



空の新たなモビリティーeVTOLの開発動向と展望

2019/6

三井物産戦略研究所
技術・イノベーション情報部 インダストリーイノベーション室
金城秀樹

Summary

- eVTOLと呼ばれる、空路で数名程度を短距離輸送する機体の開発が活発化している。
- 背景には、自動車産業での電池・モーターや、ドローン産業での自動操縦などの技術進展がある。
- 機体開発では、スタートアップ企業や航空機の大手製造企業などが多数参入している。
- サービスでは、米Uberが2020年代前半に空路のタクシー（エアタクシー）実現を目指す。
- 課題としては、機体開発では主にバッテリー、サービスでは安全性担保や収益性確保がある。
- eVTOLの普及は、用途では救急など緊急対応、地域では飛行規制が緩い新興国で先行する可能性がある。

eVTOL (electric Vertical Take-Off and Landing aircraft) と呼ばれる機体の開発が活発化している。空中を利用した立体的な輸送により、利用者に移動の大幅な時間短縮と利便性をもたらすことが期待されている。本稿では、eVTOLの特徴、機体開発の動向、サービスの動向、実現に向けた課題、展望について述べる。

他産業の技術転用で生まれた新しいモビリティー eVTOL

eVTOLは、ドローンと一般的な航空機の中間的な機体である。機体の特徴としては、垂直離着陸機能（VTOL: Vertical Take-Off and Landing）、機体の揚力・推力の電動化（モーターでローター（プロペラ）を回す）、操縦の自動化がある（図表1）。用途として、人の輸送においては、空路のタクシー（エアタクシー）、緊急対応（救急・警察・災害救助）、レジャーなどがある。モノの輸送においては、通常のドロ

図表1 eVTOLの特徴





- ✓ 垂直離着陸機能
- ✓ 機体の揚力・推力の電動化
- ✓ 操縦の自動化

出所：三井物産戦略研究所作成

ーンが運ぶものより大きな貨物輸送などがある。開発が活発化している背景には、自動車産業がけん引した電池・モーターやその制御技術、ドローン産業で培われた自動操縦技術に加え、炭素繊維複合材料といった機体軽量化技術の進展がある。

垂直離着陸機能を持つ航空機にはヘリコプターがある。eVTOLとの比較を図表2に示す。航続距離ではeVTOLはおおむね数十～300kmであり、ヘリコプターのおおむね600～800kmに比べて短い。また、定員でもeVTOLが少ない。しかし、ヘリコプターとの比較におけるeVTOLの利点として①低い騒音レベル、②低い操業コスト、③高い安全性が挙げられる。

図表 2 ヘリコプターと eVTOL の比較

	ヘリコプター	eVTOL
機体のイメージ		
ローター	・メインローター1基 ・テールローターあり	・小型のローター複数基 ・テールローターなし**
ローターを動かす動力	エンジン	モーター
動力源	燃料	・バッテリーのみ ・バッテリーとガスタービン発電機併用
航続距離***	おおむね600～800km	おおむね数十～300km
定員***	数人～十数名程度	最大で5名程度
離発着場の大きさ	着陸機体の全長・全幅以上 (地上の場合)	—

注：*メインローターを回す際に機体自体がその反対方向に回転しようとするため、それを打ち消す力を生み出す
 **eVTOLは時計回りと反時計回りのローターを持っており、機体自体が回転しようとする力が打ち消されている
 ***機種により異なるため目安
 出所：三井物産戦略研究所作成

①では、機体の揚力・推力の電動化によって、現在のヘリコプターの騒音レベルに対し4分の1程度となる見込みである。騒音は空路の利用での市民受容性における重要な要素である。低騒音により、人口密度の高いエリアや低い高度において飛行しやすくなる。

②では、電動化により複雑な回転機構や燃料系統がなくなることで、機体構造が単純化され整備コストが削減されると考えられる。ヘリコプターの整備コストは操業コストの約6割ともいわれるが、eVTOLでは操業コストの約2割まで削減できると想定されている（米Uber試算¹）。

③では、機体構造の単純化による故障発生の低下に加え、操縦の自動化（または操縦の支援）により安全性が増すとの予測もある。ヘリコプターは操縦が難しく、人的なエラーも起きやすいとされる。また、ヘリコプターは揚力や推力を生むローターが1基であり、それが故障すれば飛行が困難になる。これに対しeVTOLでは、ローターが複数基搭載されており、そのうちいくつかが故障したとしても他で補完できる頑強性がある。

¹ “Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation”, Uber, 2016

eVTOLは、①～③によりヘリコプターにはない新しい価値を持つ移動手段となる。なお、機体の価格については機種により異なるが、2人乗りの機体でいえば、老舗の米Robinson Helicopterのヘリコプター“R22”（航続距離：約460km）でおおむね30万ドル、ベンチャーの独VolocopterのeVTOL（航続距離：約27km）でおおむね34万ドルと想定される。

新規参入が進む機体開発

機体開発の分野では、スタートアップ企業や、航空機および自動車の大手製造企業を含む約80社以上が参入しているといわれる。

スタートアップ企業では、独Volocopter、中EHang、米Kitty Hawk、独Lilium、米Opener、米Hoversurf、米Joby Aviation、日CARTIVATORなどがある。

先行企業としてはVolocopterが挙げられる。同社の機体“Volocopter 2X”は定員2名（パイロット1名、乗客1名）で、その形状はマルチコプターと呼ばれる汎用の小型ドローンに近いイメージである。機体の幅は約9m、航空機用の炭素繊維複合材料で作られており重量は約290kgである。リチウムイオン電池で駆動される18基の小型ローターで飛行する。飛行速度は約100km/時、航続距離は約27kmであり、バッテリーは40分で急速充電できる。騒音レベルは、ヘリコプターの7分の1程度である。操縦桿ひとつで安定した飛行ができ、部分的なローター故障の際にも対応できるよう設計されている。機体姿勢制御など重要な航空電子機器は米Honeywellが供給している。2016年に有人飛行に成功した後、2017年にはUAEドバイにおいて飛行試験を行っている。2019年下半期にはシンガポールで同国政府支援の下で試験飛行を計画しており、2020年代前半の実用化を目指している。シンガポールでの試験では実験的に専用離発着場も建設し、ユーザーの搭乗プロセスの利便性などの検証も行う。市場開拓にも注力しており、空港運営企業の独Fraportと空港を拠点としたeVTOLを用いたエアタクシーサービスの開発を行っている。Volocopterは独Daimlerなどが支援している。図表3に主なスタートアップ企業の機体仕様と開発動向を示す。

図表3 主なスタートアップ企業の機体仕様と開発動向

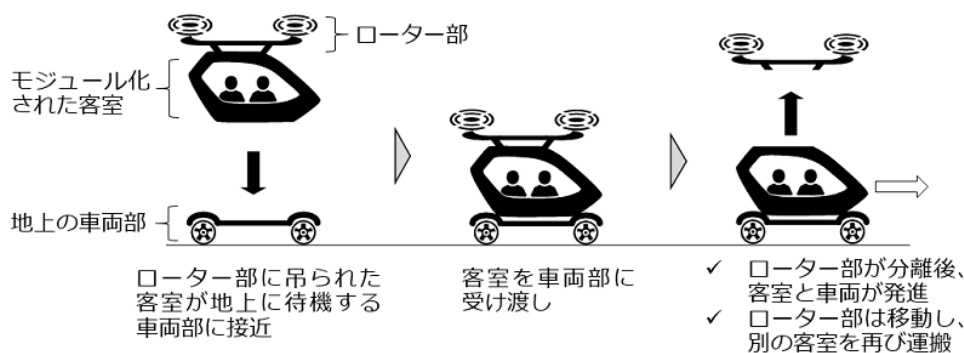
	EHang	Kitty Hawk	Lilium
拠点	中国	米国	ドイツ
機体名	EHang 216	Cora	Lilium Jet
定員	2名	2名	5名
機体幅	約4m	約11m	約11m
ローター数	16基	12基	36基
飛行速度	約130km/時	約180km/時	約300km/時
航続距離	約70km	約100km	約300km
開発動向	<ul style="list-style-type: none"> ・2021年に量産開始予定 ・1,000回以上の飛行実績 ・航空機器製造企業オーストリアFACCと協業 	<ul style="list-style-type: none"> ・2020年代前半にニュージーランドでエアタクシーを開始予定 ・400回以上の飛行実績 ・ニュージーランド航空と協業 	<ul style="list-style-type: none"> ・2025年に実用化予定 ・2019年4月に垂直離着陸の試験飛行に成功 ・中Tencentなどから約9千万ドルを調達

出所：三井物産戦略研究所作成

大手企業では、欧Airbus、米Boeing、米Bell Helicopter Textronなどがある。航空機製造技術や既存のサプライチェーンを活かせる強みに加え、プレーヤーの多様化など変化著しいモビリティサービスにおけるポジション確保の狙いがある。

Airbusは1人乗り用の機体“Vahana”と4人乗り用の機体“City Airbus”を開発している。Vahanaについては、2018年に試験機の初飛行に成功し、2019年2月には約7分間の試験飛行における垂直離着陸や水平飛行の様子が公開されている。基幹部品であるモーターは米MAGicALLが供給している。他方、City Airbusについては、2019年5月に初飛行に成功したと報道されている。Vahanaは2020年までに、City Airbusは2023年までにそれぞれ実用化を目指す。AirbusはeVTOLについては機体販売だけではなく、eVTOLを用いた関連サービスなどを含めたバリューチェーン全体でのビジネス展開を視野に入れている。同社は2017年からブラジル都市部などを中心としたオンデマンドヘリコプター（エアタクシー）サービスを提供する米Voomと連携し、都市域での航空交通システムのビジネス基盤の構築を進めている。Voomのサービスは2019年中に中国の深圳においても開始される見込みであり、Airbusはこれを足掛かりに深圳において2020年代半ばからeVTOLを用いたエアタクシーを導入する計画である。また、独Audiと連携し、空中移動と陸上移動とシームレスにつなぐコンセプトの検討を長期的な視点で行っている。“Pop.Up Next”と呼ばれるこのコンセプトでは、搭乗者の客室をコンテナのようにモジュール化し、それを空中のローター部と地上の車両部で受け渡しする革新的なものになっている（図表4）。

図表4 Pop.Up Nextのコンセプト



出所：Airbus 社資料を参考に三井物産戦略研究所作成

Boeingは、2019年1月に試験機で垂直離着陸の機能を確認している段階である。機体は2017年に買収した自動操縦技術に強い米Aurora Flight Sciencesが開発している。

Bell Helicopter Textronは、2019年1月に大型の5人乗りの機体“Bell Nexus”を発表した。同社は、2019年4月に住友商事との業務提携を発表している。

eVTOLを使ったサービスをけん引するUber

eVTOLを使ったサービスの分野で注目されるのが、先進国・新興国の都市部でのエアタクシーサービスである。類似の既存のエアタクシーとしては、携帯アプリなどで予約できるオンデマンドヘリコプター（例えば、前述のVoomなど）があるが、eVTOLを用いたエアタクシーは、より短い距離での移動に特化する。なお、都市域でのeVTOLを用いた輸送サービス全般は“Urban Air Mobility”とも呼ばれる（ヘリコプターを用いたエアタクシーを含む場合もある）。

eVTOLを用いたエアタクシーはどのような姿になるだろうか。現在、米国、ドイツ、シンガポールなどで企業が進めるエアタクシー計画がある。米国では、テキサス州のダラス・フォートワース国際空港、ダラスのダウンタウン、ダラスのベッドタウンとして急速に発展しているフリスコなどをつなぐ見込みである。そこでのエアタクシーの利用者としては、高い頻度で空港を使う出張者などが想定される。ドイツでは、フランクフルト空港を拠点とした旅行者の移動需要の取り込みが想定されている。シンガポールでは、沿岸部と中央ビジネス地区を結ぶ飛行ルートなどが挙げられており、そこではビジネスパーソンの利用が考えられる。また、シンガポールでは、eVTOLの離発着場を設置した大型ショッピングモールの買い物客などの利用も想定される。

他方、eVTOLを用いたエアタクシーを使いたいと思うのはどういった属性の人なのだろうか。AirbusはUrban Air Mobilityに対する市民の受容度の調査を実施している。調査は①メキシコシティ、②ロサンゼルス、③スイス、④ニュージーランドの約1,600人を対象に行われた。その結果、エアタクシーの利用に対し肯定的な意見を持つ割合は、地域別では①で約7割、②で約5割、③および④で約3割となっている。利用に肯定的な意見は25～34歳のグループで最も割合が多く、約6割となっている。この調査からは、深刻な渋滞がある地域を移動する人や比較的若い年齢層は、エアタクシー利用に対する受容度が高いと考えられる。

都市では、一般的には道路や公共交通といった交通システムが発達している。これに対し、エアタクシーの価値が発揮できるのは、既存の交通システムの輸送能力を利用者の需要が上回っているエリア（例：渋滞がひどい）や、既存の交通システムの利便性が利用者にとって高くないエリア（例：接続が悪い）などが主になる。他方、都市では既存の交通システムが十分にカバーできていないエリアもある。そういったエリアにおける新規ルートにおいても差別性を持つことができる。なお、エアタクシーは、出発地と目的地を直接つなぐend-to-endの移動ではない。エアタクシーの離発着場に行く必要があるため、離発着場までは他の地上の交通手段が利用される。その点において、前述のAirbusとAudiが取り組むような空中移動と陸上移動とをいかにシームレスにつなげられるかは、利便性において重要になる。

eVTOLを用いたエアタクシーサービスをけん引しているのが米Uberである。同社の2018年の自動運転（地上車両向け含む）やeVTOLの研究開発予算は約4億6千万ドルに達するともいわれる。サービスを構築するには、運航の安全性担保、騒音対策、新たな航空管制といった課題を解決しつつ、多様なプレーヤーとエコ

システムを形成する必要がある。そのため、機体や関連設備などの開発・製造企業、不動産開発事業、航空当局などとの連携を深めている。機体では、Aurora Flight Sciences、Bell Helicopter Textron、伯Embraerなど5社と協業体制を構築している。また、関連設備では、電気自動車向けの充電設備を展開する米ChargePointと協業している。Uberは2020年に米国ダラスとロサンゼルスおよび、オーストラリアのメルボルンにおいて実証試験を開始する予定である。2023年には航空機としての安全性の証明を得て、サービスを開始する計画だ。エアタクシーの利用料金についてはサービス開始当初は、既存のUberX（相乗りではなく自分だけが乗客となる配車サービス）の3倍程度になる見込みである。利用者の増加に伴いサービス規模が拡大すれば、UberXと同等の利用料金となるとしている。なお、Airbusにおいても都市域でのエアタクシーサービスの価格は自動車での移動に比べ2～2.5倍程度が妥当としている。

eVTOL産業が発展する上での課題

eVTOLの機体開発で主な課題となるのがバッテリーである。最も普及しているリチウムイオン電池のエネルギー密度は最大でおおむね240Wh/kgである。現在の性能においてもVolocopterの機体のように数10kmの航続距離の確保することは可能である。しかし、より長い航続距離のエアタクシーの実現に向け「全固体電池」などの新技術の実用化が待たれる。なお、リチウムイオン電池には可燃性の液体電解質が使用されているが、全固体電池では難燃性の固体電解質が使用されており、安全面でも利点がある。

eVTOLを使ったサービスにおける主な課題としては、①ユーザーに受容されるための安全性担保、②サービスが成立するための収益性確保などが挙げられる。

①の安全性担保では、一般的な航空機の安全性は、基準に基づいた設計・検査、緊急事態にも対応できるパイロット、何重ものバックアップ機能を有する堅牢性を持つ地上の航空管制により担保されている。現在の航空機の関連法規には、機体に関するもの、パイロット、機体整備、地上設備など運航に関するものがある。FAA（米国連邦航空局）やEASA（欧州航空安全機関）といった代表的な航空当局はこれらの既存の関連法規をeVTOLに適用しつつも、eVTOL独自の新しいものが必要との認識を示している。EASAは2018年にeVTOLの運用規制に関する公開協議を開始している。新しい関連法規の整備には時間を要する。航空当局がUberの計画の時間軸に沿った対応を確約しているわけではない。

②の収益性確保では、（1）初期コスト、（2）操業コスト、（3）機体の稼働率が重要となる。（1）初期コストには、主に機体コスト、離発着場の整備コストがある。機体コストはUberの試算では、4人乗りのeVTOL機体1機当たりで、年間100機の生産で約120万ドル、年間500機の生産で約60万ドル、年間5,000機の生産で約20万ドルを想定している。老舗米Robinson Helicopterの4人乗り用ヘリコプター“R44”の価格は、おおむね50万ドルとされる。eVTOLが、価格で対抗するとすれば、生産量としては年間500機を超える必要がある。なお、民間用ヘリコプターの販売機数は2019～2023年の5年間で約4,000機との予測がある。他方、離発着場の建設コストはUberの試算では、約80の離発着場の整備に対し約1.2億ドルのコストを想定

している。1カ所当たり、おおむね150万ドルである。離発着場は離発着のみを行うものと充電設備を持つものがある。充電設備については、他産業（電気自動車）からの技術転用がコスト削減を進めると考えられる。輸送システムとしての利便性を高めるためには、利便性の高い場所で多数の離発着場を構築する必要がある、既存のヘリポートや小規模ながらも未活用の土地がポイントとなるだろう。（2）操業コストでは、主にパイロットコスト、離発着場の運営コストがある。パイロットコストは、年間約5万ドル（小型飛行機を使った旅客運航で求められる程度の訓練を受けた人材を想定）が必要とされ、操業コストの約4割を占めると考えられる（Uber試算）。eVTOL機体の定員は最大でも5名程度であり、操縦の自動化によるインパクトは大きい。ただし、操縦の自動化による完全無人運航は10年以上先と考えられており、当面はパイロットコストを計上しておく必要がある。離発着場の運営コストには、場所代、地上オペレーション人件費、充電機器リース、警備費用などがあり、これらの削減もポイントとなる。（3）機体の稼働率は、気象に影響を受ける。雷雨、突風、視界不良などによる影響は、陸路より大きくなる。さらには、大きなビルの周辺範囲で発生する風（いわゆるビル風）などの影響もある。そのため、機体の気象に対する頑強性の向上のみならず、局所的な気象予測による運航可能時間の特定技術などの開発も求められている。

展望

eVTOL産業（機体や関連設備などの開発・製造、サービス）の本格的な立ち上がりは、2023～2025年になる見込みである。市場の成長要因としては、Uberのけん引力、バッテリーの技術進展、新しい輸送システムによる都市価値向上を狙う政府の取り組みなどがある。成長阻害要因としては、安全性確保に加え、市民の受容性や規制など事業の外部環境の不確実性がある。市場規模は多様な試算があるが、Urban Air Mobilityについては2030年までの累積で約500億ドルに達するとの予測もある。Urban Air Mobilityは都市の価値を向上させ、将来的にはスマートシティの一部になるとも考えられる。

eVTOL機体の導入が先行するのは、緊急対応用途と考えられる。経済性は低いが高社会的ニーズは高い。例えば、ドイツにおいては、救命救急ヘリコプターを運用する独ADAC Luftrettungが、短距離輸送におけるヘリコプターをeVTOL（Volocopter製）で代替することを検討している。また、UAEにおいては、ドバイ警察が現場急行の機動力確保としてeVTOL（Hoversurf製）導入を検討している。

eVTOLを用いたエアタクシーは、米国、オーストラリア、ドイツ、シンガポール、オーストラリア、ニュージーランド、UAEなどで実現に向けた取り組みが進んでいる。その一方で、交通・輸送インフラの整備が課題となっている新興国・途上国の地方部において導入が進む可能性もあるのではないかと。エアタクシーは自動車のような道路整備や鉄道のような線路敷設が不要で、相対的にインフラを整備しやすい。また、これらの地域では相対的に飛行規制が緩い点も後押しとなる。ルワンダでいち早くドローンを用いた医療関連品の輸送サービスを開始した米ベンチャーZiplineのような事業展開は、エアタクシーサービスにおいてもあり得ると考えられる。さらには、こういった場所での飛行実績を持つ企業が、先進国・新興国の都市

部を対象とした市場に参入することも考えられる。その際、飛行実績は、航空当局にとって承認にあたっての評価材料となる可能性がある。

eVTOL産業では、全固体電池や炭素繊維複合材料に加え、軽量化ニーズを満たす接着剤、3Dプリンターによる大型造形、その他省電力化技術などの発展も期待される。あらゆる技術ニーズを高いレベルで満たす必要があるeVTOL産業での技術の発展が、その後、自動車産業など他の産業に転用されていく可能性もある。

eVTOL産業の実現には時間を要するが、足元では各社の動きは活発化している。その動向に注目したい。

当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できると思われる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社及び三井物産グループの統一した見解を示すものではありません。また、当レポートのご利用により、直接的あるいは間接的な不利益・損害が発生したとしても、当社及び三井物産グループは一切責任を負いません。レポートに掲載された内容は予告なしに変更することがあります。

