
DPFのマスキュールにおける残留ガス雑音 の研究

東京大学理学系研究科
物理学専攻坪野研究室

発表者：岡田健志

共同研究者：

麻生洋一, 坪野公夫, 石徹白晃治, 安東正樹

概要

● 背景

- ・ DPFにおいてテストマスと静電アクチュエータとのギャップが狭いため残留ガス雑音が増大 (Squeeze film damping)

→ Monte CarloシミュレーションによるとDPFの現デザインでは Squeeze film damping による雑音が問題となる可能性がある

- ・ Squeeze film dampingは静電アクチュエータに穴をあけることで低減する見込み

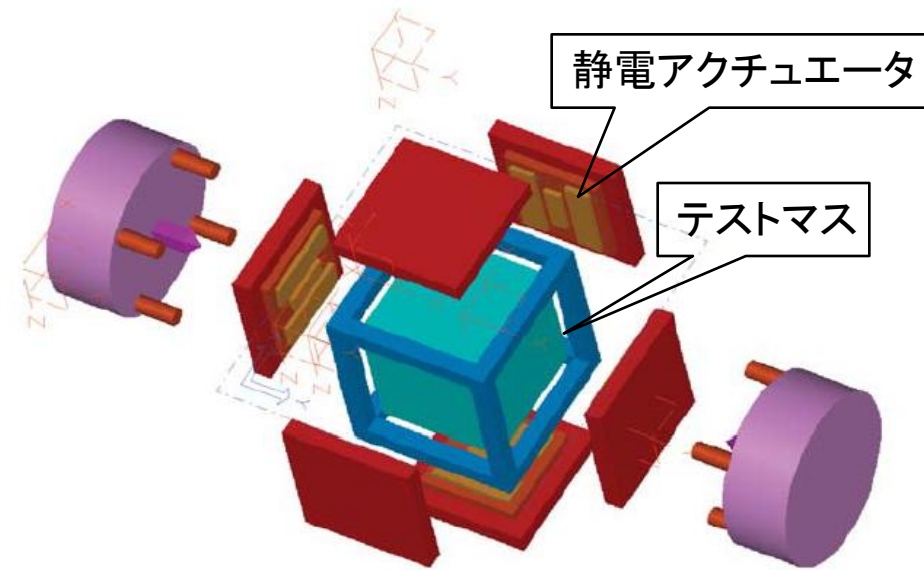
● Squeeze film dampingの研究

- 目的:
- ・ Monte Carlo シミュレーションの結果が実験値と合うか検証
 - ・ DPFの静電アクチュエータにあける穴の工夫とその効果の見積もり

方法: 超伝導磁気浮上型ねじれ振り子を用いてダンピング測定

今回は第一段階としてSqueeze film dampingの効果を測るための実験セットアップの確立を行った

DPFにおける残留ガス雑音



DPFマスモジュールの概略図

テストマス: 50 mm角の立方体

ギャップの大きさ:

静電アクチュエータ - テストマス: 1 mm

壁 - テストマス: 8 mm

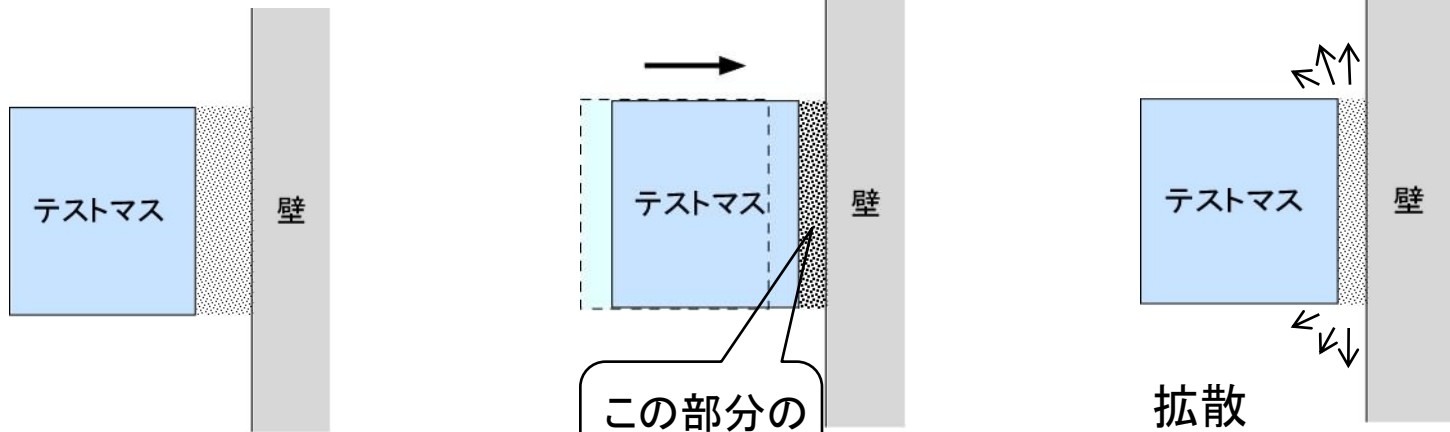
通常の残留ガスによる加速度雑音 : $8.6 \times 10^{-16} \text{ [m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}]$

Monte Carlo シミュレーションではSqueeze film damping により
残留ガス雑音がこれより一桁程度大きくなると計算された

→ 対策として静電アクチュエータの形状を工夫し 残留ガス雑音を低減したい

Squeeze film damping とは

テストマスが壁に近づく場合を考える



この部分の
圧力上昇

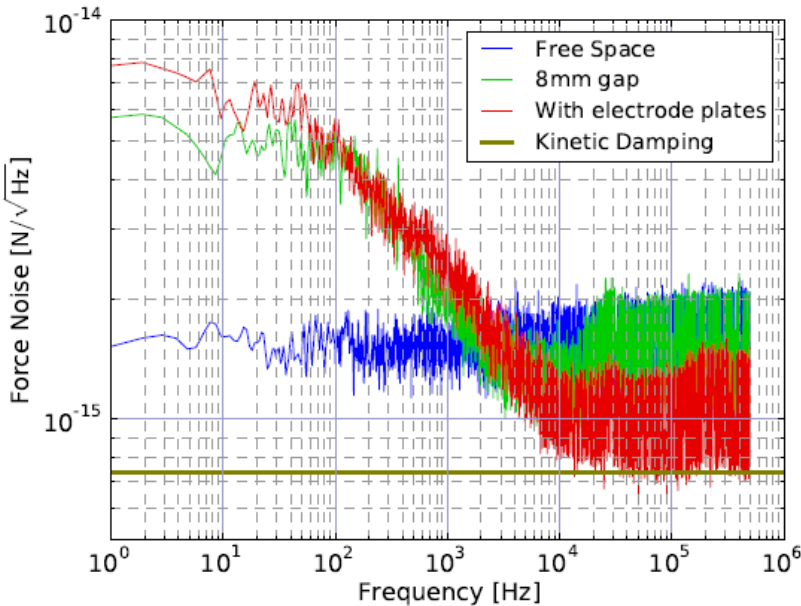
拡散

テストマスの移動が速いほど圧力上昇
が大きい

速度に比例した力 → **ダンピング力**

特徴 分子の移動が間に合わないほど高周波では
ダンピングが効かなくなる

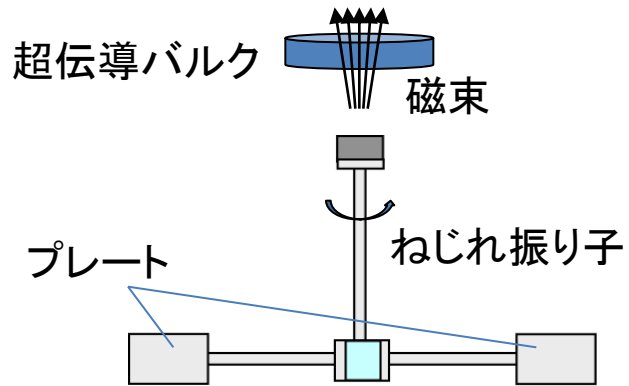
→ カットオフ周波数をもつ



Monte calro シミュレーションによって計算された
DPFにおけるSqueeze film damping の雑音 (from 麻生氏)

Squeeze film damping の測定

ねじれ振り子で Squeeze film damping の力を測る



超伝導ピン止め効果でねじれ振り子を
浮上

→ **大きな浮上力**で**散逸の小さい**
支持系を実現

Squeeze film damping による散逸

$$I\ddot{\theta} + b_{\text{squeeze}}\dot{\theta} + \kappa\theta = 0$$

$$b_{\text{squeeze}} = \frac{pA\tau}{d} \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} l^2$$

l: 振り子の腕の長さ

p: 圧力

A: プレート前面の面積

d: プレートと壁との距離

τ : 拡散時間

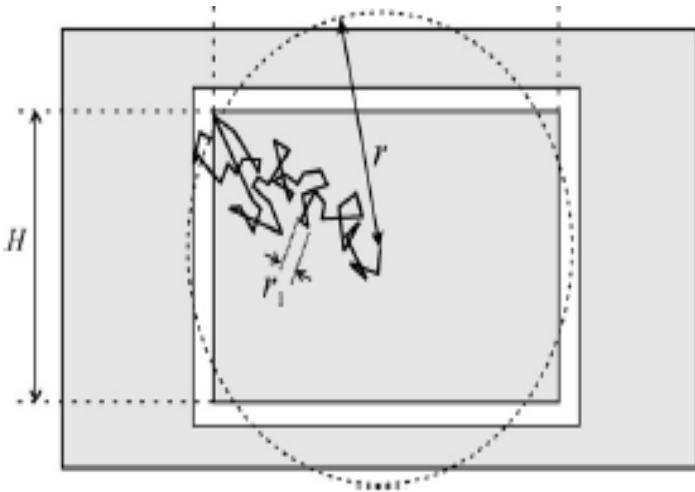
分子がギャップから抜け出るのにかかる時間スケール

→ Squeeze film damping による散逸の計算には拡散時間 τ が必要

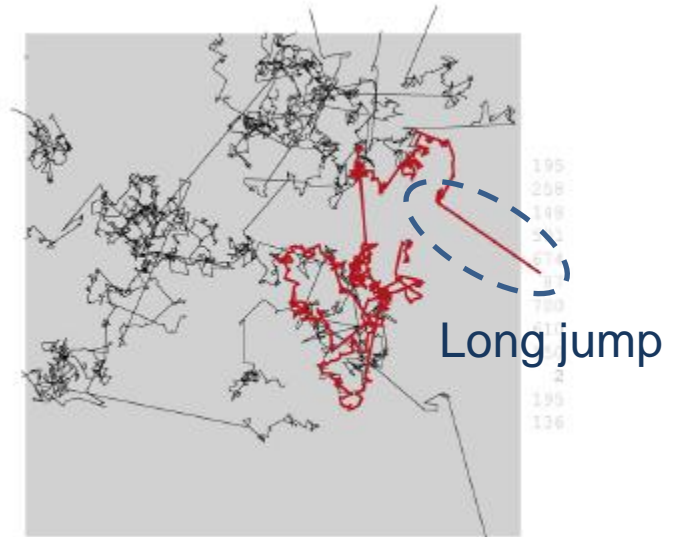
拡散時間 τ の導出

ガスがブラウン運動すると仮定すると $\tau = \frac{8}{\pi^3} \frac{A}{d\langle v \rangle}$ $\langle v \rangle$: 分子の平均速度

と計算される。(あまり正確なモデルではない。オーダー評価程度。)



ブラウン運動モデル

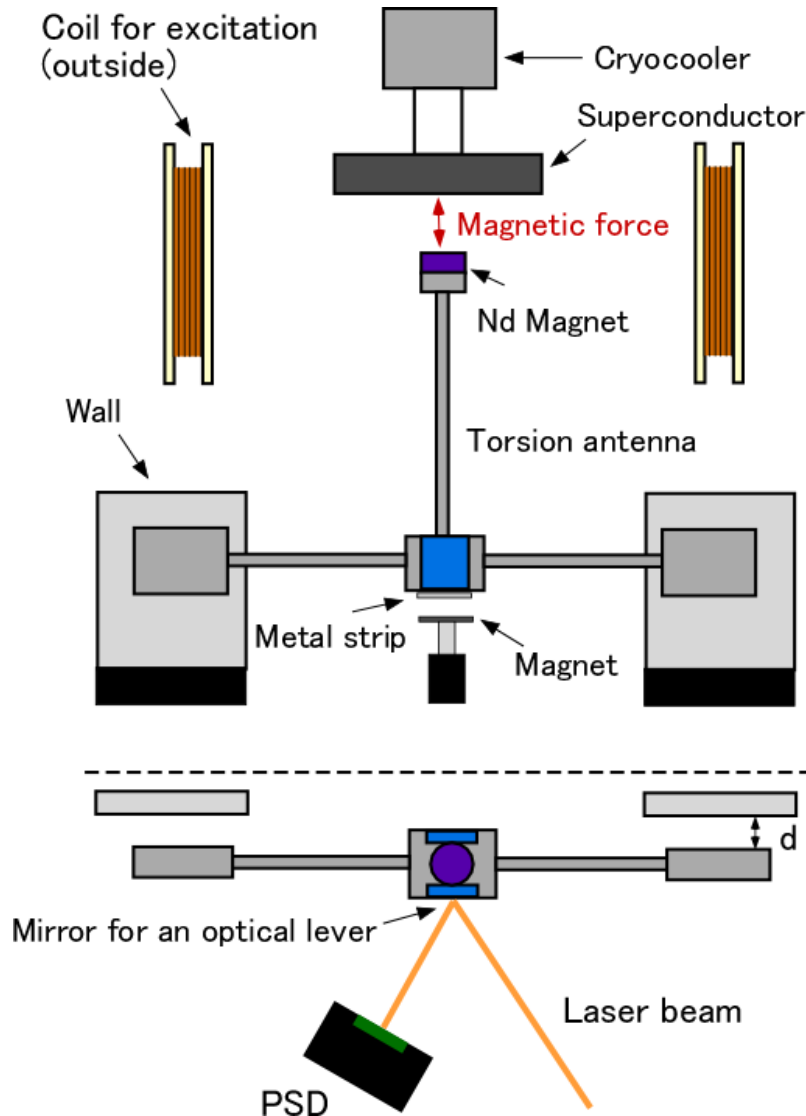


Monte Carlo シミュレーションでの
ガス分子の軌跡

M.A.G. Suijlen, et al, Sensors and Actuators A, 156 (2009) 171 から
抜粋

今回はブラウン運動モデルから得た τ による計算値をもとに、
Squeeze film damping の効果がみえる装置の設計を行った

実験セットアップ



テストマス

質量: 163 g

材質: アルミ

慣性モーメント: $4.6 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$

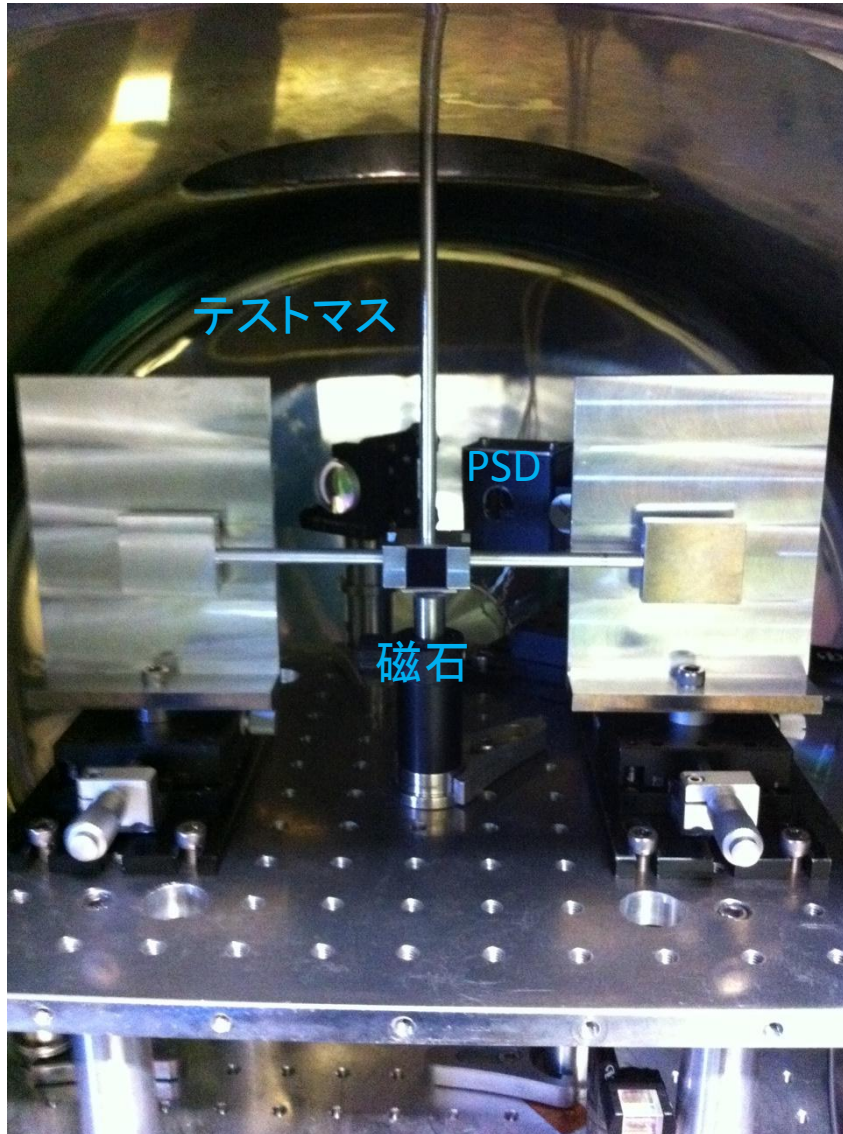
プレートの大きさ: 30 mm × 35 mm × 8.2 mm

- ・ドライポンプ、ターボ分子ポンプ
→ $5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ まで到達可能
- ・真空計: クリスタルイオンゲージ

金属片と棒状磁石 → 回転の安定点の方向を指定

回転の励起 → チェンバーの外の大型コイル

写真&特性



プレート-壁 間はマイクロメータ
で調節

共振周波数は磁石との距離で変化
(磁石がなければ共振周波数は5 mHz)

壁がなく

圧力 $1.2 - 1.1 \times 10^{-2}$ Pa
共振周波数: 33 mHz
の場合

振幅減衰時間: 六時間程度

b (実測) = 4.1×10^{-8} [N m s /rad]

通常的气体ダンピングの理論値

$b_{\text{gas}} = 10^{-8} - 10^{-7}$ [N m s /rad]

Squeeze film damping 測定における圧力と距離

- 分子どうしの衝突を無視するため平均自由行程をギャップのスケールより一桁以上大きく取る

→ 6×10^{-2} Pa 以下 (平均自由行程 50 cm 以上)

DPFにおける圧力: 10^{-6} Pa

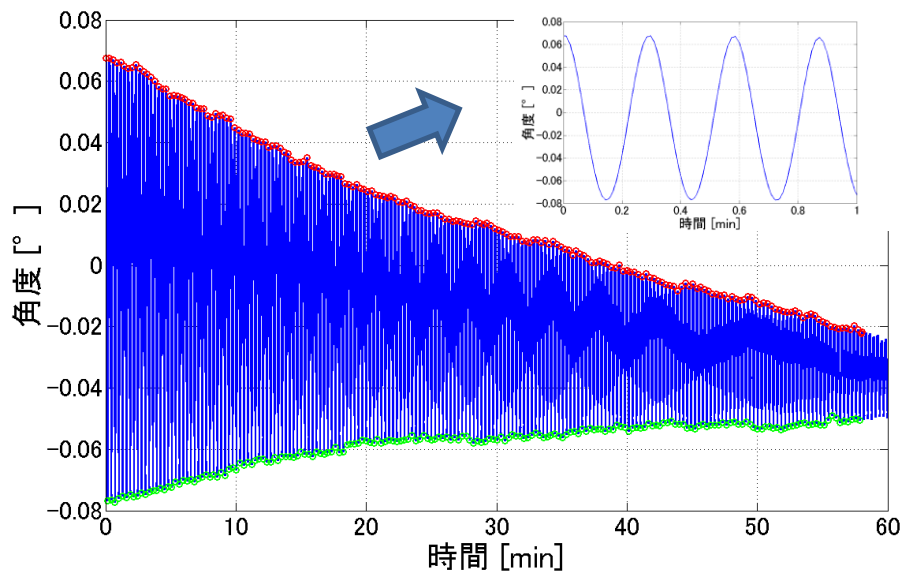
- ブラウン運動モデルによって 6×10^{-2} Pa から 1×10^{-2} Pa において Squeeze film damping の効果がみえると計算される距離

→ $d = 1$ mm 程度

ブラウン運動モデルの計算では窒素分子を仮定

Squeeze film damping

距離を変えて測定

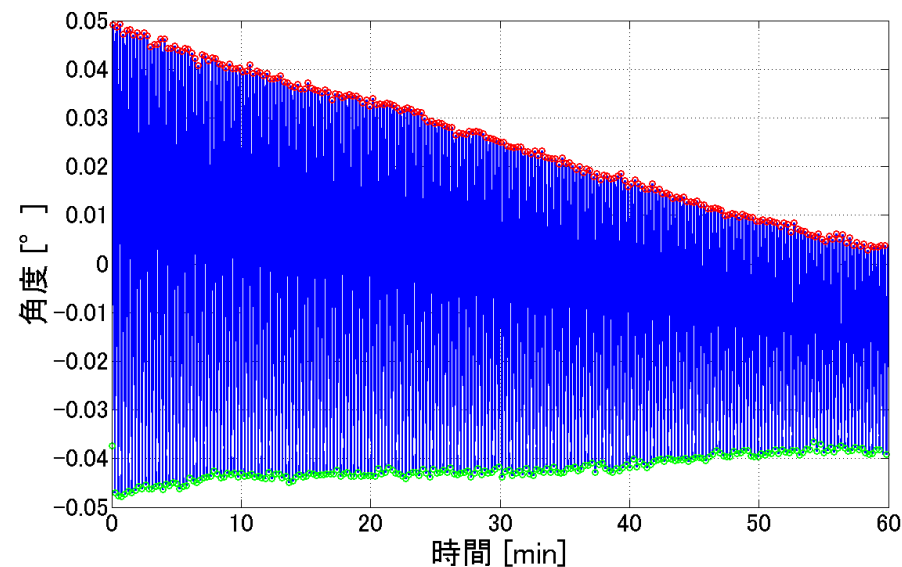


$d=1\text{ mm}$

圧力 $3.5 \times 10^{-2}\text{ Pa}$
共振周波数 58 mHz

b (測定値) = $4.1 \times 10^{-7}\text{ [N m s /rad]}$

b (ブラウン運動モデル)
= $2.7 \times 10^{-7}\text{ [N m s /rad]}$



$d=3\text{ mm}$

圧力 $4 \times 10^{-2}\text{ Pa}$
共振周波数 63 mHz

b (測定値) = $2.2 \times 10^{-7}\text{ [N m s /rad]}$

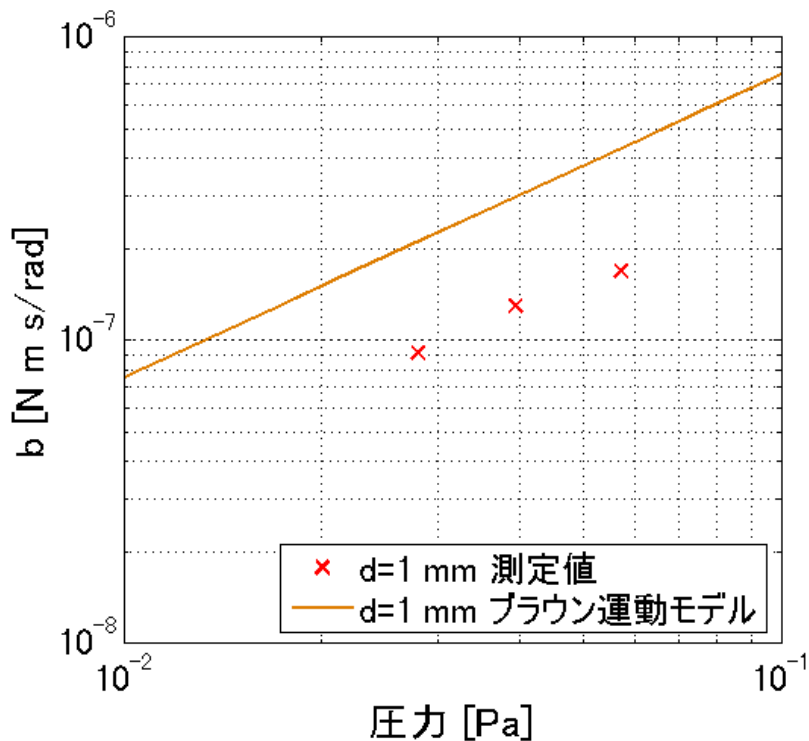
b (ブラウン運動モデル)
= $3.37 \times 10^{-8}\text{ [N m s /rad]}$

他のダンピングでリミットされた可能性

壁との距離による変化あり。ただし静電力の効果などの可能も考えられる。

Squeeze film damping

圧力依存性



d=1 mm

共振周波数 40 mHz

において圧力が

2.9 - 2.7 × 10⁻² Pa

4.1 - 3.8 × 10⁻² Pa

5.9 - 5.5 × 10⁻² Pa

の三回ダンピング測定

誤差(系統誤差、統計誤差)の評価は今後の課題

圧力 [Pa]	2.9 - 2.7 × 10 ⁻²	4.1 - 3.8 × 10 ⁻²	5.9 - 5.5 × 10 ⁻²
振幅減衰時間	80分	120分	170分

圧力依存性もあり → Squeeze film damping の効果がみえている可能性が高い

まとめ

ガス分子のブラウン運動モデルによる計算値をもとに、超伝導磁気浮上型ねじれ振り子によって Squeeze film damping の効果を見るための装置のセットアップを行った

- ・ ブラウン運動モデルによる計算値と測定値のオーダーが一致する
- ・ テストマス – 壁 間の距離と相関がある傾向がみられる
- ・ 圧力と相関がある傾向がみられる

という点から Squeeze film damping の効果を測定できている可能性が高い

今後の課題

- ・ 誤差の評価
- ・ よりSystematicなデータを取りMonte Carlo シミュレーションによる結果と一致するか調べSqueeze film damping であることの確証を得る
- ・ 壁に穴がある場合Squeeze filmdampingの効果が高減するか調べる

→ DPFの静電アクチュエータの形状を最適化