

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	2本のリボン状フィルムを用いた積層型静電アクチュエータの開発
Title(English)	
著者(和文)	奥田一雄
Author(English)	Kazuo Okuda
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9231号, 授与年月日:2013年4月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:實吉敬二,長崎孝夫,堀岡一彦,河野俊之,旭耕一郎
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9231号, Conferred date:2013/4/30, Degree Type:Course doctor, Examiner:Keiji Saneyoshi,Takao Nagasaki,Kazuhiko Horioka,Toshiyuki Kohno,Koichiro Asahi
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

2本のリボン状フィルムを用いた 積層型静電アクチュエータの開発

奥田 一雄

目次

第1章 序論	1
1.1 緒言	3
1.2 本研究の目的	3
1.3 アクチュエータの種類と特徴	4
1.3.1 場の力を用いたアクチュエータ	4
1.3.2 材料自体の性質を用いたアクチュエータ	7
1.4 電磁力と静電力の比較	10
1.5 本論文の構成	12
第2章 静電アクチュエータ	15
2.1 緒言	17
2.2 静電アクチュエータ	17
2.2.1 駆動方向による分類	17
2.2.2 アクチュエータのサイズによる分類	18
2.2.3 静電型マクロアクチュエータの問題点	22
2.3 積層型静電アクチュエータ	22
2.3.1 アクチュエータの構造	22
2.3.2 積層型静電アクチュエータの問題点	23
2.3.3 積層型静電アクチュエータに求められるバネ特性	24
2.3.4 積層型四角形状静電アクチュエータ	25
2.3.5 積層型三角形状静電アクチュエータ	27
2.4 積層型静電アクチュエータの静電力	29
2.4.1 電極が平行な場合	29
2.4.2 電極が非平行な場合	30
2.5 本章のまとめ	32
第3章 実験およびシミュレーション方法	33
3.1 緒言	35
3.2 光テコの原理を用いた測定装置	35
3.2.1 測定装置の原理	35
3.2.2 倍率と誤差	36

3.2.3	測定装置	40
3.3	アクチュエータのバネ特性と発生力の測定方法	42
3.3.1	バネ特性の測定方法	42
3.3.2	発生力の測定方法	42
3.4	導電性薄膜	44
3.5	アクチュエータの変形解析	45
3.5.1	積層型四角形状静電アクチュエータ電極の変形	45
3.5.2	積層型三角形形状静電アクチュエータ電極の変形	47
3.5.3	積層型静電アクチュエータのヒンジの変形	48
3.6	シミュレーション方法	50
3.6.1	ANSYS について	50
3.6.2	ANSYS の特徴	50
3.6.3	解析の流れ	50
3.6.4	ANSYS による連成解析	55
3.7	本章のまとめ	58
第4章	積層型四角形状静電アクチュエータ	59
4.1	緒言	61
4.2	厚薄構造を有するリボン状フィルム	61
4.3	バネ特性の規格化	64
4.3.1	電極層数の異なるアクチュエータのバネ特性	64
4.3.2	規格化されたバネ特性	64
4.4	アクチュエータの形状変化とバネ特性	66
4.4.1	電極とヒンジの厚さ効果	66
4.4.2	ヒンジの長さ効果	72
4.5	アクチュエータの発生力の測定	74
4.6	実験結果と計算結果の比較	75
4.6.1	8層アクチュエータのバネ特性	75
4.6.2	シミュレーション結果を用いたバネ特性の予測	76
4.7	アクチュエータの形状変化とバネ特性	78
4.7.1	電極の厚さ効果	78
4.7.2	ヒンジの厚さ効果	81
4.7.3	ヒンジの長さ効果	85

4.8 本章のまとめ	87
第5章 積層型三角形形状静電アクチュエータ	89
5.1 緒言	91
5.2 厚薄構造のないフィルムを用いたアクチュエータ	91
5.2.1 アクチュエータの作製方法	91
5.2.2 リボン幅変化によるバネ特性の変化	92
5.2.3 熱処理によるバネ特性の変化	94
5.2.4 リボン状フィルムの問題点	98
5.3 レーザ加工機とリボン状フィルム	100
5.3.1 リボン状フィルムの作製方法	100
5.3.2 フィルムの切断形状とレーザ加工機	101
5.3.3 リボン状フィルムとアクチュエータ	103
5.4 アクチュエータの形状変化とバネ特性	105
5.4.1 電極の厚さ効果	105
5.4.2 ヒンジの長さ効果	108
5.5 アクチュエータの発生力の測定	111
5.6 バネ特性の規格化と実験結果との比較	112
5.6.1 電極層数の異なるモデルのバネ特性と規格化	112
5.6.2 実験結果と計算結果の比較	114
5.7 アクチュエータの形状変化とバネ特性	115
5.7.1 電極の厚さ効果	115
5.7.2 ヒンジの厚さ効果	117
5.7.3 ヒンジの長さ効果	119
5.8 四角形状および三角形形状アクチュエータの比較	121
5.9 本章のまとめ	124
第6章 アクチュエータの多層化と微細化	125
6.1 緒言	127
6.2 100層を超えるアクチュエータ	127
6.2.1 リボン状フィルムの作製方法	127
6.2.2 アクチュエータの駆動実験	132
6.3 2個のアクチュエータの並列化	133
6.3.1 アクチュエータの回転方向の違いと並列化の効果	133

6.3.2	バネ特性の測定結果	135
6.3.3	並列化モデルの計算結果	138
6.4	シミュレーションに基づく微細化の効果	142
6.4.1	アクチュエータを均一に縮小した場合のサイズ効果	142
6.4.2	ヒンジの厚さを一定にして縮小した場合のサイズ効果	144
6.5	本章のまとめ	146
第7章	結論	147
	謝辞	151
	参考文献	153
	Appendix	157
Appendix I	プルイン現象	159
Appendix II	互いに傾いた電極間に発生する力	162
Appendix III	ANSYS の解析機能	164
Appendix IV	レーザアブレーション加工による微細化	167
Appendix V	フォトリソグラフィによる微細化	170

第 1 章 序論

第 1 章 序論

1.1 緒言

本章では、最初に本研究の目的と意義を述べる．次に、主なアクチュエータの特性を概観した後、モータに代表される電磁アクチュエータと静電アクチュエータをエネルギー密度の観点から比較する．このとき、ミクロなスケールにおいては、電磁力に比べて静電力は有利であり、微細化された静電アクチュエータを集積したアクチュエータは人工筋肉に応用可能な高出力アクチュエータとなり得ることを示す．最後に、本論文の構成について述べる．

1.2 本研究の目的

近年、半導体の製造技術の発展に伴い、機械や装置の小型化・高度化が目覚しく進んでおり、メカトロニクス分野でも、10年以上前から10[mm³]以下の大きさのマイクロロボットと呼ばれる新しい分野の研究が進められている⁽¹⁾．マイクロロボットを構成するには、その要素として人間の手足などを動かす筋肉に相当するマイクロアクチュエータが必要となる．マイクロアクチュエータの駆動原理には、静電方式や電磁方式、圧電方式など多様な種類があるが⁽²⁾、その中でも静電力を利用する静電アクチュエータはその動作原理において興味深いものがある．

静電アクチュエータとモータに代表される電磁アクチュエータを比較すると、静電力は電極間の距離の2乗に反比例するため、電極間隔が大きいと発生力は小さく、また高電圧が必要なことから、静電アクチュエータは大きな出力が要求される用途には不適當であると考えられてきた．しかし、静電力は体積に依存せず面積に依存し、微小化すると十分な発生力が期待されるため、マイクロロボットのような小さな領域を対象とする場合には逆にスケール効果によって静電力の方が有利となる．

静電アクチュエータの種類は一般に電極の配置と可動方向によって大別され、電極面と平行な方向に可動するタイプ⁽³⁾と垂直な方向に可動するタイプの2種類に分類することができる⁽⁴⁾．このうち、電極と垂直な方向に可動するタイプのアクチュエータは対向する電極を単に接近させておけば良いため、摩擦力が少なく大きな力を発生させることができる．さらに、それを多層に積層させた積層型静電アクチュエータは、大きな発生力と長い駆動距離を有するアクチュエータとして有望である．しかし、すでにいくつかのタイプの積層型静電アクチュエータが提案されているにもかかわらず、未だに実用化には至っていない．その大きな理由としては、最適なバネ特性を見つけないことがあげられる^{(5)～(7)}．すなわち、積層型静電アクチュエータは、その構造

が柔らかすぎると、負荷により伸びやすく容易に電極間隔が広がり、静電力が急激に減少するという問題がある。また逆に構造が硬すぎると収縮が困難になり、発生力を効率良く利用できなくなる。従って、静積層型静電アクチュエータには、電圧が印加されると容易に収縮する（柔らかい）こと、大きな発生力を維持するために負荷に対して伸びにくい（固い）こと、という2種類の相異なるバネ特性を兼ね備えている必要がある。

そこで本研究は、人工筋肉への応用を目的として、このようなバネ特性を実現し、軽量かつ応答性と瞬発力に富んだサブミクロンスケールから通常のスケールまで対応可能な積層型静電アクチュエータを開発することである⁽⁸⁾。静電アクチュエータは微小化すればするほどスケール効果によってその威力を発揮するようになるため、現在の電磁力を利用したモータの性能を超える静電アクチュエータを実現できる可能性は極めて高い。

1.3 アクチュエータの種類と特徴

アクチュエータとはさまざまなエネルギーを機械的運動に変換する駆動装置であり、駆動原理によって、電磁力や静電力のような「場の力を用いたアクチュエータ」と圧電素子（ピエゾ素子）や形状記憶合金などのような「材料自体の性質を用いたアクチュエータ」の2種類に大きく分類することができる^{(9)～(10)}。

1.3.1 場の力を用いたアクチュエータ

(1) 電磁アクチュエータ

電磁アクチュエータは直流モータや交流モータに代表されるように、現在、最も幅広い分野で利用されているアクチュエータで、一般的に永久磁石や電磁石との組み合わせで構成されている。電磁アクチュエータの発生力は、磁界中で電線に電流を流す際に発生するローレンツ力を利用しているため、

- ① 電流駆動であるため駆動電圧が低く、大きな発生力が得られ、耐環境性が良い。
- ② 通常のサイズでは、他のアクチュエータと比較すると、高速で大きな発生力を発生することができるため、最も実用的である。

など長所が多いが、以下のような短所もある。

- ① 発生力が体積に依存するため、単位体積当たりの発生力に限界がある。
- ② モータ駆動の場合、高速、低トルクの特性を有するため、減速機が必要となる。
- ③ 大きな保持力を得ようとするときには、電流を多く流さなければならないためコイルの発熱の問題がある。

(2) 静電アクチュエータ

静電アクチュエータは電荷間に作用するクーロン力を利用したもので、基本的には2つの電極を微小なギャップ間隔で向かい合わせた簡単な構造である。静電アクチュエータは図 1-1 に示すように電極の配置と可動方向によって、垂直駆動型と水平駆動型の2種類に分類することができ、それぞれの電極間に発生する力は次式で表される。

$$F_v = \frac{1}{2} \varepsilon ab \frac{V^2}{d^2} \quad (1.1)$$

$$F_h = \frac{1}{2} \varepsilon b \frac{V^2}{d} \quad (1.2)$$

ここで、 ε は電極間の誘電率、 a, b は電極の長さ、 d は電極間隔、 V は印加電圧を示す。

両者の方式の特徴は後述するが、一般的な静電アクチュエータの長所として、

- ① 静電力は電極間距離の2乗に逆比例するため、アクチュエータを小型化すればするほど他のアクチュエータに比べて発生力を大きくすることが可能となる。
- ② 静電力は面積力であるため、電極を薄膜構造にすることで軽量化が可能である。
- ③ 電圧駆動であるため、オン・オフ制御が容易で、高速化が可能である。
- ④ 良好な絶縁物を用いることで低損失・低消費電力にすることが出来る。

などがあげられるが、一方で、

- ① 小型化しない限り、他のアクチュエータに比べ発生力が小さい。
- ② 大きな発生力を得るためには高電圧を印加する必要がある、放電に関する対応を考慮する必要がある。

などの問題もある。

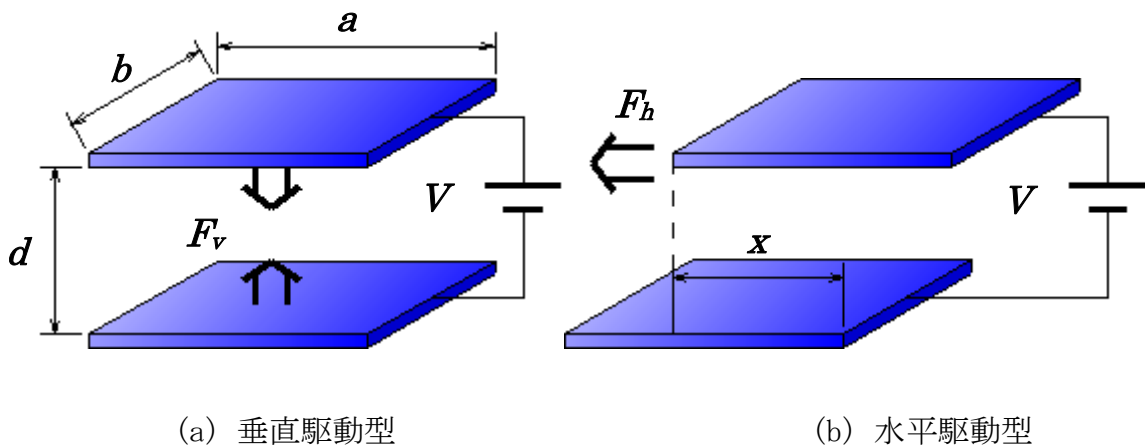


図 1-1 静電アクチュエータの動作原理

(3) 空気圧アクチュエータ

空気圧アクチュエータは図 1-2 に示すように、空気圧によるゴムの弾性変形を利用したもので、受圧面積を A 、空気圧を p とすると発生力 F は、

$$F = Ap \quad (1.3)$$

のような単純な式で表される。空気圧アクチュエータの長所は、

- ① 発生力・トルクが大きい。
- ② 湾曲動作など動作に応じた動作形態の設計が可能のため、ロボット構造との一体化が可能である。
- ③ 電気を使用しないため、耐水性・防爆性がある。
- ④ 伸縮性および接触対象物への形状適応性を持つ。

などで、以下のような短所がある。

- ① 空気を送るチューブが不可欠で自立型のロボットへの適用は困難である。
- ② マイクロ化に伴い空気の管路抵抗が増大し、応答性がさらに悪くなるため、1mm 以下のサイズのアクチュエータには不適切である。

(4) 油圧アクチュエータ

油圧アクチュエータは油圧によるパワーを直線運動、回転運動などの機械的なパワーに変換するもので、自動車や鉄道などに広く利用されている。

このアクチュエータの長所は、

- ① 非常に大きな力を発生させることができる。
- ② 微細な動作制御も容易である。

などであるが、以下のような短所がある。

- ① ゴミや汚染に弱く、作動油を劣化させないための保守が必要である。
- ② 油圧源が必要である。

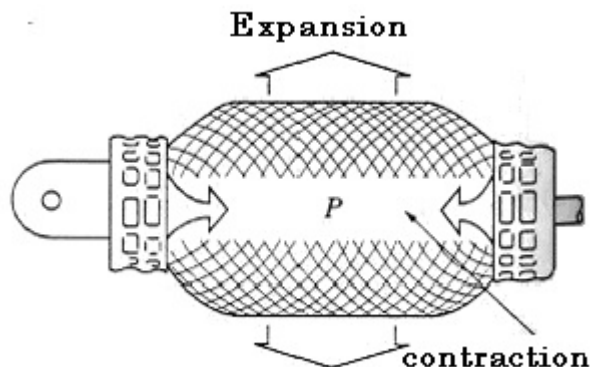


図 1-2 空気アクチュエータの動作原理

1.3.2 材料自体の性質を用いたアクチュエータ

(1) 圧電アクチュエータ

図 1-3 のように、PZT（チタン酸ジルコン酸鉛）などの圧電素子（ピエゾ素子）に力を加えて歪めると電圧が発生（圧電効果）し、逆に電圧を印加すると圧電素子自身が伸縮（逆圧電効果）する性質がある．圧電アクチュエータはこのうち後者の逆圧電効果を利用するものであり、その発生力は次式で表される．

$$F \propto A \frac{V}{t} \quad (1.4)$$

ここで、 A は底面積、 t は厚さ、 V は印加電圧である．

圧電アクチュエータの長所は、

- ① 発生力が大きく、応答速度が比較的速い．
- ② 摩擦の問題がない．また、固体アクチュエータであるため、アクチュエータと支持材を兼ねることが可能である．

などであり、以下の短所がある．

- ① 駆動範囲が極めて短いため、動作範囲が限定される．
- ② ヒステリシス、クリープなどの現象がある．

(2) 形状記憶合金アクチュエータ

形状記憶合金アクチュエータは、TiNi などの合金で生ずるオーステナイト相（高温で安定）とマルテンサイト相（低温で安定）の相変態を利用するアクチュエータである．すなわち、形状記憶合金アクチュエータは図 1-4 に示すように、ある温度以下では小さな力で大きな変形が得られ、温度を高くすると大きな力を発生しながら元の形状に戻る性質を利用するものである．

このアクチュエータの長所は、

- ① アクチュエータそれ自体が構造材料であるため、発生力が大きく、マイクロアクチュエータとして非常に利用しやすい性質を持っている．
- ② 小型化した場合には表面からの放熱量が相対的に増えるため、より応答が速くなる．

などであるが、以下のような短所もある．

- ① エネルギー効率と応答性が悪い．
- ② 小型化することによって熱容量が減る．

(3) 熱膨張アクチュエータ

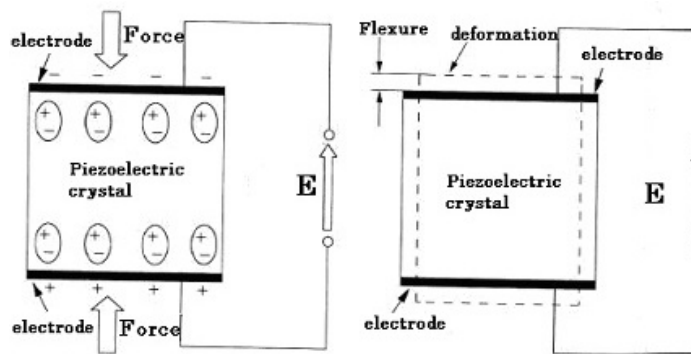
熱膨張アクチュエータは形状記憶合金アクチュエータと同様に、熱による変化を利用したものである。熱膨張アクチュエータは内部で熱を発生し、それを機械的仕事に変換するアクチュエータで、通常は熱源には電気ヒータが使用されるが、レーザ光や燃焼の熱も利用できる。その他に固体の線膨張を利用するものや2種類の固体を張り合わせたときの線膨張の差でたわませるものなどがある。

熱膨張アクチュエータの長所は、

- ① 大きな発生力を得ることができる。
- ② 比較的簡単な構造である。

などがあるが、以下のような短所もある。

- ① 動作が遅い。
- ② 消費電力が大きい。



(a) 圧電効果

(b) 逆圧電効果

図 1-3 圧電アクチュエータの動作原理

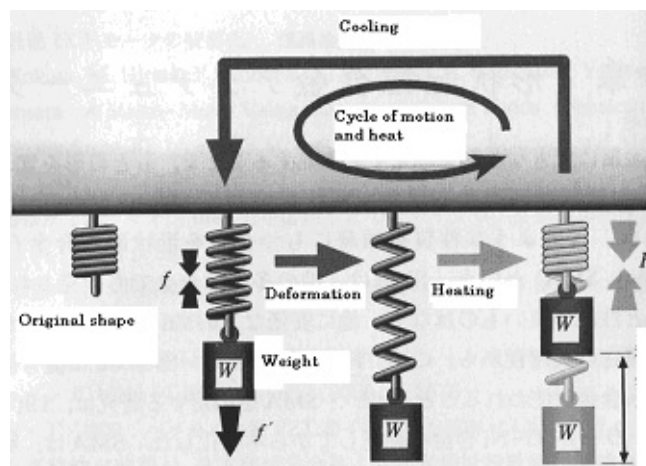


図 1-4 形状記憶アクチュエータの動作原理

(4) 磁歪アクチュエータ

磁歪アクチュエータはある種の金属材料に外部から磁界をかけると大きな歪みを生じる性質を利用したアクチュエータで、主な長所には

- ① 圧電アクチュエータに比べて大出力・大变位を得ることができる。
- ② 素子とコイルが非接触で駆動できる特徴がある。
- ③ 高い応答性を持ち、低電圧、高温でも駆動可能である。

などがあるが、以下のような短所も有する。

- ① 小型化を図る場合にはコイルや磁石の体積と重量を検討しなければならない。
- ② 応答性にはコイルの時定数を考慮する必要がある。

(5) 高分子アクチュエータ

高分子アクチュエータには高分子ゲルアクチュエータやイオン伝導アクチュエータなどがあり、2 [V]程度の電位を印加することでイオンを含む高分子が大きく伸縮する駆動デバイスである。駆動変位にはバイメタルのように素子の横方向への変位と、素子の長手方向へ伸縮する縦方向の変位があり、素子の構造を変えることでアクチュエータの変位の方法を設計可能である。図 1-5 にイオン伝導アクチュエータの動作原理を示す。このアクチュエータの長所は

- ① 軽量であること。
- ② 駆動電圧が低く、消費電力が小さい。

などであるが、以下のような短所もある。

- ① 発生力が小さい。
- ② 応答性が悪い。

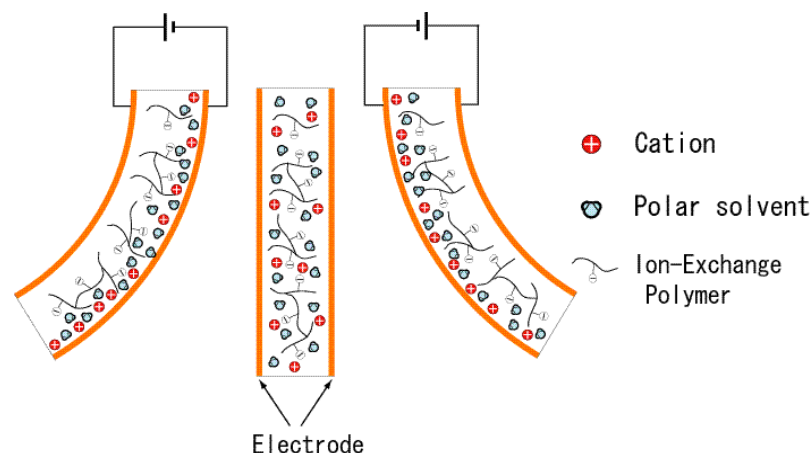


図 1-5 高分子アクチュエータの動作原理

第1章 序論

上記アクチュエータのうち、主なアクチュエータの特性を重量、消費電力、応答性、発生力、制御性、耐久性の観点から比較した結果を表 1-1 に示す。表 1-1 から明らかなように、全ての条件を満たす万能なアクチュエータは存在しない。従って、アクチュエータを使用する場合には、必要とされる特性を明らかにした上で、用途に応じて必要なアクチュエータを選定し、要求を満たすように最適化する必要がある。

表 1-1 の中で静電アクチュエータは他のアクチュエータに比べて発生力の点で劣っているものの次節で示すようにアクチュエータの小型化・集積化によってこの欠点を改善可能である。さらに、軽量で応答性に優れた特性は人工筋肉に求められる重要な要件であるため、静電アクチュエータは人工筋肉に応用するには最適なアクチュエータの一つと考えられる。

1.4 電磁力と静電力の比較

静電界と磁界のエネルギー密度を u_e と u_m とすると、これらは次式で表される。

$$u_e = \frac{1}{2} \epsilon E^2 = \frac{1}{2} \epsilon \left(\frac{V}{d} \right)^2 \quad (1.5)$$

$$u_m = \frac{1}{2\mu} B^2 \quad (1.6)$$

ここで ϵ は誘電率、 V は印加電圧、 d は電極間距離、 μ は透磁率、 B は磁束密度である。

空気中において、電界の強さ E の最大値は放電限界で制限されるので約 3[kV/mm] となる。一方、磁束密度 B の最大値は材料の磁束飽和によって制限されるので約 1[T] であり、これらの値を式(2-4)と式(2-5)に代入すると、以下の値となる。

表 1-1 主なアクチュエータの特性比較

種類	磁気	静電	圧電	形状記憶	高分子
重量	×	◎	△	○	◎
消費電力	○	○	○	×	○
応答性	△	◎	◎	×	△
発生力	◎	×	◎	◎	△
制御性	◎	○	○	△	○
耐久性	○	○	○	○	○

$$u_e = 40[J/m^3] \quad (1.7)$$

$$u_m = 40 \times 10^4[J/m^3] \quad (1.8)$$

上式より明らかなように、磁界のエネルギー密度は静電界のエネルギー密度の 10^4 倍も大きく、両者は比較にならない大きさである。しかし、アクチュエータを小型化していくと図 1-6 に示す Paschen の法則から明らかなように、放電開始電圧が上昇するため静電エネルギーの値を大きくすることができる⁽¹¹⁾。特に、空気中では、電極間隔 d を小さくすると放電開始電圧は約 $5[\mu m]$ で $330[V]$ まで下降し、それ以下になると放電開始電圧はかなり大きな値となる。そこで、仮に電極間隔 d を $1[\mu m]$ 、印加電圧を $300[V]$ とすると静電界と磁界のエネルギー密度は同程度となり、静電アクチュエータは磁力アクチュエータと同程度の力を発生することができるようになる。

一方、磁力アクチュエータは小型化することによってコイルの発熱による温度上昇が問題となり、磁界の大きさが制限されるようになる。すなわち、アクチュエータを小型化すると、放熱効率は改善され電流密度を高くできるものの、コイル自体の断面積が減少するために発生可能な磁界の強さは制限されることとなる。

以上のことから、ミクロなスケールでは静電力が電磁力を上回る事が可能となり、より高出力な静電アクチュエータの実現が可能となる。

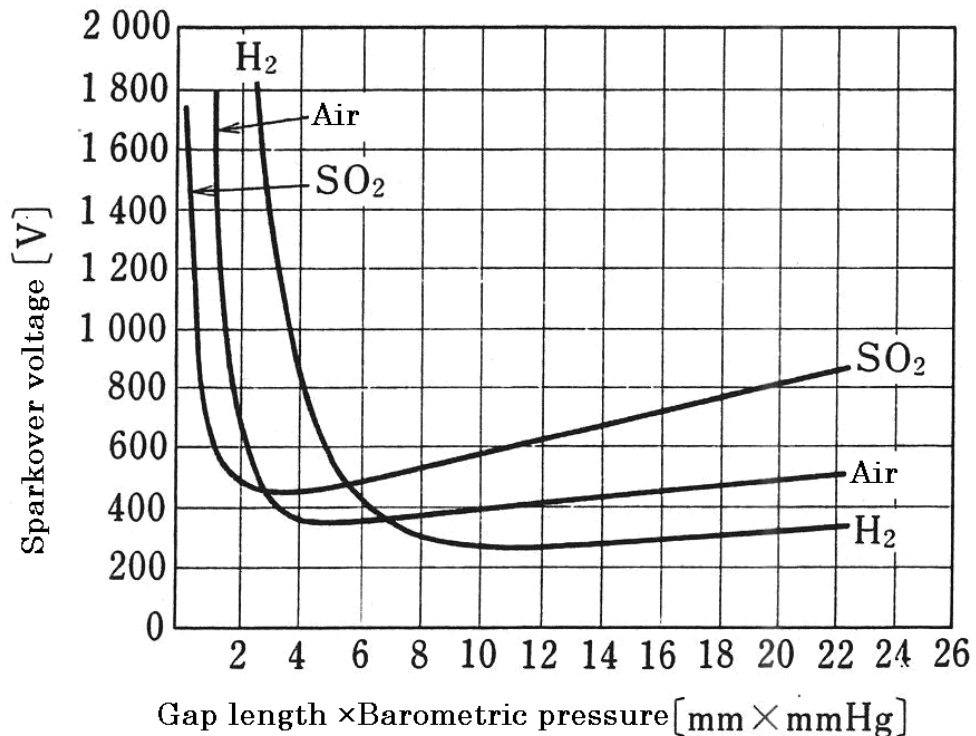


図 1-6 パッシェンの法則

1.5 本論文の構成

本論文は序論の位置づけとなる本章を含め、以下に述べる各章の合計6章からなる。

第2章では、最初に静電アクチュエータを駆動方向とサイズにより分類し、それらの種類や特徴について述べる。次に本研究で取り扱う2本のリボン状フィルムを用いた積層型静電アクチュエータの作製方法およびこのアクチュエータに求められるバネ特性について説明する。また、第4章に述べる積層型四角形状静電アクチュエータと第5章で述べる積層型三角形形状静電アクチュエータの概要と特徴を簡単に紹介する。最後に電極が平行な場合と非平行な場合における積層型静電アクチュエータの静電力について説明する。

第3章では、まず、第4章以降で共通的に使用する光テコの原理を用いた天秤について詳細に解説し、次にアクチュエータのバネ特性と発生力の測定方法およびリボン状フィルムに使用する導電性薄膜について説明する。さらに、簡単な電極およびヒンジモデルの解析結果から積層型静電アクチュエータのバネ特性の解析には有限要素法などの数値解析が不可欠である理由を説明する。最後に、第4章以降のシミュレーション方法の概要として、アクチュエータのバネ特性解析に使用した有限要素法解析ソフトウェア ANSYS の特徴とこれを用いた解析の流れについて述べる。

第4章では、電極の形が四角形の積層型四角形状静電アクチュエータについて詳細に解説する。ここでは最初に、厚薄構造を有するリボン状フィルムの作製方法について説明した後、規格化されたアクチュエータのバネ特性を紹介する。次に、アクチュエータの形状、すなわち、電極の厚さおよびヒンジの厚さと長さを変化させた場合のバネ特性の測定結果とアクチュエータの発生力の測定結果を示す。最後に ANSYS を用いたアクチュエータのバネ特性の解析結果を示し、実験結果との比較からシミュレーション方法の妥当性を検証する。最後にアクチュエータの形状変化に対するバネ特性のシミュレーション結果を詳細に説明する。

第5章では、第4章で示した結果と比較しながら、電極の形が三角形の積層型三角形形状静電アクチュエータについて詳細に解説する。ここでは、最初に厚薄構造のないリボン状フィルムを用いたアクチュエータについて説明した後、レーザ加工機を用いた厚薄構造を有するリボン状フィルムの作製方法を紹介する。次に、アクチュエータの形状を変化させた場合のバネ特性の測定結果とアクチュエータの発生力の測定結果を示す。さらに、第4章と同様に、ANSYS を用いたシミュレーション結果を示し、両者を比較した後、アクチュエータの形状変化に対するバネ特性のシミュレーション結果

第1章 序論

について詳細に説明する．最後に，積層型四角形状アクチュエータと積層型三角形形状アクチュエータのバネ特性の違いや特徴について解説する．

第6章では，アクチュエータを実用化する際に必要となる電極の多層化とアクチュエータの並列化および微細化に関して解説する．ここでは最初に100層を超えるアクチュエータのリボン状フィルムの作製方法と実際に試作した500層アクチュエータの駆動実験結果について示す．次に，リボン状フィルムの折り込み方が異なるアクチュエータについて説明し，同種類同士を組み合わせた場合および異なる種類を組み合わせた場合の並列化アクチュエータのバネ特性の測定結果をヒンジが長い場合と短い場合に分け説明する．最後に拘束条件を変化させたアクチュエータの並列化モデルに関するシミュレーション結果について述べる．

第7章では，本研究の内容を総括する．

第 1 章 序論

第2章 静電アクチュエータ

第 2 章 静電アクチュエータ

2.1 緒言

本章では、最初に静電アクチュエータの特徴について述べる。静電アクチュエータは前述したように、駆動方向の違いによって「水平駆動型」と「垂直駆動型」に大別される⁽⁷⁾。また、アクチュエータのサイズの違いによって「静電型マイクロアクチュエータ」と「静電型マクロアクチュエータ」に大別することができる。静電型マイクロアクチュエータには静電マイクロモータ、屈曲型静電アクチュエータ、櫛歯型静電アクチュエータなどがあり、また、静電型マクロアクチュエータには交流駆動型静電アクチュエータ、分布型静電アクチュエータ、螺旋構造分布型静電アクチュエータ、2重螺旋型静電アクチュエータなどがあり、それらの構造や特徴などについて紹介する。

次に、静電型マクロアクチュエータにおける問題点を述べた後、本研究で取り扱う「2本のリボン状フィルムを用いた積層型静電アクチュエータ」の作製方法、構造や特徴などを示す。このアクチュエータには、電極形状が四角形と三角形の2つのタイプがある。最後に、電極が平行な場合と非平行な場合の積層型静電アクチュエータの静電力について述べる。

2.2 静電アクチュエータ

2.2.1 駆動方向による分類

(1) 水平駆動型静電アクチュエータ

水平駆動型は垂直駆動型に比べて位置制御が容易であり、電極間隔を狭くしても変位方向への妨げとならない利点を有している。また、駆動電圧を低くしても大きな変位を得ることが可能であるが、動作性にやや不安定性があるため、得られる変位量は制限される。アクチュエータの不安定性を抑えるためには、一般に変位する方向と直角方向のバネ定数を大きくすることが重要となるが、これを余り大きくすると変位方向のバネ定数も大きくなってしまうため、アクチュエータ全体の変位量が小さくなってしまう。そのため、水平駆動型アクチュエータを位置制御に利用するには弾性支持の最適化が不可欠で、大きな変位量が必要な場合、設計は複雑で綿密なものとなる。

(2) 垂直駆動型静電アクチュエータ

垂直駆動型静電アクチュエータは構造が最も簡単であるが、このタイプのアクチュエータを位置制御に利用する場合には、ギャップ間隔を安定に制御できる範囲が狭いという点に注意する必要がある。この現象は引き込み現象 (Pull-in Phenomenon) と呼ばれており、静電力とバネ力とのバランスから電極間隔の $1/3$ の範囲内しか位置制

御はできない (Appendix-1). その場合には, バネ特性を工夫して, 変位が大きくなると非線形的にバネ定数が大きくなるようにすると, 安定範囲を広げることができる. また, 電圧一定の制御ではなく, 電荷一定の制御をすることによって動作の不安定性を回避できるが, 単純で使いやすいという利点を活かすためには, 限られた移動範囲での微調整かデジタル的な切り替えに用いる方が良いといえる.

一方, このタイプのアクチュエータを人工筋肉のように位置制御が特に不要で一定方向に収縮させる目的に利用するには, 非常に大きな利点となる. すなわち, アクチュエータに電圧を印加した際, アクチュエータが収縮可能ならば電極間隔の減少とともにアクチュエータの発生力は増大し, 電極同士が互いに接触するまで収縮が継続されることになる.

2.2.2 アクチュエータのサイズによる分類

(1) 静電型マイクロアクチュエータ

① 静電マイクロモータ

図 2-1 に静電マイクロモータの一例を示す. このモータは MEMS (Micro Electro Mechanical System) 分野の草分け的存在で, 直径 $120[\mu\text{m}]$, 厚さ $2[\mu\text{m}]$ の静電モータである. ロータの周囲には 12 個の電極が配され, ロータは中心軸の上下突起で作られた溝に支えられて基板から浮いている. このロータと周囲の電極に電圧を印加すると, 電極部分がロータを引き付けて最大 $10,000[\text{rpm}]$ で回転する. このモータは多結晶シリコンでできたそれぞれの部品の上に犠牲層となるリン珪素ガラスの層を挟み込み, フッ素でエッチングして作り上げられている^{(12)~(15)}.

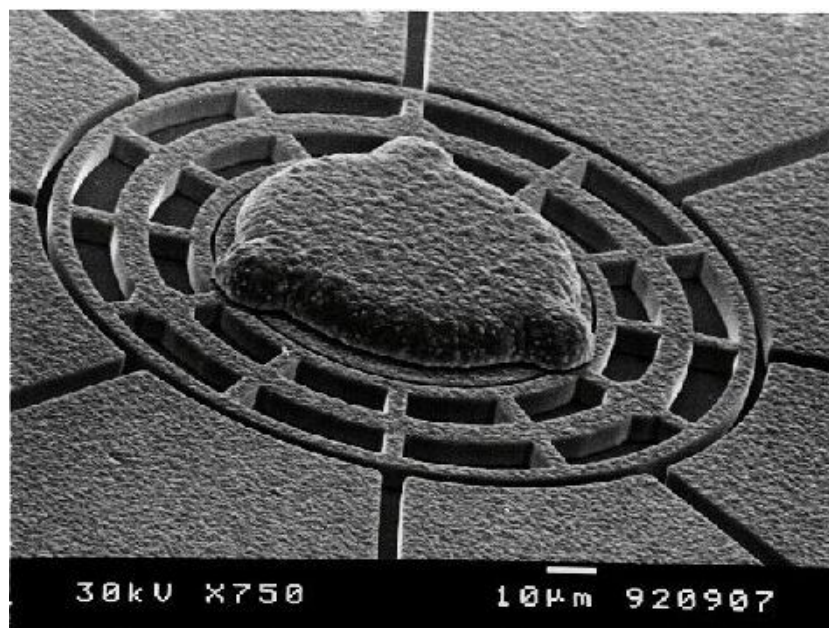


図 2-1 静電マイクロモータ

② 屈曲型静電アクチュエータ

図 2-2 に典型的な屈曲型静電アクチュエータを示す．このアクチュエータは絶縁された薄い湾曲電極の一端が固定された片持ち梁の構造を持っている．薄板電極に電圧を印加すると電極の一端が大きく湾曲する機構はマイクロミラーやマイクログリッパーの機構部分に広く利用されている^{(16)～(19)}．

③ 櫛歯型静電アクチュエータ

図 2-3 に櫛歯型静電アクチュエータの一例を示す．このアクチュエータは 2 つの櫛歯電極で構成され，基板に固定された一方の電極は固定櫛歯電極，他方は可動櫛歯電極と呼ばれている．櫛歯電極の一方をアースし，他方に電圧を印加すると可動櫛歯電極が固定櫛歯電極側に引き込まれる．このとき発生する力は比較的に弱いので，図のように多くの電極を配置することによってこの点を補っており，加速度センサなどに利用されている^{(20)～(25)}．

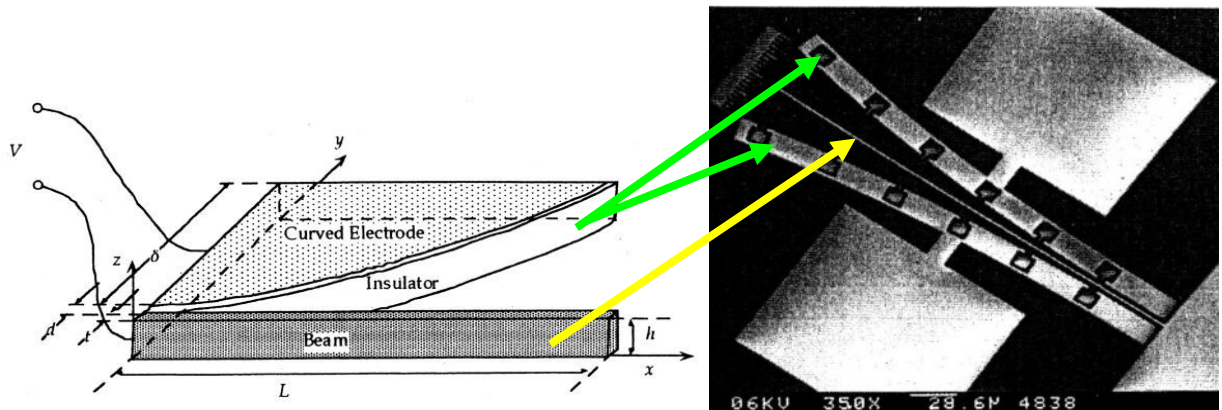


図 2-2 屈曲型静電アクチュエータ

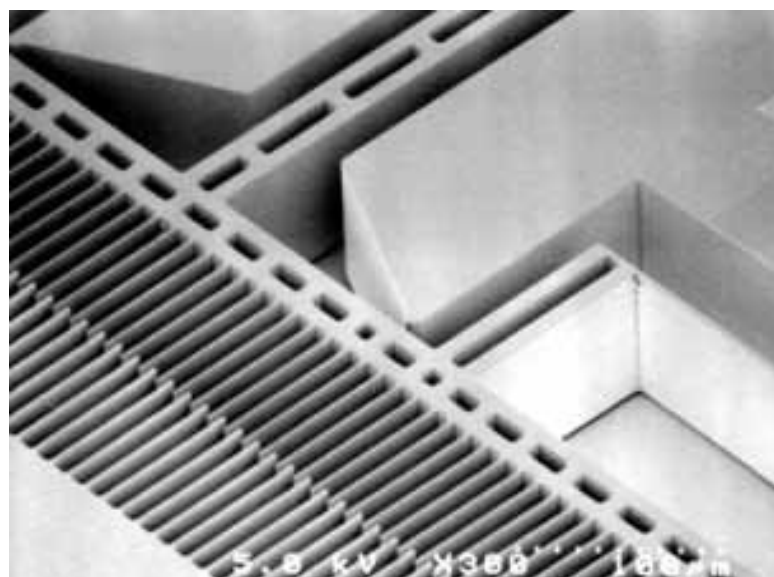


図 2-3 櫛歯状静電アクチュエータ

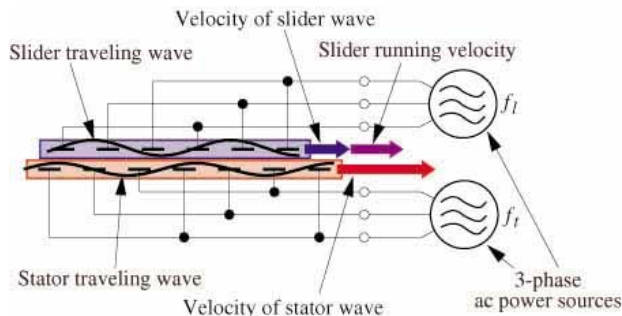
(2) 静電型マクロアクチュエータ

① 交流駆動型静電アクチュエータ

図 2-4 に交流駆動型静電アクチュエータの外形を示す．このアクチュエータは縦方向に多数の電極スリットが入った 2 枚の電極シートに図 2-4(a) のような三相交流電圧を印加することにより，シートをスライド動作させる水平駆動型のアクチュエータである．このアクチュエータは電極シート面に対して平行に動くため，静電力が働く領域を維持することができ，電極の数を増やしたり長くしたりすることで発生力を増大させることができる特徴がある^{(26)～(28)}．

② 分布型静電アクチュエータ

図 2-5 に分布型静電アクチュエータの構造と外形を示す．このアクチュエータは垂直駆動型的一种で多くの絶縁された波状電極から構成されており，それぞれの波状電極は波の上下のピーク部分が互いに重なるように接着されている．上下の波状電極に極性の異なる電圧を印加すると収縮するが，各々の駆動距離は小さいため，これらを積層することによって駆動距離を大きくしている^{(29)～(30)}．



(a) アクチュエータの動作原理



(b) アクチュエータの外形

図 2-4 交流駆動型静電アクチュエータの外形

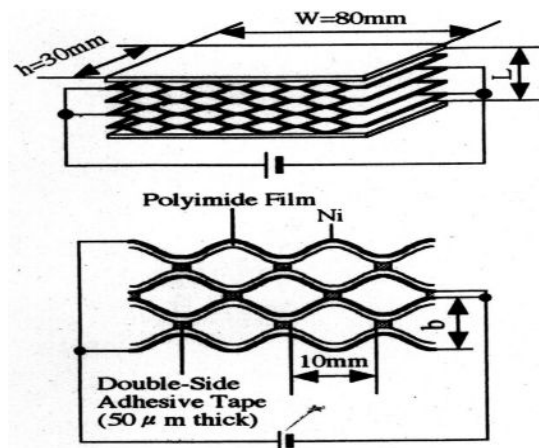


図 2-5 分布型静電アクチュエータの構造と外形

③ 螺旋構造分布型アクチュエータ

図 2-6 に螺旋構造分布型静電アクチュエータの外形を示す。このアクチュエータも垂直駆動型の一つで、その外径は 1.2[mm]で絶縁体に薄いパリレンの膜が使われており、その間に電極として金が埋め込まれている。この蛇腹状になった部分が電極であり、電圧を印加することで蛇腹部分が引きつけ合い収縮する。蛇腹部分を長くすることで大きな変位量が得られる長所がある⁽⁵⁾。

④ 2重螺旋型静電アクチュエータ

図 2-7 に 2 重螺旋型静電アクチュエータの模式図を示す。このアクチュエータは絶縁された正負の極板を交互に重ね合わせた 2 重螺旋構造となっている。このように電極を 2 重螺旋構造とすることで多数の極板を連結し、長いストロークを実現している。また、電源供給用の端子を螺旋電極の一端のみに集約できる利点がある。これも垂直駆動型のアクチュエータの一種である⁽⁶⁾。

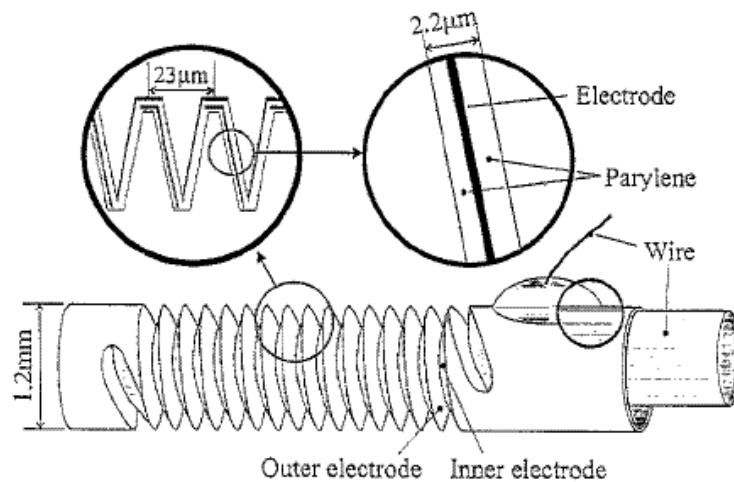


図 2-6 螺旋構造分布型静電アクチュエータ

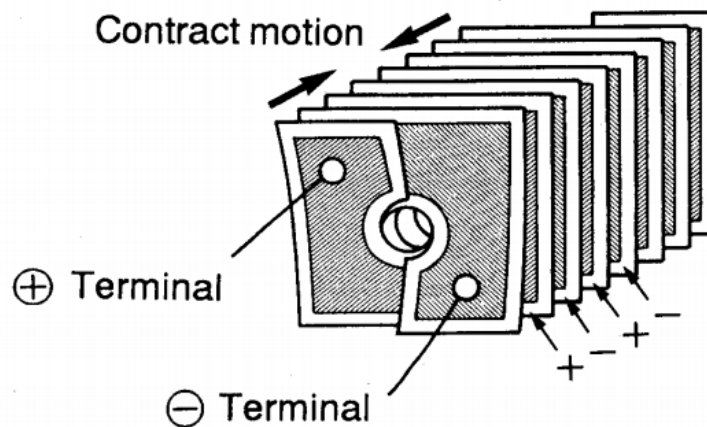


図 2-7 2重螺旋型積層型静電アクチュエータ

2.2.3 静電型マクロアクチュエータの問題点

前述した4つの静電型マクロアクチュエータの構造や機能にさまざまな長所や特徴があるものの、これらを人工筋肉などに利用するには解決しなければならない幾つかの問題がある。交流駆動型静電アクチュエータは2枚のフィルムが接触し、高速にスライドするタイプであるため、フィルム間で発生する摩擦が無視できないという問題がある。また、駆動源として高周波交流電圧を必要とするため消費電力が大きく、エネルギー損失も大きい。分布型静電アクチュエータと螺旋構造分布型アクチュエータはアクチュエータ自身の剛性が非常に高いため、電圧を印加しても十分な収縮力を得ることができないという問題がある。また逆に2重螺旋型静電アクチュエータはアクチュエータ自身の剛性が低いため、大きな負荷が掛けられた場合に電極間隔が大きくなり、急激な静電力の低下を招くという問題がある。

次節では、これらの問題を解決することが可能な新しいタイプのアクチュエータとして本研究で取り扱う2本のリボン状フィルムを用いた積層型静電アクチュエータの作製方法や特徴などについて述べ、積層型静電アクチュエータに求められるバネ特性について説明する。

2.3 積層型静電アクチュエータ

2.3.1 アクチュエータの構造

2.2.1節で述べたとおり、静電アクチュエータは電極の駆動方向で水平駆動型と垂直駆動型の2種類に分類される。このうち、垂直駆動型は水平駆動型に比べて、静電力が対向する電極全面で得られるため発生力が強い、スライドする部分がないため摩擦がないなどの長所がある。一方、垂直駆動型では大きな静電力を発生させるには電極間隔を狭くする必要があるため、水平駆動型のアクチュエータに比べると駆動距離（ストローク）が短いという短所がある。そこで、数多くの微細な電極を三次元的に積層させることにより、垂直駆動型アクチュエータは、大きな発生力と長いストロークの両者を兼ね備えたアクチュエータとすることができる。

本研究で取り扱うアクチュエータは、金や銅などの金属導体薄膜をPET（ポリエチレンテレフタレート）やポリイミドなどの薄膜フィルムで絶縁したリボン状のフィルム電極を使用して作製することができ、その作製方法を図2-8に示す⁽³¹⁾。

図2-8の左図に示すように2本のリボン状フィルムの一端を重ね合わせ、その間の角度が90度となるように固定した後、下側のフィルムが上側に来るように交互に折り込む作業を繰り返すと、右図の様な電極が四角形状の紙バネ構造を持つ積層型静電ア

クチュエータを作製することができる。このアクチュエータは材料に高分子材料を使用することで軽量化を図り、積層数を増やすことでストロークを大きくとれるようになっている。

2.3.2 積層型静電アクチュエータの問題点

2.2.2 節で述べた分布型静電アクチュエータ、螺旋構造分布型静電アクチュエータ、2重螺旋型積層型静電アクチュエータも広い意味で積層型静電アクチュエータの仲間として分類することができるが、残念ながら現在までのところ、これらを実用化する段階には至っていない。その大きな原因の一つとして、アクチュエータのバネ特性に最適値を実現しにくいことがあげられる。すなわち、十分な収縮力を得るためにアクチュエータの剛性を低くすると外部負荷等によってアクチュエータ自身に変形し、広くなった電極部分での急激な静電力の減少に伴う収縮力の低下を招くことになる。また、逆にこれを防ぐためにアクチュエータの剛性を高くすると、発生した静電力のほとんどがアクチュエータ自身を収縮させることに費やされるため、アクチュエータの発生力を効率良く利用することが困難となる。以上のことから、積層型静電アクチュエータは電圧印加時には容易に収縮し、また、電圧の有無にかかわらず許容範囲内の負荷がアクチュエータに与えられた場合には、過度に電極間隔が広がらない特性を持っているなければならない。

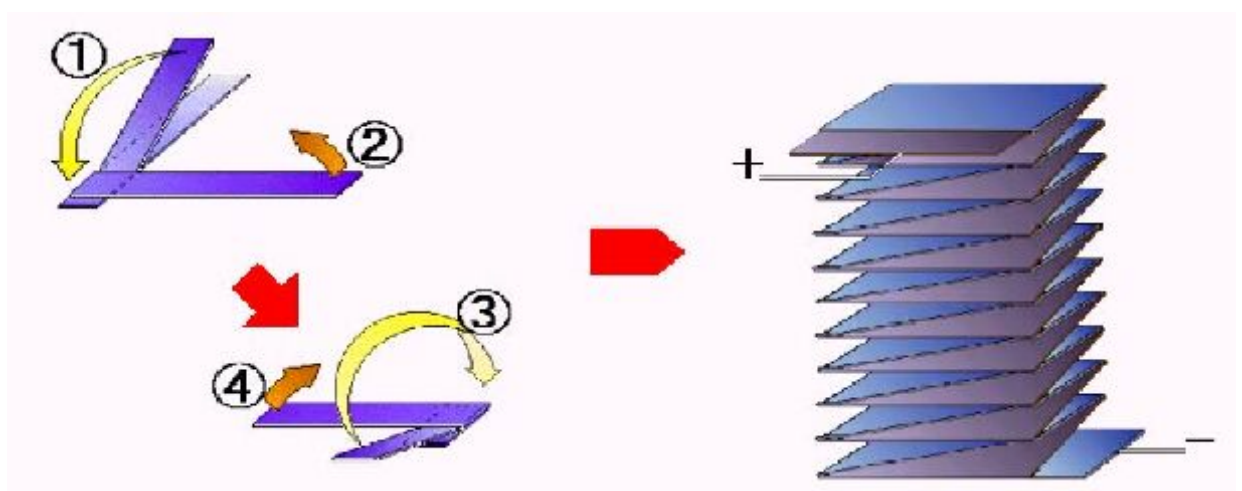


図 2-8 2 本のリボン状フィルムを用いた積層型静電アクチュエータの作製方法

2.3.3 積層型静電アクチュエータに求められるバネ特性

積層型静電アクチュエータに必要な特性は、図 2-9 に示すようなバネ特性として表現することができる。図の横軸はアクチュエータに加える力（錘などの負荷）を、縦軸はアクチュエータの変位量、すなわち、アクチュエータが完全収縮した位置A点からの伸びを示しているため、曲線の傾きの逆数がバネ定数を表すことになる。図中のB点はアクチュエータに力がかかっていない状態（自然長）を示しており、B点からA点に至る領域を駆動領域と呼ぶ。駆動領域では電圧を印加したときアクチュエータは容易に収縮しなければならないため、アクチュエータは柔らかい構造（小さなバネ定数）であることが求められる。一方、B点からC点の領域を過負荷領域と呼び、この領域ではアクチュエータは負荷が加わっても伸びにくくななければならないため、硬い構造（大きなバネ定数）であることが求められる。

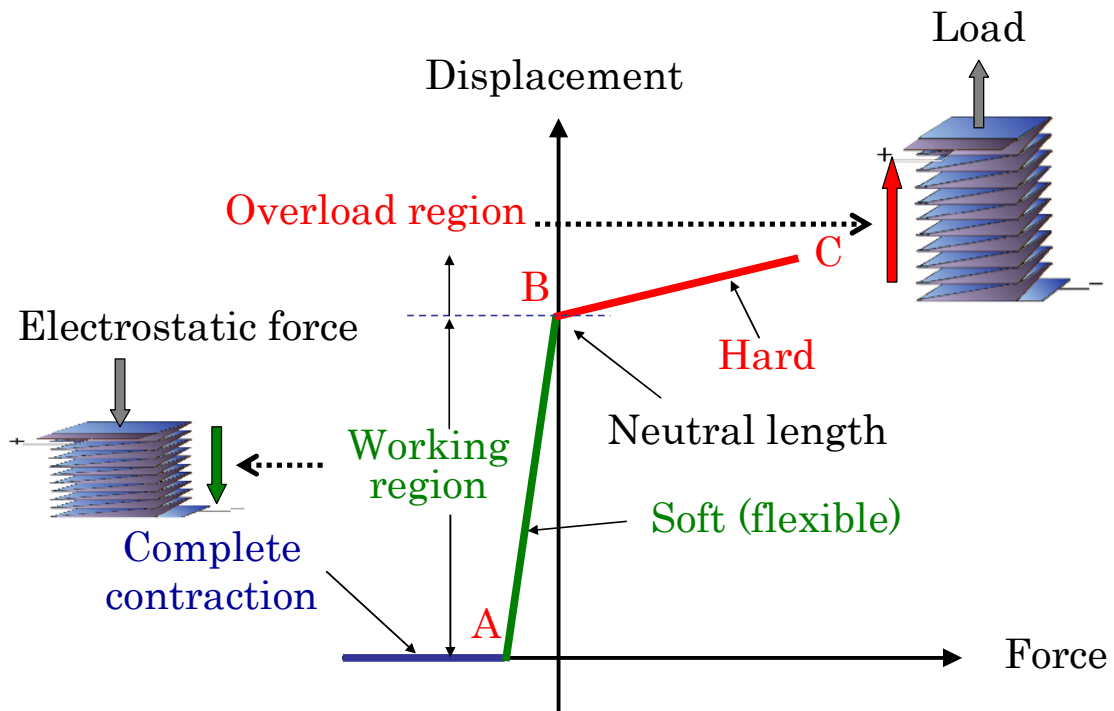


図 2-9 積層型静電アクチュエータに求められるバネ特性

2.3.4 積層型四角形状静電アクチュエータ

図 2-8 のように、電極の形状が四角形になるようにリボン状フィルムを折り込んだアクチュエータの剛性は非常に低く、負荷によって大きく変形してしまうという欠点がある。この様子を図 2-10 に示す。図 2-10 では幅 1[cm]の紙製リボンフィルムを用いて作製したアクチュエータに負荷として 1[g]から 6[g]までの錘を吊るしたときの伸びの様子を示している。

錘が 1[g]の場合と 6[g]の場合とを比較すると、アクチュエータの全長は約 2 倍まで伸びていることが分かる。実際のアクチュエータがこのような伸びてしまうと、電極間隔の増大による急激な静電力の減少によって、もはやアクチュエータとして機能しなくなるため、負荷が掛けられた場合には、アクチュエータの剛性が高くなり、アクチュエータの変形が抑制されるような工夫が求められる。

図 2-9 に示したように、積層型静電アクチュエータは駆動領域では柔らかく過負荷領域では硬くなる特性を有することが不可欠である。図 2-8 に示した 2 本のリボン状フィルム電極を用いた積層型静電アクチュエータが収縮する場合を考えると、平らな電極部分はほとんど変形せず、ヒンジ部分が変形するだけである。従って、アクチュエータが駆動領域で柔軟な特性を持つためにはヒンジ部を薄くする必要がある。一方、過負荷領域では上下の電極同士が接触し、負荷によって電極が大きく変形する。このとき、負荷による電極の変形を抑制するためには、ヒンジ部分とは逆に電極を厚くする必要がある。

以上をまとめると、電極部分を厚くヒンジ部分を薄くした構造（以下、厚薄構造と呼ぶ）を有する積層型静電アクチュエータは収縮力が作用する駆動領域ではヒンジ部分のみが変形するため柔らかく、伸長力が作用する過負荷領域ではヒンジ部分が伸ばされても電極部分が硬いためその変形が抑えられることとなる。すなわち、厚薄構造を持った積層型静電アクチュエータは、図 2-9 のように駆動領域で柔らかく、過負荷領域で硬くなるバネ特性を持ったアクチュエータであるといえる。

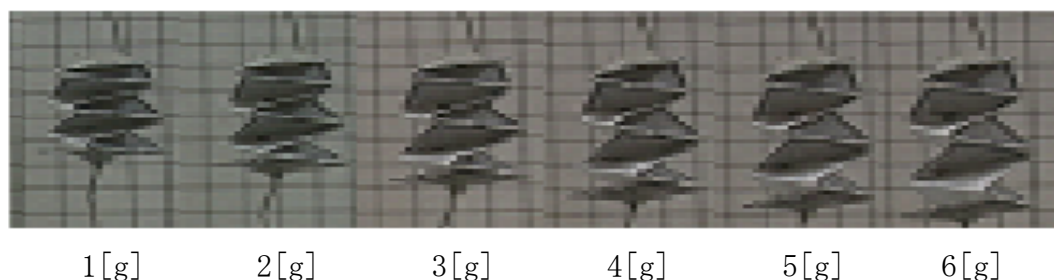


図 2-10 四角形状紙バネの伸び

第2章 静電アクチュエータ

図 2-11 は、紙製リボン状フィルムを使用してアクチュエータを模した紙バネにおいて、厚薄構造によるアクチュエータの伸びの低減効果を示す。図 (a) のアクチュエータは紙製リボン状フィルムのみを使用して作製した場合で、図 (b) と図 (c) のアクチュエータはアクチュエータの電極部分に相当する箇所を厚さ 1[mm] のプラスチックフィルムで補強したフィルムを用いて作製したものである。尚、図 (b) には軟質プラスチック材料が、図 (c) には硬質プラスチック材料が使用されており、これらに負荷として 20[g] の重さの錘をかけている。図 2-11 から明らかなように、アクチュエータの電極部分の剛性を高くすることによって負荷によるアクチュエータの伸びの低減を図ることができることが分かる。尚、図 2-12 に示す厚薄構造を有する積層型四角形状アクチュエータについては第 4 章で詳細に述べる⁽³²⁾。

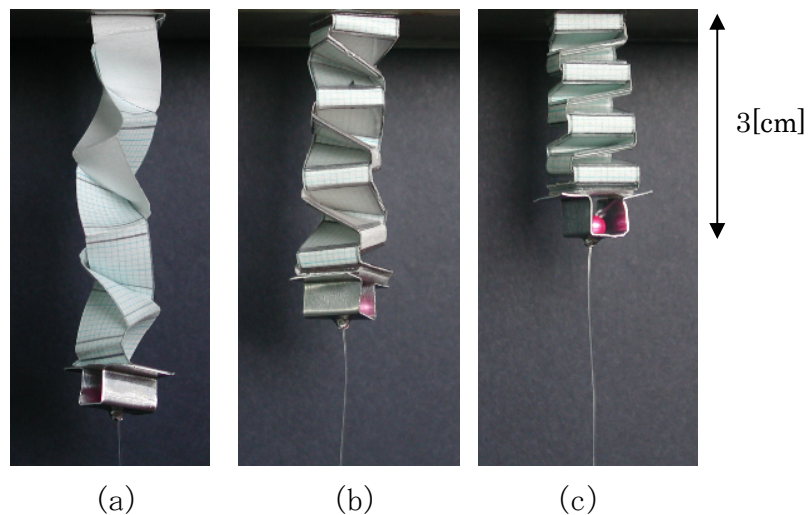


図 2-11 アクチュエータの伸びの改善

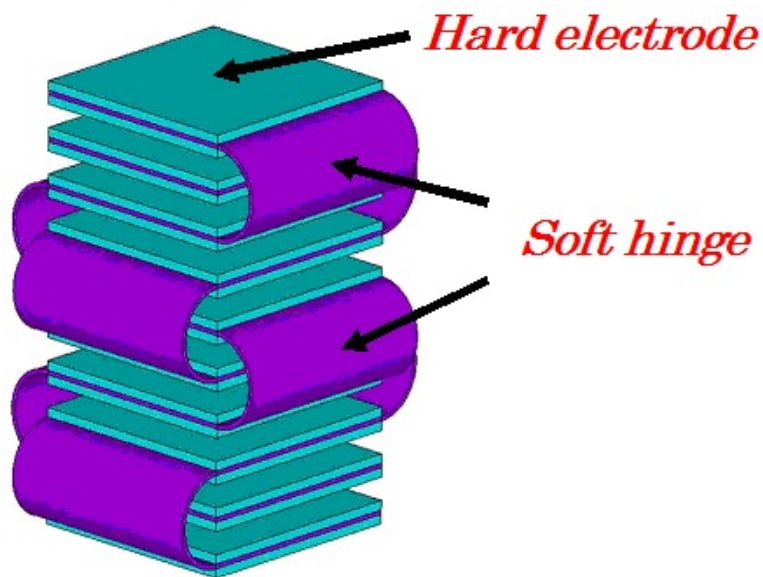


図 2-12 厚薄構造を持つ積層型四角形状静電アクチュエータ

2.3.5 積層型三角形状静電アクチュエータ

図 2-13 の左図に示すように、2 本のリボン状フィルム間の角度が 120 度となるように固定した後、下側のフィルムが上側に来るように交互に折り込んでいく作業を繰り返すと、右図の様な電極が三角形状の紙バネ構造を持つ積層型静電アクチュエータを作製することができる。

図 2-14 は図 2-10 と同様に、幅 1[cm]の紙製リボンフィルムを用いて作製した三角形状の紙バネに 1[g]から 6[g]までの錘を吊るしたときの伸びの様子を示している。錘が 1[g]の場合と 6[g]の場合とを比較すると、紙バネの全長はほとんど変化していない。また、図 2-10 と図 2-14 の比較から明らかなように、三角形状アクチュエータは四角形状アクチュエータに比べて、負荷に対して伸びにくい構造であるといえる。従って、図 2-15 に示すような厚薄構造を有するリボン状フィルム電極を使用して作製した積層型三角形状アクチュエータは負荷がかかっても非常に変形しにくい理想的な積層型静電アクチュエータとなることが期待できる。尚、積層型三角形状アクチュエータについては第 5 章で詳細に述べる⁽³³⁾。

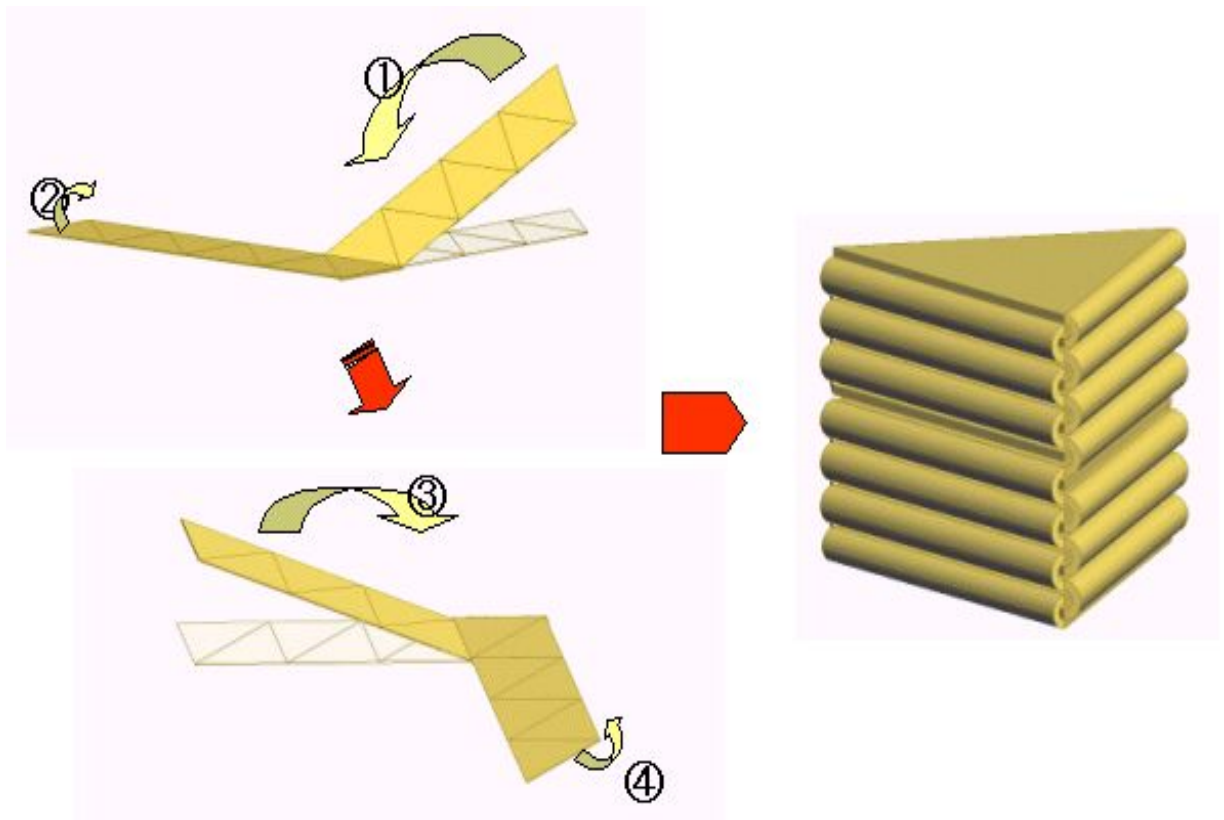


図 2-13 積層型三角形状アクチュエータの作製方法と外形

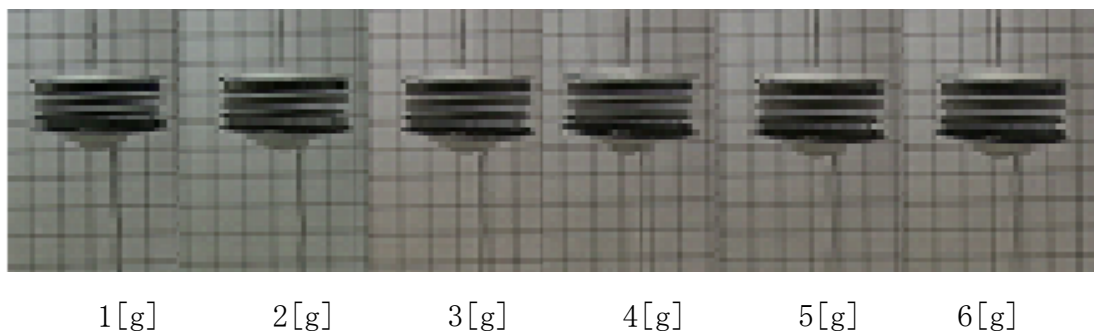


図 2-14 紙三角形形状アクチュエータの伸び

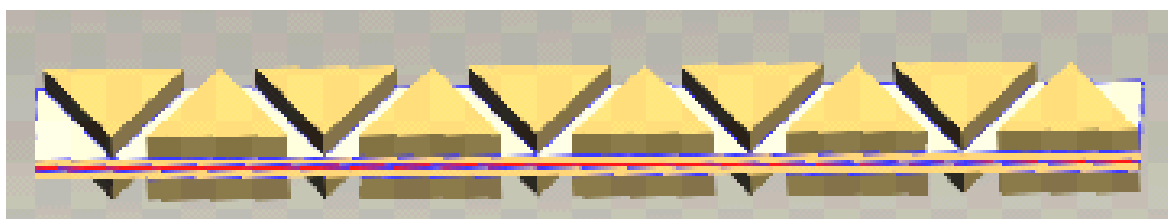
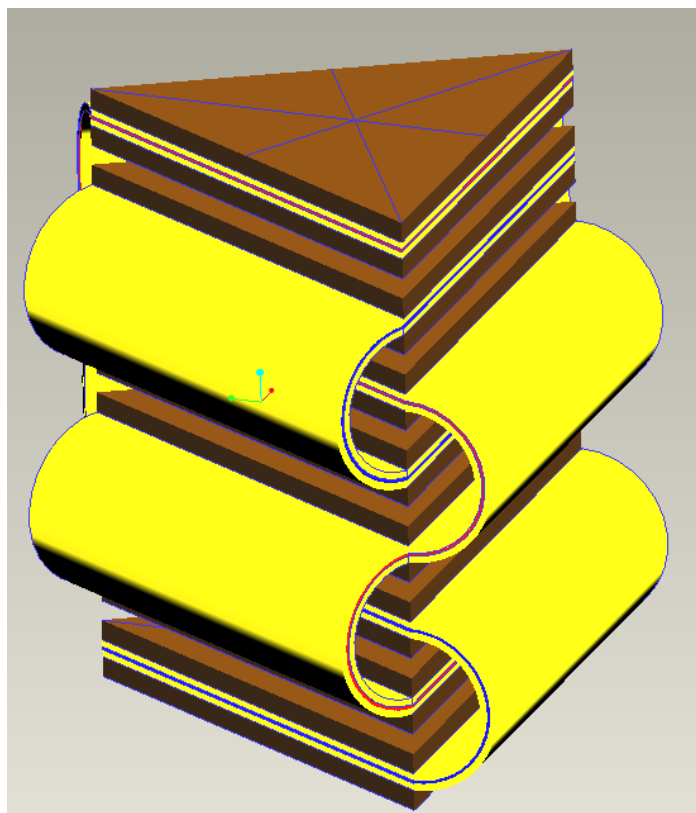


図 2-15 厚薄構造を有する三角形形状リボン状フィルムとアクチュエータ

2.4 積層型静電アクチュエータの静電力

2.4.1 電極が平行な場合

図 2-8 に示すアクチュエータのフィルム的一方に高電圧を印加し、もう一方をアース電位にすることによってアクチュエータは収縮する。このとき発生する力は図 2-15 で示すような 2 層の誘電層，すなわち固体誘電層と液体あるいは気体誘電層からなる平板コンデンサに働く力で説明できる。このコンデンサの単位面積あたりの容量 C は、

$$C = \frac{\varepsilon_0}{\frac{t}{\varepsilon_1} + \frac{d}{\varepsilon_2}} \quad (2.1)$$

で表される。ここで、固体誘電層の厚さと誘電率を $t/2$ と ε_1 ，液体あるいは気体誘電層の厚さと誘電率を d と ε_2 ，真空中の誘電率を ε_0 としている。

このコンデンサに電圧 V を印加したとき、電極間に誘起される電荷密度 σ は、

$$\sigma = CV = \frac{\varepsilon_0 V}{\frac{t}{\varepsilon_1} + \frac{d}{\varepsilon_2}} \quad (2.2)$$

となる。この電荷密度 σ は真空中で電極と誘電体の間に生じることから、この電荷密度に起因する電界 E_0 は、

$$E_0 = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = \frac{V}{2\left(\frac{t}{\varepsilon_1} + \frac{d}{\varepsilon_2}\right)} \quad (2.3)$$

となることから、電極に働く単位面積当たりの力 f_0 は、

$$f_0 = \sigma E = \frac{\varepsilon_0 V^2}{2\left(\frac{t}{\varepsilon_1} + \frac{d}{\varepsilon_2}\right)^2} \quad (2.4)$$

で表される。

従って、誘電率と電極面積 S を考慮すると、電極間に発生する静電力 F は、

$$F = \frac{\varepsilon_0 S V^2}{2\varepsilon_1 \left(\frac{t}{\varepsilon_1} + \frac{d}{\varepsilon_2}\right)^2} \quad (2.5)$$

となる。

2.4.2 電極が非平行な場合

アクチュエータの電極が図 2-16 のように平行でない場合，その発生力は次式のように表される．(Appendix-2)

$$F = \frac{\epsilon S V^2}{8ac} \log \frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \quad (2.6)$$

ここで，式(2.6)では固体誘電層の部分はなく，電極が単に対向している状態であり，媒質を空気， $V = 200[\text{V}]$ とし， $S = DL = 63[\text{mm}^2]$ ， $a = c = 5[\mu\text{m}]$ の条件で式(2.5)と式(2.6)を計算した結果を図 2-17 に示す．

図 2-17 から明らかなように，平板電極が傾けば傾くほど発生力は平行状態に比べて著しく減少することが分かる．すなわち，このタイプのアクチュエータは大きな負荷が印加され，電極間隔が大きく広がった場合でも，常に電極同士が平行に近い状態に保たれるような工夫が必要である．

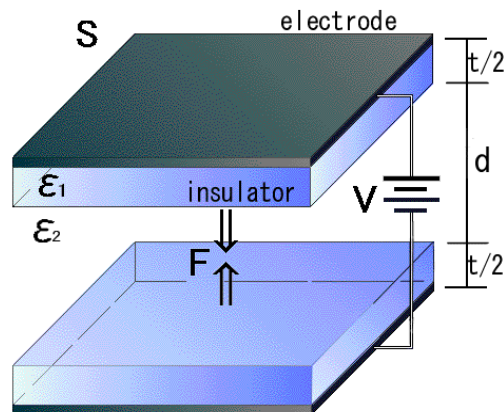


図 2-15 誘電層のある平行平板コンデンサ

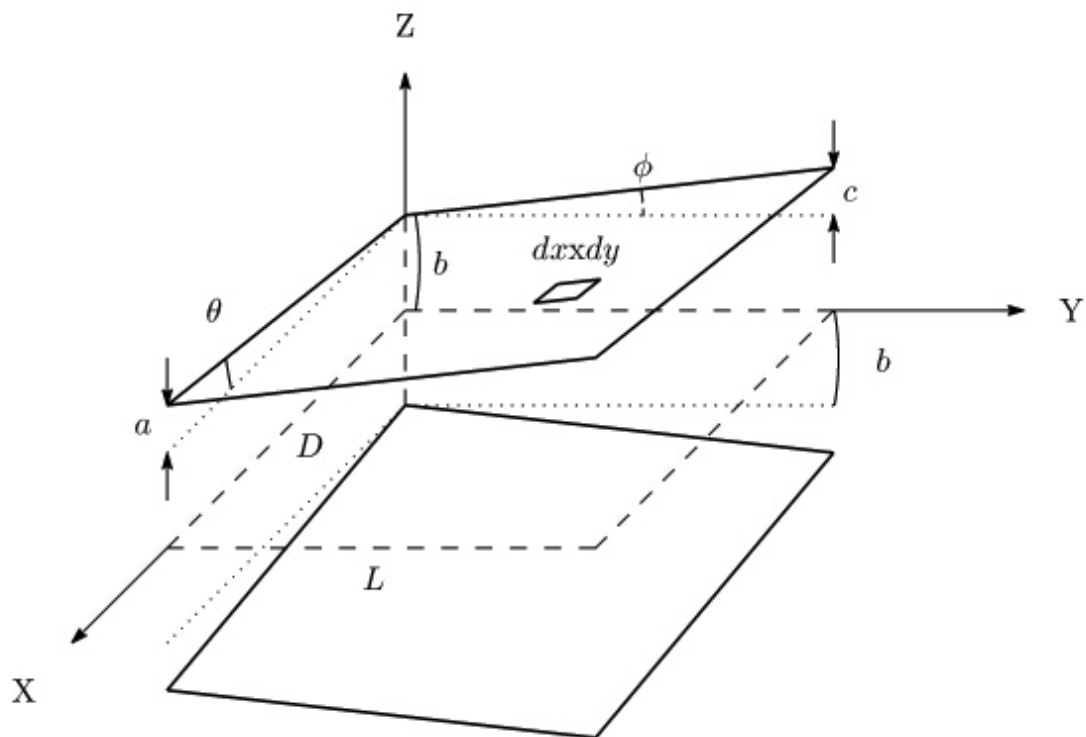


図 2-16 傾いた平板コンデンサ

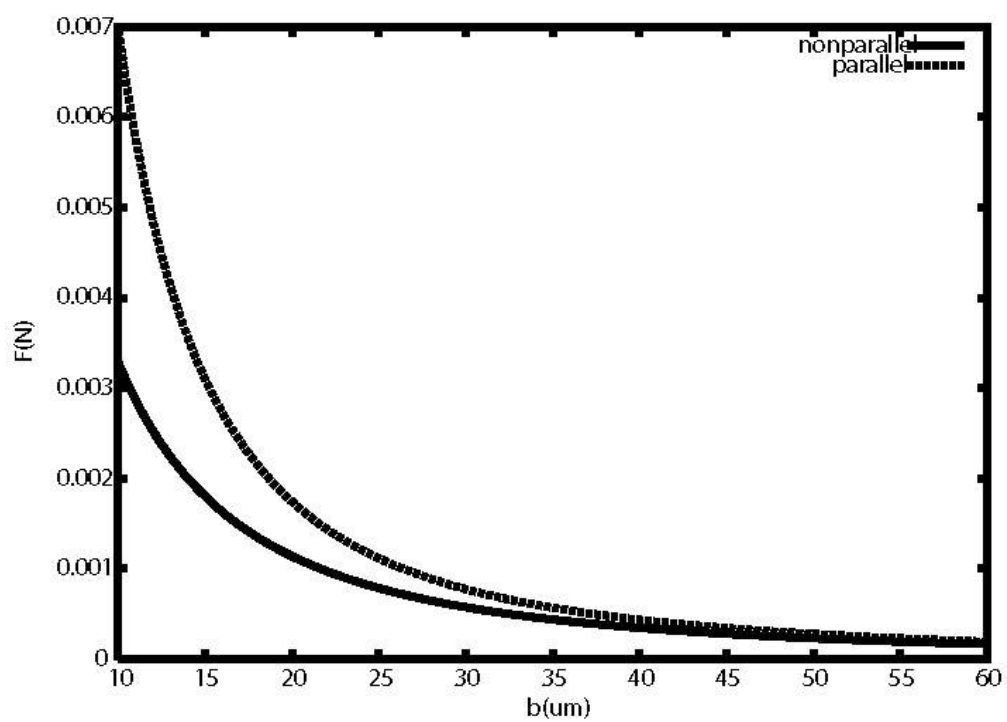


図 2-17 $V = 200[\text{V}]$, $S = DL = 63[\text{mm}^2]$, $a = c = 5[\mu\text{m}]$ のときの発生力

2.5 本章のまとめ

本章では、最初に静電アクチュエータを駆動方向の違いとアクチュエータのサイズの違いによって分類した結果を紹介した。続いて、本研究で取り扱う2本のリボン状フィルムを用いた積層型静電アクチュエータの作製方法、構造や特徴などを示した後、このアクチュエータに求められるバネ特性について説明した。そのバネ特性とは、2つの異なるバネ特性を有すること、すなわち、駆動領域では柔らかく、過負荷領域では硬くなるということであった。このとき、過負荷領域と駆動領域のバネ定数の比をバネ定数比と呼ぶが、この値を大きな値に改善していくこと自体が積層型静電アクチュエータの特性改善に直結することであり、本研究の主テーマでもある。

本研究で対象とするアクチュエータは電極形状によって、積層型四角形状静電アクチュエータと積層型三角形状静電アクチュエータに分類されるが、次節では両者に共通するバネ特性の測定方法やシミュレーション方法について解説する。

第3章 実験およびシミュレーション方法

第3章 実験およびシミュレーション方法

3.1 緒言

本章では、最初にアクチュエータのバネ特性の測定方法について述べる．数 mm 以下の伸びと数 mN 以下の発生力を同時に測定できる測定器は既製品では存在しないため、この測定装置を自作することにした．測定装置は光テコの原理を利用した天秤装置を用いており、測定の原理、倍率、誤差の影響について説明する．誤差の影響については、レーザの照射角、ミラーの高さ、天秤棒の長さ、アクチュエータの伸縮量について調査した．次に自作した測定装置の外形と動作を述べた後、アクチュエータのバネ特性と発生力の測定手順を示す．最後に有限要素法解析ソフトウェア ANSYS を使用して解析を行う理由とシミュレーション方法について述べる．シミュレーション方法では、接触問題を含む非線形構造解析を用いたアクチュエータのバネ特性の計算手順とアクチュエータの動作メカニズムの解明のための静電・構造連成解析を示す．

3.2 光テコの原理を用いた測定装置

3.2.1 測定装置の原理

アクチュエータのバネ特性を測定するため、光テコの原理を用いた装置を作製した．

光テコとは微小な変位量をレーザやミラーなどの光学系を用いて拡大するもので、測定の原理を図 3-1 に示す．図 3-1 のように、照射されたレーザは、天秤棒の中央に設置されたミラーと、その上空に設置されたミラーで反射され、床面にレーザスポットとして照射される．アクチュエータが伸縮すると天秤棒が傾き、ミラーで反射されたレーザの軌道が変化し、床面のレーザスポットが変位するため、この変位量からアクチュエータの伸縮量を測定することができる．

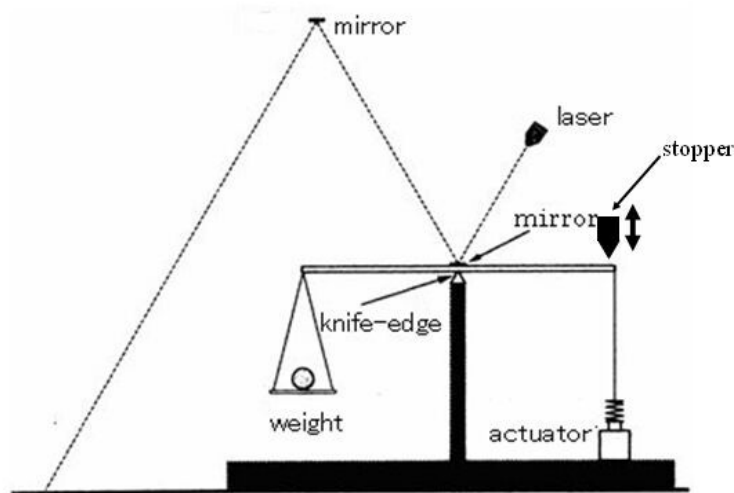


図 3-1 光テコの原理を利用した測定装置

3.2.2 倍率と誤差

(1) 倍率

本装置では、アクチュエータの微小な伸縮量をレーザスポットの変位量に変換して可視化しているが、アクチュエータの伸縮量に対するレーザスポットの変位量の割合を倍率と定義する。図3-2に示すように、床面から上空ミラーまでの高さを h 、天秤棒の中央部ミラーから上空ミラーまでの高さを h_1 、天秤棒の長さを $2l$ 、レーザ照射角を ϕ 、アクチュエータの伸縮量を Δy 、スポットの変位量を Δx とする。

今、天秤が水平状態にあり、天秤の支点からスポットまでの水平距離を x とする。この状態からアクチュエータが収縮し、天秤が図のように角度 θ だけ右側に傾き、天秤の支点からスポットまでの水平距離が x' に変化したとする。

初めのレーザスポットの位置 x は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} x &= h_1 \tan \phi + h \tan \phi \\ &= (h_1 + h) \tan \phi \end{aligned} \quad (3.1)$$

天秤が θ 傾いたときの上空ミラーへのレーザの入射／反射角は $\phi - 2\theta$ となるから、

$$\begin{aligned} x' &= h_1 \tan(\phi - 2\theta) + h \tan(\phi - 2\theta) \\ &= (h_1 + h) \tan(\phi - 2\theta) \end{aligned} \quad (3.2)$$

ここで、 $\theta \ll 1$ とすると、 $\Delta y = l\theta$ となるから $\theta = \frac{\Delta y}{l}$ より

$$x' = (h_1 + h) \tan\left(\phi - 2\frac{\Delta y}{l}\right) \quad (3.3)$$

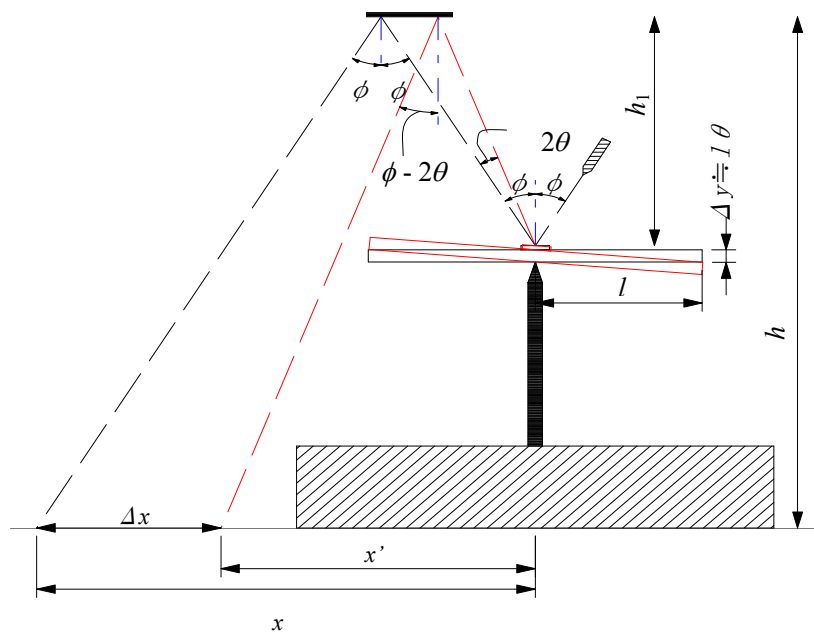


図3-2 光テコの倍率計算の原理

したがって、スポットの変位量 Δx は次式で与えられる．

$$\begin{aligned}\Delta x &= x - x' \\ &= (h_1 + h) \left\{ \tan \phi - \tan \left(\phi - 2 \frac{\Delta y}{l} \right) \right\}\end{aligned}\quad (3.4)$$

本装置では $\phi = 30^\circ$, $h_1 = 300[\text{mm}]$, $h = 1400[\text{mm}]$, $l = 100[\text{mm}]$ としたため，倍率は $\Delta x / \Delta y = 45.28$ となる．すなわち，レーザスポットが $1[\text{mm}]$ 変位したとすれば，アクチュエータは $22.08[\mu\text{m}]$ 伸縮したことになる．

(2) 誤差の影響

アクチュエータのバネ測定装置を自作するに当たって，測定装置の加工精度と測定結果に含まれる誤差の関係について事前に調査した．以下にレーザ照射角，天秤の高さ，天秤棒の長さ，アクチュエータの伸縮量の変化の影響について示す．

① レーザ照射角の変化による誤差

式(3-4)を用いてレーザ照射角 ϕ の変化に対するレーザスポットの変位量 Δx の変化を計算した結果を図 3-3 に示す．レーザスポットは目視で最小 $0.1[\text{mm}]$ 程度の移動量を確認できるため，レーザ照射角が少しでもずれるとレーザスポットの変位量も大きく変化することが分かる．しかし，レーザ照射角は大きく変化するものでなくレーザ照射源を測定装置にしっかり固定することにより，その値を一定値に維持することは容易である．従って，装置を作製する際に，レーザ照射源の部分を堅牢な構造とし，レーザ照射角を正確に測定することによって誤差の影響をなくすることができる．また，レーザ照射角を大きくするとレーザの経路が長くなって倍率が上がるが，その分，角度が少しずれただけでも大きな誤差が含まれることになる．

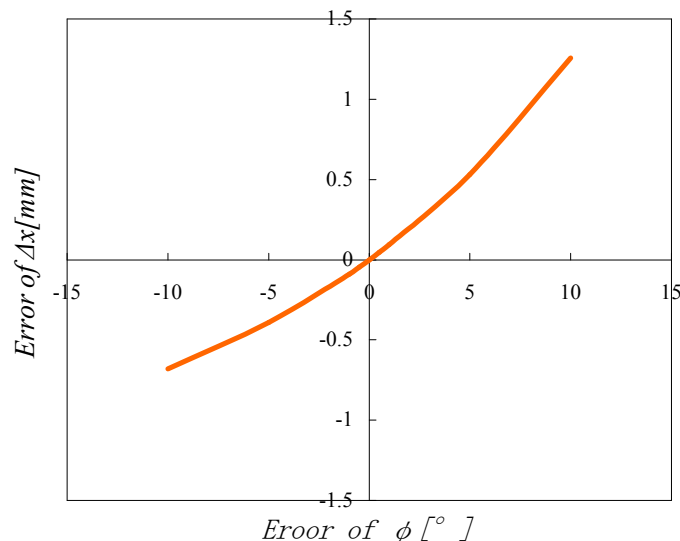


図 3-3 レーザ照射角の影響

② ミラーの高さ変化による誤差

①と同様に、式(3-4)を用いて床面から上空ミラーまでの高さ h と天秤棒中央部ミラーから上空ミラーまでの高さ h_1 がスポットの変位量に与える影響を調べると図 3-4 のようになる。図から、仮に高さが数 cm ずれても目視できない程度の誤差しか含まれないことがわかる。しかも実際には高さを測定する場合、数 mm 程度の誤差しか含まれないため、高さによる誤差はほぼ無視できると考えられる。

③ 天秤棒の長さの変化による誤差

同様にして、天秤棒の長さがスポットの変位量に与える影響を調べると図 3-5 のようになる。天秤棒の長さの半分である l が 2~3[mm]ずれただけで測定結果の誤差要因になると考えるが、実際の加工においては 1[mm]以下の加工精度を得られるため、この場合もスポットの変位量に与える影響は少ないといえる。

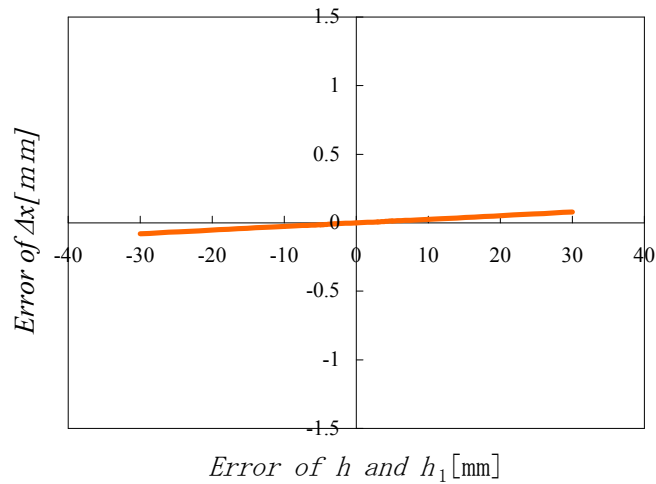


図 3-4 ミラーの影響

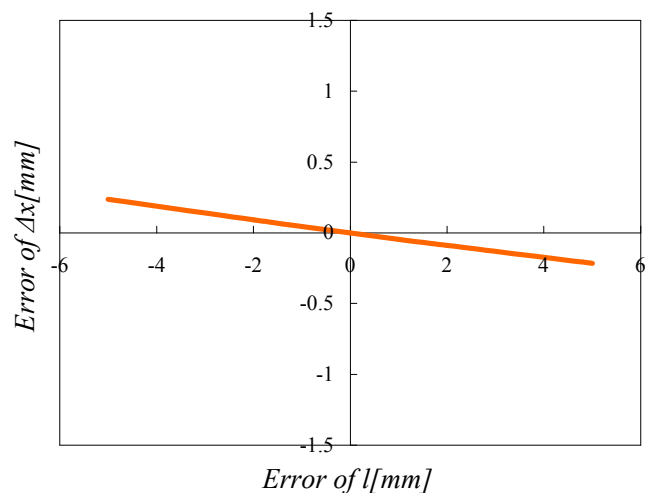


図 3-5 天秤棒の長さの影響

④ アクチュエータの伸縮量の影響

図 3-6 にアクチュエータの伸縮量が倍率に影響する様子を示す．グラフからアクチュエータが 5 [mm] 伸びると倍率は約 45.3 倍から 43.0 倍に減少する．この値はビームスポット 1 [mm] の移動量に対し約 1.2 [μm] の誤差が含まれることに相当する．本装置で測定するアクチュエータの全長は 1 [cm] 以下であり，アクチュエータの伸縮量も 5 [mm] 程度であるため，この影響はほとんど無視して差し支えないと考えられる．

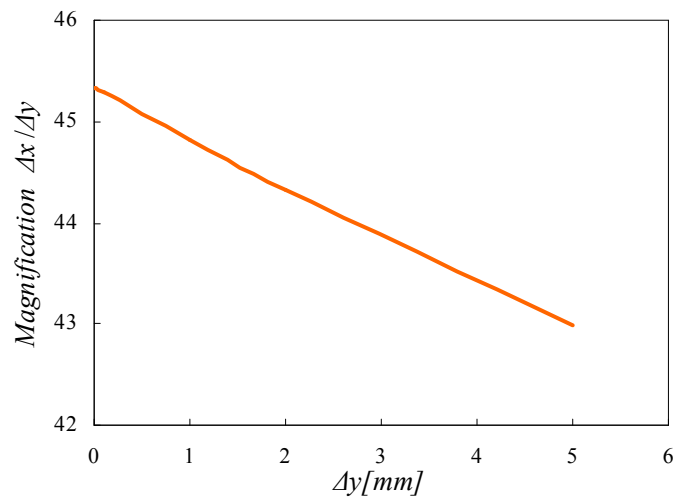


図 3-6 アクチュエータの伸縮量の影響

3.2.3 測定装置

前節に述べた誤差の影響を考慮して作製した測定装置の外形を図 3-7 に示す.

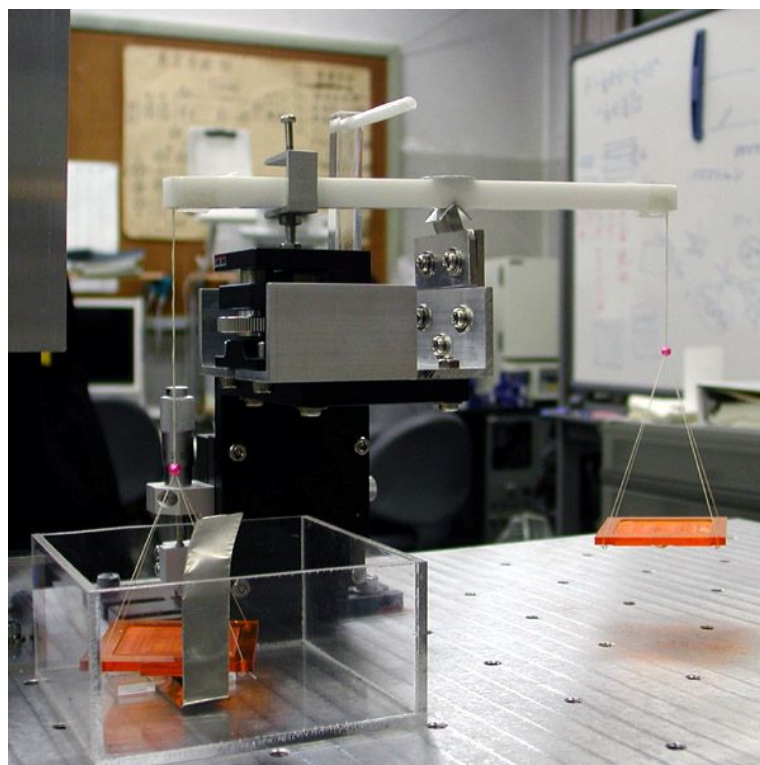
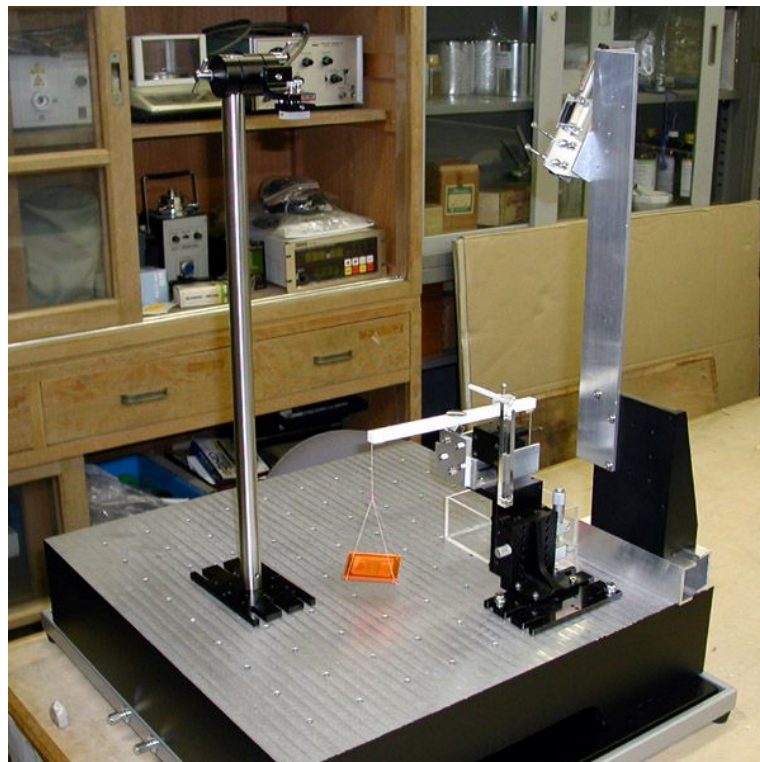


図 3-7 測定装置の外形

第3章 実験およびシミュレーション方法

図 3-8 は Z 軸アルミクロスローラステージの動作を表している．図のように天秤全体はマイクロメータの柄を回転させることによって上下させることができ，この機能により長さの異なるアクチュエータを装置に取り付けた場合でも，天秤棒を水平状態に調整することができる．

図 3-9 は Z 軸フラットブロックステージの動作を表している．図のようにローラーを回転するとストッパを上下に動かすことができる．このストッパは主にアクチュエータの静電力の測定に使用し，天秤が傾き過ぎないように調整したり，傾いている天秤を強制的に水平状態に維持したりするために使用する．

本装置は $\phi=30.03^\circ$ ， $h=1418[\text{mm}]$ ， $h_1=217[\text{mm}]$ ， $l=100[\text{mm}]$ に設定されており，仮にアクチュエータの伸縮量 $\Delta y=0.1[\text{mm}]$ とした場合，倍率は $\Delta x/\Delta y=43.58$ 倍となる．この値は前述のように Δy の値によって異なるが， $\Delta y=0.2957[\text{mm}]$ としたときには， $\Delta x/\Delta y=43.48$ ，すなわちスポットの変位量 $1[\text{mm}]$ 当たりのアクチュエータの伸縮量が $23.0[\mu\text{m}]$ となり，以後はこの値を使用することとした．

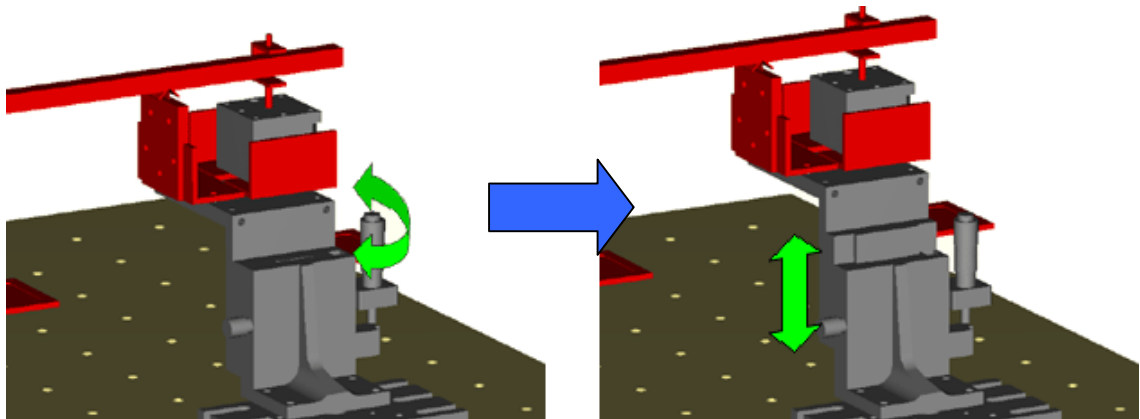


図 3-8 Z 軸アルミクロスローラステージの動作

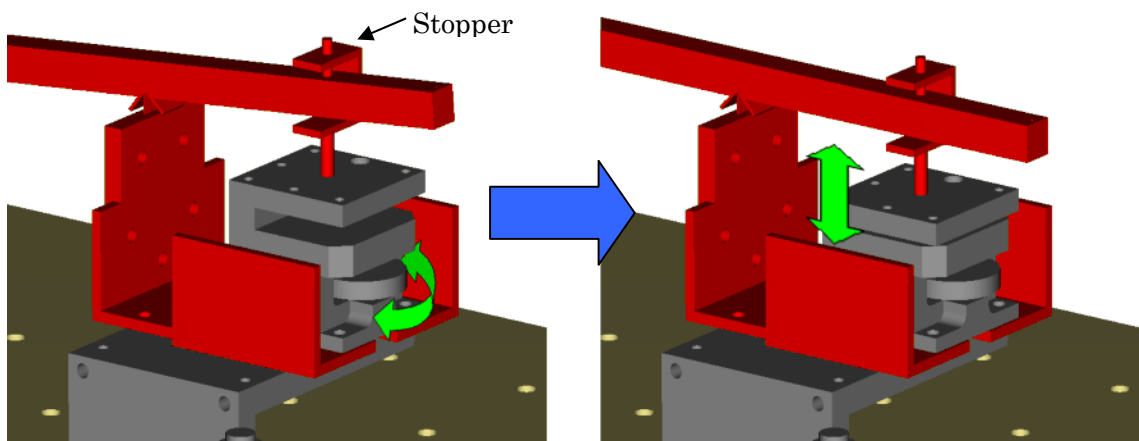


図 3-9 Z 軸フラットブロックステージの動作

3.3 アクチュエータのバネ特性と発生力の測定方法

3.3.1 バネ特性の測定方法⁽³²⁾

図 3-1 に示す光テコの原理を利用した測定装置を用いて、以下の手順でアクチュエータのバネ特性を測定する。

- (1) アクチュエータを取り付ける前に錘を用いて天秤棒が水平になるように調整する。
- (2) アクチュエータを測定装置に固定した後、図 3-8 に示す Z 軸アルミクロスローラステージのマイクロメータを用いて、天秤装置全体の高さを加減し、天秤棒が水平になるよう調整する。このとき、アクチュエータを収縮・伸張させ、アクチュエータを天秤皿に対して垂直に取り付ける。
- (3) アクチュエータ側の天秤皿に適当な錘を載せ、アクチュエータを完全収縮させる。
- (4) レーザを天秤棒中央部のミラーに照射し、上部ミラーの位置を調整した後、床面に形成されたレーザスポットの位置を記録紙に記入する。このレーザスポットの位置がアクチュエータを完全収縮させた点であり、この点をアクチュエータのバネ特性を測定する場合の基準点、すなわち、外力と変位置量がゼロの原点とする。
- (5) アクチュエータと反対側の天秤皿に適当な錘を載せ、変位したレーザスポットの位置を記録紙に記入し、載せた錘の重さとレーザスポットの変位置量を記録する。
- (6) アクチュエータが適度な長さになるまで(5)の操作を繰り返す。尚、駆動領域でのアクチュエータの長さ変化は急であるため、錘調整には注意を要する。
- (7) 加えた錘とレーザスポットの移動軌跡の関係から、外力に対するアクチュエータの変位置量の関係を計算し、アクチュエータのバネ特性を描く。

3.3.2 発生力の測定方法⁽³²⁾

前節と同様に、図 3-1 に示す光テコの原理を利用した測定装置を用いて、以下の手順でアクチュエータの発生力を測定する。

- (1) アクチュエータを取り付ける前に錘を用いて天秤棒が水平になるように調整する。
- (2) アクチュエータを測定装置に固定した後、図 3-8 に示す Z 軸アルミクロスローラステージのマイクロメータを用いて、天秤装置全体の高さを加減し、天秤棒が水平になるよう調整する。このとき、アクチュエータを収縮・伸張させ、アクチュエータを天秤皿に対して垂直に取り付ける。

第3章 実験およびシミュレーション方法

- (3) レーザを天秤棒中央部のミラーに照射し、上部ミラーの位置を調整した後、床面に形成されたレーザスポットの位置を記録紙に記入する。この点がアクチュエータが自然長の位置である。
- (4) アクチュエータ側の天秤皿に適当な錘を載せ、アクチュエータを完全収縮させた後、レーザスポットの位置を記録紙に記入する。
- (5) (3)と(4)のレーザスポットの変位量からアクチュエータの収縮量を計算する。
- (6) アクチュエータの層数と(5)の結果から、アクチュエータが自然長のときの平均電極間距離を計算する。この平均電極間距離は静電力の理論値を求める際に利用する。
- (7) アクチュエータ側の天秤皿にある錘をすべて取り除く。ここで、レーザスポットの位置が(3)の位置に戻っていることを確かめることによって、天秤棒が水平な状態で、アクチュエータが自然長の位置となっていることを確認する。
- (8) 図 3-9 に示す Z 軸フラットブロックステージ上のストップとマイクロメータを調整して、天秤棒が(7)の状態から動かないように固定する。
- (9) アクチュエータと反対側の天秤皿に適当な錘を載せる。このとき、ストップの働きによって、天秤棒は傾かず、アクチュエータは(7)の状態を維持している。
- (10) アクチュエータに適当な電圧を印加する。このとき、アクチュエータが収縮し、レーザスポットが移動した場合は印加電圧を減少させる。逆に、レーザスポットが全く動かない場合には印加電圧を増加させる。尚、アクチュエータの動作確認後は一旦電圧を遮断し、その後、異なる電圧を印加することとする。
- (11) (10)の操作を繰り返し、ビームスポットがわずかに移動する電圧を測定する。
- (12) (9)の錘の大きさと(11)の電圧を記録する。
- (13) さらに錘を追加し、(11)と(12)の操作を繰り返す。
- (14) (12)で得られた電圧値とそのときの錘の関係から、印加電圧に対するアクチュエータの発生力の関係を求める。
- (15) (6)で得られた平均電極間距離と(12)で得られた電圧の値から静電力の理論値を計算する。尚、理論値計算には平行平板に作用する静電力の式(2.5)を使用する。

3.4 導電性薄膜

リボン状フィルム材料には図 3-10 に示すような PET-Cu-PET の 3 層からなる導電性薄膜を使用した（東京フィルム加工株式会社製）。その導電性薄膜の外形を図 3-11 に示す。このフィルムがベースとなりヒンジ部分を形成するが、駆動領域で柔軟な特性を実現するため、その厚さは現有の材料で可能な限り薄くなるようにした。

使用したフィルムの幅は 2[mm]で、上下の PET フィルムの厚さは 1.5[μm]，中間層銅薄膜は幅 1.7[mm]，厚さ 0.3[μm]の蒸着層で、接着層も含めて全体の膜厚は 4[μm]となった。



図 3-10 導電性薄膜の断面図

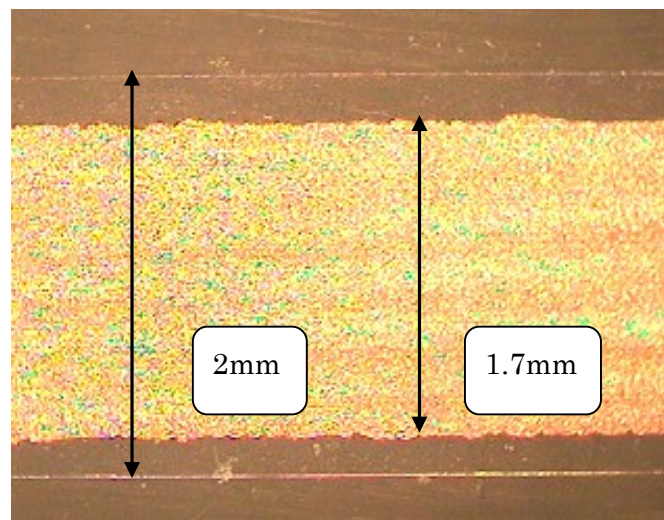


図 3-11 導電性薄膜

3.5 アクチュエータの変形解析

3.5.1 積層型四角形状静電アクチュエータ電極の変形

積層型静電アクチュエータのバネ特性を解析的に調べるためには、電極やヒンジの変形の様子を知らなければならないが、その構造が複雑なため容易に想像することができない。そこで、シミュレーションモデルの助けを借りて変形の様子を説明する。

積層型静電アクチュエータの変形メカニズムを調べるために、図 3-12(a)のような14層モデルを作製し、これを引っ張ることにより変形させた。尚、解析後の電極部分の変形が分かりやすいように前方のヒンジを非表示処理した。

まず、図 3-12(a)において、丸印をつけた3枚の電極に注目すると、中央の電極の左端上部が上の電極と、右端下部が下の電極と接している。ここで中央の電極は左辺と右辺がそれぞれヒンジを介して上部電極と下部電極と結合している。この中央の電極に注目し、他の電極との接触部分と加えられる力関係を模式的に示したのが図 3-12(b)である。図において、電極端部が固定されているとすると、ヒンジを介して作用する偶力によって、電極は左回りの方向にねじられることになる。このモデルを単純化して考えると、図 3-12(b)は図 3-13 に示す薄肉開断面の棒のねじりモデルとして取り扱うことができる⁽³⁴⁾。

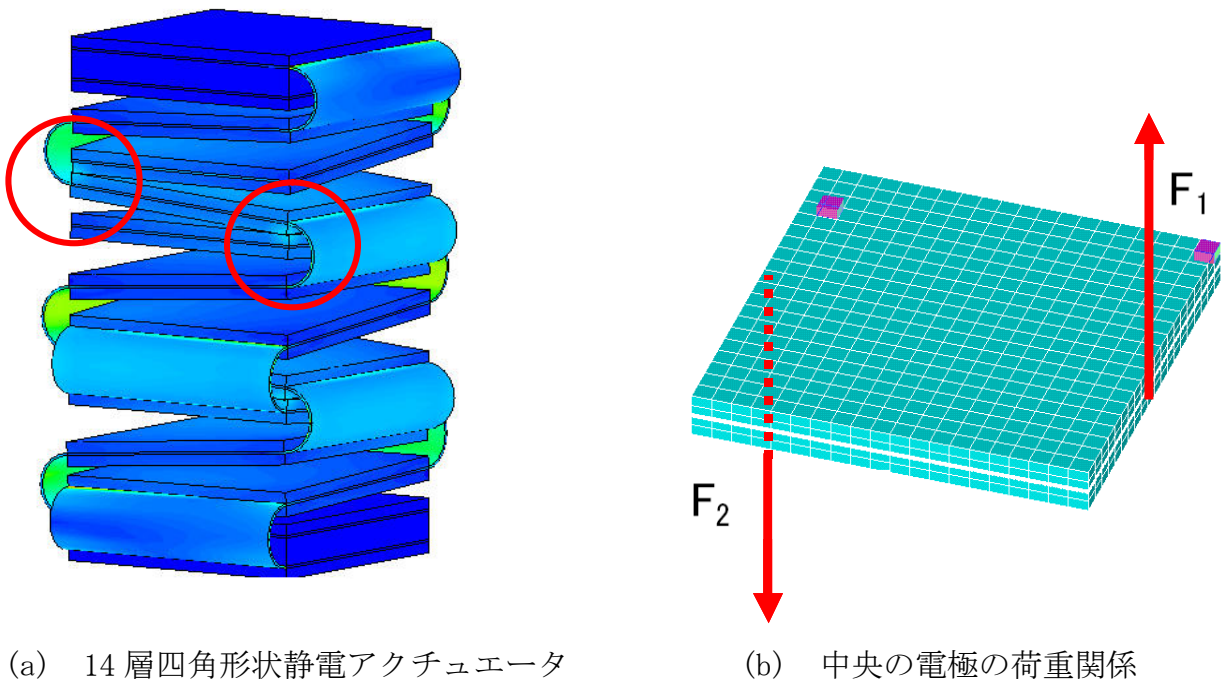


図 3-12 積層型四角形状静電アクチュエータの変形モデル

第3章 実験およびシミュレーション方法

図 3-13 に、薄肉長方形断面の棒のねじりにおけるせん断応力の分布を示す。

薄肉開断面の棒のねじりにおいて、幅が小さくても、そのねじりせん断応力分布は閉断面の場合と完全に異なる。図 3-13 に示すように、トルクを T 、長方形の幅を w 、厚さを t 、長さを ℓ とすると、薄肉開断面の表面のねじりせん断応力 τ は、

$$\tau = \frac{3T}{wt^2} \quad (3.5)$$

となり、比ねじれ角 θ は、

$$\theta = \frac{3T}{wt^3G} \quad (3.6)$$

で求められる。ここで、 G は横弾性係数（せん断弾性率）である。

次に、バネ定数を k 、力を F 、変位を x 、断面積を A とし、比ねじれ角 θ は変位に比例するとすれば、バネ定数 k は (3.5) 式と (3.6) 式から、

$$k = \frac{F}{x} = \frac{\tau A}{\theta w \ell} = \frac{\frac{3T}{wt^2} \ell t}{\frac{3T}{wt^3G} w \ell} = \frac{Gt^2}{w} \propto t^2 \quad (3.7)$$

のように、板の厚さ t の 2 乗に比例すると考えられる。

しかし、実際のアクチュエータではトルク T は一定でなく、その分布の形も具体的には分からないため、バネ定数 k は有限要素法などを用いて、数値的に求めざるを得ない。

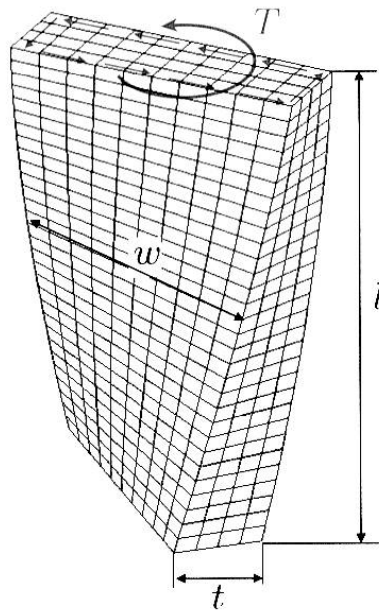


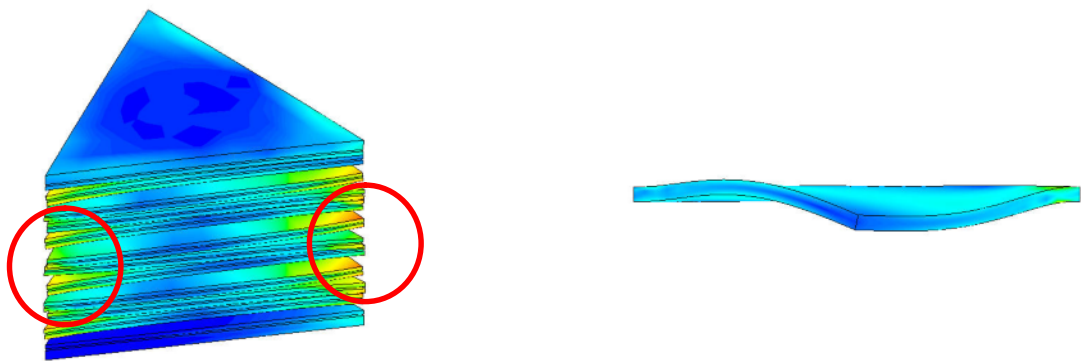
図 3-13 薄肉長方形断面の棒のねじり

3.5.2 積層型三角形状静電アクチュエータ電極の変形

積層型三角形状静電アクチュエータの場合も同様にシミュレーションモデルで説明する．ここでも，解析後の電極部分の変形が分かりやすいように，ヒンジ部分をすべて非表示処理した．

積層型四角形状静電アクチュエータの場合と同様に，図 3-14(a)において，丸印をつけた 3 枚の電極に注目すると，中央の電極の左端上部が上の電極と，右端下部が下の電極と接している．ここで中央の電極は左辺と右辺がそれぞれヒンジを介して上部電極と下部電極と結合し，各々のヒンジは図では見えない奥の一点まで伸びている．この点ではヒンジを介して上下異なる方向に力が作用するため，強いせん断応力が発生し，電極は大きく変形する．この様子を示したのが図 3-14(b)で，図では前方の点を中心として，左側には上向きの，右側には下向きの力が作用している．

図のシミュレーション結果を見る限り，三角形の形状変化は単純でなく，変形の仕方も複雑であることから，これを解析的に説くことは困難であると言わざるを得ない．従って，積層型三角形状アクチュエータのバネ特性も有限要素法などを用いて，数値的に求めることにした．



(a) 14 層三角形状静電アクチュエータ

(b) 中央の電極の変形

図 3-14 積層型三角形状静電アクチュエータの変形モデル

3.5.3 積層型静電アクチュエータのヒンジの変形

積層型静電アクチュエータのヒンジ部分は、2枚の電極連結しているため、電極部分の移動に伴い電極側から図 3-15 のようなせん断応力 τ を受ける。また、ヒンジ内部には変形に伴う垂直応力が常に存在するため、ヒンジの変形モデルでは、せん断応力と垂直応力が混在したモデルとして解析する必要があるが、単純に解は得られない。

ヒンジを中空円筒として計算しても、変形によってヒンジ形状は円筒からずれた形となる。また、ヒンジの曲げ問題として計算できるのは、対称となっている中点近傍のみで、それ以外は分割して、各場所におけるせん断応力と垂直応力を計算する必要がある。このことは最初から有限要素法を用いた数値シミュレーションを行うことと何ら変わらないことになる。

ヒンジの形状変化を調べるために、図 3-16 と図 3-17 のような2枚の四角形および三角形の電極に接続された円筒状のヒンジモデルを作製した。解析では 3.5.1 節と同様に各電極2箇所を固定し、図に示す力 F を加えてヒンジの形状変化に注目した。図のシミュレーション結果を見ると、ヒンジの円筒部分は電極が変形するにつれて円筒形からずれ、その変形の仕方は複雑である。

以上のことから、積層型静電アクチュエータの電極とヒンジの変形問題を解析的に解くことは困難であることが明らかとなったため、4章以降に述べるアクチュエータのバネ特性の解析には次節に示す有限要素法解析ソフトウェア ANSYS を使用することとし、電極やヒンジの形状変化に伴うバネ特性の変化を詳細に調べた。

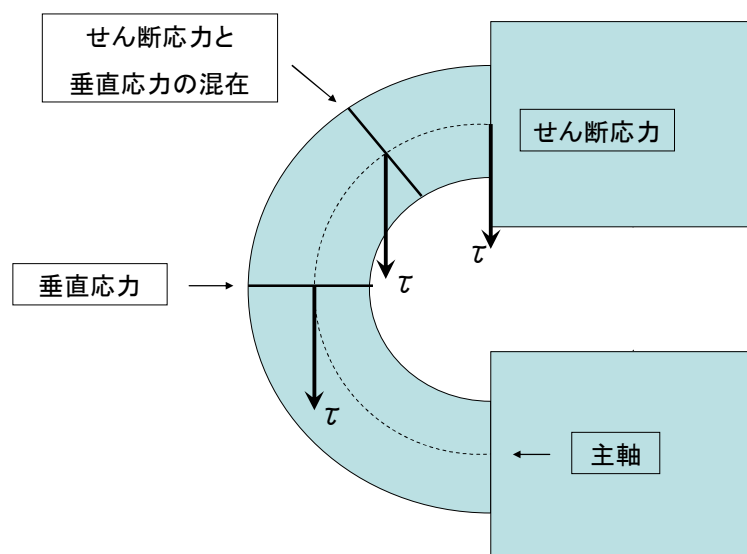


図 3-15 積層型静電アクチュエータのヒンジモデル

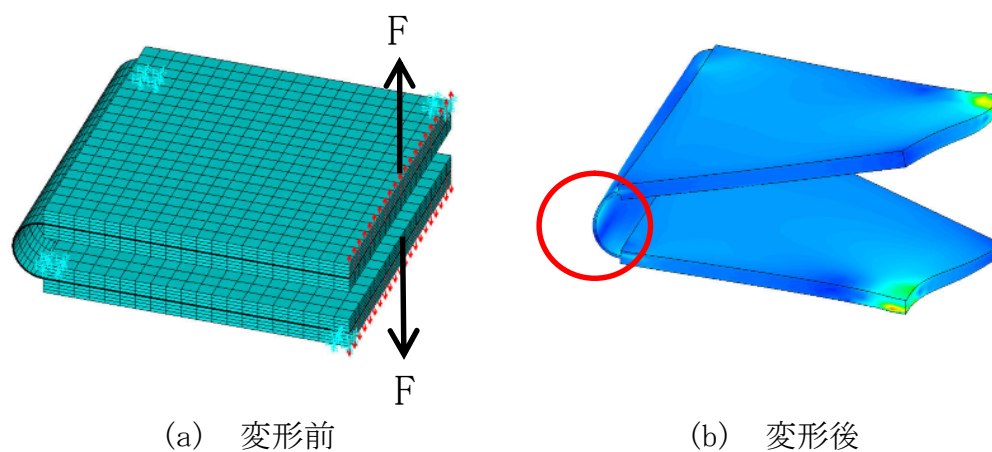


図 3-16 積層型四角形状静電アクチュエータのヒンジモデル

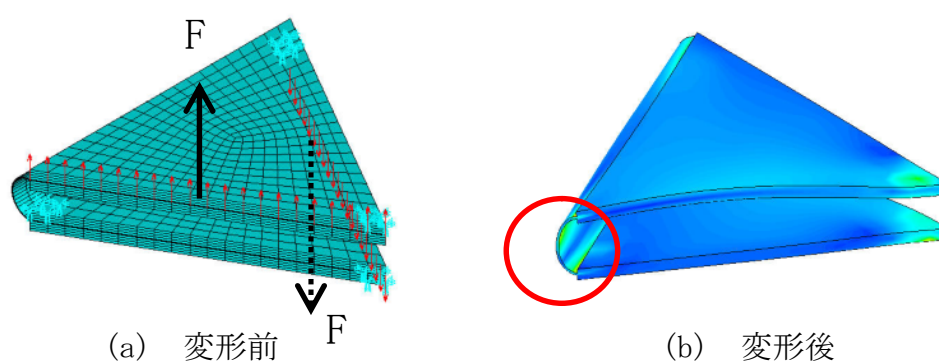


図 3-17 積層型三角形形状静電アクチュエータのヒンジモデル

3.6 シミュレーション方法

3.6.1 ANSYS について

ANSYS は、1970 年に工学分野の諸問題についてコンピュータを用いて解析するために John A. Swanson 博士によって開発された有限要素法解析ソフトで、その豊富な機能と特に柔軟な連成解析機能が広範囲のユーザーの要求を満たし、世界中で高く評価される CAE (Computer Aided Engineering) プログラムに発展した。当初は電力業界と機械業界に主として利用されていたが、現在では、電気、精密機器、自動車、自動車部品、航空宇宙、原子力、化学、医療工学、また研究所や教育機関に至るまで、さまざまな分野で利用されている。

3.6.2 ANSYS の特徴⁽³⁵⁾

ANSYS には、線形構造解析、非線形構造解析、伝熱解析、熱流体解析、電磁場解析、圧電解析、音響解析など、豊富な解析機能が用意されている。(Appendix-3)

また、ANSYS では、連立方程式を解くソルバープログラムとモデルを作成するプリプロセッサ、結果処理を行うポストプロセッサがすべて 1 つの実行ファイルに納められているため、解析に必要なすべての作業を同じ GUI (Graphical User Interface) 環境で実施できるという特徴がある。さらに、ほとんどの解析の間で連成解析が可能で、各解析環境(材料特性、境界条件など)データは Physics File と呼ばれるファイルに格納することができ、このファイルを介して各解析に必要な条件を簡単に入れ替えることが可能なため、連成解析に必要な各解析環境の再定義を容易に行うことができるようになっている。

本研究で使用した ANSYS は、サイバネットシステム株式会社から購入したもので、最大節点数が 256,000 点である Academic Teaching Advanced (ver. 11.0)であり、主に、接触問題を含む非線形構造解析機能、時刻歴解析機能、静電・構造連成解析機能を利用している。

3.6.3 解析の流れ

ANSYS を用いた非線形構造解析の流れを図 3-18 に示す。

(1) 解析モデルの作成

解析モデルの作成の目的は、モデルの形状や材料特性等を表す有限要素モデルを作成することであり、ANSYS には直接生成法とソリッドモデリングと呼ばれる 2 つの方法が用意されている。

① 直接生成法

直接生成法は、各節点の位置を定義し、次に節点を連結して要素を作成し、最後に要素を連結させて有限要素モデルを作成する方法である。線要素や長方形、立方体の要素が規則正しく並ぶ物体に対しては手早く、効果的に有限要素モデルを作成することができるシンプルな方法であるが、複雑な形状を作成するには非常に手間のかかる方法である。

② ソリッドモデリング

ソリッドモデリングは、ソリッドと呼ばれる幾何形状を組み合わせたモデルを作成し、それを要素分割（メッシング）することによって有限要素モデルを作成する方法であり、複雑な形状モデルでも比較的簡単な作業で作成することが可能である。ソリッドモデリングでは、2次元モデルならばエリア同士、3次元モデルであればボリューム同士の隣接部分において、お互いの端部節点を必ず一致させておく必要がある。本研究で作成する有限要素モデルは数多くの電極部分とヒンジ部分が複雑に構成されているため、このソリッドモデリングを用いている。

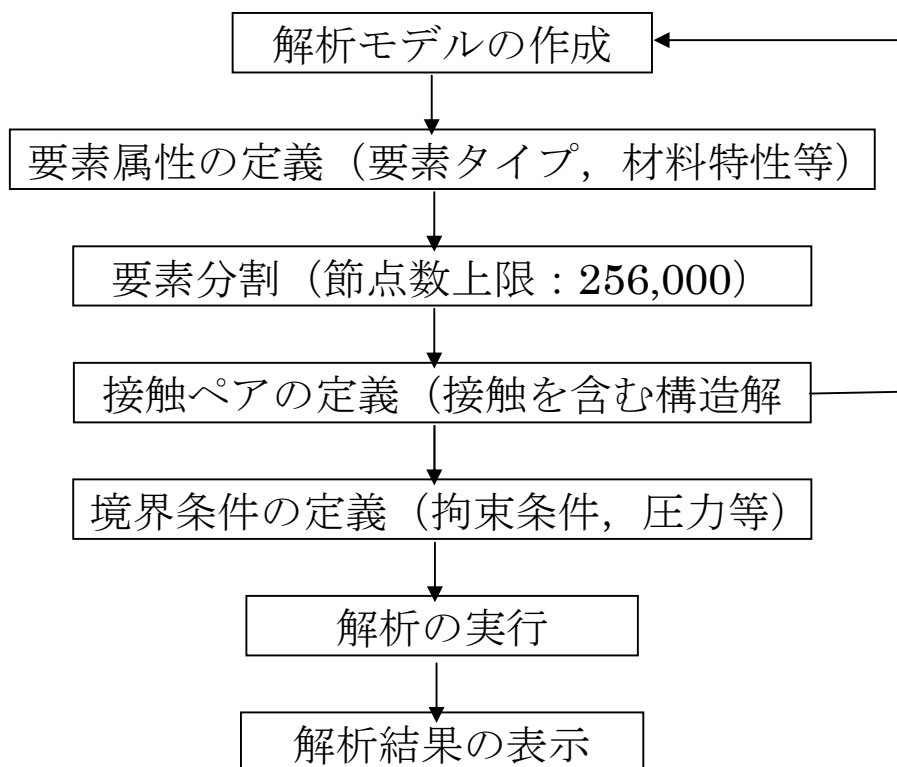


図 3-18 非線形構造解析の流れ

(2) 要素属性の定義

要素分割を実施する前にモデルの各領域に対して適切な要素属性を定義する必要がある。要素属性の定義では主に、要素タイプ、材料特性などを指定する。

① 要素タイプ

ANSYS では、解析目的（構造、伝熱、磁場など）やモデル形状（2次元、3次元など）に応じて、約150種類以上の要素タイプが用意されている。本研究の解析には SOLID185 と呼ばれる 3次元6面体の構造ソリッド要素を使用している。

SOLID185 は 8 節点の低次要素であるが、塑性、超弾性、クリープ、大変形、大ひずみなどを解析するための機能が含まれている。尚、低次要素とは、要素の頂点にのみ節点が存在する要素で、要素分割の方法によっては計算精度が劣化する場合もあるが、節点数が少ないため計算時間が少ないという特徴がある。一方、要素の頂点に加えて要素辺の中間にも節点がある高次要素は計算時間はかかるものの、計算精度は低次要素に比べて高いといえる。

② 材料特性

作成したモデルにおいて、2次元モデルならばすべてのエリアに、3次元モデルならばすべてのボリュームに対して、材料の物性値を与える必要がある。本研究では、アクチュエータ材料には PET フィルムを使用し、媒質を空気としたため、ヤング率を 540[MPa]、ポアソン比を 0.458、比誘電率を 1 とした。

(3) 要素分割

ソリッドモデルを要素分割することによって、モデル内に節点と要素が生成されるが、この作業は解析全体の中で最も重要な作業の 1 つであり、その結果によって有限要素モデルの規模が変化し、解析精度や処理時間に大きな影響を与える。要素分割を行う直前には要素の形状とサイズを決定するが、要素形状によって要素分割の方法は以下のようなフリーメッシュとマップトメッシュの 2 種類に大別される。

① フリーメッシュ

2次元モデルでは三角形のみ、または三角形と四角形で、3次元モデルでは四面体のみで要素分割する方法である。この方法はモデルに対して制限事項はないという特徴はあるものの、要素形状の歪が大きくなると計算精度が大きく劣化する問題がある。

② マップトメッシュ

2次元モデルでは四角形のみ、3次元モデルでは六面体のみで要素分割する方法である。この方法はモデルの形状や分割数の指定方法に制限を受けるが、フリーメ

ッシュに比べて計算時間を節約でき、しかも計算精度が高いという特徴がある。本研究では、計算精度向上のため、モデルの要素分割にはこの方法を用いている。

(4) 接触ペアの定義

ANSYS を用いた非線形構造解析において、圧力印加などによってモデルが変形し、その一部が接触するような場合には、互いの接触部分に接触ペアを定義することによって接触問題を解決することができる。ANSYS における接触解析では一方の境界面（通常剛体側）をターゲット面、もう一方の境界面（通常変形体側）をコンタクト面と呼び、これらを接触ペアとする慣例になっているため、本研究では3次元の非線形構造解析を可能とする要素として TARGE170 と CONTA174 からなる接触ペアを使用した。尚、問題を簡単化するために、接触解析において接触面での摩擦や初期食い込み量は特に考慮していない。

(5) 境界条件の定義

構造解析では各有限要素に作用する微小な力のバランスから解を求めるため、計算モデルに対して適切な拘束条件と荷重定義が必要である。図 3-19 は電極数が6層の四角形状静電アクチュエータモデルの下部電極を固定し上部電極面に垂直な方向に一定の圧力を加えたときの解析結果の一例を示す。ここで、(a)は上部電極の動きの自由度を特に制限しない場合であり、(b)は自由度を上下方向に限定した場合を示す。図 3-13 の比較から明らかなように、上部電極の自由度を特に制限しない場合には、外力によって電極やヒンジの一部が接触するとアクチュエータ全体が大きく歪む。これに対して、上部電極の自由度を上下方向だけに限定するとアクチュエータには大きな歪は発生せず単に上部電極が平行に移動するだけであり、実際にアクチュエータを集積して使用する場合には、これと同様となる。

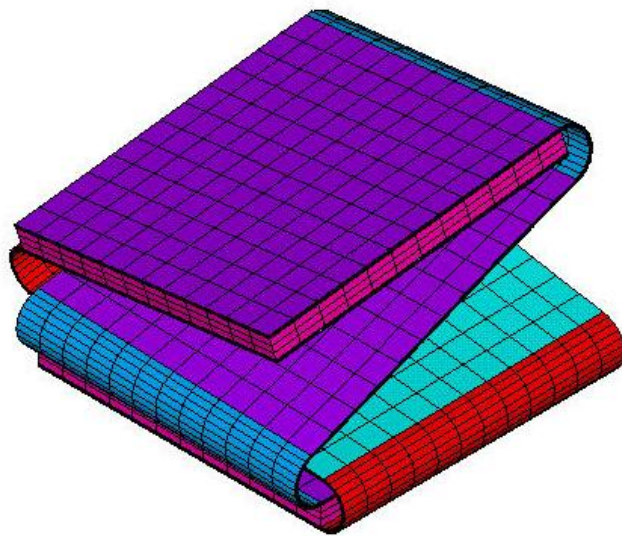
本研究では、アクチュエータのバネ特性計算においては、下部電極の全節点を完全固定（全自由度の完全拘束）し、上部電極の全節点を上下（y 軸）方向のみ可動（x 軸，z 軸方向を完全拘束）とした上で、上部電極面に電極が大きく歪まない範囲内で一定の収縮および引張り圧力を与え、アクチュエータの変位量を計算している。

(6) 解析の実行

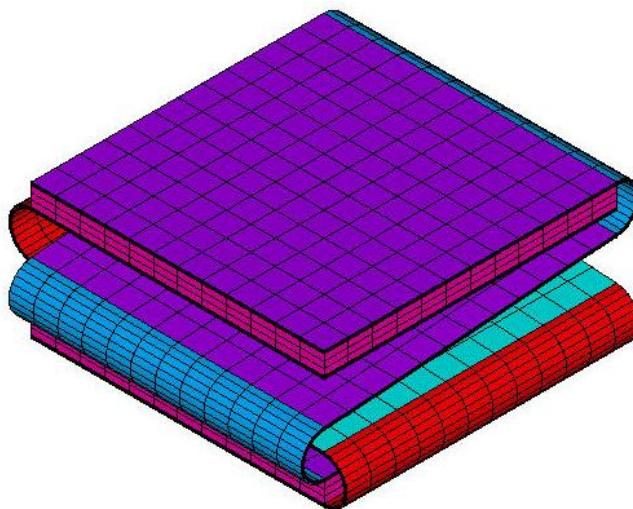
解析を実行すると、ANSYSはデータベースから入力データを読み込み、解析を実行する。得られた解析結果は欠課ファイルに書き込まれ、同時に一部の内容はデータベースに保管される。

(7) 解析結果の表示

解析結果の出力には、変形図、コンター図、ベクトル図のようなグラフィック表示と節点、要素毎の詳細な結果を確認できるリスト表示がある。また、ANSYSには便利なアニメーション機能が用意されており、解析評価に極めて有効である。



(a) 上部電極に拘束条件がない場合



(b) 上部電極が垂直方向のみ可動とした場合

図 3-19 拘束条件の違いによるアクチュエータの変形

3.6.4 ANSYS による連成解析

有限要素法では、構造解析、伝熱解析、静電解析など多くの物理現象を表現することは可能であるが、温度分布によって熱歪が発生する問題や、静電界によって構造体に変形したりする問題は、それぞれの物理現象を連携させて計算させないと問題を解決できない。このように、複数の問題を連携させて計算させる解析を連成解析と呼んでいる。

(1) 連成解析手法

連成解析を計算手法の違いで分類すると、シーケンシャル連成解析とマトリクス連成解析の2つに分けることができる。

① シーケンシャル連成解析

シーケンシャル連成解析は複数の物理現象をそれぞれ単独に解析し、個々の解析で得られた結果を続く物理現象の解析に対する荷重として利用する方法である。シーケンシャル連成解析はさらに一方向の連成で終わらせるか、連続的に双方向で結果のやりとりを行わせるかによって、一方向シーケンシャル連成解析と双方向一方向シーケンシャル連成解析分類される。

これらについては、次節の静電・構造連成解析において、その詳細を述べる。

② マトリクス連成解析

マトリクス連成解析は連立方程式を解く段階で連成が行われる、つまり、複数の物理現象を1つのマトリクスで表現することが可能な連成問題である。この方法は、最低1回のマトリクス計算（線形問題の場合）で結果を得ることができ、解析も速いが、その定式化が確立している連成問題でなければ適用できない。

(2) 静電・構造連成解析

① 一方向シーケンシャル連成解析

一方向シーケンシャル連成解析による静電・構造連成解析のプロセスを図 3-20 に示す。この方法の特徴は、静電解析によって計算された電極の近傍でのクーロン力を直接構造解析の集中荷重として用いている点である。注意しなければならない点は構造解析でのモデル変形量が非常に微少で、静電場に対してほとんど影響を与えない場合にしか用いることができないということである。構造変形が大きい場合には次に述べる双方向シーケンシャル連成解析を行う必要がある。

② 双方向シーケンシャル連成解析

双方向シーケンシャル連成解析では、まず、静電解析において定義された電位からクーロン力を計算し、これを集中荷重データとして構造解析に適用する。次に、構造解析では集中荷重からモデルの各節点の変位量を計算し、これを静電解析に適用する。このとき構造体が変形したことによって、周囲の電界強度分布は変化し、発生するクーロン力も変化するため再度静電解析によってクーロン力を計算し、これを構造解析に適用する。このような解析の繰り返しを双方向シーケンシャル連成解析と呼ぶ。

静電・構造連成解析では、図 3-21 と図 3-22 に示すように、メッシュの生成方法によって、メッシュモーフィングとリメッシュの2種類に分類される。メッシュモーフィングとは流体部のメッシュを周りの構造体のメッシュに合わせて変形させていく方法のことで、リメッシュとは構造体を含めたすべてのメッシュを再度生成する方法のことである。

リメッシュの方は完全にモデルのメッシュを生成しなおすため、計算精度はメッシュモーフィングより良いとされているが、不利な点も多い。まず、リメッシュを行うと節点番号や要素番号が完全に変わってしまうため、初期条件の定義が不可能であることが挙げられる。また、三次元モデルの場合、要素分割の方法において、マップトメッシュ（六面体メッシュ）に比べて計算精度が劣るフリーメッシュしか選べないということがある。このため、モデルの形状などから適宜にメッシュモーフィングとリメッシュのどちらを選択する必要がある。また、ANSYS にはこの双方向シーケンシャル連成を自動で行う機能があり、これを ESSOLVE マクロと呼び、メッシュモーフィングとリメッシュのどちらかを選ぶことができる。

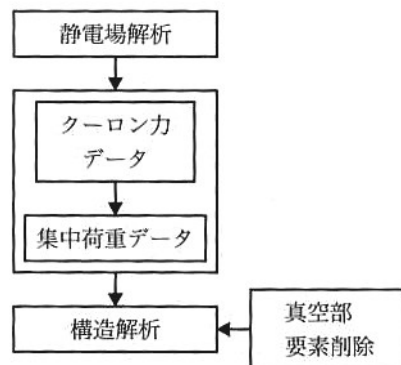


図 3-20 一方向シーケンシャル連成解析手順

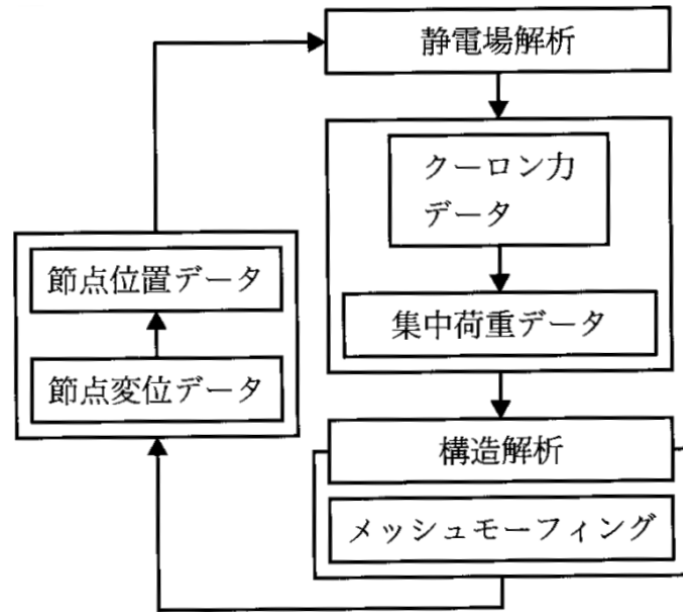


図 3-21 メッシュモーフィングの流れ

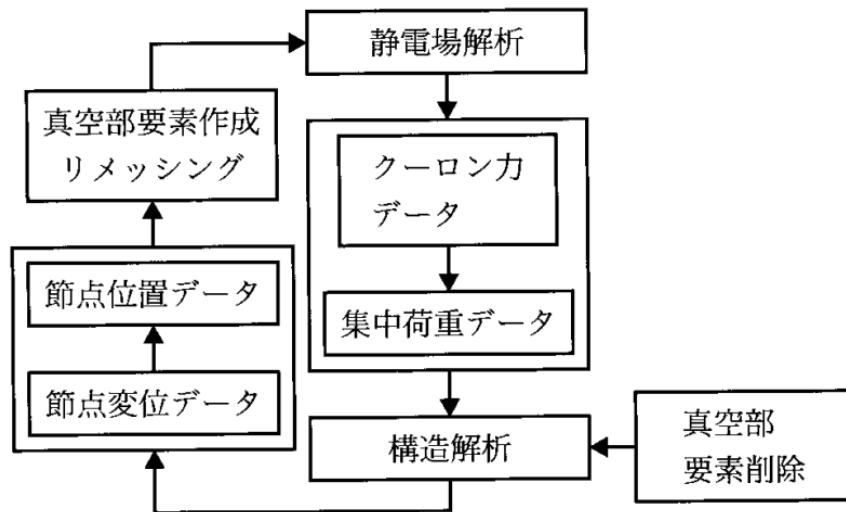


図 3-22 リメッシュの流れ

3.7 本章のまとめ

本章では、最初に光テコの原理を利用した天秤装置を用いたアクチュエータのバネ特性と発生力の測定方法について述べた。この測定方法は、次節以降に述べる積層型四角形状静電アクチュエータおよび積層型三角形状静電アクチュエータの特性を評価する際に共通的に使用する方法である。また、簡単な電極とヒンジモデルの構造解析結果から、積層型静電アクチュエータの電極やヒンジの形状変化に対するバネ特性の計算を解析的に求めることは困難であることを示した。有限要素法解析ソフトウェア ANSYS を用いた接触問題を含む非線形構造解析の手法は、バネ特性の測定と同様に、次節以降で示す積層型四角形状静電アクチュエータおよび積層型三角形状静電アクチュエータのシミュレーションにおいて共通的に使用する方法である。

尚、ANSYS による連成解析については、本研究では特に触れておらず、ANSYS の持つ機能の紹介の範囲とした。

次節では、電極の形状が四角形の積層型四角形状静電アクチュエータの作製方法、バネ特性や発生力の測定結果、アクチュエータの形状変化とバネ特性の関係を調べるためのシミュレーション結果などについて、詳細に解説する。

第 4 章 積層型四角形状静電アクチュエータ

第 4 章 積層型四角形状静電アクチュエータ

4.1 緒言

本章では、最初に厚薄構造を有するリボン状フィルムの作製方法について述べる．次に、このフィルムを用いて作製した電極層数が異なるアクチュエータのバネ特性の測定結果を示し、規格化されたバネ特性について説明する．規格化されたバネ特性は同じアクチュエータ形状で電極層数のみが異なるアクチュエータにおいて、そのバネ特性を 1 ギャップあたりに換算したものである．続いて、アクチュエータの形状、すなわち、電極の厚さ、ヒンジの厚さと長さを変化させた場合のバネ特性の測定結果について述べる．最後に有限要素法解析ソフトウェア ANSYS を用いた非線形構造解析に基づくアクチュエータのバネ特性の計算結果を示し、実験結果とシミュレーション結果を比較する．さらにアクチュエータの形状を変化させた場合のバネ特性の計算結果について述べ、電極やヒンジの形状とバネ特性との関係を明らかにする．

4.2 厚薄構造を有するリボン状フィルム

本研究で使用するリボン状フィルムの中央部は、図 4-1 (a)に示すように金属薄膜 (Cu 薄膜) を PET フィルムで絶縁した構造となっている．この導電性薄膜をベースとして厚い電極部を形成するために、図 4-1 (b)のように電極位置に別の PET フィルムを規則的に接着した構造としている．図 4-2 の(a)から (d)を参考にして、以下に治具を利用した厚薄構造を有するリボン状フィルムの具体的な作製手順を示す⁽³²⁾．

- ① PET フィルムを治具の溝に沿ってセットする．このとき、ヒートシール層（加熱により接着）が上面になるようにフィルムをセットする（図 4-2 (a)）．
- ② ①と垂直な方向に導電性薄膜をセットする（図 4-2 (b)）．
- ③ ①と裏返しの向きで PET フィルムをセットする（図 4-2 (c)）．
- ④ 上からふたでしっかりと圧着し、電気炉内で熱処理する（図 4-2 (d)）．
- ⑤ ヒートシール面の接着状況を確認後、リボン状フィルムの切り出しを行う．

図 4-3 に導電性薄膜フィルムと厚薄構造を持つフィルムの外形を、図 4-4 に図 4-3 (b)の厚薄構造を持つリボン状フィルムを用いて折り込んだ積層型四角形状静電アクチュエータの外形を示す．尚、この作製方法は専用の治具を用いているため、比較的高精度のアクチュエータを作製することができるが、電極数が少数に限定され、作業も煩雑であるなどの問題がある．

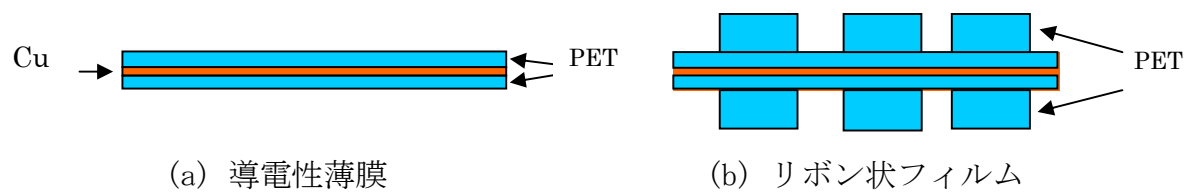


図 4-1 導電性薄膜とリボン状フィルムの断面図

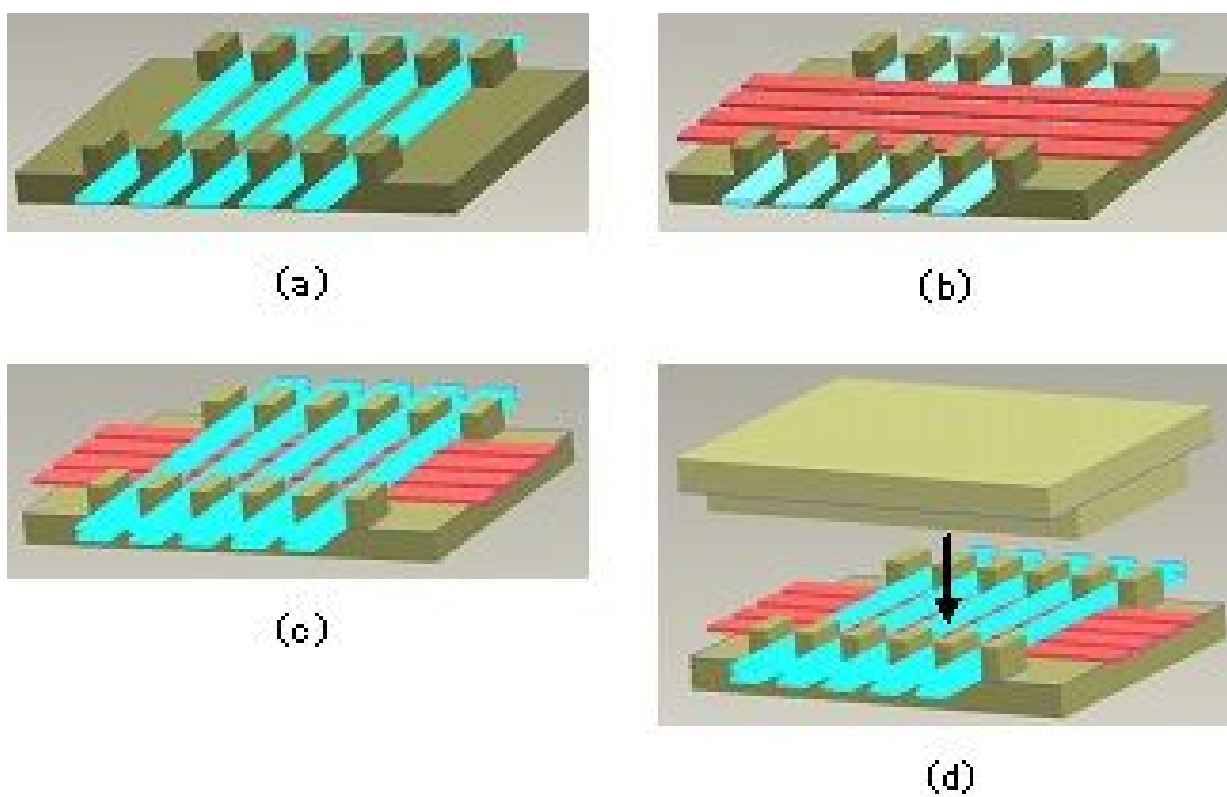


図 4-2 リボン状フィルムの作製手順

第4章 積層型四角形状静電アクチュエータ

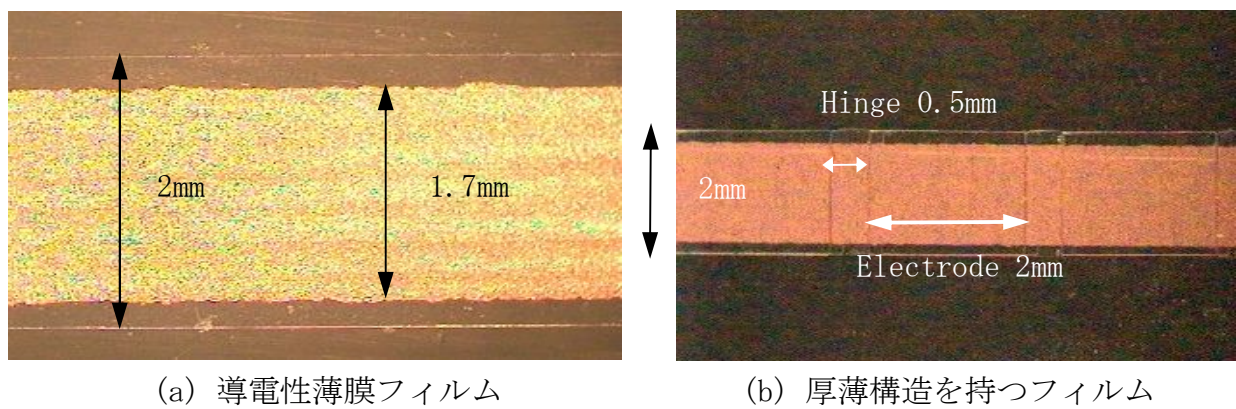


図 4-3 リボン状フィルムの外形

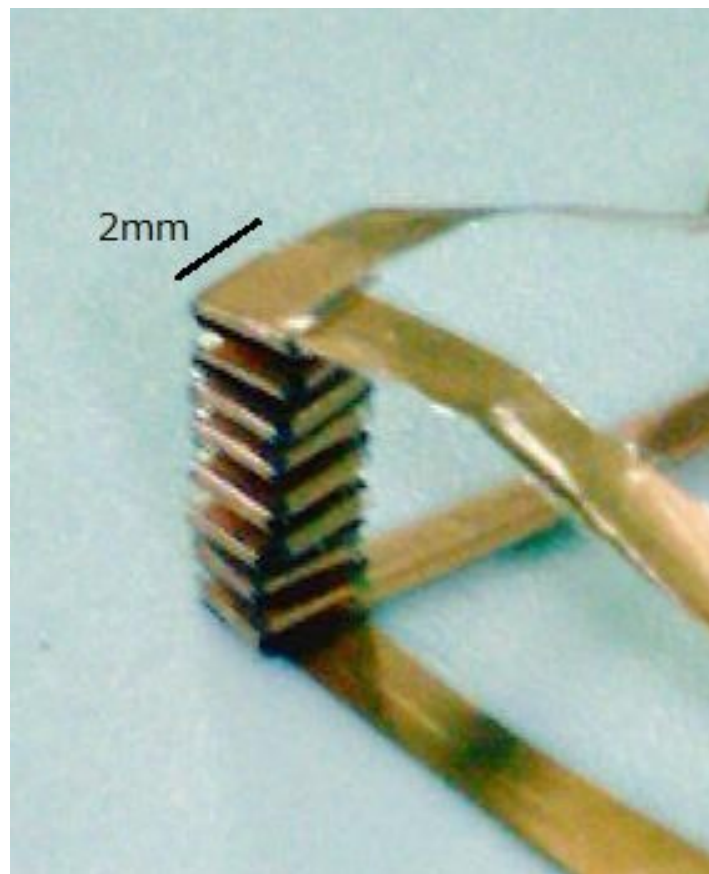


図 4-4 2 ミリサイズアクチュエータの外形

4.3 バネ特性の規格化

4.3.1 電極層数の異なるアクチュエータのバネ特性

図 4-5 に図 4-3 のリボン状フィルムを使用して作製した 8 層, 16 層, 32 層のアクチュエータの外形を示す. 導電性薄膜フィルムの PET-Cu-PET 3 層構造の厚さは PET 部分が $2.5 [\mu\text{m}]$, Cu 部分 (蒸着層) が $0.3 [\mu\text{m}]$ である (東京フィルム加工株式会社製). この導電性薄膜がベースとなってヒンジ部分を形成するが, その厚さは接着層の厚さも含めて $4 [\mu\text{m}]$ 程度と薄くなっているため, 駆動領域で柔軟な特性を実現している. 尚, 電極部を形成するためのフィルムには幅 $2 [\text{mm}]$, 厚さ $25 [\mu\text{m}]$ の PET フィルムを使用したため, 電極部全体の厚さは $56 [\mu\text{m}]$ でヒンジの長さは $0.5 [\text{mm}]$ である.

図 4-6 に図 4-5 に示したアクチュエータのバネ特性の測定結果を示す. 各測定点は図 3-1 に示した光テコの原理を利用した測定装置を使用して, 錘の変化に対するアクチュエータの変位量をプロットしたもので, その原点は 3.3.1 節で述べたように, 錘を用いてアクチュエータを完全収縮させた点である. 図から電極やヒンジが同じ形状で同じ材料特性を持つアクチュエータであっても同じバネ特性とはならず, 層数が多くなるほどバネ定数は小さな値となる. これは同じ力を加えた場合でも, 層数が多い, すなわち, ヒンジ部が多いアクチュエータほどより大きな変形を生ずるからである.

4.3.2 規格化されたバネ特性

アクチュエータの電極数を N とすると, 電極間のギャップ数は $N-1$ となるが, 実際のアクチュエータの上部と下部の電極部分は固定されているため, 可動部分のギャップ数は $N-3$ となる. そこで, アクチュエータのすべてのギャップ部分がほぼ均一に変化するものと仮定すると, 図 4-6 の変位量の値を $N-3$ で除することによって, 図 4-7 のような 1 ギャップ当たりのバネ特性のグラフを得ることができる. 図 4-7 から明らかなように, 層数の異なるアクチュエータのバネ特性を 1 ギャップ当たりのバネ特性に換算することによって, 規格化されたデータとして取り扱えることが分かった.

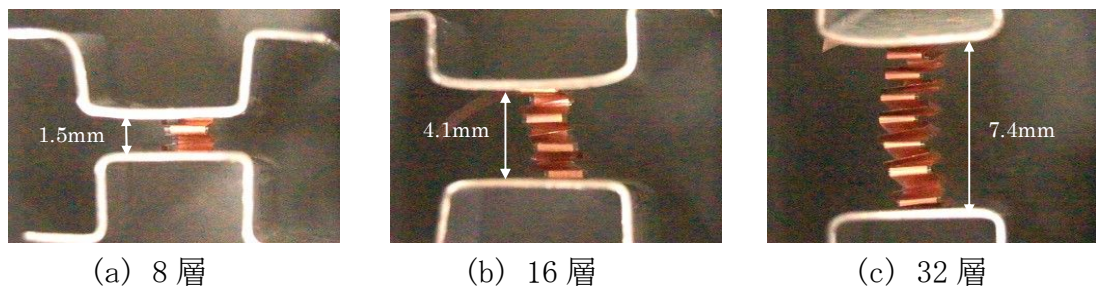


図 4-5 電極層数の異なるアクチュエータ

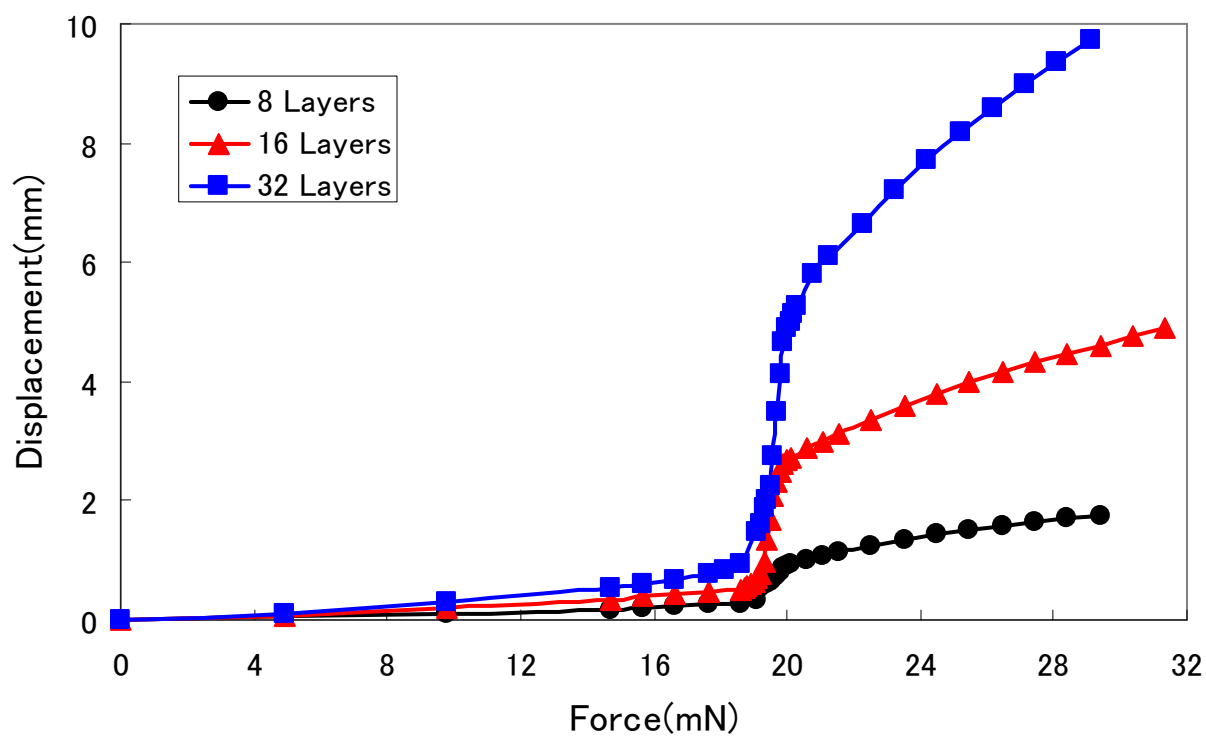


図 4-6 電極層数の異なるアクチュエータのバネ特性

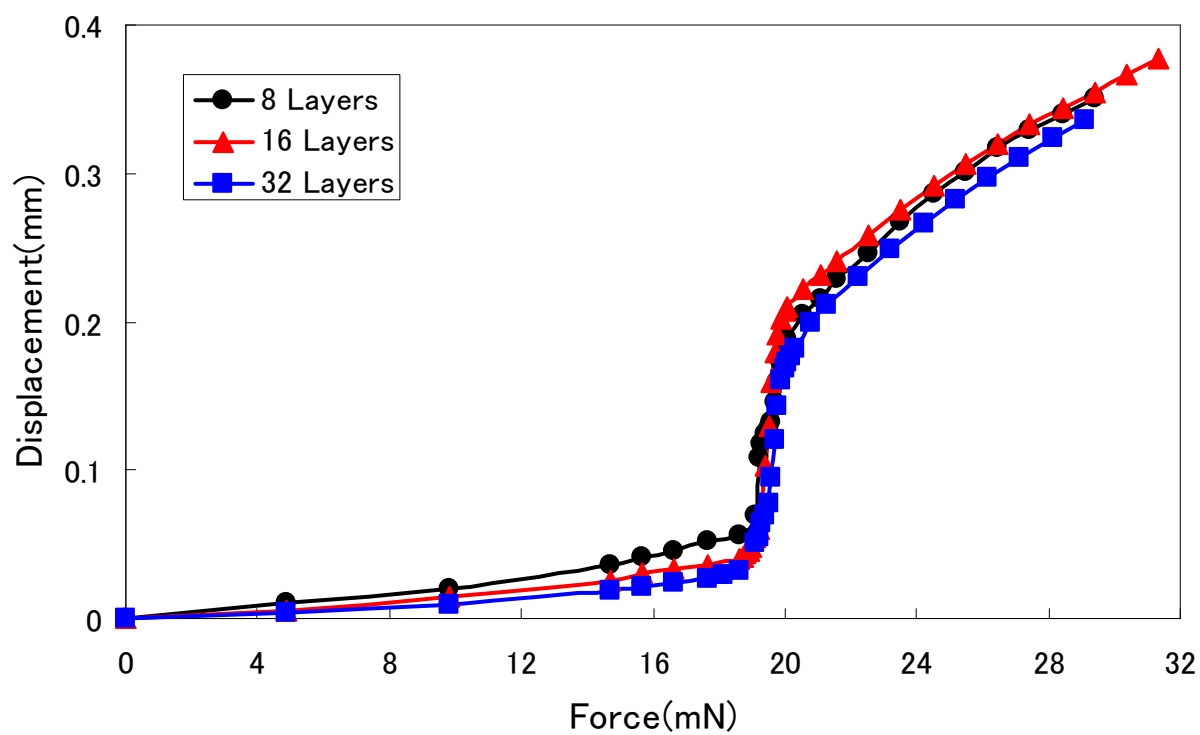


図 4-7 電極層数の異なるアクチュエータの規格化バネ特性

4.4 アクチュエータの形状変化とバネ特性

4.4.1 電極とヒンジの厚さ効果

アクチュエータの電極とヒンジの厚さの違いがバネ特性にどのように影響するのかを調べるために、幅 2[mm]で厚さが 6[μm]と 12[μm]の導電性薄膜フィルムの上に厚さが 25[μm]と 50[μm]の PET フィルムをヒートシールしたリボン状フィルムを作製した。このフィルムを使用して、電極とヒンジの厚さがそれぞれ 56[μm]と 6[μm]、106[μm]と 6[μm]、62[μm]と 12[μm]、112[μm]と 12[μm]からなる 4 種類のアクチュエータを作製し、それらのバネ特性を測定した。作製したアクチュエータの電極層数は 32 で、図 4-8 にその外形を示す。これらのアクチュエータはリボン状フィルムを折り込んだ後、応力除去のための熱処理を実施していない。そのため、電極部分が厚くなるとヒンジ部分の反発力が大きくなり、アクチュエータは少し長くなっている。

図 4-9 から図 4-16 に図 4-8 のアクチュエータのバネ特性測定結果とそのバネ特性から求めたアクチュエータの伸びに対するバネ定数の変化の様子を示す。

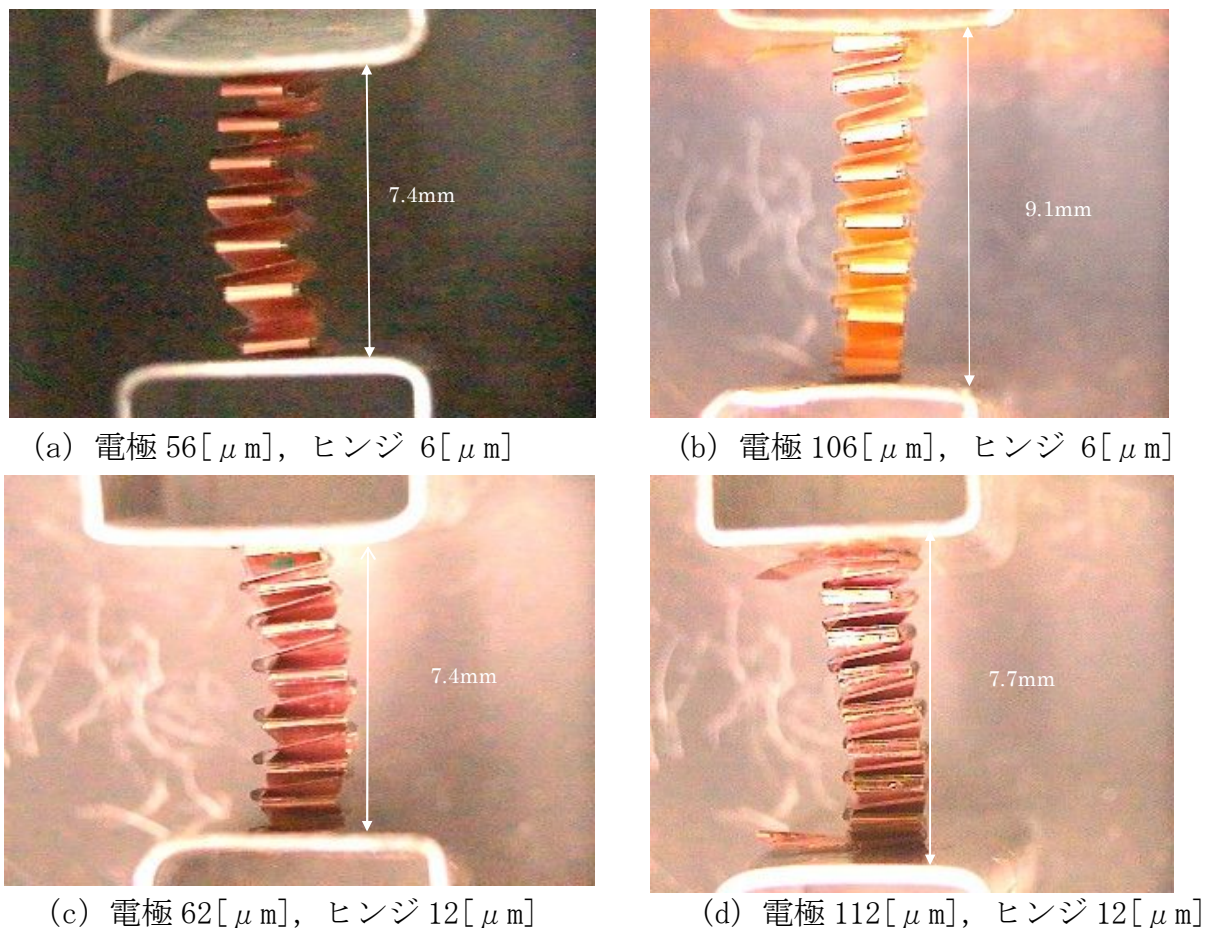


図 4-8 電極とヒンジの厚さが異なるアクチュエータの外形

第4章 積層型四角形状静電アクチュエータ

図4-9と図4-10はヒンジが薄い場合の電極厚さ効果を表している。図からヒンジが薄いと電極を厚くしても駆動領域のバネ特性はほとんど変化せず、過負荷領域のバネ特性のみが改善されていることが分かる。図4-10からアクチュエータが約6[mm]伸びたときにバネ定数は約2.7倍の大きさに改善されている。

図4-11と図4-12はヒンジが厚くなった場合で、電極を厚くすることにより過負荷領域のバネ特性を改善できるが、同時に駆動領域のバネ特性を劣化させてしまうことが分かる。図4-12からアクチュエータが約4[mm]伸びたときにバネ定数は約2.8倍の大きさに改善されているものの、駆動領域のバネ定数の平均値は約0.71[N/m]から約1.1[N/m]となり、駆動領域の柔軟性は約1.6倍劣化している。

図4-13から図4-16はヒンジの厚さ効果を表している。図4-13と図4-15における過負荷領域のバネ特性の傾きの変化からヒンジの厚さは過負荷領域のバネ定数に大きな変化を与えないことが分かった。しかし、図から明らかなように、駆動領域のバネ定数の変化は顕著で、ヒンジが6[μm]から12[μm]になると、電極の厚さが50[μm]の場合、バネ定数は約0.14[N/m]から約0.71[N/m]となり約5.1倍、また、電極の厚さが100[μm]の場合、バネ定数は約0.16[N/m]から約1.1[N/m]となり約6.9倍となる。

以上のことから、以下のことが明らかとなった。

まず、電極を厚くすると過負荷領域のバネ定数を改善できるが、一方で駆動領域のバネ特性を劣化させてしまうことがわかった。このとき、電極厚さの増加に伴う駆動領域のバネ定数の劣化の割合は、ヒンジが厚いほど大きくなることが分かった。

また、ヒンジを厚くすると駆動領域のバネ特性を大きく劣化させることが明らかとなった。換言すると、ヒンジを薄くすることによって、過負荷領域のバネ特性に影響を与えずに駆動領域のバネ特性を改善できることが分かった。すなわち、ヒンジを薄くすることによって、電極の厚さ増加に伴うバネ特性の劣化を軽減するだけでなく、駆動領域のバネ特性を大きく改善できることが明らかとなった。

(1) ヒンジ厚さが $6[\mu\text{m}]$ のときの電極の厚さ効果

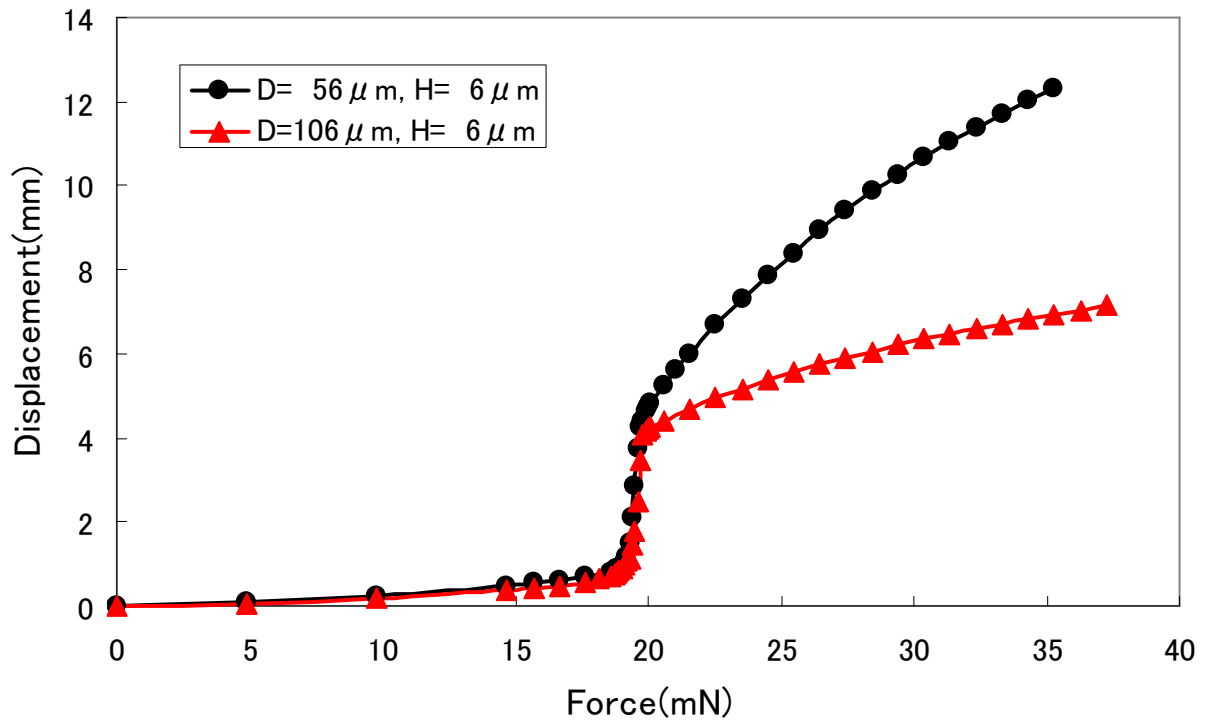


図 4-9 ヒンジ厚さ $6[\mu\text{m}]$ ，電極厚さ $56[\mu\text{m}]$ と $106[\mu\text{m}]$ のときのバネ特性

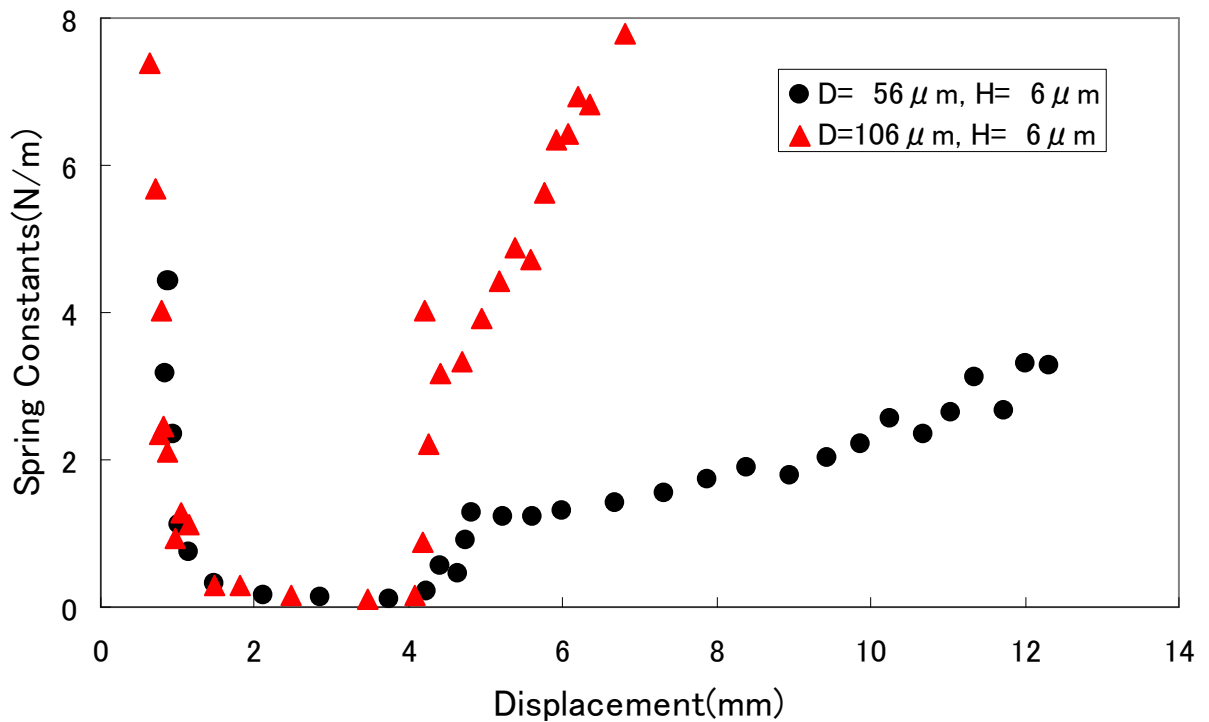


図 4-10 ヒンジ厚さ $6[\mu\text{m}]$ ，電極厚さ $56[\mu\text{m}]$ と $106[\mu\text{m}]$ のときのバネ定数

(2) ヒンジ厚さが $12[\mu\text{m}]$ のときの電極の厚さ効果

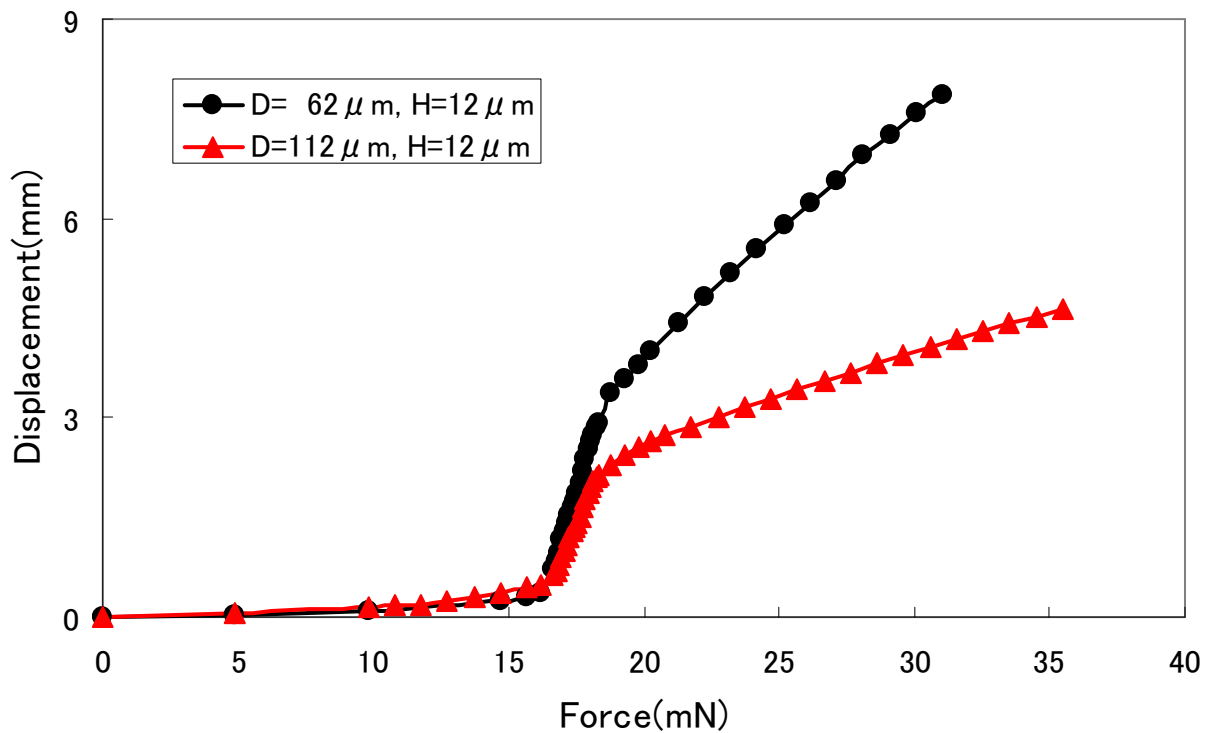


図 4-11 ヒンジ厚さ $12[\mu\text{m}]$ ，電極厚さ $62[\mu\text{m}]$ と $112[\mu\text{m}]$ のときのバネ特性

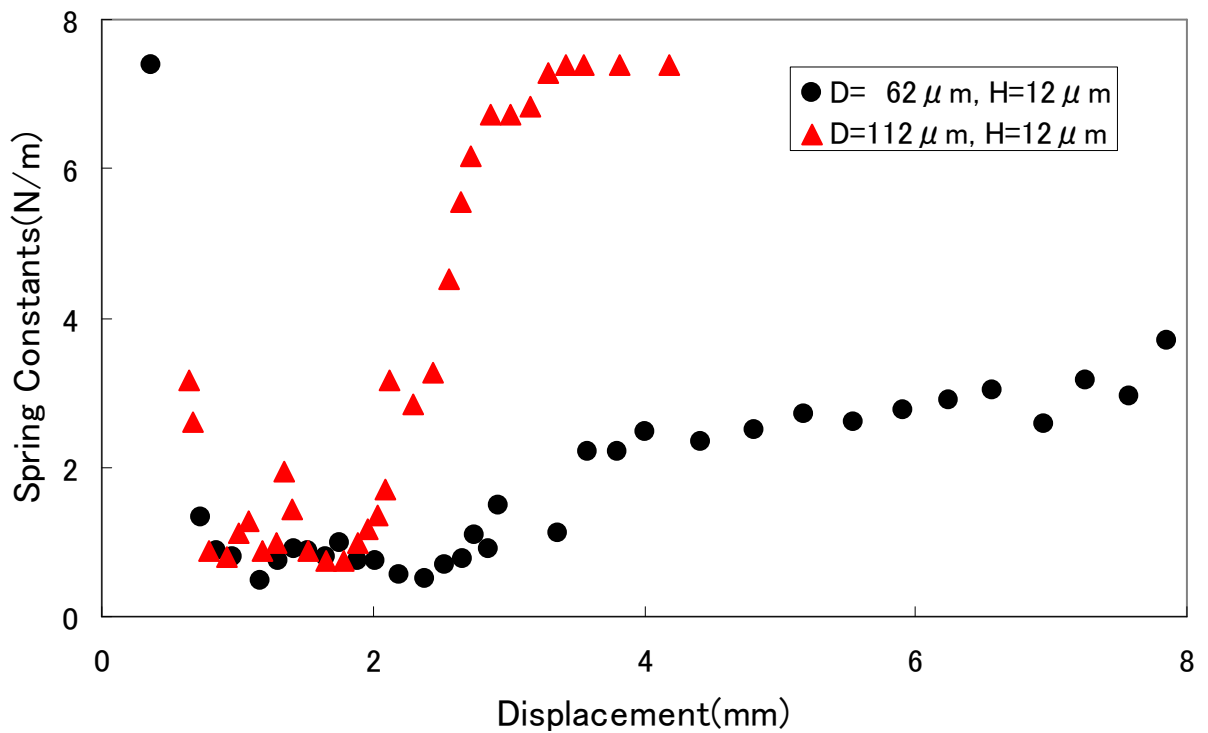


図 4-12 ヒンジ厚さ $12[\mu\text{m}]$ ，電極厚さ $62[\mu\text{m}]$ と $112[\mu\text{m}]$ のときのバネ定数

(3) 電極厚さが $50[\mu\text{m}]$ のときのヒンジの厚さ効果

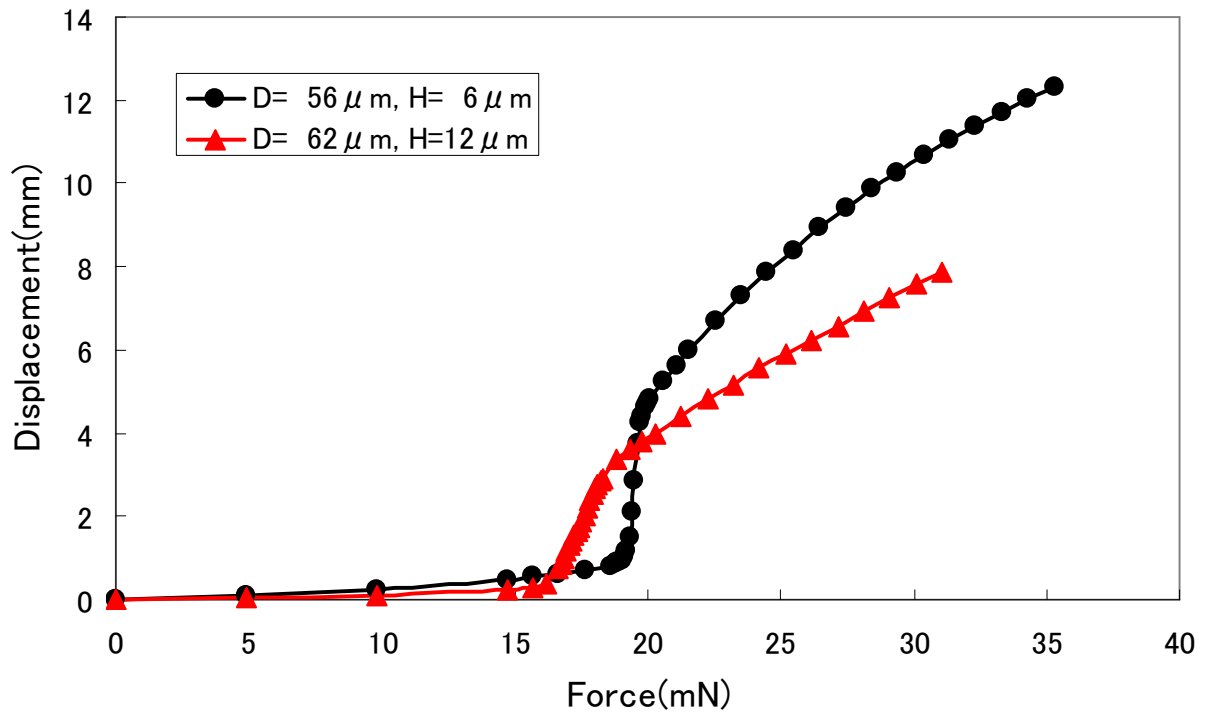


図 4-13 電極厚さ $50[\mu\text{m}]$ ，ヒンジ厚さ $6[\mu\text{m}]$ と $12[\mu\text{m}]$ のときのバネ特性

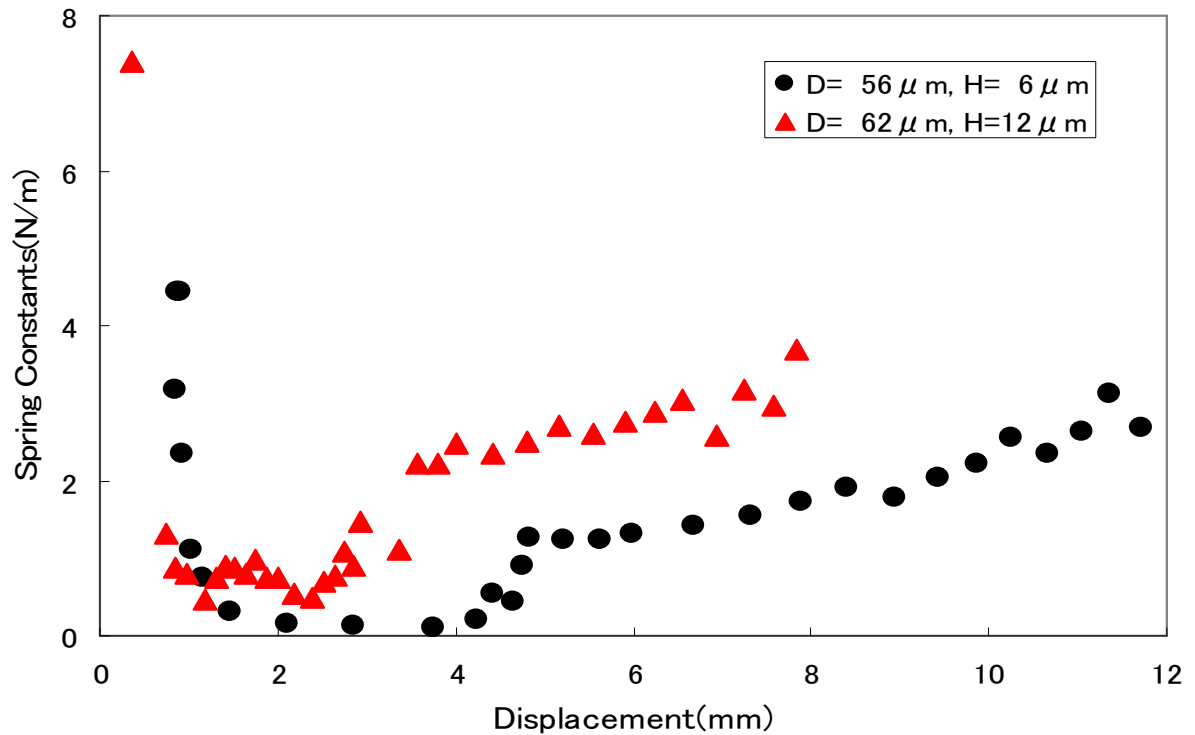


図 4-14 電極厚さ $50[\mu\text{m}]$ ，ヒンジ厚さ $6[\mu\text{m}]$ と $12[\mu\text{m}]$ のときのバネ定数

(4) 電極が $100[\mu\text{m}]$ のときのヒンジの厚さ効果

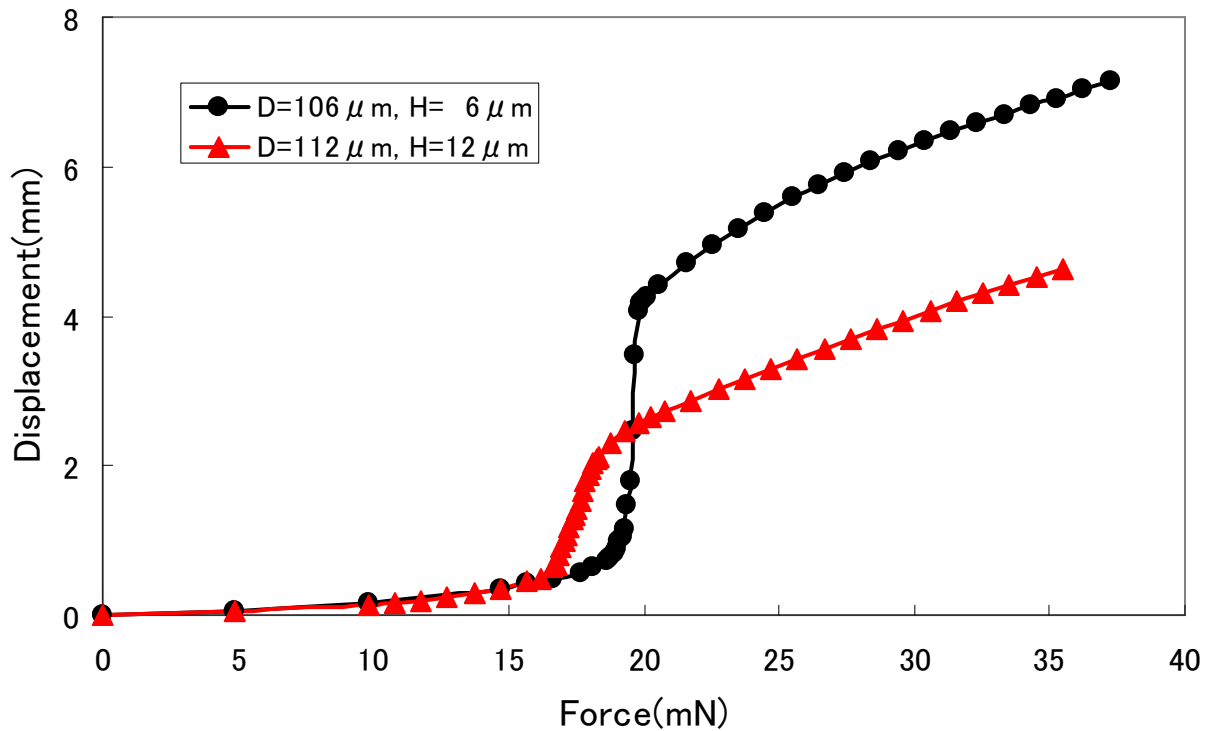


図 4-15 電極厚さ $100[\mu\text{m}]$ ，ヒンジ厚さ $6[\mu\text{m}]$ と $12[\mu\text{m}]$ のときのバネ特性

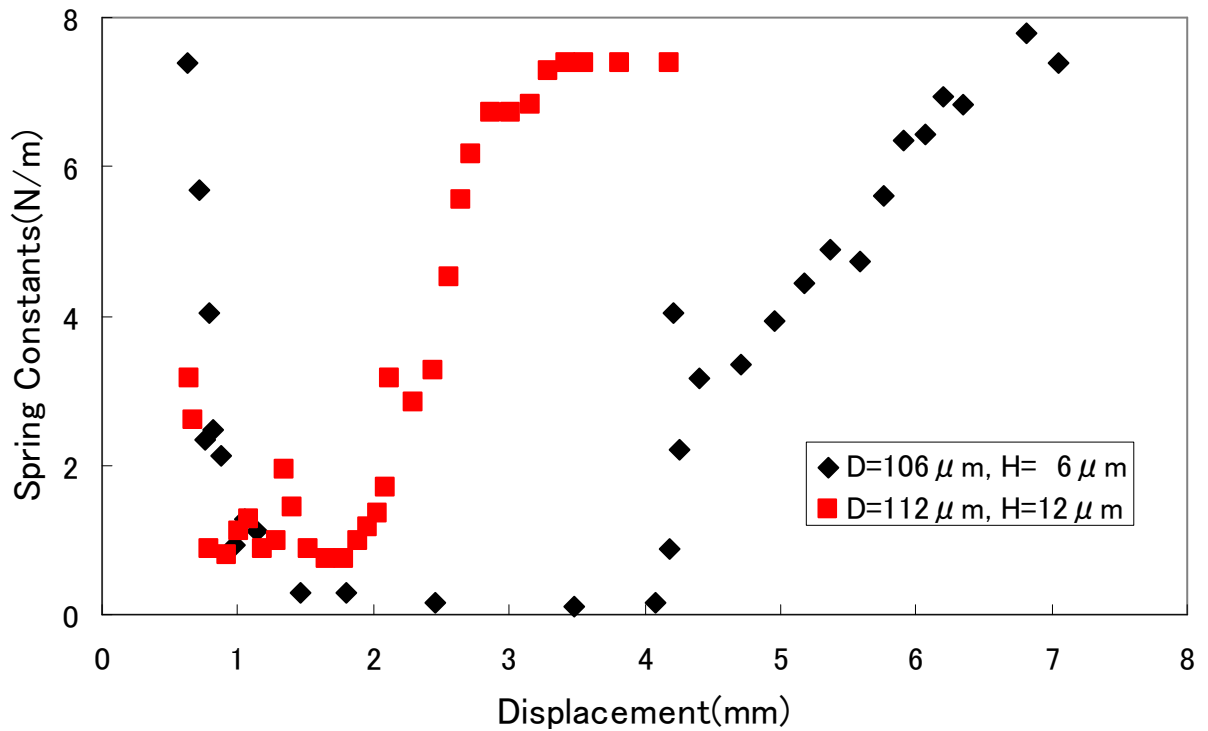
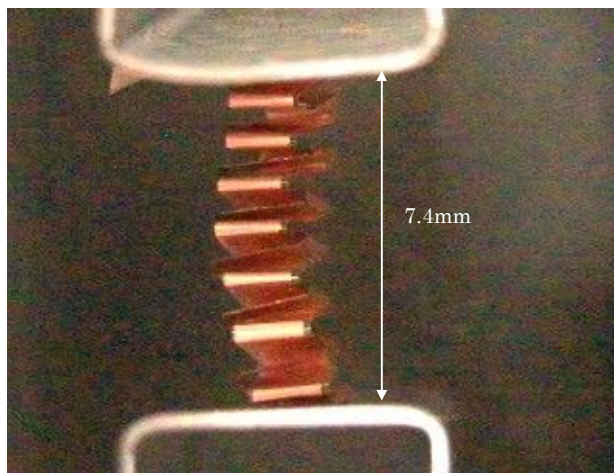


図 4-16 電極厚さ $100[\mu\text{m}]$ ，ヒンジ厚さ $6[\mu\text{m}]$ と $12[\mu\text{m}]$ のときのバネ定数

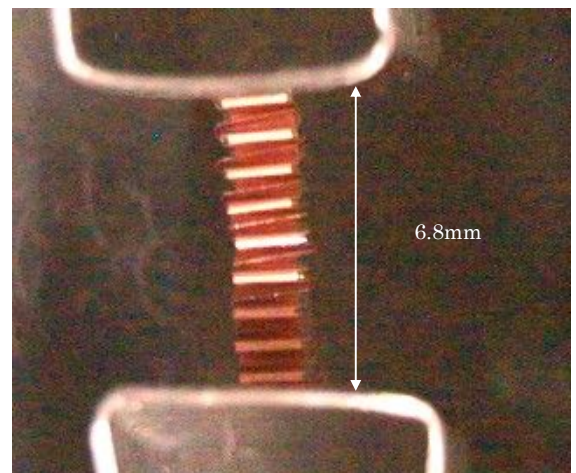
4.4.2 ヒンジの長さ効果

アクチュエータのヒンジの長さの違いがバネ特性にどのように影響するのかを調べるために、幅 2[mm]で厚さが 6[μm]の導電性薄膜フィルムの上下に、厚さが 25[μm]の PET フィルムをヒンジの長さが 300[μm]となるようにヒートシールしたりボン状フィルムを使用してアクチュエータを作製し、そのバネ特性を測定した。作製したアクチュエータの電極層数は 40 で、図 4-17(b)にその外形を示す。図 4-17(a)は前述したヒンジの長さが 500[μm]で電極層数が 32 のアクチュエータである。両者の比較から明らかのように、ヒンジが短いために、積層数が多いアクチュエータの方が逆に長さが少し短くなっている。

図 4-18 と図 4-19 に図 4-17(b)のアクチュエータのバネ特性測定結果とそのバネ特性から求めたアクチュエータの伸びに対するバネ定数の変化の様子を示す。図 4-18 からヒンジが短くなるとアクチュエータの駆動量、すなわちストロークが短くなる様子が分かる。また、図 4-19 からヒンジの長さが増えると、駆動領域と過負荷領域のバネ定数も変化することが分かる。特に、過負荷領域のバネ定数はヒンジが長くなると大きく劣化することになる。具体的には、ヒンジ長が 300[μm]から 500[μm]に変化すると駆動領域のバネ定数の平均値は約 8.0[N/m]から約 4.8[N/m]に改善されるものの、過負荷領域のバネ定数はアクチュエータの伸びが約 0.18[mm]のとき、約 80[N/m]から約 28[N/m]と 1/3 倍まで劣化する。尚、このときのバネ定数はアクチュエータの電極層数が異なっているため、1 ギャップ当たりのバネ特性で規格化した値を示している。



(a) 電極層数 32, ヒンジ長 500[μm]



(b) 電極層数 40, ヒンジ長 300[μm]

図 4-17 電極 56[μm]、ヒンジ 6[μm]でヒンジ長が異なるアクチュエータの外形

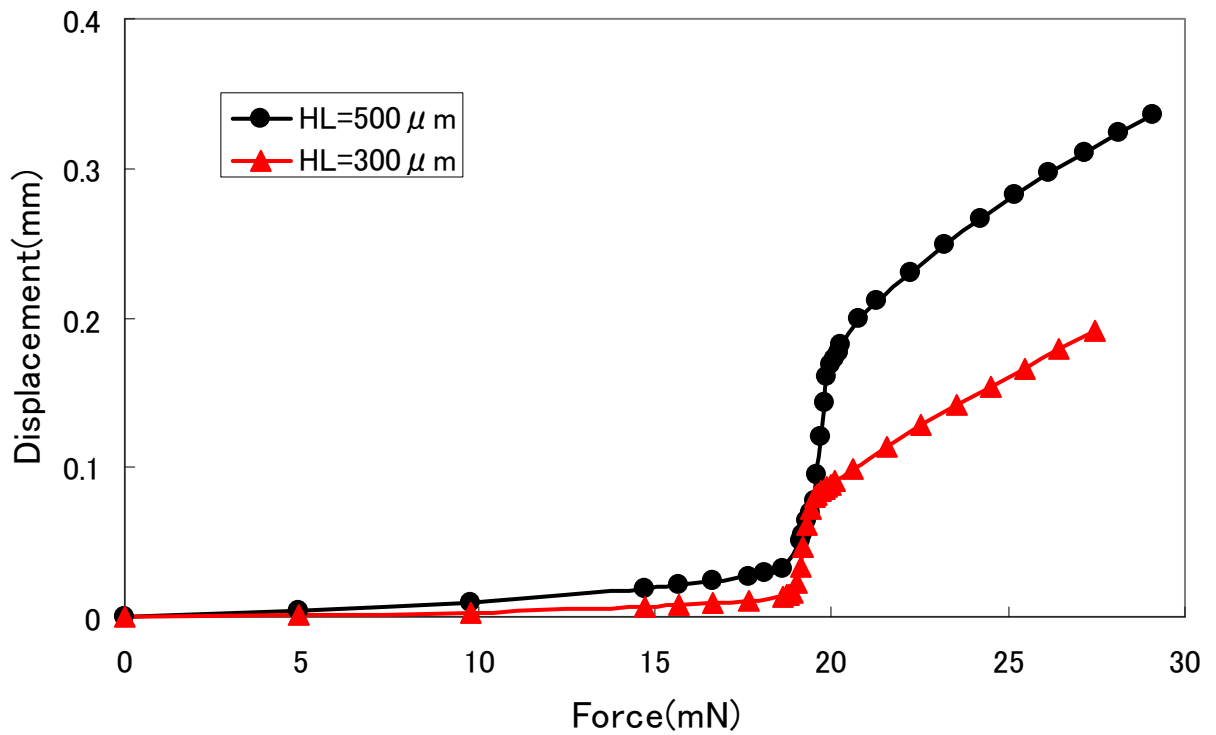


図 4-18 電極厚さ $56[\mu\text{m}]$ ，ヒンジ厚さ $6[\mu\text{m}]$ で電極層数 32，ヒンジ長さ $500[\mu\text{m}]$ と電極層数 40，ヒンジ長さ $300[\mu\text{m}]$ のアクチュエータのバネ特性

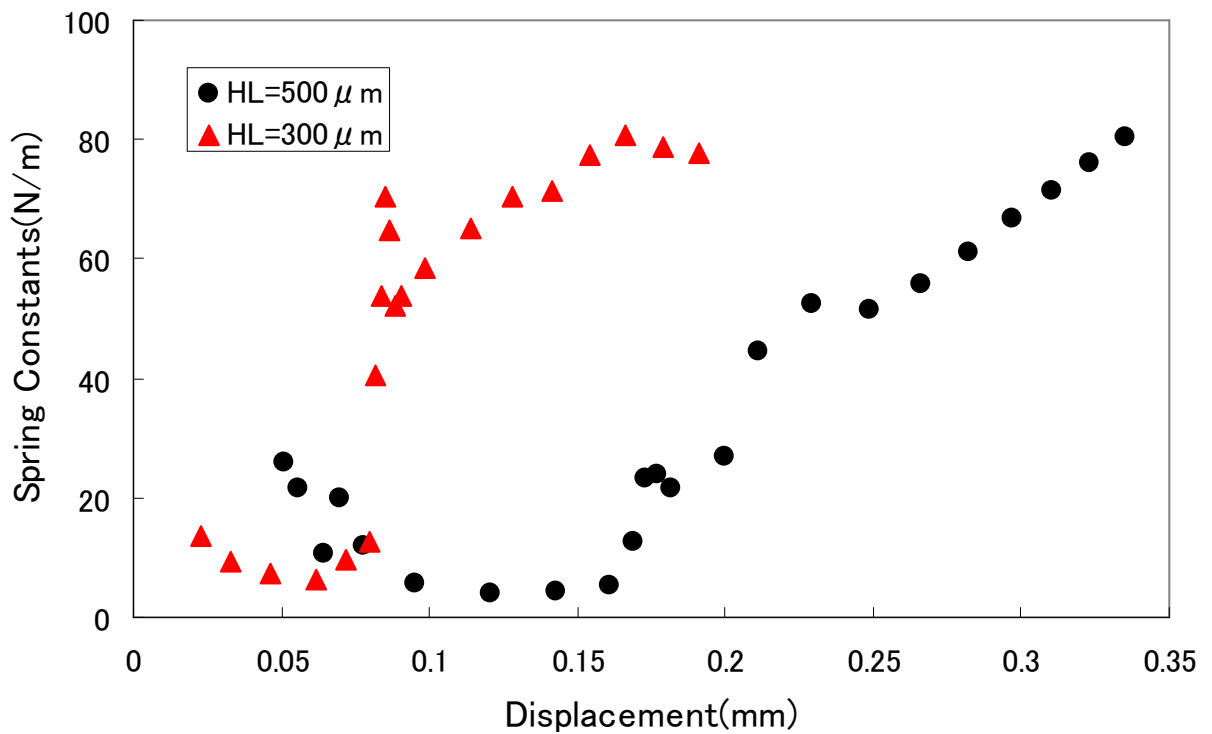


図 4-19 電極厚さ $56[\mu\text{m}]$ ，ヒンジ厚さ $6[\mu\text{m}]$ で電極層数 32，ヒンジ長さ $500[\mu\text{m}]$ と電極層数 40，ヒンジ長さ $300[\mu\text{m}]$ のアクチュエータのバネ定数

4.5 アクチュエータの発生力の測定⁽³²⁾

3.3.2 節で述べた発生力の測定方法の手順に従って、表 4-1 に示すアクチュエータを作製し、大気中でその発生力を測定した。実験結果と理論値の一例を図 4-20 に示す。尚、理論値は 3.3.2 節で述べたように、平行平板に作用する静電力の式を用いて計算したものである。図 4-20 から明らかなように、実験結果は理論値に対してやや小さいものの、理論値の 80[%]から 90[%]程度の発生力が得られていることが分かる。

また、このアクチュエータに大気中で約 600[V]を印加した場合、発生力は約 6.3[g/cm²]で、その収縮量は約 1[mm]であった。

表 4-1 発生力測定用アクチュエータの主な仕様

電極サイズ	2[mm]	有効面積	3.24[mm ²]
電極層数	32	初期ギャップ長	33.5[μm]
電極厚さ	70[μm]	比誘電率	3.2
ヒンジ厚さ	20[μm]	ヤング率	540[MPa]
ヒンジ長さ	300[μm]	ポアソン比	0.458

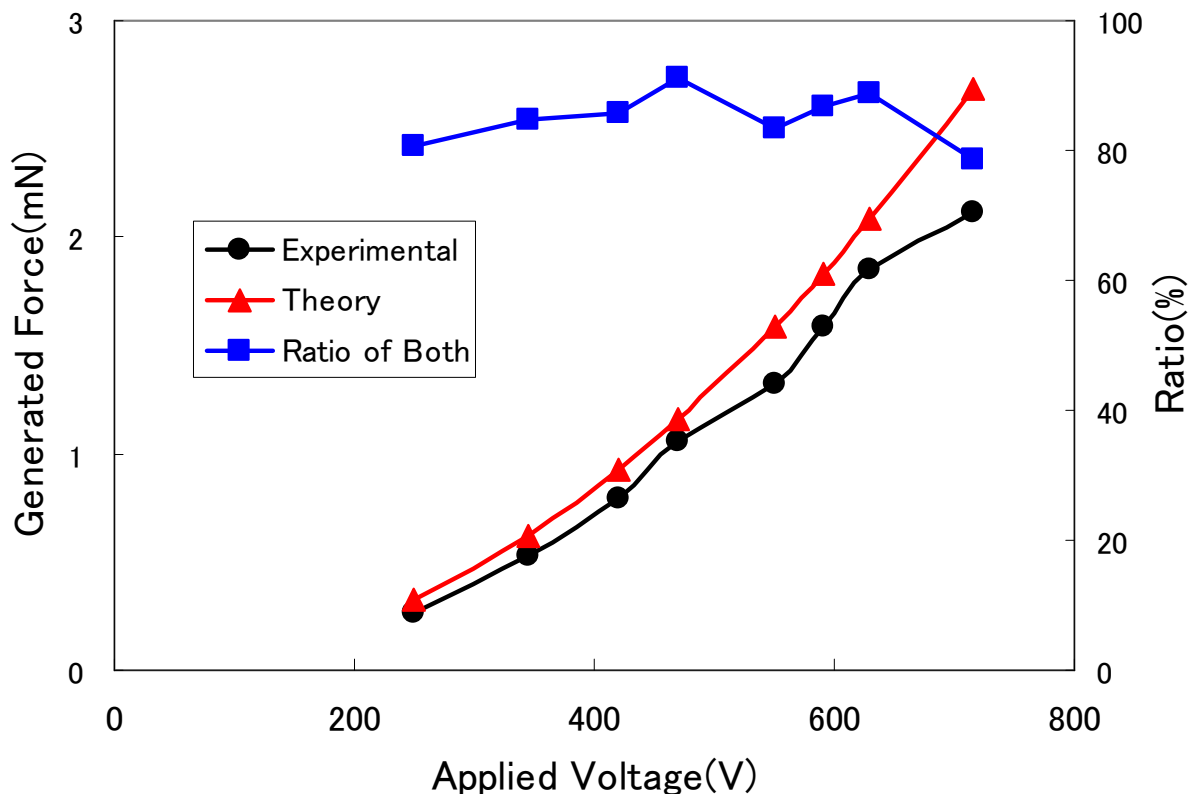


図 4-20 表 4-1 のアクチュエータの発生力の測定例

4.6 実験結果と計算結果の比較

4.6.1 8層アクチュエータのバネ特性

実験結果とシミュレーション結果を比較検討するために、図 4-21 に示すようなシミュレーションモデルを作製した。モデルの電極サイズは一辺 2[mm]の正方形で、電極部の厚さは 56[μm]、電極間のギャップ長は 104[μm]とした。また、ヒンジ形状は図 4-21 (b)に示すような中空半円筒で、長さは約 500[μm]、厚さは 6[μm]である。このモデルに収縮および引張り圧力を加え、力と変位量との対応関係からアクチュエータのバネ特性を計算した。尚、シミュレーションデータにおける基準点は、外力がゼロとなる点を原点としている。

図 4-22 に 8 層アクチュエータのバネ特性のシミュレーション結果と実験結果を示す。ここで、シミュレーション結果は加えた力と最上部面上の節点の変位量との関係を時系列的に求めたものであり、実験結果はシミュレーション結果と比較しやすいように座標軸を平行移動させている。

図 4-22 から明らかなように、過負荷領域の一部において、両者に多少のバラツキはみられるものの、計算結果と実験結果は良好な一致を示しており、シミュレーションの妥当性を確認することができた。

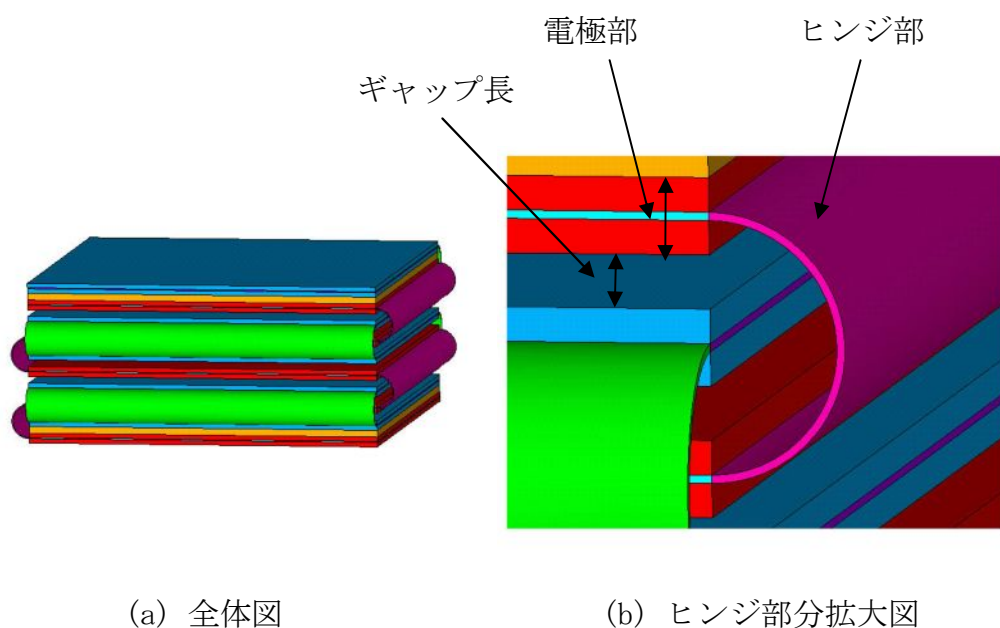


図 4-21 初期ギャップのあるモデル

4.6.2 シミュレーション結果を用いたバネ特性の予測

層数の多いアクチュエータのバネ特性をシミュレーション結果から予測する際に、シミュレーションモデルの層数を実際のアクチュエータの層数と同数にして計算することが理想であるが、節点数の制限や計算時間の制約などから、必ずしも現実的ではない。そこで、比較的少ない層数モデルのシミュレーション結果を利用して、実際のアクチュエータと同じ層数のモデルのバネ特性を予測することが必要である。

図4-23は図4-22に示した8層モデルのシミュレーション結果から予想される32層モデルのバネ特性と実験結果である。

以下に、8層モデルから32層モデルを予想する手順を示す。

- ① 8層モデルのシミュレーション結果において、力の値は変化させずこれに対応する変位量を5 ($=8-3$) の値で除して1ギャップ当たりのバネ特性を求める。
- ② ①で求めた1ギャップ当たりのバネ特性の変位量に29 ($=32-3$) の値を乗じて32層モデルの予想値とする。

図4-23から明らかなように、8層モデルのシミュレーション結果から予測した32層モデルのバネ特性と実験結果を比較すると、バネ特性全体の傾向において両者は良好な一致を示しているといえる。

以上のことから層数の少ないシミュレーションモデルで得られたバネ特性から層数の多い実際のアクチュエータのバネ特性をほぼ予測することが可能であることが分かった。

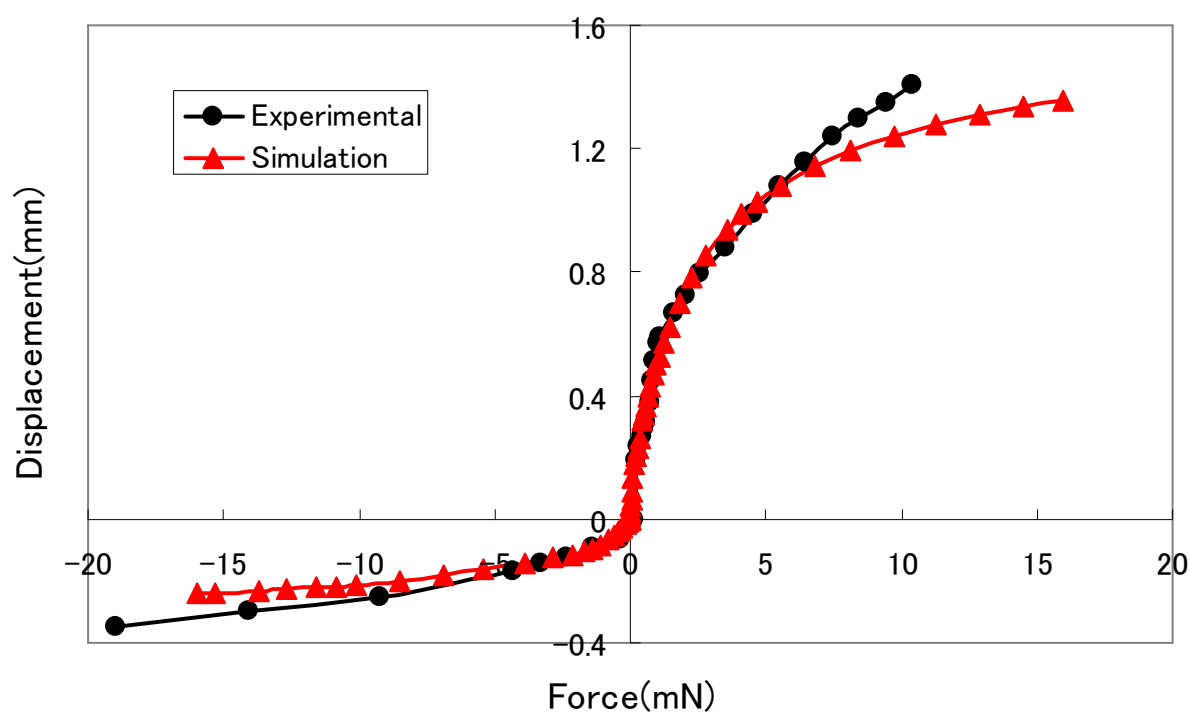


図 4-22 8層アクチュエータの実験結果とシミュレーション結果の比較

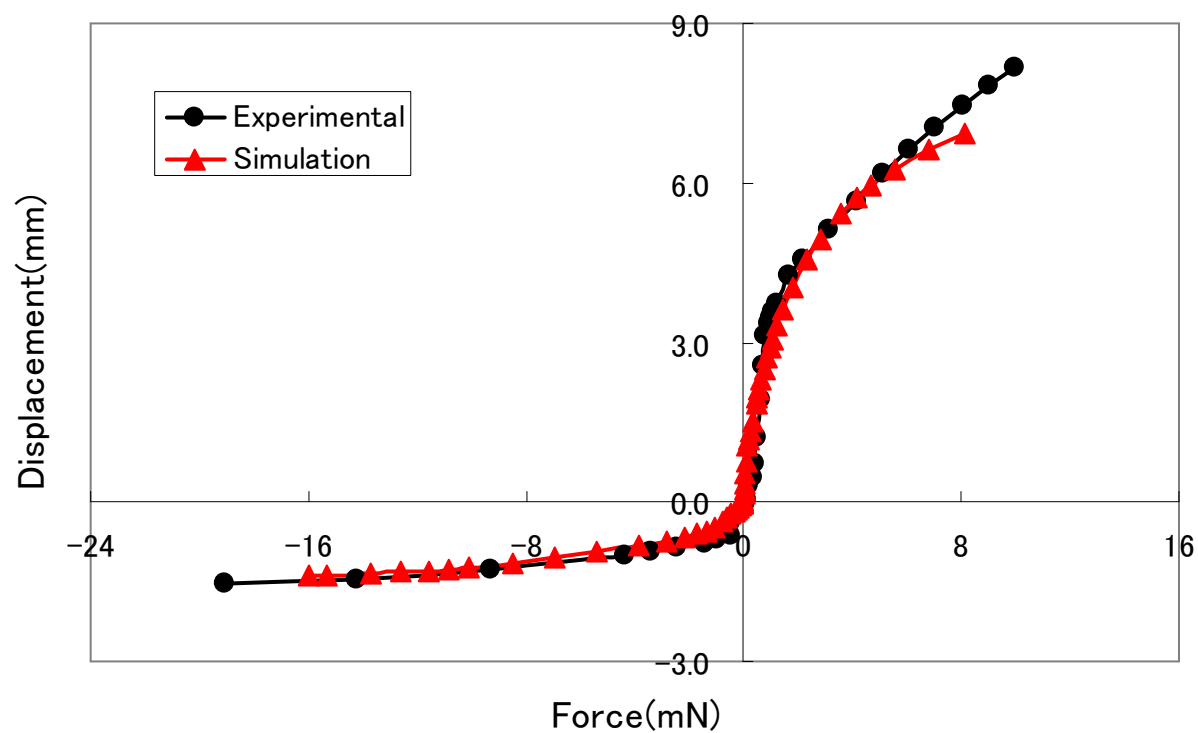


図 4-23 8層アクチュエータのシミュレーション結果から予測した32層のバネ特性と実験結果の比較

4.7 アクチュエータの形状変化とバネ特性^{(36) (37)}

アクチュエータの電極の厚さ、ヒンジの厚さや長さがアクチュエータのバネ特性とどの程度関連しているかを定量的に調べるために、電極部の厚さを $54[\mu\text{m}]$, $74[\mu\text{m}]$, $94[\mu\text{m}]$, ヒンジの厚さを $2[\mu\text{m}]$, $4[\mu\text{m}]$, ヒンジの長さ $400[\mu\text{m}]$, $500[\mu\text{m}]$ に変化させたシミュレーションモデルを作製し、それぞれのバネ特性を計算した。尚、このときのアクチュエータの電極形状は電極サイズ $2[\text{mm}]$ の正方形で、電極層数を 8 としてバネ特性を計算し、その結果を 1 ギャップ当たりのバネ特性に換算した。以下に主な計算結果について説明する。

4.7.1 電極の厚さ効果

図 4-24 と図 4-25 はヒンジの厚さが $2[\mu\text{m}]$ の場合、図 4-26 と図 4-27 はヒンジの厚さが $4[\mu\text{m}]$ の場合で、それぞれ電極の厚さを $54[\mu\text{m}]$, $74[\mu\text{m}]$, $94[\mu\text{m}]$ に変化させた場合のバネ特性とバネ定数を示す。図 4-24 と図 4-26 の曲線の傾きの変化から、電極が厚くなるほど駆動領域および過負荷領域のバネ定数が大きくなる様子が分かる。また、図 4-25 と図 4-27 から、アクチュエータの伸びの増加とともにバネ定数が増大すること、すなわち、電極を厚くすることによって、過負荷領域のバネ定数を大きな値（伸びにくい構造）に改善することができるが、一方で、アクチュエータの伸びが小さい領域、すなわち、駆動領域でも電極の厚さの増加とともにバネ定数が大きな値（収縮しにくい構造）に劣化させることが分かる。

尚、図 4-25 と図 4-27 から、アクチュエータの伸びが $0.1[\text{mm}]$ までの範囲では、電極厚さが $74[\mu\text{m}]$ のとき $(74/54)^2 \doteq 1.9$ 倍、電極厚さが $94[\mu\text{m}]$ のとき $(94/54)^2 \doteq 3.0$ 倍となっており、電極の厚さ効果によって、バネ定数はほぼ電極の厚さの比の 2 乗に比例して増加するが、それ以上にアクチュエータが伸びると電極の厚さ効果は低減する。

ここで、バネ定数がほぼ電極の厚さの 2 乗に比例する領域は、図 3-13 に示した薄肉長方形断面の棒のねじりモデルと同様の変形がアクチュエータ電極で生じているものと考えられる。

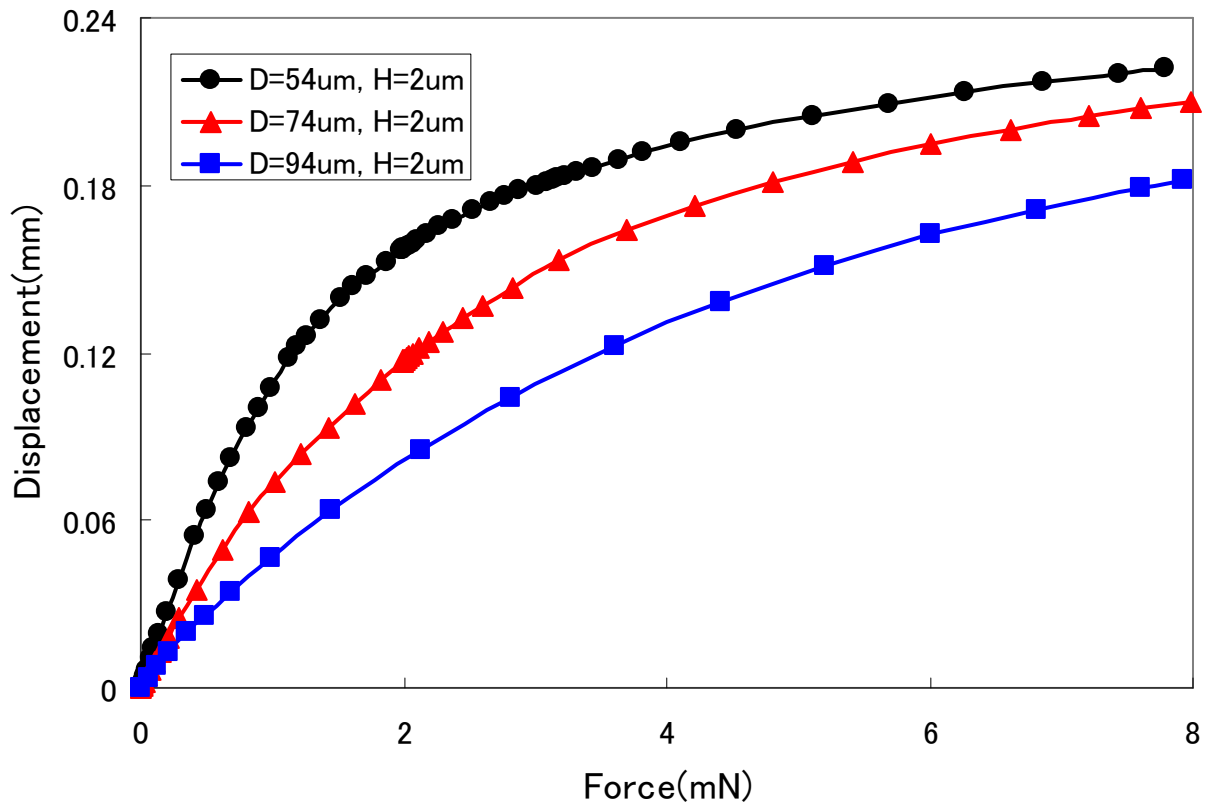


図 4-24 ヒンジ厚さが $2[\mu\text{m}]$ で電極厚さを变化させたときのバネ特性

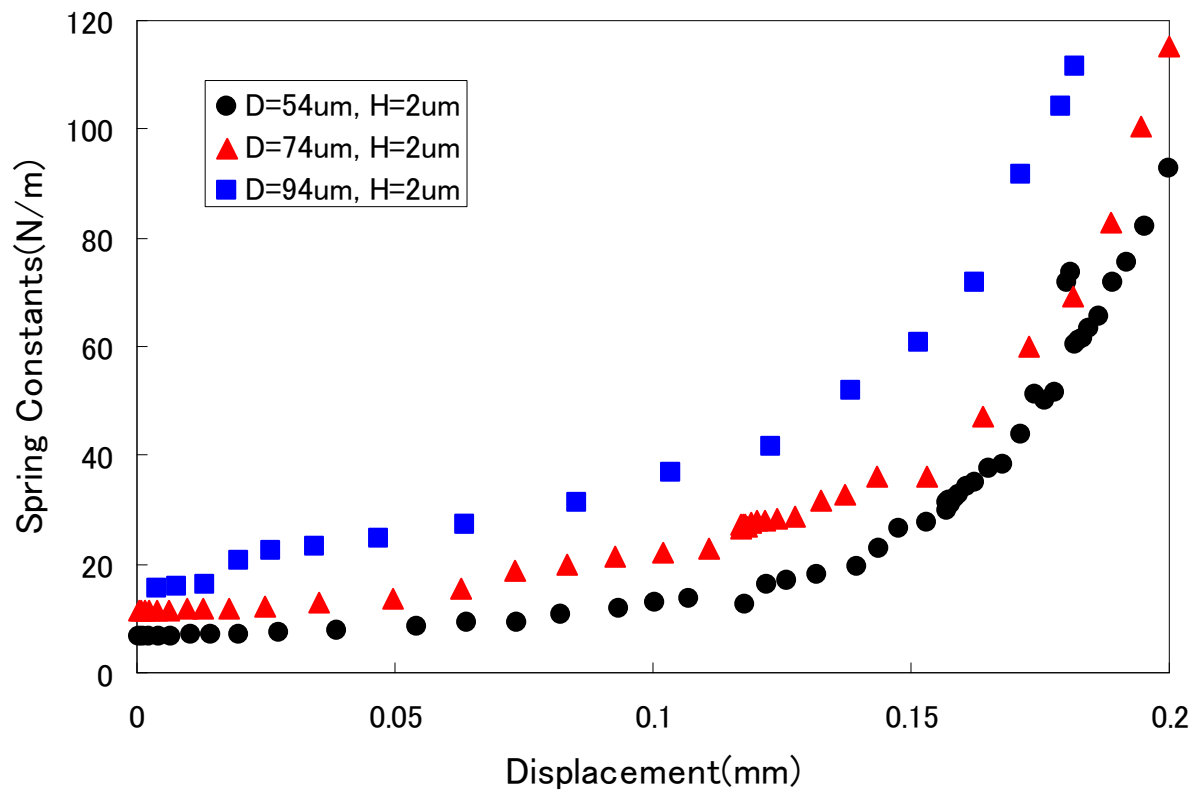


図 4-25 ヒンジ厚さが $2[\mu\text{m}]$ で電極厚さを变化させたときのバネ定数

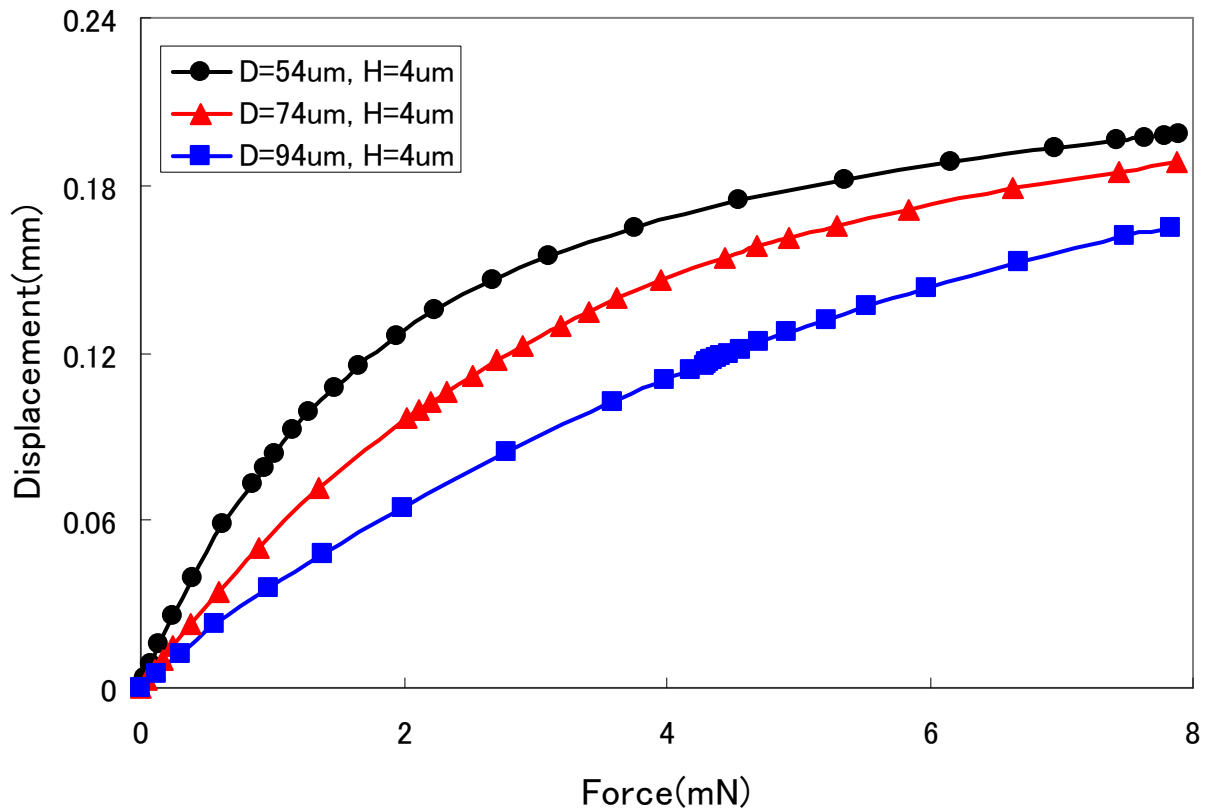


図 4-26 ヒンジ厚さが $4[\mu\text{m}]$ で電極厚さを変化させたときのバネ特性

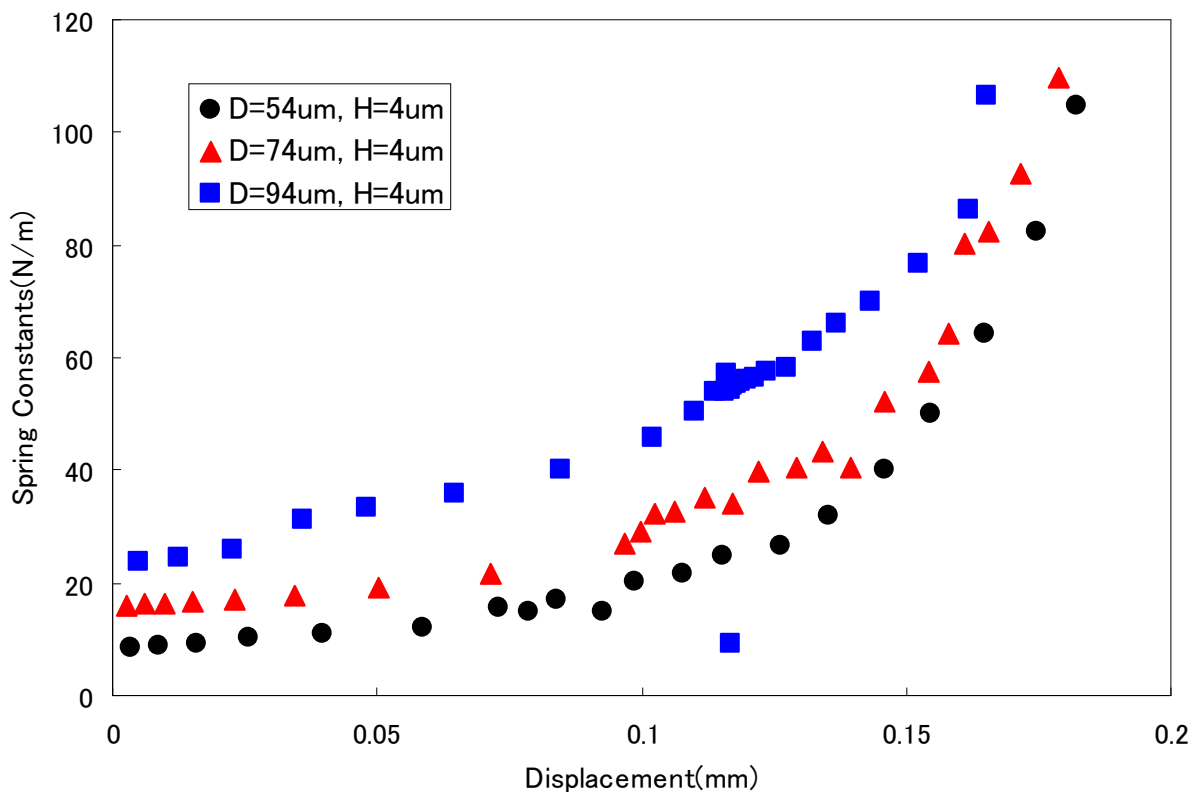


図 4-27 ヒンジ厚さが $4[\mu\text{m}]$ で電極厚さを変化させたときのバネ定数

4.7.2 ヒンジの厚さ効果

図 4-28 から図 4-30 に、電極の厚さが $54[\mu\text{m}]$, $74[\mu\text{m}]$, $94[\mu\text{m}]$ で、ヒンジの厚さを $2[\mu\text{m}]$ から $4[\mu\text{m}]$ に変化させた場合のバネ特性の計算結果を示す。図の曲線の立ち上がり部分の傾き変化から、ヒンジが厚くなると駆動領域のバネ定数が劣化すること、また、図の過負荷領域の傾きがほぼ一定となることから、過負荷領域ではほぼ同じバネ定数値に収束する様子が分かる。このときヒンジが厚くなるほど、アクチュエータの変位量（ストローク）も減少していることが分かる。

また、図 4-31 から図 4-33 に、バネ特性の傾きから求めたバネ定数の変化の様子を示す。ヒンジが厚くなると過負荷領域のバネ定数も増加するが、駆動領域のバネ定数の変化の様子から、電極が厚くなるほどヒンジの厚さ効果の影響を大きく受けることが分かる。尚、駆動領域の原点（アクチュエータの変位量ゼロ）において、ヒンジが $2[\mu\text{m}]$ と $4[\mu\text{m}]$ のバネ定数の比は、電極の厚さが $54[\mu\text{m}]$ のとき 1.27 倍 ($8.5/6.7$)、 $74[\mu\text{m}]$ のとき 1.41 倍 ($15.9/11.3$)、 $94[\mu\text{m}]$ のとき 1.53 倍 ($24.0/15.7$) である。

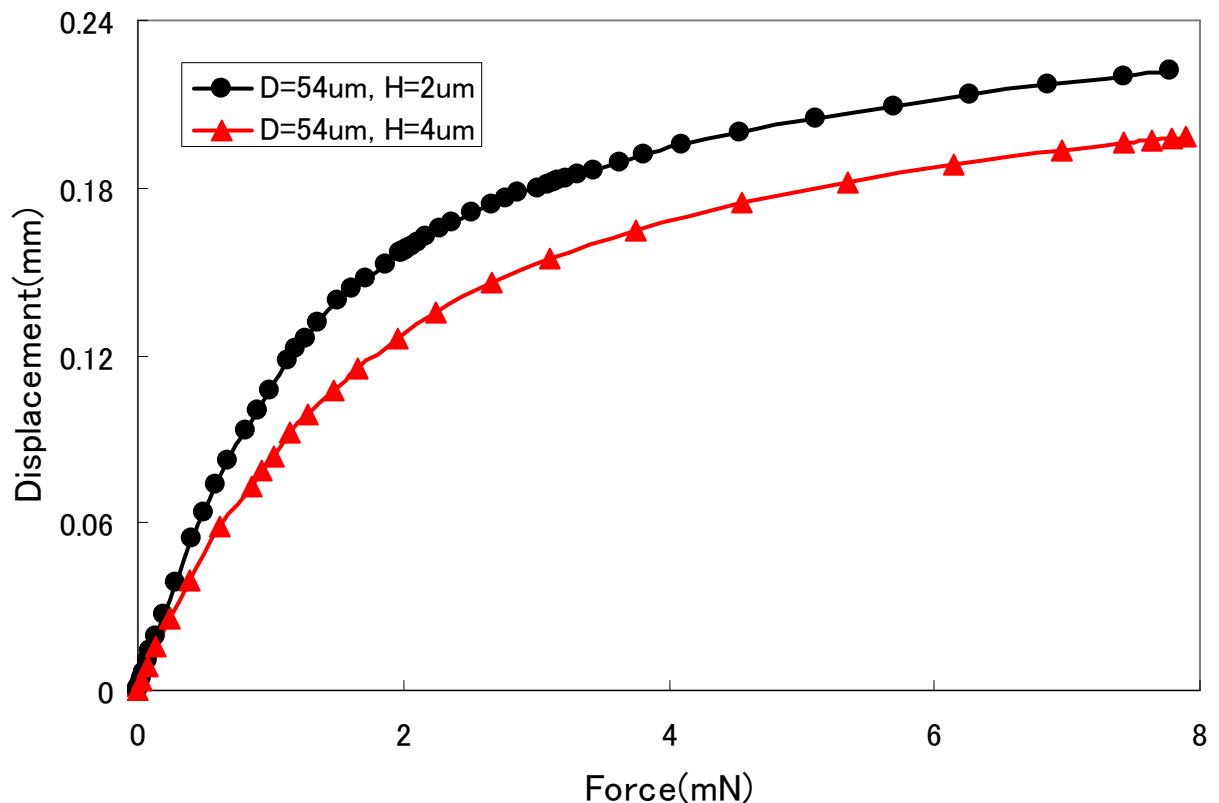


図 4-28 電極厚さが $54[\mu\text{m}]$ でヒンジ厚さを変化させたときのバネ特性

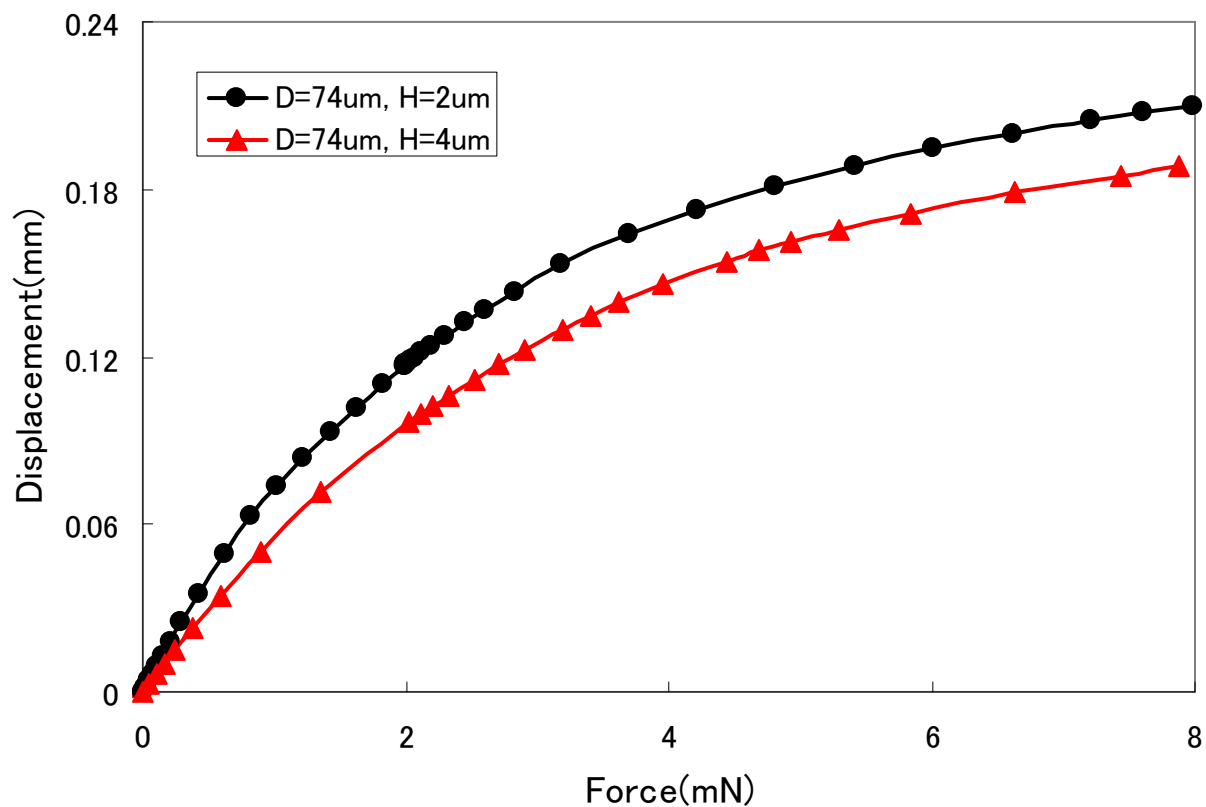


図 4-29 電極厚さが $74\text{ }\mu\text{m}$ でヒンジ厚さを変化させたときのバネ特性

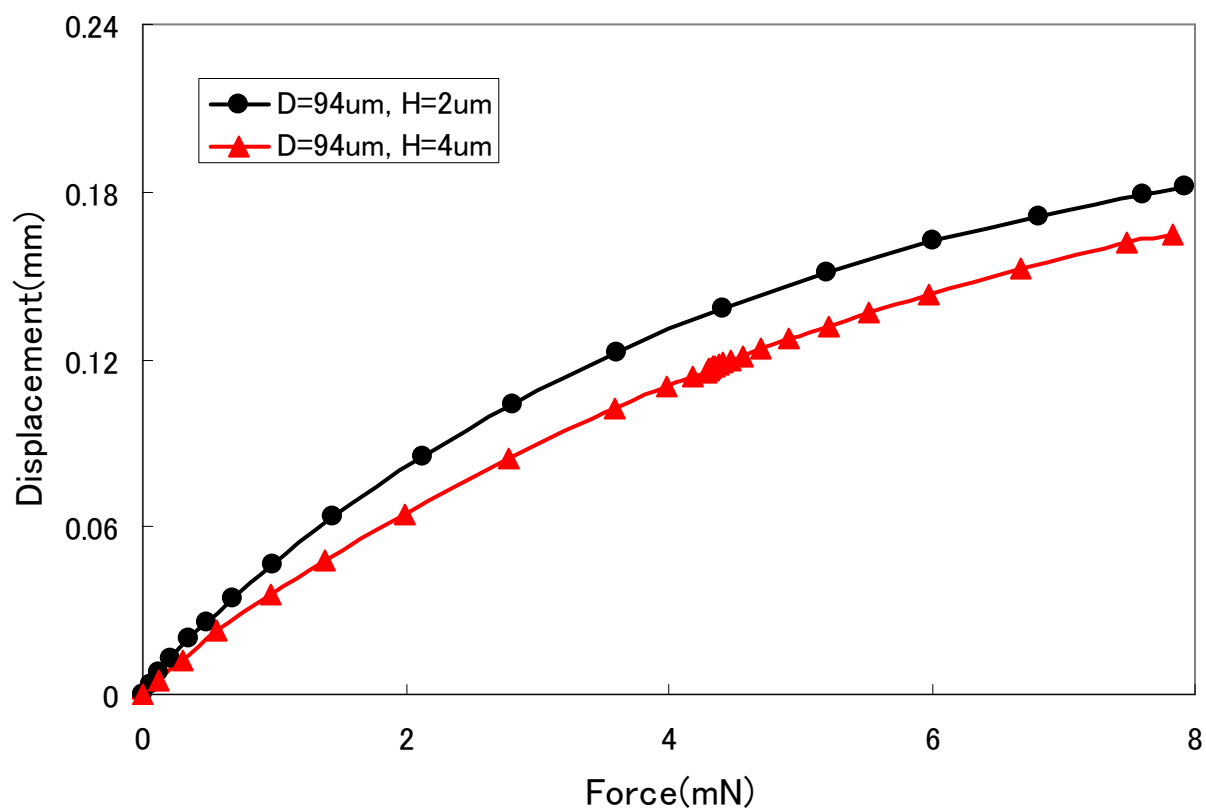
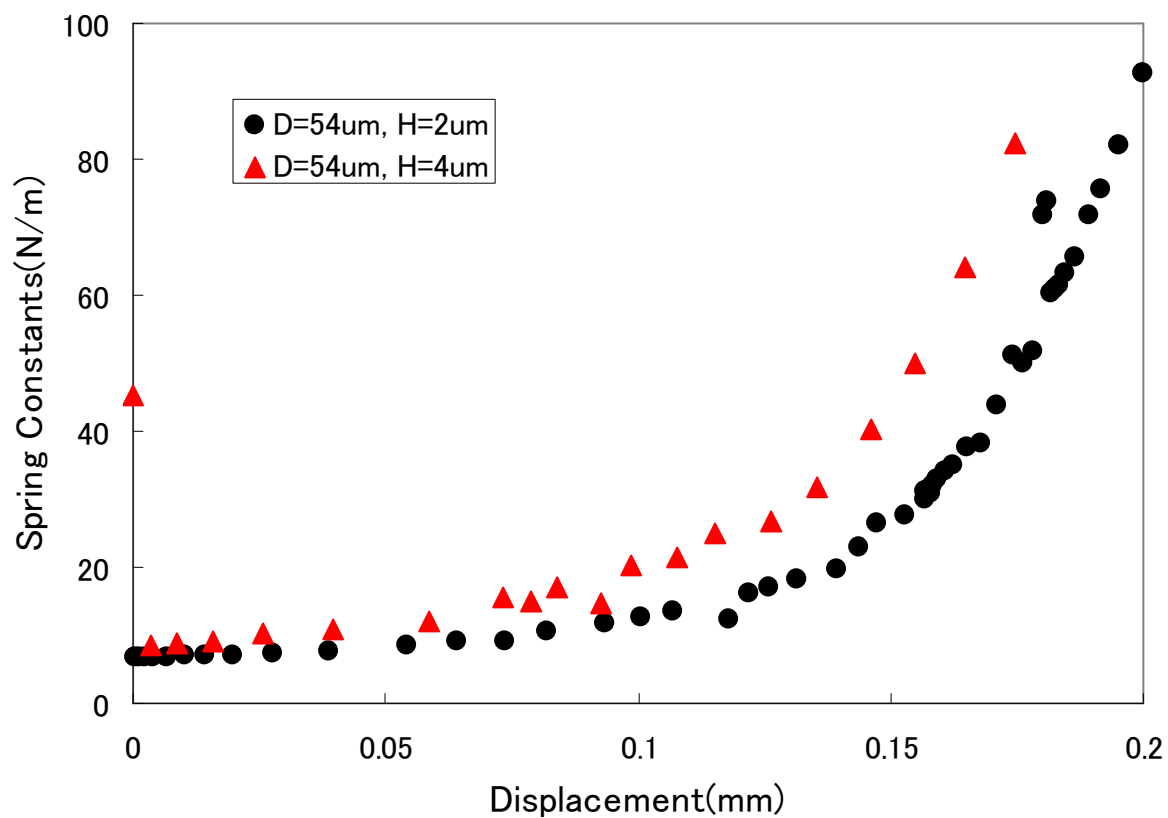


図 4-30 電極厚さが $94\text{ }\mu\text{m}$ でヒンジ厚さを変化させたときのバネ特性



図

4-31 電極厚さが $54[\mu\text{m}]$ でヒンジ厚さを変化させたときのバネ定数

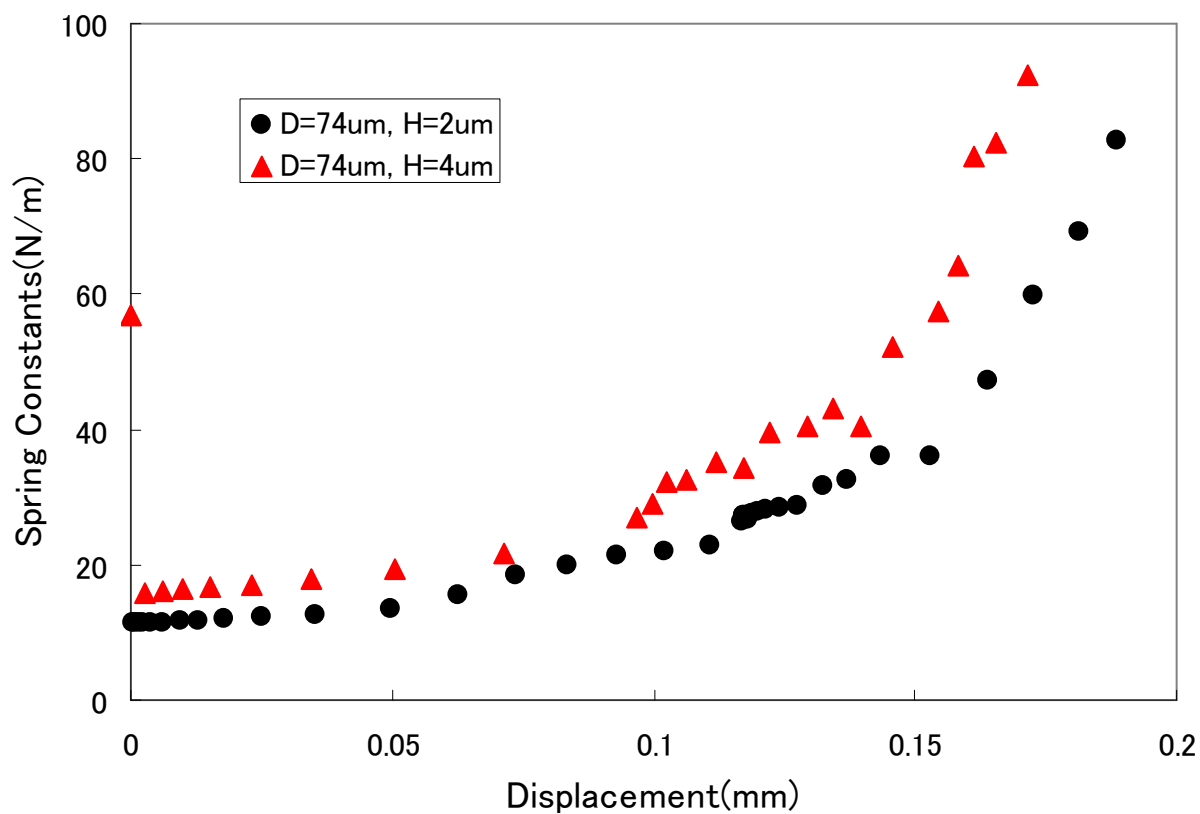


図 4-32 電極厚さが $74[\mu\text{m}]$ でヒンジ厚さを変化させたときのバネ定数

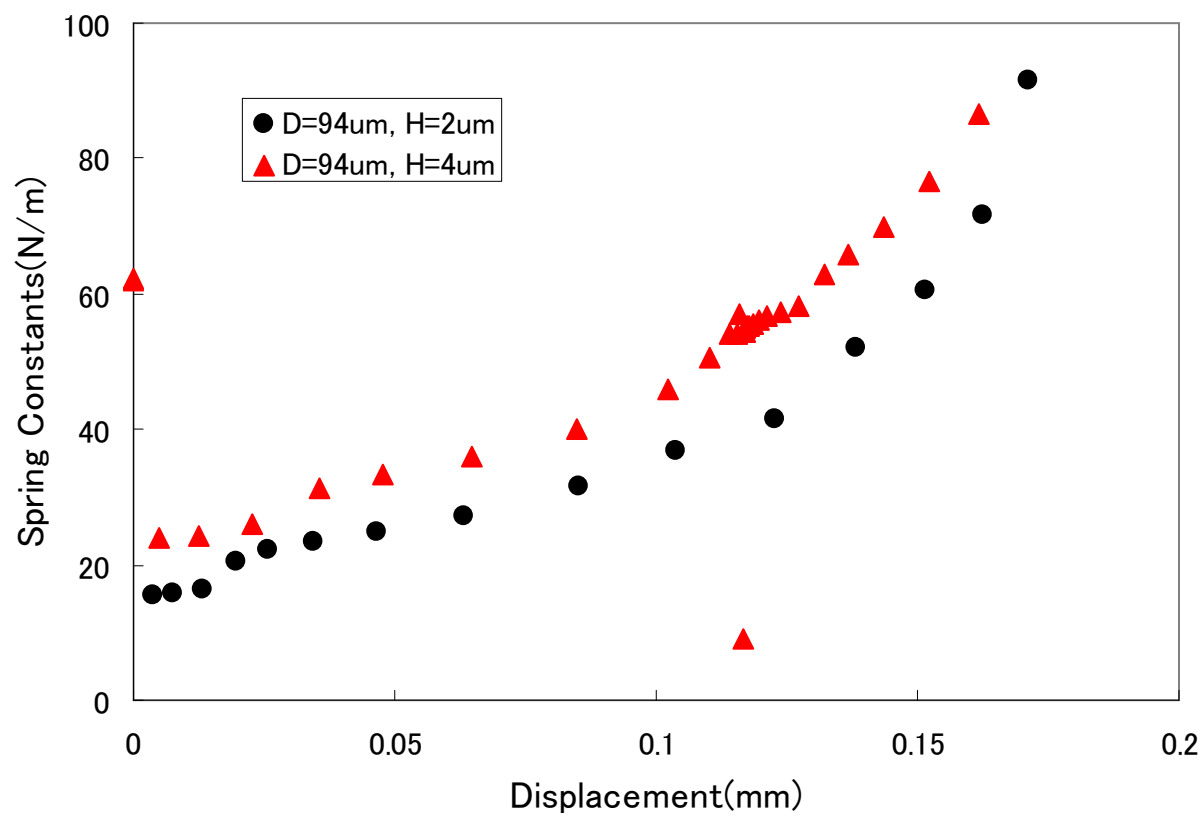


図 4-33 電極厚さが $94[\mu\text{m}]$ でヒンジ厚さを変化させたときのバネ定数

4.7.3 ヒンジの長さ効果

図 4-34 に電極の厚さが $56[\mu\text{m}]$ ，ヒンジの厚さが $6[\mu\text{m}]$ でヒンジの長さが $400[\mu\text{m}]$ と $500[\mu\text{m}]$ の場合のバネ特性の計算結果を示す．図の曲線の立ち上がり部分の傾き変化から，ヒンジが長くなると駆動領域のバネ定数が小さくなること，また，変位量の変化からアクチュエータのストロークが大きくなることが分かる．

図 4-35 は図 4-34 のバネ特性曲線の傾き変化から求めたアクチュエータの伸びに対するバネ定数の変化を示している．この図からヒンジの長さが $400[\mu\text{m}]$ のデータをバネ定数はそのまま変位量を一定量ずらせると両者はほぼ重なることが分かる．このことから，ヒンジ長を変化させると，アクチュエータのバネ特性には大きな変化がなく，ストロークだけが変化することが分かる．

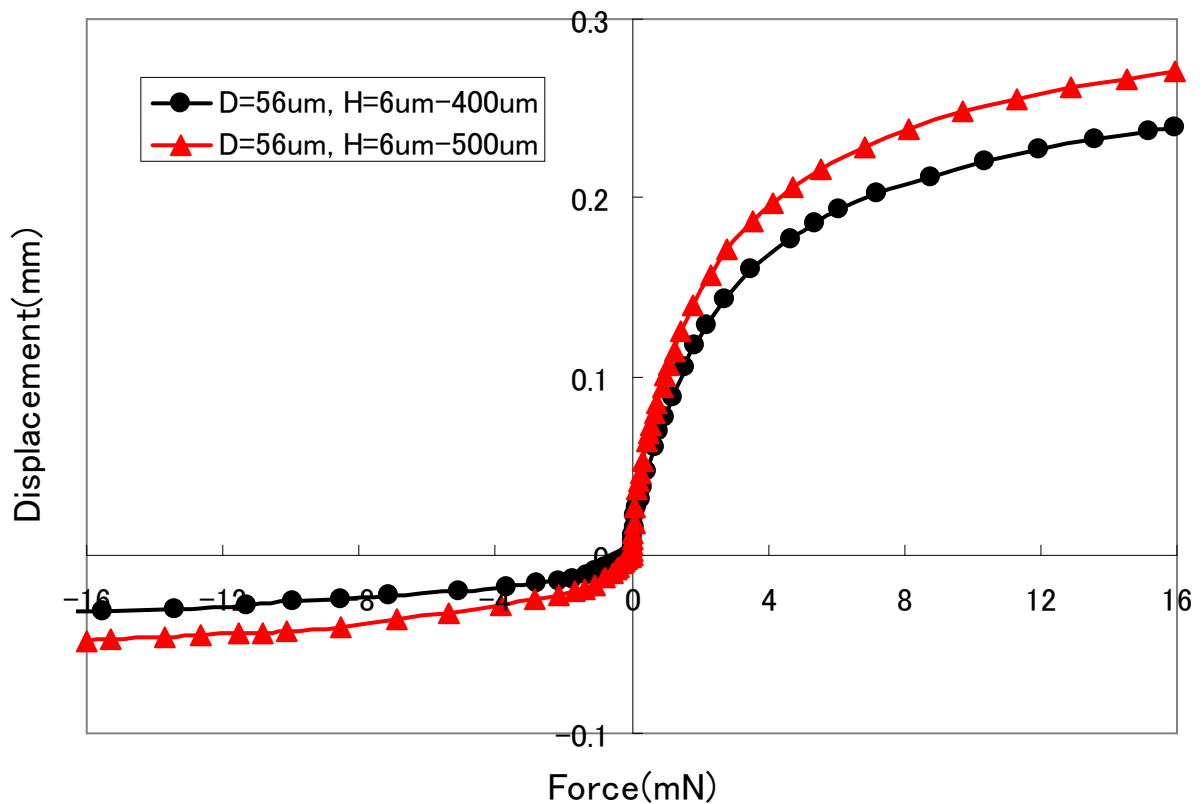


図 4-34 電極厚さ 5 ヒンジ厚さ $6[\mu\text{m}]$ でヒンジ長さを変化させたときのバネ特性

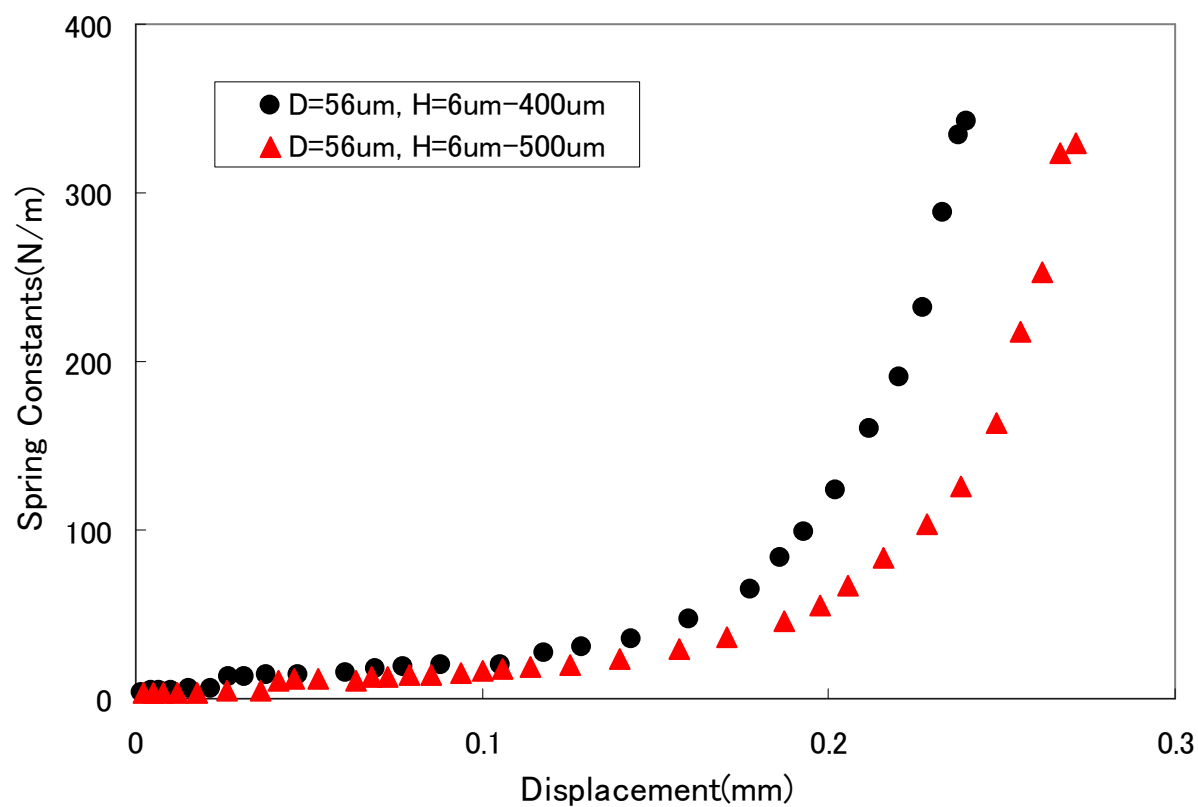


図 4-35 電極部 $56[\mu\text{m}]$ ，ヒンジ部 $6[\mu\text{m}]$ でヒンジ長さを変化させたときのバネ定数

4.8 本章のまとめ

本章では、まず、積層数が少ない場合の厚薄構造を有するリボン状フィルムの作製方法について述べた。この方法は専用の治具を用いているため、比較的高精度のアクチュエータを作製することができるが、作製できる電極数が100程度までである、作業が煩雑で大量生産には適さない、などの問題があるため、今後は別の方法や工夫を考えていく必要がある。また、本章で述べた規格化されたバネ特性は、積層数や形状が異なったアクチュエータの特性を比較する際に非常に有効であるため、今後はこの規格化されたバネ特性、すなわち、1ギャップ当たりのバネ特性をアクチュエータの特性を評価するための目安として取り扱っていくこととする。

アクチュエータのバネ特性に関しては、実験結果と計算結果は極めて良好な一致を示し、そのことからシミュレーションの妥当性を十分検証することができた。特に、アクチュエータの形状変化とバネ特性の変化の対応関係から、電極を厚くすることによって過負荷領域のバネ特性を改善することができるが、一方で駆動領域のバネ特性を劣化させてしまうことが分かった。さらに、ヒンジ部分は、このアクチュエータのバネ特性を決定する重要な要素であることが明らかとなった。すなわち、ヒンジを薄くすると駆動領域のバネ特性は大きく改善されること、ヒンジを長くするとアクチュエータのストローク長は増大することができることが分かった。

次節では、電極の形状が三角形の積層型三角形形状静電アクチュエータの作製方法、バネ特性や発生力の測定結果、アクチュエータの形状変化とバネ特性の関係を調べるためのシミュレーション結果などについて、詳細に解説する。

第 4 章 積層型四角形状静電アクチュエータ

第 5 章 積層型三角形状静電アクチュエータ

第 5 章 積層型三角形状静電アクチュエータ

5.1 緒言

本章では、三角形状のアクチュエータについて、最初に厚薄構造を持たないリボン状フィルムを用いたアクチュエータの作製方法について述べる。次に、このアクチュエータのバネ特性はフィルムの幅と熱処理によって改善されることを示した後、リボン状フィルムの変形とサンドイッチ構造の関係について述べる。続いて、レーザ加工機を用いた厚薄構造を有するリボン状フィルムの作製方法について説明する。次に、アクチュエータの形状、すなわち、電極の大きさと厚さ、ヒンジの厚さと長さを変化させた場合のバネ特性の測定結果について述べる。最後に有限要素法解析ソフトウェア ANSYS を用いた非線形構造解析に基づくアクチュエータのバネ特性の計算結果を示し、実験結果とシミュレーション結果を比較する。さらにアクチュエータの形状を変化させた場合のバネ特性の計算結果について述べ、電極やヒンジの形状とバネ特性との関係を明らかにする。

5.2 厚薄構造のないフィルムを用いたアクチュエータ

5.2.1 アクチュエータの作製方法

2本のリボン状フィルム的一端を重ね合わせてその間の角度が120度となるように固定した後、下側となったフィルムをもう一方のフィルム辺に沿って折り返すという作業を続けていくと図5-1（図2-13の再掲）に示すような電極面が三角形状のアクチュエータを作製することができる^{(38)~(42)}。

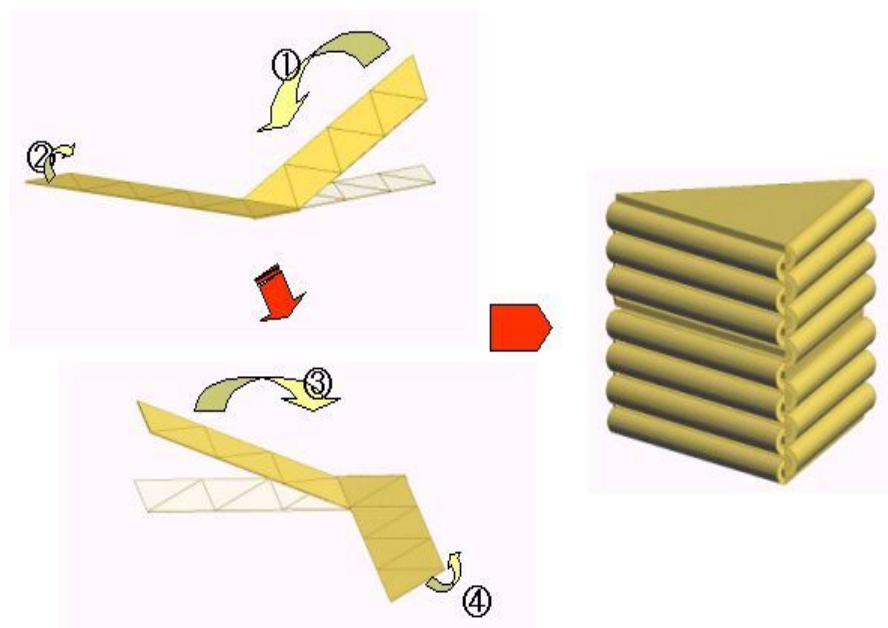


図5-1 積層型三角形状静電アクチュエータの作製方法と外形（図2-13の再掲）

このアクチュエータの電極部分は図 5-2 に示すように、一辺 a の正三角形の部分に形成されるが、フィルム幅 d を小さくしてこの辺上でフィルムを折り込んでいくと電極部分は図のような端部が欠けた形状となる。ここで、正三角形の一辺の長さを一定とし、フィルム幅を増減させることによって、アクチュエータの可動領域長に直接関係するヒンジ長 t を変化させることができる。また、リボン状フィルムに PET フィルムなどの高分子材料を用いれば、熱処理によってフィルムの硬さをある程度変化させることができることから、フィルム幅と熱処理条件を変化させるだけでアクチュエータのストロークやバネ定数の調整を行える可能性がある。

5.2.2 リボン幅変化によるバネ特性の変化

フィルム幅がアクチュエータのバネ定数に与える影響を調査するために、フィルム幅を 7[mm]～8.5[mm]まで 0.5[mm]ずつ変化させた 4 種類のアクチュエータを作製し、そのバネ定数を測定した。アクチュエータの大きさは一辺 10[mm]、積層数は 40 層とし、フィルムには厚さ 38[μ m]のテイジン製テトロン PET フィルムを使用した。

図 5-3 にアクチュエータの外形を、図 5-4 にこれらのバネ特性の測定結果の一例を示す。尚、実験で求めたバネ特性の基準点は四角形状アクチュエータの場合と同様に、アクチュエータを完全収縮させた位置を外力と変位がゼロの原点としている。

図より明らかなように、フィルム幅を変化させることによってアクチュエータのバネ特性を変化させることができる。特にフィルム幅を狭くすればするほどヒンジが長くなるため、アクチュエータのバネ定数は減少し、その自然長は増大する。

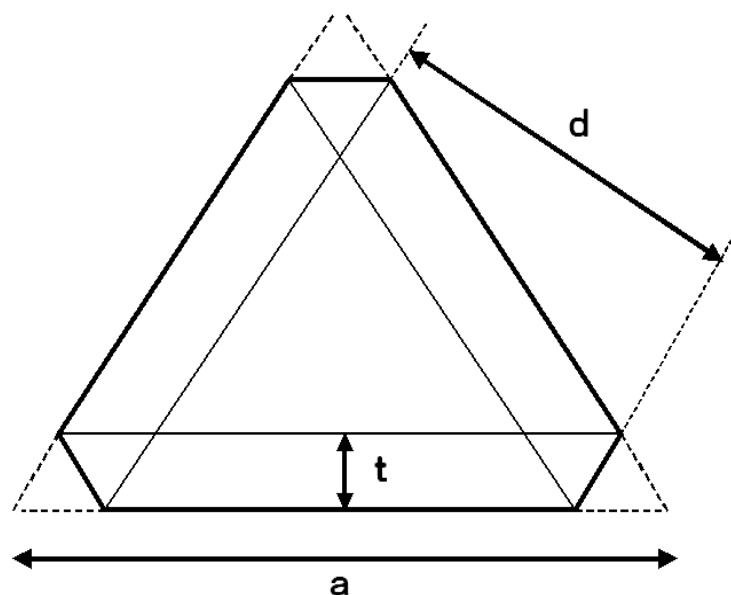
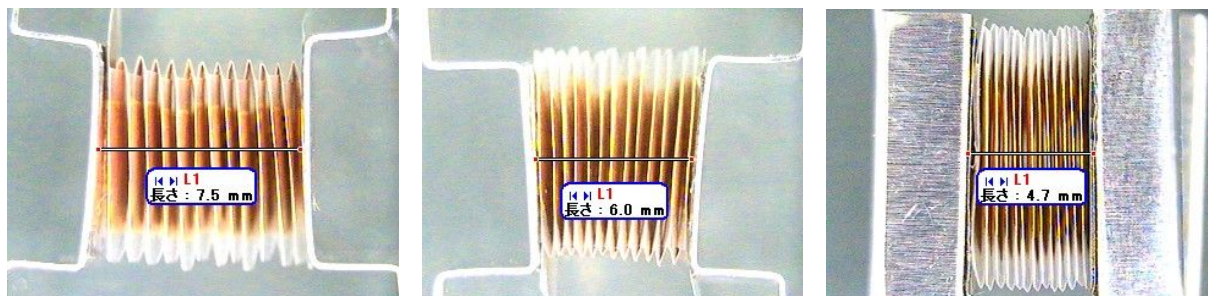


図 5-2 積層型三角形状静電アクチュエータ電極の形状



(a) 幅 $d=7$ [mm]

(b) 幅 $d=7.5$ [mm]

(c) 幅 $d=8$ [mm]

図 5-3 リボン幅 d を変化したアクチュエータの外形

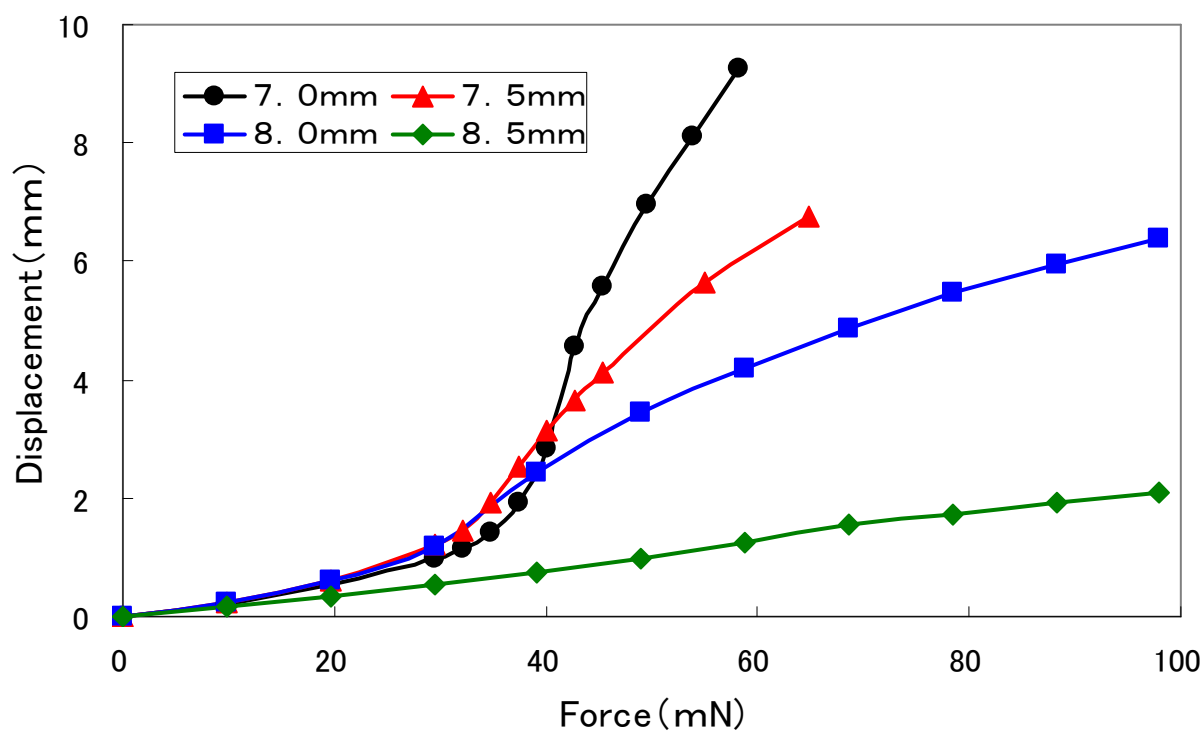


図 5-4 リボン幅 d を変化したアクチュエータのバネ特性

5.2.3 熱処理によるバネ特性の変化

リボン状フィルムを折り込んだ後、アクチュエータの内部応力を低減させるために行う熱処理条件の違いがアクチュエータのバネ特性にどの程度影響するのかを調べることを目的として、熱処理温度を 80°C ～ 140°C まで 20°C ずつ変化させた場合のバネ特性の変化を測定した。作製したアクチュエータの大きさは一辺 $10[\text{mm}]$ の正三角形で積層数を40で、フィルム幅を $7.5[\text{mm}]$ 一定とした。尚、熱処理は大気中で30分間実施し、フィルムの厚さを $4.5[\mu\text{m}]$ 、 $12[\mu\text{m}]$ 、 $19[\mu\text{m}]$ 、 $38[\mu\text{m}]$ に変化させた。

図5-5から図5-8にフィルムの厚さを変化させたときのバネ特性を、図5-9にフィルムの厚さに対する駆動領域のバネ定数の変化の様子を示す。図から明らかなように、どの厚さのフィルムにおいても、熱処理によってバネ特性を改善できることが分かる。特に、 100°C 以上で熱処理を行うことによって、駆動領域におけるバネ特性を大きく改善でき、バネ定数比（駆動領域と過負荷領域のバネ定数の比率）をある程度調節できることが分かった。

図5-10と図5-11は上記アクチュエータのうち、フィルム厚さが $38[\mu\text{m}]$ のアクチュエータを全長が $5[\text{mm}]$ となる状態で熱処理し、そのバネ特性とバネ定数を求めたものである。図から熱処理温度を 120°C としたとき、バネ定数比を10以上に改善することができることが分かる。

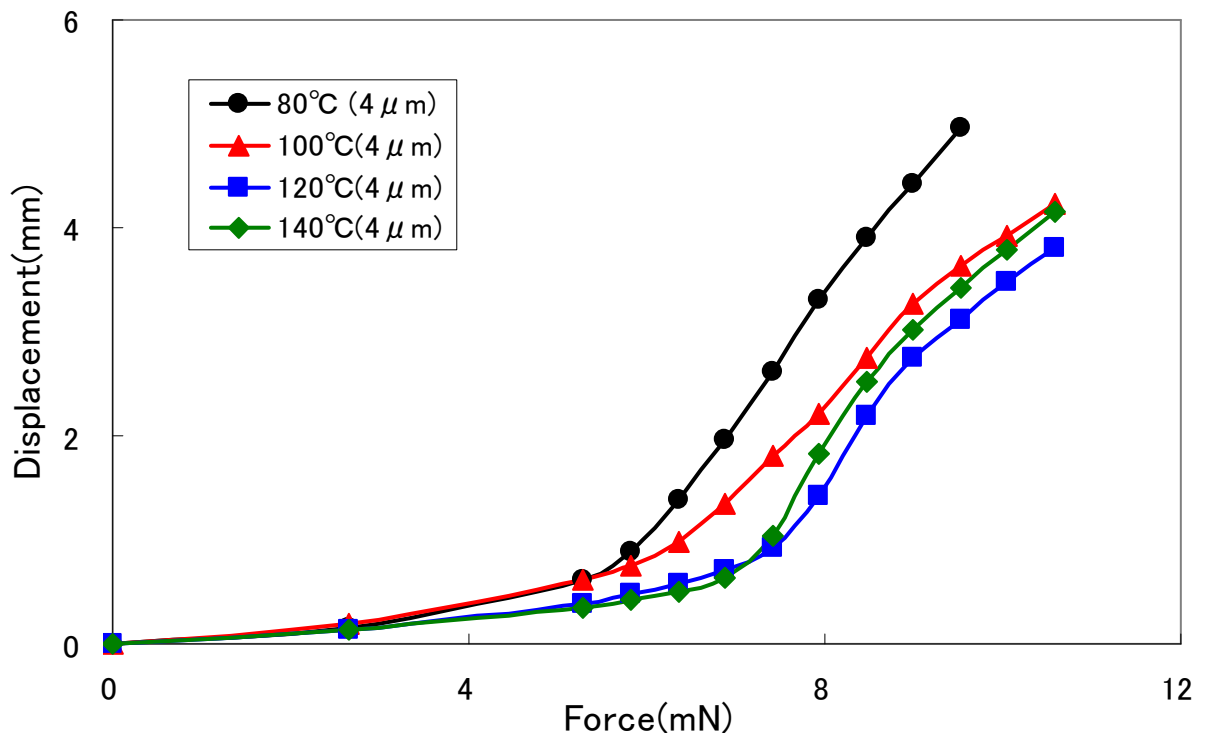


図5-5 厚さ $4.5[\mu\text{m}]$ フィルムの熱処理とバネ特性

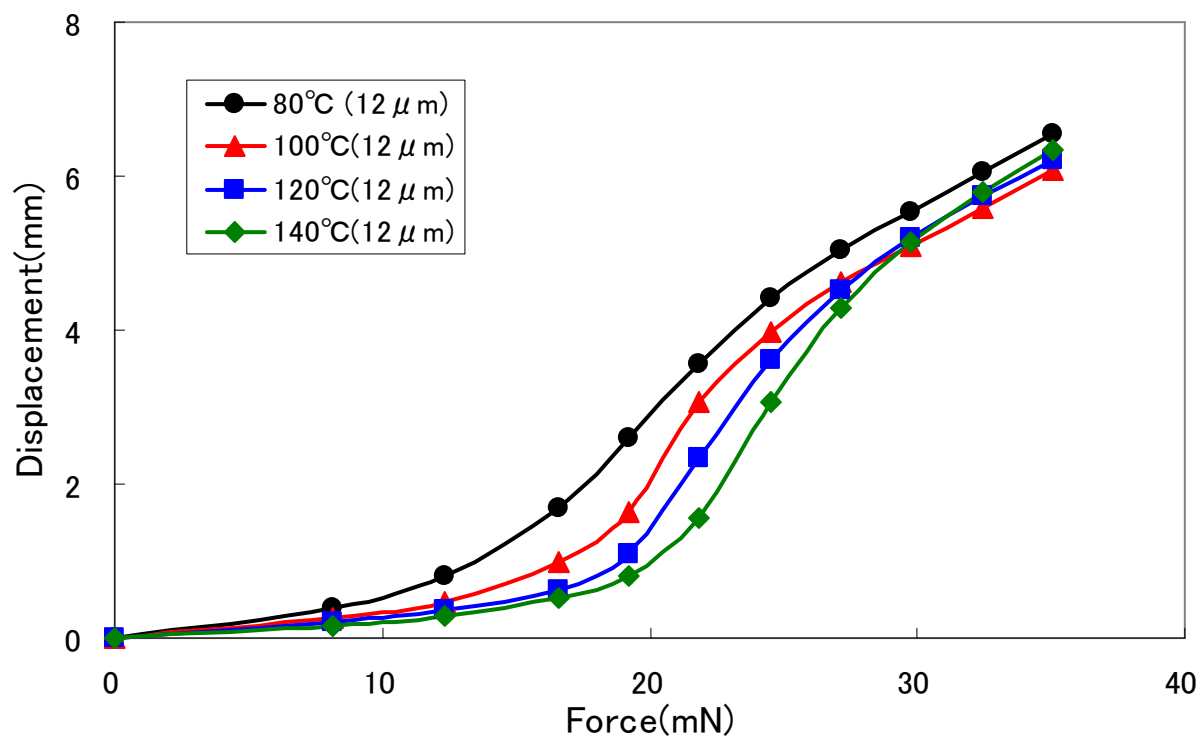


図 5-6 厚さ $12[\mu\text{m}]$ フィルムの熱処理とバネ特性

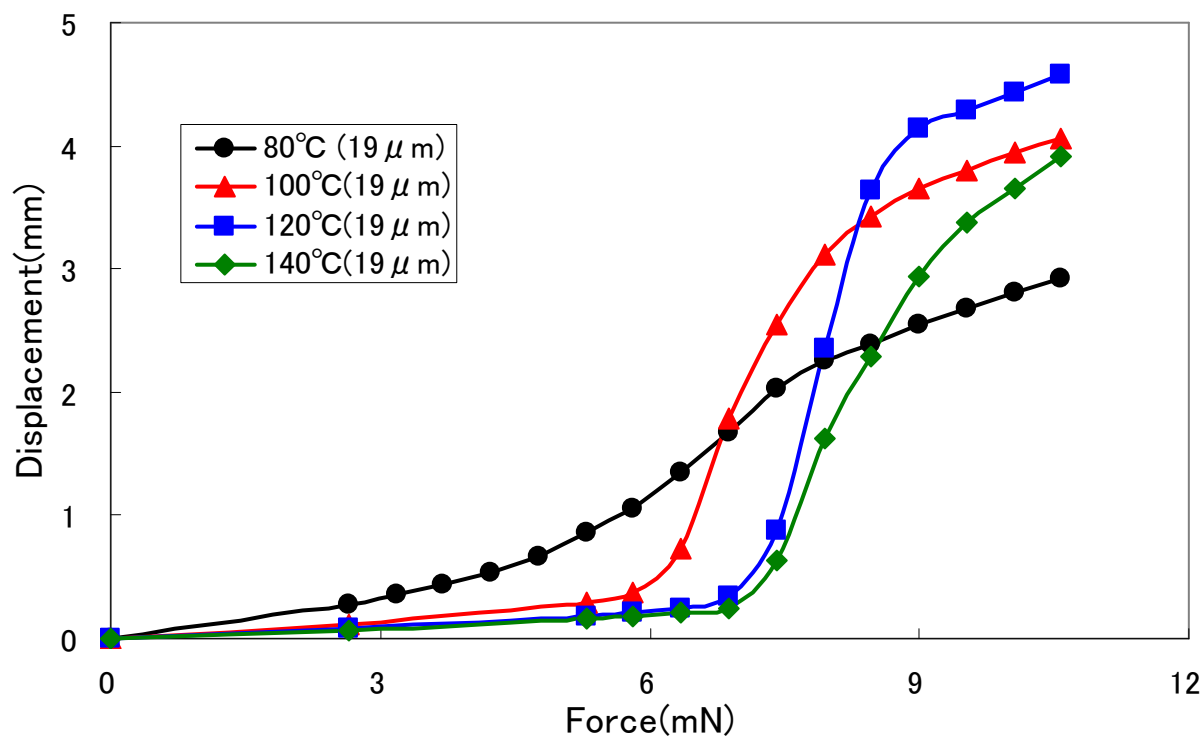


図 5-7 厚さ $19[\mu\text{m}]$ フィルムの熱処理とバネ特性

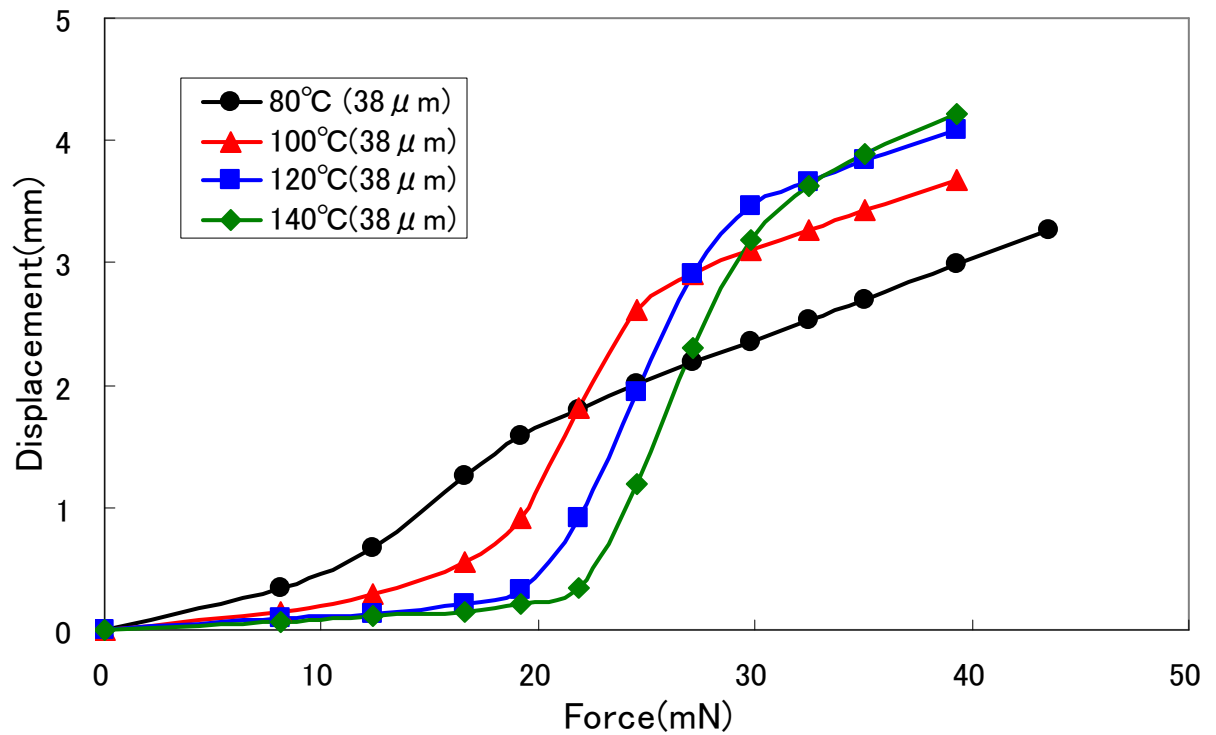


図 5-8 厚さ 38[μm]フィルムの熱処理とバネ特性

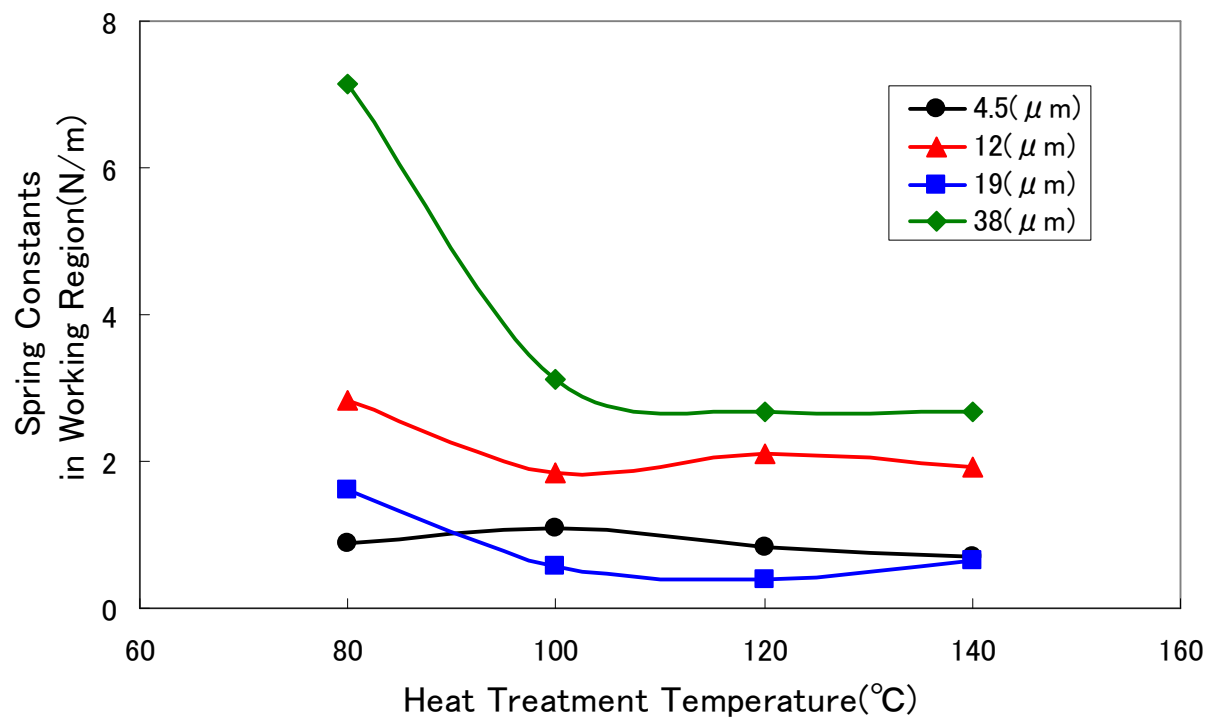


図 5-9 フィルムの厚さ変化に対する駆動領域のバネ定数

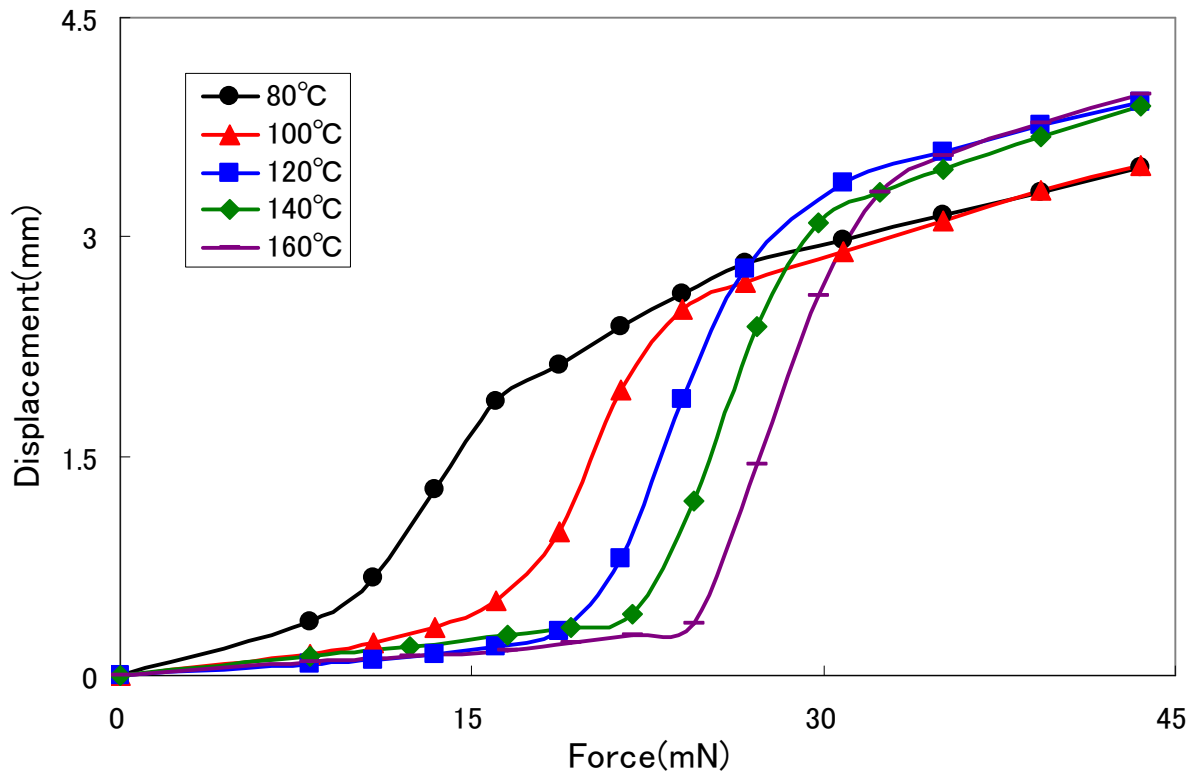


図 5-10 厚さ 38[μ m]フィルム, 自然長 5[mm]アクチュエータの熱処理とバネ特性

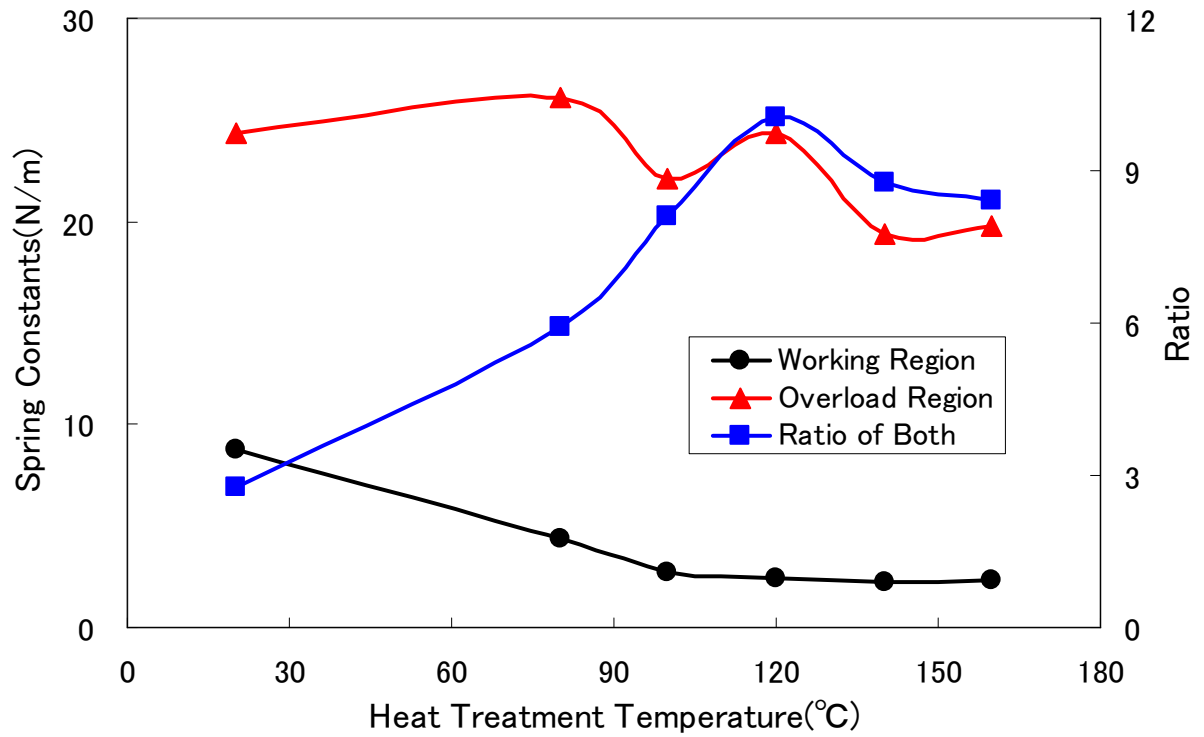


図 5-11 厚さ 38[μ m]フィルム, 自然長 5[mm]アクチュエータの熱処理とバネ定数

5.2.4 リボン状フィルムの問題点

図 5-10, 図 5-11 から明らかなように, 厚薄構造のないリボン状フィルムのみで作製したアクチュエータは, 熱処理によって駆動領域のバネ特性を改善することができるが, 過負荷領域のバネ特性を改善することはできないという問題がある. この問題を解決するために, 厚薄構造を有するリボン状フィルムを使用することが考えられるが, これについては 5.3 節以降に詳しく説明する.

リボン状フィルムに関しては, この問題の他に, サンドイッチ構造に起因する問題がある. 本研究で使用するリボン状フィルムは中間部に導電性薄膜があり, この上下を絶縁用のフィルムでサンドイッチした構造となっている. 具体的には, PET-Cu-PET の三層構造となっているが, 中間部の接着層の剛性が低いと絶縁層の剛性が高くても全体としての剛性が著しく低下することがある.

このことを図 5-12 から図 5-14 に示す ANSYS の構造解析結果から説明する. 図 5-12 はサンドイッチ構造の計算モデルで, 一辺 3[mm], 上下の絶縁層の厚さ 12[μ m], 中間層の厚さ 6[μ m]で, 平板の一端を完全拘束し, 他端に 10[mg]の荷重を加え, その変形量を計算した. このとき, 絶縁層には PET の物性値 (ヤング率 540[MPa], ポアソン比 0.458) を使用し, 中間層のヤング率を変化させて, その変形量を求めた.

図 5-13 に, 中間層も PET とした場合の変形の様子と中間層のヤング率を 1/1000 とした場合の変形の様子を示す. 中間層の厚さが全体の 1/5 しかないにもかかわらず, 全体の変形量は中間層の剛性に大きく影響を受けることが分かる.

図 5-14 は, 中間層の材料を PET としたときを基準として, 使用する中間層のヤング率の比率に対する変形量の比率を示している. 図から明らかなように, 中間層のヤング率が絶縁層の 1/10 程度までは余り変化はないが, それ以下となると急激に全体の剛性が低下し, 変形量が大きくなることが分かる.

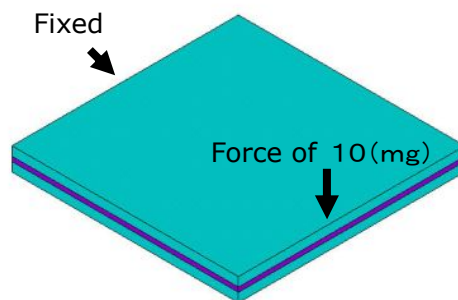
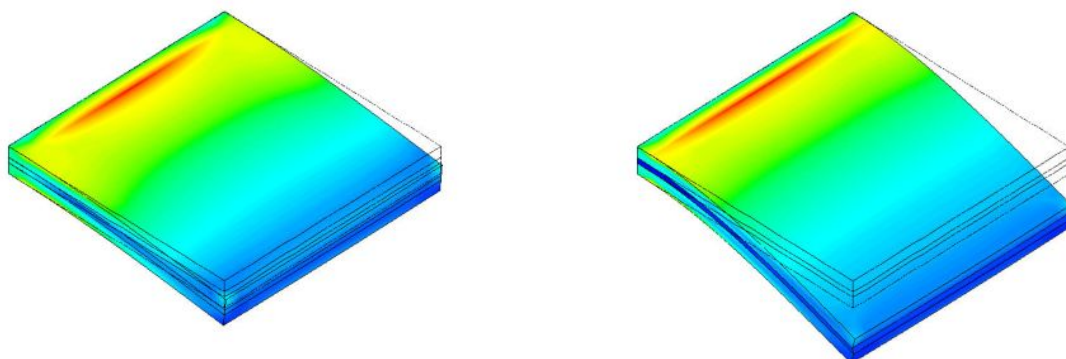


図 5-12 サンドイッチ構造の計算モデル



(a) 中間層も PET の場合

(b) 中間層のヤング率が 1/1000 の場合

図 5-13 サンドイッチ構造の変形例

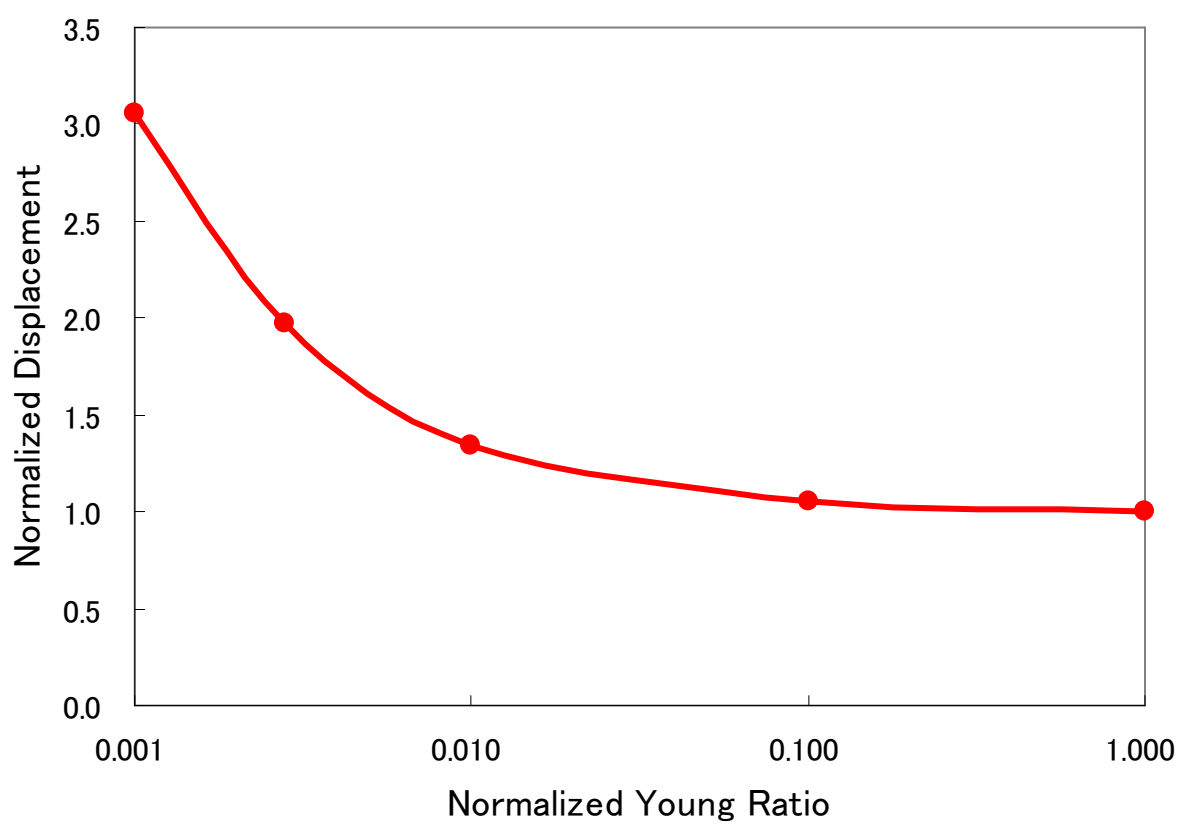


図 5-14 中間層の剛性変化に対する変位量の変化

5.3 レーザ加工機とリボン状フィルム

5.3.1 リボン状フィルムの作製方法⁽⁴³⁾

図 5-15 に厚薄構造を持つ三角形状リボン状フィルムの作製方法を示す．厚薄構造はリボン状フィルムの上下に PET フィルムをヒートシールすることにより実現されており，その具体的な方法は以下のとおりである．

- ① 図 5-15(a) のように，ヒートシール層付きの PET フィルムを適当な幅で 2 枚切り出し，ヒートシール面を向かい合わせた状態で両端を両面テープで固定する．
- ② 図 5-15(b) のように，レーザ加工機を用いて，この 2 枚のフィルムの中央部に三角形状の切り込みを入れる．尚，切断部分がアクチュエータのヒンジ部となる．
- ③ 図 5-15(c) のように，導電性薄膜を 2 枚の PET フィルムの間に挿入する．
- ④ ③のフィルムのヒートシール面を圧着し，大気中 100℃前後で 30 分間熱処理し，その後，自然冷却させることにより，ヒートシール面を圧着接着する．
- ⑤ 図 5-15(d) のように，熱処理後のフィルムを導電性薄膜の端部に沿って切断する．

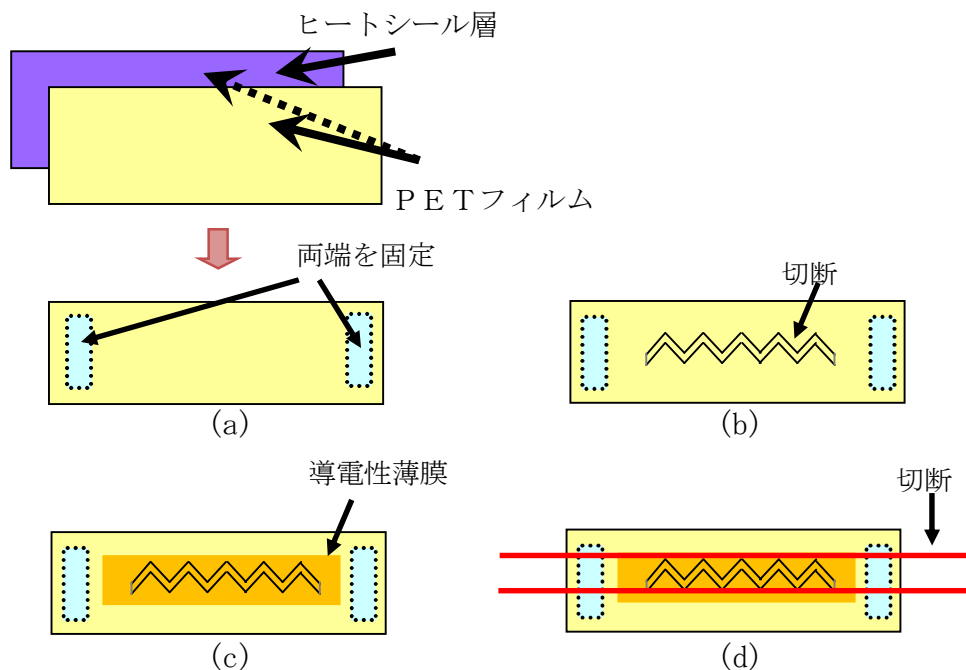


図 5-15 リボン状フィルムの作製方法

5.3.2 フィルムの切断形状とレーザ加工機

図 5-16 にレーザ加工機を用いて幅 d [mm] のリボン状フィルムを作製する際の切断形状を示す．切断部分は頂角が 60° ，高さが d [mm] + $2h$ の三角波で，必要な電極数の分を加工し，その後，高さ方向に $2h$ ずらしてから同様な作業を行う．尚，図の幅 h がアクチュエータのヒンジ長となるため，高さ方向の $2h$ を変化させることにより，必要なヒンジ長に調整することができる．

図 5-17 に使用したレーザ加工機の外形を，表 5-1 にレーザ加工機の仕様を，表 5-2 にレーザ加工機のシステム動作環境を示す．尚，レーザ加工用のデータは，ノックスデータ株式会社製の CAD ソフトウェア ACE DRAW を用いて作製した．

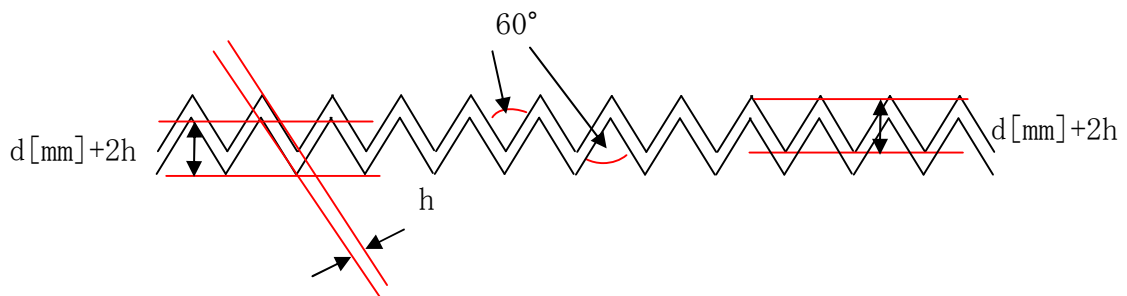


図 5-16 リボン状フィルムの切断形状



図 5-17 レーザ加工機の外形

第5章 積層型三角形状静電アクチュエータ

表 5-1 レーザ加工機の仕様

製作会社	ユニバーサルシステムズ
モデル	Versa Laser Series VL-200
使用温度	使用可能範囲：50° F (10°C) ～95° F (35°C) 推奨範囲：73° F (22°C) ～77° F (25°C)
保管温度	50° F (10°C) ～95° F (35°C)
湿度	結露が発生しない湿度
電源	単相交流 110 / 220 V, 10 / 5 A, 50 / 60Hz 接地（アース）とサージ/スパイク対策が必要
粉塵／臭気 外部排気システム	6 インチあたり 250CFM の静圧能力 (1.5 kPa で 425 m ³ /hr) を有する高圧バキュームブロー
コンピュータ	Windows 2000 / XP に対応
ソフトウェア	グラフィックソフトまたは CAD ソフト

表 5-2 レーザ加工機のシステム動作環境

レーザ規格	RF 励起 封入式炭酸ガスレーザ
レーザーカートリッジ	25 or 30 Watt CO ₂ Laser
冷却装置	空冷式
作業スペース（加工範囲）	406.4 × 304.8 mm
最小ビームスポット径	76 μm
プリンタ ドライバ	Windows 2000 / XP に対応
ハードウェア インターフェイス	USB 1.0 に対応
外形寸法	横 660.4 mm × 縦 635 mm × 高さ 355.6 mm
本体重量	38 kg
レーザーカートリッジ重量	10 / 25 / 30 W = 9 kg
オプション	ロータリー固定具, エアーアシスト, エアーコンプレッサ, ハニカム切断テープ, フォーカスレンズキット

5.3.3 リボン状フィルムとアクチュエータ

5.3.1 節の手順に従って、幅 2[mm] との幅 7[mm] のリボン状フィルムを作製した。

図 5-18 に幅 2[mm] のリボン状フィルムを示す。尚、電極部を形成するために厚さ 25[μm] の PET フィルムを使用しており、このリボン状フィルムを用いて試作したアクチュエータが図 5-19 である。このアクチュエータの電極層数は 40 で、図 4-8 の四角形状アクチュエータと同数の積層数であるが、その自然長を比較すると、その長さは約 2/3 倍に短くなっている。

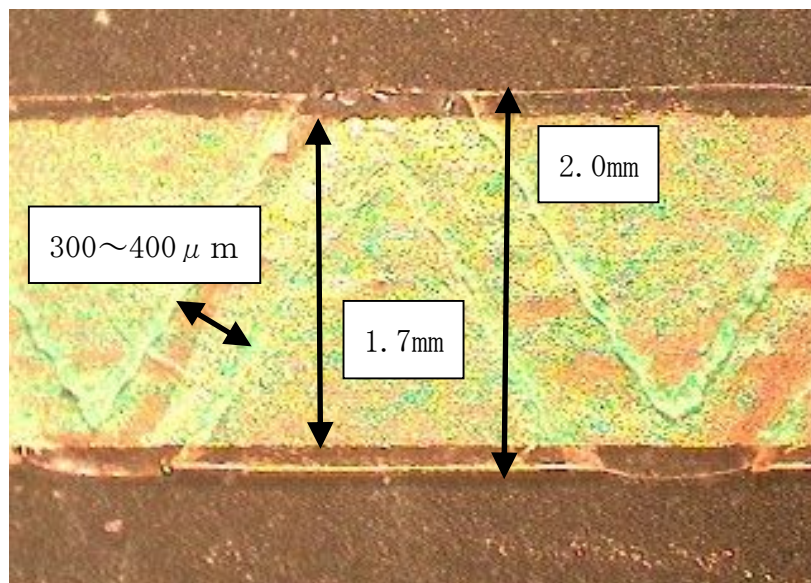


図 5-18 試作したリボン状フィルム

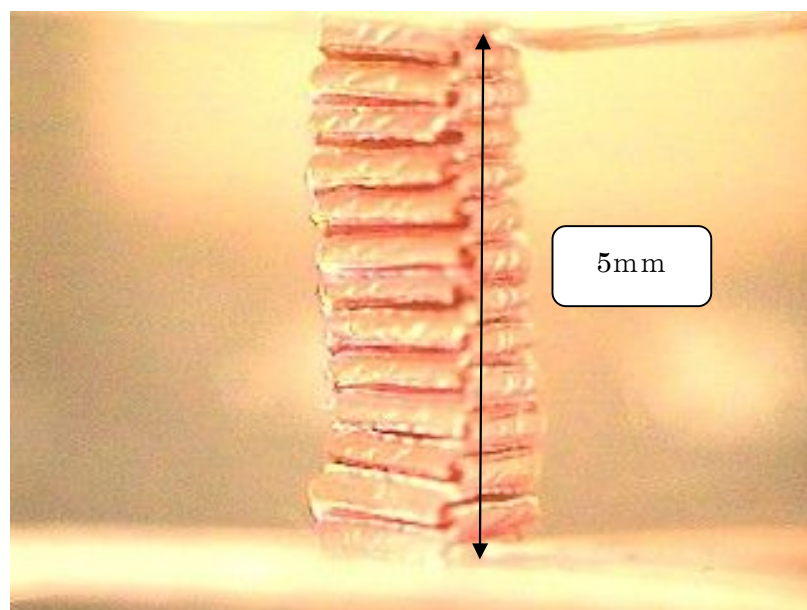


図 5-19 試作アクチュエータ

第5章 積層型三角形状静電アクチュエータ

図 5-20 に幅 7[mm]のリボン状フィルムを示す. このフィルムを用いて, 図 5-21 に示すような, 一辺が 10[mm]で 40 層のアクチュエータを作製した. このアクチュエータに使用した導電性フィルムは駆動領域における収縮特性を向上させるために, 幅 6[mm], 厚さ $0.3[\mu\text{m}]$ の Cu 電極薄膜を厚さ $1.5[\mu\text{m}]$ の PET フィルムでサンドイッチした構造としており, 接着層も含めて全体の厚さを約 $4[\mu\text{m}]$ まで薄くしている.

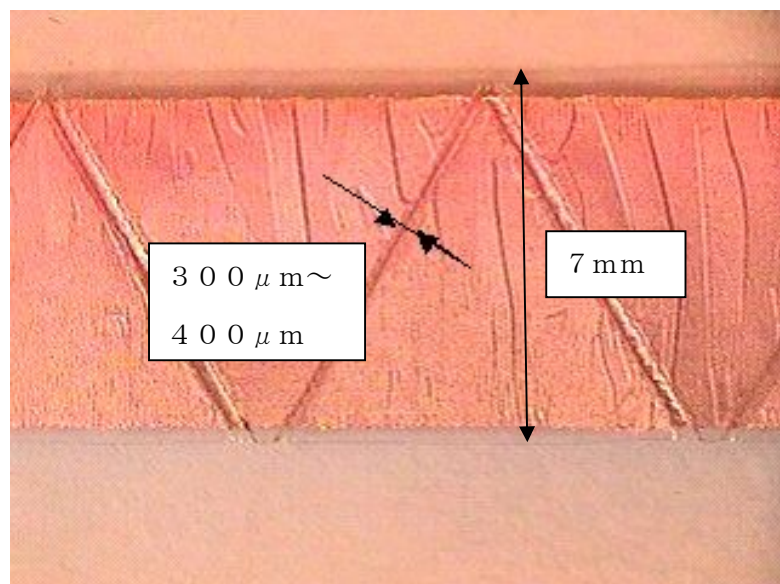


図 5-20 試作した 7[mm]幅リボン状フィルム

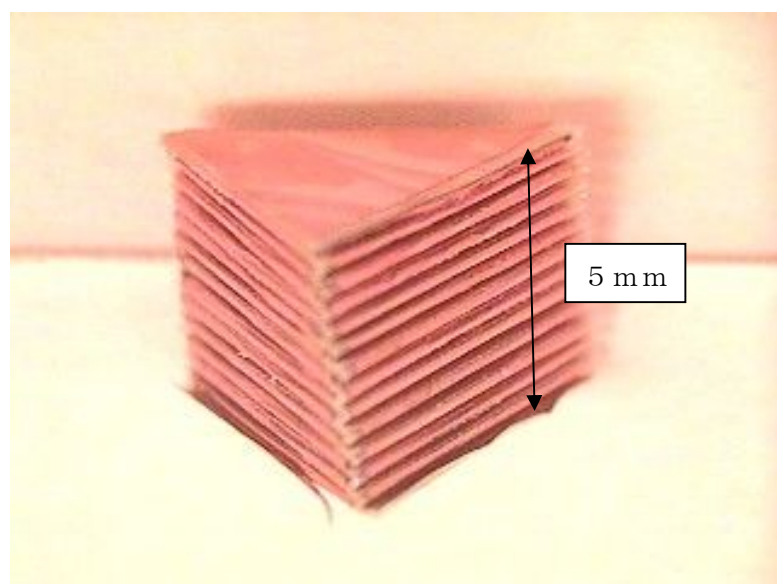


図 5-21 40 層の 10[mm]サイズ試作アクチュエータ

5.4 アクチュエータの形状変化とバネ特性⁽⁴³⁾

5.4.1 電極の厚さ効果

積層型四角形状静電アクチュエータの場合と同じように、アクチュエータの電極の厚さの違いがバネ特性にどのように影響するのかを調べるために、図 5-20 に示した幅 7[mm]で厚さが 4[μm]の導電性薄膜フィルムの上下に厚さが 12.5[μm]と 25[μm]の PET フィルムをヒートシールしたりボン状フィルムを作製した。このリボン状フィルムを使用してヒンジの厚さが 4[μm]で、電極の厚さが 29[μm]と 54[μm]、ヒンジの長さ 300[μm]と 400[μm]からなる 4 種類のアクチュエータを作製し、それらのバネ特性を測定した。尚、作製したアクチュエータの電極層数は 40 とした。

図 5-22 から図 5-25 にヒンジの長さが 300[μm]と 400[μm]で、電極の厚さを変えた場合のアクチュエータのバネ特性とそのバネ特性から求めたアクチュエータの伸びに対するバネ定数の変化の様子を示す。ここで、図 5-22 と図 5-23 はヒンジの長さが 300[μm]で、図 5-24 と図 5-25 はヒンジの長さが 400[μm]で、バネ定数の値は、積層型四角形状静電アクチュエータの場合と同じようにバネ特性の傾きから求めている。

図 5-22 から、電極を厚くすると、駆動領域のバネ定数は約 1.2 倍 ($=1.42/1.19$) に劣化するが、過負荷領域のバネ定数は大きく改善される。具体的には、アクチュエータが約 3[mm]変位したとき、電極厚さ 54[μm]のバネ定数の値は 29[μm]の場合の約 3.8 倍となり、この値は電極厚さの比の約 2.1 乗に対応する。

同様にヒンジが 400[μm]の場合には、電極を厚くすると、駆動領域のバネ定数は約 1.4 倍 ($=0.974/0.6779$) に劣化しており、過負荷領域のバネ定数は、アクチュエータが約 4[mm]変位したとき、電極厚さ 54[μm]のバネ定数の値は 29[μm]の場合の約 5.4 倍となり、この値は電極厚さの比の約 2.7 乗に対応する。

① ヒンジ長が $300[\mu\text{m}]$ のときの電極の厚さ効果

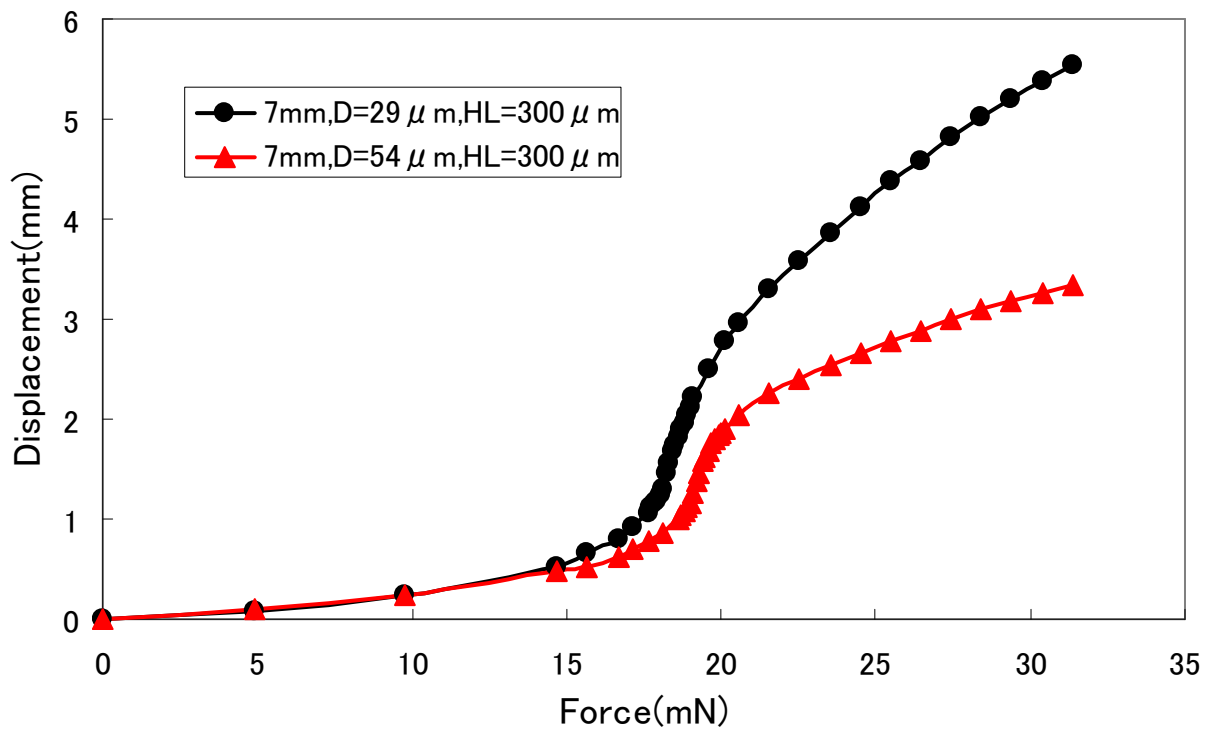


図 5-22 ヒンジ長 $300[\mu\text{m}]$ ，電極厚さ $29[\mu\text{m}]$ と $54[\mu\text{m}]$ のときのバネ特性

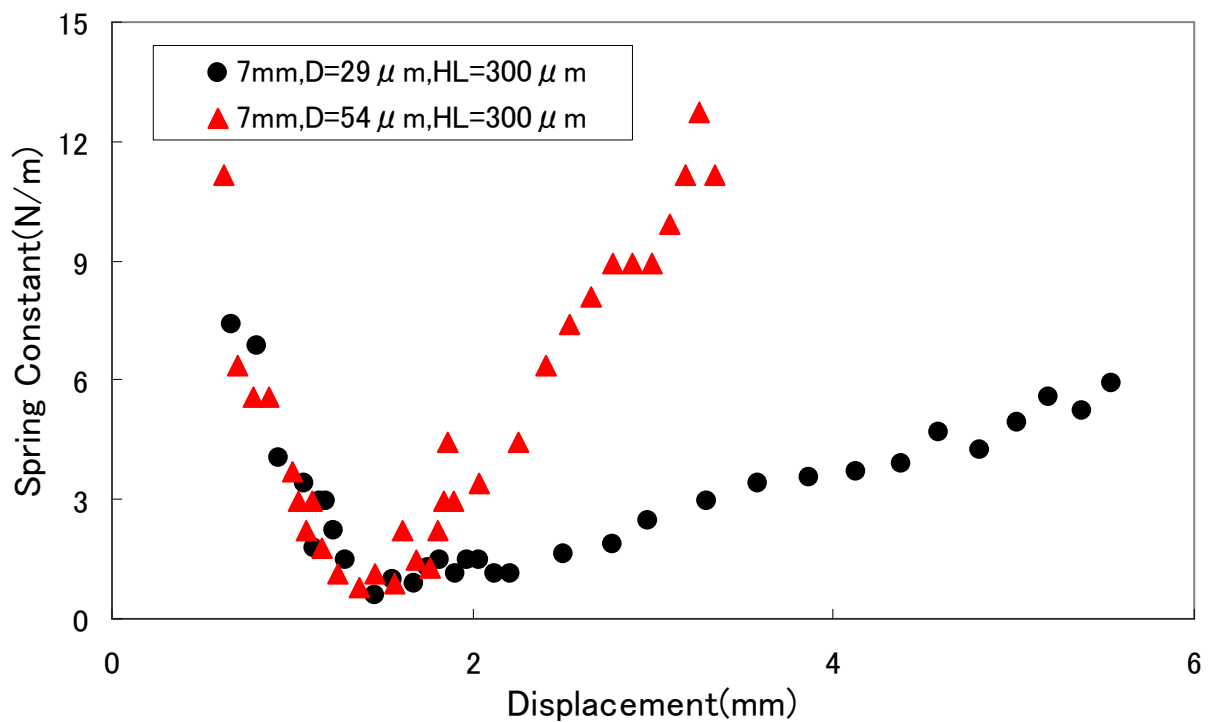


図 5-23 ヒンジ長 $300[\mu\text{m}]$ ，電極厚さ $29[\mu\text{m}]$ と $54[\mu\text{m}]$ のときのバネ定数

② ヒンジ長が $400[\mu\text{m}]$ のときの電極の厚さ効果

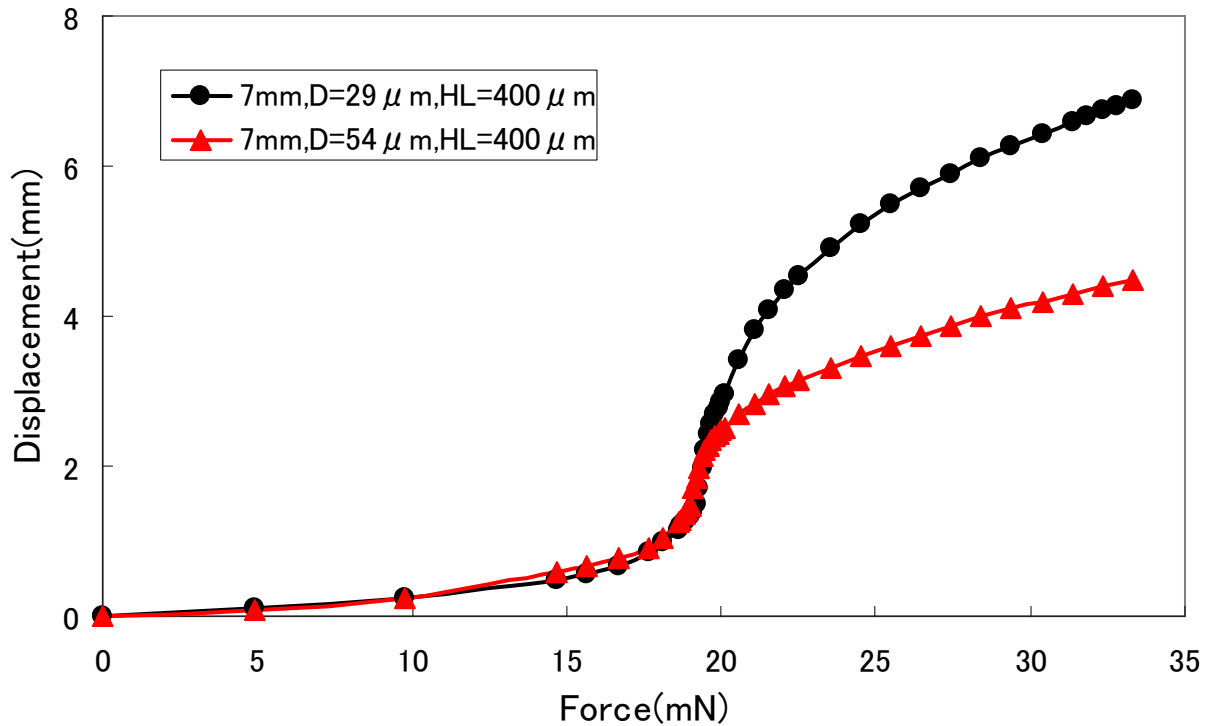


図 5-24 ヒンジ長 $400[\mu\text{m}]$ ，電極厚さ $29[\mu\text{m}]$ と $54[\mu\text{m}]$ のときのバネ特性

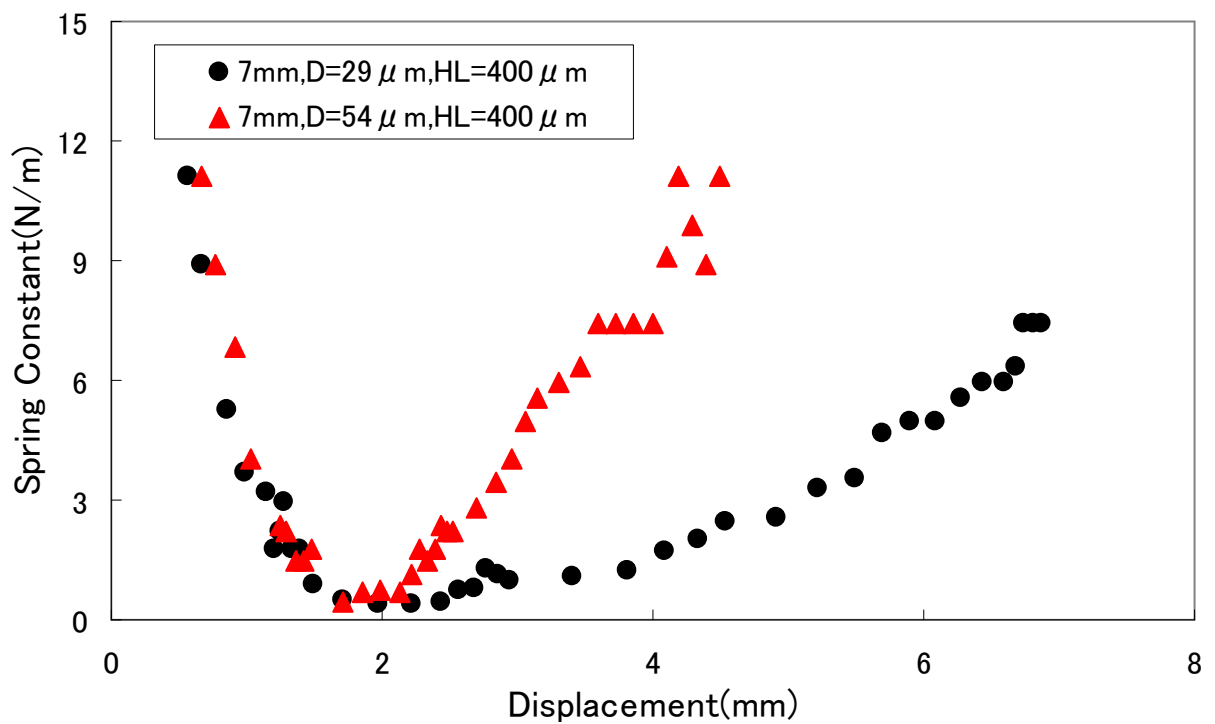


図 5-25 ヒンジ長 $400[\mu\text{m}]$ ，電極厚さ $29[\mu\text{m}]$ と $54[\mu\text{m}]$ のときのバネ定数

5.4.2 ヒンジの長さ効果

アクチュエータのヒンジの長さの違いがバネ特性にどのように影響するのかを調べるために、図 5-22 から図 5-25 の結果を電極厚さに対するヒンジ長の変化にまとめたものを図 5-26 から図 5-29 に示す。

図 5-26 と図 5-28 のバネ特性から、ヒンジが長くなるとアクチュエータのストロークが増加することが分かる。図から約 25[mN]の力が加えられた場合、ヒンジ長が増加するとストロークは電極厚さが 29[μm]のとき約 1.2 倍 ($=5.2/4.4$)、54[μm]のとき約 1.3 倍 ($=3.6/2.8$) となり、電極間隔の増加に伴い、静電力は大幅に減少することになる。

図 5-27 から、電極厚さが 29[μm]の場合には、駆動領域のバネ定数は約 0.57 倍 ($=0.677/1.19$) に改善される。また、過負荷領域のバネ定数は、アクチュエータが約 4[mm]変位したとき、ヒンジ長さ 400[μm]のバネ定数の値は 300[μm]の場合の約 0.42 倍に劣化する。また、図 5-29 から、電極厚さが 54[μm]の場合には、駆動領域のバネ定数は約 0.68 倍 ($=0.974/1.42$) に改善されるが、この値は 29[μm]の場合より小さい。しかし、過負荷領域のバネ定数は、アクチュエータが約 4[mm]変位したとき、ヒンジ長さ 400[μm]のバネ定数の値は 300[μm]の場合の約 0.47 倍で、29[μm]の場合に比べて劣化の割合は低くなる。

以上のことから、ヒンジが長くなると、駆動領域と過負荷領域のバネ定数はともに小さくなり、結果的に駆動領域は改善、過負荷領域は劣化することになる。このとき過負荷領域のバネ定数の劣化は電極間隔の増大に直接関係するため、ヒンジ長の選定に当たっては必要な発生力とストロークの観点から十分に検討する必要がある。

① 電極の厚さが $29[\mu\text{m}]$ のときのヒンジの長さ効果

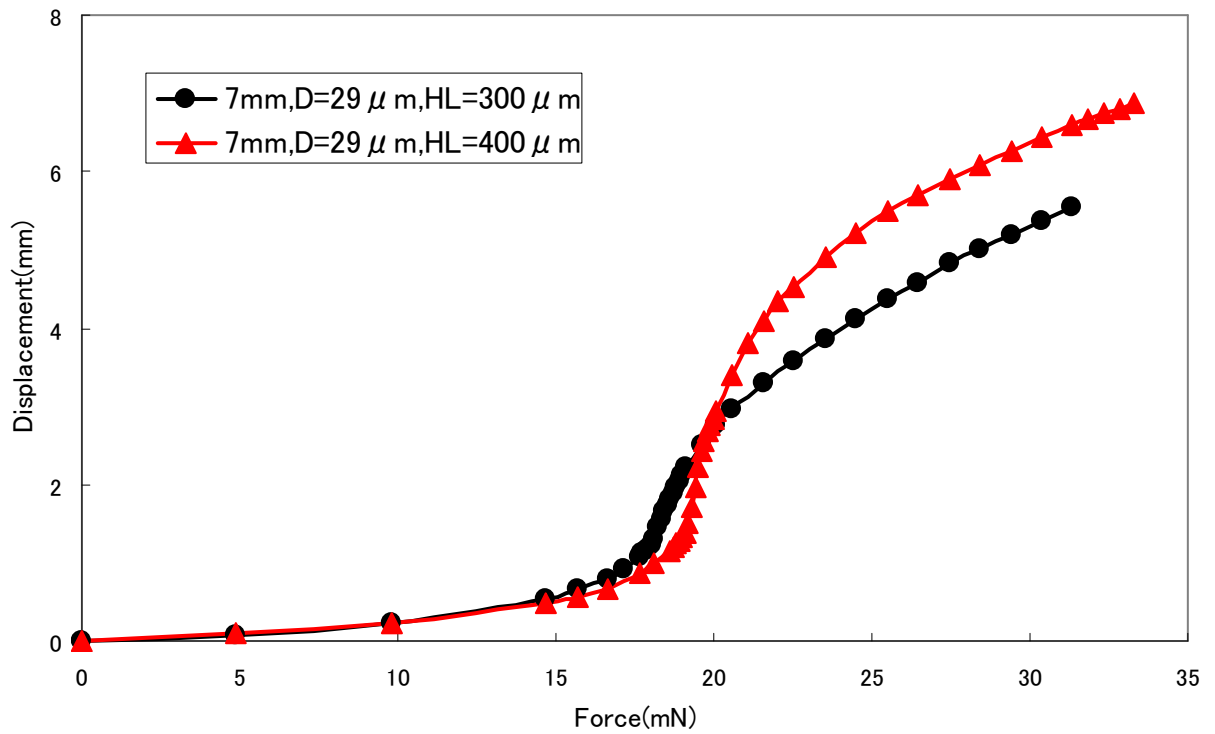


図 5-26 電極厚さ $29[\mu\text{m}]$ ，ヒンジ長 $300[\mu\text{m}]$ と $400[\mu\text{m}]$ のときのバネ特性

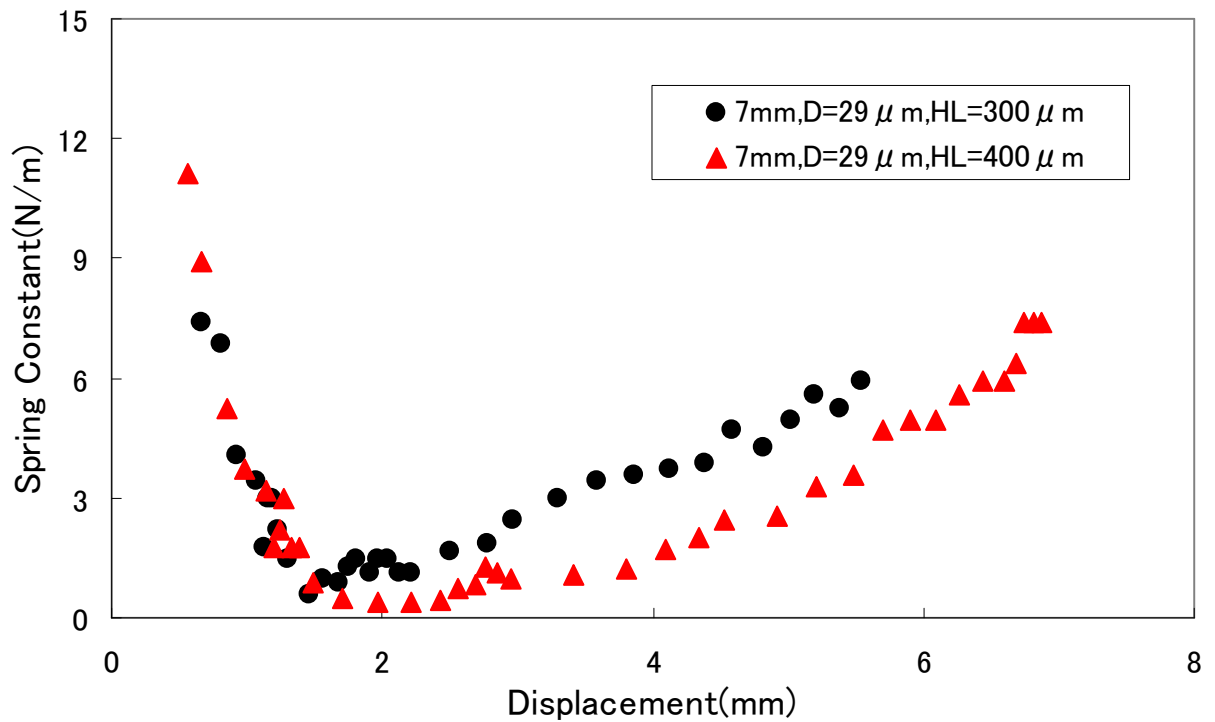


図 5-27 電極厚さ $29[\mu\text{m}]$ ，ヒンジ長 $300[\mu\text{m}]$ と $400[\mu\text{m}]$ のときのバネ定数

② 電極の厚さが $54[\mu\text{m}]$ のときのヒンジの長さ効果

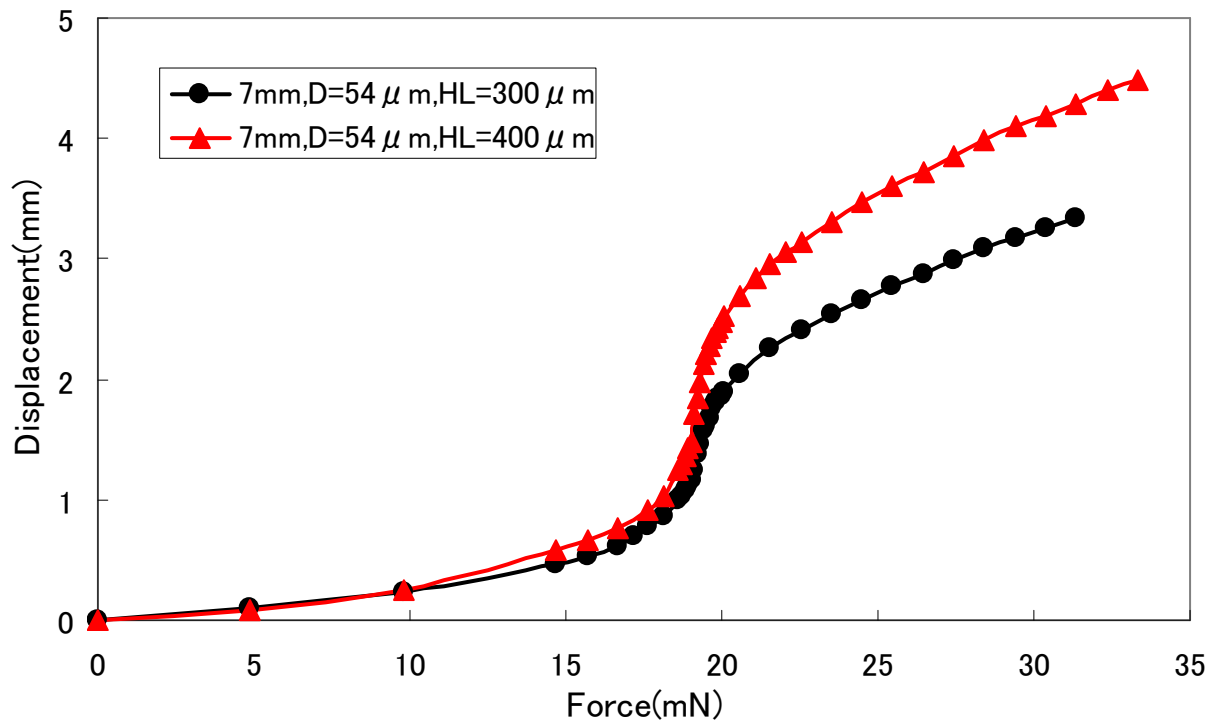


図 5-28 電極厚さ $54[\mu\text{m}]$ ，ヒンジ長 $300[\mu\text{m}]$ と $400[\mu\text{m}]$ のときのバネ特性

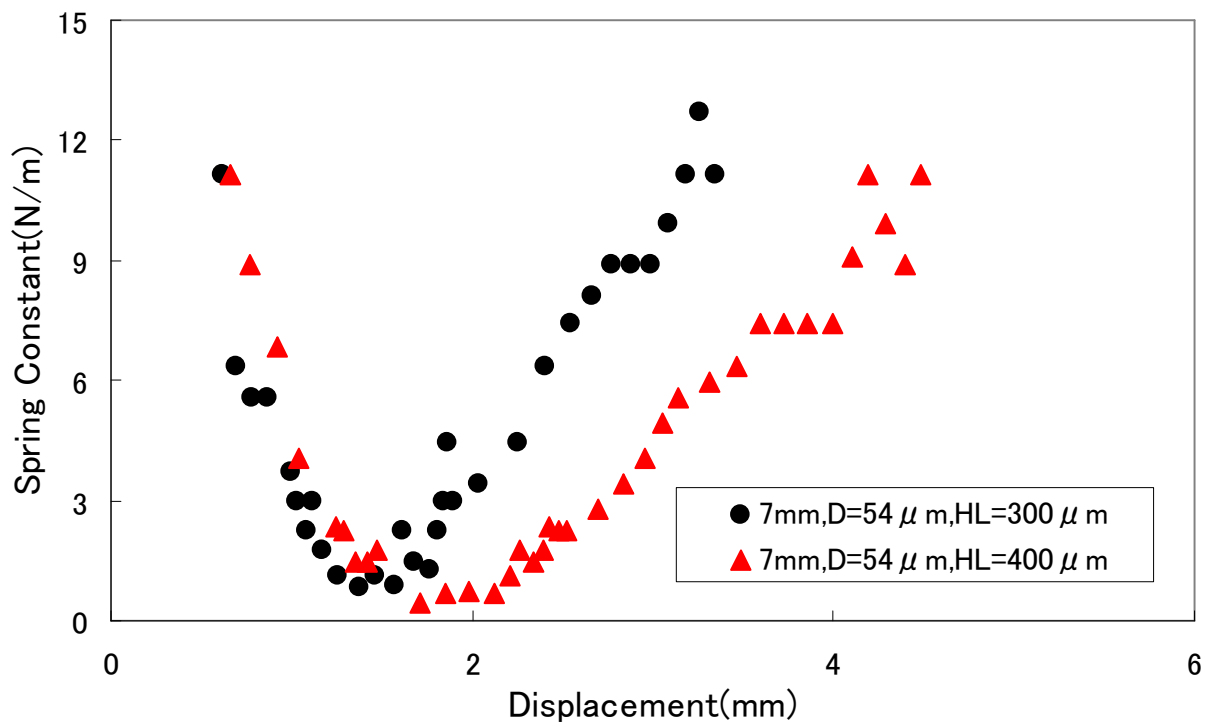


図 5-29 電極厚さ $54[\mu\text{m}]$ ，ヒンジ長 $300[\mu\text{m}]$ と $400[\mu\text{m}]$ のときのバネ定数

5.5 アクチュエータの発生力の測定⁽⁴³⁾

3.3.2 節で述べた発生力の測定方法の手順に従って、表 5-3 に示す三角形状アクチュエータを作製し、大気中でその発生力を測定した。測定結果と理論値の一例を図 5-30 に示す。尚、理論値は 3.3.2 節で述べたように、平行平板に作用する静電力の式を用いて計算したものである。

図 4-20 の四角形状アクチュエータと同様に、三角形状アクチュエータの場合も実験値は理論値に対し、やや小さいものの、理論値の 80[%]程度の発生力が得られている。また、このアクチュエータに約 1150[V]を印加した時、発生力は約 6.3[g/cm²]で、その収縮量は約 1.2[mm]であった。

表 5-3 発生力測定用アクチュエータの主な仕様

電極サイズ	2.1[mm]	有効面積	1.30[mm ²]
電極層数	32	初期ギャップ長	40.0[μm]
電極厚さ	70[μm]	比誘電率	3.2
ヒンジ厚さ	6[μm]	ヤング率	540[MPa]
ヒンジ長さ	300[μm]	ポアソン比	0.458

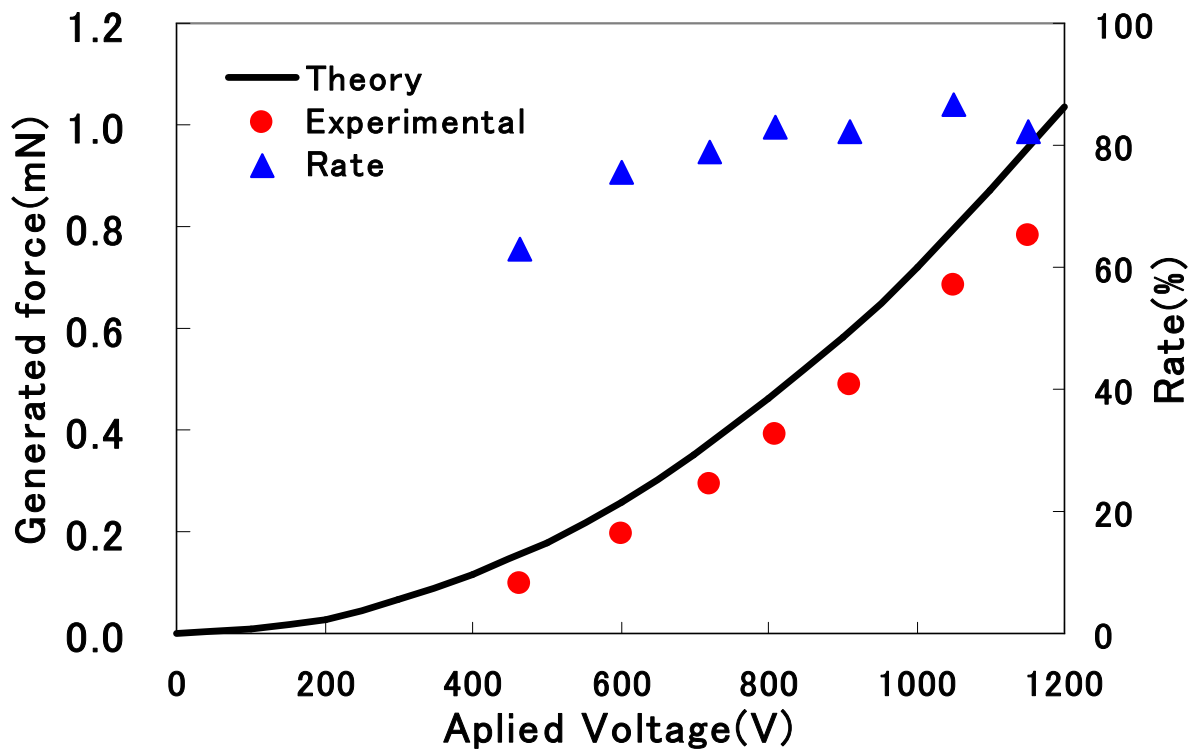


図 5-30 表 5-3 のアクチュエータの発生力の測定例

5.6 バネ特性の規格化と実験結果との比較

5.6.1 電極層数の異なるモデルのバネ特性と規格化

三角形状アクチュエータにおいて、電極数の違いとバネ特性の関係を調査するために、図 5-31 に示すようなアクチュエータモデルにおいて、その電極数を 8 層、11 層、14 層と変化させ、それらのバネ特性を計算した。図 5-32 と図 5-33 にバネ特性の計算結果と規格化されたバネ特性を示す。尚、シミュレーションデータにおける基準点は四角形状アクチュエータの場合と同様にして外力がゼロとなる点を原点とし、モデルの形状は電極サイズ $2.31[\text{mm}]$ 、電極厚さ $54[\mu\text{m}]$ 、ヒンジ厚さ $4[\mu\text{m}]$ 、ヒンジ長さを約 $190[\mu\text{m}]$ とした。

図 5-32 から明らかなように、電極やヒンジ部が同じ形状で同じ材料特性を持つモデルであっても、四角形状アクチュエータと同様に、電極数が変化すると同じバネ特性は得られず、電極数が多くなるほどアクチュエータの変位量は大きくなる。また、図 5-33 から、電極数の違いによって多少のバラツキはあるものの、1 ギャップ当たりのバネ特性として換算した結果はほぼ等しくなり、電極層数の増加とともに計算結果は一致するようになることが分かる。そこで、計算結果を比較検討する場合は、すべてこの規格化されたバネ特性を使用することとする。



図 5-31 三角形状アクチュエータモデルの外形

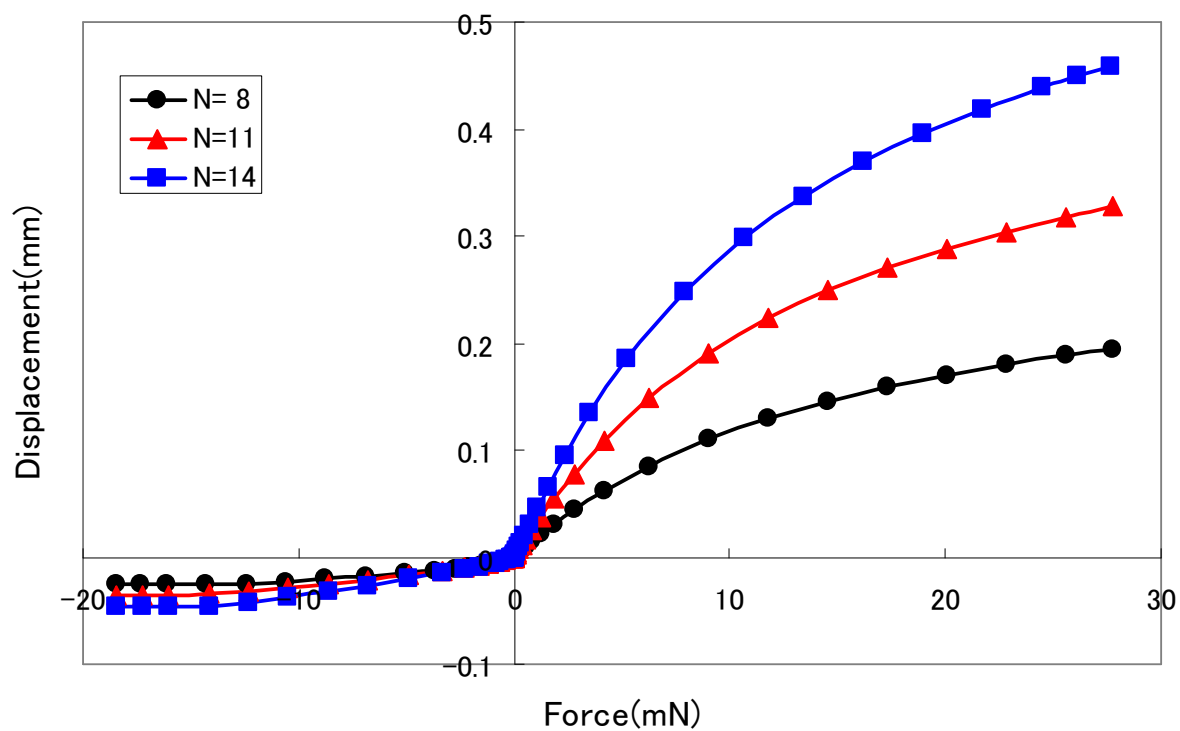


図 5-32 電極層数の異なるアクチュエータモデルのバネ特性

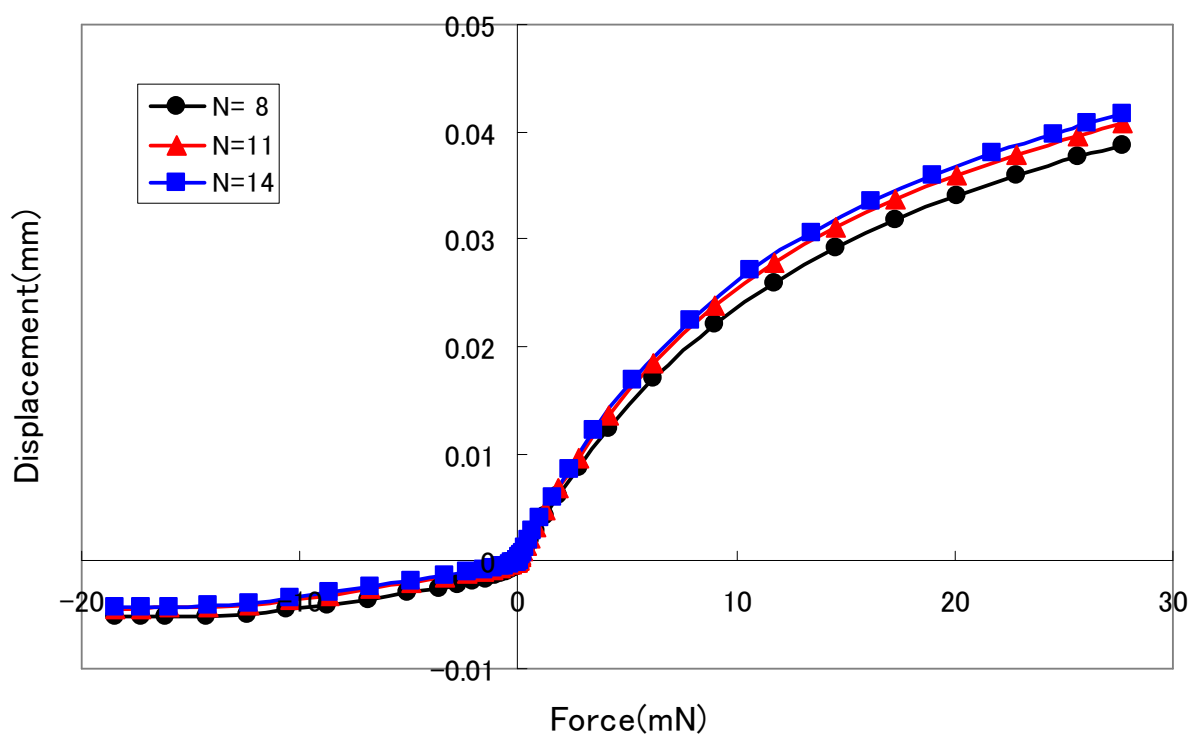


図 5-33 電極層数の異なるアクチュエータモデルの規格化バネ特性

5.6.2 実験結果と計算結果の比較

シミュレーション結果の妥当性を確認するために、図 5-19 のアクチュエータと同じ形状で電極層数が 11 のアクチュエータモデルを作製し、そのバネ特性を計算した。得られた結果から 1 ギャップ当たりの規格化バネ特性を計算し、積層数 40 のアクチュエータのバネ特性を予測し、実験結果と比較した。実験結果はシミュレーション結果と比較しやすいように図 5-34 のように座標軸を平行移動させている。

図 5-34 から明らかなように 11 層モデルのシミュレーション結果から予測した 40 層モデルのバネ特性と実験結果を比較すると、バネ特性全体の傾向において両者は良好な一致を示してしており、三角形状アクチュエータにおいてもシミュレーション結果の妥当性を十分確認することができたといえる。

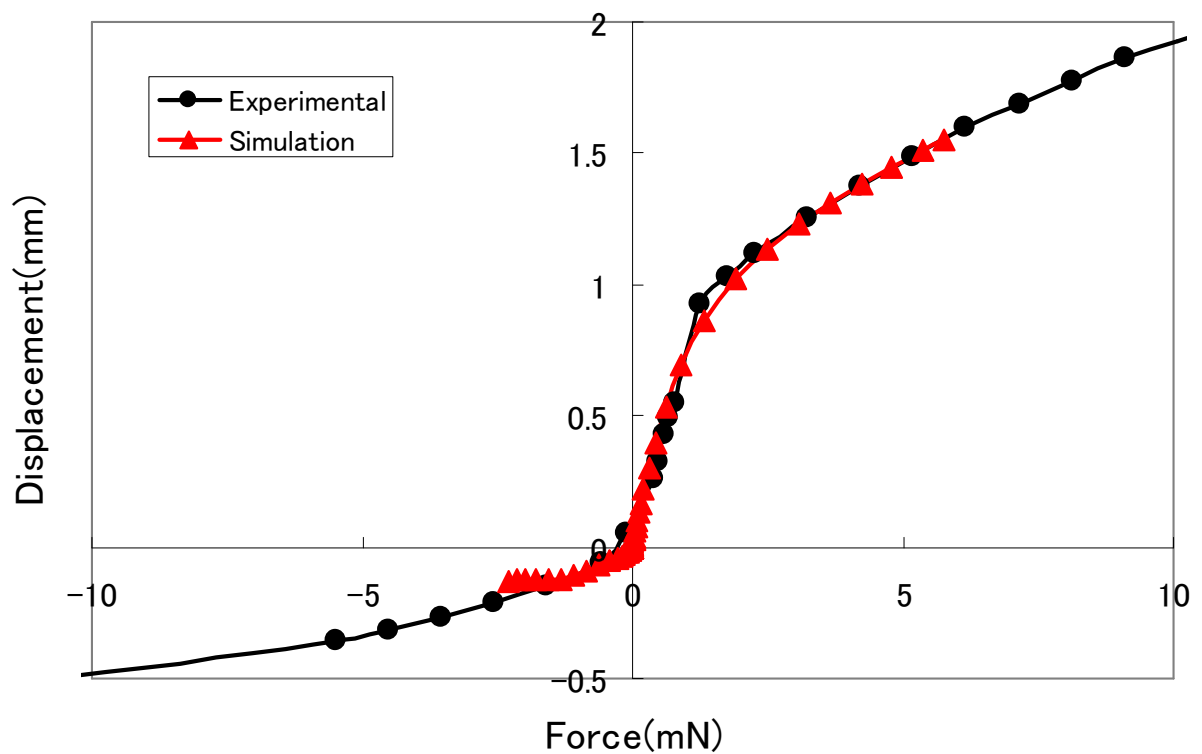


図 5-34 11 層アクチュエータのシミュレーション結果から予測した 40 層のバネ特性と実験結果の比較

5.7 アクチュエータの形状変化とバネ特性⁽⁴³⁾

四角形状アクチュエータの場合と同様に、アクチュエータの電極の厚さ、ヒンジの厚さや長さがアクチュエータのバネ特性とどの程度関連しているかを定量的に調べるために、電極部厚さを $34[\mu\text{m}]$, $44[\mu\text{m}]$, $54[\mu\text{m}]$, ヒンジ厚さを $2[\mu\text{m}]$, $4[\mu\text{m}]$, $6[\mu\text{m}]$, ヒンジ長を $173[\mu\text{m}] \sim 283[\mu\text{m}]$ に変化させたシミュレーションモデルを作製し、それぞれのバネ特性を計算した。尚、アクチュエータの電極形状を一辺 $2.31[\text{mm}]$ の正三角形、電極層数を 11 として計算し、その結果を 1 ギャップ当たりのバネ特性に換算した。以下に主な計算結果について説明する。

5.7.1 電極の厚さ効果

図 5-35 はヒンジの厚さを $4[\mu\text{m}]$ とし、電極の厚さを $34[\mu\text{m}]$, $44[\mu\text{m}]$, $54[\mu\text{m}]$ に変化させたときのバネ特性を示す。また、四角形状アクチュエータと同様に、図 5-35 の曲線の傾きの変化からアクチュエータの変位量に対するバネ定数の値を表したものが図 5-36 である。これらの図から、電極が厚くなるとアクチュエータのストロークが減少し、駆動領域および過負荷領域のバネ定数が大きくなることが分かる。

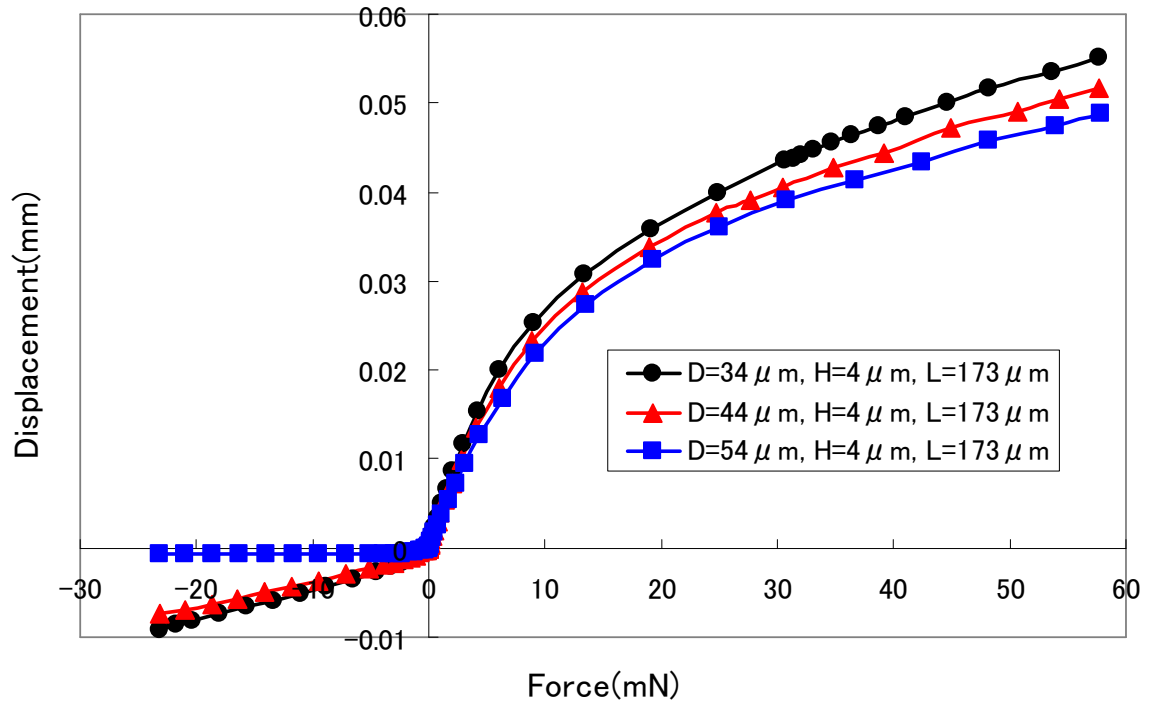


図 5-35 ヒンジの厚さ $4[\mu\text{m}]$ 、長さ $173[\mu\text{m}]$ で電極厚さを変化させたときのバネ特性

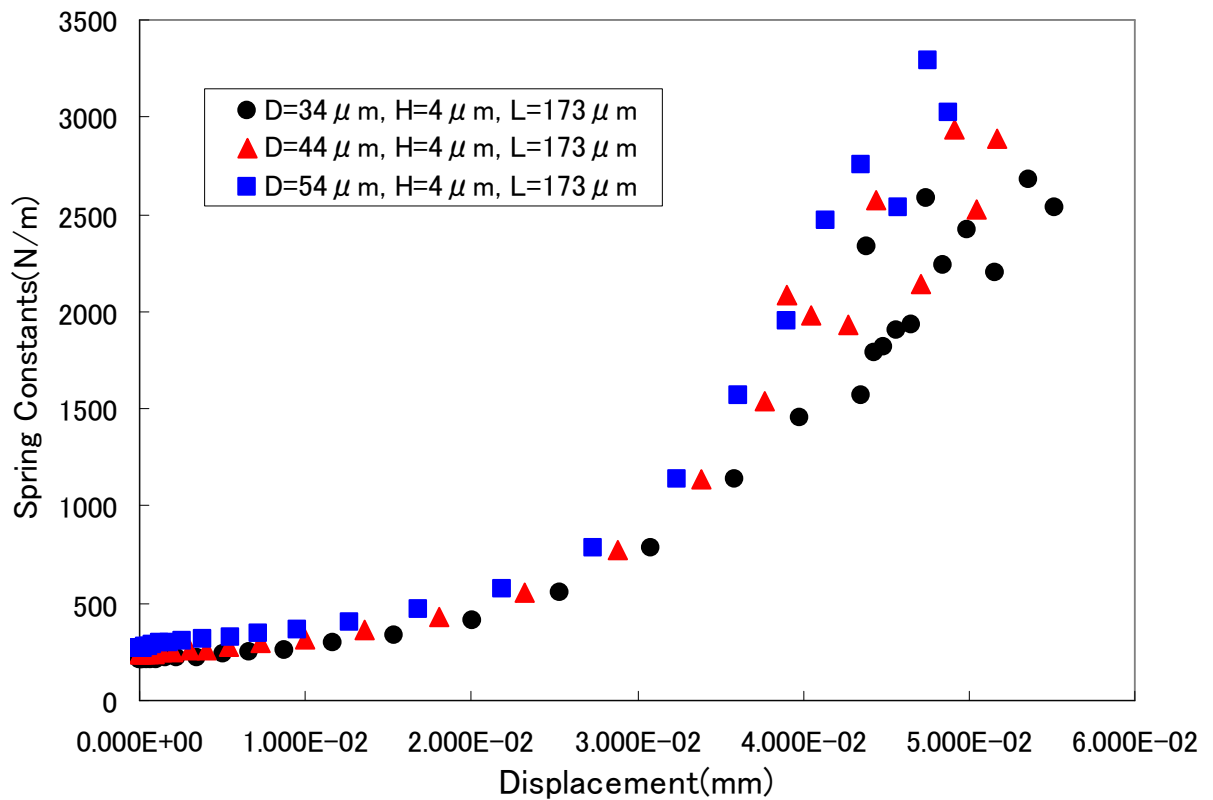


図 5-36 ヒンジの厚さ $4[\mu\text{m}]$ 、長さ $173[\mu\text{m}]$ で電極厚さを変化させたときのバネ定数

5.7.2 ヒンジの厚さ効果

図 5-37 と図 5-38 に電極の厚さを $50[\mu\text{m}]$ ，ヒンジ長を $188[\mu\text{m}]$ とし，ヒンジの厚さを $2[\mu\text{m}]$ ， $4[\mu\text{m}]$ ， $6[\mu\text{m}]$ に変化させたときのバネ特性とバネ定数を示す．

図からヒンジが厚くなってもアクチュエータのストロークが減少し，駆動領域および過負荷領域のバネ定数が大きくなることが分かる．特に，ヒンジが厚くなると駆動領域のバネ特性の劣化は著しく，アクチュエータの収縮特性を良くするためには，ヒンジを薄くすることが最も重要であることが明らかとなった．

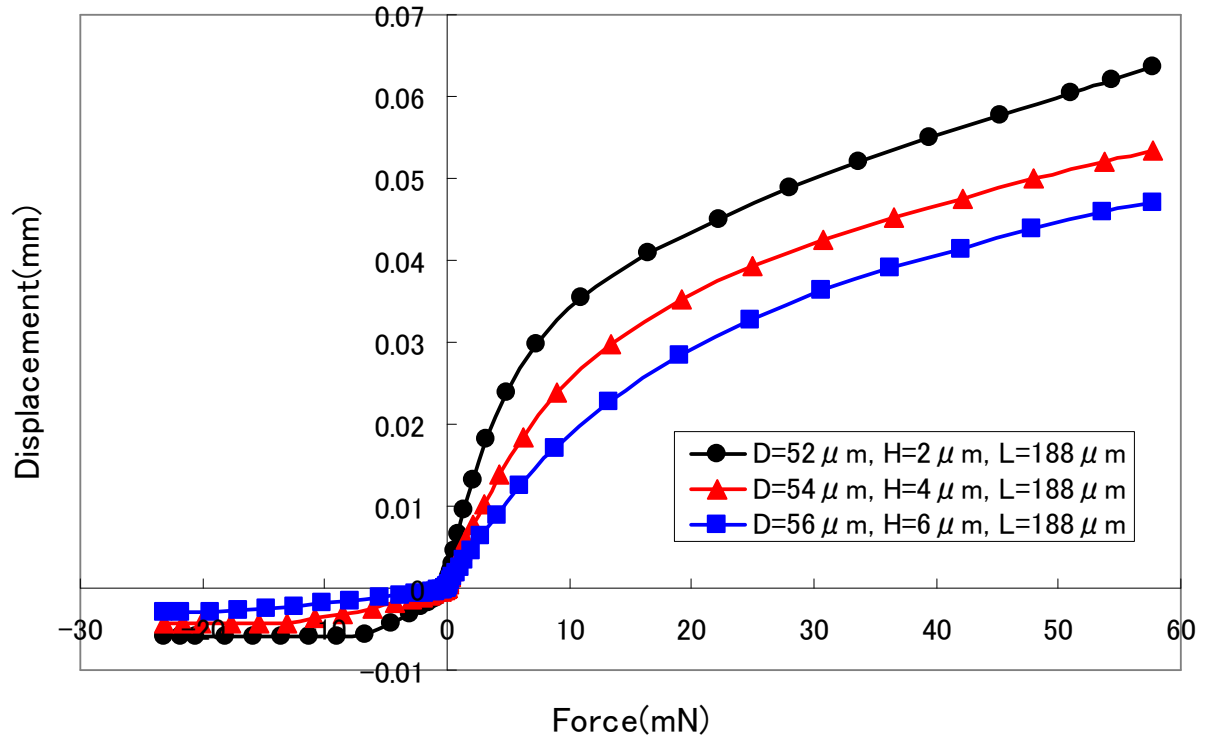


図 5-37 電極厚さ $50[\mu\text{m}]$ ，ヒンジ長 $188[\mu\text{m}]$ でヒンジの厚さを変化させたときのバネ特性

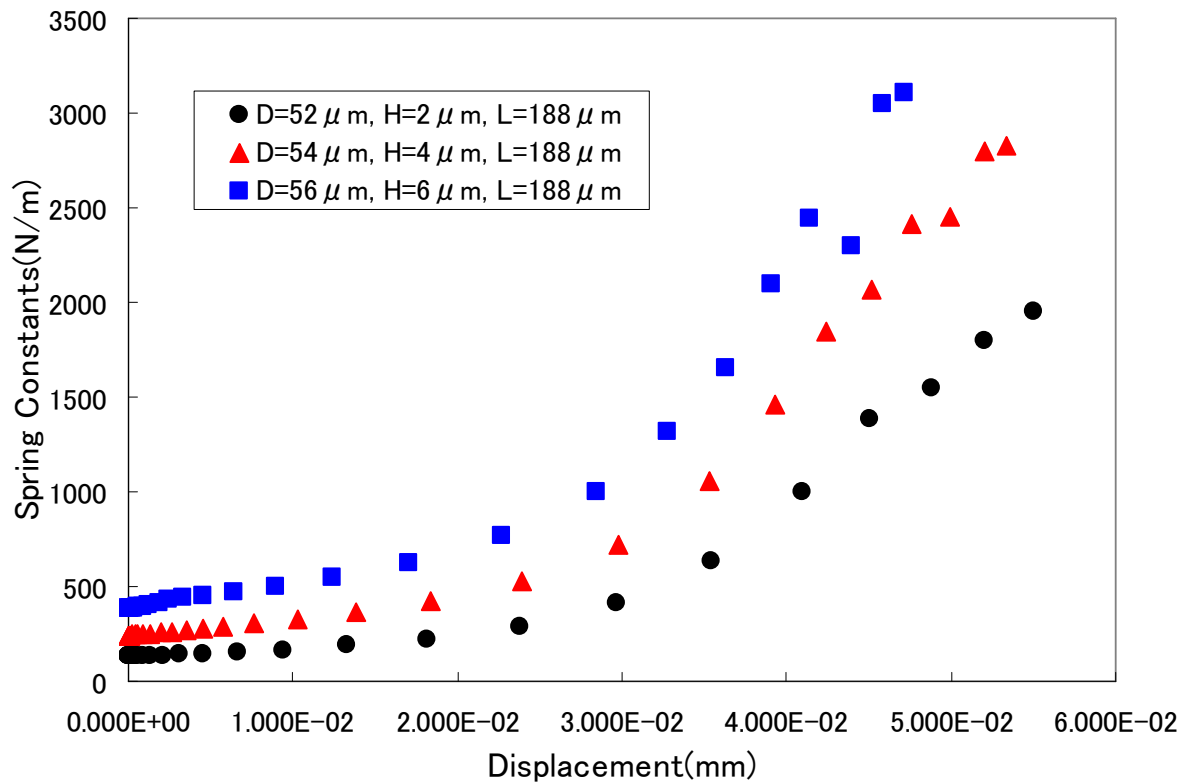


図 5-38 電極厚さ $50[\mu\text{m}]$ ，ヒンジ長 $188[\mu\text{m}]$ でヒンジの厚さを変化させたときのバネ定数

5.7.3 ヒンジの長さ効果

図 5-39 と図 5-40 に電極の厚さを $54[\mu\text{m}]$, ヒンジの厚さを $4[\mu\text{m}]$ とし, ヒンジの厚さを $188[\mu\text{m}]$, $236[\mu\text{m}]$, $283[\mu\text{m}]$ に変化させたときのバネ特性とバネ定数を示す.

図からヒンジが長くなると, アクチュエータのストロークが増加し, 駆動領域および過負荷領域のバネ定数が小さくなることが分かる. 特に, ヒンジが長くなると過負荷領域のバネ特性の劣化は著しく, アクチュエータの発生力を維持するためには, ヒンジ長を余り長くできず, アクチュエータを設計する段階でストロークと発生力を設定した後は, ヒンジの長さを変化させてはならないことが分かった.

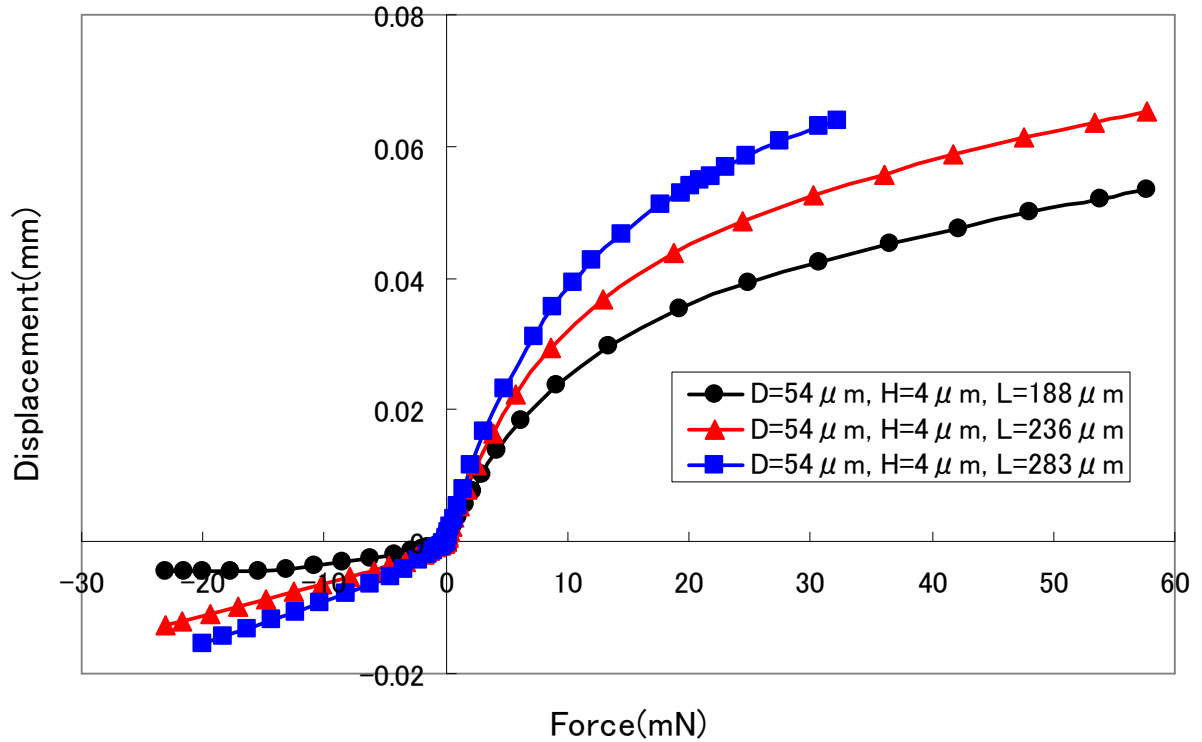


図 5-39 電極の厚さ $54[\mu\text{m}]$ ，ヒンジの厚さ $4[\mu\text{m}]$ で，ヒンジ長を変化させたときのバネ特性

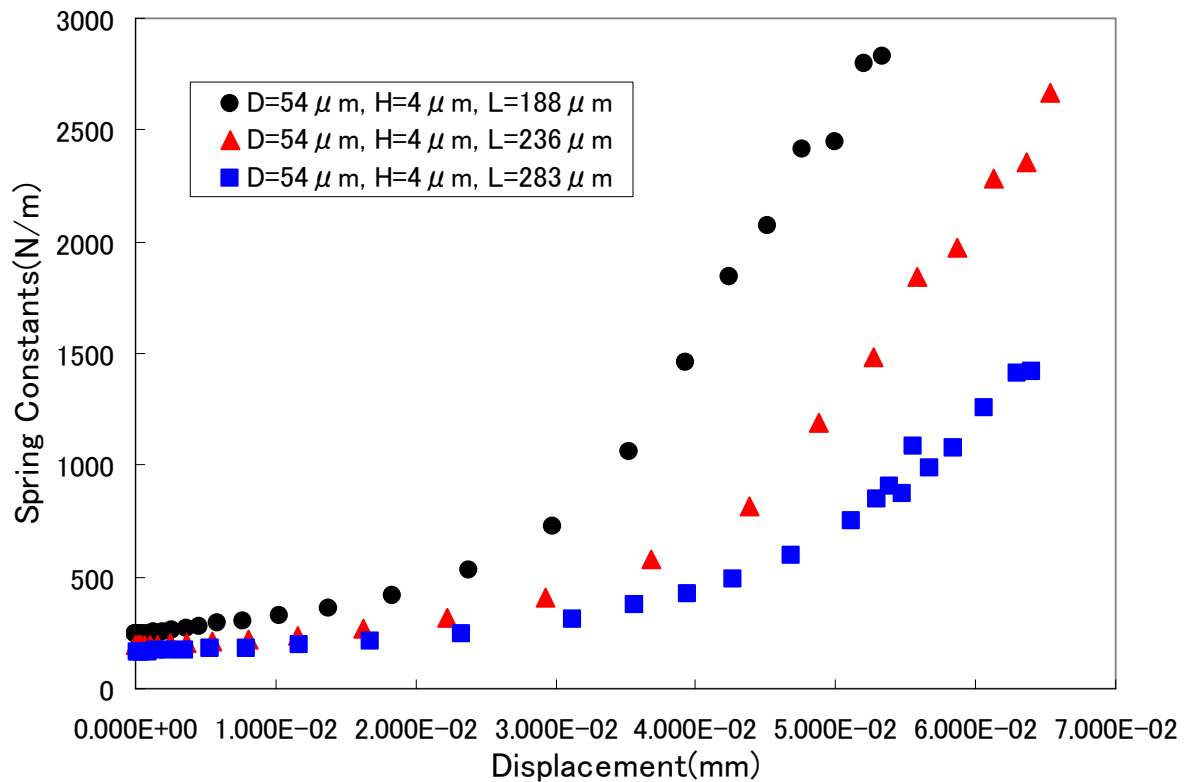


図 5-40 電極の厚さ $54[\mu\text{m}]$ ，ヒンジの厚さ $4[\mu\text{m}]$ で，ヒンジ長を変化させたときのバネ定数

5.8 四角形状および三角形形状アクチュエータの比較

四角形状アクチュエータと三角形形状アクチュエータのバネ特性を比較するために、同じ幅のリボン状フィルムを使用したアクチュエータモデルを作製し、これらのバネ特性計算結果から規格化バネ特性と求め、これらを比較した。図 5-41 にバネ特性を、図 5-42 にバネ定数を示す。尚、アクチュエータの形状は、電極部厚さ $54[\mu\text{m}]$ 、ヒンジ厚さ $4[\mu\text{m}]$ 、ヒンジ長 $188[\mu\text{m}]$ で、電極サイズは一辺 $2[\text{mm}]$ の正方形と $2.31[\text{mm}]$ の正三角形とした。

図 5-41 と図 5-42 から、四角形状アクチュエータは柔らかく伸びやすい構造であること、逆に三角形形状アクチュエータは硬く伸びにくい構造であること、バネ定数の違いは 10 倍以上であることが分かる。このバネ特性の違いは、図 5-43 と図 5-44 に示す四角形状および三角形形状アクチュエータの変形の様子からある程度説明できる。

アクチュエータに負荷がかかり伸ばされた場合、四角形状アクチュエータも三角形形状アクチュエータも電極の 2 か所が上下の電極に接触した状態で変形する。このとき、四角形状アクチュエータは図 5-43(a) のように、2 点が拘束され、フリーな 2 点は左右のヒンジから反対方向に引っ張られるため、電極は図 5-43(b) のようにねじられる。そのため、電極は大きく変形し、アクチュエータの変位量は電極の変位量とヒンジの変位量を加えたものとなるため、バネ定数は低下することになる。

一方、三角形形状アクチュエータも図 5-44(a) のように 2 点が拘束されるが、フリーな点は 1 点のみとなる。この点を中心として左右のヒンジが上下に引っ張られるため、この点に大きなせん断応力が発生する。その結果、電極に大きな応力が作用し、電極面が図 5-44(b) のように波状に変形させられる。しかし、このとき、電極はほぼ水平な状態を保っているため、大きな変位量は発生しない。すなわち、アクチュエータの変位量はヒンジの変位量だけであるためバネ定数は大きくなる。

尚、ヒンジを極めて薄く作製することができれば、駆動領域のバネ定数はヒンジの厚さに依存するように改善することができるが、ヒンジが厚いと電極の厚さの影響も加わったバネ定数となるため、バネ特性の変化はより複雑になると考えられる。

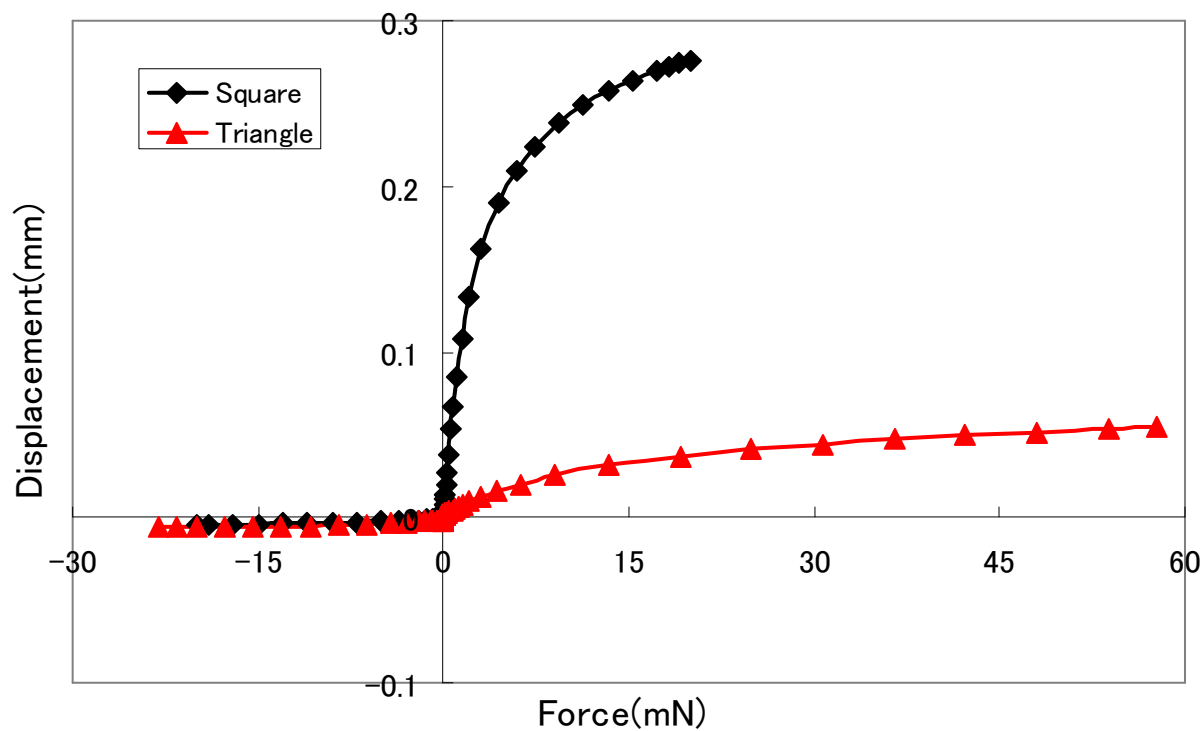


図 5-41 2[mm]幅の四角形状および三角形状アクチュエータのバネ特性

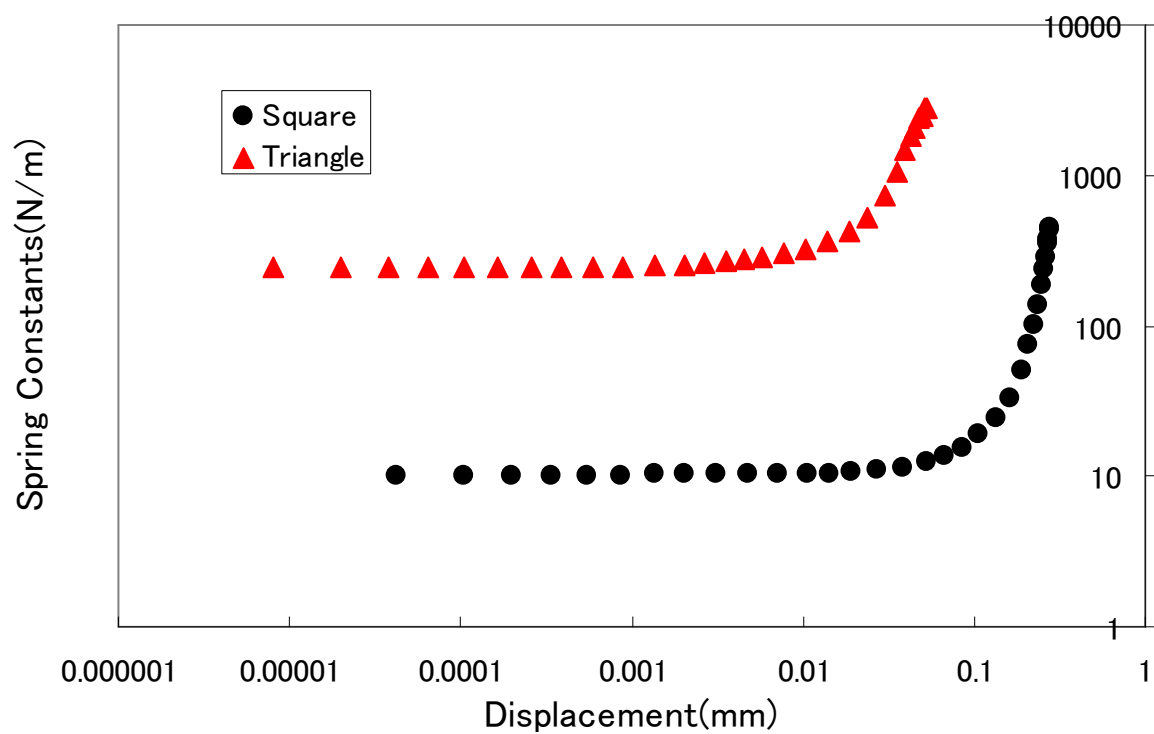


図 5-42 2[mm]幅の四角形状および三角形状アクチュエータのバネ定数

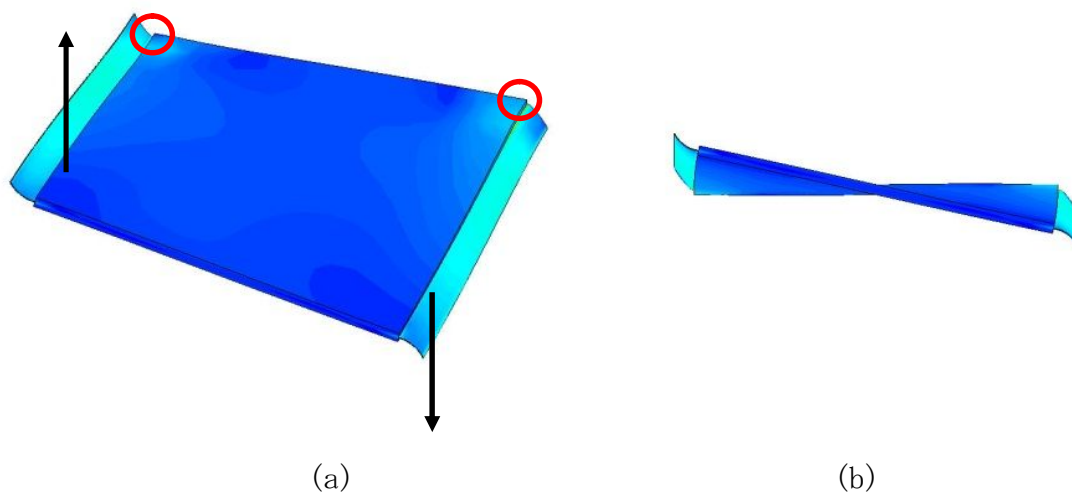


図 5-43 四角形状アクチュエータの変形

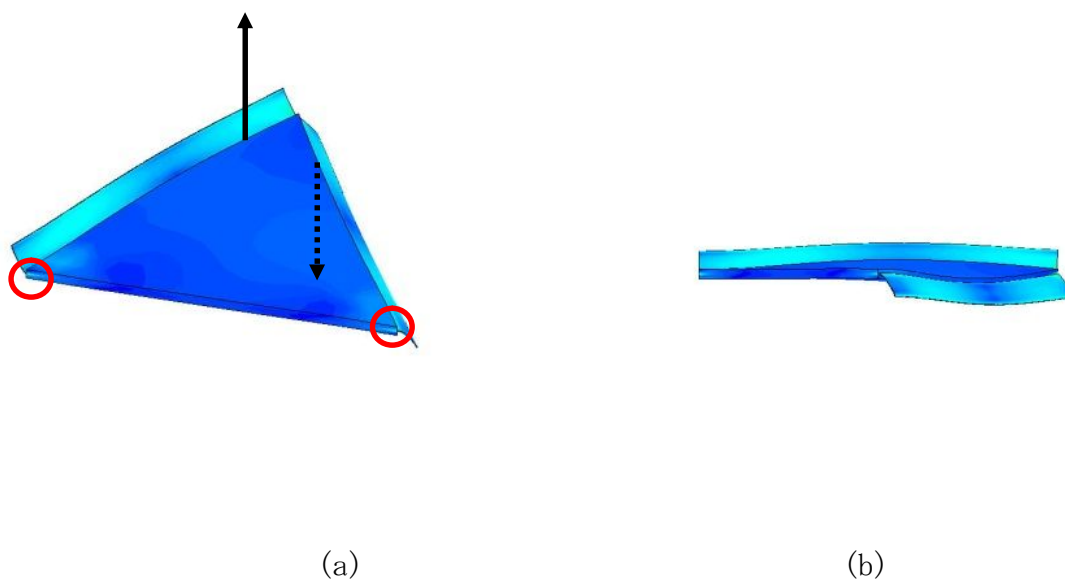


図 5-44 三角形状アクチュエータの変形

5.9 本章のまとめ

本章では、まず、厚薄構造を持たないリボン状フィルム、すなわち、導電性薄膜フィルムのみを用いたアクチュエータの作製方法について述べた。この方法は単にフィルムを折り込み、その後、適当な熱処理を施すだけで求めるバネ定数比を持ったアクチュエータを作製することが可能な方法である。しかし、熱処理によって改善できるのは駆動領域のバネ特性だけであるため、このままでは使用箇所や使用条件はかなり限定されたものになる。

また、レーザ加工機を用いたリボン状フィルムの作製方法は、必要な積層数とヒンジ長を簡単に制御することができ、非常に有用な方法であると考えられるが、リボン状フィルムを作製するプロセスが複雑で、生産効率も高くない。今後は、後述するレーザアブレーションを用いた方法やフォトリソグラフィを活用したリボン状フィルムの作製方法を積極的に進めていく必要がある。

アクチュエータのバネ特性に関しては、積層型四角形状静電アクチュエータの場合と同様に、実験結果と計算結果は極めて良好な一致を示し、そのことからシミュレーションの妥当性を十分検証することができた。積層型四角形状静電アクチュエータと積層型三角形形状静電アクチュエータのバネ特性には大きな違いがあるため、一概に比較することはできないが、アクチュエータの形状変化とバネ特性の変化の対応関係においては、両者共通する結果が得られた。すなわち、電極を厚くすることによって過負荷領域のバネ特性を改善することができるが、一方で駆動領域のバネ特性を劣化させてしまうこと、また、ヒンジを薄くすると駆動領域のバネ特性は大きく改善されること、ヒンジを長くするとアクチュエータのストローク長は増大するが、過負荷領域のバネ特性を大きく劣化させてしまうことなどである。

さらに、積層型四角形状静電アクチュエータと積層型三角形形状静電アクチュエータを比較すると、前者の構造は柔軟であるため、駆動領域の特性が優れており、過負荷領域の特性が劣っている。逆に、後者の構造は頑強であるため、駆動領域の特性が劣っており、過負荷領域の特性に優れている。

以上のことから、積層型三角形形状静電アクチュエータを使用する場合には、ヒンジ部分を柔軟な構造にしていく工夫が不可欠であることが明らかとなった。

第6章 アクチュエータの多層化と微細化

第 6 章 アクチュエータの並列化と微細化

6.1 緒言

本章では、最初にアクチュエータのストロークを増加させるために必要な多層化について述べる．具体的には、2[mm]幅のフィルムを用いた 100 層を超えるアクチュエータに関して、そのリボン状フィルムの作製方法と駆動実験の結果について示す．次に、アクチュエータの発生力を増加させるために必要な並列化に関して、2 個のアクチュエータを並列化した場合のバネ特性の測定結果と計算結果の例を述べる．最後にこのアクチュエータを人工筋肉に応用する際に必要不可欠となる微細化技術に関する事例として、シミュレーションに基づく微細化の効果について紹介する．

6.2 100 層を超えるアクチュエータ^{(44) (45)}

6.2.1 リボン状フィルムの作製方法

(1) 導電性薄膜

100 層を超えるアクチュエータの導電性薄膜にも、東京フィルム加工株式会社製の PET-Cu-PET の 3 層フィルムを使用している．このフィルムの幅は 2[mm]で、上下の PET フィルムの厚さは 4.5[μm]、中間層の Cu 薄膜は厚さ 0.2[μm]の蒸着層で、その厚さは接着層も含めて 12[μm]程度とやや厚いヒンジ部分となっているが、作製したアクチュエータは四角形状アクチュエータのため、駆動領域で柔軟な特性を実現している．

(2) 厚薄構造の作製方法

リボン状フィルムの厚薄構造において、厚い電極部分は図 6-1 に示すようなアルミ板を加工した治具を用いて作製した．この治具には、図 6-1 の右端に示す幅 2[mm]の導電性薄膜を通すための溝 10 本と下端に示す幅 2[mm]のヒートシール付 PET フィルムを通すための溝 50 本が等間隔に作られており、両方の溝が交差する部分に最大 500 (= 10×50) 個の厚い電極部を形成できるようになっている．今回使用した PET フィルムの厚さは 25[μm]と 50[μm]であるため、ヒンジ部分の厚さをほぼ 10[μm]とすると、ヒンジ部に対して電極部は、ほぼ 6 倍と 11 倍の厚さとなる．

図 6-1 に示すように、治具は厚さ 0.5[mm]のアルミニウム板で作製されているため、図 6-2 に示すように左右の接合面をずらせた螺旋形状で使用すると非常に多くの電極部を同時に形成することができる．すなわち、図 6-2 (a)のように上下のずれを 1 段とすると 500 個の電極部を持つリボン状フィルム 1 本を、また、図 6-2 (b)のように上下のずれを 2 段とすると 250 個の電極部を持つリボン状フィルムを同時に 2 本作製することができる．今回は 250 個の電極部を持つリボン状フィルムを 2 本使った 500 層ア

第6章 アクチュエータの並列化と微細化

クチュエータを試作したので、その具体的な作業手順を以下に示す。

- ① 図 6-1 の治具を図 6-2(b)のように上下のずれを 2 段にしてセットする。
- ② 治具にある程度の力が加わっても変形しないように治具を円筒状パイプにしっかりと固定する。
- ③ PET フィルムを通す溝に、幅 2[mm]の PET フィルムをヒートシール面が上面となるようにセットし、固定する。
- ④ 導電性薄膜を通す螺旋状の溝に沿って 1 本目の薄膜をしっかりと巻き付ける。
- ⑤ ④と同様に、2 本目の薄膜をしっかりと巻き付け、これらを固定する。
- ⑥ PET フィルムを通す溝に、ヒートシール面が下面となるように、幅 2[mm]の PET フィルムをセットし、固定する。
- ⑦ 導電性薄膜と PET フィルムがしっかりと密着するように、別のフィルムなどを用いて、両者を固定する。
- ⑧ 接着面を圧着し、大気中 85℃で 2 時間程度熱処理する。
- ⑨ 治具からフィルムを取り出し、必要な部分を切り出す。

上記の作業手順を模式的に示したものが図 6-3 で、治具に PET フィルムと導電性薄膜をセットした様子を図 6-4 に示す。

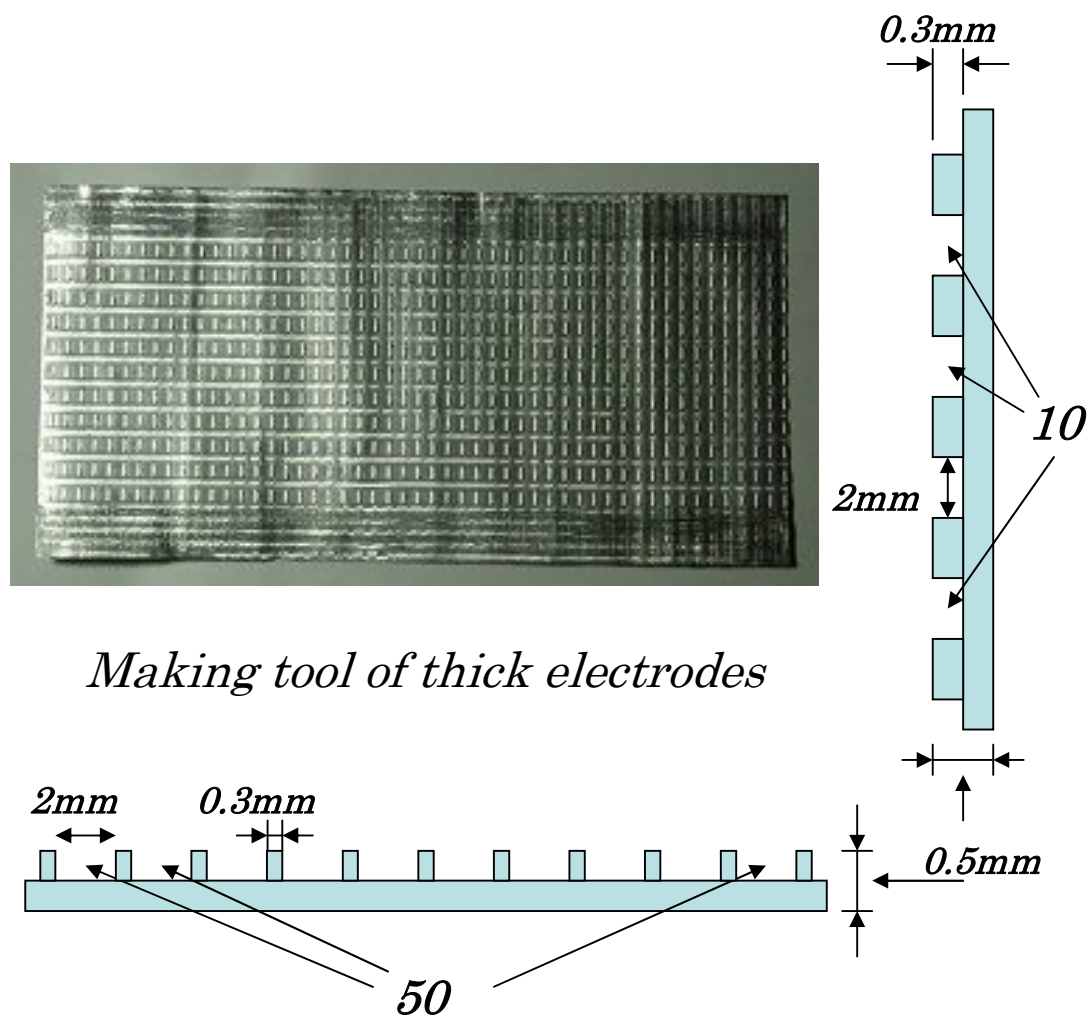
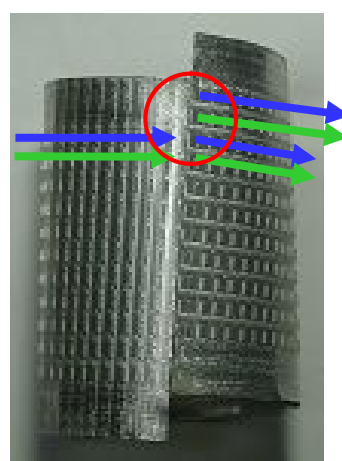


図 6-1 多くの厚い電極部を作製するための治具



(a) 500 層 1 本作製用



(b) 250 層 2 本作製用

図 6-2 治具の使用法の例

第6章 アクチュエータの並列化と微細化

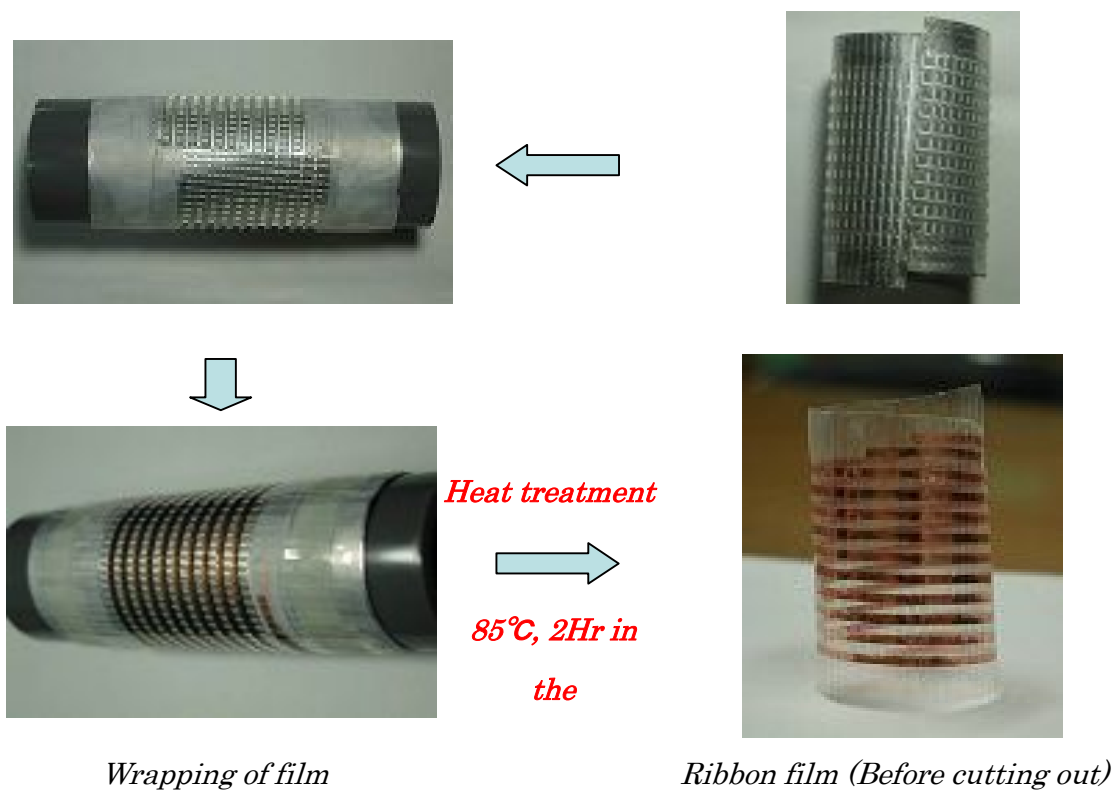


図 6-3 リボン状フィルムの作製手順

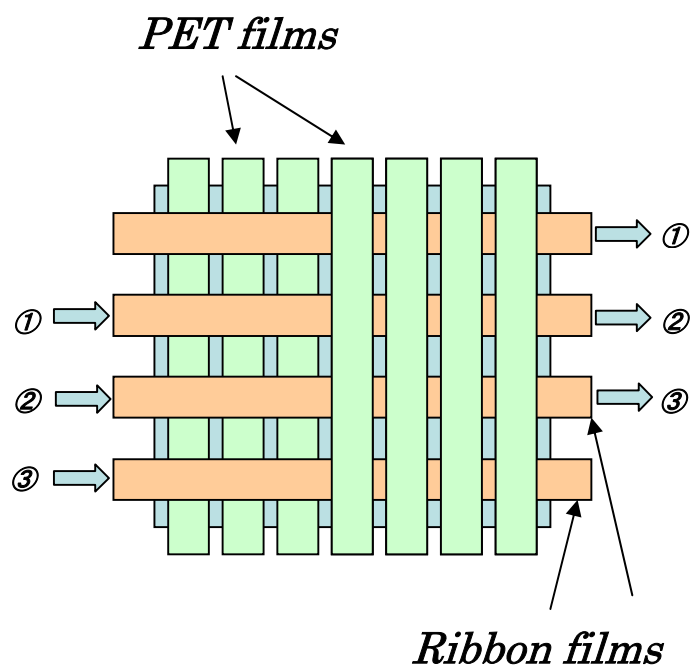


図 6-4 PET フィルムとリボン状フィルム

(3) 厚薄構造の作製方法

図 6-5 に今回試作した厚薄構造を有する 250 層のリボン状フィルムの試作例を，図 6-6 にこれらを用いて作製したアクチュエータの外形を示す．図 6-6(a)のアクチュエータの電極部の厚さは $110[\mu\text{m}]$ で，自然長で全長約 $9[\text{cm}]$ ，完全収縮時で約 $5.5[\text{cm}]$ ，駆動範囲（ストローク）約 $3.5[\text{cm}]$ である．また，この他に，電極部の厚さが $62[\mu\text{m}]$ で，自然長で全長約 $6[\text{cm}]$ ，完全収縮時で約 $4[\text{cm}]$ ，駆動範囲（ストローク）約 $2[\text{cm}]$ のアクチュエータを試作し，次節のように駆動実験を行った．

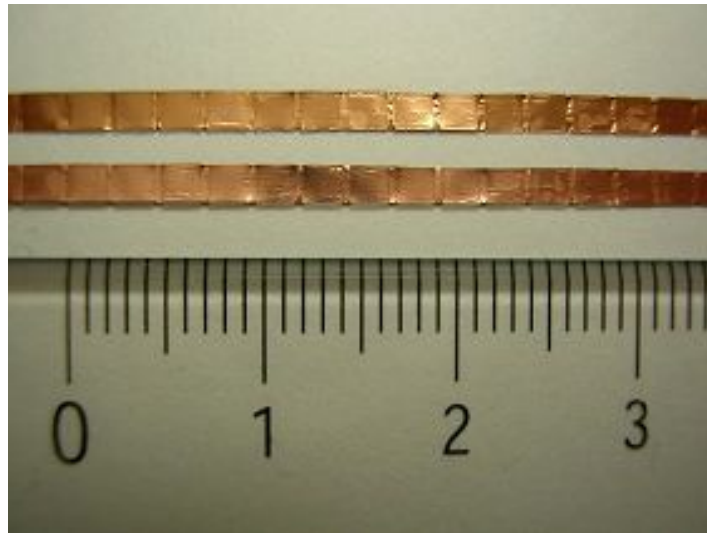
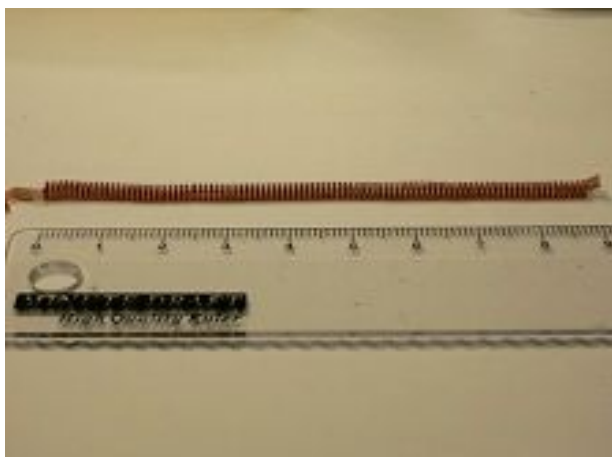


図 6-5 リボン状フィルムの外形



(a) アクチュエータの外形

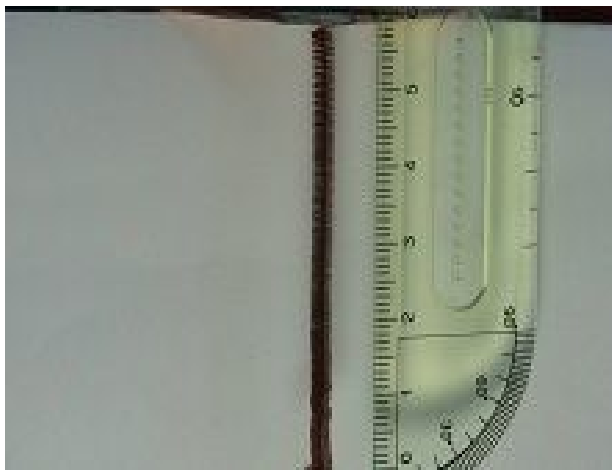


(b) (a)の拡大図

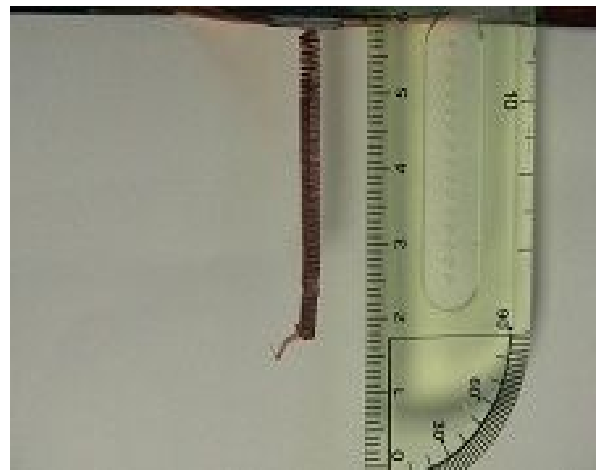
図 6-6 試作した 500 層アクチュエータ

6.2.2 アクチュエータの駆動実験

試作したアクチュエータの動作を確認するために、図 6-7 に示すように、大気中で 500 層アクチュエータの駆動実験を行った。図 6-7(a)は電圧印加前、図 6-7(b)は 600[V]の電圧を印加した場合のアクチュエータを示す。図から明らかなように、全長 6[cm]が 4[cm]、すなわち、2[cm]の長いストロークが得られることを確認した。尚、このアクチュエータの電極厚さは 62[μm]、ヒンジ厚さは 12[μm]で、そのバネ特性は図 4-13 および図 4-14 に示したように、駆動領域のバネ定数 0.71[N/m]、過負荷領域のバネ定数 2.5[N/m]、バネ定数比 3.5 倍である。また、図 4-20 に示したように 600[V]の電圧を印加したとき、収縮開始時で約 6.3[g/cm²]、完全収縮時で約 23[g/cm²]の発生力を得ることができた。



(a) 電圧印加前



(b) 600[V]印加

図 6-7 500 層アクチュエータの無負荷駆動テスト結果

6.3 2 個のアクチュエータの並列化

6.3.1 アクチュエータの回転方向の違いと並列化の効果

ヒンジが短い積層型静電アクチュエータに伸長力が作用すると、ヒンジの内側部分と電極端部の接触に伴う反力が発生するため、アクチュエータは一定方向に回転するようになる。このとき、その回転方向は2本のリボン状フィルムの折り込み方の違いによって異なったものとなる。

図 6-8 のような方向でリボン状フィルムを折り込むと、図 6-9 に示すように、アクチュエータの上部電極の法線ベクトルの方向に対して、右回転するアクチュエータとなる。

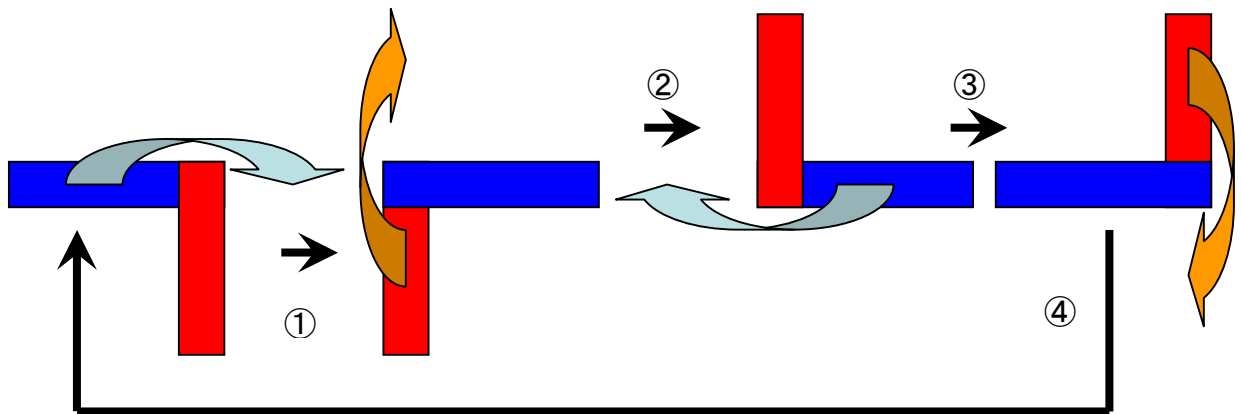


図 6-8 右回転アクチュエータのリボン状フィルムの折り方

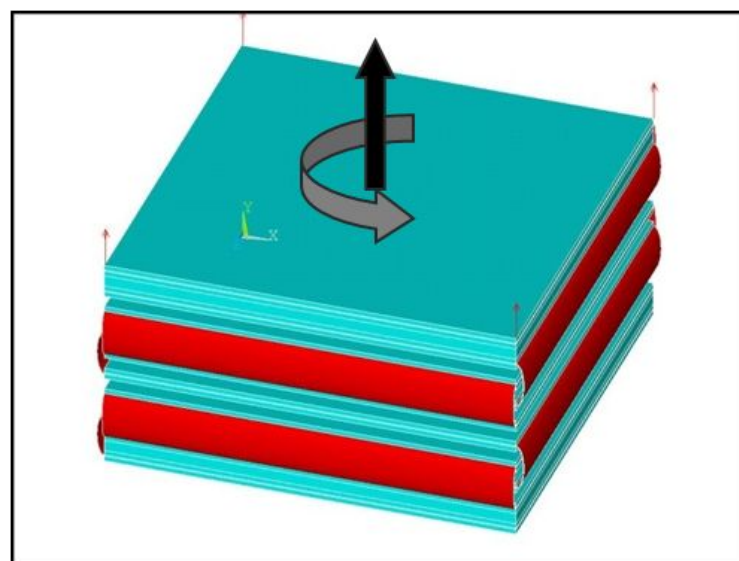


図 6-9 右回転アクチュエータ

逆に，図 6-10 のような方向でリボン状フィルムを折り込むと，図 6-11 のような左回転するアクチュエータとなる．そこで，2 個のアクチュエータを並列化する場合，同じ方向に回転するアクチュエータ同士を組み合わせる場合と異なる方向に回転するアクチュエータ同士を組み合わせる場合のバネ特性に違いが現れるかどうかを調査した．

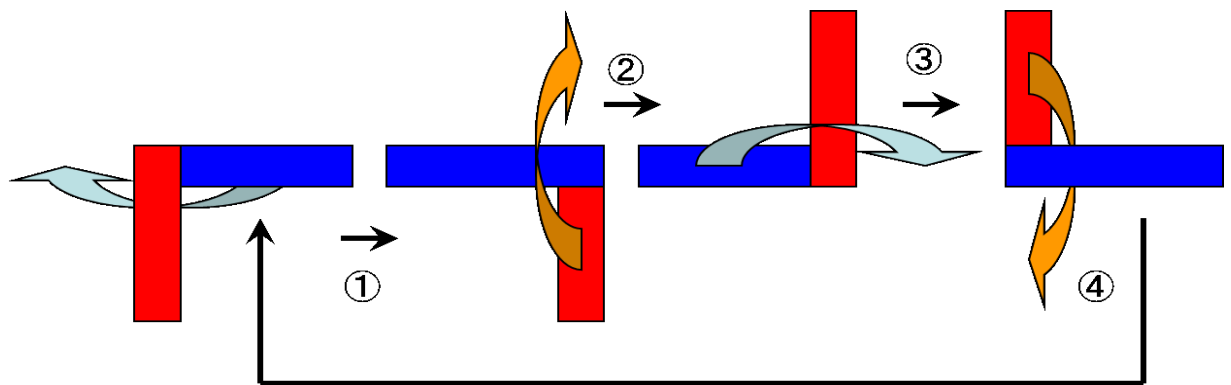


図 6-10 左回転アクチュエータのリボン状フィルムの折り方

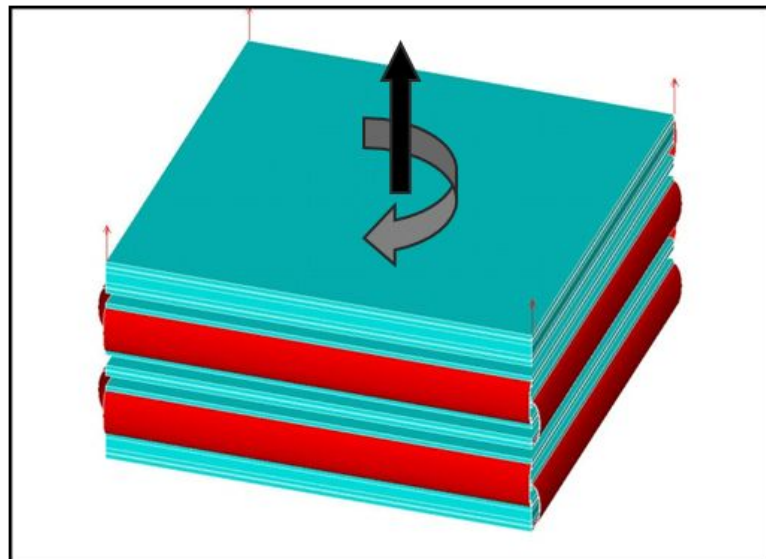
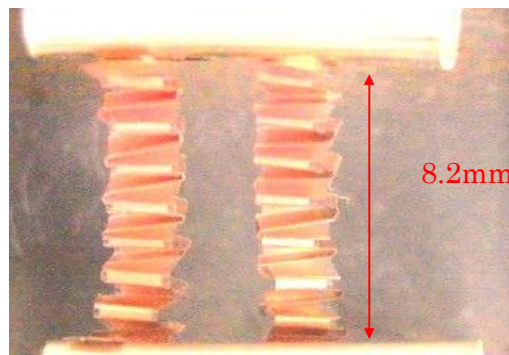
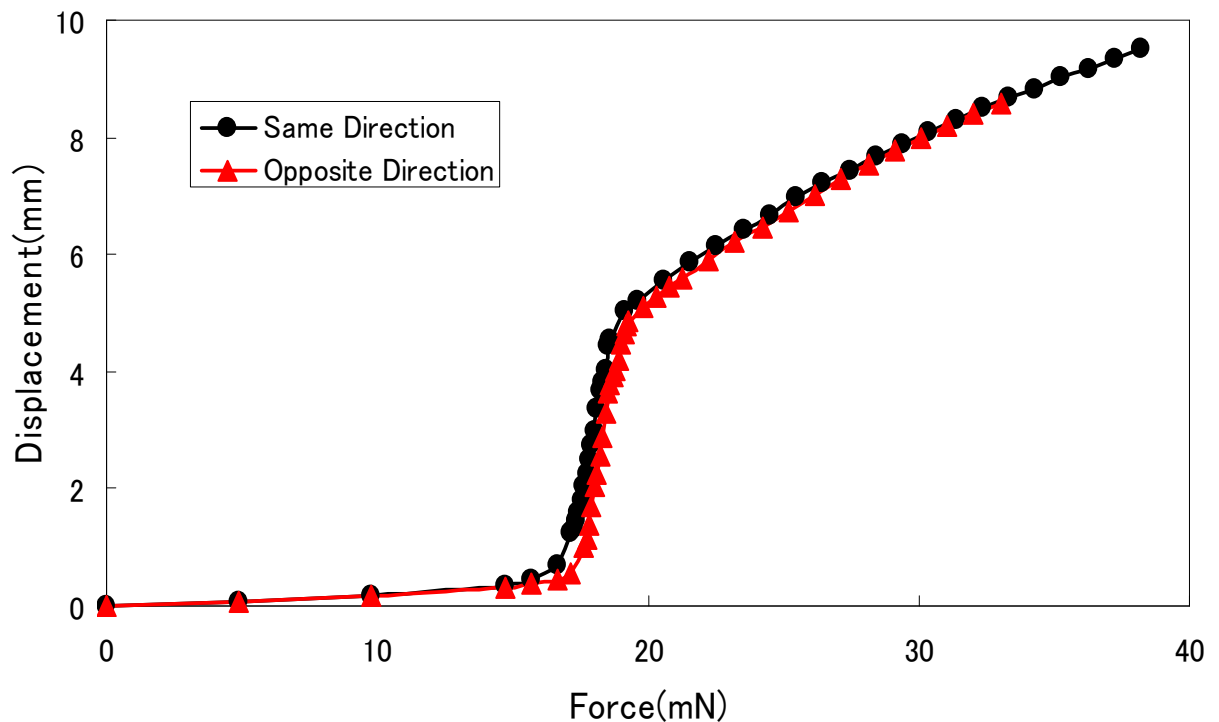


図 6-11 左回転アクチュエータ

6.3.2 バネ特性の測定結果

(1) ヒンジが長い場合

図 6-12 に電極層数 32, 電極サイズ 2[mm], 電極厚さ 56[μm], ヒンジ厚さ 6[μm], ヒンジ長さ 500[μm]のアクチュエータを 2 個並列化したときの外形を, 図 6-13 にそのバネ特性の測定結果を示す. 図 6-13 より, 同方向に回転するアクチュエータ同士を組み合わせた場合と逆方向に回転するアクチュエータ同士を組み合わせた場合のバネ特性にほとんど違いがないことが分かった. これはヒンジが長いと, ヒンジ部と電極部の接触に伴う反力が発生せず, アクチュエータ相互に影響を及ぼす力が発生しないことが原因であると考えられる.

図 6-12 ヒンジ長が 500[μm]の並列化アクチュエータの外形図 6-13 ヒンジ長が 500[μm]のアクチュエータの並列化

(2) ヒンジが短い場合

図 6-14 は図 6-12 のアクチュエータのヒンジ長のみを $500[\mu\text{m}]$ から $300[\mu\text{m}]$ に変化した場合のアクチュエータの外形を，図 6-15 はそのバネ特性の測定結果を示す．図から，ヒンジ長を $500[\mu\text{m}]$ から $300[\mu\text{m}]$ にすることによって，アクチュエータの自然長は約 30%減少していること，また，アクチュエータの組み合わせによってバネ特性に違いが現れることが分かる．

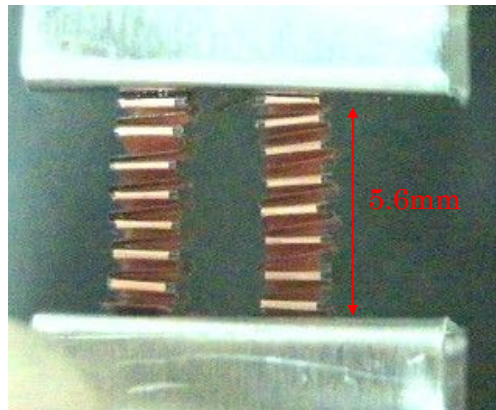


図 6-14 ヒンジ長が $300[\mu\text{m}]$ の並列化アクチュエータの外形

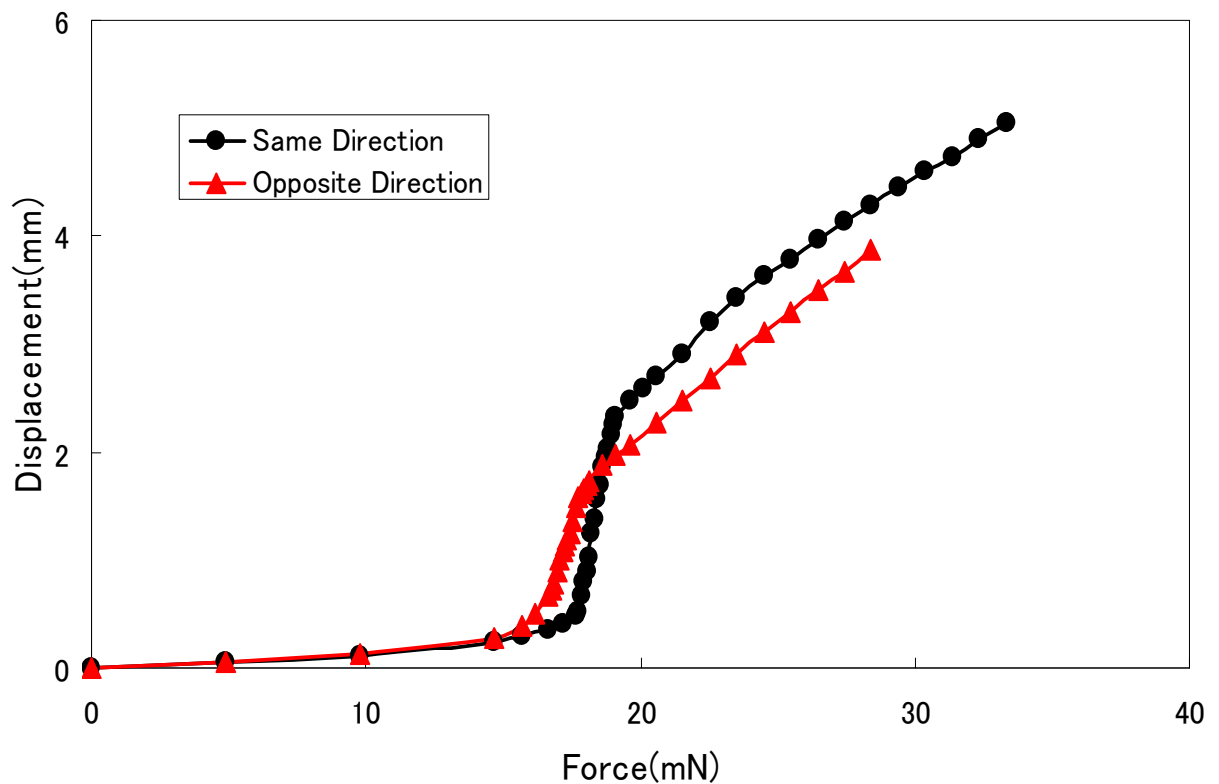


図 6-15 ヒンジ長が $300[\mu\text{m}]$ の並列化アクチュエータのバネ特性

第6章 アクチュエータの並列化と微細化

図 6-15 のバネ特性において、駆動領域と過負荷領域のバネ定数を求めたものが図 6-16 である。図から、逆方向に回転するアクチュエータ同士を組み合わせた場合の方が同方向に回転するアクチュエータ同士を組み合わせた場合よりもバネ定数が大きくなることが分かる。その大きさは、駆動領域で約 1.7 倍 ($=1.2/0.72$)、過負荷領域でアクチュエータが 2.5[mm]変位した点で約 1.4 倍 ($=4.7/3.4$) となっている。

以上のことから、ヒンジが短くなると、同じ方向に回転するアクチュエータ同士を組み合わせた場合と異なる方向に回転するアクチュエータ同士を組み合わせた場合のバネ特性に違いが現れることが分かった。その結果は電極を厚くした場合のように、駆動領域と過負荷領域のバネ定数をともに大きくする効果と同様となった。従って、発生力を増加させるためにアクチュエータを並列化した場合、ヒンジが短い場合にはアクチュエータの配置の仕方によって全体のバネ特性が変化することを考慮する必要がある。

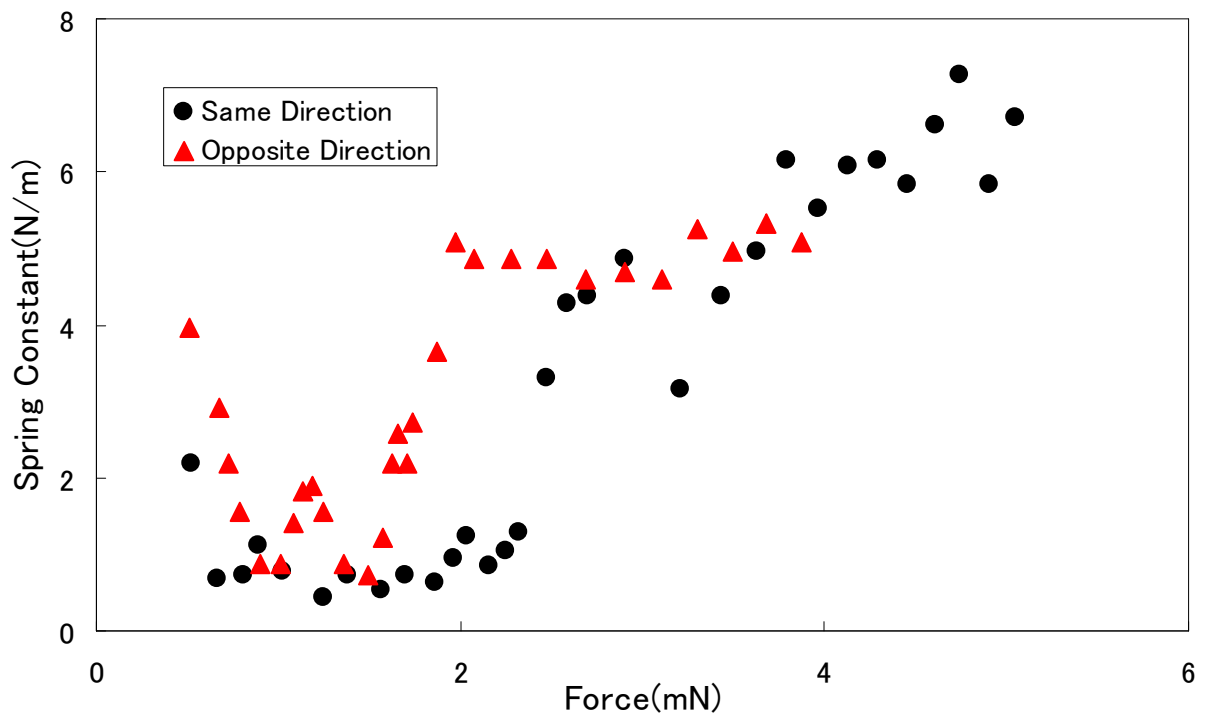


図 6-16 ヒンジ長が 300[μ m]の並列化アクチュエータのバネ定数

6.3.3 並列化モデルの計算結果

並列化によるバネ特性の変化をシミュレーションで調べるために、図 6-17 に示すように、2 個の積層型静電アクチュエータの並列化モデルを作製し、そのバネ特性を計算した。作製したモデルは、長さ 6[mm]、幅 2[mm]、厚さ 0.2[mm]のアルミ平板 2 枚の間に、一辺が 2[mm]の四角形状アクチュエータを 2 個並べたもので、その各々のアクチュエータは積層数 8、電極厚さ 56[μm]、ヒンジ厚さ 6[μm]、ヒンジ長さ 300[μm]であり、電極間の初期ギャップはゼロ（接触状態）とした。尚、アクチュエータの材料は PET フィルムのみとし、アルミ平板の物性値はヤング率 70.3[GPa]、ポアソン比 0.33 とした。この計算モデルにおいて、下部のアルミ平板を完全固定し、アクチュエータの上部に最大 1 個当たり 3[g]の引張り荷重を掛けて、その変形量を計算した。このとき計算は、伸縮方向（y 軸）を除くすべての方向（x 軸と z 軸）を拘束した場合、拘束条件なしに図 6-18(a)の A 点から D 点までの 4 点の変位量を求めた場合、図 6-18(b)のように上部電極の連結部分を取り去って、個々のアクチュエータの変形の様子を観察した場合に分けて実施した。

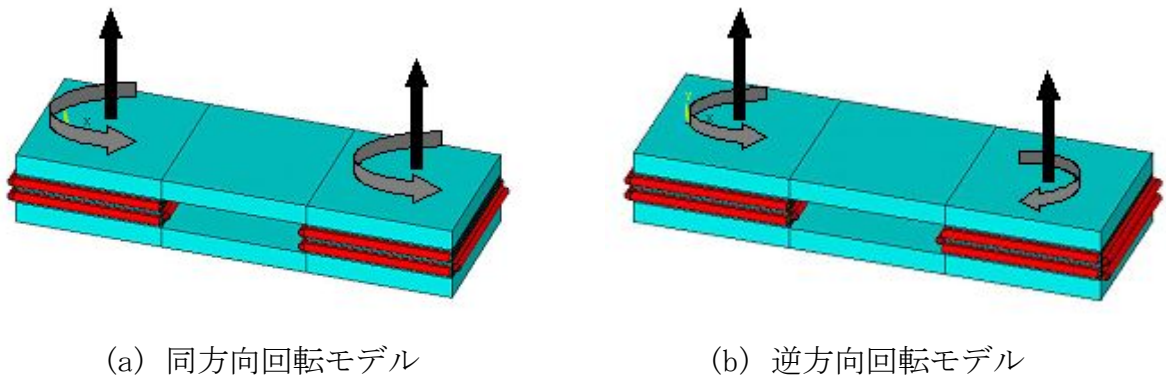


図 6-17 アクチュエータの並列化モデル

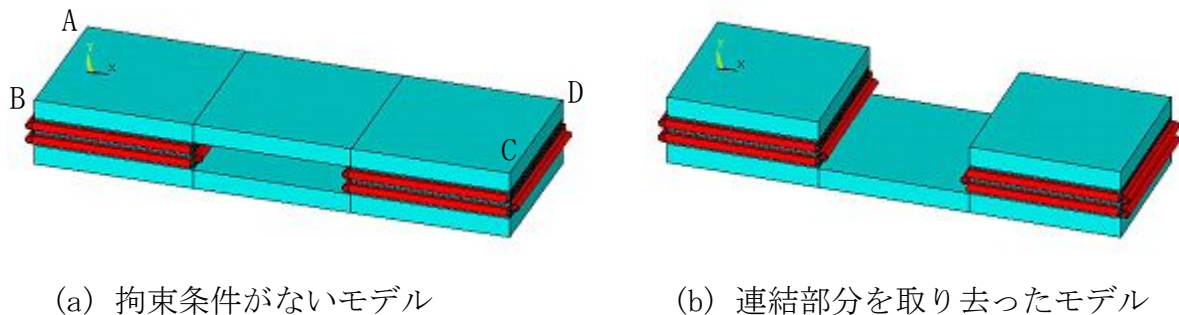


図 6-18 上部電極の拘束条件を変えたアクチュエータの並列化モデル

(1) 伸縮方向 (y 軸) を除く方向 (x 軸と z 軸) を拘束した場合

上部電極が伸縮方向にのみ可動するように拘束条件を与えた場合には、互いのアクチュエータが相互に力を及ぼさないため、同方向回転モデルも逆方向回転モデルも同じバネ特性となった。図 6-19 にバネ特性とバネ定数の計算結果を示す。

(2) 拘束条件がない場合

(1)の結果から、上部電極を特に拘束しない場合のバネ特性を計算した。このとき、アクチュエータの上面は図 6-20 のように変形するため、計算に当たっては図 6-18(a) に示す A 点から D 点までの 4 点の変位量を計算し、図 6-21 と図 6-22 にまとめた。

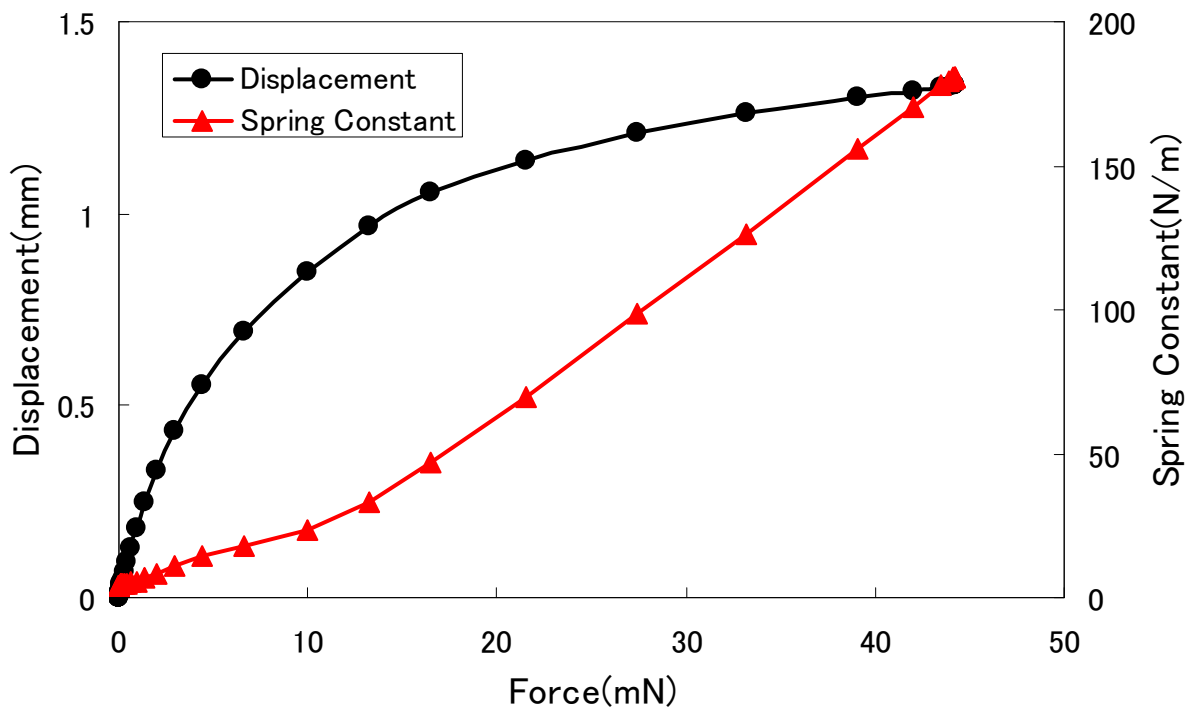
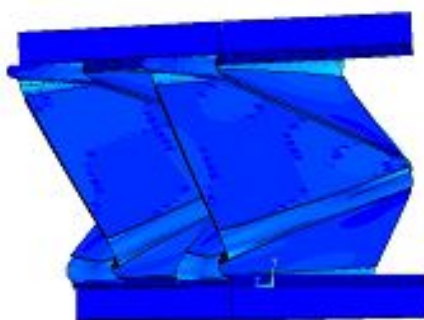
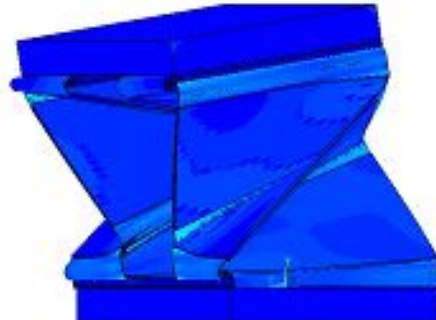


図 6-19 上部電極を拘束した場合のアクチュエータのバネ特性とバネ定数



(a) 同方向回転モデル



(b) 逆方向回転モデル

図 6-20 上部電極の拘束条件のないアクチュエータの並列化モデル

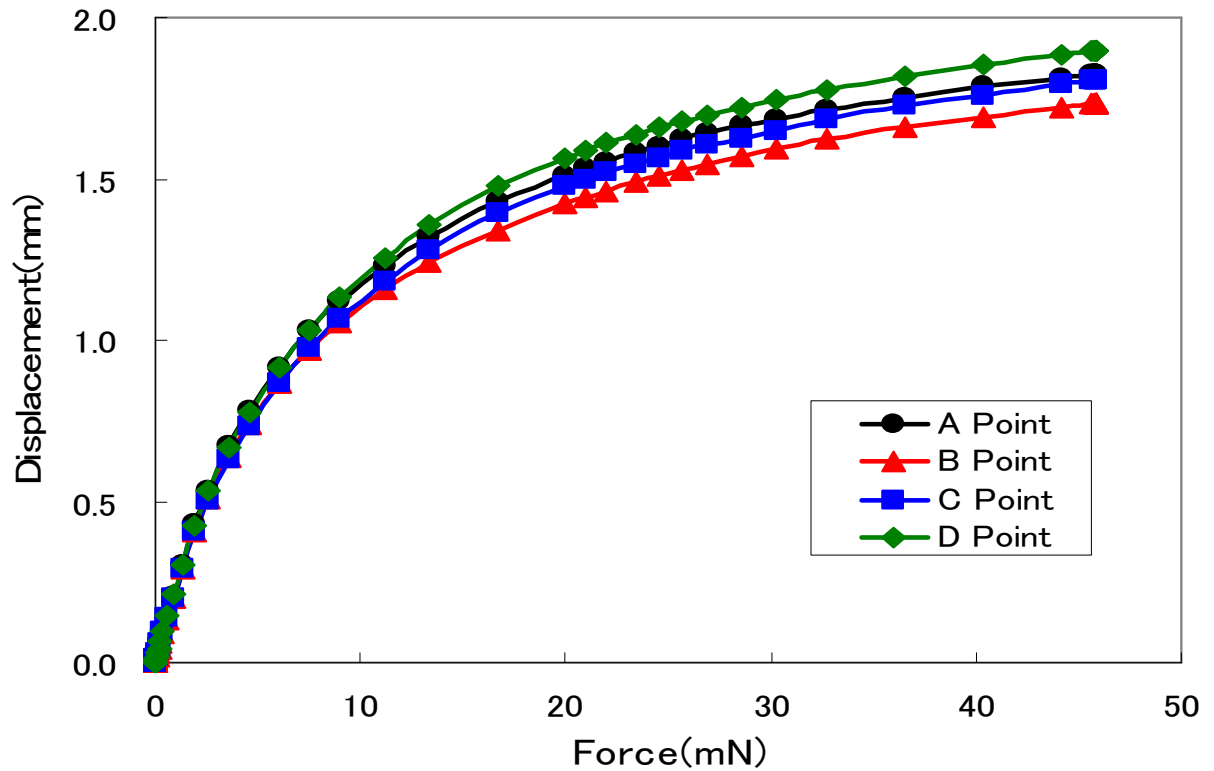


図 6-21 上部電極の拘束条件のない同方向回転モデルの変位量の変化

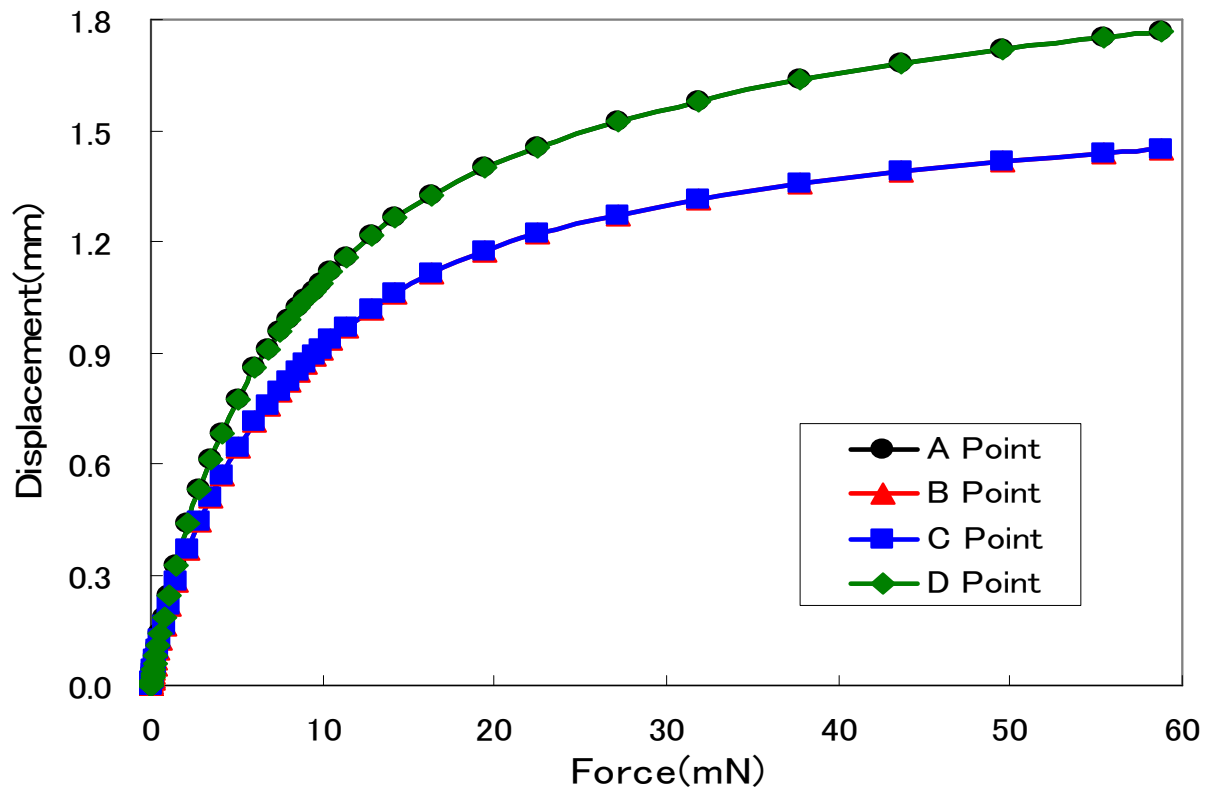


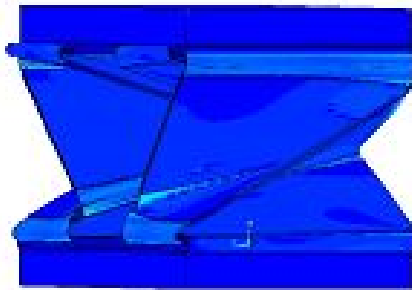
図 6-22 上部電極の拘束条件のない逆方向回転モデルの変位量の変化

(3) 上部電極の連結部分を取り去った場合

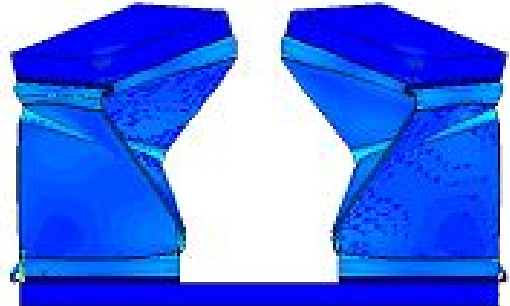
図 6-23(a) に上部電極を伸張方向のみ可動となるように拘束した場合，図 6-23(b) に上部電極の連結部分を取り除いた場合のアクチュエータの変形の様子を示す．図より，アクチュエータの回転方向の違いによって，アクチュエータの変形の様子が大きく異なることが分かる．このことから，電極の連結部分にはアクチュエータの変形に伴う圧縮応力や引張り応力が作用していることは明らかである．

(4) 拘束条件のない同方向および逆方向回転モデルの場合

図 6-24 に図 6-21 と図 6-22 に示した 4 点の平均値から求めたバネ特性を示す．図から，逆方向に回転するアクチュエータ同士を配置することによって過負荷領域のバネ特性を改善できる可能性があることが分かった．



(a) 上部電極を拘束した場合



(b) 上部電極の連結部を取り去った場合

図 6-23 上部電極を拘束した場合と連結部分がない場合のアクチュエータの変形

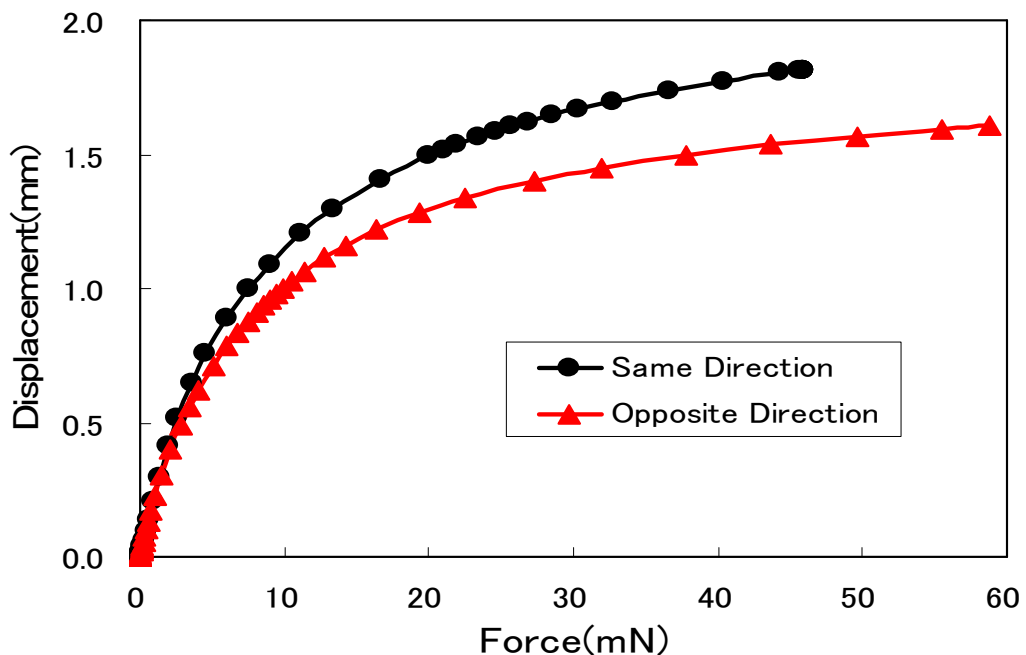


図 6-24 同方向および逆方向回転モデルのバネ特性

6.4 シミュレーションに基づく微細化の効果

アクチュエータのサイズ変化とバネ特性がどのように関係しているかを調べるために、アクチュエータを均一に縮小した場合とヒンジの厚さを一定として縮小した場合について計算を行った。

6.4.1 アクチュエータを均一に縮小した場合のサイズ効果

図 6-25 と図 6-26 に電極の幅が 2[mm] で厚さが 54[μm]、ヒンジの厚さが 4[μm] で長さが 190[μm] のアクチュエータのサイズを 1/2, すなわち体積を 1/8 に縮小した場合のバネ特性とバネ定数の変化の様子を示す。アクチュエータのサイズが異なるため、駆動領域と過負荷領域の位置が異なるが、図 6-26 から明らかなように、アクチュエータを均一に縮小するとバネ定数も大きさに比例して減少する。すなわち、サイズを 1/n に縮小したアクチュエータのバネ定数は駆動領域も過負荷領域も元のアクチュエータの 1/n となる。このとき、面積は 1/n² となるが電極間隔が 1/n となることから、同じ電圧を印加した場合には発生力に変化はなく、バネ定数も 1/n と小さくなることから、アクチュエータは容易に収縮することになる。さらに元の面積と等しくなるように 1/n サイズのアクチュエータを縦と横にそれぞれ n 個並べた n² 個集積化アクチュエータの過負荷領域のバネ定数は全体として n 倍となるため、負荷に対して伸びにくい構造となる。しかし、ストロークを増加させるために n 個を直列接続するとアクチュエータは伸びやすくなり、バネ定数は 1/n となる。

以上のことから、均一に 1/n に縮小したアクチュエータを元の大きさになるように集積化したアクチュエータは、元のアクチュエータのバネ特性とストロークが等しく、発生力が n² 倍となる優れたアクチュエータとなる。

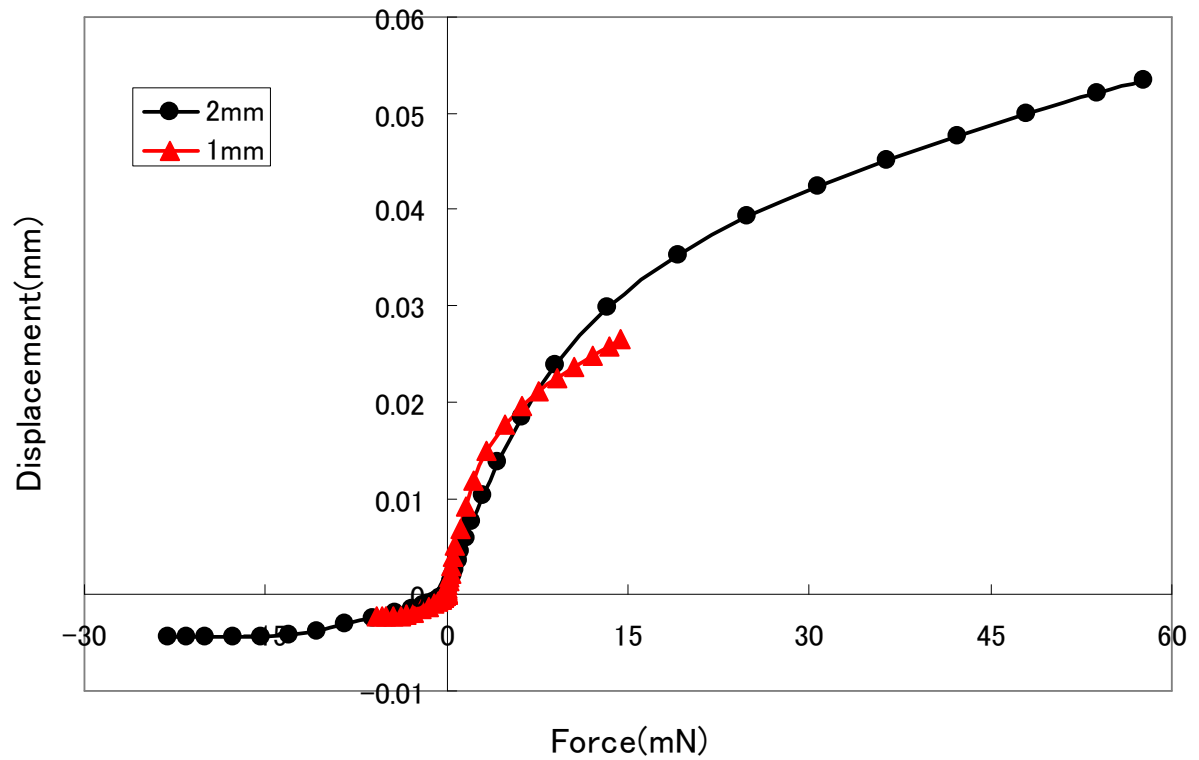


図 6-25 均一に縮小した場合のアクチュエータのバネ特性

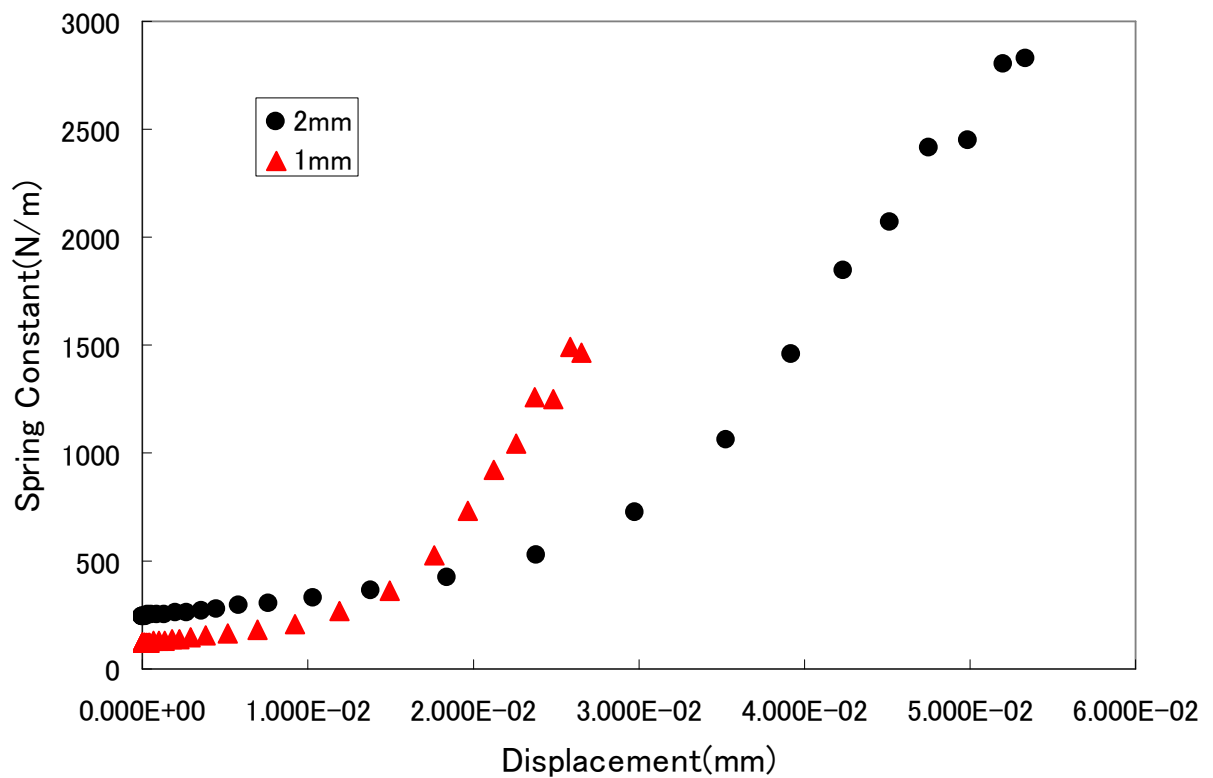


図 6-26 図 6-25 のアクチュエータのバネ定数

6.4.2 ヒンジの厚さを一定にして縮小した場合のサイズ効果

電極の幅が 2[mm]で厚さが 54[μ m]，ヒンジの厚さが 4[μ m]で長さが 190[μ m]のアクチュエータを基準サイズとして，ヒンジ厚さを 4[μ m]一定としたままで，電極の幅を 1[mm]，4[mm]，7[mm]と変化させ，アクチュエータ全体の構造を相似変換したモデルを作製し，それらのバネ特性を計算した．図 6-27 と図 6-28 にバネ特性とバネ定数を示す．図 6-28 から，電極のサイズとバネ定数の関係には直線関係があること，また，このまま縮小化しても限界があることが分かった．これは，電極部の厚さの影響が駆動領域のバネ特性に影響を与えているためと考えられる．また，電極サイズをさらに小さくしていくと，ヒンジ部の長さが短くなるために，バネ定数は増大する傾向にあると考えられる．従って，微細化していく過程でヒンジ部分を薄くして柔軟な構造にするなどの工夫が求められることは明らかである．

尚，リボン状フィルムの微細化技術に関する内容として，東京工業大学バイオ基盤研究支援総合センターアイソトープ分野の実吉研究室に所属する学生の研究成果の一部を Appendix-4 と Appenndox-5 に紹介する^{(46)～(48)}．

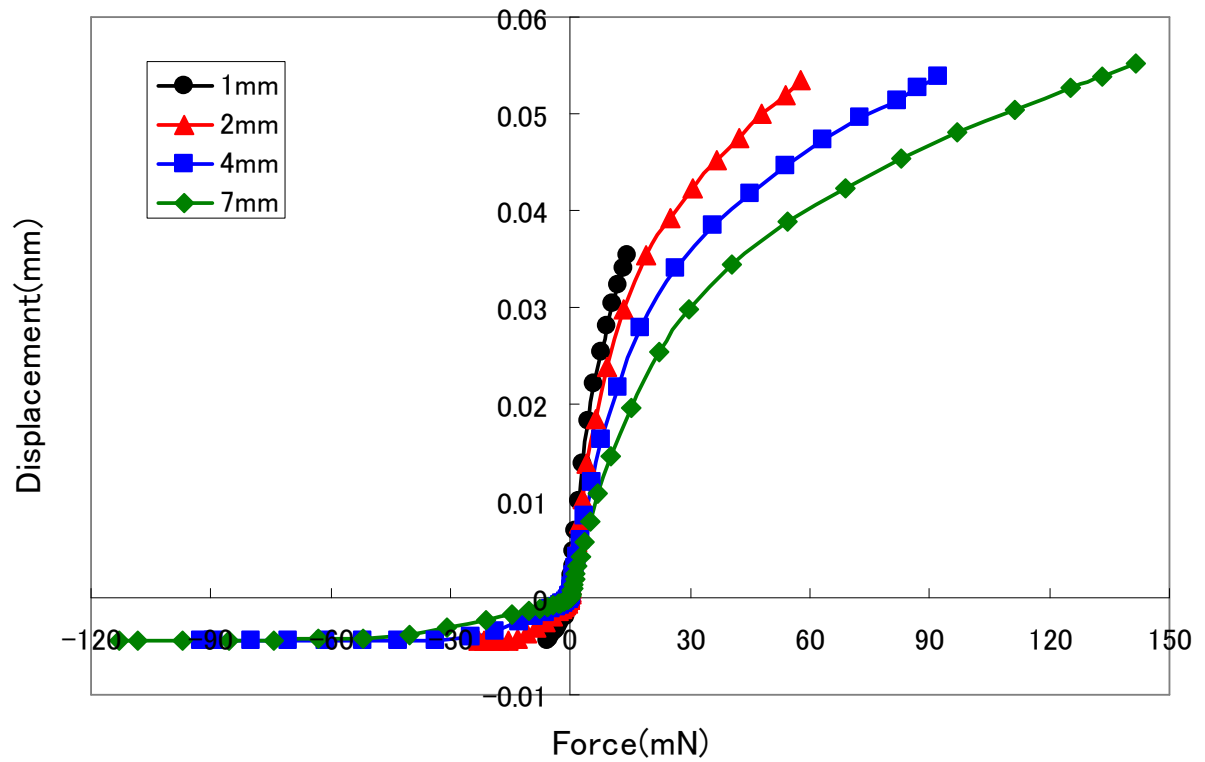


図 6-27 ヒンジ厚さを一定にして縮小した場合のアクチュエータのバネ特性

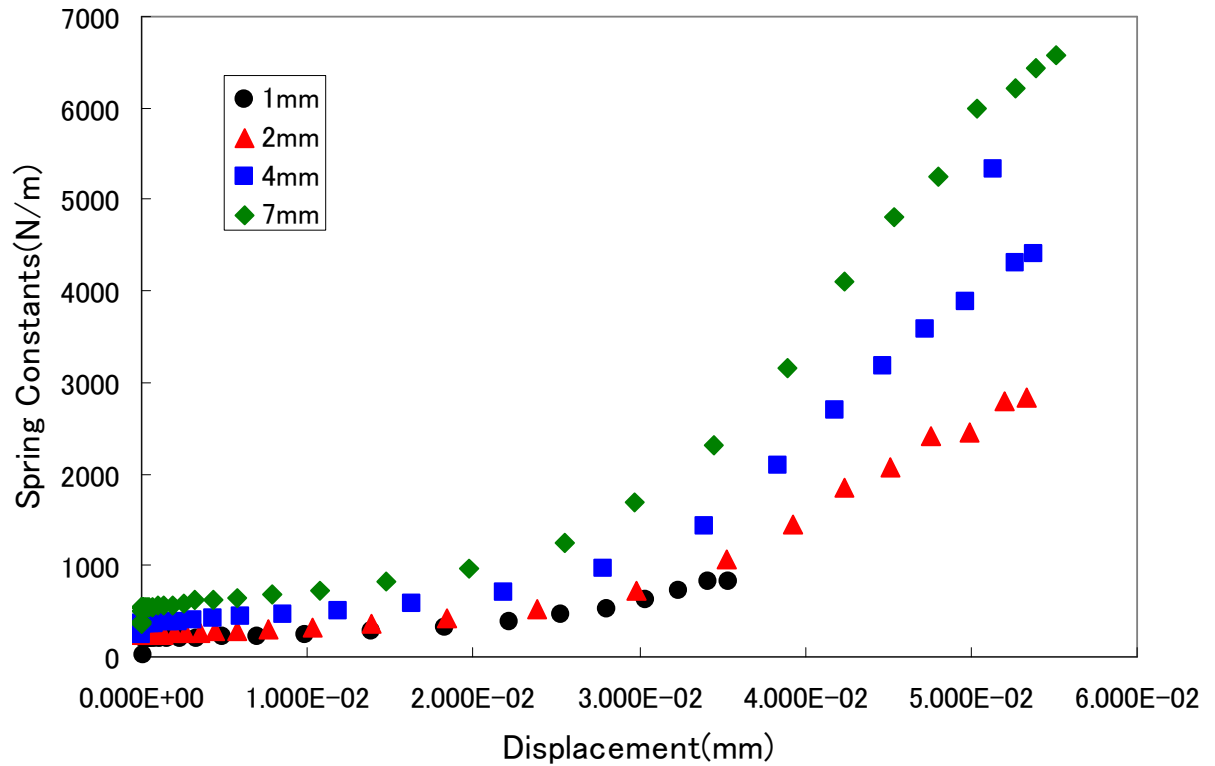


図 6-28 図 6-27 のアクチュエータのバネ定数

6.5 本章のまとめ

本章では、最初に100層を超えるアクチュエータの例として、2[mm]幅のフィルムを用いた500層アクチュエータの試作例と駆動実験例を紹介した。駆動実験は無負荷ではあったが、大気中600[V]の電圧印加で、全長6[cm]が4[cm]まで収縮した。静電アクチュエータを人工筋肉に応用する際、大きな力に加えて大きなストロークは不可欠である。今回の実験結果から、本研究のアクチュエータの積層数を増やすことによって目的とするストローク長を実現できることを再確認することができたといえる。

次に、2個のアクチュエータの並列化であるが、リボン状フィルムの折り方の違うアクチュエータを並べると回転力の相互作用によって、全体のバネ特性が変化することが明らかとなった。今後は、アクチュエータを集積化していく場合には、この点を考慮して、最適なアクチュエータの配置方法を検討する必要がある。

最後に、微細化において、シミュレーション結果から、アクチュエータ全体がそのままの比率で縮小されると、バネ特性は縮小率に比例することが分かった。このことから、微細化したアクチュエータを集積化したアクチュエータは、収縮特性に優れ、しかも大きな負荷が印加されても伸びにくい理想的なアクチュエータとなるが、このとき、ヒンジの厚さを一定にしたままで微細化するには限界があり、ヒンジを柔軟な構造にしていく工夫が不可欠であることが分かった。

現行では、100[μ m]幅のリボン状フィルムを作製することも完成しており、積層型静電アクチュエータを実用化し、人工筋肉に応用していく次のステップに現時点ですでに入っていると言える。今後はアクチュエータの微細化、集積化に関して更なる努力を継続しく必要がある。

第 7 章 結論

第7章 結論

本研究の目的は、人工筋肉への応用を目的として、軽量かつ応答性と瞬発力に富んだサブミクロンスケールから通常のスケールまで対応可能な積層型静電アクチュエータを開発することである。静電アクチュエータは微小化することによって、発生力を大きくできるため、現在の電磁力を利用したモータの性能を超える静電アクチュエータを実現すべく研究を進めてきた。

静電アクチュエータの中で電極と垂直な方向に可動するアクチュエータは、摩擦力が少なく発生力が大きいため、平行な方向に可動するアクチュエータより有利である。そのため、本研究では垂直方向に稼動し、大きな発生力と長い駆動距離を有する積層型静電アクチュエータを対象とした。

しかしながら、従来の積層型静電アクチュエータはバネ特性に起因する問題を内包していたため実用化には至らなかった。本研究で示した厚薄構造を有する積層型静電アクチュエータは、電圧が印加されると容易に収縮するが、負荷に対して伸びにくい構造であり、従来のバネ特性の問題を解決した新しいタイプのアクチュエータである。

このアクチュエータは多数の電極と多数のヒンジから構成されていて、これらの相互作用は非常に複雑であるため、解析的にアクチュエータのバネ特性を求めることは困難であることを示した。そこで、有限要素法による数値計算でアクチュエータのバネ特性のシミュレーションを行った。また、アクチュエータを実際に作製して、そのバネ特性を調べた。バネ特性を測定する装置として、微小な変位と力を同時に測定する光テコの原理を用いた天秤を自作した。積層数が異なるアクチュエータを作製し、それらのバネ特性を測定した結果、積層数や形状が異なったアクチュエータの特性を比較する際に有効となる「1 ギャップ当たりのバネ特性」を評価の目安として取り扱うことが良いことが明らかになった。この「1 ギャップ当たりのバネ特性」を用いて実験結果と計算結果を比較したところ、両者のバネ特性は良好な一致を示し、シミュレーション方法の妥当性を検証することができた。

積層型四角形状アクチュエータにおいて、アクチュエータの形状変化とバネ特性の変化のシミュレーション結果から、電極を厚くすることによって過負荷領域のバネ特性を改善することができるが、同時に駆動領域のバネ特性を劣化させてしまうことが分かった。すなわち、アクチュエータのバネ特性を駆動領域と過負荷領域に分けて考えているが、両者に明確な境界はなく、アクチュエータの形状によって、相互に影響を受けることが明らかとなった。この結果に加えて、ヒンジを薄くすると駆動領域のバネ特性は大きく改善されること、ヒンジの長さ変化がアクチュエータのストローク長に関係することなどが分かり、ヒンジ形状がアクチュエータのバネ特性を決定する

重要な要素であることが明らかとなった。

積層型三角形形状アクチュエータについては、厚薄構造を持たない構造でも、適当な熱処理を施すだけで駆動領域と過負荷領域の存在するアクチュエータとなることが示された。しかしながら、熱処理によって改善できるのは駆動領域のバネ特性だけであることも分かった。そのため、レーザ加工機を用いて、厚薄構造を有するリボン状フィルムを作製し、これを用いたアクチュエータを試作した。積層型四角形状静電アクチュエータの場合と同様に実験結果と計算結果は良好な一致を示し、積層型三角形形状アクチュエータにおいてもシミュレーション方法の妥当性を検証することができた。アクチュエータの形状変化とバネ特性の変化の対応関係においては積層型四角形状静電アクチュエータの場合と共通する結果が得られた。積層型四角形状静電アクチュエータと積層型三角形形状静電アクチュエータのバネ特性を詳細に比較したところ、前者は柔軟であるため、駆動領域の特性が優れており過負荷領域の特性が劣っていること、また、後者は構造が頑強であるため、過負荷領域の特性に優れているが駆動領域の特性が劣っていることが明らかとなった。このことから積層型三角形形状静電アクチュエータを使用する場合には、特にヒンジ部分を柔軟な構造にしていく工夫が不可欠であることが明らかとなった。

最後にアクチュエータを実用化していく中で必要となる、多層化、並列化、微細化の検討を行った。まず、多層化では2[mm]幅のフィルムを用いた500層アクチュエータを試作し、大気中600[V]の電圧でアクチュエータを全長6[cm]から4[cm]まで収縮させることに成功し、多層化によるストローク増大の実現性を確認できた。次に、並列化では、リボン状フィルムの折り方の回転方向が異なるアクチュエータ2個を並べると過負荷領域での特性が改善されることが明らかとなった。これは、アクチュエータの回転力の相互作用によって全体のバネ特性が変化することが原因であるが、今後、アクチュエータを集積化していく場合には、この点を考慮して、最適なアクチュエータの配置方法を検討する必要があることが分かった。微細化では、シミュレーション結果から、均一に $1/n$ に縮小したアクチュエータを元の大きさになるように集積化したアクチュエータは、元のアクチュエータのバネ特性とストロークが等しく、発生力が n^2 倍となる優れたアクチュエータとなることが明らかとなった。すなわち、優れたバネ特性を有する積層型アクチュエータを微細化し、これを集積化することによって、現在の電磁力を利用したモータの性能を超える静電アクチュエータを実現できる可能性があることを確認することができた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々に御世話になりました。ここに深く感謝の意を表します。

研究活動全般にわたり格別なる御指導と御高配を賜りました東京工業大学バイオ研究基盤支援総合センターアイソトープ分野の実吉准教授には甚大なる謝意を表します。私が曲がりなりにも博士論文をまとめることができたのは、先生の終始暖かい御指導と激励をいただいたからであると大変感謝しております。ありがとうございました。

また、本研究の積層型静電アクチュエータの製作で使用したフィルム全般は、東京フィルム加工株式会社の藤本氏に御提供いただきました。これによりアクチュエータの製作に掛かる時間や費用を大幅に低減できたことは言うまでもありません。御協力を感謝します。ありがとうございました。

研究活動費においては、日本学術振興会科学研究費基盤研究(B)「シミュレーションに基づく積層型静電アクチュエータの特性改善」からの御支援を頂戴しました。大変感謝しております。

実吉研究室事務補佐員の御園生さんには、いろいろと事務的な面倒を見ていただきました。ここに、感謝申し上げます。さらに、実吉研究室の現学生でアクチュエータチームに所属する掛川君、伊藤君、松原君、学生諸君にも、いろいろと御協力をいただき、ありがとうございました。また、既に実吉研究室を卒業し、社会人として活躍されておりますが、畑君、立入君、高重君、綿貫君、藤川君、山本君には、在学中にいろいろとお世話になりました。感謝申し上げます。

最後に、これまで私を暖かく応援してくれた妻 恵子、長男 康博、次男 和徳に心から感謝します。

2011 年 2 月

参考文献

第1章

- [1] 福田敏男, 光岡豊一共著: 夢のマイクロロボット, p.2, 1995 年 (オーム社)
- [2] (財) マイクロマシンセンター監修: マイクロマシン革命—日本発超微小機械の衝撃—, p.92, 1999 年 (日刊工業新聞社)
- [3] 新野俊樹, 樋口俊郎, 柄川索: "交流駆動両電極形静電モータ", 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.1, pp.97-102, 1997
- [4] M.Yamaguchi, S.Kawamura, K.Minami, and M.Esashi, "Distributed electrostatic micro actuator", Micro Electro Mechanical Systems '93, proceedings 'An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems, 1993.
- [5] K.Minami, H.Morishita, and M.Esashi, "A bellows-shape electrostatic micro actuator", Sensors and Actuators Vol. 72, pp269-276, 1999.
- [6] H.Inagaki and A.Saito, "Development of Stacked Electrostatic Actuator", J.Jpn. Soc. For Precision Eng.Vol.59, pp1625-1630, 1993.
- [7] 藤田博之著: マイクロ・ナノマシン技術入門, pp.187-188, 2003 年 (工業調査会)
- [8] 奥田一雄, 実吉敬二: "厚い電極構造による積層型静電アクチュエータの伸びの低減", 第 21 回日本ロボット学会学術講演会 (2005), 3D24
- [9] 鈴森康一, 堀光平, 宮川豊美, 古賀章浩: マイクロロボットのためのアクチュエータ技術, コロナ社, pp.180-188, 1998

[10] T. Higuchi *et al*, "Actuator Engineering", Yokendo, 2004

[11] A. Ando and M.Inutake, "High Voltage Engineering", Asakura Publishing, 2006

第2章

- [7] 藤田博之著: マイクロ・ナノマシン技術入門, pp.187-188, 2003 年 (工業調査会)
- [12] WSN Trimmer, KM Gabriel, "Design considerations for a practical electrostatic micro-motor" Sensors and Actuators. Vol. 11, pp. 189-206. 1987
- [13] L.S. Fan, Y.C. Tai and R.S. Muller, "IC-processed electrostatic micro-motors", Electron Devices Meeting, CA, USA, Dec 11-14, 1988, Technical Digest, pp666-669.

- [14] A. Fujimoto *et al*, "Miniature electrostatic motor", Sensors and Actuators A, Vol. 24, pp43-46.1990.
- [15] S.C Jacobsen, R.H. Price, J.E. Wood, T.H. Rytting, M. Rafaelof, "A design overview of an eccentric-motion electrostatic microactuator (the wobble motor)", Sensors and actuators. Vol. 20, pp1-16, 1989.
- [16] B.E. Volland, H. Heerlein, I.W. Rangelow, "Electrostatically driven microgripper" J. Microelectronics Engineering 61-62, pp1015-1023, 2002
- [17] R. Legtenberg, J. Gilbert, S. D. Senturia, "Electrostatic Curved Electrode Actuators" Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.6 No. 3, 1997.
- [18] C. Cabuz, E.I Cabuz, T.R. Ohnstein, J. Neus, R. Maboudian ;"Factors enhancing the reliability of touch-mode electrostatic actuators" Sensors and Actuator A Vol.79 pp245-250, 2002.
- [19] C.Cabuz: "Dielectric Related Effects In Micromachined Electrostatic Actuators", Conference on Electrical Institution and Dielectric Phenomenona, TX, USA Oct 17-20, 1990.
- [20] R. Legtenberg *et al*, "Comb-drive actuators for large displacements" J. Micromech. Microeng. Vol.6, pp320-329,1996.
- [21] T. Hirano, T. Fujita, K.J Gabriel, H. Fujita, "Design, fabrication, and operation of submicron gap comb-drivemicroactuators" Journal of Microelectromechanical Systems, pp52-59, 1992.
- [22] S. Krylov, Y. Bernstein, "Large displacement parallel plate electrostatic actuator with saturation type characteristic" Sensors and Actuators A Physical, 2006.
- [23] B.H. Kim, K. Chun, "Fabrication of an electrostatic track-following micro actuator for hard disk drives using SOI wafer" J. Micromech. Microeng Vol. 11, pp1-6 2001.
- [24] W. Huang, G. Lu, "Analysis of lateral instability of in-plane comb drive MEMS actuators based on a two-dimensional model" Sensors and Actuators A Physical pp78-85, 2004.
- [25] T. Matsunaga, K. Kondoh, M. Kumagae, H. Kawata, M. Yasuda, K.Murata, and M. Yoshitake, "Fabrication of a New Electrostatic Linear Actuator", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.39 pp7115-7119, 2000.
- [26] T. Niino, S. Egawa, N. Nishiguchi, and T. Higuchi, "Development of an Electrostatic Actuator Exceeding 10N propulsive Force", Micro Electro Mechanical Systems '92, Travemunde, Germany, Feb.4-7, 1992.

- [27] S. Egawa, M. Fujie, T. Higuchi : “Study on Electrostatic Actuator for Physical Aids”
Journal of the Robotics Society of Japan Vol.15, pp1147-PP1155,1997.
- [28] T. Niino, S. Egawa, H. Kimura. and T. Higuchi, “Electrostatic artificial muscle: compact,
high-power linearactuators with multiple-layer structures”, Micro Electro Mechanical
Systems, '94, Proceedings, IEEE Workshop, 1994.
- [29] K. Minami, S. Kawamura and M. Esashi, “Fabrication of distributed electrostatic micro actuator”, J.
MEMS 2 (3) pp121-127, 1993.
- [30] M. Yamaguchi, S. Kawamura, K. Minami, and M. Esashi, “Distributed electrostatic micro
actuator” Micro Electro Mechanical Systems '93, Proceedings 'An Investigation of Micro
Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems, 1993.
- [31] 実吉敬二, 菊池正芳, 鳥居毅, 松田一彦 : 2本のリボン状電極による積層型静電力アクチュエ
ータ, 第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp179-180, (2000).
- [32] 奥田一雄, 実吉敬二 : 厚い電極構造による積層型静電アクチュエータの伸びの低減, 第21回
日本ロボット学会学術講演会概要集 PDF, 3 D24, (2003).
- [33] 実吉敬二, 佐塚昌也 : 2本のリボン状電極による三角形積層型静電力アクチュエータ, 第
20回日本ロボット学会学術講演会概要集 PDF, 3 K13, (2002).

第3章

- [32] 奥田一雄, 実吉敬二 : 厚い電極構造による積層型静電アクチュエータの伸びの低減, 第21回
日本ロボット学会学術講演会概要集 PDF, 3 D24, (2003).
- [34] 邊吾一, 藤井透, 川田広之 : 最新材料の力学 pp.67, 2008年 (培風館)
- [35] CAD/CAE 研究会 : ANSYS 工学解析入門,, pp.75-78, 2001 (理工学社)

第4章

- [32] 奥田一雄, 実吉敬二 : 厚い電極構造による積層型静電アクチュエータの伸びの低減, 第21回
日本ロボット学会学術講演会概要集 PDF, 3 D24, (2003).
- [36] 奥田一雄, 畑良幸, 実吉敬二 : “積層型静電アクチュエータのバネ定数の改善”, 第10回ロボ
ティクスシンポジウム予稿集, pp569-574, 2005
- [37] K. Okuda, K. Saneyoshi :” Simulation of Spring Characteristic of A New Stacked-type
Electrostatic Actuator”, International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient
Intelligence 2006, KRS050, Korea, Oct. 2006.

第5章

- [38] 奥田一雄, 実吉敬二 : 積層型三角形静電アクチュエータのバネ定数の改善, 第22回日本ロボ
ット学会学術講演会概要集 PDF, 2C12, (2004).

- [39] Y.Hata, K.Okuda, K.Saneyoshi, “Development of fish robot using stacked-type electrostatic actuator”, International Conference on Electrical Machines 2006, OMA4-2, Greece, Sept. 2006.
- [40] Y.Hata, and K.Saneyoshi, “A stacked-type electrostatic actuator and measurement of its energy efficiency”, International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence 2006, KRS002, Korea, Oct. 2006.
- [41] Y. Hata, K. Okuda, and K. Saneyoshi, “Simulation of the energy efficiency of a stacked-type electrostatic actuator by numerical analysis”, The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON07, Proceeding pp2319-2324, Taipei, Nov 5-8, 2007.
- [42] Y. Hata, K. Okuda, K. Saneyoshi: “Measurement of Energy Efficiency of a Stacked-Type Electrostatic Actuator” The 24nd Annual Conference of The Robotics Society of Japan, Okayama, Sept 14-16, 2006, Proceeding, 3I27.
- [43] 奥田一雄, 立入泉樹, 畑良幸, 高重達郎, 実吉敬二: “厚い電極部を有する積層型三角形形状静電アクチュエータ”, 第 11 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp308-313, 2006

第 6 章

- [44] K.Okuda, M. Tachiiri, Y.Hata, T. Takashige, K.Saneyoshi :”Stacked Electrostatic Actuators with more than 100 layers” The 23rd Annual Conference of The Robotics Society of Japan, PDF, 1A21 (2005).
- [45] K. Okuda, Y. Hata, and K. Saneyoshi, “A stacked-type electrostatic actuator with thick square electrodes”, International Conference on Electrical Machines 2006, PMA4-6, Greece, Sept. 2006.
- [46] T.Takashige, Y.Hata, K.Okuda, and K.Saneyoshi, “Miniaturization of Stacked-type Electrostatic Actuator”, The 23rd Annual Conference of the Robotics Society of Japan, PDF, 1A22 Sept. 2005.
- [47] T. Takashige, Y. Hata, M. Tachiiri, K. Saneyoshi: “Miniaturization of a Stacked-type Electrostatic Actuator”, Annual Meeting of The Institute of Electostatics Japan 25pC-9 (2006)
- [48] Y. Hata, K.Okuda, K.Saneyoshi: “Parallelization of Stacked-type Electrostatic Actuators” The 25nd Annual Conference of The Robotics Society of Japan, PDF, (2007).

Appendix

Appendix I プルイン現象

弾性力とクーロン力のバランスを超える吸引力が働く現象をプルイン現象と呼んでいる。垂直駆動型の静電アクチュエータでは、平行平板電極とこれを支える弾性体との間でこのプルイン現象が発生する。図 A-1 に垂直駆動型静電アクチュエータの簡単なモデルを示す。図において、 $F_s(x)$ は弾性力、 $F_e(x)$ は静電力を示しており、これらは以下の式で表現できる。

$$F_s(x) = k(d - x) \quad \dots \dots \dots (A-1)$$

$$F_e(x) = \frac{1}{2} \frac{\epsilon S V^2}{x^2} \quad \dots \dots \dots (A-2)$$

ここで、 k は比例定数、 d は初期ギャップ長、 S は電極面積、 V は印加電圧、 ϵ は誘電率である。

アクチュエータの位置制御が可能な条件は、弾性力 $F_s(x)$ と静電力 $F_e(x)$ が図 A-2 のような関係になっているときである。このときアクチュエータに電圧を印加すると、初期ギャップ長の d 点から a 点に向かってアクチュエータは収縮し、 a 点を超えると弾性力が静電力を上回るため、 a 点において静電力と弾性力はバランスすることになる。

アクチュエータに印加する電圧を増加させると静電力が増加するため、弾性力 $F_s(x)$ と静電力 $F_e(x)$ の関係は図 A-3 のように変化することとなり、弾性力と静電力がバランスする a 点の位置は図のように左側に移動することになる。さらに印加電圧を増加させると弾性力 $F_s(x)$ と静電力 $F_e(x)$ の関係は図 A-4 のように、一点で接するようになる。この状態がアクチュエータの位置制御が可能な限界点を示す。すなわち、アクチュエータの印加電圧をこれ以上増加させると、静電力 $F_e(x)$ は常に弾性力 $F_s(x)$ を上回ることとなり、アクチュエータの位置制御は不可能になる。従って、アクチュエータの位置を制御できる範囲は図 A-4 に示す d から α の範囲となる。

ここで、 α の位置で両者の微係数が等しくなることから、(A-1) 式と (A-2) 式から、

$$F_s'(\alpha) = F_e'(\alpha) = -\frac{\epsilon S V^2}{\alpha^3} = -k \quad \dots \dots \dots (A-3)$$

を得る。

また， α の位置で両者の値が等しくなることから，(A-1)式と(A-2)式から，

$$\frac{1}{2} \frac{\varepsilon S V^2}{\alpha^2} = k(d - \alpha) \Leftrightarrow \varepsilon S V^2 = 2\alpha^2 k d - 2\alpha^3 k \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (A-4)$$

となる．

よって，(A-3)式の k を(A-4)式に代入して，

$$\varepsilon S V^2 = 2 \frac{\varepsilon S V^2}{\alpha} d - 2 \varepsilon S V^2 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (A-5)$$

を得る．(A-5)式から α を求めると，

$$\alpha = \frac{2}{3} d \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (A-6)$$

となる．この値は他のパラメータに依存せず，常に位置制御が可能な範囲は初期ギャップ d から α の位置，すなわち，初期ギャップの $1/3$ の範囲しか位置制御できない．

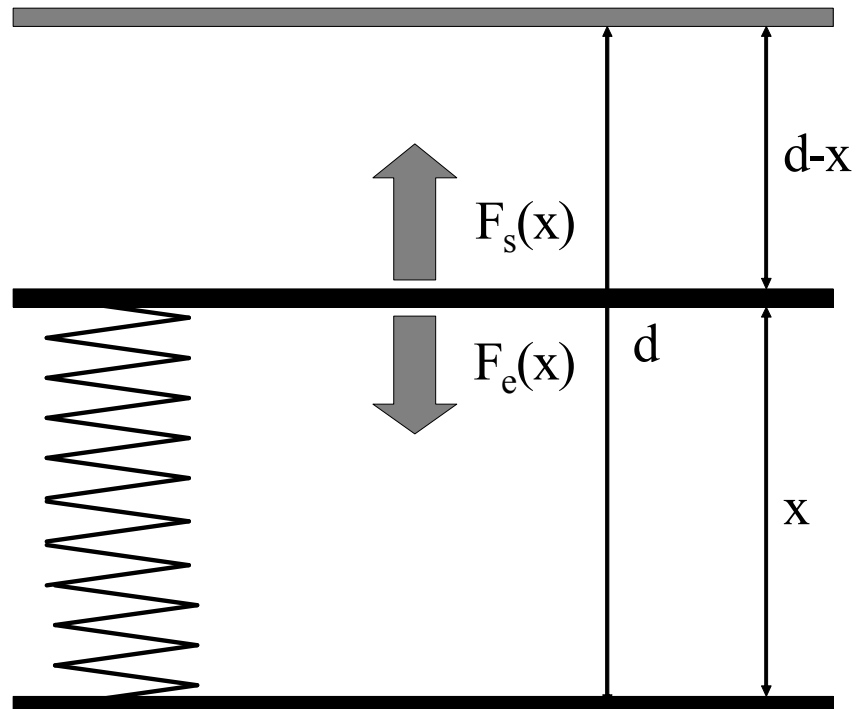


図 A-1 垂直駆動型アクチュエータの静電力と弾性力

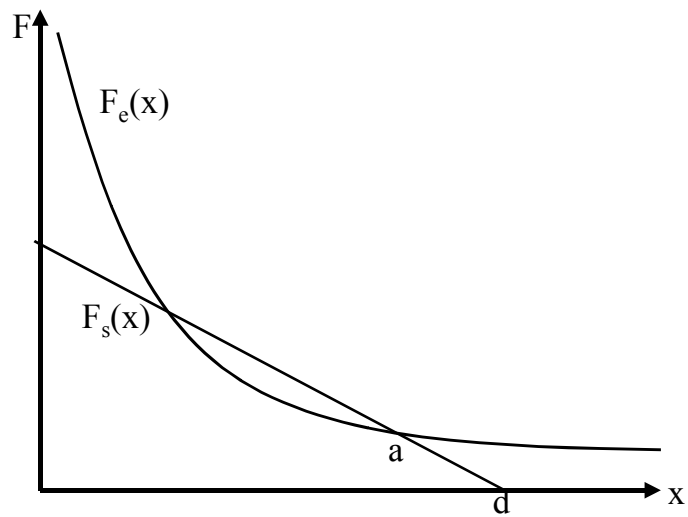


図 A-2 位置制御が可能な静電力と弾性力

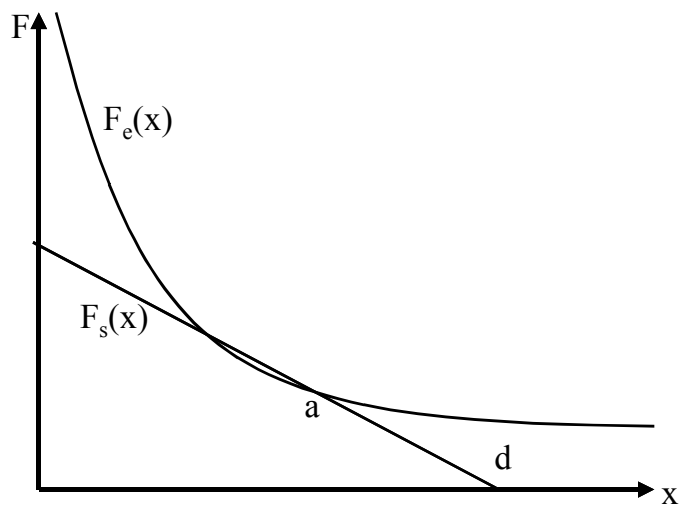


図 A-3 電圧を増加した場合の静電力と弾性力

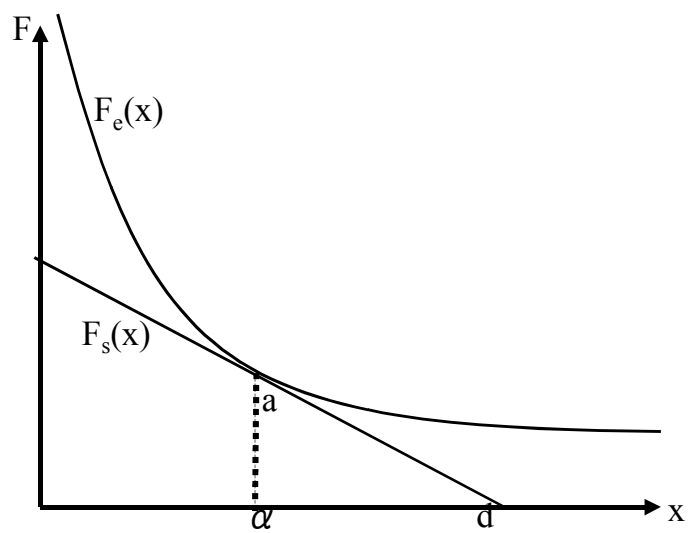


図 A-4 静電力と弾性力の臨界状態

Appendix II 互いに傾いた電極間に発生する力

1. 静電容量

図 A-5 に示すように X, Y, Z 軸をとると点(x, y)における微小面積は $dxdy$ で、その距離は $2(x \tan \theta + y \tan \phi + b)$ となることから、微小静電容量 ΔC は、

$$\Delta C = \frac{\varepsilon \cdot dxdy}{2(x \tan \theta + y \tan \phi + b)} \quad \dots \dots \dots (A-7)$$

となる。よってこの式を x 方向 y 方向について積分すると全静電容量が求まる。

$$\begin{aligned} C &= \int_0^D \int_0^L \frac{\varepsilon \cdot dxdy}{2(x \tan \theta + y \tan \phi + b)} \\ &= \frac{\varepsilon}{2} \int_0^D \frac{1}{\tan \phi} [\log(x \tan \theta + L \tan \phi + b) - \log(x \tan \theta + b)] \\ &= (\tan \theta + L \tan \phi + b) \log(\tan \theta + L \tan \phi + b) - (L \tan \phi + b) \log(L \tan \phi + b) \\ &\quad - (D \tan \theta + b) \log(D \tan \theta + b) + b \log b \\ &= \frac{\varepsilon LD}{2c} \left(\log \frac{a+b+c}{a+b} + \frac{b}{a} \log \frac{(a+b+c)b}{(b+c)(a+b)} + \frac{c}{a} \log \frac{a+b+c}{b+c} \right) \end{aligned}$$

また、c を固定し $a=0$ の近傍で展開し $a=0$ を代入すると、

$$C = \frac{\varepsilon LD}{2c} \left[\log \frac{b+c}{b} + \left(\frac{1}{b+c} - \frac{1}{b} \right) a - \frac{c}{b+c} + \frac{c}{b+c} \right]_{a=0} = \frac{\varepsilon LD}{2c} \left(\log \frac{b+c}{b} \right) \quad \dots \dots (A-8)$$

となる。

ここで、(A-8)式において、 $c=0$ の近傍で展開し、 $c=0$ を代入すると、

$$C = \left[\frac{\varepsilon LD}{2c} \left(\frac{1}{b} c - \frac{1}{2b^2} c^2 + \dots \right) \right]_{c=0} = \frac{\varepsilon LD}{2b} \quad \dots \dots \dots (A-9)$$

のように、平行のときの静電容量と一致する。

2. 静電力

電圧を V とすると微小面積 $dxdy$ に発生する静電力 dF は(A-7)式より、

$$dF = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon V^2 dxdy}{(2x \tan \theta + 2y \tan \phi + 2b)^2} = \frac{1}{8} \frac{\varepsilon V^2}{(x \tan \theta + y \tan \phi + b)^2} dxdy \quad \dots \dots (A-10)$$

となる。従って、図 A-5 の電極面に作用する静電力 F は(A-10)式を積分して、以下のような結果となる。

$$\begin{aligned}
F &= \frac{\varepsilon V^2}{8} \int_0^D \int_0^L \frac{dx dy}{(x \tan \theta + y \tan \phi + b)^2} = \frac{\varepsilon V^2}{8 \tan \theta} \left[\int_0^L -\frac{dy}{D \tan \theta + y \tan \phi + b} + \int_0^L \frac{dy}{y \tan \phi + b} \right] \\
&= \frac{\varepsilon V^2}{8 \tan \theta \tan \phi} [-\log(D \tan \theta + L \tan \phi + b) + \log(D \tan \theta + b) + \log(L \tan \phi + b) - \log b] \\
&= \frac{\varepsilon D L V^2}{8 a c} [-\log(a + b + c) + \log(a + b) + \log(b + c) - \log b] \\
&= \frac{\varepsilon D L V^2}{8 a c} \log \frac{(a + b)(b + c)}{b(a + b + c)}
\end{aligned}$$

ここで、上式を $a=0$ の近傍で展開し、 $a=0$ を代入すると、

$$\begin{aligned}
F &= \left[\frac{\varepsilon D L V^2}{8 a c} \left(-\log(b + c) + \log b + \log(b + c) - \log b - \frac{a}{b + c} + \frac{a}{b} \right) \right]_{a=0} \\
&= \left[\frac{\varepsilon D L V^2}{8 a c} \cdot \frac{a c}{b(b + c)} \right]_{a=0} = \frac{\varepsilon D L V^2}{8 b(b + c)}
\end{aligned}$$

となる。さらに、 $c=0$ とすると、

$$F = \frac{\varepsilon D L V^2}{8 b(b + c)} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon D L V^2}{(2b)^2} \quad \dots \dots \dots (A-11)$$

となり、電極が平行の場合の静電力の式と等しくなる。

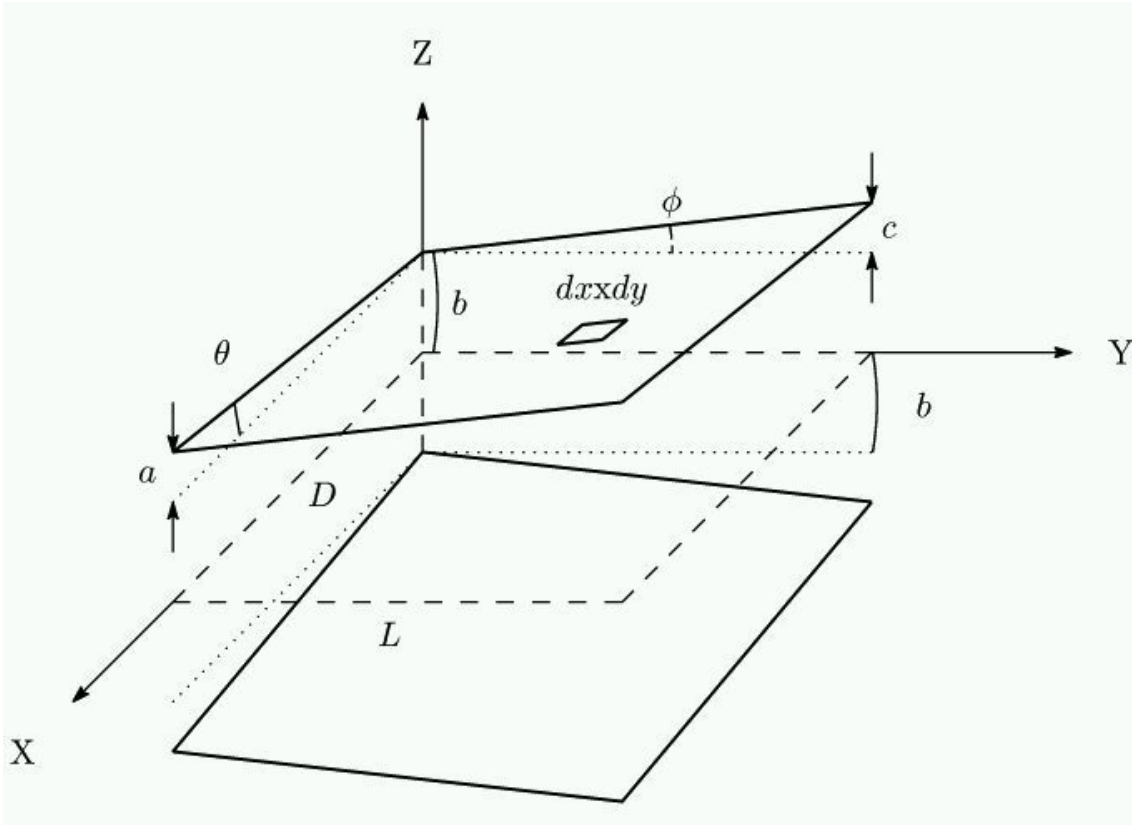


図 A-5 互いに傾いた電極間に発生する力

Appendix III ANSYS の解析機能

表 A-1 に、ANSYS の主な解析機能を示す。

表 A-1 ANSYS の主な解析機能

解析の種類	項 目		
静的構造解析	線形成的解析		
	非線形静的解析	材料非線形	弾塑性，超弾性（ゴム等）， 粘弾性，クリープ， スウェリング など
		幾何学的 非線形	大変形（大回転）， ストレススティフニング 大ひずみ など
		要素非線形	面接触要素， 非線形バネ要素， 非線形ダンパ要素， 鉄筋コンクリート要素， ボルト締め付け力設立要素， コンビネーション要素など
	熱応力解析		
	積層材		
動的構造解析	線形動的解析	線形時刻歴応答解析	
		線形周波数応答解析	
		不規則振動解析	
	非線形動的解析	非線形時刻歴応答解析	
	モーダル解析	初期応力状態でのモーダル解析	
		モーダルサイクリックシンメトリー	
	スペクトル解析	応答スペクトル解析	
		ランダム応答解析	
構造座屈解析	固有座屈解析		
	非線形座屈解析		

疲労解析	マイナー則	
電熱解析	定常電熱解析	
	過渡電熱解析	
	相転移	
	電気・熱カップリング	
	材料特性・境界条件の温度依存性	
	熱輻射	
	移流	
電磁場解析	静的磁場解析	線形静的解析
		非線形静的解析
	動的磁場解析	調和磁場解析
		過渡磁場解析
		非線形過渡磁場解析
		高周波電磁場解析
	無限境界要素	
	速度効果	
破壊解析	応力拡大係数 (K 1 , K 2 , K 3)	
	J 積分	
	エネルギー開放率	
静電場解析	クーロン力の算出	
圧電解析	静的解析	
	モーダル解析	
	周波数応答解析	
音響解析	静的解析	
	モーダル解析	
	動的応答解析	
流体解析	二次元／三次元解析	
	定常／非定常解析	
	熱伝導を考慮した層流／乱流解析	

Appendix

流体解析	超音速流
	強制対流
	自然対流
	混合対流
	回転する流れ場
	複数成分からなる流れ
	線形熱伝達
	共役熱伝達
	分布流体抵抗
	粘性発熱
	速度／圧力／温度／熱流束／熱源／熱伝達係数
	断熱／対象／周期対称の指定
連成解析	熱－構造
	磁場－構造
	流体－構造
	磁場－熱
	流体－熱
	電気－熱
	音響－構造
	圧電－音響
	電気回路－磁場
	静電場－構造
	電気－機械回路
設計最適化	
形状最適化	
サンプリング モデル	
サンプルストラク チャリング	

Appendix IV レーザアブレーション加工による微細化

1. レーザアブレーション加工とレーザ加工機

レーザアブレーション加工とは、紫外線領域のレーザを加工対象となる素材に照射して表面を除去する加工のことで、その主な特徴は、加工対象に熱的影響を及ぼさず加工することが可能なこと、また、レーザを集光することでミクロンオーダーの高精度の加工が可能なことである。

図 A-6 に使用したレーザ加工機の加工ステージ部分の様子を示す。このレーザ装置はシグマ光機社製の 6209-K14 で、レーザ発振器にはコヒレント社の Matrix355-1-60 を使用しており、レーザ波長は 355[nm] で、レーザ強度、加工ステージ速度、繰り返し周波数などが可変パラメータである。

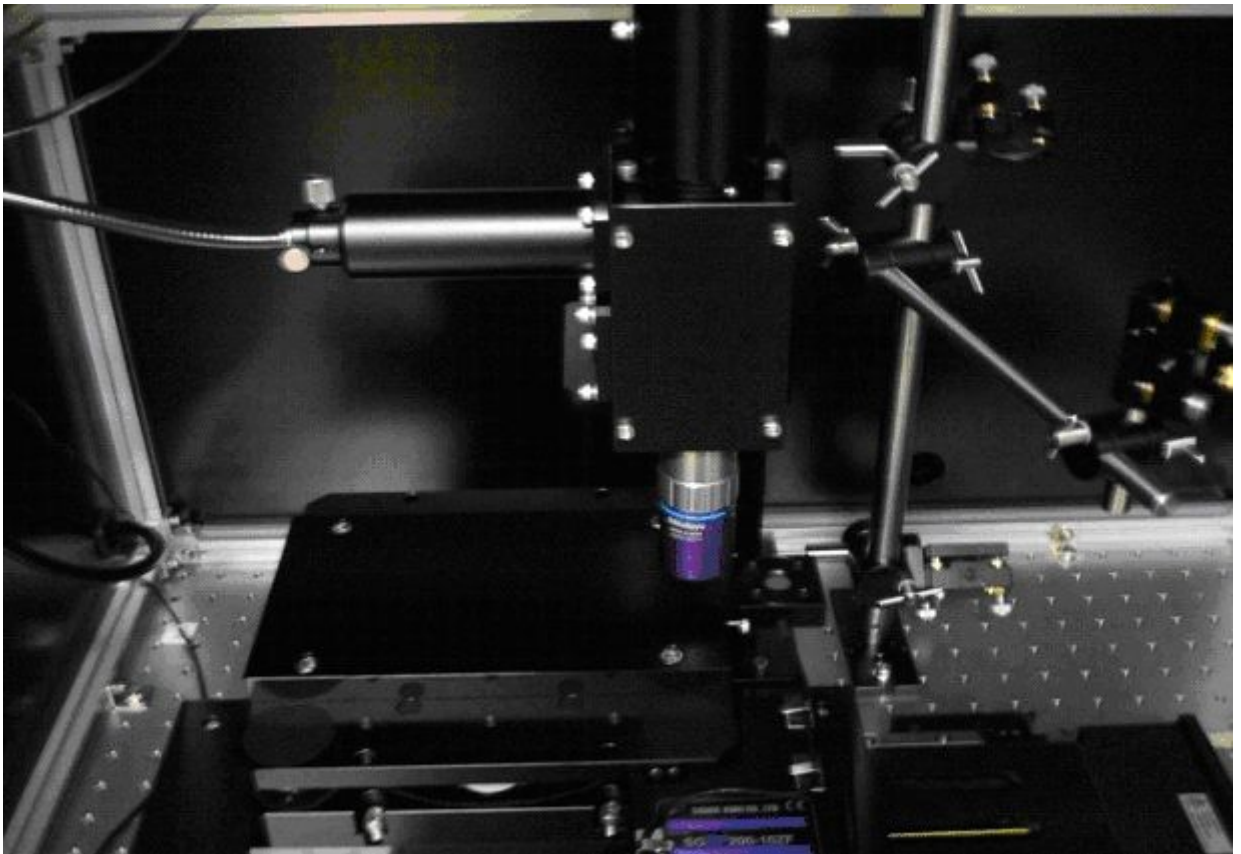


図 A-6 レーザ加工ステージの外形

2. 加工条件とリボン状フィルム

加工素材には、厚さ $0.3[\mu\text{m}]$ の Cu 薄膜の上下を厚さ $12[\mu\text{m}]$ の PET フィルムで絶縁したフィルムを使用した。この PET フィルムの上下に、深さが約 $11[\mu\text{m}]$ となるようなアブレーション加工を施して、電極厚さ約 $25[\mu\text{m}]$ 、ヒンジ厚さ約 $1[\mu\text{m}]$ のリボン状フィルムを作製することとした。レーザ加工機の最適な加工条件を決定するために、加工深さ、加工周波数、焦点距離などの条件を調査した。

まず、加工深さに関しては、レーザの強度と反復回数(同じ箇所に対して何回加工を行うか)を変化させて、加工深さを調べ、 $7[\text{mW}] - 7[\text{回}]$ の条件が最適な加工深さになることを確認した。

次に、加工周波数に関しては、レーザパルスの周波数(照射頻度)を変えることによって、1 パルス当たりのエネルギーを変化させたときの加工状況を調べた。図 A-7 に、加工周波数を変化させたときの PET フィルムの加工状況を示す。図から明らかなように、 $100[\text{kHz}]$ の場合はエネルギーが小さいため、加工箇所が途切れる部分があり、安定した加工形状にはなっていない。また、 $30[\text{kHz}]$ の場合はエネルギーが大きいため、加工部周辺への変色や変形があり、加工に適さないことが分かった。実験の結果、加工が安定しており、周辺への変色や変形が少ない $60[\text{kHz}]$ が最適な加工周波数であることを確認した。

最後に、最適な焦点距離を調べるために、レーザの焦点を合わせる位置をずらしながらその加工状況を調べた。尚、焦点距離は加工素材の中心部にある Cu 薄膜の位置を原点とし、PET フィルム表面に近づく方向の距離を目安とした。図 A-8 に加工状況の SEM 画像を示す。図から、レーザの焦点を Cu 表面に合わせた場合は、PET フィルムの内部が加工されたため、加工箇所はボイド状となっている。また、焦点距離を $10[\mu\text{m}]$ とした場合には、加工箇所は十分な深さが得られていない。実験の結果、焦点距離を $8[\mu\text{m}]$ とした場合に加工状況が最良であったため、これを最適な焦点距離に設定した。

図 A-9 にレーザアブレーションを用いて作製したリボン状フィルムの例を示す。作製したフィルムは、電極部分が長さ $0.3[\text{mm}] \times$ 幅 $0.3[\text{mm}] \times$ 厚さ $25[\mu\text{m}]$ 、ヒンジ部分が長さ $75[\mu\text{m}] \times$ 幅 $0.3[\text{mm}] \times$ 厚さ $1[\mu\text{m}]$ であり、当初の目標としていたリボン状フィルムを作製することができた。

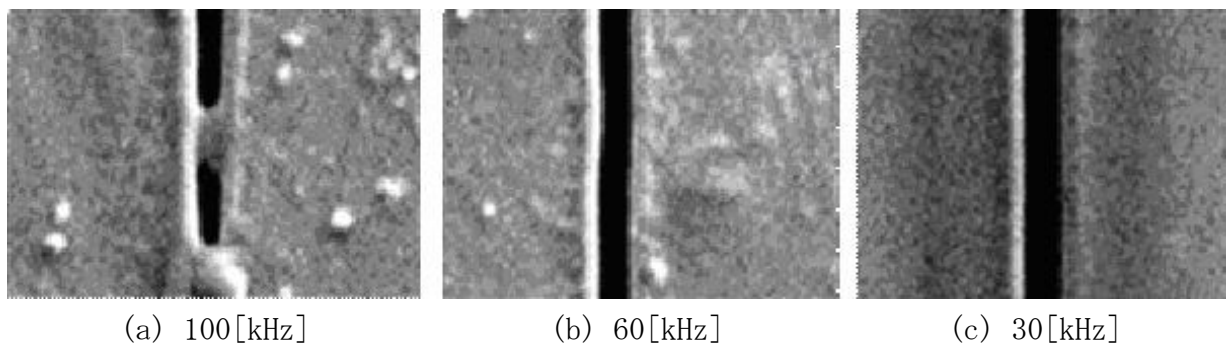


図 A-7 周波数による加工状況の違い

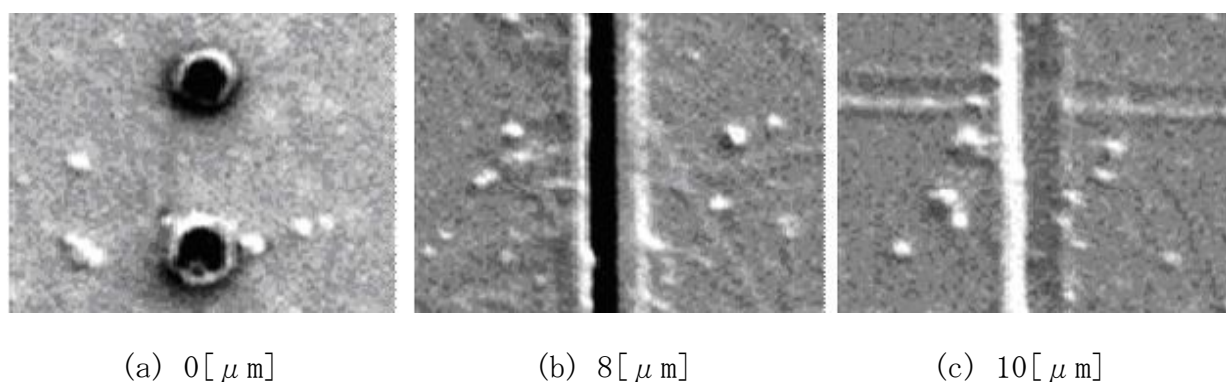


図 A-8 焦点距離による加工状況の違い

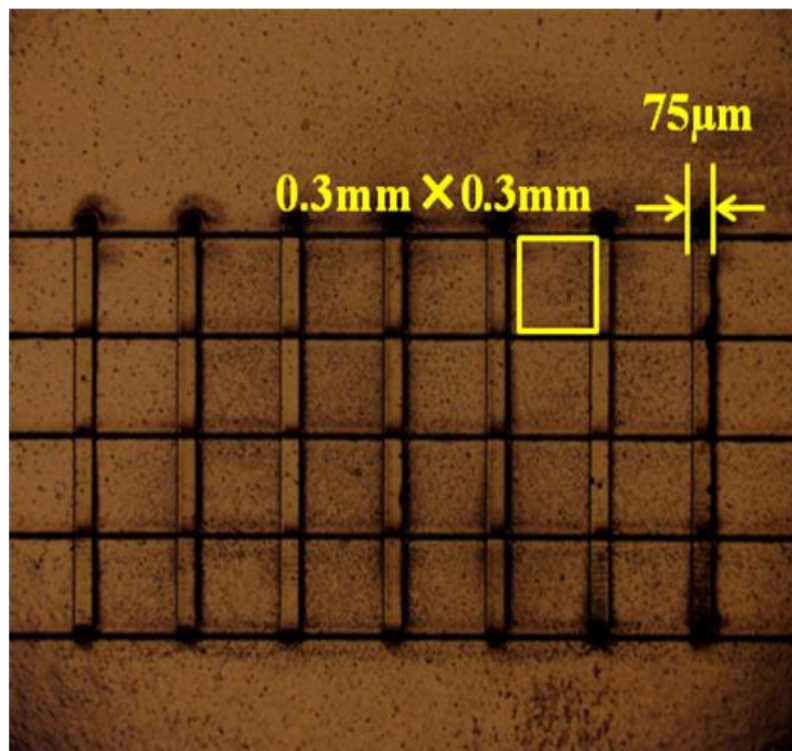


図 A-9 レーザアブレーションを用いて作製したリボン状フィルムの例

Appendix V フトリソグラフィによる微細化

厚薄構造を有するリボン状フィルムの作製は、これまで主に手作業で行ってきたが、生産性が低い上に、再現性も余り良くなかった。また、微細化に関しても2[mm]サイズ程度が限界で、これより小さなアクチュエータを作製することは困難であった。これらの問題を解決するために、以下に示すようなフトリソグラフィを用いたリボン状フィルムの作製方法を開発した。

1. フトリソグラフィの概要

フトリソグラフィは、感光性物質を加工対象の表面に塗布し、光とマスク等でパターンを焼き付ける技術のことで、ミクロン以下のオーダで高精度に凹凸加工することができ生産性の高い技術であるため、半導体の製造等に広く用いられている。また、既に実用化されている技術であるため、多くの知識と既存の設備・資材をそのまま利用することができ、リボン状フィルムの微細加工を将来的な大量生産を視野に入れて開発するのに適した技術といえる。この技術を用いて、リボン状フィルムの電極部のマスクパターンをフォトレジストに焼き付け、そのパターンに沿って絶縁体のヒンジ部のみをエッチングすることにより、厚薄構造を有するリボン状フィルムを作製することができる。図A-10にリボン状フィルムの作製手順を示す。

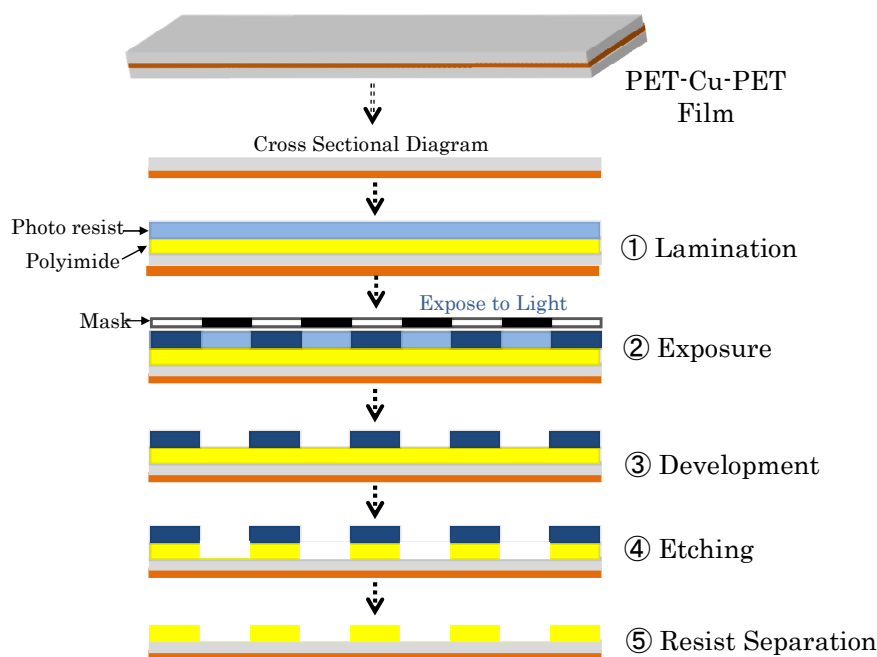


図 A-10 フトリソグラフィを用いたリボン状フィルムの作製手順

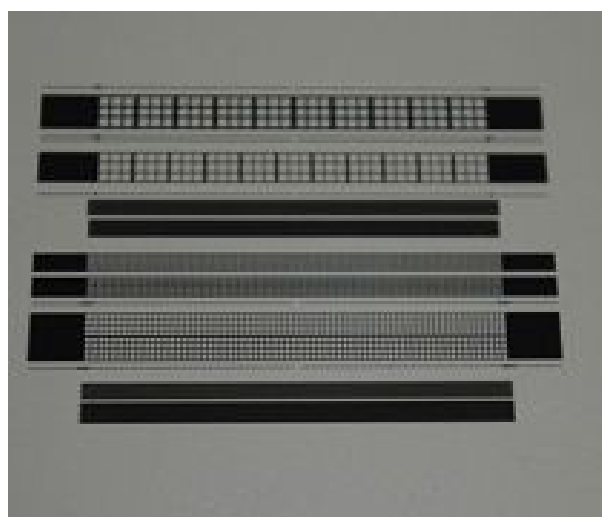
2. ラミネーションと露光

まず、厚さ $4[\mu\text{m}]$ の導電性薄膜 (PET-Cu-PET) の両側にポリイミドフィルム (カプトン H) とフォトレジスト (リストン SA150) を貼り付ける。その後、図 A-11(a) に示す電極パターンが描かれたマスク越しに紫外線を照射し、フォトレジストを感光させる。露光には図 A-11(b) に示す SUSS Micro Tec 社製の手動マスクアライナ MJB4 (紫外線露光装置) を用い、片面につき $12[\text{sec}]$ 露光した。

3. 現像

フォトレジストを感光させた後、現像を行い、感光しなかった部分だけを除去する。現像方法としては主に浸漬式、スプレー式、パドル式などが挙げられるが、精度良く短時間で現像を行えるスプレー式を採用し、そのための装置を作製した。

スプレー式とは、試料を回転ステージの上に張り付け、回転させながら現像液をスプレーで吹き付ける手法である。この手法で $30[^\circ\text{C}]$ の現像液 (Ca_2CO_3 の $1[\%]$ 溶液) を用いて、スプレー圧 $0.2[\text{MPa}]$ で $21[\text{sec}]$ 現像し、エッチングで除去したいヒンジ部分のみを露出させた。



(a) マスク



(b) 紫外線露光装置 MJB4

図 A-11 マスクと紫外線露光装置の外形

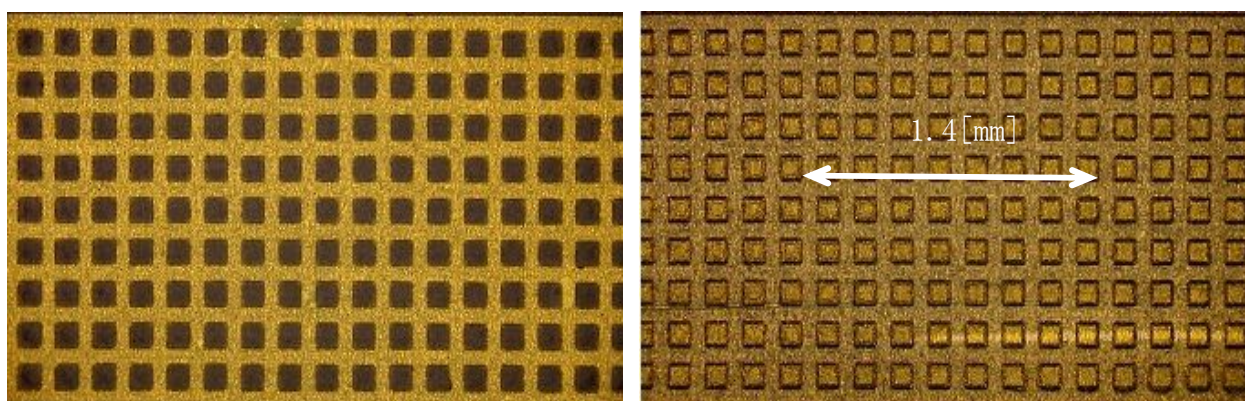
4. エッチングとレジスト剥離

エッチング液には、NaOH 27[%] と 2-(2-アミノエチルアミノ)エタノール 25[%] を用いて、50[°C]、5[min]のエッチング（浸漬法）を行い、ヒンジ部分のポリイミドを攪拌しない状態で溶解した。その後 NaOH 10[%]水溶液で洗浄し、NaOH 5[%] 水溶液で不要なレジストを除去後、純水で洗浄した。図 A-12 に現像後およびレジスト除去後のフィルムの外形を示す。

5. フィルムの切り出しと端面処理

図 A-12 の小さな四角形が電極部となるが、横に並んだ一列分が一本のリボン状フィルムとなる。これを一本ずつ切り出すために図 A-6 に示したレーザ加工機を用いた。レーザ発振機は COHERENT 社製の全固体 Q スイッチパルス UV レーザで、ガラス製プレパラートの上にエタノールを吹き付け、フィルムを張り付けて固定し、出力 50[mW]、加工速度 1[mm/sec]、周波数 35[kHz]でフィルムを切断した。

レーザで切り出したリボン状フィルムは銅箔が側面に露出しているため、アクチュエータに電圧をかけると端面から放電してしまう。そこで、エッチングで銅箔を取り除き、端面を絶縁する手法を採用した。エッチング液はサンハヤト社製の塩化第二鉄水溶液を用いた。



(a) 現像後

(b) レジスト除去後

図 A-12 現像後およびレジスト除去後のフィルムの外形

6. リボン状フィルムとアクチュエータ

図 A-13 にレーザ加工後のリボンフィルムと端面処理後のリボン状フィルムの外形を示す．図から明らかなように，一辺 $100[\mu\text{m}]$ の四角形が $75[\mu\text{m}]$ の間隔で配置され，ヒンジ部のポリイミドはきれいに除去されている様子が分かる．また，端面の銅箔もエッチングされており，絶縁性も良好であった．しかし，エッチング部分のテーパ角が約 $30[^\circ]$ であったため，微細化に際してはテーパ角の改善が必要となる．テーパ角改善にはカプトンとレジストとの接着力向上が有効だと考えられる．尚，ヒンジ部の厚さは接着層を含めて約 $10[\mu\text{m}]$ ，電極部は約 $25[\mu\text{m}]$ であった．

図 A-13 に示した $100[\mu\text{m}]$ 角のリボン状フィルムを現段階の設備では折り込むことができないため， $0.5[\text{mm}]$ 角のリボン状フィルムを作製し，図 A-14 のようなアクチュエータを作製した．このアクチュエータは 134 層で，電極の厚さ $25[\mu\text{m}]$ ，ヒンジの長さ $10[\mu\text{m}]$ ，ヒンジの長さ $75[\mu\text{m}]$ で電極の有効面積は $0.23[\text{mm}^2]$ である．

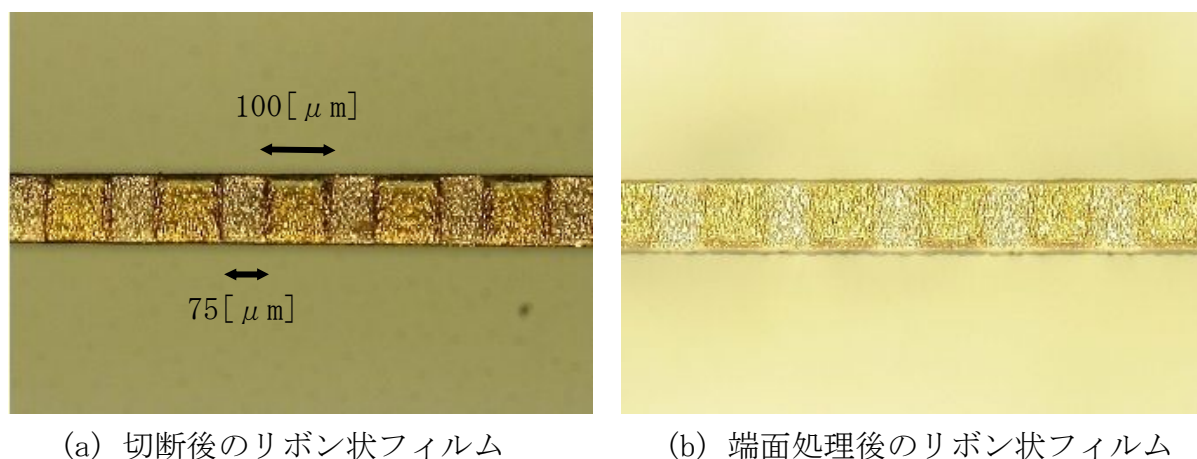


図 A-13 切断後および端面処理後のリボン状フィルム



図 A-14 $0.5[\text{mm}]$ サイズアクチュエータ

7. 発生力・バネ特性測定

作製したアクチュエータを圧縮した状態で固定し、大気中で 100[°C]、30[min]の熱処理を行った後、リボン状フィルムの先端に針で穴を開け、導電性ペースト（藤倉化成 ドータイト D-550）を塗布し、電圧を印加する端子部分を作製した。

これに電圧を印加し、光テコの原理を用いた天秤で発生力を測定したところ、図 A-15 の結果を得た。このとき、アクチュエータの全長は 4.7[mm]であり、初期電極間隔を 9.33[μm]として発生力を計算したものを理論値とした。図 A-15 より、発生力はほぼ理論値通りであり、608[V]を印加した時、61.6[g/cm²]の発生力を得ることができた。このことから、微細化によって発生力を大きくできることを確認することができた。

図 A-16 と図 A-17 に、このアクチュエータのバネ特性と 1 ギャップ当たりのバネ定数を示す。このアクチュエータのヒンジの厚さは 10[μm]であり、電極厚さ 25[μm]に比べてかなり厚くなっているためバネ特性は良好ではなく、駆動領域のバネ定数は 180[N/m]、アクチュエータの変位量が 1 ギャップ当たり 0.04[mm]のときの過負荷領域のバネ定数は 540[N/m]で、両者の比は 3.0 倍程度となっている。今後は、アクチュエータの収縮特性をより改善するためにも、導電性薄膜の作製方法やヒンジ材料の変更などのヒンジ部分を柔らかくする工夫が不可欠である。

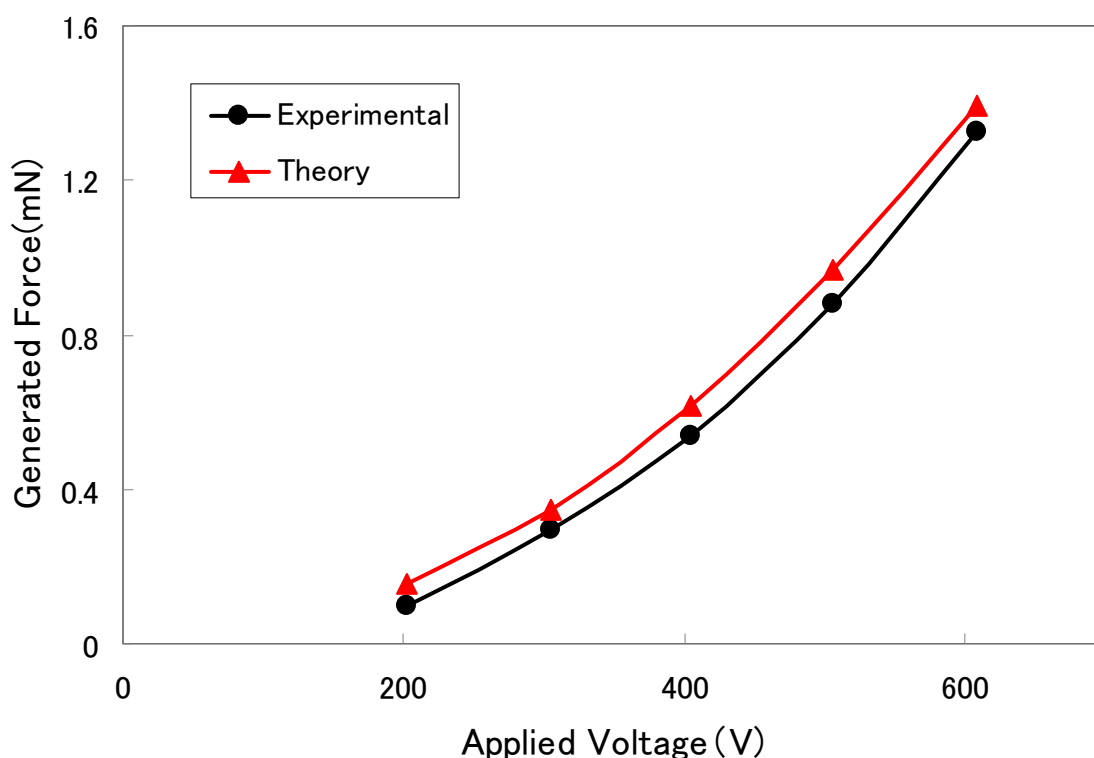


図 A-15 0.5[mm]サイズアクチュエータの発生力

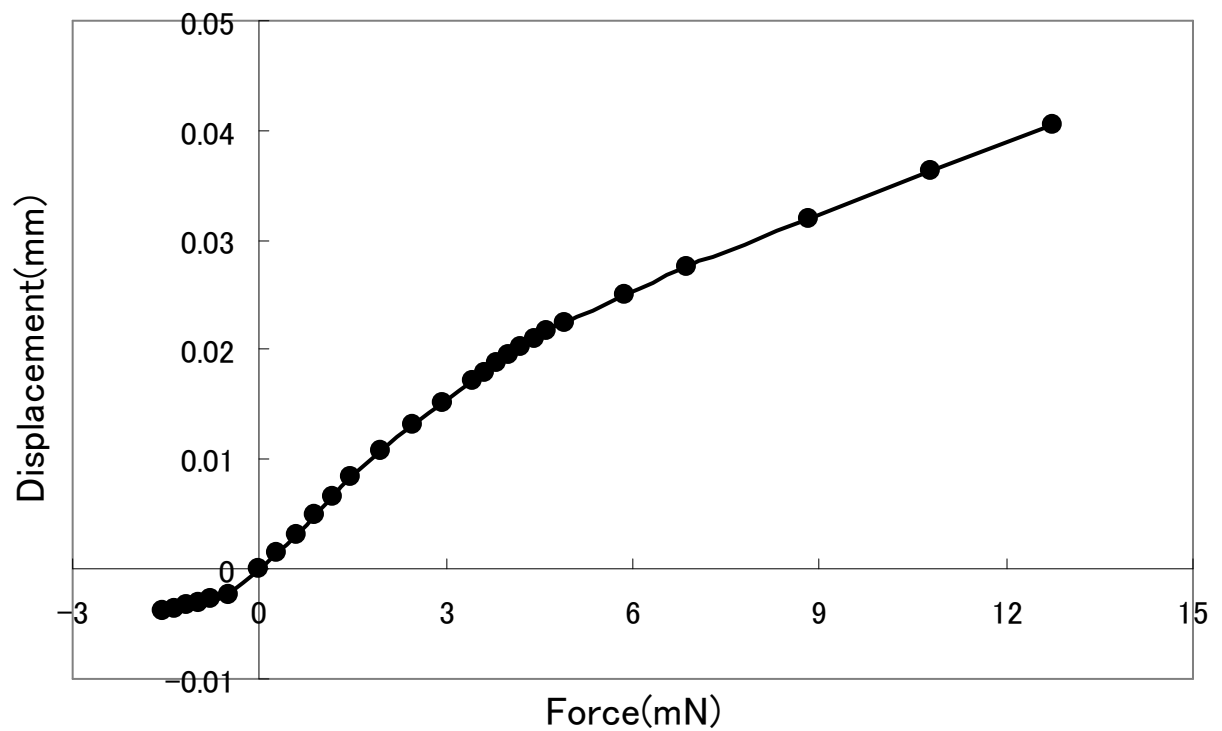


図 A-16 0.5[mm]サイズアクチュエータのバネ特性

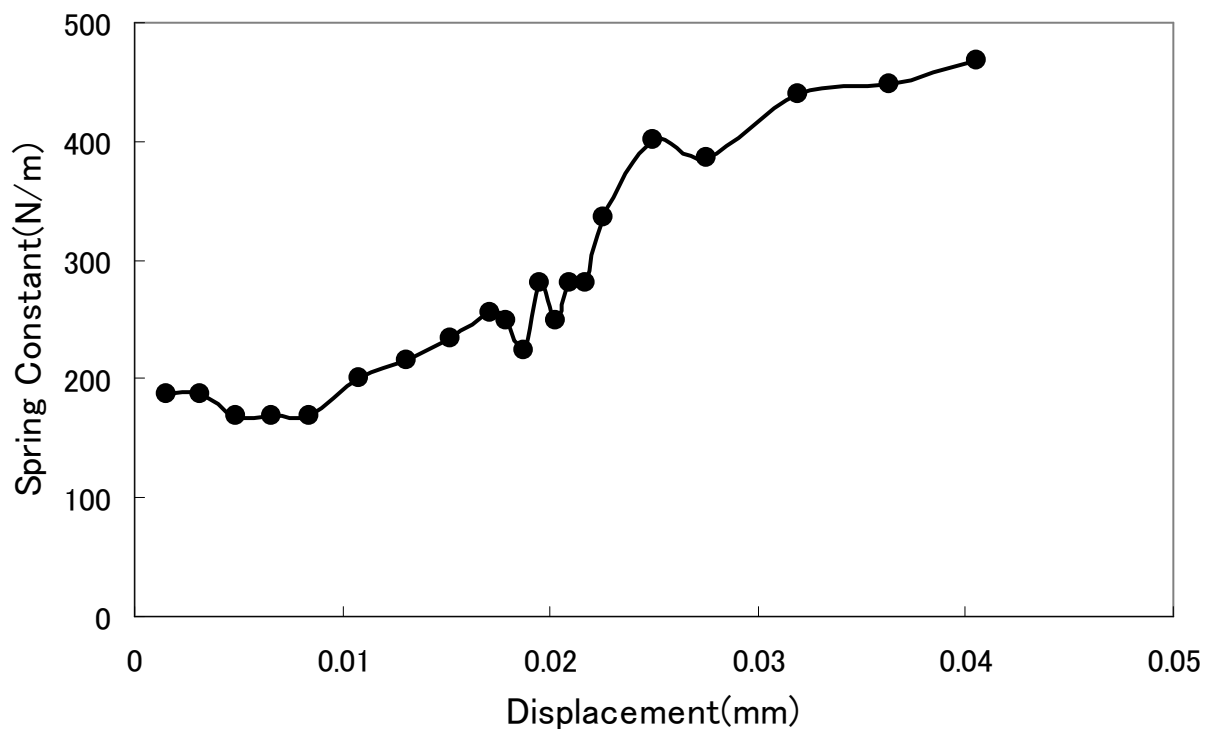


図 A-17 0.5[mm]サイズアクチュエータのバネ定数