

機械システム工学実験Ⅱ

電気自動車のヨーモーメント制御

レポート提出に関して

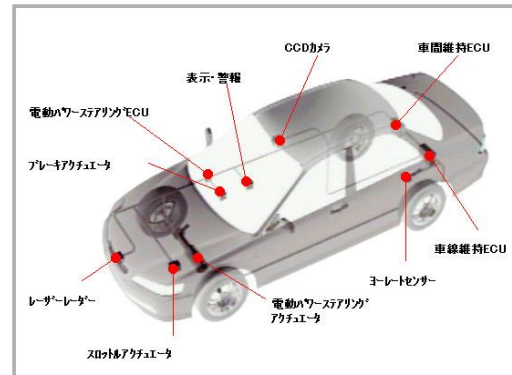
日時： 翌週の水曜10時30分
場所： 9号館553室

質問があれば
鎌田研究室（9号館352室）まで

2014/11/05 更新
2014/11/25 更新
2015/11/11 更新

制御とは？

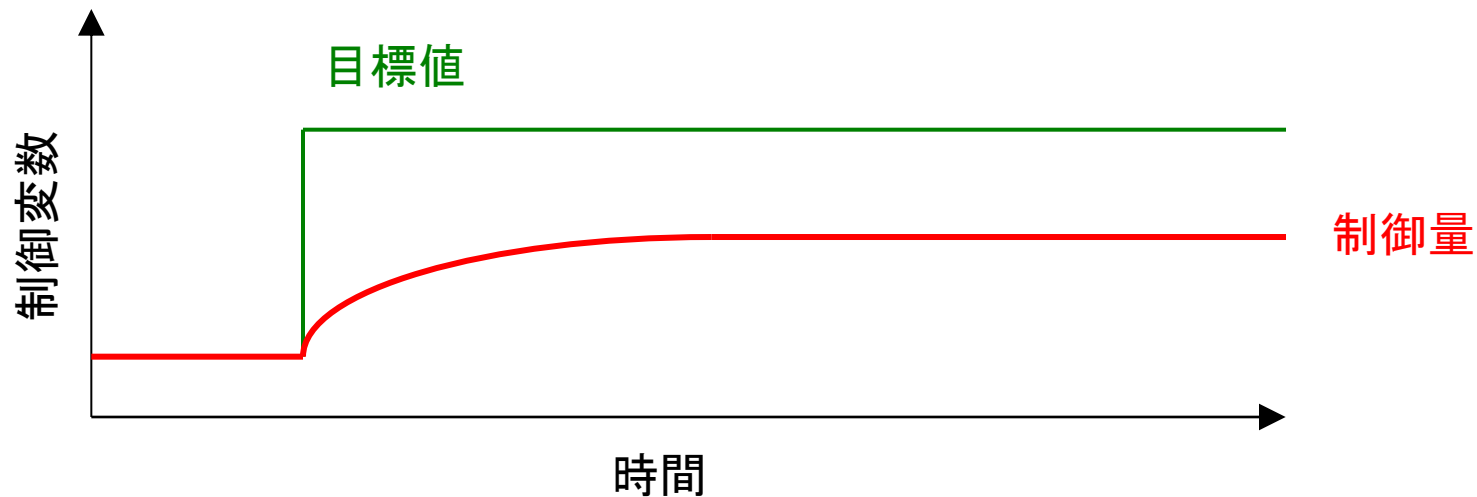
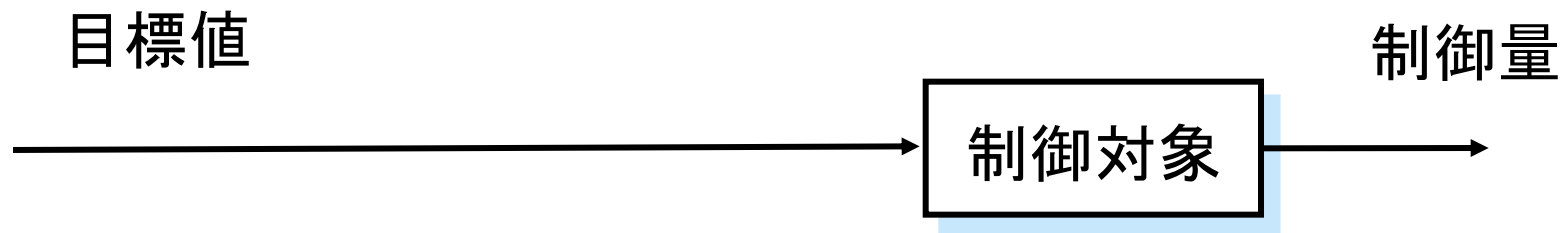
対象とする物（またはシステム）を自分の思うように操る



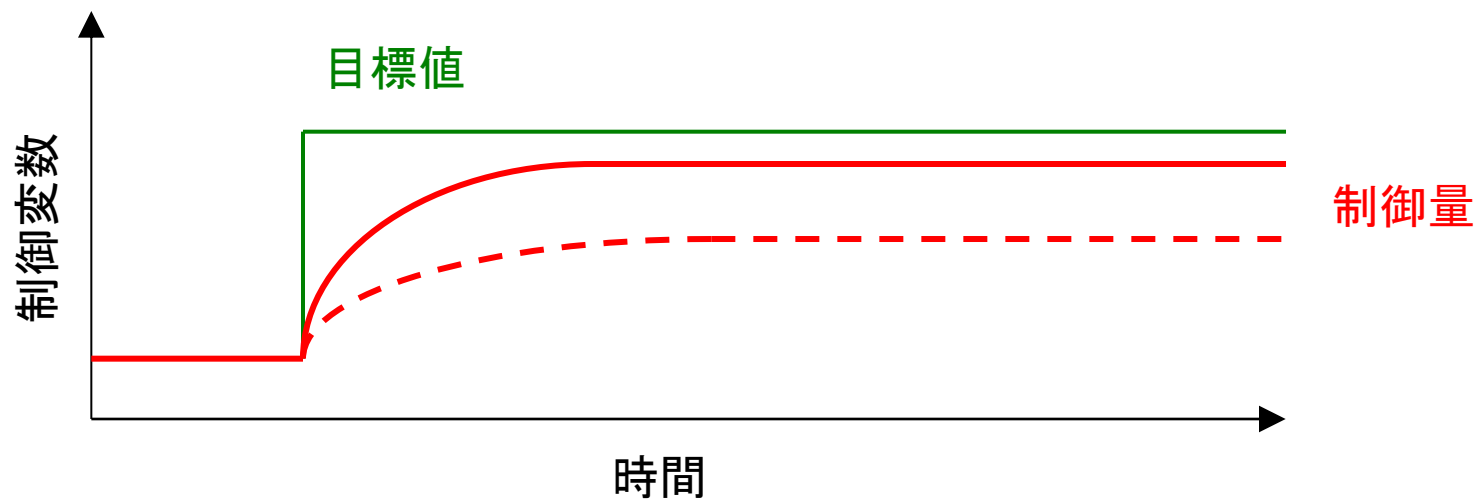
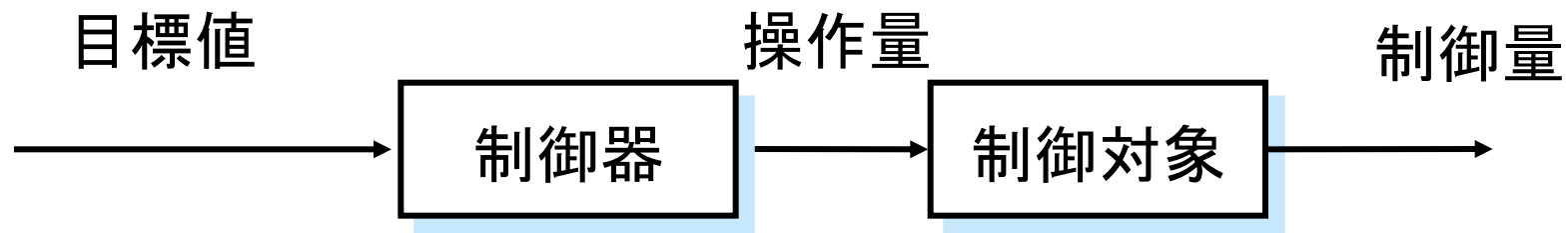
制御するためには何が必要か？

コントローラ（制御器）

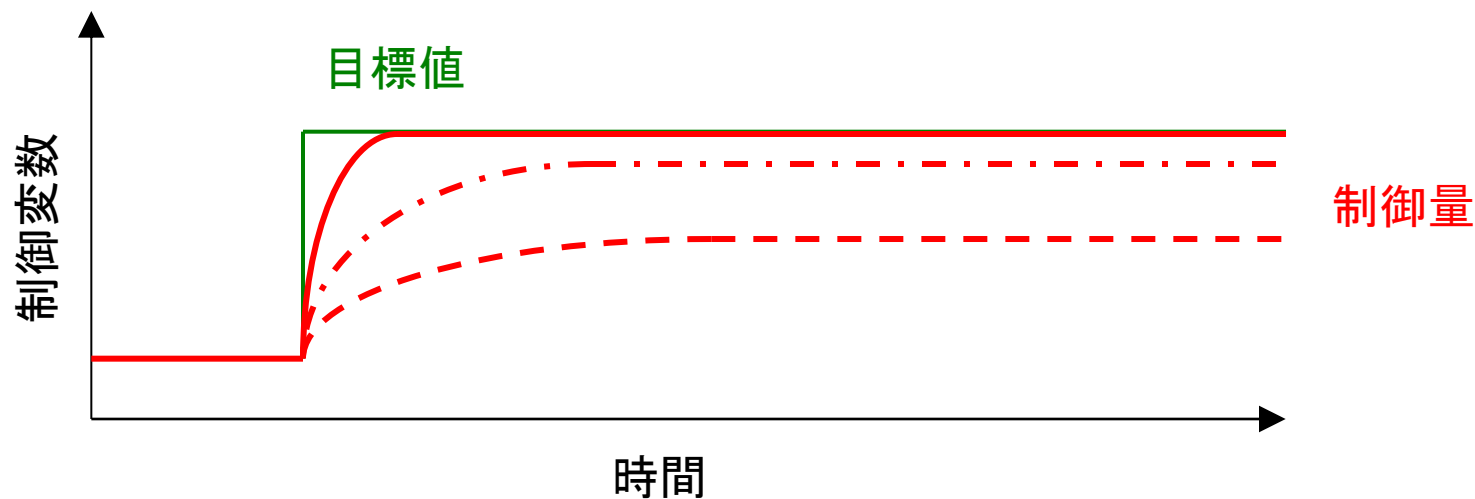
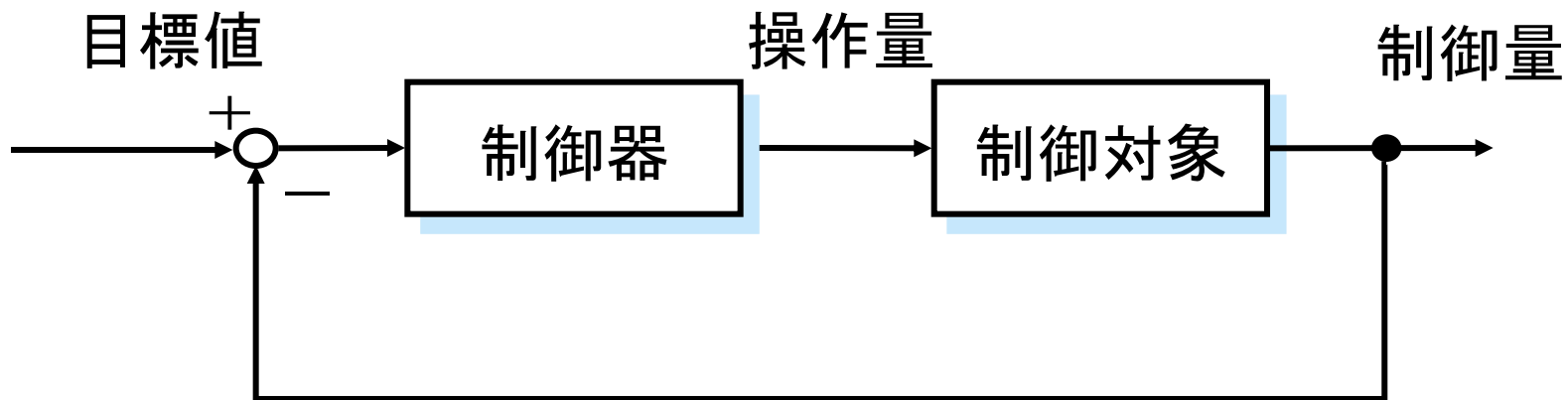
制御とは？



フィードフォワード制御



フィードバック制御



制御器の設計

種々の制御対象から，制御に関連する特性を数学的モデルという形で抽出し，このモデルに基づいてシステムの挙動を解析し，制御器を設計する．



目的

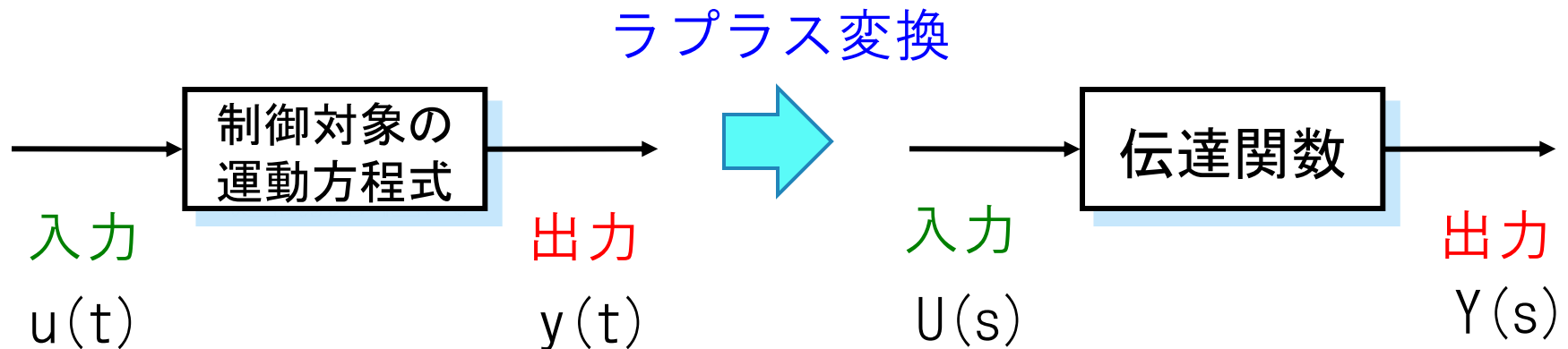
制御器設計のために必要な制御対象の数学モデルについて，電気自動車のヨーモーメント制御実験により理解をする．

数学モデル

- ・ 伝達関数 (制御工学Ⅰ)
- ・ 状態方程式 (制御工学Ⅱ)

伝達関数とは

制御対象（システム）への入力を出力に変換する関数
システムの出力と入力のラプラス変換の比で表される。

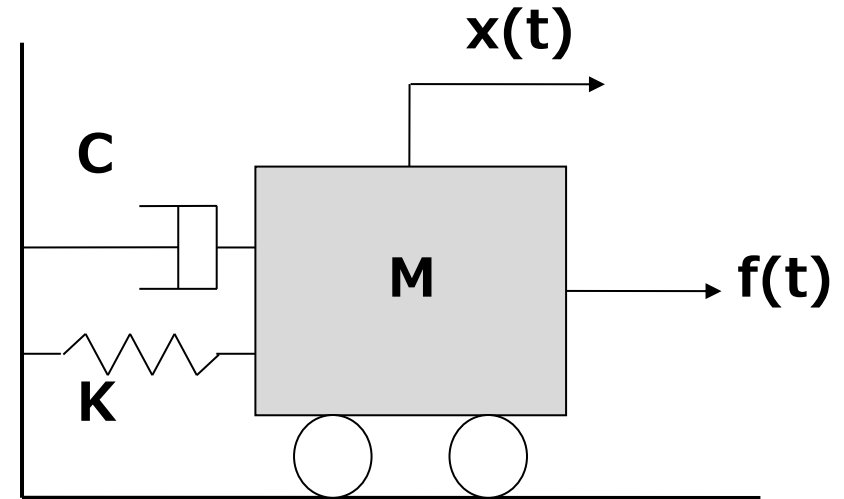


例題

問題 1

図の1自由度振動系について外力 $f(t)$ を入力，質量の応答 $x(t)$ を出力とする運動方程式を求めよ．

$$M \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + C \frac{dx(t)}{dt} + Kx(t) = f(t)$$



問題 2

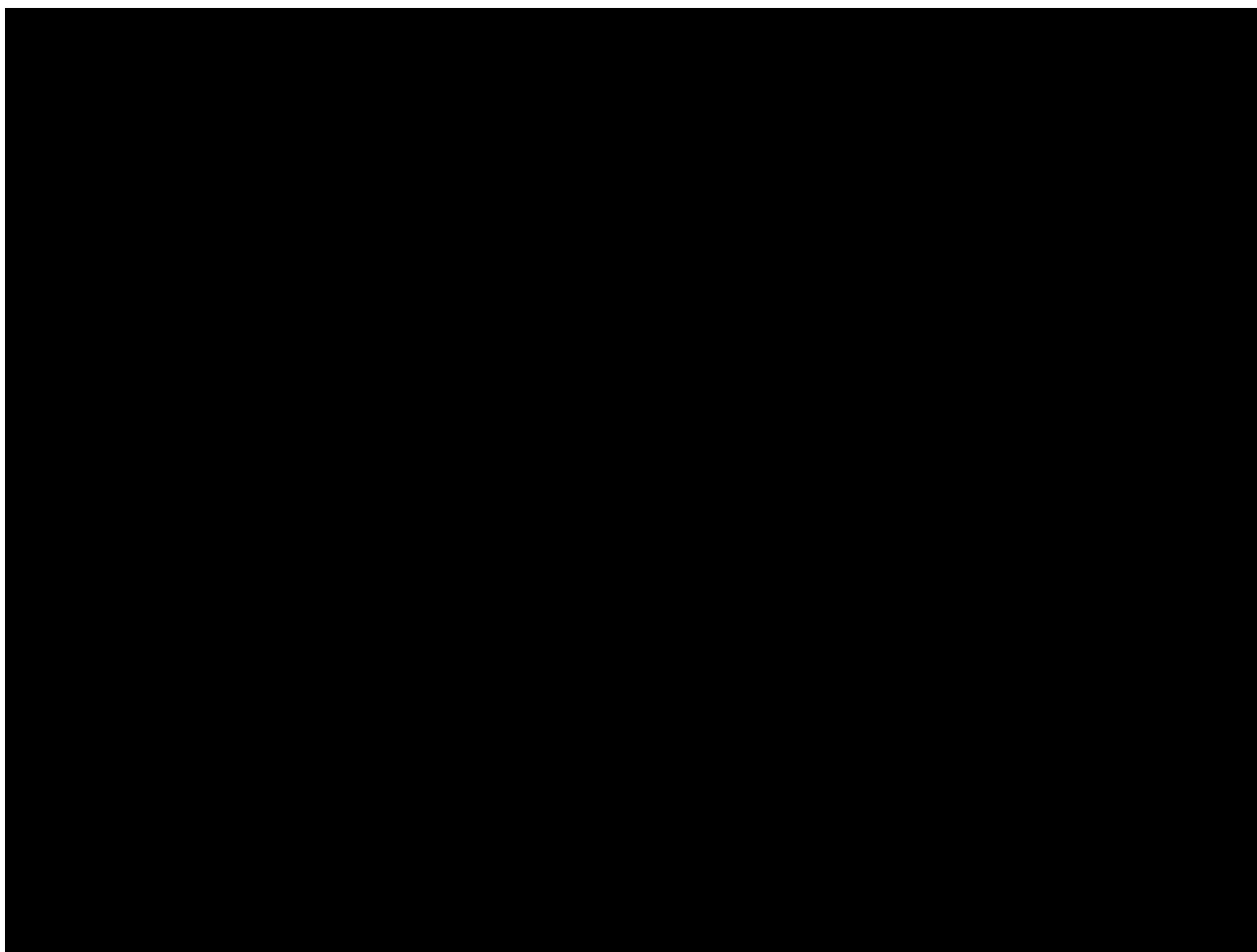
$\frac{X(s)}{F(s)}$ の伝達関数を求めよ．ただし，台車の初期位置 $X(0)$ は0とする．

$$(Ms^2 + Cs + K)X(s) - (Ms^2 + Cs + K)X(0) = F(s)$$

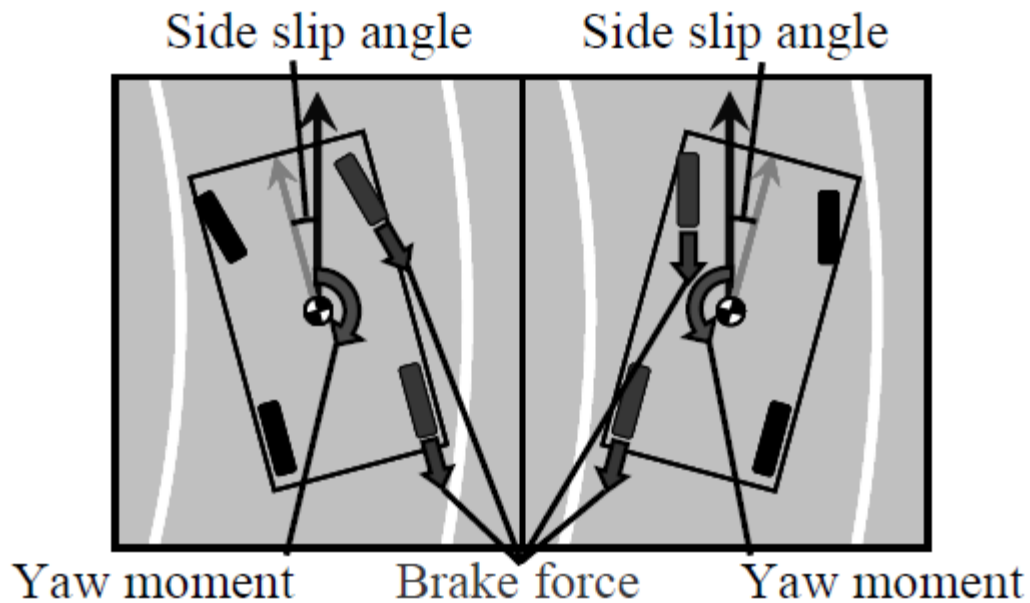
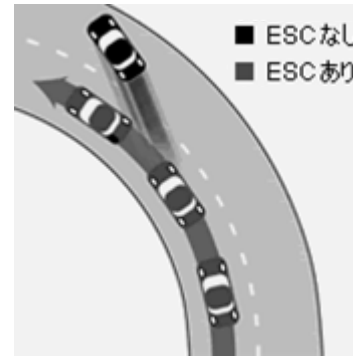
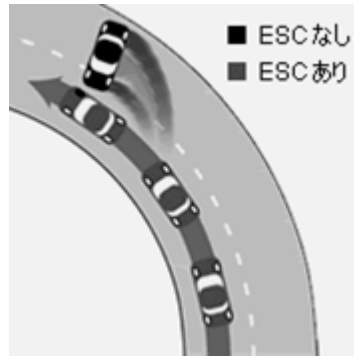
$$(Ms^2 + Cs + K)X(s) = F(s)$$

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{Ms^2 + Cs + K} = \frac{\frac{1}{M}}{s^2 + \frac{C}{M}s + \frac{K}{M}} = \frac{\frac{1}{M}}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

自動車のヨーモーメント制御



自動車のヨーモーメント制御



電気自動車の制御



ステアリングを操作しなくても、ヨーモーメントを制御することで車両操作できる！



従来の自動車の操舵方法
ハンドル操作のみ
(緊急時のみブレーキ介入)

電気自動車の操舵方法
ハンドル操作+**左右輪の独立駆動**

実験

実験概要

電気自動車を模擬した実験装置を用いて、
トルク入力に対するヨーレイト
（回転角速度）の応答を調べ、
伝達関数との違いを調査せよ

実験装置

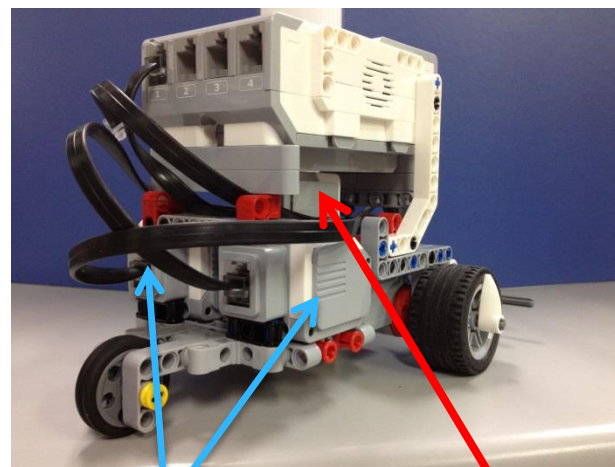
車型ロボット

実験条件

- ・ トルクを正弦波で入力
- ・ 正弦波は6種類以上の周波数
- ・ 車両の速度は一定

どのようにしてトルク入力に対する
ヨーレイトの応答を調査するのか？

運動方程式から求めた伝達関数と実験結果の
周波数応答を比較することによって調査する。



サーボモータ

ジャイロセンサ
(ヨーレイト)

実験

実験概要

電気自動車を模擬した実験装置を用いて、操舵角入力に対するヨーレイト（回転角速度）の応答を調べ、伝達関数との違いを調査せよ

実験装置

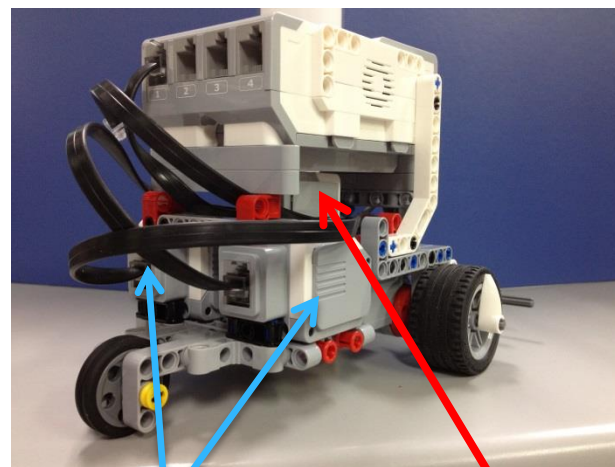
車型ロボット

実験条件

- ・ 操舵角を正弦波で入力
- ・ 正弦波は6種類以上の周波数
- ・ 車両の速度は一定

どのようにして操舵角入力に対するヨーレイトの応答を調査するのか？

運動方程式から求めた伝達関数と実験結果の周波数応答を比較することによって調査する。

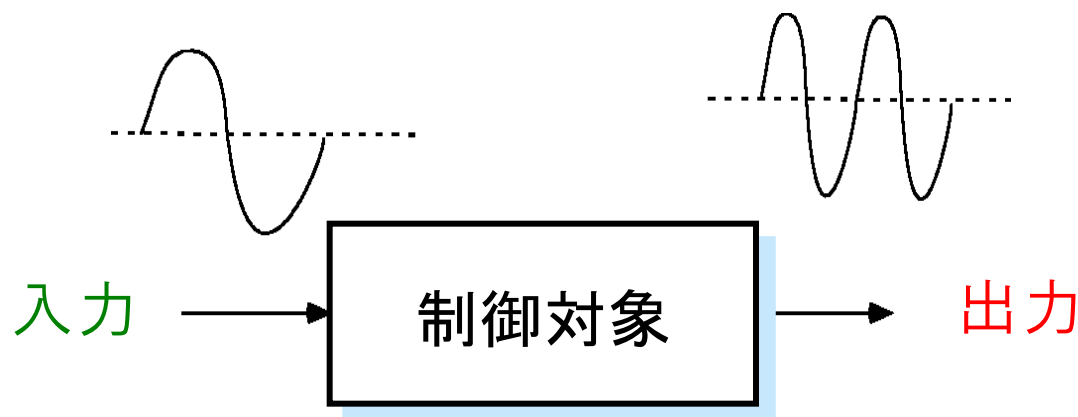


サーボモータ

ジャイロセンサ
(ヨーレイト)

周波数応答

制御対象に様々な周波数の正弦波の入力信号を与え、出力信号が正弦波の定常状態に達したときの応答を周波数応答という。

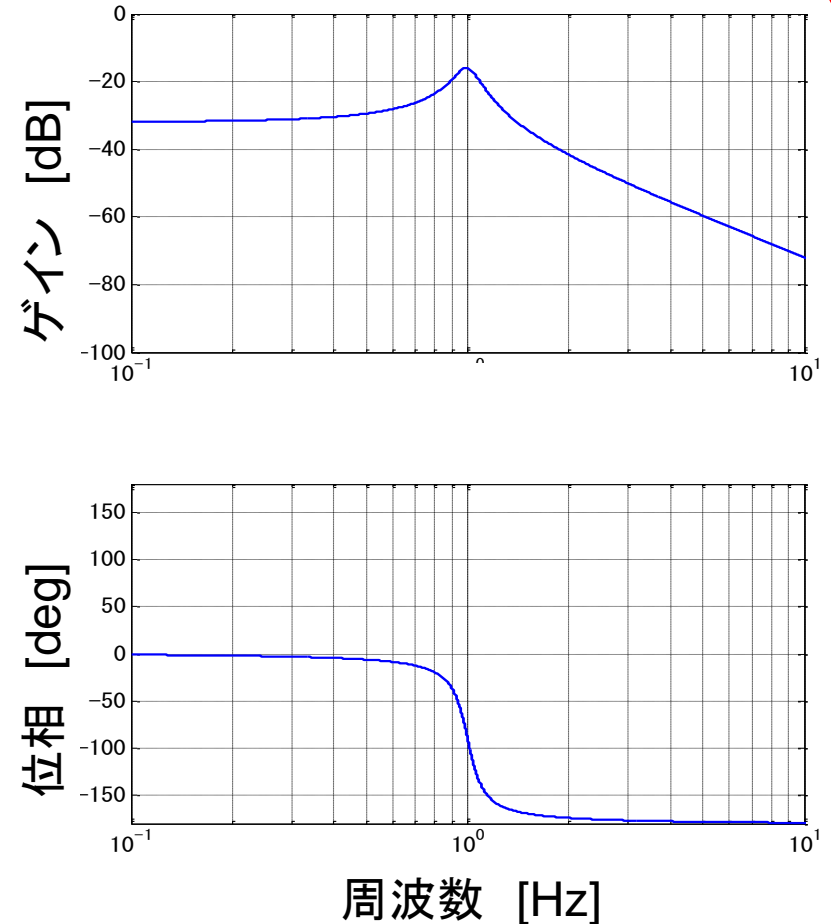


周波数応答は2つの特性を表している

- ・ ゲイン特性 (入力と出力の振幅比)
- ・ 位相特性 (入力に対する出力の遅れ)

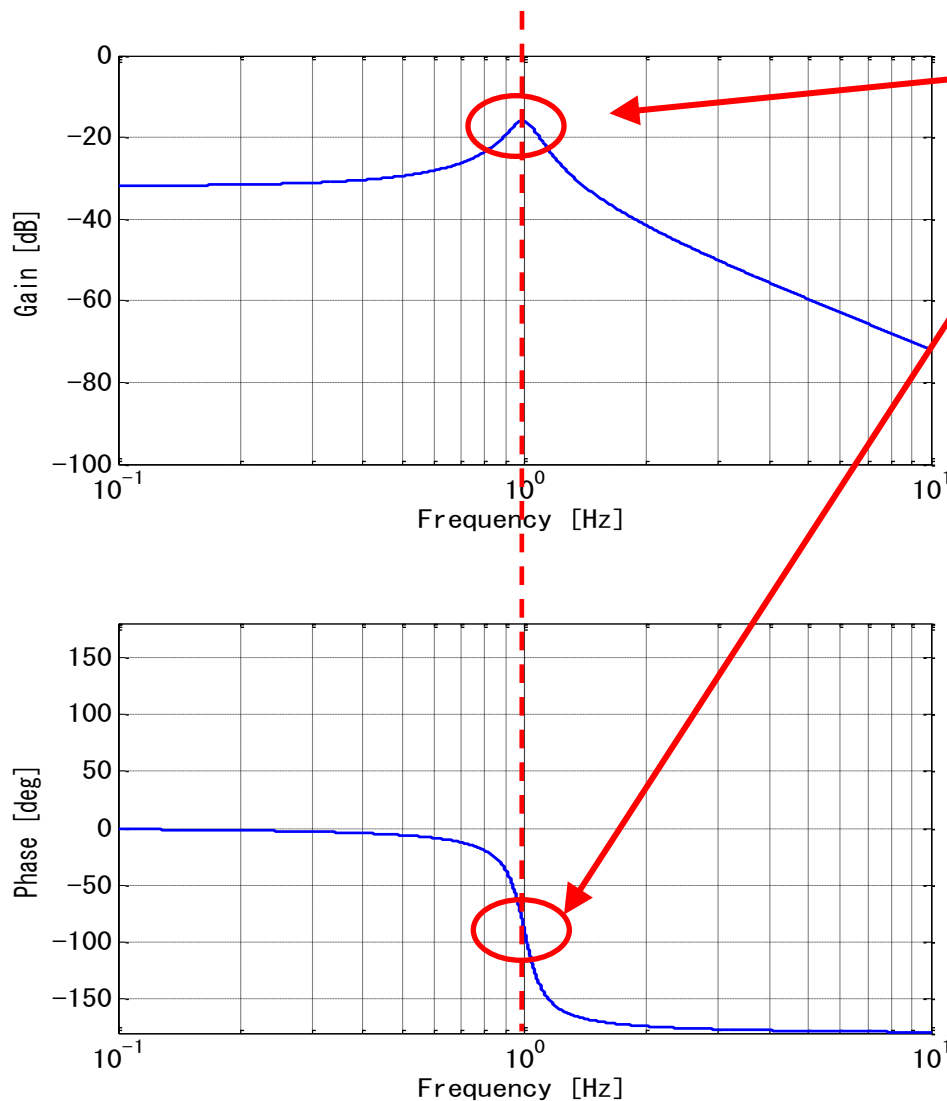
周波数応答の構成

- ・横軸は周波数
- ・片対数グラフ
- ・上がゲイン線図（単位：dB）
- ・下が位相線図（単位：deg）
- ・上下二つで一つのグラフ

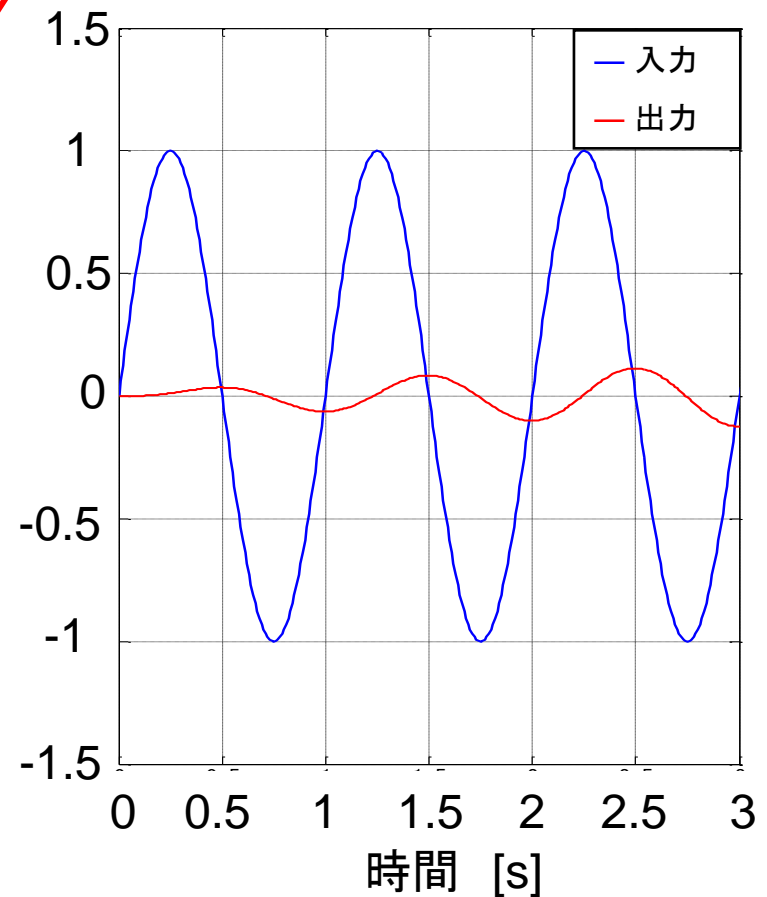


周波数応答

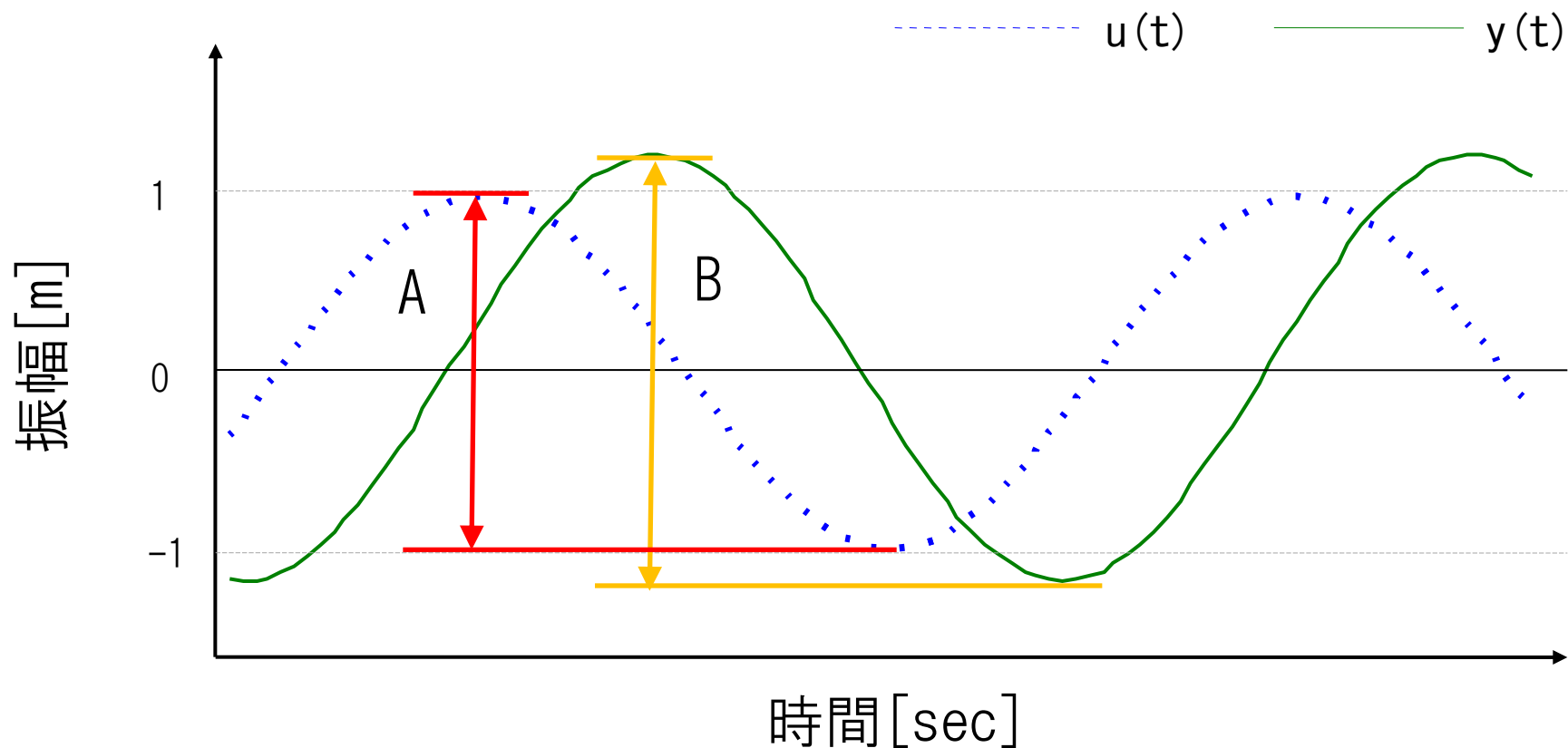
周波数応答と時刻歴応答の対応



- 周波数: 1 [Hz]
- ゲイン: $20\text{Log}_{10}(0.1) = -20[\text{dB}]$
- 位相: $-90[\text{deg}]$



実験結果から周波数応答を求める 1



振幅比 = B/A

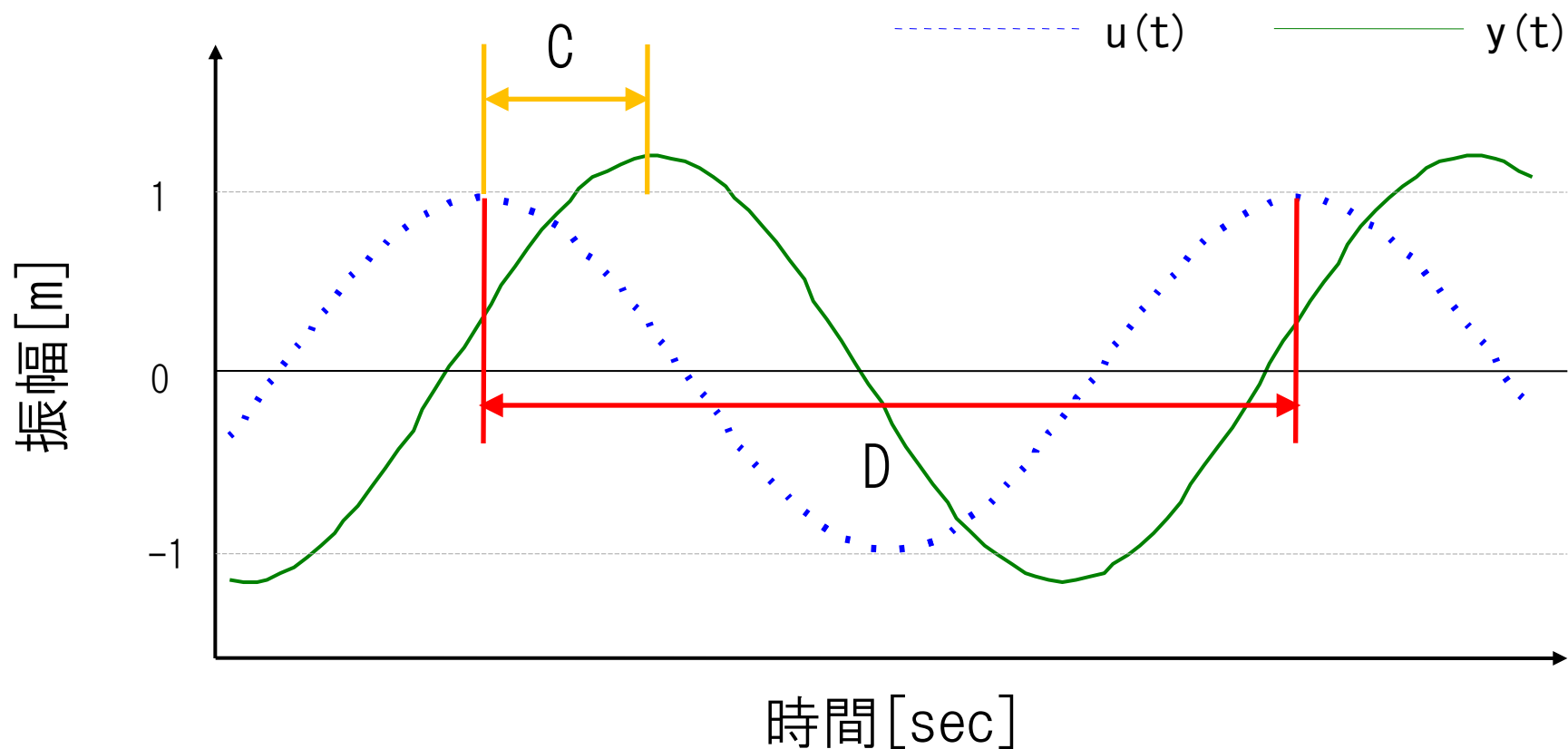
ゲイン = $20 \times \log_{10} (B/A)$

ゲインの単位はdB

A : 入力の振幅

B : 出力の振幅

実験結果から周波数応答を求める 2

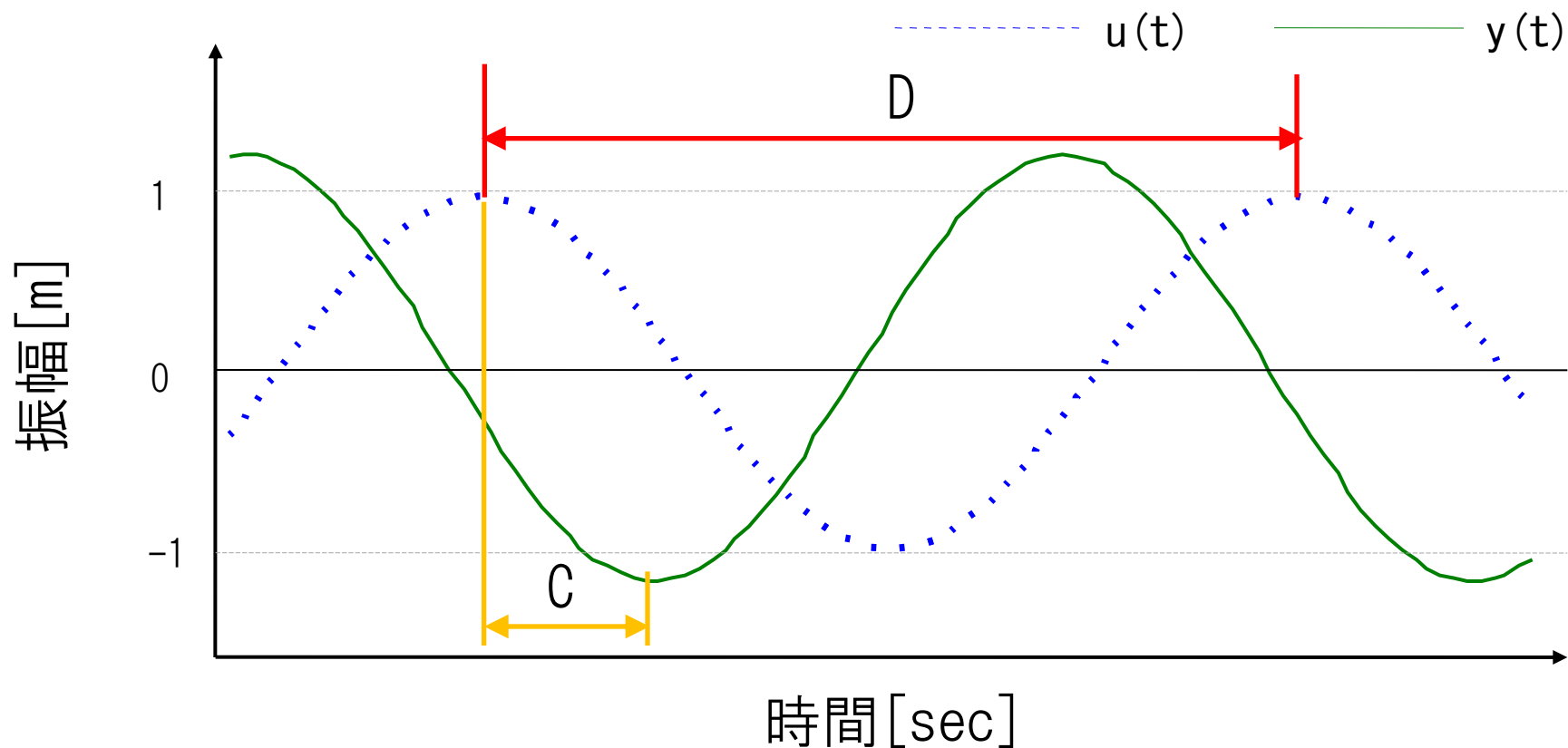


位相 = $-(C/D) \times 360$
位相の単位はdegree ($^{\circ}$)

C : 入力から出力までの時間
D : 入力の周期

実験結果から周波数応答を求める 2

後輪操舵の場合



位相 = $-(C/D) \times 360 - 180$
位相の単位はdegree ($^{\circ}$)

C : 入力から出力までの時間
D : 入力の周期

伝達関数から周波数応答を求める

先ほどの例題の伝達関数 $\frac{X(s)}{Y(s)} = G(s) = \frac{1}{Ms^2 + Cs + K}$

この伝達関数より、ゲインと位相を求めるには？

$s=j\omega$ を伝達関数に代入することにより、周波数応答を求めることができる。

$$\frac{X(s)}{Y(s)} = G(s) = \frac{1}{Ms^2 + Cs + K} = \frac{1}{-M\omega^2 + jC\omega + K} = \frac{1}{(-M\omega^2 + K) + jC\omega} = \frac{(-M\omega^2 + K) - jC\omega}{(-M\omega^2 + K)^2 + (C\omega)^2} = a + jb$$

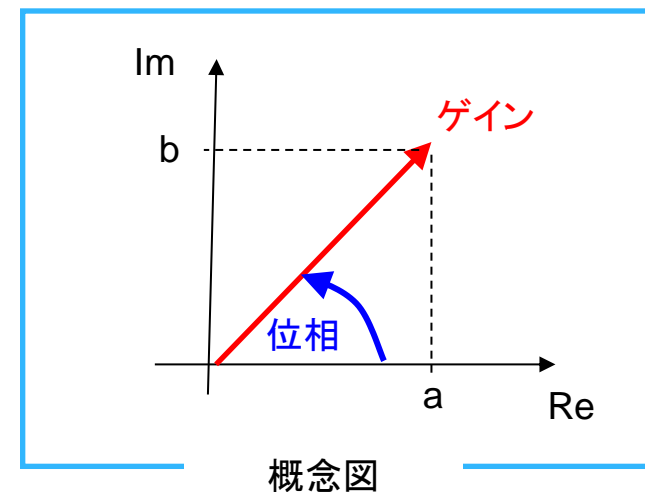
実数 a と虚数 b にまとめることができる。

ゲイン [dB]

$$\begin{aligned} \text{gain} &= 20\log_{10} G(j\omega) \\ &= 20\log_{10} \left(\sqrt{\frac{[-M\omega^2 + K]^2 + [C\omega]^2}{\{[-M\omega^2 + K]^2 + [C\omega]^2\}^2}} \right) \\ &= 20\log_{10} (\sqrt{a^2 + b^2}) \end{aligned}$$

位相 [deg]

$$\phi = \frac{180}{\pi} \left(\tan^{-1} \left\{ \frac{b}{a} \right\} \right)$$



車両の運動方程式（等価二輪モデル）

車体に固定された移動座標系における車両の運動方程式は，走行速度一定の場合，重心点の並進運動（横滑り）と回転運動（ヨーイング）に関して次のように求められる．

$$mV(\dot{\beta} + \gamma) = 2F_f + 2F_r$$

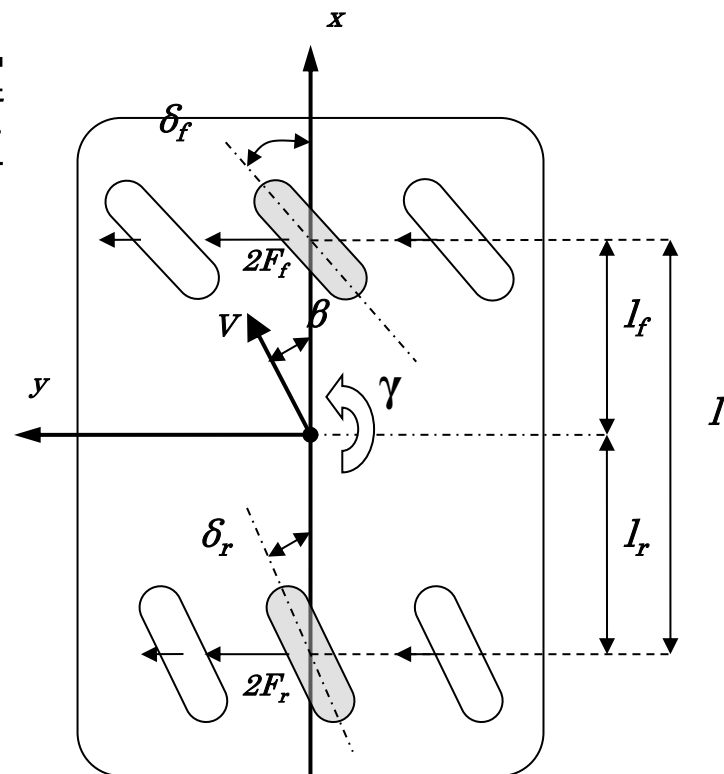
$$I_{zz}\dot{\gamma} = 2F_f l_f - 2F_r l_r$$

前後の各タイヤの発生するコーナリングフォース F は次式で表すことができる．

$$F_f = C_f \alpha_f, \quad F_r = C_r \alpha_r$$

前後タイヤの横滑り角 α_f ， α_r は，車体重心点の横滑り角 β とヨーレート γ および前後輪の蛇角 δ_f ， δ_r の関数として次のように表すことができる．

$$\alpha_f = \delta_f - \left(\beta + \frac{l_f}{V} \gamma \right) \quad \alpha_r = \delta_r - \left(\beta - \frac{l_r}{V} \gamma \right)$$



本実験装置の運動方程式 (トルク差 前一輪)

車体に固定された移動座標系における車両の運動方程式は，走行速度一定の場合，重心点の並進運動（横滑り）と回転運動（ヨーイング）に関して次のように求められる．

$$mV(\dot{\beta} + \gamma) = F_f + 2F_r$$

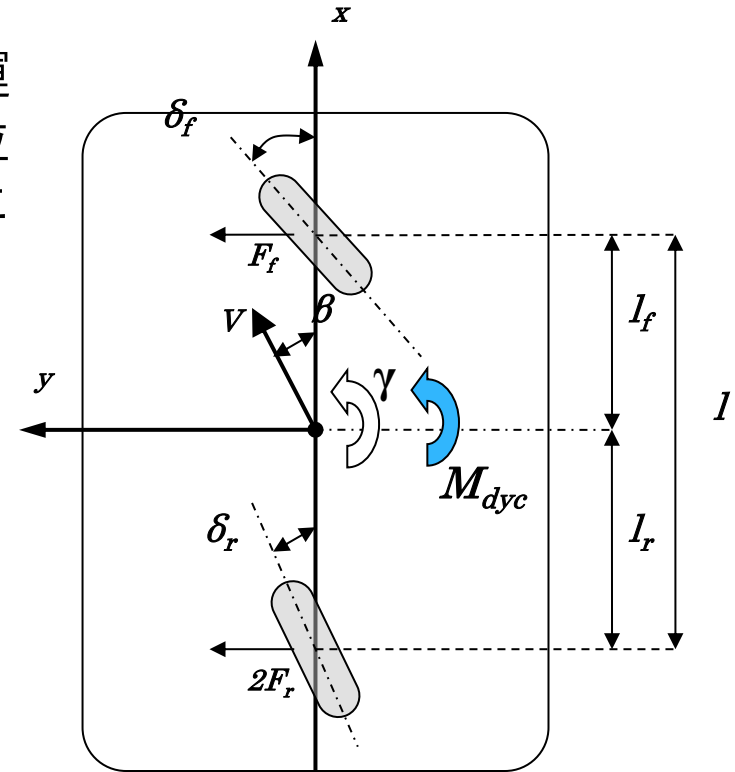
$$I_{zz}\dot{\gamma} = F_f l_f - 2F_r l_r + M_{dyc}$$

前後の各タイヤの発生するコーナリングフォース F は次式で表すことができる．

$$F_f = C_f \alpha_f, F_r = C_r \alpha_r$$

前後タイヤの横滑り角 α_f, α_r は，車体重心点の横滑り角 β とヨーレート γ および前後輪の蛇角 δ_f, δ_r の関数として次のように表すことができる．

$$\alpha_f = \delta_f - \left(\beta + \frac{l_f}{V} r \right) \quad \alpha_r = \delta_r - \left(\beta - \frac{l_r}{V} r \right) \quad \text{※ただし本実験装置では } \delta_f = 0, \delta_r = 0 \text{ と仮定する}$$



本実験装置の運動方程式 (トルク差 後一輪)

車体に固定された移動座標系における車両の運動方程式は，走行速度一定の場合，重心点の並進運動（横滑り）と回転運動（ヨーイング）に関して次のように求められる．

$$mV(\dot{\beta} + \gamma) = 2F_f + F_r$$

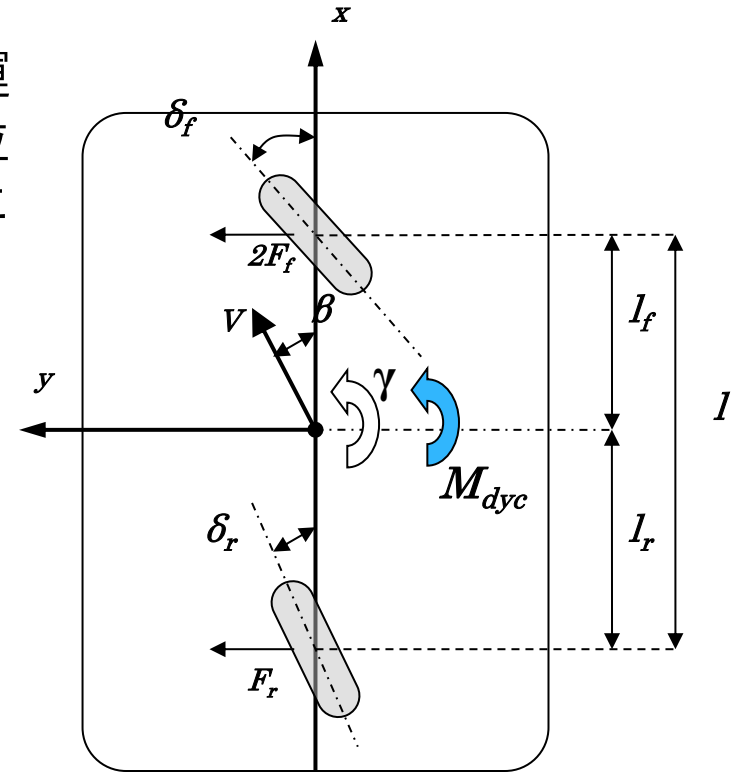
$$I_{zz} \dot{\gamma} = 2F_f l_f - F_r l_r + M_{dyc}$$

前後の各タイヤの発生するコーナリングフォース F は次式で表すことができる．

$$F_f = C_f \alpha_f, \quad F_r = C_r \alpha_r$$

前後タイヤの横滑り角 α_f, α_r は，車体重心点の横滑り角 β とヨーレート γ および前後輪の蛇角 δ_f, δ_r の関数として次のように表すことができる．

$$\alpha_f = \delta_f - \left(\beta + \frac{l_f}{V} r \right) \quad \alpha_r = \delta_r - \left(\beta - \frac{l_r}{V} r \right) \quad \text{※ただし本実験装置では } \delta_f = 0, \delta_r = 0 \text{ と仮定する}$$



本実験装置の運動方程式 (トルク差 四輪)

車体に固定された移動座標系における車両の運動方程式は，走行速度一定の場合，重心点の並進運動（横滑り）と回転運動（ヨーイング）に関して次のように求められる．

$$mV(\dot{\beta} + \gamma) = 2F_f + 2F_r$$

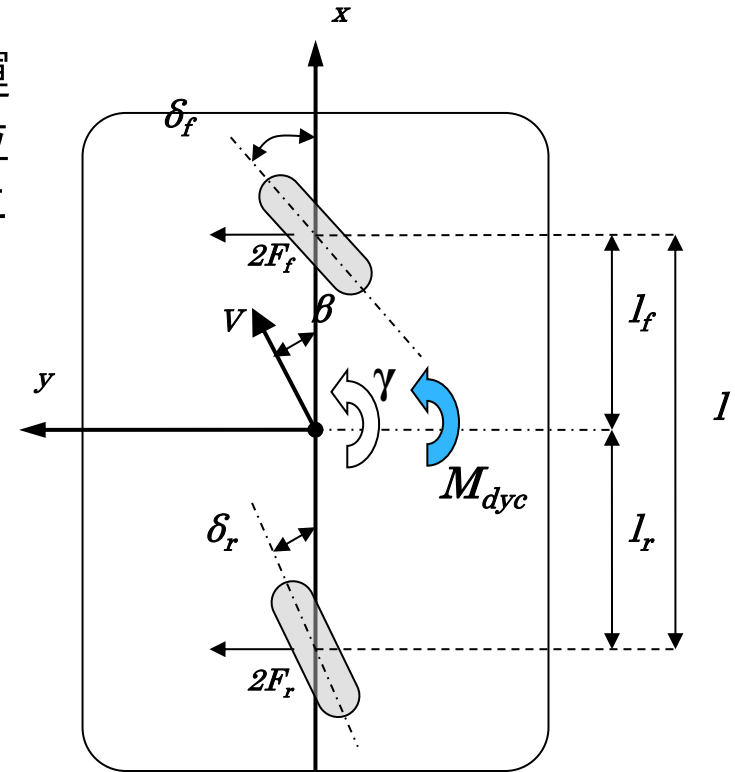
$$I_{zz}\dot{\gamma} = 2F_f l_f - 2F_r l_r + M_{dyc}$$

前後の各タイヤの発生するコーナリングフォース F は次式で表すことができる．

$$F_f = C_f \alpha_f, \quad F_r = C_r \alpha_r$$

前後タイヤの横滑り角 α_f, α_r は，車体重心点の横滑り角 β とヨーレート γ および前後輪の蛇角 δ_f, δ_r の関数として次のように表すことができる．

$$\alpha_f = \delta_f - \left(\beta + \frac{l_f}{V} r \right) \quad \alpha_r = \delta_r - \left(\beta - \frac{l_r}{V} r \right) \quad \text{※ただし本実験装置では } \delta_f = 0, \delta_r = 0 \text{ と仮定する}$$



本実験装置の運動方程式(操舵 前一輪)

車体に固定された移動座標系における車両の運動方程式は，走行速度一定の場合，重心点の並進運動（横滑り）と回転運動（ヨーイング）に関して次のように求められる．

$$mV(\dot{\beta} + \gamma) = F_f + 2F_r$$

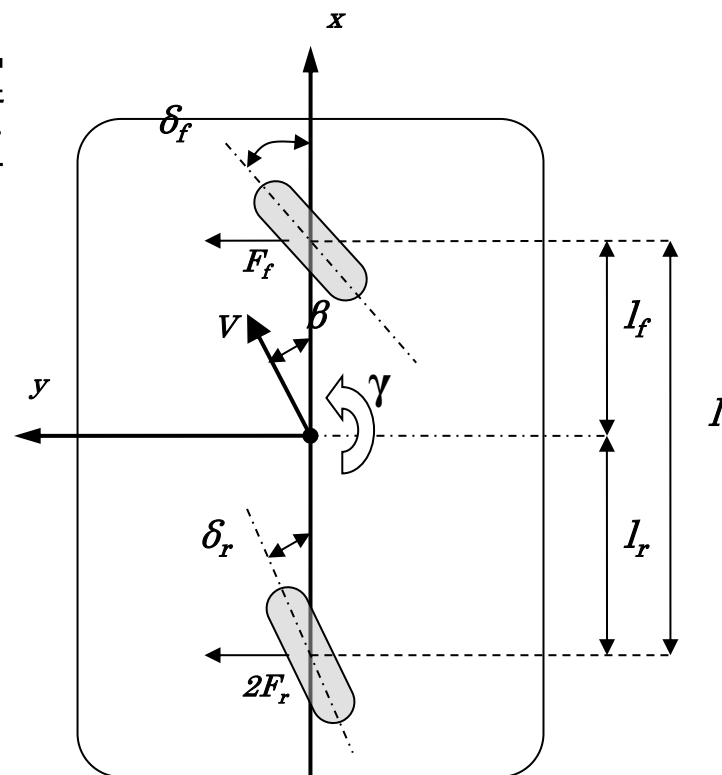
$$I_{zz}\dot{\gamma} = F_f l_f - 2F_r l_r$$

前後の各タイヤの発生するコーナリングフォース F は次式で表すことができる．

$$F_f = C_f \alpha_f, \quad F_r = C_r \alpha_r$$

前後タイヤの横滑り角 α_f ， α_r は，車体重心点の横滑り角 β とヨーレート γ および前後輪の蛇角 δ_f ， δ_r の関数として次のように表すことができる．

$$\alpha_f = \delta_f - \left(\beta + \frac{l_f}{V} r \right) \quad \alpha_r = \delta_r - \left(\beta - \frac{l_r}{V} r \right)$$



※ただし本実験装置では， δ_r は0と仮定する

本実験装置の運動方程式(操舵 後一輪)

車体に固定された移動座標系における車両の運動方程式は，走行速度一定の場合，重心点の並進運動（横滑り）と回転運動（ヨーイング）に関して次のように求められる．

$$mV(\dot{\beta} + \gamma) = 2F_f + F_r$$

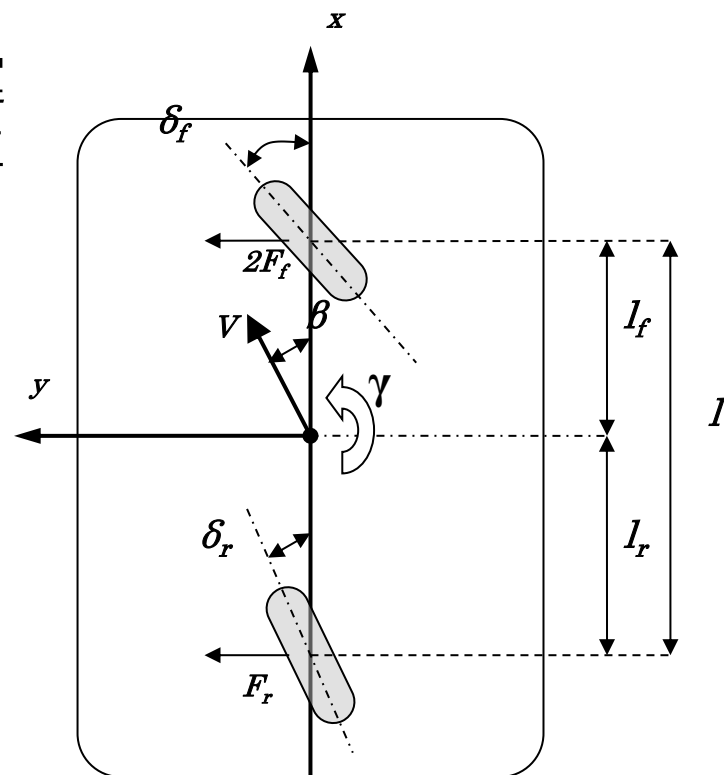
$$I_{zz}\dot{\gamma} = 2F_f l_f - F_r l_r$$

前後の各タイヤの発生するコーナリングフォース F は次式で表すことができる．

$$F_f = C_f \alpha_f, \quad F_r = C_r \alpha_r$$

前後タイヤの横滑り角 α_f ， α_r は，車体重心点の横滑り角 β とヨーレート γ および前後輪の蛇角 δ_f ， δ_r の関数として次のように表すことができる．

$$\alpha_f = \delta_f - \left(\beta + \frac{l_f}{V} r \right) \quad \alpha_r = \delta_r - \left(\beta - \frac{l_r}{V} r \right)$$



※ただし本実験装置では， δ_r は0と仮定する

本実験装置の運動方程式(操舵 四輪)

車体に固定された移動座標系における車両の運動方程式は，走行速度一定の場合，重心点の並進運動（横滑り）と回転運動（ヨーイング）に関して次のように求められる．

$$mV(\dot{\beta} + \gamma) = 2F_f + 2F_r$$

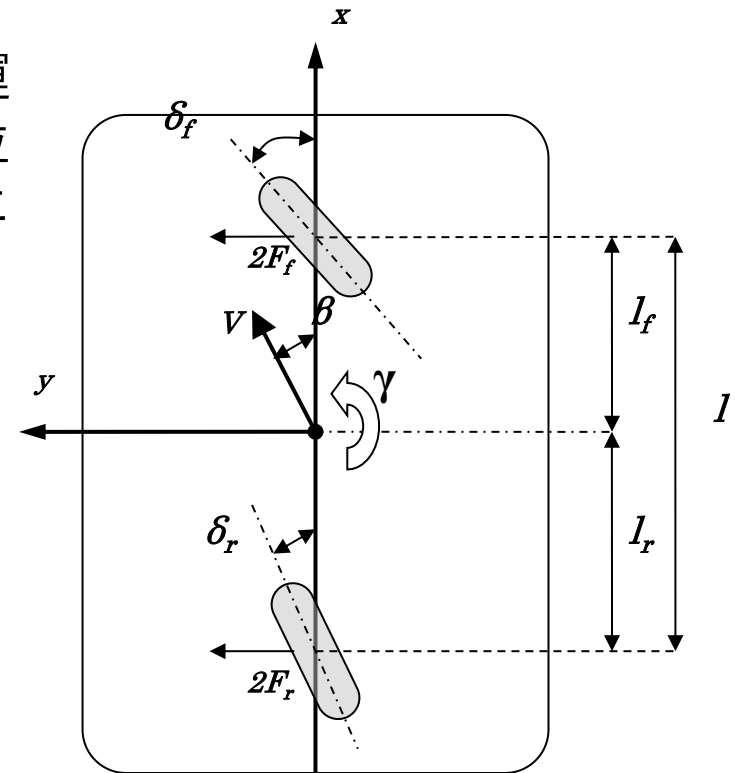
$$I_{zz}\dot{\gamma} = 2F_f l_f - 2F_r l_r$$

前後の各タイヤの発生するコーナリングフォース F は次式で表すことができる．

$$F_f = C_f \alpha_f, \quad F_r = C_r \alpha_r$$

前後タイヤの横滑り角 α_f, α_r は，車体重心点の横滑り角 β とヨーレート γ および前後輪の蛇角 δ_f, δ_r の関数として次のように表すことができる．

$$\alpha_f = \delta_f - \left(\beta + \frac{l_f}{V} r \right) \quad \alpha_r = \delta_r - \left(\beta - \frac{l_r}{V} r \right)$$



※ただし本実験装置では， δ_f または δ_r は0と仮定する

車両の運動方程式（等価二輪モデル）

トルク差三輪(前一輪)

整理すると

$$\dot{\beta} = -\frac{C_f + 2C_r}{mV} \beta - \left(1 + \frac{C_f l_f - 2C_r l_r}{mV^2}\right) \gamma$$
$$\dot{\gamma} = -\frac{C_f l_f - 2C_r l_r}{I_{zz}} \beta - \frac{C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{I_{zz} V} \gamma + \frac{M_{dyc}}{I_{zz}}$$

伝達関数を求めるには，何を知る必要があるか？

ラプラス変換は時間の関数をsの関数に変換するため，**時間によって変化する変数**を知る必要がある．

時間によって変化する変数

- $\gamma(t)$: ヨーレート
- $\beta(t)$: 横滑り角
- $M_{dyc}(t)$: DYC制御入力(左右後輪のトルク差)
- $V(t)$: 速度 (今回は一定とする)
- $C_f(t)$: 前輪コーナリングパワー (今回は一定とする)
- $C_r(t)$: 後輪コーナリングパワー (今回は一定とする)

車両の運動方程式（等価二輪モデル）

トルク差三輪(後一輪)

整理すると

$$\dot{\beta} = -\frac{2C_f + C_r}{mV} \beta - \left(1 + \frac{2C_f l_f - C_r l_r}{mV^2}\right) \gamma$$
$$\dot{\gamma} = -\frac{2C_f l_f - C_r l_r}{I_{zz}} \beta - \frac{2C_f l_f^2 + C_r l_r^2}{I_{zz} V} \gamma + \frac{M_{dyc}}{I_{zz}}$$

伝達関数を求めるには，何を知る必要があるか？

ラプラス変換は時間の関数をsの関数に変換するため，**時間によって変化する変数**を知る必要がある．

時間によって変化する変数

- $\gamma(t)$: ヨーレート
- $\beta(t)$: 横滑り角
- $M_{dyc}(t)$: DYC制御入力(左右後輪のトルク差)
- $V(t)$: 速度 (今回は一定とする)
- $C_f(t)$: 前輪コーナリングパワー (今回は一定とする)
- $C_r(t)$: 後輪コーナリングパワー (今回は一定とする)

車両の運動方程式（等価二輪モデル）

トルク差四輪

整理すると

$$\dot{\beta} = -\frac{2C_f + 2C_r}{mV} \beta - \left(1 + \frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{mV^2} \right) \gamma$$
$$\dot{\gamma} = -\frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{I_{zz}} \beta - \frac{2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{I_{zz} V} \gamma + \frac{M_{dyc}}{I_{zz}}$$

伝達関数を求めるには，何を知る必要があるか？

ラプラス変換は時間の関数をsの関数に変換するため，**時間によって変化する変数**を知る必要がある．

時間によって変化する変数

- $\gamma(t)$: ヨーレート
- $\beta(t)$: 横滑り角
- $M_{dyc}(t)$: DYC制御入力(左右後輪のトルク差)
- $V(t)$: 速度 (今回は一定とする)
- $C_f(t)$: 前輪コーナリングパワー (今回は一定とする)
- $C_r(t)$: 後輪コーナリングパワー (今回は一定とする)

車両の運動方程式（等価二輪モデル）

前輪操舵四輪

整理すると

$$\begin{aligned}\dot{\beta} &= -\frac{2C_f + 2C_r}{mV} \beta - \left(1 + \frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{mV^2}\right) \gamma + \frac{2C_f}{mV} \delta_f \\ \dot{\gamma} &= -\frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{I_{zz}} \beta - \frac{2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{I_{zz} V} \gamma + \frac{2C_f l_f}{I_{zz}} \delta_f\end{aligned}$$

伝達関数を求めるには，何を知る必要があるか？

ラプラス変換は時間の関数をsの関数に変換するため，**時間によって変化する変数**を知る必要がある．

時間によって変化する変数

- $\gamma(t)$: ヨーレート
- $\beta(t)$: 横滑り角
- $\delta_f(t)$: 前輪操舵入力
- $V(t)$: 速度（今回は一定とする）
- $C_f(t)$: 前輪コーナリングパワー（今回は一定とする）
- $C_r(t)$: 後輪コーナリングパワー（今回は一定とする）

車両の運動方程式（等価二輪モデル）

後輪操舵四輪

整理すると

$$\begin{aligned}\dot{\beta} &= -\frac{2C_f + 2C_r}{mV} \beta - \left(1 + \frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{mV^2}\right) \gamma + \frac{2C_r}{mV} \delta_r \\ \dot{\gamma} &= -\frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{I_{zz}} \beta - \frac{2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{I_{zz}V} \gamma - \frac{2C_r l_r}{I_{zz}} \delta_r\end{aligned}$$

伝達関数を求めるには，何を知る必要があるか？

ラプラス変換は時間の関数をsの関数に変換するため，**時間によって変化する変数**を知る必要がある．

時間によって変化する変数

- $\gamma(t)$: ヨーレート
- $\beta(t)$: 横滑り角
- $\delta_r(t)$: 後輪操舵入力
- $V(t)$: 速度（今回は一定とする）
- $C_f(t)$: 前輪コーナリングパワー（今回は一定とする）
- $C_r(t)$: 後輪コーナリングパワー（今回は一定とする）

車両の運動方程式（等価二輪モデル）

前輪操舵三輪

整理すると

$$\begin{aligned}\dot{\beta} &= -\frac{C_f + 2C_r}{mV} \beta - \left(1 + \frac{C_f l_f - 2C_r l_r}{mV^2}\right) \gamma + \frac{C_f}{mV} \delta_f \\ \dot{\gamma} &= -\frac{C_f l_f - 2C_r l_r}{I_{zz}} \beta - \frac{C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{I_{zz} V} \gamma + \frac{C_f l_f}{I_{zz}} \delta_f\end{aligned}$$

伝達関数を求めるには，何を知る必要があるか？

ラプラス変換は時間の関数をsの関数に変換するため，**時間によって変化する変数**を知る必要がある．

時間によって変化する変数

- $\gamma(t)$: ヨーレート
- $\beta(t)$: 横滑り角
- $\delta_f(t)$: 前輪操舵入力
- $V(t)$: 速度（今回は一定とする）
- $C_f(t)$: 前輪コーナリングパワー（今回は一定とする）
- $C_r(t)$: 後輪コーナリングパワー（今回は一定とする）

車両の運動方程式（等価二輪モデル）

後輪操舵三輪

整理すると

$$\begin{aligned}\dot{\beta} &= -\frac{2C_f + C_r}{mV} \beta - \left(1 + \frac{2C_f l_f - C_r l_r}{mV^2}\right) \gamma + \frac{C_r}{mV} \delta_r \\ \dot{\gamma} &= -\frac{2C_f l_f - C_r l_r}{I_{zz}} \beta - \frac{2C_f l_f^2 + C_r l_r^2}{I_{zz} V} \gamma - \frac{C_r l_r}{I_{zz}} \delta_r\end{aligned}$$

伝達関数を求めるには，何を知る必要があるか？

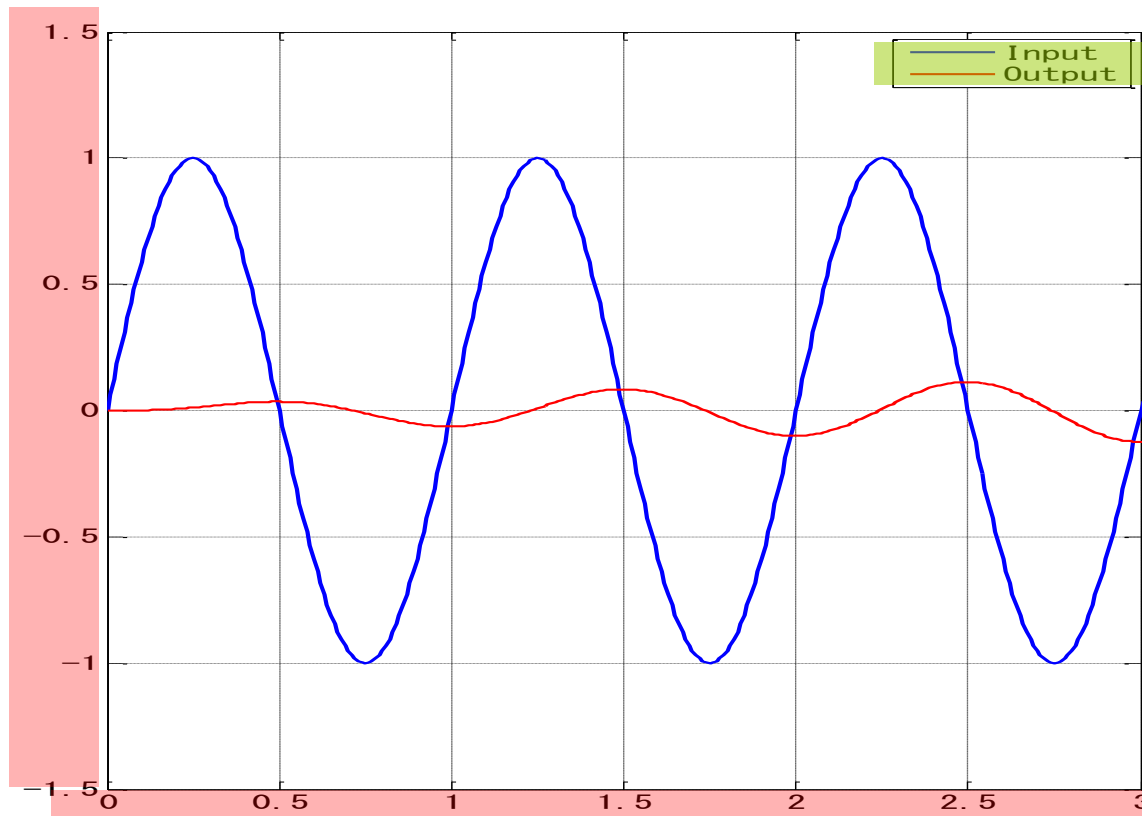
ラプラス変換は時間の関数をsの関数に変換するため，**時間によって変化する変数**を知る必要がある．

時間によって変化する変数

- $\gamma(t)$: ヨーレート
- $\beta(t)$: 横滑り角
- $\delta_r(t)$: 後輪操舵入力
- $V(t)$: 速度（今回は一定とする）
- $C_f(t)$: 前輪コーナリングパワー（今回は一定とする）
- $C_r(t)$: 後輪コーナリングパワー（今回は一定とする）

図（グラフ）について

トルク差 [Nm]
ヨーレート [rad/s]

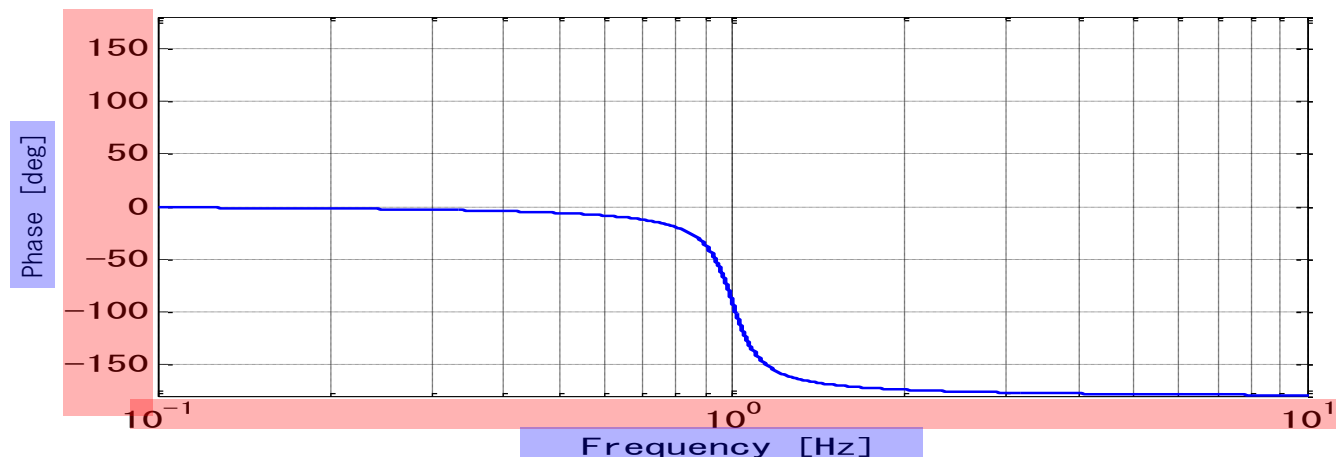
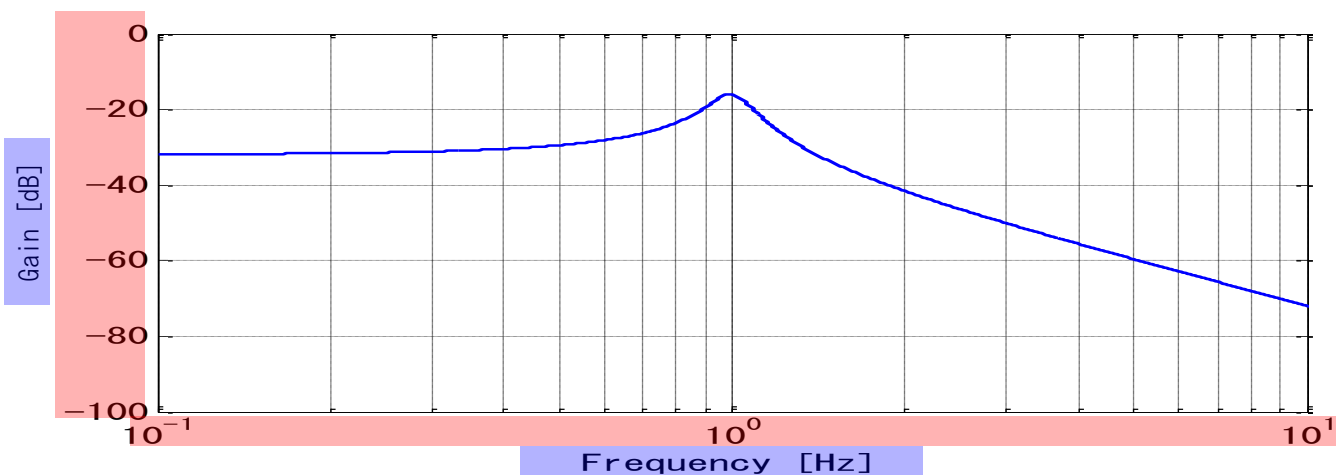


- ・ 軸は左下端
- ・ 軸の名称と単位
- ・ 凡例の記述

時間 [sec]

図1. 時刻歴応答

図（グラフ）について



- ・ 軸はグラフの端
- ・ 軸の名称と単位
- ・ 周波数応答は、ゲイン線図と位相線図で一つのグラフ
- ・ 片対数グラフ

図2 周波数応答

図 (グラフ) について

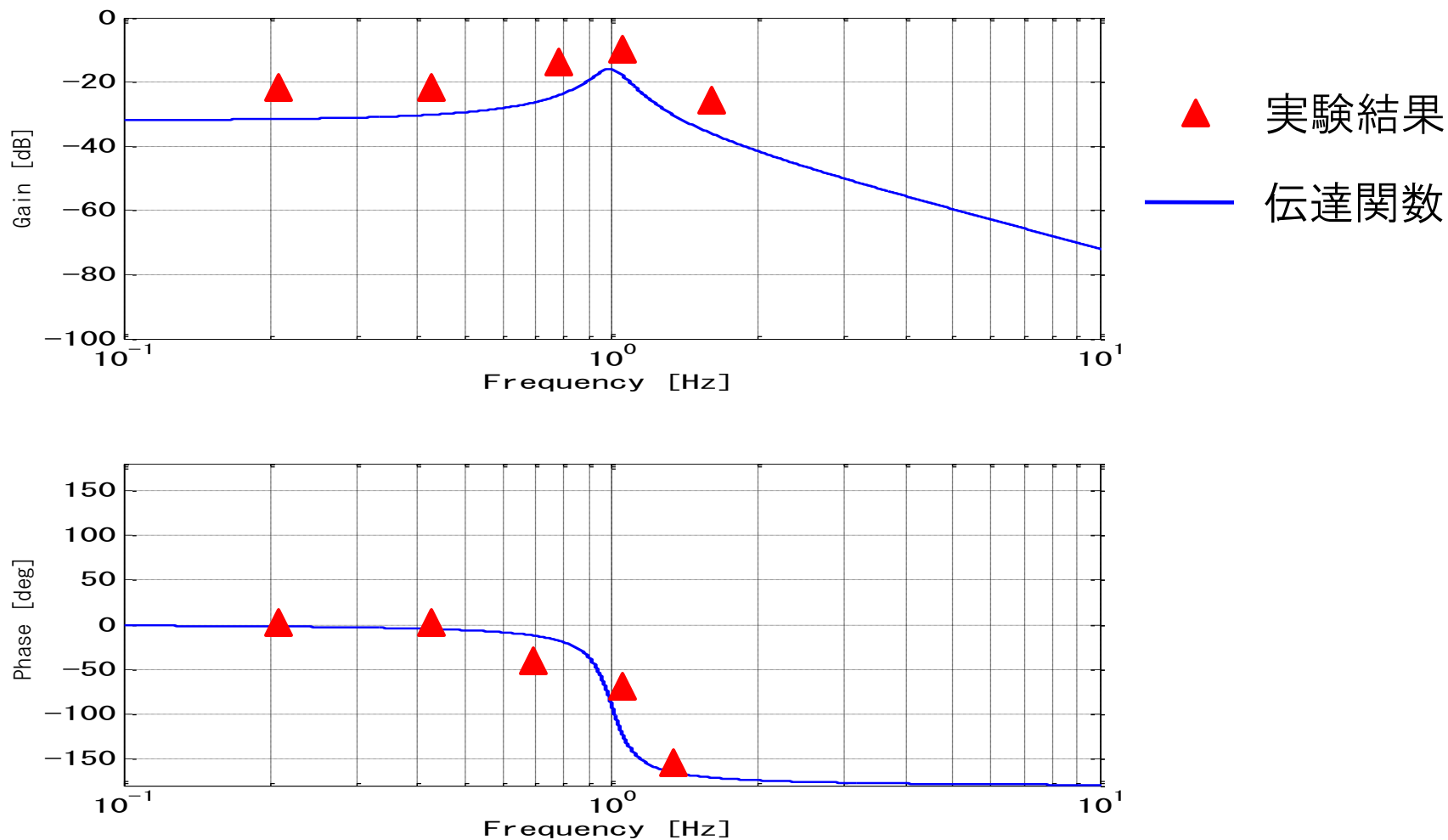


図3 周波数応答

レポートについて

Word、Excelのみで作成する。

提出時にはwordファイル(学籍番号 名前)も提出。

1. 目的
2. 課題3 (1) ~ (3)
3. グラフ

時刻暦応答（入力と出力）と周波数応答 2 種類
（実験結果，実験速度の伝達関数）

4. 考察

注意点

再提出

1. 図（グラフ）が指示したフォーマットではない。
2. すべての結果（実験，伝達関数），考察を定量的に評価をしていない。
3. 誤字脱字，おかしい日本語の文章などが多数ある。

レポートの評価

1. 考察は考え察したことであり，感想や結果の説明ではありません。
考察の内容でレポートの評価を行うため，結果の説明のみは減点。

実験データと注意事項

1. 実験データ (***.xls) → Excelで開けます
各シート毎に周波数の異なるデータを記録しています.

- ・ 時間 Time [sec] (A列)
- ・ ヨーレイト Yaw rate [rad/sec] (B列)
- ・ モータトルク差 Motor torque [Nm] (C列)
- ・ 速度 Velocity [m/sec] (D列)

2. Excel上の関数

・ $\tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)$ → **ATAN** ……範囲: $-\frac{\pi}{2}$ rad \sim $\frac{\pi}{2}$ rad

ATAN2 ……範囲: $-\pi$ rad \sim π rad

実験データと注意事項

1. 実験データ (***.xls) → Excelで開けます
各シート毎に周波数の異なるデータを記録しています.

- ・ 時間 Time [sec] (A列)
- ・ ヨーレイト Yaw rate [rad/sec] (B列)
- ・ 操舵角 Steer angle [rad] (C列)
- ・ 速度 Velocity [m/sec] (D列)

2. Excel上の関数

・ $\tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)$ → **ATAN** ……範囲: $-\frac{\pi}{2}$ rad \sim $\frac{\pi}{2}$ rad

ATAN2 ……範囲: $-\pi$ rad \sim π rad

フーリエ変換

すべての信号波形は、正弦波を足し合わせたものとして考えることができる。
よって、[周波数, 振幅, 位相]という値で任意の波形を表すことが可能となる。

