地球環境と制御

～　山小屋から核融合まで　～

―　熱音響システムの制御を中心として　―

機械系　小林泰秀

レポート課題：

講義で挙げた例以外で、環境に関する制御システムの事例をA4の紙1枚にまとめて提出しなさい。

提出期限：10月23日（水）17:00

提出場所：機械建設1号棟405室（小林居室）のドアポスト

（地球）環境と制御？

- 環境における制御
  - 環境：与えられる条件

- 環境の制御
  - 環境：制御対象？

環境とは*

- 【環境】 そのものをとりまく外界。[それと関係があり、それになんらかの影響を与えるものとして見た場合にいう]「一に適応する:一を浄化(整備・破壊)する:国際的一の厳しさ・一が悪い」
- 【環境衛生】 大気・採光・上下水道・屎尿処理・害虫など、人間の健康にかかわる一切のものの衛生状態。

*新明解国語辞典　第三版　三省堂

- ✓ (人間など考えている主体の)周囲にある物
- ✓ 変化:しない場合、する場合、させる場合
- ✓ 規模:小さい場合、大きい場合(地球環境→...)

環境とは(つづき)

- 環境問題(変動、汚染)
  - 地球温暖化、オゾン層破壊(フロンによる汚染)
  - 熱帯林の減少、砂漠化、
  - ダイオキシン、廃棄物処理、埋め立て
  - 海洋汚染、放射性物質、環境汚染、環境破壊、
  - 廃エネルギー利用、省エネ、、、

- ○○環境
  - 生活環境、居住環境、
  - 労働環境、学習・授業・教育環境、研究環境、
  - 自然環境、地球環境、
  - 環境教育、環境問題、環境生態系、環境保全、、、

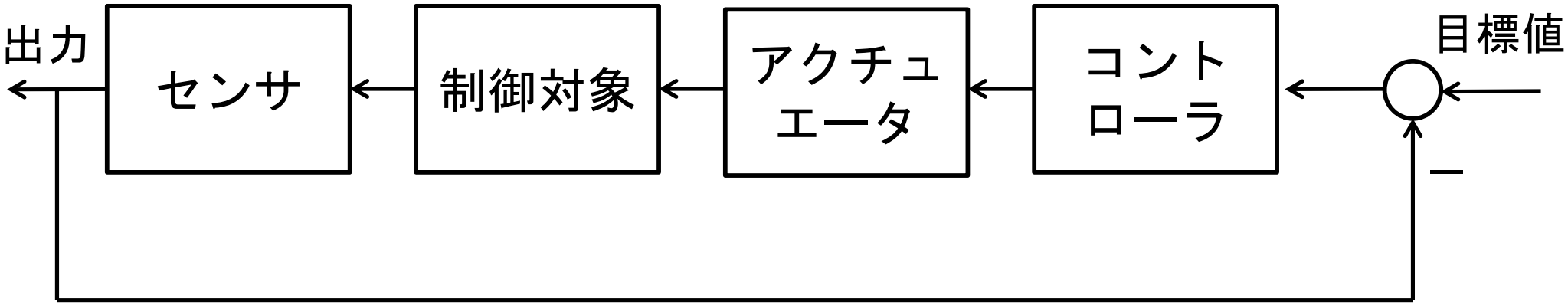
目次

- （地球）環境と制御？
- 環境とは
- 制御とは
- 環境における制御
- 環境の制御？
- 環境を動機とする制御（核融合、振動発電）
- 厳しい環境における制御（山小屋のトイレ）
- 熱音響システムに対する制御工学の応用

制御とは

- 制御対象に働きかけて、その状態を望ましい状態に近づけること。外乱に対抗して。エネルギーを使って。
- アクチュエータ、センサ、コントローラが存在、制御目的も。外乱も存在。エネルギー源も。

  … 6点セット



制御系、制御システム

環境における制御

- 環境：与えられる動作条件
  - 熱電発電：排熱源の温度（の変動）
  - 風力発電：風速（の変動）
  - エアコン：外気温（の変動）
    - ✓ 冷凍サイクル（凝縮→膨張→蒸発→圧縮）、温度センサ、PID制御、目標温度、室内外の熱源、電力
    - ✓ モーター（コンプレッサ、ファン）の回転数制御系 etc.
  - 変動に対するロバスト制御系

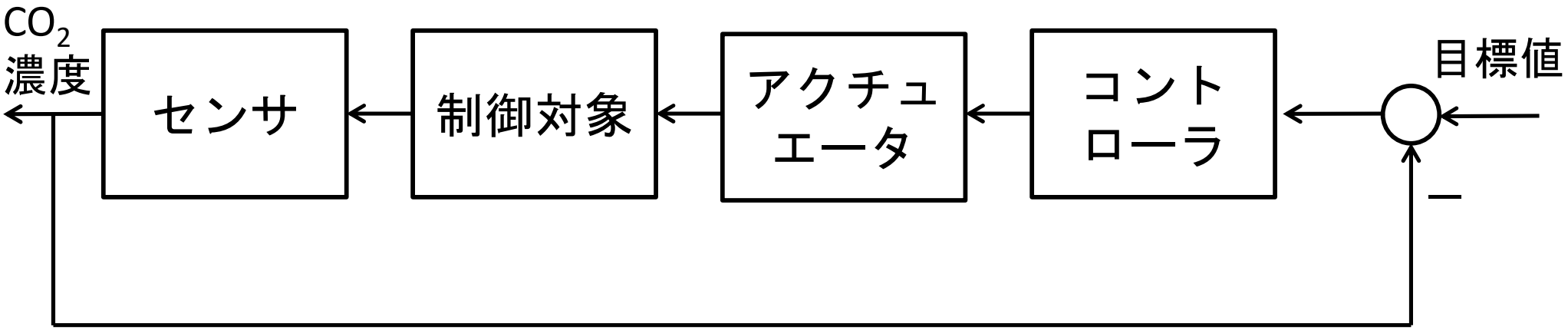
- 環境の制御？

環境の制御？

- 上水道における制御
  - 水量制御（水位、水圧、水量）
  - 水質制御（凝集剤注入制御）
- ごみ焼却処理における制御
  - 自動燃焼制御システム（燃焼用空気、ごみ送り速度）
  - 目的：燃焼の安定化、NOxやCO濃度の抑制
-
-
-

環境の制御？（つづき）

- 国立環境研 AIMモデル（アジア太平洋統合評価モデル）
  - 「社会、経済活動から排出される温室効果ガスの予測や、その蓄積、気温上昇など環境の変化や気候変動による影響を分析するためのコンピュータシミュレーションモデルの総称」
  - 方策（政策）を制御入力とする



→環境問題（エネルギー問題）を動機とした制御

参考文献

- 「計測と制御」 計測自動制御学会
  - 特集　環境の計測と制御 （2001.4）
  - 特集　環境問題における計測・制御・モデリング（2006.10）

- 「システム/制御/情報」 システム制御情報学会
  - 特集　排熱発電システムの車載実用化要素技術（2021.6）
  - 特集　気象・災害の予測と制御に向けた取り組み（2024.7）

環境を動機とする制御

- 核融合 :トカマクのプラズマ閉じ込め
  - “Maximization of the lower hybrid power coupling in the Frascati Tokamak Upgrade via extremum seeking” [Centioli et al. 2008]
  - 極値探索制御 … 共振状態の維持

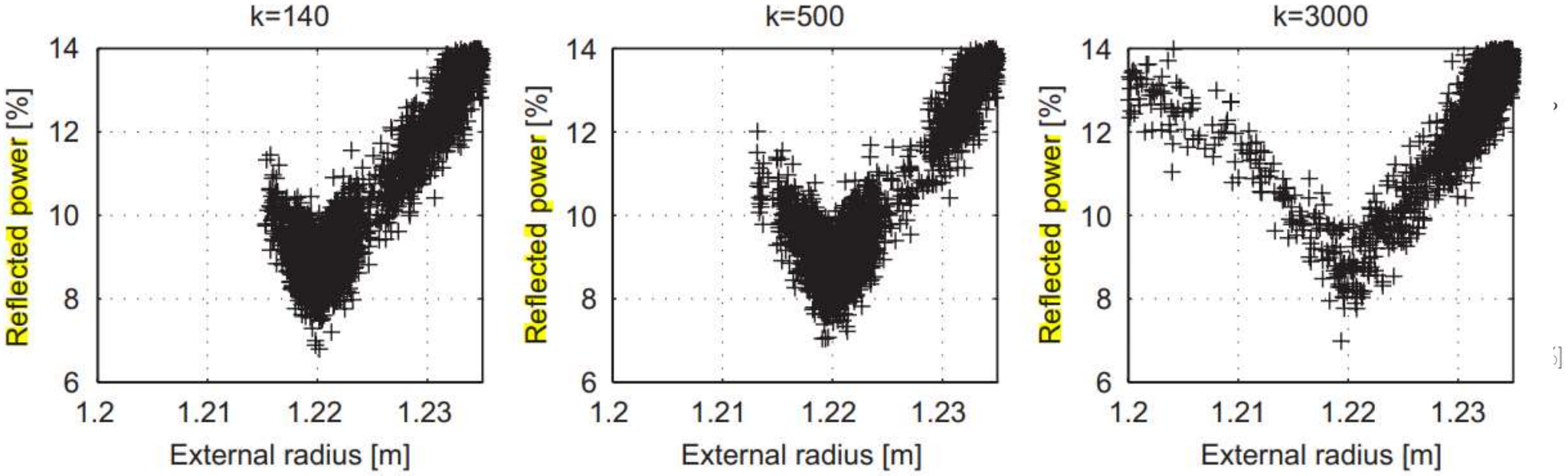
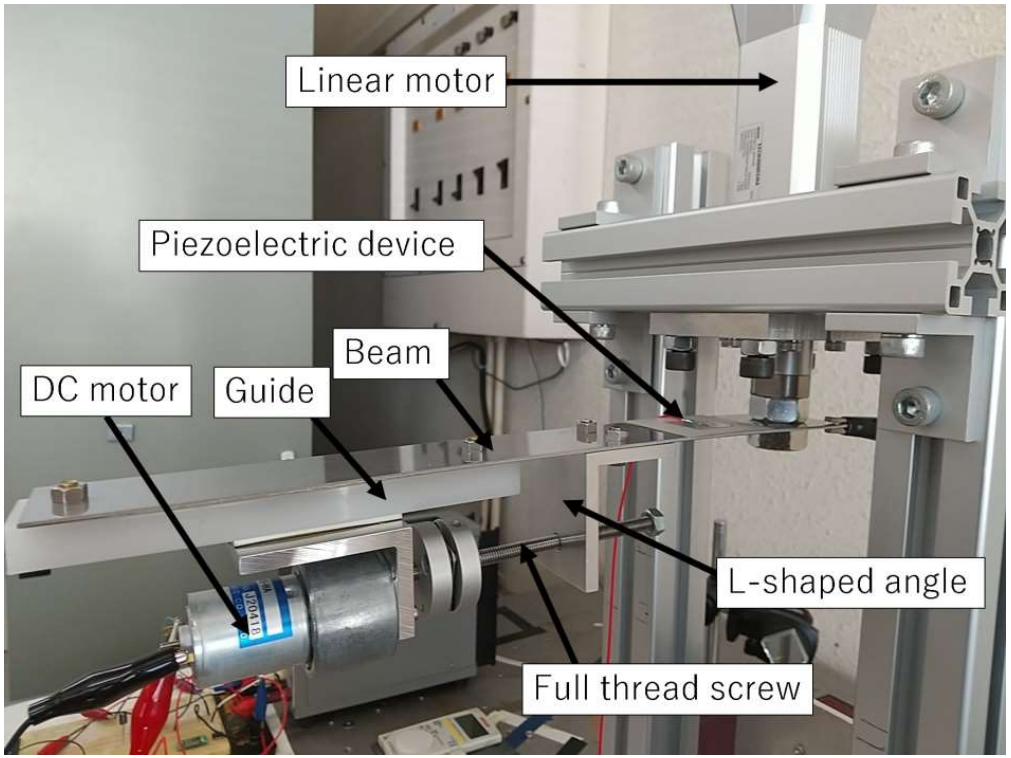


Fig. 9. The “U”-shaped curve for the three simulation studies.

文部科学省

環境を動機とする制御(つづき)

- 振動発電機の共振周波数追従
  - 渡辺、小林:極値探索制御系の共振点における不安定現象と安定条件の実験およびシミュレーションによる検討、システム制御情報学会論文誌(掲載予定)
  - 極値探索制御 … 共振状態の維持
    - ✓ アクチュエータ:モータ
    - ✓ センサ:圧電素子
    - ✓ コントローラ:極値探索制御
    - ✓ 制御目的:出力電力最大化
    - ✓ 外乱:振動源(の周波数…)
    - ✓ エネルギー源:電力



厳しい環境における制御

- 山小屋のバイオトイレ
  - （例）北アルプス 水晶小屋：標高2890m、北アルプス屈指の強風地帯、生活用水は100%天水利用
  - 厳しい仕様
    - ✓ 水の供給無し、処
    - ✓ 処理水を放出しな
    - ✓ 標高、低温に耐え
    - ✓ 使用電力を太陽光

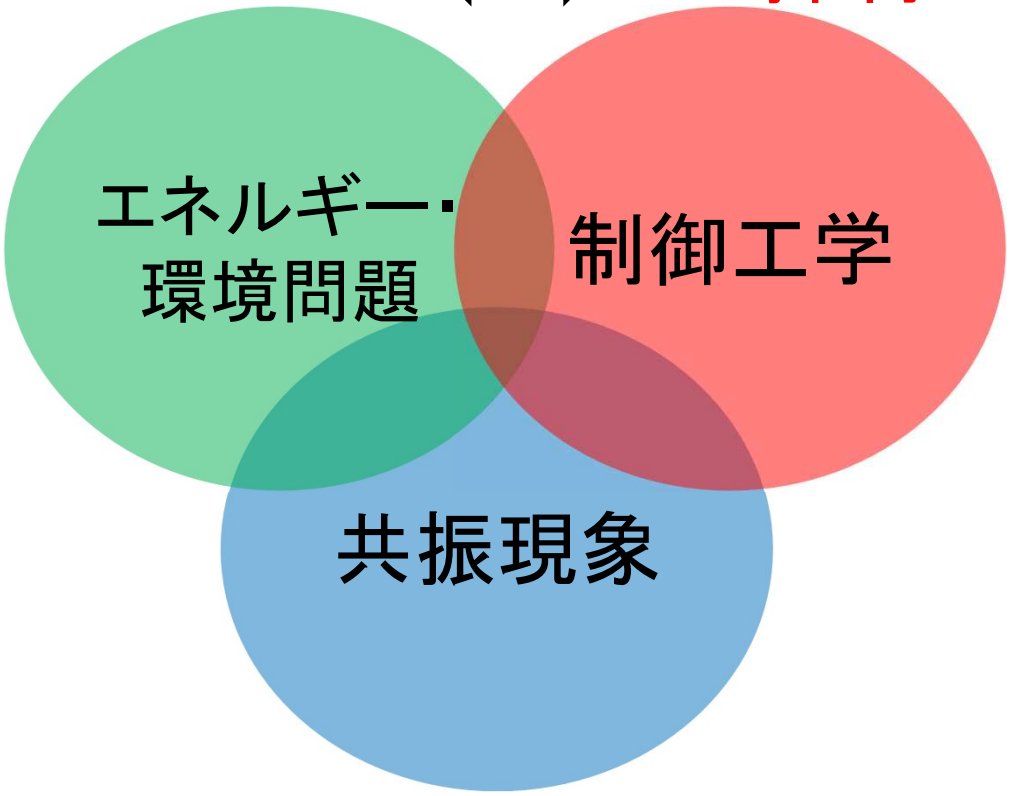
–6点セット？

- ✓ アクチュエータ：微生物
- ✓ センサ：微生物
- ✓ コントローラ：微生物
- ✓ 制御目的：水質維持

制御技術の利用無し？（太陽光発電）
制御：共振状態の維持＝自然にとって稀な状況の実現
その応用の可能性

熱音響システムに対する制御工学の応用*

共振させたい ⟷ 抑制したい



- ダクトANC
- 柔軟梁
- 水面（波）

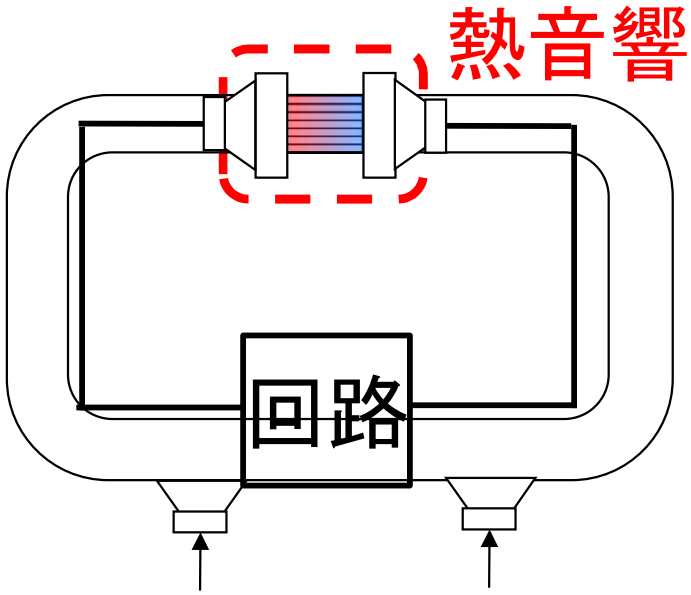
長岡技術科学大学　小林泰秀

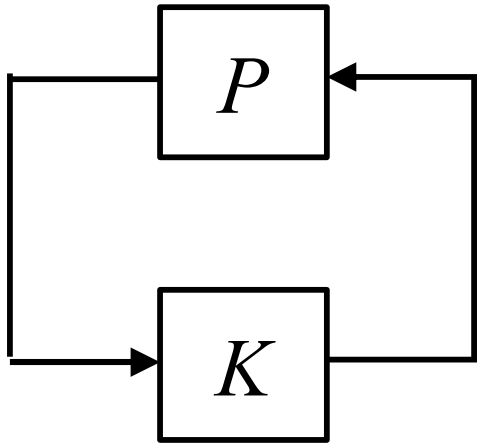
*第65回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集（2018）

熱音響システムの例

- ループ管進行波型熱音響冷凍機
  - 排熱で冷却・発電、可動部無、メンテナンスフリー
  - 共振の維持機構無し
  - 排熱源・負荷の変動
  - 仕様を満たす設計が困難
  - 臨界温度比、圧力振幅、周波数

これまでの研究（発表の概要）





- 管内の音場制御（ANC）
  - 定在波の抑制、指向性音源
  - 圧力変動抑制→定常発振制御
  - 性能評価：CTR推定[2]
- 最適な管路設計へ
  - 発振可否の推定[1]
  - 発振余裕→振幅推定
  - 振幅依存性の取得…

- 電力フィードバック進行波型熱音響発電機([3])
  - 電気回路の設計、動的な調整、… 発電効率最大を維持

    コイルにより余裕拡大　圧力を一定とする負荷の制御

発表概要

- 分割されたシステムの応答による発振可否推定[1]
  - 進行波圧力成分を入出力とする因果的システム
  - ナイキストの安定判別、発振余裕の把握可能
- 与えられたシステムの制御による発振可否推定[2]
  - 臨界温度比の推定、定常発振制御
  - 非線形システムの安定性解析
- 電力フィードバック進行波型熱音響発電機([3])
  - リニアモータの電気-音響特性
  - コイルによる余裕拡大、圧力一定とする負荷の制御

分割されたシステムの周波数応答に基づく発振可否の推定[1]：背景

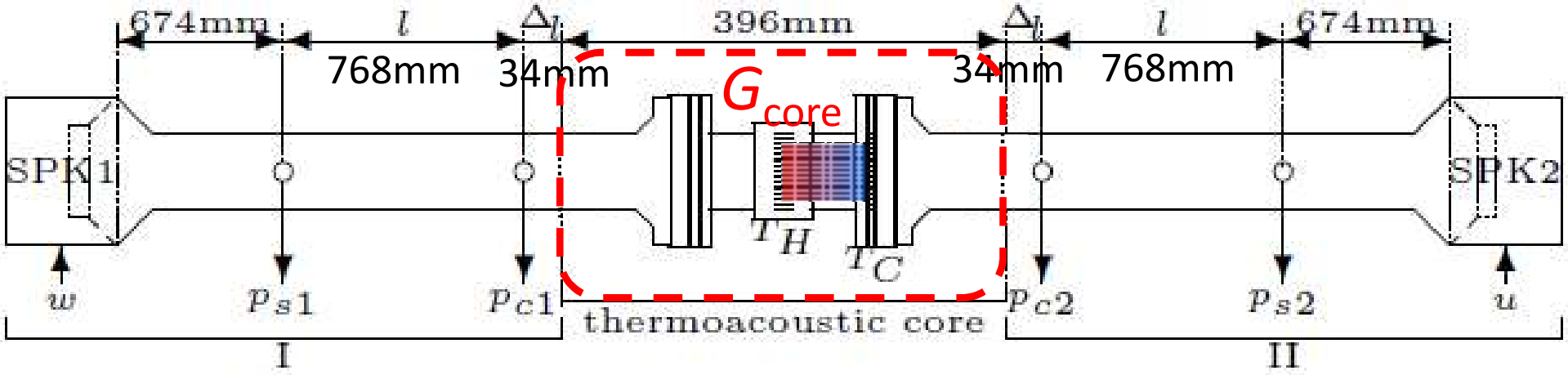
- 設計段階での予測は困難、実験的に推定
  実験データを直接利用、発振余裕の把握
- 伝達マトリクスと特性方程式の実数解（周波数）に基づく方法 [Hatori et al.2012][Guedra et al.2011]
  - 臨界状態に対応する等式条件、余裕の把握は困難
  - 定在波型／進行波型の扱いが異なる
- 特性方程式の複素数解に基づく方法（燃焼振動）
  - 複素周波数の虚部で安定余裕を把握可能
  - 実験データを直接利用できない

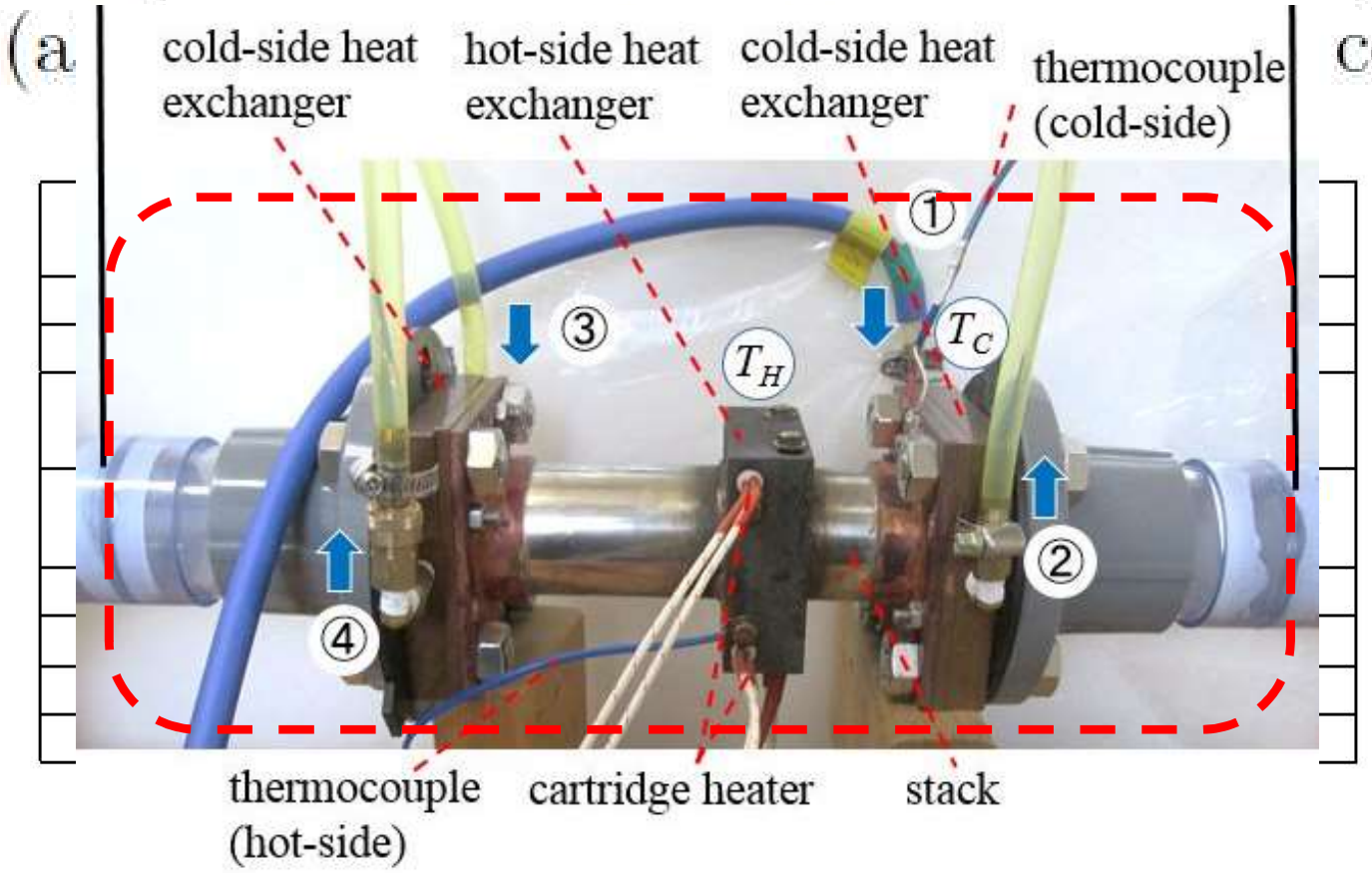
背景（つづき）

- ナイキスト安定判別に基づく方法（燃焼振動）
  - SISOの開ループ系：安定と限らない ⇒ 手続きが複雑
    （不安定極の数だけ軌跡が原点を囲む　⇔　安定）

- 【目的】ナイキストの安定判別に基づく手法を提案
  - 進行波圧力成分を入出力とする因果的システム
  - MIMOの開ループ系：安定　⇒　手続きが容易
  - 定在波型／進行波型の扱いが同じ
  - 発振実験に整合する解析結果

実験装置



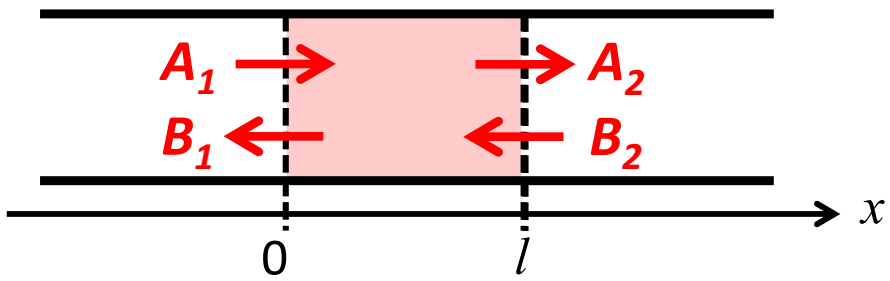


ϕ47mm
長さ 55mm
1mm ×1mm

T_H℃	T_C℃
21	21
100	23
200	26
300	29
400	33

因果的なシステム表現の導入

- 例：減衰のない管



$$\begin{bmatrix}\tilde{p}_1\\ \tilde{u}_1\end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix}\tilde{p}_2\\ \tilde{u}_2\end{bmatrix}$$

$$\begin{cases}\tilde{p}_i = \tilde{A}_i + \tilde{B}_i \\ \tilde{u}_i = \dfrac{\tilde{A}_i}{Z_c} - \dfrac{\tilde{B}_i}{Z_c} \end{cases} \quad (i=1,2)$$

$$\begin{bmatrix}\tilde{p}_2\\ \tilde{u}_2\end{bmatrix} = T\begin{bmatrix}\tilde{p}_1\\ \tilde{u}_1\end{bmatrix} \longleftrightarrow \begin{bmatrix}\tilde{A}_2\\ \tilde{B}_1\end{bmatrix} = G\begin{bmatrix}\tilde{A}_1\\ \tilde{B}_2\end{bmatrix}$$

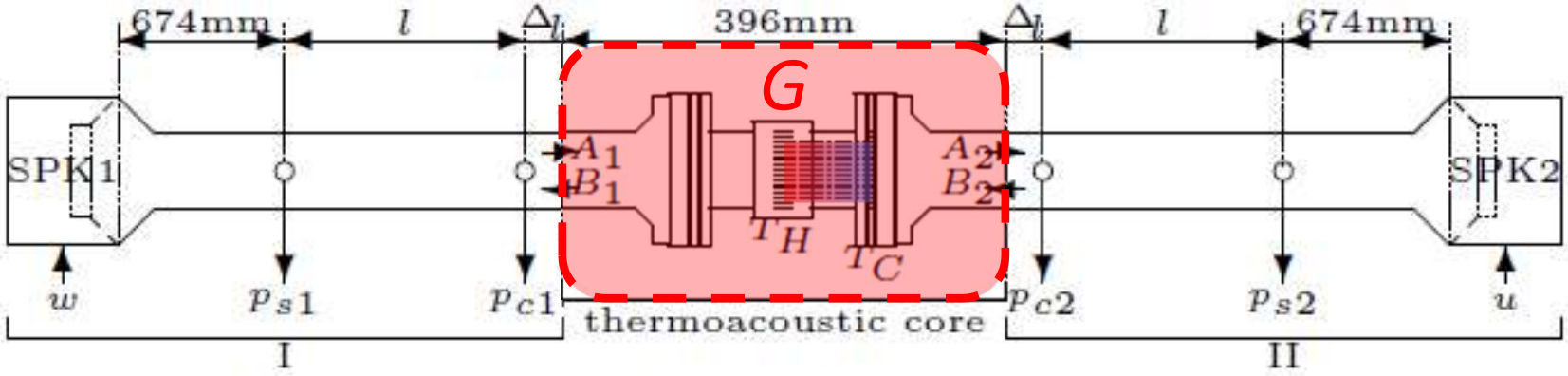
$$T(j\omega) = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} e^{j\omega\tau}+e^{-j\omega\tau} & -Z_c(e^{j\omega\tau}-e^{-j\omega\tau}) \\ -(e^{j\omega\tau}-e^{-j\omega\tau})/Z_c & e^{j\omega\tau}+e^{-j\omega\tau}\end{bmatrix}$$

$$\tau = l/c_0$$

$$T(s) = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} e^{s\tau}+e^{-s\tau} & -Z_c(e^{s\tau}-e^{-s\tau}) \\ -(e^{s\tau}-e^{-s\tau})/Z_c & (e^{s\tau}+e^{-s\tau})\end{bmatrix} \qquad G(s) = \begin{bmatrix} e^{-s\tau} & 0 \\ 0 & e^{-s\tau}\end{bmatrix}$$

実験方法

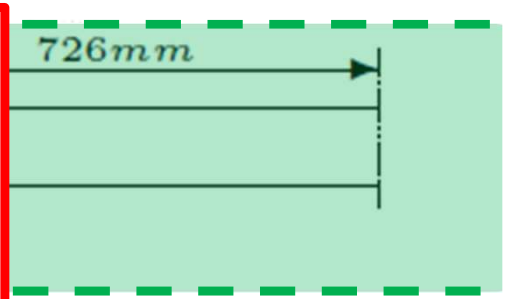
- 因果的システムの周波数応答計測



(a) measurement for thermoacoustic core

$$\begin{bmatrix} \tilde{A}_1 & \tilde{B}_2 \\ \tilde{B}_1 & \tilde{A}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -e^{-jk(l+\Delta_l)} & e^{-jk\Delta_l} \\ e^{jk(l+\Delta_l)} & -e^{jk\Delta_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}_{c1} & \tilde{p}_{c2} \\ \tilde{p}_{s1} & \tilde{p}_{s2} \end{bmatrix} /(2j \sin kl), \quad k = \omega/c_0$$

$$G = \begin{bmatrix} \tilde{A}_2^1 & \tilde{A}_2^2 \\ \tilde{B}_1^1 & \tilde{B}_1^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{A}_1^1 & \tilde{A}_1^2 \\ \tilde{B}_2^1 & \tilde{B}_2^2 \end{bmatrix}^{-1}$$



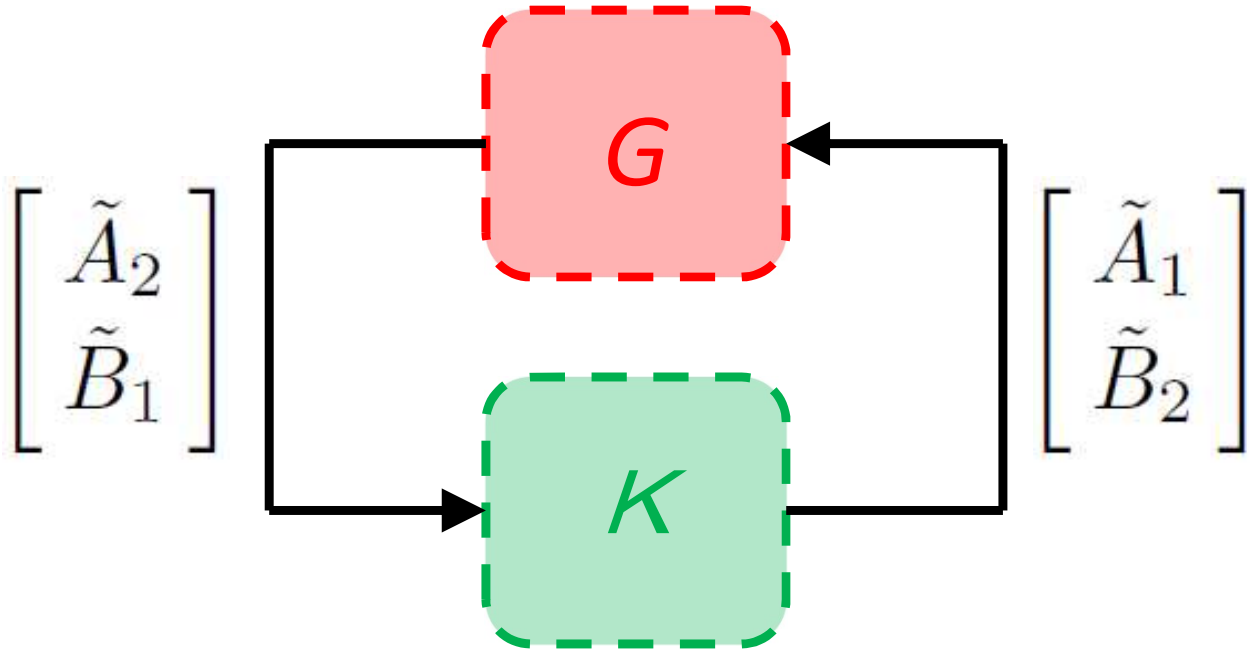
実験方法（つづき）

- ナイキストの安定判別

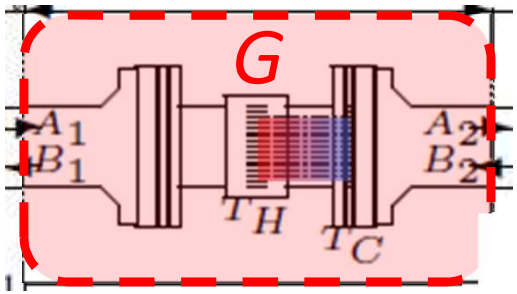
  図の閉ループ系が発振

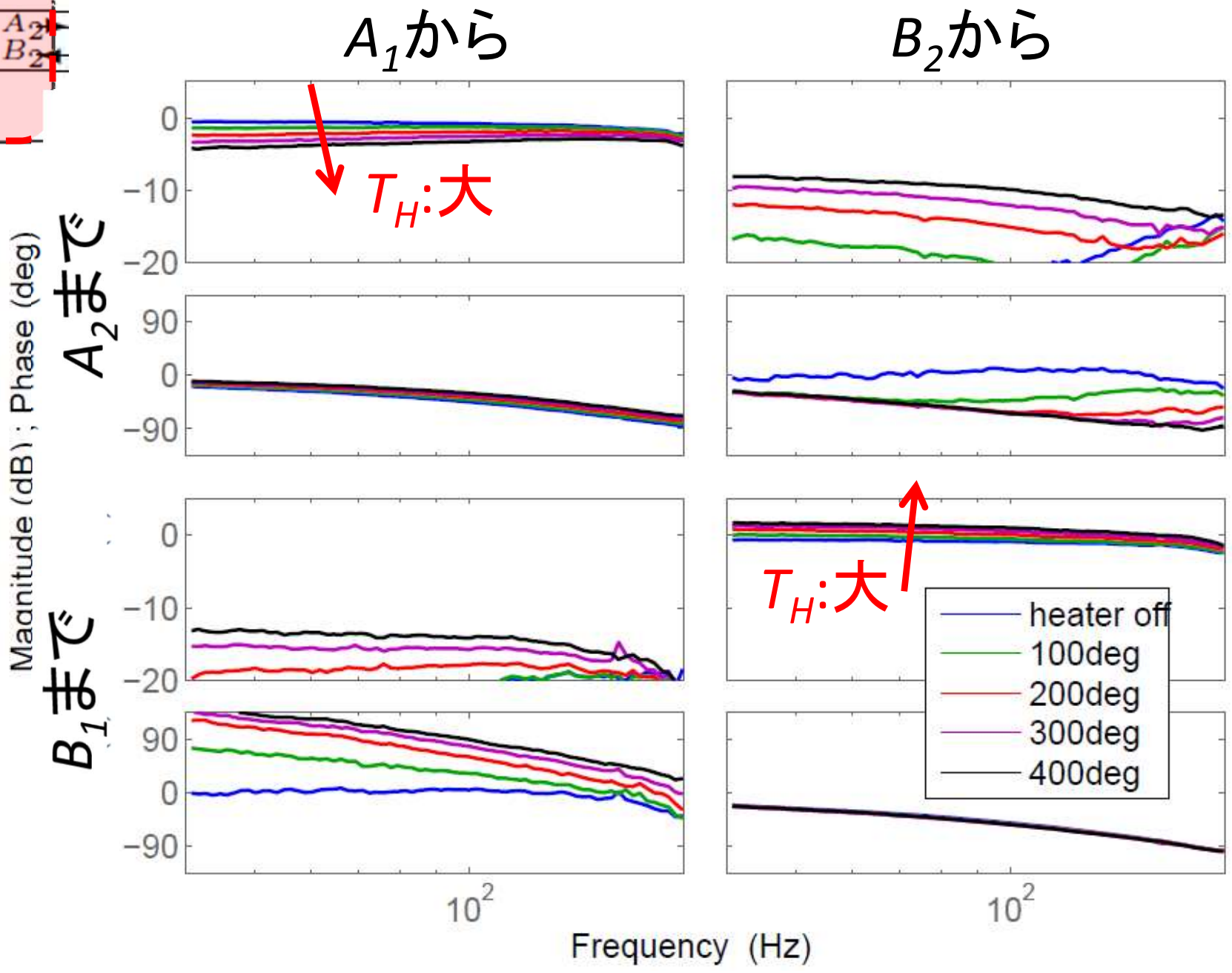
  ⇔ $\phi := \det(I - GK)$ のナイキスト軌跡が

  原点に重なるか囲むこと



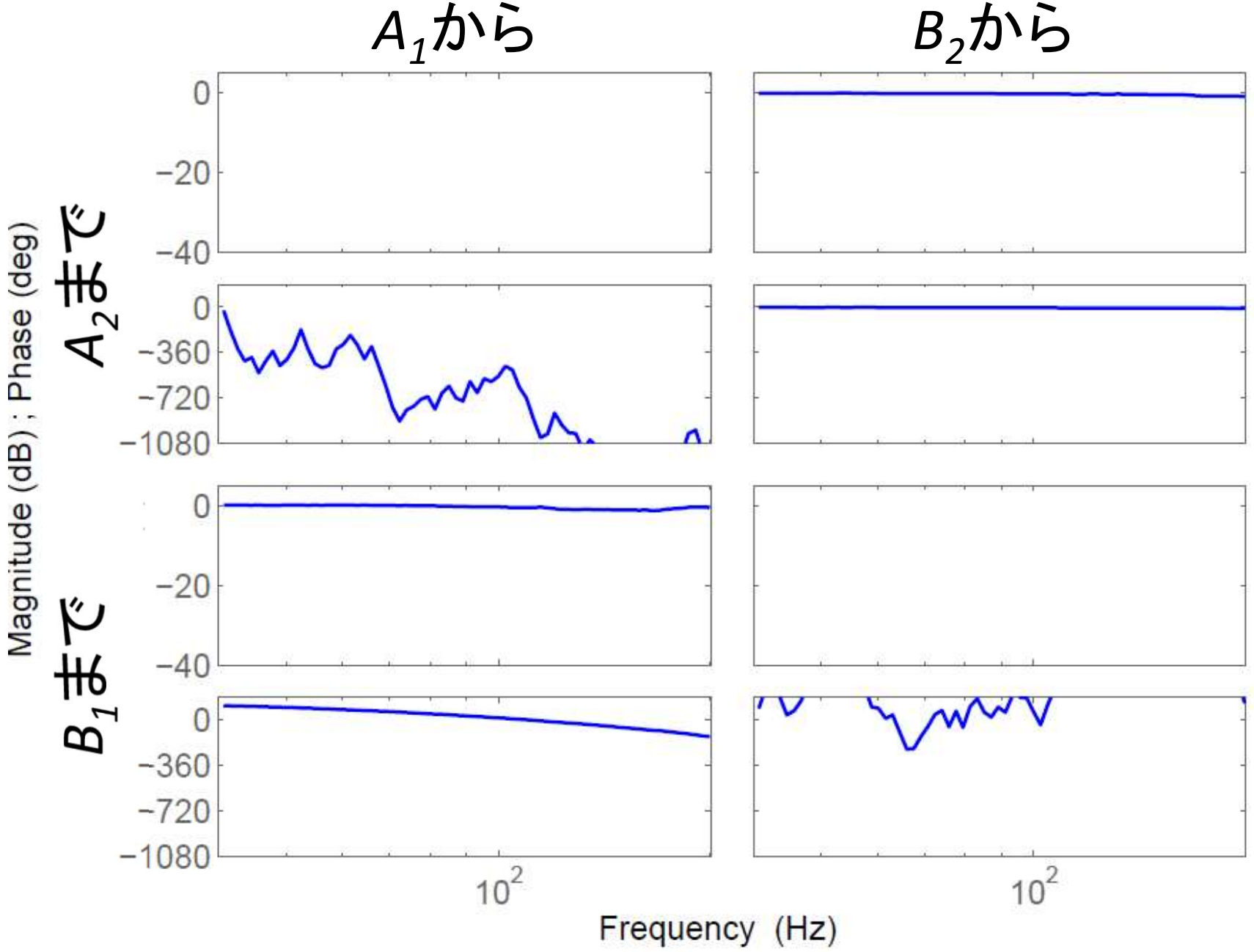
実験結果:コア部の周波数応答





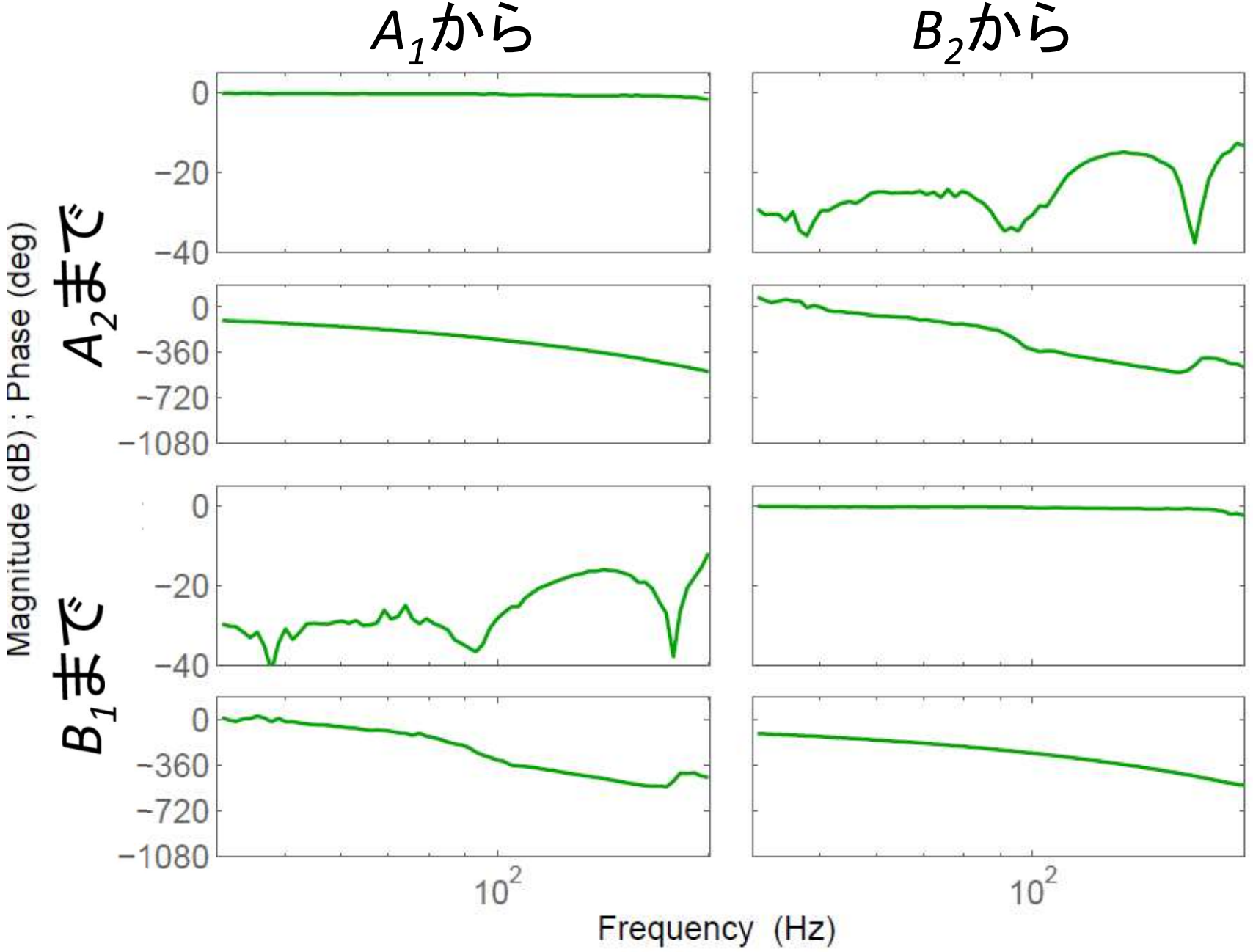
実験結果：管の周波数応答

- 定在波型エンジン



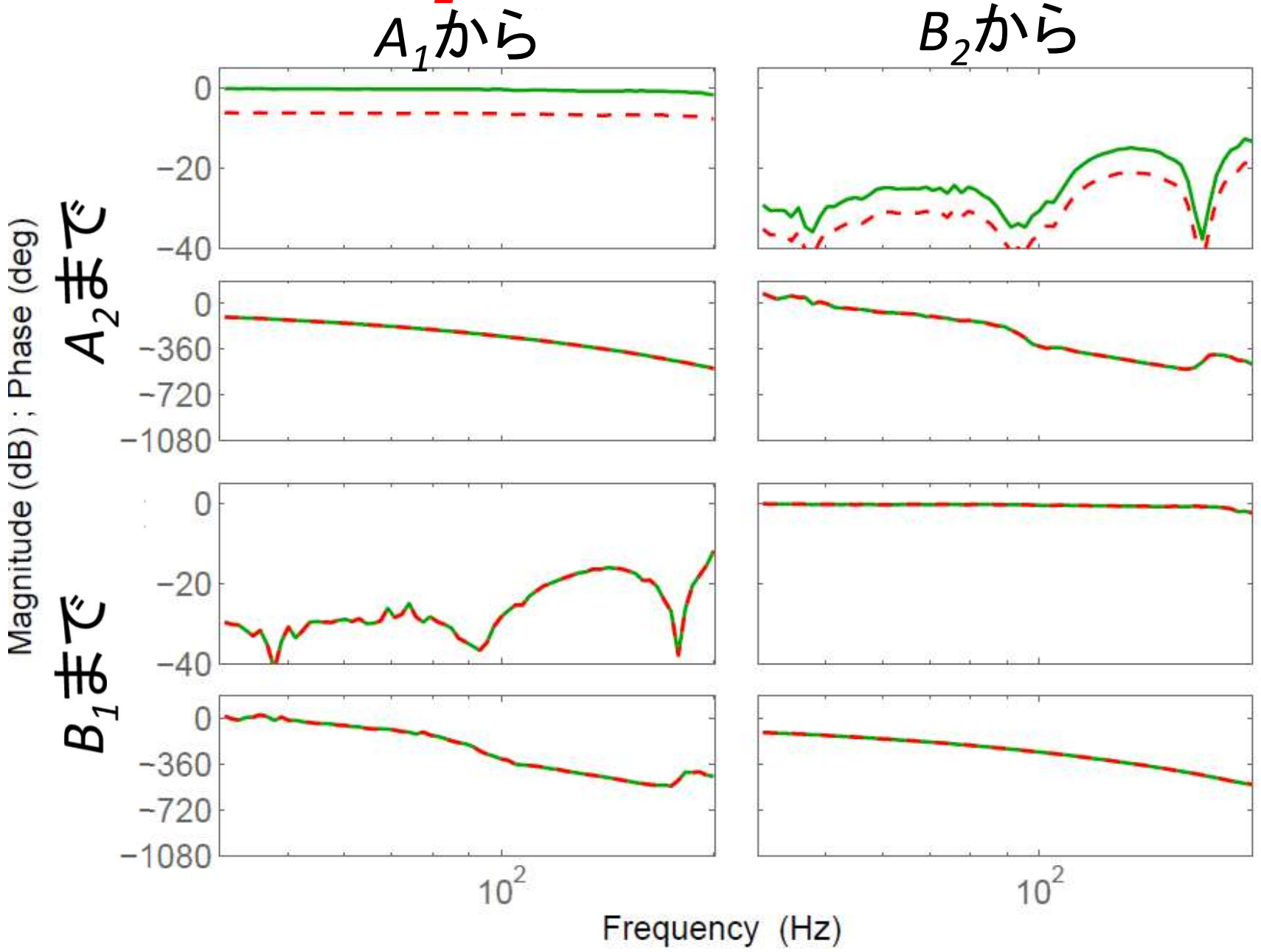
実験結果：管の周波数応答（つづき）

- 進行波型エンジン

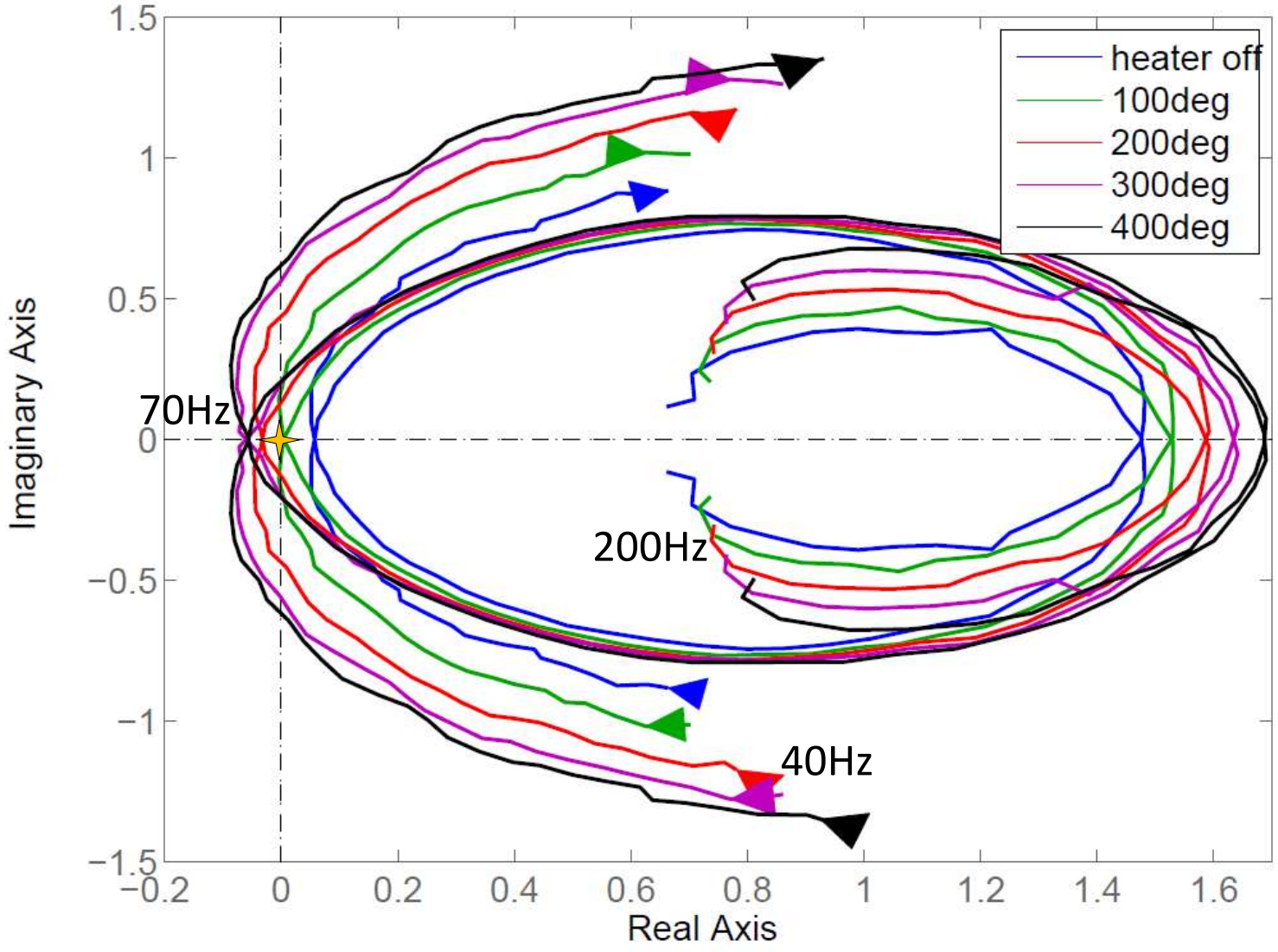


実験結果：管の周波数応答（つづき）

- 進行波型エンジン（A_2を0.5倍）



解析結果：定在波型エンジン

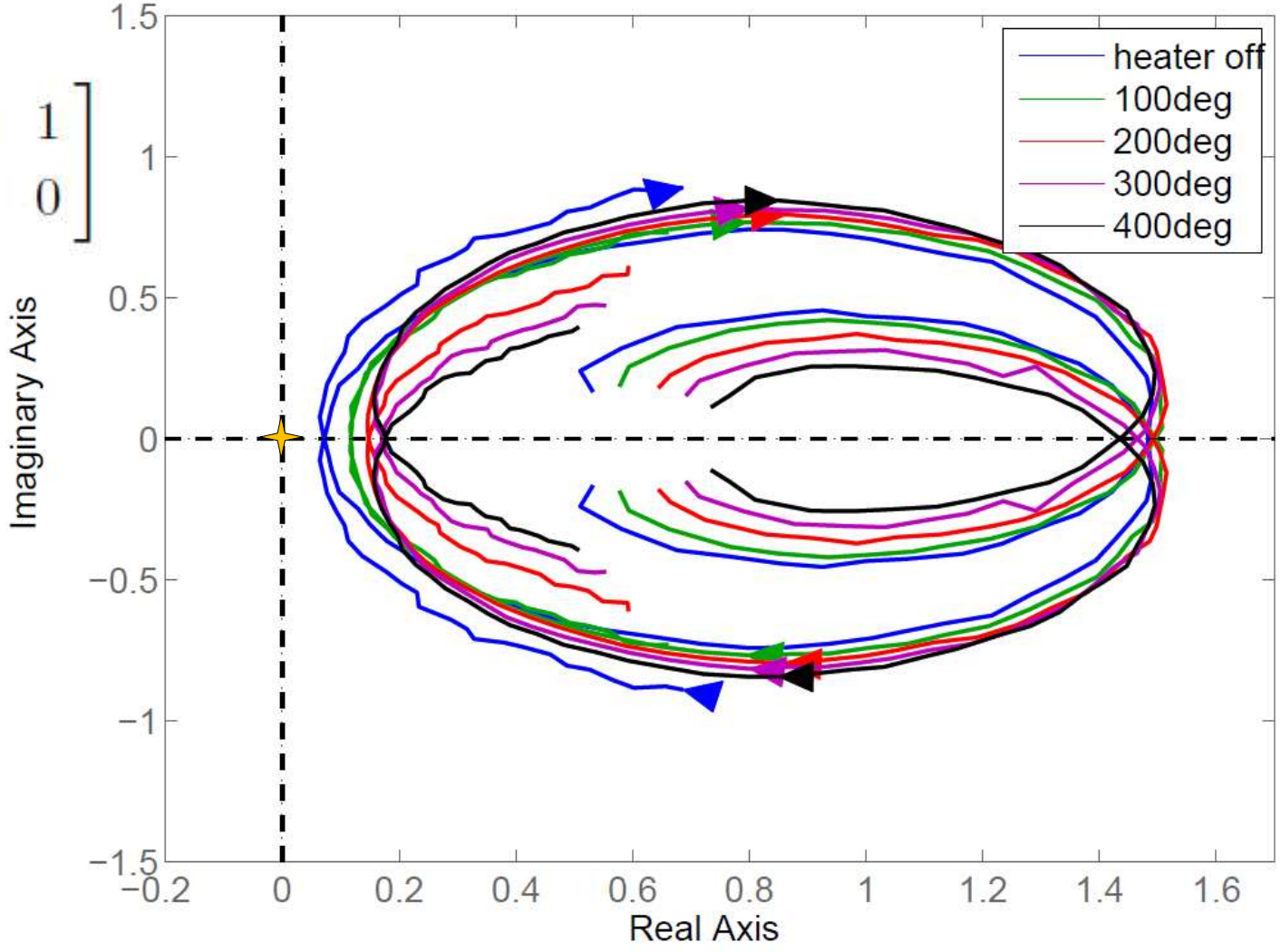


T_H：高　⇒　発振余裕：大

解析結果：定在波型エンジン（つづき）

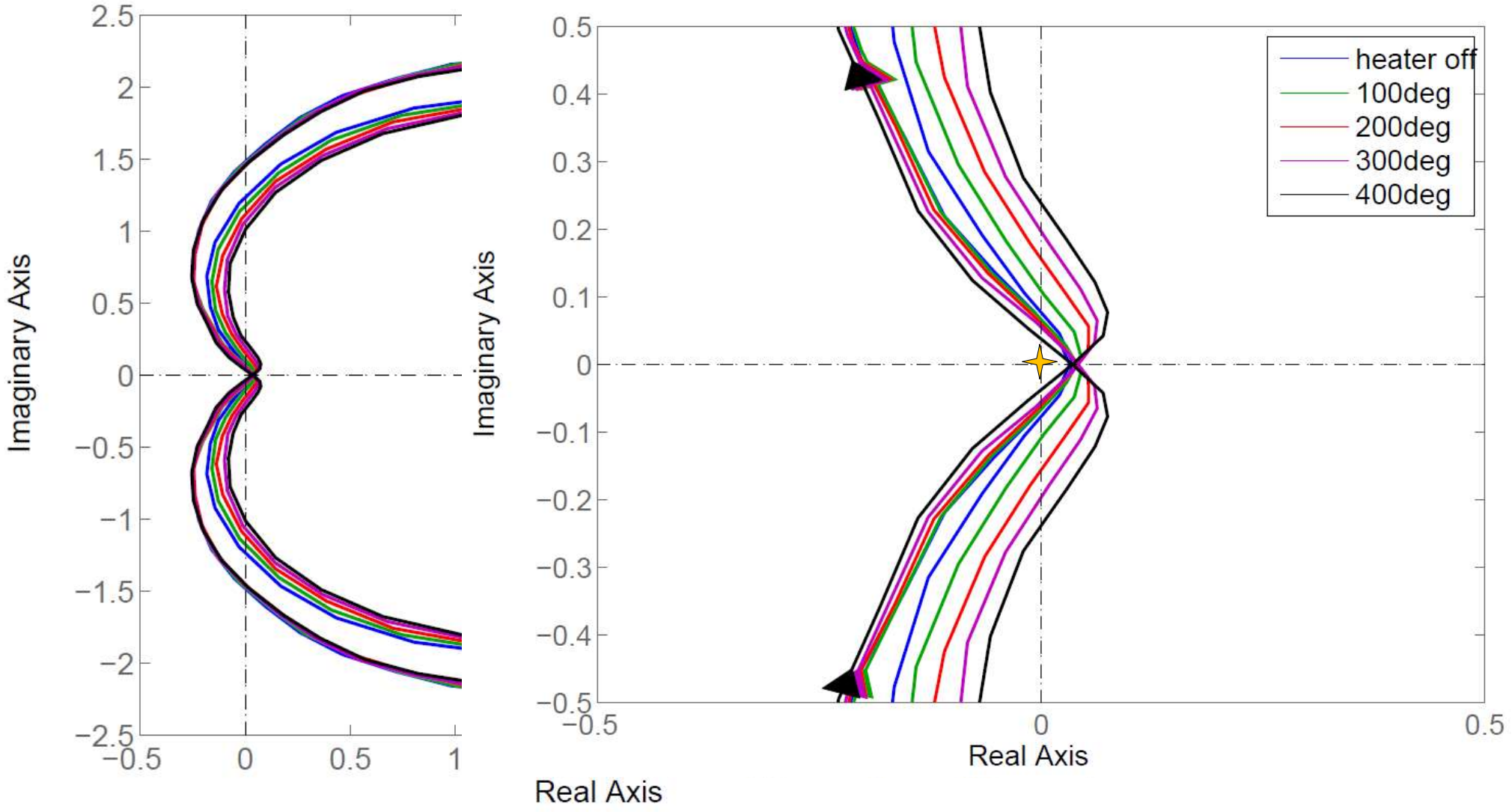
- コア部を逆向きにした場合

$$G_{\mathrm{inv}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} G \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$



T_H：高　⇒　安定余裕：大

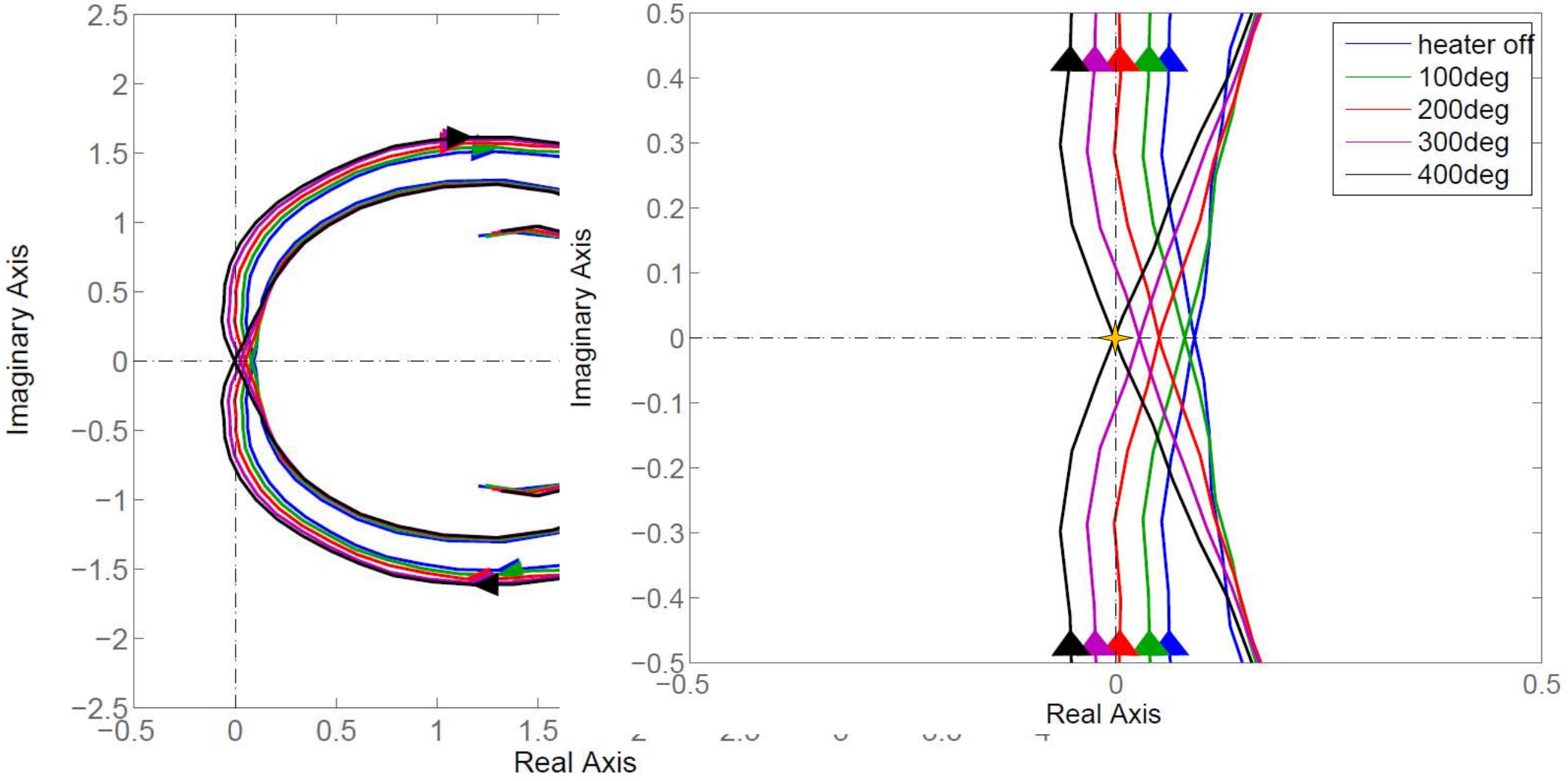
解析結果:進行波型エンジン



- T_H:大　⇒　軌跡が原点に近づく　∴発振に近い

解析結果：進行波型エンジン（つづき）

- A_2成分を0.5倍した場合



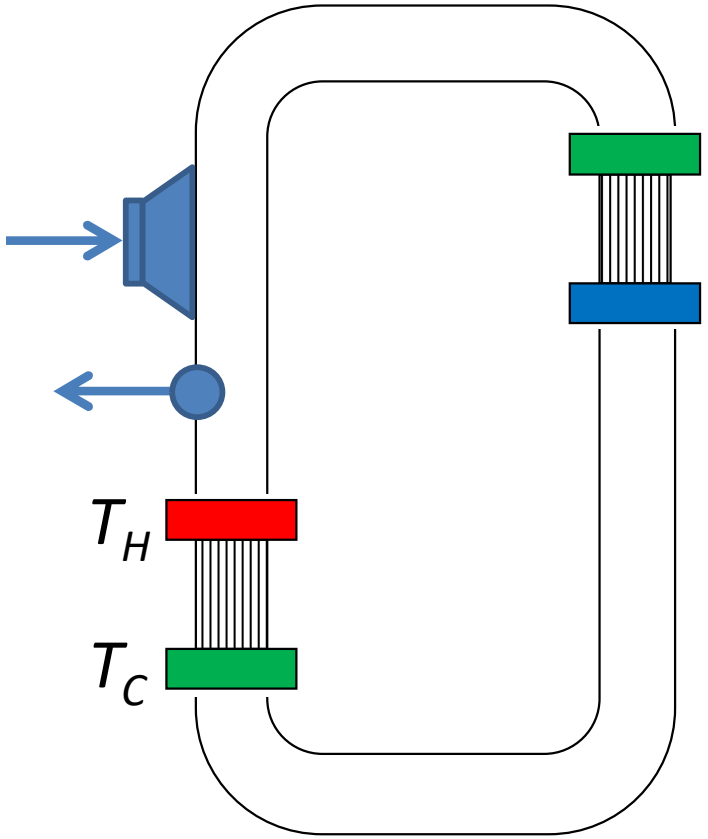
T_H=400℃のとき発振 … 定在波抑制の効果

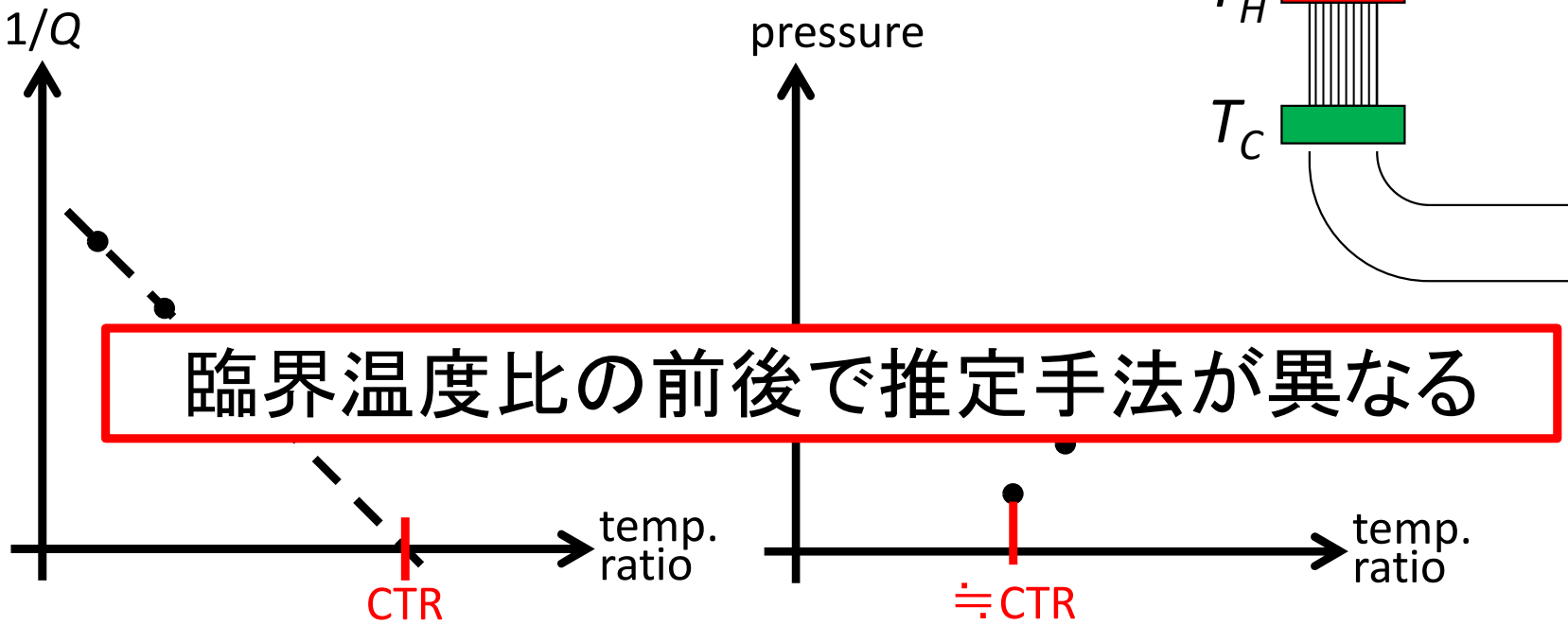
発表概要

- 分割されたシステムの応答による発振可否推定[1]
  - 進行波圧力成分を入出力とする因果的システム
  - ナイキストの安定判別、発振余裕の把握可能
- 与えられたシステムの制御による発振可否推定[2]
  - 臨界温度比の推定、定常発振制御
  - 非線形システムの安定性解析
- 電力フィードバック進行波型熱音響発電機([3])
  - リニアモータの電気-音響特性
  - コイルによる余裕拡大、圧力一定とする負荷の制御

与えられたシステムの定常発振制御に基づく臨界温度比の推定[2]：背景

- 臨界温度比CTRの推定
  - <CTR: Q値に基づく方法
  - >CTR: 実測値の最小値





臨界温度比の前後で推定手法が異なる

目的

1. 定常発振制御に基づく統一的な推定手法
   - PI（比例・積分）制御 … 圧力振幅 → 目標値
   - PI 補償器の出力を時変係数 $G(t)$ とする
   - 収束値 $G(\infty)$ で臨界温度比を推定できる
2. PIゲインに関する安定条件の導出
   - 非線形システムの安定性解析

実験装置

- 定在波型熱音響エンジン
  - T_C=27℃, T_Hを変化
  - 約60Hzで発振

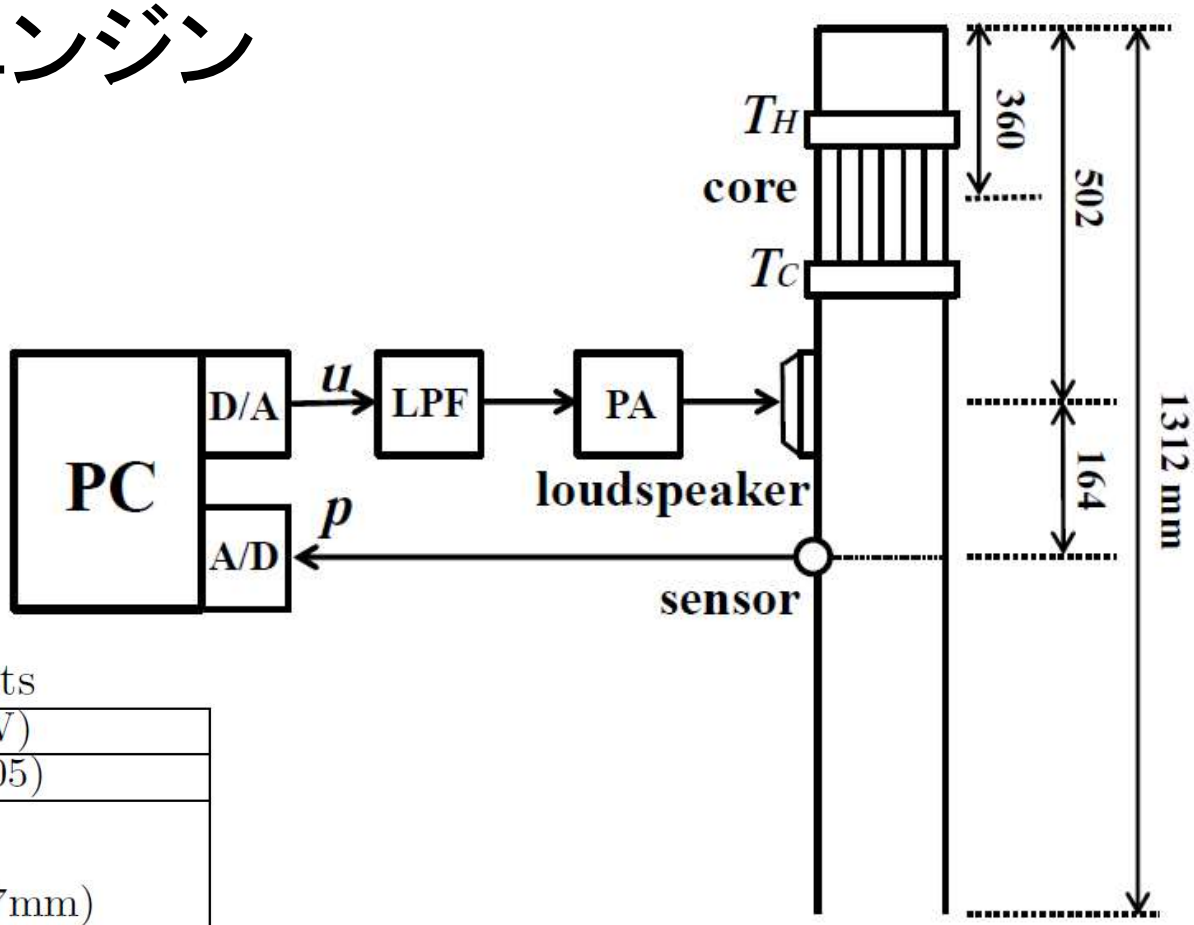
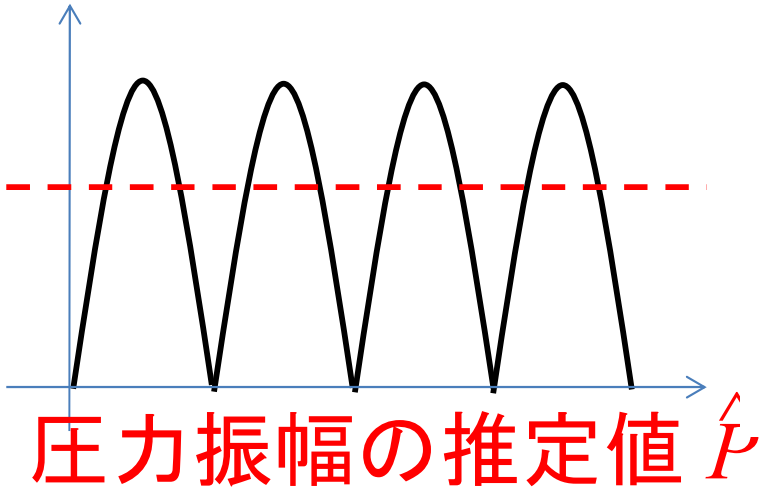


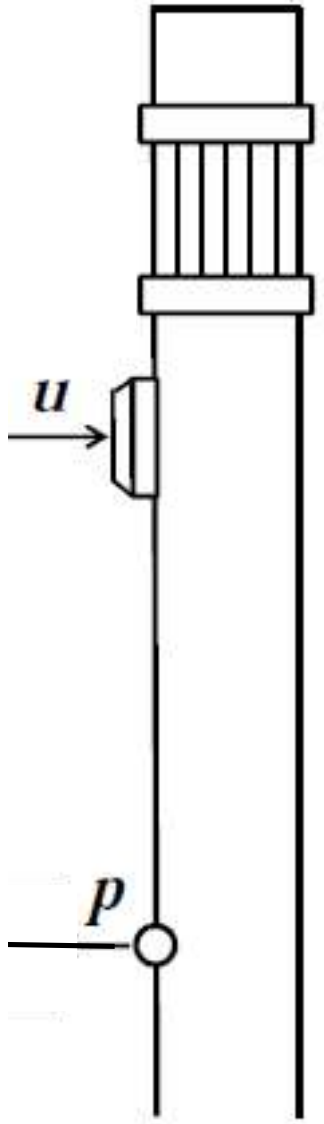
Table 1: Experimental instruments

Loudspeaker	Toptone S32U10-1 (4Ω, 3W)
Pressure sens.	PCB 106B51 (Amp. 482C05)
Stack	NGK INSULATORS honey-comb ceramics (600 cpi, $l = 50$mm, $\phi = 47$mm)
Sheath heater	HAKKO DG2P (200W)
Thermo cont.	HAKKO DGC2310
PC	Dell Power Edge840 (RTAI3.6.1 / Linux kernel 2.6.20.21)
A/D D/A	CONTEC AD12-16(PCI) CONTEC DA12-4(PCI) (12bit, ±5V, 10μs)
Power Amp.	YAMAHA P1000S

実験装置（つづき）

- 定常発振制御系
  - 圧力振幅 $P \rightarrow P^*$（抑制 / 補助）
  - phase-delay control: $u(t) = G\,p(t-\tau)$
  - G：正定数 ⇒ $P=0$（抑制），$G(t$

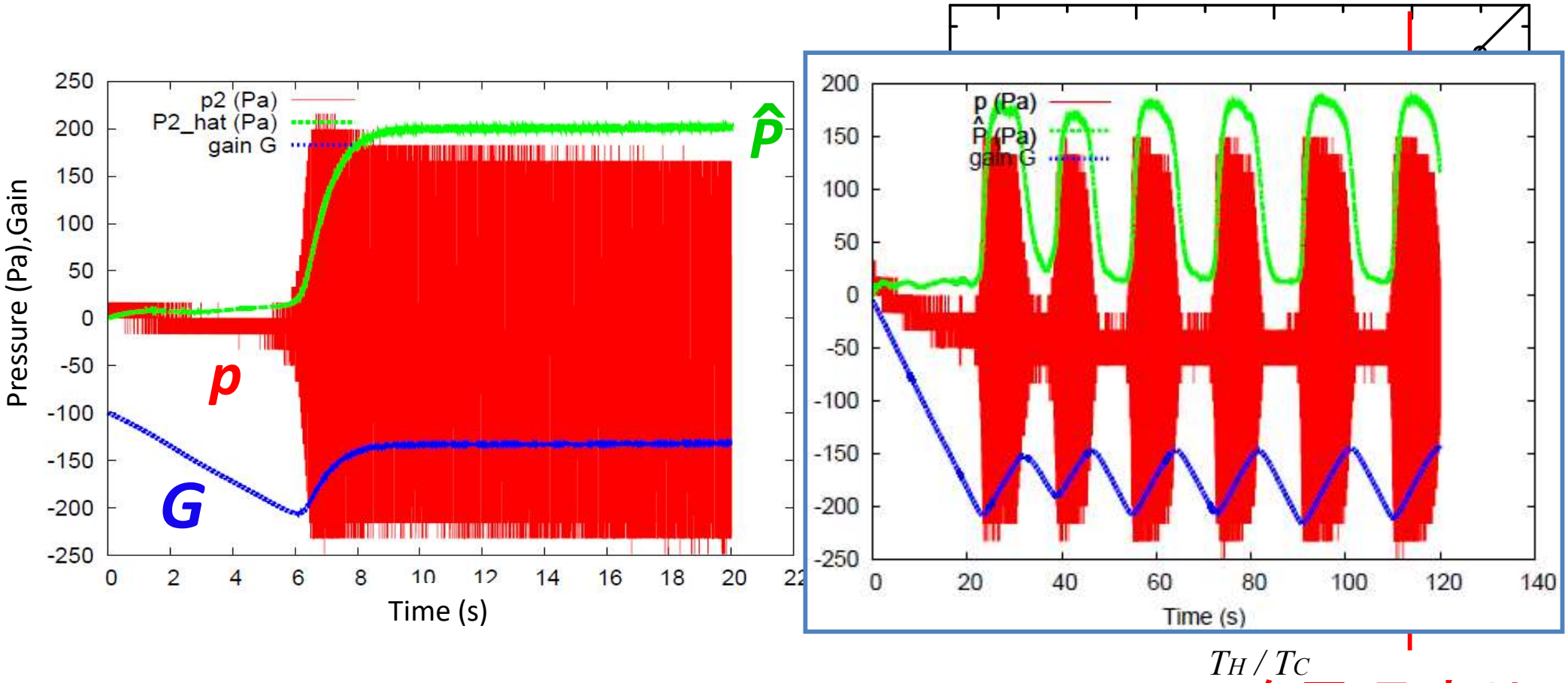




臨界温度比以下では $G<0$ で発振

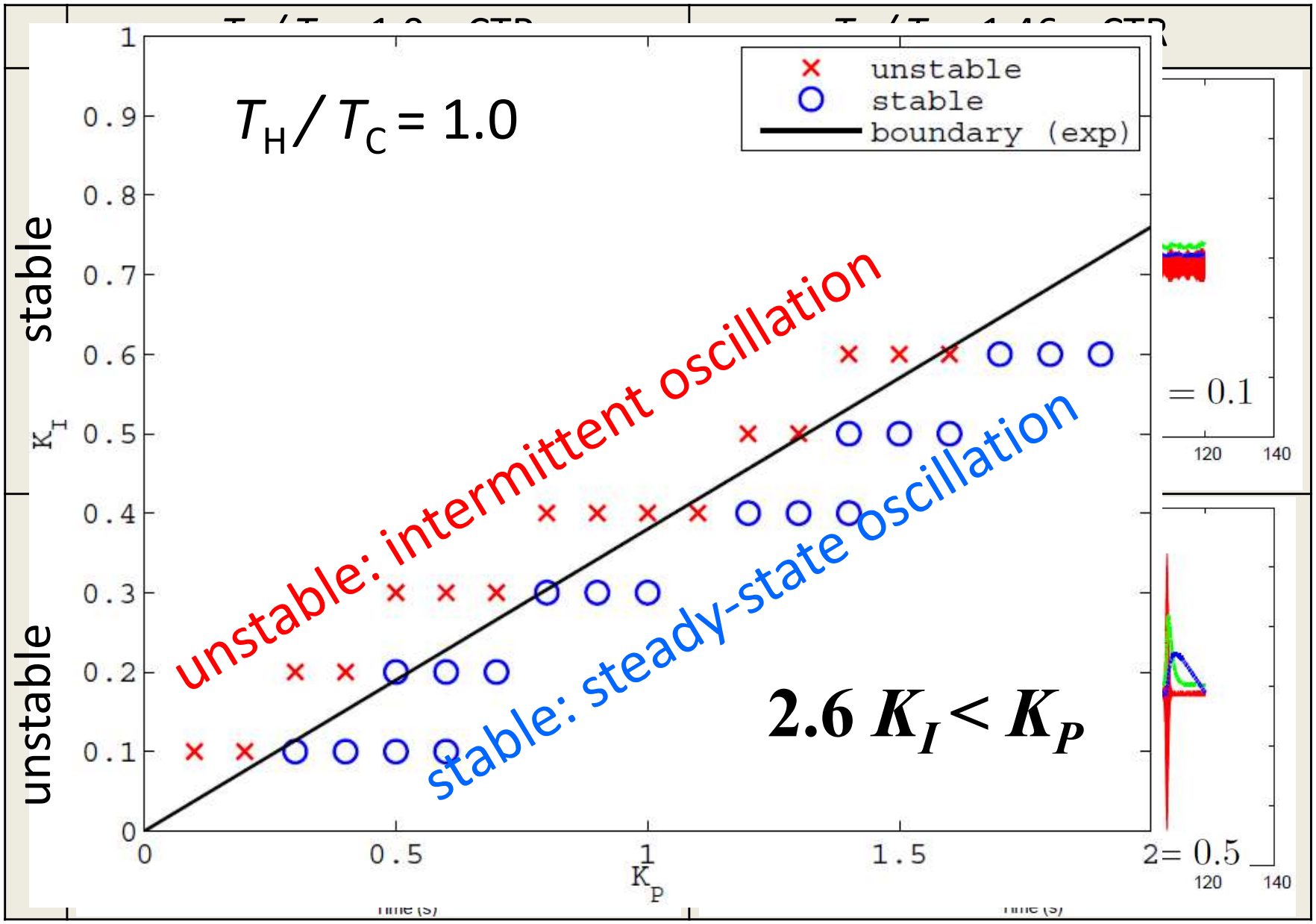
実験結果

- 時間応答の例（$T_H / T_C = 1.0$, $P^* = 200$Pa）
  - 約60Hzで定常発振
  - $K_P = 0.5, K_I = 0.1, \omega_F = 1$



Experimental results (cont.)

- example of time response (P^*=100Pa)



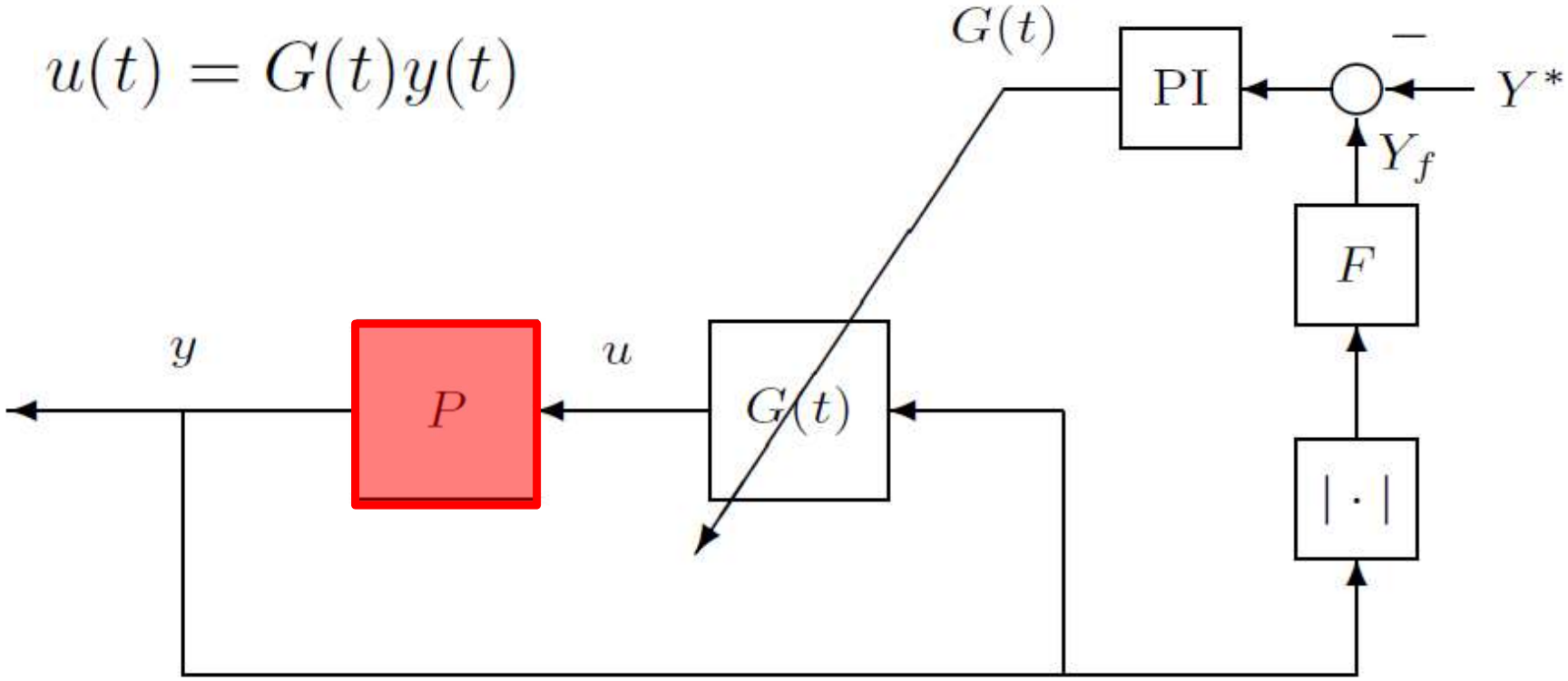
安定性解析

- 二次振動系モデル

$$\ddot{x} = -\omega_n^2 x - 2\zeta\omega_n \dot{x} + u, \quad y = 2\alpha\omega_n \dot{x}$$

$$P(s) = \frac{2\alpha\omega_n s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \qquad \alpha < 0$$

$$u(t) = G(t)y(t)$$



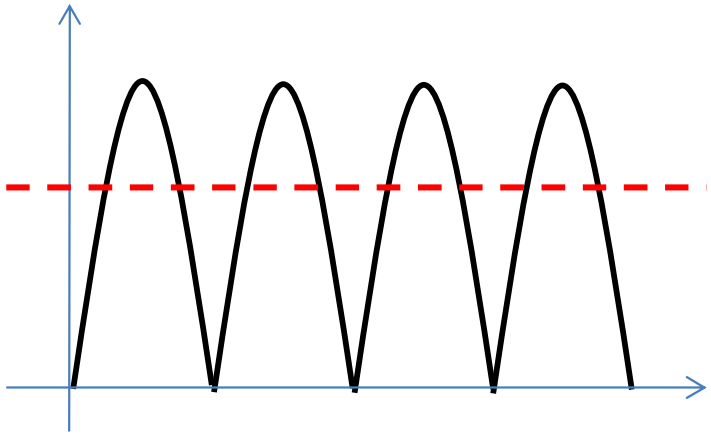
安定性解析（つづき）

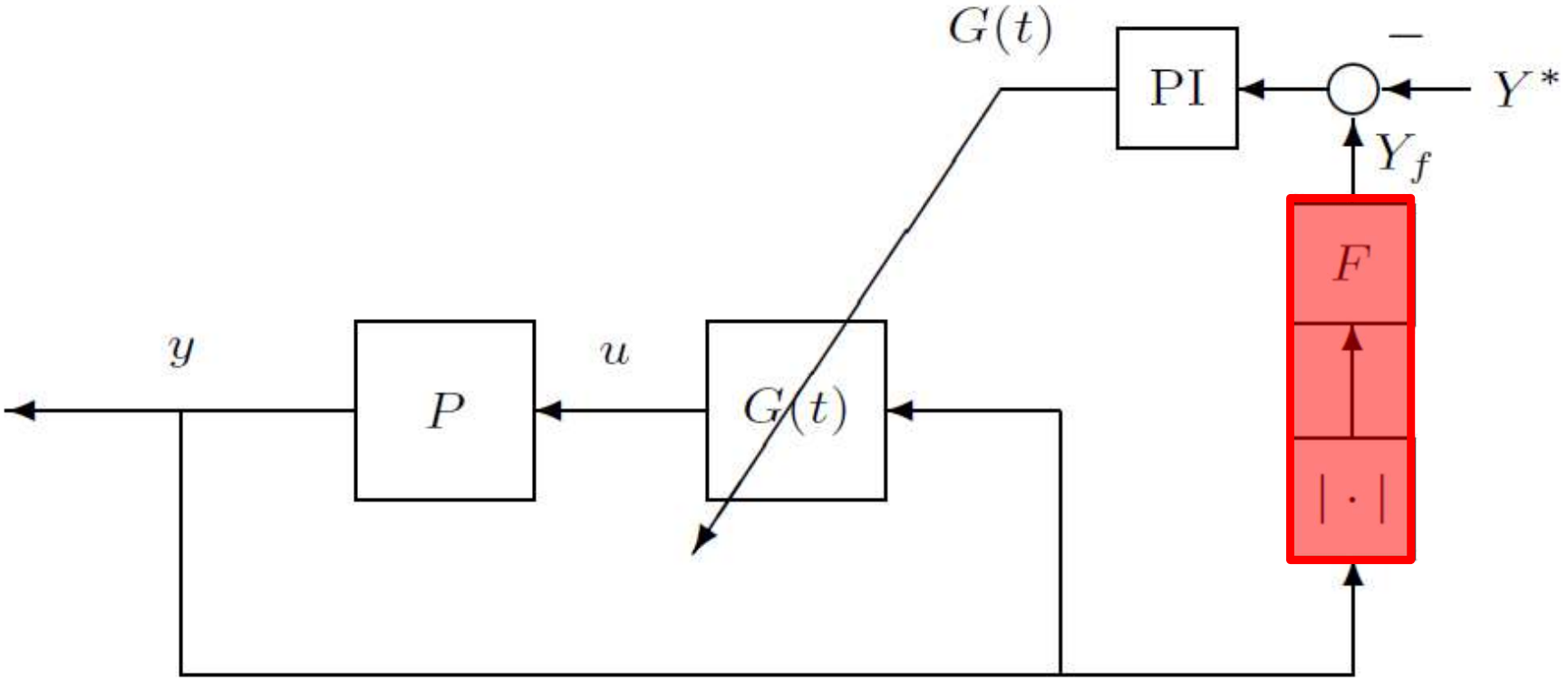
- 振幅の推定における仮定

$$\dot{x}_f = -\omega_f x_f + \omega_f \frac{2}{\pi} Y(t)$$

$$Y_f = \frac{\pi}{2} x_f$$

$$y(t) = Y(t) \cos \omega_n t$$

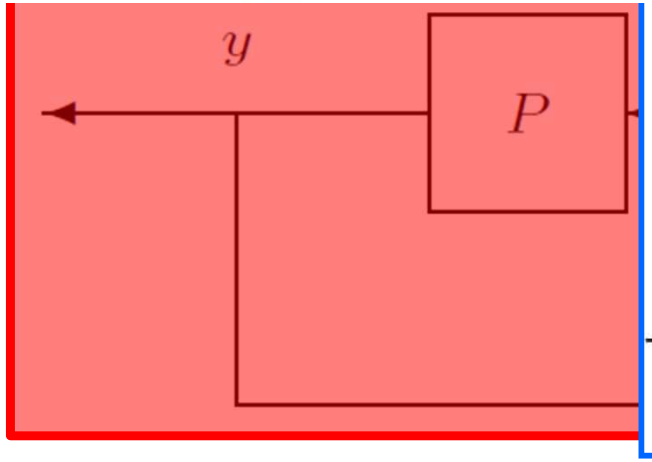


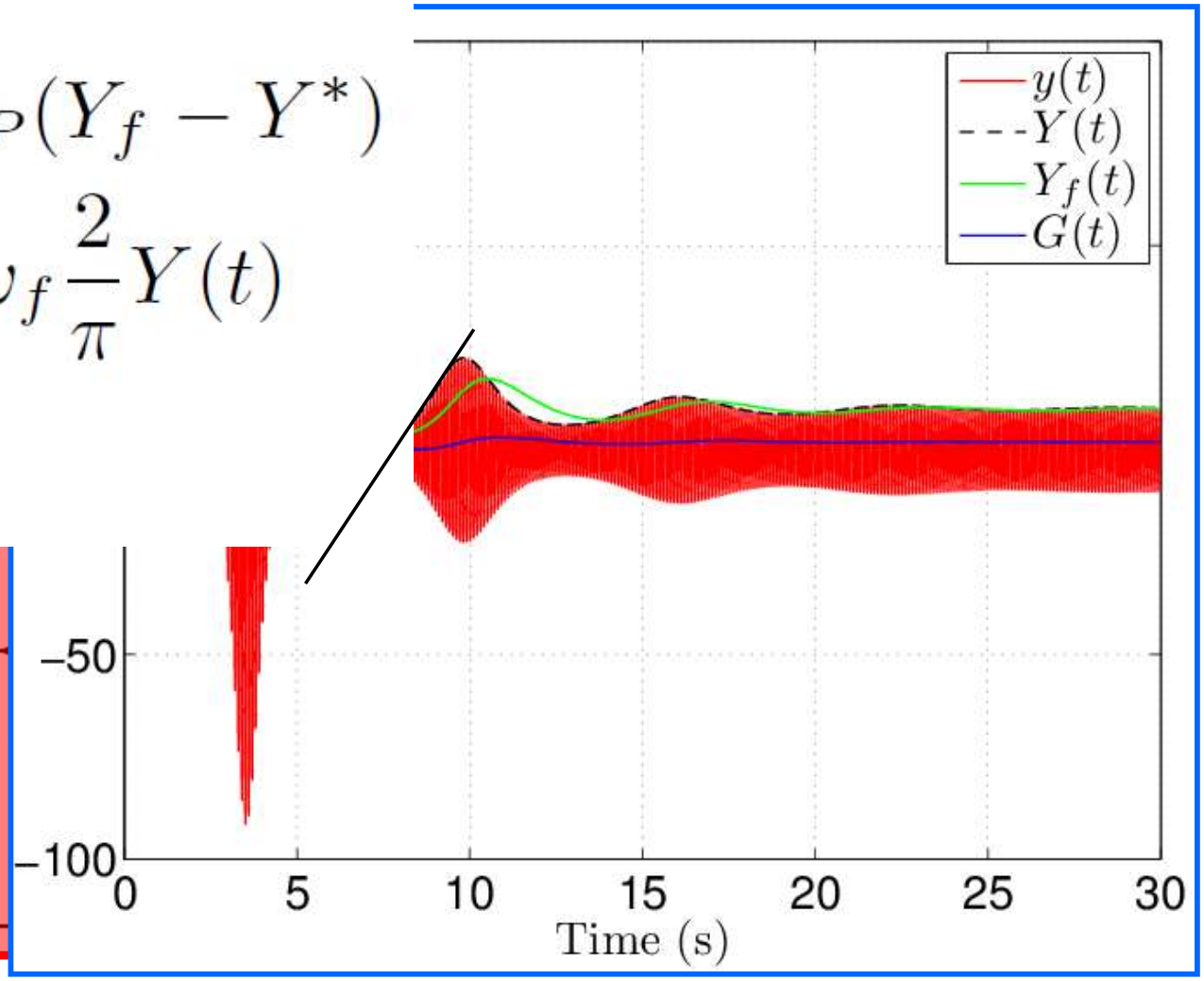


安定性解析（つづき）

- 振幅の動特性

$$
\begin{aligned}
\dot{Y} &= \omega_n(\alpha G - \zeta)Y \\
\dot{x}_c &= Y_f - Y^* \\
G &= K_I x_c + K_P(Y_f - Y^*) \\
\dot{x}_f &= -\omega_f x_f + \omega_f \frac{2}{\pi} Y(t) \\
Y_f &= \frac{\pi}{2} x_f,
\end{aligned}
$$





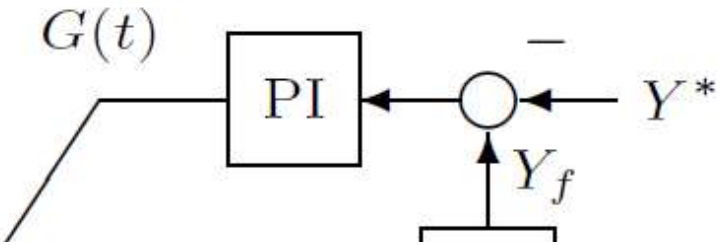
従来結果

- 平衡点周りの線形近似による安定条件

$$\alpha K_P < 0, \quad \alpha K_I < 0, \quad \alpha(K_I - \omega_f K_P) > 0$$

$$\Rightarrow \quad \hat{x} \to \bar{x}$$

$$\hat{x}(t) := \begin{bmatrix} Y(t) \\ x_c(t) \\ x_f(t) \end{bmatrix}, \quad \bar{x} := \begin{bmatrix} Y^* \\ \frac{\zeta}{\alpha K_I} \\ \frac{2}{\pi} Y^* \end{bmatrix}$$



$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} Y \\ x_c \\ x_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_n \alpha K_I \boldsymbol{Y^*} & \frac{\pi}{2}\omega_n \alpha K_P \boldsymbol{Y^*} \\ 0 & 0 & \frac{\pi}{2} \\ \frac{2}{\pi}\omega_f & 0 & -\omega_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y - Y^* \\ x_c - \frac{\zeta}{\alpha K_I} \\ x_f - \frac{2}{\pi} Y^* \end{bmatrix}$$

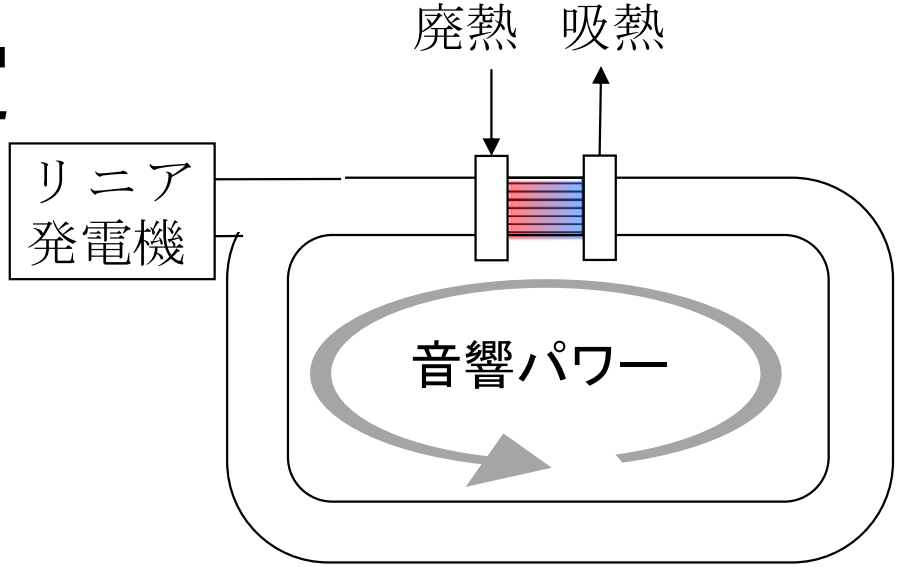
近似無しの解析 ⇒ 大域的漸近安定条件[自動制御連合2017]

発表概要

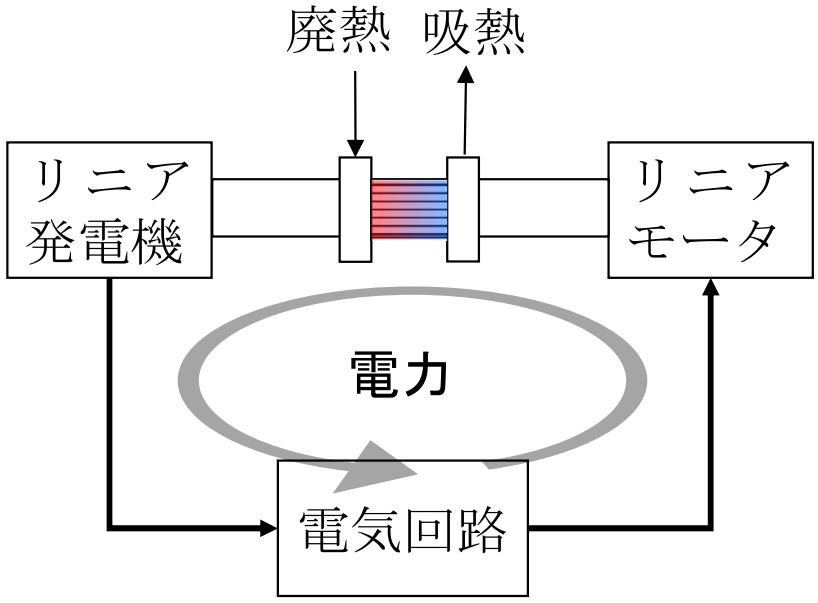
- 分割されたシステムの応答による発振可否推定[1]
  - 進行波圧力成分を入出力とする因果的システム
  - ナイキストの安定判別、発振余裕の把握可能
- 与えられたシステムの制御による発振可否推定[2]
  - 臨界温度比の推定、定常発振制御
  - 非線形システムの安定性解析
- 電力フィードバック進行波型熱音響発電機([3])
  - リニアモータの電気-音響特性
  - コイルによる余裕拡大、圧力一定とする負荷の制御

背景：電力フィードバック型熱音響発電機

- 従来システム … 周波数固定
  - ループ管：音響系の共振
  - リニア発電機：機械系の共振
  - 最大効率の維持が困難

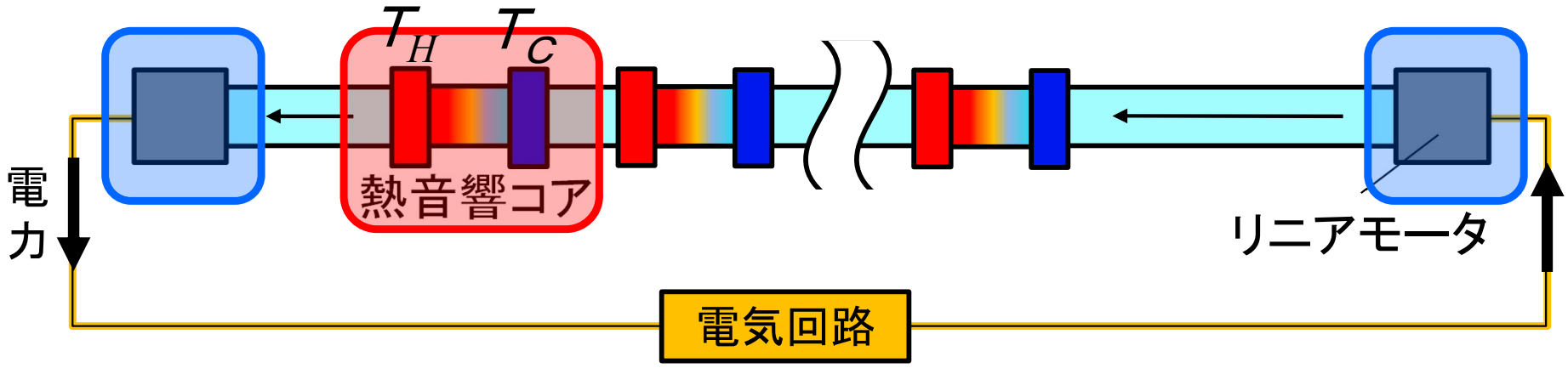


- 提案システム … 周波数可変
  - 音響パワー → 電力
  - 小型化、高効率化
  - 電気回路の定数を変化
  - 最大効率の維持を目指す



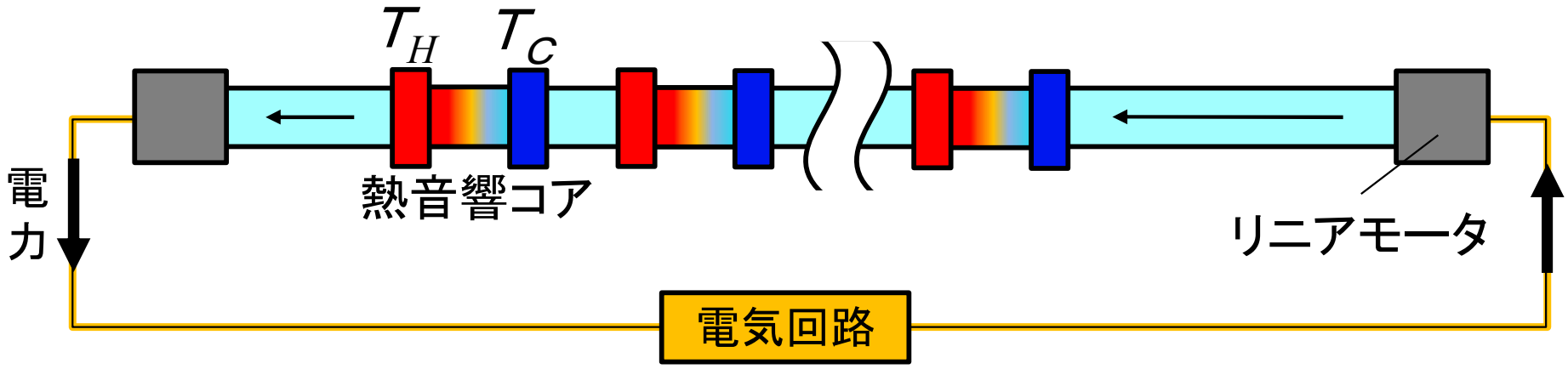
背景：これまでの結果

- ナイキスト安定判別に基づく安定解析 [3]
  - コアとリニアモータの特性 … 実験的に取得
  - 管路と電気回路の特性 … 物理モデル
- コア5段で発振するシステム [2017春、音響論（掲載決定）]
  - 電気回路＝直列抵抗 R
  - 実験と解析：R →小　⇒　音響パワー・環送電力→大
  - エネルギーがループして発振

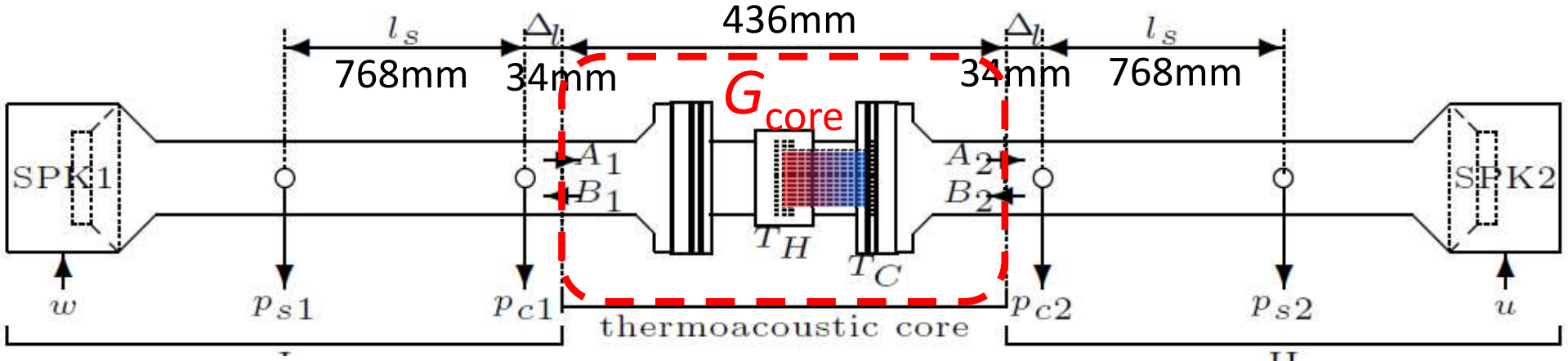


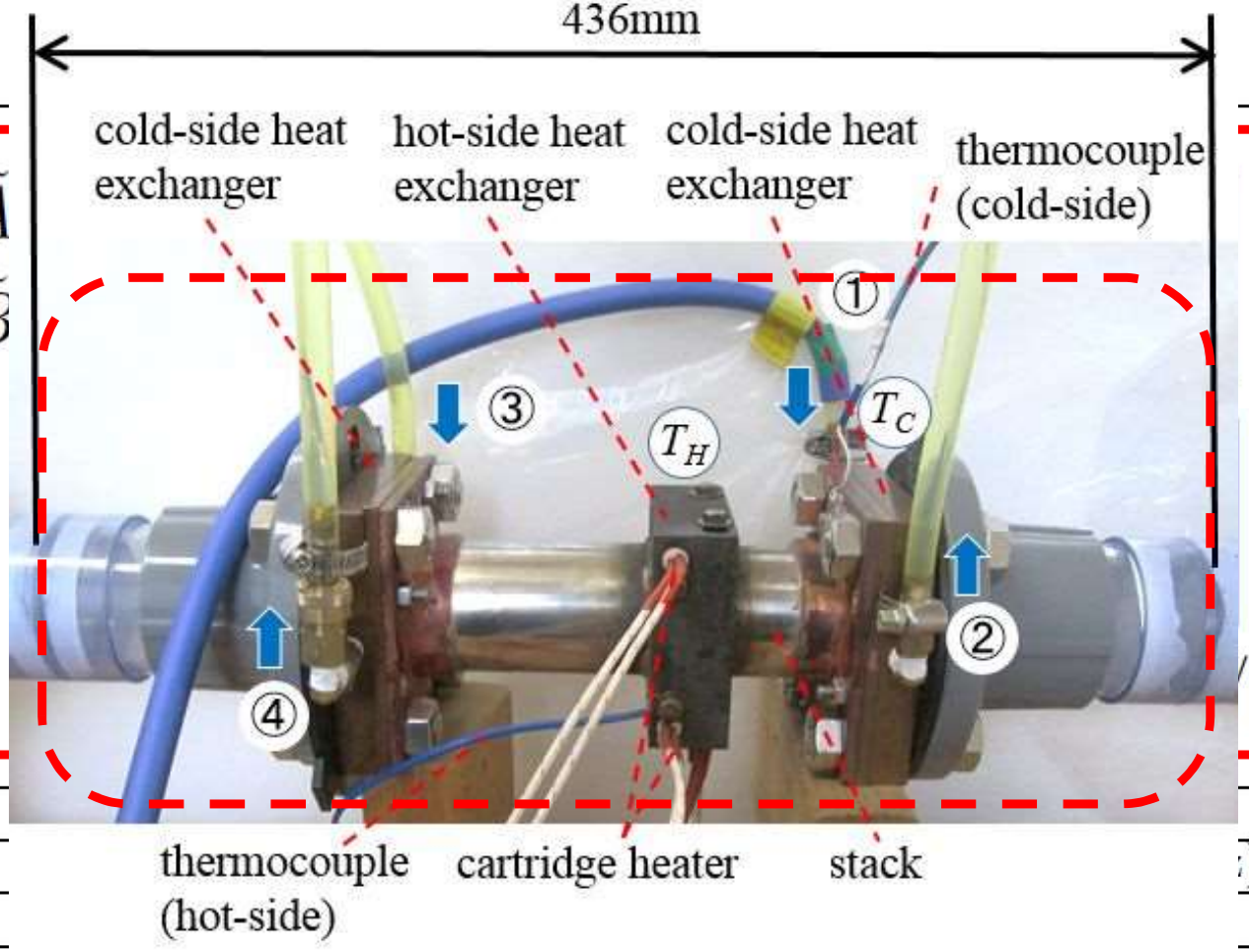
目的

- 発電機の性能向上
  1. 熱音響コアの段数低減、高効率化 [音響学会2017秋]
     … 負荷の定数を変化（コイルを追加）
  2. 温度変動に対する圧力振幅の制御 [機械学会2018.3]
     … 負荷を動的に変化（定常発振制御系の応用）



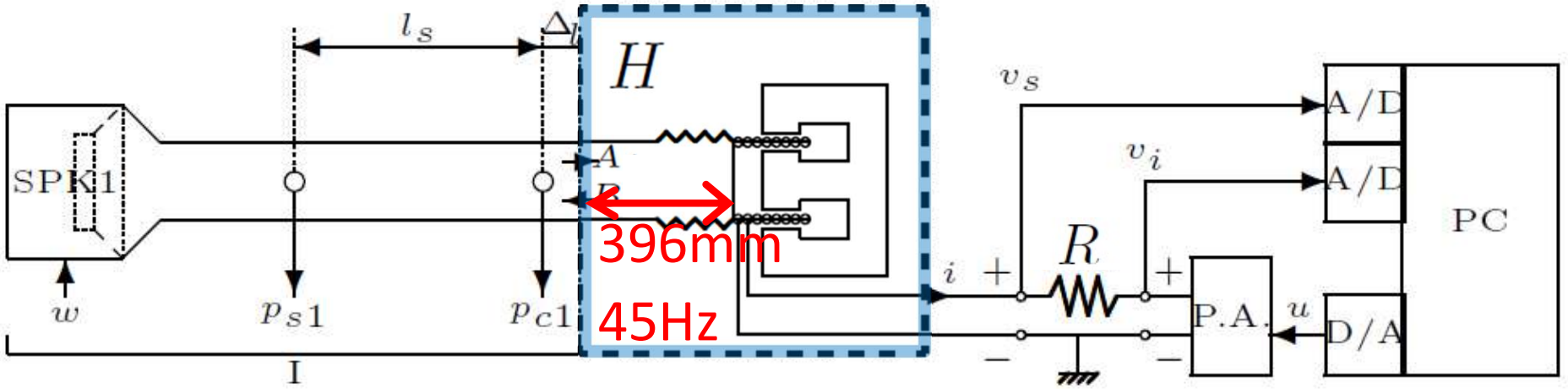
実験装置1:コアの周波数応答測定

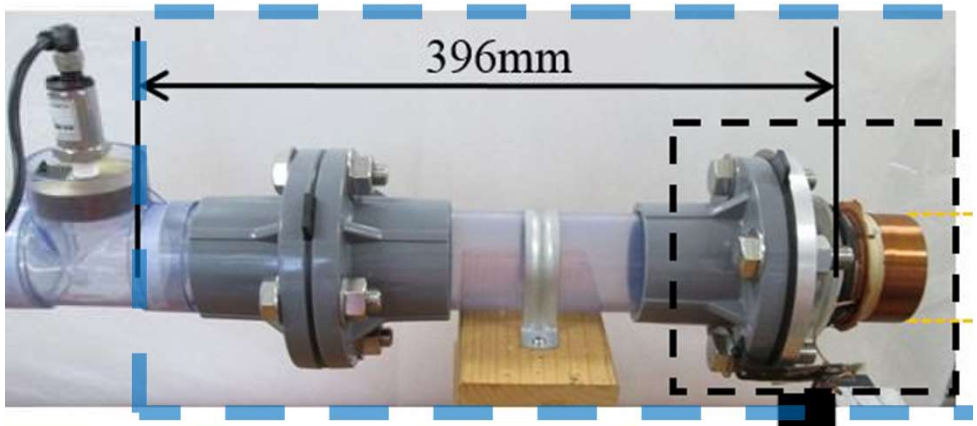


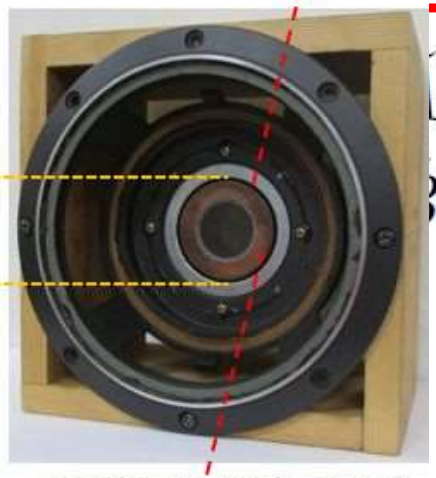


$$\begin{bmatrix} \tilde{A} \\ \tilde{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{B}_2^1 & \tilde{B}_2^2 \\ \tilde{A}_1^1 & \tilde{A}_1^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{p}_{c1} & \tilde{p}_{c2} \\ \tilde{p}_{s1} & \tilde{p}_{s2} \end{bmatrix} / c_0$$

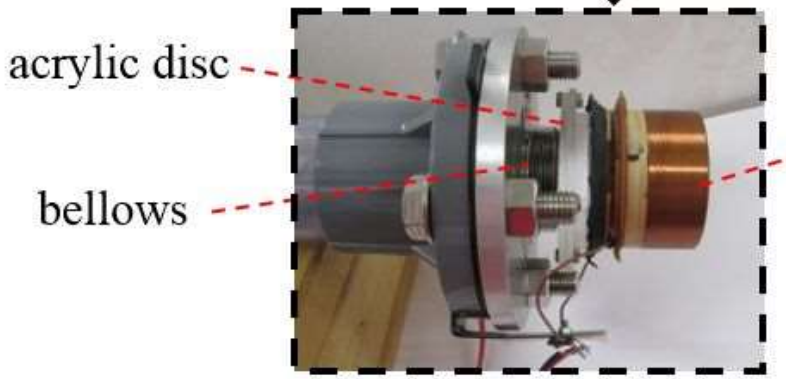
実験装置2：リニアモータの特性測定







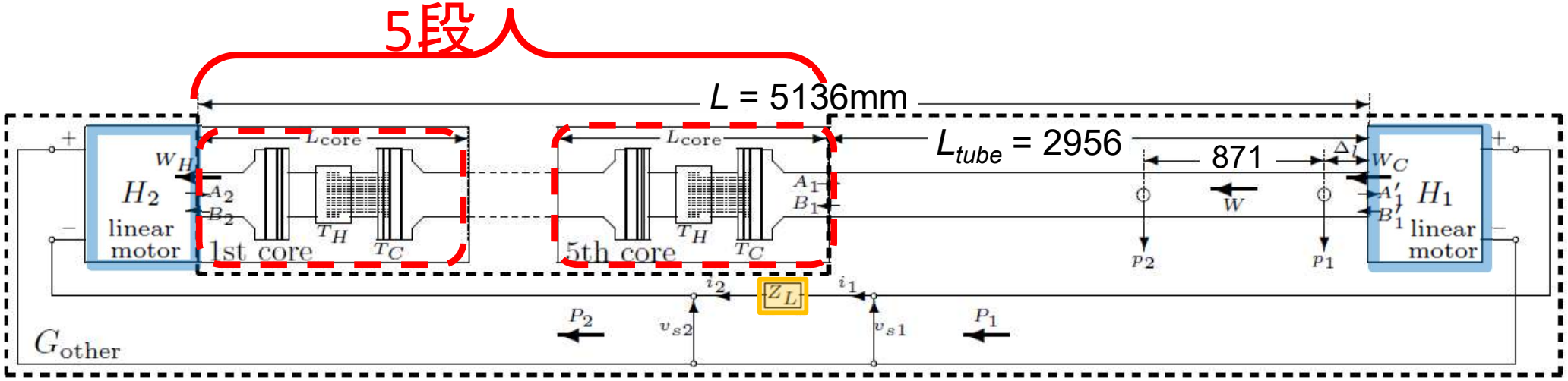
$$\begin{bmatrix} \tilde{i}^1 & \tilde{i}^2 \\ \tilde{v}_s^1 & \tilde{v}_s^2 \end{bmatrix}^{-1}$$



nm

MHz)

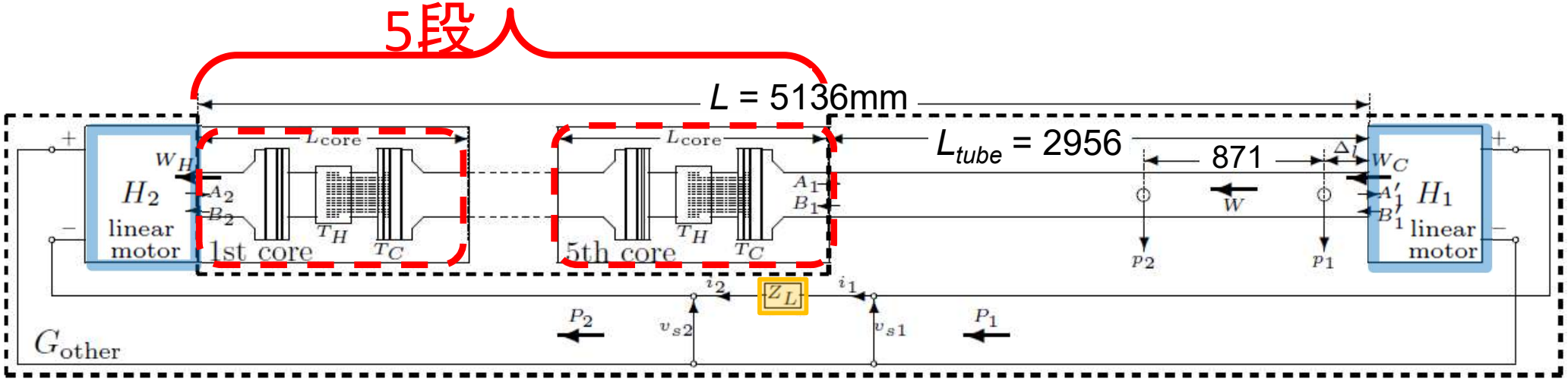
実験装置3：電力フィードバック型発電機



全長約6m（定在波あり）
p_2とp_1の位相差2～3°（44Hz）
完全な進行波型：40°
T_C = 10℃，T_H = 300℃

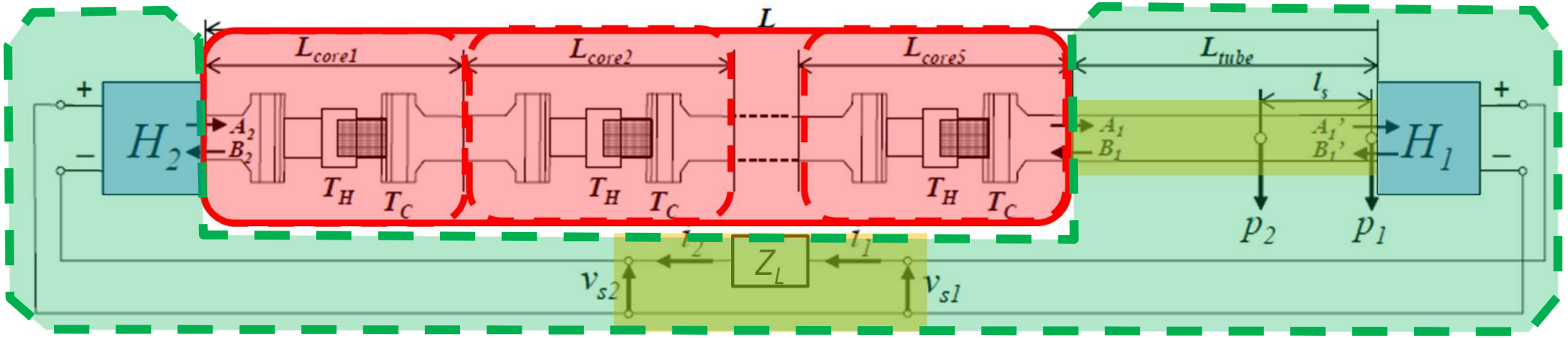
- 変更点：コイルを追加
  - 負荷$Z_L = R + j\omega X_L$
  - R = 0, 47Ω; X_L= 0, 29mH の四通り

発電機構成の経緯



1. コア1段、両端閉端のエンジンを構成
2. 閉端をリニアモータで置き換え、発振[3]
   回路を直結 ⇒ 発振余裕：大、しかし定在波型
3. 全長を保ったままコアを4段追加 ⇒ 発振せず
4. 解析で管長を探索：直結時のみ発振する長さ

安定性解析手法



1. コア1段の周波数応答G_1を取得、$G_i := G_1$

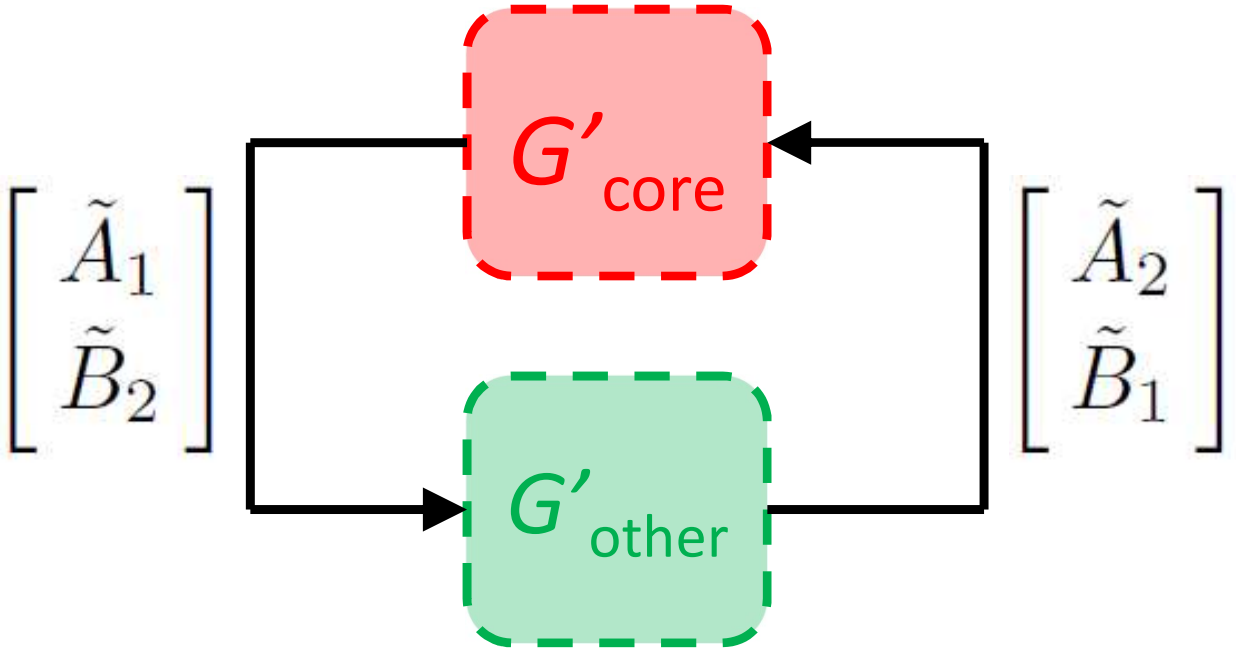
   $G_{\text{core}} = G_5 \star G_4 \star G_3 \star G_2 \star G_1$
2. リニアモータ1個の周波数応答H_1を取得、$H_2 := H_1$
3. 回路モデル、管路モデルを仮定
4. コア以外の部分の周波数応答応答G_{other}を算出
5. ナイキストの安定判別

安定性解析手法（つづき）

図の閉ループ系が不安定となるための必要十分条件

$$\phi := |I - G'_{\mathrm{core}} G'_{\mathrm{other}}|$$

のナイキスト軌跡が原点に重なるか囲むこと

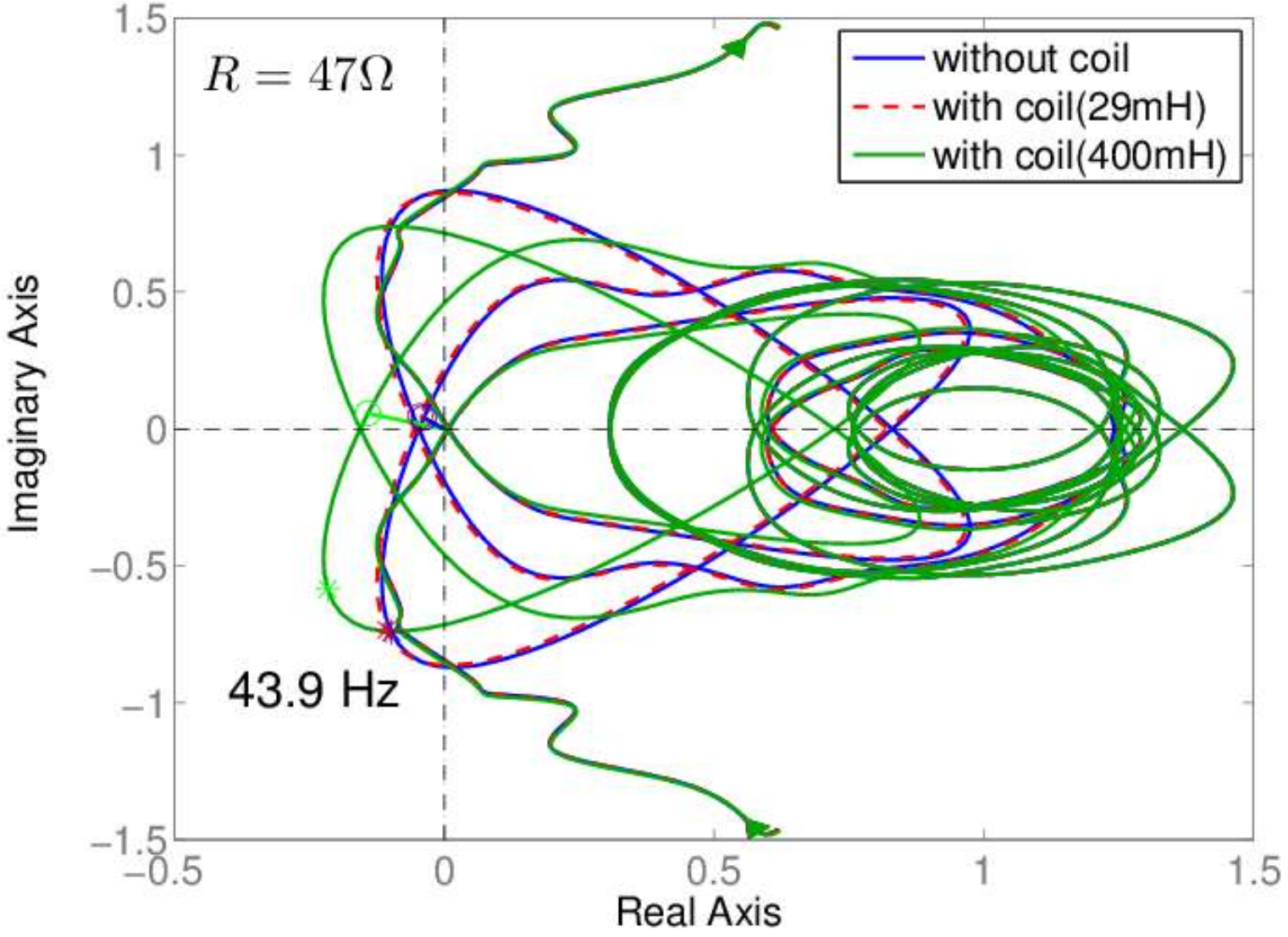


$$G'_{\mathrm{core}} := G_{\mathrm{core}} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G'_{\mathrm{other}} := G_{\mathrm{other}} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

解析結果【発振強度と周波数】

軌跡-原点間距離 d_{min}，その周波数 $\hat{f}_r$

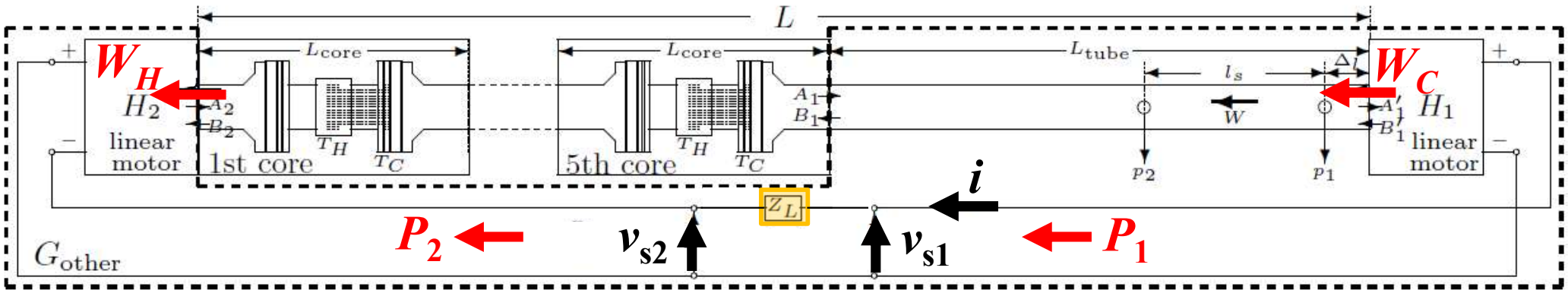


軌跡が回転

⬇

発振余裕：大

解析結果【電力･音響パワー･効率】



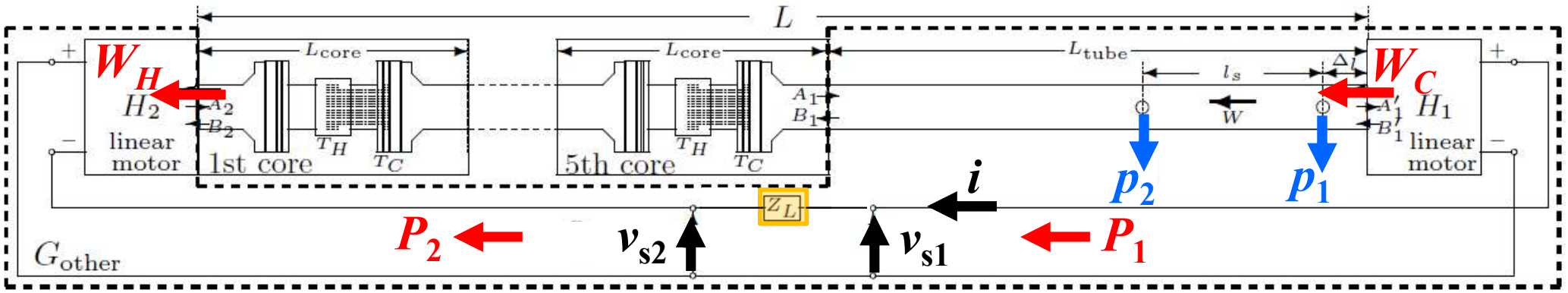
$\tilde{B}_2 = d_{\min} \times 10000$ と仮定 ⇒ 他を算出

R (Ω)	X_L (mH)	$d_{\min}$ -	$\hat{f}_r$ (Hz)
0	**0**	**0.070**	**44.46**
0	29	0.080	44.46
0	400	0.321	44.36
47	**0**	**0.056**	**44.46**
47	29	0.065	44.46
47	400	0.152	44.36

大　低下大　大　進　大　大　大　大　高　低

コイルを追加 ⇒ 軌跡-原点間距離：大、 発振周波数：低下、
音響パワー･環送電力：大

実験結果【電力・音響パワー・効率】



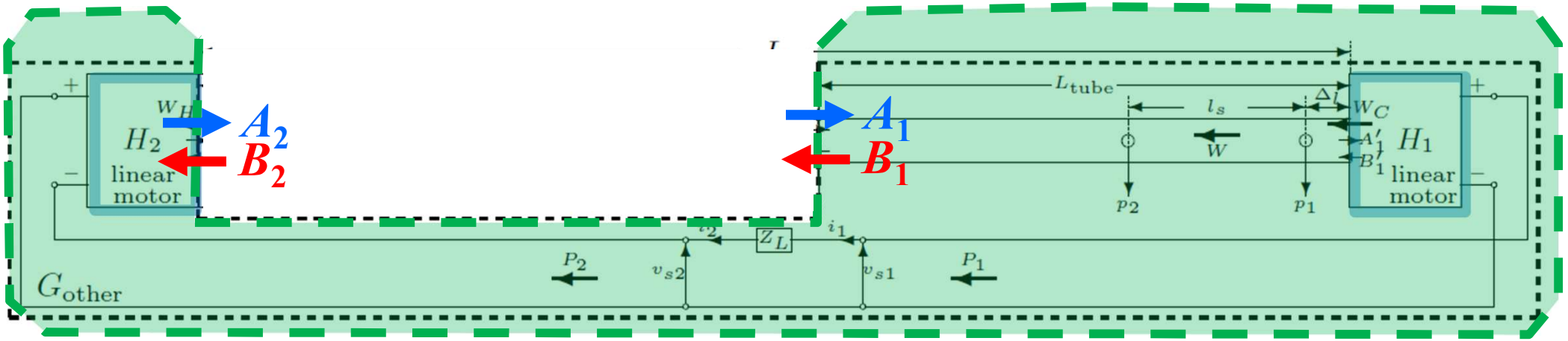
v_{s1}, v_{s2}, p_1, p_2 を 10秒間同時計測、発振周波数成分を算出

R (Ω)	X_L (mH)	exp. #	f_1 (Hz)	$\lvert\tilde{p}_1\rvert$ (Pa)	$\lvert\tilde{p}_2\rvert$ (Pa)	$\angle\frac{\tilde{p}_1}{\tilde{p}_2}$ (deg)	W (mW)	$\lvert\tilde{v}_{s1}\rvert$ (V)	$\lvert\tilde{v}_{s2}\rvert$ (V)	$\angle\frac{\tilde{v}_{s2}}{\tilde{v}_{s1}}$ (deg)	$\lvert\tilde{i}_1\rvert$ (mA)	P_1 (mW)	P_2 (mW)	P_R (mW)	W_C (mW)	W_H (mW)	η_{H_1} (%)	η_{H_2} (%)
0	0	#1	43.24	564	440	1.9	31	9.9	9.9	-0.4	-	-	-	-	-	-	-	-
0	0	#5	43.23	560	437	2.0	31	9.9	9.9	-0.2	-	-	-	-	-	-	-	-
0	29	#4	43.04	655	509	2.6	57	11.2	11.3	4.8	-	-	-	-	-	-	-	-
0	29	#8	43.04	658	511	2.7	58	11.3	11.3	4.8	-	-	-	-	-	-	-	-
47	0	#2	43.23	511	394	1.9	25	8.6	10.0	3.4	33	-129	-154	25	36	212	28	73
47	0	#6	43.25	492	380	2.0	24	8.4	9.8	3.4	32	-122	-146	23	34	201	28	72
47	29	#3	43.16	529	406	2.0	28	8.7	10.5	5.6	43	-160	-202	42	51	263	32	77
47	29	#7	43.16	525	403	2.1	28	8.7	10.5	5.6	43	-161	-205	43	54	265	33	77

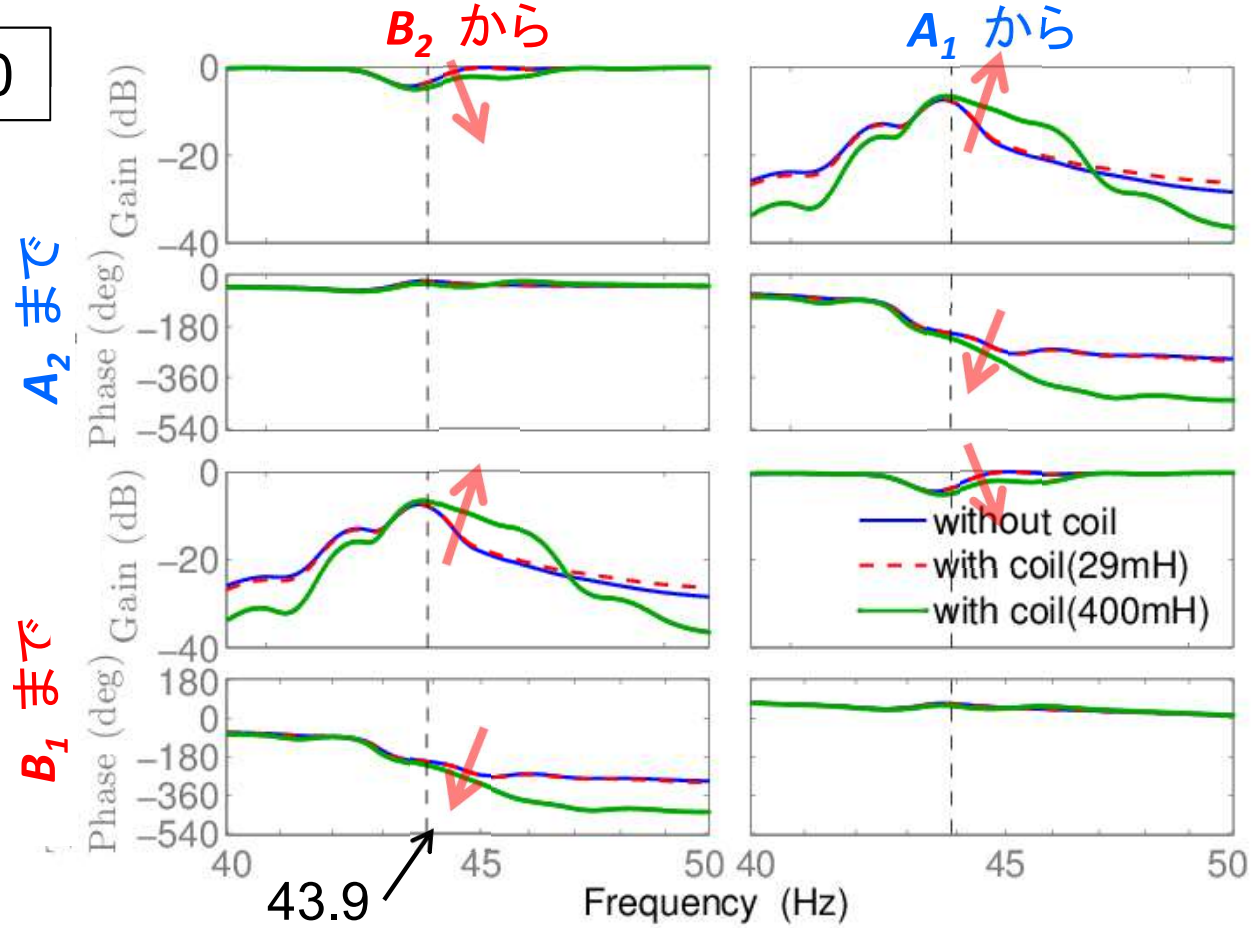
低下　大　進　大　大　進　大　大　大　高

解析に定性的に概ね一致

解析結果【G_{other}の周波数応答】



R=0



コイル：大

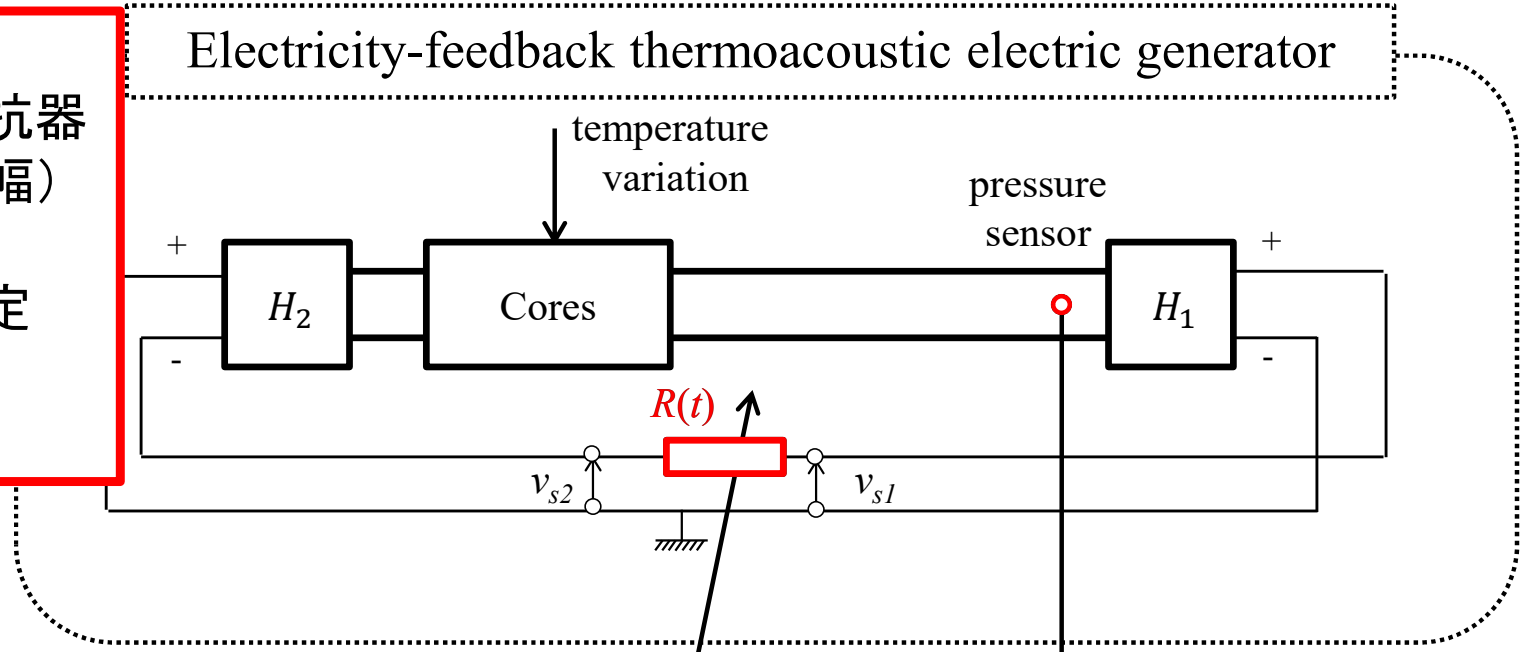
⬇

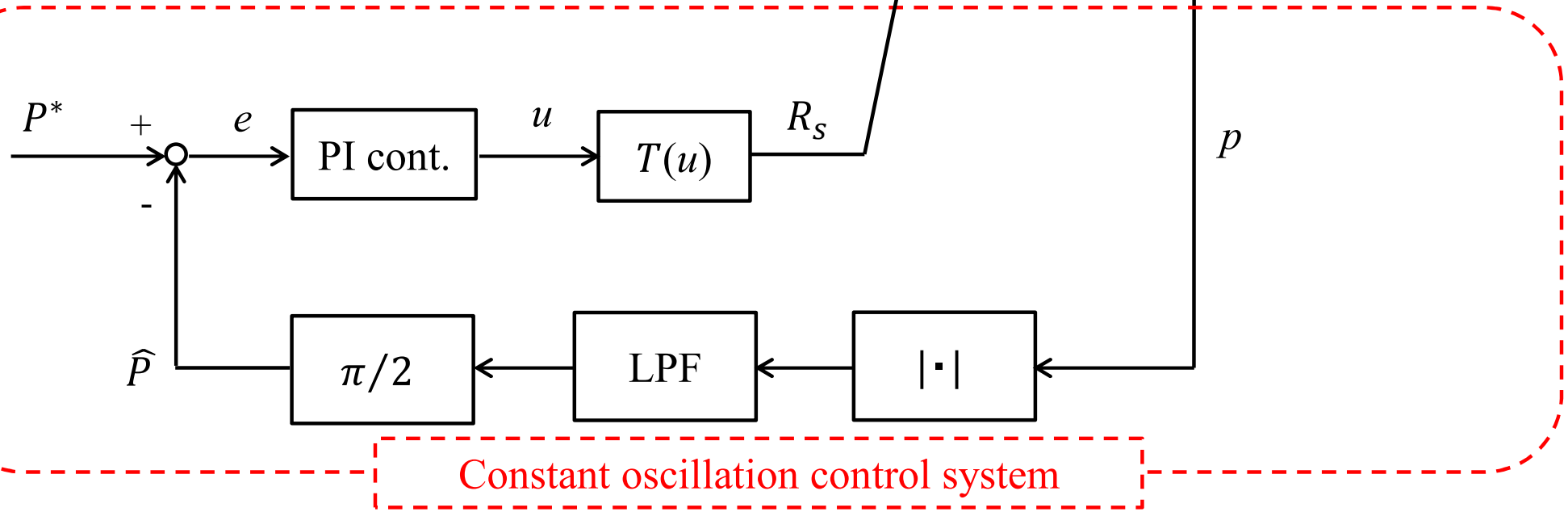
・位相：遅れ
・反射率：減少
・透過率：増加

… 発振余裕：大

圧力振幅の制御（定常発振制御系の応用）

6点セット
- アクチュエータ：可変抵抗器
- センサ：圧力センサ（振幅）
- コントローラ：PI
- 制御目的：圧力振幅一定
- 外乱：熱源の温度変動
- エネルギー源：電力

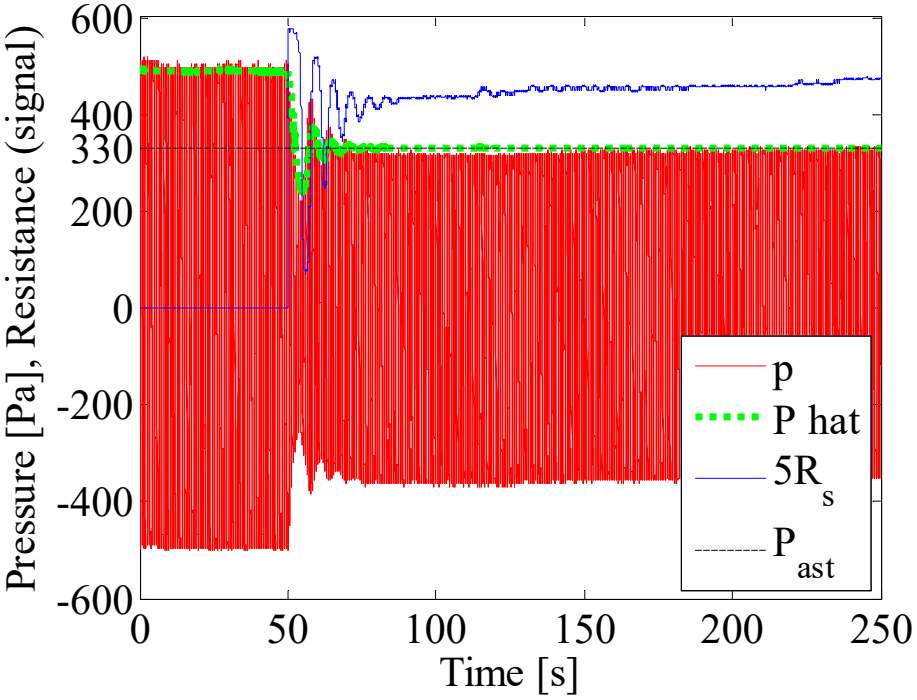


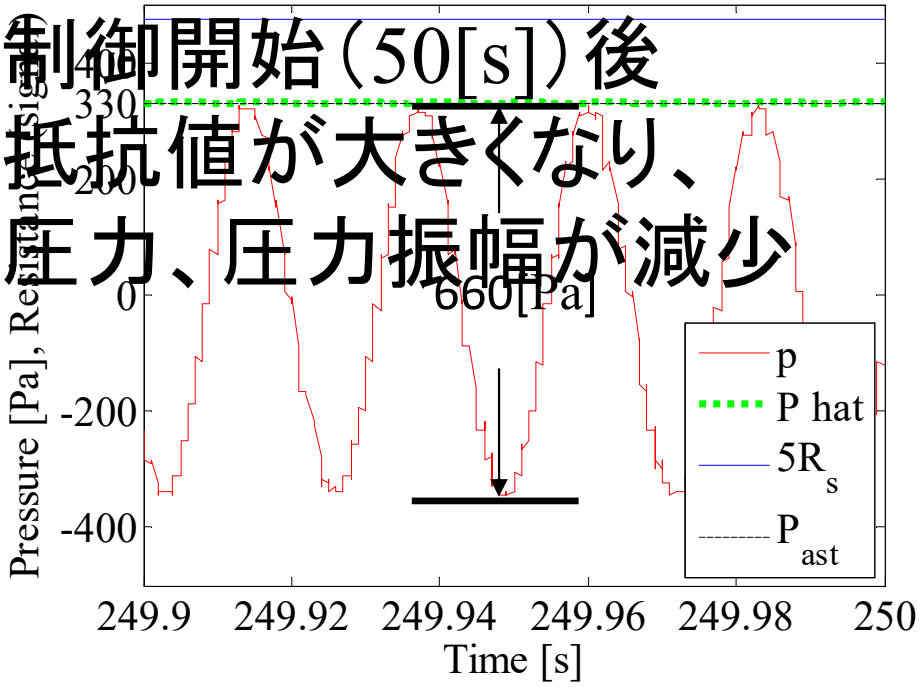


実験結果：温度一定（安定）

$T_H = 300$ [℃], $T_C = 10$ [℃]

目標値$P^* = 330$ [Pa], 比例ゲイン$K_P = 0.04$, 積分ゲイン$K_I = 0.03$



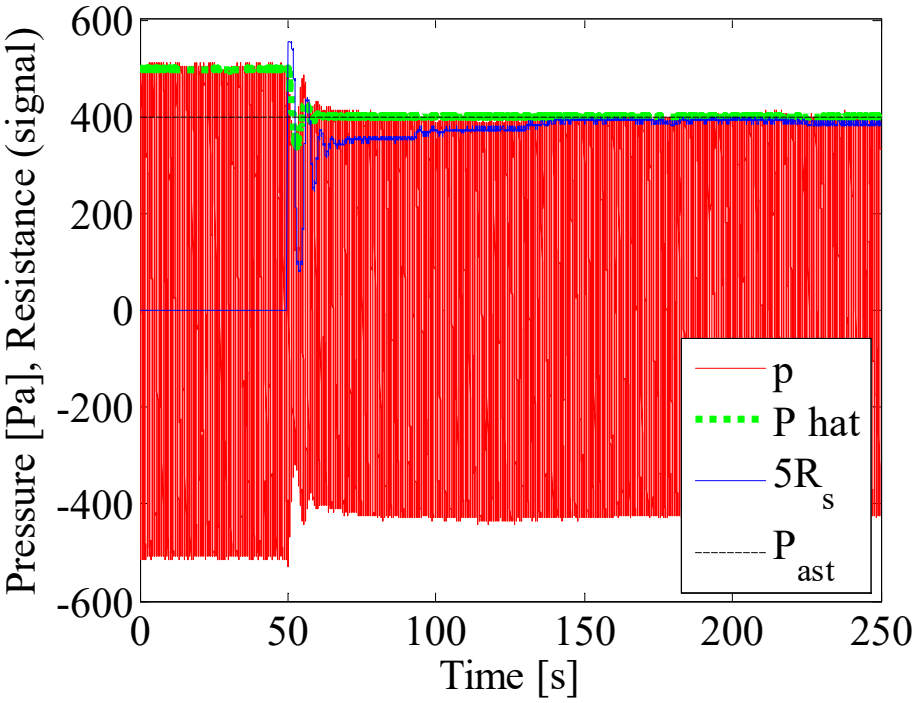


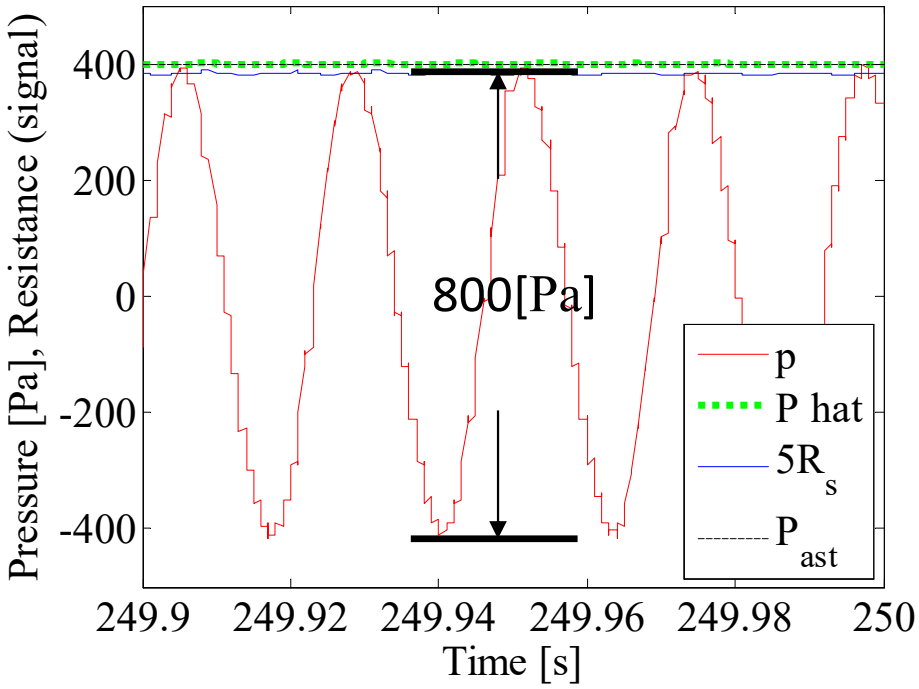
圧力振幅が目標値一定になるように負荷抵抗が自動調整

実験結果：温度一定（安定）

$T_H = 300$ [℃], $T_C = 10$ [℃]

目標値$P^* = 400$ [Pa], 比例ゲイン$K_P = 0.04$, 積分ゲイン$K_I = 0.03$

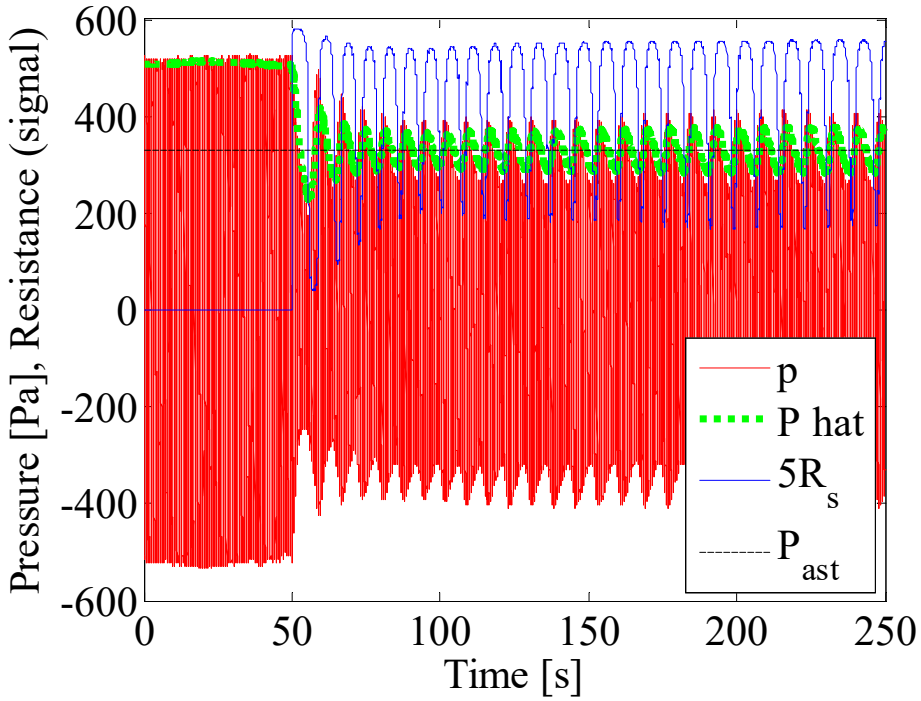




実験結果：温度一定（不安定）

$T_H = 300$ [℃], $T_C = 10$ [℃]

目標値$P^* = 330$ [Pa], 比例ゲイン$K_P = 0.03$, 積分ゲイン$K_I = 0.04$

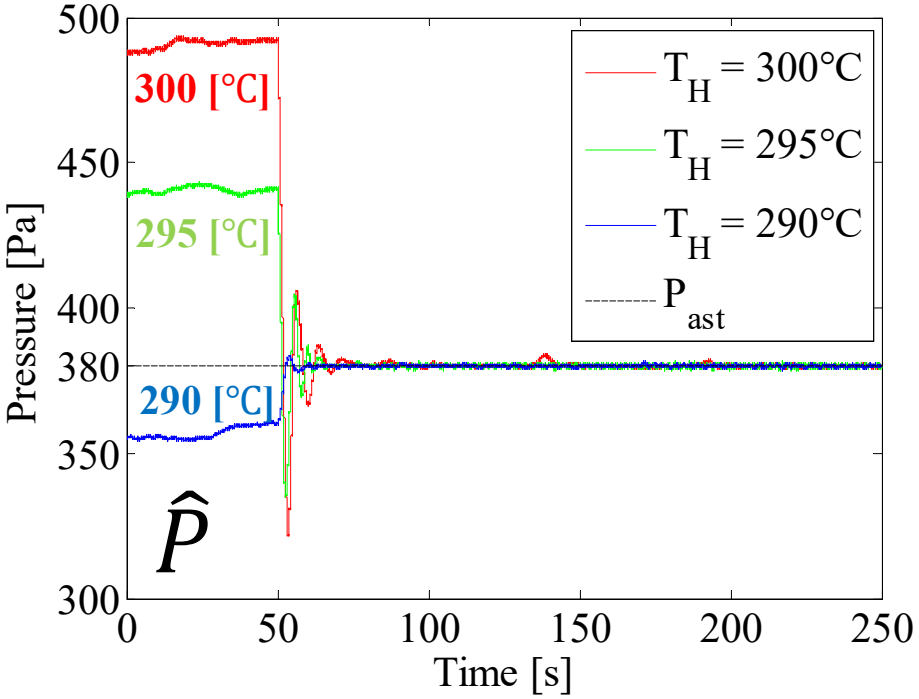


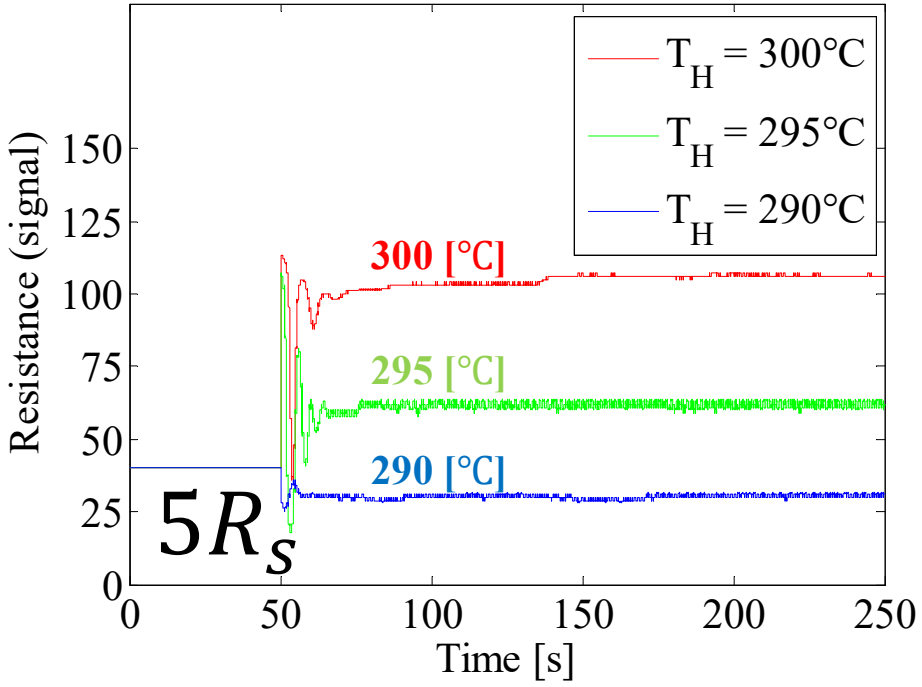
比例・積分ゲインを適切に設定すれば圧力振幅を目標値に制御可能

実験結果：温度変動

$T_H = 300,\ 295,\ 290$ [℃], $T_C = 10$ [℃]

目標値$P^* = 380$ [Pa], 比例ゲイン$K_P = 0.04$, 積分ゲイン$K_I = 0.03$





各温度において、同一の目標値に圧力振幅が収束

まとめ

- ブラックボックスの制御でも役に立つ
- 発振＝抑制の対象　→　発振余裕の最大化
- 定常発振制御：振幅依存性を考慮した音響計測
- 制御工学で扱われていない問題

- 今後の課題
  - 発電効率を最大化する回路の設計など