

2自由度IMC構造を用いた 温度制御系の設計

- 一政 豪 （熊本大学）
- 岡島 寛 （熊本大学）
- 松永 信智 （熊本大学）

講演番号 201A1

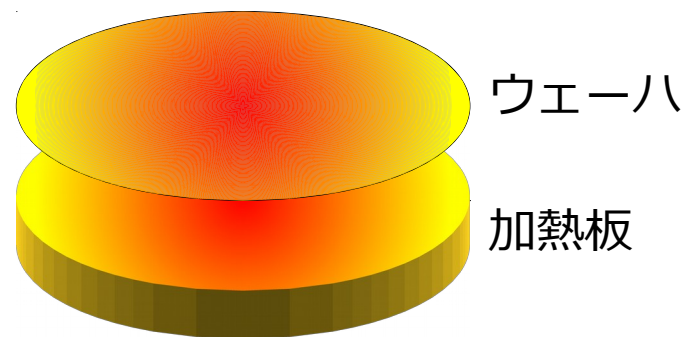
背景

フラットパネルディスプレイや半導体の高品質化に伴い、
高度な温度制御が必要



出典<http://www.vtec.co.jp/corporate/business.html>

例)半導体の熱処理過程



半導体の品質の低下(伝導特性のバラつき)

→熱処理における高精度な多点温度制御が必要

背景

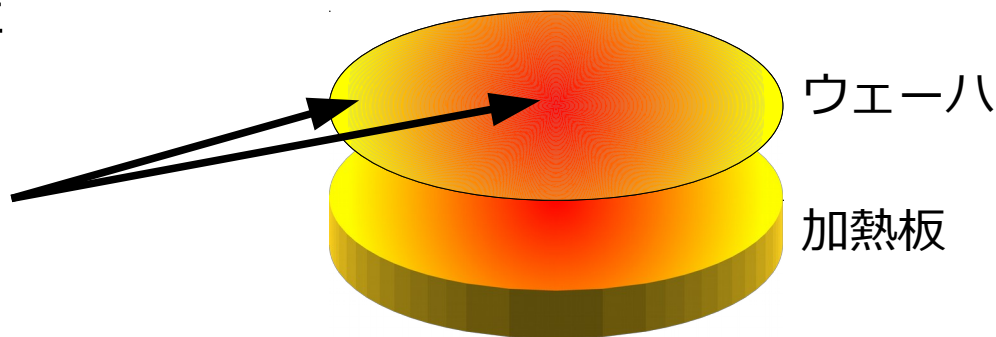
フラットパネルディスプレイや半導体の高品質化に伴い、
高度な温度制御が必要



出典<http://www.vtec.co.jp/corporate/business.html>

例)半導体の熱処理過程

温度差が生じている



半導体の品質の低下(伝導特性のバラつき)

→熱処理における高精度な多点温度制御が必要

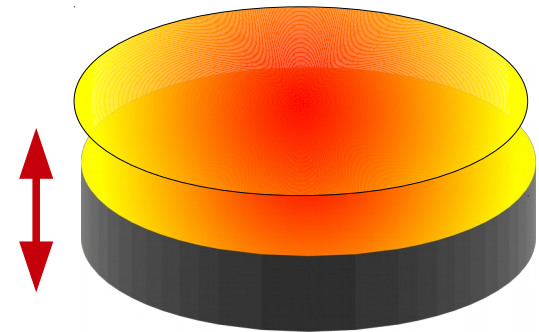
背景

▶ 従来の温度制御設計

加熱板のダイナミクスのみを考慮して設計

→ 所望の応答特性が得られる

(被加熱物体がセットされた時とダイナミクスがほぼ同じ)



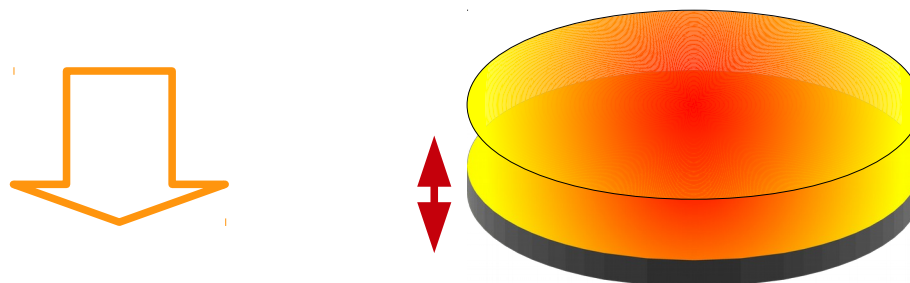
背景

▶ 従来の温度制御設計

加熱板のダイナミクスのみを考慮して設計

→ 所望の応答特性が得られる

(被加熱物体がセットされた時とダイナミクスがほぼ同じ)



近年、省エネ志向から加熱板の薄型化が進んでいる

加熱板に対する被加熱物体の比重が大きくなり
ダイナミクスが変化→モデル誤差の発生

→ 所望の応答特性は得られない

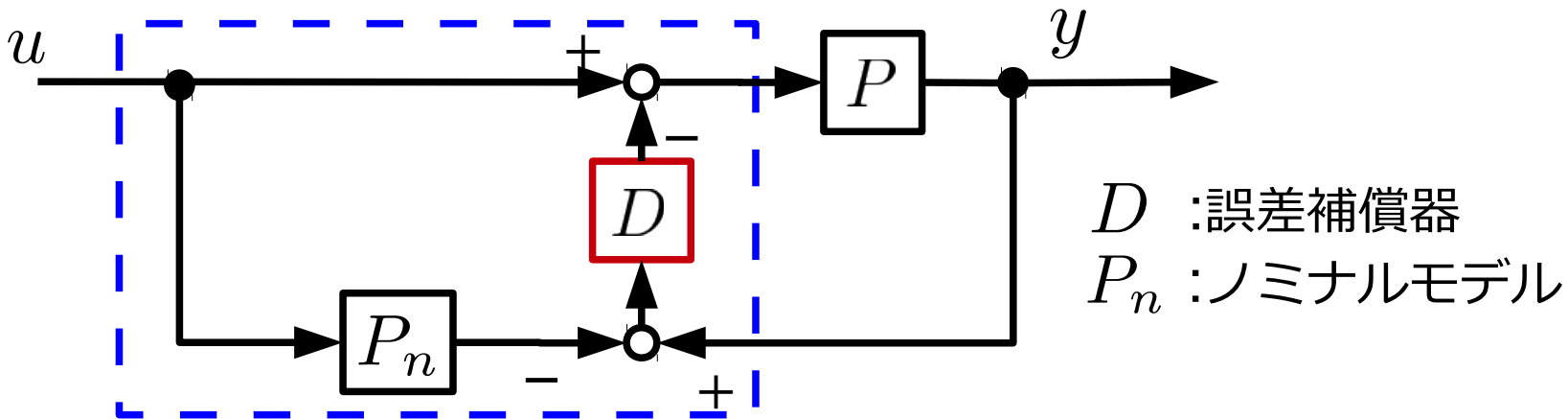
背景

▶ 先行研究:

モデル誤差の抑制を目的とした“モデル誤差抑制補償器”

H. Okajima, H. Umei, N. Matsunaga and T. Asai: "A Design Method of Compensator to Minimize Model Error" , SICE Journal of Control Measurement and System Integration ,Vol.6,No.4, pp.267-275 (2013)

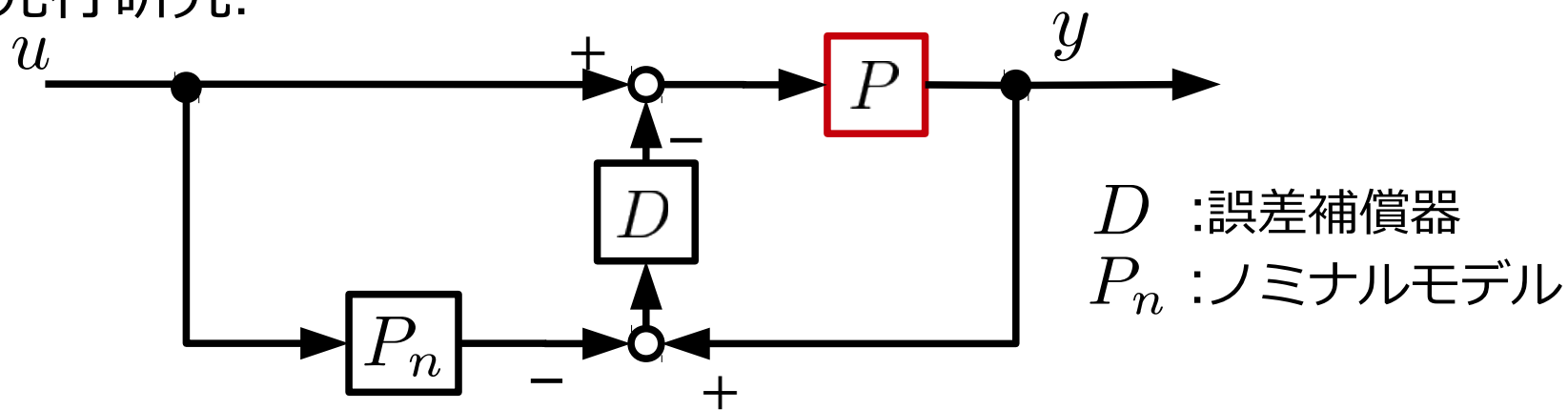
モデル誤差抑制補償器の構造



をハイゲインに設定することで、
モデル誤差の抑制が可能

背景

▶ 先行研究:



- P が最小位相系:
→ D がハイゲインに設計できる
- P が非最小位相系:
→ D がハイゲインに設計できない

熱系はむだ時間系(非最小位相系)であるため
モデル誤差抑制補償器の適用が困難

目的

問題点

熱系へのモデル誤差抑制補償器の適用が困難

目的

スミス法を付加したモデル誤差抑制補償器を適用し、
システム変動にロバストな温度制御系を構築

本発表では

- ▶ スミス法を付加したモデル誤差抑制補償器の提案
- ▶ 数値例による有効性の検証

熱系(制御対象)

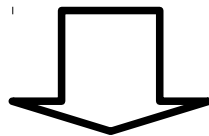
熱系は以下の偏微分方程式で表される

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad \begin{array}{l} \theta : \text{温度} \\ \lambda : \text{熱拡散率} \end{array}$$

熱系の伝達関数:

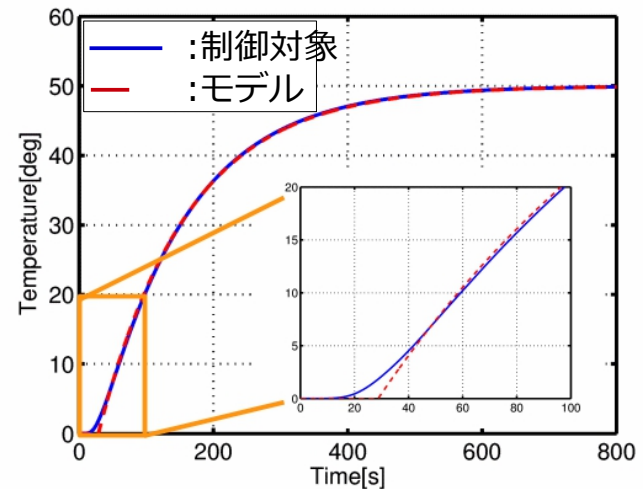
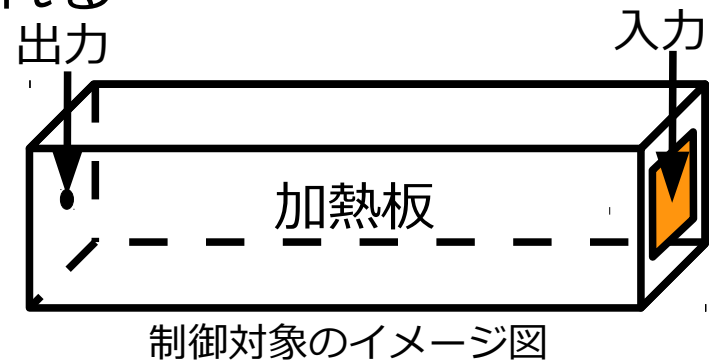
$$P(s) = \frac{1}{\cosh \sqrt{(a^2 s / \lambda)}}$$

熱系は無限次遅れ系である



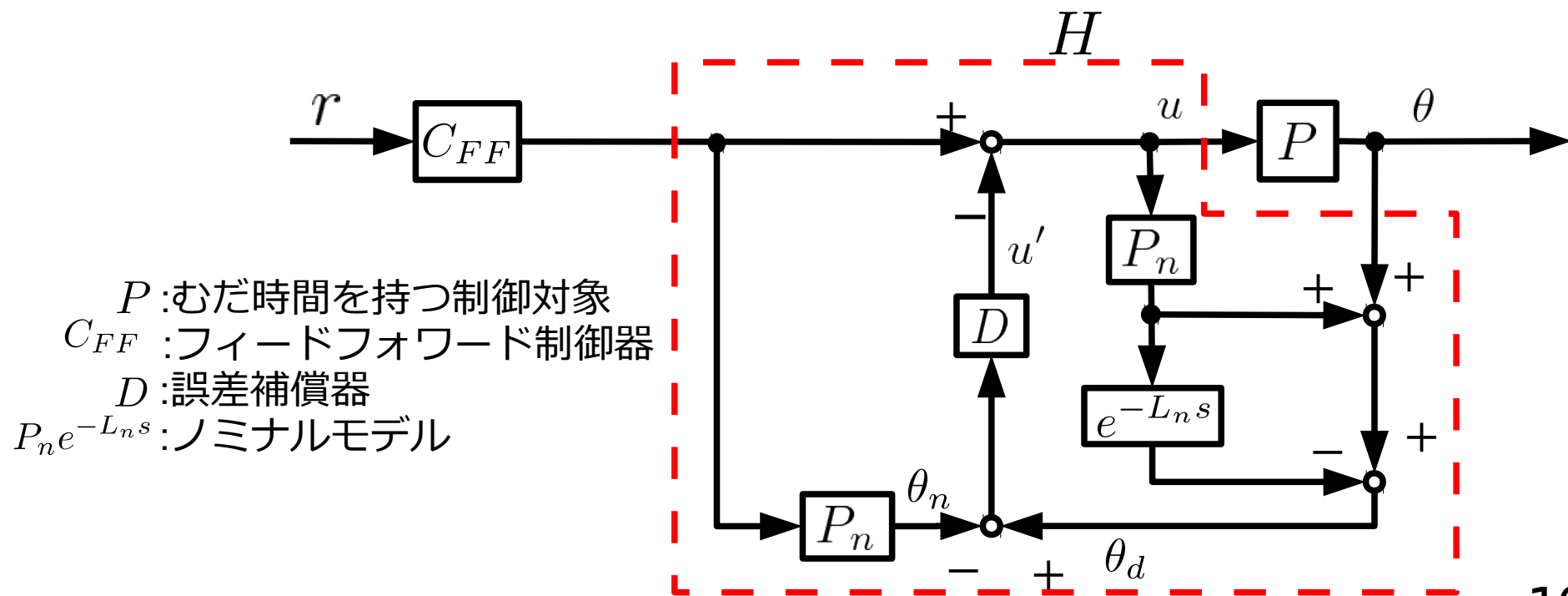
ノミナルモデルの設計が困難

一次遅れ+むだ時間などで近似→むだ時間をもつ制御対象



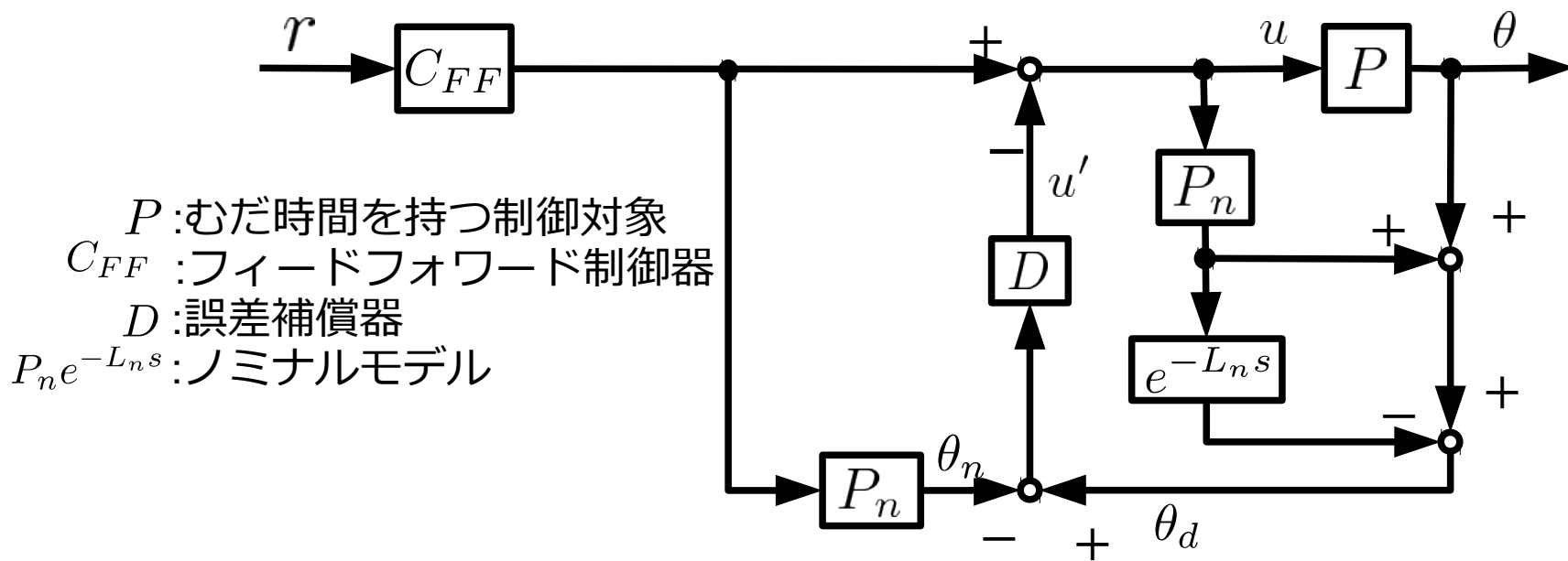
提案制御系

- ▶ C_{FF} は速応性改善のためのフィードフォワード制御器
- ▶ 補償器 H はモデル誤差を最小化する役割



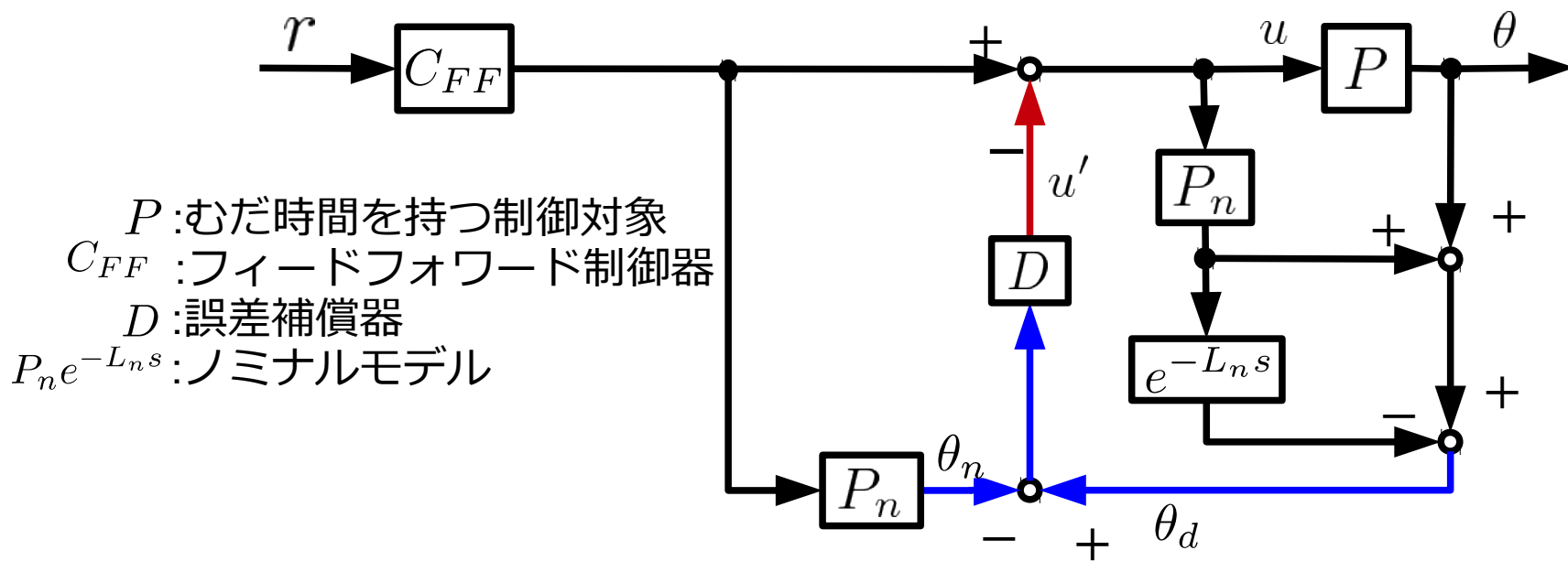
提案制御系

- ▶ 誤差補償器 D はモデル誤差を抑制する働き



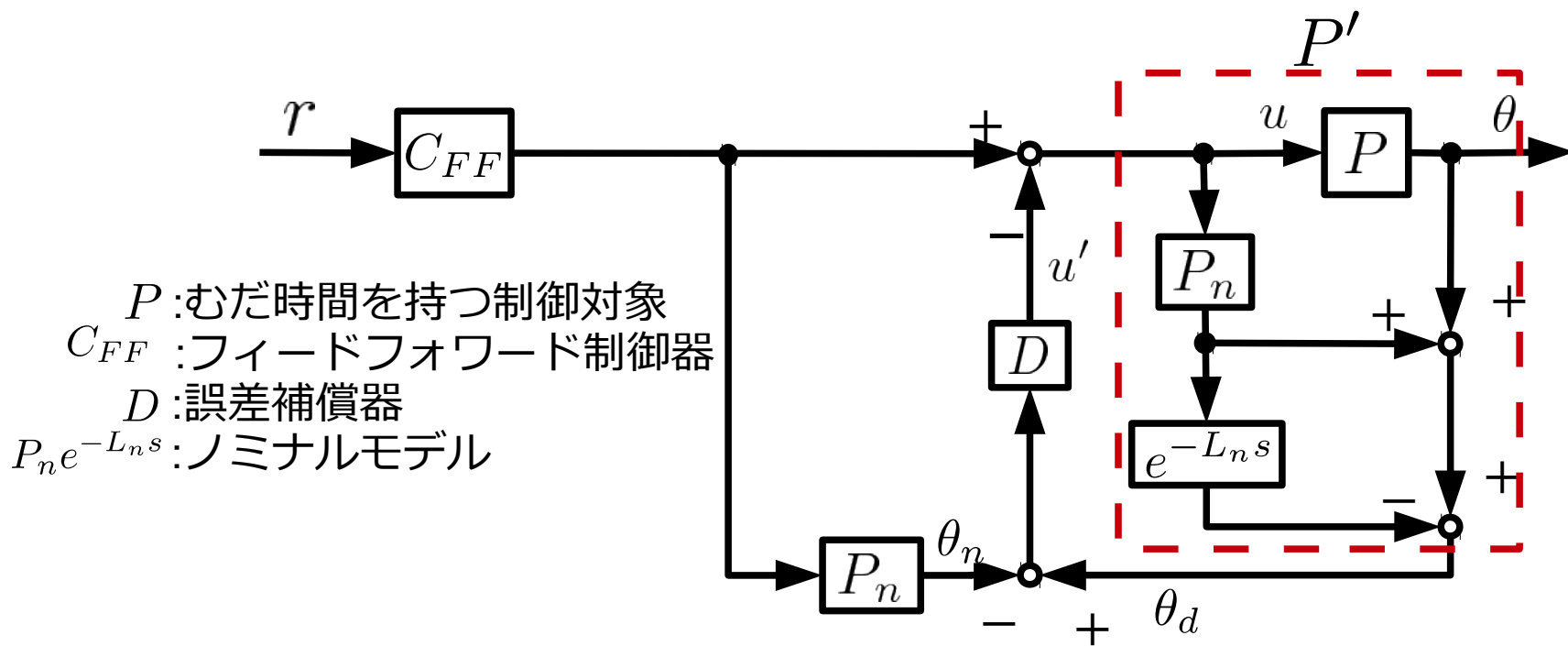
提案制御系

- ▶ 誤差補償器 D はモデル誤差を抑制する働き



提案制御系

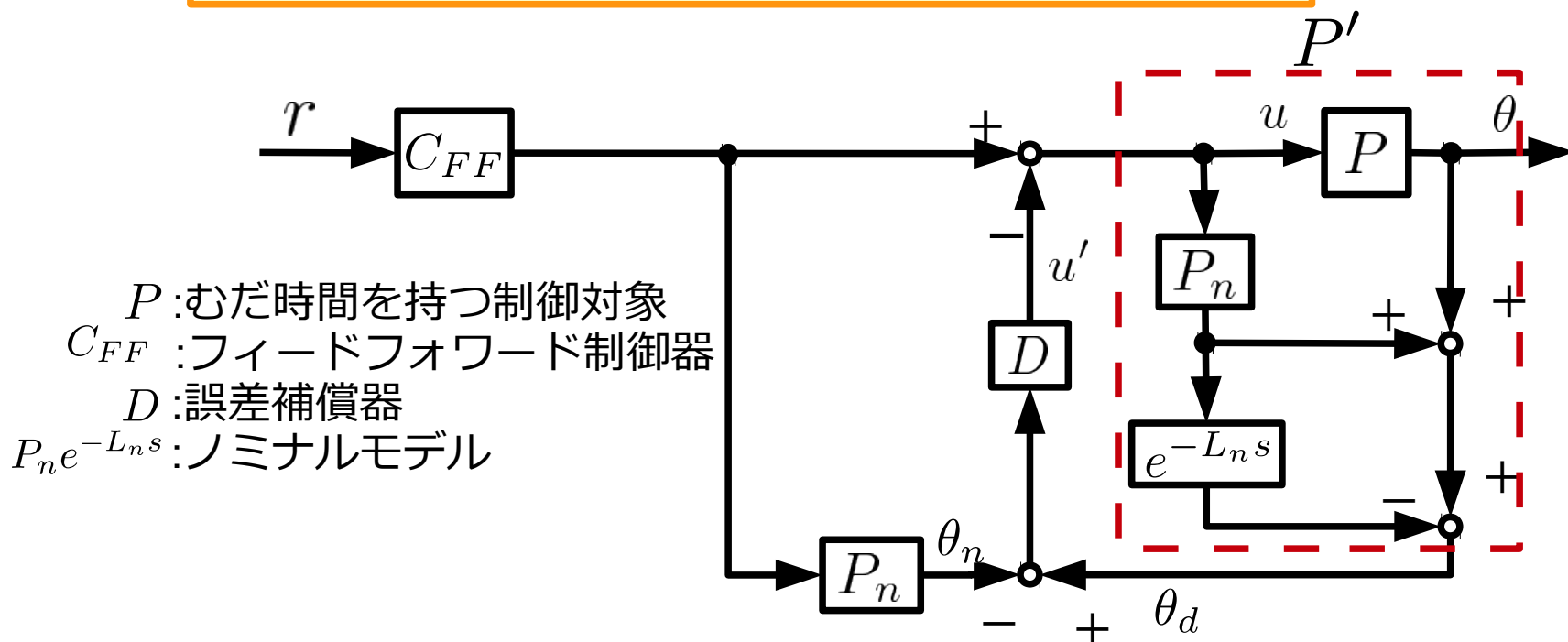
- ▶ 誤差補償器 D はモデル誤差を抑制する働き
- ▶ 制御対象 P の非最小位相部をスミス法で補償することで P' を**最小位相系**とみなせる



提案制御系

- ▶ 誤差補償器 D はモデル誤差を抑制する働き
- ▶ 制御対象 P の非最小位相部をスミス法で補償することで P' を**最小位相系**とみなせる

→ 誤差補償器 をハイゲインに設定できる



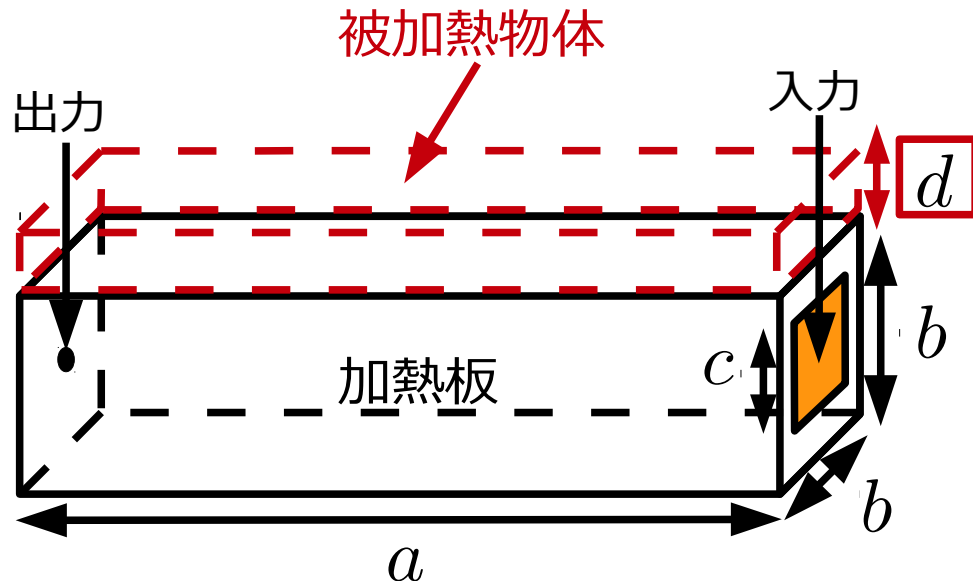
シミュレーション

フィードフォワード制御器 C_{FF} は以下の式で与える

$$C_{FF}(s) = \frac{132s + 1}{50s + 1}$$

シミュレーション条件:

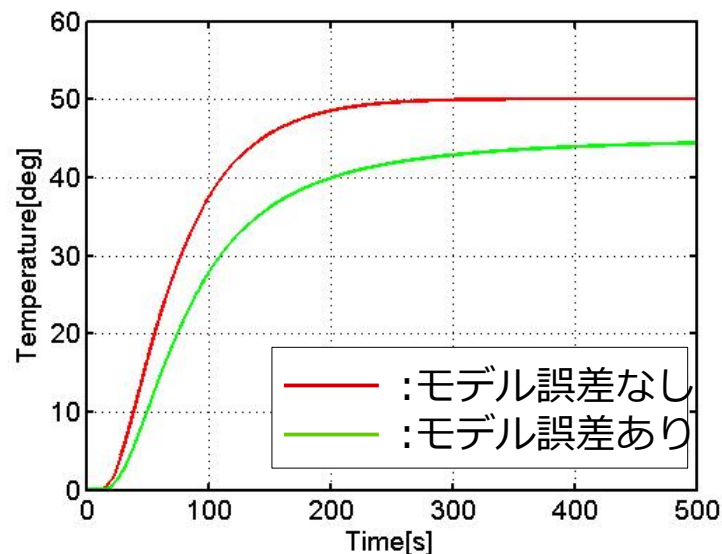
パラメータ	数値
λ	$9975 \times 10^{-8} [\text{m}^2/\text{s}]$
a	$8 \times 10^{-2} [\text{m}]$
b	$\sqrt{5} \times 10^{-2} [\text{m}]$
c	$1 \times 10^{-2} [\text{m}]$
d	$0, \sqrt{5}/5 \times 10^{-2} [\text{m}]$



シミュレーション

フィードフォワード制御のみの場合

- ▶ モデル誤差なし ($d = 0[\text{m}]$)
所望の応答特性が得られている
(250[s]付近で定常状態)
- ▶ モデル誤差あり ($d = \sqrt{5}/5 \times 10^{-2}[\text{m}]$)
過渡応答、定常状態において
所望の応答特性でない



- モデル誤差抑制補償器(従来法)
- スミス法を付加したモデル誤差抑制補償器(提案法)
の2つを比較

シミュレーション

誤差補償器は一巡伝達関数の安定条件を満たすように設計

▶ 提案法: $D_p(s) = \frac{15s + 1}{s}$

▶ 従来法: $D(s) = \frac{6s + 0.01}{s}$

※従来法の制御系に $D_p(s)$ を適用した場合、制御系が不安定となる
(ゲイン余裕: -26[dB], 位相余裕: -72[deg])

提案法を用いることで誤差補償器を
ハイゲインに設計できる

シミュレーション

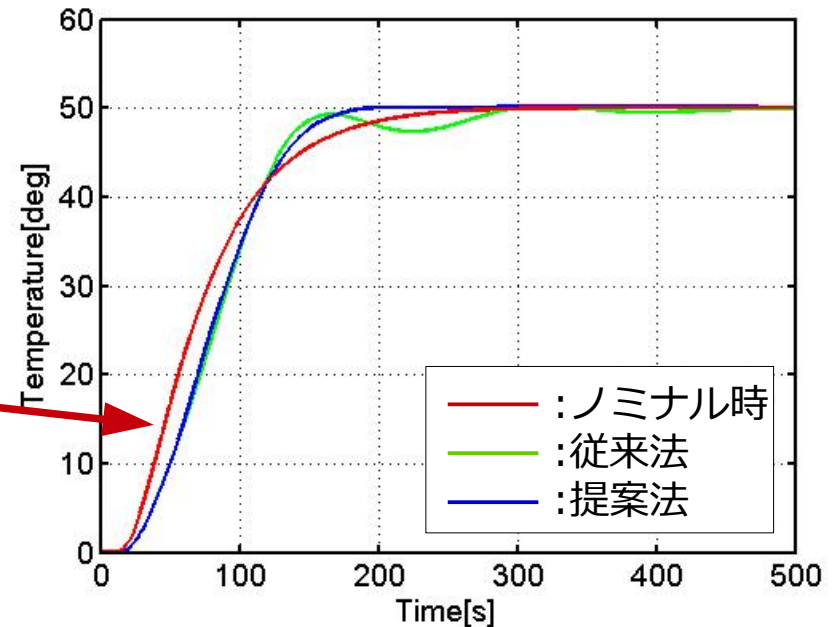
従来法と提案法の応答波形比較

評価関数:

$$E = \frac{\sum_{t=1}^{500} (y_n - y)^2}{500}$$

y_n : ノミナル時の応答

従来法	提案法
6.68	5.44



提案法を用いることで良好な制御性能が得られた

シミュレーション

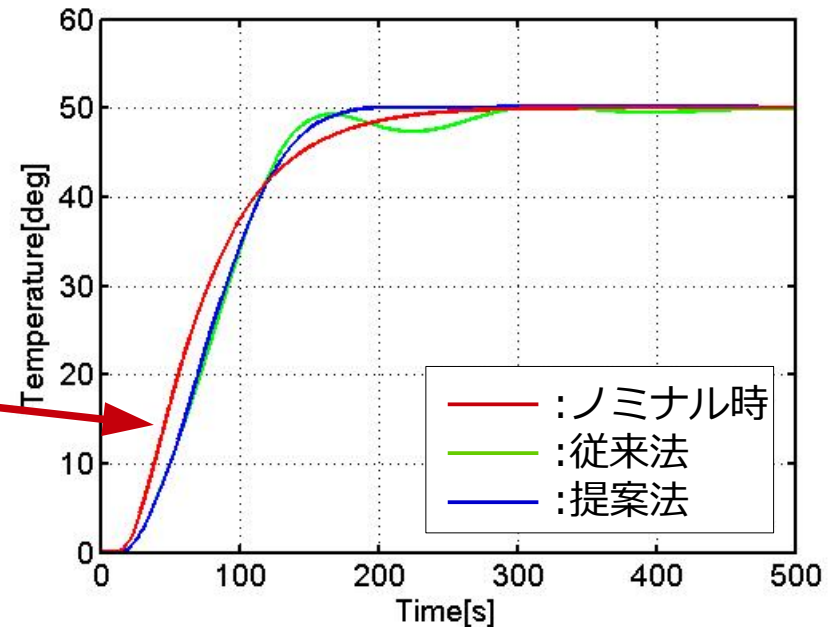
従来法と提案法の応答波形比較

評価関数:

$$E = \frac{\sum_{t=1}^{500} (y_n - y)^2}{500}$$

y_n : ノミナル時の応答

従来法	提案法
6.68	5.44



提案法を用いることで良好な制御性能が得られた

結論

目的

スミス法を付加したモデル誤差抑制補償器を適用し、システム変動にロバストな温度制御系を構築

本発表では

- ▶ スミス法を付加したモデル誤差抑制補償器を提案した
- ▶ 数値例により提案法の有効性を示した

今後の課題

入力飽和の考慮