

エアダンピング効果を考慮した 静電駆動デバイスの連成解析

株式会社 数理システム 科学技術部

望月俊輔

(motiduki@msi.co.jp)

Agenda

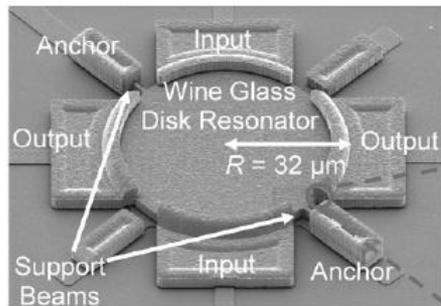
- MemS ONEにおけるエアダンピング解析
- 構造-流体-電気の連成解析の一手法
- エアダンピングのコンパクトモデル
- エアダンピングを考慮した静電デバイスの解析
- まとめ

静電駆動デバイスとエアダンピング

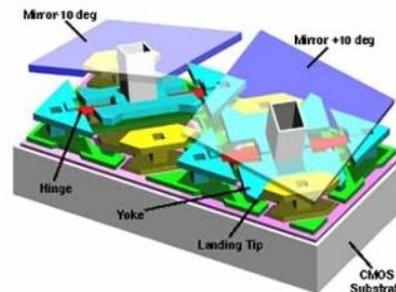
- 静電駆動デバイスのシミュレーションでは、動的な特性の解析も重要（e.g. Q値, スイッチング特性）
- 動的な特性解析では、エネルギー損失機構を考慮する必要あり
アンカーロス、表面損失、熱弾性効果、**エアダンピング** ..

本発表では、**エアダンピングを考慮した静電駆動デバイスの連成解析**を扱う

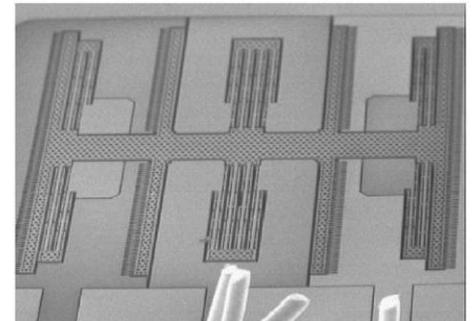
ディスク振動子 Lin et al. (2004)



DMD Texas Instruments社



櫛歯共振器 Wang et al. (2000)



MemONEを用いたエアダンピング解析

□ 機構解析を用いた方法

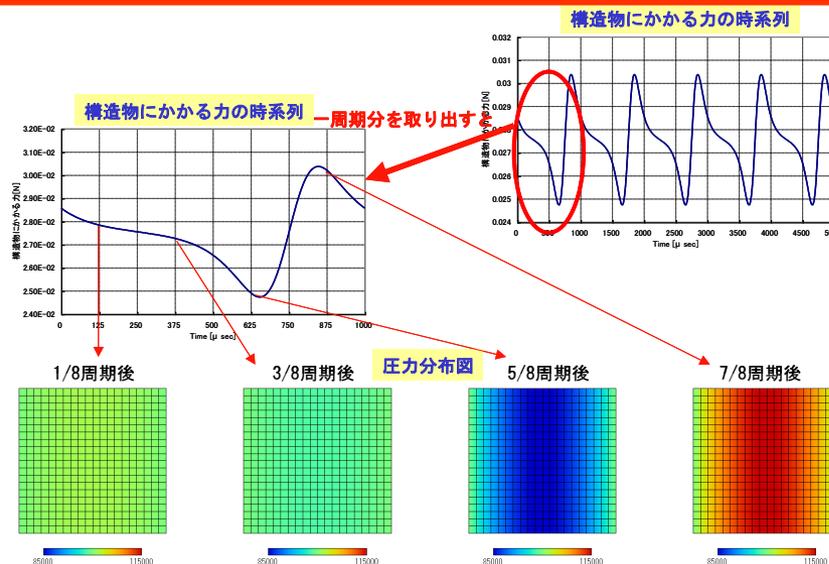
エアダンピングを考慮した構造部の周波数応答解析

■ 雰囲気気流体解析: 減衰係数を決定

■ 調和応答解析: 上記の減衰係数を設定して解析

□ MEMS回路シミュレータ(MEMSpice)を用いた方法

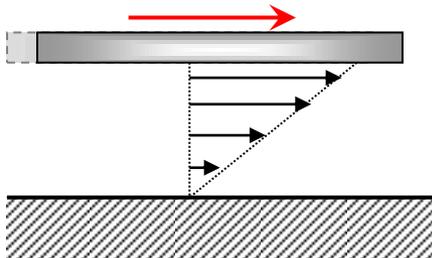
エアダンピングを考慮した静電駆動デバイスの周波数応答解析・過渡解析(構造部だけでもOK)



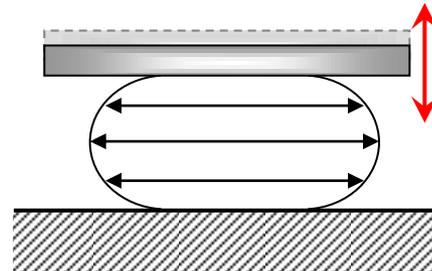
雰囲気気流体解析機能による
スクイーズフィルムダンピング
の解析例

エアダンピングモデル

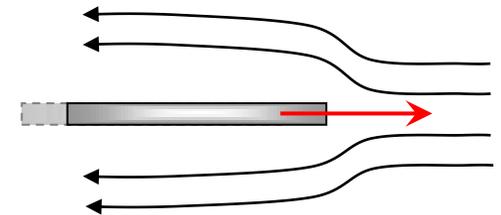
- 3次元空間で運動/変形する機械部品のダンピングを与える為、3種類の寄与の重ね合わせで記述。
 - スライドフィルムダンピング
 - スクイズフィルムダンピング
 - ドラッグフォースダンピング
- 各々の寄与は、流体方程式(e.g. Reynolds方程式)を解析的に解いて得られる閉じた式で表わされる。
→パラメトリックなモデル



スライドフィルムダンピング



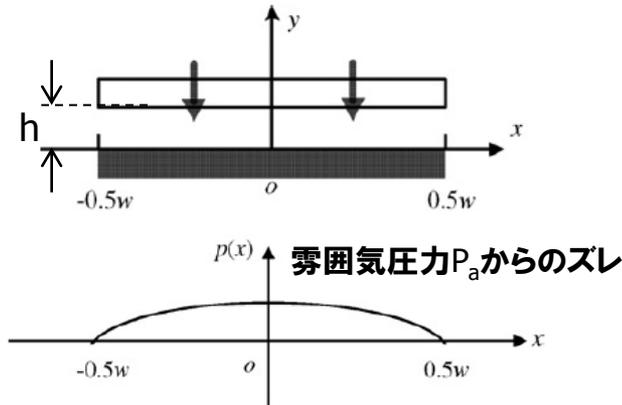
スクイズフィルムダンピング



ドラッグフォースダンピング

スクイーズフィルムダンピングの解析式の例

矩形平板の並進運動



J. J. Blech, "On isothermal squeeze films," ASME J. Lubric. Technol. vol.105, pp.615-620 (1983).

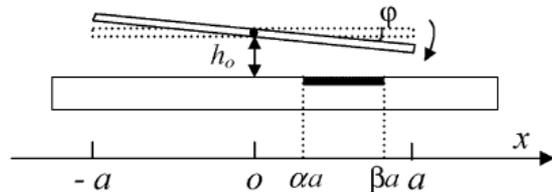
粘性抵抗力 (速度に比例)

$$F_{\text{viscos}} = \frac{64\sigma P_a A}{\omega \pi^6 h} \sum_{m,n \in \text{odd}} \frac{m^2 + (rn)^2}{(mn)^2 [\{m^2 + (rn)^2\}^2 + \sigma^2 / \pi^4]} V$$

スプリング抵抗力 (変位に比例)

$$F_{\text{elastic}} = \frac{64\sigma^2 P_a A}{\pi^8 h} \sum_{m,n \in \text{odd}} \frac{1}{(mn)^2 [\{m^2 + (rn)^2\}^2 + \sigma^2 / \pi^4]} X$$

矩形平板の回転運動



R. Darling, C. Hivick, J. Xu, Sens. Actuators A 70 (1998) 32-41.

粘性抵抗トルク (速度に比例)

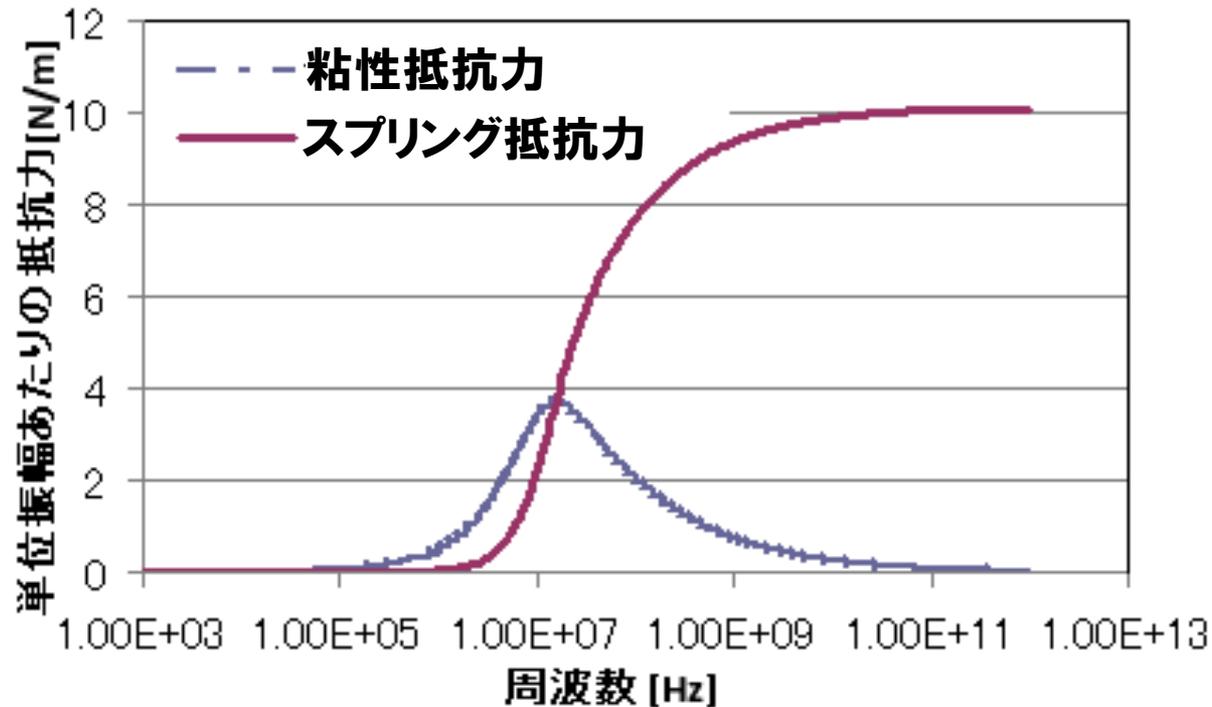
$$T_{\text{viscos}} = \frac{16w^2 \sigma P_a A}{\omega \pi^4 h} \sum_{m \in \text{odd}, n \in \text{even}} \frac{m^2 + (rn)^2}{(mn)^2 [\{m^2 + (rn)^2\}^2 + \sigma^2 / \pi^4]} \dot{\phi}$$

スプリング抵抗トルク (変位に比例)

$$T_{\text{spring}} = \frac{16w^2 \sigma^2 P_a A}{\pi^8 h} \sum_{m \in \text{odd}, n \in \text{even}} \frac{1}{(mn)^2 [\{m^2 + (rn)^2\}^2 + \sigma^2 / \pi^4]} \phi$$

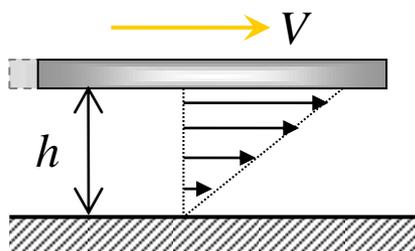
粘性抵抗力和スプリング抵抗力

10um×10um平板(h=1.0um)のスクイズフィルムダンピング



各寄与の重ね合わせ： 梁を例にして

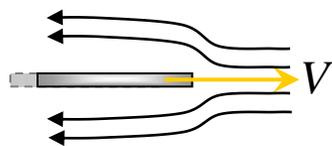
スライドフィルムダンピング



単位長さ当たり¹⁾

$$f_{sl} = -\mu \frac{V}{h}$$

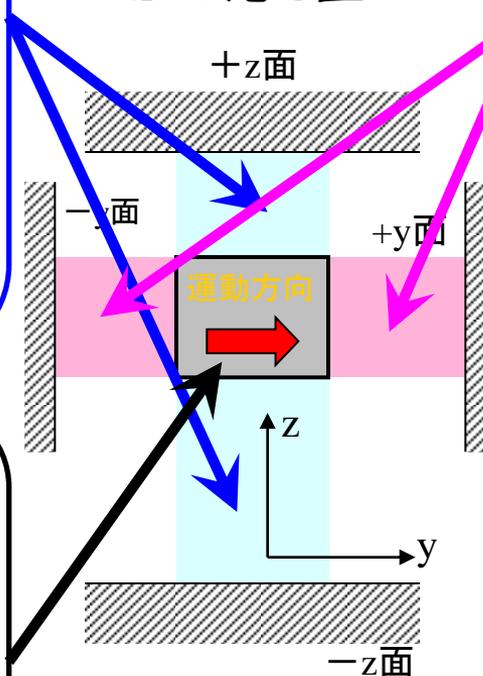
ドラッグフォースダンピング



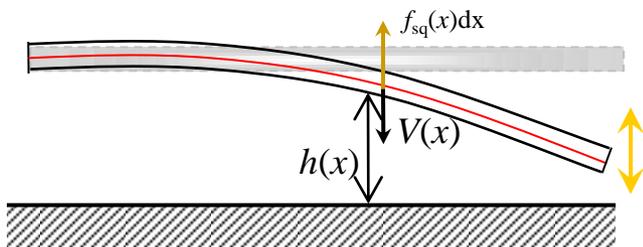
単位長さ当たり³⁾

$$f_{drag} = \pi\mu \left(a + \frac{2\delta}{d_2} \right) V$$

梁の断面方向から見た図



スクイーズフィルムダンピング



単位長さ当たり²⁾

$$f_{sq}(x) = -\alpha [\tilde{c}_{sq} V(x) + \tilde{k}_{sq} X(x)]$$

機械抵抗 スプリング抵抗

$$\begin{cases} \tilde{c}_{sq} = \frac{64\sigma P_{at}}{\omega\pi^6 \bar{h}} \sum_{m,n \in \text{odd}} \frac{m^2}{(mn)^2 (m^4 + \sigma^2/\pi^4)} \\ \tilde{k}_{sq} = \frac{64\sigma^2 P_{at}}{\pi^8 \bar{h}} \sum_{m,n \in \text{odd}} \frac{1}{(mn)^2 (m^4 + \sigma^2/\pi^4)} \end{cases}$$

Reference:

- 1) T. Veijola *et al*, J. Micromech. Syst., vol.10, pp.263-273 (2001).
- 2) J. J. Blech, ASME J. Lubric. Technol. vol.105, pp.615-620 (1983).
- 3) W. Zhang *et al*, Sensors and Actuators A, vol.134, pp.594-599 (2006).

ダンピング式の補正

ダンピング式を導出する際においた**仮定が妥当でない場合がある**. その場合には, 補正を導入している.

- 【仮定】平板の外周での圧力は雰囲気圧力と等しくなる
 - 雰囲気圧力と等しくなるのは, 外周より外側
 - 上記の効果を考慮する為に, 平板サイズが実効的に大きいという補正を加える.

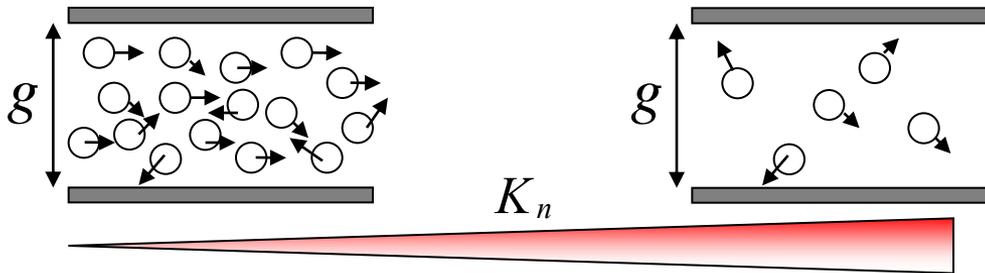
$$\Delta a = 1.3(1 + 3.3K_n)h$$

T. Veijola, A. Pursula, P. Raback, J. Micromech. Microeng. 15 (2005) 1624–1636.

- 【仮定】挟まれた気体は粘性流(連続体)として振る舞う
 - 希薄気体下では, 粘性流ではなく分子流として振る舞う
 - 上記の効果を考慮するために, 実効粘度を導入する(次ページ)

希薄気体下での取り扱い

- 希薄気体下では、粘性流では無く、分子流として取り扱われる
→分子による衝突を考慮すべき



クヌーセン数 $K_n = \frac{\lambda}{g}$
 λ : 気体の平均自由行程

□ Veijola の実効粘度の適用

- 分子流としての効果を粘度に押し込めることで、粘性流の仮定の下で導かれたダンピングの式が適用可能
- スライドフィルムダンピングの実効粘度
(線形 Boltzmann 方程式の解析結果に基づく)

$$\mu_{eff} = \frac{\mu}{1 + 2K_n + 0.2K_n^{0.788} \exp(-K_n / 10)}$$

- スクイズフィルムダンピングの実効粘度

$$\mu_{eff} = \frac{\mu}{1 + 9.658K_n^{1.159}}$$

実効粘度を適用した計算と実験の比較

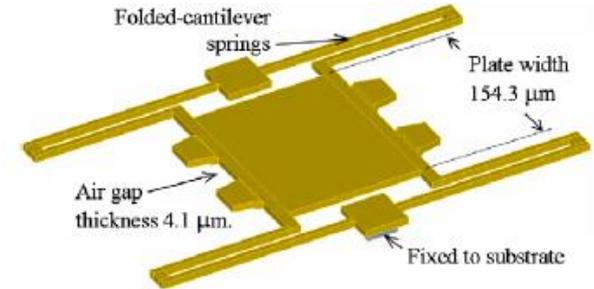
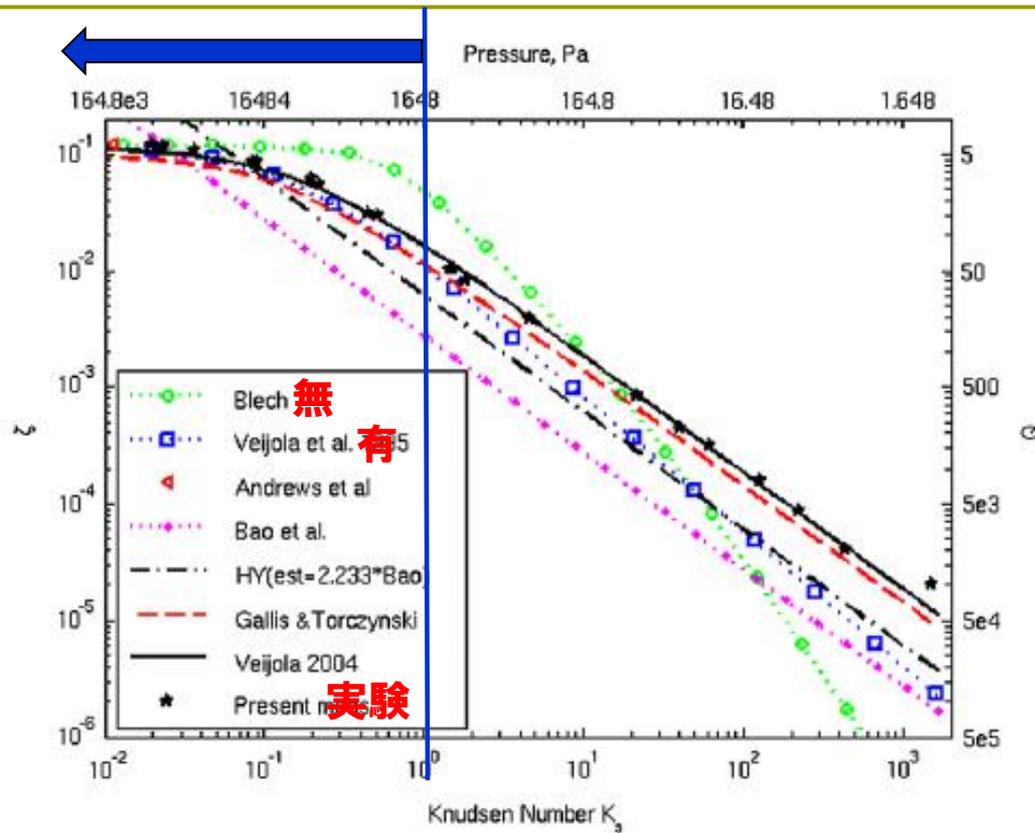


Figure 5. Test structure.

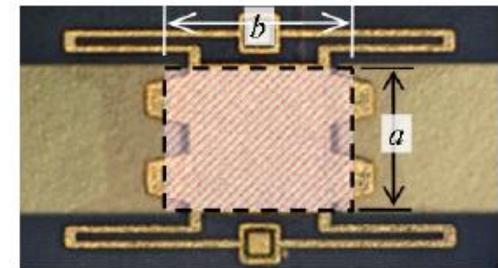


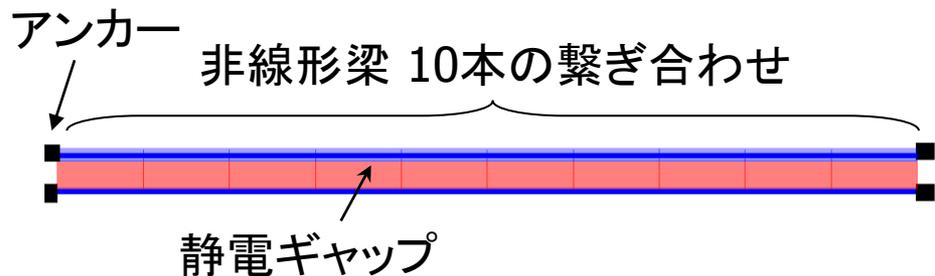
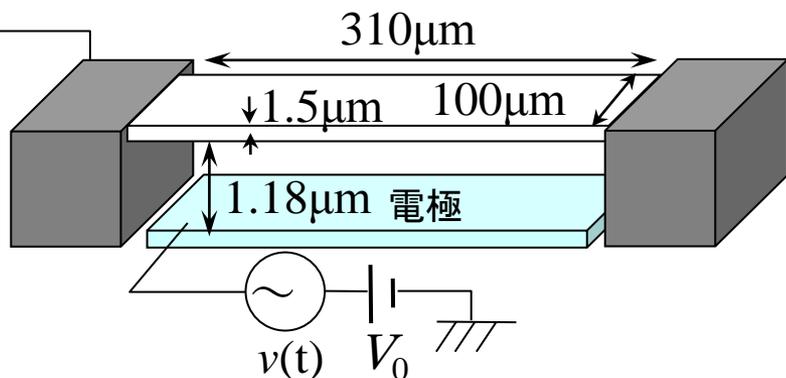
Figure 6. Equivalent length $b = \text{area of plate including tabs} / \text{width of plate } a$.

Figure 12. Comparison among squeeze-film damping ratios from seven models and from measurement.

実効粘度を導入することによって、ダンピングモデルは、クヌーセン数1以下において妥当となる。

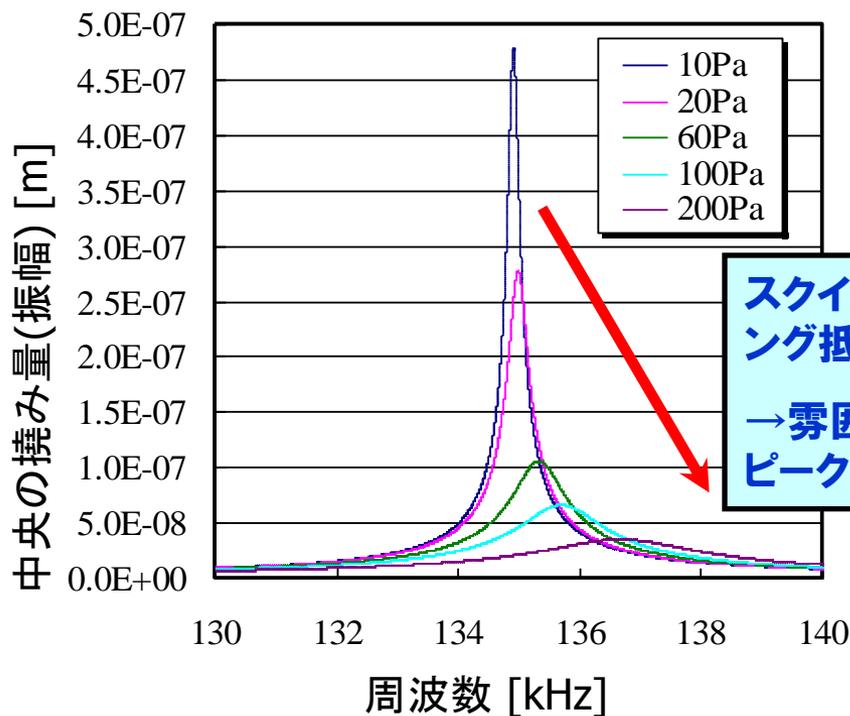
静電駆動両持ち梁の振動特性解析

MEMSpiceでの解析モデル



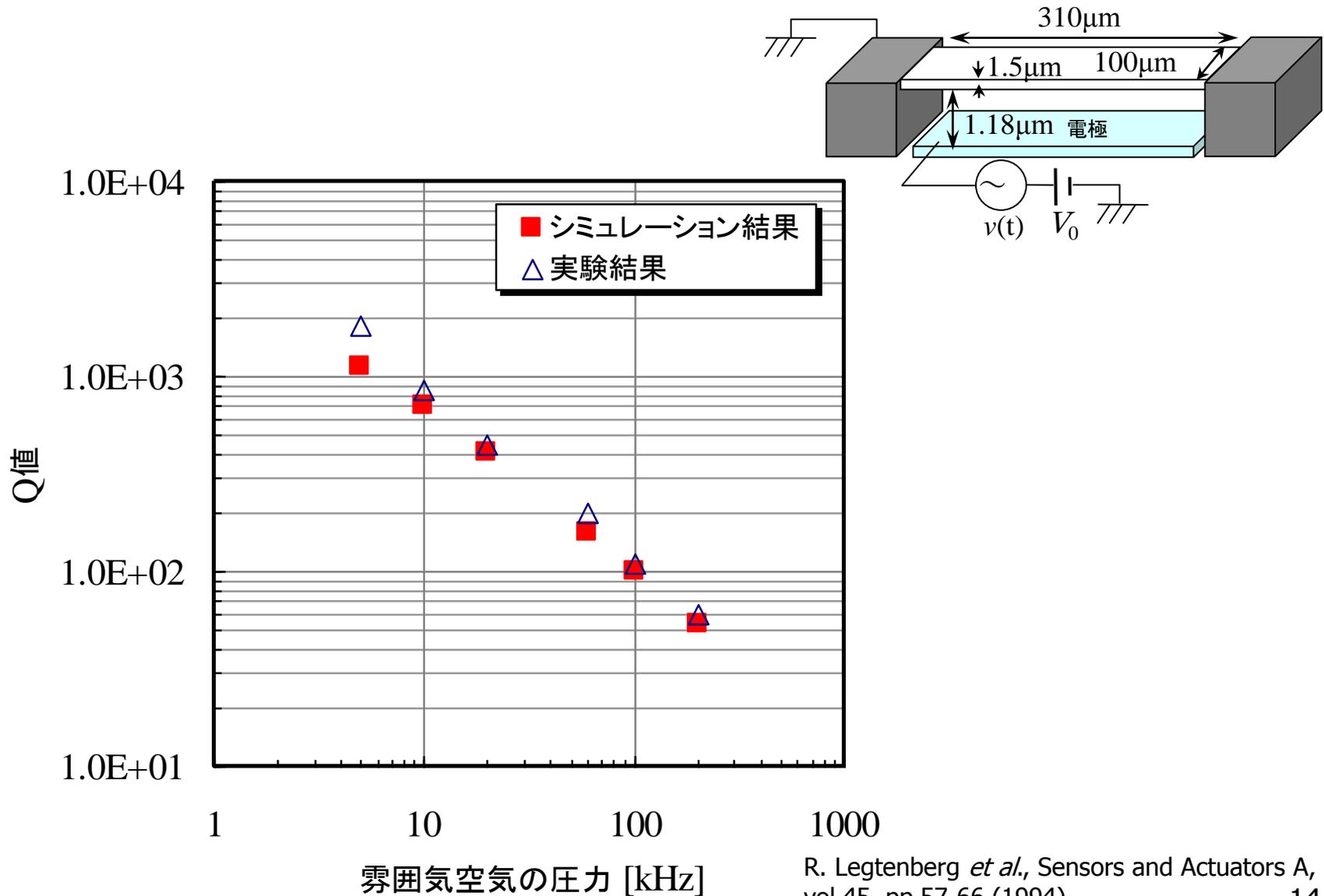
撓み振幅の 周波数依存性

(直流バイアス: 2V
交流振幅: $0.1V_{p-0}$)

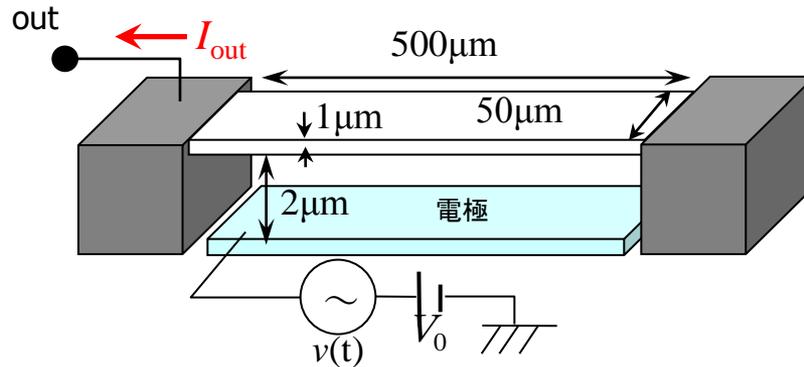


スキューズ数が大きい
ため、スプリング抵抗の寄与が
支配的
→ 雰囲気圧力上昇により、
共振ピーク高周波シフト

静電駆動両持ち梁のQ値の気体圧力依存性



両持ち梁のアドミタンス特性

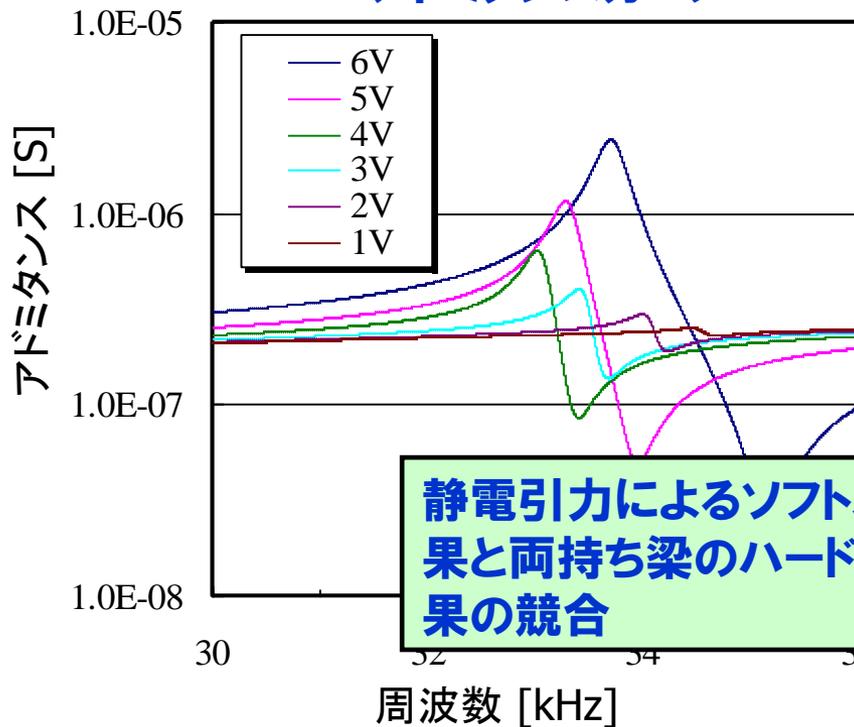


[設定]

交流電圧の振幅: 1V

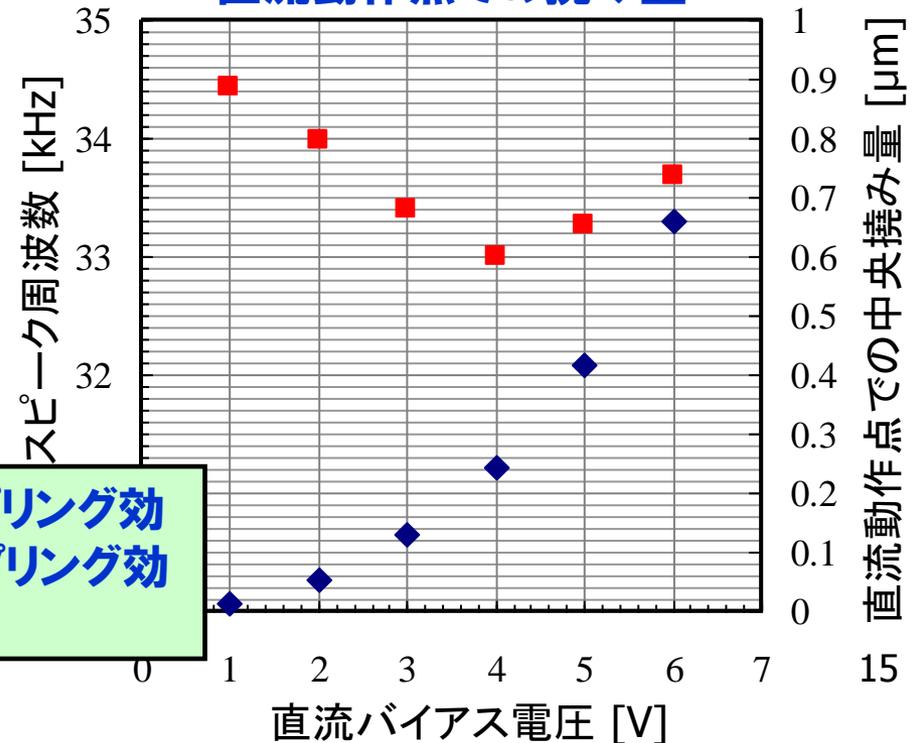
浮遊容量: 1pF

雰囲気空気圧力 20Pa 時の
アドミタンスカーブ



静電引力によるソフトスプリング効果と両持ち梁のハードスプリング効果の競合

ピーク周波数・
直流動作点での撓み量

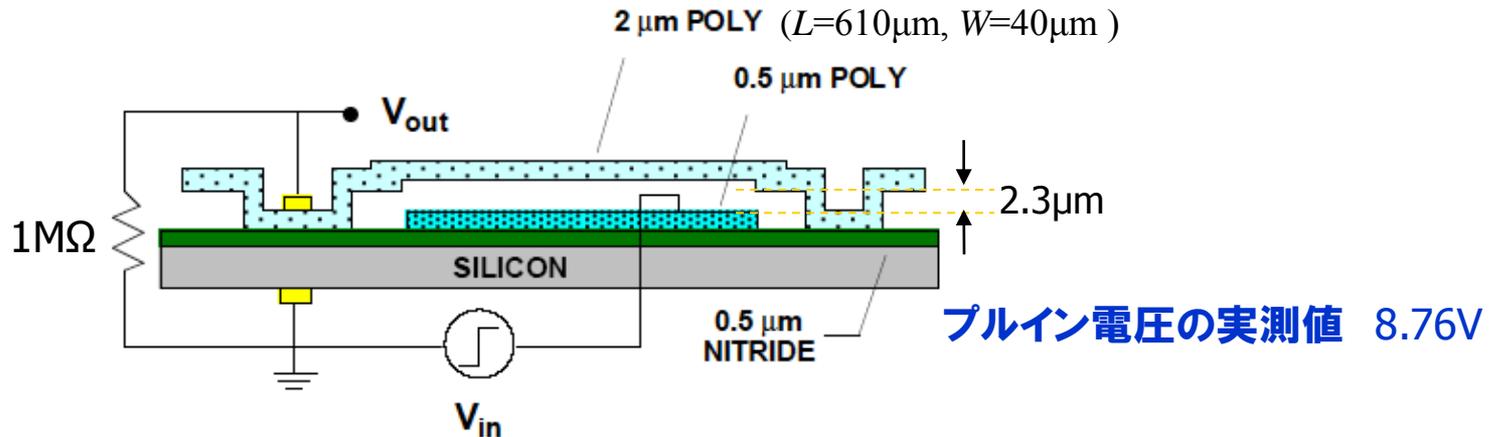


直流動作点での中央撓み量 [μm]

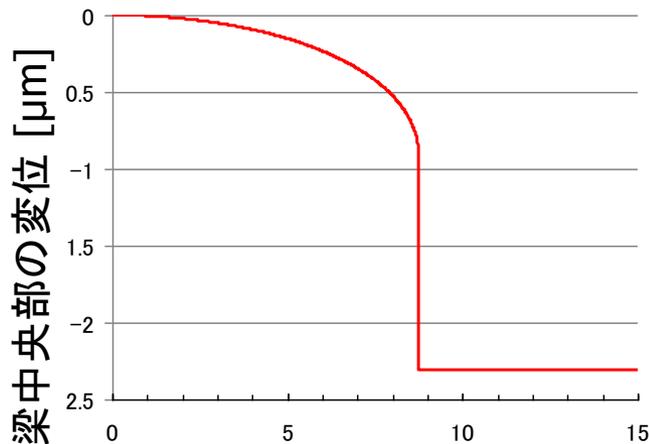
15

両持ち梁の動的プルイン解析: 設定/静的特性

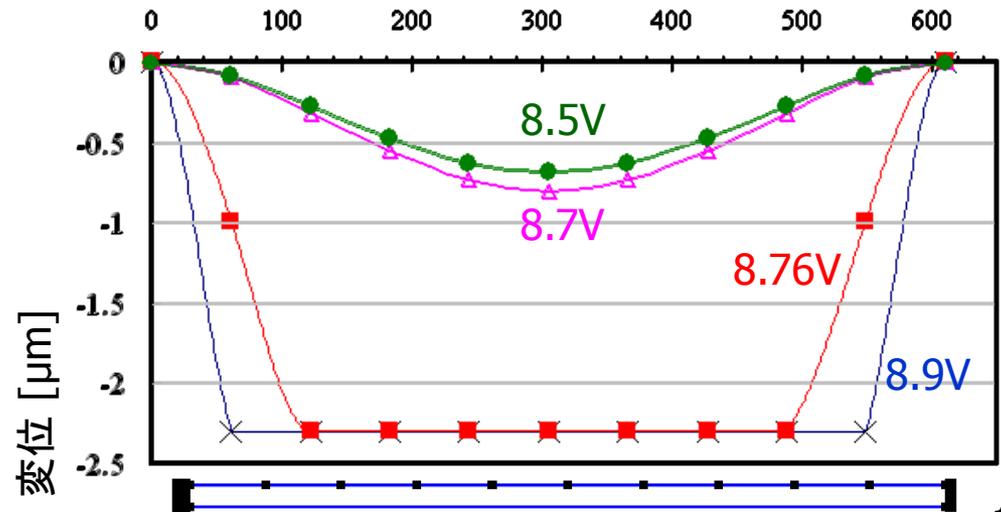
ポリシリコン両持ち梁 [Gupta et al., MEMS'97]



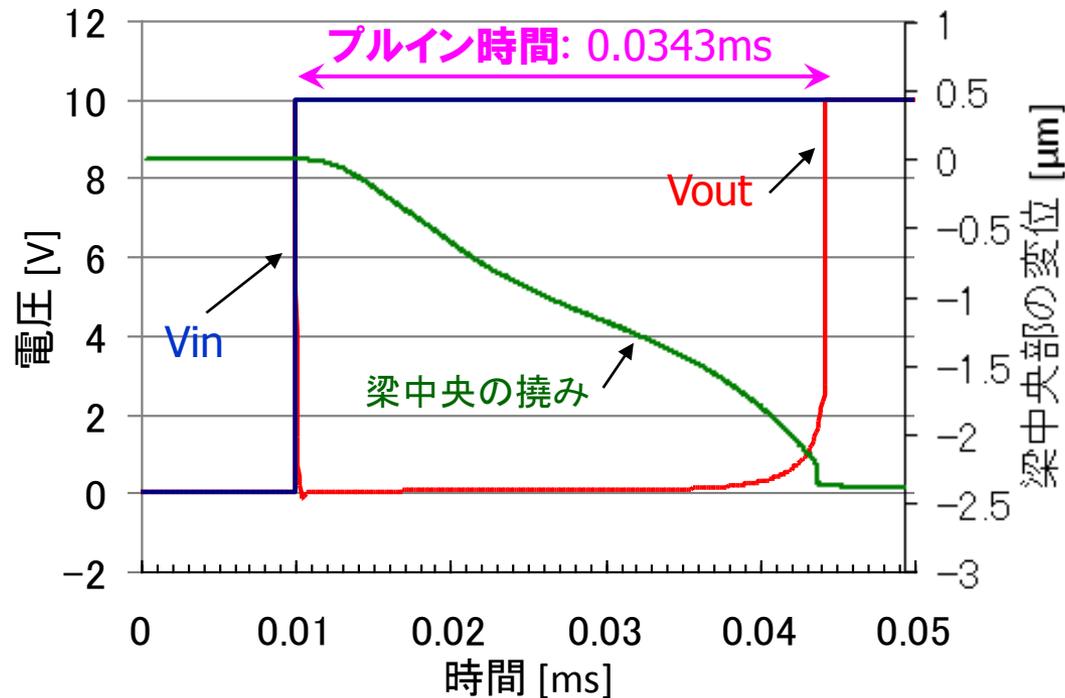
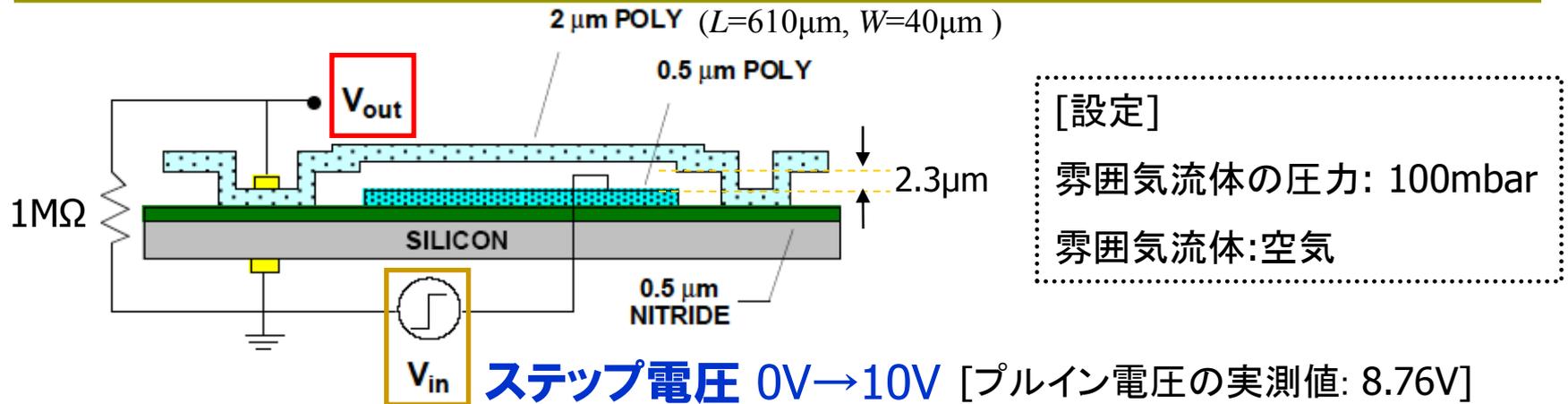
中央部撓み-電圧関係(計算結果)



プルイン前後の撓み分布(計算結果)

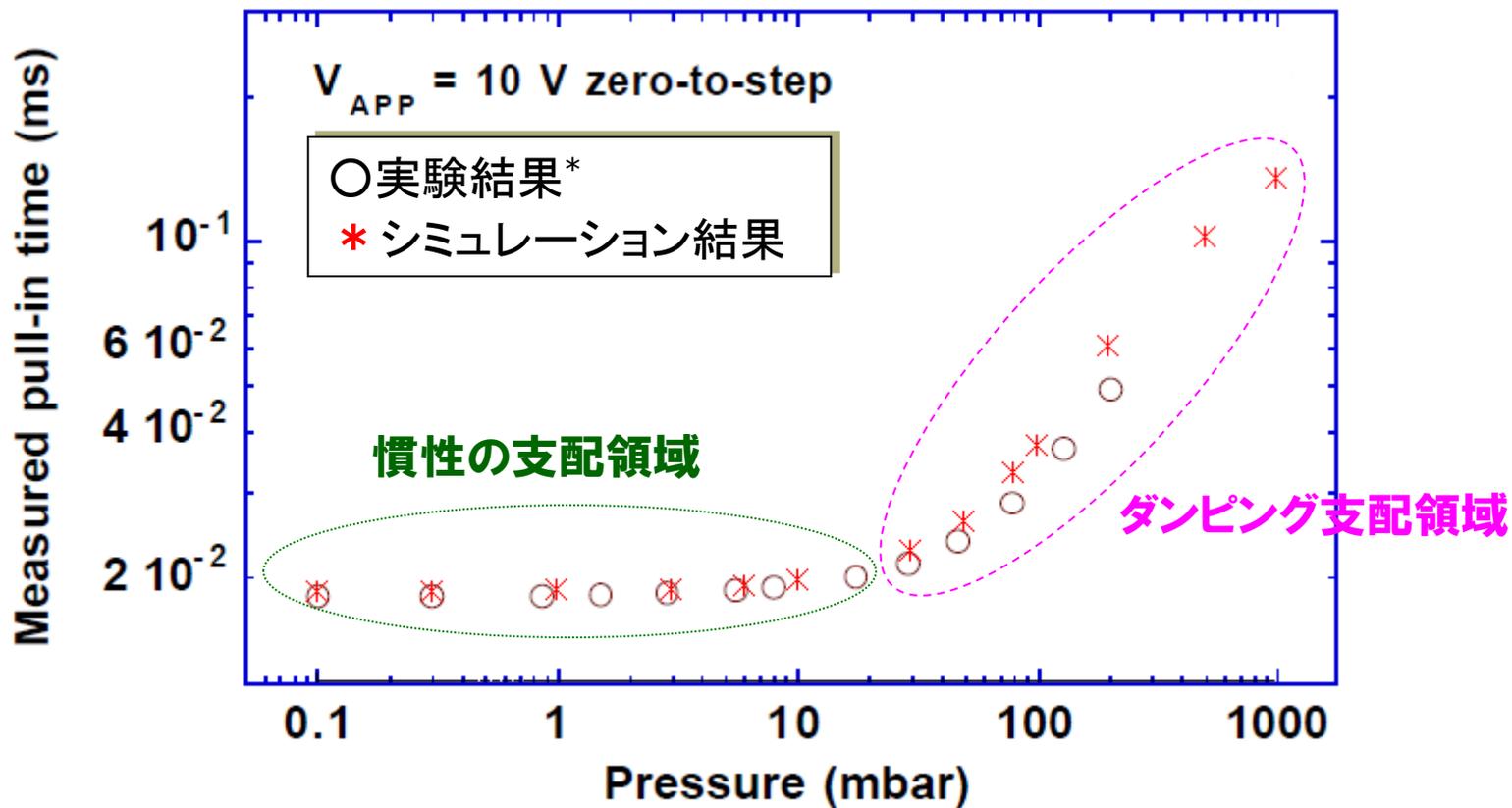


両持ち梁の動的プルイン解析 – 結果



両持ち梁のプルイン時間の気体圧力依存性

0V→10Vステップ電圧を加えた場合



まとめ

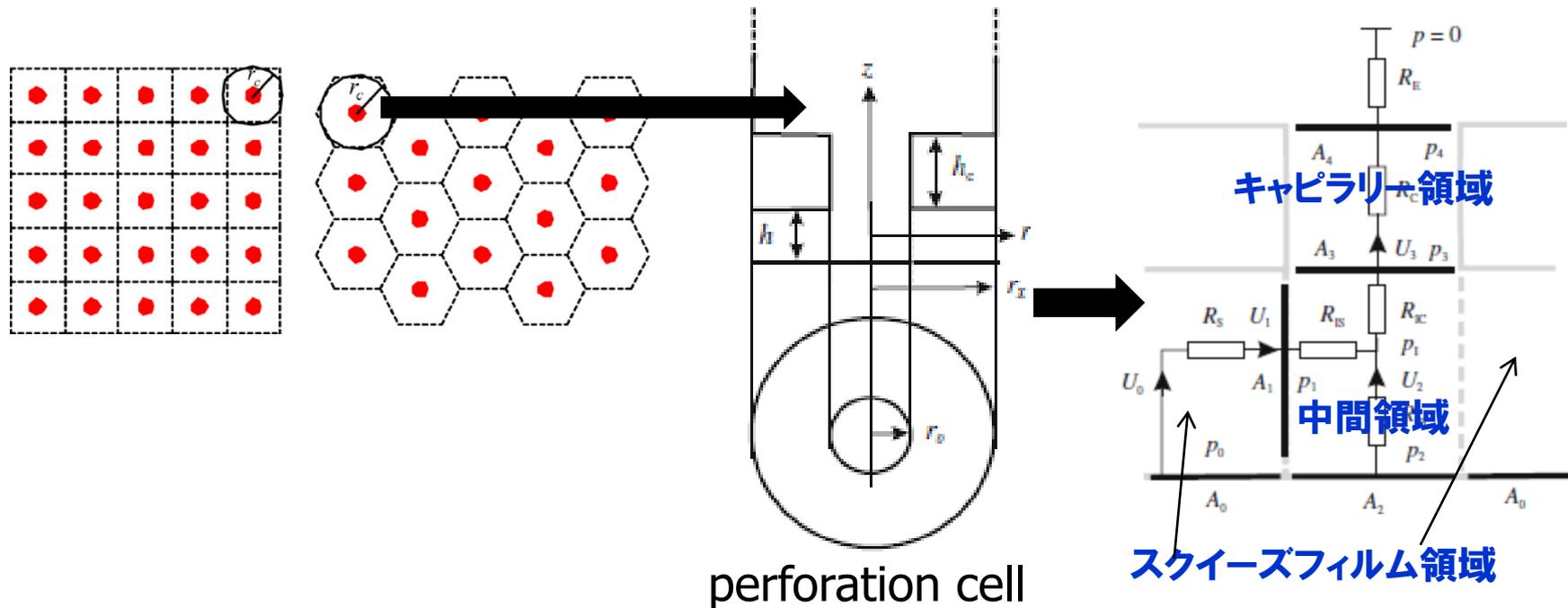
- MemsONEを用いたエアダンピング解析の方法について概観した。
- MEMS回路シミュレータでは、解析に基づくパラメトリックなダンピングモデルを搭載しており、動作特性の雰囲気圧力依存性やエアギャップ距離依存性の解析が可能。
- 静電駆動両持ち梁の連成解析を行い、モデルの妥当性を確認した。

【今後の展開】

- 希薄気体下でのモデル精度向上
→ 気体の慣性を考慮したモデルの導入
- 他のエネルギー損失機構に対するモデルの導入

穴あき平板のダンピングモデル

perforation cell モデルを採用.



- 穴は周期的に並んでいると仮定
- perforation cell 内部を3つの領域に分割し、それぞれの領域でのダンピングの寄与を計算.

各領域におけるダンピング (1)

□ スクイズフィルム領域

- エアギャップから穴へ向かう流れによるダンピング

$$R_S = \frac{12\pi\mu r_x^4}{Q_{ch} h^3} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{r_x}{r_0} - \frac{3}{8} + \frac{r_0^2}{2r_x^2} - \frac{r_0^4}{8r_x^4} \right)$$

- 相対流速係数: 希薄ガス下での気体の速度分布の補正を行うため

$$Q_{ch} = 1 + 6\lambda / h \quad (\lambda \text{ は気体の平均自由行程})$$

□ キャピラリーフロー領域

- 気体がエッチングホール内を流れることによるダンピング

$$R_C + R_E = 8\pi\mu \left(\frac{h_c}{Q_{tb}} + \Delta_E r_0 \right)$$

気体がエッチングホールから外部へ射出することによる寄与 (係数はFEMシミュレーション結果から決定)

- 相対流速係数: 希薄ガス下での気体の速度分布の補正を行うため

$$Q_{tb} = 1 + 4\lambda / r_0$$

各領域におけるダンピング (2)

- 中間領域: 3つの寄与の和
 - 中間領域に流れ込む際の気体の流量分布の変化に伴うダンピング R_{IS}
 - エッチングホールに向かって上昇する方向へ流れが変化することによるダンピング R_{IC}
 - 穴あき率が高い場合に顕著になる流速分布の変化に伴うダンピング R_{IB}
- これらの式に含まれる未定定数は, FEM解析の結果を用いて決定されている.

未定定数を決定する為に実施されたFEM解析のパラメータセット

Table 2 Dimensions used in 2D axisymmetric FEM simulations. All combinations (except those having $r_0/h \geq 4$) are used in the extraction

Symbol	Description	Values	Unit (m)
λ	Mean free path	0, 65	10^{-9}
h	Gap height	0.5, 1, 2, 3	10^{-6}
h_c	Perforation length	0.5, 1, 2, 5	10^{-6}
r_0	Perforation radius	0.5, 1, 2, 5	10^{-6}
r_0/r_x	Ratio	0.25, 0.4, 0.5, 0.6, 0.68, 0.75, 0.81, 0.85, 0.875, 0.9, 0.925, 0.95	

実験との比較

構造

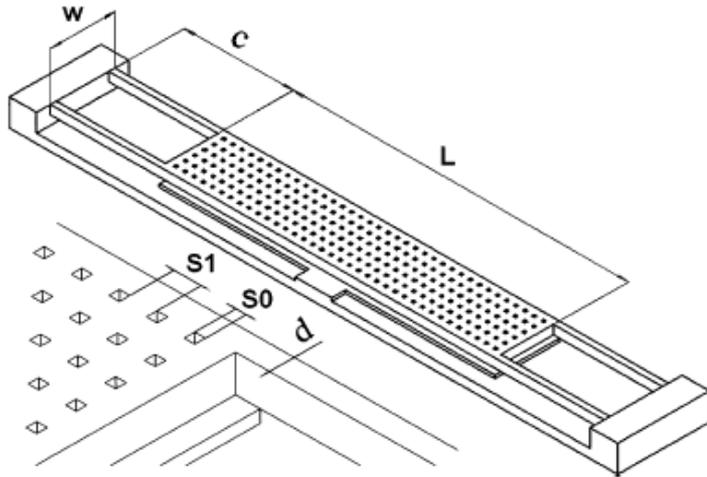


Fig. 1 Geometrical shape and dimensions of the vibrating structures

Table 1 Dimensions of measured topologies

Type	L (μm)	W (μm)	$M \times N$	$L:W$	s_0 (μm)	s_1 (μm)	q %
A	372.4	66.4	36×6	6:1	5.0	5.2	24
B	363.9	63.9	36×6	6:1	6.1	3.9	37
C	373.8	64.8	36×6	6:1	7.3	3.0	50
D	369.5	64.5	36×6	6:1	7.9	2.3	59
E	363.8	123.8	36×12	3:1	6.2	3.8	38
F	363.8	243.8	36×24	3:2	6.2	3.8	38

ダンピング係数の比較

Table 3 Relative errors of the compact models

Type	Δ_1 (%) M1	Δ_2 (%) M2	Δ_3 (%) M3	Δ_4 (%) M4
A	-23.53	-25.74	-33.51	-33.27
B	-16.36	-18.06	-21.02	-21.96
C	-5.21	-6.59	-4.11	-6.65
D	-14.66	-15.72	-12.46	-15.29
E	-17.27	-18.94	-19.03	-20.14
F	-4.77	-6.70	-5.19	-6.52

Table 4 Relative error of "perforation cell" compact models

Type	Δ_5 (%) M5	Δ_6 (%) M6
A	-17.25	-16.92
B	-7.81	-9.00
C	7.38	4.36
D	-3.55	-6.83
E	-11.45	-12.73
F	0.37	-1.08

ダンピング係数について、6種類のダンピングモデルによる計算値と実験値を比較したところ、MEMSpiceでも採用しているモデルが平均して最も実験に整合している。