

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	誘電エラストマアクチュエータを用いたマルチバルーン搬送機構
Title(English)	
著者(和文)	JANGYUJIN
Author(English)	Yujin Jang
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12690号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:鈴木 康一,遠藤 玄,岩附 信行,前田 真吾,高山 俊男
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12690号, Conferred date:2024/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

令和五年度
工学院 機械系 機械コース
博士論文

誘電エラストマアクチュエータを用いた
マルチバルーン搬送機構

指導教員 鈴森 康一 教授
遠藤 玄 教授

東京工業大学 工学院
機械系 博士 3 年
JANG YUJIN

目次

第 1 章	序論	
1.1	研究背景.	1
1.1.1	ソフトアクチュエータの進行波機構.	1
1.1.2	誘電エラストマアクチュエータ.	2
1.1.3	誘電エラストマクチュエータの構造.	3
1.1.4	マルチセグメントアクチュエータ.	7
1.1.5	ソフトアクチュエータにおけるマルチセグメント構造の製作方法.	11
1.2	研究目的.	12
1.3	本論文の構成.	13
第 2 章	シリコーンゴムのプラズマ処理接合における表面性状の影響	
2.1	大気圧プラズマ表面処理によるシリコーン同士の接合.	14
2.2	試験条件と評価方法.	16
2.2.1	試験片の製作方法と表面性状の条件.	16
2.2.2	表面形状の測定.	22
2.2.3	接合強度の測定.	25
2.3	測定結果と考察.	26
2.3.1	表面性状の評価.	26
2.3.2	シリコーンゴム同士の接合強度.	29
2.3.3	試験片表面の微細観察.	32
2.4	まとめ.	35



第 3 章	進行波生成空気圧アクチュエータの有限要素法による構造最適化	
3.1	プラズマ処理接合による渦巻型マルチセグメントアクチュエータ	36
3.1.1	渦巻型マルチセグメント構造	36
3.1.2	マルチセグメント構造による進行波機構	37
3.1.3	材料と製作方法	39
3.2	有限要素法による構造の最適化	40
3.2.1	解析モデル (2D 平面ひずみモデル)	40
3.2.2	構造パラメータの影響	41
3.2.3	3D 解析モデル	46
3.3	動作実験	47
3.3.1	実験装置	47
3.3.2	実験結果	48
3.3.3	搬送実験	51
3.4	まとめ	53
第 4 章	DEA 駆動 3-バルーン搬送機構	
4.1	誘電エラストマクチュエータのプレストレッチ効果	54
4.1.1	誘電エラストマクチュエータ	54
4.1.2	材料	55
4.1.3	プレストレッチ効果	56
4.1.4	シリコーンエラストマ膜の弾性特性	60
4.2	DEA 駆動 3-バルーンアクチュエータの構造と進行波生成機構	61
4.2.1	バルーン構造	61
4.2.2	DEA 駆動 3-バルーンアクチュエータの構造と進行波生成による搬送機構	63
4.2.3	製作プロセス	66
4.3	DEA 駆動バルーンアクチュエータの動作特性	68
4.3.1	実験による変形評価	68
4.3.2	変位量に対する電極形状の影響	73
4.3.3	理論モデルによる動作解析	74
4.3.4	空気圧供給ラインの除去の影響	80

4.3.5	DEA 駆動による応答性向上.	82
4.3.6	発生力の測定.	83
4.4	DEA 駆動 3-バルーンアクチュエータの進行波生成による搬送機構. . .	84
4.4.1	DEA 駆動 3-バルーンアクチュエータの製作.	84
4.4.2	駆動装置.	85
4.4.3	バルーン頂点位置計測実験.	87
4.4.4	空気圧供給ラインを除去した状態での駆動可能性評価.	90
4.4.5	搬送実験.	92
4.5	まとめ.	94
第 5 章	DEA 駆動バルーン機構の自励振動	
5.1	自励振動の動作原理.	95
5.2	自励振動に対する運動解析.	97
5.2.1	理論解析.	97
5.2.2	自励振動に対する動作特性の測定.	100
5.2.3	自励振動に対する電流制限抵抗と印加電圧の影響.	102
5.3	まとめ.	104
第 6 章	結論	
6.1	本研究の成果.	105
6.2	課題と今後の展望.	109



図目次

1.1	Schematics of dielectric elastomer actuators	3
1.2	A modular multilayer DEA (a) Fabricated actuator, (b)Formation of a bimorph from two unimorphs and flexible adhesive (c) Operation of a bimorph actuator.	4
1.3	Examples of prestretched structure in DEAs: (a) Linear spring, (b) Pressurized, (c) A second DE membrane, and (d) Negative-stiffness spring.	6
1.4	Examples of DEAs: (a) Untethered feel-through haptic actuator; (b) Flexible peristaltic pump with 6 integrated actuators; (c) Tunable resonator; (d) Low-voltage actuator for tactile displays; (e) Reconfigurable and latchable shape-morphing structure; (f) 3D origami-inspired folding actuator; (g) 3D reconfigurable meso-structure.	7
1.5	Micro-conveyor with 28 integrated actuators.	8
1.6	Annelid-like peristaltic crawling robot.	8
1.7	Annelid-robot made from a dielectric elastomer	9
1.8	Traveling-wave actuator made from a dielectric elastomer (a) Fabricated folded stack (b) Completely fabricated actuator.	10
2.1	Silicone direct bonding using plasma treatment.	15
2.2	Photograph of the plasma treatment device.	15
2.3	Peel test specimen.	16
2.4	Schematic illustrations of the fabrication process.	18
2.5	Top-layer and infill patterns designed to assess the surface roughness.	21
2.6	Stylus surface profiler used for measuring surface roughness	22
2.7	Roughness profile indicating R_a , R_t , and R_{ku}	24

2.8	Photograph of the 90° peel test.	25
2.9	Primary and roughness profiles obtained through FFT for all specimens.	28
2.10	Stress-strain curves for eleven types of surface properties	30
2.11	Adhesion strength with respect to roughness parameters (a) R_a , (b) R_{ku}^*	31
2.12	Microstructural images: molded substrates, exfoliated substrates, and peeled membranes.	33
2.13	SEM images for molded and exfoliated substrates.	34
3.1	Design of the spiral actuator: (a) Top view; (b) cross-sectional view.	37
3.2	The principle of operation of the actuator used to induce traveling wave motion.	38
3.3	Fabrication process: (a) 3D printing of the mold, (b) rubber molding, and (c) direct bonding via atmospheric plasma treatment.	39
3.4	The 2D plane strain model for FEA simulation. All dimensions are in mm.	41
3.5	Directional deformation obtained from FEA simulations at an air pressure of 80 kPa:(a) y-axis; (b) x-axis.	42
3.6	Displacement with respect to t/a	43
3.7	Displacement with respect to b/a	43
3.8	FEA simulation for failure condition with $b/a = 1.5$. Direction displacement in the (a) y-axis and (b) x-axis.	44
3.9	Displacement with respect to c/a	45
3.10	Total transformation results obtained from 3D finite element model. Pressurized state of (a) one chamber and (b) two successive chambers.	46
3.11	Experimental apparatus.	47
3.12	Deformation values generated from FEA simulations and experiments.	48
3.13	Top position behavior on each chamber. Each state number is indicated in response to an applied pressure signal from an inactive state (labeled 0) to an active state (labeled 1–6), corresponding to that in Table 3.2.	50



3.14	Photographs of the objects transported by the spiral actuator at a pressure of 78.5 kPa and 10 Hz: (a) pressure from inside to outside segments; (b) pressure from outside to inside segments.	51
3.15	Applications: conveyors that move objects to a central location or sort objects by size.	52
4.1	Structure and actuation principle of a DEA.	55
4.2	Experimental apparatus: (a) Top view; and (b) Side view.	57
4.3	Planar and thickness strains of the actuator versus the applied voltage for the actuators with an initial membrane thickness of (a) 50, (b) 100, and (c) 200 μ	59
4.4	Layout of the test specimen used for tensile test.	60
4.5	Stress–strain behavior of silicone membrane (thickness 200 μ m).	60
4.6	Schematic view of balloon actuator: (a) Initial state; (b) Pressurized state and activated state.	62
4.7	Schematic diagram of the designed 3–balloon actuator: (a) Actuator parts; and (b) Cross section during a pressurized state.	64
4.8	Transportation behavior of the 3–balloon actuator.	65
4.9	Fabrication process of a 3–balloon actuator: (a) Schematic diagram of manufacture flow; and (b) Snapshots of a screen-printed DEA, molded air chamber, and fabricated 3–balloon actuator.	67
4.10	Experimental apparatus.	69
4.11	Photograph of the 1–balloon actuator at the initial pressure of 12.2 kPa: (a) 0kV and (b) 9 kV.	70
4.12	Comparisons of the balloon actuator at the initial pressure of 12.2 kPa (black arrow indicates the change in the center of the ellipses).	71
4.13	Height displacement of the balloon actuator with respect to initial pressure for 8, 9 kV.	72

4.14	Width change of the balloon actuator with respect to initial width for 8, 9 kV.	72
4.15	Schematic view of balloon DEA: (a) Initial state; (b) Pressurized state; and (c) Activated state.	75
4.16	Simulation result of balloon height for pressurized and activated states (applied voltage = 9 kV)	78
4.17	Simulation result of the relationship between height displacement and initial pressure for 6, 7, 8, 9 kV	79
4.18	Response of voltage signal for constant pressure and amount of substance. . .	81
4.19	Response of DEA activated and pneumatic balloon actuator.	82
4.20	Force measurement setup for the balloon actuator.	83
4.21	x-axis force of the balloon actuator with respect to voltage at the pressure of 13.2 kPa.	84
4.22	Fabricated 3-balloon actuator.	85
4.23	Electric circuit for the control system.	86
4.24	Peristaltic wave signal applied to each segment.	88
4.25	Snapshot of the 3-balloon actuator deformation with an applied voltage of 7.5 kV and pressure of 14.6 kPa.	89
4.26	Marker position on each segment and tracking results with an applied voltage of 7.5 kV and pressure of 13.2 kPa: (a) Forward voltage signal; and (b) Backward voltage signal.	91
4.27	Behavior of pressure and the marker position with different volumes under an applied voltage of 7.5 kV and a pressure of 13.2 kPa: (a) Internal pressure over time; and (b) Marker position tracking.	92



4.28	Snapshots of the paper transported by the 3–balloon actuator with a pressure of 13.3 kV and a voltage of 7.5 kV, 1 Hz: (a) Forward voltage signal; and (b) Backward voltage signal.	92
4.29	Transportation velocity for 3–balloon actuator at a voltage of 7.5 kV, 1 Hz.	93
5.1	Structure and operation principle of self-excited balloon actuator.	96
5.2	Theoretical model of the self-excited balloon DEA.	97
5.3	Theoretical results of the relationship between frequency and applied voltage V of the self-excited actuator.	99
5.4	Experimental setup for the self-excited balloon actuator.	100
5.5	Measured self-excited actuation with different gap distances for $V = 6.5$ [kV], $R = 5$ [G Ω]	101
5.6	Experimental results of the relationship between frequency and gap distance for $V = 6.5$ [kV], $R = 1, 2, 3, 4, 5$ [G Ω]	103
5.7	Experimental results of the relationship between amplitude and gap distance for $V = 6.5$ [kV], $R = 1, 2, 3, 4, 5$ [G Ω]	103
5.8	Experimental results of the relationship between frequency and voltage V for $V = 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5, 8$ [kV], $R = 4$ G Ω	104

表目次

2.1	Surface symbols for standard samples.	19
2.2	Conditions for the mold fabrication using 3D printers (comparative samples) .	20
2.3	Surface roughness parameter R_a for eleven samples.	26
2.4	Surface roughness parameter R_{ku}^* for eleven samples.	27
3.1	Initial structural parameters for FEA simulation.	41
3.2	Pressurized and depressurized state of each chamber in steps 1 to 6. . .	49
4.1	Specifications of the silicone membrane (ELASTOSIL® FILM 2030). . . .	55
4.2	Properties of the electrode.	56
4.3	Specification of actuators used, and field strength obtained in the experiment.	57
4.4	Experimental results with balloon actuators driven by DEA of two different electrode geometries.	73
4.5	Parameters used in theoretical analysis of the balloon DEA.	78
5.1	Parameters used in theoretical analysis of the self-excited actuator.	99
6.1	Pneumatic vs DEA vs Balloon actuator driven by DEA vs Self-excited ballo- on actuator: Pros and Cons	108



第1章

序論

1.1 研究背景

1.1.1 ソフトアクチュエータの進行波機構

近年，ポリマー，ゴム，ゲルなどの柔軟な材料を用いたソフトアクチュエータの研究が盛んに行われており，従来の高出力，高硬度のアクチュエータでは不可能であったアクチュエータの配置方法や超多自由度系の実現などのことが可能になった [1][2].

生体機構に基づく動作システムは，柔らかく弾性的に変形可能な動きをすることから注目されている．生体模倣運動の一つとして，カタツムリやミミズ，ナメクジの動作原理から着想を得た進行波機構がある．このようなアクチュエータは，1つの制御可能なデバイス内に複数の活性領域を有しており，これらの活性領域を循環させることによって発現する．この構成は，従来の超音波モータのようなピエゾセラミックデバイス [3] で広く使用されてきた．また，物体磁歪インチワーム [4]，空気圧蛇ロボット [5]，環形動物ロボット [6]，人工筋肉 [7] など，様々な材料や構成のソフトアクチュエータに応用されてきた．

代表的な進行波の発生方法として，空気圧アクチュエータがある．空気圧アクチュエータは構造が単純であり，かつ出力重量比が大きいなどといった利点があるため，ソフトロボティクスで広く使用されている．進行波運動を利用した空気圧アクチュエータとして，大腸内視鏡の挿入を補助するアクチュエータ [8]，パイプラインのような複雑で制約の多い環境で移動できるスネークロボット [9]，ソフト搬送用の平面型空気圧アクチュエータ [10] が開発された．これらの空気圧アクチュエータは，独立に制御可能な複数の空気室へ周期的に位相差をつけて加圧さ



せることで動作する。しかし、一方で空圧を利用したアクチュエータは、エアホースにつながり、コンプレッサ、タンク、レギュレータ、ガス源といった大きく重い機械要素からなる駆動装置が必要となる。多くの空圧供給エアホースが必要となることはロボットへ適用の際に動作の障害になりうる。また、長距離移動や搬送時、応答遅れにより作動周波数が制限されることもある。

また、柔軟性を保つ電気活性高分子アクチュエータ (Electroactive Polymer Actuator) の一種として誘電エラストマクチュエータ (Dielectric Elastomer Actuator, DEA) がある。DEA は、誘電エラストマ膜とそれを挟んだ伸縮性の柔軟電極で構成され、表面電極間に数 kV 程度の電圧を印加することで動作する。DEA は高いコンプライアンス性を有すること、変位が大きいこと ($> 100\%$)、応答速度が速いこと (0.1 ms)、エネルギー密度が高いこと ($> 3.4 \text{ MJ/m}^3$) といった性能を兼ね備え [11][12]、誘電エラストマを用いた移動ロボット [13][14][15] やロボットハンド、グリッパー [16] のような生物模倣ロボットの開発が行われてきた。これらの特性を有することから、制御システムが簡略化されること、かつ長距離移動や長距離搬送に用いても遅れの生じない電磁気駆動が期待される。

1.1.2 誘電エラストマクチュエータ

誘電エラストマクチュエータ (Dielectric Elastomer Actuator, DEA) は、高分子材料でできた柔軟で非常に伸縮性の高いコンデンサで構成されている。DEA は、その大きな変形特性、設計の拡張性、高いエネルギー密度と効率、およびアクチュエータとセンサの二重動作により、産業用アクチュエータ [17][18]、ソフトロボット [19][20]、ウェアラブル [21][22]、人工筋肉 [23][24] など、メカトロニクスのさまざまな分野で活用されている。現在開発されている DEA ベースのデバイスのほとんどは、巨視的なレベルで動作するにもかかわらず [25]、革新的な小規模アプリケーションの開発に多くの機会を提供している [26][27]。特に、DEA の本質的な柔軟性と大きな変形可能性は、インテリジェントなウェアラブル、スマートスキン、生物に着想を得たソフトロボットなど、新たな応用分野で期待される。考えられる例としては、再構成可能な触覚ディスプレイ、協調運動が可能な生物に着想を得たロボット、小さな物体の搬送装置、局所的な圧力分布を検出するための装着可能なセンサ表面などがある。

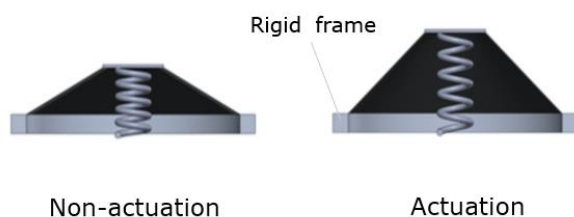
1.1.3 誘電エラストマクチュエータの構造

DEA は柔軟性が高いため、さまざまなレイアウトや作動モードを生成することが可能である [28]. シリコンゴムやアクリルゴムを用いた通常の DEA は、誘電体の材料特性により、伸展の初期で大きな応力を必要とする [11]. 従来研究では、Fig. 1.1 に示すように [29], 大きな変位量や発生力を得るための構造を利用してロボットの運動へと応用する研究が進められてきた. 以下に代表的な構造とロボットへの応用例について説明する.

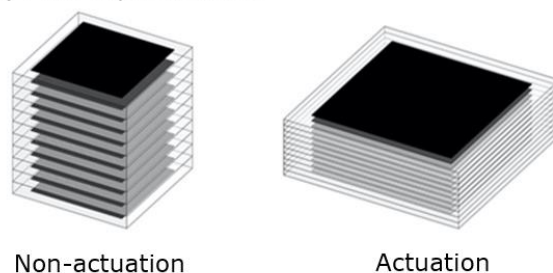
円錐構造

エラストマ膜をリジッドフレームで固定し、円錐の構造になるようにプレストレッチを与える構造となる (Fig. 1.1(a)). 電圧を印加すると大きな変位と発生力を生み出し、 $50\text{ }\mu\text{m}$ のシリコンエラストマでできた $86\times 86\times 25\text{ mm}$ の円錐アクチュエータは 10 kg の物体を 3 mm 持ち上げた [30].

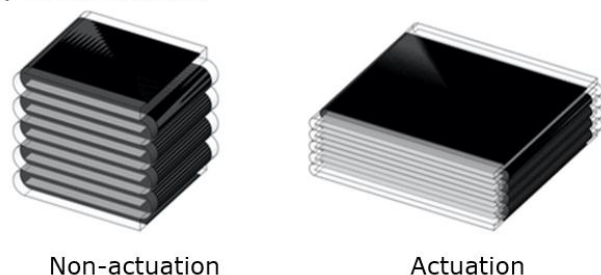
(a) Cone actuator



(b) Multi-layer actuator



(c) Folded actuator



(d) Inflated actuator

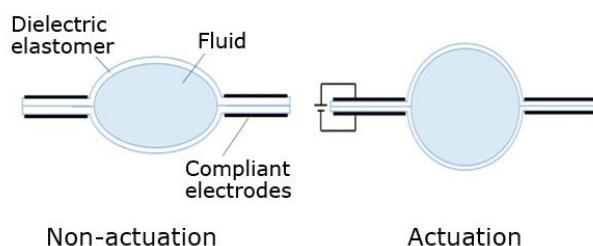


Fig. 1.1 Schematics of dielectric elastomer actuators [29]

多層構造

DEAの厚さ方向変形を生かした構造となる。複数の層を積層し、それらを同じ高電圧信号で同時に作動させることで、巨視的なストロークを実現する [31][32]。このとき、発生力と変形はレイヤーの数と電極の表面積、エラストマのヤング率で調整できるため、拡張性が高い。一般的に、大きなストロークよりも大きな力を発生させる必要がある場合には、スタック型 DEA が選択される。100 層以上の構造でできたアクチュエータで 100% を超えるひずみ量を有したという報告もある [33]。ところが、エラストマ膜を重ねる過程でアクチュエータを破損させる可能性があり、加工処理に耐える限度でレイヤー数は制限される。さらに、層間分離を抑えなければならないため、比誘電率の高いアクリルエラストマを用いた方が望ましい。重ねるエラストマ膜を独立に駆動させると Fig. 1.2 のように曲がる運動も可能である [34]。

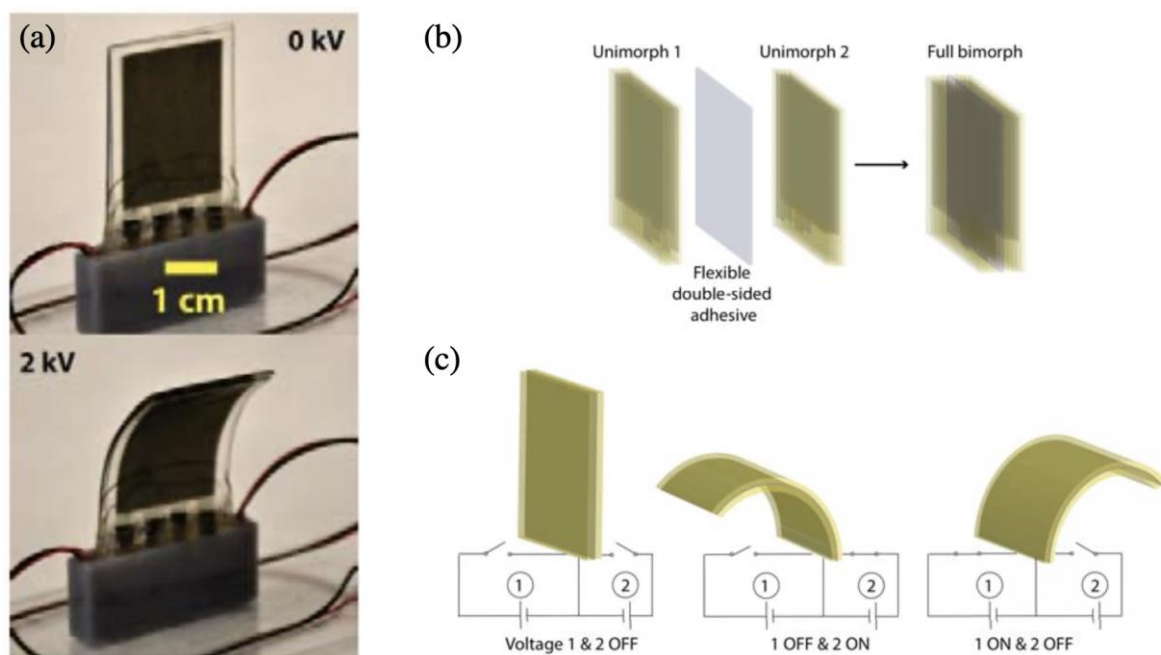


Fig. 1.2 A modular multilayer DEA (a) Fabricated actuator, (b) Formation of a bimorph from two unimorphs and flexible adhesive (c) Operation of a bimorph actuator [34]

折り畳み構造

一つの長いアクチュエータを数回折りたたむことで多層構造の効果を出せる構造となる．正方形の折りたたみアクチュエータが $12 \text{ V}/\mu\text{m}$ の電場で 16% の厚さひずみを発生した [35]．この構造を持つアクチュエータは厚さ方向への動きを用いる応用に適しており，実際手用リハビリテーションデバイスやロボットアイボール駆動装置に応用されている [36]．

バルーン構造

電極の面積拡張変形を生かした構造である．誘電エラストマを空気圧[37]や油圧 [38]，水圧により膨らました構造にすることにより大きな変形が可能となる．空圧印加時の面積拡張に伴う膨張による構造変形は，拘束する要素がないため，体積変化が大きいという特徴がある．アクリルエラストマの DEA は，面積ひずみが 158% から1692% まで改善したと報告されている [39]．これらは，機関車ロボット [40]，宇宙用多方向ドームアクチュエータ [41]，流体ポンプ [42]，ソフト触覚インターフェイス [43]，半球型スピーカー [44] などに応用されている．

作動ストロークを大きくするために，DEA は通常，プレストレッチを与えるリジッドフレームのような機械的システムと組み合わされる．このようなプレストレッチは，アクチュエータの性能を増大させる [45][46]．Fig. 1.3 は，一般的に採用されている例であり，ストロークを予測するための対応する力-変位曲線を示している．吊り下げマス [47][48]，リニアスプリング [49][50]，加圧空気 [51][52]，または 2 重構造 [53][54] などがある．



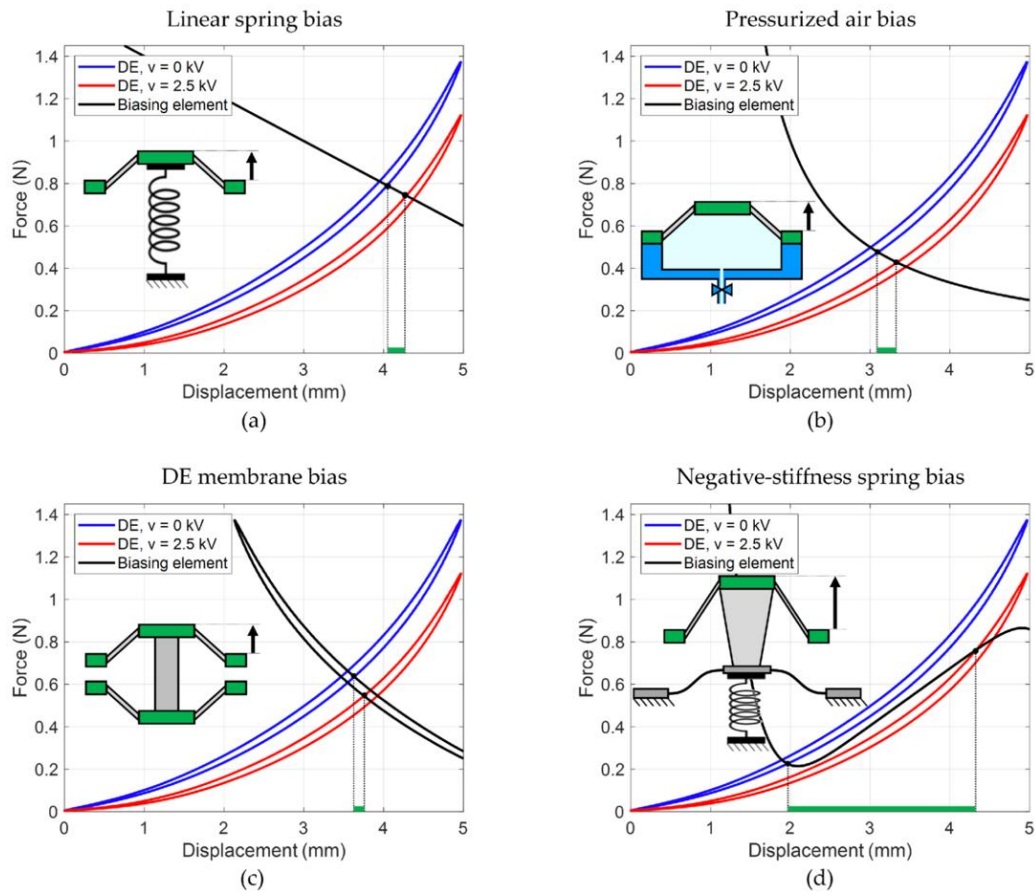


Fig. 1.3 Examples of prestretched structure in DEAs: (a) Linear spring, (b) Pressurized (c) A second DE membrane, and (d) Negative-stiffness spring [55]

1.1.4 マルチセグメントアクチュエータ

マルチセグメントアクチュエータはソフトロボットなどによく利用される構成である。DEAを用いた先行研究として、Fig. 1.4 に示すように、触覚素子 [56]、マイクロ流体フレキシブルポンプ [57]、広帯域チューナブル共振器 [58]、双方向触覚ディスプレイ [59]、表面上に分布したアクチュエータにより面内または面外で作動する再構成可能構造のアクチュエータ [60][61][62]、などがある。

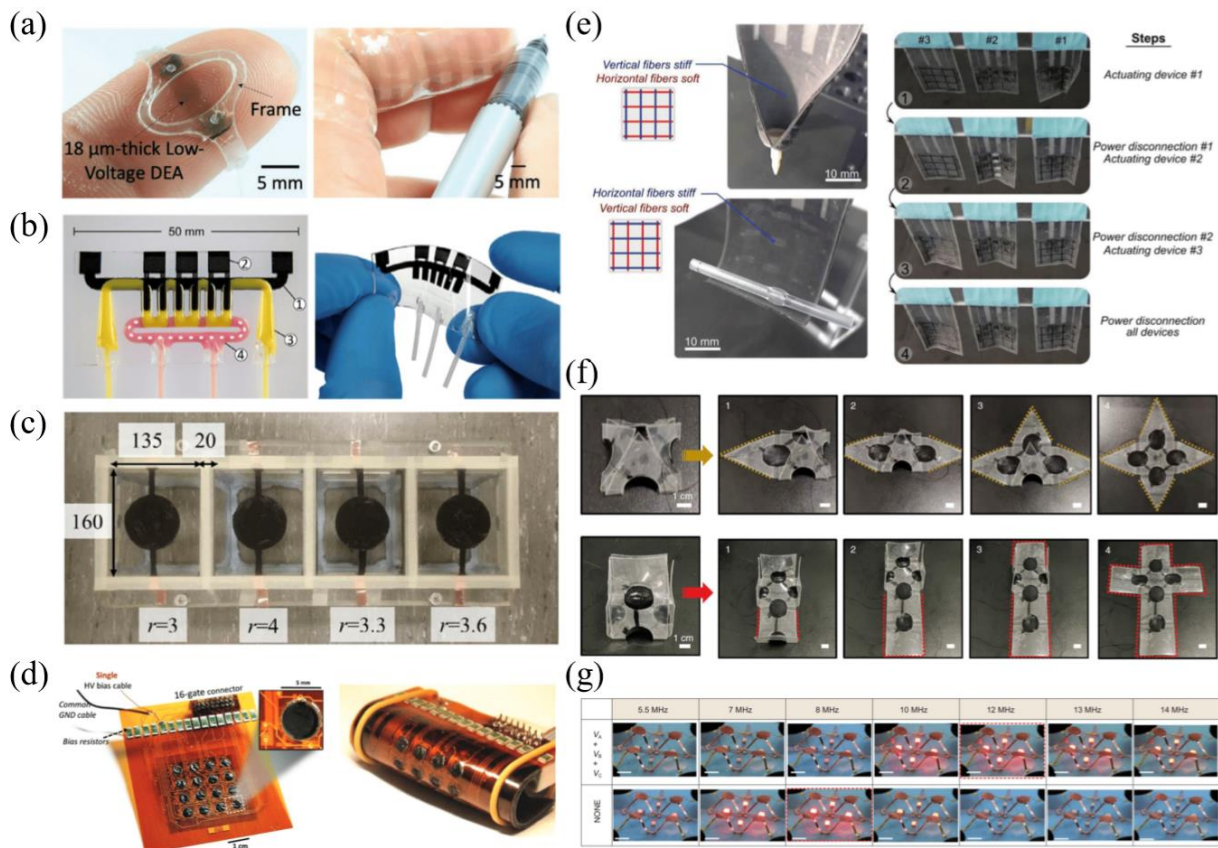


Fig. 1.4 Examples of DEAs: (a) Untethered feel-through haptic actuator [56]; (b) Flexible peristaltic pump with 6 integrated actuators [57]; (c) Tunable resonator [58]; (d) Low-voltage actuator for tactile displays [59]; (e) Reconfigurable and latchable shape-morphing structure [60]; (f) 3D origami-inspired folding actuator [61]; (g) 3D reconfigurable meso-structure [62]

生物に着想を得た進行波機構を再現したアクチュエータを紹介する． Fig. 1.5 [63] にしめすように，物体の微小輸送のために進行波を発生させることができるコンベアが開発された．駆動装置の面積は 25 cm^2 で，28 個の集積型 DEA を含み，各 DEA の面積は 0.126 mm^2 である．駆動条件 3.5 kV ， 0.2 Hz で， $6.1\text{ }\mu\text{m/s}$ の移動速度を達成した．

複数のDEAによる進行波機構は，ロコモーションロボット運動の実現にも利用されている [64][65]． Fig. 1.6 にしめすように， 1×4 配列の楕円フレームからなる設計となり，各作動ユニットそれぞれが楕円形と円形の間で切り替わり干渉することにより作動する．曲げモードで動作するアクリル製 DEA に基づく環形蠕動ロボットは長さ 150 mm ，重さ 8 g で，最大速度 11.5 mm/s で前進または後退運動を達成した．



Fig. 1.5 Micro-conveyor with 28 integrated actuators [63]

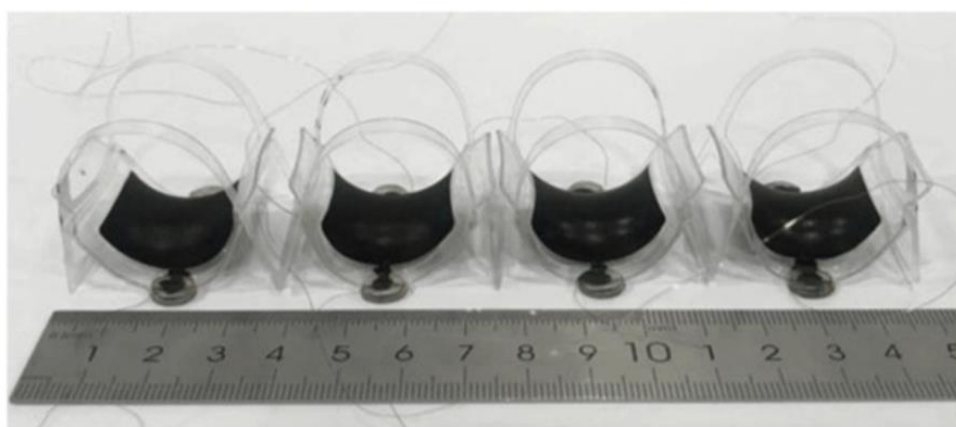


Fig. 1.6 Annelid-like peristaltic crawling robot [65]

Fig. 1.7 に示す3-セグメント環形動物ロボットは [6], シリコーンエラストマで構成され, 2 Hz の電圧信号で最大 5.3 mm/s の速度を持つ. 最低 3 セグメントを要し, サドル形のリジッドフレームでプレストretchされたエラストマが軸方向伸張と高さ方向圧縮の 2 自由度モーションを作り出し, 駆動中, 各セグメントと底面に発生する摩擦差により移動する.

Fig. 1.8 [66] に示す誘電エラストマアクチュエータは, 折り畳み構造のシリコーンエラストマで構成され, 2.5 Hz の電圧信号で最大 2.1 mm/min の速度を持つ. 長いアクチュエータを数回折りたたむことでできるセグメントを最低 3 つ並べ, 順に電圧を印加することで進行波を発生し 2 枚の平面の間を移動する. 電圧信号に従い厚さ方向圧縮および軸方向伸張を繰り返すことで, 平面との摩擦で固定されていたセグメントが電圧印加中進む. すなわち, 進行波を生成し平行面の間を移動するアクチュエータとなる.



Fig.1.7 Annelid-robot made from a dielectric elastomer [6]

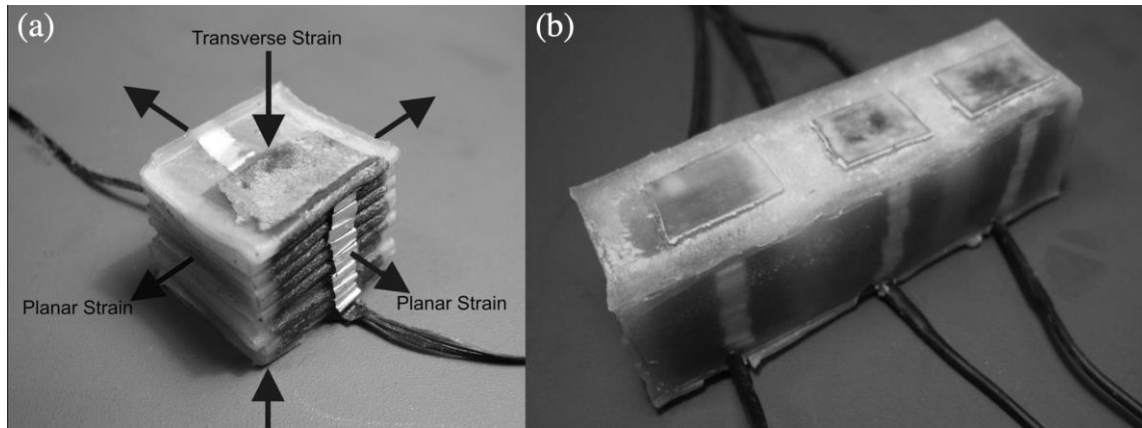


Fig. 1.8 Traveling-wave actuator made from a dielectric elastomer (a) Fabricated folded stack, (b) Completely fabricated actuator [66]

1.1.5 ソフトアクチュエータにおけるマルチセグメント構造の製作方法

ソフトアクチュエータは、本体や可動部がポリマー、ゲル、シリコーンなどの柔軟材料で構成されており、弾性的に変形可能な動きをすることから注目されている。その製作方法の一つとして、液状ゴムを用いた成型は、ソフトロボットの開発に広く導入されている [67][68]。様々なソフトマテリアルを所望の形状・サイズで短時間に製造でき、成形工程での後処理が不要である。設計の自由度が高く、同時に表面構造を形成することが可能なため、カスタムした型により、カスタムされたプロトタイプを開発することができえる [69][70]。さらに、3D プリンティング技術を使えば、複雑な形状の型も簡単に印刷でき、成形したゴムを任意の形状に成形することができる。3D プリントした型は、コンピュータ支援設計 (CAD) ファイルを使用して直接印刷されるため、それぞれのソフトロボットシステムの設計、製作、実装のための効率的なプロセスが実現する。3D プリントした型を用いてゴム成型をするといったプロセスは、リニアアクチュエータ [71]、触覚センサ [72]、ロボットアーム [73]、マイクロフィンガー [74]、グripper [75] などに用いられた。

液状シリコーンゴムは、化学的/熱的安定性に優れ、柔軟な動きが可能で、構造への組み込みが容易なため、ソフトロボットの重要な材料と考えられている。さらに、シリコーンは比較的高い引張強度を提供するため、伸縮可能なセンサスキン [76] やマイクロチャンネル [77] に使用されている。また、蛇 [78] やタコ [79] の運動を実現するため、複数の内部チャンバーを持つシリコーンゴムを採用している。

ソフトマテリアルの接合技術の向上は、ソフトデバイスの開発に密接な関係がある。ゴムの接合方法として、プラズマ [80]、アーク [81]、紫外線 [82]、レーザー処理 [83] などが研究されている。山本らは、大気圧プラズマがシリコーンエラストマの疎水性から親水性への表面改質と接合を実現する有望な技術であることを実験的に示した [84]。

3D プリントした型で成型したゴムの場合、ゴム表面とその粗さは、3D プリントした型の表面波形によって決定される。3D 印刷により堆積される層の幅と高さは波形に大きな影響を及ぼし、その結果、接触面積が異なる。以前の研究では、表面粗さは印刷速度 [85]、印刷方向 [86]、層の高さ [87][88]、および、積層構造 [89] に影響されることが実証されている。



1.2 研究目的

本研究では、高い柔軟性を持つ構造、様々な環境へ適用できる mm オーダーの振幅、長距離探査や搬送に用いても DEA 駆動、ワイヤレス駆動、の特徴を備えた進行波発生方法の開発を目指す。具体的手法として、柔軟材料だけで構成されるマルチセグメント構造の製作方法の確立と、複数バルーンが干渉しあい進行波を発生するソフトリニアアクチュエータを開発する。さらに、DEA の放電電流により実現できる自励振動機構を提案し、ワイヤレス駆動による制御回路の簡素化、及び、放電電流による高速振動が期待できる。

まず、伸張可能なマルチチャンネル構造の製作手法として、3D プリントした型を用いた成型ゴム同士のプラズマによる接合プロセスに対し、接合強度に及ぼす表面性状の影響を明らかにする。粗さパラメータの一つである従来の尖度をもとにして、新たな粗さパラメータを提案する。測定結果をもとにマルチセグメント構造となる渦巻型空気圧アクチュエータを製作することで、柔軟材料だけで構成されるソフトアクチュエータを製作し、空気圧印加による進行波機構の動作を評価する。

次に、従来の空気圧アクチュエータの課題である「応答速度が遅いこと」や「駆動するためには多くの空圧供給ホースやコンプレッサなどの巨大な駆動装置が必要となる」といった問題に対する解決策として DEA 駆動マルチバルーンアクチュエータを提案する。空気圧によるプレストレッチ効果を活かし、電氣的に駆動可能な DEA 駆動マルチバルーンアクチュエータの構成と進行波駆動機構を提案する。また、バルーンアクチュエータの動作特性を理論と実験から評価し、その結果よりマルチバルーンアクチュエータのバルーン間距離を決定し、製作した3-バルーンアクチュエータを用いて進行波による搬送駆動、かつワイヤレス境界条件での動作を評価する。さらに、テザーレス駆動の目的として、バルーンアクチュエータの自励振動機構を提案し、適用可能性を示す。

1.3 本論文の構成

本論文は全6章で構成される。第1章では研究背景及び先行研究を取り上げ、現状の課題について述べた後、本研究における目的を提示する。第2章では、3D印刷した型を用いたゴムの成型、及び、プラズマ処理による接合技術を用いることで伸縮可能なマルチチャンネル構造製作を製作可能とする方法について述べる。第3章では、柔軟性を保つマルチチャンネル構造の製作手法を用いて製作した渦巻型空気圧アクチュエータを製作し、ゴムの弾性変形による進行波機構を用いた搬送実験について述べる。第4章では、バルーンアクチュエータを用いて圧力や電圧のパラメータが動作特性に与える影響を評価し、その結果をもとに開発した3-バルーンアクチュエータの構造、駆動動作、物体の搬送実験について述べる。第5章では、ワイヤレス駆動によるテザーレス実現のため、直流電圧のみで振動を起こす自励振動機構を提案し、理論と実験により検証した動作特性について述べる。第6章では、本論文での結論及び今後の展望について述べる。



第 2 章

シリコーンゴムのプラズマ処理接合における表面性状の影響

本章では、3D 印刷した型を用いたゴムの成型、及び、プラズマ処理による接合技術を用いることで伸縮可能なマルチチャンネル構造を製作可能にする方法について説明する。そこで、3D 印刷の設定条件で決まる表面性状を有する複数の試験片において、接合強度に及ぼす表面粗さの影響を明らかにする。表面性状の評価指標としては、算術平均表面粗さ Ra が用いられるが、高さ分布を取り扱うことができないため、尖度値 R_{ku} をもととした尖度比 R_{ku}^* を提案し、評価に用いる。その後、ピール試験により接合したシリコーンゴムの接合特性を定量的に比較し、剥離された試験片を微細観察することから真実接触部を確かめる。

2.1 大気圧プラズマ表面処理によるシリコーン同士の接合

大気圧プラズマ処理による表面活性化接合は、真空中でアルゴンなどの不活性ガスのイオン照射や中性原子ビーム照射により、固体表面の安定な酸化膜や吸着層を除去し、得られた活性表面同士を接触させることにより低温で実現する手法である [90]。Fig. 2.1 に示すように、プラズマ処理されると、水の吸着による活性官能基 (OH 基) が導入され、OH 基間の水素結合によって最終的に酸素を介在した結合 (Si-O-Si) が実現する。この接合方法はプライマや接着剤が不要であり、熱・電氣的ダメージが少ない、及び、凸凹のある複雑な形状にも対応できるといった特徴をもつことから、ソフトアクチュエータの製作にも用いられる。大気圧プラズマ処理装置を Fig. 2.2 に示す。

また、3D印刷した型を用いたゴムの成型によりソフトアクチュエータの部品を製作することが主流になっている。そこで、3D印刷の設定条件で決まる表面性状に対して、接合強度に及ぼす表面粗さの影響を明らかにする必要がある。

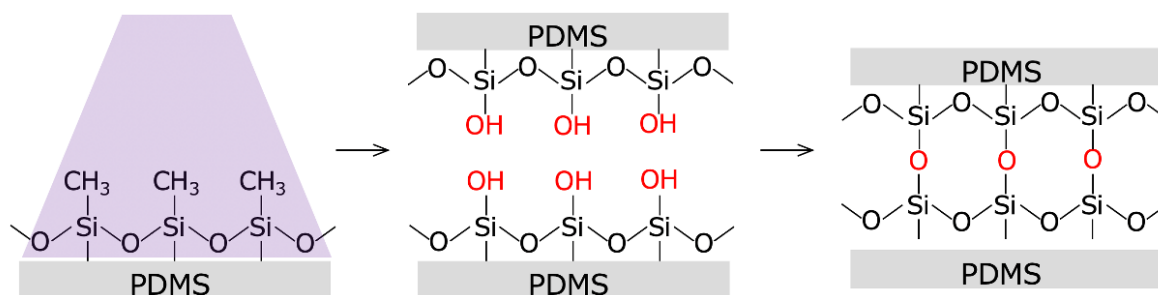


Fig. 2.1 Silicone direct bonding using plasma treatment



Fig. 2.2 Photograph of the plasma treatment device

2.2 試験条件と評価方法

2.2.1 試験片の製作方法と表面性状の条件

ピール試験に使用した試験片は、Fig. 2.3 に示すように、3Dプリンタによる型を用いた型成型で製作したシリコーンゴム基板とシリコーンの薄膜で構成されており、大気圧プラズマ処理により接合されている。本研究では、薄膜としては厚さ $200\text{ }\mu\text{m}$ のシリコーンエラストマ (ELASTOSIL® Film 2030, Wacker Chemie AG) を、成型ゴムとしては2液型 液状シリコーンゴム (主剤 KE-1600, 硬化剤 CAT-1600, 信越シリコーン株式会社) を使用した。3D印刷した型は、長さ、幅、高さがそれぞれ 35, 15, 14 mm のシリコーンゴムを製造するように設計された。

また、薄膜は Fig. 2.3 に示すように、接合面積が $15\times 20\text{ mm}^2$ となるように基板に接合した。製作プロセスとしては Fig. 2.4 に示すように、3つのステップに分かれる: (Step1) 3D印刷によるゴム成型用の型の製作, (Step2) 基板ゴムの成型, (Step3) 大気圧プラズマ処理による直接接合である。

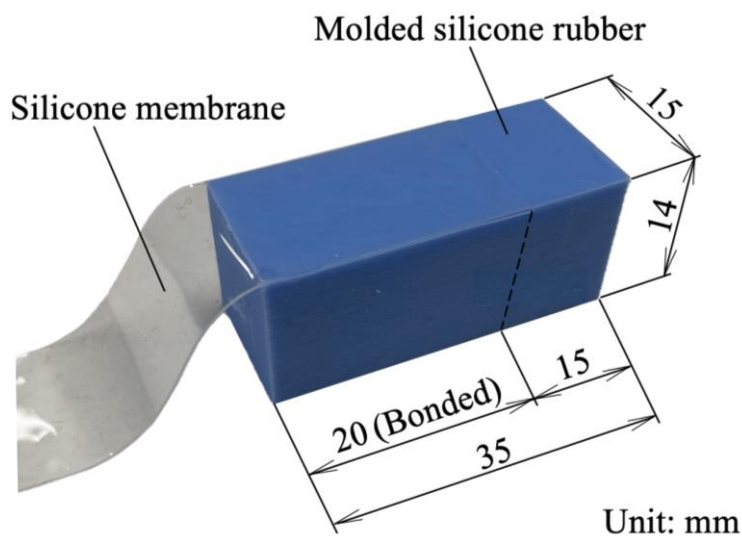


Fig. 2.3 Peel test specimen

Step1 では 3D プリントにより型を造形する．この時，型の底面に所望の表面形状を設計しておく．次に Step2 では液状シリコーンゴムの成型によりゴムの表面性状を転写する．シリコーンゴムの成型の手順を以下に示す．

1. 主剤と硬化剤は，常に 9:1 の質量の比で混合し，ミキサー（シンキー，ARE-310）を用いて攪拌・脱泡した．攪拌は 1,500 rpm で 30 s 間，脱泡は 2,000 rpm で 15 s 間のように 2 つのモード設定で行った．
- 2.2 液型液状シリコーンゴムに残っている数多くの大小の泡を除去するため，真空ポンプのついたチャンバーに入れて再度脱泡を行った．
3. 型にシリコーンゴムをキャストした後，この過程で生じた細かい泡を除去するための脱泡を真空チャンバー内で行った．
4. モールドの本体と蓋を合わせ，隙間ができないようにクランプで挟み込んだ．
5. 常温で 24 h 間硬化させた後，型から剥離した．

Step3 ではプラズマ表面処理により成型ゴムと薄膜のシリコーンを接合した．シリコーン同士の接合のため，プラズマ処理装置 (CIONE, Femto Science Inc.) を用いた．高い反応性のプラズマガスをさらすことで起こる基板とガスの間での相互作用により，表面処理が化学的に性質を変化させる．空気流量を 10 sccm (standard cubic centimeter per minute) に維持しながら，所定の圧力 7.6×10^2 Torr, RF (radio frequency) パワー 100 W でプラズマを得た．ベース圧力は 5.0×10^{-2} Torr 未満に維持し，プラズマ照射時間を 30 秒に設定した．



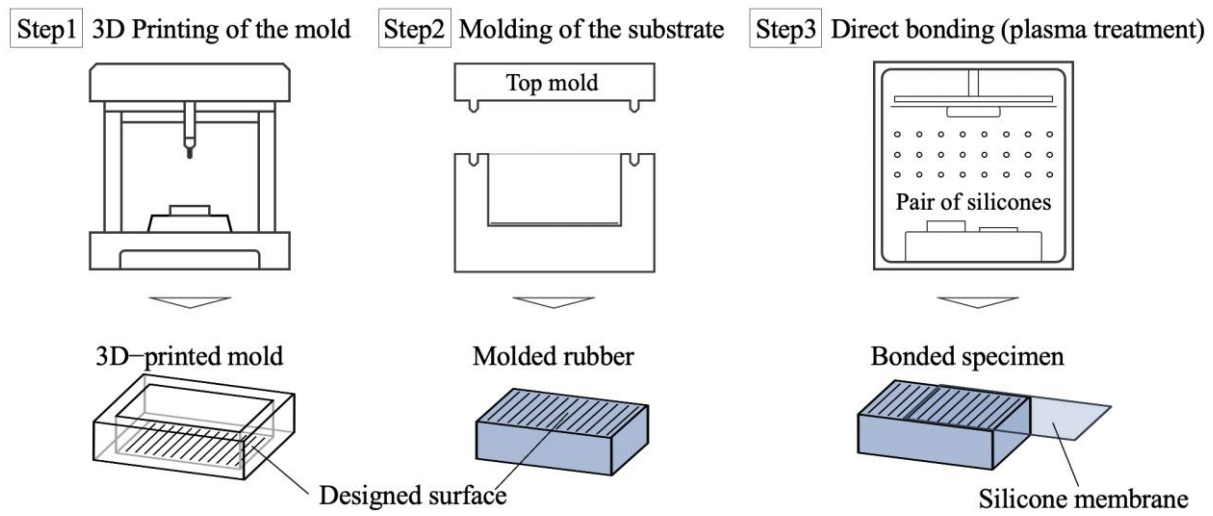


Fig. 2.4 Schematic illustrations of the fabrication process

型の転写により，11 種類の表面性状を形成した．材料表面は加工法によって，対象面が周期的か，非周期的かと大きく異なる．3D 印刷した型による成型ゴムの対象面は周期的な粗さ曲線を持つものを「P」と，それと比較する標準試料として非周期的な粗さ曲線をもつ対象面を「S」と表記した．まず，表面粗さと接合強度の相関を調べるために，Table 2.1 に示す 5 つの非周期的な標準試料 S1~S5 を評価した．

次に，PolyJet 方式のプリンタである Stratasys Objet260 Connex3，及び，FFF (Fused Filament Fabrication) 方式のプリンタである Markforged Mark Two と Zortrax M200 の 3 種の 3D プリンタで製作した試験片 P1~P6 を評価した．3D プリンタの印刷条件で表面形状が決定され，その主な要因と考えられるのは，インフィルのパターンや密度，材料，層厚，トップレイヤーのパターン，及び，プリントヘッドの移動方向によるライン方向などがある．以上の印刷条件を Table 2.2 に示す．また，剥離方向に対する印刷方向とインフィルパターンは Fig. 2.5 に示す．

Table 2.1: Surface symbols for standard samples

Type of surface	Symbol
Acrylic plate	S1
P2500-grit sandpaper	S2
P1200-grit sandpaper	S3
P1000-grit sandpaper	S4
P320-grit sandpaper	S5



Table 2.2: Conditions for the mold fabrication using 3D printers (comparative samples)

3D printer/ Manufacturer	Prototyping method	Layer thickness (mm)	Material	Infill/ Top- layer pattern	Printing orientation	Symbol
Objet260 Connex/ Stratasys	PolyJet	0.03	Vero White	Linear/ Linear	Across	P1
						P2
Mark Two/ Markforged	FFF	0.10	Onyx	Triangular/ Linear (Normal)	Parallel	P3
				Hexagonal/ Linear (Normal)		P4
M200/ Zortrax		0.29	Z-ULTRAT	Crossed/ Linear (Normal)		P5
				Hexagonal/ Linear (Normal)		P6

PolyJet 方式のプリンタでは剥離方向に対する印刷方向の影響を調べるため、直線形状の印刷パターンが剥離方向との関係が垂直や平行方向になるように設定した。FFF 方式のプリンタではインフィルのパターンの影響を調べるため、直線形状のトップレイヤーのパターンにおいて 3 種のインフィルのパターン (Triangular, Crossed, Hexagonal) を設定し、その密度はプリントの基本設定値を用いた。

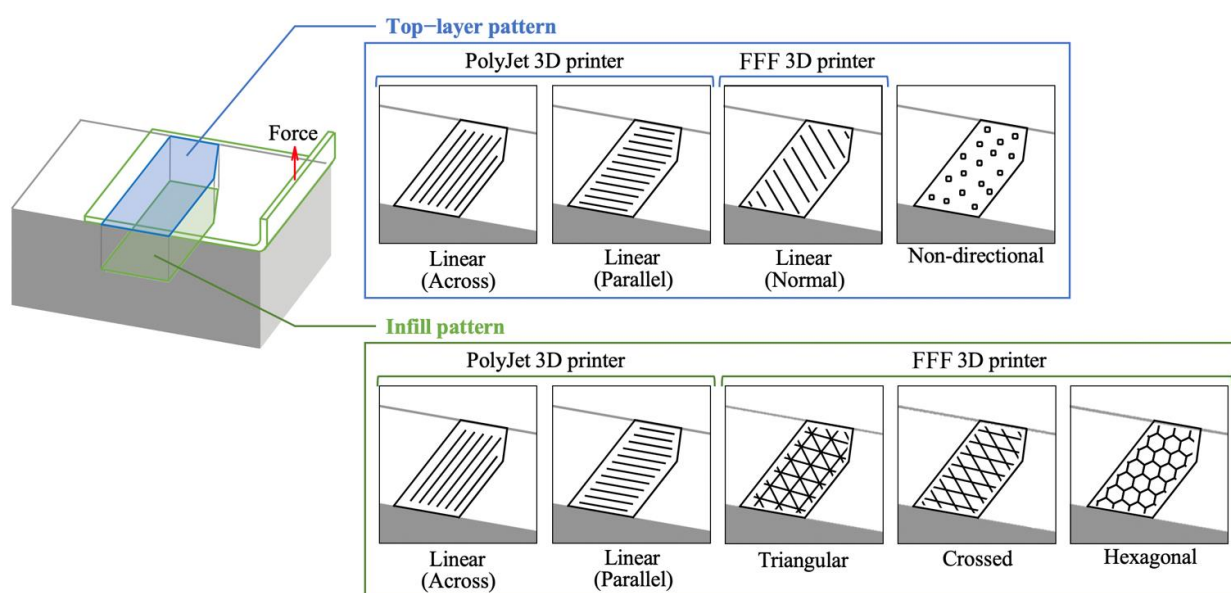


Fig. 2.5 Top-layer and infill patterns designed to assess the surface roughness

2.2.2 表面形状の測定

Fig. 2.6 に示すように，触針先端半径が $2\text{ }\mu\text{m}$ の触針式表面粗さ計 (DSF600, 株式会社菱光社) を用いて，すべてのゴム基板の幅方向の表面粗さを測定した．黒の矢印は走査経路を示す．測定は規格 ISO 4288 に準拠して行い，スタイラスの移動量は 15 mm とし，触針が浮き上がらないように測定速度は 0.05 mm/s とした．この装置のプロファイラの垂直分解能は 12 nm ，垂直測定範囲は 8 mm であった．

測定したプロファイルの周波数解析のため，MATLABソフトウェアが提供する FFT を導入した．まず，試料が平行移動ステージに対して平行でない場合に発生する変位や，傷，へこみ，亀裂などの幾何学的欠陥の存在を除去する．高周波信号をフィルタリングした後，分離したスペクトルを計算し，逆 FFT (IFFT) を用いて実験的な表面粗さパラメータを求めた．得られた位相分布に基づいて，表面性状を評価する．

最も広く利用されるパラメータの一つである算術平均高さ R_a は，基準長さにおける高さ方向の分布の絶対値の平均を表したものである．平均面からの平均的な高低差の平均値であり，キズ，ゴミ，ノイズなどの外乱の影響を受けにくいため，安定した結果を得ることができる．

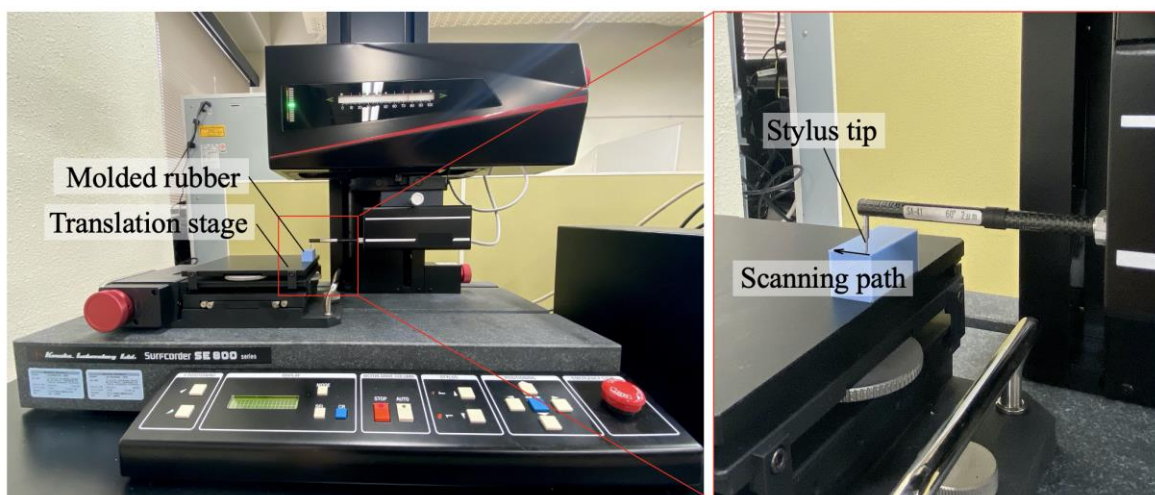


Fig. 2.6 Stylus surface profiler used for measuring surface roughness

二つの固体表面の接触（平面-平面の面接触）を考えると、本計測条件の場合、巨視的にみた接触面積は $15 \times 20 \text{ mm}^2$ となる。材料の形状によって接触形態は異なり、微視的に見ると実際の接触部は材料表面に存在している凹凸（表面突起）同士の接触となる。したがって、実際に接触している面積は、お互いの表面突起が接触する部分である真実接触部を合算したものと考えられる。真実接触部は一つ一つの真実接触部の面積を接触部の個数で掛けることより計算される。そこで、表面の鋭さの尺度である尖度を用いて、表面の高さ分布における山や谷の先端形状に関するパラメータとして接触モデルを考えた。Fig. 2.7 に示すように正規分布の尖度を 3 とする定義から、尖度が 3 より大きければ鋭いピークと、尖度が 3 より小さければより丸みがかったピークとなる。さらに、シリコン基板表面上の接触面の弾性変形の影響も考慮し、突起の高さを導入した。高い突起であるほど、垂直荷重を支えるため応力が集中し変形をすることもある。ただ、先行研究では、垂直荷重の増加に伴い、真実接触部の大きさへの影響は少なく、その数が増加することが実験的に知られている [56]。

以上の概念より、突起の尖度、密度、高さを考慮した新たな粗さパラメータを提案する。次の式で表現され、2 つの物体の接触状態の解析におけるパラメータとして用いた。

$$R_{ku}^* = \frac{R_{ku} P_c}{R_t} \quad (2.1)$$

ここで、 R_{ku} は尖度、 P_c は高さ分布の山部のカウント数、 R_t は評価長における最も高い山と最も低い谷の間の距離である。すなわち、ある鋭さを持つ突起の数と、その波形の山から谷までの距離を同時に考慮することとする。各条件につき 5 回ずつ測定し、 R_a と R_{ku}^* の平均値を求めた。

さらに、走査型電子顕微鏡（SEM, VE8800, Keyence社製）とデジタル顕微鏡（VHX-7100, Keyence社製）を用いて、試験片の成型面、剥離面、破断面を観察した。



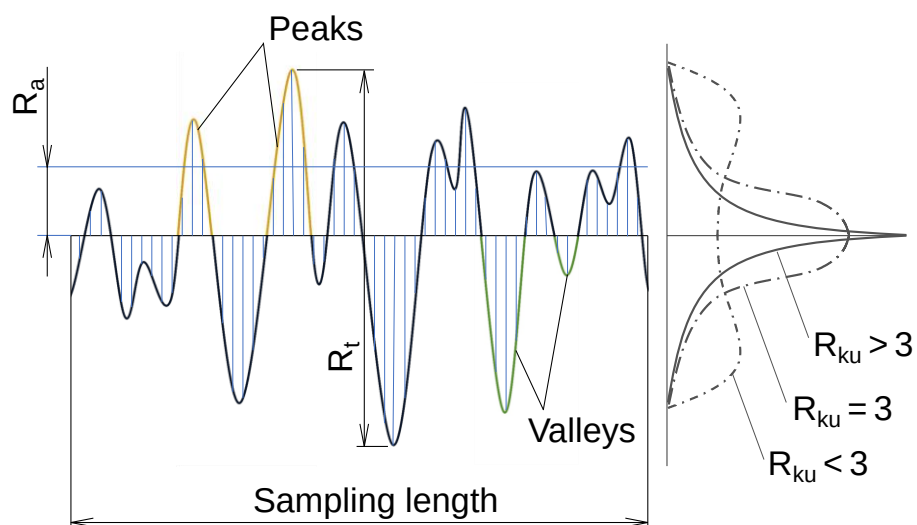


Fig. 2.7 Roughness profile indicating R_a , R_t , and R_{ku}

2.2.3 接合強度の測定

試験片を装置に固定した後，薄膜を表面に垂直方向へ引き剥がして荷重を測定した．引張荷重をかけたときの応力-ひずみ関係を評価した．Fig. 2.8 に示すように，500 N のロードセルを備えた引張試験機 (EZ-LX，島津製作所) を用いた 90° ピール試験を行った．ここで，成型したシリコン基板の硬度ショア A 値は 45 であり，薄膜の 27 の硬度ショア A 値に比べて十分に大きな値であることに留意されたい．お互いに接合されていない薄膜の端部を，18 °C の室温で 6 mm/min の速度で持ち上げた．各条件につき 3 回ずつ測定し，平均値を求めた．

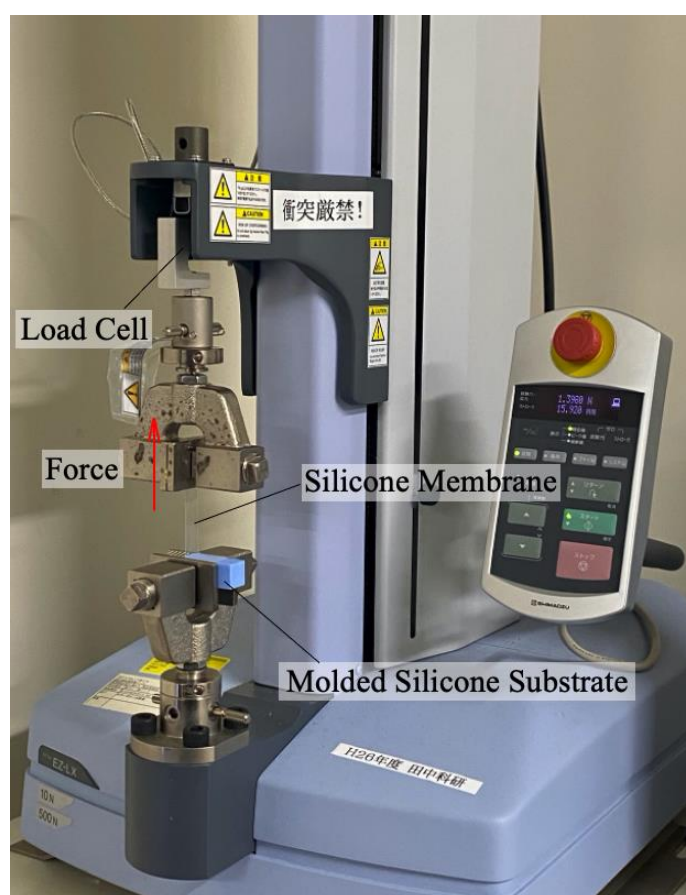


Fig. 2.8 Photograph of the 90° peel test

2.3 測定結果と考察

2.3.1 表面性状の評価

3D 印刷した型，及び，非周期性の表面性状の型で成型したシリコーンゴムの粗さパラメータを評価するために，表面測定を行った．表面の断面曲線を測定した結果を，FFT と IFFT のフィルタ処理により抽出し，サンプリング長 2.5 mm の粗さ曲線を得た．このとき， 0.4 mm^{-1} のカットオフ波長のフィルタを使用した．粗さパラメータ R_a と R_{ku}^* は，各条件について 5 つの試作品から反復測定により求め，それぞれ Table 2.3 と Table 2.4 にまとめた．Fig. 2.9 に全試験片について元のプロファイルと粗さプロファイルを示す．

試験片 S1～S5 の表面性状は無方向性・非周期的なパターンを示すのに対し，3D 印刷した型成型による試験片 P1～P6 は周期的な表面性状を持つ．PolyJet 3D プリンタでできたもの (P1, P2) と Acrylic plate の上で成型したもの (S1) は低アスペクト比の表面性状を，FFF 3D printer でできたもの (P3～P6) と，サンドペーパーの上で成型したもの (S2～S5) は高アスペクト比の性状を持つことがわかる．ここで，アスペクト比は水平方向に比べて高さ方向への分布のことを意味する．

Table 2.3: Surface roughness parameter R_a for eleven samples

Type of surface	$R_a [\mu\text{m}]$						Standard deviation
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Average	
S1	0.336	0.227	0.330	0.342	0.317	0.310	0.043
S2	2.730	2.668	3.368	3.122	3.454	3.068	0.321
S3	4.856	5.190	4.376	5.588	5.485	5.099	0.442
S4	5.206	5.654	7.626	5.385	6.759	6.126	0.924
S5	13.314	9.302	12.065	10.118	12.151	11.390	1.464
P1	0.775	0.928	0.433	0.494	0.865	0.699	0.199
P2	1.564	1.673	1.847	2.252	1.576	1.782	0.355
P3	4.400	4.459	3.810	3.388	3.983	4.008	0.395
P4	4.535	4.794	4.463	5.461	4.570	4.765	0.365
P5	6.458	7.577	7.001	7.009	7.070	7.023	0.355
P6	9.040	9.151	9.384	8.484	8.137	8.839	0.459

Table 2.4: Surface roughness parameter R_{ku}^* for eleven samples

Type of surface	R_{ku}^* [μm^{-1}]					Average	Standard deviation
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5		
S1	18.225	18.974	20.143	17.087	17.975	18.481	1.027
S2	5.678	5.893	7.087	6.945	6.389	6.398	0.557
S3	2.741	2.850	2.544	3.369	3.143	2.929	0.293
S4	1.518	1.930	2.451	1.501	2.071	1.894	0.357
S5	0.559	0.296	0.526	0.686	1.099	0.627	0.273
P1	15.584	11.360	11.911	10.720	11.376	12.190	1.738
P2	8.964	10.087	7.073	8.3053	9.459	8.778	1.034
P3	3.899	4.542	5.245	4.022	4.589	4.460	0.479
P4	3.605	3.843	3.343	3.290	4.127	3.642	0.313
P5	1.775	1.283	1.027	1.399	0.846	1.266	0.320
P6	1.250	0.567	0.637	0.808	0.843	0.821	0.238



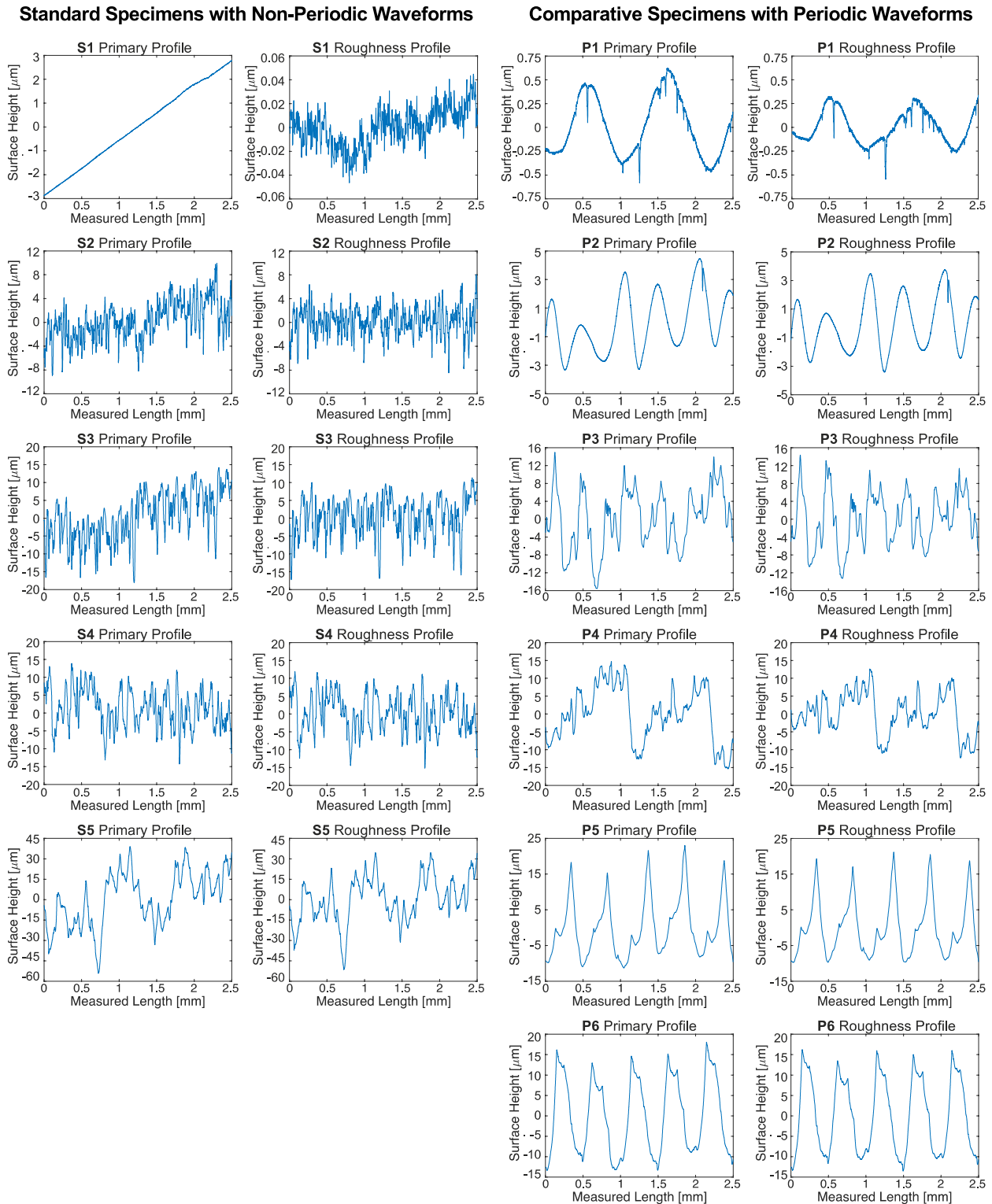


Fig. 2.9 Primary and roughness profiles obtained through FFT for all specimens

2.3.2 シリコーンゴム同士の接合強度

基材に接合された薄膜の先端部を 90° を保ちながら引き上げ、そのときの荷重を測定した結果を Fig. 2.10 に示す. 11 種の試験片について、薄膜を基材から剥離し始めるのに必要な最小力を、接合強度と定義した. 接合強度は、3 回以上の測定値を平均して求めた. その結果、試験片 S1 の引張応力が最も高く、試験片 S5 の引張応力が最も低かった. また、応力は試験片が分離するまでひずみ量とともに直線的に増加した. さらに、接合強度の高い試験片ほど、高いひずみで剥離していることがわかった.

PolyJet 方式の 3D プリンタで製作した試験片 P1 と P2 の接合強度が違うことにより、引っ張りの荷重の方向に対する表面性状の波形の方向は無視できないことがわかる. PolyJet 方式の 3D プリンタのような表面仕上げが得られない FFF 方式の 3D プリンタでできた試験片 P3~P6 の場合、比較的低い接合強度が確認できた. また、FFF プロセスでは部品のレイヤーラインが生じるが、トップレイヤーを同じパターンで設定しても、インフィルパターンが部品の表面性状に影響することがわかった. また、レイヤーの厚みも表面性状に影響し、接合構造にしたときの接合強度に影響することが確認できた.

Fig. 2.11 に、粗さプロファイルから求めた粗さパラメータ R_a と R_{ku}^* に対する接合強度を示す. 接合強さは粗さパラメータ R_a に対してほぼ直線的に減少した. 周期波形の試験片 P1~P6 の結果から、平均高さ分布が高い表面であるほど接合強度を悪化される傾向があることが明らかになる. このように、粗さパラメータ R_a は滑らかな表面仕上げや周期的な表面性状を持つ対象面を評価する上で効果的である. ところが、非周期的な粗さ曲線を持つ対象面の中、高さ分布が高い試験片 S4 と S5 はばらつきが大きい. このような特徴に有する表面性状での接触能力を判断するには、 R_a は不十分である.



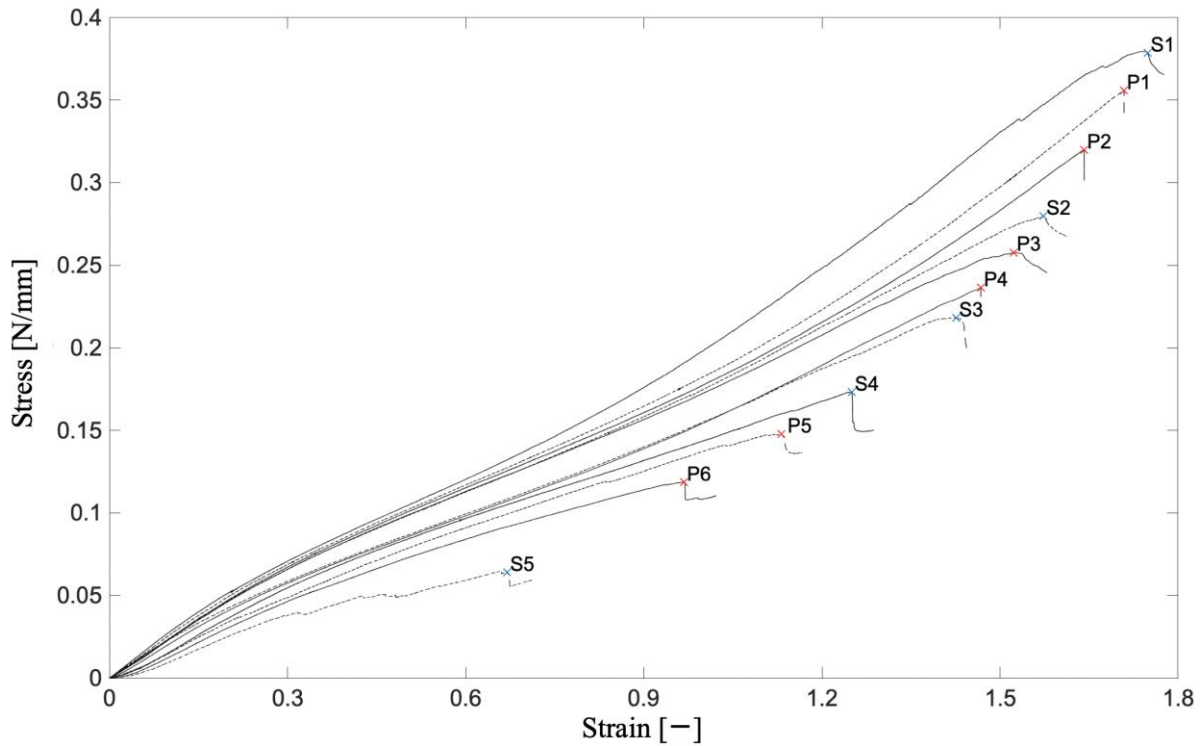


Fig. 2.10 Stress-strain curves for eleven types of surface properties

Fig. 2.11 (b) に示すように、粗さパラメータ R_{ku}^* と接合強度の相関が明確に得られた。粗さパラメータ R_{ku}^* が大きくなるほど接合強度も徐々に大きくなる。しかし、試験片 S1, P1, P2 のような平滑面で敏感に反応することが、ばらつきが大きいことより確認されている。これは、 R_{ku}^* が尖度及び高さ分布における山から谷までの距離を考慮していることが原因だと考えられる。しかし、粗さパラメータ R_a のばらつきが大きかった試験片に対しては R_{ku}^* のばらつきが小さい。すなわち、粗さパラメータ R_a と R_{ku}^* を同時に用いることで効果的な評価が可能となる。

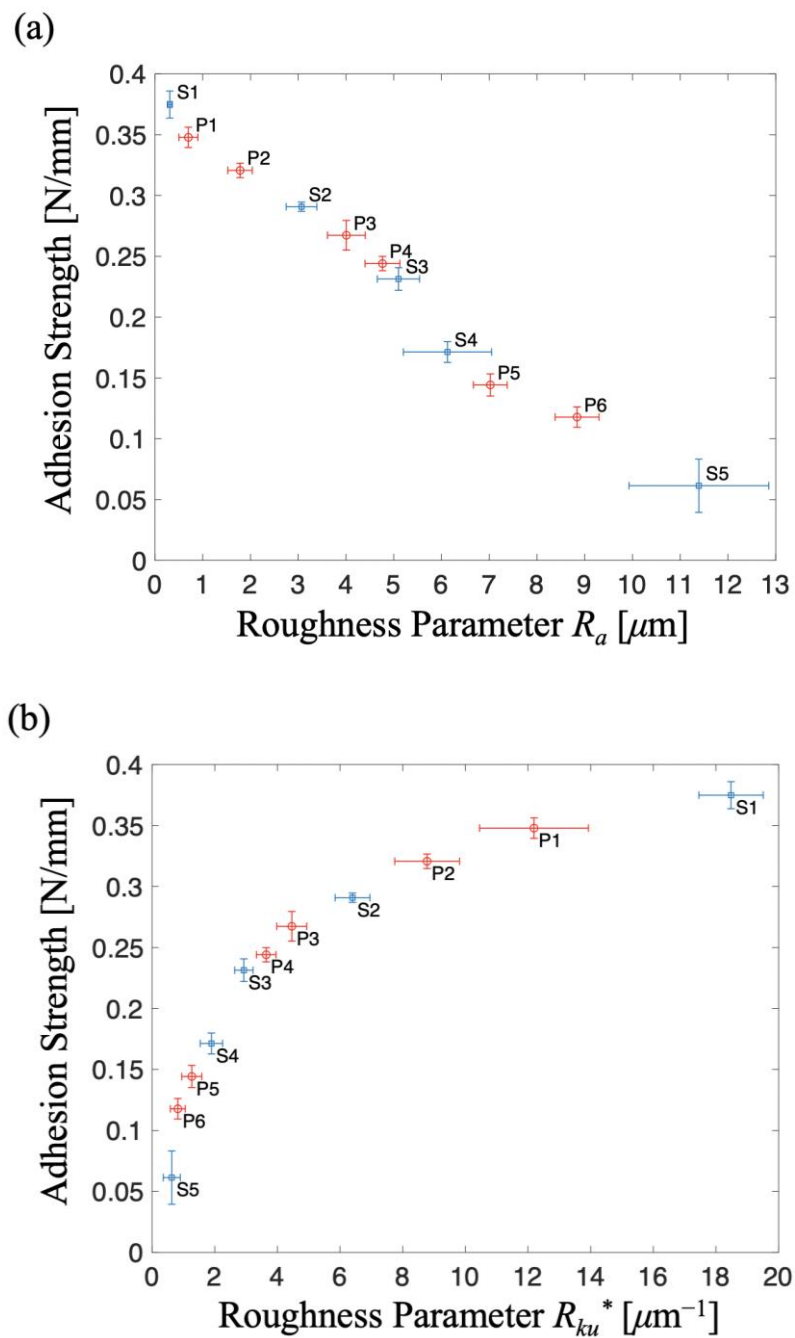


Fig. 2.11 Adhesion strength with respect to roughness parameters (a) R_a , (b) R_{ku}^*



2.3.3 試験片表面の微細観察

デジタル光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察により、成型ゴムのピール試験の前後の接合面、及び、薄膜の剥離後の破断面の性状を観察した。アクリル板の上に成型した試験片 S1, PolyJet 方式の 3D 印刷した型である P1, FFF 方式の 3D 印刷した型である P4, 及び、P5, P1200 サンドペーパーの上に成型した試験片 S3 の 5 つの条件に対して行った。デジタル光学顕微鏡で撮影した写真を Fig. 2.12 に示す。成型ゴムの写真において、試験片 S1 と S3 は無指向性で非周期的な表面性状が、試験片 P1, P4, P5 は波形の山と谷の間の距離が一定である周期的な表面性状が見られる。また、ピール試験後の薄膜の写真を見ると、成型ゴムの一部が接合され剥離されているのが見られる。これはプラズマ処理による接合が効果的にされていることを意味する。特に、試験片 P4 と P5 の薄膜における基材から剥離したゴム残渣の様子を見ると、接合面積はゴムの突起パターンに沿って分布していることが確認される。このようなことから、プラズマ処理した試験片同士の接合は、成型ゴムの表面パターンに大きく影響されていることがわかった。

試験片 P1 では、写真で示すような山 (A) と谷 (B) の幅は、 $256.6\ \mu\text{m}$, $193.9\ \mu\text{m}$ であった。試験片 P4 の山 (C) と谷 (D) の幅は、 $734.8\ \mu\text{m}$, $54.0\ \mu\text{m}$ であり、試験片 P5 では、山 (E) と谷 (F) の幅は、 $50.3\ \mu\text{m}$, $327.0\ \mu\text{m}$ であった。3 つの試験片の中、接合強度の最も高かった P1 は山部の幅が最も狭い。試験片 P1 は低アスペクト比の高さ分布を持つため、より強い接合強度を示した。実際、剥離膜には明瞭な規則性は見られず、最も深い谷と最も高いピークの間の高さが低いことが示される。突起の幅だけでなく、波形の深さの違いも接合強度に寄与することが推察される。

試験片 S1, P1, S3 について撮影した SEM 写真を Fig. 2.13 に示す。基材の表面を見ると、素地の上に表面欠陥や成型中空気が抜けずにできた変質層などが存在し、その上に吸着した不純物が存在する。また、3D 印刷した型には、小さな孔や傷などの欠陥が基板上にもそのあととして残っている。90° ピール試験後の剥離表面には、さまざまな大きさや深さの複雑な欠陥が形成された。剥離された試験片 S1 には散在した剥離痕が見られたが、試験片 P1 の破面は表面性状の山部とその周辺が支配的であった。

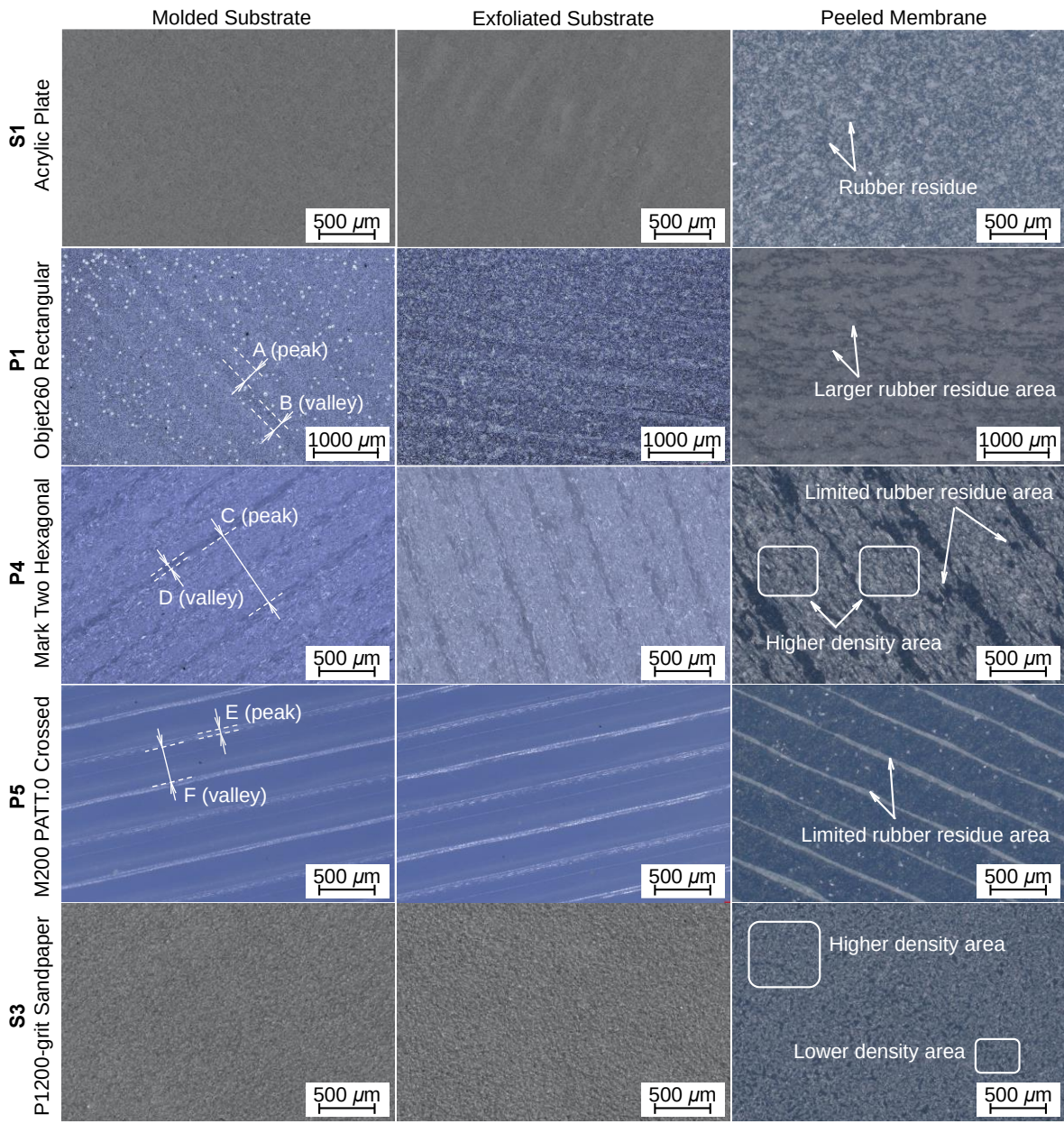


Fig. 2.12 Microstructural images: molded substrates, exfoliated substrates, and peeled membranes



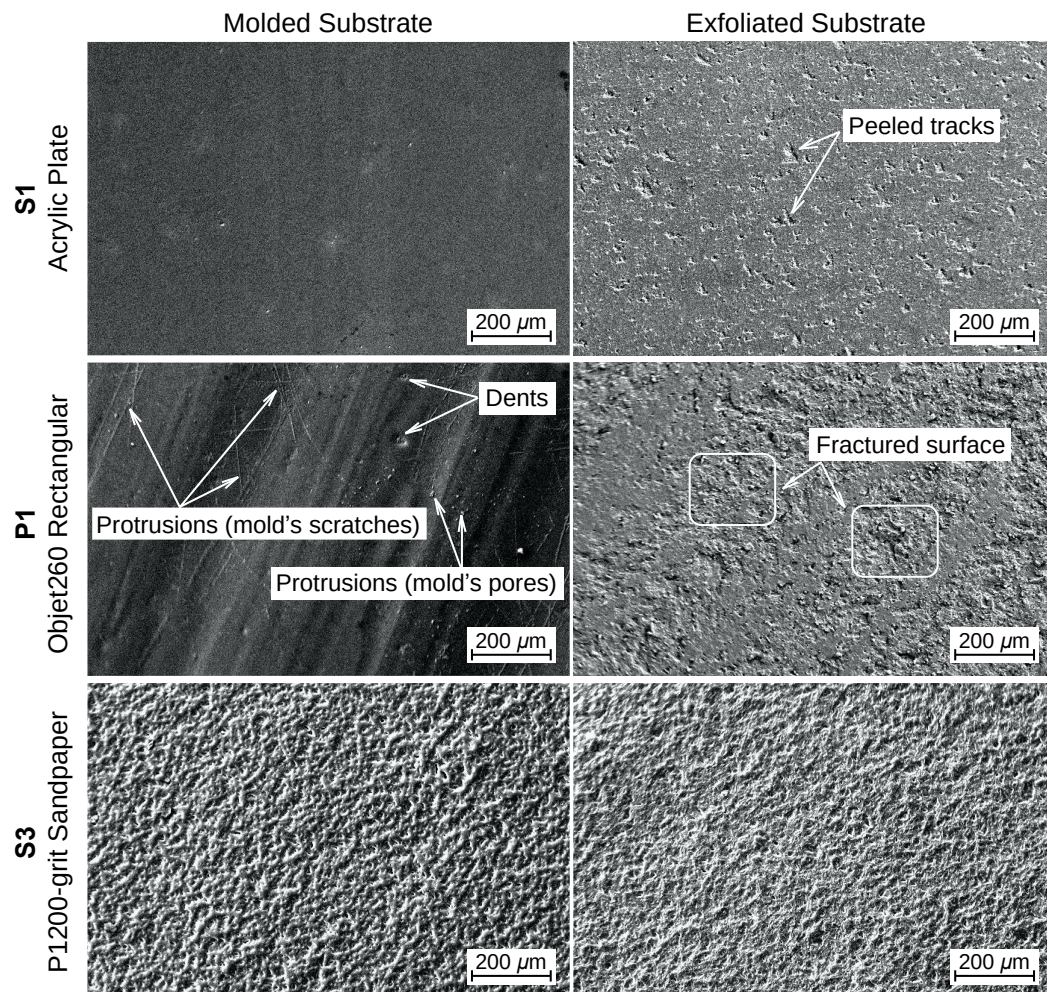


Fig. 2.13 SEM images for molded and exfoliated substrates

2.4 まとめ

本章では、伸縮可能なソフトアクチュエータの製作におけるシリコーン同士の接合方法の確立を目的として、3D 印刷の設定条件で決まる表面性状を有する成型ゴムにおいて、プラズマ処理したシリコーンゴム同士の接合強度に及ぼす表面粗さの影響を調査した。粗い試験片や非周期性の試験片の表面性状の影響を評価するためには、 R_a は十分ではない。本研究で提案した R_{ku}^* は、尖度と全高、ピーク密度を同時に求めるものであり、表面波形に関係なく接触面の特徴を表すことができることが確認された。特に粗い表面の場合、有効接触領域の表面特性を決定するのに有効である。また、表面性状の測定と微細観察により、成型基板とシリコーンの薄膜の接合に影響する要因として、3D 印刷時のトップレイヤー/インフィルパターン、剥離方向に対する印刷の方向、印刷レイヤーなどがあげられる。さらに、PolyJet 方式の 3D プリントした型で製作したシリコーンゴムのプラズマ処理は、ソフトロボットの接合強度を向上させるのに有効であることを確認した。



第 3 章

進行波生成空気圧アクチュエータの有限要素法による構造最適化

本章では、第 2 章で述べた柔軟性を保つソフトアクチュエータ製作における接合技術により渦巻型空気圧アクチュエータを製作する。一般的な進行波生成空気圧進行波アクチュエータは、渦巻型空気圧アクチュエータの構造や動作原理、製作方法について述べる。その後、渦巻型空気圧アクチュエータの進行波機構における動作特性について非線形有限要素法と実験から検証を行う。

3.1 プラズマ処理接合による渦巻型マルチセグメントアクチュエータ

3.1.1 渦巻型マルチセグメント構造

渦巻型空気圧アクチュエータの構造を Fig. 3.1 に示す。シリコンの薄膜が弾性基板に取り付けられた構造となる。薄膜とゴム基材が大気圧プラズマ処理により接合することで、内壁が 3 つの伸張可能な空気室に分割することになる。空気室はアルキメデスの螺旋 [91] によって表される曲線であり、壁同士の間隔が等しい構成となる。Fig. 3.1 (b) に示すように、空気室の断面は長方形であり、空気圧を与えると薄膜と空気室内壁に作用する。ここで、 a は空気室の幅を、 b は空気室の深さを、 c は壁の厚さを、 t は膜の厚さを示す。

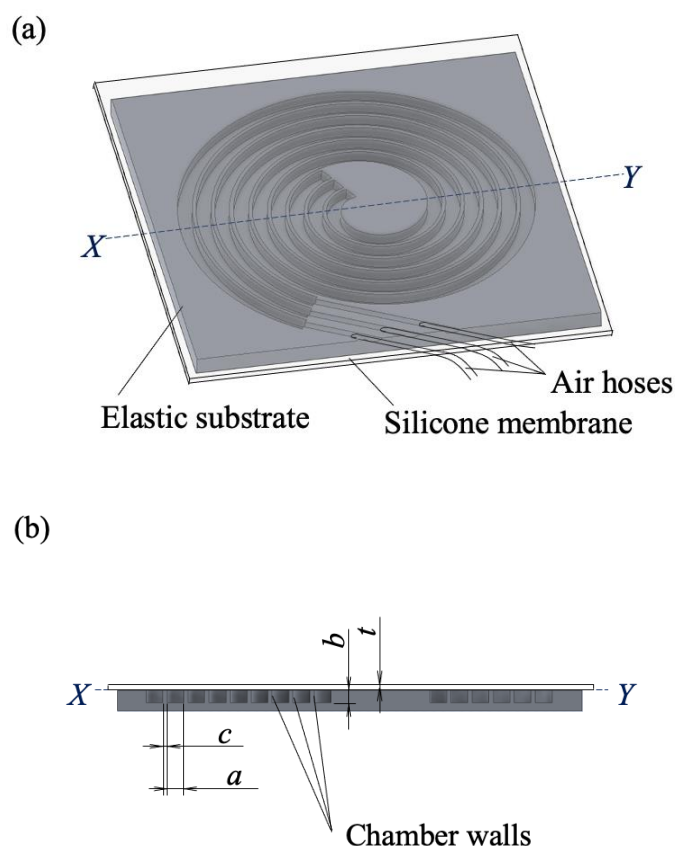


Fig. 3.1 Design of the spiral actuator: (a) Top view; (b) cross-sectional view

3.1.2 マルチセグメント構造による進行波機構

アクチュエータとして機能するための進行波機構を Fig. 3.2 に示す。一定の空気圧をそれぞれ独立した空気室に順に与えることで空気室の変形より薄膜の表面に進行波を発生させ、接触物の搬送動作を行う。独立した空気室の内圧差による内壁の弾性変形がバルーンセグメントの頂点を回転運動させ表面に進行波を生成する。緑色の矢印は加えられた空気圧による変形を、赤色の矢印は物体の搬送に寄与する変形を示している。

- Step 1. 空気室 A が加圧され，薄膜と内壁が膨らむ。
- Step 2. 隣接する空気室 B が同時に加圧されると，空気室 B も膨らみ，A と B の間の壁は圧力差がなくなり押さえられ元の位置に戻り，そのときの弾性力によって空気室 A の薄膜の表面上に左に押す力（赤矢印）が生じる。
- Step 3. 空気室 B の変形を抑制していた A 室を減圧し，空気室 B 室の左側に内壁が膨らみ薄膜も左に押さえられる。
- Step 4. Step 2 と同様。
- Step 5. Step 3 と同様。
- Step 6. Step 4 と同様。

以上のプロセスを繰り返すことで，アクチュエータは変形を続け，搬送を実現する．進行波による搬送動作のために一定の動作周波数で周期的な圧力信号を印加するが，動作周波数は，空気室 A が再び加圧されるまでの 1 サイクルあたりの時間，つまり Step 1 から Step 6 までの時間の逆数から算出される．

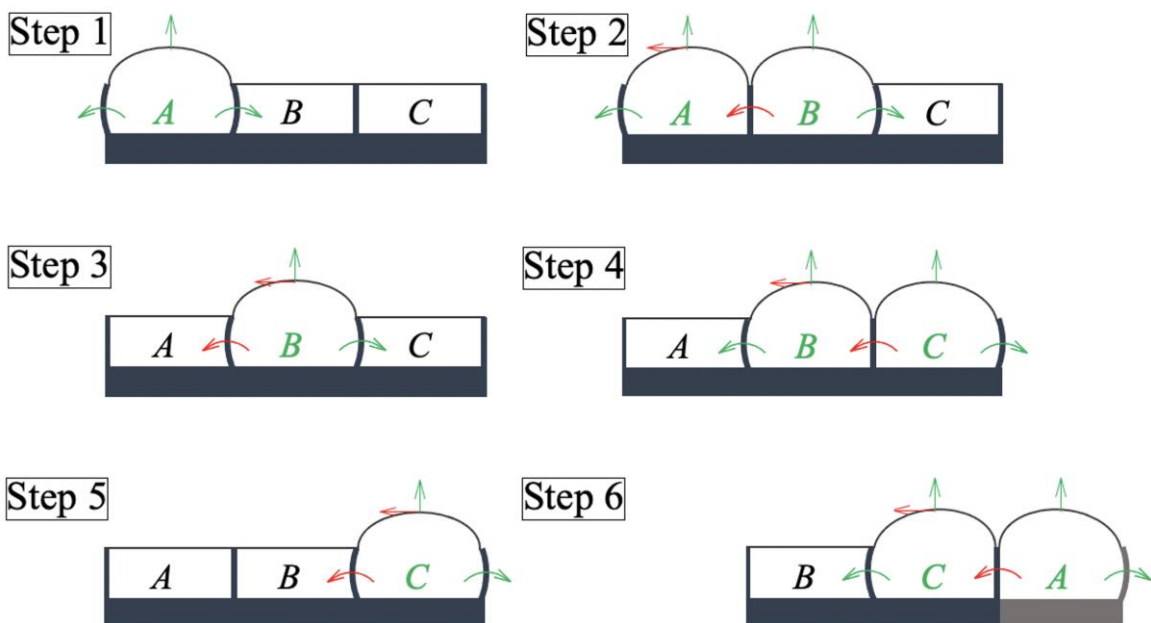


Fig. 3.2 The principle of operation of the actuator used to induce traveling wave motion

3.1.3 材料と製作方法

本研究では、膜厚 1 mm のシリコン膜と、シリコンの成型ゴムを用いて、マルチセグメント構造を実現した。ゴム基板は、PolyJet 方式の 3D プリンタで製作した型より成型したものであり、液状シリコン (KE/CAT-1600, 信越シリコン株式会社) を使用した。ゴム基板は、長さ、幅、高さがそれぞれ 64, 64, 6 mm となるように製作され、具体的な製作手順は 2.1.1 節の手順と同様である。以上の過程を経て、柔軟材料だけでできたアクチュエータが完成した。3 つの空気室はそれぞれエアホースで接続され、独立した変形を制御することができる。エアホースの固定には化学反応形接着剤 (LOCTITE, Henkel) を使用した。

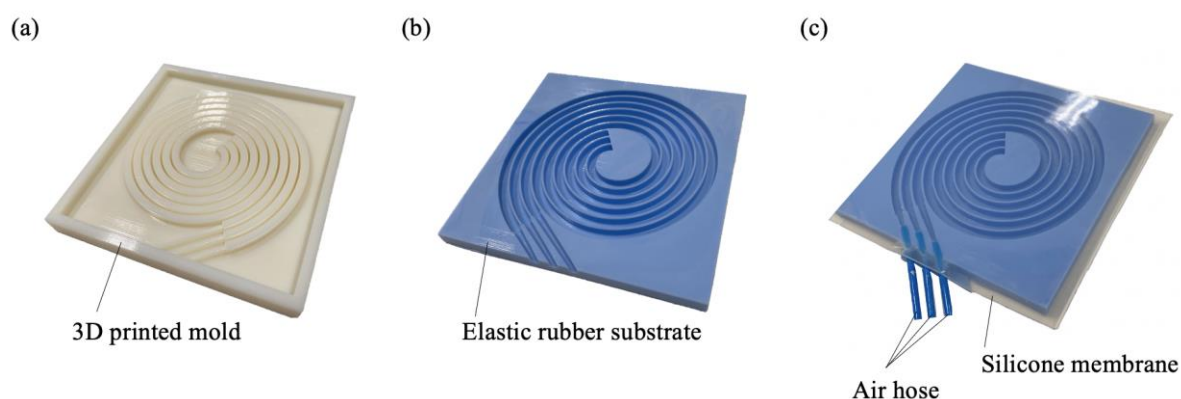


Fig. 3.3 Fabrication process: (a) 3D printing of the mold, (b) rubber molding, and (c) direct bonding via atmospheric plasma treatment

3.2 有限要素法による動作解析

3.2.1 解析モデル (2D 平面ひずみモデル)

本アクチュエータの有限要素解析 (Finite Element Analysis, FEA) による非線形解析は, ANSYS 2023R1 ソフトウェアを使用して実施した. 物体搬送のための弾性変形を最大とする設計を行った. ANSYS Workbench の静的構造解析を用いた. 材料特性は, 次式で表れる YEOH ひずみエネルギー関数 [92] を使用して, 超弾性非圧縮性材料とした.

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (3.1)$$

ここで, W はひずみエネルギー密度, C_{10}, C_{20}, C_{30} は材料定数, I_1 は偏差ひずみの第 1 不変量である.

解析で用いたエラストマの材料定数 C_{10}, C_{20}, C_{30} は, それぞれ 0.1811, -0.01598, 0.00629 MPa である [93]. ゴム基材の密度は 1.27 g/cm^3 , 硬度は 45 (タイプ A デュロメータ), 引張強度は 6.5 MPa となる. 両方の材料は超弾性で非圧縮性のものとする.

解析モデルを Fig. 3.4 に示す. アクチュエータの構造は長手方向の寸法が大きいので, 2D 平面ひずみモデルとした. 初期の構造形状に従う変形動作を調べるため空気室の幅 a は固定値として, Table 3.1 に示す範囲で解析を行った. ここで, 最適化モデルにおける他の構造パラメータを, 幅 a に対する比として表した: $t/a, b/a, c/a$. ゴム基板の空気室間の距離は 2 mm に固定した. ゴム基板の底面は固定し, 他の表面は自由境界条件とした. シミュレーションは, 入力空気圧を 80 kPa として行った.

渦巻型空気圧アクチュエータの薄膜の先端の位置及び方向を求めるため, 2 つの手順で解析を実施した. まず, 一つの空気室 (本研究では, 左から 2 番目の空気室) のみ加圧したとき, その空気室の薄膜の頂点の y 軸方向変位を求めた. 次に, 隣接する空気室を同時に加圧した場合 (本研究では, 左から 2 番目と 3 番目の空気室) に弾性変形によって生じる同一位置での x 軸方向の変位を求めた. x 軸方向の変位は, 物体の搬送機構に寄与するため重要である.

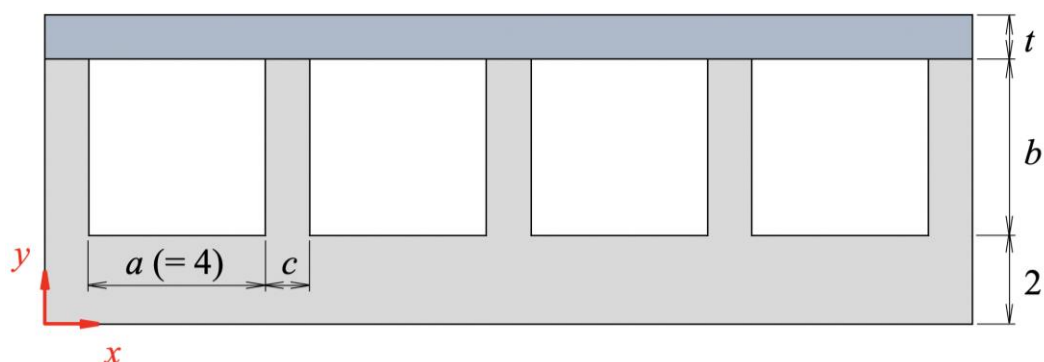


Fig. 3.4 The 2D plane strain model for FEA simulation. All dimensions are in mm

Table 3.1: Initial structural parameters for FEA simulation

Parameter	Value (mm)
Air chamber width, a	4.0
Membrane thickness, t	0.5–2.0
Air chamber depth, b	1.0–5.0
Wall thickness, c	0.5–2.0

3.2.2 構造パラメータの影響

解析モデルは 0.1 mm の 4 節点長方形と設定した． $t = 1.0, b = 4.0, c = 1.0$ [mm] のときの FEA 結果を Fig. 3.5 に示す．パラメータ比 t/a に対する変位を Fig. 3.6 に示す．パラメータ比 t/a を小さくするにつれて， x, y 軸方向変位は増加する．これは，膜厚が小さくなり曲げ剛性が低下し，加圧状態でのアクチュエータの膨らみが大きくなることを示す．しかし，膜厚が相当小さくなると， y 軸方向の変位はアクチュエータのサイズを超える変形となり不安定な動作を作る．



パラメータ比 b/a に対する変位を Fig. 3.7 に示す. 比 b/a が 0.4 より小さい場合, 空気室の深さ b が増えると変位が大きくなる. ところが, 0.4 を超えると, 内壁の曲がりが大きくなり, x 軸方向の変位は大きくなるが, y 軸方向の変位が小さくなる. x 軸方向の変位が大きくなり, 物体の搬送移動量が最大化するための最適条件である. しかし, チャンバーには最適値がある. 比 $b/a > 1.3$ の場合, 壁の過度の曲げ変形により, 加圧される空気室における薄膜の中心位置が, 隣の空気室の薄膜の中心位置よりも低くなって物体を搬送できなくなる(Fig. 3.8).

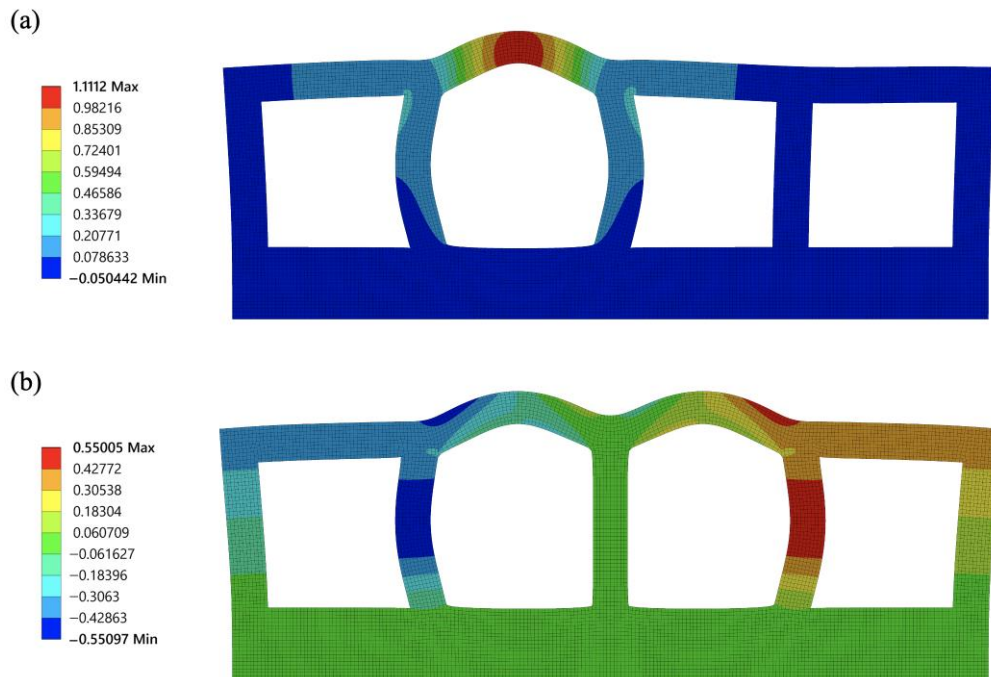
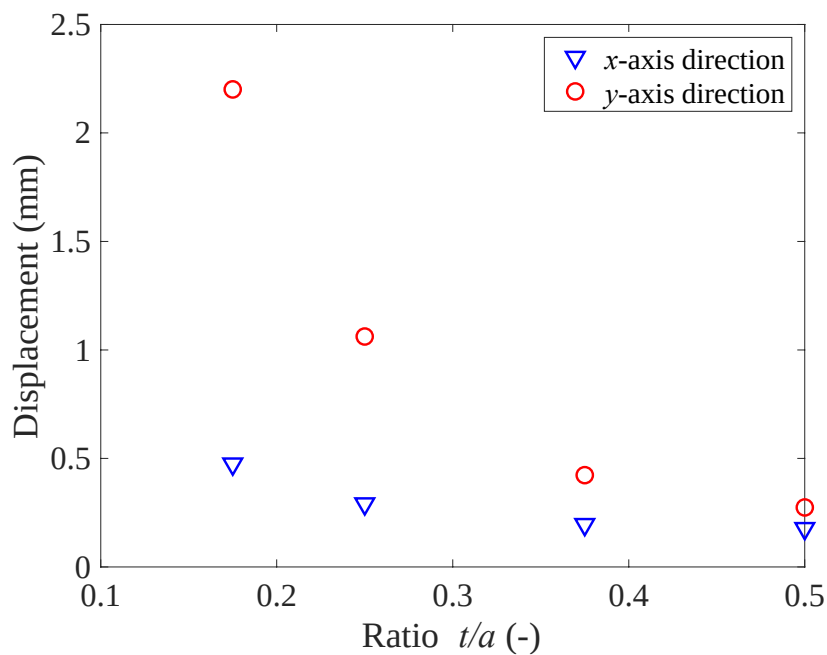
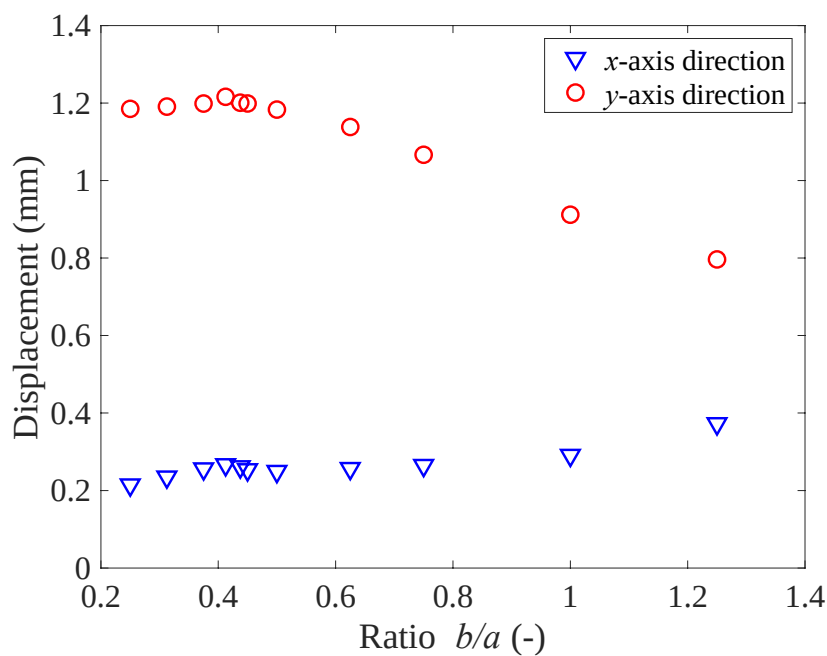


Fig. 3.5 Directional deformation obtained from FEA simulations at an air pressure of 80 kPa: (a) y -axis; (b) x -axis

Fig. 3.6 Displacement with respect to t/a Fig. 3.7 Displacement with respect to b/a 

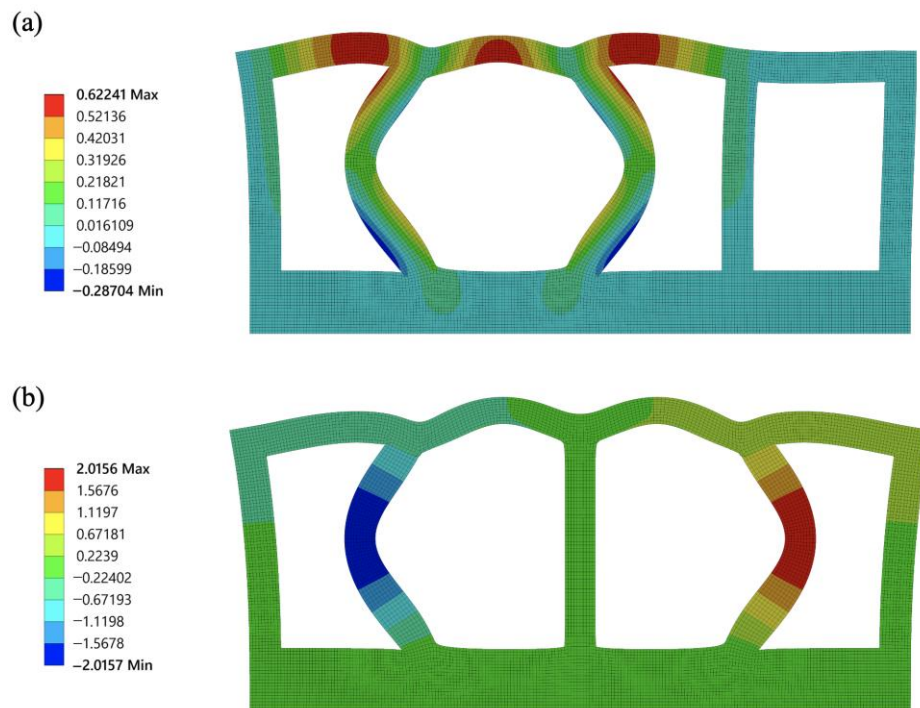


Fig. 3.8 FEA simulation for failure condition with $b/a = 1.5$. Direction displacement in the (a) y-axis and (b) x-axis

パラメータ比 c/a に対する変位を Fig. 3.9 に示す．比 c/a が増加するにつれて， y 軸変位は増加するが，約 $c/a = 0.19$ のとき最大の x 軸方向の変位が得られ，その後は低下する．つまり，効果的な搬送を実現するための最適な構造が存在する．

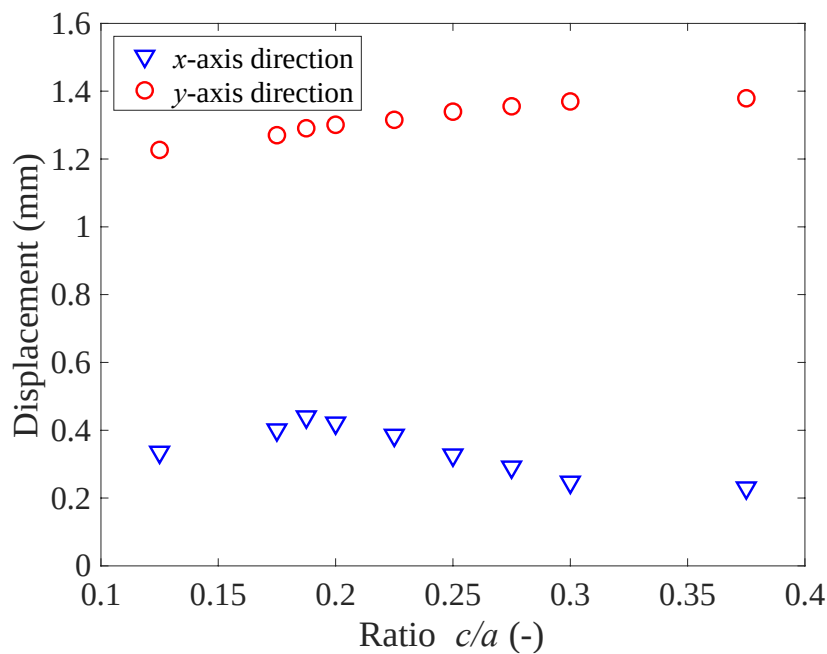


Fig. 3.9. Displacement with respect to c/a



3.2.3 3D 解析モデル

3D FEA により得られた変形結果を Fig. 3.10 に示す. 静的構造解析を用いてメッシュ化されたモデルは, ゴム基板の低面を固定し, 80 kPa の圧力をすべての空気室表面に均一に分布させるという境界条件が適用された.

Fig. 3.10 (a) に示すように, 1 つの空気室が加圧されると, 変位は膜の中央に集中した. また, Fig. 3.10 (b) のように, 連続する 2 つのチャンバーが加圧されたとき, 変形は膜の中央とその周辺に集中した. これは, 2D モデル評価で示されたように, 隣接する 2 つのチャンバーの変形が互いに影響し合い, 物体の輸送に寄与していると考えられる.

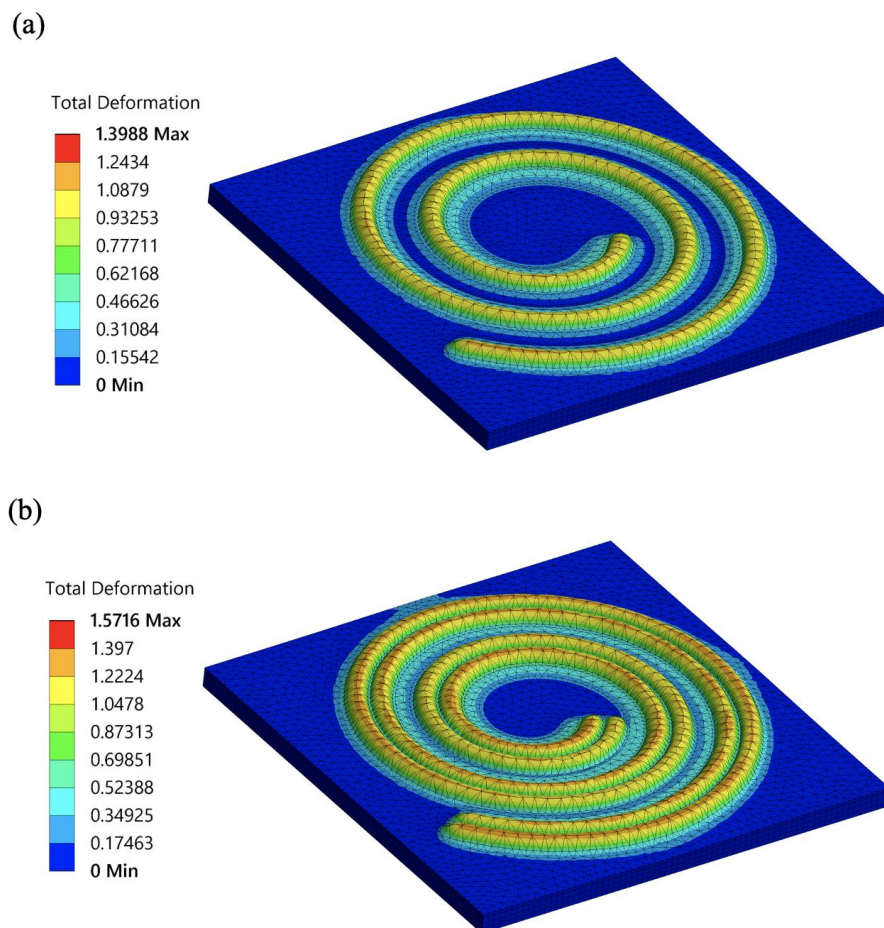


Fig. 3.10 Total transformation results obtained from 3D finite element model. Pressurized state of (a) one chamber and (b) two successive chambers

3.3 動作実験

3.3.1 実験装置

Fig. 3.11 に渦巻型空気圧アクチュエータの動作を観察するための実験装置を示す. 各空気室を膨張させ, 圧力を一定に保つためにエアホースとコンプレッサーを接続した. 動作周波数は実験中に手動で変更し, オシロスコープで記録した圧力信号から求めた. 圧力センサ (AP-C30, KEYENCE) で空気圧を計測し, オシロスコープ (DSOX2004A, Agilent Technologies) によりデータ取得した. 動作の様子はレーザ変位計 (LK-G32, KEYENCE) とビデオカメラ (DIGITAL CAMERA D5500, Nikon corporation) を用いて記録した.

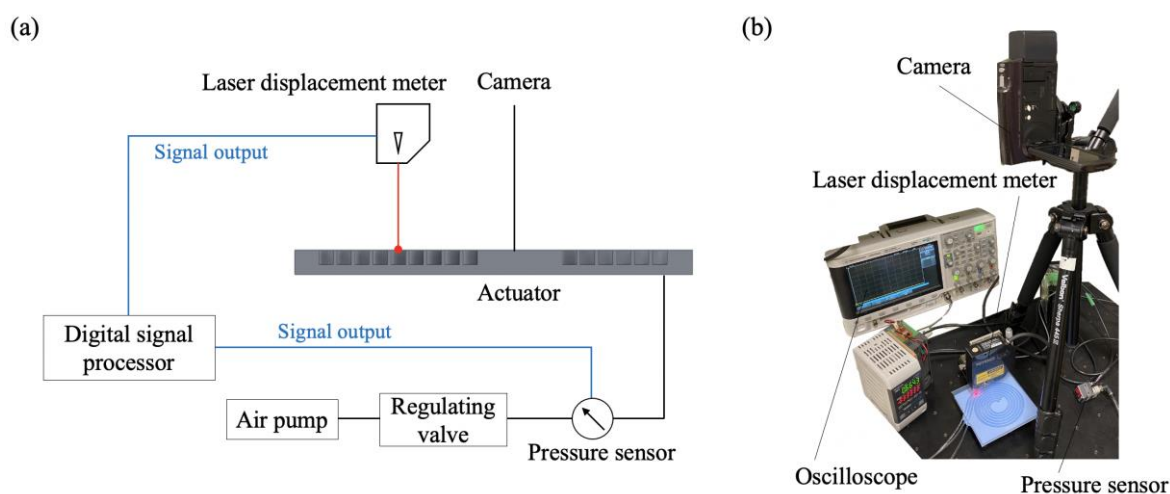


Fig. 3.11 Experimental apparatus

3.3.2 実験結果

パラメータ a, t, b, c をそれぞれ 4, 1, 4, 1 [mm] と設定し製作したプロトタイプを用いて、その変形を計測し、2D FEA の予測結果と比較した。2D FEA モデルより得られた予測結果と動作周波数 0.32 Hz での動作を計測した結果を Fig. 3.12 に示す。本アクチュエータの変形は空気圧に対して直線的に増加し、 y 軸方向の変位は x 軸方向の変位より大きい。予測結果と計測結果を比較したところ、傾向が一致し数値シミュレーションは妥当だった。予測と実験の結果、空気圧 78.5 kPa のとき、 x 軸方向の変位はそれぞれ 0.39 mm と 0.47 mm であった。また、 y 軸方向の変形は、予測と実験の結果がそれぞれ 1.21 mm, 1.32 mm であった。膜厚が均一であると仮定したことと、シミュレーションしたアクチュエータの剛性に誤差があったなどがばらつきに要因になると考えられる。

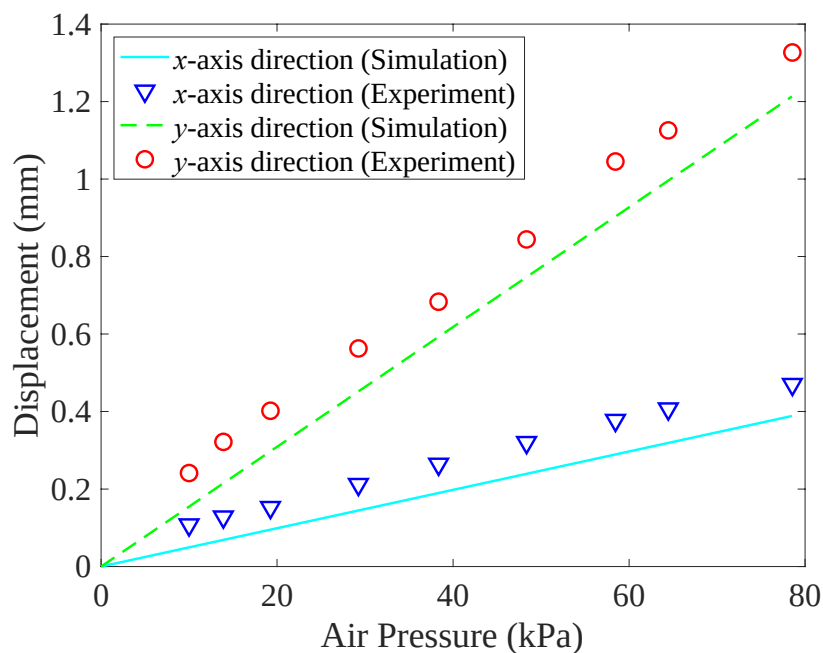


Fig. 3.12 Deformation values generated from FEA simulations and experiments

実際の膜の動作を計測するため，各空気室の膜の中心位置を測定した．空気圧 80 kPa 順次印加して得られたモーショントラッキングの結果を Fig. 3.13 に示す．状態番号は，非アクティブ状態（0 と表示）からアクティブ状態（1～6 と表示）まで，印加された圧力信号に対する応答で示されており，Table. 3.2 に各ステップでの加減圧状態をまとめている．膨らんだ膜の中心は負の x 方向に押され，その結果，接触した物体は後方に搬送される．これは，薄膜とゴム基板の弾性変形による干渉が搬送機構に寄与することを示している．

Table 3.2: Pressurized and depressurized state of each chamber in steps 1 to 6

Step	Chamber A	Chamber B	Chamber C
0	Off	Off	Off
1	On	Off	Off
2	On	On	Off
3	Off	On	Off
4	Off	On	On
5	Off	Off	On
6	On	Off	On



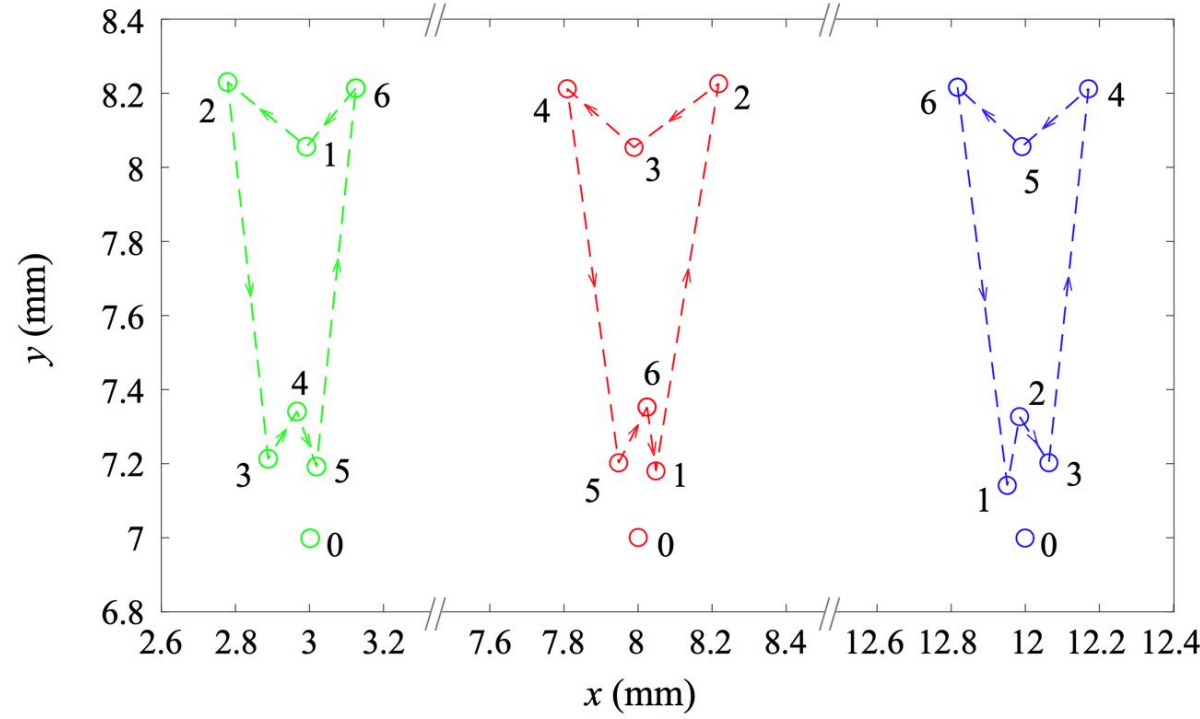


Figure 3.13. Top position behavior on each chamber. Each state number is indicated in response to an applied pressure signal from an inactive state (labeled 0) to an active state (labeled 1–6), corresponding to that in Table 3.2

3.3.3 搬送実験

渦巻型空気圧アクチュエータによる搬送試験を行い，その搬送速度を測定した．連続した空気室に順次加減圧することにより表面に進行波が発生し，物体の搬送が可能になった．得られた最大速度は，空気圧 78.5 kPa, 10 Hz で 2.28 mm/s であった．Fig. 3.14 は，アクチュエータに置かれた物体が所望の方向に移動していることを示している．

しかし，大きさや重さの異なる物体の搬送実験結果を比較すると，搬送には最小サイズが存在することが示された．提案された作動原理に従って物体を搬送するには，少なくとも連続する2つのチャンバーに物体が効果的に接触する必要があることがわかった．実際には，比較的大きなワッシャーや，2つ以上のチャンバーを覆う紙が繰り返し搬送された．黄色の矢印は，搬送に成功した物体の方向と速度を示している．しかし，搬送に寄与する進行波の変形領域に大きさが及ばない小さなサイズの物体については，ほとんど移動が見られなかった．また，物体の重量は大きな影響を与えなかった．この特徴より，大きさに分類するコンベアとして応用することが期待される (Fig. 3.15).

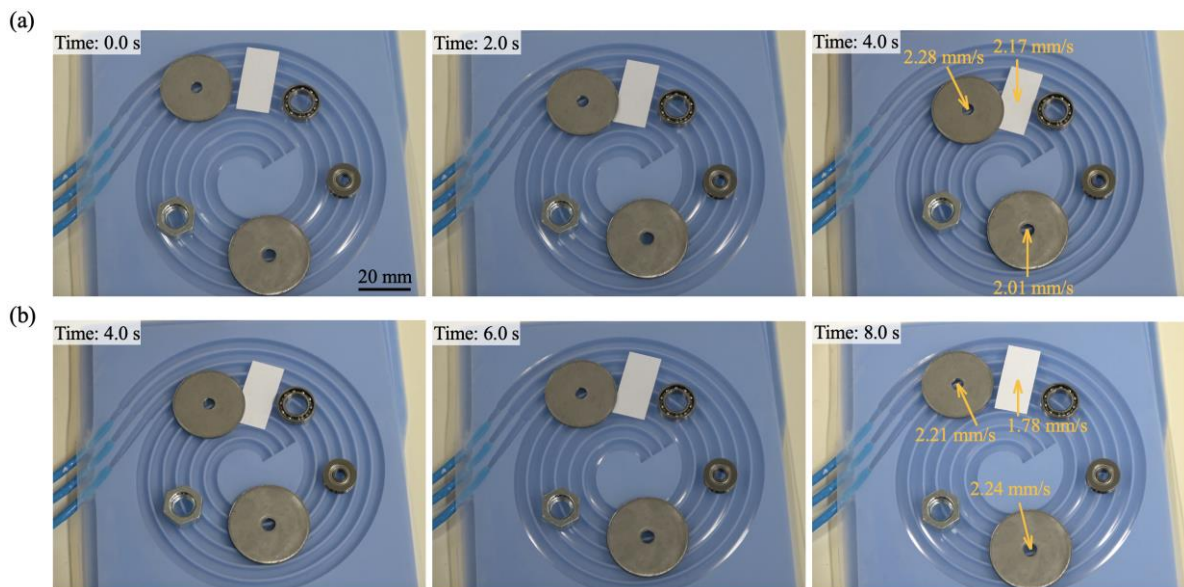


Fig. 3.14 Photographs of the objects transported by the spiral actuator at a pressure of 78.5 kPa and 10 Hz: (a) pressure from inside to outside segments; (b) pressure from outside to inside segments

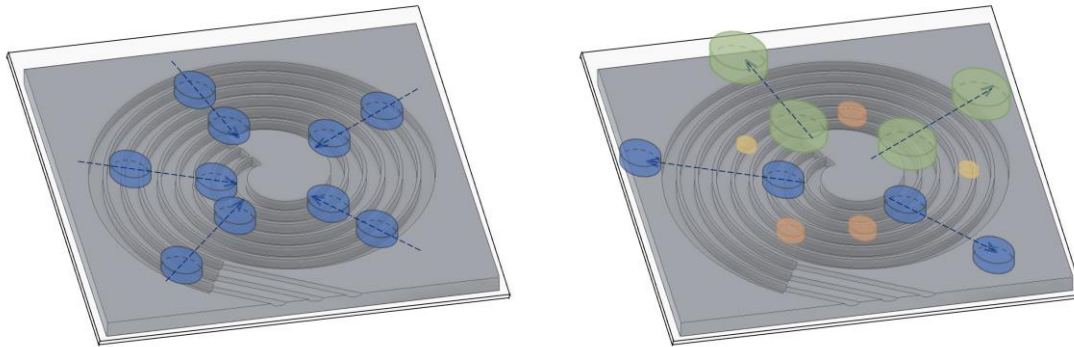


Fig. 3.15 Applications: conveyors that move objects to a central location or sort objects by size

3.4 まとめ

本章では，薄膜とゴム基板だけで構成され，身長可能なマルチセグメント構造を持つ渦巻型空気圧アクチュエータを開発し，進行波機構による搬送動作を実現した．有限要素法のモデルとして，膜厚，及び，空気室の幅，深さ，壁厚という複数のパラメータを考慮して搬送のための変形に適した構造を決定した．FEA 解析と実験による検証の結果，傾向が一致し数値シミュレーションは妥当だった．各空気室の差圧で生成される空気室の壁や薄膜の弾性変形による進行波機構を用いて搬送実験を行った結果，望む方向へ搬送に成功した．



第 4 章

DEA 駆動マルチバルーン搬送機構

本章では、従来の空気圧アクチュエータは「駆動速度が遅いこと」や「駆動するためには多くの空圧供給ホースやコンプレッサが必要となる」といった問題に対する解決策として提案する DEA 駆動のマルチバルーンアクチュエータについて説明する。まず、電氣的に駆動可能なマルチバルーンアクチュエータの構成と進行波駆動機構、製作方法について述べる。また、バルーンアクチュエータの動作特性について理論と実験から検証を行う。その結果からマルチバルーンアクチュエータのバルーン間距離を決定し、製作した 3-バルーンアクチュエータを用いて進行波による搬送駆動と空圧供給ホースなしでの動作を検証する。

4.1 誘電エラストマクチュエータのプレストレッチ効果

4.1.1 誘電エラストマクチュエータ

誘電エラストマクチュエータ (DEA) は、Fig. 4.1 に示すように、シリコーンやアクリルなどの誘電エラストマ膜とそれを挟んだ伸縮性の柔軟電極で構成される。表面電極間に数 kV 程度の高い電圧を印加すると、電極上の正と負の電荷間の静電引力と、各電荷の同様の電荷の反発により、マクスウェル応力の圧縮力がかかる。その結果、厚さ方向に圧縮され、面方向に大きな変位を生じる。

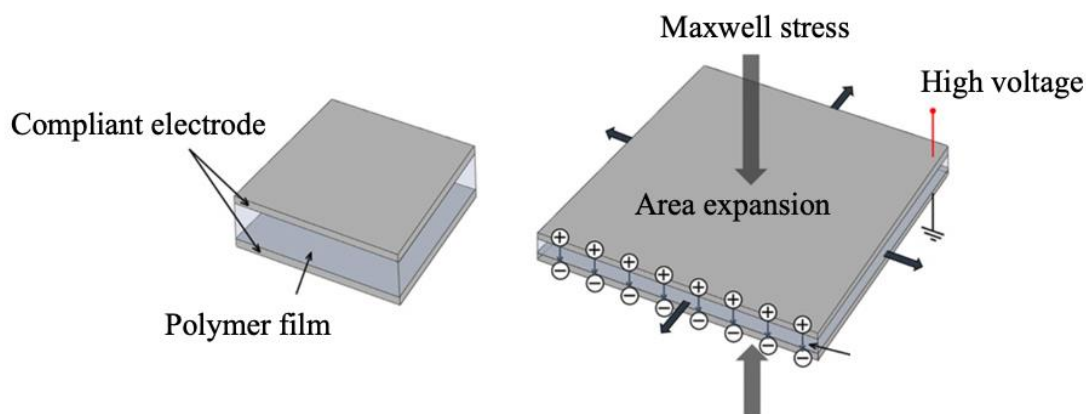


Fig. 4.1 Structure and actuation principle of a DEA

4.1.2 材料

本研究では、シリコーン膜 (ELASTOSIL® FILM 2030, WACKER) を用いる。シリコーンは高い絶縁応力と低いヤングを有し、高ひずみを発生できる。また、電界に対する形状変化応答が速いことも報告されている [94]。厚さが 50, 100, 200 μm のものの 3 種類を用意し、これらのエラストマ膜は 10% 以下の厚さのばらつきを持つ [95]。厚さが 50 μm の膜に対して、その特性を Table 4.1 に示す。

電極はエラストマ膜との接合性、及び、駆動中表面が滲まないように柔軟性を考慮した結果、カーボンプラック粒子が分散されているシリコーンペースト (ELASTOSIL® LR 3162 A/B, WACKER) を用いることにした。電極の特性を Table 4.2 に示す。

Table 4.1: Specifications of the silicone membrane (ELASTOSIL® FILM 2030) [94]

Variable		Value
Elongation at break	[%]	450.0
Hardness shore A		27
Tensile strength	[N/mm ²]	6.0
Tear-strength	[N/mm]	10.0
Elastic modulus	[MPa]	1.09
Permittivity	[$\mu\text{F/m}$]	0.028

Table 4.2: Properties of the electrode [96]

Variable	Value
Elongation at break [%]	400.0
Hardness shore A	53
Rebound elasticity [%]	54
Tensile strength [N/mm ²]	5.5
Tear-strength [N/mm]	18

4.1.3 プレストレッチ効果

誘電エラストマは伸縮性を持つ材料であり，機械的なストレッチはその静電容量を変更する．すなわち，エラストマ膜の厚さの低減により，単位静電容量が増え，たくさんの電荷が溜められる．また，観察された効果として，絶縁耐力，機械的効率，反応速度が向上するが，誘電エラストマの誘電率は低下する [97][98]．

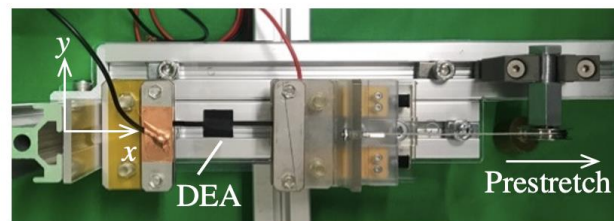
そこで，3種の厚さをもつシリコンエラストマ膜のプレストレット効果を確認する基礎実験を実施した．Fig. 4.2 に示すように，膜状 DEA をクランプで固定させ，重りで一軸のプレストレッチを与えた．電圧印加には高圧電源 (HEOP-10B2, MATSUSADA Precision Inc.) を用いた．また，動作の撮影のためアクチュエータの真上にビデオカメラ (DIGITAL CAMERA D5500, Nikon corporation) を取り付け録画した．

エラストマ膜に一軸の伸張（予ひずみ）を与え厚さ方向へ電圧を印加したとき，プレストレッチを与えた状態における電圧印加前後の変位量で定義するひずみ量を評価した．Table 4.3 に使用したアクチュエータの膜厚と電極の厚さをまとめた．平面方向のひずみは直接測定し，厚みひずみは体積一定という仮定から計算した．絶縁破壊電界は，印加電圧と破壊を起こしたときの膜厚から計算した．比較的に厚いエラストマでは絶縁破壊を起こす電圧を最大にする試みは行わず，印加電圧は 8 kV までとした．重りでプレストレッチを与えた方向を x 方向と，その表面上の垂直方向を y 方向と称する．

Table 4.3: Specification of actuators used, and field strength obtained in the experiment

Actuators		Field strength (MV/m)
Membrane thickness (μm)	Upper/ bottom electrode thickness (μm)	
200	56.6/ 52.0	—
100	48.3/ 57.1	67.7
50	53.4/ 53.0	89.9

(a)



(b)

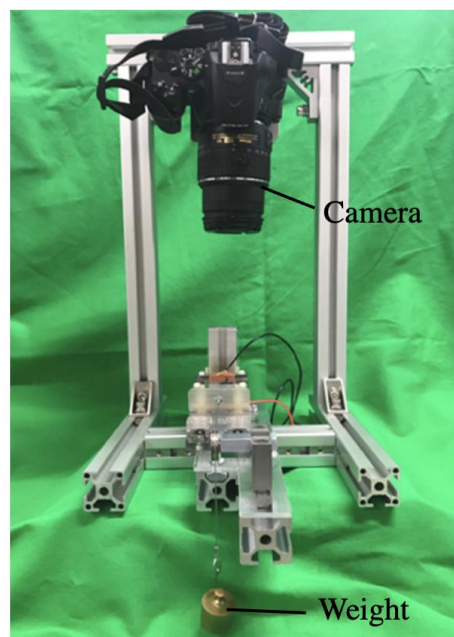


Fig. 4.2 Experimental apparatus: (a) Top view; and (b) Side view

一軸方向のプレストレッチを与える範囲はエラストマ膜の厚さで異なる．その程度が大きくなると剛性が高くなり，表面に凹凸が生じるため，それぞれ異なる伸張範囲で実験を行った．Fig. 4.3 は，測定した平面と厚さ方向のひずみをまとめた．

膜厚が薄いほど，低電圧で同等の変形が得られる．その結果，大きいプレストレッチを与えるほど発生するひずみ量が増大することが確認できた．初期厚さが $50\ \mu\text{m}$ の DEA の $3.5\ \text{kV}$ 印加時の y 方向ひずみは， 1.44% のプレストレッチを与えた膜の 2.90% から， 1.92% のプレストレッチを与えた膜の 4.49% まで増加した．ところが，電極に $4\ \text{kV}$ を印加したとき絶縁破壊を起こした．厚さが $100\ \mu\text{m}$ の DEA に $6\ \text{kV}$ 印加した時の y 方向ひずみは， 1.36% のプレストレッチを与えた膜の 3.99% から， 1.49% のプレストレッチを与えた膜の 5.39% まで増加した．ところが， 1.36% のプレストレッチを与え，電極に $5\ \text{kV}$ の電圧を印加したとき絶縁破壊を起こした．初期厚さが $200\ \mu\text{m}$ の DEA に $8\ \text{kV}$ 印加した時の y 方向ひずみは， 1.44% のプレストレッチを与えた膜の 4.31% から， 1.52% のプレストレッチを与えた膜の 8.58% まで増加した．実験条件では初期厚さが $200\ \mu\text{m}$ の DEA は絶縁破壊を起こさなかった．この主な原因は，プレストレッチした DE や短いチェーンで構成されるポリマーを用いることで，電気機械的不安定性が抑制または排除され，大きな作動ひずみを得られるためである [99]．

また，プレストレッチした x 方向ひずみよりその垂直方向となる y 方向のひずみ量が最大 3.1 倍大きかった．これは薄膜が異方的にプレストレッチされることで，剛性が異なり，その結果，2 つの面内ひずみが異なることとなる．

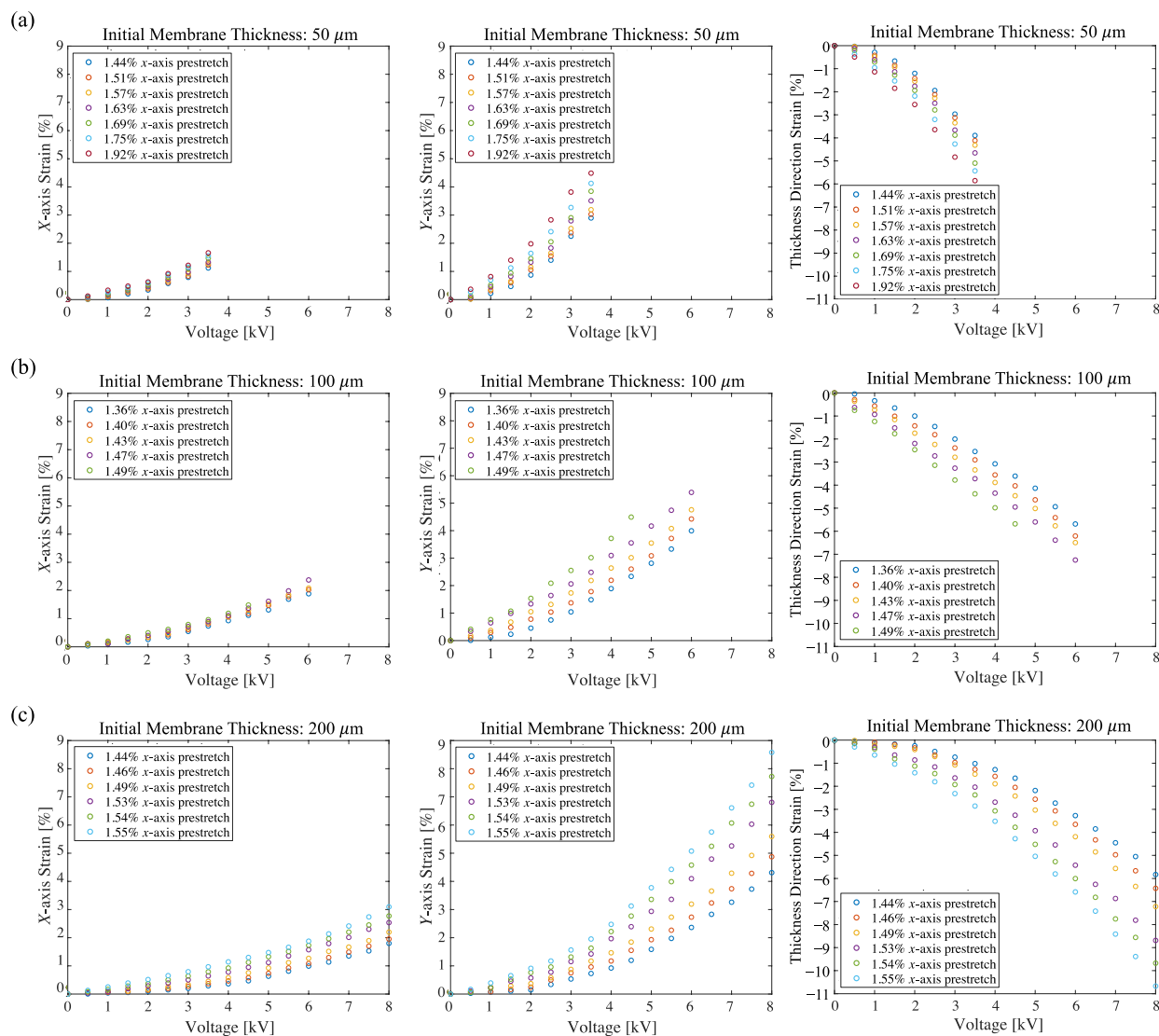


Fig. 4.3 Planar and thickness strains of the actuator versus the applied voltage for the actuators with an initial membrane thickness of (a) 50, (b) 100, and (c) 200 μm



4.1.4 シリコンエラストマ膜の弾性特性

電界が高くなり、ひずみが大きくなるとエラストマは超弾性であるため軟化し、ひずみ-電圧曲線の傾きが大きくなる．そこで、エラストマ膜の引張試験によるひずみ計測を行った．小型卓上試験機 (EZ-LX, 島津製作所) を用いた．実験は引張速度 1.5 mm/s, つかみ具間距離 40 mm, 引張ストローク 90 mm (220%) の条件で行われた．試験片の形状は, Fig. 4.4 に示すように, JIS K 6251 で規定されているダンベル状 6 号形とし, 厚さ 200 μm の ELASTOSIL® FILM 2030 を用いた．得られた応力-ひずみ曲線を Fig. 4.5 にプロットした．220% のストロークまでは壊れず伸張できることが確認できた．

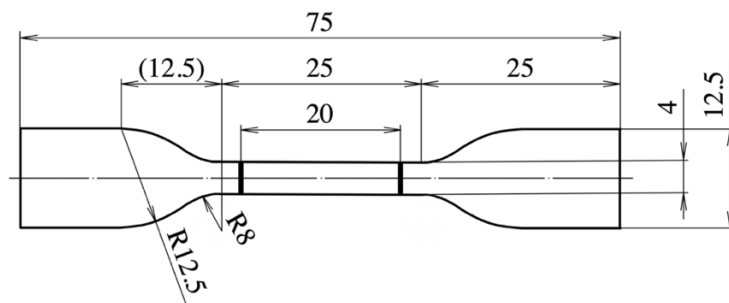


Fig. 4.4 Layout of the test specimen used for tensile test

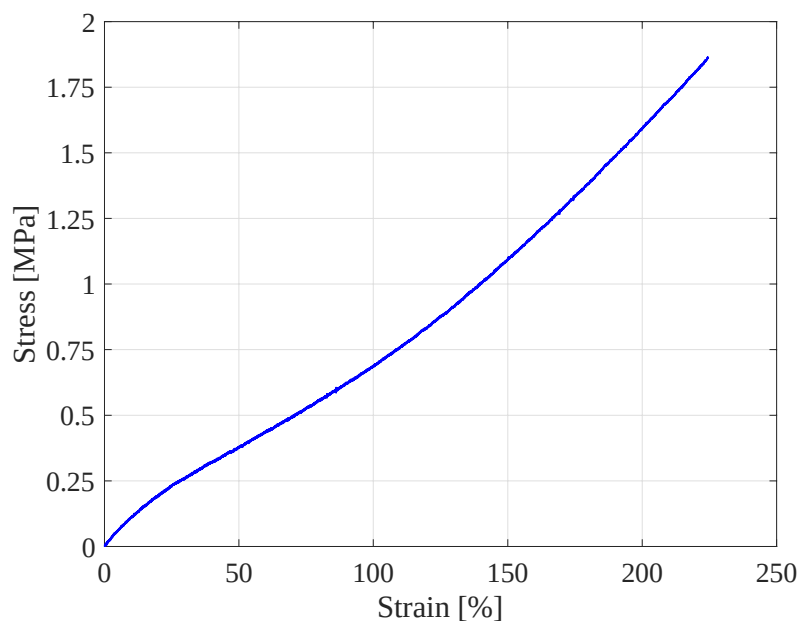


Fig. 4.5 Stress-strain behavior of silicone membrane (thickness 200 μm)

4.2 DEA 駆動 3-バルーンアクチュエータの構造と進行波生成機構

4.2.1 バルーン構造

Fig. 4.6 に示すように，高さ方向と幅方向に変位と発生力を得るため，バルーンのように膨らませたアクチュエータを用いた．シリコーンのチャンバーに固定して空気圧を加えるとバルーンのように膨らみ，プレストretch効果を活かした構造となる．動作前は加圧させるため空気ある供給ラインがつながっており，加圧後はバルブを閉め空気量を固定する．駆動中は空気圧の供給が要らないため配管を出すことができる．また，DEA の内部電極は高電圧へ，DEA の外部電極は GND へ接続されている．高電圧を膜厚方向へ印加すると大きな面積拡張が発生し，さらに膨らみ，バルーンの幅と高さ方向に変位が発生する．

マルチバルーンアクチュエータの進行波機構を実現するためには，隣接するバルーン間の干渉が必要である．そこで，駆動時のバルーンの幅 d_2 は，フレームの間隔 d_f より大きくなる必要がある．これは，各セグメントが干渉を起こし進行波を生成するための必要条件を意味する．



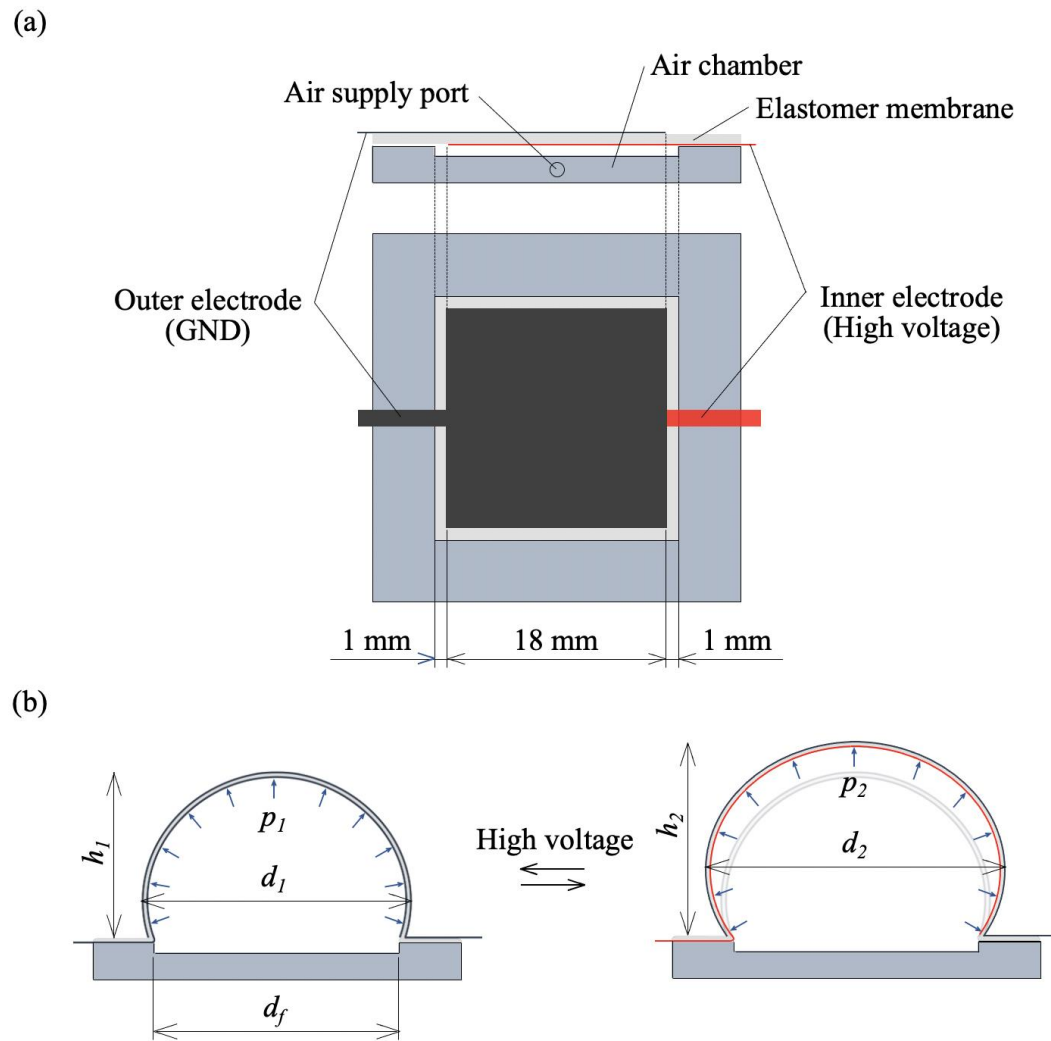


Fig. 4.6 Schematic view of balloon actuator: (a) Initial state; (b) Pressurized state and activated state

4.2.2 DEA 駆動 3-バルーンアクチュエータの構造と進行波生成による搬送機構

開発した 3-バルーンアクチュエータの構成を Fig. 4.7 に示す. このアクチュエータは, 空気圧で膨らみ印加電圧に対して変形する DEA, 内部に一つの共通空気室を有するエアチャンバー, および, 空気供給用ホースからなる. エラストマ膜は両面が異なる電極パターンで印刷され, 独立して制御可能なバルーンを形成する. エアチャンバーは, 一定間隔で空気通路がある内壁を有し, 各セグメントが同じ空気圧で膨らむことを可能にする. エアホースは, 薄膜に初期空気圧を加えるためにエアチャンバーに接続され, 作動前には取り外される.

3-バルーンアクチュエータの進行波による搬送機構を Fig. 4.8 に示す. ここでは, バルーン $A \rightarrow B \rightarrow C$ の順に電圧を印加するときを考える. 空気室を任意の圧力の空気量で固定すると, 同じ空気圧で膨らませたバルーン構造を形成する. 電圧が印加されたバルーンは高さと同幅方向に変位を発生し, 隣接するバルーン間の干渉によって進行波運動を実現する. 物体との接触が起こる各セグメントの頂点の位置は縦方向の変位だけ発生することではなく, 2つの連続するセグメントの駆動状態が重なる時に横方向へも移動する. 一連の動作を繰り返すことで進行波運動が現れ, 接触する物体を直線的に搬送させる. 電圧の印加順番を調整して搬送物を望む方向に移動させることができる. また, アクチュエータの最大直線速度とストロークは, 最大周波数と誘電損失, 電気的損失, 摩擦損失によって決定される.



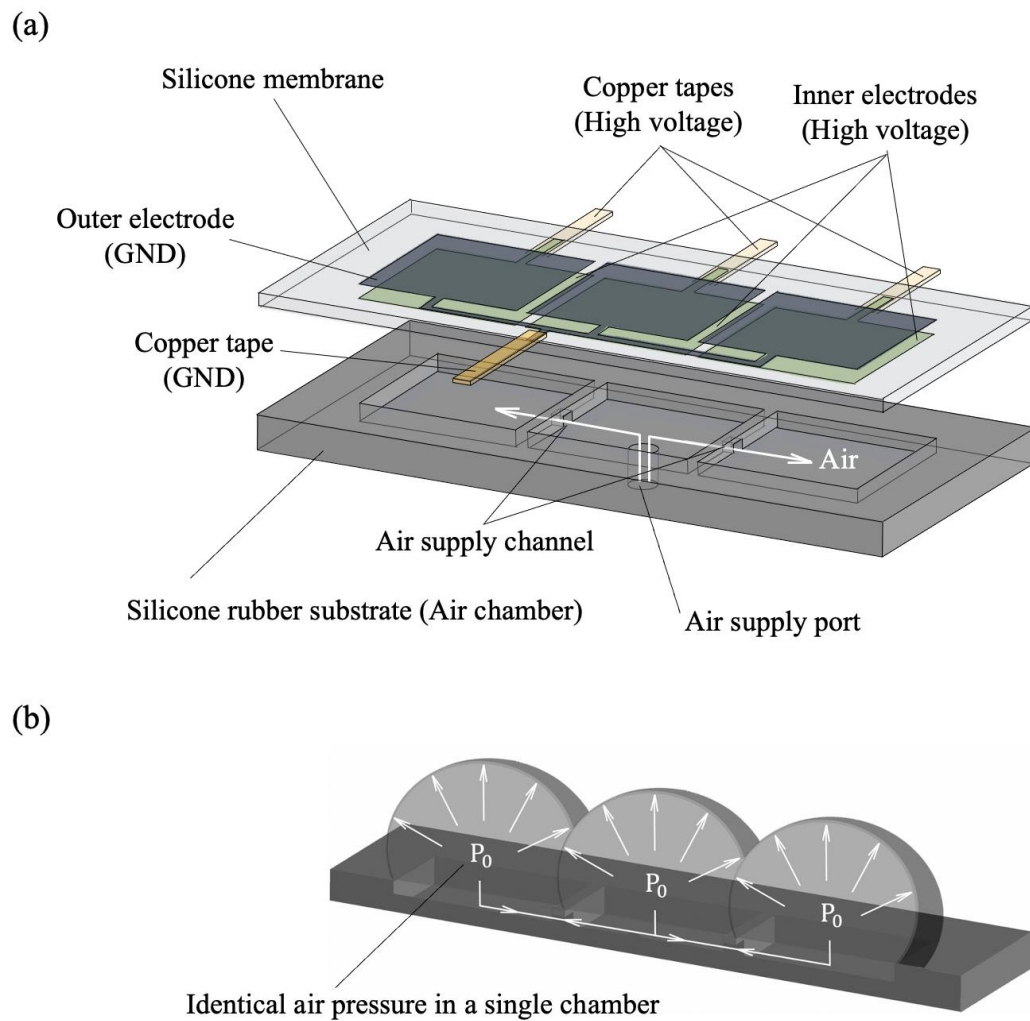


Fig. 4.7 Schematic diagram of the designed 3-balloon actuator: (a) Actuator parts; and (b) Cross section during a pressurized state

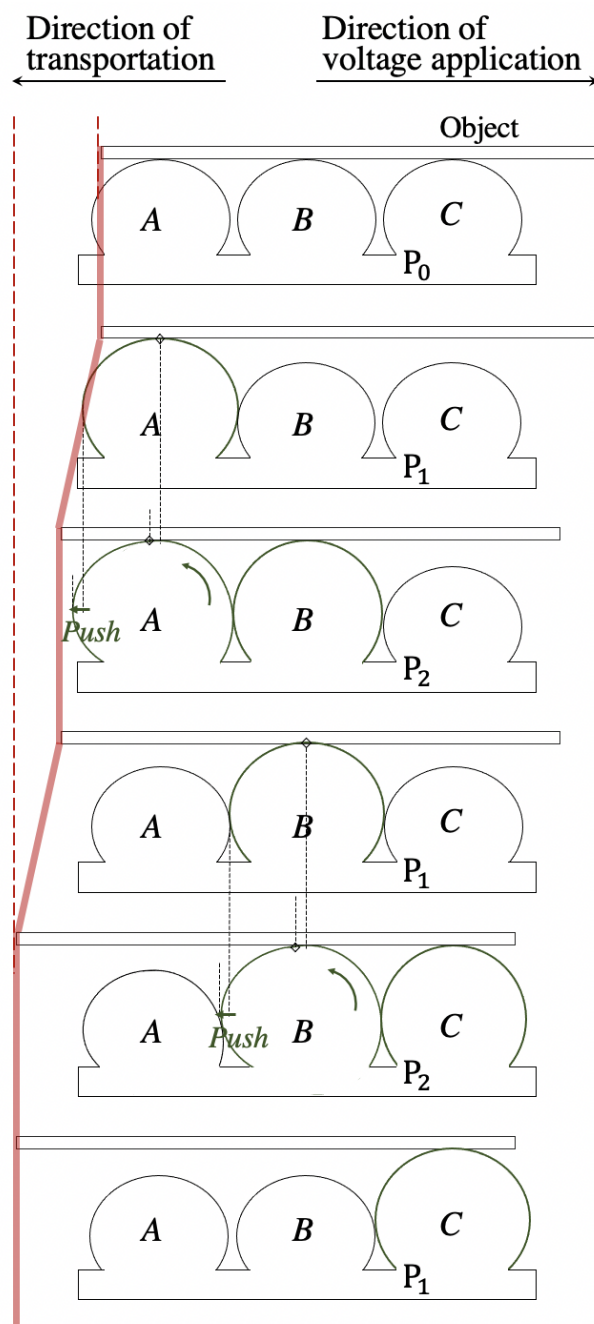


Fig. 4.8 Transportation behavior of the 3-balloon actuator

4.2.3 製作プロセス

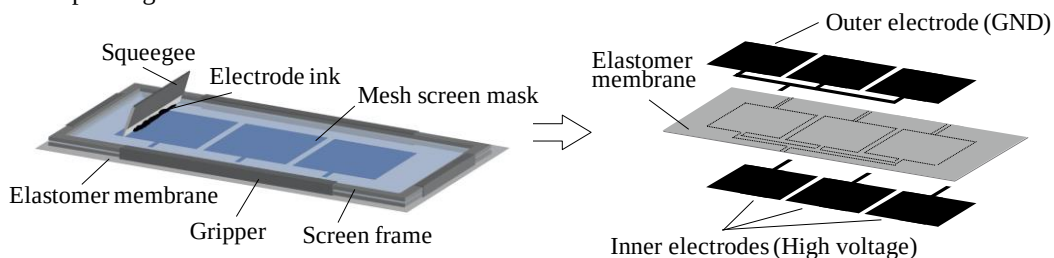
アクチュエータの製作プロセスを Fig. 4.9 に示す. 大きく 3 つのステップに分けられる: (1) スクリーン印刷による DEA の電極パターンニング, (2) 3D 印刷を用いたチャンバーのゴム成型, (3) プラズマ処理による接合. その後, 空気供給エアホースと電気配線を接続することでできる. 手順(2) と (3) については 2.1.1 節での手順と同様でありここでは省略する.

手動印刷装置を用いたスクリーン印刷による電極パターンニングの手順を以下に示す. 本研究で製作した全てのバルーン DEA における電極形状は一辺 18 mm の正方形である. また, 製作されたアクチュエータの電極厚みは片方で約 40 μm であった.

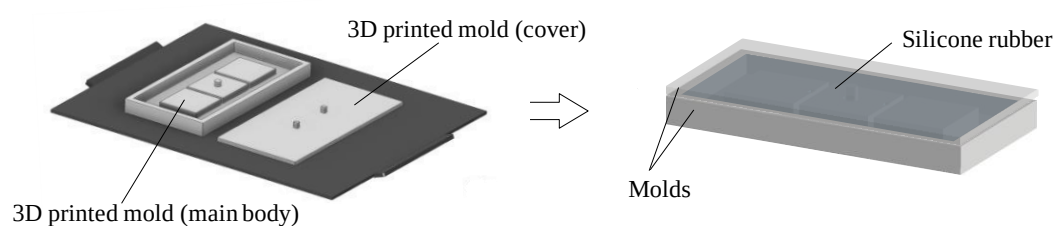
1. 電極形状データをデジタルスクリーン製版機 (GOCCOPRO100, RISO KAGAKU) に転送し, スクリーンマスク (デジタルスクリーンマスター 200P-32-12, RISO KAGAKU) を製版する.
2. パターンに沿って開孔部が生じたスクリーンマスクを, 両面テープを貼ったアルミフレームで挟み, にじみなく均一に引っ張らせる.
3. 露出されたメッシュの部分に残ったゴミなどをマスキングテープでとる.
4. 卓上式印刷台 (WHT ラボ, 株式会社身のグループ) にフレームを固定し, 基板の上に間隔 (1 mm 以上) を設定して置く. 基板は印刷台に取り付けられている真空ポンプで固定する.
5. ドラフト内で粘度調整した電極ペーストを短時間内にスクリーンマスクの上の開孔部以外のところに分布させる. 電極の ELASTOSIL® LR 3162 A と B とイソオクタンを, 1:1:1.25 の質量の比で混合した.
6. ゴム製のスキージでスクリーンマスクの上から押し圧を加え, スクリーンマスクをクリアランス分だけ伸ばしながらの印刷パターンを転写させる.
7. ペーストがメッシュを通り抜け, ペーストがメッシュの開孔部に「充てん」される. 同時に膜に密着させる.
8. その一瞬後, スクリーンマスクの張力による反発力で, 「版離れ」が起こり, ペーストが膜に残される.
9. 充てんと版離れが一連の動作で連続的に実現されることで, 刷られる.
10. 印刷した電極が乾燥したら以上の過程を繰り返し, 3 回レイヤーする.

(a)

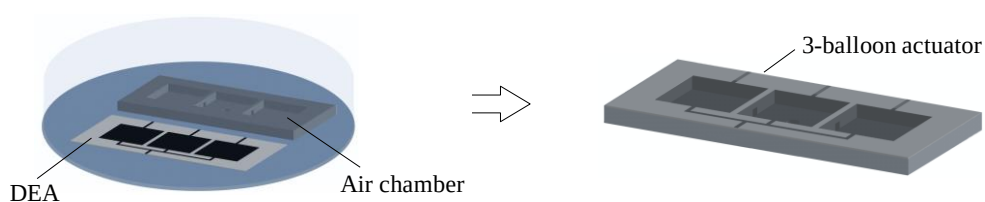
1) Screen-printing of DEAs



2) Mold casting of air chamber

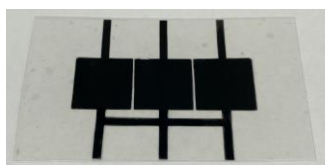


3) Plasma treatment for bonding

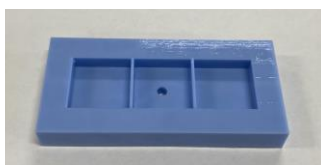


(b)

1) Screen-printed DEA



2) Molded air chamber



3) Fabricated 3-balloon actuator

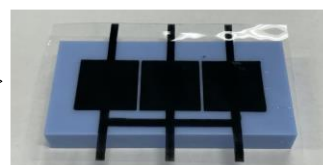


Fig. 4.9 Fabrication process of a 3-balloon actuator: (a) Schematic diagram of manufacture flow; and (b) Snapshots of a screen-printed DEA, molded air chamber, and fabricated 3-balloon actuator



電極をパターニングした DEA とシリコンのエアチャンバーを接合するため、プラズマ接合を用いるが、電極の印刷されている部分は接合されない。チャンバーの封止のため、その隙間に導電性銅箔テープを差し込み、化学反応形接合剤 (LOCTITE, Henkel) を使用した。また、空気供給ホースをチャンバーの接続部に差し込み同様に封止した。

4.3 DEA 駆動バルーンアクチュエータの動作特性

4.3.1 実験による変形評価

進行波駆動による物体搬送が可能なマルチバルーンアクチュエータを構成するため、バルーン間隔を決定する必要がある。そこで、バルーン DEA の動作特性と発生力を計測する基礎実験を行った。膜厚が 50, 100, 200 μm のエラストマで製作したバルーン DEA を用いて、初期空気圧 p_0 と印加電圧 ϕ に対するバルーンの変形を観察した。

実験装置を Fig. 4.10 に示す。バルーン DEA を加圧させた後、バルブを閉め、表面電極に高電圧を印加して駆動させる。高電圧はマイクロコンピュータの信号を高圧電源 (HEOP-10B2, MATSUSADA Precision Inc.) で増幅し、アクチュエータの内部電極に印加した。圧力センサ (AP-C30, 株式会社キーエンス) を用いて空気圧を、かつレーザー変位計 (LK-G32, 株式会社キーエンス) を用いてバルーンの頂点の変位を測定しオシロスコープ (DSOX2004A, 株式会社キーエンス) で信号を読み取った。また、バルーンの幅の変位の測定には、正面に固定したカメラ (DIGITAL CAMERA D5500, Nikon corporation) を用いた。

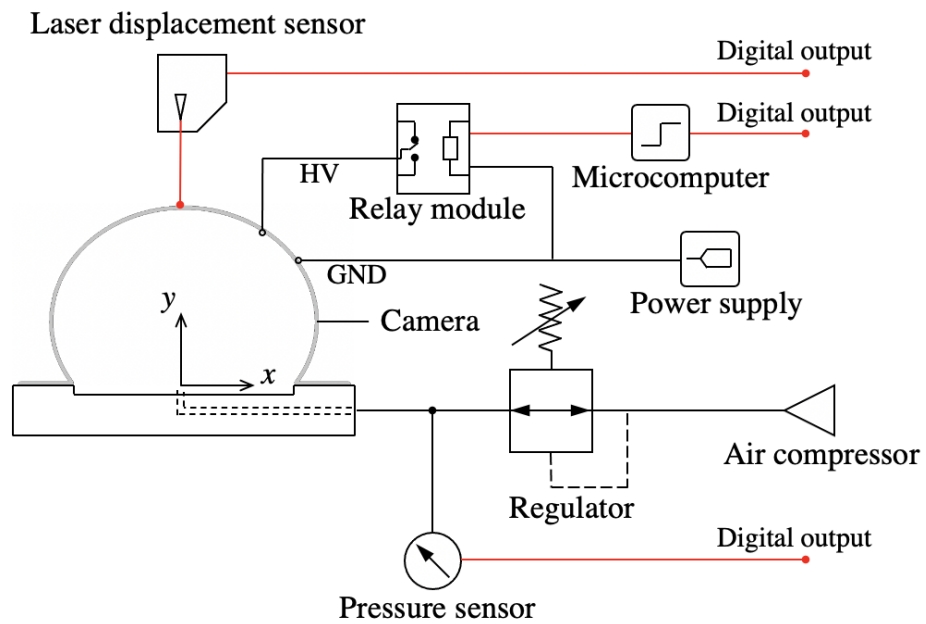


Fig. 4.10 Experimental apparatus

初期空気圧が $p_0 = 5 \sim 20 \text{ kPa}$ の範囲で、電圧印加前後のバルーンの頂点と幅の変位を評価した。その結果、膜厚 $50 \text{ }\mu\text{m}$ のバルーン DEA は $p_0 = 5 \text{ kPa}$, $\phi = 2 \text{ kV}$ の動作条件で絶縁破壊を起こした。そのとき、バルーンの幅は薄膜の固定距離を超えない形状であり、マルチバルーンアクチュエータの進行波駆動のための条件には満たせなかった。膜厚 $100 \text{ }\mu\text{m}$ のバルーン DEA は $p_0 = 11 \text{ kPa}$, $\phi = 4 \text{ kV}$ の動作条件で絶縁破壊を起こし、同様であった。膜厚 $200 \text{ }\mu\text{m}$ のバルーン DEA は $p_0 = 15 \text{ kPa}$, $\phi = 9 \text{ kV}$ の動作条件で絶縁破壊を起こした。実際、 $p_0 = 12.2 \text{ kPa}$, $\phi = 9 \text{ kV}$ の動作条件での撮られた変形の様子を Fig. 4.11 に示す。膜厚 $200 \text{ }\mu\text{m}$ のバルーン DEA は進行波駆動のため十分膨らみ、高さと幅の方向へ変位を発生することを確認した。また、表面電極に高電圧を印加するとエラストマ膜の面積が伸張によりバルーンがより大きく膨らみ、その体積増加で圧力が減ることがわかった。さらに、撮影したバルーンの変形を解析した結果、全てのバルーン DEA は楕円体を維持しつつ、電圧印加の前後でその中心の位置が変わるということが確認された (Fig. 4.12)。

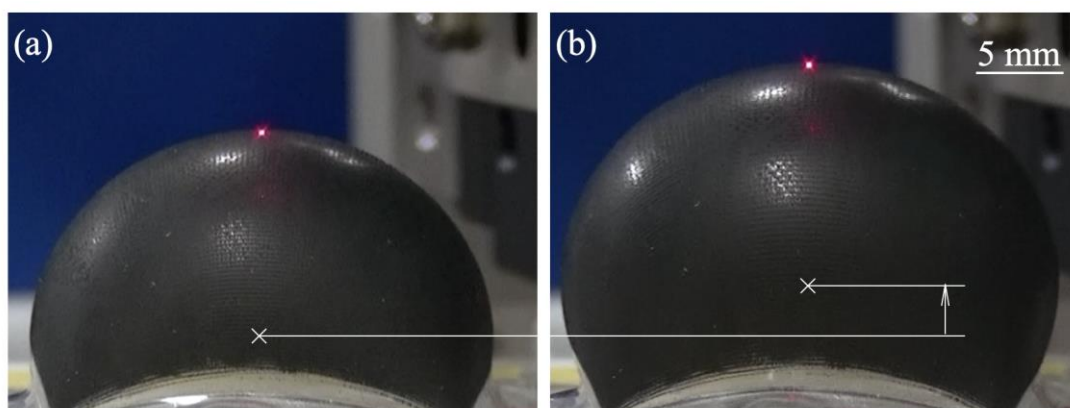


Fig. 4.11 Photograph of the 1-balloon actuator at the initial pressure of 12.2 kPa: (a) 0 kV; and (b) 9 kV

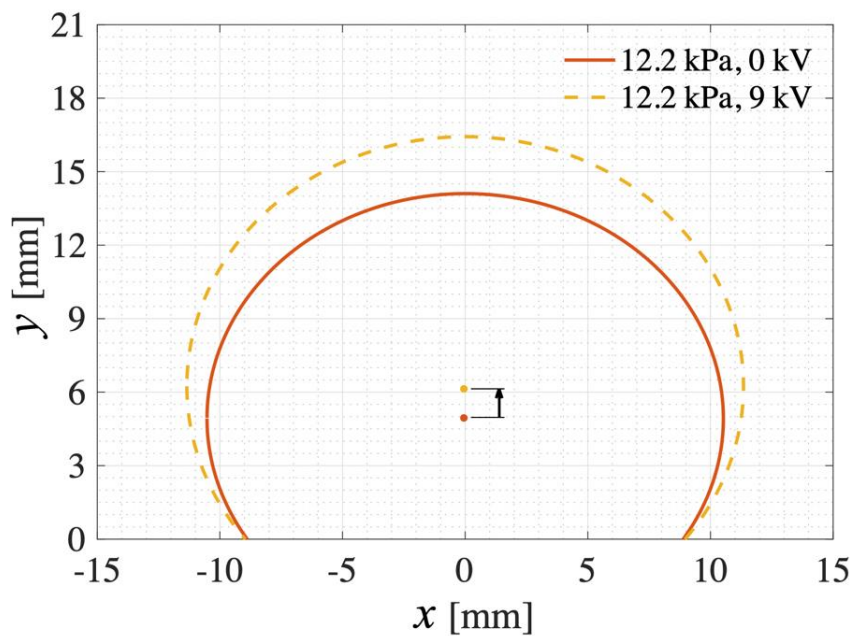


Fig. 4.12 Comparisons of the balloon actuator at the initial pressure of 12.2 kPa (black arrow indicates the change in the center of the ellipses)

バルーン DEA の動作特性において、プレストレッチ効果を決める空気圧の影響を評価した。膜厚 $200\ \mu\text{m}$ のバルーン DEA を電圧 $\phi = 8, 9\ \text{kV}$ の動作条件で測定し高さ変位を Fig. 4.13 に、幅の変位を Fig. 4.14 に示す。

その結果、高さ変位は初期空気圧 $p_0 = 12\sim 13\ \text{kPa}$ 付近で最大値をもち、測定された最大高さ変位は印加電圧 $\phi = 8, 9\ \text{kV}$ でそれぞれ $1.57, 2.28\ \text{mm}$ であった。また、初期のバルーンの幅に対する幅の変位を測定したところ、初期空気圧 $p_0 = 12.2\ \text{kPa}$ 付近で最大値が得られた。加圧状態で幅 $21.1\ \text{mm}$ のバルーンは、印加電圧 $\phi = 9\ \text{kV}$ で $1.64\ \text{mm}$ の変位が、加圧状態で幅 $22.3\ \text{mm}$ のバルーンは、印加電圧 $\phi = 8\ \text{kV}$ で $1.05\ \text{mm}$ の変位が得られた。プレストレッチによりバルーン表面の面積ひずみは増加したが、これらの結果は変位と初期空気圧の関係が非線形であることを示している。

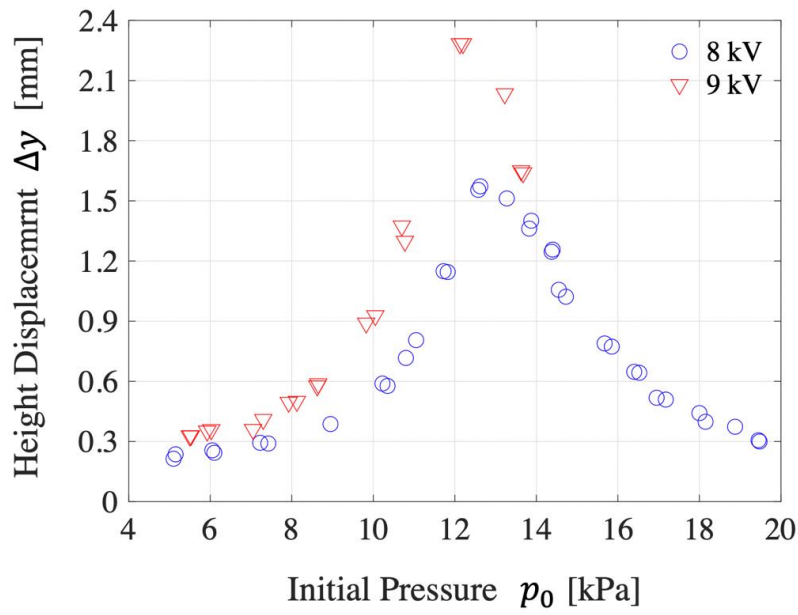


Fig. 4.13 Height displacement of the balloon actuator with respect to initial pressure for 8, 9 kV

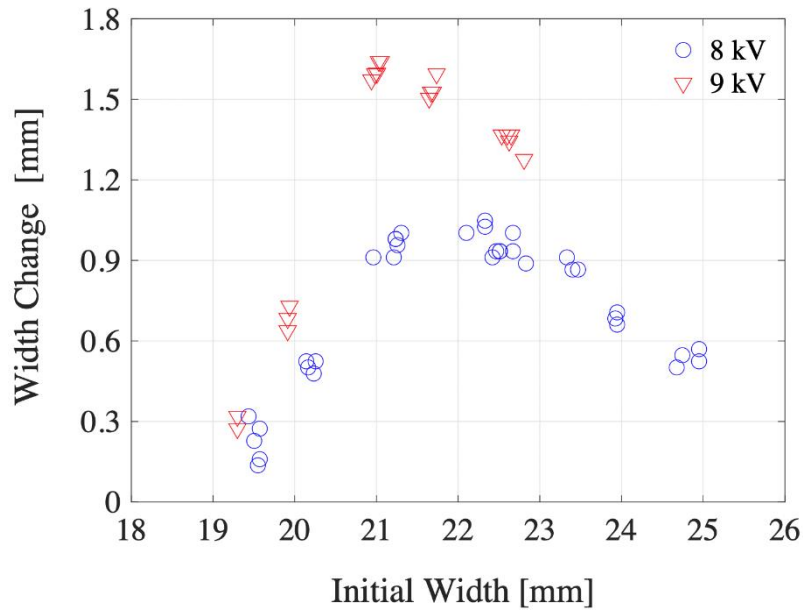
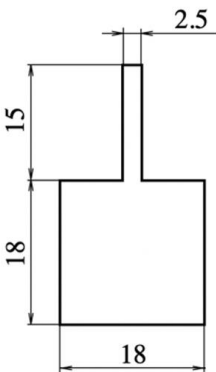
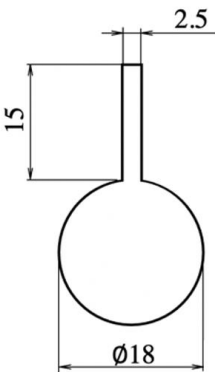


Fig. 4.14 Width change of the balloon actuator with respect to initial width for 8, 9 kV

4.3.2 変位量に対する電極形状の影響

DEA 駆動バルーンアクチュエータは初期空気圧（プレストレッチ）により動作特性が決定されることがわかった．ここで，円形の電極形状を持つアクチュエータを製作し，その変形を正方形電極形状のものの高さ変位測定結果（4.3.2 節の結果）と比較した．円形電極の直径は正方形電極の一辺の長さと同様に 18 mm とした．円形のバルーンアクチュエータは正方形のものに比べて表面積が小さいため同様の体積のバルーン構造にするのにより高い空気圧を必要とした．また，DEA に最適のプレストレッチ与えるための初期空気圧が異なり，マルチセグメント構造にしたとき膨らみやすい方が干渉変形を起こしやすいため，正方形電極のアクチュエータを今後使用することにする．最適変位を生成するときの電圧印加前のバルーンの表面積を比較したところ，正方形電極のものは 982.4 mm^2 (面積拡張率 303.2%)，円形電極のものは 819.1 mm^2 (面積拡張率 321.9%) となった．プレストレッチの程度が異なる原因として，エラストマのひずみ硬化の効果や電極の厚さによる剛性の影響が考えられる．

Table 4.4: Experimental results with balloon actuators driven by DEA of two different electrode geometries

	Actuator 1	Actuator 2
Electrode pattern	Square	Circle
		
Upper/ bottom electrode thickness	aver. 48 μm	aver. 46 μm
Pressure range for maximum displacement	12~13 kPa	14~15 kPa
Pressure to make balloon height 14 mm	12.2 kPa	16.3 kPa
Dielectric breakdown (voltage, pressure)	6.5 kV, 23 kPa	6.0 kV, 21 kPa



4.3.3 理論モデルによる動作解析

解析モデルを Fig. 4.15 に示す．空気圧に対する球状バルーン DEA に電圧を印加して駆動したとき高さの変位を求め、実験結果と比較する．Fig. 4.15 (a) に示すように、空気圧も電圧も受けていない時、厚さ t_0 、半径 $d_f/2$ の平らな円形の膜を考える．加圧状態では、膜は点 $P(d_f/2, 0)$ の位置が固定されたまま面内方向に伸張し、膜の内側から差圧 p_1 を受ける (Fig. 4.15 (b))．そのときのバルーンはエアチャンバーからの高さが h_1 、膜厚が t_1 の球欠体と仮定する．電極に高電圧 ϕ が印加され 2 つの電極に $+Q, -Q$ の電荷が蓄積された状態になると、膜はさらに膨らみ、高さが h_2 、膜厚が t_2 の球欠体となり、その時の差圧を p_2 とする (Fig. 4.15 (c))．

原点をバルーンを中心に固定し、各状態での座標系 (x, y) を Fig. 4.15 のように設定する．円の中心を基準に点 $Q(r, 0)$ と点 $P(d_f/2, 0)$ のなす角度を θ と示す．エアチャンバーと薄膜の接合条件により、 $r = (d_f/2)/\cos \theta$ の関係式が得られる．点 P, Q, R からなる曲線を y 軸について回転させたときにできる球欠の表面積 s と体積 v は次のように計算される．

$$s = 2\pi r^2(1 - \sin \theta) \quad (4.1)$$

$$v = \pi r^3 \left(\frac{2}{3} - \frac{3}{4} \sin \theta - \frac{1}{12} \sin 3\theta \right) \quad (4.2)$$

平衡状態において、バルーンの自由エネルギーの変化 δW は、空気圧によって行われる仕事 $p\delta v$ と電圧印加により行われる仕事 $\phi\delta Q$ の和に等しいということより、以下の式で表される．

$$\delta W = p\delta v + \phi\delta Q \quad (4.3)$$

ここで、 p は圧力、 v は誘電体の体積、 ϕ は印加電圧、 Q はエラストマの電荷である．

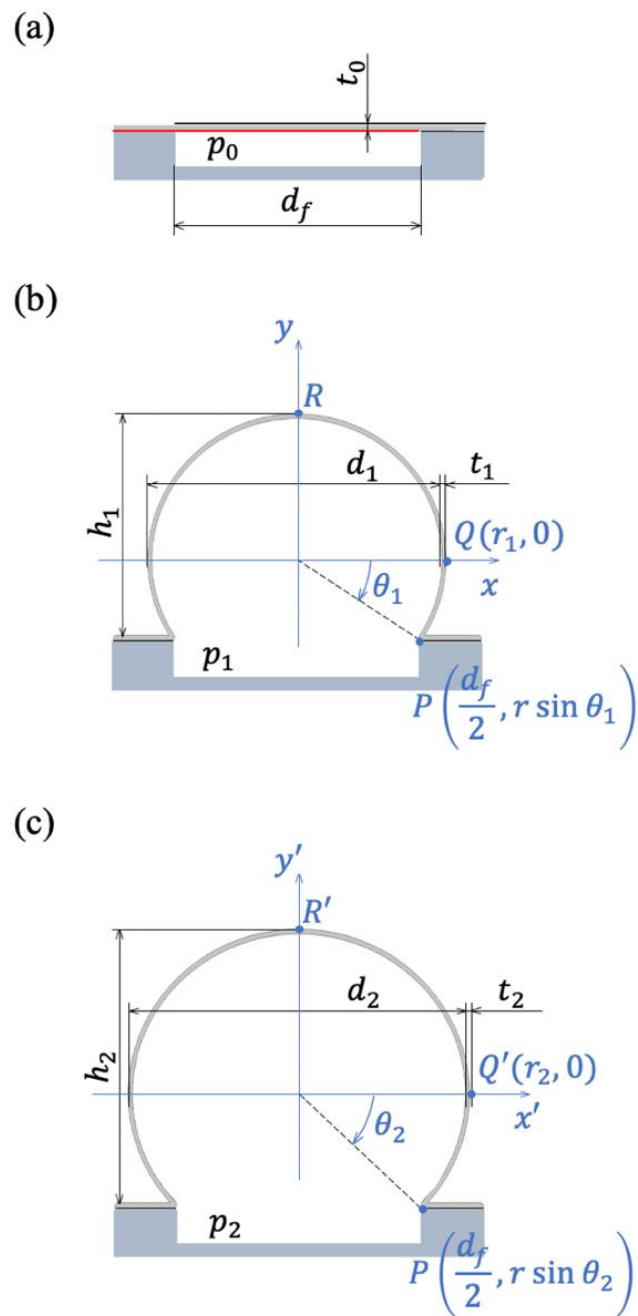


Fig. 4.15 Schematic view of balloon DEA: (a) Initial state; (b) Pressurized state; and (c) Activated state

理想な DEA モデルの自由エネルギーは、エラストマの非圧縮性により、ひずみエネルギーと初期状態の体積をかけたものである。

$$W(\lambda) = \pi \left(\frac{d_f}{2} \right)^2 t_0 W_s(\lambda) \quad (4.4)$$

ここで、 d_f はエアチャンバーの幅、 t_0 はエラストマの初期厚さ、 $W_s(\lambda)$ はエラストマのひずみエネルギー密度である。

また、エラストマの超弾性応答モデルとして、Gent モデル [100] によるひずみエネルギー密度関数を用いる。エラストマのひずみ硬化の効果を考慮したものとなり、次の式で表す。

$$W_s(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = -\frac{\mu}{2} J_{lim} \log \left(1 - \frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3}{J_{lim}} \right) \quad (4.5)$$

ここで、 μ はせん断弾性率、 λ_1, λ_2 はエラストマの面内方向伸張比、 λ_3 はエラストマの厚さ方向伸張比、 J_{lim} は限界伸びに関連する材料定数である。

エラストマの非圧縮性 ($\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$)、かつ対称構造により面内方向への伸張が均等ということ ($\lambda_1 = \lambda_2$) で、膜厚方向の伸張比は $\lambda_3 = 1/\lambda_1 \lambda_2 = 1/\lambda_1^2$ となるので、式 (4.5) は λ_3 のみの関数として表すことができる。

$$W_s(\lambda_3) = -\frac{\mu}{2} J_{lim} \log \left(1 - \frac{\lambda_3^2 + 2 \lambda_3^{-1} - 3}{J_{lim}} \right) \quad (4.6)$$

初期状態 (Fig. 4.15 (a)) から加圧状態 (Fig. 4.15 (b)) になるまで空気圧によって行われる仕事は以下のように計算される。アクチュエータとチャンバーに密閉された空気が理想気体である仮定すると、大気圧 p_g とチャンバーを含めた系の体積 v_0 として、 $(p_g + p_0)v_0 = (p_g + p_1)(v_0 + v_1)$ の関係が得られる。

$$\int_0^{v_1} p_1 dv = (p_g + p_0)v_0 \log \left| \frac{v_0 + v_1}{v_0} \right| - p_g v_1 \quad (4.7)$$

次に、初期状態 (Fig. 4.15 (a)) から電圧印加状態 (Fig. 4.15 (c)) になるまでを考える. 空気圧によって行われる仕事は式 (4.8) のように得られる. さらに、この状態では電圧が印加されマックスウェル応力の仕事量も考慮する必要がある. エラストマの非圧縮性により、 $\pi(d_f/2)^2 t_0 = st$ となる関係より、電圧印加により行われた仕事は式 (4.9) で計算される.

$$\int_0^{v_2} p_2 dv = (p_g + p_0)v_0 \log \left| \frac{v_0 + v_2}{v_0} \right| - p_g v_2 \quad (4.8)$$

$$\int_{t_0}^{t_2} -\varepsilon_0 \varepsilon_r \left(\frac{\phi}{t} \right)^2 s dt = \frac{\pi}{8} \varepsilon_0 \varepsilon_r \phi^2 d_f^2 \left(\frac{1}{t_2^2} - \frac{1}{t_0^2} \right) t_0 \quad (4.9)$$

ここで、 ε_0 は真空の誘電率、 ε_r はエラストマの比誘電率である.

式 (4.1)–(4.9) を用いて、初期状態から加圧状態になるときの式 h_1 – p_0 の関係、初期状態から電圧印加状態になるときの式 h_2 – p_0 の関係が求められる. そこで、同一空気圧 p_0 に対する高さの変位 $\Delta h (= h_2 - h_1)$ が計算される.

加圧状態と 9 kV の電圧印加状態におけるバルーンの頂点の高さ方向変化を解析した結果を Fig. 4.16 に示す. また、6, 7, 8, 9 kV の電圧印加時のバルーンの頂点の高さ方向変位を解析した結果を Fig. 4.17 に示す. 数値解析では、Table 4.5 に示したパラメータを使用し、一部は先行研究で求められた材料定数を用いる. 高い空気圧を加えるほどバルーンは膨らみ、プレストレッチ効果により電圧印加時の変位が大きくなることが確認できる.



Table 4.5: Parameters used in theoretical analysis of the balloon DEA

Variable	Symbol	Value
Shear modulus	μ [kPa]	20.62
Constant defining the limit stretch	$J_{lim}[-]$	220
Relative permittivity	$\varepsilon_r[-]$	2.8

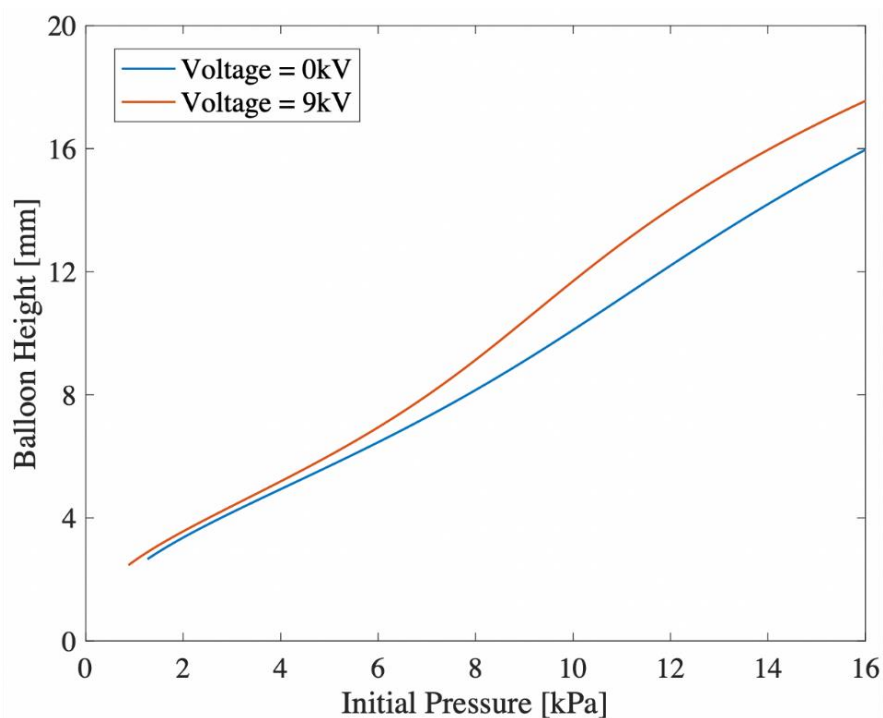


Fig. 4.16 Simulation result of balloon height for pressurized and activated states (applied voltage = 9 kV)

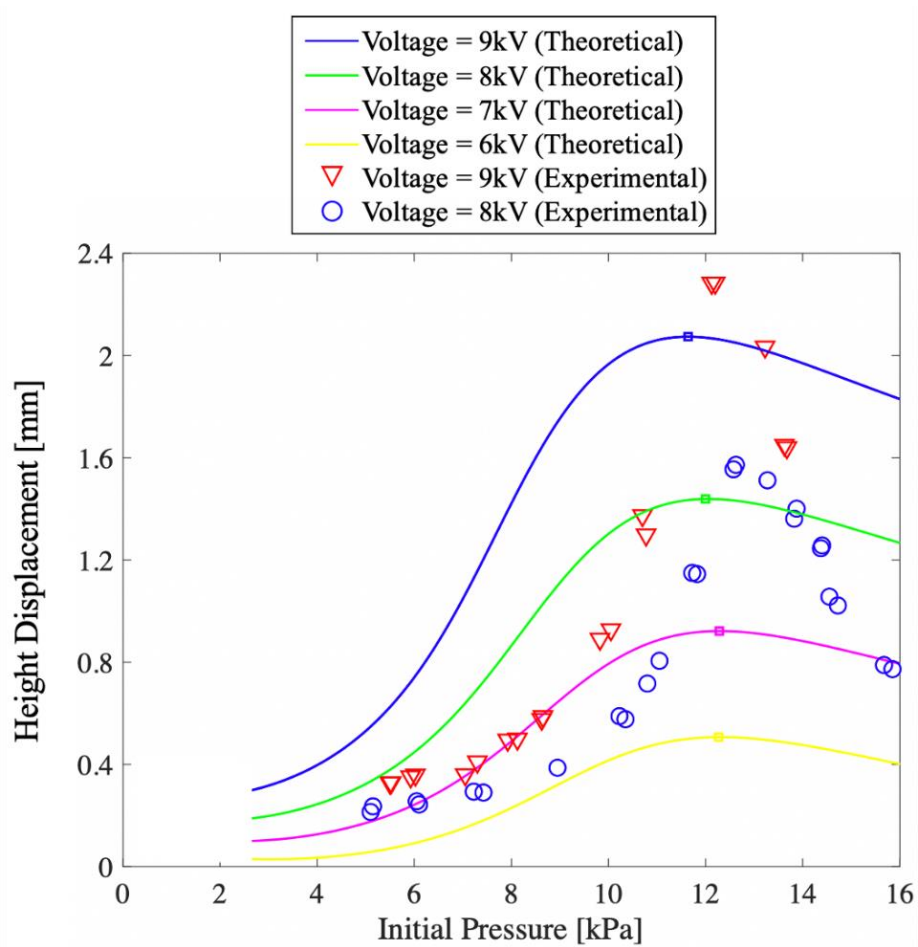


Fig. 4.17 Simulation result of the relationship between height displacement and initial pressure for 6, 7, 8, 9 kV



4.3.4 空気圧供給ラインの除去の影響

空圧供給ラインを除去してアクチュエータへの空気の入出りを封じると、DEA 駆動によるバルーンの内部体積増大に伴い、圧力が低下し、その結果変位が減る可能性がある。そこで、DEA の印加電圧を切り替えた際のバルーンアクチュエータの立ち上がり特性の評価を行った。測定では、ステップ状に電圧を印加してバルーンの頂点の位置をレーザー変位計で測定した。

DEA 駆動バルーンアクチュエータに関して、空気圧 13.8 kPa を充填し、アクチュエータからすぐ近くのバルブを閉鎖してアクチュエータ内部の空気量を固定した場合 (Case1) と、アクチュエータを空圧供給ラインに接続して空気圧を 13.8 kPa に一定に保った場合 (Case2) について比較実験を行った。ステップ状に電圧 6.5 kV を DEA に印加したときの結果を Fig. 4.18 に示す。

すぐ近い距離でバルブを閉めアクチュエータ単体の体積で空気量を固定したとき (Case1) は、急速にバルーンが膨らみ定常状態に至った。観測された立ち上がり時間は約 4.3 ms という高い応答性を示した。圧力一定条件 (Case2) では、体積増加時圧縮気体の密度変化により、立ち上がり時間は約 27.3 ms であった。体積の増加による内圧低下の影響が低くなり、Case1 に比べて変位量が高くなることが確認された。以上の実験より、アクチュエータの空圧供給ラインを除去して内部の空気量一定の条件で駆動すると、立ち上がり時間が 27.3/4.3 倍となり、高い周波数帯域でも安定に駆動できる可能性が示された。

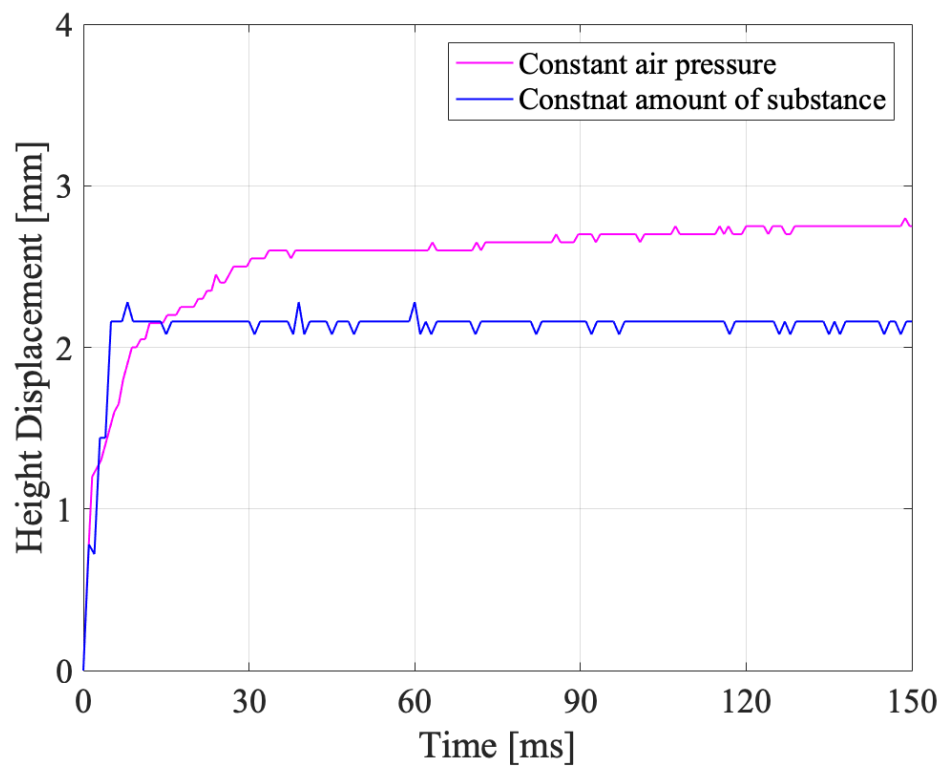


Fig. 4.18 Response of voltage signal for constant pressure and amount of substance conditions



4.3.5 DEA 駆動による応答性向上

空圧ホースを接続し外部の電磁弁とコンプレッサで駆動する従来方法の場合と、空圧ホースを除去し DEA で駆動する場合について応答性を比較した。電磁弁駆動では、内径 2 mm、長さ 236 mm の空圧ホースを用い、空気圧は 13.8 kPa とした。DEA 駆動実験では、空気圧 13.8 kPa を印加した状態でバルブを閉めて空圧ホースを切り離し、6.5 kV の電圧で DEA を駆動した。

結果を Fig. 4.19 に示す。空圧ホースを通して外部の電磁弁で駆動する場合の立ち上がり時間は約 53.2 ms、DEA 駆動時の立ち上がり時間は約 4.3 ms で、本条件では $53.2/4.3 \approx 12$ 倍の周波数で駆動できる。CR 一段近似回路と取り扱って、周波数帯域が立ち上がり時間に比例すること、および、搬送速度が周波数と振幅に比例する関係より約 1.9 倍の搬送速度が期待できる。

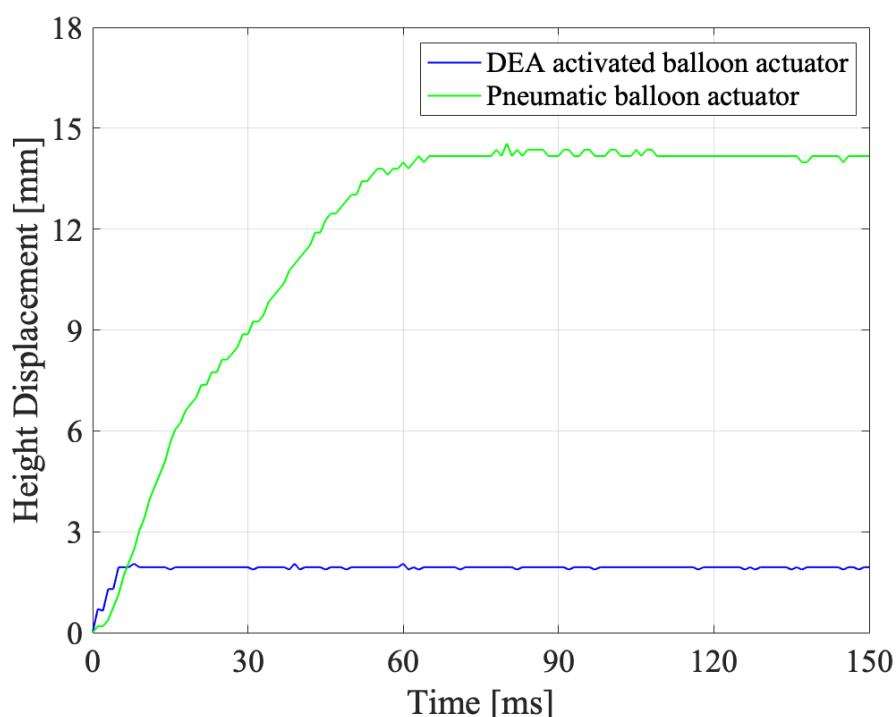


Fig. 4.19 Response of DEA activated and pneumatic balloon actuator

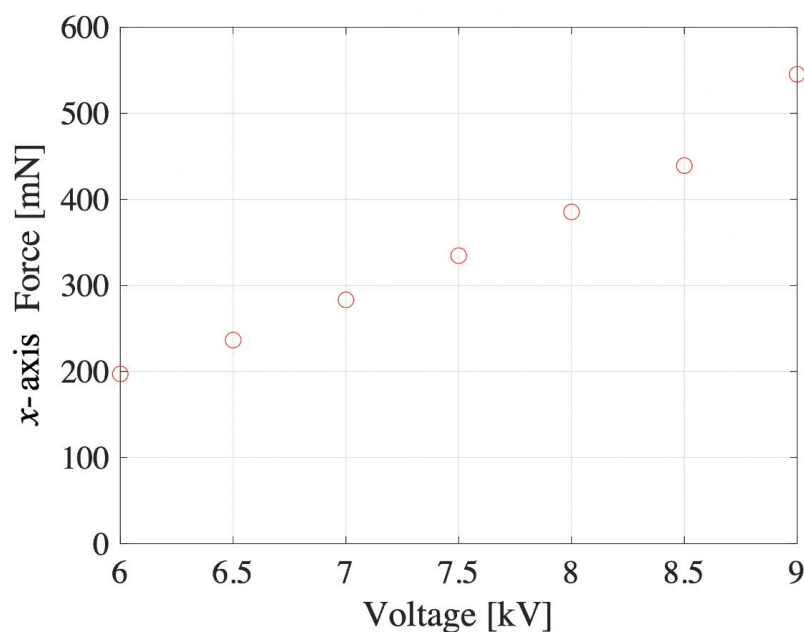


Fig. 4.21 x-axis force of the balloon actuator with respect to voltage at the pressure of 13.2 kPa

4.4 DEA 駆動 3-バルーンアクチュエータの進行波生成による搬送機構

4.4.1 DEA 駆動 3-バルーンアクチュエータの製作

マルチバルーンアクチュエータが進行波を発生させ接触物の搬送が可能か確認するため、3-バルーンアクチュエータを製作して運動の様子を観察し、搬送実験を行った。第4.3節のバルーンDEAの変位計測結果より、3-バルーンアクチュエータのバルーンの間隔を 1 mm と決定した。製作したアクチュエータを Fig. 4.22 に示す。

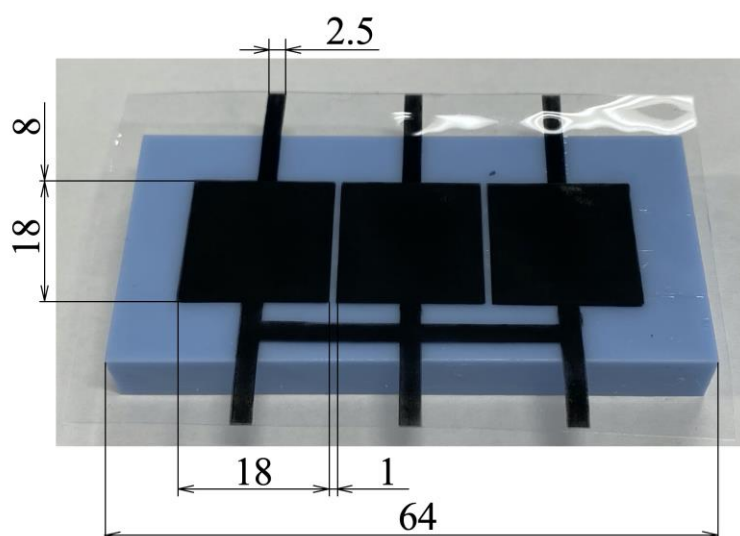


Fig. 4.22 Fabricated 3-balloon actuator

4.4.2 駆動装置

3-バルーンアクチュエータの駆動装置を Fig. 4.23 に示す. マイクロコンピュータの出力信号がリレーモジュールを経由して増幅した電圧を印加することでアクチュエータは駆動する. コントローラは, マイクロコンピュータ (Microcomputer NUCLEO-F446RE, STMicroelectronics), 高圧電源 (HEOP-10B2, MATSUSADA Precision Inc.), 3つのパワーリレー (Power Relays K81C245, TE Connectivity Aerospace) で構成される. そこで, 各バルーンセグメントに印加する電圧信号は Fig. 4.24 に示す. セグメント A が起動して再起動するまでの時間を用いて印加電圧の振動数を決定する.

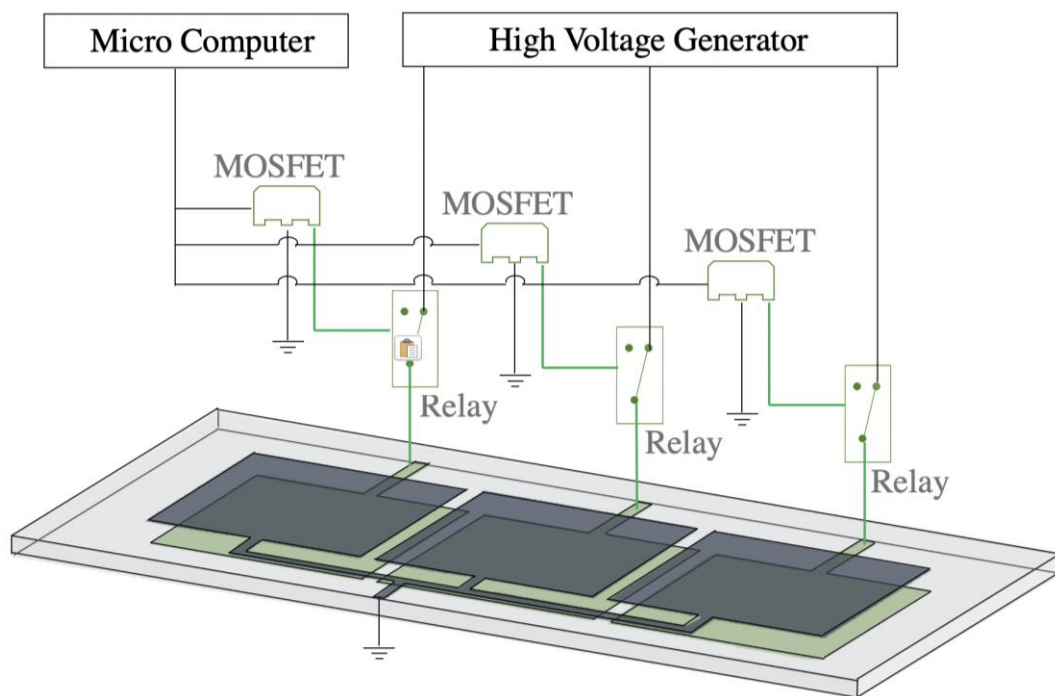


Fig. 4.23 Electric circuit for the control system

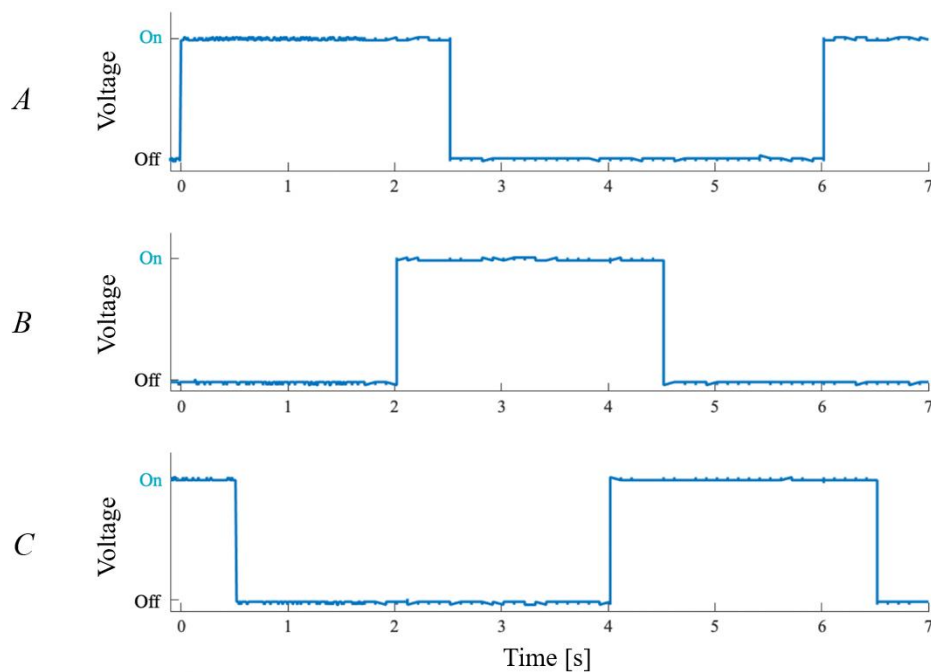


Fig. 4.24 Peristaltic wave signal applied to each segment

4.4.3 バルーン頂点位置計測実験

マルチバルーンアクチュエータは膜の弾性変形と、バルーンの頂点と物体との摩擦力により、進行波による搬送機構を得る。マルチバルーンアクチュエータの頂点の運動の様子を観察するため、モーショントラッキングを行った。実験では各マーカーはバルーンセグメントの上部にプロットし、その位置は正面から撮影した動画から求めた。印加電圧 7.5 kV, 空気圧 14.6 kPa の条件で、アクチュエータの動作を観察した結果を Fig. 4.25 に示す。また、印加電圧 7.5 kV, 空気圧 13.2 kPa の条件で、異なるバルーンの印加順番に対して、停止状態 (0 で表示) から起動状態 (1~5 で表示) までの各ステップを Fig. 4.26 に示している。

電圧印加順番が順方向 (セグメント $A \rightarrow B \rightarrow C$) または逆方向 (セグメント $C \rightarrow B \rightarrow A$) に対して動作を測定した結果、目的の方向に頂点が移動することができた。Fig. 4.26 (a) に示すように、状態 1-2 のところで、セグメント A はセグメント B のさらなる膨らみによって $-X$ 方向に押さえられた。すなわち、セグメント A における状態 1-2 とセグメント B の状態 3-4 のように干渉するステップでは、左下方向への移動が観察される。この状態でバルーンの頂点と搬送する物体の間に摩擦力が働くと、物体が $-X$ 方向に移動し搬送ができる。3-バルーンアクチュエータのセグメント C は、相互作用することができる連続したセグメントがないため、物体の搬送に寄与する変形が見られなかった。また、体積の増加に伴う圧力低下により、 $-Z$ 方向に沿ったわずかな変位がセグメント A と B で観察されたが、これらの変化は電圧による $+Z$ 方向の変位に比べれば小さいため、進行波機構に影響が少ないと判断できる。

Fig. 4.26 (b) に示すように、逆方向に電圧を印加すると、セグメント C はセグメント B のさらなる膨らみによって $+X$ 方向に押さえられたことがわかる。すなわち、セグメント B の状態 3-4 とセグメント C の状態 1-2 のところで、搬送に有効な変位が観察された。



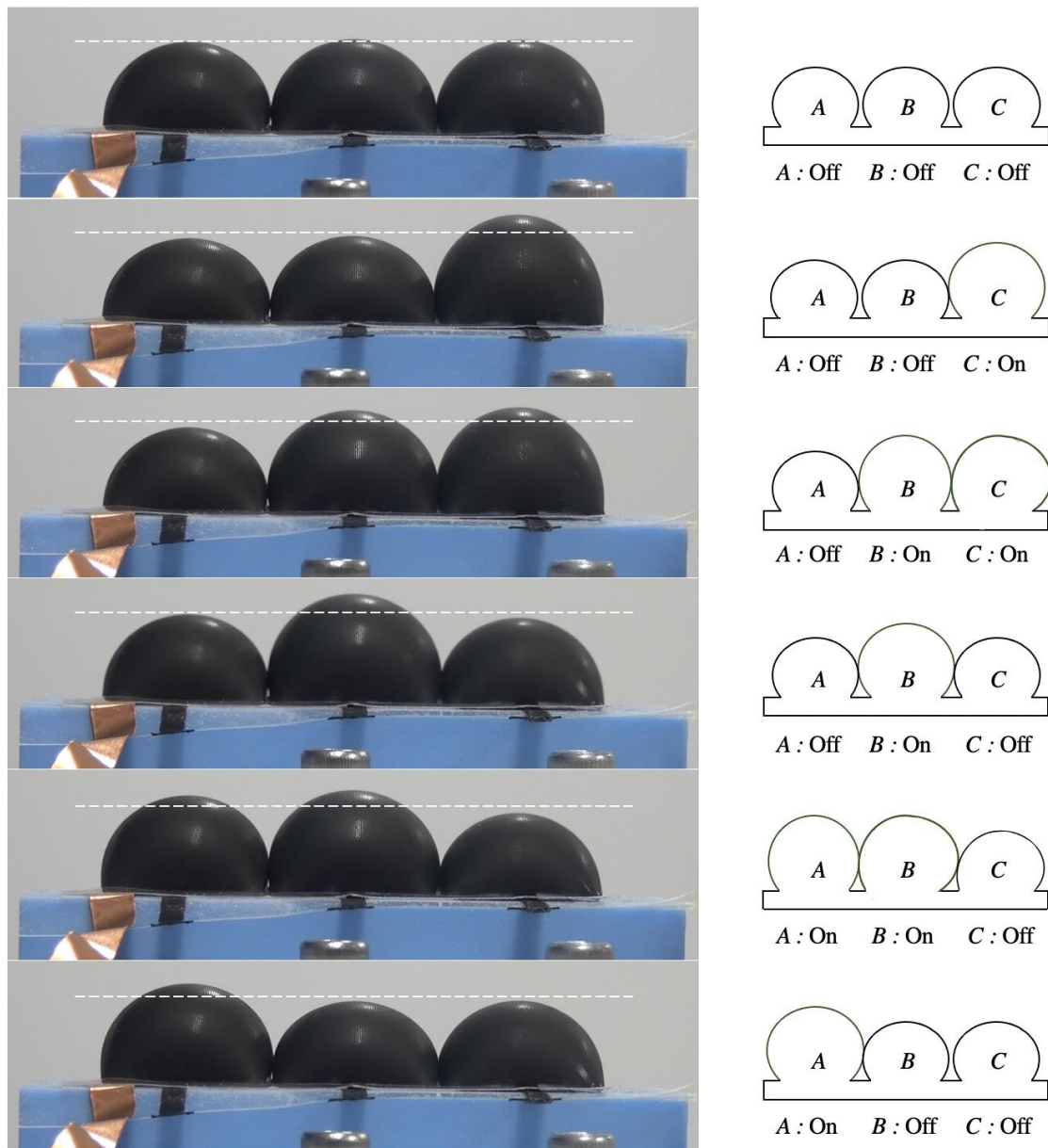
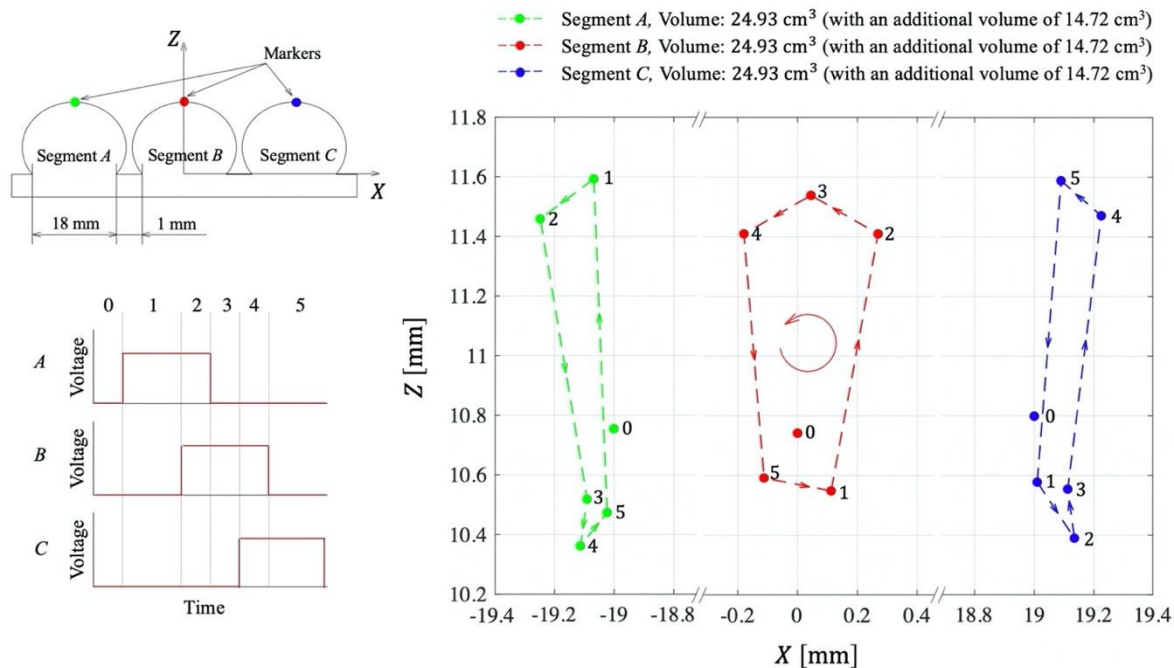


Fig. 4.25 Snapshot of the 3-balloon actuator deformation with an applied voltage of 7.5 kV and pressure of 14.6 kPa

(a)



(b)

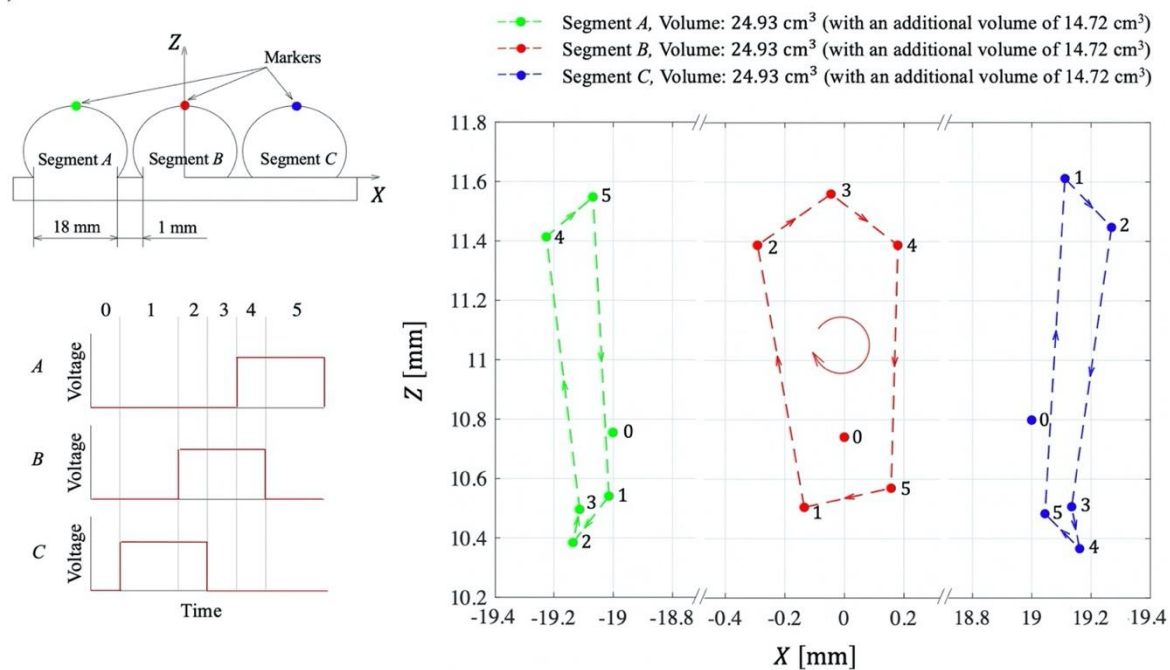


Fig. 4.26 Marker position on each segment and tracking results with an applied voltage of 7.5 kV and pressure of 13.2 kPa: (a) Forward voltage signal; and (b) Backward voltage signal

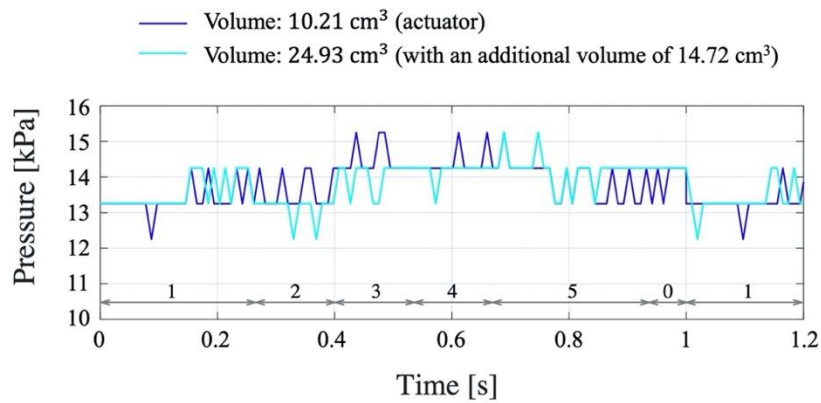


4.4.4 空気圧供給ラインを除去した状態での駆動可能性評価

これまでの実験では、空気供給ラインを接続し、初期空気圧を設定し、ホースの長さや別途のチャンバーが追加されたまま動作を評価した。アクチュエータの内部空間が大きくなったことで、電圧印加時の体積増加に伴う圧力低下を抑えられた。空気供給ラインを除去した時の動作を測定し、空気供給ラインが付いたときの動作と比較することで、空気供給ラインなしでの駆動可能性の評価する実験を行った。

印加電圧 7.5 kV、圧力 13.2 kPa における、3-バルーンアクチュエータのみのときと、駆動中の体積変化による圧力変動が動作に与える影響を低くするために外部チャンバーを接続したときの動作を比較し、その結果を Fig. 4.27 に示す。内圧が 13.2 kPa で加圧された 3-バルーンアクチュエータのみの体積は 10.21 cm^3 であり、4.4.3 節で測定した時の体積は 24.93 cm^3 であった。比較した結果、圧力変動とバルーンの頂点の動作にはほとんど差が見られなかった。

(a)



(b)

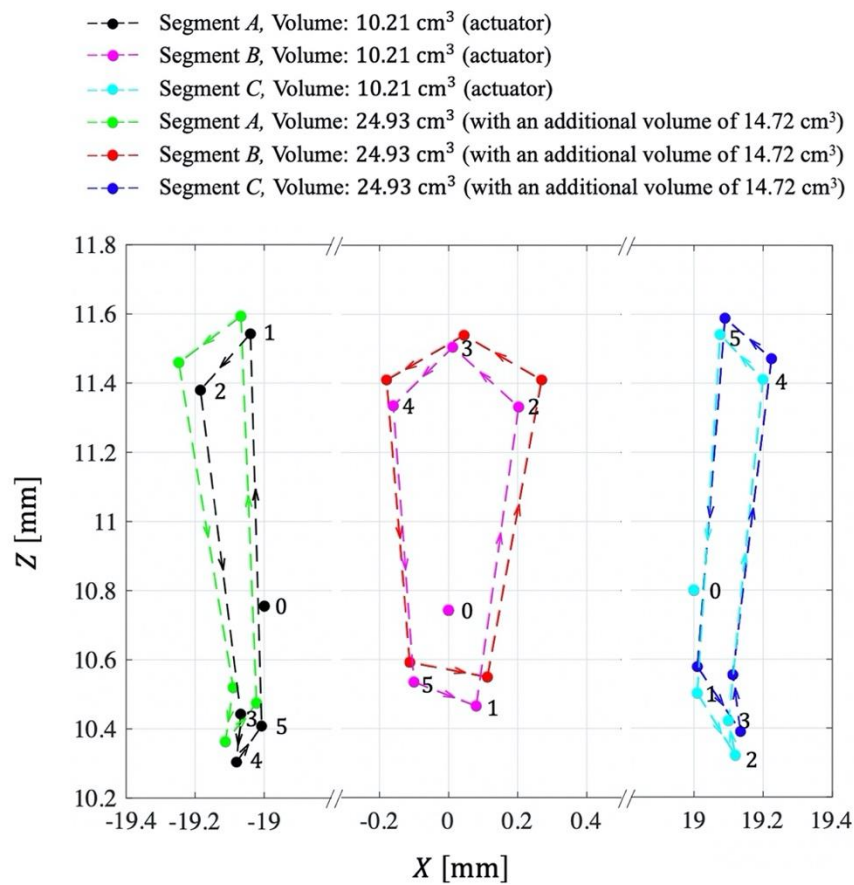


Fig. 4.27 Behavior of pressure and the marker position with different volumes under an applied voltage of 7.5 kV and a pressure of 13.2 kPa: (a) Internal pressure over time; and (b) Marker position tracking



4.4.5 搬送実験

提案した搬送メカニズムの有効性を検証する．搬送の対象物は紙 (Post-it 1 枚) とし，初期空気圧が13.3 kPa，印加電圧が7.5 kV, 1 Hz の条件で，各バルーンへの電圧印加順に対して搬送実験を行い，その様子を Fig. 4.28 に示す．その結果，電圧印加順に対して逆方向へ搬送することに成功し，最大搬送速度は0.97 mm/s であった．さらに，13.3~18.2 kPa の初期空気圧範囲での搬送速度を測定し，その結果を Fig. 4.29 に示す．初期空気圧が下がると搬送速度が直線的に下がることが確認できた．この下降曲線は，バルーンアクチュエータの変位-圧力の下降曲線に対応している．

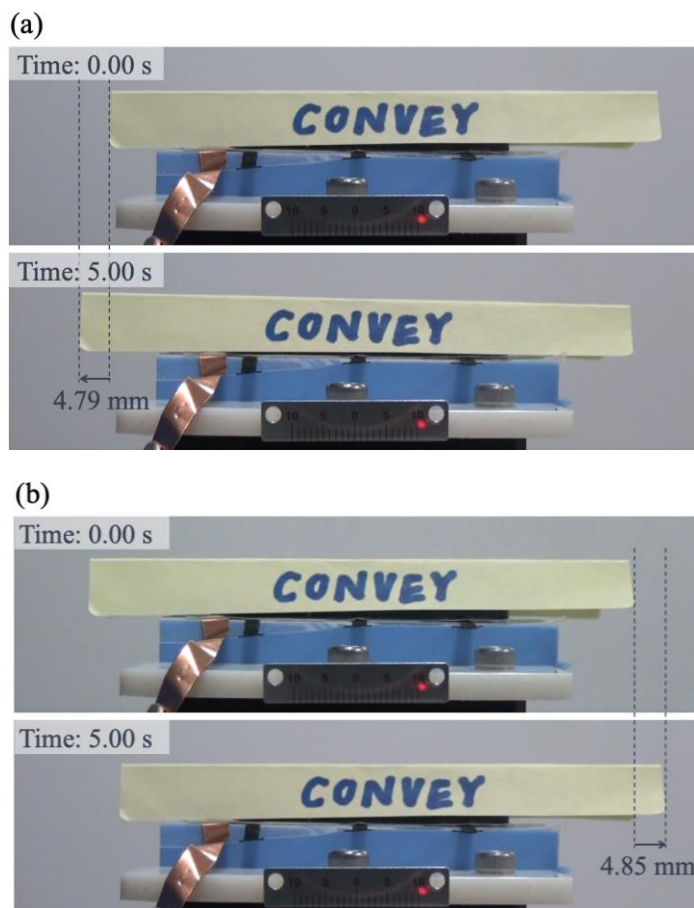


Fig. 4.28 Snapshots of the paper transported by the 3-balloon actuator with a pressure of 13.3 kPa and a voltage of 7.5 kV, 1 Hz: (a) Forward voltage signal; and (b) Backward voltage signal

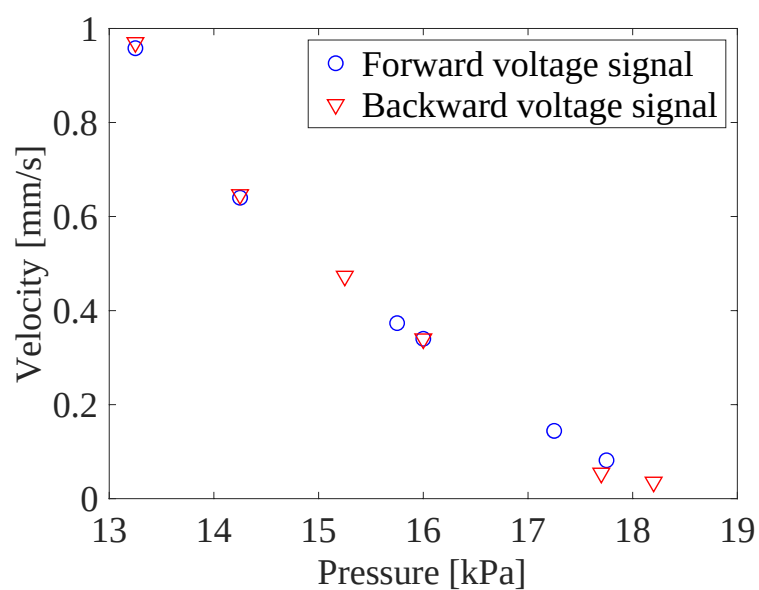


Fig. 4.29 Transportation velocity for 3-balloon actuator at a voltage of 7.5 kV, 1 Hz

4.5 まとめ

バルーンセグメント間の干渉による弾性変形を用いて進行波機構を実現する 3-バルーンアクチュエータを開発した。電極をパターンニングしたシリコーンエラストマと成型ゴムで構成され、柔軟性を保ったまま製作することができた。開発したアクチュエータの性能を検証するため、いくつかの実験を行った結果、バルーン DEA は 12.2 kPa 付近で最大変形が得られた。また、搬送機構に有効な発生力が確認できた。さらに、立ち上がり特性として、4.3 ms という結果が得られ、空気圧バルーンアクチュエータに比べて高い応答性を示した。提案した進行波機構の実現を確認するため、物体と接触が起こるバルーンの頂点の位置の時系列変化を計測した結果、電圧の印加順番に対して有効なモーションが示された。テザーレス化に向け、空気圧供給ラインを除去したときのアクチュエータの動作測定でも、同様な変形が得られ、進行波を発生できた。搬送実験では初期空気圧 13.3 kPa, 印加電圧 7.5 kV で 0.97mm/s の最大搬送速度が得られた。本アクチュエータは、現在 1 Hz に固定されている作動周波数の点で改善の余地がある。

第 5 章

DEA 駆動バルーン機構の自励振動

今までのマルチバルーンアクチュエータはリレーモジュールを用いた電圧印加電極の切り替えによって往復運動を生み出すことができた。そこで、ワイヤレス駆動によるテザーレス実現のため、DEA の放電電流により実現できる自励振動機構を提案する。まず、自励振動型アクチュエータの構成と動作原理について述べる。また、その動作特性について解析と実験から検証を行う。自励振動の実現により、ワイヤレス駆動による制御回路の簡素化、及び、放電電流による高速振動が期待できる。

5.1 自励振動の動作原理

自励振動型アクチュエータの構造と動作原理を Fig. 5.1 に示す。振動子となるバルーン DEA と隣に配置される固定電極からなり、固定電極と DEA の内部電極は高電圧へ、DEA の外部電極は GND へ接続されている。DEA の両面の電極が正負に帯電することで膜厚方向へ圧縮のマックスウェル応力が働き、面内方向に広がるように変形するとバルーンはより膨らむ (充電)。バルーンが固定電極に近づき、空中放電が発生する距離になると、DEA から電荷の放電が始まり抵抗へ電流が流れる (放電)。そのとき、バルーンは元の形状に戻るが、DEA の外部電極が再び帯電すると、バルーン DEA は膨らむ。以上のように DEA の放電電流により固定電極と非接触で往復運動を生み出すことができる。直流電圧で駆動するため制御回路を簡素にできる。



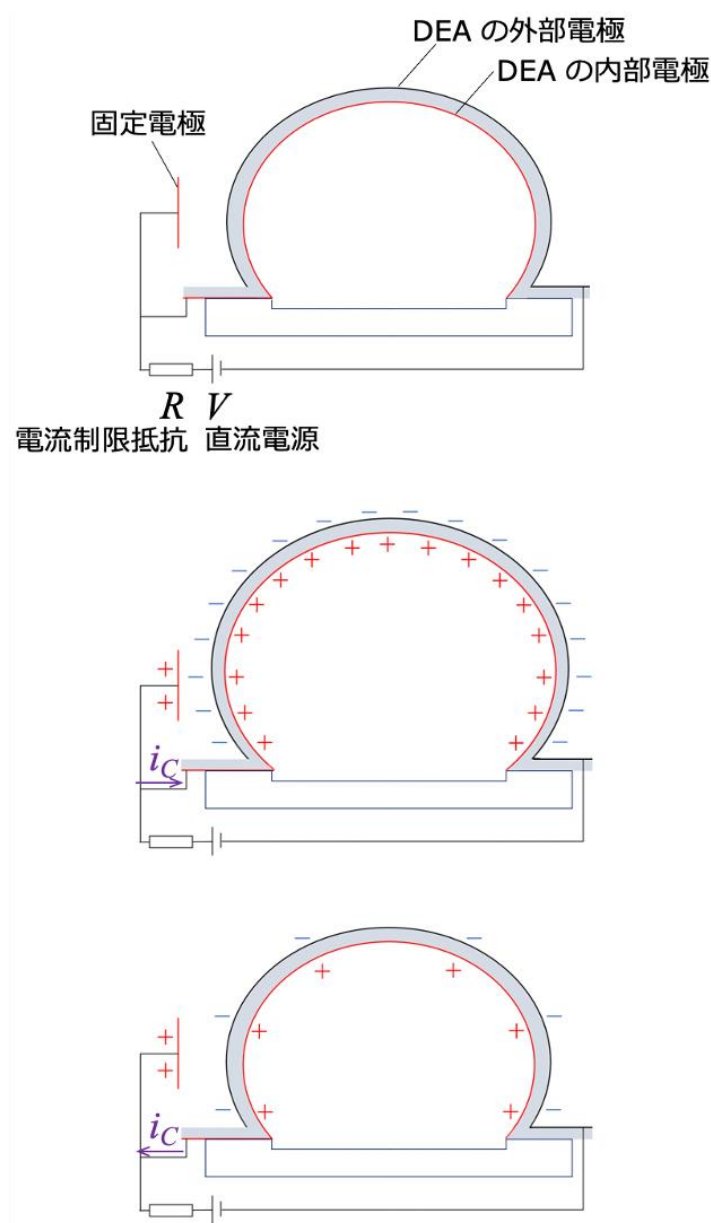


Fig. 5.1 Structure and operation principle of self-excited balloon actuator

5.2 自励振動に対する運動解析

5.2.1 理論解析

自励振動型アクチュエータの印加電圧と周波数の関係に対する計算モデルについて述べる．自励振動型アクチュエータは，一定直流電圧を与えあらかじめ充電されたコンデンサの放電電流で駆動する方法である．このようなコンデンサ駆動では瞬時電流による駆動であり短時間で変形を起こす．すなわち，電圧が高くなると動作周波数が大きくなる．本解析では，その特性について基礎的な電気回路を用いて検討を行った．Fig. 5.2 のモデルにおいて， V は外部電源からの一定値の直流電圧であり， R は回路に過度な電流が流れることを防ぐ抵抗として途中に数 $G\Omega$ の抵抗が接続されている．解析は，DEA のエラストマ膜の厚さが一定であり平らであり電極が平行であるという仮定と，かつ電極の表面に対して垂直方向のみの運動を考慮するという仮定を設定する．また，電圧印加による振動子の位置 y は線形近似することにより， $y = aV$ と仮定し，計測結果をもとに比例定数 a を決定した．

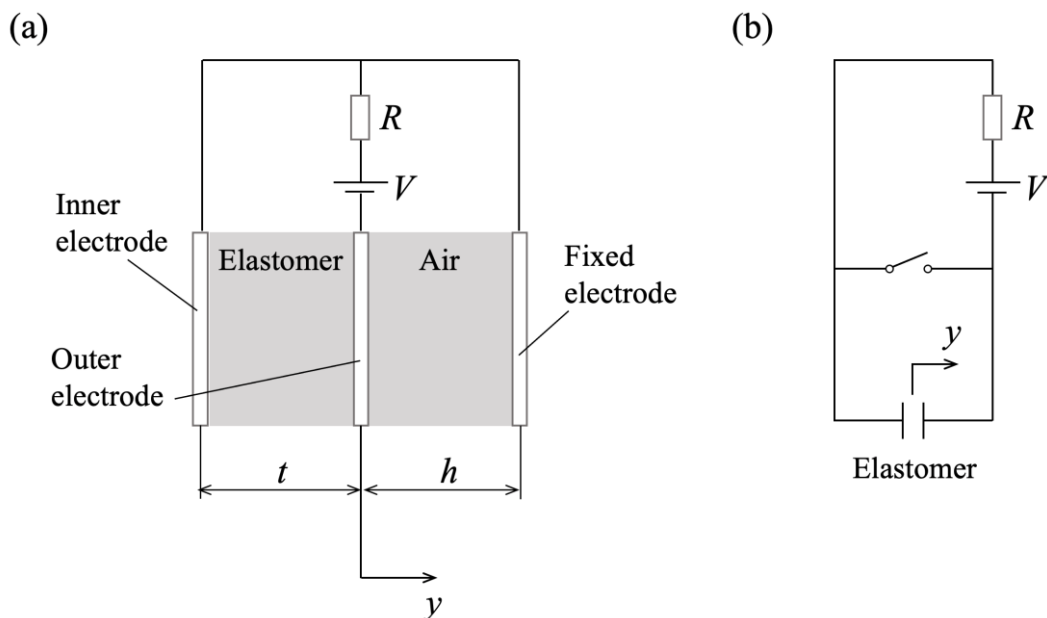


Fig. 5.2 Theoretical model of the self-excited balloon DEA

Fig. 5.2 (b) の RC 直流回路において以下の微分方程式が成立する.

$$V_0 = R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} \quad (5.1)$$

ここで, V_0 は一定直流電圧, Q は電極に蓄えられる電荷量, C はエラストマの静電容量である. この微分方程式を解くと, 以下のようになる. ここで, 境界条件 $Q(t=0) = CV_0$ を用いた.

$$Q = CV_0 \left(1 - e^{-\frac{1}{RC}t}\right) \quad (5.2)$$

次に, $Q = CV$ の関係と, 仮定した $y-V$ 関係である $y = aV$ により, 振動の周波数 f が得られる.

$$f = \frac{1}{RC \ln\left(\frac{aV_0}{aV_0 - y_0}\right)} \quad (5.3)$$

ここで, y_0 は印加電圧による振動の振幅となる. 本研究では, 実験結果をもとに値を決定した.

エラストマの比誘電率を ε_r と, 静電容量 C は以下の式で表される.

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{S}{t} \quad (5.4)$$

ここで, ε_0 は真空の誘電率, t はエラストマの膜厚, S はコンデンサ (電極) の表面積である.

自励振動型アクチュエータにおける動作振動数の計算結果を Fig. 5.3 に示す. この計算に用いたパラメータの値を Table 5.1 に示す. この計算では電流制限抵抗は $4 \text{ G}\Omega$ とし, 印加電圧 V ($V=4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5, 8, 8.5, 9 \text{ kV}$) に対して計算を実行した. 印加電圧が増加するほど振動数が直線的に増加するという結果が得られた.

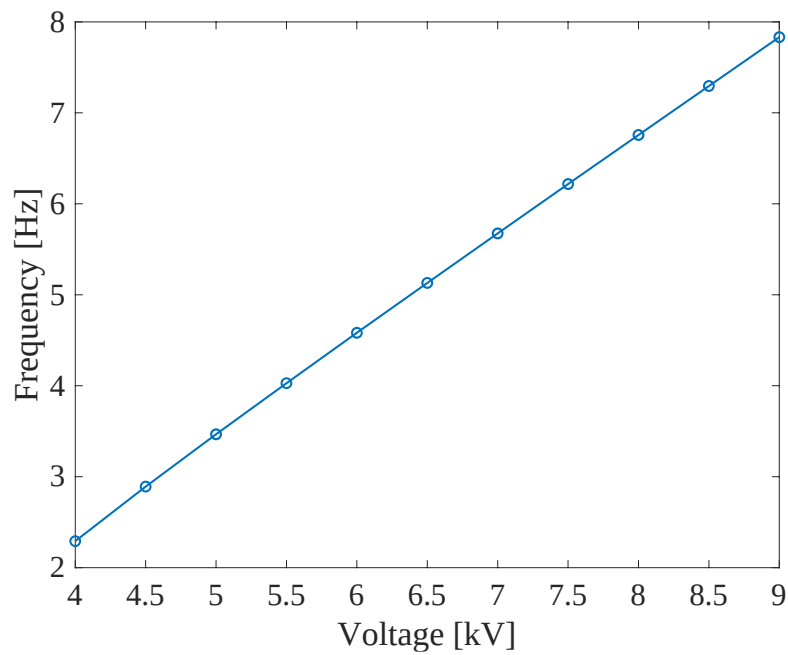


Fig. 5.3 Theoretical results of the relationship between frequency and applied voltage V of the self-excited actuator

Table 5.1: Parameters used in theoretical analysis of the self-excited actuator

Variable	Symbol	Value
Constant of proportion	a [$\mu\text{m}/\text{V}$]	0.2
Amplitude of self-excited oscillation	y_0 [mm]	0.6
Relative permittivity	ϵ_r [—]	2.8



5.2.2 自励振動に対する動作特性の測定

実験装置を Fig. 5.4 に示す. 第4章で用いたものと同様の構造となるバルーン DEA (電極形状は一辺 18 mm の正方形である) を用いた. 膜厚は $200\ \mu\text{m}$, 電極の厚さは片方で $40\ \mu\text{m}$ 程度のものを用いた. 加圧されたバルーンの頂点から距離 h 離れたところに外部電極を設置した. 距離 h の微細制御, かつ外部電極の表面が水平面と平行になるような状態で固定するため, 外部電極は精密3軸ネジ式ステージに固定した. 底面を固定したバルーン DEA を加圧させた後, バルブを閉め, 表面電極に高電圧を印加して自励振動させる. 圧力センサ (AP-C30, 株式会社キーエンス) を用いて空気圧を, レーザー変位計 (LK-G32, 株式会社キーエンス) を用いてバルーンの頂点を測定した.

バルーン頂点の y 方向変位における時間変化を Fig.5.5 に示す. 直流電圧 6.5 kV, 電流制限抵抗 $5\ \text{G}\Omega$ を接続し, あるギャップに固定電圧を設置することで, 自励振動を確認することができた. 固定電極とのギャップの距離により DEA の電位差が決定され, 自励振動の振幅と周波数を調整できることが示された.

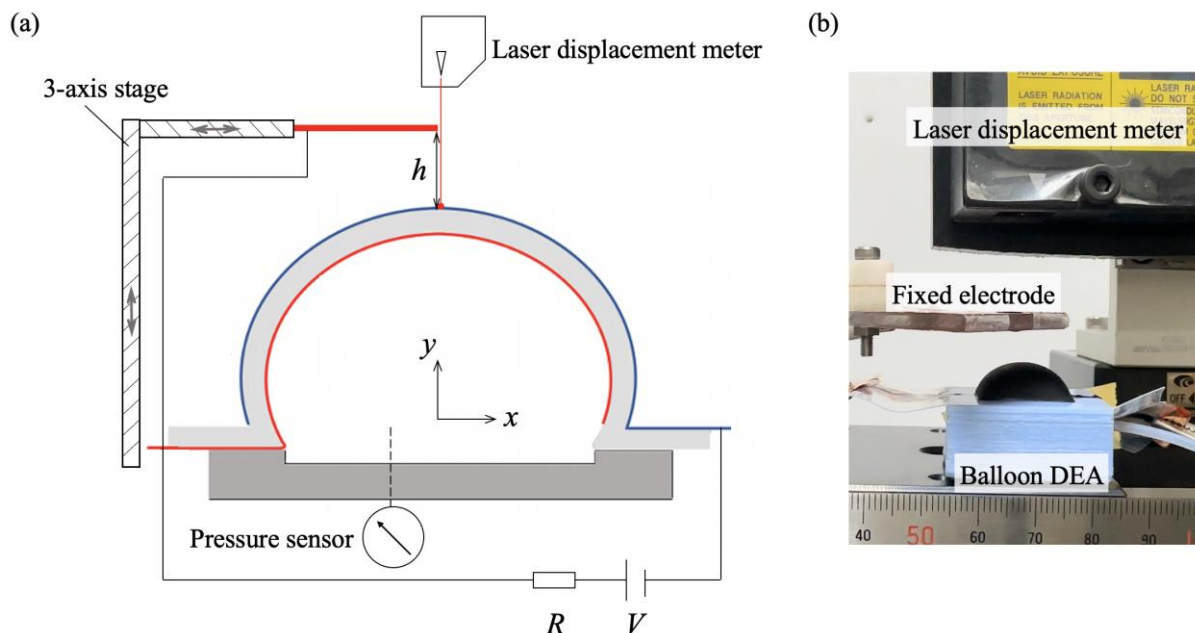


Fig. 5.4 Experimental setup for the self-excited balloon actuator

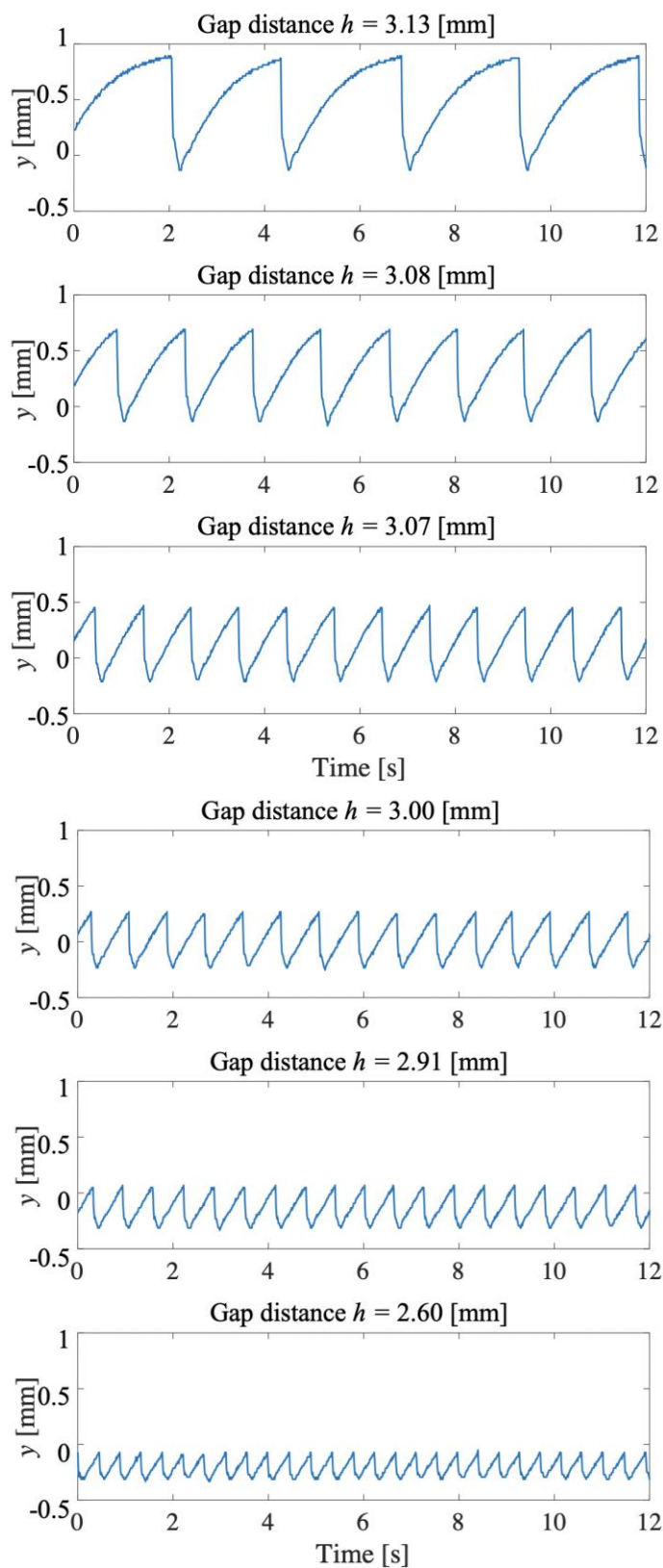


Fig. 5.5 Measured self-excited actuation with different gap distances for $V = 6.5$ [kV], $R = 5$ [G Ω]



5.2.3 自励振動に対する電流制限抵抗と印加電圧の影響

自励振動型アクチュエータの動作における電流制限抵抗や印加電圧がアクチュエータの運動に与える影響を評価した。実験において、外部電源からの印加電圧 V ($V = 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5, 8$ kV), 電流制限抵抗 R ($R = 1, 2, 3, 4, 5$ G Ω) に対して実験を行った。

得られたアクチュエータの振動数と電流制限抵抗 R の関係を Fig. 5.6 に示す。アクチュエータの振動数は、5 回往復するのにかかった時間から求めた。計測結果、電流制限抵抗値が減少するほど振動数が増加することが示された。また、自励振動を起こす最適のギャップ h があることが確認できた。 $V = 6.5$ kV, $R = 1$ G Ω の条件で、ギャップ h が 2.33 mm のとき周波数 20 Hz が得られた。これは電極間に蓄えられるまでの時間が短くなるためであると考えられる。次に、振動の振幅を調べた計測結果を Fig. 5.7 に示す。電流制限抵抗値が増加するほど振幅が増加することが示された。

次に、アクチュエータの振動数と印加電圧 V の関係を Fig. 5.8 に示す。この実験では電流制限抵抗 R は 4 G Ω とし、印加電圧 V ($V = 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5, 8$ kV) に対して実験を行った。測定結果、印加電圧が増加するほど振動数が増加するという結果が得られた。計算結果と同様な結果が得られた。これは電極に流れ込む電流が大きくなり、電極間に蓄えられるまでの時間が短くなるためであると考えられる。

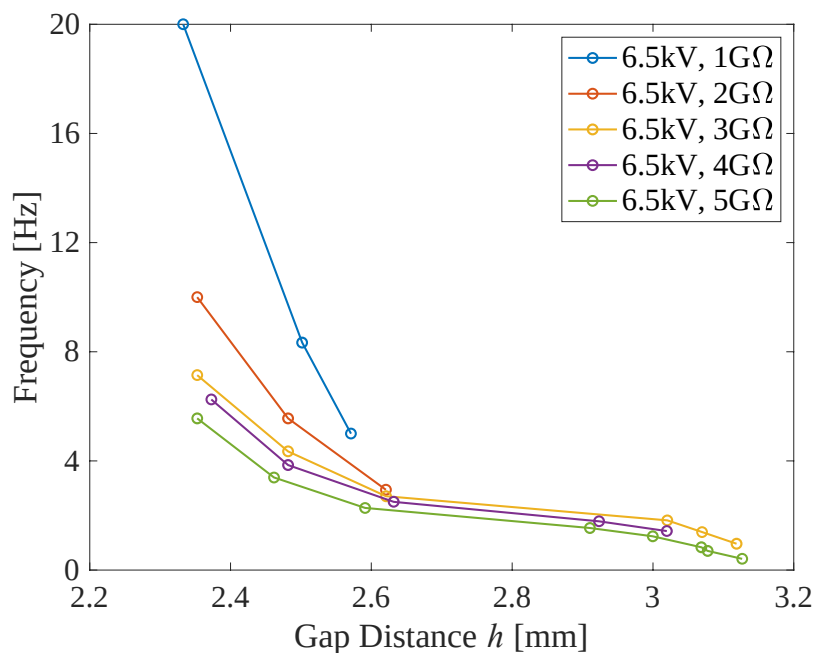


Fig. 5.6 Experimental results of the relationship between frequency and gap distance for $V = 6.5$ [kV], $R = 1, 2, 3, 4, 5$ [GΩ]

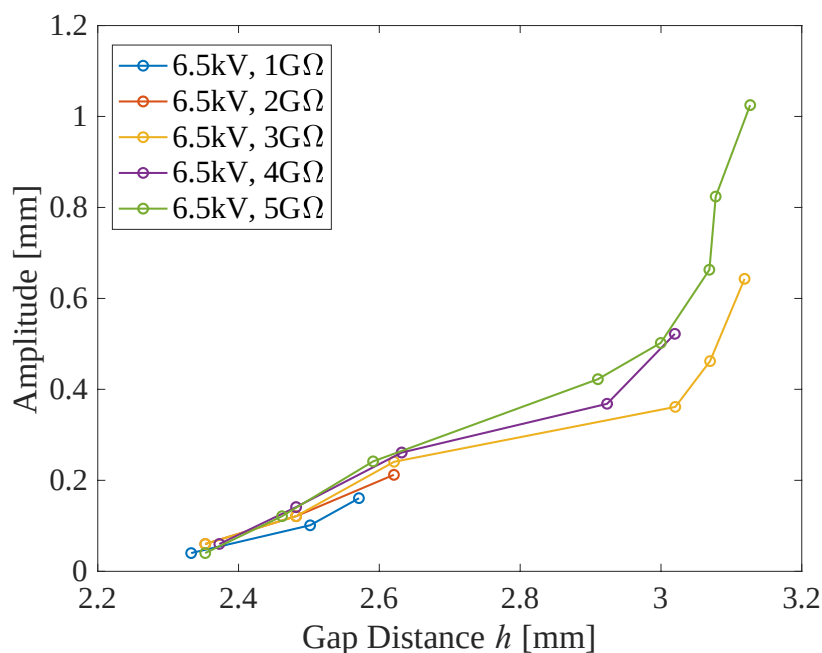


Fig. 5.7 Experimental results of the relationship between amplitude and gap distance for $V = 6.5$ [kV], $R = 1, 2, 3, 4, 5$ [GΩ]



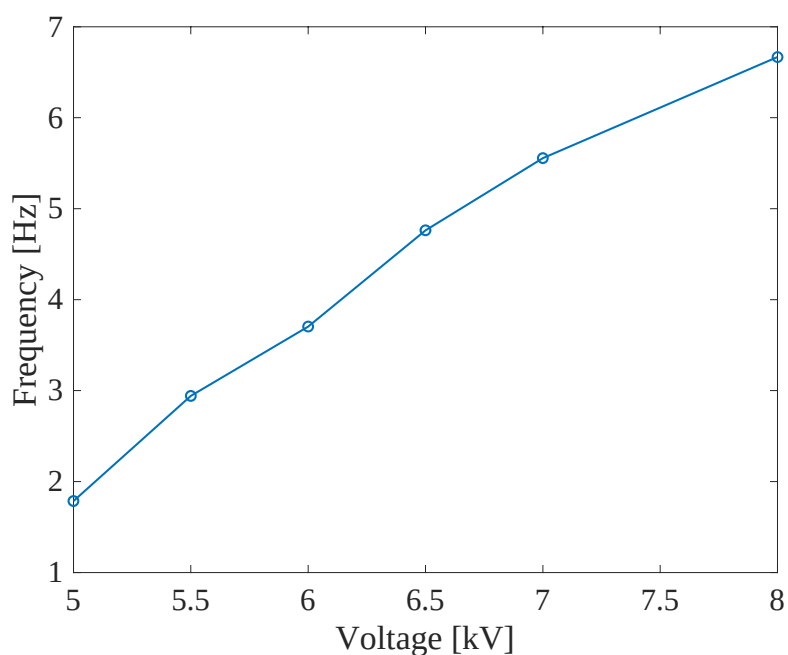


Fig. 5.8 Experimental results of the relationship between frequency and voltage V for $V = 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5, 8$ [kV], $R = 4 \text{ G}\Omega$

5.3 まとめ

本章では、直流電圧で駆動可能な自励振動型バルーン誘電アクチュエータを提案し、その動作特性について計算と実験より評価した。提案したアクチュエーションを理論と実験により動作を検証し、印加電圧や抵抗値を変えてアクチュエータに流込する電流値を制御することで、振動数や振幅が変化されることを明らかにした。直流電圧によりあらかじめ DEA を充電しておく、充電電圧を高くするという簡単な方法で大きい反応速度が得られる。

第6章

結言

6.1 本研究の成果

本研究では、独立に制御可能な複数のセグメントで構成されるソフトアクチュエータの製作方法の確立と、複数バルーンが干渉しあい進行波を発生するソフトリニアアクチュエータの開発に成功した。ソフトアクチュエータを構成する柔軟材料の弾性変形を生かすため、3D プリントした型でゴムを成型し、大気圧プラズマ処理による接合強度に着目し、接合技術に及ぼす表面性状の影響をあきらかにした。尖度をもとにする粗さパラメータを新たに提案し、表面における接合強度と表面粗さの関係を示した。また、その結果をもとにマルチチャンネルの渦巻型アクチュエータを製作し、弾性変形による進行波機構の実現に成功した。次に、従来の空気圧アクチュエータの課題である「応答速度が遅いこと」や「駆動するためには多くの空圧供給ホースやコンプレッサなどの巨大な駆動装置が必要となる」といった問題に対する解決策として電気駆動の誘電エラストマアクチュエータに注目した。空気圧により膨らみプレストレッチされるバルーン形状に着目し、シリコンエラストマを用いたソフトリニアアクチュエータを開発した。プレストレッチ効果を確認した後、スクリーン印刷による電極印刷、3D プリントした型を用いたゴム成型、プラズマ処理による接合に対して検討を行なった。また、駆動実験により圧力、電圧のパラメータがアクチュエータの動作特性に与える影響を明らかにした。さらに、開発したソフトリニアアクチュエータを用いたモーショントラッキングと搬送実験により提案したメカニズムの妥当性を確認した。次に、電気回路の簡略化に向け、自励振動型バルーンアクチュエータを提案し、実現に成功した。以下に、本研究で得られた成果をまとめる。



マルチセグメント構造の製作方法の確立

- 3D プリントした型で液状ゴムを成型し，プラズマ処理による接合技術において，3D 印刷の設定条件で決まる表面性状を有する成型ゴムにおいて，プラズマ処理したシリコンゴム同士の接合強度に及ぼす表面粗さの影響を明らかにした
- 本研究で提案した R_{ku}^* は，尖度と全高，ピーク密度を同時に求めるものであり，表面波形に関係なく接触面の特徴を表すことができることが確認された．特に粗い表面の場合，有効接触領域の表面特性を決定するのに有効である
- 表面性状の測定と微細観察により，成型基板とシリコンの薄膜の接合に影響する要因として，3D 印刷時のトップレイヤー/インフィルパターン，剥離方向に対する印刷の方向，印刷レイヤーなどがあげられる．さらに，PolyJet 方式の 3D プリントした型で製作したシリコンゴムのプラズマ処理は，ソフトロボットの接合強度を向上させるのに有効であることを確認した
- 以上の方法より渦巻型空気圧アクチュエータを製作し，弾性変形による進行波機構で物体を搬送することに成功した

DEA 駆動進行波生成による搬送機構

- DEA 駆動バルーンアクチュエータの動作特性を理論と実験から評価し，電圧印加により楕円体を維持しつつ横縦方向への大きい変位を有するが，12.2 kPa 前後で最適な駆動をすることが確認できた
- DEA 駆動バルーンアクチュエータのステップ状信号の電圧を印加したときの立ち上がり特性を評価したところ，4.3 ms という応答性を示し，空気圧バルーンアクチュエータ (27.3 ms) に比べて高い応答性を持つことが確認された
- 空気圧によるプレストレッチ効果を活かし，電氣的に駆動可能なマルチバルーンアクチュエータの構成と進行波駆動機構を提案し，進行波による搬送実験を成功し，0.97 mm/s の最大搬送速度が得られた

- テザーレス化に向け，空気圧供給ラインの除去したときのアクチュエータの動作測定でも，同様な変形が得られ，進行波機構を発生させた．さらに，バルーンアクチュエータの自励振動機構を提案し，印加電圧や抵抗値を調整し，アクチュエーション部分に流入する電流値を制御することで，振動数や振幅を変化させられることを示した

以上のアクチュエータの特徴を Table 6.1 にまとめる．



Table 6.1: Pneumatic vs DEA vs Balloon actuator driven by DEA vs Self-excited balloon actuator: Pros and Cons

	Pneumatic	DEA	Balloon actuator driven by DEA	Self-excited balloon actuator
Pros	High force and displacement High compliance Safety	Noiseless Fast response Lightweight High efficiency(80–90%) [11] Wide frequency range [101]	Noiseless Fast response Air-hose detached Entirely soft	Noiseless Fast response Frequency controllability Simplification of drive circuits Entirely soft
Cons	Bulky power source Air-hose connected Response delay	Prestretch (Rigid frame) Low output force	Low output force	Low output force

6.2 課題と今後の展望

提示されたプロトタイプは、搬送機構や自励振動の可能性を示すことに成功したとはいえ、実用上の限界は存在する。作動に成功したプロトタイプは製作したものの中で一部である。また、アクチュエータを構成するユニットが発生させるストロークと力は、他の先行研究で紹介されている DE の大変形の可能性に比べて比較的小さい。これは、DE 膜と電極の両方に対する現在の微細加工法の限界、および、電極の厚さによる剛性の影響が大きい状態であることを示す。

加えて、意味のある作動を生み出すために数 kV のオーダーの高電圧を発生させる必要がある。その結果、材料の絶縁破壊強度に近い高電界が発生し、さらに、材料の強い非線形性と大きな変形が相まって、その正確なモデリングと制御は非常に困難な課題となっている。特に、現在実験的に確認できた動作特性として、バルーン DEA のストローク—圧力（プレストレッチの程度）の関係をより精密にモデリングできるとすると、最適性能を生み出す構造を設計できると考えられる。

DEA は、材料の誘電率を上げるか膜厚を薄くすることで、より小さな入力電圧で同じ作動応力を得ることができる。膜厚の低減を追求することで、1 kV 以下で動作可能な DE マイクロアクチュエータが開発されている。Ren ら [102] は、重量約 150 g で 3.7 という高い揚力重量比を達成する高揚力マイクロ空中ロボットを提案している。多層構造を採用して、アクチュエーションは、各層の厚さが 10 μm の 20 層 DEA 膜によって提供され、この膜は 630 V、周波数 400 Hz で作動する。Poulin ら [103] は、厚さ 3 μm の DEA を製造するパッド印刷法を開発し、7.5% の作動ひずみを維持しながら 245 V で作動できるようにした。さらに、極薄（10 nm）で伸縮性の高いスパッタ蒸着金属電極を採用することで、電極による総合剛性の影響を減らしてストロークを大きくすること、及び小型化の可能性も高まる [104]。

次に、提案した自励振動バルーンアクチュエータをマルチバルーンアクチュエータに適用することを想定して、コンデンサ放電電流により往復運動がロボットの設計に利用できるようにするためには、動力学モデルが必要となる。さらに、プレストレッチの量と印加される DC 電圧により、各 DEA の固有周波数を調整することができる。Gu ら [105] の粘弾性挙動モデル、および、スプリン—ダンパ要素を増やしてより精密な動力学モデルを組み立てた Cao ら [106] の研究がその参考になると考えられる。





参考文献

- [1] K. Suzumori, S. Iikura, and H. Tanaka, "Applying a flexible microactuator to robotic mechanisms," *IEEE Control Systems Magazine*, vol.12, no.1, pp.21–27, Feb. 1992.
- [2] J. Shintake, S. Rosset, B. E. Schubert, D. Floreano, and H. R. Shea, "A foldable antagonistic actuator," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol.20, no.5, pp.1997–2008, Oct. 2015.
- [3] A. Suleman, S. Burns, and D. Waechter, "Design and modeling of an electrostrictive inchworm actuator," *Mechatronics*, vol.14, pp.567–586, 2004.
- [4] J. H. Goldie, M. J. Gerver, J. E. Kiley, and J. R. Swenbeck, "Observations and theory of Terfenol-D inchworm motors," *Smart Struct. Mater.*, 3329, 1998.
- [5] X. Qi, H. Shi, T. Pinto, and X. Tan, "A Novel Pneumatic Soft Snake Robot Using Traveling-Wave Locomotion in Constrained Environments," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol.5, pp.1610–1617, 2020.
- [6] L. Xu, H. Q. Chen, J. Zou, W. T. Dong, G. Y. Gu, L. M. Zhu, and X. Y. Zhu "Bio-inspired annelid robot: a dielectric elastomer actuated soft robot," *Bioinspir. Biomim.*, vol.12, 025003, 2017.
- [7] R. Kornbluh, R. Pelrine, J. Eckerle, and J. Joseph, "Electrostrictive polymer artificial muscle actuators," *Proc. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation* 3, 1998.
- [8] S. Wakimoto, and K. Suzumori, "Fabrication and Basic Experiments of Pneumatic Multi-chamber Rubber Tube Actuator for Assisting Colonoscope Insertion," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3260–3265, 2010.
- [9] X. Qi, H. Shi, T. Pinto and X. Tan, "A Novel Pneumatic Soft Snake Robot Using Traveling-Wave Locomotion in Constrained Environments," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol.5, no.2, pp.1610–1617, Apr. 2020.
- [10] T. Noritsugu, D. Kaneshiro, and T. Inoue, "Soft Planar Actuator using Pneumatic-Rubber Balls," *J. Robot. Mechatron*, vol.12, pp.254–260, 2000.

- [11] R. Pelrine, R. Kornbluh, Q. Pei, and J. Joseph, "High-Speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater Than 100%," *Science*, Feb. 2000.
- [12] R. Pelrine, R. D. Kornbluh, Q. Pei, S. Stanford, S. Oh, J. Eckerle, R. J. Full, M. A. Rosenthal, and K. Meijer, "Dielectric elastomer artificial muscle actuators: Toward biomimetic motion," *Proc. SPIE 4695, Smart Structures and Materials 2002: Electro-active Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, July. 2002.
- [13] Q. Pei, M. Rosenthal, S. Stanford, H. Prahlaad, and R. Pelrine, "Multiple-degrees-of-freedom electro elastomer roll actuators," *Smart Mater. Struct.* 13 N86, 2004.
- [14] O. A. Araromi, P. Romano, S. Rosset, J. Perruisseau-Carrier, and H. R. Shea, "A tunable millimeter-wave phase shifter driven by dielectric elastomer actuators," *Proc. SPIE 9056, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, 90562M, 2014.
- [15] O. Araromi, I. Gavrilovich, and H. R. Shea, "Rollable Multisegment Dielectric Elastomer Minimum Energy Structures for a Deployable Microsatellite Gripper," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015.
- [16] V. Cacucciolo, J. Shintake, and H. Shea, "Delicate yet strong: Characterizing the electro-adhesion lifting force with a soft gripper," *2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, Seoul, Korea (South), 2019.
- [17] M. Hill, G. Rizzello, and S. Seelecke, "Development and Experimental Characterization of a Pneumatic Valve Actuated by a Dielectric Elastomer Membrane," *Smart Mater. Struct.* 26, 085023, 2017.
- [18] J. J. Loverich, I. Kanno, H. Kotera, "Concepts for a new class of all-polymer micro-pumps," *Lab Chip* 2006, 6, pp.1147–1154, 2006.
- [19] G. -Y. Gu, J. Zhu, L. -M. Zhu, and X. Zhu, "A survey on dielectric elastomer actuators for soft robots," *Bioinspir. Biomim.*, 12, 011003, 2017.
- [20] Y. Guo, L. Liu, Y. Liu, and J. Leng, "Review of Dielectric Elastomer Actuators and their Applications in Soft Robots," *Adv. Intell. Syst.* 3, 2000282, 2021.
- [21] B. Huang, M. Li, T. Mei, D. McCoul, S. Qin, Z. Zhao, and J. Zhao, "Wearable stretch sensors for motion measurement of the wrist joint based on dielectric elastomers," *Sensors*, 17, 2708, 2017.
- [22] C. R. Kelley, and J. L. Kauffman, "Towards wearable tremor suppression using dielectric elastomer stack actuators," *Smart Mater. Struct.* 30, 025006, 2020.
- [23] R. Pelrine, R. D. Kornbluh, Q. Pei, S. Stanford, S. Oh, J. Eckerle, R. J. Full, M. A. Rosenthal, and K. Meijer, "Smart Structures and Materials," *In Proceedings of the SPIE'S 9th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, CA, USA*, 17–21, Vol.4695, pp.126–137, 2002.



- [24] N. F. Wang, C. Y. Cui, H. Guo, B. C. Chen, and X. M. Zhang, "Advances in dielectric elastomer actuation technology," *Sci. China Technol. Sci.* 61, pp.1512–1527, 2018.
- [25] R. D. Kornbluh, R. Pelrine, H. Prahla, and R. Heydt, "Electroactive Polymers: An Emerging Technology for MEMS," *International Society for Optics and Photonics: Bellingham, WA, USA*, vol.5344, pp.13–27, 2005.
- [26] B. Balakrishnan, E. Smela, "Challenges in the Microfabrication of Dielectric Elastomer Actuators," *International Society for Optics and Photonics: Bellingham, WA, USA*, vol.7642, pp.141–150, 2010.
- [27] E. Hajiesmaili, and D. R. Clarke, "Dielectric elastomer actuators," *J. Appl. Phys.* 129, 151102, 2021.
- [28] Y. Jung-Hwan, J. Seung, H. Geonwoo, K. Hyunwoo, H. Kyujin, and P. Jihwan, "Dielectric Elastomer Actuator for Soft Robotics Applications and Challenges," *Appl. Sci.*, 2020.
- [29] G. Kovacs, L. Düring, S. Michel, and G. Terrasi, "Stacked dielectric elastomer actuator for tensile force transmission," *Sens. Actuators A Phys.*, 155, 299–307, 2009.
- [30] J. Maas, D. Tepel, and T. Hoffstadt, "Actuator design and automated manufacturing process for DEAP-based multilayer stack-actuators," *Meccanica* 50, 2839–2854., 2015.
- [31] S. Hau, G. Rizzello, and S. Seelecke, "A novel dielectric elastomer membrane actuator concept for high-force applications," *Extrem. Mech. Lett.*, vol. 23, pp. 24–28, 2018.
- [32] H. F. Schlaak, M. Jungmann, M. Matysek, and P. Lotz, "Novel multilayer electrostatic solid state actuators with elastic dielectric," *Smart Structures and Materials 2005: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, 2005.
- [33] F. Berlinger, M. Duduta, H. Gloria, D. Clarke, R. Nagpal, and R. Wood, "A Modular Dielectric Elastomer Actuator to Drive Miniature Autonomous Underwater Vehicles," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018.
- [34] F. Carpi, and D. D. Rossi, "Contractile folded dielectric elastomer actuators," *SPIE Smart Structures and Materials*, 2006
- [35] F. Carpi, C. Salaris, and D. D. Rossi, "Folded dielectric elastomer actuators," *Smart Mater. Struct.*, 2007.
- [36] J. Zhu, S. Cai, Z. Suo, "Nonlinear oscillation of a dielectric elastomer balloon," *Polym. Int.* 59, pp. 378–383, 2010.
- [37] S. Ho, H. Banerjee, Y. Y. Foo, H. Godaba, W. M. M. Aye, J. Zhu, and C. H. Yap, "Experimental characterization of a dielectric elastomer fluid pump and optimizing performance via composite materials," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 28, pp.3054–3065, 2017.

- [38] C. Keplinger, T. Li, R. Baumgartner, Z. Suo, and S. Bauer, "Harnessing snap-through instability in soft dielectrics to achieve giant voltage-triggered deformation," *Soft Matter*, 2012.
- [39] R. F. Shepherd, F. Ilievski, W. Choi, S. A. Morin, A. A. Stokes, A. D. Mazzeo, X. Chen, M. Wang, and G. M. Whitesides, "Multigait soft robot," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2011.
- [40] J. Ashby, S. Rosset, E. -F. M. Henke, and I. Anderson, "Inflatable dielectric elastomer robots for space," *Proc. SPIE 10966 Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXI 109661L*, 2019.
- [41] Z. Li, J. Zhu, C. C. Foo, and C. H. Yap, "A robust dual-membrane dielectric elastomer actuator for large volume fluid pumping via snap-through," *Appl. Phys. Lett.* 111, 2017.
- [42] S. Mun, S. Yun, S. Nam, S.K. Park, S. Park, B.J. Park, J.M. Lim, and K.U. Kyung, "Electro-Active Polymer Based Soft Tactile Interface for Wearable Devices," *IEEE Trans. Haptics* 11, pp.15–21, 2018.
- [43] N. Hosoya, H. Masuda, and S. Maeda, "Balloon dielectric elastomer actuator speaker," *Applied Acoustics*, 2018
- [44] N. Koike, and T. Hayakawa, "Evaluation of the deformation shape of balloon-type dielectric elastomer actuator prestretched with water pressure," *Robomech Journal*, 2021.
- [45] S. Hau, D. Bruch, G. Rizzello, P. Motzki, and S. Seelecke, "Silicone based dielectric elastomer strip actuators coupled with nonlinear biasing elements for large actuation strains," *Smart Mater. Struct.*, 27, 074003, 2018.
- [46] J. W. Kwak, H. J. Chi, K. M. Jung, J. C. Koo, J. W. Jeon, Y. Lee, J. -D. Nam, Y. Ryew, and H. -R. Choi, "A Face Robot Actuated With Artificial Muscle Based on Dielectric Elastomer," *J. Mech. Sci. Technol.* 19, 578–588, 2005.
- [47] Kunze, J.; Precht, J.; Bruch, D.; Fasolt, B.; Nalbach, S.; Motzki, P.; Seelecke, S.; Rizzello, G. Design, Manufacturing, and Characterization of Thin, Core-Free, Rolled Dielectric Elastomer Actuators. *Actuators* 2021, 10, 69.
- [48] Wang, Y.; Zhu, J. Artificial muscles for jaw movements. *Extrem. Mech. Lett.* 2016, 6, 88–95.



- [49] Zhang, R.; Lochmatter, P.; Kunz, A.; Kovacs, G. Spring roll dielectric elastomer actuators for a portable force feedback glove. In Proceedings of the Smart Structures and Materials 2006: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), San Diego, CA, USA, 26 February–2 March 2006; Volume 6168, pp. 505–516.
- [50] He, T.; Cui, L.; Chen, C.; Suo, Z. Nonlinear deformation analysis of a dielectric elastomer membrane–spring system. *Smart Mater. Struct.* 2010, 19, 085017.
- [51] Keplinger, C.; Li, T.; Baumgartner, R.; Suo, Z.; Bauer, S. Harnessing snap-through instability in soft dielectrics to achieve giant voltage-triggered deformation. *Soft Matter* 2012, 8, 285.
- [52] Li, T.; Keplinger, C.; Baumgartner, R.; Bauer, S.; Yang, W.; Suo, Z. Giant voltage-induced deformation in dielectric elastomers near the verge of snap-through instability. *J. Mech. Phys. Solids* 2013, 61, 611–628.
- [53] Jordi, C.; Michel, S.; Kovacs, G.; Ermanni, P. Scaling of planar dielectric elastomer actuators in an agonist-antagonist configuration. *Sens. Actuators A Phys.* 2010, 161, 182–190.
- [54] F. Carpi, F. G. Frediani, and D. De Rossi, "Hydrostatically Coupled Dielectric Elastomer Actuators, " *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 15, 308–315, 2010.
- [55] G. Rizzello, "A Review of Cooperative Actuator and Sensor Systems Based on Dielectric Elastomer Transducers, " *Actuators*, 12, 46, 2023.
- [56] Ji, X.; Liu, X.; Cacucciolo, V.; Civet, Y.; El Haitami, A.; Cantin, S.; Perriard, Y.; Shea, H. Untethered Feel-Through Haptics Using 18- μm Thick Dielectric Elastomer Actuators. *Adv. Funct. Mater.* 2021, 31, 2006639.
- [57] Lotz, P.; Matysek, M.; Schlaak, H.F. Fabrication and Application of Miniaturized Dielectric Elastomer Stack Actuators. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 2011, 16, 58–66.
- [58] Yu, X.; Lu, Z.; Cui, F.; Cheng, L.; Cui, Y. Tunable acoustic metamaterial with an array of resonators actuated by dielectric elastomer. *Extrem. Mech. Lett.* 2017, 12, 37–40.
- [59] Marette, A.; Poulin, A.; Besse, N.; Rosset, S.; Briand, D.; Shea, H. Thin Film Transistors: Flexible Zinc-Tin Oxide Thin Film Transistors Operating at 1 kV for Integrated Switching of Dielectric Elastomer Actuators Arrays. *Adv. Mater.* 2017, 29, 1700880.
- [60] Aksoy, B.; Shea, H. Reconfigurable and Latchable Shape-Morphing Dielectric Elastomers Based on Local Stiffness Modulation. *Adv. Funct. Mater.* 2020, 30, 2001597.

- [61] Marette, A.; Poulin, A.; Besse, N.; Rosset, S.; Briand, D.; Shea, H. Thin Film Transistors: Flexible Zinc-Tin Oxide Thin Film Transistors Operating at 1 kV for Integrated Switching of Dielectric Elastomer Actuators Arrays. *Adv. Mater.* 2017, 29, 1700880.
- [62] Aksoy, B.; Shea, H. Reconfigurable and Latchable Shape-Morphing Dielectric Elastomers Based on Local Stiffness Modulation. *Adv. Funct. Mater.* 2020, 30, 2001597.
- [63] Sun, Y.; Li, D.; Wu, M.; Yang, Y.; Su, J.; Wong, T.; Xu, K.; Li, Y.; Li, L.; Yu, X.; et al. Origami-inspired folding assembly of dielectric elastomers for programmable soft robots. *Microsyst. Nanoeng.* 2022, 8, 1–11.
- [64] Pang, W.; Cheng, X.; Zhao, H.; Guo, X.; Ji, Z.; Li, G.; Liang, Y.; Xue, Z.; Song, H.; Zhang, F.; et al. Electro-mechanically controlled assembly of reconfigurable 3D mesostructures and electronic devices based on dielectric elastomer platforms. *Natl. Sci. Rev.* 2020, 7, 342–354.
- [65] Schlatter, S.; Grasso, G.; Rosset, S.; Shea, H. Inkjet Printing of Complex Soft Machines with Densely Integrated Electrostatic Actuators. *Adv. Intell. Syst.* 2020, 2, 2000136.
- [66] Li, W.B.; Zhang, W.M.; Zou, H.X.; Peng, Z.K.; Meng, G. Multisegment annular dielectric elastomer actuators for soft robots. *Smart Mater. Struct.* 2018, 27, 115024.
- [67] Lu, X.J.; Wang, K.; Hu, T.T. Development of an annelid-like peristaltic crawling soft robot using dielectric elastomer actuators. *Bioinspir. Biomim.* 2020, 15, 046012.
- [68] A. D. Poole, J. D. Booker, C. L. Wishart, N. McNeill, and P. H. Mellor, "Performance of a Prototype Traveling-Wave Actuator Made From a Dielectric Elastomer," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 17, no. 3, pp. 525–533, 2012.
- [69] Y. -L. Park, K. Chau, R. J. Black and M. R. Cutkosky, "Force Sensing Robot Fingers using Embedded Fiber Bragg Grating Sensors and Shape Deposition Manufacturing," *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Rome, Italy*, pp. 1510–1516, 2007.
- [70] D. Santos, B. Heyneman, S. Kim, N. Esparza and M. R. Cutkosky, "Gecko-inspired climbing behaviors on vertical and overhanging surfaces," *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA*, pp. 1125–1131, 2008.
- [71] M. Matschuk, N. B. Larsen, "Injection molding of high aspect ratio sub-100 nm nanostructures," *J. Micromech. Microeng.* 23, 2013.



- [72] S. H. Park, W. I. Lee, S. N. Moon, Y. E. Yoo, and Y. H. Cho, "Injection molding micro patterns with high aspect ratio using a polymeric flexible stamper," *eXPRESS Polymer Letters*, vol. 5. No. 11, pp. 950-958, 2011.
- [73] Y. Jang, H. Nabae, G. Endo, and K. Suzumori, "Analysis of the multi-balloon dielectric elastomer actuator for traveling wave motion," *Sens. Actuators, A* 2022, 333, 113243, 2022.
- [74] H. B. Lee, Y. W. Kim, J. Yoon, N. K. Lee, and S. Park, "3D customized and flexible tactile sensor using a piezoelectric nanofiber mat and sandwich-molded elastomer sheets," *Smart Mater. Struct.*, 26, 045032, 2017.
- [75] A. Georgopoulou, S. Michel, B. Vanderborght, and F. Clemens, "Piezoresistive sensor fiber composites based on silicone elastomers for the monitoring of the position of a robot arm," *Sens. Actuators, A*, 318, 2021.
- [76] Y. Hwang, O. H. Paydar, and R. N. Candler, "Pneumatic microfinger with balloon fins for linear motion using 3D printed molds," *Sens. Actuators, A* 2015, 234, pp.65–71, 2015.
- [77] J. Zhou, S. Chen, and Z. Wang, Z. "A soft-robotic gripper with enhanced object adaptation and grasping reliability," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 2017, 2, pp.2287– 2293.
- [78] C. Majidi, "Soft robotics: A perspective—current trends and prospects for the future," *Soft Rob.* 1, pp.5–11, 2014.
- [79] M. D. Dickey, "Emerging applications of liquid metals featuring surface oxides," *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2014, 6, pp.18369– 18379, 2014.
- [80] C. D. Onal, and D. Rus, "Autonomous undulatory serpentine locomotion utilizing body dynamics of a fluidic soft robot," *Bioinspiration Biomimetics*, 8, 02600, 2013.
- [81] M. Calisti, M. Giorelli, G. Levy, B. Mazzolai, B. Hochner, C. Laschi, and P. Dario, "An octopus-bioinspired solution to movement and manipulation for soft robots" *Bioinspiration Biomimetics*, 6, 036002, 2011.
- [82] S. R. Gaboury, and M. W. Urban, "Microwave plasma reactions of solid monomers with silicone elastomer surfaces: a spectroscopic study," *Langmuir*, 9, 3225– 3233, 1993.
- [83] N. Miyakawa, S. Minamisawa, H. Takikawa, and T. Sakakibara, "Physical–chemical hybrid deposition of DLC film on rubber by T-shape filtered-arc-deposition," *Elsevier*, vol. 73, pp. 611– 617, 2004.

- [84] S. Wakimoto, K. Ogura, K. Suzumori, and Y. Nishioka, "Miniature soft hand with curling rubber pneumatic actuator," *2009 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp.556– 561, 2009.
- [85] Y. Zhou, M. Chen, Q. Ban, Z. Zhang, S. Shuang, K. Koynov, H. J. Butt, J. Kong, and S. Wu, "Light-switchable polymer adhesive based on photoinduced reversible solid-to-liquid transitions," *ACS Macro Lett.*, 8, 968– 972, 2019.
- [86] T. Yamamoto, "Solid-state bonding of silicone elastomer to glass by vacuum oxygen plasma, atmospheric plasma, and vacuum ultraviolet light treatment," *Surf. Interface Anal.*, 45, 817– 822, 2013.
- [87] O. Luzanin, D. Movrin, and M. Plancak, "Experimental investigation of extrusion speed and temperature effects on arithmetic mean surface roughness in FFF-built specimens," *J. Technol. Plast.*, 38, 179– 190, 2013.
- [88] D. Ahn, J. Kweon, S. Kwon, J. Spog, and S. Lee, S. "Representation of surface roughness in fused deposition modeling," *J. Mater. Process Technol.*, 209, 5593–5600, 2009.
- [89] B. Vasudevarao, D. P. Natarajan, M. Henderson, and A. Razdan, "In Sensitivity of RP Surface Finish to Process Parameter Variation," *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp 251–258, 2000.
- [90] C. J. L. Pérez, "Analysis of the surface roughness and dimensional accuracy capability of fused deposition modelling processes," *Int. J. Prod. Res.* 40, 2865– 2881, 2002.
- [91] M. M. Gad, S. M. Fouda, R. Abualsaud, F. A. Alshahrani, A. M. Al-Thobity, S. Q. Khan, S. Akhtar, I. S. Ateeq, M. A. Helal, and F. A. Al-Harbi, "Strength and surface properties of a 3D-printed denture base polymer," *J. Prosthodont.*, 31, 412–418, 2022.
- [92] T. Suga, K. Miyazawa, and Y. Yamagata, "Direct Bonding of Ceramics and Metals by Means of a Surface Activation Method in Ultrahigh Vacuum," *MRS Internal Meeting on Advanced Materials, Material Research Soc.*, 8, 257–262, 1989.
- [93] D. Dowson, "History of Tribology," *Longman London, New York*, 1979.
- [94] H. C. Holland, "The Archimedes Spiral," *Nature*, 179, 432–433, 1957.
- [95] F. -F. M. Henke, K. E. Wilson, and I. A. Anderson, "Entirely soft dielectric elastomer robots," *In Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring (EAPAD), Portland, OR, USA*, 25–29, March 2017.



- [96] M. Y. Jung, N. H. Chuc, J. W. Kim, L. M. Koo, K. M. Jung, Y. K. Lee, J. D. Nam, H. R. Choi, and J. C. Koo, "Fabrication and characterization of linear motion dielectric elastomer actuators," in *Proc. SPIE 6168* 616824–7, 2006.
- [97] B. Fasolt, M. Hodgins, and S. Seelecke, "Characterization of screen-printed electrodes for dielectric elastomer (DE) membrane: Influence of screen dimensions and electrode thickness on actuator and sensor performance," *Proc. SPIE 9798*, 2016.
- [98] Y. Bar-Cohen, "Electroactive polymers: current capabilities and challenges," in *Proc. SPIE Smart Mater. Struct. Symp.*, San Diego, CA, 18–21 Mar. 2002, vol. 4695, pp. 1–7, 2002.
- [99] K. M. Pa lakodeti R, "Influence of frequency and prestrain on the mechanical efficiency of dielectric electroactive polymer actuators," *Mater Lett*, 60, 3437, 2006.
- [100] S. J. A. Koh, T. Li, J. Zhou, X. Zhao, W. Hong, J. Zhu, and Z. Suo, "Calculation of the Stress-Strain State of a Polymer Composite in a Direct Electric Current Field," *Mechanics of Solids*, 58, 1, pp. 119–130, 2023.
- [101] A. Yoshihara, A. Miyazaki, T. Maeda, M. Fukushima, and T. Abe, "Brillouin Light Scattering from Thin Albumen of Chicken Egg," *J. Phys. Soc. Jpn.* 79, 125001, 2010.
- [102] A. N. Gent, "Elastic instabilities of inflated rubber shells," *Rubber Chem Technol* 72(2), pp. 263–268, 1999.
- [103] Z. Ren, S. Kim, X. Ji, W. Zhu, F. Niroui, J. Kong, and Y. Chen, "A High-Lift Micro-Aerial-Robot Powered by Low-Voltage and Long-Endurance Dielectric Elastomer Actuators," *Adv. Mater.* 34, 2106757, 2022.
- [104] A. Poulin, S. Rosset, and H.R. Shea, "Printing low-voltage dielectric elastomer actuators," *Appl. Phys. Lett.* 107, 244104, 2015.
- [105] J. Hubertus, J. Neu, S. Croce, G. Rizzello, S. Seelecke, and G. Schultes, "Nanoscale Nickel-Based Thin Films as Highly Conductive Electrodes for Dielectric Elastomer Applications with Extremely High Stretchability up to 200%," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 13, 39894–39904, 2021.
- [106] G.Y. Gu, U. Gupta, J. Zhu, L. M. Zhu, and X. Zhu, "Modeling of viscoelastic electromechanical behavior in a soft dielectric elastomer actuator," *IEEE Trans. on Robotics*, 99, pp. 1–8, 2017.

-
- [107] J. Cao, W. Liang, Q. Ren, U. Gupta, F. Chen and J. Zhu, "Modelling and Control of a Novel Soft Crawling Robot Based on a Dielectric Elastomer Actuator," *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Brisbane, QLD, Australia*, pp. 4188–4193, 2018.
- [108] I. S. Park, K. Jung, D. Kim, S. M. Kim, and K. J. Kim, "Physical principles of ionic polymer–metal composites," *MRS Bull.*, 33, pp.190– 195, 2008.



謝辞

まず初めに，本研究テーマを与えてくださった，東京工業大学工学院 鈴森康一教授に心より感謝いたします。研究活動を進める中，壁にぶつかる場面もありましたが，広い視野での助言，多彩な知識は，問題を解決するのに助けられました。東京工業大学工学院 遠藤玄教授，東京工業大学工学院 難波江裕之助教にも心より感謝申し上げます。ゼミや発表練習などで多くのアドバイスや知識をいただきました。また，製作や実験計測，動作解析において助言をいただき，活用させていただきました。

そして，本論文の審査をご担当頂きました岩附信行教授，前田真吾教授，高山俊男教授に心から感謝を申し上げます。

いつもお世話になっていた鈴木直美さんに大変感謝申し上げます。研究室の先輩，後輩にも大変お世話になりました。最後に，私の海外生活を支えてくれた家族に心から感謝致します。



