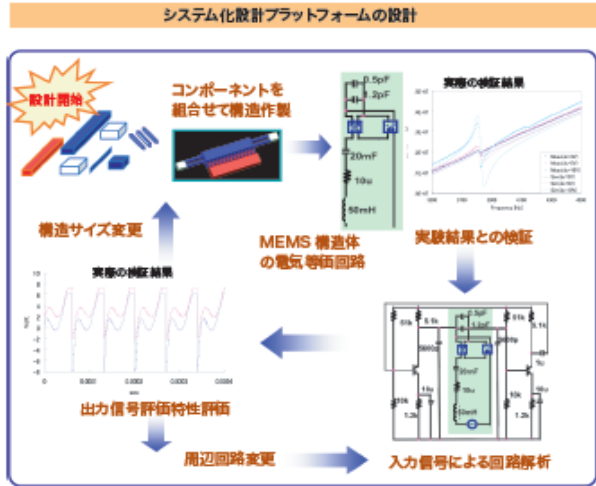


V-5. 研究開発項目⑤ 高集積・複合 MEMS システム化設計プラットフォームの開発
(マイクロマシンセンター)

1. 研究の概要

特徴

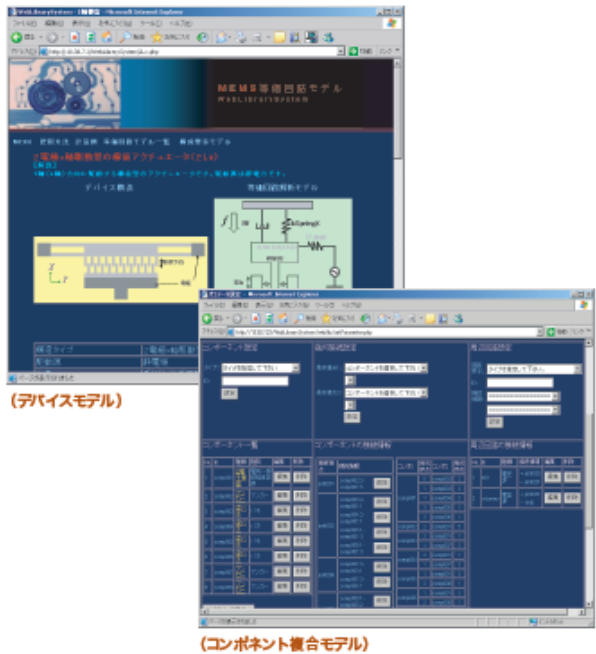
1. コンポーネントで構成される MEMS 構造体の電気等価回路抽出方法を世界に先駆けて開発、実験的に検証。
2. コンポーネントをライブラリ化し、入力信号（加速度、圧力等外力）から周辺回路を含めた電気回路システムとして直接的に出力信号（電気信号）を解析可能な従来にない設計環境を構築。



技術内容・特性

Web ライブラリーシステムとして、次のサービスをご提供。

1. あらかじめ用意したファイン MEMS に係わる 12 種類のデバイスに対応した等価回路モデルのネットリストを生成(デバイスモデル)。
2. MEMS-MEMS 集積化を想定した MEMS デバイス同士の機械的接続に対応した等価回路モデルのネットリストを生成(コンポーネント複合モデル)。このネットリストから電気的特性、機械的特性を抽出する機能を持つ。さらに、MemS ONE の 3 次元 CAD を活用した CAD モデルとの相互変換機能も備えている。



用途・目的

「MEMS 構造体+周辺電気回路」電気回路システムとして概略設計ができる。
MEMS、電気回路をシステム全体としての設計がしたいあらゆる技術者に！



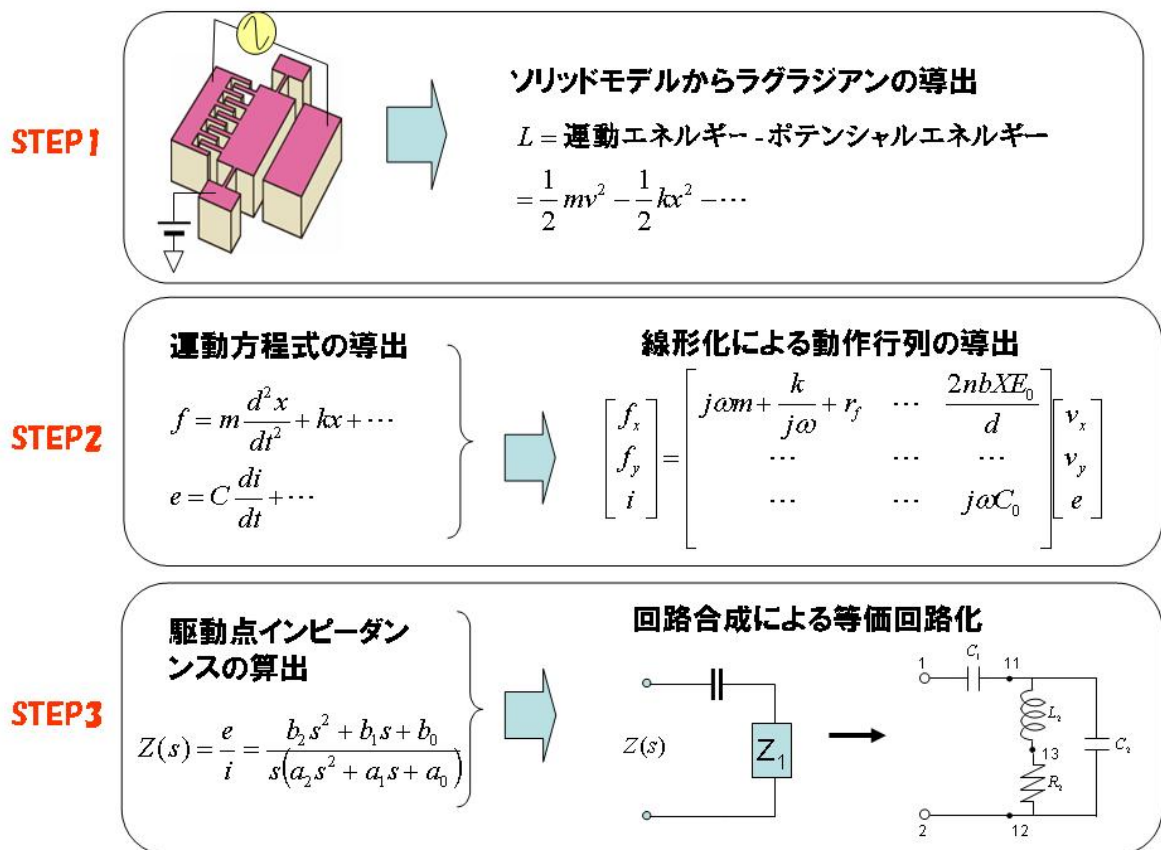
2. 成果の詳細

はじめに

本研究開発は高集積複合MEMS製造技術開発事業において新たな研究開発課題として H19 年度に単年度の課題として追加された。さらにその成果が評価され H20 年度には、より汎用性を持たせるために継続開発することとなった。したがって、H19 年度と H20 年度とは別個の目標と内容で実施されたもので、以下それぞれに関する開発成果を記述するものである。最終成果としての Web システムでは、両成果をインターネット上から閲覧できるように構成した。以下、個別にその成果について報告する。

⑤. 2 ファイン MEMS 等価回路モデルの構築

1) 外力無しモデル (H19)



図⑤.2-1-1 外力なしモデルの導出手

本モデルは、MEMS デバイスを電気回路側からみたイミタンスとして表現したものあり、電気回路への接続端子だけを有し、他機械系への接続をすることはできない。MEMS デバイスの機械構造パラメータは、電気回路素子のパラメータ計算に含まれる。本モデルは、デバイス固有の等価回路として拡張性、汎用性に欠けるが、MEMS デバイスの特性を回路から容

易に理解でき、回路設計者にとってはその後の回路設計に対して見通しのよい表現となっている。このモデルの導出過程を図⑤.2-1-1に示す。

STEP1 ではまずモデル化する MEMS をエネルギー関数であるラグランジアンで表す。ラグランジアンは系の運動エネルギーからポテンシャルエネルギーを引いた関数である。このとき、考慮する機械系の自由度に合わせたエネルギー表現を行う。機械系のパラメータは、集中定数として与えられるものとして表現する。また、エネルギーの消費を表す散逸関数も合わせて導出する。

STEP2 では、STEP1 で得られたラグランジアンより考慮する系の数だけ運動方程式を導出する。これは、ラグランジアンをラグランジュ方程式に代入して微分を実行するだけで簡単に得られる。このとき散逸関数もラグランジュ方程式に代入される。次に得られた運動方程式を直流バイアス点のまわりでテイラー展開し、その1次項だけ採用して線形化する。これにより、モデル化する MEMS の線形動作行列が得られる。

STEP3 では、得られた線形動作行列の機械系外力を零として、印加交流電圧と交流電流の比である駆動点インピーダンスをまず導出する。駆動点インピーダンスは、複素数 s を変数とする有理関数である。等価回路は、この駆動点インピーダンスを回路合成の手法により生成する。回路合成は、駆動点インピーダンスの極を次々に分離していくことにより行われる。極の複素関数上の位置により、LCR 回路が一意的に決定される。これによりモデル化する MEMS の等価回路が得られる。

このように外力なしモデルは、LCR 素子による等価回路表現になり、MEMS の共振特性や応答特性などが直感的に理解できるようになる。また、本手法は STEP1 におけるラグランジアンさえ得られれば、どのような MEMS に対しても電気端子から見込んだ等価回路が得られるため、MEMS のモデル化としては極めて有効な手法であり、本プロジェクトにおいてその実証をすることができた。

2) 外力有り接続モデル(H20)

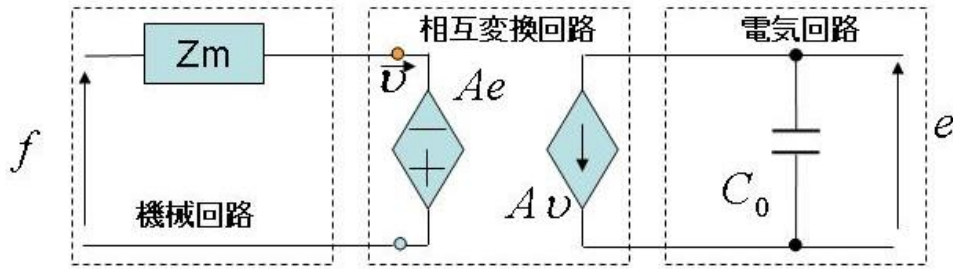
設計プラットフォームの汎用性を高めるためには、任意のデバイス形状に対して等価回路を出力できるようにする必要がある。そこで電気端子の他に、機械端子を有する回路モデルを構築した。機械端子は自由度に応じた数だけ有しており、当該自由度のどの方向に対しても機械構造の追加、外力の入力が可能となった設計となっている。MEMS の等価回路としてはこの点が従来にない新しい点であり、本プラットフォームの特徴でもある。梁等の各構造体についても、各自由度に応じた機械パラメータが自動的に算出され、それぞれの方向に対する等価回路が生成される。ここでは、電気機械エネルギー変換系を有する MEMS デバイスの外力有り接続モデルの導出法と、各自由度における機械回路の合成法について述べる。

まず、MEMS デバイスのモデル化については、図⑤.2-1-1 の STEP2 までは同じである。外力有り接続モデルは、線形化動作行列を各物理系と相互変換部分に分けることにより構成される。図 3.2-2-1 は、機械系自由度 1 の櫛歯アクチュエータの例である。得られた線形動作行列の対角項は、機械項と電気項に分けられる。また非対角項は、機械系と電気系の相互作用項を表している。これらを電気回路にすると、相互作用項は従属電源素子として表現され、機械項は、質量をインダクタ、バネ定数の逆数をコンデンサ、機械抵抗を電気抵抗で置き換えられる。また本モデル化では、機械系の力を電圧、速度を電流として扱っている。電気回路行列はアドミッタンス行列となっているので、並列回路で表現される。結局機械系 1 自由度の櫛歯アクチュエータ外力モデルは図⑤.2-2-2 のようになる。

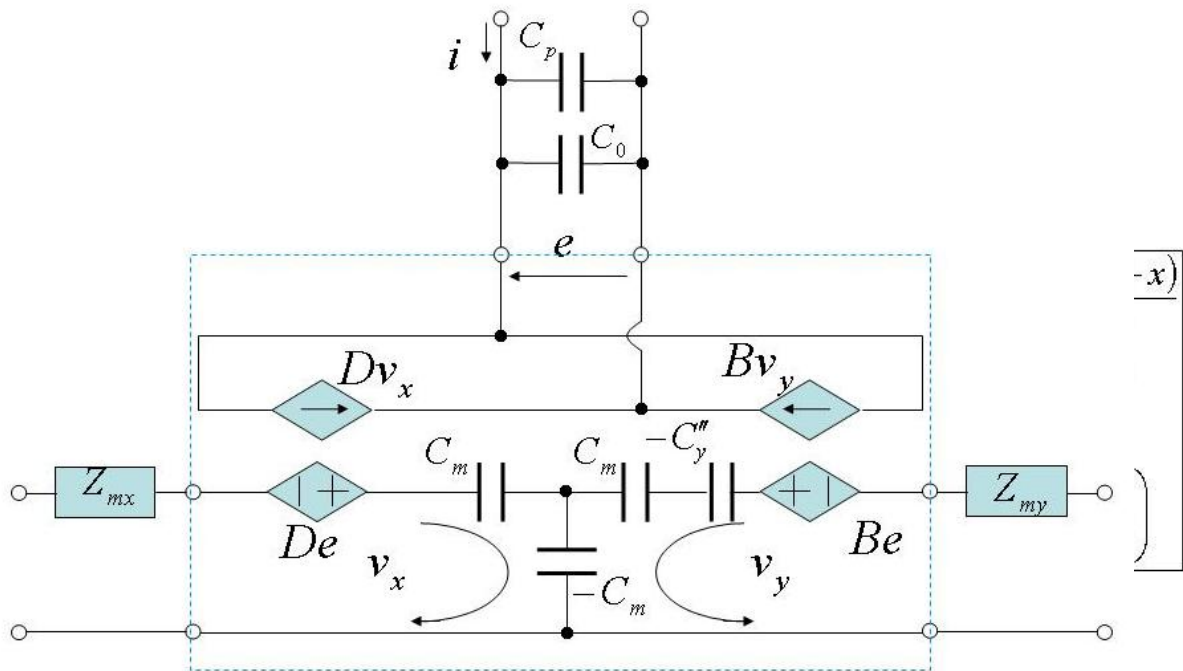
$$\begin{pmatrix} f_1 \\ i_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{f1} + j\omega m + \frac{k}{j\omega} & -\frac{C_1 E_1}{X_1} \\ \frac{C_1 E_1}{X_1} & j\omega(C_1 + C_{p1}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ e_1 \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} r_{f1} + j\omega m + \frac{k}{j\omega} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -\frac{C_1 E_1}{X_1} \\ \frac{C_1 E_1}{X_1} & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & j\omega(C_1 + C_{p1}) \end{pmatrix}$$

図⑤.2-2-1 外力モデルの構成



図⑤.2-2-2 機械系 1 自由度の櫛歯アクチュエータの外力モデル



$$L = \frac{1}{2} m_1 \quad \text{図⑤.2-2-4 2 自由度の櫛歯アクチュエータの等価回路} \quad \frac{qf}{C(x, y) + C_{stray}}$$

$$f_x = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial v} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial v}$$

$$f_x(v_x, v_y, x, y, q) = f(0, 0, 0, 0, 0) + \left. \frac{\partial f}{\partial v_x} \right|_0 v_x + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_0 x + \left. \frac{\partial f}{\partial y} \right|_0 y + \left. \frac{\partial f}{\partial q} \right|_0 q$$

図⑤.2-2-3 櫛歯アクチュエータの 2 自由度解析モデル

多自由度の機械系を扱う場合も、同様の方法手法で回路化できる。櫛歯アクチュエータに対する 2 自由度モデルを図⑤.2-2-3 に示す。

機械系自由度は、対向する櫛歯電極がお互い引き込む方向を x 方向、隣り合う櫛歯構造に変位する方向を y 方向としている。図⑤.2-1-1 の STEP1 で作成されるラグランジアン及び STEP2 における線形化のテイラー展開項も合わせて示してある。図⑤.2-2-4 に、図 3.2-1-1 の手順に従って得られた 2 自由度櫛歯アクチュエータの電気等価回路を示す。相互作用行列の等価回路化は、

得られた行列のままでは表現できないので、機械系どうしの相互作用を表す非対角項と同じ項をダミー項として差し引き零になるように対角項に付け加えることで実現した。これにより機械系はT型等価回路で表現できるようになり、図に示すように相互作用行列の等価回路が結局得られることになる。機械系3自由度も同じ手順により理論的に得られる。

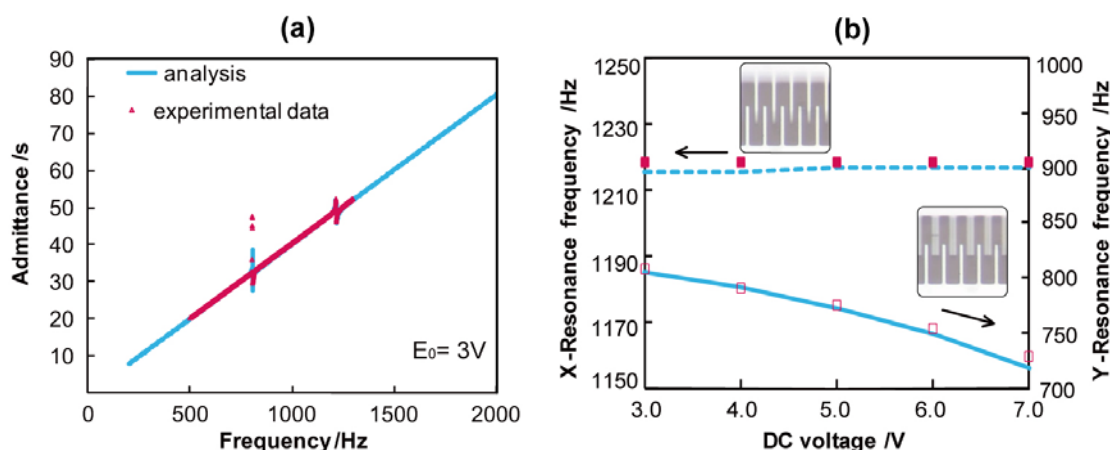
また、本プロジェクトでは音響回路についても等価回路化を行ったが、音響回路について従来使われているモデルを踏襲し、本プロジェクトにおける他のモデルとの接続を考慮して、音響端子と機械端子を有するモデルとしている。

3) それぞれの検証について

a) 外力なしモデルの検証

2自由度櫛歯アクチュエータ等価回路の検証

多自由度の櫛歯等価回路モデルは、本研究開発で初めて導出したものであるため、その検証実験を行った。図⑤.2-3a)-1に2自由度櫛歯アクチュエータのアドミッタンス特性と、速度共振信号の直流バイアス電圧依存性を示す。

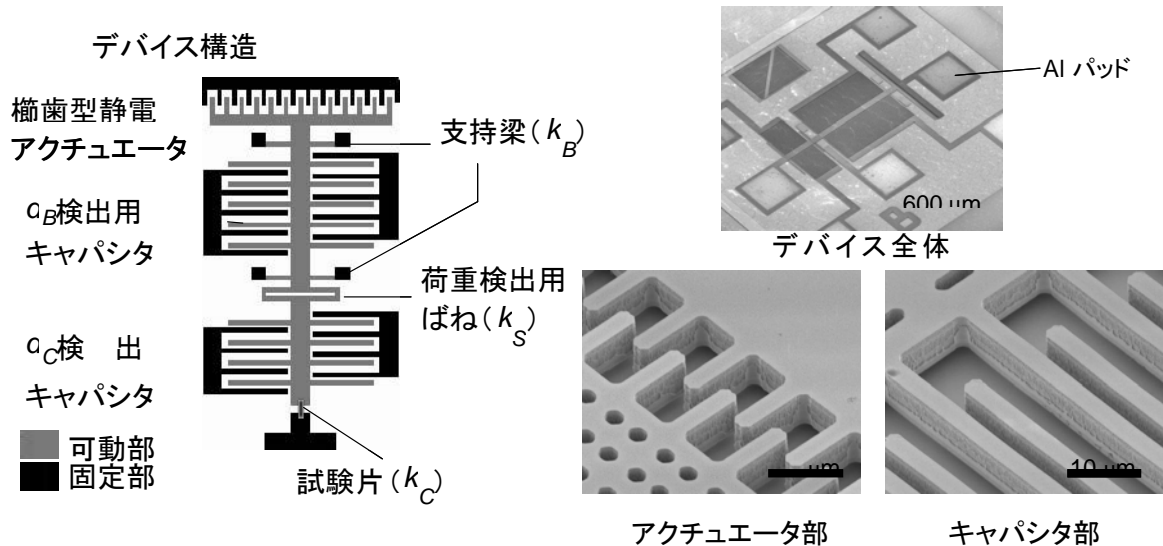


図⑤.2-3a)-1 2自由度櫛歯アクチュエータのアドミッタンス特性と速度共振の直流バイアス依存性

アドミッタンス特性には、x方向とy方向の2つの共振が観測されるが、実測値と本モデルを用いたシミュレーションは良い一致を示している。ただし、アドミッタンスのベースレベルを合わせるため、浮遊容量は実験値を用いている。また、速度共振信号の直流バイアス依存性では、x共振はほとんど直流バイアスに依存しないことがシミュレーションと実測で一致し、さらにy共振では直流バイアスを大きくするに従って周波数が下がることが非常によくシミュレーションできている。これらの結果より、本開発で導出した2自由度等価回路モデルが妥当なものであることが検証できた。

b) 外力あり接続モデルの検証(1) -静電櫛歯デバイス-

静電櫛歯と梁が複合的に接続されたモデルとして、図3.2-3b-1に示すデバイスを用いた。本デバイスはナノ材料の引張試験を行うために設計された静電力駆動、静電容量検出のデバイスである。活性層厚み $5\mu\text{m}$ のSOIウエハに形成している。等価回路モデルの検証用にはデバイスの動作を確認することを目的に製作したデバイスを用いている。ここでは試験片を設置する場所に後述する荷重検出用のばねと同じO型のばねを配置している。このO型ばね（実際には薄膜材料で作成した試験片）に印加する荷重はデバイスの他端に配置された櫛形電極アクチュエータにより発生する静電力で印加する。また、ばねの変位、印加荷重はそれぞれ、ばねと一体で変位する平行平板静電容量、O型ばねと直列に接続された荷重検出用のばねとその変位を検出するもう一つの平行平板静電容量で検出される。後者の静電容量では2つのばねの変位の合計が計測される。2つの変位検出用平行平板静電容量はそれぞれ変位に対する静電容量変化が逆になるような電極構造と対になっており、これらを差動検出する構成になっている。これらの構造は変位検出用の静電容量の部分で4本の梁で支持されている。

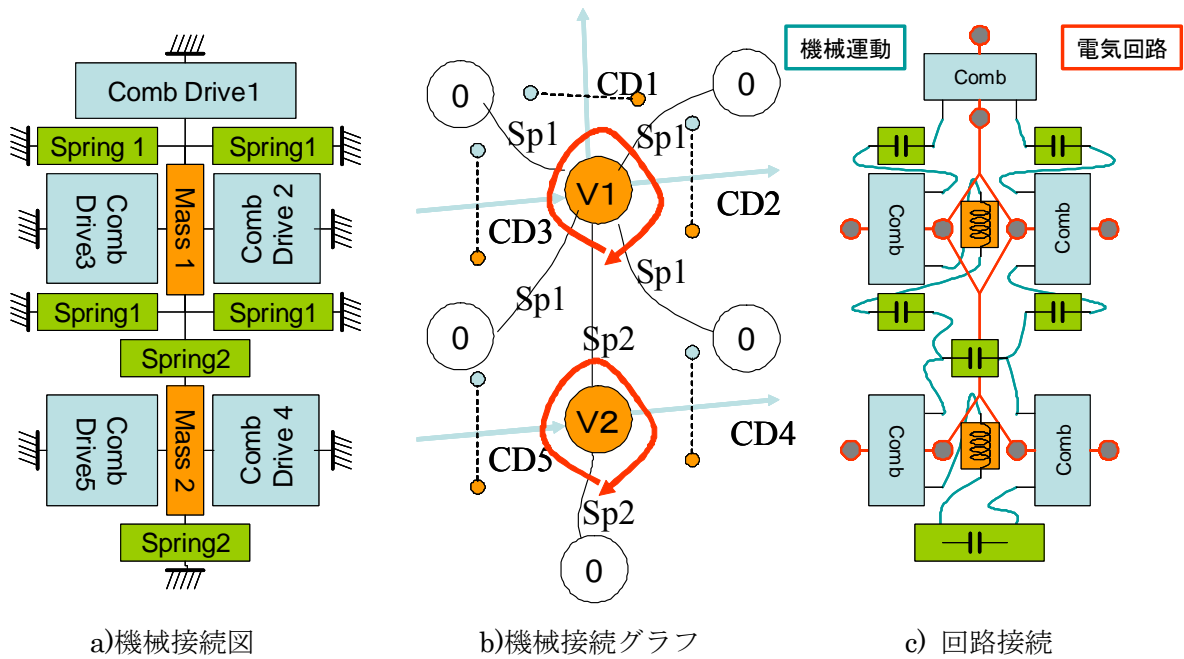


図⑤.2-3b-1 静電櫛歯デバイス

以上のようにこのデバイスは5組の静電トランスデューサ（変位検出用をそれぞれ2組として）と6個の梁構造，2個のマス，さらに10個のアンカーをコンポーネント（要素）として有する静電櫛歯デバイスとして扱うことができる．ここではこのデバイスを外力あり接続モデルの検証として，等価回路モデル化を行い，実測との比較を行う．

i) 各コンポーネントの接続の変換

すでに述べたように本デバイスは23個のコンポーネントの接続モデルとして表現することができる．まず，これを電気等価回路に変換したときの接続モデルに変換する．図⑤.2.3b-2aは本デバイスを上記のコンポーネントとして表現したときの機械的接続関係を示した図である．なお，今回のモデル化においては面内方向の変位(x, y)のみ取り扱う．しかし，実質的には横(y)方向には変位しない．電気回路接続に変換するにあたって機械接続グラフとして表現した(図⑤.2.3b-2b)．電気接続に変換するにあたってはそれぞれのマスに速度を定義し，これが一つの閉回路の電流に対応するとしてマスに接続するコンポーネントを閉回路に直列に接続していく．このため2つのマスを接続するばねはそれぞれの速度を表現する閉回路に共有されるように接続される．以上の考え方に基づいて表現される接続パターンが図3.2.3b-2cである．これをx, y 双方向に展開する．



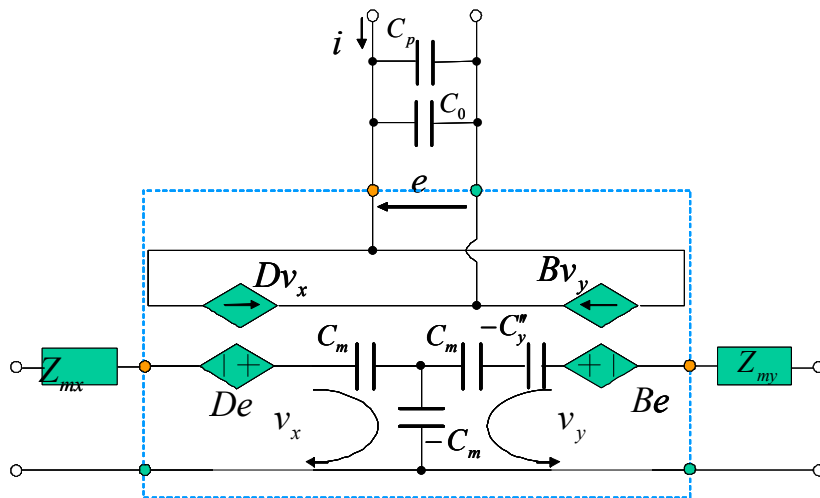
図⑤.2-3b-2 コンポーネント接続の変換

ii) 各コンポーネントの変換

マスはその質量をインダクタンスで表現した。同時にマスに付随して定義する減衰定数は、予測されるQ値（約100）と共振周波数（約10kHz）と質量から計算し、抵抗として仮に設定した。

ばねはそのばね定数の逆数を容量とするキャパシタンスに変換した。なお、等価回路の電気系を表現する回路ではばねのもつ電気抵抗を算出し、等価回路に含めている。

静電トランスデューサは前述した「外力あり」の2自由度櫛歯トランスデューサモデルを利用した。個々の櫛歯コンポーネントを示す等価回路を図⑤.2.3b-3に示す。本等価回路ではまず、櫛歯の直流動作点（初期変位）を櫛歯に与えられるバイアス電圧（後述の実験に対応して30, 40, 50V）と外力から計算し、その動作点における、櫛歯の静電容量 C_0 、 y (ギャップ)方向変位による静電ばね C_y'' 、 x, y の相互作用 C_m 、 x, y 軸方向の電気機械結合係数 D, B が算出される。DCバイアスを50Vと設定した場合の算出された各櫛歯のパラメータを表⑤.2.3b-1に示す。



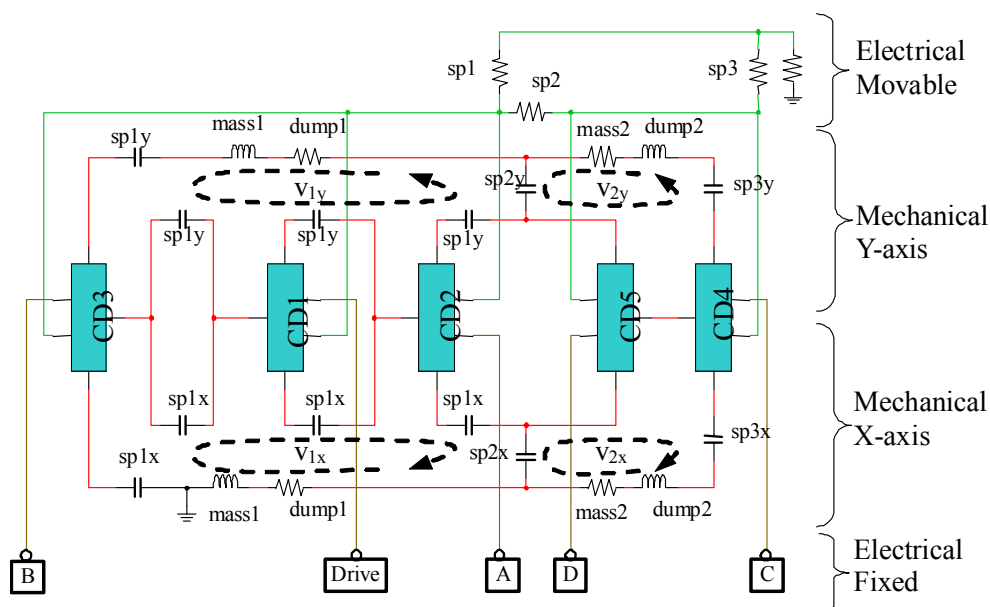
図⑤.2-3b-3 2自由度櫛歯トランスデューサの等価回路

表⑤.2.3b-1 櫛歯電極の等価回路パラメータ バイアス電圧50V

	CD1	CD2	CD3	CD4	CD5
C_0 [F]	1.21×10^{-14}	3.82×10^{-13}	4.83×10^{-13}	2.21×10^{-13}	2.48×10^{-13}
C_y'' [F]	3.92×10^2	1.41×10^3	7.63×10^2	2.26×10^3	1.52×10^3
C_m [F]	6.95	4.19	2.02	6.66	4.06
D	2.13×10^{-7}	2.13×10^{-7}	3.93×10^{-7}	1.32×10^{-7}	1.97×10^{-7}
B	2.89×10^{-11}	2.54×10^{-9}	3.22×10^{-9}	1.47×10^{-9}	1.65×10^{-9}

iii) デバイスの等価回路

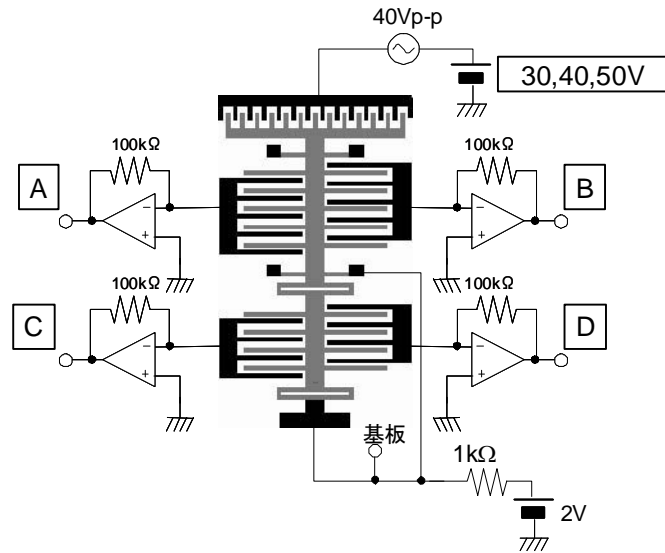
以上の変換によって導出された等価回路を図⑤.2.3b-4に示す。5つの静電トランスデューサに対して上部に機械系 y 方向の等価回路，下部に機械系 x 方向の等価回路が示されている。それぞれ、2つのマスに対応する2つの閉回路が形成されている。



図⑤.2-3b-4 デバイス等価回路

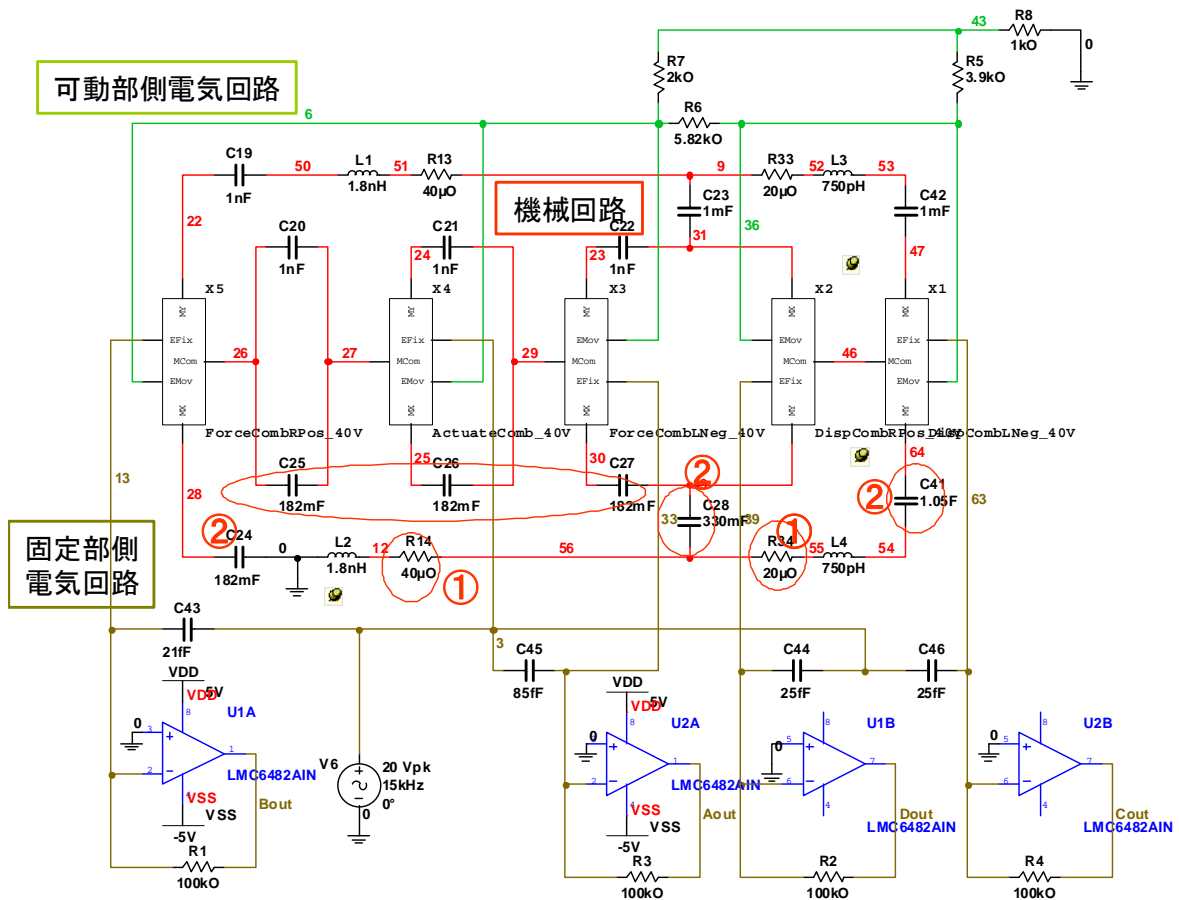
iv) 実験

実験は、デバイス駆動用の櫛歯電極にDCバイアス電圧30~50Vと交流電圧(40Vp-p)を印加し、変位検出用電極に電流検出アンプを接続する。電流検出アンプのバイアス電圧は0Vであるが、デバイスの可動部に2VのDCバイアスを印加することで検出用電極には2Vのバイアス電圧が印加されていることになる。電流検出アンプ等を含む回路接続を示したのが図⑤.2.3b-5である。測定はHP (現: Agilent) のFFTアナライザHP35665Aを用いた。内蔵の信号源からの出力2Vp-pを高電圧アンプ(NF回路: HSA4051)を用い、信号源出力を20倍し、DCバイアス電圧を加え、櫛歯電極に印加した。電流検出アンプの出力はシングルエンドの場合は信号源をA入力、検出アンプ出力をB入力に接続し、差動検出の場合は2つの検出アンプ出力をそれぞれA、B入力に接続した。これを Frequency Response (A信号に対するB信号の比として)計測している。



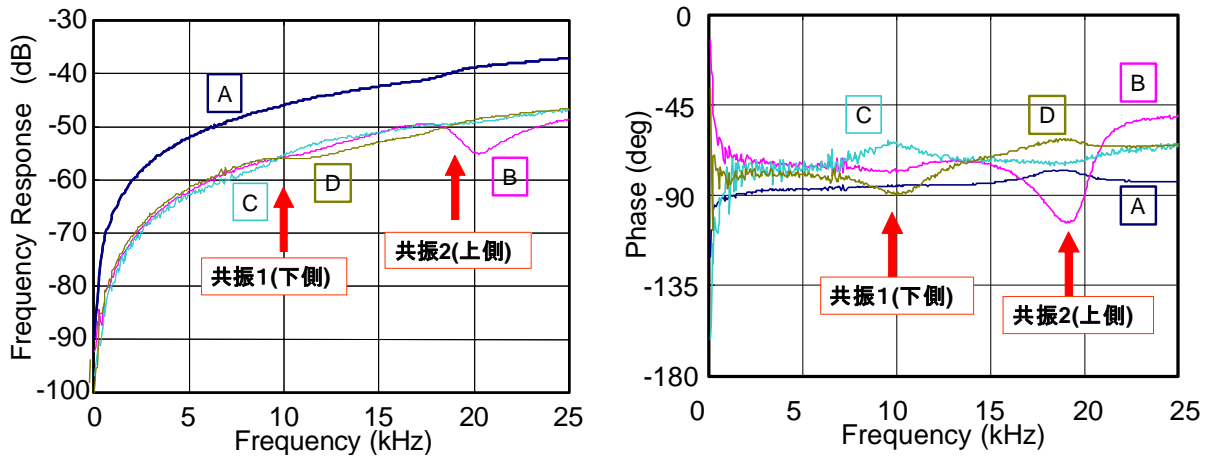
図⑤.2-3b-5 測定系

一方, 上記の実験系を含めたシステム全体を等価回路上で表現したのが図⑤.2.3b-6の回路である. 本回路を回路シミュレータ (ナショナルインスツルメンツ, MultiSim) の交流小信号解析で解析した. 解析の出力は計測方法に対応するように設定した. シングルエンド出力の場合は交流電圧源の電圧に対する各電流検出アンプの出力の比にアンプゲインを乗じた値, 差動出力の場合は2つの出力の比である.



図⑤.2.3b-6 検出回路を含む等価回路

シングルエンド出力の計測結果を図⑤.2.3b-7に示した。2つの錘の共振周波数に対応するピークがわずかに観察されている。しかし、実測値と等価回路の解析値にはいくつかの違いがあった。これらはデバイスの構造などの設計値と実測値との差異、等価回路導出において考慮していない要素の寄与などによるものである。これらの差異を合わせ込む作業によって、原因を解析し、等価回路の改良に役立てることができる。今回行ったあわせこみについて以下に記述する。

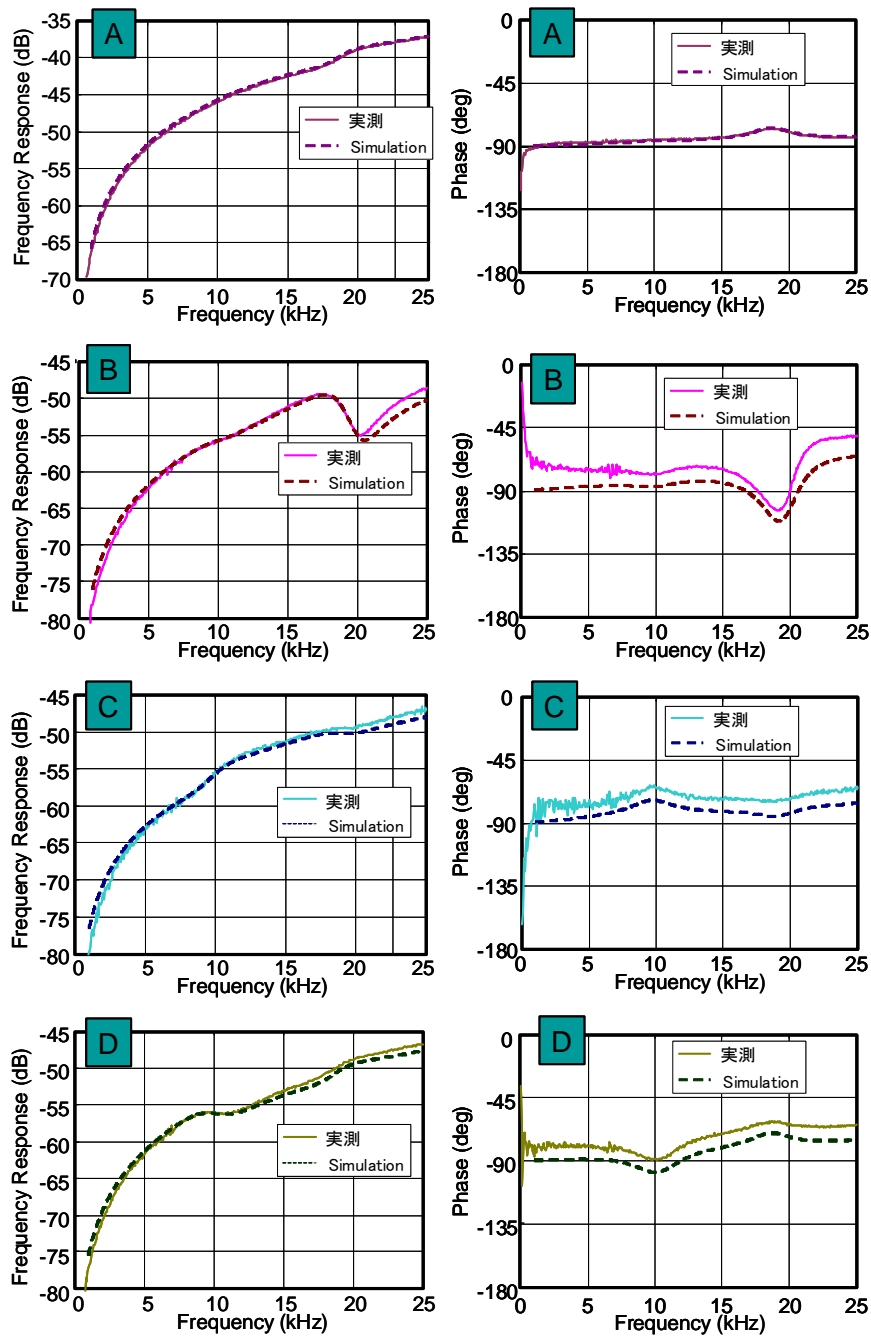


図⑤.2.3b-7 シングルエンド応答特性 (バイアス 4.0 V)

1)寄生容量：シングルエンド出力の周波数応答特性はこのような容量成分は検出回路、パッケージ、チップ上電極配線間の寄生容量に起因するが、等価回路の導出では考慮していない。そこで、観察された周波数応答特性のベースラインを元に信号源と電流検出アンプの間の寄生容量を当てはめた。

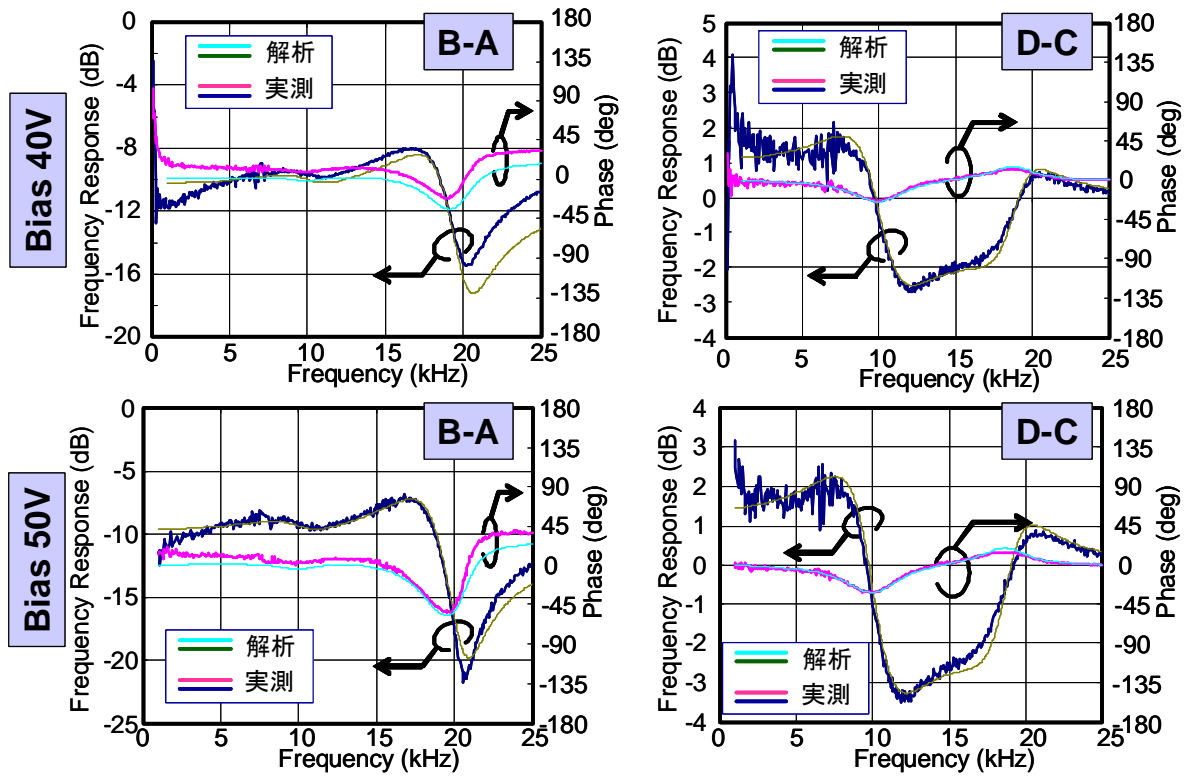
2)機械振動特性：実測値に基づいて、共振周波数と振動Q値をあわせこんだ。具体的にはマス質量を固定し、ばね定数と機械抵抗値を調整した。

以上のあわせこみ操作によって得られた回路定数の元で回路シミュレーションして得られた結果を図⑤.2.3b-8に破線で示した。振幅比はほぼ一致している一方で、位相には誤差があり、これは寄生容量の与え方によるものと考えている。



図⑤.2.3b-8 等価回路解析と実測結果の比較（あわせこみ後）

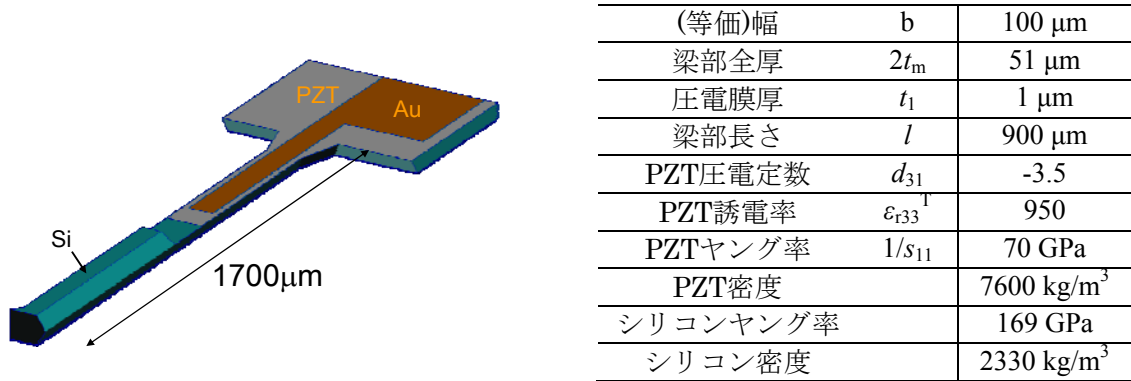
差動検出による計測，解析においては対になる検出電極の組で測定した．図⑤.2.3b-9はバイアス電圧40V，50Vにおける周波数特性を実験値と解析値で示した．この結果では寄生容量による影響がある程度取り除かれているのでデバイスの応答特性がよく現れており，その中で正しく表現できていることが示されている．



図⑤.2.3b-9 差動計測での周波数応答特性

c) 外力あり接続モデルの検証(2) - 圧電片持ち梁デバイス -

圧電片持ち梁の等価回路モデルの検証として、単純な片持ち梁型振動子を取り扱った。全体形状を図⑤.2.3c-1に示す。等価回路モデルでは片持ち梁は単純なユニモルフ構造であるが先端に外力が印加（接続）可能なモデルになっている。ここでは外力を慣性力で加えることを考慮して先端に錘をつけた構造になっている。このデバイス構造に対して、インピーダンス特性、外部圧電素子による外力印加における電圧出力のモニタリングを行い、等価回路モデルの検証を行った。



図⑤.2.3c-1 圧電片持ち梁振動子

i) 等価回路モデルの生成

用いたモデルは単結晶シリコンを主な構造体として用い、結晶異方性エッチングによって形状が作製されている。圧電薄膜はチタン酸ジルコン酸鉛(PZT)を用い、白金電極を下部電極、金電極を上部電極としている。今回は図⑤.2.3c-1に示した各部の寸法を用いた。3.2章2)に示した導出方法に基づいて計算している。

電気機械結合係数A

$$A = \frac{3bet_m}{2l} = \frac{3 \times 1.0 \times 10^{-4} \times (-3.5) \times 2.55 \times 10^{-5}}{2 \times 8.2 \times 10^{-4}} = -1.63 \times 10^{-5}$$

変位拘束時の静電容量：C₃₃^{LC}（パッド部容量を含む）

$$C_{33}^{LC} = \epsilon_{33}^{LC} \frac{bl}{t_1} = 8.24 \times 10^{-9} \frac{1 \times 10^{-4} \times 8.2 \times 10^{-4} + 3 \times 10^{-4} \times 5.5 \times 10^{-4}}{1.0 \times 10^{-6}} = 2.03 \times 10^{-9} \quad [F]$$

梁の曲げ剛性 K_M

$$K_M = 1.81 \times 10^{-7} \quad [Nm^2]$$

固有振動数 ω（断面形状を考慮）

$$\omega = \frac{1.875^2}{l^2} \sqrt{\frac{K_M}{\rho A}} = 5.32 \times 10^5 \quad [rad/s]$$

梁先端の等価ばね定数：K

$$K = 7.49 \times 10^2 \quad [N/m]$$

梁の等価質量： m_{eq}

$$m_{eq} = \frac{K}{\omega^2} = \frac{7.49 \times 10^2}{(5.32 \times 10^5)^2} = 2.64 \times 10^{-9} \quad [\text{kg}]$$

今回のモデルでは先端にマスが付加されているため、モデルではさらに質量を追加する必要がある。しかし、マスの重心は圧電梁部の先端から離れた位置にあるので簡単な解析では上記のパラメータのモデルに整合させることは難しい。ここでは、測定された共振周波数が合致するように次式に基づいて等価な付加質量 m_{top} を計算した。

$$f = 2\pi \sqrt{\frac{K}{m_{eq} + m_{top}}}$$

同様に機械抵抗値 r は計測された Q 値を用いて次式により計算した。

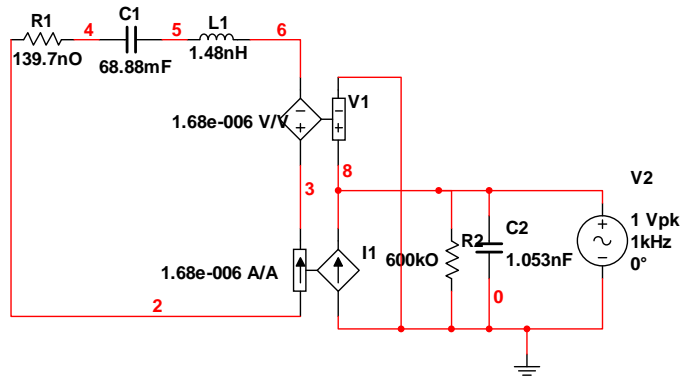
$$r = \frac{\sqrt{(m_{eq} + m_{top})K}}{Q}$$

ii) 導出したモデルの評価。

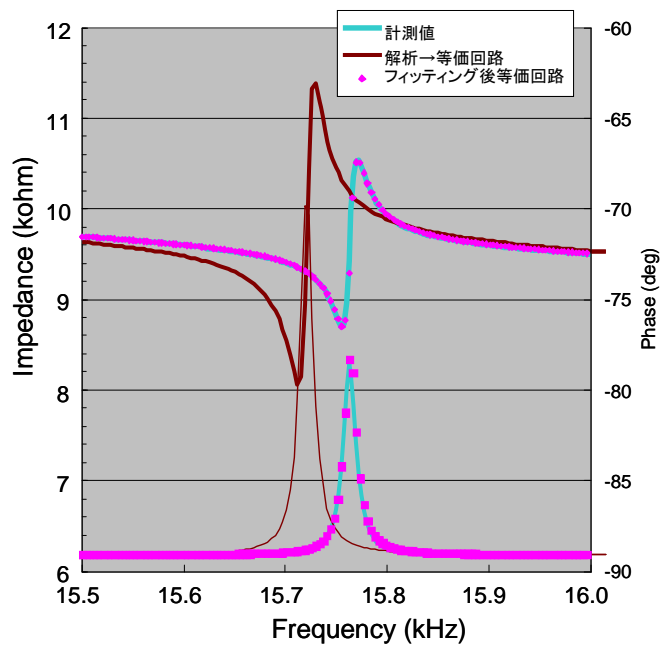
圧電素子による加振、レーザドップラー振動計による変位計測から、共振周波数15.75kHz、 Q 値1050として算出した等価回路パラメータを表⑤.2.3c-1に示した。また、片持ち梁デバイスの等価回路を図⑤.2.3c-2に示した。まず、このデバイスのインピーダンス特性をインピーダンスアナライザ(Agilent 4394A)で測定した結果と、等価回路の機械系端子を短絡したときの電気系端子間のインピーダンス解析結果を比較した(図⑤.2.3c-3)。周波数(0.4%)、ピークインピーダンスで10%程度と差は小さく、等価回路のモデルがデバイスの動作をよく表現できていると判断できる。

表⑤.2.3c-1 圧電片持ち梁の等価回路パラメータ

		回路	等価回路生成	フィッティング後
Mass	m_{eq}	L1	$7.65 \times 10^{-8} \text{ kg}$	$1.48 \times 10^{-9} \text{ kg}$
Spring constant	K	C1	749 N/m	14.52 N/m
Mechanical resistance	R	R1	$7.21 \times 10^{-6} \text{ Ns/m}$	$1.39 \times 10^{-7} \text{ Ns/m}$
Coupling constant	A	V1,I1	-1.63×10^{-5}	1.68×10^{-6}
Capacitance	C_{33}^{LC}	C2	2.03 nF	1.053 nF
Resistance	--	R2	---	600 kW



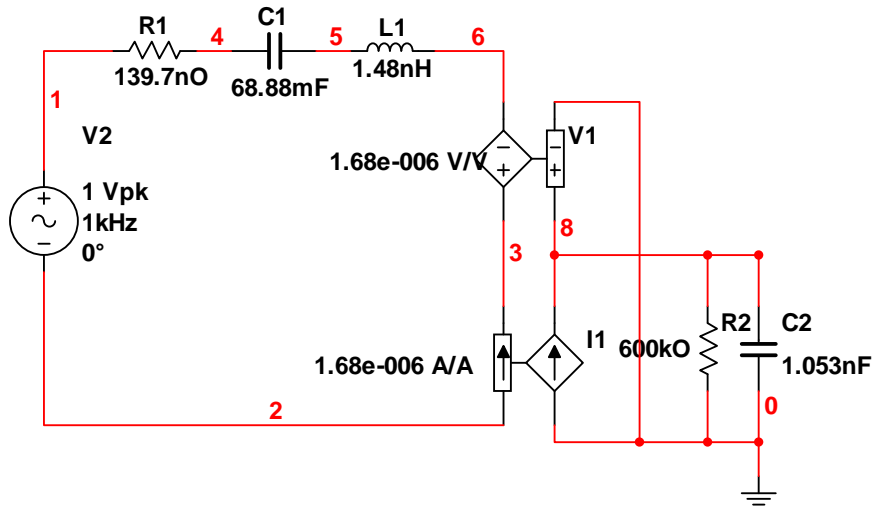
図⑤.2.3c-2 圧電片持ち梁の等価回路（フィッティング後；インピーダンス計測時）



図⑤.2.3c-3 圧電片持ち梁のインピーダンス特性

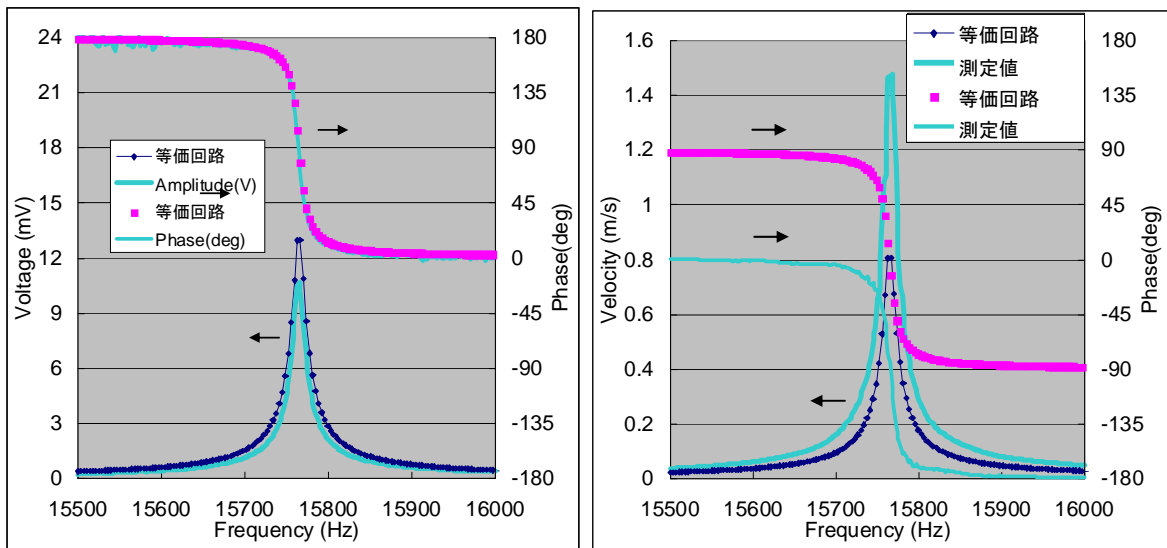
iii)外力印加モデルの検証

外力が表現できるモデルの検証のため、次のような手順で比較を行った。1)まず、図⑤.2.3c-2のモデルを用い、図⑤.2.3c-3に示すインピーダンスの特性を最もよく表す各回路要素のパラメータを求めた。このパラメータにおける回路シミュレーション結果を同じグラフにプロットした。よく一致している。2)次に外力印加による動作を模擬するために、片持ち梁圧電振動子を積層圧電素子の上に載せ、圧電素子を駆動することによって先端部のマスに慣性力を与え、これを外力の入力とみなす。このときに、圧電薄膜に発生する電圧を測定すると同時に、梁の先端の変位をレーザドップラー振動計（GRAPHTEC, AT0023）で計測した。同時に梁の根元の変位も較正のために計測している。なお、等価回路では外力の印加を交流電圧源（等価：力）として表記した（図⑤.2.3c-4）。積層圧電素子により印加される入力の変位（加速度）であるので固定部の変位をレーザドップラー振動計で計測し、ここから先端部のマスの質量を用いて換算した入力慣性力に対する応答として評価している。



図⑤.2.3c-4 圧電片持ち梁の等価回路（外部加振時）

図⑤.2.3c-5aは電圧出力の応答特性を共振周波数まわりで計測し、解析したものである。両者はかなりよく一致している。一方同図bにおいては振幅と、位相が異なっていた。振幅の大小は測定点の違いによるものとほぼみなすことができるが、位相のずれの原因はまだ明らかでなく今後の検討が必要である。しかしながら、開発した圧電素子の等価回路モデル導出式、モデルそのものは計測結果と翌一致している。この開発した圧電素子の等価回路の有用性を示すことができた。



a) 圧電膜電圧出力

b) 片持ち梁先端の速度

図⑤.2.3c-5 外部加振による圧電片持ち梁の周波数特性

⑤. 3 MEMS デバイスモデルの等価回路導出と登録及び文献調査

1) MEMS デバイスモデルの等価回路導出と登録 (H19)

H19 年度に Web システムに登録したデバイスは 12 種類である。一覧を表 3.3-1-1 に示す。登録デバイスの決定においては以下の点を考慮した。

- 主要 MEMS 関連論文調査結果
- ファイン MEMS プロジェクトで優先での高いデバイス
- ファイン MEMS プロジェクト参加機関へのニーズ調査

表⑤.3-1-1 Web システムに登録したデバイス(H19)

No.	デバイスの種類	説明
①	櫛歯：2 電極：ストレートタイプ	1 軸駆動の櫛歯アクチュエータ
②	櫛歯：2 電極：ダブルホールド	1 軸駆動の櫛歯アクチュエータ
③	櫛歯：2 電極：ストレートタイプ	2 軸駆動の櫛歯アクチュエータ
④	櫛歯：3 電極：角速度センサ	2 軸可動の櫛歯型センサ
⑤	櫛歯：3 電極：ストレートタイプ	1 軸駆動の櫛歯アクチュエータ
⑥	櫛歯：3 電極：ダブルホールド	1 軸駆動の櫛歯アクチュエータ
⑦	振動子：3 電極	シリコンナノ振動子
⑧	カンチレバー	CNT カンチレバー
⑨	カンチレバー	磁気駆動のカンチレバー
⑩	平行平板	圧力センサ
⑪	平行平板	平行平板型デバイス
⑫	梁構造	ピエゾ抵抗型加速度センサ

それぞれのデバイスの等価回路およびその導出を以下に報告する。

① 櫛歯：2電極：ストレートタイプ

櫛歯：2電極：ストレートタイプの解析モデルを図 3.3-1-1 に示す。

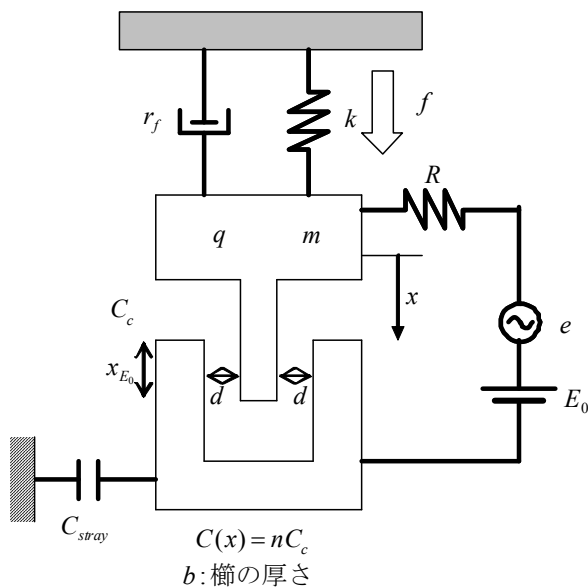


図 ⑤.3-1-1 櫛歯：2電極：ストレートタイプ解析モデル

このモデルの等価回路は、図 3.3-1-2 のようになる。

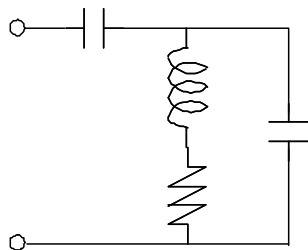


図 ⑤.3-1-2 櫛歯：2電極：ストレートタイプ等価回路図

② 櫛歯：2電極：ダブルホールド

櫛歯:2電極:ダブルホールドは解析モデルが櫛歯:2電極:ストレートタイプと同様であり、導出される等価回路も同形である。櫛歯:2電極:ストレートタイプとの違いは、回路素子パラメータを算出する際に用いる梁のパラメータが形状に応じて異なる。

③ 櫛歯：2電極：ストレートタイプ(2軸駆動の櫛歯アクチュエータ)

櫛歯:2電極:ダブルホールドの解析モデルは、図 3.3-1-1 と同様で、紙面垂直方向運動も考慮する。等価回路は図 3.3-1-1 から図 3.3-1-6 で表せる。

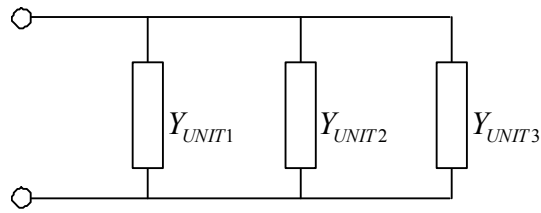


図 ⑤.3-1-2 櫛歯：2電極：ストレートタイプ(2軸駆動)等価回路図

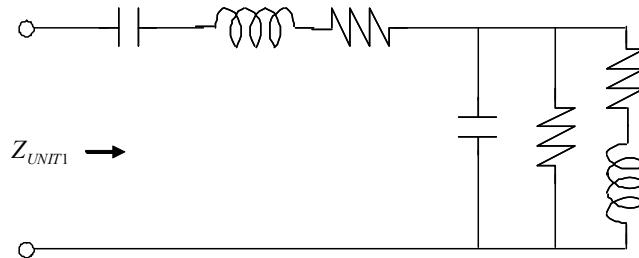


図 ⑤.3-1-3 櫛歯：2電極：ストレートタイプ(2軸駆動)等価回路図(1)

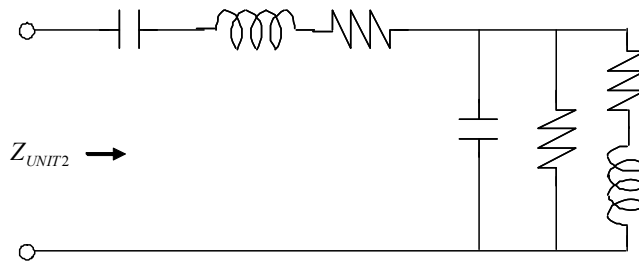


図 ⑤.3-1-4 櫛歯：2電極：ストレートタイプ(2軸駆動)等価回路図(2)

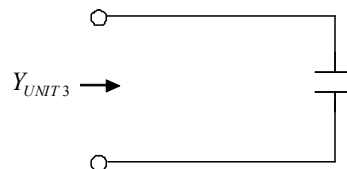


図 ⑤.3-1-5 櫛歯：2電極：ストレートタイプ(2軸駆動)等価回路図(3)

④櫛歯：3電極：角速度センサ

櫛歯：3電極：角速度センサの解析モデルを図 3.3-1-7 に示す。

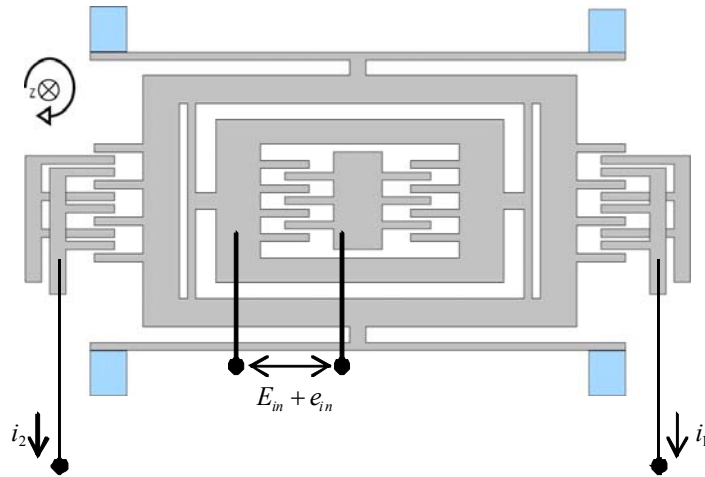


図 ⑤.3-1-6 櫛歯：3電極：角速度センサ解析モデル

検出電極を流れる電流値を電流源を持つ回路は図 ⑤.3-1-8 で表せる。

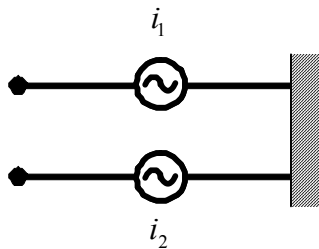


図 ⑤.3-1-7 櫛歯：3電極：角速度センサ等価回路図

⑤櫛歯：3電極：ストレートタイプ

櫛歯：3電極：ストレートタイプの解析モデルを図 ⑤.3-1-9 に示す。

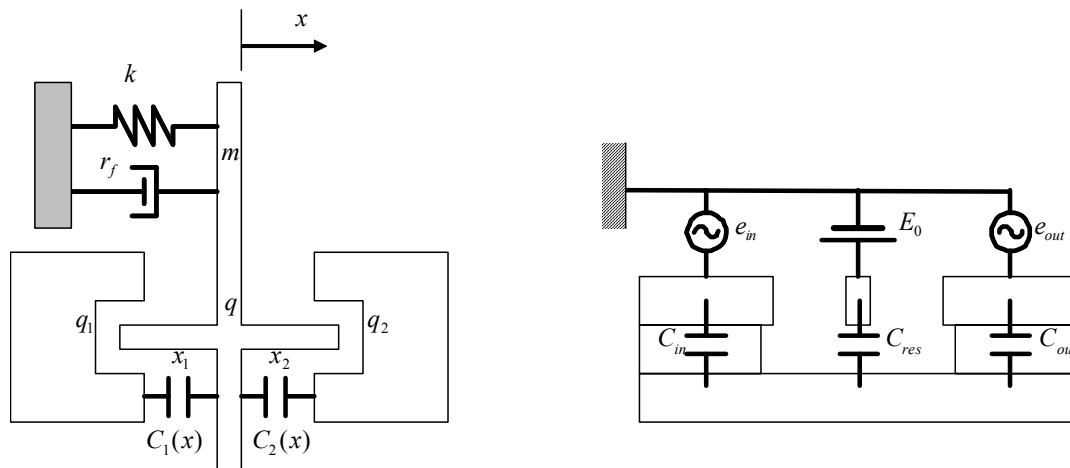


図 ⑤.3-1-8 櫛歯：3電極：ストレートタイプ解析モデル

このモデルの等価回路は図 ⑤.3-1-10 で表される。

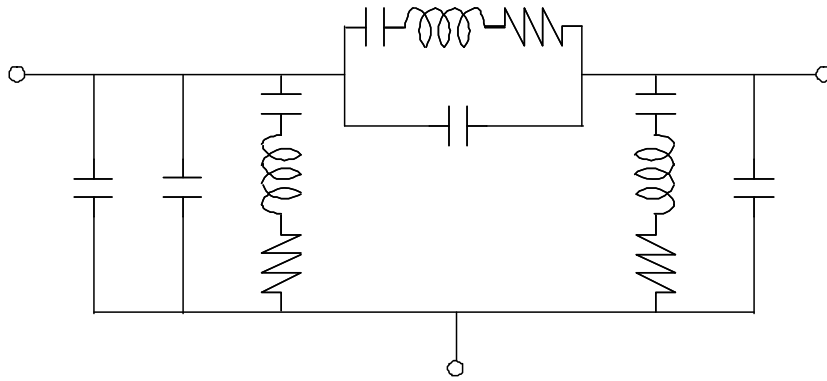


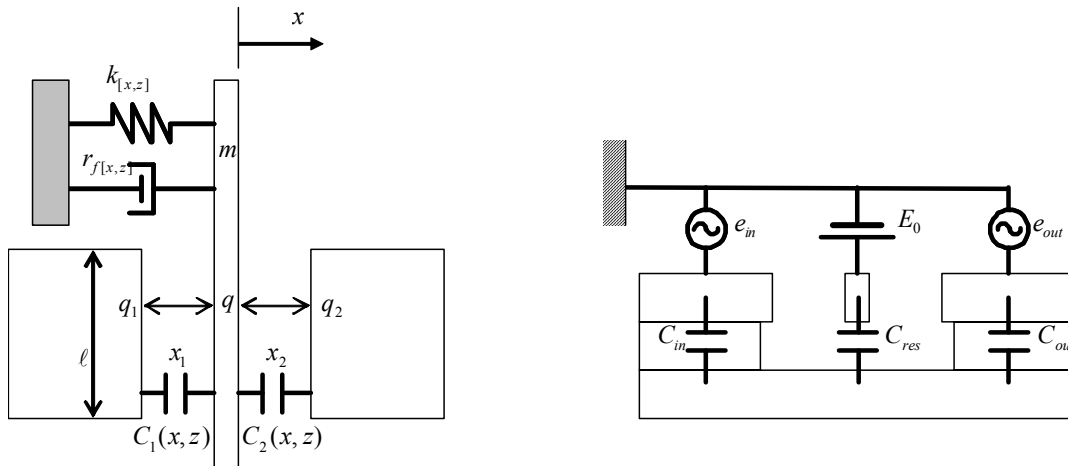
図 ⑤.3-1-9 櫛歯：3電極：ストレートタイプ等価回路図

⑥櫛歯：3電極：ダブルホールド

櫛歯：3電極：ダブルホールドは解析モデルが櫛歯：3電極：ストレートタイプと同様であり、導出される等価回路も同形である。櫛歯：3電極：ストレートタイプとの違いは、回路素子パラメータを算出する際に用いる梁のパラメータが形状に応じて異なる。

⑦振動子：3電極

振動子：3電極の解析モデルを図 ⑤.3-1-11 に示す。電極間の対向(x)方向と基板に垂直(z)方向の2軸運動を考える。



図⑤.3-1-10 振動子：3電極解析モデル

このモデルの等価回路は図 ⑤.3-1-12 から図 ⑤.3-1-13 で表される。図 ⑤.3-1-11 ⑤.3-1-12 において矩形で表した部分は、図 ⑤.3-1-12 ⑤.3-1-13 のような形をした回路である。

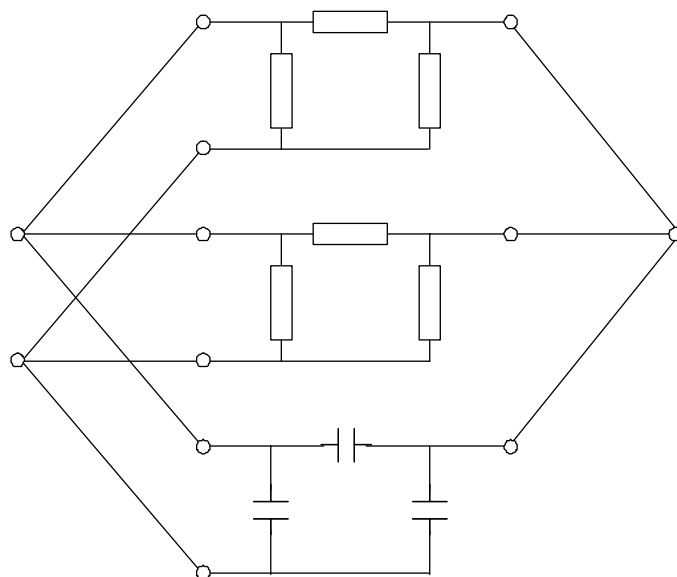


図 ⑤.3-1-11 振動子：3電極等価回路

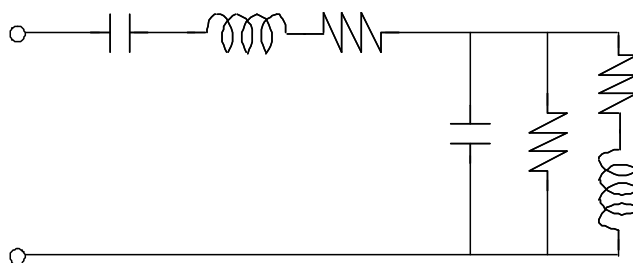


図 ⑤.3-1-12 振動子：3電極等価回路(部分)

⑧カンチレバー (CNT カンチレバー)

CNT カンチレバーの解析モデルを図 ⑤.3-1-14 に示す。

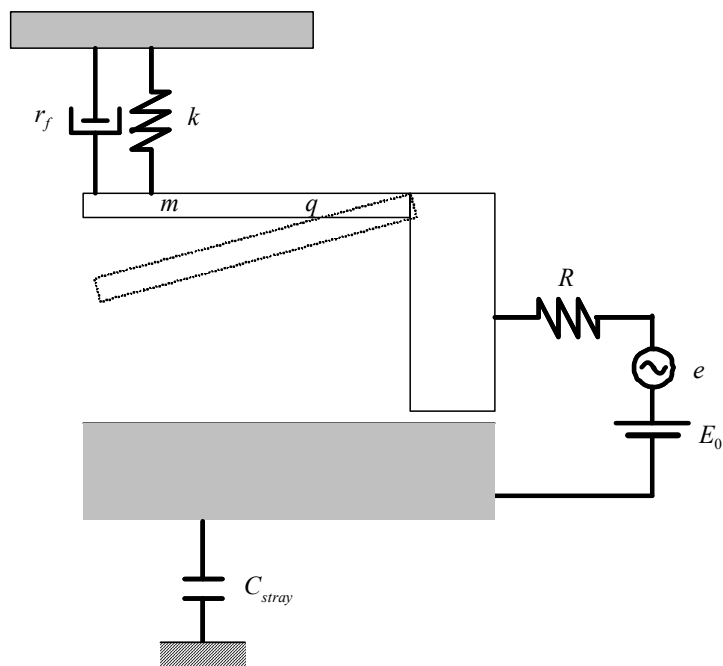


図 ⑤.3-1-13 CNT カンチレバー解析モデル

CNT カンチレバーの等価回路を図 ⑤.3-1-15 に示す。

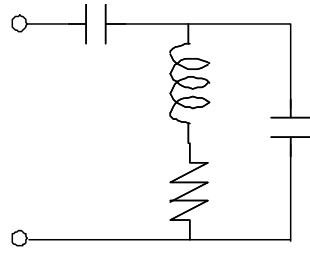


図 ⑤.3-1-14 CNT カンチレバー等価回路

⑨カンチレバー (磁気駆動カンチレバー)

磁気駆動カンチレバーのモデル図を図 ⑤.3-1-16 に示す。

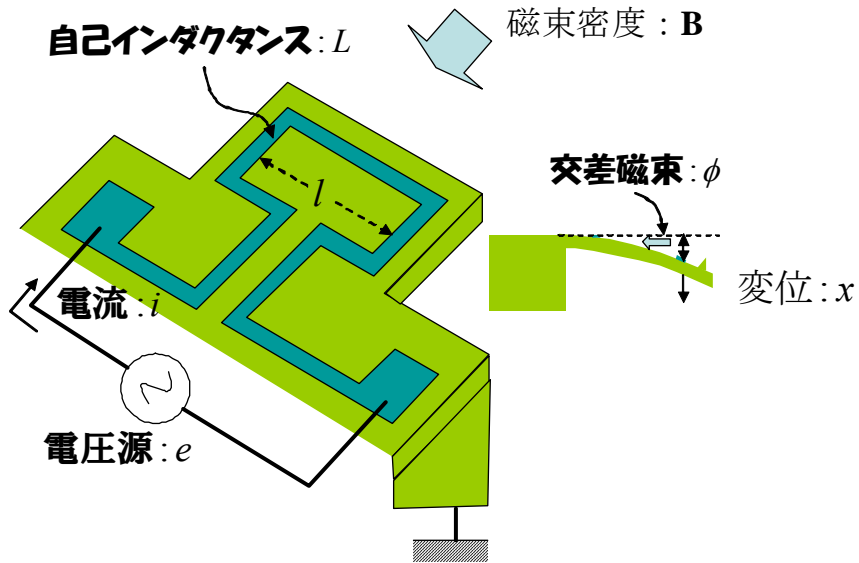


図 ⑤.3-1-15 磁気駆動カンチレバー解析モデル

このモデルの等価回路は図 ⑤.3-1-17 で表される。

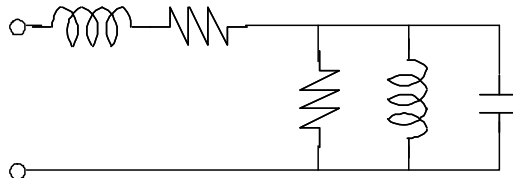


図 ⑤.3-1-16 磁気駆動カンチレバー等価回路

⑩平行平板(圧力センサ)

平行平板(圧力センサ)の解析モデルを図 ⑤.3-1-18 に示す。

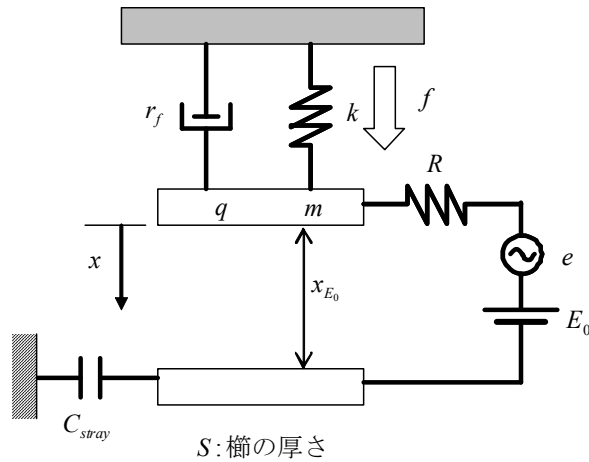


図 ⑤.3-1-17 平行平板(圧力センサ)解析モデル

等価回路は図 ⑤.3-1-19 となる。

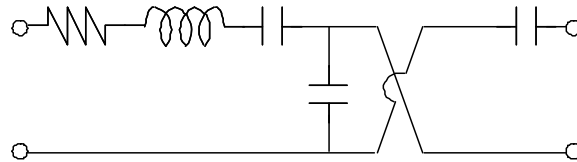


図 ⑤.3-1-18 平行平板(圧力センサ)等価回路

⑪平行平板(平行平板型デバイス)

平行平板型デバイスの解析モデルは「平行平板(加速度センサ)」と同様である。等価回路図は図 ⑤.3-1-20 である。

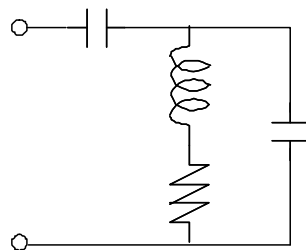


図 ⑤.3-1-19 平行平板型デバイス等価回路

⑫梁構造 (ピエゾ抵抗型加速度センサ)

ピエゾ抵抗型加速度センサは、ピエゾ抵抗の値を加速度の成分ごとに検出ブリッジ回路として表現する。導出方法およびブリッジ回路に関しては、「⑤. 4 単位要素モデル、MEMS 構成要素モデルによる機械パラメータ等抽出の検討」で報告する。

2) MEMS デバイスモデルの等価回路導出と登録 (H20)

H20 年度に開発した Web システムでは、単位要素を定義し、その単位要素に対応する等価回路を用意した。単位要素を組み合わせたデバイスを等価回路の接続として表現することにより高集積化に対応した。Web システムに登録した単位要素は 14 種類である。一覧を表⑤.3-2-1 に示す。

等価回路導出にあたっては、外力を扱える MEMS デバイス同士を回路的に接続する方式を用いた。単位要素の組み合わせを等価回路の接続として表現する際のソフトウェア上の取り扱い方法についても検討も行った。

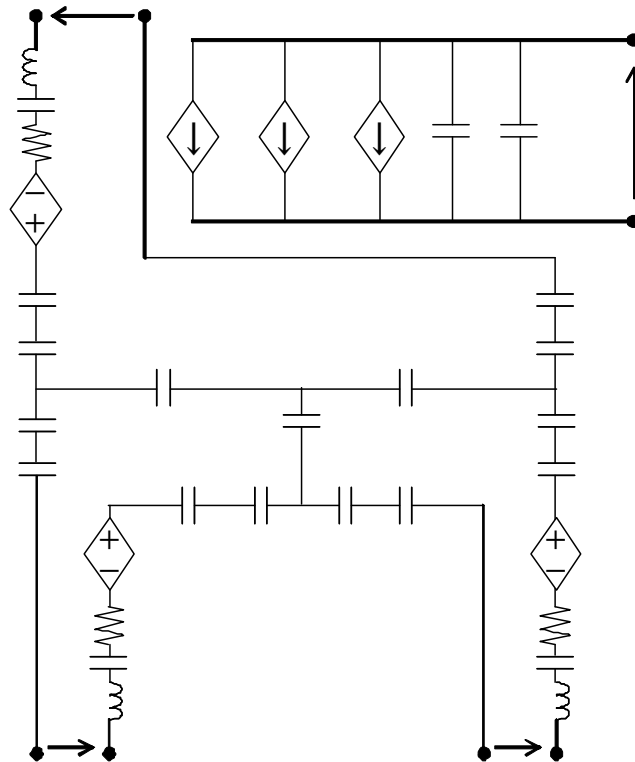
表⑤.3-2-1 Web システムに登録した単位要素(H20)

デバイスの種類	説明
<input type="checkbox"/> 電気・機械相互変換 単位要素	
① 2 端子櫛歯	静電型 2 端子櫛歯
② 静電平行平板	静電型平行平板
③ ユニモルフ圧電駆動梁	ユニモルフ構造圧電駆動梁
④ 磁気駆動梁	片持ち磁気駆動梁
<input type="checkbox"/> 音響 単位要素	
⑤ 音響平行平板アクチュエータ	静電型音響平行平板
⑥ 穴あき管路	音響イナータンスが支配的な音響管
⑦ 空洞	音響容量が支配的な音響管
⑧ 細管	音響抵抗が支配的な音響管
<input type="checkbox"/> バネ 単位要素	
⑨ 梁バネ	ストレート梁
⑩ O 型バネ	O 型梁
⑪ ダブルフォールデッドバネ 1	ダブルフォールデッド梁
⑫ ダブルフォールデッドバネ 2	ダブルフォールデッド梁
<input type="checkbox"/> 質量 単位要素	
⑬ 剛体平板	剛体平行平板質量
⑭ 剛体フレーム	剛体フレーム質量

それぞれの単位要素の等価回路およびその導出を以下に報告する。

①2 端子櫛歯

H19 年度モデルで、運動方向を 3 軸に拡張すると、等価回路は図⑤.3-2-1 のようになる。ひし形で表した素子は従属電源であり、「+」が付いたものは従属電圧源、「→」が付いたものは従属電流源である。



図⑤.3-2-1 3軸2端子櫛歯等価回路

②静電平行平板

解析モデルは H19 年度平行平板モデルと同様である。平行平板の場合、運動方向が 1 軸に制限される。等価回路は図⑤.3-2-2 で表せる。

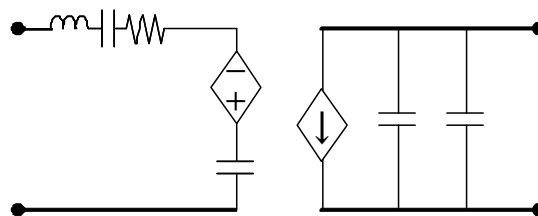
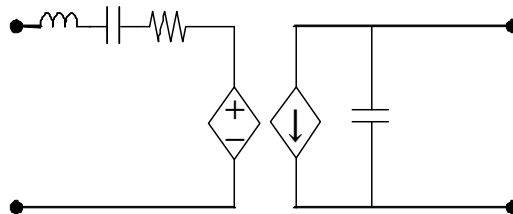


図 ⑤.3-2-2 静電平行平板等価回路

③ユニモルフ圧電駆動梁

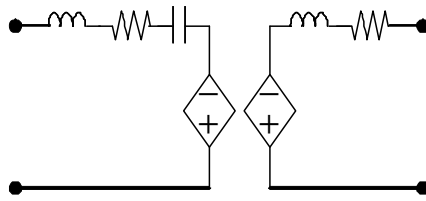
この等価回路は、図⑤.3-2-3 で表される。



図⑤.3-2-3 ユニモルフ圧電駆動梁等価回路

④磁気駆動梁

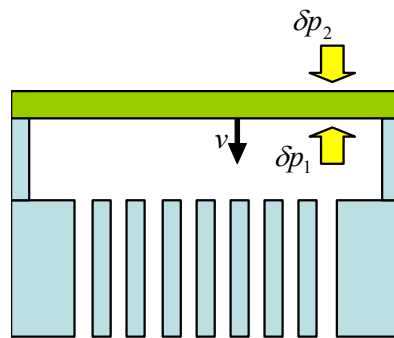
解析モデルは H19 年度モデルと同様である。電気系と機械系の相互変換を従属電源で表現すると、等価回路は図⑤.3-2-4 のようになる。



図⑤.3-2-4 磁気駆動梁等価回路

⑤音響平行平板アクチュエータ

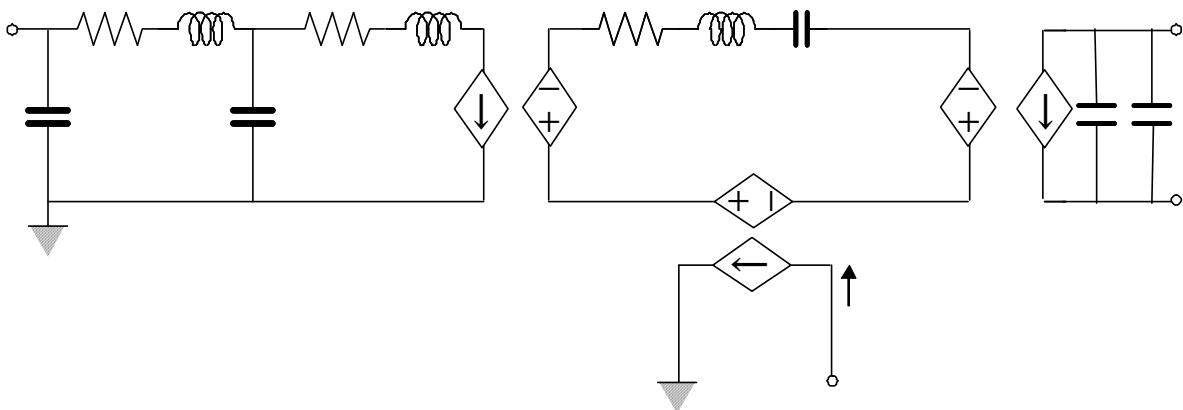
音響平行平板アクチュエータの構造を図⑤.3-2-5に示す。電気系と機械系の相互変換に関しては、静電平行平板モデルと同様である。機械系と音響系の類似性により音響系の等価回路を導出した。電気系と音響系の対比表を表⑤.3-2-2に示す。等価回路は図⑤.3-2-6のようになる。



図⑤.3-2-5 音響平行平板アクチュエータ構造

表⑤.3-2-2 電気系と音響系の対比

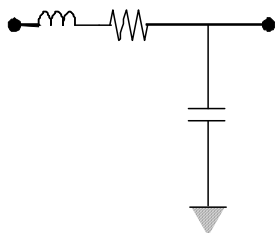
電気系物理量	音響系物理量
電流	体積速度
電圧	音圧
容量	音響容量
インダクタンス	イナータンス
抵抗	音響抵抗



図⑤.3-2-6 音響平行平板アクチュエータ等価回路

⑥穴あき管路

穴あき管路は、一般に音響イナータンスが支配的な音響コンポーネントと考えられるが、音響容量、音響抵抗をも成分として等価回路に考慮する。等価回路を図⑤.3.3-2-7に示す。



図⑤.3-2-7 音響コンポーネント等価回路

⑦空洞

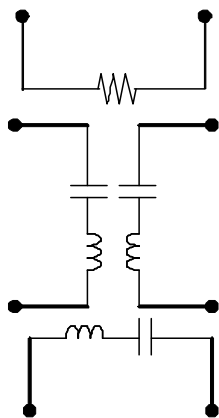
空洞は、一般に音響容量が支配的な音響コンポーネントと考えられるが、音響イナータンス、音響抵抗も成分として等価回路に考慮する。空洞の等価回路は、穴あき管路と同形である。

⑧細管

細管は、一般に音響抵抗が支配的な音響コンポーネントと考えられるが、音響イナータンス、音響容量も成分として等価回路に考慮する。細管の等価回路は、穴あき管路と同形である。

⑨梁バネ

梁バネは、電気的には電気抵抗を持ち、機械的には容量および自重によりインダクタをもつ。等価回路は図⑤.3-2-8となる。



図⑤.3-2-8 バネ等価回路

⑩O型バネ

O型バネの等価回路は、梁バネと同形である。

⑪ダブルフォールデッドバネ1

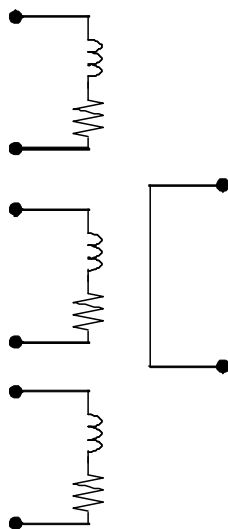
ダブルフォールデッドバネ1の等価回路は、梁バネと同形である。

⑫ダブルフォールデッドバネ2

ダブルフォールデッドバネ1の等価回路は、梁バネと同形である。

⑬剛体平板

梁バネは、電気的には完全導体と仮定している。機械的には質量によるインダクタンスと機械抵抗をもつ。



図⑤.3-2-9 質量等価回路

⑭剛体フレーム

剛体フレームの等価回路は、剛体平板の等価回路と同形である。

3) 文献調査 (H19)

Web システムに登録 MEMS デバイスは、主要 MEMS 関連文献を調査し、その結果を踏まえ選択をいった。文献調査結果について報告する。調査対象文献は表⑤.3-3-1 の通りである。ここでは、可動機構を含むデバイスが提示されている文献を抽出し、以下の項目で集計した。

- デバイスの種類 主にアクチュエータかセンサか
- センシング方法 デバイスがセンサである場合に検出に利用する物理機構
- 構造 デバイス構造の分類
- 駆動源 デバイスの駆動に利用する物理機構
- 主席著者
- 所属機関
- 図 デバイスの構造、動作を表す図

調査結果は、巻末に示す。

表⑤.3-3-1 調査対象文献(H19)

会議予稿集	開催年
IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)	2007
	2006
	2005
International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)	2007
	2005
	2003
Sensor Symposium on Sensors, Micromachines, and Applied Systems (Sensor Symposium)	2006
	2005
	2004

4) 文献調査 (H20)

H20 年度に調査した文献は表⑤.3-4-1 の通りである。ここでは、可動機構を含むデバイスが提示されている文献を抽出し、以下の項目で集計した。

- デバイスの種類 主にアクチュエータかセンサか
- センシング方法 デバイスがセンサである場合に検出に利用する物理機構
- 構造 デバイス構造の分類
- 駆動源 デバイスの駆動に利用する物理機構
- 主席著者
- 所属機関
- 図 デバイスの構造、動作を表す図

表⑤.3.3-4-1 調査対象文献(H20)

会議予稿集	開催年
IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)	2008
Sensor Symposium on Sensors, Micromachines, and Applied Systems (Sensor Symposium)	2008

⑤. 4 単位要素モデル、MEMS 構成要素モデルによる機械パラメータ等抽出の検討

⑤. 4. 1 研究開発の概要

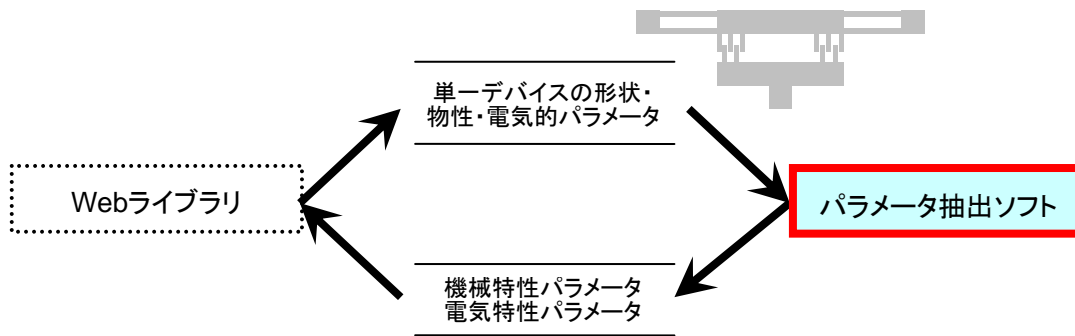
MEMS 等価回路モデルを用いる際には、モデルを構成する各電気素子の回路定数を決定する必要がある。これらの回路定数を計算する為には、バネ定数等の機械特性パラメータや直流動作点での電気特性パラメータ等を求める必要がある。そこで、MEMS 等価回路の回路定数を定める為に機械特性パラメータおよび電気特性パラメータを、デバイスの形状パラメータや電氣的パラメータ等から算出するパラメータ抽出ソフトウェアを開発した。H19 年度では、ファイン MEMS プロジェクトで利用するデバイス構造で等価回路 Web ライブラリシステムに登録されたものを対象として、パラメータ抽出ソフトウェアを作成した。一方、H20 年度では、MEMS デバイスを構成する基本部品（コンポーネント）を任意に組み合わせた構造を対象として、コンポーネントごとにパラメータ抽出を行うソフトウェアを作成した。パラメータ抽出ソフトウェアの出力結果は、Web ライブラリシステムに提供される。

3. 4. 2 研究開発成果の詳細

⑤. 4. 2. 1 H19 年度の成果詳細

H19 年度では、ファイン MEMS プロジェクトで利用する単一の MEMS デバイス構造の形状パラメータや電気パラメータ等から、バネ定数等の機械特性パラメータや直流動作点での電気特性パラメータ等を算出するパラメータ抽出ソフトウェアを作成した（図⑤3.4.2.-1）。パラメータ抽出ソフトウェアで対応する MEMS デバイス構造は、以下の 12 種類である。

- (1) 1 軸駆動櫛歯アクチュエータ (2 電極、ストレートタイプ)
- (2) 1 軸駆動櫛歯アクチュエータ (2 電極、ダブルホールドタイプ)
- (3) 1 軸駆動櫛歯アクチュエータ (3 電極、ストレートタイプ)
- (4) 1 軸駆動櫛歯アクチュエータ (3 電極、ダブルホールドタイプ)
- (5) 2 軸駆動櫛歯アクチュエータ (2 電極、ストレートタイプ)
- (6) 2 軸櫛歯角速度センサ (3 電極)
- (7) 磁気回路デバイス
- (8) 静電駆動カンチレバー
- (9) ピエゾ抵抗型加速度センサ
- (10) ナノ振動子
- (11) 圧力センサ
- (12) 平行平板型デバイス



図⑤.4.2.-1 H19年度のパラメータ抽出ソフト

(1) 入出力データ仕様の検討

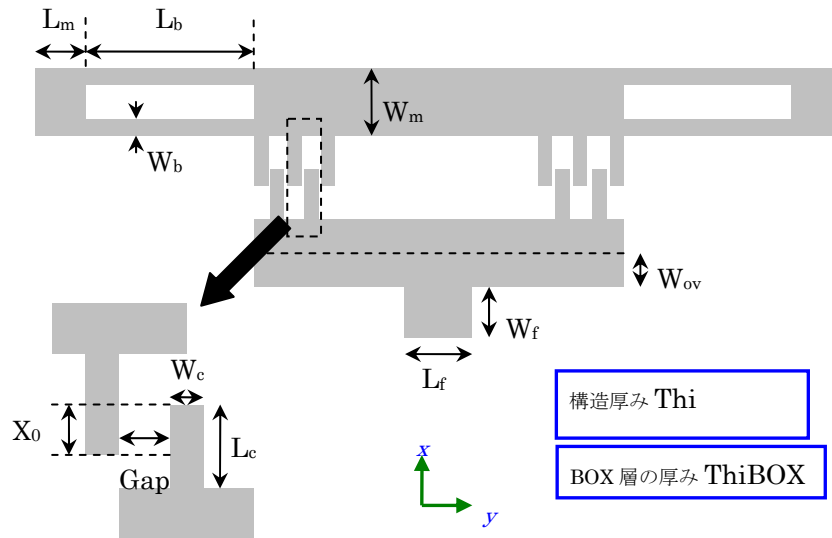
ソフトウェア仕様の検討として、それぞれの MEMS デバイス構造に対して、パラメータ抽出ソフトに対する入出力データの仕様を検討した。

①入力データ

入力データは Web ライブラリ上でユーザが指定するデータであり、MEMS デバイス構造の形状パラメータや物性パラメータ等のデータである。表⑤.4.2-2 に、一例として、1 軸駆動櫛歯アクチュエータ (2 電極、ストレートタイプ) の入力データを示す。尚、入力データの値のエラーチェックは本ソフトウェアにおいて行われる。

表⑤.4.2-1 1 軸駆動櫛歯アクチュエータ (2 電極、ストレートタイプ) の入力データ

パラメータの種類	パラメータ名	記号	単位
形状パラメータ	櫛歯間のギャップ	Gap	m
	初期重なり幅	X0	m
	櫛歯の長さ	Lc	m
	櫛歯の幅	Wc	m
	櫛歯の土台の幅	Wm	m
	繰り返し数	Num	—
	梁の長さ	Lb	m
	梁の幅	Wb	m
	構造の厚み	Thi	m
	可動部接続電極の横の長さ	Lm	m
	基板部と電極の重なり幅	Wov	m
	固定部接続電極の縦の長さ	Wf	m
	固定部接続電極の横の長さ	Lf	m
	BOX 層の厚み	ThiBOX	m
物性パラメータ	ヤング率	young	Pa
	密度	density	kg/m ³
	BOX 層の比誘電率	permittivity	—
電気パラメータ	直流バイアス電圧	biasVolt	V



図⑤.4.2-2 1軸駆動櫛歯アクチュエータ（2電極、ストレートタイプ）の形状パラメータ

②出力データ

パラメータ抽出ソフトの出力データは、MEMS 等価回路の回路定数を決定する為に必要な機械特性パラメータおよび電気特性パラメータの一群である。表⑤.4.2-2 に、一例として、1軸駆動櫛歯アクチュエータ（2電極、ストレートタイプ）における出力データ一覧を示す。

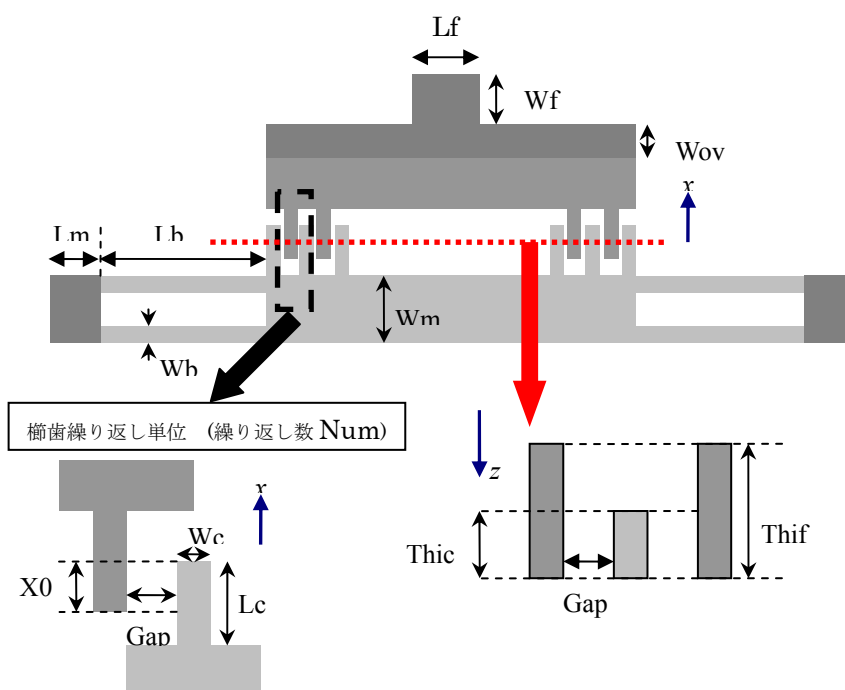
表⑤.4.2-2 1軸駆動櫛歯アクチュエータ（2電極、ストレートタイプ）における出力データ

パラメータ名	記号	単位
バネ定数	kSpringX	N/m
櫛歯可動部の質量	mass	kg
直流動作点における櫛歯重なり幅	Xb	m
直流動作点におけるオーバーラップ容量	Cb	F
直流動作点における櫛歯先端容量	Ctip	F
直流動作点におけるフリンジ容量	Cfringe	F
浮遊容量	Cstray	F
直流バイアス電圧	biasVolt	V
櫛歯の長さ	Lc	m

(2) MEMS デバイスの機械特性パラメータおよび電気特性パラメータの算出

12 種類の MEMS デバイスの機械特性パラメータおよび電気特性パラメータの算出方法は、パラメータ抽出仕様書としてまとめ、web ライブラリに掲載した。パラメータの算出方法は MEMS デバイスごとに異なるので、本報告書では、一例として、図⑤.4.2-3 に示す 2 軸駆動櫛歯アクチュエータ (2 電極、ストレートタイプ) を挙げて、パラメータ算出方法を述べる。このデバイスでは、以下の 5 種類のパラメータを算出する。

- 1) 質量
- 2) バネ定数
- 3) 浮遊容量
- 4) 直流動作点における櫛歯容量
- 5) 直流動作点における櫛歯容量の変位に関する 1 階および 2 階微係数



図⑤.4.2-3 2 軸駆動櫛歯アクチュエータ (2 電極、ストレートタイプ)

①質量の算出

櫛歯可動部の実質量と梁バネの等価質量の和で算出する。後者については、梁バネが集中質量系であるため、エネルギー法を用いて等価な集中質量系に置き換えたときの質量を用いている。

②バネ定数の算出

バネ部は、梁 4 本で構成されている。それぞれの梁のバネ定数は、長軸方向の張力を考慮した以下の式から求める。

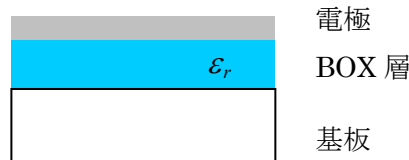
$$k = k_0 \left\{ 1 + \frac{\pi^4}{128} \left(\frac{x}{w} \right)^2 \right\} \quad (3.4.2-1)$$

ここで、 k_0 は線形梁のバネ定数 (今の場合、 $k_0 = Etw^3 / L^3$)、 x は櫛歯の変位である。バネ定数の算出にあたっては、式(3.4.2-1)を用いて評価されるバネの復元力と静電引力の釣り

合いから変位を決定した後、式(3.4.2-1)によりバネ定数を求める。

③浮遊容量の算出

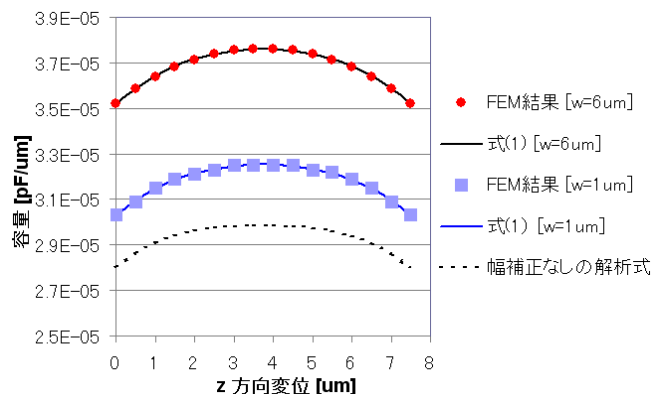
浮遊容量としては、可動部直下の基板は抜かれているものとして、BOX 層を挟む電極と基板間の容量成分のみ考慮する。この容量成分の計算は、BOX 層の厚みに等しいギャップを有する平行平板コンデンサとみなして行う。また、固定部接続の電極部に生じる容量と、可動部接続の電極部に生じる容量は直列につながっているとして、浮遊容量の総計を求める。



図⑤.4.2-4 浮遊容量の算出

④直流動作点における櫛歯容量

2 軸駆動櫛歯アクチュエータは、図⑤.4.2-5 に示すような垂直駆動櫛形電極を有する。これは、水平駆動櫛形電極と比較すると、重なり長さが短い、アスペクト比が小さい等の理由でフリンジ電場の寄与が大きい。この為、容量変化を水平駆動櫛形電極に対してしばしば行われるように、平行平板近似を用いて記述すると誤差が大きい。より精度良い結果を得る為には、有限要素法もしくは境界要素法に基づく数値シミュレーションや、等角写像法を用いた静電場解析を行うことが考えられる。しかし、パラメトリックな設計に適用することを考えた場合、フリンジ電場の寄与を適切に記述しながら、かつ閉じた形式の容量式を得ることは重要である。そこで、本研究では、垂直駆動櫛形電極を対象として、解析的な 2 次元電場計算で得られる閉じた形式の容量式と 2 次元 FEM 解析結果を組み合わせた半解析的な容量式を導出した (付録 1 参照)。幅を無視した垂直駆動櫛歯電極の容量式を 2 次元電場計算によって解析的に求め、2 次元 FEM 解析結果を考慮した櫛歯電極幅の補正項を導入した。図 3.4.2-6 に、導出した半解析的な容量式と 2 次元 FEM 結果の比較を示す



図⑤.4.2-6 半解析的な容量式と 2 次元 FEM 解析結果との比較 ($t_m=7.5\mu\text{m}$, $t_f=15\mu\text{m}$, $g=3\mu\text{m}$)

この容量式を用いて、直流動作点における櫛歯容量を求めるためには、直流動作点における x 方向、z 方向の櫛歯変位を計算する必要がある。パラメータ抽出においては、x 方向、z 方向の

力の釣り合いの式を同時に解いている。

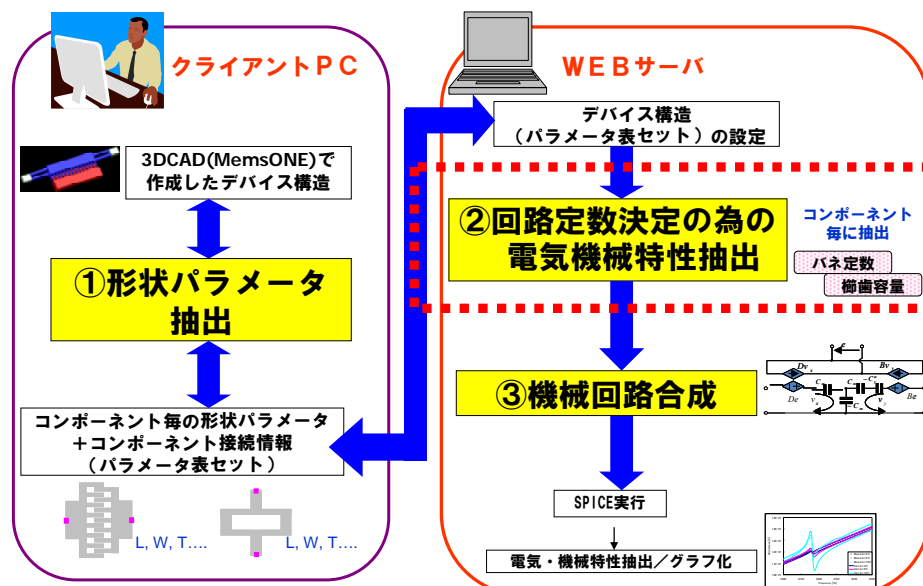
$$k_x x = F_x(x, z) \quad k_z z = F_z(x, z)$$

ここで、 k_x, k_z は x 方向、z 方向のバネ定数、 $F_x(x, z), F_z(x, z)$ は櫛歯間静電引力の x 方向、z 方向成分である。櫛歯間静電引力は、櫛歯間容量の変位微分から求める。

⑤. 4. 2. 2 H20 年度の成果詳細

H20 年度は、MEMS を構成する基本部品（コンポーネント）を用意し、それら任意に組合せて作成された MEMS デバイス構造を対象として、バネ定数等の機械特性パラメータや直流動作点での電気特性パラメータ等を算出するパラメータ抽出ソフトウェアを作成した。このソフトウェアでは、web ライブラリシステムから、各コンポーネントのパラメータ（形状パラメータ、物性パラメータ、電気パラメータ等）とコンポーネント間の接続情報を受け取り、それに基づき、コンポーネント毎に電気機械特性パラメータが算出される。

H20 年度のパラメータ抽出ソフトウェアで対応するコンポーネントは、表⑤.4.2-3 に示す 5 分類、15 コンポーネントである。



図⑤.4.2-7 処理フロー

表⑤.4.2-3 抽出ソフトウェアで対応するコンポーネント

分類	コンポーネント名
電気機械相互変換コンポーネント	2 端子櫛歯
	静電平行平板
	ユニモルフ圧電駆動梁
	磁気駆動梁
バネコンポーネント	梁バネ
	O 形バネ
	ダブルフォールデッドバネ 1

	ダブルフォールデッドバネ 2
マスコンポーネント	剛体平板 剛体フレーム
音響コンポーネント	音響平行平板アクチュエータ 穴あき管路 空洞 細管
アンカーコンポーネント	アンカー

(2) ソフトウェア機能

開発したソフトウェアは、各コンポーネントの電気・機械特性パラメータを算出するものである。以下に、具体的な機能を示す。

▶ 各コンポーネントのパラメータ値の有効性の確認

Web ライブラリから提供を受けたデータ (ECP データ) を解釈し、各コンポーネントの形状パラメータ、物性パラメータ、電気パラメータの値を逐次確認する。パラメータ値が有効でない場合は、エラーメッセージをファイル出力する。

▶ コンポーネント同士の接続状態の有効性の確認

Web ライブラリから提供を受けたデータ (ECP データ) を解釈し、全コンポーネントの全端子がアンカーへのパスを持つかを調査する。パスを持たない場合は、端子名とともに、エラーメッセージをファイル出力する。

▶ デバイス全体の直流動作点解析の結果に基づく電気・機械特性パラメータの算出

コンポーネントを組合せて構成されるデバイスに対して直流動作点解析を行い、デバイスの電極に直流バイアス電圧を加えたときの可動部の変位を計算する。その計算結果を用いて、非線形バネのバネ定数等の機械特性パラメータや容量値等の電気特性パラメータを計算する。計算結果はテキストデータとして出力され (図⑤.4.2-7)、web ライブラリに提供される。パラメータの算出方法の詳細については、次節に示す。

```

*/ Extracted parameters of each component /*
Component
+Name=comp001
+Ctype=conv_comb2term
+Mass1=7.560850e-008
+Mass2=7.561316e-008
+C0=3.628782e-013
+Cdx=-0.000000e+000
+Cdy=-2.361117e-008
+Cdz=0.000000e+000
+Cdx2=8.063960e-002
+Cdxdy=0.000000e+000
+Cdxdz=0.000000e+000
+Cdy2=7.149530e-003
+Cdydz=0.000000e+000
+Cdz2=-9.500129e-003
+Rfx1=1.373992e-005
+Rfy1=3.917133e-006
+Rfz1=6.683768e-003
+Rfx2=1.374010e-005
+Rfy2=3.917318e-006
+Rfz2=6.683768e-003
+BiasVolt=2.000000e+001

Component
+Name=comp003
+Ctype=spring_beam
+KspringX=3.200000e+004
+KspringY=3.200000e+000
+KspringZ=5.120000e+001
+MassX=3.883339e-011
+MassY=4.327143e-011
+MassZ=4.327143e-011
+RL=1.000000e+005

Component
+Name=comp004
+Ctype=spring_beam

```

図⑤.4.2-7 出力データの例

(3) コンポーネントの機械特性パラメータおよび電気特性パラメータの算出

本ソフトウェアでは、コンポーネントごとに機械特性パラメータおよび電気特性パラメータを算出する。その算出方法は、チュートリアルに記述し、ユーザが参照できるようにした。以下では、代表的なコンポーネントである 2 端子櫛歯、及びバネコンポーネントのパラメータの算出について述べる。

① 2 端子櫛歯のパラメータ算出

図⑤.4.2-8 に示す 2 端子櫛歯では、以下のパラメータを算出した。

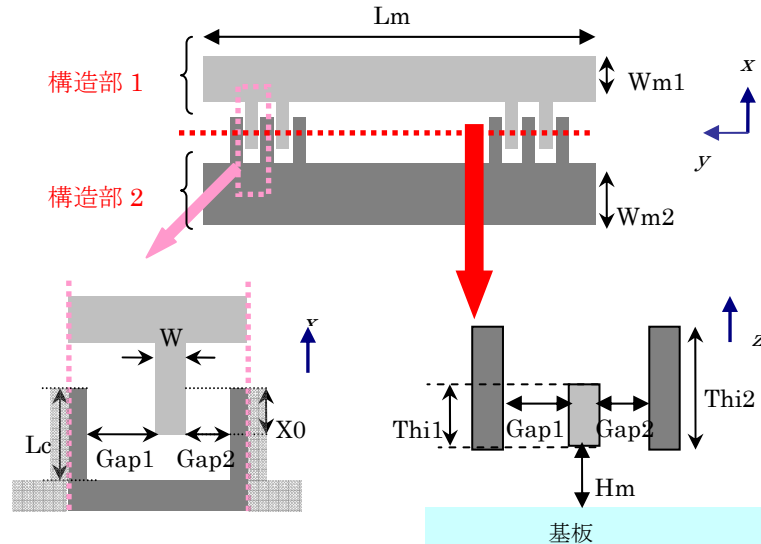
- 各構造部の質量
- 直流動作点における櫛歯間容量
- 直流動作点における櫛歯間容量の 1 次および 2 次微係数
- 各構造部の機械抵抗

直流動作点における櫛歯容量は、直流動作点解析によって求めた各構造部の変位に基づいて計算した。このとき、ストローク部の重なり容量の他に、櫛歯先端と対向構造部の容量やフリンジ容量の寄与を考慮した。櫛歯の厚さが異なる場合、もしくは一方の構造部が他方に対して厚み方向にずれている場合は、前節に示したフリンジ効果を適切に考慮した半解析的な容量式を適用した。

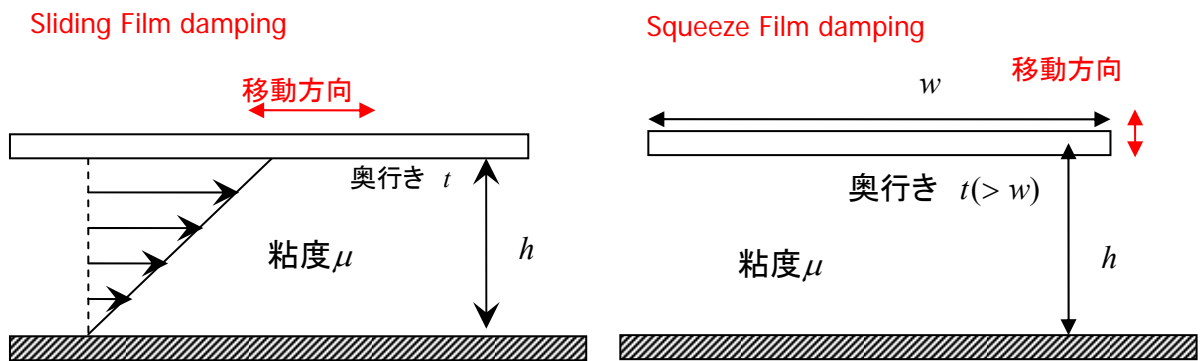
また、各構造部の機械抵抗では、図⑤.4.2-9 に示す sliding film damping と squeeze film damping の解析式を元に、X 方向、Y 方向、Z 方向のそれぞれの値を算出した。X 方向の機械抵抗は、以下に示す寄与の和から算出している。

- (1) 櫛歯間ギャップの sliding film damping
- (2) 櫛歯先端-対向面間の squeezing film damping
- (3) 可動部-基板間の sliding film damping

Y、Z方向についても、同様の考え方でパラメータ算出を行っている。



図⑤.4.2-8 2端子櫛歯



図⑤.4.2-9 機械抵抗

②バネコンポーネントのパラメータ算出

バネコンポーネントでは、以下のパラメータを算出した。

- バネ定数
- 等価質量
- 電気抵抗

バネ定数は、非線形性の寄与を考慮して算出した。まず、バネ構造を棒状の梁の繋ぎあわせとしてモデル化した。例えば、O型バネでは、図 3.4.2-9 に示すように、8本の梁の組合せとしてモデル化している。そして、梁のモデルとして長軸方向の伸縮によって生じる張力を考慮したも

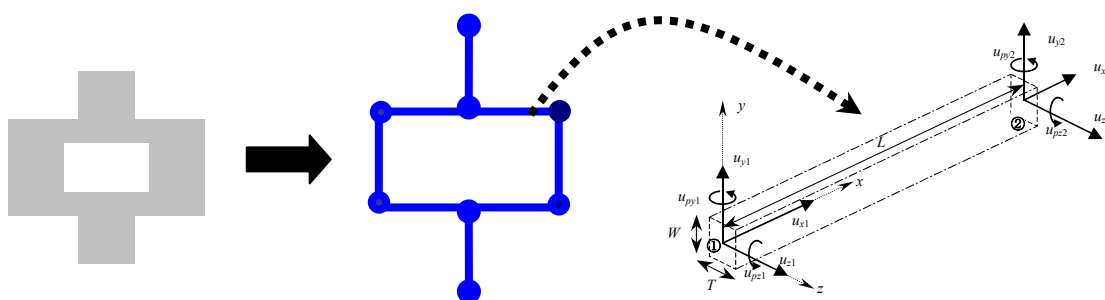
のを用いることによって、非線形性を考慮した変位を求めることができる。具体的には、デバイスの電極に直流バイアス電圧をかけたときのバネ変位を直流動作点解析によって求め、その結果からバネ定数を算出した。

等価質量は、分布質量系であるバネを等価な集中質量系に置き換えた場合の実効的な質量である。これは、エネルギー法に基づいて算出した。まず、バネ定数の場合と同様に、バネ構造を棒状ばねのつなぎ合わせとして表現する。そして、それぞれの梁の変位を両端点の変位を係数に含む3次関数として表現し、梁が周波数 ω で振動しているときの運動エネルギーの最大値を求めた。その値を等価な集中質量系の運動エネルギーの最大値と等置することによって、等価質量を求めた。

電気抵抗は、LSIの配線抵抗を見積もる方法を用いて計算した。バネコンポーネントの中心線の長さを L 、断面積を A 、バネの材質の抵抗率 ρ としたとき、バネ抵抗 R は、

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

から求める。中心線に分岐がある場合は、抵抗が並列配置されているものとして計算した。



図⑤.4.2-9 O型バネのモデル化

付録1. 垂直駆動櫛形電極の半解析的な容量式

本付録では、「⑤. 4. 2. 1 (2) -④直流動作点における櫛歯容量」の補足として、垂直駆動櫛形電極の半解析的な容量式について説明する。この容量式は、解析的な2次元電場計算で得られる閉じた形式の容量式と2次元FEM解析結果を組み合わせて導出した。

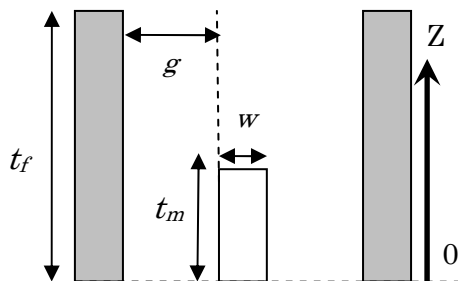


図 3.4.2-5 垂直駆動櫛形電極

解析的な2次元電場計算による容量式には、Yehらの導出式を適用した。Yehらは、櫛歯の幅が無視できる程に小さいコムドライブを対象に、2次元ポアソン方程式を等角写像法で解き、電場に関する閉じた解析式を得た。

$$E(w) = \frac{-jA(a, b, c)}{\sqrt{(w-a)(w-b)(w-c)(w+1)}}$$

ここで、係数Aは、櫛歯間電圧をVとすると、以下の式で表される。

$$A(a, b, c) = \frac{V\sqrt{(a-c)(b+1)}}{2[F(\delta, q) + F(\kappa, q)]}$$

$$q = \sqrt{\frac{(b-c)(a+1)}{(a-c)(b+1)}}, \quad \delta = \arcsin \sqrt{\frac{(b+1)c}{(c-b)}}, \quad \kappa = \arcsin \sqrt{\frac{(a-c)b}{(b-c)a}}$$

$$a = \exp(-\pi(t_f - t_m - z)/g), \quad b = \exp(-\pi(t_f - z)/g), \quad c = \exp(-\pi t_f/g)$$

この解析では、櫛歯の幅の効果を無視している為、解析式で計算した容量は、2次元FEM解析結果より小さい。そこで、櫛歯の幅の寄与を櫛歯幅のストリップ容量と4次の補正項の和で評価した。補正項は、(1)櫛歯対の一方が他方の中央に位置するときに容量が最大になり、(2)この位置に関して容量のz変位依存性が対称になる点を考慮して設定した。補正項には未知のパラメータ α, β が含まれるが、これらは種々の櫛歯幅、ギャップ幅に対する2次元FEM解析結果から、その櫛歯幅、ギャップ幅依存性を決定した。

$$C(x, z) = 2N(x_{ov} + x) \left[\frac{\varepsilon F(\pi/2, r(z))}{F(\delta(z), q(z)) + F(\kappa(z), q(z))} + \frac{\varepsilon K\left(\sin \frac{\pi w}{2(w+g)}\right)}{2K\left(\cos \frac{\pi w}{2(w+g)}\right)} + \{\alpha(z - 2z_0)^2 z^2 + \beta\} \right]$$

⑤. 5 特性抽出機能と Web システムの開発

1) 特性抽出機能と Web システムの開発 (H19)

H19 年度構築した MEMS 等価回路を閲覧、取得可能とするために Web システムを開発した。ユーザの利便性のため、MEMS 構成要素モデルの検討を通して得られたモデルの解説も掲載した。

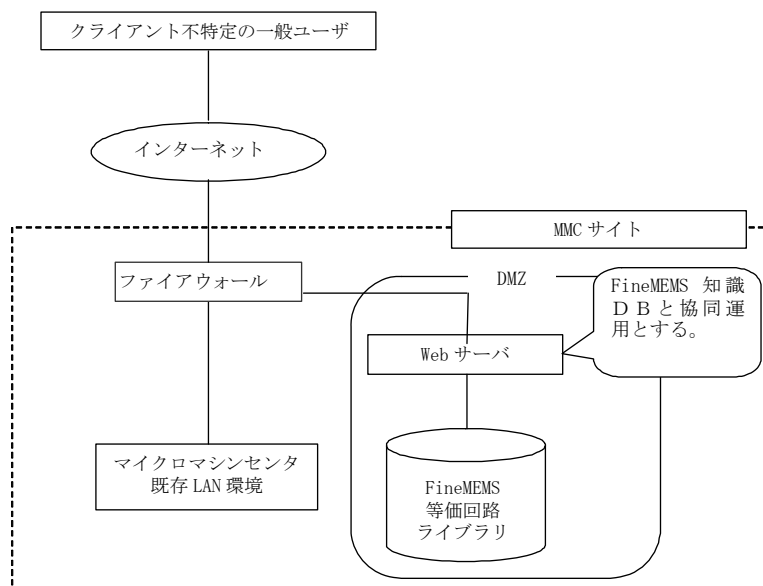
①機能要件

Web システムの機能要件は以下の通りである。

- 1 高集積・複合 MEMS (ファイン MEMS) および文献等により収集した MEMS 等価回路データ (MEMS デバイス構造、等価回路図、等価回路モデルに対応するネットリストデータ) を掲載し、一般ユーザが閲覧できる。
- 2 MEMS 構成要素モデルの解説を掲載し、一般ユーザが閲覧できる。
- 3 機械構造パラメータの入力により生成されたネットリストデータを、ユーザがダウンロードできる。

②システム構成

Web ライブラリ閲覧システムは、蓄積されたライブラリデータ (等価回路モデル、ネットリストデータ等の知識データ) を広く一般に公開する。不特定の一般ユーザがインターネット経由で Web サーバに接続し、等価回路モデルの表示、ネットリストのダウンロード等が可能な Web サーバシステムである。ライブラリデータの閲覧システムのシステム構成を図⑤.5-1-1 に示す。



図⑤.5-1-1 Web ライブラリ閲覧システム構成

③画面構成

画面構成と主な機能を表⑤.5-1-1 に示す。

表⑤.5-1-1 画面構成

画面		機能	
トップ		システムの概説	本システムの背景、経緯、位置づけ等を簡単に説明する。
		使用許諾契約	ネットリストの使用許諾契約に対する同意を得る。
	使用方法	使用方法概要	モデル選択、パラメータ入力、ネットリストダウンロードまでの概要を解説
	計算例	パラメータ入力例および回路シミュレーション結果	形状パラメータ入力例および機会パラメータ抽出結果、作成されたネットリストの回路シミュレーション結果を示す。
	等価回路モデル一覧	モデル選択	等価回路モデル一覧を示す。
		解説	構成要素モデルの概説を示す。
		形状パラメータ定義	ユーザが変更可能な形状パラメータに対して、数値を入れる。
		形状パラメータ設定	構造における指定すべき形状パラメータを示す。
		機械構造パラメータ設定	機械構造パラメータを抽出する。もしくは、ユーザが機械構造パラメータに対して、数値を入れる。
		ネットリスト生成	設定された形状・機械構造パラメータを基に、ネットリストの生成とダウンロードを行う。

	構成要素モデル	モデル選択	構成要素モデル一覧を示す。
		モデル説明	機械構造パラメータ抽出仕様の表示を行う。

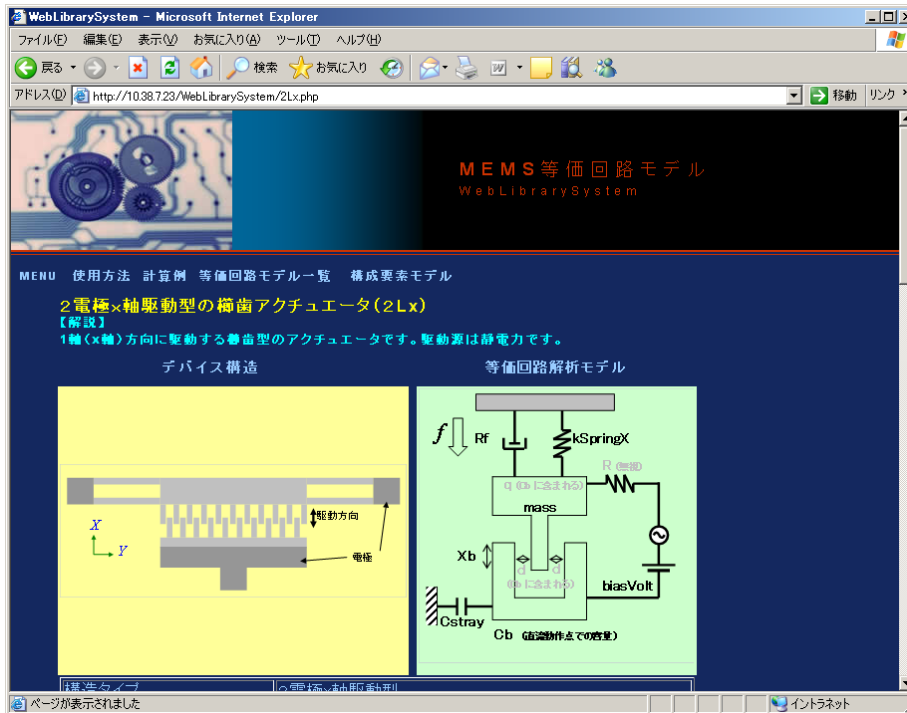
④システム全体処理概要フロー

まず、ユーザは等価回路を得たいモデルを一覧から選択する(図⑤.5-1-2)。



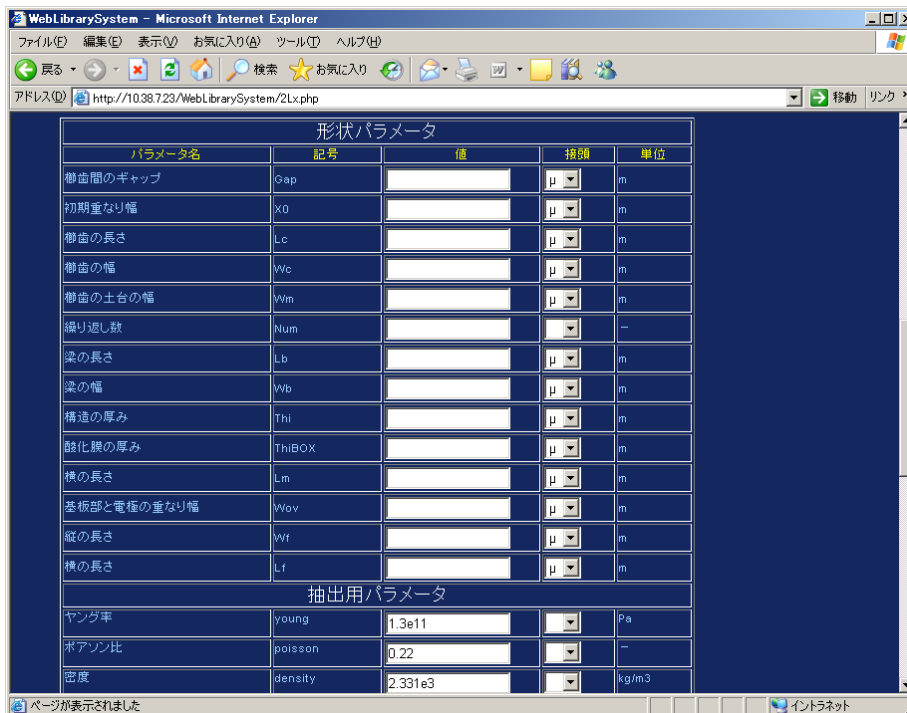
図⑤.5-1-2 モデル選択

モデルを選択すると画面が遷移し、図⑤.5-1-3のようなデバイスの構造および解析モデルの解説が表示される。



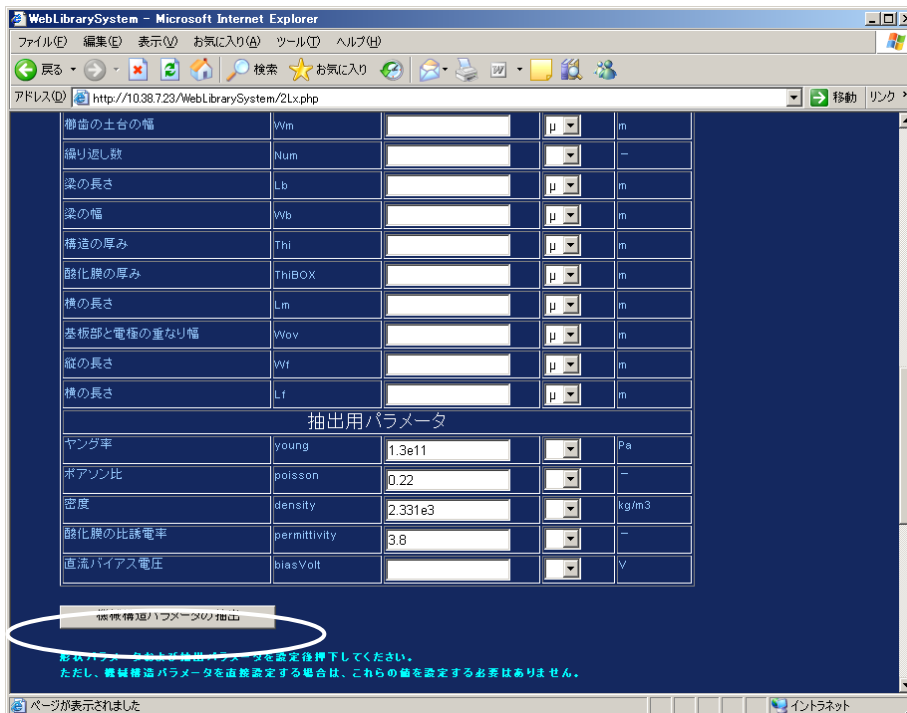
図⑤.5-1-3 デバイス構造解説

解説の下方には、形状パラメータを入力するフィールドがあるので、値を設定していく(図⑤.5-1-4)。



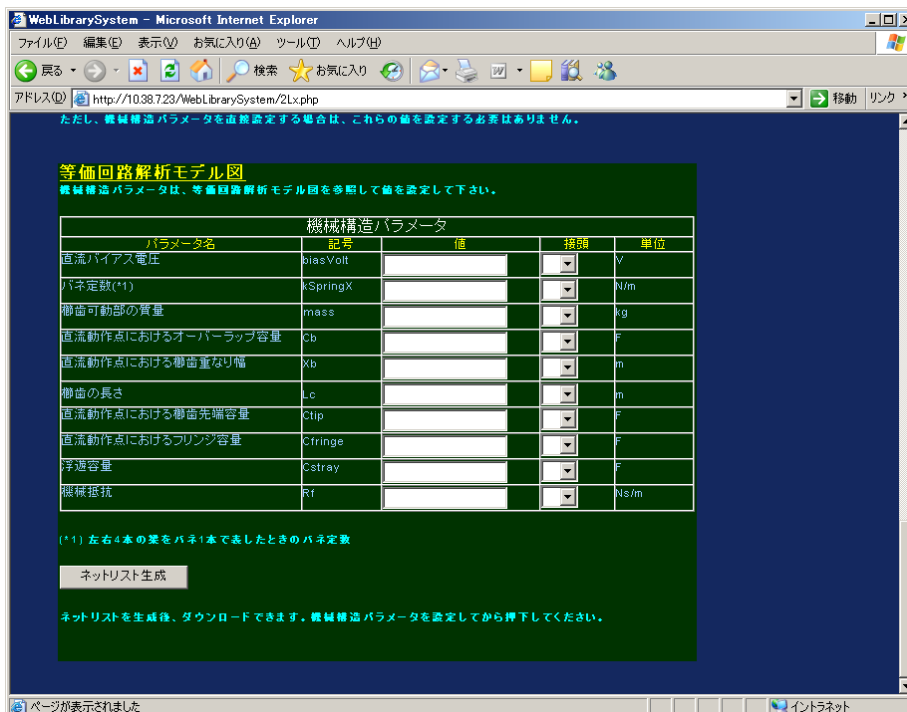
図⑤.5-1-4 形状パラメータ入力

すべての値を設定後、[機械構造パラメータの抽出]ボタンを押下し、機械構造パラメータ抽出を実行する(図⑤.5-1-5)。



図⑤.5-1-5 機械構造パラメータの抽出

機械構造パラメータの抽出が終了すると、図⑤.5-1-6 に示す、機械構造パラメータのフィールドに値が反映される。機械構造パラメータの抽出を行わずに、ユーザが準備した機械構造パラメータをここで入力しネットリストを作成することも可能である。ここで、[ネットリスト生成]ボタンを押すと等価回路のネットリストの取得が行える。



図⑤.5-1-6 機械構造パラメータの設定

2) 特性抽出機能と Web システムの開発 (H20)

H20 年度に構築した等価回路モデルを登録し、閲覧できるよう Web システムを開発した。さら

に、モデル間の等価回路的接続をソフトウェア的に実現するための機能を開発した。等価回路モデル検討を通して得られたモデルの解説も掲載し、閲覧できるよう Web システムを構築した。H20 年度 Web システムでは、Web システムを介して回路シミュレーションを実行可能とし、回路シミュレーション結果の可視化機能も開発した。

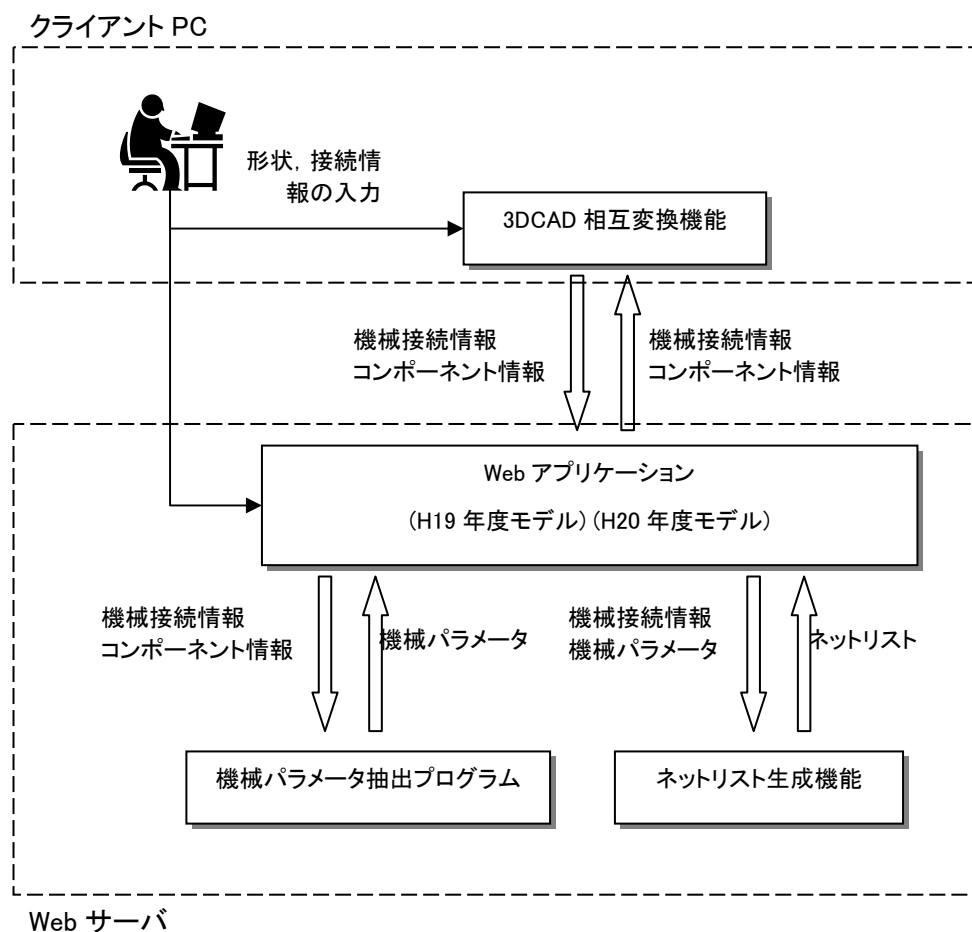
①機能要件

H20 年度版 Web システムの機能要件は以下の通りである。

1. CAD データをもとに単位要素の形状およびそれらの接続関係を読み込むことができる。
2. 単位要素の形状パラメータおよび物性パラメータを Web 画面で参照、編集することができる。
3. 単位要素間の接続関係を Web 画面で参照、編集できる。
4. 機械構造パラメータの入力を考慮し、一般ユーザがネットリストデータをダウンロードできる。
5. 機械構造パラメータの入力を考慮し生成したネットリストの回路シミュレーションができる。

②システム構成

H20 年度の Web ライブラリ閲覧システムは、H20 年度開発手法に基づく登録ライブラリデータ（等価回路モデル、ネットリストデータ等の知識データ）を広く一般に公開する。システム構成を図⑤.5-2-1 に示す。H20 年度 Web 機能では、H19 年度に開発したライブラリ機能も使用可能となるよう包含した形で開発した。



図⑤.5-2-1 Web ライブラリ閲覧システム構成

③画面構成

画面構成と主な機能を表⑤.5-2-1 に示す。

表⑤.5-2-1 画面構成

画面		機能		
トップ			システムの概説	本システムの背景、経緯、位置づけ等を簡単に説明する。
			使用許諾契約	ネットリストの使用許諾契約に対する同意を得る。
	デバイスモデル		H19 年度 Web 機能	H19 年度 Web 機能への入り口
	コンポーネント複合モデル			
		使用方法	パラメータ入力例および回路シミュレーション結果	形状パラメータ入力例および機会パラメータ抽出結果、作成されたネットリストの回路シミュレーション結果を示す。
			計算例	形状パラメータ入力例および機会パラメータ抽出結果、作成されたネットリストの回路シミュレーション結果を示す。
			コンポーネント一覧	コンポーネント選択 解説
	等価回路ジェネレータ		CAD 情報読み込み	CAD 情報ファイルを選択し読み込みを行う。
			コンポーネント設定	コンポーネントの追加、形状パラメータの編集、機械構造パラメータ抽出の実行を行う。
			幾何接続設定	コンポーネント間の接続関係設定を行う。

			周辺回路設定	周辺回路の設定を行う。
			回路シミュレーション制御設定	回路シミュレーション上の制御設定を行う。
			ネットリスト生成	ネットリストのダウンロード、回路シミュレーションの実行を行う。

④システム全体処理概要フロー

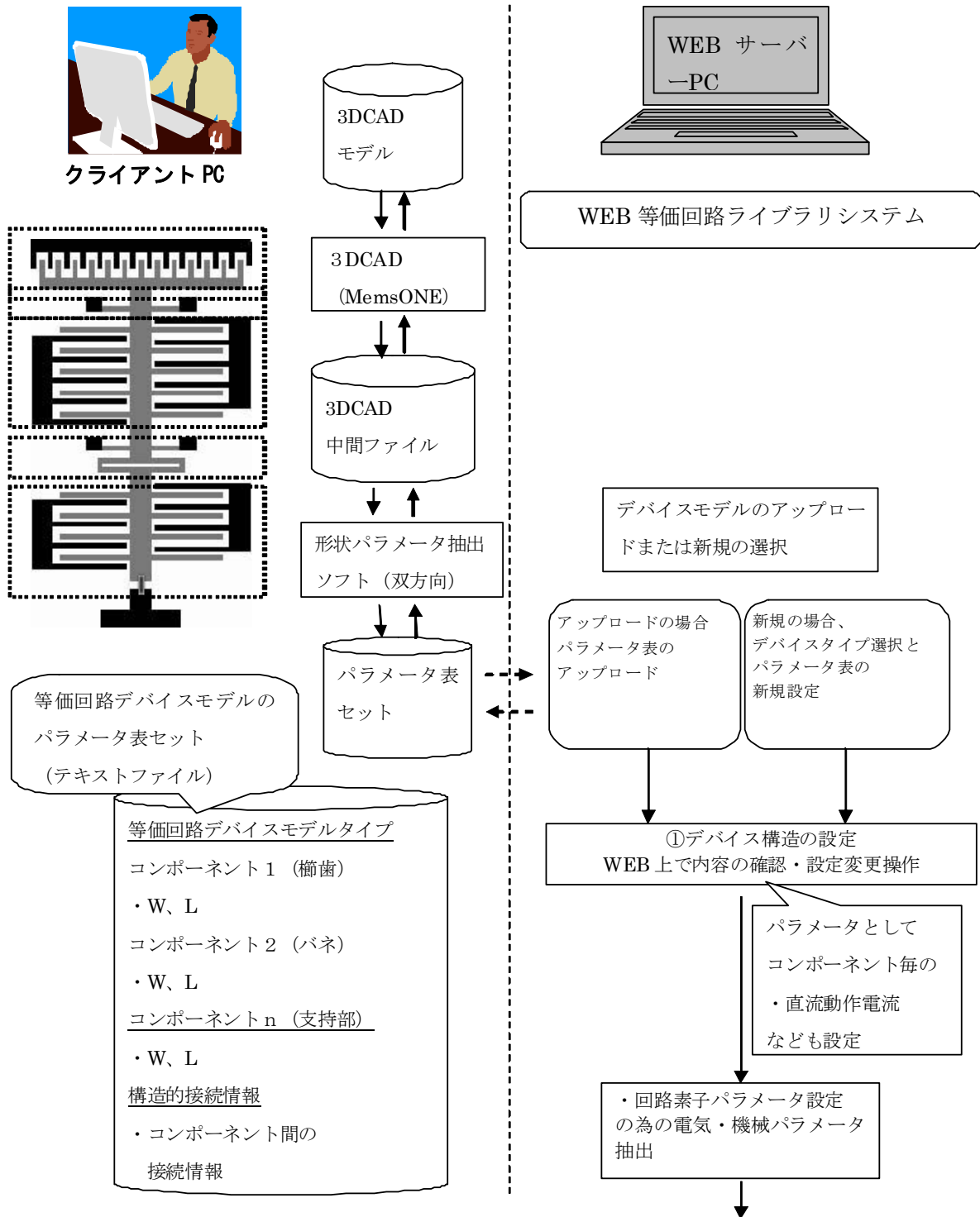
Web ライブラリシステム全体の処理概略フローを図⑤.5-2-2 に示す。まず、ユーザはデバイスの構造を決定し、単位要素間の接続関係を定義する。これはクライアント PC にインストールされた 3D CAD および形状パラメータ抽出ソフトによって行うか、クライアント PC から Web ブラウザを介して計上パラメータの設定および単位要素間の接続関係を定義する。

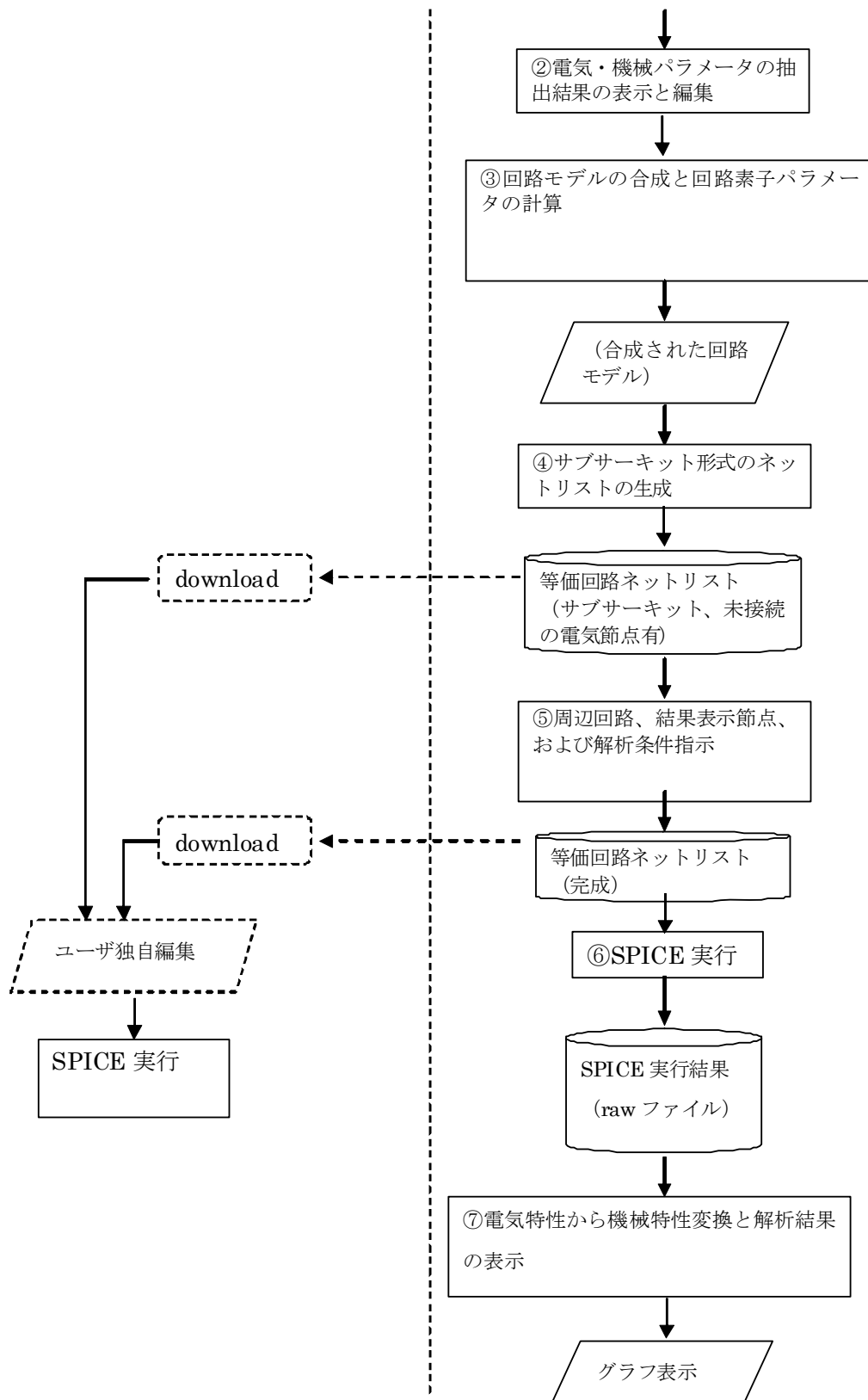
次に、電気機械パラメータ抽出プログラムを Web ブラウザを介して実行し、電気機械パラメータを抽出する。更に、周辺回路素子の設定や、回路シミュレーションの制御設定を行う。

最後に、ネットリストのダウンロードおよび回路シミュレーションの実行を行う。

この中で、Web システムとは Web サーバにインストールされたモジュールのうち、電気機械パラメータ抽出プログラムおよび回路シミュレータを除く機能である。電気機械パラメータ抽出プログラムおよび回路シミュレータは Web ブラウザを介してユーザが意識することなく利用できるようにするものである。

以降で Web システムの各機能の報告を行う。



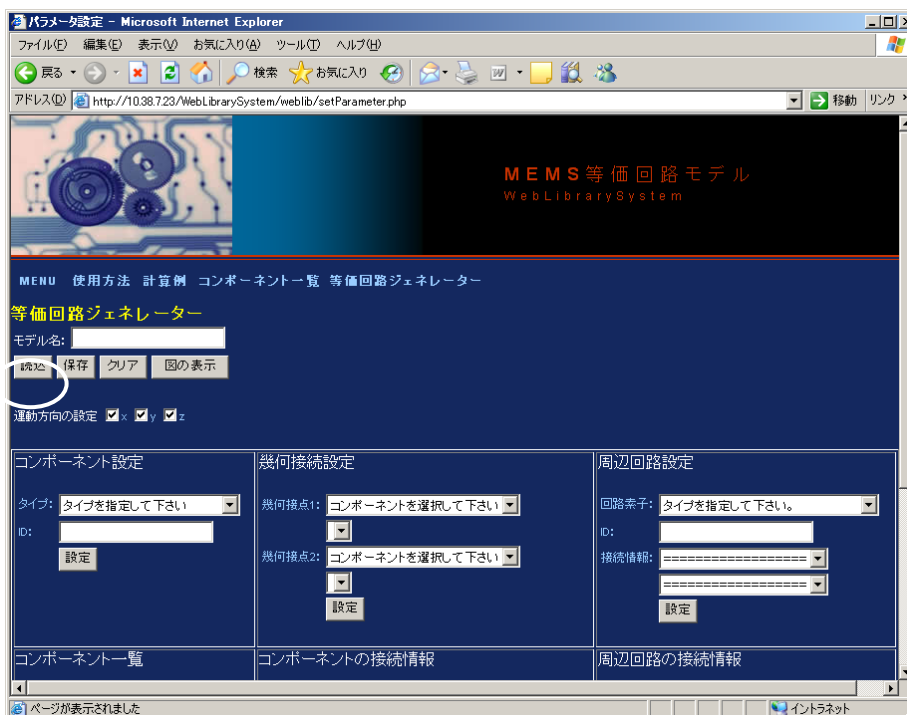


図⑤.5-2-2 Web ライブラリシステムの概略フロー図

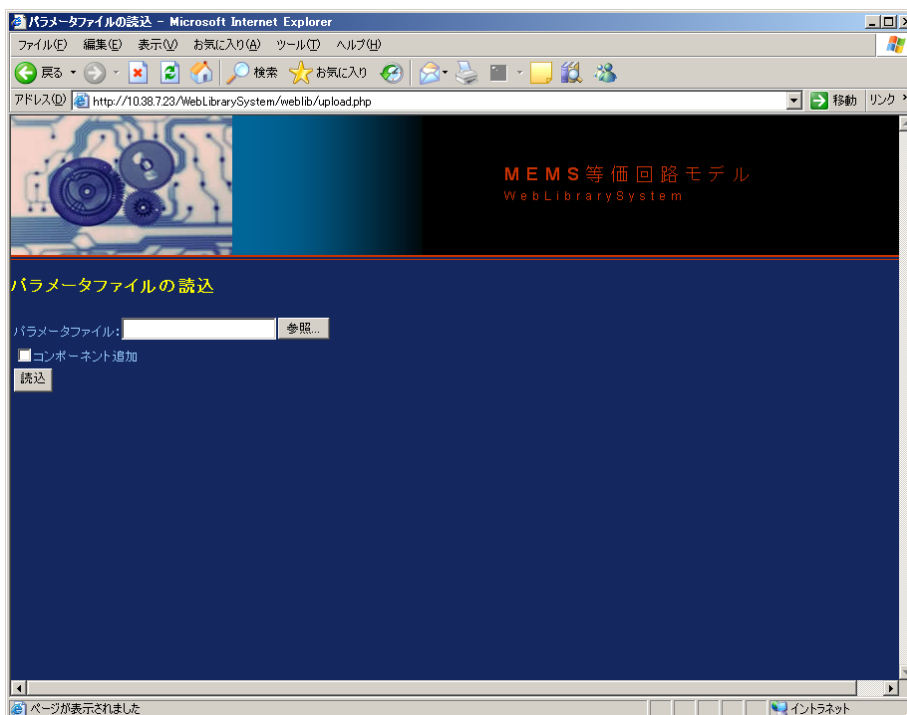
a) CAD 情報アップロード機能

クライアント PC にインストールされた 3D CAD および形状パラメータ抽出ソフトで作成したデバイス情報を Web システムに読み込みボタンでアップロード(図⑤.5-2-3)する。図 3.5-2-4 のパラメ

ータファイルの読み込み画面で作成したファイルを指定することにより、アップロードを行う。



図⑤.5-2-3 アップロード機能への遷移



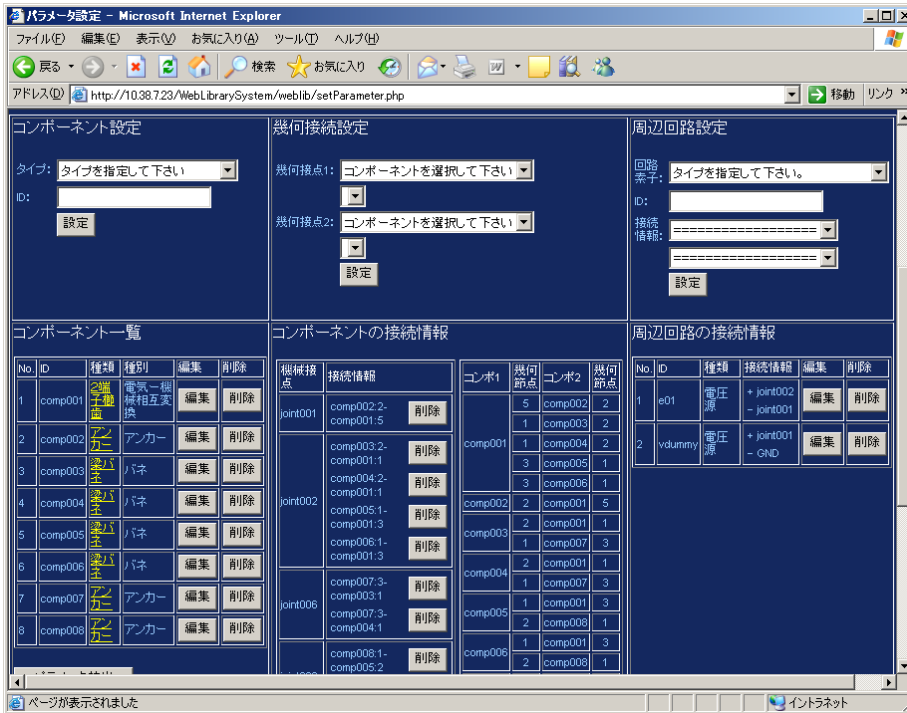
図⑤.5-2-4 アップロード機能

b) コンポーネント設定機能

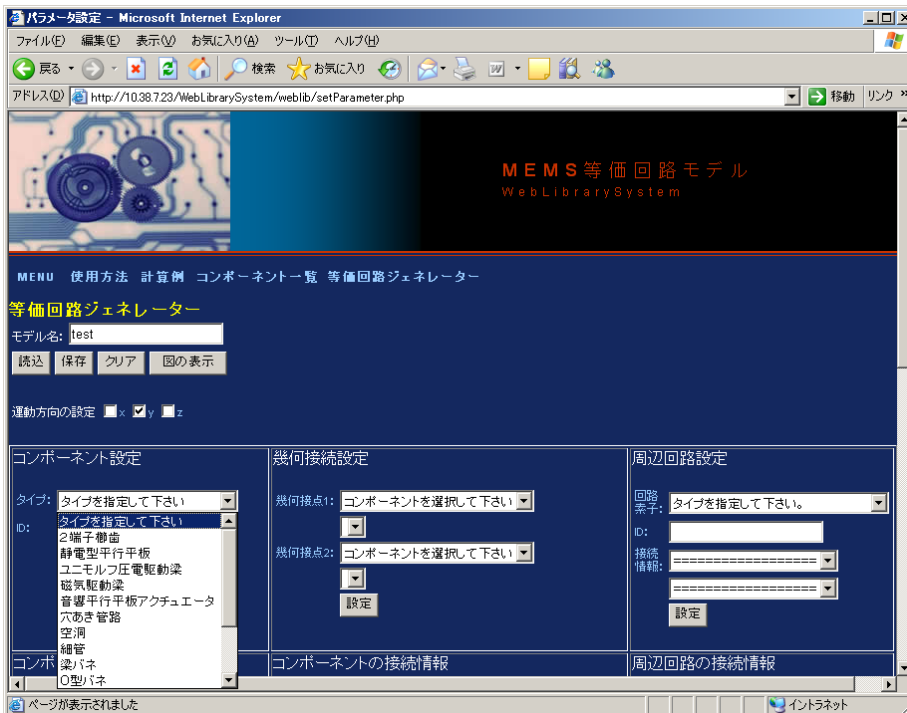
アップロード機能を用いた場合、CAD 情報に記述された内容が画面に反映される(図⑤.5-2-5)。アップロード機能を用いない場合、本画面上で単位要素であるコンポーネントを定義することができる。コンポーネントのタイプをコンボボックスから選択し(図⑤.5-2-6)、コンポーネントの ID をキーボードから入力するとコンポーネント一覧に追加される。

コンポーネント一覧に表示されるコンポーネントの[編集]ボタンを押すと、図⑤.5-2-7 のようなパ

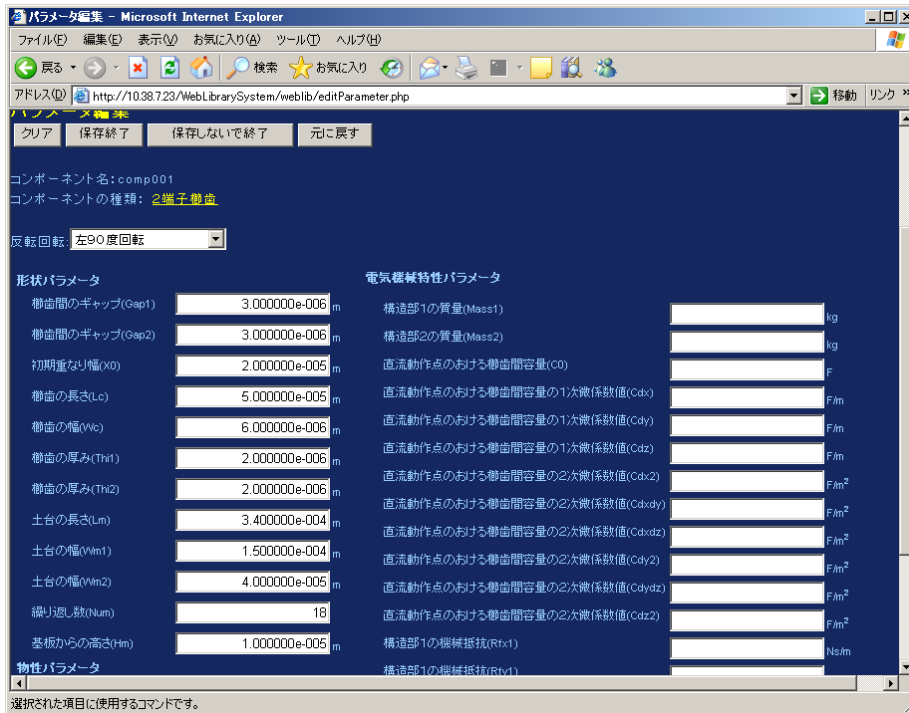
ラメータ編集画面が表示される。形状パラメータの入力や変更を行う。



図⑤.5-2-5 アップロード機能利用時のコンポーネント設定



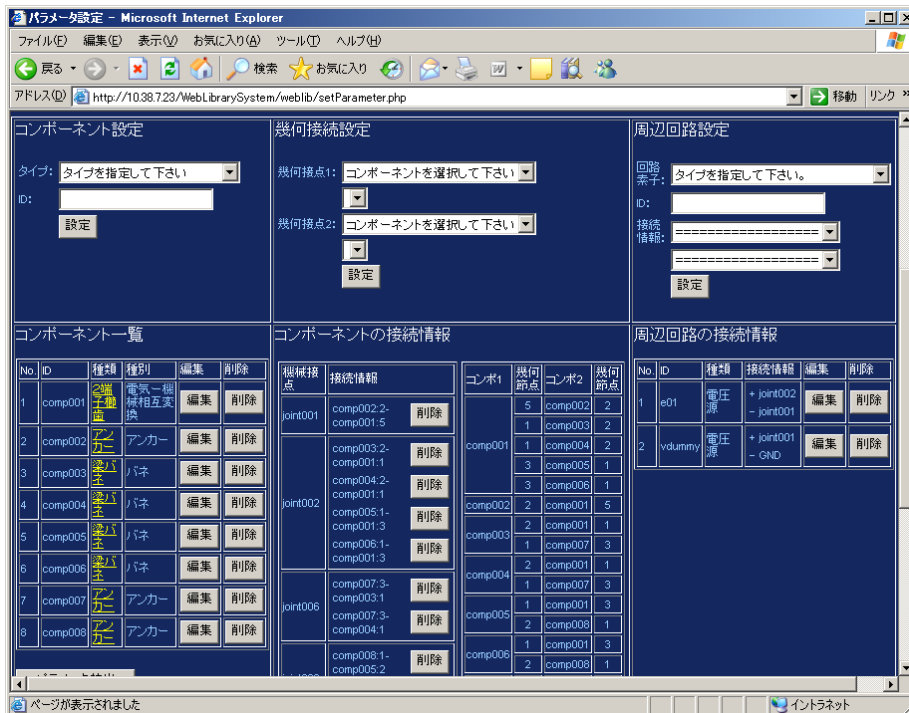
図⑤.5-2-6 コンポーネントの設定



図⑤.5-2-7 パラメータ編集画面

c) 幾何接続設定機能

アップロード機能を用いた場合、CAD 情報に記述された内容が画面に反映される(図⑤.5-2-8)。接続関係の変更も可能である。アップロード機能を用いない場合は、設定されたコンポーネントの接続関係をここで定義する。

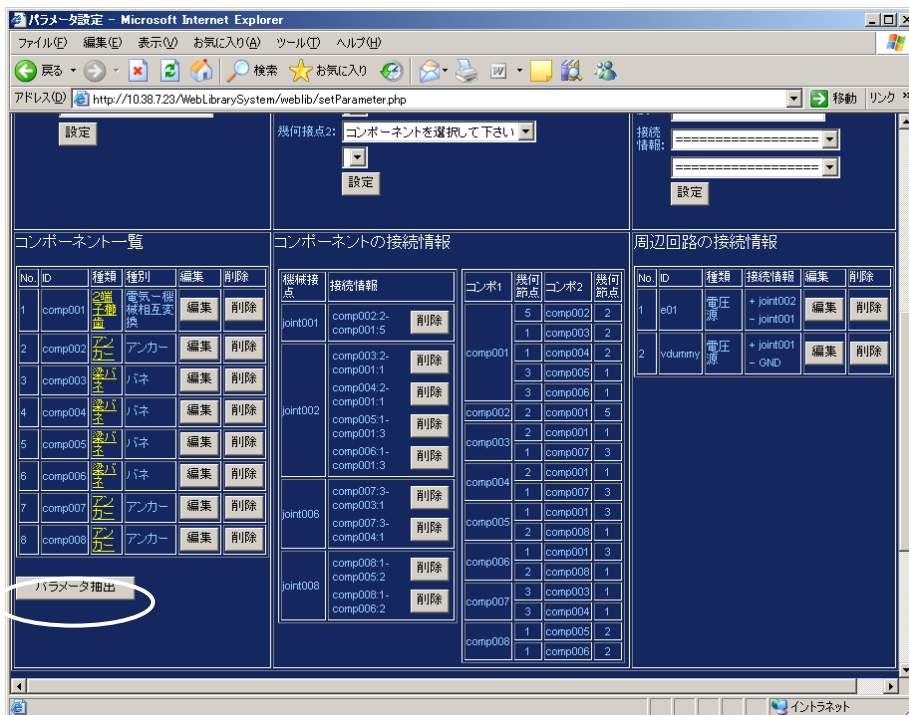


図⑤.5-2-8 アップロード機能利用時の接続情報設定

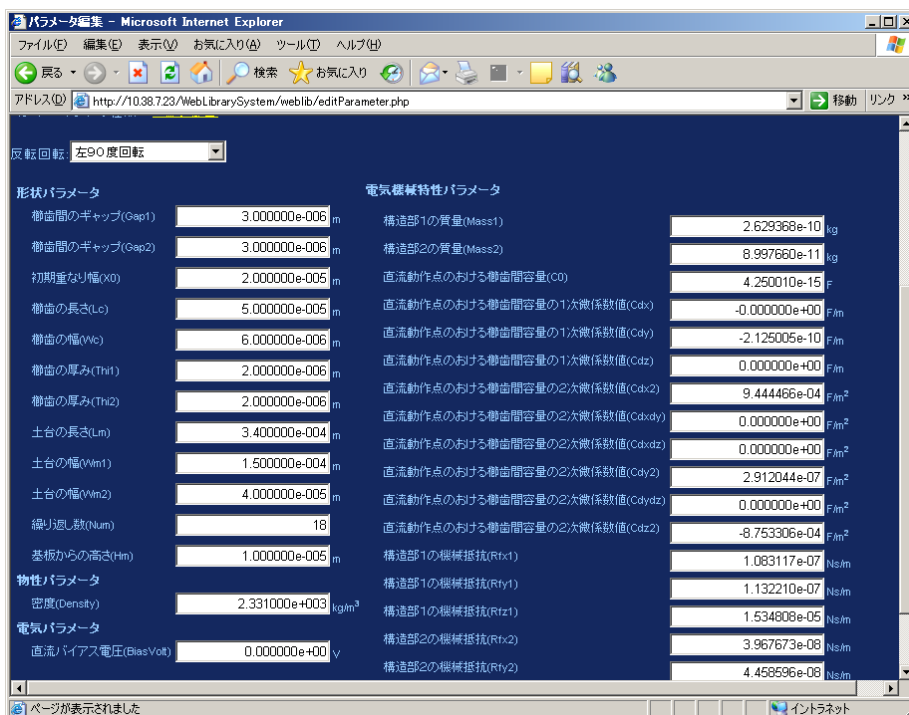
d) 電気機械パラメータ抽出

形状パラメータ入力および接続情報設定完了後、電気機械パラメータ抽出を行う。図⑤.5-2-9に

示すようにコンポーネント一覧の下方に表示される[パラメータ抽出]ボタンを押すと、電気機械パラメータ抽出プログラムが実行される。結果は、コンポーネント一覧に表示されるコンポーネントの[編集]ボタンを押して表示されるパラメータ編集画面で確認できる(図⑤.5-2-10)。



図⑤.5-2-9 電気機械パラメータ抽出

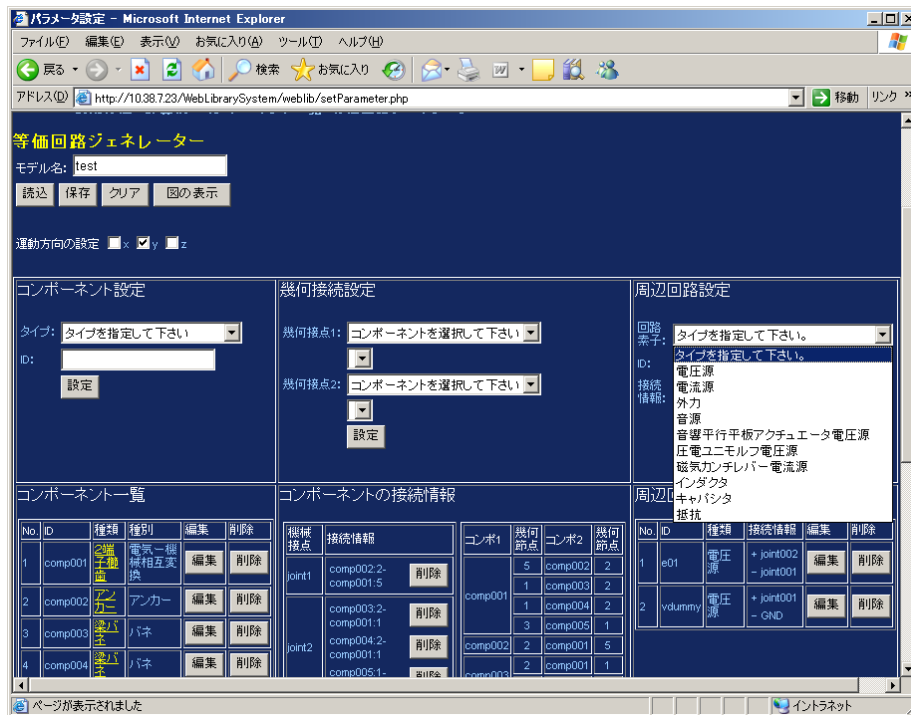


図⑤.5-2-10 電気機械パラメータ抽出結果

e) 周辺回路設定機能

駆動電源等の設定を行う。アップロード機能を用いた場合、CAD 情報に記述された内容が画面に反映される。新たに追加する場合は、回路素子タイプをコンボボックスから選択する(図⑤.5-2-11)。素子の ID とコンポーネントとの接続関係を指定すると周辺回路の接続情報に追加され

る。

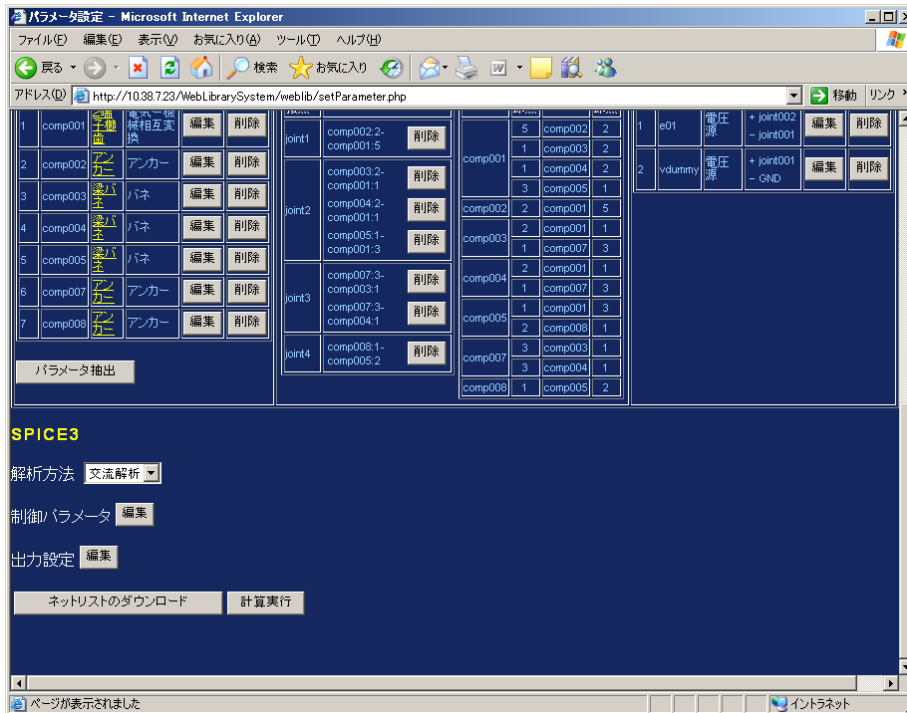


図⑤.5-2-11 周辺回路設定

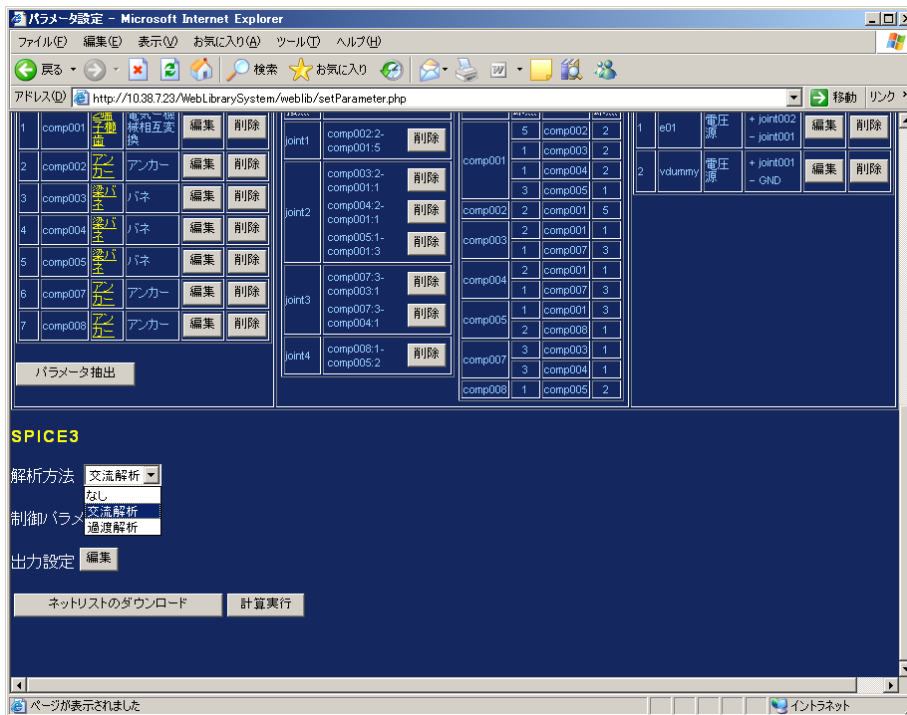
f) 回路シミュレーション設定機能

解析の方法、解析の制御パラメータ、出力指定を行う(図⑤.5-2-12)。解析方法は、図⑤.5-2-13のようにコンボボックスから選択する。制御パラメータの指定は[編集]ボタンを押して表示される画面で設定を行う。選択した解析方法によって画面構成が異なる。交流解析の場合は、図⑤.5-2-14、過渡解析の場合は、図⑤.5-2-15のような画面が表示される。出力指定は、Webシステムで回路シミュレーションを実行する場合、必須である。

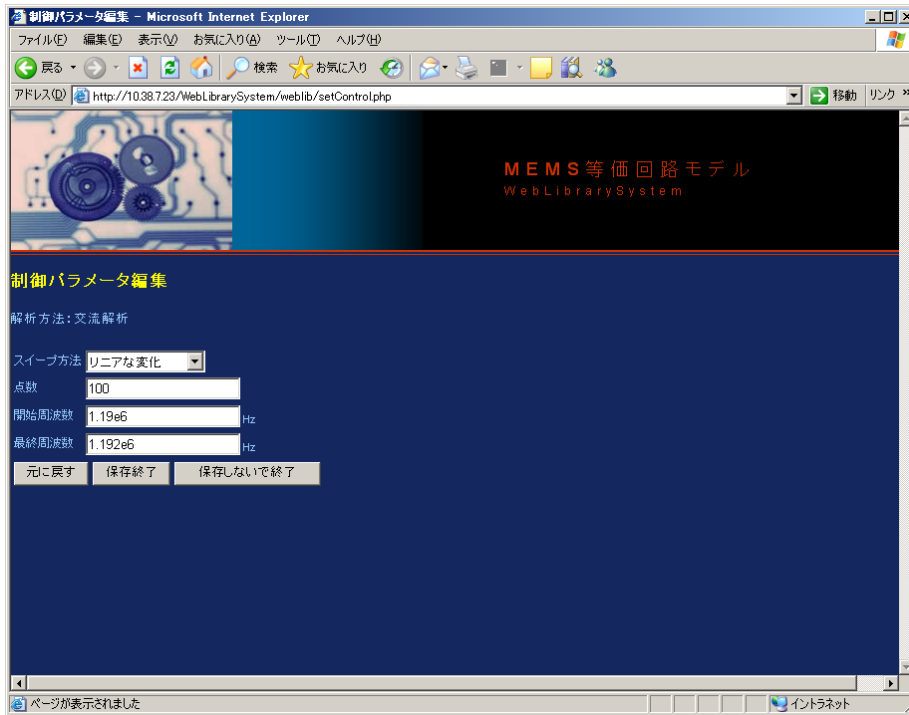
出力指定は、図⑤.5-2-16のような画面である。コンポーネントごとに出力できる値が限定されるので、まずコンポーネントをコンボボックスから選択すると、選択されたコンポーネントで出力可能な値がリストされる。



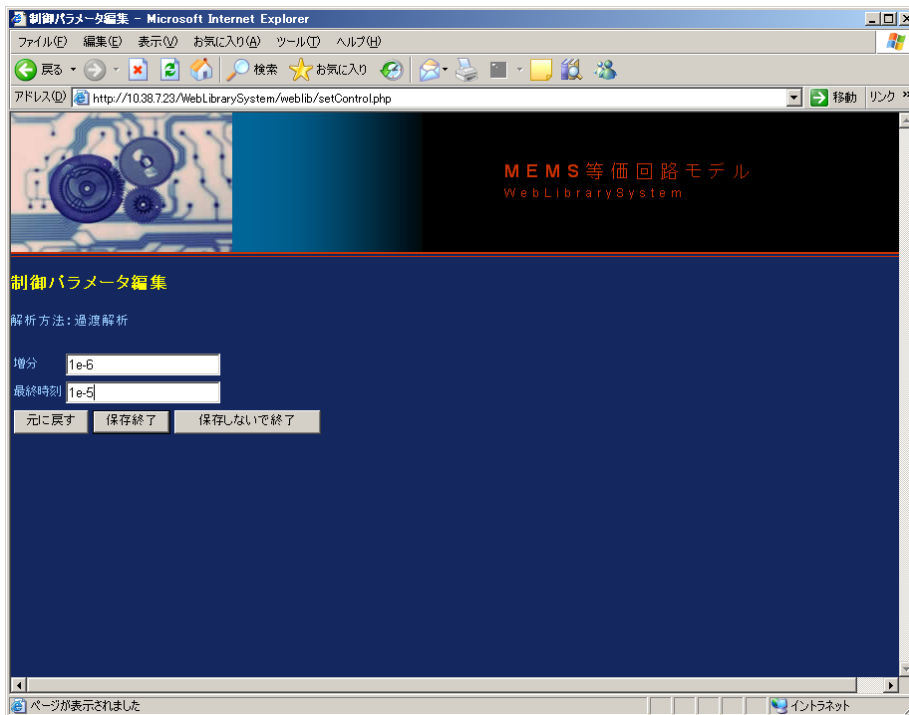
図⑤.5-2-12 回路シミュレーション設定機能



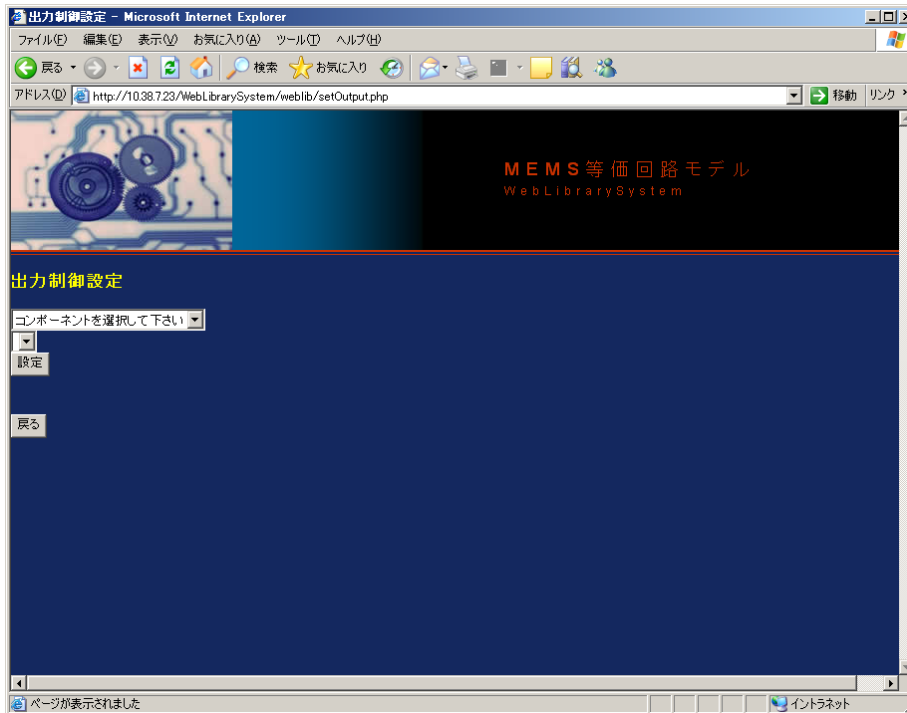
図⑤.5-2-13 解析方法



図⑤.5-2-14 制御パラメータ(交流解析)



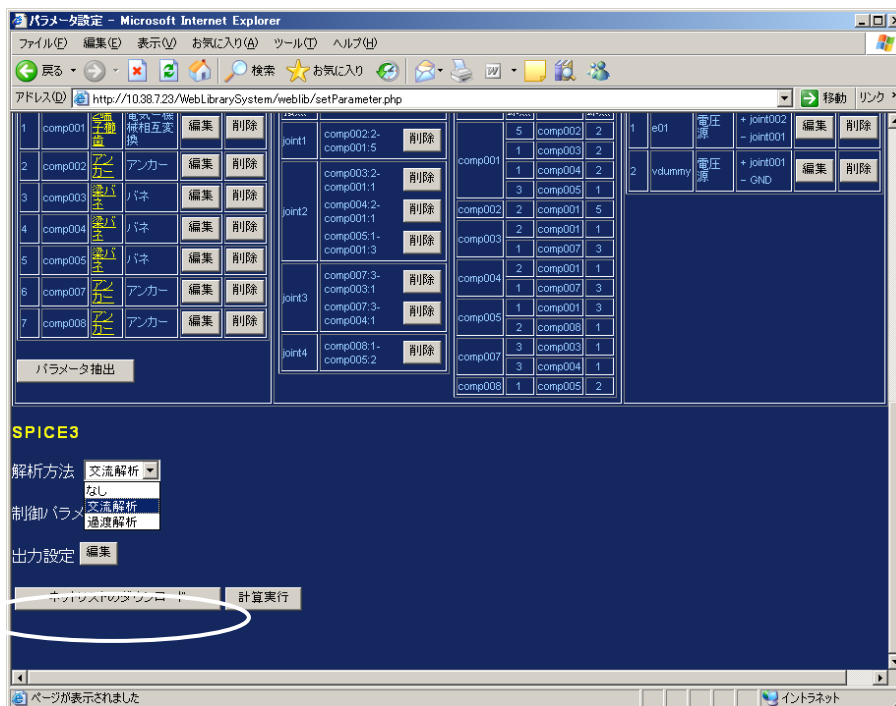
図⑤.5-2-15 制御パラメータ(過渡解析)



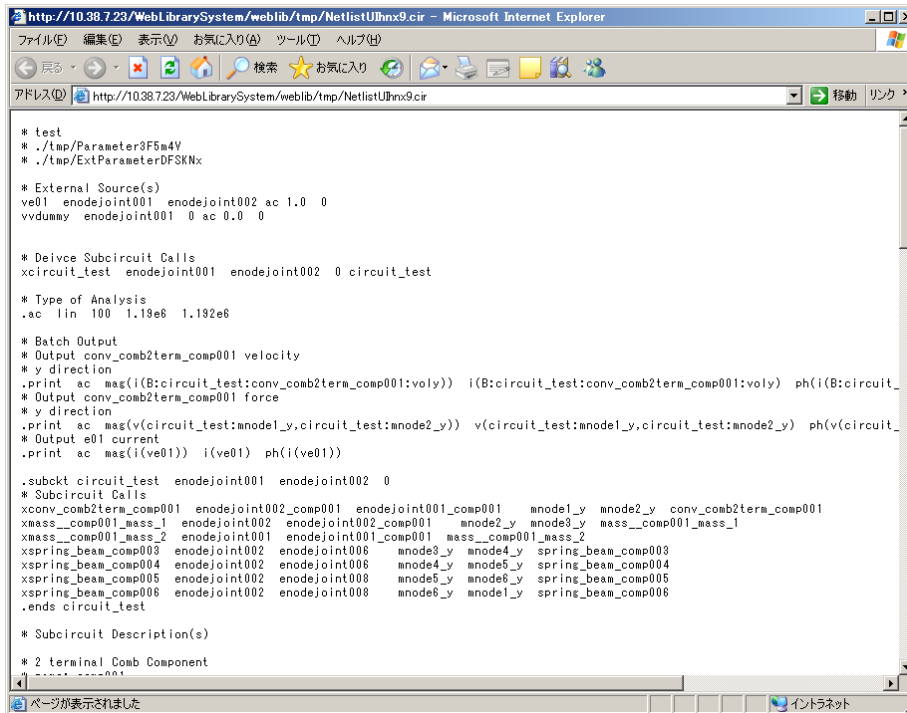
図⑤.5-2-16 出力指定

g) ネットリストダウンロード

以上の設定が完了すればネットリストの生成が可能である。[ネットリストのダウンロード(図⑤.5-2-17)]ボタンを押すと新しい画面に生成されたネットリストが表示される(図⑤.5-2-18)。この内容をファイルに保存し、自環境の回路シミュレータで実行を行うことができる。



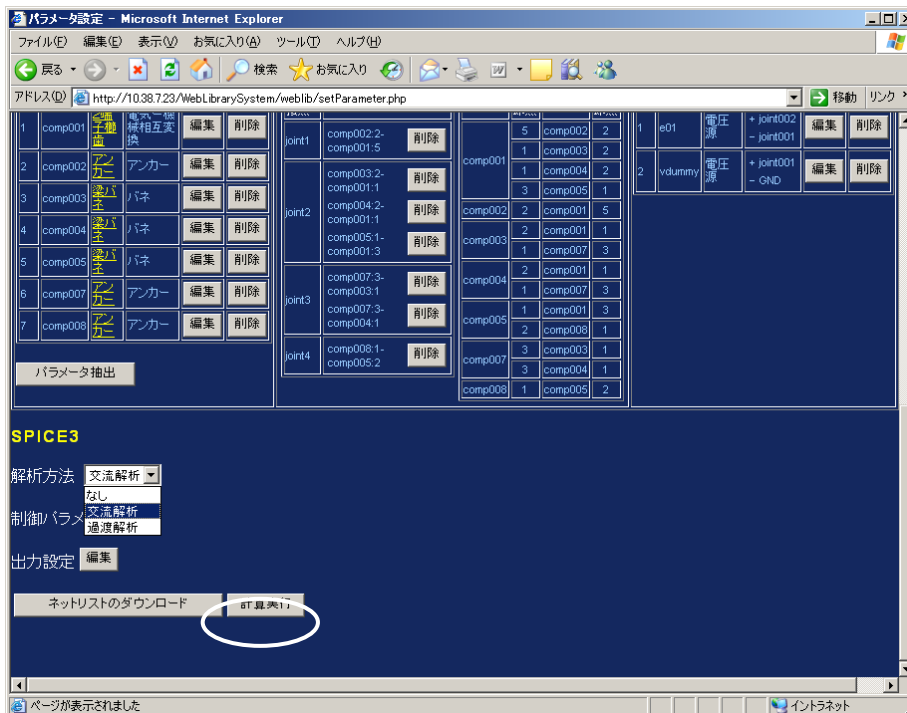
図⑤.5-2-17 ネットリストダウンロード



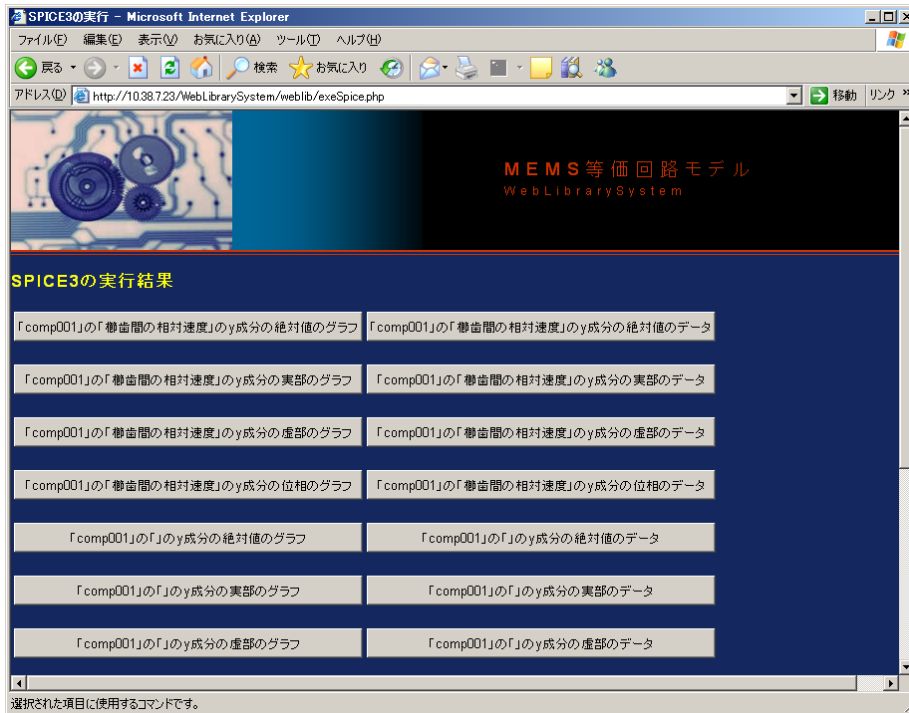
図⑤.5-2-18 生成されたネットリスト

h) 回路シミュレーション実行

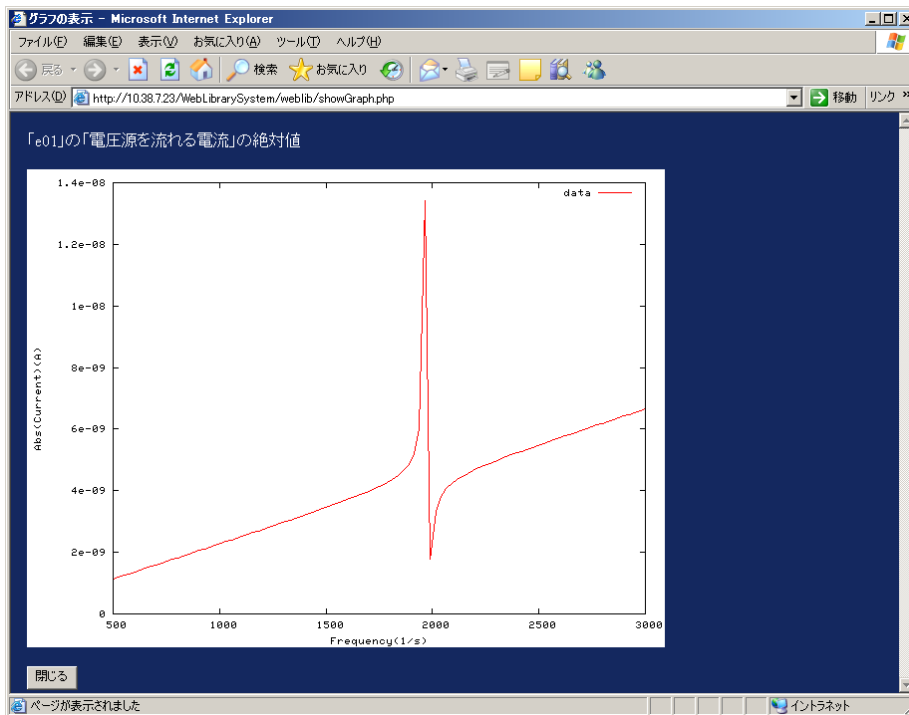
Web システムから回路シミュレーションを実行する場合は、図⑤.5-2-19 に示す[計算実行]ボタンをおす。回路シミュレーションが正常に終了すると図⑤.5-2-20 のような画面が表示される。出力指定した値のうち、グラフ表示したいものを選択しボタンを押すとグラフが表示される。図⑤.5-2-21 に出力例を示す。また、出力指定した値を csv 形式で取得することも可能である。



図⑤.5-2-19 解析方法



図⑤.5-2-20 実行結果



図⑤.5-2-21 出力量のグラフ表示

⑤. 6 等価回路モデル・3次元 CAD モデル相互変換の開発

⑤. 6. 1 等価回路モデル・3次元 CAD モデル相互生成技術調査

I. 調査研究の目的と実施方法

1) 研究調査の目的

回路一体型あるいは異種複合型高集積 MEMS の設計・開発に関わる技術力の向上のためには、試

作品を作成することなくデバイス性能の予想・検証を可能とするシミュレーションソフトウェアが重要となる。

そこで、WEB 等価回路ライブラリーと MEMS 用設計・解析シミュレーションソフトが連携して活用できる仕組みについて技術的調査を行う。

2) 研究調査の実施方法

調査は、等価回路解析シミュレーションソフトと MEMS 用設計・解析シミュレーションソフトの共通の重要データである形状データと材料データを対象とし、CAD モデルにおける 3 次元形状データと等価回路モデルにおける形状パラメータの双方向生成技術、および、CAD モデルにおける材料データと等価回路モデルの材質物性パラメータの双方向生成技術に関し、まず、市販のシミュレーションソフトの機能および CAD 分野における形状データの近似技術の調査も含めて、課題の抽出を行う。次に、抽出課題に対する技術的な対処方法を分析・検討し、WEB 等価回路ライブラリーのデバイスを対象に具体的な相互変換処理ロジックの調査・検討結果を報告書として取りまとめる。

3) 調査研究の内容・範囲

Web 等価回路ライブラリーと 3 次元 CAD モデルの形状データおよび材料物性値の相互変換に関する下記 (1)、(2)、(3)、(4) の調査を行う。

(1) 市販 MEMS ソフトの回路モデルと CAD モデルにおける形状データおよび材料物性値の相互連携

(2) CAD モデルにおける形状近似技術

(3) WEB 等価回路モデルの形状パラメータと CAD モデルの形状データの相互変換技術

CAD デバイスモデルの形状的特徴を踏まえ、データから等価回路モデルへの変換技術も含めて、形状データを相互に生成する技術の調査を行う。

- ・ Web 等価回路モデルの形状パラメータから 3 次元 CAD モデルの形状データの生成

- ・ 3 次元 CAD モデルの形状データから Web 等価回路モデルの形状パラメータの生成

(4) WEB 等価回路モデルの材料物性パラメータと CAD モデルの材料物性データの相互変換技術

- ・ Web 等価回路モデルの材料物性値パラメータから 3 次元 CAD モデルの材料物性値の生成

- ・ 3 次元 CAD モデルの材料物性値から Web 等価回路モデルの材料物性値パラメータの生成

4) まとめと提案

等価回路モデルと 3 次元 CAD モデルの相互生成技術に関わる下記の調査分析結果を取り纏める。

(1) 市販 MEMS ソフトの回路モデルと CAD モデルにおける形状データおよび材料物性値の相互連携

(2) CAD モデルにおける形状近似技術

(3) WEB 等価回路モデルの形状パラメータと CAD モデルの形状データの相互変換技術

(4) WEB 等価回路モデルの材料物性パラメータと CAD モデルの材料物性データの相互変換技術

調査内容は、Web 等価回路ライブラリシステムと 3 次元 CAD の機能連携、具体的には、WEB 等

価回路モデルと 3 次元 CAD モデルの形状データおよび材料物性値に関わる相互変換に関する(3) および(4) が主であり、この調査結果を踏まえて、相互変換技術の実装および、具体的な実装方式を提案する。

II. 市販 MEMS ソフトと CAD 形状近似技術の調査および相互生成技術課題の整理

1) 市販 MEMS ソフトの調査

MEMS 用設計・解析支援ソフトとして代表的な下記 4 ソフトの回路モデル関連情報の調査を本節でまとめる。

- ・ CoventorWare (開発元: Coventor 社)
- ・ IntelliSuite (開発元: IntelliSense 社)
- ・ MEMSpro (開発元: MEMSCAP 社)
- ・ MemsONE の回路集積化シミュレーションソフト(開発元: 数理システム)

(1) CoventorWare

回路シミュレーションソフトは、ARCHITECT モジュール内の機能であり、ARCHITECT モジュール機能の調査結果を取り纏める。

ARCHITECT の主要構成機能は下記の通りである。

- Saber 関連ソフト
 - ／Saber simulation . . . SPICE 相当の回路シミュレータ
 - ／Saber Sketch . . . 回路図作成・編集ツール
 - ／Saber Template Library . . . 回路用基本ライブラリー
 - ／Saber Component Library . . . 回路用拡張ライブラリー
- Manufacturing Analysis . . . モンテカルロ解析、センシビリティ解析
- EM library . . . 電気機械系素子ライブラリー
- Electromagnetic/Optical Library . 磁場解析用／光の導波路解析用ライブラリー
- Fluidics Library . . . 流体解析用ライブラリー

これらの中で、EM ライブラリーが Electro Mechanical モデル (beam、plate、comb、など) の雛形ライブラリーである。次表に EM ライブラリー一覧を示す。

no	大分類	テンプレート種類	補足
1	Beam	Beam Beam Contact Beam Actuator Beam Piezo Actuator Beam Electrode Post L-Beam J-Beam Box Beam Serpentine	複数タイプ有り 接触付き Actuator 付き beam Piezo Actuator 付き Beam 電極付き Beam anchor 付き Beam L 字形 Beam J 字形 Beam 中抜き BOX 形 U 字系他

		Freeform Beam	任意の折れ線形
2	Rigid Plate	Rigid Plate Rigid Plate Contact Electrode	Rigid Plate 接触付き 電極付きの Rigid Plate
3	Flexible Plate	Four-Node Quadrilateral Plate Four-Node Quadrilateral Plate Contact Four-Node Quadrilateral Plate Electrode Nine-Node Quadrilateral Plate Nine-Node Quadrilateral Plate Contact Nine-Node Quadrilateral Plate Electrode	Elastic Plat : 4 節点 同上 : 接触付き 同上 : 電極付き Elastic Plat : 9 節点 同上 : 接触付き 同上 : 電極付き
4	Comb Drive	Straight Comb Curved Comb Radial Comb Straight Comb with Split Stator Radial Comb with Split Stator	平行型櫛歯 (電極付き、以下同) 円弧型櫛歯 : 円弧方法に移動 円弧型櫛歯 : 半径方法に移動 平行型櫛歯 : 歯の一部が固定 円弧型櫛歯 : 歯の一部が固定

EM ライブラリーの主要プロパティの例として、「beam_1seg」の主要プロパティを掲げる。(他のライブラリーも同様。)

- ①ラベル : Beam 名称
- ②Knot 座標値 他の素子と結合するための節点の座標値
- ③end 座標値 Beam の幾何的位置 (→長さ)
- ④w : beam 幅
- ⑤layer(main layer)
- ⑥layer_oberride
- ⑦sidewall_angle . . . 側面テーパ角度

物性値 (ヤング率、ポアソン比、密度、粘性、など) は beam のプロパティには (直接) 含まれない。レイヤ属性として、物性値があり、これを間接的に参照する方式である。

(2) IntellSuite

IntellSuite における MEMS 素子+電気回路のシミュレーションソフトとして、SYNPLE が存在する。 梁やプレートのような MEMS デバイスの基本的な構造、あるいは、櫛歯アクチュエータのような複合構成要素を使用したデバイス構造の設計や各種電気回路、論路回路と組み合わせたシステム設計が可能である。

SYNPLE での解析機能の種類は、以下の通りである。

- ・フルレンジ解析
- ・小信号解析
- ・大信号解析
- ・過渡解析
- ・AC 解析
- ・DC 解析
- ・感度解析
- ・要素解析
- ・モンテカルロ解析

SYNPLE での MEMS elementary ライブラリーを次表に示す。

n o	大分類	テンプレート種類	補足
1	Anchor	Anchor	
2	Beam	Linear Beam NON-Linear Beam	大変形用
3	Beam joint	BeamJoint_2、BeamJoint_4 BeamJoint_T	Beam や Plate の接続用 素子 接続口数で種類が分かれ る。
4	Rigid Plate	Rigid Plate	
5	Comb_Dri ve	ElectroStatic Comb_Drive	平行櫛歯,Beam,gap を含 む
6	Gap	ElectroStatic Gap	MemsONE の GAP 素子 と同じ
7	Knot	Knot : 力,モーメント,電圧,温度の 0 化 Full Knot : 力その他の全ての値の 0 化 FOECE/MOMENT Knot:力とモーメ ントを 0	拘束条件に相当する素子
8	その他	translation-Based Gyroscope Generalized Inertia Device MEMS Swich with Repulsive Force Thin Film Swich MacroModel of TEM	microgyroscope 回転系の microgyroscope Switch Switch reduced order model 要 素

MEMS elementary ライブラリーのプロパティの例として、「beam」の主要プロパティを掲

げる。(他のライブラリーも同様。)

- ①name (素子名称)
- ②Density
- ③Yong 率
- ④Poisson 比
- ⑤長さ
- ⑥幅
- ⑦厚さ
- ⑧粘度
- ⑨bloat : Damping の補正項
- ⑩air-gap
- etc

(3) MEMSpro

MEMSpro のシステム設計関連モジュールは、下記の 3 モジュールから構成されている。

- ・ T-SPICE・・・SPICE 相当のシミュレータ
- ・ S-EDIT・・・回路モデルの定義・編集ツール。netlist を出力する。
- ・ W-EDIT・・・解析結果の波形のビューア

T-SPICE および S-SPICE のモデルは、電気回路素子が対象で、MEMS 素子を包含したモデルではない。

MEMSpro にも、MEMS 用ライブラリが存在するが、これらのライブラリは、主として、マスク作成にて使用されている。

(4) MemsONE

MemsONE における MEMS 素子ライブラリを次表に示す。

n	大分類	テンプレート種類	補足
1	Anchor	Anchor	
2	Beam	Beam	弾性体
3	Plate	Rigid Plate 、 Elastic Plate	
4	Gap	Gap	キャパシタ

MemsONE における MEMS 素子ライブラリのプロパティの例として、Beam のプロパティを示す。

- ①名前 ②始点座標値 ③終点座標値 ④幅
- ⑤厚み ⑥軸回転 ⑦密度 ⑧ヤング率
- ⑨ポアソン比 ⑩粘性 (流体の粘度、エアギャップ)

Rigid Plate のプロパティは以下の通り。

- ①名前 ②中心 ③大きさ (各軸方向の幅)
- ④回転 (各軸方向) ⑤密度
- ⑥粘性 (流体の粘度、エアギャップ)

2) CAD 形状近似技術の調査

CAD 分野における形状表現は、自由曲線・曲面、円・円弧・円錐面・円筒面・球面・球体などの解析線・解析面・体、および、直線・三角面・四角面・4面体・6面体などの単純形状など、さまざまな形式が存在し、相互の近似変換技術も多岐にわたっている。

本調査では、WEB 等価回路ライブラリーでの形状モデルが単純形状であること、および、3次元 CAD の形状タデータとの変換処理を課題にしていることもあり、CAD 分野で比較的多く利用されている多面体近似形式、STL 形式、有限要素形式、および、IGES 形式、VRML 形式に関する調査結果を取りまとめる。

□ 多面体近似形式

3次元形状の表面を折れ線列から構成される多面体により表現する形式であり、3次元のソリッド形状を表現するための最も単純かつ汎用的な表現形式である。

多面体近似形式においては、頂点、境界線、構成面がそれぞれ、以下の関係で定義される。

- ・頂点：3次元の点
- ・境界線：頂点を順番に連結した線分列
- ・構成面：複数の境界線により定義される3次元形状の表面

多面体を構成する表面の構成単位

多面体近似形式により（位相関係を有する）ソリッドデータを表現する場合は、頂点、境界線、構成面の相互関係（位相情報）を有する必要がある。ソリッドデータとしての表現が必要なければ、3次元形状の表面を構成する複数の構成面が定義されれば十分である。

多面体近似形式の具体的なフォーマットは、標準化されているわけではなく、利用ソフトウェアにより異なる。

□ STL 形式

STL 形式（Virtual Reality Modeling Language）データは3次元形状のすべての表面形状を三角形多面体で近似した標準表現形式である。

具体的には、多面体近似した三角形の3頂点の座標値、および面の法線ベクトル（物体の内から外方向）により定義される。面の法線ベクトルは3頂点から計算することができるが、3角形が近似形状であり、近似前の表面形状の法線ベクトルの正確な表現および STL を利用するソフトの処理効率を考慮して、3頂点とは別に法線ベクトルを設定する形式となっている。

STL 形式は、位相情報を持たない3角形による多面体近似形式ともいえる。

STL は特に光造形における標準ファイルフォーマットとして使用されている。

□ 有限要素形式

構造解析などで使用される 3 次元形状の近似データである。

3 次元形状を、有限要素または要素と呼ばれる単純な形状（に細かく分割し、解析のため数学方程式をその 1 つ 1 つの要素に適用し、この単純な方程式を組み合わせ、すべての方程式が成立する解を求めることによって、全体形状に対する解析を行う手法を目的で利用される。

有限要素の具体的な種類としては、3 角形、4 角形などの面形状または、4 面体、6 面体、5 面体などの立体形状が存在する。

有限要素の中で、4 面体、6 面体、5 面体などの立体要素を VOXEL（ボクセル）と呼ぶこともある。

□ IGES

IGES (Initial Graphics Exchange Specification) は異なる CAD 間でデータを交換する際に使用する中間ファイルフォーマットのの一つである。

ANSI が策定し、自動車産業を中心に実質的に世界標準の CAD データ形式であり、3 次元データを扱う際によく用いられる。

□ VRML

VRML は、「Virtual Reality Modeling Language」の略で、3 次元形状のすべての表面を多面体（3D ポリゴン）で表現する多面体近似形式の一つである。

VRML は、形状近似のみならず、色を表現できることが特徴である。

3 次元形状の表現方式としては、ファイル形式は テキストファイル（コンパイルが不要）であり、ヘッダ、コメント、ノード（フィールド）、プロトタイプ、ルートの 5 つの要素から構成される。3D ポリゴンの頂点および線の座標、ポリゴンや色や画像による テクスチャ、光源による明るさなどを指定できる。

一般的にはインターネット上で 3 次元グラフィックスを表現するためのマークアップ言語として利用されている。

3) 相互生成技術の課題の整理

前節までの調査結果を元に、回路モデルにおける機械素子と 3次元 CAD モデルの相互生成技術を以下に取りまとめる。

なお、MEMSpro の回路シミュレータソフト S-EDIT では、機械素子の扱いが無いため、下記の一覧表からは除外している。

1	回路モデル → 3次元 CAD モデル : 形状データ	生成の為 の 内部情報 有無	生成機能 有無	備考など
1.1	Coventor	○	△(★1)	ARCHTECT
1.2	Intellisuite	○	×	SYNPLE
1.3	MemsONE	○	×	回路集積化シミュレータ
2	回路モデル → 3次元 CAD モデル : 材料物性デー タ	生成の為 の 内部情報 有無	生成機能 有無	備考など
2.1	Coventor	○	△(★1)	レイヤによる間接定義
2.2	Intellisuite	○	×	
2.3	MemsONE	○	×	
3	3次元 CAD モ デル →回路モデル : 形状データ	生成の為 の 内部情報 有無	生成機能 有無	備考など
3.1	Coventor	△(★2)	×	
3.2	Intellisuite	△(★2)	×	
3.3	MemsONE	△(★2)	△(★3)	
4	3次元 CAD モ デル →回路モデル : 材料物性デー タ	生成の為 の 内部情報 有無	生成機能 有無	備考など
4.1	Coventor	○	×	
4.2	Intellisuite	○	×	
4.3	MemsONE	○	×	

★1 : 直接的に生成する機能はなく、

回路→マスク→プロセスエミュレータ→3次元モデルの作業の流れで生成。

★ 2 : 3 次元 CAD モデルは、一般的に形状の自由度が高く、Besm や Plate の形状へのダイレクトな変換はできず。

★ 3 : 3 次元形状モデル→SSL 形式データ→回路ソフトでの取り込み・参照が可能

回路モデル→3次元 CAD モデルおよび、回路モデル←3次元 CAD モデルの両方への直接的な変換はともに、ソフト機能として存在しない。

各技術項目別の課題を取りまとめる。

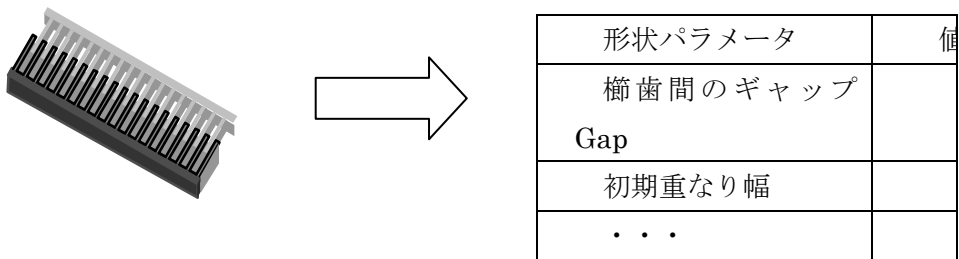
no	技術項目	課題
1	回路モデル→3次元 CAD モデル : 形状データ	生成のための内部情報はある。
2	回路モデル→3次元 CAD モデル : 材料物性データ	生成のための内部情報はある。
3	3次元 CAD モデル→回路 モデル : 形状データ	3次元のモデル形状から、Beam、Plate など回路ソフトで使用する単純化されたモデル形状に変換することが必要。 3次元モデルの形状の自由度の極めて高いことを考えると、技術的難易度は極めて高い。
4	3次元 CAD モデル→回路 モデル : 材料物性データ	3次元 CAD モデルにおける材料物性値は、立体と直接関係付けられてなく、材質番号やレイヤ番号を介して間接的に定まるが、生成のための情報はある。

Ⅲ. 等価回路モデルと CAD モデルの形状データの相互変換処理

形状データの相互変換処理ロジックは、等価回路デバイス種類毎に異なる。

技術的には、CAD モデルから等価回路モデルへの変換が主要課題である

形状データの相互変換処理ロジックの主要課題である「3次元 CAD モデルから等価回路モデルの形状パラメータ抽出ロジック」に関する共通の前提と処理の基本方針は下記の通りである。



1) CAD モデルのデータ構造に関し

①3次元 CAD データは、頂点(vertex)、境界線 (edge)、構成面 (face) から構成される位相を持つ立体データ (3次元ソリッドデータ) とする。

2) モデルデータの座標系に関し

等価回路モデルの平面図・断面図は、縦軸、横軸を X 軸または Y 軸として説明されている。変換ロジックは、CAD モデルの座標系が等価回路モデルの (平面図・断面図で説明されている) 座標系と同一であることを前提にして説明する。

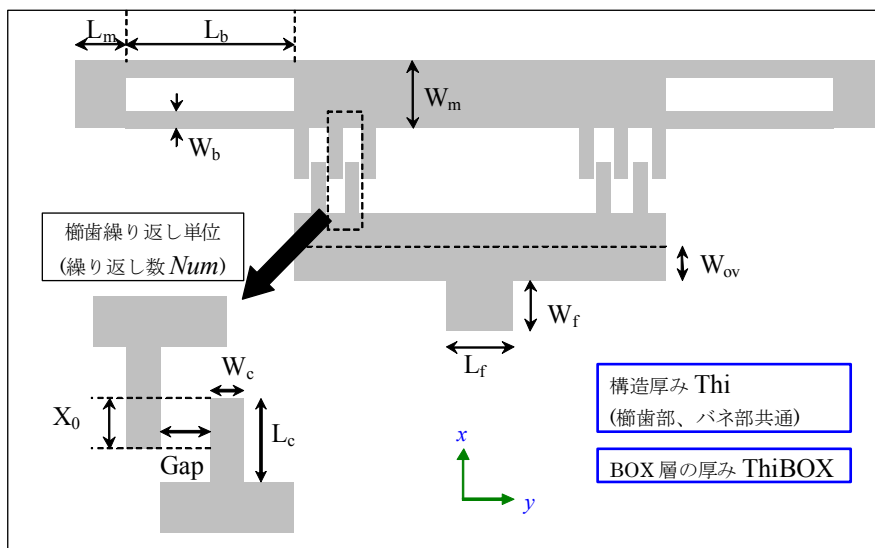
プログラムの実装においては、CAD モデルでの座標系と等価回路モデルの座標系の対応をユーザが指示する仕組みが必要になる。

3) 変換ロジックに関し

3次元 CAD データの形状は、等価回路の形状パターンと一致することを前提として変換ロジックを検討するが、形状的にパターン一致ができない場合でも、出来る限り、類似の形状パラメータを出力することとする (できる限り、変換エラーにしない)

1) 2 LX

(1) 等価回路モデルの形状パラメータ



(2) CAD データから等価回路モデルの形状パラメータへの変換

<ロジックの前提と補足>

①立体データは、上部（可動部）と下部（固定部）の2立体から構成される。

（上部、下部がそれぞれ複数立体から構成されていても、ユーザ指示などにより上部と下部の区別が付けば、ほぼ同じロジックが適用できる）

2) モデルデータの座標系に関し

②櫛歯の移動方向が X 軸、歯の並び方向は Y 軸、奥行き（厚さ）方向が Z 軸とする。

③櫛歯は Y 軸（横軸）方向に左右対称で、対象中心の Y 座標値 = 0 とする。

（仮に対象中心の Y 値 not=0 であっても、その値を入力または自動計算すれば = 0 と同じ内部ロジックが適用可）

④バネ部分をもつ構造は、上部（X+方向）立体とする

<形状パラメータ抽出ロジック>

STEP1 立体データの平面データ化

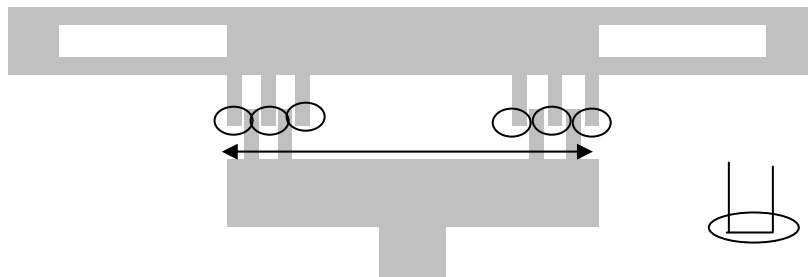
立体の境界線から、XY ビューでの最上面に属する境界線をすべて、抜き出す。

（平面境界線とよぶ。境界線間の連結情報も有する。）



STEP2 上部立体の歯データの取り出し

上部平面境界線から、歯先に相当する境界線群を求める。



- 下部境界線の Y 値の範囲内（両矢印）で、X 値が最小となる境界線を歯先とする。
ここに属する境界線の長さが、櫛歯の幅に相当する。

→境界線の長さ：櫛歯の幅： W_c

境界線の数＝櫛歯の数： Num

櫛歯の長さ L_c ：幅を示す境界線と直交する境界線の長さ。



STEP3 下部立体の歯データの取り出し

STEP2 と同様に、下部平面境界線から、櫛歯の幅、櫛歯の数、櫛歯の長さを取り出す。

ここでの櫛歯の幅＝STEP2 での櫛歯の幅 と一致

櫛歯の数＝STEP2 での櫛歯数－1 と一致

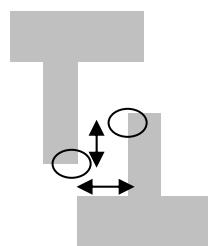
(櫛歯の長さ <＝STEP2 での櫛歯の長さ：参考情報)

となるはず。(一致しなければ、例えば、上部と下部の平均値をもとに決める)

さらに、上部櫛歯と下部櫛歯の X 座標値の差により、初期重なり幅 X_0 、

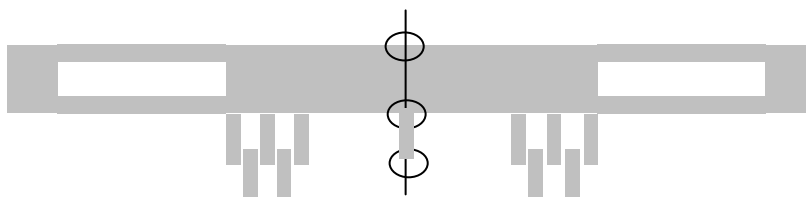
Y 座標値の差により、櫛歯間の GAP Gap

を得る。



STEP4 上部立体の櫛歯の土台の幅

$Y=0$ と上面境界線との交点計算結果の 2 点間の距離から櫛歯の土台の幅 W_m を得る。



○：交点。下部または中間部の 2 点のいずれかが求まる。
 (櫛歯数が奇数であれば下部、偶数であれば中間部)

交点 2 点の最小 Y 値が櫛歯部分の先端頂点の Y 値と一致すれば、

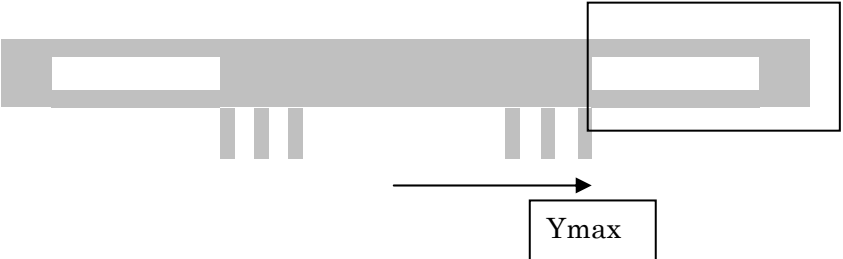
$$W_m = 2 \text{ 点間交点の距離} - \text{櫛歯の長さ (LC)}$$

else $W_m = 2 \text{ 点間交点の距離}$

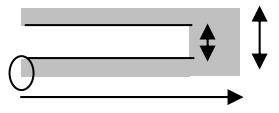
以上で、櫛歯部分の形状パラメータが得られた。

STEP 5 バネ部・可動部電極部の形状パラメータ

最初に、STEP1 で検出した、櫛歯を構成する境界線の Y 値の最大値 Y_{max} を求めておく
 左右対称につき、上部平面境界線から、 Y_{max} 以上の値を持つ境界線のみを取り出す。



この取り出した境界線の中で、Y 値を見て、
 バネの中空部に相当する境界線の横幅 (一) を梁の長さ (L_b) とする。



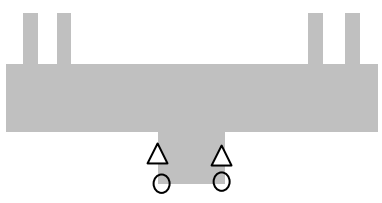
{「取り出した境界線全体の線幅 (→部分)」 - L_b (一部分) } を
 可動部電極部の横長さ (L_m) とする。

ばね部の梁の幅 (W_b : ○) は、

$$W_b = \frac{\{ \text{取り出した境界線全体の X 幅 (大きな両矢印)} - \text{ばね中空部の境界線の X 幅 (小さな両矢印)} \}}{2}$$

で求まる。

STEP 6 固定電極の BOX 部

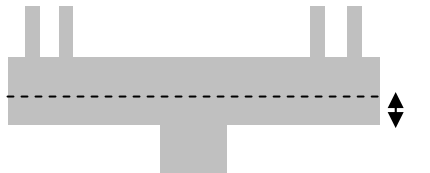


下部平面境界線の中から、X 値が最少となる頂点 (○)、および、この頂点を片側端点とする境界線 (△) を求める。

固定部電極の横の長さ (Lf) = ○間の長さ

固定部電極のたての長さ (Wf) = △境界線の長さ

STEP 7 固定部接続の電極部の、基盤部と電極の重複幅 Wov



Wov の値 (両矢印長さ) は、下部形状データが厚さ一定の 1 立体データであれば、直接的には求められない。

(基盤部と電極部が別立体である、または、基盤部と電極部で厚さが異なるのであれば、計算可能) 求められない場合、目安値として設定するのであれば、基盤部全体の幅 (縦線長さ) / 2 が考えられる。

STEP 8 構造部の厚さ

ばね部の構造部の厚さ (Thi)

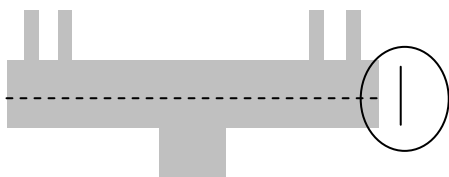
= 櫛歯頂点から Z 軸方向に向かう境界線の長さ

固定電極 BOX 部の厚さ (ThiBOX)

= BOX 部の頂点から Z 軸方向に向かう境界線の長さ

(3) 等価回路モデルの形状パラメータから CAD データへの変換

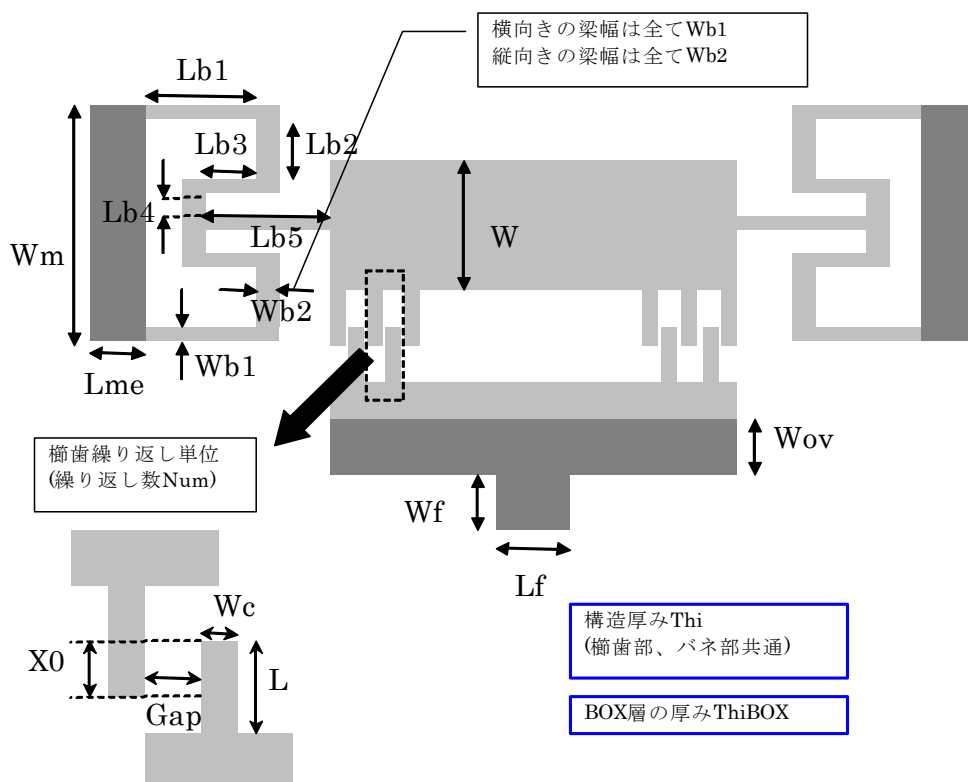
CAD データの形状を決定するためのパラメータは、基盤部の幅 (下記の縦棒長さ) を除き、すべて与えられている。



基盤部の幅を目安として定めるのであれば、= $Wov \times 2.0$ が考えられる。

2) 櫛歯 2LXD

(1) 等価回路モデルの形状パラメータ



(2) CAD データから等価回路モデルの形状パラメータへの変換

<ロジックの前提と補足>

①立体データは、上部（可動部）と下部（固定部）の2立体から構成される。

（上部、下部がそれぞれ複数立体から構成されていても、ユーザ指示などにより上部と下部の区別が付けば、ほぼ同じロジックが適用できる）

②モデルデータの座標系に関し

櫛歯の移動方向が X 軸、歯の並び方向は Y 軸、奥行き（厚さ）方向が Z 軸とする。

③櫛歯は Y 軸（横軸）方向に左右対称で、対象中心の Y 座標値 = 0 とする。

（仮に対象中心の Y 値 not=0 であっても、その値を入力または自動計算すれば = 0 と同じ内部ロジックが適用可）

④バネ部分をもつ構造は、上部（X+方向）立体とする

<形状パラメータ抽出ロジック>

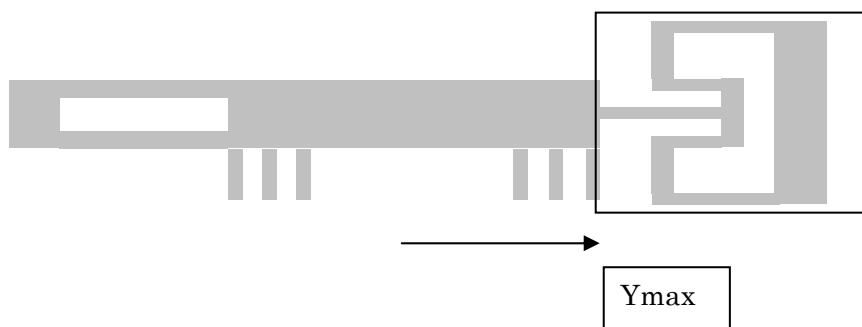
前節の 2LX デバイスと、STEP5 のバネ部・可動部電極部を除き、同一である。

STEP 5 は下記の通り。

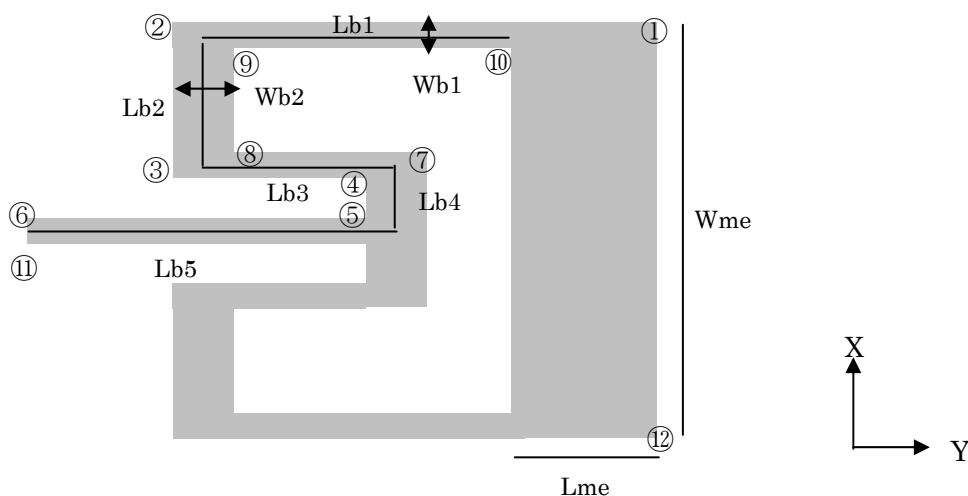
STEP 5 バネ部・可動部電極部の形状パラメータ

最初に、STEP1 で検出した、櫛歯を構成する境界線の Y 値の最大値 Ymax を求めておく

左右対称につき、上部平面境界線から、Ymax 以上の値を持つ境界線のみを取り出す。



取り出した境界線から、各頂点位置の X,Y を求める。



可動部の電極部

横の長さ $Lme = ①$ と $②$ の Y 値の差

縦の長さ $Wme = ①$ と $⑫$ の X 値の差

バネ部の長さ：

$Lb1 = (②$ と $⑨$ の Y 値の平均) と ($⑩$ の Y 値) の差

$Lb2 = (②$ と $⑨$ の X 値の平均) と ($③$ と $⑧$ の X 値の平均) の差

$Lb3 = (③$ と $⑧$ の Y 値の平均) と ($⑦$ と $④$ の y 値の平均) の差

$Lb4 = (⑦$ と $④$ の X 値の平均) と ($⑥$ と $⑪$ の X 値の平均) の差

$Lb5 = (⑦$ と $④$ の Y 値の平均) と ($⑥$ の y 値) の差

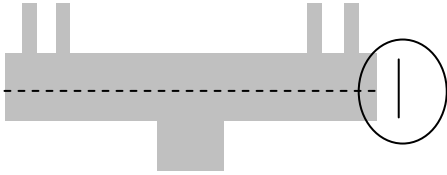
バネ部の幅

$Wb1 = ①$ と $⑩$ の X 値の差

$Wb2 = ②$ と $⑨$ の Y 値の差

(3) 等価回路モデルの形状パラメータから CAD データへの変換

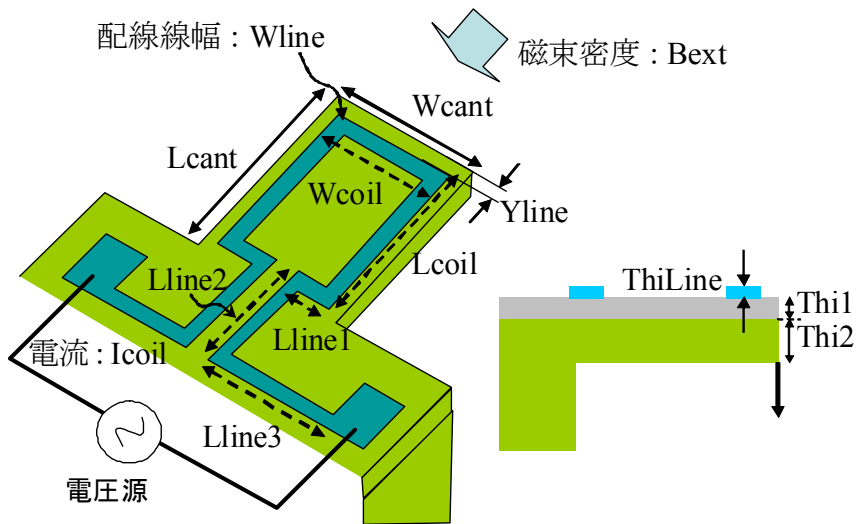
CAD データの形状を決定するためのパラメータは、基盤部の幅（下記の縦棒長さ）を除き、全て与えられている。



基盤部の幅を目安として定めるのであれば、 $= W_{ov} \times 2.0$ が考えられる。

3) 磁気回路

(1) 等価回路モデルの形状パラメータ



(2) CAD データから等価回路モデルの形状パラメータへの変換

<ロジックの前提と補足>

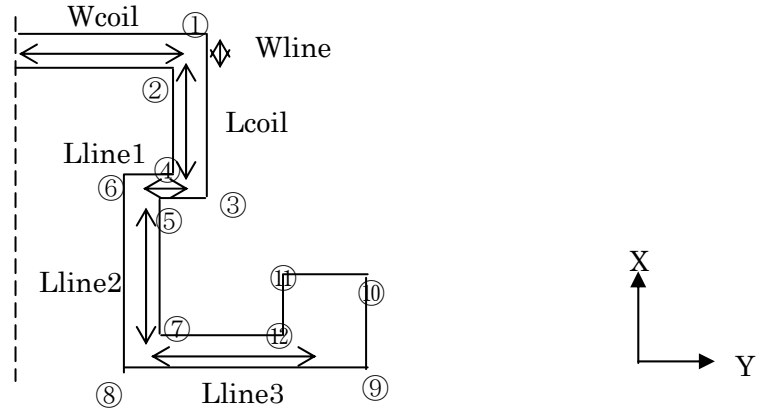
モデルデータの座標系に関し

- ①奥行き方向が X 軸、高さ方向が Z 軸とする。
- ②デバイスは Y 軸（横軸）方向に左右対称で、対象中心の Y 座標値 = 0 とする。
(仮に対象中心の Y 値 $\neq 0$ であっても、その値を入力または自動計算すれば = 0 と同じ内部ロジックが適用可)

<形状パラメータ抽出ロジック>

STEP1 コイル部分の立体抽出

立体の Z 値最大の値をもつ立体の境界線を全て取り出す。
左右対称で、右半分は、次図の形状。中心線の Y 値 = 0。



コイル部の

横の長さ $W_{coil} = (\text{①と②の Y 値の平均}) \text{ と } 0 \text{ (中心線の Y 値) の差}$

縦の長さ $L_{coil} = (\text{①と②の X 値の平均}) \text{ と } (\text{③と④の X 値の平均}) \text{ の差}$

線幅 $W_{line} = \text{①と②の X 値の差}$

配線の長さ

$L_{line1} = (\text{③と④の Y 値の平均}) \text{ と } (\text{⑤と⑥の Y 値の平均}) \text{ の差}$

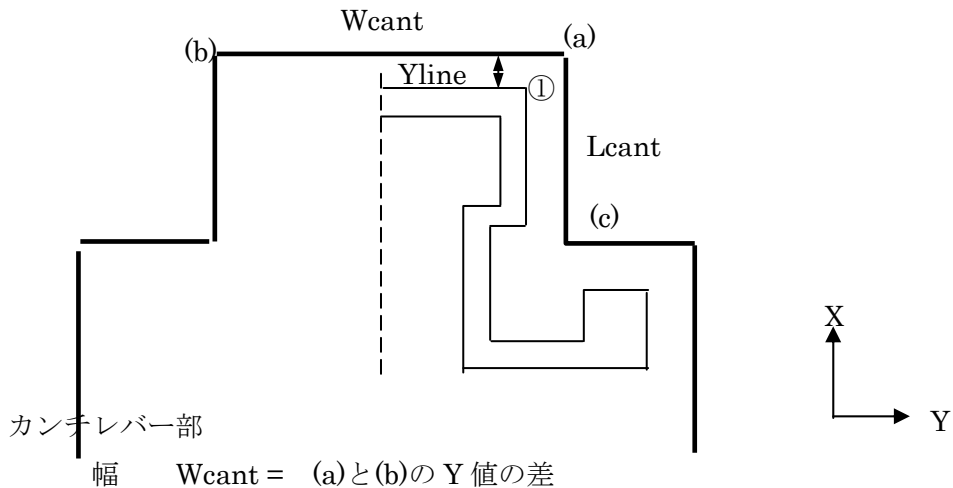
$L_{line2} = (\text{⑤と⑥の X 値の平均}) \text{ と } (\text{⑦と⑧の X 値の平均}) \text{ の差}$

$L_{line3} = (\text{⑦と⑧の Y 値の平均}) \text{ と } (\text{⑨と⑫の Y 値の平均}) \text{ の差}$

コイル部の厚さ $ThiLine = \text{コイル立体の Z 値の最大値と最小値の差}$

STEP2 カンチレバー部立体の平面データ化

STEP1 のコイル以外の立体の境界線から、XY ビューでの最上面に属する境界線を抜き出す。



長さ $L_{cant} = (a) \text{と}(c) \text{の} X \text{値の差}$

コイルの配線位置 $Y_{line} = (a) \text{と} \textcircled{1} \text{の} X \text{値の差}$

カンチレバーの1層目 (Sio2層) の厚さ $Thi1 :$

カンチレバー立体1層目立体 Z 値の最大値と最小値の差

カンチレバーの2層目 (Si層) の厚さ $Thi2 :$

カンチレバー立体2層目立体 Z 値の最大値と最小値の差

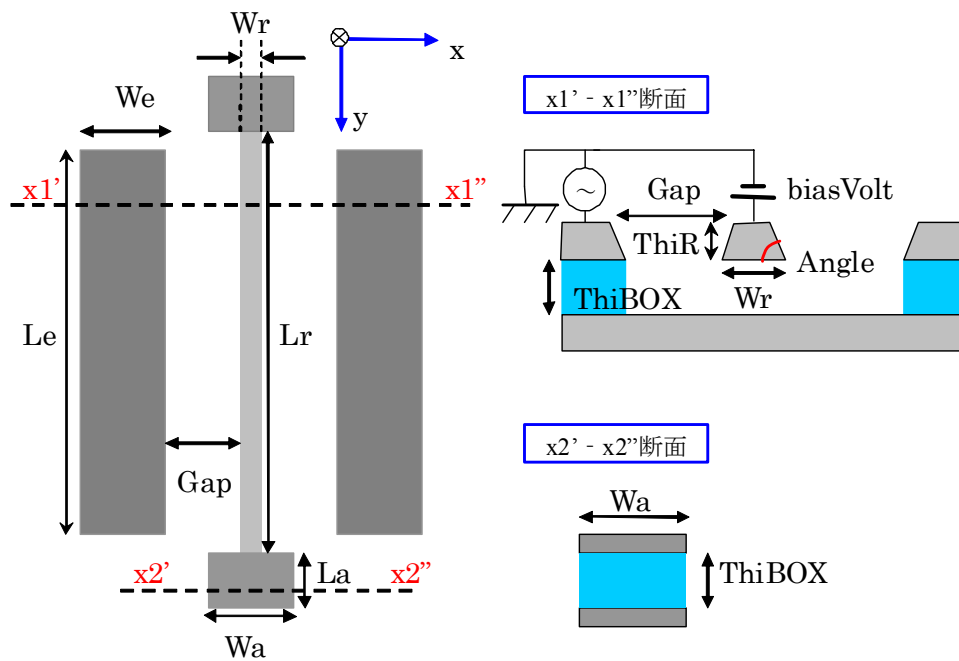
(3) 等価回路モデルの形状パラメータから CAD データへの変換

CAD データの形状を決定するためのパラメータは、カンチレバー支持部分を除き、全て与えられている。

カンチレバー支持部の X 方向寸法は未確定であるが、 L_{cant} や L_{line*} を元にラフに定めることは可能である。例えば $= L_{cant} + L_{line1} + L_{line2} + L_{line3}$

4) ナノ振動子

(1) 等価回路モデルの形状パラメータ



(2) CAD データから等価回路モデルの形状パラメータへの変換

<ロジックの前提と補足>

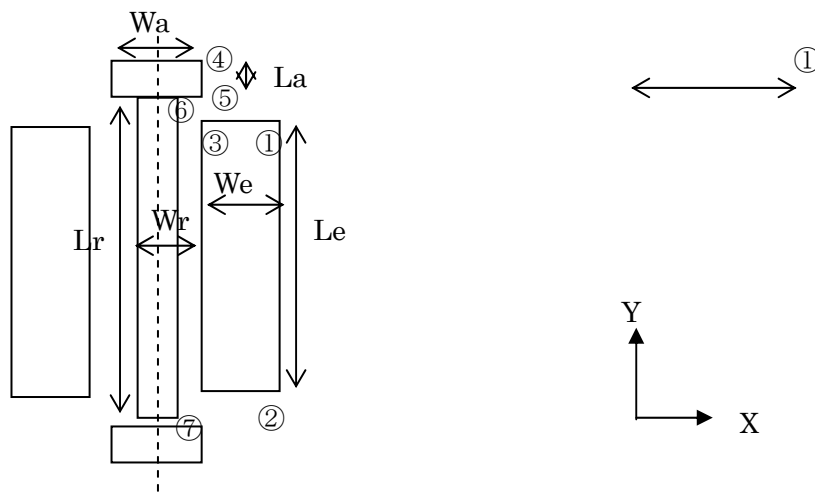
モデルデータの座標系に関し

- ①奥行き方向が Y 軸、高さ方向が Z 軸とする。
- ③デバイスは X 軸（横軸）方向に左右対称で、対象中心の X 座標値 = 0 とする。
(仮に対象中心の X 値 not=0 であっても、その値を入力または自動計算すれば = 0 と同じ内部ロジックが適用可)

<形状パラメータ抽出ロジック>

STEP1 最上位層（振動子）部分

立体の境界線から XY ビューで最上面に属する境界線を全て取り出す。



STEP2 電極部

横の長さ $We =$ ①と③の X 値の差

縦の長さ $Le =$ ①と②の Y 値の差

BOX 層の厚さ $ThiBOX =$ ①②③を含む最上位立体の直下に位置する立体の Z 値の最大、最小の差

STEP3 アンカー部

横の長さ $Wa =$ ④の X 値 \times 2.0

縦の長さ $La =$ ④と⑤の Y 値の差

STEP4 振動子

長さ $Lr =$ ⑥と⑦の Y 値の差

幅 $Wr =$ ⑥の立体底部（台形の底辺部分）の X 座標値 \times 2.0

厚さ $ThiR =$ ⑥の立体上部（台形の上辺部分）と立体底部（台形の底辺部分）の Z 値の差。

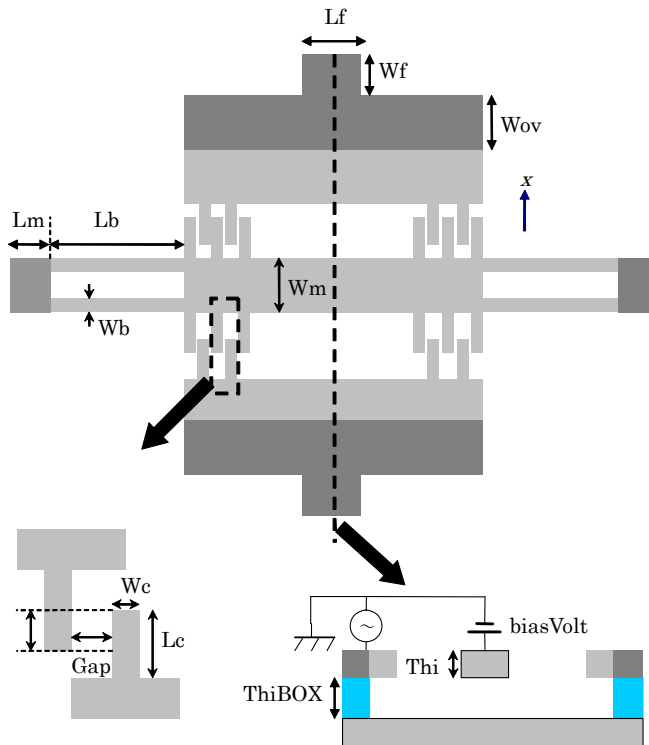
側面角 $Angle =$ ⑥の立体上部（台形の上辺部分）と立体底部（台形の底辺部分）の X 値の差と、厚さ $ThiR$ より求めた角度。

振動子と電極間の距離 $\text{Gap} = \text{③と、⑥の立体底部の X 座標値の差}$

(3) 等価回路モデルの形状パラメータから CAD データへの変換
CAD データの形状を決定するためのパラメータは全て与えられている。

5) 3 LX

(1) 等価回路モデルの形状パラメータ



(2) CAD データから等価回路モデルの形状パラメータへの変換

<ロジックの前提と補足>

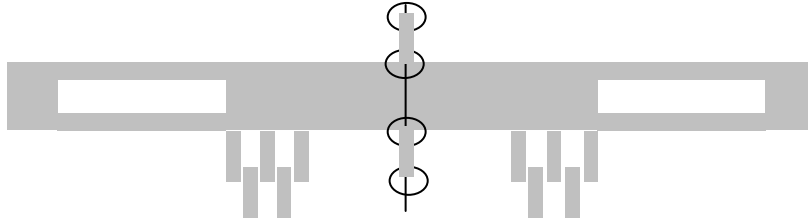
- ①立体データは、中間部（可動部）と上部および下部（固定部）の3立体から構成される。
- ②モデルデータの座標系に関し
櫛歯の移動方向が X 軸、歯の並び方向は Y 軸、奥行き（厚さ）方向が Z 軸とする。
- ③櫛歯は Y 軸（横軸）方向に左右対称で、対象中心の Y 座標値 = 0 とする。
- ④バネ部分をもつ構造は、中間部の立体とする

<形状パラメータ抽出ロジック>

2 LX デバイスと、STEP 4 の土台の幅を除き、同一である。STEP 4 は下記の通り。

STEP 4 中間部立体の櫛歯の土台の幅

Y=0 と上面境界線との交点計算結果の 2 点間の距離から櫛歯の土台の幅 W_m を得る。



○：交点。下部または中間部の 2 点のいずれかが求まる。
 (櫛歯数が奇数であれば下部、偶数であれば中間部)

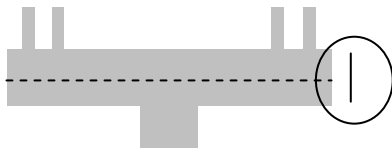
交点 2 点の最小 Y 値が櫛歯部分の先端頂点の Y 値と一致すれば、

$$W_m = 2 \text{ 点間交点の距離} - \text{櫛歯の長さ (LC)} * 2$$

else $W_m = 2 \text{ 点間交点の距離}$

(3) 等価回路モデルの形状パラメータから CAD データへの変換

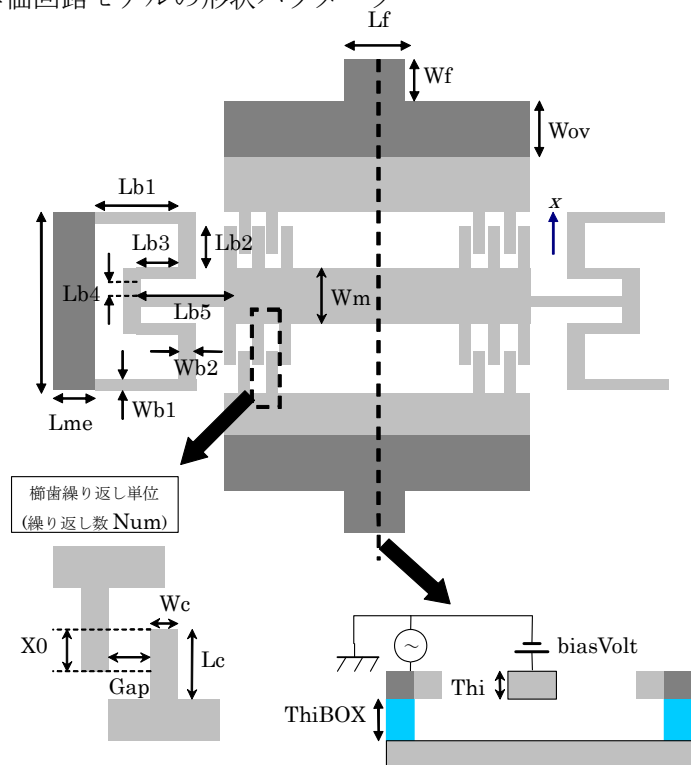
CAD データの形状を決定するためのパラメータは、基盤部の幅 (下記の縦棒長さ) を除き、すべて与えられている。



基盤部の幅を目安として定めるのであれば、 $= W_{ov} \times 2.0$ が考えられる。

6) 3LXD

(1) 等価回路モデルの形状パラメータ



(2) CAD データから等価回路モデルの形状パラメータへの変換

<ロジックの前提と補足>

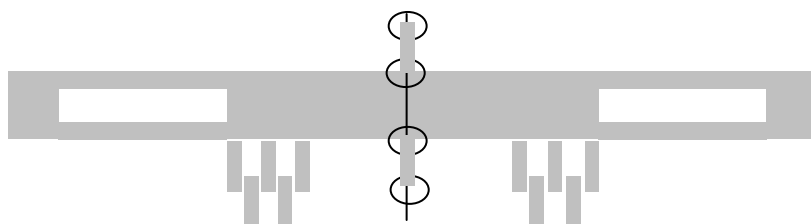
- ①立体データは、中間部（可動部）と上部および下部（固定部）の3立体から構成される。
- ②モデルデータの座標系に関し
 櫛歯の移動方向が X 軸、歯の並び方向は Y 軸、奥行き（厚さ）方向が Z 軸とする。
- ③櫛歯は Y 軸（横軸）方向に左右対称で、対象中心の Y 座標値 = 0 とする。
- ④バネ部分をもつ構造は、中間部の立体とする

<形状パラメータ抽出ロジック>

2LX デバイスと、STEP 4 の土台の幅および、STEP 5 のバネ部分を除き、同一である。STEP 4、STEP 5 は下記の通り。

STEP 4 中間部立体の櫛歯の土台の幅

Y=0 と上面境界線との交点計算結果の 2 点間の距離から櫛歯の土台の幅 W_m を得る。



○ : 交点。下部または中間部の 2 点のいずれかが求まる。

(櫛歯数が奇数であれば下部、偶数であれば中間部)

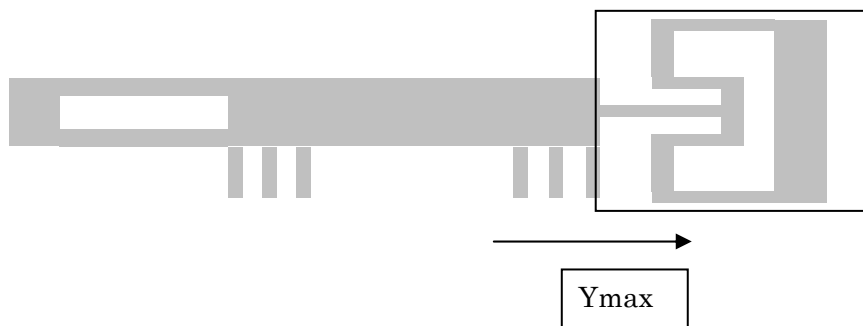
交点 2 点の最小 Y 値が櫛歯部分の先端頂点の Y 値と一致すれば、

$$W_m = 2 \text{ 点間交点の距離} - \text{櫛歯の長さ (LC)} * 2$$

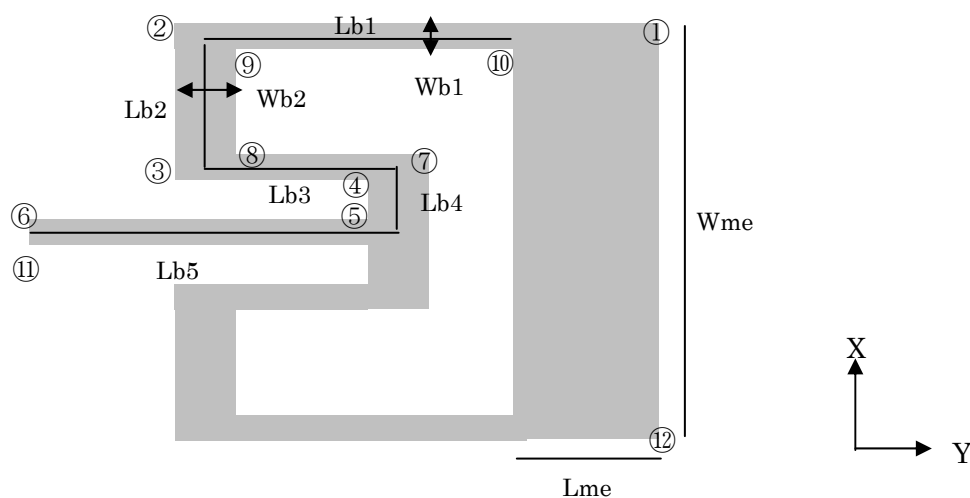
else $W_m = 2 \text{ 点間交点の距離}$

STEP 5 バネ部・可動部電極部の形状パラメータ

最初に、STEP1 で検出した、櫛歯を構成する境界線の Y 値の最大値 Y_{max} を求めておく
左右対称につき、上部平面境界線から、 Y_{max} 以上の値を持つ境界線のみを取り出す。



この取り出した境界線から、各頂点位置の X,Y を求める。



①立体データは、上部（固定部）と下部（可動部）の2立体から構成される。

②モデルデータの座標系に関し

櫛歯の移動方向が X 軸、歯の並び方向は Y 軸、奥行き（厚さ）方向が Z 軸とする。

③櫛歯は Y 軸（横軸）方向に左右対称で、対象中心の Y 座標値 = 0 とする。

④バネ部分をもつ構造は、中間部の立体とする

<形状パラメータ抽出ロジック>

2LX デバイスと、STEP 8 の構造部の厚さの処理を除き、同一である。

STEP 8 は下記の通り。

STEP 8 構造部の厚さ

固定部のばね部のの厚さ (Thi f)

= 固定部の櫛歯頂点から Z 軸方向に向かう境界線の長さ

可動部のばね部のの厚さ (Thi c)

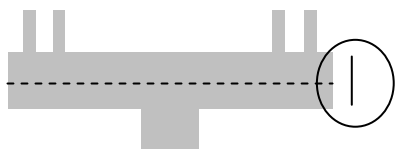
= 可動部の櫛歯頂点から Z 軸方向に向かう境界線の長さ

固定電極 BOX 部の厚さ (ThiBOX)

= BOX 部の頂点から Z 軸方向に向かう境界線の長さ

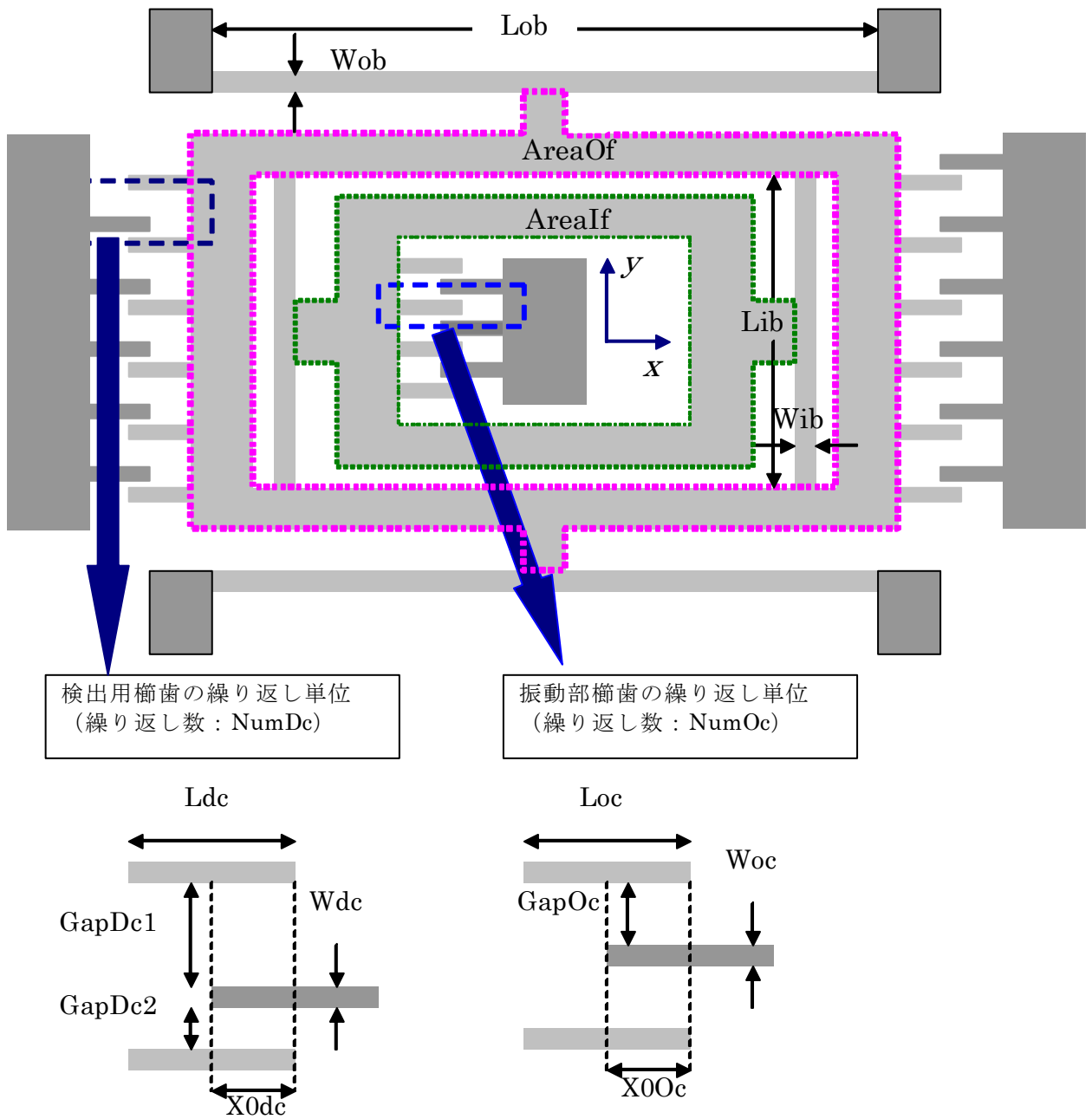
(3) 等価回路モデルの形状パラメータから CAD データへの変換

CAD データの形状を決定するためのパラメータは、基盤部の幅（下記の縦棒長さ）を除き、すべて与えられている。



基盤部の幅を目安として定めるのであれば、 $= Wov \times 2.0$ が考えられる。

- 8) 3Lxy 櫛歯 (櫛歯角速度センサ)
 (1) 等価回路モデルの形状パラメータ



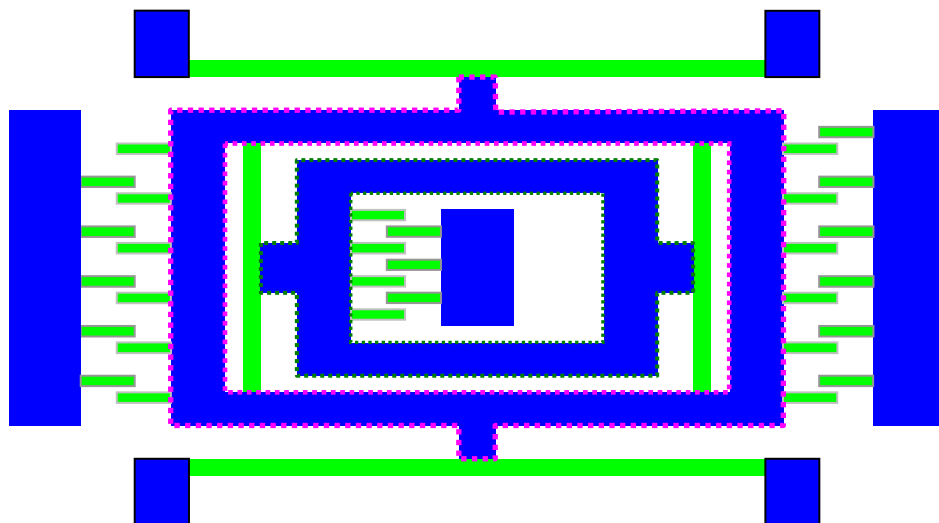
(2) CAD データから等価回路モデルの形状パラメータへの変換

<ロジックの前提と補足>

モデルデータの座標系に関し

- ① 櫛歯の移動方向が X 軸、歯の並び方向は Y 軸、奥行き (厚さ) 方向が Z 軸とする。
- ③ 検出用の櫛歯は Y 軸 (横軸) 方向に左右対称で、対象中心の Y 座標値 = 0 とする。
 (対象中心の Y 値 not=0 であっても、その値を入力または自動計算すれば = 0 と同じ内部ロジックが適用可)

形状パラメータから定まる部分は、下記の緑色の部分で、これ以外の紺色の部分は、形状寸法が定まらない。

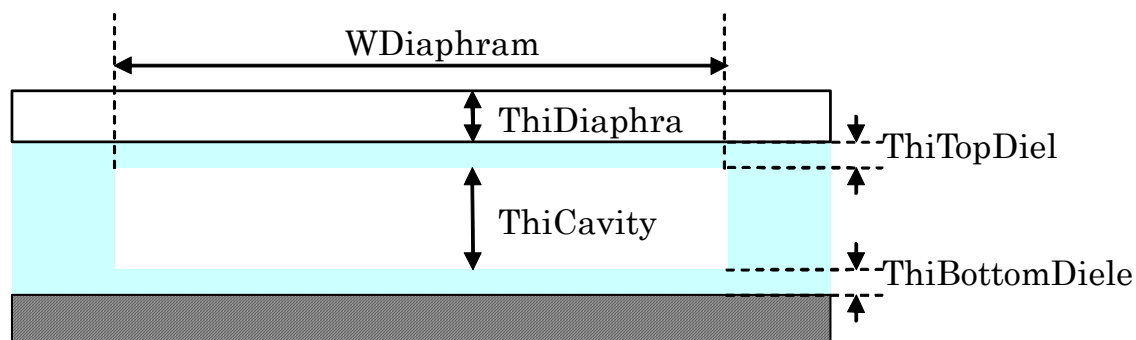


AreaOf, AreaIF で与えられる面積値は与えられているので、未確定部分の扱いとして、例えば、

Wsob、Wsib のヒンジ部分は縦幅＝横幅、
それ以外は、幅一定 等
と仮定して、目安値を定めることになる。

9) 圧力センサー

(1) 等価回路モデルの形状パラメータ



(2) CAD データから等価回路モデルの形状パラメータへの変換

<ロジックの前提と補足>

モデルデータの座標系に関し

- ①横方向が X 軸、高さ方向が Z 軸とする。
- ②横方向に左右対称で、中心線の X 値は 0 とする。

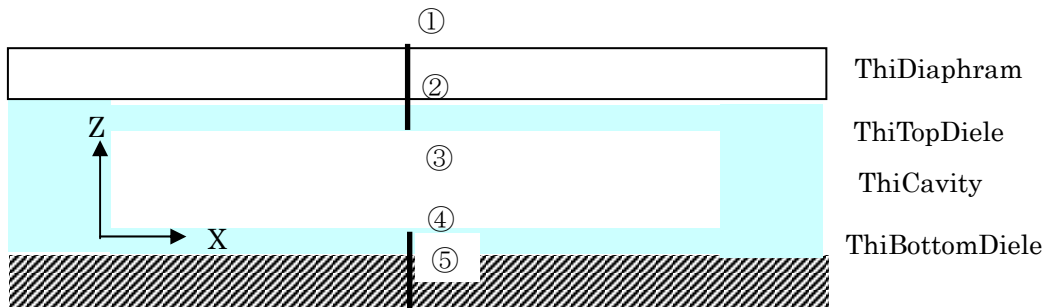
<形状パラメータ抽出ロジック>

STEP 1 断面上の各部の厚さ寸法

空洞部を通過する垂直方向の断面線を求める。

法線方向=Y軸、X=0を通過する平面で、モデル全体を断面取りした面の境界線を断面線とする。

断面線はXZビューで、以下形状となる。



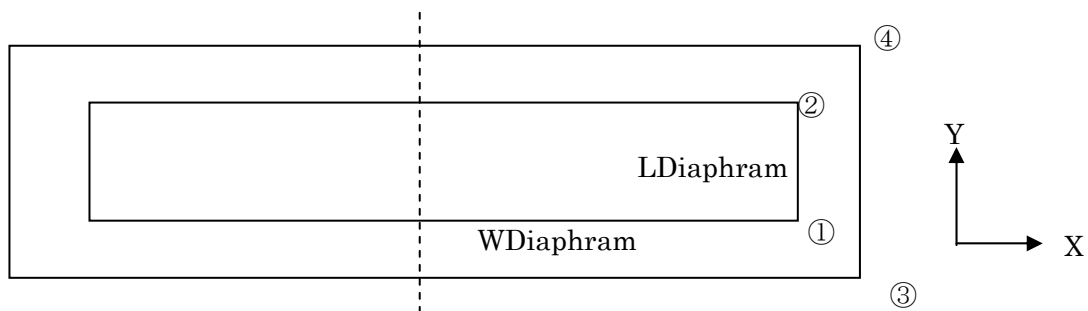
ダイアフラム（最上部立体）の厚さ	ThiDiaphram	=	①と②のZ値の差
誘電体層（第2層立体）の厚さ	ThiTopDiele	=	②と③のZ値の差
空洞部の厚さ	ThiCavity	=	③と④のZ値の差
誘電体層の厚さ	ThiBottomDiele	=	④と⑤のZ値の差

STEP 2 ダイアフラムの幅と奥行き

空洞部を通過する水平方向断面線を求める。

法線方向=Z軸、通過点=<STEP 1で求めた③と④の midpoint>とする平面で、モデル全体を断面取りした面の境界線を断面線とする。

断面線はXYビューで、以下形状となる。



ダイアフラム部の幅	WDiaphram	=	①のX値 x 2.0
奥行き	LDiaphram	=	①と②のY値の差

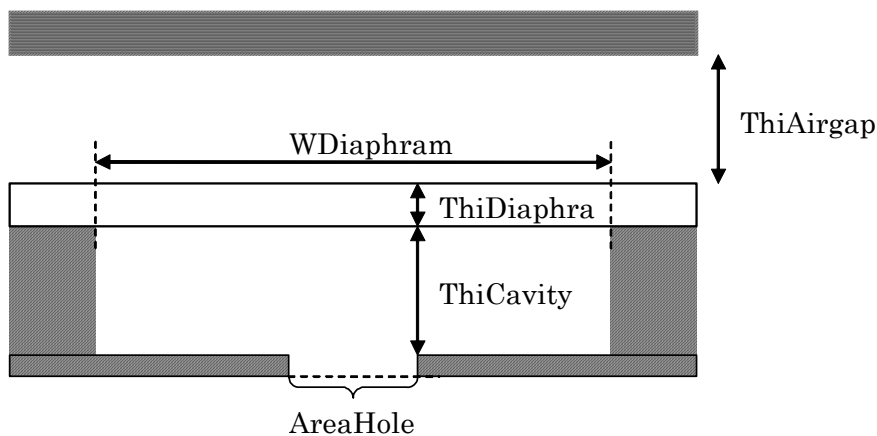
(3) 等価回路モデルの形状パラメータから CAD データへの変換

CAD データの形状を決定するためのパラメータは、ダイアフラムの周辺部分（上図で③、④の寸法）を除き、与えられている。

ダイヤフラムの周辺部を目安として定めるのであれば、ダイヤフラム部分の寸法を一定割合拡大した領域に設定することは可能である。

10) 波長可変レーザーデバイス

(1) 等価回路モデルの形状パラメータ



(2) CAD データから等価回路モデルの形状パラメータへの変換

<ロジックの前提と補足>

モデルデータの座標系に関し

- ①横方向が X 軸、高さ方向が Z 軸とする。
- ②横方向に左右対称で、中心線の X 値は 0 とする。

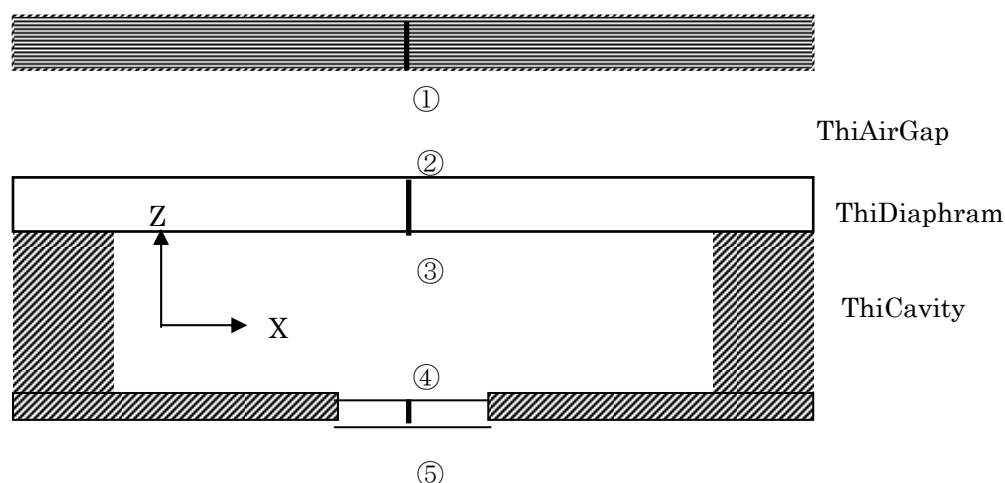
<形状パラメータ抽出ロジック>

STEP 1 断面上の各部の厚さ寸法

空洞部を通過する垂直方向の断面線を求める。

法線方向= Y 軸、 $X=0$ を通過する平面で、モデル全体を断面取りした面の境界線を断面線とする。

断面線は XZ ビューで、以下形状となる。



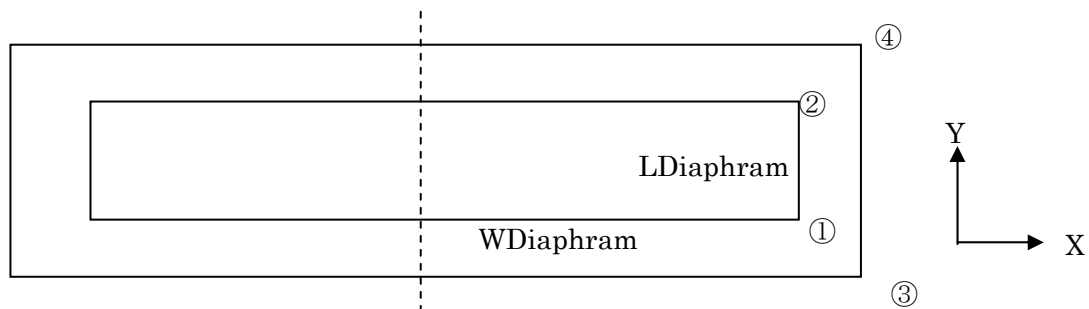
ダイアフラムの上部空気層の厚さ $\text{ThiAirGap} = \text{①と②の Z 値の差}$
 ダイアフラムの厚さ $\text{ThiDiaphragm} = \text{②と③の Z 値の差}$
 空洞部の厚さ $\text{ThiCavity} = \text{③と④の Z 値の差}$

STEP 2 ダイアフラムの幅と奥行き

空洞部を通過する水平方向断面線を求める。

法線方向=Z 軸、通過点=<STEP 1 で求めた③と④の midpoint>とする平面で、モデル全体を断面取りした面の境界線を断面線とする。

断面線は XY ビューで、以下形状となる。



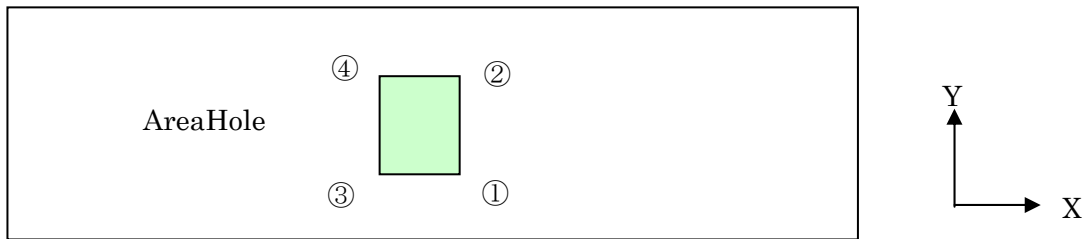
ダイアフラム部の幅 $\text{WDiaphragm} = \text{①の X 値} \times 2.0$
 奥行き $\text{LDiaphragm} = \text{①と②の Y 値の差}$

STEP 3 下部電極の穴の面積

底面の穴部を通過する水平方向断面線を求める。

法線方向=Z 軸、通過点=<STEP 1 で求めた④と⑤の midpoint>とする平面で、モデル全体を断面取りした面の境界線を断面線とする。

断面線は XY ビューで、以下形状となる。



下部電極の穴の面積 $\text{AreaHole} = \text{①と③の X 値の差} \times \text{①と②の Y 値の差}$

(3) 等価回路モデルの形状パラメータから CAD データへの変換

CAD データの形状を決定するためのパラメータとして、以下の寸法が未確定である。

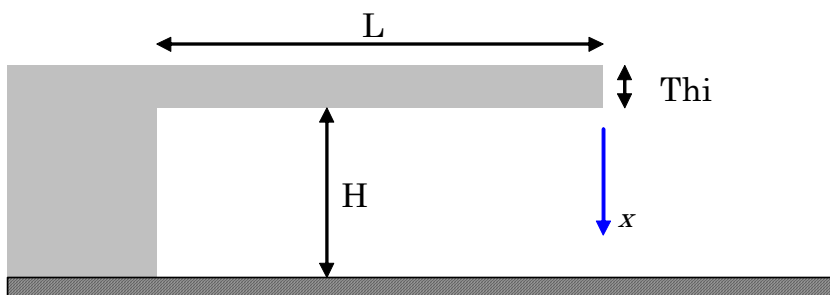
- ①最上面立体の厚さ、(STEP 1 の図で①の上)
- ②ダイアフラムの周辺部分 (STEP 2 の図で③、④の寸法)、
- ③下部電極の穴の縦横寸法 (STEP 3 の図で、穴の縦横)

上記寸法を目安として定めるのであれば、

- ①最上面立体の厚さ：上部空気層の厚さ一定割合
- ②ダイアフラムの周辺部分：ダイアフラム部分の寸法を一定割合拡大した領域とする
- ③穴形状：ダイアフラムの縦横比を穴形状に適用が考えられる。

11) カンチレバー

(1) 等価回路モデルの形状パラメータ



(2) CAD データから等価回路モデルの形状パラメータへの変換

<ロジックの前提と補足>

モデルデータの座標系に関し

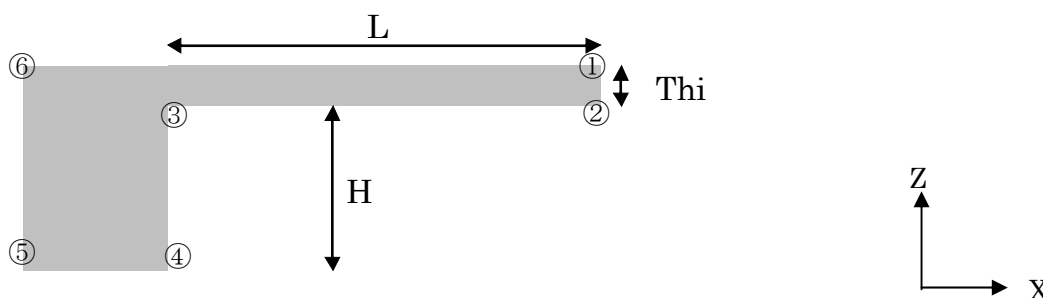
①横方向が X 軸、高さ方向が Z 軸とする。

<形状パラメータ抽出ロジック>

STEP 1 断面上の各部の厚さ寸法

法線方向=Y 軸、X=モデル全体の重心の X 値を通過する平面で、モデル全体を断面取りした面の境界線を断面線とする。

断面線は XZ ビューで、以下形状となる。



カンチレバーの

厚さ	$Thi =$	①と②の Z 値の差
長さ	$L =$	①と⑥の X 値の差
基盤からの高さ	$H =$	③と④の Z 値の差

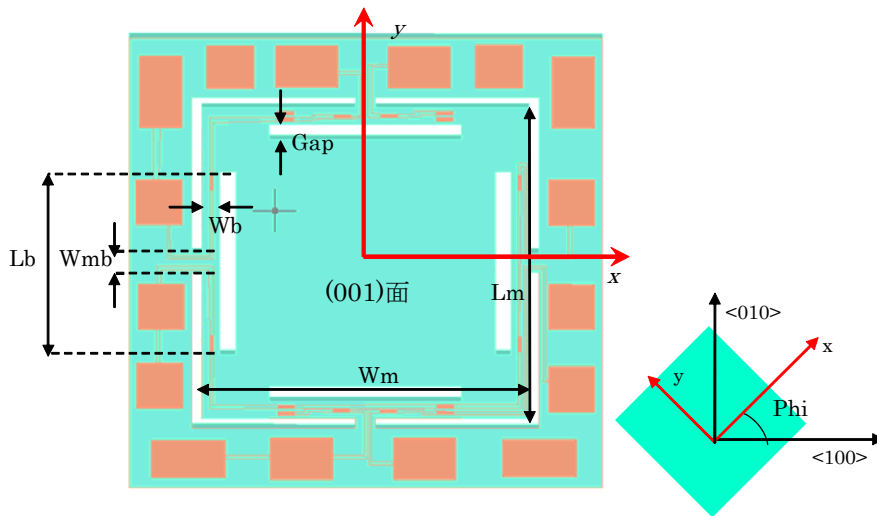
また、幅 W は = 最上面立体の Y 値の最大値と最小値の差 で定める。

(3) 等価回路モデルの形状パラメータから CAD データへの変換

CAD データの形状を決定するためのパラメータは、支持部の長さ（④と⑤の X 値差）以外は与えられている。支持部の長さは、目安として、 L の一定割合、または、 H と同程度のながさにすることが考えられる。

12) ピエゾ抵抗型加速度センサー

(1) 等価回路モデルの形状パラメータ



(2) CAD データから等価回路モデルの形状パラメータへの変換

<ロジックの前提と補足>

モデルデータの座標系に関し

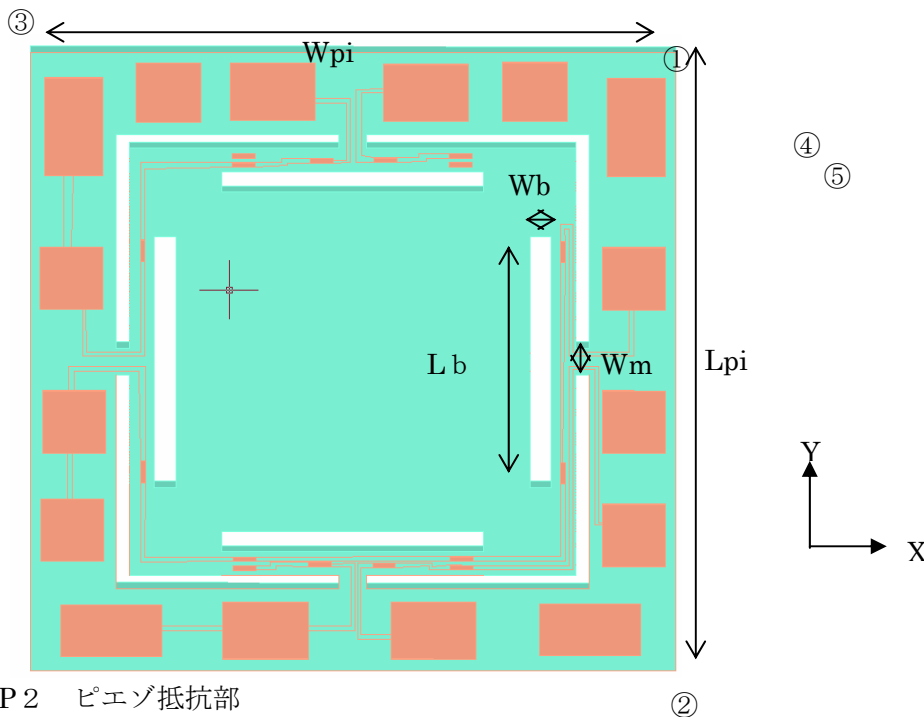
①モデル全体は、上下対称、左右対称とし、中心点が原点とする。

②横幅方向が X 軸、縦の長さ方向が Y 軸、奥行き（厚さ）方向が Z 軸とする。

<形状パラメータ抽出ロジック>

STEP1 立体データの平面データ化

立体の境界線から、XY ビューでの最上面に属する境界線をすべて、抜き出す。



STEP 2 ピエゾ抵抗部

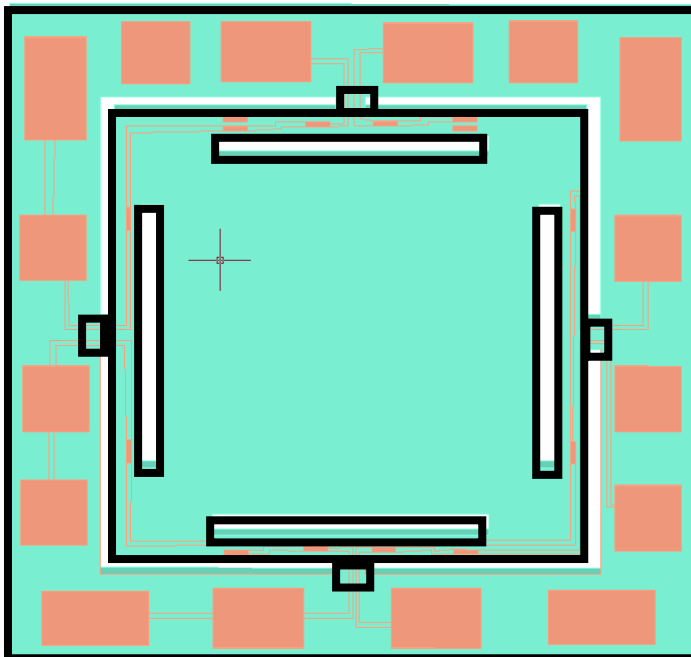
長さ $L_{pi} = \text{①と②の Y 値の差}$

幅 $W_{pi} =$ ①と③の X 値の差
厚さ $Th_{pi} =$ ①の立体の Z 方向の厚さ

STEP 3 検出梁部、錘部

2 次元的にモデルを見たときの空洞部（デバイス構造でない部分）の領域を求め、この矩形領域のサイズを求めることになる。細部ロジック検討の必要がある。
なお、座標軸の傾きは CAD 形状としては情報がなく、パラメータ値の計算の対象外となる。

(3) 等価回路モデルの形状パラメータから CAD データへの変換
形状パラメータから定まる部分は、下記の太枠の部分である。
形状を定めるためのパラメータはすべて確定している。



IV. 等価回路モデルと CAD モデルの材料物性パラメータの相互変換処理

材料物性値の相互変換処理は、デバイス種類によらず、共通の処理ロジックとなる。

等価回路モデルの解析において必要な材料物性パラメーター一覧

等価回路モデルの解析において必要な材料物性パラメーター一覧を次表に取りまとめる。

材料物性値としては、ヤング率、ポアソン比、密度が主である。

N O	デバイス名称	材料物性値			
		ヤ ン グ 率	ポ ア ソ ン 比	密 度	その他
1	2 LX	○	—	○	BOX 層の比誘電率
2	2 LXD	○	—	○	BOX 層の比誘電率
3	磁気回路デバイス	○	—	○	—
4	ナノ振動子	○	—	○	BOX 層の比誘電率
5	3 LX	○	—	○	BOX 層の比誘電率
6	3 LXD	○	—	○	BOX 層の比誘電率
7	2 LXZ	○	—	○	BOX 層の比誘電率
8	3 LXY 櫛歯角加速度セン サー	○	—	○	—
9	圧力センサー	○	○	○	誘電体層の比誘電率
1 0	波長可変レーザー	○	○	○	Cavity 内の粘度
1 1	カンチレバー	○	—	○	—
1 2	ピエゾ型加速度センサー	—	—	○	ピエゾ抵抗部の ピエゾ抵抗係数、比抵 抗

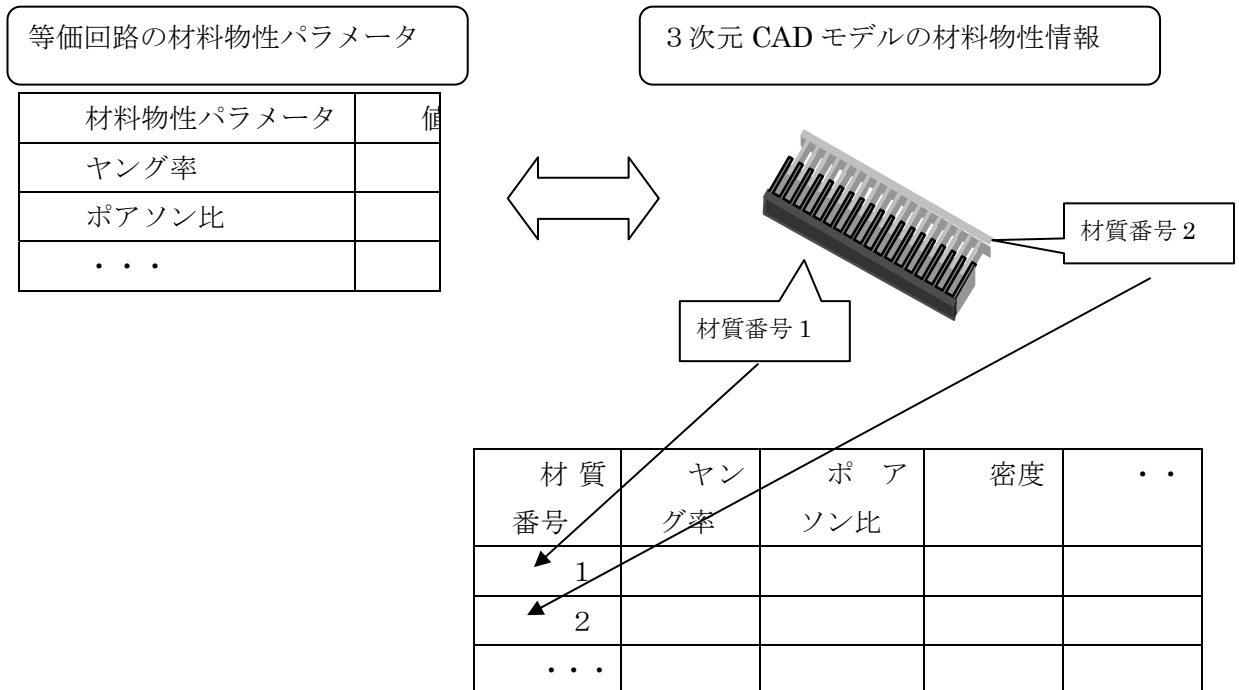
等価回路モデルから CAD データの材料物性パラメータへの相互変換

多くの市販の 3 次元設計・解析用の 3 次元 CAD システムにおいては、立体（ソリッド）にヤング率やポアソン比などの材料物性値を直接プロパティとして持たせるのではなく、立体には材質番号（または材料名）をプロパティとして持たせ、別途、設定される材質番号（または材料名）とヤング率、ポアソン比などの物性値の対応表により、間接的に、立体の物性値の設定をおこなう仕組みとなっている。（材質番号の代わりにレイヤ番号を使用するソフトもあるが、同趣旨である。）

これは、解析シミュレーションにおいて、1 つの形状モデルに対し、材料種類や物性値を少しずつ変えながらシミュレーションを繰り返すことが多く、そのためには、立体と材番号の対応付けは変更せず、材質番号と物性値や材料名との対応のみを変更し、解析実行することが操作性や運用上勝ることが多い為である。（前者は立体指示のための CAD の操作が必要であるのに対し、後者は、

単純な表操作のみで対応可能である)

この3次元 CAD 側での一般的な方式をふまえると、等価回路モデルと CAD モデルの材料物性パラメータの相互変換処理ロジックに関しては、以下の方式が有力となる。



<等価回路の材料物性値から CAD データの材料物性値への変換>

3次元 CAD データの該当立体に対し

- ①材質番号を（既存の材質番号と重複しない）材質番号を発番
- ②材質番号に対応する材料物性値として、等価回路の材質物性値を設定
- ③立体のプロパティに材質番号を設定。

を行うことにより、CAD データの材料物性値に変換する。

<CAD データの材料物性値から等価回路の材料物性値への変換>

3次元 CAD データの立体に付随した材質番号と、材質番号毎の材料物性値から、立体毎の材料物性値を求め、これを、立体に対応する等価回路モデルの材料物性値として設定する。

V. まとめと提案

市販 MEMS ソフトの調査結果から、回路モデルと 3 次元 CAD モデルの形状データあるいは材料物性パラメータ値を直接的に相互変換する機能は市販 MEMS ソフトに存在しないことが判明した。この現状と、回路モデルと 3 次元 CAD モデルを連携して使用することの重要性を踏まえて、Web 等価回路ライブラリシステムと 3 次元 CAD の機能連携、特に、WEB 等価回路モデルと 3 次元 CAD モデルの形状データおよび材料物性値を相互に変換するソフトウェアツールが必要であると考えられる。

具体的には、WEB 等価回路ライブラリーと 3 次元 CAD モデルの形状データおよび材料物性値の相互変換に関する下記 (1) (2) を内容とするソフト開発を提案する。

(1) WEB 等価回路モデルと 3 次元 CAD モデルの形状データおよび材料物性値の相互変換ソフトの実装を行う。実装内容は以下の 4 項目からなる。

- ①WEB 等価回路モデルの形状パラメータから 3 次元 CAD モデルの形状データの生成
- ②WEB 等価回路モデルの材料物性パラメータから 3 次元 CAD モデルの材料物性値の生成
- ③3 次元 CAD モデルの形状データから WEB 等価回路モデルの形状パラメータの生成
- ④3 次元 CAD モデルの材料物性から WEB 等価回路モデルの材料物性値パラメータの生成

(2) 開発項目を実装する CAD ソフトは MemsONE とする。

MemsONE による相互変換処理の実装方式として、WEB 等価回路ソフトと MemsONE の相互連携のための連携データファイルを定め、MemsONE 側では CAD データと連携ファイルの入出力機能を開発し、WEB 回路ソフト側では個々の等価回路モデルに対応した相互変換機能を開発する。連携用ファイルの具体的なデータ形式は、MemsONE のプラグイン機能のひとつである、SSL データ形式をベースに定め、形状データおよび材質物性値などの表現可能なデータ内容の拡張と、取り扱う処理プログラムの対応を行う。

提案内容の実現により、WEB 等価回路ライブラリーの等価回路モデルと 3 次元 CAD モデルの有機的連携が実現でき、WEB 等価回路ライブラリーおよび MemsONE の双方の利用者にとって、ソフト活用範囲が拡大され、MEMS の設計・解析におけるソフトウェアツールの有用性が向上することが期待される。

⑤. 6. 2 等価回路モデル・3次元 CAD モデル相互変換機能の開発

I. 等価回路モデル・3次元 CAD モデル相互変換機能の概要

回路解析を目的とする等価回路解析シミュレーションソフトと、機構解析やプロセス解析を主目的としたMEMS用設計・解析シミュレーションソフトが連携して活用できる仕組みとして、CADモデルにおける3次元形状および材料物性値と等価回路モデルの形状パラメータおよび材料物性パラメータの相方向の変換処理の開発を完了した。

WEB等価回路モデルと3次元CADモデルの相互変換処理の具体的な機能内容は、以下の4項目からなる。

- ・WEB等価回路モデルの形状パラメータから3次元CADモデルの形状データの生成
- ・WEB等価回路モデルの材料物性パラメータから3次元CADモデルの材料物性値の生成
- ・3次元CADモデルの形状データからWEB等価回路モデルの形状パラメータの生成
- ・3次元CADモデルの材料物性からWEB等価回路モデルの材料物性値パラメータの生成

相互変換処理の具体的な実装方式に関して、3次元CADモデルを扱うCADソフトは、現状唯一の国産の統合MEMS用設計・解析支援ソフトであるMemsONEとした。

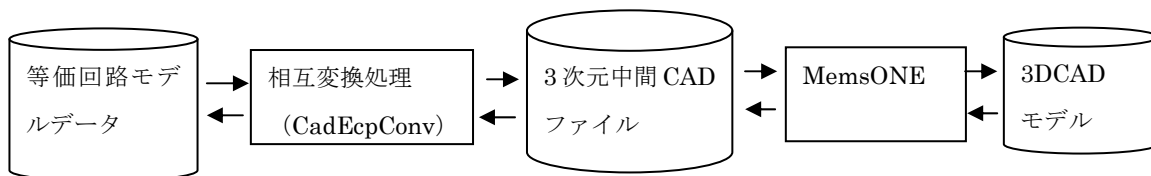
但し、今後、MemsONE以外のCADソフトが等価回路モデルとの相互変換機能と連携することを可能とするため、CADソフトに依存しない3次元CAD中間ファイルを定め、相互変換処理の主要処理は等価回路モデルと3次元中間CADファイルに間で実行する仕組みとした。

この結果、等価回路モデルと3次元中間CADモデルの相互変換機能は3次元CADソフトとは独立したツールとして利用することが可能となった。

・本開発のメイン処理は、WEB等価回路モデルと3次元CAD中間ファイルの相互変換処理であるあり、この変換のための専用ツールとして、WEB等価回路モデルと連携データファイルの形状パラメータおよび材料物性値を相互に自動変換する機能を実装した。

等価回路モデルは、コンポーネントと呼ばれるMEMSデバイスを構成する部品の組み合わせにより表現されるが、形状パラメータ抽出と同時に、コンポーネント間の幾何配置関係を自動認識し、組み合わされたデバイス構造の機械的接続網を自動生成する機能の組み込みも行った。

図⑤.6.2-1 相互変換機能の位置づけを示す。



図⑤.6.2-1 相互変換機能の位置づけ

以降、

3次元中間 CAD ファイル (データ) を「3次元 CAD ファイル (データ)」

等価回路モデルデータ (ファイル) を「ECP データ (ファイル)」

3次元中間 CAD ファイルと等価回路モデルデータの相互変換ソフトを「CadEcpConv」と称す。

なお、等価回路モデルのデータ詳細に関しては、

- ・付録 A. 等価回路モデルにおけるパラメータ表データ仕様書、

3次元中間 CAD ファイルのデータ形式に関しては、

- ・付録 B. 3次元中間 CAD ファイル データ仕様書

相互変換処理 (CadEcpConv) の操作方法に関しては、

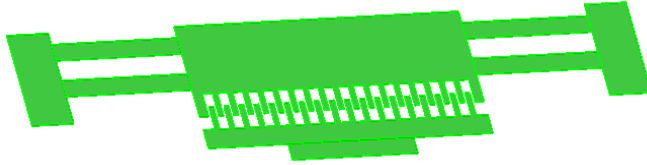
- ・付録 C. CadEcpConv 操作マニュアル

を、それぞれ参照のこと。

II. 2端子櫛歯モデルによる相互変換処理の実行結果例

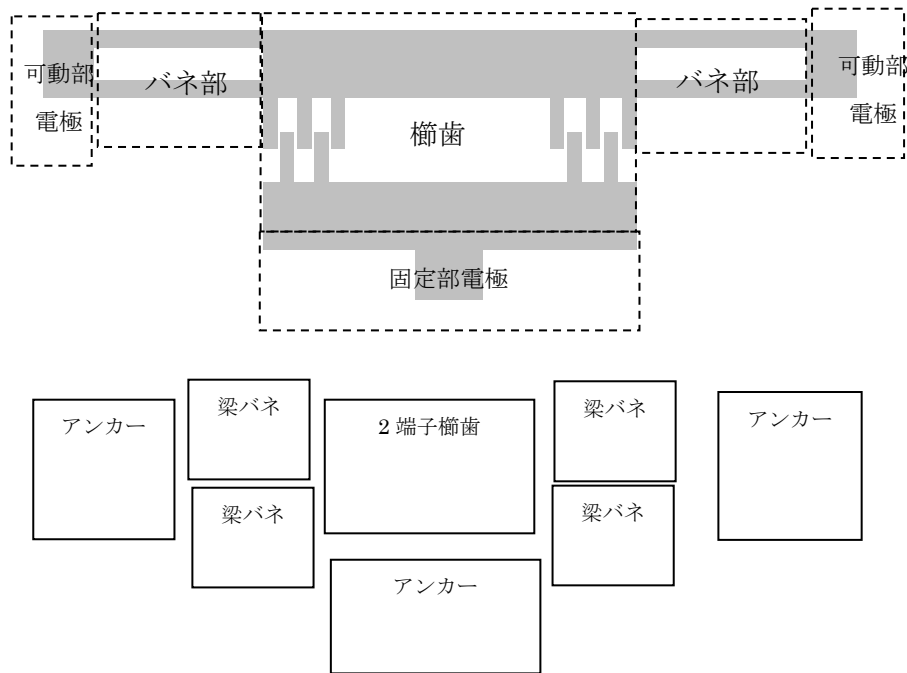
2端子櫛歯デバイスを例に、開発した相互変換処理の実行結果を示す。

例とする2端子櫛歯デバイス構造を図⑤.6.2-2 2端子櫛歯デバイス構造に示す。



図⑤.6.2-2 2端子櫛歯デバイス構造

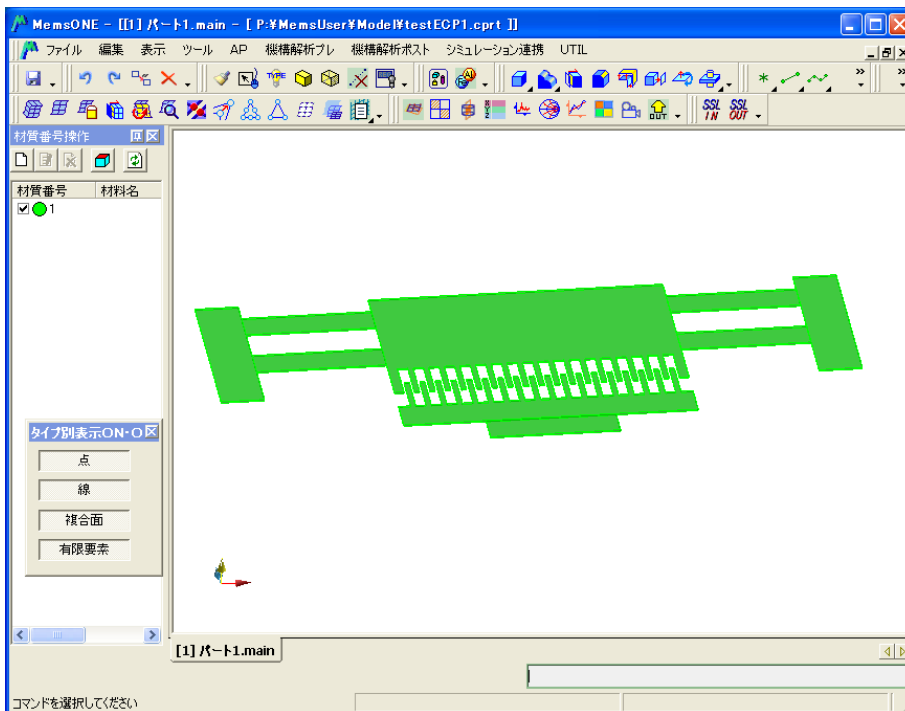
2端子櫛歯デバイスの部品構造と等価回路モデルとしての構成コンポーネントは 図⑤.6.2-3の通りとする。



図⑤.6.2-3 2端子櫛歯のコンポーネント構成

<3次元 CAD ファイルから ECP ファイルへの変換実行結果例>

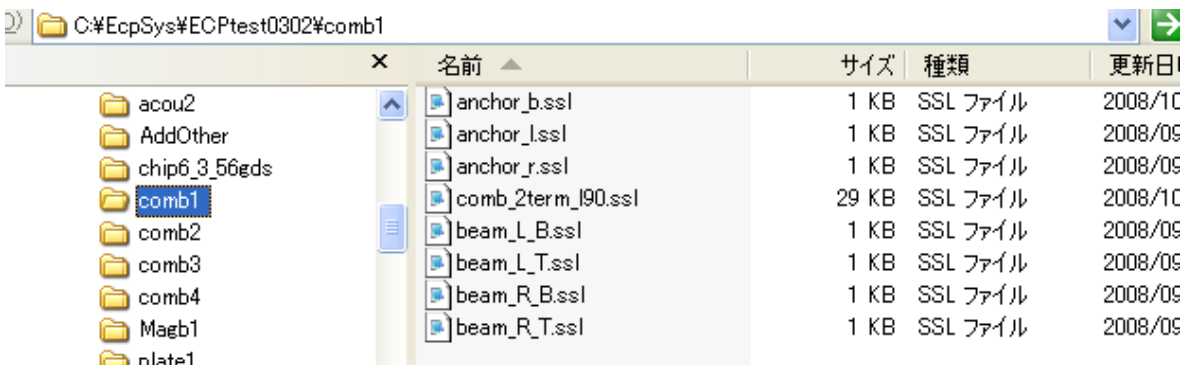
(1) MemsONEにて、コンポーネント毎の3次元 CAD ファイルを出力
MemsONE でモデリングした2端子櫛歯モデルを図⑤.6.2-4に示す。



図⑤.6.2-4 MemONEによるモデリング例

MemsONEでの櫛歯モデルはコンポーネントに対応した立体構成にしたあと、3次元 CAD ファイル出力 (SSL 出力) を行い、出力ファイル群は、適当なフォルダーにまとめておく。

図⑤.6.2-5は、フォルダーcomb1直下に出力された3次元 CAD ファイル群 (8ファイル) を示す。

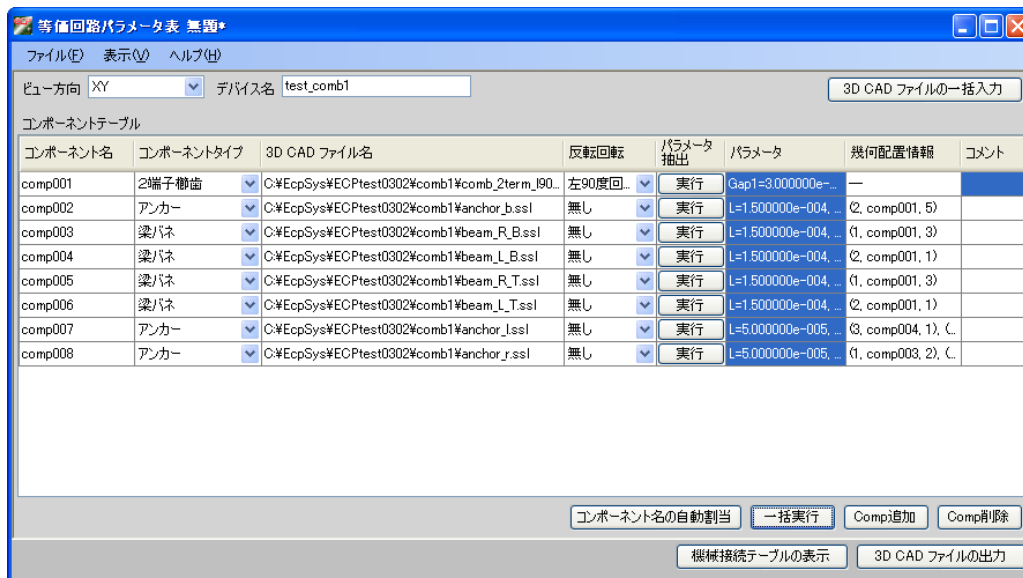


図⑤.6.2-5 MemsONEで作成された3次元 CAD ファイル群

なお、出力ファイル名は、次処理のパラメータ抽出操作が容易になる様、ルールに従った名前が付けられている。

(2) 相互変換プログラム CadEcpConv の実行例

3次元 CAD ファイルと等価回路モデルの相互変換プログラム (CadEcpConv) を起動させた後、3次元 CAD ファイルから形状パラメータ、材料物性パラメータ、幾何配置情報の自動抽出、および、コンポーネント間の幾何接続情報の自動生成を実行した画面例を、図⑤.6.2- 6 に示す。



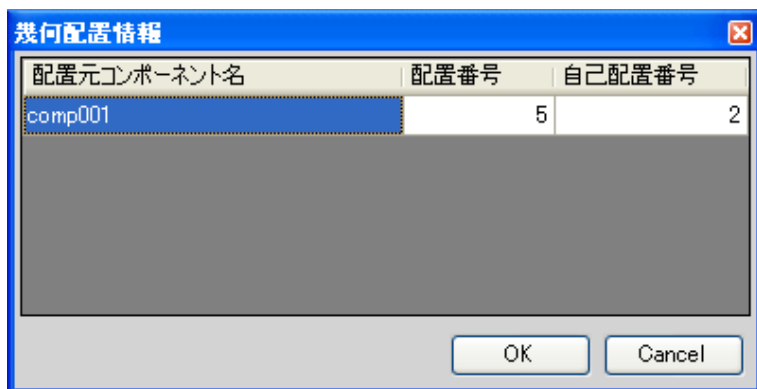
図⑤.6.2- 6 CadEcpConv 操作画面

図⑤.6.2- 7 は、2端子櫛歯コンポーネントの3次元 CAD データから自動抽出された形状パラメータと材料物性パラメータの例を示す。

パラメータ名	パラメータ値	単位
櫛歯間のギャップ1 [Gap1]	3.000000e-006	m
櫛歯間のギャップ2 [Gap2]	3.000000e-006	m
初期重なり幅 [X0]	2.000000e-005	m
櫛歯の長さ [Lc]	5.000000e-005	m
櫛歯の幅 [Wc]	6.000000e-006	m
櫛歯の厚み1 [Thi1]	2.000000e-006	m
櫛歯の厚み2 [Thi2]	2.000000e-006	m
土台の長さ [Lm]	3.400000e-004	m
土台の幅1 [Wm1]	1.500000e-004	m
土台の幅2 [Wm2]	4.000000e-005	m
繰り返し数 [Num]	17	
基板からの高さ [Hm]	0.000000e+000	m
密度 [Density]	2.330000e+021	kg / m3
直流バイアス電圧 [BiasVolt]	0.000000e+000	V

図⑤.6.2- 7 自動抽出された形状パラメータと材料物性パラメータ

図⑤.6.2- 8 は、comp002 のアンカーの幾何配置情報（2 端子櫛歯コンポーネントのどの位置に配置されているか）の例を示す。



図⑤.6.2- 8 自動抽出された幾何配置情報

図⑤.6.2- 9 は、幾何配置情報から自動抽出された、コンポーネント間の機械接続情報の例を示す。

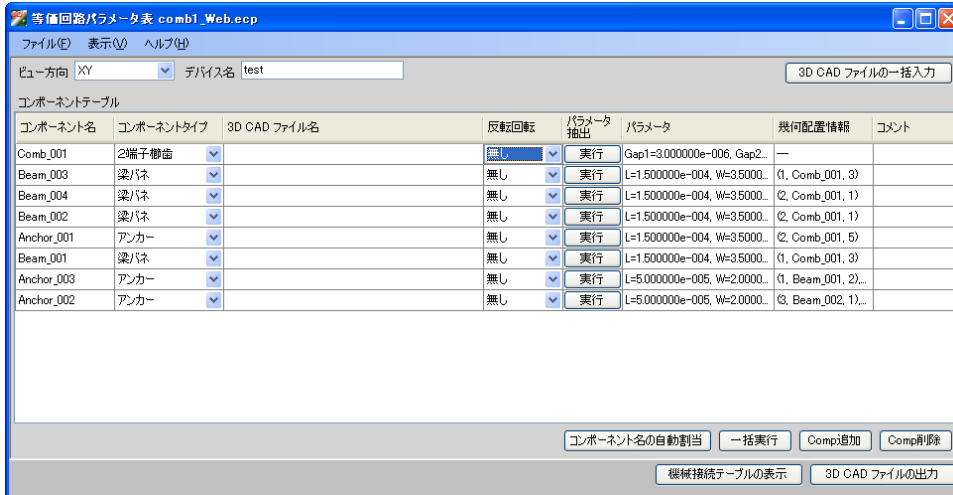
joint node 名	コンポーネント名 機械節点番号	コンポーネント名 機械節点番号	コンポーネント名 機械節点番号	コンポーネント名 機械節点番号	コンポーネント名 機械節点番号
joint001	comp001, 2	comp002, 1			
joint002	comp001, 1	comp003, 1	comp004, 2	comp005, 1	comp006, 2
joint006	comp004, 1	comp006, 1	comp007, 1		
joint008	comp003, 2	comp005, 2	comp008, 1		

図⑤.6.2- 9 自動生成された機械接続情報

<ECP ファイルから 3 次元 CAD データへの変換実行結果例>

(1) 相互変換プログラム CadEcpConv の実行例

図⑤.6.2- 10 に、CadEcpConv を起動したあと、メニューバーの「ファイル」／「開く」で作成済み ECP ファイルを指示した画面例を示す。

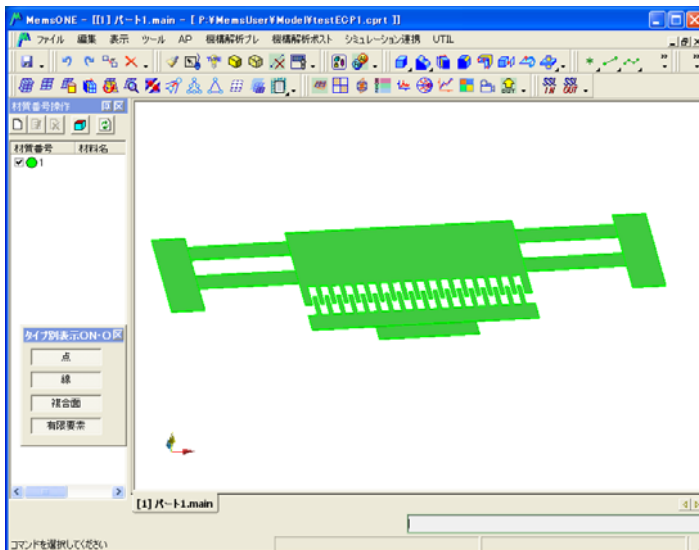


図⑤.6.2- 10 作成済み ECP ファイルが開かれた操作画面

この GUI 操作画面の「3DCAD ファイルの出力」指示により、コンポーネント毎の 3 次元ファイルが、出力時に指示したフォルダー名に出力される。

(2) MemsONE における、3 次元 CAD ファイルの取り込み

図⑤.6.2- 11 は、「3DCAD ファイルの出力」指示により出力された 3 次元 CAD ファイル群を MemsONE に取り込んだ画像例を示す。



図⑤.6.2- 11 MemsONE への取り込み結果

⑤. 7 プロジェクト推進業務

H19年度から着手した本研究開発課題への取り組みを効果的に効率的に推進するために、マイクロマシンセンターが主体となり、開発項目やその方針など重要事項を検討を主目的とした「ファイン MEMS システム化設計プラットフォーム検討委員会」と、具体的な開発設計と開発の進捗管理、及び開発成果の普及に関わる検討を行う「ファイン MEMS システム化設計プラットフォームワーキンググループ」の2つを組織しすすめることで、システム化プラットフォームのあるべき姿の整合や、その開発課題の解決方法の抽出、進捗管理などをタイムリーに行うことができ、当初の目標を遅滞なく達成することができた。

(1) ファイン MEMS システム化設計プラットフォーム検討委員会

ファイン MEMS システム化設計プラットフォームとしてあるべき姿や MEMS 等価回路モデルの考え方についての方向付けなど重要事項を議論し確定する為に、東京大学生産技術研究所藤田博之教授を委員長としてこれらに係わる有識者をメンバーとして、年4回のチェックポイントに開催した。H19年度は、ファイン MEMS プロジェクトで具体的に開発されるデバイスの等価回路化を目標としたので、ファイン MEMS プロジェクト参画メンバを主体に構成し実施した。H19年度の開催実績を表⑤.7-1-1に示す。

表⑤.7-1-1 ファイン MEMS システム化設計プラットフォーム検討委員会 開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第1回	7月4日(水) 15:30~17:30	MMC会議室	17名
第2回	10月15日(月) 13:30~17:00	MMC会議室	16名
第3回	12月17日(月) 13:30~16:00	MMC会議室	17名
第4回	2月28日(木) 13:30~15:30	MMC会議室	17名

MMC：財団法人マイクロマシンセンター

20年度は、汎用性を向上させる狙いから MEMS 等価回路同士の接続モデルを想定し、その観点での研究者を主体に構成し実施した。H20年度の開催実績を表⑤.7-1-2に示す。

表⑤.7-1-2 ファイン MEMS システム化設計プラットフォーム検討委員会 開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第5回	6月17日(火) 13:30~16:00	MMC会議室	15名
第6回	8月25日(火) 13:30~16:30	MMCテクノサロン	14名
第7回	12月3日(火) 13:30~16:30	MMCテクノサロン	18名
第8回	2月26日(火) 13:30~16:30	MMCテクノサロン	16名

MMC：財団法人マイクロマシンセンター

(2) ファイン MEMS システム化設計プラットフォームワーキンググループ

ファイン MEMS システム化設計プラットフォーム検討委員会の基本方針を受け、システム化プラットフォームとしての開発会議の位置づけで、等価回路モデルや Web システムの開発に関する

概念設計の明確化、具体的作業の進捗管理を行った。必要に応じて、MEMS デバイス開発現場でのデバイス作成や評価に関する実地検証等を交えることも効率化を目的として実施した。2年間を通して、毎月開催することにより進捗管理と連携緊密性を確保できた。

H19年度は、主にファイン MEMS プロジェクトで具体的に開発されているデバイスに関し実施した。H19年度の開催実績を表⑤.7-2-1に示す。

表⑤.7-2-1 ファイン MEMS システム化設計プラットフォームワーキンググループ開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第1回	6月6日(水) 9:30~15:00	MMC会議室	8名
第2回	7月9日(月) 15:00~18:00 7月10日(火) 9:30~15:00	香川大学工学部橋口研究室 及び会議室	8名
第3回	8月16日(木) 10:00~16:00	MMC会議室	9名
第4回	9月12日(水) 9:00~15:00	MMC会議室	10名
第5回	10月5日(金) 11:00~17:00	MMC会議室	10名
第6回	11月19日(月) 15:00~21:00 11月20日(火) 9:00~14:00	静岡大学浜松キャンパス 大学院棟4F 세미나室、他	10名
第7回	12月18日(火) 10:00~16:00	東京国際フォーラム ガラス 棟4階 G603 会議室	10名
第8回	1月23日(水) 10:00~16:00	MMC会議室	12名
第9回	2月21日(火) 10:00~16:00	MMC会議室	11名
第10回	3月17日(月) 13:00~17:30	MMC会議室	11名

また、定例ワーキンググループ以外にも、緊急ないし追加的に議論すべき課題の検討のために関係する参加者での臨時ワーキンググループを開催した。H19年度の臨時の開催実績を表⑤.7-2-2に示す。

表⑤.7-2-2 臨時ファイン MEMS システム化設計プラットフォームワーキンググループ開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第1回	7月31日(水) 10:00~11:00	MMC会議室	5名
第2回	9月6日(木) 13:00~17:00	京都大学土屋研究室、 立命館大学磯野研究室	5名
第3回	10月4日(木) 17:00~18:15	立命館大学COE研究機構 杉山先生居室	6名
第4回	10月22日(月) 10:30~16:00	MMC会議室	5名
第5回	10月24日(水) 16:00~17:30	MMC会議室	7名
第6回	11月26日(月) 10:00~13:30	MMC会議室	9名
第7回	1月8日(火) 9:00~13:00	MMC会議室	12名

H20年度は、汎用性を向上させる目的で、MEMS 等価回路同士の接続モデルに関し具体的に

実施した。H20年度の開催実績を表⑤.7-2-3に示す。

表⑤.7-2-3 ファイン MEMS システム化設計プラットフォームワーキンググループ開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第11回	4月17日(月) 10:00~16:00	MMC会議室	12名
第12回	5月27日(火) 13:00~17:00 5月28日(水) 9:00~14:00	兵庫県立大学書写紀年会館 第2会議室、前中研究室、他	11名
第13回	7月9日(水) 10:00~16:00	MMC会議室	13名
第14回	8月14日(木) 11:00~17:30	MMC会議室	12名
第15回	9月29日(月) 9:30~15:00	MMCテクノサロン	11名
第16回	10月28日(火) 10:00~16:00	MMC会議室	12名
第17回	11月26日(水) 10:00~15:30	MMC会議室	13名
第18回	12月25日(木) 14:00~16:30	MMC会議室	13名
第19回	2月2日(月) 13:30~17:00	MMCテクノサロン	10名
第20回	2月23日(月) 10:00~16:00	MMCテクノサロン	11名
第21回	3月13日(月) 15:00~17:30	MMCテクノサロン	11名

H19年度に引き続きH20年度も、緊急ないし追加的に議論すべき課題の検討のために関係する参加者での臨時ワーキンググループを開催した。H19年度の臨時の開催実績を表⑤.7-2-4に示す。

表⑤.7-2-4 臨時ファイン MEMS システム化設計プラットフォームワーキンググループ開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第8回	5月8日(木) 10:00~14:00	MMC会議室	8名
第9回	6月4日(水) 9:30~11:30	MMC会議室	6名
第10回	7月17日(木) 10:00~18:00	MMC会議室	10名
第11回	9月2日(火) 10:00~14:00	MMC会議室	10名
第12回	10月2日(木) 15:00~18:00 10月3日(木) 10:00~15:00	MMCテクノサロン	12名
第13回	10月7日(火) 18:00~20:00	MMC会議室	8名
第14回	10月15日(水) 9:00~14:00	MMC会議室	11名

2-4. 開発成果のまとめ

(1) 目標の達成度

発表用スライドの該当部分を貼り、簡単な説明文をつける

本研究開発課題はH19年度に新たに追加されたものでありH19年度に完結させるものとして開発目標を設定して実施した。その成果が認められH20は継続手今とするが、新たな研究開発目標に向けて取り組まれたものである。これらの、経緯を踏まえ、達成目標に関する総合的な評価としては、H19年度とH20年度それぞれについて示すものである。

先ず、H19年度取り組みに関する開発目標とその達成度評価を表⑤.8-1に示した。取り組んだ5項目に関し、すべて予定通り達成することができた。Webライブラリーシステムに関しては完成しているが、H20年度の開発内容とその結果に基づいて成果普及の考え方を検討する必要があるため、来年度の完成を待ってリリースすることとした。

表⑤.8-1 H19年度の開発目標と成果・達成度評価

研究項目	19年度目標	成果	達成度
1. ファインMEMS等価回路モデルの構築	生成データ(ネットリスト)を利用した回路計算結果が実デバイスの動作や機械形状の依存性を的確に表現し特性の変化を評価できること	デバイスモデル化終了。CNTカンチレバー及び櫛歯角速度センサ完了。MEMS同士の練成のモデル化について方策を検討H20年度の取り組み課題とした。	○
2. MEMS等価回路モデルの収集・登録	範囲:櫛歯(角速度センサ、アクチュエータ3種類)、梁2種類、平行平板2種類、磁気回路、振動子等価回路モデルコンテンツの数:10件	等価回路モデル化終了。MEMS同士の練成のモデル化について方策を検討H20年度の取り組み課題とした。	○
3. MEMS等価回路モデル閲覧用Webライブラリの構築	等価回路モデルの閲覧及び汎用電子回路シミュレータで利用可能なデータ(ネットリスト)でダウンロード可能なこと	Webライブラリ構築終了。	○
4. 単位要素モデル、MEMS構成要素モデルの検討	Webライブラリシステムに掲載された等価回路モデルの汎用電子回路シミュレータで利用可能なリスト生成に必要なばね定数などの機械構造の特性値を抽出できること	終了。櫛歯角速度センサについて実装含め完了。	○
5. 等価回路モデル・3次元CADモデル相互生成技術調査	3次元CADシステムと等価回路システム間の形状データの相互変換技術に関する課題を明確化できていること	技術課題を抽出しを完了し、相互変換処理の検討を終了した。H20年度の取り組み課題とした。	○

H20年度の開発目標とその成果及び達成度評価について表⑤.8-2に示した。今年度は、最終年度にあたり、Webシステム使用法やMEMS等価回路モデルの理論的説明、機械的、電気的パラメータの導出方法、3DCADからの相互変換に関するMemsONEとの連携の仕組みをなど、利用に当たって重要と考える解説書の完備、Webシステムのリリースを踏まえWebシステムへのアクセスの仕組み（ユーザ登録やパスワード管理、など）を踏まえて検討した。

表⑤.8-2 H20年度の開発目標と成果・達成度評価

研究項目	H20年度開発目標	成果	達成度
1. ファインMEMS等価回路モデルの構築	外力を扱えるモデル3件、および基本的MEMS-MEMS接続モデルを開発し、モデルの検証を完了する。新規MEMS等価回路モデルとして圧電デバイス、音響デバイスの2件開発する。	①歯歯・平行平板・磁気回路デバイスに関しコンポーネント化想定の外力等価回路モデルを開発 ②それらの外力端子を活用した接続モデルを開発 ③歯歯とバネなどの接続モデル実験的に検証 ④圧電・音響デバイスの外力を扱える等価回路モデルを追加	○
2. MEMSデバイスモデルの等価回路導出と登録、及び文献調査	MEMSデバイスの等価回路導出に関する定式化手法を開発し、等価回路モデルの定式化を完了する。MEMS2008およびセンサシンポを調査し、基礎データを収集、開発対象とするMEMSデバイスコンポーネントを決定する。	①上記に相当する等価回路モデルの定式化と理論的検証を終了 ②定式化手法は、特許化するとともに、Sensor Symposium08で報告した。 ③MEMSデバイスに関する基礎データを収集、随時開発内容に取り込んだ	○
3. 単位要素モデル、MEMS構成要素モデルによる機械パラメータ等抽出の検討	Webシステムに登録されたMEMS等価回路モデル、およびMEMS-MEMS接続モデルを対象として、その回路定数を決定する為に必要な機械パラメータ、及び電気パラメータのモデル仕様を確定し、パラメータ抽出ソフトの実装およびテストを完了する。	①各デバイス・コンポーネントに対応した各機械パラメータ抽出ソフトを開発した ②この成果の一部は、Sensor Symposium08で報告した。	○
4. 電気的特性および機械的特性抽出機能の開発	H19年度構築したWebシステムに項目1のMEMS等価回路の生成と周辺回路の接続機能、電気回路シミュレーションの実行環境、および電気・機械的特性抽出機能の実装を完了し、Webシステムを一般に公開する。	①等価回路モデルおよび入力システム、機械等パラメータ抽出ソフト、3DCAD中間データ取り込み、およびSPICEを活用した電気・機械的特性解析モジュールをWebシステムとして作成 ②全体としての、解説書を合わせて収録予定 ③H19年度版と合わせ、Web公開を5月末とした	○
5. 等価回路モデル・3次元CADモデル相互変換の開発	3次元CADシステム(MemsONE)とWebシステム間の形状データ、および材料物性データの相互変換機能の実装を完了し、システム間の連携を確認する。	3次元CADモデルの形状データ・材料物性値の生成とその逆システムを中間ファイルとして扱う方式を開発(MemsONE CADを利用)	○

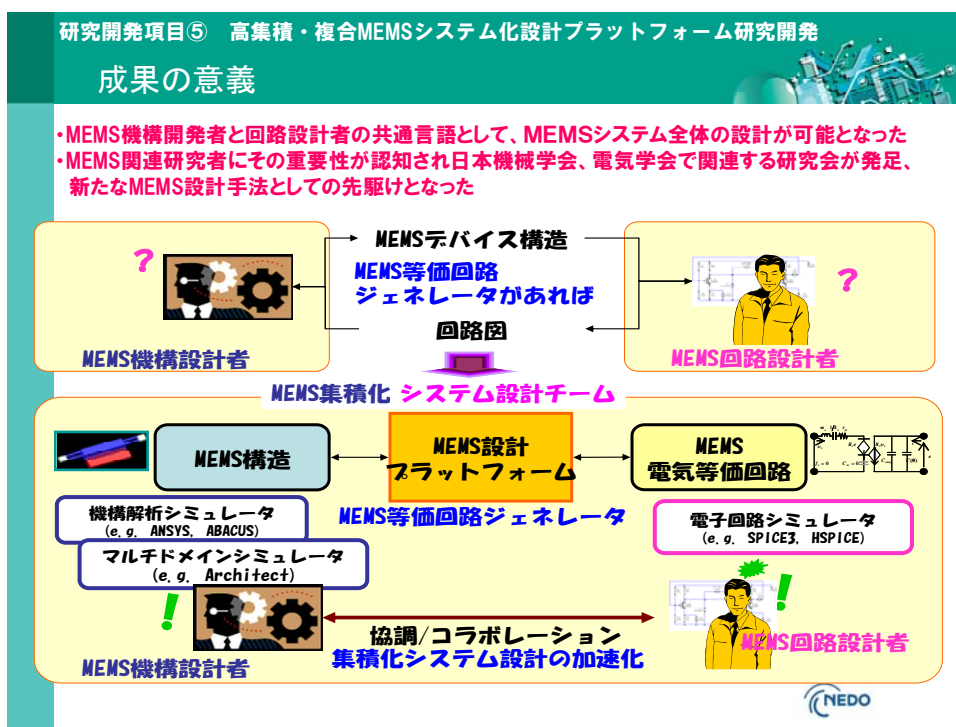
最終的に、WebシステムはH21年6月8日よりマイクロマシンセンターホームページ上にリリースした。

(2) 成果の意義

成果の意義として、以下の2点があげられる。

- ①MEMS 機構開発者と回路設計者の共通言語として、MEMSシステム全体の設計が可能となった。
- ②MEMS 関連研究者にその重要性が認知され日本機械学会、電気学会で関連する研究会が発足、新たな MEMS 設計手法としての先駆けとなった

成果の意義として、これらをわかりやすく示したものが、図(2) 1となる。MEMS 開発において電気回路設計者と機構設計者の共通言語としてシステム設計に関する新たな手法の先鞭となった意義は大きい。



図(2) 1 ファインMEMSシステム化設計プラットフォーム研究開発成果の意義

(3) 知的財産等の取得

知財権取得として、以下の一件が成果となった。

特許の名称	特徴・強み・新規性
解析支援システム、解析支援方法及び解析支援プログラム	MEMS デバイスを構成要素の組み合わせとして取り扱う。構成要素の電氣的、機械的特性を等価回路で表すことにより、MEMS デバイス全体をこれら等価回路の接続で表現した。これら等価回路は、受動素子(LCR)を中心に構成され、汎用回路シミュレータで解析可能である。

(4) 成果の普及

プロジェクトを通じて、せきあの普及には特に注力して NanoTech2008、マイクロマシン・MEMS 展での展示や、成果報告会での発表に勤めた。

さらに開発成果の集大成として、H21年6月8日にマイクロマシンセンターホームページから、等価回路ジェネレータとして、利用方法や導出原理などの解説書含めて Web 上にリリースした。これらの普及活動の要約を図（4）に示す。

研究開発項目⑤ 高集積・複合MEMSシステム化設計プラットフォーム研究開発 23

成果の普及

③ 展示会などへの出展

開催時期	展示会名称
H20年2月	Nano Tech 2008
H20年7月	第19回マイクロマシンMEMS展示会
H21年7月	第20回マイクロマシンMEMS展示会


第19回マイクロマシンMEMS展
(2008年7月30日～8月31日)

④ H21.6.8 Web上にMEMSPediaとして一般公開
(マイクロマシンセンターホームページ)

- 併せてユーザ支援の仕組み作りとして、技術交流掲示板を設置
- 日経マイクロデバイスより取材記事

H21.6.9 Tech On"MEMSPedia"がネット上に公開

高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクト



図（4）成果普及活動の要約

3. 実用化・事業化の見通し

成果の普及に関し、H21年6月8日にマイクロマシンセンターホームページから、等価回路ジェネレータとして、利用方法や導出原理などの解説書含めてWeb上にリリースした。基本的に、このWebシステムでの閲覧を普及の基本としているが、この新しい設計手法をさらに周知し普及させるため以下の取り組みを実行していく。

- ①発足した研究会、専門委員会との連携や、学会、講習会を活用して、新しい設計手法としてさらに認知度を深める。
- ②マイクロマシンセンターの委員会として、MEMS等価回路ジェネレータ普及検討委員会を立ち上げ、効果的な普及に関する継続的な検討をすすめていく。
- ③ツールとしての使い勝手の向上や、継続的に活用できる為の方策を、上記2つを通じて検討を進める。

特に注力する研究会、専門委員会との連携に関し、現状での開催状況と反響は以下の通りである。

- 日本機械学会 第1回電気等価回路から考えるMEMS設計手法研究会(東大、85名)H20/12/1
第2回電気等価回路から考えるMEMS設計手法研究会(東大、55名)H21/5/15
電気学会 第一回電気等価回路を用いたMEMS設計手法調査専門委員会(〃)H21/5/15

研究開発項目⑤ 高集積・複合MEMSシステム化設計プラットフォーム研究開発

電気等価回路から考えるMEMS設計手法研究会 **研究会の反響**

「第一回、第二回の開催を通じ、多くの参加者が集い、その参加が継続的で、活発な議論が行われた。新しいMEMS設計ツールとして期待が高い。」

参加者からの声

第一回

- ・実際にMEMSを設計している企業の研究者からの注目が非常に高かった。
- ・ラグランジアンを用いたMEMSの統一的なモデリング手法に対して詳細を知りたいという声も多かった。MEMSモデリングの教科書的な意味合いでも注目されているようである。
- ・企業設計者は外力に対する応答、つまりセンサの感度を設計の段階で把握するのに利用できるかどうか最大の関心のようである。

第二回

- ・機械回路の合成は、従来研究されてきた圧電素子よりMEMSはより複雑であるので、CADのソリッドモデルからダイレクトに変換されることに関して、進歩したという評価を受けた。
- ・MEMSのソリッドモデルからネットリストが生成される手法に関して、新しい設計ツールであるという印象を持ってもらえたようである。
- ・機械系自由度を6自由度まで拡張して欲しいという声もあった。(2)

