

1. はじめに

背景

- 大気汚染物質の排出規制が進行。
- SCR(選択的還元触媒)**は、NH₃を還元剤として用い有害なNO_xをN₂とH₂Oに還元する。また、**200°Cから400°C**の温度帯で高い浄化性能を発揮する。



Fig. 1: 4トントラック[1]

研究目的・アプローチ

- 排出ガス温度の調整によりSCR温度の過渡応答を改善する。
- 熱の伝達時間によるむだ時間を考慮し、**状態予測制御**を適用する。
- ロバスト化の負担を抑制した設計モデル**に基づき、良好な応答を達成する制御系を構成する。

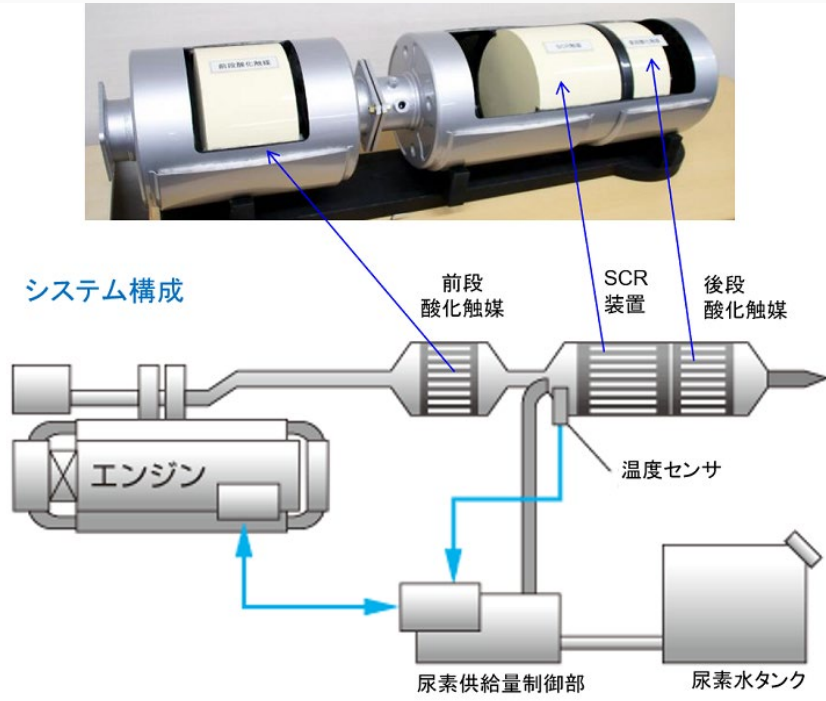


Fig. 2: 尿素SCRシステム[2]

2. 制御対象

特徴

- 調整した排出ガス温度が触媒に伝達するまでに**むだ時間**が発生。
- 排出ガス流量の条件により、むだ時間を含む制御モデルの**パラメータが変動**。

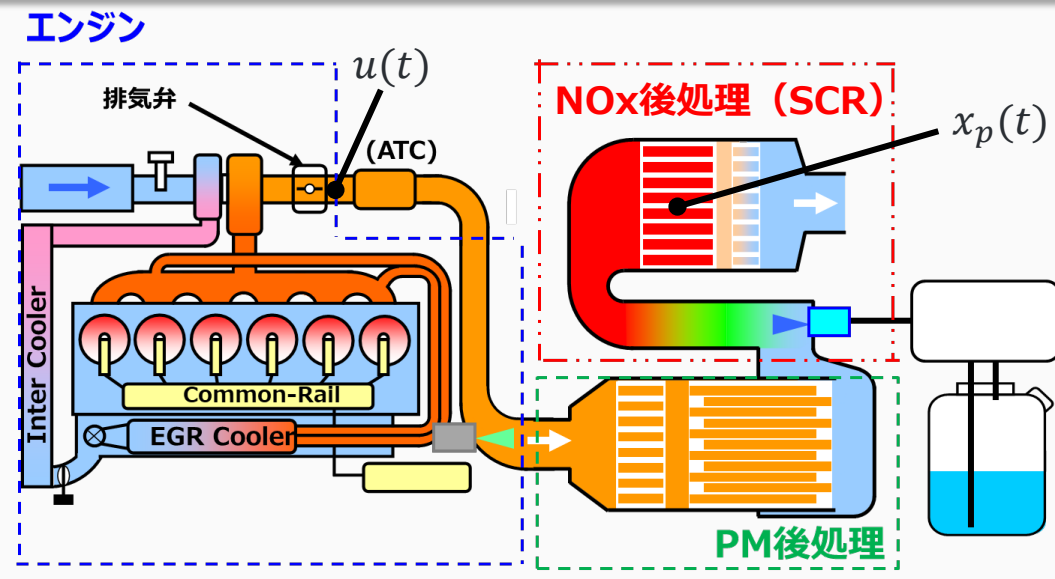


Fig. 3: ディーゼルエンジンと排出ガス後処理システム

熱伝達モデル[3]

熱の伝達時間を表した入力むだ時間系で表す。

$$\frac{d}{dt} x_p(t) = -\frac{1}{\tau} \{x_p(t) - \eta \cdot u(t-h)\}$$

$$\tau = \frac{m_c \cdot c_c}{\dot{m}_{EG} \cdot c_{EG}}$$

記号	定義
m_c	触媒質量 [kg]
\dot{m}_{EG}	排出ガス流量 [kg/h]
c_c	触媒比熱容量 [J/(kg·K)]
c_{EG}	排出ガス比熱容量 [J/(kg·K)]
h	むだ時間 [s]
τ	時定数 [s]
η	放熱係数 [-]

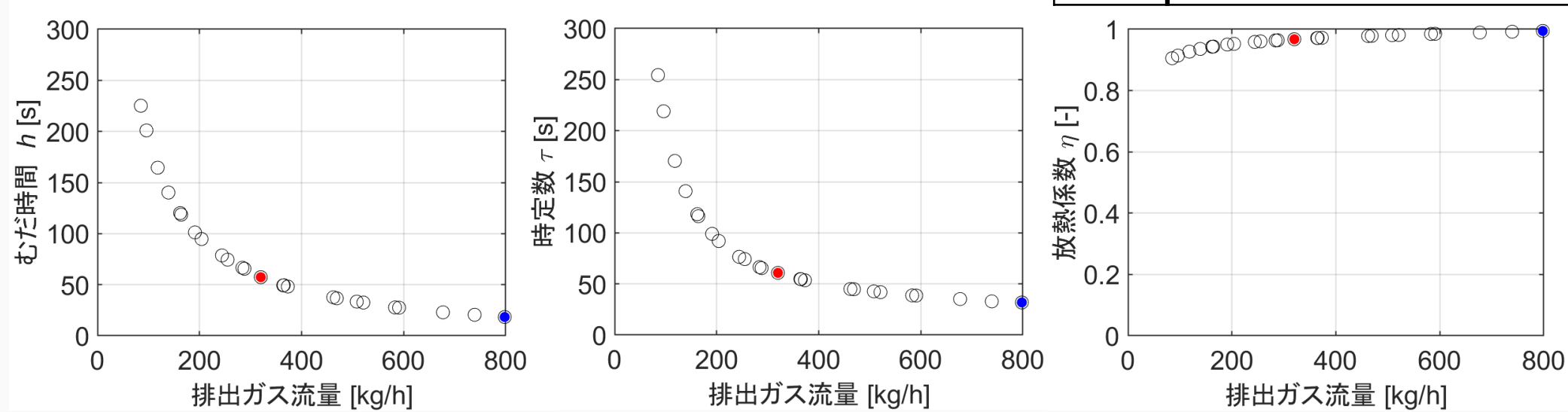


Fig. 4: パラメータ同定結果 (赤点: ①, 青点: ②)

- ✓ 入力むだ時間系に対する予測制御系を構成、パラメータ変動に対する安定性の確保が必要になる。

3. 状態予測型最適サーボ系

入力むだ時間系(SCR熱伝達モデル)に対し、出力を目標値(指定温度)に追従させる**状態予測型最適サーボ系**を構成する。

拡大系 Σ_e : $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t-h) + Dr(t)$

$$\begin{cases} \dot{x}_p(t) \\ \dot{x}_i(t) \end{cases} = \begin{bmatrix} A_p & 0 \\ -C_p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p(t) \\ x_i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \end{bmatrix} u(t-h) + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} r(t)$$

補助変数 $p(t) := x(t) + \int_{-h}^0 e^{-A(\beta+h)} Bu(t+\beta) d\beta$ を導入する。

仮想的な集中定数系 Σ_p [4]:

$$\dot{p}(t) = Ap(t) + \tilde{B}u(t) + Dr(t), \quad \tilde{B} := e^{-Ah}B$$

Σ_p に対して Fig. 5 の最適サーボ系を構成する[5]。

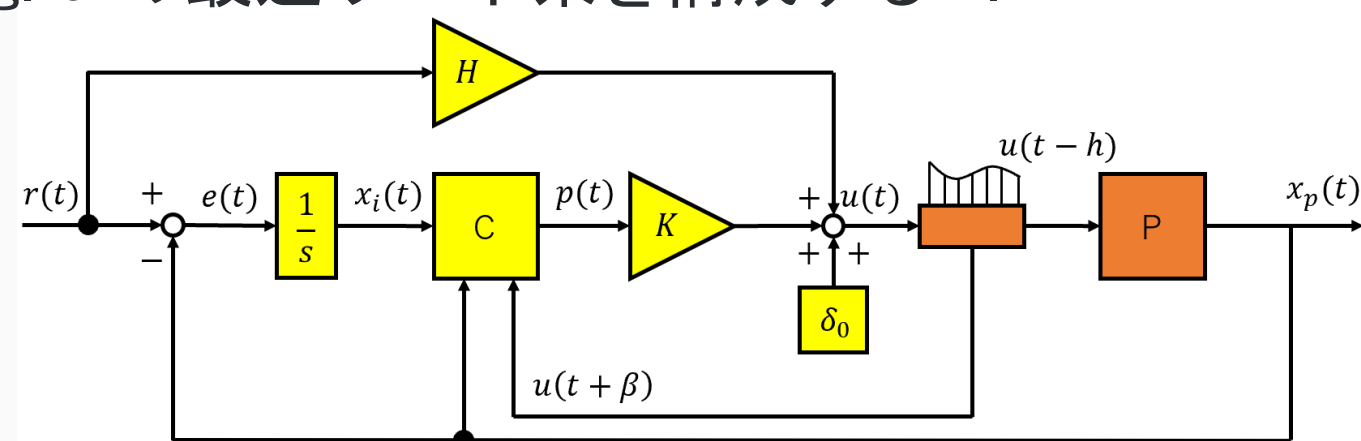


Fig. 5: 状態予測型最適サーボ系

参考文献

- [1] 日野自動車, "シャーシラインアップ | 日野レンジャー(中型トラック) | 日野自動車", <https://www.hino.co.jp/ranger/chassis/index.html>, (参照2023/12/26)
- [2] 日本自動車輸送技術協会, "技術解説—有害排出ガスの浄化技術について8", https://www.ataj.or.jp/technology/haigas_jyoka/haigas_jyoka8.html, (参照2023/09/28)

4. ロバスト安定条件・摂動を考慮した設計モデル

制御対象 $P(s)$ の変動をFig. 6のような乗法的摂動として評価する。

$$P(s) = \frac{\eta}{\tau s + 1} e^{-sh} \rightarrow \frac{\eta'}{\tau' s + 1} e^{-sh'}$$

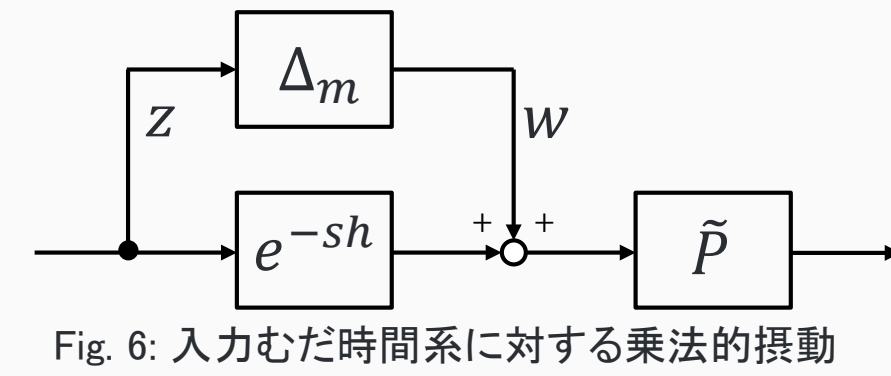


Fig. 6: 入力むだ時間系に対する乗法的摂動

乗法的摂動 $\Delta_m(s)$: $\Delta_m(s) = \frac{\eta'}{\eta} \cdot \frac{\tau s + 1}{\tau' s + 1} \cdot e^{-sh'} - e^{-sh}$

ロバスト安定条件

乗法的摂動 Δ_m に対する一般化プラント。

$$G_{zw}: \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t-h) + Dr(t) + Bw(t)$$

$$z(t) = u(t)$$

集中定数系への変換

$$\tilde{G}_{zw}: \dot{p}(t) = Ap(t) + \tilde{B}u(t) + Dr(t) + Bw(t)$$

$$z(t) = u(t)$$

乗法的摂動 Δ_m に対する安定条件[6]:

$$|\Delta_m(j\omega)| < \frac{1}{|\tilde{G}_{zw}(j\omega)|}, \quad \forall \omega$$

摂動を考慮した設計モデル

- ✓ **摂動の最大ゲイン**が最小になるパラメータ h, τ, η を選定し、感度改善の余力を残した設計を行う。
- ✓ パラメータ空間の各軸を10分割し、グリッド上の最適点を調べた結果、Fig. 4の青点のノミナルパラメータを得た。
- ✓ 集中系 \tilde{G}_{zw} に基づき状態予測制御系が構成できる。

5. ロバスト安定性解析とシミュレーション

- エンジンシミュレータ(GT-Power)を用いてシミュレーションを実施。
- 積載量 4.0 t, 総排気量 5.1 L の中型ディーゼルトラックを想定。
- ① **パラメータの中央値**(Fig. 4赤点)と、② **摂動を考慮したパラメータの組み合わせ**(Fig. 4青点)を用いた2通りの設計モデルを用いて設計。

- Fig. 7から、両者ともロバスト安定条件を満たしている。
- ②のモデルの方がパラメータ変化に対するロバスト化の負担が少ない。

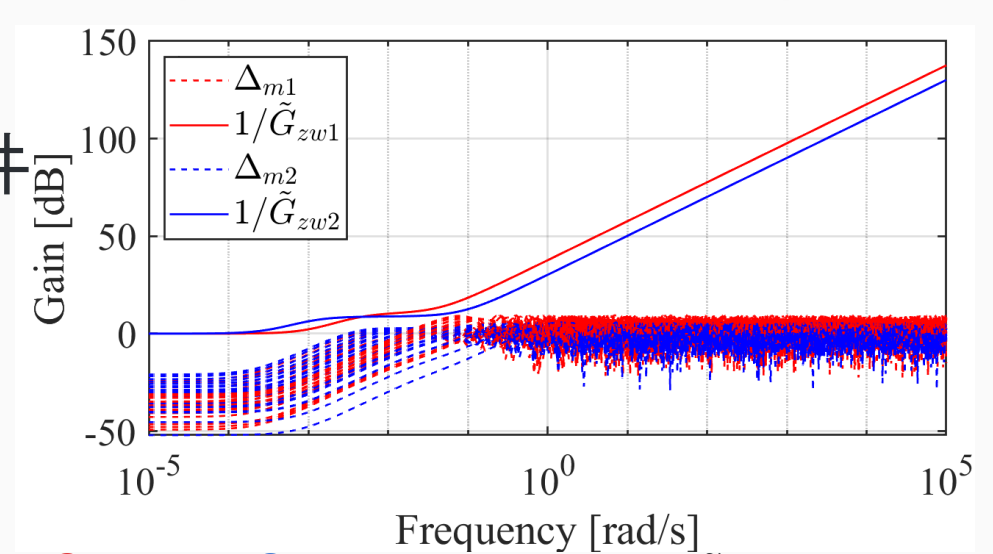


Fig. 7: ①(赤線)と②(青線)における Δ_m と $1/\tilde{G}_{zw}$ のゲイン線図

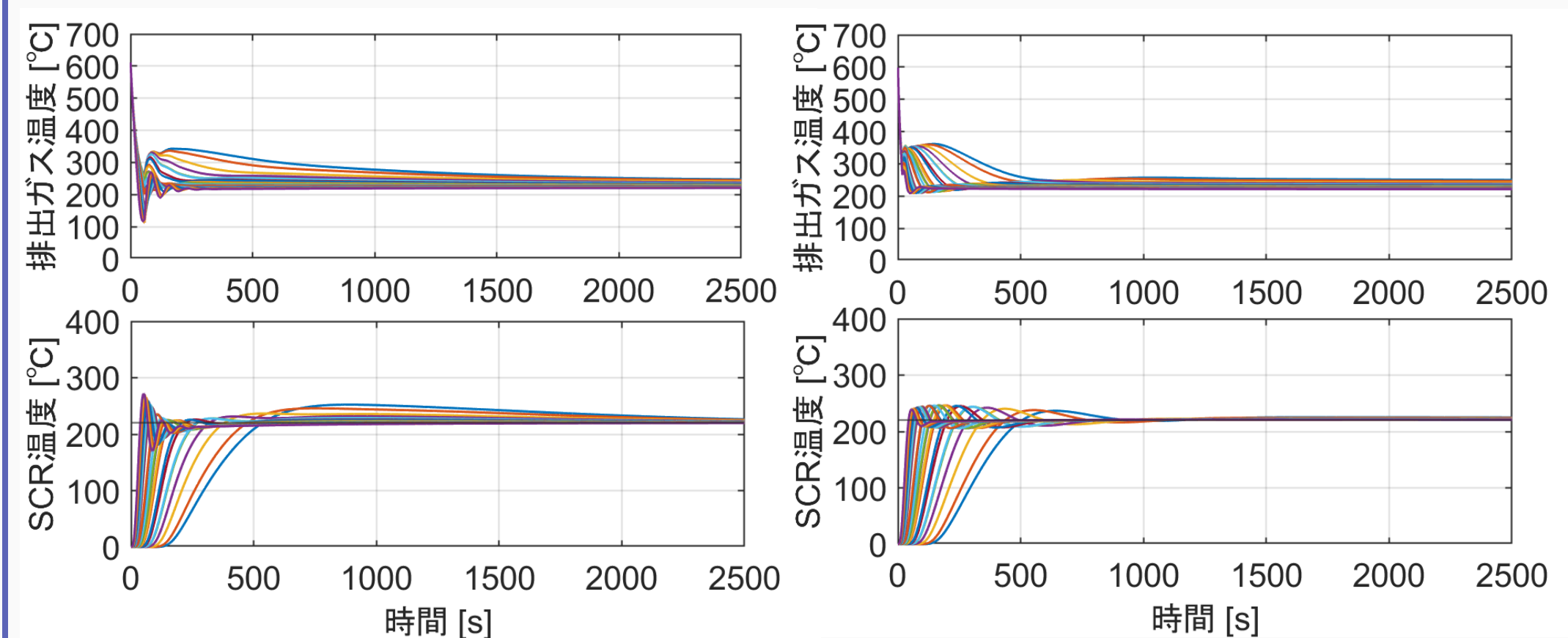


Fig. 8: シミュレーション結果

- ②の方が入力・応答ともに振動が小さく、対象の変動特性をとらえた設計により、良好な過渡特性が確保されている。

6. まとめと今後の展望

まとめと今後の展望

- 排出ガス後処理システムの触媒温度制御系をむだ時間系ととらえた状態予測制御系を構成し、摂動を考慮した設計モデルにより応答の改善を図った。
- 今後は、エンジン制御系を含めた制御性能の評価を行う予定である。

- [3] Bernd Hollauf: Model-Based Closed-Loop Control of SCR Based DeNOx Systems, Master's Thesis Submitted at the University of Applied Science Technikum Kärnten, (2009)
- [4] 阿部, 児島: 『むだ時間・分布定数系の制御』, コロナ社, (2007)
- [5] 池田, 須田: 積分型最適サーボ系の構成, 計測自動制御学会, Vol.24, No.1, pp.40-46, (1988)
- [6] 平田: 『実践ロバスト制御』, コロナ社, (2017)