

MEMSpiceを用いたパラメトリック解析



株式会社 NTTデータ数理システム 科学技術部

望月俊輔

(motiduki@msi.co.jp)

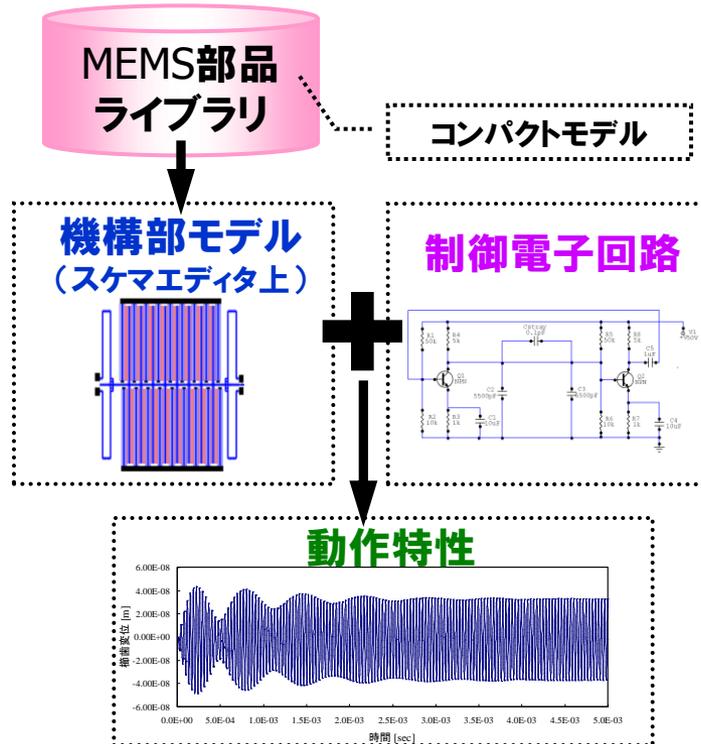
Agenda

- MEMSpice概要
- パラメトリック解析
- パラメータ値の自動抽出の試み
- まとめ

MemsONEによるMEMS-電子回路連成解析

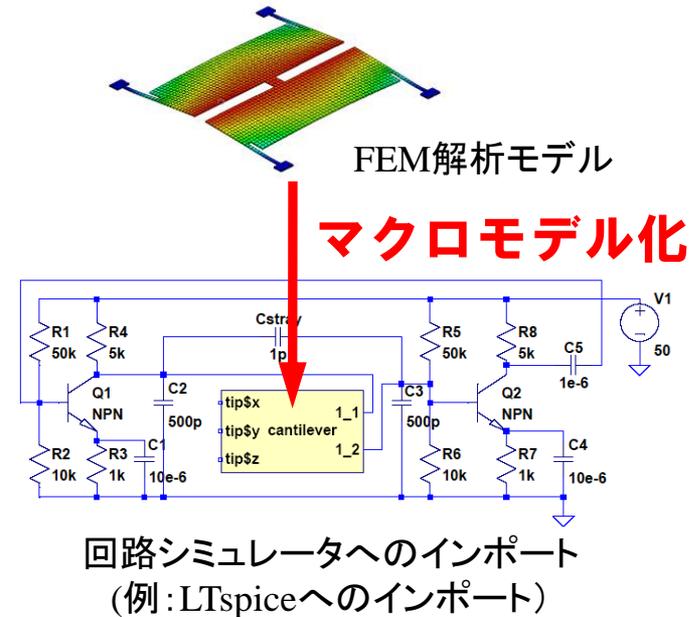
① 部品のパラメータ値を振りながら動作検討をしたい

連成解析ツール MEMSpice

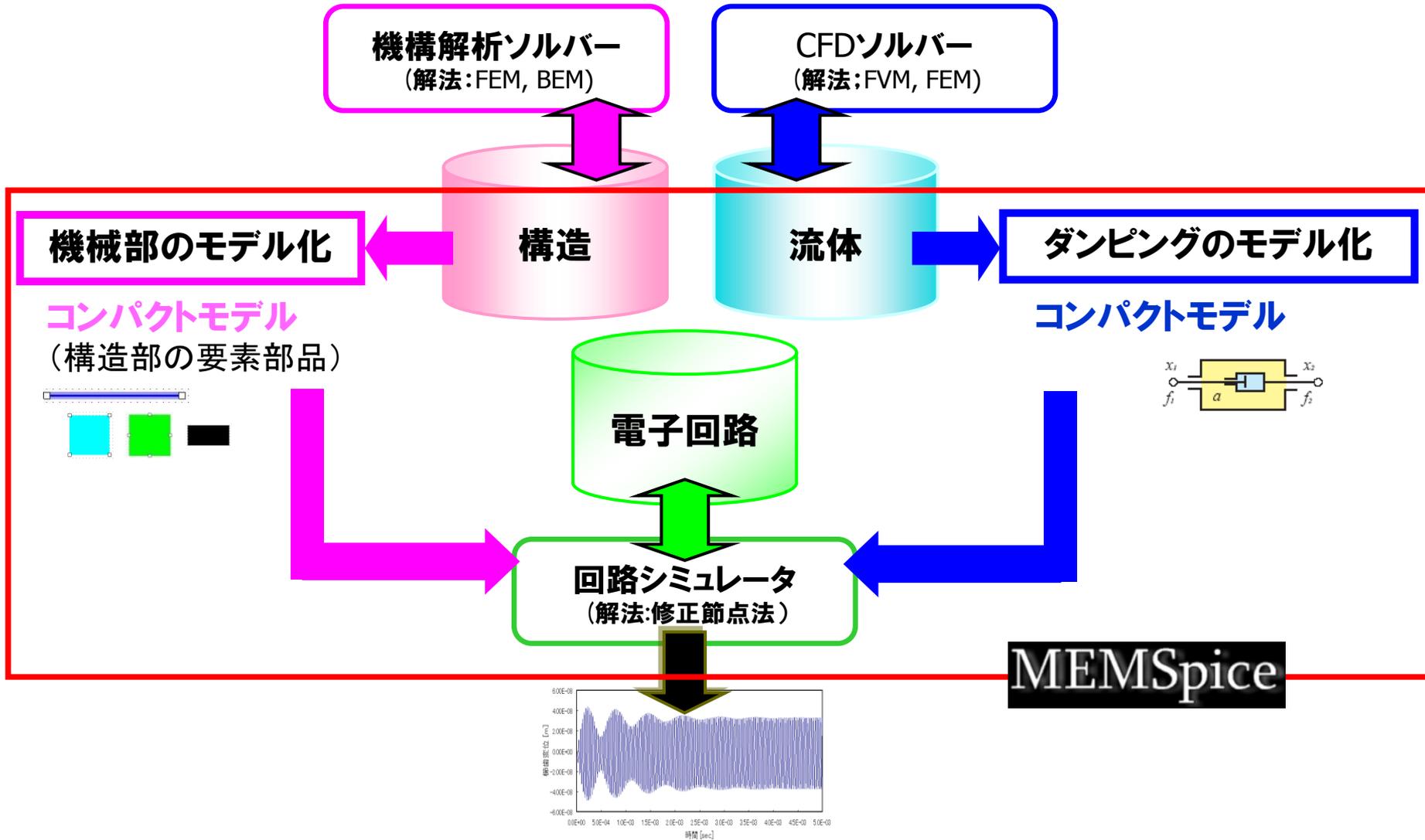


② FEM解析モデルを回路シミュレーションに繋げたい

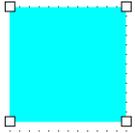
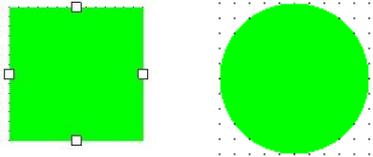
マクロモデル抽出ツール
(MemsONE V4.1で追加)



MEMSpiceにおける機械-回路連成解析手法

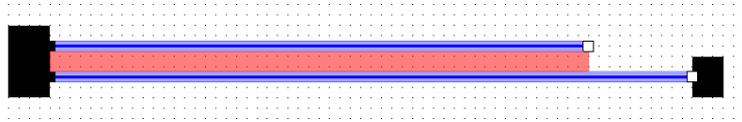


部品(MEMS素子)の種類

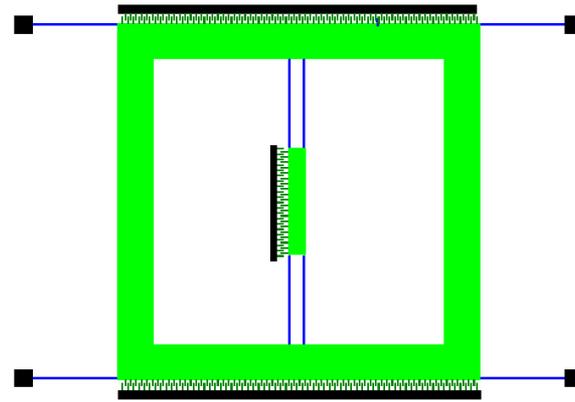
<p>線形梁</p>	 <p>テーパ付にも対応</p>	<p>弾性平板</p>	 <p>平板自身の変形有</p>
<p>非線形梁</p>	 <p>長軸方向の張力の効果を考慮</p>	<p>櫛歯</p>	 <p>静電相互作用を担う</p>
<p>積層梁</p>	 <p>複数の材料を積層した梁</p>	<p>静電ギャップ</p>	 <p>静電相互作用を担う</p>
<p>剛体平板</p>		<p>ピエゾ抵抗梁</p>	 <p>表面に複数のピエゾ抵抗を埋め込んだ梁</p>
<p>剛体フレーム</p>		<p>アンカー</p>	

MEMS素子による機構部の構築例

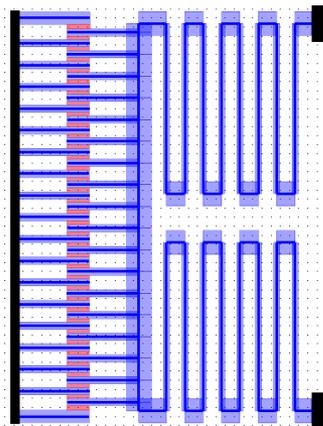
静電駆動カンチレバー



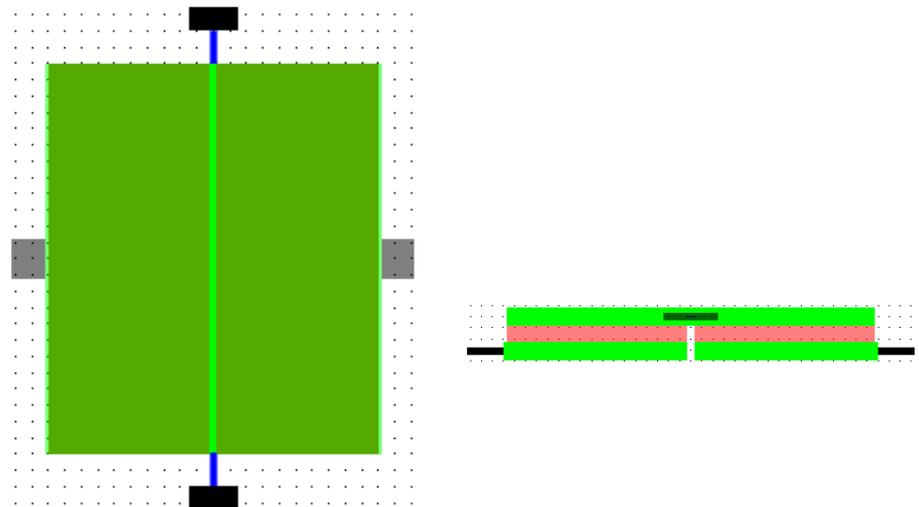
振動型ジャイロセンサ



櫛歯アクチュエータ

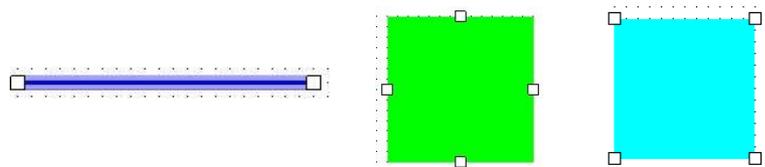


トーシヨンミラー



MEMS素子の物理モデル

梁 / 平板

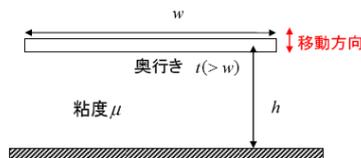
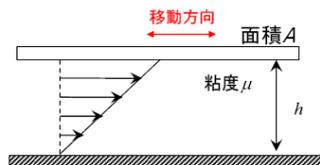


$$\vec{F} = \mathbf{m} \frac{d\vec{v}}{dt} + \mathbf{k}\vec{x} + \mathbf{B}\vec{v}$$

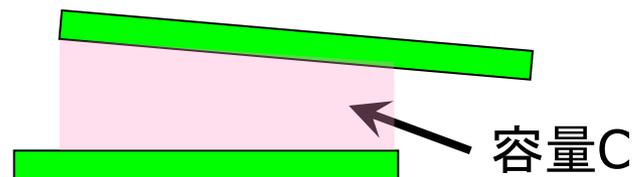
[慣性力]+[弾性力]+[ダンピング力]

- 慣性力、弾性力は、弾性力学/剛体力学の手法に基づいて導出。
- 雰囲気流体によるダンピングのモデル
(スライドフィルムダンピング、スクイーズフィルムダンピング、ドラッグフォースダンピング)

スライドフィルムダンピング スクイーズフィルムダンピング



静電ギャップ



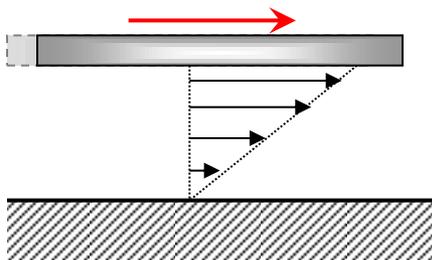
静電引力 $F_i = \frac{1}{2} V^2 \left(\frac{\partial C}{\partial x_i} \right)$

電流 $I = \frac{d}{dt}(CV)$

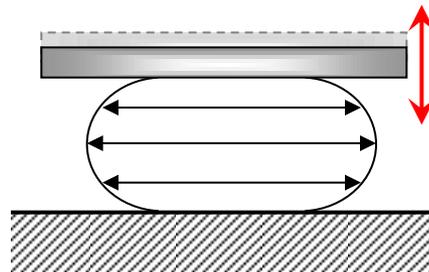
電極間の容量の解析式に基づいて、電流と静電引力を計算。

エアダンピングモデル

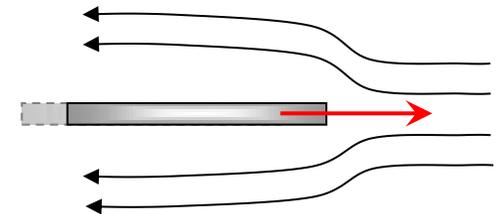
- 3次元空間で運動/変形する機械部品のダンピングを与える為、3種類の寄与の重ね合わせで記述。
 - スライドフィルムダンピング
 - スクイズフィルムダンピング
 - ドラッグフォースダンピング
- 各々の寄与は、流体方程式(e.g. Reynolds方程式)を解析的に解いて得られる閉じた式で表わされる。
→パラメトリックなモデル



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

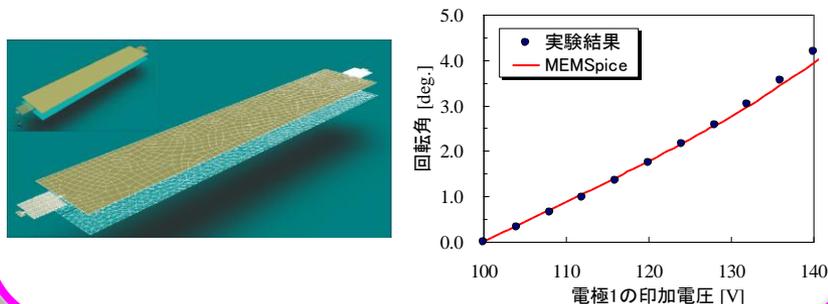


ドラッグフォースダンピング

MEMSpiceを用いた解析例

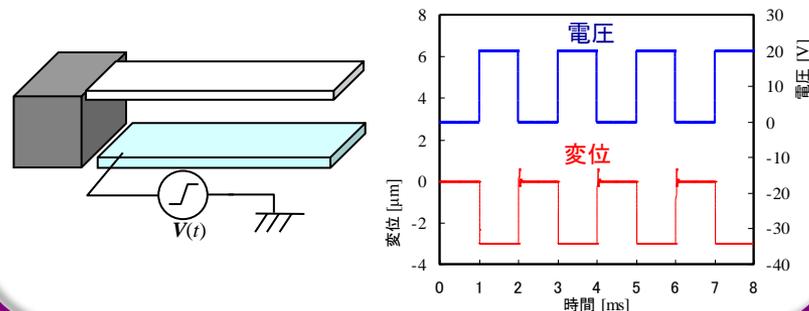
アクチュエータ

(例) 静電駆動ミラーデバイス



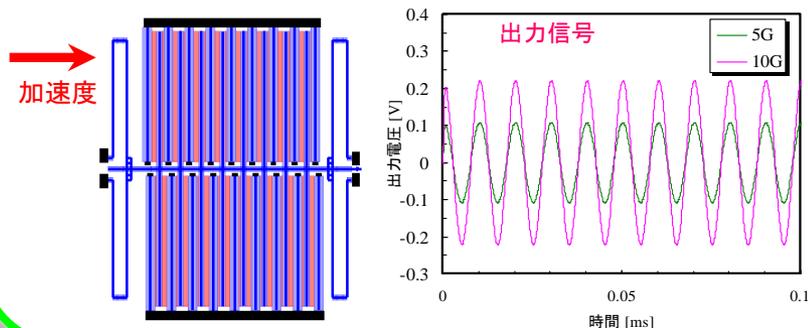
接触特性

(例) 静電駆動カンチレバーのスイッチング特性



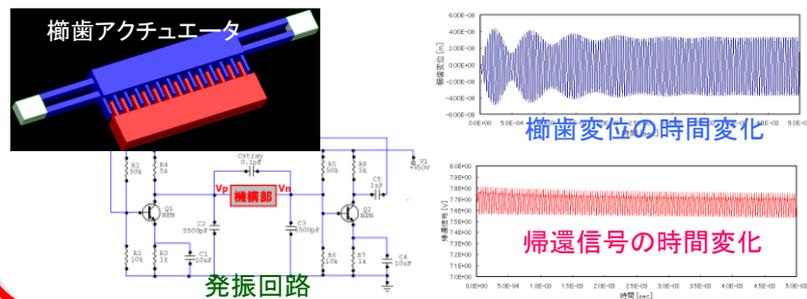
センサ

(例) 容量型1軸加速度センサ



フィードバック系

(例) 自励発振歯車デバイス



設計パラメータ値を如何に決めるか?

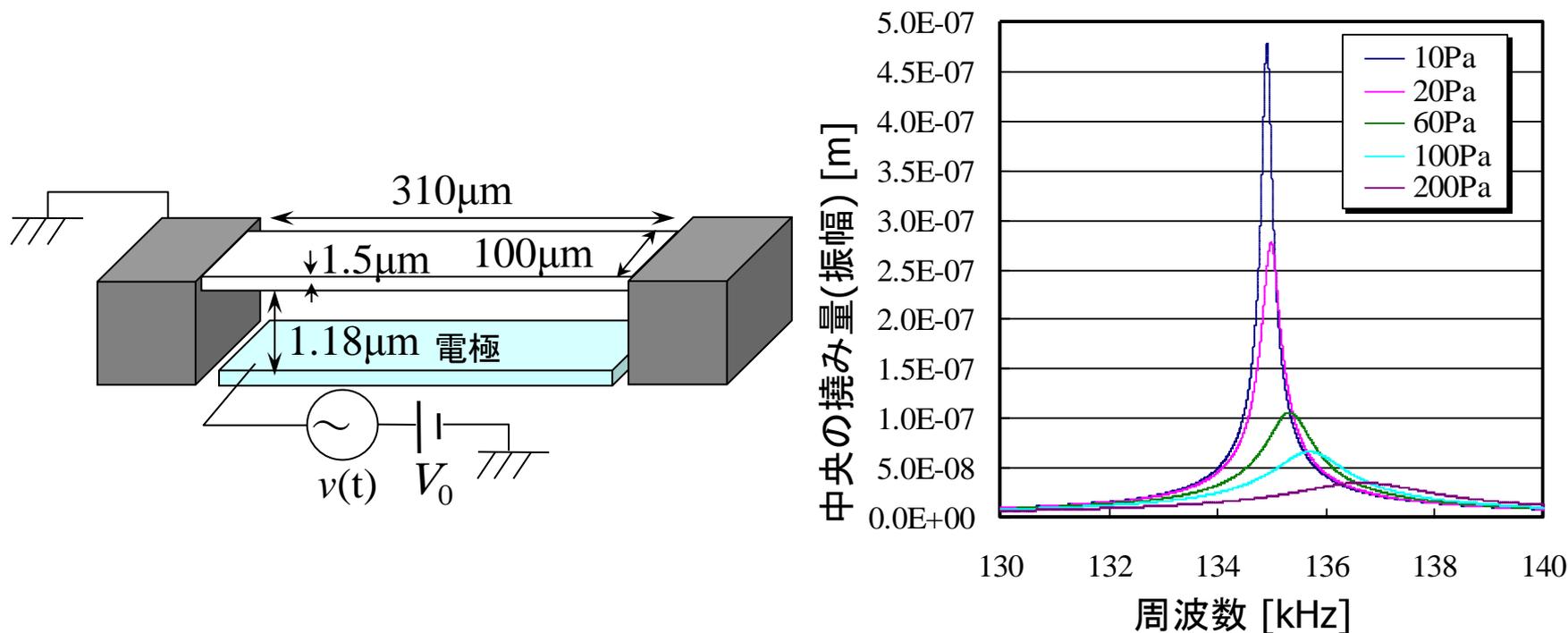
回路シミュレータ, もしくはその関連ツールが提供する支援機能の例

- パラメトリック解析機能
- 最適化手法を用いた部品パラメータ値の自動抽出

パラメトリック解析

- 部品パラメータの値を変化させてシミュレーションを行い、一つの結果に纏めて出力.
- 回路シミュレータでは、典型的な機能.
- 部品パラメータの値が結果に与える影響を系統的に解析可能.

(パラメトリック解析の例) 振動駆動両持ち梁の振幅の雰囲気気圧力依存性



MEMSpiceのパラメトリック解析コマンド

□ .ST: パラメータスイープコマンド

- .ST LIN [パラメータ名] [開始値] [終了値] [増分]
- .ST OCT|DEC [パラメータ名] [開始値] [終了値] [点数]
- .ST LIST [パラメータ名] [値1] [値2]

□ .PARAM: パラメータ指定コマンド

- ユーザがパラメータ名を指定し、そのパラメータを部品に設定できる.

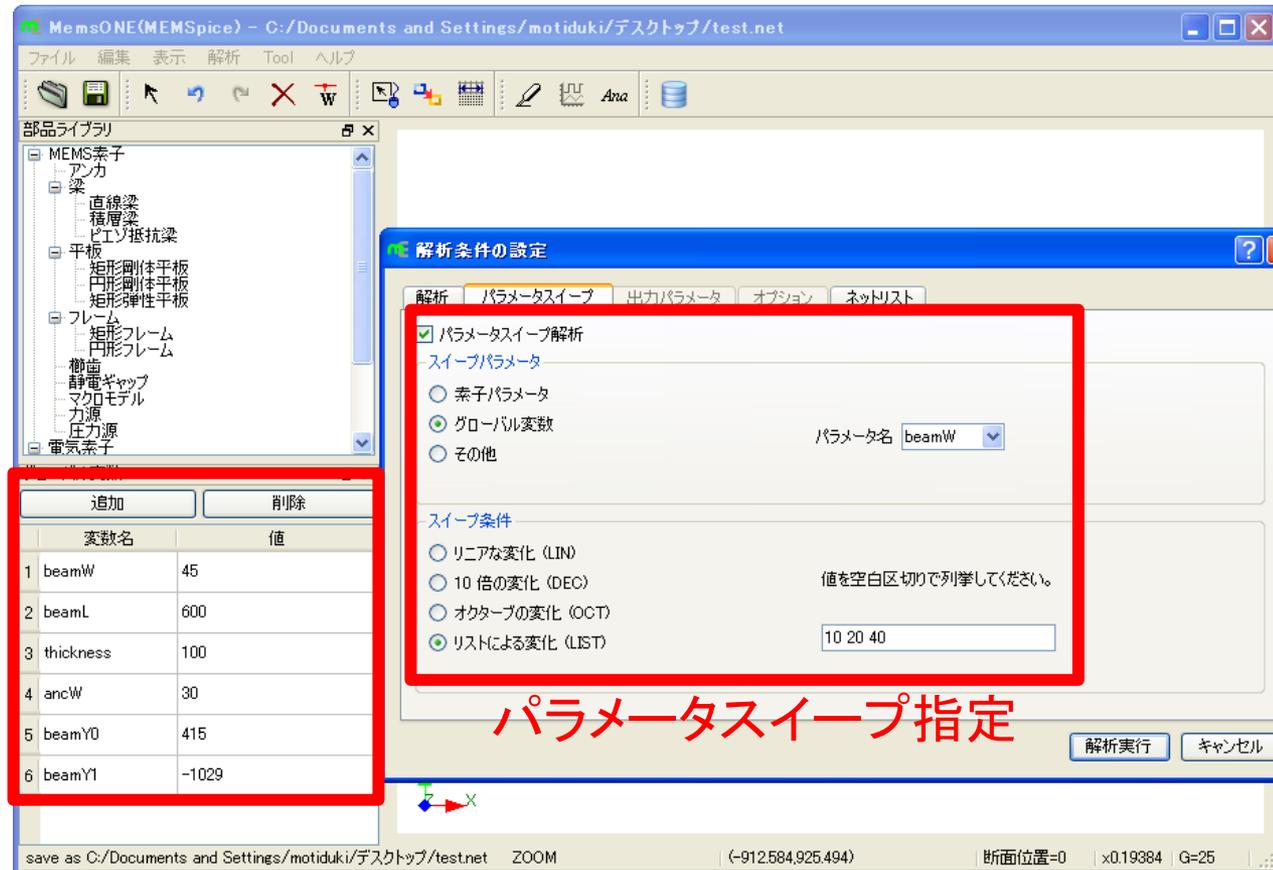
■ 例

```
.PARAM WIDTH=5u LEN=100u TH=200u
_Beam1 n1 n2 modelBeam0 L={LEN} W={WIDTH} T={TH} ...
_RPlate1 n3 n4 modelRPlate0 L={LEN} W={WIDTH} T={TH} ...
```

□ .MEASURE: 解析結果のポスト処理コマンド

- MAX: 最大, MIN: 最小, DELAY: 遅延, CROSS: 交差
- AVG: 平均, RMS: 実行値, PP: Peak-to-peak

パラメトリック解析のGUI上での設定



パラメータ指定

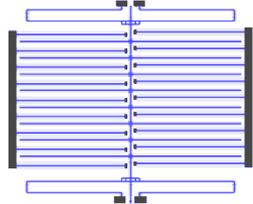
パラメータスイープ指定

※一部、未リリース。

最適化手法を用いた部品パラメータ値の自動抽出

部品パラメータの値を振りながら試行錯誤→多大な手間

部品パラメータ
の最適値は？



L=L1, T=T1

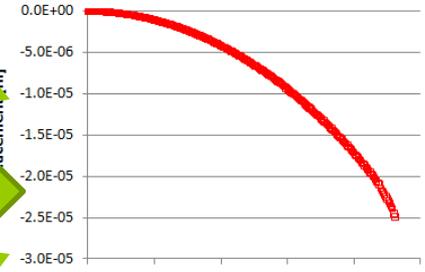
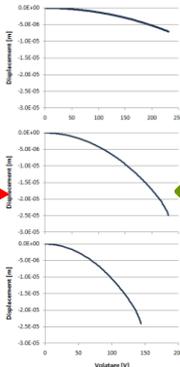
⋮

L=L1, T=T2

⋮

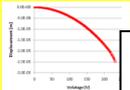
L=L2, T=T3

MEMSpiceによる
シミュレーション



目標とする動作特性

最適化手法を用いたパラメータ値の効率的な決定



目標とする動作特性

最適化対象パラメータ情報
(パラメータ名、探索範囲等)

モデルファイル

最適化エンジン

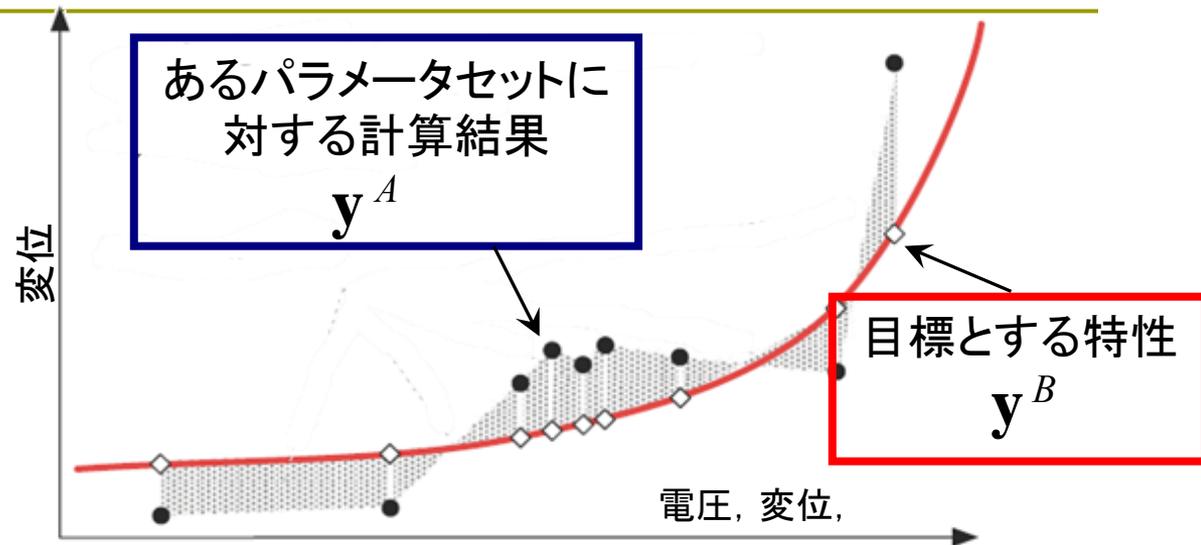
部品パラメータの
最適値のセット

L=L1, T=T2

MEMSpice

何を最適化するのか?

「目標とする特性」と「あるパラメータセットに対する計算結果」の差を、目的関数値として求め、それを最適化(最小化)する



① Euclid 距離

$$\delta = \|\mathbf{y}^A - \mathbf{y}^B\| = \sqrt{\sum_i (y_i^A - y_i^B)^2}$$

絶対値の大きな点が誤差を支配→絶対値の小さな点は乖離する傾向

② 多目的測度*

$$\delta = \theta \sum_i \frac{|y_i^A - y_i^B|}{\bar{y}^A} + (1 - \theta) \sum_i \frac{|y_i^A - y_i^B|}{y_i^A} \quad \left[\bar{y}^A = \frac{1}{N} \sum_i |y_i^A| \right]$$

規格化した絶対誤差 相対誤差

③ ずれ部分の面積

上図の灰色の部分. 点がクラスター化しているときに有効.

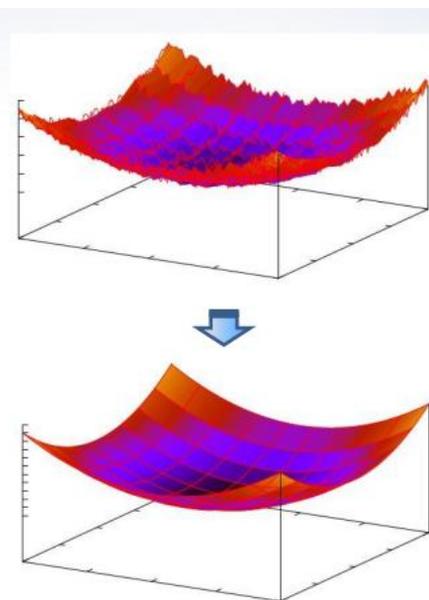
(*) T. Begin, B. Baynat, F. Sourd, A. Brandwajn, "A DFO technique to calibrate queueing models," Computers & Operations Research, vol.37(2), pp.273-281 (2010).

最適化手法

□ Derivative Free Optimization*を適用

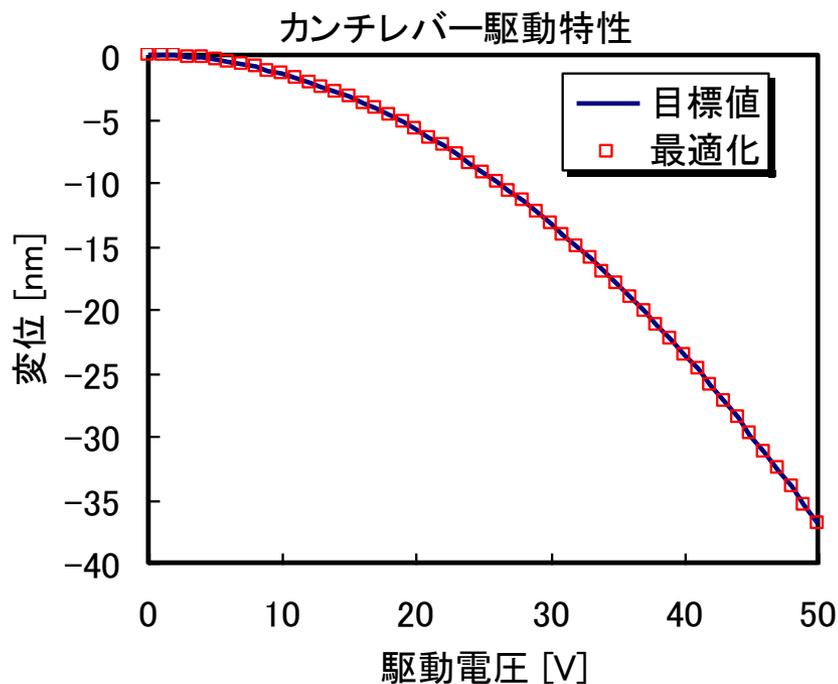
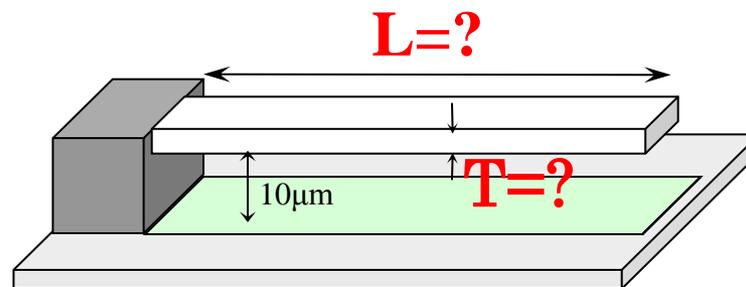
- (目的関数の)微分についての情報を用いずに数理計画問題を解く手法の総称.
- そもそも目的関数がブラックボックスになっている問題に向いている
→シミュレーションや物理現象等の結果, 得られる値であるような問題
- 目的関数を近似したモデル関数を用いる手法を利用

- モデル関数を構築することで部分問題をより扱いやすいものに (計算コスト削減)
- 目的関数の (局所的な) 形状を考慮した探索点の決定が可能
- 目的関数の形状が, ある程度なめらかである場合に適合的



解析事例 静電駆動カンチレバー

構造パラメータの自動決定



【自動決定の結果】

$L=11.29\mu\text{m}$

$T=1.646\mu\text{m}$

実行時間: 41秒*

(MEMSpice実行時間も含む)

(*) CPU: AMD XP3200+ 2.19GHz, 1.0GB RAM

まとめ

- MEMSpiceは, MemsONEの一機能モジュールで, 部品ベースの連成解析ツール.
- 部品パラメータの値を決めるための支援機能の例として, パラメトリック解析機能, 最適化手法を用いた部品パラメータ値の自動抽出について紹介した.