

# 22 熱音響自励発振における定常圧力振幅の予測

Prediction of steady-state pressure amplitude in thermoacoustic spontaneous oscillation

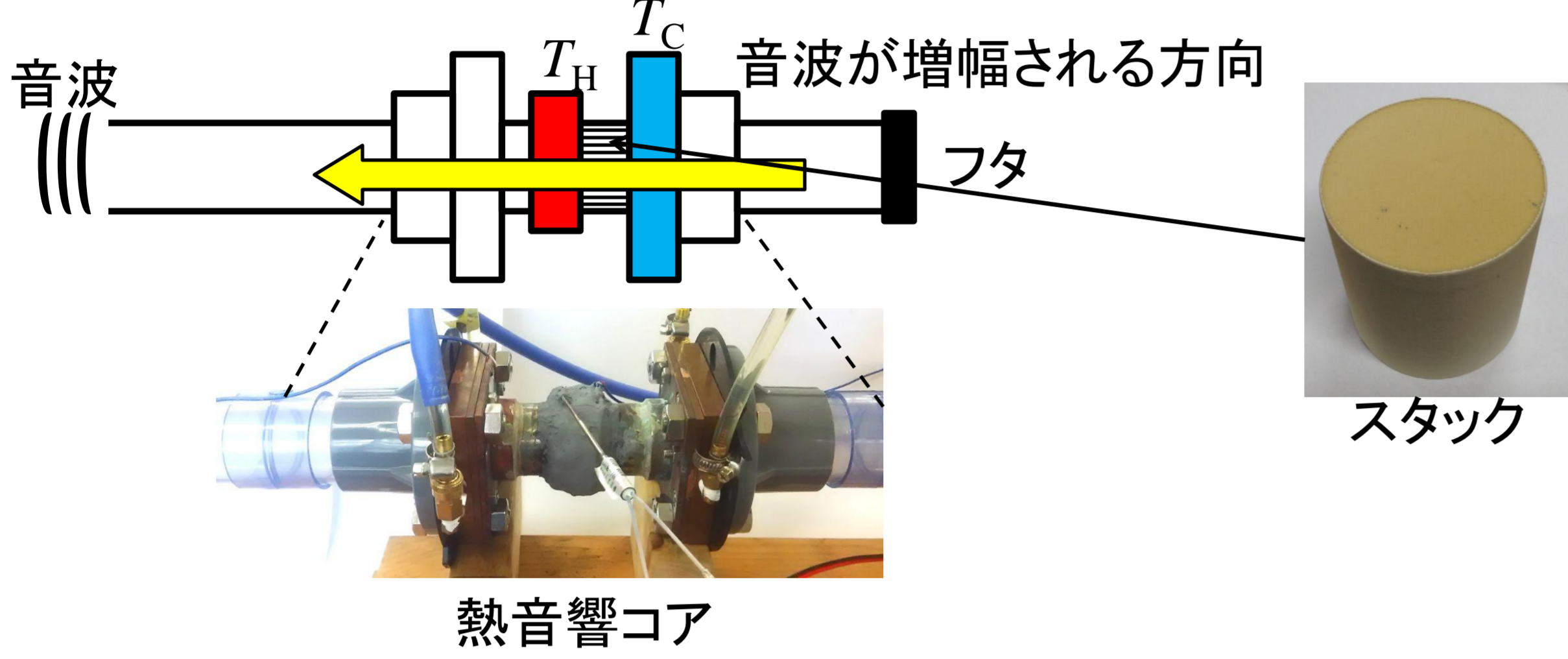
学籍番号：14306191 氏名：中田匠 指導教員：小林泰秀

Student ID: 14306191 Name: Takumi Nakata Supervisor: Yasuhide Kobayashi

In order to solve energy problems, it is important to utilize exhaust heat energy from factories and cars. As countermeasure, paying attention to effective utilization of energy, thermoacoustic phenomenon has attracted much attention, since it can convert heat and soundwave energy. Thermoacoustic systems use exhaust heat energy by converting it to soundwave because it does not restrict heat sources. However, It is difficult to predict self-excited oscillation condition accurately. Experimental prediction had been executed so far. From a control engineering point of view, we proposed an analysis method of oscillation based on the Nyquist stability criterion. The purpose of this study is to provide useful tools to design high efficiency thermoacoustic devices. The study show that steady-state pressure is qualitatively estimated by instability margin of spontaneous oscillation analysis. Steady-state pressure amplitude is measured experimentally by pressure sensors. Instability margin is measured from Nyquist diagram.

## 背景

- 熱音響現象・・・熱と音波の相互エネルギー変換
- ・スタックに温度比 $T_H/T_C$ を与えると管内の気体が自励発振
- ・これまで捨てられていた工場排熱を利用することができる



スタックや熱交換器の構造が複雑

設計段階で定常発振状態を予測することは困難  
実験的な推定

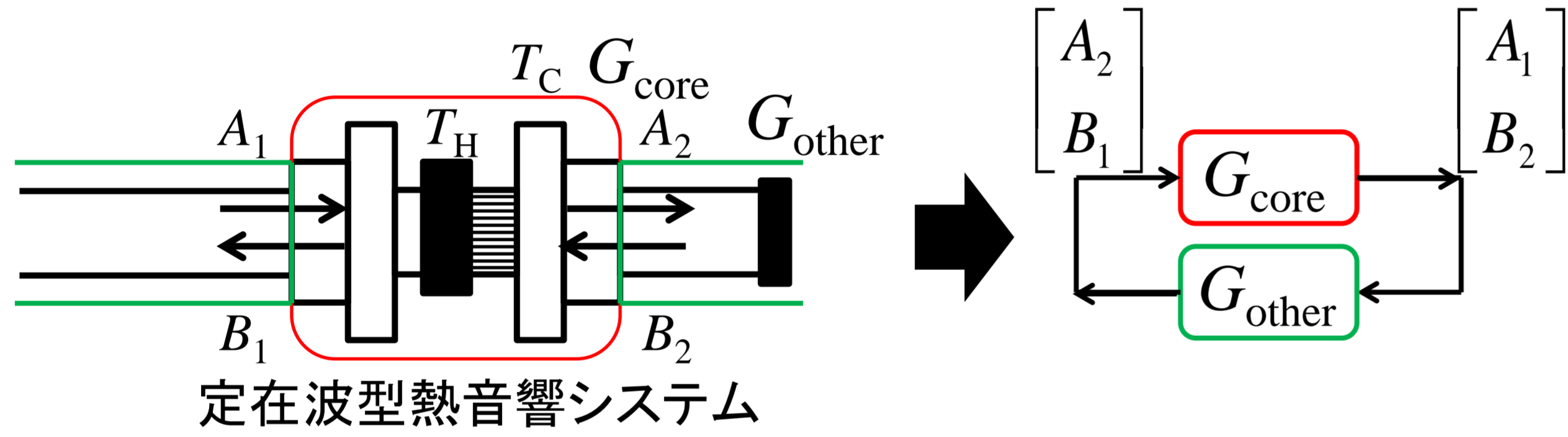
最終目的: 高効率な熱音響デバイスの設計に役立つ解析ツールの提供

本発表: 定常圧力振幅の予測

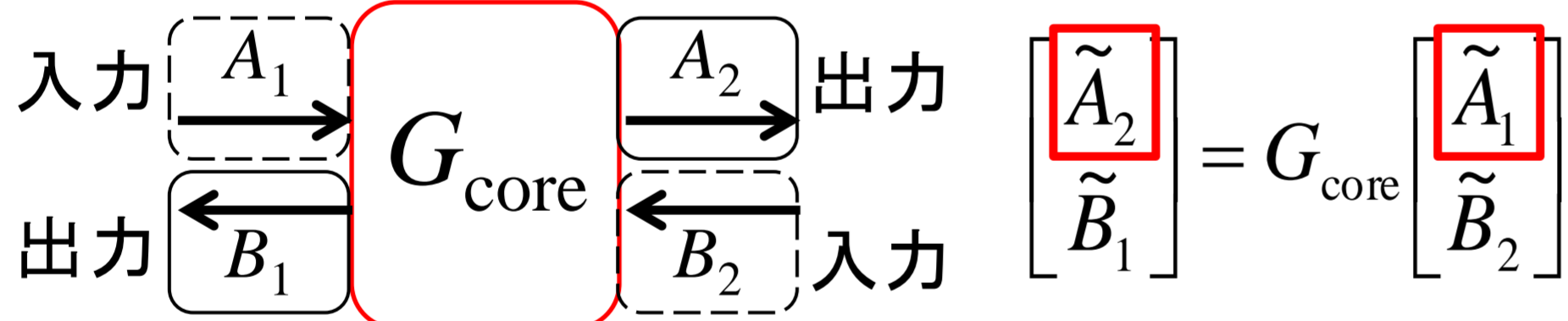
## 従来研究

- 熱音響システムへの制御工学の応答例は少ない
- ・・・制御工学の観点から熱音響システムを考える

従来の研究: 2方向の進行波圧力成分に関する因果的なシステム表現とナイキストの安定判別を用いた熱音響システムの解析手法を提案



定在波型熱音響システム

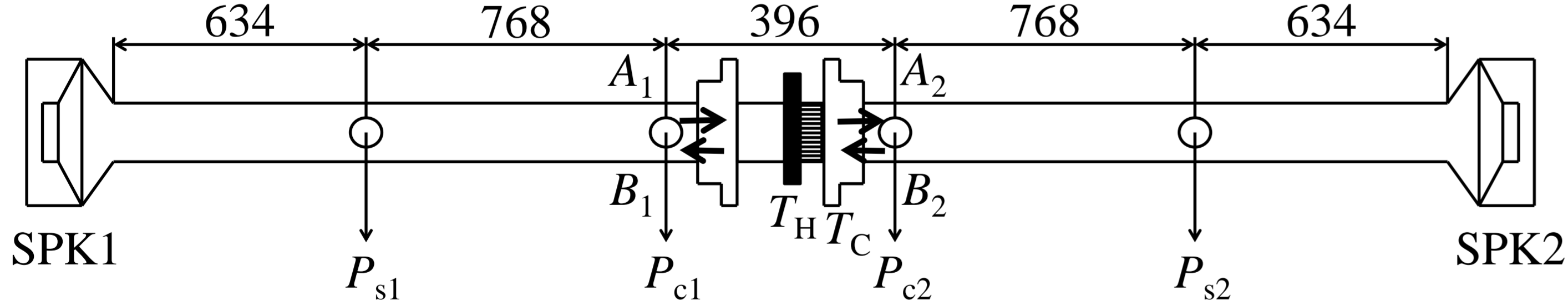


因果的なシステム表現・・・むだ時間要素をもつ  
ナイキストの安定判別に用いることができる

閉ループ系が不安定となる必要十分条件

$$\phi := |I - G_{core} G_{other}|$$

のナイキスト軌跡が原点に重なるか原点を囲うこと



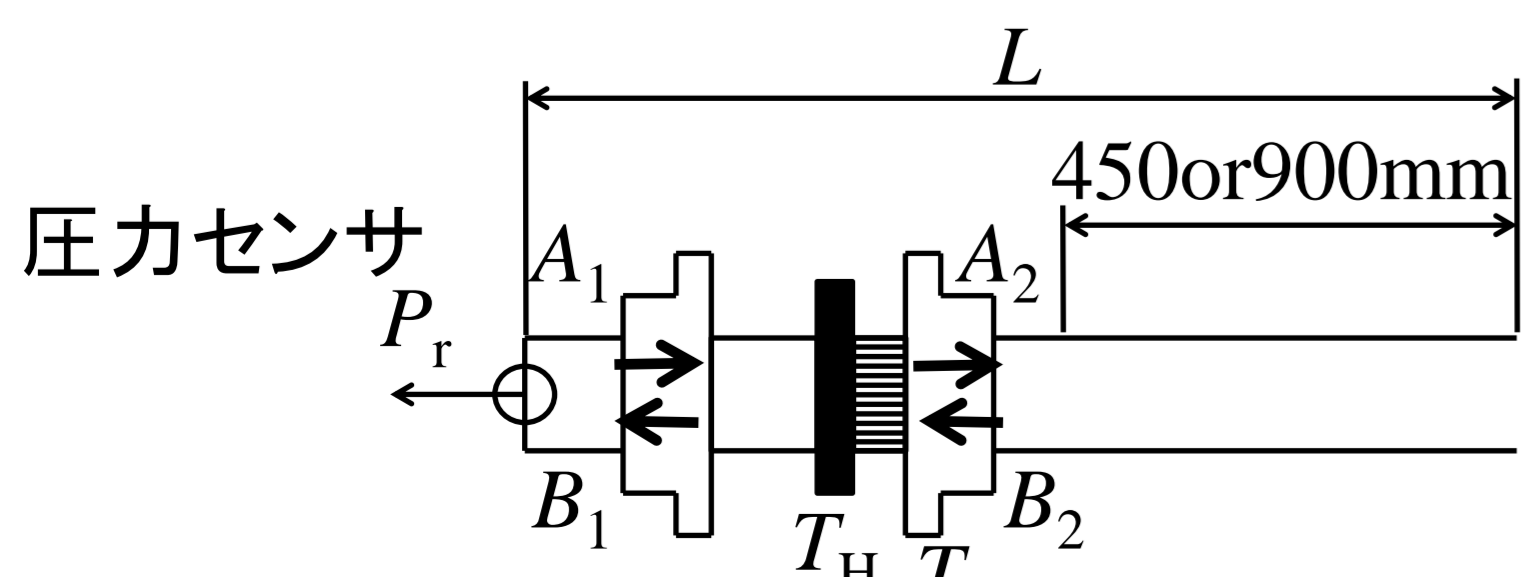
- ・両端のスピーカを交互に駆動
- ・左右2個ずつの圧力センサ

Stack	NGK INSULATORS Honey-comb ceramics 600cpi
Loudspeaker	FOSTEX FW108N
Power Amp.	YAMAHA P1000S
Pressure sens.	NAGANO KEIKI KP15

コアの周波数応答を計測

## 自励発振解析における発振余裕と定常発振状態における圧力振幅の関係

[実験]



- ・ $T_C$ は通水によって15~20°Cに保たれる
- ・ $T_H=17^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$
- ・管内圧力 $P_r$ を得る

共振周波数

$$c_0: \text{音速}[\text{m/s}]$$

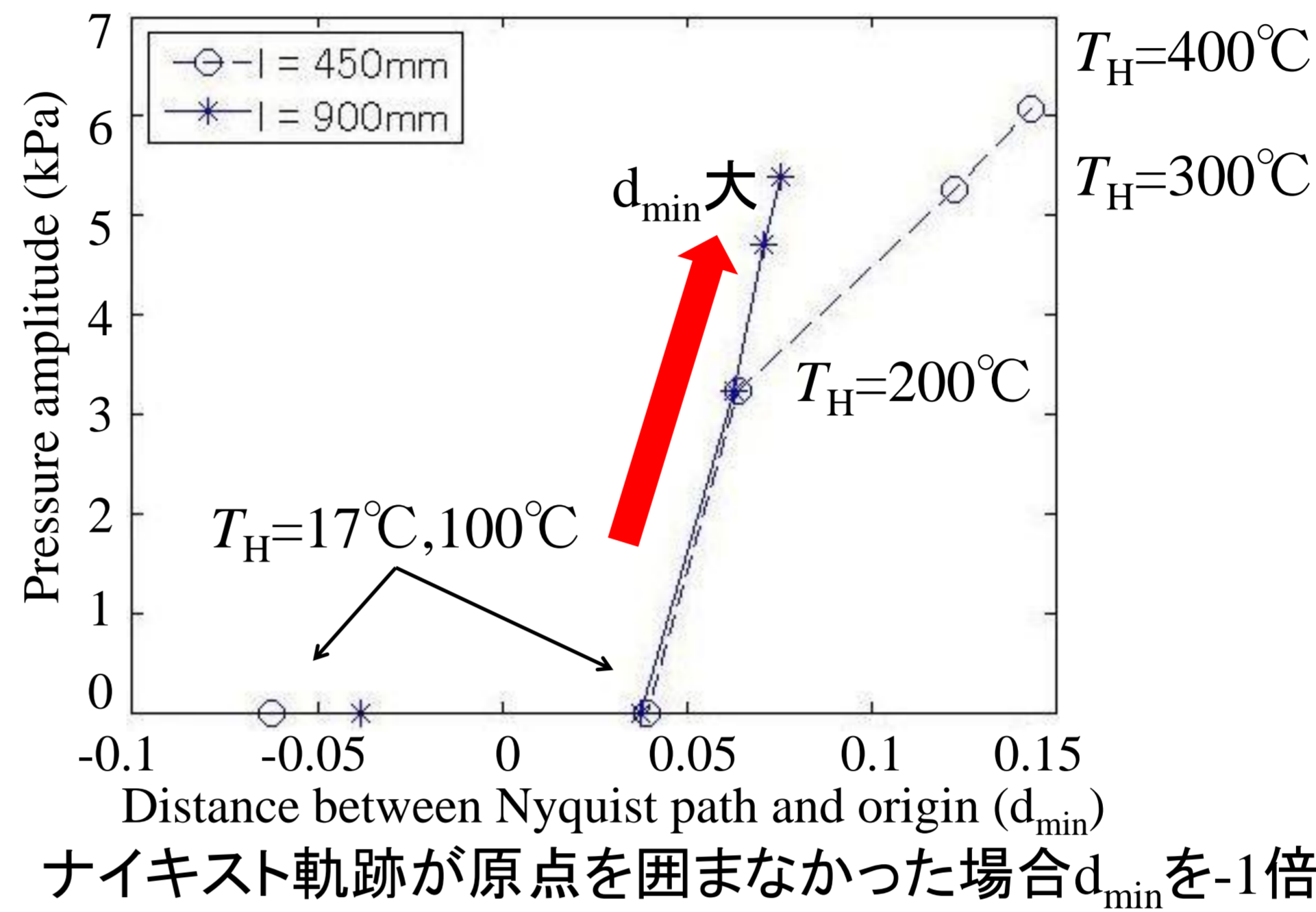
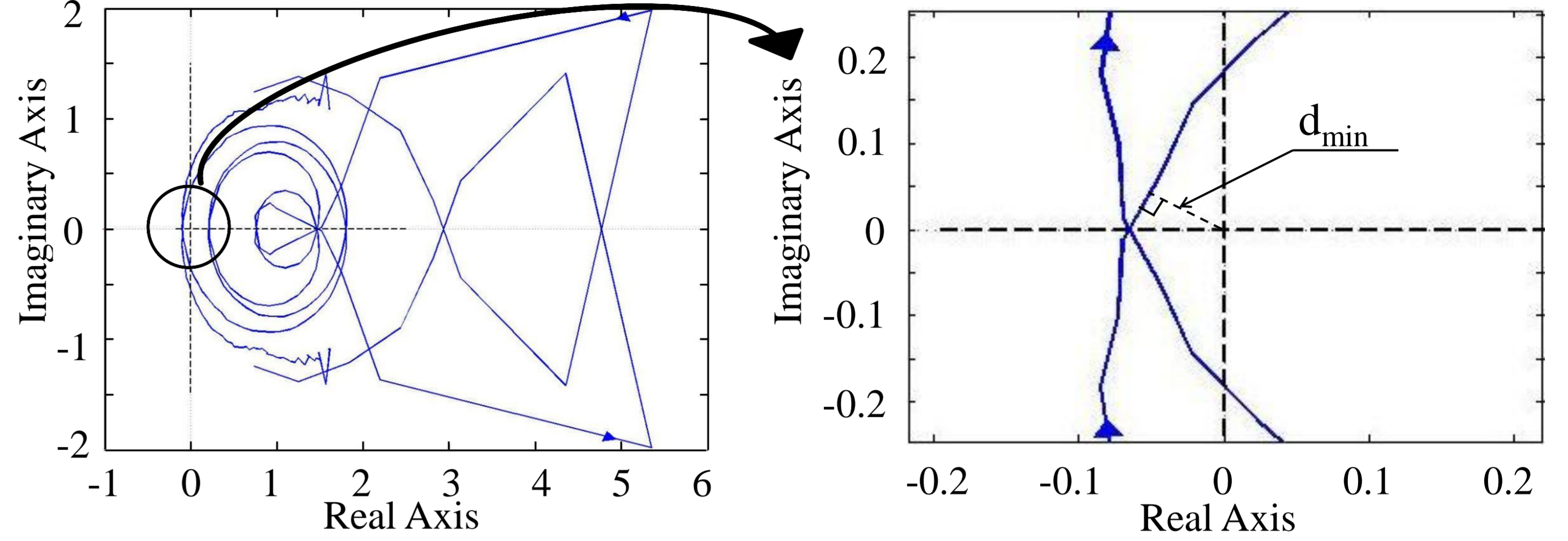
$$L: \text{装置の全長}[\text{m}]$$

$$f = \frac{c_0}{4L}$$

$$= \frac{346}{4 \times (0.45 + 0.4)}$$

$$\approx 102 [\text{Hz}]$$

[解析]



$d_{min}$ 大  
↓  
定常圧力振幅大  
 $d_{min}$ で定常圧力振幅の定性的な予測が可能  
課題: 定量的予測  
理論的な関連付けが必要

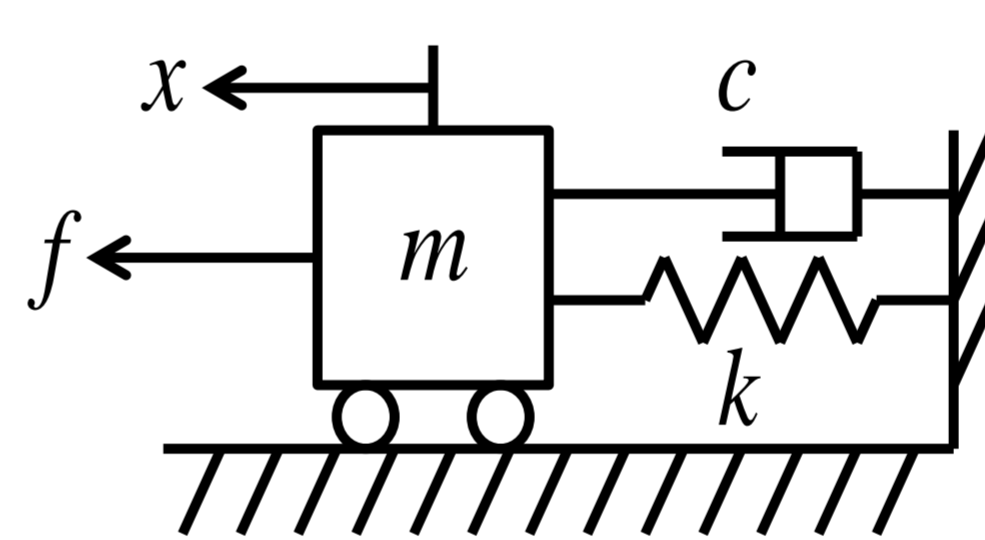
## 熱音響コアの振幅依存性

定量的な予測がしたい

線形制御理論: 閉ループ系が不安定な場合、信号は発散

現実の熱音響システム: 信号(振幅)は一定値に収束

例: 力 $f$ を受ける2次振動系 入力 $f$ から出力 $x$ までの伝達関数



$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$\frac{c}{m} = 2\zeta\omega_n, \quad \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\ddot{x} = -\omega_n^2 x - 2\zeta\omega_n \dot{x} + \frac{f}{m}$$

$\zeta$ は定数 → 振幅は $\infty$ に発散

$$\ddot{x} = -\omega_n^2 x - 2\zeta'\omega_n \dot{x} + \frac{f}{m}$$

$\zeta'$ が $\dot{x}$ の振幅に依存  $\beta$ : 非線形度を表すパラメータ

$\therefore \dot{x} \rightarrow \text{大}, \zeta' \rightarrow \text{大}$

振幅と減衰が釣り合ったところで収束

[実験]

パワーアンプのボリュームを変えてコアの周波数応答を取得

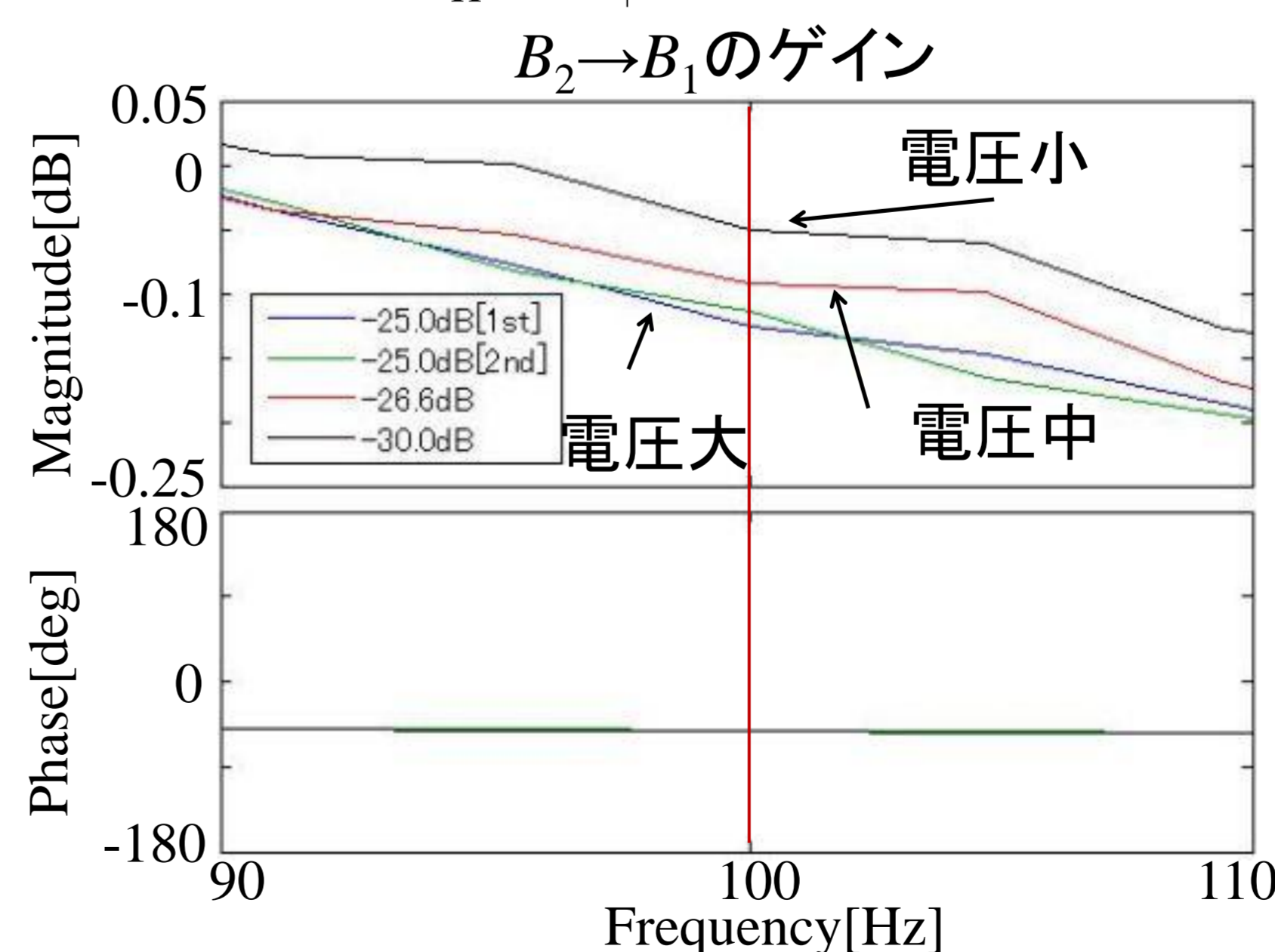
-30.0dB → -25.0dB

電圧小 → 電圧大

$T_C$  [°C] | 17

$T_H$  [°C] | 200

予想  
システムの $B_2 \rightarrow B_1$ のゲイン低下



アンプのボリューム大 (スピーカの駆動電圧大)

ゲインが低下  
予想通り

## まとめ

- ・ナイキスト軌跡-原点間の距離が大きいほど発振時の圧力が大きいことを示した
- ・自励発振時の周波数において振幅依存性と考えられる傾向を確認した

## 今後の課題

- ・得られた振幅依存性に基づいて、定常圧力振幅を定量的に予測する