

博士論文 2019 年度

微細構造設計によるマテリアルへの
インタラクション機能統合の研究

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

中丸 啓

博士論文 2019 年度

微細構造設計によるマテリアルへの
インタラクション機能統合の研究

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

中丸 啓

博士論文 2019 年度

論文要旨

論文題目：

細構造設計によるマテリアルへのインタラクション機能統合の研究

論文要旨

モノのインターネットに代表される様に、我々の身の回りの物質にセンシングやアクチュエーションの機能が統合されつつある。これらのシステムの多くはデバイスを取り付けることで実現されており、その存在を認識させない静的なシステムである。

一方, Human Computer Interaction の領域では, Organic User Interface や Radical Atoms のビジョンが提唱され, 物質特性をデジタル情報の様に流動的に扱い, 物質と情報をよりシームレスに繋げる研究が行われている。また, ロボティクスの分野では形状や色といった様々な物理特性を環境に応じて変化させる柔らかなロボットの開発が注目を集めている。ファブ리케이션分野では, 特殊なマテリアルを用いることで, 機能と形状を同時に設計し, 直接実世界に出力する取り組みが行われている。この様にモノに高度なインタラクションを統合する試みが複数の領域で進んでいる。将来的には, モノもより能動的な機能を持ち, ヒトや環境に調和しながら活用されていくことが期待される。

しかし, これらのインタラクション機能の多くは, 特定サイズを有するデバイスによってもたらされており, 機能統合時に物質の機械特性が損なわれたり, 形状やスケールが限定されたりといった課題が存在する。本研究ではデバイスより小さな微細構造領域の設計を行うことで, マテリアルにインタラクション機能を統合する手法を提案する。この手法では, 機能がより小さな構成単位により付与されるため, マテリアルの機械特性の維持や様々な形状やスケールへの対応が可能となる。本論文では微細構造の設計を, すでに存在する材料や構造を活用する手法と, 材料や構造を設計する手法の2つの立場から実装を行ない, 新たなインタラクション体験や機能を提案した。またそれぞれの設計手法の特徴をまとめ, インタラクション設計者が目的に応じて, これらの設計手法を適切に活用するための知見を共有した。

キーワード

マテリアル, センサ, アクチュエータ, フィジカルインタラクション, デジタルファブ리케이션

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科
中丸 啓

Doctoral Thesis Academic Year 2019
SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION

Title

Research on Integration Method of Interaction Capability to Materials by Fine Structure Design

Summary

With the development of device and information technology infrastructures, sensing and actuation functions are being integrated into the materials around us. Mainly implementation is progressing in a form close to the world of the calm computing proposed by Mark Weiser.

On the other hand, in the area of Human Computer Interaction, visions such as Organic User Interface and Radical Atoms are presented. Interactions are being explored, treating substances like digital manner and trying to connect them seamlessly. In the field of robotics, soft robots that can deform to complex shapes are actively studied. Soft robots attempt to integrate physical function such as shape and color changing in react to the environment. At the same time, fabrication technology tries to adopt functional materials and directly output both shape and functions. In this way, more sophisticated interaction features are being integrated into materials. In the future, physical interaction is expected to be more active and harmonized with human and environments.

However, many of these interaction functions are provided by a device with a certain size, and there are issues such as the loss of material properties during function integration, and the limitation of shape and scale. We propose a method to integrate the interaction function into the material by designing fine structure. It becomes easy to maintain the property of materials and configure in various shapes.

In this paper, we implemented from two viewpoints: the method of utilizing existing materials and structures and the method of designing materials and structures. New interaction experiences and functions by proposed method are proposed. I also aimed to organize the features of the method and allow interaction designers to utilize this method.

Keyword(5 words)

Material, Sensor, Actuator, Physical Interaction, Digital Fabrication

Graduate School of Media and Governance Keio University
Satoshi Nakamaru

目次

第 1 章	緒論	2
1.1	物質へのインタラクション機能統合の背景	3
1.2	インタラクションの定義と対象について	5
1.3	研究の目的	5
1.4	本論文の構成	6
1.5	プロジェクトの貢献範囲について	7
第 2 章	関連研究	9
2.1	機能を有する材料の研究	10
2.2	センシング手法の研究	13
2.3	アクチュエーション手法の研究	22
2.4	機能を付与するファブリケーションの研究	27
2.5	物理世界のインタラクションに関する研究	29
2.6	ソフトロボットの研究	31
第 3 章	微細構造設計によるマテリアルへのインタラクション機能統合手法の提案	32
3.1	マテリアルへのインタラクション機能統合の現状と課題	33
3.2	微細構造設計によるインタラクション機能統合手法の提案	35
3.3	微細構造設計による機能付与のアプローチ法	38
第 4 章	入手可能なマテリアルの組み合わせと構造化による機能統合手法	40
4.1	マテリアルの組み合わせと構造化手法の背景	41
4.2	ユーザーリサーチの実施	42
4.3	インサイトの抽出	43
4.4	要求性能の仮説とカスタマージャーニーマップの作成	45
4.5	モデリングと統合機能の実現法の探索	49
4.6	ユーザーテストの結果と改善策の提案	54
4.7	マテリアルの組み合わせと構造化手法のまとめ	60

第 5 章	既存のモノづくりプロセスを活用する手法	61
5.1	既存のモノ作りプロセス活用手法の背景	62
5.2	テキスタイルへの機能付与の関連研究	65
5.3	西陣織のプロセスを活用した機能統合手法の提案	66
5.4	Heteroweave001 <color>	67
5.5	Heteroweave002 <digitize>	71
5.6	Heteroweave003 <form>	73
5.7	既存のモノづくりプロセス活用手法のまとめ	77
第 6 章	材料が有する微細構造を活用する手法	79
6.1	材料が有する微細構造を活用する手法の概要	80
6.2	多孔質構造活用のデザインプロセス	82
6.3	多孔質構造と導電性インクを組み合わせた構造体の基本特性	86
6.4	多孔質構造の設計による機能拡張性の考察	99
6.5	導電性インクと多孔質構造組みわせのまとめ	102
6.6	配線設計によるセンシングモードの拡張	104
6.7	浸潤パターンニング手法による設計の考察	108
6.8	多孔質構造活用手法の制約事項	110
6.9	アプリケーションシナリオの紹介	112
6.10	材料が有する微細構造を活用する手法のまとめ	118
第 7 章	材料の分子構造を設計する手法	120
7.1	材料の設計が必要となる背景	121
7.2	自励振動ゲルの研究背景	122
7.3	自励振動ゲルの駆動メカニズム	125
7.4	分子設計による自励振動ゲルの機能拡張手法の提案	129
7.5	サンプル作成手法	132
7.6	新規自励振動ゲルの駆動特性と考察	134
7.7	材料の分子設計による機能向上の手法のまとめ	141
第 8 章	微細構造を設計する手法	143
8.1	微細構造を設計する手法の背景	144
8.2	小型分散配置可能なポンプの提案	144
8.3	EHD ポンプの先行研究	146
8.4	本提案の目指す EHD ポンプ	148
8.5	自由構造設計可能なポンプの提案	154

8.6	流路と一体化したポンプの提案	160
8.7	ポンプ接続時の特性	166
8.8	流れのコントロール手法の提案	168
8.9	EHD ポンプ駆動のための回路仕様	170
8.10	EHD ポンプをモノと統合するための設計環境の試作	172
8.11	小型分散配置可能な EHD ポンプを用いたアプリケーション	174
8.12	EHD ポンプの制約事項	179
8.13	微細構造を設計する手法のまとめ	180
第 9 章 微細構造設計によるインタラクション機能統合の考察		181
9.1	微細構造設計を活用すべき状況	182
9.2	機能統合時に検討すべき項目	183
9.3	微細構造設計の各アプローチの原理的な強みと活用方法についての考察	189
9.4	微細構造設計のスケールと機能のまとめ	195
第 10 章 結論		198
10.1	各章の振り返り	199
10.2	微細構造設計がもたらす体験	202
10.3	マテリアルへの機能統合の将来展望	202
参考文献		205
研究業績		220
謝辞		221

目次

2.1	刺激応答性ゲルの概要	12
2.2	光応答性材料のメカニズムと変形の様子 (A) 光異性化反応による分子長変化の様子, (B) 偏向方向に応じて変形方向を制御したフィルムの様子 ([161] の Figure1 より引用)	12
2.3	フォトフレクタを活用した柔らかな物質の変形状態のセンシング手法 (A) 変形測定のメカニズム, (B) 変形取得の様子 ([123] の Figure1, 2 より引用)	14
2.4	構造の工夫による柔軟性の付与 (A) ブリッジ構造により伸縮性を持たせた無機材料, (B) 変形取得の様子 ([111] の Figure1, 2 より引用)	15
2.5	柔らかな素材で構成される伸縮性電極 (A) polydimethylsiloxane(PDMS) 上に単層のカーボンナノチューブを成膜した伸縮性電極 (B) 変形に対する伸縮性電極の導電性変化の様子, (C) 伸縮性電極材料をウェアラブル歪みセンサとして応用している様子 ([72] の Figure1, 4, より引用)	17
2.6	イオン導電体による伸縮電極素材 (A) イオン導電体の駆動原理 (B) 静電容量型デバイスへの適用図, (C) イオン導電体の伸長の様子, (D) イオン導電体電極で構成した静電容量型デバイスの延伸に対する容量の変化とサイクル特性 ([58] の Figure1, [125] の Figure1, 3 より引用)	17
2.7	微細構造を有する柔らかな静電容量式タッチセンサ (A) エラストマー層の微細構造の作成プロセス (B) センサデバイスの外観, (C) ハエが止まった時のセンサ容量変化の様子 ([82] の Figure1, 2, より引用)	18
2.8	柔らかな素材で構成される軽量・薄型のタッチセンサ (A) デバイスの構成図 (B) 羽とデバイスを空気中で落下させた様子 (スケールバー =2 cm), (C) デバイスを折り曲げた様子 ([54] の Figure1, 4, より引用)	19
2.9	液体金属とエラストマーからなる柔らかなセンサ (A) デバイスの構造図 (B) 圧縮と剪断を検知可能なソフトセンサの外観, (C) 人体に取り付けた様子 ([54] の Figure1, 4, より引用)	19

2.10	周波数掃引によるインピーダンスのパターンマッチングによる状態の解析 (A) ユースケースのイメージ, (B) システム構成図, (C) 周波数特性とインタラクション状態の関係 ([114] の Figure1, 2, 6 より引用)	20
2.11	液体金属とエラストマーからなる柔らかなセンサ (A) デバイスの構造図 (B) 圧縮と剪断を検知可能なソフトセンサの外観, (C) 人体に取り付けた様子 ([162] の Figure1, 4, より引用)	21
2.12	IPMC の駆動原理	23
2.13	IPMC を用いた魚型ロボット (A) システム構成図, (B) 魚型ロボットの 外観 ([9] の Figure1 より引用)	23
2.14	誘電エラストマーアクチュエータの構造と駆動メカニズム	24
2.15	パウチモーターの設計プロセスと外観 ([95] の Fig1 より引用)	25
2.16	エラストマーに溶媒を分散させた相転移アクチュエータ (A) アクチュエータの構造, (B) 駆動原理 (C) 内部構造と実際の駆動の様子 ([85] の Fig2, 4 より引用)	26
2.17	物性と構造を設計するファブリケーションの例 (A)4D printing により出力された物質の変形の様子 ([134] の 1 ページ目より引用), (B) 磁性と構造の設計のシミュレーションと実験の比較の様子 ([62] の Fig1 より引用)	27
2.18	完全に柔らかな自律駆動ロボット Octobot (A)Octobot の外観, (B) Octobot の設計図 ([144] の Fig1, 3 より引用)	28
2.19	inForm (A) インタラクションの様子, (B) システム構成図 ([24] の Fig1, 10 より引用)	30
2.20	環境に応答する物理インタラクション (A) 汗に応答して形状が変化する衣服 ([157] の Fig.1 より引用), (B)pH に応答して色が変わるインタフェース ([55] の Fig27 より引用)	30
2.21	複数の物理変化を起こせるソフトロボット (A) 色付きの液体により背景にカモフラージュしたソフトロボット ([86] の Fig.2 より引用), (B) 発光と変形を同時に起こせるソフトロボット ([71] の Fig.4 から引用)	31
3.1	機能を生み出す最小構成要素と機能の複雑さにおける微細構造設計の位置付け	37
4.1	ファブリケーション手法の先行例 (A)Protopiper 左: 装置外観, 右: 造形時の様子, ([2] の Fig.1, 6 から引用) (B)BlowFab 左: プロセス図, 右: 造形サンプルの外観 ([153] の Fig.2, 18 より引用), (C) ProtoMold 左: プロセス図, 右: 造形サンプルの外観 ([152] の Fig.2, 4 から引用)	42
4.2	プロトタイプのカテゴリ	45

4.3	機能をもつ製品作成のプロセス	47
4.4	提案手法に求められる機能のまとめ	48
4.5	アプローチ法探索のためのプロトタイプの様子	50
4.6	材料の特性比較	50
4.7	提案手法の概要 (A) 磁性と硬化の機能を付与したマテリアル, (B) 提案手法で作成した三次元の硬い構造体, (C) マグネット式電子部品モジュール	52
4.8	提案手法による機能統合の様子 (A) 導電インクによる配線の様子, (B) マグネットコネクタを備えたデバイス部位 (左: マイクロコントローラ, 中央: スピーカー, 右: LED, バッテリー, スイッチ素子)	53
4.9	ユーザーテストの様子 (A) 作成するオブジェクトの作り方を検討している様子, (B) 提案手法の紙を加工する様子, (C) モジュールの特性を調べている様子	56
4.10	ユーザーテストから考案された追加要素 (A) 硬さを選択肢の追加, (B) オブジェクトコネクタ, (C) 回路コネクタ, (D) 電子部品コネクタ	57
4.11	提案手法を用いた作品例 (A) ラジコンロボット, (B) IoT ライトスタンド, (C) 貼り付け可能な2次元インタフェース	59
5.1	西陣織の外観	64
5.2	Heteroweave001 <color> の展示の構成	69
5.3	Heteroweave001 <color> の色変化の様子	69
5.4	温度に対するロイコ染料インクの色変化の事例	70
5.5	Heteroweave002 <digitize> の展示構成	72
5.6	Heteroweave002 <digitize> の展示外観	72
5.7	Heteroweave003 <form> の造形手順	74
5.8	白を基調とした Heteroweave003 <form> を箱型に造形した時の概観	75
5.9	Heteroweave003 <form> で造形したモデルの外観	75
5.10	実際の展示の様子	76
6.1	外部応力に対する変形の様子 (赤は特に圧縮されている領域)	81
6.2	FoamSense の設計手順	82
6.3	キャリア素材の外観 (A) スポンジ, (B) 繊維構造, (C) ビーズ充填構造	84
6.4	計測システム (A) 計測システムの構成, (B) サンプルをセットした状態, (C) サンプル圧縮時の様子	87
6.5	スポンジ型 FoamSense の特性 (A) 圧縮と応力の関係, (B) 圧縮と抵抗率の関係	90
6.6	スポンジ型 FoamSense 変形時の断面構造	91

6.7	繊維型 FoamSense 測定の様子	92
6.8	繊維型 FoamSense の特性 (A) 圧縮と応力の関係, (B) 圧縮と抵抗率の関係 (○:0.1 g/cm ³ と ●:0.05 g/cm ³)	94
6.9	繊維型 FoamSense の使用例 (A) 構成図, (B) フェルトの外装に実装した様子	95
6.10	ビーズ充填型 FoamSense の構成例 (A) 導電性ビーズを用いた構成, (B) 導電性ビーズとエラストマーを用いた構成	96
6.11	ビーズ充填型 FoamSense の特性 (A) 圧縮と応力の関係, (B) 圧縮と抵抗率の関係 (○: 導電性ビーズとエラストマーを用いた構成, ●: 導電性ビーズ単体の構成)	98
6.12	デジタルファブリケーションによって形成される FoamSense (A) 3 D プリンタで出力されたシリコンの多孔質構造体, (B) 多孔質構造体の変形時の様子, (C) 導電性インクを付与した後の多孔質構造体 (左: 楕円球孔構造, 右: 球孔構造)	100
6.13	デジタルファブリケーションによって形成される FoamSense の特性 (A) 圧縮と応力の関係, (B) 圧縮と抵抗率の関係 (緑の円: 球孔構造の FoamSense, 青の正方形: 楕円球孔構造の短軸方向, 青の白抜きの正方形: 楕円球孔構造の長軸方向)	101
6.14	ビーズ充填型 FoamSense の構成例 (A) 導電性ビーズを用いた構成, (B) 導電性ビーズとエラストマーを用いた構成	103
6.15	スポンジ型 FoamSense による屈曲状態推定 (A) 配線接続の様子, (B) 曲率に対する抵抗値 (○: 曲げと内径側の配線 CH1 の抵抗値の関係, ●: 曲げと外側の配線 CH2) の抵抗値の関係, (C) 曲げと CH1 と CH2 の抵抗値の差分の関係	105
6.16	スポンジ型 FoamSense によるひねり状態推定 (A) 配線レイアウトとパラメータ (θ_i : 回転角度), (B) ひねり角度と抵抗値の関係	106
6.17	スポンジ型 FoamSense による剪断状態推定 (A) 配線レイアウトとパラメータ (d: 初期厚み, θ_m : 剪断によるずれ角度), (B) 導電性ビーズとエラストマーを用いた構成	107
6.18	導電性インクの浸潤法を工夫した FoamSense (A) 複数のセンサを設計するためのプロセス, (B) FoamSense の電気等価回路, (C) 二つのセンサが統合された FoamSense 変形の様子	109
6.19	人形玩具型インタフェースのシステム構成図	112
6.20	人形玩具型インタフェースの外観 (A) FoamSense 設置の様子, (B) FoamSense 導入後の柔軟性の様子, (C) FoamSense により画面内のオブジェクトを操作する様子	113

6.21	ネックピロー型インタフェース (A) システム図, (B) 使用時の様子	115
6.22	ビーズ充填型 FoamSense の構成例 (A) 導電性ビーズを用いた構成, (B) 導電性ビーズとエラストマーを用いた構成	117
6.23	異なる機能性インクを染み込ませた FoamSense, (A) ロイコ染料を染み込ませた FoamSense, (B) フェライトを染み込ませた FoamSense(黒色), 表面にネオジウム磁石を固定したスポンジ(白色)	119
7.1	自励振動ゲルを応用したシステム (A) 自律歩行するゲルロボット, (B) 蠕動運動する自励振動ゲル ([80] の Fig4 と [81] の Fig3 より引用)	124
7.2	溶液系の BZ 反応 (A) 攪拌状態の様子, (B) 静置状態の様子 ([145] より引用)	127
7.3	自励振動ゲル (poly(NIPAAm-co-Ru(bpy) ₃ gel) の化学構造式	128
7.4	自励振動ゲルの反応メカニズム	128
7.5	駆動可能温度範囲を拡張した新規自励振動ゲル poly(VP-co-Ru(bpy) ₃) gel の化学構造式	130
7.6	自励振動ゲル酸化還元状態それぞれの温度に対する体積変化 (A) 従来手法温度応答性ポリマーを用いた自励振動ゲル, (B) 提案手法温度に対して体積変化を起こさないポリマーを用いた自励振動ゲル	131
7.7	poly(VP-co-Ru(bpy) ₃) gel の温度に対するゲルの長さ比率の関係 (○: 酸化状態, ●: 還元状態)	135
7.8	poly(VP-co-Ru(bpy) ₃) gel の溶液条件と BZ 反応周期の関係 (温度は 20 度, 変数以外の基質濃度は固定) (A) MA の濃度と反応周期の関係 ([NaBrO ₃] = 0.084M, [HNO ₃] = 0.3M) (B) NaBrO ₃ の濃度と反応周期の関係 ([MA] = 0.0625M, [HNO ₃] = 0.3M), (C) HNO ₃ の濃度と反応周期の関係 ([MA] = 0.0625M, [NaBrO ₃] = 0.084M)	137
7.9	外液組成と駆動周期の関係 (温度は 20 度条件に固定)	138
7.10	温度と駆動周期の関係 (外液組成: [MA] = 0.0625M, [NaBrO ₃] = 0.48M, [HNO ₃] = 0.48M)	139
7.11	poly(VP-co-Ru(bpy) ₃) gel の自励振動 (外液組成: [MA] = 0.0625M, [NaBrO ₃] = 0.48M, [HNO ₃] = 0.48M) (A) 20 度での変形の様子, (B) 50 度での変形の様子	140
8.1	EHD ポンプを用いた半導体チップ冷却装置 (A) デバイス構成図, (B) 冷却装置の外観 ([15] の Figure2, 10 から引用)	147
8.2	EHD ポンプを用いた動的なサクシオンカップ (A) デバイス構成図, (B) サクシオンカップ駆動時の様子 ([70] の Figure1, 11 より引用)	147

8.3	インタラクション設計のための EHD ポンプのデザインスペース	148
8.4	ポンプの電極間距離と駆動電圧と印加電界強度の関係	150
8.5	楕形電極構造 EHD ポンプの設計パラメータ (A) 上面図, (B) 側面図	153
8.6	デジタルファブ리케이션を用いた EHD ポンプの作成手順	155
8.7	EHD ポンプ作成に使用するマテリアル (A) カuttingプロッター (右上), 銅箔テープ (左上) カutting時の下地 (右下), PET フィルム (下中央), ゴムローラー (左下), (B)3D プリンタで作成した筐体部位 (左), カuttingした電極パターン (中央), 接着用紫外線硬化樹脂, (C) 光造形型 3D プリンタ (Formlabs, Form2), (D) 電極を挿入したケースの様子, (E) 電極を封止した EHD ポンプデバイス	156
8.8	デジタルファブ리케이션による EHD ポンプの特性評価 (A) デバイスの外観, (B) 測定の様子, (C) 各流路高さに対する印加電界強度と発生圧力の関係	158
8.9	様々な形状のポンプの試作品 (A) 曲面構造をもつポンプ, (B) ブロック型のポンプ, (C) 円柱型ポンプ, (D) ゴム材料で形成される曲げられるポンプ (Formlabs, flexible フィラメントにより作成)	159
8.10	楕形電極構造チューブ型 EHD ポンプデバイス作成の手順	161
8.11	楕形電極構造チューブ型 EHD ポンプデバイスの特性評価 (A)EHD ポンプの外観, (B) 測定系全体の様子, (C) 流路幅の異なる 2 つのチューブ型ポンプの電界強度に対する圧力の関係	162
8.12	螺旋電極構造チューブ型 EHD ポンプデバイス作成の手順	164
8.13	螺旋電極構造チューブ型 EHD ポンプデバイスの特性評価 (A)EHD ポンプの外観, (B) 曲げの様子, (C) 電界強度に対する圧力の関係	165
8.14	ポンプ接続時の特性評価 (A) ポンプ接続時の外観, (B) 測定時の様子, (C) 電界強度に対する圧力の関係 (○:1 ユニット駆動, ●: 2 ユニット駆動)	167
8.15	複数ポンプによる流れ制御実験 (A) 実験構成図, (B) 三つのポンプの制御方向と初期からの水面位置の変化	169
8.16	EHD ポンプのシステム図 (A) システムのブロック図, (B) 昇圧回路の外観	171
8.17	ポンプを配置するためのインタラクティブなシステム (A) モデル作成時の様子, (B) 本システムで作られたオブジェクトの断面図, (C) カエル型のオブジェクトにチューブ型 EHD ポンプを配置した様子	173
8.18	チューブ一体型冷却システム (A) 動作原理確認のプロトタイプ, (B) 衣服やカメラの内部に配置した時のイメージ図	175

8.19	EHD ポンプで構成されるピンアレイディスプレイ (A) ピンアレイディスプレイの外観, (B) ディ스플레이駆動時の様子, (C) 机に組み入れたシステムのイメージ	177
8.20	EHD ポンプによる形状変形 (A) エラストマー膜を変形させる原理, (B) シリコンエラストマーを膨らませている様子, (C) 膨らませたエラストマーにより柔らかな構造体を動かす様子	178
9.1	二つの物理量を結びつける現象またはデバイス名	184
9.2	機能統合部位の形状による特徴の違い (A) デバイス配置による離散的な構成, (B) 面形状による構成, (C) 三次元形状の構成	186
9.3	手動作により動きをプログラミング可能なソフトロボット: MorphIO (A) システム外観, (B) センシング部位の構造	192
9.4	微細構造の設計スケールに対する本論文提案手法のマッピング	197

用語の定義

インタラクション

ヒト・環境・モノが対象に何かしらの入力を与えた時に、それが一方通行にならずに何かしらのアクションを返し、相互作用を及ぼす関係性のこと

デバイス

複数の材料の組み合わせから構成される特定の機能を有した構成要素.

マテリアル

モノを構成する生地, 素材, 筐体.

インタフェース

モノ, ヒト, 外界など異なるシステムの境界となる部分やそのプロトコル.

スマートマテリアル

外部からの物理信号を別の物理信号に変換する機能を備えた材料.

デジタルファブリケーション

デジタルデータを元に、コンピュータ制御によりモノを作る手法特に本論文中では、3D プリンタ、カッティングプロッター、レーザーカッターといった比較的安価なパーソナルファブリケーション装置を用いた製造手法を意図する.

ソフトロボット

全体として、0.1 GPa以下の剛性を持つマテリアルまたは機構により構成される柔らかさを有するロボットの総称 [87].

流体ポンプ

空気や液体をアクチュエータによって搬送するポンプの総称. 空気ポンプや油圧ポンプも含まれる.

トランスデューサ

外部から加えられた物理信号を別の物理信号に変換するデバイス.

高分子ゲル

三次元に構成されたポリマーネットワーク構造が溶媒を含み膨潤した物質.

自励振動

外部からの ON-OFF のスイッチングを伴わずに自律的に膨潤収縮を繰り返す現象.

エラストマー

ゴムに代表される弾性を有する高分子の総称.

下限臨界溶液温度 (lower critical solution temperature : LCST)

溶液が温度変化によって二相に分離する時の温度.

第 1 章

緒論

1.1 物質へのインタラクション機能統合の背景

2000年代以降、デバイスや情報技術、インフラの発展により、スマートフォンなどのモバイルコンピュータが広く普及した。また2010年代からはモノのインターネット (Internet of Things) に代表される様に、我々の身の回りのモノにセンサやマイクロコンピュータが接続され、様々な分野でサービスが展開されている。この様なセンサノードの普及により私達の生活環境は情報世界と接続されつつある。この状況は1980年代に Sakamura が提唱した分散コンピューティングの概念である Highly Functionally Distributed System (HFDS) や Mark Weiser が提唱した Ubiquitous Computing のコンセプトが実現されつつあると捉えることができる。現在、センサノードの多くは空間中に配置され、静的な形で存在しながら、人や環境から情報を集めている。

2016年に科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業 (ERATO) のプロジェクトにおいて Kawahara らは現在の IoT のモノの作り方、配置、動かし方、エネルギーの供給法、そしてデータを活用して実世界に働きかける部分においては、IoT は専門的な知識や人間の手を必要とする「操作的な道具」となっていることに触れ、将来的には IoT のノードは人間だけでなく、環境と調和したより持続可能なシステムとなり、人がそれぞれの能力を自発的に発揮しながら共に生きていくための「Convival (自立共生的) な道具」として発展していくことを掲げている。さらなる IoT の可能性として、人工物があらゆる環境に溶け込み、実世界に働きかけ、人間と自立共生しながら新しい価値を生み出していく万有情報網のビジョンを提唱している。

一方、Human Computer Interaction (HCI) の分野では、1960年代に初代のマウスが考案されて以降、情報と物理世界を接続するための様々なインタフェースやビジョンが提唱されている。90年代後半に Ishii らによって Tangible Bits のビジョンが発表された [48] [45]。ここでは、マウスやキーボードといったデジタル情報を操作するためのインタフェースだけではなく、物質そのものをデジタル世界との接続に用いている。物質の有する形状や特性を利用しつつ、ソフトウェアだけでなく、プロジェクタやアクチュエータを用いて物理世界と接続することで、より直感的に情報世界とインタラクションを行う研究が数多く提案された [47] [105] [53]。その後、2008年に Holman らによって Organic User Interface のコンセプトが提案された [37]。Organic User Interface (OUI) では入力デバイスはより機械的に自由度の高いデバイスで構築されている。情報は二次元のディスプレイに限らず、デバイス形状そのモノも活用される。OUI ではこれまで静的であった物質をより動的なインタフェースとして扱う方向性を示し、Flexible Display といった次世代のデバイス開発の動機となっている [122]。2012年には Ishii らによって Radical Atoms のビジョンが提案された [46]。Radical Atoms では、物質はデジタル世界の情報の様に、流動性、可変性を持ち、形だけで

はなく様々な物理特性が変化したり、組み合わせたりすることが可能になる。機能性材料やデバイスを組み合わせることで、このビジョンを具現化するための研究が進められている [24] [90] [98]。この様にデジタルが現実世界に重畳される世界観から、物質と情報がシームレスに繋がり、状況に合わせて瞬時に物質が再構成される世界観へと提唱されるビジョンも変化しつつある。

またロボティクスの研究領域を見てみると、材料や構造の工夫により、形成される柔らかなロボット（ソフトロボット）の研究領域が盛り上がっている [126] [137]。2012年に IEEE Robotics and Automation Society に Soft Robotics の研究会が立ち上げられ、Journal of Soft Robotics といった専門の雑誌が刊行されている。これらのロボットは柔らかな物質のハンドリングといった従来のロボティクスの課題を扱うだけではなく、外部環境に応じて変形し、悪路を踏破したり、複雑な形状の物質に沿って機能するといった適応性も注目を集めている [61] [85] [118]。また近年ではこれらのロボットに機能性の材料を統合することで変形だけではなく、見た目や温度を変化させるマルチモーダルな Soft Robot も提案されている [86] [71]。これらは物理世界で様々なセンシングやアクチュエーションを行うノードと捉えることもできる。

デジタルファブリケーションの領域では近年は構造だけではなく、出力する物質の機能も含めて設計することで、時間経過と共に意図した変形を生じさせる 4D Printing [134] や、外部環境に応じて意図した様に振る舞うソフトロボット [144] など、より高機能な物を直接出力できる様になりつつある。

このような研究領域のトレンドを鑑みると、モノのインターネットのシステムで静的に用いられている情報ノードも将来的には多様な入力機能や表現機能を備えた環境に調和する動的なシステムに発展していく可能性がある。このような動的なノードの存在する環境では、ユーザーは物理世界の物質性と情報世界の流動性の両方の特性を活かしながら、より身体的かつ流動的に情報とインタラクションができると期待される。

しかし、現実的には物質に入出力といった機能を付与するのは容易ではない。現在の IoT ノードの機能の多くは、硬い無機半導体デバイスによって実現されている。これらのデバイスは特定の物理信号を高精度に定量化することに適している。しかし、表面全体など広い領域に機能を統合しようとすると、物質が本来有する機械特性が損なわれたり、デバイスの体積より小さい領域には機能を実装できないといった課題がある。そのため、柔らかく、薄い布地の様な素材への機能の統合やソフトロボットの様な柔らかい筐体から構成されるロボットに駆動源を内包させるといったことは未だに困難である。物質がヒトや環境と相互作用しながら、調和的に働いていくためには、その機能を統合していくための設計手法が発展していくことが必要となる。

1.2 インタラクションの定義と対象について

本論文で扱うインタラクションの定義と対象について述べる。インタラクションとは”inter：相互の”と”action：作用”の組み合わせからなる様に、ヒトや環境が作用した際に何かしらの応答を示し、それが一方通行にならずに、ヒト、モノ、環境にアクションを返す相互作用を及ぼす関係性のことを本論文では意図している。

インタラクションは様々なスケールで存在しており、材料やデバイスの相互作用もあれば、それらを介したヒトや環境に対する関係の設計も含まれる。

本論文では、マテリアルにインタラクションするための機能を統合する手法を提案するが、そのインタラクションに関わる議論は、コンピュータを介した機能の設計だけではなく、ヒトやモノが介在するコンテキストやその機能を統合させるためのプロセスも含めて取り扱っていく。

1.3 研究の目的

物質世界のマテリアルへのインタラクション機能の統合が、より多様な環境や用途に拡張していくためには、様々な形態や機能で構成できることに加えて、モノがもたらす体験を損なわない様に見た目や硬さといった物質性を維持しつつ、機能統合を容易に行えることが重要になるであろう。

これらの課題に対して、材料やデバイスの領域で研究が行われている。材料分野では、外部から加えられえた物理刺激を別の物理情報に変換するトランスデュース機能を備えた材料(スマートマテリアル)がインタラクション体験の構築に活用されている [55] [157]。スマートマテリアルはその変換機能が材料単位でもたらされているため、非常に小さなサイズで機能させることが可能である。具体的には、インク状などに加工して扱うことで、様々な形状やサイズに設計可能な形状随意性を備えている。スマートマテリアルによる物体の修飾は、デバイスでは導入が困難な領域に対して機能を統合し得る可能性がある。一方でスマートマテリアルによりもたらされた機能は、材料由来となり、デバイスに比べるとその機能は一般的に限定される。

新規のデバイスを作り出す研究も行われている。柔らかい材料や配線や基材の構造を工夫することで柔らかさを保ちつつ、従来のデバイスでは難しい箇所への機能の統合を行なっている [110] [111] [119] [82]。また、この様な新規デバイスを用いて直感的にデジタルコンテンツを操作する様な研究も発表されている [122]。これらの新規デバイスは設置可能な場所を拡張しているが、デバイス単位で機能するという点においては、無機半導体を用いたアプローチと同じく、それより小さな単位には分割できないという原理的な課題を抱えている。そ

のため、様々な材料に適用していくためには、用途に合わせてデバイスを設計する必要がある。高機能なデバイスの設計には未だに高価な産業用の装置を必要とし、新規デバイスを普及させる上での課題となっている。

この様な現状を踏まえると、インタラクション機能の統合をより多くの状況や材料に適用していくためには、デバイスの様な優れた機能とスマート材料の様な形状随意性を両立させるための設計論が必要になる。本論文ではデバイスより小さく、様々な形状に統合でき、スマート材料の特性を、用途に合わせてより引き出すための設計手法の提案を目指す。期待される主な成果と貢献は次の通りである。

- デバイスや材料以外の機能統合のための設計要素を見出すこと。
- 材料、デバイス、ファブリケーションの各領域の知見を活用し、機能を組み込む手法を設計手法として提案すること。
- 提案した設計手法を活用し、従来のアプローチでは実現が難しい、新たなインタラクション機能や体験を示すこと。
- アプローチ法の特徴や制約事項をまとめ、手法を選択する際の指針を示すこと。

1.4 本論文の構成

本論文は次の様に構成される。2章では、材料へのインタラクション機能統合のために、これまで行われてきた様々な領域の研究事例を紹介する。スマート材料の事例や、センシングやアクチュエーションの機能を担う各種新規デバイス研究、コンピューショナルに材料を加工したり、組み合わせて出力するデジタルファブリケーションといった領域を扱う。またシステムとして提案されたインタラクションやソフトロボットといった応用領域の研究について紹介する。

3章では先行研究を元に、現在のデバイスを主体としたアプローチでは解決が難しい課題を示し、それに対してどの様な試みが取られているかを整理し、解決したい課題をより明確にする。デバイスとスマート材料の間を繋げる微細構造の領域を設計するコンセプトを示し、そのコンセプトを実現するためのいくつかの手法を提案する。

4章から8章では、提案手法を実装し、そこで得られた知見から手法の特徴や有効性、制約条件などを論ずる。

4章では、入手可能な複数の材料とプロセスを組み合わせ、所望の特性を得るための設計プロセスについて、手作業でモデリングするプロトタイピングツールを事例で紹介する。

5章では、既存のモノづくりの手法に機能性を持つ材料を組み入れることで、微細構造を導入する手法について論じている。西陣織の織プロセスを例に、構成要素の一つである緯糸に

機能性材料を組み入れて、織物の質感や製造プロセスはそのままに機能統合できることを示す。また、伝統工芸と先端技術を組み合わせるといった本アプローチによってもたらされたモノ作りのプロセスの変化について報告する。

6章では、機能を組み入れるマテリアルが元から有している微細構造を活用する手法を提案する。スポンジ、繊維、ビーズ重点構造といった多孔質の材料を活用することで材料への機能統合や複数機能の導入といったアプローチを提案している。また、本章の中ではスポンジの孔構造自体を設計することでさらにセンサの特性をカスタマイズできる可能性や将来展望についても論じる。

7章では、材料そのものを改良する手法の有効性やその設計によりもたらされる効果について論じている。スマートマテリアルとしては、外部からの制御ではなく、環境に応じて自律的に振る舞い、将来的にはインタラクションの領域をより広げていく可能性のある自励振動ゲルマテリアルを題材に、分子設計によりその機能を拡張する手法を示す。また微細構造に対するアプローチとの選択基準や相補的な関係として材料アプローチが存在し得ることについて論じる。

8章では、デジタルファブリケーションを活用し、微細構造を意図的に設計することで機能を付与する手法について論じる。分散配置可能な微細な流体ポンプを例に構造設計により従来では難しかったアクチュエーション機能のマテリアルへの一体化に取り組んだ。身近なツールを用いて構造を設計することによる利点や可能性について論じる。

9章では、これまでに紹介してきた手法の特徴などをよりメタな視点で捉え、各アプローチの利点や制約事項や機能以外のどの様な要素に配慮して機能統合を行うべきかについて論じる。これらの議論から本設計手法がどの様なシーンで活用されていくべきかについて考察する。また、本手法が提唱したデバイスと材料の間のスケールに対して、提案した手法がどの様に位置するかについてマッピングし、微細構造設計手法をまとめる。

10章では、各章の振り返りと、得られた知見をまとめた。本論文で得られた知見や先行事例と現在の技術トレンドを元に、物理世界でのインタラクションの将来展望について論じる。

1.5 プロジェクトの貢献範囲について

今回、著者が本論文で紹介するプロジェクトの内、実際の貢献した範囲などについて述べる。4章のプロジェクトは、ユーザーリサーチからソリューションの提案、プロトタイプの実装とそのユーザーテストに到るまで主体として行なった。共著者のメンバーには定性的なデータの分析やワークショップの運営などの助力をいただいた。

5章の既存のモノづくりのプロセスを活用するプロジェクトでは、東京大学の筧康明先生と YCAM（山口情報芸術センター）のリードの元、先端マテリアルを活用した西陣織の機能向上に活用できる機能性材料のアイデア出しと Heteroweave001 に使用する材料の選定

と調合を主に担当した。具体的には、箔の塗工プロセスに適用できる様にするための粘度調整や展示に適した色変化の温度や色の選定、必要量の確保を行なった。展示のソフトウェアや機構設計は他のメンバー、実際の織の工程は株式会社細尾のご協力をいただいた。

6章の既存のマテリアルの微細構造を活用した設計手法では、技術アプローチの提案、実験データの取得、塗り分け等の応用法の提案を行なった。また、アプリケーションの実装は当時修士学生であった中山凌輔氏と一緒に実装した。設計手法については東京大学の笥康明先生と議論しながら、一連の設計プロセスとしてまとめた。

7章の材料の分子設計によるインタラクション機能拡張の手法では、芝浦工業大学の前田真吾先生、筑波大学の原雄介先生の技術のご指導の元、新規材料の合成と最適な組成の探索と周辺環境とマテリアル物性との関係のデータ取得を実験者として行なった。また化学物質を用いた複雑系のシステムの研究についての位置付けについては、早稲田大学の橋本周司先生からご助言をいただいた。

8章の微細構造設計による小型分散型の電気流体力学ポンプのプロジェクトでは、高電圧で動かせるポンプのハンドメイドの設計手法について、芝浦工業大学の前田真吾先生よりご助言をいただいた。本プロジェクトでは、デジタルファブリケーションを用いたポンプの設計パラメータの導出や流路と一体化させる製造プロセスを提案した。またこれらのデバイスのデータの取得などを実施した。アプリケーションの提案や利用法については東京大学の笥康明先生や藤井樹里氏にご助力をいただいた。またポンプ設計時のインタラクションシステムでは、計算のモデルの部分を考案し、実装の部分は東京大学特任研究員の山岡潤一先生が担当した。

その他、本論文では独立した章としては取り扱っていないが、9章で材料と構造の組み合わせによる機能拡張の例として紹介している手動作で柔らかなロボットの動きを設計するMorphIO [93] のプロジェクトでは、内部に6章の構造のセンサを用いている。本プロジェクトにおいては、シリコンと密着する低剛性な可変抵抗として使用可能な電極材料とその浸潤プロセスの部分を共著者としてサポートした。

第 2 章

関連研究

物質に機能を付与する試みは、これまでも様々な領域・視点からアプローチが取られてきた。本章では、様々な機能を持つ材料やデバイス、それらを統合するためのファブリケーション技術、また要素技術を統合して作られたインタフェースやソフトロボットといった応用事例について紹介する。

2.1 機能を有する材料の研究

本節では、金属以外の材料が有する電気的な特性とインタラクション分野で応用可能が期待できるユニークな特徴を有するスマートマテリアルの研究を紹介する。スマートマテリアルは外部からの物理刺激に対して、何らかの物理的な変化を起こす材料の総称である [3]。電流が流れる際に発光する EL(Electro Luminescence) 材料、刺激応答性のゲル・ポリマー、色変化材料、光電変換材料など様々なスマートマテリアルが知られている。これらの材料技術はそれ単体で応用されることもあれば、新たな機能をもつデバイスの構成要素ともなり得る。また無機半導体と組み合わせて使用することもできる要素技術である。

2.1.1 有機材料の電気的な性質

導電性高分子

インタラクション機能を設計する際に、電気信号は盛んに用いられている。これは現在のコンピュータが電子デバイスで構成されているためである。有機材料の電気的な現象の理解と応用は 1977 年にドーピングしたアセチレンが電気を通す特性が発見されたことが大きな転換点となっている [10]。これらの材料は導電性プラスチックや導電性高分子(ICP: Intrinsic conductive polymer) などの名称で現在も盛んに研究されている。その後、poly(aniline)(PANI) [41] や poly(3,4-ethylenedioxythiophene) doped with poly(styrene sulfonic acid)(PEDOT/PSS) などの有機材料を活用したインタラクションやデバイス設計で現在もよく導電体として用いられる材料が発見されてきた [33] [63]。これらの素材は溶液状で扱うことができるため、印刷やディッピングといったウェットプロセスにより物質に導電性を付与することができる。またプラスチックなどに薄く塗工することで透明化したり、曲げにも耐えられるといった新たな機能の創出も期待されている。

Electro Luminescence(EL) 材料と有機材料の半導体物性

電気により発光する EL 材料は KODAK 社らが有機ダイオードを 1987 年に発表したことをきっかけに、実用化に向けての研究が本格化した [131]。その 19 年後にソニー株式会社から世界初の有機 EL テレビが商品化されている [28]。本研究領域では導電性高分子の研究等と共に、有機材料中に電子が存在できる分子軌道のエネルギー準位 (MO:Molecular Orbital) の知見や材料の半導体物性の理解が進んだ [158]。2000 年代にはこれらの材料知見

を活用することで、発光材料のならず、太陽電池や電界効果トランジスタ材料といった他の電子部品の構成要素としての応用研究も行われている [119] [65].

従来の無機材料に対して印刷プロセスによって安価に大面積を作れる可能性や柔らかなデバイスなどの実現が期待されている。一方で信頼性などの課題もあり、2019年現在では、機能性の有機材料を用いたデバイスはディスプレイなどを除いて広くは流通していない状況である。

2.1.2 刺激応答性ゲル, ポリマー材料の研究

ゲルとは高分子の鎖（ポリマー）が三次元に架橋した網目構造体が溶媒を含んで膨潤した物質の総称である。1970年代後半から田中らによって、特定の外部刺激に対してゲル体積が変化する相転移現象が発見され、実験と理論の両方から物理理論が解き明かされてきた [130] [129].

外部の物理刺激に対して相転移を起こすゲルは刺激応答性ゲル (Stimuli-Responsive Gel) と呼ばれている (図2.1)。刺激応答性ゲルには pH [35], 温度 [36], 電場 [163], 光 [], など様々な系が発見されている。刺激応答性ゲルはドラッグデリバリーシステム (DDS) や細胞の培地の表面条件のコントロールなど、ウェット環境での応用が主に進められている [4] [13]. また環境を制御することで変形を起こせるため、熱や光を与えることで、配線を伴わずに操作できるアクチュエータとしても注目されている。

実際に配線を使わずに複雑な動きを実現したマテリアルの研究では、アゾベンゼン部位を含んだ液晶ポリマー材料の系が知られている [161]. アゾベンゼンは特定波長の光エネルギーを吸収して Cis 体と Trans 体で構造が変化する光異性化反応を起こす [67]. Cis はトランス体に比べると分子長が短くなるので、光異性化時に変形を起こす。この光の吸収は分子の構造に対して光の振動面が揃っている時に起こるため、偏向を用いるとその方向により大きく収縮する。この特徴を活用し、偏向方向をコントロールすることで Fig2.2の (B) の様にマテリアルの屈曲方向をコントロールすることができる。

この様に刺激応答性の材料に特定の分子構造を取り入れることで、より複雑な機能を実現している。これらのゲルやポリマー材料は素材自体が柔らかいと同時に、トランスデューサとしても機能するため、入出力のインタラクション機能の要素技術となり得る。

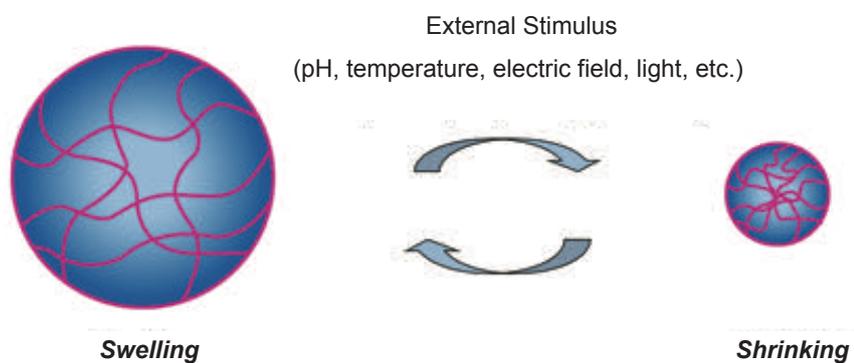


図2.1: 刺激応答性ゲルの概要

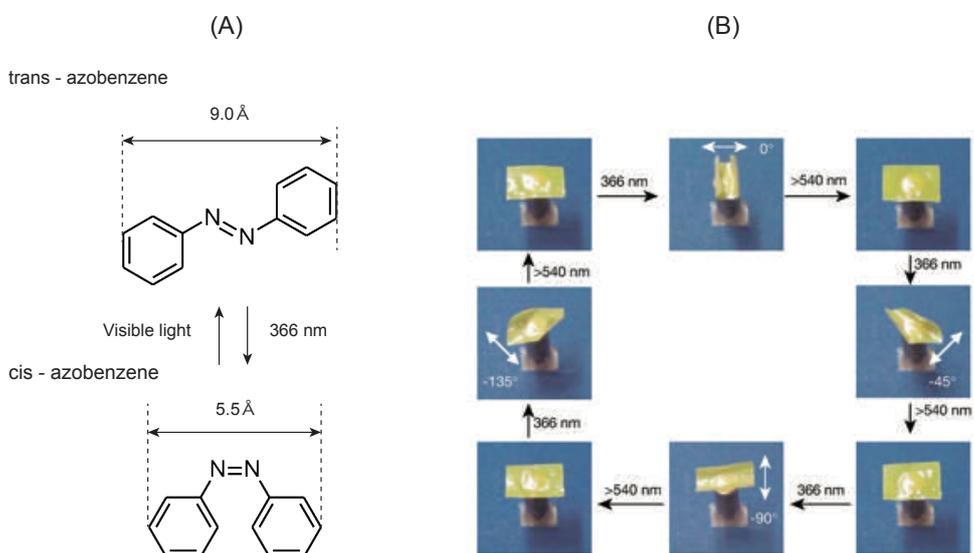


図2.2: 光応答性材料のメカニズムと変形の様子 (A) 光異性化反応による分子長変化の様子, (B) 偏向方向に応じて変形方向を制御したフィルムの様子 ([161] の Figure1 より引用)

2.1.3 色が変化する材料

スマートマテリアルには環境に応じて色が変化する材料も知られている。液晶インクは材料中の液晶部位が温度によりその配向状態が代わり、色変化を起こす。この材料を布地に定着させることで、温度に応じて色変化を起こす Mosaic Textile が提案されている [142]。発光せず色が変化することから前項の EL 材料とは異なる表現が可能である。

温度に対して色変化を起こす材料としては、ロイコ色素も知られている。この材料はナフトールなどの顕色剤と呼ばれる物質と近づくと、プロトンの供与を受け、分子構造が変化し、色変化を起こす [136] [66]。ロイコ染料と顕色剤はマイクロカプセル化されたインクにすることで、温度によってその混ざり具合が変化し、特定の温度以上で色が変化する機能を実現している。ロイコ染料はフリクションペン（摩擦で加熱することで色が消えるボールペン）などの商品で活用されている。

また温度以外にも特定の波長の光に応答して色が変わるフォトクロミック材料 [132] や溶媒に反応して色変化を起こすソルバトクロミック材料も存在する [6] [43]。

これらの有機材料をベースとした機能性材料はインクや粉体などの形で提供されることも多い。機能を生み出す要素が分子構造などから由来しているため、非常に小さなスケールでも機能できるという特徴がある。力学的な強度を有していないものは、印刷により表面に機能を付与したり、添加物としても用いられることで機能を付与することができる。

2.2 センシング手法の研究

ユーザーの操作や、周辺環境を認識するセンシング技術も無機半導体のセンサデバイスの活用だけでは、解決が難しい課題も存在する。一つは柔らかさと高機能の両立である。例えば生き物の皮膚は柔らかさを維持しつつ、非常に高い機能を兼ね備えている。圧力だけでなく、剪断力や捻り、温度や質感といった様々な情報を取得することができる。

また、広く複雑な形状でセンシングを行う際には、物質が本来有しているしなやかさの維持も課題となっている。本章ではこれまでに提案されてきたセンサデバイスによる物質との機能統合アプローチを紹介していく。

2.2.1 無機デバイスと柔らかな構造体を組み合わせるアプローチ

無機半導体により構成されるデバイスは一般的に小型高性能である。これらのデバイスは通常硬い材料で構成されているため、取り付けることで、物質が本来有していた柔らかさやしなやかさを損ねてしまうという課題がある。この様な課題にアプローチするいくつかの研究が存在する。Sugiura らは図 2.3 の様に、フォトリフレクタをクッションなどの柔ら

かな物質に設置し、物質の変形により生じる光量の変化から物資の変形状態を推定している [123]. この手法ではフォトフレクタを一定の間隔で配置し、測定データを無線通信で集めることで圧力中心の位置を推定している. 硬い部位が小さい場合は全体の剛性に与える影響が少ないため、物質の有する柔軟性を維持しつつ、機能を付与することができる.

センサデバイスを柔らかな配線で接続することで、柔軟性や伸縮性を付与するといった研究もされている [111]. 図2.4では無機半導体に橋架け構造を設けることで、硬い材料に柔軟性と伸縮性を付与している. この様に硬い材料でも構造を工夫することで、柔らかさや伸縮性を付与することができる.

これらの無機デバイスを活用したアプローチはデバイスの特性が安定しているという利点がある. 一方で伸縮可能な構造を作るためには、硬い無機材料を加工する必要があり、大きなサイズを作ることは一般的には困難と考えられている. またセンシング機能はデバイスによるものなので、広いエリアに適用した場合はデバイスが存在しない部位の比率が大きくなり、センサの情報が離散的になるという課題がある.

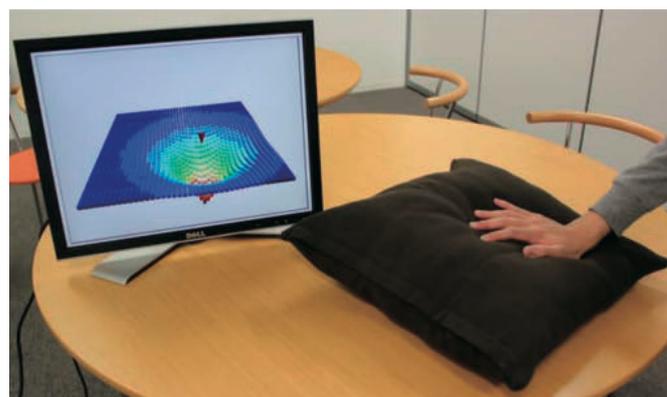
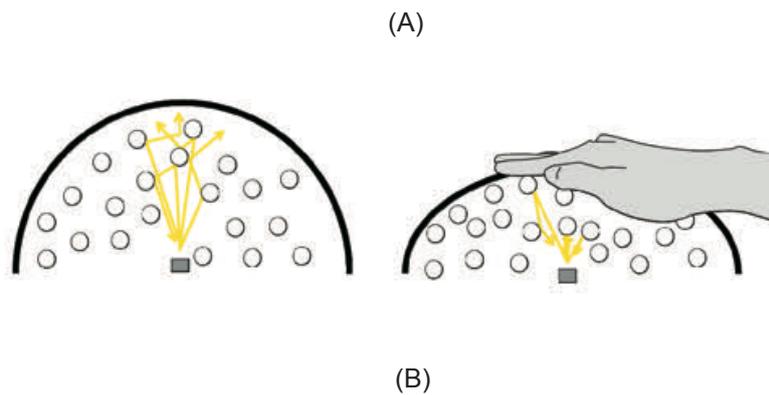


図2.3: フォトリフレクタを活用した柔らかな物質の変形状態のセンシング手法 (A) 変形測定のみカニズム, (B) 変形取得の様子 ([123] の Figure1, 2 より引用)

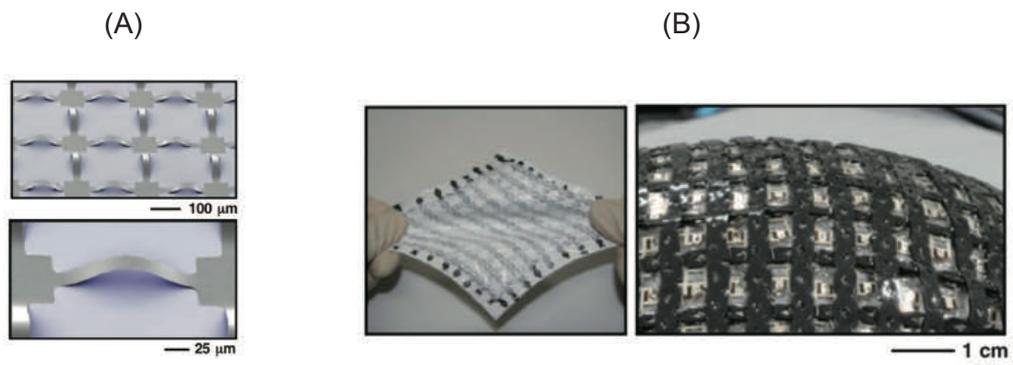


図2.4: 構造の工夫による柔軟性の付与 (A) ブリッジ構造により伸縮性を持たせた無機材料, (B) 変形取得の様子 ([111] の Figure1, 2 より引用)

2.2.2 柔らかい材料により構成されるセンサデバイス

先ほど紹介した手法は硬いコンポーネントに組み合わせる材料や構造を工夫したアプローチである。一方で構成するコンポーネント自体を柔らかな材料で構成するというアプローチも取られている。

柔らかな電極材料

デバイスの構成要素でよく活用される部材に配線が存在する。柔らかさや伸縮性を持たせた様々な配線材料が提案されている。グラフェン [60] やカーボンナノチューブ [39] といったアスペクト比の高いカーボン材料や金属フレーク [150] をポリマー中に分散させた材料は広く研究されている。

また導電性高分子の分子構造を設計 [121] することで、伸縮性を持たせる様な取り組みもなされている。これらの伸縮性導電材料はエラストマーなどの柔らかい基材上に形成することで伸縮配線を作ることができる [72]。この様な材料で電極を作るアプローチでは材料自体が伸縮するため、配線レイアウトは通常の電極と同様に設計することができる。

また、一般的に伸縮性材料は伸びによって導電率が変化する。これはデバイスの配線としてはデメリットであるが、歪みセンサとして活用することで、図2.5の様にウェアラブルなセンシングデバイスとしても応用されている。

先ほど紹介したフィラーや材料構成を工夫するアプローチの場合は、歪み量が大きくなりすぎると、フィラー同士の接触が失われたり、導電性高分子の構造が破壊されて導電性が失われる。非常に大きな変形に耐える電極として、イオン導電体を利用する手法が提案されている [58]。これはアクリルアミドなどのゲルにフッ化リチウムなどのイオン導電体を浸潤させた構成から成る。電界を加えることでゲル媒質内でイオンが電極近傍に移動し電気二重層によるキャパシタを作る。この伸縮性電極は静電アクチュエータなどの電極として機能する [125]。この電極は剛性が数十 kPa と低く、500% 以上の大変形時にも、アクリルアミド層が破壊されなければイオン導電体として機能することができる。図2.6の様に非常に大きな延伸に追従しつつ、透明化することもできるので、各種センサやソフトロボットへの応用が行われつつある。

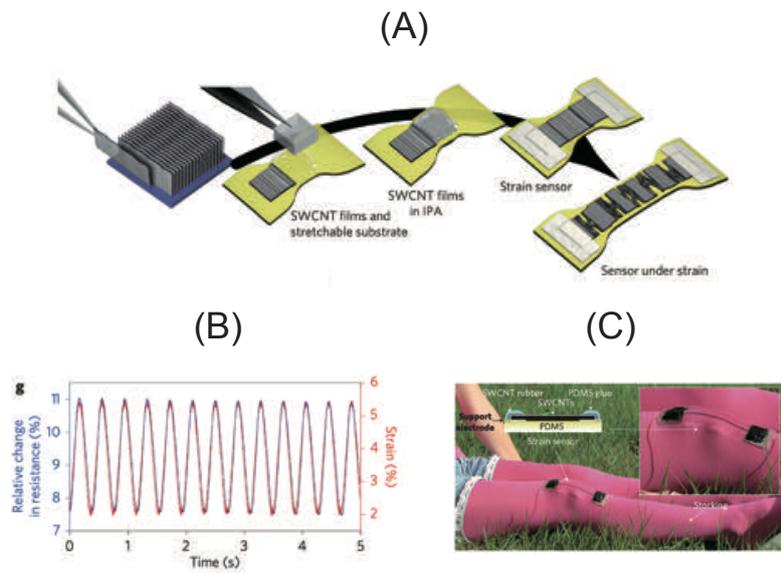


図2.5: 柔らかな素材で構成される伸縮性電極 (A) polydimethylsiloxane (PDMS) 上に単層のカーボンナノチューブを成膜した伸縮性電極 (B) 変形に対する伸縮性電極の導電性変化の様子, (C) 伸縮性電極材料をウェアラブル歪みセンサとして応用している様子 ([72] の Figure 1, 4, より引用)

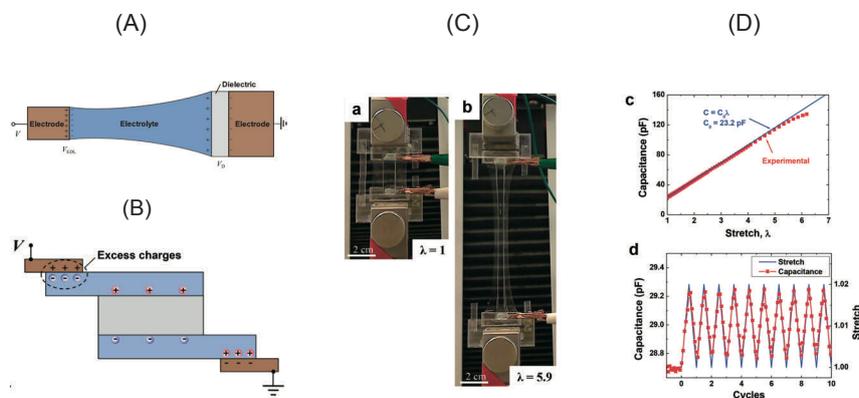


図2.6: イオン導電体による伸縮電極素材 (A) イオン導電体の駆動原理 (B) 静電容量型デバイスへの適用図, (C) イオン導電体の伸長の様子, (D) イオン導電体電極で構成した静電容量型デバイスの延伸に対する容量の変化とサイクル特性 ([58] の Figure 1, [125] の Figure 1, 3 より引用)

柔らかな材料によるセンシング機能の実現

配線以外にも、柔らかい材料でセンサ部位を作る試みも行われている。前項でも紹介された静電容量式のタッチセンサは絶縁体と一对の電極により構成され、人が触れた際の静電容量の変化から圧力を測定している。このタッチセンサの中間層の材料に polydimethylsiloxane(PDMS) などの柔らかい材料を用いることで、柔らかなタッチセンサアレイを構築することができる。

Mannsfeld らは中間層の PDMS に微細なピラー型の構造を作り、外力に対して静電容量がより大きく変化しやすくすることで、図2.7の高感度なフレキシブルなタッチセンサを実現している [82]。Kaltenbrunner らは、薄いフィルム上に回路素子を実装した厚み3 mの非常に軽量なタッチセンサを実現している (図2.8)。このデバイスは二倍以上に伸長することができ、折り曲げた後も材料が破壊されずに機能することができる。

静電容量型デバイス以外の構造も提案されている。図2.9のセンサはエラストマーの内部に液体金属を封止した構造をした伸縮型のデバイスである。エラストマーと液体金属は非圧縮性材料であることを利用し、変形時の断面積変化により生じる抵抗値変化から変形状態を推定する [141] [84]。この手法では液体電極を配置する内部構造を設計することで、圧縮だけでなく剪断力などを測定することができる。この様に柔らかい材料からデバイスを設計することで、より大きな変形に耐える追従性や複雑な変形状態を推定するといった機能が実現されつつある。

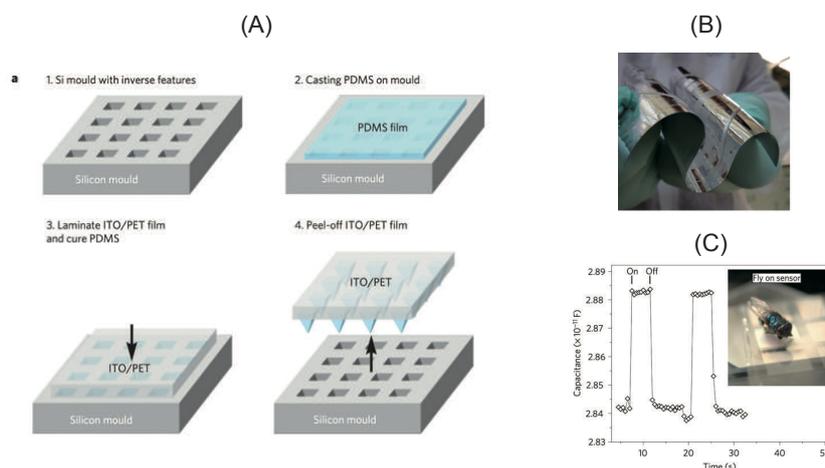


図2.7: 微細構造を有する柔らかな静電容量式タッチセンサ (A) エラストマー層の微細構造の作成プロセス (B) センサデバイスの外観, (C) ハエが止まった時のセンサ容量変化の様子 ([82] の Figure1, 2, より引用)

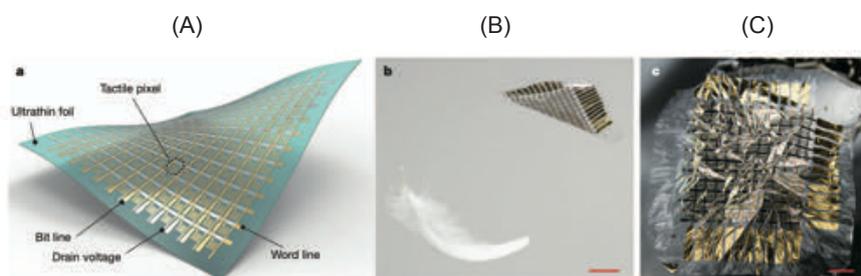


図2.8: 柔らかな素材で構成される軽量・薄型のタッチセンサ (A) デバイスの構成図 (B) 羽とデバイスを空気中で落下させた様子 (スケールバー =2 cm), (C) デバイスを折り曲げた様子 ([54] の Figure1, 4, より引用)

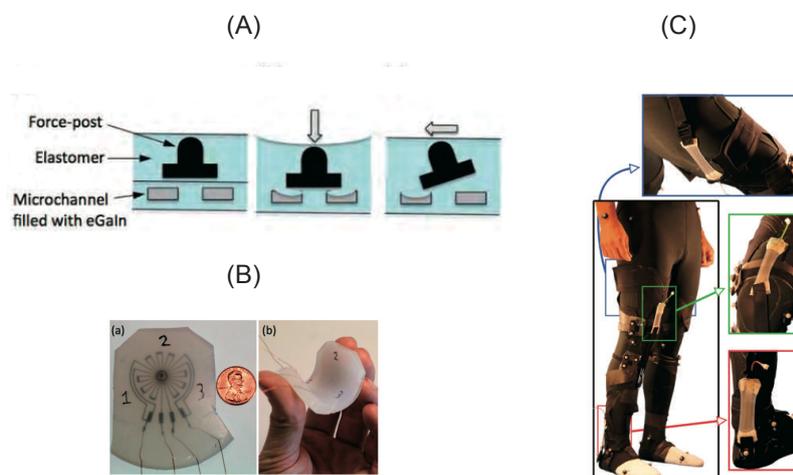


図2.9: 液体金属とエラストマーからなる柔らかなセンサ (A) デバイスの構造図 (B) 圧縮と剪断を検知可能なソフトセンサの外観, (C) 人体に取り付けた様子 ([54] の Figure1, 4, より引用)

2.2.3 信号処理を活用した入力解析手法

広い入力エリアからの情報取得を沢山のセンサアレイで解決しようとする、センサ素子にアクセスするための配線の実装が課題となる。この課題に対して、材料や対象物の電気的な特性を、信号処理を活用することで少ない配線で状態を推定する試みも行われている。

Sato らは導電体に繋いだ配線の入力信号の周波数を掃引させながら導電体のインピーダンスを測定することで、物質とのインタラクション状態を推定する手法を提案した [114]。この手法はオブジェクトの各要素に加わる力などは測定していないが、システム全体のインピーダンスの周波数特性をパターン認識することで、ヒトとオブジェクトとのインタラクション状態を推定している。

Zhang らは図2.11の様に物質の周囲に電極を配置し、AC 信号で電極間の特性を測定することで、二次元平面上のどこが触れているかを推定する手法を提案している [162]。またこの手法を拡張し三次元のオブジェクトの表面に導電性のインクをスプレーコーティングし、同様のパターンマッチングをすることで、どの部位を触られたかを判定することも行なっている。この様に物質の電気的な特性を信号処理技術と組み合わせることで、より高度な情報を得ようという試みが2012年以降、起こりつつある。この手法はシステムの電気特性に影響を与える外乱に対するロバスト性や外部に周波数掃引用の回路素子を必要とする点が課題である。

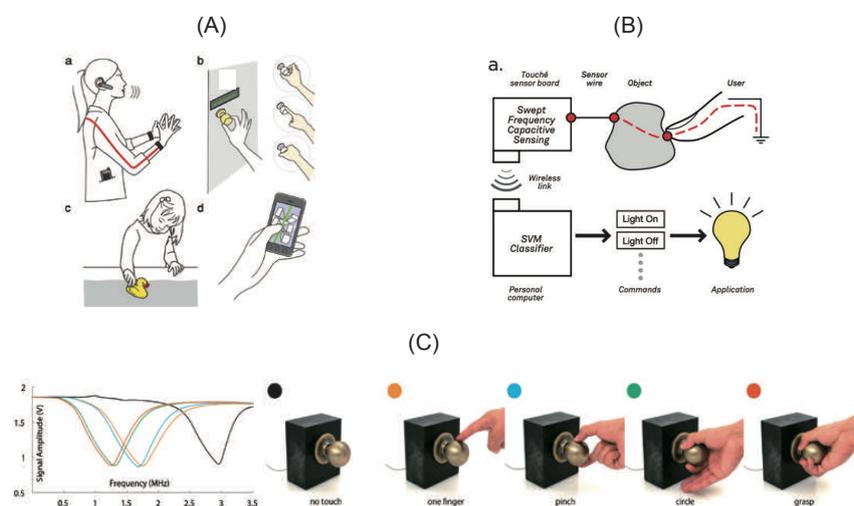


図2.10: 周波数掃引によるインピーダンスのパターンマッチングによる状態の解析 (A) ユーケースのイメージ, (B) システム構成図, (C) 周波数特性とインタラクション状態の関係 ([114] の Figure1, 2, 6 より引用)

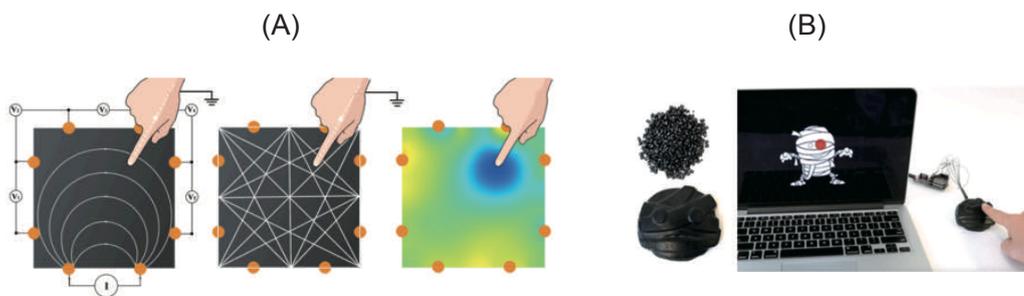


図2.11: 液体金属とエラストマーからなる柔らかなセンサ (A) デバイスの構造図 (B) 圧縮と剪断を検知可能なソフトセンサの外観, (C) 人体に取り付けた様子 ([162] の Figure1, 4, より引用)

2.3 アクチュエーション手法の研究

出力機能についても様々な取り組みが行われている。特に物質世界の表現では、二次元のディスプレイ表面で行われている視覚上の変化以外に形状や硬さといった別の物理情報の表出も期待されている [46]。

現在、変形は電磁モーターや圧電素子といったアクチュエータを様々な機構（ギア、リンク機構、ポンプなどの流体デバイスなど）を使用することで実現されている。一方でマテリアルやデバイスの領域では、より小型で設計自由度の高い様々なアクチュエータデバイスが研究されている。本章ではこの様な変形に関する技術を紹介する。

2.3.1 Ion Polymer Metallic Composite(IPMC) アクチュエータ

柔らかな素材や機構により、しなやかな動きを生み出すアクチュエータを総じてソフトアクチュエータと呼ぶ。ソフトアクチュエータは広義には前節で紹介した刺激応答性ゲルなど柔らかく環境に応答して変形する材料も対象に含まれる。一方で、インタラクションやロボティクスといった分野での応用を考えると、ある程度短い時間で応答できることが好ましい。

図2.12 Ion Polymer Metallic Composite(IPMC) アクチュエータは、ソフトアクチュエータの中でも低電圧で静音駆動できることから、盛んに研究されている素子の一つである。IPMC はナフィオンなどのイオン交換膜を二枚の電極で挟み込んだ構造をしている [116]。電圧を加えると陽イオンが負に帯電しているイオン交換膜から脱離し、負極に引き寄せられる。この時、水は酸素部位が負に帯電しているため陽イオンの移動と共に泳動する。この様に電極間に非対称性が生じる。この現象により、正極と負極で膨潤度に差が生まれ、IPMC 全体が大きく屈曲する。IPMC は音を立てずに屈曲運動を起こせるので、図2.13の様に魚型遊泳ロボットのひれなどへの導入が試みられている [9]。

また Fukushima らは中間層にカーボンナノチューブとイオン液体を混練した材料を用いたイオン移動型のアクチュエータを提案している [26]。このアクチュエータは Bucky gel と呼ばれており、溶媒が気化しないという利点を有している。

これらのアクチュエータは静音で屈曲動作という特徴を有している。一方で発生力は小さく、力を稼ぐために、重ねると屈曲量が落ちるといった点が課題となっている。また屈曲動作は、回転や伸縮といった現在の主要なアクチュエータと異なっており、使用するためには機構設計も合わせて設計する必要がある。インタラクションの領域では大きな力を必要とせず、変形そのものが価値となる様なアプリケーションに適した素子と考えられる。

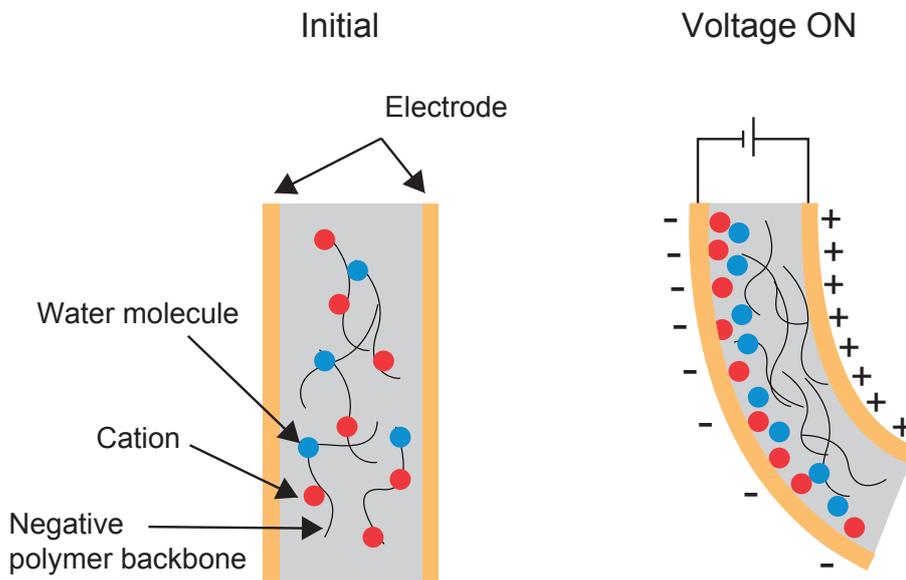


図2.12: IPMC の駆動原理

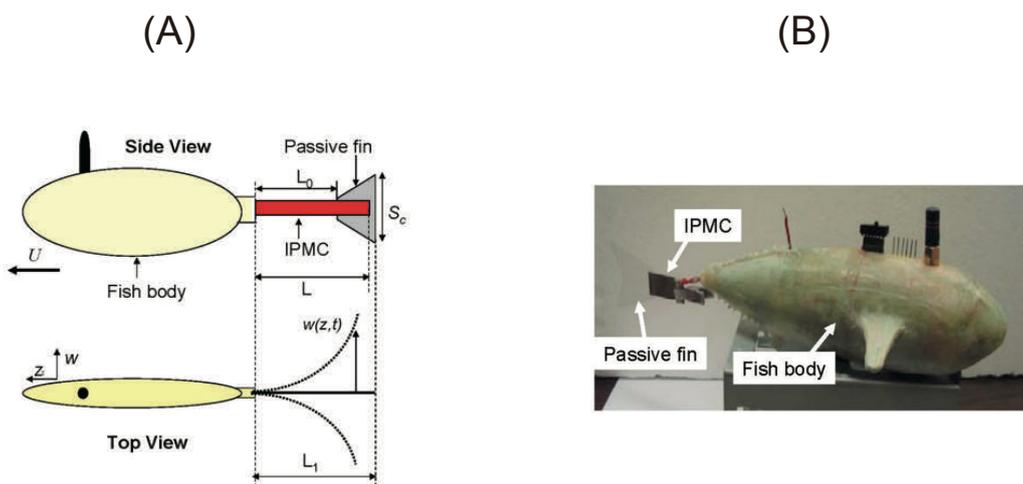


図2.13: IPMC を用いた魚型ロボット (A) システム構成図, (B) 魚型ロボットの外観 ([9] の Figure1 より引用)

2.3.2 誘電エラストマーアクチュエータ

誘電エラストマーアクチュエータ (Dielectric Elastomer Actuator: DEA) は図2.14の様に誘電体のエラストマー材料の両面に伸縮性の電極を配置した構造をした素子である。電圧を加えることでエラストマー表面に電荷が蓄積し、極板間引力 (Maxwell 応力) により電極が引き合う、エラストマーは非圧縮性の材料のため圧縮方向に対して垂直な方向に広がる。Perline らが 2000 年にエラストマーに予歪み (変形の前に伸ばした状態にすること) を加えることで、電界印加時に面積比で倍以上に変形することから注目を集めた [102]。これは予歪みを加えることで、エラストマーの弾性をわずかに下げる効果とエラストマー層の膜厚を減らしつつ、絶縁耐圧を上げる効果が寄与しているためである [40]。

DEA は人間の筋力に近い 0.15 MPa 以上の発生力と圧電素子よりも十倍以上大きな変位を出せることから、次世代アクチュエータとして注目を集めている [99]。これまでにその駆動特性やアレイ化できる特性を活かして、柔らかなグリッパやウェアラブル触感デバイスといった応用例が報告されている [118]。DEA は材料の比誘電率と印加した電界強度の 2 乗の積により発生力が決まる。しかし、この様な優れた特性で動かすためには 60 MV/m 以上の高い電界強度が必要である。そのため、市販されている $100 \mu\text{m}$ を超えるエラストマーシートでは駆動電圧が kV を超えてしまうという課題がある。低電圧駆動に対しては、転写プリントによるエラストマーの薄層化手法により、現在厚み $3 \mu\text{m}$ の DEA が提案されている [106]。

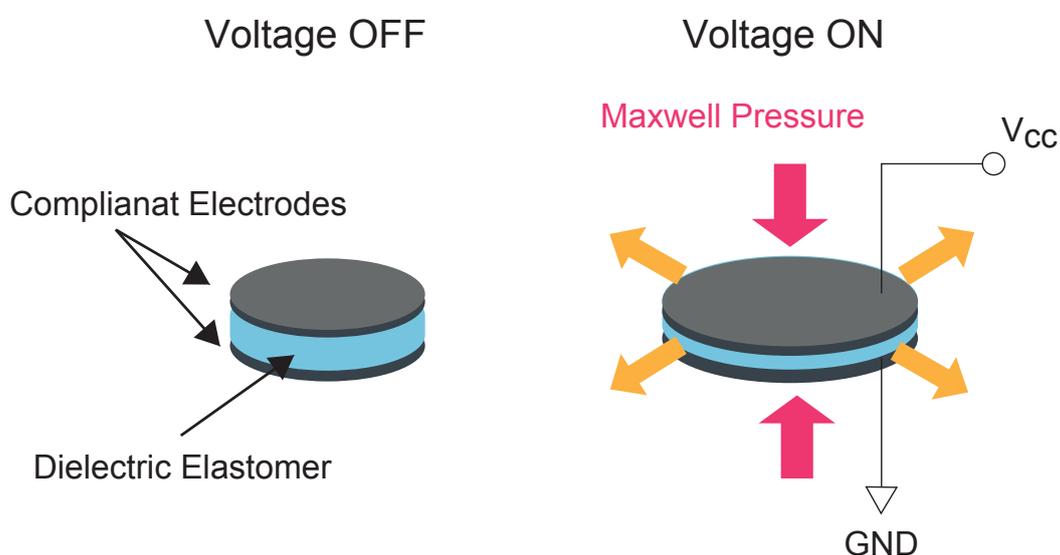


図2.14: 誘電エラストマーアクチュエータの構造と駆動メカニズム

2.3.3 相変化アクチュエータ

液体から気体への相変化現象を用いたアクチュエータも盛んに提案されている。Niiyamaらは加熱用の電熱ヒーターの電極パターンをディスペンサによって描画し、封止用の構造体を取りつけ、内部を誘電性の液体で満たしたパウチモーターを提案している [95]。このアクチュエータは図2.15の様にデジタルに設計し、加熱により溶媒を気化させることで、変形を起こすことができる。この加熱ヒーター回路部分をインクジェットプロセスで行う提案も報告されている [92]。デジタルに設計可能であるため、様々な形状やアレイ化が容易という利点を有している。

また図2.16の様に、溶媒をエラストマー中に細かく分散させ、加熱により気液変化を起こすことで膨張させるタイプのソフトアクチュエータも提案されている [85]。このアクチュエータは熱さえ伝われば変形を起こせるため、原理的には様々なスケールに構成可能な手法である。

相転移型のアクチュエータは大きな変位をもたらすことができるが、周辺環境の温度に依存するため細かな制御などは苦手である。

物理世界のインタラクションに関わるアクチュエータ技術を紹介した。研究領域のアクチュエータは電磁モーターや圧電素子に対して静かに駆動したり、アレイ化できるといった異なる特性を有している。新たなインタラクション体験の創出のためには、これらの特徴を活かしたアプリケーションの提案が望まれる。

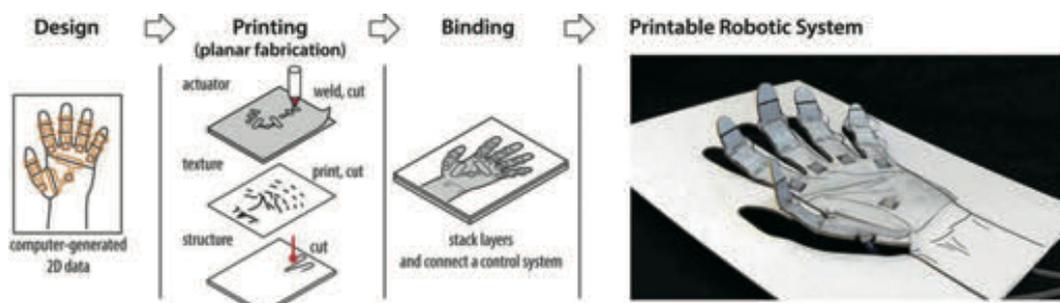


図2.15: パウチモーターの設計プロセスと外観 ([95] の Fig1 より引用)

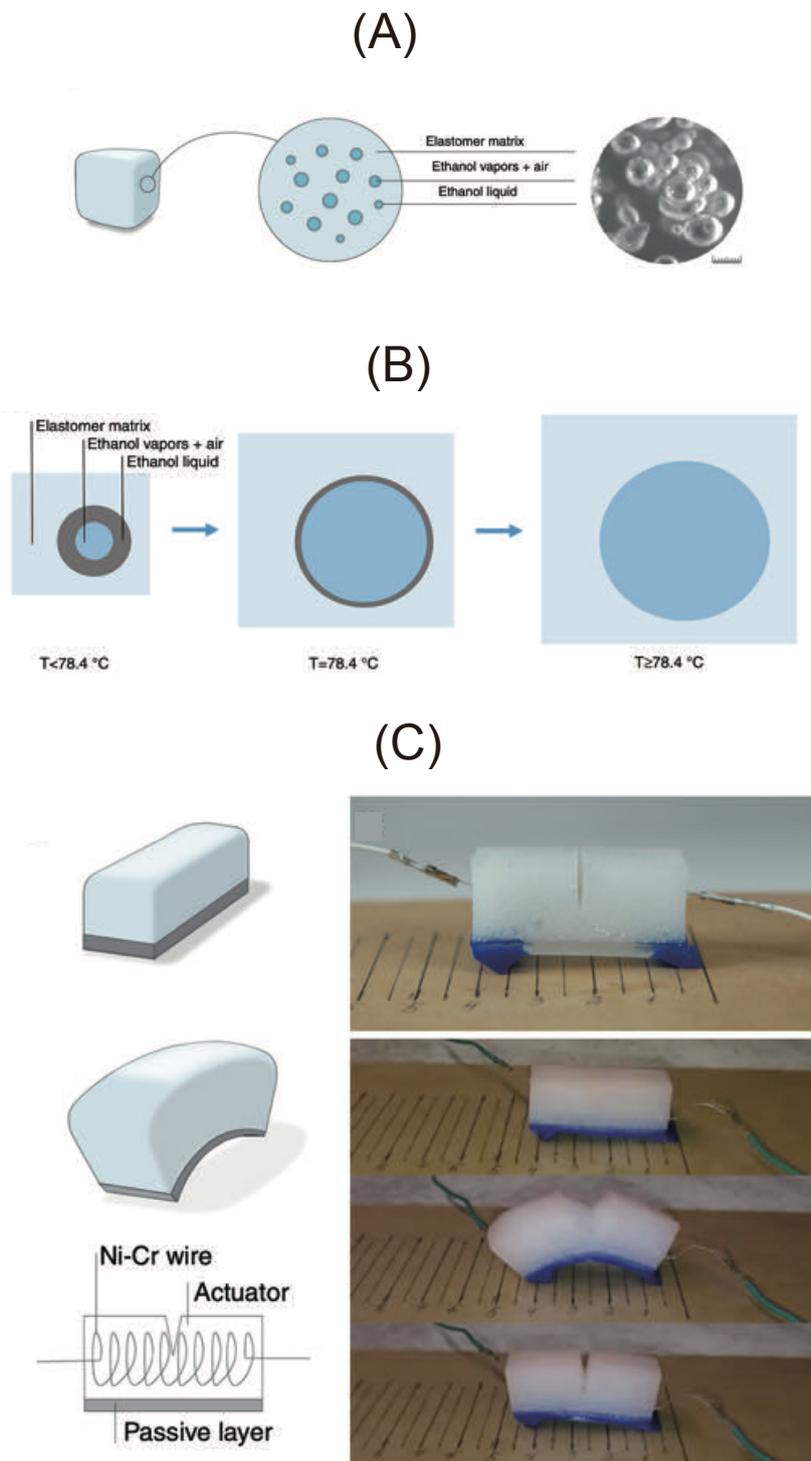


図2.16: エラストマーに溶媒を分散させた相転移アクチュエータ (A) アクチュエータの構造, (B) 駆動原理 (C) 内部構造と実際の駆動の様子 ([85] の Fig2, 4 より引用)

2.4 機能を付与するファブリケーションの研究

3D プリンタやレーザーカッター, CNC といった機器が普及することで, デジタルの設計通りに, 様々な材料の出力や加工が可能になりつつある [146]. 近年では材料を付加的に配置していく Additive Manufacturing 手法の領域で, 機能性材料や複数の材料を組み合わせる研究が盛んに行われている [74] [138].

Tibbits は環境に対して応答する材料をデジタルに設計することで, 出力した物質がある条件の時間経過と共に構造を自己組織的に作る 4D プリンティングを提唱している [134]. この手法では複数の材料をデジタルに出力するだけでなく, その物性を含めて設計することで, 出力後に特定の環境に置くことで, 意図した構造を得ることができる.

Kim らは磁性を有するソフト材料の構造設計と出力を行うことで, 磁力の変化と共に全体に様々な変形を起こせることを報告している [62]. 本手法では出力の前に磁界に対してどのように振る舞うかをシミュレーションすることが可能である.

Wehner らは図2.18の Octobot と呼ばれる内部で化学反応を起こし, 自律的に運動する柔らかなロボットを報告している [144]. Octobot は化学反応により生じた気体により, システムが所望の動きをする様にその流路の構造や燃料のタンクも設計して作られている.

材料を組み合わせることで出力した物質にセンサを直接統合する試みも行われている. Muth らはエラストマー型の歪みセンサをオブジェクトの筐体内部に埋め込む形で出力している [89]. 現在は溶解度や粘度といった条件の制約はあるが, この様なアプローチが発展していくことで, 柔らかなデバイスを内包させることも可能になりつつある.

この様に構造だけではなく, その物性 (材料) やインタラクション機能もコンピュータに設計する技術が日々進歩を続けており, 様々な機能を有したオブジェクトを直接出力できる様になりつつある.

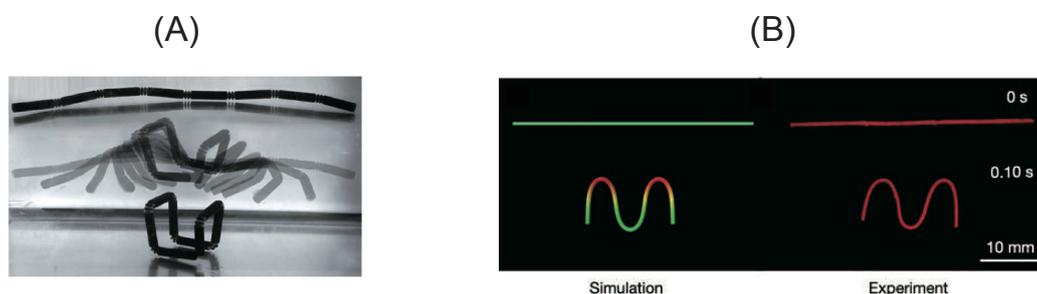


図2.17: 物性と構造を設計するファブリケーションの例 (A)4D printing により出力された物質の変形の様子 ([134] の 1 ページ目より引用), (B) 磁性と構造の設計のシミュレーションと実験の比較の様子 ([62] の Fig1 より引用)

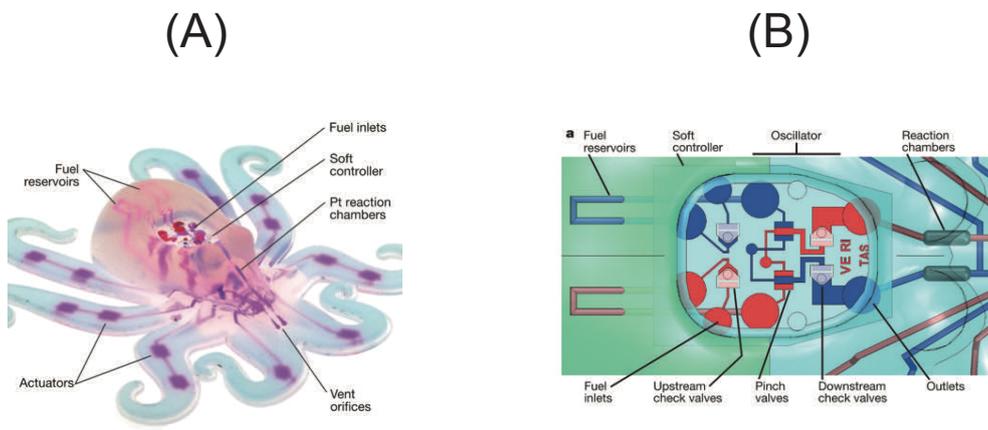


図2.18: 完全に柔らかな自律駆動ロボット Octobot (A)Octobot の外観, (B) Octobot の設計図 ([144] の Fig1, 3 より引用)

2.5 物理世界のインタラクションに関する研究

物理世界における情報とのインタラクションの研究を報告する。コンピュータの発展と共に情報は様々な形で活用されている。一方で我々が存在する物理世界では物質はその形状、テクスチャ、匂いといった様々な物理情報を内包しており、我々はそれらを直感的に扱うことができる。Ishii が Tangible Bits のビジョンを提案し、物理世界のオブジェクトがデジタルのピクセルを超えてよりシームレスに繋がるインタラクションの体験を提案してきた [48] [45]。物理世界とのインタラクションはデバイスを介した情報のインプットに加えて、フィードバックにはプロジェクションによる表現やアクチュエータデバイスを介した簡易化された力覚や音を中心に行われてきた [5] [47] [105] [14]。

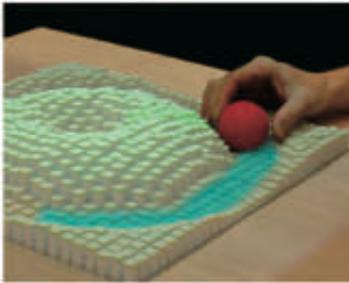
2000 年代になると材料やデバイスの技術も進み、曲げられる電子部品などが現れてきた [119]。2008 年には Holman によって Organic User Interface が提唱された [37]。ここでは触れる、曲げるといった行為が Graphical User Interface におけるポインティングやスクロールに対応しており、物体の形がそのまま情報に対応している。

2012 年には Ishii が Radical Atoms のビジョンを提案し、物質の形状がデジタル情報とシームレスに繋がる世界が様々な形式で提案された [24] [90] [73] [91]。図 2.19 の inFORM, inFORCE はアクチュエータアレイによって駆動するピンディスプレイシステムである。センサによってユーザーの手の位置などを認識し、これらのピクセルとインタラクションをすることができる。ピンアレイディスプレイのプラットフォームは色をプロジェクションで補いつつ、その硬さや弾性といった触感表現もピンにより表現することができる。

ピクセル以外の形でもセンシングと変形を伴うインタラクション体験が提案されている。PneUI では柔らかなエラストマー素材を入出力インタフェースとすることで物質の柔らかさや変形特性を活用したインタラクション体験を設計した [156]。この他にも空気圧ポンプにより硬さを変えるインタフェースやヒューマンスケールでインタラクションする体験が提案されている [23] [98] [113]。

物理世界のインタラクションではその入力信号も必ずしもセンサと組み合わせたものではなく、図 2.20 の様に、周囲の pH [55] をトリガーとするものや、汗などの水分によって変形するウェア [55] も提案されている。このような入力トリガーの多様性も物理世界の新たなインタラクションの領域として注目を集めている。

(A)



(B)

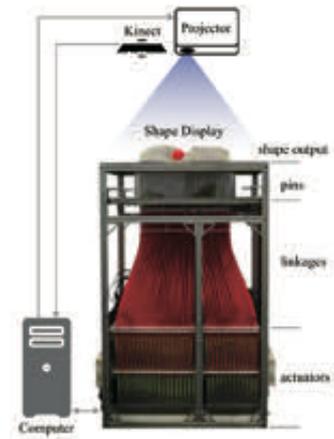
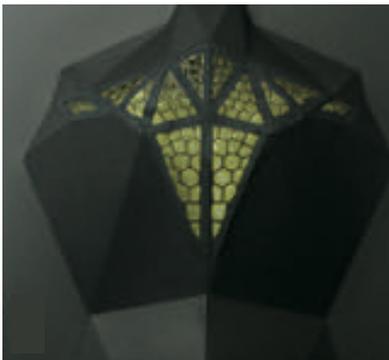


図2.19: inForm (A) インタラクションの様子, (B) システム構成図 ([24] の Fig1, 10 より引用)

(A)



(B)



図2.20: 環境に応答する物理インタラクション (A) 汗に応答して形状が変化する衣服 ([157] の Fig.1 より引用), (B)pHに応答して色変化するインタフェース ([55] の Fig27 より引用)

2.6 ソフトロボットの研究

柔らかな筐体をもつソフトロボットは Suzumori らに提案された [126]. エラストマーと空気圧ポンプを兼ね備えた構成で、電磁モーターと硬い筐体からなるロボットが苦手な柔らかいモノを取り扱うタスクや、捻り動作といった、その柔らかさを活かしたアプリケーションが提案されている。この構成は 20 年以上経過した現在も主流である。

災害救助用途ではその変形性が注目されており、高熱環境下などでも動かせるソフトロボットなどに発展を見せている [135]. また、Morin らはソフトロボットを駆動させる流体を工夫することで周囲の環境に合わせて見た目の色を変化させたり、温度を変えるとといったカモフラージュの機能を提案している [86]. この他にも、発光性の材料を内包させることで電気刺激により筐体を光らせることができるソフトロボットも提案されている [71]. この様に柔らかさに加えて別の物理変化を起こせるシステムが提案されつつある。このようなマルチモーダルな機能は擬態などを可能とし、環境中にインタラクション機能を有したノードをより自然に配置できる可能性を示している。

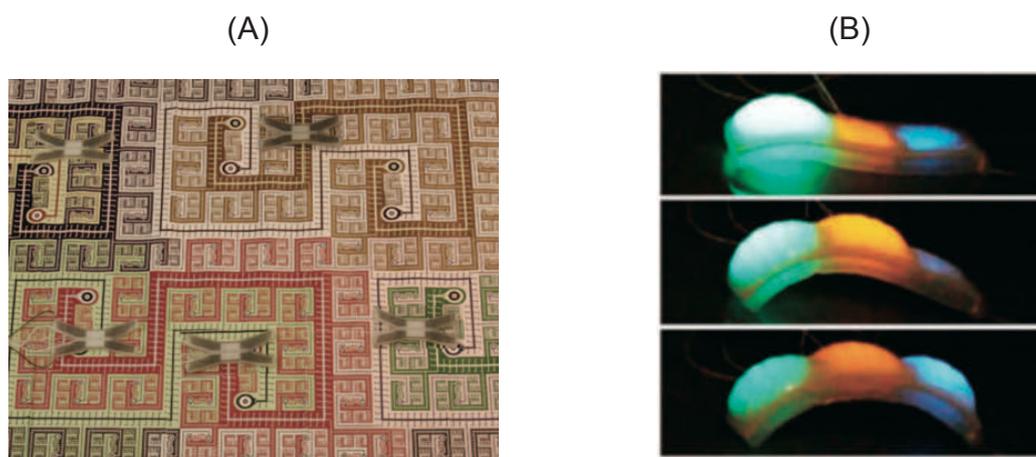


図2.21: 複数の物理変化を起こせるソフトロボット (A) 色付きの液体により背景にカモフラージュしたソフトロボット ([86] の Fig.2 より引用), (B) 発光と変形を同時に起こせるソフトロボット ([71] の Fig.4 から引用)

第 3 章

微細構造設計によるマテリアルへの インタラクション機能統合手法 の提案

本章では本研究のコンセプトを紹介する。前項で紹介したマテリアルへのインタラクション機能統合の課題について議論し、対象とするマテリアルや機能を拡張するための新たな設計法を提案する。

3.1 マテリアルへのインタラクション機能統合の現状と課題

第二章の機能統合の事例を見ると材料、デバイス、それらををを活用した物理インタフェースやロボットなどの応用領域、その設計手法と様々なレイヤーで物理世界とのインタラクション研究が行われている。

スマートマテリアルの様な物理信号を変換する機能を有する材料とデバイスの区切りは難しいが、本論文ではデバイスを複数の材料を組み合わせる構成された、ある決まった形状単位で機能を生み出す素子と定義する。

はじめに、機能の元となる材料とデバイスという異なる構成要素の研究が、それぞれどの様な機能を実現し、課題を抱えているかについて論じる。

3.1.1 スマートマテリアル活用の特徴と課題

デバイスは素子単位で所望の機能を実現するため、そのサイズ以下には分割できないという問題を抱えている。我々が通常入手できるデバイス（特にアクチュエータ）は数 mm から数 cm 程度のサイズを有しているものが主流であるため、非常に小さなスペースにはデバイスを設置することができない。

一方で、スマートマテリアルは機能をもたらす構造が非常に小さなスケールの微粒子や分子の構造であるため、デバイスでは設置が難しい箇所や形状にも、機能を付与することが可能である。スマートマテリアルの場合、材料は様々な形で供給される。例えばインク形状にして表面に塗工することで機能を統合したり、エラストマーやポリマー材料の硬化前にフィラーとして添加することで、機能を付与するといった手法が用いられている。この様にスマートマテリアルは物質に一体化させることで、様々な形状に対応可能なスケーラブルなシステムであることが特徴である。

スマートマテリアルはデバイスに比べると様々な形状に設計可能できる性質（形状随意性）を持つアプローチであるが、マテリアルをそのまま付与しただけでは、単一機能を反映させたシステムとなる。そのため、一般的に得られる情報はデバイスに比べると限定されてしまう。

3.1.2 新規デバイスの現状と課題

現在主流の無機半導体デバイスを活用する手法は安定で高性能なデバイスをそのまま活用できるという利点がある。しかし、硬い無機半導体をベースとしているため、広い面積や曲面を覆うといったことは苦手である。多くのエリアをカバーするためには、沢山のデバイスを配置することになり、物質が本来有する機械特性などが損なわれるというトレードオフが存在する。

機能や機械特性を維持しつつ、広面対応や曲面形状に対応するアプローチとして柔らかな電子デバイス(フレキシブルエレクトロニクス)や印刷プロセスによって大面積に形成される電子デバイス(プリンタブルエレクトロニクス)が研究されている。

柔らかな電子デバイスには、硬い材料の構造的工夫や、材料そのものを柔らかくするというアプローチが存在する。これらの柔らかな新規デバイスは、センシングやアクチュエーション機能を組み込める領域の拡張や、時には従来では損なわれてた物質の柔らかさを維持することができる。この技術を活用することで、変形を伴うインタラクションといった新たな体験の拡張に寄与することが期待されている [122]。実際にディスプレイや高度に集積された圧力センサアレイなど高度な機能を実現しつつある。また、三次元的に材料を組み合わせることで液体金属とエラストマーの事例 [141] の様により複雑な変形状態を取得可能なデバイスも提案されている。

しかし、デバイスの機能を拡張していくアプローチは、デバイス単位で機能するため、それより小さなサイズには分割できないという課題は従来と共通である。また、用途やサイズに合わせてその都度デバイスを設計する必要がある。無機デバイスの代替として利用する様な高性能なデバイスはクリーンルームや高精度の印刷プロセス用の装置が必要であり、少量多品種の用途向けに入手することは現在は困難である。そのため、スマートフォンなどの多くの数が販売されるプロダクトを中心に、曲面ディスプレイといった一部デバイスが採用され始めた状況である。

3.1.3 アプリケーション領域の現状と課題について

現在物理世界のモノに機能を付与する際の現状や課題について論じる。上で述べた様にデバイスと材料はそれぞれ異なる特徴を有している。そのため、アプリケーションの用途に合わせてより適切なアプローチが採用されている。

スマート材料を活用した物理世界でのインタラクション設計も行われている。これまでは材料分野でその原理や機能創出が研究されてきたユニークな素材を、実際にどの様なシーンで活用できるかについても提案がされている [55] [77]。スマート材料はデバイスでは難しい、紙や布といった素材を扱う事も多く、より物理世界のモノと一体化した形で

提案されている。その統合手法は浸漬やスプレー塗工、混錬といった料理や建築など、他分野でも用いられる技法も盛んに用いられている。色々な形状で機能が統合されてきているが、その機能は材料の機能がそのまま表出されることが多く、演算や複雑な制御を伴うインタラクション体験への応用は未だに難しい。

デバイスを用いた物理世界のインタラクション研究では、inFORM [24] の様にリアルタイムに物質の形状や特性が変わるシステムが提案されている。ここでは、形状変化を利用したより直感的な表現や触感情報の伝達など、情報と物質の世界がよりシームレスに接続された時のシナリオが提案されている。これらのプロトタイプのお多くは、硬い部品の集合体である。特にアクチュエータシステムの大型化や柔らかく、しなやかな物質への機能統合などは未だに大きな課題となっている。これは高度な入出力機能を伴うインタラクションの設計は未だにデバイスが主流であり、容易にアクセス可能で有用な代替手段がないことが、技術的な課題として存在しているためだと推察できる。

3.1.4 機能を統合しつつあるファブリケーション領域

これまで述べてきた様に材料とデバイスは異なる特性を有している。構造や材料を工夫し、新規のデバイスを開発するアプローチは複雑な情報を取得することができるが設計や作成が難しく、形状の自由度に制約を受ける。一方でスマートマテリアルを物理世界のインタラクションの世界に持ち込む場合には、機能する単位が細かいため、様々な形状やスケールに展開できるが、統合可能な機能はシンプルなものに限定される。

もし新規デバイス分野が実現している優れた機能とスマートマテリアルによる形状随意性の高さを両立しつつ、設計者が容易に設計可能な手法を提案することができれば、マテリアルへの機能統合で実現できる体験が大きく広がることが期待される。

この両立を行なっている取り組みの一つがスマートマテリアルとデジタルファブリケーション技術と組み合わせたアプローチである。モノを作り出すプロセスの領域がデジタル化され、物性という情報も活用することで、物質自体をよりコンピューショナルに設計することを目指している。このアプローチは時に、デバイスを作る手法として用いられ、時には、デバイスを物質に内包化させる取り組みとして行われている。現在は特定の材料向けに開発されているため、汎用的に使用できないことが多く、製造時間などに課題はあるが、発展が期待される領域である。

3.2 微細構造設計によるインタラクション機能統合手法の提案

前節で述べた様に、マテリアルの機能統合において、様々な形やスケールで機能を組み込む形状随意性と、より高度なインタラクションを可能にする優れた機能を両立させることができれば、物理世界におけるインタラクション機能統合により設計できる領域が大きく広

がると期待される。デバイスの設置自由度の課題は、特定の形状や構成で機能するという特徴から生じている。そのため、この問題を解決するためにはデバイスより細かな構成要素由来で機能が付与できる手法が求められる。

一方で、スマートマテリアルの機能は材料レベルの非常に小さい構成要素によってもたらされている。これらの材料は手作業で表面に塗工したり、混ぜこむといった簡単なプロセスを用いるだけで、マテリアル全体に一体化した形で機能を付与することができる。しかし、位置に応じて異なる制御をしたり、材料が有する以上の複雑な機能を持たせることは難しい。

我々はデバイスの形状随意性の向上とスマートマテリアルの高機能化を両立するために、デバイスよりは細かく、分子構造よりは大きな微細構造の領域に着目した。

例えば、柔らかいデバイスの先行研究例をみると、デバイスを構成する要素である配線や基材の構造を工夫することで、柔らかさを実現している例が見られる [111]。トランスデューサ部位は硬いが、配線のレイアウトを馬蹄形に印刷することで伸縮性を持たせている。この事例ではデバイスより小さな構成要素である配線の機能が構造により拡張されたと捉えることもできる。この他にも、前章で紹介したフォトリフレクタにより変形を推定する手法 [123] ではクッションの内部に詰める素材に綿の様な空隙構造を有する材料を用いることで、柔らかさに加えて、変形時に光学反射特性が変化するという特性を活用している。

この二つの事例では微細構造が材料の機能を拡張している。微細構造は、デバイスより小さな構成単位で、機能を拡張可能な設計要素である。私たちはスマートマテリアルの高機能化とデバイスの形状随意性の向上を目的にこの微細構造の領域を様々なアプローチとスケールで実装することで、材料とデバイスの領域を繋げることを提案する。

また、実際に設計手法として活用されていくためには、アクセスするのが困難な特殊な装置ではなく、個人でアクセスが容易なパーソナルファブリケーション装置や材料の組み合わせにより実現されることが好ましい。この製造上の制約条件も含め、我々が活用できるモノづくりのプロセスやファブリケーションを用いて、図3.1のデバイスと材料の中間領域における機能設計手法の確立を目指す。

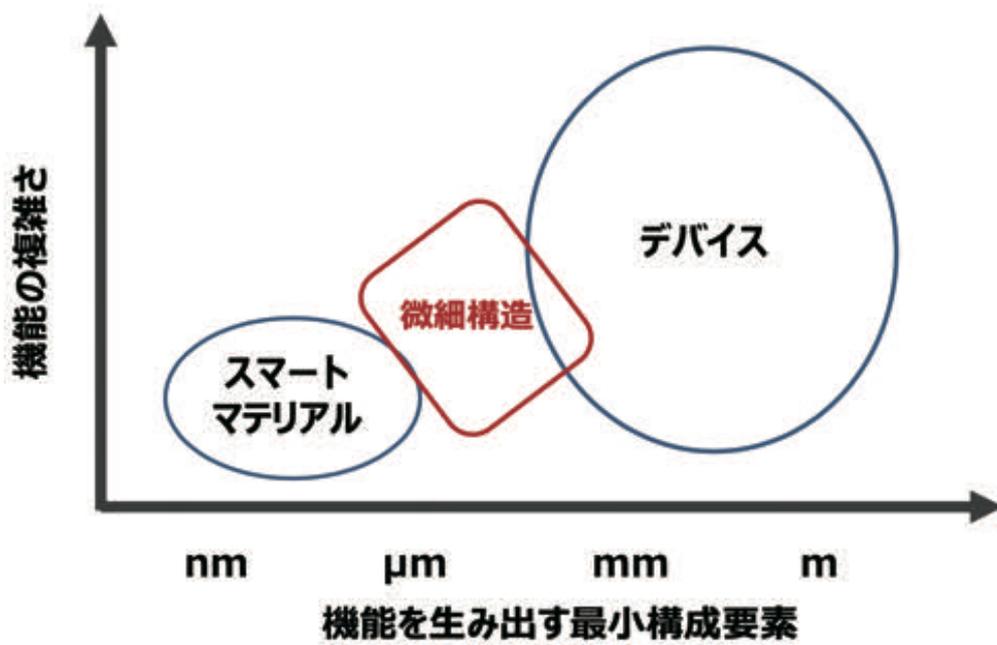


図3.1: 機能を生み出す最小構成要素と機能の複雑さにおける微細構造設計の位置付け

3.3 微細構造設計による機能付与のアプローチ法

織物やスポンジの様に我々の身の回りのモノにはすでに織や多孔質といった微細な構造を有している材料が存在する。微細構造により機能を付与する今回の提案では、組み込む対象が元から有する微細構造を活用するか、あるいは構造自体を設計するといったアプローチも考えられる。構造を設計する場合にも、パーソナルファブ리케이션装置などアクセスが容易なシステムによって作られることもあれば、現在モノづくりに利用されているプロセスをそのまま活用することも考えられる。

一方で材料の機能は静的な物性を活用するか、スマートマテリアルの様にトランスデューサ機能を有する物質を活用するか、あるいは用途に合わせて材料自体を設計するといった視点も考えられる。

インタラクション機能を付与・向上させるために、新たな機能を有する材料を作り出すか、あるいは構造的工夫により、その機能を拡張していくのかについては議論すべき点である。

我々は下の五つの手法でインタラクション機能の統合を試みた。また、そこで得られた知見から各手法がどのような用途に適しているか、物理世界におけるインタラクション設計でどのように活用されていくかについて論じていく。

- 入手可能な材料の組み合わせと構造化
- 既存のモノづくりプロセスの活用
- 材料が有する微細構造の活用
- 材料の分子構造を設計する手法
- 微細構造を設計する手法

3.3.1 既存のプロセスや材料を活用する手法

上に挙げた五つのアプローチは大きく分けて二つの立場に別けられる。一つはすでに存在するモノづくりのプロセスや材料そのものを活用する立場である。具体的には下の様な手法を提案する。

入手可能な材料の組み合わせと構造化

4章では入手可能な材料を目的に合わせて適切に組み合わせ、構造化することで機能を拡張する事例を紹介する。この事例では複雑な材料はプロセスを用いなくても、実世界のインタラクションを設計する上で材料に求められる特性を調査し、身の回りの材料の特性を上手く活用する構造を作ることで、ユニークな機能を実現する。どの様に材料の機能を選定し、拡張していくか、そのプロセスを構築する試みも行なっている。

既存のモノづくりプロセスの活用

私たちの身の回りにはすでに微細な構造を内包した材料も多く存在する。その様な材料が作られるプロセスに適切にスマート材料を導入することができれば、従来の製造プロセスを踏襲しつつ、機能を組み込めると考えた。このアプローチでは従来の装置を転用することで効率にモノを作ったり、組み入れる材料を選択することで多様なバリエーションが構築できる可能性に着目した。5章で西陣織のプロセスに着目し、緯糸に様々な材料を組み合わせることで、様々なインタラクション機能を統合した。

材料が有する微細構造の活用

材料が元から備えている微細構造を活用するアプローチも考えられる。この場合は新たに設計者が微細構造を付与、設計する必要がないという利点が考えられる。実際に材料の構造を活用することで、どの様な体験の構築が可能になるかについて、6章で多孔質体と導電性のインクの組み合わせる手法を提案し、センシングの機能の拡張を試みた。

3.3.2 材料や構造を設計する手法

上の三つの手法はすでに存在し、容易にアクセス可能な材料やプロセス技術を活用したアプローチである。しかし、上のアプローチはあくまで既存の材料やプロセスの活用であるため、所望の要求を満たす材料と構造の組み合わせが、見つからない様なケースも存在するであろう。この様な場合は、新規の材料を開発するか、微細構造を設計することが候補として考えられる。

材料の分子構造を設計する手法

材料を設計するアプローチでは m, 7章の自励振動ゲルの材料の分子設計を例に材料開発により機能設計空間がどの様に広がったか、どの様なシーンに材料設計が必要となるかについて議論する。

微細構造を設計する手法 機能を付与する材料の微細構造を設計、付与するアプローチも考えられる。デジタルファブリケーション装置を用いると、数十 μm の積層ピッチで材料を意図した形に重ねたり、1mm 以下の精度で材料を加工することが可能である。微細構造を設計するアプローチは加工の手間が必要になるが場所によって異なる構造を導入できたり、構造と特性の相関が分かれば、どの様な機能がもたらされるか予想できるという利点がある。8章で、微細構造を設計することで、アクチュエーション機能を付与する試みを行なった。次章以降でそれぞれのプロジェクトの詳細について紹介していく。

第 4 章

入手可能なマテリアルの組み合わせ と構造化による機能統合手法

4.1 マテリアルの組み合わせと構造化手法の背景

本章では身の回りの存在するマテリアルやプロセス技術を活用して、それらを構造化していくことで目的に合わせた機能を得る手法について論じていく。この手法は特殊な材料やプロセス装置を使わないため、誰にでも実施できるが、設計できる範囲が手作業などで実施できる範囲に留まるという課題を有している。具体例として、機能を有したハードウェアを試作するためのプロトタイピング手法を取り扱う。特定のシーズ技術からではなく、課題からマテリアルに必要とされる機能を抽出し、それを解決するための機能を統合するプロセスを紹介する。

機能を有するハードウェア制作プロセスの背景

オープンソースハードウェアやデジタルファブリケーション装置はデザイナー、メイカー、教育など様々な領域の関心を集めている。特にデスクトップ型の 3D プリンタやレーザーカッター、CNC マシンなどは物理世界において所望の形状を作ることをより容易にしつつある [128]。また Thingiverse [133] の様に三次元のモデリングデータを共有できるウェブサイトなどのサービスが存在することから、様々な形状のオブジェクトを容易に入手できる様になっている。しかし、3D プリンタによる三次元のオブジェクトの作成はいまだに時間がかかり、特にその形状を試行錯誤しながら設計したい様な状況では、3D プリンタ等が適さないケースも存在する。そのため、図4.1の様オブジェクトの一部を高速に造形したり、必要に応じて、元の形状に戻せるといった様々なファブリケーション技法が提案されている。

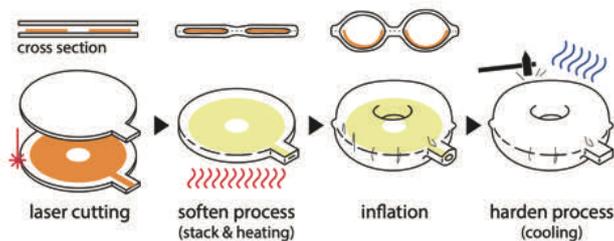
Protopiper [2] は持ち運び可能な装置からテープを筒状に丸めながら射出することで、リジッドな構造体を射出可能なデバイスである。これらをフレームとして組み合わせることで、様々な形状のオブジェクトを試作できる。BlowFab [153] は PET フィルム、カプトンテープ、マスキングを重ねたシート状の素材をレーザーカットし、温めながら空気を入れることでオブジェクトを膨らませて造形する手法である。非常に短い時間で 3 次元の頑強な構造体を作ることができる。ProtoMold [152] はピンアレイ構造とバキュームフォーミングを組み合わせたファブリケーションマシンでピンアレイの構造に合わせた三次元構造体を作り、再び加熱することで元の状態に戻すことができるシステムである。

これらの手法は特定の用途で有効であるが、装置は市販されておらず、また手法毎に得意な形状なども決まっている。本プロジェクトでは特に、物質に機能を組み込んだ様々なプロダクトを作る（電子工作を行う）デザインスクールの学生達を対象に、彼らの創作をサポートするための三次元形状のモデリング手法の提案を行なった。

(A)



(B)



(C)

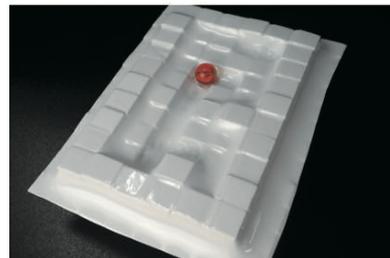
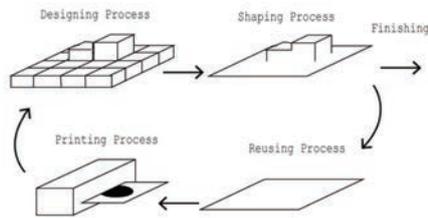


図4.1: ファブリケーション手法の先行例 (A)Protopiper 左: 装置外観, 右: 造形時の様子, ([2] の Fig.1, 6 から引用) (B)BlowFab 左: プロセス図, 右: 造形サンプルの外観 ([153] の Fig.2, 18 より引用), (C) ProtoMold 左: プロセス図, 右: 造形サンプルの外観 ([152] の Fig.2, 4 から引用)

4.2 ユーザーリサーチの実施

User-Centered Design のプロセスは, 現在の状況やそこに存在する課題を理解するために, 活用されるプロセスの一つである [1]. 我々はいくつかのステップに分けながらユーザーの特性と課題を発見するためのユーザーリサーチを実施した.

はじめに様々なプロトタイプ活動を行うユーザーに対するインタビューと実際に製作する場所の観察・調査を行なった。エキスパートから中級レベルのユーザーを中心にデザインスクールの学生やメイカーズスペースで製作活動を行っている 10 名に対して実施した。本文中では、この様なプロトタイプを通じた製作活動を行うユーザーをデザイナーと表現する。場所はデザインスクール、メイカーズスペース、ハードウェアスタートアップ会社、大学(二箇所)を訪問し、そこで活用されているツールやその選定理由などについてもオンサイトでヒアリングを実施した。

4.3 インサイトの抽出

4.3.1 観察の結果の概要

プロトタイプで実際に作成したモノやその目的といった情報について整理すると、ひとえにプロトタイプといっても、[図4.2](#)の様に大きく分けて四つに分類できることが分かった。デザイナーは一般的にプロジェクトの初期の段階では、簡単なプロトタイプから開始する。これはエンドユーザーや自身が形にしたモノからさらなる情報を得るためである。Initial Prototype では特に簡単なイラストや機能も文字として表現される場合も多い。またこの段階では紙やダンボールといった材料を用いて試作する人も存在した。

次の段階ではデザイナーは状況に応じてより解像度の高いプロトタイプを行う。一つは見た目の解像度をあげた Appearance Prototype である。モノを伴うプロトタイプではこの段階で CG や 3D プリンタによるモックアップを作る行為が該当する。もう一つは作成するモノがもたらす機能についてフォーカスしたプロトタイプである。電子工作やプログラミングなどを用いながらインタラクション機能を実装したり、機構や形状が重要なモノであればその特定の部位のみを試作する。

そしてプロトタイピングの最終段階ではデザイナーは、機能的な部位と視覚的な構成要素を組み合わせ、実際の体験にさらに近づけた Working Prototype を作る。実際のプロトタイプのプロセスはこの様に線形ではなく、プロトタイプの過程で得られたアイデアやユーザーテストなどを通じて、これらのプロセス間を行き来する。そのためプロトタイプのプロセスは時に何度も繰り返される。

このプロセスにおいて、デジタルファブリケーションツールは重要な役割を果たしている。一つはユーザーの設計した形状などをそのまま出力できる正確性が挙げられる。これは市販されていない複数の部品を作成する時などにも有効である。また形状によっては複雑な加工工程の時間を大幅に削減することができる。

デザインスクールでの一週間の製作プロジェクトを観察していると興味深い現象が見られた。製作初期の Initial Prototype の段階では多くのデザイナーが紙やダンボールを用いて試作をしていた。ファブリケーションツールでは、3D プリンタはほとんど使われず、代わり

にレーザーカッターとMDFが紙などと併用して使用されていた。これはInitial Prototypeの行程では加工による形状の精度はそこまで必要でなく、速度の方が重視されているためである。プロジェクトが進んでいくと、徐々にプロトタイプの筐体などを作るパートで、3Dプリンタなどの稼働割合が増えてきて、段々と列ができる様な状態になっていた。

Working Prototypeの段階になると、ユーザーテストのフィードバックを受け形状などを再考しなくてはいけないケースなども生じ、モノづくりの経験があるデザイナー達でも設計を修正する場面が度々見られた。

このような状況を鑑みて、我々は下の様な仮説を立てた。電子工作を伴う様なフィジカルプロトタイプにおいて、現在のWorking Prototypeより早い段階で、機能とある程度のサイズ感や見た目を確認できるMid-Fidelity(中解像度)のPre-Working Prototypeをサポートするツールが提案できれば、プロトタイプのプロセスがより多様化し、効率的にモノの設計ができるようになるのではないかと考えた。

4.3.2 課題認識

Initial Prototypeの様子を見てみると一部のデザイナーは紙などで作った構造体を活用して、そこに電子回路などをテープで固定するなどの工夫をすることで簡易的なWorking Prototypeを作成していた。しかし、観察とインタビューから次の点が解決されていないことに気づいた。

- 材料強度の不足
- 材料の統合性の欠如
- ツールの制約

材料強度の不足は言葉の通り、紙や割り箸といった身の回りのオブジェクトを用いて形状を作った場合には、しばし強度が足りず満足したWorking Prototypeが作れていないことがわかった。デザインスクール等では様々な木材などが作業場に存在するが、自宅での作業などでは特に困っているデザイナーが見られた。

二つ目は電子部品をインストールする手法である。セロハンテープなどで貼り付けるケースが多いが剥がれやすかったり、配線が綺麗に収まりづらい等の課題が存在した。また粘土やグルーガンで固めた場合には、部品を再び分解して使用するのが難しい様であった。配線や部品の収まりがよく、ブレッドボードの様に簡単に位置や配線を変えられる様なソリューションが好ましいと思われる。

三つ目はツールの制約である。上の二つの様な課題があるため、強度を確保しつつ、電子部品も綺麗に納めたいデザイナーはレーザーカッターを使用するケースが多かった。しかし、レーザーカッターは比較的高価であり、個人で所有することは難しい。また使用頻度が高い

機器であるのでなかなか使えないという状況も見られた。我々は、アクセスが難しいファブリケーションマシンを極力用いずに、手と簡単な文房具等で Working Prototype を構成できるソリューションが好ましいと考えた。

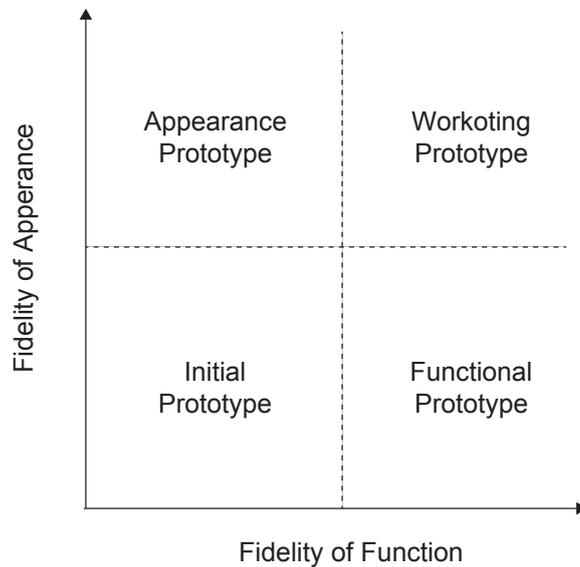


図4.2: プロトタイプの種類

4.4 要求性能の仮説とカスタマージャーニーマップの作成

Working Prototype の作成を助ける手法の提案にあたり、これまでのユーザー調査で得られた知見を元にデザイナーのモノづくりのプロセスを図4.3の形でまとめた。

ここでは、プロセスを五段階に分けている。一番上の行では実際に行う活動内容を表している。二行目はユーザーにとっての課題を書いている。そして一番下の行には、この状況と前節のインサイトから我々の提案手法に求められる機能を記載している。

4.4.1 ユーザーの体験プロセスの説明

PLANNING

PLANNING の段階ではデザイナーはスケッチやディスカッション、先行事例などを調査しながらアイデアを膨らませる。ここでどの様に実装するか、どんな素材が必要かといっ

た基本的な情報を整理する。我々が提案する手法は、この構想段階に置いてアイデアの創発を助けられる手法であることが望ましい。また、これまでのプロトタイプのプロセスと互換性があり、新たな学習コストを極力支払わずに進められることが重要となる。

PREPARATION

準備の段階では必要な素材を入手する必要がある。オンラインまたはオフラインで材料を購入する。基本的には簡単、安く、早く入手できるアプローチが好まれる。

DEVELOPMENT

製作の段階ではプロジェクトによって機能を実装したり (Functional Prototype)、三次元の形状を作る (Appearance Prototype) を行う。チームプロジェクトの場合はメンバーで分担して同時並行に進めるケースも存在する。プロトタイプが形になってきた段階で、両者を統合し、Working Prototype を作成する。このプロセスではどの様に動くか、どの様なサイズ感になるかといった情報と共に、これらをどうやって統合するかが、デザイナーにとっての課題となっている。意図した形を作りやすいこと、機能を統合しやすいこと、分解しやすいことが重要となる。

USE

使用のプロセスはプロトタイプまたは完成品を実際の使用環境で機能させる段階である。自分が使うこともあれば、作り方を文書化したり、時には人渡すといったことが考えられる。Working Prototype の場合は実環下でどう機能するか、プロダクトとしてどの様に感じるかが評価される。この段階で使用するには、プロトタイプがある程度の強度を持つ必要がある。

KEEP/DESTROY

実際に使用できるモノになったあとは、そのまま使い続けるか、分解して一部要素をリサイクルする、破棄するといった行動するが考えられる。そのまま利用する場合は特に問題ないが、リサイクルや破棄を行う場合には、部品のリユースや簡単に破棄できることが重要になる。そのため我々の提案手法も分解性能と容易に捨てられるという点が重要な要素となる。

ユーザーの体験マップを元に提案手法に要求される機能を図4.4の形で整理した。提案手法は特殊なファブリケーションや知識を用いずに設計できる手法であり、大きく分けて「モデリング機能」と「統合機能」を満たすことが期待される。

4.4.2 必要とされる機能

統合機能

統合機能は Working Prototype を作るために、筐体となるパーツ同士や電子部品、配線を統合できる機能である。簡単に取り付けられるというと同時に、容易に取り外し分解できる機能がデザイナーにとっては重要となる。

モデリング機能

モデリング機能は形を簡単に加工、設計できると共に、その形を保持できる特性である。加工などは特殊な装置を用いずに文房具程度で設計できることが好ましい。また使用用途に応じて、その環境中でプロトタイプに加わる負荷に対して耐える必要がある。

その他の要求

上の二つの特徴に加えて、Working Prototype に使用するにはコストが安いこと、そして安全に使えて廃棄が容易であるといった特徴が求められる。実際にレーザーカッターによるプロトタイプで用いられる MDF やアクリル板といったマテリアルもコストが高いという意見も出ており、紙や粘土程度の価格や扱いやすさで Working Prototype が構成できることが望ましい。



図4.3: 機能をもつ製品作成のプロセス

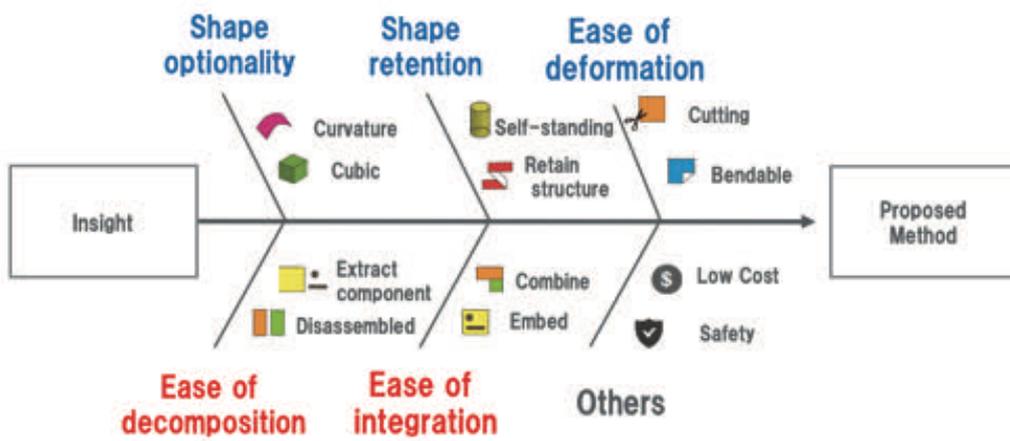


図4.4: 提案手法に求められる機能のまとめ

4.5 モデリングと統合機能の実現法の探索

4.5.1 アプローチ法の検討

前節までに要求される機能を提案した。実際にその機能を満たすためにどのような手法でアプローチするかについて検討を行なった。ユーザーリサーチですでにデザイナー達が Initial Prototype に用いている材料は、彼らの現在のモノづくりのプロセスに親和性が高いと考えた。具体的には粘土、紙、ブロックの3つのアプローチに着目した。これらそれぞれのアプローチに対して、前節で重要と考えたモデリング機能と統合機能をどの程度満たせるか実際に試作をしながら検討をした。検討の様子を図4.5に示す。

粘土

粘土は安価であり、直感的に扱える素材である。柔らかく手で触れたままに形状を作ったり、鋳型を利用することができる。またユニークな特徴として紙粘土は乾燥させると固めることができる。また統合機能では電子部品と電氣的に接続するために導電性のカーボンペースト (Bare Conductive Inc., SKU-001) を添加して回路と接続できることを確認した。粘土を活用したアプローチは、NeonDough [151] の様に、内部に素子を埋め込むことも可能である。

紙

紙も Initial Prototype でよく用いられる材料の一つである。容易に切断することができ、折り曲げることで様々な形を作ることができる。一方で面で構成されており、強度は高くないので作れない形も存在する。折りによっても複雑で強い構造を作れる可能性はあるが、折り手法の知識やその構造を作るための折り技術が必要となってしまう。形状の維持は素材としての課題となっている。機能統合では面という紙の形状特性を活かし、導電体や素子を表面に貼るといったアプローチが可能である。

ブロック

レゴなどのブロックは様々な形やスケールに展開できるため、プロトタイプにもよく活用されるツールである。また近年ではレゴのパーツもマインドストームシリーズの様にプログラミング可能なモジュールが提案されており、その活躍の幅を広げている。一方で曲面構造の実装には解像度が落ちたり、硬いコンポーネントのため、変形させながらモデリングすることは難しいという課題がある。また形状の維持自体は容易であるが、外れ易いため力が加わる様な用途では接着するといった工夫が必要となる。

各アプローチが要求性能に対してどの程度満たし得るかを図4.5と図4.6にまとめた。手法

毎に得意な点と苦手な点が存在していることがわかる。粘土は基本的にモデリング機能を満しているが、一方で埋め込んだオブジェクトを分解して取り出すといった試行錯誤が難しい。紙は強度に課題はあるが、形の加工が容易で、多少収まりは悪いが、機能部位をテープなどを介して取り付けることができる。ブロックは組み立て分解が容易でスケールもしやすいが、曲面構造や複雑な形状の設計が難しい。

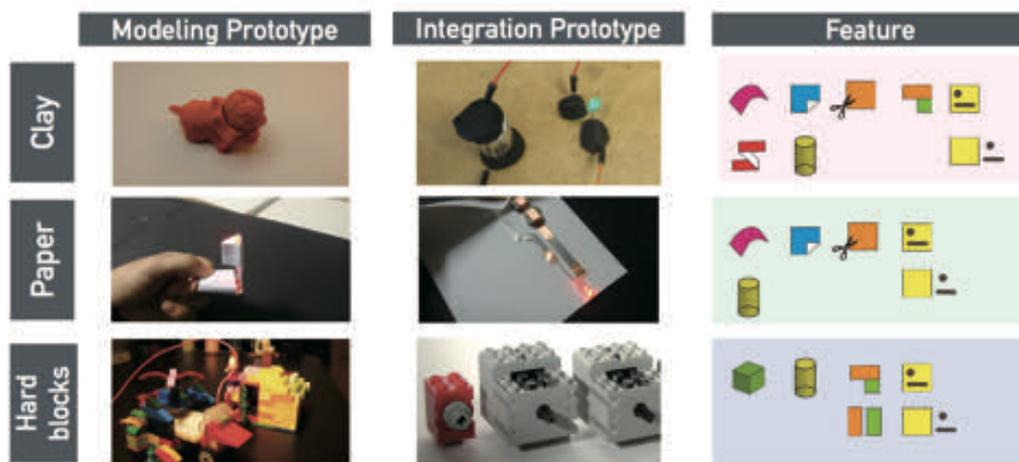


図4.5: アプローチ法探索のためのプロトタイプの様子

MATERIAL	MODELING FUNCTION			INTEGRATION FUNCTION	
	SHAPE OPTIONALITY	EASE OF DEFORMATION	SHAPE RETENTION	EASE OF INTEGRATION	EASE OF DECOMPOSITION
CLAY	○ (Curvature)	○ (Malleable)	○ (Stable)	○ (Embed)	× (Hard)
PAPER	○ (Curvature)	○ (Malleable)	× (Fragile)	△ (Tape)	△ (Possible)
HARD BLOCKS	△ (Curvature NG)	× (Curvature NG)	△ (Self-standing) (Fragile)	○ (Easy integration)	○ (Easy disassemble)
TARGET	○ (Curvature)	○ (Easy manipulation)	○ (Self-standing)	○ (Easy integration)	△ (Extract components)

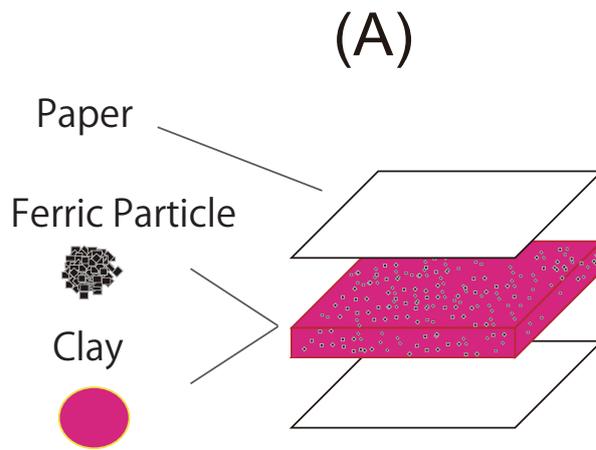
図4.6: 材料の特性比較

4.5.2 提案手法

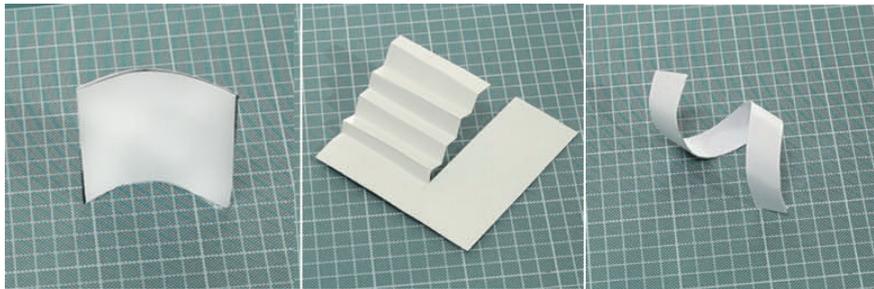
前項の様に現在使われているマテリアルをそのまま活用すると、それぞれに課題が存在する。我々は各マテリアルの特徴に着目し、その機能の統合を試みた。具体的には図4.7(A)の様に、紙の間に磁性体を混ぜ込んだ粘土を挟み込んだ構造のマテリアルを考案した。

粘土は乾燥と共に硬くなる安価な紙粘土、磁性体は市販の磁性シートをハサミで細かく1mm程度のサイズに刻んだ物を使用している。はじめに、図4.8の様に粘土にハサミで刻んだ磁性シートを混ぜ込む。続いて、粘土の層が1mm程度になる様に、ヘラで薄く伸ばす。このマテリアルは乾燥する前は粘土も柔らかいため、図4.7(B)の様に手で様々な形を作ることができる。また普通の紙とは異なり乾燥が進むと内部の粘土が硬化し、その形状を維持することができる。紙で作成したプロトタイプへの機能の実装は通常はテープなど他の道具を活用して固定するが、本提案では電子部品側にマグネットのコネクタを設けることで、電子部品を直接紙に貼り付けることができる。配置した部材はブロックやブレッドボードの様に、簡単に取り外すことができる。

配線材料も先端にマグネットを固定したコネクタを用いることで、簡単に接続をすることができる。配置し、機能を確認したあとに配線をよりシンプルにまとめたい場合は、図4.8の様に導電インクペン (AgIC Inc., Silver Ink maker)) などを用いて配線部位を平面上に記入することも可能である。マグネットコネクタを備えた電子部品は電池、スイッチ、スピーカー、可変抵抗などを試作した。



(B)



(C)

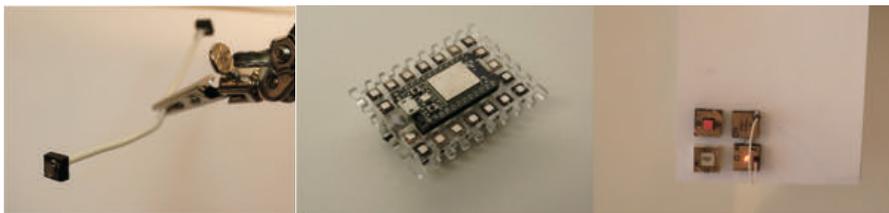


図4.7: 提案手法の概要 (A) 磁性と硬化の機能を付与したマテリアル, (B) 提案手法で作成した三次元の硬い構造体, (C) マグネット式電子部品モジュール

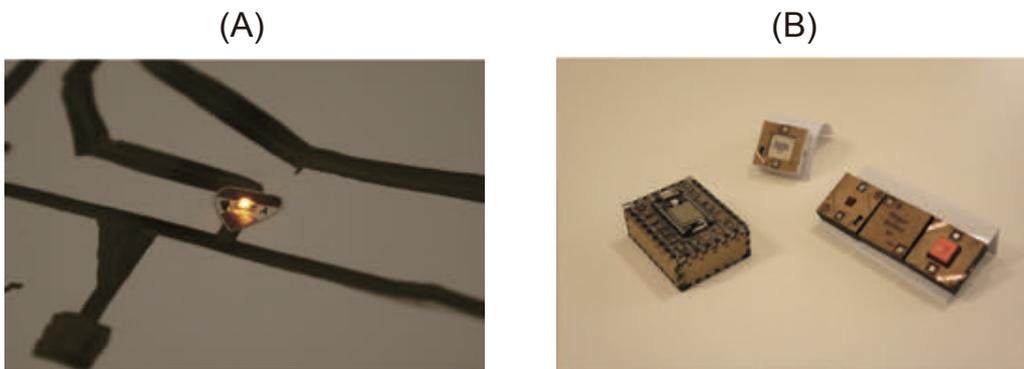


図4.8: 提案手法による機能統合の様子 (A) 導電インクによる配線の様子, (B) マグネットコネクタを備えたデバイス部位 (左: マイクロコントローラ, 中央: スピーカー, 右: LED, バッテリー, スイッチ素子)

4.6 ユーザーテストの結果と改善策の提案

提案手法の紙を五枚、様々な長さのマグネットワイヤ、基本的な回路部品のブロック、銀インクペン等を用意し、それらを用いて作品を三組に作っていただいた。その様子を観察とインタビューにより、フィードバックを集めた。ユーザーテストの様子を図4.9に示す。

主に下の四つのポイントについて気づきを得て、実際に図4.10の追加要素を考案した。

マテリアルの選択肢の追加

提案した新規の紙材料は手と簡単な文房具で加工し、オブジェクトを形成することができた。ユーザーは色々な形状のオブジェクトを通常の紙の様に直感的に組み立てることができた。一方でボックス型の様な構造の場合、折り目の部分は粘土成分が硬化しても曲がり易く、梁構造などが必要な場合も見られた。またユーザーからは完全に硬化しなくとも、ある程度の硬さで作成後も形状を変化させることが可能な中間の硬さの紙が欲しいとの意見をいただいた。構造を支えるのではなく、スタイリングを気にする様な部位に適していると考えられる。中間の硬さはシリコン粘土などが利用でき、粘土と同様に磁性の付与が可能である。また、紙材料が表面にくることで、ブロックの設置箇所やデザインを直接書き込むといった紙の機能も積極的に活用されていた。

オブジェクトコネクタ

本手法では電子部品とオブジェクトの統合に目を向けていたが、ユーザーのテストでは、構造体同士を接続したいシーンも見られた。のりなどを用いて接続することもできるが、強度が低く、取り外しが容易でないという課題が見られた。試作用に図4.10のジョイントを追加で設計した。このジョイントはネオジム磁石の表面に、粗いフリクションテープが巻かれた構造をしている。このジョイントで紙の接合部付近を挟むことで、接合部位をつなげることができる。外力が加わる状況では強度が不十分なケースもあるが、形状を触りながら試行錯誤したい場合には、有用なツールとなり得る。

回路コネクタ

銀インクペンで配線を設計した場合、マグネットコネクタによる配線端子では接続が外れやすいという問題が生じた。接点の安定性を改善する為に、面積が大きく磁力の強いコネクタパーツを設けることで、安定して銀インク回路と接続できる様にした。このコネクタ部位は、複数の配線を集約する際にも有効に活用できた。

電子部品コネクタ

用意された電子部品以外にも、すでに所持している電子部品をそのまま活用したいとの声をいただいた。我々は電子工作のプロトタイプツールとして知られている電子ブロック LittleBits [78] を取り付け可能なコネクタを設計した。LittleBits モジュールをコネクタに載せることで、我々の提案手法に適用できるようにした。LittleBits にはブレッドボード型のモジュールも存在するため、ディスクリートの部品も用いることができる。

(A)



(B)



(C)

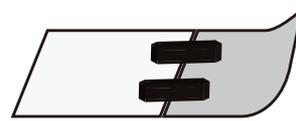


図4.9: ユーザーテストの様子 (A) 作成するオブジェクトの作り方を検討している様子, (B) 提案手法の紙を加工する様子, (C) モジュールの特性を調べている様子

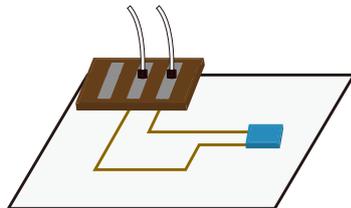
(A)
Material Options



(B)
Object Connectors



(C)
Circuit Connectors



(D)
Block Connectors

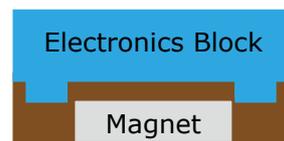


図4.10: ユーザーテストから考案された追加要素 (A) 硬さを選択肢の追加, (B) オブジェクトコネクタ, (C) 回路コネクタ, (D) 電子部品コネクタ

作品例

本提案手法を用いて作成した Working Prototype の例を図4.11に示す。(A)はモーターやライトを内臓したラジコン型ロボットである。ロボットの無線操作には LittleBits のラジコンモジュールを用いている。LittleBits のモジュールは筐体の内側に電子部品コネクタを介して設置されている。このプロトタイプは着手から約2時間半で作成された。

(B)は家の形をしたオブジェクトでボタンを押すと内部のマイコンにシグナルが送られて、ライトが光ると共にメールが発信される。筐体が硬いので、安定した置物として長期間の使用にも耐えると思われる。2時間程度の時間で作成された。

(C)壁などに貼り付け可能なユーザーインターフェースである。平面状に配置されたボタンやスピーカー、マイコンなどを通じて対象者の位置を知らせたり、帰宅直前に音で知らせてくれるという機能を備えている。前の二つとは異なり、ユーザーテストで見出された書き込めという特徴を活かしたアプリケーションである。インターフェースの見た目や物理ボタンの位置を用意に変換できるという利点がある。

(A)



(B)



(C)



図4.11: 提案手法を用いた作品例 (A) ラジコンロボット, (B)IoT ライトスタンド, (C) 貼り付け可能な2次元インタフェース

4.7 マテリアルの組み合わせと構造化手法のまとめ

デザイナーのモノづくりのプロセスをサポートするための、機能と形状を両立した Working Prototype をより容易に行えるツールの提案を題材に複数の材料を組み合わせ、構造化することで機能を拡張する手法の提案を行なった。

要求される機能はユーザーの状況と体験を調査し、推定した。またソリューションの提案では、どの様に材料を組み合わせるかのヒントを得るために、通常の初期段階のプロトタイプに用いられる材料の特性を調べ、これらの強みとなる特性を統合するアプローチを採用した。

形状保持機能に優れる粘土に、機能統合時に接続が容易になる様に磁性体を粒子で分散させることで機能を拡張した。またこの粘土を紙の間に挟み込むレイヤーバイレイヤーの構造にすることで、粘土の剥離などを抑えつつ、表面の修飾性を高めた。

また、この手法を実際にユーザーに使用していただき、そこからフィードバックを得て、追加要素となるツールも合わせて設計した。これらのツールにより、ユーザーは特殊なプロセスを学ぶことなく、モジュールを物質表面に触りながら実装することができることを示した。

一方で、提案手法は従来の紙に比べると加工がしづらく、より細やかな形状を作るためには材料をさらに薄くしていくといった工夫が必要である。また二次元のサーフェスによる設計では球体のような苦手な構造も存在するため、最終的な Working Prototype には別のツールとの併用が必要になる。

本章の材料を組み合わせることで、機能を拡張するアプローチは材料の特性を理解し、組み合わせることで機能を拡張している。粘土への機能の付与は従来の材料のプロセスと同様に均質な機能の付与である。一方で紙に挟み込むレイヤーバイレイヤーの構造は面直方向に機能を分割することで状況に対応させている。このアプローチは、特殊な設備や材料を使わないため、機能を部位によって切り分けたり、複雑にパターンニングすることは難しい。しかし、その様な細かな分割や制御を必要としない状況においては、このアプローチも新たなインタラクション体験を設計に寄与することができる。また、用いる材料や装置が簡単であるため、手法自体を展開することが容易であることも本アプローチと利点となる。

第5章

既存のモノづくりプロセスを活用する手法

本章では既存のモノ作りのプロセスを活用することで、微細構造要素を導入する手法を提案する。我々の身の回りにはすでに微細な構造を備えたマテリアルが存在する。例えば、織物などは編みパターンの層構造を有している。また紙はセルロースによる繊維構造、スポンジは発泡体による空隙構造といった様にそれぞれの製造工程でこれらの微細構造は形成される。もしこの様なモノづくりのプロセスに、機能性の材料を上手く取り入れることができれば、マテリアルの機能と微細構造を兼ね備えたインタラクション機能を備えたマテリアルが作成できると考えた。我々は今回西陣織の技術に着目し、機能の統合を試みた。

5.1 既存のモノ作りプロセス活用手法の背景

西陣織は京都の西陣地区で生産される先染めの紋織物の総称である (図5.1)。先染めの紋織物とは言葉の通り、染色糸を使って模様を作るプロセスである西陣織には1200年余りの歴史があるとされ、職人の手によって華やかな意匠が生み出され、上流階級の装束等に用いられてきた。技術的には西陣織はその紋様を実現するために、20層近い複雑な糸の構造を意図した通りに織り込む技術が特徴である。これに加えて、糸の多様な染色技術や、箔と呼ばれる紙材料に特殊な素材を塗布したものを絹糸に合わせて織り込む技法などが、その華やかな表現を支えてきた。近年の取り組みでは、情報が古くなった海図を裁断し箔にして編み込んだランチョンマットが発表されている [94]。多様な素材を織り込める西陣織の特徴を活かすことで、海図の水に強いという素材特性を活かしながら、古くなった海図の素材再利用として、また新たな意匠としての価値創造にアプローチしている。

伝統的に続く製法でありながら、西陣織は昔からその織技術や染色技術を革新することで常に新たなプロダクトの創出や機能を付与する取り組みを積極的に行ってきた。その中には、今回筆者らが目指す方向性と同様に動的な装飾効果を西陣織に導入するものも挙げられる。例として古くは、麴塵染に代表されるように光源に応じて色が変化して見える糸を用いた織物など、静的なデザインのみならず周囲との関係の中でより動的な変化の導入を目指す取り組みがある。また、近年の取り組みでは遺伝子組換えを施した蚕から紫外線に反応して発光する糸を紡ぎ、西陣織の手法を応用して暗闇で「光る」ドレスを製作した例もある [120]。

また、より電氣的なアプローチで西陣織を人間とコンピュータをつなぐインタフェースを実現した例もある。代表的な例として黒田らは西陣織に導電性の糸を織り込むことで、心拍を測るベストを提案している [68] [69]。また、織り込まれた金銀箔の導電性を利用することで、西陣織をスピーカのタッチセンサとして利用する手段が提案されている [100]。これらの例では、導電性を有する生地の中に織り込むことで、外部から硬いセンサ等の素子を組み入れることなく、生地そのものをインタフェースとして活用する点が特徴として挙げられる。これらは、特殊な糸を開発・導入したもので織機に合う強度や硬度、耐久性などの条件に合わせることであればそのデザイン自由度は高いが、その特性の変更自由度や選択自由度は

必ずしも高くない。また、導電性の素材を用いた例では、インタラクションの構成のために物理的な結線を通じて外部のデバイスと接続する必要があるという制約もある。

今回筆者らは、西陣織を介して構成されるインタラクションの系をより広く扱い、環境の変化に応じてその物理特性が変化する織物や、物理的に接続されない外部のセンサを通じて西陣織そのものの動きをセンシングし、音や光などを通じて環境にフィードバックをする手法を提案する。

これらのインタラクションを構成するにあたり、西陣織の独特の手法である箔に注目した。これは、上でも触れたように、和紙の上に多様な素材を塗布したり、他の素材自体を細く糸状に裁断し緯糸として用いることで、絹だけでは表現が難しい装飾効果を施すものである。筆者らの手法では、箔として機能性材料を取り込み、布に外部デバイスを物理的に接続することなく、布らしさを保った上で、上述のような環境の変化に応じた特性変化や布自体の状態・種類のセンシングを活用したインタラクションを構成する。具体的には西陣織の工房の協力を得て、以下の3つのプロトタイプを作成した。

- Heteroweave001 <color>

西陣織で伝統的に使用される箔の材料にサーモクロミック特性を有する顔料を塗布し、織り込むことで外部の温度に応じて柄が変化する織物。

- Heteroweave002 <digitize>

特殊なドットパターンが印刷された裁断された和紙を緯糸として織り込み、光学的に位置を読み取ることができる織物型のインタフェース。

- Heteroweave003 <form>

乾燥具合によって硬さの変化する素材を緯糸として織り込むことで、立体的な形状を保持可能な織物。

これは、山口情報芸術センター（YCAM）にて行われた布のデミウルゴス展の一環で行われたものである。本稿では、各作品の紹介と共に、本手法の応用可能性とこのアイデアを広げるために実際に展示活動を行った内容を報告する。

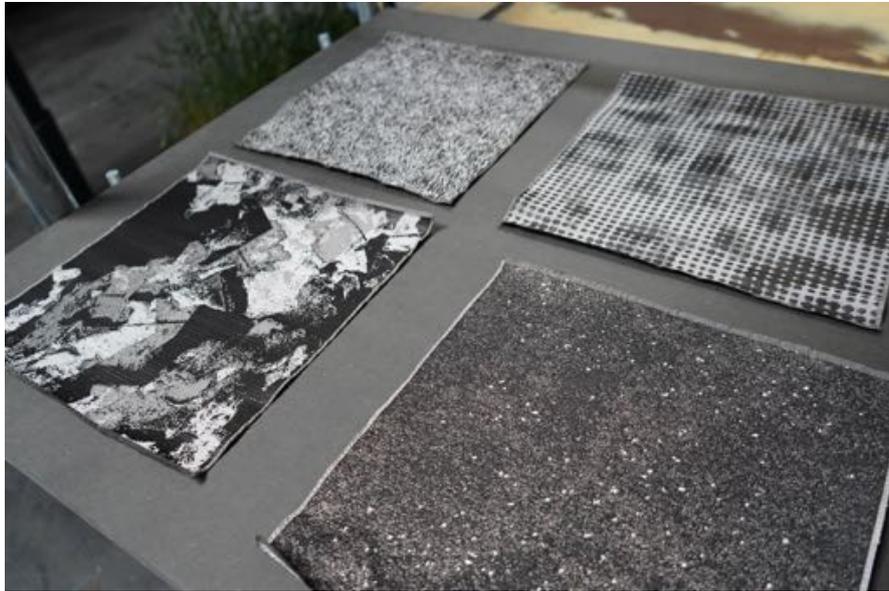


図5.1: 西陣織の外観

5.2 テキスタイルへの機能付与の関連研究

テキスタイルに機能を付与する取り組みはこれまでも多く行われてきた [38] [7]. 例えば、導電性の糸を編み込むことで、配線としてだけではなく、それ自体をタッチセンサや圧力センサとして利用する手法が提案されている [127] [143]. またテキスタイルの内部に電子部品を編み込むといったアプローチも取られている [52] [18]. この様にテキスタイル高機能化し、ウェアラブルデバイスとしてスポーツやヘルスケア等の領域で応用が進められている [12]. この他にも、動きに対して電気を発生させる圧電性の材料を用いたテキスタイルも提案されている [19] [59]. このテキスタイルは動きの検出以外にも、発電といった環境用途でも使用が期待されている. 発電だけでなく、エネルギーを蓄積することができるテキスタイルも研究されている. ファイバー状のキャパシタを編み込むことで、エネルギーに貯蔵することができる [42]. この様にエネルギーを作り、蓄える媒体としてもテキスタイルの利用が進んでいる. これらの例の他にも、環境に応答して形や色が変わるもの等、様々な機能の統合が行われている [142] [8]. 一方でこれらの研究は機能の付与やそれによる表現の拡張が注目されており、テキスタイルが本来有する意匠については、目立たない様に実装する動きはあれど、その美しさを最重項目としては扱っていないと推察される.

スマートマテリアルを活用した表現

前項で紹介したテキスタイルへの機能付与では多くのユニークな材料が使用されている. 材料科学の領域では、2章でも紹介した様に熱、光、電界、磁界、pH といった様々な物理的な信号に対して応答する物質が見出されている [97] [161] [163] [50]. これらの材料はスマートマテリアル等と呼ばれ、それ自体がトランスデューサとなっている. スマートマテリアルをインタラクション体験に活用する試みも行われてきた [55].

これらのスマートマテリアルはファイバーやインクの形態に加工することで、テキスタイルに様々な機能を付与してきた [38]. しかし、物質自体をインタフェースに活用する際には、これまで静的な物質として本来有していた見た目の美しさや質感、重さといった特性は必ずしも維持されない. 同時にスマートマテリアルはときに高価であったり、従来のモノづくりのプロセスに必ずしも合致しないという問題も抱えている.

一方で西陣織はその歴史的な経緯もあり、美しい意匠を有することが前提条件となってきた. この様な状況を鑑みて我々は本来有していた意匠の美しさを維持しつつ機能を統合することを目指した. 通常の西陣織の意匠を維持するために、普段使用されている製造機器やデザインをそのまま活用する形で、西陣織の機能を拡張する手法を提案する.

5.3 西陣織のプロセスを活用した機能統合手法の提案

本研究では、西陣織の緻密なパターン形成技術に加えて、緯糸材料の選択肢の広さに着目した。西陣織の緯糸は必ずしもポビンに巻き取れる糸のような形状である必要はなく、幅広い素材や靱性が低い素材も織機あるいは職人の手の工夫によって織り込むことができる。本作品ではこれまでに導入されていない様々な機能性素材を持ち込み、その織り方を工夫することで従来とは異なるユニークな機能の取り込みを試みた。

本手法では、織で構成される緯糸単位で独特の機能を与えることができる。西陣織で設計された織構造は、印刷による表面を二次元的に修飾したものや、浸漬により全体を修飾したものとは異なり、機能を三次元の特定の箇所に配置することができる。この特徴により特定の機能を統合する際に、背面や内部に配置することで意匠を損なわずに織物を作成することができる。

また、織の工夫により複雑なパターンを形成できることも特徴である。多色の複雑なパターンを作る際に、スクリーン印刷に必要な多層擦りや高価なインクジェット装置を用いる必要がない。この時、表面の凹凸といったテクスチャもそのまま維持することができる。本手法は緯糸に組み入れることさえできれば織ることができるため、機能性材料のインク粘度などを材料側で細かくチューニングしなくて済むことも大きな利点である。

次節以降で我々が実際に作成した三つのプロトタイプの詳細と展示形態について紹介する。

5.4 Heteroweave001 <color>

5.4.1 変色テキスタイルの背景

まず、一つ目の西陣織への機能付与として、変色機能を取り上げる。ディスプレイやスマートマテリアルを活用することで色や見た目を変化させる様々な手法が存在する。ディスプレイは液晶や有機 EL といった発光現象を利用したものが多い。これらは暗い環境でも情報を伝えることができるが、静的な物質の通常の見え目とは異なり目立つという問題がある。目立たないディスプレイとしては反射型の電子ペーパーが知られている。細かい粒子の配置をコントロールすることで、表面の反射率を変えることで表現しているため、環境に溶け込みやすい。しかし電子ペーパーはそれぞれのピクセルに電界を加える必要があるため、複雑な配線が必要になる。最近ではフレキシブル基板などと組み合わせることで時計のベルトや文字盤に電子ペーパーを組み入れることで意匠が変わるプロダクトなども出現している。

色が変わるスマートマテリアルもこれまでに数多く提案されている。特定の波長の光に応じて色が変わるフォトクロミック材料や、温度に応じて色が変わる色素、溶媒の状態によって変化するものなど様々である [43]。これらは必ずしも電子デバイスと接続しなくても色の変化を起こすことができる。温度によって色が変わるロイコ色素と顔料の組み合わせは、玩具や凍結防止の注意喚起の看板など様々なシーンで利用されている。

これらのスマートマテリアルはインク化されていることも多く、様々な形で利用されている。例えば液晶インクをテキスタイルに浸潤させ、温度によって色を変化させるといった研究が提案されている [142]。サーモクロミックインクをスクリーン印刷などのプロセスによって T シャツに印刷した製品などは実際に販売されている。しかし、スクリーン印刷やディッピングにより機能を付与した素材はインクが表面や内部に一定量ずつ添加されるため、表面の凹凸構造が損なわれたり、布地素材が持つような柔軟性が損なわれたりという問題がある。

5.4.2 Heteroweave001 <color> の作成手法

本作品では、環境に反応して見た目が変わる機能の和紙上への導入および箔としての西陣織への織り込みを試みた。今回はすでにインク化技術が存在する色変化をモチーフに、サーモクロミックインクにより表面を修飾した箔を織り込んだ。糸自体を染色すると、織り機で巻き取る際にインク表面にクラックなどが生じ剥離してしまう。しかし、緯糸に使用する箔の表面にコーティングする場合は製織時に大きく巻き取る必要がないため、使用することができる。具体的には次の手順で作成した。

- サーモクロミックインク（松井色素工業所製、クロミカラー AQ インクシリーズ）

バインダー（松井色素工業所製、印刷インク調整用バインダー）、フィクサー（松井色素工業所製、フィクサー FE）を重量比 150 : 100 : 3 の比率で混合する。

- 自転公転ミキサ（Thinky 社製、AR100）にて 1 分間攪拌した後、1 分間脱法する。
- 箔の素材を PET 基材にポリイミドテープで固定し、バーコータ（スペース幅 100 mm 厚条件）で塗工する。
- 室温で一昼夜乾燥させる。
- 乾燥後にサーモクロミックインクが塗工された箔を裁断機により細い繊維状にカットする。
- 通常の箔材料と同様に西陣の手機によって所望のパターンに織り込む。

5.4.3 Heteroweave001 <color> の作品概要と展示形態

本作品では、これまでは静的であった織物の見た目が環境によって変化したり、人が触れるという行為を色の変化に対応させることで、織物そのものを環境に対して動的に振る舞うメディアとして表現した。

Heteroweave001 <color> は図5.2の形で展示を行った。今回使用したサーモクロミックインクはマゼンタとバーミリオンの色で温度が 5 度以下では呈色し、5 度を上回ると消色が始まり、10 度でほぼ乳白色となる。この乳白色はロイコ染料を封止しているマイクロビーズの色である。今回は白い箔素材の上にサーモクロミックインクを塗布しているため、10 度以上では色が消えた様に見える。

この生地は、周囲の温度変化に応じてその柄が変化するという点が特徴になるが、展示形態としてはその場で変化を視認できるようにするために、図5.3のようにレールに沿って生地の上を反復的に移動するアイスバーを設置した構成を用いた。

アイスバーは金属の筐体に凍らせた保冷剤を詰めたモノで表面温度がほぼ 0 度となる。バーは自重で西陣織に触れながら約 10mm/sec で移動するため、通過して冷却された部分のみが呈色する。その後しばらくすると室温の環境に合わせて自然と消えていくという表現を実現した。また呈色した箇所には人が触れると体温により、即時に色が消えることで人の触れるという行為に対する応答を表現した。

今回の温度設定は、展示会場の温度設定で通常時の色が消色し、かつアイスバーにより急冷させることで、バーの接触により鮮やかに発色し、人が触れると即時に消色する表現を可能とした。

Heteroweave001 <color> は箔の表面という限られた部位に緯糸という配向性を持つ部位に機能が付与されているため、織物全体としてのしなやかさを保ちつつ、機能を付与することができた。また、しなやかさ等が維持されていることを表現するために、織物の端部は半径 1cm 程の棒に巻きつけることで、しなやかに巻き取れることを表現した。本作品の箔の幅は、

通常の西陣織で使用される箔と同じく 1mm 以下の幅のモノを用いており、意匠などは色変化を起こす以外は完全に通常の西陣織と同様である。

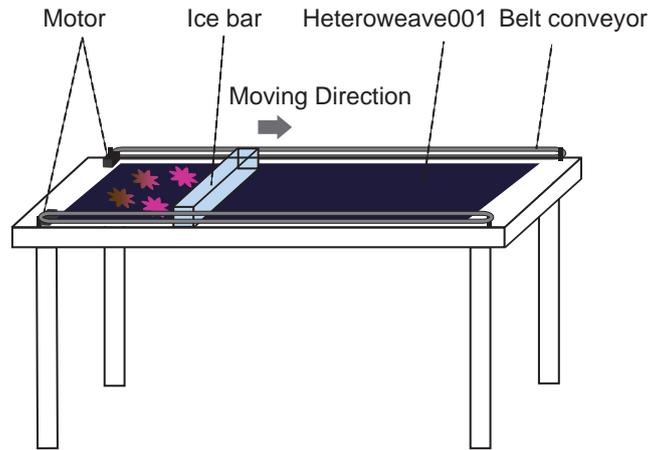


図5.2: Heteroweave001 <color> の展示の構成



図5.3: Heteroweave001 <color> の色変化の様子

5.4.4 Heteroweave001 <color> の表現の幅

西陣織のプロセスでは異なる箔を織物の最表面の任意の位置に配置することができる。そのため複数の色を組み合わせた様々なパターンを伝統の西陣織の技法をそのまま適用させて設計することができる。また材料面でも様々な設計を行う余地がある。色変化はサーモクロミックインクの特性に依存する。今回使用したサーモクロミックインクは染料と顕色剤がマイクロカプセル化して分散したものである。すでに材料メーカーより色と変化温度のバリエーションが存在する。これらのインクはいずれも箔に塗工することができるので、西陣織のデザインパターンと同時に温度に対する意匠の変化を設計者は考えることができる。

またマイクロカプセル化されたサーモクロミックインクは組み合わせて利用することも可能である [66]。図5.4に示す様に、インクを複数混ぜ合わせると温度に応じて多段階で色の変化するといった設計も可能である。

今回は環境に対する応答を対象としたが、西陣織は三次元的にレイヤ配置を構成することができる。そのため、例えばヒータとなる導電性の繊維を上下層に組み合わせることで、温度制御により見た目をより細かく制御したり、箔そのものを塗り分ける工夫を行うことで色をグラデーション状に変化させるといった様々なメディア表現が設計できると考えている。

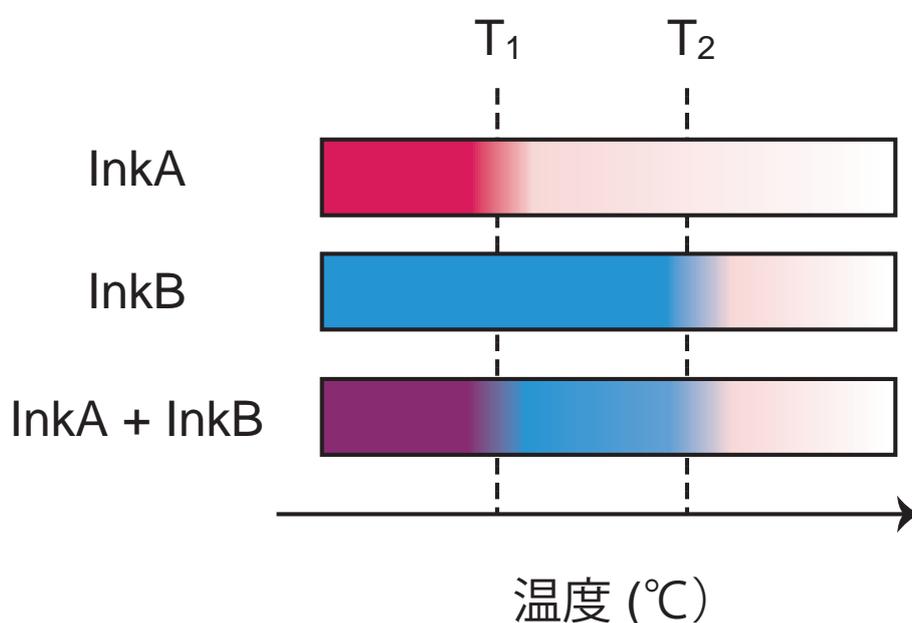


図5.4: 温度に対するロイコ染料インクの色変化の事例

5.5 Heteroweave002 <digitize>

5.5.1 情報を付与した織物の背景

西陣織はその織の設計図が存在する。職人達は設計図とおりに、織機を用いながら、時には20層にも及ぶ構造を作る。Heteroweave002 <digitize> では、美しい意匠の背景にある織技術を体感できる作品を作ることで、伝統技法の技術の奥深さをより多くの人に感じていただくことを目指した。

磁気テープや不揮発性メモリ、光学ディスクなど私達の身の回りには情報を記録する様々なメディアが存在する。これらのメディアに織の構造をデータとして保存することはできるが、実際の織物との関係性を対応させることが難しい。

本作品では、西陣織に織り込む緯糸に特殊なドットパターンを印刷した紙（アノトマーカ）を緯糸に織り込むことで、布全体に位置情報を埋め込むという試みを行なった。

5.5.2 Heteroweave002 <digitize> の作品概要と展示法

Heteroweave002 <digitize> はアノトマーカと呼ばれる特殊なドットパターンに注目する。これは、アノトペンというデジタルペンのために用紙に印刷して用いるもので、縦横 1.8 mm のエリアの中に ID 及び位置情報のデータを埋め込むことができるものである。通常はマーカの印刷された紙の上で、デジタルペンを動かすことでその紙のページ番号やペンの位置を取得するような用途で用いられる。今回は、筆者らのグループで行った先行研究 PaperImposer のように、デジタルペンを埋め込んだステージの上で、マーカの印刷した材を動かすことでその材を入力インタフェースのように用いるという形式を採用 [164]。

今回、緯糸にはアノトマーカが印刷された紙を箔状（幅 3mm）に裁断したモノを用いた。西陣織は意図した箇所に緯糸を配置することができるため、アノトマーカが最下面に配置される様に織り込んだ。この様に織り込むことで西陣織の意匠を残しつつ、裏面からカメラで読み込むことで、織物の種類の判別とカメラで読み込んでいる位置を判別することができる。西陣織は織機によって作られる糸の構造の設計図を持っているため、場所を読み込み、その座標を参照することで、織の構造との対応関係をシステムが認識できる。

Heteroweave002 <digitize> の展示では図5.5の様に展示している机の下面から Heteroweave 002 の下面のドットパターンをスキャンし、位置に対応する織の3次元構造のCGを映している。また織物の種類とこれらの糸の構造に合わせてシステムが音を生成することで視覚だけでなく、聴覚でも西陣織の構造を体験できる様に工夫した。図5.6の様に、ユーザが西陣織を入力インタフェースとして、その位置をスキャンしながら、内部の構造を観察し、織構造に応じた音を奏でることができる。

今回表示した CG は静止状態が続くと Heteroweave002 <digitize> 全体の外観が表示され、展示客が操作すると、その部位に向かってズームインする形で織のパターンを表示した。また、カメラで実際に除いている箇所が分かる様に、展示台に取り付けた小型のライトによりカメラ部位を照射することで覗いている箇所が分かる様に設計を工夫した。

本作品では、アノトマーカの層は一切表面に表れないため、表面の意匠は通常の西陣織と同様に職人が設計したモノを用いている。この様な構成をとることで、見た目は普通の西陣織と同様のモノを観客が直接操作しながらその構造を視覚と聴覚の両面から体験できる形にした。

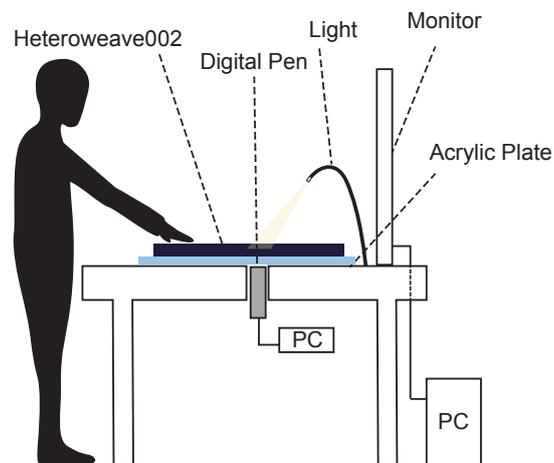


図5.5: Heteroweave002 <digitize> の展示構成

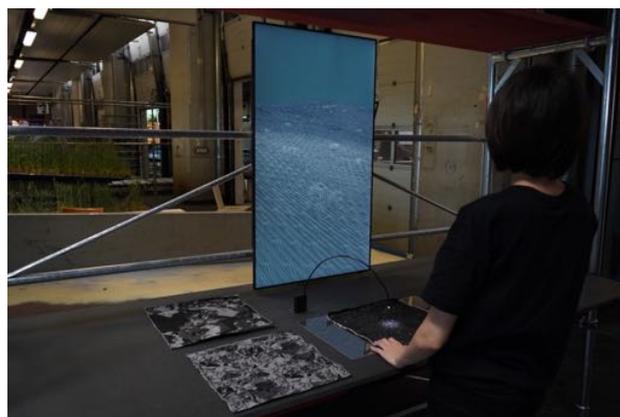


図5.6: Heteroweave002 <digitize> の展示外観

5.6 Heteroweave003 <form>

5.6.1 形状を記憶する物質の背景

物質の形状を書き換え、保持する手法は粒子や層状に束ねたシートやファイバを詰めた袋の空気を抜くジャミングや、温度条件により記憶を保持できるスマートマテリアルの使用などが報告されている [23].

テキスタイルは一般的にしなやかで、形を維持するには適していない。そのため、下着やジャケットのフードなどは形が崩れない様に、意図的に金属のワイヤを入れて形を整えている商品も存在する。しかし、これらの手法は折りたたみが難しくなるといった課題を抱えている。

テキスタイルに形状を保持し、必要に応じて書き換える機能を搭載することができれば、西陣織を器や造形物といった新たな用途でも扱えると考えた Heteroweave003 <form> はこの様な形状の書き換えと保持機能を提案する作品である。

これまでに材料分野では温度が上がると柔らかくなる材料 [149] や、特定の波長の光を当てるとその剛性が変化する様な材料 [75] が知られている。これに対し今回、我々はその中でも安全かつ身近に扱えるトリガーとして含水状態によって硬さが変化する材料を緯糸として採用し、作品を構築した。

5.6.2 Heteroweave003 の作品概要と展示法

Heteroweave003 <form> の緯糸には合成セーム革を用いる。これは、スポーツタオル等の素材として用いられている素材で、濡らした時には柔らかく、乾燥するとその状態で固まるといった特性を有している。作成の手順は次の通りである。

- 合成セーム革でできた速乾タオル（Speedo 社）をレーザーカッターにより、2mm 幅で切断する。
- 通常の箔材料と同様に西陣の手機によって所望のパターンに織り込む。

合成セーム革は給水機能を保つために、2mm 幅としている。また Heteroweave002 <digitize> と同様に表面に表出させない様に織れるため、表面の意匠は自由に設計することが可能である。

上の手順で作成した Heteroweave003 <form> を図 5.7 の様に水に浸漬することで全体を柔らかくし、その状態で型や洗濯バサミなどの固定具を使って所望の形状に造形する。この状態でドライヤーを用いて 30 分間、その後室温の静置環境下で一晩、乾燥させるとセーム革が硬化し、固定具や型を取り外しても形状を維持することができる。

乾燥させると緯糸が配向しているのので、一方向にのみ丸めることができる織物となる。Heteroweave003 <form> の生地自体は伸縮性はほとんどないため、造形時には折りをうまく使い形状を作る必要がある。また形状は保持するが、あくまでセーム革の特性に依存するため、自立して構造を維持できる程度の強度となっている。この強度は織の構造にも依存する。

今回はテクスチャや織の意匠が見やすい白を基調とした図5.8の作品と造形を強調するための黒を基調とした図5.9の作品を作成した。

図5.10の様に造形した Heteroweave003 <form> の手前に硬化したサンプルとして乾燥したセーム革の箔と乾燥した Heteroweave003 <form> を、柔らかい状態のサンプルとして、水に浸漬させた Heteroweave003 <form> を用意することで、どの程度硬さが変化するか体感できるようにした。

タブレット端末ではモデリングの様子を動画で流すことで、造形から書き換えの一連のプロセスを鑑賞できるようにした。

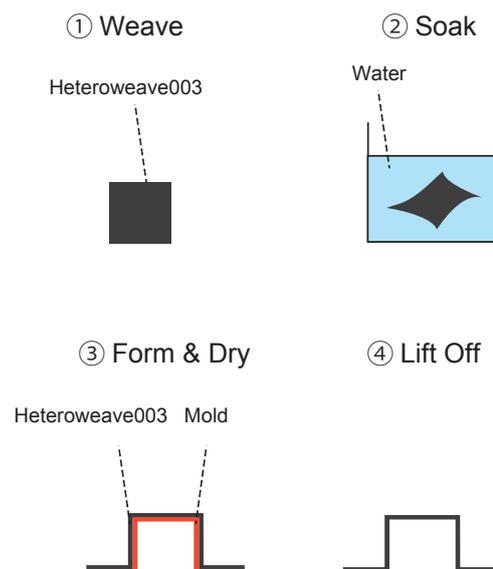


図5.7: Heteroweave003 <form> の造形手順



図5.8: 白を基調とした Heteroweave003 <form> を箱型に造形した時の概観



図5.9: Heteroweave003 <form> で造形したモデルの外観



図5.10: 実際の展示の様子

5.7 既存のモノづくりプロセス活用手法のまとめ

既存の製造プロセスを活用し、構成要素に機能を組み込むことで従来のモノの特性や作り方を活用しながら新たな機能を取り組むアプローチを提案した。

実装には、西陣織の伝統技法を用いて様々なマテリアルを織り込むことにより、新たな機能を発現させる Heteroweave のコンセプトを三つの作品として実装した。

Heteroweave001 <color> では西陣織の質感と本来の意匠を活かしつつ、箔の材料を修飾することで、温度に対しても表現を拡張することを示した。この手法により、機能性材料をパターンニングして塗布しなくても、意匠の機能は西陣織のプロセスによって実現できるという点がユニークである。また後から印刷プロセスにより、修飾した場合とは異なり繊維の形状といったテクスチャも維持することができる。

Heteroweave002 <digitize> では、位置情報のタグを埋めこむことで、インタフェースとして機能する様子を体験できるようにした。織のプロセスにより最下面のみに配置することが可能であるため、この様なシステムを実装することができている。織物は丸めて持ち運ぶことができる。

Heteroweave003 <form> では、西陣織の形状を水に浸漬し、乾燥させるという簡単な行為により形状を書き換え、保持できることを示した。近くで実物を見ると、西陣織のテクスチャや意匠が保持されている。造形オブジェクト以外にも服の襟の部分といった意匠性と形状保持が求められる用途に応用できると考えられる。

Heteroweave はこの三つのプロトタイプ以外にも、別の機能を持った緯糸を採用したり、複数の特性を持った糸を同時に編み込んだりすることでより複雑な機能を実現できる可能性がある。また、今回は製造プロセス的に自由度の高い緯糸に限定して織物の機能を拡張していったが、もし箔や糸をボビンに巻き取れる形で準備することができれば縦糸にも組み込むといったことも可能となる。

Heteroweave の事例の様に既存のモノづくりのプロセスを活用する場合は従来のノウハウを活用できるという利点がある。今回の事例では、スマートマテリアル自体は全面塗工や裁断といった基本的な修飾や加工しか行っていない。どの層に配置し、パターンを表出させるかといったパターンニングや微細構造は織のプロセスによって実現されている。この様に追加の装置などを用いずに、従来の知見を活用しながら機能を統合することができる。また、量産や大型化といった商業用途へも展開しやすいことも利点である。

一方で既存のプロセスを使う場合には、糸に導入される材料がそのプロセス装置に適合するか、必要となる最小の材料の量を確保できるかといった問題が生じる。Heteroweave も、量産用のコーティングマシンで箔を塗工するために必要なインクの最低必要量が 15 リットルであるといった制約が存在した。既存プロセスの活用は良い面も悪い面も製造プロセスの

影響を受けるため、組み込みたい用途やプロダクトに合わせて適切に活用されていくことが望ましい。

また今回の取り組みでは伝統的な西陣織工房の職人の方と一緒にモノづくりをおこなうことで、お互いの知識が交換された。途中から職人の方からこういった材料がないかといった提案をいただけるようになった。また我々も、好きな層に織り込めるといった特性を活用したり、彼らのノウハウから新たなアイデアが生まれる場面が見られた。既存プロセスを活用したアプローチは他分野の知識が交換されることで、アイデアの創発やモノを作るプロセス自体を変化させる可能性を有している。

第 6 章

マテリアルが有する微細構造を活用する手法

本章ではマテリアルが元から備えている微細構造を活用することでインタラクション機能を統合する手法を提案する。前章でも述べた様にすでに微細構造を兼ね備えた材料は存在する。Heteroweave の事例ではその製造プロセスに機能性の材料を持ち込むことで機能を統合するアプローチを取ってきたが、すでに構造を有している材料を上手く活用することでより高機能なインタラクション機能が統合できると考えた。本章では多孔質材料と導電性のインクを染み込ませることで構成される芯まで柔らかいセンサ FoamSense を提案し、微細構造活用の効果やその応用可能性などについて論じる。

6.1 マテリアルが有する微細構造を活用する手法の概要

我々の身の回りにはソファ、ベッド、衣服など様々な柔らかい物質が存在する。しかし、この様な物質へのインタラクション機能の統合は限定的である。これは3章で論じた様に、機能を統合することで物質の本来ならの物理特性が損なわれたり、柔らかなセンサデバイスの製造コストといった点で実用化に課題がある。FoamSense のプロジェクトではスポンジ、綿、ビーズクッションなどの孔構造に着目した。これらの孔構造は物質の柔らかさや軽さにも寄与しており、様々な箇所で利用されている。また通常はこの孔構造そのものはインタラクション機能に積極的に活用されていないが、外力が加わった時には剛性の低い孔構造が変形していると推察される。この三次元に分散配置された孔構造の変形を活用することで、マテリアルの様々な変形状態を測定できると考えた。

多孔質体の変形状態を電気的に取得するために、孔構造を有する物体に導電性のインクを付与することで、芯まで柔らかいセンサ FoamSense を提案した。FoamSense は圧縮されることで電気を通さない孔の部分が潰れ、より電気を通しやすくなる。

本プロジェクトでは、多孔質構造をインタラクション設計に活用するために、材料やインクの浸潤手法といった様々な設計要素について扱っている材料の項目では多孔質材料にスポンジ、綿、ビーズといった様々なものを採用し、適した導電性材料の種類や、実際に導電性を付与した際の基本特性を調べ、それぞれの材料の特性や制約事項について論じた。

取得可能な変形状態についても検討を行なった。図6.1の様に、外力が加わると多孔質材料は、特定の箇所がより大きく圧縮される。FoamSense の導電性インクを浸潤させる箇所や電極の取り出し形状を工夫することで、この変形特性を活用し、圧縮、剪断、ひねり、曲げといった様々な変形状態を推定できることを示した。上のセンシング情報の設計以外にも、インクの浸潤パターンと配線を工夫することで、複数の圧縮センサを一つのスポンジ中に導入する設計手法を提案した。

また微細構造設計のスケールからは外れるが、3D プリンタによって孔構造を設計したスポンジを使用することでさらに機能を拡張できる可能性を示した。そしてこの微細構造を活用したセンシング機能の統合が、どの様なインタラクション体験を提供できるか三つのシナ

リオを紹介する.

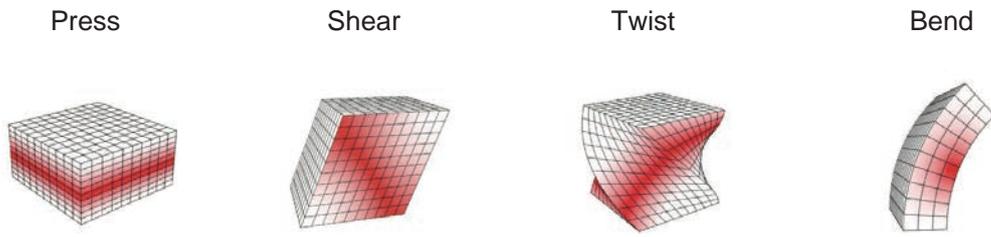


図6.1: 外部応力に対する変形の様子 (赤は特に圧縮されている領域)

6.2 多孔質構造活用のデザインプロセス

FoamSense は多孔質材料と導電性のインクの組み合わせによって構成される。また様々なセンサモードを実現するためには、インクを染み込ませるパターニングや配線の取り回しなども重要になる。我々は今回、FoamSense を作るプロセスを図6.2の様に整理した。

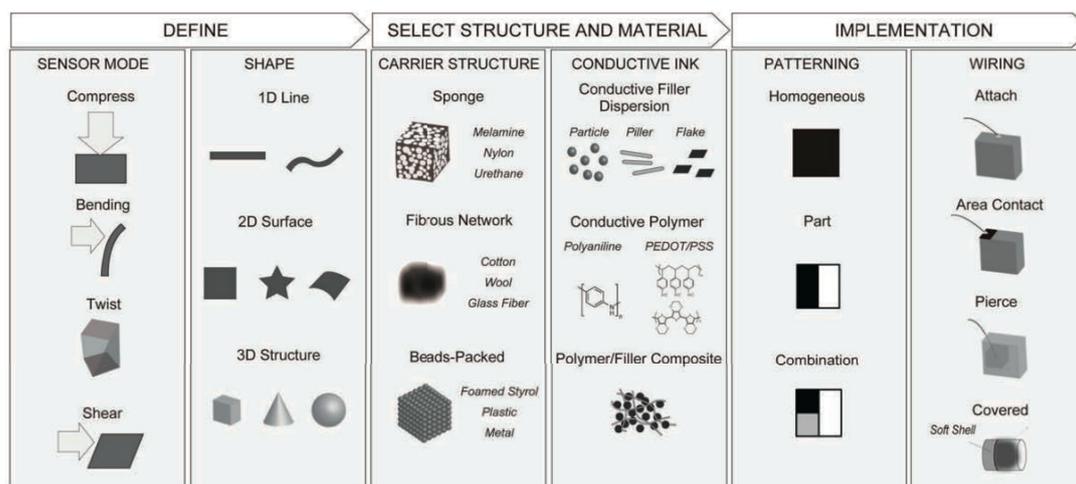


図6.2: FoamSense の設計手順

6.2.1 要求仕様の設計のプロセス

はじめにセンシング機能を統合するにあたり、ユーザーがどのような認識機能をどのような形や機械特性、見た目で実装したいかを選択する。

センシング情報と形状

ユーザーの使用目的に合わせて、変形状態を取得する手法を選定する。FoamSense は外力によって生じる孔構造の変化を導電性の変化として取得するので、変形する箇所に設置する必要がある。本論文中では、圧縮、剪断、ひねり、曲げの変形状態が測定できることを示した。また圧縮を二つ組み合わせることによってどの程度、上面が傾いているかを想定するなど、これらの変形モードを組み合わせることも可能である。表面に変形しない物質（例えば非伸縮性の皮）などを貼り付けることで、その方向の変形は抑制されるので部材の組み合わせでカスタマイズすることも可能である。FoamSense は多孔質体であれば機能することができるので、多孔質体の形状を加工することで、様々な形状でセンシング機能を統合することができる。

多孔質体が柔らかい場合、曲面の表面上に沿わせて設置するといった設計も可能である。

通常の柔らかなタッチセンサレイ [115] [82] 等と比べて、体積をもつオブジェクトそのものをセンサ化できる設計の自由度がある。

6.2.2 材料選定のプロセス

測定したい情報や形状を決めた後は、それを実現するのに適した材料（多孔質体と導電性インク）を選定する。導電性インクを付与される多孔質体をここではキャリアと呼ぶ。

キャリアの選定

FoamSense のキャリアには二つの特性が求められる。一つは外部からの力に対して孔のサイズが変形すること、もう一つは孔構造が繋がっており、導電性を付与するインクを浸潤させられることである。後者についてはあらかじめキャリアを構成する物質が、導電性を有する素材で構成されている場合にはこの限りではない。本論文では図6.3の三つのキャリア構造に着目した。これらの中から使用する用途の硬さや形状に合わせて適したものを選択する。

一つはスポンジである。軽量で変形しやすい特徴がある。またキャリアが三次元の構造を有するため、粘性成分が他の素材に比べると少なく応答特性が良好である。スポンジは元となるポリマーと発泡体を鋳型に流し込む方法と物理的に切削するアプローチが考えられる。今回は化学的なプロセスを用いずに完成したスポンジを加工するアプローチを採用した。メラミン樹脂などは安価で加工がしやすいが、材料としては長時間の使用で劣化する。化粧品の塗工などで使われるウレタンのように、繰り返しの変形に対して安定している材料も存在する。

二つ目は綿などに代表される繊維構造である。繊維が空気を含んでおり、変形により孔構造が変化する。単体では崩れ易くもあるため、柔らかい袋型の構造体に充填して利用される。選択する繊維の種類や充填密度によって剛性や孔変化特性が変化する。

三つ目は柔らかい袋型の構造にビーズを充填した構造である。ビーズはサイズが小さくなると流体のように振る舞う。ビーズクッションのように伸縮性のある生地にビーズを閉じ込めることで、内部の構造が変化する。ビーズを充填した構造は非圧縮生のビーズを用いると液体金属をエラストマーに封止した系のに近い構造となる。実際にはビーズ径の不均一性などもあるため、異なる挙動をすると予想される。繊維構造とビーズの重点構造はどちらもある袋に入れることを前提としているので、スポンジとは得意な形状が異なる。すでに内部に繊維やビーズが含まれたプロダクトであれば中身を入れ替えることで、その構造をそのまま利用することができる。

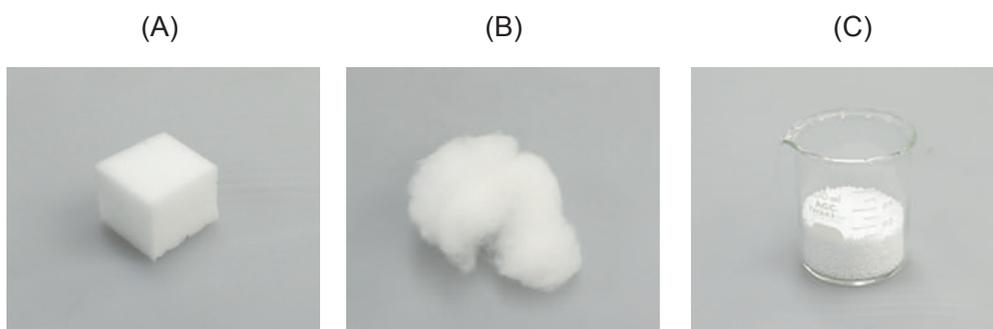


図6.3: キャリア素材の外観 (A) スポンジ, (B) 繊維構造, (C) ビーズ充填構造

導電性インクの選定

導電性のインクはそれ自体が硬化後に硬くなりすぎないこと、十分にキャリアに浸透する粘度であることなどが求められる。導電性高分子ではポリアニリン(PANI)やPEDOT/PSSなどが候補となる。カーボンブラックの分散溶液(W311-N, Lion社)などは入手しやすいが伸縮性に乏しいので、ビーズの表面加工などに向いている。カーボンインクに伸縮性を持たせたい場合には、導電性のナノカーボンフィラーとエラストマー材料を混練した材料などが候補となる。

6.2.3 実装のプロセス

材料を選定した後はインクを付与する場所やその組み合わせの選定と、配線を形成する。

インク浸潤のパターニング

インクの染み込ませ方によっても特性を設計することができる。例えば、ある細かい領域の変形だけで十分な時はその部分にだけ浸漬したり、シリンジで局所的に修飾することが可能である。用途に合わせて必要最小限の部分だけを浸漬することで、インクの消費量を抑えつつ、導電性付与による、機械特性変化の影響を小さくすることができる。また抵抗値の小さな導電材料で表面層を塗工することで、等電位面を作ることが可能である。これは大きな面積の平均値を取得する場合などに利用することで、材料の不均一性などに伴うノイズを低減することができる。

配線について

配線も点で接触することもあれば、内部を貫通させることも可能である。繊維やビーズ充填の様な構造の場合は、外側の袋の内側に電極を設けてコンタクトを取ると、接触面の設計が容易になる。詳細は後で述べるが、センサモードによっては値を安定して取得するために、電極の等電位面の位置を適切に設計するといった工夫が必要となる。

この様に FoamSense を設計する際には上の要素を適切に選択していく必要がある。実際に作成する際には、後の節で紹介するセンサの基本特性やセンサモード実装時のデータと合わせて参照いただきたい。

6.3 多孔質構造と導電性インクを組み合わせた構造体の基本特性

本節では先程紹介した3つのキャリア構造の変形に対する導電特性について紹介する。また各キャリア構造に対して様々な材料の選択肢が存在するが、今回は容易に入手や加工ができる素材を中心に選択している。

6.3.1 測定系のセットアップ

FoamSense の特性を測定する実験系を図に示す。圧縮試験機 (Shimazu Inc., AGS-X) に平板のアルミプレートを取り付けている。また変形と応力の関係と同時に、導電特性も測るために、サンプル上下面の導電プレートにデジタルマルチメータ (Keithley Inc., 2800 Digital Multimeter) を接続している。繊維やビーズ構造を測定する際にはサンプルが圧縮方向以外に広がらない様に 3D プリンタでケースを作り、一軸方向に変形が生じる様にした条件で同様に測定している。

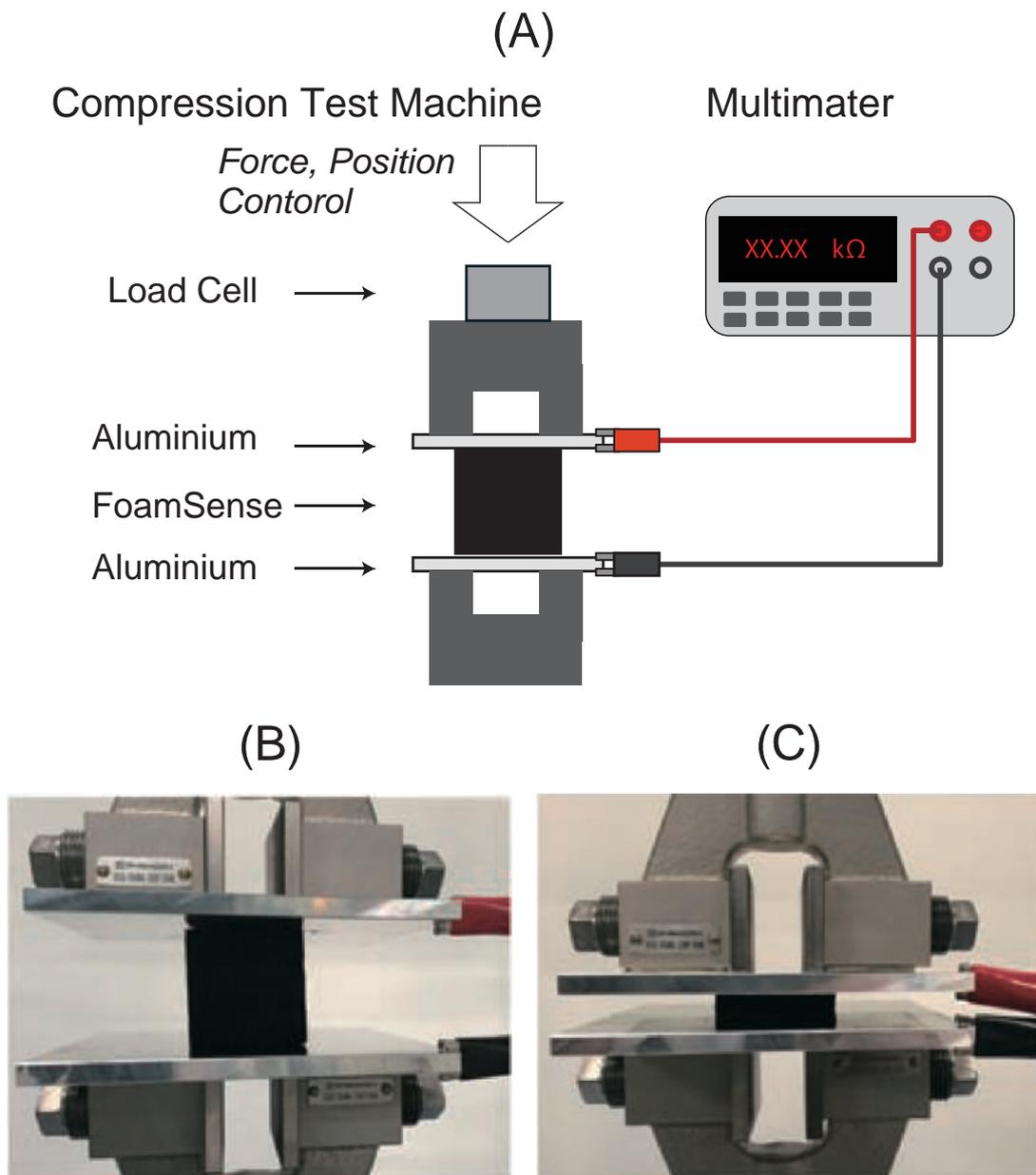


図6.4: 計測システム (A) 計測システムの構成, (B) サンプルをセットした状態, (C) サンプル圧縮時の様子

6.3.2 スポンジ構造サンプルの作成手法

導電の伸縮性インクは次の手順で作成した。1.0gの導電フィラー用のナノカーボン (Cabot Inc., Black Pearl 200) を 2-プロパノール (Kanto-kagaku Inc.) 20.0 mlに溶解させる。直径10mmのジルコニアビーズを6つ加えた状態でボルテックスミキサー (Scientific Industries Inc.) にて振動レベルを8にセットし、15分間分散させる。また別のボトルにシリコンエラストマーのプレポリマー液 (Dow Corning Inc., Sylgard 184)4.0gをトルエン (Kanto-kagaku Inc.)16.0gに溶解させた後、ナノカーボン分散溶液に加える。その後、ボルテックスミキサーでさらに15分間攪拌をする。

このインクに30mm角にカットしたメラミン樹脂スポンジ (Azuma Kogyo Inc.) を約30秒間浸漬する。浸漬後は軽く絞り、室温 (25度) の環境で30分間、向きを変えながらドラフト中で乾燥させる。これは溶液の重量によって塗りムラが大きくなることを抑えるためである。その後、110度の恒温槽に30分間入れて、エラストマーを硬化させるとスポンジ周囲のインクが硬化し、FoamSenseが形成される。

スポンジサンプルの素材について

今回はスポンジ材料にはメラミン樹脂スポンジを用いた。理由は価格が安く、カッターなどで容易に加工ができること。また、粘性が比較的小さく、数十%の変形後も1秒以内にほぼ元の状態に戻るため、センサデバイスとしての使い勝手が良かったためである。より高度な設計が必要な場合には、センサの用途に合わせて素材や孔径などを探索する必要がある。

6.3.3 孔の構造と物性の関係

実際に前項で作成したスポンジ型 FoamSense の特性を測定した。結果を図6.5に示す。圧縮率が80%程度に到達したところで FoamSense の抵抗率が一定になっている様子が見られる。これは、さらに大きく歪ませても、材料の電気的な物性が変化していないことを示している。センサとしては抵抗率が一定の領域は、変位量に対して線形に抵抗値が変化することを意味する。

変形時の孔の様子を調べるために、治具で変形状態を作り、三次元形状測定器 (Keyence Inc., VR3100) を用いて観察した。その結果を図6.6に示す。断面構造を見ると変形と共に孔が潰れている様子が観察できる。また、100%圧縮になると、孔はほぼ潰れており、スポンジ全体が座屈していることがわかる。これらの結果から、FoamSense の圧縮に対する導電特性は、孔の構造が変化する状態と孔が潰れきった状態の2つで異なるメカニズムに従っていると考えられる。この様な物質の構造変化により特性が非線形的に変化する現象は、ポリマーマトリックス中に導電フィラーが分散した系などでも見られる [76] [83]。センサの特性が非

線形になるため、変形状態を推定するためには、片方のモデルで従う領域でのみ使用するか、あらかじめ非線形の変換用にデータを取得し、補正すると言ったアプローチが考えられる。

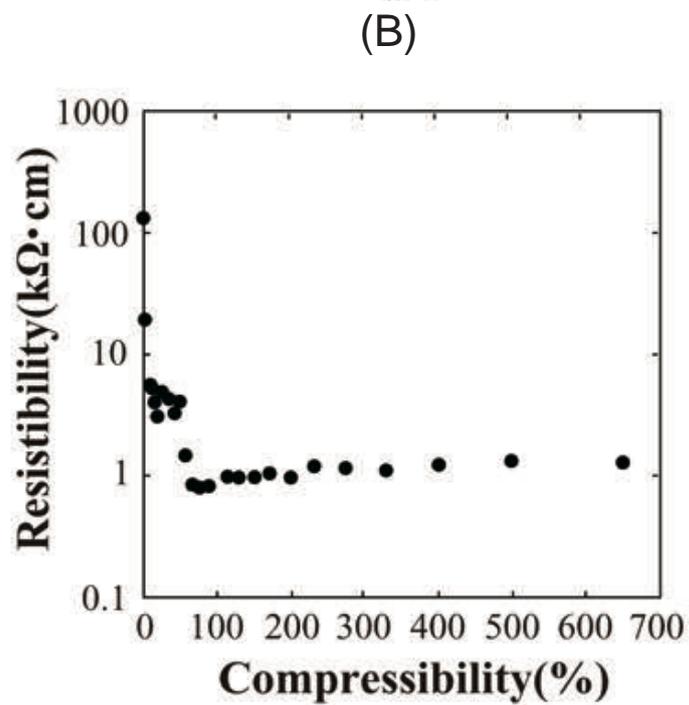
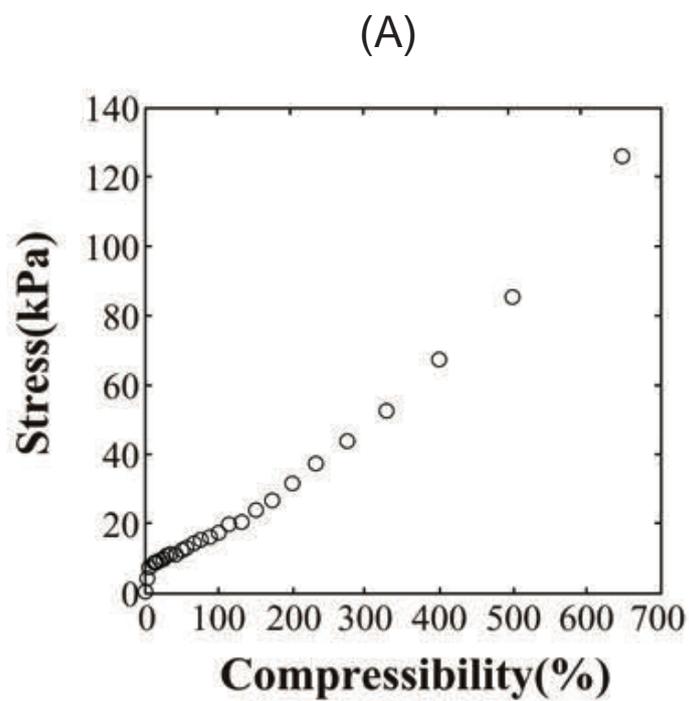


図6.5: スポンジ型 FoamSense の特性 (A) 圧縮と応力の関係, (B) 圧縮と抵抗率の関係

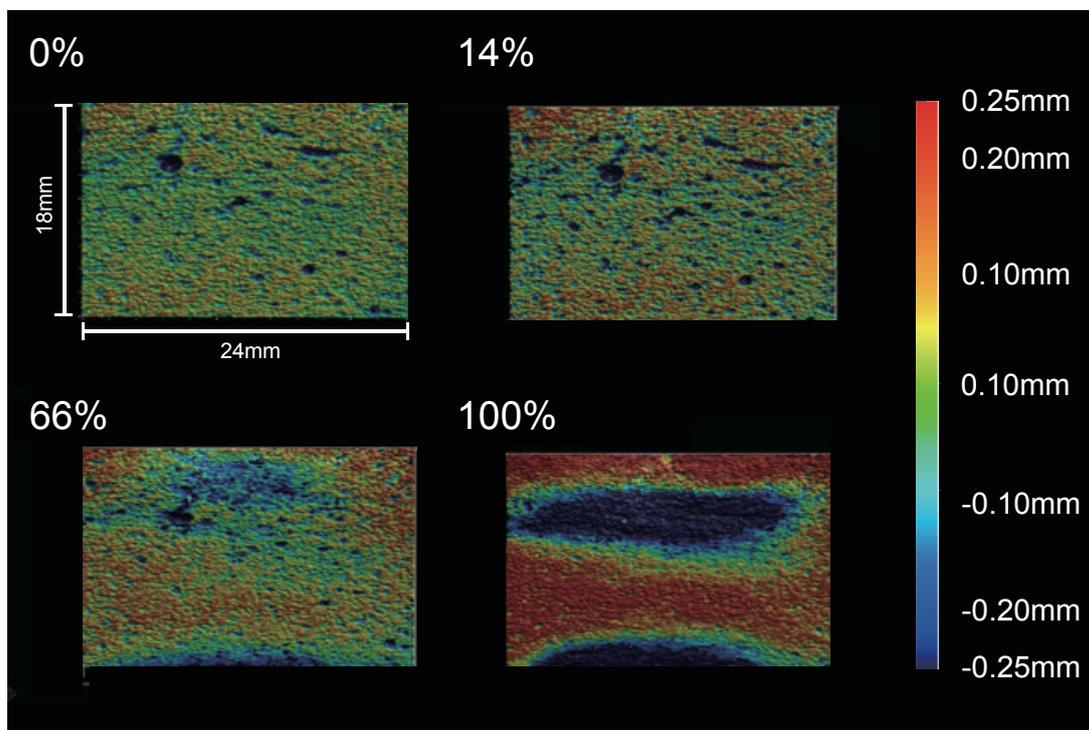


図6.6: スポンジ型 FoamSense 変形時の断面構造

6.3.4 繊維構造サンプルの作成手法

繊維構造サンプルの作成手順を紹介する。繊維の素材にはぬいぐるみ等にもよく使用される綿を採用した。最初に繊維を可能な限りほぐし、繊維全体を先程のスポンジの系と同じ導電性のインクに浸漬した。軽く絞ったあと 25 度の室温環境下で乾燥させた。その後、110 度で 30 分間加熱し、シリコーンエラストマーを硬化させることで繊維に定着させた。実際に FoamSense を作る場合には、機械特性と導電特性は内部に充填された繊維素材の量によって変化することが予想される。そのため今回は 3D プリンタで治具を形成し、[図6.7](#)の形で評価を行なった。

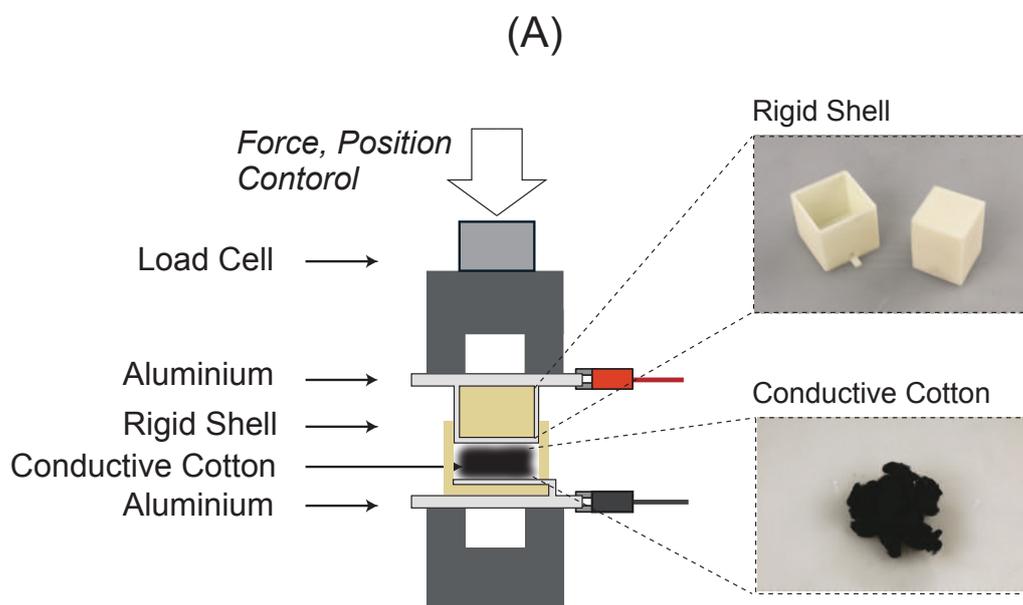


図6.7: 繊維型 FoamSense 測定の様子

6.3.5 繊維型 FoamSense の特性

繊維型 FoamSense の特性を調べる為に、30 mm角の治具に前項の手順で形成した導電性インクが定着した綿を 0.05 g/cm^3 と 0.1 g/cm^3 の条件で充填した。 0.05 g/cm^3 は綿が自身の反力で元の状態に戻ることができる最小限の量の目安である。それぞれの条件の測定結果を図6.8に示す。綿の充填率が大きいほど、剛性が高く、抵抗率が低いという結果が見られた。これは沢山充填することで、すでに圧縮されたのと同じ様な状態になっている為だと考えられる。実際に繊維型の FoamSense を使用する場合には、図6.9の様に、袋の様な構造体に詰めて使用する。外側の袋も柔らかい材料で構成することで、センシング部位の柔らかさを保つ事が可能となる。

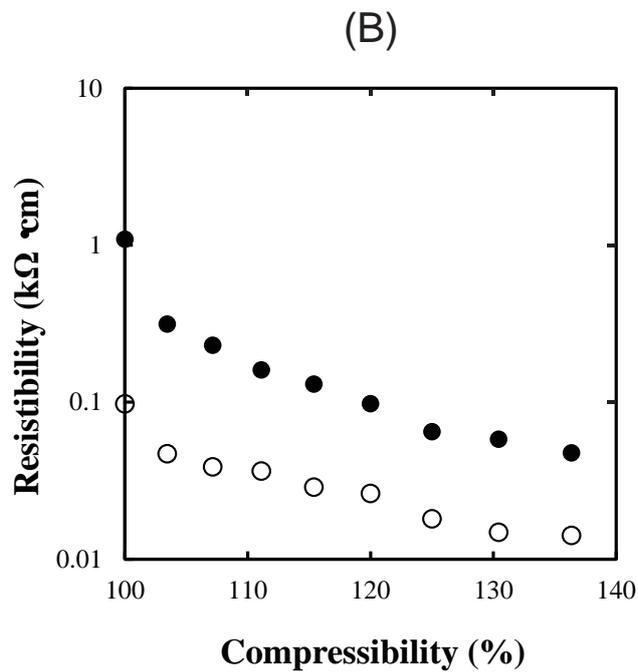
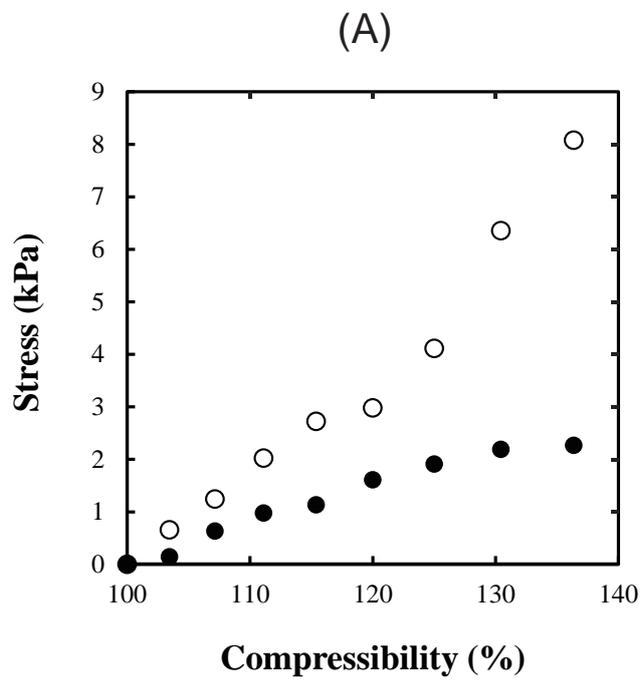


図6.8: 繊維型 FoamSense の特性 (A) 圧縮と応力の関係, (B) 圧縮と抵抗率の関係 (○:0.1 g/cm³と ●:0.05 g/cm³)

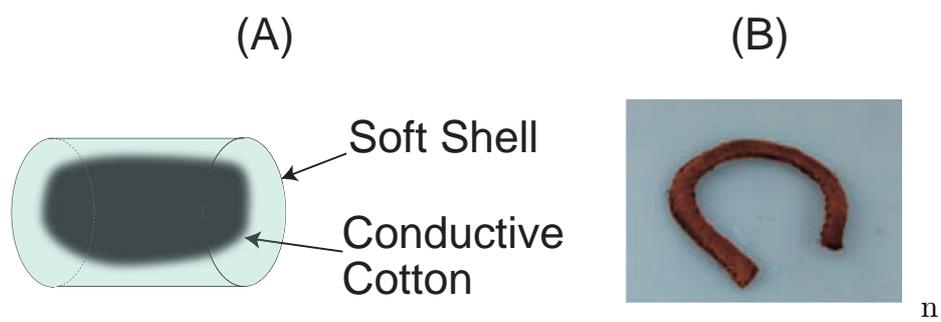


図6.9: 繊維型 FoamSense の使用例 (A) 構成図, (B) フェルトの外装に実装した様子

6.3.6 ビーズ充填型 FoamSense の作成手法

発泡スチロールなどのビーズを柔らかい袋の中に詰めることで、柔らかい構造体を作ることができる。この構造体も一種の多孔質構造とみなすことができる。しかし、この構造はスポンジ等とは異なり、自らで構造を維持することができない。このビーズ充填構造を活用し、[図6.10](#)の二種類の構造を作成した。

一つはビーズをナノカーボン溶液で導電コートしてそのまま使用する系である。今回充填材料には直径1.64 mmの発泡ポリスチロールビーズ、導電性インクには水溶性のナノカーボン分散液（Lion Inc., W-311N）を用いた。溶液に完全に浸潤させたあと 80 度で 4 時間乾燥させている。ビーズは圧力に対して容易に袋の中を移動するため、導電性インクには伸縮性などは要求されない。そのため、ポリマー溶液などを加えなくても機能させることができる。このサンプルは繊維状の FoamSense と同様に30 mm角の治具の中で測定を行なった。

二つ目の構造は、上と同様のビーズを充填したあとにシリコンエラストマー溶液（Dow Corning Inc., Sylgard184）を染み込ませ、110 度で 30 分間硬化させたサンプルである。このサンプルではビーズの位置は固定化されている。また、充填するエラストマーの種類によって、剛性をコントロールすることができる。このサンプルも30 mm角のサイズで特性評価を行なった。

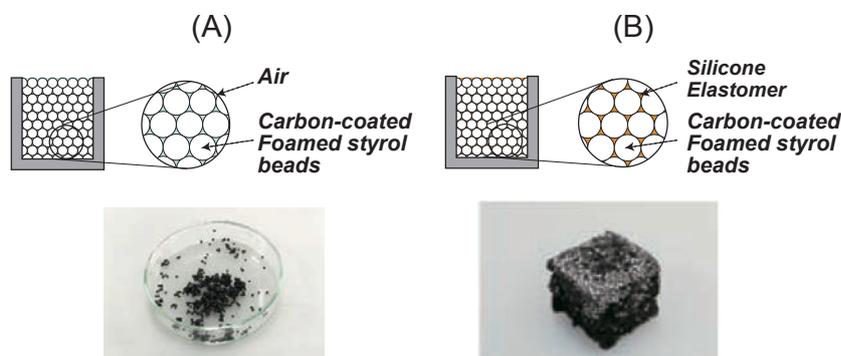


図6.10: ビーズ充填型 FoamSense の構成例 (A) 導電性ビーズを用いた構成, (B) 導電性ビーズとエラストマーを用いた構成

6.3.7 ビーズ充填型 FoamSense の特性

ビーズ充填型 FoamSense の特性を図6.11に示す。試作した2つの構造のどちらも機能している。また、エラストマーを用いた一体型構造のタイプがより大きな反力を示していることが分かる。これは空隙がエラストマーにより充填されたことが原因であると推察される。空気成分の粘性を減らしたい場合や、より硬い剛性が必要な場合などは、エラストマーを充填した手法を採用することは有効であろう。

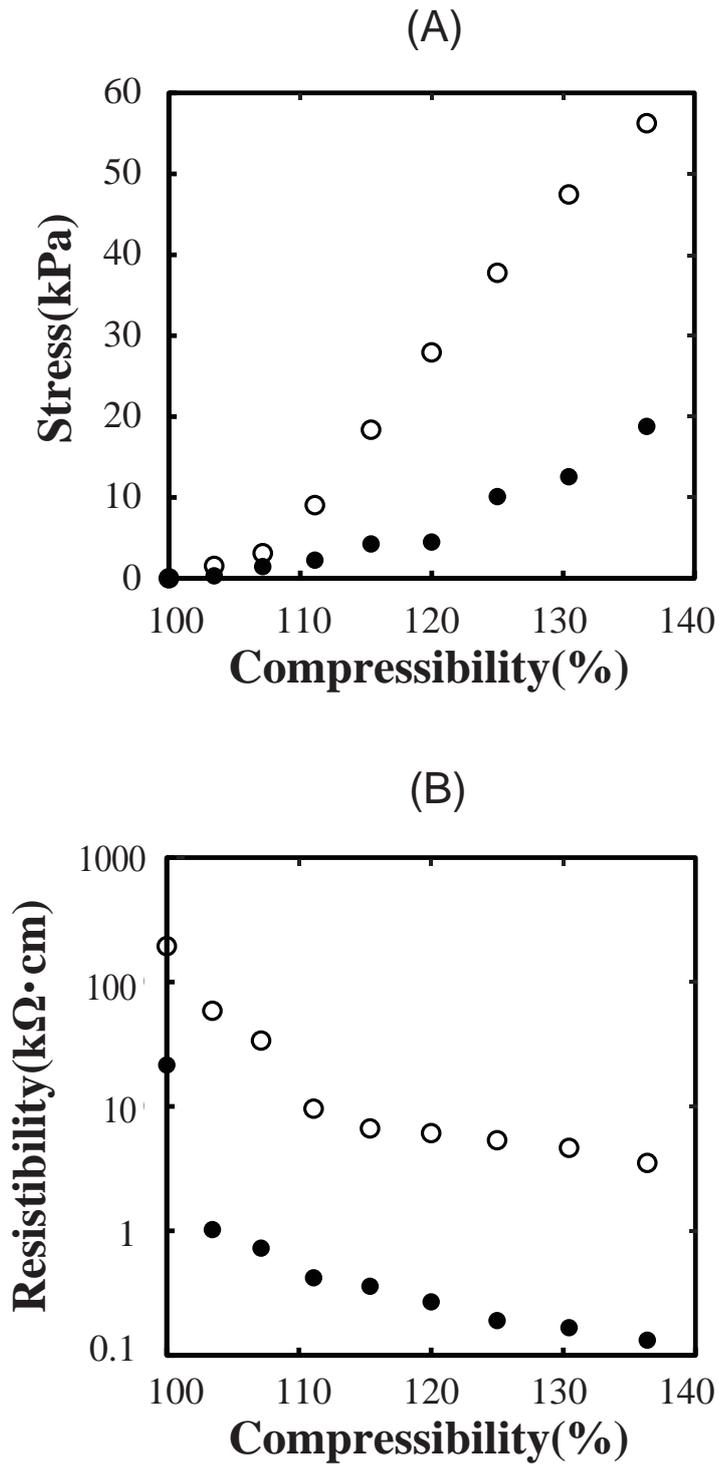


図6.11: ビーズ充填型 FoamSense の特性 (A) 圧縮と応力の関係, (B) 圧縮と抵抗率の関係 (o: 導電性ビーズとエラストマーを用いた構成, •: 導電性ビーズ単体の構成)

6.4 多孔質構造の設計による機能拡張性の考察

これまでですでに存在する製品の微細構造を活用することで、FoamSense を設計してきた。また構成する素材や構造により、センシング特性が大きく変化することがわかった。本節ではデジタルファブリケーションの装置を用いることで、人工的に孔の構造を制御するアプローチを紹介する。2010 年代以降、ソフトマテリアルを扱える 3D プリンタも増えて来ており、柔らかいマテリアルの立体構造の構築が可能になりつつある [148] [138]。これらの技術を応用することで、FoamSense はさらに次の様な発展性がある。

- センシング機能をより高度に設計する。
- 複雑なパターンニングを実現する。
- 形を設計できる。

センシング機能の発展について

前節で紹介した様に FoamSense の電気的な特性の変化は孔構造と対応している。そのため、孔の形に異方性を持たせることで特定の方向の変形により反応させるといった設計が可能となる。またセンサ部位とそうでない部位を意図的に孔のサイズを変化させることで、触感的にセンシング部位だけを柔らかくするといった設計が構造的なアプローチが可能となる。この様に孔構造を自在に設計することで、電気的な特性と機械的な特性の両方をチューニングできる余地がある。

パターンニングの発展可能性について

FoamSense の導電性付与は浸漬による手法を主に扱ってきた。もし、多孔質材料の内部に局所的にパターンニングするには、ニードルを突き刺しながらインクを射出するなどの工夫が必要となる。シリンジを用いた局所修飾のアプローチを用いた場合でも、微細な孔構造によって導電性液体が毛細管現象によって拡散する可能性がある。3D プリンタを活用した場合には、孔構造の接続パスを設計すれば、浸漬手法をそのまま活用しながら、孔が繋がっている部分だけを修飾するといったアプローチが可能となる。

形状の設計について

3D プリンタで出力されるオブジェクトは形も自由に設計できる。そのため用途に合わせてセンシング部位の最終的形態をそのまま出力すれば、スポンジを加工する後工程の必要がなくなる。

我々は柔らかい素材 (シリコーン樹脂) を出力可能な光造形型の 3D プリンタ (Keyence,

Agilista 3000) を用いて、図6.12の様に、孔構造を球体にしたサンプルと楕円球にしたキャリア構造サンプルをそれぞれ作成した。導電性インクには通常のスポンジ構造の FoamSense と同様のカーボンとエラストマーの混合溶液を使用した。

この様に作られたサンプルの特性を図6.13に示す。圧縮と応力を見ると、楕円球の短軸方向は潰れやすく、そのために抵抗率も孔が潰れきった後のモードがすぐに観察される。楕円球構造を作ることによってセンサの感度が大きく変化する様子を観察することができた。

しかし、このような多孔質構造のスポンジを作るのは、従来の発泡体をベースとした手法と比べて、30mm角で30時間以上と非常に時間がかかる。発泡体と樹脂を混ぜ合わせた材料の印刷など、別のデジタルファブ리케이션と合わせて発展させていくことが望まれる。

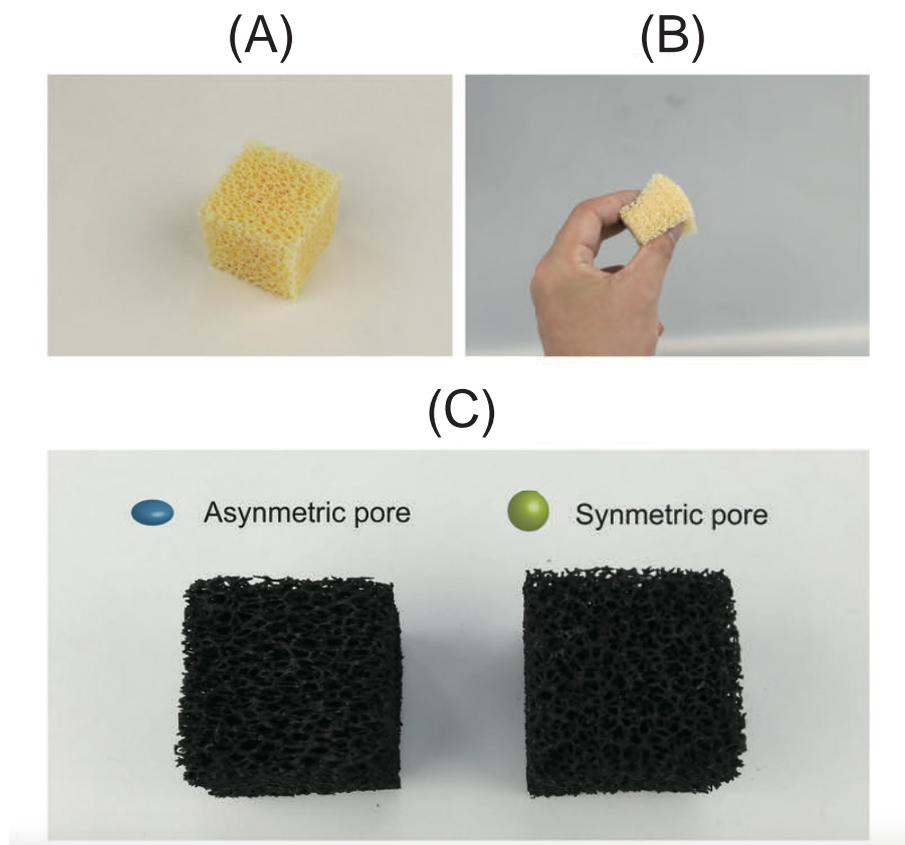
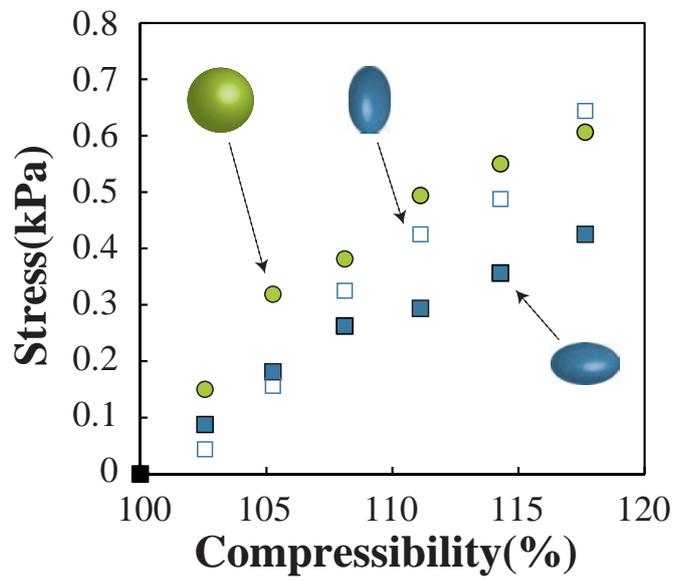


図6.12: デジタルファブ리케이션によって形成される FoamSense (A) 3 D プリンタで出力されたシリコンの多孔質構造体, (B) 多孔質構造体の変形時の様子, (C) 導電性インクを付与した後の多孔質構造体 (左: 楕円球孔構造, 右: 球孔構造)

(A)



(B)

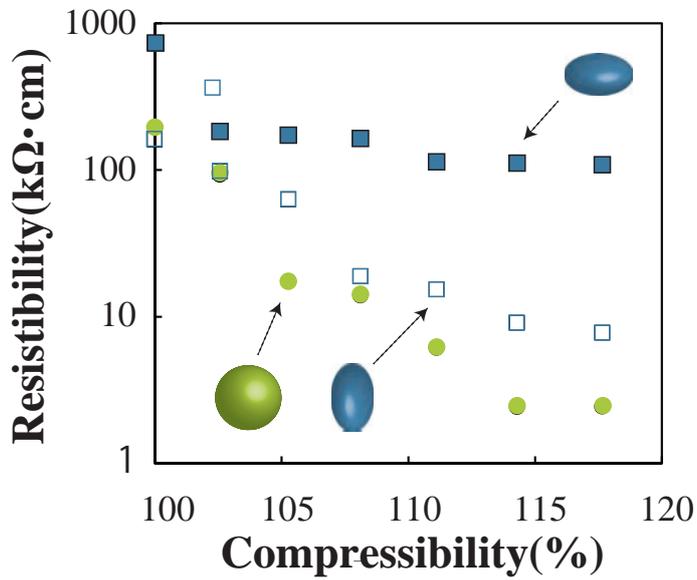


図6.13: デジタルファブリケーションによって形成される FoamSense の特性 (A) 圧縮と応力の関係, (B) 圧縮と抵抗率の関係 (緑の円: 球孔構造の FoamSense, 青の正方形: 楕円球孔構造の短軸方向, 青の白抜き正方形: 楕円球孔構造の長軸方向)

6.5 導電性インクと多孔質構造組みわせのまとめ

これまでに実験を行ってきた FoamSense の基本特性についてまとめる。マテリアルや構造の特性を剛性に対して、図6.14にまとめた。FoamSense は選択するマテリアルによってその剛性が1 kPaから1 MPaと大きく変化する。これは FoamSense が様々な硬さの物質にセンシング機能を付加できることを示している。またこれらの特徴が材料だけではなく、孔の構造や内部に充填される密度などによってある程度チューニング可能であることが示唆された。

硬さ以外に重要な要素となるのが、形状を作るためのプロセスである。市販のスポンジを使う場合は構造体の形を切削などにより加工することで形状を作る。一方で、繊維やビーズなどは外装に充填しておくことで形成される。また、デジタルファブリケーションは形と孔の構造を同時に設計し得る有効なアプローチである。使用する用途に合わせて選択していく必要がある。

導電性インクはキャリアとなる材料に安定して定着するか、変形に対して導電部位追従できるかが選定時の指標となる。ビーズ充填構造の場合は内部の孔構造の変化が、ビーズの位置変化によってもたらされるため、導電性材料の伸縮性などは気にする必要がない。また有機溶媒系の導電性インクは水系に比べて乾燥が早いため、浸潤させてから定着させるまでのリードタイムが短くなる。しかし、一部の素材は有機溶媒に対して溶解することもある。製品のデータシートなどを見て薬剤耐性のある組み合わせで導電性を付与することが望ましい。

大きなサイズの FoamSense を作る場合には、抵抗値が大きくなりすぎるケースなども出てくると予想される。その場合には、今回のカーボンとシリコンを混合した電極の代わりに、より導電性の高い導電性高分子のインク (PANI や PEDOT/PSS 等) を用いることを勧める。

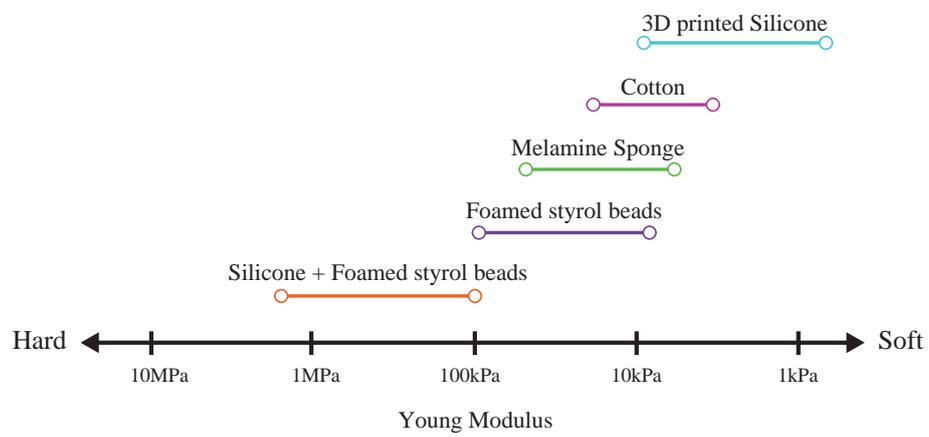


図6.14: ビーズ充填型 FoamSense の構成例 (A) 導電性ビーズを用いた構成, (B) 導電性ビーズとエラストマーを用いた構成

6.6 配線設計によるセンシングモードの拡張

本節では、FoamSense の配線レイアウトを工夫することで圧縮以外に曲げ・ひねり・剪断の三種類の変形状態の取得を試みた結果を報告する。このような変形を取得できる様になれば、ユーザーは柔らかな物質を掴んだり、ひねるといったより直感的で複雑な操作を行える様になることが期待される。導電性の発泡材料をセンサ応用した例 [155] [11] の多くは単純な圧縮に利用されている。本節の設計手法はこれらの多孔質発泡体を応用する手法としても利用することができる。変形状態の取得には、光学実験用の各種治具を用いて、強制的に変形させながら物性を測定した。

6.6.1 配線の取り付け手法

配線の取り付け手法について述べる。FoamSense は柔らかい素材のみで構成されているが、複雑なインタラクションを実現するには、外部の素子とつなぐ必要がある。この配線部分がきちんと固定されていないと、変形した際に配線と FoamSense 間の接触抵抗が変動し、安定したセンシングができなくなったり、外れてしまい故障が起こってしまう。

我々は主に二つの配線取り付け手法を採用した。一つは配線を取り付ける部位にアルミファイバーが分散したナイロンファイバーを置き、その上を導電性の接着剤 (Cemedine Inc., EC03A) で固める手法である。導電性ファイバーは人が触れない箇所で金属配線と結び、導電性の接着剤で固めている。この様に固定化することで、FoamSense の配線接続部由来のセンサ信号のばらつきを抑えることができた。また特に変形回数が大きい用途などでは、この配線部位を保護するために、導電性接着剤部位をさらにエラストマーなどのソフトマテリアルで覆う手法も効果的である。我々は剛性が数十 kPa と低く扱いやすいシリコンエラストマー (Smooth-on Inc., Ecoflex 0010) などを必要に応じて保護層として使用した。

もう一つの配線手法は接着剤がついている銅箔テープなどを直接貼り付けるアプローチである。メラミン樹脂をキャリア材料にした FoamSense は、市販の銅箔テープなどでも十分に接着させることができる。テープの場合は容易に広い面積のコンタクトを設けることができる。一方で金属箔の硬さが気になる様な用途では、前者の様な導電ファイバーなどの柔らかい素材を用いる手法の方が好ましい。

6.6.2 曲げ状態の推定

柔らかい物質はアスペクト比が大きいと容易に曲げることができる。この曲げ状態を測定することができれば、人形の腕やベルトの締め付け具合など身の回りのモノに様々な入力を行うことができるようになる。スポンジ構造の FoamSense を高さ：80 mm* 幅：30 mm* 奥行き：15 mm角の直方体に加工し、[図6.17](#)の様に四本の配線を接続した。ある曲率半径を持った物体に添わせて曲げていくと、内側の配線 (CH1) と外側の配線 (CH2) のそれぞれの抵抗値が減少する。一方で曲げの量が大きくなりすぎると、外側の配線の抵抗値が大きくなっていく様子が観察できる。これは大きく曲げすぎることによる圧縮による影響だけではなく、伸長側の孔構造の変化が抵抗値を上げていると考えられる。二つの配線の値の差分値を用いることで、おおよその曲げ状態予測することができる。

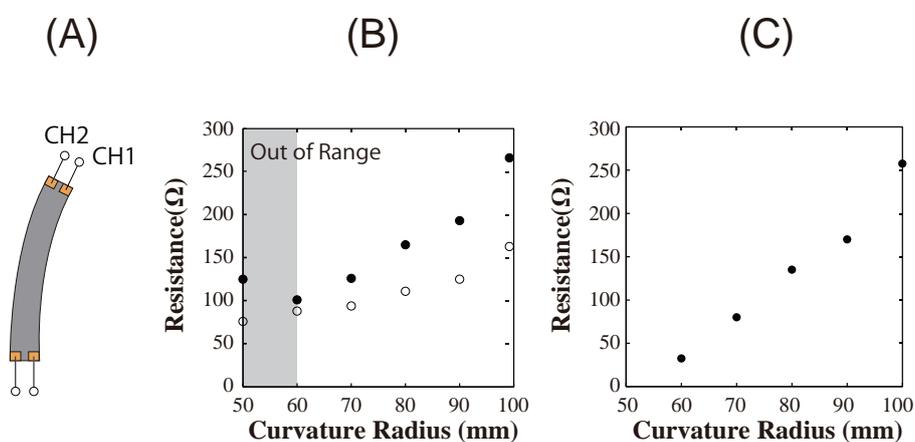


図6.15: スポンジ型 FoamSense による屈曲状態推定 (A) 配線接続の様子, (B) 曲率に対する抵抗値 (○: 曲げと内径側の配線 CH1 の抵抗値の関係, ●: 曲げと外側の配線 CH2) の抵抗値の関係, (C) 曲げと CH1 と CH2 の抵抗値の差分の関係

6.6.3 ひねり状態の測定

柔らかい物質は様々な方向にひねることができる。このモードを測定することができれば、回転運動をより直感的に入力する手法等に応用が期待できる。通常ひねりや回転はロータリーエンコーダなどのデバイスによって測定されるが、FoamSense も配線のパターンを工夫することで、ひねりの量を推定することができる。ひねりの測定には30 mm角の立方体型のFoamSense を用いた。FoamSense の回転軸の上下面を図6.16の様に導電テープで半分程覆い、場所をずらして配置している。測定結果では、ひねりの量に対して抵抗値が低下している様子が観察される。電極部位は抵抗値がほぼ0であるので、等電位面としてみなすことができる。ひねりの動作のことで電極が重なるエリアが大きくなるため、圧縮による抵抗値変化と導電パスの面積が増える効果により抵抗値が下がると推察される。

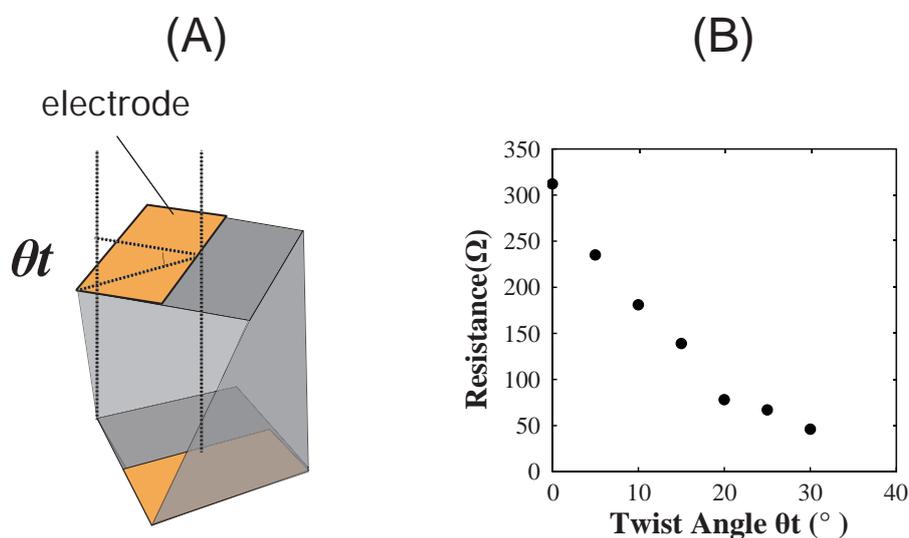


図6.16: スポンジ型 FoamSense によるひねり状態推定 (A) 配線レイアウトとパラメータ (θ_t : 回転角度), (B) ひねり角度と抵抗値の関係

6.6.4 剪断状態の推定

多孔質材料は単に押すだけでなく、ずらす操作も加えることができる。この時の内部の剪断状態の推定を試みた。剪断の測定には30 mm角の立方体型のスポンジ型 FoamSense を用いた。電極配置もひねりと同じレイアウトである。またキャリア材料が非伸縮性の場合には剪断を起こすために、あらかじめ電極の上下面方向に FoamSense を歪ませておくと、より多くの剪断を加えることができる。配線レイアウトと測定の結果を図6.17に示す。剪断によって生じたずれの角度に対して、一様に抵抗値が低下している様子が観察された。材料の伸縮性が小さい場合は、圧縮をしてから歪ませた方が対応可能な領域は広がる

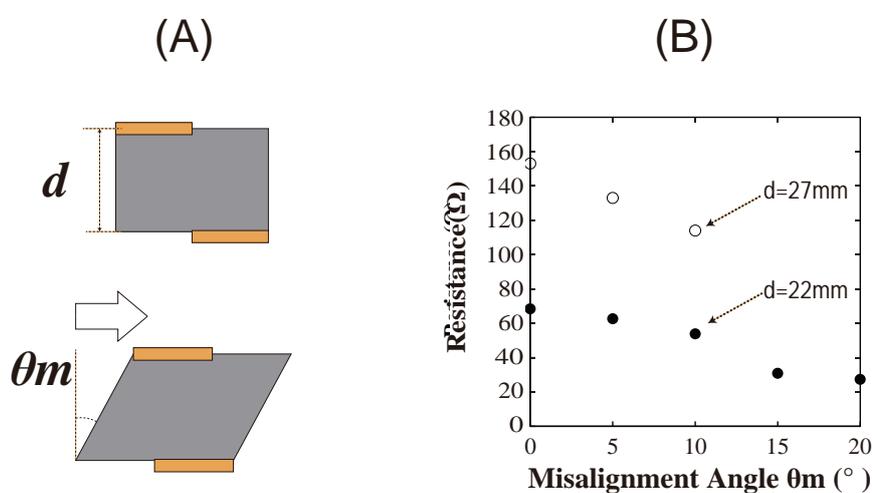


図6.17: スポンジ型 FoamSense による剪断状態推定 (A) 配線レイアウトとパラメータ (d : 初期厚み, θ_m : 剪断によるずれ角度), (B) 導電性ビーズとエラストマーを用いた構成

6.7 浸潤パターンニング手法による設計の考察

ここまでに紹介した FoamSense は均一に電極を浸潤させた構成であった。FoamSense は導電性インクの浸潤法を工夫することで、部分的に導電性を付与することも可能である。この特性は通常の導電性スポンジに対していくつかの優位性を持っている。一つは、導電性を付与するための材料の消費量を減らすことができる。全体に導電体を分散させなくても、測定領域の電極配線の間のみ修飾させればセンシングを行うことができる。またインクを染み込ませる位置を工夫することで、一つのキャリアの中に複数のセンサを実装することができる。

例えば、図6.18はセンサの表面の可変抵抗部位を PANI, 等電位面をより抵抗値の低い PEDOT/PSS で塗工することで複数の圧縮センサを1つのキャリア中に実装している。このセンサの左右の信号を読み取ることでどちらがより多く歪んでいるかを測定できるので、FoamSense の上面がどの様に傾いているか推定することができる。また FoamSense は物質の柔らかさを損なわない様に変形に追従する導電性素材を付加しているが、表面のテクスチャや見た目を完全に維持したい場合などは、必要な箇所のみをシリンジなどを用いて浸潤させることで物質性をより確保することができる。この様に導電性の付与のやり方により物質性、機能性の両面でカスタマイズをすることが可能である。

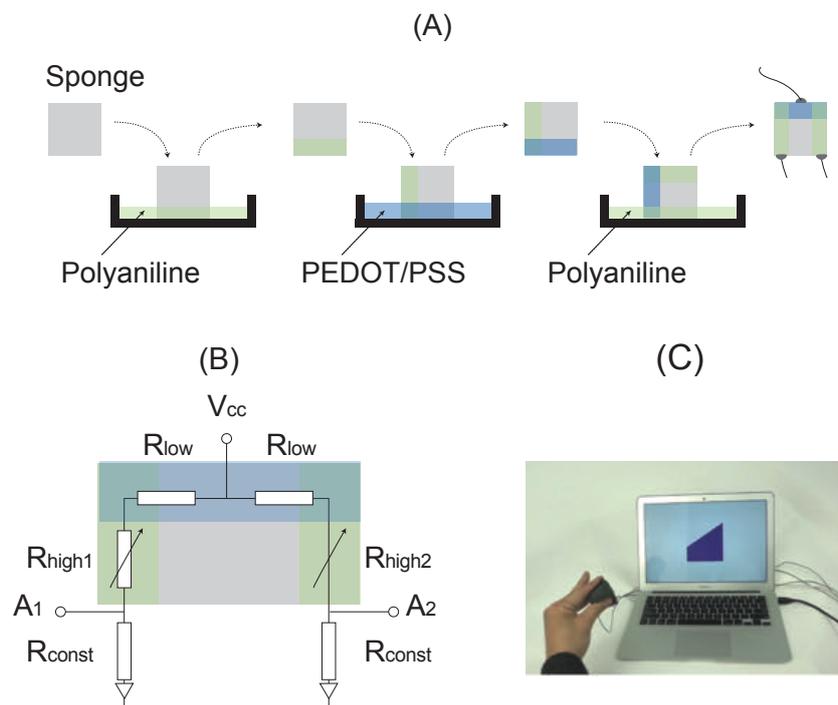


図6.18: 導電性インクの浸潤法を工夫した FoamSense (A) 複数のセンサを設計するためのプロセス, (B) FoamSense の電気等価回路, (C) 二つのセンサが統合された FoamSense 変形の様子

6.8 多孔質構造活用手法の制約事項

本節では FoamSense の制約事項について述べる。

センサの基本特性について

はじめにセンサとしての基本特性としては、前節で紹介した様に抵抗値の変化が孔構造の変化によって引き起こされるため、孔構造が変化する領域と孔が潰れた状態からの圧縮で抵抗変化が異なる。そのため、変形量を正確に推定するためにはあらかじめセンサの特性を測定し、変換する必要がある。最小分解能はより大きく抵抗値が変化する孔構造が変化する領域の特性に準じた値となる。

複数変形モードの推定

配線を増やしていけば理想的には複数の変形も推定できる。しかし、実際にはソフトマテリアルであるため、いくつの変形が与えられているかといった前提条件も与えられていない状態では、複数の変形を同時に推定することは難しい。また、導電性のインクを浸潤させる現在の手法の場合は、毛細管現象により溶液が拡散してしまう。そのため、浸潤によるパターンニングでは孔のサイズと溶媒の粘度などにより、実現可能な空間分解能が決まってしまう。この部分についてはさらに詳細な研究が必要である。

前節では様々な変形状態の推定手法を提案したが、単線の接続で取得可能な情報は一つの抵抗値変化として現れる。そのため、シンプルな構成で変形状態を推定する場合にはあらかじめどのような変形が生じるか、システムが知っている必要がある。

材料の耐久性について

またソフトマテリアル全般の課題であるが、材料によっては変形によって材料が疲労し、初期の孔構造を維持できなくなる。単純な圧縮の場合はメラミン樹脂を用いたスポンジ型 FoamSense では約 200 回程度まではすぐに元の状態に戻るが、その後は徐々に初期値が低下し、ダイナミックレンジが下がる。キャリア材料にウレタンフォームなどを用いた場合は 1000 回程度大きく変形させてもほとんど劣化は見られなかった。材料の疲労などによる効果を低減するには、繰り返し変形に対して耐久性の高い材料を使用するか、定期的にキャリブレーションをするなどの対策をする必要がある。

センサの応答特性について

センサとしての応答特性も材料に依存する。FoamSense の変形特性は多孔質体の材料と孔構造に依存する。シリコンやウレタンの様に粘性に対して弾性が大きな材料であれば外

力に対して短い時間応答が完了する。これらの特性は材料力学で用いられる一般 Maxwell モデルなどにより特性をある程度予測することができる。今回のメラミン樹脂の場合、劣化していない状態でほぼ 1 秒以内に復元することができた。構造上基本的に空気を含むため、高周波になるほど粘性の影響が大きくなりセンサとしてのヒステリシスは大きくなると予想される。

6.9 アプリケーションシナリオの紹介

FoamSense の特徴を活かしたアプリケーションとその活用シナリオを 3 つ提案する.

6.9.1 人形玩具型インタフェース

ぬいぐるみの様な柔らかなオブジェクトにセンシング機能を搭載する様な試みはいくつか行われているが, 柔らかい素材のみで連続的な変形状態を取得することは未だに困難である [108] [124]. 我々は図6.19の様に, スポンジ型の FoamSense を人形の腕の中に実装することで, 腕の曲げ具合を測定できるぬいぐるみ型インタフェースを実装した. 図6.20の様に, ぬいぐるみは元から柔らかい素材が詰まっているので内部に FoamSense を加えても, 見た目や触り心地はほとんど変化しない. 人間とコミュニケーションする玩具などはすでに販売されているが, FoamSense を用いることでより複雑な状態を認識することができる可能性がある. またこのインタフェースはシンプルなコネクタで接続されており, インタフェースとして使用しないときは普通の人形として遊ぶことが可能である. またこの FoamSense の価格は材料費で 20 円弱であり, センシング部位の導入コストが低いという利点も有している.

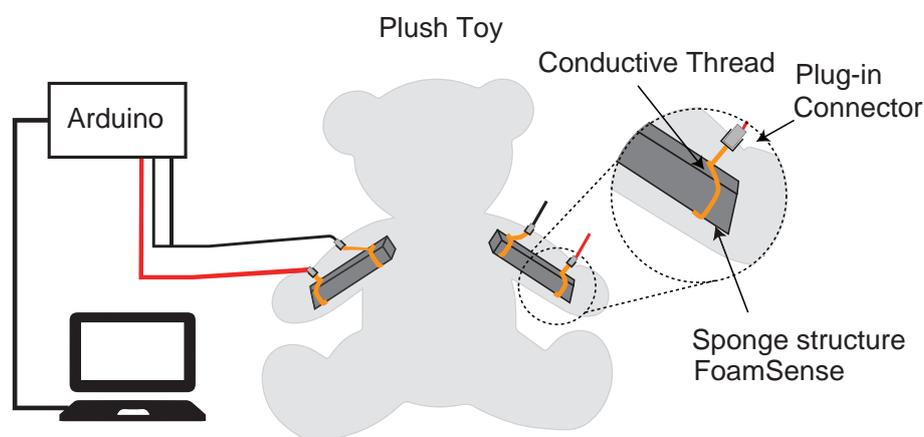


図6.19: 人形玩具型インタフェースのシステム構成図

(A)



(B)



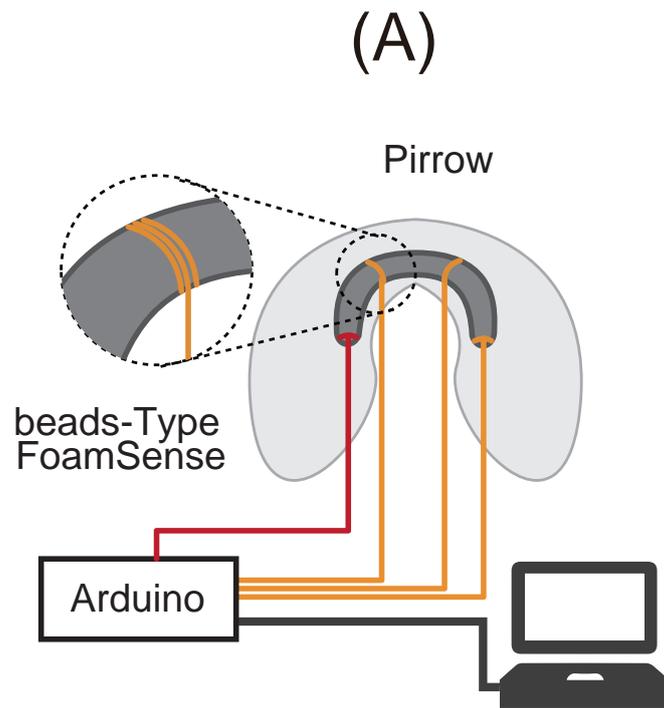
(C)



図6.20: 人形玩具型インタフェースの外観 (A)FoamSense 設置の様子, (B)FoamSense 導入後の柔軟性の様子, (C)FoamSense により画面内のオブジェクトを操作する様子

6.9.2 ネットピロー型インタフェース

図6.21の様に、圧力センサアレイをネットピローに導入したアプリケーションを提案する。この様に人が直接触れるオブジェクトは、特に柔らかさを損なわないことが重要となる。今回は手が不自由な人などが首の動きでデジタルコンテンツをコントロールするといったユースケースを想定している。ネットピローはの内部の FoamSense は繊維状のモノが利用されており、綿とフェルトの袋を組み合わせて構成されている。100 円程度の材料費で首周辺部位の入力をカバーすることができる。複数本モジュールを加えたり、分割する配線を増やすことでより細やかなデータを取得することも可能である。



(B)

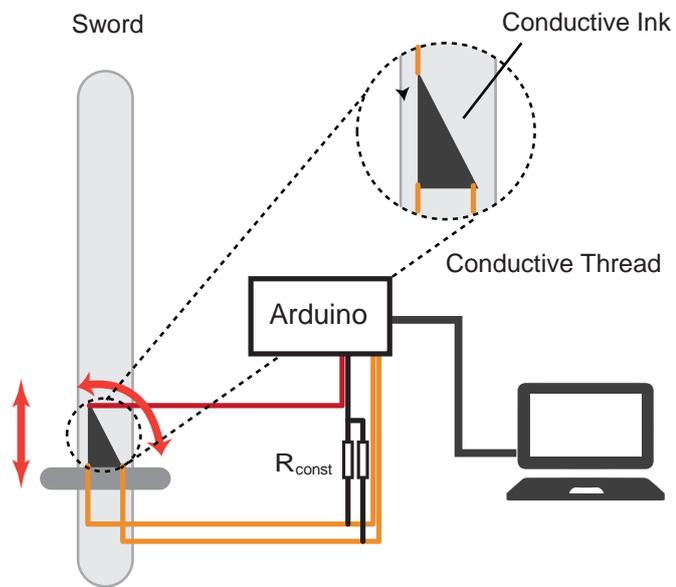


図6.21: ネットピロー型インタフェース (A) システム図, (B) 使用時の様子

6.9.3 玩具の剣型のインタフェース

スポンジでできた玩具の剣にインタラクション機能を統合する手法を提案する。玩具の表面の一部に図6.22の様に導電性の電極を塗布することで、剣を振った時の曲がりを検知して音を鳴らすことごできる。またひねる動作によって音のモードを切り替える操作ができる様になっている。このアプリケーションの特徴は、既に存在するプロダクトに対して、付加的にインタラクション機能を統合している点である。材料が元から多孔質構造を有している場合は、導電性を部分的に付加することでインタフェース機能付加することができる。

(A)



(B)



図6.22: ビーズ充填型 FoamSense の構成例 (A) 導電性ビーズを用いた構成, (B) 導電性ビーズとエラストマーを用いた構成

6.10 マテリアルが有する微細構造を活用する手法のまとめ

微細構造を活用して、マテリアルに認識機能を統合する手法として FoamSense を提案した。FoamSense は多孔質体に導電性インクを浸潤させることで形成される芯まで柔らかいセンサである。本章では、実際に FoamSense を設計する際の手順をキャリア構造と導電性インクの組み合わせ方法とそれらの特徴などを紹介した。HCI 領域の研究者はこのプロセスを元に、用途に合わせた様々なセンシング機能を組み入れられる。

また、FoamSense の特徴を活かして、孔構造を 3D プリンタを用いて形成するアプローチを提案した。この手法はセンサの特性に異方性を持たせると同時に、形そのものを設計できる可能性がある。デジタルファブリケーションプロセスを組み合わせることで形状や機械特性、センサの特性など様々な要素をコンピューショナルに設計できる可能性があり、今後の発展が期待される。

FoamSense は孔構造の変化を利用するため、孔の歪み方が決まっていれば、配線を工夫することで圧縮以外にも曲げ、ひねり、剪断などの変形量を推定することができる。加えて、浸潤のパターンにより、複数のセンサを一つのキャリア中に内包させることができる。この特徴から、すでに多孔質体を含んでいるプロダクトに違和感なく機能を加えることができる。デバイスを取り付けるのではなく、マテリアルに直接物性を付加するアプローチは、追加コストも少なく、柔らかさなどを保ちたい用途では有効な選択肢になり得るであろう。

また今回は導電性を付与しているが、インク状のスマートマテリアルを組み合わせることで、異なる機能を付与することも可能である。例えば図 6.23 の様に、多孔質体の表面に温度に対して色が変化するロイコ染料インク (Matsui Shikiso Chemical Coro., Chromicolor AQ ink) により温度に対する色の変化を起こしたり、フェライトパウダー (Sigma Aldrich Inc.) をシリコーン樹脂に分散させたインクを加えることで、常磁性を持たせて磁石に反応する様に特性をカスタマイズすることができる。将来的にはこのアプローチ法により複数の機能の統合や信号処理技術などの活用により、より複雑な変形状態の推定などが期待される。

材料が元から有する微細構造を活用するアプローチは、そこに付加する機能やその位置を工夫することで、様々な機能に展開していける可能性がある。そのためには機械特性や密着性、溶剤耐性といった条件を満たす適切な材料の組み合わせとインタラクション機能と微細構造の関係性を把握することが重要となる。このアプローチでは微細構造そのものは設計しなくても機能を付加できることから、既存のプロダクトに付加的に機能を付与していける点もユニークである。



図6.23: 異なる機能性インクを染み込ませた FoamSense, (A) ロイコ染料を染み込ませた FoamSense, (B) フェライトを染み込ませた FoamSense(黒色), 表面にネオジウム磁石を固定したスポンジ (白色)

第 7 章

材料の分子構造を設計する手法

前章までは既に存在するマテリアルやプロセス、微細構造を活用する手法の提案であった。本章では材料の機能に寄与する分子構造をそのものを設計することで、その機能を拡張するアプローチについて論ずる。

7.1 材料の設計が必要となる背景

前章までは、既存の材料の組み合わせや元からある微細構造を活用することで機能の向上を試みてきた。しかし、容易にアクセスできる材料や元から存在する微細構造の組み合わせでは所望の特性が実現できない場合は、材料と構造設計のどちらに取り組む必要があるのであろうか。

2章で紹介した様々なスマートマテリアルは、その分子構造により機能が創出されている。外部刺激に応答して変形する刺激応答性ゲルは、ゲル分子と溶媒分子に働く相互作用 (van der Waals 力, 水素結合, 疎水結合, 静電相互作用) といった微視的な力が全体に影響を及ぼし、化学ポテンシャルに応じて、その釣り合いの状態に移行することで巨視的な変形を起こす。また光吸収により変形するポリマーフィルムでは、光異性化反応を起こすエネルギーに相当する波長の光が吸収され変形を引き起こしている。この様に機能を生み出す要素が非常に小さな構造に由来する場合は、その機能をカスタマイズするためには、小さなスケールでの設計が必要となる。

機械的な構造設計により、この様な領域の特性の実現を試みている研究も存在する。光学の分野では人工的に負の屈折率をもつ光学的なメタマテリアルを作る試みが行われている [140]。このマテリアルの作成には半導体プロセスを用いて、小さなコイルに相当する部位を周期的に配置している。数 μm 以下スケールで微細構造を作りこむことで、光とも干渉できる様になり、新たな機能が創出されている。

しかし、微細構造のスケールが小さくなるほど、大きな面積に対応しようとした際に、加工にかかる手間も大きくなる。この様な原則を考えると、パーソナルファブリケーションでは実現が難しい数十 μm を下回る様な領域では、トップダウンで作る加工設計のプロセスではなく、化学反応といったより小さな構成単位からボトムアップで作るプロセスの方がアクセスしやすく、スケールもしやすいと考えられる。

本章では、この様な分子設計が必要になるケースとして自励振動ゲル材料の機能拡張を取り扱う。この材料は特定の環境条件下で膨潤と収縮運動を繰り返すというユニークな特性を持っている。これは現在のプロセッサにより動きをコントロールするという現在のアーキテクチャに対して、自律的な変形がマテリアルによって実現されているという点でセンシングやアクチュエーションという機能を越えた系である。将来的により複雑なインタラクションをマテリアルのみで実現するための、重要な基礎的な知見になると考えている。

しかし、この材料は 30 度を超えると、その分子構造由来の収縮力により動作できなくなる

という問題を抱えている。また、駆動可能な周期が 100 秒程度と長く、リアルタイムでインタラクションを行うことが困難であった。この課題は構造によるアプローチでは解決することが難しいため、材料の分子構造を設計することで、特殊な装置を用いずに、機能を拡張していくプロセスを紹介する。また実際にこの様な材料の改良によるインタラクション機能拡張の意味について論ずる。

7.2 自励振動ゲルの研究背景

2章でも紹介した高分子ゲルは、三次元に架橋したポリマーが溶媒を含み膨潤したソフトマテリアルである。我々の身の回りにも、給水剤、食品、化粧品など様々な形で利用されている。また外部からの物理刺激に対して体積が変化する刺激応答性を備えるゲルも存在し、アクチュエータやドラッグデリバリーなど様々な用途への応用が期待されている [36] [4] [163]。

ポリ N イソプロピルアクリルアミド (PNIPAAm) に代表される一部の刺激応答性ゲルは、その安定状態が非線形モデルとなっており、不連続な変化 (相転移) を起こすことが知られている。これは大きな体積変化として現れるので、静音な駆動源として用いる試みがソフトアクチュエータの分野でなされている [34] [96] [161]。

また、相転移現象を用いなくても、ゲルの両面に電極を備え、ポリマー中のイオンの移動による膨潤収縮を利用し、変形を起こす Ion Polymer Metallic Complex (IMPC) [116] などのアクチュエータも低電圧駆動で音がしないため注目を集めている。課題である溶媒の蒸散を抑える手法としてはイオン液体とゲル構造体を組み合わせたアプローチなども提案されている [26]。

イオン駆動型のアクチュエータの他に、外部と物質をやりとり可能であるゲルの特性を活かしたユニークなゲルアクチュエータとして、自励振動ゲルが知られている [159]。自励振動ゲルは振動系の化学反応として知られる Belousov-Zhabotinsky 反応 (BZ 反応) の構成要素である金属触媒をゲルのポリマーに共重合させたゲルである。このゲルを BZ 反応環境場に置くことで、金属触媒の価数が周期的に変化し、自励振動を起こす [49]。BZ 反応環境場中の自励振動ゲルは金属触媒の価数が周期的に変化する。金属触媒の酸化・還元の状態により、ゲルの溶媒に対する溶解度が変化するため、ゲルの体積が変化が生じる。

図 7.1 の様に、この自励振動ゲルに微細な構造的な差異を設けることで、変位を拡大する試みも行われている。Maeda らはゲルを硬化させる前のプレゲル溶液を上下面で異なる濡れ性をもつモールドに注入し、硬化させることで、ゲルの内部に親水性成分の傾斜をつけた自励振動ゲルを提案した [80]。このゲルは IPMC の様に片面がより大きく変形するため、自励振動時に大きく撓み運動を起こす。このゲルを波状の床面上に置くことで、摩擦に異方性が生じ、自律的に一方向に進む Self-Walking Gel が実現されている [80]。

この他にも自励振動ゲルに相分離を起こし、ゲルの網目サイズを広げることで、膨潤収縮

変位を拡大し、化学波に伴い蠕動運動する自励振動ゲルが提案されている [81] [88]。この自励振動ゲルは、上に置いた物質を化学反応により輸送することもできる。

これらの自励振動ゲルを構造の工夫により拡張したシステムはいずれも、外部から物理信号の ON/OFF スwitching を加えずとも、化学反応に同期して自励振動する。このような材料を用いることで、体内に入ってから定常的に薬を射出する様な自励振動型のドラッグデリバリーシステム (DDS) やロジック回路を必要としないペースメーカーといった従来ではソフトマテリアルだけでは難しい機能の実現が期待されている。

しかし、このユニークな自励振動ゲルはその分子鎖に温度に対して体積相転移を起こす PNIPAAm を用いている。そのため、相転移を起こす下限臨界共溶温度 (Lower Critical Solution Temperature ; LCST) である 32 度を上回るとゲルの分子鎖が収縮し、駆動できなくなるという課題が存在した。自励振動ゲルを DDS などのシステムで使用するためには、40 度以上でも駆動できることが好ましい。我々は分子設計をすることで、自励振動ゲルが動作可能な温度領域をより広げることを試みた。また駆動可能な温度範囲を広げることで、温度上昇に伴い化学反応の速度も向上するため、自励振ゲルの応答速度を早め、より短い応答速度でのインタラクションの実現を試みた。

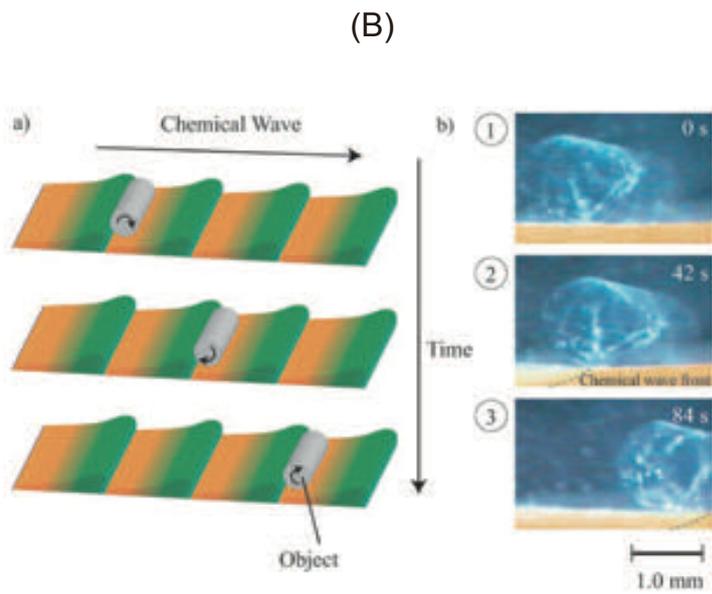
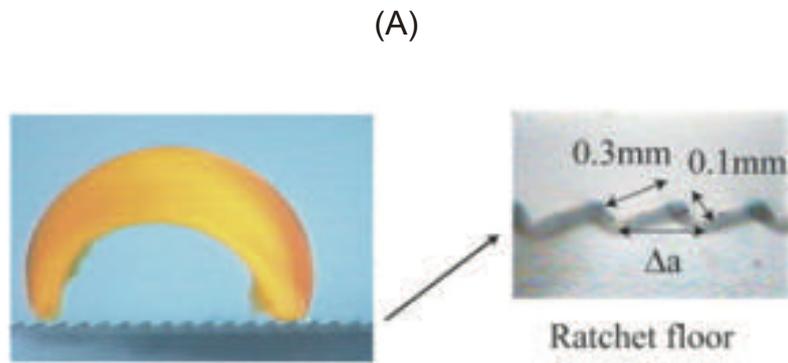


図7.1: 自励振動ゲルを応用したシステム (A) 自律歩行するゲルロボット, (B) 蠕動運動する自励振動ゲル ([80] の Fig4 と [81] の Fig3 より引用)

7.3 自励振動ゲルの駆動メカニズム

本節では自励振動ゲルの駆動原理である BZ 反応と従来の自励振動ゲルの構造について説明する。

7.3.1 BZ 反応の概要

BZ 反応とはセリウム塩やルテニウムなどの金属塩と臭化物イオンを触媒とし、マロン酸などのカルボン酸を臭素酸塩等により緩やかに酸化する化学反応である。系内に存在するいくつかの物質の濃度が周期的に変化する振動反応の代表的な例として知られている。図7.2の様に、溶液攪拌化では金属触媒の価数に合わせて溶液の色が変化し、溶液静置下では金属触媒部位の酸化還元状態が化学反応波として伝搬し、周期的なパターンを作り出す。BZ 反応には次の4つの要素が必要である。

- 金属触媒 (Ce, Ru など)
- 酸化剤 (臭素酸)
- 還元剤 (マロン酸などの基質)
- 酸 (硫酸や硝酸など)

BZ 反応の反応機構は、1974 年に Field らにより報告された FKN メカニズムが最も代表的なものである [22]。これら4つの要素を適切な比率で加えると複数の化学反応が同時平行に進む。実際にはいくつかの中間体を作る非常に複雑な反応系である。反応後の溶液の分析などから全体としては、下の化学式で表されるマロン酸などの基質の酸化反応であると考えられている。[139] [29]。



FKN メカニズムによると化学反応は大きく下の3つのプロセスに分けられると考えられている [29] [139]。

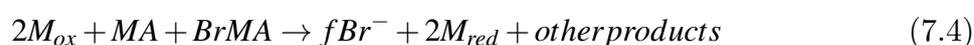
プロセス A



プロセス B



プロセス C

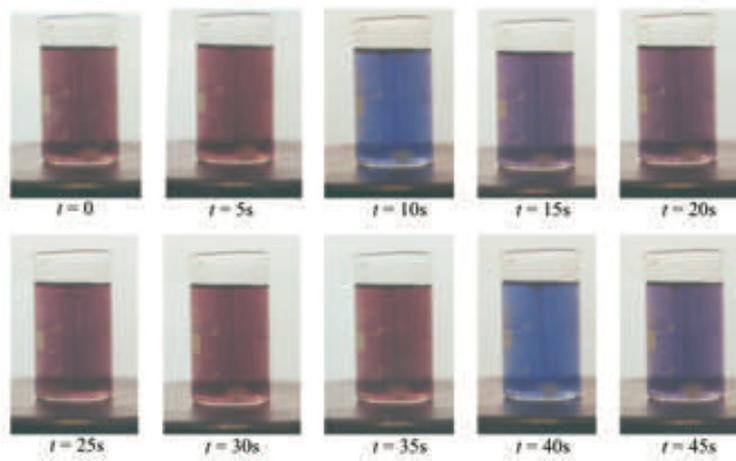


M は金属触媒, MA はマロン酸 (基質) を表している. プロセス A は臭素イオンの消費過程である. プロセス B は金属触媒の酸化と $HBrO_2$ の自触媒反応, プロセス C は金属触媒還元と臭素イオンの生成を行なっている. このプロセス A, B, C が順に繰り返されることで, 金属触媒の価数が周期的に変化しながら全体の酸化反応が進んでいく.

7.3.2 自励振動ゲルの構造と動作メカニズム

従来の自励振動ゲル [159] は BZ 反応の構成要素の内, 図 7.3 の様に金属触媒 (ルテニウムビピリジン錯体 ($Ru(bpy)_3$)) を温度応答性の高分子 PNIPAAm に共重合することで作られる. このゲルを酸化剤, 基質, 酸を含んだ溶液環境に浸漬させると, 図 7.4 の様に外部から物質を取り込み, ゲルの内部で BZ 反応が生じる. BZ 反応が起こることで, ゲルの分子鎖中のルテニウム錯体は酸化 (二価, オレンジ色) と還元状態 (三価, 緑色) に変化する. 分子鎖の錯体の価数により, ゲルと溶媒との相互作用力が変化する. 金属触媒が部位が三価の時は BZ 環境場により膨潤しやすくなるため [159], BZ 反応の周期に同期して自励振動を起こす.

(A)



(B)

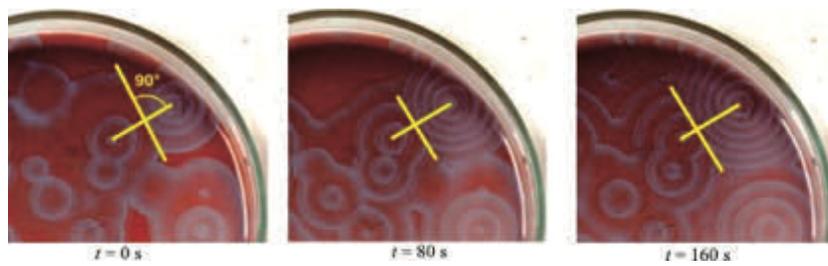


図7.2: 溶液系の BZ 反応 (A) 攪拌状態の様子, (B) 静置状態の様子 ([145] より引用)

poly(NIPAAm-co-Ru(bpy)₃)

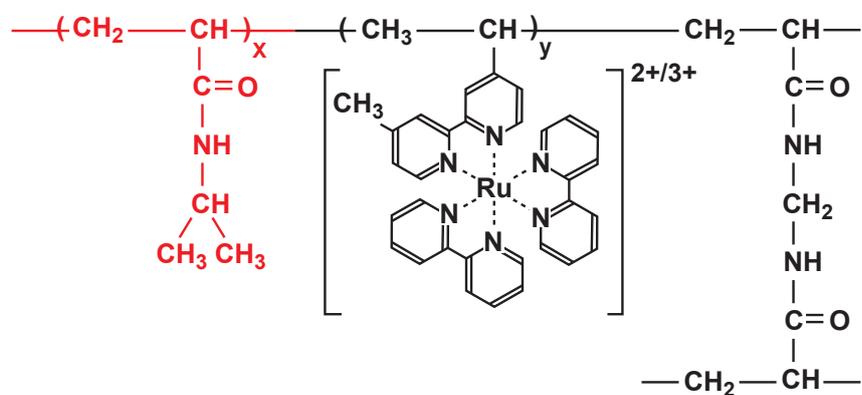


図7.3: 自励振動ゲル (poly(NIPAAm-co-Ru(bpy)₃ gel) の化学構造式

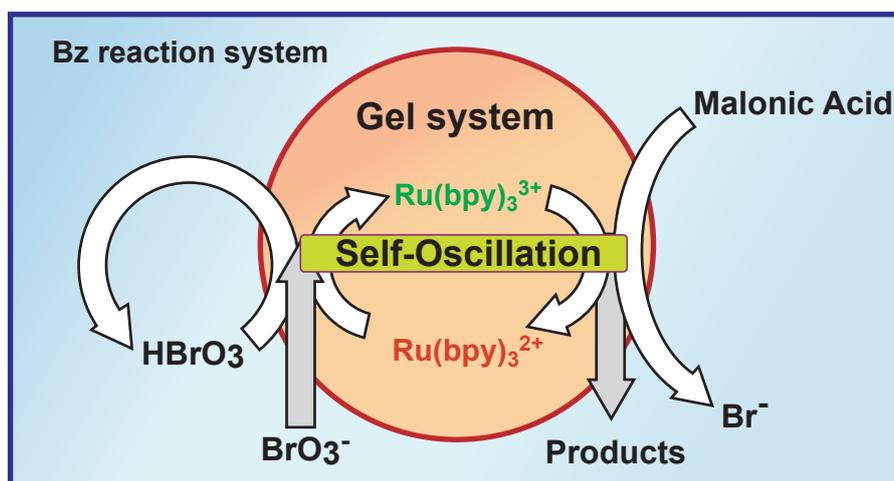


図7.4: 自励振動ゲルの反応メカニズム

7.4 分子設計による自励振動ゲルの機能拡張手法の提案

前章で述べた様に自励振動ゲルは温度応答性のポリマーである PNIPAAmRu(bpy)₃ の共重合体である。PNIPAAm は LCST 以下の温度では側鎖のアミド基と水の強い相互作用により、水中に溶解する（親水性）特性を示すが、水温が上がることで分子鎖の動きが活発となり脱水和を起こす。この時、高分子鎖は疎水性相互作用により収縮し、相転移が起こる [36]。自励振動ゲルの時も同様で、LCST 以下の温度であれば、ゲルは膨潤した状態になるが、温度が上がってくると脱水和を起こし収縮する。収縮するとゲルが溶媒を取り込みにくくなり、化学物質の拡散が妨げられる。また、ゲル自体の剛性も上がるため金属触媒の価数の変化による体積変化がほとんど見られなくなってしまう。

我々は、この自励振動ゲルの分子の温度に対して応答する部位を、温度に対して変化しない材料に変えることで、高温環境下でも自励振動ゲルを動作させられるのではないかと考えた。図7.5の様に従来温度応答性のポリマーが導入されていた部位を青で表記している poly(vinylpyrrolidone) (PVP) というポリマーに変更する。PVP はコンタクトレンズなどにも用いられている材料で、PNIPAAm と同じ架橋剤（ポリマーを三次元につなぐための材料）と開始剤（ポリマー化を起こすためのラジカルを発生させるための材料）を使用でき、水溶性であることから採用した。

本手法の概要を図7.6に示す。図7.6の (A) の様に温度応答性高分子を用いると高温では動作できなくなる。一方で図7.6の (B) の様に、金属触媒の酸化と還元で体積差が生じる系であれば、高温環境下でも自励振動できると予想される。また BZ 反応はアレニウスの式に従い、その反応速度定数 k は次の様に表せる。

$$k = Ae^{-E/RT} \quad (7.5)$$

ここで A は頻度因子と呼ばれる定数、 E は活性化エネルギー、 R は気体定数、 T は絶対温度をそれぞれ表している。この関係から温度と共に BZ 反応の速度が上昇するので、提案手法により駆動可能な温度範囲だけではなく、自励振動の応答可能な周波数領域を広げる可能性がある。次節以降で実際のゲルの作成条件や環境に対する振る舞いについて紹介する。

poly(VP-co-Ru(bpy)₃)

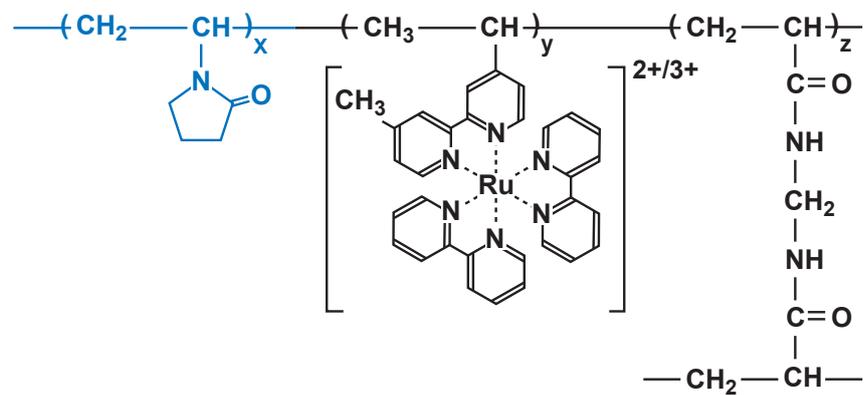


図7.5: 駆動可能温度範囲を拡張した新規自励振動ゲル poly(VP-co-Ru(bpy)₃) gel の化学構造式

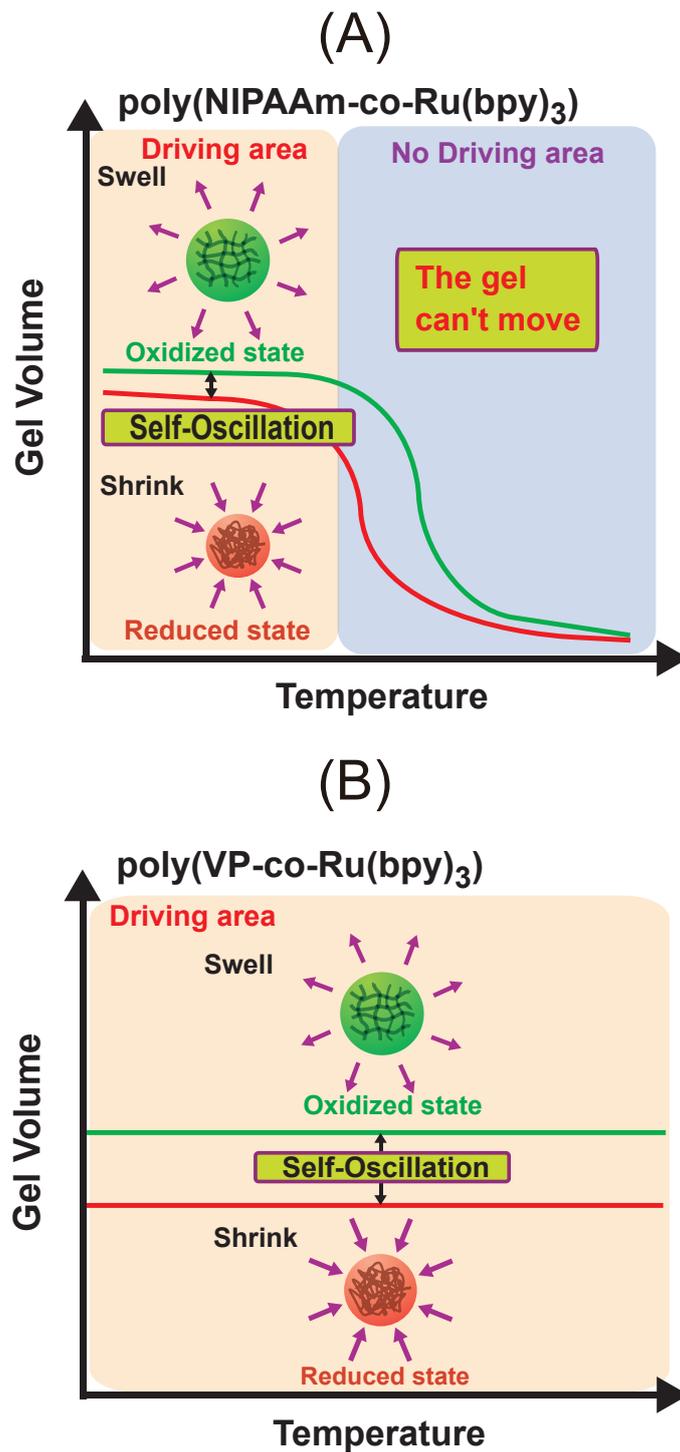


図7.6: 自励振動ゲル酸化還元状態それぞれの温度に対する体積変化 (A) 従来手法温度応答性ポリマーを用いた自励振動ゲル, (B) 提案手法温度に対して体積変化を起こさないポリマーを用いた自励振動ゲル

7.5 サンプル作成手法

本節では、新規自励振動ゲルの作成手法と実験のセットアップについて紹介する。自励振動ゲルの作成や BZ 反応環境場を作るための試薬は下の表7.1の薬品を使用した。

7.5.1 ゲルの組成について

ゲルの組成は含まれるモノマー (VP と $\text{Ru}(\text{bpy})_3$), 架橋剤, 開始剤, 溶解させる溶媒の量など様々な影響を受ける。我々は実際に過去の自励振動ゲルの例 [159] [160] [80] を参考に従来のモル比を標準に、最も剛性に影響を与える架橋剤の比率を最初に変化させた。架橋剤の影響は大きく、材料全体 (100) に対するモル比率が 1 から 2 程度が好ましいことがわかった。量が少ないと脆くなり、多すぎると硬くなりすぎて、ほとんど膨潤しなかった。今回はできるだけ変形を取りやすい様に架橋剤のモル比率 1 を標準組成として選定した。続いて金属触媒の量を変動させた、この割合を増やす程、BZ 反応の酸化還元の影響をより大きく受けそうであるが、増やしすぎるとゲルが脆く扱いにくくなることがわかった。今回はモールドからの取り出しに問題ない強度を維持しつつ、できるだけ触媒量を増やしたモル比率 1.5 付近を採用することにした。自励振動ゲルのポリマー化反応は連鎖反応であるため、開始剤量はモル比率 1 程度の少量を加えることで反応が進行する。特性評価に実際に用いたゲルは下の手順で作成した。

7.5.2 特性評価に用いたサンプル

金属触媒の $\text{Ru}(\text{bpy})_3$ を 0.110 g を 0.877 g の vinylpyrrolidone (VP) に溶解させる。続いて架橋剤の N,N'-Methylenebisacrylamide (MBAA) を 0.012 g, 開始剤の 2,2'-Azobis(isobutyronitrile) (AIBN) を 0.020 g を 3 ml のメタノールに溶解させる。これらの二つの溶液を混ぜ合わせ、15 分間窒素パージを行い、溶存酸素を取り除く。このモノマー溶液をガラス上にテフロンシートを貼ったプレート 2 枚と 0.5 mm 厚のシリコーンゴムシートのスペーサによって構成された鋳型にシリンジで充填する。サンプル挿入口はエポキシパテ (Cemedine Inc.) で埋めて、恒温槽で 60 度に加熱し、18 時間加熱重合を行う。取り出したゲルは 1 週間メタノールに浸漬して未反応のモノマーを取り除き、一日ごとに水 (MilliQ water) の比率を 25%, 50%, 75%, 100% と増やしながらか透析を行う。

Material	Supplier
N-Vinylpyrrolidone (VP)	Kanto kagaku Inc.
N,N'-Methylenebisacrylamide (MBAA)	Tokyo kasei kogyo Inc.
2,2'-Azobis(isobutyronitrile) (AIBN)	Tokyo kasei kogyo Inc.
Ru(<i>bpy</i>) ₃	Fujimoto Bunshi Kagaku Inc.,
Methanol	Kanto kagaku Inc.
Cerium(III) Sulfate ($Ce_2(SO_4)_3$)	Kanto kagaku Inc.
Cerium(IV) Sulfate ($Ce(SO_4)_2$)	Kanto kagaku Inc.
Nitric Acid	Kanto kagaku Inc.
Sodium bromate ($NaBrO_3$)	FUJIFILM Wako Pure Chemical Corp.
Malonic Acid	FUJIFILM Wako Pure Chemical Corp.

表7.1: 自励振動ゲルの実験に用いる材料リスト

7.6 新規自励振動ゲルの駆動特性と考察

7.6.1 膨潤平衡特性の評価

図7.6の (B) の様に, 今回提案した poly(VP-co-Ru(bpy)₃) gel が温度に対して体積を一定に保ち, ゲル内の金属触媒の酸化還元状態のそれぞれで, 体積変化を起こすかについて調べた. 平衡状態での特性を見るために, 酸化剤と還元剤を用いて強制的に酸化状態と還元状態を作った. 酸化状態には $[Ce_2(SO_4)_3] = 0.001\text{ M}$ と $[HNO_3] = 0.3\text{M}$, 還元状態には $[Ce(SO_4)_2] = 0.001\text{ M}$ と $[HNO_3] = 0.3\text{M}$ の溶液を用いた. 溶液中の様子はマイクロスコープ (Fortissimo Corp. WST-250D) を用いて観察し, 画像処理ソフト Image J によって変形の様子を解析した. 溶液の温度はアクリルで作成した恒温層によって, 溶液の温度を制御した. poly(VP-co-Ru(bpy)₃) gel は薄いガラスを用いて, 20 mm*20 mm*2 mmの形にカットし, 上の酸化状態環境と還元状態環境の溶液に浸漬した.

還元状態環境 (Ce(III) 溶液中) では, ゲルはオレンジの状態を維持した. これはゲル中の金属触媒が二価の還元状態であることを示している. 一方, 酸化状態環境 (Ce(IV) 溶液中) に浸漬するとゲルはすぐに全体が緑色になり, 金属触媒が三価の酸化状態になったことを確認できた. サンプルを浸漬後は, 平衡状態にするために 30 分程静置してから, 一辺あたりの変化を測定した. 図7.7の結果に示す様に poly(VP-co-Ru(bpy)₃) gel は酸化還元状態のそれぞれで一辺あたりのサイズが約 1.4 倍となり, 従来では分子鎖の収縮が起きていた 32 度以上の環境でも体積が維持されることを確認できた.

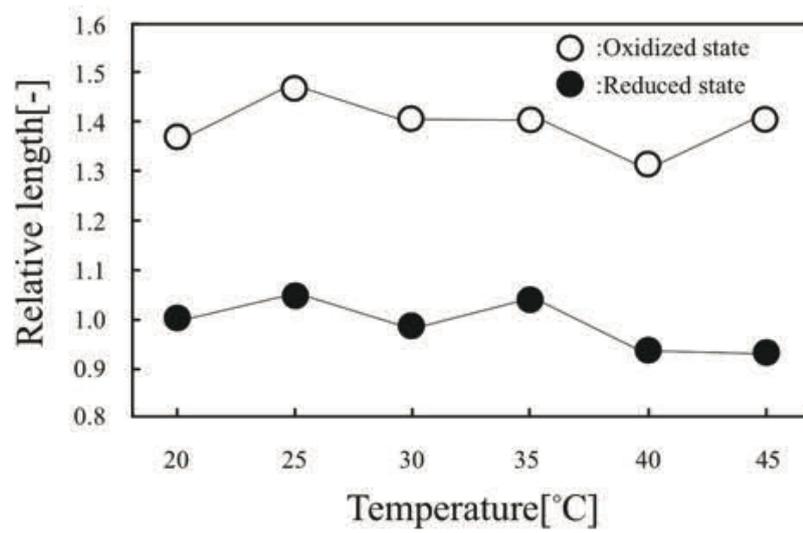


図7.7: poly(VP-co-Ru(bpy)₃) gel の温度に対するゲルの長さ比率の関係 (○: 酸化状態, ●: 還元状態)

7.6.2 自励振動ゲルの駆動周期制御

本項では, poly(VP-co-Ru(bpy)₃) gel の BZ 環境場の組成 (外液組成), 温度など) に対する BZ 反応速度について調べる. この関係を理解することで, poly(VP-co-Ru(bpy)₃) gel を動かす条件を制御できる様になる. BZ 反応を起こすには外液に基質 (MA), 酸化剤 (NaBrO₃), 酸 (HNO₃) が必要である. これらを総量 8 ml 条件で濃度を変えながら恒温槽で 20 度の条件で周期の測定を行なった. 全ての溶液の濃度を変動させると変数が増大してしまうため, 過去の自励振動ゲルの駆動で用いられた BZ 反応条件 [160] を参考に, [MA] = 0.0625M, [NaBrO₃] = 0.084M, [HNO₃] = 0.3M を標準条件とし, 影響を調べる物質の濃度のみを変化させて測定を行なった. BZ 反応の周期は反応が起き始めてから 20 分程度待ち, ゲル内部に生じる化学波の周期が一定になった状態での波の周期を指す.

結果を図 7.8 に示す. 基質の濃度により BZ 反応の周期が大きく変化している様子が観察できる. 化学反応の速度は分子の衝突頻度に影響されるため, 化学反応速度論の一次衝突モデルを考えると, 図 7.8 の様に両対数プロットに対して直線で近似することができる. 自励振動の周期は, 外液組成の基質がある一定の濃度を越えるとそれ以上は向上しない, 飽和領域が存在することを確認できた.

飽和の周期を見ると MA は他の飽和周期に比べて長い時間帯で周期が飽和している. FKN メカニズムの式 7.4 から, MA は金属触媒を還元状態に戻し, 臭素イオンを生成する行程に関わっている. これはこれ以上金属触媒の還元状態への反応速度向上を試みても, ゲルの収縮に影響を与えないことを意味している. 一般的に高分子ゲルの収縮は膨潤より早く起こることが知られている. Ru(bpy)₃ の疎水性がすでに十分高いことから MA を増やしても反応周期に影響がないと考えられる. またこれらの結果を, 過去の周期研究の様に [160], 三つの基質の濃度と周期 T の関係を 1 つの式で近似すると次の式で表すことができる. 図の様に 20 度での外液組成に対する概ねの周期は式 (7.6) の形で求めることができる.

$$T = 0.048 [MA]^{-1.21} [NaBrO_3]^{-1.07} [HNO_3]^{-2.19} \quad (7.6)$$

これらの実験結果を参考に外液組成を決めることで, 所望の自励振動周期を得ることができる.

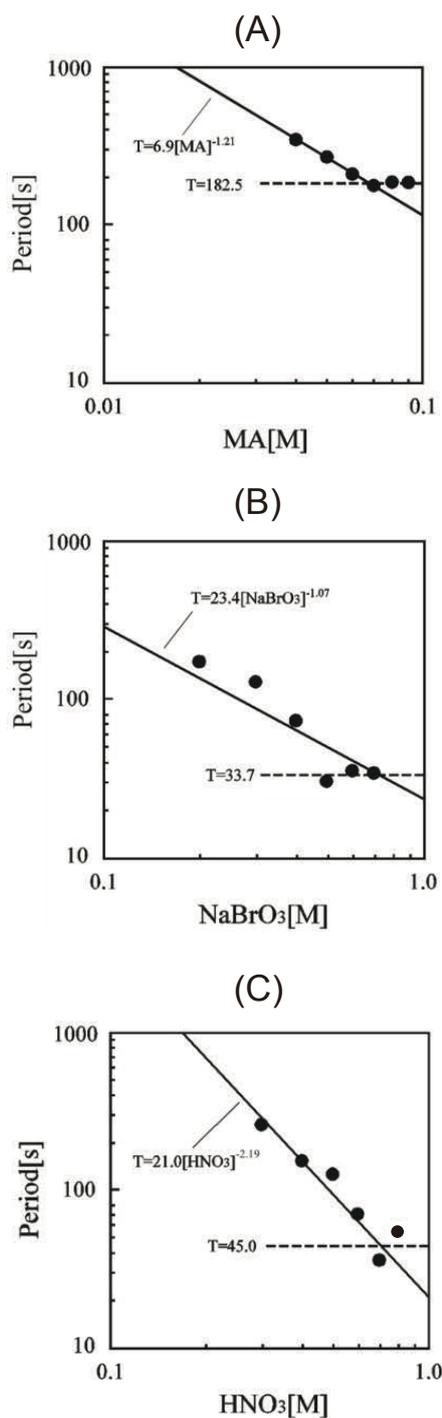


図7.8: poly(VP-co-Ru(bpy)₃) gel の溶液条件と BZ 反応周期の関係 (温度は 20 度, 変数以外の基質濃度は固定) (A)MA の濃度と反応周期の関係 ($[NaBrO_3] = 0.084M$, $[HNO_3] = 0.3M$) (B)NaBrO₃ の濃度と反応周期の関係 ($[MA] = 0.0625M$, $[HNO_3] = 0.3M$), (C)HNO₃ の濃度と反応周期の関係 ($[MA] = 0.0625M$, $[NaBrO_3] = 0.084M$)

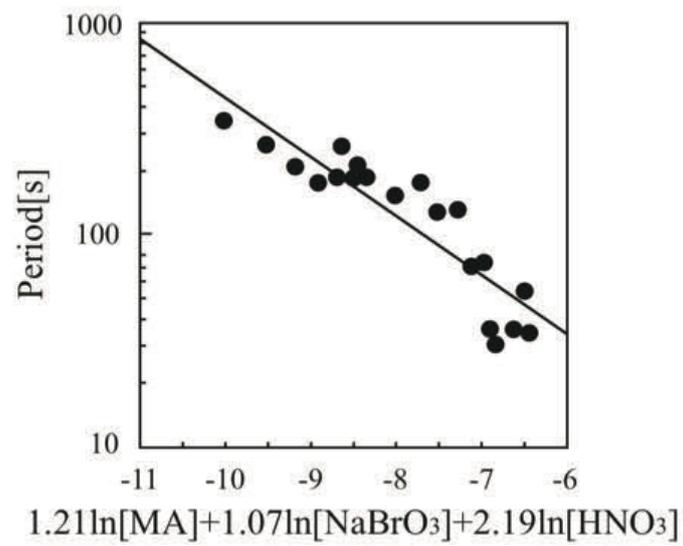


図7.9: 外液組成と駆動周期の関係 (温度は 20 度条件に固定)

7.6.3 温度と駆動周期の関係

温度と BZ 反応の周期の関係について述べる. 反応をより早く起こせる様に外液の組成は $[MA] = 0.0625M$, $[NaBrO_3] = 0.48M$, $[HNO_3] = 0.48M$ の条件で行なった. この時の温度に対する駆動周期の関係を図7.10に示す.

この外液組成条件の 20 度と 50 度時の自励振動ゲルの変形の様子を図7.11に示す. 変形は 0.05 秒間隔で動画から静止画のサムネイルを作り, 同箇所のエッジの位置を記録することで導出した. 今回提案した poly(VP-co-Ru(bpy)₃) gel は温度をあげることで, 最短で 2 秒程度の周期で自励振動することが示された. 一方で, 変形量は 20 度の時に比べると 10m から 4m と半分以下になっていることが確認できた. これはゲルが素早い新疎水性の変化に対して十分に追従できていないといった要因が考えられる. また今回の実験で示された 0.5Hz での応答は従来の自励振動ゲルの周辺環境を最適化して実現された駆動周期の約 20 倍の速度である [160].

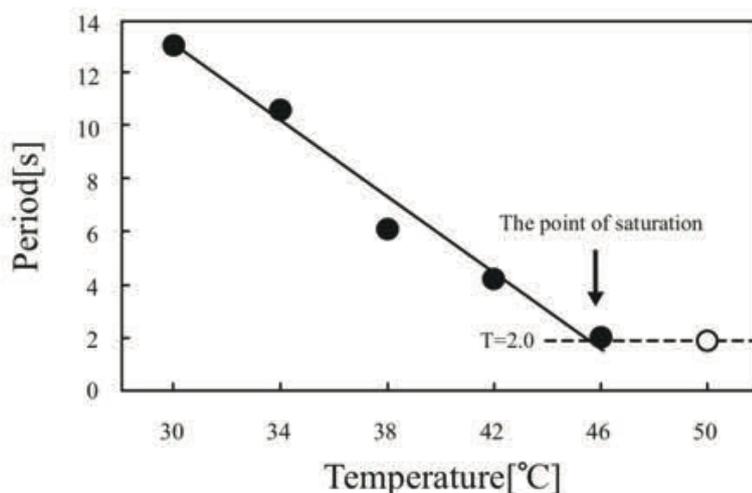


図7.10: 温度と駆動周期の関係 (外液組成: $[MA] = 0.0625M$, $[NaBrO_3] = 0.48M$, $[HNO_3] = 0.48M$)

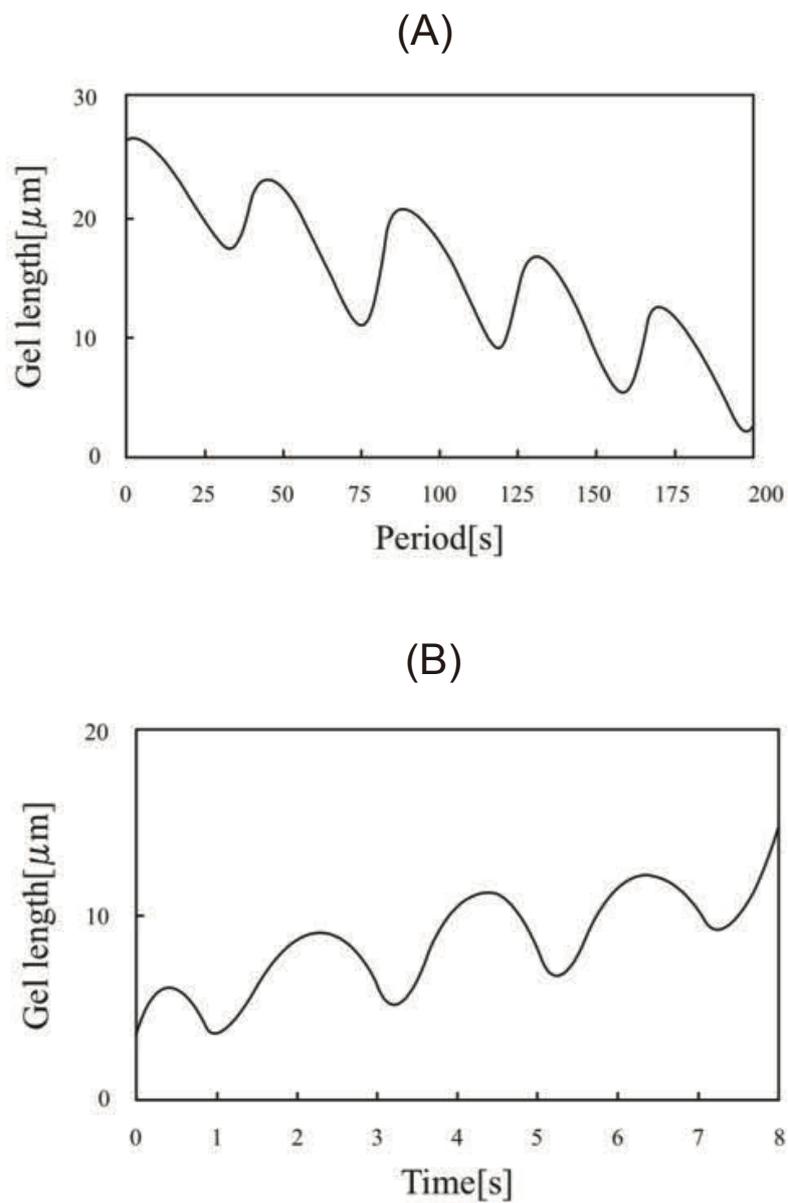


図7.11: poly(VP-co-Ru(bpy)₃) gel の自励振動 (外液組成: $[MA] = 0.0625\text{M}$, $[NaBrO_3] = 0.48\text{M}$, $[HNO_3] = 0.48\text{M}$) (A) 20 度での変形の様子, (B) 50 度での変形の様子

7.7 材料の分子設計による機能向上の手法のまとめ

特定の環境で膨潤収縮を繰り返す自励振動ゲルを題材に、その駆動できる温度範囲を拡張するための分子設計を行なった。従来の自励振動ゲルは温度応答性のポリマー部位を含んでいたため、高温環境条件では分子の側鎖が脱水和を起こし凝集することが高温での駆動を妨げていた。この問題は分子レベルの要因から生じていたため、改善には原因となっている分子構造を温度に対して相転移を起こさない材料に変える分子設計的なアプローチが必要であった。

従来では、金属触媒の価数の変化による体積変化を起こすほどの大きな新疎水性の変化は、温度応答性の分子鎖を用いなければ得られないと考えられていた。今回の提案では材料の種類だけでなく、その組成も探索することで温度に対して一定変化をもつポリマー材料系においても、自励振動を起こせることを示した。

また、この自励振動が外部環境に対してどの様に応答するかについて、その詳細な条件を調べた。その結果、数百秒から数十秒まで自励振動の周期を外液組成によってコントロールできることを示した。今回提案した自励振動ゲルは高温でも動作が可能であるため、温度をあげることでさらに駆動周期を早めることができた。従来は最短でも 50 秒以上かかっていた自励振動を、2 秒毎に起こすことに成功した。

これは自励振動をより早い周期の用途で使用する場合や、温度に対するセンサとして使うといった別の可能性を広げる知見である。また応答速度が人間がリアルタイムにより近くしやすい速度になることで化学反応による複雑な応答を動画の早回しなどを用いずに、その場で知覚できるようになった。

一方で、高速駆動時には変位が減衰するといったトレードオフの関係が認められた。これらを改善するには先行研究で行われていたような組成に非対称性をもたらすようなアプローチや相分離によるゲルの孔構造の改良といった従来研究の知見が活用できると考えられる [80] [81]。この他にも変形をしないゲルと貼り合わせたバイモルフ構造など、構造的なアプローチを適応することも考えられる。

材料は非常に小さな要素であるが故に、より大きな構造の設計をそのまま適用できるケースも多い。材料の高機能化と構造の設計は対立するものではなく、相補的に存在し得る要素技術である。

今回のケースの様に、改善したい項目が材料レベルから生じており、その代替候補材料がない場合や4章のような組み合わせや構造化によって解決できない場合は、分子構造から設計指針を打ち立てる必要がある。この手法は材料合成といった化学のスキルを必要とし、時間も要するが、高価な加工装置などを必ずしも用いずに、非常に小さいサイズで起きている物理現象に対して機能拡張やカスタマイズが可能なアプローチである。また作成された新機能

材料は、従来のマテリアルと同様に構造的なアプローチも適用できる余地が残っている。材料の分子構造設計は今回の事例のように、構造によるアプローチでは解決が困難な非常に小さなスケールで起きている物理現象の課題に対して適用することが好ましい。

第 8 章

微細構造を設計する手法

8.1 微細構造を設計する手法の背景

本章では微細構造を自ら設計し、付与する手法について紹介する。デジタルファブリケーションツールの登場により、様々な材料を意図した形に加工できる様に成りつつある。レーザーカッターやカッティングプロッターなどは紙、アクリル、木材などの平板サンプルを mm 以下の精度でカットすることができる。また小型 CNC マシンなどを用いることで石膏や樹脂などを切削により造形することも可能である。3D プリンタも数十 μm 以下のスケールで自在に設計できることに加えて、フィラメント状の樹脂、光硬化するプレポリマー溶液、焼結させることで固まる金属粉体等、様々な材料を取り扱える様に成りつつある。

微細な構造状態を自ら設計する手法では、すでに存在するマテリアルに対して付加的に微細構造を作っていくケースもあれば、6章で紹介した 3D プリンタを用いて作成したスポンジの様に微細構造を内包したマテリアルそのものを出力することも可能である。どちらの構造設計のアプローチでも、特定の箇所にのみ構造を付与したり、複数の構造を配置するといったことが可能であるため、より目的に応じた設計をしやすくなるという利点がある。本章では、アクチュエーション機能を題材にデジタルファブリケーションを活用した設計手法を紹介する。

8.2 小型分散配置可能なポンプの提案

物理世界とのインタラクションの研究領域では、周囲の環境やユーザーの操作に対して物理的な特性が変化するインタフェースが盛んに研究されている。これらのインタラクションを実現するための重要な機能の一つがアクチュエーションである。6章のセンシング機能に比べて、アクチュエーションは物質を変形させるための出力が必要なため、小型集積化が難しく課題となっている。

アクチュエータは2章で紹介した様に色々な種類のものが提案されているが、体積あたりの変位や力に限界がある。そのため、大きな変形と集積化を両立させるためには、アクチュエータシステムが大きくなるという課題がある。

これに対する主要なアプローチ法が流体ポンプの活用である。実際に inFORM [24], inFORCE [91], PneuUI [156] といった変形を伴うインタラクションで盛んに使用されている。これはポンプが駆動部位と変形部位を切り離せる点や、圧力と変形量を流路の幅でコントロールすることができるため、必要に応じて変形量を大きく取れるといった特徴がある。この流体アクチュエータの特徴はギアなどの機構によって動力を変換するモーター等に比べて、逆入力に対してシステムが壊れにくいという利点を持つ。これらの特徴のために、ポンプは柔らかい素材や構造で形成された筐体を有するソフトロボットの動力源としても盛んに利

用されている [112] [126] [117].

また流体ポンプをインタラクション領域で活用した事例には、搬送する流体を工夫することで変形だけでなく、温度や色を変化させるといったマルチモーダルな変化を起こす試みも行われている [86]. この特徴を活用した HydroRing は指に取り付ける小型のウェアラブルデバイスで、様々な触感を提示することができる [31].

この様に流体ポンプシステムはアクチュエータの集積化やマルチモーダルの表現といったインタラクション体験を広げる可能性があるが、外部に大型のポンプアクチュエータを必要とすることが多く、システム全体が大型化してしまうことが大きな課題となっている。

大きな変位や力を必要としない場合には、小型の圧電素子を用いたマイクロポンプも利用される [147]. 市販されている一般的な圧電マイクロポンプ (Takasago Inc., SDMP302) を例にとると 25 mm * 25 mm * 4.8 mm 程度と小さく、薄型の製品として販売されている。しかし、このデバイスは硬く、価格も 10USD 以上と高いため、物質の柔らかさを維持しながら、多くの数を導入することは難しい。

今回、我々は電界流体泳動効果 (Electrohydrodynamics : EHD) と呼ばれる電界に対して誘電性の液体が泳動する現象を用いたポンプに着目した。このポンプはコンデンサの様に対向して配置された 2 つの電極と外装構造で構築される。ポンプの主要な形式である電磁アクチュエータポンプに比べるとコイルや磁石を必要しないため小型化に優位であり、高価な圧電バイモルフアクチュエータを用いるマイクロポンプデバイスに比べて、容易にアレイ化ができる可能性がある。

これまで EHD ポンプは主に半導体デバイスの冷却などを目的に MEMS 分野で研究がなされてきた。本提案では EHD ポンプのユニットとなる微細構造をデジタルファブリケーションの装置で作成することで作られる小型のポンプシステムを提案する。このポンプは様々な形や機械特性で構成され、分散配置が可能なシステムである。これまで HCI 領域では用いられてこなかった、EHD Pump の設計手法や製造プロセス、その特性について紹介していく。本研究の主な貢献は次の通りである。

- 小型のポンプを分散配置・駆動させる設計のコンセプトの提案
- 特殊な産業機器を用いずに HCI コミュニティの研究者がポンプを作成可能なポンプの設計と製造プロセスの提案
- デジタルファブリケーションを用いた特殊形状や曲げられるポンプ素子の提案
- 複数のポンプを組み合わせた際の特性と流路コントロール手法の原理確認
- 本手法を用いたアプリケーション例の提示

8.3 EHD ポンプの先行研究

EHD ポンプはシンプルな構造で動作可能な静音のポンプ素子である。1960年代に EHD 現象を Pickard らがポンプに応用して以降 [103] [104], 理論と実験の両面から様々な研究が進められてきた。その駆動のメカニズムは Jones らによって考察されてきた [51]。EHD の流動現象は電場と誘電媒質の相互作用によってもたらされる。電場によって流体にもたらされる力 f_e は次の式で表されると考えられている [51] [21]。

$$\mathbf{f}_e = \rho_e \mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon + \frac{1}{2} \nabla \left[E^2 \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right)_T \rho \right] \quad (8.1)$$

ここで ρ_e は電荷密度, E は電場, ε は溶液の比誘電率, ρ は密度, T は温度をそれぞれ表している。式 8.1 の最初の項はクーロン力, 第二項は誘電力, 第三項は密度の偏りによって生じる電歪力に対応している。等温の誘電液体を使用する場合, クーロン力の影響が支配的であると見なされている [57]。また, この時印加する電界強度や電極材料の仕事関数などにより, 二つのタイプの駆動メカニズムが存在すると考えられている [21]。

一つはコンダクションポンピングと呼ばれる誘電液体が電界によりイオン化し, 反対の電荷の電極側に移動することで引き起こされる泳動現象である。イオンのサイズや電荷の偏りが異なるため, 運動量が交換されて一方向に流れを作り出すと考えられている。

もう一つはイオンドラッグポンピングと呼ばれ, 電極から電荷が注入されて, 対極側に移動する際に溶媒中の分子と衝突して流れを作るモードであるイオンドラッグポンピングは 10 MV/m 以上の高電界条件で発生し, より大きな出力を出せるが [21], 誘電液体の劣化を引き起こす。そのため, 長時間駆動するアプリケーションには向いていないと指摘されている [57]。

これまでに多くの種類の液体が検討されており, ハイドロフルオロエーテル (3M Inc., NOVEC 7100) が高電界下での安定性に優れ, ポンプの出力と正の相関をもつ比誘電率も 7.52 と高いため, よく用いられている [27]。

8.3.1 EHD ポンプを用いたアプリケーションについて

これまでに EHD ポンプを用いたいくつかのアプリケーションが MEMS 分野を中心に提案されている。図 8.1 の様に, Darabi らは EHD ポンプを半導体の冷却に利用している。使用されている誘電液体の NOVEC7100 は, 一般的に冷媒としても使用されている材料であるため, 冷却に使う本用途と親和性が高い。

この他にも小型な用途ではマイクロ流路用のミキサーなどにも使用されている [20]。またより大きなスケールでは, 図 8.2 の様に液体を満たしたサクシジョンカップの内部に EHD ポン

プを形成し、内部の流体の動きにより表面のエラストマーを変形させることで、電氣的に吸脱着を可能とするシステムを提案している。この様にいくつかの応用例が提案されているが、その用途は主に小さいサイズの応用が多く、インタラクション領域では盛んに用いられていない。

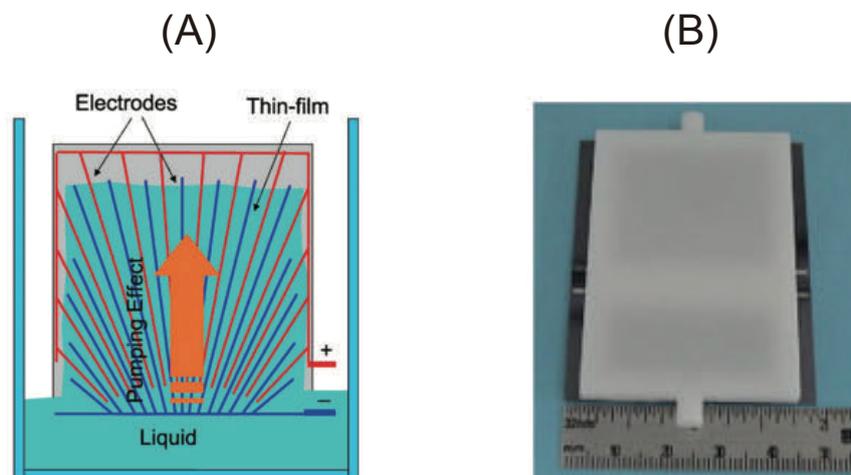


図8.1: EHD ポンプを用いた半導体チップ冷却装置 (A) デバイス構成図, (B) 冷却装置の外観 ([15] の Figure2, 10 から引用)

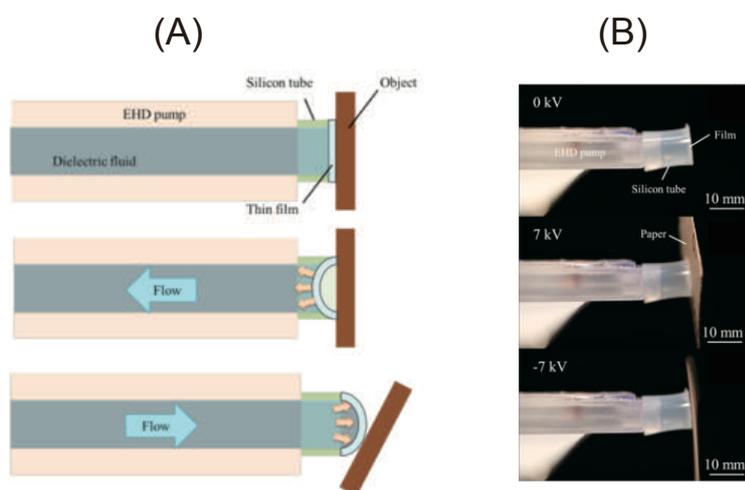


図8.2: EHD ポンプを用いた動的なサクシヨンカップ (A) デバイス構成図, (B) サクシヨンカップ駆動時の様子 ([70] の Figure1, 11 より引用)

8.4 本提案の目指す EHD ポンプ

前節までに述べた様に、EHD ポンプは小型化と静音駆動などの利点がある。一方で形状変化ディスプレイをはじめとした変形するインタフェースなどには利用されていない。これは EHD ポンプの従来の研究主流が MEMS 領域であり、低電圧かつ小型に動作させるために、半導体プロセスを用いて構成されており、大型化が困難であったため、用途が限定されていたためと推察した。

本研究では HCI 分野の研究者のアプリケーションシナリオをサポートできる様に、様々な形態のポンプの作り方と、それらの特徴についてまとめる。またポンプデバイスの特徴である接続性を活かすことで、流路コントロールの可能性や出力の増加ができることを実験的に示すことを試みた。

EHD ポンプは電極材料の表面状態や溶液中の酸素の量といった様々な要因の影響を受けることが知られている [27]。本提案ではこの様な詳細な要因の最適化ではなく、できるだけ簡易的なシステムとモデルにより図8.3のデザインスペースの要素が与える影響を設計者が把握できる様になることを目指す。

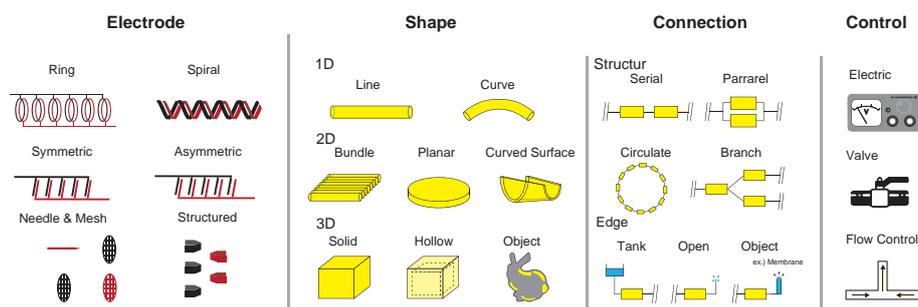


図8.3: インタラクション設計のための EHD ポンプのデザインスペース

8.4.1 EHD ポンプの設計指針

流路内の EHD ポンプの発生圧力は電界強度の 2 乗に比例する。これは流体に働く力を電極近傍のヘテロチャージ層領域で積分することで得られる [21]。EHD ポンプを動作させるためには適切な電界を加える必要がある。従来の半導体プロセスを用いた EHD ポンプは駆動電圧を下げるために、 $100\mu\text{m}$ 以下の狭い電極間隔で整形しているケースが多い [15] [17] [56]。しかし、このプロセスは大きな面積に電極パターンを構成するのには向いていない。我々がデジタルファブリケーション装置を用いて、設計するポンプの微細構造のパラメータを以下の三つを考慮して提案する。

- 製造プロセス上の制約
- ポンプ駆動モードの制約
- 駆動電圧上の制約

はじめにポンプを 3 D プリンタやカッティングプロッターといったデジタルファブリケーションマシンを用いて作成する場合には、これらの装置の精度によって設計可能な分解能が決まる。EHD ポンプの構成要素である電極はカッティングプロッターにより、市販の金属テープをカットすることで形成する。最後は人が手動で不要な部分の金属テープを取り除くことや刃の太さを考慮すると、電極の細線化は 0.5 mm 程度が限界である。

またポンプを駆動させる時の電界は、繰り返し時の安定性を重視すると、コンダクションポンピングであることが好ましい。一方で圧力は電界の 2 乗に比例するので、小さすぎるとほとんど出力が得られなくなる。これらを考慮すると、電界は 5 MV/m 以上、 10 MV/m 以下、安全マージンを見込むと 5 MV/m 以上、 8 MV/m の領域での駆動が好ましい。

この電界条件と加工精度で動作させるには、駆動電圧は kV オーダーとなり、昇圧モジュールが必要となる。コンダクションポンピングは静電型のアクチュエータであるため、電流量は小さくても問題ない。小型に実装するためには、市販の小型昇圧モジュール (Matsusada Precision Inc., HVBT-10) を用いることで、 21.59 mm 角のサイズで 10 kV までは対応することができる。

10 kV を超えてしまうと、体積が 8 倍以上になるものが多く、EHD による小型化の利点が薄れてしまう。これらの制約条件は図 8.4 の形で表すことができる。

つまり先の 3 つの条件を考慮すると電極幅が 0.5 mm から 1.0 mm の条件で 10 MV/m 以下の条件で動作させれば、小型の昇圧モジュールのみで EHD ポンプを用いたインタラクションの設計が可能となる。本提案では製造時の歩留まりも考慮して、一番加工精度の影響が少ない 1.0 mm の電極幅を採用す

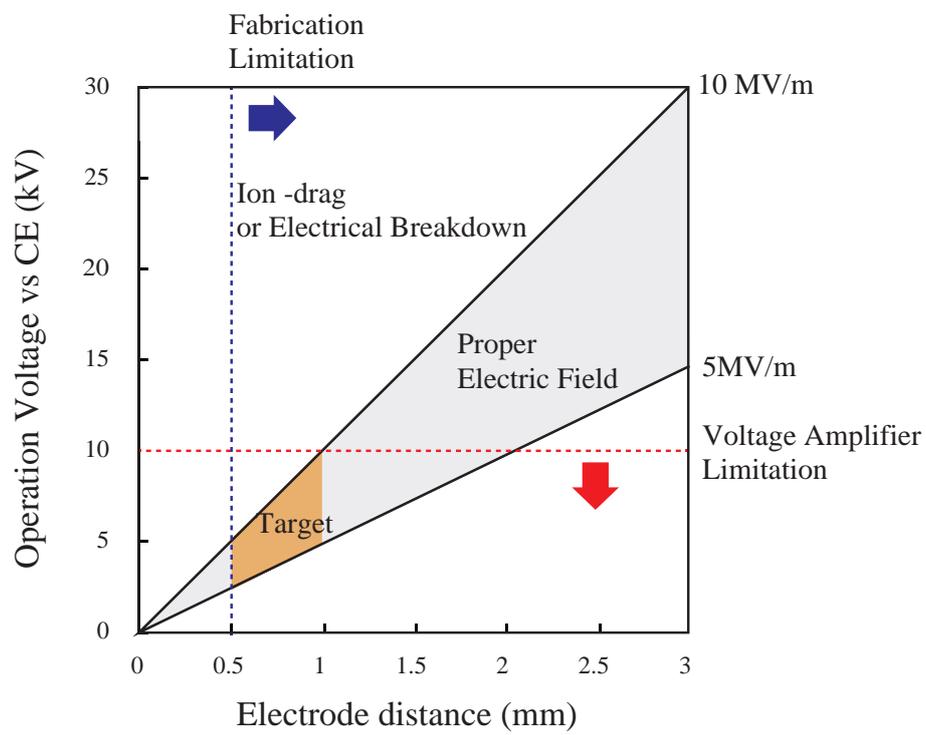


図8.4: ポンプの電極間距離と駆動電圧と印加電界強度の関係

8.4.2 デバイスの構造とパラメータの選定

EHD ポンプは様々な電極のレイアウトが可能である。これまでも楕形電極 [16] [56] やメッシュと針形状を組み合わせたもの [101] などが提案されている。本研究では作りやすく、対称性があり制御がしやすいことから、対称な楕形電極を採用することにした。楕形電極の主要な構造パラメータは図8.5の様に表すことができる。

楕形電極の短い方の電極間距離 r_1 は前項の制約事項から1.0 mmに設定している。続いて、楕形の繰り返し周期 r_2 について考察する。電極ペア間には、ポンプの流れを打ち消す方向に電界が生じるため、間隔が広いほど損失が少なくなる。しかし、体積あたりの出力を最大化しようとした場合には最適値が存在すると予想される。

過去に電界と流体シミュレーションを練成することで、最適なデバイスパラメータを予想するといった試みが行われている [17]。我々の系では材料加工時に寸法の制度や、溶存酸素、電極表面の状態といった詳細なパラメータは詰めていないので、ここでは正確な最適値を求めるのではなく、概ね体積あたりの効率を引き出せると期待される条件を次の仮定を用いて導出した。

EHD ポンプの出力は式 (8.1) の流体に加わる力が元になっている。この力はクーロン力が支配的であるため、電界に比例する。ポンプの構造由来による特異的な乱流などの影響を除けば、ポンプ体積あたりの電界の総和が大きくなるほど、出力効率が上がると予想される。電界の総和を E_{tot} とすると

$$E_{tot} = E_1 - E_2 \quad (8.2)$$

$$= \frac{V}{r_1} - \frac{V}{r_2} \quad (8.3)$$

と表すことができる。 E_1 と E_2 はそれぞれ電極間距離 r_1 と r_2 に生じる電界に対応している。ポンプの断面積は一定であると仮定すると、単位体積は単位長さとして計算しても問題ない。電極の幅を d とすると、単位長さあたりの電界量の総和 p は次の式で表せる。

$$p(r_1, r_2, d) = \frac{V}{r_1 + r_2 + 2d} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (8.4)$$

ここで電極間距離の比率 x を次の様に定義する。

$$x = \frac{r_2}{r_1} \quad (8.5)$$

式 (8.4) と式 (8.5) から p は次の形で表現することができる。

$$p(r_1, r_2, d) = \frac{V}{r_1^2} \left(\frac{1}{1+x+\frac{2d}{r_1}} \right) \left(1 - \frac{1}{x} \right) \quad (8.6)$$

もし r_1 と d をある値に固定すれば p の最大値は下の偏微分方程式の条件を解くことで求まる。

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{r_1, d} = 0 \quad (8.7)$$

A を次の様に定義すると

$$A = 1 + \frac{2d}{r_1} \quad (8.8)$$

式 (8.7) は

$$\frac{1 - \frac{1}{x}}{(A+x)^2} = \frac{1}{x^2(A+x)} \quad (8.9)$$

と表現される。 $x > 0$ と式 (8.9) から p の最大値は

$$x = 1 + \sqrt{2 + \frac{2d}{r_1}} \quad (8.10)$$

となる。この式は電極間距離と電極幅が同一の時、体積あたりの電界強度を最大にする r_1 と r_2 の比率は 1:3 になることを示している。今後の楕円電極パターンでの EHD ポンプの設計では、この知見を活用する。

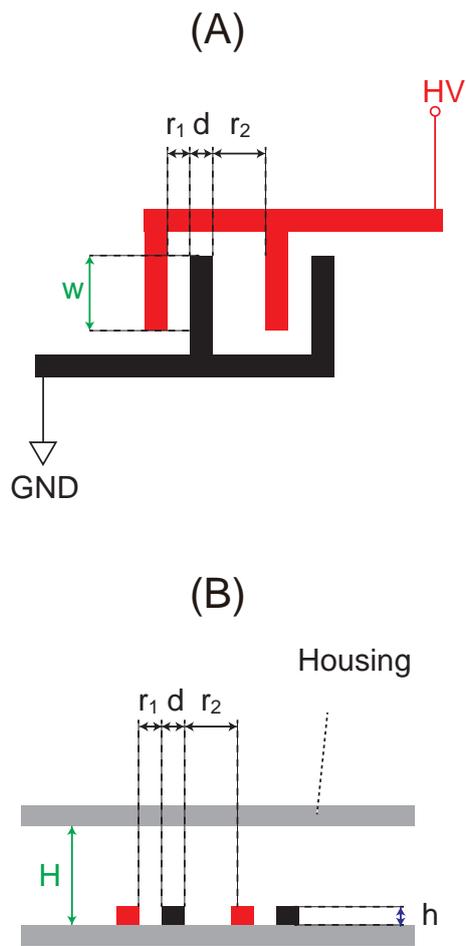


図8.5: 楕形電極構造 EHD ポンプの設計パラメータ (A) 上面図, (B) 側面図

8.5 自由構造設計可能なポンプの提案

8.5.1 作成手順

我々は二つのタイプのユニークなポンプを提案する。一つはデジタルファブリケーション装置を用いた自由形状のポンプである。もう一つは通常は流路のパスとして用いられているチューブに EHD ポンプを統合したものである。本節では前者について述べる。

我々は 3D プリンタとカッティングプロッターによって図8.6のプロセスで EHD ポンプを作成した。使用した材料は図8.7の通りである。最初に銅箔テープを PET フィルム (3M Inc., CG3550) に貼り付けた後、台座シートに固定し、カッティングプロッター (silhouette Inc., Cameo2) により所望の形にカットした。続いてゴムローラーにより電極とフィルムの密着性を向上させた後、不要な電極部位をピンセットによって取り除いた。

同時に、電極を収める為の筐体部位を 3D プリンタで形成した。3D プリンタは光造形型 (SLA) の装置 (Formlabs Inc., Form2) を使用した。3D プリンタは熱溶解積層法 (FDM) 形式の製品も多いが、本用途では液体が漏れない様に封止する必要があるため、SLA タイプのものが好ましい。この筐体に先ほどカットした電極パターンを挿入し、SLA タイプのフィラメント (Formlabs Inc., Clear Resin) を用いて接着し、紫外光照射装置 (Azone Inc., HLR100T-2) で、30cm ほどの距離から 20 分ほど紫外光を当てて硬化させた。

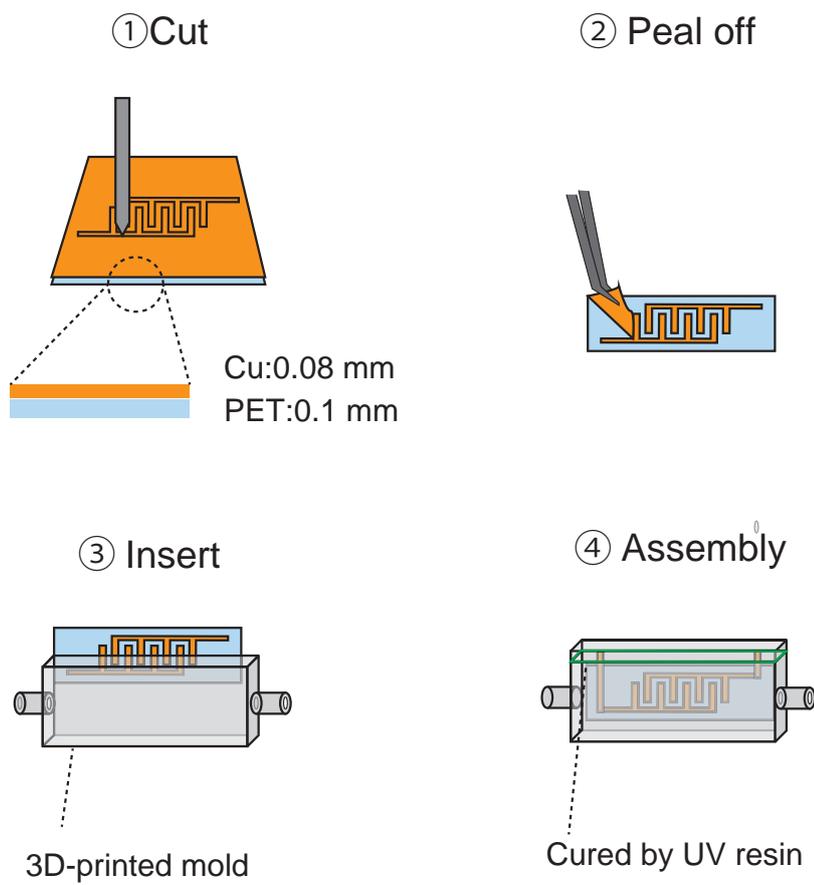


図8.6: デジタルファブ리케이션を用いた EHD ポンプの作成手順

(A)



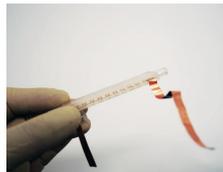
(B)



(C)



(D)



(E)

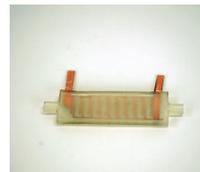


図8.7: EHD ポンプ作成に使用するマテリアル (A) カuttingプロッター (右上), 銅箔テープ (左上) Cutting時の下地 (右下), PET フィルム (下中央), ゴムローラー (左下), (B)3D プリンタで作成した筐体部位 (左), カットした電極パターン (中央), 接着用紫外線硬化樹脂, (C) 光造形型 3D プリンタ (Formlabs, Form2), (D) 電極を挿入したケースの様子, (E) 電極を封止した EHD ポンプデバイス

8.5.2 EHD ポンプの基本特性

前項で作成したポンプの特性を紹介する。デバイスの構造パラメータは表8.1の通りである。流路高さが異なるサンプルを用意し、電界強度に対する発生力を測定した。発生力は過去に EHD ポンプの特性評価の研究を参考に、図8.8の様に、流路を L 字の治具で上方向に对称に曲げた状態で、電界印加前後の液面差から算出した [70]。またポンプのインレットとアウトレットの内径は共に4 mmである。変化の状態はカメラ (SONY, a7M3) で行い、動作の解析は画像解析ソフト ImageJ (NIH) で行なった。電源は高電圧発生装置 (Matsusada Precision Inc., HJPQ-30P1) を使用した。EHD ポンプに重点する誘電液体には NOVEC 7100 を用いた。NOVEC 7100 の基本特性は表8.2に示す [27]。

図8.8の結果を見ると、流路高さが狭い方が高い圧力を示している。1.0 mmを下回るサイズの実装は機械の加工精度と電極部位挿入の限界などもあり、今回の装置とプロセスでは作成することは難しい。また筐体の強度と加工精度を考慮すると、この手法によるポンプの薄型化の限界は厚み3.0 mm程度となる。カッティングプロッターと 3D プリンタを用いた EHD ポンプの設計の手法は、図8.9の様な色々な形状のポンプを設計できる。ポンプを仕込むオブジェクトで空隙となっているスペースや、外装の内部に埋め込むといった設計が可能となる。

r_1 (mm)	r_2 (mm)	d (mm)	h (mm)	w (mm)
1	3	1	0.18	13

表8.1: 平板型 EHD ポンプの楕形電極の構造パラメータ

Material	Density (kg/m^3)	Permittivity
NOVEC7100	1520	7.52

表8.2: 誘電液体 NOVEC7100 の特性

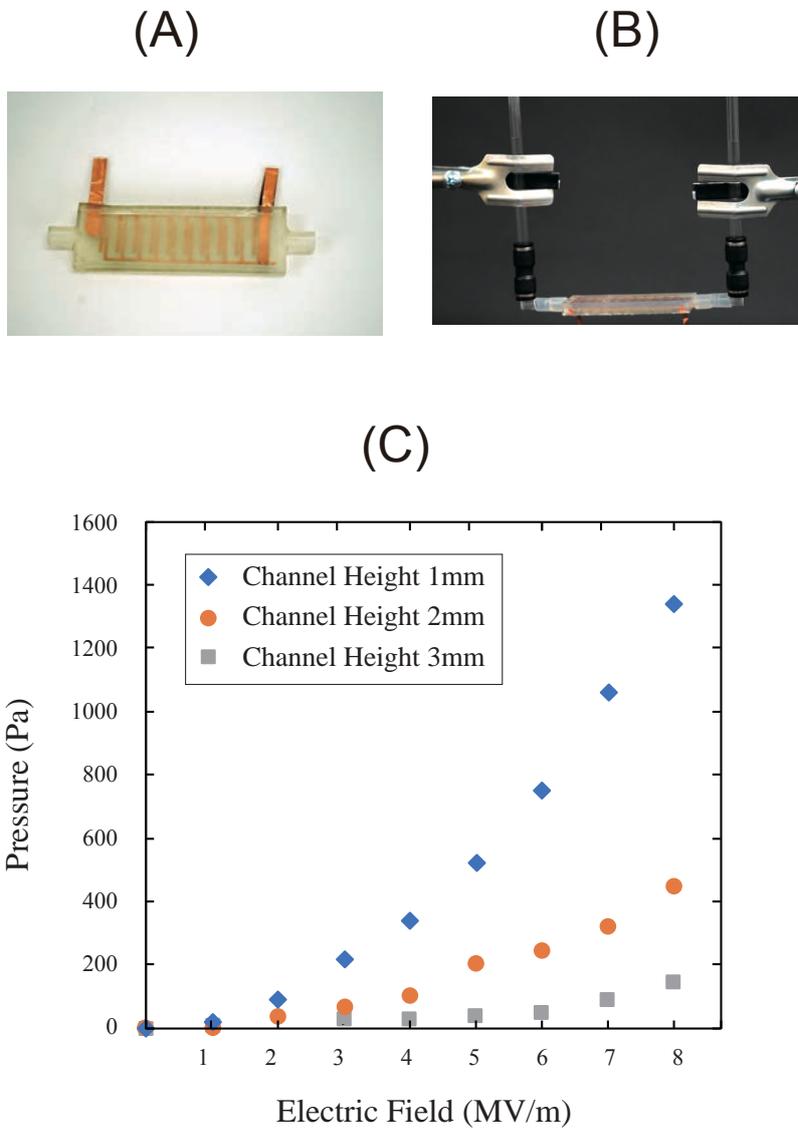
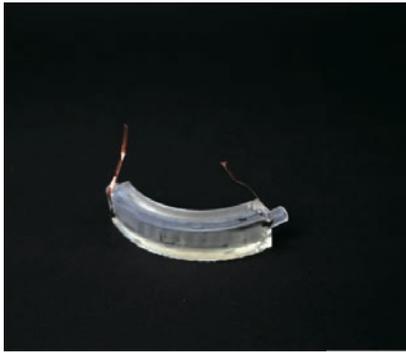
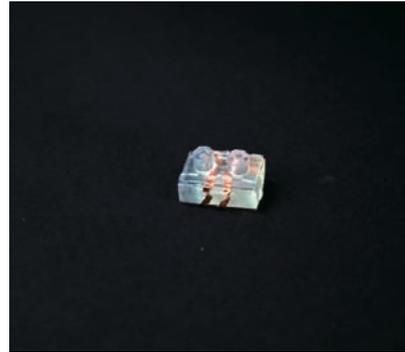


図8.8: デジタルファブ리케이션による EHD ポンプの特性評価 (A) デバイスの外観, (B) 測定の様子, (C) 各流路高さに対する印加電界強度と発生圧力の関係

(A)



(B)



(C)



(D)



図8.9: 様々な形状のポンプの試作品 (A) 曲面構造をもつポンプ, (B) ブロック型のポンプ, (C) 円柱型ポンプ, (D) ゴム材料で形成される曲げられるポンプ (Formlabs, flexible フィラメントにより作成)

8.6 流路と一体化したポンプの提案

本節では流路と一体化した EHD ポンプの設計手法とその特徴について説明する。スペースをより有効に利用することを考えると、ポンプに接続された流路は、流体のパスとしてしか活用されていない。我々はチューブ内部に微細な電極の周期構造を作ることで、本来は受動的な部位である流路をポンプデバイスとして有効に活用することを提案する。このポンプは、前節の自由構造設計可能なポンプや従来の市販の液体ポンプとも組み合わせて使用することが原理的には可能である。

8.6.1 楕形電極構造を用いたチューブ型 EHD ポンプ

楕形電極構造を用いたチューブ型の EHD ポンプは図8.10の手順で作成する。前節と同様にカッティングプロッターで電極を作成する。今回はチューブ構造のハウジングに収めるので、丸めて挿入する。絶縁しない様に、端部をポリイミドのテープで覆っている。挿入された電極シートは PET フィルムの剛性により、チューブ型ハウジングの中に固定される。試作によるトライアンドエラーの結果、チューブ内径が4 mmまでは今回の手法で電極を設置することができた。

流路高さが低い方が圧力が観察しやすいので、以後チューブの内径は4.0 mmの条件で行う。配線の取り出しには、予め電極レイアウトで取り出し様に伸ばしていた部分をチューブの端まで伸ばし、外に折り返すことで外部から掴める様になっている（図8.10の4の部分）。

取り出しの配線幅が太いと、連結部位からの溶液リークの原因となるので、取り出し電極の幅も1.0 mm程度であることが望ましい。このチューブ型の EHD ポンプは市販の安価なアクリルチューブなどを筐体として用いることができる。必要圧力に応じて、長さの調整や束ねることで流量を増やすといったことが可能である。特性評価用サンプルの電極の構造は表8.3の条件で行なった。

前節で、幅以外同じ電極構造パラメータを有する平板 EHD ポンプが、圧力を大きくとるためには流路高さが1 mm程度が好ましいという結果を示した。このチューブ型ポンプは内径が4.0 mmであるので、さらなる細径化により圧力が高まることが期待される。今回は電極基材の制約上これより細くできないため、 $\phi 2.0$ mmのアクリル棒をチューブの中心に配置することで、流路高さが1.0 mmになるサンプルを作成し、それぞれのチューブサンプルの電界に対する圧力の関係を調べた。

図8.11を見るとポンプデバイスとして機能している様子が観察できる。また圧力の特性も平板形状の時と同様に流路高さが狭い方が大きくなる傾向が観察された。また平板型に対して多少出力が下がっているのは、チューブ型 EHD ポンプの電極の有効面積が減っていることを考慮すると妥当であると考えられる。

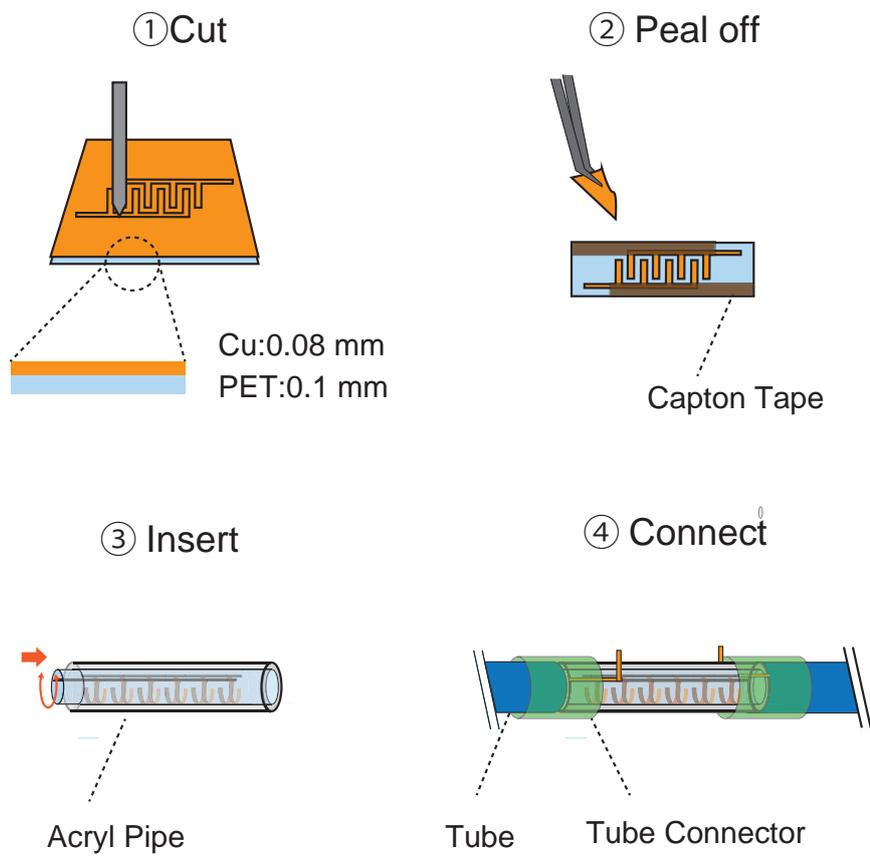


図8.10: 楕形電極構造チューブ型 EHD ポンプデバイス作成の手順

r_1 (mm)	r_2 (mm)	d (mm)	h (mm)	w (mm)
1	3	1	0.18	8

表8.3: チューブ型 EHD ポンプの楕形電極の構造パラメータ

(A)



(B)



(C)

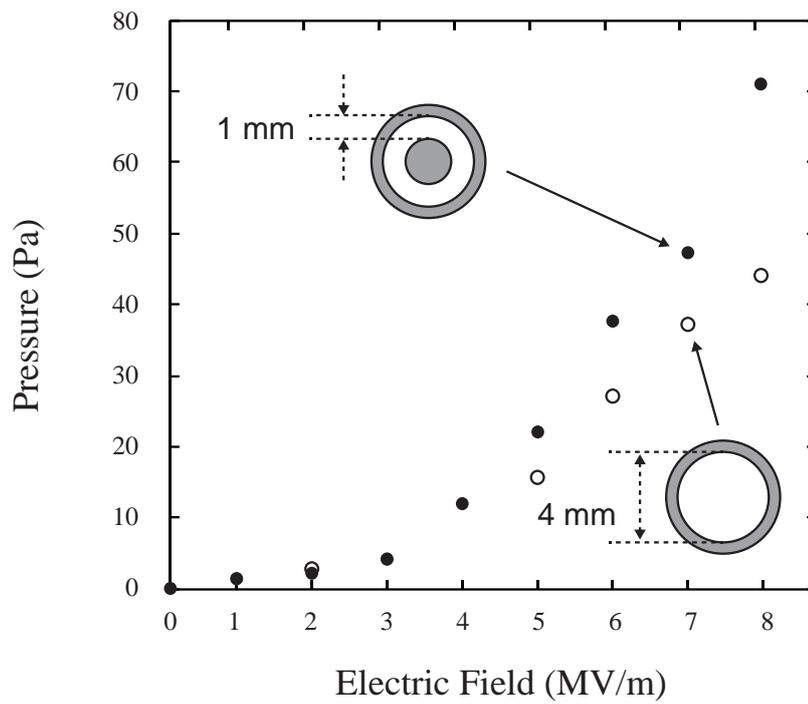


図8.11: 楕円電極構造チューブ型 EHD ポンプデバイスの特性評価 (A)EHD ポンプの外観, (B) 測定系全体の様子, (C) 流路幅の異なる 2 つのチューブ型ポンプの電界強度に対する圧力の関係

8.6.2 螺旋電極構造を用いたチューブ型 EHD ポンプ

前項でチューブの内部に楕形電極を配置することでポンプデバイスとして機能することを示した。楕形電極は安定して作成できるが、端部のショートを避けるために絶縁体で覆うため、電極の有効面積が減ってしまう。また、丸めてチューブに挿入するために電極部位が、PET フィルムの管構造により曲げられなくなるという欠点がある。このような課題を解決する手段として螺旋型の電極構造を用いたチューブ型 EHD ポンプを提案する。

螺旋電極構造のチューブ型 EHD ポンプは図8.12の手順で作られる。電極は狭い方の電極間距離が一定になる様に PET フィルム上に形成される。電極ペア同士間の距離は手動で鉄製の棒に固定されて巻き取られるため、正確に配置するのが難しい。電極ペア間の距離 r_2 の設計の目安は、元々電極間の距離 r_1 の3倍に設置されており、ここからさらに距離が開いても、打ち消す方向の電界が弱まるだけであるので、影響は限定的であると考えられる。

螺旋電極を用いたチューブ型 EHD ポンプの構造パラメータは表8.4の値を用いた。図8.13の様に螺旋構造型の電極は曲げることができ、また全周囲を覆っているため、流路幅を狭めなくても大きな圧力を示している。このポンプは曲げられる流路に適用でき、出力も大きく取り出せるので、流路と一体化した EHD ポンプの有用な構成であると考えられる。

r_1 (mm)	r_2 (mm)	d (mm)	h (mm)	windingnumber
1	3	1	0.18	12

表8.4: チューブ型 EHD ポンプの螺旋電極の構造パラメータ

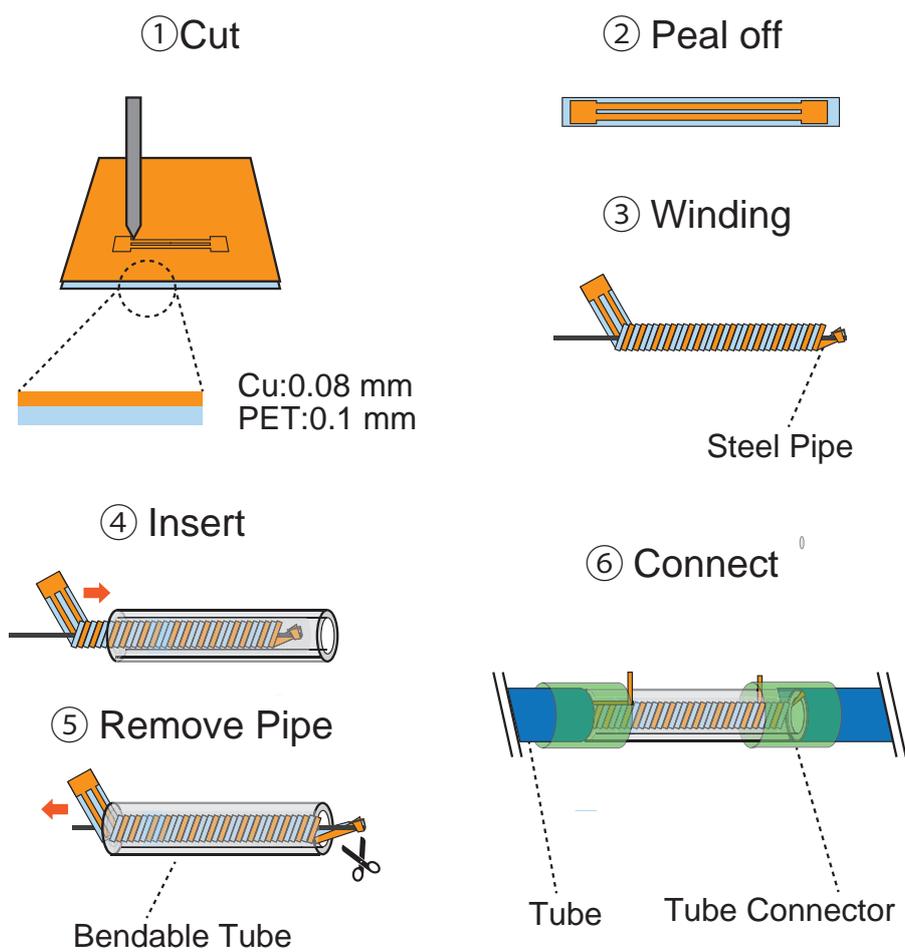
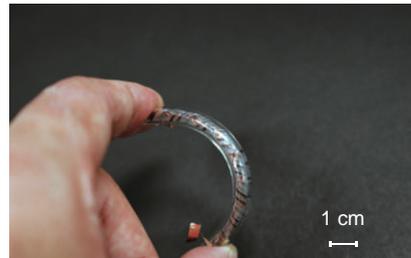


図8.12: 螺旋電極構造チューブ型 EHD ポンプデバイス作成の手順

(A)



(B)



(C)

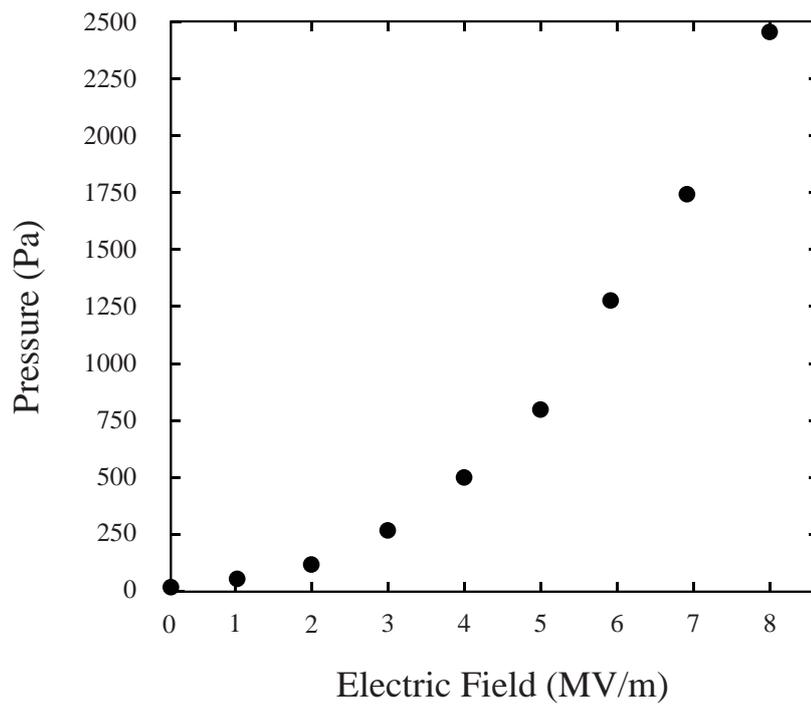


図8.13: 螺旋電極構造チューブ型 EHD ポンプデバイスの特性評価 (A)EHD ポンプの外観, (B) 曲げの様子, (C) 電界強度に対する圧力の関係

8.7 ポンプ接続時の特性

流体ポンプは原理的には接続することで、特性を加算することができる [27]。過去の研究報告例では同じ体積の EHD ポンプ内に電極のペア数だけを増やしていった場合、その数に比例して特性が向上している [70]。しかし、実際には接続によってポンプの体積が増え、システム全体の流路抵抗が増加するといった負の影響も受けると予想される。

我々は電極構造と封止状態が一番安定する楕形電極構造のチューブ型 EHD ポンプデバイスをシリコンエラストマーチューブを用いて接続し、その特性について調べた。今回は中心にはアクリルの棒を挿入しない系を使用している。これはわずかな軸のずれが系の流路抵抗に大きな影響を与える可能性があるためである。

結果を図 8.14 に示す。連結したポンプを両方とも動作させることで特性が大きく伸びている。またこの時の出力が一つのユニットのみを動作させた値の倍以上になっている。これは二つのポンプを接続した状態の場合は流路抵抗成分の占める割合が増えるためである。実際にポンプを連結していない図 8.11 の一ユニット駆動と比べると、今回の二連結ポンプの特性は約二倍となっている。

これらの結果から、チューブ型の EHD ポンプは通常のポンプと同様に直列に接続することで圧力を増やすことができることを確認した。特性をより有効に引き出すには、電極の凹凸など管の流路抵抗に影響を与えそうな部分を抑えるなどのアプローチも考えられる。

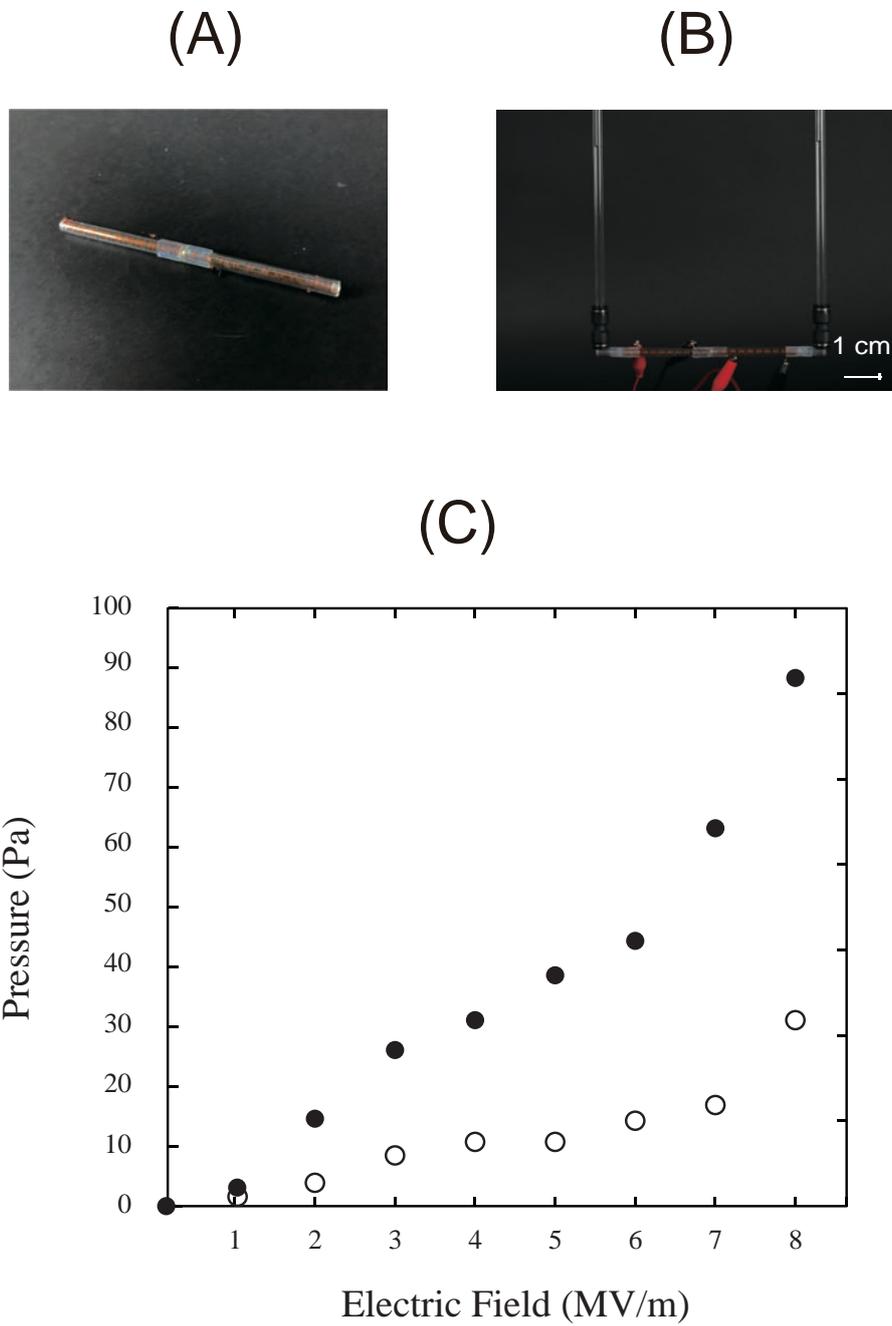


図8.14: ポンプ接続時の特性評価 (A) ポンプ接続時の外観, (B) 測定時の様子, (C) 電界強度に対する圧力の関係 (○:1 ユニット駆動, ●: 2 ユニット駆動)

8.8 流れのコントロール手法の提案

流体ポンプを活用するシステムでは、複雑な動きやインタラクションを実現するために、しばしば複数のポンプを使用する [25] [117] [24] [61]. この時、ポンプを増やすアプローチもあれば、メカニカルバルブを小型に実装し、一つ流体ポンプから複数の動きを作り出す試みも行われている [64] [135]. しかし、バルブ自体もサイズを有するため、複数の流路が集まる部分の小型化が課題となっている.

我々の提案する流路一体型の EHD ポンプはシステム全体に広く分散配置することが可能である. 本論文では、三つの楕形電極のチューブ型 EHD ポンプを組み合わせ、その駆動方向を独立制御することで、流れの制御が可能か検討した.

三つのポンプをいずれも同じ電界強度 (5 MV/m) で動作させてその時の振る舞いを観察した. 図8.15に示す様に、ポンプの駆動方向を制御することで、誘電液体が押し出されるチャンネルを制御することができた. この結果は流路が分岐する様な、流体制御システムにおいて、追加のコンポーネントを伴わずに流体の流れを制御できる可能性を示している.

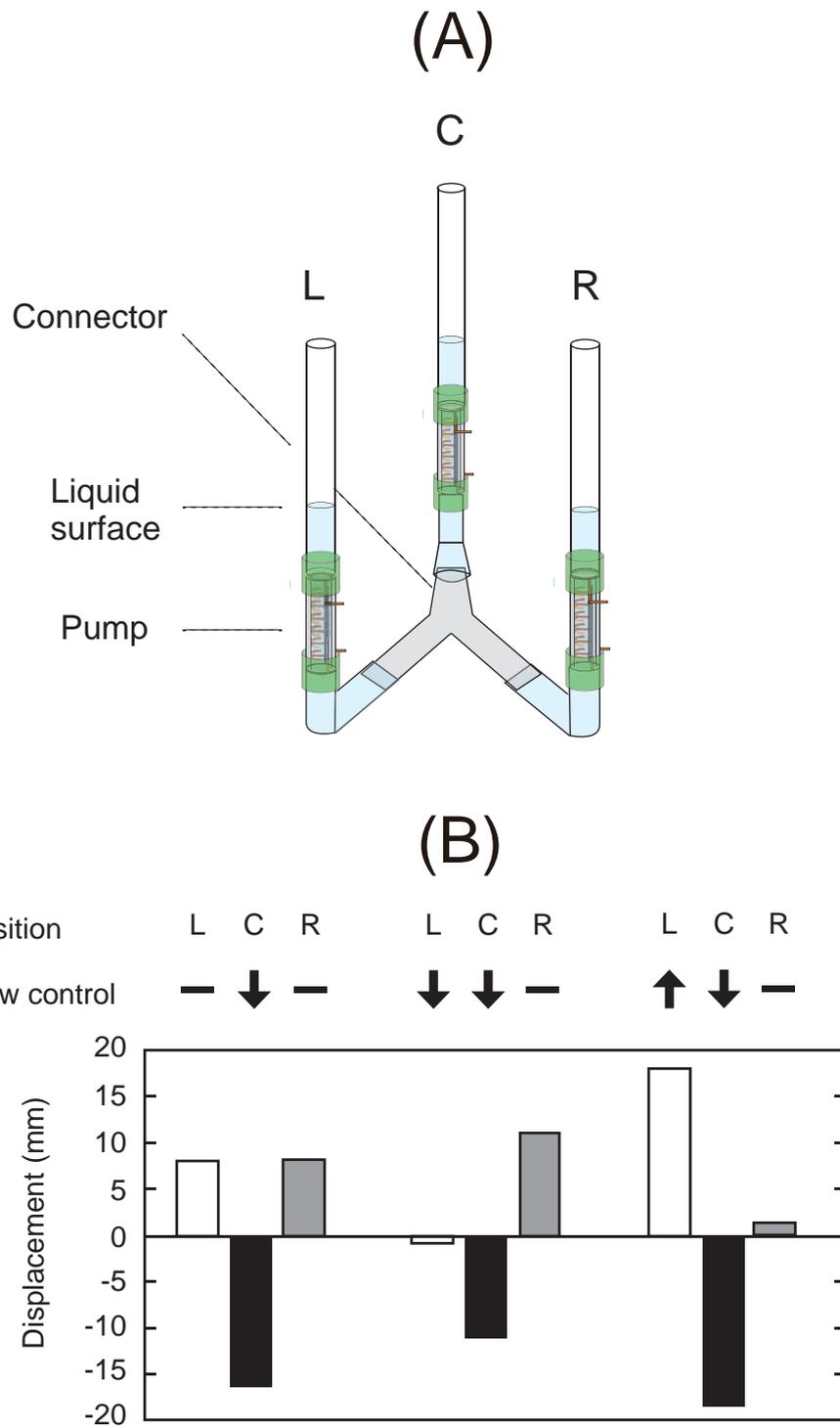


図8.15: 複数ポンプによる流れ制御実験 (A) 実験構成図, (B) 三つのポンプの制御方向と初期からの水面位置の変化

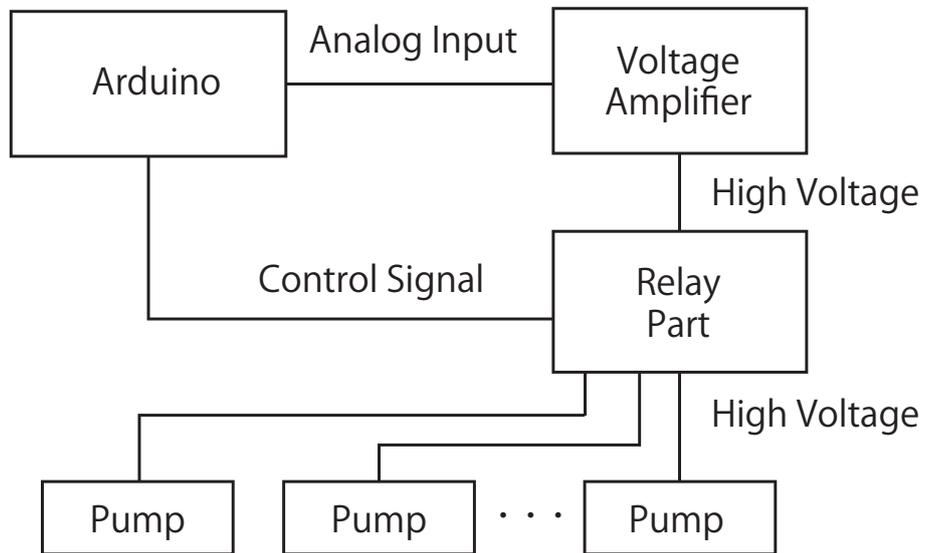
8.9 EHD ポンプ駆動のための回路仕様

提案手法によって作られた EHD ポンプは mm スケールの電極周期構造を有しており、適切な電界で動作させるには kV オーダーの電圧が必要となる。EHD ポンプは一種の静電アクチュエータであり、表8.1の楕形電極構造の場合、電流は約 $1 \mu\text{A} / \text{cm}$ 程度と小さい。

EHD ポンプをアプリケーションに組み込み、10kVまでの駆動に対応するには図8.16の様に 21.59mm角の立方体形状の昇圧モジュール（Matsusada Precision Inc., HVBT-10）を用いることができる。EHD ポンプに比べると体積のあるモジュールであるが、流路付近に配置する必要はないため、前節の流路制御などをシステム全体として小さく設計できるというメリットがある。

また複数のポンプ昇圧回路を利用したい場合は、高電圧対応のリレー素子を用いることで $50\mu\text{A}$ まで是一个のモジュールで対応することができる。各々の電圧を独立に制御したい場合は昇圧モジュールを増やすか、高耐圧のトランジスタを設けるといった工夫が必要になるであろう。

(A)



(B)

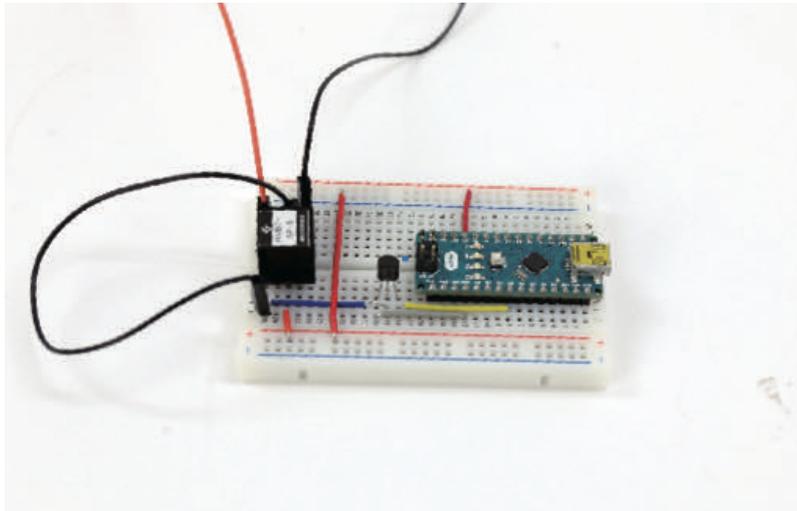


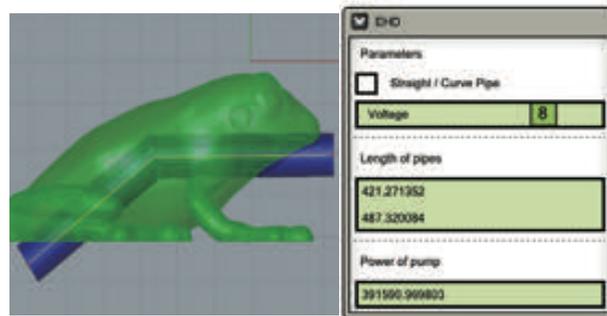
図8.16: EHD ポンプのシステム図 (A) システムのブロック図, (B) 昇圧回路の外観

8.10 EHD ポンプをモノと統合するための設計環境の試作

EHD ポンプをオブジェクト内部にインストールするための、インタラクティブなシステムのプロトタイプを行なった。システムは三次元モデリングツール Rhinoceros とそのプラグイン Grasshopper(Robert McNeel Associates) を用いた。システムは図8.17の様ユーザーが Rhinoceros のモデリング画面で、ポンプ設置箇所にパスを描くと、三次元モデル中にチューブ型ポンプを配置できるスペースが自動的に形成される。ポンプは楕形電極構造のチューブ型ポンプと曲げられる螺旋電極構造型のチューブポンプから選択できる様になっており、前者は直線、後者は曲線を描くことができる。

全てのポンプを駆動することを前提にポンプの長さに応じて出力圧力の概算値を表示する。この様に作成した三次元モデルをポンプを配置できる様に、ユーザーが必要に応じて分割して出力し、ポンプを配置したあとに接着することで、オブジェクトの内部にポンプデバイスを配置することができる。

(A)



(B)



(C)

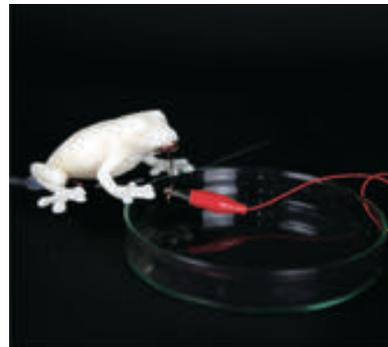


図8.17: ポンプを配置するためのインタラクティブなシステム (A) モデル作成時の様子, (B) 本システムで作られたオブジェクトの断面図, (C) カエル型のオブジェクトにチューブ型 EHD ポンプを配置した様子

8.11 小型分散配置可能な EHD ポンプを用いたアプリケーション

デジタルファブリケーションプロセスを用いて作られる EHD ポンプは、単ユニットが mm スケールの小さなポンプを様々な形状で設計することができる。これは、互いを繋げることで発生力を増やすことができるスケーラブルなシステムである。これらの特徴を活かしたアプリケーションの例を紹介する。

8.11.1 チューブ一体型循環システム

液体の循環は視覚的な効果を起こしたり、熱を交換する等の用途で使われている [44] [15]。通常はこのシステムはポンプのモジュールに流路が取り付けられた構造をしているが、ポンプの部分だけが大型化してしまうという課題がある。我々が提案した EHD のシステムは、流路にポンプを一体化できるので配管のみで液体の循環を起こすことが可能である。実際に、図 8.18A の様に流路中にポンプを配置し、ポンプを駆動させることで青いプロペラを回転させることができた。この原理を用いることで、例えば衣服やカメラの内部にチューブ型 EHD ポンプによる冷却システムを統合するといった応用が考えられる。また、流路内の液体が相分離する様に設計すれば、色付きの液体を押し出すことで視覚的な変化を起こせる可能性がある。

(A)



(B)



図8.18: チューブ一体型冷却システム (A) 動作原理確認のプロトタイプ, (B) 衣服やカメラの内部に配置した時のイメージ図

8.11.2 静かなピンアレイディスプレイ

棒状のオブジェクトを並べたピンアレイディスプレイは直感的な表現、モノの操作、触感の提示といった特徴を有するため、インタラクション領域で盛んに研究されている [107] [24] [91]. 特にポンプを用いたピンディスプレイは各ピクセルの変形量を多く取れるという利点があるが、ポンプのサイズとその駆動音が課題となっている. EHD ポンプの場合はポンプを様々な形状で作ることができるので、例えば図8.19の様に机の面積方向に薄型にポンプを実装し、静音で動かすといったアプローチも可能である.

ピンの部分の表現は NOVEC 7100 より軽量の色付きの洗剤を浮遊させることで、水面の高さを視覚的に表現した. 必要な表現に応じて COLORISE [25] の様に、エラストマーの膜を膨らませたり、摩擦の少ないシリンジポンプや折りたたみ構造体を動作させるといった応用も考えられる

(A)



(B)

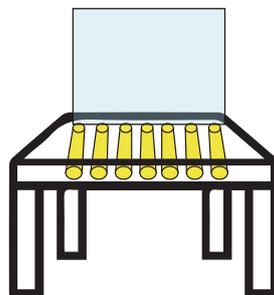


図8.19: EHD ポンプで構成されるピンアレイディスプレイ (A) ピンアレイディスプレイの外観, (B) ディスプレイ駆動時の様子, (C) 机に組み入れたシステムのイメージ

8.11.3 形状変化によるインタラクション

前項の最後でも触れたが、ポンプによる出力で物体を変化させることも可能である。図8.20の様に、EHD ポンプの出力側にエラストマー膜を貼ることで、電界により凹凸構造を制御することができる。また出力先の構造体を工夫することで曲げといった運動も表現可能である。EHD ポンプは流路と一体化できるため、アクチュエータの設置箇所が観察者からは、見えなくなる様な表現ができる点もユニークである。

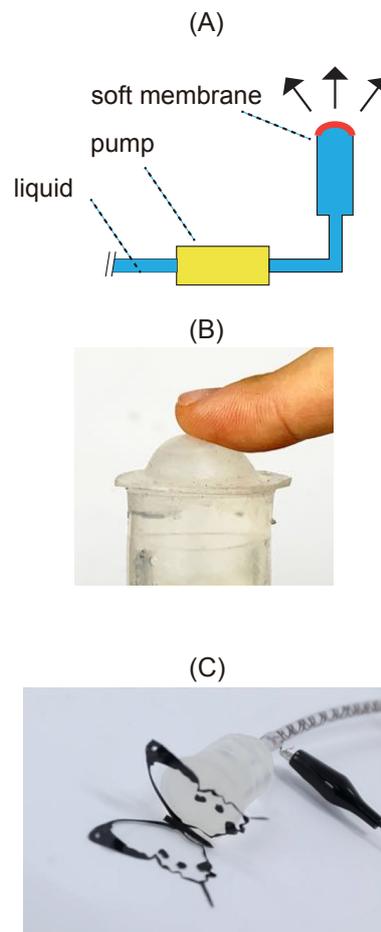


図8.20: EHD ポンプによる形状変形 (A) エラストマー膜を変形させる原理, (B) シリコンエラストマーを膨らませている様子, (C) 膨らませたエラストマーにより柔らかな構造体を動かす様子

8.12 EHD ポンプの制約事項

EHD ポンプをインタラクションのために活用するにはいくつかの制約事項がある。一つは EHD ポンプの性能限界である。これは誘電液体の物性、印加電界強度、流路抵抗などによって決まる。EHD ポンプを安定して動作させるには、コンダクションポンピングのモードで動かす必要があり、電界強度は最大でも 10 MV/m 程度となる。

そのためアクチュエータとして見ると 50 MV/m 以上の電界を加えられる誘電エラストマーアクチュエータなどに比べると、体積あたりのパワーは小さくなる [102] [99]。またデジタルファブリケーションを用いることで様々な形状を設計できる一方で、装置の加工精度の制約から電極間の距離は 1mm 程度と広くなり、高電圧に昇圧する必要がある。高電圧駆動の場合、ユーザーが直接高電圧部位に触れない様に、十分な絶縁距離をとった構造に設計する必要がある。また空気の絶縁耐圧は 3 MV/m 程度と低いため、配線が空気を介して絶縁破壊しない様に、配線レイアウトのスペースなども注意する必要がある。

EHD ポンプの出力には材料の比誘電率も影響している。水などはイオン導電性があるため使用できない。また無機の結晶材料などとは異なり、一般的に比誘電率は 10 以下程度が限界である。

EHD ポンプはスケラブルで分散配置が可能であるため、ユニットを分割して細かく制御することで、流路操作をできる可能性がある。しかし、細かくユニットを分けて制御をする場合には、流路のポンプ部位のそれぞれに独立した配線つなぎ制御する必要がある。このような配線の設計と制御は今後の技術課題となっている。

8.13 微細構造を設計する手法のまとめ

構造を設計する手法により、機能を付与する手法を流体アクチュエータを題材に提案した。これまでの材料が備えていた構造を活用する手法などに比べて、どの箇所や形状に設計するかということを用途に合わせて設計できるという利点がある。

実際に今回デジタルファブリケーションプロセスを活用することで、様々な形状のポンプを設計することができた。また構造する電極の形に応じてポンプとしての特徴だけではなく、チューブ型ポンプの例では屈曲性といった機械特性にも影響を与えた。

この様に微細構造を設計する場合は、その構造によって付与される機能がどの要素に影響するかも含めて設計する必要がある。また微細構造はコンピュータシミュレーションに設計できるので、長さや幅といったデバイスの構造パラメータによって、ポンプの圧力や流量を予測できる。これは、微細構造設計により意図した形を作れるが故の特徴である。

今回提案した EHD ポンプシステムは従来では受動的な要素として存在していた流路部分にアクチュエーション機能を付加しており、インタラクション機能の配置上の制約を減らすことで、より効率的に動作させられる可能性を示すことができた。

本システムにより、インタラクション機能をさらに拡張していくためには、送液を単なる力として利用するのではなく、熱や色といった別のモジュールを伝えるといった応用が期待される。また、体積パワー密度では原理的に不利な系であるので、システム全体のポンプのエネルギー集約したり、必要によって振り分けるといった流路コントロール制御がより重要になる。そのため、分割したユニットへの配線方法やシステム全体への圧力情報のフィードバック、制御手法がさらに高機能化する上では重要な課題になると考えている。

第 9 章

微細構造設計によるインタラクシヨ ン機能統合の考察

4章から8章にかけて、デバイスより小さく、材料より大きな領域の構造と材料特性を掛け合わせることで、高機能かつ形状随意性を有する機能統合の手法を探索してきた。

様々なスケールとアプローチによる物質へのインタラクション機能の統合を試みてきた結果、各手法にの利点や制約事項を確認することができた。

本章では今回提案した微細構造設計をどのような時に活用すべきか、またその時に機能を統合するマテリアルにとって、どの要素が重要となるのかについて論じる。

9.1 微細構造設計を活用すべき状況

マテリアルにインタラクション機能を統合する際に、どのようなシーンで今回提案した技術が適用されるべきかについて論じる。

現在のIoTや電化製品といったプロダクトや研究で作成されるハードウェアは、アナログとデジタルを時に行き来しながら設計し、必要な部材を購入する。筐体などの部材は必要に応じて、機械加工やデジタルファブリケーションなどにより作成し、組み立てていくアプローチが主流である。複雑なインタラクション機能を実現するためには、プロセッサやバッテリーといった構成要素が必要となるケースが多く、これらは単体のマテリアルや構造だけでは扱えないため、デバイスとして導入される。そのため、製造プロセスでは、通常アセンブリの工程も必要となる。

市販で入手できるデバイスを活用するアプローチには、すでに設計に有用な様々なサービスやデータが公開されている。例えば、電子工作で使用される各種デバイス素子の特性やサイズは公開されており、設計時にこれらのデータをCADで活用することができる。また、デバイスや回路の電氣的な振る舞いもシミュレータなどを用いることで検証することができる。ソフトウェアのコードも、様々なWEBサイトでシェアされており、必ずしも最初から設計する必要がない。この様なモノづくりの環境は非常に有用であり、積極的に活用していくべきモノであろう。

一方で、3章の課題で述べた様に、デバイスを組み込むというアプローチだけでは対応できないケースがも存在する。デバイスは優れた機能を有する素子であるが、組み込むマテリアルの機械特性の維持、情報を取得したい箇所への設置、意匠性の確保といった要求を満たせない時には、別の方法で補う必要がある。この様な時は、今回提案した様なデバイスより小さな構造単位を設計してマテリアルに機能を取り込むことが一つの手段となる。

デバイスはすでに機能を生み出すために設計された高機能な構造体であるため、異なるアプローチを採用する場合は、単一のトランスデューサとしての機能以外の要素が求められることも多い。

次節でインタラクション体験を設計する上で機能以外に求められる項目とそれらに対する知見をまとめる。

9.2 機能統合時に検討すべき項目

デバイスの機能以外の要素としては、設計者はどのような要素に配慮すべきであろうか。これは設計対象によって大きく変化するであろう。

これまでに、Rasmussen らはインタラクション機能を統合した Shape-Change Display を題材に先行研究の取り組みを、デザインスペース（設計領域）としてまとめている [109]。彼らはトポロジ的に等価なものを同じタイプの変形と定義し、表現する対象、動作パラメータ、インタラクションの形式といったいくつかの分類の視点を提示している。

また、HCI 分野の研究ではあるシーズ技術がどのような設計に対応できるかという視点で、そのアプローチが取り得るデザインスペースをまとめている例も見受けられる [32] [98]。このようなケースでは作成し得る形状や硬さ、拡張性といった、機能や原理に基づき、どの様なものが設計し得るかという視点で整理されている。

我々は今回、設計者視点で最終的にシステムとして組み上げる時に、考慮すべき要素を下の項目で整理した。

- 統合する機能
- 機械特性
- 見た目
- 形状
- 製造方法

これらの要素は、本論文中の事例や、過去の先行研究のデザインスペースを参考に、必要とされる機能を抽象度高くまとめ、選んだものである。問題設定によってさらに項目を加えて活用することが出来る。詳細を順に説明する。

統合する機能

物理世界でのモノとヒトや環境とのインタラクションは何かしらの物理的な信号を検知し、別の物理信号により伝達する。この入出力機能は、二つの物理量を結びつける現象やそれを応用したトランスデューサを活用することで利用することができる。2章で紹介した様に、多くのスマートマテリアルやデバイスが提案されている。

二つの物理量を結びつける代表的な物理現象やデバイスを図9.1に記載した。この対応関係はユーザー側から見たときは必ずしも一対一で完結する必要はなく、物理信号を一度電気信号に変換し、その信号を元に演算装置で計算し、命令の信号を電気で送り、別の物理運動に変えるといった具合に応用されているケースが多い。

設計者は作りたい体験がどの様な物理現象の組み合わせで表現でき、そこに紐付く、現象

やデバイスを見つける必要がある。

		Input								
		電流	電圧	磁界	応力	熱	光	pH	溶媒	物質
Output	電流		オームの法則 (電磁誘導)		圧電	熱電対	光電変換	酸化還元	電池	酸化物半導体
	電圧	オームの法則		電磁誘導	静電容量	熱電対	(光電変換)	(酸化還元)	電池	固体電池
	磁界	電磁誘導	電磁誘導		磁性フィルター	磁気熱電効果	スピントロニクス	-	-	-
	応力	平行導線	圧電 DEA	ローレンツ力		熱膨張熱収縮	光異性化反応	ゲル相転移	液体駆動	-
	熱	ジュール熱	熱電体	スピントロニクス	エラストマー		レーザー加熱	中和熱	混合熱	反応熱
	光	熱	(熱)	スピントロニクス	応力発光材	サーモクロミック		化学反応	化学反応	化学反応
	pH	酸化還元	(酸化還元)	-	-	-	-	化学反応	化学反応	化学反応
	溶媒	化学反応(電場など)	界面活性剤	ゲル相転移	ゲル相転移	ゲル相転移	ゲル相転移	ゲル相転移	ゲル相転移	ゲル相転移
	物質	化学反応(電場など)	電気泳動	ゲル相転移	ポンプ	ゲル収縮	光異性化反応	ゲル相転移	拡散	

図9.1: 二つの物理量を結びつける現象またはデバイス名

機械特性

半導体デバイスをベースとした現在主流の機能付与アプローチでは、マテリアルの柔らかかさやしなやかさの維持が課題となるケースが存在する [90] [122]. 柔らかさを実現するアプローチは大きく分けて、柔らかい物質で構成する [156], 硬い物質を微細化して変形させる [111], またはそのハイブリッド [119] [123] の3つに分類することができる。

一般的に無機材料は原子を強く結びつける共有結合, イオン結合, 金属結合によって結びついている。そのため、機械特性としては硬くなるが、同時にこの様な構造が優れた導電性や耐熱性に寄与している。この特徴から、精度高く安定なシステムを実現するには無機の材料やデバイスは適している。

バネや安全ピンと行った身の回りの製品に代表される様に、金属のような硬い素材も、薄くすることで数%の歪みを小さな力で起こすことができる。この微小な変形は、電極の配線レイアウトや折りや螺旋の様な構造体を用いることで、全体として大きく歪ませることも可能となる。近年は、デジタルファブリケーションの活用により、容易に構造設計ができる様になりつつあり、無機のデバイスと組み合わせるで対応できるシーンを増えている。

一方でトランスデューサ自体は変化しないので、変形時などにはデバイスがより粗な状態で配置される。この様なトレードオフが許される系であるかを考える必要がある。

柔らかな材料によって、機械特性の課題を解決することも可能である。その様な場合はこれらの柔らかい材料を適切に組み合わせ、必要に応じて多チャンネルに対応できる様に分割するといった工夫が必要になる。その分割にもデジタルファブ리케이션技術が利用できる。柔らかい材料によるアプローチは耐久性の低下や変形時の物性変化が起こるため、機構的にはシンプルに構成できるが、設計者は材料の特性をよく把握した上で採用する必要がある。

形状

インタラクション機能を付与する部位の形状も重要な要素となる。これは完成品の形状だけではなく、機能を付与する部位の形状も意図している。機械特性の項目で述べた様に、構造と材料により特性と得意な形状が異なる。

三次元形状の物体への機能付与の形状を図9.2の様に整理した。(A)はデバイスを配置することで、全体の信号を取得する手法である。精度高く計測することができるが、センサやアクチュエータは離散的に配置されるので、全てのエリアをカバーすることは難しい。またデバイスが設置可能なスペースを必要とする。

(B)は、タッチセンサアレイなど [119] ある程度二次元的なサイズを持ったケースである。この場合は入出力時に位置の情報も扱えるため、より複雑な意味情報を取得・表出できる可能性がある。例えば触れるという行為に対して、どの箇所に、どんな手の向きで触れているかといった内容まで予想できる可能性がある。

(C)はオブジェクトの内部を含めた全体がインタラクション機能を担う部位となっているケースである。センシングのケースでは、表面の状態だけではなく内部変化の情報を扱うことができる。例えば、タッチセンサを例にとると、触れた位置に加えて押し込んだ力の方向といった情報まで取得できる可能性がある。また、アクチュエータとして捉えるとその出力はデバイスの体積に比例する。スケーラブルなシステムの場合は、体積を有効に活用することでより大きな物理的変化を及ぼすことが期待される。

目的に応じてどの様な形状で機能が統合されていることが望ましいかを必要とする情報や表現形態と合わせて、設計の段階で考えることが重要である。

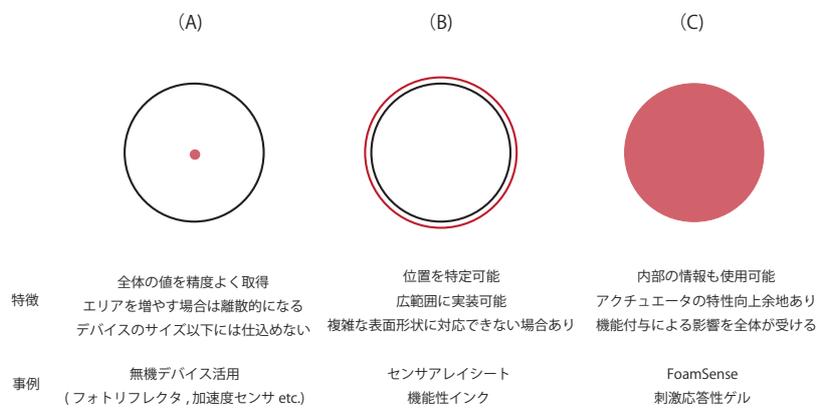


図9.2: 機能統合部位の形状による特徴の違い (A) デバイス配置による離散的な構成, (B) 面形状による構成, (C) 三次元形状の構成

見たい目

家電製品などを例に従来の機能組み込みの事例を考えると、デバイスは製品の内部に埋め込まれている。また筐体などに印刷や機械加工などを施すことで、機能と意匠性を切り分けて両立させているケースが多い。

一方で本論文で扱った織物の様に、物質の内部にデバイスを埋め込むことが困難なケースも存在する。この様な状況に対応するには、より小さな機能性の部位を導入していくことが必要である。代表的なアプローチの一つが、スマートマテリアルなどをインク化して塗工するアプローチである。この手法では、インク中の微粒子や分子という微細構造が物質表面に定着することで機能が付与される。

曲面や細かいパターンニングなどに課題があるが、適切な組み合わせを選ぶことで、印刷により表面に様々な機能を持たせることができる。機能性インクは日々新たな商品が開発されており、表面修飾によりアプローチする際には常に最新の材料を探索することが好ましいであろう。

印刷などによって表面を修飾した場合は、インクが表面を覆うため、マテリアル表面の微細な凹凸構造が覆われることで、テクスチャが変化する場合がある。塗工するインクの厚みなどに合わせて、塗工して問題ないか配慮する必要がある。

テクスチャを改変する手法には、4章の事例の様に、表面にさらに層を重ねてレイヤーバイレイヤー構造にすることで設計することも可能である。これはサイズ感は異なるが、従来の機能と意匠性を切り分ける発想に近いアプローチである。

あるいは、印刷に頼らずその物質を構成する要素にあらかじめ機能を導入するアプローチが考えられる。例えば5章の様に、糸に機能を付与することで、織物としての質感を維持することができる。その他にも硬化前のエラストマーやポリマーに機能を付与する分子構造や微粒子を導入することで、従来の作り方を踏襲したまま、見た目と機能を変化させる手法も有効である。

この様に機能を統合した際に意匠性をどの様に扱うかによって、印刷か、内部と切り分けるか、構成要素自体を修飾するかといった選択肢が生じてくる。

製造方法について

上の要素に加えて、どの様に作成するかも重要である。例えば新規デバイスにより、機能と機械特性を両立させようとすると、高精度のデバイスでは、数百 μm 以下のスケールで精度良く材料を組み合わせしていく必要がある。電氣的に制御する様なデバイスの場合には、クリーンな環境と特殊なプロセス装置が必要となる。

現在、デジタルファブリケーション技術の発展はこの様な制約を少しずつ解決しつつある。トランジスタの設計などには活用はまだ難しいが、0.1 mm程度のパターンニングレイアウト

は現実的になりつつある。製造プロセス時間の課題も、高い解像度が必要な箇所とそうでない箇所適切に組み合わせるといった工夫が重要になるであろう。

デジタルファブ리케이션においてプロセスの精度と製造時間以外に重要になるのが、マテリアルの選択肢である。FDM形式の3Dプリンタでは、PLAやABSといった樹脂以外にも、柔らかい素材、形状記憶ポリマー、生体適合性の素材といった選択肢が増えつつある。また高価ではあるが、複数材料をインクジェットプロセスにより混ぜ合わせながら射出することで剛性と色をある範囲で調整可能な装置なども発表されている。

この様に装置による選択肢が増えることは非常に嬉しいことであるが、プロダクトには本章で紹介しているだけでも、上に挙げた多くの要求項目があるため、全ての用途に対してユニバーサルに対応するのではなく、6の様6に機能部位は後から付加的に追加する方法と合わせて検討していくことは製造時間を短縮していくためには有用であろう。

9.2.1 その他の留意すべき項目について

ここまでは主にインタラクション機能を統合する上で留意する点とそこにこれまで提案してきた微細構造設計のアプローチがどの様に関わるかについて述べてきた。実際に用いる際には、上に挙げた要素の他にも、次の様な項目に配慮する必要があると考えられる。

一つは安全性である、ヒトが触れて扱う物理世界のインタラクションを設計する際には、安全性がちゃんと確保された形で提供する必要がある。スマートマテリアルの様な材料を扱う際には、Safety Data Sheet(SDS)の内容などをきちんと読み、人体への影響が無いものを扱う必要がある。

実際に手法が活用されるかという点においてはコストも重要である。スマートマテリアルの活用においては特殊な材料は価格が高くなる傾向があるので、局所的に付加できる設計や、すでに他の用途で使われていて安価なものを採用することを推奨する。

また製造プロセスの完成度によっては、歩留まりが低かったり、サンプル間のばらつきが大きいといった問題も生じ得る。精度を求める様な場合には、誤差が発生しにくいプロセスを選択することが好ましい。

問題が発生しやすい項目としては信頼性が挙げられる。信頼にはある環境下での動作を保証する様な環境耐性と経時変化による影響（ライフタイム）と繰り返し動作により生じるサイクル特性などの項目が存在する。これらの項目も使用用途に合わせて検証する必要がある。すでに材料単体としてある程度信頼性知見が共有されているモノを選ぶことが好ましい。

9.3 微細構造設計の各アプローチの原理的な強みと活用方法についての考察

本節では、今回提案した微細構造設計のためのアプローチがどのような利点と制約事項を持っているかについて論じる。

本論文では微細構造の設計に対して、大きく分けて二つの立場をとっている。一つは入手できる材料やアクセス可能なプロセスを活用して機能を実現するアプローチである。もう一つは材料や微細構造を必要に応じて作り、機能を創発していくアプローチである。

9.3.1 材料や微細構造を活用する手法の特徴と考察

前者のすでにアクセスできる材料やプロセス、あるいは構造そのものを活用するアプローチは、新たに構造を作る必要がなく、付加的な要素が少ないため、機能導入の障壁が比較的小さい。

一方で使える材料やプロセスを限定するため、活用できる領域が限定されてしまう。言い換えるとそのような制約の元でも要求される項目を満たせる場合において、活用のアプローチはとても有効に働くと言えるであろう。

入手可能なマテリアルの組み合わせと構造化による手法の特徴と考察

4章の既存のマテリアルを組み合わせ・構造化するアプローチは、特別な材料や装置を用いていないために、誰にでも再現可能であることが一つの利点となっている。設計したマテリアル自体は面内方向に均質でシンプルなものであるが、作成方法やプロセスの情報を伝えるだけで多くの人々が実践することができる。この手法はプロセスや材料が入手しやすいために、機能設計の自由度は限定されるが、代わりに展開性が広がったと見ることも出来る。

また、4章の事例を見ると、プロセスの項目を簡略化されたことで、いくつかのばらつきとなり得る要因が生じている点も注目に値する。7章の様に、マテリアルそのものを設計する場合には、材料の組成や各プロセス条件に非常に細かい条件を指定する必要がある。しかし、求められる機能が磁石にくっつくかといった簡易的な指標になると、プロセスに求められる厳密性は低下する。この様に求められる機能に応じて、材料や構造の設計難易度が大きく変わるため、インタラクション設計時の初期段階においてどのような機能が必要かについて精査することが重要であろう。

既存のモノづくりプロセスを活用した手法の特徴と考察

5章の様に既存のモノづくりのプロセスを活用する手法は、従来のプロセスのノウハウを活用できるため、時には構造を設計するアプローチ以上に、複雑な微細構造を設計できる可能性がある。

スマートマテリアルを手作業やデジタルファブリケーションプロセスによりマテリアルに付与する手法と新規デバイス設計の手法の間には、プロセス精度に大きな隔たりが存在している。高分解能のプロセス技術により、デバイスは特性を最適化したり、複数のトランスデューサを独立に動かすといったことが可能となっている [111]。しかし、プロセス精度が高い程、装置の価格が上がり、サイズも大きくなる傾向がある。そのため、アクセス性を考慮すると、デジタルファブリケーションが有する精度や機能以上に微細構造を作りこむことは困難である。

既存のプロセスを活用する場合、最終的に構成されるマテリアルの構造は、そのモノづくりの精度に依存する。活用するプロセスによっては、適切な構成要素に着目し、そこに機能を付与するだけで、完成品に複雑な微細構造を導入できる可能性がある。

プロセスを活用するアプローチにおいては、そのプロセスが設計できる構造自体が、機能統合するマテリアルに実装可能な微細構造と対応している。プロセスの活用は導入が容易というだけでなく、より複雑な構造を導入するためのアプローチ手法としても候補となる。

また本論文では主に目的に対してアプローチを選択していくというエンジニアリング的な構成を示してきたが、実際に5章で西陣織の職人と一緒にプロセスを活用しながらモノづくりをすることで、違いの知識が拡張し、新たなプロダクトや材料開発の要求が得られるということを経験した。この様な異分野の知識の交流によって、新たなアイデアや材料が生まれる可能性があることはこの手法による別の価値として存在している。

マテリアルが有する微細構造を活用する手法の特徴と考察

6章の様に、すでにマテリアルが備えている構造を活用するアプローチは、モノに後天的に機能を付加できるという特徴がある。他のアプローチでは機能を統合したい場所や形状に合わせて、材料やプロセスからボトムアップで作っていくが、マテリアルが有する構造体を活用する手法では、そこに付加的に機能を付け加えていくので、組み立てのプロセスは最小限に、身の回りのモノの機能を拡張していくことができる。

マテリアルの構造を活用するケースでは、その微細構造がデジタルファブリケーションよりも細かい精度の場合などもある存在する。利用方法によっては、構造体を設計・付与する手法では困難な機能を実現することができる。微細構造を元から備えているマテリアルは、その微細構造自体が、すでに何かしらの機能を付与していると考えられることができる。例えば、多孔質体の場合は柔らかさや軽量、通気性といった機能が付与されている。構造によりもた

らされている特性に注目することで、設計に関するヒントを得ることも可能である。

インタラクション機能を統合する際に、機能以外に柔らかさと軽量性も必要であれば、スマートマテリアルを付与した物体を多孔質形状に加工するといった発想を得ることもできる。逆にすでにその様な特徴を有している物質として多孔質体を選定し、そこに機能を付与するといったプロセスで適切な構造を探索していくことも可能である。

9.3.2 材料や微細構造を設計する手法の特徴と考察

この様にすでに存在するマテリアルや構造を活用するアプローチは、導入は材料や微細構造を設計するアプローチに比べると一般的に容易であることが利点である。また、用途によってはデジタルファブ리케이션によって構造を設計するアプローチに比べて、高精度な微細構造を活用できるためより高機能化できるケースも存在する。

しかしながら、マテリアルの微細構造活用のアプローチでは、その微細構造はそのプロダクトが本来必要とされる機能や製造プロセス上の制約から生じている。そのため、既存の組み合わせだけでは実現できないケースも存在する。インタラクション機能をより高度に作りこむためには、特定の部位にだけ変化を持たせたりと、カスタマイズ性が必要になるケースも存在するであろう。この様なケースでは、微細構造を作ることもあれば、活用の段階で一部にデジタルファブ리케이션を活用することも可能である。構造の設計と活用は完全に別れてはならず、目的に応じて相補的に活用されていくべき手法である。

材料の分子構造を設計する手法の特徴と考察

7章で扱った材料そのものを改良するアプローチでは、非常に小さな領域で生じている物理現象が問題となる時に、活用されることが好ましいアプローチである。小さい領域の物理現象としては分子構造によって変わる光学特性、材料との密着性、溶媒などに対する溶解性などが挙げられる。また本論文中では扱っていないが、バイオマテリアルなども視野に入れると、特定の物質との吸着性といった機能なども該当する。

他アプローチに比べると時に技術的な敷居は高いが、必ずしも高価な設備は必要とせず、物理世界とのインタラクションの新たな信号を取り扱ったり、自励振動ゲルの様なセンシングとアクチュエーションの機能の枠を超えた様な新機能を取り込んでいくには重要となる技術要素である。

また材料は nm スケールの非常に小さい領域での機能のカスタマイズを行なっているため、さらにスケールの大きい微細構造や他材料との組み合わせといった別の手法と一緒に活用することも可能である。

例えば、我々は柔らかいロボットの変形状態を取得するために、ロボットの内部に図9.3の様に材料と構造を工夫した柔らかいセンサを導入した [93]。このロボットは空気圧駆動タイ

プのもので、構造を維持するために柔らかいシリコーン製の多孔質構造を内包していた。

このロボットの変形に耐え、機械特性を損なわずに機能を導入するために、シリコーンに密着可能で伸長量をセンシング可能な材料を新たに設計した。6章の FoamSense で用いられているカーボンとシリコーンの種類を変更し、伸長時にも低剛性で伸長量を測定可能なカーボンとの混合組成比率を見出した。この材料をロボット筐体内部の多孔質のシリコーンに定着させた。この材料は単体では伸長に対して抵抗値が変化する機能のみを有しているが、伸縮性の多孔質構造と組み合わせることで、伸長だけでなく、圧縮も測れる様に機能を拡張した。この様に材料と構造の設計を組み合わせることで、統合可能なインタラクション機能をより広げることができる。

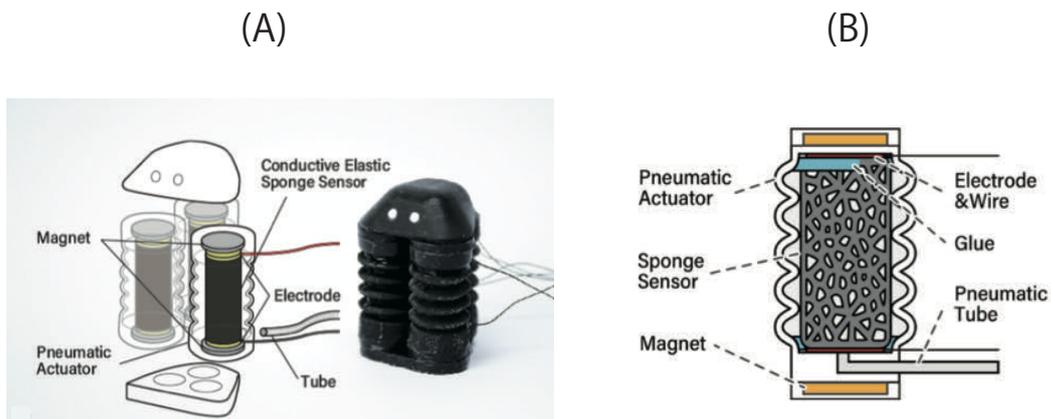


図9.3: 手動作により動きをプログラミング可能なソフトロボット : MorphIO (A) システム外観, (B) センシング部位の構造

9.3.3 微細構造を設計する手法の特徴と考察

デジタルファブ리케이션技術の発展により、様々な形状をコンピュータシヨナルに設計し活用することができる。このアプローチは上に述べた様に設計の自由度が高く、位置によって異なる構造を導入することが可能である。設計可能な精度は半導体プロセスには劣るが、mm 未満のスケールで加工できることから機能の分割に必要な配線レイアウトなども、作れる様になりつつある。

8章ではカッティングプロッターにより二次元な構造を作っているが、Additive Manufacturing の三次元構造も本論文の分類では微細構造を設計する手法に分類される。前節で述べた様に、製造時間や得意とする材料が異なるため、用途に合わせて適切なプロセスを採用することが設計上では重要となる。

デジタルファブ리케이션により構成された微細構造は、そこに材料を組み合わせて利用することもできれば、すでに機能を持った材料を出力して高機能化するというアプローチを取ることでもできる。

微細構造を設計した場合は材料と構造の特徴が分かっているならば、外力などの物理刺激に対して、どの様に振る舞うかをシミュレーションしやすくなるという点もこのアプローチの優れた特徴である。2012年以降、インタフェースの領域で応用が盛んになってきた信号処理による解析なども材料と構造の初期条件が与えられることで、さらに進化する可能性があると考えている。

9.3.4 微細構造を設計活用の指針について

本章でマテリアルにインタラクション機能を統合する際に微細構造設計手法がどのようなシーンで活用されるべきか、また機能面以外で留意すべき要素や、各アプローチの特徴などについて論じてきた。

今回提案した微細構造設計によるインタラクション機能統合はデバイスという構造単位では、達成できない様々な形状や機械特性を実現する際に特に適したアプローチであると考えている。所望の特性を得るために必要な微細構造を既にあるものを活用するか、自ら構造を設計するかは、本章で紹介した様な種々の制約条件によって変化する。

完成したプロダクトや身の回りの物質に機能を付与するには、その作り方や構造を活用すると、組み立てなどの工程を少なく導入することができる。この様に完成したプロダクトや構成要素に対して、付加的に機能を加えていく時にも有効に活用し得るものである。

微細構造設計をどの程度まで行うかは、求める機能によってある程度判断できる。センサアレイやディスプレイのデバイスの様に機能を分割する必要がある場合には、機能を分割したり、配線パスを作る必要があるため、少なくともデジタルファブ리케이션や既存プロ

セスの活用が必要になる。

一方でスケールは小さくても、マテリアルに付与される特性が均一な系であれば、マテリアルが元から備えている構造を活用したり、混錬・塗工・浸漬といった材料を組み合わせる手法で対応することができる。

必要となる機能が材料特性由来であり、単純な材料の組み合わせやマクロなスケールでの改良では解決できない場合は時には、材料の分子構造そのものを見直す必要がある。

この様に、材料と構造設計の要素を求める機能や統合する対象物に応じて、適したアプローチで組み合わせていくことで、より自然な形で、身の回りのモノへのインタラクション機能の統合を行うことができる。

これらの手法が活用されていくことで、これまでは機能を導入できなかった材料やユースケースに対して新たなインタラクション機能を導入したり、これまでは取得できなかった、より複雑な情報の取得と活用が期待される。

9.4 微細構造設計のスケールと機能のまとめ

本節では、これまで様々な手法で設計してきた微細構造のスケールと対応する機能についてにまとめる。これまで提案してきた手法を、設計した微細構造のスケールに対して整理すると図9.4の様に表すことができる。それぞれのスケールの視点で、微細構造設計の手法について論じる。

ナノスケールの設計

7章や本章の材料改良の事例として紹介した MorphIO などは、材料を分子構造またはナノカーボンなどの材料を利用しているため、ナノスケールで構造を設計していると捉えることができる [93]。

このスケールでの設計は、半導体プロセスを用いることで自在に設計することも可能であるが、個人が利用することは未だに難しい。一方で材料の合成やコンポジット化は攪拌や加熱などのプロセスを組み合わせることで実現することができるため、個人でも機能を付与することができる。つまり、インタラクション統合のための、微細構造設計におけるナノメートルスケールの設計は材料の合成やチューニングが該当する。

ナノメートルスケールでは、光の吸収や干渉といった光学的な現象や、時にはトンネル電流といった量子効果の影響も受ける。またエラストマーなどの力学モデルは統計力学を元に構築されており、熱統計力学として現象を捉える領域となる。このような領域の物理現象を扱う場合には、材料の設計が必要となる。

既存の微細構造やプロセスの活用においても、機能性材料は盛んに用いられる。この場合は共に用いるマテリアルとの密着性や分散性、あるいはプロセス装置に適合させるための粘度の調整などもインタラクション機能統合のための材料設計の範疇となる。

メソスケールの設計

デジタルファブリケーション装置による微細構造の設計やマテリアルが元から備える構造を活用する手法では、 μm から mm 程度のメソスケールと呼ばれる領域の微細構造設計が主流となる。また既存プロセスの活用の場合も、数百 μm のスケールを扱うことも多く、微細構造における主要な領域である。

このスケールは構造的な工夫により、柔らかさを付与することができる。本論文で提案した様に構造の設計から活用と様々な手法でアプローチすることができ、デバイスよりは小さなスケールであることから、機械特性の向上やデバイスのアレイ化などに用いることで出力に関わるインタラクション機能を拡張することができる。

この領域では量子効果などの影響は受けにくいですが、機械加工の精度の限界に近づいている

ため、扱う装置によってどの程度の精度を確保できているかを確認することが重要となる。またプロセスに使用するインク材料等がチキソ性を有している場合などは、その影響が大きくなるスケールでもあるため、構造設計時にはマクロスケール時とは異なる課題が出てくることが多い。扱うプロセスと材料に応じて専門家の知識やノウハウを取り入れながら設計していくことを推奨する。

マクロスケールの設計

4章の様に機能統合を手作業でも行える mm 以上のスケールの設計について述べる。この領域は、メソスケールと同様に機械的な剛性をカスタマイズしたり、折り紙構造を用いて変形や伸縮性を持たせるということが可能である。構造の単位が大きいため、大きな材料に適用する場合は実装にかかる手間を抑えることができる。

一方で、デバイスのサイズと近くなってくるので、AccordionFab の様に [154] それらと組み合わせるアセンブリを前提に活用していくことも選択肢となる。

またこのスケールは製造装置へのアクセスがより容易となり、視覚的にも認識しやすくなるため、手法を他者に伝え易い点も用途によっては魅力的な部分となる。

微細構造設計のスケールのまとめ

本論文ではナノスケールで機能を発言するスマート材料とマクロスケールで機能するデバイスの中間領域の微細構造を設計することを論じてきた。提案してきた手法をスケールの視点で整理すると、ナノスケールからマクロスケールの各領域をカバーできていることを確認することができた。

また現在の製造プロセスの制約を考えると、メソスケールにおける設計が、その自由度とアプローチの多様性から材料とデバイスの領域をつなぐための重要な設計領域となっていることを俯瞰的に捉えることができた。

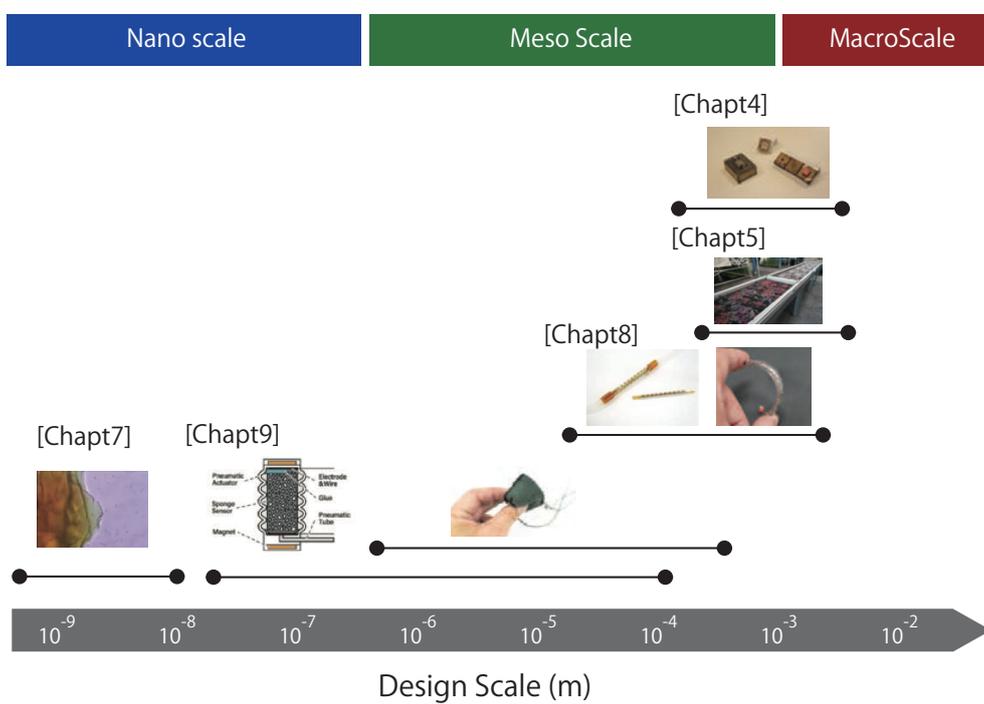


図9.4: 微細構造の設計スケールに対する本論文提案手法のマッピング

第 10 章

結論

本論文では、物理世界のマテリアルへのインタラクション機能を拡張するために、デバイスが組み入れられない対象物への機能統合や、スマートマテリアルの機能を拡張するための設計手法について様々な視点から提案し、その手法の実践とその活用のための指針となる知見をまとめてきた。

10.1 各章の振り返り

1章では、物質への機能統合が現在は静的なシステムとして構築されている現状と、研究領域では入出力機能がより高機能に統合されつつある状況について述べた。また物理世界へのインタラクション機能の統合が、より多くの用途に展開されていくためには、現在主流のデバイスを取り付ける手法やスマートマテリアルの活用で解決できていない課題があることを紹介した。

2章では、機能統合に関わる様々な要素技術と実装例を紹介した。様々な物理信号に対して応答するスマートマテリアルや、機械的な特性を改良するための新規デバイスの研究やそのアプローチ手法として材料や構造設計が積極的に活用されている現状を紹介した。

出力機能では、アクチュエータ研究分野に触れて、手法毎の特徴と適した用途について紹介した。

ファブリケーションの領域では、Additive Manufacturingの手法により、デジタルファブリケーションが構造の制御だけではなく、材料物性も計算した機能設計にまで領域が広がりつつある現状を紹介した。

インタラクション領域の応用研究では、静的なシステムから動的なシステムへのパラダイムの変化と、それらを実装していく過程で、物理世界のインタラクション表現が様々なモードへと拡張しているトレンドを紹介した。またソフトロボティクスの分野が従来のロボットが苦手とするタスクの解決だけでなく、環境と調和するための様々な物理表現が可能なシステムへと展開されている事例などを紹介した。

3章では、先行研究の現状を分析し、デバイスによる機能統合が、形状の自由度を制限している要因であると分析した。またスマートマテリアルによる機能付与は、実現できる機能が限定されることから、他の材料の組み合わせや構造化といった設計が必要になるという問題を提起した。

形状随意性の向上とスマートマテリアルの高機能化を両立するために、デバイスより小さく、材料よりは大きな微細構造領域に着目した。微細構造を設計するためのアプローチをすでに存在する材料やプロセスの活用と、材料や構造そのものを設計するという二つの立場から下の様な手法を提案した。

- 入手可能なマテリアルの組み合わせと構造化
- 既存のモノづくりプロセスの活用

- マテリアルが有する微細構造の活用
- 材料の分子構造を設計する手法
- 微細構造を設計する手法

4章では入手可能な材料を特殊な装置を用いずに、組み合わせ、構造化することで、機能を統合する手法を提案した。デザインスクールのハードウェアのプロトタイプシーンを題材にユーザーの行動を調査・分析することで、必要な機能を特定した。その機能を実現するために、マテリアルの機能を調べ、混練や貼り合わせという特殊な装置を必要としないシンプルなプロセスにより、材料に硬化と磁石に応答する機能を統合した。本アプローチは複雑な設計ができないが、設計が容易であり、一般的に安価であることや手法を広げるといった点などに利点がある。

5章では既存のモノづくりのプロセスを活用した微細構造設計手法を提案した。この手法は、統合する機能性の材料を適切に選択できれば、従来のモノづくりのノウハウや技術を転用できるという利点がある。実装は、西陣織のプロセスに着目し、プロセス上、導入制約が少ない緯糸に機能性材料を用いることで、西陣織の意匠性と機能の両立を試みた三つの作品を提案した。

Heteroweave 001 ではスマートマテリアルであるロイコ染料により緯糸を修飾することで環境に対して色変化を起こす機能統合した。Heteroweave 002 ではドットパターンが印刷された紙を下面に編み込むことでカメラによって位置情報が読み込める情報と一体化された織物とそれをインタフェースとしたインスタレーションを作成した。Heteroweave003 では乾燥により硬化する合成セーム革を編み込むことで、様々な形に造形し、その形状を記憶できる織物を提案した。

西陣織のプロセスを活用することで、同じ手法でも緯糸の種類を変えることで様々な機能の織物に展開できることを確認できた。また、この手法により実際にプロダクトを作っている職人（デザイナー）の方との間でノウハウが交換されお互いのアイディアを広げるといった効果を確認することができた。

6章ではマテリアルが有する構造を活用するアプローチを提案した。この手法は微細な構造部位については作る必要がなく、付加的に機能を加えられるという利点がある。そのためプロダクトの特性を維持したまま機能を追加することができる。また、機能を付与する箇所や材料を工夫することで、特性を変化させられる拡張性の高い手法である。

実装には、多孔質体の孔構造に着目し、導電性のインクを浸潤させることで、芯まで柔らかい材料にセンシング機能を付与することができた。スポンジ、繊維、ビーズといった様々な多孔質体に対して、本アプローチにより形成されるセンサの特徴を評価した。また、染み込ませ方や配線を工夫することで圧縮以外の変形を取得できることを示し、センシング機能材料や機能で統合できることを示した。

7章では既存の材料や構造の組み合わせでは実現の難しい機能に対して、材料レベルで改良を加えることで改善を試みた。材料の改良でしかアプローチできない機能について論じ、材料設計と構造設計が相補的に活用し得ることについて述べた。

実装には、自励振動ゲルを題材に、その機能の拡張とメカニズムの理解による制御条件を見出した。課題解決のために機能に影響を与える分子構造部位を置き換え、最適化をすることで材料の機能を拡張することに成功した。また物質と環境の相互作用を分析し、環境を最適化することで、駆動可能な温度範囲の拡大と、最大で20倍以上の周波数で自励振動ゲルが動作できる条件を見出した。

機能に寄与する構造単位が分子レベルであり、改良後もほぼ同等の溶液として扱えたので、元の材料としてプロセス性能などは維持することができた。これは従来の材料に活用していた構造的アプローチも適用できる可能性を示した。

材料の改良は化学の知識やウェットラボの環境などが必要なため、分子レベルでの機能の改良が必要な際に用いられるアプローチである。しかし、インタラクションの設計者が特異な機能を拡張したい場合には、今回の様にメカニズムを分析し、マテリアルの専門家と分子構造レベルで改善策を探索することは一つ有効なアプローチになるであろう。

またマテリアル自体の機能という視点では、外部制御を伴わずに自律的に駆動可能なスマートマテリアルの機能を拡張することで、入出力という単純な機能に加えて材料が環境に応じて特定のリズムを生み出すという一種の演算機能を示すことができた。将来的にはこの例の様な複雑系の活用により、マテリアルにより高度な機能が統合されていくことを期待したい。

8章では構造を設計するアプローチを提案した。この手法では構造を設計できるので、カスタマイズ性が高いという特徴がある。一方で、構造作成のための手間や加工する機械の精度の影響を受ける。実装にはデジタルファブリケーションを用いた、電気流体力学現象を用いた微細ポンプの設計手法を提案した。ポンプデバイスを安価なデジタルファブリケーションで設計し、小型なモジュールのみで駆動させるのに適したパラメータを提案した。

加えて本アプローチにより従来では実装の難しかった、複雑な形状や流路と一体可能なポンプデバイスを実装し、その性能を評価した。また分散配置設計が可能な小型ポンプを組み合わせることにより、発生圧力増加の効果や弁を使わずに流体を制御できることを実験的に示した。これらの結果を通じてスケラブルに設計可能なアクチュエータの可能性を示した。

9章では、これまでの実装と技術的な状況を踏まえて、微細構造設計を活用すべき状況や、実際に導入を試みる時に設計者が配慮すべき項目について論じた。また、各アプローチの特徴と制約条件をまとめた。どの様なシーンに対して効果的なアプローチとなるかを論じた。そして、これまで提案してきた手法をスケールで整理してまとめることで微細構造設計の手法を整理した。

10.2 微細構造設計がもたらす体験

微細構造設計のアプローチは機能的には、形状の自由度と高度なインタラクションを両立させることを目指している。実際に実装をしてみると、機能面以外にも統合時のプロセスにもいくつかの発見が得られた。Heteroweave の事例では、すでに存在しているプロダクトに対して従来と同じ作り方で機能を付与することができる。そのため、一緒に作業をした西陣織の職人の方からもこういう表現がしたいといったフィードバックをいただくことができた。これは目的の達成という視点ではなく、モノ作りの目的自体を変化させる大きな変化であると思われる。

マテリアルが有する微細構造を活用するアプローチでは、ボトムアップによる設計とは異なり、完成したものに機能を付加していくため、その設計プロセスも大きく変化した。アセンブリで組み立てる通常のプロセスとは異なり、最終のプロダクトをイメージした状態で機能を付加していくことで、設計者は機能統合時の完成イメージを明確にしながら実装することができる。将来的にはその場で機能を統合する様な、オンサイトでの機能統合といった新たなプロセスに発展していける可能性を感じた。

構造を設計する手法では、物理現象の把握と必要なデータが集まれば、機能を予測できるようになるため、必要な機能とモノを同時に設計できるようになる。要求される機能を満たせるかを実装の前段階から気づくことができるので、機能を組み込む際の設計がより効率的になることが期待される。

この様に微細構造領域の設計はマテリアルへのインタラクション機能を拡張するだけでなく、製造工程においても作成物に対するアプローチが変化するため、設計者のアイデアを広げたり、作り方もよりインタラクティブに拡張していくことが期待される。

10.3 マテリアルへの機能統合の将来展望

近年の研究のトレンドと微細構造設計手法がもたらす体験から、物理世界のマテリアルへのインタラクション統合が将来的にどの様に発展していくか、どんな課題が残っているかについて考えを述べる。

モノへのインタラクション機能統合の先行研究を調べると、様々な方向に進化の兆しが見られる。

マテリアルの領域では材料や素材の性能の向上や新たな機能が研究されている。例えば近年では織物のマテリアルである糸の形状をした太陽電池 [79] やアクチュエータ [30] などが考案されている。この様にマテリアルが進化することで従来と同じ作り方でも、様々な機能を内包させることが可能となるであろう。本論文で提案した既存のプロセスや構造の活用に

より使いやすい材料も有効に活用し得ると考える。

ハードウェアの領域ではデバイスやファブ리케이션装置も日々進化すると予測される。例えば、デジタルファブ리케이션装置の空間分解能の向上や使用可能な材料の種類を広げることで、より複雑な機能を生み出すことができるようになることが期待される。そうすると、より小さな構成単位で意図した箇所に機能を埋め込むことができるようになるため、製造可能なマテリアルが広がることに加えて、微細な領域に複数の機能が統合されるといったことも起こり得る。

このような技術進化の一方で、センシングする情報は増加していくという問題がある。得られた情報を意味に変換するための仕組みやフィードバック手法が大きな課題となると予想される。材料物性の変化を信号処理的なアプローチで解析する手法 [114] [162] とマテリアルや設計分野と連携していくことがより重要になるであろう。

また、ファブ리케이션分野では材料組成や硬化方法を工夫することで、造形時間が短縮されていくことなどが予想される。将来的にはより多くの用途に Additive Manufacturing が適用されるようになるであろう。

一方で Additive Manufacturing が発展していったとしても、製造速度やコスト面から、従来のモノづくりの手法も共存して存在すると考えられる。そのため、身の回りの様々なマテリアルに機能を統合して、インタラクション体験を物理世界に拡張していくためには、マテリアルの構造活用といった付加的なアプローチによる機能統合手法も重要な役割を果たすと思われる。

インタラクション体験がより活用されていくためには、この機能付与の工程は今回の様にラボで行われるのではなく、オンサイトで機能を付与したり、カスタマイズできる様なツールが期待される。このような機能設計のためのツールやソフトウェアといった設計環境の進化も今後の重要な研究対象であると考えている。

プログラミングを例にとると、従来とは異なる特性を有するマテリアルに機能が統合されるため、4章の手法や9章の MorphIO [93] の様に、手作業により造形や動きを教えるといった新たなアプローチも提案されていくであろう。

将来より多様なインタラクション体験の実現を考えると、変形といったアクチュエーション機能は今後も大きな課題として残ると思われる。アクチュエータは系に投入されたエネルギーを運動エネルギーに変換する素子であるため、系に投入可能なエネルギーの限界値は材料と体積によって決まる。材料やデバイスに大きなブレイクスルーがなければ、アクチュエータを小型集積化するためには、これらの機能をシステムの中に偏在させ体積を大きくし、それらを協調的に動かす仕組みを考案する必要がある。そのためには、細かいユニットを動かすための配線や各セグメントの信号を取得する手法なども発展していく必要がある。

将来的に身の回りのマテリアルにインタラクション機能が統合され、物理世界と情報世界よりシームレスかつ、ダイナミックに接続されていくためには、材料からそれらを扱うハー

ドウェアやデバイス, そして有効に活用するための設計環境が, 微細構造の領域で上手く組み合わさりながら発展していく必要がある. 本論文の提案手法や議論がその一助になれば幸いである.

参考文献

- [1] Chadia Abras, Diane Maloney-Krichmar, Jenny Preece, and others. 2004. User-centered design. Bainbridge, W. *Encyclopedia of Human-Computer Interaction*. Thousand Oaks: Sage Publications 37, 4 (2004), 445–456.
- [2] Harshit Agrawal, Udayan Umapathi, Robert Kovacs, Johannes Frohnhofen, Hsiang-Ting Chen, Stefanie Mueller, and Patrick Baudisch. 2015. Protopiper: Physically sketching room-sized objects at actual scale. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*. ACM, 427–436.
- [3] Silvestro Barbarino, Onur Bilgen, Rafic M Ajaj, Michael I Friswell, and Daniel J Inman. 2011. A review of morphing aircraft. *Journal of intelligent material systems and structures* 22, 9 (2011), 823–877.
- [4] Joseph M Beaurline, Patrick J Roddy, and Mark A Tomai. 1999. Gel formulations for topical drug delivery. (Aug. 17 1999). US Patent 5,939,090.
- [5] Scott Brave and Andrew Dahley. 1997. inTouch: a medium for haptic interpersonal communication. In *CHI'97 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 363–364.
- [6] PW Carr. 1993. Solvatochromism, linear solvation energy relationships, and chromatography. *Microchemical journal* 48, 1 (1993), 4–28.
- [7] Lina M Castano and Alison B Flatau. 2014. Smart fabric sensors and e-textile technologies: a review. *Smart Materials and Structures* 23, 5 (2014), 053001.
- [8] Yvonne YF Chan Vili. 2007. Investigating smart textiles based on shape memory materials. *Textile Research Journal* 77, 5 (2007), 290–300.
- [9] Zheng Chen, Stephan Shatara, and Xiaobo Tan. 2009. Modeling of biomimetic robotic fish propelled by an ionic polymer–metal composite caudal fin. *IEEE/ASME transactions on mechatronics* 15, 3 (2009), 448–459.
- [10] Chwan K Chiang, CR Fincher Jr, Yung W Park, Alan J Heeger, Hideki Shirakawa, Edwin J Louis, Shek C Gau, and Alan G MacDiarmid. 1977. Electrical conductivity in doped polyacetylene. *Physical review letters* 39, 17 (1977), 1098.

- [11] Sungwoo Chun, Ahyoung Hong, Yeonhoi Choi, Chunho Ha, and Wanjun Park. 2016. A tactile sensor using a conductive graphene-sponge composite. *Nanoscale* 8, 17 (2016), 9185–9192.
- [12] Shirley Coyle, Deirdre Morris, King-Tong Lau, Niall Moyna, and Dermot Diamond. 2009. Textile-based wearable sensors for assisting sports performance. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [13] Ricardo MP Da Silva, Joao F Mano, and Rui L Reis. 2007. Smart thermoresponsive coatings and surfaces for tissue engineering: switching cell-material boundaries. *TRENDS in Biotechnology* 25, 12 (2007), 577–583.
- [14] Peter Dalsgaard and Kim Halskov. 2012. Tangible 3D tabletops: combining tangible tabletop interaction and 3D projection. In *Proceedings of the 7th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Making Sense Through Design*. ACM, 109–118.
- [15] J Darabi and K Ekula. 2003. Development of a chip-integrated micro cooling device. *Microelectronics Journal* 34, 11 (2003), 1067–1074.
- [16] Jeff Darabi, Mihai Rada, Michael Ohadi, and John Lawler. 2002. Design, fabrication, and testing of an electrohydrodynamic ion-drag micropump. *Journal of Microelectromechanical Systems* 11, 6 (2002), 684–690.
- [17] J Darabi and C Rhodes. 2006. CFD modeling of an ion-drag micropump. *Sensors and Actuators A: Physical* 127, 1 (2006), 94–103.
- [18] Anuj Dhawan, Tushar K Ghosh, Abdelfattah M Seyam, and John Muth. 2002. Development of woven fabric-based electrical circuits. *MRS Online Proceedings Library Archive* 736 (2002).
- [19] Joshua Edmison, Mark Jones, Zahi Nakad, and Thomas Martin. 2002. Using piezoelectric materials for wearable electronic textiles. In *Proceedings. Sixth International Symposium on Wearable Computers*,. IEEE, 41–48.
- [20] Ahmed Ould El Moctar, Nadine Aubry, and John Batton. 2003. Electrohydrodynamic micro-fluidic mixer. *Lab on a Chip* 3, 4 (2003), 273–280.
- [21] Yinshan Feng and Jamal Seyed-Yagoobi. 2004. Understanding of electrohydrodynamic conduction pumping phenomenon. *Physics of fluids* 16, 7 (2004), 2432–2441.
- [22] Richard J Field and Richard M Noyes. 1974. Oscillations in chemical systems. IV. Limit cycle behavior in a model of a real chemical reaction. *The Journal of Chemical Physics* 60, 5 (1974), 1877–1884.
- [23] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Nadia Cheng, and Hiroshi Ishii. 2012. Jamming user interfaces: programmable particle stiffness and sensing for malleable and shape-changing devices. In *Proceedings of the 25th annual ACM symposium*

- on User interface software and technology. ACM, 519–528.
- [24] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Akimitsu Hogge, and Hiroshi Ishii. 2013. inFORM: dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation.. In *Uist*, Vol. 13. 417–426.
 - [25] Juri Fujii, Takuya Matsunobu, and Yasuaki Kakehi. 2018. COLORISE: Shape-and Color-Changing Pixels with Inflatable Elastomers and Interactions. In *Proceedings of the Twelfth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*. ACM, 199–204.
 - [26] Takanori Fukushima, Kinji Asaka, Atsuko Kosaka, and Takuzo Aida. 2005. Fully plastic actuator through layer-by-layer casting with ionic-liquid-based bucky gel. *Angewandte Chemie International Edition* 44, 16 (2005), 2410–2413.
 - [27] Emmanouil D Fylladitakis, Michael P Theodoridis, and Antonios X Moronis. 2014. Review on the history, research, and applications of electrohydrodynamics. *IEEE Transactions on Plasma Science* 42, 2 (2014), 358–375.
 - [28] Bernard Geffroy, Philippe Le Roy, and Christophe Prat. 2006. Organic light-emitting diode (OLED) technology: materials, devices and display technologies. *Polymer International* 55, 6 (2006), 572–582.
 - [29] László Györgyi, Tamás Turányi, and Richard J Field. 1990. Mechanistic details of the oscillatory Belousov-Zhabotinskii reaction. *Journal of Physical Chemistry* 94, 18 (1990), 7162–7170.
 - [30] Carter S Haines, Márcio D Lima, Na Li, Geoffrey M Spinks, Javad Foroughi, John DW Madden, Shi Hyeong Kim, Shaoli Fang, Mônica Jung de Andrade, Fatma Göktepe, and others. 2014. Artificial muscles from fishing line and sewing thread. *science* 343, 6173 (2014), 868–872.
 - [31] Teng Han, Fraser Anderson, Pourang Irani, and Tovi Grossman. 2018. HydroRing: Supporting Mixed Reality Haptics Using Liquid Flow. In *The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. ACM, 913–925.
 - [32] Felix Heibeck, Basheer Tome, Clark Della Silva, and Hiroshi Ishii. 2015. uniMorph: Fabricating thin film composites for shape-changing interfaces. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*. ACM, 233–242.
 - [33] Gerhard Heywang and Friedrich Jonas. 1992. Poly (alkylenedioxythiophene) s— new, very stable conducting polymers. *Advanced Materials* 4, 2 (1992), 116–118.
 - [34] Toshihiro Hirai, Hiroshi Nemoto, Mitsuhiro Hirai, and Sadao Hayashi. 1994. Electrostriction of highly swollen polymer gel: possible application for gel actuator.

- Journal of Applied Polymer Science 53, 1 (1994), 79–84.
- [35] Yoshitsugu Hirokawa and Toyochi Tanaka. 1984. Volume phase transition in a non-ionic gel. In AIP Conference Proceedings, Vol. 107. Aip, 203–208.
- [36] Shunsuke Hirotsu, Yoshitsugu Hirokawa, and Toyochi Tanaka. 1987. Volume-phase transitions of ionized N-isopropylacrylamide gels. The Journal of chemical physics 87, 2 (1987), 1392–1395.
- [37] David Holman and Roel Vertegaal. 2008. Organic user interfaces: designing computers in any way, shape, or form. Commun. ACM 51, 6 (2008), 48–55.
- [38] Jinlian Hu, Harper Meng, Guoqiang Li, and Samuel I Ibekwe. 2012. A review of stimuli-responsive polymers for smart textile applications. Smart Materials and Structures 21, 5 (2012), 053001.
- [39] Liangbing Hu, Wei Yuan, Paul Brochu, George Gruner, and Qibing Pei. 2009. Highly stretchable, conductive, and transparent nanotube thin films. Applied Physics Letters 94, 16 (2009), 161108.
- [40] Jiangshui Huang, Samuel Shian, Roger M Diebold, Zhigang Suo, and David R Clarke. 2012. The thickness and stretch dependence of the electrical breakdown strength of an acrylic dielectric elastomer. Applied Physics Letters 101, 12 (2012), 122905.
- [41] Wu-Song Huang, Brian D Humphrey, and Alan G MacDiarmid. 1986. Polyaniline, a novel conducting polymer. Morphology and chemistry of its oxidation and reduction in aqueous electrolytes. Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases 82, 8 (1986), 2385–2400.
- [42] Yang Huang, Minshen Zhu, Zengxia Pei, Qi Xue, Yan Huang, and Chunyi Zhi. 2016. A shape memory supercapacitor and its application in smart energy storage textiles. Journal of Materials Chemistry A 4, 4 (2016), 1290–1297.
- [43] Olle Inganäs, WR Salaneck, J-E Österholm, and J Laakso. 1988. Thermo-chromic and solvatochromic effects in poly (3-hexylthiophene). Synthetic Metals 22, 4 (1988), 395–406.
- [44] Yuki Inoue, Yuichi Itoh, and Takao Onoye. 2018. TuVe: a flexible display with a tube. In SIGGRAPH Asia 2018 Emerging Technologies. ACM, 16.
- [45] Hiroshi Ishii. 2008. Tangible bits: beyond pixels. In Proceedings of the 2nd international conference on Tangible and embedded interaction. ACM, xv–xxv.
- [46] Hiroshi Ishii, Dávid Lakatos, Leonardo Bonanni, and Jean-Baptiste Labrune. 2012. Radical atoms: beyond tangible bits, toward transformable materials. interactions 19, 1 (2012), 38–51.

- [47] Hiroshi Ishii, Ali Mazalek, and Jay Lee. 2001. Bottles as a minimal interface to access digital information. In CHI'01 extended abstracts on Human factors in computing systems. ACM, 187–188.
- [48] Hiroshi Ishii and Brygg Ullmer. 1997. Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems. ACM, 234–241.
- [49] Tsutomu Ishiwatari, Mitsuru Kawagishi, and Masaru Mitsuishi. 1984. Oscillatory reactions in polymer systems. *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition* 22, 10 (1984), 2699–2704.
- [50] Mark R Jolly, J David Carlson, Beth C Muñoz, and Todd A Bullions. 1996. The magnetoviscoelastic response of elastomer composites consisting of ferrous particles embedded in a polymer matrix. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 7, 6 (1996), 613–622.
- [51] TB Jones. 1979. Electrohydrodynamically enhanced heat transfer in liquids—a review. In *Advances in heat transfer*. Vol. 14. Elsevier, 107–148.
- [52] Stefan Jung, Christl Lauterbach, Marc Strasser, and Werner Weber. 2003. Enabling technologies for disappearing electronics in smart textiles. In 2003 IEEE International Solid-State Circuits Conference, 2003. Digest of Technical Papers. ISSCC. IEEE, 386–387.
- [53] Yasuaki Kakehi, Kensei Jo, Katsunori Sato, Kouta Minamizawa, Hideaki Nii, Naoki Kawakami, Takeshi Naemura, and Susumu Tachi. 2008. ForceTile: tabletop tangible interface with vision-based force distribution sensing. In *ACM SIGGRAPH 2008 new tech demos*. ACM, 17.
- [54] Martin Kaltenbrunner, Tsuyoshi Sekitani, Jonathan Reeder, Tomoyuki Yokota, Kazunori Kuribara, Takeyoshi Tokuhara, Michael Drack, Reinhard Schwödiauer, Ingrid Graz, Simona Bauer-Gogonea, and others. 2013. An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics. *Nature* 499, 7459 (2013), 458.
- [55] Viirj Kan, Emma Vargo, Noa Machover, Hiroshi Ishii, Serena Pan, Weixuan Chen, and Yasuaki Kakehi. 2017. Organic primitives: Synthesis and design of pH-reactive materials using molecular I/O for sensing, actuation, and interaction. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 989–1000.
- [56] Ichiro Kano and Tatsuo Nishina. 2013. Effect of electrode arrangements on EHD conduction pumping. *IEEE Transactions on Industry Applications* 49, 2 (2013), 679–684.

- [57] Ichiro Kano, Yosuke Shii, and Tatsuo Nishina. 2007. Development of an electrohydrodynamic micropump. In 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting. IEEE, 38–44.
- [58] Christoph Keplinger, Jeong-Yun Sun, Choon Chiang Foo, Philipp Rothemund, George M Whitesides, and Zhigang Suo. 2013. Stretchable, transparent, ionic conductors. *Science* 341, 6149 (2013), 984–987.
- [59] Azam Khan, Mazhar Ali Abbasi, Mushtaque Hussain, Zafar Hussain Ibupoto, Jonas Wissting, Omer Nur, and Magnus Willander. 2012. Piezoelectric nanogenerator based on zinc oxide nanorods grown on textile cotton fabric. *Applied Physics Letters* 101, 19 (2012), 193506.
- [60] Keun Soo Kim, Yue Zhao, Houk Jang, Sang Yoon Lee, Jong Min Kim, Kwang S Kim, Jong-Hyun Ahn, Philip Kim, Jae-Young Choi, and Byung Hee Hong. 2009. Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes. *nature* 457, 7230 (2009), 706.
- [61] Sangbae Kim, Cecilia Laschi, and Barry Trimmer. 2013. Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics. *Trends in biotechnology* 31, 5 (2013), 287–294.
- [62] Yoonho Kim, Hyunwoo Yuk, Ruike Zhao, Shawn A Chester, and Xuanhe Zhao. 2018. Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials. *Nature* 558, 7709 (2018), 274.
- [63] Stephan Kirchmeyer and Knud Reuter. 2005. Scientific importance, properties and growing applications of poly (3, 4-ethylenedioxythiophene). *Journal of Materials Chemistry* 15, 21 (2005), 2077–2088.
- [64] Christopher Kopic and Kristian Gohlke. 2016. InflatBits: A Modular Soft Robotic Construction Kit for Children. In *Proceedings of the TEI'16: Tenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*. ACM, 723–728.
- [65] Frederik C Krebs, Suren A Gevorgyan, and Jan Alstrup. 2009. A roll-to-roll process to flexible polymer solar cells: model studies, manufacture and operational stability studies. *Journal of Materials Chemistry* 19, 30 (2009), 5442–5451.
- [66] Rahela Kulčar, Mojca Friškovec, Nina Hauptman, Alenka Vesel, and Marta Klanjšek Gunde. 2010. Colorimetric properties of reversible thermochromic printing inks. *Dyes and pigments* 86, 3 (2010), 271–277.
- [67] G Sudesh Kumar and DC Neckers. 1989. Photochemistry of azobenzene-containing polymers. *Chemical Reviews* 89, 8 (1989), 1915–1925.
- [68] Tomohiro Kuroda, Kikuo Hirano, Kazushige Sugimura, Satoshi Adachi, Hidetsugu Igarashi, Kazuo Ueshima, Hideo Nakamura, Masayuki Nambu, and Takahiro Doi.

2013. Applying NISHIJIN historical textile technique for e-Textile. In 2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). IEEE, 1226–1229.
- [69] Tomohiro Kuroda, Hiroki Shiomi, Eri Minamino-Muta, Yugo Yamashita, Tomohide Iwao, Hiroshi Tamura, Kazuo Ueshima, and Takeshi Kimura. 2017. Evaluation of NISHIJIN e-textile for 12-lead ECG measurement through automatic ECG analyzer. In 2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). IEEE, 1234–1237.
- [70] Yu Kuwajima, Hiroki Shigemune, Vito Cacucciolo, Matteo Cianchetti, Cecilia Laschi, and Shingo Maeda. 2017. Active suction cup actuated by ElectroHydro-Dynamics phenomenon. In 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 470–475.
- [71] Christina Larson, B Peele, S Li, S Robinson, M Totaro, L Beccai, B Mazzolai, and R Shepherd. 2016. Highly stretchable electroluminescent skin for optical signaling and tactile sensing. *Science* 351, 6277 (2016), 1071–1074.
- [72] Phillip Lee, Jinhwan Lee, Hyungman Lee, Junyeob Yeo, Sukjoon Hong, Koo Hyun Nam, Dongjin Lee, Seung Seob Lee, and Seung Hwan Ko. 2012. Highly stretchable and highly conductive metal electrode by very long metal nanowire percolation network. *Advanced materials* 24, 25 (2012), 3326–3332.
- [73] Daniel Leithinger, Sean Follmer, Alex Olwal, Samuel Luescher, Akimitsu Hogge, Jinha Lee, and Hiroshi Ishii. 2013. Sublimate: state-changing virtual and physical rendering to augment interaction with shape displays. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 1441–1450.
- [74] Jennifer A Lewis. 2006. Direct ink writing of 3D functional materials. *Advanced Functional Materials* 16, 17 (2006), 2193–2204.
- [75] Yuzhan Li, Orlando Rios, Jong K Keum, Jihua Chen, and Michael R Kessler. 2016. Photoresponsive liquid crystalline epoxy networks with shape memory behavior and dynamic ester bonds. *ACS applied materials & interfaces* 8, 24 (2016), 15750–15757.
- [76] Jiajie Liang, Lu Li, Kwing Tong, Zhi Ren, Wei Hu, Xiaofan Niu, Yongsheng Chen, and Qibing Pei. 2014. Silver nanowire percolation network soldered with graphene oxide at room temperature and its application for fully stretchable polymer light-emitting diodes. *ACS nano* 8, 2 (2014), 1590–1600.
- [77] David Lindlbauer, Jörg Müller, and Marc Alexa. 2016. Changing the appearance of physical interfaces through controlled transparency. In *Proceedings of the 29th*

- Annual Symposium on User Interface Software and Technology. ACM, 425–435.
- [78] LittleBits. 2019 accessed. LittleBits Official website. (2019 accessed). <https://littlebits.com/>.
- [79] Zhibin Lv, Jiefeng Yu, Hongwei Wu, Jian Shang, Dan Wang, Shaocong Hou, Yongping Fu, Kai Wu, and Dechun Zou. 2012. Highly efficient and completely flexible fiber-shaped dye-sensitized solar cell based on TiO₂ nanotube array. *Nanoscale* 4, 4 (2012), 1248–1253.
- [80] Shingo Maeda, Yusuke Hara, Takamasa Sakai, Ryo Yoshida, and Shuji Hashimoto. 2007. Self-walking gel. *Advanced Materials* 19, 21 (2007), 3480–3484.
- [81] Shingo Maeda, Yusuke Hara, Ryo Yoshida, and Shuji Hashimoto. 2008. Peristaltic motion of polymer gels. *Angewandte Chemie International Edition* 47, 35 (2008), 6690–6693.
- [82] Stefan CB Mannsfeld, Benjamin CK Tee, Randall M Stoltenberg, Christopher V HH Chen, Soumendra Barman, Beinn VO Muir, Anatoliy N Sokolov, Colin Reese, and Zhenan Bao. 2010. Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers. *Nature materials* 9, 10 (2010), 859.
- [83] Naoji Matsuhisa, Martin Kaltenbrunner, Tomoyuki Yokota, Hiroaki Jinno, Kazunori Kuribara, Tsuyoshi Sekitani, and Takao Someya. 2015. Printable elastic conductors with a high conductivity for electronic textile applications. *Nature communications* 6 (2015), 7461.
- [84] Yiğit Mengüç, Yong-Lae Park, Ernesto Martinez-Villalpando, Patrick Aubin, Miriam Zisook, Leia Stirling, Robert J Wood, and Conor J Walsh. 2013. Soft wearable motion sensing suit for lower limb biomechanics measurements. In *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 5309–5316.
- [85] Aslan Miriyev, Kenneth Stack, and Hod Lipson. 2017. Soft material for soft actuators. *Nature communications* 8, 1 (2017), 596.
- [86] Stephen A Morin, Robert F Shepherd, Sen Wai Kwok, Adam A Stokes, Alex Nemiroski, and George M Whitesides. 2012. Camouflage and display for soft machines. *Science* 337, 6096 (2012), 828–832.
- [87] Bruce R Munson, Theodore H Okiishi, Alric P Rothmayer, and Wade W Huebsch. 2014. *Fundamentals of fluid mechanics*. John Wiley & Sons.
- [88] Yoko Murase, Shingo Maeda, Shuji Hashimoto, and Ryo Yoshida. 2008. Design of a mass transport surface utilizing peristaltic motion of a self-oscillating gel. *Langmuir* 25, 1 (2008), 483–489.
- [89] Joseph T Muth, Daniel M Vogt, Ryan L Truby, Yiğit Mengüç, David B Kolesky,

- Robert J Wood, and Jennifer A Lewis. 2014. Embedded 3D printing of strain sensors within highly stretchable elastomers. *Advanced Materials* 26, 36 (2014), 6307–6312.
- [90] Ken Nakagaki, Artem Dementyev, Sean Follmer, Joseph A Paradiso, and Hiroshi Ishii. 2016. ChainFORM: a linear integrated modular hardware system for shape changing interfaces. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*. ACM, 87–96.
- [91] Ken Nakagaki, Daniel Fitzgerald, Zhiyao John Ma, Luke Vink, Daniel Levine, and Hiroshi Ishii. 2019. inFORCE: Bi-directionalForce’Shape Display for Haptic Interaction. In *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*. ACM, 615–623.
- [92] Kenichi Nakahara, Koya Narumi, Ryuma Niiyama, and Yoshihiro Kawahara. 2017. Electric phase-change actuator with inkjet printed flexible circuit for printable and integrated robot prototyping. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 1856–1863.
- [93] Ryosuke Nakayama, Ryo Suzuki, Satoshi Nakamaru, Ryuma Niiyama, Yoshihiro Kawahara, and Yasuaki Kakehi. 2019. MorphIO: Entirely Soft Sensing and Actuation Modules for Programming Shape Changes through Tangible Interaction. In *Proceedings of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference*. ACM, 975–986.
- [94] nendo. 2015. ミラノ国際博覧会日本館ギャラリースペース CS005. (2015).
- [95] Ryuma Niiyama, Xu Sun, Cynthia Sung, Byoungkwon An, Daniela Rus, and Sangbae Kim. 2015. Pouch motors: Printable soft actuators integrated with computational design. *Soft Robotics* 2, 2 (2015), 59–70.
- [96] Mihoko Otake, Masayuki Inaba, and Hirochika Inoue. 1999. Development of a gel robot made of electro-active polymer PAMPS gel. In *IEEE SMC’99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No. 99CH37028)*, Vol. 2. IEEE, 788–793.
- [97] Kazuhiro Otsuka and Xiabing Ren. 2005. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys. *Progress in materials science* 50, 5 (2005), 511–678.
- [98] Jifei Ou, Mélina Skouras, Nikolaos Vlavianos, Felix Heibeck, Chin-Yi Cheng, Jan-nik Peters, and Hiroshi Ishii. 2016. aeroMorph-heat-sealing inflatable shape-change materials for interaction design. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*. ACM, 121–132.
- [99] Ailish O’ Halloran, Fergal O’ malley, and Peter McHugh. 2008. A review on

- dielectric elastomer actuators, technology, applications, and challenges. *Journal of Applied Physics* 104, 7 (2008), 9.
- [100] Panasonic 株式会社. 2015 accessed. 「未来の豊かな暮らし」を探究する GO ON × Panasonic Design. (2015 accessed). <https://panasonic.co.jp/design/goon/>.
- [101] Matthew R Pearson and Jamal Seyyed-Yagoobi. 2011. Experimental study of EHD conduction pumping at the meso-and micro-scale. *Journal of Electrostatics* 69, 6 (2011), 479–485.
- [102] Ron Pelrine, Roy Kornbluh, Qibing Pei, and Jose Joseph. 2000. High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100%. *Science* 287, 5454 (2000), 836–839.
- [103] William F Pickard. 1963a. Ion drag pumping. I. Theory. *Journal of Applied Physics* 34, 2 (1963), 246–250.
- [104] William F Pickard. 1963b. Ion drag pumping. II. Experiment. *Journal of Applied Physics* 34, 2 (1963), 251–258.
- [105] Ben Piper, Carlo Ratti, and Hiroshi Ishii. 2002. Illuminating clay: a 3-D tangible interface for landscape analysis. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. ACM, 355–362.
- [106] Alexandre Poulin, Samuel Rosset, and Herbert R Shea. 2015. Printing low-voltage dielectric elastomer actuators. *Applied Physics Letters* 107, 24 (2015), 244104.
- [107] Ivan Poupyrev, Tatsushi Nashida, and Makoto Okabe. 2007. Actuation and tangible user interfaces: the Vaucanson duck, robots, and shape displays. In *Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction*. ACM, 205–212.
- [108] Hayes Solos Raffle, Amanda J Parkes, and Hiroshi Ishii. 2004. Topobo: a constructive assembly system with kinetic memory. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. ACM, 647–654.
- [109] Majken K Rasmussen, Esben W Pedersen, Marianne G Petersen, and Kasper Hornbæk. 2012. Shape-changing interfaces: a review of the design space and open research questions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 735–744.
- [110] CA Rogers, C Liang, and J Jia. 1991. Structural modification of simply-supported laminated plates using embedded shape memory alloy fibers. *Computers & Structures* 38, 5-6 (1991), 569–580.
- [111] John A Rogers, Takao Someya, and Yonggang Huang. 2010. Materials and mechanics for stretchable electronics. *science* 327, 5973 (2010), 1603–1607.

- [112] Daniela Rus and Michael T Tolley. 2015. Design, fabrication and control of soft robots. *Nature* 521, 7553 (2015), 467.
- [113] Harpreet Sareen, Udayan Umapathi, Patrick Shin, Yasuaki Kakehi, Jifei Ou, Hiroshi Ishii, and Pattie Maes. 2017. Printflatables: printing human-scale, functional and dynamic inflatable objects. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 3669–3680.
- [114] Munehiko Sato, Ivan Poupyrev, and Chris Harrison. 2012. Touché: enhancing touch interaction on humans, screens, liquids, and everyday objects. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 483–492.
- [115] Tsuyoshi Sekitani, Hiroyoshi Nakajima, Hiroki Maeda, Takanori Fukushima, Takuzo Aida, Kenji Hata, and Takao Someya. 2009. Stretchable active-matrix organic light-emitting diode display using printable elastic conductors. *Nature materials* 8, 6 (2009), 494.
- [116] Mohsen Shahinpoor, Yoseph Bar-Cohen, JO Simpson, and J Smith. 1998. Ionic polymer-metal composites (IPMCs) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles—a review. *Smart materials and structures* 7, 6 (1998), R15.
- [117] Robert F Shepherd, Filip Ilievski, Wonjae Choi, Stephen A Morin, Adam A Stokes, Aaron D Mazzeo, Xin Chen, Michael Wang, and George M Whitesides. 2011. Multi-gait soft robot. *Proceedings of the national academy of sciences* 108, 51 (2011), 20400–20403.
- [118] Jun Shintake, Samuel Rosset, Bryan Schubert, Dario Floreano, and Herbert Shea. 2016. Versatile soft grippers with intrinsic electroadhesion based on multifunctional polymer actuators. *Advanced Materials* 28, 2 (2016), 231–238.
- [119] Takao Someya, Tsuyoshi Sekitani, Shingo Iba, Yusaku Kato, Hiroshi Kawaguchi, and Takayasu Sakurai. 2004. A large-area, flexible pressure sensor matrix with organic field-effect transistors for artificial skin applications. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 101, 27 (2004), 9966–9970.
- [120] Sputniko! 2015. TRANCEFLORA. (2015). <https://sputniko.com/Tranceflora>.
- [121] Hristiyan Stoyanov, Matthias Kollosche, Sebastian Risse, Rémi Waché, and Guggi Kofod. 2013. Soft conductive elastomer materials for stretchable electronics and voltage controlled artificial muscles. *Advanced Materials* 25, 4 (2013), 578–583.
- [122] Paul Strohmeier, Jesse Burstyn, Juan Pablo Carrascal, Vincent Levesque, and Roel Vertegaal. 2016. ReFlex: A Flexible Smartphone with Active Haptic Feedback

- for Bend Input. In Proceedings of the TEI'16: Tenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction. ACM, 185–192.
- [123] Yuta Sugiura, Gota Kakehi, Anusha Withana, Calista Lee, Daisuke Sakamoto, Maki Sugimoto, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi. 2011. Detecting shape deformation of soft objects using directional photorefectivity measurement. In Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology. ACM, 509–516.
- [124] Yuta Sugiura, Calista Lee, Masayasu Ogata, Anusha Withana, Yasutoshi Makino, Daisuke Sakamoto, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi. 2012. PINOKY: a ring that animates your plush toys. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, 725–734.
- [125] Jeong-Yun Sun, Christoph Keplinger, George M Whitesides, and Zhigang Suo. 2014. Ionic skin. *Advanced Materials* 26, 45 (2014), 7608–7614.
- [126] Koichi Suzumori, Shoichi Iikura, and Hirohisa Tanaka. 1991. Development of flexible microactuator and its applications to robotic mechanisms. In Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1622–1627.
- [127] Seiichi Takamatsu, Takahiro Yamashita, and Toshihiro Itoh. 2016. Meter-scale large-area capacitive pressure sensors with fabric with stripe electrodes of conductive polymer-coated fibers. *Microsystem Technologies* 22, 3 (2016), 451–457.
- [128] Hiroya Tanaka. 2012. *FabLife*. Oreilly Japan (2012).
- [129] Toyochi Tanaka. 1978. Collapse of gels and the critical endpoint. *Physical Review Letters* 40, 12 (1978), 820.
- [130] Toyochi Tanaka and David J Fillmore. 1979. Kinetics of swelling of gels. *The Journal of Chemical Physics* 70, 3 (1979), 1214–1218.
- [131] Ching W Tang and Steven A VanSlyke. 1987. Organic electroluminescent diodes. *Applied physics letters* 51, 12 (1987), 913–915.
- [132] Fumio Tatezono, Toshio Harada, Yoshiaki Shimizu, Meguru Ohara, and Masahiro Irie. 1993. Photochromic rewritable memory media: a new nondestructive readout method. *Japanese journal of applied physics* 32, 9R (1993), 3987.
- [133] Thingiverse. 2019 accessed. Thingiverse Web site. (2019 accessed). <https://www.thingiverse.com/>.
- [134] Skylar Tibbits. 2014. 4D printing: multi-material shape change. *Architectural Design* 84, 1 (2014), 116–121.
- [135] Michael T Tolley, Robert F Shepherd, Bobak Mosadegh, Kevin C Galloway,

- Michael Wehner, Michael Karpelson, Robert J Wood, and George M Whitesides. 2014. A resilient, untethered soft robot. *Soft robotics* 1, 3 (2014), 213–223.
- [136] Peter Trefonas III, James R Damewood Jr, Robert West, and Robert D Miller. 1985. Organosilane high polymers: thermochromic behavior in solution. *Organometallics* 4, 7 (1985), 1318–1319.
- [137] Deepak Trivedi, Christopher D Rahn, William M Kier, and Ian D Walker. 2008. Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research. *Applied bionics and biomechanics* 5, 3 (2008), 99–117.
- [138] Ryan L Truby and Jennifer A Lewis. 2016. Printing soft matter in three dimensions. *Nature* 540, 7633 (2016), 371.
- [139] Tamas Turanyi, Laszlo Gyorgyi, and Richard J Field. 1993. Analysis and simplification of the GTF model of the Belousov-Zhabotinskii reaction. *The Journal of Physical Chemistry* 97, 9 (1993), 1931–1941.
- [140] Jason Valentine, Shuang Zhang, Thomas Zentgraf, Erick Ulin-Avila, Dentcho A Genov, Guy Bartal, and Xiang Zhang. 2008. Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index. *nature* 455, 7211 (2008), 376.
- [141] Daniel Vogt, Yong-Lae Park, and Robert J Wood. 2012. A soft multi-axis force sensor. In *Sensors, 2012 IEEE*. IEEE, 1–4.
- [142] Akira Wakita and Midori Shibutani. 2006. Mosaic textile: wearable ambient display with non-emissive color-changing modules. In *Proceedings of the 2006 ACM SIGCHI international conference on Advances in computer entertainment technology*. ACM, 48.
- [143] Yangyong Wang, Tao Hua, Bo Zhu, Qiao Li, Weijing Yi, and Xiaoming Tao. 2011. Novel fabric pressure sensors: design, fabrication, and characterization. *Smart materials and structures* 20, 6 (2011), 065015.
- [144] Michael Wehner, Ryan L Truby, Daniel J Fitzgerald, Bobak Mosadegh, George M Whitesides, Jennifer A Lewis, and Robert J Wood. 2016. An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots. *Nature* 536, 7617 (2016), 451.
- [145] Wikipedia. 2019 access. ベロウソフ・ジャボチンスキー反応. (2019 access).
- [146] Terry Wohlers and Tim Gornet. 2014. History of additive manufacturing. *Wohlers report* 24, 2014 (2014), 118.
- [147] Peter Woias. 2005. Micropumps—past, progress and future prospects. *Sensors and Actuators B: Chemical* 105, 1 (2005), 28–38.
- [148] Willie Wu, Adam DeConinck, and Jennifer A Lewis. 2011. Omnidirectional print-

- ing of 3D microvascular networks. *Advanced materials* 23, 24 (2011), H178–H183.
- [149] Tao Xie. 2010. Tunable polymer multi-shape memory effect. *Nature* 464, 7286 (2010), 267.
- [150] Feng Xu and Yong Zhu. 2012. Highly conductive and stretchable silver nanowire conductors. *Advanced materials* 24, 37 (2012), 5117–5122.
- [151] Junichi Yamaoka and Yasuaki Kakehi. 2012. NeonDough: Crafting with interactive lighted clay. In *ACM SIGGRAPH 2012 Posters*. ACM, 74.
- [152] Junichi Yamaoka and Yasuaki Kakehi. 2017. ProtoMold: An interactive vacuum forming system for rapid prototyping. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2106–2115.
- [153] Junichi Yamaoka, Ryuma Niiyama, and Yasuaki Kakehi. 2017. BlowFab: rapid prototyping for rigid and reusable objects using inflation of laser-cut surfaces. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. ACM, 461–469.
- [154] Junichi Yamaoka, Kazunori Nozawa, Shion Asada, Ryuma Niiyama, Yoshihiro Kawahara, and Yasuaki Kakehi. 2018. AccordionFab: Fabricating Inflatable 3D Objects by Laser Cutting and Welding Multi-Layered Sheets. In *The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology Adjunct Proceedings*. ACM, 160–162.
- [155] Hong-Bin Yao, Jin Ge, Chang-Feng Wang, Xu Wang, Wei Hu, Zhi-Jun Zheng, Yong Ni, and Shu-Hong Yu. 2013a. A flexible and highly pressure-sensitive graphene–polyurethane sponge based on fractured microstructure design. *Advanced Materials* 25, 46 (2013), 6692–6698.
- [156] Lining Yao, Ryuma Niiyama, Jifei Ou, Sean Follmer, Clark Della Silva, and Hiroshi Ishii. 2013b. PneuUI: pneumatically actuated soft composite materials for shape changing interfaces. In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*. ACM, 13–22.
- [157] Lining Yao, Jifei Ou, Chin-Yi Cheng, Helene Steiner, Wen Wang, Guanyun Wang, and Hiroshi Ishii. 2015. BioLogic: natto cells as nanoactuators for shape changing interfaces. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 1–10.
- [158] Hartmut Yersin. 2004. Triplet emitters for OLED applications. Mechanisms of exciton trapping and control of emission properties. In *Transition Metal and Rare Earth Compounds*. Springer, 1–26.
- [159] Ryo Yoshida, Toshikazu Takahashi, Tomohiko Yamaguchi, and Hisao Ichijo. 1996.

- Self-oscillating gel. *Journal of the American Chemical Society* 118, 21 (1996), 5134–5135.
- [160] Ryo Yoshida, Masami Tanaka, Satoko Onodera, Tomohiko Yamaguchi, and Etsuo Kokufuta. 2000. In-phase synchronization of chemical and mechanical oscillations in self-oscillating gels. *The Journal of Physical Chemistry A* 104, 32 (2000), 7549–7555.
- [161] Yanlei Yu, Makoto Nakano, and Tomiki Ikeda. 2003. Photomechanics: directed bending of a polymer film by light. *Nature* 425, 6954 (2003), 145.
- [162] Yang Zhang, Gierad Laput, and Chris Harrison. 2017. Electrick: Low-cost touch sensing using electric field tomography. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 1–14.
- [163] Miklós Zrínyi, József Fehér, and Genovéva Filipcsei. 2000. Novel gel actuator containing TiO₂ particles operated under static electric field. *Macromolecules* 33, 16 (2000), 5751–5753.
- [164] 田代俊太郎, 山岡潤一, and 筧康明. 2012. Paperimposer: 紙に小型ディスプレイを透かす拡張現実感システムの提案. *日本バーチャルリアリティ学会大会論文集* 17 (2012), 201–204.

研究業績

原著論文 (査読あり)

1. Nakamaru, S., Maeda, S., Hara, Y., Hashimoto, S. (2009). Control of autonomous swelling– Deswelling behavior for a polymer gel. *The Journal of Physical Chemistry B*, 113(14), 4609-4613.

国際会議 (査読あり, White List Full paper)

2. Nakamaru, S., Nakayama, R., Niiyama, R., Kakehi, Y. (2017). FoamSense: Design of three dimensional soft sensors with porous materials. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (pp. 437-447). ACM. (Full Paper and Demo, White List paper)

国際会議 (査読あり)

3. Nakamaru, S., Bak, J., Saxena, D. (2016). Tangible modeling methods for faster rapid prototyping. In *Proceedings of the TEI'16: Tenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction* (pp. 518-523). ACM. (extended abstract and demo)
4. Hirai, T., Nakamaru, S., Kawahara, Y., Kakehi, Y. (2018, April). xSlate: A Stiffness-Controlled Surface for Shape-Changing Interfaces. In *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (p. D113). ACM.(extended abstract)
5. Nakayama, R., Suzuki, R., Nakamaru, S., Niiyama, R., Kawahara, Y., and Kakehi, Y. (2019). MorphIO: Entirely Soft Sensing and Actuation Modules for Programming Shape Changes through Tangible Interaction. *DIS'19: Proceedings of the 2018 ACM Conference Companion Publication on Designing Interactive Systems*, in press (Best paper award)

謝辞

本研究を進めるにあたり、お世話になった皆様に感謝いたします。

東京大学大学院情報学環の笈康明准教授には、日々研究に対するご指導だけでなく、展示活動など研究内容を様々な形で社会に接続する機会も与えていただきました。また社会人の生活が両立できる様にディスカッションの時間などもご調整いただき、充実した研究生活を送ることができました。心より感謝申し上げます。

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科の田中浩也教授には、主査をお受けいただき、研究テーマに不足している点やサーベイのやり方などご指導賜りました。また同じ研究フロアでの活発な研究の様子からも、日々大変良い刺激をいただきました。心より感謝申し上げます。

同大学院、脇田玲教授、中西泰人教授には副査をお受けいただき、研究発表の際には様々な視点からアドバイスをいただきました。心より感謝申し上げます。

芝浦工業大学工学部の前田真吾准教授には副査をお受けいただき、デバイスの作成や分析に関する多くのアドバイスをいただきました。また設備を貸していただくなど、環境面でも多くのご助力をいただきました。心より感謝申し上げます。

早稲田大学の橋本周司教授、筑波大学の原雄介准教授には学士と修士時代に高分子ゲル材料や研究シナリオについて沢山の助言とご指導をいただきました。心より感謝申し上げます。

本研究テーマは JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト予算のサポートをいただきました。また研究総括の東京大学大学院工学系研究科の川原圭博教授、同大学院の新山龍馬講師からは研究に対する様々なアドバイスをいただきました。心より感謝申し上げます。

日々の研究生活では同じ研究室のメンバーの山岡潤一氏、西原由実氏には研究に関する多くのアドバイスをいただきました。研究補助員の羽當英果氏には環境を整える上でご助力いただきました。また中山凌輔氏、藤井樹里氏とは一緒に多くの実験を行い、沢山のサポートをいただきました。他のメンバーからも日々沢山の視点やアドバイスをいただきました。心より感謝申し上げます。

最後に研究活動を生活面から支え、応援してくれた家族に感謝します。