

アナログ計算機方式による 電気機械マルチフィジクス解析手法

年吉 洋

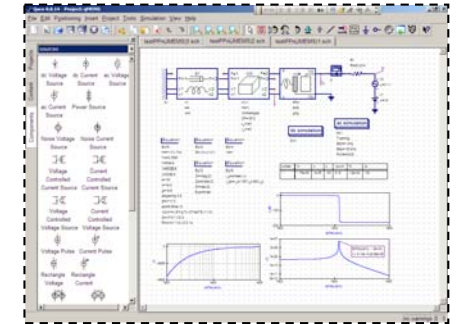
東京大学 先端科学技術研究センター(本務)
東京大学 生産技術研究所マイクロナノメカトロニクス国際研究センター(兼務)



東京大学生産技術研究所
Institute of Industrial Science, the University of Tokyo

本日の内容

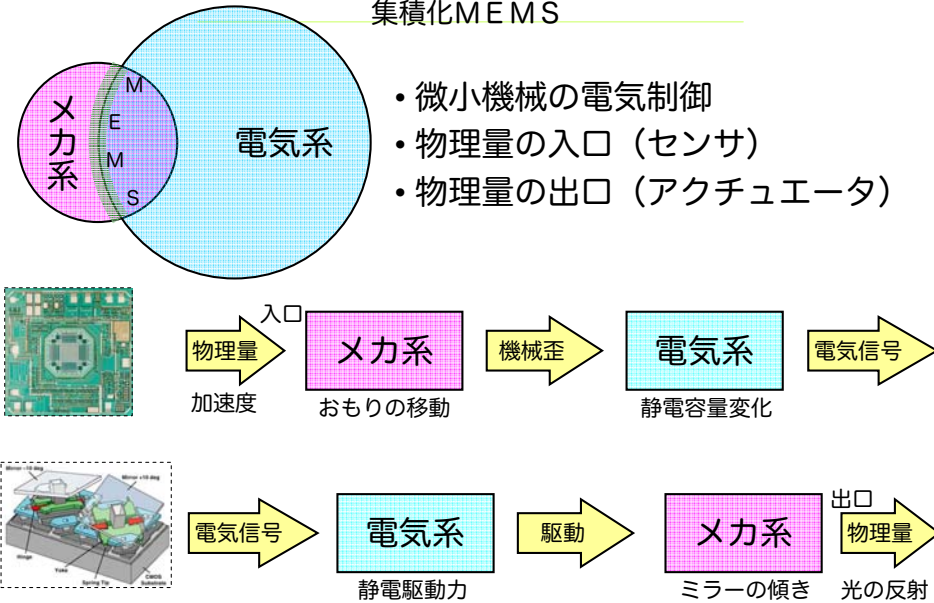
- ➔ 1. マルチフィジクス解析の必要性
- 2. 運動方程式の等価回路モデル
- 3. LTspiceによる連成解析
- 4. デモ(過渡応答、AC解析)
- 5. 解析精度
- 6. まとめ



Hiroshi Toshiyoshi © 2010, <hiro@iis.u-tokyo.ac.jp>, RCAST, Univ. of Tokyo, http://toshi.iis.u-tokyo.ac.jp/

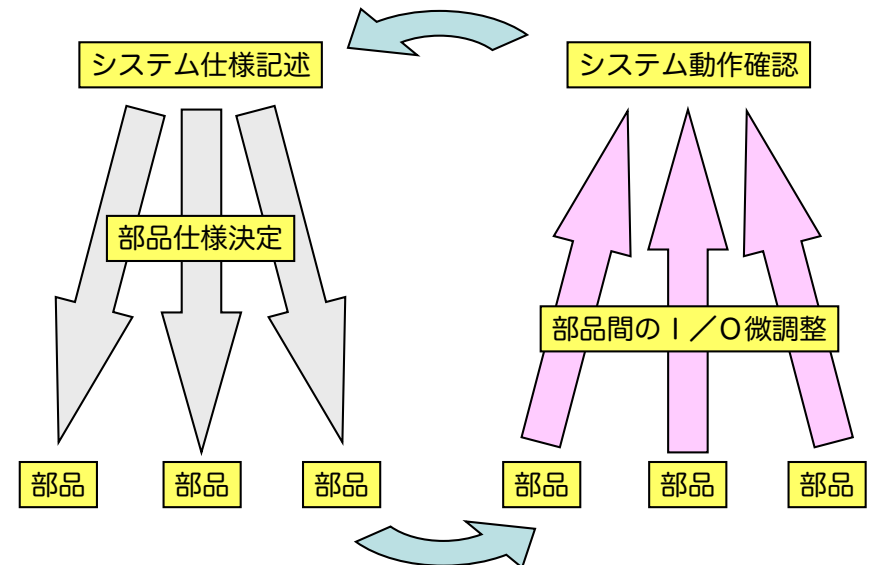
マルチフィジクス解析の必要性

集積化MEMS

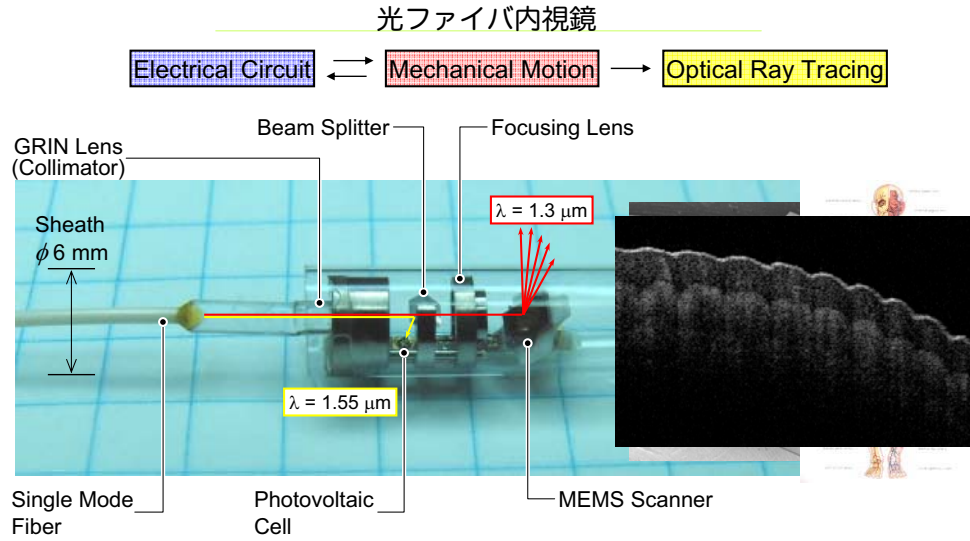


マルチフィジクス解析の必要性

トップダウン・ボトムアップの両方で設計製作

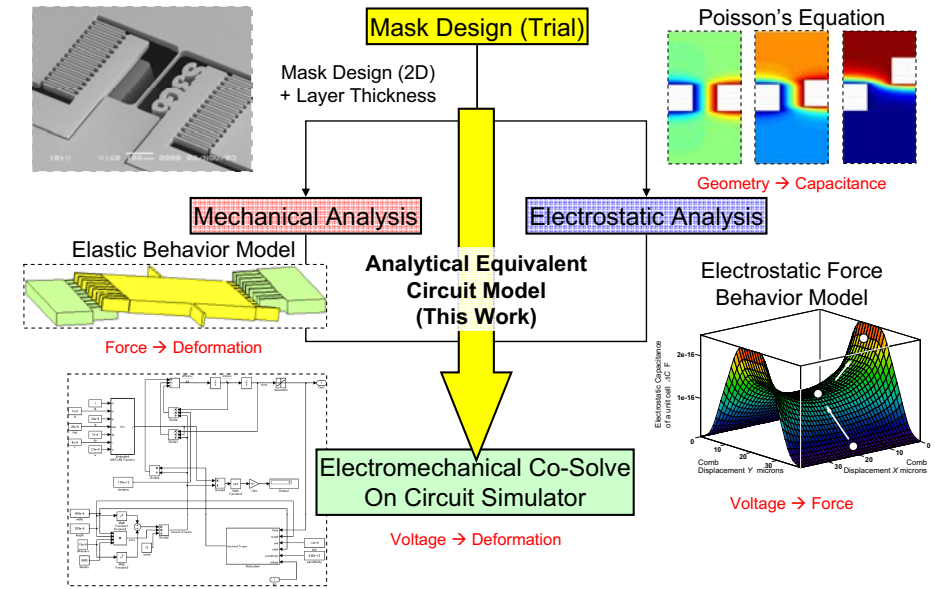


マルチフィジクスの例



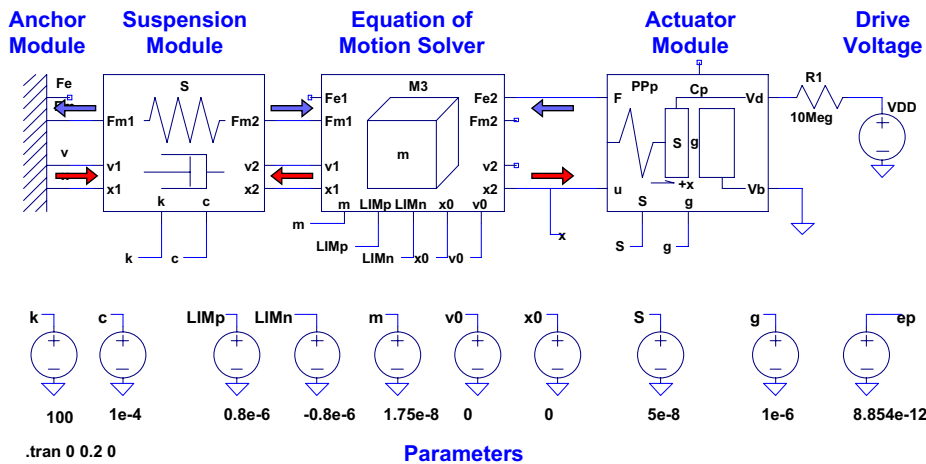
Reference: Muneki Nakada, Chongho Chong, Atsushi Morosawa, Keiji Isamoto, Takuya Suzuki, Hiroyuki Fujita, and Hiroshi Toshiyoshi, "Optical coherence tomography by all-optical MEMS fiber endoscope." IEICE Elec. Express, 2010.

MEMS連成解析の手法



SPICEベースの解析手法

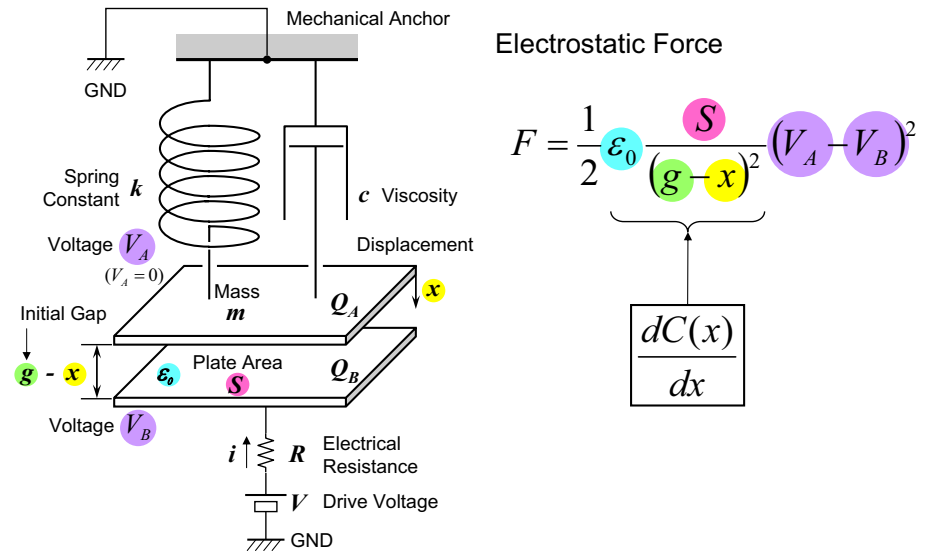
発生力は**電流**として伝達、変位と速度は**電圧**として分配



T. Konishi, S. Maruyama, T. Matsushima, M. Mita, K. Machida, N. Ishihara, K. Masu, H. Fujita, H. Toshiyoshi, "A SPICE-based Multi-physics Seamless Simulation Platform for CMOS-MEMS," in Proc. 2010 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2010), The Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan, Sept. 22-24, 2010, G-6-5 (Late News Paper, oral presentation).

静電アクチュエータの解析モデル

平行平板型静電アクチュエータ



一般的な機械-電気アナロジー

機械系
$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + k x = F$$

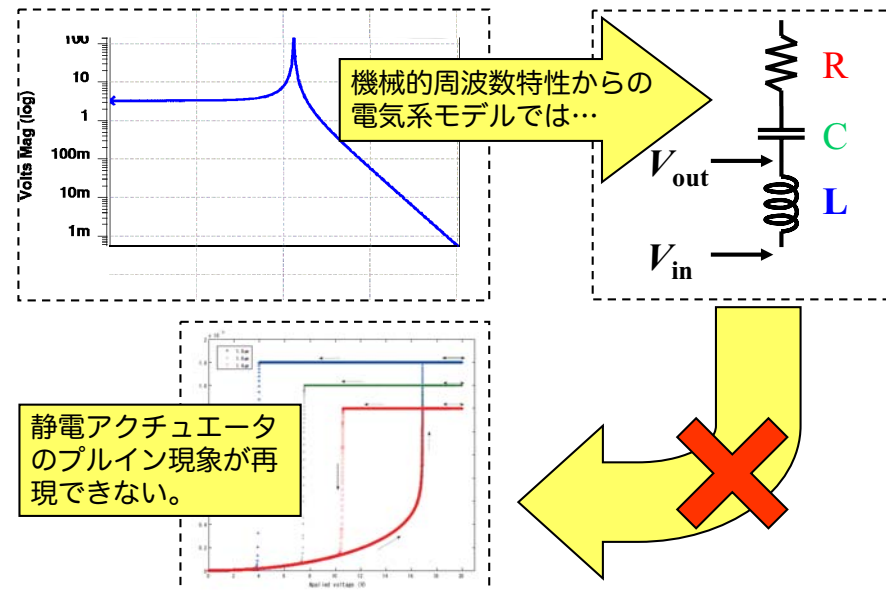
加速度 速度 変位 力

電気系
$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = V$$

電流の時間変化 電流 電荷 電圧

一般的な電気機械変換の弱点

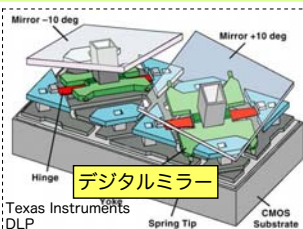
LCR置き換えモデル



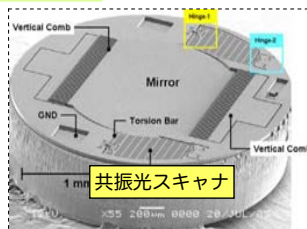
大振幅特性・プルイン現象を利用したMEMS



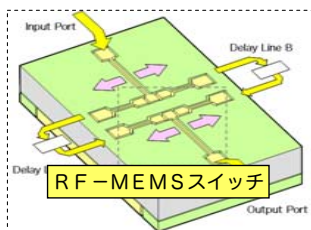
→ 非線形領域の見積もり (安定制御領域)



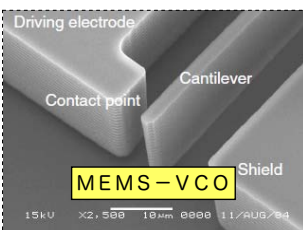
→ タイミング制御、ピクセル明度調整



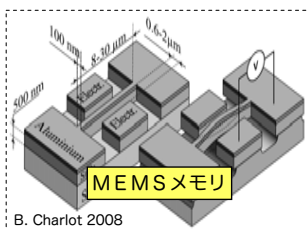
→ 電圧パルス高、幅による共振振幅の制御



→ スイッチ・タイミング制御



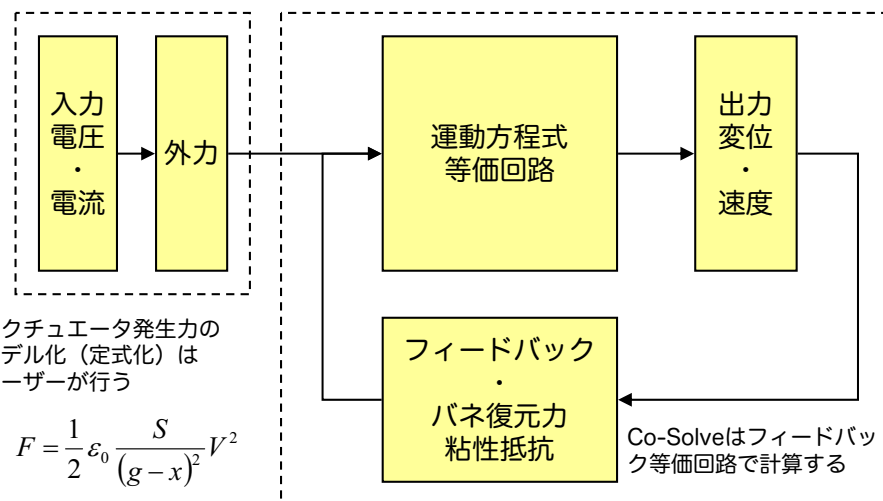
→ 印加電圧による発振周波数制御



→ 印加電圧による保持時間制御

本研究の手法

アナログ回路シミュレータを用いて運動方程式を解く

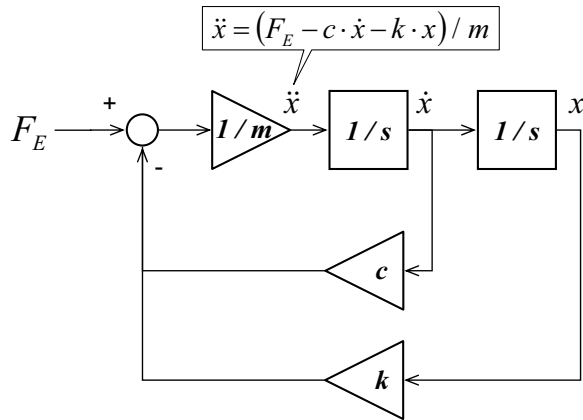


アクチュエータ発生力のモデル化 (定式化) はユーザーが行う

$$(例) F = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{S}{(g-x)^2} V^2$$

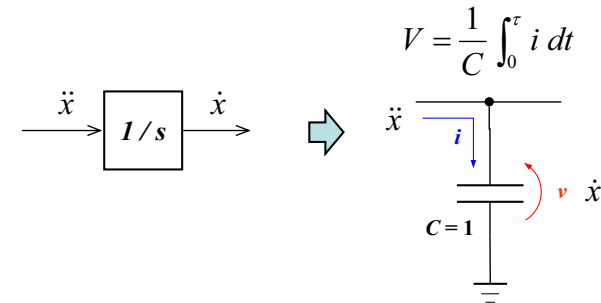
一般的な運動方程式の解法

2次の微分方程式 → 積分フィードバック回路



電気回路による微分の表現

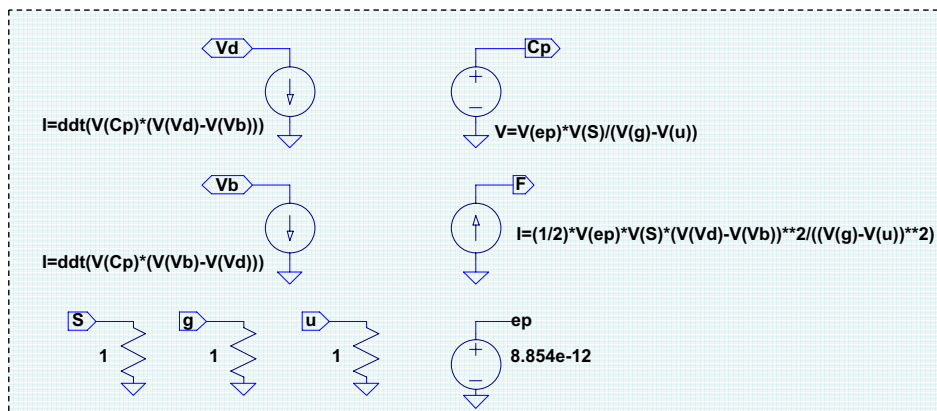
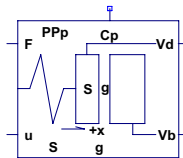
電流入力 → 電圧出力



理想的な静電容量（等価回路の計算機モデル）にはリーク電圧、寄生容量、非線形性は無い！

静電アクチュエータの等価回路モデル

平行平板型静電アクチュエータ



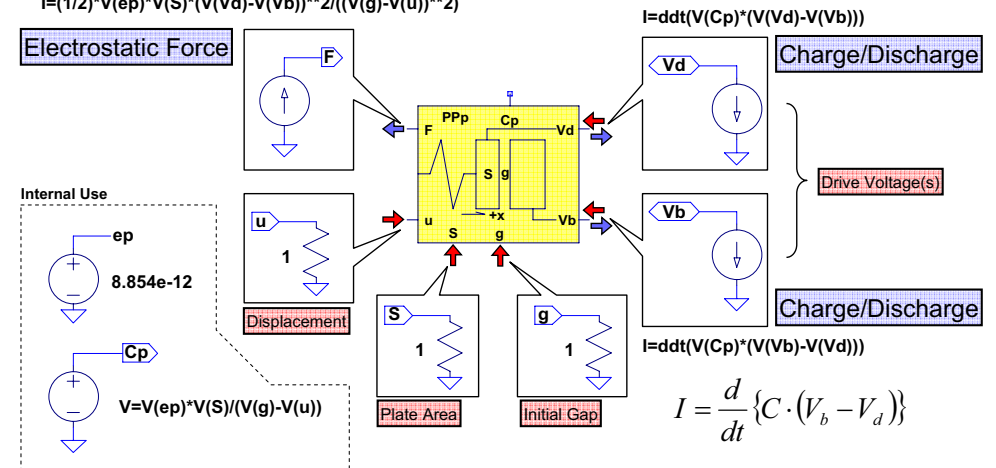
静電アクチュエータの等価回路モデル

平行平板型静電アクチュエータ

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{S}{(g-x)^2} (V_d - V_b)^2$$

$$I = (1/2) * V(ep) * V(S) * (V(Vd) - V(Vb))^2 / ((V(g) - V(u))^2)$$

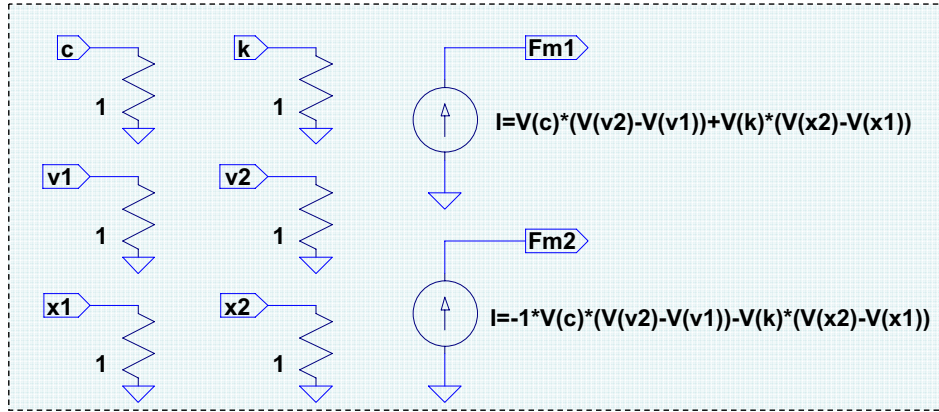
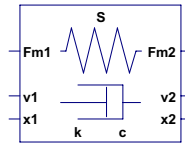
$$I = \frac{d}{dt} \{ C \cdot (V_d - V_b) \}$$



Collaborative work with JAXA, Tokyo Institute of Technology and NTT Advanced Technology, Japan

粘弾性サスペンションの等価回路モデル

バネ+ダッシュポッド



粘弾性サスペンションの等価回路モデル

バネ+ダッシュポッド

Visco-elastic Force (Left)

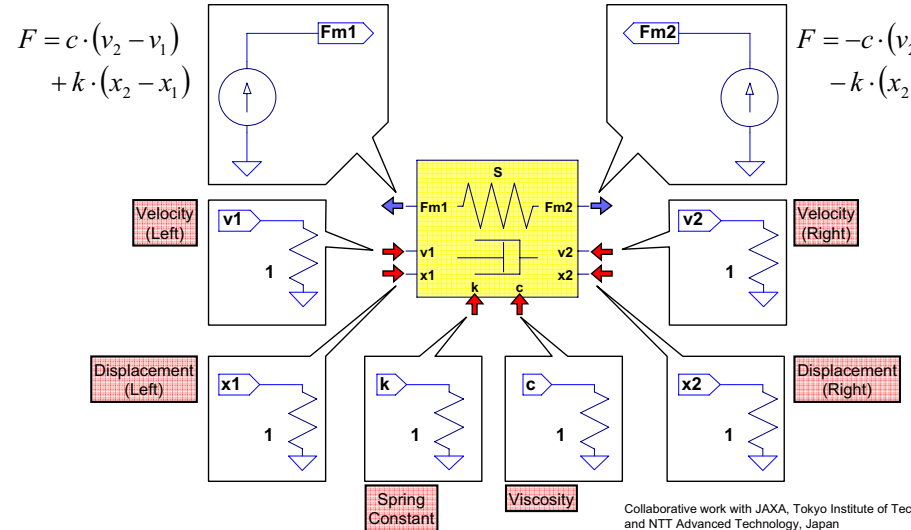
$$I = V(c) \cdot (V(v_2) - V(v_1)) + V(k) \cdot (V(x_2) - V(x_1))$$

$$F = c \cdot (v_2 - v_1) + k \cdot (x_2 - x_1)$$

Visco-elastic Force (Right)

$$I = -1 \cdot V(c) \cdot (V(v_2) - V(v_1)) - V(k) \cdot (V(x_2) - V(x_1))$$

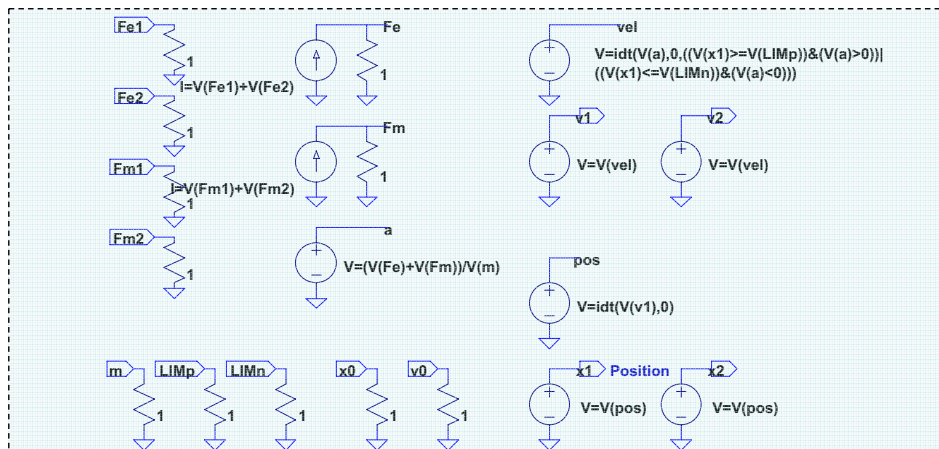
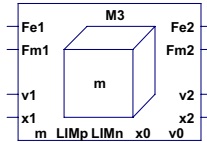
$$F = -c \cdot (v_2 - v_1) - k \cdot (x_2 - x_1)$$



Collaborative work with JAXA, Tokyo Institute of Technology and NTT Advanced Technology, Japan

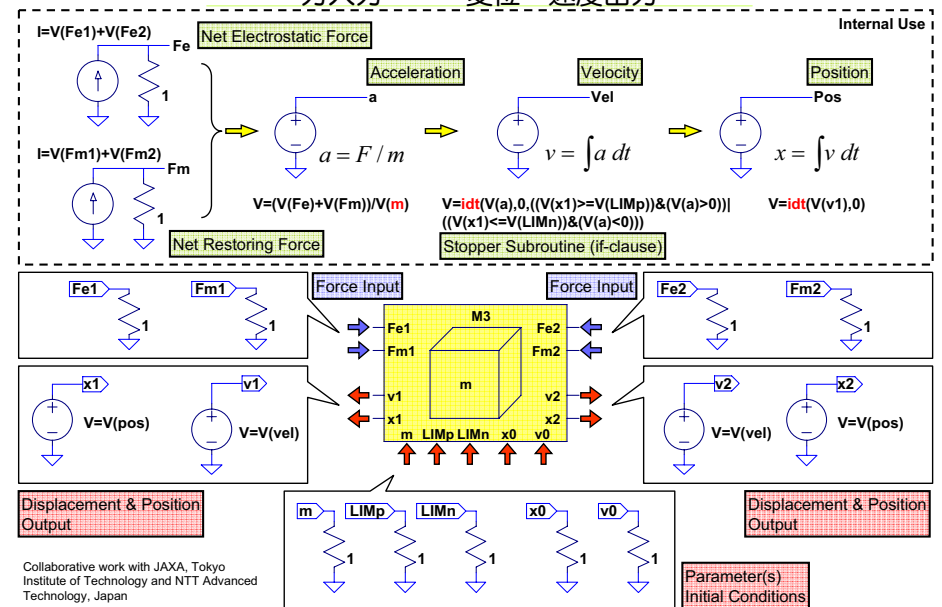
運動方程式ソルバーの等価回路モデル

力入力 → 変位・速度出力



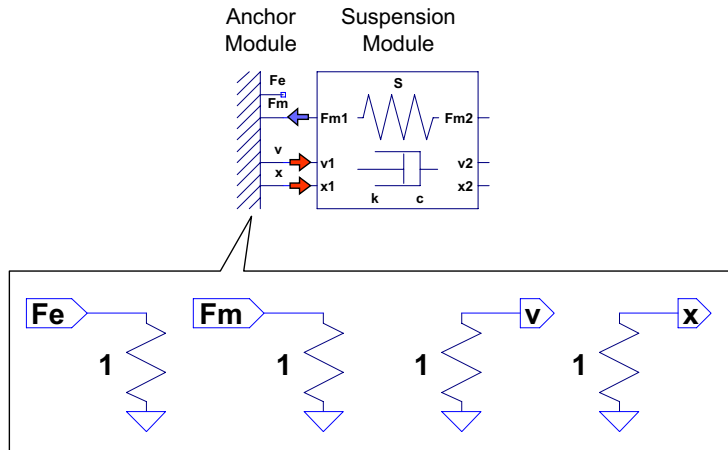
運動方程式ソルバーの等価回路モデル

力入力 → 変位・速度出力



機械アンカーの等価回路モデル

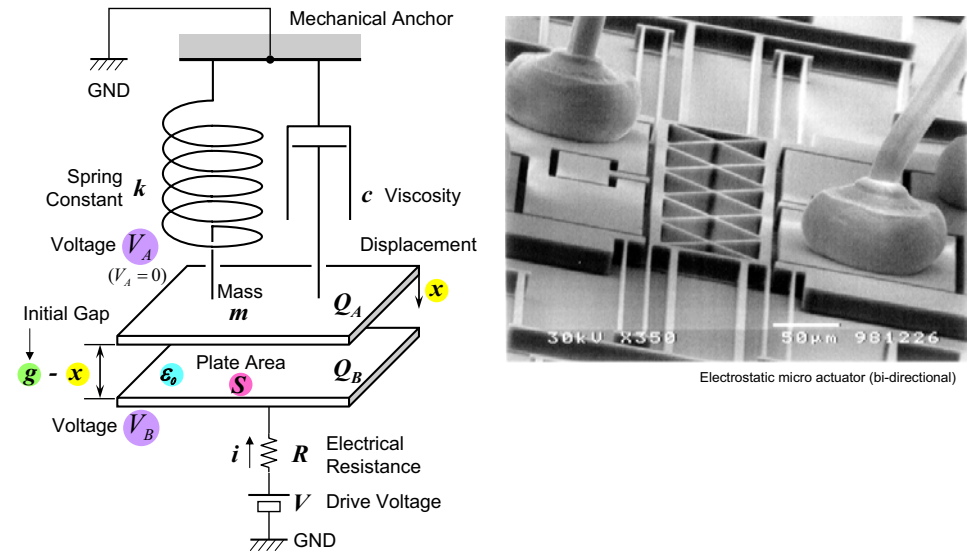
電流・電圧のターミネータ



Collaborative work with JAXA, Tokyo Institute of Technology and NTT Advanced Technology, Japan

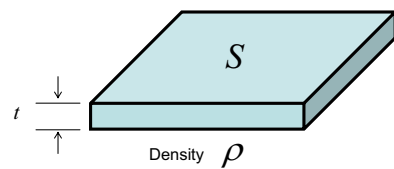
解析例 (1)

平行平板型静電アクチュエータのプルイン解析



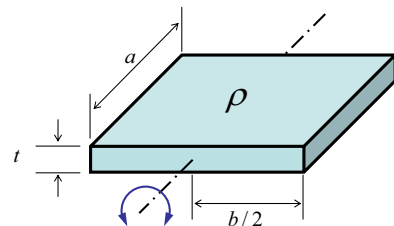
パラメタの抽出方法 (1 / 3)

集中質量 m



$$m = \rho S t$$

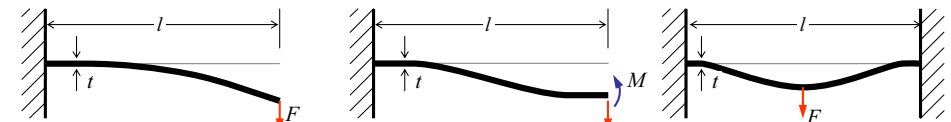
Moment of Inertia I_m



$$I_m = \rho a t \int_{-b/2}^{b/2} x^2 dx = \rho \frac{ab^3 t}{12}$$

パラメタの抽出方法 (2 / 3)

梁の曲げ理論によるサスペンションのバネ定数 k



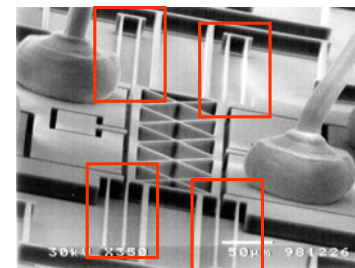
$$u(x) = \frac{F}{6EI} x^2 (3l - x)$$

$$k = \frac{3EI}{l^3}$$

$$u(x) = \frac{F}{12EI} (3lx^2 - 2x^3)$$

$$k = \frac{12EI}{l^3}$$

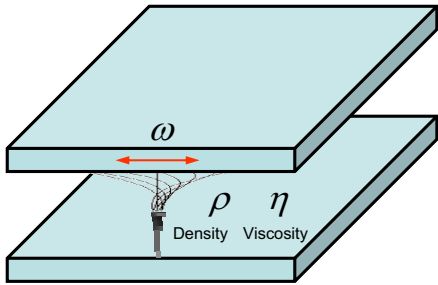
$$k = \frac{192EI}{l^3}$$



$$= \text{[Diagram of a beam with force F]} \times 4 = \frac{1}{2} \times \frac{12EI}{l^3} \times 4$$

パラメタの抽出方法 (3 / 3)

空気の層流による粘性 c



Laminar Flow Viscosity

$$c = S\sqrt{2\rho\omega\eta}$$

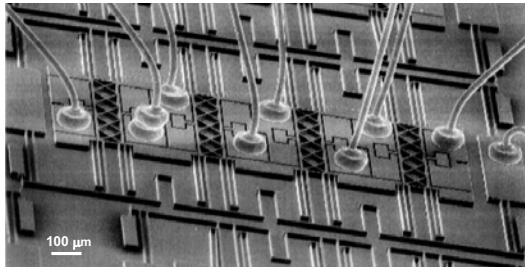
$$Q_{\text{air}} = \frac{\sqrt{mk}}{c}$$

$$Q_{\text{total}}^{-1} = Q_{\text{material}}^{-1} + Q_{\text{air}}^{-1} + Q_{\text{support}}^{-1} + Q_{\text{acoustic radiation}}^{-1} + \dots$$

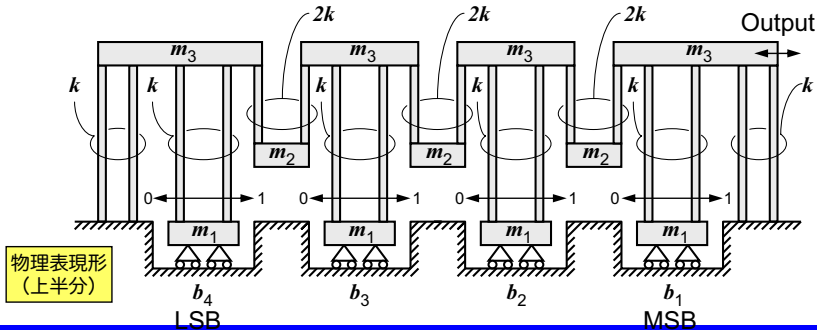
$$c_{\text{total}} = \frac{\sqrt{mk}}{Q_{\text{total}}}$$

分岐モデルの検証

MEMDAC (Micro Electro Mechanical Digital/Analog Converter)



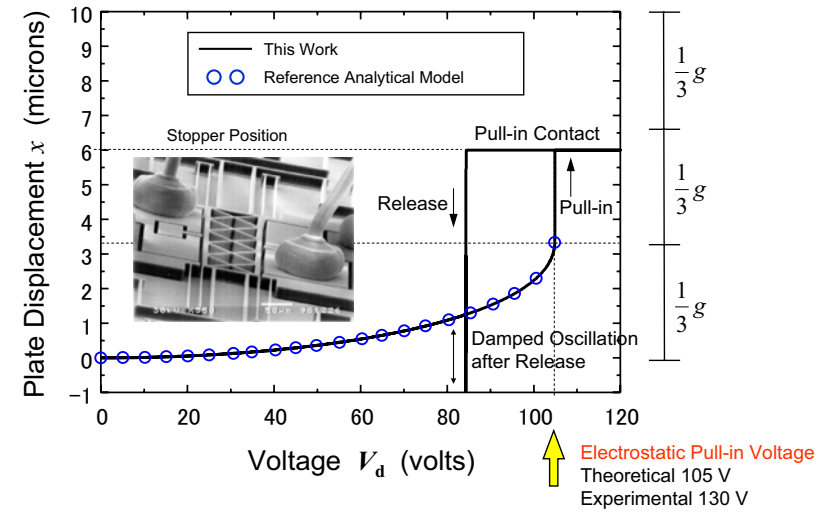
実際の構造



物理表現形 (上半分)

解析例 (1)

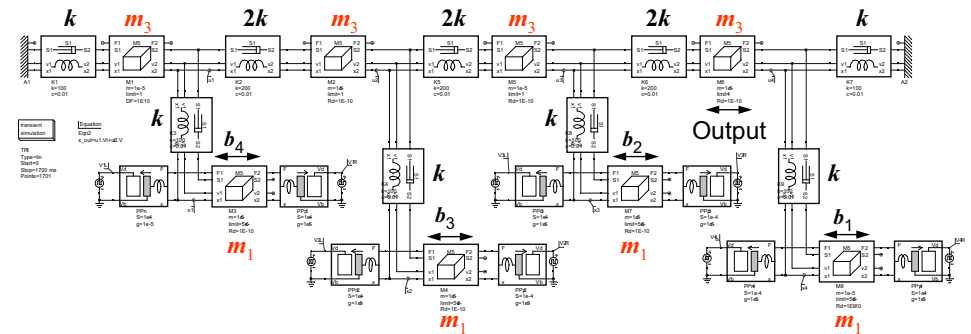
平行平板型静電アクチュエータのプルイン解析



Collaborative work with JAXA, Tokyo Institute of Technology and NTT Advanced Technology, Japan

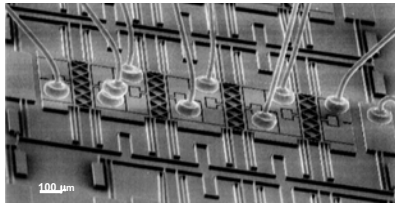
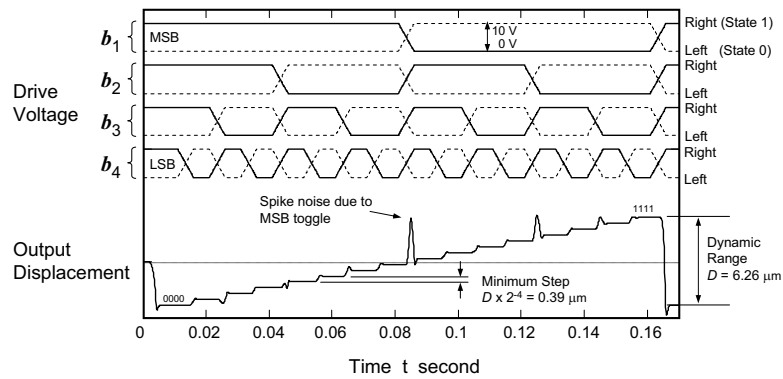
分岐モデルの検証

4ビットMEMDACのQucs等価回路モデル (8連立2階微分方程式)



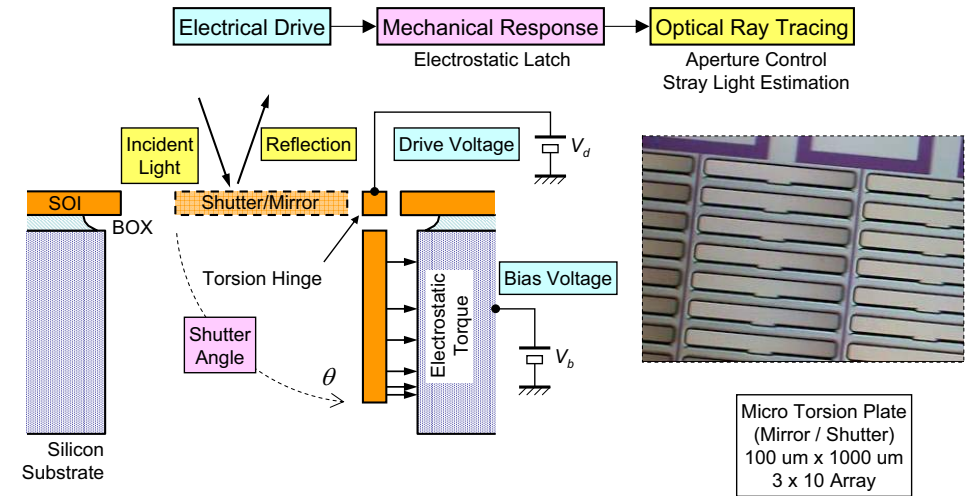
分岐モデルの検証

ローカルなバイナリ・デジタル変位入力 → D/A変換 → 変位出力

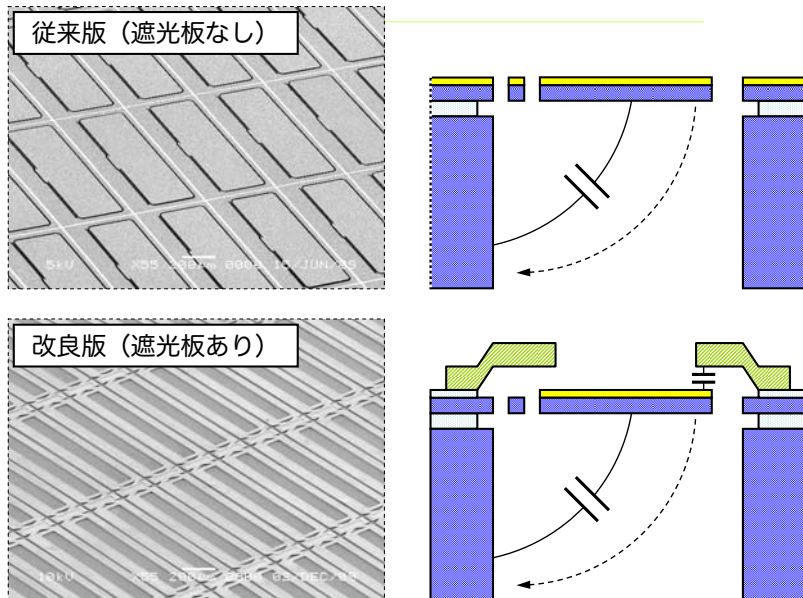


解析例 (2)

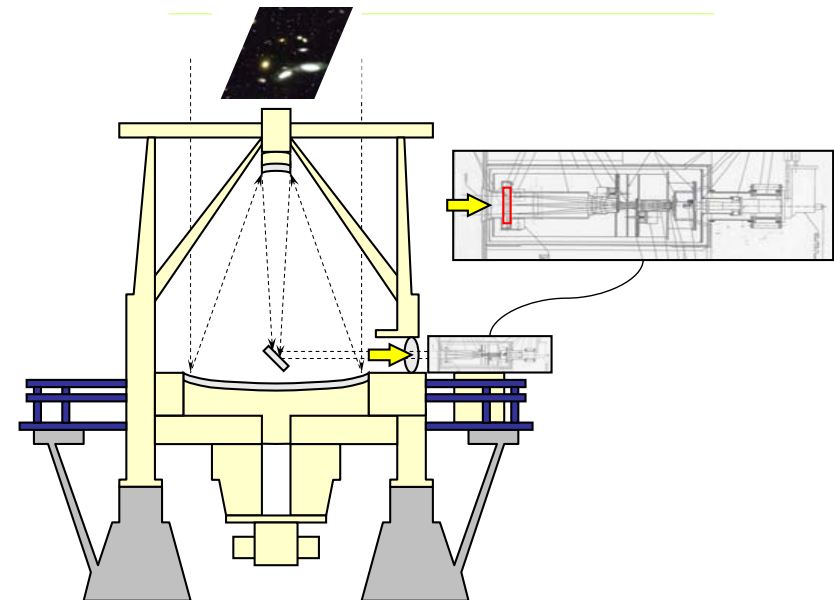
電圧 → トーションミラー駆動 → 光の反射



遮光板付きシャッタアレイ

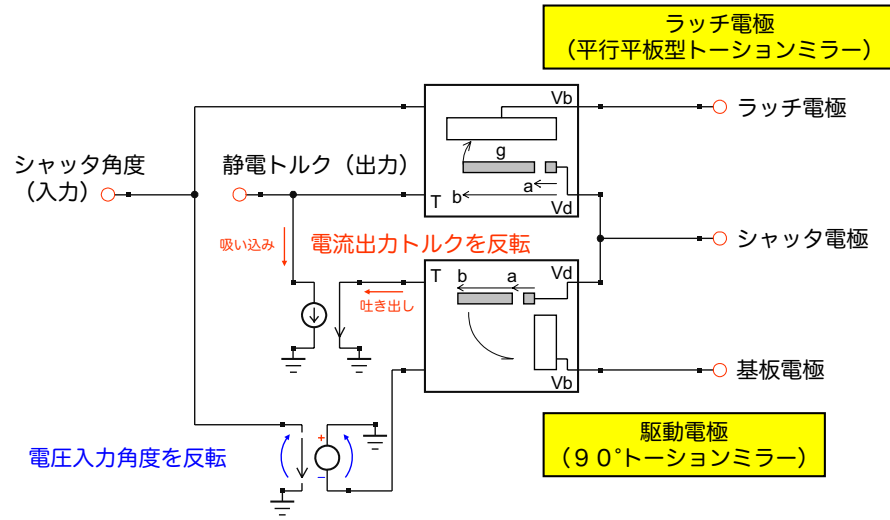


東大理学部天文センター アタカマ天文台

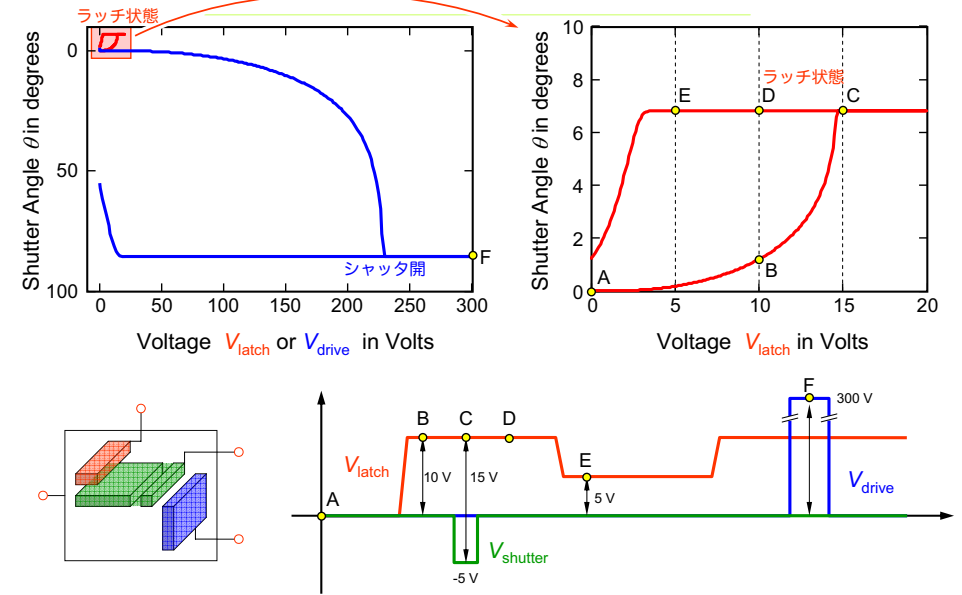


等価回路モデルの中身

平行平板と90°トーションミラーの組み合わせ

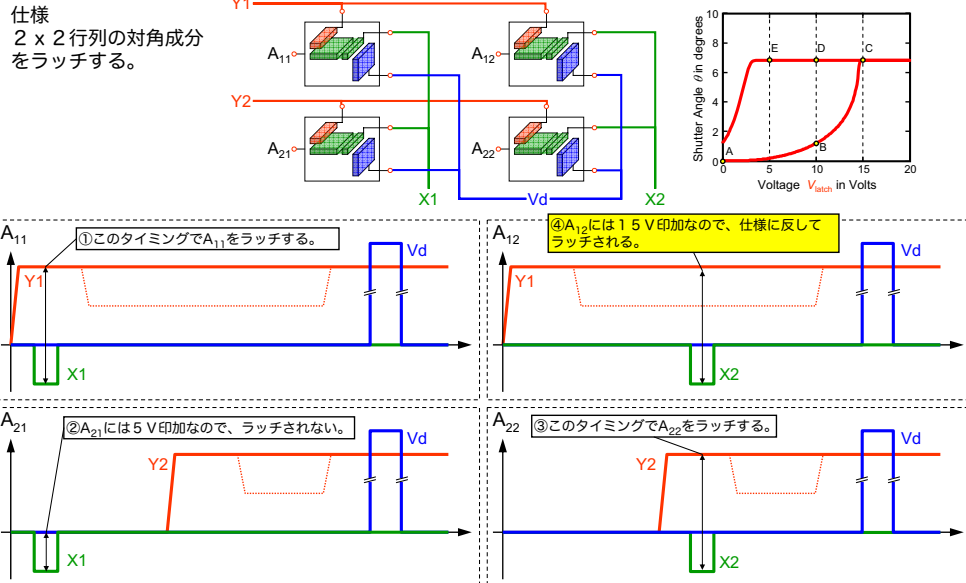


ラッチ用アドレッシング信号のタイミング (基本)



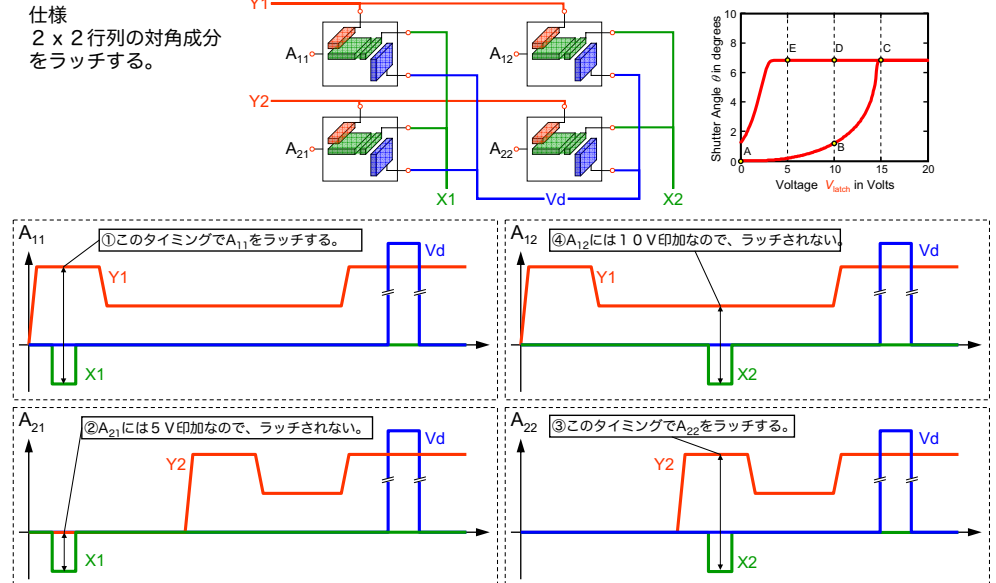
ラッチ電圧のタイミングチャート (不完全動作)

ラッチ電圧が常時高いと、他の行とのクロストークを発生



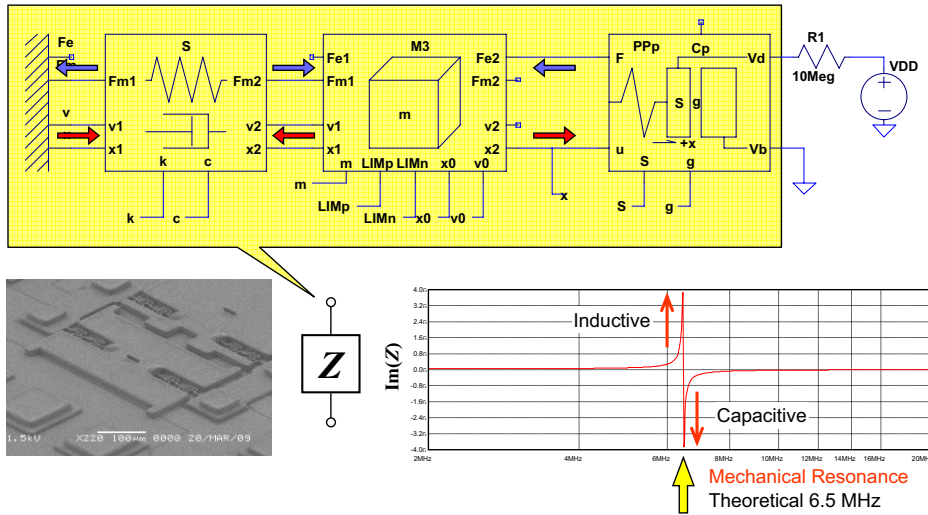
ラッチ電圧のタイミングチャート (完全動作)

ラッチ電圧を一瞬下げて、他の行とのクロストークを回避



解析例 (4)

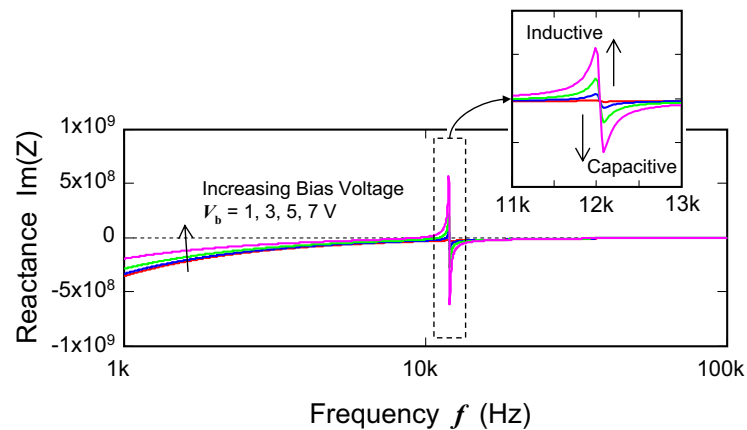
静電アクチュエータのインピーダンス解析



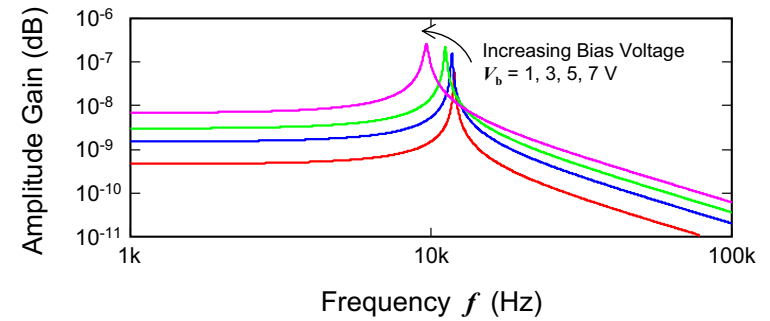
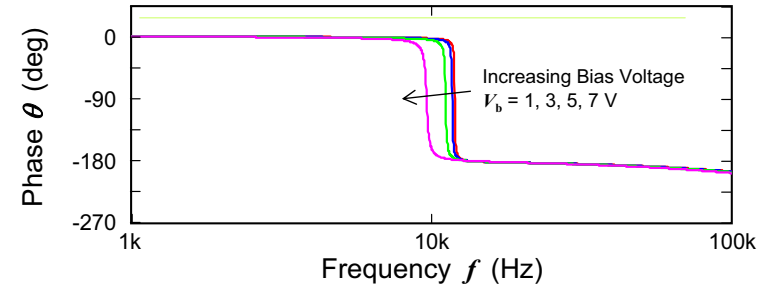
Collaborative work with JAXA, Tokyo Institute of Technology and NTT Advanced Technology, Japan

リアクタンス成分のバイアス電圧依存性

共振L成分 (インダクタンス) の発生にはバイアス電圧が必要

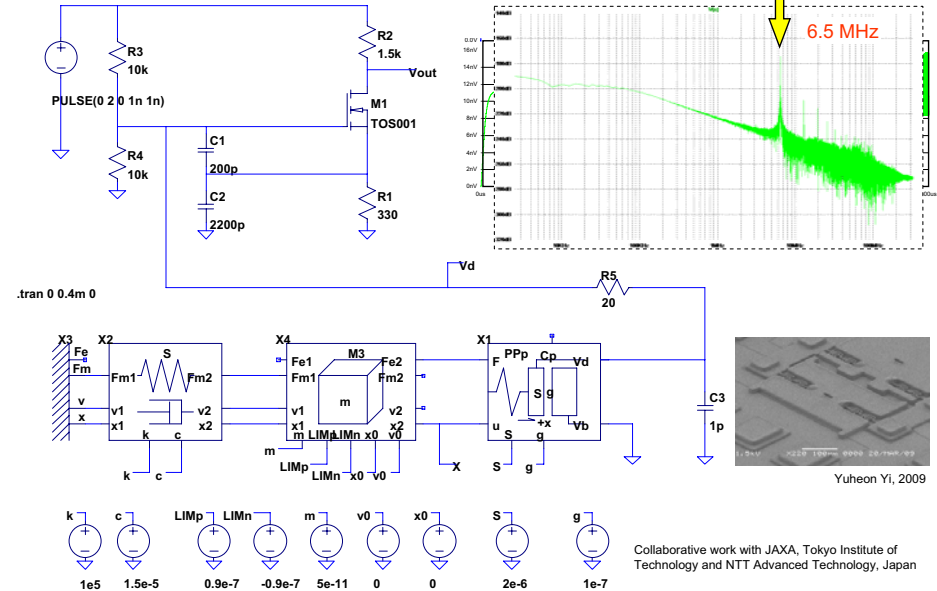


負のバネ定数効果 (バイアス電圧↑で共振周波数↓)



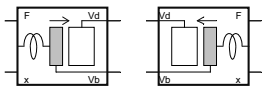
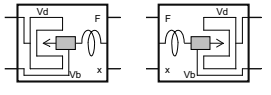
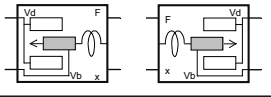
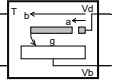
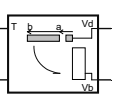
解析例 (5)

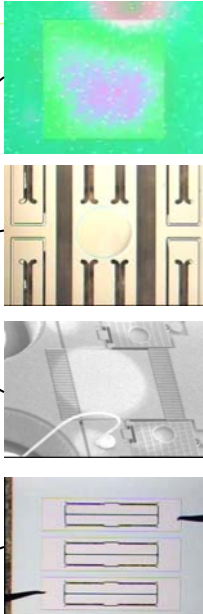
シリコン共振子を用いた発振回路のバイアス点検証



Collaborative work with JAXA, Tokyo Institute of Technology and NTT Advanced Technology, Japan

その他のアクチュエータモデル

No.	Sub Circuit Model	Circuit Symbol
1	Parallel Plate Electrostatic Actuator	
2	Comb-Drive Actuator 1	
3	Comb-Drive Actuator 2	
4	Parallel-Plate Torsion Mirror	
5	Large Angle Torsion Mirror	



まとめ

1. **運動方程式の等価回路モデル**を用いて、電気-機械変換アナロジーを意識することなく、電気機械の連成解析する手法を提案した。
2. **LTspice**を用いた連成解析プラットフォームを構築した。Sub-circuitモデルにより、アイコンを並べる感覚でMEMSアクチュエータの解析が可能になった。
3. **Verificationモデル**により、AC解析の精度を保証した。過渡応答（プルイン）の解析誤差を見積もる手法を提案した。分岐モデルによる複雑なサスペンション・ネットワークも表現可能。
4. 発展形として、非線形従属電源モデルを用いた静電容量センサや、他の物理モデル（光線追跡、音波、回転系）も可能である。**市販の解析ツールがサポートしていない物理現象にも対応可能。**

マルチフィジクス解析手法の比較

	Conventional Separated Design		Multi-Physics Simulation		
	MEMS[1]	LSI	Ref [2]	Ref [3]	This Work
MEMS mechanical simulation capability	FEM	---	Limited types of MEMS module provided.	Equation defined analytical model	Equation defined analytical model
Electrical Circuit Simulation Capability	---	Spice	Yes but requires net-list generation	Yes	Yes Spice-based
Simulation Time	Lengthy		Fast	Fast	Fast
Parametric Analysis (Parameter Sweep)	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Extension to RF Analysis	No	Yes	No	Yes	Yes
Deviation Analysis	No	Yes	No	Yes	Yes
Multi-physics Analysis	Yes but needs extra analysis module.		No	Yes	Yes
Mask Design Layout Capability	On separate circuit-only CAD environment.		No	No	Under Development

[1] S. D. Senturia, Sensors & Actuators A67 (1998) 1.

[2] Y. Nishimori, H. Ooiso, S. Mochizuki, N. Fujiwara, T. Tsu-chiya, G. Hashiguchi, Jpn. J. Appl. Phys. 48 (2009) 124504.

[3] M. Mita, S. Maruyama, Y. Yi, K. Takahashi, H. Fujita, H. Toshiyoshi, IEEJ Trans. (2010), in press.