

V-3.研究開発項目③ MEMS/MEMSの高集積結合技術の開発

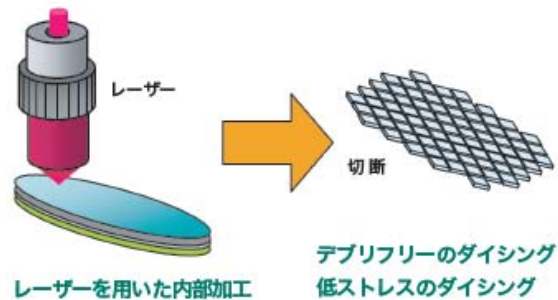
(1)多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシング技術

(レーザー技術総合研究所/東北大学)

1. 研究の概要

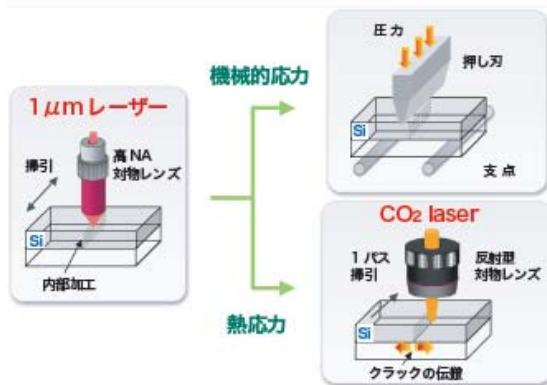
特徴

MEMS 素子は内部に可動機構やダイアフラムなどの脆弱構造を有しており、ウェハをチップに分割する際に半導体集積回路の様に水を掛けながら回転刃でウェハを切断すると素子が破損しやすい。現状では、破損を避けるためにチップ保護の工程を導入しておりデバイス設計が制約されている。そこで、新たなダイシング手法として、パルスレーザーによるウェハの内部加工に着目し、工業的に広く用いられている高繰り返し Nd:YVO₄ レーザーやファイバーレーザー、CO₂ レーザー等を用いて低コストにドライで切削粉の出ないダイシング技術を開発した。従来のダイシング技術に比べて、製造工程の簡素化、歩留まりの向上を可能とする。



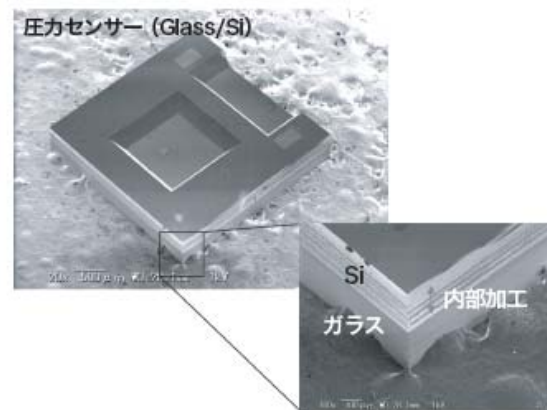
技術内容・特性

高 NA の対物レンズを用いてパルス赤外レーザー光をウェハ内部に集光すると、集光点近傍で選択的に光吸収が起き内部クラックを形成することができる。この内部クラックを連続的に形成することによりウェハ内部に脆弱部を形成し機械的応力を加えることによりチップ分割が可能となる。特に、ガラス/Siから構成される多層ウェハの場合、波長 1 μ m、パルス幅 100~200ns のレーザーを用いて Si 層だけに内部加工を施すと、デブリフリーかつ低ストレスで切断が可能となる。さらに、波長 10 μ m の CO₂ レーザーを Si 層側からガラス接合面に対して照射し熱応力を加えると、より低ストレスでのチップ分割が実現する。



用途・目的

本ダイシング技術により、積層ウェハを低ストレスに切断でき水や切削粉に対する設計上の制約から解放されるため、従来にはない MEMS の多様化が期待できる。今後は、レーザー総研と東北大に設置した設備で、高集積・複合 MEMS 製造技術開発事業への参加企業他を対象に、切断テスト等を行い、プロセス技術の普及を図る。本研究は、レーザー学会進歩賞と電気学会の電気学術振興賞(論文賞)を受賞し、学術面でも高く評価されている。



2. 成果の詳細

第1章 緒論

1.1 背景及び目的

MEMS (Micro Electro Mechanical System : 微小電気機械システム) は小型・低消費電力・高機能という特徴を活かし、自動車・情報通信分野等で市場規模を拡大し続けている。この MEMS とは、半導体集積技術を用いてガラスや Si 基板上に、電子回路・機械要素部品・センサ・アクチュエータなどを作り込んだデバイスを示す。代表例としてはインクジェットプリンタヘッド・圧力センサ・加速度センサ¹⁻¹⁾等が挙げられる。

MEMS デバイスは、薄膜形成、フォトリソグラフィ、ドライエッチングなどの工程後に、切断 (ダイシング) 工程へと移る。従来、MEMS ウエハをチップ化するには接触方式であるダイヤモンドブレード (回転刃) が用いられている。このブレードを用いるダイシング工程では、接触方式であるため切断時に MEMS デバイスに負荷がかかる。更に、ブレードの冷却や切削粉の除去のために水をかける必要がある。しかし、ダイヤモンドなどを有する精密な MEMS 素子に水が浸入すると、汚染や破損が生じ歩留まりが大幅に低下する。このため、通常は MEMS ウエハのチップ化前に保護テープを施したり、レジストにより保護したりするが、これが MEMS の設計の大きな制約となる。また、回転ブレードによるダイシングでは、ブレード幅に相当する分割代とチップングが発生する領域が広いいため、ウエハ内でのチップ数が減少するという問題がある。これは、特に小型チップのコストに直結するため MEMS 実用化の障害となる。以上の背景から、ドライな環境でチップングなしに低ストレスダイシングする技術が求められている。

これまでに、レーザーアブレーションを用いた切断が検討されているが、デブリ (ゴミ) の発生や熱影響が懸念される。レーザーアブレーション切断の応用として、レーザーマイクロジェットという技術があるが、これは水の問題を避けられない。前述した問題を解決する手法として、ウエハ内部に改質層を発生させ切断するステルスダイシング技術が開発された。しかし、厚みのある試料や積層構造 MEMS への適用はできておらず装置が高額である。したがって、我々は MEMS の一般的な構成要素であるテンパックスガラスと Si のレーザー加工特性を調べた後、積層 MEMS をレーザーによってデブリなしに低ストレスで分割する技術の開発を行った。

1.2 低ストレスレーザーダイシング技術の開発

1.2.1 低ストレスダイシングの手順

本研究で行ったレーザーダイシングは3つの工程から構成されており、その概要を図1-1に示す。第1工程として、試料に対して透過性のある短パルスレーザーをウエハ内部に集光して内部クラックを形成する。続いて、このクラックがライン状につながるようにレーザーを走査させ内部加工ラインを作る。厚みのあるウエハに対しては厚さ方向にレンズのデフォーカス量を変化させて数回レーザー走査させ、数層の内部加工ラインを形成する。ここで、ウエハ表面がアブレーションしてデブリ（ゴミ）が発生しないように内部加工ラインの層数、レンズのデフォーカス量を調整する。また、形成された内部クラックによってレーザー光が散乱しエネルギーロスすることを避けるために、レーザー走査はウエハの底面から表面の順に行っていく。次に、第2工程として、ブレード等によって外部ストレスを加えることでウエハを内部クラック層に沿って完全に切断する。最後に第3工程としてテープエキスパンドを行いチップ間の隙間をあける。図1-2(a)に第3工程で用いたテープエキスパンダ装置（ヒューグルエレクトロニクス社製）を示す。本研究では、第1工程の前後どちらかで図1-2(b)に示すテープマウント装置（ヒューグルエレクトロニクス社製）を用いて、ウエハにダイシングテープを貼り付けている。テープエキスパンダ装置はダイシングテープの端をリングで固定し、ステージを上昇させることでテープを伸ばす。このテープが引張られる時に発生する引張り応力を利用して、個々のチップ間に隙間をあけていく。第1工程で用いたレーザーダイシング装置、第2工程で用いたウエハ切断装置については第2章で詳しく述べる。

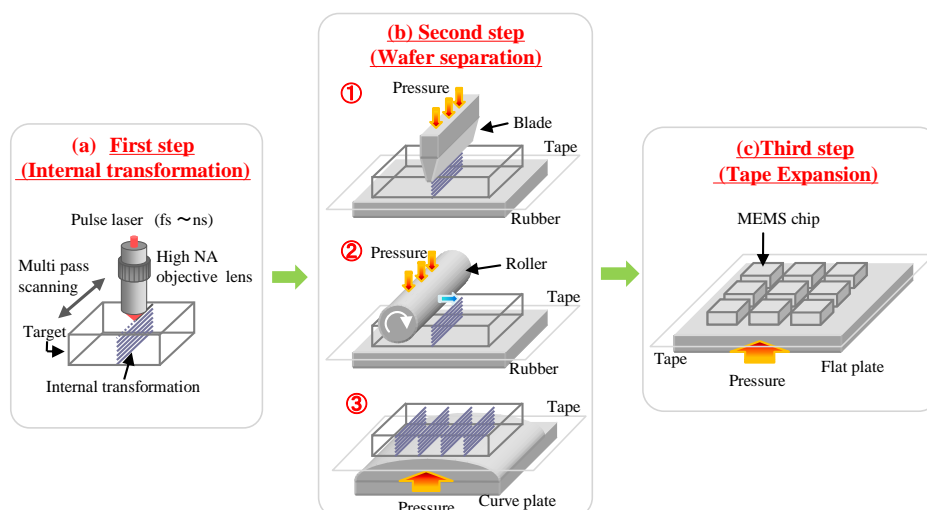
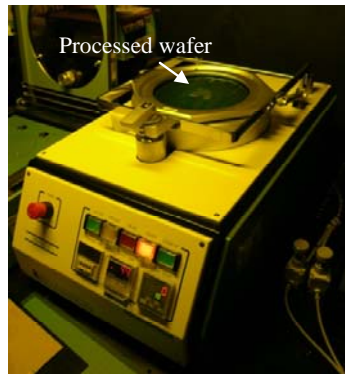
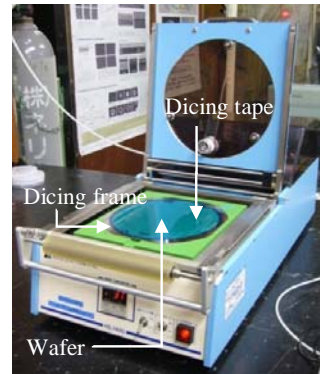


図1-1 低ストレスダイシングのプロセスフロー



(a) テープエキスパンダ装置



(b) テープマウント装置

図 1-2 テープエキスパンダ，テープマウント装置の外観

1.2.2 短パルスレーザーによるウエハの内部加工

レーザーでバンドギャップの大きいガラスの内部加工をする場合は，非線形現象である多光子吸収を起こす必要がある．物質の電離エネルギーや解離エネルギーに比べて，1光子のエネルギーが大きい場合は，図 1-3(a)のように1光子の吸収により物質の状態が変化する．この場合，吸収係数はレーザー光強度に依存せず，照射強度に比例してイオン数などは増加する．これに対して，図 1-3(b)，(c)のように1光子のエネルギーに比べて励起準位のエネルギーが大きい場合は，レーザー強度を大きくすると複数の光子を同時に吸収して遷移する多光子吸収が起こる．この多光子吸収には2つのケースがある．図 1-3 (b) に示される原子の光電離のように中間に共鳴準位が存在しない場合，電離に要する光子数を n とすると，吸収は光強度の n 乗に比例する．これに対して，図 1-3 (c) の分子振動のようにエネルギー準位が密な場合，段階的な吸収が起こるため励起準位に達するには n 個の光子が必要な場合でも，吸収は強度の n 乗には比例せず，強度依存性は n 乗に比べてかなり小さくなる．ガラスの内部クラックは図 1-3(b)の多光子吸収で起こるため，光強度の大きい短パルスレーザーが必要である．一方，Si の内部加工をする場合は，Si に対して吸収の少ない赤外域のレーザー波長を選択する．Si のバンドギャップは約 1.1eV であり，波長 1064nm のレーザーで内部加工をした場合，フォトンエネルギーが 1.17eV であるため図 1-3(a)の1光子吸収で加工が行われる．

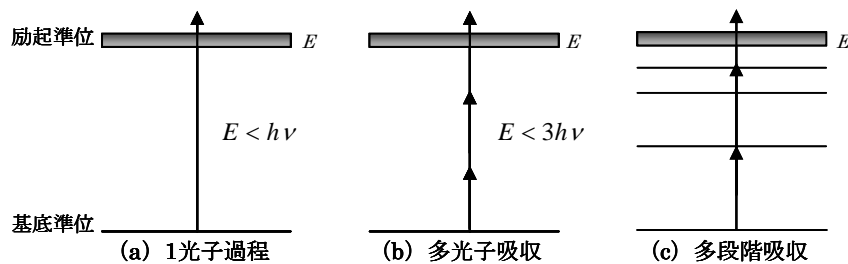


図 1-3 光の吸収過程

ウエハの内部加工をするには、ウエハの表面と内部集光点のエネルギー密度の関係も重要になる。ウエハ表面のレーザーエネルギー密度はアブレーション閾値以下、集光点は内部クラック形成閾値以上という条件を満たすには高 NA の対物レンズが必要になる。本研究では NA0.7 と NA0.8 の対物レンズを使用した。続いて、短パルスレーザーを NA0.8 の対物レンズでガラスや Si に内部集光した時の集光位置について述べる。図 1-4 にレンズのデフォーカス量に対する内部集光位置を示す。内部集光位置(内部加工位置) l はスネルの法則より以下のように導かれる。

$$l = n_2 \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{NA}{n_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{NA}{n_1}\right)^2}} \cdot d \quad (1-1)$$

ここで、 d はレンズのデフォーカス量、 n_1 は空気の屈折率、 n_2 は基板の屈折率、 NA はレーザーの入射 NA である。ガラスの屈折率は 1.5、Si の屈折率は 3.6、空気の屈折率は 1 としている。図 1-4 よりガラスの場合は屈折率が小さいため内部集光位置が基板内部に少し入り込む程度であるが、Si の場合は屈折率が大きいいため集光位置が基板内部に大きく入り込んでいることが確認できる。一例として式(1-1)を用いて、NA0.8 の対物レンズで $10\mu\text{m}$ デフォーカスした場合、ガラスの内部集光位置は $21.6\mu\text{m}$ 、Si の内部集光位置は $58.5\mu\text{m}$ となる。

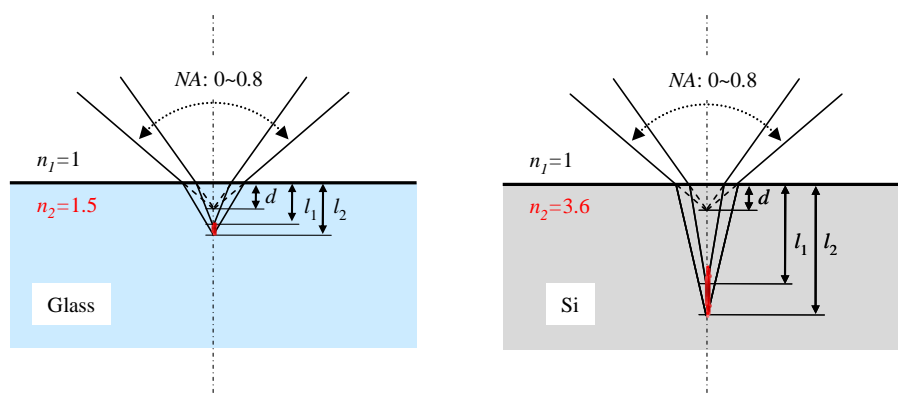


図 1-4 入射 NA と内部集光位置の関係

1.3 ガラスの熱応力割断

液晶パネル、プラズマパネルなど薄型ディスプレイの基板となるガラスの切断には、超硬ホイールによって表面にクラックを入れブレイクする方法と、レーザーによる熱応力を利用した方法¹⁻⁴⁾が用いられている。図 1-5 にレーザー照射による熱応力割断の原理を示す。割断プロセスとしては、割断予定ラインに端にホイールやレーザーで初期亀裂を形成する。そこに CO₂ レーザー (波長: $10.6\mu\text{m}$) を照射し、割断ラインに沿って走査させる。この時、

ガラス表面にレーザー光が吸収され、表面は融点以下の温度まで加熱される。ガラスには熱膨張に伴って照射域では圧縮応力、その周辺では引張り応力が発生する。この引張り応力は照射部を中心とした円周方向に作用するため、引張り応力場内にある初期亀裂はレーザー照射部中心に向かって進展していき切断される。また、このプロセス中に冷却源を同時に走査することで、引張り応力が大きくなり切断プロセス時間の短縮ができる。この技術の利点としては、きれいな切断面が得られる点とクラックを入れてブレイクする方式にはできない自由曲線で切断できる点である。欠点としては、引張り応力が加わりにくい細い幅の切り出しが困難であることが挙げられる。

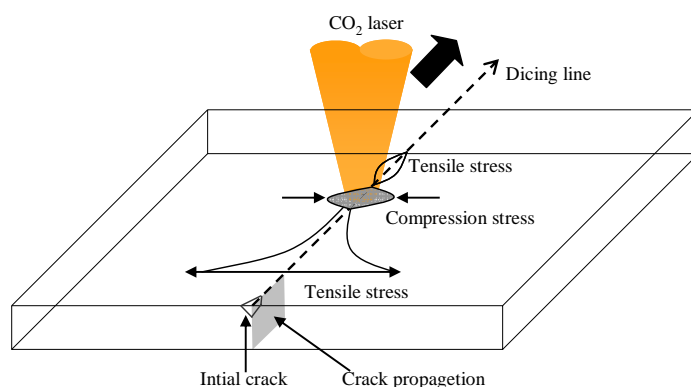


図 1-5 ガラスの熱応力切断

参考文献

1. 林正和：レーザー式ガラス切断装置の開発，芝浦メカトロニクス技報(2007-1)
2. 黒部利次：YAG レーザーによる精密切断技術，精密工学会誌，Vol.65，No.11，(1999)
3. 上田隆司：切断における温度計測，レーザー加工学会誌，Vol.12，No.1(2005)
4. 才元明秀，今井康文，森田英毅：き裂面加熱に伴う反無限き裂の熱応力拡大係数，日本機械学会論文集(A 編)，62 巻 597 号(1996-5)

第2章 低ストレスレーザーダイシング装置の開発

2.1 高速レーザー加工装置

波長 $1\mu\text{m}$ のレーザーによる Si の内部クラック形成は 1 光子吸収による熱影響に基づいている¹⁾。これに対して、ガラスの内部クラック形成には多光子吸収を利用する。N 次の多光子吸収では吸収の強さは入射光強度の N 乗に比例するため、高強度である短パルスレーザーがガラスの内部クラック形成に適している。そこで本研究では、光学特性の異なるガラス、Si 共に内部加工を施すため、短パルスレーザーである Nd:YVO₄ レーザー (MEGAOPTO 社製) を用いた。Nd:YVO₄ は YVO₄ 結晶中の Y³⁺ を Nd³⁺ に置換した結晶である。発振波長は $1.0643\mu\text{m}$ と Nd:YAG レーザーの $1.0641\mu\text{m}$ に近い値となっている。Nd:YVO₄ レーザーは、発振閾値が低く発振が容易であり、LD 励起に適しているため小型である。また、上準位の蛍光寿命が比較的短く高繰り返し発振に適しているため、高速レーザーダイシング装置に組み込んだ。波長は 1064nm 、パルス幅は 10ns 、繰り返し周波数は $10\text{kHz}\sim 100\text{kHz}$ で任意に設定可能である。加工条件の最適化を行うためにその他のレーザーとして、Ti:sapphire レーザー (波長: 800nm , パルス幅: 100fs , 繰り返し周波数: 1kHz , SpectraPhysics 社製), Nd:YVO₄ レーザーの第 2 高調波 (波長: 532nm , パルス幅: 10ns , 繰り返し周波数: $10\sim 100\text{kHz}$, MEGAOPTO 社製), Yb ファイバーレーザー (波長: 1064nm , パルス幅: 200ns , 繰り返し周波数: $10\sim 100\text{kHz}$, SPI 社製) も用いた。

使用したレーザー加工装置の概略図を図 2-1 に示す。加工用のレーザーを各レーザー波長に対応したミラーで打ち下ろし、NA0.8 の対物レンズを通して試料に照射する。試料の固定にはステージ上に設置された真空ポーラスチャックを用いる。観察系としては基盤の歪み

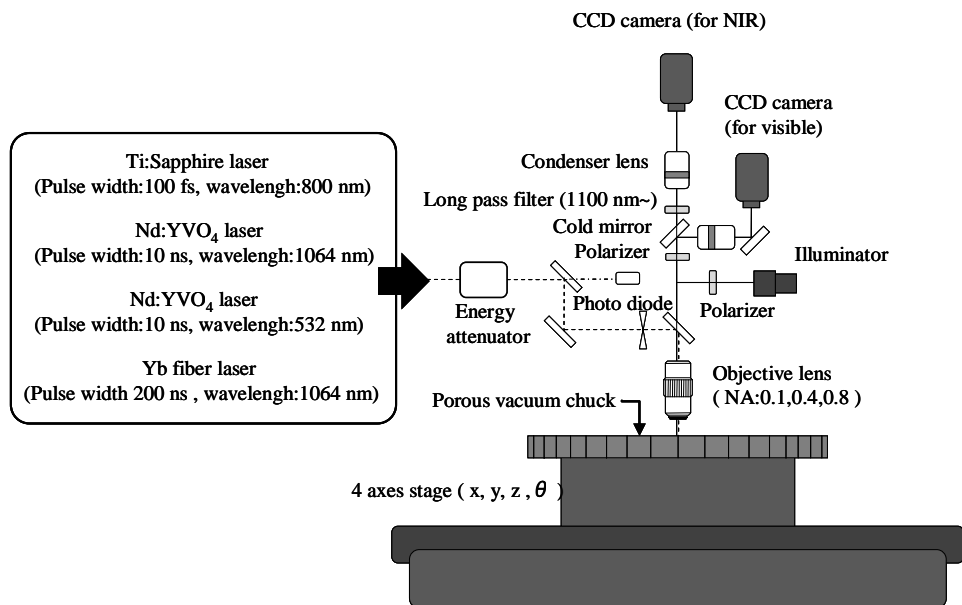


図 2-1 高速レーザー加工装置の概要

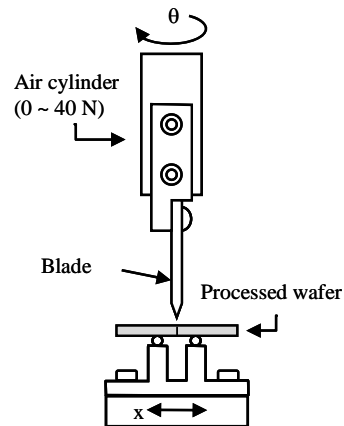
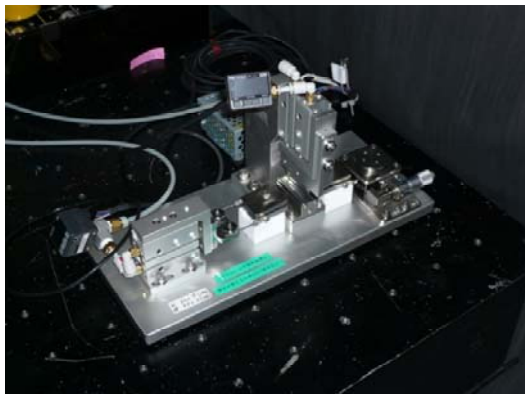


図 2-2 最大曲げ応力評価装置

を見るための偏光顕微鏡機能, Si の内部加工を見るための赤外顕微鏡機能を搭載している。加工ステージは 4 軸のものを用いており, 最大速度が X・Y 軸 : 700mm/sec, Z 軸 : 100mm/sec である。XY ステージのストロークは 300mm と 6 インチウエハに対応しており, 大口径ウエハの高速ダイシングが実証できる。ステージの繰り返し位置決め精度は $\pm 500\mu\text{m}$, Z 軸ステージの分解能は 100nm である。レーザーのエネルギー調整は半波長板と偏光子を組み合わせることでエネルギー源衰器を作製し用いた。本装置を用いて, 図 1-1 に示す第 1 工程のレーザー加工を行った。

2.2 曲げ応力測定装置

内部加工を施した試料は外部ストレスを加えることで完全にチップ化されるが, 脆弱構造を有する MEMS ウエハは出来る限り低ストレスに切断する必要がある。この切断条件の最適化を行うために, 図 2-2 に示す 3 点曲げ応力装置を設計しウエハの分離に必要な最大曲げ応力を測定した。装置の支点間距離は 10mm, ブレード先端の幅は $200\mu\text{m}$, ブレードにかかる圧力はエアシリンダーによって供給される。試料に形成された内部加工ラインとブレード先端が沿うように x 軸と θ 軸で位置調整を行った。曲げ応力測定に使用した評価試料サイズは, Si が厚み $300\mu\text{m}$ で $6 \times 20\text{mm}$, テンパックスガラスが厚み $500\mu\text{m}$ で $6 \times 20\text{mm}$, ガラス/Si 接合ウエハが厚み $300\text{-}300\mu\text{m}$ で $6 \times 20\text{mm}$ である。ガラスと Si の接合には陽極接合技術を用いた。この原理は, $300\text{-}500$ 度で加熱すると同時にガラス側を陰極, Si 側を陽極として高電圧をかけることで, ガラス中の陽イオンを陰極側に強制的に拡散させ, ガラスと Si の間に静電引力を発生させて密着を促すとともに, ガラスと Si を化学反応によって結合させている。接合最大曲げ応力 σ_{max}^2 [MPa] は以下の次式より求めた。

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M}{Z} \quad (2-1)$$

$$M = \frac{F}{2} \cdot \frac{l}{2} \quad (2-2)$$

$$Z = \frac{bh^2}{6} \quad (2-3)$$

ここで、 M は曲げモーメント、 Z は断面係数、 F は試料に加えた圧力、 l は支点間距離(10mm)、 b は奥行き方向の試料幅(6mm)、 h は試料厚み(Si: 300 μ m, テンパックスガラス: 500 μ m, 接合ウエハ: 600 μ m)である。

2.3 ウエハ分割装置

2.3.1 ブレイク装置

図 1.1 の第 2 工程(a, b)でウエハの割断に用いるブレイク装置について述べる。初めに、(a) ブレードを用いた場合の装置概要を図 2-3 に示す。ブレードは 1~9 枚まで重ねて使用することができ、複数のブレードを利用することでチップ化の効率が上がる。ブレードの押し当て方は図 2-4 に示す 2 つの方式を用いた。図 2-4(a)はウエハの表面にブレードを押し当てる接触方式であり、下にあるスポンジと挟み込むことで大きな力が加えられる。図 2-4(b)は空中に浮いており、テープ側から押し込むため非接触であるが、加えられる力が弱くなる。また、この方式ではブレードの押し込み量が増えるとテープが裂けたり剥がれたりした。そこで、図 2-5 のようなローラー式のブレードを用いて、局所的に割断を行うことでテープ剥がれの問題を解決した。ウエハの割断方法はそれぞれウエハの状態に合わせて最適な方式を選択し用いた。

ブレードを用いたチップ化の手順としては、Y 軸方向のウエハ内部加工ラインとブレードが沿うように CCD カメラでアライメントを行う。そして、Z 軸方向にブレードを押し込むことで亀裂を進展させ短冊状に割断する。その後、 θ 軸を用いて 90 度回転させ X 軸方向に対しても割断を行いチップ化する。ローラーを用いた場合には図 2-5 に示すように Z 軸方向に押し込んだ後、内部加工ライン方向にスキャンさせることで割断を行っている。

2.3.2 球面テープエキスパンダ装置

テープエキスパンダ装置は、ウエハ固定のために使用するダイシングテープを引張ることで発生する引張り応力を利用してチップ間に隙間をあける。通常、この装置はブレードダイシング等の手法で、完全に切断されたウエハに対して用いられる。本研究においても、図 1-9 に示すようにブレイク装置で割断を行った試料に対して第 3 工程で用いている。そこで、プロセスの簡略化として、第 2 工程、第 3 工程を同時に行うために、引張り応力だけでなく、縦方向に曲げ応力も加えられる球面テープエキスパンダ装置を開発した。図 2-6 にこの装置の外観を、図 2-7 にプロセス手順を示す。

プロセス手順としては、初めに、ダイシングテープを伸ばしやすくするためにヒーターで

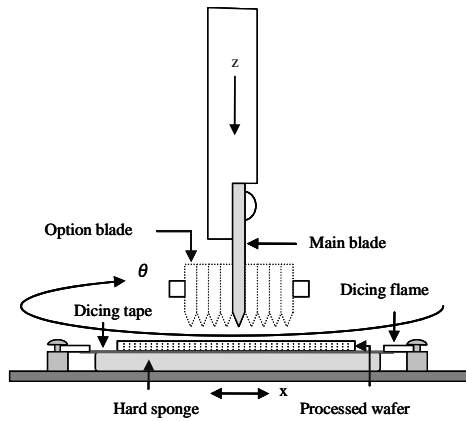
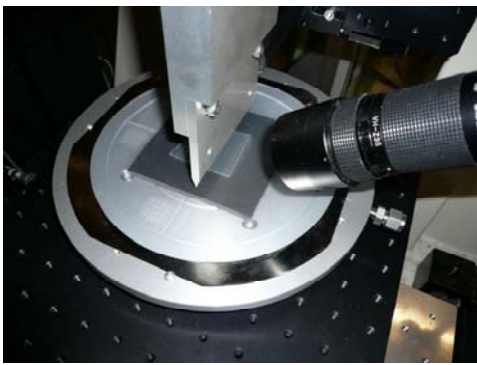


図 2-3 ブレードを用いたウエハ自動分割装置

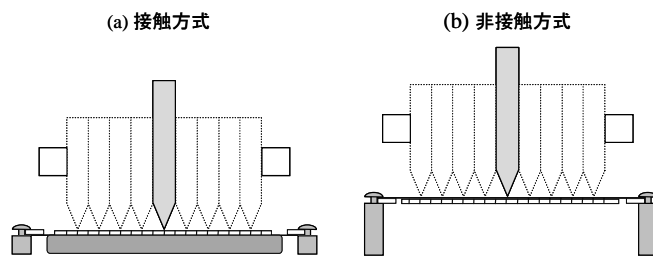


図 2-4 ブレードによる分割方法

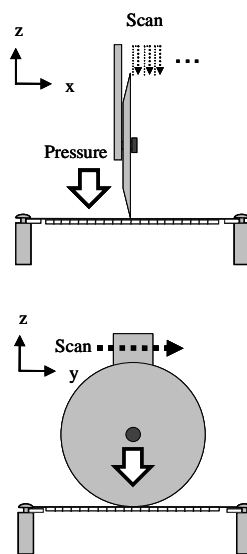
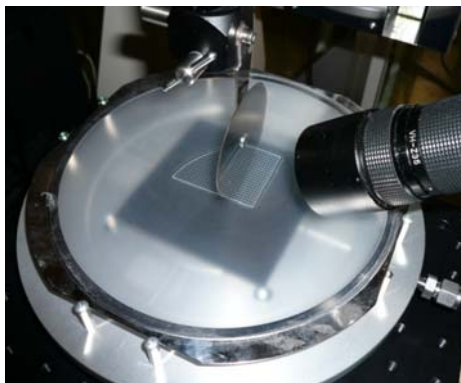


図 2-5 ロールを用いたウエハ自動分割装置

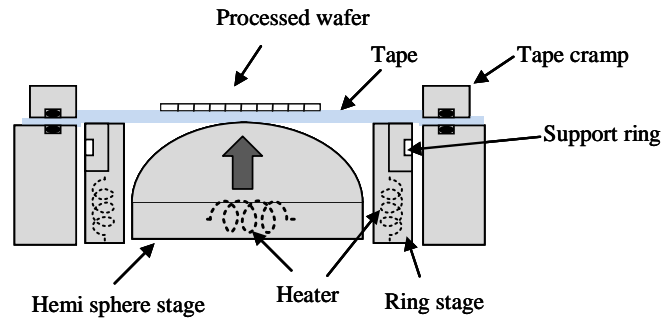
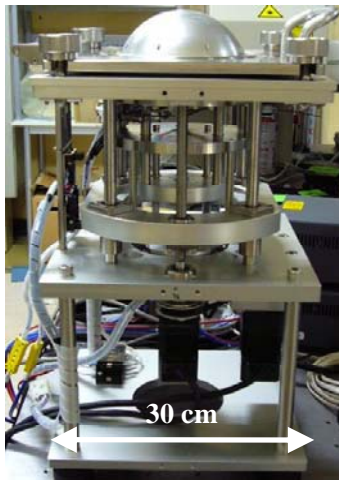


図 2-6 球面テープエキスパンダ装置の概観

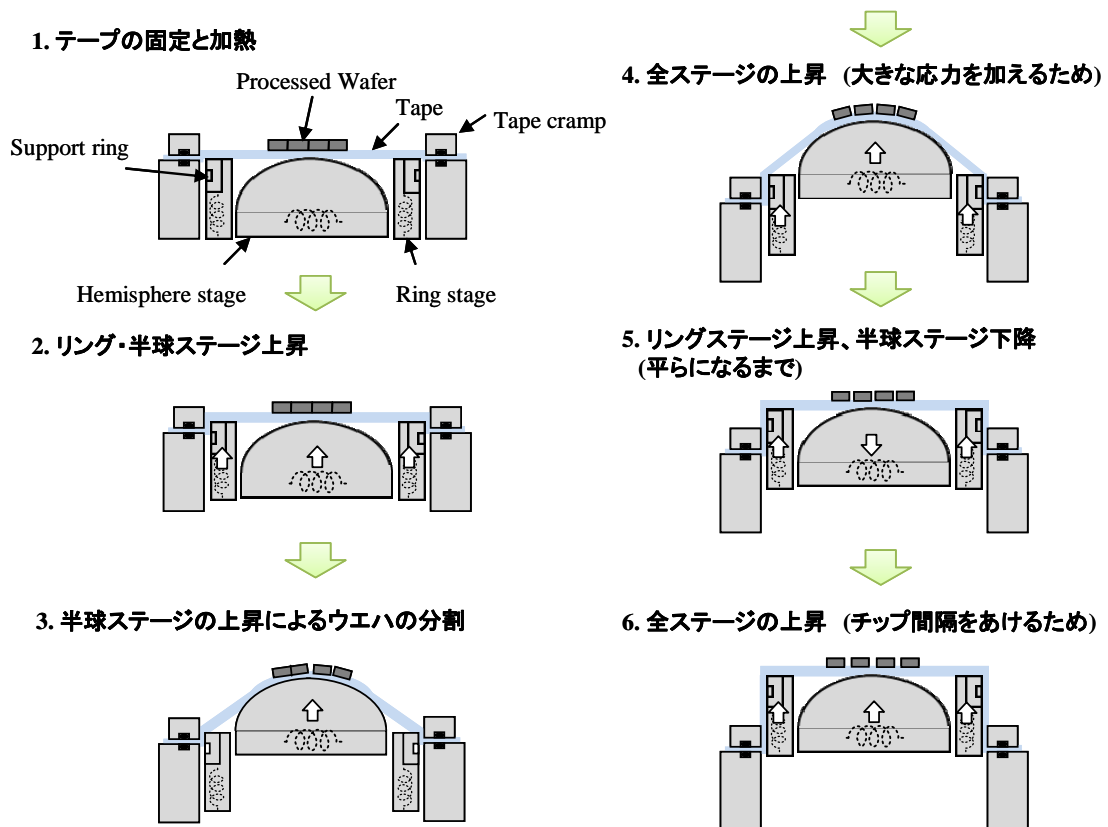


図 2-7 球面テープエキスパンダ装置のウエハ分割手順

加熱 (60°C) を行う。加熱後、外側のリングと半球のステージが上昇して、通常のエクスパンダ装置と同様に引張り応力を加える。弱い力で分割されるウエハはこの過程で完全にチップ化される。チップ化されない場合は、中央から半球ステージが上昇し、ウエハに対

して縦方向の曲げ応力が加えられチップ化される。また、途中から更に応力を加えるためにリングステージも上昇する。完全にチップ化すると、外側のリングがそのまま上昇してチップ間の隙間を広げつつ、曲面ステージが下降し、最終的に平らな状態でテープにマウントされたチップが得られる。この装置には、粘着力が 20N/25mm と強力な UV 剥離タイプのダイシングテープ(ウノン技研製)を用いた。これは、球面ステージでテープ側から曲げ応力を加えると、粘着力が弱い場合には、ウエハがテープから浮き上がってしまい力が伝わらなくなるため、強粘着なテープを使用した。

参考文献

1. T.Monodane, E.Ohmura, “Thermo-Elastic -Plastic Analysis on Internal Processing Phenomena of Single-Crystal Silicon by Nanosecond Laser”, in *Proceedings of LAMP 2006*, Kyoto, May 16-19, 2006, #06-125.
2. 須藤一：材料試験法, p.61 (2002)

第3章 パルスレーザー照射による内部クラック形成実験

3.1 テンパックスガラスに形成される内部クラック形状

表 3-1 に示す物性値をもったテンパックスガラスに対して、パルス幅の異なるレーザーを照射し、形成される内部加工の比較を行った。テンパックスガラスはドイツ、ショット社の製品で、耐熱ガラスとして有名なパイレックスガラス(アメリカ、コーニング社)と同等の特徴をもっている。パイレックスガラスが生産中止となったため、本製品を実験に用いた。レーザーには Nd:YVO₄ レーザー (波長: 1064nm, パルス幅: 10ns), Ti:sapphire レーザー (波長: 800nm, パルス幅: 200ps), Ti:sapphire レーザー (波長: 800nm, パルス幅: 100fs) の 3 種類を使用した。レーザー光を NA0.7 の対物レンズでガラス内部に集光し、シングルパルス照射して形成されるクラック形状を観察した。シングルパルスの切り出しにはメカニカルシャッターを利用した。

ナノ秒レーザー, ピコ秒レーザー, フェムト秒レーザーで形成した内部クラックを上部からレーザー顕微鏡で観察した結果を図 3-1 に示す。上段は加工閾値近くのエネルギーを照

表 3-1 ガラス物性値の比較

	熱膨張係数 (0~300°C) × 10 ⁻⁷ [°C ⁻¹]	熱伝導率 [W/m/K]	比誘電率 (25°C, 1MHz)	屈折率 (589.3nm)	ポワソン比	ヤング率 × 10 ³ [kg/mm ²]
テンパックスガラス 厚み: 500 ± 10 μm (ホウケイ酸ガラス)	32.1	1.2	4.8	1.472	0.22	6.42
パイレックスガラス (ホウケイ酸ガラス)	32.5	1.1	4.6	1.474	0.2	6.68
ソーダライムガラス	93.5	1.0	7.0	1.523	0.23	7.20

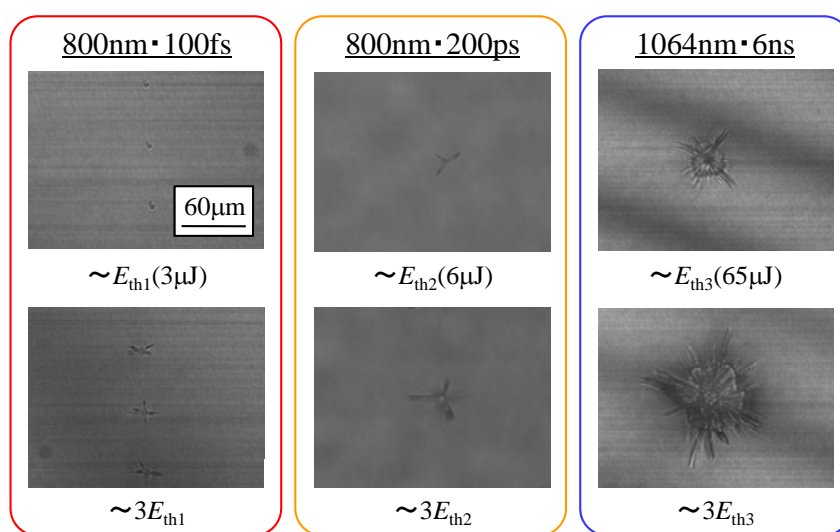


図 3-1 レーザーパルス幅の違いによる内部クラック形状比較(LSM 像)

射した結果で、下段は加工閾値の約 3 倍のエネルギーを照射した結果である。それぞれの加工閾値エネルギーは Nd:YVO₄ レーザー (パルス幅 : 10ns) は 80μJ, Ti:sapphire レーザー (パルス幅 : 200ps) は 6μJ, Ti:sapphire レーザー (パルス幅 : 100fs) は 3μJ となり、パルス幅の短い Ti:sapphire レーザーは多光子吸収が起こりやすいため、加工閾値エネルギーが低くなったと考えられる。加工閾値エネルギーで形成される内部クラック形状は、Nd:YVO₄ レーザーの場合、集光点からほぼ等方的に約 30μm のマイクロクラックが発生しており、内部クラック幅は約 60μm であった。一方、パルス幅 100fs の Ti:sapphire レーザーの場合は多光子吸収が起きやすく、少ないエネルギーで加工できるため熱影響が抑えられ、集光点のみに局所的なクラックを形成できた。その内部クラック幅はナノ秒レーザーに比べて 1 桁低い 5 μm 程度であった。

図 3-2 に内部クラック幅の照射エネルギー依存性を示す。このグラフにおいて Nd:YVO₄

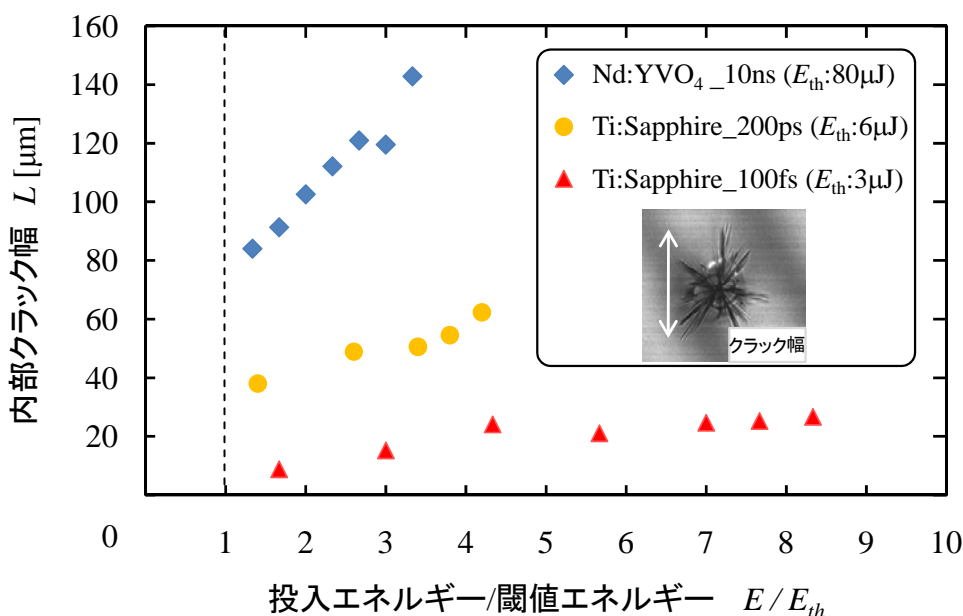


図 3-2 内部クラック幅のパルス幅依存性

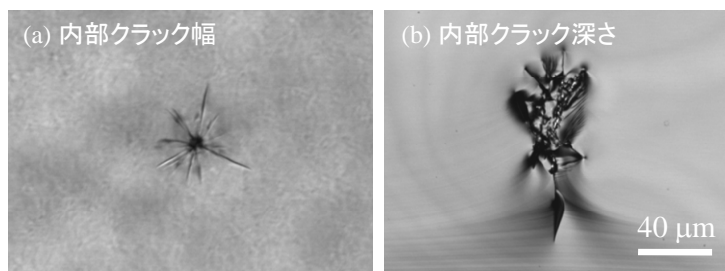


図 3-3 Nd:YVO₄ レーザー (パルス幅 : 10ns) で形成される内部クラック形状

レーザーの場合，集光点から等方的にマイクロクラックが発生するため，中心から端までの距離を平均して 2 倍したものを内部クラック幅と定義している．グラフの横軸には投入エネルギーを加工閾値エネルギーで割った値を示している．投入エネルギーの増加に伴い内部クラック幅が増加しており，パルス幅が短いほど小さい内部クラックを形成できた．また，試料の厚み方向に形成される内部加工ライン深さも調べた．内部クラック層を 1 ライン形成したガラスの断面をレーザー顕微鏡で観察した．図 3-3 にナノ秒レーザーで形成された(a)内部クラック幅 (シングルパルス)，(b)内部加工ライン深さを示す．加工閾値エネルギーの 1.5 倍のエネルギーを投入すると，ナノ秒レーザーの場合は $100\mu\text{m}$ ，フェムト秒レーザーの場合は $10\mu\text{m}$ の内部クラック深さとなることから，ガラスに形成される内部クラックのアスペクト比は約 1.5~2 であることが分かった．以上の結果から，パルス幅の短い Ti:sapphire レーザーは内部クラックを小さく形成できるため，ダイシング幅を狭く抑える可能性を示しており優位な点といえる．しかし，ダイシングにおいては内部クラックがつながるようにレーザーの走査速度を決定しなければならない．つまり，レーザーの走査速度は内部クラックの大きさとレーザーの繰り返し周波数によって決定されるため，Ti:sapphire レーザーを用いた場合は Nd:YVO₄ レーザーに比べて大幅に時間がかかる．特に厚みのある MEMS ウエハに対しては，深さ方向にも数回レーザー走査させるため Nd:YVO₄ レーザーの方が有効である．例えば，平均出力 10W，繰り返し周波数 20kHz の Nd:YVO₄ レーザーを用いた場合， $80\mu\text{m}$ の内部クラックをつなげるようにレーザー走査すると 1 ライン当たり 1600mm/sec の加工が可能である．厚さ 1mm のガラスウエハに対しては深さ方向に数ライン走査する必要があるが，これを考慮してもブレードダイシングと比べてかなり高速である．また，レーザー装置の価格も 1 桁違うため Nd:YVO₄ レーザーの方が実用的であるといえる．

3.2 Si に形成される内部クラック形状

表 3-2 に示す物性値をもった Si ウエハに対して，透過性のある Nd:YVO₄ レーザー (波長：1064nm，パルス幅：10ns) を用いて内部加工を行った．レーザー光を NA0.8 の対物レンズで Si 内部に集光し，図 3-4 に示すようにレンズのデフォーカス量を深さ方向に $5\mu\text{m}$ ずつ変化させレーザー加工を行った．内部加工ライン幅のレーザーエネルギーによる変化を図 3-5 に示す．それぞれの左図が上部から赤外顕微鏡で内部加工ラインを観察したもの，右図が図 3-4 の Y 軸方向に Si ウエハを切断して，断面を光学顕微鏡で観察したものである．赤外顕微鏡像で確認できる黒い線は表面アブレーションで，薄い線が内部加工ラインである．照射エネルギーの増加に伴い表面アブレーションする領域が増えている．しかし，内部加工ライン幅はエネルギーの増減によらずほぼ一定で約 $5\mu\text{m}$ であることが分かった．また，ガラスの場合に発生したマイクロクラックも確認されなかった．断面図からは，Nd:YVO₄ レーザーを用いることで深さ方向全面に内部加工が形成できることが確認できる．この断面の内部加工ライン深さをレーザー顕微鏡で観察した結果を図 3-6 に示す．照射エネルギーを $10\mu\text{J}$ 以上にすると内部加工ライン深さが飽和し，その時のサイズは約 $70\mu\text{m}$ である．以

上の結果から、Si ウエハにエネルギー $10\mu\text{J}$ 投入した場合、内部加工ライン幅が約 $5\mu\text{m}$ 、内部加工ライン深さが約 $70\mu\text{m}$ とアスペクト比の高い加工形状が得られることが分かった。

表 3-2 Si ウエハの物性値

	結晶成長法	タイプ	ドーパント	結晶軸方位	厚み	抵抗率	熱伝導率
Si (両側鏡面)	CZ	N	Phos	100	$300\pm 10\mu\text{m}$	$10\sim 20$ [$\Omega\cdot\text{cm}$]	168 [W/m/K]

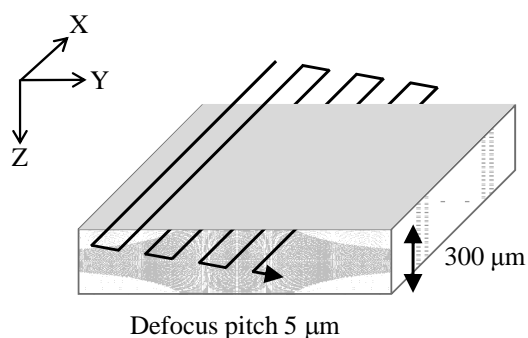


図 3-4 Si ウエハのレーザー加工方法

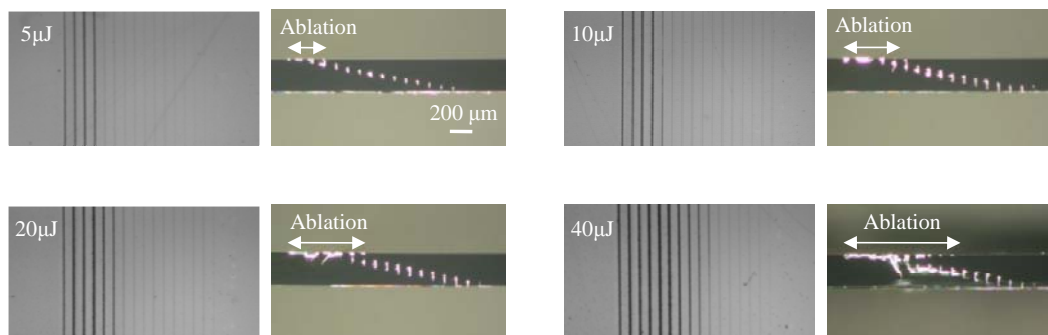


図 3-5 Si ウエハに形成された内部クラック幅(赤外顕微鏡像)と内部加工断面写真(光学顕微鏡像)

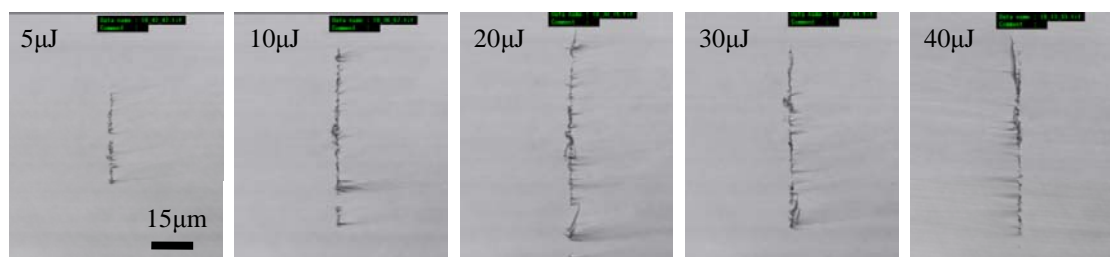


図 3-6 内部加工ライン深さの照射エネルギー依存性

ガラスと比較して、このような高アスペクト比な加工形状が得られるのは、Si の屈折率が 3.6 と大きいためである。第 1 章の図 1-12 に示すように、ガラスに比べて屈折率が高い分、ウエハの内部で集光 NA が小さくなり焦点深度が伸びたため長尺な加工形状になったと考えられる。また、ガラスに比べて投入エネルギーも小さいため熱影響が抑えられ、クラックが横方向に広がらなかったと考えられる。

3.3 透過波長レーザーによる Si の内部加工

波長 1550 nm のレーザーは Si に対して透過性を持っているので内部加工ができる可能性がある。本節では波長 1550 nm、パルス幅 1 ps および 200 ps の Er ファイバーレーザーによる Si 内部加工特性について述べる。表面に関しては図 3-6 に示すようにパルス幅 1ps でもパルス幅 100 fs の時と同じように、c-Si 表面にアモルファス化を発生させることは可能であった。

図 3-7 のように、デフォーカス量を 5 μm ずつシフトさせるプログラムを作成し、NA 0.8 の対物レンズを用いて、内部集光を行った。照射エネルギーは 0.65 μJ であった。図 3-8 に加工部の透過型近赤外顕微鏡像を示す。パルス幅 1 ps の場合、アブレーションの発生を確認することはできるものの、内部加工を観察することはできなかった。一方パルス幅が 200 ps の場合は内部加工がしっかりと発生しているのが分かる。図 3-9 にそれぞれの加工部を劈開して断面観察を行ったものをしめすが、パルス幅 1 ps の場合は何も確認することができなかった。200 ps の場合は、ウエハの深部まで内部加工されていることが見て取れる。このことから、パルス幅 1 ps の場合はウエハ内部に加工に十分なエネルギーを伝えることができていないと思われる。フェムト秒レーザー加工が起こる場合、レーザーが当たったとほぼ同時にキャリアの励起が発生し、その吸収係数が大幅に増加する。内部加工を行う場合、集光点に達するまでに Si ウエハを通過するので、そのたびに多くのエネルギーをロスすることになる。このため、超短パルスレーザーは Si の内部加工には不向きであることが明らかになった。

パルス幅 200 ps で加工した断面の結晶構造を確認するため、EBSD (Electron Back Scatter Diffraction) 観察を行ったが、その方位は元の Si 基板と同じであった (図 3-10)。このことから、内部加工においても 200 ps のロングパルスではアモルファス化は発生しないことが分かった。

3.4 まとめ

テンパックスガラスに対して Nd:YVO₄ レーザー (パルス幅 : 10ns) と Ti:sapphire レーザー (パルス幅 : 200ps, 100fs), Si に対して Nd:YVO₄ レーザー (パルス幅 : 10ns) を用いた結果、ウエハ内部にクラックを形成できた。

テンパックスガラスの場合、パルス幅の短い Ti:sapphire レーザーを用いることで内部クラックサイズを 10 μm 程度に抑えることができるため、精密なダイシングが行える。Nd:YVO₄

レーザーで形成される内部クラックは Ti:sapphire レーザーと比較すると大きいですが、その分、レーザー加工を高速にできるため、ダイシングに要する時間が短くできる利点がある。また、ガラスに形成される内部クラックはアスペクト比 1.5 程度であった。

Si の場合、透過性のある Nd:YVO₄ レーザーを用いることで内部クラックを形成でき、ダイシング幅 5 μ m とガラスに比べて極めて細い幅となった。また、屈折率の影響により形成される内部加工のアスペクト比がガラスに比べて高くなることがわかった。

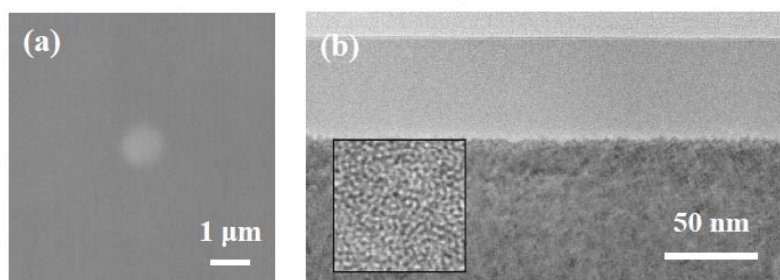


図 3-6 パルス幅 1ps の Er ファイバーレーザーによって発生した c-Si のアモルファス化. (a) 表面のレーザー顕微鏡写真, (b)断面の TEM 像

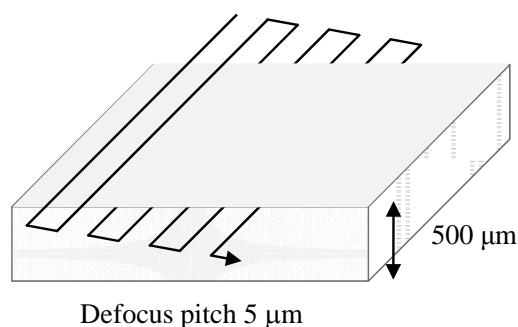


図 3-7 内部加工条件だしプログラムの一例

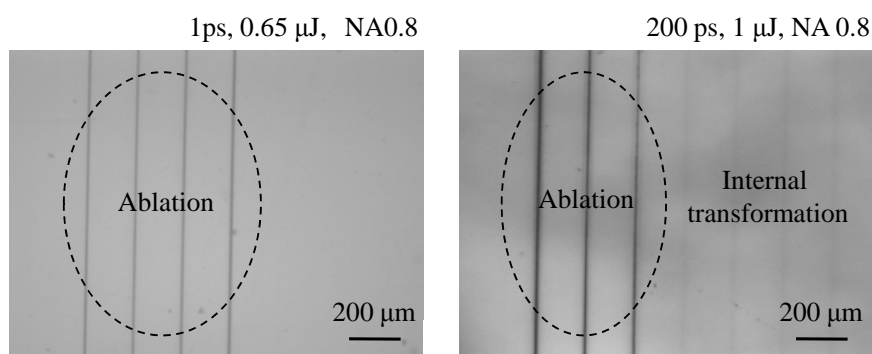


図 3-8 透過型近赤外顕微鏡による Si 内部加工の観察.

右図：レーザーパルス幅 200 ps, 左図：レーザーパルス幅 1 ps.

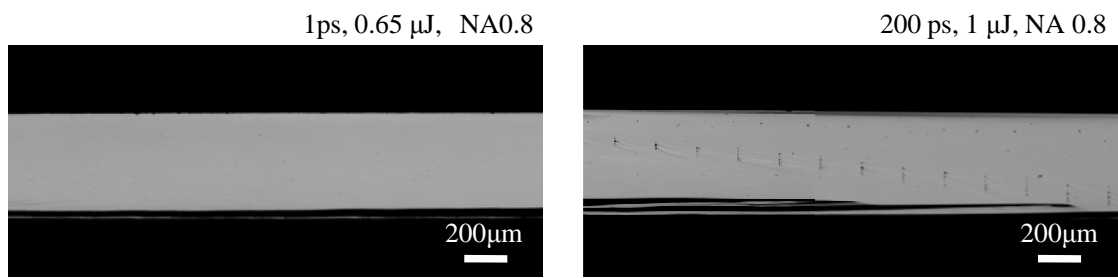


図 3-9 図 3-8 のレーザー加工部の劈開箇所におけるレーザー顕微鏡像

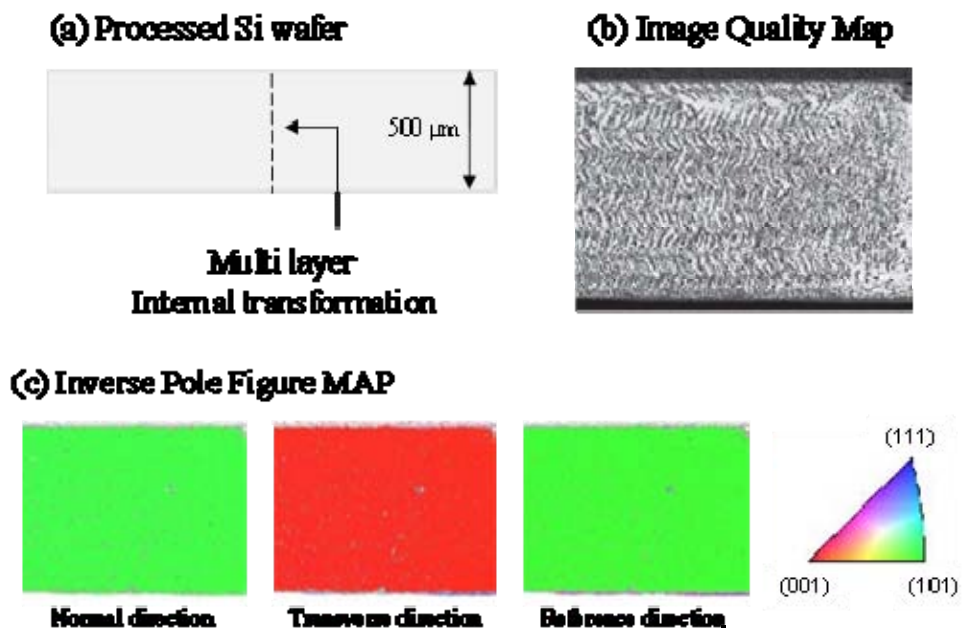


図 3-10 パルス幅 200 ps の Er ファイバーレーザーによる c-Si 内部加工断面の EBSD 観察結果

第4章 ウエハの割断に必要な曲げ応力測定結果及び 熱応力割断結果

4.1 はじめに

第3章に示した内部クラックを利用し、テンパックスガラス、Si ウエハ、テンパックスガラス/Si 接合ウエハに対して低ストレスレーザーダイシングを行った。レーザーは加工速度が速くできる、価格が安い、1台のレーザーで光学特性の異なるガラス・Siを共に内部加工できる点から Nd:YVO₄ レーザー（波長：1064nm、パルス幅：10ns、繰り返し周波数 10～100kHz）を用いた。レーザー加工した試料に対して、割断に必要な最大曲げ応力を第2章に示す応力評価測定し、最適な加工条件を見つけた後、実デバイスである評価試料（圧力センサ）を割断した。以下にそれらを示す。

4.2 ガラスの割断結果

4.2.1 テンパックスガラスの割断に必要な曲げ応力測定

テンパックスガラス（厚み：500 μ m）に対して、Nd:YVO₄ レーザー（パルス幅：10ns）を NA0.8 の対物レンズで集光し内部加工ラインを形成する。この時、低ストレスに割断するためにできるだけ表面近くに内部加工を行い表面へ亀裂を進展させた。この表面亀裂が割断の起点になるため、低ストレスを加えるだけでウエハがダイシング予定ラインに沿ってきれいに割断される。図4-1に試料表面から内部に向けてのレンズのデフォーカス量と表面に発生した亀裂の関係を示す。レーザー照射条件は、エネルギー125 μ J、繰り返し周波数 20kHz、レーザー走査速度 100mm/sec である。レンズのデフォーカス量が小さいとウエハの一部が欠けたり、亀裂が蛇行したりするため高品質なダイシングができない。デフォーカス量を増やすと亀裂の蛇行が減少し、デフォーカス量 70 μ m の時に直線状の亀裂が得られた。直線状の亀裂はレンズのデフォーカス量 70 \pm 20 μ m の範囲で発生する。

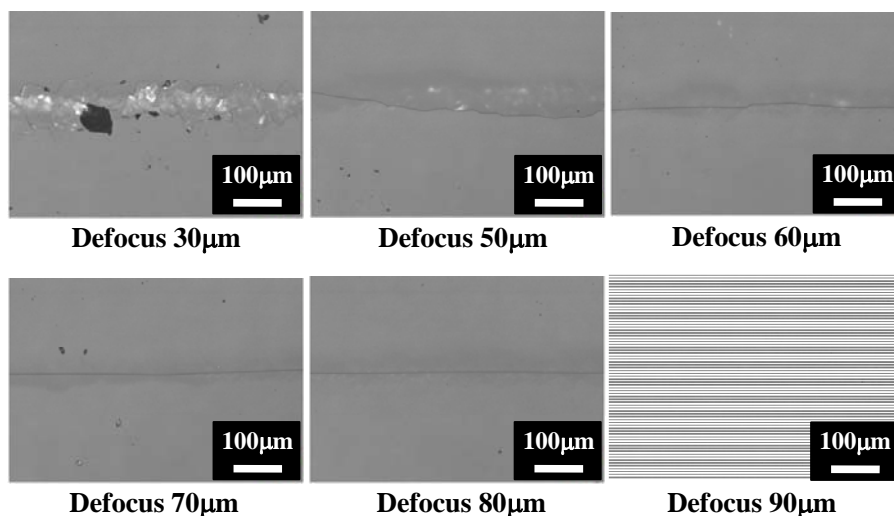


図4-1 レンズのデフォーカス量と表面亀裂の関係

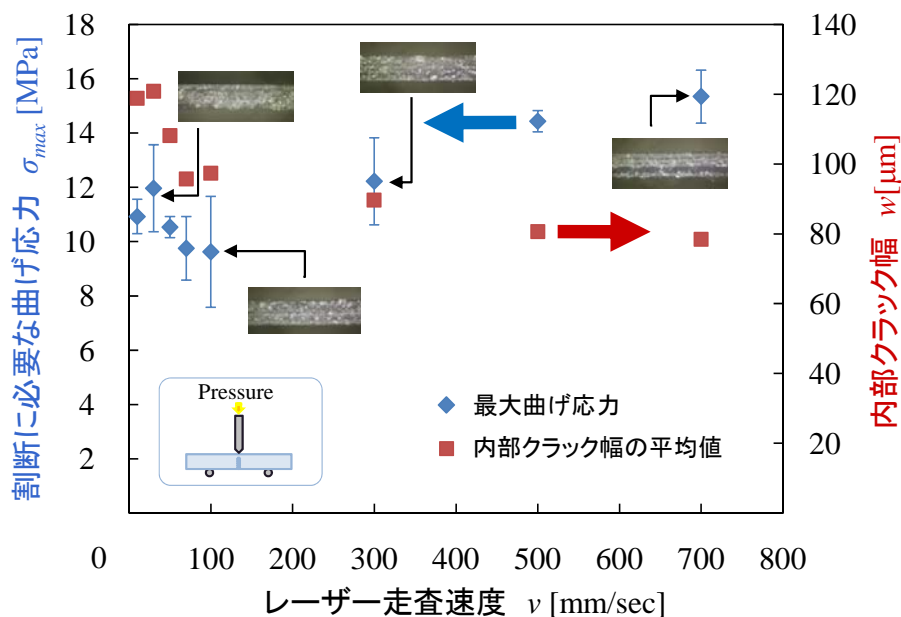


図 4-2 加工線幅と曲げ応力のレーザー走査速度依存性

この直線状の亀裂を利用して、ウエハの割断に必要な曲げ応力の測定を行った。図 4-2 に加工線幅と曲げ応力のレーザー走査速度依存性を示す。ウエハ加工条件は、エネルギー125 μJ 、繰り返し周波数 20kHz、レーザー走査速度 10~700mm/ssec であり、ウエハの厚さ方向全体に内部加工がつながるようにレンズのデフォーカス量を 65 μm ずつ変化させ 5 層レーザー加工した。評価試料サイズは、テンパックスガラス（厚み：500 μm ）の 6 \times 20mm であり、各条件ごとに 5 サンプル測定した。走査速度の減少に伴い、内部クラックが重なり成長するため加工線幅が増加している。一方、曲げ応力は多少の増減はあるが、全てにおいて 15MPa 以下と低い値を示しており低ストレスに割断できることがわかった。レーザー走査速度が 100mm/sec の場合に、曲げ応力は 9.5MPa と一番低い値を示している。そこで、最上層と最下層のレーザー加工位置を固定して、その間の層数を 0~35 層と変化させて曲げ応力を測定した結果を図 4-3 に示す。全ての場合において 18MPa 以下と低い値を示していたが、3 層以上加工した場合には、曲げ応力は 10MPa 程度と値が飽和した。加工線幅は層数が増える毎に増加していく。5 層加工した場合の線幅は 95 μm に対して、2 層加工した場合の線幅は 60~70 μm 程度とシングルパルスで形成されるクラックとさほど変わらないことがわかった。これは深さ方向のクラックが重ならなかったためと考えられる。ガラスの割断において層数は、厚さ 150 μm ごとに 1 層程度で十分低ストレスに割断ができる。また、加工線幅を極力細くしたい場合は、深さ方向のクラックが完全に重ならないように層数を設定することで達成できる。図 4-4 に走査速度 100mm/sec で 5 層レーザー加工し、3mm 角のチップに切り出したテンパックスガラスを示す。レーザーを円形に走査させた場合には、図 4-5 のようなテンパックスガラスの円形カットも可能であった。

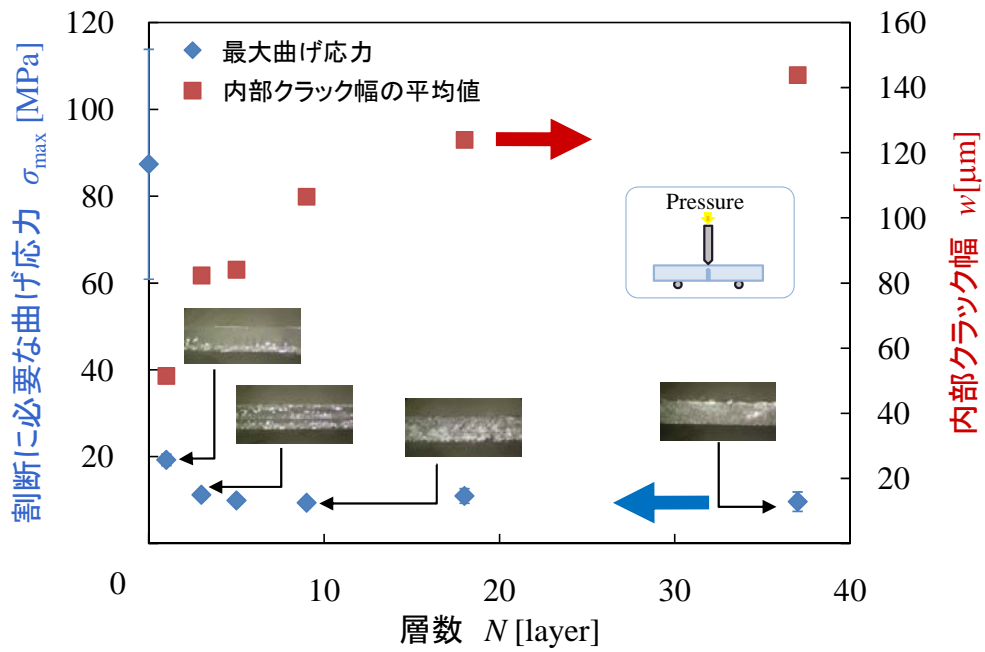


図 4-3 加工線幅と曲げ応力の内部加工層数依存性

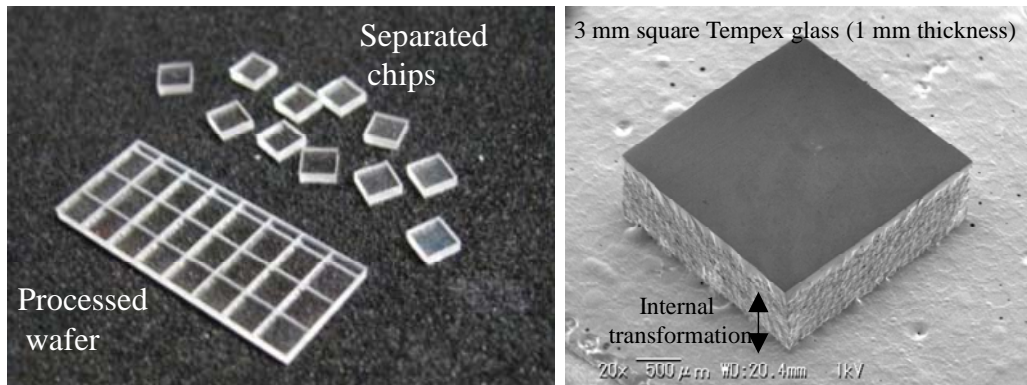


図 4-4 3 mm角にチップ化したテンパックスガラス

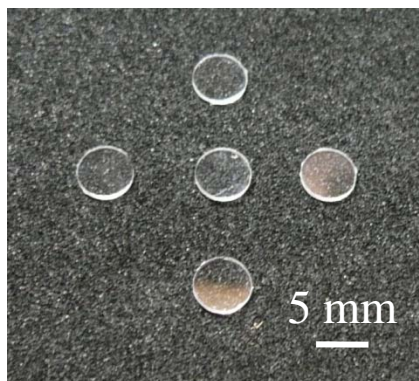


図 4-5 テンパックスガラスの円形カット

4.2.2 ガラスの熱応力割断結果

第 1 章で示すように大口径ガラスの割断には熱応力割断が用いられている。従来、熱応力割断はクラックの伝搬方向の制御が難しいため、MEMS のような小型素子に対しては適用されていなかった。そこで、レーザー内部加工を併用することで小さなチップに切り出せるか試した。図 4-6 に CO₂ レーザー照射実験系を示す。連続発振の CO₂ レーザーを反射型対物レンズか ZnSe レンズで集光し、ガラスに照射した。基板の固定には真空ポーラスチャックを用いており、マイクロスコープでアライメントを行った。通常、熱応力割断するには初期亀裂を形成する必要がある。従来はブレードなどで端の一部に傷をつけるが、本研究では Ti:Sapphire レーザーでダイシング方向に向かって 2mm 内部加工を形成し初期亀裂とした。図 4-7 のように間隔をあけて 2 つの初期亀裂を形成したサンプルを作成し、CO₂ レーザーをファーストライン、セカンドラインの順に 1 パス走査させてソーダライムガラス(厚み：1mm)を割断した結果を図 4-8 に示す。図 4-8(a)は初期亀裂の横の間隔が 10mm、図 4-8(b)は間隔が 2mm の場合である。レンズは反射型対物レンズを用いており、照射エネルギーは 4.7W、レーザー走査速度 3mm/sec、ビームの形状はリング状で外径 2mm、内径 0.5mm である。10mm 間隔の場合には、初期亀裂が進展し真っ直ぐに切断できているが、2mm 間隔の場合には、セカンドラインがそれて割断されている。これは、ファーストラインを割断後、セカンドラインの左側の幅が 2mm と狭くなったために熱応力が非対称にかかり亀裂が直進しなかったと考えられる。

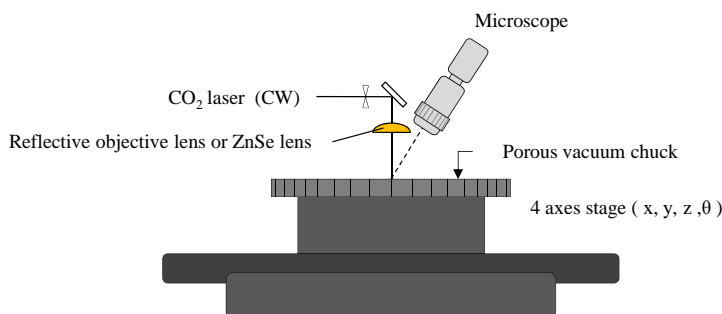


図 4-6 CO₂ レーザー照射実験系

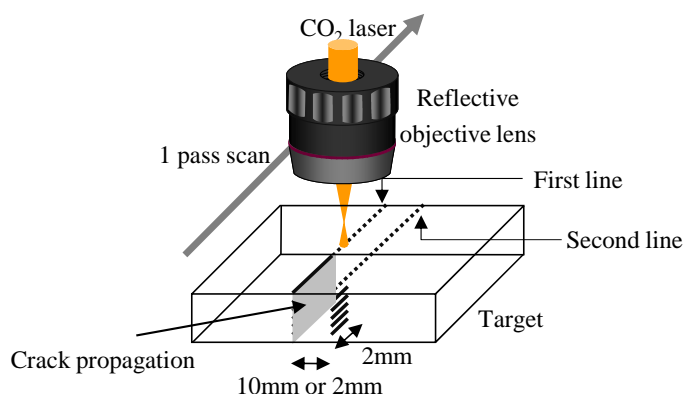


図 4-7 熱応力割断実験方法

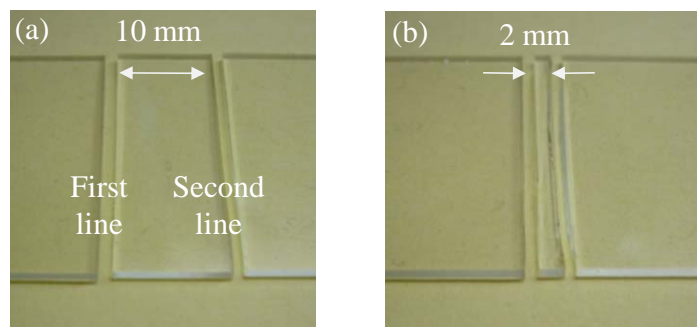


図 4-8 ソーダライムガラスの熱応力割断(加工品質のライン幅による影響)

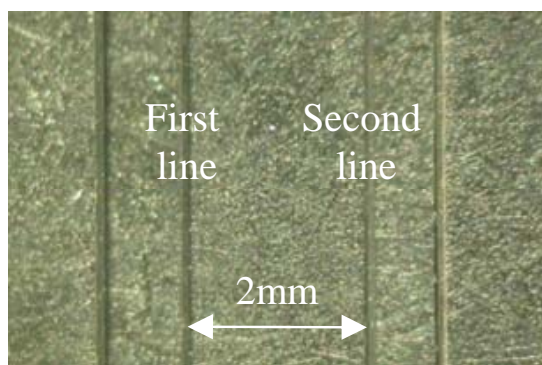


図 4-9 レーザー内部加工+熱応力割断の結果

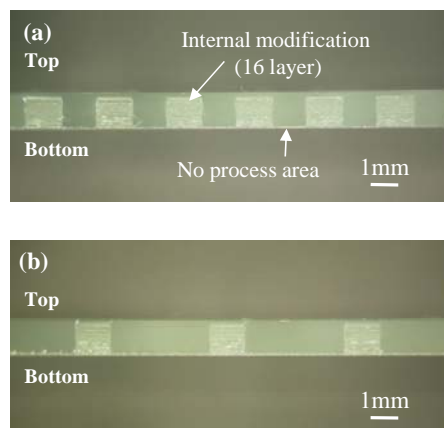


図 4-10 ミシン目状に内部加工したソーダライムガラスの熱応力割断面

そこで、Ti:Sapphire レーザーによる内部加工をダイシングライン全体に形成し、CO₂ レーザーを照射した結果を図 4-9 に示す。内部加工を形成することで、熱応力によって発生した亀裂が内部クラックに沿って伝搬するため、間隔が 2mm であっても図 4-9 のようにそれずに平行なダイシングラインが得られた。しかし、全面に内部クラックを形成すると時間がかかってしまう。そこで、スループット向上のためミシン目状の内部クラックについて検討を行った。図 4-10 はミシン目状に内部クラックを形成し、その後、熱応力で割断を行ったソーダライムガラスの割断面の顕微鏡写真である。それぞれのデューティー比は図 4-9(a) は 0.5, (b) は 0.25 である。白い部分に内部クラックが形成されていることから、熱応力によってのびた亀裂がダイシングラインに沿って真っ直ぐに進んだことがわかる。また、全体に内部加工を形成しなくても、シリンドリカルレンズを用いてビームをライン状 (14mm × 0.5mm) にすることで図 4-11 に示すように 4mm 間隔に割断できる。これは、スポット幅が狭くなることで熱応力のかかる領域が狭くなるためと考えられる。以上の結果を踏まえて、テンパックスガラスウエハ(厚み: 1mm)の熱応力割断を行った。時間短縮を考えてガラスに

Ti:Sapphire レーザーでクロス状の内部加工を形成した後に熱応力を加えて割断を行った. 図 4-12 に示すようにテンパックスガラスを小さな 3mm 角のチップに分割することに成功した. 断面に内部加工ラインが確認できるためダイシングラインに沿って割断されたことがわかる.

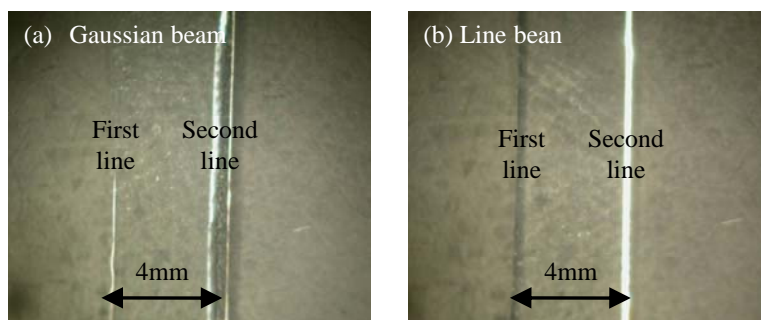


図 4-11 照射レーザースポットによる直進性の向上

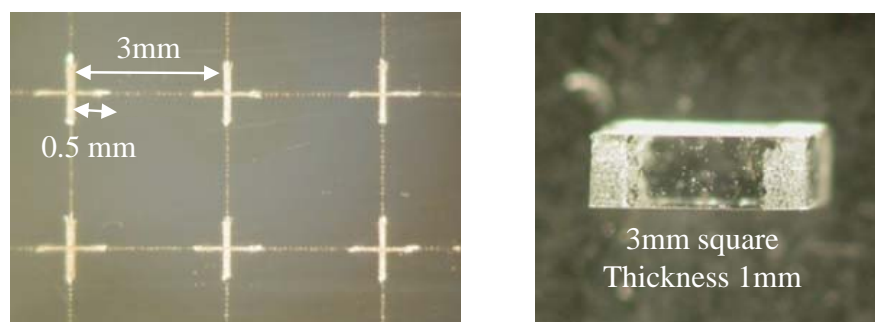


図 4-12 クロス状に内部加工を施したテンパックスガラスの熱応力割断結果

4.3 Si ウエハの割断に必要な曲げ応力

Si ウエハ (厚み: 300 μ m) に対して, Nd:YVO₄ レーザー (パルス幅: 10ns) を NA0.8 の対物レンズで集光し内部加工ラインを形成する. Si の場合においても, 低ストレス割断するために表面にのびてくる亀裂の観察を行ったが, ガラスの場合に確認された表面亀裂は本実験では確認されなかった.

Si ウエハの割断に必要な曲げ応力のレーザー走査速度依存性を図 4-13 に示す. ウエハ加工条件は, エネルギー 20 μ J, 繰り返し周波数 100kHz, レーザー走査速度 10~700mm/ssec であり, ウエハの厚さ方向全体に内部加工がつながるようにレンズのデフォーカス量を 10 μ m ずつ変化させ 5 層レーザー加工した. 評価試料サイズは, Si(厚み: 300 μ m)の 6 \times 20mm であり, 各条件ごとに 5 サンプル測定した. 図 4-13 の写真より走査速度が速くなるにつれて内部クラックからそれて割断されていることが確認できる.

図 4-14 に Si ウエハをレーザー走査速度(a)100mm/sec, (b)300mm/sec で内部加工して割断した時の断面図を示す. 走査速度を上げると内部クラックが重ならなくなると同時に深さ

方向のサイズが減少し、未加工部ができる。上部から観察した時の Si の内部クラック幅は $5\mu\text{m}$ 程度と小さいため、外部ストレスを加えた場合、深さ方向に未加工部があることによってそれで割断される可能性が高くなる。その結果、余分な力が必要になり大きな曲げ応力になったと考えられる。逆に走査速度 10mm/sec と遅い場合に曲げ応力が大きくなったのは、レーザーが同一箇所に重なって当り過ぎたことで溶けが発生し、引っ付いた可能性が考えられる。

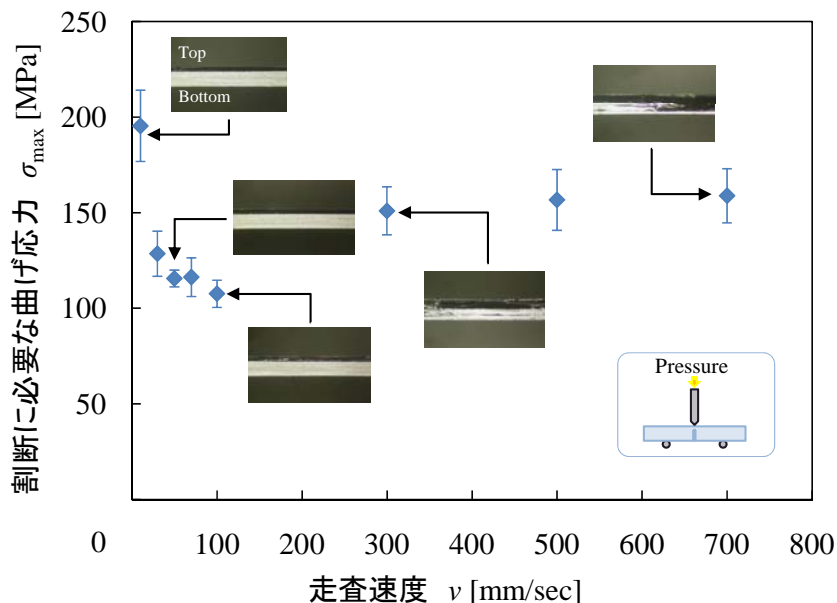


図 4-13 Si ウエハの割断に必要な曲げ応力のレーザー走査速度依存性

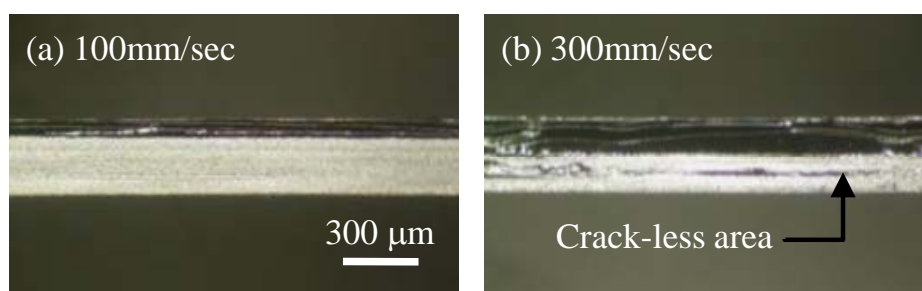


図 4-14 内部加工を施した Si ウエハの割断面観察

深さ方向のクラックがつながっており、一番曲げ応力が小さい走査速度 100mm/sec の場合でも、 110MPa とテンパックスガラスに比べて非常に大きな力が必要であった。次に、ガラスの場合と同様に、走査速度を 100mm/sec で最上層と最下層のレーザー加工位置を固定して、その間の層数を $0\sim 41$ 層と変化させて曲げ応力を測定した結果を図 4-15 に示す。内部加工ラインの層数が 5 層以上の場合には、曲げ応力が 100MPa 程度と飽和した。また、深さ

方向にクラックがつながっていない 3 層の場合は大きな曲げ応力が必要となった。エネルギー $20\mu\text{J}$ で加工を行った場合は、表面アブレーションを避けるためデフォーカス量を多くしており、表面から $50\mu\text{m}$ が未加工になっていた。そこで、エネルギーを低くして表面近くに内部加工を形成することで曲げ応力低下を狙った。エネルギーを $5\mu\text{J}$ に変更した結果、未加工部が $20\mu\text{m}$ となり、曲げ応力を 73MPa まで低下できた。以上のことから、Si に対しては深さ方向にクラックがつながるように層数と速度を設定する必要がある。Si に形成される内部クラック深さは $70\mu\text{m}$ であるため、重なりを少し考慮して $60\mu\text{m}$ ごとに 1 ライン加工を行うことで、ダイシングラインに沿った割断ができる。走査速度は繰り返し周波数が 100kHz の場合、 100mm/sec が適当である。また、低エネルギーでなるべく未加工部を残さない加工を行うことが重要である。

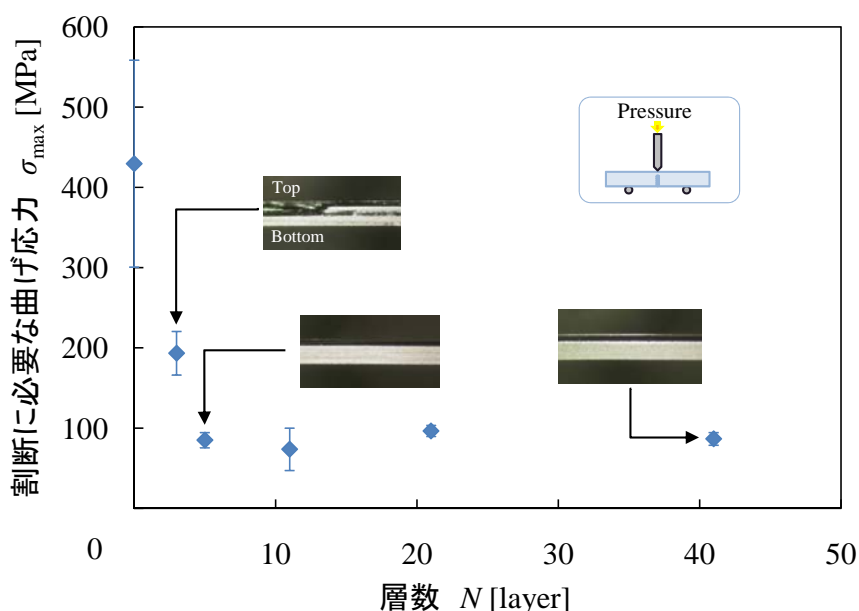


図 4-15 Si の割断に必要な曲げ応力の内部加工層数依存性

4.4 接合ウエハの割断に必要な曲げ応力

4.2.1 節, 4.3 節の結果を踏まえて、テンパックスガラス/Si 接合ウエハの割断に必要な曲げ応力を測定した。積層ウエハをレーザー加工する場合、エネルギー損失を考慮してガラス側からレーザーを照射し Si, テンパックスガラスの順に加工した。レーザー照射条件は、前述した実験結果より Si に対しては加工層数 6, エネルギー $5\mu\text{J}$, 繰り返し周波数 100kHz , 走査速度 100mm/sec , テンパックスガラスに対しては加工層数 5, エネルギー $125\mu\text{J}$, 繰り返し周波数 20kHz , 走査速度 500mm/sec とした。実験の結果、接合ウエハの割断に必要な曲げ応力は約 14MPa であった。式(1-1)からもわかるように曲げ応力は厚みの 2 乗がかかるため、接合ウエハは厚みがある分、曲げ応力が小さく表れる。これを押し力 $F[\text{N}]$ で評価すると 1.9N であり、Si の割断に必要な押し力と同じであることが確認できた。次に、このダ

イシング技術が実デバイスに対しても有効であるか確認するため、図 4-16 に示す圧力センサの切断を行った。この圧力センサはダイヤフラムやギャップ間に破損や張り付きが起きないように、また、ITO 電極の隙間に水やゴミが浸入しないようにダイシングする必要がある

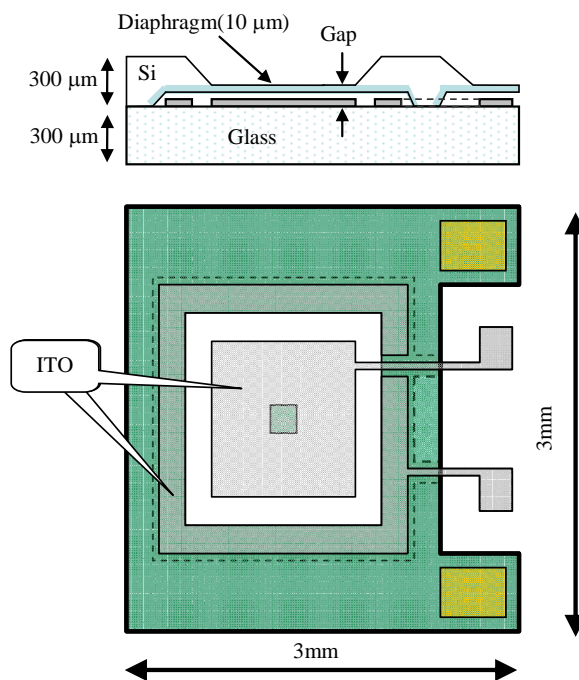


図 4-16 静電容量式圧力センサの構造

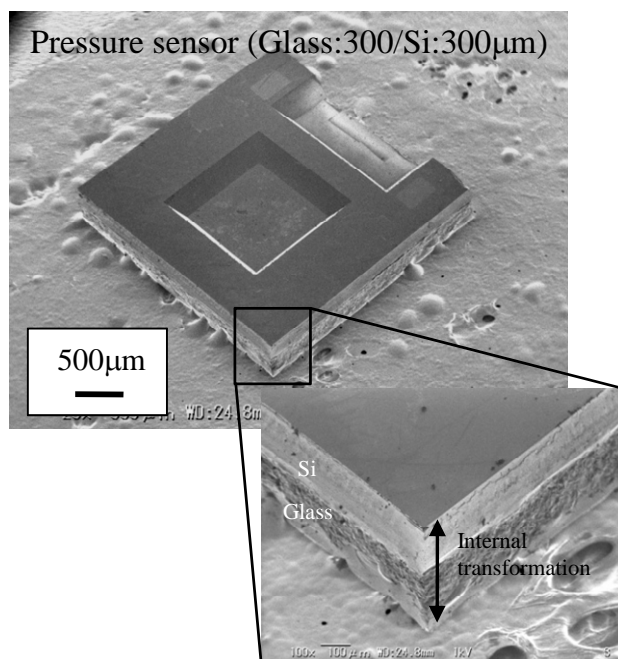


図 4-17 圧力センサの低ストレスレーザーダイシング結果

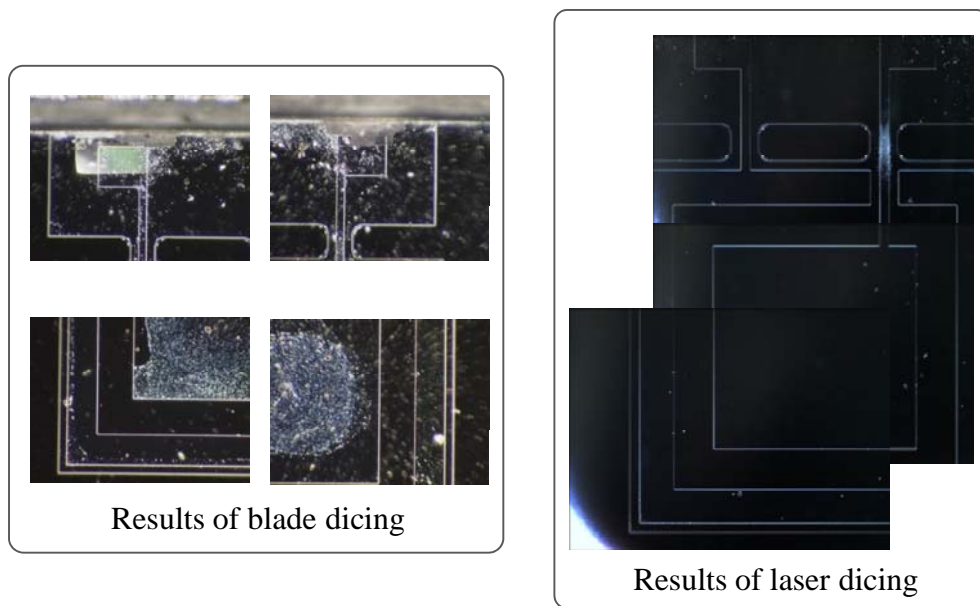


図 4-18 ダイシング法による加工品質の比較

る．図 4-17 に上記の条件で実デバイスを切断し SEM で観察した様子を示す．ダイヤモンド内にデブリの侵入はなく，内部クラックラインに沿ってきれいに切断することができている．図 4-18 は低ストレスレーザーダイシング，ブレードダイシングで圧力センサを切断した後に，それぞれのデバイスを暗視野観察した結果である．ブレードダイシングの場合には，水が侵入し多くのデブリが付着して全てのデバイスが破損したのに対して，レーザーダイシングの場合にはダイヤモンド内に水・デブリの侵入はなく高品質に切断できたといえる．以上の結果より，この低ストレスレーザーダイシング技術が有効であることが示された．

4.5 まとめ

テンパックスガラス, Si ウェハ, テンパックスガラス/Si 接合ウェハに対して, 波長 1064nm, パルス幅 10ns の Nd:YVO₄ レーザーで低ストレスレーザーダイシングを行った．

Nd:YVO₄ レーザーを用いると，テンパックスガラスに表面亀裂を形成でき，それを利用することで 10MPa 程度と低ストレス切断が可能となった．ガラスの切断において層数は，厚さ 150μm ごとに 1 層程度で十分低ストレスに切断ができる．また，ガラスの熱応力切断に内部加工を併用すると，ダイシングラインからのそれがなくなり，従来困難であった小さなチップの切り出しに成功した．

Si の場合，本実験では表面亀裂が確認できず，ウェハの切断に必要な曲げ応力は 74MPa とテンパックスガラスに比べて大きな力が必要であることがわかった．Si の切断においては，深さ方向にクラックがつながるように最低 60μm ごとに 1 層加工し，速度も最適値選ぶ必要がある．また，低エネルギー照射し表面近くの未加工部分を残さない加工を行うこと

が重要である。

接合ウエハに対して、1 台の Nd:YVO₄ レーザーを使用して低ストレスレーザーダイシングを行った結果、チップに分割することに成功した。接合ウエハの割断においては、Si 層の割断に必要な押し力が支配的であることが明らかとなった。また、実デバイスである圧力センサの割断を行った結果、破損することなく高品質に割断することができ、ダイシングブレードによる割断と比較して本手法が有効であることが示された。

第5章 低ストレスダイシングに向けて各種ウエハ加工条件の検討

5.1 はじめに

第4章に示すように、パルス幅 10ns の Nd:YVO₄ レーザーを用いることで実デバイスをデブリフリーに切断できたが、MEMS ウエハはできる限り弱い力で切断することが望まれる。そこでテンパックスガラス、Si ウエハそれぞれに対してレーザー波長やパルス幅を最適化し、その条件で接合ウエハのダイシングを行った。また、接合ウエハダイシング方法の再検討も行った。

5.2 テンパックスガラスの切断に必要な曲げ応力のレーザー波長依存性

テンパックスガラスは低ストレス切断を実証しているため、Nd:YVO₄ レーザーの第2高調波（波長：532nm）を用いてダイシング幅の減少を試みた。

テンパックスガラス（厚み：500 μ m）に対して Nd:YVO₄ レーザーの基本波と第2高調波をシングルパルス照射して内部クラックを形成した。図5-1にガラスの加工閾値近傍のエネルギーを照射した時に形成される内部クラック形状を示す。照射エネルギーは基本波 80 μ J、第2高調波 38 μ J であり、レンズはそれぞれに波長透過率が高い NA0.8 の対物レンズを用意し用いた。内部クラックの形状はどちらも集光点から等方的にクラックが伸びており似ているが、第2高調波の場合は大きさが半分抑えられていることがわかる。表5-1はNd:YVO₄ レーザーの基本波、第2高調波による加工を比較したものである。テンパックスガラスに対して加工閾値近傍のエネルギー（基本波：80 μ J、第2高調波：38 μ J）をシングルパルス照射した時の内部クラックサイズと、加工条件が加工層数5、加工閾値の1.5倍エネルギー（基本波：125 μ J、第2高調波：57 μ J）、繰り返し周波数20kHz、走査速度100mm/secでレーザー加工した時の加工線幅と切断に必要な曲げ応力を示している。第2高調波を用いることで、加工線幅を基本波の半分以下である約43 μ mにできる。また、曲げ応力に関しては少し増加したが、17MPaであれば弱い力で問題なく切断できるため、ダイシング幅を抑えたいデバイスの切断に有効であるといえる。

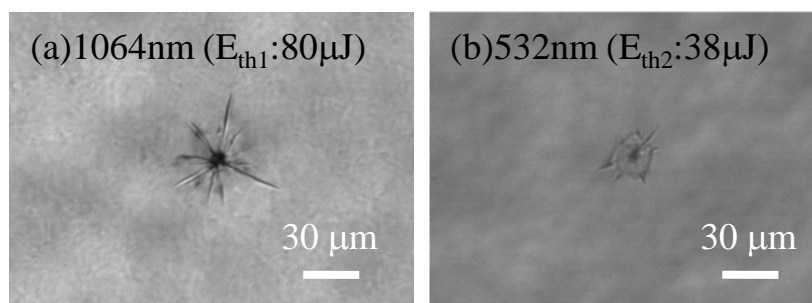


図5-1 テンパックスガラスの内部クラック形状比較

表 5-1 Nd:YVO₄ レーザーの基本波，第 2 高調波による
テンパックスガラス内部加工比較

	Nd:YVO ₄ (λ:1064nm)	Nd:YVO ₄ (λ:532nm)
シングルパルス照射によるクラックサイズ	60μm	30μm
加工線幅(閾値の1.5倍のエネルギーで加工)	95μm	43μm
分離に必要な曲げ応力	10MPa	17MPa

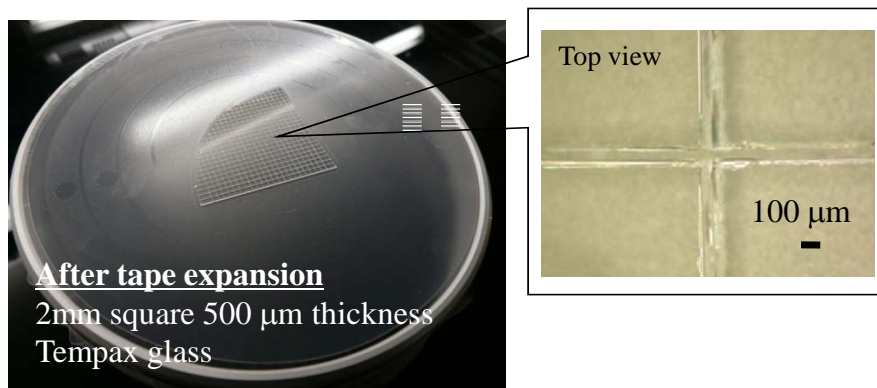


図 5-2 Nd:YVO₄ レーザー (λ : 532nm) による
テンパックスガラスの 2mm 角ダイシング

図 5-2 に Nd:YVO₄ レーザーの第 2 高調波を用いて，テンパックスガラス（厚み：500μm）を 2mm 角にチップ化した結果を示す．チップ分割手順は，レーザー加工したガラスウエハに対してブレード方式のブレイク装置を用いてチップに分割し，テープエキスパンドを行った．ダイシング幅を抑えたまま全てチップに分割することに成功した．

5.3 Si ウエハの割断に必要な曲げ応力のレーザーパルス幅依存性

接合ウエハの割断において，Si の低ストレス割断が重要であることがわかった．そこで，Si に対して，ウエハ表面まで伸びてくる亀裂を発生できれば低ストレス割断ができると考えられるため，表面亀裂のパルス幅依存性について調べた．

Si（厚み：300μm）にパルス幅の異なる Nd:YVO₄ レーザーを NA0.8 の対物レンズで集光し，内部加工を行った．図 5-3 にエネルギー 5μJ，パルス幅(a)10ns，(b)50ns，(c)100ns，レンズのデフォーカス量 10μm で 1 ライン加工を行った Si 表面の様子を示す．10ns の場合には表面亀裂が，パルス幅が長くなるにつれて安定して発生した．特に，100ns の場合にはウエハ全体に安定して亀裂を発生でき，レンズのデフォーカス量 5μm の範囲において表面亀裂の発生が確認された．

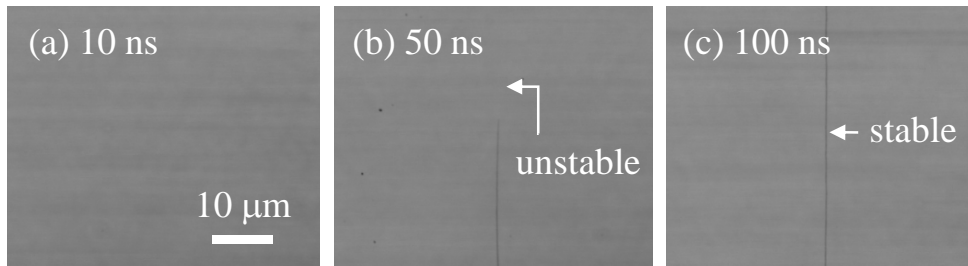


図 5-3 Si 表面に発生する亀裂の観察

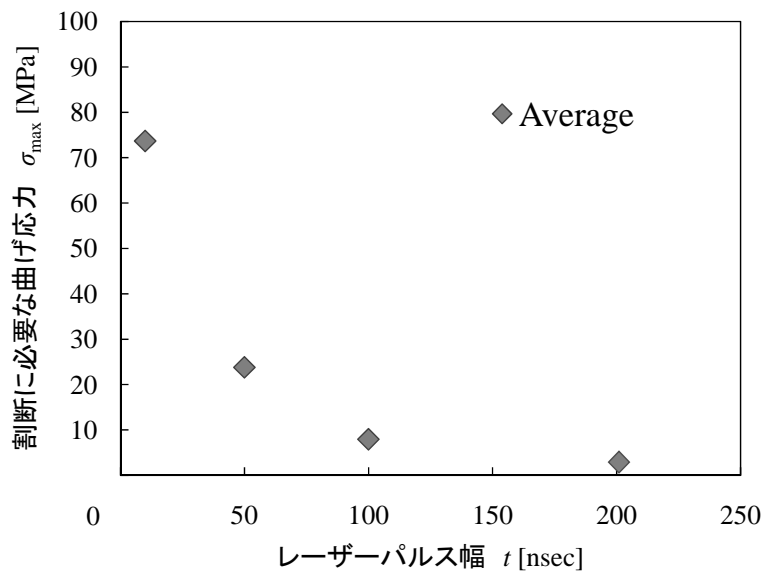


図 5-4 Si の割断に必要な曲げ応力のレーザーパルス幅依存性

次に、Si の割断に必要な曲げ応力のパルス幅依存性を図 5-4 に示す。加工条件は深さ方向全面に密に内部加工されるように層数を増やし、加工層数 13、エネルギー 5 μ J、繰り返し周波数 100kHz、走査速度 100mm/sec とした。パルス幅の長さに伴い曲げ応力が減少していることが確認できる。100ns の場合には、非常に割断されやすくサンプルの大半が測定できない程であった。そのため、図 5-4 には測定できたサンプルの平均値を示しており、実際はテンパックスガラスよりはるかに低ストレスで割断できるようになった。また、パルス幅 200ns の Yb ファイバーレーザー（波長：1064nm）で加工を行うと、更に表面亀裂が安定的に形成できることが明らかになった。この時の曲げ応力は現状の装置では測定できない程に弱いため、Si の内部加工には熱影響が大きいロングパルスレーザーが適しているといえる。図 5-5 にパルス幅 10ns と 200ns レーザーで 1 ライン内部加工した時の断面を示す。パルス幅が長くなると内部クラックの幅が少し大きくなり、更に上下端にクラックが進展していることが確認できる。これは、パルス幅が長いと熱拡散長が長くなりウエハ表面までクラックが進展するため、ウエハ全面に安定的に表面亀裂が形成されたと考えられる。熱

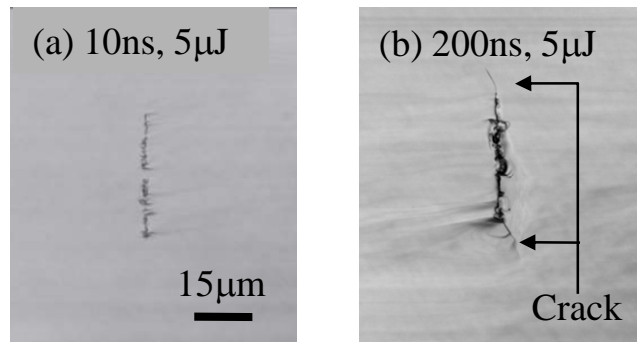


図 5-5 Si に形成される内部加工ラインの断面比較

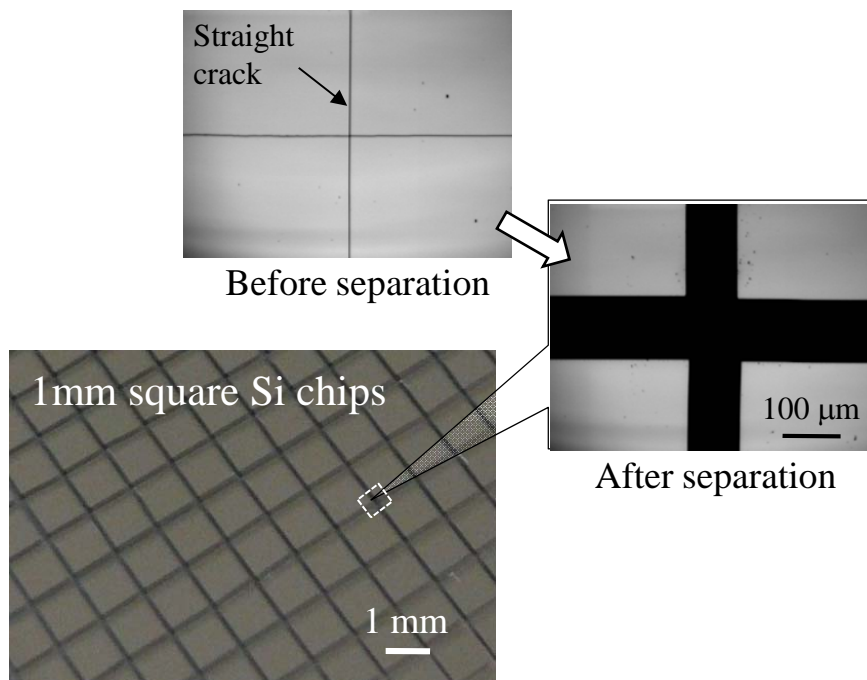


図 5-6 Yb ファイバーレーザーによる Si ウエハの 1 mm 角ダイシング

拡散長 l は、材料の熱拡散係数 D 、レーザーパルス幅 τ として次式で表される。

$$l = 2(D \cdot \tau)^{\frac{1}{2}} \quad (5-1)$$

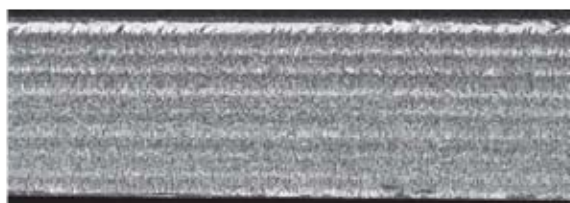
ロングパルスレーザーの熱影響については、断面に溶けがなく、EBSD 法で結晶方位を確認しても多結晶化していなかったため問題ないと考えられる。しかし、横方向に内部加工が広がりマイクロクラックが発生したため、部分的には脆くなっている可能性がある。今後、このマイクロクラックがどの程度デバイスに対して悪影響を及ぼすのか検討する必要がある。図 5-6 に Yb ファイバーレーザー(パルス幅 : 200ns)を用いて Si ウエハ (厚み : 300 μ m) を 1mm 角にチップ化した結果を示す。レーザー加工後の Si 表面の光学顕微鏡像より表面亀

裂が安定的に発生している様子がわかる。この Si ウエハに対して球面テープエキスパンド装置を用いてチップ化とエキスパンドを行った結果、全て 1mm 角にチップ化でき、デブリフリー低ストレスダイシングを実現した。

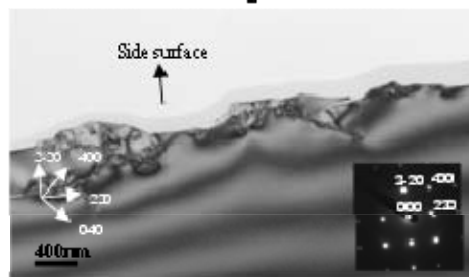
5.4 加工断面の構造解析

Si 切断を行った試料の切断面に対して、EBSD 解析と HRTEM 観察を行った。図 5-9 にパルス幅 50 ns の時の観察結果を示す。(a)の EBSD 観察から、切断面の結晶構造は、元の(100)ウエハと同じ方位を向いており、多結晶化も発生していないことが明らかになった。これは図 3-20 で示したパルス幅 200 ps の Er ファイバーレーザーによって加工したものに対する結果と変わらなかった。奥行き方向のウエハのダメージを観察するために行った HRTEM 観察 (b)からは、奥行き方向に最大で長さ 1 μm 程度の転位の発生を確認できたが、周囲での結晶性の変化は見られなかった。このことから、本技術による Si の切断面はレーザーアブレーションに比べて熱的ダメージが極めて少ないことが明らかになった。

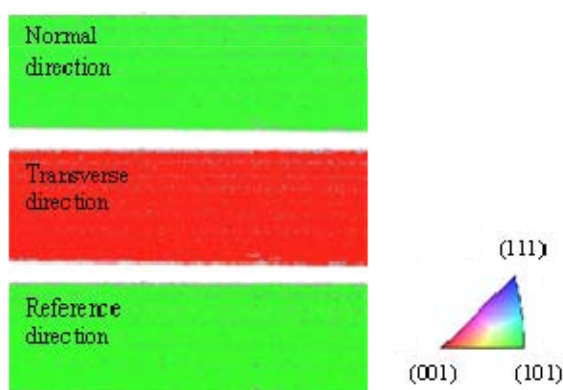
(a-1) Image quality MAP



(b-1) HRTEM image $\times 50,000$



(a-2) Inverse Pole Figure MAP



(b-2) HRTEM image $\times 2,000,000$

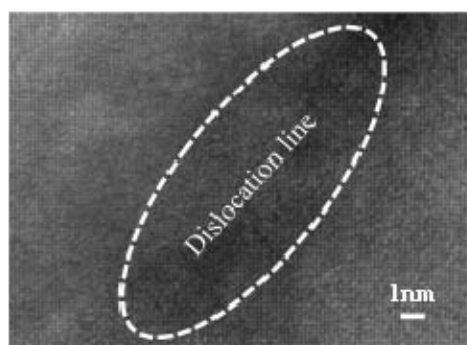


図 5-9 パルス幅 50 ns の Nd:YVO₄ レーザーによる Si 内部加工断面への (a)EBSD 測定および(b)HRTEM 測定

5.5 二台のレーザーによる接合ウエハのダイシング結果

5.2 節, 5.3 節の結果から, 接合ウエハ (厚さ: 300-300 μm) のテンパックスガラスに対して Nd:YVO₄ レーザーの第 2 高調波, Si に対してパルス幅 200ns の Yb ファイバーレーザーで加工した結果を図 5-10, 図 5-11 に示す. レーザー照射条件は, Si に対しては加工層数 13, エネルギー 5 μJ , 繰り返し周波数 100kHz, 走査速度 100mm/sec, テンパックスガラスに対しては加工層数 5, エネルギー 57 μJ , 繰り返し周波数 20kHz, 走査速度 500mm/sec である. また, Nd:YVO₄ レーザーの第 2 高調波の時はガラス面を上にして照射, Yb ファイバーレーザーの時は Si 面を上にして照射した. このような加工を行った接合ウエハの曲げ応力を測定した結果は 9MPa (押し力: 1.3N) であり, 10ns レーザーで加工した場合の 14MPa (押し力: 1.9N) と比較して, 低ストレスでチップ化できることが示された.

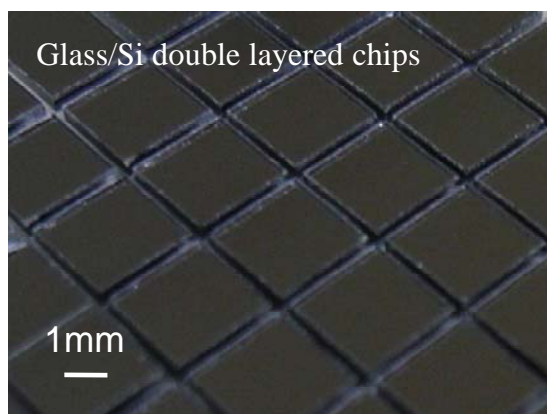


図 5-10 2 種類のレーザーを用いた接合ウエハの 3mm 角ダイシング

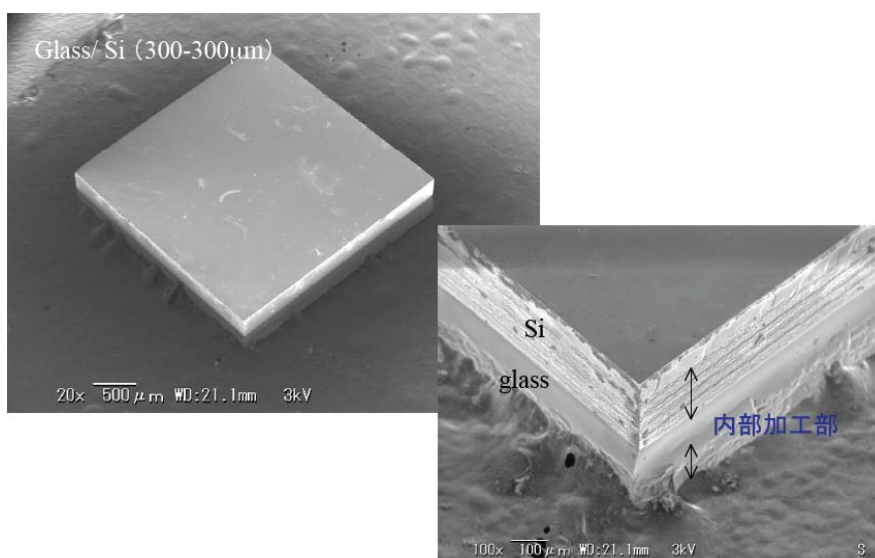


図 5-11 図 5-10 でダイシングされたチップの SEM 像.

5.6 接合ウエハの新たなダイシング方法

図 4-17, 図 5-10, 11 に示す 2 層構造試料の低ストレスレーザーダイシング結果は, ガラスに内部加工を行ったため, ガラス断面にその内部クラックの形状が残ってしまう. 低ストレスレーザーダイシングしたデバイスに対して衝撃試験, 振動試験をした結果, デバイスの品質上問題ないレベルではあったが, 断面から小さなガラス片が取れる可能性がある. そこで, ガラスに内部加工を行わずに接合ウエハをダイシングする手法を考えた.

初めに, 接合ウエハ (厚み: 300-300 μm) の Si のみに加工を行いチップに分割できるか試した. パルス幅 10ns, 50ns, 100ns の Nd:YVO₄ レーザー, パルス幅 200ns の Yb ファイバーレーザーを用いて, 接合ウエハの Si 側からレーザー照射して Si のみに内部加工を行った後, ガラス側からブレードを押し当てた時の割断に必要な曲げ応力測定結果を図 5-12 に示す. 接合ウエハの Si 加工条件は加工層数 13, エネルギー 5 μJ , 繰り返し周波数 100kHz, 走査速度 100mm/sec である. 図 5-4 と同様にレーザーのパルス幅が長い程, 割断に必要な曲げ応力が減少している. また, パルス幅 100ns 以上の場合には, 曲げ応力の値が飽和することが確認できた. パルス幅 200ns で加工を行った接合ウエハの割断に必要な曲げ応力は約 14MPa (押し力: 1.9N) であった. 2 種類のレーザーを用いた場合の 9MPa (押し力: 1.3N) と比べると曲げ応力が増加したが, 10ns の Nd:YVO₄ レーザーでガラス, Si とともに加工した場合とほぼ同じ曲げ応力であることがわかった. パルス幅 200ns のレーザーで評価用ウエハ (圧力センサ) の Si のみを加工して割断した結果を図 5-13 に示す. レーザー加工した接合ウエハの分割方法としては, Si の表面亀裂から割くように分割するため, ガラス面にブレ

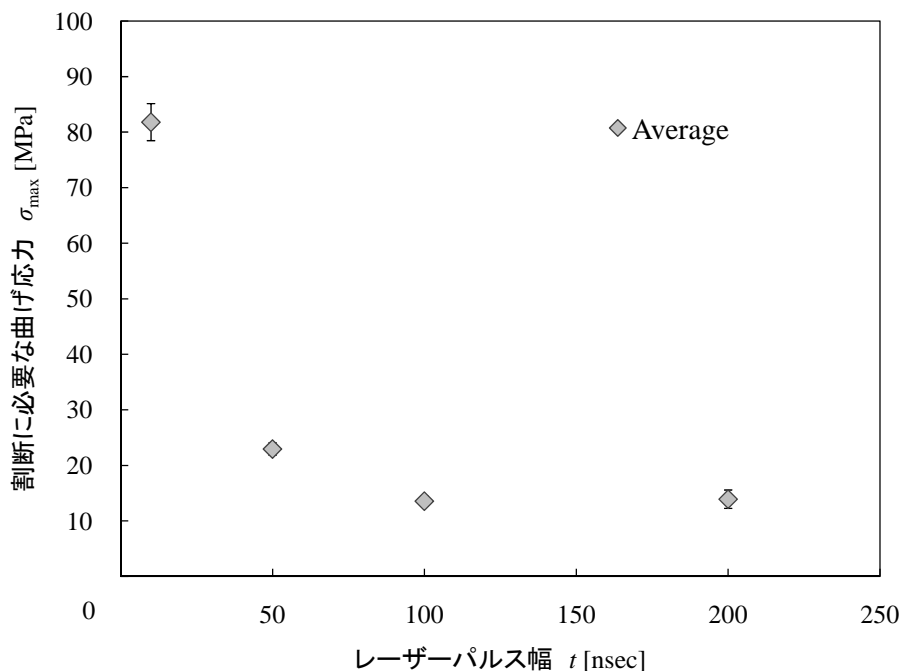


図 5-12 Si のみ加工した接合ウエハの割断に必要な曲げ応力 (レーザーパルス幅依存性)

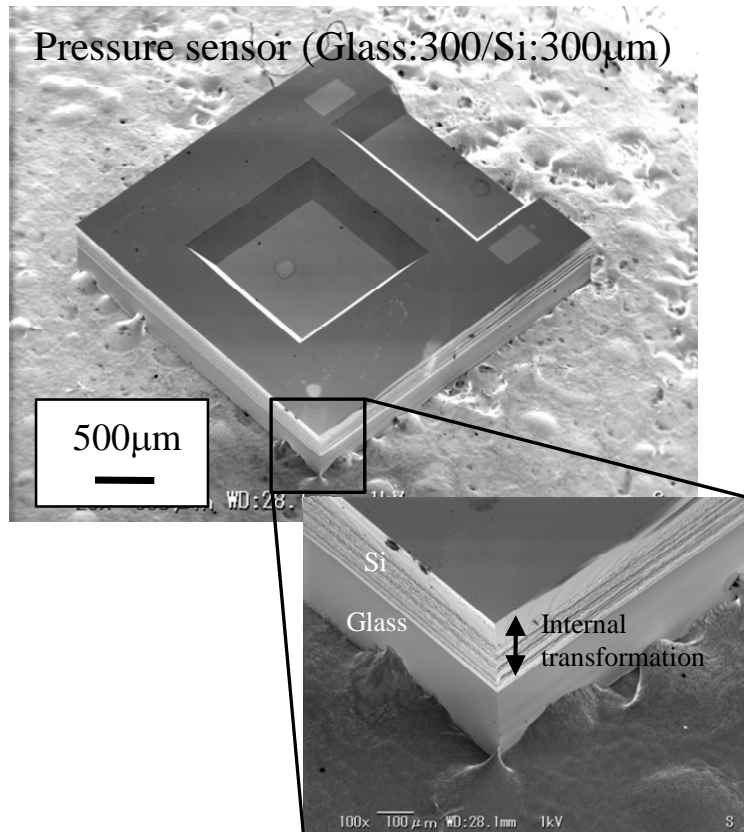


図 5-13 圧力センサのレーザーダイシング結果 (Si のみ加工した場合)

ードを押し当ててチップ化した。このダイシング方法の利点は、図 5-13 からわかるように、ガラスを一切加工していないため、傷がなく高品質な断面が得られる点である。Si が内部加工された時にガラスにも応力が局所的に集中することで、きれいに切断できたと考えられる。

また、この Si のみを加工した接合ウエハに対してブレードではなく、熱応力を加えることでチップ化できるかも試した。パルス幅 50ns, 100ns の Nd:YVO₄ レーザー、パルス幅 200ns の Yb ファイバーレーザーを用いて、接合ウエハの Si 側からレーザー照射して Si のみに内部加工を行った後、CO₂ レーザーを Si 側から照射して熱応力を加えた。Si 加工条件は図 5-12 と同様で、加工層数 13、エネルギー 5 μ J、繰り返し周波数 100kHz、走査速度 100mm/sec である。CO₂ レーザー照射条件は Si ウエハが溶けないように、かつガラスに亀裂が入るように設定し、エネルギー 54.6W、走査速度 90mm/sec、バーンパターンは 1mm で 1 ライン走査した。この接合ウエハの切断に必要な曲げ応力測定結果を図 5-14 に示す。熱応力を加えた場合は、レーザーのパルス幅の影響を受けずにほぼ一定の曲げ応力で切断されることが確認できる。熱応力を加えた接合ウエハの切断に必要な曲げ応力は、約 4.6MPa (押し力 0.65N) であり極めて低ストレスに接合ウエハの切断ができた。この実験では曲げ応力評価用サン

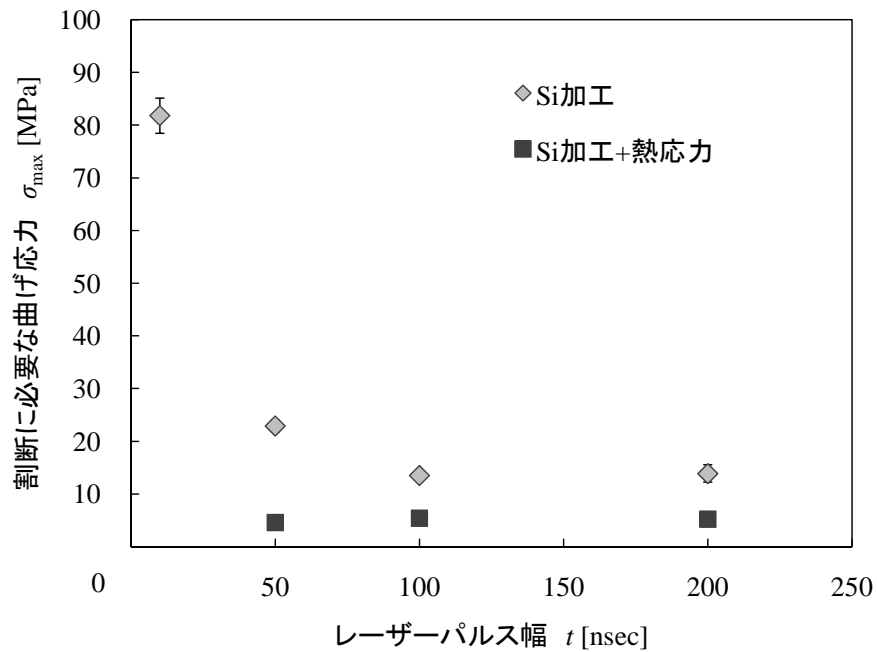


図 5-14 Si 内部加工と熱応力を加えた接合ウエハの割断に必要な曲げ応力 (レーザーパルス幅依存性)

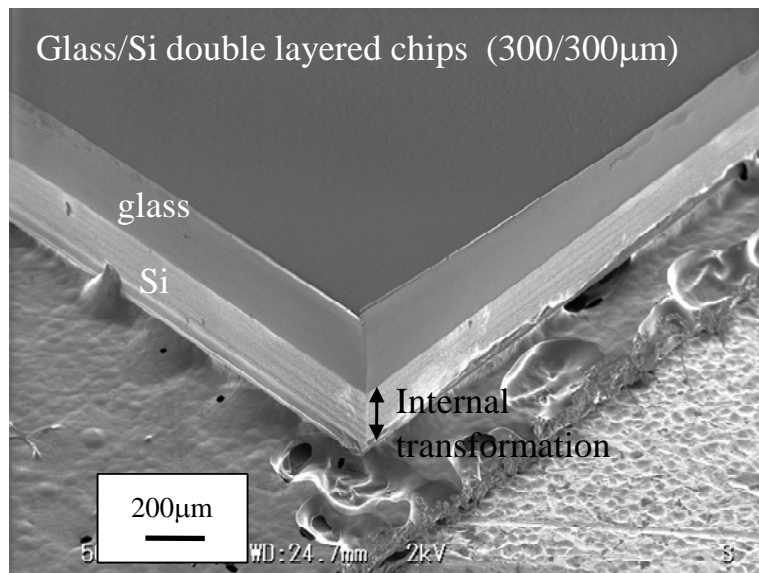


図 5-15 接合ウエハのレーザーダイシング結果(Si 加工+熱応力割断の場合)

プルを複数用意したが、一部のサンプルは測定前に分離されるほどであった。図 5-15 にパルス幅 50ns のレーザーで Si 内部加工をした接合ウエハの熱応力割断結果を示す。ガラスの部分が熱影響によって少し溶けたように見えるが、CO₂ レーザーの照射条件を最適化するこ

とで解決できると考えられる。この手法を用いることで、ガラス面のクラック傷もなく低ストレスに切断できることが明らかとなった。

5.7 まとめ

ダイシングの低ストレス化、品質向上のために、ガラス、Si それぞれに対してレーザー波長、パルス幅の最適化を行い、その条件を用いることで接合ウエハの低ストレス切断に成功した。また、新たな加工方法を用いることで接合ウエハのガラス断面に傷がなく高品質にチップ化できることを示した。

テンパックスガラスに対して、Nd:YVO₄ レーザーの第 2 高調波を用いることで加工線幅を 43 μ m まで抑えることができ、チップの取り数が増えるメリットがうまれる。また、Si に対しては、パルス幅が数 100ns のレーザーを用いることで表面亀裂の形成が可能となり、テンパックスガラス以上に低ストレスで切断できることを示した。

接合ウエハにおいては、テンパックスガラスに対して Nd:YVO₄ レーザーの第 2 高調波、Si に対してパルス幅数 100ns のパルスレーザーを使用することで低ストレスダイシングを実証した。また、接合ウエハのガラス面に傷がない高品質なチップを望む場合は、Si のみを加工することで達成できる。Si のみ加工したウエハに対して CO₂ レーザーで熱応力を加えると、切断に必要な曲げ応力が 4.6MPa と大幅に減少し、高品質にデブリフリー低ストレスダイシングが行えることを示した。

第6章 結論

従来のダイシング技術では切断が困難であった積層 MEMS を、レーザーによってデブリフリーに低ストレス切断する技術の開発を行った。

初めに、MEMS の一般的な構成要素であるテンパックスガラス、Si に対してレーザー内部加工を行い、形成される内部クラックの形状を調べた。テンパックスガラスに対しては、フェムト秒レーザーを用いることで、ダイシング幅を $10\mu\text{m}$ 以下にでき、チップの取り数を多くできることを示した。ナノ秒レーザーを用いた場合は $80\mu\text{m}$ 程度と内部クラックは大きい。高速にチップ化できる利点がある。いずれの場合においても、内部クラックのアスペクト比は 1.5 程度であった。Si に対しては、透過性のある Nd:YVO₄ レーザーでダイシング幅 $5\mu\text{m}$ 以下の加工が出来ることを示した。また、Si に形成される内部クラックのアスペクト比は 15 以上とガラスに比べて大きいことがわかった。

次に、内部クラックをライン状につなげて、テンパックスガラス、Si ウエハ、テンパックスガラス/Si 接合ウエハのダイシングを行った。加工用レーザーにはガラス、Si の両方に対して透過性のある Nd:YVO₄ レーザーを用いた。ガラスの曲げ応力切断結果は、表面亀裂を利用することで曲げ応力 10MPa 程度とわかり、低ストレスに切断できることを示した。また、熱応力切断では内部加工を併用することで従来困難であった小さなチップの切り出しに成功した。一方、Si の切断に必要な曲げ応力は 74MPa とガラスに比べて大きいことがわかった。Si を低ストレス切断するには、照射エネルギーを低くして、表面近くに未加工部を残さないことが重要である。以上の結果を踏まえて、ガラス/Si 接合ウエハの切断を行った結果、 3mm 角にチップ化することに成功した。接合ウエハの切断においては、Si 層の切断に必要な曲げ応力が支配的であることが明らかとなった。この技術を用いて実デバイスである圧力センサを切断した結果、破損することなく高品質に切断することができた。ダイシングブレードによる切断と比較して本手法が有効であることが示された。

実デバイスの低ストレスレーザーダイシングに成功したが、脆弱構造を有する MEMS デバイスはできる限り低ストレスに切断する必要がある。そこで、ダイシングの低ストレス化、品質向上のために、ガラス、Si それぞれに対してレーザー波長、パルス幅の最適化を行い、その条件を用いることで接合ウエハの低ストレス切断を行った。テンパックスガラスに対しては、Nd:YVO₄ レーザーの第 2 高調波を用いることで加工線幅を $43\mu\text{m}$ に抑えることができた。Si に対しては、パルス幅数 100ns のレーザーを用いることで表面亀裂を形成でき、ガラス以上に低ストレス切断できることを実証した。接合ウエハのテンパックスガラスに対して Nd:YVO₄ レーザーの第 2 高調波、Si に対してパルス幅数 100ns のパルスレーザーを使用することで、パルス幅 10ns のレーザーを 1 台使用するよりも低ストレスにダイシングできることを示した。また、接合ウエハの Si のみを加工することで高品質なチップの切り出しが行えることを発見した。更に Si のみ加工したウエハに対して CO₂ レーザーで熱応力を加えると、切断に必要な曲げ応力が 4.6MPa と大幅に減少し、高品質、デブリフリー

ーに低ストレスダイニングできることを実証した.

2-4. 開発成果のまとめ

(1) 目標の達成度

	研究項目	目標	成果	達成度
基本計画の目標	多層 MEMS 構造の切断技術開発	多層構造 3 種類以上についてレーザーダイシング試験を行い、試料の破損率 1%以下を達成する。	多層構造 3 種類以上についてレーザーダイシング試験を行い、試料の破損率 1%以下を達成。	○
自主目標	MEMS 構成材料のレーザー加工・改質特性調査	Si とガラスにおいて 1-2 μ m の波長帯域で、Si において 10ns-200ns のパルス幅範囲でレーザー加工・改質特性を確認	広範囲な波長域、パルス幅領域でレーザー加工・改質特性を確認することにより、ガラス/Si 積層体に対して新たなダイシング手法を見いだした。	◎
自主目標	分割支援構造の評価・設計・製作・検討	破損率を定義・評価できる試料を製作	破損率評価に適宜サンプルを提供	○

(2) 成果の意義

産業用として普及している安価な YAG レーザー、CO₂ レーザーを用いて積層ウェハをデブリフリーでダイシングできる可能性を明らかにした。これにより、既存の高価でブラックボックス的なレーザーダイシング法にとらわれることなく、様々なダイシングニーズが存在する少量多品種の MEMS ウェハに対してデブリフリーレーザーダイシング手法の適用性が拡大する。

(3) 知的財産等の取得

国内特許出願 3 件

(4) 成果の普及

大阪大学と東北大学に“お試し”加工用レーザーダイシング装置を設置しユーザーの評価を得ると共に、装置メーカーへ技術供与し製品化へつなげる。

3. 実用化・事業化の見通し

(1) 成果の実用化可能性

本プロジェクトで得られた基礎データは全て公開されており、公的機関（大学、公益法人）による技術指導/移転を行う体制も整備されている。システムコンポーネント（レーザー装置、光学部品等）の単価も数百万円程度であり、中堅企業が当該技術を実用化する際の障壁は低いものと考えられる。

(2) 波及効果

本プロジェクトで得られた新しい知見は、大面積ガラスの割断に適用できる可能性があり、FPD（フラットパネルディスプレイ）等の製造技術として有用なものとなる可能性がある。レーザーによるガラス割断において、これまで困難とされてきたクロスカットの問題を解決できる可能性が高い。

V-4. 研究開発項目④ 高集積・複合 MEMS 知識データベースの整備

(マイクロマシンセンター)

1. 研究の概要

特徴

ネット上で自由記述・閲覧可能なシステムの構築

- 複数ユーザが特殊なアプリ、専門的記述言語の知識無く共同作業できる環境
- Web ブラウザ / MediaWiki システムを知識 DB のインフラとして活用
- Wiki(閲覧者の共同作業ツール)⇔ブログ(個人の情報交換ツール)



技術内容・特性

知識データの収集・体系化

- (プロセス、デバイス、材料特性、解析) 4分類を軸にファイン MEMS 研究・開発キーワードで知識データを体系化し、登録データ件数: 1500 件超(目標 1000 件)
- 開発テーマに対応した 2000 年以降の国内公開特許、米国登録特許、および PCT 公開特許を調査し、抽出した 4500 件超をデータベースに実装
- 特許出願件数の多い MEMS / 半導体の一体形成技術および MEMS/MEMS の高集積結合技術の出願動向をまとめた分析資料集をデータベースに実装
- データベース傾向の可視化(カテゴリ・キーワード別知識ランキング表示)、今日の知識(日替わりランダム表示)、新着知識表示、各種検索機能(データベース内全文検索、Google 検索)



用途・目的

ファインMEMS開発・製造に係わる研究者・技術者の支援、裾野拡大を図ることを狙いとして、ファイン MEMS プロジェクトの一環として整備したファインMEMS知識データベースを、ウェブを通じてわが国産業界に広く公開するとともに、マイクロマシンセンター内でのサーバーおよびユーザ登録の管理により、ユーザが関心を持っている技術分野・知識の把握・分析を行い、これらの情報を踏まえて、MEMS分野の包括的な知識基盤となる百科事典 MEMSPedia として整備、効果的な普及を図る。

2. 成果の詳細

②-1 高集積・複合MEMS製造技術に関わる知識データの収集、整理

高集積・複合MEMS製造技術に関わる知識、知見を集約するとともに、代表的なデバイス、プロセス、計測評価等関連技術について事例を含めて、知識データとして集約を行った。本開発事業の参画事業者（委託先及び助成先）の研究開発の成果（研究データや科学的知見）および再委託する大学の研究開発の成果に加え、国内外のMEMS関連の主要学会や主要学会誌（出版物）から知識データ情報を収集し、目標 1000 件に対して 1500 件超の知識データを収集し蓄積した。また、最新の知識データを収集した学会・シンポジウムは次の世界的主要学会をカバーした。

(1) Optical MEMS 2006 (International Conference On Optical MEMS and Their Applications, 2006年8月21日～24日、アメリカ) においては、特に光MEMSに関する高集積化関連技術の情報収集を主に行った。

(2) NNT2006 (Fifth International Conference on Nanoimprint and Nanoprint Technology, 2006年11月15日～17日、アメリカ) においては、ナノ構造或いはナノ修飾に関する製造技術の先端的な研究開発情報収集を主に行った。

(3) 2006IEDM (2006 IEEE International Electron Devices Meeting, 2006年12月10日～13日、アメリカ) においては、半導体集積化の中でのMEMS関連技術の知識データの収集を主に行った。

(4) Transducers 2007 (International Conference On Solid-state Sensors and Actuators and Microsystems, 2007年6月10日～14日、フランス) において、特にSensorやActuatorに関するMEMS高集積化関連技術の知識データの収集を主に行った。

(5) MNE2007 (33rd International Conference on Micro- and Nano-Engineering, 2007年9月23日～26日、デンマーク) においてマイクロ及びナノに関する機能の複合化関連技術の知識データの収集を主に行った。

(6) 2007IEDM (2007 IEEE International Electron Devices Meeting, 2006年12月10日～12日、アメリカ) においては、半導体集積化の中でのMEMSの高集積化関連技術の知識データの収集を主に行った。

(7) EUROSENSORS 2008 (22nd international conference EUROSENSORS, 2008年9月7日～10日、ドイツ) において、SensorやActuatorに関するMEMS高集積化関連技術及びパッケージング技術並びにアセンブル技術の知識データ収集を主に行った。

(8) MNE2008 (34rd International Conference on Micro- and Nano-Engineering, 2008年9月15日～18日、ギリシャ) においてマイクロ及びナノに関する機能の複合化関連技術の知識データの収集を主に行った。

また、高集積・複合MEMS製造技術に関わる特許情報として、①MEMS/ナノ機能の複合化技術、②MEMS/半導体の一体形成技術、③MEMS/MEMSの高集積結合技術の三つの研究開発項目を対象に、2000年以降2009年2月までに公開された国内（公開）、米国（登録）（国際特許PCT出願（公開）は、2000年以降2006年11月まで）の総件数12627件を、調査、分析し、ファインMEMSに係わる4500件超を分類・抽出してデータベースに実装した（表1、図4参照）。

さらに、ファインMEMSカテゴリの内、②MEMS/半導体の一体形成技術、③MEMS/MEMSの高集積結合技術（主にパッケージング関連技術）については、国内特許情報では表れてこない欧米企業・研究機関等の出願動向を調べるために、米国（登録）、欧州（EP公開）、国際PCT出願（公開）を対象に、分析し、主要な企業、研究機関の出願動向をまとめた総論部、及び代表的な特許情報の要約（和文）と特許フロントページを配置した各論部から成る分析資料集をデータベースに実装した。

表1 ファインMEMS関連特許分類一覧

ファインMEMS分類	国内公開特許	米国登録特許	PCT公開特許
A1: MEMS/ナノ機能の複合技術	204	10	2
A2: MEMS/半導体の一体形成技術	191	66	13
A3: MEMS/MEMSの高集積結合技術	66	32	2
A4: その他*	3968	20	—
抽出合計	4429	128	17

* A4（その他）は、A1～A3への分類困難であるが、ファインMEMSに関連する特許

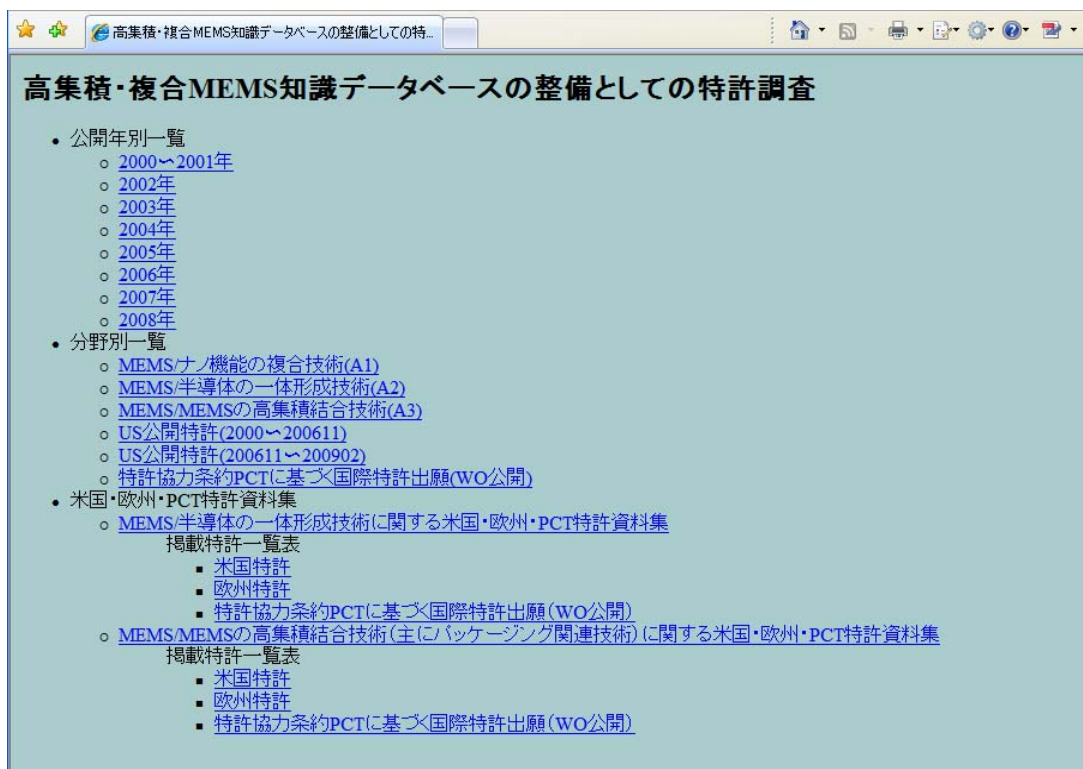


図4 知識データベースに実装した特許調査・分析資料の一覧

②-2 知識データの研究開発

助成（企業）対象の研究内容に関する知識データの収集を補完するため、MMCから大学研究室へ以下の研究開発を再委託することにより、それらの成果としての知識データを収集、整理した。

（1）MEMS／半導体におけるプロセス統合モノリシック技術に関する知識データベースの研究開発
（東京大学 杉山研究室）

目的) CMOS デバイスとMEMSを1チップに集積させ新機能を発現するモノリシック集積技術は、次世代MEMSを設計するためにきわめて重要である。これには、エッチング、精密アラインメント、薄膜堆積による高アスペクト構造の埋め込み、平坦化など様々な要素技術が含まれている。しかもLSI製造技術と違ってこれらの要素技術が標準化されていない。そこで、すでに製作されているモノリシック集積MEMSに関する知見、今後MEMSに利用可能な新技術（たとえば超臨界製膜技術など）に関する知見を文献・学会発表などのデータから抽出し、知識データベースに入力した。

研究開発の成果) 平成18年度は、プロセス統合モノリシックに関する項目を中心に31件のデータを入力した。とくに、「マイクロゼオライトカラムによるガス分離」、「O₂プラズマ処理を用いたInP基板とSi基板の接合」など異種材料の融合による高機能化に関連した事例を多く取り上げた。この中には、「マイクロチャネルエピタキシーによるヘテロエピタキ

シャル層の転位低減」など当研究室の成果を平易にまとめたものも含まれる。

平成19年度は、「シングルウォールカーボンナノチューブ(SWNTs)を用いた NO₂ ガスセンサ」など異種材料融合プロセスに関する事例をさらに入力するとともに、「水素化アモルファスシリコンを用いた高電圧太陽電池アレイ」、「光発電による静電アクチュエータの直接駆動」など太陽光発電の MEMS への取り込みに関する事例を、今後の展開が期待される分野として取り上げた。また、「超臨界 CO₂ を媒体に用いた金属製膜」、「超臨界 CO₂ を用いたガラス表面への生態適合材料のコーティング」など当研究室で開発したプロセス技術で、モノリシック集積 MEMS に関連の深い技術を平易にまとめて事例として入力した（平成19年度の知識データの登録件数 30 件）。

平成20年度は、「CMOS 上マイクロ流路での磁性体微粒子の操作と光学検出」、「リコンフィギュラブル IC に向けた CMOSMEMS プローブの作製」など、CMOS とマイクロ分析デバイスや MEMS との集積に関する事例、「CMOS プロセスによるシリコンナノワイヤアレイの作製」など CMOS プロセスを用いて MEMS に応用可能な機能構造を作製する事例を中心に、30 件を入力した。また、すでに入力されたデータベース内の事例を改良するためのコメントを 50 件入力した。

このような事例入力と並行して、データベースの内容をプロセスで実証するための実験を行った。LSI と MEMS の統合プロセスに不可欠なシリコンの深掘りエッチングに関して、超高真空蒸着装置を立ち上げ、アルミをマスクとした高アスペクト比のエッチングを可能にした。さらに、等方性エッチングと異方性エッチングのバランスによる 3 次元形状形成を支配するメカニズムを明らかにするための系統的な実験を行い、解析モデルとの比較検討によりエッチング形状を大枠で予測するモデルを構築した。

このような深掘りエッチング技術を活用した MEMS の作製にシミュレーションがどこまで精度よく活用できるかを検証するため、MemsONE および市販の汎用有限要素法シミュレーションソフト（COMSOL）を用いた櫛歯型振動子の設計を行い、設計に基づいて製作した振動子の機械特性を測定した。シミュレーション結果と実験結果の比較により、MemsONE におけるメッシュ生成の問題などを指摘し、シミュレーションの改善に貢献した。

（2）高集積化 MEMS 解析手法に関する知識データベースの研究開発

（東京大学 藤田研究室）

目的) 平成18年度～20年度にかけて、高集積化 MEMS 解析手法に関する知識データベースの研究開発を行った。平成18年度は、高集積化 MEMS 解析手法としてマイクロアクチュエータとそれを支持する機構を解析した。平成19年度は、電子回路とマイクロ機構が集積化されたデバイスに着目し、その動作解析手法を調査した。また平成20年度は、「生物を駆動源としたマイクロシステム」、「空気圧駆動マイクロバルブ」の内容を中心に、知識データベースに新規登録を行うとともに、データベースの質的向上を目指し、一二年次に作成したデータベースの内容に加筆を行った。

研究開発の成果)平成18年度は、高集積化 MEMS 解析手法としてマイクロアクチュエータとそれを支持する機構の解析を中心に研究した。

まず、多数のマイクロアクチュエータと複雑な支持構造が組み合わされた高集積 MEMS 駆動デバイスの典型例として、MEMS 機械式アナログ・デジタル (AD) 変換デバイスを取り上げ、その構造の概要、駆動原理、AD 変換原理を考案した。

そして本デバイスの最適な設計を行うため、連成バネ構造を弾性マトリックスで表現し、複数のマイクロアクチュエータからの駆動入力に対してどのような動きをするかを解析した。その結果に基づき、12ビットの機械式 AD 変換デバイスとして適切な動作をするように、総計60以上の支持バネの硬さを決定することができた。この結果を、知識データベースに登録した。

このデバイスは、静電駆動櫛歯型アクチュエータを用いているため、このアクチュエータの基本特性の解析についても検討し、その結果を知識データベースに登録した。すなわち、櫛歯アクチュエータの不安定性の解析手法、安定性を向上しより大きな変位を得るための支持構造の設計手法、位置決め用垂直くし歯型アクチュエータのクロストークを低減するための電極構造解析手法、静電アクチュエータの共振周波数と最大変位を規定する式の導出方法、などを調査した。

次にナノ構造デバイスとして、ウェットエッチングによるシリコン対向ナノ針端の製作方法、ナノ針端をシリコン電界電子放出銃として用いたときの先端の劣化状態を透過電子顕微鏡内で実時間観察した研究結果、生体分子モータをマイクロ流体デバイスに付加し標的分子を選択的に直接搬送するデバイスなどについて知識データベースに登録した。さらに、アクチュエータアレイチップとセンサアレイチップの積層集積化方法を含め、全部で10件に登録した。

平成19年度は、高集積化 MEMS の解析手法を検討するため、多くの電子回路とマイクロ機構が集積化されたデバイスに着目し、その動作解析手法を調査した。

解析ソフトウェアを用いて、センサとアクチュエータを集積したデバイスの動作解析を行った。そして実験結果との対比による解析の有効性の検討を試みた。これを高集積化 MEMS のデータベースへ追加した。またデータベースへ新規のキーワードなどを追加した。さらに文献検索によりデータを蓄積した。加えて、MEMS-08 (米国) に出席し、関連情報を収集した。以上の結果、知識データ累積登録件数は61件であった。

平成20年度は、高集積化 MEMS 解析手法に関する知識データベースを充実させるために、以下の3つの活動を行った。

他ユーザが登録した項目に対して、より内容の詳細が必要だと思う部分に、計52件のコメントを記入した。(データベース、ノートへの52件のコメント記入)

「生物を駆動源としたマイクロシステム」、「空気圧駆動マイクロバルブ」の内容を中心に、知識データベースに新規登録を行った。また第25回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウムに出席し、情報を収集し、この情報についても登録を行った。(知

識データ累積登録件数：93 [61+32]件[2009年3月2日現在]

さらにノートに記載された21のコメントに対し、対応を行った。具体的には、データベースの項目に図表、説明、リンクの追加を行い、データベースの内容を充実させた(データベース、21件コメントへの対応)。

(3) MEMS/半導体における高集積配線技術のための知識データベースの研究開発

(東京大学 三田研究室)

目的) MEMSに先端CMOS回路を集積化することで、寄生素子の低減による性能向上や、機械部品が主体であったMEMS単体では不可能であった、高度なその場情報処理等新機能が創出されると期待できる。この、CMOS-MEMS集積化技術の鍵となる技術はCMOS回路とMEMSとの間を接続する「微細配線技術」である。わが国をはじめ欧米、アジア等で集積化MEMSの実現方法が提案されているが、これらの成果をひとつのデータベースにまとめることで技術の利用価値を向上させるものである。

研究開発の成果) 論文調査、MEMS集積化技術を研究している諸外国の研究機関の技術者と面会、国際会議等に出席、等の方法で、様々な研究機関で発表されている異種部品融合・微細配線技術のサーベイを行い、統一した形式でデータベース化した。また、CMOSポストプロセスを実際に行っている研究所・企業において実地調査(研究代表者自らの手によるプロセス実行も含む)を行い、成果をデータベース化した。このような研究を行い、生のラボデータを記入することによって論文では得られない<<現場>>の知見をデータベース化することができた。特に、研究代表者自らが全てのデータベース並びにコメントの記入を行うことで、質の高いデータベースの実現に寄与できたと考えている。

平成18年度は、シリコンMEMS構造を利用した立体配線技術、機械的にMEMS構造とLSIとの位置合わせを取る技術について、重要と思われる技術を東京大学武田先端知ビルにおいて追試し、得られた内容を元に使いやすいデータベース整備を行った。また、CMOS8インチラインをもち、ポストプロセスを専門とするエジンバラ大マイクロエレクトロニクスセンターに出張し、配線技術に関する情報収集を行った。同大学はスコットランドにおけるR&Dセンターの中心として最近新築されたクリーンルームを持ち、CMOSイメージセンサ発祥の地であるなど、イメージセンサやCMOS回路についての欧州における重要な拠点のひとつである。学会はNanotech Montreux 2006、MEMS2007に出席し動向調査を行った。

平成19年度は、前年度に引き続いて実地調査先として、エジンバラ大マイクロエレクトロニクスセンターを選び、第一・第二四半期に同大学に研究代表者自らが長期出張を行った。ここではポストプロセスによる配線技術とその応用をサーベイ・追試・開発した。生まれた成果を平成20年3月の国際会議International Conference on Microelectronic Test Structure (ICMTS 2009, Edinburgh)で発表し、内容を速やかにデータベース化した。また、学会のチュートリアルから抜粋してデータベースを充実させた。学会ならびに研究

会として同年度に始まった「ナノテクノロジー・ネットワーク」への会合に出席して技術動向を調査、MEMS2008に研究代表者が出席して動向調査を行った。また本研究開発の予算によって Transducers2007 に出席し、引き続いて LETI/CEA、LAAS/CNRS、IEF/CNRS を訪問して先端 CMOS と MEMS の微細配線に利用可能な技術調査を行った。特に CEA-LETI 訪問が契機となって、技術主任の Jean-Philippe Gouy 氏の紹介によって、厚み 2.5 ミクロンの塗布が可能な電子線レジスト「OEBR-CAP112」を東京大学で継続的に購入するチャンネル開拓に成功し、MEMS 微細配線実験の実施がさらに容易になった。また、東京大学武田先端知ビルのスーパークリーンルーム環境は文部科学省の「ナノテクノロジー・ネットワーク東京大学拠点」を通じて全国の研究所・企業に技術提供ができるため、本邦の MEMS 微細配線技術の加速的な向上に寄与できることになった。

平成 20 年度は、引き続き文献調査、MEMS 集積化技術を研究している諸外国の研究機関の技術者と面会、国際会議等に出席、等の方法で、様々な研究機関で発表されている異種部品融合・微細配線技術のサーベイを行い、統一した形式でデータベース化した。ICMTS 論文会議、APCOT2008、ESSDERC2009、LATW などの国際学会への出席による情報収集に加えて、CMOS ポストプロセスを実際に行っている研究所・企業、またはアプリケーションとして MEMS を利用する研究所において動向調査を行い、成果をデータベース化した。

(4) MEMS/MEMS における多層接合技術のための知識データベースの研究開発

(東京大学 須賀研究室)

目的) 本研究は、接合技術に関するデータベース構造化を検討し、データベースの枠組みを構築することを目的とし、接合に関する知識を体系に整理し、高集積化 MEMS との関連をキーワードベースに相関させるものである。特に、当研究グループが中心になって行ってきた、MEMS 関連の低温接合技術研究の 900 余りの論文、および、特許検索等に基づいて、データベースのコンテンツを収集、分析し、さらにまた、ウエハの低温貼合せなどの重要技術については、実験的な検証実験を行い、独自の実験データ収集を行なうことを目的とした。

研究開発の成果) この目的を遂行するため、高集積・複合 MEMS 知識データのうち、特に、接合やウエハ貼合せのプロセス、構造、応用に関わるものに関しての検討を行なった。特に、平成 18 年度については、Wafer Bonding 国際会議への出席、および Polymer パッケージの国際会議の主催により、接合界面に被接合体とは異なる接合介在物質を挿入する方法と直接接合の 2 つの接合方法について、平成 19 年度においては、IEEE-CPMT の低温ウエハ接合国際会議の主催、平成 20 年度には ECS-Wafer Bonding Symposium のアレンジ等を通して、最新のウエハ接合に関する論文、科学技術的知見の蓄積・整理を行った。また、接合技術に関するデータベース構造化を検討し、ローカルなデータベースの枠組みを構築した。当研究グループが中心になって行ってきた、MEMS 関連の低温接合技術研究の 900 余

りの論文に基づき、接合に関する知識を体系に整理し、データベースのコンテンツを収集、分析した。特に表面活性化技術、表面改質技術、それらの応用事例を重点課題として、重要と思われる96件、ノート50件を、ファインMEMS知識データベースにアップした。

また、重要技術であるウエハの低温貼合せについては、シーケンシャルプラズマの効果に関する実験、高精度の位置決め、およびフッ素を使った新しい表面活性化手法の実験的検討等に関する実験的な検証実験を行い、Si やガラスに対して、低温接合のための新しい知見を得た。またこれらの実験や調査により収集したデータについても精査した上で本知識データベースに掲載した。

(5) MEMS-MEMS 結合技術のための知識データベースの構築

(慶応義塾大学 三木研究室)

目的) 高集積・複合MEMSの開発者のためのデータベース整備として、知識情報および学会等の新規技術情報の収集・体系化をおこなった。特に、本研究開発では、MEMSの高集積化、複合化に不可欠なMEMS-MEMS結合技術に関する知識データベースの構築をおこなった。

研究開発の成果) 平成18年度は、アクティブ方式およびパッシブ方式によるMEMSウエハもしくはチップの高精度な位置合わせ方法、デバイスの保護かつ異種材料の熱膨張係数の違いを考慮した接合後プロセスフローなど、ビルドアップ多層集積、チップレベル高精度接合に関し、国内外の最新の研究について、11月に米国バークレーで開催されたPowerMEMS2006、および1月にタイ国バンコクで開催されたIEEE NEMS、その他国内会議や、ジャーナル、書籍より情報収集をおこない、知識データベースに入力した。また、研究室において当該分野における基礎実験をおこなうために、備品として、ミスアライメント測定アライナ(特殊試料ホルダー:ユニオン光学)、高圧電源(HJPZ-0.3Px3:松定プレジジョン)、金属薄膜成膜装置(SC-701 Quick Coater:サンヨー電子)を購入した。シリコンウエハなど材料を購入し、基礎実験を開始した。入力知識データ実績30件を達成した。

平成19年度は、平成18年度に続き、アクティブ方式およびパッシブ方式によるMEMSウエハもしくはチップの高精度な位置合わせ方法、デバイスの保護かつ異種材料の熱膨張係数の違いを考慮した接合後プロセスフローに加え、液体の封入接合技術を含むビルドアップ多層集積、チップレベル高精度接合技術、さらにはポストボンディングプロセスに関し、国内外の最新の研究について、1月に米国アリゾナで開催されたMEMS2008、その他国内会議や、ジャーナル、書籍より情報収集をおこない、知識データベースに入力した。また、研究室において当該分野において基礎実験をおこなうために、備品として電気炉を購入した。シリコンウエハなど材料を購入し、液体封入接合技術およびパッシブアライメントに関する基礎実験を行った。入力知識データ実績30件を達成した。

平成20年度は、MEMSの高集積化、複合化に不可欠なMEMS-MEMS結合技術に加

え、ファイン MEMS 分野に大きく貢献すると考えられるナノ構造製作技術に関する知識データベースの構築を行った。特に、金、銀ナノ粒子の製作方法と、それを用いた接合方法、インクジェットや液相反応を利用したナノ構造製作に関する国内外の最新の研究について、2008年6月に台湾で開催された APCOT 2008、2009年1月にイタリアソレントで開催された MEMS2009、その他国内会議や、ジャーナル、書籍より情報収集をおこない、知識データベースに入力した。また、シリコンウエハなど材料を購入し、液体封入接合技術およびパッシブアライメントに関する基礎実験を行い、その成果を国際学会 MEMS2009 にて発表した。断面積が上部と下部で異なる（下部の断面積が上部より大きいとする）マイクロチャンバ内に、非圧縮性かつ不揮発性流体であるグリセリンを、大変形可能なシリコンゴムで封入した。接着剤には紫外線硬化樹脂を用いている。下部をマイクロアクチュエータで駆動すると、上部では、断面積の比に従い、変位が増幅されて出力される。この変位増幅機構を用いることで、触覚ディスプレイや、大流量バルブなど大変位を必要とするアプリケーションに使用可能な MEMS アクチュエータが実現される。特に、グリセリンを空気の混入なく封入するために、液体で封入する技術を確立した。通常のボンドアライナが使用できない液中接合のために、シリコンゴムの凹凸形状を利用したパッシブなアライメント技術を構築した。入力知識データ実績 30 件を達成した。また、知識データベースの質向上のために、他知識データベースに対し、ノート記入実績 50 件を達成した。

以上、平成 18～20 年度において、MEMS-MEMS 結合技術に関する基礎研究を行うとともに、国内外の学会および論文誌を調査し、90 件の知識データをデータベースに入力した。また知識データベースのあり方、内容について検討し、初心者への参考となる知識を共有化するための知識データベースの実現に貢献した。また、研究発表や、講演、および展示会での発表を通じ、当該研究とともに、高集積・複合 MEMS に関し収集・体系化された知識データベースの紹介を行い、その普及に貢献した。

②-3 高集積・複合 MEMS (ファイン MEMS) 知識データベースの構築

本研究開発では、ファイン MEMS プロジェクトの研究開発を通じて得られた成果・知識情報、国際会議情報等を体系的にデータベース化し、高集積・複合 MEMS 開発・製造を目指す研究者・技術者が容易に活用できる環境を提供することを目的とした。そこで、知識データベースのユーザが、特殊なアプリケーションや専門的記述言語の知識が無くともデータの閲覧・登録を容易に行え、かつ継続的な知識データの編集・更新も簡単で、複数のユーザが同時に共同作業できる環境の構築に取り組んだ。この環境を実現するインフラとして、フリー百科事典「ウィキペディア」が活用例として知られている Web ブラウザ/MediaWiki システムの導入を行った。インターネットに接続可能な環境であれば、同時に複数のユーザが、気軽にいつでもデータを閲覧・更新・意見交換できることが、この Wiki システムの大きな特徴である。図 5 に示すように、本研究開発で

は、Web ブラウザ/MediaWiki システムをデータ蓄積サーバ（MMC内）に実装し、さらに知識データの体系的格納を可能に、かつ支援できるデータベースのシステム、入力・表示・検索機能を開発することで、知識データの蓄積及びデータベースシステムの構築を行った。

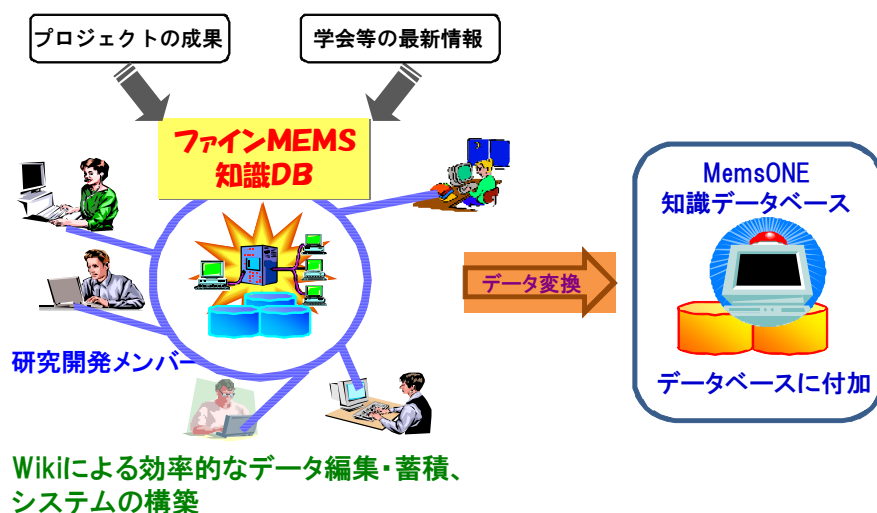


図5 ネット上での共同作業を主眼とする共有コラボレーション環境の構築

まず、平成18年度では、ファインMEMSに関する知識の体系化、データベースの枠組み、知識データの入力方式及び表示方式の設計等に関わる知識データベースの概念設計ならびに入出力方式等に係る技術的評価を踏まえた詳細設計の一部を実施し、知識データ収集用システムの構築と試験的な運用を実施した。さらに、平成19年度では、ファインMEMS知識データベースの詳細設計を完了し、知識データの集積およびシステムの構築作業を行った。また、データベース検索プログラムの開発および特許情報のデータベース化を実施した。そして、平成20年度では、ファインMEMSプロジェクト成果・知識情報の集積、登録データの質的向上を図りながら、知識データベースのWeb上の一般公開に向けたガイドラインの作成および一般公開用システムの構築作業を行った。また、高集積・複合MEMS知識データベースをMemsONE知識データベースへ付加することを目的としたデータ変換作業を実施した。

(1) 知識の体系化

知識の体系化として、ファインMEMSプロジェクトの研究開発項目から研究キーワードを抽出、整理を行い、表2のようなカテゴリに分類し、これをMediaWiki上でのデータ入力時の選択項目としてシステムに実装した。

一方、MemsONEは、4つの大分類項目（プロセス、デバイス、材料特性、解析）と、さらにそれぞれが中分類に細分化されたカテゴリで体系化されている。ファインMEMSの知識データをMemsONEの知識データに変換するために、カテゴリ分類の対応関係の明

確化を行った。その結果を表3に示す。

表2 ファインMEMS知識データベースにおける知識データのカテゴリ

- ・ ナノ機械構造
- ・ 選択的バイオ修飾
- ・ 選択的材料修飾
- ・ ナノ機能デバイス化
- ・ プロセス統合モノシリック
- ・ センサ新原理
- ・ CMOS/MEMS 多層
- ・ 3次元インターポーザル
- ・ 擬似SOC
- ・ MDW3次元垂直型配線
- ・ 自己組織化高密度実装
- ・ 異種材料多層集積
- ・ ビルドアップ多層集積
- ・ チップレベル高精度接合
- ・ 低ストレスダイシング

表3 ファインMEMSとMemsONEとのカテゴリ相関マトリクス

大分類	MEMS/ONE分類		MEMS/ナノ機能複合技術				MEMS/半導体一体形成技術						MEMS/MEMS高集積化結合技術						
	中分類	ナノ機械構造	MEMS/ナノ機能複合技術	選択的バイオ修飾	選択的材料修飾	ナノ機能デバイス化	プロセス統合モノシリック	センサ新原理	縦方向配線			横方向配線			異種材料多層集積	ビルドアップ多層集積		低ストレスダイング	
									CMOS/ME MS多層	3次元インターポーザル	接合SOC	MD*3次元垂直型配線	自己組織化高密度実装	ビルドアップ多層集積		チップレベル高精度接合			
プロセス	成膜	◎	◎	◎	◎	◎		◎		◎									
	ドライエッチング	◎	◎	◎	◎	◎		◎		◎				◎					
	ウェットエッチング	◎	◎	◎	◎	◎		◎		◎									
	洗浄	◎	◎	◎	◎	◎		◎		◎									
	リソグラフィ	◎	◎	◎	◎	◎		◎		◎				◎					
	接合							◎						◎	◎		◎		
	不純物拡散・熱処理	◎			◎	◎		◎						◎	◎				
	パッケージ							◎						◎	◎				
	マルチプロセス							◎						◎	◎				
その他						◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎				◎			
デバイス	制御	光制御	◎		◎		◎				◎			◎	◎		◎		
		電気制御	◎		◎														
	感知	流体制御																	
		物理センシング	◎	◎			◎	◎	◎		◎				◎	◎			
	可動構造	化学バイオセンシング																	
		静電駆動	◎			◎	◎	◎	◎		◎				◎	◎		◎	
	固定構造	電磁駆動																	
マイクローブ		◎	◎		◎	◎		◎		◎				◎	◎				
マイクロニードル																			
材料	半導体材料					◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
	酸化膜/窒化膜					◎			◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
	ポリマー								◎		◎			◎	◎	◎	◎	◎	
	ガラス/セラミクス								◎			◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
	磁性材料											◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
	圧電材料							◎				◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
	形状記憶合金																		
	その他							◎				◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
材料特性	基本特性	◎			◎							◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
	力学特性	◎			◎	◎		◎											
	熱特性	◎			◎	◎		◎						◎	◎				
	電気特性			◎	◎	◎		◎	◎		◎								
	光学特性	◎	◎														◎		
	圧電特性							◎				◎	◎						
解析	応力ひずみ解析				◎			◎						◎				◎	
	接合解析							◎						◎		◎		◎	
	プロセス解析																		
	半導体解析																		
	伝熱解析																		

(2) 知識データ収集用システムの構築

上述の「知識の体系化」の検討結果に基づき、知識データを格納するデータベース及び知識データの入力・表示方式の設計を行い、さらにデータの入力およびウェブを通じて広く公開する際に必要な機能について開発を行った。図6には、MMC内に構築した知識データ収集用システムの概要を示す。この収集システムは、2006年12月に運用を開始し、本事業参加メンバー（委託・助成事業者・再委託大学）がインターネット経由で、直接知識データを入力・参照することが可能となった。また、このシステムの改善については、ファインMEMS知識DB委員会活動(②-4 プロジェクトの推進並びに本開発事業の運営管理支援参照)を通じて、データ収集進捗管理、学会等の最新情報のデータベース化と並行して取り組んだ。

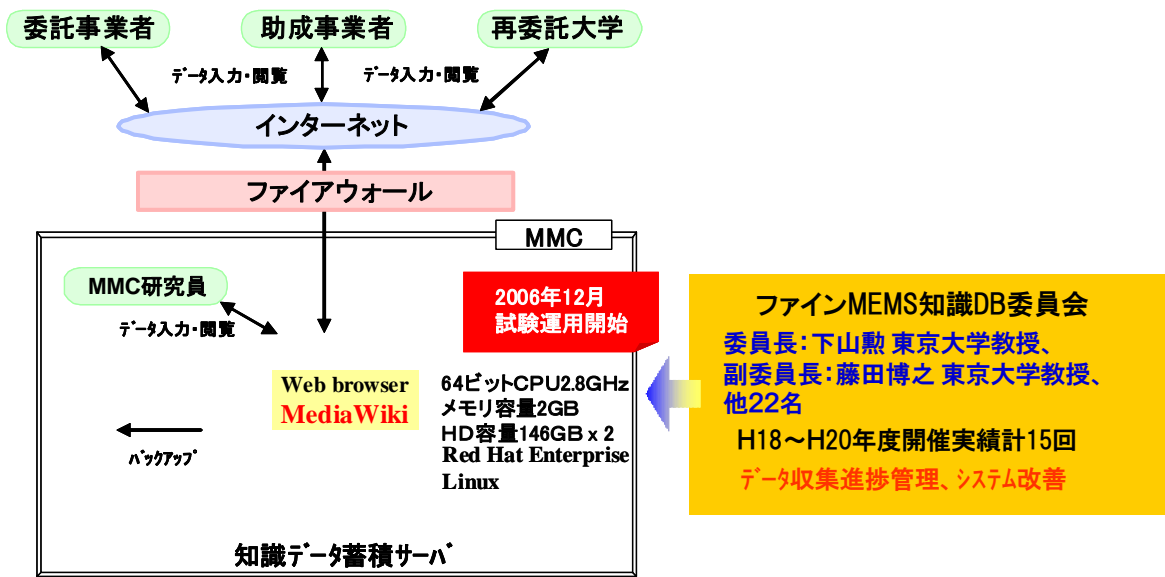


図6 知識データ収集用システムの概要

次に、知識データ収集用システムに実装した機能の概要を以下に示す。

図7-1にはシステムのメインページを示す。



図7-1 データベースメインページ画面

図7-2には、知識データ入力（新規事例入力）画面を示す。この画面では、事例タイトル、カテゴリ（表3）を選択し、知識データ（事例）タイトルを入力後、新規事例入力ボタンを押すことで、選択したカテゴリに対応する編集画面を表示させ、各種情報を入力・登録することができる。編集画面で入力したデータ例を図7-3に示す。

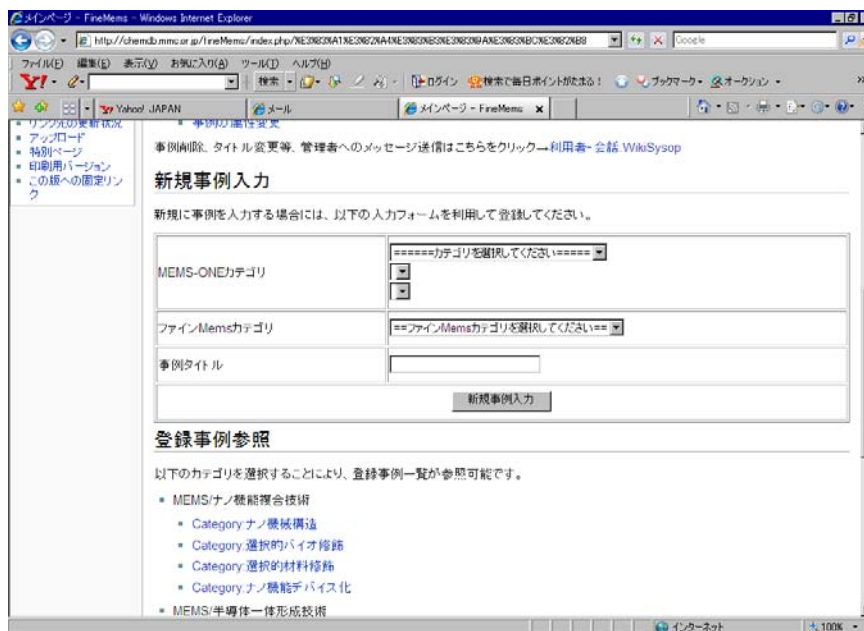


図7-2 知識データ入力画面



図7-3 編集画面で入力した知識データの例

また、このシステムでは、ファインMEMSカテゴリでのデータ集積状況およびMemsONEカテゴリ分類でのデータ集積状況を表示させる機能を実装した。図7-4には、ファインMEMSカテゴリ毎の登録数を表示した例を示し、図7-5には、MemsONEカテゴリ分類でのデータ集積状況を表示した例を示す。

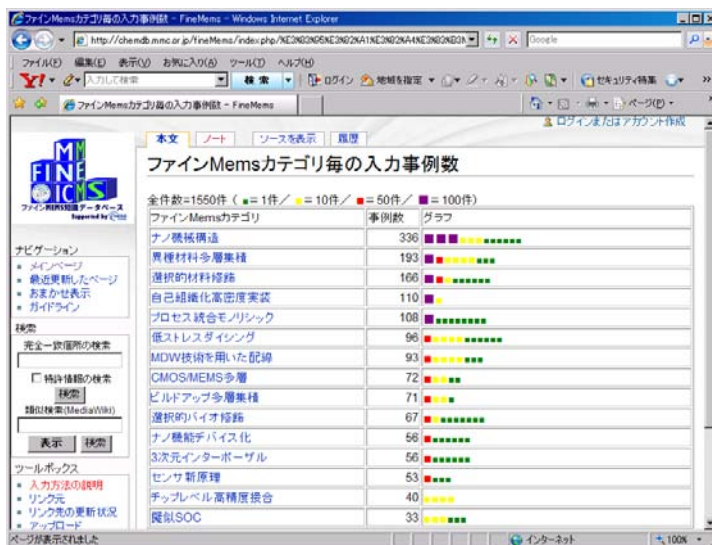


図7-4 ファインMEMSカテゴリ別の入力ランキング表示例



図7-5 MemsONEカテゴリ別の入力ランキング表示例

さらに、本システムでは、データベースの使い勝手を高めるために、日本語の検索精度を高めた検索ボックスを実装した。このボックスでは、登録データのタイトル、及び本文について検索ワードの完全一致部分を検索することができ、空白区切りでAND検索が可能である。さらにこの検索機能では、特許データベース対象・非対象を選択可能とし、特許データの全文検索結果を網羅することが可能である。図7-6に検索実行の表示例を示す。

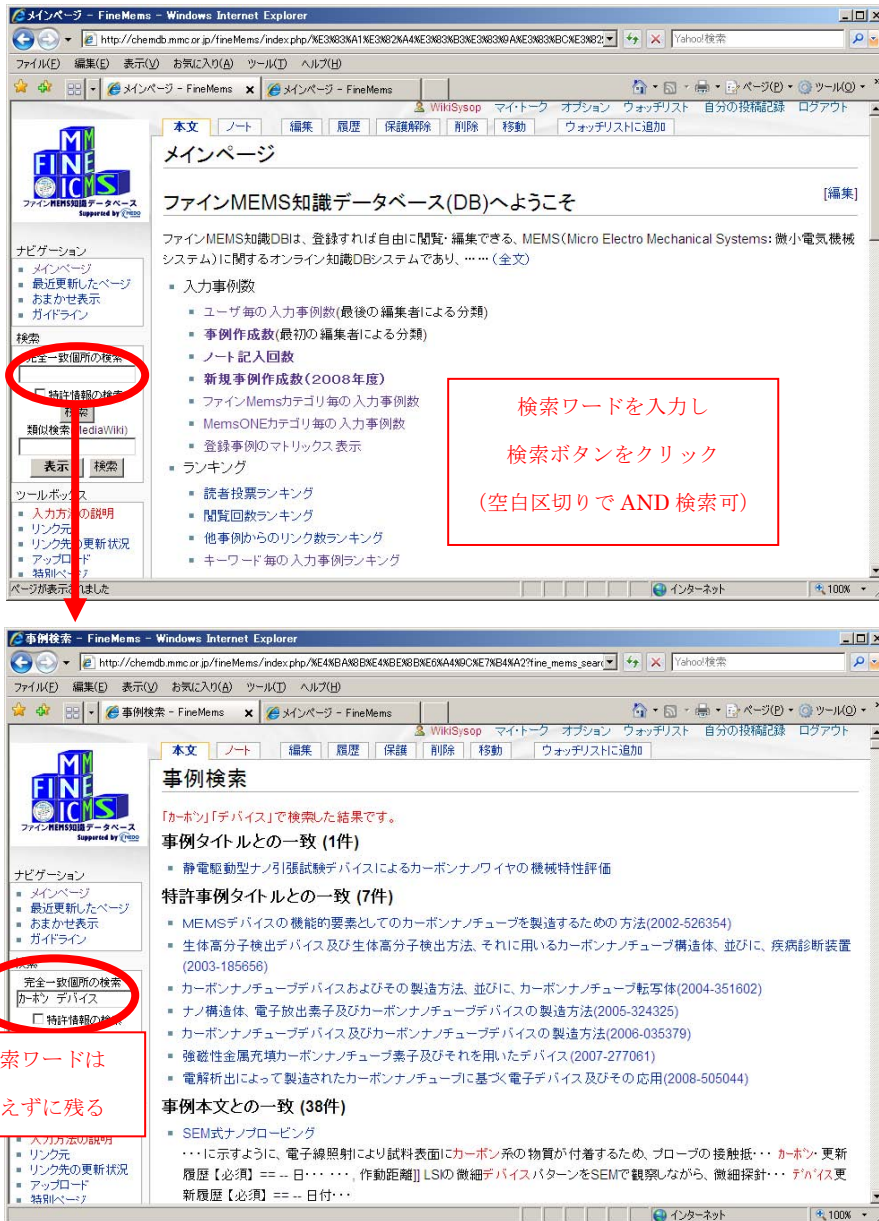
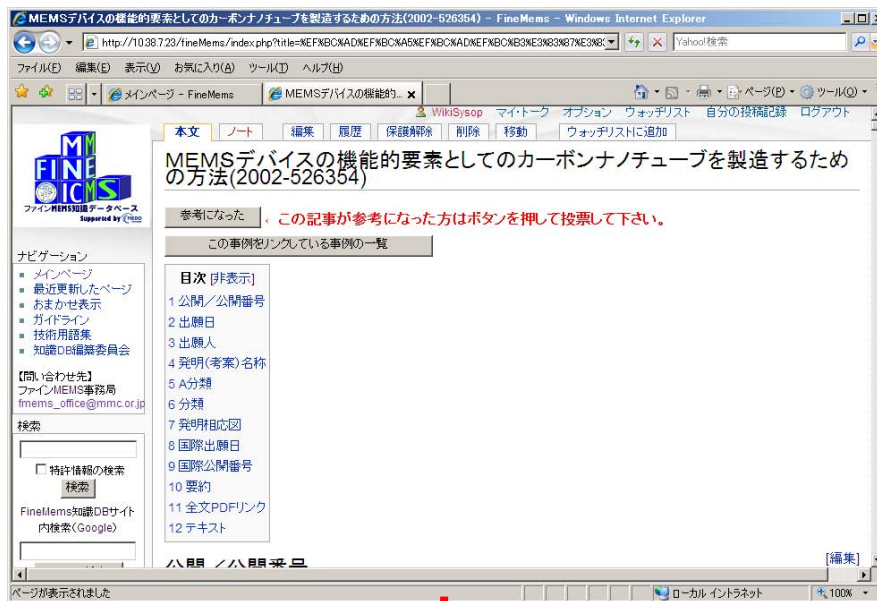


図 7-6 日本語検索実行の画面表示例

また、特許調査のデータベースは、図 7-1 のデータベースメイン画面の「特許調査」から、特許情報一覧の Web ページにリンクしており、公開年別一覧、分野別一覧、及び欧米特許分析資料集の閲覧を可能とした (図 4 参照)。図 7-7 には、特許データの登録例を示す。



スクロールして画面下方へ

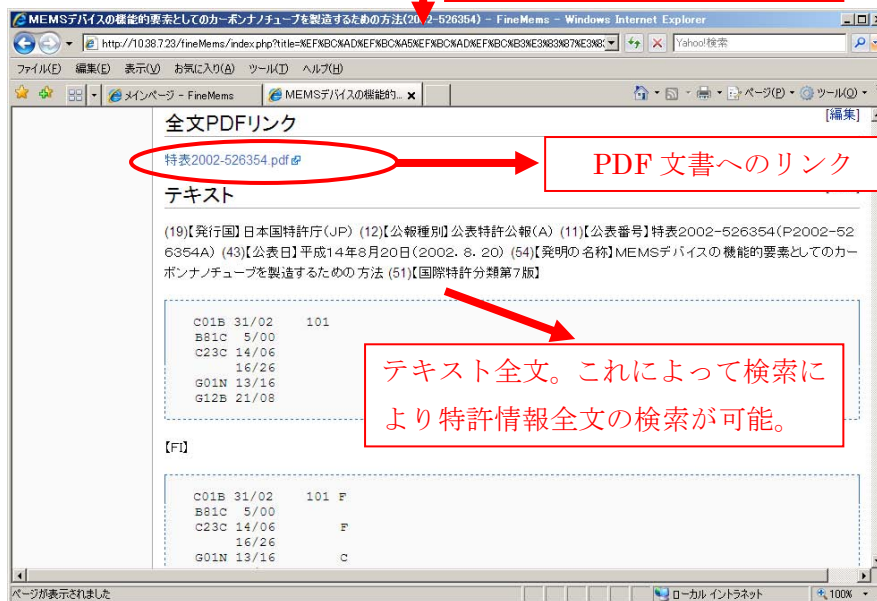


図 7-7 特許データの登録例

(3) Web上の一般公開に向けたガイドライン作成および一般公開用システムの構築と運用

データベースの著作権、個人情報保護等についての弁護士見解を踏まえ、公開用データベースに掲載する利用ガイドライン、利用規約を作成し（弁護士による条文精査も行き）、実装を行った。図 8-1 に実装する利用ガイドラインの画面表示、図 8-2 には利用規約の画面表示を示す。



図 8-1 公開用知識データベースに実装する利用ガイドラインの画面表示



図 8 - 2 公開用知識データベースに実装する利用規約の画面表示

次に、一般公開用メインページ（図8-3）と一般公開用システムの機能を以下に示す。

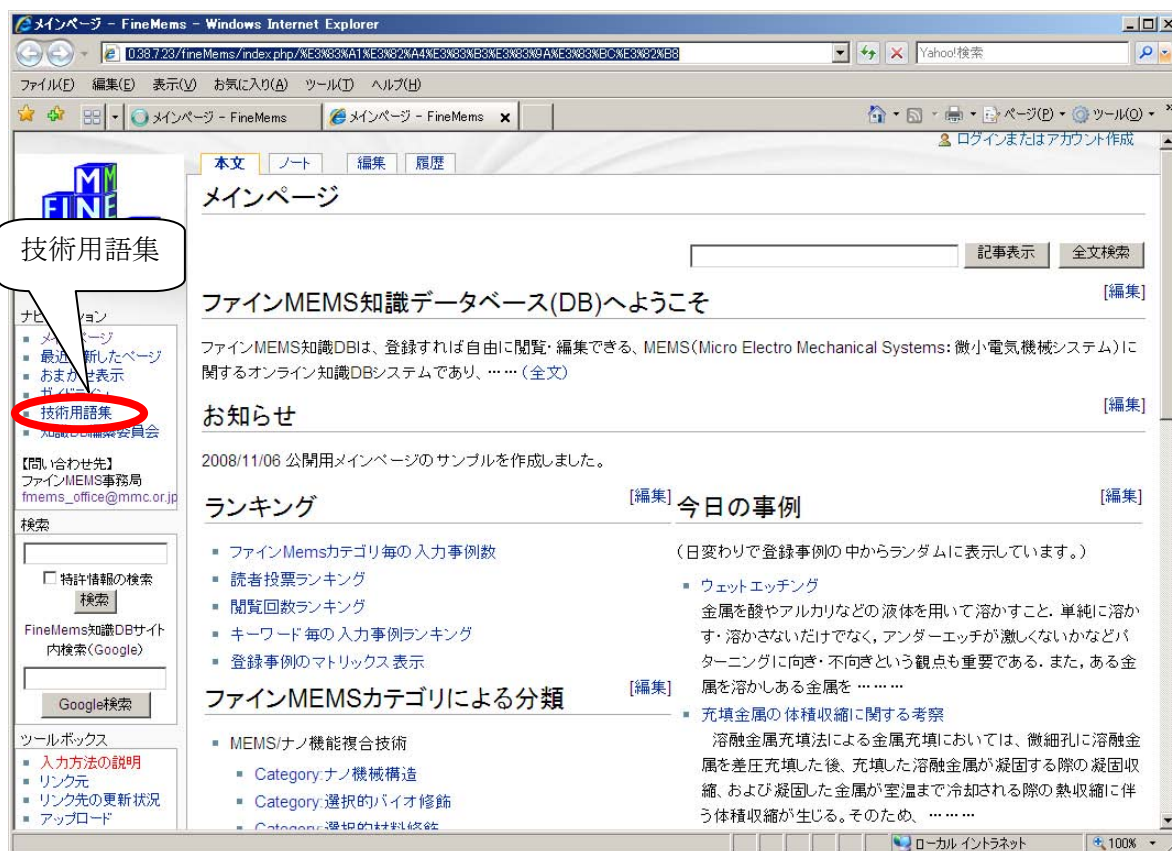


図8-3 公開用知識データベースのメインページ

一般公開用のデータベースでは、上述の利用規約・ガイドライン以外に、一般ユーザにとって有用な機能、表示として、MEMSに関する略語等の技術用語を閲覧・登録できる技術用語集の実装、グーグル検索ボックスの配置、ファインMEMS知識データベースの概要紹介の表示、新規登録事例の表示、お知らせの表示、ファインMEMSカテゴリ別のランキングの表示、ファイン知識DB委員会のメンバーが選んだキーワードによるランキングの表示等を追加した。さらに、一般ユーザがデータベースの閲覧・編集ユーザになるための登録機能を実装した。図8-4に技術用語集の表示画面を示し、図8-5には、ユーザ登録のアカウント名とパスワード作成画面（利用規約および利用ガイドラインの承認を求める画面構成）を示す。

また、一般公開用知識データベースの運用については、ファインMEMS知識DB委員会を通じて検討し、知識データ収集システムと同様に、プロジェクト終了後も継続してMMC内にサーバを置き、MMCが管理者となって、サーバの管理、データのバックアップ、著作権侵害等、法律に抵触する内容の監視、一般ユーザの登録アカウントの管理、各種問い合わせ対応等を行うことを決めた。



図 8-4 技術用語集の表示画面

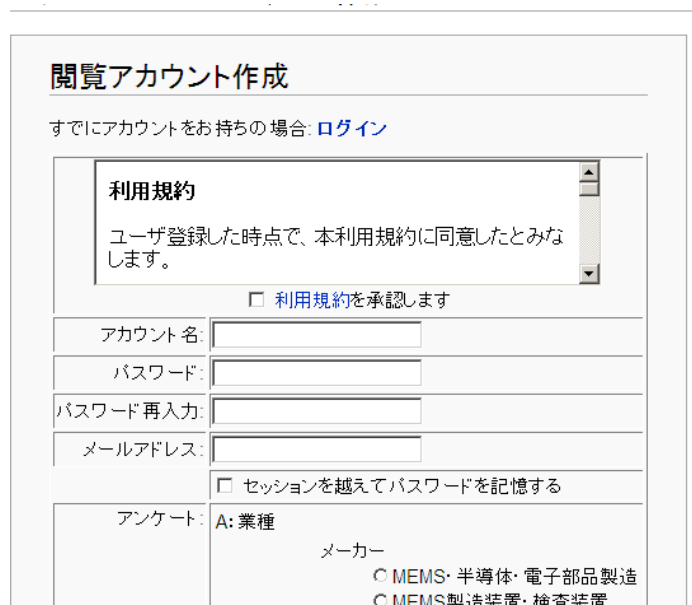


図 8-5 ユーザ登録のアカウント作成画面

(4) MemsONE 知識データベースへのデータ変換

データベースの表示ソフトウェア（ファインMEMS システム：MediaWiki、MemsONE システム：MemsONE 独自のソフトウェア）およびデータ入力形式が異なるため、データ変換ツールを作成し、ファインMEMS 知識データ（全 1557 件）の MemsONE 知識データへの変換を実施した。

MemsONE 知識データベースではデータの入力を XML 形式（Extensible Markup Language 形式）のデータファイルから入力することになっているため、その XML 形式のデータファイルにファイン MEMS の知識データを変換して入力する必要がある。以下に変換プロセスと図 9-1 にフローを示す。

① 変換スクリプトの作成

ファイン MEMS のテンプレートの項目に従って MemsONE 知識データベース入力用 XML ファイルを作成する変換スクリプトを作成した。（MemsONE 知識データベース入力用 XML ファイルを作成するため、ファイン MEMS 知識データベースでは知識データの入力用のテンプレートの項目を MemsONE 知識データベースの入力用 XML 形式の項目と一致させてある（図 9-2）。）

② MemsONE 入力用 XML ファイルの作成

作成したスクリプトを用いて、ファイン MEMS 知識データから MemsONE 知識データ入力用 XML ファイルを作成する。

③ MemsONE 知識データベースへの入力

MemsONE 知識データ入力用 XML ファイルを使って MemsONE 知識データベースへ知識データを入力する。

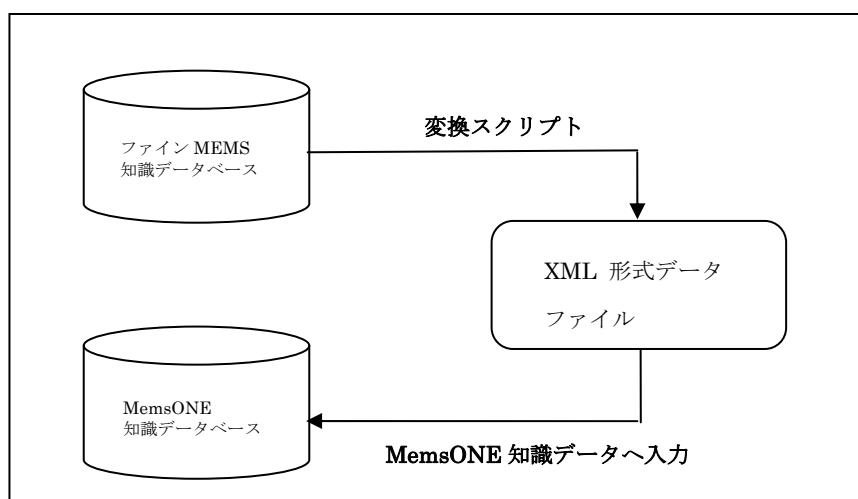


図 9-1 MemsONE 知識データベースへの変換

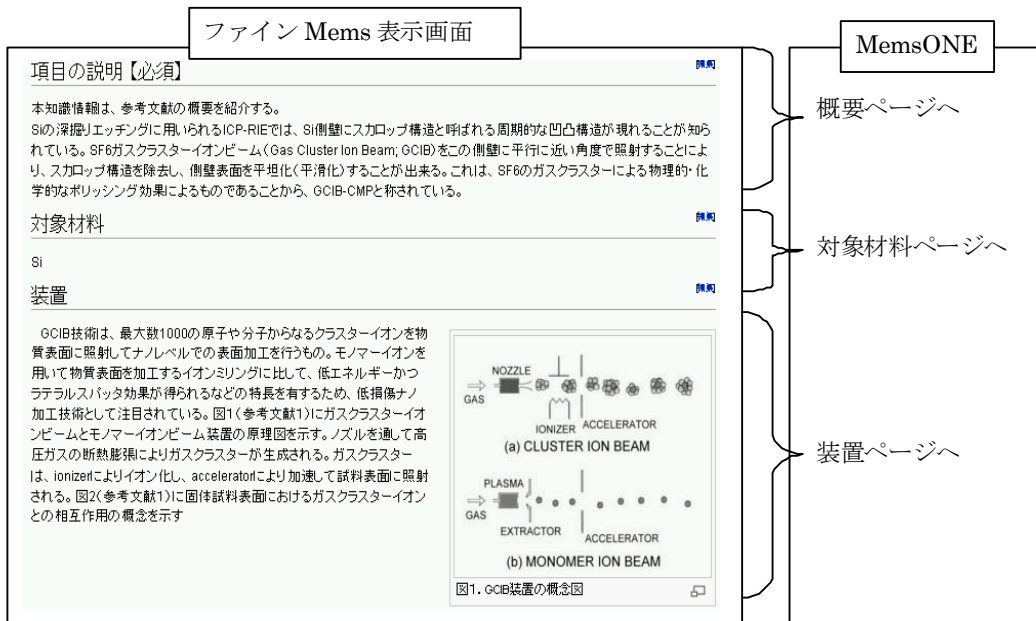


図 9-2 データ入力形式の違い

「X線二重露光法による PMMA 3次元加工技術」をサンプルとして MediaWiki を用いた Web ベースのファイン MEMS 知識データから MemsONE 知識データに変換した結果を図 9-3 に示す。



図 9-3 (a) ファイン MEMS 知識データベースの表示例

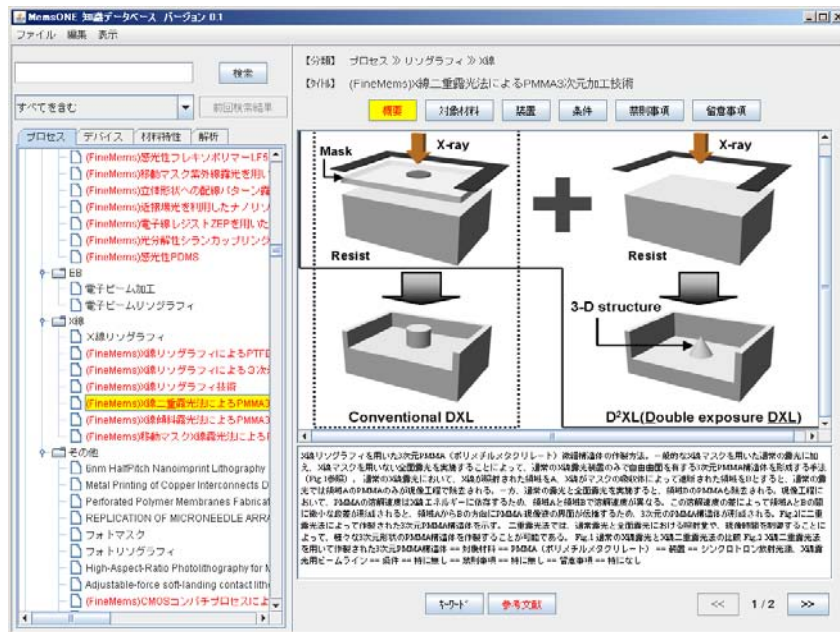


図 9 - 3 (b) MemS ONE 知識データベースへ変換後の表示例

②-4 プロジェクトの推進並びに本開発事業の運営管理支援

高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクトの参画事業者の研究者、再委託大学の研究者、および有識者から成る「高集積・複合MEMS知識データベース委員会（委員長 下山勲 東京大学教授、副委員長 藤田博之 東京大学教授、副委員長 三原孝士 オリンパス株式会社、副委員長 入江康郎 みずほ情報総研株式会社、委員 20名）」（以下「ファインMEMS知識DB委員会」という）を設置し、知識データの収集・整理、データベースシステムの仕様・機能、及び公開用データベースの運営方針・普及活動等について広範な検討を行った。平成18年度は、9月、12月、2月に計3回、平成19年度は、4月、6月、9月、10月、12月、2月に計6回、平成20年度も、前年と同様に、4月、6月、9月、11月、12月、3月に計6回開催した。また、本開発プロジェクトの参画事業者の研究開発責任者クラスから成る「ファインMEMSプロジェクト推進連絡会」（座長 下山勲 東京大学教授、副座長 杉山進 立命館大学教授、委員 15名（平成18年度）、16名（平成19～20年度））を設置し、研究項目別の進捗状況の把握、研究項目間の調整、研究開発成果の普及活動等に関わる運営支援をすることにより、本プロジェクト全体の円滑なる推進を図った。平成18年度は、7月、11月、2月の計3回、平成19年度は、6月、8月、11月、2月に計4、平成20年度は、5月、8月、12月、2月に4回開催した。

2-4. 開発成果のまとめ

(1) 目標の達成度

	目標	達成度	備考
基本計画目標	全研究開発項目に係わる知見のDB化	○	1500件超の知識データをDB化 特許情報4500件超をDB化
基本計画目標	MemsONE知識DBへの実装	○	全データをMemsONEデータとして統合
自主目標1	知識の体系化	○	ファインMEMS/MemsONE カテゴリの関連マトリックスを構築
自主目標2	知識データ収集用システム構築	○	Wikiベースの知識データ収集用システムを マイクロマシンセンターに構築
自主目標3	DB入力・表示機能開発	○	データ入力初期設定機能、各種ランキング ・新着知識表示、全文検索機能を実装
自主目標4	公開用DBシステムの構築	○	一般ユーザの利用規約、ユーザアカウント作成 機能等を実装し、マイクロマシンセンターに構築
自主目標5	MemsONEデータ入力形式に変換	○	変換スクリプトを作成し、全データをMemsONE データに変換

ファインMEMSプロジェクトの研究開発項目にかかわる研究成果（研究データ、科学的知見、および文献情報）を、三年間合計で1000件以上収集し、体系的にデータベース化するとともに、収集した知識データをMEMS用設計解析支援システム(MemsONE)の知識データベースに付加することを目標とした。本研究開発では、インターネットを通じて複数のユーザが自由記述・閲覧可能なWebブラウザ/MediaWikiシステムをデータ蓄積サーバ(MMC内)に実装し、さらに知識データの体系的格納を可能に、かつ支援できるデータベースのシステム、入力・表示・検索機能を開発することで、知識データの蓄積及びデータベースシステムの構築を行った。このシステムを用いて、ファインMEMSプロジェクトのカテゴリおよびMemsONEのカテゴリで分類し、目標をはるかに上回る1500件超の知識データをデータベース化することができた。また、ファインMEMSの知識データは、データ変換ツールの開発により、MemsONEシステムの知識データとして変換を完了した。

(2) 成果の意義

高集積・複合MEMS開発・製造を目指す研究者・技術者が、インターネットを介して自由にDBにアクセスでき、DBの可視化・検索機能の搭載により活用し易く、アプリケーションの知識がなくても知識データの更新が容易なDBシステムを実現した。

(3) 知的財産等の取得

なし。

(4) 成果の普及

①展示会による普及活動

第17回マイクロマシン展 (2006年11月7日～9日、東京国際フォーラム)

第18回マイクロマシン展 (2007年7月25日～27日、東京ビッグサイト)

国際ナノテクノロジー総合展 nano tech2008 (2008年2月13日～15日、東京ビッグサイト)

第19回マイクロマシン展 (2008年7月30日～8月1日、東京ビッグサイト)

第20回マイクロマシン展 (2009年7月29日～7月31日、東京ビッグサイト)

②ファイン MEMS プロジェクト成果発表会の開催 (2007年7月27日、2008年7月31日、2009年7月31日、東京ビッグサイト)

③ファイン MEMS ホームページによる広報活動

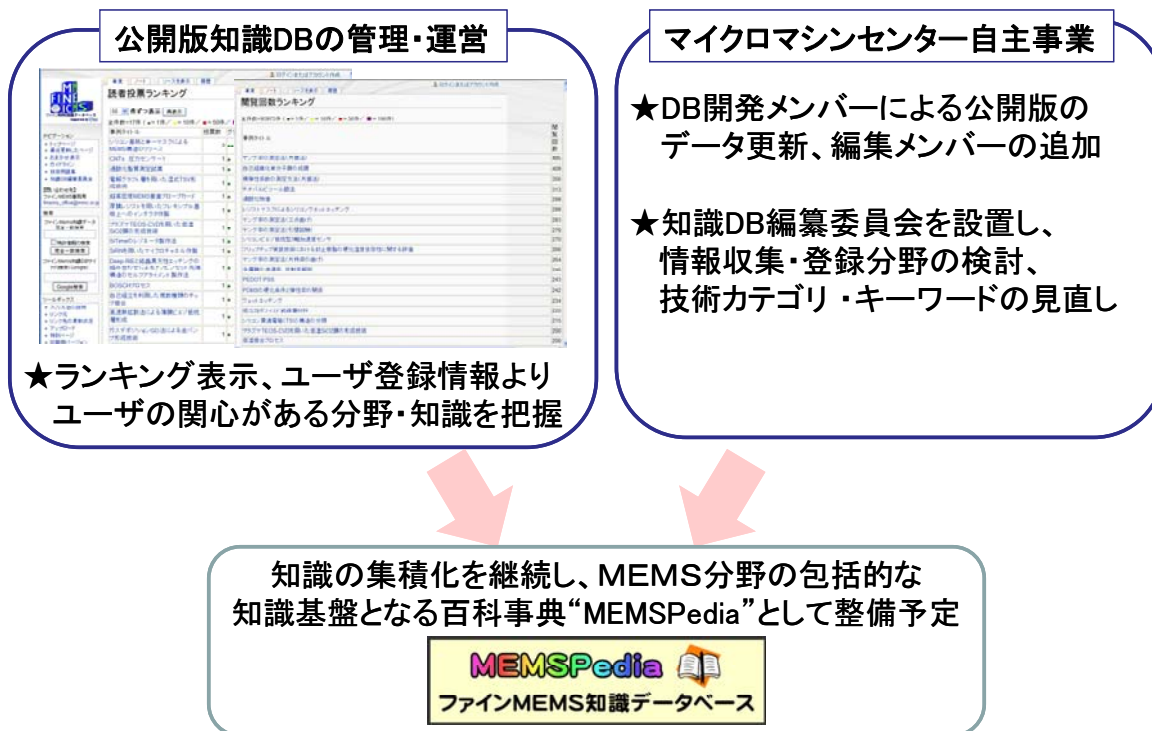
マイクロマシンセンターのホームページ内に開設した「ファイン MEMS」のホームページを漸次更新し、当プロジェクトの活動内容を一般公開した。

④知識データベースの一般公開

マイクロマシンセンターのホームページ内に開設した「MEMSPedia」のホームページに2009年6月第2週より知識データベースの一般公開を開始した。

3. 実用化・事業化の見通し

(1) 成果の実用化可能性



知識の集積化を継続し、MEMS分野の包括的な知識基盤となる百科事典“MEMSPedia”として整備予定

(2) 波及効果

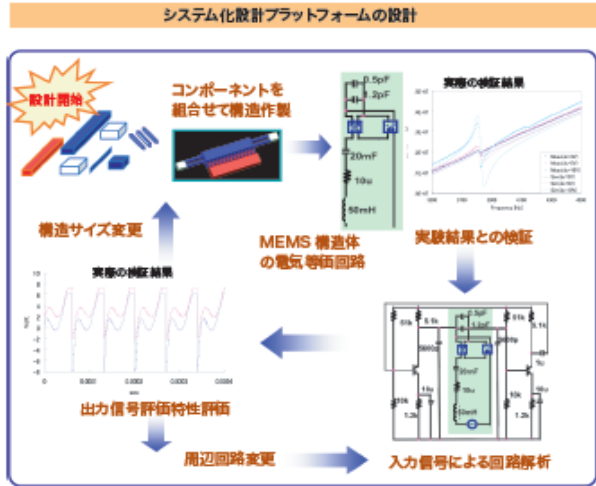
知識データベースを整備することにより、今後成長が期待される自動車、情報通信、安全・安心、環境、医療等の分野において必要不可欠となる、小型・省電力・高性能・高信頼性の高集積・複合MEMSの製造技術に関する高度な知見やデータを容易に利用することが可能となり、様々なMEMSの創出、MEMS開発・製造効率の向上、さらにMEMS研究者・技術者の裾野拡大に寄与することが期待される。

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

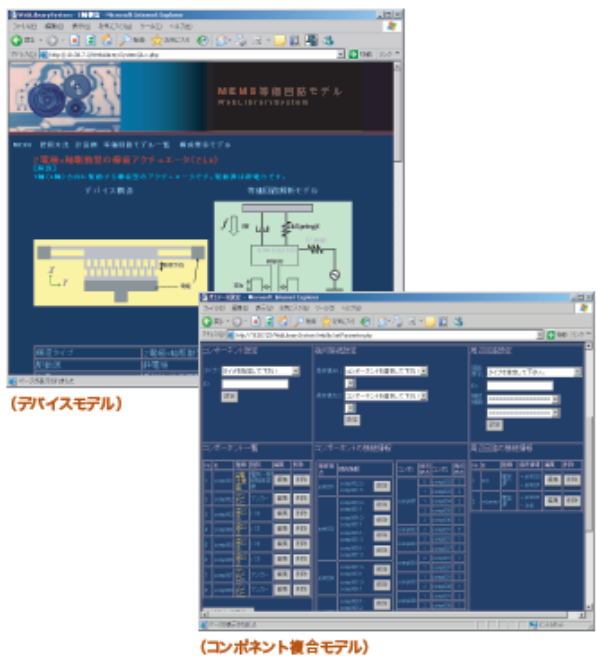
1. コンポーネントで構成される MEMS 構造体の電気等価回路抽出方法を世界に先駆けて開発、実験的に検証。
2. コンポーネントをライブラリ化し、入力信号（加速度、圧力等外力）から周辺回路を含めた電気回路システムとして直接的に出力信号（電気信号）を解析可能な従来にない設計環境を構築。



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！



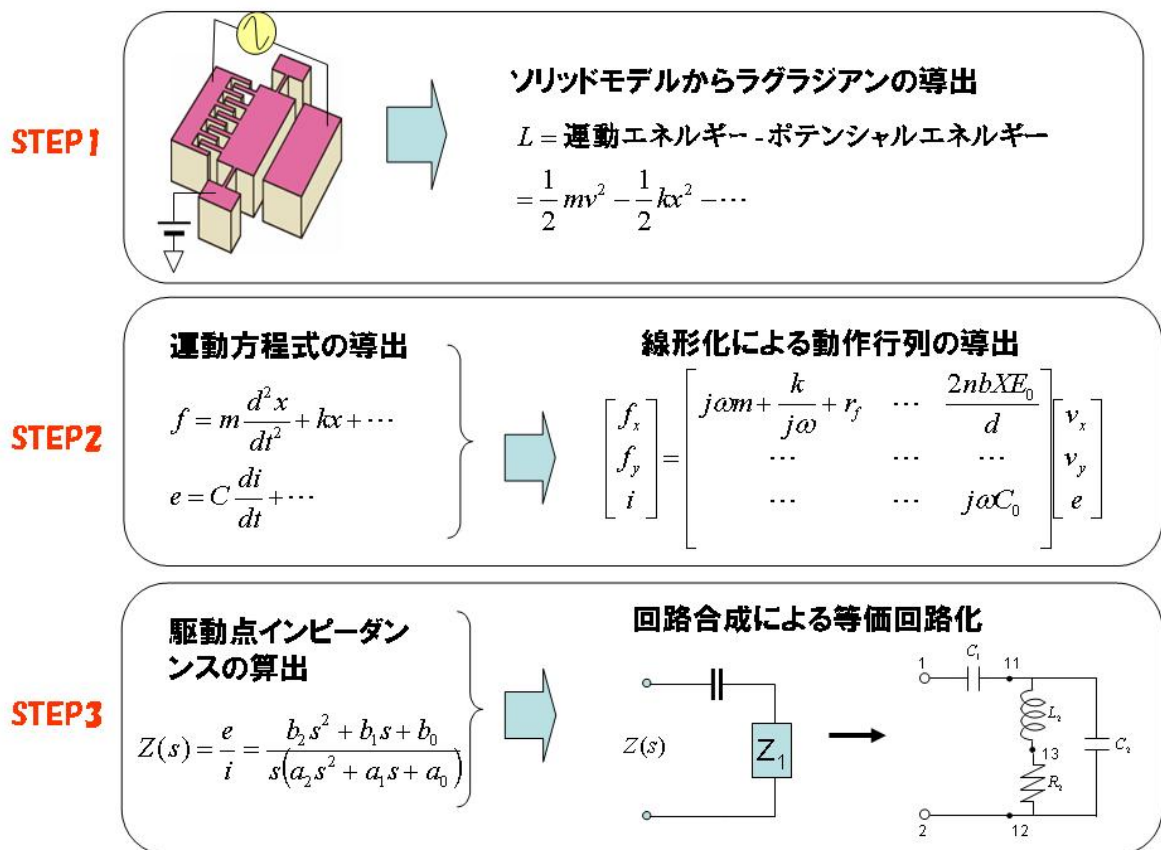
2. 成果の詳細

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)

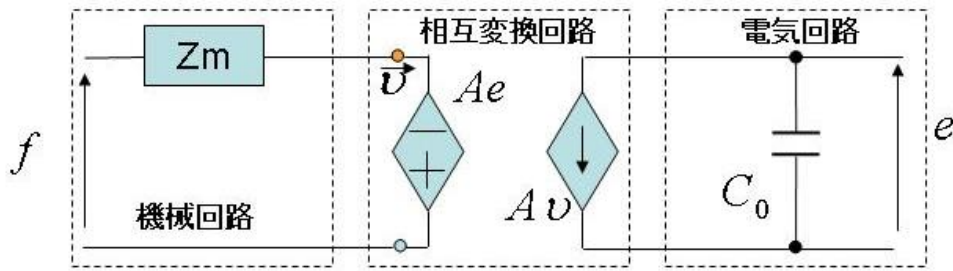
設計プラットフォームの汎用性を高めるためには、任意のデバイス形状に対して等価回路を出力できるようにする必要がある。そこで電気端子の他に、機械端子を有する回路モデルを構築した。機械端子は自由度に応じた数だけ有しており、当該自由度のどの方向に対しても機械構造の追加、外力の入力が可能となった設計となっている。MEMS の等価回路としてはこの点が従来にない新しい点であり、本プラットフォームの特徴でもある。梁等の各構造体についても、各自由度に応じた機械パラメータが自動的に算出され、それぞれの方向に対する等価回路が生成される。ここでは、電気機械エネルギー変換系を有する MEMS デバイスの外力有り接続モデ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

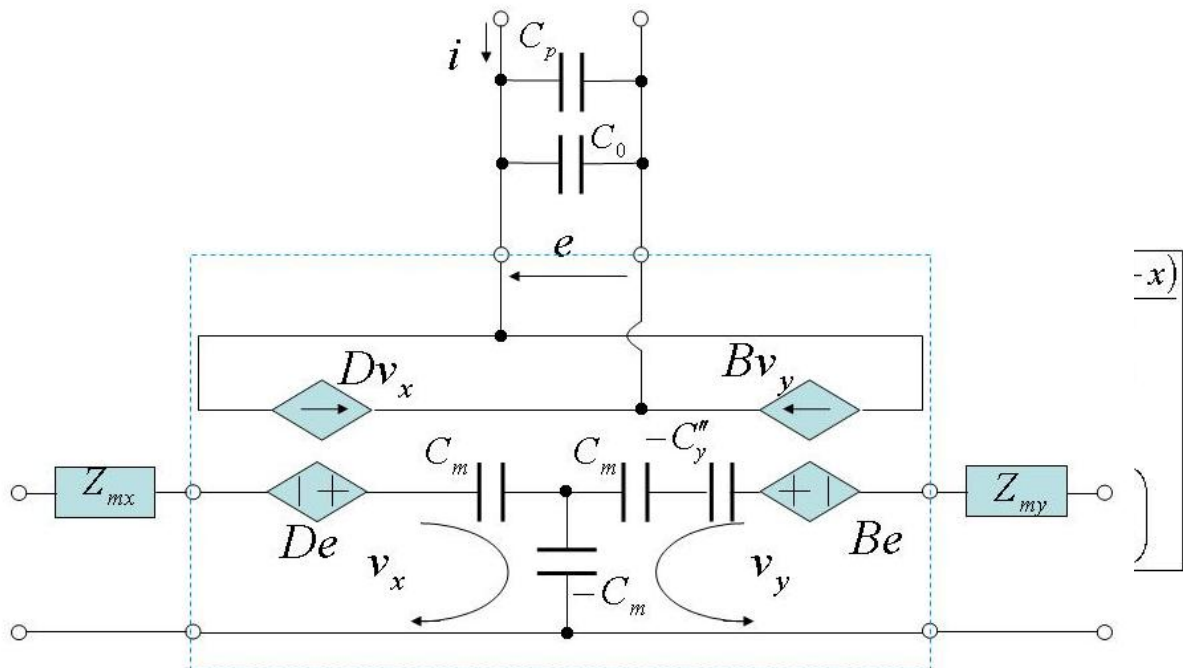
$$\begin{pmatrix} f_1 \\ i_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{f1} + j\omega m + \frac{k}{j\omega} & -\frac{C_1 E_1}{X_1} \\ \frac{C_1 E_1}{X_1} & j\omega(C_1 + C_{p1}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ e_1 \end{pmatrix}$$

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

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。

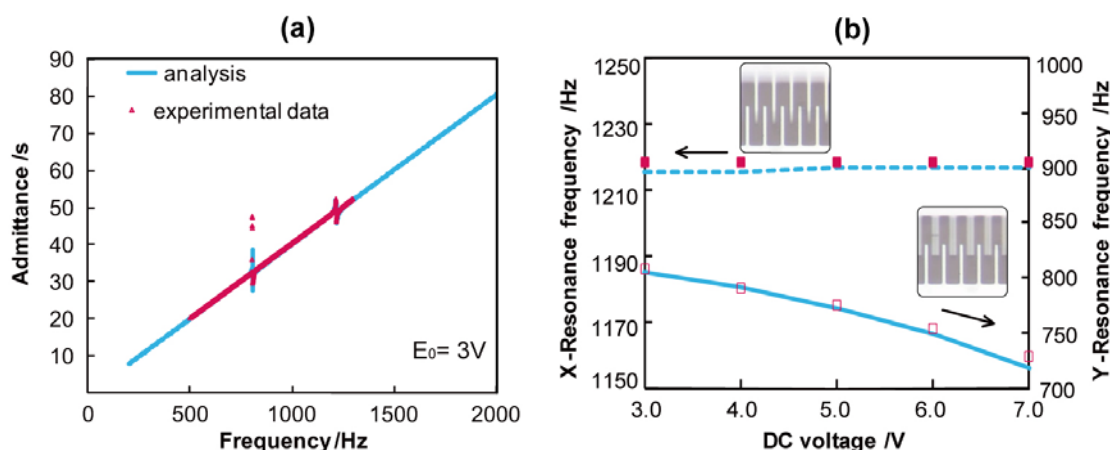
また、本プロジェクトでは音響回路についても等価回路化を行ったが、音響回路について従来使われているモデルを踏襲し、本プロジェクトにおける他のモデルとの接続を考慮して、音響端子と機械端子を有するモデルとしている。

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。

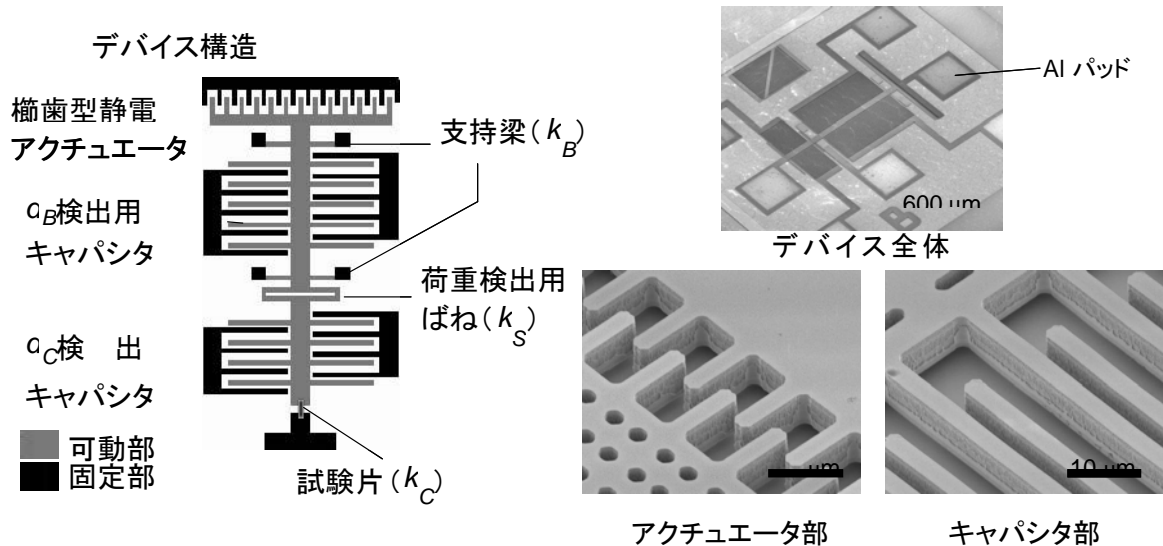


図⑤.2-3a)-1 2自由度櫛歯アクチュエータのアドミッタンス特性と速度共振の直流バイアス依存性

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。

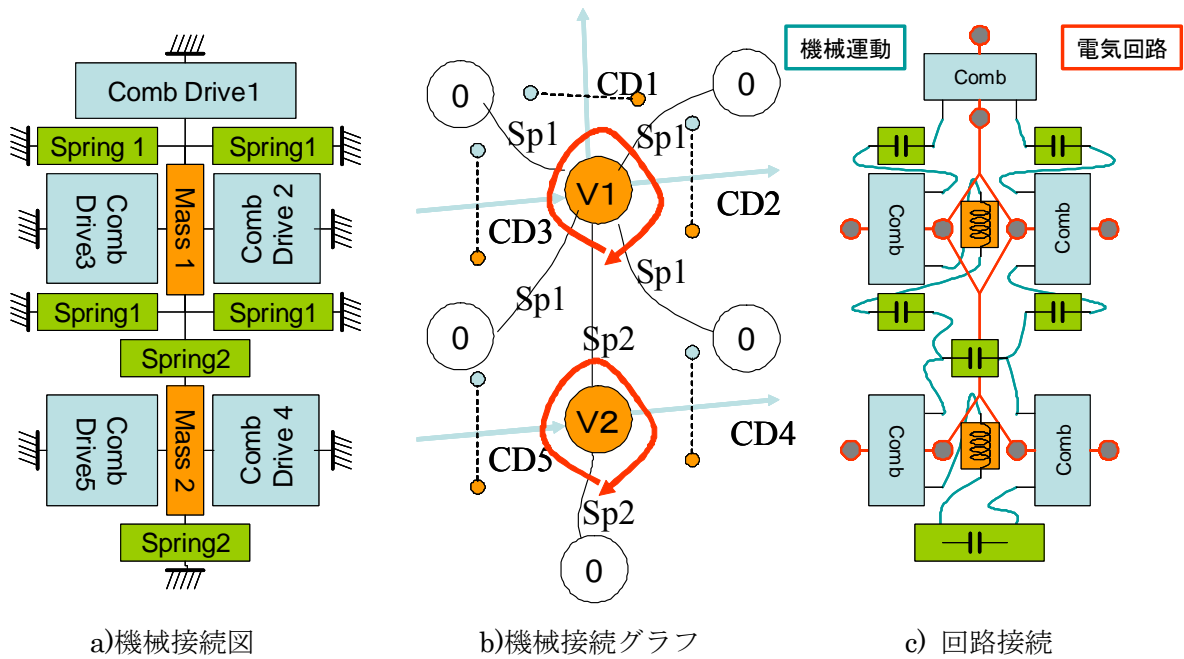


図⑤.2-3b-1 静電櫛歯デバイス

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．



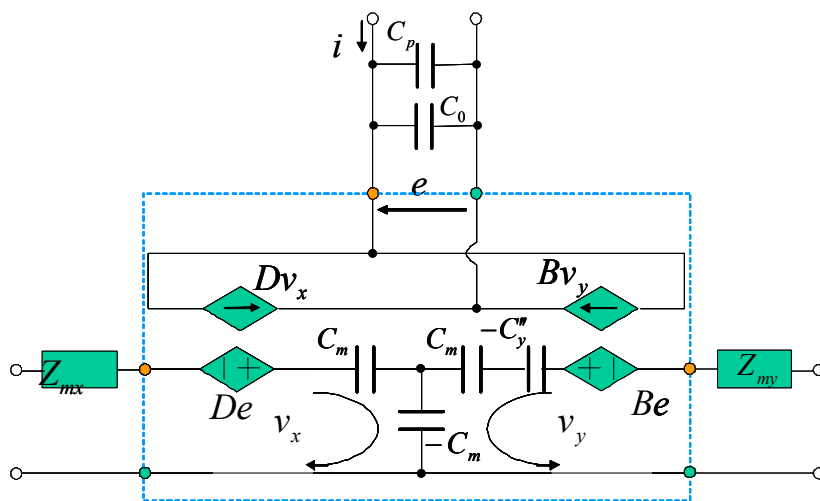
図⑤.2-3b-2 コンポーネント接続の変換

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。



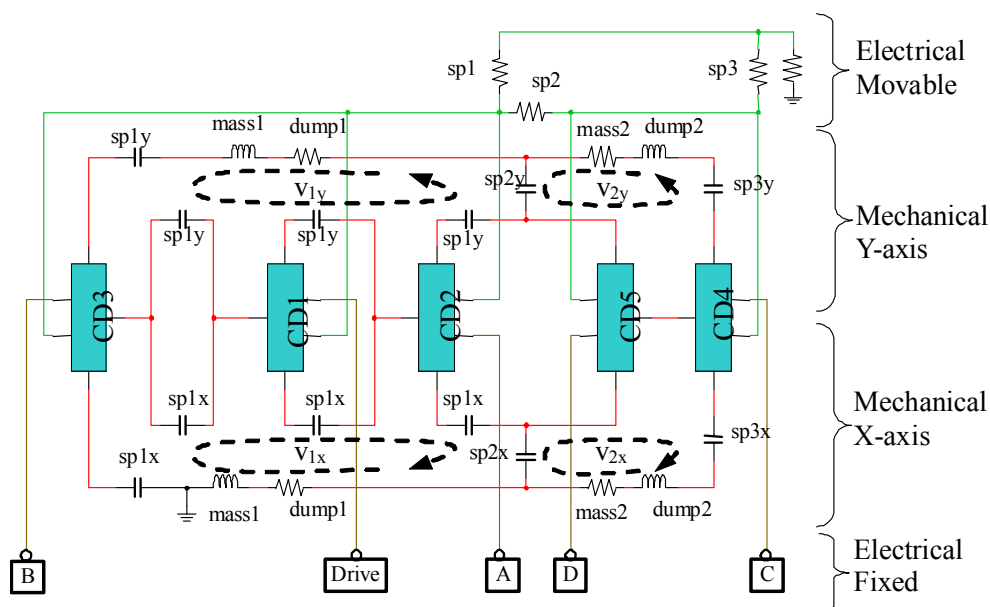
図⑤.2-3b-3 2自由度櫛歯トランスデューサの等価回路

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

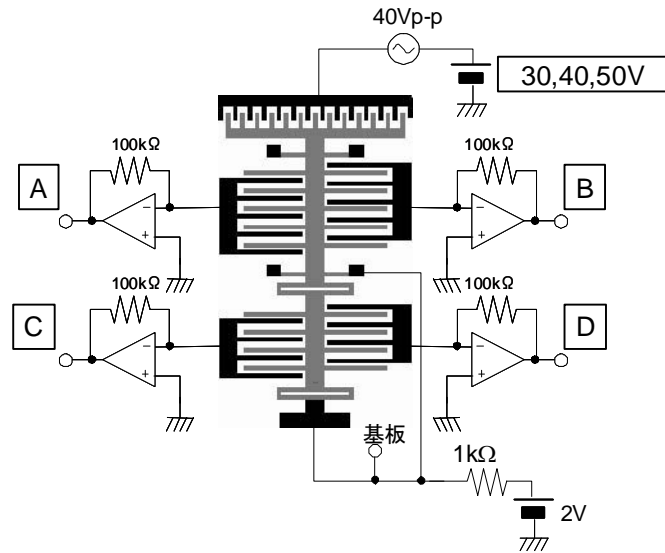
以上の変換によって導出された等価回路を図⑤.2.3b-4に示す。5つの静電トランスデューサに対して上部に機械系 y 方向の等価回路，下部に機械系 x 方向の等価回路が示されている。それぞれ、2つのマスに対応する2つの閉回路が形成されている。



図⑤.2-3b-4 デバイス等価回路

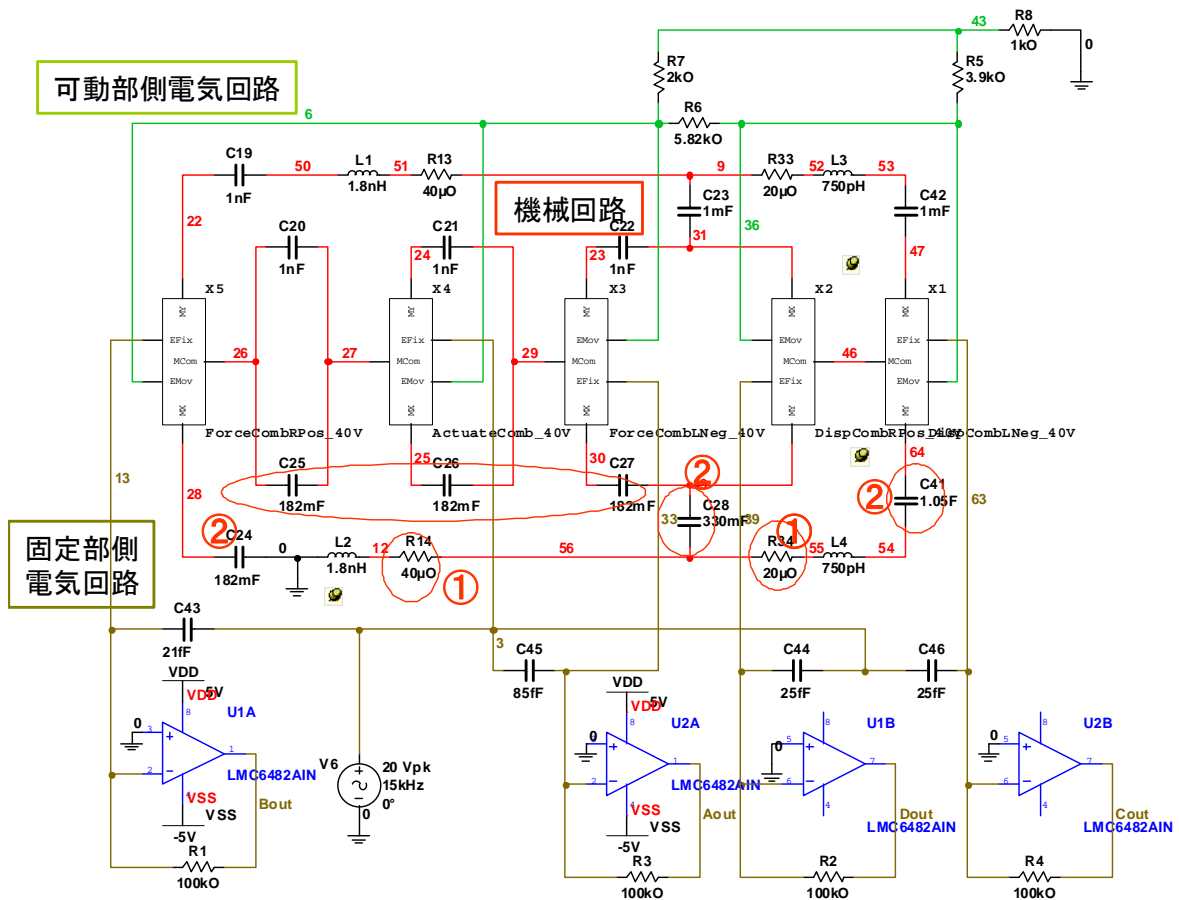
iv) 実験

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。



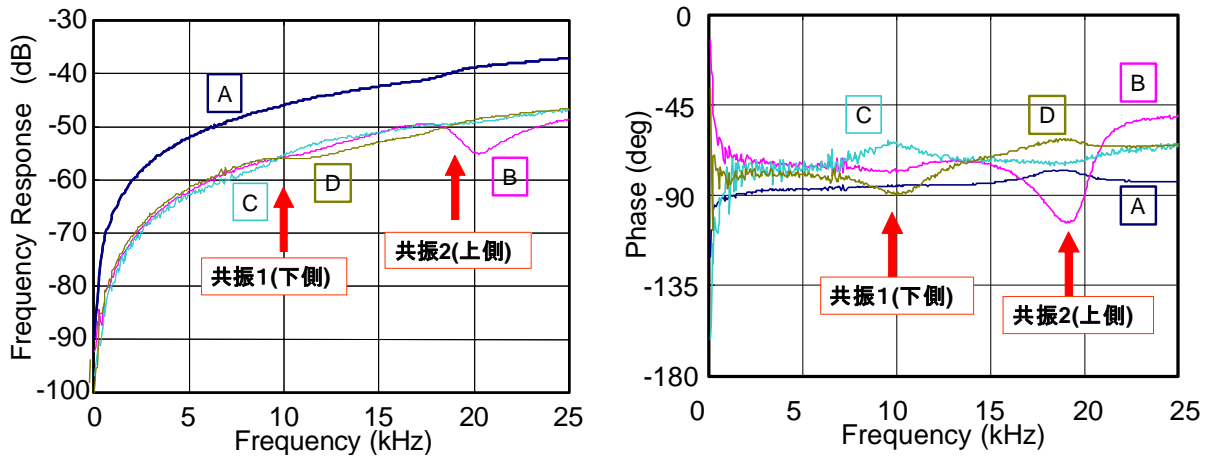
図⑤.2-3b-5 測定系

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。今回行った合わせこみについて以下に記述する。

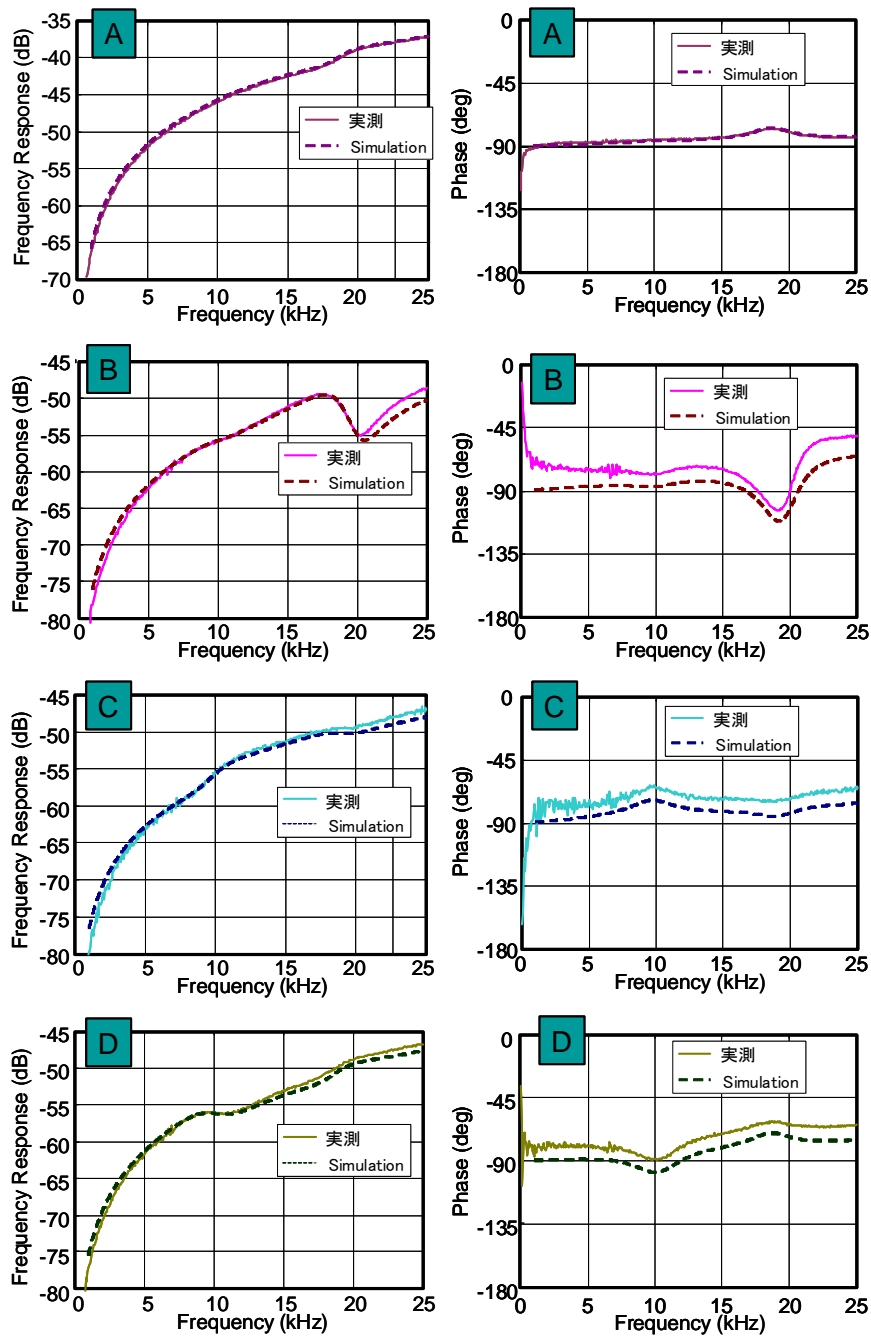


図⑤.2.3b-7 シングルエンド応答特性 (バイアス 4.0 V)

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。

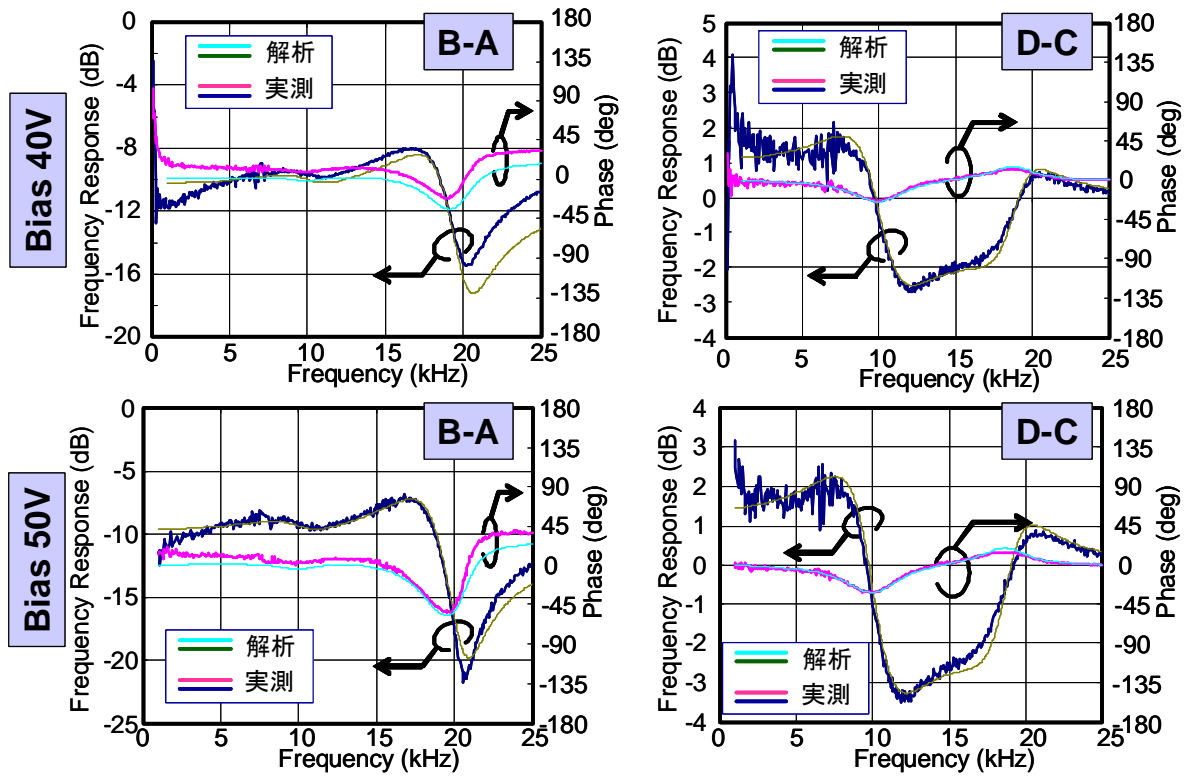
2)機械振動特性：実測値に基づいて、共振周波数と振動Q値を合わせこんだ。具体的にはマス質量を固定し、ばね定数と機械抵抗値を調整した。

以上の合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）

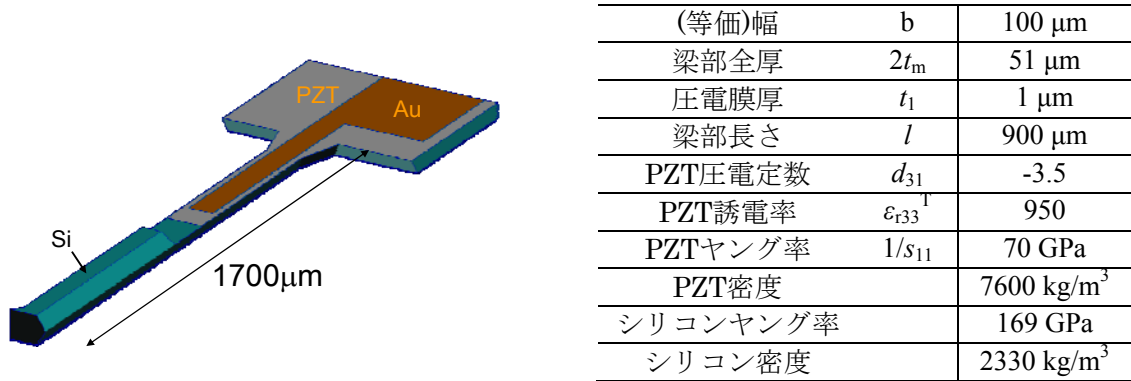
差動検出による計測，解析においては対になる検出電極の組で測定した．図⑤.2.3b-9はバイアス電圧40V，50Vにおける周波数特性を実験値と解析値で示した．この結果では寄生容量による影響がある程度取り除かれているのでデバイスの応答特性がよく現れており，その中で正しく表現できていることが示されている．



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）

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

梁の曲げ剛性 K_M

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

固有振動数 ω（断面形状を考慮）

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

梁先端の等価ばね定数：K

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

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。

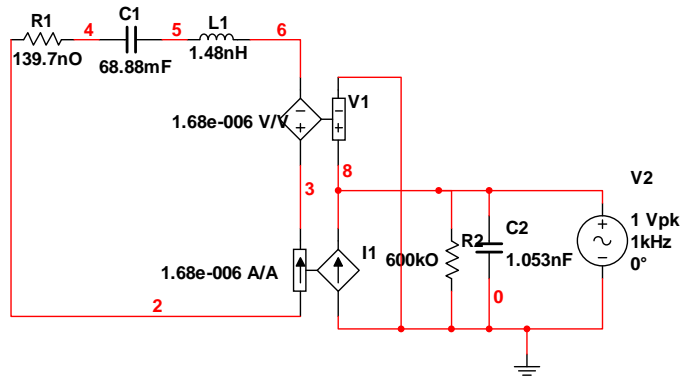
$$r = \frac{\sqrt{(m_{eq} + m_{top})K}}{Q}$$

ii) 導出したモデルの評価。

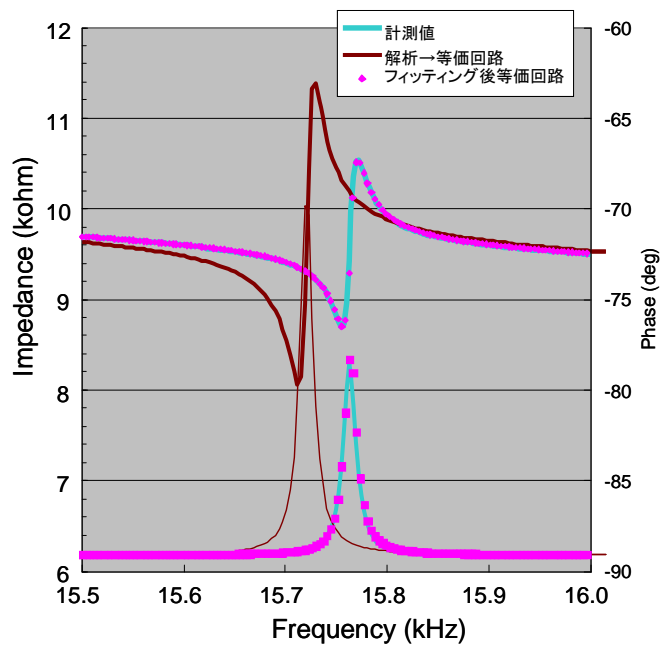
圧電素子による加振、レーザドップラー振動計による変位計測から、共振周波数15.75kHz、 Q 値1050として算出した等価回路パラメータを表⑤.2.3c-1に示した。また、片持ち梁デバイスの等価回路を図⑤.2.3c-2に示した。まず、このデバイスのインピーダンス特性をインピーダンスアナライザ(Agilent 4394A)で測定した結果と、等価回路の機械系端子を短絡したときの電気系端子間のインピーダンス解析結果を比較した(図⑤.2.3c-3)。周波数(0.4%)、ピークインピーダンスで10%程度と差は小さく、等価回路のモデルがデバイスの動作をよく表現できていると判断できる。

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



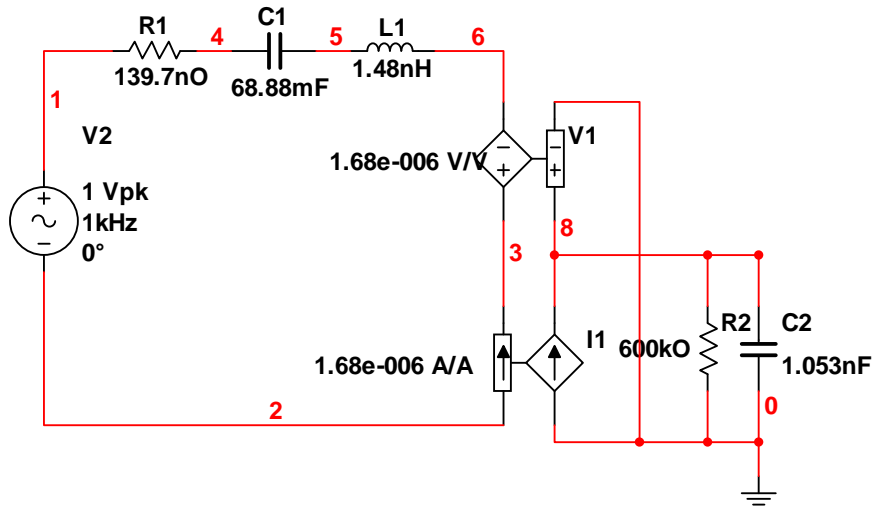
図⑤.2.3c-2 圧電片持ち梁の等価回路（フィッティング後；インピーダンス計測時）



図⑤.2.3c-3 圧電片持ち梁のインピーダンス特性

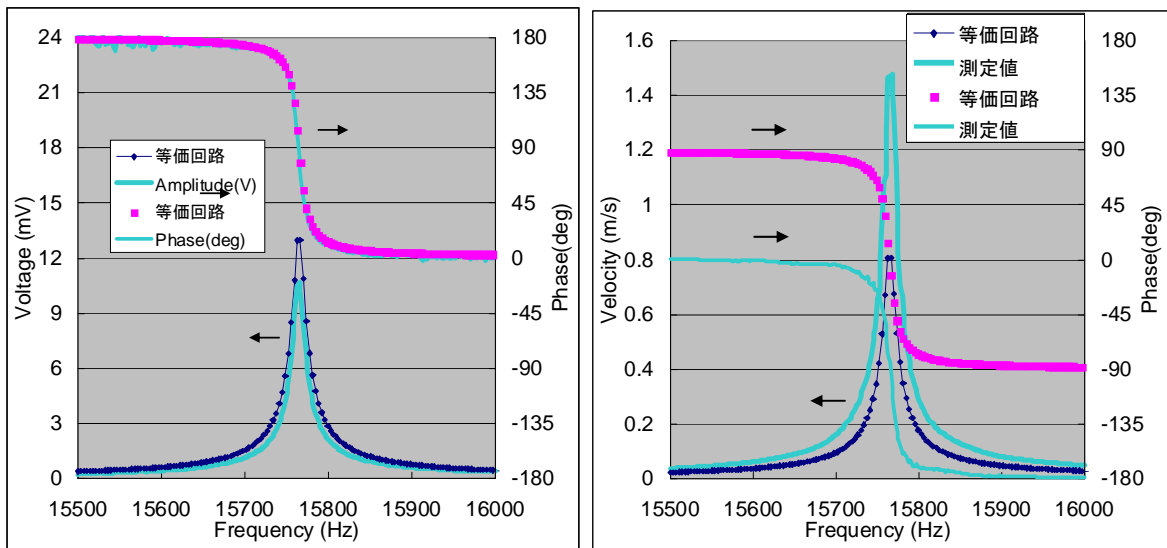
iii)外力印加モデルの検証

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。

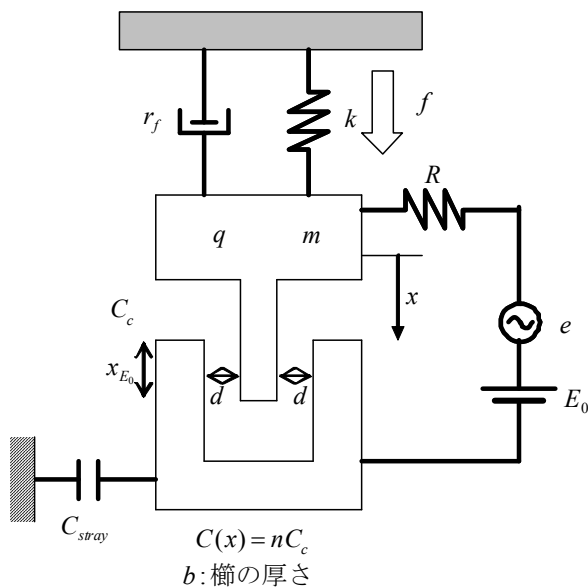


図 ⑤.3-1-1 櫛歯：2電極：ストレートタイプ解析モデル

このモデルの等価回路は、図 3.3-1-2 のようになる。

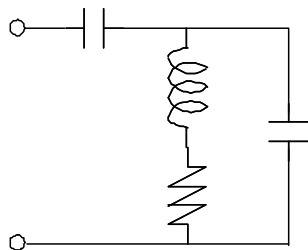


図 ⑤.3-1-2 櫛歯：2電極：ストレートタイプ等価回路図

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。

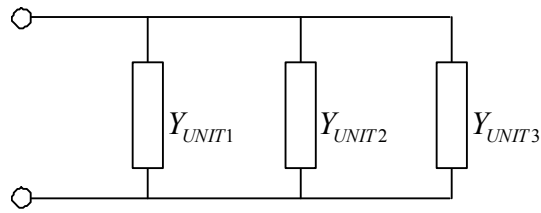


図 ⑤.3-1-2 櫛歯：2電極：ストレートタイプ(2軸駆動)等価回路図

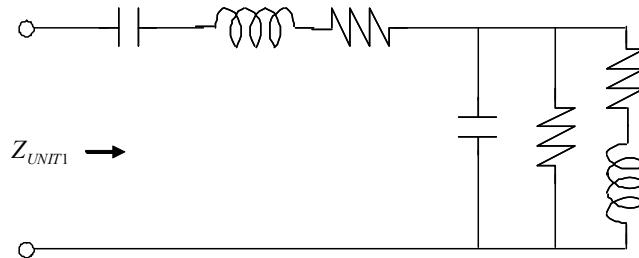


図 ⑤.3-1-3 櫛歯：2電極：ストレートタイプ(2軸駆動)等価回路図(1)

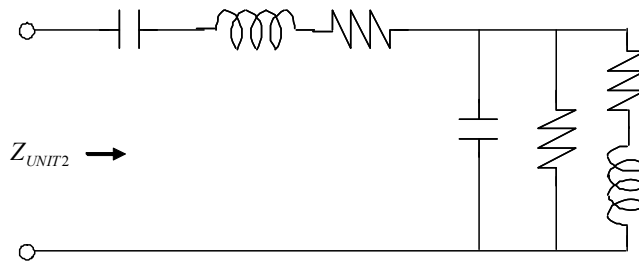


図 ⑤.3-1-4 櫛歯：2電極：ストレートタイプ(2軸駆動)等価回路図(2)

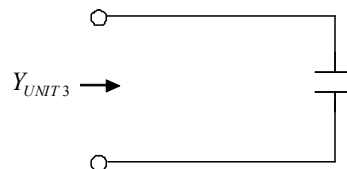


図 ⑤.3-1-5 櫛歯：2電極：ストレートタイプ(2軸駆動)等価回路図(3)

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。

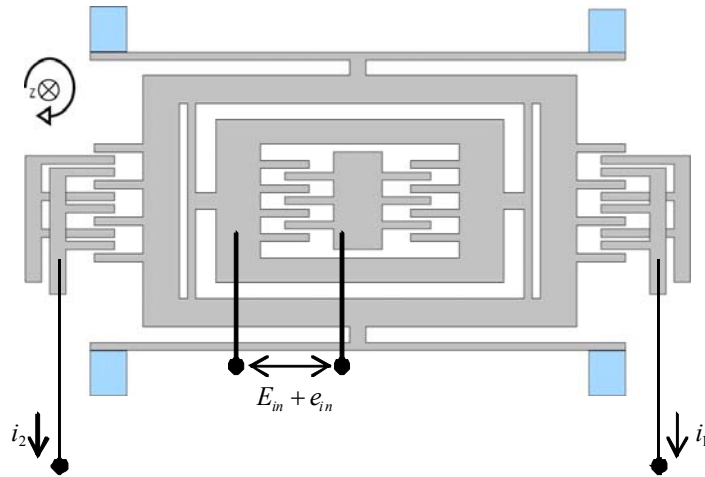


図 ⑤.3-1-6 櫛歯：3電極：角速度センサ解析モデル

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。

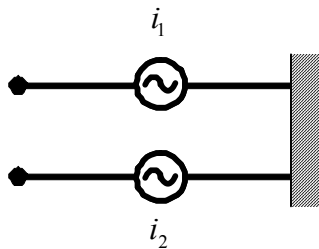


図 ⑤.3-1-7 櫛歯：3電極：角速度センサ等価回路図

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。

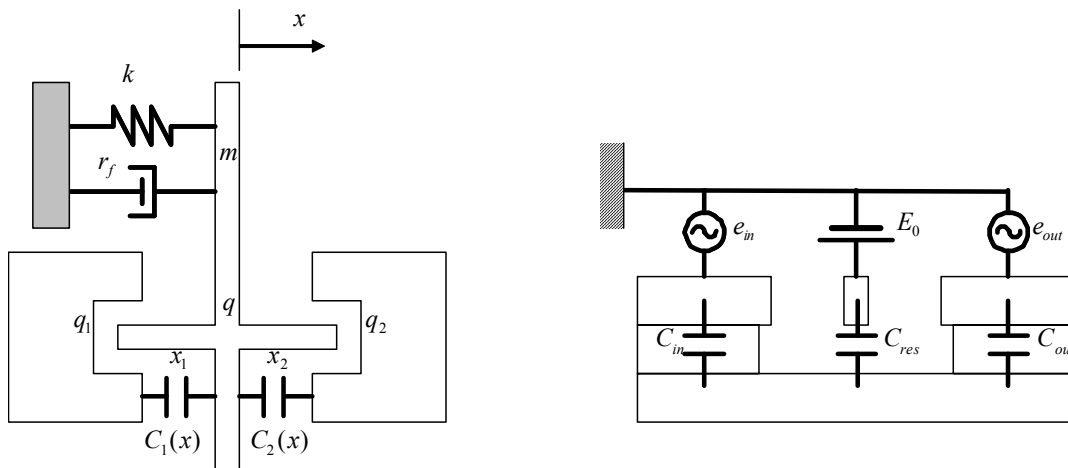


図 ⑤.3-1-8 櫛歯：3電極：ストレートタイプ解析モデル

このモデルの等価回路は図 ⑤.3-1-10 で表される。

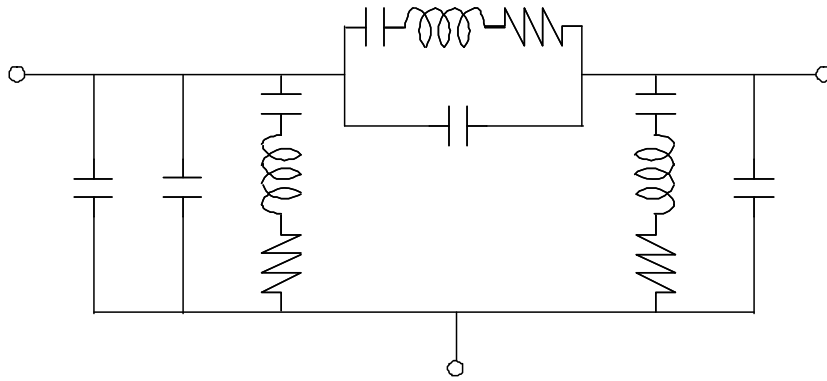


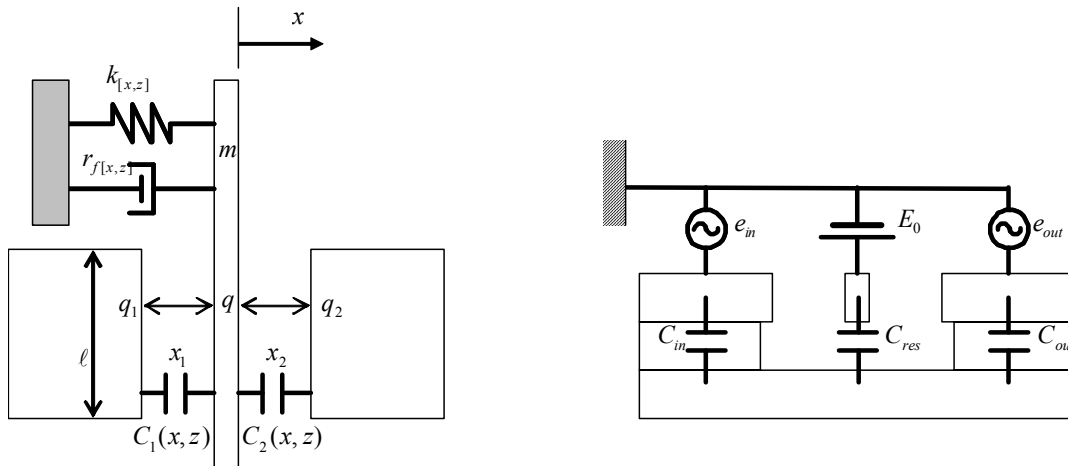
図 ⑤.3-1-9 櫛歯：3電極：ストレートタイプ等価回路図

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。

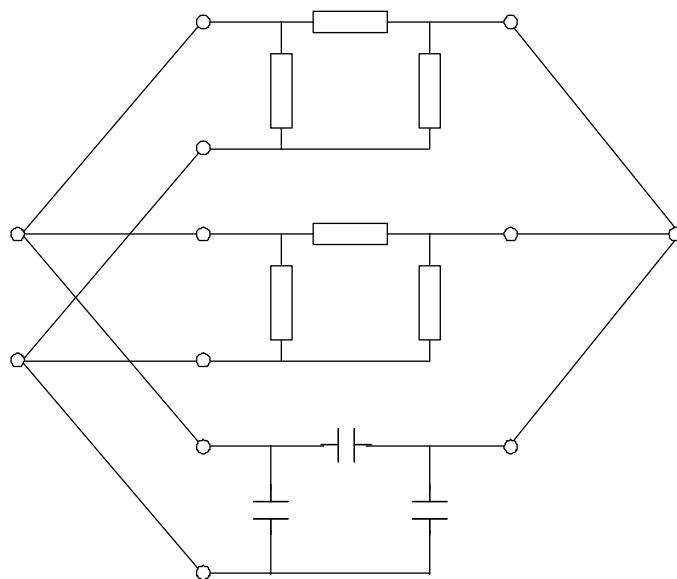


図 ⑤.3-1-11 振動子：3電極等価回路

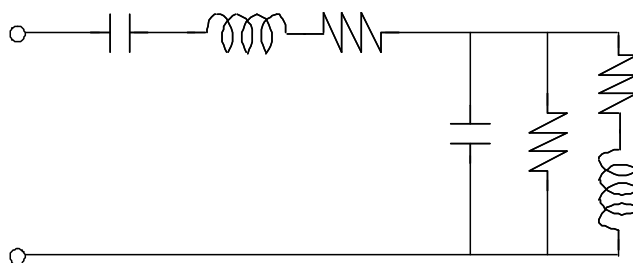


図 ⑤.3-1-12 振動子：3電極等価回路(部分)

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。

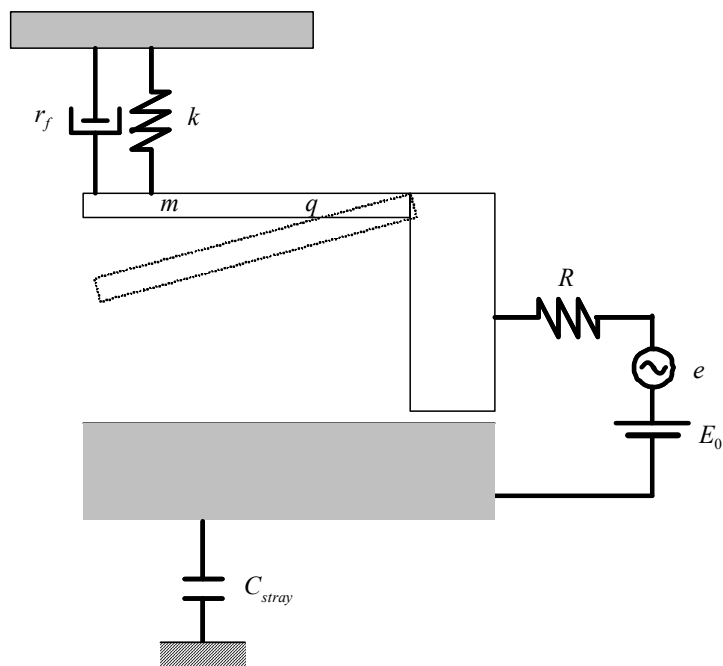


図 ⑤.3-1-13 CNT カンチレバー解析モデル

CNT カンチレバーの等価回路を図 ⑤.3-1-15 に示す。

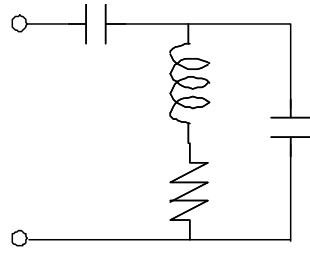


図 ⑤.3-1-14 CNT カンチレバー等価回路

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。

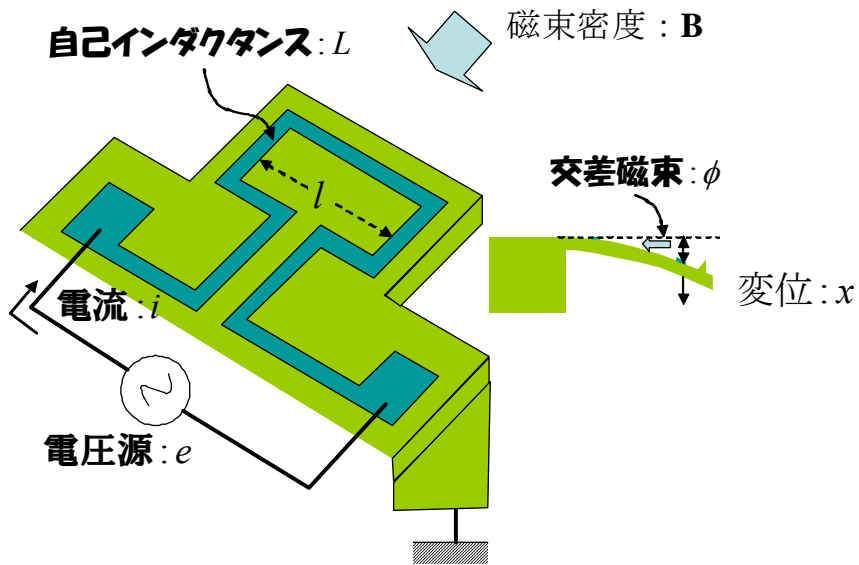


図 ⑤.3-1-15 磁気駆動カンチレバー解析モデル

このモデルの等価回路は図 ⑤.3-1-17 で表される。

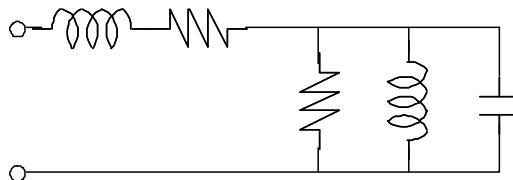


図 ⑤.3-1-16 磁気駆動カンチレバー等価回路

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。

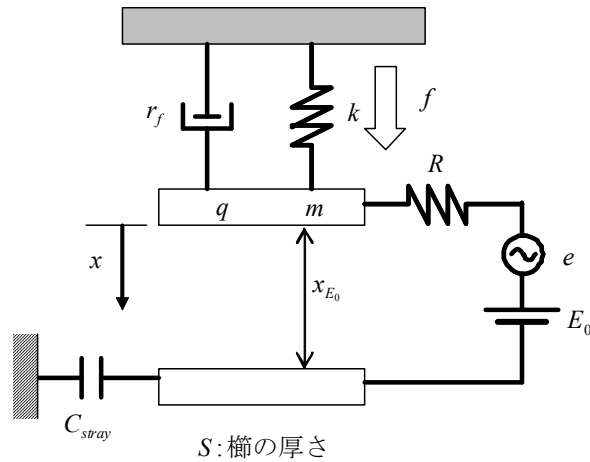


図 ⑤.3-1-17 平行平板(圧力センサ)解析モデル

等価回路は図 ⑤.3-1-19 となる。

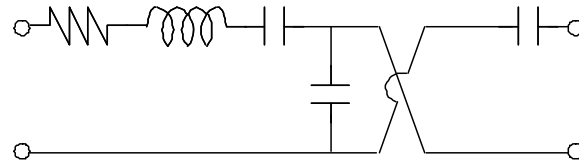


図 ⑤.3-1-18 平行平板(圧力センサ)等価回路

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。

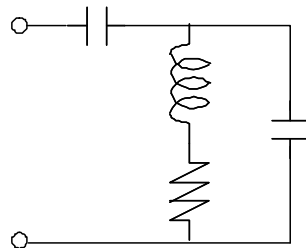


図 ⑤.3-1-19 平行平板型デバイス等価回路

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。

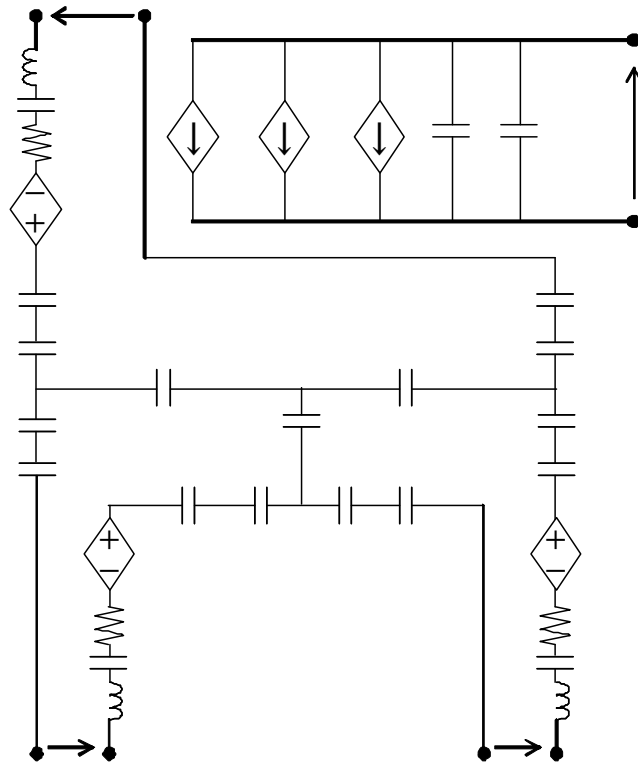
表⑤.3-2-1 Web システムに登録した単位要素(H20)

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。

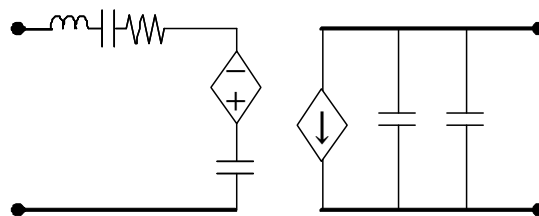
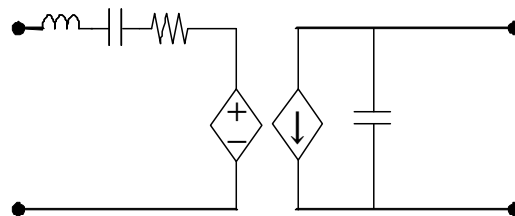


図 ⑤.3-2-2 静電平行平板等価回路

③ユニモルフ圧電駆動梁

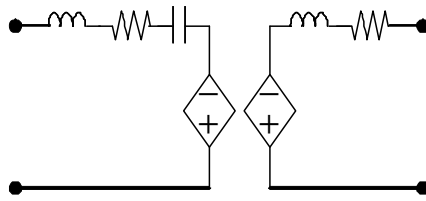
この等価回路は、図⑤.3-2-3 で表される。



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

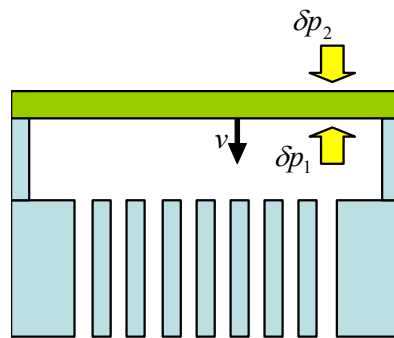
解析モデルは H19 年度モデルと同様である。電気系と機械系の相互変換を従属電源で表現すると、等価回路は図⑤.3-2-4 のようになる。



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

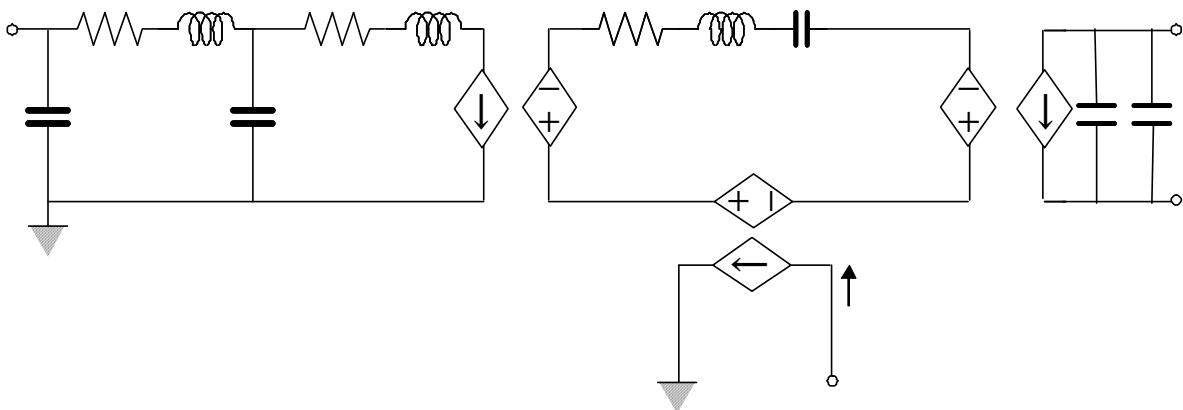
音響平行平板アクチュエータの構造を図⑤.3-2-5に示す。電気系と機械系の相互変換に関しては、静電平行平板モデルと同様である。機械系と音響系の類似性により音響系の等価回路を導出した。電気系と音響系の対比表を表⑤.3-2-2に示す。等価回路は図⑤.3-2-6のようになる。



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

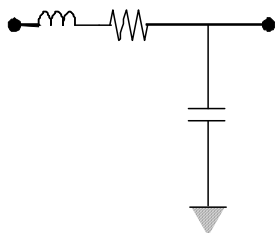
電気系物理量	音響系物理量
電流	体積速度
電圧	音圧
容量	音響容量
インダクタンス	イナータンス
抵抗	音響抵抗



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

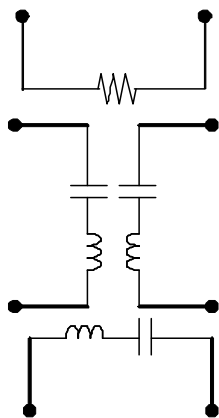
空洞は、一般に音響容量が支配的な音響コンポーネントと考えられるが、音響イナータンス、音響抵抗も成分として等価回路に考慮する。空洞の等価回路は、穴あき管路と同形である。

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

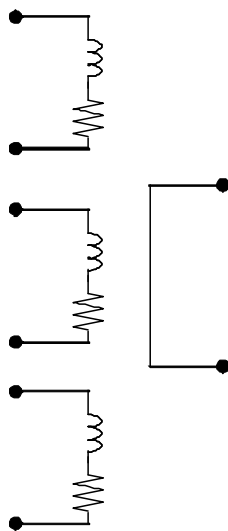
ダブルフォールデッドバネ1の等価回路は、梁バネと同形である。

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

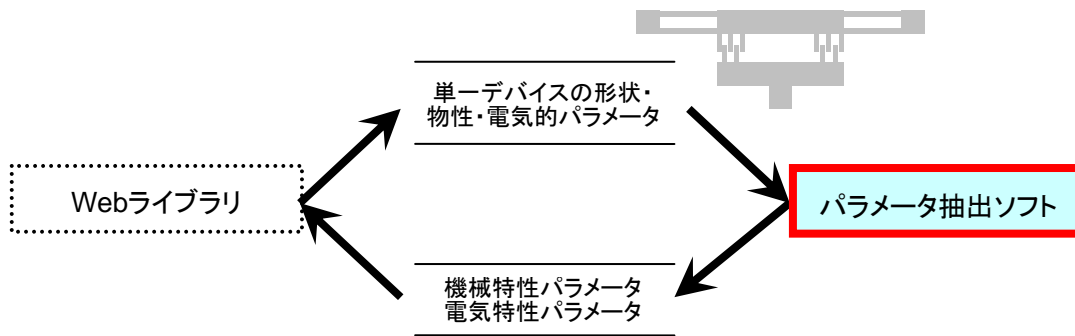
MEMS 等価回路モデルを用いる際には、モデルを構成する各電気素子の回路定数を決定する必要がある。これらの回路定数を計算する為には、バネ定数等の機械特性パラメータや直流動作点での電気特性パラメータ等を求める必要がある。そこで、MEMS 等価回路の回路定数を定める為に機械特性パラメータおよび電気特性パラメータを、デバイスの形状パラメータや電氣的パラメータ等から算出するパラメータ抽出ソフトウェアを開発した。H19 年度では、ファイン MEMS プロジェクトで利用するデバイス構造で等価回路 Web ライブラリシステムに登録されたものを対象として、パラメータ抽出ソフトウェアを作成した。一方、H20 年度では、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

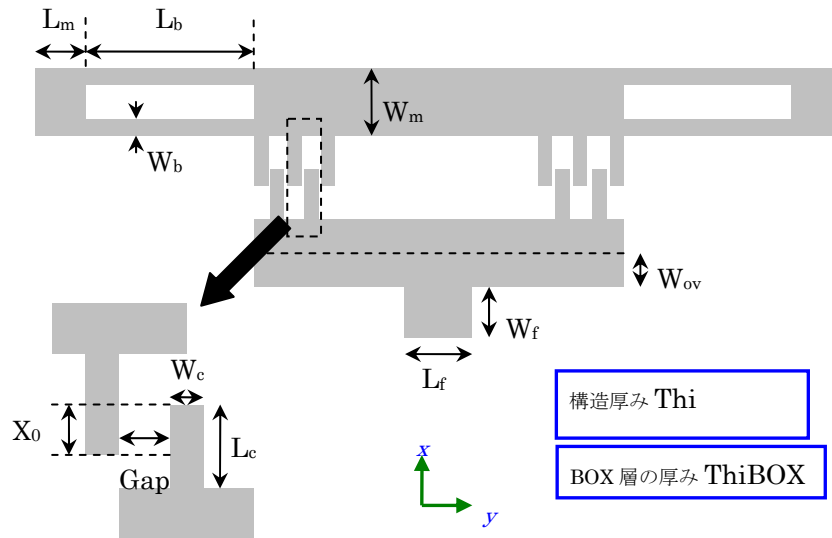
ソフトウェア仕様の検討として、それぞれの MEMS デバイス構造に対して、パラメータ抽出ソフトに対する入出力データの仕様を検討した。

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。

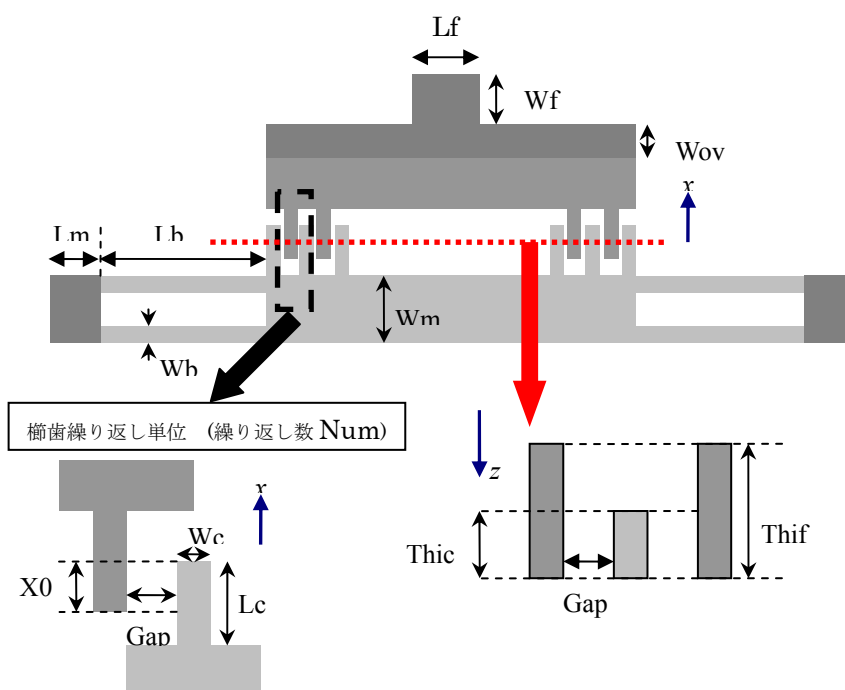
表⑤.4.2-2 1軸駆動櫛歯アクチュエータ（2電極、ストレートタイプ）における出力データ

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。

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

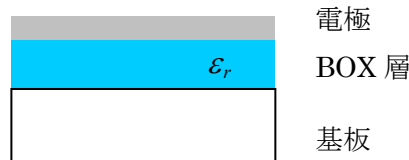
ここで、 k_0 は線形梁のバネ定数 (今の場合、 $k_0 = Etw^3 / L^3$)、 x は櫛歯の変位である。

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

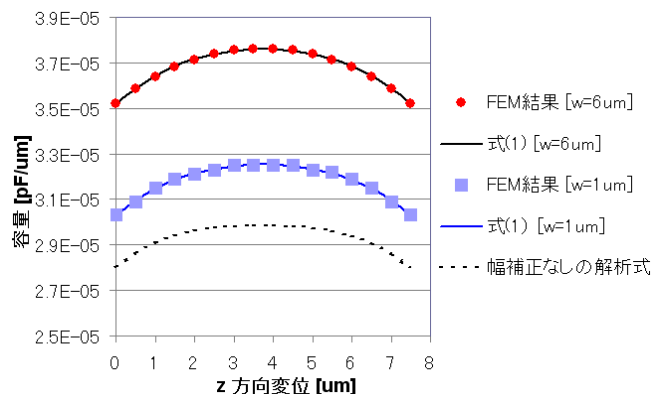
浮遊容量としては、可動部直下の基板は抜かれているものとして、BOX 層を挟む電極と基板間の容量成分のみ考慮する。この容量成分の計算は、BOX 層の厚みに等しいギャップを有する平行平板コンデンサとみなして行う。また、固定部接続の電極部に生じる容量と、可動部接続の電極部に生じる容量は直列につながっているとして、浮遊容量の総計を求める。



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形電極の容量式を 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形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。

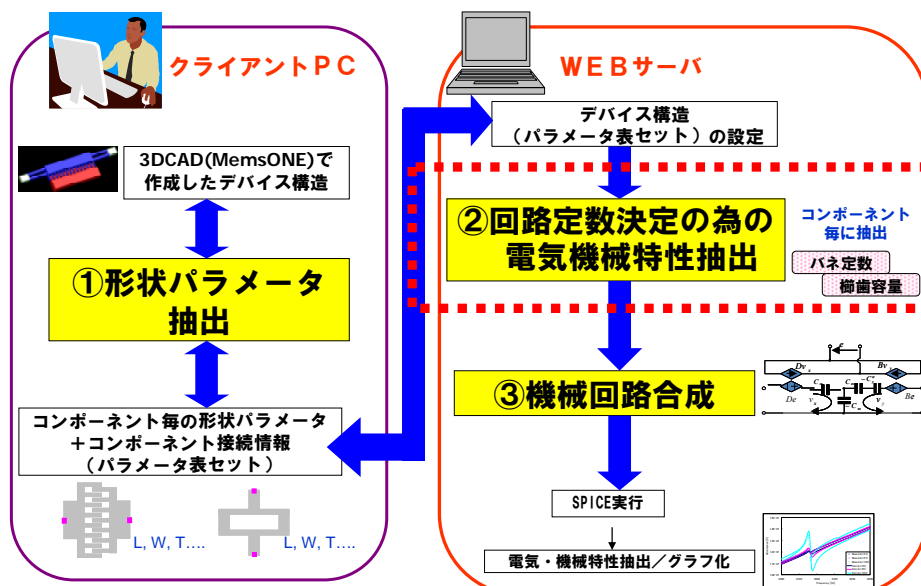
$$k_x x = F_x(x, z) \quad k_z z = F_z(x, z)$$

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。

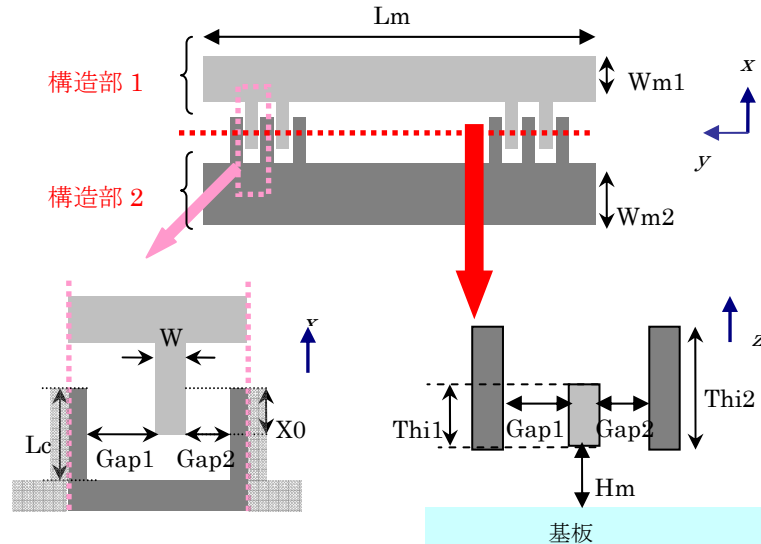
- 各構造部の質量
- 直流動作点における櫛歯間容量
- 直流動作点における櫛歯間容量の 1 次および 2 次微係数
- 各構造部の機械抵抗

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。

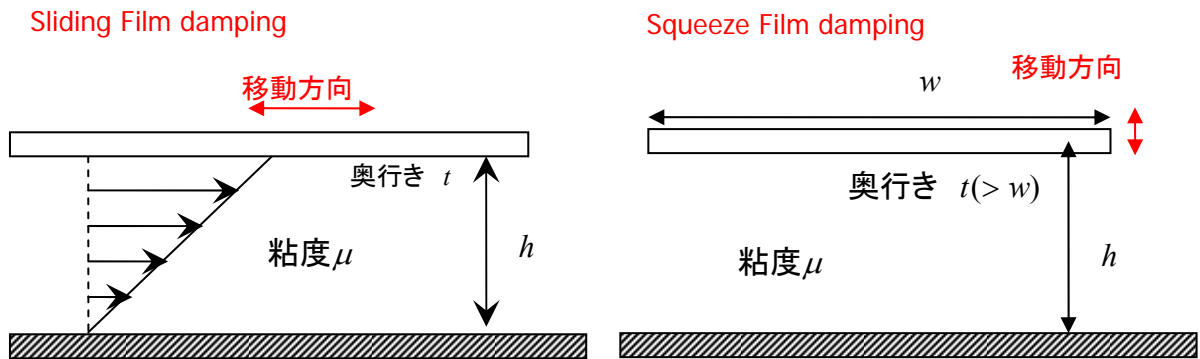
また、各構造部の機械抵抗では、図⑤.4.2-9 に示す sliding film damping と squeeze film damping の解析式を元に、X 方向、Y 方向、Z 方向のそれぞれの値を算出した。X 方向の機械抵抗は、以下に示す寄与の和から算出している。

- (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

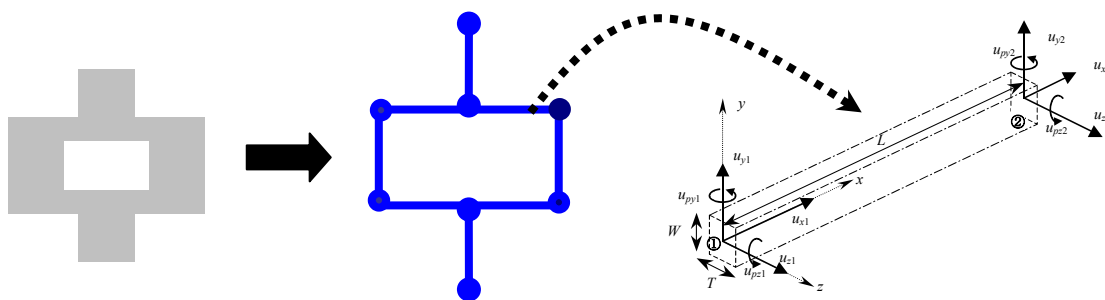
のを用いることによって、非線形性を考慮した変位を求めることができる。具体的には、デバイスの電極に直流バイアス電圧をかけたときのバネ変位を直流動作点解析によって求め、その結果からバネ定数を算出した。

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。

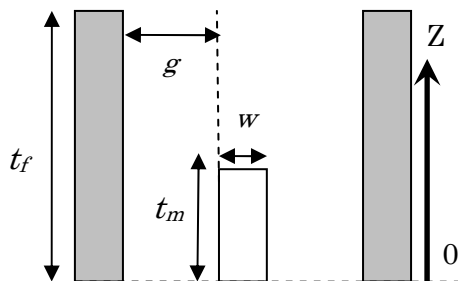


図 3.4.2-5 垂直駆動櫛形電極

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。

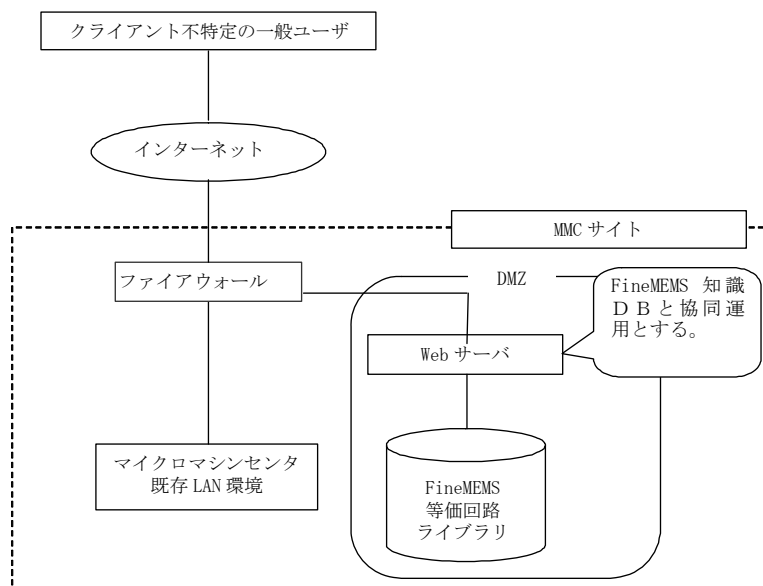
①機能要件

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。

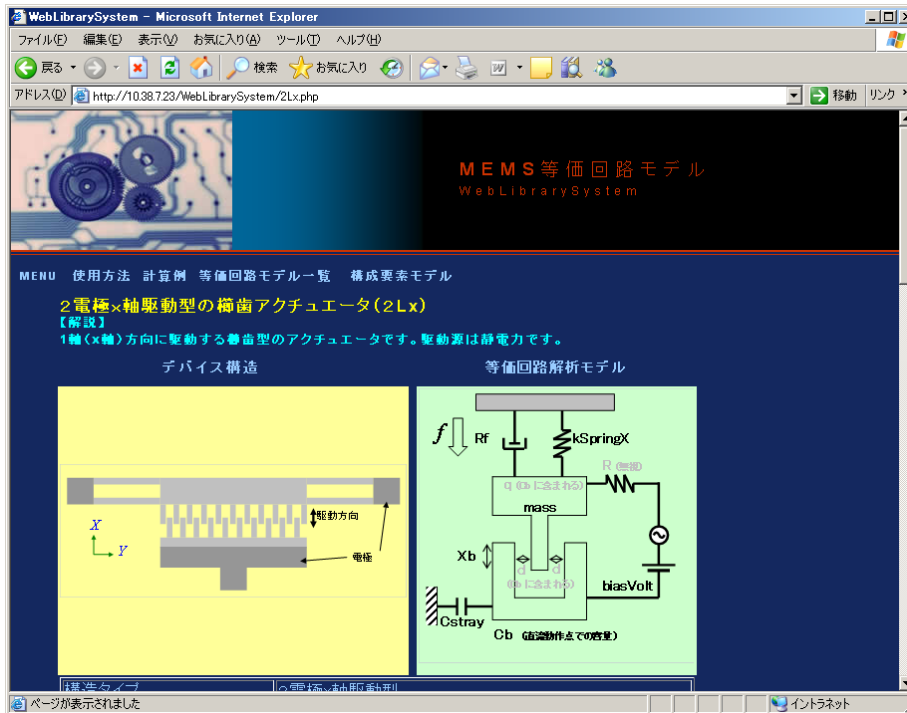
④システム全体処理概要フロー

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)。



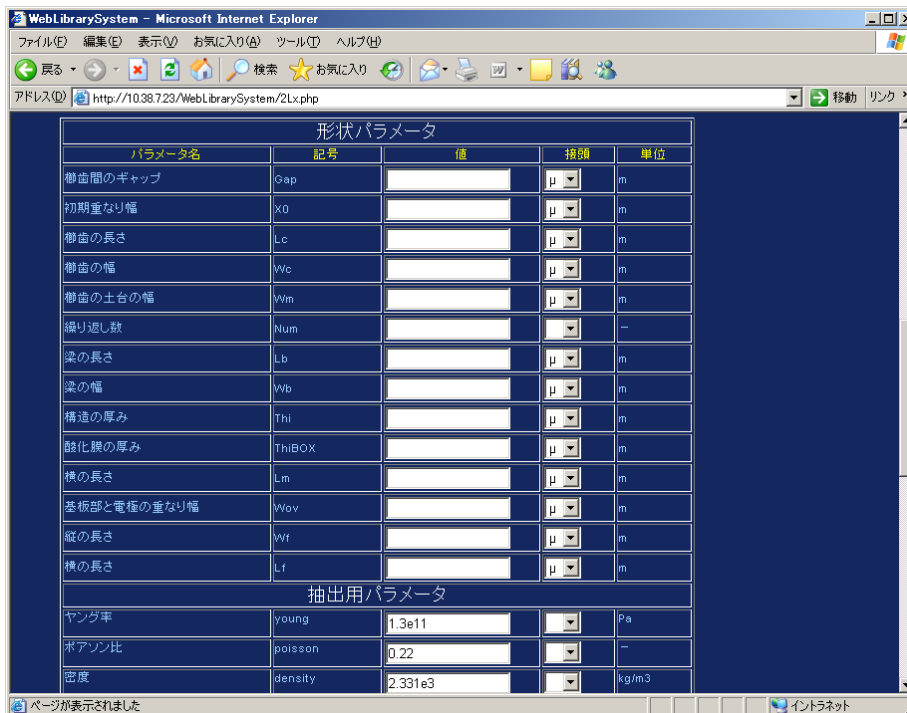
図⑤.5-1-2 モデル選択

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。



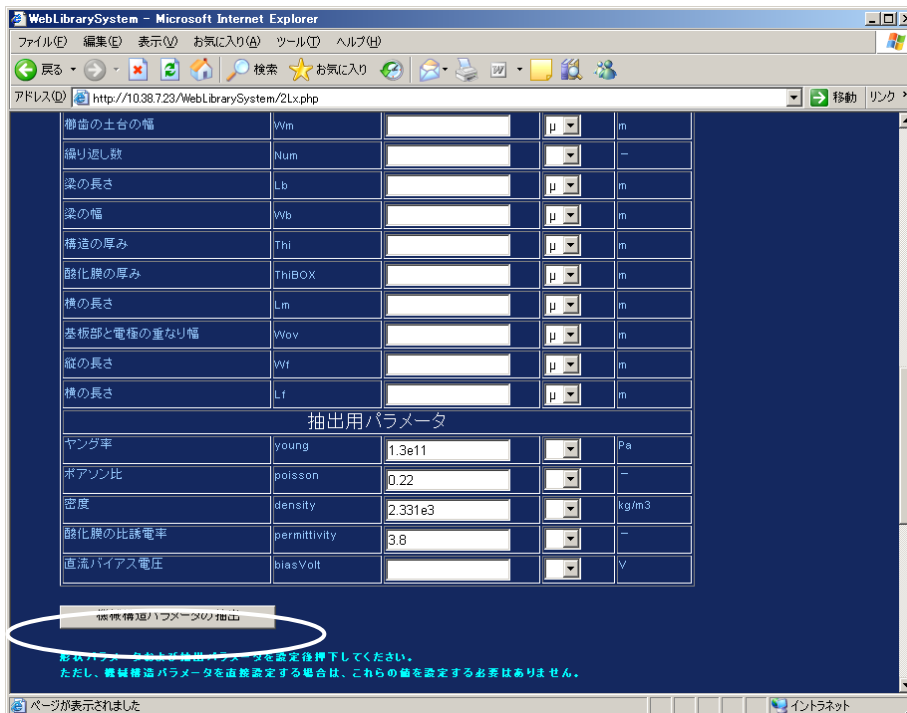
図⑤.5-1-3 デバイス構造解説

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)。



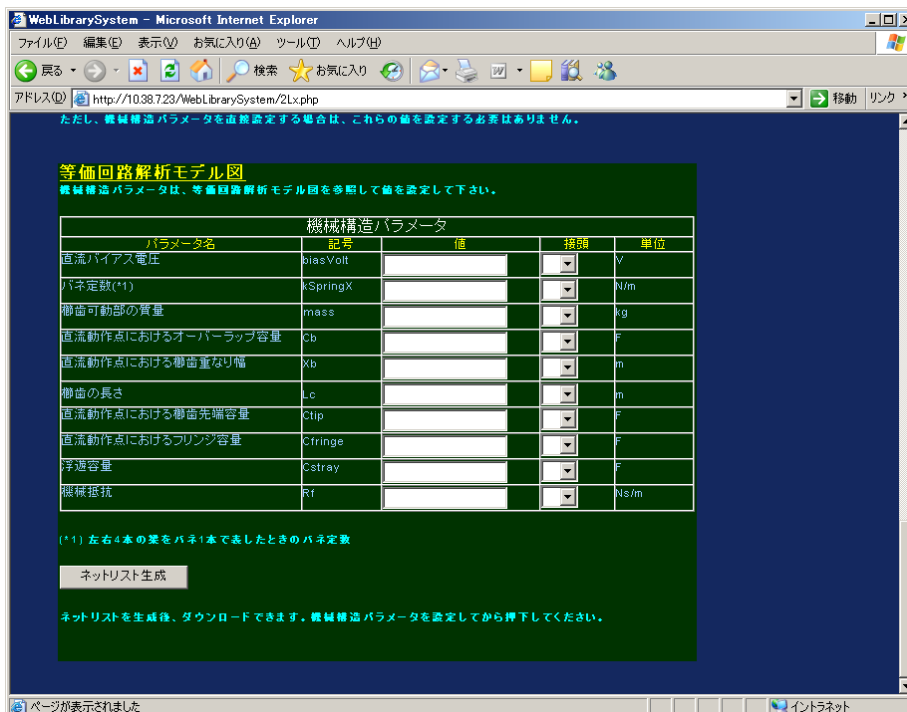
図⑤.5-1-4 形状パラメータ入力

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。

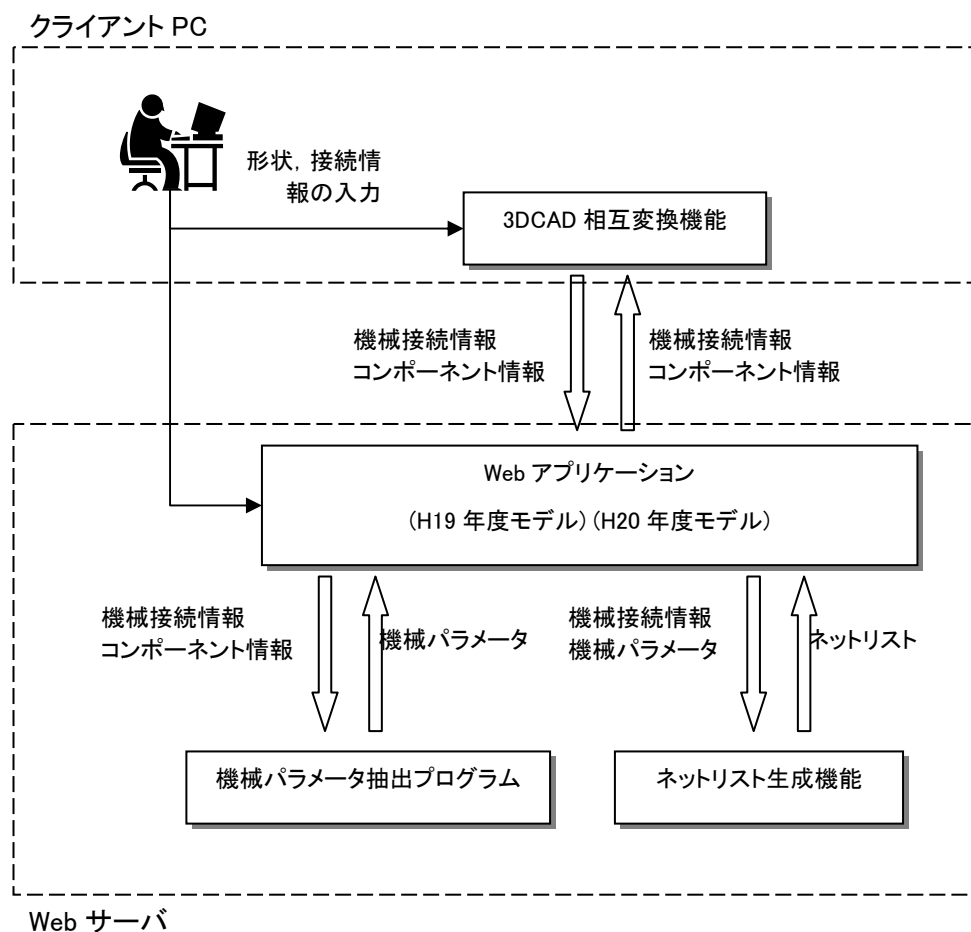
①機能要件

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

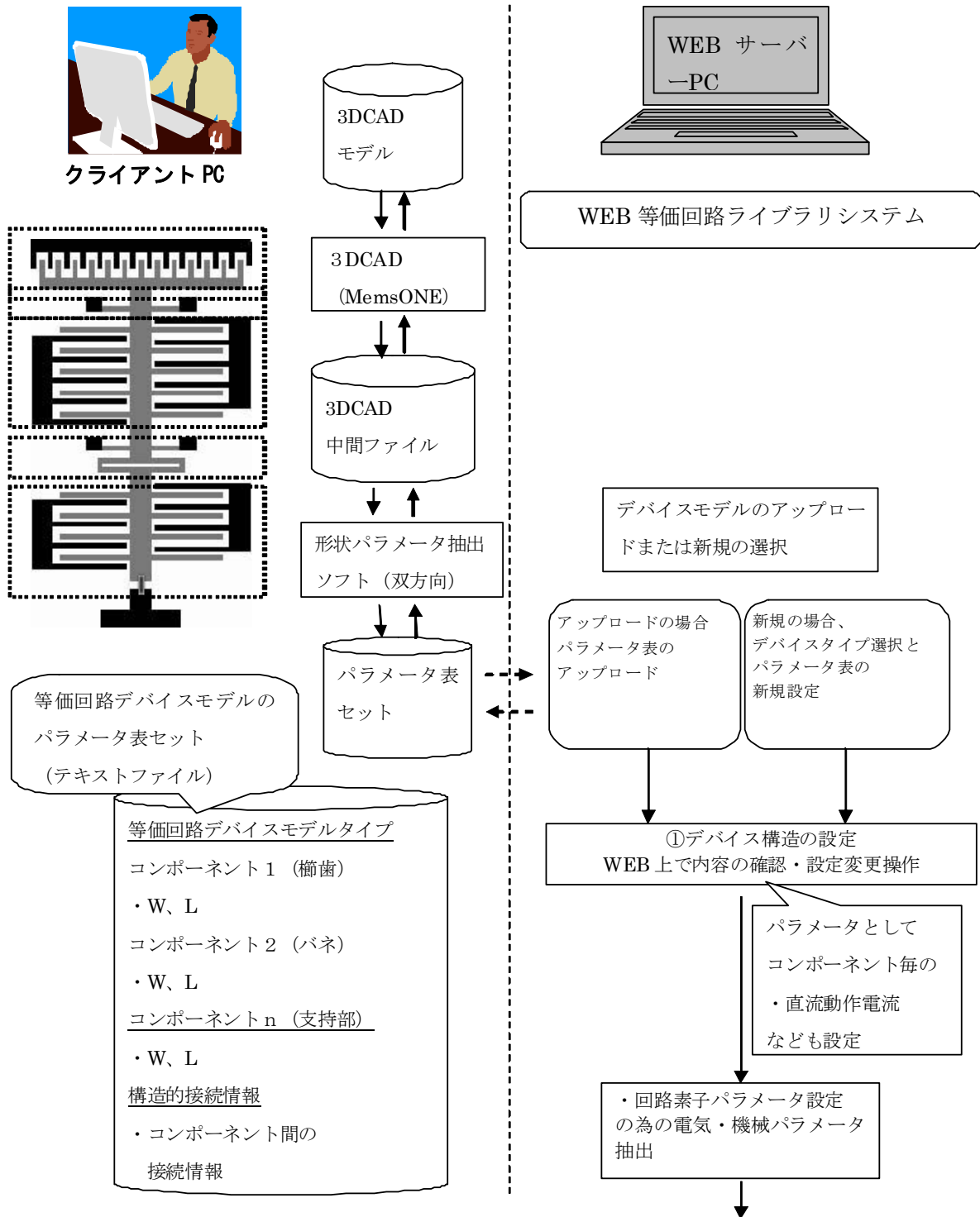
Web ライブラリシステム全体の処理概略フローを図⑤.5-2-2 に示す。まず、ユーザはデバイスの構造を決定し、単位要素間の接続関係を定義する。これはクライアント PC にインストールされた 3D CAD および形状パラメータ抽出ソフトによって行うか、クライアント PC から Web ブラウザを介して計上パラメータの設定および単位要素間の接続関係を定義する。

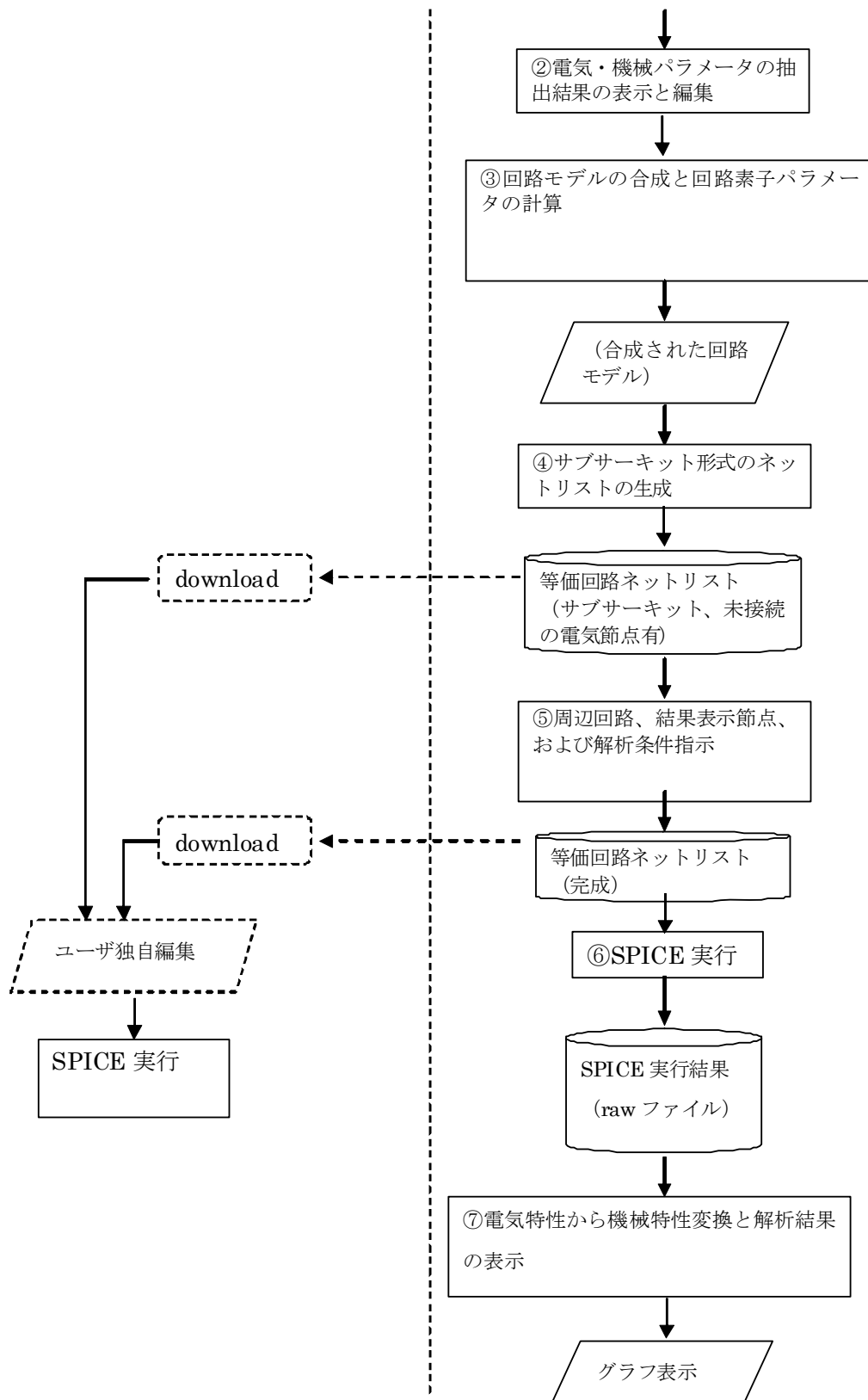
次に、電気機械パラメータ抽出プログラムを Web ブラウザを介して実行し、電気機械パラメータを抽出する。更に、周辺回路素子の設定や、回路シミュレーションの制御設定を行う。

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。



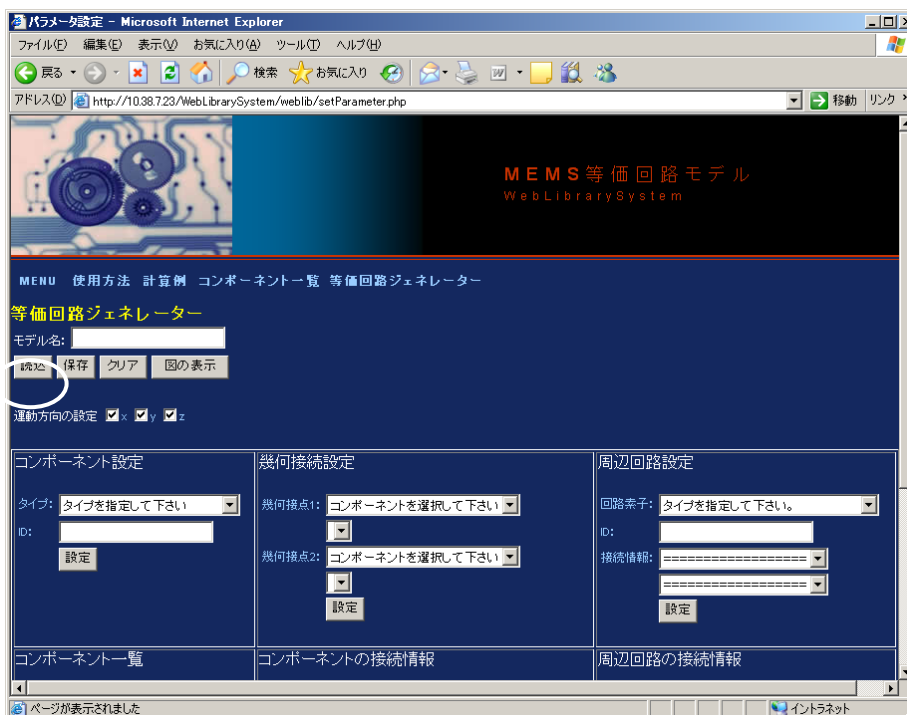


図⑤.5-2-2 Web ライブラリシステムの概略フロー図

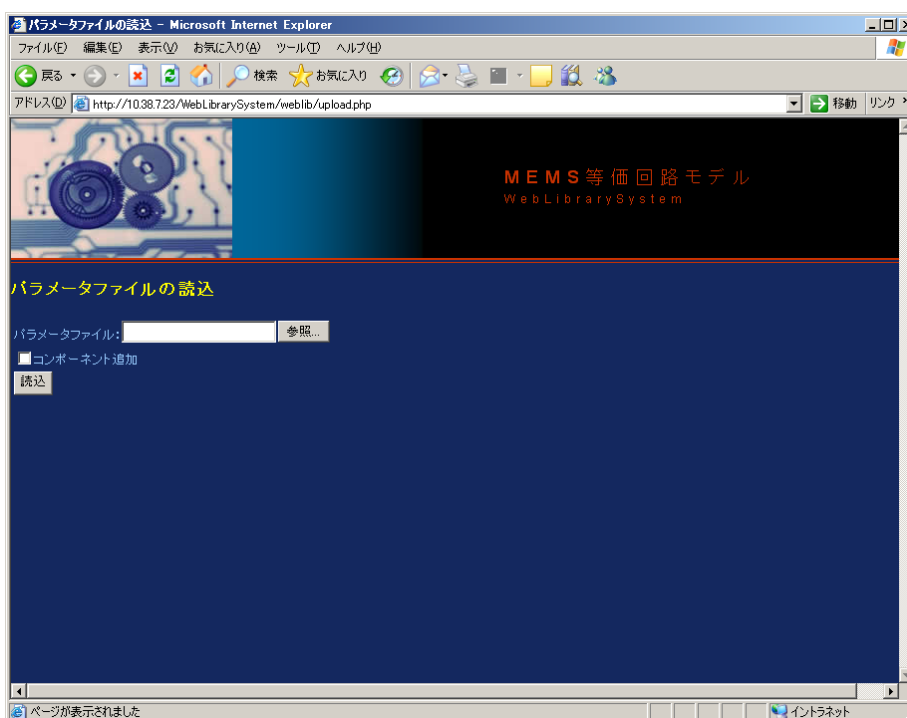
a) CAD 情報アップロード機能

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



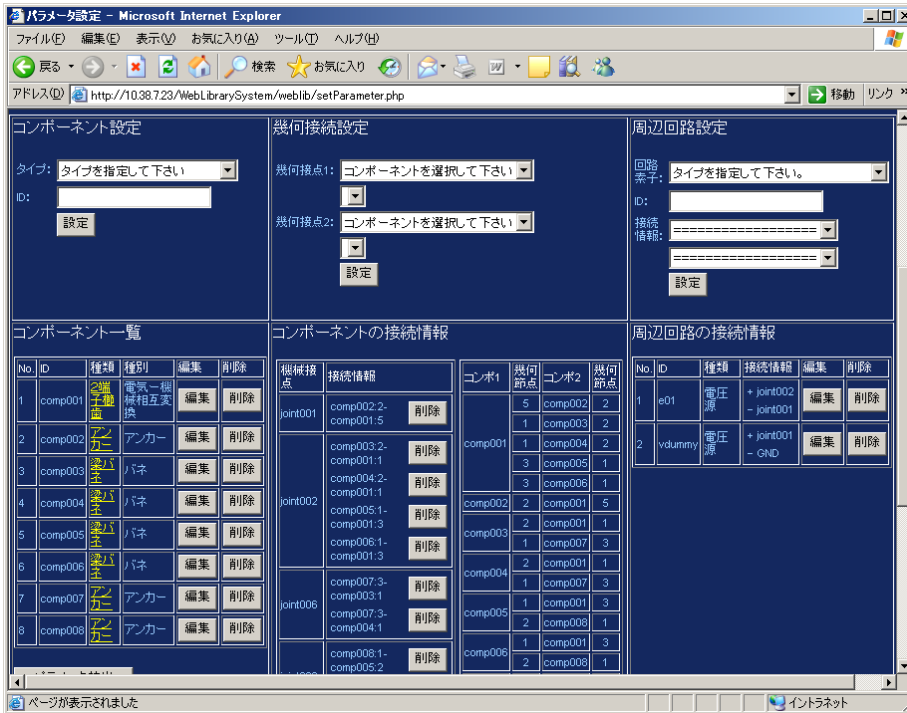
図⑤.5-2-4 アップロード機能

b) コンポーネント設定機能

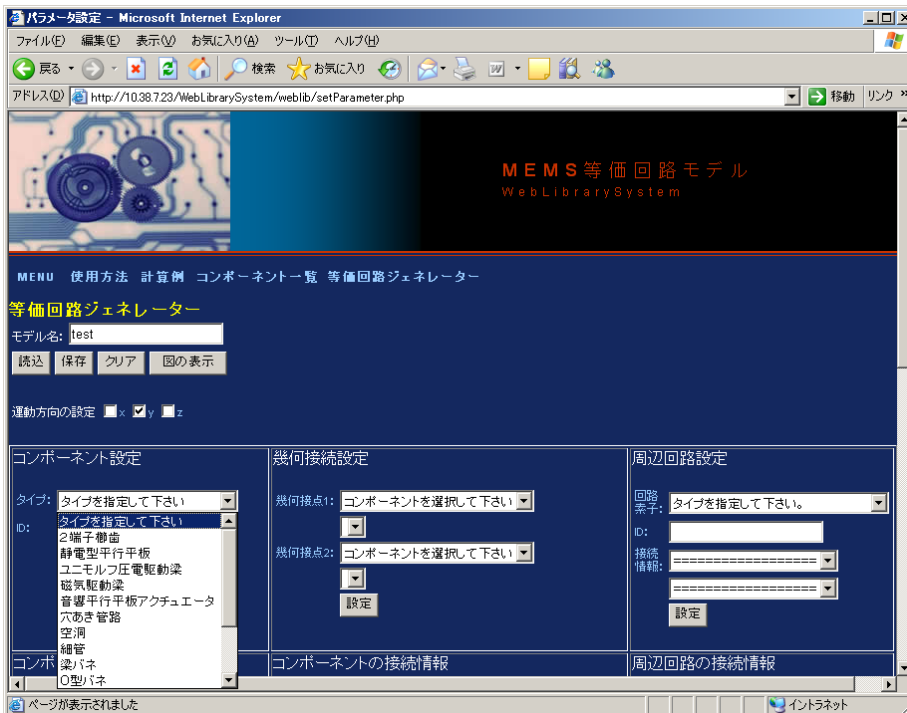
アップロード機能を用いた場合、CAD 情報に記述された内容が画面に反映される(図⑤.5-2-5)。アップロード機能を用いない場合、本画面上で単位要素であるコンポーネントを定義することができる。コンポーネントのタイプをコンボボックスから選択し(図⑤.5-2-6)、コンポーネントの ID をキーボードから入力するとコンポーネント一覧に追加される。

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

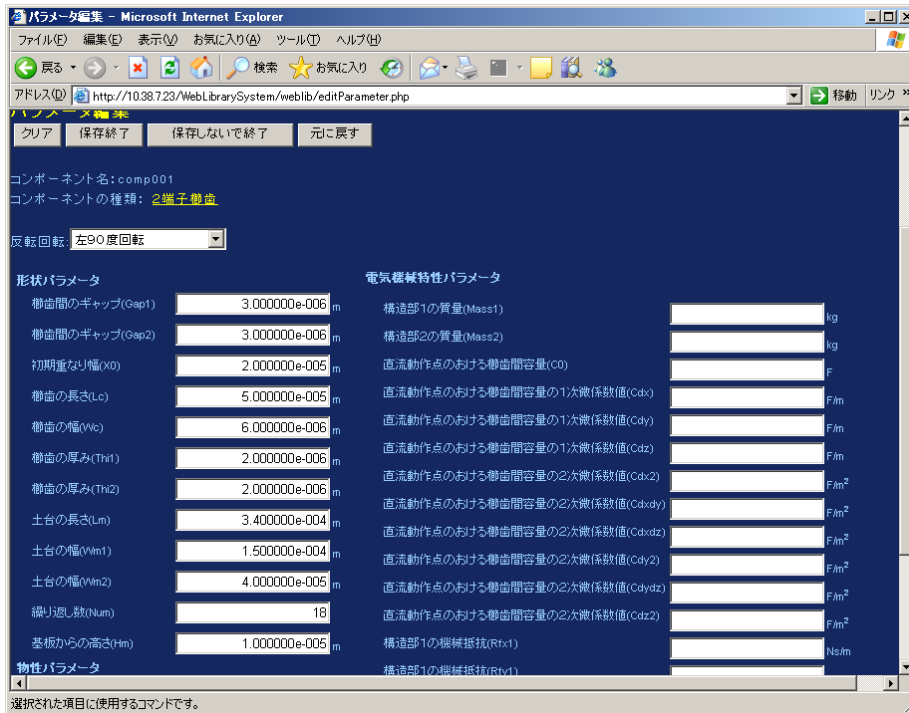
ラメータ編集画面が表示される。形状パラメータの入力や変更を行う。



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



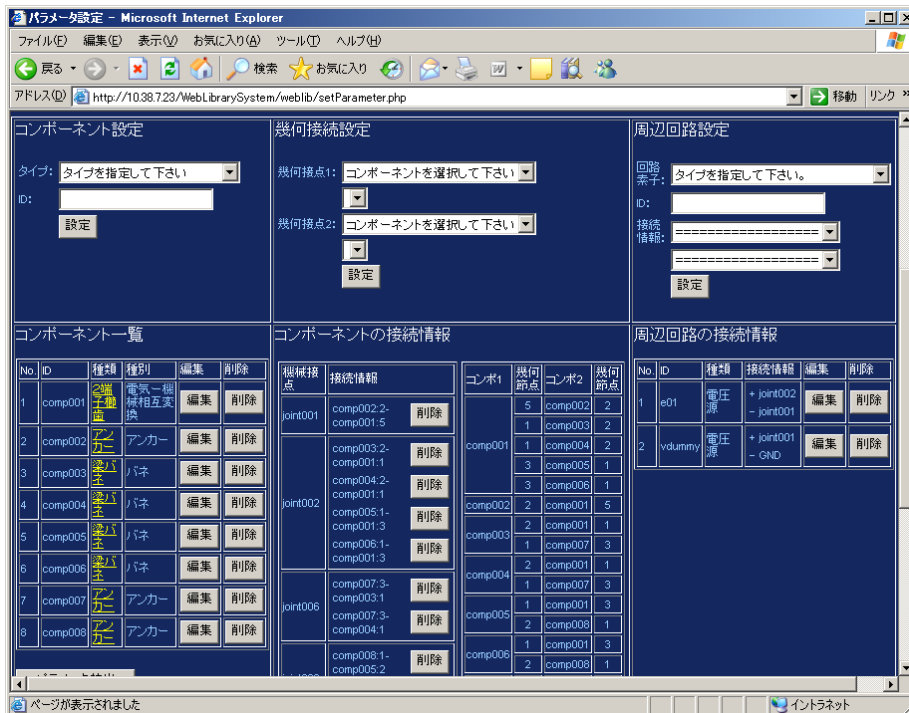
図⑤.5-2-6 コンポーネントの設定



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。

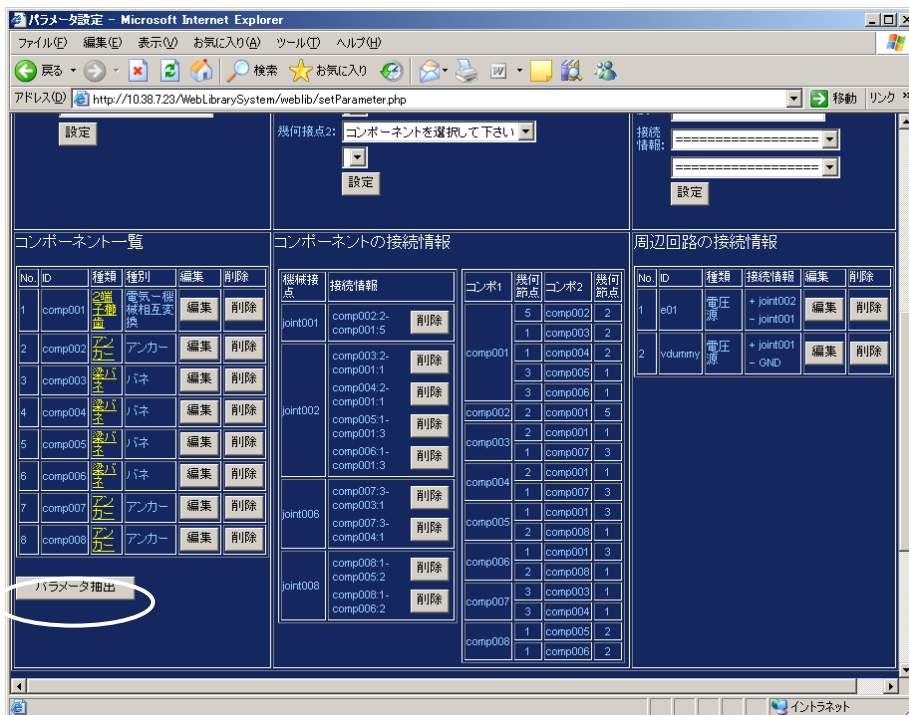


図⑤.5-2-8 アップロード機能利用時の接続情報設定

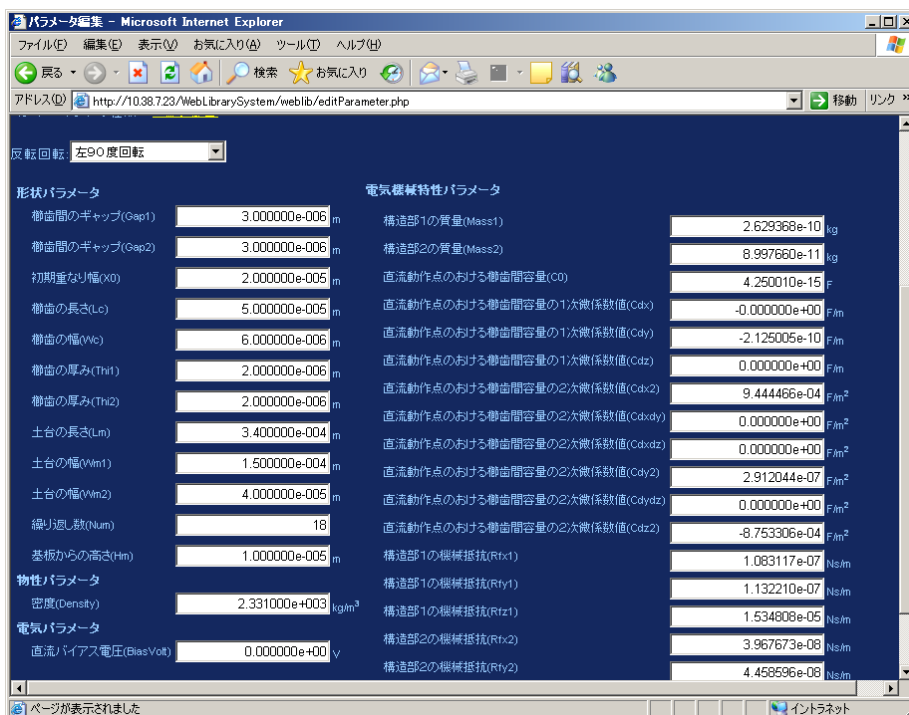
d) 電気機械パラメータ抽出

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

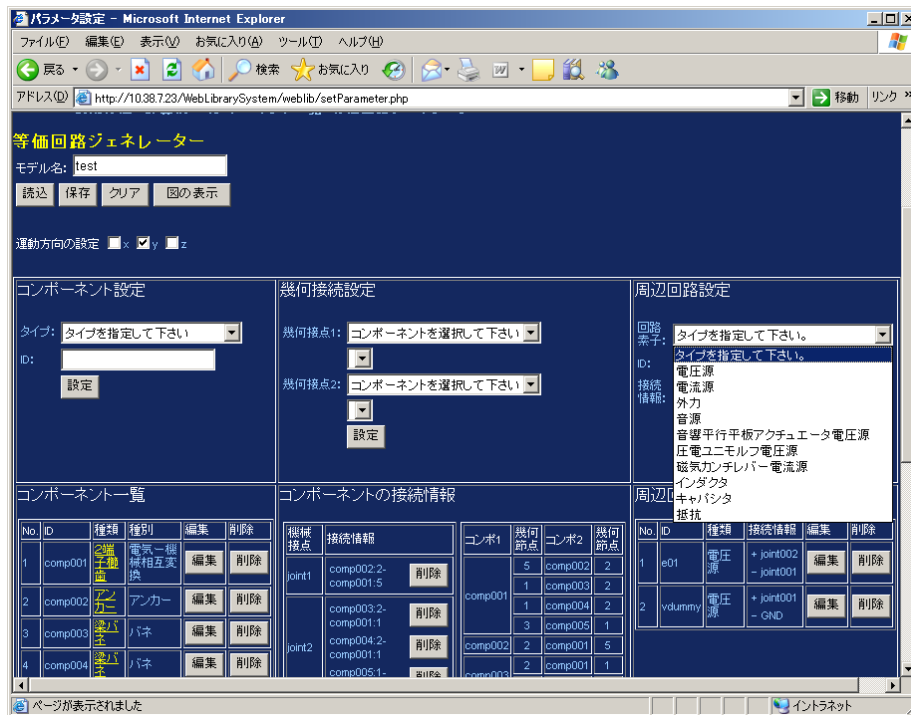


図⑤.5-2-10 電気機械パラメータ抽出結果

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。

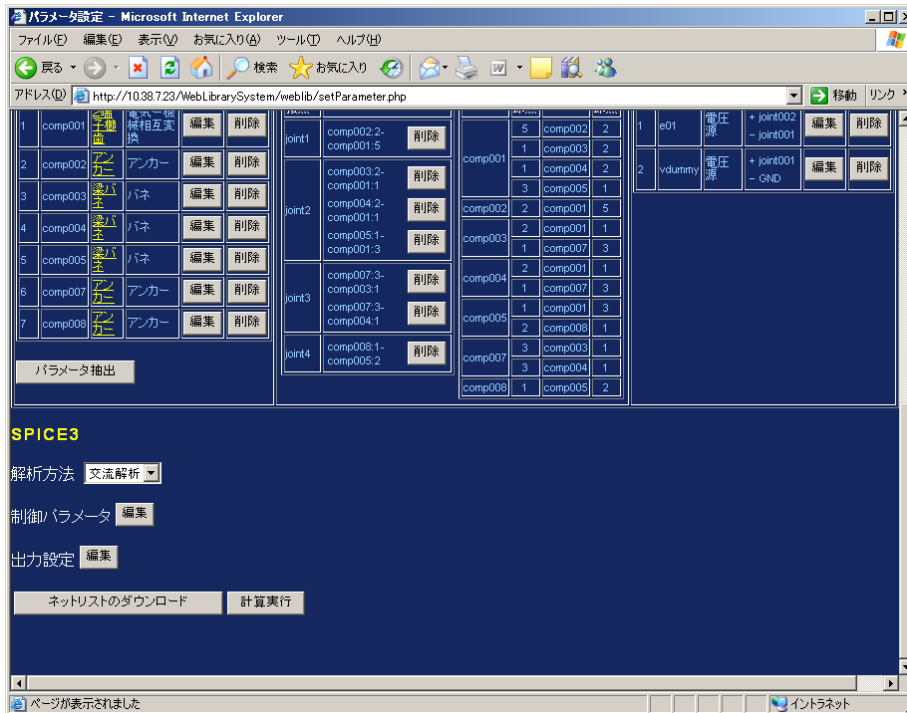


図⑤.5-2-11 周辺回路設定

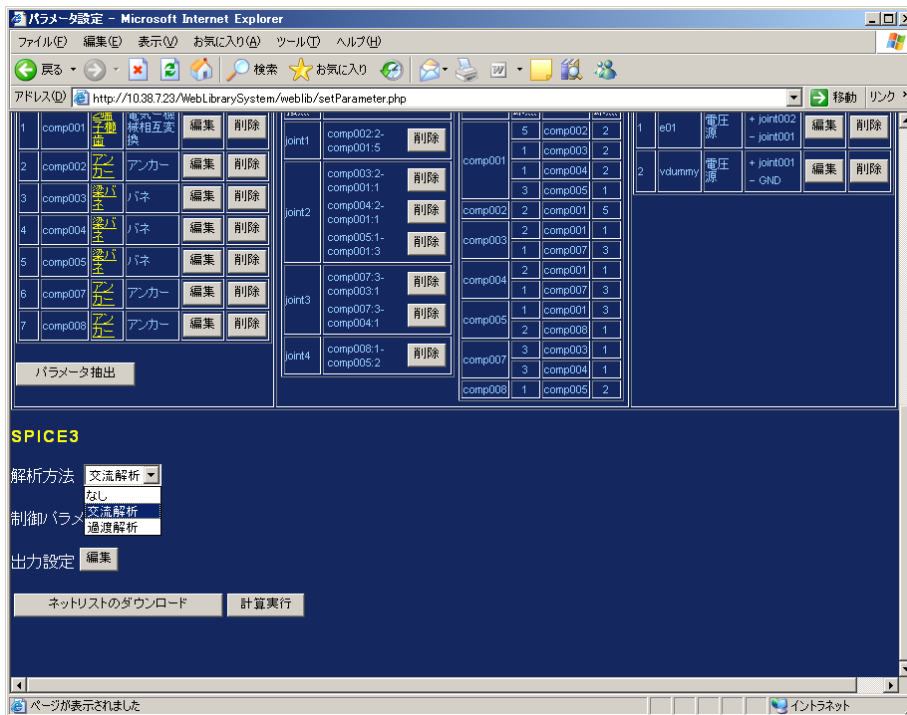
f) 回路シミュレーション設定機能

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



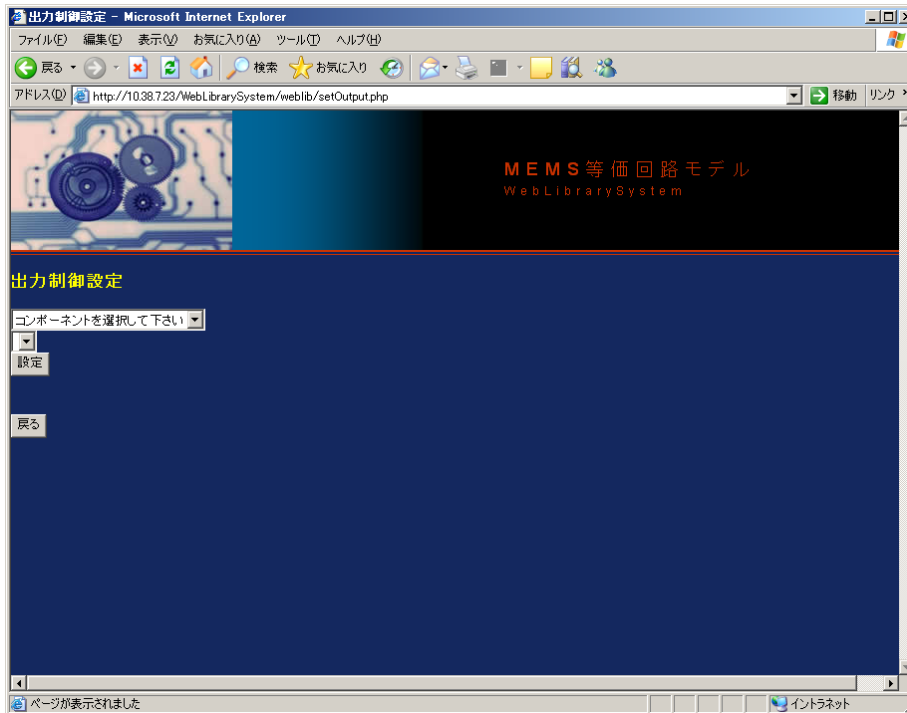
図⑤.5-2-13 解析方法



図⑤.5-2-14 制御パラメータ(交流解析)



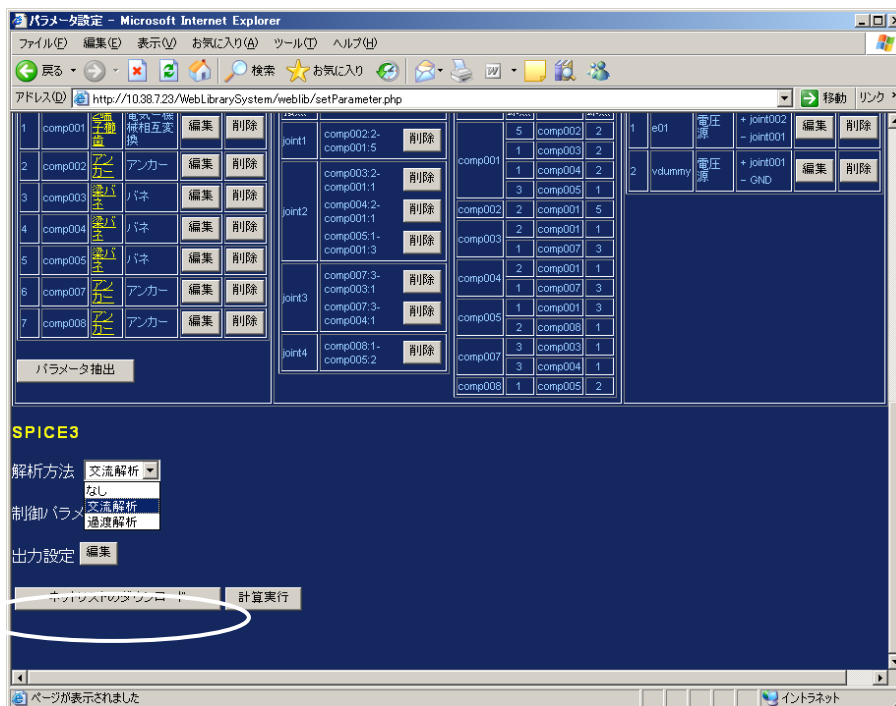
図⑤.5-2-15 制御パラメータ(過渡解析)



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

```

http://10.38.723/WebLibrarySystem/weblib/tmp/NetlistUhn9.cir - Microsoft Internet Explorer
ファイル(F) 編集(E) 表示(V) お気に入り(A) ツール(T) ヘルプ(H)
戻る 検索 お気に入り
アドレス(A) http://10.38.723/WebLibrarySystem/weblib/tmp/NetlistUhn9.cir 移動 リンク

* test
* ./tmp/Parameter3F5m4Y
* ./tmp/ExtParameterDFSKNx

* External Source(s)
ve01 enodejoint001 enodejoint002 ac 1.0 0
vvdummy enodejoint001 0 ac 0.0 0

* Device Subcircuit Calls
xcircuit_test enodejoint001 enodejoint002 0 circuit_test

* Type of Analysis
.ac lin 100 1.19e8 1.192e6

* Batch Output
* Output conv_comb2term_comp001 velocity
* y direction
.print ac mag(i(B:circuit_test:conv_comb2term_comp001:voly)) i(B:circuit_test:conv_comb2term_comp001:voly) ph(i(B:circuit_
* Output conv_comb2term_comp001 force
* y direction
.print ac mag(v(circuit_test:mnode1_y,circuit_test:mnode2_y)) v(circuit_test:mnode1_y,circuit_test:mnode2_y) ph(v(circuit_
* Output e01 current
.print ac mag(i(ve01)) i(ve01) ph(i(ve01))

.subckt circuit_test enodejoint001 enodejoint002 0
* Subcircuit Calls
xconv_comb2term_comp001 enodejoint002_comp001 enodejoint001_comp001 mnode1_y mnode2_y conv_comb2term_comp001
xmass_comp001_mass_1 enodejoint002_comp001 enodejoint002_comp001 mnode2_y mnode3_y mass_comp001_mass_1
xmass_comp001_mass_2 enodejoint001 enodejoint001_comp001 mass_comp001_mass_2
xspring_beam_comp003 enodejoint002 enodejoint006 mnode3_y mnode4_y spring_beam_comp003
xspring_beam_comp004 enodejoint002 enodejoint006 mnode4_y mnode5_y spring_beam_comp004
xspring_beam_comp005 enodejoint002 enodejoint008 mnode5_y mnode6_y spring_beam_comp005
xspring_beam_comp006 enodejoint002 enodejoint008 mnode6_y mnode1_y spring_beam_comp006
.ends circuit_test

* Subcircuit Description(s)
* 2 terminal Comb Component
-----001

```

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。

パラメータ設定 - Microsoft Internet Explorer

アドレス(A) http://10.38.723/WebLibrarySystem/weblib/setParameter.php 移動 リンク

1	comp001	電圧源	+	joint002	-	joint001	編集	削除
2	comp002	アンカー						
3	comp003	パネ						
4	comp004	パネ						
5	comp005	パネ						
6	comp007	アンカー						
7	comp008	アンカー						

パラメータ抽出

SPICE3

解析方法: 交流解析
なし

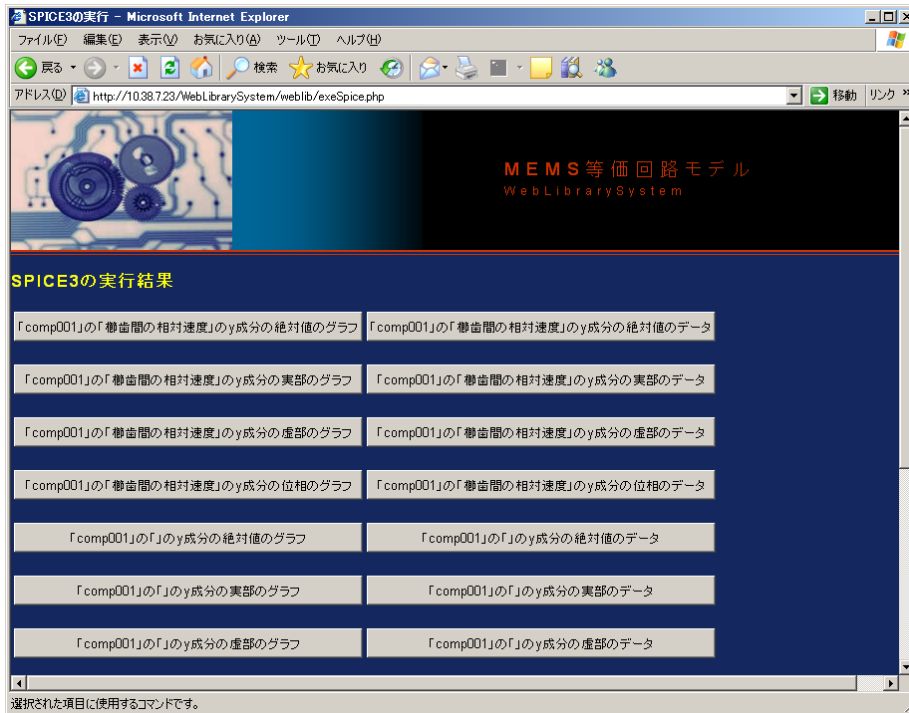
制御パラメ: 交流解析
過渡解析

出力設定: 編集

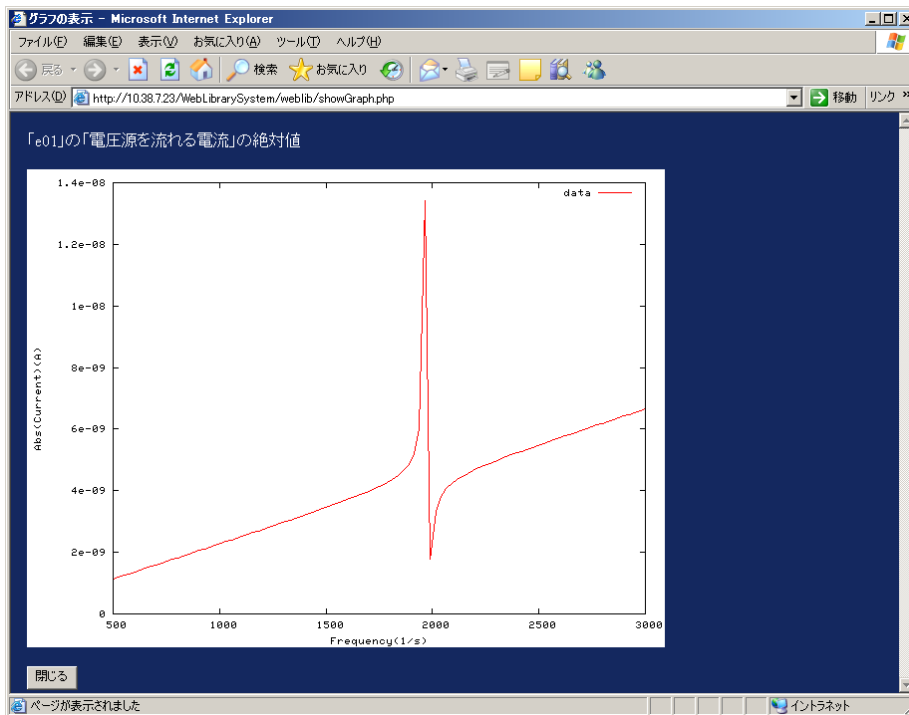
ネットリストのダウンロード

計算実行

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 [テクスチャー](#)、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。

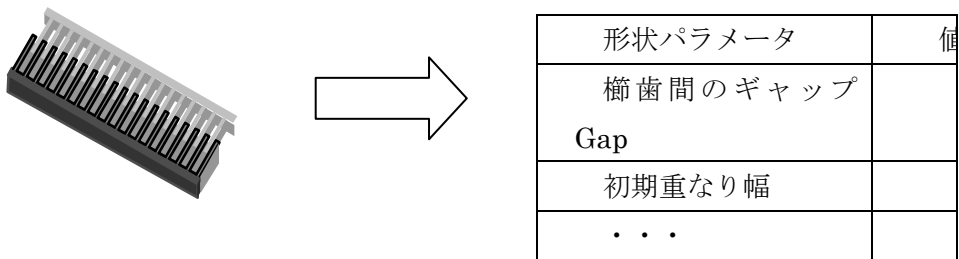
no	技術項目	課題
1	回路モデル→3次元 CAD モデル : 形状データ	生成のための内部情報はある。
2	回路モデル→3次元 CAD モデル : 材料物性データ	生成のための内部情報はある。
3	3次元 CAD モデル→回路 モデル : 形状データ	3次元のモデル形状から、Beam、Plate など回路ソフトで使用する単純化されたモデル形状に変換することが必要。 3次元モデルの形状の自由度の極めて高いことを考えると、技術的難易度は極めて高い。
4	3次元 CAD モデル→回路 モデル : 材料物性データ	3次元 CAD モデルにおける材料物性値は、立体と直接関係付けられてなく、材質番号や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

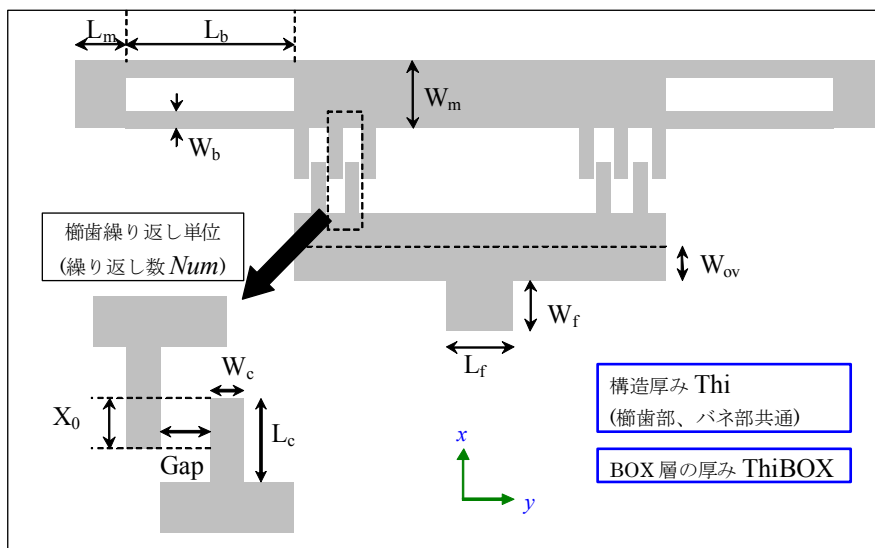
プログラムの実装においては、CAD モデルでの座標系と等価回路モデルの座標系の対応をユーザが指示する仕組みが必要になる。

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

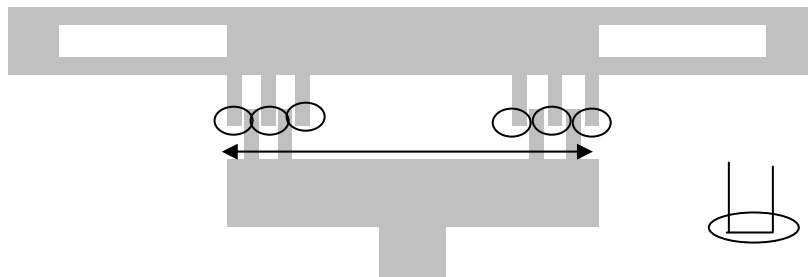
立体の境界線から、XY ビューでの最上面に属する境界線をすべて、抜き出す。

（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

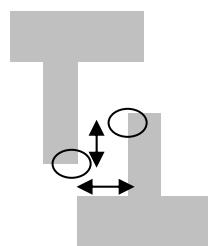
(櫛歯の長さ \leq STEP2 での櫛歯の長さ：参考情報)

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 、

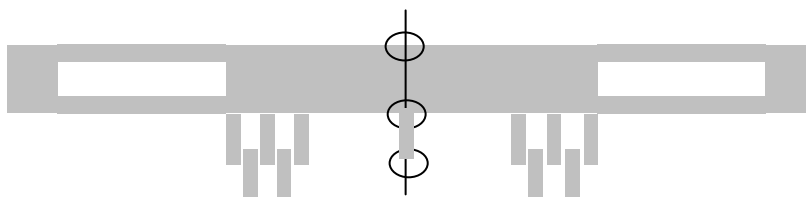
Y 座標値の差により、櫛歯間の GAP Gap

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。



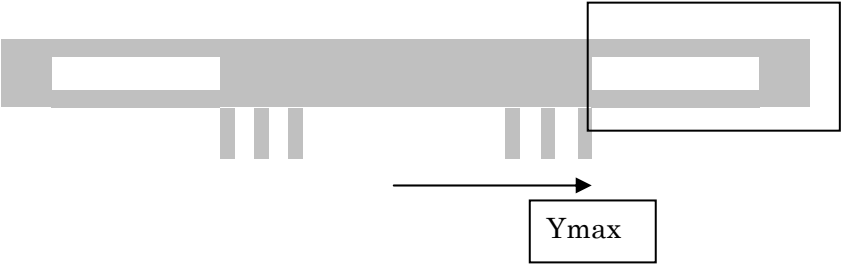
○：交点。下部または中間部の 2 点のいずれかが求まる。
 (櫛歯数が奇数であれば下部、偶数であれば中間部)

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 $W_m = 2 \text{ 点間交点の距離}$

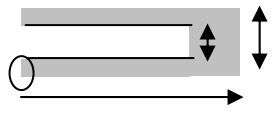
以上で、櫛歯部分の形状パラメータが得られた。

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。



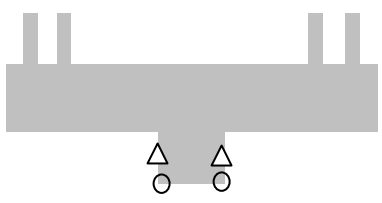
この取り出した境界線の中で、Y 値を見て、
 バネの中空部に相当する境界線の横幅 (一) を梁の長さ (L_b) とする。



{「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、
 {取り出した境界線全体の X 幅 (大きな両矢印)
 - 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

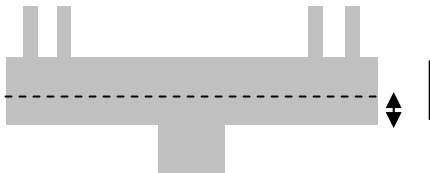


下部平面境界線の中から、X 値が最少となる頂点 (○)、および、この頂点を片側端点とする境界線 (△) を求める。

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)

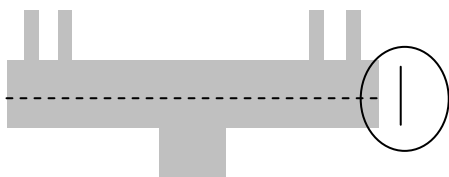
= 櫛歯頂点から Z 軸方向に向かう境界線の長さ

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

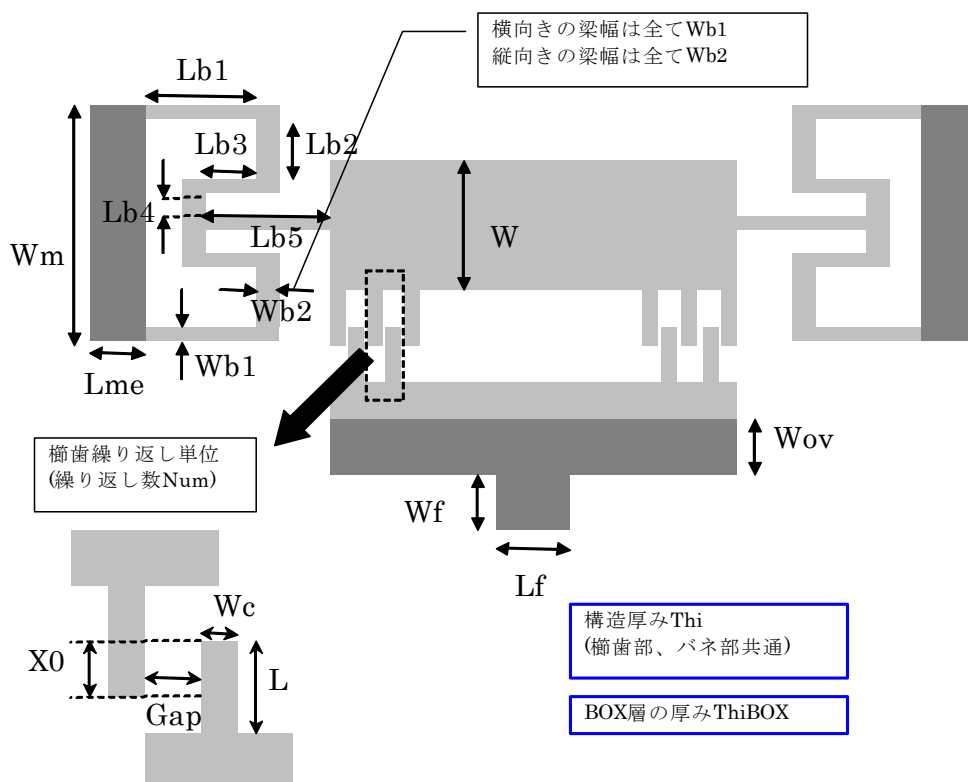
CAD データの形状を決定するためのパラメータは、基盤部の幅 (下記の縦棒長さ) を除き、すべて与えられている。



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>

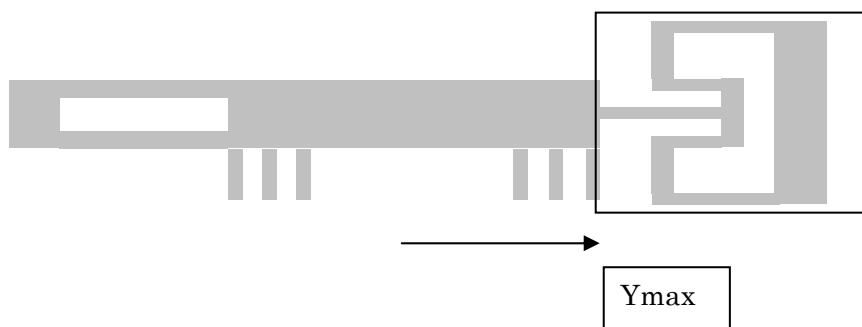
前節の 2LX デバイスと、STEP5 のバネ部・可動部電極部を除き、同一である。

STEP 5 は下記の通り。

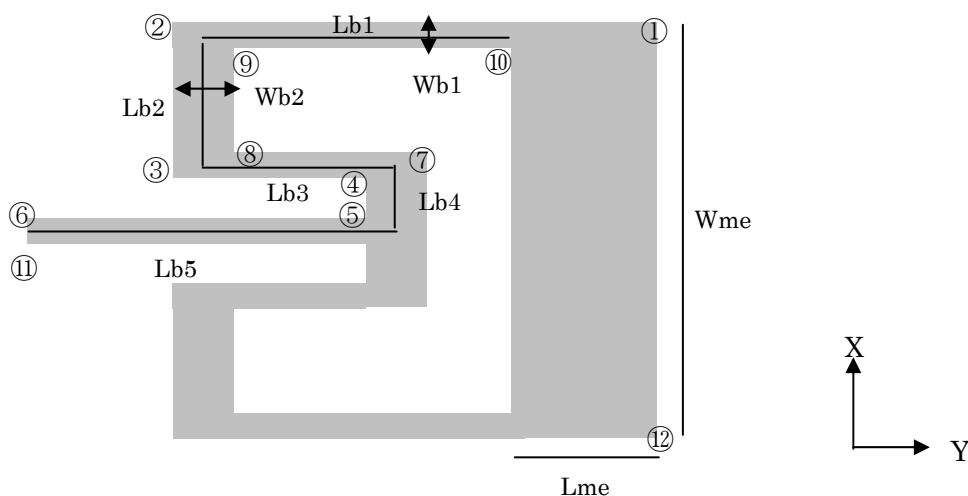
STEP 5 バネ部・可動部電極部の形状パラメータ

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

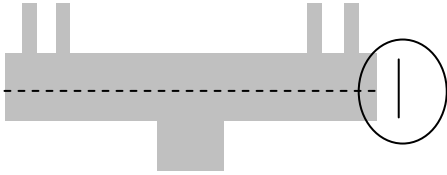
バネ部の幅

$Wb1 = ①$ 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

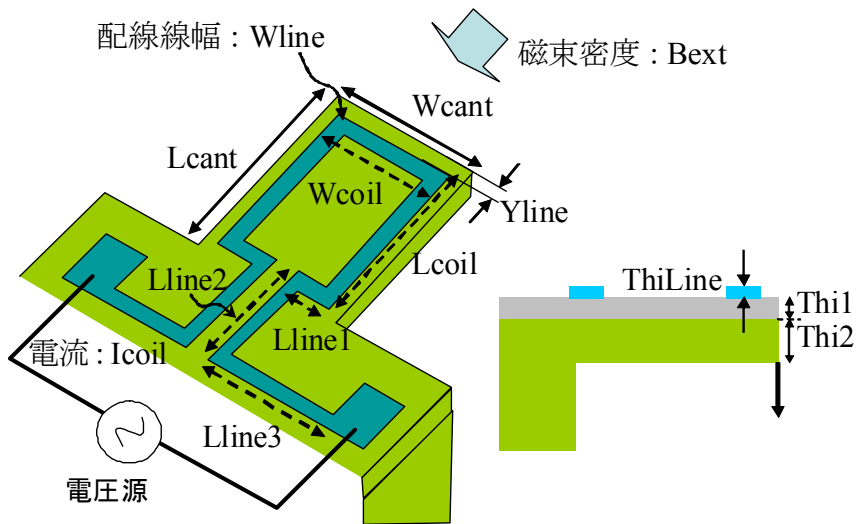
CAD データの形状を決定するためのパラメータは、基盤部の幅（下記の縦棒長さ）を除き、全て与えられている。



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>

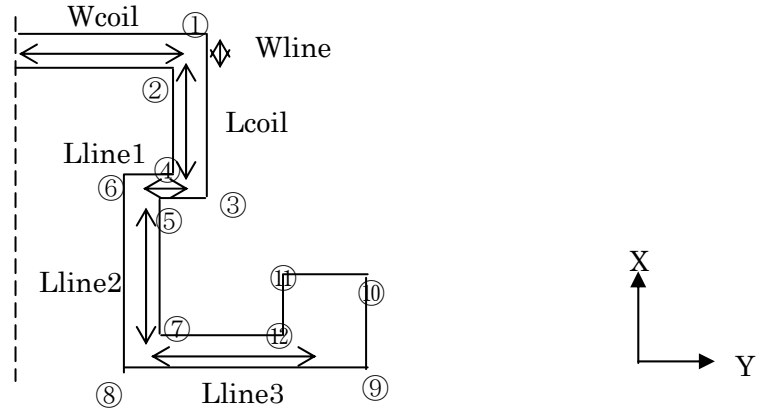
モデルデータの座標系に関し

- 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

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

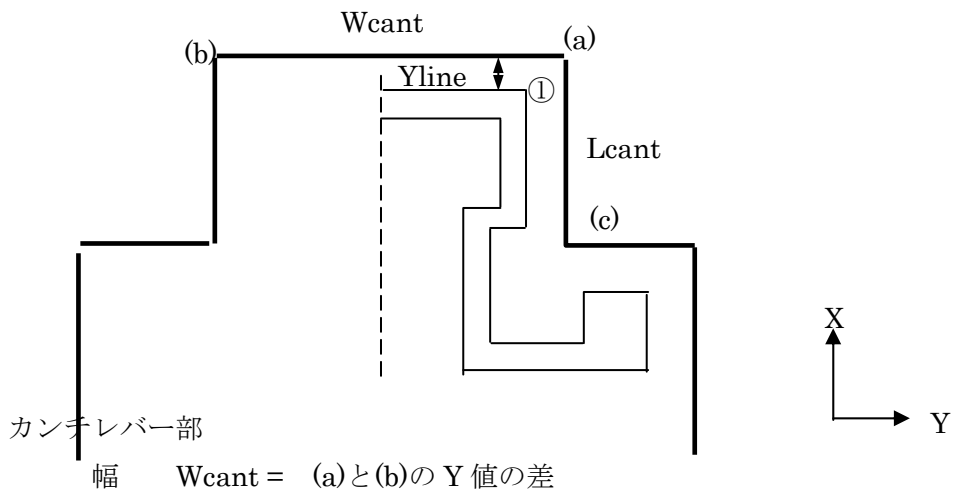
$L_{line2} = (\text{⑤と⑥の X 値の平均}) \text{ と } (\text{⑦と⑧の X 値の平均}) \text{ の差}$

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

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

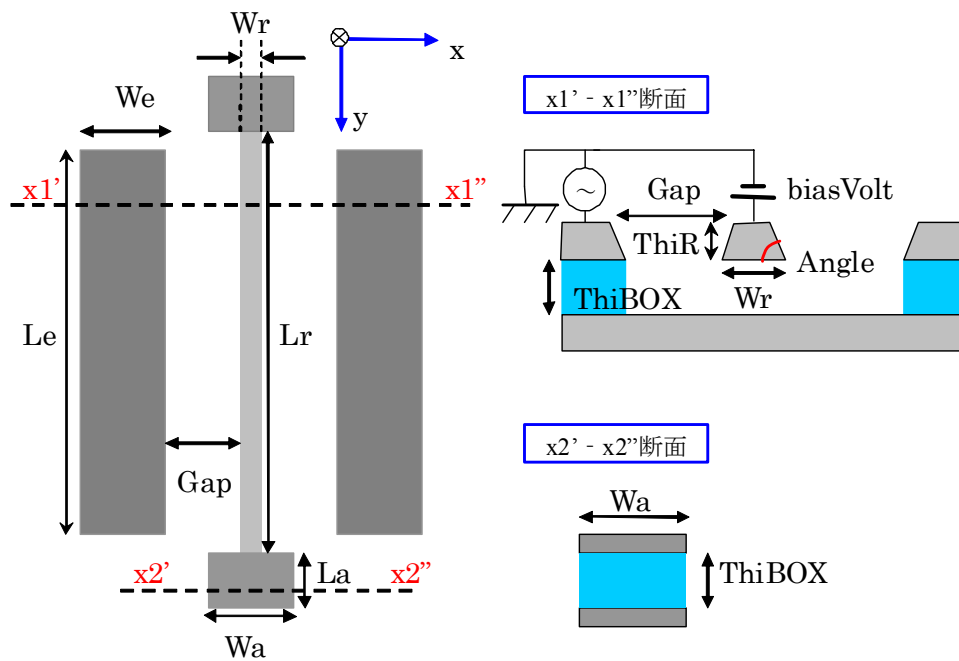
(3) 等価回路モデルの形状パラメータから CAD データへの変換

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>

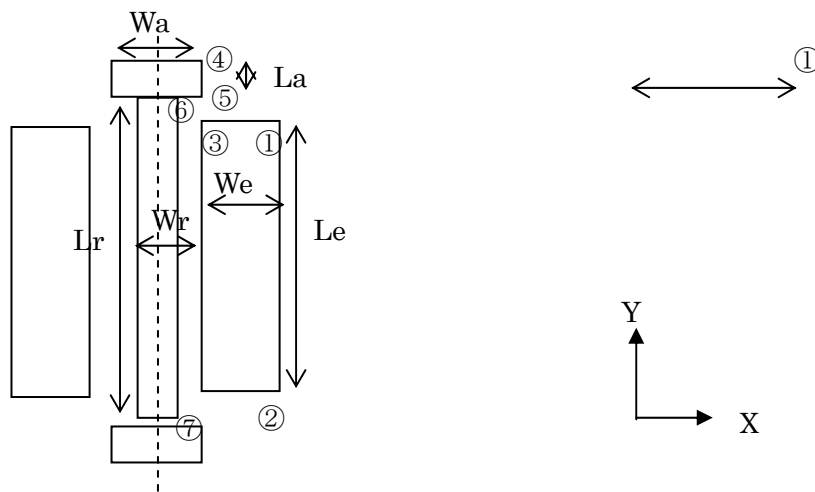
モデルデータの座標系に関し

- 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 $We = \text{①と③の X 値の差}$

縦の長さ $Le = \text{①と②の Y 値の差}$

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

STEP3 アンカー部

横の長さ $Wa = \text{④の X 値} \times 2.0$

縦の長さ $La = \text{④と⑤の Y 値の差}$

STEP4 振動子

長さ $Lr = \text{⑥と⑦の Y 値の差}$

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

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

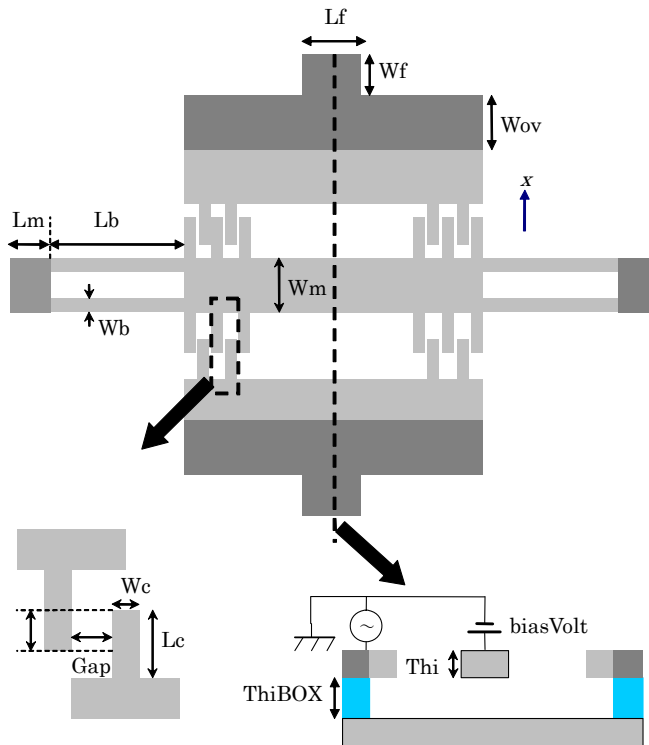
側面角 $Angle = \text{⑥の立体上部（台形の上辺部分）と立体底部（台形の底辺部分）の X 値の差と、厚さ ThiR より求めた角度。}$

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>

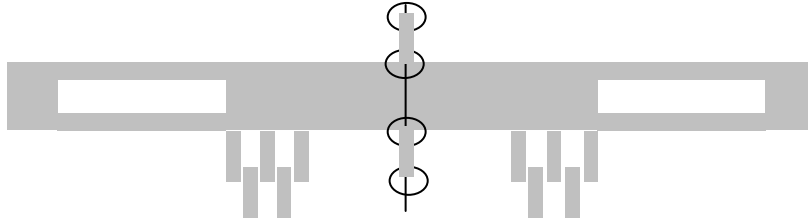
- ①立体データは、中間部（可動部）と上部および下部（固定部）の3立体から構成される。
- ②モデルデータの座標系に関し
櫛歯の移動方向が X 軸、歯の並び方向は Y 軸、奥行き（厚さ）方向が Z 軸とする。
- ③櫛歯は Y 軸（横軸）方向に左右対称で、対象中心の Y 座標値 = 0 とする。
- ④バネ部分をもつ構造は、中間部の立体とする

<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)

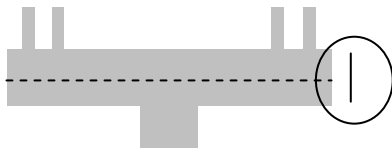
交点 2 点の最小 Y 値が櫛歯部分の先端頂点の Y 値と一致すれば、

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

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

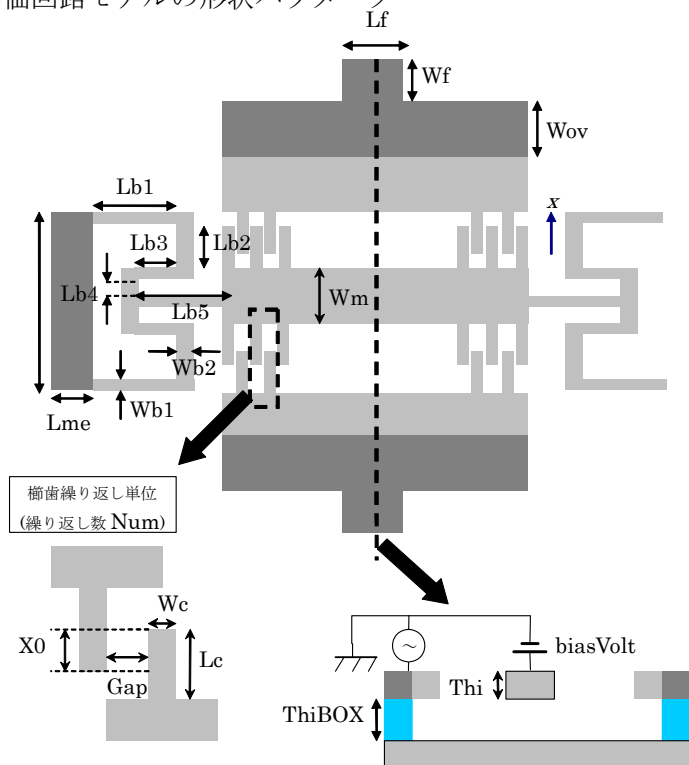
CAD データの形状を決定するためのパラメータは、基盤部の幅 (下記の縦棒長さ) を除き、すべて与えられている。



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>

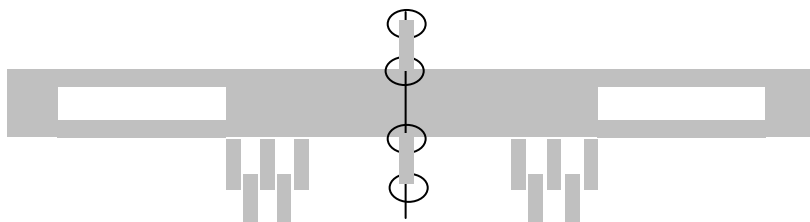
- ① 立体データは、中間部（可動部）と上部および下部（固定部）の3立体から構成される。
- ② モデルデータの座標系に関し
 櫛歯の移動方向が X 軸、歯の並び方向は Y 軸、奥行き（厚さ）方向が Z 軸とする。
- ③ 櫛歯は Y 軸（横軸）方向に左右対称で、対象中心の Y 座標値 = 0 とする。
- ④ バネ部分をもつ構造は、中間部の立体とする

<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)

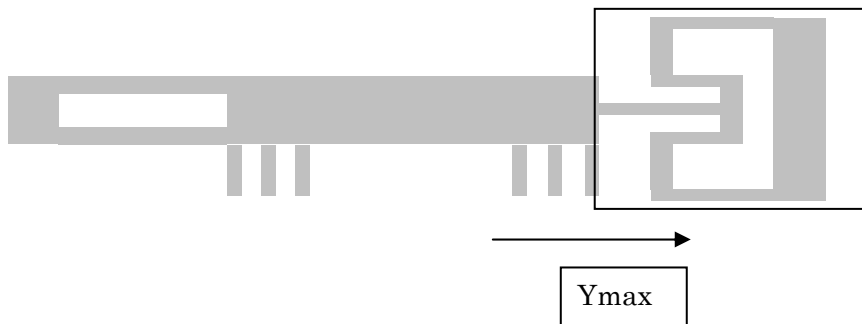
交点 2 点の最小 Y 値が櫛歯部分の先端頂点の Y 値と一致すれば、

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

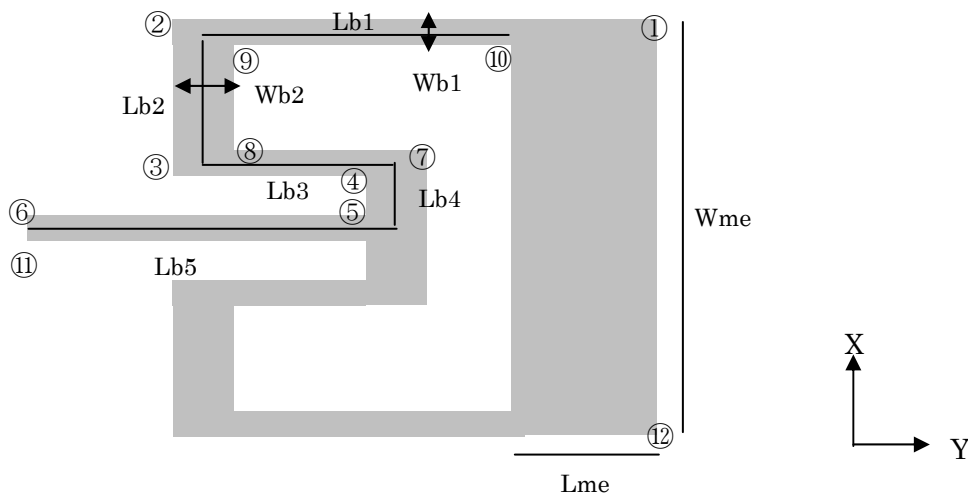
else $W_m = 2 \text{ 点間交点の距離}$

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。



可動部の電極部

横の長さ L_{me} = ①と②の Y 値の差

縦の長さ W_{me} = ①と⑫の X 値の差

バネ部の長さ：

L_{b1} = (②と⑨の Y 値の平均) と (⑩の Y 値) の差

L_{b2} = (②と⑨の X 値の平均) と (③と⑧の X 値の平均) の差

L_{b3} = (③と⑧の Y 値の平均) と (⑦と④の y 値の平均) の差

L_{b4} = (⑦と④の X 値の平均) と (⑥と⑪の X 値の平均) の差

L_{b5} = (⑦と④の Y 値の平均) と (⑥の y 値) の差

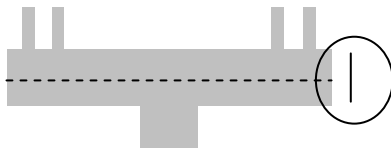
バネ部の幅

W_{b1} = ①と⑩の X 値の差

W_{b2} = 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

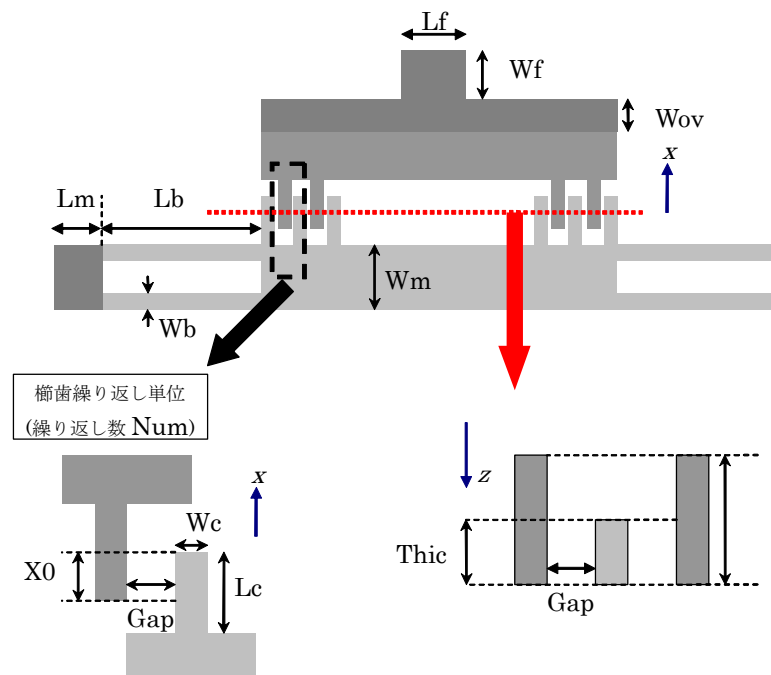
CAD データの形状を決定するためのパラメータは、基盤部の幅（下記の縦棒長さ）を除き、すべて与えられている。



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。

7) 2LXZ

(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（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)

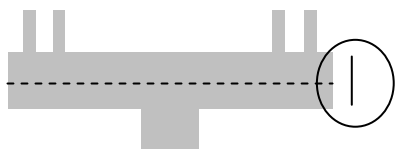
= 可動部の櫛歯頂点から Z 軸方向に向かう境界線の長さ

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

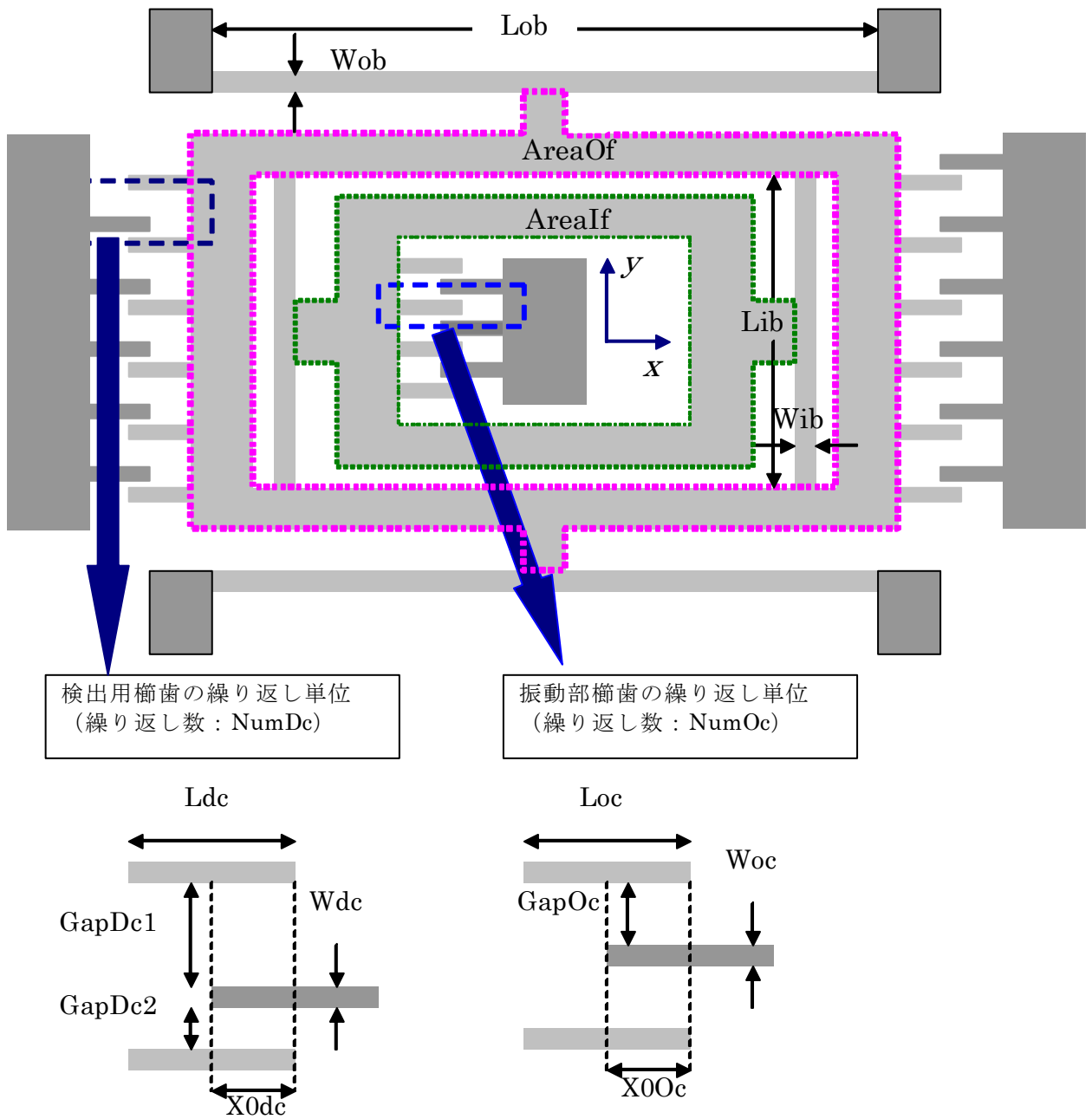
(3) 等価回路モデルの形状パラメータから CAD データへの変換

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

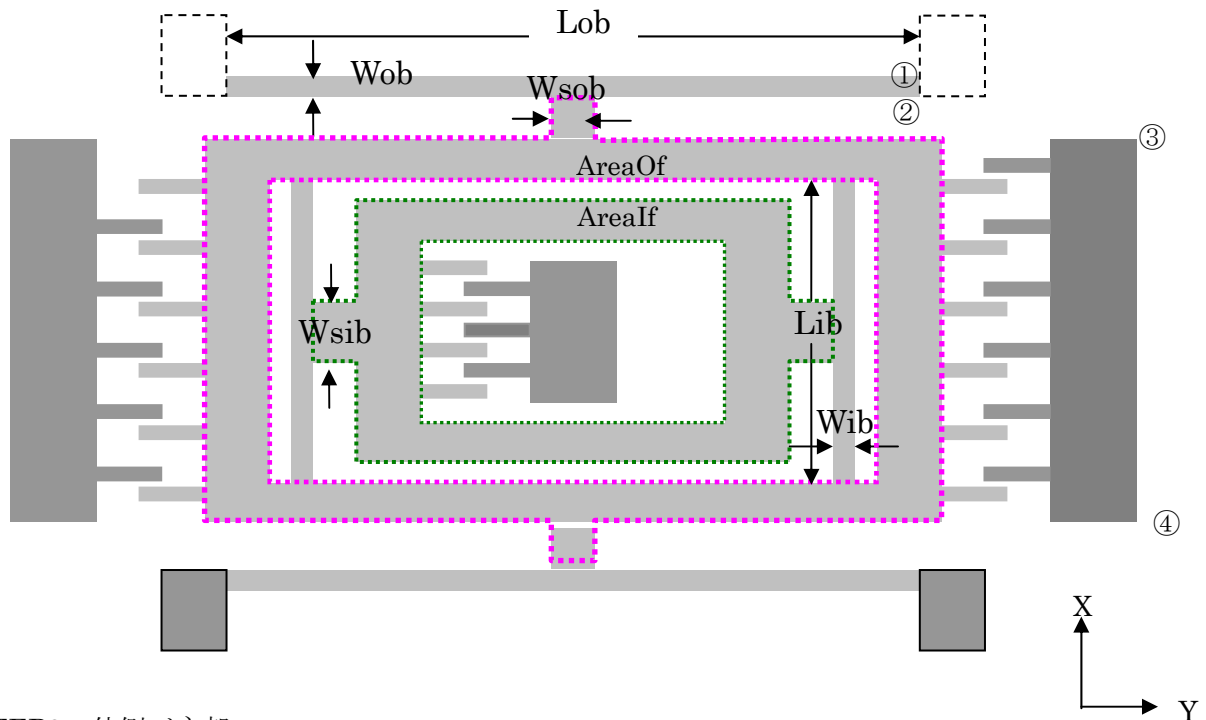
- ① 櫛歯の移動方向が X 軸、歯の並び方向は Y 軸、奥行き (厚さ) 方向が Z 軸とする。
- ③ 検出用の櫛歯は Y 軸 (横軸) 方向に左右対称で、対象中心の Y 座標値 = 0 とする。
 (対象中心の Y 値 not=0 であっても、その値を入力または自動計算すれば = 0 と同じ内部ロジックが適用可)

④振動部櫛歯は、左右の中心から左側に位置するとする。

<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。



STEP2 外側バネ部

外側バネの支持部の立体を除いた、X 値最大の立体が外側バネとする。

梁の幅 $Wob =$ ①と②の X 値の差

梁の長さ $Lob =$ ②の Y 値 \times 2.0

STEP3 検出用櫛歯部分

全体の Y 値最大立体の境界線を③④からたどり、検出用の櫛歯寸法パラメータを取り出す。詳細は、2LX における櫛歯寸法パラメータと同様である。

→ $GapDC1, GapDC2, X0DC, Ldc, Wdc, NumDc$

STEP4 振動櫛歯部

全体の中心に位置する立体から STEP3 と同様に、櫛歯寸法を求める。

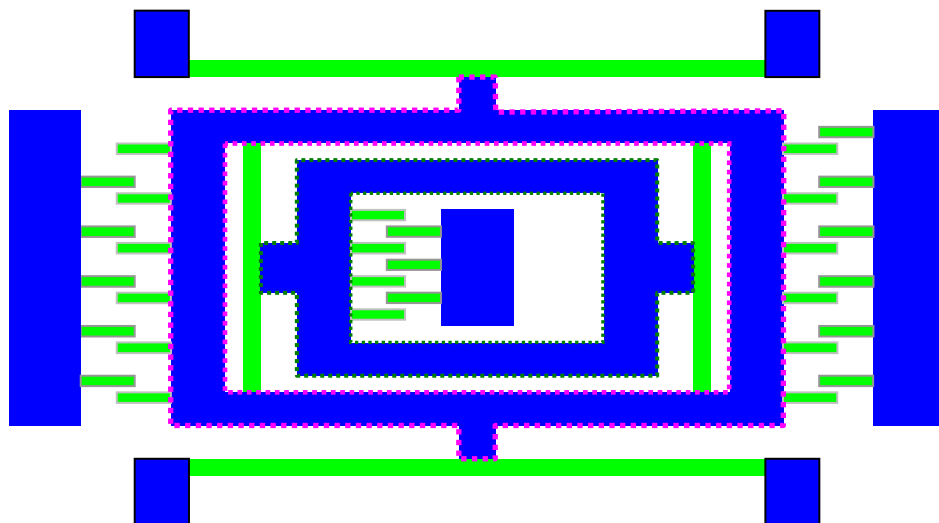
→ $GapOc, X0Oc, Loc, Woc, NumOc$

STEP5 各部共通

構造の厚さ $Thi =$ 櫛歯部分立体の Z 軸方向の厚さ

(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

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。

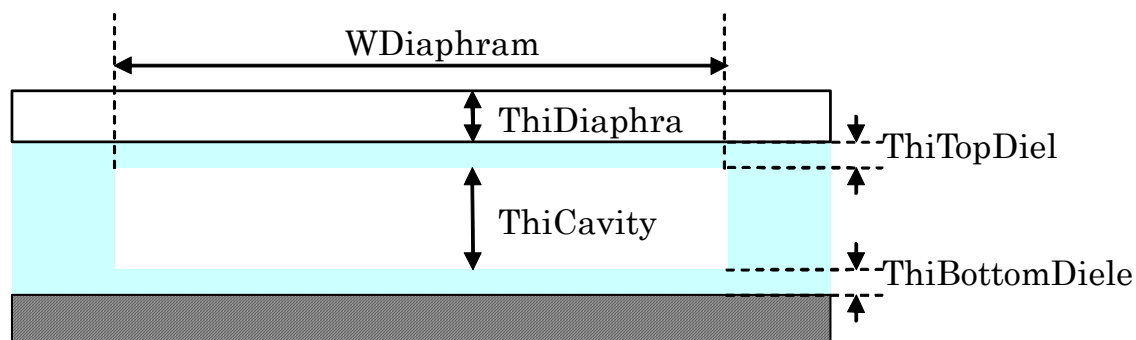


AreaOf, AreaIF で与えられる面積値は与えられているので、未確定部分の扱いとして、例えば、

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。

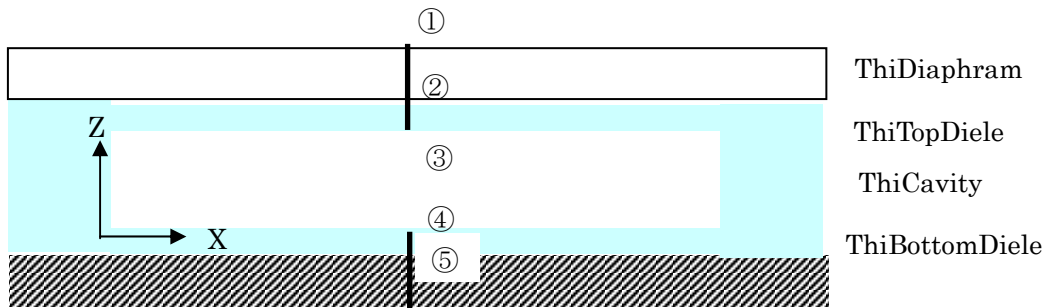
<形状パラメータ抽出ロジック>

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。



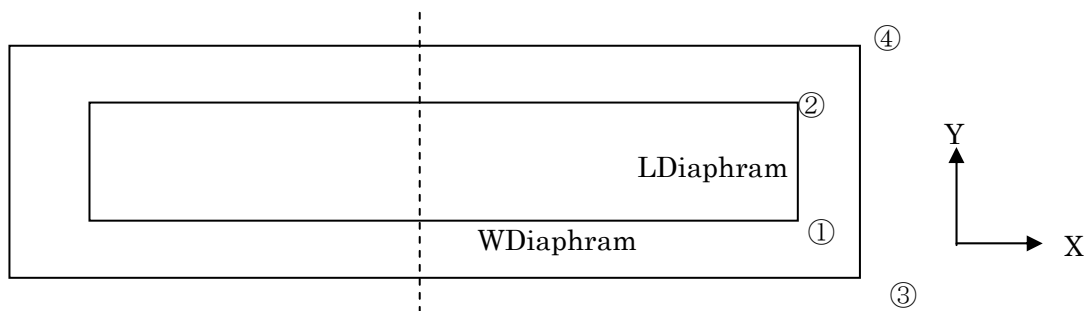
ダイアフラム（最上部立体）の厚さ	$\text{ThiDiaphram} = \text{①と②の Z 値の差}$
誘電体層（第2層立体）の厚さ	$\text{ThiTopDiele} = \text{②と③の Z 値の差}$
空洞部の厚さ	$\text{ThiCavity} = \text{③と④の Z 値の差}$
誘電体層の厚さ	$\text{ThiBottomDiele} = \text{④と⑤の Z 値の差}$

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	$\text{WDiaphram} = \text{①の X 値} \times 2.0$
奥行き	$\text{LDiaphram} = \text{①と②の Y 値の差}$

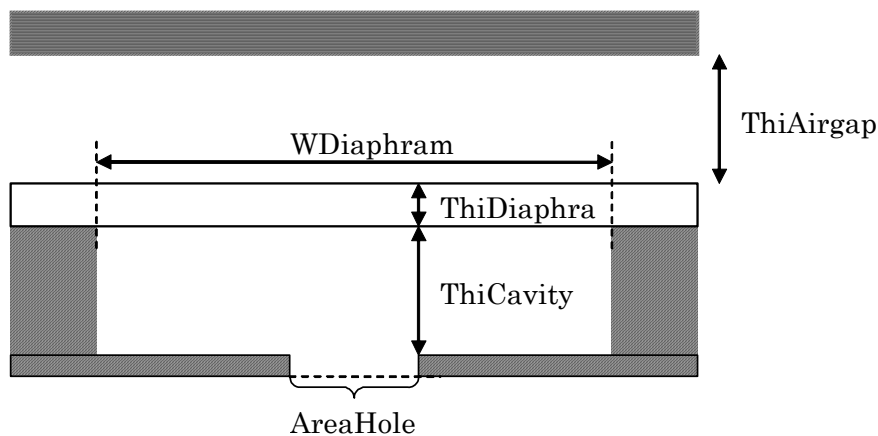
(3) 等価回路モデルの形状パラメータから CAD データへの変換

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。

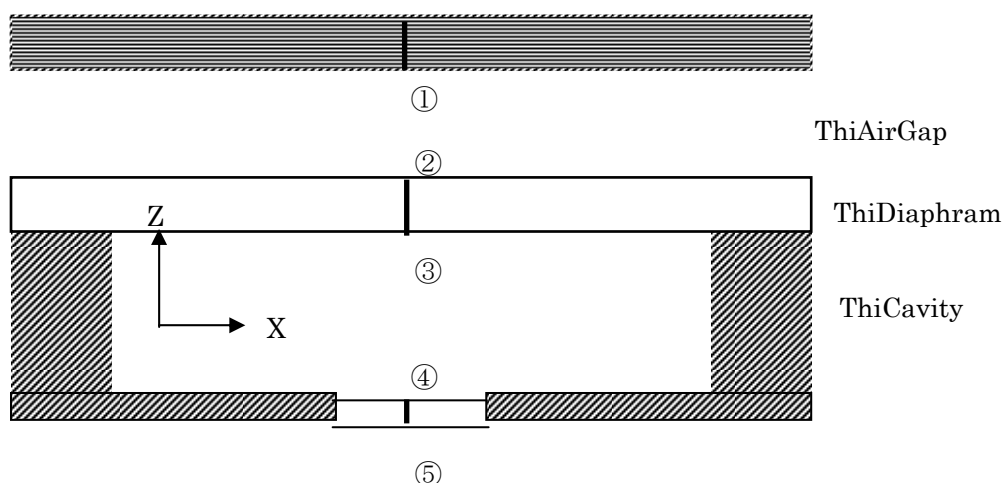
<形状パラメータ抽出ロジック>

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。



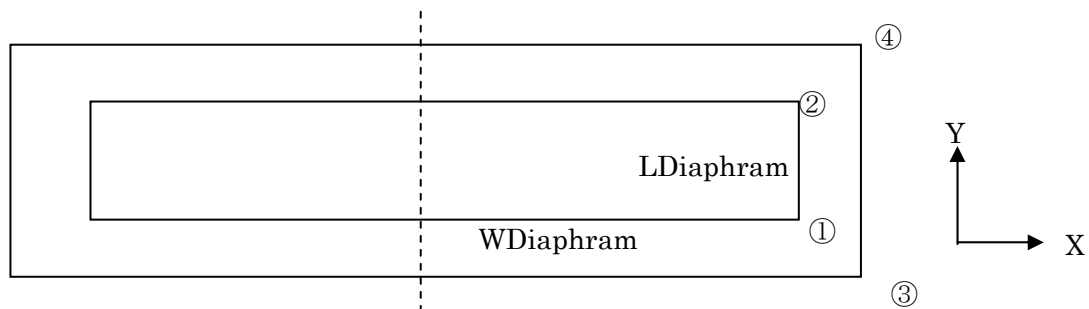
ダイアフラムの上部空気層の厚さ $\text{ThiAirGap} = \text{①と②の Z 値の差}$
 ダイアフラムの厚さ $\text{ThiDiaphragm} = \text{②と③の Z 値の差}$
 空洞部の厚さ $\text{ThiCavity} = \text{③と④の Z 値の差}$

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。



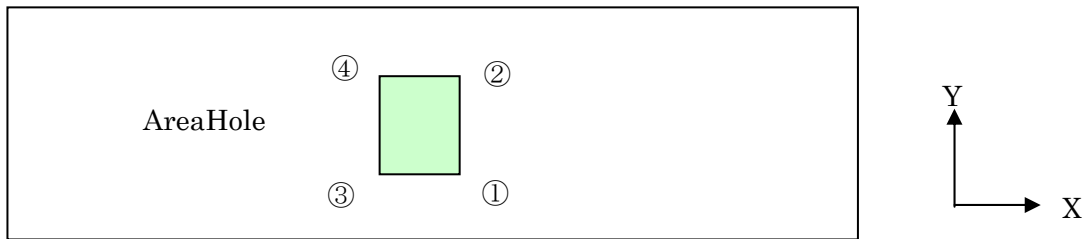
ダイアフラム部の幅 $\text{WDiaphragm} = \text{①の X 値} \times 2.0$
 奥行き $\text{LDiaphragm} = \text{①と②の Y 値の差}$

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。

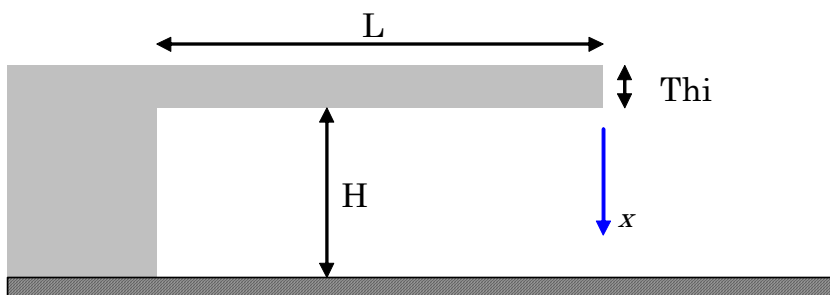
- ①最上面立体の厚さ、(STEP 1 の図で①の上)
- ②ダイアフラムの周辺部分 (STEP 2 の図で③、④の寸法)、
- ③下部電極の穴の縦横寸法 (STEP 3 の図で、穴の縦横)

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

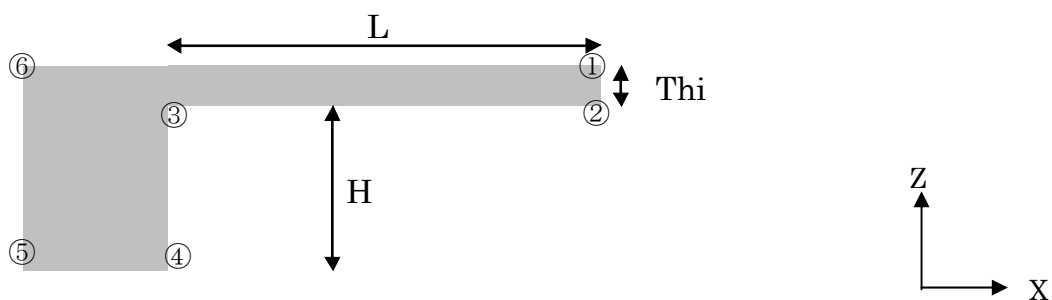
①横方向が X 軸、高さ方向が Z 軸とする。

<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

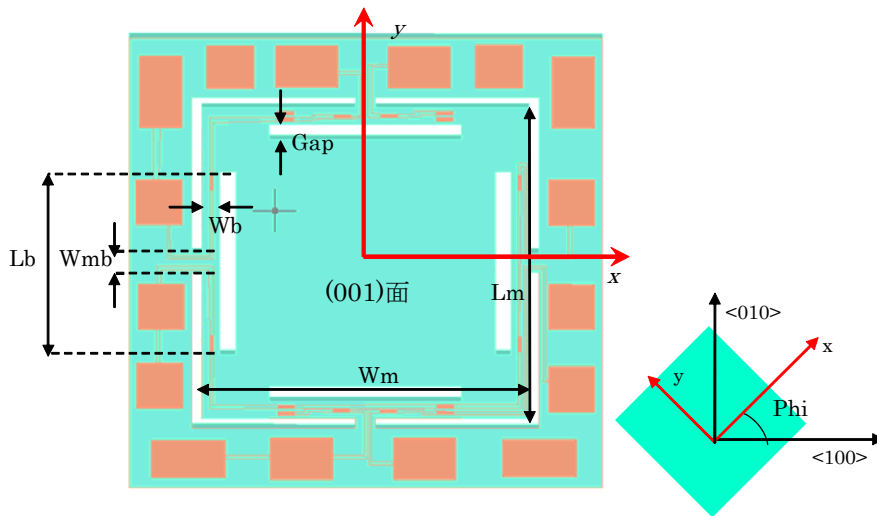
また、幅 W は = 最上面立体の Y 値の最大値と最小値の差 で定める。

(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

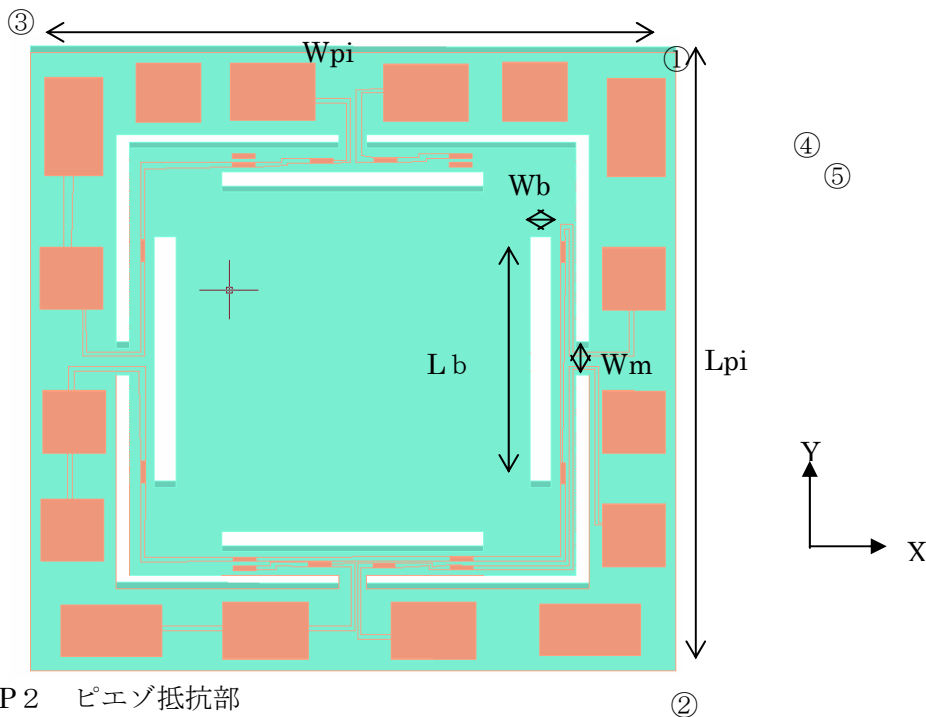
①モデル全体は、上下対称、左右対称とし、中心点が原点とする。

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

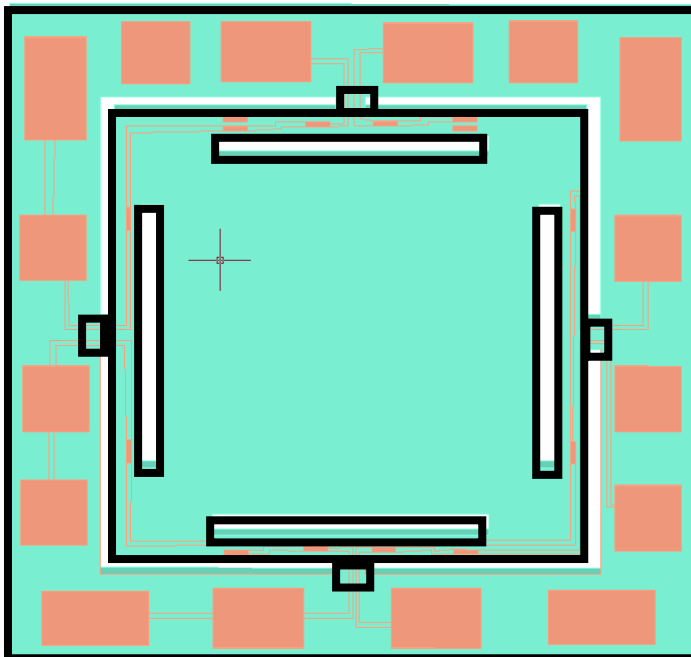
長さ $L_{pi} = \text{①と②の Y 値の差}$

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

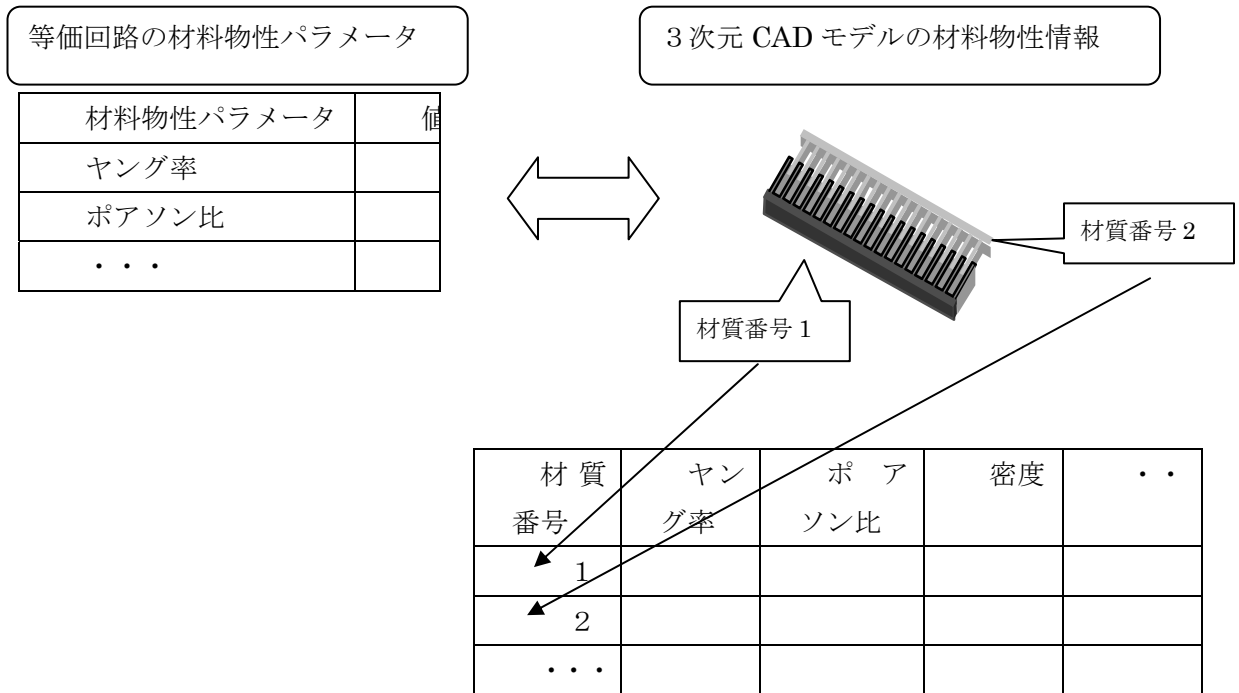
等価回路モデルから CAD データの材料物性パラメータへの相互変換

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。

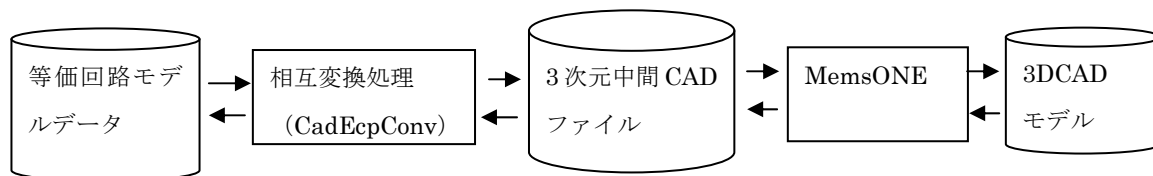
但し、今後、MemsONE以外のCADソフトが等価回路モデルとの相互変換機能と連携することを可能とするため、CADソフトに依存しない3次元CAD中間ファイルを定め、相互変換処理の主要処理は等価回路モデルと3次元中間CADファイルに間で実行する仕組みとした。

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、

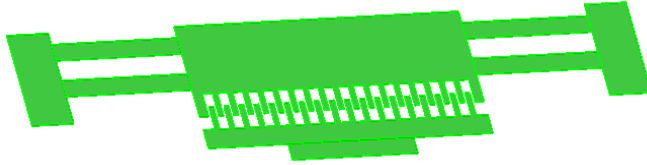
- ・付録 C. CadEcpConv 操作マニュアル

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

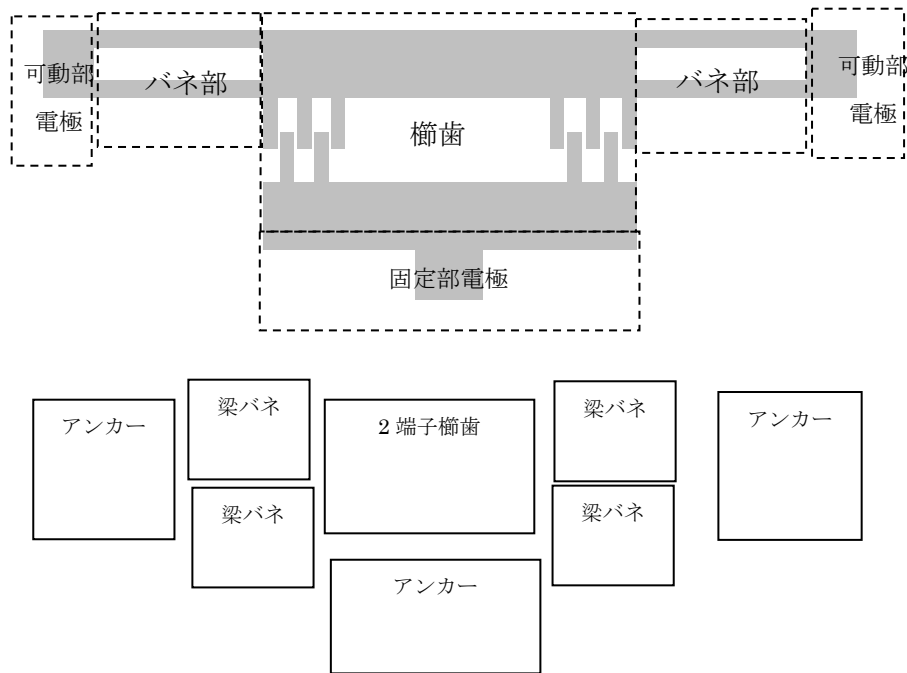
2端子櫛歯デバイスを例に、開発した相互変換処理の実行結果を示す。

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

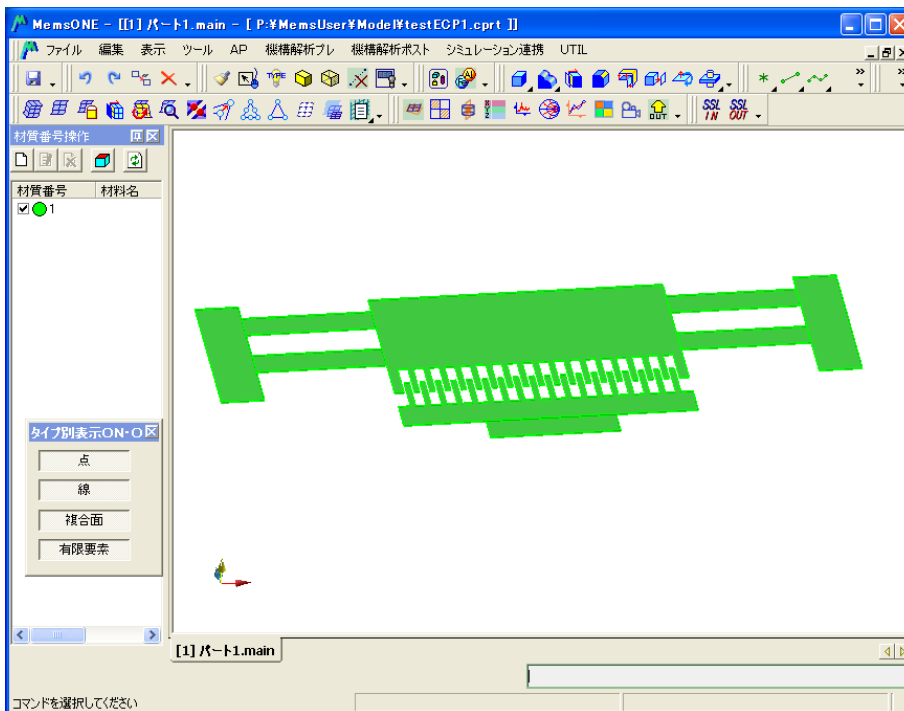
2端子櫛歯デバイスの部品構造と等価回路モデルとしての構成コンポーネントは 図⑤.6.2-3の通りとする。



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>

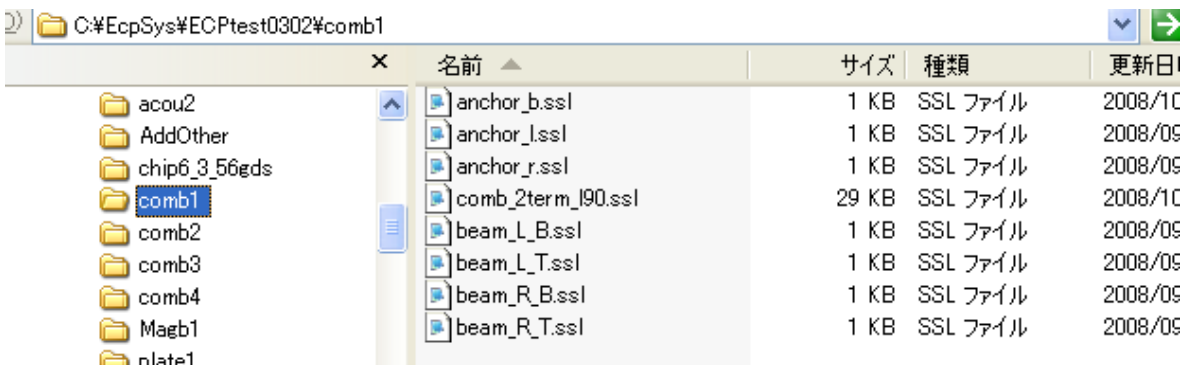
(1) MemsONEにて、コンポーネント毎の3次元 CAD ファイルを出力
MemsONE でモデリングした2端子櫛歯モデルを図⑤.6.2-4に示す。



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。

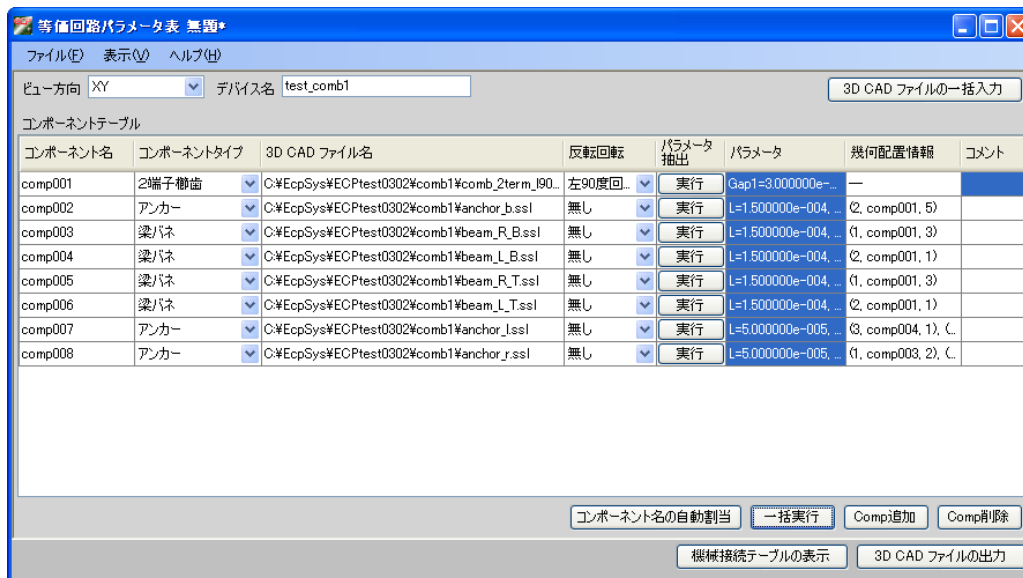


図⑤.6.2-5 MemsONEで作成された3次元 CAD ファイル群

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。



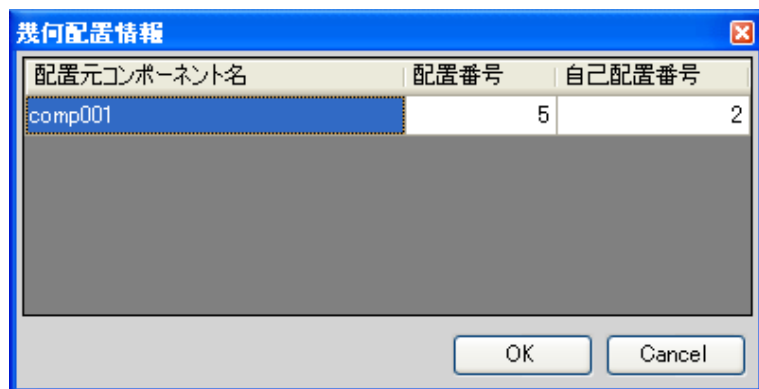
図⑤.6.2- 6 CadEcpConv 操作画面

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。



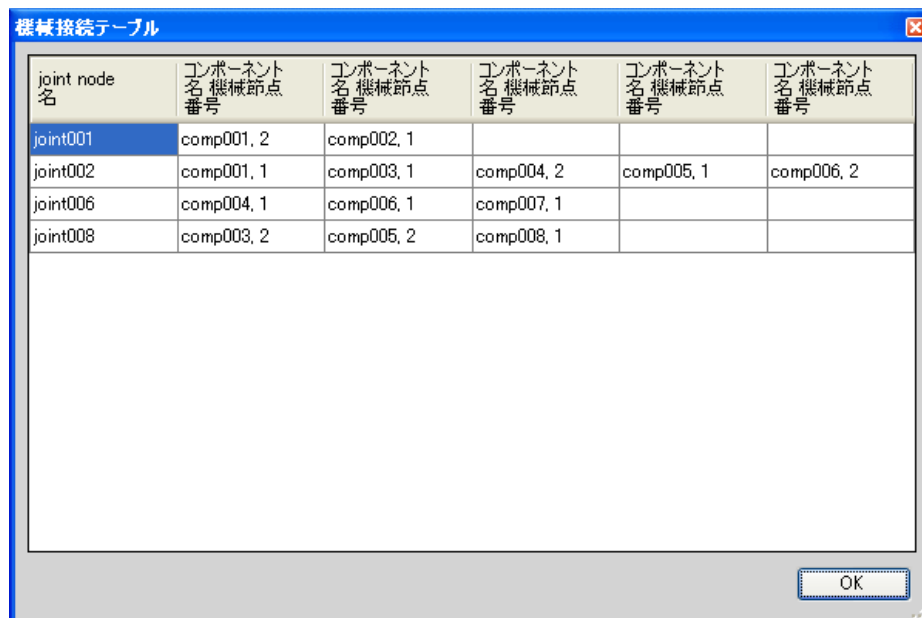
図⑤.6.2- 7 自動抽出された形状パラメータと材料物性パラメータ

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。

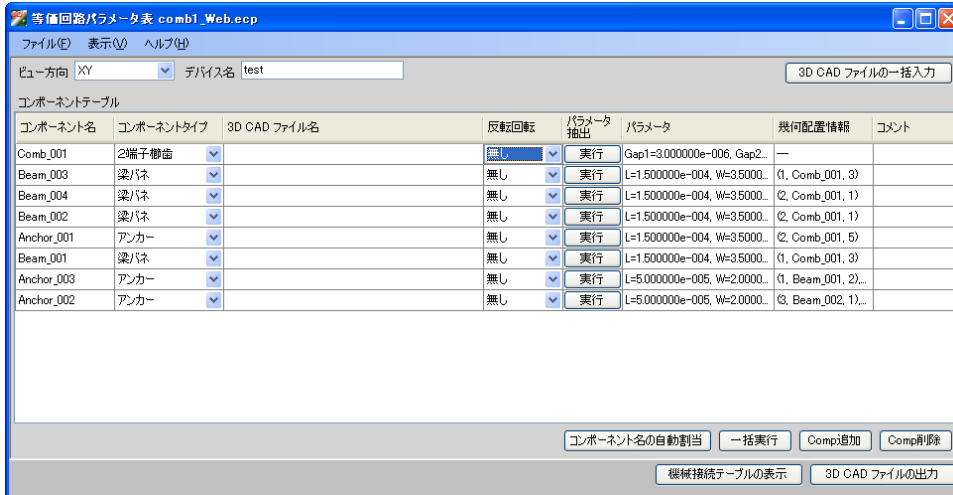


図⑤.6.2- 9 自動生成された機械接続情報

<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。

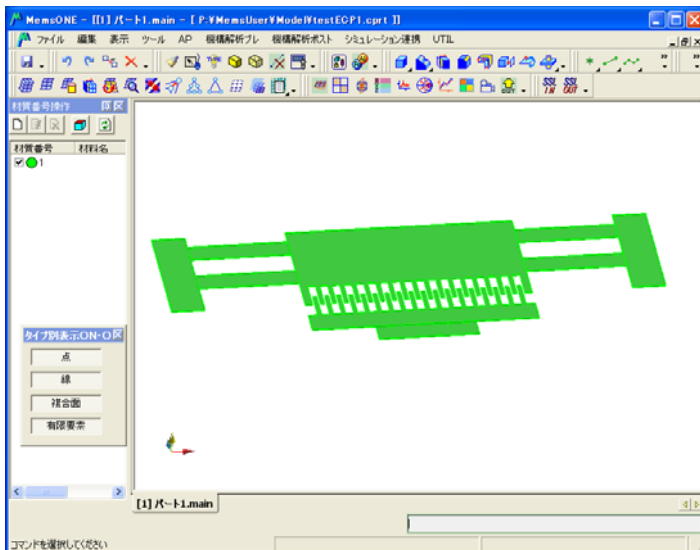


図⑤.6.2- 10 作成済み ECP ファイルが開かれた操作画面

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)	○

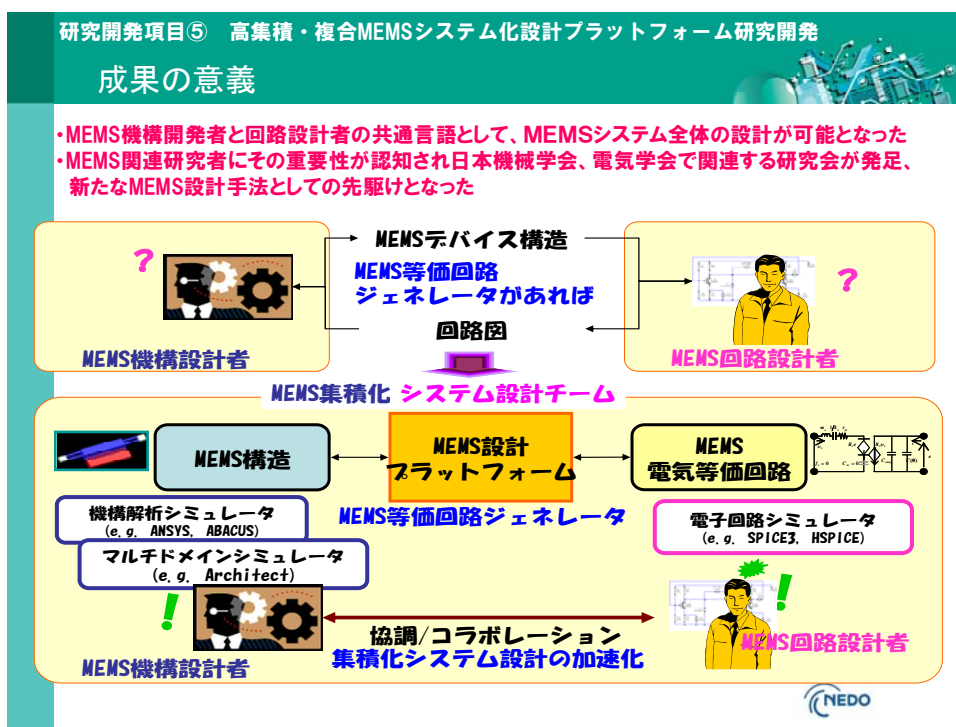
最終的に、WebシステムはH21年6月8日よりマイクロマシンセンターホームページ上にリリースした。

(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。



23

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

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

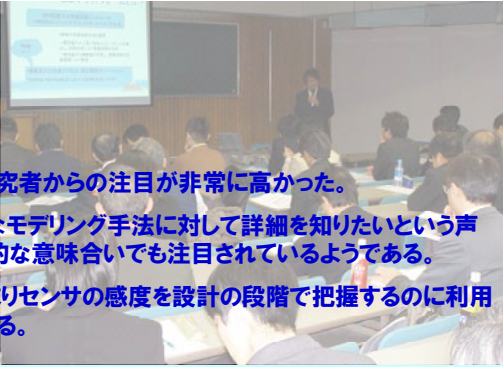
電気等価回路から考えるMEMS設計手法研究会 **研究会の反響**

「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)