［招待論文］

Activating the Physical
インタラクティブマターとマテリアルインタラクション

Activating the Physical
Interactive Matter and Material Interactions

筧 康明
慶應義塾大学環境情報学部准教授

Yasuaki Kakehi
Associate Professor, Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

Abstract:　デジタルテクノロジーの影響力は画面の中に留まらず、物理世界へと染み出し、より多様な状況や問題 X に対して適用されようとしている。そこでは既存のバーチャルリアリティや拡張現実感技術のように情報の視覚的重ね合わせのみならず、実体を有するオブジェクトそのものをコントロールして物理世界に動的な変化を与え、より直接的に作用するインタラクションや関係性を生み出そうという流れが立ち上がっている。プログラマブル・マターやクレイトロニクスとしてかつて検討が進められてきたものが、群ロボットとしての具現化のみならず、HCI と材料科学の知見が融合することにより、変化を伴うマテリアルの創造及びそのインタラクション応用による新たな可能性が見えてきた。本稿では、筆者らのグループで取り組むマテリアルにインタラクティビティを付与するための取り組みと、マテリアルによって調停あるいは生み出されるインタラクションのデザインに関する事例などを挙げながら、その動向や今後に求められる課題についてまとめる。

The power of digital technology has not stayed inside of monitors any more, and it is seeping out to the physical world to be applied to more diverse situations and problem X. There, not only the visual superposition of information as in the existing Virtual Reality and Augmented Reality, but also methods for property-controlling of physical objects have attracted much attentions. These research that used to be studied as Programmable matters and Claytronics have been advanced recently as applications of swarm robotics but also as integrations of knowledge of HCI and material science. In this paper, the author describes the trends and issues of this research field by citing pioneering works and works of our groups which add interactivity to materials and relate to design of interactions mediated or created by materials.

Keywords: プログラマブルマター、インタラクションデザイン、バーチャルリアリティ、拡張現実感、マテリアルサイエンス
programmable matter, interaction design, virtual reality, augmented reality, material science

1　はじめに

2016 年は VR 元年と呼ばれた。視覚的没入を伴うバーチャル世界の構成・提示を行う技術が産業との接点を得て、エンタテインメントやコミュニケーションツールとして普及の兆しを見せている。さらに、視覚的重畳による現実世界の拡張を行う Augmented Reality(AR) 技術も注目を集める。技術が日常的に手の届くものになることにより、リアルとバーチャル、デジタルとフィジカルの垣根はますます曖昧になり、それらの重なりや連なりを駆使した「体験」のデザインが一斉に展開されている。それと同時に、これまで画面の中だけで視聴覚優位に設計されてきた情報デザインやインタラクションデザインとは異なり、異なる機序で動く世界を調停しながら、より複雑な問題へと取り組むためのデザインが求められているとも言える。

VR や AR を実現する方法として、大きく 2 種類のアプローチがある。ここでは、感覚拡張型と環境拡張型と呼ぶ。前者のアプローチで代表的なのは HMD (Head-Mounted Display) を用いる方法である。実世界からの光を遮断して、目の前に取り付けたディスプレイで別の視覚情報を提示することにより、鑑賞者を別の環境に「没入」させる。また、HoloLens [1] のようにシースルー型 HMD を通した AR も製品として展開され、大きな注目を集める。このアプローチは極端に言えば、実世界に直接手を加えずとも世界を変える (変わったかのように感じさせる) ことができる。その一方で、自然な世界の提示のためには、コンテンツと実世界との間に光学的・幾何学的・時間的な整合性を確保するなど高度なセンシングや処理が必要になる。また、高いリアリティの提供のために視覚・聴覚のみならず、触覚・嗅覚・味覚などの感覚も提示しようとすると、より多くの入出力機器の装着が必要になり、身体への装着性や使用感などヒューマン・ファクタやデザインに起因する要件をクリアする必要が出てくる [2]。

後者は環境拡張型のアプローチである。これは、物理世界の対象物をテク

ノロジーにより変化・拡張させるものである。典型的なものとしては、近年普及するプロジェクション・マッピングが挙げられる。1970 年代頃から続けられているプロジェクタによる映像投影による実世界の拡張についての研究[3]だが、2010 年代以降になって日本でもエンタテインメントやイルミネーションなどのシーンで積極的に用いられるようになった。筆者もプロジェクションベースのインタラクティブシステムを多く開発してきた背景を持つ（[4] [5] [6] など）。この利点の一つは、鑑賞者が HMD などのデバイスを身につける「儀式」が無く、参加コストが低いことである。街中でのプロジェクション・マッピングのショーなど、同時に数万人もの人が肉眼で鑑賞することができる。実体がある状況を前提とするために、物理的な整合性が取りやすく、触覚や嗅覚など他の感覚と接続しやすい。その一方で、感覚拡張型の VR と比べると、プロジェクション・マッピングは実世界にそのまま映像を重ね合わせることから、光などの環境要因の影響を受けやすく、実世界の形状や物性、重力などの制約から解き放たれることはない。近年も動物体へのプロジェクションなどより高度な視覚的拡張に向けた取り組みが続けられている。

解決・改良すべき課題を残しながらも、これらのアプローチは既に研究の域を超え、表現や制作手段としてその可能性の探求が進められている。これに対して本稿で注目するのは、実験レベルで立ち上がってきた 3 つ目のアプローチである。2016 年の 9 月にオーストリア・リンツで披露されたパフォーマンス Drone 100 [7] は、HMD でもなくプロジェクションでもないアプローチで、広大な実世界中に、動的で三次元的な光の表現を繰り広げた。このパフォーマンスでは、ドナウ川の上空に 100 台のクアッドコプターが飛行する。それぞれのクアッドコプターは、位置や速度の制御が可能なだけではなく、搭載した照明の輝度や色を変更可能である。このモジュールデバイスを用いて、それらの位置関係や光のパターンを音楽に合わせて統制・制御することにより、上空に物理的な“ピクセル”で構成される像を描き出した。これは、環境拡張型をさらに発展させ、実世界に物理的に存在するオブジェクトの位置や形状、振る舞いをコンピュテーショナルに制御し、その個体あるいは集合体で情報を構成しようというアプローチである。鑑賞者は身体への機器の装着の必要もなく、既存の環境の状態に強い制約を受けることもない。

Mark Weiser は、“The most profound technologies are those that disappear. They weave themselves into the fabric of everyday life until they are indistinguishable from it.”としてコンピュータが環境に溶け込む未来の可能性を指摘した[8]。このために、フィジカルとデジタルが「重畳」される関係から、もう一歩進んで互いに「浸透」し合う関係を構築する必要があると考える。これは、明示的にデジタルデバイスを装着する HMD でもなく、物理環境の制約を大きく受けるプロジェクション・マッピングのアプローチでもない。実際に動き回り見た目を変化するオブジェクトによって動的な環境を構成するというこのアプローチは、ひいては我々の五感を拓き、身体を拡げる可能性を持っている。筆者らの研究グループでも、近年オブジェクトひいてはマテリアルにインタラクティビティを付与するための研究、そして身近なものを含むマテリアルによって生み出されるインタラクションのデザイン創出に取り組んでいる。本稿では関連する研究領域の流れを参照しながらこれらを事例として取り上げることにより、その可能性や現状についてまとめる。

2　クレイトロニクス、Organic User Interface、Radical Atoms

このアプローチの源流を辿れば、Toffoli と Margolus によって生み出されたプログラマブル・マター (Programmable Matter) [9]、さらには Seth Goldstein と Todd Mowry が立ち上げたクレイトロニクスの研究 [10] が挙げられる。クレイトロニクスは、catoms と呼ばれる (理想的には) ナノメータースケールのコンピュータを定義し、これらが互いに通信しながら動き、つながることで、より大きな自在にその形状を変化させるオブジェクトを構成するというビジョンを描いたものである。

この考え方はその後多くの研究者に引き継がれ、例えば MIT で開発された M-Blocks [11] はブロックの中にフライホイールを内蔵することで、外部制御装置を用いることなくブロック自体を移動・回転させる。さらに、磁力を用いてブロック同士の接続・切断を制御することで、複数のブロックの集合体を構成する。Programmable Robot Swarms [12] では数千個レベルの小型ロボットによる群生成・制御を行う。SF 映画で描かれるように群ロボットが実世界の中で役割を果たせるほどの強度、速度、柔軟性を獲得するにはまだ時間を

要するが、目に見える形でその可能性が実証されている。

並行してヒューマン・コンピュータ・インタフェース (HCI) の領域でも、オブジェクトの物理的な変形・変化を前提としたインタフェースである Organic User Interface の可能性が議論されるようになった [13]。ここでは、Input Equals Output (Input と Output が一体として設計される)、Function Equals Form（形状が機能を表し、状態が形状に現れる)、Form Follows Flow (状況に応じて動的に形を変化させる) といったデザイン指針が挙げられている。同じく HCI 分野では、MIT の Ishii らのグループ も Radical Atoms というインタフェースのビジョンを提唱している [14]。キネティックに制御されるピンのアレイを用いて、2.5 次元的な形状を動的に表現するテーブル [15] や、天井に取り付けた磁石により宙に浮く磁力球を用いて重力に逆らうようにバーチャルな物理現象を表現する浮遊インタフェース [16] など、動的に変化する物理物体を介したインタラクションシステムの実装を通して具現化されてきている。

ここで挙げられた事例の多くは、モータなど機械的な構造でその動きや変化を実現するものであることに気がつく。2012 年の時点で、Ishii らは Radical Atoms の論文を以下のように締めくくっていた。“Even though we may need to wait decades before atom hackers (material scientists, self-organizing nano-robot engineers, etc.) can invent the enabling technologies for Radical Atoms, we believe the exploration of interaction design techniques can begin today.” インタラクション研究と材料科学やロボティクス研究の分野間の距離を認めながらも、今はまだ無い材料を想定したインタラクションのプロトタイピングを進めていこうとしたのである。

3　機械のように振る舞うマテリアル

上にも述べた通り、インタラクション研究分野で取り組まれるものの多くは情報・電気工学的アプローチの延長線上で開発された「動的に変化するマテリアル」をシミュレート / エミュレートするようなシステムやデバイスだった。

これらに対してこの数年立ち上がった動きは、材料科学分野との密な連携のもとで、マテリアルからつくるインタラクションの探求である。材料科学

分野では従来から応答性を持つ材料の開発が進められている。スマートマテリアルなどと呼ばれるこれらのマテリアルは、応力、温度、湿気、pH、電場、磁場などの外部刺激に対して応答する形で特定の反応を返すものである。これを「機械のように振る舞い、制御できるマテリアル」と見ると、インタラクションデザインとの接点が見えてくる。

以下、材料開発の代表的なアプローチを分類しながら概観する。

(1) 高分子材料: 1978 年の田中豊一による高分子ゲルの体積相転移現象の発見 [17] 以後、高分子ゲルの機能化に関する研究が注目を集め、続けられている。これは、溶媒・pH・温度等の外部変化に対し、ゲルの体積が不連続的かつ可逆的に変化する現象である。この高分子ゲルの性質は、人工筋肉やアクチュエータ、形状記憶材料、さらにはドラッグデリバリーなどのデバイスへの応用が検討されている。前田らにより開発された自律歩行ゲルロボットは、内部に機械的機構を持たず、化学エネルギーにより自律的に動きを作り出す [18]。

(2) ソフト・ロボティクス: 上記のゲル・アクチュエータにも関連するが、柔らかいマテリアルで構成されるソフト・ロボティクスも研究されている。特にインフレータブルマテリアルと空気制御などを用いたソフト・ロボティクスの研究が盛んで鈴森康一らの研究 [19] [20] が先駆的である。近年インタフェースデザインへの応用も進められ、さらにハーバード大学が変形ロボットの作り方を Soft Robotic Toolkit としてレシピと共に公開するなど、非専門家以外へのアウトリーチも進められている [21]。

(3) フレキシブルエレクトロニクス: ムーアの法則に従うように半導体・電子部品が小型化・廉価化し、RFID チップのように電子回路をオブジェクトに埋め込んで、通信や処理を行うというアプローチも進展してきている。川原らの銀ナノインク材料を用いたプリンタブルエレクトロニクスの研究 [22] など、簡易的なプロトタイピングや、軽量・安価な電子回路の作成を可能にする技術が登場している。さらに、歪曲や伸縮など変形を許容する材料 [23] の検討も進み、柔らかい電子デバイスの普及への道筋が見えてきている。

(4) バイオマテリアル：マテリアルの一つとして、生体由来の組織や生物自体を用いた、あるいは模倣したセンサやアクチュエータの検討もなされている。バイオマテリアルと呼ばれる生体由来の材料は、環境に優しく、またセンサとしては固有の選択応答性を持つものなど、他のアプローチより単純な構成で複雑な対象物を扱えるなどの特徴がある。インタラクションデザインの文脈においても、生物を模倣したロボットやインタフェースの研究は数多いが、生物そのものを系の一部として組み込むものも出てきている[24]。

これらの取り組みは、変化をマテリアルの上に実装すること手法自体を主眼にしており、マテリアルを通したインタラクションの創出や周囲との関係性の調停といった筆者らの目的に必ずしも合わせて設計されていない。またそのスケールや反応速度もインタラクションに適さないものも多いと言える。一方で、この数年は世界でも、Lining Yao らの BioLogic[25] や、Google ATAP の Project Jacquard[26] などインタラクション研究者と材料科学者が早い段階から手を取るインタフェースデザインのプロジェクトが立ち上げられ、その流れに注目が集まっている。

4　筆者らの取り組み：インタラクティブマターの創出とマテリアルインタラクション

筆者らのグループでも、映像による実世界拡張とは異なる、物理世界の拡張及びインタラクション設計に取り組んできた。本項では、いくつかのトピックに渡って、筆者が関わるプロジェクトとその開発に至る過程についてまとめる。

4.1　マテリアルから動きを取り出す

4.1.1　Loopers[27]

Loopers は、テーブルの上に置かれた 12 匹の「シャクトリムシ」が、動き、振る舞いを変化させることで生じる音を利用したサウンドインスタレーションである（図 1）。Ars Electronica Festival 2016 以降、Ars Electronica Center にて展示されている。この作品のベースになるのは河野通就と共に開

発した tamable looper [28] という装置で、テーブルの内部に埋め込まれた電磁石のアレイを用いてテーブル上に磁場を発生させ、その引力と斥力の関係を利用して磁力球の連なりで構成される物体の動きを制御する。テーブルの上で磁力球が屈曲・伸長を繰り返す様は、シャクトリムシのような可笑しげな生物感を想起させる。

技術的な観点で、磁力を用いてオブジェクトを移動させる先行研究は、筆者らの研究以前にも存在する ([16] [29] など)。これに対して、筆者らの tamble looper や Loopers では、非電気的なものから独特の「振る舞い」を引き出すという態度で取り組んでいる。コンピュータに指示した通りに動かすということではなく、摩擦等により偶発的に起こる動きやノイズを予め「らしさ」として積極的に認めて、それらを含めた動きを構成するようにプログラムを構成する。この際、制御プログラムのパラメータの設定と同等に、磁石の個数や大きさ、床面の材質などの選択が重要になる。

Loopers では、ムシの身体がテーブル面に当たり擦れる際に発生する音に注目し、サウンドインスタレーションという観点から複数のムシの振る舞いの同時制御を行い、音の動きと重なりによる表現を行った。また、2015 年に山口情報芸術センター、2016 年に神奈川芸術劇場で上演されたパフォーミングアート作品「dividual plays」[30] の中でこの装置が用いられ、ダンサーと共

図 1　Loopers

にムシが「踊る」シーンを構成した。

4.1.2　lapillus bug [31]

河野通就、星貴之と共に制作したインスタレーション lapillus bug も同様のアプローチと言える。2013 年の文化庁メディア芸術祭、2014 年の Ars Electronica Festival などで発表し、その後も各地の美術館で展示されている(図 2)。この作品では、テーブル上に置かれた皿の上を黒い粒が浮遊しながら飛び回る。技術的には文献 [31] にまとめたように、超音波フェーズドアレイを利用し、これを皿の上に設置する。超音波振動子から発せられた波と、皿の表面で反射して鉛直上向に帰っていく波との重ね合わせにより局所的な定在波を生成し、その節を利用して粒を浮遊させ、節の位置を水平方向に移動させることにより空中での粒の位置を制御するという仕組みである。

最初から音響浮揚を目的に据えて始め たのではなく、当初は共同研究者の星の開発していた超音波フェーズドアレイをツールキット化し、彼らのグループが既に作っていた非接触触覚提示装置 [32] とは異なる使い方を探るというところから議論が始まった。その可能性を探るうちに、小さな物体なら超音波で動かせるというアイディアが生まれ、その過程である種偶発的に粒を浮遊させるという現象に出会ったのである。実験環境において粒がやや揺れながら浮く様子は、新鮮で不思議な印象を与えると同時に、シャクトリムシ

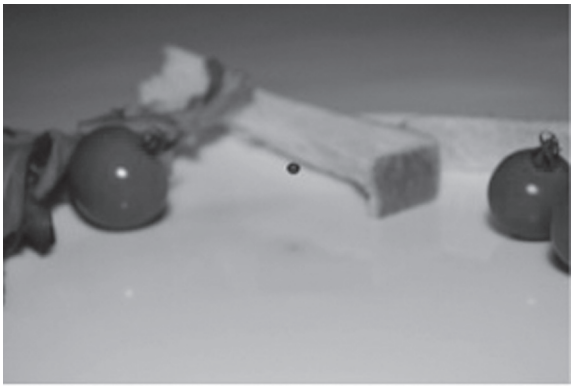

図 2　Lapillus bug

の際と同様、強く生き物感を感じさせる姿だった。このことから、この動きの特徴を活かしながら精細な制御を可能にするハードウェア構成やソフトウェアの開発を進め、インスタレーションとしての構成を行なっていったという流れである。皿を置き本物の食材を並べるという状況設定や、このムシの動きに関するシナリオを作り、物体や光を用いたムシとのインタラクションを実装した。

もちろん、この浮揚技術自体の可能性はこのインスタレーションのような用い方に留まらない。技術的には、この独特の揺れを生じさせるノイズを少なくする努力も可能である。それと同時に、この作品制作の中で行ったようなマテリアルや現象との試作・対話の中で、発見的に動きや振る舞いの特徴を見つけ、コンピュテーショナルなツールを用いてそのチューニングをしていく発見型・介入型のデザインの可能性も探求していきたい。

4.2　もののかたちを造る、変える

4.2.1　microcosm [33]

Ars Electronica Festival2016 で発表した microcosm（武井祥平、筧康明）は、身体を超えるスケールでの Shape-changing Interface の可能性を提示するものである（図 3）。これは、約 30cm から 5m 程度までその長さを変化させることが可能なモジュールを立体的に組み合わせて、変形立体構造体を構成するものである。帯状の素材を押し出しながら丸め、開口部をベルクロテープでとめることで円柱構造を構成し、強度を保ちながら長さが変わるモジュールを実現する。数ある Shape-changing Interface の中でもその伸縮変化率に関しては最大クラスであると言える。

本研究は、武井らが研究してきた巻尺の組み合わせによる変長モジュールの考え方をベースにしている [34]。inFORM [15] のようにピンアレイを駆使した実体ディスプレイは従来から存在する。Hyposurface [35] や Megafaces [36] のように建築スケールの大規模な作品やシステムもある。膨大なアクチュエータで 2.5 次元的に面を押し出すというこれらのアプローチと異なり、点と線を行き来することができるこの手法はそれ自体で三次元的な立体物を構成できるという特徴がある。そこで、筆者らは、より少ないモータで、かつ軽量で強

図３　microcosm

度のあるマテリアルを用いた変長モジュールを開発し、より複雑な構成を持つ 変形構造体の実現に向けた開発を行っている。

展開としては、コンピュータグラフィクスの実体化、（居住やパフォーマンスのための）変形する空間の生成、さらにはロボティクスの一部としてなどのシナリオが考えられる。環境の変化や人間の意図・状況などを汲み取り、インタラクティブにその姿を変えるオブジェクト兼空間として、さらなる実践的取り組みを続けていく。

4.2.2　Single-Stroke Structures [37]

長谷川貴広と共に開発を行った Single-Stroke Structures も、身体スケールを超えるサイズの構造体を即興的に作り出すためのプロジェクトである（図4）。上記の microcosm では即時的に変形することを目的とするのに対して、この Single-Stroke Structures では材料から簡易に 3D 形状を作り出すためのファブリケーション手段として位置付けている。

3D プリンタをはじめとするデジタルファブリケーション機械の普及はハンズオンなものづくりの状況を劇的に変え、より簡単に、正確なものを作ることができるようになった。その一方で、機械の大きさが、造作物のサイズの制約になり、卓上サイズ、手のひらサイズのパーツにとどまる。建築スケールの 3D プリンタの検討も進められており、その一部は実際の建築物にも適

図４　Single-Stroke Structures

応されているが、それに対応する装置が大型になり、一部の専門家の手にとどまっているという現状がある。

身体スケール以上の簡易なものづくりに新しい道を切り拓いた関連研究の一つとして、Harshit Agrawal らの Protopiper [38] がある。これはテープをチューブ状にして送り出す機構を手持ちのデバイスの上に実装して、所望の長さの円筒状の棒をその場で即座に作り出すことができるというツールである。これを貼り合わせていくことで家具スケールのオブジェクトの骨格を試作することなどができる。筆者らの Single-Stroke Structures も Protopiper のアプローチを引き継ぐ。その上でテープではなく、ビニールチューブを用いて空気で膨らませることで、より強度があり、かつより大きなスケールの物体試作に向いた装置の実現を目指している。具体的には、比較的安価に手にはいるビニールチューブに対して、局所的に熱圧着の処理を施すことで、空気を入れた際にゆるやかなカーブを作る。熱圧着の位置・間隔を制御することで、その場で所望の曲率のカーブを構成することができる。Ars Electronica Festival では、湾曲させたチューブを積層して３次元的なオブジェクトを構成したものを複数個展示した。

ビニールチューブを用いる利点は、利用後に空気を抜いてチューブを巻き取ることで、再びコンパクトな「材料」に戻せるという点にもある。将来的には、仮設のテントなどの立体形状を現場の条件に合わせて設計・出力し、

使い終わったらまた畳んで持ち運ぶという状況の実現を想定している。既にArs Electronicaでは、展覧会スタッフの手による本プロジェクト成果物の「移設」が実現しており、この側面の応用可能性についても具体的な現場や状況と接続しながら掘り下げていきたい。

4.2.3　ProtoMold [39]

MicrocosmとSingle-Stroke Structuresでは線を基本要素として骨格構造を作るという方法で進めている。もう一つ、同じくマテリアルの再利用や形状のリライトの実現の観点で、面から立体を取り出すというアプローチで進める研究を紹介する。山岡潤一を中心に進める研究ProtoMoldは、ハンズオンスケールながら即興的に面から2.5次元的な形状を作り出す装置である。これは、マテリアルの硬度変化を利用して、必要な時に物の形を作る（作り変える）ことができる（図5）。

具体的には、バキュームフォームという旧来からある造形手法に注目し、そこにデジタル制御を組み合わせることで、やり直し・作り直し可能なラピッドプロトタイピング環境を実現する。我々にとって興味深いのは、形作られたオブジェクトは加熱すると数秒で再び平坦なサーフェスへと戻るという点である。これにより、必要な際に必要な形状のオブジェクトを瞬時に作り、必要がなくなれば面に戻して小さく格納する、あるいは別のデザインのオブジェクトを作る際のための素材として再利用するという（リ）サイクルが可能

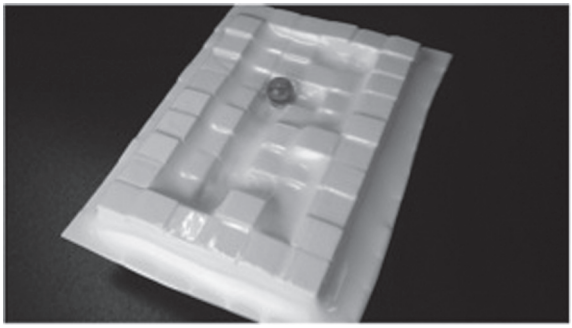

図５　ProtoMold

になる。

従来のバキュームフォームに対する差分として、ProtoMold ではデジタル形状制御可能なピンアレイをステージに配置することにより、型を 3D プリントなどで事前に用意せずにその場で型を作ることにより高速なプロトタイピングを可能にした点が挙げられる。ピンアレイディスプレイの研究の観点からも、ピンの並びを型として用いることでその形状を物質に転写して複製することができるという特徴がある。文献 [39] [40] にまとめたように、ピンを操作するためのジェスチャを用いたインタラクションや、ものや身体の形に合わせた造形手法などその体験や使い道についての検討を行っている。

4.3　マルチモーダルな変化とインタラクション

これまで挙げてきた研究事例のように、動き、形状などあるプロパティに注目して、それを引き出すという取り組みがある程度進んでくると、動きと形、形と色など複数のプロパティを同時に、または個別に同じオブジェクトの上で変化させる、あるいは制御することがチャレンジとして見えてくる。マテリアルの特性と外部からの刺激や制御を組み合わせてマルチモーダルなプロパティ変化及びインタラクションを可能にした事例を挙げる。

4.3.1　BelliesWave [41]

BelliesWave (図 6) は、エラストマ素材で構成される実体変色ピクセルによるインスタレーションである。野尻風香と共に開発した初期バージョンの開発は、膨らませると色が変わる市販の風船に注目したところから始まった。表と裏に異なる色が施されたゴム風船に空気を入れて膨らませると膜が伸びて薄くなり、内側の色が次第に現れるという仕組みである。

このエラストマ素材に対してコンピュータで空気を制御し、その膨らみをコントロールすることにより、従来の発光型ディスプレイとは異なるマテリアル自体が発色するフィジカルなピクセルとして作用する。ICC 等で展示を行ったインスタレーションでは図 6 のように、テーブル状の筐体の天面に変色エラストマをアレイ状に配置する。白い状態から、膨らむと共に色づき、また空気を抜くことで元の形状・色へと戻っていく。また、プリセットのパタ

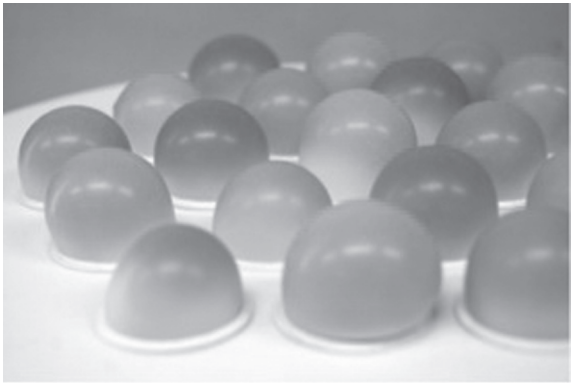

図 6　Bellieswave

ーン表現のみならず、鑑賞者のジェスチャに反応するインタラクティブなバージョンも制作した。

このプロジェクトでは、上述の通り当初のバージョンでは市販の素材を用いていたが、現在では 研究室でエラストマから自作するようになっている。現在も藤井樹里や松信卓也らと共に、より強度や伸縮性のある素材を作るということと、色味の選択の自由度を向上させるため、さらにはエラストマ自体にさらなるインタラクティブな機能を持たせるという方向に研究を発展させている。

4.3.2　Organic Primitives [42]

MIT Media Lab の Kan らと共同で研究を行った Organic Primitives（図 7）は、形状と色、匂いを変化させることが可能なマテリアルと、それを用いたインタラクションの提案である。この研究で用いるマテリアルでは、電気的な部品を内蔵することなく、外部からの電気的な制御も行わない。上記の変化の駆動のために、このシステムでは pH 応答型のマテリアルを用いる。そのマテリアルの pH 状態を制御することで、それに応じて形状、色あるいは匂いの変化が引き起こされる [42]。

このマテリアルの特徴の一つとして、柔らかいという点、さらには Edible（摂食可能）という点がある。例えば、りんごの表面にシールのように Organic

図 7　Organic Primitives [42]

Primitives を貼り付けると、そのりんごの pH 状態に応じてその箇所の色が変わる。これにより、りんご自体がその食べごろや、劣化による危険などを知らせてくれるインタフェースとなる。また、pH の値によって形状を変化させるマテリアルをスープの中に入れ、そこに調味料などを加えると、スープ内の pH 度数に応じてマテリアルを自己変形させることができる。また、雨など環境の要因・変化を可視化・可匂化するなど、環境の中で成立するインタラクティブなインスタレーションなどへの応用を狙っている。

5　議論

5.1　応用シナリオとその具現化

今回紹介した我々のプロジェクトは、まだ多くはその開発の途上にある。変化そのものの具現化のための試行錯誤を繰り返し、実験室レベルではなく、外部にてそれを再現・展示・体験可能なものを作り出すためのプロセスにある。本特集号のテーマである DesignX ＊ XDesign の文脈に寄り添って考えると、まだ具体的な社会の問題と接続して、それを解決する段階には至っていないものがほとんどである。

しかし、先に紹介してきたようにマテリアルそのものを操る術を探求していると、材料科学と情報科学、さらにはアート・デザインの領域を横断する過程で「建築」「野生」「生物」「食」「インプラント」「化学反応」「運動」など、これまで HCI 研究があまりカバーしてこなかった様々なキーワードと出会う

ことになる。例えば、今筆者らのグループでは、微生物や植物など自然物を積極的に系の中に取り込む新たなロボティクスやディスプレイシステム[43]、摂食あるいはインプラント可能なインタフェースなどについての検討も進めている。これらは、画面の中のコンピュータと物理世界の人間をつなぐための架け橋（インタフェース）という意味での旧来のHCI研究の枠には到底収まらない。人工物系と自然の生態系、体内と体外、ソリッドなオブジェクトとソフトマテリアル、など異質なもの・空間・系をつなぎ、関係を調停するためにはテクノロジー側からのみならず多様な観点からの眼差しが必要になる。

これらを世に問うためには、今できることのデモンストレーションに加えて、そのアイディアが切り開くデザインスペース、さらにはそのテクノロジーがどんな未来（や問題）と接続され得るかを合わせて提示することが求められる。そしてそれらは従来SF等で描かれてきた世界観とも異なる可能性がある。このために、筆者らのグループでもシナリオメイキングのために、スペキュラティブ・デザインやデザインフィクションと呼ばれる手法[44]を積極的に取り込み、未来の（possible/plausibleな）シナリオと、具体的に今動作するデモンストレーションを結びつけるための取り組みを行なっている[45]。

5.2　研究環境（ラボ）構築とノウハウの醸成

これまでにも述べてきたが、マテリアルからつくるフィジカルインタラクションデザインの促進のためには、HCI研究者やインタラクションデザイナーとマテリアル研究者がアイディア・課題整理の段階から議論や作業を共に行える場づくりが必要になる。従来は、市販される新材料を手にいれてインタラクションデザイナーがその使い道を考える、あるいは材料研究者がその応用を探るためにデザイナーに相談するという関係は多く見られた。しかし、基本的に材料設計と応用体験設計のフェーズが分断され、それぞれの開発にかける工程や時間も異なるため、ニーズとシーズのマッチングを採ることは難しい。同じチーム内に複数の専門家を含み、問題発見・整理、アイディア構想、実験、実装、発表まで共にプロセスを経ることにより、それぞれの専門性からの貢献やフィードバックを多く取り込むことができると

期待される。

この交流を促進する一環として、筆者らのグループではデジタルファブリケーションやモーションキャプチャなどの装置に並んで、電子工作のためのスペース、そして簡単な材料作成・実験・評価が可能なマテリアルラボ、バイオラボを同じ空間内に並置している。さらに専門性の壁を超えた超領域的なプロジェクトへと発展させるために、材料レシピやソースコード、さらには日誌という形でのノウハウや勘どころの共有[46]、さらにツールキットやライブラリのような形で制作をオープンにサポートするための環境づくりにも取り組もうとしている。このようなフィジカルな環境とデジタルなツールを通して、単なるコラボレーションを超えて、ハードウェア（電子回路・機械など）、ソフトウェア（プログラミング）という領域に加えて、ドライ（コンピュータ）とウェット（マテリアル）という両領域を行き来する新たな技能、さらにはそれを人間とのインタラクションや社会の問題へと接続する視点を持つデザイナーが開拓され、領域として醸成していくことを期待している。

6　むすびに

本稿では、画面を前提としたVR、ARに並ぶ新たな物理世界の活性化手段として、マテリアルベースのフィジカルインタラクション設計の動向についてまとめた。関連する先駆的取り組みに加えて、筆者らの取り組みの事例を紹介しながら、そのプロセスや環境の工夫について触れた。

これを参照しながら本稿でタイトルに据えた「Activating the Physical」とは、デジタル技術を前提とした物理世界の活性化の意味である。Nicholas Negroponteは、90年代半ばに新しいデジタルの時代の到来を「Being Digital」という著書で示した[47]。それから20年あまり、筆者らが再びフィジカルな世界へと眼差しを向けるのは決して懐古的な態度に基づくものではない。高度に発達したデジタル技術は、次にハードウェアとソフトウェアのみならずウェットとドライ、物理と化学の垣根を超えて結びつける新たなフィールドの開拓へと進んでいく。

次の段階として、インタラクティビティを持つマテリアルで構成されたツールや空間の中で、人間の営み自体により介入する具体的なインタラクショ

ンのデザインやインタフェースの開発を行なっていきたい。また、マテリアルを介するインタラクションの対象は人間のみならず、他の生物や環境を巻き込みうるものであり、実験室を飛び出した様々なフィールドでの実践を軸に据えて議論・応用・展開を進めていきたい。

謝辞

本原稿をまとめるにあたり、紹介した各研究の共同研究者の方々、及び議論に協力してくれた中丸啓氏、山岡潤一氏をはじめとする慶應義塾大学 SFC 筧研究室のメンバー、Pattie Maes 教授、中垣拳氏、Viirj Kan 氏など MIT Media Lab の方々、JST ERATO 川原万有情報網プロジェクトのチームメンバーに深く感謝する。また、本稿で紹介したプロジェクトの一部は、JST ERATO JPMJER1501 の支援を受けたものである。

参考文献

[1] Microsoft HoloLens <https://www.microsoft.com/en-us/hololens> (2017. 4 確認) .
[2] 舘 暲・佐藤 誠・廣瀬 通孝『バーチャルリアリティ学』日本バーチャルリアリティ学会 、2010 年。
[3] Oliver Bimber and Ramesh Raskar, *Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds*, A. K. Peters, Ltd., 2005.
[4] Y. Kakehi, T. Naemura and M. Matsushita, “Tablescape Plus: Interactive Small-sized Vertical Displays on a Horizontal Tabletop Display,” In *TABLETOP '07*, 2007, pp. 155-162.
[5] 筧 康明・近森 基・久納 鏡子「hanahana & hanahanahana: 香りの視覚化によるインタラクティブアート」『日本 VR 学会論文誌』Vol. 15, No. 4、2010 年、pp. 571-577。
[6] Yasuaki Kakehi, Makoto Iida, Takeshi Naemura, Yoshinari Shirai, Mitsunori Matsushita, and Takeshi Ohguro, “Lumisight Table: An Interactive View-Dependent Tabletop Display,” *IEEE Comput. Graph. Appl*., 25, 1, 2005, pp. 48-53.
[7] Ars Electronica Future Lab, “Drone 100,” <https://www.aec.at/futurelab/en/project/drone-100/zzz> (2017.4 確認) .
[8] Mark Weiser, “The computer for the 21st century,” *ACM SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev*. vol. 3, No. 3, July 1999, 1999, pp. 3-11.
[9] Tommaso Toffoli, Norman Margolus, “Programmable matter: Concepts and realization,” *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Volume 47, Issue 1, 1991, pp. 263-272.
[10] Seth Copen Goldstein and Todd C. Mowry, “Claytronics: A scalable basis for future robots,” In *RoboSphere 2004*, 2004.
[11] Yu. G. Martynenko, “Motion control of mobile wheeled robots,” *Journal of Mathematical Sciences*, Vol. 147, Issue 2, 2007, pp. 6569-6606.
[12] Justin Werfel, Kirstin Petersen, and Radhika Nagpal, “Designing Collective Behavior in a Termite-Inspired Robot Construction Team,” *Science*, Vol. 343, Issue 6172, 2014, pp. 754-758.
[13] David Holman and Roel Vertegaal, “Organic user interfaces: designing computers in any

way, shape, or form," *Commun*., 51(6), 2008, pp. 48-55.
[14] Hiroshi Ishii, et al., "Radical atoms: beyond tangible bits, toward transformable materials," *interactions*, 19(1), 2012, pp. 38-51.
[15] Sean Follmer, Daniel Leithinger, et al., "inFORM: dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation," In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '13)*, 2013, pp. 417-426.
[16] Jinha Lee, et al., "ZeroN: mid-air tangible interaction enabled by computer controlled magnetic levitation," In *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '11)*, 2011, pp. 327-336, DOI <https://doi.org/10.1145/2047196.2047239>.
[17] 田中 豊一「ゲルの相転」『日本物理學會誌』41(7)、1986 年、pp. 542-552。
[18] Satoshi Nakamaru, et al., "Development of novel self-oscillating gel actuator for achievement of chemical robot," In *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ international conference on Intelligent robots and systems (IROS'09)*, 2009, pp. 4319-4324.
[19] Koichi Suzumori,et al., "Development of Flexible Microactuator and Its Applications to Robotic Mechanisms," In *Proc. IEEE International. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 1989)*, 1991, pp. 1622-1627.
[20] K. Suzumori, et al., "A Bending Pneumatic Rubber Actuator Realizing Soft-bodied Manta Swimming Robot," In *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007, pp. 4975-4980.
[21] Harvard Biodesign Lab, "Soft robotics toolkit," <http://softroboticstoolkit.com/> (2017.4 確認).
[22] Yoshihiro Kawahara, et al., "Instant inkjet circuits: lab-based inkjet printing to support rapid prototyping of UbiComp devices," In *Proceedings of the 2013 ACM international joint conference on Pervasive and ubiquitous computing (UbiComp '13)*, 2013, pp. 363-372.
[23] Sekitani T., et al., "Flexible organic transistors and circuits with extreme bending stability," *Nat. Mater*. 9, 2010, pp. 1015-1022.
[24] K. Shoji, et al., "Gold nanoparticle-based biofuel cell using insect body fluid circulation," In *2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII)*, 2013, pp. 2811-2814.
[25] Lining Yao,et al., "bioLogic: Natto Cells as Nanoactuators for Shape Changing Interfaces," In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15)*, 2015, pp. 1-10.
[26] Ivan Poupyrev, et al., "Project Jacquard: Interactive Digital Textiles at Scale," In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '16)*, ACM, 2016, pp. 4216-4227.
[27] Yasuaki Kakehi and Michinari Kono, "Loopers," In *Ars Electronica Festival 2016*, 2016.
[28] Michinari Kono and Yasuaki Kakehi, "tamable looper: creature-like expressions and interactions by movement and deformation of clusters of sphere magnets," In *ACM SIGGRAPH 2012 Posters (SIGGRAPH '12)*, ACM, Article 25, 2012, 1 page.
[29] Gian Pangaro, et al., "The actuated workbench: computer-controlled actuation in tabletop tangible interfaces," In *Proceedings of the 15th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '02)*, 2002, pp. 181-190.
[30] Keina Konno, Richi Owaki, Yoshito Onishi, Ryo Kanda, Sheep, Akiko Takeshita, Tsubasa Nishi, Naoko Shiomi, Kyle McDonald, Satoru Higa, Motoi Shimizu, Yosuke Sakai,

Yasuaki Kakehi, Kazuhiro Jo, Yoko Ando, Kazunao Abe, and Takayuki Ito, “Dividual Plays Experimental Lab: An installation derived from Dividual Plays,” In *Proceedings of the TEI '16: Tenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '16)*, 2016, pp. 647-652.

[31] Michinari Kono, Takayuki Hoshi, and Yasuaki Kakehi, “lapillus bug: creature-like behaving particles based on interactive mid-air acoustic manipulation,” In *Proceedings of the 11th Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE '14)*, Article 34, 2014, 8 pages.

[32] Takayuki Hoshi, et al., “Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound,” *IEEE Trans. Haptics*, 3(3), 2010, pp. 155-165.

[33] Shohei Takei and Yasuaki Kakehi, “microcosm,” In *Ars Electronica Festival 2016*, 2016.

[34] Shohei Takei, et al., “KineReels: extension actuators for dynamic 3D shape,” In *ACM SIGGRAPH 2011 Posters (SIGGRAPH '11)*, ACM, Article 84 , 2011, 1 page.

[35] Aegis Hyposurface, in <http://www.sial.rmit.edu.au/Projects/Aegis_Hyposurface.php>（2017.4 確認）.

[36] iart, “The Kinetic Facade of the MegaFaces Pavilion Sochi 2014 Winter Olympics,” <https://iart.ch/en/-/die-kinetische-fassade-des-megafaces-pavillons-olympische-winterspiele-2014-in-sotschi>（2017.4 確認）.

[37] Takahiro Hasegawa and Yasuaki Kakehi, “Single stroke structures,” In *Ars Electronica Festival 2016*, 2016.

[38] Harshit Agrawal, et al., “Protopiper: Physically Sketching Room-Sized Objects at Actual Scale,” In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology (UIST '15)*, ACM, 2015, pp. 427-436.

[39] Junichi Yamaoka and Yasuaki Kakehi, “ProtoMold: An Interactive Vacuum Forming System for Rapid Prototyping,” In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17)*, ACM, 2017, pp. 2106-2115.

[40] Junichi Yamaoka and Yasuaki Kakehi, “DrawForming: An Interactive Fabrication Method for Vacuum Forming,” In *Proceedings of the TEI '16: Tenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '16)*, ACM, 2016, pp. 615-620.

[41] Fuka Nojiri and Yasuaki Kakehi, “BelliesWave: color and shape changing pixels using bilayer rubber membranes,” In *ACM SIGGRAPH 2014 Posters (SIGGRAPH '14)*, ACM, Article 17, 2014, 1 page.

[42] Viirj Kan, Emma Vargo, Noa Machover, Hiroshi Ishii, Serena Pan, Weixuan Chen, and Yasuaki Kakehi, “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 (CHI '17)*, ACM, 2017, pp. 989-1000.

[43] Takaki Kimura and Yasuaki Kakehi, “MOSS-xels: slow changing pixels using the shape of racomitrium canescens,” In *ACM SIGGRAPH 2014 Posters (SIGGRAPH '14)*, ACM, Article 20, 2014, 1 page.

[44] Anthony Dunne and Fiona Raby, *Speculative Everything: Design, Fiction, and Social Dreaming*, The MIT Press, 2013.

[45] 水野 大二郎・筧 康明・連 勇太朗「スペキュラティヴ・デザインが拓く思考――設計プロセスから未来投機的ヴィジョンへ」<http://10plus1.jp/monthly/2016/04/issue-01.php>（2017.4 確認）。

[46] 筧 康明「ものづくり教育の現場で Fabble を使う―慶應義塾大学 SFC「オープンデザイン実践」での取り組み」*<https://fabcross.jp/topics/fabble/20160331_fabble_01.*

html> (2017.4 確認)。
[47] Nicholas Negroponte, *Being Digital*, Alfred A. Knopf, 1995.

〔受付日　2017. 5. 3〕