

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

2100年社会における個人航空モビリティの実装と 立体都市の実現に向けて

Toward the installation of personal air mobility and
a realization of a three-dimensional city in 2100

中村 日向子, 井村 裕紀, 唐木 文, 藤井 崇史, 武藤 正剛, 上野 真

NAKAMURA Hinako, IMURA Yuki, KARAKI Aya, FUJII Takafumi, MUTO Masataka
and UENO Makoto

2024年11月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目次

概要	1
1. はじめに	2
2. 手法	6
3. 仮定とコンセプト	6
4. 2100年に適用される新たな航空輸送手段の提案	8
4.1. 輸送のデータの考察	8
4.2. 2080年までの航空社会予測と2100年の個人移動の需要	10
4.3. 2100年DREAMにおいて必要とされるモビリティ	10
4.4. EAMにおける移動意識の変化	12
4.5. EAMにおける課題点	14
5. 2100年に実現される社会	14
5.1. 都市構造の変化	14
5.2. ライフスタイルの変化	16
6. 2100年の戦略立案とロードマップ	17
6.1. 社会動向	18
6.2. 都市構造	18
6.3. モビリティ社会実装	18
6.4. モビリティ研究開発	19
6.5. 法整備・交通網整備	20
6.6. JAXAが行うべきこと	20
7. 議論とまとめ	21
謝辞	21
参考文献	22

2100年社会における個人航空モビリティの実装と 立体都市の実現に向けて

中村 日向子^{*1}, 井村 裕紀^{*2}, 唐木 文^{*3}, 藤井 崇史^{*4}, 武藤 正剛^{*5}, 上野 真^{*6}

Toward the installation of personal air mobility and a realization of a three-dimensional city in 2100

NAKAMURA Hinako^{*1}, IMURA Yuki^{*2}, KARAKI Aya^{*3}, FUJII Takafumi^{*4}, MUTO Masataka^{*5},
UENO Makoto^{*6}

ABSTRACT

In the future year 2100, global warming, an aging society with a declining birthrate, and population growth will be progressing worldwide. These social surroundings have indicated the need for the functions of a city and population to be distributed vertically rather than horizontally, and a city would be three-dimensionally developed. As the demand for three-dimensional movement for individuals increases in such cities, it is expected that air mobility, which does not exist today, will coexist with the cities, allowing individuals to move within the cities easily. This study devised this new form of air mobility based on physical feasibility. It proposed how it would play a role in a three-dimensionally developed urban society in the future social and urban structure. It also suggests a roadmap for the realization of this new means of air transportation. The findings of this investigation emphasize the importance of air transportation means in the future of urban society.

Keywords: Future aviation society, Scenario planning, Three-dimensional movement, New air mobility, Roadmap to realize new air mobility

* 2024年9月2日受付 (Received September 2, 2024)

^{*1} 有人宇宙技術部門きぼう利用センター (JEM Utilization Center, Human Spaceflight Technology Directorate)

^{*2} 第一宇宙技術部門 EarthCARE / CPR プロジェクトチーム (EarthCARE/CPR Project Team, Space Technology Directorate I)

^{*3} 宇宙戦略基金事業部事業推進課 (Management and Integration Division, Space Strategy Fund Department)

^{*4} 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 (HTV-X Project Team, Human Spaceflight Technology Directorate)

^{*5} 第一宇宙技術部門地球観測研究センター (Earth Observation Research Center, Space Technology Directorate I)

^{*6} 航空技術部門航空システム研究ユニット (Aviation Systems Research Unit, Aviation Technology Directorate)

概 要

2100年の将来には、地球温暖化や少子高齢化、人口増加などが世界的に進行すると言われている。本調査では、この社会において水平方向よりも鉛直方向に都市機能や人口が分散する必要性を示し、都市が鉛直方向に発達する必然性を唱えた。このような都市では鉛直移動の需要が高まるため、現代には存在しない、個人が気軽に移動できる航空モビリティが発現すると予想できる。本調査では、この新しい航空モビリティを物理的な実現可能性を考慮しながら考案し、鉛直方向に発展した都市社会の中でどのように活躍しているのかを、社会・都市構造、ライフスタイルと照らし合わせながら提案した。加えて、この航空輸送手段の実現に向けたロードマップを提案した。本調査結果は、将来の都市社会における航空輸送手段の在り方と、その重要性を強調している。

1. はじめに

古来より人類は未来予測を試みてきたが、近年、社会の不確実性が高まる中、未来予測の重要性は増すばかりである。未来を予測することの意味は「リスクの低減」と「ベネフィットの最大化」にある^[1]と考えられ、研究開発機関にとっては将来トレンドを見通すことで、長大な研究期間を要する研究課題の端緒をいち早く掴んだ先導的な研究開発投資が期待できる。宇宙航空研究開発機構においても、JST ミレニアプログラムに参加して 2050 年の社会像の提案^[2]などを行なってきたところであるが、今回、さらに超長期の未来予測となる 2100 年の社会を前提とした調査研究を実施することで、より早期の技術トレンドを掴むことを試みた。

2100 年は現在から半世紀以上先の未来であり、現代と比べて大きな社会構造の変化が起こっていると考えられる。本節では、この社会変化を「世界人口」「少子高齢化」「気候」という 3 つのトピックに焦点を当てながら、2100 年の社会背景について詳述する。

まず、世界人口について着目する。現在の統計予測によると、国や地域によって人口の将来予測に大きな差異が生じている^[3]。具体的には、発展途上国ではアフリカ各国（ナイジェリア、コンゴ民主共和国、エチオピアなど）やインド、インドネシアなど、先進国ではオーストラリアや北米で人口が増加するが、反対に日本などアジア諸国や南米では 2100 年にはピークアウトして人口の減少が予測されている。このように、将来人口の増減予測に地域差はあるものの、世界的なトレンドとしては 2100 年には世界人口は 100 億人を超える、すなわち約 80 億人という現在の世界人口から 20 億人ほど増加すると試算されている^[4]（図 1）。

世界人口の増加に伴い、地方の人々は都市部に移動して、都市人口が現在よりも過密になると予想される。これは、都市部には文化的に繁栄、恵まれた教育環境、雇用機会の多さ、エンターテインメントの充実、交通網の発達などの様々な利点があげられ、快適な生活を送ることができる、人々にとって非常に魅力的な場所であることが理由である。実際に現在でもそのような動向は世界的に見られ、世界の都市人口は 2015 年には約 40 億人であったが、2040 年には 60 億人まで増加すると推定されている^[5]。

このように、人々は多くのメリットを享受できる都市部に移動する傾向にあるが、同時に都市部への人口流入には多くのデメリットが潜在する。感染症拡大の観点では、都市部の人口過密が感染症のリス

クを増大させる可能性がある。過去の事象を例に挙げると、2020年頃から蔓延した新型コロナウイルス（COVID-19）をはじめ、重症急性呼吸器症候群（SARS）、中東呼吸器症候群（MERS）、エボラウイルス感染症など、過去に幾多の世界的なパンデミックが発生し、人口が集中した都市部では特に感染症の拡大が顕著であった^[6]。また、人口過密は自然災害のリスクを増加させる恐れがある。具体的には、中国のようにインフラが密集した地域で地震が起こると、その被害が増幅する危険があると指摘されている^[7]。また、インドでは沿岸域に人口が集中しているのが原因で、2004年にインドを襲った津波では甚大な被害が発生し、ほかにも高潮やハリケーンなどで沿岸域の人口密集地における被害リスクが増加しているため、人口増加を抑える取り組みの必要性を唱える先行研究も存在する^{[7][8]}。

上記の感染症や自然災害に関するリスクに加え、公共インフラへの負担という観点で都市人口の増加は特に大きな問題を孕んでいる。都市が過密状態に陥ると、交通混雑が発生しやすくなったり水道管・ガス管などの整備に不備が生じたりと、公共インフラへの負荷が大きくなる。そこで、市街地開発が都市部から郊外に向かって進行し都市機能が分散していく、いわゆるスプロール現象^{[9][10]}が起こりやすくなる。この都市機能の拡散現象により、公共インフラを水平方向により広範囲に拡大する必要性が高まる。このような社会において重要なのは、拡大する公共インフラの維持管理を担える若い年代の人口の確保である。そこで、高齢者人口に対する若い世代の人口の比率（潜在扶養指数）を示した図2をみる。アフリカ大陸の多くの国では潜在扶養指数が増加する一方で、ほかの多くの国では潜在扶養指数は2100年までに世界的に減少していることがわかる。また、国連によると2100年までに世界の65歳以上の高齢者人口は、現在の2倍以上になることが推測されている^[11]。このように、2100年には世界人口は最大化または増加が鈍化して、一部の地域では人口増が続くものの社会の成熟化に伴う少子高齢化が同時に世界的なトレンドとなり、郊外に拡張していく公共インフラの維持管理は現代よりも一層難しくなることが予想される。前述のように、アフリカなどの現在の発展途上国では、逆に若い年代の人口の割合が増加する見込みであるが、このような国では人口が現在と比べて大きく増加して都市人口が増加する可能性があるため、いずれにせよ公共インフラの維持管理に負担がかかってしまう。

ここまで世界人口数や人口の年代構成の変化に焦点を当てたが、2100年には気候の観点でも大きな変化が見込まれる。図3は、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第6次報告書（AR6）が示している、全球平均した地上気温の偏差（平年値からのずれ）を過去の観測値と将来の気温予測値について表している。これをみると、現在も世界的に温暖化が進行していることがわかり、2100年には現在よりも4℃近く地上気温が上昇するという予測である^[12]。そこで、人々は暑くなった地上を避け、より涼しい場所を求めようになると考えられる。また、地球温暖化に伴って海面上昇や砂漠化が進行すると予測されており^{[13][14]}、人間の居住可能域が狭小化することが予想される。そのため、人々は限られた面積内で効率的な生活することを余儀なくされると考えられる。

以上をまとめると、2100年には世界人口は現在よりも増加するが、拡大する公共インフラを支える生産年齢人口が減少し、公共インフラの維持管理が難しくなると同時に、地球温暖化により地上は暑く生活しづらくなり、砂漠化や海面上昇により居住可能地域が減少することが予測される。一方で過度な集中は感染症等の被害リスクを高めるため、いずれかの方法で分散を実現する必要がある。このような未来社会では、都市機能や人口を鉛直方向に分散させる必要性が高まると考える。その理由として以下の点が挙げられる：(1)少ない労働人口で維持管理するため、都市機能を限られた面積に集約することで公共インフラの効率化を図ることが必要である。(2)地球温暖化により暑くなった地上での生命活動が難

しくなり、高所の涼しい空間を求めるようになる。(3)気候変動によって人間の居住可能域が狭小化するため、限られた面積に都市機能を集約する必要がある。

これらを踏まえて、本調査では将来において都市機能が鉛直方向に分散する需要を踏まえて議論を行い、2100年の都市の在り方を表す都市構想・コンセプトである DREAM (Design for high-Rise city with Easy Air Mobility) と、DREAM を実現するために鍵となる個人用次世代航空モビリティ EAM (Easy Air Mobility) を提案する。本文書の構成は以下のとおりである。第2節では、本調査を行うにあたっての手法と仮説、2100年の都市構想・コンセプト DREAM について説明している。第3節では DREAM の実現に必要な EAM について、その形状やスペックについて詳述している。第4節では、EAM を必要とする都市構想としての DREAM は、どのような規模感でどのようなシステムが構築されているのか説明している。第5節では、DREAM を実現する EAM を普及させるために JAXA がすべきことの道筋を示したロードマップを提示し、戦略立案を行っている。第6節では、まとめと議論を行っている。

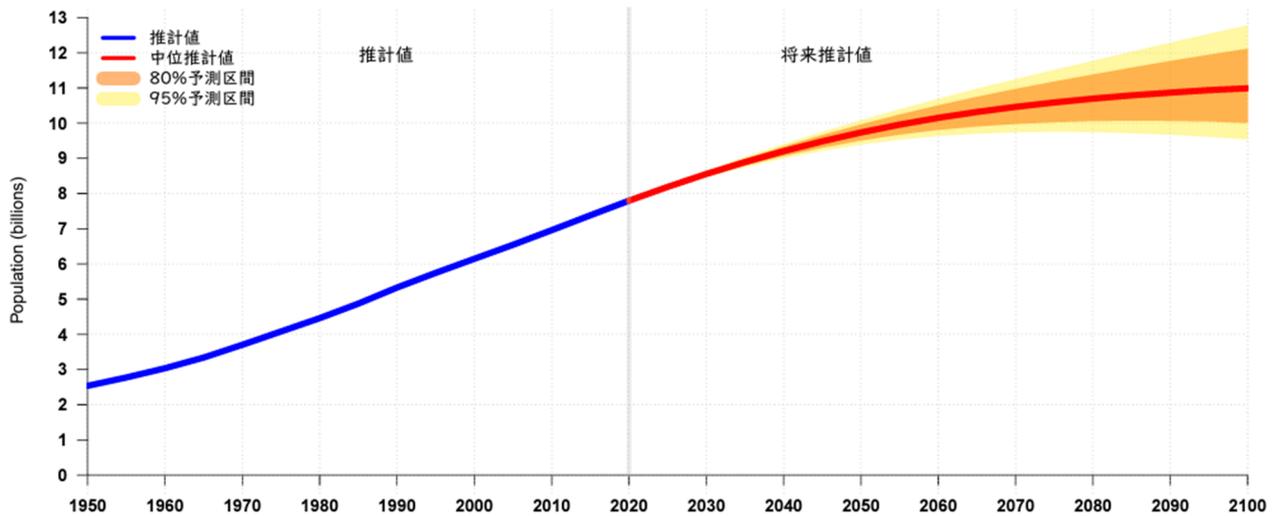


図 1 世界人口の推計値：1950～2020年の推計値（青線）、2020～2100年の中位推計値（赤線）および80%・90%予測区間（肌色・赤色の陰影）（国際連合経済社会局より引用）。

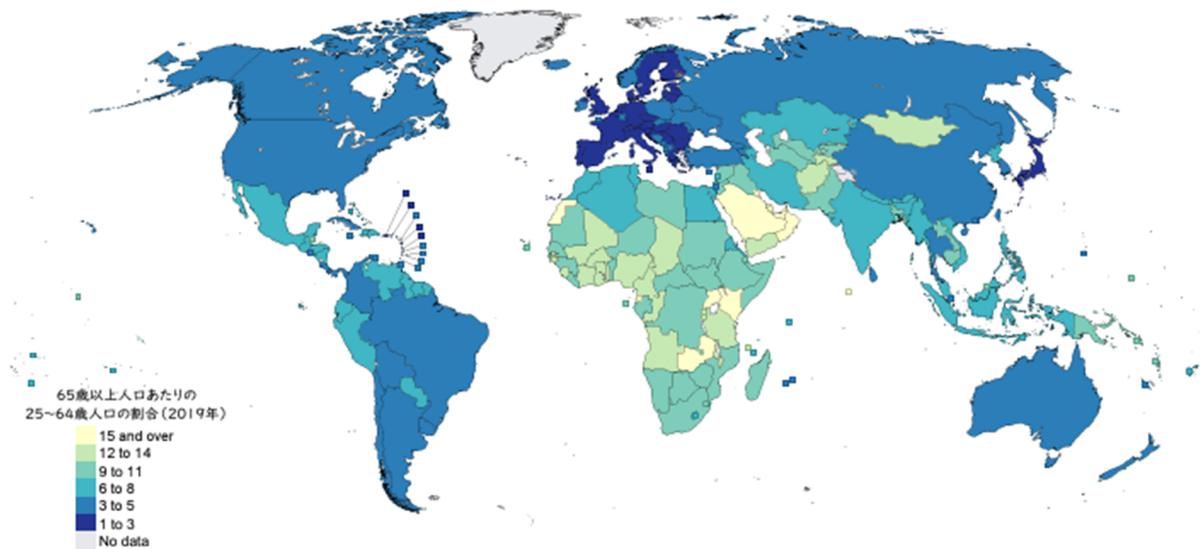


図 2 65 歳以上人口に対する 25 歳から 64 歳人口の比率を表す、潜在扶養指数の世界分布を示している（国際連合経済社会局より引用）。

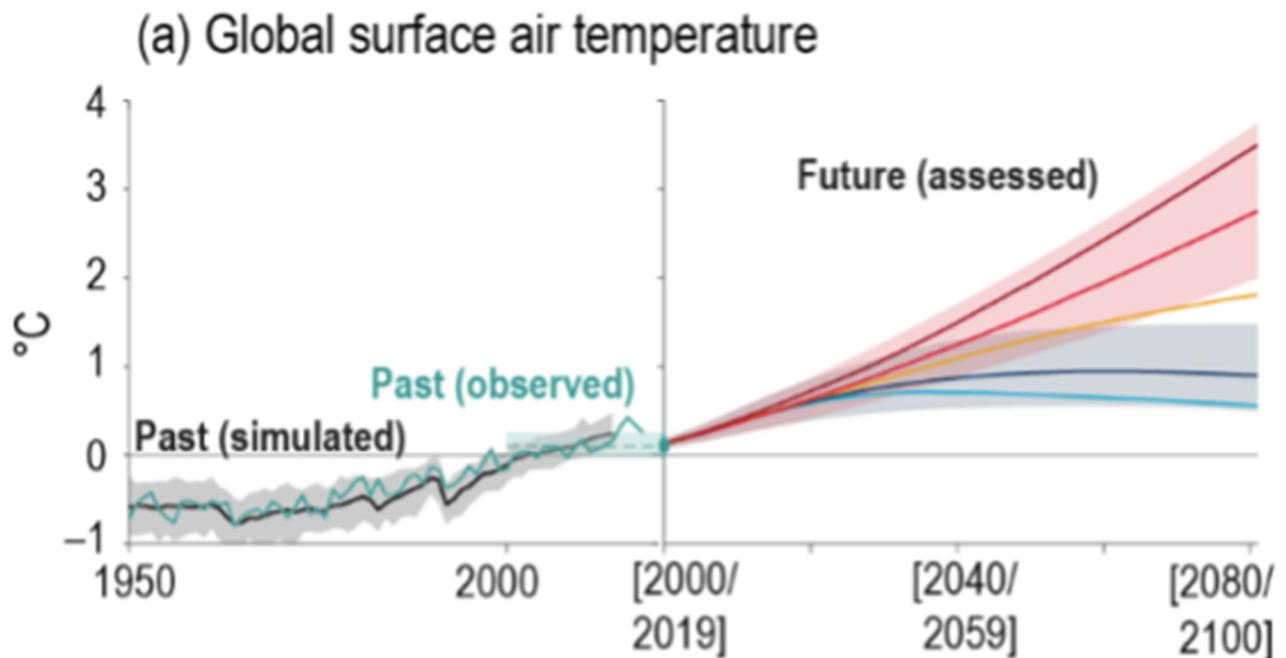


図 3 1950 年から 2019 年までの地上気温の観測値と、2100 年までの全球平均気温の偏差予測（IPCC AR6 より引用）。色付きのシェードは不確実性の範囲を示している。将来予測について、赤のシェードは温暖化対策を十分に行わなかった場合、青のシェードは対策を十分行った場合の予測を示している。

2. 手法

本節では、本調査で使用した手法について述べる。本調査では、規範的シナリオを使用してシナリオ・プランニングを行った。ここで、シナリオ・プランニングとは、計画策定手法の1つで、今後起こりうる環境変化の可能性を複数の未来シナリオとして描き出す手法のことである^[7]。規範的シナリオとは、未来に対して「何が起こるべきか」ということを考え「ビジョン／コンセプト」とし、その内容をもとに「ロードマップ」を描き出すことを指す。すなわち、規範的シナリオに基づく戦略立案とは、我々が目指すべき未来（ビジョン／コンセプト）とそれにつながる道筋（ロードマップ）を明らかにすることで、そこに向かう際の課題を明らかにすることで戦略を立案するものである。

規範的シナリオでは、以下のような3つの手順がある。

1. 動機付け
2. ビジョンとしての成立
3. 手段

まず、動機付けを行う。ここで課題意識を明らかにし、ビジョンにおいて解決すべき課題を明確化する。次に、課題意識で明確化したものを漸増的にビジョンとして明確化していく。その後、手段を考える。ここでは、ロードマップを作成しながら段階的に考案し、ビジョンを実現するための手段を考える。以上が一般的な規範的シナリオのプロセスである。

しかし、実際には上記のような手段通りに行うことは難しい。特に、ビジョンの作成の際には、課題のみからビジョンを作成することは難しい。これは、課題意識とその手段が繋がっていなければビジョンとして成立しないためである。そこで、実際には技術的な検討から出発しつつ課題と手段を漸増的に行き来する。本調査では具体的には輸送手段における技術的トレンドから定量的未利用領域を模索し、その未利用領域の利用が都市生活の中でどのような位置づけとなるかを考えることから始めて、技術的な方向性を見据えつつ都市像のビジョンを形作って行った。

そのため、調査初期段階では、輸送機の定量的な未利用領域を考察することから始めて、現在予測されている2100年の社会像の調査、さらには、2100年における社会課題の模索を交互に行った。これにより、徐々にビジョンを成立させ、成立したビジョンから逆算する形で手段としてのロードマップを作成した。

3. 仮定とコンセプト

本節では、第2節で述べた手法における「1. 動機付け」の部分を行うべく「2100年のあるべき姿」の考案を行う。そこで、まず我々は第1節で述べた背景のもと、仮説を立てた。2100年社会では、水平方向の限られた面積に人を集約すると同時に人口や都市機能を拡散させるために、2100年には都市が高層化するという仮説を提唱する。すなわち、都市化と地球温暖化は避けられないという仮定の下、都市機能を限られた面積に集約して都市機能の効率化を図り若年労働人口減少に対応すると共に、気候変動に伴う居住可能域の狭小化に対応、加えて地表の温度上昇から逃れることを目指して居住域を上へ伸ばす（図4）。今後も進む都市化と気候変動に対して持続可能な解となりうる本都市構想のコンセプト

DREAM を考案した。これは平面的に拡張してきた従来の都市とは全く異なる新たな都市像である。

このコンセプトでは都市空間が鉛直方向に拡張され、人口が鉛直方向に分散しながらも、水平方向の限られた面積で集約した都市サービス（教育機関や医療機関の選択肢の拡大、迅速な食料調達など）の供給が可能な都市が実現される。一方、高度に高層化されたこの立体都市を実現するためには、鉛直方向に分散された都市空間を鉛直方向のみならず建築物間を含め個人が自在に移動できなければならないが、エレベータでは地上を経由しなければならず、また現状で提案されている空飛ぶクルマのサイズは個人移動には大きすぎる。

そこで、比較的省スペースでの近距離飛行に特化した移動手段がその成立の鍵となる。本調査では、新たな都市像を成立させるために必須の移動手段として、個人用次世代航空モビリティ EAM をコンセプトの一部として提案した。この個人用次世代航空モビリティは鉛直移動、建物間移動を実現するのみならず、空間移動を自転車並みに気軽な移動へと転換することで空間の利用形態そのものを変化させて、図 4 に示すような空中に浮遊するサービスの成立をも促すものである。



図 4 DREAM の概念図

DREAM では都市が円柱型の空間として広がる。

4. 2100年に適用される新たな航空輸送手段の提案

本調査で特徴的なのは、まず技術的なトレンドを把握してこれから利用が進む未利用領域を見定め、その未利用領域を利用することで実現される今は無いビジョンに迫った所にある。本節では、輸送手段のトレンドの考察から始めて、今後の発展が見込まれる技術的未利用領域を見出し、当該未利用領域の利用が我々の提案する2100年社会DREAMに必要とされる理由について述べる。次いで、DREAMにおいて需要が高まる、より気軽なモビリティとして我々が提案するEAMのコンセプトとその詳細、それによって生じる移動意識の変化を述べる。

4.1. 輸送のデータの考察

本節では、まず輸送手段における動向を積載量と輸送速度の観点から考察する。まず、図5に各種輸送手段の積載量と輸送速度の関係を示す。ここで、輸送手段とは人やモノを運ぶものであり、コンテナ船などの海上輸送手段、貨物機やヘリコプターなどの航空輸送手段、自動車や列車などの陸上輸送手段など、幅広いものを含んでいる。図5をみると、積載量と輸送速度の関係は、大きく2つの領域に分けられる。

- 領域1：積載量が1 [kg] ~ 10,000 [kg]程度で、輸送速度が10 [km/h] ~ 1,000 [km/h]程度で相関関係のある領域
- 領域2：積載量が100 [kg] ~ 1,000,000 [kg]程度で、輸送速度が10 [km/h] ~ 100 [km/h]程度の領域

まず、領域1は主に航空輸送の領域である。詳細は次節で述べるが、領域の左下は無人航空輸送、右上は有人航空輸送である。ここで領域1に相関関係がみられる理由の1つは、航空輸送では、最大揚力係数の限界があるため、より多くの積載量を運ぼうとすると一般に速く飛ぶ必要があるためである。すなわち、総重量 W と釣り合う揚力 L 、速度 V で密度 ρ の空气中を参照面積 S の機体が水平定常飛行していると仮定すると $W = L = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_L$ であり、同じ形状かつ速度によって空力特性が変化しない（揚力係数 $C_L = const$ ）のであれば、速度 V または代表面積 S を大きくする必要があり、更に長さスケールの3乗に比例する重量に対して代表面積 S は2乗のスケールであるため、速度 V も大きくすることになる。

次に、領域2は主に陸上輸送と海上輸送の領域である。積載量が小さい左側の領域は陸上輸送であり、積載量が多い右側の領域は海上輸送である。領域2では、輸送速度はほぼ横ばいとなっている。これは、陸上や海上では空よりも輸送速度を上げにくいことが要因である。また、海上輸送では、速度が他の輸送手段よりも小さい傾向がある一方で、積載量は他の輸送と比較して大きい。そのため、輸送速度が小さくとも、多くのものを一度に輸送することができる。

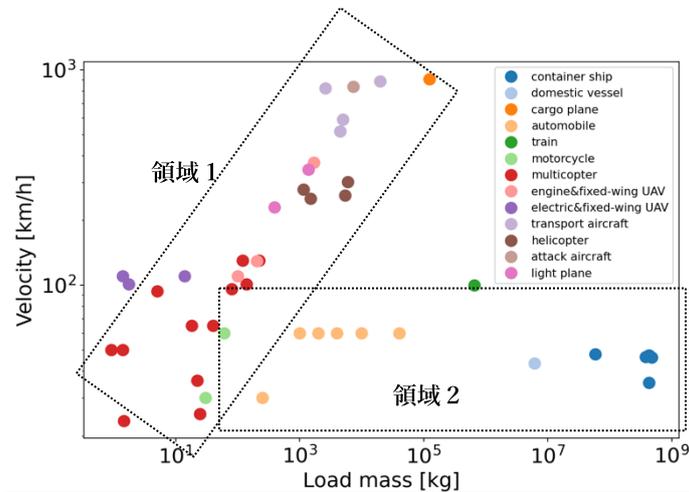


図 5 輸送機械の積載量と輸送速度の関係（データソース_ [18][19][20][21]）

領域 1、つまり航空輸送の領域について詳細に検討する。6 は、航空輸送機の積載量および輸送速度についての散布図であり、5 から航空輸送に関するもののみ抽出している。6 の散布図は大きく 2 つの領域に分けられる。

- ✓ 領域 1-1：積載量が約 400 [kg]以上で、輸送速度が約 200 [km/h]以上の領域
- ✓ 領域 1-2：積載量が約 400 [kg]以下で、輸送速度が約 200 [km/h]以下の領域

領域 1-1 は、積載量と輸送速度がともに大きい領域である。この領域に含まれる航空輸送機は、主に飛行機やヘリコプターといった有人航空輸送機である。これは従来、有人航空輸送においてより多くの積載物をより速く輸送することを目指してきたことや、前述の通り積載量を大きくするためには輸送速度を大きくする必要があることが要因である。一方で、領域 1-2 は、積載量と輸送速度がともに小さい領域である。この領域に含まれる航空輸送機は主にドローンといった無人航空輸送機である。

元々、領域 1-1 と領域 1-2 の間には隙間があったが、図 6 で領域 1-3 として示した領域への進出が始まっている。図中で領域 1-3 を埋めているのは”multicopter”と”engine&fixed-wing UAV”であり、いずれも無人機であるが、この領域には有人の機体も進出し始めており、空飛ぶクルマは積載量と輸送速度より、領域 1-1 と領域 1-2 の間の新たな領域である領域 1-3 に位置する。例えば、FlyNow 社やヒロボー社が提案した空飛ぶクルマ^{[22][23]}は有人機であるが、積載量と輸送速度は従来の無人機の領域である領域 1-2 に近い。このように、有人航空輸送は従来の大量輸送だけではなく個人単位の輸送へ領域を拡大してきており、物理的には、より軽く、より遅い輸送手段が検討されている。

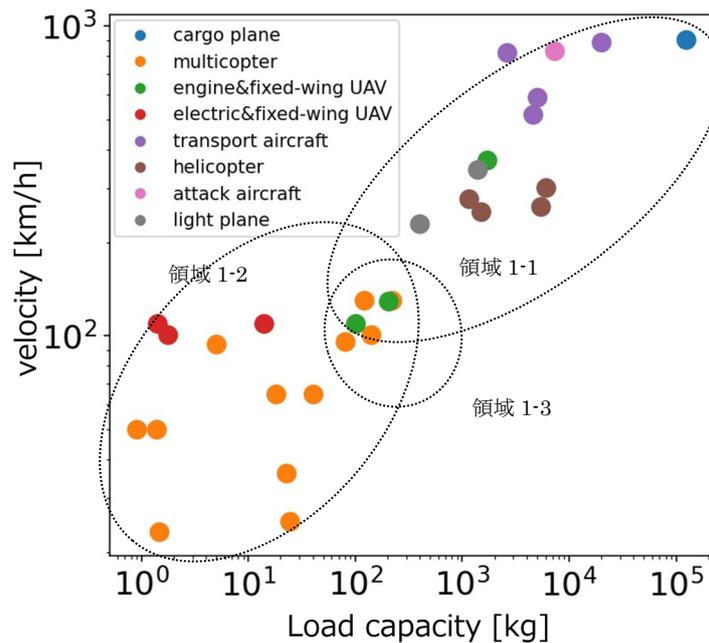


図 6 航空輸送手段の積載量と輸送速度の関係 (データソース_ [18][19][20][21])

4.2. 2080 年までの航空社会予測と 2100 年の個人移動の需要

本節では、2080 年までの航空社会の予測、および 2100 年社会 DREAM における個人移動の需要について述べる。近年、空飛ぶクルマの試験実証が盛んに実施されており、2025 年に開催予定の大阪万博でも空飛ぶクルマの試験実証が予定されている^[24]。さらに、経済産業省が策定した空の移動革命に向けたロードマップ(改訂案)^[25]では、2030 年代以降に空飛ぶクルマの社会実装を進めると言及している。また、2050 年には空飛ぶクルマの世界市場規模が 180 兆円を超えるという予測が発表されている^[26]。

上記を踏まえ、4.1 節で述べた近年の有人航空輸送の傾向も考慮すると、我々は 2080 年には空飛ぶクルマはすでに社会実装されているだろうと考えた。ここで社会実装されている空飛ぶクルマとして想定しているものは、主に長距離移動に利用される複数人用の空飛ぶクルマや、中距離移動に利用される 1 人用の空飛ぶクルマである。一方で、我々が提案する 2100 年社会 DREAM は都市が高層化し、上空に生活圏が広がっているため、近距離の移動にも空中を移動するモビリティが必要である。

このモビリティが生活圏内の近距離移動で日常的に利用されることを考慮すると、現在の自転車のような気軽なものであることが求められると考える。気軽さを感じる要素は複数あり、例えば、外壁やシートベルトがなくシンプルでコンパクトな構造であるということや、自動車よりも移動の自由度が高いことなどが関係する。これは心理的な要素が大きく、非性能要求だが、このような気軽さがモビリティにも求められると考えられる。

4.3. 2100 年 DREAM において必要とされるモビリティ

本節では、2100 年社会に必要とされる空飛ぶモビリティについて述べる。ここで、我々が提案する空飛ぶモビリティを EAM (Easy Air Mobility) と定義する。EAM は、都市が高層化した 2100 年社会 DREAM において、個人が、生活圏内の近距離を自転車のよう気軽に空間を移動するためのモビリティ

である。ここで気軽さとは、モビリティのコンパクトさ、操作の自由さなどを含んだ、心理的作用のことを指す。表 1 に我々が提案する EAM に対する要求を示し、モビリティの概念図を図 7 に示す。

性能項目	要求	理由・備考
機体寸法	1.2m×1.5m×1m	コンパクト性を有すること
飛行方法	回転翼 / サイクロローター	垂直離着陸可能なこと
操作	マニュアル / オート	個人での操作が可能なこと
動力	電気	燃料部分に大きな容積を要しないこと
垂直離着陸	可能	発着場が小さくなること
機体重量	25~30 kg	個人が運ぶことができること
積載量	100 kg	成人 1 人とその荷物を積載可能であること
航続時間	10 時間	1 回の充電で 1 日中使用可能であること
通常速度	30 km/h	現在の電動自転車と同等の速度性能を有すること
飛行高度	0~1500 m	DREAM において使用可能であること
機体材料	炭素複合繊維	軽くて強度のある素材を使用すること
価格	現在価格 30 万円程度	個人単位で購入可能であること

表 1 EAM に対する要求



図 7 EAM の概念図

EAM は、自転車と同様の気軽さで生活圏内を移動できることを目的としているため、表 1 における

操作性、航続時間、価格は、特に「気軽さ」を満たすために必要な要求事項である。2080年までに社会実装される空飛ぶクルマよりもさらに気軽な空飛ぶモビリティとなり、2100年の個人単位での航空輸送の需要を満たすことができる。

4.4. EAM における移動意識の変化

本節では、我々が提案する EAM の登場によってもたらされる個人の移動意識の変化について述べる。EAM は、都市が高層化した 2100 年社会 DREAM において、生活圏内を現在の自転車のように気軽に移動することができる。EAM によって個人は 3 次元的に気軽な移動を行うことが可能となり、移動意識、すなわち移動時の意思決定に影響を及ぼす心理的作用に変化が生じると考えられる。

ここでは、自分の家からコンビニエンスストア（以下、「コンビニ」と略す）に行く際の意思決定における心理的作用について具体的な例を用いて説明する。図 8 のように自分の家から、150m 離れたビルの 200m 地点にあるコンビニ 1 と、家から 300m 離れた地点にあるコンビニ 2 のどちらかに行くことを移動の観点から考える。ここで、どちらのコンビニも自分の家からの直線距離は 300m である。現在、ビルの上階層にはエレベータを用いて移動することが一般的である。そのため、ビル 200m 地点にあるコンビニ 1 に行くためには、①家から徒歩でビルのエントランスに行き、②ビルのエレベータに乗り、③エレベータから降りてコンビニ 1 に徒歩で行くことが必要になる。一方で、家から 300m 離れた地点にあるコンビニ 2 には①家から徒歩でコンビニ 2 まで行くのみでよい。この例においては、移動時間を同等に設定しているが、多くの方は家から 300m 離れた地点にあるコンビニ 2 に行くであろう。これは、手段トリップ数が増加していることが原因であるといえる。手段トリップ数^[27]とは、都市工学における用語であり、目的地までに使用した移動手段の数のことである。具体的には、コンビニ 1 に対する手段トリップ数が 3 となる一方で、コンビニ 2 における手段トリップ数が 1 となる。このように、手段トリップ数が増加することは、待ち時間や移動時間の増加につながり、移動における意思決定に負の影響を及ぼすことがわかる。

次に、上記の具体例を EAM が社会実装された場合として考える。EAM は、3 次元的に気軽な移動を行うことが可能であるため、エレベータや階段のような従来の移動手段を使わずに移動することができる。そのため上記の例における移動では、ビル 200m 地点にあるコンビニ 1 と、家から 300m 離れた地点にあるコンビニ 2 では、どちらも家から EAM に乗って 300m 飛ぶだけで移動することができるようになる。つまり、どちらも手段トリップ数が 1 で移動することが可能になる。

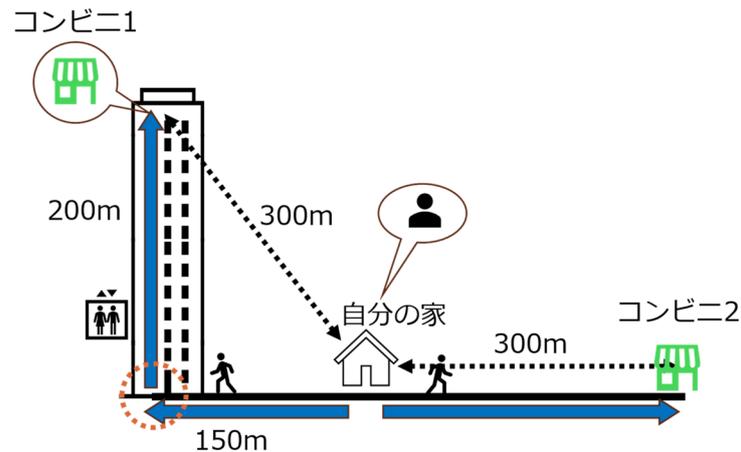


図 8 コンビニへの移動の概念図（現在）

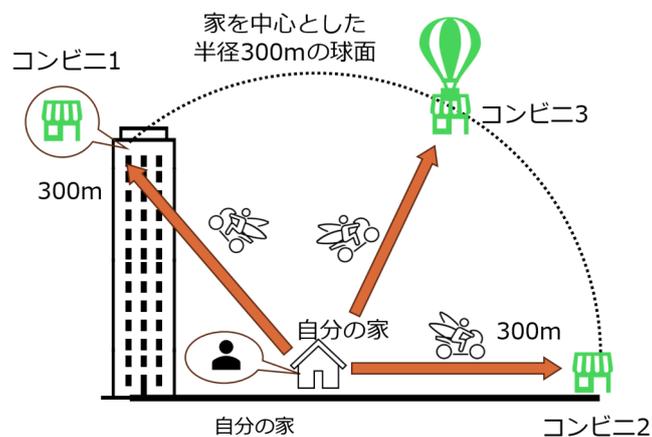


図 9 コンビニへの移動の概念図（2100年社会 DREAM）

現在、移動の多くは徒歩や自転車、自動車などといった地上を移動する2次元的なものである。そのため、ビルの上層階に移動するなどの3次元的な移動が必要となる場合には、エレベータのような鉛直に移動する手段を使用することや、階段やスロープのような立体構造物を2次元的な手段によって移動する必要があるため、手段トリップ数は増加せざるを得なかった。一方でEAMは3次元的な移動を個人単位で可能にし、手段トリップ数を従来よりもはるかに減少させるものである。EAMが社会実装された2100年社会DREAMでは、3次元的な移動を気軽に実現することができる。このように3次元的に気軽に移動できるということは、生活圏を3次元的に捉えることが可能となるということである。

当初、人口推移、少子高齢化、気候変動の観点からの要求に応える形で構想されたDREAMであるが、単純に現在の都市の高層化を進めるだけでは利便性は低下する。しかし、利便性は低下する。しかし、有人航空輸送で現在進行しつつある進化の方向性を押し進めた先に見える個人移動手段としてのEAMの登場が、移動の概念を2次元的なものから3次元的なものへと抜本的に変更し、DREAMの実現性を

大いに高めることになった。

4.5. EAM における課題点

本節では、我々が提案する EAM の開発における現状の課題について述べる。EAM は、個人がより気軽に空間を移動することができるモビリティであるが、その実現のためには主に以下の課題が挙げられる。

- 長時間使用に耐えることができる電池の開発
- オート飛行時における安全なナビゲーションの開発
- マニュアル操作時の操作性の向上
- 安全性の担保

まず、電池の開発とナビゲーションシステムの開発が考えられる。社会への普及を考えると、1 日 1 回の充電で 10 時間程度は連続飛行できることが望ましい。そのためには、それを実現できる電池の開発が必要である。また、オート飛行時には安全なナビゲーションが必要である。マニュアル操作時には簡単に操作することが必要である。現在、航空機の操縦には専門的な能力が必要であるが、個人が日常的に使用するモビリティの操縦は、誰でも、簡単にできることが求められる。さらに、我々が提案する EAM では、搭乗者を保護する外壁は存在しないが、空を飛ぶことを考えると基本的な安全性は担保されるべきであり、そのための研究開発が必要となる。

上記のように多くの課題があり、これらの課題を段階的に解決していく必要があるため、本調査では、そのためのロードマップを作成した。詳細については第 6 節に述べる。

5. 2100 年に実現される社会

我々が提案する EAM の発現により 2100 年の社会がどのように変革されるのか、「都市構造」と「ライフスタイル」という 2 つの観点に着目する。それらについて、以下に説明と議論を示している。

5.1. 都市構造の変化

現在の都市は、水平方向に広がりながら整備されているが、私たちが提案する 2100 年社会 DREAM は、上空における現在の未利用空間に向かって鉛直方向に広がっている。そこで、本節では現在と将来の都市における鉛直方向の生活圏の大きさに着目しながら議論を行う。なお、本節での「生活圏」は「徒歩自転車圏」と同義とし、現在の水平方向の生活圏については国土交通省作成の資料より 1.5 km 圏内と定める^[28]。加えて、現在の高さ方向の生活圏を、東京都内に完成している超高層ビル 10 棟の高さの平均が 255.866m であることから、250m と定める。

図 10 は、2024 年現在の都市と 2100 年社会 DREAM の生活圏を、底面積一定のもと高さ方向に比較した図である。2024 年では 250m である一方で、2100 年社会 DREAM では EMS の登場により鉛直方向と水平方向の感覚が等しくなることから、生活圏の高さ方向の距離も 1.5km となる。つまり、同面積における生活圏は $1.5 \text{ km} \div 250\text{m}$ より 6 倍に拡大する。

上空での個人単位の気軽な移動が可能になり上空に生活圏が広がることで、建造物が高層化する他、例えば空飛ぶキッチンカーや空中宅配ロッカー、空飛ぶモビリティの空中充電スポットといった現在の

地上の生活コンテンツが上空の空間にも出現し、未利用だった空間を効率的に活用できる。すなわち、生活圏が上空へ広がることにより、人口過密を防ぎながら限られた面積への人口の集約が可能になる。

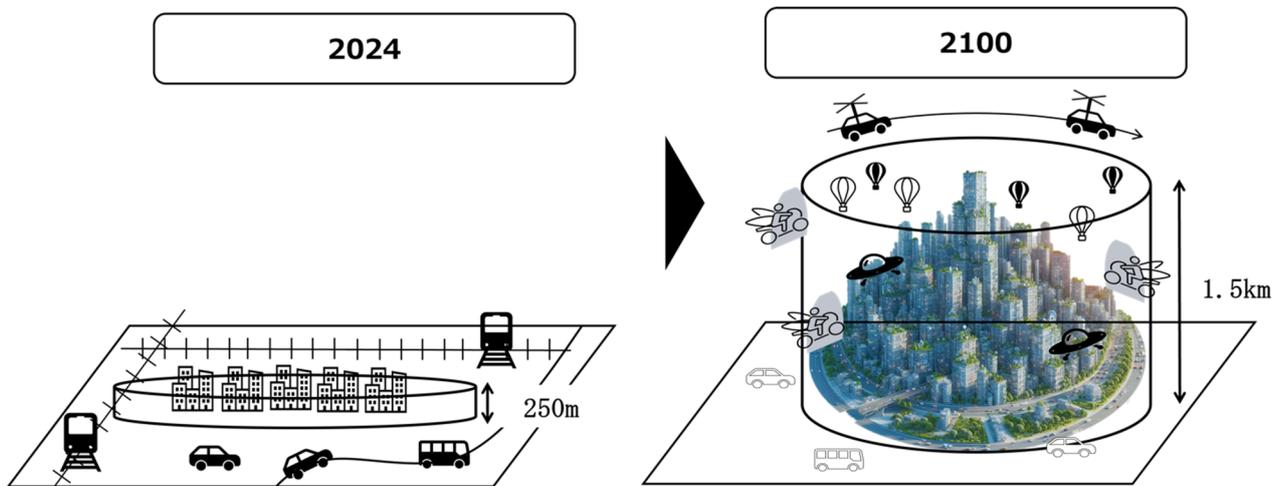


図 10 2024年と2100年の都市における生活圏の大きさの比較

また、生活圏が上空の空間へ集約されることで、図 11 に示す通り地上中心点からの距離が短縮する。現状の高さ方向を除いた地上の生活圏である半径 1.5km の円の範囲の面積を上述したとおり 6 倍すると、6 倍後の円の半径は、 $1.5\text{ km} \times 1.5\text{ km} \times 6$ 倍のルートとなり約 3.7 km となる。つまり、地上中心点からの最大距離が 3.7 km の範囲が、2100 年では高さ 1.5 km の円柱に集約される。地上中心点から円柱空間範囲の最大距離は円柱の上面積の直径上に位置し、その距離は、三平方の定理より $1.5\text{ km} \times \sqrt{2}$ となり、約 2.1 km となる。つまり、2024 年では 3.7 km の距離が 2100 年社会 DREAM の実現によって 2.1 km となる。

このように、立体的に拡張された都市では生活圏が拡大するとともに地点間距離が削減されるという大きなメリットがある一方で、次のようなデメリットも挙げられる。まず、限られた地域で多くの都市機能を支えているため、地球温暖化によって頻発する可能性がある洪水、竜巻等による局所的な災害に対する都市の脆弱性が懸念される。また、未利用空間である上空で新たな航空モビリティを人々が安全に利用できる社会を実現するためには、新たな空の交通網と法を整備するとともに、人々の既存の交通規範意識を改革する必要がある。

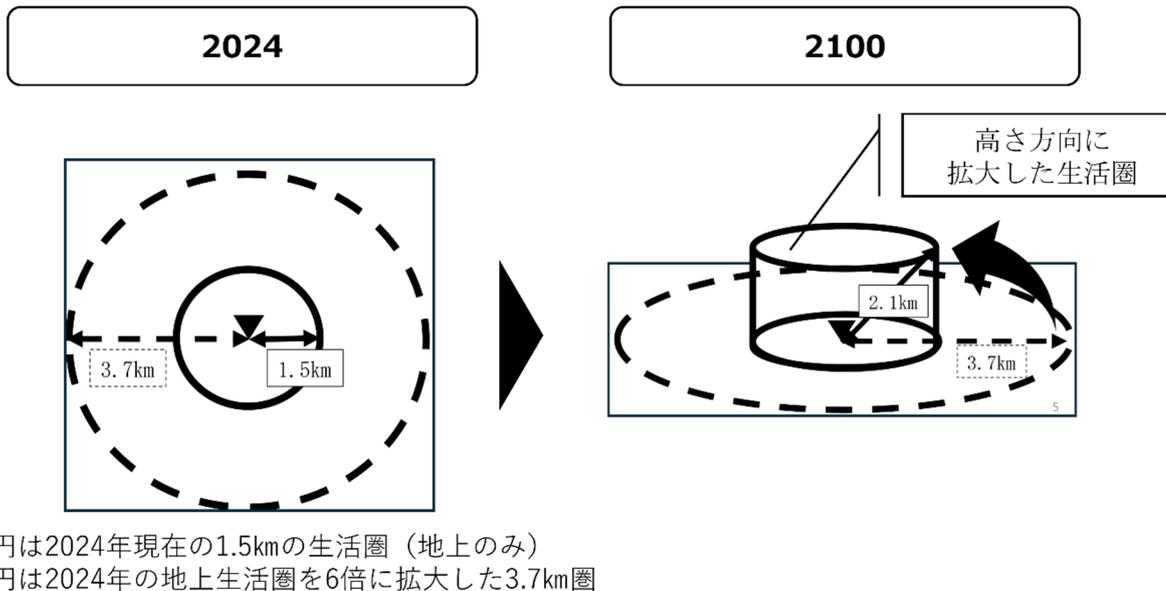


図 11 2024年と2100年における生活圏の定義および大きさ

5.2. ライフスタイルの変化

上述のような2100年における都市構造の変化や社会動向にตอบสนองして、個人のライフスタイルがどのように変化するのか記述する。まず個人が享受できるメリットについて、前述のように、従来では立体空間にアクセスするためには地上を介してエレベータや階段を利用しながら移動する必要があったが、EAMが実装されることで立体空間に浮かぶ空飛ぶキッチンカー・コンビニのような施設にも少ないトリップ数で移動できる。これは、前述の通りトリップ数が従来よりも減少するという観点の他、エレベータの待ち時間を短縮できたり、階段を昇降する手間を省くことができたりする点もメリットとして挙げられる。また、人口や都市機能が限られた面積に集約されることで、水平移動よりも距離が小さくなり（図11を参照）、現在よりも短距離で効率的に移動が可能になる。さらに、目的地が同じであっても地上だけでなく空を介する移動手段が増えることで、地上の公共インフラにおいて懸念される都市過密による交通渋滞も緩和されることが期待でき、地上の交通手段を使用する人々もストレスなく快適に運転ができる。

また、地球温暖化にも適合した持続可能な社会が実現可能である。例えば、高所では地上と比べて気温が低くなるため（高度とともに約 $1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の割合で気温は減少）、ビルが高層化された社会では暑い季節に涼しい空間をエアコン要らずで手に入れることができ、節電・省エネにもつながるため環境にフレンドリーである。さらに、都市機能が小さい底面積に集約されることで、空いた土地を有効活用することで緑化地域を多くすることもでき、二酸化炭素削減につながるという点でもエコフレンドリーな社会である。

このように2100年社会DREAMには様々なメリットがある一方で、デメリットも存在する。例えば、モビリティを利用した移動が多くなるため、人々の運動量が低下し、健康リスクが増大する可能性がある

る。また、EAMを利用する際には高所空間にさらされるため、高所恐怖症の人々には適応しづらい社会であるうえに、相対的に低酸素の空間であることから心肺機能に疾患を抱える人々への身体的負荷が大きい。さらに、地上の交通インフラへの負荷は緩和されるかもしれないが、空の移動手段へと移行する人が増えることで、空における交通渋滞という新たな問題が発生する可能性がある。

また、都市の高層化によって増加すると予想される超高層建築物は、環境や経済へ不利な影響を及ぼすといわれている。実際に、アメリカの大都市であり高層ビルが立ち並ぶニューヨーク市では、建築物からの温室効果ガスの排出量が市全体の75%を占めている^[15]。また、都市部では都市部以外と比べて高い温度上昇が記録されており、ヒートアイランド現象や、局地的豪雨による都市型洪水の発生などには対策が必要である。

6. 2100年の戦略立案とロードマップ

本章では、先述した2100年社会DREAMとEAMを実現するための戦略やそのためのロードマップについて述べる(図12)。ここでは、世界的な社会動向やモビリティ開発の動向も併せて考察する。

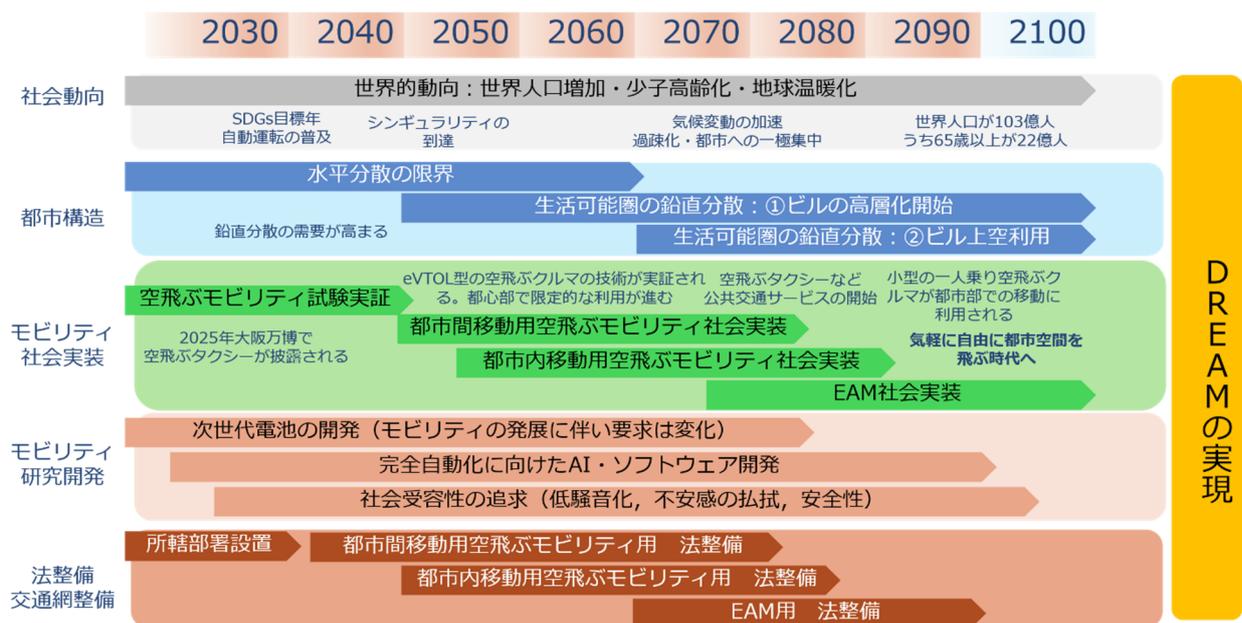


図 12 DREAM と EAM の実現に向けたロードマップ

ここでは、以下の5つの要素について考察を行った。

- 社会動向
- 都市構造
- モビリティ社会実装
- モビリティ研究開発
- 法整備・交通網整備

6.1. 社会動向

本節では、社会動向について述べる。ここでは第1節で述べたように、世界人口は2100年に向けて100億人以上へと増加し、先進国を中心に高齢化が進行、気候の温暖化も図3における温暖化対策が十分に行われなかったモデルを採用する。また、2030年には自動運転が普及し、2040年代にはシンギュラリティが起こると予想されていることから^[30]、2050年を前にAIを用いた自動化に対する社会の親和性は高まっているとする。当然、航空モビリティにおいてもAIの利活用が促進されると予想され、自動化・自立化が進むと考えられる。

6.2. 都市構造

都市の高層化に伴って、都市を構成する建築物も高層化すると考えられるが、現在、建築物の高層化には技術的な課題や経済的な課題があり、1,000mを超える建築物は存在しない。しかし、1990年代には日本建築センターを事務局として1994年12月に発足したハイパービルディング研究会が高さ1,000m、敷地1,000ha、耐用年数1,000年、人口10数万人の立体都市構想を実現するための研究を実施したことがあり^[31]、また2024年現在サウジアラビアで建設中のJeddah Towerは高さ1,000m以上とされており^[32]、ある程度の技術的基盤はあると考えられる。ただし、1,000mを超えるような高層建築物が群として都市形成しているものは現存しない。そのため、DREAMが提唱するような都市空間としての1,000mを超えるような高層化はそのための研究開発と並行して進んでいくと予想され、徐々に進行する。また、高層化に合わせて、ビル上空の空間を利用することもその後始められる。例として、後述する空飛ぶモビリティの社会実装が進行したことにより、わざわざ地表まで降りずに移動経路上で受けられる、例えばビル上空にキッチンカーのようなサービスが展開されることなども考えられる。このようにして都市構造は変化し、徐々に生活可能圏が高層化していくことで、我々が提案する2100年社会DREAMに近づくのである。

6.3. モビリティ社会実装

本節では、モビリティの社会実装のロードマップについて述べる。前節では都市構造の変化として都市の高層化を述べたが、これはモビリティの社会実装が完了することにより実現できる。しかし、モビリティの社会実装は容易ではなく、段階的に行う必要がある。まず、2020年代では、空飛ぶモビリティとしての技術開発が進み、試験実証を行っている。これにより、2030年までには、人間が個人単位で空を飛ぶことの技術が確立される。続く2030年代では、開発された技術から、空飛ぶモビリティを社会実装することを目標とする。ここで、対象とする空飛ぶモビリティは主に都市間移動に使用される固定翼を搭載したモビリティと、回転翼を搭載したモビリティであり、乗客を包む機体外壁があるものである。これらの社会実装には、社会的受容性の向上が必要不可欠である。特に、技術的には、航続時間を一般的なモビリティと同様にすることや、モビリティの自律化、低騒音化などを実現する必要がある。また、社会的受容性を向上させるためにはある一定期間が必要であり、徐々に受容性が高まることが想定される。そのため、2030年代以降、40~50年の期間を経て社会的受容性を向上させる。

これにより、2080年には空飛ぶモビリティが社会において一般的なモビリティとなっていることが予想される。また、空飛ぶモビリティの社会的受容性がある程度向上されたうえで、EAMのようなさらに

気軽な空飛ぶモビリティの社会実装を進める。ここでは、航続時間や低騒音化などの技術開発を続けるとともに安全性を格段に向上させることで、従来のような機体外壁のない空飛ぶモビリティ特有の不安感などを払拭し、社会的受容性を向上させることが必要となる。このようにして、段階的にモビリティの社会実装を進めることで、我々の提案する 2100 年社会 DREAM を実現するモビリティを社会に根付いたものにすることができると考えられる。

6.4. モビリティ研究開発

本節では、前節で述べた段階的なモビリティ社会実装に合わせて必要となる、モビリティのための研究開発について述べる。

- 次世代電池の開発

現在の空飛ぶモビリティにおける航続時間は 5~30 分程度と非常に少ない。これでは、一般利用を促進するためには不十分である。これは、現在使用されている電池の性能が原因である。電池の大きさを大きくすれば電池のエネルギー総量が増えて航続時間は伸びることが期待できるが、ある程度以上になると電池を運ぶためのエネルギー消費が卓越して航続時間は伸びなくなる。よって、電池の搭載量を増やすのではなく、電池のエネルギー密度を増やすか、機体の重量を可能な限り軽くしていく必要がある。また、DREAM で提唱する空飛ぶモビリティ EAM の目指す方向は 1 人が気軽に飛ぶことができるものであることを踏まえても、機体は可能な限り軽くできることが理想である。このことから、小型で高出力の動力を出すことができる次世代電池と共に比強度の高い材料の研究開発を進める必要がある。

具体的に現在の技術水準と要求される電池性能を比較する。たとえばマルチコプター型の一人乗り空飛ぶクルマである HELIX^[33]は全容量 8kWh の電池を搭載しており、30 分間航続可能とされている。バッテリーの重量は公表されていないが、仮にこのバッテリーのエネルギー密度が 200Wh/kg (現状の一般的な空飛ぶクルマに搭載されているバッテリーのエネルギー密度) とすると、このバッテリーの重量はおよそ 40kg ということになる。私たちが提案する EAM の要求性能である 10 時間航続可能で機体重量 30kg、バッテリー重量をその半分の 15kg に抑えたとすると、およそ 10kWh/kg のエネルギー密度が必要であることになる。これは HELIX に搭載されたバッテリーのエネルギー密度のおよそ 50 倍である。

近年では電気自動車や空飛ぶクルマの開発に伴って次世代二次電池の開発の重要性が指摘されている。特にリチウム空気電池は、理論容量密度が 10kWh/kg を超える可能性がある^[34]とされており、EAM への搭載も期待できる。

- 自動化、自律化

空飛ぶモビリティは、空という新たな環境であることから、地上の乗り物に比べて操作が困難であることが想定される。これは現在の飛行機やヘリコプターの操縦を見ても明らかである。一般社会に空飛ぶモビリティを普及させるためには、そうした操作の困難さを克服する必要がある。このことと、2040 年代にはシンギュラリティの到達が起こることを踏まえると、空飛ぶモビリティを社会実装初期段階で自動化、自律化をしておくことが妥当であるといえる。自律化されたものであれば行き先の指示だけで操作は容易、もしくは不要であり、社会実装に大きく貢献すると考えられる。そこで、現在ロボットや自動車において進められている自律化を航空モビリティに

においても進める必要がある。

- 社会的受容性の向上

上記のような技術的研究に加えて、人間の心理的な社会的受容性を向上させる研究開発も必要である。我々が目指すモビリティである EAM では、現在検討されているような空飛ぶモビリティとは異なり、機体外壁などの個人を守る機能が少ない。これは、陸上のモビリティとして自転車やバイクと、自動車の違いに表れているが、自転車やバイクが一般社会に普及した要因は、自分を守るものが少ない欠点よりも、その気軽さが勝ったためである。EAM においてもそのような気軽さの需要は必ずあると考えられるが、空を飛ぶということを考えると、自転車やバイクとは異なり、心理的不安感は強いと想定される。その要因は現在のところ不明瞭であり、機体外壁がないモビリティで高度数百メートルにいることの関係性などを明らかにする必要がある。また、オートモビリティとして機体外壁があるモビリティであった場合でも、空を飛ぶことに対する不安感がある人は多い。これは現在の飛行機をみても明らかである。こうした心理的不安感に対する研究を行い、原理を究明したうえで社会実装を行い、社会的受容性を向上させていくことが必要である。

6.5. 法整備・交通網整備

本節では、EAM を社会実装するにあたり必要となる法整備や交通網の整備について述べる。法整備や交通網整備の必要性については、すでに述べた通りである。しかし、現在のところ気軽に乗れる個人用エアモビリティを前提とした社会では無いため、そうした法整備を行う部署は日本においては設置することができていない。そのため、まずはそうした法整備を可能にする仕組みを設置し、その後法整備を進める必要がある。法整備は、モビリティの社会実装と都市構造の変化に合わせて進められる。まず、都市間移動用のモビリティを社会で使用可能にするため、都市上空の法整備を進める。具体的には、モビリティの飛行高度や速度上下限、安全審査項目の決定、交通網の整備などが挙げられる。その後、都市内移動用のモビリティの技術開発の進行に合わせて、必要な法律や規定類の整備を進める。ここでは、都市内（ビル間）を対象としている。最後に、EAM のような気軽なモビリティのための法整備を進める。ここでは、都市内を対象としつつ、モビリティの安全審査項目や認証基準の決定や、オートモビリティとの共存のための速度上下限や通行帯の整備が必要となる。このように、モビリティの社会実装の流れに合わせて、法整備や交通網整備を進める必要がある。

6.6. JAXA が行うべきこと

本節では、先述の戦略を踏まえ、JAXA として行うべきことについて述べる。JAXA は航空宇宙産業における先導者であることを踏まえると、先述したようなモビリティの社会実装のための技術開発と、法整備のための働きかけを行なっていくべきである。宇宙航空は莫大なコストがかかる技術が多く、そのための研究開発は民間だけでは難しい。そこで、JAXA が先導してその研究開発を行い、基盤技術が確立したのちに民間主導の産業としていく必要がある。また、法整備については、JAXA として研究開発を進める中で必要となる法律や交通網を提案し、関係各所に働きかけていくことが必要である。これは、宇宙航空の長い蓄積のある JAXA のみが貢献できる部分であると考えられる。

7. 議論とまとめ

本調査では、2100年の社会背景を世界人口や少子高齢化、気候変動などの観点からデータに基づいて考えたうえで、DREAMという都市社会の構想案を考案し、その社会を実現するために必要な新しい航空モビリティ EAM、およびこの新モビリティを社会に普及させるためのロードマップを提案した。

まず2100年の社会背景を考えると、世界人口の増加、少子高齢化、地球温暖化が進行することが、現状のデータから示された。これらの予測を考慮したうえで、2100年社会においては限られた地域・面積内に人口・都市サービスを集約し、公共インフラの維持管理の効率化を図る必要性が高まると推測した。そこで、人口が鉛直方向に分散しながらも、限られた面積に集約した都市サービスを享受できる都市構想 DREAM を提案し、この社会に共存する新たな航空モビリティ EAM を考案した。

EAM は、空飛ぶクルマよりも気軽で自由な移動手段を社会に提供する新規的な航空モビリティである。10時間航続可能なバッテリーを搭載し、マニュアル操作で自由な飛行移動が可能である。また、コンパクトで鉛直離着陸が可能な回転翼も搭載している。この EAM が 2100 年社会に登場することで、移動意識に明確な変革が起こる。すなわち、今まで地上を介することでしか立体空間へアクセスできなかったのが、地上を介さずに point-to-point で立体空間にアクセスできるようになり、移動のパラダイムシフトが起こる。航空機は従来より、空を飛ぶことで新たな価値を社会にもたらしたが、一般市民の日常生活にとって、その意義は平面移動の高速化以上のものを意味しなかった。しかし本調査を通して、高度に高層化され、鉛直方向に分散した都市社会 DREAM において EAM が導入されると、移動意識に水平方向と鉛直方向の区別がなくなるという劇的な変革が生じることを明らかにした。

このような利便性の高い EAM が実装され、移動意識に変革が起こった 2100 年社会 DREAM では、現在と比べて様々な変化が起こると考える。例えば、現在未利用の高所空間が生活領域へと拡張され、空飛ぶ自動販売機や宅配ボックスが浮遊していたり、ビル状の野菜工場で効率的な農業が可能になったり、公共インフラの維持管理が効率化したりと、多様な変化が見込まれる。この社会は、背景部分の課題であった世界人口の増加による都市人口の過密、少子高齢化による労働力不足、地球温暖化による居住可能地域の狭少に対応可能である。

最後に、この DREAM の実現のために、JAXA が取り組むべき項目をまとめたロードマップを提示した。このロードマップの中で、モビリティの社会実装に向けて JAXA 航空部門で次世代電池の開発や完全自動化に向けた取り組み、低騒音化などの研究開発を進める必要性を示した。また、モビリティの飛行時に必要となる法整備や交通網の整備に関しても、関連機関に対して働きかけを行う必要性を唱えた。

本調査は 2100 年に向けた予測の元で生じうる大きなパラダイムシフトの可能性を示した初期検討に当たる。今後は提示された要件について、より詳細かつ定量的な技術検討を進め、将来における社会変容の潮流を踏まえた技術戦略へと繋げていく必要がある。

謝 辞

本文書は宇宙航空研究開発機構の現場実習の一環として作成したものです。本実習の遂行にあたり、宇宙航空研究開発機構航空技術部門の二宮哲次郎氏、高戸谷健氏には多大なるご支援やご助言を賜りま

した。この場をお借りして、厚く感謝申し上げます。同部門の笹森萌奈美氏、徳川直子氏、川口純一郎氏、小池俊輔氏、賀澤順一氏、Zauner Markus 氏、Sansica Andrea 氏、Lusher David 氏、横川譲氏、村山光宏氏、恩田千尋氏、辻村光樹氏、佐藤花菜氏には、本実習の遂行にあたり多大なご助言、ご協力を賜りました。ここに深謝の意を表します。

参考文献

- [1] 齊藤 徹 (2020) : 「ビジネスマンのための未来予測入門」, 第 5 回 未来を予測することの意味, 未来予測支援ラボ, 株式会社 電通, <https://www.dentsu-fsl.jp/articles/951/>, (2024 年 6 月 6 日取得)
- [2] Abe et al. (2024): “Dynamic Living Space: Toward a Society Where People Can Live Anywhere in 2050”, *Futures* <https://doi.org/10.1016/j.futures.2024.103363>
- [3] 国立社会保障・人口問題研究所 (2024) : 「人口統計資料集」 https://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/Popular/P_Detail2024.asp?fname=T01-15.htm, (2024 年 6 月 6 日取得)
- [4] 国際連合広報センター (2019) : 「世界人口の増大が鈍化、2050 年に 97 億人に達した後、2100 年頃に 110 億人で頭打ちか：国連報告書」 https://www.unic.or.jp/news_press/info/33789/, (2024 年 6 月 4 日取得)
- [5] 総務省 (2020) : 令和 2 年版情報通信白書, 「第 1 部 5G が促すデジタル変革と新たな日常の構築」, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/html/nd121120.html>, (2024 年 6 月 4 日取得)
- [6] Spornobasilis et al. (2021): “Epidemics and pandemics: Is human overpopulation the elephant in the room?”, *Ethics Med Public Health*, doi.org/10.1016/j.jemep.2021.100728.
- [7] Population Reference Bureau (2011): “Disaster Risk and Vulnerability: The Role and Impact of Population and Society” <https://www.prb.org/resources/disaster-risk/>, (2024 年 6 月 4 日取得)
- [8] Kaushik et al. (2017): “Overpopulation and Its Association with Natural Disasters: A Case Study of Indian Tsunami, 2004”, *Environmental Issues Surrounding Human Overpopulation*, 189-201, doi.org/10.4018/978-1-5225-1683-5.ch011.
- [9] Cobbinah, P. B., and R. M. Darkwah (2016): “African Urbanism: The Geography of Urban Greenery.” *Urban Forum*, **27** (2): 149–165. [doi:10.1007/s12132-016-9274-z](https://doi.org/10.1007/s12132-016-9274-z).
- [10] Mosammam, H. M., J. T. Nia, H. Khani, A. Teymouri, and M. Kazemi (2017): “Monitoring Land Use Change and Measuring Urban Sprawl Based on Its Spatial Forms: The Case of Qom City.” *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, **20** (1): 103–116. [doi:10.1016/j.ejrs.2016.08.002](https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.08.002).
- [11] United Nations (2019): “World Population Prospects 2019” <https://www.unic.or.jp/files/8dddc40715a7446dae4f070a4554c3e0.pdf>, (2024 年 6 月 4 日取得)

- [12] 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第 6 次評価報告書 (2021) : <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/technical-summary/>, (2024 年 6 月 4 日取得)
- [13] NOAA (2022): “Climate Change: Global Sea Level” <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level>, (2024 年 6 月 4 日取得)
- [14] Held and Soden (2006): Robust responses of the hydrological cycle to global warming, *J. Climate*, 19, 5686–5699, doi.org/10.1175/JCLI3990.1.
- [15] 一般財団法人自治体国際化協会 : PlaNYC ニューヨーク市の長期計画 <https://www.clair.or.jp/jforum/pub/docs/PlaNYC20130111.pdf>, (2024 年 6 月 4 日取得)
- [16] 横浜国立大学先端科学高等研究院客員教授 織山和久著 : タワー公害 https://www.homes.co.jp/cont/press/opinion/opinion_00123/#hd_title_1, (2024 年 6 月 4 日取得)
- [17] NRI 用語解説一覧 : “シナリオ・プランニング” https://www.nri.com/jp/knowledge/glossary/1st/sa/scenario_planning, (2024 年 6 月 4 日取得)
- [18] 山田 健翔, 内山 貴啓, 加藤 裕之, 上野 真 (2021) : 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, 宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-20-003, 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA), <https://jaxa.repo.nii.ac.jp/record/47298/files/AA2030008000.pdf> (2024 年 7 月 6 日取得)
- [19] WIRED(2012) : 「日本のメーカー、「1 人乗りヘリ」を開発」 <https://wired.jp/2012/11/29/hirobo-hx-1/> (2024 年 7 月 6 日取得)
- [20] PIVOTAL: 「Introduce The HELIX」 <https://pivotal.aero/helix> (2024 年 7 月 6 日取得)
- [21] FLYNOE: 「Revolutionizing Urban Air Mobility」 <https://www.flynow-aviation.com/#perks> (2024 年 7 月 6 日取得)
- [22] FlyNow-Aviation, FlyNow, <https://www.flynow-aviation.com/>, (2024 年 6 月 4 日取得)
- [23] 日経クロステック : “タケコプター、タイムマシン、どこでもドアは実現できるか、3 大道具を徹底検証” <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00996/092000019/>, (2024 年 6 月 4 日取得)
- [24] NHK News : 空飛ぶクルマ 万博で国内初の商用運航へ 有人でテストフライト <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20231212/k10014285071000.html>, (2024 年 6 月 4 日取得)
- [25] 経済産業省 : 空の移動革命に向けたロードマップ(改訂案) https://www.meti.go.jp/shingikai/mo-no_info_service/air_mobility/pdf/008_01_02.pdf, (2024 年 6 月 4 日取得)
- [26] 矢野経済研究所 プレスリリース : “空飛ぶクルマ世界市場に関する調査を実施” https://www.yano.co.jp/press-release/show/press_id/3252, (2024 年 6 月 4 日取得)
- [27] 国土交通省 : PT 調査とは, <https://www.mlit.go.jp/crd/tosiko/pt.html>, (2024 年 6 月 4 日取得)
- [28] 国土交通省 : 都市における人の動きー平成 22 年全国都市交通特性調査集計結果からー (第 2 編)
- [29] 外務省 持続可能な開発目標 (SDGs) https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/pdf/SDGs_mokuhyou.pdf, (2024 年 6 月 4 日取得)
- [30] Kurzweil, R. (2005): The singularity is near: When humans transcend biology. Duckworth
- [31] 小林秀樹, 藤本秀一, 江袋聡司(2003) : 立体基盤建築物を成立させる法制度の研究 立体基盤 (スケルトン・人工地盤) と二次構造物 (インフィル等) を分離した建物に適した建築確認及び所有関連

制度の提案, 第2章, 国総研研究報告 第11号, 国土交通省国土技術政策総合研究所, chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/rpn/rpn0011pdf/kh0011006.pdf, (2024年6月5日取得)

[32] Jeddah Economic Company : The World's Tallest Tower, <https://jec.sa/>, (2024年6月5日取得)

[33] PIVOTAL、HELIX <https://pivotal.aero/helix>, (2024年6月4日取得)

[34] キーエンス：リチウムイオン電池・次世代電池における最新の観察と解析 <https://www.keyence.co.jp/ss/products/microscope/vhx-casestudy/electronics/lithium-ion-battery.jsp>, (2024年6月4日取得)

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-24-002
JAXA Research and Development Memorandum

2100年社会における個人航空モビリティの実装と立体都市の実現に向けて
Toward the installation of personal air mobility and a realization of a three-dimensional city
in 2100

発行 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1
URL: <https://www.jaxa.jp/>
発行日 2024年11月29日
電子出版制作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。
Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are
strictly prohibited. All Rights Reserved.

