



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

「インフラの投射によって実現される 動的生活空間に関する調査研究」 調査研究報告書

令和3年7月

目標検討チーム「Candy Factory」

チームリーダー：上野 真（国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 航空技術部門
数値解析技術研究ユニット 主任研究開発員）
サブリーダー：阿部 侑真（国立研究開発法人情報通信研究機構 ネットワーク研究所
ワイヤレスネットワーク研究センター 宇宙通信研究室システム研究室 研究員）
チームメンバー：内山 貴啓（国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 航空技術部門
空力技術研究ユニット 研究開発員）
山田 健翔（国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 航空技術部門
数値解析技術研究ユニット 研究開発員）
笹森 萌奈美（国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 航空技術部門

航空システム研究ユニット 研究開発員)
木村 華 (宇宙航空研究開発機構 航空技術部門 事業推進部 主事補)
加藤 裕之 (国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 航空技術部門
空力技術研究ユニット 主幹研究開発員)
辻 宏之 (国立研究開発法人情報通信研究機構 ネットワーク研究所
ワイヤレスネットワーク研究センター 宇宙通信システム研究室 室長)
伊藤 彰 (パナソニック株式会社 インダストリアルソリューションズ社
電子材料事業部 企画センター 事業開発部 事業開発1課 主任技師)
中塩屋 祥平 (パナソニック株式会社 イノベーション推進部門 デザイン本部
未来創造研究所デジタルリレーションラボ
コミュニケーションデザイン課 シニアデザイナー)
中居 慎太郎 (パナソニック株式会社 アプライアンス社
コールドチェーン事業部 商品技術部 小型ショーケース開発課)
濱本 翔 (株式会社そらや代表取締役)
田道 靖久 (長崎県五島市 総務企画部 政策企画課 政策企画班 係長)
山口 行隆 (長崎県五島市 総務企画部政策企画課 課長補佐)
中元 達也 (清水建設株式会社 フロンティア開発室 ベンチャービジネス部 主任)
前田 裕一 (清水建設株式会社 土木技術本部 海洋プロジェクト室主任)
安藤 香織 (奈良女子大学 生活環境学部 准教授)
坂井 洋子 (国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 有人宇宙技術部門
月周回有人拠点居住棟プリプロジェクト 研究開発員)
一水 紗理 (国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 有人宇宙技術部門
きぼう利用センター 研究開発員)
山田 耕史 (国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 有人宇宙技術部門
新型宇宙ステーション補給機プロジェクトチーム 研究開発員)
矢野 雄一郎 (国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波研究所
電磁波標準研究センター 時空標準研究室 研究員)
佐藤 知紘 (国立研究開発法人情報通信研究機構 Beyond5G 研究開発推進ユニット
テラヘルツ研究センター テラヘルツ連携研究室 主任研究員)
山口 紗佳 (奈良女子大学 生活環境学部 学部生)
田中 里奈 (奈良女子大学 男女共同参画推進機構
ダイバーシティ研究環境支援本部 教育研究支援員)
張 芸誼 (奈良女子大学 大学院人間文化総合科学研究科 大学院生)

【～2021年3月31日】

湯村 翼 (国立研究開発法人情報通信研究機構 オープンイノベーション推進本部
ソーシャルイノベーションユニット 総合テストベッド研究開発推進センター

テストベッド研究開発運用室 研究員)

久保 実 (長崎県五島市 総務企画部 部長)

村井 靖孝 (長崎県五島市 総務企画部 政策企画課 課長補佐)

目次

I. MS 目標案のコンセプト

1. MS 目標案
 - 1.1 MS 目標案の名称
 - 1.2 実現したい 2050 年の社会像
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
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
 - 3.2 目標達成の社会的意義
 - 3.3 当該 MS 目標の達成に向けた社会全体の取組み概要
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

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）や必要な取組
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
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

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
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
3. 目標達成に向けた国際連携の在り方
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
5. 目標達成に向けて取り組む上での倫理・法的・社会的課題及びその解決策

IV. 結論

V. 参考文献

Appendix

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、インフラの拘束から解放されて暮らし方の自由度が飛躍的に向上した社会を実現」

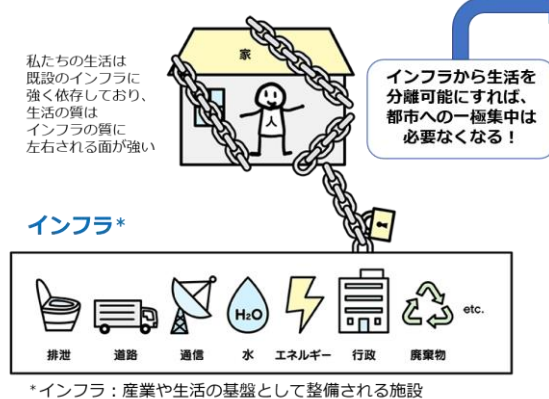
1.2 実現したい 2050 年の社会像

2050 年にはインフラのポータブル化によって任意の場所にインフラサービスを投射（持ち運び、展開し、機能させること）できる Infrastructure Projection Anywhere（IPA）技術が完成している。2021 年現在、私たちの生活空間はインフラの存在無しには成り立たず、インフラは地域と強く結びついているため住居といった生活空間の主要な要素は静的（Static）である（図 1：左図）。しかし、IPA 技術によって私たちの生活は静的な住環境に縛られなくなり、豊富な選択肢の下、より多くの人が自分の生き方を自分で好きなように選ぶことができる社会が実現している（図 1：右図）。

IPA 技術は、人間の生活に不可欠な様々なインフラをほぼ任意の場所に成立させ、宇宙ステーションのような自己完結した生活空間を各世帯に提供する。さらに、広帯域のネットワーク通信技術により、リッチなユーザー体験（UX）を通してどのような場所にいようともその場に臨んでいるのと変わらないコミュニケーションを実現することを可能にする。また、高速な完全自動無人輸送が確立されており、必要なものは必要な時に手に入れることができる。

つまり人々は自身の生活空間を移しながら非常に流動的にコミュニティを形成することが可能になり、仕事や教育、娯楽などの活動を全く新しい形で営んでいる。このような生活空間を Dynamic Living Space (DLS) と呼ぶ。従来ほとんどインフラを享受できなかったような地域でも都市レベルの利便性・快適性を容易に手にできるようになり、土地の格差は解消され、オフィスや学校のみならず都市という概念すら物理的なものから機能だけが分離された仮想的なものに転換されている。行政や自治体も地域に縛られない流動的なものになっており、自治体の在り方や住所、税制など社会構造にも大きな変化が起きている。

現在の社会像



2050年の社会像

暮らし方が土地のインフラに縛られることはなくなり、自分の暮らし方をもっと自由に追い求めることができる社会

Infrastructure Projection Anywhere (IPA) 技術
インフラをパッケージングして投射* = この社会像を実現するキー技術

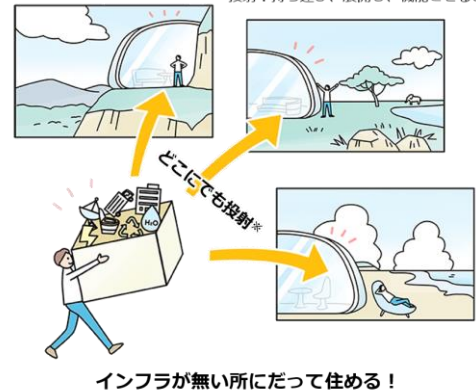


図1：本 MS 目標案で掲げる社会像を示した図

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

本目標は一般世帯における生活を変革するものである。インフラを投射可能にして土地との拘束から切り離すことで、ほぼオンデマンドに好きな場所での生活（Dynamic Living Space; DLS）を始めることができる。これは自らが体験したい場所に直接赴いて全身で体験することを最優先として、その経験を最大化して創造的に生きるための全く新しい生活様式である。

2050 年に本 MS 目標案が達成された社会の場面を鳥瞰図的に示したものが図 2 である。人々は好きな場所に暮らし、好きなタイミングで好きなコミュニティを形成している。詳細は II で述べるが、この暮らしは、人間らしく暮らすために必要な二つの機能、すなわち

- 「生活を成り立たせる機能」
- 「生活を彩り豊かにする機能」

によって実現されている。

「生活を成り立たせる機能」は

- 「エネルギーが自給できること」
- 「資源が循環できること」
- 「物資が届くこと」

の 3 つの機能からなり、インフラを地面から切り離しどこにでも投射できるようにすることで実現する。また、「生活を彩り豊かにする機能」は、

- 「『場』を体験できる」ようにすること

で実現する。

詳細は III で述べるが、これらの機能を実現するために、本目標では望む誰もがオンデマンドに暮らせる生活基盤となる技術を 2050 年までに確立する。具体的には、

- 高度に自立できる「エネルギー自給」と「資源再生循環」の技術

- 動的なコミュニティを醸成・受容する社会意識の下、オンデマンド性の高いニーズに応える「完全自動輸送」の技術
- たとえその場になくとも、遠隔地にいる人や遠隔地の環境を自分の居場所に違和感なく再現する「五感通信」の技術
- 家自体を空間再現デバイス化することで、上記 4 つの技術を統合して人々の望みに柔軟に応える空間構築技術と家電環境からなる彩り豊かな「環境構築デバイスとしての家屋」を実現する技術

の 5 つの技術要素が相当する。

図 3 は生活像にフォーカスして上記 5 つの技術が完成された時の生活場面を示している。図 3 (a)では、エネルギーは自然エネルギーで自給され、水や有機物は再生循環されると共に、それらで賄えない物資は完全自動輸送で供給されている。すなわち、インフラが地面に紐づけられる必要は無い。これを象徴的に表すために家にはタイヤのようなものが付いている。図 3 (b)では、図 3 (a)の水回りのことを特に示しており、水や有機物が循環再生されている。1 人が一日に使用する水の量は 200 リットルを超えと言われ[1]、水は縮まらないため貯蔵を効率的に行う必要がある。この図ではテーブルの下を水の貯蔵庫かつインテリアとして活用している。図 3 (c)と(d)では、家が住む場所から場の再現をするデバイスに転換したことを現わしており、図 3 (c)のようなくつろぎの時間には外の景色を最大限利用して、図 3 (d)のような仕事の時間では、場を仕事に適したものに転換している。いずれの場合でも五感を伝送して再現できるようになっており、あたかもその場に居合わせているような感覚で、あるいはよりその場にいることのメリットを感じられるような感覚で、場を体感しながら生活することができる。

中間時期である 2030 年においては、本 MS 目標案の生活基盤を構築する上で基礎的な部分の技術が開発されており、アーリーアダプターが積極的に試せる環境が整備され、本 MS 目標案が達成された社会におけるコミュニティの在り方といった社会面の骨子も形成されていく地盤が築かれている。

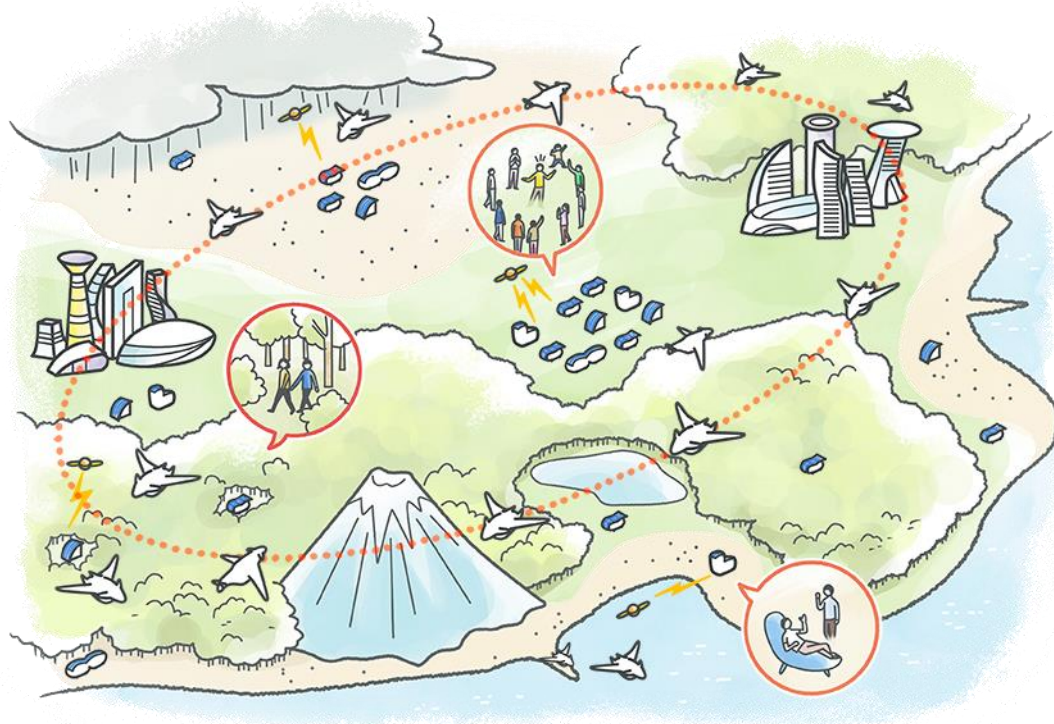
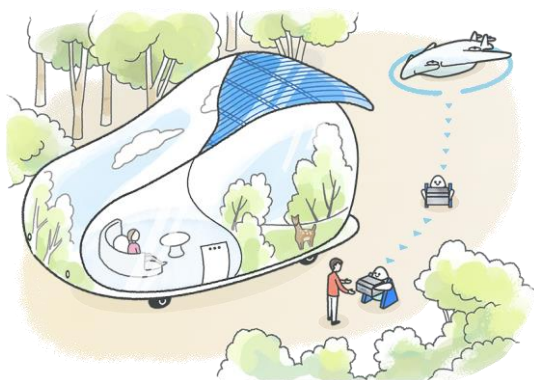


図 2：本 MS 目標案を達成した社会像のシーン



(a)



(b)



(c)



(d)

図3：本 MS 目標案を達成した生活の象徴的なシーン
(a)：輸送、(b)：水回り、(c)：くつろぎ、(d)：仕事

このような社会像の変化によって、2050 年の都市像も大きく変わる。本 MS 目標案はインフラを投射可能にして土地との拘束から切り離すことで、ほぼオンデマンドに好きな場所での生活（Dynamic Living Space; DLS）を始めることができる。そして、概念的には都市像を図 4 の左側に示す従来の延伸的なものから右側に示す「点の集合」へと変容させる。現代の都市像は人口密集地域を中心として延伸的にインフラ整備を進めていくものであり、広大な市域に対して人口が集中している領域は小さいため、市域全体のインフラ維持には莫大なコストがかかる。一方、世帯ごとにインフラを維持することになると、広大な市域全体にインフラを供給するために途中区間を維持する必要がなくなって人口密度に関わらずインフラの維持費は変化しないため、移住に伴うハードルは著しく下がっている。この結果、2050 年にはインフラを整備しなくても事実上どこにでも住むことが可能になっており、それに伴う生活の変化に応じた法規や行政の仕組みの整備も完了している。

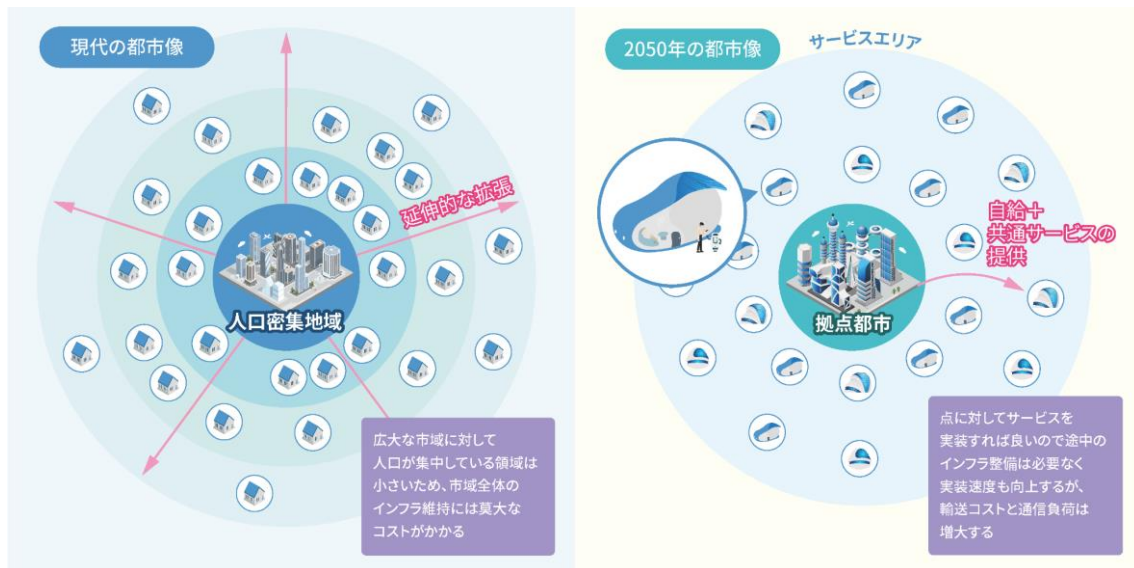


図4：現代の都市像と2050年の都市像の比較

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

本 MS 目標案は、「2050 年までに、インフラの拘束から解放されて暮らし方の自由度が飛躍的に向上した社会を実現」することで、大きく分けて二つの要請に応える。一つ目は都市への人口集中の必要性を解消すること。もう一つは、インフラ更新・保守・保全コストを削減することである。

具体的には以下に説明するが、これらは人々の生活様式に大きな変化を与え、それに沿って多岐にわたる既存社会のシステムを再構築せねばならない。したがって、これまでになかったインフラのパッケージ化に要する高度な技術の研究開発に加え、広範で多側面にわたる社会システムの変化や、多くの関係機関との連携を要する。同時に、人々が無理なく段階的に生活様式を移行するためには、行政や法制の変化及び時間をかけた適合の仕組みが必要である。よって、本 MS 目標案は、国家が長期にわたって取り組まねばならない課題と言える。

また、本 MS 目標案の達成のために必要となる社会システムの再構築のためには、1.2 で述べたような「エネルギー自給」、「資源再生循環」、「完全自動輸送」、「五感通信」、「環境構築デバイスとしての家屋」といった広範囲な分野を含む活動が必要となる。すなわち、我が国の研究開発プログラムとして取り組むべき課題が多数含まれている。

3.1.1. 都市への人口集中必要性の解消

(都市のメリット)

社会的生き物である人間は生来集まって生活しており、古来集積によって市が立ち都市へと発展する中で、商売・学術・娯楽を享受することで経済・文化を活性化し、文明を築

いてきた。経済学者である山崎[2]は、都市への人口集中を招く4つの原因を挙げている。第一に、face-to-face のコミュニケーションと移動費用の削減である。人々は直接会って触れ合うことに重きを置き、そのための移動費用を互いに節約するために都市部への集積が効率的になる。第二に、多様な財やサービスが揃っていることである。需要量の規模が大きいため、企業同士が差別化を図り自然にモノやサービスが多様になる。第三に、労働の多様性である。需要規模が多く、多種多様な財やサービスが採算に乗ることから、様々な能力を持った労働者が集まる。すると、多様な企業が多彩な労働者を獲得するべく都市部に集合し、さらに生産性を向上させる。第四に、十分な公共財である。特に、人口が集中した場所では多額の予算が使えるのでより多様な公共サービスを受けることができ、地域が便利になる。さらに人が集まれば、一人当たりのコスト負担が低下する。

一方、都市部に住む人々は都市部の恩恵を受けられるが、劣悪な住居環境や様々なリスクを承知で都市部に留まることになる。都市の過密化は、大気や河川の汚染といった公害、交通渋滞および混雑現象などの都市問題、災害発生時の被害が甚大化する危険性の上昇、自然の少なさや情報過多などの不自由さ、地方の希薄化といった多くの弊害を生む。しかし、都市の便利さや魅力は都市部に住み続けなければ、享受することができない。

（災害による危機）

一方、人口の集積は COVID-19 パンデミックの到来によってより喫緊の脅威となっている。人口密度と感染者数との相関が指摘されており[3]、国連の「都市化する世界と COVID-19 に関する政策概要」[4]では COVID-19 感染者数の 90%が都市部で発生していると報告されている。加えて東京圏はパンデミックのみならず首都直下地震の危険性も指摘され続けている[5]。

（成長の限界）

ところで、西崎[6]は「東京の生産性が突出して日本の成長をリードしてきたとはいえず」、低所得国以外では Williamson-Hansen の仮説（経済発展の初期の段階では全国的にインフラを整備する資金が無いため、一部の大都市へ集中的に投資を行うとともに起業の集積を進めるのが有利であるが、発展段階が進むにつれそうしたメリットが薄れ、デメリットが相対的に大きくなる。その結果、先進国においては大都市への集中度の高さはトレンド的な経済成長率（潜在成長率）にマイナスの効果を持つ）を確認する結果を得たとしている。すなわち東京は既に集中のメリットを得られなくなっているとする考えがあり、広井[7]は AI を用いたシミュレーション結果を経て一極集中から「多極集中」への転換を主張している。しかし、日本においては東京圏への一極集中の傾向が続いている。国土交通省の「企業等の東京一極集中に関する懇談会 とりまとめ」[5]によると、東京圏の人口は一貫して増加しており、国際的に見ても日本は首都圏人口の比率が高くかつ上昇が続いており、固定された一極集中によって国際的競争力を確保するために必要な流動性が失われていると考えられる。

（地方の疲弊と生活者の閉塞感）

人口減少局面に入っていく中で、日本における少子高齢化は東京圏への更なる一極集中もたらす[5]との指摘もあり、地方の疲弊[8]は今後さらに深刻化する可能性が高い。都市のスポンジ化[9]も進む中で地方の疲弊の解消は喫緊の課題である。しかし同時に、東京圏への流入者の移住の背景となった地元の事情について、[5]は『「仕事」や「進学先」関係の割合が高いが、女性を中心に「利便性」や「娯楽」、「閉塞感」等と回答する人も一定数存在』として「生まれ育った地元の不便さや閉塞感」を赤裸々に活写しており、現状のまま地方への人流を作るのは無理がある。我々は都市に人が集まる行動を、仕事や進学の選択肢を得るために加えて、男尊女卑の価値観が色濃く残る地方からの脱出など、いずれも自由度の向上を求める行動として理解した。

現代を生きる人々——特に日本人——は、みな閉塞感を抱えながら生きている。事実、我々の行った日本人を対象とした社会調査の結果、現在の生活での拘束感や疲労感、退屈感を抱えている人の割合が最大 60%近くいることが示されている（Appendix A.1）。また、内閣府「我が国と諸外国の若者の意識に関する調査（平成 30 年度）」[10]では、「自国の将来は明るい」と応えた日本の若者の割合は調査 7 か国（日本、韓国アメリカ、イギリス、ドイツ、フランス、スウェーデン）で最も低い割合を示した。

1950 年以降、一貫して首都圏人口比率の上昇が続いていることを考慮すると日本社会の構造は固定化しており、日本で自由度の向上を求めるには東京圏に出ざるを得ない。我々は気付かないうちに暮らしの方向性を、都市を中心としたものに固定化しており、生活の選択の自由度を失っている。流動性の欠如は経済的な問題のみならず、個人の生活における閉塞感としても現れているのである。

上記の通り、パンデミックや災害の回避、加えて生産性の限界や地方の疲弊といった喫緊かつ長期的な取り組みを必要とする課題があるにもかかわらず、実際には地方への人流の形成が大きな流れになるには至っておらず、またその流れを形成するには構造的な困難が存在するのが現状である。

3.1.2. インフラ更新・保守・保全コストの削減

（インフラの維持）

一極集中に加え、日本の中で大きな課題となっているのはインフラの更新・保守・保全である。国土交通省の 2018 年度の試算[11]では、以後 30 年間の国土交通省所管分野におけるインフラの維持管理・更新費は 176.5～194.6 兆円（下水道だけで 37.9～38.4 兆円）とされている。高度成長期に一気に整備されたインフラの老朽化は非常に大きく、かつ喫緊の問題となっており、建設から 50 年以上が経過している施設の割合は、道幅が 2 メートル以上の橋は 2023 年に 29%、2033 年には 63%、トンネルは 2023 年に 27%、2033 年には 42%にも上る[12]。また、近年は携帯電話の 5G 基地局など、新規インフラの整備もコス

ト要因になる。このような従来型インフラの特徴は、延伸的に広げる必要があることである。例えば、人口密度が低い地方でも、水道管や電力網を敷設しておく必要がある。人口減少局面において、インフラをどのように維持していくのか、世代交代に合わせてどのように更新していくのかは極めて困難な選択となる。

（インフラの世代交代）

一方、アフリカ大陸等の新興国では固定電話の普及を待たずに携帯電話網の普及が進んだことなど、リープフロッグ型発展が見られている[13]。旧来の充実したインフラを持つ先進国は、ますます開発速度が速くなる新しい技術を、後方互換性を持ちながら高速に社会へと組み入れなければならない。

これらを踏まえると、成長速度を維持しながら同時に高度なインフラを維持し続けるためには、インフラ更新・保守・保全コストを削減する抜本的な対策が必要である。

3.2 目標達成の社会的意義

I.1.1 で述べたように、我々の MS 目標案では「2050 年までに、インフラの拘束から解放されて暮らし方の自由度が飛躍的に向上した社会を実現」することを提案している。具体的にはインフラのポータブル化によって任意の場所にインフラサービスを投射（持ち運び、展開し、機能させること）できる Infrastructure Projection Anywhere（IPA）技術を実現することで、人間の生活に不可欠な様々なインフラをほぼ任意の場所に成立させ、宇宙ステーションのような自己完結した生活空間を各世帯に提供する。これは、I.3.1 で述べた構造的な困難を解消するものである。

3.2.1. 社会像の意義

前節 I.3.1 では喫緊の課題として、「都市への人口集中必要性の解消」と「インフラ更新・保守・保全コストの削減」を挙げたが、本 MS 目標案が示す社会像では都市に住むのと同等の利便性をどこにいても提供できるため、都市への人口集中自体が必要無くなり、東京一極集中に固定化された社会像を打破して経済発展に必要な流動性をもたらす。また、インフラが延伸的なものから世帯毎の点実装に転換されるため、市域全体でのインフラ維持の必要性が無くなり、インフラシステム全体での更新・保守・保全コストが削減され、更新速度の向上が実現できる。すなわち、掲げた社会的課題の解決が期待される。

本 MS 目標案の達成は都市部の魅力を享受するために必ずしも都市に住む必要がなくなることの意味する。すなわち、都市機能を持ち運び可能な一つのパッケージにまとめ、都市への過集中による弊害を解消する。

3.2.2. 達成シーンの意義

社会像の意義そのものは生活者に直接的なメリットとして感じにくいだが、達成シーンの意義は生活者の体感として認識される。社会像の意義には社会的課題解決のみならず、閉

塞感の解消も含まれる。本調査研究で人々の動的生活への潜在的欲求を調べたところ、本 MS 目標案が実現した場合の方が、現状のままの場合よりも高く、その意図の背景には自由な生活への憧憬があることが確認されている（Appendix A.1.3.6, A.1.3.8）。また、2050 年に実現してほしい社会像を尋ねたところ、本 MS 目標案により実現を図る社会像に相当する「自分で移動して、様々なことを実際に体験できる社会」を望む人の割合は他の社会像と比べて高かった（Appendix A.1.3.5）。この結果より、人々は可能であるならば、動的生活を望んでいることがわかる。すなわち、人々の志向は上記の社会像がもたらす動的生活像とマッチしており、達成シーンは社会面で好ましいだけでなく、生活者にとって受け入れやすいため、MS 目標案の社会への適合性は高い。

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 MS 目標案を達成するためには、広範囲な分野・セクターによる連携や、先進国、新興国、発展途上国との国際連携が必要不可欠である。

本 MS 目標案を達成するための課題は、現状のインフラが土地に固定されていることである。その課題を解決してインフラをどこでも展開し機能させるためには、現在の社会像からの大規模な変革を目指す必要がある。そのためには、何か一つの突出した技術を実現することよりも、技術群を適切に配置することで社会全体として統合した機能を有する社会を実現することが重要になる。本 MS 目標案が目指している社会像を成立させるための重要な機能が一つでも欠落していると、社会像全体の成立性が危ぶまれる。また、社会像の変革によって生じる副作用への対処は、行政や立法、ソーシャルセクターの参画が極めて重要である。したがって、本 MS 目標案の達成に向けた社会全体の取組みとしては、社会システム工学による舵取りと社会像としての技術的整合性の確保と共に、必要な仕組みや法規を整備するための社会デザインの考え方を軸として、その周りに必要な技術要素を配置して取り組みを行うことが重要である。

本 MS 目標案は都市の機能をあらゆる場所に実現するものであるため、技術面で関係する分野やセクターは非常に広範になる。したがって、I.2 で述べた 4 つの技術要素（「エネルギー自給」、「資源再生循環」、「完全自動輸送」、「五感通信」）を実現するために、エネルギー生成・循環、水循環・再生、廃棄物循環・再生、輸送、情報通信、家屋、家電、建設等の広範囲な分野と、都市構造の設計まで含めたセクターを越えた連携が必須である。

本 MS 目標案の達成には、諸外国との連携も必要不可欠である。詳細は III.5 に述べるが、本 MS 目標案を作成する調査研究の中で、世界六大州出身の外国籍の方と日本国内各地の日本国籍の方を集めて国際ワークショップを開催し、本 MS 目標案が掲げる社会像に対して好意的な反応があったものの、コミュニティをどのように維持するか、加えて公的な機能をどのように機能させるかが課題として浮かび上がった。先進国との研究開発における連携はもちろんのこと、現在まさに都市過密化の問題に直面している新興国、特に ASEAN に加盟する東アジア諸国との連携にあたっては、同じ問題を抱えるパートナーとして共に本 MS 目標案に取り組む必要がある。また、日本において本 MS 目標案が達成さ

れ、発展途上国を始めとした海外へ当該技術を積極的に輸出することで、発展途上国の主体的・自律的な発展の支援が可能となる。

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

本 MS 目標案達成によって社会は動的な生活を可能とするものになり、主に通信網や輸送網を介してサービスが提供されるものとして都市は仮想化される。すなわち、都市に集中的に居住する必要性は消滅するため、社会構造は大規模に変化する。また、仕事での人のつながりと地縁が分離した都市型の人間関係が普遍化するため、従来の地縁に頼った地域社会は新たな関係性の構築を求められる。これは、行政や福祉に対して大きなチャレンジを要求するであろう。一方で、地方に制約されることが少なくなるため、生まれ育った土地に住み続けながら、新たな教育機会や就業機会を得たり、あるいは逆に社会基盤の維持が困難になりつつある地域に移住して新たな経済活動を開始したり、といったことも可能になる。また、インフラ機能を個人の住居に持たせることは公共の負担が減ると共に、個人の負担が増えることを意味し、税負担を軽減させるか、世帯に補助金を助成するか、といった公共投資負担の変化、移動に伴う住民票や住民税の概念の変化といった、大規模な社会システムの変更を伴う。

また、インフラが延伸的なものから点実装に転換されるため、これまで行われてきたインフラ投資は縮退し、インフラ維持のための産業に代わって点で生活する世帯向けのインフラ機能維持産業が活性化するなど、産業構造也大規模に変化する。なお、COVID-19 パンデミックの影響で、リモートワークの選択肢が取りやすくなったが、製造業ではリモートワークが難しい曲面も多い。本 MS 目標案で直接的に掲げることはしないが、ムーンショット目標 1 [14] の掲げる「サイバネティック・アバター」やムーンショット目標 3 [15] の掲げる「AI ロボット」などの活用によって、製造業でも工場の自動化が極限まで進み、リモートワークが主要な働き方になり、誰もが本 MS 目標案の掲げる動的な生活空間 (Dynamic Living Space) の恩恵を享受できるようになることを期待している。

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）や必要な取組み

2050 年に本 MS 目標案が達成されて完成している機能として、I.2 では「生活を成り立たせる機能」を構成する 3 つの機能（「エネルギーが自給できること」、「資源が循環できること」、「物資が届くこと」と、「生活を彩り豊かにする機能」を成り立たせる（五感まで再現するリモート環境を構築して「『場』を体験できる」ようにすること）の、あわせて 4 つの機能を実現する必要があることを述べた。本節では社会的課題からスタートして、これらの機能の導出について述べる。

I.1.1 で述べたように、本 MS 目標案では「2050 年までに、インフラの拘束から解放されて暮らし方の自由度が飛躍的に向上した社会を実現」する。すなわち、インフラと土地との拘束を解消して、インフラをどこにでも展開し機能させる。そこで、どのような自由度の向上が求められるかという観点から様々な社会的機能を導出することで機能分解を行った。具体的には、本 MS 目標案は I に述べたように、どこに住んでいても都市と同等の機能を実現するものであるため、都市と地方の比較から都市での暮らしにおいて期待される機能を明らかにした上で、それらの機能をどこでも享受可能にするためにはどのような課題が考えられるかを検討して目標を機能ごとに分解し、それらの実現に際して社会的・技術的に障壁となるものとして課題を明らかにした。ここで、本報告書において都市の明確な定義や数値情報が必要になった場合は Urban Centre database[16]に基づく人口集中領域を参考とする（詳細は Appendix A.2 参照）。

まず、暮らしに期待される機能の導出から目標の機能分解までの詳細は Appendix A.3 に述べられている。最終的に導出された本 MS 目標案の機能分解は表 1 に示されている「暮らしの 14 項目」と名付けられた項目である。エネルギー／生活インフラといった暮らしに必須の機能に加えて、意外な発見・出会いといった機能も、暮らしの自由度を向上させる上で必要なものであるという結果を得た。それらの機能を自在性という観点からまとめ直すと、「暮らし」、「環境」、「情報」、「コミュニティ」、「仕事」、「移動」の 6 つの自在性が重要である。また、これらは、「都市にも地方にもレベルの差はあるものの共通して存在する機能」（必須機能）と「地方のメリットを維持した上で、享受したい都市の機能」（差分機能）に分類される。必須機能は暮らしを成り立たせるために必須の機能であり、差分機能は暮らしを彩り豊かにする。

表 1：本 MS 目標案の暮らしに基づいた機能分解

性質	分類	項目	自在性
受動的に 享受する 機能	必須機能	1. エネルギー／生活インフラ	暮らしの自在性
		2. 安心／安全のためのサービス	
		3. 暮らしを支えるサービス	
		4. 地域に魅力があること	環境の自在性
		5. 環境との調和	
	差分機能	6. 意外な発見・意外な出会い	情報の自在性
		7. 人と会う機会（面白い人・多様な人と会う機会）	コミュニティの自在性
		8. 仕事のための情報が得られること （人との出会いを通じて情報を得ること）	
		9. 受けた教育が受けたときに受けられること	
		10. 自分のやりたい仕事を選べること	仕事の自在性
		11. 話題になっているヒト・モノ・コトへの容易なアクセスができること	情報の自在性
		12. 欲しいもの・手に入るものが制限されないこと	移動の自在性
		13. ものに簡単にアクセスできること＋その安心感	
		14. 好きな時間に移動できること	
能動性が 妨げられ ないため の機能			

新しい「都市像」では、これらの機能を維持しつつ「どこにでも住める」、すなわち地方でも都市でもどこに住んでも同じ品質の生活を実現する必要がある。「どこにでも住める」は究極的には世帯レベルでどこにでも居住可能であることを意味する。しかし、救急医療・消防・警察・裁判所等の機能は日常的に各世帯と直接的な関係を持つものではないため、日常的に直接的な関係を持たないが社会として共有しておく、あるいは間接的に社会の成立性を担保する共有サービスは拠点都市に配置し、それ以外のものは各世帯が自己完結的に維持することで「どこにでも住める」を実現する形態として図4の都市形態を提案することにした。

このような都市像を前提とすればインフラを地面から切り離すことで暮らしを成り立たせることはできるが、都市での生活で享受できるものは暮らしを成り立たせる以上のものである。すなわち、表 1 における必須機能のみが満たされた状態である。どこでも都市と同じ品質の生活を実現するためには、暮らしを彩り豊かにする手立てが必要になる。本

MS 目標案では、五感まで再現するほどのリモート環境を実現することで、人と会う・買い物に行く・エンターテインメントを体験するといった暮らしを彩り豊かにする差分機能（表 1）をどこに住んでいても実現することを提案する。2021 年現在でも、リモートワーク環境は一般化しつつあるが、あくまで音声と二次元画像を用いた動画の送受信の範囲にとどまり、実際に会って話をするものとは大きく異なる。本 MS 目標案では、五感をリアルタイムに送受信することを可能にして、どこに住んでいても、あたかも人と会っているかのように、モノと触れているかのように、その場の空気感までも再現可能にする。

以上より、本 MS 目標案では暮らしの「必須機能」と「差分機能」をどこにでも投射（持ち運び、展開し、機能させること）を可能にすることで、都市のメリットをどこでも享受できるようにする。これに伴い、家屋の役割は従来の住むための器としての役割から、これらの必須機能と差分機能を実現する器へと役割を変えていくことになる（図 5）。

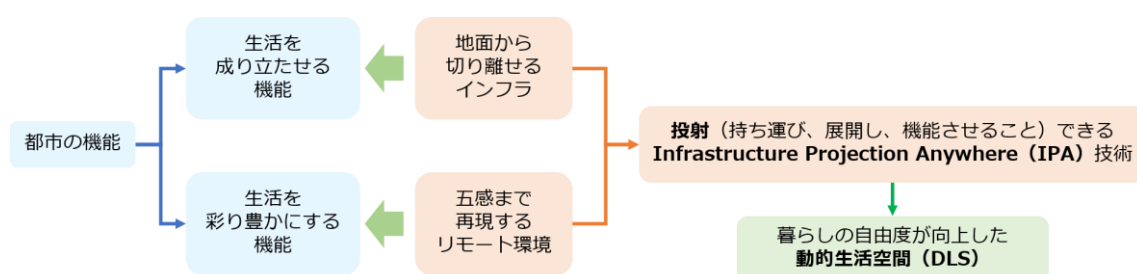


図 5：都市の機能をどこでも実現するための考え方

以上より、当該 MS 目標達成に向けて機能分解により抽出された暮らしの 14 項目を通じて必要な取組みが導かれる過程の俯瞰図を図 6 に示す。暮らしの 14 項目から必要な取組みを導く過程では、図 5 の考え方をベースとして「2050 年における人の生活像」を中心に、優先的に必要であると判断された項目を取組みとして選択している。社会を作り上げていく上ではここに示す項目以外の取組みも必要になるが、本報告では図 6 に示す 5 つの取組みについて述べる。また、I.3 で述べたように、本 MS 目標案を達成するためには、広範囲な分野・セクターによる連携や、先進国、新興国、発展途上国との国際連携が必要不可欠である。詳細は III.3, III.4, III.5 で述べる。

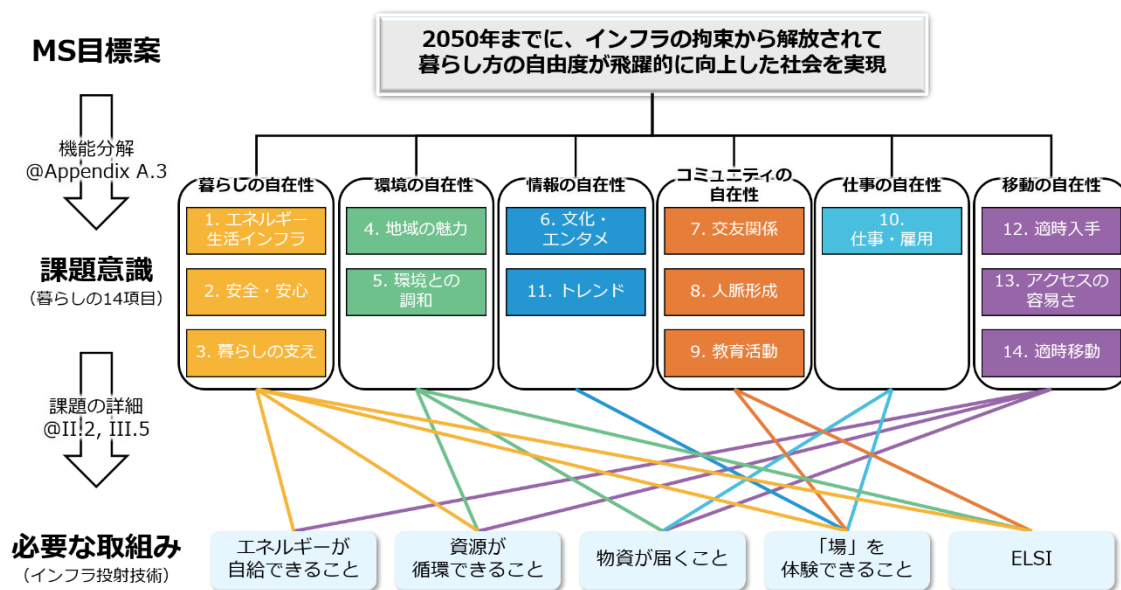


図 6：本 MS 目標案から必要な取組みまでの俯瞰図

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

本節では、本 MS 目標案の達成に向けた科学技術的課題及び必要な取組みを分野ごとに具体的に記述し、それぞれの技術に求められる研究開発を俯瞰的に示す。

まず、前節図 5 で述べたように、人間らしく暮らすためには生活を成り立たせる機能と生活を彩り豊かにする機能が必要になる。これを踏まえて表 1 に示した合計 14 個の要素に分解された都市機能とロジックモデル[17]に基づき、本 MS 目標案を達成するために取り組むべき具体的な課題を導出した。ロジックモデルの雛型と、ロジックモデルから導出された各項目の詳細は Appendix A.4 に示す。結論としては、図 6 に示すように「エネルギーが自給できること」、「資源が循環できること」、「物資が届くこと」、「『場』を体験できること」の 4 つを供給する機能が必要であることが導かれた。

これらの機能を維持しつつ I.3.2 で述べた「固定化された社会由来の不自由さの解消」を出発点として社会像として完結するように論理的な連関を考慮して再構成すると、図 7 のような因果関係をもって成立する。ここでは「固定化された社会由来の不自由さの解消」の解決策として「暮らしの実現に必要なものを投射」するにあたり、「生活を成り立たせる機能」としての「インフラ機能の維持」と、「生活を彩り豊かにする機能」としての「人とのつながりの維持」という二つの要素が必要であることから、これを満たすために必要な要素や技術のつながりが描かれている。最終的に得られた技術要素は II.1 で述べた技術要素を含んでいる。

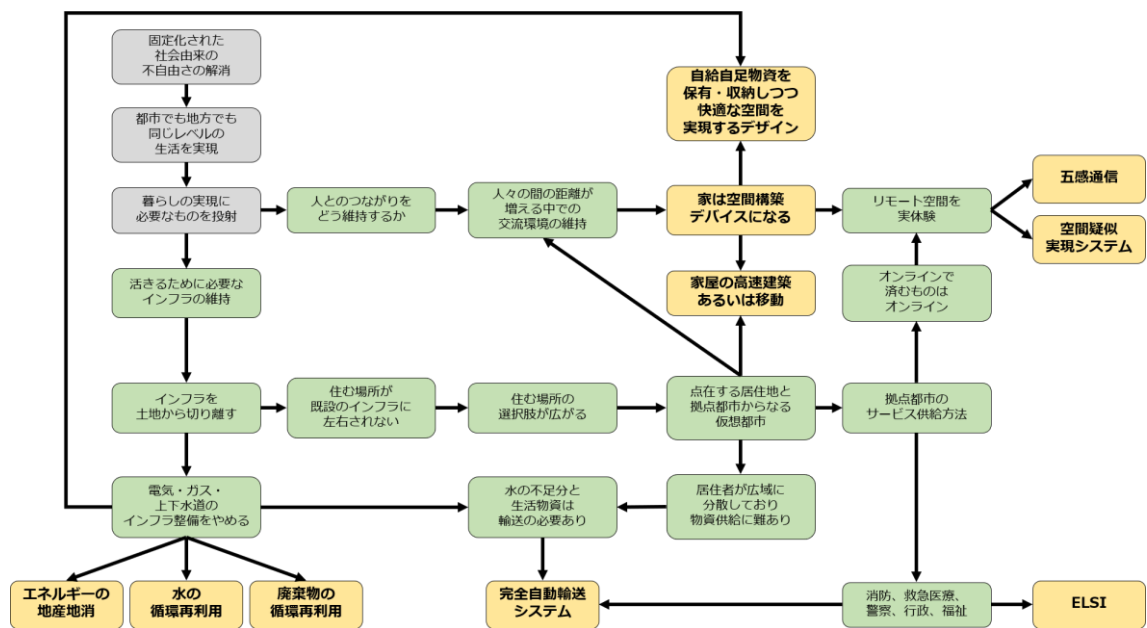


図7：動機と手段の論理関係（構成要素のうち、灰色は動機、黄色は技術項目と ELSI、緑は動機と技術項目をつなぐ途中経過を表す）

以下では、具体的に上記の実装手段の実現に係る課題について述べる。なお、仮想的な都市像であったとしても、人が住む以上、社会的な課題は存在する。加えて人の移住が促進されることや、各世帯間の距離が広がること等に伴う新たな社会的課題を解決するための取組が必要になる。これらについては III.5 に述べる。本目標に関連する分野・技術群の構造を図8に示す。

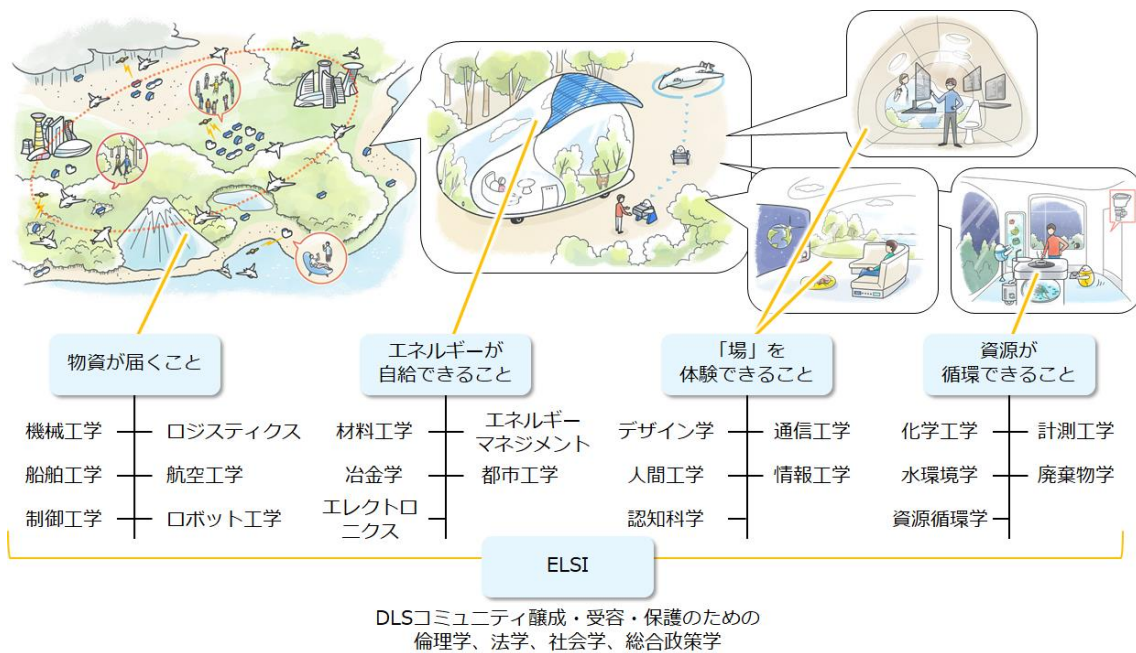


図8：本目標に関連する分野・技術群の構造

2.1 エネルギーが自給できること

2.1.1. 課題

II.1 の表 1 に示した暮らしの 14 項目のうち、「エネルギー／生活インフラ」を各居住空間で実現するためには、どこにいても居住空間単位でエネルギーを自給できる必要がある。

家庭で利用するエネルギーの主な供給源は電力、ガス、石油であるが、ガスと石油が担っていた給湯や暖房、調理といった機能はオール電化住宅[18]の例にもあるとおり、電力により代替可能である。電力は持ち運ぶことが難しいため、長大な電力ネットワークを通じて発電所から各需要家へ送られている。家庭用太陽光発電システムも実用化されているが、時間や季節、天候による発電量の変動が大きく、電力ネットワークへの接続を前提としている。したがって、電力ネットワークの有無に縛られず、どこにいても電力を利用するためには居住空間単位で電力を自給できる必要がある。

大人 1 名の単身世帯における電力消費量を試算すると約 5.6 kWh/日であり、これを再生エネルギーで賄おうとする場合、家庭用として標準的な太陽光パネル 6 枚から得られる電力（5.4 kWh/日：日照時間が少ない金沢における年平均実績値）に相当し、家庭用蓄電システムに用いるリチウムイオン蓄電池ユニット（容量：5.6 kWh、重量：68 kg）1 台に相当する（Appendix A.5 参照）。

2.1.2. 必要な取り組み

エネルギー自給によって克服される課題は、エネルギーインフラによる我々の生活基盤の土地への拘束である。電力は生活に必須なものであるが、人口減少局面においては発電や送電の維持コストを受け入れることは難しくなり、居住域が発電所に拘束されることが推測される。この課題を解決するためには、場所を選ばず設立や撤廃が容易で且つ世帯単位で行えるエネルギー生成技術や、無線送受技術や高効率なエネルギー貯蓄技術といったものの組み合わせにより、土地から解放されたエネルギーインフラが展開できるようにするべきである。この取り組みを本報告書ではエネルギー自給と呼ぶ。

世帯レベルでのエネルギー自給を達成するために必要となる取組みは、エネルギーの種類ごとに研究開発テーマなどは異なってくると考えられる。ここでは主に電力について考える。場所を選ばず設立や撤廃が容易な発電技術や、世帯単位の発電技術の代表例は屋上や天井を利用した太陽光発電であると考えられる。発電基地からの無線送受技術については、レーザーやマイクロ波を用いた無線伝送の研究開発が進められている[19][20]。電気ではなく他の媒体で貯蔵する方向性もある。一つはエネルギーを水素ガスに変換し貯蔵する Power to Gas (P2G) である。また熱に変換して貯蔵する手法もあり、気候などの地方特有の性質を利用して小型蓄熱デバイスによるエネルギー分散及び地産地消について、ミレニア・プログラムの一つである HO・DO・HO・DO が提案している。この分野における研究開発の俯瞰は当該チームの報告書[21]を参考されたい。

2.2 資源が循環できること

2.2.1. 水循環

2.2.1.1. 課題

II.1 の表 1 に示した暮らしの 14 項目のうち、「エネルギー／生活インフラ」を各居住空間で実現するためには、どこにいても居住空間単位で水資源を循環できる必要がある。

上下水道インフラは古代ローマ帝国の時代から国家事業として取り組まれるインフラの代表格だが、水源を起点として一度敷設されたインフラの維持コストはかさばっていく一方で、人口減少局面においてそのコストは受け入れることが難しくなると考えられる。そこで、排水やし尿を再生する世帯単位の小さな循環システムを構築することで、生活基盤の土地への拘束から解放することができる。

人々が動的に生活をする場合には、水資源を小さく循環する必要がある。人間は 1 日 1 人あたりおよそ 262 kg の水を消費する。お風呂や洗面、洗濯、炊事に 255 kg が消費され、排出される。飲み水としては 2 kg 消費され、トイレにおいては尿や便の洗浄に水が 4.8 kg 消費され、排出される（詳細は Appendix A.5 を参照）。お風呂やトイレ等に使用される水を 100%再生しても、飲み水分だけは必ず補給（輸送）する必要がある。健康状態等にもよるが、人間が排出する尿に含まれる水は 1 日 1.5 kg、便に含まれる水は 107 g といったデータがある[24]。これらの水を再生することができれば、外部から輸送する水は減らすことができる。100%水を循環するためには、各水再生技術の再生率向上に加えて、こうした、これまであまり対象としてこなかった有機物や大気からの水回収・再生が課題となる。また、再生対象が増えると、適切な再生を行うための水質のセンシングも課題になる。

2.2.1.2. 必要な取組み

日本では、上水として、河川やダムなどの水源の水を主に濾過により浄化し消毒を行ったものが提供される。一方、生活排水等の下水については、沈殿物を取り除き、微生物により有機物を分解する等の処理を行ったあと、河川や海へと放出される。日本の一般的な下水処理は、処理後の水は上水よりも汚く、河川や海へ放出後に自然の中を循環する過程で浄化されていく。河川や海から配管を引いて処理を行う従来の上下水道を分散化させるためには、生活排水からの上水の再生技術が必要になる。

生活排水に含まれる汚濁物質には大別して、1) 水に溶解していないごみや沈殿物（夾雑物）、2) 微生物等の水生生物、3) 水に溶解している有機物、4) 水に溶解しているイオン類（無機塩類）があり[25]、これらを取り除くことにより、きれいな水が得られる。1)や2)は除去物質に対して適した大きさの孔を持つ膜を選択し濾過することによって除去することができる。しかし、3) 4)については、1) 2)のように簡単に濾過はできない。分子サイズの大きさの孔をもつナノろ過膜や、逆浸透膜により分離除去する手法もあるが、それ以外に、吸着剤に吸着させる、微生物に分解（燃焼）させる、酸化還元反応をさせて無害なものにする等、成分に応じて様々な除去手法がある[26]。

排水に含まれる汚濁物質の種類に加えてその量によっても処理の大変さや手法が変わってくる。1つの指標としてBOD（Biochemical Oxygen Demand、生物化学的酸素要求量）というものがある。これは、酸化分解のために微生物が必要とする酸素量により水質を示すものであるが、水道水は3 mg/L 以下、風呂や洗濯排水は5 mg/L 以下、炊事排水は平均20 mg/L 程度、尿は平均30 mg/L 程度である[27]。

先述した水の消費状況を考えると、風呂や洗濯等の比較的きれいな生活排水を100%再生できるとすると、使用する水の約83%を再生によりまかなうことができる。尿や炊事排水を100%再生すると、約99.8%を再生によりまかなうことができる。実際にはII.3.2.1にも示す現状の通り、排水の100%を水道水程度に再生することは難しいため、循環率はこれよりも下がるが、排水や尿からの水再生率を向上させることで、循環率を上げることができるため、再生装置の再生率向上や省エネルギー化に取り組む必要がある。さらに循環率100%を目指すためには、便からの水回収や、廃棄物中の有機物からの水回収等、より幅広い対象からの水回収方法を検討する必要がある。宇宙ステーションでは、完全閉鎖空間のため人の汗や呼気に含まれる水分がキャビン中に放出されて蓄積するため、除湿することにより環境制御を行っており、さらに除湿した水も飲み水に再生している。IPAにおいても大気中から除湿・再生により水を得ることで、補給量を0にすることが可能となるかもしれない。

また、先述の通り、水質のセンシングにより適切な再生処理の選択の仕組みも必要になってくると考えられる。例えば宇宙ステーションでは、尿と除湿水では水の汚さが大きく異なるため処理方法の一部が異なっている。宇宙の場合は、再生対象水を分けて回収しているため不都合なく処理ができているが、各世帯で炊事時、洗濯時、風呂時、等、時間によって排水の汚さが変わる可能性がある場合は、水質をセンシングして再生方法を最適化することも必要になる可能性がある。

2.2.2. 廃棄物処理

2.2.2.1. 課題

II.1の表1に示した暮らしの14項目のうち「環境に調和する」ことについて、動的な生活においては、ごみを生み出す人や居住空間の存在する場所が分散される。廃棄物の成分（e.g. 燃やすと水とCO₂になる、燃やすと有毒物が出る、燃えない）によって、可能な処理方法が変わるが、世帯単位で処理をする場合には一世帯で多様な処理に対応することは難しいと考えられる。一方で、現在都市分布に沿って作られているようなごみ処理場における処理を維持する場合、分散的に居住する位置までごみを回収する必要があることから、現在よりも輸送コストがかかってしまう。また、ごみ処理場には燃焼熱を利用した発電所が併設されているケースもあるが、人口減少局面において、設備の維持コストに対して発電量が少ないなど発電のメリットは少なくなると考えられる。

以上を踏まえると、動的な生活においては、水や電気等の有用なものに変換可能なゴミの世帯単位処理と、金属や処理中に毒性物質が発生するゴミ等の世帯単位処理が難しいゴ

ミの集中処理との組み合わせによる廃棄物処理が必要になると考えられる。その実現のためには、廃棄物の定性や分類方法、そもそも処理が難しい素材を使わないようにする、などのマテリアルフローコントロールが課題となる。

2.2.2.2. 必要な取組み

前項で述べたとおり、まずは、ごみの構成成分・物質の定性と定量を行い、適切な分別手法、処理手法を選択し、最適化することが重要となる。ごみの構成成分・物質の定性と定量に関しては、廃棄物に関するマテリアルフローの調査研究が自治体[28]や専門団体[29]にて行われているが、こうした調査を発展させ、量の多いごみを例えば燃えやすい／再生しやすいものにする、などの素材等の研究につなげていくことや、どのようなゴミであれば水や電気などの有用なものに変換できるかの検討が必要である。

世帯単位でゴミを水や電気などの有用なものに変換処理するものについては、コンパクト、省電力、簡単な操作、を実現する処理方式の検討から必要だと考える。また、集中処理と世帯処理とを組み合わせるにあたっては、廃棄したゴミをその場で定性・分別をする仕組みが必要である。現代でも、燃やすごみ、燃えないゴミ等ある程度の分類は人が実施しているが、世帯処理に回せるゴミはさらなる分類が必要になる可能性があり、処理装置レベルで、燃やしてはいけないゴミを識別できるようなセンシング技術の研究も必要と考えられる。

2.3 物資が届くこと

2.3.1. 課題

本目標を達成する上で輸送面において克服しなければならない課題は第一にオンデマンド性の確保であり、次いで人手不足解消及び環境負荷低減が来る。以下にその理由を具体的に述べる。

前節では、人々の生活の自由度を飛躍的に向上させるという意味において都市と地方の機能の差分を分析することで、「欲しいものが制限されないこと」、「モノに簡単にアクセス出来ること」、「好きな時間に移動できること」の3つの項目が明らかになった。これは人の要求への迅速な対応が求められることから、極めて高いオンデマンド性の確保が重要となる。近年この傾向の端緒は既に見られており、ネット通販の飛躍的な普及で買い物の自由度は向上したが、その影響で1件当たりの貨物量は2.43トン（1990年）から0.98トン（2015年）に減少しており、逆に物流件数は13,656件（1990年）から22,608件（2015年）に増加している[30][31]。貨物の小口化・高頻度化という荷主や消費者の輸送に対するニーズは、本目標においてよりエスカレートする方向に向かうと考えられ、目標実現のために克服すべき重要な課題となる。

オンデマンド性を確保するために輸送件数が増加することで問題になるのは、輸送の担い手の不足である。ボストンコンサルティンググループの分析[32]によると、2017年において約83万人いるトラックドライバーは、2027年には約72万人に減る一方で、輸送需要

の増大からドライバーの需要は96万人になるという試算を出している。ここからトラックドライバーだけでも24万人の不足が見込まれる。本目標において、貨物の小口化と多頻度化はより進むと考えられることから輸送に携わる人員は更に求められるため、輸送における人手不足解消は重要な課題の一つとなる。

また、輸送件数が増加することで輸送機械自体も数を増やすことが予想される。そこで問題となるのは環境負荷である。国土交通省[33]によると、2019年度の日本のCO₂排出量は11億800万トンであり、その内18.6%の2億600万トンが運輸によって排出されている。運輸におけるCO₂排出量の内訳は、自動車が86.1%を占めており、航空が5.1%、内航海運が5%、鉄道が3.8%となっている。本目標において、輸送需要の増加から2050年の輸送機械の数も増え、それらが現在主流である化石燃料を用いた内燃機関を動力源とする場合、更なるCO₂を排出してしまうことが危惧される。よって、全ての輸送機械について環境負荷低減は重要な課題の一つとなる。

2.3.2. 必要な取り組み

完全自動輸送を実現するための研究開発は多岐にわたる。輸送機械の無人化は様々な分野で進みつつあるが、基本的な性能向上は必須である。詳細はAppendix A.6に示すが、近年発展が目覚ましいマルチコプターなども、将来的には大幅な性能向上が必要になると考えられる。また、環境への配慮も重要な項目であり、内燃機関を利用する場合、その燃料は水素エネルギー等、炭素含有量の少ないものへの移行が求められる。無人輸送機械においては、多くが電動になると考えられる。電動輸送機械の性能向上において重要なのは、バッテリーの性能向上は言うまでもなく輸送機械の性能向上に直接利いてくるが、空気を動くものであれば空気抵抗の低減も重要であることが自動車業界などでも言われている[34]。現在主に自動車が進みつつある自動運転技術についても、自動車のみならず船舶や航空機においてもレベル5相当の技術開発が必要となる[35]。更には、輸送機械だけでなく運航体制に係るヒューマンリソースも問題となる。現状のドローンの運航体制とヒューマンリソースの削減可能性についてAppendix A.7に示しているが、実用上のマネジメントといった面からの運用体制の省人化に関する研究開発も必要になってくると考えられる。

主なブレイクスルーについては、本MS目標達成のための完全自動輸送という観点から、上記の研究開発が航空輸送でも問題なく適用できるようになることが重要になってくると思われる。空の輸送手段はコストもかかるがその分様々なメリットがある。輸送ルートを選択肢は地上に縛られることなく選択でき、速度についても地上より高速な輸送を実現できる。高速道路などでは自動車も高速に移動できるが、ヒト中心になりつつある社会において身近な範囲での地上を移動する輸送機械は移動速度がより制限される方向に向かうと考えられる。特に、無人機の輸送業務への適用は航空機が先駆的に進んでおり、無人機による輸送業務の運用体制についてのブレイクスルーは無人航空機の分野から出てくるのではないかと思われる。

2.4 「場」を体験できること（五感通信・環境構築デバイスとしての家屋）

2.4.1. 情報通信

2.4.1.1. 課題

II.1 の表 1 に示した暮らしの 14 項目のうち、どこに住んでいても「自分のやりたい仕事を選べること」「受けた教育が受けたときに受けられること」を実現するためには、現実と同等レベルの感覚をどこにいても享受できる必要がある。そのために克服を目指す課題は、「五感のうち、触覚、味覚、嗅覚が十分なレベルで伝送できていないこと」と「分散的に居住した場合に通信できない場所があること」の 2 つである。これらの課題の解決により、「住居」による制約が緩和され、どこに住んでいたとしても「自分のやりたい仕事を選べる」ようになり、「受けた教育が受けたときに受けられる」ようになる。

仕事に着目すると、2020 年度における「全就業者（雇用型、自営型）のテレワーカーの割合は 22.5%」となっている[36]。新型コロナウイルス感染症の影響でテレワークの実施率は増加しているが、生身の人間と接触が不可欠である医師や看護師、介護士などをはじめとする多くのエッセンシャルワーカーは、テレワークをすることが難しく、常に新型コロナウイルス感染のリスクと戦いながら現場での仕事に従事している。また、味覚・嗅覚が必須となる宿泊業、飲食サービス業の割合は就業者数の約 6%にもなり、保育など味覚・嗅覚を補助的に活用する医療・福祉業まで含めると約 19%と大きな割合を占める[37]。したがって、触覚、味覚、嗅覚まで含めた形で遠隔地からのロボット操作や遠隔地との情報伝送ができるようになれば、テレワークが可能となる職種はさらに増え、より自由に職業を選択できるようになる。

多くの人が分散的に居住をする場合、既存の通信インフラが整備されていない場所や通信品質が不十分な場所における通信ニーズが多くなる。しかし、本 MS 目標案が達成された社会を実現するためには、現在の日本における携帯電話による通信ネットワークの面積カバー率は低い。利用する周波数帯や携帯電話事業者によって異なるが、携帯電話による通信サービスの人口カバー率は 90%を超えている[38]。一方で、面積カバー率は 50%に到達していないものが多く、最大でも 70%程度であり[38]、人口密集地域に集中して携帯電話通信サービスが提供されていることがわかる。I.3 で述べたように、延伸的に整備されたインフラの維持や、新たな場所へのインフラの整備には大きなコストがかかる。これは、携帯電話ネットワークだけではなく光回線など、通信インフラについても同様である。また、通信ネットワークにおいて要求される通信回線品質としては、五感のうち、視覚情報の伝送には 2 Tbps 程度のスループットが必要となる（導出は Appendix A.8 参照）。聴覚情報や触覚情報の伝送には 1ms-数 ms 程度の低遅延が要求される[39][40]。また、大容量の通信を必要とする場合に利用される光回線に関しては、現状、1 世帯あたり 100 Mbps 程度の伝送速度であるから 1 つのアクセスネットワークあたり 51.2 Tbps の伝送速度で十分だが、2050 年には 1 人あたりが視覚情報を 2 Tbps で通信することになると、2050 年には 1 つのアクセスネットワークあたり 2.56 Ebps の伝送速度が必要になる（導出は Appendix

A.8 参照)。

2.4.1.2. 必要な取り組み

上で述べた「五感のうち、触覚、味覚、嗅覚が十分なレベルで伝送できていないこと」「分散的に居住した場合に通信できない場所があること」の 2 つの課題を解決するために、五感のセンシングと再生を行うための「人間とのインタフェース」と五感の伝送を行うための「点と点をつなぐ通信ネットワーク」を実現するための研究開発が必要である。視覚、聴覚、触覚、味覚、嗅覚の五感情報をセンシングしてデジタル化し、それらの五感情報を同期させて再生できるインタフェースと、あらゆる場所の点と点をつなぐ通信ネットワークを実現することが、自然で現実感の高いコミュニケーションを可能とするブレイクスルーとなる。以下では、視覚、聴覚、触覚、味覚、嗅覚の五感情報を離れた二地点間で伝送し合うことを「五感通信」と呼ぶ[41]。

人間とのインタフェース

視覚と聴覚については、これまでも十分に研究開発と実装が進められてきた。一方で、触覚、味覚、嗅覚についての要素技術は出てきているが、視覚と聴覚に比べて研究開発と実装が遅れている状況である。したがって、五感すべてを対象とした通信を実現するためには、触覚、味覚、嗅覚の情報化技術を推し進める必要がある。ただし、五感はいずれが独立に作用するのではなく、「感覚間相互作用」と呼ばれるように、互いが相互作用し合うことが知られている。感覚間相互作用のメカニズムを利用した研究開発も進められているが（例えば、[42][43]）、感覚間相互作用のメカニズムは各感覚を独立に捉えた場合よりもより複雑となるため、まずは各感覚を独立にセンシング、再生する技術に注力すべきである。

触覚については、仮想的な力覚（物体と接触した際に人間が感じる力感覚）を実現するハプティクス技術[44]として研究開発が進められている。一般に、触覚は対象からの反作用と作用デバイスの速度を用いて定義され、ロボット制御はその触覚を制御するために力制御と速度制御（位置決め）を行っている。人間のように対象に触れた瞬間に力を調整できなければ対象を破損させてしまう恐れがあるため、安全性や適応能力の高いロボット制御が必要である。

味覚と嗅覚については、ポータブルな味覚、嗅覚のセンサとアクチュエータが必要となる。味覚は甘味、酸味、塩味、苦味、うま味の 5 基本味で定量化されるが、おいしさの要素となるコクは、舌表面の脂質膜との吸着度合いと強い相関があることが知られている[45]。そのため、味覚センサには、定常的な味の定量化だけでなく、時間応答性を含めた味のデジタル化が必要となる。一方、嗅覚の情報化は味覚よりも大幅に遅れている。これは、約 400 種という嗅覚受容体の種類の多さと、ニオイ分子と嗅覚受容体の結合の大きさに起因しており、鼻が舌よりも複雑な構造の感覚器であるためである。したがって、嗅覚情報を標準的に定量化・数値化する技術が今後必要であり、このような数値化は、嗅覚セ

ンサの設計指針に重要な役割を果たす。

センサデバイスの視点からは、ヒトの味覚、嗅覚の情報化を支えるためには、化学センサの高感度化、高ダイナミックレンジ化が必要となる。高感度化については、現在、質量付加効果を利用した化学センサが市販されているが数 ppb (parts per billion) が限界検出感度[46]であり、ヒトの嗅覚閾値である数 ppt (parts per trillion) [47]にはまだ達していない。この高感度を達成するためには、センサ性能だけでなく、化学物質の選択性や濃縮工程を含めるなど、システム全体での感度向上の取り組みが必要となる。化学センサの高ダイナミックレンジ化については、ヒトの感覚刺激にウェーバー・フェヒナーの法則（感覚強度と物質濃度は対数関係）が成り立つこと、かつ、臭気強度の数値化として 6 段階臭気強度表示法を採用すると仮定すると、およそ 5 桁のダイナミックレンジが化学センサに求められる。しかし、現在の化学センサのダイナミックレンジは 3 桁程度[46]であるため、ダイナミックレンジを 2 桁向上させる必要がある。

味覚、嗅覚を高度に再現するためのアクチュエーションデバイスの開発は、センシングデバイスの開発に比べて更に遅れている。これは、ヒトに対して感覚刺激を再現性高く実施するための標準的な方法がないことや、ヒトによる官能評価では被験者の個人差によって客観性と正確性が確保できないことがアクチュエーションデバイス開発の障害となっているためである。そのため、まずは再現性、客観性、確度が高い味覚・嗅覚応答評価の規格化と標準化を確立することが、研究開発の進展において重要な役割を果たすと考えられる。また、化学物質を直接感覚器に作用させる嗅覚アクチュエータの場合では、使用する化学物質の種類が多いほど経済性と小型化の点で実現化の障害になることは明らかである。そのため、少ない化学種で嗅覚を再現できる範囲を最大化できる化学物質を同定する必要がある。また、その化学物質は人体の安全性が十分に検証される必要がある。

点と点をつなぐ通信ネットワーク

あらゆる場所の点における通信を成立させるためには、広い通信カバレッジを有する衛星や HAPS (High Altitude Platform Station : 高高度プラットフォーム)、ドローンなどの中継局で構成される非地上系ネットワークを中継して伝送することが望ましい。ただし、非地上系ネットワークに比べて地上の光回線の方が大容量であるため、それらを組み合わせて利用することが求められる。課題で述べたように、五感の中で必要な情報量や要求される遅延が異なる。したがって、本 MS 目標案が達成された社会を実現し、分散居住の社会においても全員が等しく通信できるようになるためには、通信速度や遅延など、異なるアプリケーションに応じて適切な通信ネットワークを介した伝送が必要となる。

2.4.2. 環境構築デバイスとしての家屋

2.4.2.1. 課題

本目標を達成する上で家屋として克服しなければいけない課題は、生活空間に望む場を

デザインして構築出来るようになることである。以下にその理由を具体的に述べる。

家屋それ自体は所有物としては非常に大きい部類であり、人の要求に応じて適宜変更を加えるのは難しい。事実、住団連の調査によると、住宅購入を検討する上で特に重視する点として、66.7%の人が住宅の間取りを挙げることが明らかになっている[48]。また、同調査では、住環境の面で特に重視した点について、通勤、通学などの利便性（59.7%）に次いで敷地の広さや日当たりなど空間のゆとり（41.2%）が挙げられている。このような背景から、家屋において生活の自由度を上げるために、自らが存在する空間の中で最大限快適と感じる「場」を構築できるようにすることが重要な課題である。

2.4.2.2. 必要な取り組み

これを解決するためには、二つの取組が考えられる。一つは出来る限り短い期間で簡単に望む形の家屋が作れるようになることである。もう一つは、家屋自体の構造は変えずに、限られた空間において人間の感覚を最大限「良い」と感じるようにデザインすることである。前者は主に建築学における取組になり、後者は主にデザインにおける取組になる。

より短い期間で簡単に望む形の家屋が作れるようになる方向性の取組として、プレハブ工法によるオフグリッドハウスの建築がある。この分野においては、3D プリンタやロボットによる施工の自動化によって、大幅な施工期間の短縮が達成されている。本 MS 目標案に照らし合わせると、家屋は建てれば終わりというものではないため、家屋を自然環境に調和させることや、耐災害性は重要であり、家屋そのものの移動だけでなく取り壊し及び再利用が簡単にならねば自由にどこでも暮らすことはできない。よって、これらを達成する技術にブレイクスルーが必要である。

限られた空間において人間が本能的に「良い」と感じるようにデザインするには、人の感じ方を計測し、因果関係を明らかにし、評価できるようにするという分野横断的な取り組みが必要となる[49]。人の感じ方を計測し、因果関係を明らかにするには、医療などの分野における生化学的データの計測や、人間工学、認知科学における取組が必要である。このような科学的側面がわかった上で、人が「良い」と感じるには何を計測して、状況に応じて何をどのように変化させる必要があり、そのためにはどのようなモノ（又はコト）を創り上げる必要があるかというのを考える必要がある。近年、デザイナーの問題解決に対する考え方が論理的に説明され、様々な分野に応用されつつあるが、デザインにおける創造性についても論理的に分析する取組が必要であると考えられる。創造性は言語化が極めて難しいため、言語化できない領域に論理的な説明を与えるきっかけとなるようなブレイクスルーが必要である。

デザインと工学的分野の連携の例として冷蔵庫についての検討を Appendix A.9 に示す。冷蔵庫は現代の生活に欠かせない電化製品であるが、数百リットル程度の空間を占有する大きな機器である。必要に応じた大きさの変更、従来と異なる冷却機構の開発など、デザイン側面からの要望を工学的分野との連携によって解決する必要がある。

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

まずは、日本と海外の各国で進められているまちづくりや都市計画に関する様々なプロジェクトの動向について述べる。

日本においては、トヨタが Woven City 構想[50]を掲げ、Woven Planet Group を通じて『「ヒトが中心」で、未来のための「実証実験」ができるプラットフォーム』[51]としての「コネクティッド・シティ」を東富士（静岡県裾野市）に実現することを進めている。パナソニック株式会社は、神奈川県藤沢市、神奈川県横浜市、大阪府吹田市にサステイナブル・スマートタウン（SST）を展開し、各地域で官民一体の共同プロジェクトを進めている[52][53][54]。これらの SST では、「スマートライフ提案→スマート空間設計→スマートインフラ構築」の順序を踏むことで、人中心で「くらし起点」のまちづくりを進めている。最後に、「風の谷プロジェクト」は「都市集中型の未来に対するオルタナティブ」を作ることを目的として進められている[55][56][57]。このプロジェクトは「自然と共に人間らしく豊かな暮らしを実現する」ことを重要視しており、短期的かつ特定の場所に関するまちづくりではなく、長期的な視点で「場所」としての「風の谷」を創るプロジェクトである。

次に、海外の事例を挙げる。米アルファベット傘下の Sidewalk Labs は、カナダ・トロントで「Sidewalk Toronto」プロジェクトを進めていた[58]。本プロジェクトは 2020 年 5 月に終了が発表されたが[59]、公開されている報告書にはトロントのウォーターフロントエリアの約 49,000 平方メートルに対する開発構想が具体的に述べられている。Sidewalk Labs は様々なパートナーを募り、このエリアをテストフィールドとして利用することで新しい技術と新しい生活空間の実装を計画していた。オランダ・アムステルダムでは 2012 年より、市北部の工業地帯であった場所に「De Ceuveld」と呼ばれる持続可能な循環型社会の実験場が整備されている[60][61]。この場所にはかつて造船所があり、重大な土壤汚染が発生していたが、「廃棄物を資源として捉え、敷地全体で循環システムを構成すること」がコンセプトとして掲げられたプロジェクトにより、敷地内でエネルギーと養分が循環するように設計された街となっている。

これらの新しく作られる都市やまちを全体的、統一的に機能させるために必要な取り組みとして、都市 OS（Operating System）やリファレンスアーキテクチャの制定が挙げられる。内閣府「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」では、「ビッグデータ・AI を活用したサイバー空間基盤技術のアーキテクチャ構築ならびに実証研究事業」において、スマートシティリファレンスアーキテクチャが公開されている[62]。このような都市 OS やリファレンスアーキテクチャは、コンピュータの OS と同様に「必要最低限のデータや認証等のやり取りルール」を統一的に定めている。これにより、都市間、もしくは都市内で「サービスやデータが相互に接続して効率よく流通」させることが可能となる。

以下では、II.2 で述べた各項目について研究開発の動向を示す。

3.1 エネルギーが自給できること

エネルギー源は様々あるが、ここでは多用途に利用できるエネルギーである電力に着目した。電力の自給について、再生可能エネルギーで年間収支をプラスにすることができるが、時間変動や季節変動を十分に吸収するシステムがないため、従来の電力ネットワークへの接続が必要になっている。再生可能エネルギー、蓄電システム、無線給電の研究開発動向を以下に示す。

現在の電力インフラは発電所と需要家を結ぶ長大な電力ネットワークにより構成されており、今後も大規模災害対策や再生可能エネルギーの大量導入に対応すべく、増強が進められている。また、日本における発電に用いる一次エネルギーは化石燃料に大きく依存しており、化石燃料依存度は 85.8%（2018 年度）にのぼり、一次エネルギー自給率は 11.8%（2018 年度）で OECD 諸国と比較して低い水準にある[63]。

詳細な電力収支は不明だが、住宅用太陽光発電・蓄電システムを導入した家庭の事例[64]では、売電収入が電力料金を上回る事例も報告されている。

しかしながら、太陽電池から出力される電力やリチウムイオン蓄電池が入出力する電力は直流電流である一方、電力ネットワークからの配電は交流 100V/200V であるため、家庭内への分電には直流電流から交流電流への変換が必要であり、発電・蓄電システムの制御と合わせて複雑なシステム構成が必要である[65]。

太陽電池として最も多く市場の九割を占めるのが結晶シリコン太陽電池である。シリコンの結晶系や太陽電池セルの構造の違いにより数種類が知られているが、ヘテロ接合型太陽電池は高効率な結晶シリコン太陽電池であることが知られている。今後開発が期待されるものとしてはペロブスカイト太陽電池があり、桐蔭横浜大学の宮坂力教授らが発明した日本発のオリジナル技術である。結晶シリコン太陽電池とペロブスカイト太陽電池を積層したタンデム型太陽電池は異なる波長の光を有効利用することで高効率を実現できる[66]。一般に太陽電池は可視光を吸収するため黒色で不透明であるが、赤外線と紫外線を吸収して発電する無色透明型光発電素子も開発されており、建築物の意匠や採光に配慮した太陽電池として期待される[67]。

蓄電池としてはリチウムイオン電池がエネルギー密度の高さから広く利用されているが、安全性に課題もある。安全性の面からリチウムイオン電池の電解質を固体材料に置き換えた全固体電池が注目されており、その開発には東京工業大学の研究グループや物質・材料研究機構の研究グループが大きく貢献している。そのほか、従来のリチウムイオン電池の発展形である次世代リチウムイオン電池やナトリウム硫黄電池、レドックスフロー電池など様々な電池の研究開発が推進されている[68]。

再生可能エネルギーのうち太陽光発電や風力発電は、気象条件や時間帯などによって発電量が大きく変動するという問題がある。Appendix A.5 に示した例の通り、年間発電量で言えば太陽光発電でも一般家庭の消費エネルギーを概ね賄えるが季節変動の影響は大きく、冬季の発電量は夏季の発電量を大きく下回る。発電量が電力需要を上回る時は余剰電力を貯蔵する必要がある。余剰電力を気体燃料に変換して貯蔵・利用する方法を Power to Gas

(P2G) といい、ドイツやアメリカで実証が進められている。P2G を利用した自律型水素エネルギー供給システムの研究開発も進められており、電気分解による水素生成、貯蔵、燃料電池発電（出力 3.5 kW）を 1 つのコンテナに納めたものが開発されている。余剰電力を水素として貯蔵することで、水素タンク容量次第では曜日間や季節間での電力の融通も可能になる[69]。

清水建設と産業技術総合研究所は「Hydro Q-BiC」を開発し、水素吸蔵合金により大量の水素をコンパクトに貯蔵（約 1000 分の 1）できるだけでなく、従来課題となっていた合金の微細化を防ぐことで着火のリスクを抑えることに成功している[70]。現在は福島県郡山市の市場で実証的な運用を行なっている。

身の回りの電子機器への無線給電としては電磁誘導方式の Qi 規格が普及しており、スマートフォンなどで広く利用されている。磁界共鳴方式を用いた電気自動車への無線給電として米国 Society of Automotive Engineers (SAE) International は WPT1 をはじめとする複数の規格を策定している。マイクロ波方式の空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムは東芝やパナソニックといった本邦企業が研究開発を進めており、ヘルスケア用途や産業用途での IoT デバイスへ 10 m 以上の距離での無線給電が可能である[71]。

3.2 資源が循環できること

資源再生循環について水循環と廃棄物循環について述べる。従来の水循環は上下水道施設による人工的な処理と自然界の水循環を組み合わせで行っているが、ここでは、人工的な水循環について、再生技術の高効率化、再生対象水の拡張や付随する課題について、実用化例と研究動向を II.3.2.1 に示す。II.3.2.2 では、廃棄物循環について、世帯単位処理の候補であるエネルギーに変換して利用する場合と物質として再利用する場合の実用化例と研究動向について示す。

3.2.1. 水循環

世帯単位での水循環技術として、好例になるのが、宇宙ステーションの水再生装置である。宇宙ステーションでは、シャワーや洗濯は行わないため、主な“水源”は、汗や呼気に含まれる水、尿及びその洗浄水となるが、有機物や無機塩類が普通の生活排水よりも高濃度で含まれ、小型で省電力に再生を行うハードルは地上よりも高い。現在、国際宇宙ステーション（ISS）で稼働している NASA の水再生システムでは、蒸留により尿に含まれる塩類を除去し、その後、汗や呼気に含まれる水と合わせてイオン交換樹脂や膜ろ過及び触媒酸化により、飲み水を再生している[72]。より小型で省電力なシステムとして、日本も独自の水再生システムの開発を行っている。こちらは、電気分解による有機物の分解と、イオン交換樹脂や電気透析によるイオンの除去技術を用いて尿について 85%の再生率を実現しており、消耗品が必要ないシステムとなっている[73]。こうした水再生技術の将来的な改良としては、触媒やイオン交換樹脂等の性能向上があげられる。また、地上では一般

的な生物処理については、先述の化学的処理と比較して、その安定性が課題となるため採用されていないが、そこが解決されれば、より高効率なシステムとなる可能性もあり、研究がなされている[74]。

地上における”水源”には空気を活かすこともできる。アクアテック株式会社が開発するエアリスは空気を結露させ飲料水を生成し、電源さえあればどこでも飲料水を作り出すことを可能とする[75]。また、シャワーや手洗いの水であれば、既に小型の水循環装置の実用化も実現している。WOTA 株式会社が開発した自律分散型水循環システム「WOTA BOX」は逆浸透膜(RO 膜)など 4 種類のフィルターにより汚濁物質を除去しており、さらに塩素添加、紫外線照射を行うことでシャワー排水の 98%以上を再利用できる。[76]。

RO 膜及びさらに細かい孔をもつ NF 膜は、日本企業のシェアが世界の約 5 割を占めており、その他の膜も含めて、日本は世界屈指の技術・ノウハウを有している。膜のメンテナンスや耐久性の向上が課題の 1 つであり、素材や、モジュール構造の工夫等が主な研究課題となっている[77]。

以上のような処理技術に対して、生活排水の成分に応じて適切な処理方法を効率的に組み合わせることも重要となる。この場合、センシング技術を用いて最適な処理手法を選択できるようにすることで、効率良く水循環が達成できるため、そのような最適化技術も、今後の研究課題となる。

また再生した水を長期間きれいに保つための殺菌技術も重要である。IPA 技術においては、水の貯蔵期間も長期にわたる可能性があるため、使用直前の UV 殺菌等やフィルタリングでは貯蔵タンク内にバイオフィームが発生した場合に十分な水質を維持できない。宇宙ステーションであればヨウ素や銀が殺菌剤として使用されているが、ヨウ素は飲む前に除く必要があり、銀殺菌はタンク内での析出が課題になっている。他の殺菌手法としてナノバブルの利用検討も行われている。先述した WOTA では、UV 殺菌に加えて塩素が殺菌剤として投入されている。塩素は消耗品となるため、メンテナンス性を上げるよりよい殺菌技術は研究課題といえる。

3.2.2. 廃棄物循環

廃棄物の内、“有用なものの再生”は、現在でも燃焼熱による発電を行っているごみ処理施設があり、大規模施設では、鶏糞メタン発酵発電[78]等のバイオガス化[79]も実現している。小型化された装置の開発例[80]もあるが、今後はより小型で低維持コストな装置の実現が待たれる。また、有機物からなるごみについては、触媒等を用いた湿式酸化法により水を得ることもできる[81]。生ごみについては微生物を用いた分解処理により水化する手法[82]や、たい肥化するもの[83]は実用化も進んでいる。こうした手法が生ごみ以外のごみについても実現されることが期待されている。

どうしても処理の難しいごみについては、現状は埋立処分となるが、例えば圧縮して構造物にしたり細かくして 3D プリンタの材料にしたりするなどの有効利用もできると考えられる。例えば、宇宙では発生するごみを補給船等に詰め、地球帰還時に補給船と一緒に

燃やしているが、ごみを加熱圧縮することで、建材に使えるようにするような研究[84]もある。また、現在のごみ処理のように、ペットボトルを回収してまた、ペットボトルの素材を得る、というリサイクルは、一見世帯単位で実現してもどうしようもないようにも思えるが、プラスチックごみから 3D プリントを行う技術も実現しており[85]、こういった、再利用技術の発展も IPA を後押しすると考えられる。

3.3 物資が届くこと

本 MS 目標において物資輸送のオンデマンド性を極めて高くするための取組として、無人機の環境適合性向上、性能向上、自動操縦技術の向上、運航体制の省人化を挙げる。

輸送機械の環境適合性については主に電動化になると考えられるが、自動車では電気自動車が既に巷を走行しており、他の様々な機械でも研究が進められている。特に無人機は小型のものから発展していった都合上、電動化の傾向が強いと考えられる。また、元来化石燃料を用いて飛んでいる航空機についても、電動化の研究開発が進められているものも世界的には存在している[86]。船舶についても、国際海運のエミッションフリーに向けたロードマップがわが国においても検討されており、2050 年には温室効果ガス排出量ゼロを目指している[87]。

電動機械の性能向上については、バッテリーの性能向上及び空力抵抗の低減が重要である。現状電動無人機は様々な輸送機械において実現しているが、バッテリーの性能向上については、現在主流のリチウムイオン電池のみならず更なるバッテリー容量の期待できる電池の研究開発が期待される。リチウムイオン電池については 2030 年までの性能の目標値が世界的に設定されており、理論上は現在の平均的な性能の約 4 倍になるとされている[88]。また、ポスト Li イオン電池として期待される Ca イオン電池については東北大が新たな電解質を開発するなど世界をけん引できると期待される[89]。

自動操縦技術については、自動車の自動運転技術はレベル 4 の実装や法整備がアメリカ先行で進んでおり、安全規格が発行されている[90]。船舶については世界的に自動化及び無人化の研究開発が進んでおり、ロールスロイス社は 2035 年までに自動かつ無人航行に向けたロードマップを公表している[91]。ロールスロイス社の船舶海洋部門は Advanced Autonomous Waterborne Applications (AAWA) というプロジェクトを主導しており、フィンランド政府より 660 万ユーロの支援を受けている[92]。これらスマート SHIPPING は北欧を中心に世界的に研究開発が進められている。各国の動向をまとめたものは文献[93]に詳しい。深海領域においても無人航行船は数を増やしていくと思われるが、海洋研究開発機構は次世代巡航探査機に求められる様々な要素技術の研究開発を行っており[94]、これは日本の強みに繋がると期待される。

運航体制の省人化については、自動配送において取り組まれている。米国においては Starship Technologies 社が自動運転ロボットにより無人デリバリーサービスが実現している[95]。我が国でも新エネルギー・産業技術開発機構がロボット・AI 分野において、自動走行ロボットによる新たな自動配送サービスの実現に向けた技術開発プロジェクトを遂行

している[96]。今後はドローンによる無人配送も実装される流れになると期待されるが、飛行中の受け渡しの自動化についてはハードルが高いと考えられるため、これらの陸上輸送サービスの知見を参考にすることで、サービスの安全な実現を保証する必要がある。

3.4 「場」を体験できること（五感通信・環境構築デバイスとしての家屋）

3.4.1. 情報通信

五感通信のための研究開発項目としては、「人間とのインタフェース」と「点と点をつなぐ通信ネットワーク」を挙げたが、本項でもそれに基づいて記述する。

3.4.1.1. 人間とのインタフェース

「人間とのインタフェース」については、五感のそれぞれについて、様々な研究開発と実用化が進められてきた。近年、視覚については、複数方向から撮影した映像を用いて、任意の視点からの映像を再現することができる自由視点映像や、人の動作を三次元のデジタルデータとして保存し、再生可能とするボリュメトリック映像[97]などの研究開発が進められ、一部実用化されている[98]。聴覚については 3 次元的な音の方向や距離、拡がりなどを再生し、知覚できる立体音響などの研究開発が進められてきた。現在は、国内外で 22.2 マルチチャンネル音響の家庭への普及を目的とした標準化が進行しつつある[99]。また、Google は Project Starline において、3D イメージの取得、リアルタイムの圧縮、3D ディスプレイの組み合わせにより、目の前に相手が実在するかのようなリアルなオンラインコミュニケーションの実現に取り組んでいる[100]。

触覚については、振動に関する感覚は商用化されるレベルに達しているが、我々が日常的に感じている皮膚からの感覚は、研究開発段階のものがほとんどである。ハプティクス技術は、新型コロナウイルス感染拡大による非接触へのニーズ増加も追い風となって研究規模が拡大し、世界のハプティクス市場は 2020 年現在では 129 億ドル（約 1 兆 3663 億円）、2027 年までには 409 億ドル（約 4 兆 3322 億円）まで成長すると予測されている[101]。2020 年に発表されたホワイトペーパー[102]のロードマップでは、器用さが求められる人間の作業をロボットで実現できるようになるのは 2035 年頃と予測されている。日本においては、ハプティクス研究センターでリアルハプティクス技術の実用化・展開を目指した取組みが行われている[44]。当センターから創出されたモーションリブ株式会社は AbcCore と呼ばれるリアルハプティクスの実装を簡便にする汎用力触覚 IC チップを開発し、薄鋼板製造工程におけるロール表面の付着物を拭き取る作業[103]や左官作業[104]など、職人技が要求されるような作業を可能とするための実証実験を行っている。また、ロボットによる遠隔操作については、サイバネティクスアバターの実現を掲げるムーンショット目標 1 に関する研究開発でも一部実施されている[14]。

味覚と嗅覚については、人間の「匂い」「味」「フェロモン」などの化学感覚シグナルの受容と情報伝達、脳における情報処理機構を解明することを目的としたプロジェクトが

進められてきた[105]。

嗅覚については、ヒトには約 400 種類の嗅覚受容体遺伝子があることが知られているが、大阪大学では、ヒト嗅覚受容体全てを用いた嗅覚受容体センサを作製し、ヒトの感じる匂い全てを定量することに成功している[106][107]。さらに、現在では、「多数の匂い物質の嗅覚受容体応答の計測結果を蓄積したデータベース（匂い DB）を構築し、これを基にして目的の匂いを単純な香料の組み合わせで再現する」ことを目指した JST の研究成果最適展開支援プログラム（A-STEP）「ヒト嗅覚受容体センサーを応用した AI 調香師の創生」が進められている[106]。味覚については 5 基本味の定量評価が卓上型の装置により可能となり、その結果に基づいたマーケティングも展開されている。

味覚、嗅覚センサは圧電効果やピエゾ抵抗を利用したバイオセンサが主流である。これらバイオセンサは低消費電力、小型、安価であることから、専門業者以外でも味覚、嗅覚情報のセンシングが可能となるデバイスの実現が期待される。化学物質濃度の測定原理は大きく 2 つに分かれる。1 つ目は圧電デバイスの表面に塗布された受容体に化学物質が吸着することで生じる質量付加効果を振動周波数変化として測定する方法、2 つ目は化学物質の付着による表面応力変化を抵抗値変化として測定する方法がある。前者の圧電振動センサは、水晶振動子を用いた QCM（Quartz Crystal Microbalance）から、半導体プロセスに親和性の高い圧電薄膜振動子（FBAR：Film bulk acoustic resonator）を用いたセンサが開発され、小型化と量産化に向けた動きが進んでいる。また、後者の膜型表面応力センサ（MSS：Membrane-type Surface stress Sensor）については、MSS を用いた嗅覚センサの社会実装及びそれに基づく社会貢献を目的とした MSS フォーラムが形成され、嗅覚センサ素子の開発が進められている[108]。圧電デバイスのコアとなる材料開発も進んでいる。従来の典型的な圧電材料である窒化アルミニウム（AlN）にスカンジウム（Sc）を添加させた高機能な圧電材料や、近年では、レアアースである Sc を使わない複合窒化物圧電材料の研究開発が精力的に進められている。

現在進められている味覚と嗅覚のアクチュエーションの方法としては、化学物質を感覚器に直接作用させる方法と電気や光により感覚器に刺激を与え疑似的に再現する方法の大きく 2 つに分類される。前者のアクチュエータで味覚を再現する場合には、5 基本味の化学物質を組み合わせる感覚器に直接作用させる。例えば、5 基本味のゲル状電解質を舌に直接接触させ、電流印加によってイオン導入量を制御し、味を変化させる味ディスプレイの開発が進められている[109]。味覚は 5 基本味を再現する必要がある一方で、嗅覚を高精度に再現するためには約 100 種の化学物質を組み合わせる必要があることが知られている[110]。このような多種類の化学種を全て用意し、リアルタイムに組み合わせることは難しいことから、現在の市販されている香り発生デバイスでは、予め用意された数種類の香りカートリッジを組み合わせる再生している[111]。また、ウェハープロセスによる微小な機械加工技術の発展により、マイクロ流体を精緻に制御することが可能となっており、チップ上で複数の液体薬品の混合が可能となってきた[112]。圧電振動による表面弾性波（SAW：Surface Acoustic Wave）を利用したアトマイザー（噴霧器）の研究開発

も進められている。これら微細加工技術を組み合わせ、ワンチップ化することで、再現性が高い嗅覚アクチュエータの実現が期待できる[113]。これらデバイスのコアとなる微細加工技術および表面弾性波の制御技術においては、日本は黎明期から産官学連携体制が築かれており、材料技術から生産技術まで一貫した研究開発で世界をリードしている。後者の電気刺激によるアクチュエータでは、前者のような化学物質を消耗しない点において有利である一方で、電気・光による刺激と味覚、嗅覚とを関係づけるメカニズム解明、および人体への安全評価指標の研究開発が必要となる。

3.4.1.2. 点と点をつなぐ通信ネットワーク

「点と点をつなぐ通信ネットワーク」については、日本では2020年から第5世代移動体通信システム（5G）のサービスが開始されているが、5Gの次の世代のBeyond 5Gや6Gと呼ばれる通信システムの概念に関する検討が既に始まっている。総務省のBeyond 5G推進戦略懇談会[114]では、5Gが掲げている「高速・大容量、低遅延、多数同時接続」の特徴を、Beyond 5Gではさらなる高度化に位置づけられる「超高速・大容量、超低遅延、超多数同時接続」だけでなく、新たに「自律性、拡張性、超安全・信頼性、超低消費電力」といった機能が求められると記述されている。これらの特徴は、国内外含む様々な機関が公開しているホワイトペーパー等の報告書の記述でも共通している[115][116][117][118][119][120]。これらの特徴の中で、本MS目標案の達成に特に必要と考えられるのは「自律性」と「拡張性」である。「自律性」とは、有線・無線を意識せず即座に利用者のニーズに合わせて最適なネットワークを構築する機能である。II.2.4.1に記載したとおり、五感通信の実現のためには、通信ネットワーク上での経路や質・量をアプリケーションに応じて最適化する必要がある。「拡張性」とは、通信の経路にカバレッジが広い衛星やHAPSなどを用いることで、海、空、宇宙を含むあらゆる場所で通信を利用可能とする機能である。衛星については、多数の衛星によって構成される衛星コンステレーションの整備が世界中で進められている。米SpaceXのStarlinkは合計12,000機を超える衛星を打ち上げることを計画しており、既に1,500機以上の衛星が打ち上げられている[121][122]。また、HAPS向け無人航空機の開発を進めているHAPSモバイルは、2020年9月に成層圏飛行（飛行高度6万2,500フィート：約19キロメートル）に成功している[123]。また、楽天モバイルは米AST社との連携により、災害発生時も安定して提供できる通信環境の構築を目指したスペースモバイル計画を進めている[124]。本計画では、既存のスマートフォンと衛星の直接通信により、日本全土の100%カバーが可能なブロードバンドな通信インフラの実現を目指している。

3.4.2. 環境構築デバイスとしての家屋

環境構築デバイスとしての家屋に対する動向として、課題に必要な取組において述べた方向性と同様に、完成するまでに期間を要する家屋が極めて短時間で建つという建設における方向性と望む環境を構築するためのデザインにおける方向性の二種類の動向について

述べる。

望む誰もがその時々需要に応じて居住空間を変化させるには、極めて短時間で望む家が建てられることが一つの解である。その方向性にプレハブ工法によるオフグリッドハウスがある。オフグリッドハウスの建築に関する動向として、プレハブ工法であれば 3D プリンタを用いることで、約 8 時間で建てるのが可能となっており、実際に物件を提供している企業も存在している[125][126]。また、3D プリンタの利用の傾向と同じく、施工の無人化も研究開発が進んでいる。DFAB House では木造の骨組みをロボットが組み上げ、天井のスラブを 3D プリンタで製造している[127]。このような動向から、3D プリンタの導入による家屋の施工期間の短期間化が進んでいる。

また、家屋そのものを新たに建てるのではなく、家屋の内部に新たなデバイスを追加することは、家屋に望む環境を構築する一つの手段である。これは主にデザインにおける取組になる。モノをデザインする上で、近年ではユーザを観察して課題を抽出するインサイト分析が人間工学的な研究と共同して行われている。一例として、人間工学的な視点から人の動きや身体の構造に合わせた椅子やキーボードなどが世に出ている。さらには人が意識的に認知できる部分のみならず、認知できない部分において本能や習性で快適であると感じる部分への研究が進んでいる[128]。環境の変化に対して人は無意識の内に生化学反応(=ホメオスタシス)を起こしていることが神経科学の分野から明らかになっている[129]。ホメオスタシスといった無意識の内に「良い」「幸せである」と思われる方向へ向かう反応も理解した上でそれらに良く作用するデザインを目指すことはデザインの本来の目的でもあるが、ウェルビーイングのためのデザインとして注目を受けている近年の動向の一つであると言える。分野の性質上、ウェルビーイングに関する動向は医学的な分野での実践が多いが、より良く生きるために何を測定すべきかという点について、身体特性・生体反応、振る舞い・行動、主観報告の3つの分類を始め細かい分類がなされており、ウェルビーイングの構成要因の解明が進められている[130]。また、消費者インサイト分析の分野においては、デジノグラフィ[131]と呼ばれるビッグデータによるインサイト分析の手法も国内の動向として存在している。以上のような流れから、この分野において日本は強みを有することが出来ると期待される。

デザイナーの考え方に対する解釈が進みつつあり、それが社会へ広く浸透し始めている点も近年の主要な動向である。デザインにおけるデザイナーの思考はしばしばダブルダイアモンドで可視化される、問題発見と問題解決の二段階に分けられる[132]。デザイン思考[133]はデザイナーの思考の主に問題解決の部分を可視化するもので、近年はモノのデザインだけでなく経営など様々な領域へと浸透している[134]。一方で、問題解決は問い自体の良さに左右されることから問題発見の研究開発も非常に重要である[135]。この研究はスペキュラティブデザイン[136]と呼ばれる。昨今様々な問題が叫ばれる中で調和して生きていくためには、問題を与えられてから考えるのではなく問い自体を正しく設定する必要があることから、今後この分野のより一層の発展が見込まれると期待される。スペキュラティブデザインの動向としては、デザイン思考と同様に芸術とは異なる分野への応用が進んで

いる。例えば、英国は高齢化社会に対する立案をするために、スペキュラティブデザインの手法を用いたワークショップが催されており、政府も関わるプロジェクトとなっている[137][138]。また、ヒト中心デザインという言葉自体は約 30 年前から存在しているが[139]、Woven City[50]もヒト中心を大きなキーワードの一つとして挙げており、社会のデザインにおいて重要視されている。最後に創造性に関する国内動向について述べる。創造性はデザイナーが新しいものを発想/構想する上で必要な能力だが、創造性を発揮するためには、旅で得られるような経験に代表される一次情報に様々な感覚を通じて触れることが重要であると認識されている[140]。一次情報とは人による解釈といった制限を受けていない情報のことであり、例えば映像を通じて何かを見ることよりも、全ての感覚が制限を受けない状況でその「何か」を体験することが相当する。また、デザイナーが何に気づいているのかという点についても未だ言語化されていない領域であるため、神経科学や心理学の分野からのアプローチが見られている[141]。創造性自体の構造が言語化されることはこれまでほとんど無かったが、直近の動向として進化とのアナロジーから創造性に対する解釈が与えられている[142]。

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

II.1 で明らかにした「暮らしを成り立たせる機能」から演繹した技術課題を II.2 で述べたが、これらをどこにでも延伸的なインフラ敷設に頼らずどこにでも供給する機能を実装する技術的手段は、

- エネルギーをその場で自給する「エネルギー自給」
- 生活用水の供給を最低限にして有機物を回収する「資源再生循環」
- 廃棄物の輸送に加えて自給できない物資の輸送を担う「完全自動輸送」
- 生活が成り立った上で彩り豊かな生活をどこにでも実現する「五感通信」
- 上記を実現する機器を実装した上でどこにでも彩り豊かな「環境構築デバイスとしての家屋」

からなる。これらの技術を統合してどのような都市構造を実現するかを総合する社会システム工学と、社会構造の変化を受け止める ELSI (Ethical, Legal, Social Issues) への配慮、これら全体として社会像を構成する実装手段となる (図 9)。自由度が飛躍的に向上した社会の実現に必要な研究開発の主な分野・領域を図 10 に示す。

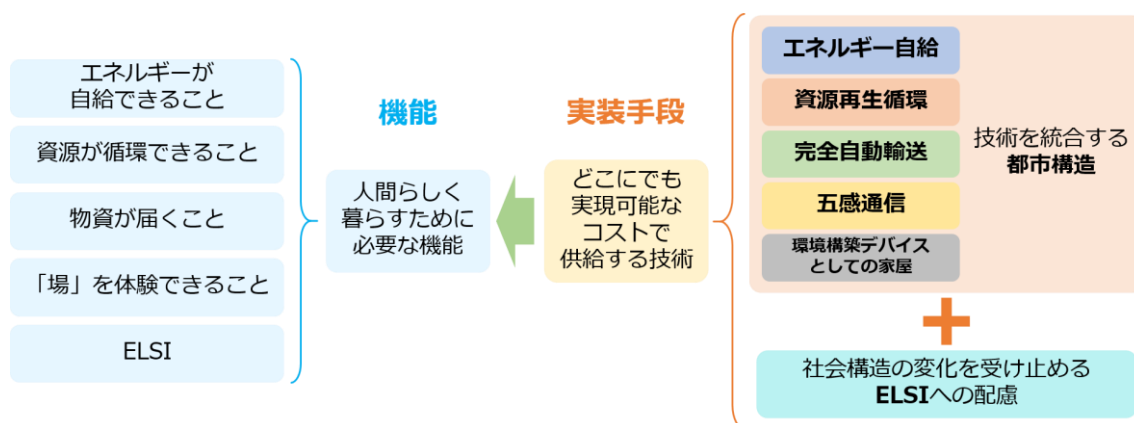


図 9：人間らしく暮らすために必要な機能とその実装手段

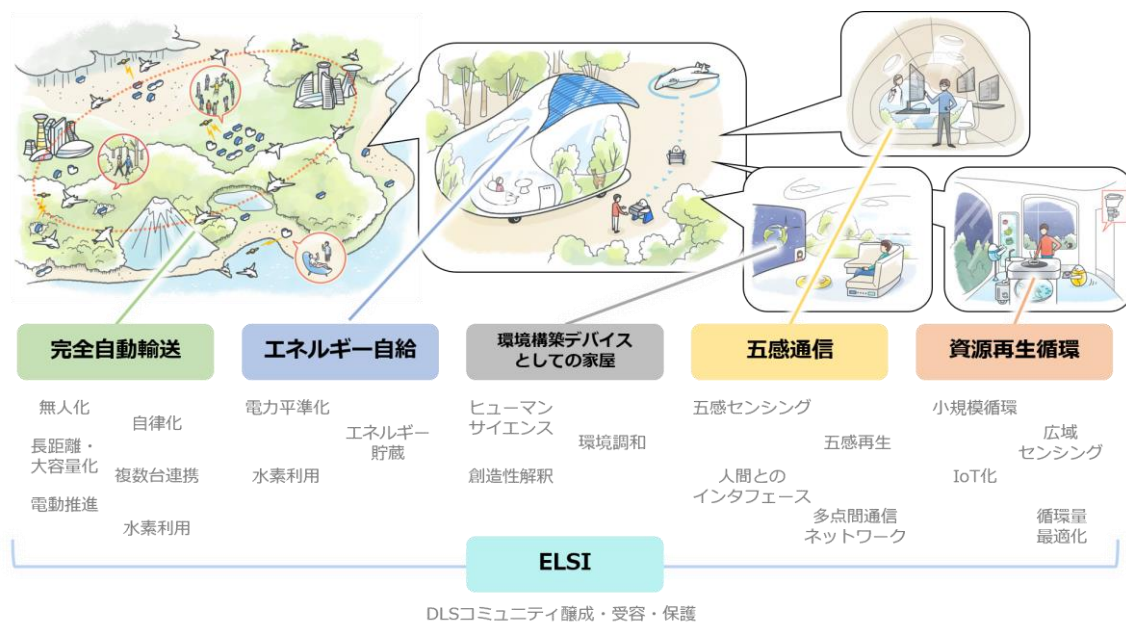


図 10：自由度が飛躍的に向上した社会の実現に必要な研究開発の主な分野・領域

本 MS 目標案では社会像を設定している。社会はバラバラに技術要素だけがあっても成立しえず、論理欠陥があっても成立しない。むしろ様々な技術のバランスを取ることで社会として成立する。従って、社会像を実現するためには当然個別の技術要素が必要になるが、各技術要素がどのような理由で必要になるか、なぜそこでその技術が必要になるのかを詳細に明らかにすることが社会像実現のカギを握っている。また、II.1 でも述べたが、技術の社会実装を行って社会に変化がもたらされれば、必ず心理的な作用を伴って社会的課題が発生し、これには ELSI、すなわち法規・行政対応・福祉といった公的な対応と NGO 等ソーシャルセクターの関与で対応していかなければならない。すなわち、コレクティブ・インパクト[143]（＝集合的な社会変化）を起こす必要がある。また、新たなガバナンスモデルも同時に作っていかなければならない[144]。

よって、上記の 5 つの技術要素と、これら技術要素を束ねた上で ELSI を含めて一貫した社会像として維持し続ける社会のアーキテクチャーデザイン[145]が最も重要な研究領域である。すなわち、社会とは多数のサブシステムからなるシステム・オブ・システムズであり、構成する技術要素同士の因果関係を整理した上で、必要な供給量を供給しうるサブシステムの成立に加えて、社会システム全体としてどのようなバランスで成り立ちうるのかを設計し、社会実験によって実証し、不足点を計測した上で設計を改善するという、社会システムの設計サイクルを見出すことこそが本 MS 目標の核となる研究課題である。

1.1 エネルギー自給

・エネルギー貯蓄技術

都市の機能を支えるエネルギーの多くは、再生エネルギーにシフトしていくことが期待されており、先述の通り、P2G に関する研究や実証が進められている。一方で再生可能エ

エネルギーの導入拡大に伴い、その出力変動や余剰エネルギーが問題になっており、エネルギーを安定化する仕組みが必要とされている。リチウムイオン電池に代表される蓄電池をはじめとするエネルギーを蓄える技術に注目が集まっており、その 1 つとして技術開発が加速しているものが水素である。水素は基本的にタンクに貯蔵する形態を取るため、自然放電がなく長期貯蔵に向いている。また、水素吸蔵合金を使うと約 1000 分の 1 にまで体積を圧縮できるため、大量貯蔵が可能である。

つまり、通常よりも大規模であったり、長いスパンでの運用に適していると考えられ、例えば、太陽光発電の発電量が大きく施設のエネルギー需要の少ない春や秋に発生する余剰電力を水素で蓄えて、エネルギー需要ピークが生じがちな夏や冬に使うといった、季節を跨いだエネルギーマネジメントの可能性を検討している。

II.3.1 で述べた「Hydro Q-BiC」は、大量の水素をコンパクトに貯蔵することが可能であるが、大掛かりな装置が必要であるため持ち運ぶことは現実的ではない。したがって、コンパクト化させたり、家庭のエネルギーマネジメントを高度化するなど、この技術を進化させることで、DLS 生活者の自由度を向上させることが期待できる。生活拠点において、太陽光発電や風力発電等で電力を水素に変換、水素吸蔵合金を用いて安全に水素を保管しておくことで、日照量が不足している場合や十分な風が吹かないといった場合においても、安定的に居住空間や移動に必要なエネルギーを確保、利用できる可能性がある。また、拠点都市においてもこのシステムは普及していくため、都市全体でのエネルギーマネジメントの高度化が必要である。

1.2 資源再生循環

水や廃棄物等の資源再生循環に係る個別技術は既に各分野にて研究が進んでいるため、本 MS 目標案としては改めてその重要性を強調しておくにとどめるが、それらの個別技術をシステム化し、コスト等の観点から最適化することが、本 MS 目標案実現のために重要な研究領域と考えている。前章で述べた物質循環とエネルギーの地産地消技術は、実際には、既存のインフラも一部流用した水や廃棄物、バッテリーや燃料等の輸送との組み合わせに最適点があると考えられる。各技術や輸送のパラメータ化と、それを組み合わせたインフラの最適化手法の検討を行う研究が重要となる。つまり、こうした「循環システム工学」が最も取り組むべき研究領域となる。

さらにその社会実装のために IT 技術による各パラメータの監視と物流調整システム等の社会システムの構築を研究していく必要がある。世帯単位でインフラパッケージを所有することになると、その維持管理が課題になると予想される。水循環や廃棄物処理は、衛生管理が必須であり、電力はその安全管理が必須であり、個人に任せていては、危険な場面があることが予想されると同時に、インフラパッケージの維持管理に個人の時間を奪うことは、分散インフラのメリットを低減するものである。インフラパッケージの自動自律制御の確立はもちろんのこと、遠隔でインフラパッケージの状態をセンシングする技術、センシングした内容から必要なアクションを自動的に取るような管理システムの確立を行う

ことで、現在と同じように何も心配することなくインフラを享受できる必要がある。

水循環を例にとりて挙げると、先述したように、排水中に含まれている汚濁物質の種類や量に応じて、適切な処理方法が異なってくる。効率的な処理を行うためには、水質や装置のモニタリングがポイントとなる。水質のモニタ方法は色々あるが、成分を厳密に同定し、定量することは、かなりの手間がかかるため、簡易な指標とセンシング技術が必要となる。宇宙ステーションの水再生装置は、主に電気伝導度により水や装置の健全性を常時監視しており、時々、再生した水をサンプリングし、軌道上で全有機炭素量（TOC）や pH 等をモニタするほか、定期的に地上で詳細な成分分析を行っている。装置の健全性については、さらに、圧力・温度等のモニタリングにより、常時監視を行っている。

地上においても、[146]にも示されるように、人口減少下の下水道設備維持に向けて ICT による課題解決を図ろうという検討もなされており、センシングや収集した情報（ビッグデータ）の活用等、について検討会が行われており[147]、IPA における水循環においても、同様の技術が必要になると考えられる。同様の「分散インフラの遠隔管理もしくは自動自律化」が、電力（エネルギー）循環や、廃棄物処理等にも必要になってくるだろう。

また、特に水については、将来的に完全循環を目指すためには「水循環対象の拡張」が必要となる。先述の通り、排水や尿等、既存の再生対象だけでは、輸送に頼る水を 0 にすることができない。II.3.2.1 の水循環の項目で述べたように、空気から水を生成する技術に代表されるように、効率良く十分な浄水を入手する技術の研究開発を推進する必要がある。例えば、廃棄物中の有機物は燃焼により水が出るため、燃焼処理と同時に水を得るようなシステムの開発も可能と予想される。

水道インフラを世帯ごとの循環装置に置き換えた際のコスト削減シナリオの一例を Appendix A.10 に示す。水循環により、水道インフラの維持コストが削減できると予想されるため、それによって削減できたコストと世帯数から水循環装置の一台当たりの目標額が推定できる。同様の推定が他のデバイスにも応用できると考えられ、その目標額へとコストを削減していくための技術開発も必要になると考えられる。

1.3 完全自動輸送

完全自動輸送を実現するためには、無人輸送機および運搬作業を補助するロボットの研究開発が必要である。実現までの過程として、両者ともにまずは遠隔操作による普及が進み、技術の進展とともに自律化することを想定している。ゆえに、第一段階として、どこからでも繋がる遠隔通信技術が必要である。これにより、今は人力に頼る輸送業務を、遠隔で操作されるロボットないしは輸送機が担うようになり、人々は場所を選ばずに業務にあたるのが可能となる。次に、衝突回避や天候に左右されない飛行をするための制御技術など、輸送機およびロボットが自律的に業務をこなすための研究開発が求められる。無人輸送機においては、需要の拡大を見据えて、円滑な運用のための運航管理システムの構築も必須である。また、オンデマンド性を確保するために、垂直離着陸飛行で高積載量、かつ長距離を高速輸送可能な機体の開発が求められる。環境負荷低減の観点から、その機

体の駆動源には電動化が望まれる。以上の中で、目標達成のために最も大きな研究課題は垂直離着陸機能を有した高積載量を長距離輸送可能な機体の開発である。Urban Centre Database[16] (Appendix A.2 参照) から得られる全世界の都市 (Urban Centre) 間距離のデータから、拠点都市間輸送を担うには 252.8 km の航続距離が必要であると見積もられた (Appendix A.6 参照)。しかし、バッテリー性能と達成航続距離の検討 (Appendix A.6.4 参照) によるとこの目標は現時点では達成できない。また、1000 km、2000 km は 2050 年においても達成できないため、次世代電池の開発が必須となる。また、機体形状について、積載量・燃費・速度の点で優れる固定翼飛行機と垂直離着陸機能を有するマルチコプターを融合させた優れた機体を考案する点に研究課題がある。

1.4 五感通信

II.2.4.1 で述べたように、五感通信をあらゆる場所 (点) で実現し、互いに距離が離れた 2 人がバーチャル空間において物理空間と同等の知覚を違和感なく得られるようにするためには、五感のセンシング技術と五感再生技術、そして五感の伝送を行うための多点間通信ネットワーク技術に関する研究開発が必要である。五感の各特性に適した通信技術を確立することで、離れた場所でもその場にいる場合と同等の感覚を提供することができる。さらに、点で居住している場合でも、居住空間に人とのインタフェースが実装されていれば、部屋が単なる空間ではなく、仕事部屋やコミュニケーション部屋などに変化し、多様な機能や価値を提供する空間、すなわち III.1.5 に述べる「環境構築デバイスとしての家屋」を実現できる。

・五感センシング技術、五感再生技術

各点において五感通信を成立させるためには、あらゆる場所で五感のセンシング、プロセッシング、アクチュエーションが可能となるデバイスが実現されており居住空間に実装されている必要がある。さらには人が居住空間の外に出ても五感通信を可能とするために、人が持ち運ぶことができるウェアラブルデバイスや、ドローンのように浮遊しながら人とともに移動するデバイスも必要であり、その場合には 3 次元空間情報や時間情報を物理空間に直接再生する技術が必要である。

触感については、どこにいても安全性や適応能力の高いロボット制御を可能とするために、高い応答速度性と多点制御性を兼ね備えた触覚デバイスを実現する研究開発が必要である。味覚と嗅覚のセンサデバイスの視点からは、ヒトの味覚、嗅覚のリアルな情報化を支えるためには、化学センサの高感度化、高ダイナミックレンジ化に関する技術が必要となる。アクチュエータデバイスの観点からは、化学物質を感覚器に直接作用させる方法では、化学物質の種類とデバイス数が比例すると仮定すると、経済性と小型化の点で嗅覚アクチュエータ実現化の障害になることは明らかである。そのため、嗅覚アクチュエータの普及を目指すならば、少ない化学種で嗅覚を再現できる範囲を最大化できる化学物質を同定する必要がある。また、その化学物質は人体の安全性であることが必要である。電気や

光により感覚器に刺激を与え疑似的に再現する方法では、化学物質を消耗しない点において有利であるが、電気・光による刺激と味覚、嗅覚とを関係づけるメカニズム解明、および人体への安全評価指標の研究開発が必要となる。

また、これら五感情報の伝送処理においては、送信側の全ての情報を受信側に伝えるのではなく、受信側のパーソナリティを考慮したフィルタ処理も必要となる。例えば、幼児が味覚を受信する場合には苦みを低減、味覚減退の利用者には感度を上げるなどのフィルタ処理は、利用者の安心と快適性の面で重要となる。

・多点間通信ネットワーク技術

要求される通信のアプリケーションに応じ、情報量が多く、2 Tbps 程度のスループットが必要となる視覚情報は圧縮して伝送し、無線回線だけではなく大容量の光回線も併用して伝送する、数 ms 程度の低遅延が要求される聴覚情報や触覚情報は優先度を高くし、地上に近いドローンなどの中継局で伝送するなど、五感の中で必要となる情報量や時間知覚のニーズに合わせて通信ネットワーク上での経路や質・量を最適化できる通信プラットフォームやネットワークスライシング技術に関する研究開発が必要である。

1.5 環境構築デバイスとしての家屋

環境構築デバイスとしての家屋を実現するには、本 MS 目標案では人が自ら赴き全身で体験するためのデザインが重要となることから、デザインに関連する次の二つの研究分野・領域において研究開発を推進する必要がある。一つは人が認知できない領域における人の感じ方に関する研究分野であり、もう一方は発想の源となる一次情報に対するデザイナーの感じ方や創造性に関する研究分野である。

人が認知できない領域における人の感じ方に関する研究分野は主に人間工学や認知科学からなる統合的な領域になる。本稿ではこれをヒューマンサイエンスと呼ぶ。このヒューマンサイエンスに関する研究開発には二段階ある。まず、人がより良く生きる（=well-being）ために何かをデザインするには、認知の可否に関わらず人が「良い」と感じる理論的な枠組みについての研究が必要である。これは五感通信において推進する研究とも関連するが、人が何かを感じるセンサは五感がすべてではないことから、その他の項目についても研究が望まれる。次いで、これらの感じ方が明らかになることで、それを計測し、制御を加え最適化する方向の研究開発が当該分野において必要になる。

発想の源となる一次情報に対するデザイナーの感じ方や創造性に関する研究分野は主に認知科学や心理学の領域になると考えられる。人々が自由に体験し、一次情報に溢れる状況になることは本 MS 目標において目指す姿であるが、その一次情報をどのように活かすかも重要な要素である。この研究の方向性は消費者インサイト分析とは異なり、情報を受け取り発想するデザイナー自身が一次情報に対してどのように感じ、創造性を発揮しているのかを明らかにする方向性の研究となる。デザイナーにとって新しい情報の感じ方や意思決定プロセスが認知科学や心理学の分野において明らかになることで、デザインの手法

が様々な分野に浸透していく流れと同様に、様々な分野で発揮されている創造性が論理的に説明可能になってくると考えられる。そのため、この研究が応用できる分野は多岐にわたり、より良い創造性を発揮するための手法に関する研究が各分野で推進されると考えられる。

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

III.1の内容を踏まえ、科学技術の達成シーンの実現に向け、2030年、2040年、2050年のそれぞれにおいて達成すべきマイルストーンと、マイルストーンの達成に向けて取り組むべき具体的な研究開発テーマを図11に示す。マイルストーンの達成が社会にもたらす効果はAppendix A.11に述べる。

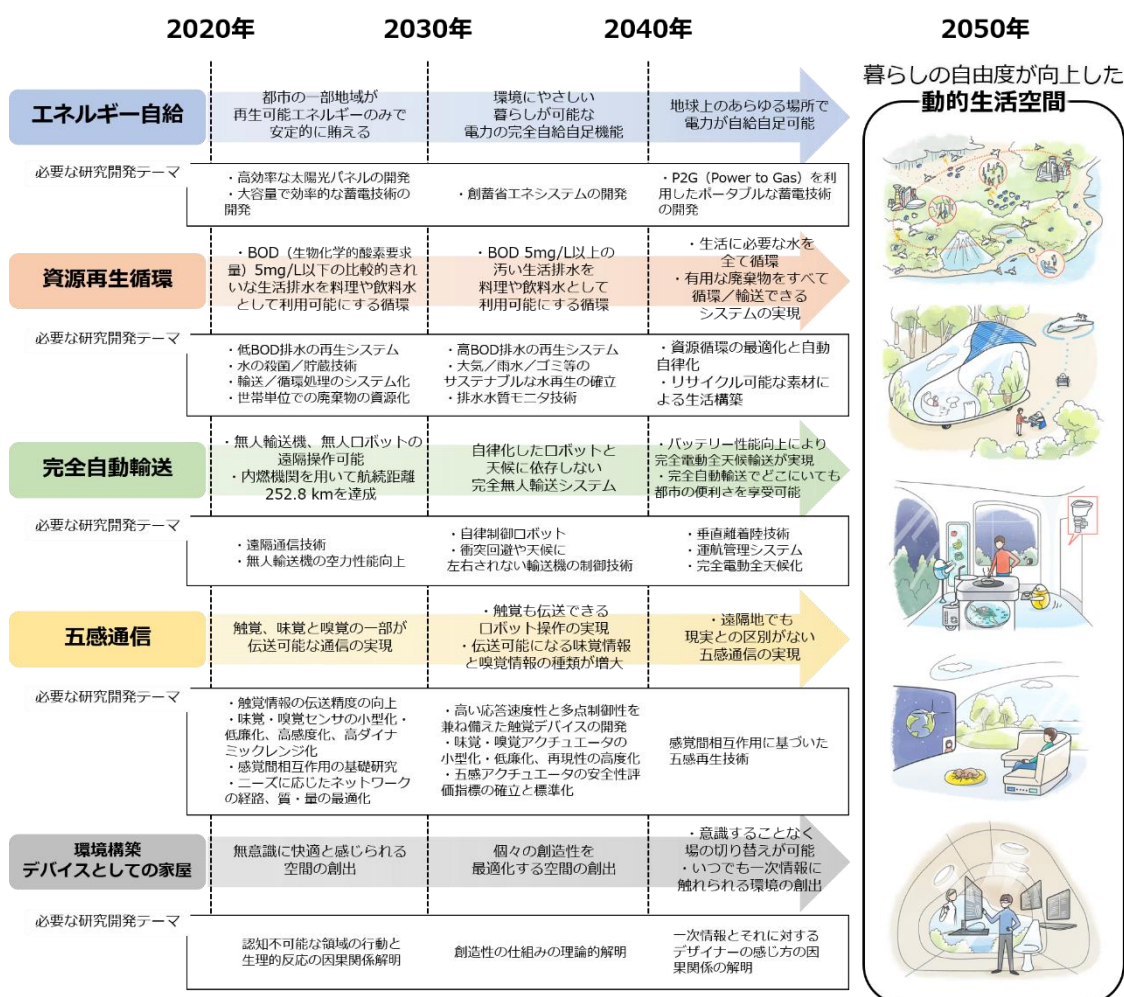


図 11：2050 年までのマイルストーンと研究開発テーマ

3 目標達成に向けた国際連携の在り方

本 MS 目標案の達成には、諸外国との連携も必要不可欠である。先進国との研究開発に

おける連携はもちろんのこと、現在まさに都市過密化の問題に直面している新興国、特に ASEAN に加盟する東アジア諸国との連携にあたっては、同じ問題を抱えるパートナーとして共に本 MS 目標案に取り組む必要がある。

発展途上国との連携は、当該諸国のインフラ整備を飛躍的に発展させることに貢献できる。日本において本 MS 目標案が達成され、発展途上国を始めとした海外へ IPA 技術を積極的に輸出することで、発展途上国の主体的・自律的な発展の支援が可能となる。例えば、未だインフラが整備されていない発展途上国でも水やエネルギーなどを安定して供給できる可能性がある。これは、発展途上国において、固定電話よりも先に携帯電話が普及しているという現象と同様に、インフラ整備コストを低く抑えることにつながると考えられる。現に、「携帯電話の人口普及率は最も低い水準のアフリカでも 80.8%となり、先進国と途上国との間にそれほど大きな差はなくなっている」[148]。社会像が我が国に特化したものになると、付随する技術を商品として展開する市場が小さくなって高コストになってしまうことを考慮すれば、諸外国との連携も IPA 技術の発展に必要な要素である。

詳細は III.5 に述べるが、今回、世界六大州出身の外国籍の方と日本国内各地の日本国籍の方を集めて国際ワークショップを開催し、提案する社会像の世界各国での社会的受容性について調査した。今後とも、このような国際的な取り組みを継続することで、継続して社会的な受容性を調査する必要がある。

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

本チームは、輸送、情報通信、住環境、建築、行政、心理面と、幅広い分野を専門とする機関にまたがっているため、本活動そのものがセクターを越えた連携になっている。したがって、本検討から出てきた都市構造、エネルギー自給、資源再生循環、完全自動輸送、五感通信、環境構築デバイスとしての家屋、ELSI といったテーマ間の連携が、ムーンショット目標達成に向けて特に重要となる。また、その他にもこれらのテーマの中で着手できなかった分野・セクターや、本検討テーマ以外の分野・セクターを越えた連携も必要である。特にエネルギー分野は人間の生活を成り立たせるために必須の分野の一つであるが、似たような分散型社会を試行した MS 目標検討チーム「Moon Village ～HO・DO・HO・DO[21]」「電解パーソナルグリッドチーム[22]」のソリューションは本 MS 目標案が掲げる社会像実現と整合すると期待できる。また、「Flex インフラを考える会[23]」は「いつでも×だれでも好きな場所で好きな暮らし」ができることの実現を目的として「自律進化する情報インフラ」と「柔軟に変化する建物空間」のソリューションを提案しているので、本 MS 目標案が掲げる社会像実現と整合すると期待できる。

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

ここまでは主に科学技術面から本 MS 目標案を達成するための取り組みに言及してきたが、本節では本 MS 目標案が達成された社会を実現するために想定される倫理・法的・社会的課題とそれらを解決するための取り組みについて述べる。動的な生活を送る上では、

生活に密着した行政・民間サービスに対するニーズがより多様化・高度化するため、IPA 技術の社会実装は行政や社会システムにも大きな転換を要求する。

どのような暮らしを実現したいか考えるうえで、II.1 の表 1 に示した暮らしの 14 項目のうち、8 項目を抽出した（8 項目：「2. 安心／安全のためのサービス」「3. 暮らしを支えるサービス」「4. 地域に魅力があること」「5. 環境との調和」「7. 人と会う機会（面白い人・多様な人と会う機会）」「8. 仕事のための情報が得られること（人との出会いを通じて情報を得ること）」「11. 話題になっているヒト・モノ・コトへの容易なアクセスができること」「12. 欲しいもの・手に入るものが制限されないこと」）。これらの理想を実現するには、社会的受容性を念頭とした ELSI への配慮が必要となる。

さらに、動的生活に対する国際的な社会的受容性を検討するため、世界六大州（南北アメリカ大陸・欧州・アフリカ大陸・アジア・オセアニア）から人口比を考慮しつつ満遍なく集めた外国籍の一般の方と、日本国内各地から募集した一般の日本国籍の方に集まっていただき、国際ワークショップ開催した（詳細は Appendix A.12 参照）。その結果、表 2 に示すように、全体的に本 MS 目標案が掲げる社会像に対して好意的な反応があったものの、コミュニティをどのように維持するか、加えて公的な機能をどのように機能させるかが課題として浮かび上がった。

表 2：国際ワークショップで指摘された本 MS 目標案の掲げる社会像のメリット・デメリット

メリット	デメリット
● 居住地域によって就業機会や都市のリソースへのアクセスが制限されている社会的弱者のサポートにつながる。 ● インフラが未発達の国、地域へ適用すれば、新規インフラ敷設にかかる障壁を下げる事が可能。 ● 趣味や研究対象に関連する場所の近くに住むことが可能 ● 同じ価値観を持つ小規模なグループを形成することでつながりを強化できる。 ● 土地の占有を減らし、より平等な社会の実現につながる。 ● 島国では都市のある島とそれ以外の格差が大きく、是正につながる。	● コミュニティとのつながりが消え、孤独死のリスクを助長する。 ● IPA を利用できるひととそうでない人の格差が生じる。 ● 災害時／救急時に救助、支援をしてくれるのが誰か、所掌が曖昧になる。 ● コミュニティを失い、アイデンティティを失う可能性がある。 ● 社会的セーフティネットの所掌はどうなるか、またどのように機能させるか。 ● 誰もが自然に踏み入ることを可能とし、環境破壊につながりうる。 ● 個々の移動/居住を誰がコントロールするのか。

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ● 分散型農業を可能にし、様々な形態の土地利用を可能にする（集中農業からの解放） ● 砂漠のような不毛地帯の活用が可能 | |
|--|--|

また、我々の行ったオンライン調査の結果、多側面で人々が動的生活に対して懸念点を抱いていることが明らかになった（Appendix A.1.3.8）。例えば、「移動中や移動先で病気になった時に、付近に病院がなかった場合が心配だ」と「移動に伴う書類手続きが面倒くさい」は特に動的生活での懸念点として目立った。また、「家族と離れ離れになりたくないと思う」、「友人と疎遠になりそうだと思う」といった人間関係の疎遠に関する不安や、「社会保障を享受できなくなるのではないかと思う」といった行政サービスに関する不安も見られた。

以上より、II.1の表1に示した暮らしの14項目と、国際ワークショップとオンライン調査の結果に基づく検討結果を踏まえ、動的生活中で生じうる倫理・法的・社会的課題とそれぞれの解決策を導出した（導出までのプロセスは Appendix A.13 を参照）。動的生活中では、地域のボーダレス化・個人化が進み個人の選択の自由度が上がる一方で、「近隣」の状況が絶えず変化することで様々な不安要因が生じる。例えば、人対人のつながりが弱い社会においては、無拘束の反面として個人の孤立感が深まり、個人の力では処理できない問題についての不満感や無力感が蓄積される[149]。また、近隣の目が届かないため、犯罪増加の懸念も生じる。そこで、本 MS 目標案を達成するにあたっては、個人のプライバシー等を守りながら、行政が犯罪抑止環境や制度、人々のコミュニケーションを絶やさないう創発性のあるコミュニティなどを整備し、誰もが暮らしやすい社会を実現する必要がある。ただし、全ての人が IPA を利用した動的生活を行うとは限らないことに留意する必要がある。したがって、動的生活を行う人と行わない人々との共存を可能にするように、段階的な社会システムを転換することが求められる。

本 MS 目標案の達成に向けて、誰もが暮らしやすい社会を実現するため、以下では、11個の ELSI 課題とその解決策を提案する。図 12 に示すように、これら 11 個の ELSI 課題は 3 つにグルーピングできる。「人をまもる」は人の命や人権に関する課題、「場所をまもる」は住む場所の自然環境保護に関する課題である。「社会をまもる」は、人と場所が守られて始めて成立する社会に対し、その社会の質を上げるための課題である。

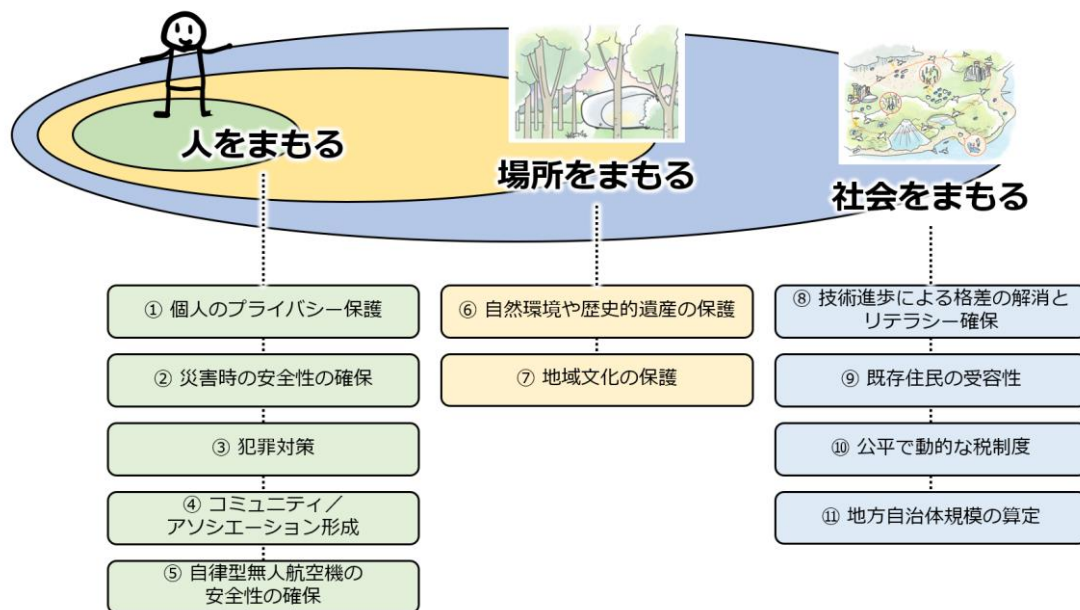


図 12：社会的受容性を高めるために必要な ELSI に対する取り組み

【人をまもる】

① 個人のプライバシー保護

本 MS 目標案が達成された社会において、住民にきめ細かい行政サービスを提供するためには、住所管理や個人識別、個人追跡によって一人ひとりがどこにいるのかを知る必要がある。これにより、郵便物や物資の配送などが容易に行える。一方で、監視社会が懸念され、個人のプライバシーの問題も生じると考えられ、「個人情報保護法」をはじめとしたプライバシー保護の観点が重要になる。現在の個人情報保護法では、利用目的の特定、第三者へ提供する際の本人同意、不必要なデータの取得や提供の制限、必要のないデータの遅滞なき消去、データの安全管理体制、苦情受付体制等の適切な各種対策が求められるため、実装・運営にあたっては特例的な対応を新たに定める必要がある。

したがって、サービスを受ける必要のある人が個人情報を特定されことなく、情報のやり取りが可能なシステムが求められる。動的生活によって絶え間なく動く住民の情報を管理する必要があるため、出入りする住民の移動情報を絶え間なく収集・管理する手法が必要となる。また、収集した情報のうち、サービスの提供に必要な情報を適切に切り出して処理し、必要な相手に渡す必要があるため、個人特定には至らないよう途中の階層で厳重な管理が可能な枠組みをデジタルに作り上げる必要がある。例えば、データの中身を秘匿したまま計算ができる「秘密計算」と呼ばれる技術を適用することで、個人情報に関わるデータの秘密を守りながら、情報を取り扱うことが可能となる[150]。情報を知る必要がある対象にだけ必要十分量の情報が提供できるような役割は引き続き行政が担っていると考えられる。

② 災害時の安全性の確保

本 MS 目標案が達成された社会では、あらゆる場所に居住することができるため、移り住んだ先の土砂崩れや洪水のリスクなど、自分が住もうとしている地域の安全性が把握できない。さらに、災害が起きた際、自分たちが避難すべき場所がわからない恐れがある。また、災害が起きた際、人の所在が分からないので警察、消防、救急、救助など行政の対応が遅れてしまう可能性もある。

上記の課題を解決するために、過去の災害情報から自動的に収集された膨大なデータによって事前にリスクを把握し、ハザードマップを整備する必要がある[151]。災害警戒区域に住もうとする際には必ずその地域の災害リスクや災害履歴がリスク感知センサを通じて自動的に伝達される仕組みが必要となる。また、災害発生時には、予め行政が把握している人の所在地情報に基づいてドローンが避難者の適切な誘導を行うことや、怪我などによって動けない人を検知し、自動的に救助を要請することなど、被害を最小限に抑えるためのシステムが必須となる。

③ 犯罪対策

本 MS 目標案が達成された社会では、居住の自由度が高まることで、結果的に現在よりも分散して人々が居住することが想定される。したがって、これまで行政が担当してきた防犯範囲がさらに大きくなるため、犯罪発生の予防や犯罪発生の検知、その後の対応が難しくなることが想定される。

したがって、ドローンによるパトロールを実施することで、犯罪の抑止力の向上や犯罪の早期発見が見込まれる。ただし、犯罪者を後々逮捕するために個人情報参照して特定する際には、犯罪者以外の一般人個人に対するプライバシーの問題も生じると考えられるため、これらのトレードオフを考慮した運用が必要となる。また、検知が難しい家庭内犯罪を抑制するために、危機を感じた人や被害者が SOS サインを広く発信できる仕組みや、その人たちがすぐに逃げられるような仕組みが必要で、これらの仕組みを行政が適切に整備する必要がある。

④ コミュニティ／アソシエーション形成

本 MS 目標案が達成された社会では、どこでも生活できるようになり、II.1 で述べたように、多様な人と出会う機会が多くなることが望まれる。しかし、現在の社会では、物理的に離れた人が関係性を形成するためにはインターネット上の SNS などを利用するしか手段がない。国際ワークショップ (III.3 の表 2 参照)では、動的な生活下においては「コミュニティとのつながりが消え、孤独死のリスクを助長する」、「コミュニティを失い、アイデンティティを失う可能性がある」ことが指摘された。したがって、本 MS 目標案が達成された社会では新たな出会いを通して動的な関係を築きあげていくコミュニケーションの場が必要となると考えられる。また、従来のコミュニティが果たしてきた役割である犯罪抑止、防災、孤立を防止するための機能等も必須となる。

したがって、本 MS 目標が達成された社会におけるコミュニティ／アソシエーションの機能としては、これまで町内会や公民館が担ってきた機能を物理空間だけではなく仮想空間にも実現されていることが必要となる。ここでは、その場を「コミュニティ」ではなく、「アソシエーション」と呼ぶ。コミュニティとは、伝統的に、自分が生まれ育った場所や地縁、祖先崇拝や信仰などを共有している血縁によって結ばれていたり、子育てや介護の基盤となるような強いつながりを示すが、アソシエーションは学校や会社のように、目的や関心が同じ人々が自分の意思で繋がり、そこから利益を得る限りにおいては属し、利益を得られなくなったら脱退する場を表す[152][153]。このアソシエーションにおいては、他者との「創発的な」[154]コミュニケーションを生成・促進できるよう、五感通信で現実空間と同等の感覚をバーチャルで実現することが望まれる。

ただし、アソシエーションはコミュニティに取って代わるものではなく、従来のコミュニティにしか提供できない価値は依然として残るため、お互いに顔が見える環境づくり等により、生活課題の早期発見に繋がる関係性の強化や、きめ細やかな福祉サービスの充実が求められる。

さらに、五感通信などの技術を用いて就業、教育、人間関係の維持・構築がすべてリモートによって行われる場合のコミュニティ／アソシエーションの維持についても注視する必要がある。現実世界では一度も会わないままで、オンライン上のみで新たな人と出会い、人間関係を構築するケースも増加すると予想されるため、そのような環境において形成される人間関係は、従来の人間関係やコミュニティ／アソシエーションのあり方とどのように異なるのかを明らかにする必要がある。

⑤ 自律型無人航空機の安全性の確保

本 MS 目標案が達成された社会では、人々があらゆる場所に居住可能となり、無人航空機を使った荷物配送が主流となると考えられる。現在の無人機物流の実証実験で行われているような、限られた特定の飛行ルートを、単体または 2 機程度機体が同時飛行するようなものではなく、それぞれ限りなくオンデマンドに近い配送地点に対して、多数の機体が同時にそれぞれの配送拠点に飛行する複雑な航空交通環境が発生していることが想定される。この中で、機体のあらゆるものへの衝突が起これないようにすること、機体による騒音などの住民等の社会受容性の醸成、飛行を可能とする制度整備が課題となる。

現在行われている機体認証や操縦ライセンス制度の他、航空法等の法改正を行う必要がある。技術要求としては、機体同士の衝突回避や有人機・物件等との衝突防止などの安全を担保するための機体及び周辺装置等の技術開発、周辺住民に受け入れられる騒音レベルに止めるための技術開発や飛行ルート設計の工夫が求められる。そして、リスクの高い有人地帯でも自律した目視外飛行が認められるよう、安全確保のための制度整備を国が中心となって進めることが必要となる。

【場所をまもる】

⑥ 自然環境や歴史的遺産の保護

本 MS 目標案が達成された社会では、既存インフラの有無にかかわらず、人々があらゆる場所に居住できるようになるため、居住地の自然環境の悪化や、歴史的な遺産や景観の破壊につながる可能性がある。特に、国立公園や世界自然遺産地域など、自然環境が保護されている地域への移動においては制限を設けなければならない。

したがって、世界遺産など登録資産そのものが属する地域やその周囲に定められているバッファゾーン（緩衝地帯）[155]など、住むことができない地域を予め特定し、その土地に住もうと考えている人にその情報が伝わる仕組みが必要である。また、環境を破壊するリスクの低い、信頼できる人が特定の地域に住めるようにするために、各個人の居住履歴の把握や、そもそも循環可能でゴミを出さないようなシステムを居住空間に組み込むといった仕組みも有効であると考えられる。

⑦ 地域文化の保護

本 MS 目標案が達成された社会では、多くの土地に価値観の異なる人が自由に流入すると考えられる。これにより、その地域の文化を伝承する人が相対的に少なくなってしまう。さらに、新しく入ってきた人が地域文化を知ろうとしてくれない、認知したとしても尊重してくれない、知っても伝播されないことも考えられる。この原因としては、地域文化が自然に伝わりやすくなるような工夫がされていないことが課題であると考えられる。

したがって、本 MS 目標案が達成された社会において、地域文化を保護するためには、能動的に地域文化を伝えるだけでなく、受動的に地域文化が伝わる仕組みを導入することが必要となる。そのためには、その土地に行くとき自然と目に入る仕掛けや、その土地に行く前に地域文化を知ることができる仕掛けが有効であると考えられる。物理空間への情報投影技術（3次元空間情報+時間情報）により、土地と地域文化を結びつける情報投影システム（VR（Virtual Reality）やAR（Augmented Reality）などのXR）など、リアリティを伝えることができるツールが必要となる。

【社会をまもる】

⑧ 技術進歩による格差の解消とリテラシー確保

近年の技術革新により、個人が所有する端末の機能が高度化し、提供されるサービスも幅広くなっている。しかし、スマートフォン等の情報端末が普及している社会においては、「経済的理由」や「使い方が分からない」、「興味がない」等の理由で、所有している人としていない人の情報格差が社会的な課題となっている[156]。このことが原因で、個人が享受できるはずのサービスの幅が狭くなっていると考えられる。また、SNS（Social Network Service）の利用者の情報リテラシーの欠如が原因となり、犯罪の発生や、差別など他者への悪影響が生じているケースも多く見られる。したがって、本 MS 目標案が達成された社会においても同様に、IPA 技術を活用したサービスを享受できる人とできない人の間に格差が生じる恐れがある。これは、国際ワークショップでも指摘された（III.3 の表

2 参照)。

本 MS 目標案に関係した技術は、使えない人を生まないように、誰もが使えるものである必要がある。例えば、個人が利用する端末やシステムは可用性の高いユニバーサルなデザインとする必要がある[156]。また、その技術に関するリテラシーが自動的に醸成され、その質の維持ができるようにしなければならない。また、動的な生活を選択せずに現状維持を選択してしまう中間層に対しては、動的生活を促す補助金政策を打ち出すことが有効となる。動的生活への積極的な移行の決定因は、主に新奇性欲求と現状生活の不満の高さである (Appendix A.1.3.7)。この特性を持った人物が先導となって動的生活に移行したとしても、それ以外の人々は敢えて現状の生活を変えようとはせず、IPA 技術の導入に踏み込むことができない可能性がある。したがって、IPA 技術の利用者人口を増やし、社会変容を確保するためには、自治体へ IPA/DLS への移行を促すための補助金を交付することも 1 つの手段となりうる。

⑨ 既存住民の受容性

本 MS 目標案が達成された社会では、新しくその土地に住む人 (新規住民) と、元からその土地に住んでいる人 (既存住民と呼ぶ) との衝突が起きる可能性がある。その大きな原因としては、新規住民がこれまで住んでいた土地と既存住民が住んでいる土地のルールの違いによる住民間の問題や、新規住民の流入に対する既存住民の不安などが挙げられる。このような事象は、現代において引っ越しや移住によっても生じている課題であるが、本 MS 目標案が達成された社会では居住地の自由度が上がることから、より顕著になると考えられる。

したがって、本 MS 目標案が達成された社会では、その土地のローカルな不文律的なルールを居住者が事前に把握できるようにするために、伝わるべきルールがデジタル情報として入域時に自動的に伝わるような仕組みが有効であると考えられる。また、そもそも問題を起こす人を減らすために、生じたごみを利用した発電を可能にすることでごみになるべく出ないようにすることや、外界からの騒音を遮断するような膜シートを居住空間の外壁に貼ることなどの対策が必要である。

⑩ 公平で動的な税制度

本 MS 目標案が達成された社会において、人々が自由に居住地を選べるようになった場合、短期間で住居を移す暮らし方も考えられるため、これまでの住民票や住民税の仕組みでは、多くの自治体で適切なサービスを提供できる財源を賄うことができなくなることが予想される。現状、ある年度の住民税は、1月1日時点で住民票を登録している自治体に、その前年度の収入に応じた住民税を納めている。住民基本台帳法[157] 第二十二条によると、「転入 (中略) をした者は、転入をした日から十四日以内に」氏名や住所、転入をした年月日や従前の住所を「市町村長に届け出なければならない」。また、民法[158]第二十二条では、「各人の生活の本拠をその者の住所とする」と規定されている。その住所につ

いては、「人の住所は一つしかあり得ないとの学説が有力であった」[159]が、現在では、「生活の中心は複数であり得るのであって、問題となった法律関係につき最も深い関係のある場所をもって住所とすべきであるとの見解」[159]も得られている。

したがって、本 MS 目標案が達成された社会では、住民票や住民税の概念を変える必要がある。前項で述べたように、個人の位置特定を容易に、かつ安全にできるシステムが確立されれば、現在よりも柔軟に税金を徴収できる可能性がある。より柔軟に住民票を移し替えられる仕組みや制度により、自身がその瞬間に位置する自治体に税金を支払うなど、より柔軟に住民税の納め先を変えられることが望ましい。

⑪ 地方自治体規模の算定

現在、国が策定している地方交付税の算定基準の代表的な項目の一つに国調人口（国勢調査から得られる日本の人口）が含まれている[159]。本 MS 目標案が達成された社会では単純に人口だけで算出することが良いとは限らない。これにより、多くの自治体で適切なサービスを提供できる財源を賄うことができなくなることが予想される。

したがって、本 MS 目標案が達成された社会では、単純な国調人口ではなく、動的な人口や面積に応じて地方自治体規模や地方交付税の配分を決定する必要がある。

IV. 結論

本調査研究では、現状の都市と地方の関係のように固定化された構造がもたらす閉塞感と自由度の低下について述べ、暮らしの自由度を上げるためにどこでも都市で得られるメリットを享受できるようにするための方法を調査研究した。その手段として、インフラを地面から切り離し、どこにでも投射（持ち運び、展開し、機能させること）できるようにすることを提案した。このための技術の本調査研究では Infrastructure Projection Anywhere (IPA) 技術と呼ぶ。この IPA 技術を用いれば、どこにでも住むことが可能になり、容易に居住地を移すことも可能になることが期待されるため、IPA 技術で実現される動的な生活空間を Dynamic Living Space (DLS) と呼ぶ。この結果として、社会面では都市一極集中を不要とし、都市化のデメリット軽減やインフラシステム全体での更新・保守・保全コストの低減が期待できる。また、生活者視点では、無意識に固定化された都市集中型社会の閉塞感を解消し、どこに住むかに囚われずにどこでも都市化のメリットを享受しながらありたい姿で暮らすことを選択可能になる。本調査研究では、IPA 技術を用いて DLS を実現することを MS 目標案として提案している。

この提案を現実のものとするために、以下の調査研究を行った。

まず、インフラを投射することで、現在の延伸的な拡張を必須とする都市構造から、拠点都市を中心として点在する居住点に対して都市機能を提供する新たな都市モデルを構想した。現在の実際の都市分布からこの都市モデルは一つの拠点都市に対して直径 252.8 km という広大な領域をカバーすることが求められる (Appendix A.6.2 参照)。このようにすることでほぼ日本全域をサービスエリアとした仮想的な都市空間が実現する。

次に、暮らしに期待する機能を分析して、この仮想都市サービスエリアに供給するべき 6 つの自在性を実現する 14 個の機能（「暮らしの 14 項目」）を明らかにし、これらをどこでも享受できるようにするためには、大きく分けて「エネルギーが自給できること」、「資源が循環できること」、「物資が届くこと」、「『場』を体験できること」、の 4 種類の機能が必要であることを示した。都市を変革するということは、取りも直さず社会構造を変革するということであり、現状存在する人間にまつわる問題が姿を変えて現れると共に、社会構造の変革に伴って生じる新たな問題をどう扱うかに対する、行政・立法・NGO 等ソーシャルセクターの準備が必要であることも指摘して、ELSI への配慮が必要であることを示した。

また、これらの機能を実装するためにはエネルギー自給、資源再生循環、完全自動輸送、五感通信、環境構築デバイスとしての家屋の 5 つの技術要素と、これらを統合する都市構造、加えて社会構造の変化を受け止める ELSI への配慮が必要であるとして、それぞれに対する課題を示し、社会像実現に向けたシナリオを作成した。

以上より、本調査研究では、Infrastructure Projection Anywhere (IPA) 技術の実現によって、都市構造を分散化することを可能にし、動的な生活空間 (DLS) を実現することを

MS 目標案として提案する。これによって、人々の暮らしの自由度を向上して閉塞感を解消し、持続可能な形で高度な暮らしを維持することが可能になる。

V. 参考文献

- [1] 東京都水道局, “よくある質問 もっと知りたい「水道」のこと”.
<https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/faq/qa-14.html#2> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [2] 山崎福寿, “都市集中のメカニズムと地方創生の問題点”, 土地総合研究, 23, 113-120, 2015.
- [3] 山中大学, 甲山治, 杉原薫, “人口密度に比例した総感染者数分布と今後の人類圏への示唆”, Japan Geoscience Union, American Geophysical Union, AGU Joint Meeting 2020, 2020.
- [4] United Nations, "Policy Brief: COVID-19 in an Urban World", July 2020.
- [5] 国土交通省, “企業等の東京一極集中に関する懇談会とりまとめ（参考資料）”, 2021.
<https://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/content/001384143.pdf> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [6] 西崎文平, “東京一極集中と経済成長”, JRI レビュー, Vol. 6, No. 25, 2015.
- [7] 広井良典, “AI を活用した社会構想と人口減少社会のデザイン”, 国土審議会計画推進部会 国土の長期展望専門委員会（第 3 回）資料 1, 2019.
- [8] （株）富士通総研, “地域・地方の現状と課題”, 総務省 AI インクルージョン推進会議（第 5 回）事務局説明資料 2, 2019.
https://www.soumu.go.jp/main_content/000629037.pdf (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [9] 国土交通省 “都市計画基本問題小委員会 中間とりまとめ「都市のスポンジ化」への対応”, 社会資本整備審議会 都市計画・歴史風土分科会 都市計画基本問題小委員会, 2017.
<https://www.mlit.go.jp/common/001197384.pdf> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [10] 内閣府, “我が国と諸外国の若者の意識に関する調査（平成 30 年度）”, 2019.
<https://www8.cao.go.jp/youth/kenkyu/ishiki/h30/pdf-index.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [11] 国土交通省, “国土交通省所管分野における社会資本の将来の維持管理・更新費の推計”, 2018.
- [12] 国土交通省, “社会資本の老朽化の現状と将来”.
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [13] 総務省, 令和元年版情報通信白書, 2019.
- [14] 内閣府, ムーンショット型研究開発事業 ムーンショット目標 1 「2050 年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」, 研究開発構想.
<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/sub1.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [15] 内閣府, ムーンショット型研究開発事業 ムーンショット目標 3 「2050 年までに、

AI とロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現」, 研究開発構想.

<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/sub3.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .

- [16] Florczyk, A.J. et al., "Description of the GHS Urban Centre Database 2015", Public Release 2019, Version 1.0, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-99753-2, doi:10.2760/037310, JRC115586, 2019.
- [17] 馬田隆明, “未来を実装するーテクノロジーで社会を変革する 4 つの原則”, 英治出版, 2021.
- [18] パナソニック株式会社, “オール電化住宅とは?”.
<https://sumai.panasonic.jp/alldenka/setsuden/index.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [19] 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門, “レーザー無線エネルギー伝送技術の研究”.
<https://www.kenkai.jaxa.jp/research/ssps/ssps-lssps.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [20] 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門, “マイクロ波無線エネルギー伝送技術の研究”.
<https://www.kenkai.jaxa.jp/research/ssps/ssps-mssps.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [21] Moon Village ～ HO・DO・HO・DO, 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「マルチスケールなエネルギー収穫・貯蔵システムによる適度な分散社会の可能性に関する調査研究」調査研究報告書, 2021.
- [22] 電解パーソナルグリッドチーム, 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「電解をコアテクノロジーとした集積化可能なパーソナルグリッド(PG)の実現に関する調査研究」調査研究報告書, 2021.
- [23] Flex インフラを考える会, 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, 2021.
- [24] Molly S. Anderson, Michael K. Ewert, and John F. Keener, "Life Support Baseline Values and Assumptions Document", NASA Technical Publication, 2015-218570, 2018.
- [25] 栗田工業株式会社 KCR センター, “水処理教室, 水処理とはなにか”.
<https://kcr.kurita.co.jp/wtschool/002.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [26] 栗田工業株式会社 KCR センター, “水処理教室, 汚染物質に応じた排水処理方法の選択”.
<https://kcr.kurita.co.jp/wtschool/056.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [27] 小川雄比古, “生活行為と排水”, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 1997.
- [28] 北海道大学大学院工学院, “旭川市ごみ処理システムのマテリアルフロー分析とごみ処理計画策定への応用”, 2017.
<https://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/waste/wp->

- content/uploads/2017/04/01d822e6598b90542580b1b53497657f.pdf (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [29] 国立研究開発法人国立環境研究所, “マテリアルフロー分析”, 環境儀, No.14, 2004.
<http://web4.nies.go.jp/kanko/kankyogi/14/14.pdf> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [30] 国土交通省, “物流を取り巻く現状”, 2019.
<https://www.mlit.go.jp/common/001347054.pdf> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [31] 島田勘資, “「物流生産性革命」で日本経済を再生”, 運輸政策研究, Vol. 19, No. 1, 2016.
<https://www.jttri.or.jp/kenkyusyo/product/tpsr/bn/pdf/no72-topics01.pdf> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [32] ポストンコンサルティンググループ, “日本の物流トラックドライバーの労働力は 2027 年に需要分の 25%が不足 96 万人分の労働力需要に対し, 24 万人分が不足と推計〜BCG 調査”, 2017.
https://image-src.bcg.com/Images/JPR_171026_logistics_driver_urlmodified_tcm9-227440.pdf (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [33] 国土交通省, “運輸部門における二酸化炭素排出量”, 2021.
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [34] Audi, “エアロダイナミクス”.
https://www.audi-press.jp/press-releases/PressKit/e-tron/PressKit_information_Audi_e-tron_Aerodynamics_FIX_JPN.pdf (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [35] 国土交通省, “自動運転のレベル分けについて”.
<https://www.mlit.go.jp/common/001226541.pdf> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [36] 国土交通省, “令和 2 年度 テレワーク人口実態調査 – 調査結果の抜粋 – (令和 3 年 3 月) ”.
<https://www.mlit.go.jp/toshi/daisei/content/001392106.pdf> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [37] 総務省, “労働力調査 (基本集計) 2020 年度 (令和 2 年度) 平均結果”.
<https://www.stat.go.jp/data/roudou/sokuhou/nendo/index.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [38] 総務省, “令和 2 年度 携帯電話及び全国 BWA に係る電波の利用状況調査の評価結果の概要”, 2021.
https://www.soumu.go.jp/main_content/000731415.pdf (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [39] 田山忠行, “近年の時間知覚研究の諸問題とモデル”, 北海道大学文学研究科紀要, Vol.155, pp.107-142, 2018.
- [40] D. V. Berg et al, "Challenges in Haptic Communications Over the Tactile Internet",

- IEEE Access Vol. 5, pp. 23502-23518, 2017.
- [41] 総務省, “五感情報通信技術に関する調査研究会 最終報告書”, 2001,
https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/chousa/gokan_index.html (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [42] 安藤広志ほか, “多感覚インタラクション技術とシステム応用”, 情報通信研究機構研究報告, Vol.56, Nos.1/2, pp.147-155, 2010.
 - [43] 鳴海 拓志, “総説 感覚間相互作用を活用した味と匂いの提示と拡張”, 日本味と匂学会誌, 2021, 28 巻, 1 号, pp. 17-24, 2021.
 - [44] ハプティクス研究センター, <http://haptics-c.keio.ac.jp/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [45] 金田弘拳 “ビールの美味しさを求めて”, 日本醸造協会誌, Vol. 109, No. 6, pp. 417-425, 2014.
 - [46] A. Mujahid, A. Afzal and F. L. Dickert "An Overview of High Frequency Acoustic Sensors—QCMs, SAWs and FBARs—Chemical and Biochemical Applications", Sensors, vol. 19, No. 4395, 2019.
 - [47] 岩崎好陽, “シリーズ「悪臭に関わる苦情への対応」－第 1 回 においの特徴と悪臭公害の現状－”, ちょうせい, 第 83 号, 総務省公害等調整委員会, 2015.
https://www.soumu.go.jp/main_content/000386163.pdf (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [48] 住宅生産団体連合会, “戸建注文住宅の顧客実態調査”, 2019.
<https://www.judanren.or.jp/activity/proposal-activity/report03/index.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [49] NTT データ, “ヒューマンセンシングの活用について”, 2015.
<https://www.nttdata.com/jp/ja/data-insight/2015/121702/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [50] TOYOTA WOVEN CITY, <https://www.woven-city.global/jpn> (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [51] トヨタタイムズ, “今、明かされる Woven City の原点 トップが悩み、たどり着いたこと”, 2021.
<https://toyotatimes.jp/insidetoyota/122.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [52] Fujisawa サステイナブル・スマートタウン (Fujisawa SST) .
<https://fujisawasst.com/JP/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [53] Tsunashima サステイナブル・スマートタウン (Tsunashima SST) .
<https://tsunashimasst.com/JP/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [54] Suita サステイナブル・スマートタウン (Suita SST) .
<https://suitasst.com/JP/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [55] 安宅和人, “シン・ニホン AI×データ時代における日本の再生と人材育成”, NewsPicks パブリッシング, 2020.
 - [56] 安宅和人, “「風の谷」という希望”, 2019.

- <https://kaz-ataka.hatenablog.com/entry/2019/07/15/015558> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [57] 安宅和人, “Introduction 「風の谷を創る」 ことで、未来そのものを創る”,
https://slowinternet.jp/article/intro_valley-of-wind/ (2021 年 7 月 9 日取得) ..
 - [58] Sidewalk Tronto, <https://www.sidewalktoronto.ca/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [59] Daniel L. Doctoroff, "Why we're no longer pursuing the Quayside project — and what's next for Sidewalk Labs", Sidewalk Talk, 2020.
<https://medium.com/sidewalk-talk/why-were-no-longer-pursuing-the-quayside-project-and-what-s-next-for-sidewalk-labs-9a61de3fee3a> (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [60] Open A+公共 R 不動産 編, “テンポラリーアーキテクチャー：仮設建築と社会実験”, 学芸出版社, 2020.
 - [61] De_Ceuvel, <https://deceuvel.nl/en/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [62] 内閣府, “SIP サイバー/アーキテクチャ構築及び実証研究の成果公表”, 2020.
<https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/20200318siparchitecture.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [63] 資源エネルギー庁, “日本のエネルギー2020”.
https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/pdf/energy_in_japan2020.pdf
(2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [64] パナソニック株式会社, “お客様の声：太陽光発電・蓄電池”.
<https://sumai.panasonic.jp/users-voice/solar-battery/detail/id/539770000/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [65] パナソニック株式会社, “太陽光発電・蓄電システム：[住宅用]創蓄連携システム S+”.
https://sumai.panasonic.jp/chikuden/sochiku/system/s_plus.html (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [66] NEDO, “太陽光発電開発戦略 2020”.
<https://www.nedo.go.jp/content/100926249.pdf> (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [67] NTT アドバンステクノロジー, “NTT-AT、inQs との間で無色透明型光発電素子「SQPV」技術を使用して製造した高機能ガラス製品の国内独占販売契約を締結”.
<https://www.ntt-at.co.jp/news/2020/detail/release200511.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [68] みずほリサーチ&テクノロジーズ, “蓄電池技術はどこに向かうのか?”.
https://www.mizuho-ir.co.jp/publication/report/2019/mhir18_battery_04.html
(2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [69] 東芝, “H2One コンテナモデルカタログ”.
https://www.toshiba-energy.com/hydrogen/file/H2One_Brochure_201903_JP.pdf
(2021 年 7 月 9 日取得) .

- [70] 清水建設株式会社, “建物付帯型水素エネルギー利用システム「Hydro Q-Bic」”.
<https://www.shimz.co.jp/solution/tech362/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [71] business network.jp, “無線で電力を遠くまで 10m 以上先の IoT デバイスへワイヤレス給電が可能に”.
<https://businessnetwork.jp/Detail/tabid/65/artid/8089/Default.aspx> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [72] ファン!ファン!JAXA!, “宇宙でトイレ：どうする？どうなる？”, 2016.
<https://fanfun.jaxa.jp/topics/detail/7771.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [73] 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA), “宇宙ステーション・きぼう 広報・情報センター, 次世代水再生実証システム”.
<https://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/mspr/jwrs/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [74] M. Salehi et al., "A Two-Stage Biological Reactor for Treatment of Space Based Waste Waters", 48th International Conference on Environmental Systems, 2018.
- [75] アクアテック株式会社, <https://www.aquatechgy.com/business001.php> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [76] WOTA 株式会社, <https://wota.co.jp/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [77] 環境展望台, “水処理膜”, 国立研究開発法人 国立環境研究所.
<https://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=44> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [78] 株式会社日立パワーソリューションズ, “鶏糞メタン発酵発電システム”.
<https://www.hitachi-power-solutions.com/energy/self-generation/methane/index.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [79] 環境省, “廃棄物系バイオマスの種類と利用用途”.
<http://www.env.go.jp/recycle/waste/biomass/biomass.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [80] 大阪ガス株式会社, プレスリリース, “安価でコンパクトな小型バイオガス化システムを開発し、実証試験を開始します”, 2011.
https://www.osakagas.co.jp/company/press/pr_2011/1195412_4332.html (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [81] 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA), プレスリリース, “「有機廃棄物の連続処理装置」の実用化 ～宇宙技術で私たちの生活をより便利・豊かに～”, 2004.
https://www.jaxa.jp/press/2004/06/20040621_organicwaste_j.html (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [82] EMIRA, “微生物が 24 時間で分解！ 生ゴミは“運ばず、燃やさず、その場で処理”が最先端に”, 2019.
<https://emira-t.jp/special/13049/> (2021 年 7 月 9 日取得) .

- [83] パナソニック株式会社, “家庭用ごみ処理機総合カタログ”, 2020.
<https://panasonic.jp/catalog/ctlg/garbage/garbage.pdf> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [84] NASA, "What is NASA's Heat Melt Compactor?", 2018.
<https://www.nasa.gov/ames/heat-melt-compactor> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [85] Ideas for Good, “3D プリンターで循環型社会に貢献？廃プラスチックに新たな命を吹き込む Colossus3D”, 2019.
<https://ideasforgood.jp/2019/02/21/colossus3dprinter/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [86] MagniX, "Connecting communities: All Electric. No Fuel. No Emissions. Less Noise".
<https://magnix.aero/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [87] 国際海運 GHG ゼロエミッションプロジェクトチーム, “国際海運のゼロエミッションに向けたロードマップ”, 2020.
<https://www.mlit.go.jp/common/001354532.pdf> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [88] N. Nitta , et al., "Li ion battery materials: present and future", Materials Today, Vol. 18, Issue 5, pp. 252-264, 2015.
- [89] K. Kisu et al., "Monocarborane Cluster as a Stable Fluorine-Free Calcium Battery Electrolyte", Scientific Report, 11, 7563, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86938-0>, 2021.
- [90] 日本クロステック, “世界初の完全自動運転の安全規格、レベル 4 は米国先行”, 2020.
<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/04041/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [91] Rolls Royce, "Autonomous ships The next step".
<https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/%20customers/marine/ship-intel/rr-ship-intel-aawa-8pg.pdf> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [92] Rolls Royce, “Remote and autonomous ships The next step”.
<https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/marine/ship-intel/aawa-whitepaper-210616.pdf> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [93] 日本船舶輸出組合ら, “スマート SHIPPING 等における重要技術要素の開発・実用化動向の調査”, 2018
https://www.jstra.jp/html/PDF/research2017_01.pdf (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [94] JAMSTEC, “次世代巡航探査機”.
<https://www.jamstec.go.jp/maritec/j/development/auv/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [95] Starship Technologies, <https://www.starship.xyz/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [96] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, “自動走行ロボットを用い

- た新たな自動配送サービスの実現に向けた技術開発事業”。
- https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100184.html (2021 年 7 月 9 日取得)。
- [97] L.Gorelick et al., "Actions as Space-Time Shapes", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.29, Issue 12, pp.2247-2253, 2007.
 - [98] キヤノン株式会社, “Volumetric Video Studio – Kawasaki”。
- <https://global.canon/ja/vvs/> (2021 年 7 月 9 日取得)。
- [99] 小野一穂ほか, “3 次元音響の標準化動向”, NHK 技研 R&D, No.169, 2018.
 - [100] Google, Project Starline, <https://blog.google/technology/research/project-starline/> (2021 年 7 月 9 日取得)。
 - [101] Global Industry Analysts, Inc., "Haptics - Global Market Trajectory & Analytics", 2021.
 - [102] "A Roadmap for US Robotics - From Internet to Robotics, 2020 Edition".
- <https://www.therobotreport.com/wp-content/uploads/2020/09/roadmap-2020.pdf> (2021 年 7 月 9 日取得)。
- [103] 慶應義塾大学, プレスリリース, “リアルハプティクスを利用した薄鋼板製造工程における付着物拭き取り作業の遠隔化・自動化に成功”, 2021.
- <https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/2021/5/20/28-80092/> (2021 年 7 月 9 日取得)。
- [104] 慶應義塾大学プレスリリース, “リアルハプティクスを利用した建設技能作業再現システムを開発－遠隔での左官作業における性能や作業性を実証－”, 2021.
- <https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/2021/3/24/28-78808/> (2021 年 7 月 9 日取得)。
- [105] JST ERATO 東原化学感覚シグナルプロジェクト,
- <https://www.jst.go.jp/erato/touhara/> (2021 年 7 月 9 日取得)。
- [106] 佐藤翔ほか, “AI を活用したヒト嗅覚受容体応答の網羅的解析”, 生産と技術, Vol. 72, No. 2, pp. 78-80, 2020.
 - [107] 株式会社香味発酵, <https://komi-hakko.co.jp/> (2021 年 7 月 9 日取得)。
 - [108] MSS フォーラム, <https://mss-forum.com/> (2021 年 7 月 9 日取得)。
 - [109] H. Miyashita, "Taste display that reproduces tastes measured by a taste sensor", Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. pp.1085-1093, 2020.
 - [110] C. Bushdid, et al, "Humans Can Discriminate More than 1 Trillion Olfactory Stimuli", Science, vol. 343, no. 6177, 1370-1372, 2014.
 - [111] H. Ando "Development of an olfactory display system capable of instant switching between aromas", New Breeze, pp. 16-17, 2013.
 - [112] P. S. Dittrich and M. Andreas "Lab-on-a-chip: microfluidics in drug discovery", Nature reviews Drug discovery vol. 5, no. 3, pp. 210-218, 2006.

- [113] K. Chono et al. "Development of novel atomization system based on SAW streaming", Japanese journal of applied physics vol. 43 no. 5S p. 2987, 2004.
- [114] 総務省, “Beyond 5G 推進戦略－6G へのロードマップ－”.
https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000364.html (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [115] 国立研究開発法人情報通信研究機構, “Beyond 5G/6G White Paper”, 2021.
<https://www2.nict.go.jp/idi/#whitepaper> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [116] NTT, “IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想”.
<https://www.rd.ntt/iown/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [117] DoCoMo, “ドコモ 6G ホワイトペーパー”, 2021.
https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/whitepaper_6g/ (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [118] KDDI, “Beyond 5G/6G ホワイトペーパー”, 2021.
https://www.kddi-research.jp/tech/whitepaper_b5g_6g/ (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [119] University of Oulu, "6G Flagship".
<https://www.6gchannel.com/6g-white-papers/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [120] Samsung, "The Next Hyper---Connected Experience for All".
https://cdn.codeground.org/nsr/downloads/researchareas/20201201_6G_Vision_web.pdf (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [121] Starlink, <https://www.starlink.com/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [122] 豊嶋守生ほか, “超スマート社会における ICT×宇宙通信”, Vol.104 No.5, pp.453-462, 2021.
- [123] HAPS モバイル, “Sunlider の成層圏飛行に成功”, 2020.
https://www.hapsmobile.com/ja/news/press/2020/20201008_01/ (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [124] 楽天モバイル株式会社, デジタル変革時代の電波政策懇談会 移動通信システム等制度 WG (第 1 回資料 : 2021 年 2 月 5 日) , 2021.
https://www.soumu.go.jp/main_content/000725184.pdf (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [125] haus.me, <https://haus.me/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [126] Revolution Precrafted, <https://revolutionprecrafted.com/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [127] DFAB House, <https://dfabhouse.ch/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [128] 矢野和男, “データの見えざる手 ウエアラブルセンサが明かす人間・組織・社会の法則”, 草思社, 2014.
- [129] アントニオ ダマシオ (訳 : 高橋洋) , “進化の意外な順序 : 感情、意識、創造性と文化の起源”, 白揚社, 2019.
- [130] 渡邊淳司ほか, “わたしたちのウェルビーイングをつくりあうために その思想、実践、技術”, BNN Books, 2020.

- [131] 博報堂生活総合研究所ほか, “デジノグラフィ インサイト 発見のためのビッグデータ分析”, 2021.
- [132] 廣田章光, “特集 新製品開発・新規事業創出に向けた取り組み 1. デザイン思考と人間中心思考”, 冷凍 2020 年 1-2 月号, 2020.
- [133] Rowe, P. G., "Design Thinking", 1987.
- [134] 特許庁, “Business Person’s Guide to Design Driven MGMT”.
https://www.jpo.go.jp/introduction/soshiki/document/design_keiei/handbook_20200319.pdf (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [135] 安斎勇樹, “問いは、「良い答え」を導くためのモノである”...は本当か?”.
https://note.com/yuki_anzai/n/nd3684e6dd08f (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [136] Dunne, A., and Raby, F., "Speculative Everything: Design, Fiction, and Social Dreaming", MIT Press, 2013.
- [137] Government Office for Science, "Speculative Design and the Future of an Ageing Population Report 1: Outcomes", 2015.
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/441883/speculative-design-workshop-outcomes.pdf (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [138] Government Office for Science, "Speculative Design and the Future of an Ageing Population Report 2: Techniques", 2015.
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/441876/speculative-design-workshop-techniques.pdf (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [139] Cooley, "Human-centered Systems", pp. 133-143, 1989.
https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1717-9_10
- [140] 山口周, “自由になるための技術” リベラルアーツ, 講談社, 2021.
- [141] 山鳥重, “「気付く」とはどういうことか”, ちくま新書, 2018.
- [142] 太刀川英輔, “進化思考——生き残るコンセプトをつくる「変異と適応」”, 海士の風, 2021.
- [143] デイヴィッド・ピーター・ストロー, “社会変革のためのシステム思考実践ガイド 共に解決策を見出し、コレクティブ・インパクトを創造する”, 英治出版, 2018.
- [144] 経済産業省, “GOVERNANCE INNOVATION: Society5.0 の実現に向けた方とアーキテクチャのリ・デザイン”, Ver.1.1, 2020.
- [145] 独立行政法人情報処理推進機構 “デジタルアーキテクチャ・デザインセンター”, デジタルアーキテクチャ・デザインセンター憲章, 2020.
- [146] 国土交通省水管理・国土保全局下水道部, “下水道における ICT 活用に関する検討会報告書 持続的かつ質の高い下水道事業の展開に向けた ICT 活用ビジョン”, 2014.
<https://www.mlit.go.jp/common/001031194.pdf> (2021 年 7 月 9 日取得) .

- [147] 国土交通省, “下水道における ICT 活用に関する検討会”.
https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000262.html (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [148] 総務省, 情報通信白書 平成 29 年版, 第 1 部 特集 データ主導経済と社会変革、第 4 節 広がる ICT 利活用の可能性、2 世界に広がる ICT 利活用, 2017.
- [149] 清水馨八郎, “コミュニティ生活の場における人間性の回復—”, 国民生活審議会調査部会コミュニティ問題小委員会, 1969.
- [150] 日経スタイル, “秘密守ってデータ解析 日本企業に強み、実用化へ動く”, 2021.
<https://style.nikkei.com/article/DGXMZO71492330Q1A430C2000000> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [151] 国土交通省, ハザードマップポータルサイト.
<https://disaportal.gsi.go.jp/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [152] 一般社団法人第一生命財団, “特集：平成から令和へコミュニティはどう変わるか, コミュニティ”, No.162, 2019.
- [153] 横嶋勝仁, “社会目標としてのコミュニティとアソシエーション：人とのつながりで助け合う地域社会組織の考察のための先行研究・概念のレビュー”, 千葉商科大学大学院政策研究科 Policy Studies Review, No.45, pp.3-12, 2018.
- [154] 吉原直樹, “コミュニティと都市の未来—新しい共生の作法”, 筑摩書房, 2019.
- [155] 文化審議会文化財分科会世界文化遺産特別委員会 第 1 回 資料 4, 2006.
https://www.bunka.go.jp/seisaku/bunkashingikai/bunkazai/sekaitokubetsu/01/pdf/shiryo_4.pdf (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [156] 劉継生, “情報格差を解消するための対策に関する研究”, 創価大学通信教育部論集, No.21, pp.85-102, 2018.
- [157] 住民基本台帳法 (昭和四十二年法律第八十一号)
<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=342AC00000000081> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [158] 民法 (明治二十九年法律第八十九号) .
<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=129AC00000000089> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [159] 川根誠, “税務上の「住所」概念の研究－民法上の「住所」概念の不確かさと「借用」の困難性－”, 税大ジャーナル, 第 28 号, 2017.
- [160] 総務省, 地方交付税.
https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/c-zaisei/kouhu.html (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [161] 常陰歌歩, “大学生における旅行の動機について－観光動機尺度を用いた分析より－”, 2020.
<http://ando.sakura.ne.jp/wp/wp->

- content/uploads/2015/05/dd495756292aeb0dcedf08837fd899ca.pdf (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [162] 吉川茂, “旅行者新奇性に関する心理学的考察”, 阪南論集 人文・自然科学編, 38, 41-49, 2003.
 - [163] United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division, World Population Prospects The 2017 Revision, ESA/P/WP/248, 2017.
 - [164] 川喜多二郎, “発想法 - 創造性開発のために”, 中公新書, 1967.
 - [165] 公益社団法人日本青年会議所 中国地区 岡山ブロック協議会, “若い世代の声を岡山県に～人口流出抑制アンケート調査～”, 2017.
 - [166] NASA, "Reference Guide to the International Space Station".
<https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/np-2015-05-022-jsc-iss-guide-2015-update-111015-508c.pdf> (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [167] JAXA, “STS-88 ノード 1 の概要”.
https://iss.jaxa.jp/iss/2a/node1_spec.html (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [168] 環境省, “平成 29 年度 家庭部門の CO2 排出実態統計調査 (確報値) ”, 2019.
<https://www.env.go.jp/press/106537.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [169] Panasonic, “公共・産業用太陽光発電システム 年間推定発電量”.
https://www2.panasonic.biz/ls/souchikuene/solar_industrial/about.html (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [170] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, “日射に関するデータベース：日射量データベース”.
https://www.nedo.go.jp/library/ZZFF_100041.html (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [171] 電気事業連合会, “再生可能エネルギー導入拡大に伴う技術的課題と対応策について”, 第 2 回 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 新エネルギー小委員会 資料 2, 2014.
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/pdf/002_04_00.pdf (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [172] 山田健翔, 内山貴啓, 加藤裕之, 上野真, “無人固定翼機の将来性能に関する潜在ニーズの調査研究”, JAXA-RM-20-003, 2021.
 - [173] 一般社団法人日本物流団体連合会, “航空貨物の今後の可能性と ANA の戦略”, Grow, pp. 1-6, 12 2017.
 - [174] EHang, "Passenger Transportation Overview".
<https://www.ehang.com/ehangaav> (2021 年 7 月 9 日取得) .
 - [175] 茂木春樹, 佐藤貴文, 吉田郁哉, “蓄電池技術はどこに向かうのか？一次世代・革新型蓄電池技術の現状と課題－”, みずほ情報総研レポート vol.18, 2019.
 - [176] Roger N. Clark, "Notes on the Resolution and Other Details of the Human Eye", ClarkVision.com.

- <https://clarkvision.com/articles/eye-resolution.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [177] 一般社団法人日本電気計測器工業会, “電子応用計測ガイド”.
<https://www.jemima.or.jp/tech/4-02-03.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [178] 森口明彦, “脳の動作クロックは 33Hz? 人間のスペックに適合させたゲームの遅延対策とは”, CEDEC 2019, 2019.
<https://jp.gamesindustry.biz/article/1909/19090502/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [179] 総務省, “第 5 世代移動通信システム (5G) の今と将来展望”, 2019.
https://www.soumu.go.jp/main_content/000633132.pdf (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [180] 日本学術会議第三部, 報告, “理学・工学分野における科学・夢ロードマップ 2014 (夢ロードマップ 2014) ”, 2014.
- [181] 国土審議会政策部会長期展望委員会, “「国土の長期展望」中間とりまとめ”, 2011.
- [182] 大串貞一郎、佐藤壮、佐伯直人, “増大するトラフィック対応に向けた 10G-EPON の開発”, NEC 技報, Vol.68, No.3, 2015.
- [183] 電子情報通信学会 光エレクトロニクス研究会, 電子情報通信学会 光エレクトロニクス研究会(OPE)のホームページ.
<https://www.ieice.org/es/oep/oep/aboutOPE> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [184] Graph Golf, 10×10 nodes, degree 4, length 2.
<http://research.nii.ac.jp/graphgolf/solutions/n10x10d4r2.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [185] Graph Golf, 100×100 nodes, degree 4, length 2.
<http://research.nii.ac.jp/graphgolf/solutions/n100x100d4r2.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [186] Graph Golf, 9344 nodes, degree 6.
<http://research.nii.ac.jp/graphgolf/solutions/n9344d6.html> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [187] Yanko Design, BIO ROBOT REFRIGERATOR, 2010.
<https://www.yankodesign.com/2010/06/21/bio-robot-refrigerator/> (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [188] 総務省, “公営企業の経営のあり方に関する研究会” 報告書, 2017.
https://www.soumu.go.jp/main_content/000473607.pdf (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [189] 秦野市, “参考 公共施設等更新費用試算ソフト 仕様書抜粋”, 第 2 回公共施設等総合管理計画策定 WG, 2015.
https://www.city.hadano.kanagawa.jp/www/contents/1001000003492/simple/2702_sogokanriwngshiryou3.pdf (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [190] 松江市, “松江市公共施設適正化計画 ～30 年後の松江市を見据えて～”, 2016.
<http://www1.city.matsue.shimane.jp/shisei/keikaku/zaisei/koukyou/tekiseika.data/keikaku-zentai.pdf> (2021 年 7 月 9 日取得) .

- [191] 独立行政法人国際協力機構（JICA）・株式会社三菱総合研究所, “道路・橋梁維持管理に関する情報収集・確認調査 最終報告書”, 2013.
- [192] 財務省, “社会資本整備”, 歳出改革部会 提出資料 3, 2019.
https://www.mof.go.jp/about_mof/councils/fiscal_system_council/sub-of_fiscal_system/proceedings_sk/material/zaiseier190516/03.pdf (2021 年 7 月 9 日取得) .
- [193] 久保田 麻美, “初めてのグラフィックレコーディング”, 株式会社翔泳社, 2020.

Appendix

- A.1 オンライン調査
- A.2 市域面積と Urban Centre 面積の比
- A.3 暮らしに期待される機能に基づいた本 MS 目標の機能分解
- A.4 ロジックモデルを用いた課題抽出
- A.5 本 MS 目標案が達成された社会における居住空間及び生活像の検討
- A.6 自動高速輸送のソリューション例：無人航空機
- A.7 自動高速輸送における機体の運用体制
- A.8 必要となる通信特性とネットワーク構成
- A.9 居住空間内の冷蔵庫の検討
- A.10 水道インフラのコスト削減効果
- A.11 社会像の達成シーンに対応した MS 目標案のマイルストーン、研究開発テーマ、社会にもたらす効果
- A.12 国際ワークショップの実施
- A.13 本 MS 目標案が達成された社会の受容性を高める行政サービス

A.1 オンライン調査

A.1.1 本調査の目的

本調査は3つの目的をもって行われた。すなわち、本 MS 目標案に対する人々の潜在的な需要を把握すること、インフラ投射技術（以下、IPA 技術）を使った動的生活を希求する人物の特徴を明らかにすること、本 MS 目標案に対して人々が持つ態度を確認することである。

A.1.2 方法

A.1.2.1 手続き

2021 年 4 月 23 日に web 上で調査を実施した。日本全国に居住する 18～49 歳の調査会社モニター登録者 17,777 人に調査への参加を求めた。性別、年代で偏りがないように割り付けを行い、2,056 人から回答を得た（回収率 11.6%）。うち調査票の前半ならびに後半で同じ選択肢を連続して選択していた 77 人を無効回答として除外し、1,979 人を分析対象とした。

A.1.2.2 調査項目

動的生活意図：動的生活意図尺度は「様々な場所に自由に移り住みたいと思う」、「今とは環境が異なる場所での生活をしたいと思う」、「移動せずにいつまでも現在の場所に住み続けたいと思う（逆転項目）」、「家賃の心配がないのであれば様々な場所に住みたい

と思う」、「今住んでいる場所から遠く離れたところに移り住みたいと思う」の 5 項目で構成され、いずれも調査者が独自に作成した。参加者には「あなたは、今住んでいる場所を離れて、様々な場所に移り住むというライフスタイルについてどう思いますか」と質問し、各項目に対して、「1：まったくそう思わない」から「5：非常にそう思う」の 5 件法で評定を求めた。

また、すべての参加者に、次の 2 つの条件下での動的生活意図尺度への回答を求めた。1 つ目の条件では、IPA 技術により実現された状態のシナリオを読んでもらい、参加者にはその状態にあることを想像してもらった上で、尺度への回答を求めた（IPA あり条件）。シナリオは「将来、次のような状態が実現したことを想像してみてください。あなたは、いつでもどこにでも好きなだけ移動でき、移動した先々で生活できるとします。例えば、孤島や高い山の上、海の上、宇宙空間など。そこでの生活レベルは都市に住むのと同じ程度を維持することができ、遠隔であっても対面と同じ質のコミュニケーションが可能です」というものであった。もう一つの条件では、IPA 技術については触れずに、尺度への回答を求めた（IPA なし条件）。

IPA 技術を利用した動的生活をする上での利点と懸念点：IPA 技術を利用した動的生活をする上で考え得る利点と懸念点について計 18 項目を独自に作成し、各項目に対して、「1：まったくそう思わない」から「5：非常にそう思う」の 5 件法で評定を求めた（項目内容は後述：表 A.5 参照）。

生活満足度：[161]の生活満足度尺度に、「現在の生活は拘束されていると感じる」という項目を加え、計 8 項目で構成された（項目内容は後述：表 A.2 参照）。参加者には「あなたの現在の生活について、あなた自身が感じることをお尋ねします」と質問し、各項目に対して、「1：まったくそう思わない」から「5：非常にそう思う」の 5 件法で評定を求めた。

生活をする上で重視すること：人々が快適な生活を送る上で重要とされる 17 の事柄を調査者が独自に作成し、それぞれの重要度合いについて、「1：まったく重要ではない」から「5：非常に重要だ」の 5 件法で評定を求めた（項目内容は後述：表 A.3 参照）。

新奇性欲求：[162]の旅行者新奇性欲求尺度から一部の項目を選択し、それらを本調査の目的に沿うように改変した。項目は「理想の生活は、私がこれまで見たこともないものが見られることだ」、「私は、退屈感を無くすような生活をしたい」、「私は、生活には、冒険を求める」、「私は、生活する上で、何か新しいことを経験させてくれる環境変化を好む」、「私は、生活する中で、これまで慣れ親しんできたものとは違う風習や文化を経験したい」、「生活の一部には新しいことを発見する感じがあってほしい」、「私は、生活では、新しい変わったことを経験したいと思う」、「私は、予期できないような生活が

好きだ」、「私は、予期しないことが起きるように、生活の細かい計画は立てない」の計 9 項目で測定した。参加者には、各項目に対して、「1：まったくそう思わない」から「5：非常にそう思う」の 5 件法で評定を求めた。

2050 年に実現してほしい社会像：参加者に多様な社会像を 10 個提示し、それぞれどれくらい 2050 年に実現してほしいかを、「1：まったく実現してほしくない」から「5：非常に実現してほしい」の 5 件法で評定を求めた（項目内容は後述：図 A.3 参照）。

オンラインサービスの使用頻度：「電子メールの送受信」、「SNS の利用（LINE、Facebook、Twitter、Instagram など）」、「オンライン会議ツール（Zoom、Teams、Skype など）」、「オンラインショッピング」について、それぞれの利用頻度を、「1：まったくくない」から「5：とてもよくある」の 5 件法で評定を求めた。

テレワーク経験の有無：過去 1 年間における在宅でのテレワーク経験の有無とその期間について尋ねた。参加者には、「1：テレワークはしたことがない」、「2：ある（期間：0～3 か月）」、「3：ある（期間：3～6 か月）」、「4：ある（期間：6 か月～1 年）」、「5：ある（1 年以上）」の中から 1 つを選択するよう求めた。

基本属性：性別、年齢、未婚、子どもの有無、親との同居の有無、世帯収入、居住地の都市規模、18 歳以降の引っ越し回数について尋ねた。

A.1.3 結果と考察

A.1.3.1 回答者の属性

回答者の平均年齢は 35.14 歳（ $SD=8.55$ ）であった。また、その他の属性は表 A.1 に記載する。

表 A.1：回答者の属性

性別	
男性	966 人
女性	1,013 人
年代	
18～29 歳	33.1%
30 代	33.4%
40 代	33.5%
家族構成	

子持ち	36.8%
親と同居	30.8%
世帯年収	
300 万円未満	21.1%
300～600 万円	42.9%
600～900 万円	22.5%
900 万円以上	13.5%
都市規模	
10 万人未満	22.4%
10～100 万人	48.8%
100 万人以上	28.9%

A.1.3.2 尺度構成

いずれの尺度も、構成する逆転項目は、「6－（得点）」によって各回答者の値を逆転させた上で、以下の因子分析を実施した。また、抽出された因子はそれぞれ尺度とし、尺度得点は尺度を構成する全項目の合計得点を項目数で除することにより算出した。

まず、生活満足度を構成する 8 項目について因子分析を行った。以下、特に説明のない限り、因子分析は最尤法を採用し、複数の因子が抽出された尺度にはバリマックス回転をかけて行った。その結果、固有値の推移が 3.25, 1.23, 1.01, 0.72, …であったため、3 因子構造を採用した。結果を表 A. 2 に示す。それぞれの因子を構成する項目の特徴から、第 1 因子は「生活不満」、第 2 因子は「生活満足」、第 3 因子は「生活刺激」とラベリングした。因子の信頼性係数の推定値は、「生活不満」が Cronbach's $\alpha = 0.75$ 、「生活満足」が 0.79 であり、当該尺度に一定の信頼性があると判断した。

表 A. 2：生活満足度の因子構造

因子名	項目	平均値	因子1 ($\alpha = .753$)	因子2 ($\alpha = .793$)	因子3	共通性
生活不満	現在の生活に退屈していると感じる	3.02	0.67	0.26	0.04	0.52
	現在の生活に物足りなさを感じる	2.86	0.65	0.33	-0.02	0.53
	現在の生活に疲れたと感じることがある	2.55	0.56	0.26	-0.03	0.39
	現在の生活はパターン化していると感じる	3.10	0.56	-0.06	0.28	0.40
	現在の生活は拘束されていると感じる	2.31	0.47	0.29	-0.19	0.35
生活満足	現在の生活は毎日充実している	3.20	0.22	0.77	0.19	0.68
	今の生活に満足している	3.16	0.29	0.73	0.14	0.64
生活刺激	現在の生活は刺激が多いと感じる	2.58	0.00	0.20	0.71	0.54
固有値			1.85	1.51	0.67	
累計寄与率 (%)			23.18	42.07	50.50	

因子抽出法: 最尤法、バリマックス回転

次に、生活する上で重視することを構成する 17 項目について因子分析を行ったところ、固有値の推移が 4.73, 2.16, 1.80, 0.88, …であったため、3 因子構造を採用した（表 A. 3）。それぞれの因子を構成する項目の特徴から、第 1 因子は「空間的にゆとりのある生活重視」、第 2 因子は「生活施設の充実重視」、第 3 因子は因子負荷量が低く、他の 2 項目と意味合いの異なる「近くに子どもが通える学校や保育園がある」という項目を除外した 2 項目で構成し、「ネットワーク拡大重視」とラベリングした。因子の信頼性係数の推定値は、「空間的にゆとりのある生活重視」が Cronbach's $\alpha = 0.79$ 、「生活施設の充実重視」が 0.78、「ネットワーク拡大重視」が 0.69 であった。

表 A. 3：生活する上で重視することの因子構造

因子名	項目	平均値	因子1 ($\alpha=0.789$)	因子2 ($\alpha=0.785$)	因子3 ($\alpha=0.642$)	共通性
空間的に ゆとりのある 生活重視	騒音を気にしなくてよい	4.06	0.70	0.15	-0.03	0.52
	人目を気にしなくてよい	3.84	0.70	0.06	0.00	0.49
	混雑していない	3.93	0.67	0.07	0.07	0.45
	物価が安い	4.04	0.58	0.22	0.04	0.39
	家がない	3.79	0.46	0.20	0.19	0.29
	豊かな自然環境がある	3.59	0.46	0.06	0.35	0.34
	ネットの接続環境がよい	4.16	0.41	0.41	-0.06	0.34
	車で移動しやすい	3.50	0.40	-0.01	0.34	0.28
生活施設の 充実重視	周りに服などのショッピングできる店がたくさんある	3.37	0.04	0.66	0.13	0.46
	周りに飲食店が複数あり、外食しやすい	3.49	0.04	0.65	0.13	0.44
	情報が得やすい	3.51	0.10	0.64	0.23	0.48
	図書館、劇場、映画館などの文化施設・娯楽施設が近くにある	3.38	0.14	0.57	0.21	0.39
	交通の便が良い	4.08	0.19	0.52	-0.18	0.34
	医療機関へのアクセスがよい	3.90	0.32	0.52	0.15	0.39
ネットワーク 拡大重視	近所づきあいが活発	2.46	0.01	0.01	0.76	0.58
	多くの人と知り合う機会がある	2.92	-0.01	0.32	0.65	0.53
	近くに子どもが通える学校や保育園がある	3.40	0.18	0.20	0.45	0.27
	固有値		2.73	2.57	1.68	
累計寄与率 (%)			16.07	31.18	41.04	

因子抽出法：最尤法、バリマックス回転

動的生活意図は条件ごとに因子分析を行った。その結果、固有値の推移が、IPA あり条件では 3.27, 0.85, 0.35, …であり、IPA なし条件では 2.81, 0.76, 0.61…であり、いずれの条件においても 1 因子構造を採用した。因子の信頼性係数の推定値は IPA あり条件は Cronbach's $\alpha = 0.86$ 、IPA なし条件は 0.80 であり、十分な信頼性があると判断した。

新奇性欲求を構成する 9 項目について因子分析を行い、固有値の推移が 5.16, 0.93, 0.64, …であったため、1 因子構造を採用した。因子の信頼性係数の推定値は Cronbach's $\alpha = 0.91$ であり、十分な信頼性があると判断した。

オンラインサービスの利用頻度を構成する 4 項目について因子分析を行い、固有値の推移が、1.86, 0.87, 0.67, …であったため、1 因子構造を採用した。因子の信頼性係数の推定値は Cronbach's $\alpha = 0.61$ であった。

A.1.3.3 現在の生活に対する閉塞感

人々の抱く現状の生活への閉塞感を検討するため、生活満足度を構成する 5 つの逆転項目の回答分布を確認した（図 A. 1）。その結果、現状の生活への閉塞感を認める「ややそう思う」「非常にそう思う」と回答した人の割合が、「現在の生活は拘束されている」「現在の生活に退屈を感じていると感じる」においては約 30%を、「現在の生活に物足り

なさを感じる」においては約 40%を、「現在の生活に疲れたと感じることがある」においては約 50%を、「現在の生活はパターン化していると感じる」においては 60%以上を占めていた。

これらの結果から、現代日本人の多数が現在の生活に退屈と疲労を感じていることが明らかになった。また、現在の生活に拘束されていると感じない人の割合が 40%弱を占めるものの、全体の 3 割程度の回答者が現状の生活に拘束されていると感じており、現在の生活に対して抱く人々の閉塞感は決して低くない。

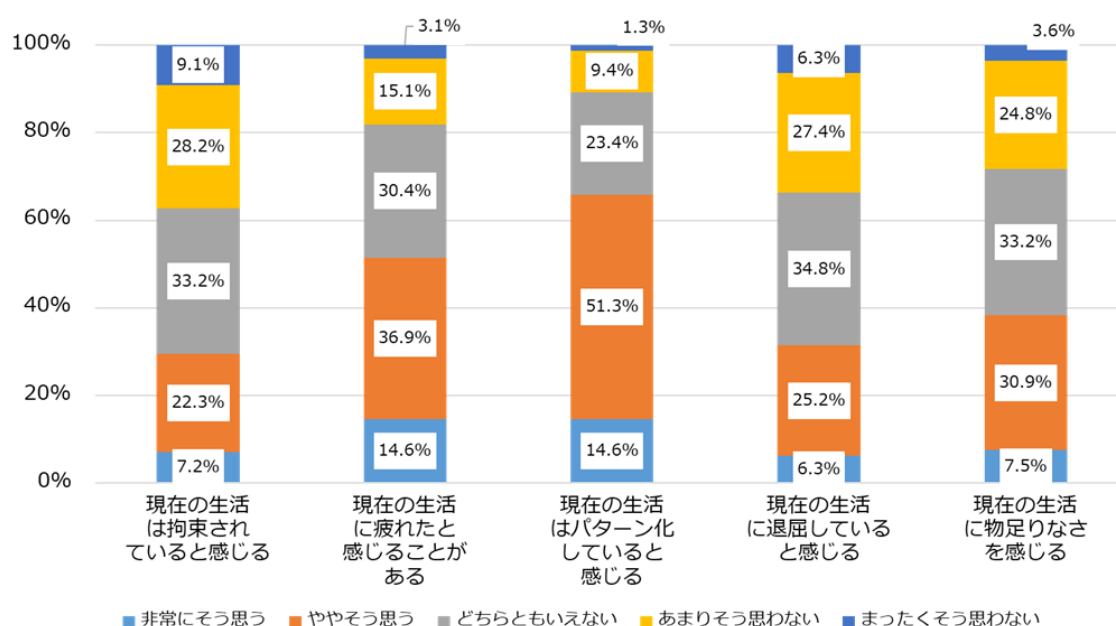


図 A. 1：閉塞感についての設問に対する回答

A.1.3.4 快適な生活を送る上で重視すること

生活する上で重視することの 3 因子について、それぞれの平均値を回答者の都市規模ごとに図 A. 2 に示す（エラーバーは標準偏差を示す）。都市規模によって各事項の重要度合いを比較するため、「空間的にゆとりのある生活重視」、「生活施設の充実重視」、「ネットワーク拡大重視」を従属変数、都市規模（3 水準；大都市、中都市、小都市）を独立変数とする 1 要因分散分析を行った。その結果、「空間的にゆとりのある生活重視」は都市規模の主効果が有意で（ $F(2, 1976) = 23.71$, $\eta_p^2 = 0.072$, $p < 0.001$ ）、多重比較の結果、各都市規模間で有意差が確認された（ $ps < 0.01$ ）。空間的にゆとりのある生活重視は都市規模が小さいほど高い傾向にあった。「生活施設の充実重視」は都市規模の主効果が有意傾向にとどまった（ $F(2, 1976) = 0.08$, $\eta_p^2 = 0.038$, $p < 0.10$ ）。全体として平均値が高かったが、都市規模間で統計的な有意差は認められなかった。それとは対照的に、「ネットワーク拡大重視」は全体的に平均値が低かった。都市規模の主効果は有意で（ $F(2, 1976) = 5.03$, $\eta_p^2 = 0.031$, $p < 0.01$ ）、多重比較の結果、大都市と小都市の間で有意差が見られ

た ($p < 0.01$)。都市規模の小さい場所に住む人々は、大都市圏に住む人々よりも、生活する上で人的ネットワークの維持・構築の重要度を高く評価していた。

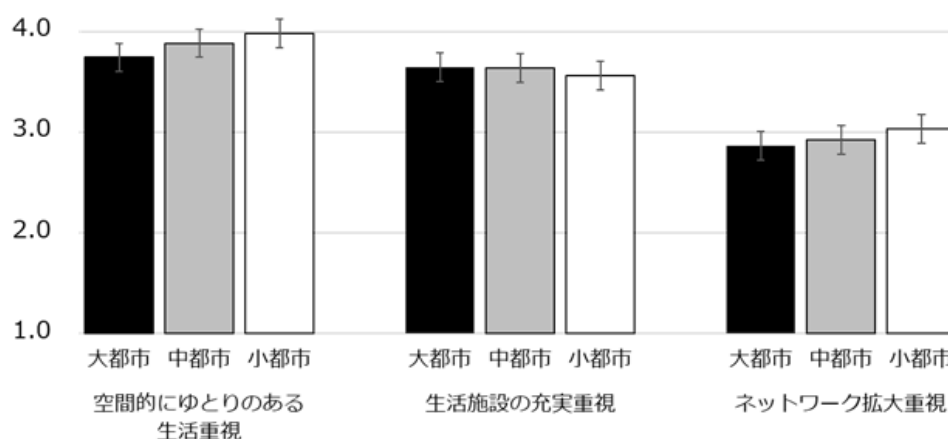


図 A.2：生活する上で重視することの3因子

A.1.3.5 理想的な社会像について

人々が 2050 年に実現してほしい社会像を把握するため、社会像ごとに回答分布を図 A.3 に示す。まず、本 MS 目標案として実現を図る社会像に相当する「自分で移動して、様々なことを実際に体験できる社会」および「仕事や余暇活動など、あらゆることをバーチャル空間で体験できる社会」の実現を望む人は、それぞれ全回答者の 55.5%、47.9% を占めていたのに対し、仮想空間のみでの生活に関わる「仕事や余暇活動などすべてが仮想空間で完結できる社会」の現実を望む人は全回答者の 30.6% であった。この結果から、本 MS 目標案が達成された社会を望む人の相対的な多さが示唆される。

また、本 MS 目標案を別の側面から表現した社会像である「宇宙空間や砂漠、高い山の上など、これまで居住不可能であった場所にも住むことができる社会」、「都市圏が拡大して広い範囲で都会的な生活が享受できる社会」、「田舎に移り住んでスローライフを楽しむ人が増える社会」の実現を望む人は、それぞれ全回答者の 41.6%、46.4%、56.5% であった。全体的な高い需要が確認されたが、特に、田舎に移り住んでゆったりとした生活を送ることのできる人が多い社会の実現が望まれていると考えられる。

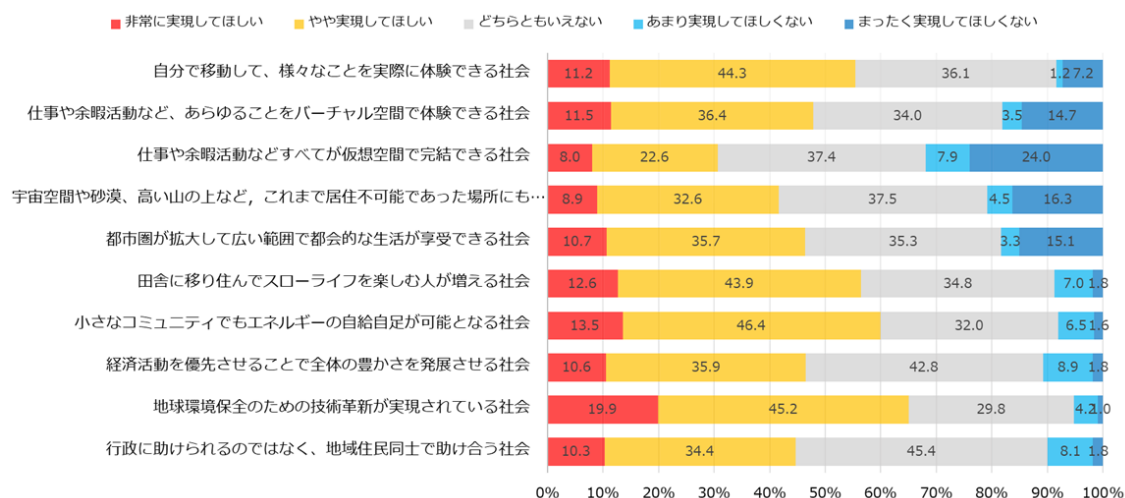


図 A.3：2050 年に実現してほしい社会像

A.1.3.6 動的生活意図の条件間比較

人々が動的生活をしようと思う程度（意図）を、IPA あり条件と IPA なし条件ごとに検討した（図 A.4；エラーバーは標準偏差を示す）。IPA あり条件では、すべての項目が中央値である 3 を超えたが、逆転項目の平均値が最も低く、3.01 にとどまった。IPA なし条件では、動的生活への積極的姿勢を表す「様々な場所に自由に移り住みたいと思う」、「今とは環境が異なる場所での生活をしたいと思う」、「今住んでいる場所から遠く離れたところに移り住みたいと思う」の 3 項目の平均値が中央値である 3 を下回った。一方、逆転項目の平均値は 3.18 と 5 項目の中で 2 番目に高かった。

さらに、条件ごとの変数間の差が統計的に有意かどうかを確認するため、IPA の有無（2 水準：参加者内）×意図変数（5 水準：参加者内）の 2 要因分散分析を行った。その結果、IPA の有無の主効果（ $F(1, 1978) = 400.53$, $\eta_p^2 = 0.17$, $p < 0.001$ ）、意図変数の主効果（ $F(4, 7912) = 133.78$, $\eta_p^2 = 0.06$, $p < 0.001$ ）、交互作用効果（ $F(4, 7912) = 185.95$, $\eta_p^2 = 0.09$, $p < 0.001$ ）がいずれも有意であった。単純主効果の検定の結果、動的生活への積極的姿勢が反映された 4 項目は IPA あり条件の方が IPA なし条件より有意に平均値が高かった（ $ps < 0.001$ ）。一方で、定住生活意図を示す逆転項目は、IPA なし条件の方が IPA あり条件より有意に平均値が高かった（ $p < 0.001$ ）。これらの結果は、人々の動的生活への潜在的欲求はそれほど高くないことを示すのだろうか。

ここで、「家賃の心配がないのであれば様々な場所に住みたいと思う」という、経済的余裕という条件付きの動的生活意図の結果に着目する。いずれの条件においても共通して、その平均値は項目間で最も高かった。この結果は、人々が条件付きで動的生活への潜在的欲求を有している証拠に他ならない。これは、動的生活への積極的姿勢を反映する他 3 項目において、IPA 技術が存在するという条件下の平均値が IPA なし条件より高まった結果とも整合している。したがって、IPA なし条件で動的生活意図を示す 3 項目が定住生活意図を示す逆転項目よりも低いことは、人々の動的生活への欲求が低いことの表れではなく、

様々な制約の下に動的な生活欲求が潜んでいることを示唆するといえる。

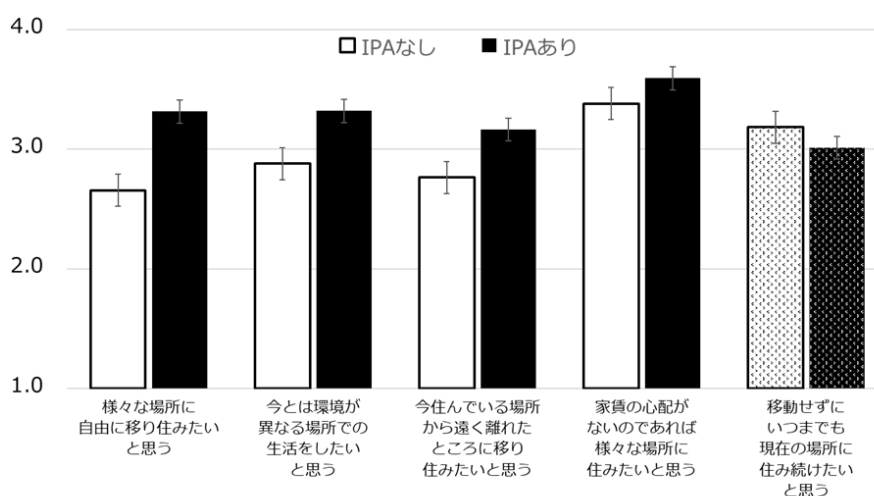


図 A. 4：動的な生活意図の各項目の平均値

A.1.3.7 IPA 技術を用いた動的な生活意図の規定因

IPA あり条件の動的な生活意図を規定する要因を検討するため、階層的重回帰分析（強制投入法）を行った。IPA あり条件の動的な生活意図尺度を従属変数とし、Step1 では属性（年代、未婚、子どもの有無、親との同居の有無、引っ越し回数、世帯年収、居住地の都市規模）、オンラインサービスの使用頻度、テレワーク経験の有無を投入した。続く第 2 ステップでは、生活不満、新奇性欲求、空間的にゆとりのある生活重視、生活施設の充実重視、ネットワーク拡大重視を投入した。結果を表 A. 4 に示す。

その結果、Step1 ($R^2_{adj} = 0.04$, $F(9,1969) = 9.57$, $p < 0.001$) から Step2 ($R^2_{adj} = 0.23$, $F(14,1964) = 42.67$, $p < 0.001$) で分散説明率の有意な増加が見られた ($\Delta R^2 = 0.19$, $\Delta F(5,1964) = 97.99$, $p < 0.001$)。Step1 では、子どもの有無 ($\beta = -0.08$, $p < 0.05$)、引っ越し回数 ($\beta = 0.13$, $p < 0.001$)、世帯収入 ($\beta = -0.06$, $p < 0.05$)、居住地の都市規模 ($\beta = -0.06$, $p < 0.01$)、オンラインサービスの使用頻度 ($\beta = 0.14$, $p < 0.001$) の効果が有意であった。全体的に標準偏回帰係数の大きさが小さかったが、引っ越し回数とオンラインサービスの使用頻度が比較的高い正の効果を示し、それ以外は標準偏回帰係数が 0.1 より小さい負の効果を示した。Step2 で新たに投入した変数は、生活施設の充実重視以外の全ての変数が有意な効果を示し、Step1 で投入した変数の影響力はいずれも小さくなった。新奇性欲求 ($\beta = 0.30$, $p < 0.001$)、生活不満 ($\beta = 0.22$, $p < 0.001$)、空間的にゆとりのある生活重視 ($\beta = 0.13$, $p < 0.001$) が正の影響を、ネットワーク拡大重視 ($\beta = -0.14$, $p < 0.001$) が負の影響を示した。Step2 で新たに投入した変数のうち、有意な影響が確認された変数はすべて標準偏回帰係数が 0.1 を超え、特に新奇性欲求と生活不満の影響が大きかった。

これらの結果から、IPA が実現した場合の動的な生活意図は、新奇性欲求、現在の生活へ

の不満、空間的にゆとりのある生活の重視、ネットワーク拡大の重視によって大きく影響を受けることが明らかになった。特に、生活に真新しさや冒険を求める高い新奇性欲求を有することや、現在の生活に拘束感や退屈感を持つ場合は動的生活意図が高まる一方で、人付き合いの維持や人との新たな出会いを求める人は、動的生活を望まない傾向がある。また、個人特性である引っ越し回数の高さやオンラインサービス使用頻度、すなわち生活拠点移動やインターネット利用に慣れている人は、動的生活へのフットワークを軽くするのかもしれない。

表 A. 4：動的生活意図を規定する要因

	Step1		Step2	
年齢	-0.04		-0.02	
未既婚	-0.01		-0.04	
子どもの有無	-0.08	*	-0.05	
親との同居の有無	0.01		-0.01	
引っ越し回数	0.13	***	0.09	***
世帯年収	-0.06	*	-0.05	*
居住地の都市規模	-0.06	**	-0.04	*
オンラインサービスの使用頻度	0.14	***	0.10	***
テレワーク経験の有無	-0.01		-0.01	
生活不満			0.22	***
新奇性欲求			0.30	***
空間的にゆとりのある生活重視			0.11	***
生活施設の充実重視			-0.01	
ネットワーク拡大重視			-0.11	***
R^2	0.04		0.23	
Adjusted R^2	0.04		0.22	
F値	9.57	***	41.88	***
ΔR^2			0.19	
ΔF 値			95.88	***

(注1) *** $p<0.001$, ** $p<0.01$, * $p<0.05$

(注2) カテゴリ変数の割り当ては以下のとおりである。

- ・未既婚 -1: 結婚していない, 1: 結婚している
- ・同居家族(親) -1: なし, 1: あり
- ・世帯年収 1: 100万円未満, 2: 200万円未満, 3: 300万円未満, 4: 400万円未満, 5: 500万円未満, 6: 600万円未満, 7: 700万円未満, 8: 800万円未満, 9: 900万円未満, 10: 1000万円未満, 11: 1200万円未満, 12: 1500万円未満, 13: 2000万円未満, 14: 2000万円以上
- ・居住地の都市規模 1: 人口10万人未満の地域, 2: 人口10～100万人の地域, 3: 人口100万人以上の地域
- ・テレワーク経験2群 -1: なし, 1: あり

A.1.3.8 IPA 技術を使った多拠点生活をする上での利点と懸念点

IPA 技術を利用した動的生活意図の高さの背景に、どのような動的生活への期待あるいは懸念が含まれているか検討するため、IPA 技術で実現される動的生活への利点・懸念点の平均値と標準偏差、およびそれらと IPA あり条件の動的生活意図との相関係数を算出した(表 A. 5)。

まず、それぞれの利点と懸念点の平均値をみると、利点は全体的に平均値が高く、いずれも 3.5 近くをマークしていた。一方、懸念点の平均値にはばらつきがあり、特に平均値が高かったのは「移動中や移動先で病気になった時に、付近に病院がなかった場合が心配

だ」と「移動に伴う書類手続きが面倒くさい」であり、特に平均値が低かったのは「移動した先で他人に迷惑をかけそうだと思う」と「環境破壊につながるのではないかと心配だ」であった。また、「子どもに望ましい教育を受けさせてあげられなさそうだと思う」、「移動生活を送ることで、犯罪に遭う可能性が高くなると思う」、「移動生活を送ることで、災害に遭うリスクが高くなると思う」は中央値である 3 近くをマークした。これらの結果から、人々は IPA 技術によってもたらされるであろう利点をそれぞれ等しく認知していた。また、懸念点は想定し得るもののうち、病気になった時の対処と移動生活にかかる労力に特に不安を感じていたものの、移動生活で人に迷惑をかけるかもしれないことや環境破壊、教育機会、犯罪被害、災害リスクに対してはあまり不安を感じていなかった。

また相関分析の結果、動的生活意図と有意な中程度の相関を示したのは、すべて IPA 技術によってもたらされる利点項目であった。それらのうち、「その土地ごとに異なる環境を楽しむことができる」($r = 0.51, p < 0.01$)、「制約なしに好きな場所に住むことができる」($r = 0.47, p < 0.01$)、「生活のマンネリ化を打破できる」($r = 0.43, p < 0.01$)との相関が高かった。このように全体的に利点とは有意な正の相関を示したが、懸念点とはかなり低い相関しか見られず一部は非有意な相関を示した。以上の結果から、動的生活意図の高さの背後には、それにより多くの側面の恩恵を享受できるという期待があることが示唆された。

表 A. 5：動的生活意図に潜む期待あるいは懸念

IPA技術を用いた動的生活への利点と懸念点	M	SD	動的生活意図との相関係数
その土地ごとに異なる環境を楽しむことができる	3.54	0.91	0.509**
制約なしに好きな場所に住むことができる	3.58	0.92	0.474**
行く先々で、様々なバックグラウンドの人と出会える	3.43	0.91	0.341**
生活のマンネリ化を打破できる	3.61	0.86	0.425**
わずらわしい人間関係から抜け出せる	3.47	0.94	0.294**
自分の住む場所を、自分の好みや都合だけで決定できる	3.52	0.93	0.389**
自然を体感する生活を送ることができる	3.59	0.85	0.349**
様々な場所での文化や自然を体験することができる	3.69	0.83	0.355**
移動中や移動先で病気になった時に、付近に病院がなかった場合が心配だ	3.92	0.92	0.072**
子どもに望ましい教育を受けさせてあげられなさそうだと思う	3.13	1.00	0.01
移動生活を送ることで、犯罪に遭う可能性が高くなると思う	3.04	0.92	-0.02
移動に伴う書類手続きが面倒くさい	3.96	0.89	0.116**
移動した先で他人に迷惑をかけそうだと思う	2.87	0.93	-0.074**
家族と離れ離れになりたくないと思う	3.52	1.08	-0.117**
友人と疎遠になりそうだと思う	3.31	0.99	-0.04
社会保障を享受できなくなるのではないと思う	3.25	0.93	0.01
環境破壊につながるのではないかと心配だ	2.82	0.96	-0.04
移動生活を送ることで、災害に遭うリスクが高くなると思う	3.05	0.91	-0.045*

(注) ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

A.2 市域面積と Urban Centre 面積の比

国連の世界都市人口予測・2018 年改訂版によると、55%の世界人口が都市部に暮らして

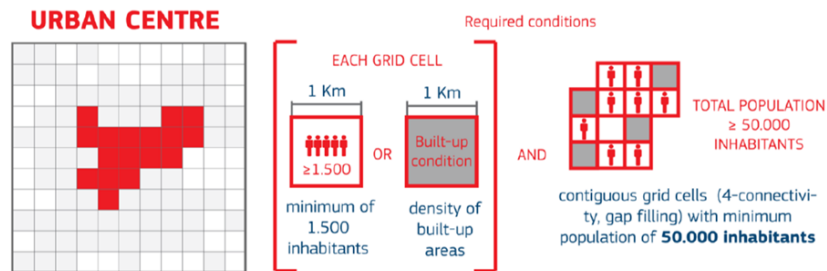
いるが、その人口は 2050 年に 68%に達すると予測されている。世界的な都市化動向の中で持続的な開発は、2050 年までに最速の都市化が予測されている低所得・低中所得国における都市部拡大にいかに対応できるかにかかっている[163]。実際、都市に住む人口の比率はアジアが 50%、北米が 82%、欧州 74%、最も低いアフリカは 43%となっており、成熟社会では都市化が進行する。

成熟した国家における都市の実像を知るために日本における都市を分析してみる。日本を選択した理由はデータや実情を集めやすいという理由もある。まず、前提としてここでは GHSL (Global Human Settlement Layer) の提供するオープンデータ[16]を使用し、都市を GHSL における Urban Centre を用いて記述する (図 A. 5)。日本国内を対象に最寄りの Urban Centre 間の距離を算出すると、その中央値は 29.5 km となる (平均値は 40.0 km)。この中央値に近い値を持つ都市間を典型的な日本の都市間隔を実現した 2 都市と考えて抽出した上で大都市である札幌を含む小樽・札幌間を除去する (表 A. 6)。すると、この表に登場する都市では一部の例外を除いて市域全体に対して Urban Centre として定義された地域は極めて狭く (図 A. 6)、岩国を例にとると市域の 6%に人口が密集して住んでいることが分かった。現状では市域全体への行政サービスやインフラの供給は地方財政への大きな負担となっており、効率の観点では Urban Centre に人を集中させてインフラ投資を節約することも考えられる。しかし、2020 年に開始した COVID-19 パンデミックは都市化のリスクを著しく高めており、また世界最大の都市である東京への一極集中は日本の地方の空洞化をもたらしているなど、都市化には負の側面もある。日本は人口が減っていくことが予想されているが、人口の減少が東京の過密度を低下させ、さらなる東京一極集中要因となるとする予想もある[5]。

放っておくと都市化が進行する中で、日本においては東京一極集中解消へ向けた動きが継続して行われているところであるが、大きな成果を上げているとは言い難い。そもそも現在の都市サービスが集中を前提としたものである点を改善しない限り、パンデミックリスク、都市化リスク、市域維持コストなどがあっても都市への集中を避けることは困難であろう。よって、本調査研究では分散居住を前提としてインフラを既設のものから分離して各世帯に分散可能にするために、どのような取り組みが出来るかについて論考する。そのために、まずは現在の都市サービスがどの程度のボリュームを持っているのかを推定し、これを各世帯に分散したときにエネルギー消費、水消費、情報伝送、物流などに対してどのような要求がなされるのかを推定すると共に、現在の都市圏での暮らしよりもさらに快適な暮らしを供給するための技術について提案することを目指して調査研究を実施する。インフラを分散することによって、リスクの分散、維持負担の軽減、化石燃料消費量の削減といったアウトカムが得られる。加えて、従来のインフラが持つ漸進的に発展せざるを得ない性質を世帯ごとに点で整備できるように変えることで、アフリカで固定電話の敷設を待たずに携帯電話が普及したように、発展途上国でのインフラ整備を飛躍的に発展させる可能性ももたらす。

都市（Urban Centre : UC）の定義

- Urban Centre (UC) : 土地1km²あたり少なくとも1,500人の住民の密度と50,000人の最小人口を持つ1km²の隣接するグリッドセルの高密度クラスター (Dijkstra & Poelman, 2014)
- 文献中で実装されているUC : 土地1km²あたり少なくとも1,500人の住民の密度または土地1km²あたり50%以上の建造物占有面積、および50,000の最小人口



"Description of the GHS Urban Centre Database 2015," Public Release 2019 Version 1.0
doi:10.2760/037310

図 A. 5 : Urban Centre の定義[16]

表 A. 6 : Urban Centre 位置データのうち 27 km ~ 33 km (±10%) を抽出

UC 距離	都市 1	都市 2
32.2 km	小樽	札幌
32.8 km	出雲	松江
29.5 km	佐賀	大牟田
30.8 km	岩国	呉
28.1 km	鹿児島	霧島
30.7 km	霧島	都城

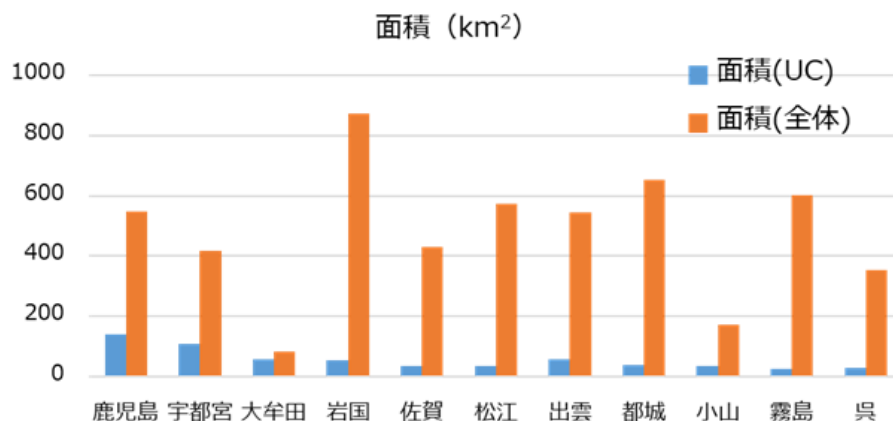


図 A. 6 : Urban Centre 面積と市域全体面積の比較

A.3 暮らしに期待される機能に基づいた本 MS 目標案の機能分解

暮らしに期待される機能を明らかにするために、まず「都市」と「地方」に期待される「暮らしを構成する機能」を抽出した上で、「都市にも地方にもレベルの差はあるものの共通して存在する機能」（必須機能）と「地方のメリットを維持した上で、享受したい都市の機能」（差分機能）を明らかにした。具体的には KJ 法[164]を用いたグループディスカッションを行って、出てきた要素をグルーピングすることで「①都市が我々に提供してくれるもの」「②地方に我々が期待するもの」を抽出した上で、そこから更に連想して「③生活を構成する機能」「④必須インフラの機能種別」「⑤地方に期待するものを維持した上で享受したい『都市の提供してくれるもの』＝生活を豊かにする機能」を抽出した。分析の結果は表 A.7 のようになる。

表 A.7：暮らしに期待される項目とその要素

項目	要素
①都市が我々に提供してくれるもの	● オンデマンド性 ● 雇用 ● 教育 ● 人との交流 ● 交通 ● 情報 ● エンターテインメント
②地方に我々が期待するもの	● 食事 ● アウトドア活動 ● 環境に優しい生活 ● 文化 ● 人間関係 ● リセット機能 ● 刺激の少なさ（心の安らぎ） ● 空間的余裕
③生活を構成する機能	● 交通インフラ ● 安心安全 ● 医療・公共サービス・防災・セーフティネット ● 買い物 ● 衛生面の確保 ● 教育 ● 住まい ● 社会的ネットワーク ● 自然環境 ● 職場 ● インフラ（上下水道、電気、ガス） ● 公共放送 ● 土地の印象（イメージ） ● インターネットへのアクセス
④必須インフラの機能種別	● エネルギー／生活インフラ

	● 安心・安全のためのサービス ● 暮らしを支えるサービス ● 環境との調和
⑤地方に期待するものを維持した上で享受したい『都市の提供してくれるもの』＝生活を豊かにする機能	● 意外な発見・意外な出会い ● 人と会う機会（面白い人・多様な人と会う機会） ● 好きな時間に移動できること ● 情報（話題になっているヒト・モノ・コトへの容易なアクセスが出来ること） ● 情報（仕事のための情報・人との出会い） ● 自分のやりたい仕事を選べること ● 受けたい人が受けたいときに教育を受けられること ● ものに簡単にアクセスできること＋その安心感 ● 欲しいもの・手に入るものが制限されないこと

表 A. 7 で得られた分析結果に基づき、③が④と⑤のどの部分を担うのかを分析した。ただし、④は若干の程度の差はあるものの都市にも地方にも共通して必要十分なレベルで備わっている機能（必須機能）である一方、⑤は現状都市のみが享受している、もしくは享受できるレベルが大幅に都市の方が高いが、地方においても同様のレベルで享受することを選べるようになることが望ましい機能（差分機能）であるため、④と⑤は性質が違う。これらが豊かな生活を送るための要素となる。

本 MS 目標案が達成された社会では必須機能と差分機能の両者がどこでも享受できることを目指す。また、これらの機能に対して自在性の観点でのラベル付けを実施した。自在性は本 MS 目標案に通底する考えであり、生活の自由度を上げるためにはありたい暮らしをどこでも実現できる「自在性」が欠かせないものであり、「コミュニティ」、「仕事」、「情報」、「移動」、「環境」、「暮らし」の 6 つの要素で構成され、「暮らし」と「環境」は最低限必要な要素、それら以外の自在性は付加価値的なものとして定義した。

明らかになった 5 つの必須機能と 9 つの差分機能からなる計 14 個の機能を表 A. 8 に示す。なお、この表の中でそれぞれの機能は上から自分が身を置く環境が理想的であること（受動的に享受する機能）から、行動が妨げられないこと（能動性が妨げられないための機能）の順番に並んでいる。これらは自在に生活を実現しているときに満たされているべき社会的機能であり、これら社会的機能をどこにいても実現できることが本 MS 目標案を達成するための具体的な課題である。

表 A. 8 の内容を以下に詳説する。まず④の 5 つの必須機能については、

1. 「エネルギー／生活インフラ」

上下水道、都市ガス、電気といった一般にインフラと呼ばれるものに加え、家そのもの

や、家にあるトイレ、風呂といった機能もこの中に含まれている。

2.「安心／安全のためのサービス」

医療機関、避難所、行政といった生活をする上でのセーフティネットが含まれる。

3.「暮らしを支えるサービス」

ごみ処理施設を含むごみ処理の仕組みや、道路を清掃するサービス、町内会の活動をしている。また、スーパーや薬局、本屋、保育施設といったサービスも含まれることとした。ただし地域によって程度の差が大きいため、後述する差分機能の中でも取り扱う。

4.「地域に魅力があること」

空気のおいしさ、自然環境や土地のブランド意識といった人の感性に程度が左右されるものが含まれる。

5.「環境に調和していること」

環境への配慮をすることで、新たにその土地に導入するものの他者・他生命へのマイナスの干渉をなくすもしくは減らすことであり、各々の地域の独立した環境の自由が担保されることである。

続いて⑤に属する 9 つの差分機能について以下に述べる。こちらは抽象的であるが人々が都市に期待している要素、地方には不足している自在性としてまとめられる。

6.「意外な発見、意外な出会い」

人工物か自然物に関わらず日常的でない驚き、つまり新しいもしくは偶然の刺激を欲していることを表している。また各土地の施設の利用や文化活動を通じて予想していなかったような人とつながりを持つ機会を求めている。言い換えると、新鮮さを日常生活に取り入れたい、またそういったことのできる、自分の身を置く環境の自在性を要求している。

7.「人と会う機会（面白い人・多様な人と会う機会）」

上記の新鮮さに関連しているが、こちらは更に交流を広げたい、自分の知らないような考えを持った人と知り合ってみたいという多様性を求める欲求を表しており、住む場所に関わらずそういった多様性に富んだコミュニティにアクセスできる自在性を要求している。

8.「仕事のための情報が得られること（人との出会い）」

6.とほぼ同じ意味であるが、6.の自在性の先にある、働き口、働き方に関する示唆を得たいといったより具体的な欲求を表しており、6.と 10.を接続する機能である。単なる出会いの場ではなく、雇用口や商談相手と知り合う機会が土地によって差が出なくなるための自在性を要求している。

9.「受けた人が受けた時に教育を受けられること」

例えば都市にしか大手の進学塾がない、学校がない、都市と地方で授業進行度に差があるといった認識から出てきた意見である。地域に依らずにどこでも望んだ教育を受けられる自在性を要求している。

10.「自分のやりたい仕事を選べること」

上記の教育と似ており、土地や地域によって就ける仕事が大幅に変わるという現状認識

から派生している。希望業種がないから他地域に移動するといった現象の原因の一つであるが[5][165]、暮らす地域に関わらず関われる仕事の選択肢が増えること、自分の興味、適正のある業種で働ける自在性を要求している。

11.「話題になっているヒト・モノ・コトへの容易なアクセスができること」

ヒト・モノ・コトとは実体ではなく情報を指しており、都市における広告のような、ラベルの付いた情報を簡単に手に入れたいという欲求から派生している。ネットで検索をすると情報を探することができるが、そういった能動的に達成できることではなく、受動的にそういったラベルの付いた情報を得られる自在性を要求している。また、得たくないときは得ないで済むといった、情報量の調整の自在性も要求している。

12.「欲しいもの・手に入るものが制限されないこと」

こちらは逆に実物やサービスを得たいという欲求である。現状で言うと Amazon に代表されるような e コマースの取り扱っているものは、インフラの整備された地域であればおおよそ手に入れられるようになっている。一方、例えば新鮮な魚、レストランの料理といった食料や、e コマースに出品されないものは現地に赴かないと手に入らない。また医療なども地域によっては近くに利用できる医療施設がないといった状況が存在する。そういった差をなくし、究極的にはどこにいても手に入る自在性を要求している。

13.「ものに簡単にアクセスできること＋その安心感」

上記の手に入るものが、時間的に短時間であることと、それによる安心感のことである。例えば自動車が故障した際、それが都市の近く、つまり多くの店やサービスにアクセスできるような状況で生じた場合と、それらにアクセスできない状況で生じた場合では、故障の重大さやそれに対する備えのしかたが変わってくる。そのため、究極的にはいつでもものが手に入る自在性を要求している。

14.「好きな時間に移動できること」

公共交通機関の運行頻度や運航路線によって、移動できる時間、範囲、持ち運べる荷物量は限られているが、これを自分の望んだ時間、場所に移動できる自在性を要求している。自家用車はこの自在性を一部達成しているが、低速度（鉄道比）、渋滞、道路の整備状況などによって自在性が制限されている。

表 A. 8：本 MS 目標案の暮らしに基づいた機能分解

分類	項目	自在性
必須機能	エネルギー／生活インフラ	暮らしの自在性
	安心／安全のためのサービス	
	暮らしを支えるサービス	
	地域に魅力があること	環境の自在性
	環境との調和	
差分機能	意外な発見・意外な出会い	情報の自在性

	人と会う機会（面白い人・多様な人と会う機会）	コミュニティの自在性
	仕事のための情報が得られること（人との出会いを通じて情報を得ること）	
	受けた教育が受けたときに受けられること	
	自分のやりたい仕事を選べること	
	話題になっているヒト・モノ・コトへの容易なアクセスができること	仕事の自在性 情報の自在性
	欲しいもの・手に入るものが制限されないこと	移動の自在性
	ものに簡単にアクセスできること＋その安心感	
	好きな時間に移動できること	

A.4 ロジックモデルを用いた課題抽出

II.1 で述べたように、暮らしに期待される機能には「暮らし」、「環境」、「情報」、「コミュニティ」、「仕事」、「移動」の 6 つの自在性を実現する 14 個の機能（以下、「暮らしの 14 項目」とする）があることが分かった。ここでは、図 4 に述べた都市像を前提に、これらの 14 個の機能を実現するために必要な技術をロジックモデル（図 A.7）を用いて検討した結果について述べる。

ロジックモデルとは、「あるプロジェクトについて、投入する資源、活動、結果として生まれる製品やサービス、それによる成果、その成果がもたらすインパクトの因果関係を体系的に図示するもの」である[16]。本検討で用いたロジックモデルの雛型を図 A.7 に示すが、これは文献[16]に示されたロジックモデルに対して若干のアレンジが加えられており、「アウトプット／実装」をソリューションとし、「アクティビティ」との間に「キー技術」を設定した。これは、目標を設定すべきキー技術の抽出が本検討の大きな目的の一つであるからである。また、具体的なアクティビティを設定するのは MS 目標となった時に具体的な事業を提案する提案者が行うべきことであるから、「インプット／リソース」および「アクティビティ」は検討の対象外とした。

作成したロジックモデルはすべて掲載しないが、本検討では、「インパクト」に理想の社会像が備えているべき上述の「暮らしの 14 項目」を置き、「インパクト」の実現を構成する「アウトカム」をモノ・概念・サービスとして表した。それらアウトカムを実現する手段として「ソリューション」を考案し、「ソリューション」を実現するためのキーとなる技術分野をそれぞれ導出した。

「暮らしの 14 項目」について、アウトカムとのソリューションの関係を表 A.9 にまとめた。このソリューションを見ると何度も登場する技術があることが分かる。これらをまとめると、エネルギー自給、資源循環、完全自動輸送、五感通信、環境構築デバイスとしての家屋に関する技術分野が課題であることが導出された。

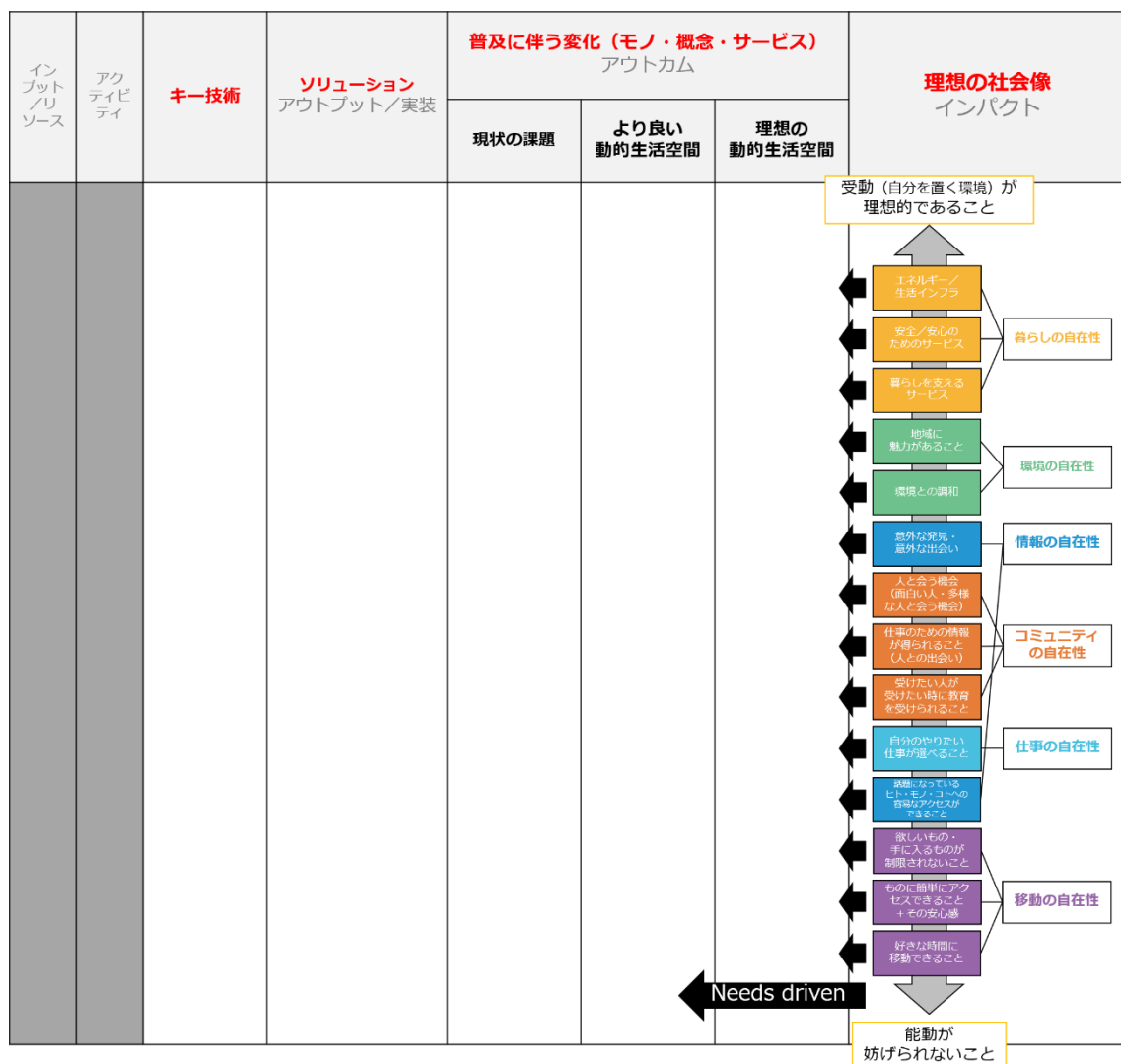


図 A.7：ロジックモデル雛型

表 A.9：「暮らしの14項目」に関連したアウトカムとソリューション

暮らしの14項目	アウトカム	ソリューション
1. エネルギー／生活インフラ	● 生活も移動もすべて自家発電かつ環境に良いエネルギー ● ごみになる有機物はすべて発電に利用できる ● いつでもどこでも必要な分量の水が手に入る ● 必要以上に水を使わない	● 動的な生活や宇宙等への生活において、物理的な空間の確保には限界があるものの、本MS目標案が達成された社会では断熱や遮音だけでなく、空間の演出により快適な住空間を実現する

	● 好きな時に好きなところへ移住できる	
2. 安全/安心のためのサービス	● 体調管理がされていて、緊急搬送機会が減っている ● 住む場所に応じてきめ細かな災害発生情報・予報が提供される ● 更新する必要があるインフラが極端に減っている ● ハザードマップを意識しなくても土地の選択時に自動的に情報が得られる ● 広域であっても高速に駆けつける警察・消防・救急 ● 遠隔であっても家庭内での虐待等の行為を認知・通報できる ● 交番が無い場所でも広域に犯罪抑止力がある ● 信用スコアにより、どこでもマナーを守ろうとする人が増える	● 医療や教育等のサービスについては、オンラインによる提供をメインとし、物理的な移動の必要性を最低限にする ● 身体接触デバイスによる直接的な計測に加えて、排泄物なども利用した健康保持のための身体モニタ機能を実現して、突然死リスクを下げた救急搬送機械を減らす ● 防犯は、遠隔による危険検知やロボットによる迅速な対応により実現する ● 広域に警戒するため、人的な警邏ではなく、ドローン等による自動的な巡回・検知を行う ● 身体モニタ機能を利用して、家庭内における暴力行為（ネグレクト等含む）を検知する
3. 暮らしを支えるサービス	● 距離に関係なく多様な商店・サービスにアクセス可能で、必要な時に必要な商品、サービスが入手可能 ● 都市部やそれ以上の高速通信 ● 無線通信増加による外部電磁波の影響を受けない ● 生活が外部の意図しない影響（騒音・光害など）	● 買い物についてはオンライン注文、自動配送、あるいは3D造形によりオンデマンドな買い物体験により不便さを解消する ● オンデマンド完全自動輸送が実現しており、人の手を介さずにいつでも必要なものを入手できる ● 宇宙や空に基地局を浮かべることで、どこにいても高速・

	を受けなくなっている ● 外の景観を外部の意図しない影響を受けずに時間、気分に合わせて楽しめる	高品質の通信が実現している ● 屋内が外部に対して電波遮蔽材で電磁遮蔽されており、電磁干渉が起きない ● メタマテリアル等を用いて外界の騒音が遮蔽されている ● 外部と隔絶されることで逆に家の内部が無機質になる点を、空間のプロパティ（Co2濃度、湿度、温度、気流、照明）の調整や取り入れたい部分だけ抽出した外の映像や音の投影で快適にする
4. 地域に魅力があること	● 知名度や他者から見た魅力に関わらず、住人が幸福や自己肯定感を感じられる地域 ● 誰もが景観を楽しむことができる地域	● 本 MS 目標案が達成された社会における生活者のウェルビーイングの測定技術 ● 景色を肉眼で見るよりも美しくダイナミックに楽しめる
5. 自然環境に調和していること	● 家屋の外観がどんな場所にも馴染むことができる ● ゼロエミッション ● 外部への電波公害を起こさない	● これまでの活動領域の拡大は、地球環境や他の生物への悪影響と引き換えに実現してきたものであり、異常気象や資源の枯渇といった問題に直面している ● これからは自然環境や他の生物、さらに他の人間と調和しながら発展していく方法が必要である ● 現状では、CO2 排出を抑える法律やプラスチックの使用を制限するようなルール等、利便性がある程度犠牲になるような方針がとられている ● 本 MS 目標案が達成された社

		会では地球環境や他の生物と調和するため、電力、水道、ごみ処理については各居住単位での自律循環を実現する。 また他の人間と調和するため、高品質で安定な高速無線通信環境を電磁波制御技術で実現し、自然の景観を守るためにどんな場所でも馴染める外観の住居を実現する
6. 意外な発見、意外な出会い 7. 話題になっているヒト・モノ・コトへの容易なアクセスができること	● 生活レベルを変えずに、都市部、山中、砂漠、海中どこでも生活ができる ● 今いる場所の魅力を調べなくても教えてもらえる	● 種々のセンシングの精度向上、コミュニティのマッピング
8. 人と会う機会（面白い人・多様な人と会う機会） 9. 仕事のための情報が得られること（人との出会い）	● 離れた場所においても偶然性が担保された出会いの場が物理空間／仮想空間ともに提供されている ● 遠隔であっても会話は現実感が非常に高い ● 電話と話す以外の周囲環境がわかる ● 仮想現実でカフェや酒場のようなコミュニティが実現している	● これまでは、家族、学校、会社等、土地に根差したコミュニティ形成であったが、オンラインでのネットワーク形成により、より幅広いコミュニティの成立が可能となり、新たな価値を創出すると考えられる。理想の IPA/DLS 社会では、所在によらず、他者と空間を（五感含めて）共有できる
10. 受けたい人が受けたいときに教育を受けられること	● どこに住んでいても、好きな学校で学校生活が送られる ● 現実感が非常に高い仮想空間上の学校ですべての科目を学ぶことができる ● 何歳になっても高度な教	● 学校自体の近くへの移住、遠隔地からも通える高速移動手段、遠隔地からの参加、アバターの利用、など教育機関への参加の手段が多様になっている ● 感覚伝送手段によって、アバ

	育が受けられ、誰もが教える側になることもできる	ター参加であったとしても教室にいるのと同様の教育を体感できる ● 何歳になっても高度な教育を受けられ、誰もが教える側になることもできるプラットフォームが用意されている
11. 自分のやりたい仕事を選べること	● 通勤圏が国土全域まで広がり選択肢が増える ● どんな仕事も遠隔でできる ● 仕事に必要な機材や材料がオンデマンドですぐに届く ● ほとんどすべての職種で仕事と場所の関係なくなり、勤務地という概念がなくなる ● 離れている場所で仕事をすることを雇用する側が当たり前のことだと受け入れている ● クエスト的に様々な仕事を割り当てることができる ● どんな環境下でも農業など第一次産業が行える	● 現場仕事はロボット（自動かだけではなく、遠隔操作を含む）が行い、人間の仕事のほとんどがオンラインで可能になる ● アバターが活用されており、感覚もリアルタイム伝送されるため、遠隔地でも現場にいるのと同様の仕事の実現できる ● 仕事の現場と居住地、必要物資の配送拠点が離れているため、業務内容と連携した配送システムで配送手配の手間が無い ● 家屋等では、仕事環境自体を再現することが可能であり、場所を移動しなくても場所を体感できる ● 能力や居住条件などを考慮した仕事の提案があり、時分割を意識させない副業と報酬計算がされる
12. 欲しいもの・手に入るものが制限されないこと 13. ものに簡単にアクセスできること	● 新鮮な魚、レストランの料理、定食屋のごはんがどこにいても食べられる ● 都市でも無人島でも同じ物・サービスが手に入る	● いくら、オンラインでできることが増えても、食料や生活物資等ハードからは逃れられないが、輸送やオンデマンド製造より、たいいていのものが

と+その安心感	のでいつでも安心 ● モノが任意の複数地点間を人の手を介さずに自動で移動できる ● 物資は必要な時（昼夜問わず、待ち時間も無く）に必要なだけ手に入る	待つことなく手に入る ● 自己位置を暗号化しつつ、サービスに必要な情報を必要な相手にのみ届けることができる技術でプライバシーを保護しながら自動配送が可能になる
14. 好きな時間に移動できること	● 昼夜間問わず、待ち時間も無く移動ができる ● 大雨洪水暴風関係なし、かつ移動時間も短い ● 世界中どこに住居が移動してもピンポイントにモノが届く ● 荷物の移動でなく「暮らし自体」が移動するようになっている	● いつでも安全に移動できる個人向け高速輸送手段の提供 ● 高速輸送手段は効率だけでなく、周囲への騒音などを考慮して最適な経路を選択し、内部環境に対しては能動的な静粛化を実現する ● 引っ越しは、次の移動場所にあるものと今あるものを比較して差分のみを移動させる

A.5 本 MS 目標案が達成された社会における居住空間及び生活像の検討

本項においては、本 MS 目標案が達成された場合の居住空間や生活像の検討結果を示す。

まずは、生活に必要なインフラの識別と定量化を行った。人間の生活に必要なインフラの識別においては、一般的な住宅の構成要素をリストアップすることに加えて、自律循環型の好例として国際宇宙ステーションの構成システムに着目した。図 A. 8 に、宇宙ステーションにおけるインフラ、現在の一般住宅におけるインフラ、IPA の構成要素となるインフラの調査検討結果をまとめる。IPA の構成要素となるもののうち、通信やテレコマ制御については、別途検討にて詳細を検討とし、それ以外の要素について分析したところ、IPA 化にあたって、現状との乖離が一番大きい部分は水供給と電力供給、家構造であることを識別した。

これらに関しては、現在、供給が土地に拘束されている。そこから解放されるためには、輸送による解決と、循環による解決がある。つまり、水の場合は、既存（ないしは新規）の上下水道設備を起点として必要な量の上水を運搬・貯蔵し、排水を運搬・処理するか、排水を世帯単位で上水へと再生することが必要となる。電力の場合は、既存の発電所・変電所からの送電は容易に拡張できないと考えられ、充填されたバッテリーを運ぶ、ないしは、太陽光発電等、世帯単位で発電を行うことが必要となる。家構造については、家ごと運ぶ、ないしは、3D 成型等の簡便な建築を行う技術が必要になると考えられる。実際に

は、輸送と循環のバランスはそれぞれのコストやエネルギーの最適化の結果決まると考えられ、その検討に向けて、

表 A. 10 の通り、IPA の構成要素として必要な装置について、重量や水、電気の必要量等をリストアップした。

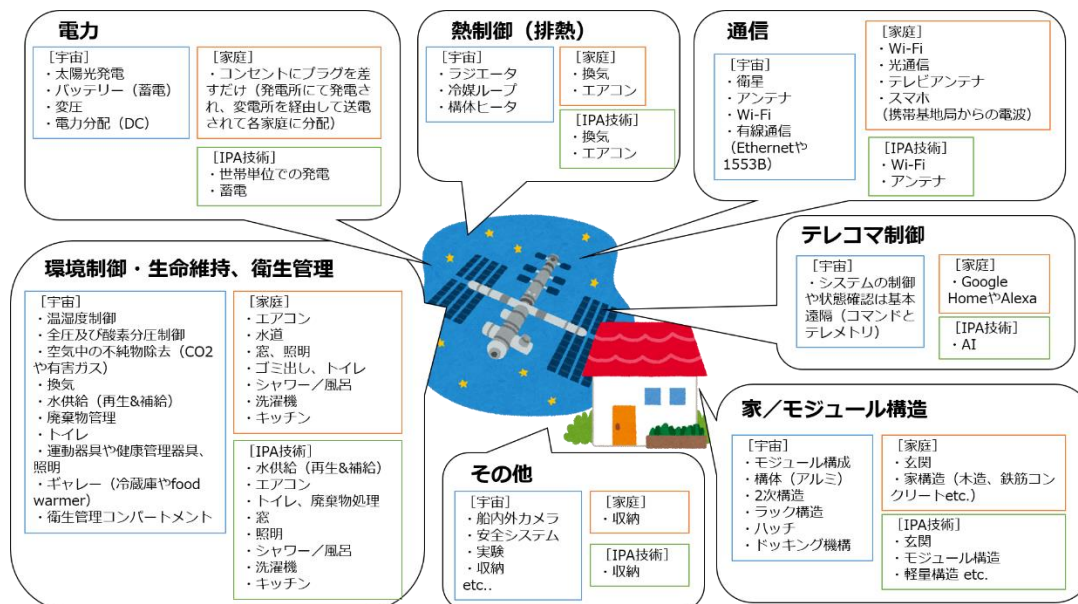


図 A. 8：宇宙ステーション、現在の一般住宅におけるインフラ及び IPA の構成要素のブレインストーミング結果 ([166][167]を参考に作成)

表 A. 10：IPA の構成要素およびその重量、必要電力等

大項目	小項目	設備重量	補給重量 (水)	補給重量 (食料)	補給重量 (その他)	使用電力	ゴミ重量	備考
居間 モジュール	寝る、 昼間過ごす	0	2 kg/人・日 (飲み水)	1.5 kg/人・日 (弁当、 容器含む)		0	0.918 kg/人日	
	荷物受取口 (家構造の一部)		0	0	0		0	
	エアコン	25 kg	0	0	0	2000 Wh/日	0	パナソニック製ルームエアコンCS-221DFR https://panasonic.jp/aircon/p-db/CS-221DFRS_spec.html
	ベッド	7kg (布団)	0	0	0	0	0	ニトリ製すぐに使える寝具 6 点セット ふとん用 シングル https://www.nitori-net.jp/ec/product/7543176/
	全体構造	1500 kg	0	0	0	0	0	12ftコンテナ http://container.jp/container_12.html
水回り モジュール	トイレ	17~20 kg (陶器だと25kg)	4.8 kg/回 (大)	0	0	190 Wh/日	汚水3kg+洗浄水1.8kg (廃棄)	パナソニック製タンクレストイレ アラウーノ S160シリーズ https://sumai.panasonic.jp/toilet/alauno/alauno-s160/spec/
	シャワー/風呂	シャワー (水栓+ ヘッド) : 2.8 kg バスタブ : 28 kg	(90 kg/人・日)	0	0	0	(水90kg/人・日) (再生)	
	冷蔵庫	32 kg	0	0	0	816 Wh/日	0	2ドア138Lタイプ パナソニック製NR-B14DW https://panasonic.jp/reizo/p-db/NR-B14DW_spec.html
	エアコン	25 kg	0	0	0	2000 Wh/日	0	
	洗濯機	28 kg	(114 kg/回 (容量 5 kg))	0	洗剤	100 Wh/日	(水 114kg/回) (再生)	1日1回と仮定。パナソニック製全自動洗濯機 NA-F50B14 https://panasonic.jp/wash/p-db/NA-F50B14_spec.html
	洗面台	60 kg	(13 kg/人・日)	0	0	0	(13 kg/人・日) (再生)	WOTA WOSH https://wota.co.jp/wosh/spec/
	水処理装置	82 kg	(~4 kg/min (再生))	0	0	500VA (500 W再生時 間64 min/日と仮 定し533 Wh/ 日)	0	WOTA BOX https://wota.co.jp/wota-box/spec/
	キッチン		(38 kg/人・日)	0	0	0	(38kg/人・日) (再生)	
	全体構造	1500 kg	0	0	0	0	0	12ftコンテナ http://container.jp/container_12.html
	水タンク	10.5 kg	0	0	0	0	0	再生分255L/人日を1日分貯める
合計		約3,300 kg	6.8 kg/人日	1.5 kg/人日		5,639 Wh/日	5.72 kg/人・日	

また、一般家庭でのエネルギー消費量と、それらを太陽光発電で賄うことが可能かについての試算を行った。まず、環境省「平成 29 年度 家庭部門の CO2 排出実態統計調査（確報値）」[168]より、地方別世帯当たり年間エネルギー種別消費量・構成比から再構成した地方別世帯当たり年間エネルギー消費量とその構成比は表 A. 11 のようになる。

表 A. 11：地方別世帯当たり年間エネルギー消費量とその構成比

	[kWh/世帯・年]		GJ 換算各エネルギー構成比 [%]			
	電気	電気	*GJ：ギガジュール			合計
			都市ガス	LP ガス	灯油	
北海道	3,906	27.5	8.2	5.1	59.3	100
東北	4,994	38.4	6.9	9.4	45.3	100
関東甲信	3,833	44.8	36.2	8.3	10.6	100
北陸	6,333	49.4	14.9	6.2	29.5	100
東海	4,464	49.1	26.0	12.2	12.6	100
近畿	4,108	48.2	39.8	4.2	7.9	100
中国	5,164	59.5	11.5	13.0	16.0	100
四国	5,153	61.0	6.0	15.7	17.3	100
九州	4,669	59.1	11.1	14.6	15.2	100
沖縄	3,942	67.7	3.4	21.8	7.1	100
全国	4,322	46.9	25.3	9.0	18.8	100

上記表 A. 11 を元に、各エネルギー種を電力換算した数値と、公表されている市販太陽光発電システムの年間推定発電量[169]を比較すると、以下の表 A. 12 のようになる。北海道、東北、北陸では 10%程度以下の不足が見られるが、年間発電量としては現状の市販製品でも太陽光発電で概ね一般家庭一世帯分の発電量が期待できる。

表 A. 12：地方別世帯当たり年間エネルギー消費量と太陽光発電で可能な年間推定発電量

	各エネルギー種を電力 換算した合計値 [kWh/世帯・年]	年間推定発電量 [kWh/世帯・年]	
北海道	14,204	12,752	札幌市
東北	13,005	12,833	仙台市
関東甲信	8,556	12,313	東京都
北陸	12,820	11,740	金沢市
東海	9,092	13,884	名古屋市
近畿	8,523	12,870	大阪市
中国	8,679	13,740	広島市
四国	8,448	13,749	高松市
九州	7,900	12,941	福岡市
沖縄	5,823	13,024	那覇市
全国	9,215	-	-

しかし、日射量は年間を通して変動がある。図 A. 9 に新エネルギー・産業技術総合開発機構の提供する日射に関するデータベース[170]から得た金沢市付近の日射量年変動グラフを例として載せるが、年間での日射量変動はかなり大きい。また、一日の間でも太陽光の発電量は大きく変動することが指摘されており[171]、現在はどちらかというところの変動への対策が強く意識されている。いずれにしろ、自然エネルギーの活用は変動量を吸収して年間を通して効率よく使えるようにすることが技術的なカギとなる。

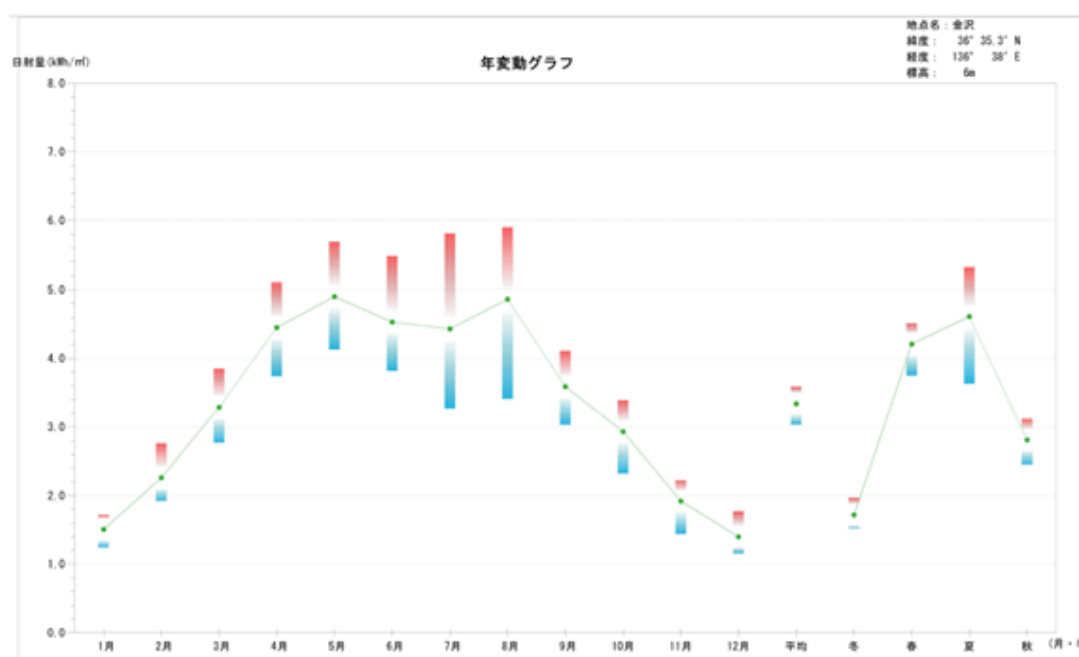


図 A. 9：金沢市の日射量年間変動[170]

A.6 自動高速輸送のソリューション例：無人航空機

自動高速輸送のソリューション例として、無人航空機を考える。航空機の性能を決定する上で重要なのは、積載量と輸送距離の二点である。本節では、2050 年の日常生活において個人宅への個別輸送を担う機体について考える。まず、輸送サービスの形態から積載量の目標値を定める。次いで、都市間距離の分布とリーチすべき範囲のモデル化によって輸送距離の目標値を定める。続いて、世の中に存在する輸送手段と本機体例の適性を整理するために、輸送機械ごとに現状の積載量と輸送距離の調査を行った結果を示す[172]。最後に、輸送距離の長大化に対するキー技術の一つとして挙げられるバッテリー性能の向上によって無人機の性能がどの程度向上するかについての概念検討の結果を示す。

A.6.1 必要積載量の調査

まず本 MS 目標案が実現された社会では、日常生活に最低限必要な水、食料といった物資とそれに伴う廃棄物、および嗜好品を必ず運べる必要がある。本調査研究では、現状日常生活に最低限必要な物資の量を、居住空間の観点から調査により明らかにした。詳細は A.6 に示されているが各要素を合計すると水は 261.8 kg/人日、食料は 1.5 kg/人日、ごみは 259.8 kg/人日運ぶ必要がある。実際に輸送しようとする、水と食料を住居まで輸送した後、ごみを処理場まで輸送必要がある。これを考慮すると、将来の輸送では 1 回で水と食料を合わせた 263.3 kg/人日を最大で運べることが求められる。複数回、もしくは複数機に分けられる場合もあるが、必ず複数回もしくは複数機に分けないといけない場合、自由度が下がる恐れがあるため、目標値の 1 つとして 263.3 kg が設定

される。

また、ネット通販に代表されるような嗜好品の入手、近年存在感が増しているフードデリバリーなども問題なく行える必要がある。嗜好品の輸送重量に関しては個人のデータを手に入れられないため、代替として複数の運送会社の輸送規格を調査することでこういった重量の荷物が想定されているかを調査した。各運送会社の輸送規格を表 A. 13 に示す。海外向けのものは全て 1 荷物最大 70 kg 程度である一方、国内向けの荷物はラージサイズのものを除き 1 つあたり 20~30 kg が制限として存在する。この調査結果から、国内の嗜好品などの輸送は 30 kg 運べると十分であることが示唆される。

表 A. 13：運送会社の輸送規格

種類	制限	引用元
ヤマト宅急便	~25 kg 3辺合計160 cm以内	https://www.kuronekoyamato.co.jp/ytcs/search/payment/size/
ヤマト便	~30 kg 3辺合計200 cm以内	
佐川飛脚宅配便	~30 kg 3辺合計160 cm以内	https://www.sagawa-exp.co.jp/service/takuhai/
佐川飛脚ラージサイズ宅配便	~50 kg 3辺合計260 cm以内	
カンガルー宅配便	~20 kg 3辺合計130 cm以内	https://www.seino.co.jp/seino/service/domestic/takuhai/
フクソー宅配便	~30 kg 3辺合計160 cm以内	https://corp.fukutsu.co.jp/service/f-takuhai/index.html
UPS	~70 kg 3辺合計400 cm以内	https://www.ups.com/jp/ja/help-center/packaging-and-supplies/weight-size.page
DHL Express Worldwide	~70 kg 3辺合計400 cm以内	https://www.dhl.co.jp/content/dam/downloads/jp/express/ja/shipping/weights_and_dimensions/weights_and_dimensions_jp_ja.pdf
FedEx Express International	~68 kg 3辺合計330 cm以内	http://www.fedex.com/downloads/jp/packagingtips/howtopack.pdf

フードデリバリーに関しては、デリバリー企業では重量制限を課していないことから明確に定義することはできなかったが、市販の各種デリバリー用バッグの使用では耐荷重 10 kg 台から 25 kg 程度までのものが主流であるため、フードデリバリー目的であれば 25 kg 程度の運搬性能があれば充分であると考えられる。宅配便の重量も考慮して、輸送可能重量の目標値の 1 つとして 30 kg を設定した。この重量は個人が取り扱いやすい限界重量でもある。以上の検討から、輸送可能重量の目標値は 263.3 kg、30 kg と結論付けた。

A.6.2 必要航続距離の調査

次に輸送距離について考える。物資は基本的に都市に集まるため、都市と都市の間に任意の場所に輸送できれば、都市に存在する物資をどこにでも運べるようになると考えられる。従って本調査研究では、都市同士の距離を輸送距離に対する要求とした。本来都市はサプライチェーンの終着地であり、更にそこから航空輸送で物資を運ぶのは非効率的であるはずだが、輸送手段の使い勝手としての面では目安となり得る。

都市の定義方法、位置、人口、面積などのデータとして、Urban Centre Database[16]を

用いた。このデータベースでは世界中に都市 (= Urban Centre, UC) が 13,135 存在し、UC に合計で 35.4 億人の人口が住んでいる。このデータベースを用いて、世界中の UC について最も近い UC までの距離を算出し、ヒストグラムを作成した (図 A. 10)。ほとんどの UC は隣の UC を 100 km 以内に持っていることがわかる。なお、500 km 以上離れた隣接 UC を持つ UC も存在するが、ごく少数であるためグラフでは省略している。中央値は 21.7 km、95 パーセンタイルは 109.5 km となっている。代表値として、広く参考値として扱われる 95 パーセンタイルの値を使うと、UC 同士はおおよそ 109.5 km 以内に存在していると言え、輸送としては 95% の UC を結べるという理由で、この距離を運べるのが 1 つの基準となり得る。ここで、95% の UC には、隣の UC が 109.5 km よりも近い範囲に存在しているので、これらを結ぶ最も厳しい条件として 109.5 km の間隔で UC が最密充填で配置されている状況を仮定する (図 A. 11)。これらを結べる性能として航続距離 109.5 km を設定すると、中央に空白地帯ができてしまうことがわかる。これを埋められるように六角形の最大対角距離を飛べる、つまり六角形の中心から端までをどこでも往復できるようにするため、126.4 km の航続距離が必要となる。更に、目的地の UC で何かしらの問題が生じ、更に一つ隣の UC に移動しなくてはならなくなった場合を考え (旅客機でも滑走路が封鎖された場合別の空港にダイバートする可能性がある)、倍の 252.8 km を必要な航続距離と結論付けた。ここで実際にこの航続距離がどの程度の土地の範囲をカバーできるか調べるため、図 A. 12 に世界に点在する UC の位置 (図 A. 12 (a)) と、各 UC を中心とした直径が 252.8 km、1000 km、2000 km の円を世界地図上にプロットした。ここではメルカトル図法が使われているため、円の大きさが正確ではないことに留意されたい。上で定めた 252.8 km という航続距離がカバーできる輸送範囲をおおよそ表しているのが図 A. 12 (b) である。これを見ると、UC 同士が輸送によって繋がり、多くの UC 周りの土地に物資を輸送できるようになることがわかる。一方でサハラ砂漠、ゴビ砂漠等の砂漠が輸送不可能領域であることがわかる。さらに砂漠だけではなく、地中海を南北結べない、各大陸の中央付近の土地に輸送不可能領域が存在するなど、どこにでも輸送ができるようになっていたとは言えない。そのため理想的にはより長い輸送距離が必要となる。図 A. 12 (c)、図 A. 12 (d) には直径が約 1000 km、2000 km の円を図示してある。もし航続距離が 1000 km であった場合、地中海を輸送可能領域としてカバーできるようになり、太平洋などに浮かぶ小さい島々を除けば、砂漠と北極、南極付近以外はほぼ網羅できることが分かる。更に航続距離が 2000 km であった場合、島々、オーストラリア中央部、北極、南極付近以外は完全にカバーできることが分かる。これらの検討結果から、最終的に航続距離として、252.8 km、1000 km、2000 km と 3 つのターゲットを設定した。

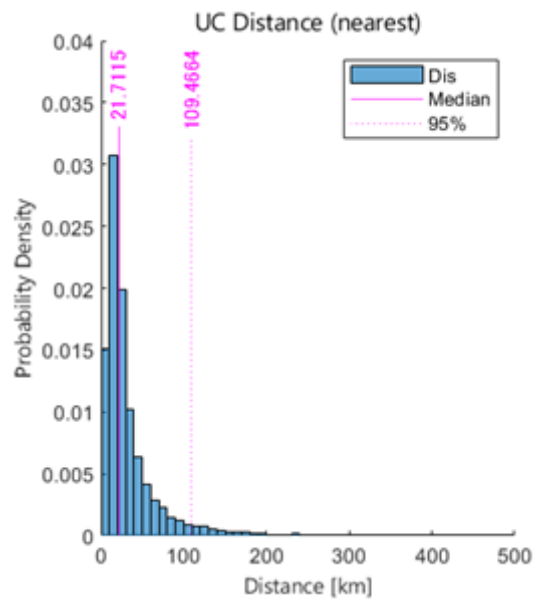


図 A. 10 : Urban Centre 同士の最短距離のヒストグラム

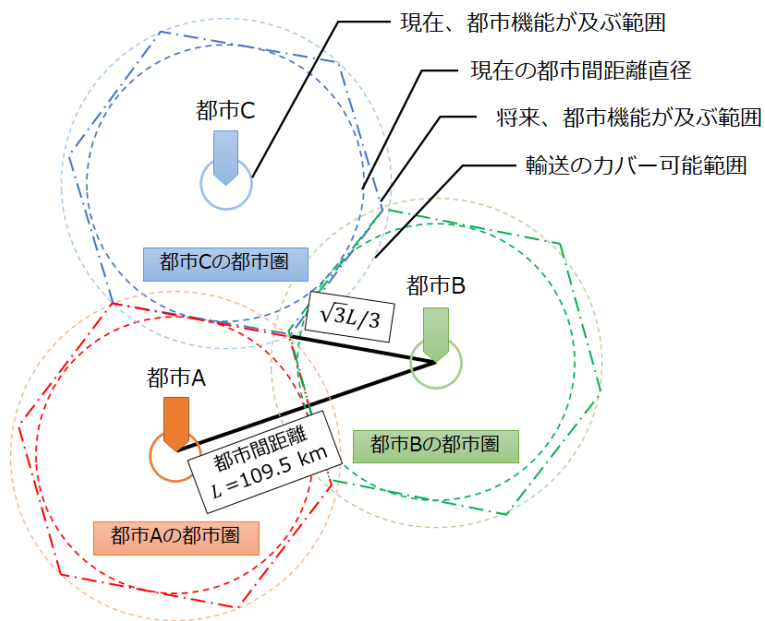


図 A. 11 : 都市配置イメージ



(a) Urban Centre (UC) 位置



(b) UC を中心とした直径 252.8 km 範囲



(c) UC を中心とした直径 1000 km 範囲



(d) UC を中心とした直径 2000 km 範囲

図 A. 12 : Urban Centre (UC) を中心とした各直径の円が占める土地の範囲 (正積図法)

A.6.3 様々な輸送機械の積載量と輸送距離

調査した輸送機械の種類とデータ数は表 A. 14 のとおりである。また図 A. 13 に集計したデータの両対数グラフを示す。この結果から、航空輸送と、地上・海上輸送の 2 つの輸送モードが存在することがわかる。地上・海上輸送は各輸送機械の性能限界まで活用していないことから、このバンドの上が、採算や使い勝手の面から適切な領域として可視化されていると判断できる。航空輸送は同じ輸送距離に対し積載量が少ないことがわかるが、輸送として成立していることがデータとして示されている。

表 A. 14 : 調査を行った輸送機械の種類と参照データ数[172]

輸送機械	データ数
船舶	9
航空機	10
ヘリコプター	4
鉄道	1
自動車	6
バイク・自転車	4
マルチコプター	9
UAV	7

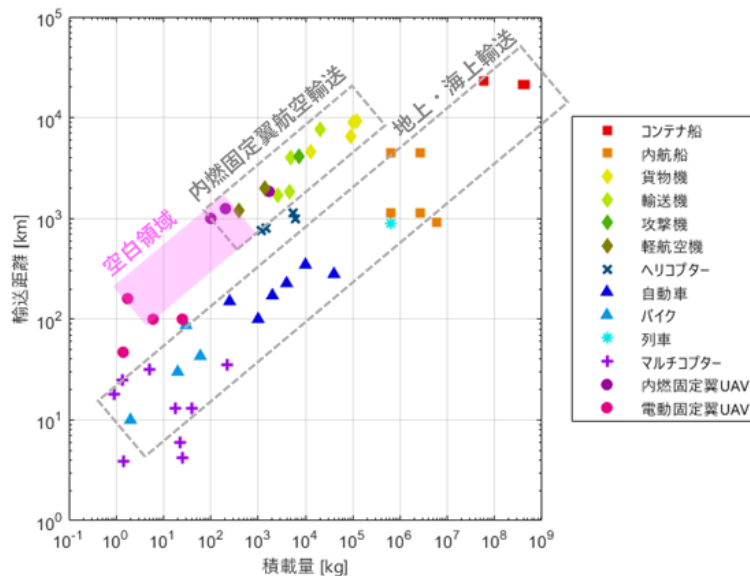


図 A. 13：各輸送機械の航続距離とペイロード（[172]掲載の図を一部加工）

一般に、航空輸送が選ばれる理由は大きく 3 つある[173]。1 つ目は運ぶ品目の特性であり、高速、かつ温度管理などが容易であり、湿度、温度、鮮度を気にする医薬品や食材の輸送に適している。またトラックや船舶と比べ衝撃や振動が少なく、精密機器や貴重品の輸送に適している。更にデジタル家電や液晶パネルといった、商品サイクルの短いものを高速で運べるのが長所として挙げられる。2 つ目は戦略的理由で、新製品を、時流を逃さずにマーケットに投入し、シェア確保を狙えることがメリットである。また、航空機一機当たりの輸送量は船舶などに比べ小さいものの、便数が非常に多いため、物資を保管せず逐次輸送することで、倉庫などの貯蔵施設を建造、維持するコストが必要なくなり、トータルでコストが低く抑えられる場合がある。また単価の高い衣料品、半導体、PC、携帯電話などは、高速高頻度輸送によって資金回転率の向上が望める。3 つ目は時間的制約であり、生産が遅れた場合など不測の事態による緊急出荷手段として、他の輸送手段の何倍も高速な航空輸送が選ばれる。また、製品の需要が非常に高く品薄になる場合にも緊急出荷手段として用いられる。これら 3 つの要因が、航空輸送が同じ輸送距離に対し積載量が少なくとも成立している理由である。

また逆に航空輸送は、地上・海上輸送に対し、同じ積載量で輸送距離が長いことが特徴であるが、これは速度によって時間当たりの距離を稼いでいると言える。これらの航空輸送の特徴を鑑みると、2050 年の社会像にはオンデマンド性に優れた航空輸送に適性があり、図中の航空輸送バンドが 2050 年の社会像に適した領域であると推測される。一方で航空輸送は大量輸送には適さないため、配送拠点間の輸送には、既存のインフラが存在する、鉄道や車両が引き続き使用され则认为られる。

なお、マルチコプターは、現状バイクと同じ領域に存在しており、一般的に言われる航空輸送のメリットを有しておらず、垂直離着陸が可能という以外はバイクと変わらないこ

とがわかる。新しい機種ほど地上・海上輸送バンドに沿ってグラフ右上にプロットされる傾向があるものの、バンドから外れることはない。更にヘリコプターが航空輸送と地上・海上輸送の中間に存在することを鑑みても、将来的にマルチコプターは航空輸送バンドに含まれないと推測され、オンデマンド性の観点から2050年の社会像の最適解ではないと考えられる。ただしマルチコプターは固定翼機と比べ操縦が容易であり、扱いやすいという特徴を持っている。

近年の動向としては、垂直離着陸可能な電動固定翼 UAV や、内燃固定翼 UAV が開発され始めており、図 A. 13 に示す航空輸送バンドの空白領域を少しずつ埋め始めている。一般に固定翼航空機はマルチコプターと比べ、積載量、燃費、速度が優れているという特徴を持っているが、一方で性能としては垂直離着陸機能との両立が難しく、操縦も難易度が上がる。そのため現状この領域を飛行できる機体が少ないと言える。しかしこの領域は積載量が数 kg～数百 kg とバイク～軽トラックと 2t トラックの中間あたりで、輸送距離が数百 km～数千 km の領域であり、既存の旅客機や軽航空機などの航空輸送と比べると小型輸送だと言えるが、個別宅への輸送という観点からは好ましい領域であると推測される。従って、本節で定めた目標値を達成するような無人航空機が今後作られるようにと考えられる。

A.6.4 バッテリー性能向上による輸送距離増大

ここまでで社会像に必要な輸送重量と航続距離を見積もった。これらの技術的な実現可能性を本項で解説する。なお環境面への配慮から、内燃機関を搭載した UAV ではなく、電動固定翼 UAV について実現可能性を検討する。

輸送重量に関しては航空機のサイズに関係してくるため基本的には大きい機体を用意すれば達成でき、実現可能性という点では重大な問題にならない。ただし機体の大きさは地上設備のサイズや、人々に受け入れられるかといった観点から大きすぎてはならない。受容性は機体の外見やその時々的情勢にも左右されることから、定量的な検討は困難であるため、本調査研究では詳しく扱わない。しかし Ehang はペイロードが 220 kg のエアモビリティを開発中であるなど[174]、図 A. 13 に示すようにペイロードが 300 kg の機体は開発され始めているため、受容性を含め実現性は低くないと言える。

航続距離に関しては現状の電動固定翼 UAV の性能や、バッテリー性能等を考慮して、将来的な固定翼実現性の検討を行っている。詳しい導出過程や使用した式に関しては[172]を参照されたい。図 A. 14 に検討結果を示す。横軸に機体の総重量、縦軸に航続距離（輸送距離）が示されている。黒い 5 本の曲線は機体の総重量からバッテリー重量を引いた値、つまり機体の構造重量とペイロードの合計重量が一定の線を表している。ここから言えるのは、30 kg のペイロードを運びたいのであれば、30 kg の曲線よりもグラフ右下側に機体の設計点を置く必要があるということである。また重要な点として、総重量が増える、つまりバッテリー重量を増やすことによって航続距離が伸びるが、あるところまでバッテリーを増やすと、それ以降は航続距離が伸びなくなる。これはバッテリー増大による電源容

量増加のメリットが、重量増加のデメリットを上回れなくなってしまうことを表しており、現状ドローンに使用されているようなリチウムイオンバッテリーの性能（重量エネルギー密度 156 Wh/kg）では、航続距離が 219 km までしか達成できないことを意味している。航続距離は機体性能の観点では空気抵抗を小さくすることで、バッテリー性能の観点ではエネルギー密度を向上させることで伸ばすことができる。図中の水色の線は、リチウムイオンバッテリーの重量エネルギー密度が、理論値である 662 Wh/kg まで向上[175]した際の見積もりを表している。この場合航続距離の限界は 929 km まで伸びる。しかし前項で設定した 1000 km、2000 km という航続距離は達成できない。このため、次世代電池の開発、合わせて機体空力性能の向上が今後必要になると結論付けられる。また、電気料金を 25 円/kWh として、バッテリーの容量から一回のフライトに必要な充電コストを見積もった結果が 4 本の黒い直線である。100 円の直線と、30 kg の黒い曲線が交わっている点は、おおよそ航続距離が 100 km、総重量が 55 kg 程度の点であり、ペイロード、バッテリー重量を含め 55 kg の機体が 100 km 飛行するには、100 円必要であるということを示している。なおこの検討では水平飛行時の消費電力にフォーカスしているため、実際には離着陸時により大きな電力を要する点で注意が必要である。しかし離着陸に要する時間は水平飛行中の時間と比べ短く、大きな問題とはならない。

以上の検討結果から、ロジックモデルで記述された社会像の中の輸送は、機体そのものの空力性能や、バッテリー性能が向上すれば成立すると結論付けられる。バッテリーに関しては[175]が示すように様々な新しい形式の電池が開発されているため、これらの実現が待たれる。

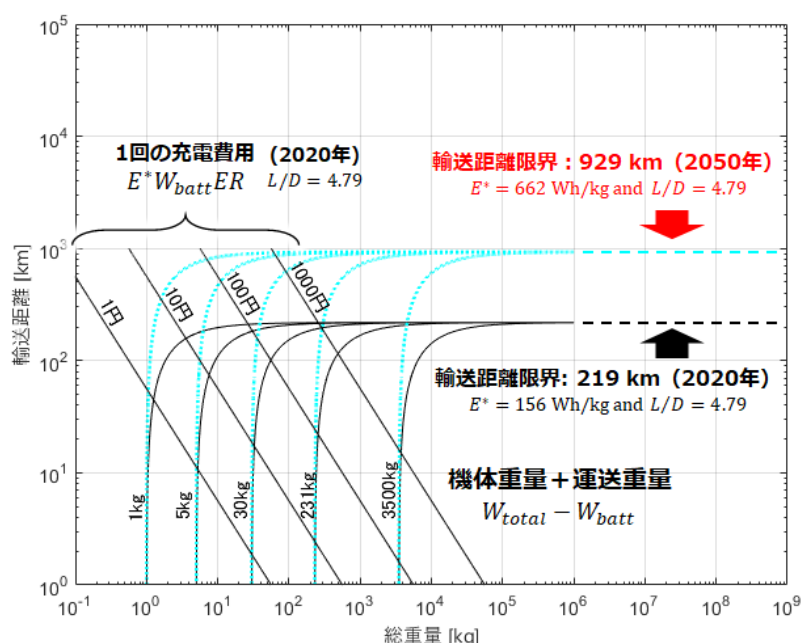


図 A. 14：航続距離と機体総重量の見積もり

A.7 自動高速輸送における機体の運用体制

ドローンでの輸送を効率的、低コストで実現するためには限りなく無人での輸送体制を構築することが寛容である。五島市におけるドローン物流実証実験（2019 年 9 月、2020 年 1 月、2021 年 11 月）時の運航体制はオペレーター2 名、離着陸地点 A,B それぞれに最低 1 名ずつの 4 名以上の体制で 1 日最大 4 回の荷物を届けた。この場合、人件費だけを考えても 1 回の輸送につき 1 人×1 日分の人件費が輸送費に上乗せされる計算となり、輸送費が食品、水などの日用必需品の輸送においては実用的な料金設定とはならない。

これを踏まえ、いかに人が直接介入しない、無人に限りなく近い運航体制を敷くことができるかが今後の技術開発における重要な観点となる。

表 A. 15：ドローン物流周辺の設備整備状況と想定運航体制の関係

	レベル3基本体制	ポート柵あり 立ち入り認証あり	ポート柵あり 立ち入り認証あり	完全自律飛行
運航レベル	レベル3 (補助者なし目視外飛行)	レベル3 (補助者なし目視外飛行)	レベル4 (目視外補助者なし)	レベル4 (目視外補助者なし)
飛行の方法	ルートを指定した自動航行	ルートを指定した自動航行	ルートを指定した自動航行	完全自律飛行 (障害物回避機能含む)
オペレーター	1人	1人	1人	0-1人 (1人で複数台運航が可能)
ポートカメラ・気象観測機	有り	有り	有り	有り
立ち入り管理区画柵	有り	有り	有り	有り
立ち入り者認証機能	無し	有り	有り	有り
立ち入り管理者	各ポート1人	不要	不要	不要

A.7.1 運航オペレーション：1 人のオペレーターが複数機を同時に管理できる体制

1 人のオペレーターが一度に運行管理できる機体の数が増えることによって、効率的な運航が可能となる。ただし、人間の視覚等の能力に依存している間は、管理できる機体の数には限りがある。そこで、ある程度自動で運航を制御する技術を機体に搭載することが肝要である。したがって、搭載、開発すべき技術としては、機体の自動衝突回避機能、完全自動離着陸、無人航空機の航空管制を可能とするシステムである。また、整備すべき環境としては、離着陸のための土地の確保、または屋根部分への着陸を可能とする家屋／建物、空路全体をカバーする機体用の通信網である。

A.7.2 離発着地点：離着陸地点の人員削減

離着陸地点の荷物の搭降載にかかる人員が必要となると、そこに人的コストがかかることと、配送先が降載に対応可能な人材がいる場所に限られる。そこで荷物の離着陸地点での荷物の自動搭載、自動降載機能及び、機体の自動点検機能等は重要な技術となる。したがって、搭載すべき技術としては、荷物の自動搭載や機体の自動点検機である。また、整備すべき環境としては、荷物サイズの規格化である。

A.8 必要となる通信特性とネットワーク構成

A.8.1 五感通信のための情報量と時間知覚

五感を伝送するのに必要な情報量と時間知覚は以下の通りである。

○情報量：

- ・視覚[176]：人の目の解像度は 5 億 7600 万画素（参考：8K は 3318 万画素）
- ・聴覚[177]：可聴域：20 Hz - 20 kHz

サンプリング周波数：40 kHz、量子化ビット数：32 bit とすると、ビットレート：1,280 kbps = 160 kB/s（導出方法：40 kHz × 32 bit = 1280 kbps = 160 kB/s、8 bit = 1 バイト）

○時間知覚[39]：

- ・視覚：30 ms - 40 ms = 25 fps - 33.3 fps（ゲームは 144 fps 程度[178]）
- ・聴覚：3 ms - 5 ms
- ・触覚：10 ms

以上より、視覚の情報量が最も多いため、視覚情報が通信容量を逼迫する最も大きな要因となる。また、聴覚の応答が最も速いので、遅延情報の伝送で違和感が生じる限界が決まると考えられる。したがって、五感伝送のための通信ネットワーク構成としては、遅延に対する感度が高い聴覚情報をドローンなどによる無線回線で伝送し、遅延は比較的許容されるが大容量伝送が必要な視覚情報は、大容量だがルーティングで遅延が大きくなる光ファイバによる地上回線で伝送することが考えられる。すなわち、聴覚情報だけドローンを経由して先に伝送し、視覚情報は光ファイバで伝送する構成となる。

A.8.2 五感通信に必要な通信速度と遅延の導出

本節では、互いに距離が離れた 2 人がバーチャル空間において物理空間と同等の知覚を仮想空間で違和感なく実現するために必要となる通信速度と通信遅延を計算した結果を述べる。ただし、ここではブレインマシンインタフェースがない場合を考える。

視覚情報である 5 億 7600 万画素（1 フレーム）を 24 ビットカラー画像、144 fps で伝送する場合、

$$5 \text{ 億 } 7600 \text{ 万画素} / \text{フレーム} \times 24 \text{ ビット} \times 144 \text{ fps} = 1.99 \text{ Tbps}$$

となる。5G の最高伝送速度は 10 Gbps[179]なので、要求される伝送速度としては約 100 倍となる。また、[180]によると、2040 年ごろには 1 人あたり 1 Tbps の時代が到来すると書かれているため、数値の妥当性も高いと考えられる。

次に、必要な通信遅延を導出する。ここでは、室温における音速は 340 m/s、光速は一定で 3×10^8 m/s とし、情報は光速で伝送できると仮定する。以下では、直線距離で情報伝送が可能な場合と 1 ホップの中継局経由で情報を伝送する場合を考える。

（直線距離で情報伝送が可能な場合：図 A. 15）

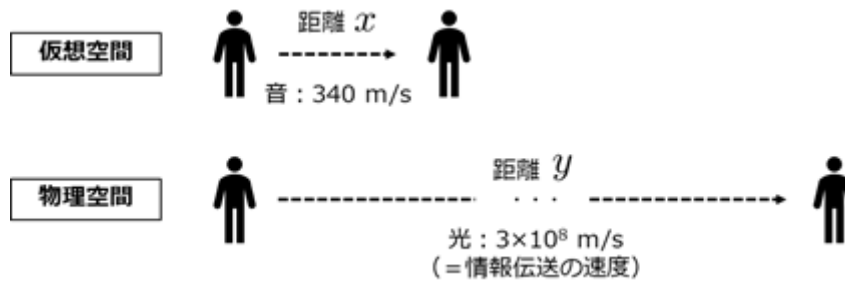


図 A. 15：直線距離で情報伝達が可能な場合

仮想空間において聴覚に違和感がないようにするためには、A.8.1 に示した通り、聴覚の応答が最も早い場合、この距離が遅延による違和感のリミットになると考えられる。すなわち、仮想空間における音の到達よりも、物理空間における音声情報の到達が早くなる必要があり、この条件から、物理空間と仮想空間における 2 人の距離の制約が求められる。したがって、違和感が生じないようにするためには、

$$\frac{\text{仮想空間における距離}}{\text{音速}} \geq \frac{\text{物理空間における距離}}{\text{光速}}$$

を満たす必要がある。この条件が満たされていないと、仮想空間で物理空間と同じように音が伝達されず、音が遅れて届いてしまう。仮想空間における距離 x を、物理空間における距離を y とおくと、

$$\frac{x}{340 \text{ m/s}} \geq \frac{y}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} \quad (\text{式 1})$$

となる。ここで、 $r_{ls} := 3 \times 10^8 \text{ m/s} / 340 \text{ m/s} = 8.824 \times 10^5$ とおくと、この条件は

$$y \leq r_{ls} x$$

と記述できる。この領域は図 A. 16 のように図示できる。

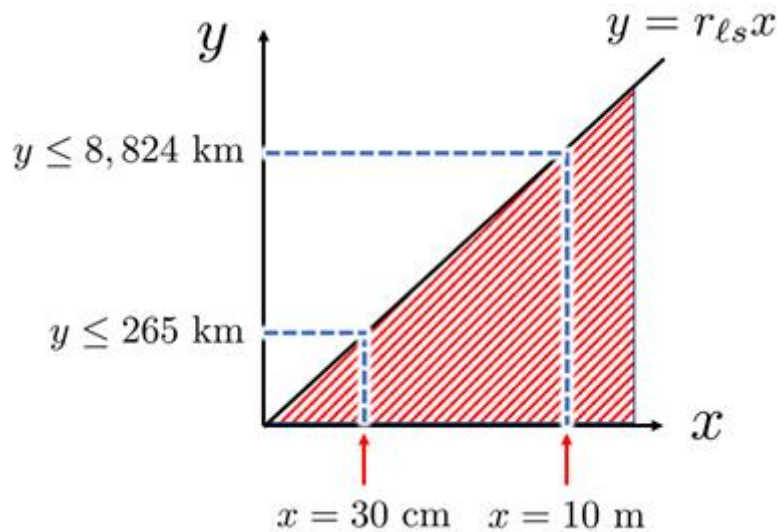


図 A. 16：不等式条件の領域図示（直線距離で情報伝送が可能な場合）

図 A. 16 に示した条件について、以下に例を示す。

例 1：仮想空間において 10 m 離れると、音は

$$\frac{10 \text{ m}}{340 \text{ m/s}} = 29.4 \text{ ms}$$

で到達する。したがって、音の伝達を仮想空間で体感するためには、物理空間で

$$8.824 \times 10^5 \times 10 \text{ m} = 8,824 \text{ km}$$

よりも離れていると聴覚に違和感が生じる。したがって、仮想空間で 10 m 離れて行うアプリケーション、例えばキャッチボールは可能となる。物理空間の距離が 8,824 km 以下であればシステムで補正し、仮想空間で 10 m 離れているような感覚にできる。

例 2：仮想空間で 30 cm 程度離れて実施するアプリケーション（例えば柔道などの近距離スポーツ）の場合、図 A. 16 より、物理空間で 265 km 以内にいないと聴覚に違和感が生じる（東京駅を基準とすると、265 km の範囲は名古屋市、富山市、新潟市あたりまで）。

例 3：地球上で一番遠くの人、すなわち 20,000 km（地球の円周 40,000 km/2）だけ離れている人）とは、バーチャル空間で

$$\frac{20,000 \text{ km}}{8.824 \times 10^5} = 22.7 \text{ m}$$

以上離れて会話しないと聴覚に違和感が生じる。

例 4：リアルなアバターを操作する場合の遅延限界は、自分がいる場所とアバターがいる場所の往復を考えればよい。最も応答が早い聴覚の時間知覚（3 ms）を考慮すると、アバターを操作して遅延を感じなくなるのは、

$$\frac{2 \times \text{物理空間における人とアバターの距離}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 3 \text{ ms}$$

を解いて、450 km になる。すなわち、アバターは自分の位置から物理空間において 450 km 以内にないと違和感が生じる。

（1 ホップの中継局経由で情報を伝送する場合：図 A. 17）

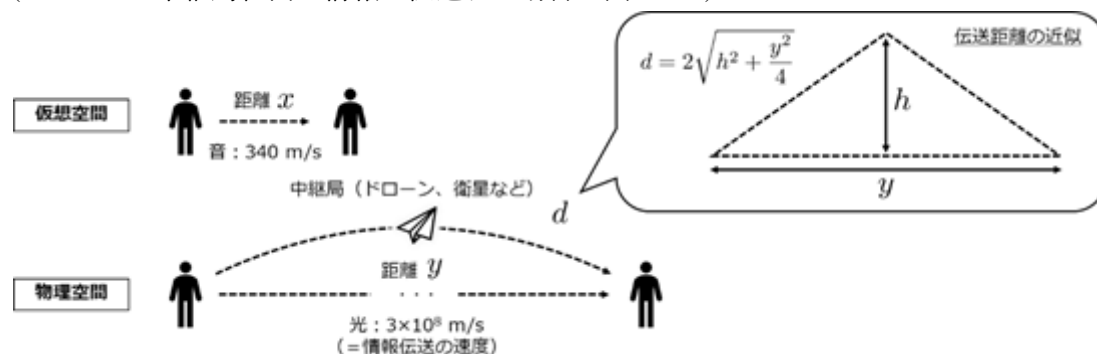


図 A. 17：問題設定（1 ホップの中継局経由で情報を伝送する場合）

次に、1 ホップの中継局経由で情報を伝送する場合を考える。中継局の高度を h 、中継局を経由した場合の物理空間における伝送距離を d とみると、違和感が生じない条件は、

$$\frac{x}{340 \text{ m/s}} \geq \frac{d}{3 \times 10^8 \text{ m/s}}$$

$$d \leq r_{ls} x$$

と表される。ここで、ドローンを介した場合の伝送距離は

$$d = 2\sqrt{h^2 + \frac{y^2}{4}}$$

$$\frac{x^2}{(2h/r_{ls})^2} - \frac{y^2}{(2h)^2} \leq 1 \quad (\text{式 2})$$

となる。この不等式は双曲線を表し、図 A. 18 のように図示できる。ここで、

$$a = \frac{2h}{r_{ls}}$$

は仮想空間で違和感が生じない物理空間における距離の下限を表しており、この距離以下では必ず違和感が生じることになる。中継局の高度が 1 km の場合、 a は 2.27 mm、10 km の場合、 a は 2.27 cm、100 km の場合、 a は 22.7 cm となる。

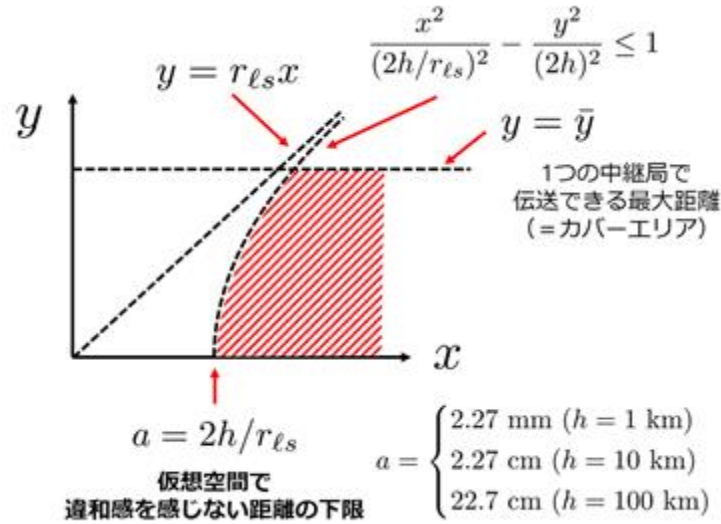


図 A. 18：不等式条件の領域図示（1 ホップの中継局経由で情報を伝送する場合）

本節で導出した関係式より、仮想空間と現実空間における距離と遅延限界の関係を具体的に計算できる。

■「物理空間の要求」から「仮想空間の限界」を導出

・国内最長距離：3,000 km（知床岬灯台～与那国島）で違和感がない距離の下限
（直接通信が可能な場合：伝送距離：3,000 km、遅延：0.01 秒）：仮想空間で 3.4 m（式 1 を利用）

（1 ホップで伝送ができるカバレッジを持つ中継局の場合）：
中継局の高度が 1,000 km の場合（伝送距離：3,606 km、遅延：0.012 秒）：仮想空間で 4.1

m (式 2 を利用)

■「仮想空間の要求」から「物理空間の限界」を導出

- ・仮想空間における会話 (2 m 程度と仮定) のユースケースを仮定
(直接通信が可能な場合) : 物理空間で 1,765 km 以内 (式 1 を利用)
(1 ホップで伝送ができるカバレッジを持つ中継局の場合)

仮想空間で違和感がない距離の下限=2 m とすると、高度は 882 km

中継局の高度が 822 km の場合 : 物理空間で 499 km 以内 (式 2 を利用)

A.8.3 五感通信を実現するために必要な地上回線ネットワーク (視覚情報ベース)

本項では、五感通信を実現するための地上回線ネットワークについて述べる。ただし、A.8.1 で述べたように、大容量伝送が必要な視覚情報を伝送するネットワークと仮定する。

A.6.2 で述べたように、本 MS 目標案が達成された社会における都市間距離は 109.5 km と設定した。ここでは具体的なシナリオを設定し、全員が五感通信をする場合にコアネットワークで必要となる伝送速度について計算した結果を示す。

本項では日本を対象とし、総人口が各 UC (Urban Center) に分散して集まっていると仮定する。日本は 109 の UC が存在し、さらに 2050 年の人口はおよそ 1 億人と推定されている[181]ことから、1UC あたり約 100 万人が住んでいることになる。以下では、2020 年現在の人口合計が 101 万人となる東京都八王子市 (人口 : 57.6 万人、面積 : 186.4km²、人口密度 : 3091 人/km²、世帯数 : 25.3 万世帯、町・丁目の数 : 199) と東京都町田市 (人口 : 43.4 万人、面積 : 71.5km²、人口密度 : 6071 人/km²、世帯数 : 20 万世帯、町・丁目の数 : 186) をサンプルケースとしてコアネットワークの必要容量の計算を進める。

世帯人数を 2.5 人と仮定 (全国平均) すると、五感通信に必要な 1 人あたりの伝送速度は 1.4.3 に示したとおり 2 Tbps なので、1 つの ONU (Optical Network Unit : 利用者側の光回線終端装置) あたり $2 \text{ Tbps} \times 2.5 = 5 \text{ Tbps}$ の伝送速度が必要となる。したがって、OLT (Optical Line Terminal : 電気通信事業者側の光回線終端装置) 1 つあたりの ONU 収容可能数は 128 であるので[182]、1 つの OLT あたり $5 \text{ Tbps} \times 128 = 640 \text{ Tbps}$ を収容できる必要がある。ここで、八王子市と町田市は合計 45.3 万世帯なので、アクセスネットワーク当たりの基地局数を 4000 と仮定 (≒世帯数/ONU 収容数) すると、1 つのアクセスネットワークあたり $640 \text{ Tbps} \times 4000 = 2560 \text{ Pbps} = 2.56 \text{ Ebps}$ が必要である。したがって、コアネットワークでは、2.56 Ebps を伝送できる必要がある (図 A. 19)。ただし、これは 1 アクセスネットワークの必要速度であるため、ネットワーク構造によっては複数のアクセスネットワークを束ねた伝送速度が必要となる。1OLT が収容できる ONU 数やコアネットワークが収容するアクセスネットワーク数によって、コアネットワークに必要な伝送速度は変わる。

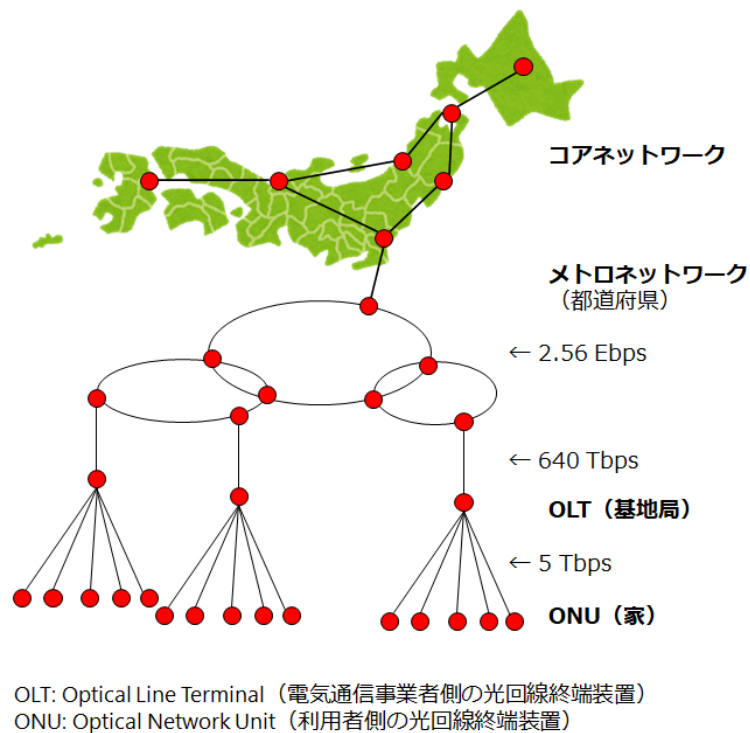


図 A. 19：広域光ネットワークの階層構造

上記で計算した五感通信に必要な伝送速度と、2020 年現在、全員がインターネット通信をする場合の必要伝送速度を比較する。2020 年では、1 世帯あたり 100 Mbps (ベストエフォート型最大) と仮定すると、上記と同様の計算により、コアネットワークでは、51.2 Tbps (×N アクセスネットワーク分) が必要となる。したがって、1 世帯に必要な必要伝送速度を基にすると、5 Tbps/100 Mbps=50 倍の伝送容量が必要となることがわかる。

図 A. 20 に、光エレクトロニクス関連技術のロードマップを示す。この図より、2050 年には、1 リンクあたりゼータビット・km 伝送の実現が見込まれている。ゼータビット伝送が 2050 年に成立し、109.5 km を伝送すると仮定すると、転送速度は

$$1 \times 10^9 \text{ Tbps} \cdot \text{km/link} / 109.5 \text{ km} = 9.1 \text{ Ebps / link}$$

となる。五感通信の必要伝送容量は 2.56 Ebps であり、オーダーが一致しているため、光回線の観点から見て実現性が高いと考えられる。

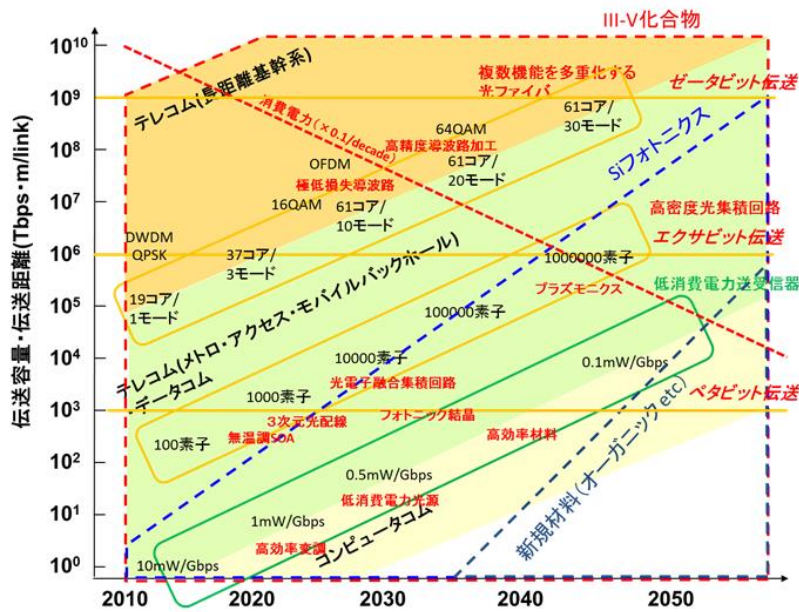


図 A. 20：光エレクトロニクス関連技術ロードマップ[183]

A.8.4 五感通信を実現するために必要なドローン中継ネットワーク（聴覚情報ベース）

本項では、五感通信を実現するためのドローン中継ネットワークについて述べる。ただし、A.8.1で述べたように、遅延に対する感度が高い聴覚情報を伝送するネットワークと仮定する。

同一のメトロネットワーク内、アクセスネットワーク内での通信であれば、ROADM（Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer）によるオール光スイッチでのルーティングでありルーティングはほぼ変わらないため、遅延の影響は 0.5 ms 以下（メトロネットワークの直径は約 100 km 以内）となる。また、ネットワーク圏から出の場合にはルーターによるパケット交換が生じるため遅延が発生する。特に、OLT-ONU 間は安価な設備機器であり、周波数共用と時間分割を利用する通信方式を採用するため遅延が大きく生じる。以上のことから、アクセスネットワークに近い基地局に直接通信した方が遅延を抑えられる可能性が高い。

アクセスネットワークの局舎を 40（≡八王子市と町田市の町・丁目の合計数の 1/10＝385/10）と仮定すると、局舎の密度は平均 6.5km²/台（＝八王子市と町田市の合計面積 257.9 km²/40 局舎）となる。すなわち、一辺が約 2.5 km 四方の領域を 1 つの局舎がカバーする構成になる（図 A.21）。

遅延を聴覚の時間知覚である 1 ms 以下にしようとする場合、電波のマルチパスとの兼ね合いにより、5G NR（New Radio）規格では 1 フレーム 10 ms、1 タイムスロット 1 ms と決められているため、57 GHz 以下の電波による上述の遅延要求を満たす信号伝送は難しく思える。そのため、遅延を 1 ms 以下に遅延を抑えるには、よりサブキャリアスペースが大きく、直進性が高くマルチパスの影響を受けにくい空間光通信が有効な選択肢であると考えられる。

空間光通信でのドローン中継の場合、ドローンの高さを現在の法規制に基づく 150 m、ビーム拡がり角を 45 度程度とすると、約 300 m×300 m をカバーできる（図 A. 21）。また、これ以上のドローン間隔は、姿勢制御安定性とビーム制御、レーザ光拡散の点で現実的ではないと考えられる。ここで、ビーム拡がり角を 45 度程度と仮定したのは、角度が浅くなるほど、実効的な受光面積が取れず S/N が悪くなり、スループットが低くなるためである。

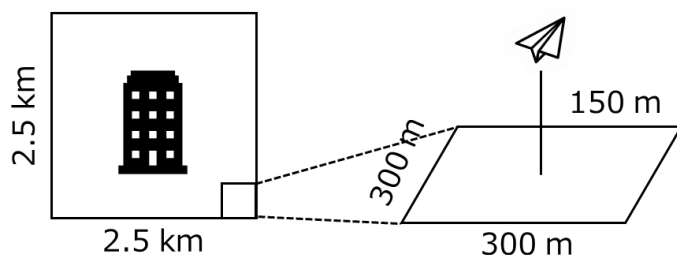


図 A. 21：アクセスネットワーク局舎とドローンのカバレッジの関係

これにより、ドローンに必要な通信容量を求める。約 300 m×300 m をカバーできるドローンで一辺が約 2.5 km 四方を埋めるためには 81 機のドローンが必要となる。すなわち、ドローンの必要合計数は、

$$\text{合計面積 } 257.9 \text{ km}^2 / \text{1 局舎のカバー面積 } 6.5 \text{ km}^2 \times 81 \text{ 台} = 3,214 \text{ 機}$$

である。すなわち、ドローン 1 機あたりのカバー人数は

$$\text{人口 } 101 \text{ 万人} / 3,214 \text{ 機} = 314 \text{ 人/機}$$

となり、ドローン 1 機あたりが音声データ（1.4.2 で計算した 1280 kbps = 1.28 Mbps）を送るために必要通信容量は

$$314 \text{ 人/機} \times 1.28 \text{ Mbps/人（音声データ）} \times 2 \text{（双方向）} = 804 \text{ Mbps/機}$$

となる。

一つの基地局がカバーする人数は、

$$\text{人口密度 } 3,914 \text{ 人/km}^2 \text{（八王子市と町田市の合計）} \times \text{基地局のカバレッジ } 6.5 \text{ km}^2 = 25,441 \text{ 人}$$

である。25,441 人の音声データを集約して基地局に直接届ける必要があるが、ホップして集約すると一番基地局に近いドローンに通信トラフィックが集中する。その場合、そのドローンが収容すべき伝送速度は

$$25,441 \text{ 人} \times 1.28 \text{ Mbps/人} \times 2 \text{（双方向）} = 65 \text{ Gbps}$$

である。また、4 機のドローンで 1 局の基地局に伝送する場合、

$$65 \text{ Gbps} / 4 = 16.3 \text{ Gbps}$$

となる。例えば、4 方向と同時に通信できるドローン 100 機を 10 機×10 機として基盤の目のように配置する場合、現在では図 A. 22 のようなネットワークポロジが理想的であることが知られている。

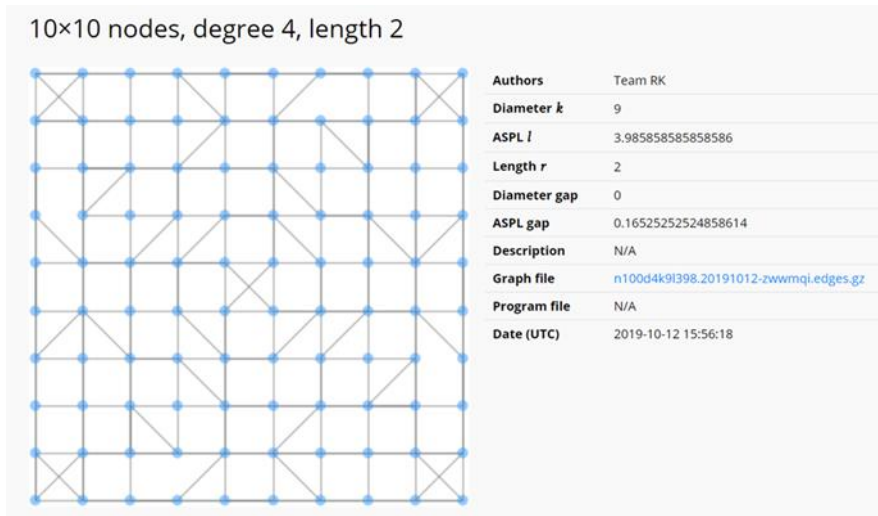


図 A. 22：ノード数 100、腕の数が 4 つの場合の最適トポロジー[184]
(注意：ASPLgap が 0 でないため、大域的最適解ではない)

住居がノードとして通信をする場合、 6.5 km^2 の世帯数はおよそ 13,000 世帯であるが、簡単のために 10,000 世帯とする。1 機のドローンが 4 つ光通信端末を有し、4 方向同時に通信できるような場合、図 A. 23 に示すようなトポロジーにより、最大 99 ホップで伝送できる。最大ホップ数が 99 とすると、1 ノード当たりの遅延は最大で $10 \mu\text{s}$ 以下 ($\doteq 1 \text{ ms}/99$) に抑える必要がある。ノード数が 9344 として、ドローン 1 機が 6 つの腕を持つ、すなわち、6 方向同時に通信できるような場合、図 A. 24 のトポロジーにより、最大 7 ホップで伝送可能となる。この場合、1 ノード当たりの遅延は $143 \mu\text{s}$ ($\doteq 1 \text{ ms}/7$) まで緩和されることになる。これらホップ数を最小化するネットワークトポロジーは、疑似アニーリング法に基づいたアルゴリズムにより導出されるため、今後の量子コンピューティングの発展により、動的にトポロジーが変化するにおいても最適なトポロジーが提供できるようになる可能性がある。

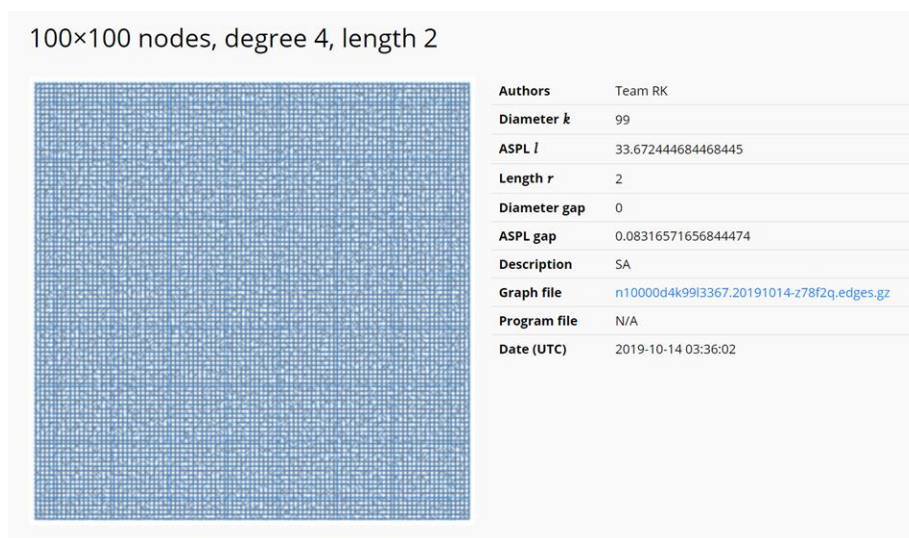


図 A. 23：ノード数 10,000、自由空間光通信端末を 4 つ搭載した場合の最適なネットワークポロジ－[185]

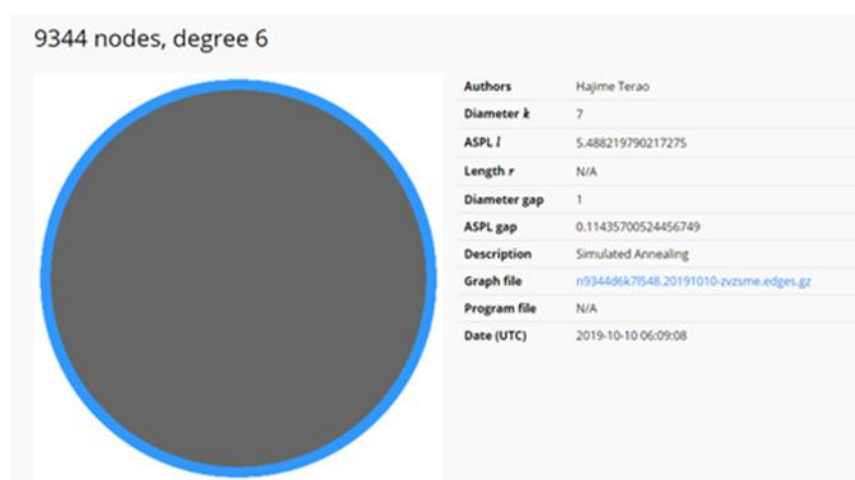


図 A. 24：ノード数 9344、自由空間光通信端末を 6 つ搭載した場合の最適なネットワークポロジ－[186]

A.9 居住空間内の冷蔵庫の検討

一般的に冷蔵庫は主に電気信号の入力からコンプレッサを動かすことで動力を生み出し、冷媒を状態変化させている。冷媒の状態変化時に吸熱と放熱が伴い、冷却回路に高温部と低温部の温度ムラを発生する。低温部で空気を冷却することで冷気を作り出し、冷気を循環させることで庫内の食品を効率的に冷やしている。しかし更なる冷却の効率化を考えた際、庫内の大きさが固定されているので、冷気循環の最適化、もしくは入力電気信号の ON/OFF のみでしか効率化する手立てがない。冷蔵庫の大きさが固定されていることを、幾つものライフイベントが起こりえる長期的視点でみても時として無駄になることが多く、

不便利であると言える。そのため IPA 技術では、低温のバイオポリマー（生体高分子）ジェルを物理的に接触させることで食品を冷却させる冷蔵庫を実現する[187]。容易に変更させるジェルを使用することで、冷蔵庫の大きさが固定させず、その状況に合わせた最適化な大きさを食品を冷却することを可能とする。またジェルにより食品の周囲を取り囲むことで、食品の匂い移りを防止する役割も持つ。今後の研究課題として、バイオポリマージェルによる冷却性能の検証、またジェルが食品に直接触れるので人の身体に悪影響がないかの安全性を検討していく必要があるだろう。

A.10 水道インフラのコスト削減効果

A.10.1 水道インフラの現状と課題

本 MS 目標案では、独立した水インフラの構築が必要となる。ほとんどの先進国においては、固定の居住地に上下水道インフラがくまなく整備されており、いつでも安全な水にアクセスすることができる。日本国内における下水道の管路延長は、平成 29 年度末時点で 47 万 km にもなり、日々メンテナンスや更新工事が行われている。一方で、高度経済成長期に整備した水道管の老朽化問題や耐震化対応など、利便性を支えるインフラの維持管理などに関する課題を抱えている自治体や事業者も存在している。特に、日本国内の上下水道事業は極めて公益性が高いため、地方自治体の水道局が公共事業として一手に引き受けているが、その事業採算性は厳しいものがあり[188]、少子高齢化や都市部への人口流出により税収が減少する中、その持続可能性については疑問が残る。

A.10.2 水道インフラの維持管理コストの削減効果について

IPA 技術の普及に伴い、これまで固定インフラとして「面」で維持管理がされていた水道設備が「点」で供給されるようになった場合、これまでと同等の設備を維持する必要はなく、IPA 生活者は、既存の水道ネットワークから切り離されると考えられる。そこで、IPA 生活が浸透した場合、水道インフラの削減による経済的な効果を調査した。Appendix A.2 の Urban Centre (UC) に関する調査において、UC 間隔および人口密度が標準的であった島根県松江市をモデルとした。なお松江市は、財務省が各地方自治体等に提供している「維持管理費試算ソフト」[189]の試算結果を公表しており[190]、その結果を採用している。松江市では、今後 40 年間で市内の上下水道の維持管理に、

表 A. 16 の維持管理費が必要であると試算している。

表 A. 16：松江市の上下水道維持管理費（[190][191]より情報を引用して作成）

項目		保有状況	維持管理費		建設費 (維持管理 × 7/3)	想定削減額	
			今後40年間の 総額	年平均		額	算出仮定
道路	一般道路	10,812,434 m ²	1355.4億円	33.9億円	3163億円		
	自動車専用	2,911 m ²					
橋梁		84,662 m ²	404.3億円	10.1億円	943億円		
上水道		933,660 m ²	821.2億円	20.5億円	1916億円	-227億円	インフラ投射 技術により 80%削減
下水道		952,799 m ²	1037.6億円	25.9億円	2421億円	-287億円	インフラ投射 技術により 90%削減

IPA 普及によって、少なくとも上水道および下水道は、既存設備を縮小させ維持管理費を削減することができると考えられるため、40 年後に IPA が世帯 8 割に普及したとして経済効果を試算した。IPA による新規建設費の抑制や自然災害に対する被害分散などの副次的効果があるが、単純に上下水道の維持管理費の削減だけで 40 年間で約 514 億円の削減効果があるという結果となった（

表 A. 16)。なお普及割合は後半に伸びるものと仮定し、経過年数の二次関数として年間維持管理費を図 A. 25 のように算出している。

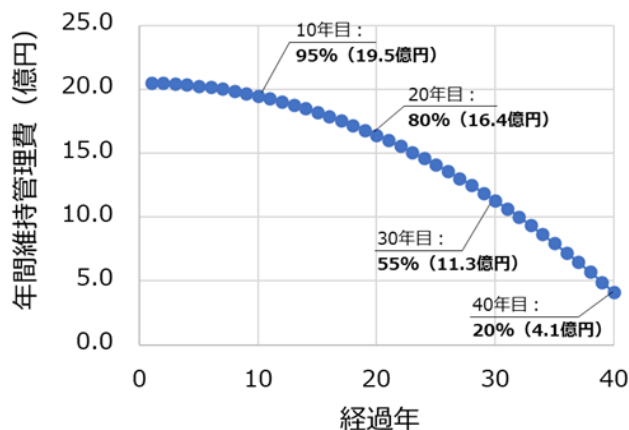


図 A. 25：松江市で IPA 技術が世帯の 8 割に普及したときの上下水道維持管理費用

これまでの水道インフラ整備は、効率的にサービスを提供するために、一定の規模の人口が一定期間定住することを前提に行われてきたが、人口減少下においては、水道インフラを既設のネットワークに接続せずに、合併処理浄化槽を設置するなど個別処理に切り替えた方が、全体としてコストが安くなるという考え方も存在する（図 A. 26）。

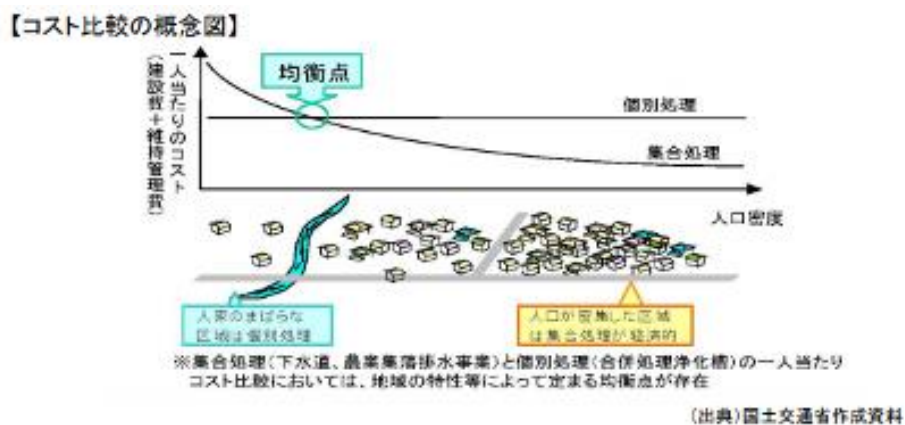


図 A. 26：コスト比較の概念図[192]

IPA 技術は、利用者の生活に自由度を与えることが期待されているが、水道や道路など既存のインフラを極力不要にすることで、現在課題となっている予算不足や人手不足による維持管理の限界という課題に対する一つの解を与えるものと考えられる。

A.11 社会像の達成シーンに対応した MS 目標案のマイルストーン、研究開発テーマ、社

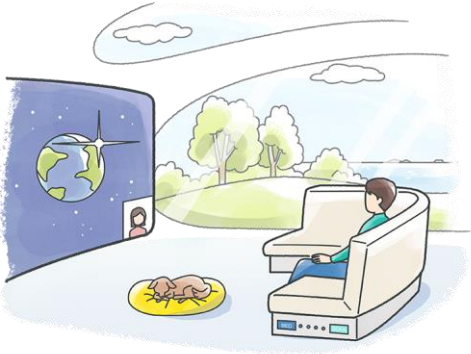
会にもたらす効果

I.2 に示した達成シーンと紐づけてイメージされる技術的マイルストーン、研究開発テーマ、社会にもたらす効果を以下の表 A. 17 にまとめる。これらを集約したものが、III.2 にまとめられている。

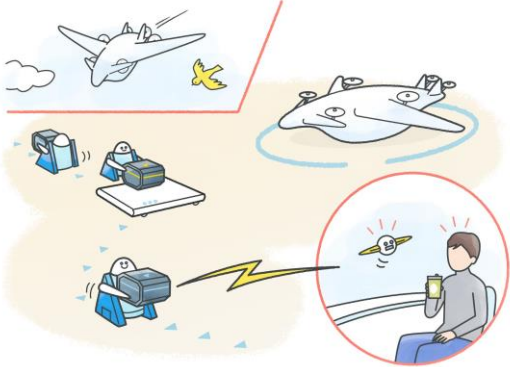
表 A. 17：達成シーンと紐づけてイメージされる技術的マイルストーン、研究開発テーマ、社会にもたらす効果

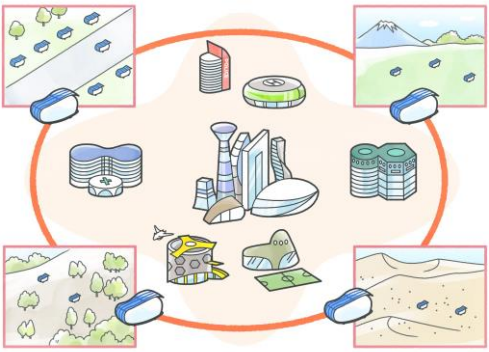
	①マイルストーン 【2030 年】 ・電力や水の供給が土地と切り離され、独立している 【2040 年】 ・電力等の完全自給自足機能の追加により環境にやさしい暮らしができる 【2050 年】 ・家の外観を変化させて、周囲の環境に溶け込む
②研究開発テーマ 【2030 年】 ・透明太陽光パネルの高効率化の開発 【2040 年】 ・創蓄省エネシステムの構築の開発 【2050 年】 ・時間や場所、シーンに合わせ外観を変化させる光学迷彩システムの開発	③社会にもたらす効果 【2030 年】 ・特定の地域・環境を除き電力と水のインフラ独立でき、より人が移動しやすくなる 【2040 年】 ・過酷な地域・環境下でも電力・水の自給自足の暮らしを可能にする 【2050 年】 ・家屋の外観がどんな場所にも馴染み、その土地の景観を崩さない暮らしができる

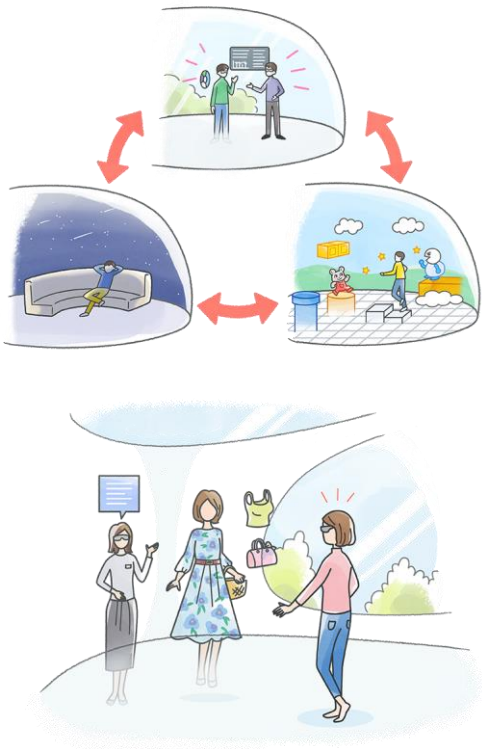
	①マイルストーン（直接的な技術の結果） 【2030 年】 ・お風呂や洗濯等の比較的きれいな生活排水（BOD 5mg/L 以下）を水道水（BOD 3mg/L 以下）程度に再生できる（再生効率を 99%として使用する水のうち 82%を再生によりまかなう）。循環させ、料理や飲料水として利用することができる ・生ごみや有毒ガスを出さない有機物ゴミを各世帯で完全処理できる。 【2040 年】 ・尿や汚い生活排水（BOD 5mg/L 以上）を循環させて、水道水程度に再生できる（再生効率を 90%として、使用する水のうち 97.5%を再生によりまかなう）。料理や飲料水として利用することができる ・無機廃棄物やプラスチック等を世帯単位で再利用できる 【2050 年】 ・再生対象水を増やすことにより、生活に必要な水を全て循環により賄うことができる ・有用な廃棄物はすべて資源化され、廃棄物の循環／輸送システムが最適化されている
②研究開発テーマ 【2030 年】 ・低 BOD 排水の高効率再生システム ・水の殺菌／貯蔵技術 ・輸送／循環処理のシステム化 ・世帯単位での廃棄物の資源化技術 【2040 年】 ・高 BOD 排水の高効率再生システム	③社会にもたらす効果 【2030 年】 ・一部の水再生や廃棄物処理が世帯単位で実現し、人口減少地域等一部地域において普及 【2040 年】 ・一部の水や廃棄物処理を輸送に頼るが、大半は世帯内で完結し、大都市以外に普及

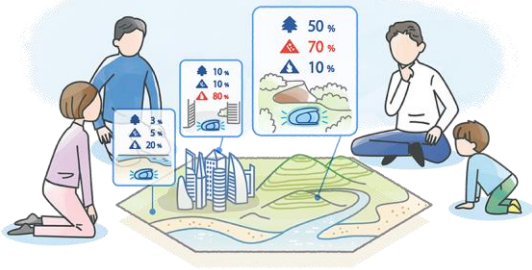
・大気／雨水／ゴミ等のサステイナブルな水再生の確立 ・排水水質モニタ技術 【2050 年】 ・資源循環の最適化及び自動自律化 ・リサイクル可能な素材による生活構築	【2050 年】 ・いつでもどこでも必要な分量の水が手に入る ・好きな時に好きなところへ移住できる
	①マイルストーン 【2030 年】 ・映像を狭域に映し出すデバイスの種類が増える 【2040 年】 ・実際にある景色を部屋の広域に映し出し、視覚的に楽しむ 【2050 年】 ・映し出した景色に基づいた風や香りを触覚や嗅覚に伝送し、その場にいるような体験ができる
②研究開発テーマ 【2030 年】 ・小型の多様な映像デバイスの開発 【2040 年】 ・景色をよりダイナミックに見せる照明・音響技術の開発 【2050 年】 ・五感体験空間システムの開発	③社会にもたらす効果 【2030 年】 ・生活空間への映像投影により、狭い空間によるストレスを緩和させる 【2040 年】 ・外観をリアルに生活空間の中に取り込むことでより、その土地の独自外観を居住空間内で楽しむことができる 【2050 年】 ・生活が外部の意図しない影響（騒音・光害など）を受けなくなっている ・外の景観を外部の意図しない影響を受け

	ずに時間、気分に合わせて楽しめる
	①マイルストーン 【2030 年】 ・遠隔のロボット操作に触覚の通信が加わる ・味覚、嗅覚のセンシング技術が完成 ・MR 技術により立体ホログラムが実現 ・無意識に快適と感じられる空間の創出 【2040 年】 ・視覚、聴覚に加え、触覚の通信が完成 ・味覚、嗅覚のアクチュエーション技術が完成 ・タッチ空間機能が実現 ・個々の創造性を最適化する空間創出 【2050 年】 ・五感通信が実現され、対面と同じクオリティで仕事ができる ・遠隔地でもその場にいるような感覚で共同作業ができる ・いつでも一次情報に触れられる環境創出
②研究開発テーマ 【2030 年】 ・高臨場感音響技術 ・味覚・嗅覚センサの小型化・低廉化技術 ・感覚間相互作用の基礎研究 ・認知不可能な領域の行動と生理的反応の因果関係解明 【2040 年】 ・味覚・嗅覚アクチュエータの小型化・低廉化技術 ・五感アクチュエータの安全性評価指標の	③社会にもたらす効果 【2030 年】 ・どんな環境下でも農業など第一次産業が行える ・通勤圏が国土全域まで広がり選択肢が増える 【2040 年】 ・ほとんどすべての職種で仕事と場所は関係なくなり、勤務地という概念がなくなる ・クエスト的に様々な仕事を割り当てることができる

確立および標準化 ・創造性の仕組みの理論的解明 【2050 年】 ・感覚間相互作用に基づいた五感再生技術 ・一次情報とそれに対するデザイナーの感じ方の因果関係解明	【2050 年】 ・すべての仕事が遠隔でできる ・離れている場所で仕事をすることを雇用する側が当たり前のことだと受け入れている
	①マイルストーン 【2030 年】 ・輸送機の無人化が進む ・輸送現場のロボットによる無人化が進む。輸送機往来の監視もロボットが担う ・現場作業ロボット及び無人機は遠隔操作でどこからでも業務が可能 ・シリーズハイブリッドなど内燃機関を用いて航続距離は達成 【2040 年】 ・現場作業ロボットが自律化 ・無人輸送機が天候などに左右されなくなり、輸送システムの完全無人化が進む 【2050 年】 ・バッテリー性能向上により完全電動全天候輸送が実現する ・大半の無人輸送機が自律化し、完全自動輸送が主流となる
②研究開発テーマ 【2030 年】 ・遠隔通信技術 ・無人輸送機の空力性能向上 【2040 年】 ・自律制御ロボットの研究開発 ・輸送機の衝突回避や天候に左右されない	③社会にもたらす効果 【2030 年】 ・超遠隔でロボットや輸送機の操作が可能となるため、人は場所を選ばずに業務が可能となり、業務のどこでも化が達成される 【2040 年】 ・現場作業ロボットの自律化が進み、人に

制御技術 【2050 年】 ・垂直離着陸技術 ・運航管理システム ・完全電動全天候化（バッテリー性能向上）	とってロボット操作の負担が軽減され、心と時間にゆとりが産まれる 【2050 年】 ・オンデマンド輸送による輸送件数が増加し、どこに住んでいても迅速な輸送が可能となり、住む場所を問わず都市の便利さを享受できるようになる
	①マイルストーン 【2030 年】 ・脱炭素の取り組みが加速する ・都市の一部地域が再生可能エネルギーのみで安定的に賄えるようになる ・街の随所に空飛ぶクルマの離発着場が整備される 【2040 年】 ・ガソリン車が姿を消す ・自動陸送と自動航空輸送が普及し始める 【2050 年】 ・再生可能エネルギーと水素を活用したシステムの個人での利用が実現 ・地球上のあらゆる場所でエネルギーが自給自足できる
②研究開発テーマ 【2030 年】 ・大容量で効率的な蓄電技術の開発 ・既存建物や既存市街地への離発着場の整備手法 【2040 年】 ・化石燃料に頼らないモビリティの進化 ・無人機の管制、安全確保のための技術	③社会にもたらす効果 【2030 年】 ・化石燃料への依存が激減し、エネルギーを貯蔵して使う社会が到来する 【2040 年】 ・陸上輸送と航空輸送の併用で、いつでも好きな時に好きな場所に高速で移動することができる

【2050 年】 ・ P2G を利用した持ち運びできる蓄電技術の開発 ・ 水素を活用した輸送機等の開発	【2050 年】 ・ 各家庭はエネルギーを自給自足で賄えるようになり、一部の大型工場などを除いて、電力がオフグリッド化される
	①マイルストーン 【2030 年】 ・ 視覚、聴覚を 3D で再現するルームができる ・ 味覚と嗅覚の一部は伝送できる ・ 仕事部屋、リラックス部屋、ゲーム部屋の切り替えがマニュアルで変更できる ・ 買い物についてはサイバー空間上で試着ができる 【2040 年】 ・ 味覚と嗅覚の大部分は伝送できる ・ 店員の姿と自分の姿が立体投影され、コミュニケーションができる ・ 触覚の伝送により、服の肌触りや質感が確かめられる 【2050 年】 ・ 五感通信が実現され、仕事部屋、リラックス部屋、ゲーム部屋など場の切り替えが意識することなく可能となっている
②研究開発テーマ 【2030 年】 ・ 触覚情報の伝送精度の向上 ・ 味覚・嗅覚センサの小型化・低廉化、高感度化、高ダイナミックレンジ化 ・ 感覚間相互作用の基礎研究 【2040 年】 ・ 高い応答速度性と多点制御性を兼ね備えた触覚デバイスの開発	③社会にもたらす効果 【2030 年】 ・ 遠隔であっても現実感の高い会話が可能になる ・ 距離に関係なく多様な商店・サービスにアクセス可能で、必要な時に必要な商品、サービスが入手可能 【2040 年】 ・ 通勤圏が国土全域まで広がり選択肢が増

・味覚・嗅覚アクチュエータの小型化・低廉化、再現性の高度化 ・五感アクチュエータの安全性評価指標の確立と標準化 【2050 年】 ・感覚間相互作用に基づいた五感再生技術	える ・都市部やそれ以上の高速通信 ・仮想現実でカフェや酒場のようなコミュニティが実現している。 【2050 年】 ・生活レベルを変えずに、都市部、山中、砂漠、海中どこでも生活ができる ・どこに住んでいても、遠隔でやりたい仕事や受けた教育を受けられる ・離れた場所においても偶然性が担保された出会いの場が物理空間／仮想空間ともに提供されている
	①マイルストーン 【2030 年】 ・洪水・土砂災害・高潮・津波のリスク情報、道路防災情報、土地の成り立ちについてのハザードマップが完成 ・複数の災害が同時多発的に発生する場合のリスクを検討できる 【2040 年】 ・地上 IoT センサや高度な観測機器及び衛星観測のデータを用いて、台風やスコール等の情報が追加 ・数時間～数日先のエリアごとの災害発生確率が推定できる 【2050 年】 ・あらゆる場所の災害リスクが集約され、共有できる統一プラットフォームとサービスが連携している
②研究開発テーマ 【2030 年】 ・複数の災害シミュレーションを組み合わせ	③社会にもたらす効果 【2030 年】 ・住む場所に応じてきめ細かな災害発生情

せることで、特定の土地の災害リスクを定量的に評価するシステムの開発 【2040 年】 ・大量のセンサ類の情報を集約し、生活者の居住場所において発生する災害を予測、情報提供を行う技術の開発 【2050 年】 ・災害状況を都市のデジタルツイン上にリアルタイムで再現し、救助や支援が必要な場所に駆けつける体制の構築	報・予報が提供される 【2040 年】 ・ハザードマップを意識しなくても土地の選択時に自動的に災害リスクに関する情報が得られる 【2050 年】 ・広域であっても高速に駆けつける警察・消防・救急
---	--

A.12 国際ワークショップ

社会像が我が国に特化したものになると、付随する技術を商品として展開する市場が小さくなって高コストになってしまう。そこで、提案する社会像の世界各国での受容性について調査するために、世界六大州（南北アメリカ大陸・欧州・アフリカ大陸・アジア・オセアニア）から人口比を考慮しつつ満遍なく集めた人と、日本国内各地から募集した一般の日本国籍の人を対象に、国際ワークショップを開催した。

A.12.1 国際ワークショップ概要

(a) 開催日時：4 月 25 日（日）10:00-12:00

(b) 開催形態：Zoom および Miro（オンラインホワイトボード）を用いたオンライン開催

(c) 参加者：23 名（表 A. 18、表 A. 19、表 A. 20 に詳細を示す。2050 年に現役世代である世代を中心にするため、参加者の年代は 20 代 30 代を主体にした）

当該ワークショップでは、日本語 1 セッション、英語 2 セッションの合計 3 セッションを設け、冒頭で本 MS 目標案に関する提案の概要とコンセプトを紹介したのちに、ファシリテーション専門のファシリテーターと、議論をリアルタイムで図にするグラフィックレコーディング[193]専門のグラフィッカーによる進行で意見の聴取を行った。

表 A. 18：日本語セッション参加者構成

No.	国籍	性別	年代	職業
1	China	F	20	研究職
2	Indonesia	M	20	会社員

3	Japan	F	20	IT コンサルタント
4	Japan	F	20	Dance instructor
5	Japan	F	30	自営業
6	Japan	F	20	会社員
7	Japan	M	20	Web プログラマ
8	Japan	F	20	Pharmacist

表 A. 19：英語セッション#1 参加者構成

No.	国籍	性別	年代	職業
1	Japan	M	40	fragrance company as head of development
2	Indonesia	F	20	学生
3	Zambia	F	30	学生
4	Colombia	M	20	学生
5	United States	F	30	NGO
6	Italia	M	30	研究職
7	New Zealand	M	50	大学教員

表 A. 20：英語セッション#2 参加者構成

No.	国籍	性別	年代	職業
1	Japan	M	30	Video editor
2	Indonesia	M	30	engineer エンジニア
3	Spain	F	30	engineer エンジニア
4	United States	M	20	Teacher in English 英語教師
5	Malaysia	F	30	Researcher 研究職
6	Russia	F	30	Artist アート
7	New Zealand	F	20	Student 学生
8	India	F	20	Student 学生

A.12.2 国際ワークショップの成果

ワークショップ参加者がワークショップ自体を 5 段階（5 が最良）で採点した事後アンケートでは平均 4.48 点と高評価を得た。また、ワークショップ中および事後アンケートに

において本提案は非常に好意的な受け止め方をされていた一方、実装で生じうる社会的な課題についても意見を得た。

(a) それぞれのセッションの特徴的な意見

各セッションにおいて、参加者の経験・出身地の社会課題等を踏まえた意見が多く出された。以下に主な意見を示す。

① 日本語セッション

[メリット]

- ・居住地域によって就業機会や都市のリソースへのアクセスが制限されている社会的弱者のサポートにつながる。
- ・インフラが未発達な国、地域へ適用すれば、新規インフラ敷設にかかる障壁を下げる事が可能。
- ・趣味や研究対象に関連する場所の近くに住むことが可能

[デメリット]

- ・コミュニティとのつながりが消え、孤独死のリスクを助長する。
- ・IPA を利用できるひととそうでない人の格差が生じる。
- ・災害時・救急時に救助、支援をしてくれるのが誰か、所掌が曖昧になる。

② 英語セッション#1

[メリット]

- ・同じ価値観を持つ小規模なグループを形成することでつながりを強化できる。
- ・土地の占有を減らし、より平等な社会の実現につながる。
- ・島国では都市のある島とそれ以外の格差が大きく、是正につながる。

[デメリット]

- ・コミュニティを失い、アイデンティティを失う可能性がある。
- ・社会的セーフティネットの所掌はどうなるか、またどのように機能させるか。

③ 英語セッション#2

[メリット]

- ・分散型農業を可能にし、様々な形態の土地利用を可能にする（集中農業からの解放）
- ・砂漠のような不毛地帯の活用が可能

[デメリット]

- ・誰もが自然に踏み入ることを可能とし、環境破壊につながりうる。
- ・個々の移動/居住を誰がコントロールするのか。

(b) 全体として対応すべきと考えられる意見

- ・五感を共有する通信手段の確立

いずれのセッションにおいても、IPA の実現によりコミュニティの喪失や人間関係の希薄化の可能性が指摘された。IPA 技術の社会受容性を高めるために、実際に対面で接しているかのようなコミュニケーションを可能にする通信手段をパッケージに含めることが必要と考えられる。また、このような手段は、遠隔地での医療や教育を実現する上でも求めら

・行政のあり方の検討

(c) グラフィックレコード (参考)

[illegible]

図 A.27：日本語セッショングラフィックレコーディング

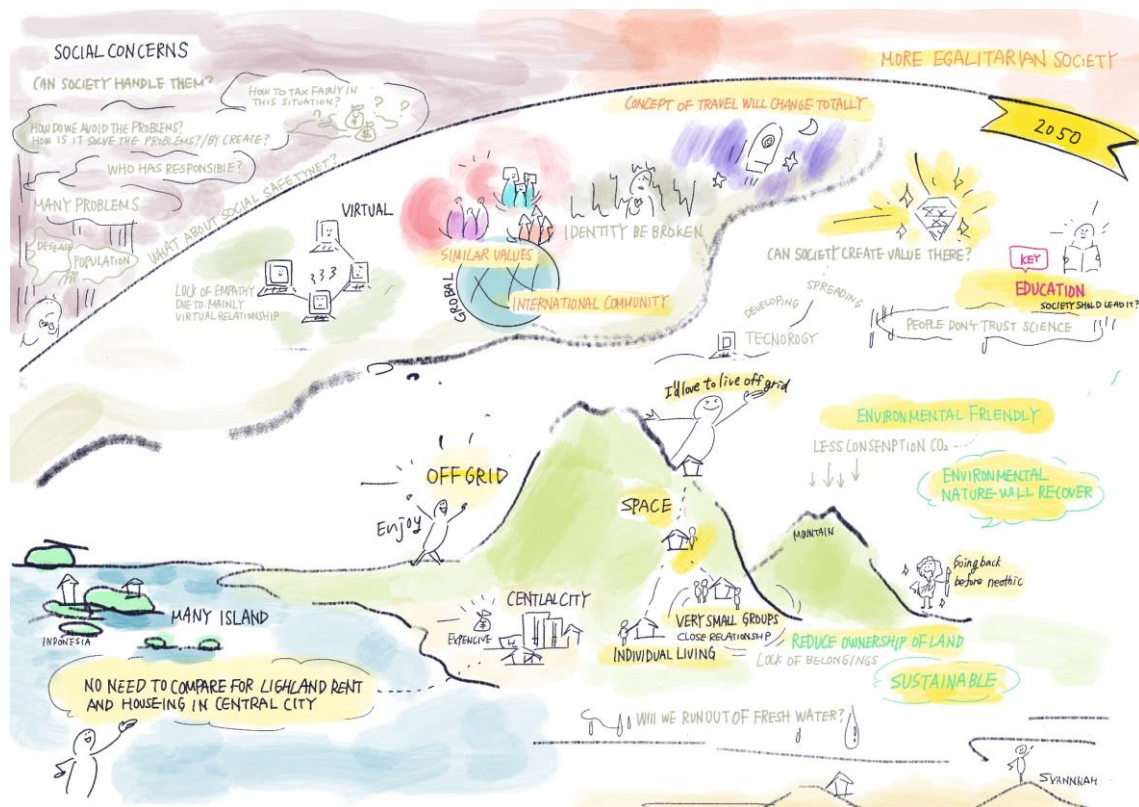


図 A. 28 : 英語セッション#1 グラフィックレコーディング



図 A. 29 : 英語セッション#2 グラフィックレコーディング

A.12.3 結論

初対面の参加者同士のワークショップにもかかわらず活発な意見交換が行われ、各参加者の出身地の状況を反映した意見を集約できたことから、大変有意義なワークショップとなった。ワークショップにおいて参加者から指摘のあったメリットを最大化する検討を行うとともに、デメリットの解決策などを本チームの検討内容に反映した（III.5 参照）。

A.13 本 MS 目標案が達成された社会の受容性を高める行政サービス

II、III でも述べたが、本 MS 目標案を実現する技術の社会実装においては、個人の生活様式が大きく変容し、生活に密着した行政サービスに対するニーズがより多様化・高度化することが予見されるため、行政側も大きなシフトチェンジを要する。そこで、現在提供されている市民向けの行政サービスを「毎日の生活に不可欠なもの」「安心・安全な生活のために必要なもの」「生活維持に必要なもの」「生活のレベル向上に必要なもの」「生活の障壁を取り除くもの」「税金、証明書等の行政サービス」にそれぞれ分類した（図 A.30）。

そのうえで、動的生活下で生じる不安要素を以下の通り整理した（図 A.31）。動的生活下では、地域のボーダレス化・個人化が進むことで孤立感が深まり、個人の力では処理できない問題が生じる恐れがある。行政サービスによる創発的なコミュニティづくりや犯罪抑止環境づくりが求められる。

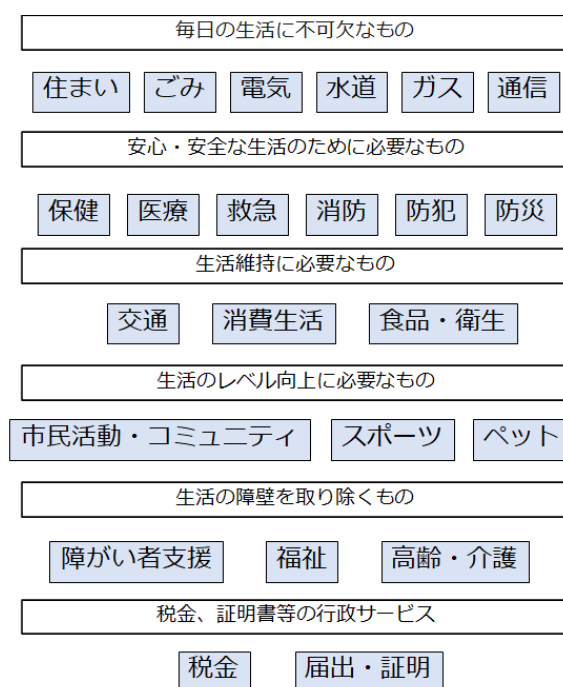


図 A.30：行政サービスの分類

コミュニティ形成 ・家族・友人との連絡手段の確保 ・周囲に住んでいる人々の状況確認 ・自分自身や子供のコミュニティ ・地元民と移住民の差 ・ローカルな不文律 ・精神的な安定 ・地域文化の継承	行政サービス管理 ・行政サービスの役割分担 ・サービスが均一かどうか ・警察、消防、救急の管轄地域
自己位置の特定 ・プライバシー保護 ・個人識別 ・郵便等の送付先の判断	グローバル移動 ・出入国管理 ・国の法律差
	安全性 ・防犯 ・輸送安全性

図 A. 31：動的生活下における不安

本 MS 目標を実現する技術の社会実装をするにあたっては、

表 A. 21 に示すように、主に障壁となると予想されるのは、個人の位置特定の困難さと、市区町村の導入率の差（自治体差）である。動的な生活を送る上で、特定の住所を持たない個人が適切なサービス享受し、快適な生活を送るためには、個人の位置特定が喫緊の課題となる。個人の位置特定は郵送物や物資の送付先の特定等の用途だけではなく、行政が国民から税を徴収し、適切な行政サービスを提供するために必要不可欠である。しかし、GPS（Global Positioning System）等の衛星測位システムによって位置を特定することは容易であるものの、昨今、監視社会への懸念は強く、個人のプライバシーの担保が必要となる。そこで、位置情報システム（GIS：Geographic Information System）と掛け合わせた、ブロックチェーン等改竄の恐れなく履歴を残せる技術の活用が有効であると考えられる。

本技術の導入にあたっては、財源問題等を理由に自治体ごとの導入率の差が生じると地域の格差を助長することになり兼ねないため、均一な導入が求められる。国による導入・管理のもと、基礎自治体レベルで活用することが理想的である。

表 A. 21：動的生活に対する不安を解消する主な行政サービスと導入課題

動的生活において共通する不安要素	不安要素の行政的な課題	行政サービスによる解決策	管理	解決策を実現する際の障壁
自己位置の特定	・郵送物の送付先 ・税金の支払先の特定 ・監視社会への懸念 ・個人のプライバシーの担保	ブロックチェーン等の技術を用いた履歴管理	【国】の管理のもと、【市区町村】が活用	・自主財源は 20%、そのほか 80%程度は交付金や市債等で賄う。インフラ関係にも使うが、生活困窮者や高齢者への扶助費など削れない支出も多い。 ・現在、国が策定している交付税の算定基準に人口や面積は入っているが、その

行政サービス管理	・住所管理			基準を変える必要がある。 ・国が動的な税金システムを採用した際、自治体運営に必要な財源が配分されるか懸念が残る（行政サービスに係る人件費、公債費等）。
	・地方税のうち、住民税等の課税方法	動的な税金	【国】の管理のもと、【市区町村】が活用	
	・住民票等の各種証明取得のオンライン化	バーチャル行政、住民票等の証明取得手続きの完全電子化	【国】	
環境・衛生	・不法投棄の監視	監視システム	【市区町村】	個人のプライバシーの担保
グローバル移動	・国境を越える際の出入国管理（個人特定）	位置情報伝達システム	【国】	領海侵入等に対する物理的な管理