17
	mNm		30.6		130		24.5		187	
駆動電圧	V		7.2		24		12		48	
重量	g		160		336		260		480	
価格	円		1,000		3,000		20,000		80,000	
出力重量比	W/g		0.395		0.408		0.0562		0.313	
トルク重量比	mNm/g		1.23		1.15		0.452		5.33	
トルク感度	mNm/A		2.80		28.2		14.0		60.4	
	mNm/VA		0.389		1.18		1.17		1.26	
コストパ フォーマンス	W/g/1k円		0.395		0.136		0.00281		0.00391	
	mNm/g/1k円		1.23		0.385		0.0226		0.0667	
	mNm/A/1k円		2.80		9.40		0.700		0.755	
	mNm/VA/1k円		0.389		0.392		0.0583		0.0157	

モータの価値

Performance (Specification)

- 重量(体積)に対して出力(トルク)が大きい
- 少ない電流で大きなトルクを発生(トルク感度が高い)
- 慣性モーメントが小さく, 角加速度が大きい
- 加えた電力に対して大きな出力となり効率が良い

Additional Value

- 回転ムラ(コギングトルク)がなく, 滑らかに回る
- 低電圧から滑らかに起動できる
- 短時間における強大な(最大)出力
- 長時間に渡り, 十分な(定格)出力を維持できる
- (想定外の)過負荷, 過熱に対して堅牢
- 長期間に渡り性能を維持する信頼性(品質)

低スペックでも, メンテナンスフリーかつ全数検査できない組み込み用の低価格品にこそ求められる性質

高性能モータと汎用モータのスペック

RE40	ポイント	RS-540SH
150W	出力	20W
38項目	スペックの数	19項目
0.91	効率	0.72
60.4[mNm/A]	トルク定数	2.80[mNm/A]
1.26[mNm/A]	トルク定数	0.389[mNm/A]
13	極数	3
0.256[W/g]	出力重量比	0.125[W/g]
1.38[W/ μm^3]	出力体積比	0.398[W/ μm^3]
¥80,000-	価格	¥1,000-

(知っておこう)

- 値段が安くても品質が悪いとは言い切れない
- 違うのは性能
- 家電・情報機器の小型モータは単価¥5-~¥10-

安いデバイス類は全数検査できないから信頼性を上げておく必要あり

良いモータを使う意義



付加価値	決定要素
強力なトルク	大電流に耐える太い巻線(コイル)
	精度の良いコイル巻き付け(コアレス構造)
	精度の良い磁気回路(マグネット形状・材質)
高速応答	動的に正確に動く
極低速時の滑らかな回転	低摩擦軸受
	精度よく動く
	
	

て精度

良いモータを理論から考える

$$\omega(s) = \frac{\frac{1}{K_G}}{T_E T_m s^2 + \left(T_m + \frac{Lb}{K_I K_G}\right) s + \frac{Rb}{K_I K_G} + 1} E + \frac{\frac{Ls + R}{K_I} \frac{1}{K_G}}{T_E T_m s^2 + \left(T_m + \frac{Lb}{K_I K_G}\right) s + \frac{Rb}{K_I K_G} + 1} \tau$$

$\frac{Ls + R}{K_I}$ について考えてみよう

これが小さいほど



外乱トルク τ に対する感度が下がる



外乱に強い

- インダクタンス L は概して小さい
- 電機子抵抗 R が小さいほど良い
 - 良質な巻線
 - 良質な接点
- トルク定数 K_I が大きい程良い
 - 強力な磁気回路
 - 高精度な磁気回路

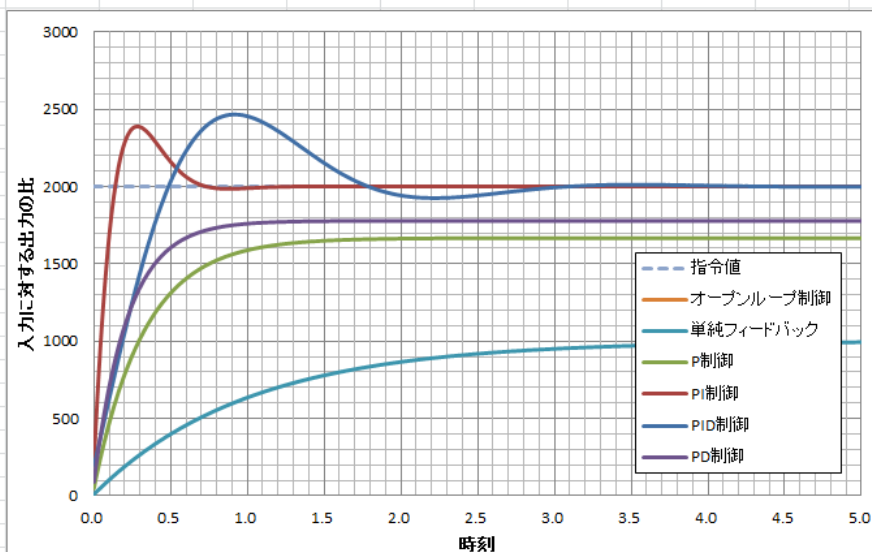
6. レポート課題

課題9説明

1. 実験時に用いた値(目標値, 時定数やゲイン)を利用しシミュレータ上で再現
 1. 結果グラフのプリントアウト
 2. 実測値との比較, 考察
2. 他の制御方式のゲインを調整し, どのように変化するか検討
 1. 自身でよい調整ができたとも思われる例をプリントアウト
 2. 比較・考察

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1				オープンループ制御	単純フィードバック	P制御	PI制御	PID制御	PD制御	
2										
3	T	sec	2	2	2	2	2	2	2	
4	Kp	1	1	1	5	20	5	8		
5	Ti	sec				18	30			
6	Td	sec					15	1		
7	Ki	1				1.111111	0.166667			
8	Kd	1					75	8		
9	Δt	sec	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
10	PV(0)	rpm	0	0	0	0	0	0	0	
11	SV	rpm	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	

	授業時に測定, 指定された値を利用
	自身で調整
	参考値表示(変更不要)
	変更不要



各制御方式の応答の比較

ダウンロード先

- http://www.isc.meiji.ac.jp/~mcelab/kikai_jikken1/20141203_jikken1_kadai.xlsx

レポート体裁と締切について

- 自分の言葉で即座にレポート化し、**必要な情報**の十分な記載が大事と考えている。
- とは言え、体裁を整えた方が損をしない。
 - 書類の雛型，締め切り，不文律的な常識が重視されることは多々あり，印象が格段に異なる。
- **体裁・内容は次のスライドに示す。**
- **締め切りは来週の実験前。**
- **提出日は忘れずに書くこと。**

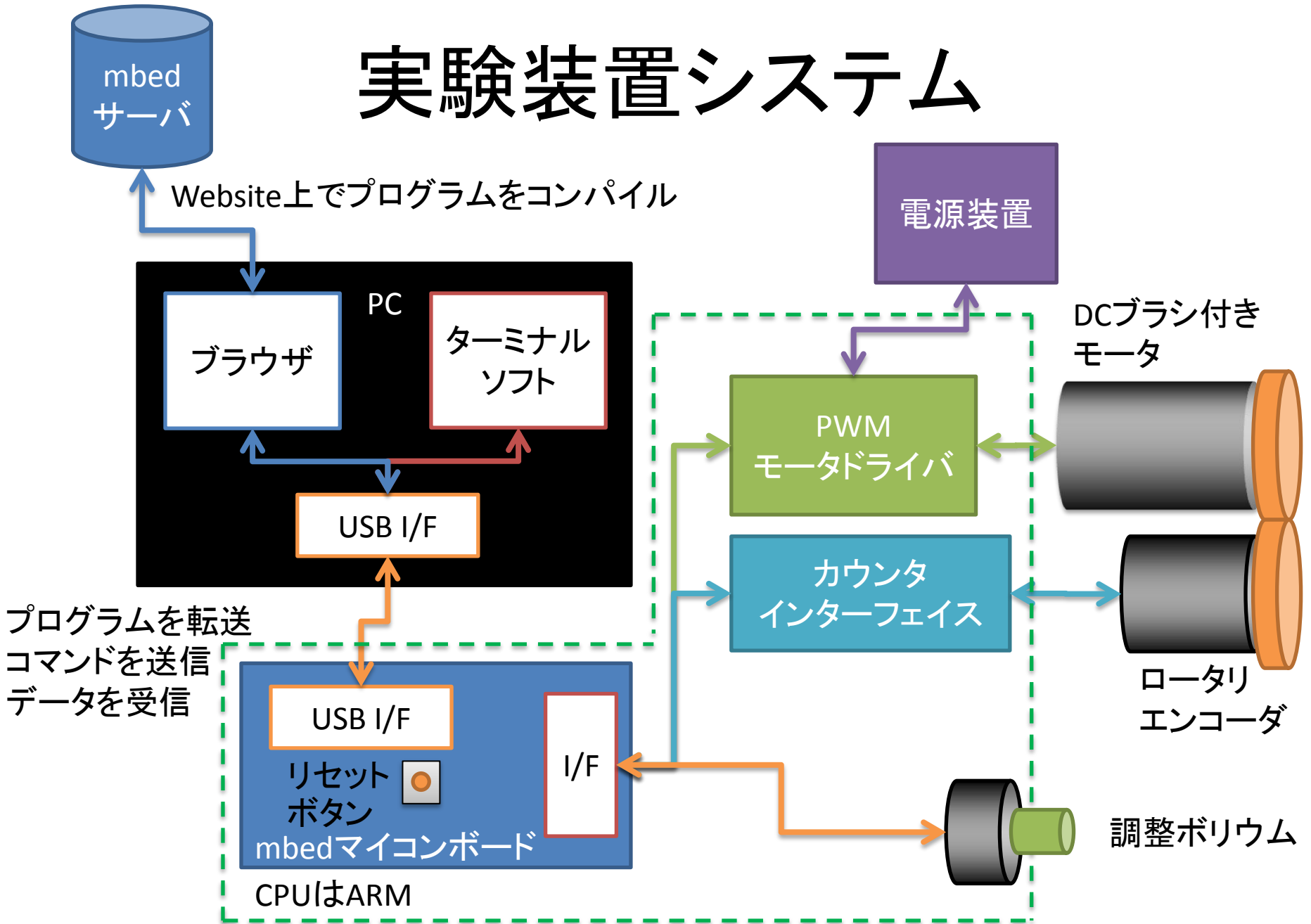
レポートの作成

No	項目	必要	内容・備考
1	実験の目的	要	自分で見出した目的・意義を書いて下さい テキストの文章を写す必要はありません。
2	方法原理	一	資料・課題に含まれています
3	装置・器具	要	次スライドを基に説明付きで書いて下さい
4	実験結果	一	課題に含まれています
5	課題・考察	要	課題1～10に相当します
6	結論	要	結論と全体を通して理解した事を自分の言葉で書いて下さい(半ページ位)
7	参考文献	要	課題1～10に関して必要なものを記して下さい「文献名, 著者, 出版社または学会, 出版年, ページ」あるいはURLなど
8	その他	要	意見, 要望, 提案, 希望などを書くことが望ましい

レポート採点のポイント

項目	注意点	採点ポイント
本日の出席と取り組み	-	-
レポートの体裁	表紙の感想はしっかりと	適切な内容で90%以上埋めることが重要
実験の目的	自身の言葉で	テキストや配布資料の丸写しではなく、簡単に示す
装置の図解と説明	自身の理解した機能の説明を添えて	図を示すこと、簡潔な説明を添える
課題1～8	実験中に書く	-
課題9～10	実験後に書く	例示と理由を明確に説明
結論	本日の実験で理解したこと	理由を含めて説明すること
参考文献	面倒でも調べた文献を説明	十分な件数を挙げるだけ 加点
その他	実験内容についての意見やアイデア	優れた内容は加点
課題1～8までに関連するグラフ	自動記録されたデータを基に1グラフをA4に整える	-

実験装置システム



レポート作成にあたって

A) 授業中の作成箇所

- 手書きのままで構いません。
- (ペン入れは必要ありません。)

B) 応答グラフ

- PCによる出力, 方眼紙への手描きは問いません。
- 必要な応答が示されていることが重要です。

C) 持ち帰って作成した部分(特に①, ⑥, ⑦)

- ペンによる手書きとして下さい。

D) 自身の理解とその説明を特に重視します。

- 上記は当実験の決まり(実験中理解, すぐ反映を重視)
- 他の実験課題は担当の研究室の指示を理解して下さい。

「参考文献」の書き方

単行本(教科書)の場合

(1) 著者名: 書名, 始めのページ/終わりのページ, 発行所(発行年).

例

(1) 江原伸郎, 他, 動的システムの解析と制御, pp10-15, コロナ社(1991).

論文の場合

(2) 著者名: 論文題目, 雑誌名, 巻(号), 始めのページ/終わりのページ(発行年).

例

(2) 加藤恵輔, 広瀬茂男, 形状帰還型マスタ・スレーブアームの提案と基礎実験, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 5, pp.752-757, 2000.

URLの場合

(3) webサイト管理人(著者), 参照したページ, サイト名, (分かれば発行年), URL

例

(3) 浅井 徹, フィードバック制御 VS フィードフォワード制御
, はじめての制御工学, http://www-watt.mech.eng.osaka-u.ac.jp/~tasai/control/control_p3.html

手動計測 と 自動計測

特徴

- 現象を観察しながら計測

利点

- 現象を判断, 考察しながら計測
- 計測結果に応じ追加パラメータの計測や計測法の変更も可能
- 計測そのものに技能を要する場合に有効

欠点

- 計測に集中, 専念する必要
- 計測ミスが発生するリスク
- 計測条件変動の可能性(再現性)

現象そのものについて調べながら, 試行錯誤的に入念な観測をする場合に適す. 素早い計測で試行・検討するにも良い.

特徴

- 現象を計測する装置を利用

利点

- 現象そのものをじっくり観察可能
- 確実な計測データを得られる
- 計測条件が確実に管理可能

欠点

- 他の作業を行うこともでき, 計測対象外の現象を見落とす可能性
- 計測法や実験法そのものの是非に関する判断を誤る可能性
- 計測対象や計測法の変更が容易ではない

設定条件を細かく変化させながら網羅的に検討する場合に適す. 計画通りの精度の良い計測にも良い.

グラフは何故描くか？

自動計測の場合，誰もがデータを共有できる。
(データを持っていけば誰でもグラフが描ける)

グラフを描く以上，

- 現象が正確に反映されている
- 伝えるべき付帯情報が添えられている

だけではなく，

- 考察するにあたって何を伝えたいか
- 読み手にどのように理解してほしいか

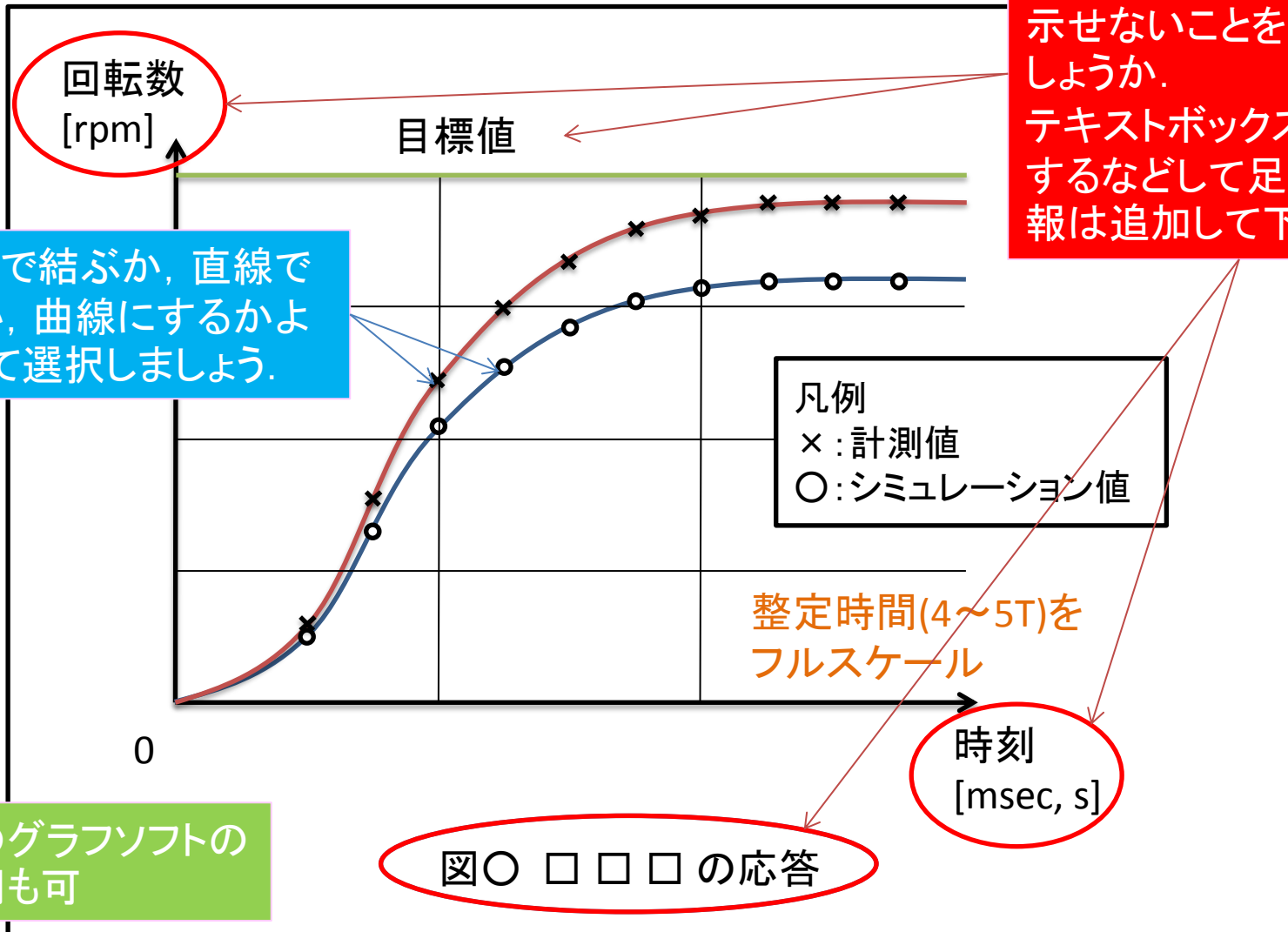
といった**意思**を理解されるようにしたいため。

グラフの描き方

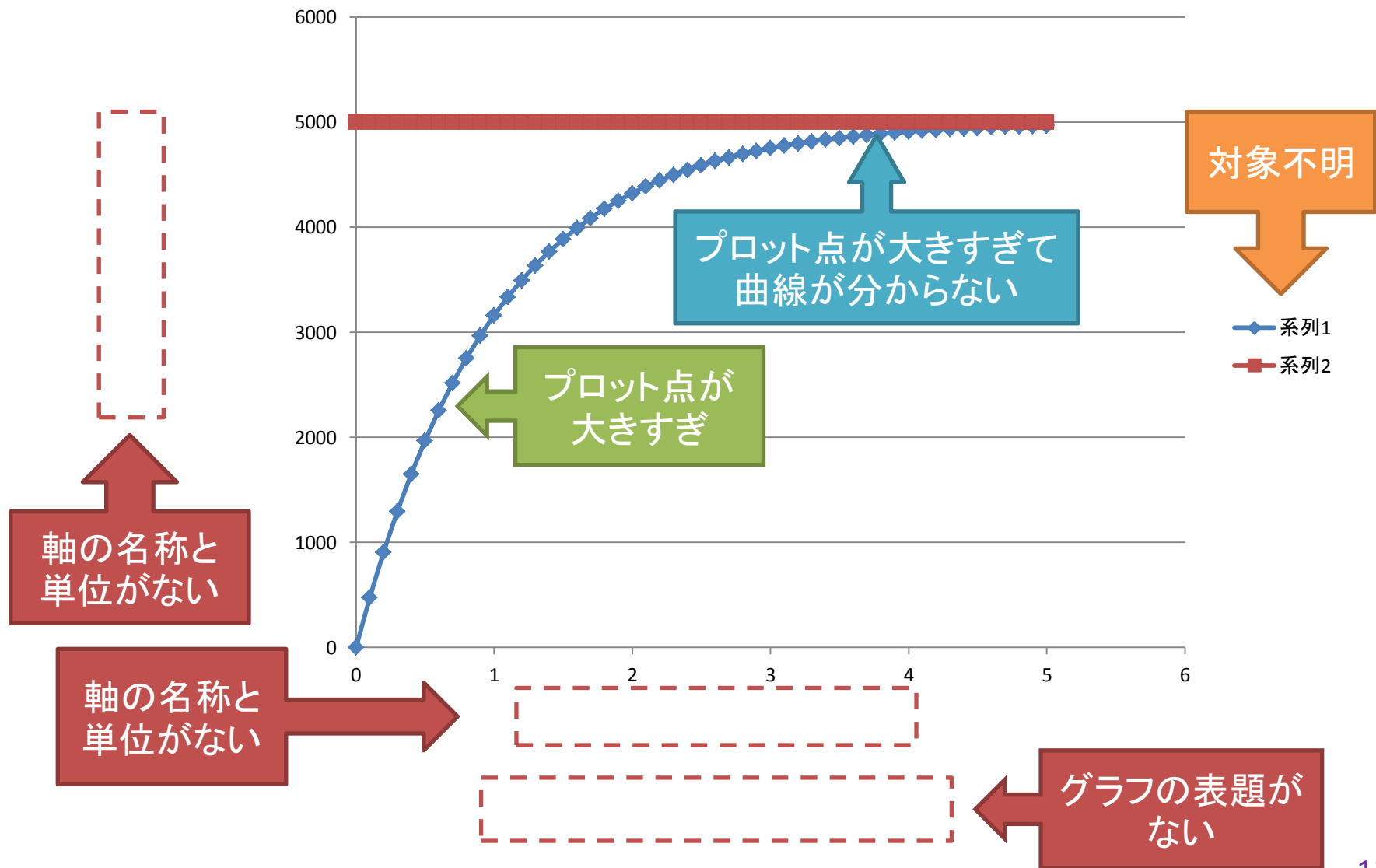
(A4サイズ一杯でお願いします)

エクセルのグラフの機能だけでは十分な情報が示せないことを御存じでしょうか。

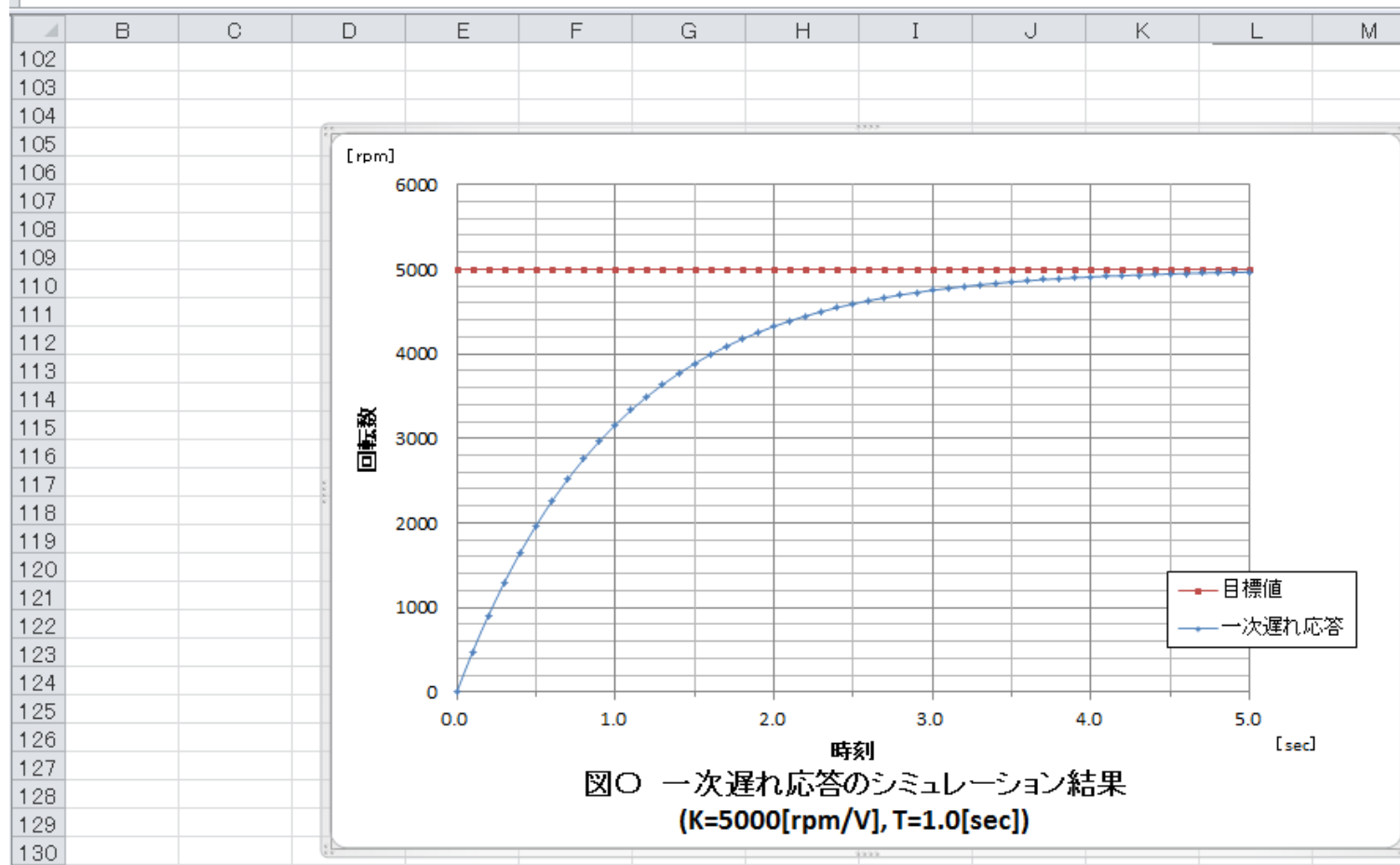
テキストボックスを併用するなどして足りない情報は追加して下さい。



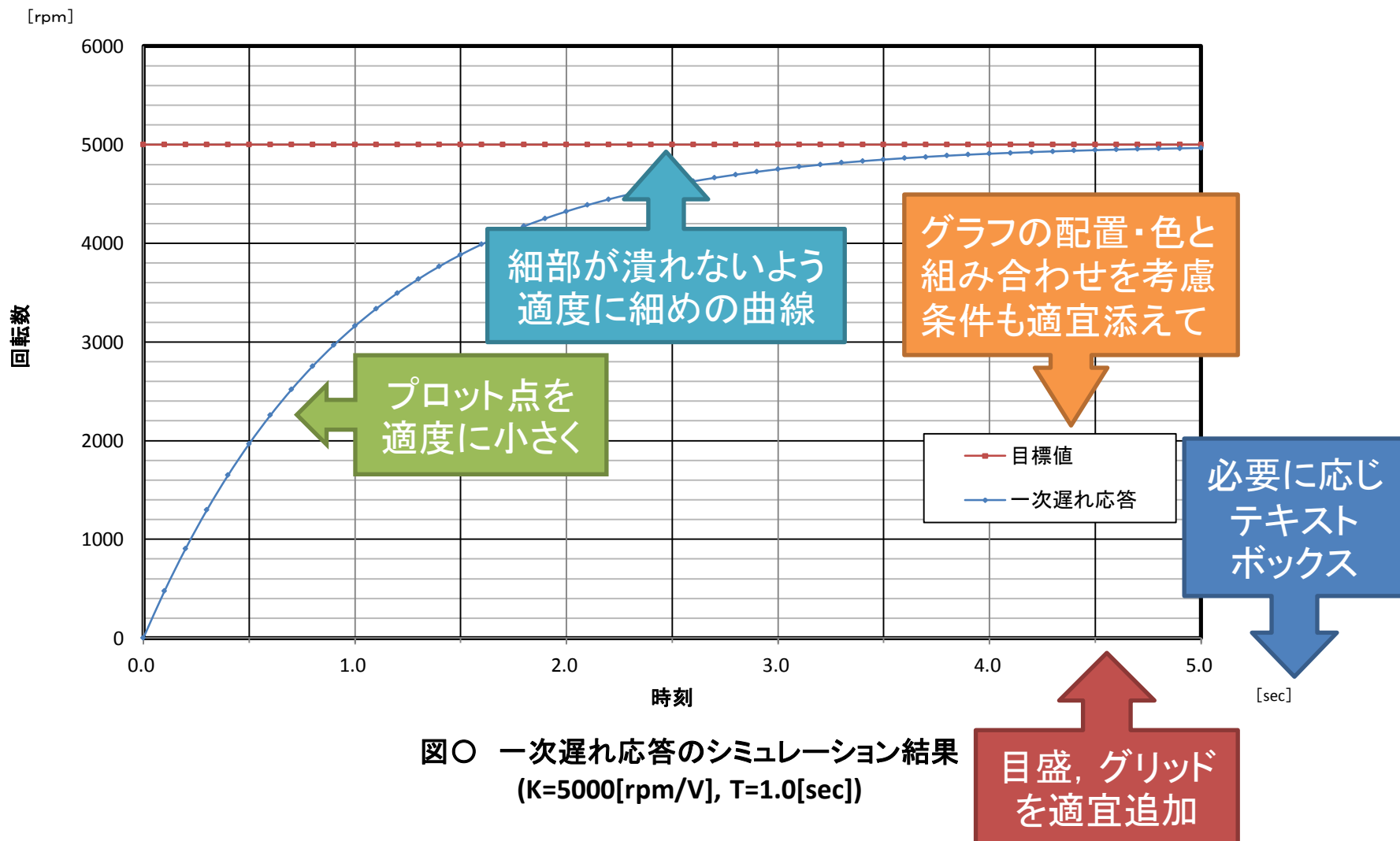
エクセルのグラフ設定そのままだと



Excelのグラフ機能のタブを見てみよう



見やすいグラフの例



実験グラフの実例・比較

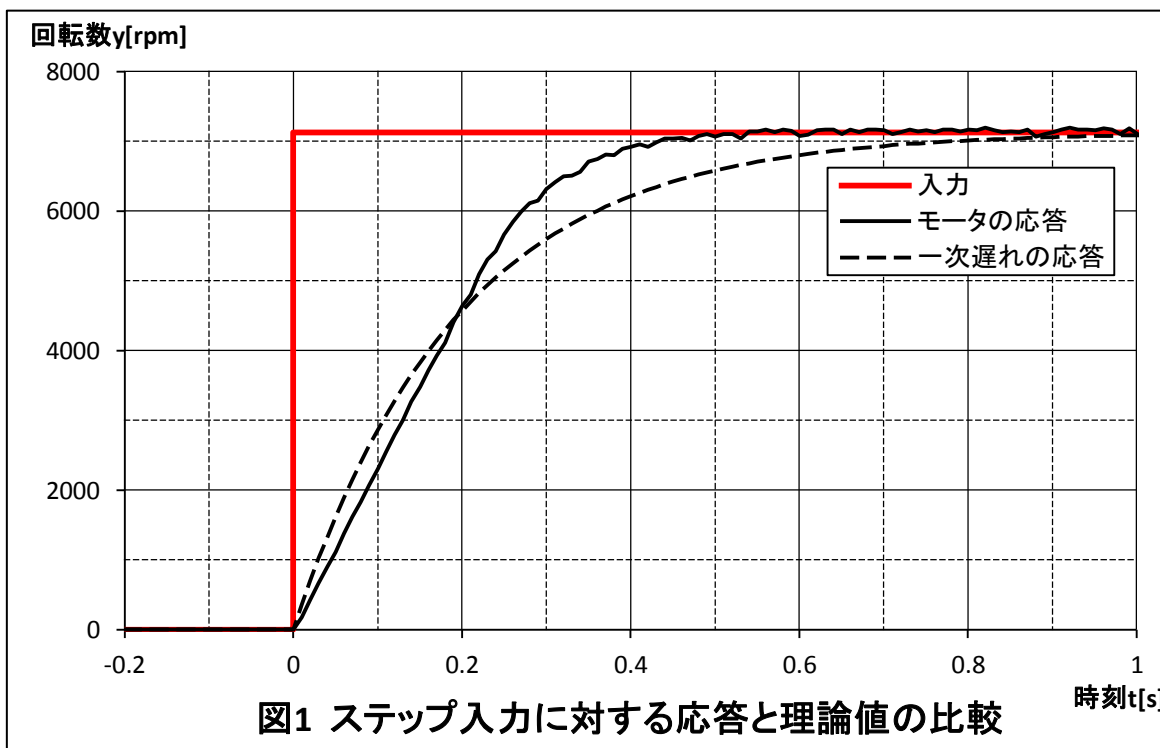
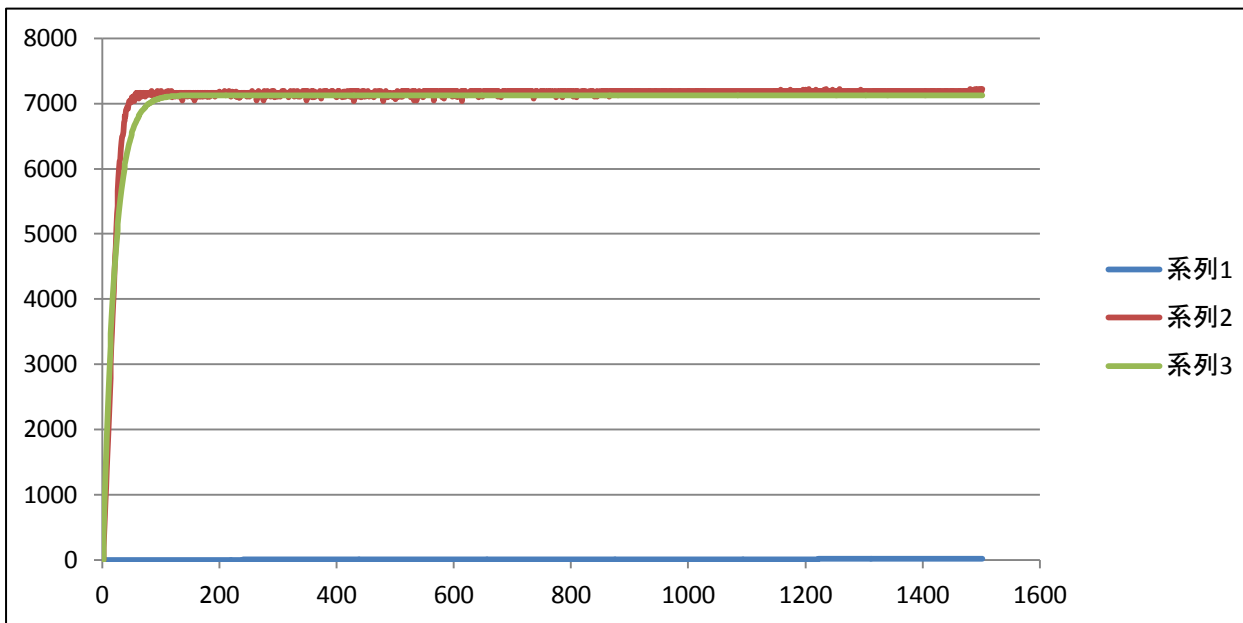


図1 ステップ入力に対する応答と理論値の比較

時刻t[s]

考察の着眼点

実験時

結果

- 実験条件の影響
- 設定した変数(パラメータ)の影響・効果

結果に基づく考察

- 想した結果との比較(予測シミュレーションを行った場合)
- 実験方法間の違いの比較
- 結果についての妥当性(失敗や芳しくないことも)

事実や観察に基づく推論

- 予実験環境や装置の状態について(直接測定していなかったが観察できたことなど)

持ち帰り

- 結果等を正確に整理しグラフ等を作成
- 結果や実験全体を振り返って理解
- 文献等を調査して関連する情報(手法, 理論, 知見)を獲得し, 実験結果を再評価
- 実験を通して理解した知見に基づく応用
- 今後につながるであろう展望を思索し, 実験を通しての目的と問題点を再評価

客観的なレポート作成：考察

主観を入れてはいけないのか？

客観性は求められるが，主観なしで考察はできない

- 事実に基づく自身の理解
- 理解したことに対する判断
- 俯瞰的推論
- 実験で得た知見の今後の応用法
- 実験そのものの課題

について，現象そのものなのか，自身の見識が含まれているのかを明確に示し，見出しや章立てなど工夫して客観性の度合いが分かるように書くとよい。

- **感想：主観による意見，情緒的な表現．事実そのものにはほとんど言及していない．**

例) 成功はたまたま運がよかったのだろう。

考察の記述例

設定した条件

$K_p=○○$, $K_i=○○$ を以下の式～～から算出した。

式)～～

この時の条件は $△△$ である。

実験前の問題

実験の目的

実験の手段

条件設定の根拠

直前の実験時に $K_p=○○$ にしたところ、応答が $△△$ であったため、これを $△△$ のように改善する必要があると判断したため、上記のような条件を選定した。

実験結果・観察

計測したデータを基とした事実

観察した事実

実験結果の考察

事実の確認

事実からの明らかな知見

知見から導かれる推論と根拠

観察からの推論と根拠

実験で得た事実, 知見から導かれる予測

*□は参考文献□, *□は参考文献□

1/14 プレゼンテーション

1. はじめに
 - 何を明らかにする実験か？
2. 理論的背景
 - 資料の中の式を基にどのような特性を実現するか
3. 実験方法・装置
 - 簡単でよい.
4. 実験条件
 - 2と合わせ, どのようなパラメータを選定したか？その理由は？
5. 実験結果
 - 期待した応答は得られたか？得られなかったか？その理由は？
6. 実験の考察
 - 実験を通して結果を基にわかったこと.
7. まとめ
 - 実験を通してわかったこと.
8. 感想・提案