

# 非対角成分のフィードバックによる ロバストな均一温度制御系の設計

○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 101A3

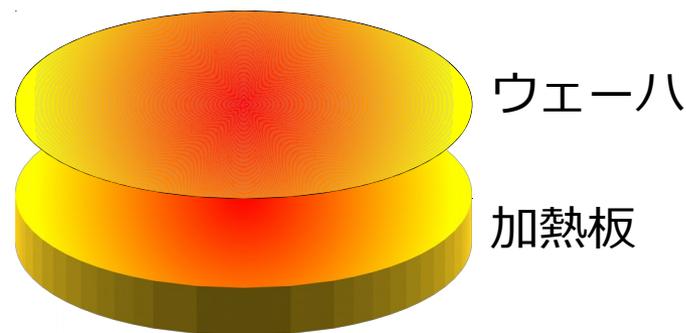
# 背景

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

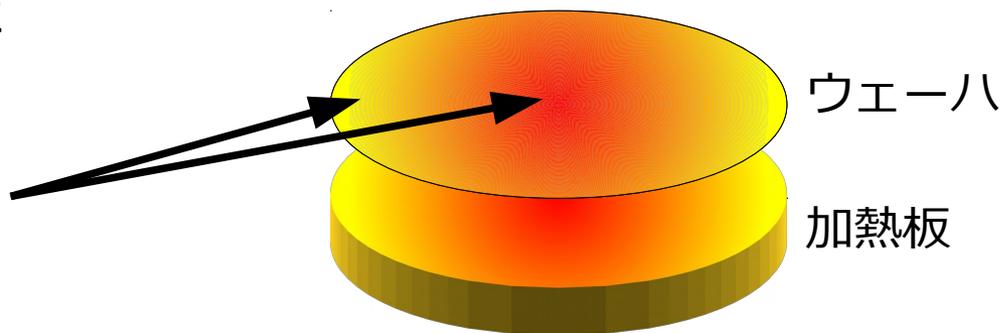
フラットパネルディスプレイや半導体の高品質化に伴い、  
高度な温度制御が必要



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

- ▶ 先行研究: "温度均一化を目的とする傾斜温度制御法の効果分析"

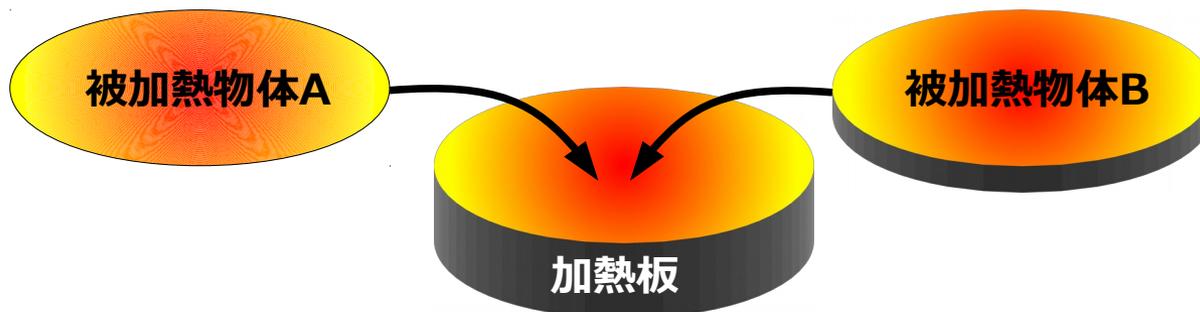
南野ら, 電気学会論文誌, Vol.124-C, No.8, pp.1606-1612 (2004)

面の温度均一化を達成

- ▶ 先行研究の問題点

1つの制御対象に対して制御器設計

被加熱物体などが変化すると理想応答が得られない



被加熱物体の大きさ厚さによって

モデル誤差(熱容量, 熱伝達率などの変動)が発生

モデル誤差を抑制するロバストな制御系が必要

# 目的

## 先行研究の問題点

制御対象の特性が変動することを考慮していない

## 目的

モデル誤差抑制補償器による  
システム変動にロバストな均一温度制御系を構築

## 本発表では

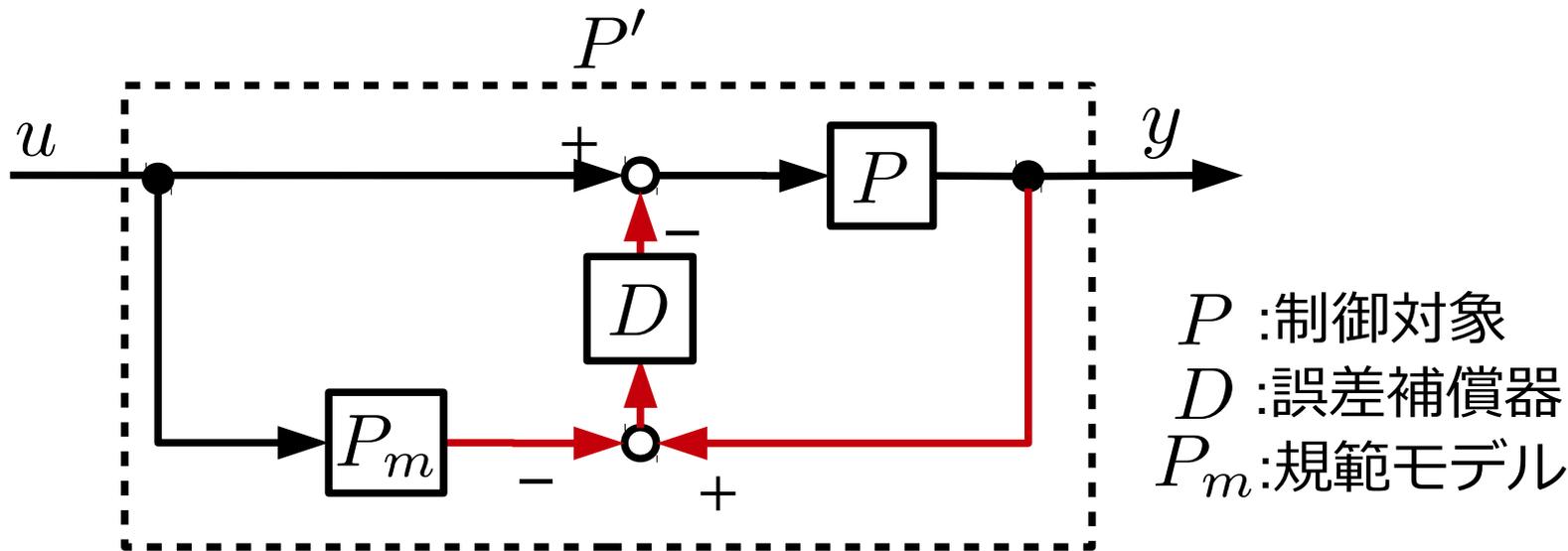
- ▶ モデル誤差抑制補償器の概要
- ▶ 均一温度制御系の設計法
- ▶ シミュレーションによる有効性の検証

# モデル誤差抑制補償器(MEC)

## ▶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(MEC)の構造

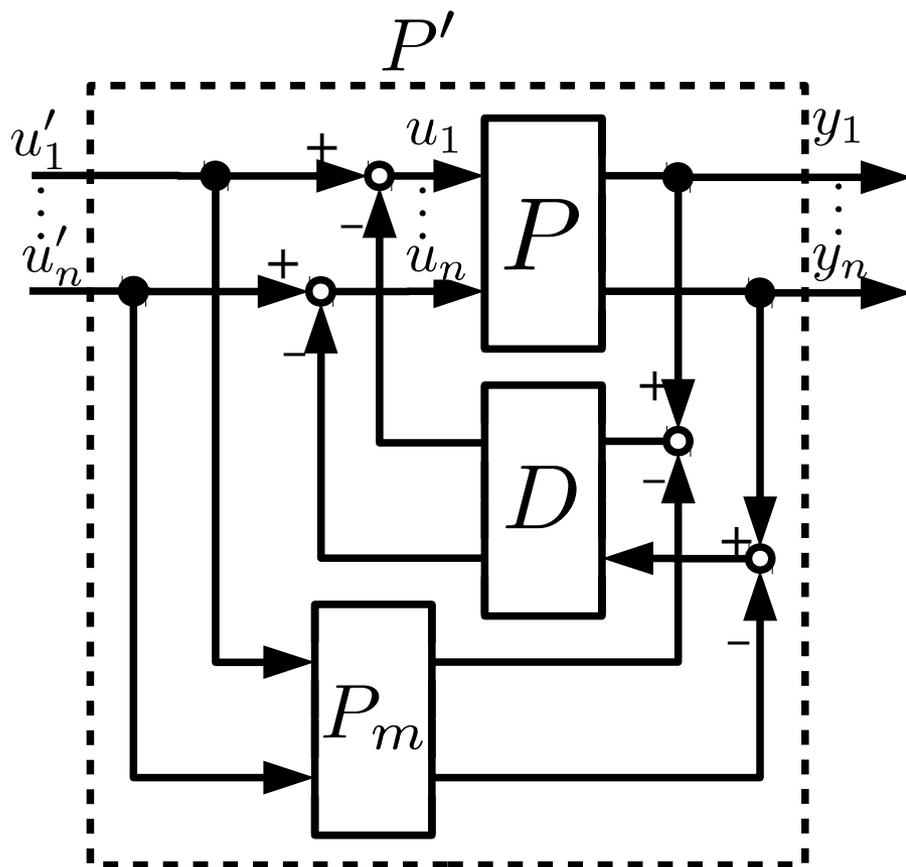


$P'$ の特性を $P_m$ に近づける構造

適切な誤差補償器  $D$  を設計することで  
モデル誤差の抑制が可能

# 熱系に対するMECの設計

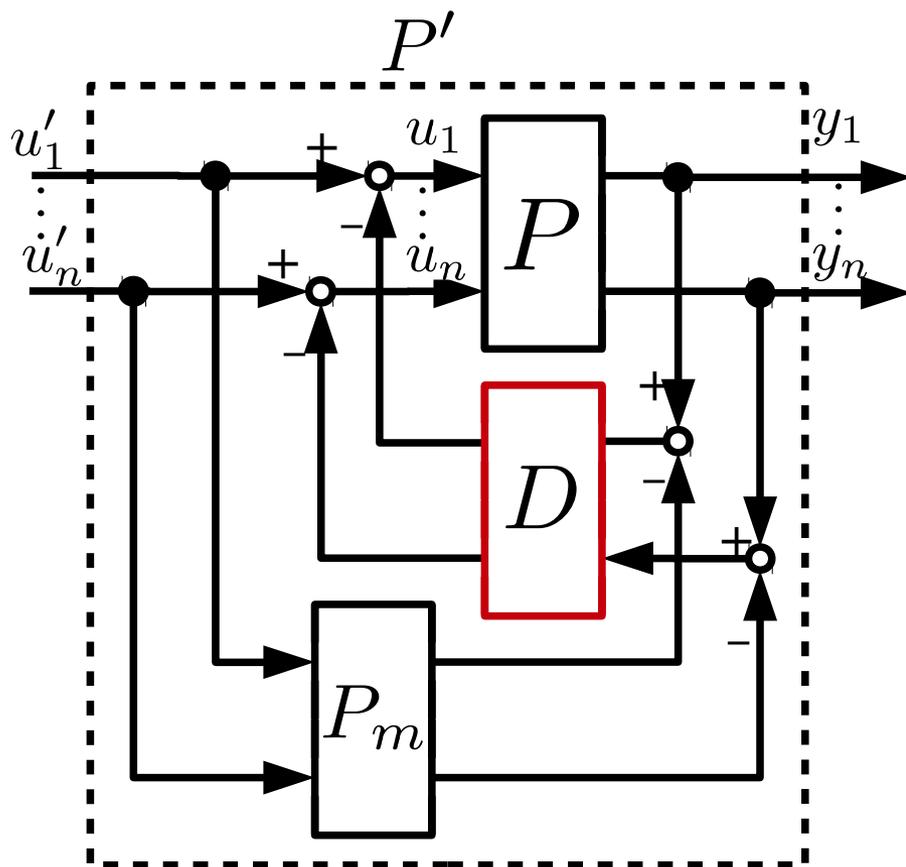
- ▶ 誤差補償器  $D$  によって  $P'$  の特性を  $P_m$  に近づける
- ▶ 適切な  $P_m$  を与えることで均一温度での昇温を行う



$P$  : 制御対象  
 $D$  : 誤差補償器  
 $P_m$  : 規範モデル

# 熱系に対するMECの設計

- ▶ 誤差補償器  $D$  によって  $P'$  の特性を  $P_m$  に近づける
- ▶ 適切な  $P_m$  を与えることで均一温度での昇温を行う



$P$  : 制御対象  
 $D$  : 誤差補償器  
 $P_m$  : 規範モデル

# 熱系に対するMECの設計

## ▶ 誤差補償器 $D$ の設計仕様

- ①  $P'$  と  $P_m$  との間でのモデル誤差の抑制
- ②  $P'$  をロバスト安定化

$H^\infty$ 制御問題の枠組みで扱える

## ▶ 混合感度問題による $D$ の設計

$$\left\| \begin{array}{c} W_e(I + P_m D)^{-1} \\ W(I + P_m D)^{-1} P_m D \end{array} \right\|_\infty < \gamma$$

$I$  : 単位行列

$D$  : 誤差補償器

$P_m$  : 規範モデル

$W_e$  : 誤差抑制に関する重み

$W$  : 摂動に対する重み

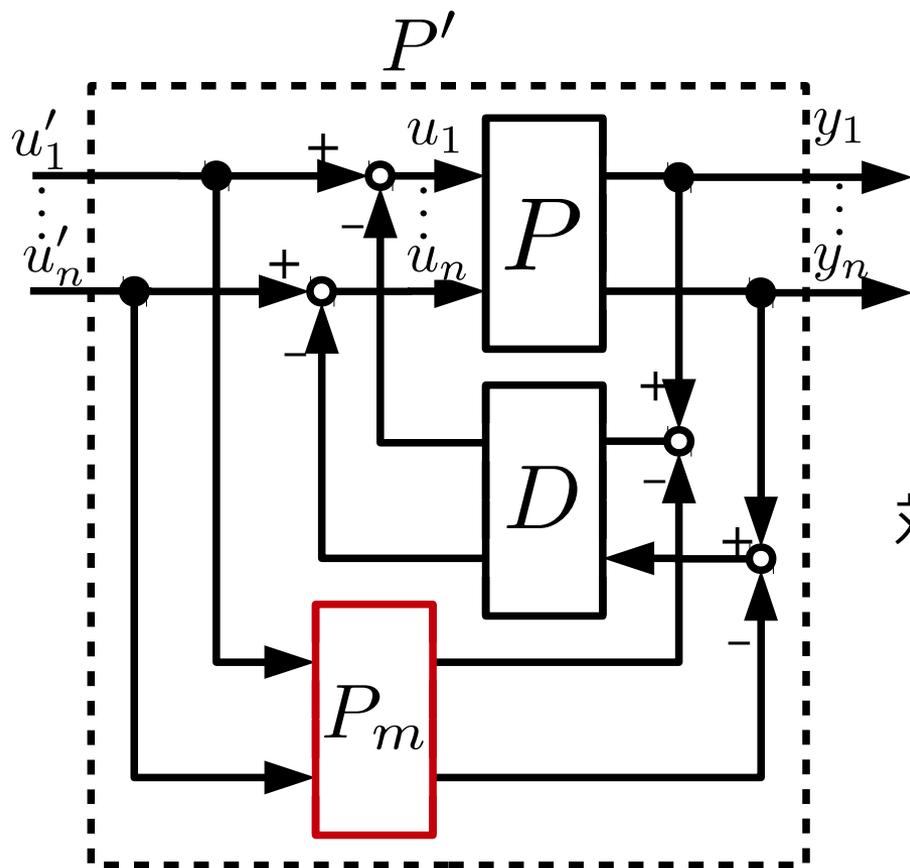
モデル誤差抑制性能の評価:  $\|W_e(I + P_m D)^{-1}\|_\infty$

ロバスト安定条件を達成するための制約条件:

$$\|W(I + P_m D)^{-1} P_m D\|_\infty < 1$$

# 熱系に対するMECの設計

- ▶ 誤差補償器  $D$  によって  $P'$  の特性を  $P_m$  に近づける
- ▶ 適切な  $P_m$  を与えることで均一温度での昇温を行う



- 規範モデル  $P_m$  の与え方 :

$$P_m(s) = \begin{bmatrix} P_{m1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & P_{m1} \end{bmatrix}$$

対角項に同じ規範モデル  $P_{m1}$  を与える

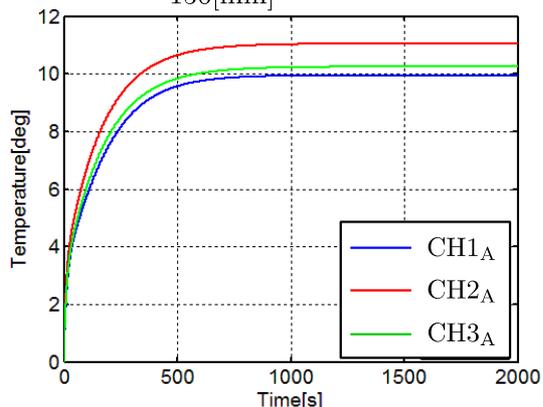
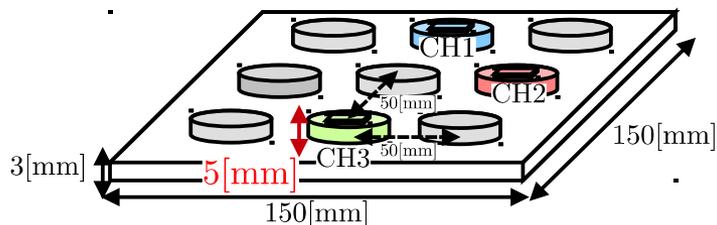
- 制御点を均一温度で昇温できる
- SISO系となるため見通しが良い

# 数値例

▶ 制御対象…CH 1 ~ 3 の3つのCHを制御

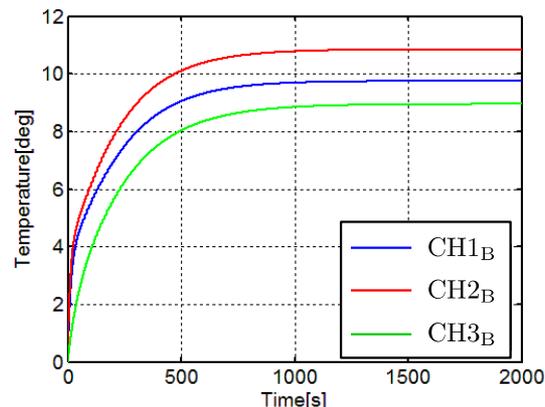
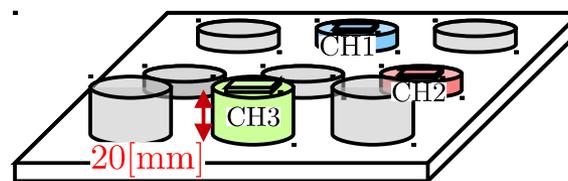
CH3に異なる被加熱物体がセットされ動特性が変動する場合を想定

● パターン A:



5 W印加(制御なし)

● パターン B:



5 W印加(制御なし)

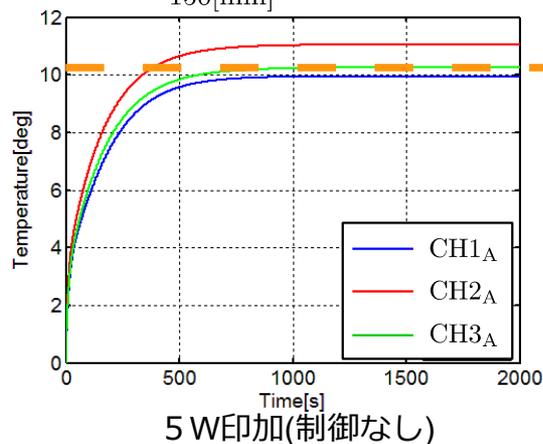
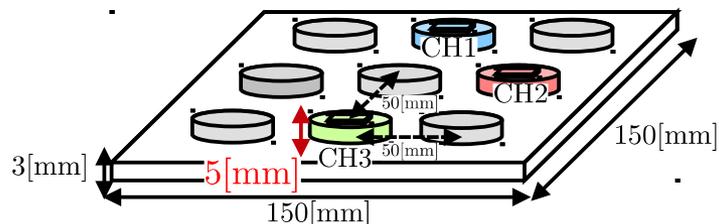
- 熱干渉の影響により温度がバラついている
- CH3の厚さが変動したことで特にCH3の応答特性が変動

# 数値例

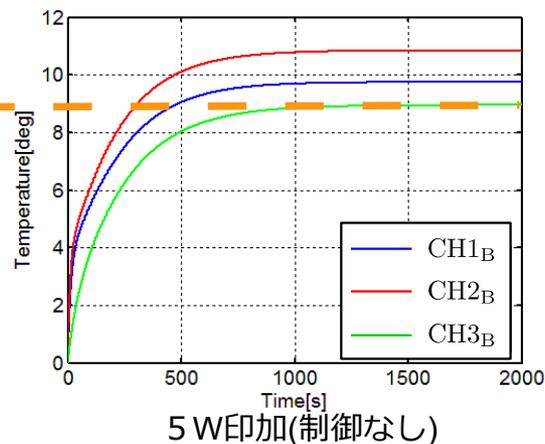
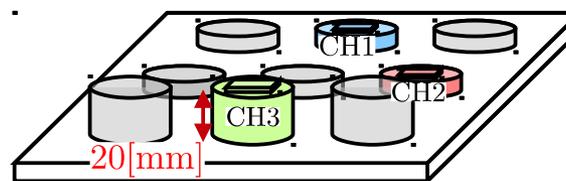
▶ 制御対象…CH 1 ~ 3 の3つのCHを制御

CH3に異なる被加熱物体がセットされ動特性が変動する場合を想定

● パターン A:



● パターン B:

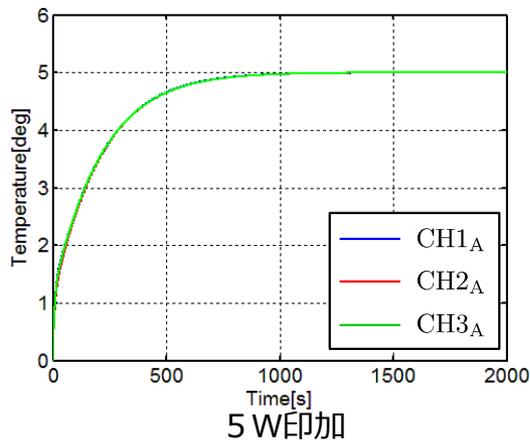
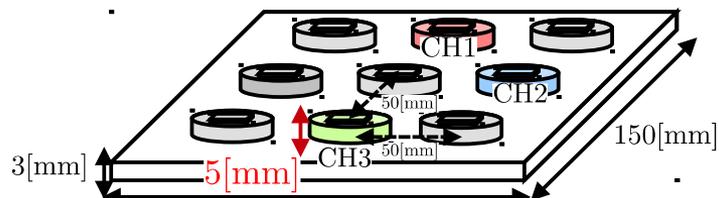


- 熱干渉の影響により温度がバラついている
  - CH3の厚さが変動したことで特にCH3の応答特性が変動
- 先行研究を適用した場合

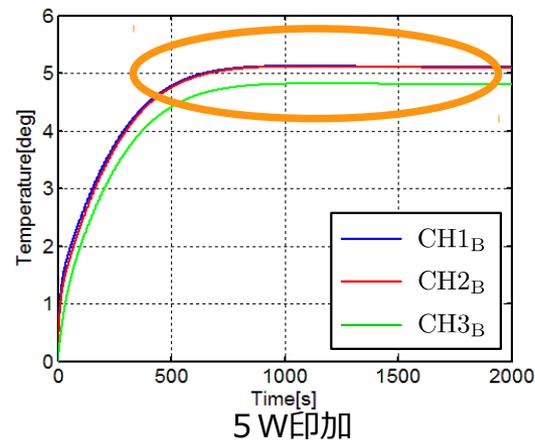
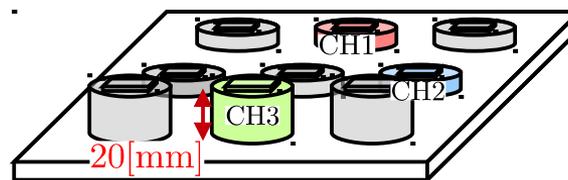
# 数値例

## ▶ 先行研究による均一温度制御

### ● パターン A:



### ● パターン B:



パターンAに対して制御系を設計

→モデル誤差の影響によりパターンBにおいて温度がバラつく

→MECによる均一温度制御系と比較

# 数値例

## ▶ 混合感度問題による $D$ の設計

$$\left\| \begin{array}{c} W_e(I + P_m D)^{-1} \\ W(I + P_m D)^{-1} P_m D \end{array} \right\|_{\infty} < \gamma$$

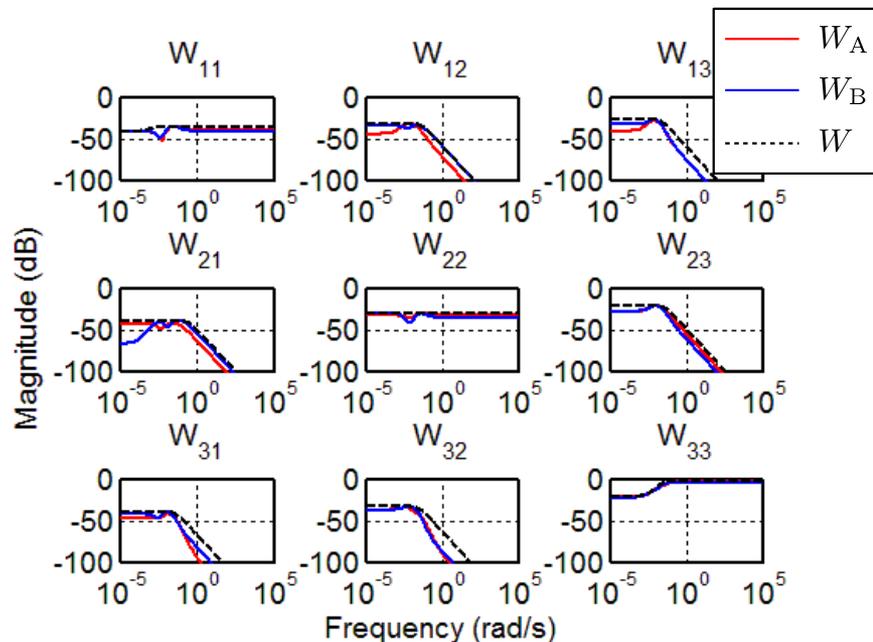
- 誤差抑制に関する重み  $W_e$ :

$$W_e = \begin{bmatrix} W_{e1} & 0 & 0 \\ 0 & W_{e1} & 0 \\ 0 & 0 & W_{e1} \end{bmatrix}$$

$$W_{e1} = \frac{1000}{1000s + 1}$$

- 摂動に対する重み  $W$ :

$$|W| > |(P - P_m)P_m^{-1}|$$

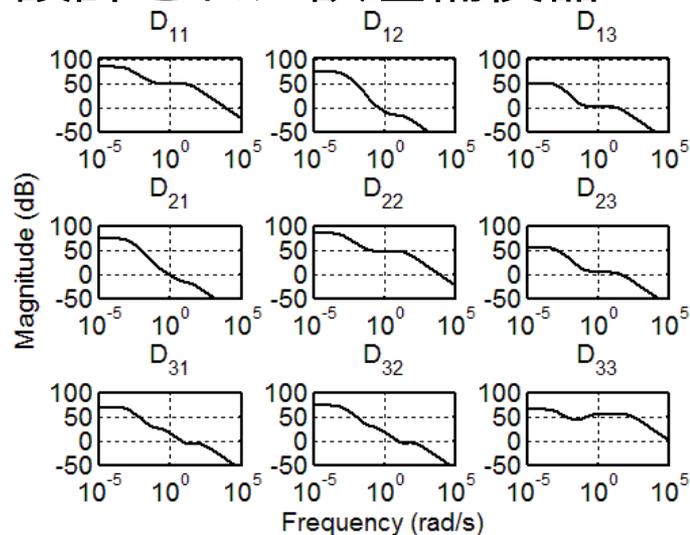


# 数値例

▶ 混合感度問題による  $D$  の設計

$$\left\| \begin{array}{c} W_e(I + P_m D)^{-1} \\ W(I + P_m D)^{-1} P_m D \end{array} \right\|_{\infty} < \gamma$$

● 設計された誤差補償器  $D$  :

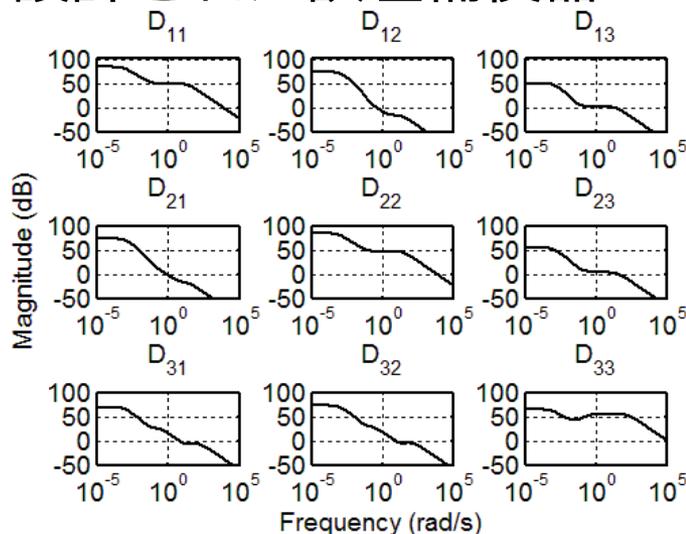


# 数値例

## ▶ 混合感度問題による $D$ の設計

$$\left\| \begin{matrix} W_e(I + P_m D)^{-1} \\ W(I + P_m D)^{-1} P_m D \end{matrix} \right\|_{\infty} < \gamma$$

### ● 設計された誤差補償器 $D$ :



## ▶ 規範モデル $P_m$ の設計

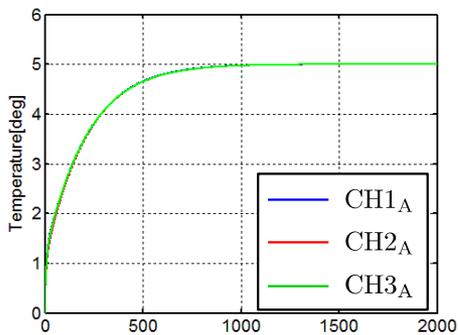
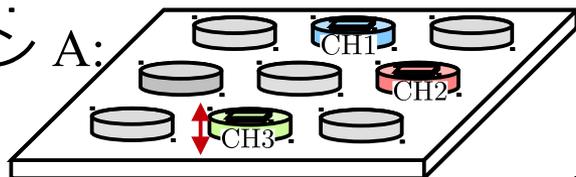
$$P_m(s) = \begin{bmatrix} P_{m1}(s) & 0 & 0 \\ 0 & P_{m1}(s) & 0 \\ 0 & 0 & P_{m1}(s) \end{bmatrix} \quad P_{m1}(s) = \frac{113s + 1.03}{8090s^2 + 249s + 1}$$

最も応答の遅いCH3の入出力関係を規範モデルとして採用 17

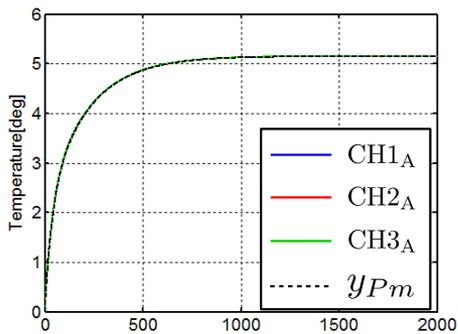
# 数値例

## シミュレーション結果

● パターン A:

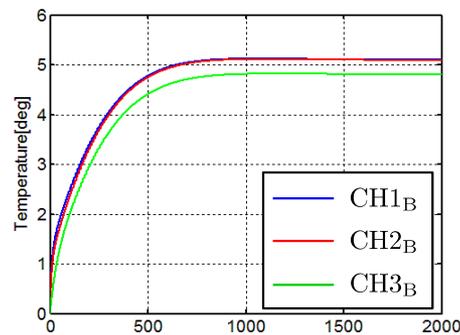
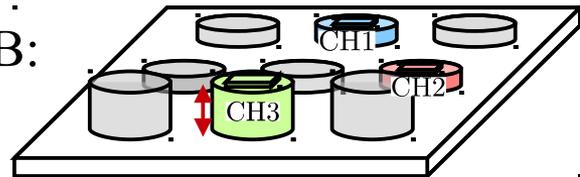


先研究

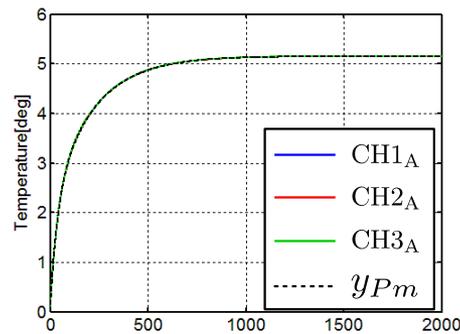


MEC

● パターン B:



先研究



MEC

MECによりシステム変動にロバストな均一温度制御を達成

# 結論

## 先行研究の課題

制御対象の特性が変動することを考慮していない

## 目的

モデル誤差抑制補償器による  
システム変動にロバストな均一温度制御系を構築

## 本発表では

- ▶ 誤差補償器と規範モデルの設計法について示した
- ▶ シミュレーションにより有効性を示した