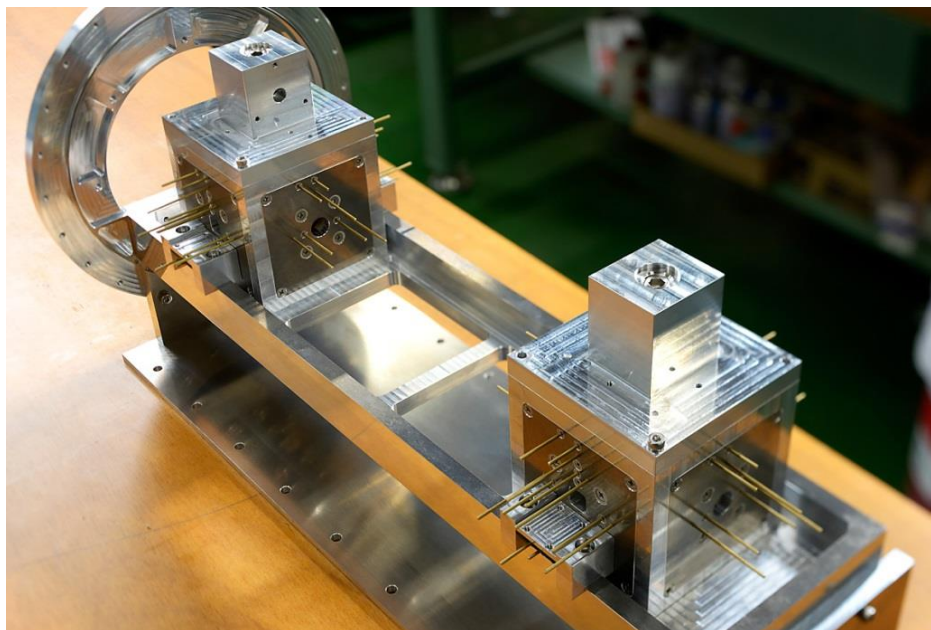


# 小型重力波観測衛星DPF 試験マスモジュールにおける ガス雑音の影響

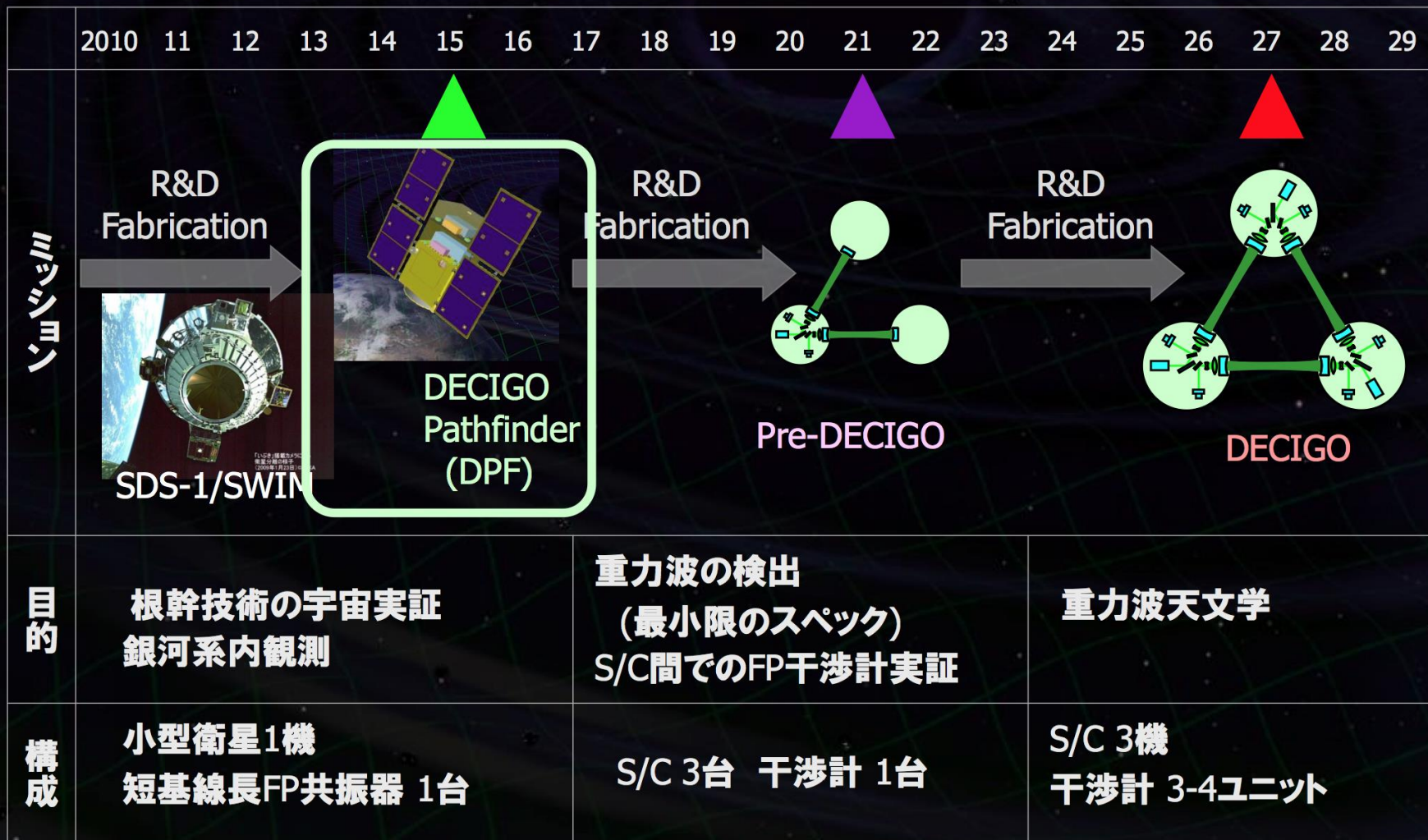


**奥富弘基**（総研大／国立天文台重力波プロジェクト推進室）

阿久津智忠，安東正樹，DPFワーキンググループ

# DECIGO計画とDECIGO Pathfinder

Figure: S.Kawamura  
Slide: M.Ando



# 目次

- 概要
- DPF試験マスモジュール
- 試験マスに働く外力雑音
- Monte Carlo法による雑音の推定
- まとめ

# 概要

## ❖ 研究の目的

DPFのミッション要求値を満たす試験マスモジュールの設計を行う

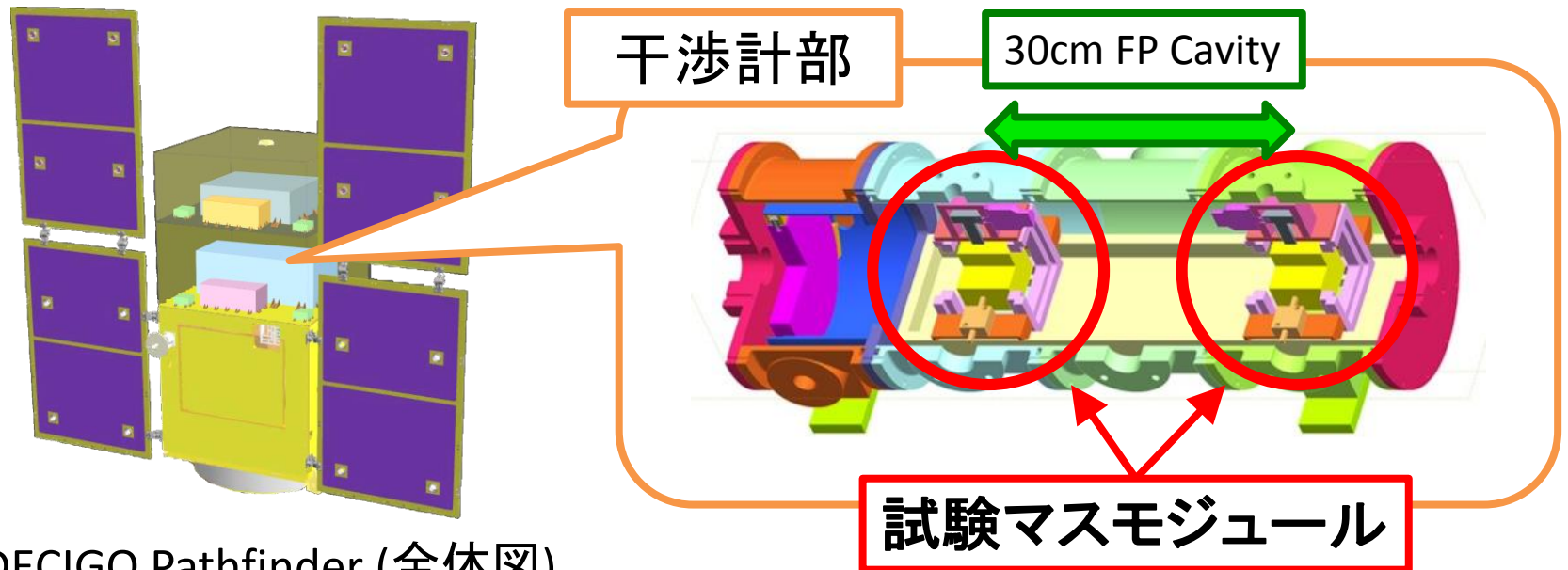
## ❖ 今回の話題

試験マスに働く外力雑音を数値計算で見積もり、要求値との比較を行った

# 目次

- 概要
- **DPF試験マスモジュール**
- 試験マスに働く外力雑音
- Monte Carlo法による雑音の推定
- まとめ

# DPF 試験マスモジュール



DECIGO Pathfinder (全体図)

## ● 試験マスモジュールの主な機能

- 試験マスの保持
- 試験マスの変位の観測
- 観測帯域での外乱の抑制
- Discharge, Launch Lock, Clump Release, ...

ローカルセンサ  
ローカルアクチュエータ  
が必要となる

# 試験マス・ハウジング

## Breadboard Modelの概観

### ❖ 静電センサ

静電容量の変化によって  
試験マスの変位を観測

### ❖ 静電アクチュエータ

静電気力を利用して試験  
マスをアクチュエート

### ➤ 非接触保持・制御を 行う

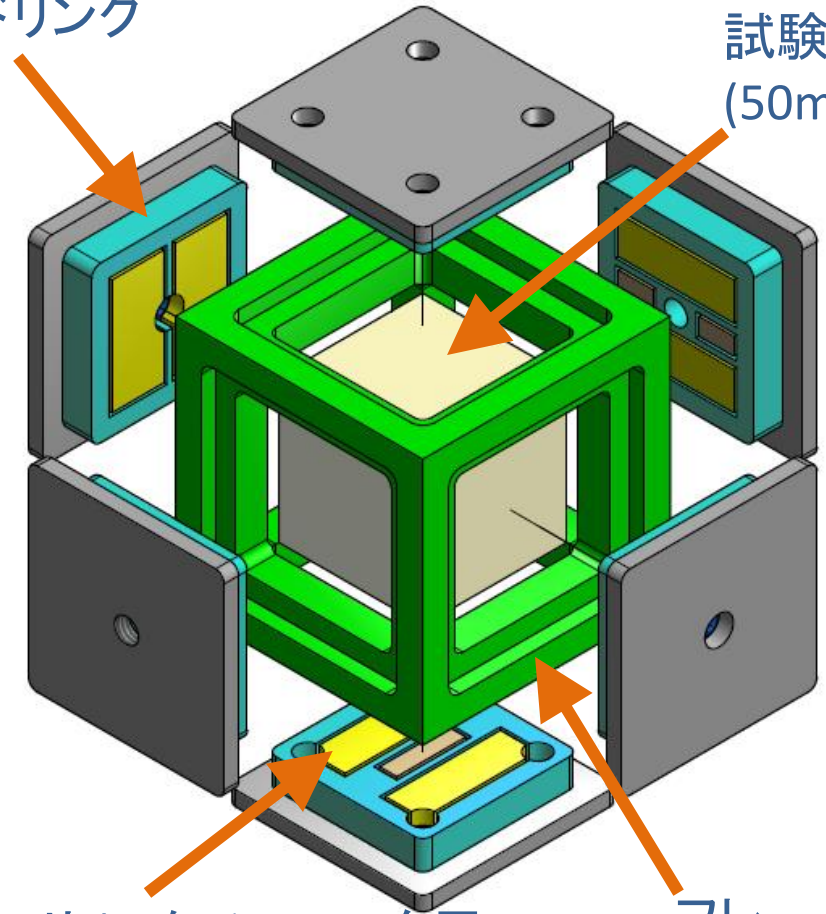
試験マスと壁・電極板  
の隙間は**3mm**程度

ガードリング

試験マス  
(50mm角)

センサ/アクチュエータ用  
電極板

フレーム



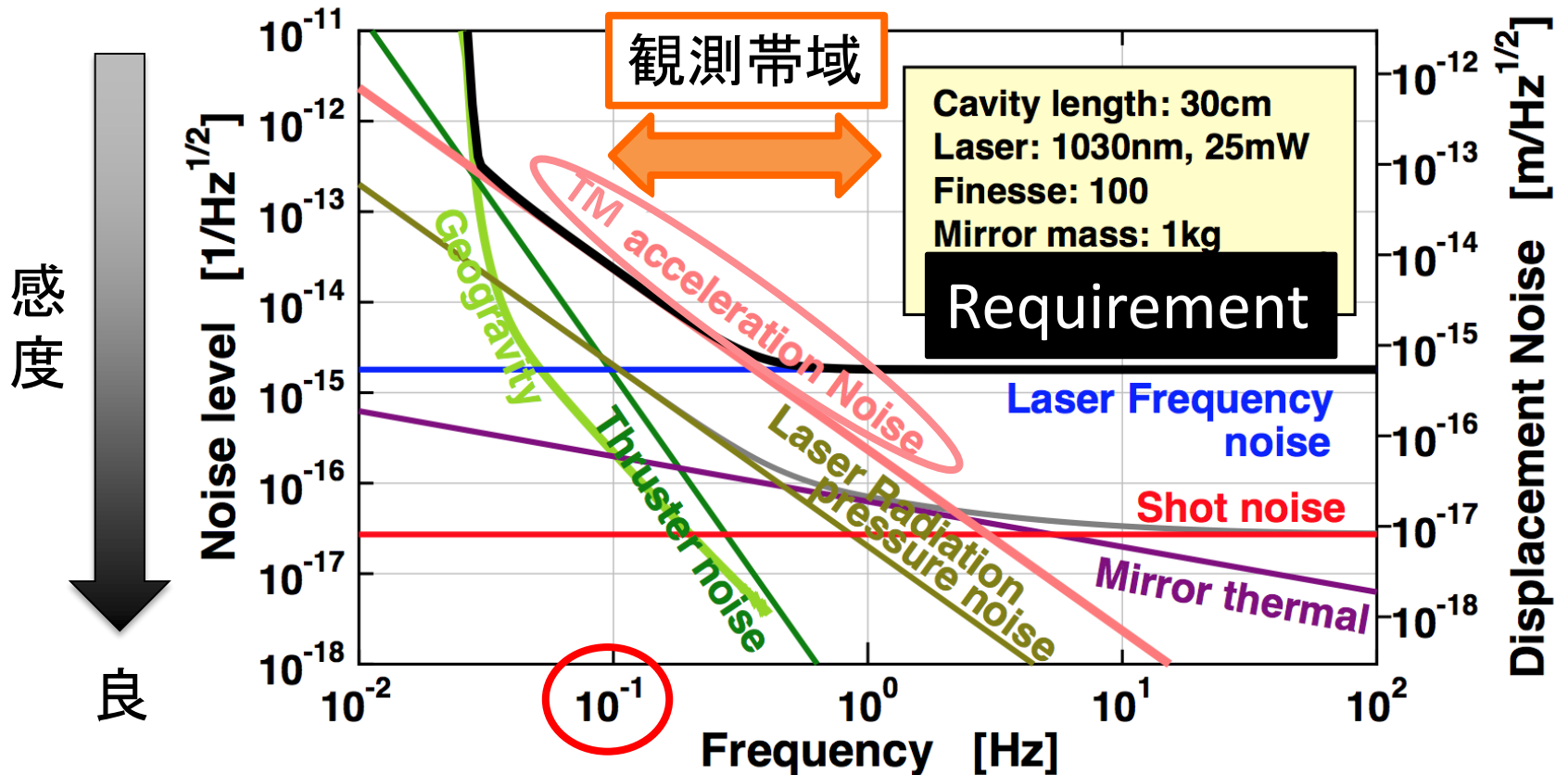
# 目次

- 概要
- DPF試験マスモジュール
- **試験マスに働く外力雑音**
- Monte Carlo法による雑音の推定
- まとめ



# DPFにおける雑音

❖ 加速度雑音 要求値:  $1 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$  以下@0.1 Hz

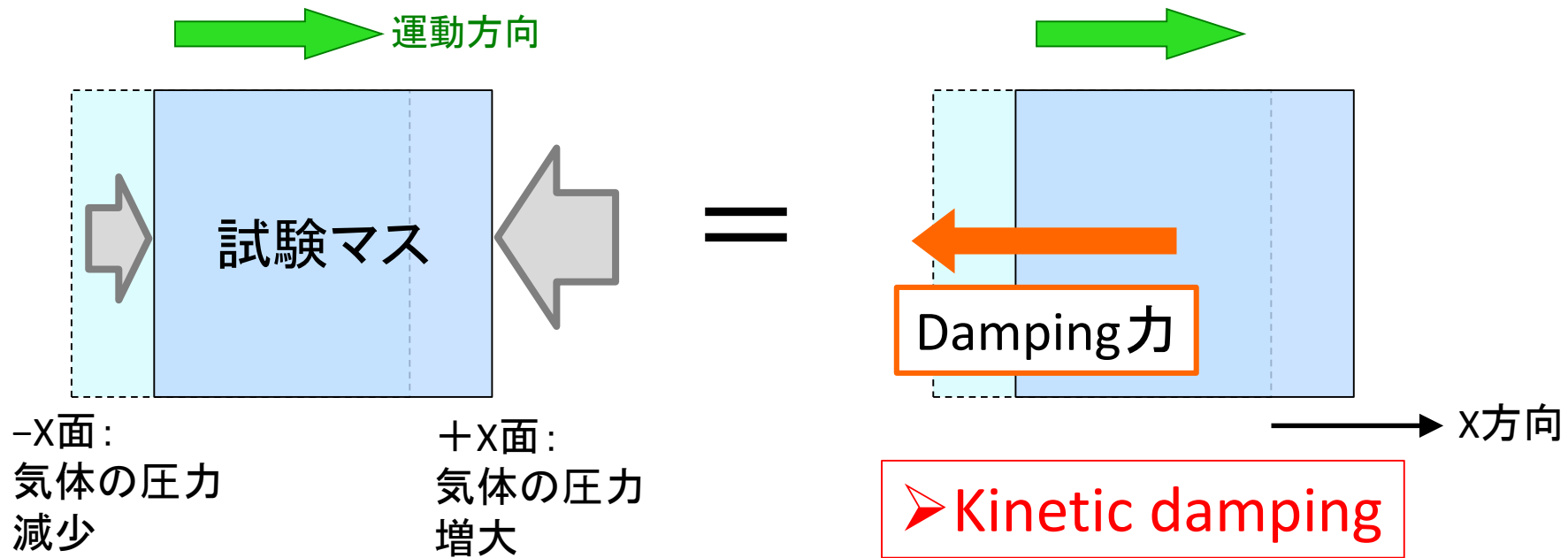


Test Mass加速度雑音はほぼ残留ガスの影響で決まっている

# ガスが及ぼす力①

試験マス周囲の残留ガス分子のランダムに衝突による外力

- 気体中を試験マスがX方向に運動している場合

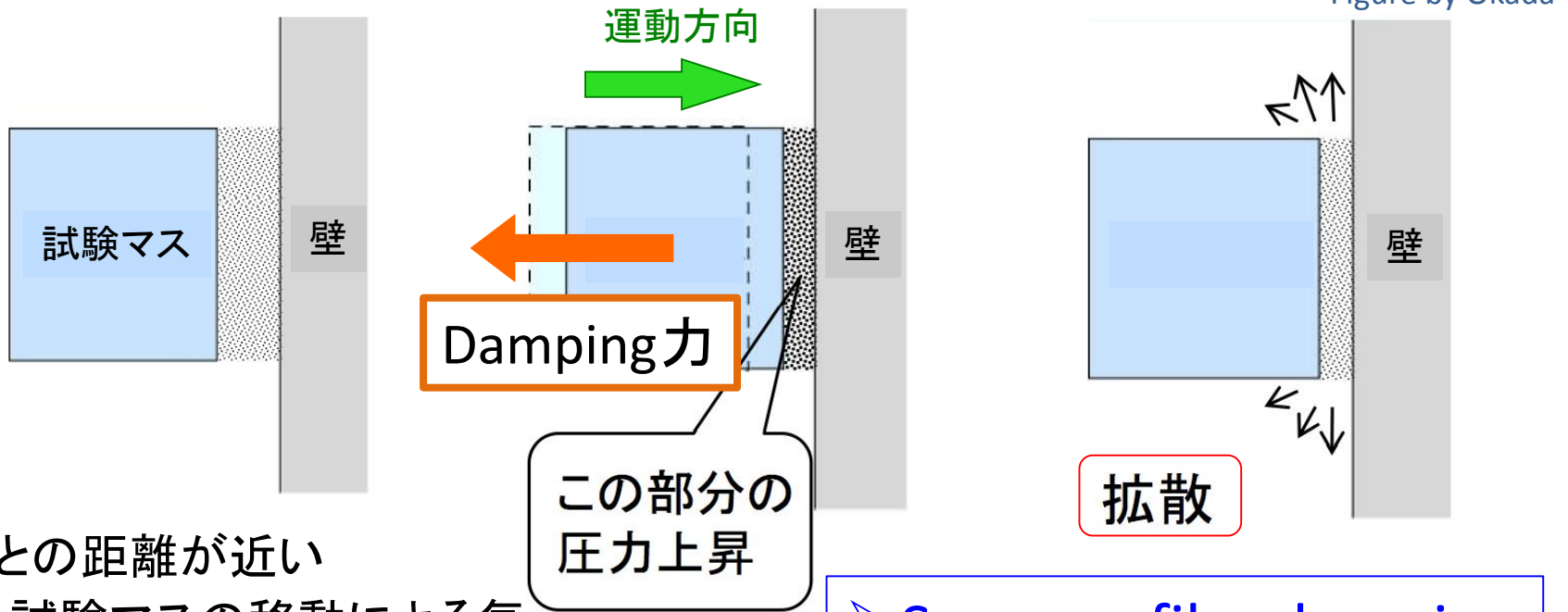


当初の見積もりではKinetic dampingのみを考慮していた

しかし、試験マスの近くに壁があると別の効果加わる

# ガスが及ぼす力②

- 試験マスが壁の直近で運動する場合



壁との距離が近い

- 試験マスの移動による気体の体積変化が有意

➤ Squeeze film damping

DPFの場合、隙間 < 試験マスの大きさなので、Kinetic damping と Squeeze film damping の両方を考慮する必要がある

# 残留ガス雑音

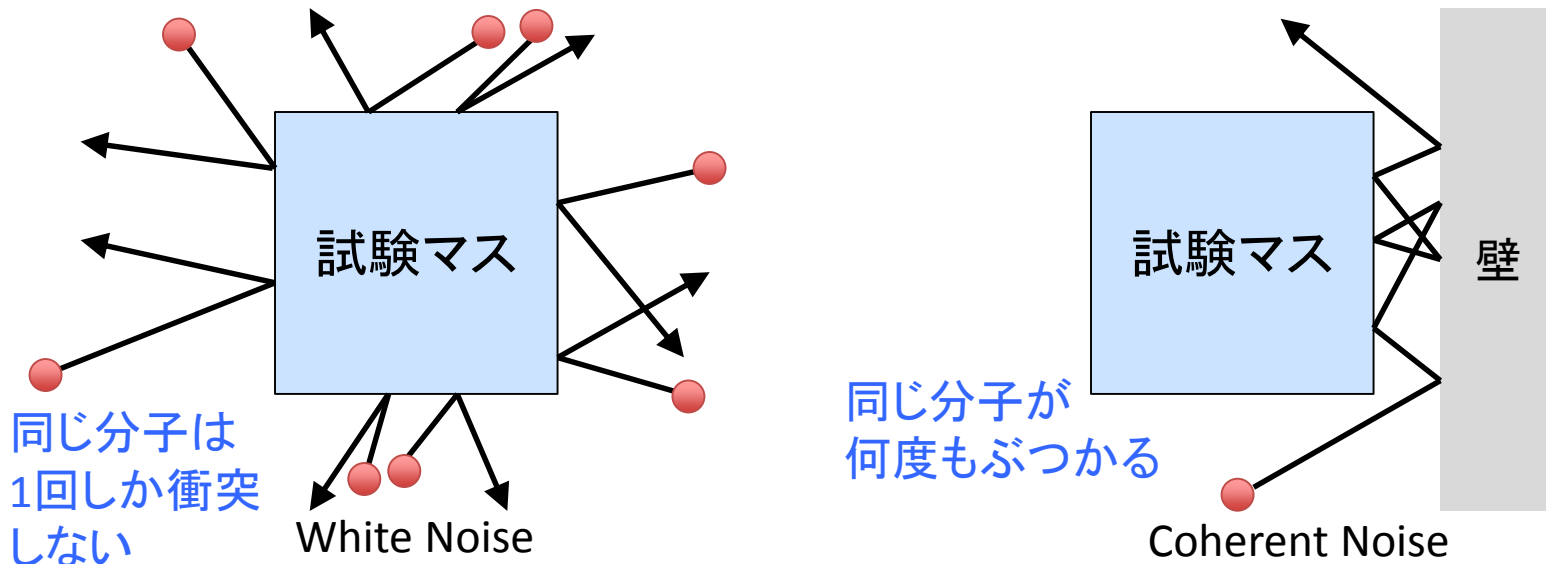
Kinetic **damping**

Squeeze film **damping**

揺動散逸定理

熱平衡状態の揺らぎ  $\leftrightarrow$  揺動力

ガスの揺らぎは試験マスの外力雑音の原因となる



# 目次

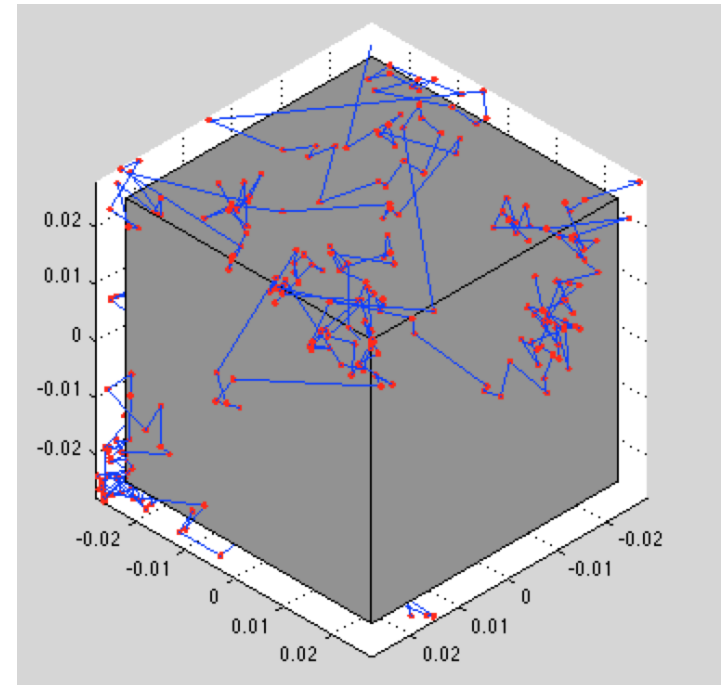
- 概要
- DPF試験マスモジュール
- 試験マスに働く外力雑音
- Monte Carlo法による雑音の推定
- まとめ

# 残留ガス雑音の見積もり

## ❖ Monte Carlo法による数値シミュレーション

(コードはM. Evans氏、麻生氏のMATLAB Scriptに変更を加えたものを使用)

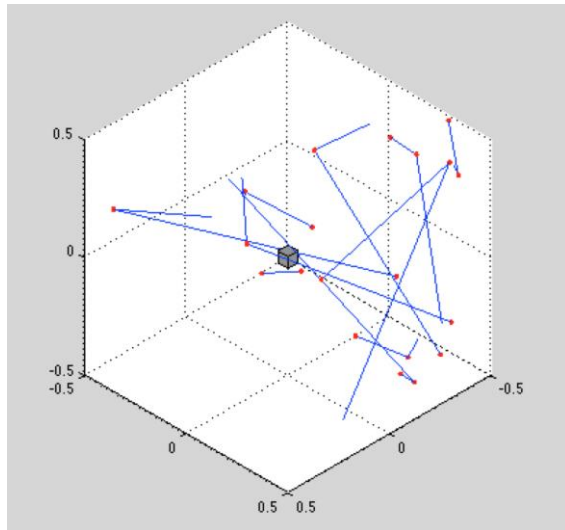
1. 分子の初期位置をランダム、初期速度をMaxwell-Boltzmann分布で与える
2. 分子は壁や極板、試験マスと衝突を繰り返す
3. 一定時間、分子から試験マスに加えられた力を記録する



- 分子は1000個と仮定し、DPFの運用環境: 圧力  $10^{-6}$  Pa での雑音力に換算
- 分子どうしの衝突は考慮しない

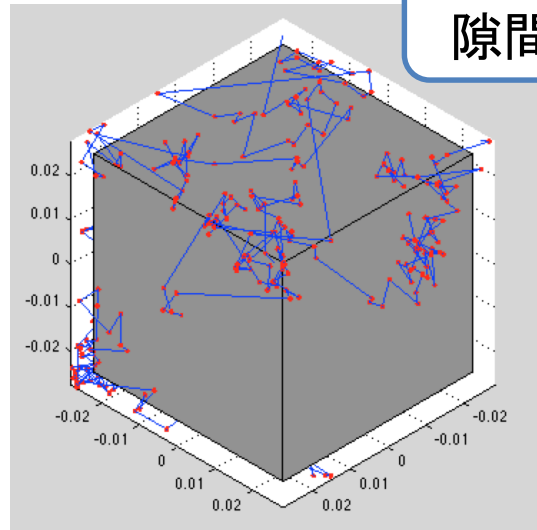
# 簡略化されたモデル

- 次の3つのモデルで計算



## 自由空間

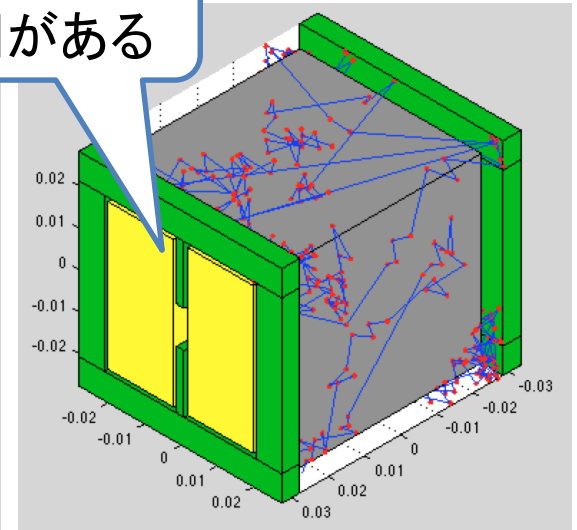
箱との隙間 (~1m)  
≫ 試験マスのスケール



## 試験マス + 周りの箱

箱との隙間 (= 3 mm)  
< 試験マスのスケール

わずかに  
隙間がある



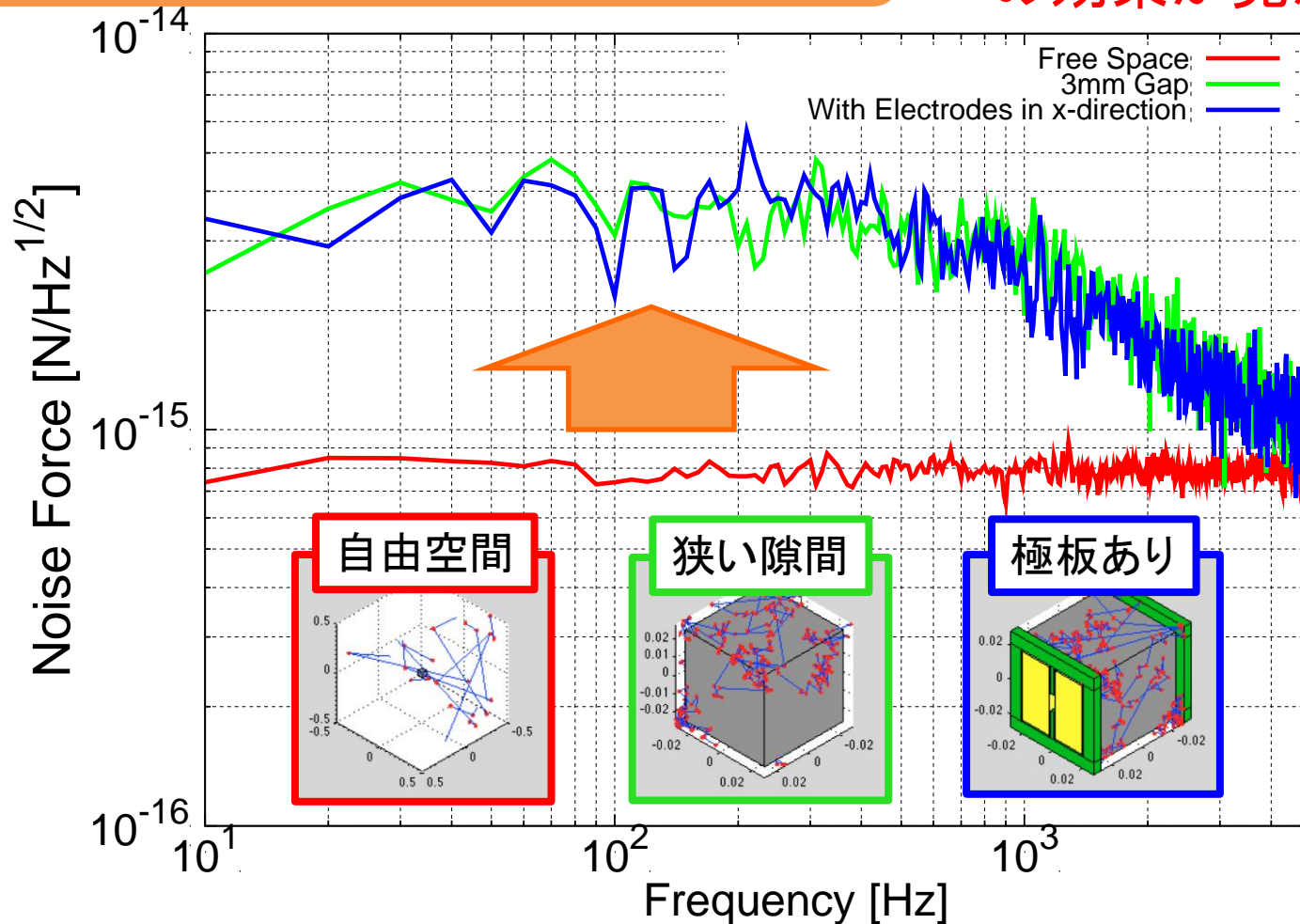
## 試験マス + 壁, 極板 (x方向のみ) + 周りの箱

現在の試験マスモジュールの  
デザインに近い

# 簡略化モデルでの計算結果

隙間が狭い場合に雑音力が増大する

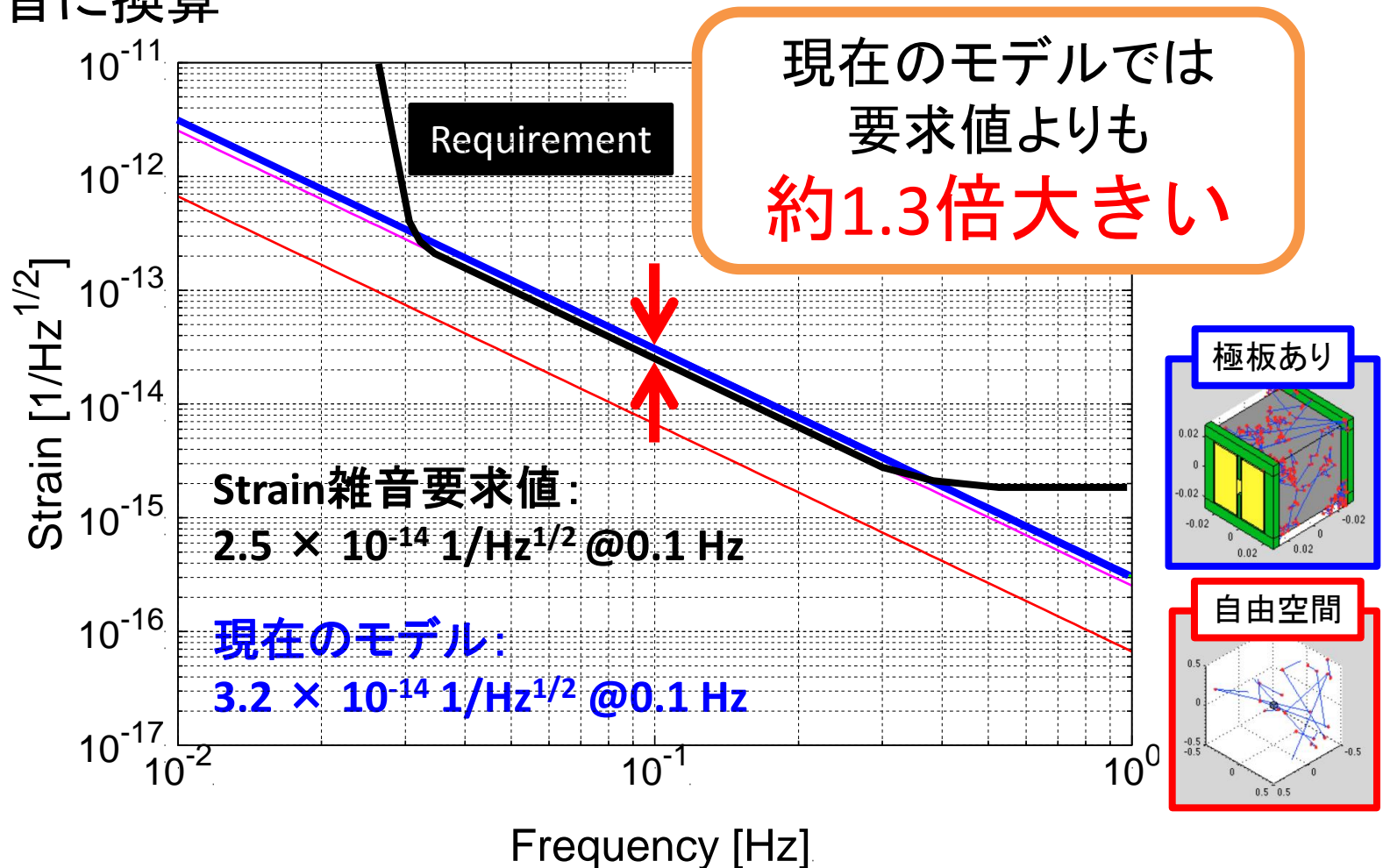
➤ Squeeze film damping  
の効果が見えている





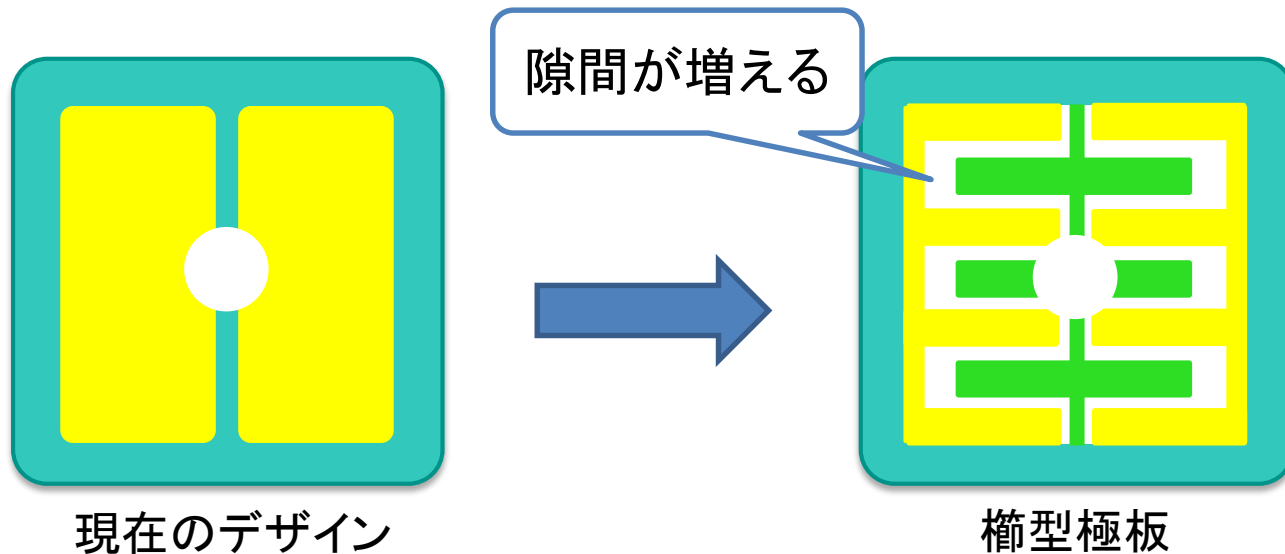
# Strain換算雑音 @観測帯域

- 1 Hz付近の雑音力を低周波側へ外挿し、0.1 Hz付近のStrain雑音に換算

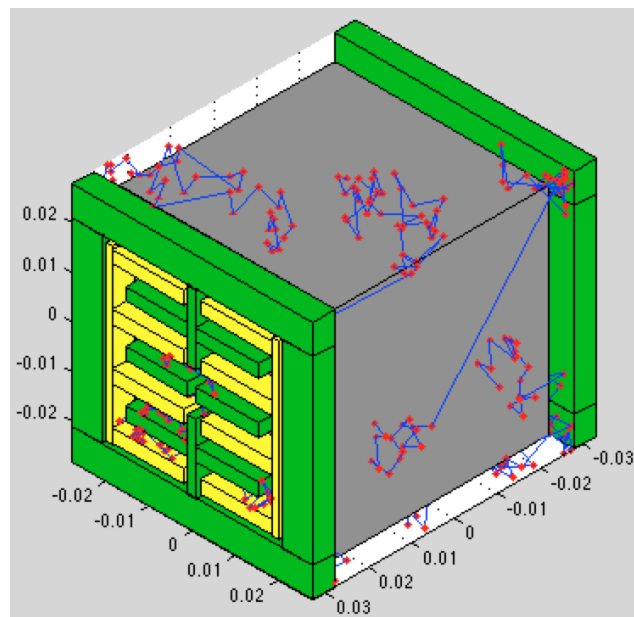
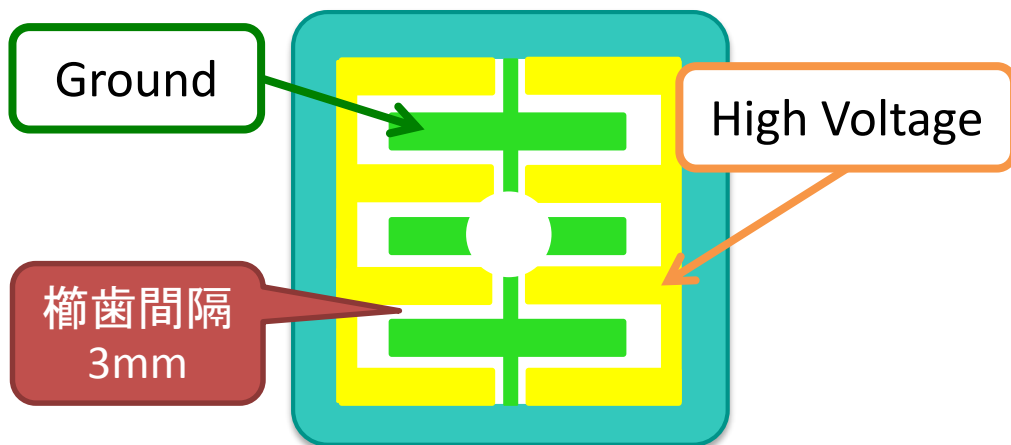


# ガス雑音の回避策

- より高真空化
  - 実際は更に真空度が悪くなる可能性が高い
- 極板の形を変更する
  - 電極板に隙間を増やして気体分子が逃げる経路を与える
    - 極板の形状を楕型にすることが考えられる



# 楕型極板と計算モデル



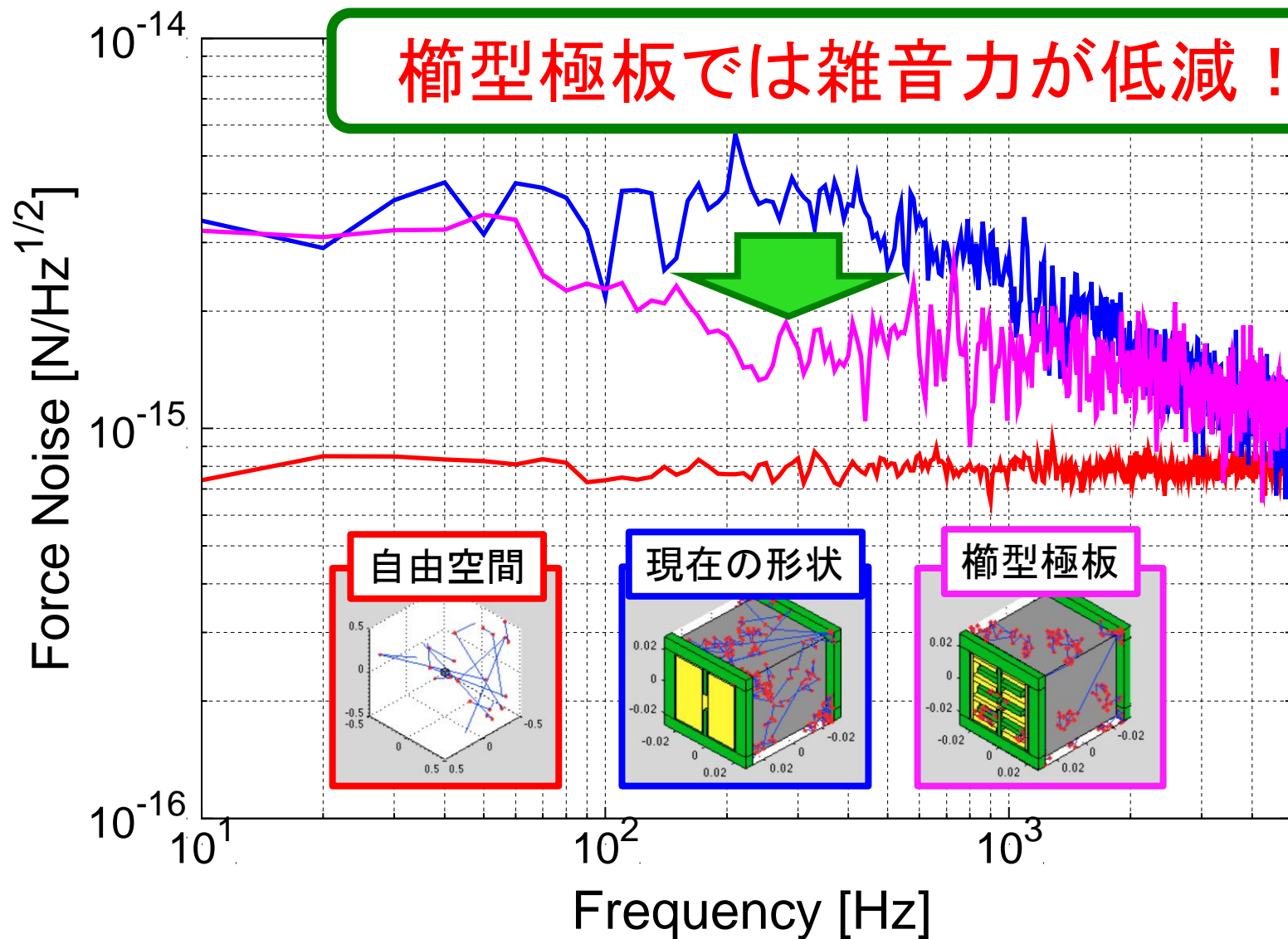
楕型極板の計算モデル

## Actuation Range

現在のデザイン	: ~ 20.1 $\mu\text{N}$
楕型極板	: ~ 20.4 $\mu\text{N}$
ミッション要求値	: $\geq 10 \mu\text{N}$

- 極板に隙間を増やす + 奥行き方向に空間を拡大 (~ 試験マスの大きさ分だけ)
  - 試験マス周囲の **実効的な空間を拡げる**
  - Squeeze film damping の効果を低減

# 楕型極板での雑音力



# まとめ

- 今回の結果

- Monte Carlo法による計算の結果、現在のモデルでは残留ガス雑音が要求値よりも約1.3倍大きくなることが判明した
- 極板を楕型にすることで雑音の低減が見込まれるが、低周波数帯では別の対策が必要になる可能性がある

- 今後の予定

- より処理速度の速いコンピュータを用いて、観測帯域でのガス雑音の影響を直接推定する
- 別の計算手法によるガス雑音の見積もりを行う(角度係数法by COMSOLなど)
- 感度要求値を満たすようハウジングを設計し、実測を行う