



ムーンショット型研究開発事業

新たな目標検討のためのビジョン策定

「柔軟で安心な「場」と多様な幸せのカタチを
実現するFlexインフラに関する調査研究」

調査研究報告書

令和3年7月

目標検討チーム「Flexインフラを考える会」

チームリーダー：今西 美音子（株式会社竹中工務店 技術研究所 研究員）
サブリーダー：石垣 陽（電気通信大学 大学院情報理工学研究科 特任准教授）
チームメンバー：井上 竜太（株式会社竹中工務店 技術研究所 グループ長）
井上 修作（株式会社竹中工務店 技術研究所 グループ長）
橋山 智訓（電気通信大学 大学院情報理工学研究科 教授）
金子 修（電気通信大学 大学院情報理工学研究科 教授）
湯浅 剛（Avanti R&D, Inc. Founder/CEO）
倉本 秀治（TIS株式会社 戦略技術センター センター長）
吉見 真聡（TIS株式会社 戦略技術センター エキスパート）
戴 競択（TIS株式会社 戦略技術センター 主査）
大岸 智彦（株式会社KDDI総合研究所 グループリーダー）
上野 高明（株式会社KDDI総合研究所 研究主査）
三澤 純子（エム・ティ・プランニング株式会社 取締役会長）
矢吹 惇（エム・ティ・プランニング株式会社 ディレクター兼デザイナー）
吉澤 睦博（株式会社竹中工務店 技術研究所 主任研究員）
柳橋 邦生（株式会社竹中工務店 技術研究所 専門役）

目次

I. 提案するMS目標案のコンセプト	1
1. MS 目標案	1
1.1. MS目標案の名称	1
1.2. 実現したい2050年の社会像	1
2. 当該 MS 目標の達成シーン。2050 年（及び2030年）に何が実現しているか	2
2.1. 多様な生活ニーズに応える可変空間で構成されたまち	2
2.2. 様々な生活スタイルを実現できるまち - 地方多拠点空間の共有が容易な社会	4
2.3. 気象災害でも安心して生活が送れるまち	5
2.4. オープンな情報インフラと高いモジュール性によって広がる多彩なサービス	6
3. 当該 MS 目標を設定した理由及び、目標達成の社会的意義等	8
3.1. 当該 MS 目標の設定や目標達成に向けた取組みが今必要である理由	8
3.2. 目標達成の社会的意義	9
3.3. 当該 MS 目標の達成に向けた社会全体の取組み概要	9
4. 当該目標達成によりもたらされる社会・産業構造の変化	11
4.1. 住民や企業の拠点選択	11
4.2. オープンなデータ共有による産業の活性化	12
II. 統計・俯瞰的分析	12
1. 当該 MS 目標を達成するための課題（科学技術的・社会的課題）や必要な取組み	12
2. 当該 MS 目標を達成するために取り組むべき研究開発の俯瞰	13
3. 当該目標に関連する研究開発の動向（全体）、海外動向及び日本の強み	17
3.1. 柔軟なフィジカル空間	17
3.2. 拠点を自由に選ぶ暮らし	23
3.3. センシングによる「場」の最適化	27
3.4. 真にオープンなデータ共有	29
III. 社会像実現に向けたシナリオ	34
1. 挑戦的研究開発の分野・領域及び研究課題	34
1.1. 挑戦的研究開発を推進すべき分野・領域	34
1.2. 目標達成に当たっての研究課題	35
2. 2030 年・2040 年・2050 年のそれぞれにおける、達成すべき目標（マイルストーン）、マイルストーン達成に向けた研究開発、これによる波及効果	37
2.1. 研究開発のマイルストーンと開発継続判断	37
2.2. 波及効果	39
3. 目標達成に向けた国際連携の在り方	39

3.1. 海外の先行スマートシティ事例の参照	39
3.2. 国際的な工業規格との連携	39
4. 目標達成に向けた分野・セクターを越えた連携の在り方	39
4.1. 建物変形機構に関する連携	39
4.2. 建物の制御に関する連携	40
4.3. 自律進化型通信インフラ構築に関する連携	40
5. 目標達成に向けて取り組むうえでの倫理・法的・社会的課題及びその解決策	40
5.1. 建築関連法規	40
5.2. 拠点移動における行政・福祉サービス	41
5.3. 個人情報保護	41
IV. 結論	42
V. 参考文献	43

I. 提案するMS目標案のコンセプト

1. MS 目標案

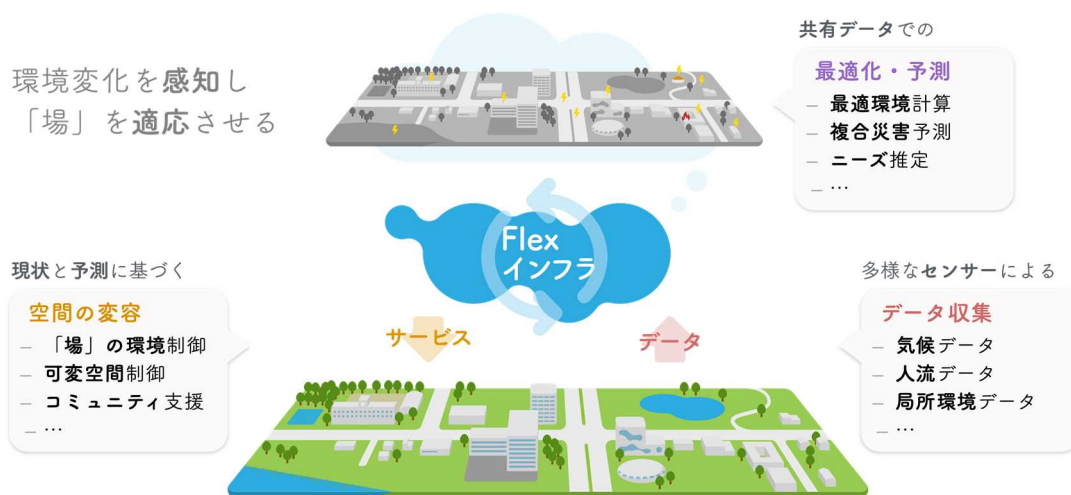
1.1. MS目標案の名称

「2050年までに、柔軟な「場」で誰もが安全で幸せに暮らせる社会を実現」

1.2. 実現したい2050年の社会像

私たちが描く2050年は、個人や社会のニーズに合わせて柔軟に・タイムリーに環境を変えられる空間により、国民それぞれが好きな場所で好きな暮らしをおくれる社会である。それは、時々の変更が容易で、状況に合わせて環境を調整し、ときには形状さえもダイナミックに変化させる柔軟性の高い建物空間と、人々や社会の「今」のニーズを把握できるオープンな情報インフラによって実現される。これが私たちの目指す人間中心のフレキシビリティの高い空間と情報のインフラ（以下、Flexインフラと称する）である。そして、このインフラは以下の4つの観点から国民の暮らしの場を豊かにすることを目指している。

- ・ Diverse: 多様な状況の人が幸せを享受できる
- ・ Selectable: 生活スタイルを選択できる
- ・ Customizable: 好みの空間に変更できる
- ・ Stable: 災害で生活が脅かされない



図I.1 Flexインフラの概念図

この社会では、データを企業が囲い込まずに相互利用できるようになることで、多面的なセンシングデータや予測データを組み合わせた高度な状況推測と適用が可能となり、また新規サービスの参入も容易となることでこの情報インフラ自身の自律的な進化が図れ

る。高度なフィジカル空間（実空間）情報は対となるサイバー空間の情報量も高め、人々は実空間とサイバー空間の行き来さえも容易となる。

サイバー空間での交流の併用と実空間の柔軟な可変性により個人の短時間での拠点変更も可能となる。「その時」に「居たい場所」に居られる生活では、人の拠点選択も合理的の必要性だけでなくライフスタイルや好みが反映できる。地域が持つ個性豊かな文化や特性が改めて見直され、現在の都心偏重から地方都市への分散化が進む。

さらに、柔軟性の高い社会は災害にも堅牢である。予測できる災害においては先回りして場が被害をいなせるよう備え、想定外の有事でも短期で生活の立て直しが可能となる。

2. 当該 MS 目標の達成シーン。2050 年（及び2030年）に何が実現しているか

1.2に示した社会像で実現されるシーンのうち、代表的なものを以下に示す。

2.1. 多様な生活ニーズに応える可変空間で構成されたまち

Flexインフラの整備された社会では、状況に合わせて空間が人に寄り添い最適化する。

建物や部屋はソフトウェアで管理されるようになり、利用者のバイタルデータや行動・好みなどの個人データと、天候や流行といった外的なデータを合わせて、利用者が「今」必要とする環境を整えてくれる。例えば、天気の良い日は居住者の機嫌が良さそうなら自動で窓を開けて外光を取り込み目覚めを促す。このとき、裏ではセンシングで得られた利用者の居場所や部屋の形状や部材、気候などに合わせた高度なシミュレーションを行い、最適な室環境を導き出して空調機器が稼働する（図11.2）。

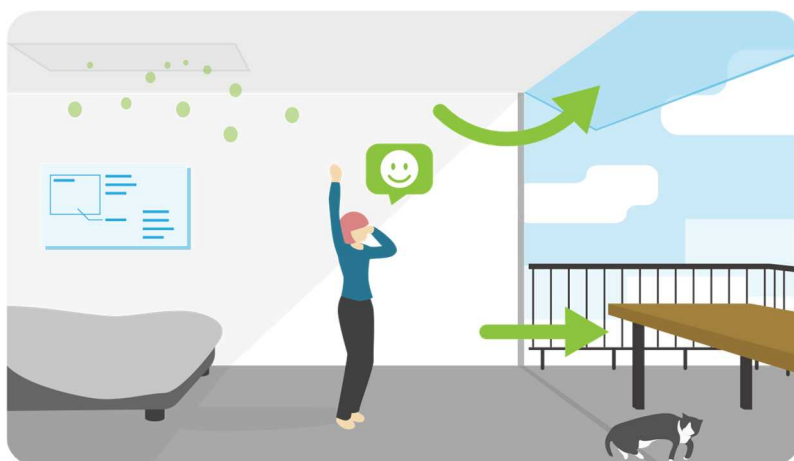


図1.2 状況に合わせて可変する空間

空間の情報をソフトウェアがふんだんに持ち、室内の可動域も広いと、人の能力に合わせた場所の提供も容易になる。車椅子利用者にはフラットで十分な移動領域を提供し、視覚に障害がある人には「今」の空間情報をその人が持つデバイスに提供することで、初め

での場所でもひとりで快適に移動できる。

可変性の高い室空間は利用用途によって異なる環境の提供も可能である。飲食店やオフィスでの打ち合わせのときは、利用人数によって間仕切りが動くことで各個室のボリュームが変化し、プライバシーを保って利用ができる。その時の用途によって柔軟に空間を変えられることで建物の共用もしやすくなり、昼は職場・夜は社交スペース、のように同一空間の時間による用途変更も可能となる。

時代によって移り変わる生活スタイルや働き方の変化にも、この空間は柔軟に対応する。まちの広場空間や建物の内部は、短期間で容易に変更ができるようになっている。これは建設のユニット化や将来の変更をあらかじめ考慮した建物設計に加え、オンデマンド生産の整備や空間を環境と合わせて3次元データで管理する情報インフラの恩恵が大きい。これにより店舗として整備した空間を住居に転用することや、室内のしつらえの変更、IoT設備の交換も容易である。個人が自分の環境に合わせて設備や什器パーツを選んで気軽に変更できるようになる。

用途の変更により建物を安易に建て直すのではなく、一つの建物を、そのときの先端技術を十分に使いながら利用者のニーズも満たし、長期に利用することが可能となる。このような建物空間はピカピカの新建築ばかりではない。それぞれの地域にある建物ストックを時には生かし、また新しく建設する建物も経年への配慮をすることで、意匠の好みも選択肢が広がる。古いながらも優れた意匠性を有する古民家を改装してこれまでの歴史を継承しつつ最新技術の利便性を享受できるサイバー空間とも融合した空間など、これらの多様なライフスタイルと嗜好に応える個々の拠点も、個人レベルのニーズに合わせてカスタマイズできるようになっている。個人が積極的に自分の暮らしの場となる空間を選び、働きかけることができるようになり、それぞれの人にとって最適な空間を創造することが可能となる上に、このような空間と個人の対話ともいえる関係により、自分の暮らしの場に愛着を感じ生活における精神的な充実感をも得られる。

現時点ではスマートホームやスマートシティの構想の中で、高度な情報技術を使った都市生活の一部は描かれて、実現に向け動き始めている。建物空間のここまでダイナミックな可変性についてはこれらの構想では触れられていないが、動く大型建造物の事例はスタジアムの可動式ドーム屋根などに、内装変更の容易化はメタボリズム建築¹などに萌芽が見られ、技術開発による各要素技術の製品化やコスト低減により普及が可能だと考えられる。2050年には上記のような「場」が日本のどこでも実現できることを目指すが、2030年の時点でも、現在より多様なデータを用いた設備の出現や、可変性の高い室内が先進的な建物として実装されて提供できるだろう。天候や個人のバイタルデータ・行動履歴を用いて利用者に必要な環境を予測し室内の温熱環境を整えるような、設備の高度なソフトウ

¹ 古い細胞が新しい細胞に入れ替わるように、部屋やユニットが更新されることで、社会の変化や技術の発展に対応する考え方の建築様式

エア制御も早期に実現可能だと考えられる。

2.2. 様々な生活スタイルを実現できるまち - 地方多拠点空間の共有が容易な社会

Flexインフラでもたらされる柔軟性の高い実空間を有する社会では、活動空間の選択肢が増えることで生活拠点の変更に自由度が高まり、人々の拠点選択にも流動性が増す。例えば、個人の好みや設定として持ち運べ異なる場所にそれを適用することで、拠点を変更しながら利便性は損なわずに生活を続けることができる。個人のライフステージやジョブ、または気分の転換で「居たい場所」は変わる。流動性の高い社会では、その時に気軽に拠点を変更し、またはサイバー空間も含めた複数の拠点を行き交うことで、豊かな生活が実現する（図11.3）。

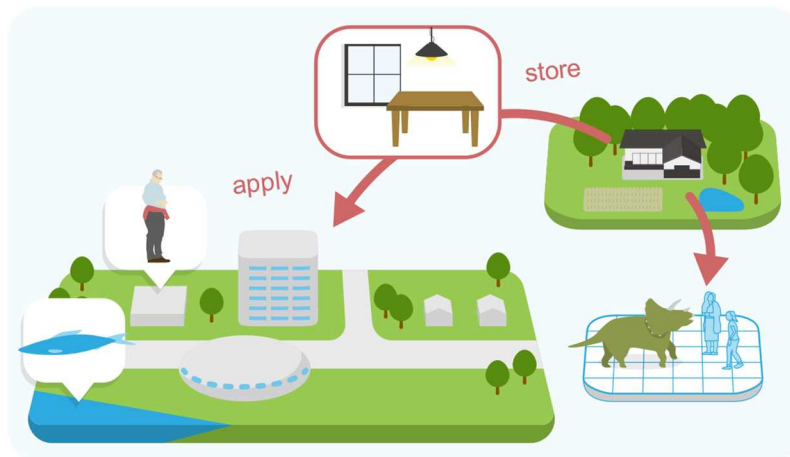


図11.3 拠点を飛び交う暮らし

この社会では拠点の選択も2021年現在とは意味が変わってくる。この頃には情報と物流はさらに発達し、サイバー空間を通じて実空間の拠点が異なる人たちとニーズに合わせて交流ができるようになり、日本のどこにいても公共サービスや医療、買い物の利便性を享受できるようになっているであろう。実空間の拠点は「それでも実際に会いたい人」や「その土地が持つ地理的・文化的な特性」、「拠点となる実空間、つまりまちや建物そのものの魅力」を基準に選ばれるようになる。これらのwell-beingに直結するともいえる観点は、2021年現在でも実際には個々人のニーズとして存在しているにも関わらず、他の物理・社会的な制約で優先度が下げられていたものであるとも言える。拠点を選ぶときに参考になるような、日本の個性豊かな各地域のプロフィールをまとめた新しい地域の俯瞰の仕方も出現するだろう。

現在の大都市一極集中ではなく、個々人が好みに合わせて「居たいとき」に「居たい場所」で時間が過ごせるようになることは、生活に多様性を生み、また地域にも多様性と活気もたらす。まずは2030年に、都市部の一角やいくつかの地方都市でこのような暮らしを

試行できる拠点の整備を目指す。また、サイバー空間も含めた新しい拠点選びのかたちも始まっているだろう。提案する2050年のFlexインフラは、特定の建物や特区だけでなく日本のどこでも、このような情報インフラの利用と可変性の高い空間の構築を実現するものである。それぞれの地方の特性を活かすことで大都市のみが恩恵を受けるのではなく、すべての国民が幸せを享受できる社会となる。

2.3. 気象災害でも安心して生活が送れるまち

気象災害の激甚化やコロナ禍のような予想外の社会変動は、一瞬にして今までとは異なる生活を強いられる。柔軟性の高い空間を整備しておくことで、このような災害や未曾有の事態でも生活を短期で立て直すことが可能となる。日常で利用していた空間を災害時には一時避難場所や災害の対策拠点に転換して初期対応にあたり、予測できる災害については事前に安全な場所に拠点を移すことでそのまま生活を続けることさえ可能となる（図1.4）。別の用途で利用していた空間を社会で融通し生活拠点に変更することで、現在のようなプライバシーと十分な設備のない狭い割り当て空間での長期の避難生活は、過去のものとなっているだろう。

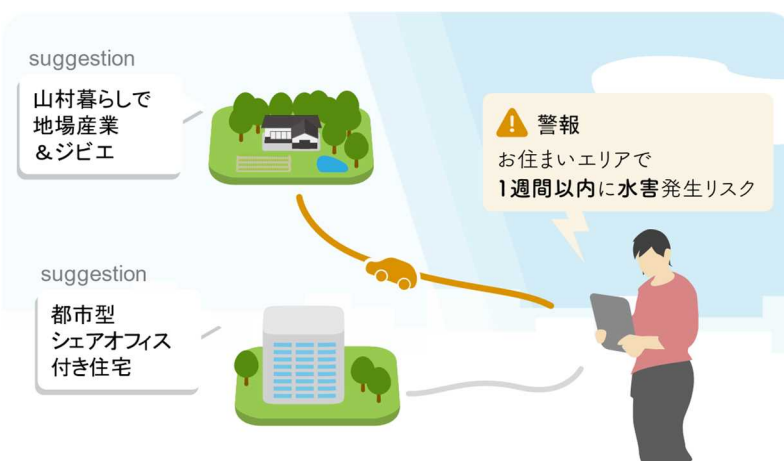


図1.4 災害リスクに備える拠点移動

さらにこの社会では建物や車、ウェアラブル端末、衛星画像などの多種多様かつ高度化したセンシング技術で気候や大気環境、人流などのデータが、オープンな情報インフラに逐次蓄積されている。これらは個人情報保護された上で取得可能になっており、取得されたデータを用いて災害の最新予測が公開されるとともに、日本丸ごとの人流解析が行われ、混雑の緩和や災害時の避難最適化などに利用される。気象災害の予測精度と個人データの情報量が上がることで、各個人と地域の状況に合わせた細やかな避難提案も可能となる。予測精度の向上は事前の災害対策も促進する。これらは予測の計算精度の技術進化だけでなく、オープンな情報インフラにより多様なセンシングデータや高精度のまち・建物

の空間情報などの複数のデータを広く利用できることによって実現する。2030年時点でもデータ共有の整備さえ進めば、このような高度な災害予測とその対策への利用は十分に可能である。

また、建物の動的な変容は災害にも威力を発揮する。災害予測に合わせた安全性確保のための建物外装や形状の変化が実現されている。例えば2050年の頃には、暴風の方角や強度などの気象予測とまちの3次元形状や部材の情報からそれぞれの建物にかかる風の力を予測しその風をいなす角度に外装材の角度を動的に調整したり、豪雨に合わせて街の生活動線に屋根を架けたり止水版を自動展開したり、まちが災害を予測し堅牢になることで安心して生活が続けられるようになるだろう。

2.4. オープンな情報インフラと高いモジュール性によって広がる多彩なサービス

上記の柔軟な「場」の実現を下支えするシステムが、提案にも掲げる自律進化するオープンな情報インフラである。これは特定の企業や行政機関に依らずそれぞれの企業や個人などが取得したデータをプライバシーは保護した状態で広く共有し、共通のAPIを通じて利用できる情報システムである。現在のインターネットのように、全てをコントロールする主体は不在でありながら総体して成り立つことを志向している。

高度な予測や「今」を捉える様々なセンシングデータ取得は一機関では決して為し得ず、複数の機関が取得した多種多様なデータを自由に利用できる経済的な循環が不可欠となる。この社会では個人のデータを一企業やサービスに預けることなく、個人それぞれが自己に関するデータの全てを俯瞰して管理できるようになり、また一方で土地や建物などの社会全体で共有するデータは、APIの共通化で高い汎用性を有しながら売買をすることでビジネスモデルとしての運用が成り立つ。またセンシングした一次データを高度に統合し新しい予測データや最適化データを販売したり、そのデータを用いたサービス・ソフトウェアの提案をしたりといった新規事業の参入も自由に行える（図1.5）。一企業や幾つかの企業の連合による閉じたデータ・API共有ではその企業内の技術や領域を超えるサービスは現れない。自由に使えるデータの存在により、新たな発想での想定もしていなかったサービスの展開や、特定地域の住民のニーズを満たす地域限定サービスの出現も期待できる。

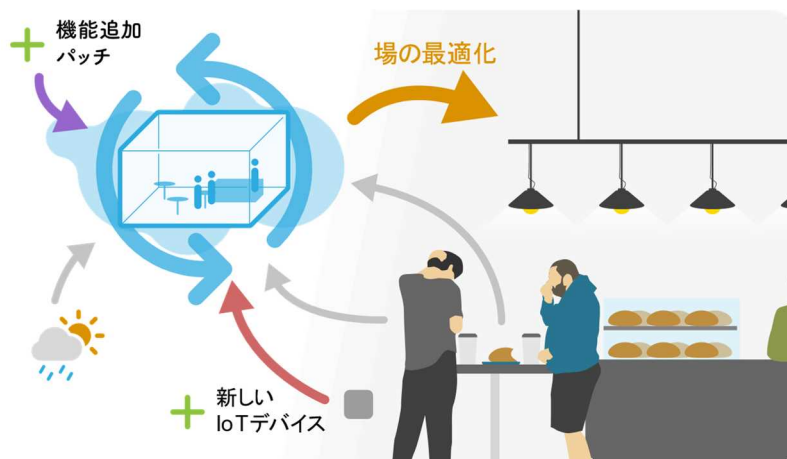


図1.5 オープンなデータ提供・利用によるサービスの自律進化

また建物空間においても、空間のAPIとも言える接続部のモジュールを整備することにより、個人レベルでもそれに適合する部材の作成が容易となり、またメーカーを跨いだ設備の取り替えも容易となる。設備や建物、IoT機器のメーカー間の競争力が高まるとともに、利用者にとっても「新しく発売されたあの製品は、私の部屋には使えない」といった不満がなくなり、実空間設備の更新が促される。個人が3Dプリンタ用の什器データを販売し、それを別の人が設置する部屋に合わせて自分なりのカスタマイズを加えながらメーカーに発注して自分の空間に取り付ける、このようなことが日常に行われるようになる。主となる業で生計をたてながら家具モデルデザイナーとして活躍することや、趣味として解析技術を磨いて予測精度の向上に貢献するような、複数の本業を持つライフスタイルも現れるだろう。

その際個人データや特定の領域のデータについては、プライバシーの確保とデータ所有の明確性なしには成り立たない。個人や建物のデータは一企業に委ねるのではなく、個人や建物などのエッジ側で管理・処理し、各サービスが共通のAPIを通じて、プライバシーとデータの正しさを保ったまま、そのサービスが必要とする最低限の加工データが受け渡される仕組みが整えられている。

データのオープン化は、個人の有志活動やスタートアップの新規ビジネスの参入障壁も低く、高い公共性と透明性を保ちながら健全かつ爆発的な技術促進が期待できる一方で、ビジネスモデルとして成り立つ多様性を保ったサイクルを実現するためには最初の着火剤が必要となる。ムーンショット型研究開発で2030年までにまずはプロトタイプとなる仕組みを構築することで、その後は企業や個人の自由参入による自律進化の実現が進むことが期待できる。2050年には、現在オープンソースのソフトウェア開発で実現しているこの参入の自由性による進化の促進が、私たちの暮らす「場」の技術でも多様性を持って実現される。

3. 当該 MS 目標を設定した理由及び、目標達成の社会的意義等

3.1. 当該 MS 目標の設定や目標達成に向けた取組みが今必要である理由

現在に至るまで建物空間は、建設時または大規模な改修時の綿密な計画をもとに建設がされてきた。大型の構造物で成り立つ実空間の変更は容易ではなく、完成後は何十年と使われるのが通常である。翻って、近年の情報技術の進化はめざましく、IoT機器などの情報技術を活用した設備は数年で陳腐化してしまう。また個人や経済活動で要する空間も、社会情勢や個人のライフステージにより本来は変化するものであり、固定的な実空間はこの変化に対応しきれず使用に不便も生じる。気候変動により激甚化をする気象災害や我が国では避けられない地震災害、または今回のコロナ禍など、災害により突如として今までの生活から変更を強いられるリスクも固定的な実空間において課題である。

2050年には全国の居住地域の約半数で人口が50%以上減少すると見込まれており [1]、人口が増える一部の都市部を除き、多くの地域・地方が人口減少という課題を突き付けられている。またそれに伴い空き家問題も深刻化 [2]している。一方、2019年から本格的に施行され始めた働き方改革 [3]にも象徴されるワークライフバランスに対する価値観の変化やリモートワークの普及を契機に、都心の高額で狭隘な空間を離れ新たな暮らし方を求める地方への転出も見られ始めた。現在まで続くコロナ禍を経験した今、リスク回避の意味も含め、こうした企業拠点・生活拠点の複数化、リモートワークの推進は今後進めるべき社会の姿として重要な位置づけにある。多くの国民にこうした環境を提供するためには、現在の居住地と仮想空間を含む他の拠点を繋ぐ基盤が必要であり、多様な人のニーズや感情をも踏まえたフレキシブルな空間整備が必要と考えられる。

2020年に内閣府が掲げたスーパーシティ構想 [4]では、地方創生をキーワードに先端的な情報技術を活用したまちづくりを国家戦略特区として試行する。AIやビッグデータなどを用いて国民の暮らしの向上を目指す先端的な取り組みではあるが、社会システムの整備が主となり、実際の暮らしの場となる建物のようなフィジカル空間に関する革新的な技術構想はみられない。

可変性を持つ建築については、今までにも少ないながら事例はあるが、それらは大型施設やコンセプト建築として人の判断と操作で空間を変容させるものが主である。センシングや情報技術で状況を高度に解析できるようになった今はじめて、フィジカル空間の高度な制御が日常の技術となることに現実的な期待が見え始めた。建物制御は空調制御や自然換気まではAI制御できているが、用途に合わせた可変空間までは議論が進んでいない。また、制御も建物単位であり、まちや街区レベルの制御は手が付けられていない。

こうした社会基盤を含む空間整備は、現行の建築基準法を含む法制度では規制を受けるものもあり、時間をかけて実証実験を行ったうえで制度設計をしてゆくことも必要である。Flexインフラでは様々なデータの活用が考えられるため、共通化されたAPIに基づくIoTやAIの技術開発も必要であるが、特に可変空間の実現は建築基準法をはじめとする現行のルールにしばられており、可変空間の研究開発と共に可変空間のためのルール作りも

進める必要がある。よって、2050年までに可変空間技術を社会実装するためには、2030年の時点では技術的な目途が立っている必要がある。

3.2. 目標達成の社会的意義

本提案の目的はすべての人が関わる仕事・暮らしの「場」の改善である。多様性を許容し、将来の暮らしの変化を受容できる社会は、将来においても普遍的に求められるものである。また災害に堅牢で安全・安心に生活がおくることができる社会は、災害大国でもある日本においてすべての人の望みである。

私たちの暮らしに密着する建物・まちというフィジカル空間の革新的な進化は、生活の利便性の向上をもたらすのみではない。それぞれ「居たい場所」を得られることや「自分の好みに」自らがカスタマイズできることは、自分の暮らしと場に愛着を生み、幸福感とwell-beingな暮らしを育む。地方創生においても、地域の個性やストックを活かす社会のあり方はコミュニティの醸成と活性化を促す。単なる回顧主義でなく、高度な技術的投資で機能性を高めることで、人の幸せに資する人間中心の「場」を実現できる。

本章3.1.で挙げたように私たちの暮らしの場は転換期を迎えており、多くのステークホルダーとすべての国民の生活に係る課題であるにもかかわらず、既往のムーンショット目標1-7には暮らしの場であるまち・建物や災害に対する安全・安心に関する目標がない[5]。建物や暮らしは土地に密着している。普遍的な自然科学技術と異なり、我が国の風土と建物という固有の資材を活かすためには、我が国が自ら技術投資をする必要がある。本検討を経ての目標追加が強く求められる。

3.3. 当該 MS 目標の達成に向けた社会全体の取組み概要

本章2.1~2.4に記載したシーンを実現するためには、建設や通信インフラ、IoTデバイスやAI、UI²/UX³など多岐に渡る産業の技術者や関連技術分野の研究者、幸福感やwell-beingの観点での議論に必要な心理・生理・社会学関連の研究者が連携して、それぞれの分野に落とし込んだ課題を解決するとともに、共通ルールや標準化が必要なもの、国際連携が必要なもの、法令対応が必要なものは、それぞれ取組みが必要である。以下にこれらの取組みをFlexインフラの実現に必要な構成要素である柔軟なフィジカル空間、拠点を自由に選ぶ暮らし、センシングによる「場」の最適化、真にオープンなデータ共有の4つに分けて記す。

² User Interfaceの略。ユーザーと製品やサービスとのインターフェース（接点）を指す。

³ User eXperienceの略。ユーザーが製品やサービスを通じて得られる「体験」を指す。UIおよびその使いやすさはUXの中の一要素である。

3.3.1. 柔軟なフィジカル空間

柔軟なフィジカル空間を実現するためには、空間を構成する建物の部材が変形する技術や、様々なセンシング情報や人のニーズにより空間の環境を制御する技術が必要である。フィジカル空間を大胆に変化させるには、家具や間仕切りの移動をはじめ、ユニット化されて自由な空間の組合せができる建物や、映像投影などの設備や電氣的に材質を変化させることで室内環境を変容させる技術が要素として挙げられる。さらに柔軟性を高める方法としては、サイバー空間の活用もある。フィジカル空間とサイバー空間を融合させ、その境界を感じさせない空間を形成することができれば、サイバー空間も生活空間の一部として溶け込ませることができる。

これらの空間をそれぞれの人が思いどおりに変形・制御するためには、ユーザ中心の原則に則り、ユーザの心理や状況に応じたUX設計を行うことも重要な技術要素である。高齢者や障がい者を含めた様々なユーザを想定し、ユニバーサルデザインやインクルーシブデザインの観点を持った開発が必要である。ユーザの好みを情報として持ち出し別の空間で再現する技術においては、記録するユーザの好みの要素や何を再現すると「同じものが再現された」と感じるかといった心理学的な視点の研究も必要となる。

以上の技術は、あらかじめ決めておくべき空間の用途がニーズに応じて刻々と変わることが前提となる。当然ながら現行の法体系ではカバーされておらず、関係省庁との法令対応に関する協議も必要となる。

3.3.2. 拠点を自由に選ぶ暮らし

Flexインフラが実現した社会では、個々人や企業が拠点を自由に選び、ニーズに合わせて気軽に移動する生活や、時には複数の拠点を持つ生活が日常となる。しかし現行の法令では人は一つの自治体に住民票を持ち、その一箇所に納税をすることで行政サービスを受けることが前提となっており、短期間での頻繁な拠点の変更や多拠点への関わりは想定されていない。流動的な拠点移動を容易にする自治体のあり方や法令の検討も求められる。

また、多拠点型のライフスタイルを実践する際には場を選択するための情報が必要となる。場の特性を表す情報としては歴史・文化・地理に関する情報などが挙げられるが、十分にデータ化されているとは言えない。こうした不足している人文地理情報をデータ化し、活用サービスを試行することも重要な課題である。この新しいライフスタイルでの人の生活や「場」と個人の関係など、目標に掲げる「多様な状況の人が幸せを享受できる」社会のあり方を調査し技術開発に還元する心理学・社会学の研究も求められる。

3.3.3. センシングによる「場」の最適化

Flexインフラが目指す場の最適化のためには、状況を感知 (sense) し将来を予測する必要がある。多様なセンシングデータと空間データを統合し、いかに最適化を図るかはAIなどの情報技術を要し、また何を制御しその最適環境を作り上げるかについても研究開発が

必要である。センシングデータを活用した場の最適化の代表的な適用対象として、災害対策サービスや環境制御システムに組み込み、機能検証する必要がある。

収集したデータは何らかの処理が行われてユーザへのサービスに反映されるが、データをどのような形でユーザにフィードバックするかによってサービスの質は全く変わってしまう。こうしたセンシングデータの活用においてもUI/UX設計の技術要素は重要である。

3.3.4. 真にオープンなデータ共有

現在国内で推進しているスマートシティやスーパーシティでは、個人情報保護の観点で、ある程度制限を受けた状態でデータ基盤が構築されている。Flexインフラを実現するための情報インフラは、扱う情報のすべてをオープンデータとして扱うことで、個人レベルや起業して間もないスタートアップでもアプリケーション開発に参入でき、次々と新しいサービスが生み出される姿を目指しているが、扱う情報のプライバシーは安全に保護しつつ、共通化されたAPIに基づいた情報インフラは、まずプロトタイプを構築して動作検証する必要がある。接続するオープンデータは多種・多様なものが対象となるため、情報インフラをその都度集設計するのではなく、自律進化により機能向上する仕組みが必要である。不正アクセスに対するデータ保護機能も必要であることから、ブロックチェーン等を利用した機能もこの自律進化型情報インフラシステムに機能を組み込んで検証することも必要である。

さらにデータの所有者に関しても課題がある。ある建物空間に訪れた利用者に何らかのサービスを提供する場合に扱いたいデータとして建物空間の環境データ、防犯カメラデータ、利用者のウェアラブルデバイスやスマートフォンのデータなど多岐に渡るが、これらはそれぞれビル管理者、ウェアラブルデバイスやスマートフォンのサービス事業者といった異なるデータ保有者が介在している。これらのデータを横断的に活用する場合は、それぞれのデータ保有者、データの種類によっては利用者に使用許諾を求める必要があり非常に煩雑である。建物が保有しておくべき情報はビル管理者に、利用者が保有しておくべき情報は利用者本人に集約して保有する仕組みを構築することで、こうした煩雑さを解消することも課題である。

4. 当該目標達成によりもたらされる社会・産業構造の変化

4.1. 住民や企業の拠点選択

暮らしや仕事の間や空間を容易にカスタマイズできる社会や多拠点化することが容易になった社会では、ライフスタイルが従来とは大きく異なる。住民によっては、例えば平日は企業で仕事をし、週末は農村部の拠点に移動して農作物の手入れや、建築に興味がある人が古民家を自分で改装するといった姿は珍しくはなくなる。リモートワークやオンラインショッピングの普及も伴い、通勤や機能上のみでの必要性のための遠隔地への移動は減少し、余暇活動や、より人や実地を体験する必要がある場所への移動が増加する。

企業においては、これまでは地方都市にサテライトオフィスを整備して、一定期間、企業活動の拠点を移す取り組みはあったが、上記の社会では拠点の移動が日常的になる。特に拠点間の距離が近い場合は、日単位や時間単位で拠点を变えて企業活動を行うことも可能となる。

複数の拠点を持つ社会では、住民も単独の自治体のみとの関係ではなくなる。複数の拠点に住民票やそれに準ずるものを置いて、別の拠点から関わりを続けることとなるだろう。サイバー空間を通じて遠隔から地域のイベントを支援する、あるいは遠方の拠点の馴染みの生産者からサイバー空間を通じて定期的に食材を購入するなど、その時その場所に住んでいない人と土地との関わりが生まれる。

これらのライフスタイルの変化と拠点間の行き来の活発化のため、飲食や居住に関連するサービス、多拠点で業務を行うことを前提としたクラウドサービス、簡単に移動するためのパーソナルモビリティを含む交通手段など様々な業種で多様化が起こり、これらに関連する新規産業の創出も期待できる。

4.2. オープンなデータ共有による産業の活性化

自律進化型の通信インフラには様々なオープンデータが接続・結合されるため、通信やアプリケーション開発、または設備機器などのデータを扱うすべての産業において参入の機会が増加する。企業の新規事業という形だけでなく、スタートアップの参入はもちろんのこと、ボランティアベースの個人の参入も容易になる。オープンイノベーションによる協業も同様に裾野が広がり、順当にAPIの共通化が進んでいけば、海外の機器メーカーの導入も容易になる。国内外を問わず、優れた製品同士を組合せたサービスも提供されることとなり、これらの通信事業者、個人ベースのものを含むアプリケーション開発者、関連する機器メーカーや商社など多くの産業でビジネスが活性化する。

II. 統計・俯瞰的分析

1. 当該 MS 目標を達成するための課題（科学技術的・社会的課題）や必要な取り組み

MS目標の達成のための課題を、科学技術的課題、国際連携が必要な課題、分野・セクター間で連携を要する課題、ELSI（倫理的・法的・社会的な課題）に分類した上で、1章3.3に記載した社会全体の取り組みの構成要素ごとに整理し図II.1に示す。



図II.1 MS目標達成のための課題俯瞰

科学技術的課題としては、柔軟なフィジカル空間の創出に必要な構造部材や非構造要素の変形機構をはじめ、柔軟な空間カスタマイズの仕組み、建物環境の制御UIの設計、およびサイバー交流のためのフィジカル空間などがある。拠点を自由に選ぶ暮らしに関しては社会課題が主となるが、科学技術的課題として、風土や人文地理のデータを活用した拠点のプロファイルと提案の技術開発が挙げられる。また、データ活用による「場」の最適化としては、センシングデータによる環境制御や災害対策も課題である。さらには真にオープンなデータ共有のための自律進化型情報インフラの試行やプライバシー面で安全なデータ管理といった課題も克服する必要がある。なお、検討の過程で既存の建設技術の延長上にある技術や様々なAIやIoT、通信関連技術も話題に上ったが、Flexインフラと関わりなく発展・進化するものについては割愛した。

国際連携が必要な課題としては、日本が取り入れるべき海外のスマートシティの成功例の情報収集や、国際工業規格との互換性や優れた国産技術の海外展開といった課題がある。

分野・セクター間で連携を要する課題としては、変形建物の可動部や接合部の仕様の共通化や、建物制御用APIの共通化といった課題がある。

ELSIとしては、変形する建物についての建築基準法や消防法の整備や法改正、オープンデータの共有に障壁となっている個人情報保護の在り方、多拠点型の生活を選択する際の住民票や公的サービスの問題がある。

2. 当該 MS 目標を達成するために取り組むべき研究開発の俯瞰

図II.1に示したMS目標達成のための課題のうち、科学技術的課題とそれぞれに関連する分野との関係を図II.2に示す。分野は建築、設備、材料、情報、センシング、AI、UX、心理、モビリティ、地理学、都市計画、社会学、社会システム、経済などが挙げられる。



図II.2 関連する分野・技術群の構造

2030年までに実施する研究開発課題について、ブレークスルーとなるポイントを表II.1にまとめた。

表II.1 科学技術により克服すべき課題

大項目	技術項目	ブレークスルーとなるポイント
柔軟な フィジカル空間	フィジカル空間の 動的な変容	展望レストランや開閉式の屋根を有するドーム球場等で建物の変形機能は一部実現されているが、空間の容積変化を伴うような仕組み・構造はまだ実現されていない。その基礎研究に相当する展開構造物の研究は進みつつあるが、居住空間用途では実用化されていない。可動部分の耐久性や稼働時の安全性・静音性も含めた研究開発や、建物の変形に伴う設備機器や配管部分の機構についても研究開発が必要である。

大項目	技術項目	ブレイクスルーとなるポイント
	柔軟な 空間カスタマイズ	<p>変更の容易性と生産効率性のためには建築のユニット化・モジュール化が必須となる。また、小型の単一素材については個人でもCADデータを入稿することで3Dプリンタでの出力や木材カットができるサービスが現れ始めた。カスタマイズについては、既存の建設ストックの利用も課題となる。</p> <p>空間の柔軟なカスタマイズ性の実現のためには、短工期での施工と、ユーザのニーズに合わせた個別の建具・什器などの生産が望まれる。モジュール化された空間データや先端のUIと連動した簡単なモデル作成システム、モデルデータの共有、複合的なパーツやより多彩な材質の加工などの技術を実用化する研究開発も必要である。</p>
	空間環境の 変容と持ち運び	<p>環境の変容と持ち運びについては、ソフト的な変容・持ち運びと、物理的な持ち運びが考えられる。後者については現在はMaaSの提案として車をユニットの一つとして建物に組み込み移動可能な空間とする事例も出てきている。ただし、人の好みに合った空間を持ち運ぶといった観点はまだ入っておらず、コンセプトワーク等を含め、実現できる形のものを検討する必要がある。</p>
	建物環境の制御UI	<p>IoT家電を統合的に操作するモバイルアプリケーションなどは存在するが、まだ実現されていない空間の動的な変容にまで踏み込んだものはない。建築環境をそれぞれの人が心地よく、思いどおりに制御できるように、UI/UX設計を行う必要がある。</p>
	サイバー フィジカル空間 の接続	<p>近年の情報技術の進展やコロナ禍を受けてネットワークを通じての人々の交流機会が急増している一方で、そのようなサイバーコミュニケーションを行うためのフィジカル空間の検討は十分でない。実際の住居・オフィスなどでサイバー交流を実施するためのしつらえ・設備などについての研究と実証が必要である。</p>

大項目	技術項目	ブレークスルーとなるポイント
拠点を自由に選ぶ暮らし	拠点のプロファイルと提案	人が拠点を選ぶときに、個々人の「好きな」場所を見つけるために土地の性格をデータ化し適切に情報として提示する仕組みがあると良い。気候や地形データのみならず、歴史や文化遺産・食文化など人文地理的な情報のデータ化、また人が土地の何に惹かれるかについて研究開発が必要。
センシングによる「場」の最適化	空間と人のセンシングとその利活用	人のニーズにより自動制御で「場」を最適化するには、センシングデータの集約と、それらを利用したニーズの理解、さらにそこからの「場」の制御が必要となる。空調機や照明、液晶ガラスの透過特性のAI制御などは既に実現されている。空間や人のセンシングも既に多くあるが、そこから統合された空間-人の関係を得ることは技術的課題が多い。さらにFlexインフラでは、制御トリガーとしてまだ適用されていない人のニーズや感情等を制御のトリガーとして考えており、対象となるセンシング技術を適用したPoCを通じて一連の機能検証をする必要がある。
	センシング情報による広域最適化	近年、衛星データの位置や高さの精度が大幅に向上し、屋外の様々な環境データの活用が始まっている。例えば、都市部の熱画像データを入手し、即時熱環境シミュレーションでヒートアイランド現象の危険度マップを提供し、熱中症対策サービスに活用するようなことも可能。
真にオープンなデータ共有	自律進化型情報インフラの実現	Flexインフラで目指す自律進化型の情報インフラは、構想および一部の機能は試行されているものの、本格的な機能実証はこれからである。特に建物や空間に関する様々な制御・サービスの情報インフラとしてはまだ検証されておらず、詳細な機能は作り込みながら小規模な事例から実証をスタートすることでその価値を共有し、先行エリアや全国への普及に繋げる必要がある。

大項目	技術項目	ブレークスルーとなるポイント
	プライバシー安全なデータ管理	Flexインフラでは、モビリティで収集される位置情報やカメラ画像データ、人流や個人のパーソナルデータ、設備機器で収集される環境データなど様々なデータがオープンされ、様々な用途に活用することを想定している。現状では、制御信号はMQTTプロトコルで標準化されているものの、個人情報に関する使用許諾の問題や、データセキュリティの問題があり、データのオープン化にハードルがある。オープンデータの活用の幅を広げ、その利便性を早急に認知してもらうためにもパブリックデータとプライベートデータの切り分け、それぞれのデータの保有の仕方、相互にデータをやり取りするためのAPIの整備などの技術を開発・検証する必要がある。

3. 当該目標に関連する研究開発の動向（全体）、海外動向及び日本の強み

図II.1にまとめた関連する分野・技術群について、それぞれの観点から研究開発の動向や現状の課題について報告する。

3.1. 柔軟なフィジカル空間

3.1.1. フィジカル空間の動的な変容

日本建築は、従来内部空間を限定せず、その時々ニーズに応じて居間、寝室、客間と使い分けて使用されていた。それは「ユニバーサルスペース」という概念であり、ある時は大空間を、ある時は仕切られた空間として活用できるよう、壁ともドアとも異なる、ふすまや障子で構成されている。また家具においても、ベッドではなく自由に移動が可能な布団や、ローテーブル、座布団などが活用されている。元来日本人が行ってきた文化や生活様式そのものがまさにニーズに合わせた生活空間の変容の場であった。

現状の建物でも、すでに可変・可動しているものは多い。例えば、エスカレータやエレベータがそうであるし、回転レストランや、可動橋、大型建物でいえば、ドームスタジアムの屋根の開閉や室内ドーム空間への芝グラウンドの移動（札幌ドーム：図II.3）など大小さまざまである。海外では、ドバイにおいて各フロアが回転する超高層ビルも構想されている。建物と同規模の飛行機や客船はまさに動く建造物であり、また、それらを整備するメンテナンスドックにおいても、整備用の足場が自由に可動し連結するような仕組みが組み込まれている。以上のように、巨大な構造物が可変すること自体はすでにあちこちで行われており、技術的に不可能なものではない。一方、これが簡単に行えるか、という点ではまだまだ技術的な課題は多い。



図11.3 札幌ドーム [6]

建物空間のフィジカルな可変性は、建物の構造を支える構造躯体の可変と、それ以外の非構造躯体部分での可変、さらには建物以外の什器類の可変に分けられる。一般的に前者に近い方が動的な変容は技術的に困難である。

その中、注目されているのは展開構造物の技術である。宇宙衛星では地上では小さく膜を折りたたんでおき、宇宙でそれを大きく広げて活用することが必要なことから発展した膜面展開構造技術が近年大きく進化している。本技術は日本で発展し、もとはミウラ折り [7]と呼ばれる折り畳み方法によって1方向の力を加えることで折りたたんだ膜が瞬時に2次元展開するという革新的技術から深化がスタートした。その後、十亀折り [8]と呼ばれる3次元展開構造物が開発され、すでにこれを活用した技術の応用としてベンチャー企業で様々な活用が試みられている。近年さらなる進展としては、これまで薄い膜のみであった展開構造が厚みを持った構造体に対しても数学的に展開可能なことが示され、実際に試作もされた。これにより、厚みを持った建物への応用や非構造部材以外への転用も今後可能となると考えられる。また、展開膜面同士を折り合わせることで、ある程度の強度が発現する折り紙建築と呼ばれるシステムが研究開発されており、これも建物内で活用することにより空間のダイナミックな変容に活用されることが期待されている。

建物内部に目を向けると多くの什器類がある。これらについても近年、物流倉庫などで棚を動かす自走式ロボットが活用されているが、それらをオフィスの什器類の移動に活用することは技術的には十分可能と考えられる。また、その機能を椅子に組み込むことによって自走する椅子 [9]などはすでに製品化もされている。そのほかにも海外ベンチャーにおいて、什器類を様々に動かすことで生活空間を自由に変容させるようなシステム [10]を

開発している企業もある。

3.1.2. 柔軟な空間カスタマイズ

建築物は作るのが容易ではないため、ニーズに合わせ短期での建設や改修が難しい。それを解消するために、製作工程を簡単にするためのユニット化やモジュール化、耐久性の異なる構造躯体とそれ以外を分けて考えるスケルトンインフィル建築などが発展してきている。

ユニット化については、プレファブ建築では、工場で生産した部屋を現地で組み立てることで、高い品質の建物を短時間で施工可能にする技術が活用されている。近年では、輸送に用いられるコンテナを活用したユニット化建築や、海外においては、ユニット化した部品を積み上げることで高層ビルを短時間に構築するような事例（例えば10階建てを29時間で建設 [11]や、大規模コロナ用病院10日間で建設 [12]など、いずれも中国）も見受け始めている。日本でもメタボリズム建築と呼ばれる将来のユニット交換を考慮した建築物が先進的に行われた。近年では電気自動車やMaaSの台頭により、車と家の関係性が変化してきており、車自体をユニットの一つとして建物に組み込むような事例も出てきている [13]。

建物を構造躯体部分（スケルトン）と間取り内装部分（インフィル）に分離し、耐久性を重視する前者と、ニーズに合わせて柔軟に取り換え可能な後者を合わせて持った仕組みとしてスケルトンインフィルが、1960年代オランダで考え出された。技術開発は実証研究まで行われた [14]が、その後普及するまでには至らず、臨機応変にインフィルをカスタマイズするような使い方はされていない。

また、近年の生産における革新技術としては3Dプリンタがあげられる。3Dプリンタは素材にプラスチックを用いた小ぶりの工業製品に対してのみだけでなく、大型の建物にも適用可能な無機材料や金属材料を用いた技術の開発が進んでいる。例えば、無機材料ではモルタル積層による人が居住可能な建物が3Dプリンタで試作されている [15]。金属材料においても、金属溶接による3Dプリンティング技術によって自由な接合部を作成した事例や、粉末による金属3Dプリンタによりジョイントパーツを自由に成型することにより、人間の力で組み立て可能な三角形パネルを組み合わせた移動式シェルターが作成されている [16]。

ニーズに合わせた建築空間の変容事例としては、2000年代に、都市の空洞化対策として都市部の収益性の低いオフィスビルを住宅に変更したいというニーズの高まりから、既存のオフィスビルをマンションへとコンバージョンするといったことが行われ、それに関する技術開発が行われた。近年では、国の登録有形文化財に指定されている文化資源を活かしつつ建物全体に残る装飾や建具を保存しながら、スタートアップ企業の集積やイノベーションを促すシェアオフィス空間の創出なども行われている [17]（図II.3）。

これまでの日本では世界に比べ、既存の建物を活かすよりもスクラップアンドビルドが

主流であったが、空間を容易に変更できるのであれば、SDGsの観点からも上記のようなリノベーションが主流になっていくと考えられる。

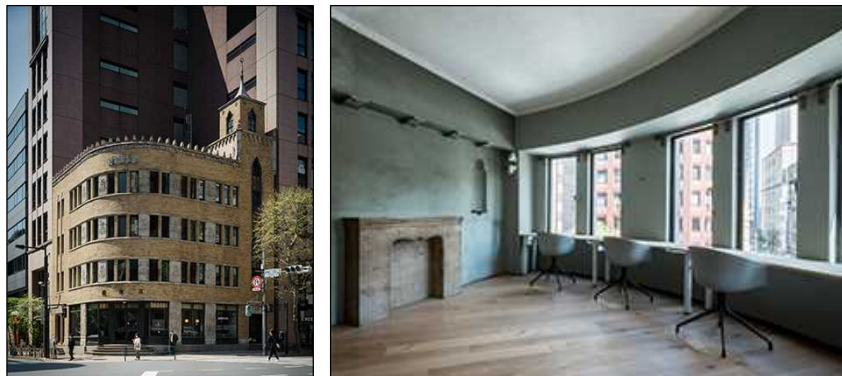


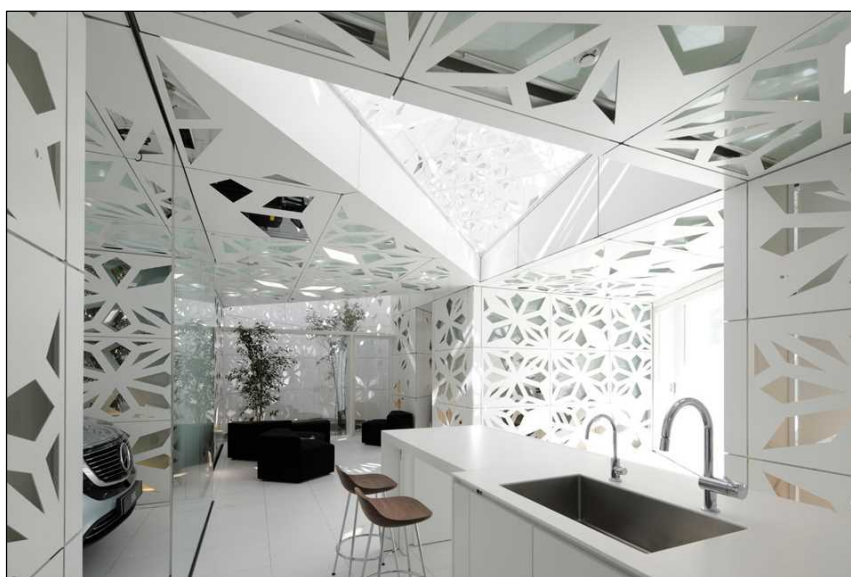
図11.3 既存オフィスビルの歴史を活かしたリノベーション（堀ビル） [18]

3.1.3. 空間環境の変容と持ち運び

建物内の環境変容としては、プロジェクションマッピング技術や、高精細モニターなどを活用する技術、それらを連動しさらに五感を刺激することによりあたかも本物の窓のように機能するシステムなどはすでに開発されている（例えば [19] [20]）。また、常に電力共有が必要なこれらの技術だけでなく、壁紙などであれば、画面を更新するときのみ電源が必要で、それ以外は紙と同様に消えずに残るE-Inkなども大型化している（例えば [21]）。これを壁紙に活用することで、常時の電力は不要で、その日の雰囲気に合わせて壁紙の変更を行いつつ、災害時には適切な避難指示などが可能な壁紙も可能であると考えられる。また、海外においては、横断歩道や道路標識に情報を直接表示する（例えば [22]）ことで、時間帯の交通量に応じた変化をさせるなども、すでに実証実験として行われている。

建物内での環境要素の変更には、必ず、建物内のセンサーや設備機器と通信機能との連動が必須である。これについては、いくつか技術は開発されており、例えば、建物内の様々なセンサーデータ、ならびに、空調といった設備機能を決められた通信プロトコルでやり取りすることで、誰もがデータ利用ならびにフィジカル空間の機能をサイバー空間側から動かせる技術などは建物にすでに組み込まれている事例 [23]がある。

先進的な事例としては、コンピューショナルデザインにより、24時間365日の室内光環境を計算しつくし、それに応じた1000枚以上の各自が異なる形状のパネルを配置した建物 [24]（図11.4）が実現しており、この中では、先ほどのセンサーデータと通信技術と組み合わせることで、建物内環境を感知して、例えば、人が来た時にガラスが曇ったり、透明になったり、さらには、スマートウォッチで快適な環境であることを「いいね」することで、建物がその状況を人間が心地よいと学習する機能などが備わっている。



図II.4 各自が異なる形状のパネル（EQ House） [25]

これらソフト的に環境を変容する技術は、3.1.1で挙げたフィジカル空間の動的な変容や3.3.1で後述するセンシングデータの活用を通じて、人の好みを設定として記憶し、それを新たな空間に適用することで、空間環境の持ち運びが可能となると考えられる。また、3.1.2で挙げたスケルトンインフィルとも連動することで、インフィル部分がユニット化され、車のような可動部分がインフィルとして活用される未来も想定される。このような移動する生活空間ユニットという概念はムーンショット・ミレニアプログラムの上野チームからも提案されており、将来におけるニーズと実現可能性が示唆される。

3.1.4. 建物環境の制御UI

空間が柔軟性を手に入れユーザにより操作可能となっても、その操作性が悪くニーズに合わせた制御ができなければ、目的を達成したとは言えない。また、操作した際の「心地よさ」も豊かな体験には欠かすことができない。

可動性のある設備の操作については、現在は専用のコントローラやPCやスマートフォンアプリと連携した操作が一般的だが、今日ではセンシング技術を用いたジェスチャーによるコマンド推定や自然言語による対話的な指示も実現している。他方で、2020年から日本でも義務教育でのプログラミング教育が必須 [26]となり、将来の世代は機械への複雑な指示が平易に行えるようになることも考えられる。

フィードバックや操作系の提示においても、3次元空間を画面という2次元で提示することは難しい。例えば、スマートフォンなどの個人所有デバイスだけではなく、壁面や実空間上に映し出されれば、複数の人が感覚的に共有できる情報を受け取ることができる。さらに制御できる選択肢の粒度や提示のタイミングなど、設計すべき項目は多い。

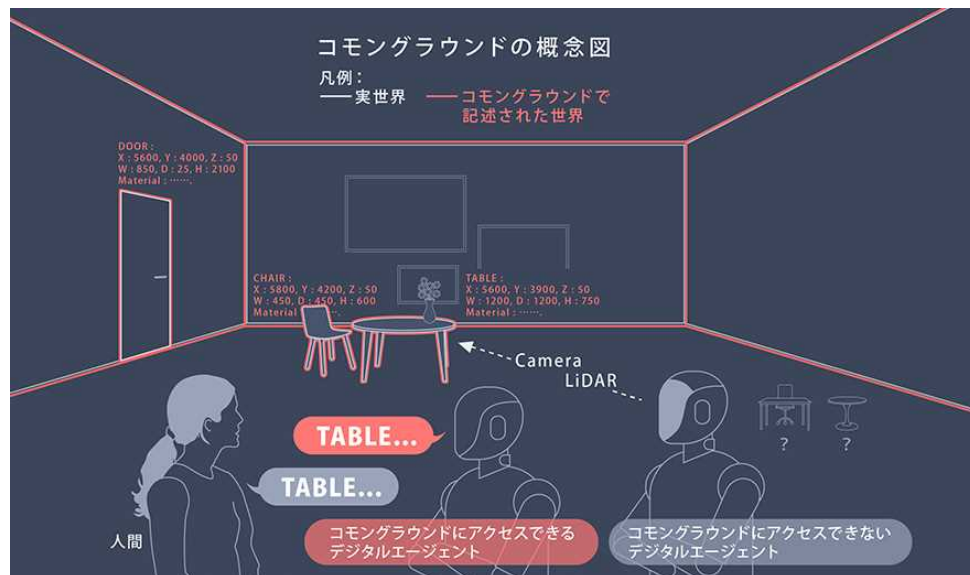
Apple社は2021年6月の技術者カンファレンスで次期OSでのスマートホーム連携の強化

を打ち出し、複数のIoTデバイスを統合した一体の体験と制御の進化を謳っている。UIについても独自のガイドラインを設け、それら設備をApple社のデバイスを通じて操作する際のデザイン思想についてまとめている [27]。空間や設備それぞれの可変性の確保のみでなく、それらを統合したときのユーザから見た体験設計の重要性がうかがえる。しかし、現状のスマートホームは主に後付けしたIoTデバイスの操作に止まり、空間そのもののダイナミックな可動性にまで議論には至っていない。

これら日進月歩の新技术を用いての“空間の動的制御”という過去にない事象の制御については、新たな研究開発が必要となる。

3.1.5. サイバー交流のためのフィジカル空間

我が国日本が目指す未来社会であるSociety 5.0 [28]では、「サイバー空間とフィジカル空間の融合による持続可能で強靱な社会への変革」が提言されており、IoTによってサイバー空間に収集蓄積されたセンシング情報を分析し、フィジカル空間にフィードバックする取組みが進められている。建設分野での活用は、例えば室内空間のジオメトリデータと建設設備のIoT情報を取り込んだサイバー空間とフィジカル空間で共有できるデータ基盤を構築し、デジタルツインの両空間の活用を促進する構想“コモングラウンド” [29] (図II.5) が発表されており、2021年には小規模な実験空間 [30]も整備された。



図II.5 コモングラウンドの概念図 [30]

フィジカル空間からサイバー空間に接続する技術としては、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) 等を用いてサイバー空間に没入感のある視覚映像を体験させるVR (Virtual Reality) 技術や、フィジカル空間にCG等の仮想的な情報を重ねた視覚を提供するAR (Augmented Reality) 技術を経て発展してきたフィジカル空間のカメラ画像やセンシング

情報をサイバー空間に反映するMR (Mixed Reality) 技術がある。さらには、HMDに目線の位置のカメラのライブ映像を、あらかじめ同じ場所で撮影された過去映像が織り交ぜて表示するSR (Substitutional Reality) も開発が進められている [31]。これらを総称したxR技術は、サイバー空間とフィジカル空間をつなぐだけでなく、両空間の境界を取り払う。

フィジカル空間での交流を一部サイバー空間で代替することで各個人や企業の拠点の制約が減り、拠点選択の可能性を広げることに貢献するが、現時点では、これらサイバー空間に接続するデバイスや五感通信技術、またコモングラウンドのようなフィジカル空間をサイバー空間から扱う技術の開発が進む一方、サイバー空間での交流をするのに最適なフィジカル空間自体の検討や整備は十分でない。

3.2. 拠点を自由に選ぶ暮らし

3.2.1. 地方自治体と拠点づくり

本目標検討調査のヒアリングで得られた地域・地方の住民の拠点づくりの現状や取り組み事例の一端を表II.2に紹介する。

表II.2 地方自治体の取り組みの例

地域・地方	取り組み・課題
佐賀県	大学入学や就職のタイミングで福岡など都市部へ人口が流出している。観光による一過性の賑わいづくりではなく、長期滞在や移住に繋げる上で、ワーケーションの試行や市民参加型イベントを行うコミュニティスペース等、「関係人口」(地域や地域の人々と多様に関わる人)創出に向けた拠点づくりを行っている。都市部や首都圏からの距離が課題だが、ゲーム「ロマンシング サガ」とのコラボレーションにより、サイバー空間における佐賀県フィールドを通じた異空間関係人口の創出による認知度の向上にも取り組んでいる。
仙台市 (宮城県)	東北地方の各県から大学生が集まるものの、就職で首都圏へ人口が流出している。国家戦略特区としてテレワークを推進する等、魅力ある勤め先となる企業の誘致を進めている。東日本大震災以降、地域で活動する社会起業家が増えたが、それぞれの独立した活動が定住やソーシャルイノベーションへと繋がっていないのが課題である。仙台市×東北大学スーパーシティ構想によるプラットフォーム構築では、「仮想市民」(住民に限らずまちづくりに寄与する人々)にIDを付与することを通じて、多様な仮想市民同士の有機的な繋がりをサイバー上で創出しようとしているが、個人情報等の観点でデータのオープン化が進められないことが課題のひとつとなっている。

地域・地方	取り組み・課題
君津市 (千葉県)	広域な山間部での少子高齢化の課題がある中、2019年に大きな台風被害に遭った。当時、被害を想定した対策や避難誘導が実施できず、街区や建物レベルでのハザードマップの必要性とセンシング技術による気候・災害予測の重要性を自治体として感じている。またこの災害の教訓から住民の居住地の近くに自治体の拠点を構える必要性を痛感しており、少子化で統廃合が進む学校校舎の地域拠点へのリノベーションを計画中で、平常時に市民に利用されつつも災害時に機能する拠点づくりを模索している。

人口減少という課題に対して、観光・旅行から移住・定住へと一足飛びの展開に期待するのではなく、ワーケーションや地域交流・体験のように、段階的なニーズに対応した地域との多様な交流の機会の創出が有効な手段と考えられつつある。また、地域や地域住民との多様な関わりを持つ人の「関係人口」や「仮想市民」を増やし、その人々と地域とのより深い関わりを継続的に築く新たな仕組みづくりや場づくりが重要視されるようになってきている [32]。日本の各地域には個性豊かな文化・自然資産もあり、これら地域・地方の資産を活かしながらか拠点創出を促すことが本提案の掲げる「多様な生活スタイル」の実現につながると考える。

また、1箇所への移住・定住とは異なる多拠点生活の動向についても紹介したい。国土交通省の調査 [33]において、二地域居住（デュアルライフ）への関心は大都市になるほど高く、約4割が「関心がある」「どちらかといえば関心がある」と答えている。このニーズに応える施策として、「全国二地域居住等促進協議会」（事務局：国土交通省国土政策局地方振興課） [34]が発足し42道府県597市町村計639団体（2021年6月1日現在）が参加している。居住・就労・生活支援等に係る情報提供や相談の対応窓口「移住・交流情報ガーデン」の開設や、二地域居住に係る経費への特別交付税措置等も実施される予定である [35]。

これらの国や自治体の取り組みの発端となっているのが、個々の生活者の動きである。都市圏への一極集中化の時代を経て失われた、豊かな自然体験への回帰や、コミュニティにおける自らの存在感や、地域への愛着など、個々のwell-beingを満たすための地域間移動が活発化している。その一方で、人口過疎地の居住者にとっては買い物・医療福祉サービス・文化施設などへのアクセシビリティが課題となっており、過疎地から市街地へのニーズも存在する。相次ぐ大規模災害におけるボランティア活動や、コロナ禍における働き方・住まい方・生き方の再考が、多拠点生活者の増加に拍車をかけており、彼らの動きは個人レベルの交流を超えた「関係人口」や「仮想市民」といった概念を生み出し、まちづくりの将来像を担う大切な要素として組み込んでいく必要性が生まれてきている。

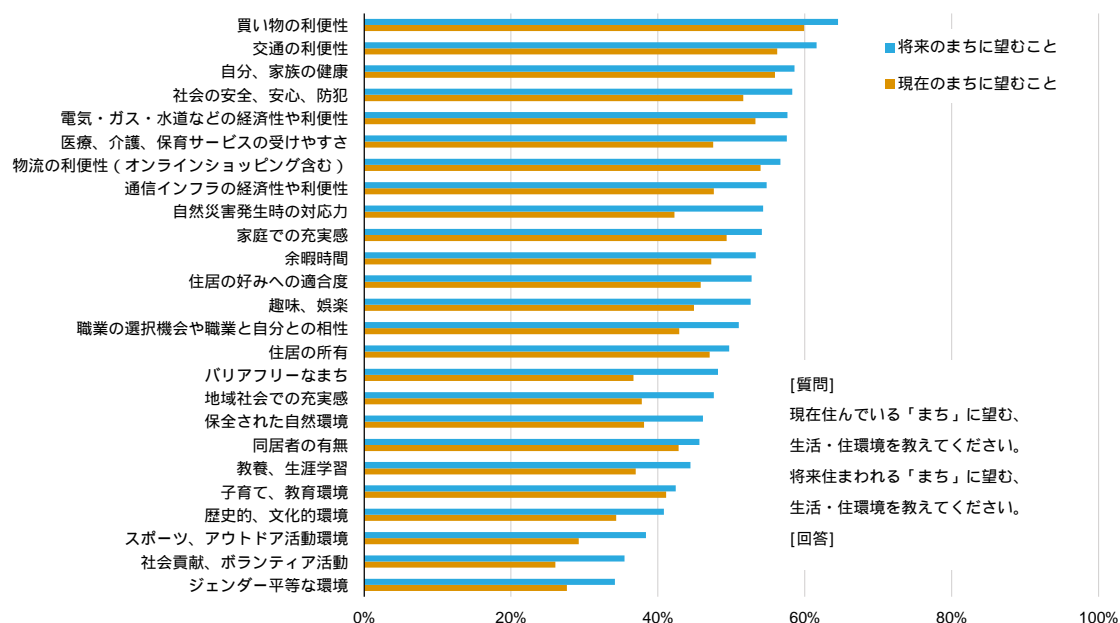
このように地方自治体や政府による取り組みはみられるが、その土地への移動や移住の煩わしさの除去、その土地の歴史・文化の継承と利便性享受を両立させる拠点の提供とい

った潜在ニーズに対する具体的な研究開発手法については模索している状況である。また、災害という観点でも、平常時と災害時の異なるニーズに対してフレキシブルに対応できる拠点づくりや、人・車・建物と気象等のデータに基づく避難の最適化といった視点での提案が求められているにも関わらず、これらは横断的な技術開発を要するため、ニーズに
 応えられていないのが現状である。

3.2.2. 国民の拠点と暮らしへの意識

Flexインフラで提案する「様々な生活スタイルを実現できるまち」で実現すべき将来像を抽出するために、オンラインアンケート調査（有効回答数1,235人）を実施した。アンケート項目は、現在の生活・住環境において困っていることや不満について、コロナ禍で急変した暮らし方や働き方でのシーンをキーワードに、段階評価で設問を設定した。また近年のAIやIoT等の先端的情報技術が活用されるスマート社会に対する意識や個人データの取扱いに関する受容性についても調査を行った。結果のうち、代表的な結果を示す。

図II.6は現在と将来に住むまちに望む生活・住環境に関する回答である。買い物や交通などの日常生活の利便性に関する希望が圧倒的に多い。それぞれの項目で「将来」と「現在」に望むことのポイントの変化を見ると、災害時対応やバリアフリー、医療等のサービス、地域社会との関りに関する項目を望む回答者の増加が大きいことがわかる。



図II.6 住む「まち」に望む生活・住環境に関する回答

図II.7は現在の居住地からの移住を仮定した場合に、移住先での生活・住環境の向上に関する回答である。現在の居住地よりも人口が多い地域に移住する場合と、人口が少ない

地域に移住する場合とで、向上すること、向上しないことがほぼ対称となる結果であった。また図11.8は現在の居住地からの移住を仮定した場合に、それを阻害する要因についての回答である。同居する家族のライフスタイルの変化や職場へのアクセスが悪くなることは、移住先の地域に関わらず上位に現れている。人口の多い地域に移住する場合は住居確保の経済面での問題が、人口の少ない地域に移住する場合は日常生活の利便性の悪化が、主な阻害する要因として上がっている。

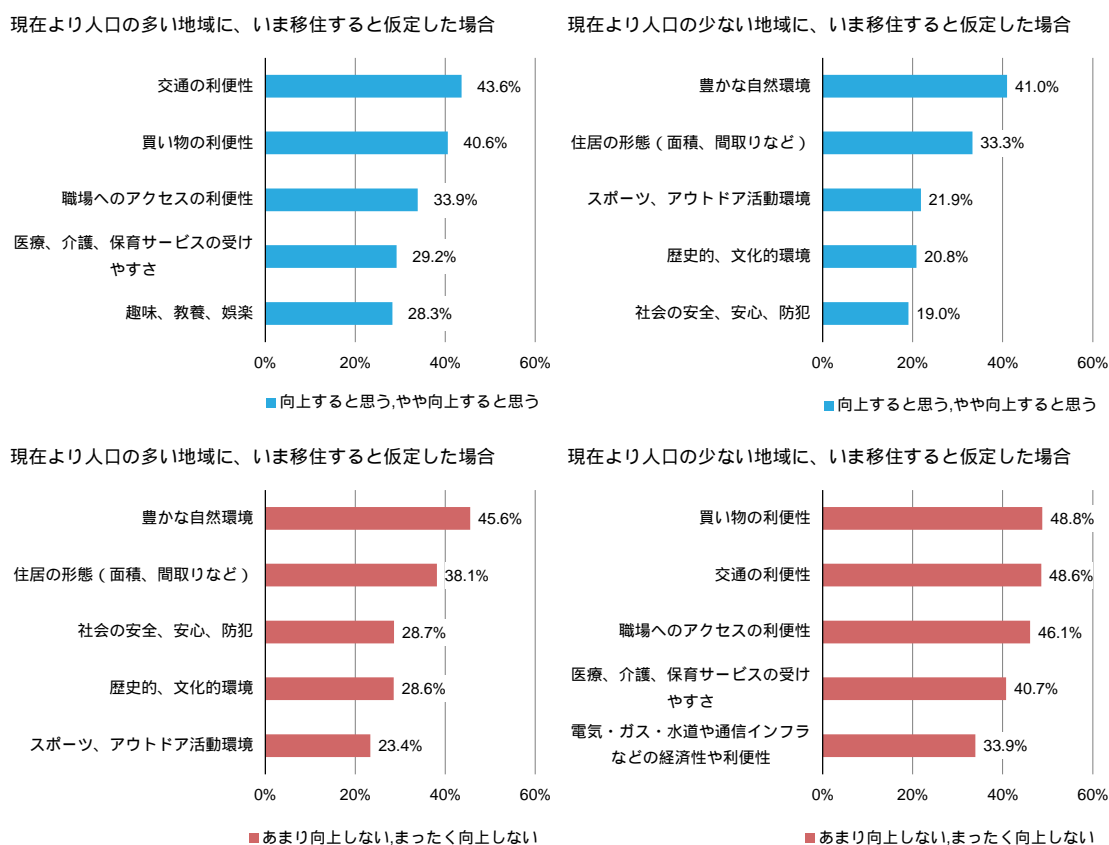


図11.7 移住を仮定したときの生活・住環境に関する回答（上位5位）

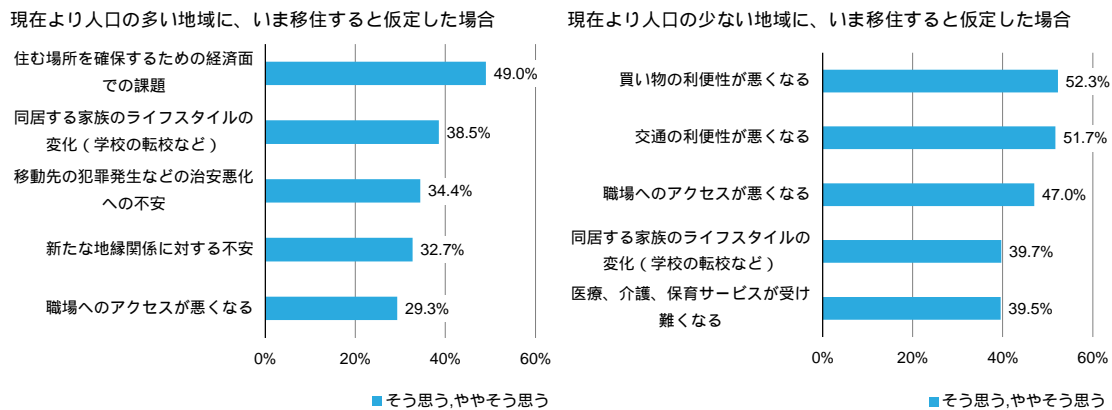


図11.8 移住を仮定したときに移住を阻害する要因に関する回答（上位5位）

アンケート結果では自身が暮らすまちに望む生活・住環境は日常生活の利便性であることは当然だが、将来にわたって大きくポイントが増える項目は、災害時対応や医療等のサービス、地域社会との関わりなどであり、個々の住居単独ではなく、Flexインフラでつながるまちに求められるサービスが把握できた。また、現在の居住地からの移住を阻害する要因としては、移住先の人口規模によらず同居する家族等のライフスタイルの変化や職場へのアクセスが上位にあがった。これは学校での授業や職場での仕事が場所に拠らずに柔軟に対応できる環境が整えば、多様な暮らしと働き方ができる可能性を示唆している。

3.3. センシングによる「場」の最適化

3.3.1. センシング情報と空間の紐づけ

Flexインフラでは、利用者の属性の把握が空間単位で必要となるため、収集したセンシング情報を空間IDと紐づける技術が必要となる。あるIDを持つ建物の空間をセンシングし、何らかの空間制御やサービスアプリケーションに情報を渡す場合、建物に設置されたIoTセンサーのデータは通常はビル管理システム上にあり、利用したいデータが個人のウェアラブルデバイスやスマートフォン上にあるケースでは、これらが異なるデータ基盤上にあるため、連携に課題がある。また、GNSS (Global Navigation Satellite System) やWi-Fi、BLE (Bluetooth Low Energy) ビーコンのスマートフォンでの決済サービス利用情報など位置情報を含む個人情報を利用できればデータ連携すべき対象となる空間IDの特定は可能となるが、利用者データの開示に対する同意といった課題も存在する。さらに、位置座標を人が認識する部屋やエリア単位で切り分けることにも技術が必要となる。

3.3.2. 人のセンシングによる嗜好の学習・推測

近年次々と市場に投入されるセンシング技術、例えば各種カメラ画像やBLEビーコン、LiDAR (Light Detection And Ranging) などの発達により、建物空間内の環境状態や、人やロボットの識別や位置把握、人流などを精度よく把握できるようになっている。また、

屋外においては様々な衛星データを活用することで、屋外空間における人や物の位置情報や、対象とする空間の温室効果ガスや水循環、気候変動などの情報が把握できるようになっている。人の感情や嗜好に関するセンシング技術も、深層学習の発達もあって静止画や動画からリアルタイムで感情を推定できるところまで進歩している。

Flexインフラへの適用を想定しているユーザの場に対する嗜好を学習・推測に関する技術として、人の情動や気分、性格特性を表情や音声から読み取って認識し、空間制御のトリガーとして活用することが考えられる。

こういった感情の認識に関する試みは、1997年にAffective Computingという用語が考案されて以来、心理学的な解釈を含めて研究が行われている。近年は深層学習の発展もあり、特徴抽出と推定が統一的に扱えるようになっており、例えば静止画の特徴抽出にCNN (Convolutional Neural Network) が、動画の特徴抽出にはGRU (Gated Recurrent Unit) や LSTM (Long short-term memory)、C3D (3次元CNN) が用いられている。また、顔の動きや頭部姿勢、視線方向、音声情報、あるいはこれらを複合したマルチモーダル情報も用いられている。感情における概念のモデル化も進められており、ソフトバンクロボティクス社のpepperにも感情の表出機能が組み込まれるまでになっている [36]。

このように感情認識の技術は概ね確立されており、今後はコミュニケーション内容の理解や気配のセンシングによる通信や五感による通信といった技術に発展していくことが期待されている [37]。

3.3.3. センシング情報による広域最適化

災害や自然現象の予測では、計算機の発展に伴って現象をモデル化し数値計算によって予測をする手法が主流となっている。計算の前提条件となる諸条件（例えば、地形や建物データ等）が精緻化するほど、また計算機能力が上がるほど、予測精度はますます精緻化していくため、この方向性での災害予測の高度化は確実な未来である。

上記をモデルドリブンと呼ぶと、データそのものから災害を予測するデータドリブンな手法も近年発展してきている。例えば位置情報と紐づけられたSNS情報により、早期のインフルエンザ発生地域の特定や、ゲリラ豪雨の事前予測が実現している。さらに、予測自体へのデータ活用だけでなく、大量のセンシングデータからモデルそのものを構築しようとする動きもあり、現在見つけられていない新たな物理モデルがデータドリブンによって将来には発見されることも想定される。また、観測データとモデルによるシミュレーションを連動させるデータ同化手法なども発展してきており、リアルタイムの状況に合わせて先の未来を高精度に予測する手法なども確立されている。こういったいくつかの側面によって、ビッグデータ活用は新たな災害予測技術の発展に貢献すると考えられる。

またセンシングデータは、予測だけではなく災害対応にも大きな効果を発揮する。建物に設置されたセンサーの情報はそのまま建物の健全性評価に活用され、衛星データは直接的に被害の様子を映し出す。想定外の激甚災害では特定の対応方法が存在せず、その

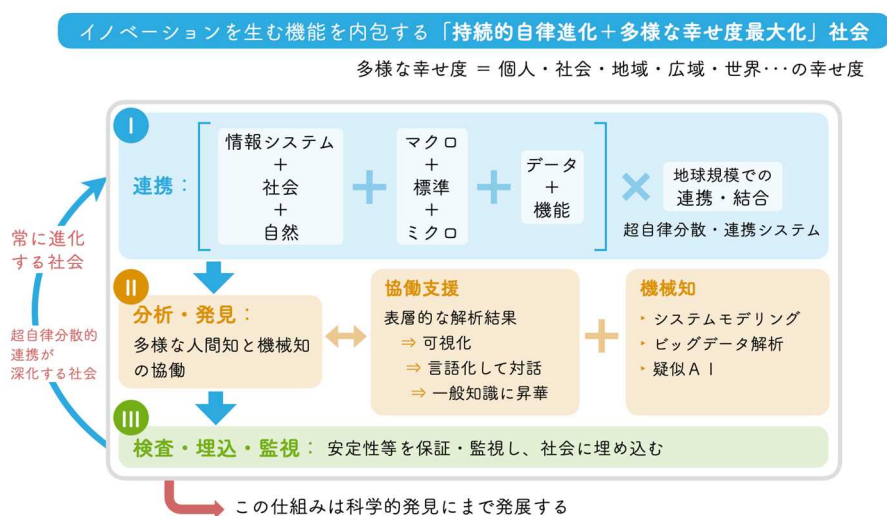
都度、最適な対策を瞬時にかつ臨機応変に判断する必要がある。そのためには、正確な状況の把握が最重要であり、この点において大量のセンシングデータは多大な役割を果たすと考えられる。

3.4. 真にオープンなデータ共有

3.4.1. 自律進化型の通信インフラ

人の介入を最小限とし構成や監視・保守を自身が実行するネットワークを自律的なネットワークと呼び、近年その有用性と実現化が提唱されている。2020年12月にはITU-T (International Telecommunication Unionの電気通信標準化部門) に自律型ネットワーク (Autonomous Networks) のフォーカスグループ (FG-AN) が設置され、将来の通信ネットワークに関する議論が開始された [38]。このネットワークは、従来人が意思決定をしたルールに基づき運用されていた事象を人工知能やクラウドネットワークを用いた機械制御とすることで、それらを分散的に運用するシステムである。

国立大学法人電気通信大学はこれをさらに発展させた自律“進化”型の通信インフラを提唱しており、JSTの未来社会創造事業で「機械・人間知とサイバー・物理世界の漸進融合プラットフォーム」といった探索研究を実施し、データの連携・結合、人間知と機械知を活用した分析・発見、システムを自律進化させる時の検査・監視による安定性の保証を包括した通信インフラを提案している [39]。Flexインフラを考える会で主催した公開シンポジウムでの電気通信大学田野学長の基調講演から、この通信インフラについて、様々なオープンデータを接続し、第三者が自由に開発したサービスアプリケーションが活用され、そのサービスから生まれたデータを含め、さらに新たなサービスアプリケーションが開発される姿を想定している (図II.9) 旨が示された。



図II.9 サイバー・物理世界の漸進融合プラットフォームの概要 ([40]から作成)

さらに、この自律的な進化による新価値創造の課題として以下の3点が示唆された：

多くの基盤技術が必要

⇒ 理工学だけでなくアート・ビジネス・政策もあって初めて、人の幸せに資する技術となる。

「社会」と呼べる実験場が必要

⇒ 多くの産業や人が関わり多様なデータ・機能が公開されることで真価が発揮される。

データ・機能の公開への抵抗の打破

⇒ 特定の分野のデータ・機能を既得権益を持つ特定の企業群が占有する現状では、参加者が少なく分野間の連携にも繋がらずイノベーションが生まれない。

多様な研究を結集し成功事例として示すことで初めて、これら課題が解決され、社会が変わり始めると考えられる。

Flexインフラでは多岐にわたるデータの利用と多様なニーズに対するサービス創出を目指しているため、柔軟な「場」の実現のためにはこのような自律進化型の情報インフラの整備が求められる。

3.4.2. プライバシーを確保したデータ共有・通信

Flexインフラでは、建物内に設置されたセンサー、ウェアラブルデバイス、スマートフォンなど、多数のプレイヤーが準備した多種のセンサーから得た情報をクラウド上に共有し、多数のプレイヤーが分析を行い、その分析結果をプレイヤー間で相互に共有し、それを多数のユーザが利用するモデルを想定している。

センサーで得られる情報は、位置情報、購買情報、その日の服装などプライバシーに関わる情報も含まれるため、個人保護の観点から、サービス提供者が利用する際に同意を取ることが求められている。この同意は一般的に、サービス提供者が一つのサービスを提供する度に行われるため、現状では別のサービスを提供したりそのために第三者にデータを提供したりする場合には、新規の同意をユーザから得る必要がある。この煩わしさを緩和する取り組みとして、ユーザが同意する基準を体系化したPPM(Privacy Policy Management) [41]が提案されており、oneM2MやITU-Tなどで標準化が行われている。また、このPPMを普及させるためのデータの相互流通を目指した実証実験 [42]も行われてきた。

データ共有の仕組みが複雑化する理由として、政府(G: Government)、企業・民間(B: Business)、消費者(C: Consumer)によってデータ共有に対する考え方が異なるという側面がある。例えば、B2Cでは、サービス提供時のデータの一時利用に関する同意・契約を行う。B2B2Cでは、BがCから得たデータを第三者提供するため、それに対してBがCに同意を取る必要がある。G2B, G2Cでは、Gはオープンデータの形でBまたはCとデータのやり取りを行う。このようにプレイヤーのタイプによってデータ共有の考え方が違う点を踏ま

えて、データ共有プラットフォームの検討を進める必要がある。

データの蓄積技術については、従来は各端末の記憶媒体に保存していたが現在はクラウドによるものが主流である。しかし将来技術に関しては、現在主流のクラウドからクラウド連携技術やさらにその先の技術もできると予想される。現在、精力的に行われているEdge Computing技術が進めば、すべての情報を蓄積するのではなく必要な情報のみを蓄積するという手法に代わってくると考えられる。また、新興のブロックチェーン技術は特定の箇所にデータを置くのではなく、データの取引を保障しつつ分散的にデータ保持することができる。現在はGAFAに代表されるように一部のIT企業によりそのデータの蓄積サービスが独占されているが、これら技術が進めば、個人データを一企業に委ねるのではなく、利用者自身が自身のデータに権限を持ち管理することが技術的に可能となると考えられる。

3.4.3. スマートシティ

国内のスマートシティ

本年4月に内閣府をはじめとするスマートシティ官民連携プラットフォームから公表されたスマートシティガイドブック [43]では、Flexインフラと同じ方向性である「市民の幸福度（well-being）の向上」がスマートシティに取り組む意義・必要性として示された。このガイドブックには、市民（利用者）中心主義、ビジョン・課題フォーカス、分野間・都市間連携の重視を3つの基本理念とともに、スマートシティの初動・準備から計画（戦略）策定、実証・実装、定着・発展までの各段階で留意すべき公平性、包摂性の確保、プライバシーの確保、セキュリティ、レジリエンスの確保、相互運用性・オープン性・透明性の確保、運営面、資金面での持続可能性の確保といった5つの基本原則が示されている。また、内閣府地方創生推進事務局で公募されたスーパーシティ型国家戦略特別区域の公募には31の地方自治体から応募があり、その概要が紹介されている [44]。6月に実施した仙台市へのヒアリング [45]においても、基本的にはこの原則に沿って東北大学キャンパスの整備計画が進められていることが見受けられる。

ガイドブックに記載されている都市OSは、様々な環境センサーやカメラ等の接続や、防災・防犯・交通・観光といったアプリケーションと連動する環境・画像・地図・位置情報などの各種データ連携基盤である。この都市OSとFlexインフラの主要構成技術である自律進化型の通信インフラとでは類似の点はあるが、前者には建物や空間の物理的な変化までは想定していないこと、多拠点での居住を意識した暮らしも特に触れられていないこと、さらには現在のスマートシティ・スーパーシティでは、個人情報保護のルールに沿った形でデータの共有が検討されており、扱うデータに制限を受けながらデータ共有基盤が構築されている点で異なる。Flexインフラでは、共有できるデータの範囲を拡大することを試行したうえでより広範囲なデータを活用した新たなサービスを生み出すことを目指している。

海外のスマートシティ

海外におけるプロジェクトの中から、代表的、かつプロジェクトを進める上で参考にしたいケースを表II.3にいくつか紹介する。

表II.3 海外のスマートシティの例

エリア	都市	概要
北米	トロント	Googleの兄弟会社（アルファベット傘下）であるSidewalk Labsが主導。各種センサーから得られたデータの取り扱いについて多くの酷評、批判を受け続け、当初の計画を縮小、遅延を繰り返してきた。2020年5月に財政的な理由で中止を発表。
アジア	シンガポール	シンガポール土地管理局および情報通信開発庁などが主導。ビルやインフラ、緑地など、シンガポールでの生活のほぼすべての側面を仮想化して災害の被害予測、ソーラーパネルの発電量、日照時間などを建設前に知るためのツール「バーチャル・シンガポール」を開発。
	ドバイ	ドバイ政府主導。「世界一幸福な都市」を目指しSmart Dubai 2021を計画。100%デジタル政府、無人タクシー、空飛ぶタクシー、ドローン内蔵自動運転警察車両の設置計画など、利便性や生活安全性など全方位。
欧州	コペンハーゲン	コペンハーゲン市、国内大学、IT企業などが主導。2025年までに「カーボン・ニュートラルを達成する世界で最初の都市」になることをビジョンとして掲げ、交通渋滞の改善、市民の安全性向上を目指す。市民参加型実証実験手法「リビングラボ」先進国。幸福度ランキング上位常連国。

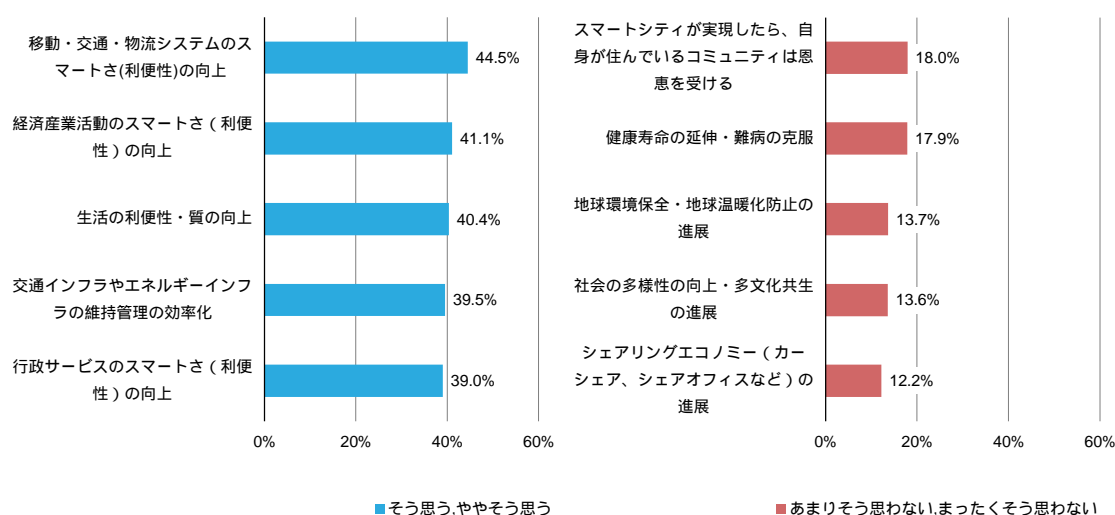
海外のスマートシティ・スーパーシティプロジェクトで共通して課題となっているのが、まちから得られた情報の取り扱いである。例えば民間企業が市民情報へアクセス、市民サービスを提供することに対して、特にローカル企業以外の新参者に対しての抵抗感が強い。トロントのケースでは近隣住民や政治家がITの巨人であるGoogleが情報を取り扱うことに対して懸念を表明したことでプロジェクトの遅延、中止に繋がった。この背景には政府・自治体・市民のデジタル音痴が課題とも言われている。一方でデンマークはIT立国とも呼ばれ、電子政府ランキングでは世界第1位（2018年/2020年連続、国連経済社会局）となっている。オープンデータ化の取り組みが進んでおり、2015年に日本で導入されたマイナンバーは、デンマークでは1968年にCPRナンバーとして導入され既に半世紀以上の実績がある。全国民の医療診断情報も古くからデータベース化され既往歴やアレルギー情報などは医者が変わっても正しく共有される。欧州を跨いだ遠隔医療診察サービスにも利用

されている。デンマークは「国民負担率」でも世界第4位（2021年、財務省）とネガティブな項目でも上位にいるものの、世界幸福度ランキングでは毎年上位（2021年2位）に位置している。首都コペンハーゲンではCO₂削減施策が成功し、通勤は車の数よりも自転車の数が増え、結果的に市民が健康になった。環境保全 モビリティ変革 健康維持という良いサイクルが生まれた良い例である。

3.4.4. 国民のデータ共有やスマートシティへの意識

3.2.2で示したアンケートから、スマートシティや個人情報への意識に関する結果の代表的なものを以下に紹介する。

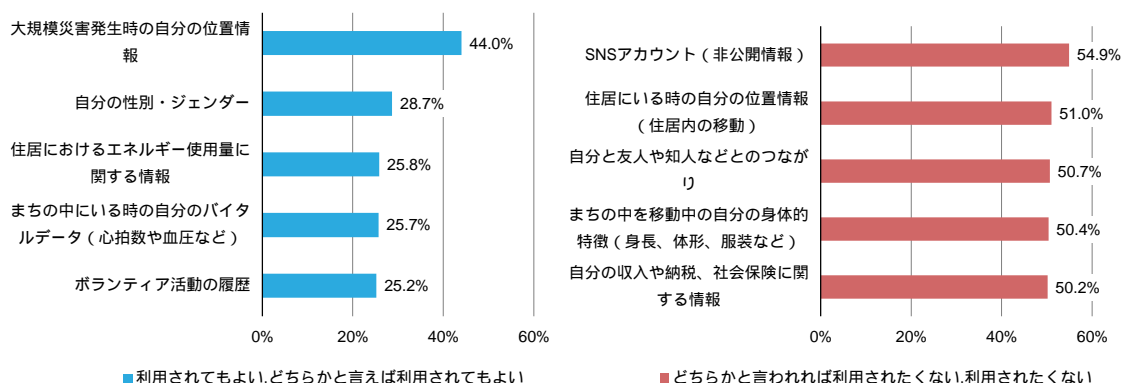
図II.10は現在のスマートシティに対するイメージの回答結果である。日常生活の利便性の向上に関するイメージが強く、健康面や地球環境問題、社会の多様性の向上などについて向上するイメージは低い結果であった。



図II.10 スマートシティに対するイメージに関する回答（上位5位）

図II.11は、スマート化した社会で個人の情報や行動・活動に関するデータを基にしたサービス提供が行われる場合に、そのデータの取扱いに関する回答である。大規模災害発生時の個人の位置情報については、例外的に利用に対する受容性が高かったが、全体としてデータの利用に対する受容性はあまり高くはない。性別やバイタルデータなど、個人が特定されにくいデータ利用への受容性が上位にきている。また利用されたくないデータとしては個人情報や行動に関するデータが上位にあがっており、行動に関しては位置情報や身体的特徴のデータが上位にあがった。

スマート社会でのサービス提供のためにあなたに関するデータが使われる場合に、あなたのお考えに最も近いものを選んでください。



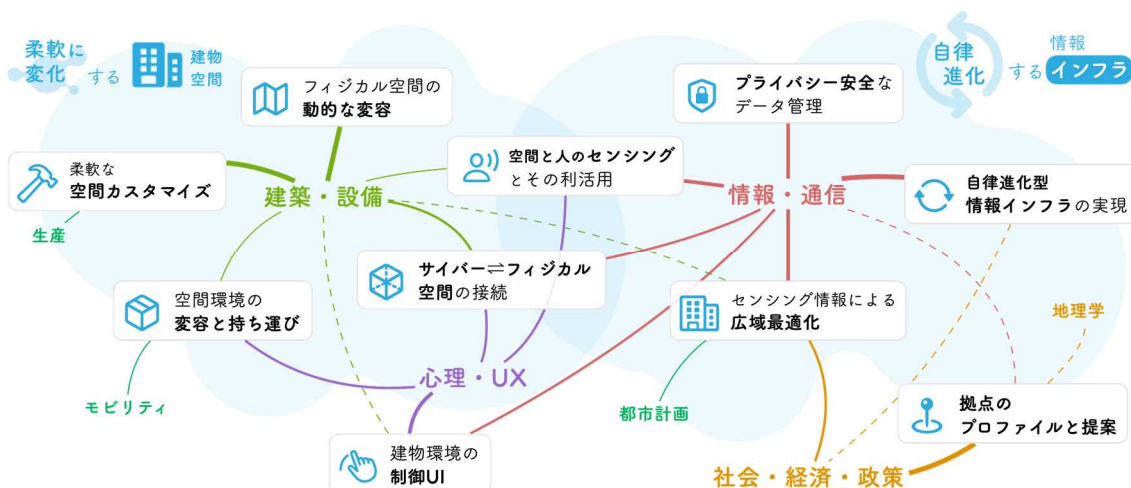
図II.11 個人の情報や行動・活動に関するデータの取扱いに関する回答(上位5位)

III. 社会像実現に向けたシナリオ

1. 挑戦的研究開発の分野・領域及び研究課題

1.1. 挑戦的研究開発を推進すべき分野・領域

提案するFlexインフラの研究開発を推進する分野・領域と課題の関係を図III.1に示す。大きくは工学系分野として建築・設備などのハードに関わる領域と情報・通信などのソフトに関わる領域がある。また、それを支える社会文化系分野として、心理・UXなどの個人の快適性・幸福に関わる領域と社会・経済・政策などのこのインフラの実装や普及に関わる領域がある。実現にあたっては、科学技術開発を推進しつつ、これらの分野が連携し課題解決を進めることが求められる。

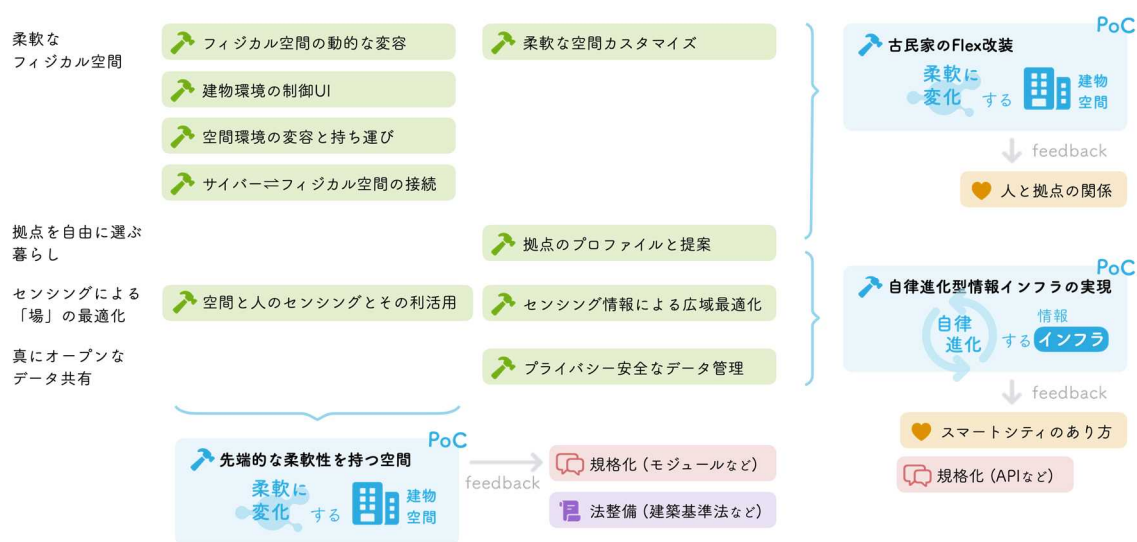


図III.1 Flexインフラの実現に関連する分野・技術群の構造

1.2. 目標達成に当たっての研究課題

Flexインフラの社会像実現のためには、II章2節の表II.1に示した要素的な科学技術課題のほかに、要素技術を統合し目指す社会像のモデル実装と機能検証のためのPoCを必要とする。また科学技術課題のうち、「自律進化型情報インフラの実現」はそれ自体がPoC的な性格を持つ。要素的な科学技術課題にこれら新規のPoC課題を加え、さらに互いの関係性を俯瞰したものを図III.2に示した。

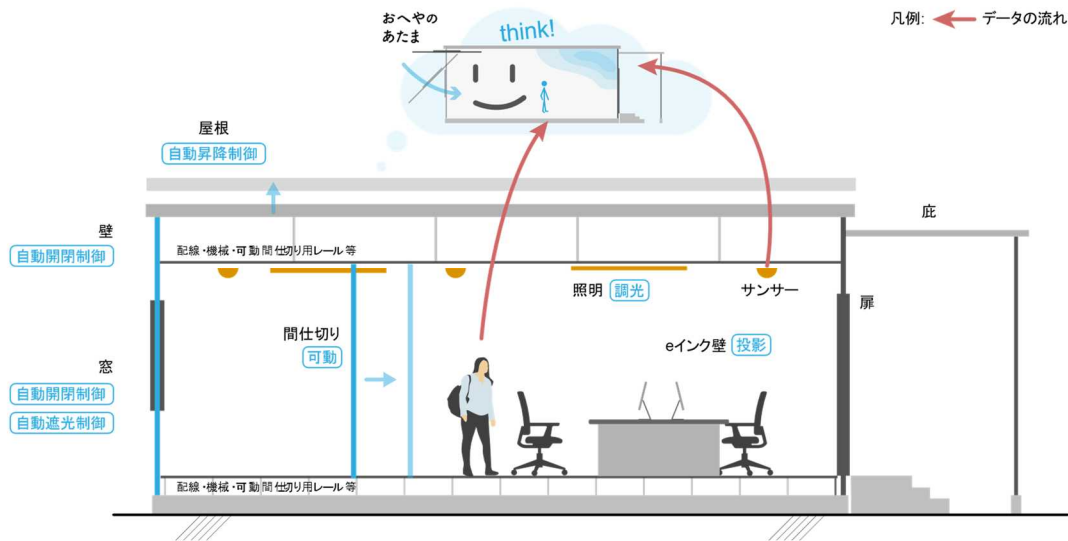
各研究課題がブレイクスルーすべきポイントは表II.1に示した通りであるが、Flexインフラの実装・機能検証は、研究開発の投資効率を考慮して比較的小規模の新築建物や既存建物の改修によるアジャイル的な試行を実施するべきである。以下1.2.1, 1.2.2にPoC研究を例示する。



図III.2 各研究開発課題とFlexインフラの実装・機能検証との関係

1.2.1. PoC : 先進的な柔軟性を持つ空間の新設

部材の変形などの大掛かりな変形や多様な新規技術を組み合わせる試行するには、小規模ながら新規の建物建設が望ましい。例えば、多数の利用者が使用する低層の小規模オフィスをもしたものが考えられる(図III.3)。オフィス空間として必要な機能を持たせつつ、自律進化型情報インフラを実装して、初期の段階では非構造の変形部材や可動家具・間仕切りを組み込み、ジェスチャーや感情認識などの新しいセンシング技術をトリガーとして空調や照明、換気、空間変容の制御との連動を検証することが考えられる。各種センシング機能の追加や制御対象の拡張は随時行っていけばよい。

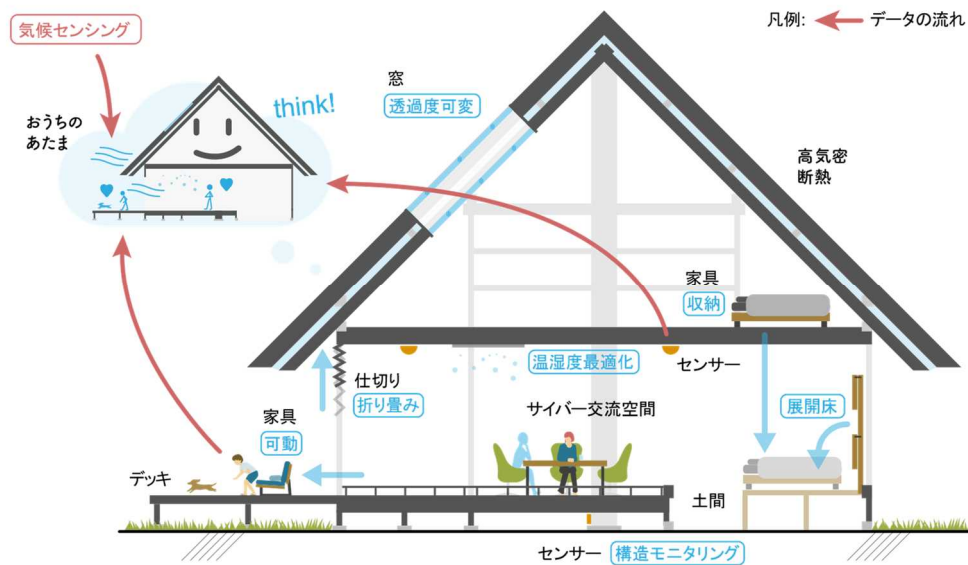


図III.3 PoCを実施する小規模新設オフィスのイメージ

1.2.2. PoC：古民家のFlex改修による多拠点生活も含めた試行

柔軟な生活をおくれるこの新しい空間は、スクラップ&ビルドで成り立つ新規建物だけのものであるべきではない。多様な「場」を提供するための挑戦的試みとして、既存建物の先端技術による改修を強く提案したい。その「場」の歴史を継承しながら同時に快適性と意匠性を兼ね備えた新しい住居は、その地域のストックを利用する点からも、多様な幸せのカタチを実現する一つの選択肢であると考えられる。古民家などの改修をベースとして、新規の建物と同様に様々なセンシング技術や制御機能を検証（図III.4）することが考えられる。一般に“趣はあるが快適性は低い”とされる旧建築の、先端技術による積極的活用提案を示すことは、その後の産業界・社会へ開発促進のインパクトも強く示すことができる。

対象とする建物が地方にある場合は、多拠点型のライフスタイルを試行することも考えられる。利用者のライフスタイルの継続的調査や開発においてフィードバックすべき心理面の変化など、心理学・社会学的研究もあると良い。センシングで得られた多様なデータを活用して、災害予知や拠点選択の情報の充実など新たなサービスに繋がる技術を試行することもできる。

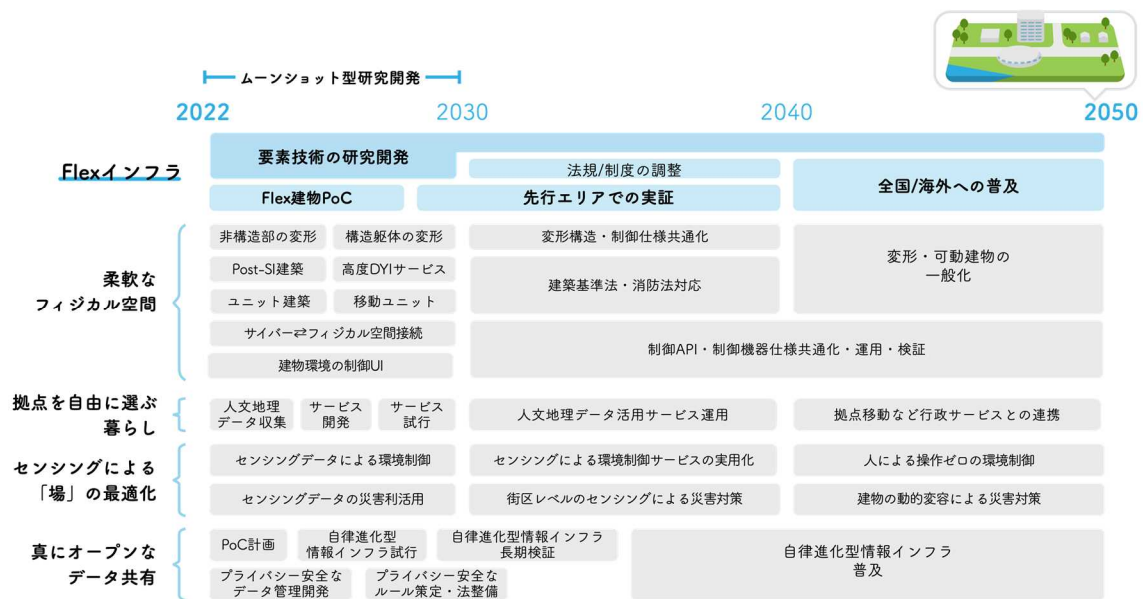


図III.4 PoCを実施するFlex古民家のイメージ

2. 2030年・2040年・2050年のそれぞれにおける、達成すべき目標（マイルストーン）、マイルストーン達成に向けた研究開発、これによる波及効果

2.1. 研究開発のマイルストーンと開発継続判断

Flexインフラが目指す社会像の実現に必要な2030年～2050年の研究開発を図III.5に、10年毎のマイルストーンを表III.1に示す。2030年までの期間は要素技術の研究開発と空間変容のPoCを実施すべき研究開発とし、2030年～2040年は先行エリアで実証しながら関連法規や制度の調整を行い、2040年～2050年には各要素技術や実証したFlexインフラシステムの全国に展開することを想定した。



図III.5 Flexインフラを構成する技術・社会課題全体のロードマップ

表III.1 2030年～2050年におけるマイルストーン

	2030年	2040年	2050年
柔軟な フィジカル 空間	・ センシング情報を活用して動的に環境を整える建物の先行的実装が完了	・ 法整備の完了 ・ 開発技術の一般製品としての出現 ・ ストック建築の積極的利用増加	・ 柔軟なフィジカル空間が当たり前の生活
自律進化型 情報インフラ とデータ活用	・ Flexインフラの実装や機能検証がPoCレベルで完了	・ 先行地域での自主的なFlexインフラ実装	・ Flexインフラが全国レベルで普及
拠点選択	・ 多拠点生活に適した先行的拠点の整備	・ 拠点選択の多様性増加 ・ 各都市の関係人口増加	・ 地方都市の若年層人口増加

研究開発の継続判断の基準については、大項目のうち「柔軟なフィジカル空間」や「センシングによる「場」の最適化」においては、工学的な要素技術の集積で実現し各要素段階の完成でも社会実装は可能であると考えられるため、研究開発自体の全面中止は要とせず、要素技術ごとに規模や目指す柔軟性の縮小または開発期間の延長を検討する。なお、ムーンショット型研究開発以降の業界での研究開発においては、実現性よりも経済合理性が判断基準となると考えられる。一方、「拠点を自由に選ぶ暮らし」や「真にオープンなデータ共有」については社会動向や業界動向も係るため、折を見ての継続判断が必要とな

る。「プライバシー安全なデータ管理」については、利用者のニーズと技術可能性の折り合いによって合意プロセスや仕様を変更する可能性を含んでいる。「自律進化型情報インフラ」と「拠点のプロファイルと提案」、またFlex古民家などの実建物での試行については、要素技術の完成度や社会ニーズ、利用しながらフィードバックなどを通して、随時実施判断をしながらのアジャイル的な研究開発を志向する。社会に対して完成例を示すPoCとしての役割が強いため、PoC期間は最適解を模索しながら研究開発を継続し、その後の運用や普及についてはPoCを通じての社会判断を仰ぐ。

2.2. 波及効果

2030年までのPoCおよび要素技術開発期間は、PoC実施に伴う新規産業の候補創出を期待する。またAPIやモジュールが各業界で立案されるに従い、それに適合した製品・サービスの開発が促進される。2030年以降は、自律進化型の通信インフラが整備されたエリアにおいて、センシング技術やオープンデータを用いた様々なサービス事業が新たに出現することが期待できる。

3. 目標達成に向けた国際連携の在り方

3.1. 海外の先行スマートシティ事例の参照

II章3.5.2に記述したとおり、海外のスマートシティでの成功例は大いに参考すべきである。本提案が掲げる「多様な幸せのカタチを実現」するためには人のデータが不可欠である。各国の事例や当事者へのヒアリングを通じて良い例は取り入れ、Flexインフラで拡張すべきポイントを含めて国際標準化に向けた議論を始めたい。

3.2. 国際的な工業規格との連携

日本技術は国内の利用者のニーズに寄り添う細やかな製品を生み出す傍ら、しばしば国内でしか使えないガラパゴス化に陥ることがある。建設技術においては特に、日本の風土や災害、建築法規などに適合する国内独自の技術も多い。一方でソフトウェア産業やIoTデバイスなどの分野は、既に海外発の製品が多く流通する。Flexインフラにおいては、我が国の風土や暮らしに合う「場」のための技術開発を進める一方で、海外技術や設備なども柔軟に国内の建物に取り込めるよう配慮する必要がある。開発する技術は国際的な工業規格との互換性を確保しながら、可変空間などの新規技術に関してはその海外展開を図るとともに我が国がイニシアティブを取りISOなどで規格化を進めることも望まれる。

4. 目標達成に向けた分野・セクターを越えた連携の在り方

4.1. 建物変形機構に関する連携

建築物に可変性を求めるということは、非構造部材の移動、構造部材の変形、設備システムの変形部分への追従性などが必要である。可動部分の増加に伴う材料の疲労特性や耐

火性の確認、部材ベースでの構造解析や検証実験による性能検証とともに、設計手法への反映など、建設産業のみならず材料素材産業、解析ソフトウェア産業が連携して技術的課題の解決を図っていく必要がある。

また、可変建築物の普及のため、可動部分や可動機構のハードウェアに関しても接合部や可動部の仕様を共通化することが必要である。建設産業と可動部構成部品の製造産業とが連携してこうした仕様の共通化を進める必要がある。

4.2. 建物の制御に関する連携

建物で使われる設備機器は、基本的にはBACnet⁴と呼ばれるISO規格に従って、機能の相互利用や外部制御ができる仕組みが用意されている。しかしながら、建物変形に関連するセンサーや駆動制御はその対象に含まれておらず、BACnetシステムインターオペラビリティガイドライン [46]を発行している電気設備学会に加え、Flexインフラ用のセンサーを提供する通信デバイス産業や駆動制御を提供するソフトウェア産業が連携してAPIの確認や拡張について協議し、共通化を図る必要がある。

4.3. 自律進化型通信インフラ構築に関する連携

Flexインフラの実現には、通信インフラに様々なオープンデータを接続・結合する必要がある。扱うデータは、センサー情報をはじめとする入力データおよびサービスアプリケーションに受け渡す情報などの出力データの双方であり、これらのAPIを共通化する必要がある。また、II章の3.3.1 センシング情報と空間の紐づけの項目で例として記述したビル管理データの拡張については、連携対象のデータ基盤との接続ルールの取決めや標準化も必要である。

通信ネットワークのプラットフォーマー産業を中心としてアプリケーションのソフトウェア産業、III章の4.2に記述したIoTデバイス産業、建築設備産業を含めた産業やこれらに関連する学術分野の大学研究者との連携により解決すべき事項である。

5. 目標達成に向けて取り組むうえでの倫理・法的・社会的課題及びその解決策

5.1. 建築関連法規

現状では、変形する建物については建築基準法では定めがなく、建築確認申請を行うことができない。また間仕切りが移動すると部屋の床面積が変わることで防火区画が定まらず、避難経路も変化する想定になるため、この状態で消防法に適合させることは難しい。建築基準法については国土交通省や建築センター等の認定機関と連携して法整備を含めた協議が必要である。同様に消防法に関しては、総務省や実証試験の際の当該地の消防署等と法整備を含めた協議が必要である。

⁴ Building Automation and Control Networking Protocol

また、建築基準法では、住居の環境保護を目的とし、都市計画法に基づく都市計画区域内に住居系・商業系・工業系からなる12種の用途地域を定めその地域での建築物の建築を制限している。この用途制限が、提案する「場」の柔軟性を阻害する可能性が高い。国家戦略特別区域法では、経済の成長戦略で必要となる施設の迅速な整備を目的とし、用途制限を緩和する国家戦略特区を定めているが、特区などでのPoCにおける成果を踏まえながら用途制限緩和の方向性を検討する必要がある。

5.2. 拠点移動における行政・福祉サービス

多拠点を自由に行き来するライフスタイルで問題となるのが、住民票や学校教育など自治体を跨ぐ際の行政手続きと行政と紐付くサービスの利用である。例えば、現行の住民基本台帳法や学校教育法では居住地が複数あることは想定されておらず、生活の場を多拠点化する場合は、何れかの主とする居住地のある自治体に住民票を登録し、学童は定められた学区内の公立学校または通学可能な私立学校で義務教育を受けさせる必要がある。このため副とする居住地での生活は週末や連休の期間に限られてしまう。自治体にとっても、住民に対してサービスを行う原資は、国から支給される地方交付税交付金や住民税などで賄うが、直接的に当該自治体に住民税を収めていない副居住地の住民が存在することになる。こうした副居住地に対して税金を納める方法としては、ふるさと納税の制度を活用する方法はあるが、収めた税額に対する減税額には限度があり、多拠点生活者を視野に入れた税制改革は必要になると考えられる。

また医療などの個人の健康に深く関わるサービスについても、現状は通院や診察などは個人と医療機関の間で行われるため、かかりつけ医から遠い拠点に移動したときに継続しての通院が困難となる。個人の健康データを個人が管理し必要に応じて医療機関に開示できる体制を整えることで、医療機関を変えても継続して安定した治療が受けられると考える。さらに、ムーンショット・ミレニアプログラムの樋口チームの提案 [47]からは、将来的に遠隔医療やバイタルデータを使った未病も含めた健康管理が普及することで、実際の医療機関に通院せずとも個人の健康管理が可能になることも示唆された。

これら自治体を跨ぐ行政・福祉サービスの利用では、個人のデータ紐付けIDとしてマイナンバーカードの活用も考えられる。

5.3. 個人情報保護

調査で実施したアンケートによる国民の個人データ利用に関する感度からも、個人情報の保護は重要課題であるが、これと同時に公開ワークショップでの電気通信大学の田野学長の基調講演およびPDでの発言 [40]から、データの流通は基本的にオープンソースとすることが人の幸福に資する様々なサービスを生み出すことも示された。オープンな規格と適切なAPIを用いた通信とデータ保持で、データの扱いの透明性を保ちながら多様なサービスを楽しむことができる通信システムの技術開発と整備が必要となる。

また、人流データを用いた混雑の最適化やバイタルデータを用いた健康・医療サービスに関する開発など、公益性が見込める個人情報の社会的な利活用については、この解決には時間はかかるが、データ提供元である個々の人、その人々が集うコミュニティとの対話を通じて個人情報のオープンな利活用（2次利用、3次利用）に関するルール作りが必要である。スマートシティ官民連携プラットフォームから公表されたスマートシティーガイドブックでも、様々な官民データを流通させ、利活用を図るためには、「保護」と「利活用」のバランスが重要であることが示されており、市民参加型のワークショップやパブリックコメントの実施、リビングラボやシビックテック等も活用して、データの取り扱いに関するコンセンサスを得る活動が必要である。

IV. 結論

本調査研究では「2050年までに、柔軟な「場」で誰もが安全で幸せに暮らせる社会を実現」することをムーンショット目標として提案した。これは、私たちの生活の場である建物・まちというフィジカル空間の利便性を向上させることで、我が国に暮らす人々の場所や状況による格差を是正し暮らしを豊かにする提案である。

この社会像実現に必要な開発技術として、現在の課題や国内外の技術動向から以下を挙げる。まず、「場」の柔軟性の実現のために建物空間の可変性を高める研究開発と、拠点選択の柔軟性を高めるためにサイバー空間の利便を取り込んだフィジカル空間整備が必要となる。また、その時々状況に即した「場」を提供するためには、状況を感知しそれを「場」に伝えられるセンシングと情報インフラが必要となる。この情報インフラにおいては、多様なデバイスによる多量のセンシングと、その多様かつ多量なデータを用いた個人や地域に応じた予測・サービスのために、固有の企業や機関に寄らないオープンなデータ共有と活用が求められる。さらに、この社会が実現した際の人々の拠点選択のあり方や地域の連携のあり方、住民の幸福に寄与し住民に受け入れられるサービス提供のあり方など、建物技術や通信技術などの工学分野のみならず、これら技術と人を繋ぐUI/UXの観点や、地域の魅力と人を繋ぐ人文地理学、心理学・社会学の観点も欠かすことはできない。

実現までのロードマップとしては、まず2030年まではムーンショット型研究開発として、現在コンセプト段階で実現していない要素技術を各業界分野の研究開発により実用レベルに到達させることと平行し、それらを統合したものとして小規模の建物やシステムとしてPoCを実践し、有効性を示しながらのアジャイル開発を提案する。その後の2040年まで、PoCで示した実例を今度は各自治体や企業の自発的な開発によりいくつかの都市やエリアで実装し自律的に進化するモデルを確立し、2050年までにはこのFlexなインフラによる豊かな暮らしを日本国内あらゆる場所に住む人々が享受できるように広げていきたい。

本調査研究で提案する社会像を実現するために研究開発が求められる分野は多岐に及ぶ。各業界が連携をしながらこの目標に向かって技術開発を進め、目先の経営保守に走る

ずにオープンイノベーションがすすむ環境を醸成することで従来にはないサービスを生み出し、住民の幸福に資する技術とすることが大切である。

V. 参考文献

- [1] 国土交通省, “2050年の国土に係る状況変化,” 2020-9. [オンライン]. Available: <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001361256.pdf>.
- [2] 国土交通省, “空き家の現状と課題,” 2021-06-07. [オンライン]. Available: <https://www.mlit.go.jp/common/001125948.pdf>.
- [3] 厚生労働省, “働き方改革 一億総活躍社会の実現に向けて,” 2019-04. [オンライン]. Available: <https://www.mhlw.go.jp/content/000474499.pdf>.
- [4] 内閣府, “スーパーシティ,” [オンライン]. Available: <https://www.chisou.go.jp/tiiki/kokusentoc/supercity/openlabo/supercitycontents.html>. [アクセス日: 2021-06-29].
- [5] 内閣府, “ムーンショット型研究開発制度,” [オンライン]. Available: <https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/index.html>. [アクセス日: 2021-06-29].
- [6] 竹中工務店, “札幌ドーム,” 2001. [オンライン]. Available: <https://www.takenaka.co.jp/majorworks/10801052001.html>. [アクセス日: 2021-07-05].
- [7] 三浦公亮, “地図・折り紙・宇宙 -ミウラ折りをめぐって,” *地図*, 第35巻, No. 2, p. 1 – 10, 1997.
- [8] 十亀昭人准教授 (東海大学), Interviewee, *展開構造物に関するヒアリング*. [インタビュー]. 2021-04-14.
- [9] 日産, “INTELLIGENT PARKING CHAIR,” [オンライン]. Available: <http://www.nissan.co.jp/BRAND/TFL/IPC/>. [アクセス日: 2021-07-05].
- [10] Ori, Inc., "Ori," [Online]. Available: <https://www.oriliving.com>. [Accessed 2021-06-29].
- [11] dailymail, "Chinese builders construct ten-storey apartment block in 29 HOURS," 2021-06-23. [Online]. Available: <https://www.dailymail.co.uk/news/article-9716291/What-wrong-Chinese-builders-construct-ten-storey-apartment-block-29-HOURS.html>. [Accessed 2021-06-23].
- [12] 江村英哲, “大規模コロナ用病院10日間で建設,” *日経XTECH*, 23 3 2020. [オンライン]. Available: <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00154/00832/>. [アクセス日: 2021-06-29].
- [13] Honda, “TOKYO CONNECTED LAB 2017,” 2017. [オンライン]. Available: <https://www.honda.co.jp/motorshow/2017/TCL/>. [アクセス日: 2021-06-29].

- [14] 笠井浩, 親本俊憲, 柳橋邦生, 佐藤秀雄, “資源循環型住宅技術開発プロジェクト技術成果概要,” *コンクリート工学*, 第 巻41, 第 12, p. 3-40, 2003.
- [15] 寺町幸枝, “「3Dプリンターの家」2021年最新事情! ついにオランダで賃貸スタート、日本も実用化が進む,” *suumo*, 2021-06-24. [オンライン]. Available: <https://suumo.jp/journal/2021/06/24/180708/>. [アクセス日: 2021-06-29].
- [16] “PENTA-HARD,” *新建築*, 6月号, pp. 154-161, 2021.
- [17] “堀ビル保存活用事業,” *新建築*, 6月号, pp. 148-153, 2021.
- [18] 竹中工務店, “登録有形文化財「堀ビル」をシェアオフィスとして運用開始,” 2021-04-20. [オンライン]. Available: <https://www.takenaka.co.jp/news/2021/04/04/index.html>. [アクセス日: 2021-06-29].
- [19] Atmoph Inc., “Atmoph Window Up,” 2021. [オンライン]. Available: <https://atmoph.com/ja/products/up>. [アクセス日: 2021-07-05].
- [20] BAE編集部, “すべての窓を映像表現の場に変える「透明スクリーン」の活用法と効果,” 13 9 2019. [オンライン]. Available: <https://bae.dentsutec.co.jp/articles/kareido-screen/>. [アクセス日: 2021-07-05].
- [21] E Ink, “E Ink | 建築、空間設計,” [オンライン]. Available: <https://jp.eink.com/architecture.html>. [アクセス日: 2021-07-05].
- [22] Umbrellium Ltd., “Starling Crossing,” 2017. [Online]. Available: <https://umbrellium.co.uk/projects/starling-crossing/>. [Accessed 2021-07-05].
- [23] 竹中工務店, “ビッグデータ、AIによりスマートビルを推進するデータ・プラットフォームの新機能を開発,” 2021-05-19. [オンライン]. Available: <https://www.takenaka.co.jp/news/2021/05/02/>. [アクセス日: 2021-06-29].
- [24] ココジカ, “デジタル技術が生む暮らし「EQ House」を体験する,” 2019-06. [オンライン]. Available: https://www.sunwood.co.jp/sunwoodclub/webmagazine/magazine_201906.html. [アクセス日: 2021-06-29].
- [25] 竹中工務店, “EQ House,” [オンライン]. Available: https://www.takenaka.co.jp/eq_house/. [アクセス日: 2021-06-29].
- [26] 文部科学省, “プログラミング教育,” [オンライン]. Available: https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/zyouhou/detail/1375607.htm. [アクセス日: 2021-07-05].
- [27] Apple, Inc., “Human Interface Guidelines: HomeKit,” [Online]. Available: <https://developer.apple.com/design/human-interface-guidelines/homekit/overview/introduction/>. [Accessed 2021-06-29].

- [28] 内閣府, “Society 5.0,” [オンライン]. Available:
https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/. [アクセス日: 2021-06-29].
- [29] “Mirror World #デジタルツインへようこそ,” *WIRED*, 第33巻, 2019.
- [30] コモングラウンド・リビングラボ運営委員会, “コモングラウンド・リビングラボ資料,” 2020. [オンライン]. Available:
https://www.cgll.osaka/assets/img/home/cgll_document.pdf. [アクセス日: 2021-07-08].
- [31] Motto AR編集部, “xRとは? AR・VR・MR・SRの総称 | それぞれの共通点と違いを解説,” 2020-09-28. [オンライン]. Available: <https://www.motto-ar.com/start-xr-202009/>. [アクセス日: 2021-06-29].
- [32] 総務省, “これからの移住・交流施策のあり方に関する検討会報告書,” 2018-01. [オンライン]. Available: https://www.soumu.go.jp/main_content/000568239.pdf.
- [33] 国土交通省, “「国土形成計画の推進に関する世論調査」補足説明資料,” 2015-10. [オンライン]. Available: <https://www.mlit.go.jp/common/001106577.pdf>.
- [34] 国土交通省国土政策局地方振興課, “全国二地域居住等促進協議会,” 2021. [オンライン]. Available: <https://www.mlit.go.jp/2chiiki/>. [アクセス日: 2021-06-29].
- [35] 総務省, “二地域居住等関連施策,” 2021-03. [オンライン]. Available:
https://www.mlit.go.jp/2chiiki/files/210309document_07.pdf.
- [36] “特集「Affective Computing」,” *人工知能*, 第36巻, 第1号, 2021.
- [37] ソニービジネスソリューション株式会社, “NTTドコモのWebイベント「docomo Open House 2021」にて5Gを活用した新たな通信の可能性をコンセプトムービーで公開,” 2021-02-04. [オンライン]. Available:
https://www.sony.jp/professional/News/sbsc_info/2021/20210204.html. [アクセス日: 2021-06-29].
- [38] ITU, “ITU Focus Group on Autonomous Networks (FG-AN),” 2021. [Online]. Available: <https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/an/Pages/default.aspx>. [Accessed 2021-06-29].
- [39] 科学技術振興機構, “未来社会創造事業 採択課題一覧,” 2020-12. [オンライン]. Available: <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/uploads/project-r02.pdf>.
- [40] 田野俊一, “共創進化型Society5.0の出現による世界の劇的变化と国家プロジェクトの必要性,” 著: ムーンショットミレニアプログラム *Flex* インフラを考える会公開シンポジウム「場と幸せのカタチ2050」, オンライン, 2021.
- [41] *ITU-T, X.1363: Technical framework of personally identifiable information handling in Internet of things environment*, 2020.
- [42] 総務省, “「IoT/BD/AI 情報通信プラットフォーム」社会実装推進事業 課題III.IoT デ

- バイス/プラットフォーム等の連携技術の確立と相互接続検証に向けた研究開発,” 2019. [オンライン]. Available: https://www.soumu.go.jp/main_content/000699987.pdf.
- [43] 内閣府・総務省・経済産業省・国土交通省スマートシティ官民連携プラットフォーム, “スマートシティーガイドブック2021.04.ver.1.00,” 2021-04-09. [オンライン]. Available: https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/smartcity/index.html.
- [44] 内閣府地方創生推進事務局, “スーパーシティ区域の指定に関する地方公共団体からの提案,” 2021-04-20. [オンライン]. Available: https://www.chisou.go.jp/tiiki/kokusentoc/supercity/koubo/supercity_broucher.pdf.
- [45] 仙台市ヒアリング (2021年6月23日実施) . [インタビュー].
- [46] 電気設備学会, BACnetシステムインターオペラビリティガイドライン, 一般社団法人電気設備学会, 2017.
- [47] 樋口ゆり子, ムーンショットミレニアプログラム 合同シンポジウム「2050年 自遊に生きる」, 2021.