

CARATS open dataを用いた航空機の占有空域 評価手法に関する検討

○塩川健斗 (大阪府立大学) , アンドレエバ森アドリアナ, 松野賀宣 (宇宙航空研究開発機構) ,
辻井利昭 (大阪府立大学)

Exploration of Potential Routes for Low-altitude UAM Operations near Kansai International Airport
Kento Shiokawa (Osaka Prefecture University), Adriana Andreeva-Mori, Yoshinori Matsuno (Japan
Aerospace Exploration Agency), Toshiaki Tsujii (Osaka Prefecture University)

Key Words: Urban Air Mobility (UAM), Kansai International Airport, Trajectory Containment Boundaries

Abstract

Recent technological advancements of electric thrust systems have enabled the fast development of Electric Vertical Take-off and Landing vehicles (eVTOL). An urban transportation system which moves people and goods in the air, i.e. Urban Air Mobility (UAM) can transform the world of aviation. UAM realization requires both eVTOL research and development as well as operation-supporting air traffic management systems. The trajectories used by UAM vehicles should not interfere with existing aircraft routes. In this research, Kansai International Airport is chosen as a use-case of congested airport and CARATS Open Data is used to obtain past aircraft trajectories. We investigate the airspace and routes potentially available to eVTOL by analyzing the airspace occupied by traditional civil aircraft arriving at the airport.

1. 研究概要

1.1 研究背景

近年、主にドローンなどに用いられる電気推進技術の目覚ましい発展やバッテリー容量の増大及び小型化により、小型のeVTOL (electric Vertical Take-off and Landing vehicle: 電気式離着陸機) や eSTOL (electric Short Take-off and Landing vehicle) の開発が世界中で行われている。この技術は、遠隔地における救急患者の輸送、交通渋滞が激しい都市部において長時間の通学、通勤を減らすといった人員輸送や、災害時における被災地への食糧の輸送といった物資輸送などの分野への応用が期待されている [1]。このようにeVTOLを用いて短距離かつ離陸地と目的地を直接結ぶ交通手段の概念はUAM(Urban Air Mobility)と呼ばれている [2]。過去には、Los Angeles Airwaysが1947年から1979年の32年間、New York Airwaysが1947年から1971年の24年間、ロサンゼルスやニューヨークといったアメリカの大都市においてヘリコプターを用いた人や物資の輸送を行っていたが、技術的な欠陥や騒音、諸費用といった要因により運航を停止した [1]。しかし、近年の電気推進技術は過去の騒音問題や燃料をはじめとする諸費用を最小化する可能性を秘めており、空を用いたより流動的な社会の実現可能性についての研究が数多くなされている。

日本では2018年に「空の移動革命に向けた官民協議会」という日本政府と民間業者から構成される有識者会議により「空の移動革命に向けたロードマップ」 [3]が取りまとめられた。ロードマップは主に、電動・垂直離着陸型・無操縦者航空機などのいわゆる“空飛ぶクルマ”を用いた身近で手軽な空の移動手段の実現が、地方における課題の解決策となることを期待し、官民が取り組んでいくべき技術開発や制度整備などについてまとめたものである。UAMの実現には、このように機体自身の開発とその機体の運航モデルや管制システムの開発を同時並行で進める必要がある。

1.2 先行研究

アメリカ全土にユーザーを持つ配車サービス大手のUBERは、UAMの実現に向けた問題点を、機体性能の観点だけでなく、ビジネスモデルの面からも分析を行っている [4]。UBERは配車サービスという事業をすでに行っていることから、地上における交通手段を自身で所持している。その手段を活かして、最大12機という複数のヘリポートを持つ施設に充電設備などの設備を持った「Vertiport」や、UAMを対象とした素早い離着陸を目的とする航空機用の単一のヘリポート「Vertistops」から、配車サービスによって目的

地へと客を移動させるビジネスモデルを提案している。また、運航面に関する指摘も行っており、その中でもUAMを実現させるために必要なこととして、音声によらないeVTOLや他の航空機との相互間の大規模なデータ交換システム、高高度において他の航空機との衝突を避けるためのUTM (Unmanned Traffic Management) システム、大都市の空港周辺の低高度において旅客機の離着陸と共存できるようなVTOLの交通流などを上げており [4]、空港周辺におけるeVTOLの空域統合性に言及している。

このようにUAMの運航は既存の航空機運航と密接に関わっている。それゆえ、UAMシステムはATC (Air Traffic Control) システムや、UAMに関係する航空機運航上のルール (例えばFAAやICAOなど) に加えられる変更、追加の設備が最小になるようにすべきである。また、同様に既存の航空機の管制を行う航空管制官への負担も最小にするべきである [1]。つまり、初期のUAMの運航は既存の航空機の占有空域に干渉しないように、UAMに特化した空域を考え、将来的に時間帯や運航形態によっては、IFRの間を協調して飛ばすようにするべきであると考えられる。

また、eVTOLとともに実用化が期待されているのがドローンなどの小型無人航空機である。Choiらは小型無人航空機に対してVRP (輸送計画問題) を用いて、それらが飛行可能な領域を効率的に設定することについて検討を行っている [5]。これは小型無人機だけでなく、eVTOLにも適応することも可能であると考えられる。

騒音問題はUAM実現のための重要課題である。電気推進技術の進歩により、現状のジェットエンジンなどに比べて電気推進では騒音は低減されることが予想されるが、eVTOLが上空を飛行する可能性のある地域において、住民らが納得できるレベルでなければならない [2]。また、騒音問題に関連して、飛行禁止空域を設定することや、万が一の場合に備えた緊急着陸地をあらかじめ設定しておくことも重要であると考えられる。このように、地域に受け入れられる運航システムを開発することはUAMを実現するためには必要不可欠である。

機体のエンジンシステムや形態に関しても数多くが提案されている。Polaczykらは世界中で研究開発が行われている44つのVTOL開発プロジェクトについて、機体開発の傾向や各形態のメリット・デメリットについてまとめている。その中でも、現在の主流は全電動式 (エンジンを一切使わない設計) であるが、エンジンと電気のハイブリッドにも言及しており、ハイブリッドの方が航続距離の面で全電気式の機体に

勝るという主張は興味深い [6]。また、Shamiyehらはマルチコプタ-型と揚力推力分離型 (Lift+Cruise) の主に2種類の形式について、エネルギー効率や飛行時間の算出を行った [7]。今後さらなる研究開発の結果として新たなeVTOLの形態が提案されることは十分に考えられる。

1.3 研究目的

eVTOLは空を利用する新たなユーザーとして、既存の航空管制に与える負担を最小にする必要があるが、そのためには天候などを考慮して、eVTOLがどこをどのように安全かつ効率的に飛行するかを考えなければならない。特に大規模空港周辺では多くの航空機が飛行することから注意が必要である。そこで本研究では、既存の航空機の占有空域を統計的に評価し、既存の航空機に干渉せずにeVTOLが飛行可能な空域を把握することを目的とした。本報告書ではそれに至るまでの過程として、関西国際空港への着陸便をユースケースとして、その占有空域を把握した結果について考察する。

2. Carats Open Dataを用いた占有域評価

2.1 解析の流れ

以下の図 1に占有空域評価のプロセスを示す。①まず初めに、実機のレーダーデータを用いて関西国際空港への着陸便の交通流モデルを作成する。②そして、それぞれの滑走路への着陸経路に対して平均経路を算出する。③Trajectory Containment Boundaries [8]という、平均経路に垂直な境界を占有空域を評価するために用い、それぞれの滑走路への着陸便の占有空域を評価した。次章以降でそれぞれの方法について詳しく説明する。

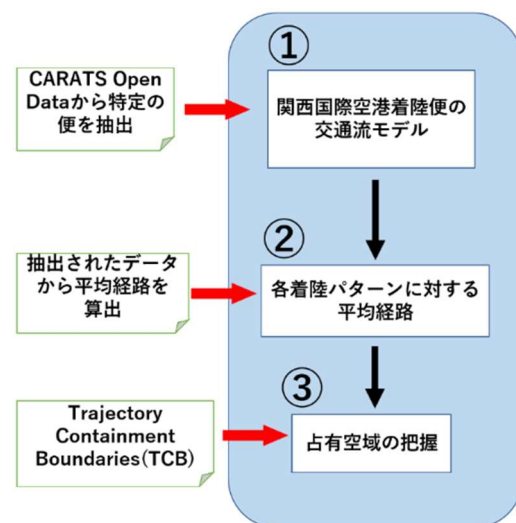


図 1 占有空域評価のプロセス

2.2 関西国際空港の概要

研究対象とした関西国際空港の概要について説明する。関西国際空港は、大阪の泉州沖に位置する24時間運用の海上空港であり、空港の北側にはユニバーサルスタジオジャパンや2025年に大阪・関西万博が行われる予定の夢洲が存在している。

関西国際空港は滑走路を2本持ち、方向は北から時計回りに60°及び240°である。北東風が強い場合、着陸便は主にRWY(Runway)06を用い(図 2)、南西風が強い場合にはRWY24を用いる(図 3)傾向にある。

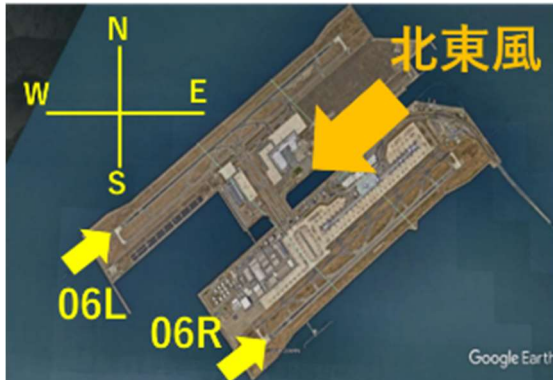


図 2 北東風が強い場合の運用



図 3 南西風が強い場合の運用

2.3 CARATS Open Data

次に本研究で実機のレーダーデータとして用いたCARATS Open Dataについて説明する。CARATS Open Dataは国土交通省が提供しているもので、福岡FIR(福岡情報区)を飛行するIFR機の位置情報が記録されている。CARATS Open Dataには各年の奇数月において1週間分のデータが記録されており、本研究では2013年5月から2017年3月までの合計168日分の飛行データを使用した。

なお、本研究において抽出された便数は各滑走路に対して、表 1 のようであった。ただし、風によってはRWY24かRWY06のどちらか一方しか使用しない日もあるため、上述した日程の全てで4つの滑走路への着陸便が記録されたわけではないことに留意されたい。

表 1 抽出された着陸便数

着陸滑走路	抽出便数[便]
06R	10920
06L	8898
24R	3760
24L	6908

3. 関西国際空港着陸便の交通流モデル

CARATS Open Dataから抽出された各滑走路への着陸便のL番目の経路に対する滑走路に近い方からn番目に記録された点の座標を $X_L(n)$ とし、その緯度(Latitude)、経度(Longitude)および高度(Altitude)を以下のように表す。

$$lat_L(n), lon_L(n), alt_L(n) \quad (1)$$

ここで、 $n=1$ の点は各経路に対して滑走路に一番近い場所で記録された点であり、そこから $n=2, 3$ と n を増加させながら記録された点を結んでいくことで、各滑走路への着陸便の交通流モデルを作成することが出来る。以下の図 4、図 5に北東方向から風が吹く場合と南西側から風が吹く場合のそれぞれの場合について、上記の要領で作成した着陸便のモデルを上から見た図を示した。

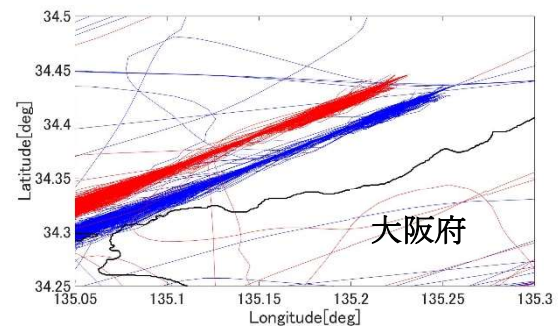


図 4 北東風が強い場合の交通流モデル

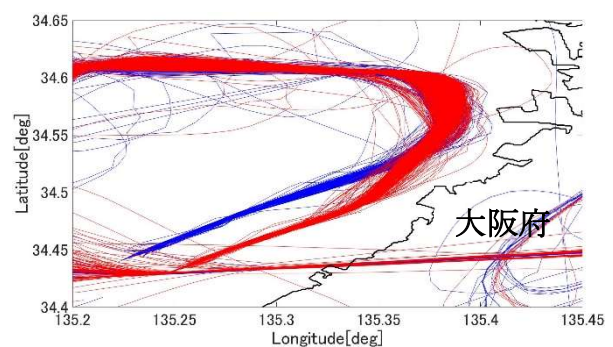


図 5 南西風が強い場合の交通流モデル

図 4では、RWY06Lへの着陸便が赤、RWY06Rへの着陸便が青で示されているが、全体的な傾向として滑走路から遠い位置から直線的に着陸している様子

が分かる。また、RWY06Rへの着陸便の中には大阪府南西部の陸地付近とかなり近くなっている便も見ることが出来る。RWY06Rへの着陸便は陸地とは離れた位置への着陸であるが、滑走路付近において広がりが大きくなっている様子も見られる。

一方、図 5にはRWY24Lへの着陸便が赤、RWY24Rへの着陸便が青で示されているが、大阪湾岸の陸地を避けるために旋回しながら着陸する必要がある。特にRWY24Lへの着陸便は陸地に近い位置を旋回しながら着陸しなければならないため、全体の交通流モデルの曲りも大きくなっている様子が見られる。また、全経路の中には、旋回の内側をショートカットしながら着陸する経路も見られるが、これは交通流が少ない時間帯などに早く空港へ着陸するため、外側に膨らみ陸地に重なるのを避けるため、また風によって流されたためといった原因が考えられる。RWY24Rへの着陸は陸地から遠いため、RWY24Lへの着陸便と比べて極端にショートカットを行う便は少なく、比較的余裕を持ちながら着陸している様子が見られる。

4. 占有空域評価方法

4.1 水平方向の占有空域評価手法

上述した着陸便の交通流モデルに対して、占有空域を算出する方法について説明する。Vascikらが提唱したTrajectory Containment Boundaries [8]は以下の図6のように、平均経路に垂直な四角形の領域を考え、その中に全着陸便に対して特定の割合の便数が含まれるように境界の値を設定し、それを平均経路に沿って繰り返すことで占有空域を評価するというものであった。

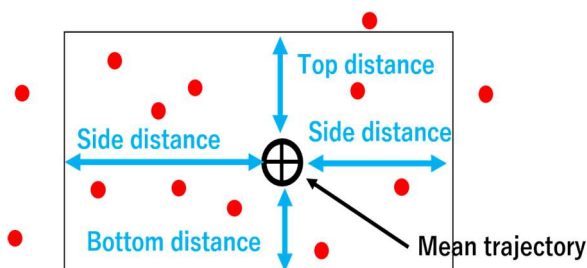


図 6 占有空域評価手法の概念図

続いて、具体的にこの境界をCARATS Open Dataに保存された点から算出する方法を説明する。

まず、ある滑走路への着陸便に対して、 n 番目の平均点の緯度、経度は以下のように表される。

$$\text{lat}_m(n) = \frac{\sum \text{lat}_L(n)}{M}, L: 1 \sim M \quad (2)$$

$$\text{lon}_m(n) = \frac{\sum \text{lon}_L(n)}{M}, L: 1 \sim M \quad (3)$$

ただし、 M は各滑走路着陸便の総数である。この平均点を線形補完することで平均経路を算出することが出来るが、ここで n 番目の平均点と $n+1$ 番目の平均点を結ぶ直線(平均線)、および n 番目の平均点を通る平均線に垂直な線(垂直線)の式は、それぞれの直線上の緯度を $\text{lat}_{\text{average}}$ 、 $\text{lat}_{\text{vertical}}$ 、経度を $\text{lon}_{\text{average}}$ 、 $\text{lon}_{\text{vertical}}$ のように表すと、

$$\text{lat}_{\text{average}} = A(\text{lon}_{\text{average}} - \text{lon}_m(n)) + \text{lat}_m(n) \quad (4)$$

$$\text{lat}_{\text{vertical}} = -\frac{1}{A}\text{lon}_{\text{vertical}} + B \quad (5)$$

ただし、

$$A = \frac{\text{lat}_m(n+1) - \text{lat}_m(n)}{\text{lon}_m(n+1) - \text{lon}_m(n)} \quad (6)$$

$$B = \frac{1}{A}\text{lon}_m(n) + \text{lat}_m(n) \quad (7)$$

さらに、平均線に平行な直線は、切片を B_2 として

$$\text{lat}'_{\text{average}} = A \times \text{lon}'_{\text{average}} + B_2 \quad (8)$$

このとき、ある $\mathbf{X}_L(n)$ が直線(8)よりも上に位置しているとき、その点の満たすべき条件は

$$\text{lat}_L(n) > A \times \text{lon}_L(n) + B_2 \quad (9)$$

であり、これを満たす点が特定の数(例として99%の占有空域に対しては0.5%)になるように B_2 を変更し、その時の式(8)と式(5)の交点 $\mathbf{Z}_1(n)$ の経度と緯度

$$\text{lon}_{\text{TCB}} = \frac{B - B_2}{A + \frac{1}{A}}, \text{lat}_{\text{TCB}} = -\frac{B - B_2}{A^2 + 1} + B \quad (10)$$

を、水平方向の占有空域の片方の境界の点とする。同様に、

$$\text{lat}_L(n) < A \times \text{lon}_L(n) + B_2 \quad (11)$$

を満たす点の数が特定の数(例として99%の占有空域に対しては0.5%)となるようにして求めた式と式の交点 $\mathbf{Z}_2(n)$ の経度および緯度をもう片方の境界の値として設定する。以上の要領で算出した境界の端点を結んだものが n 番目のTrajectory Containment Boundariesの横幅となる。

4.2 高度方向の占有空域評価手法

高度方向も同様にして、下限高度よりも下側と上側のそれぞれに特定の割合の点が存在するように下限高度と上限高度を設定した。つまり、 n 番目の点の分布に対して、下限高度を $\text{alt}_{\text{bottom}}(n)$ 、上限高度を $\text{alt}_{\text{top}}(n)$ とすると、99%の占有空域では

$$\text{alt}_L(n) < \text{alt}_{\text{bottom}}(n) \quad (12)$$

を満たす点がある滑走路へ着陸する全便数の0.5%に

なるように $alt_{bottom}(n)$ を決め、さらに

$$alt_L(n) > alt_{top}(n) \quad (13)$$

を満たすように $alt_{top}(n)$ を決めることで n 番目の下限高度と上限高度を求められる。以上の方法で求められた境界の点を結ぶことで n 番目の境界(四角形)を描くことが出来る。

これを $n=22$ まで繰り返し、それぞれの端点を繋いでいくことで全体の占有空域を評価することが出来る。

5. 水平方向の占有空域評価

5.1 RWY06を用いた場合の占有空域

以下の図 7, 図 8にRWY06を用いた場合の95%の水平方向占有空域と99%の水平方向占有空域の概形を上から見た図で示した。



図 7 RWY06への着陸便の占有空域(95%)

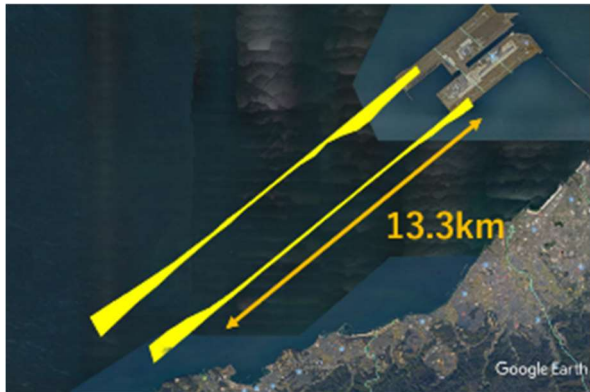


図 8 RWY06への着陸便の占有空域(99%)

まずRWY06への着陸便は交通流モデルで確認されたように、滑走路から離れた位置から直線的に着陸していることから占有空域の広がり小さいことが分かる。実際、95%の占有空域に着目すると、占有空域の横幅は約100mで一定であることが分かった。また、99%の占有空域は95%の占有空域と同様に全体的には直線的で狭い範囲を示しているが、滑走路末端から13.3kmの地点よりも遠い位置で占有空域が広がる様子が見られる。RWY06Lへの着陸便は陸地から離れているため、滑走路末端から遠くなるにつれて

中心線に対称に広がっている様子が見られるが、RWY06Rへの着陸便は進行方向東側に陸地があり、進行方向東側よりも陸地から遠くの西側に広がっている様子が見られる。99%、95%のどちらの占有空域を考えてもRWY06Rへの占有空域は陸地の近くにまで及ぶことから、陸地周辺でeVTOLの飛行を考える際は注意が必要である。

5.1 RWY24を用いた場合の占有空域

次に、RWY24を用いた場合の占有空域の概形を上から見た図を以下の図 9及び図 10に示す。

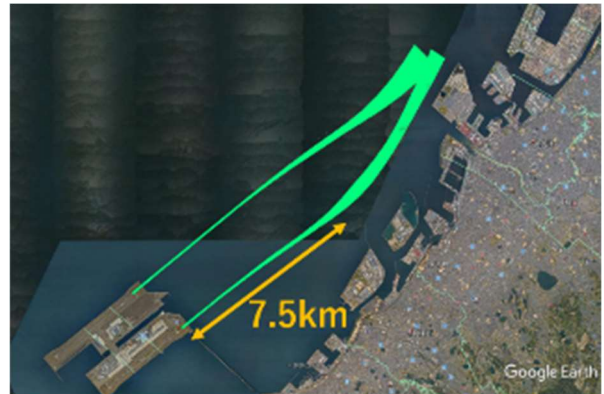


図 9 RWY24への着陸便の占有空域(95%)

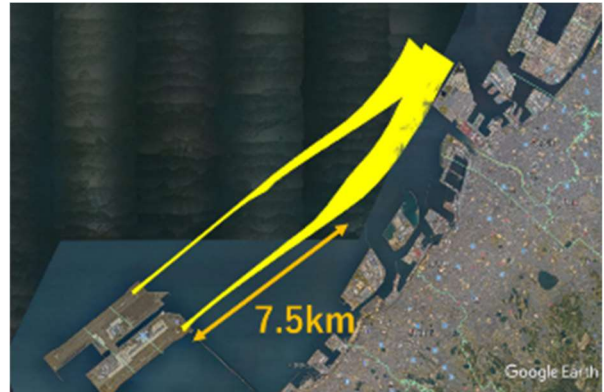


図 10 RWY24への着陸便の占有空域(99%)

RWY24を用いた場合は、RWY06とは異なり旋回を伴う着陸をするため、占有空域が95%、99%共に広がっている様子が見られる。95%の占有空域に着目すると、RWY24Rへの着陸便は滑走路末端から約15kmの位置($n=22$ の位置)から進入するにつれて急激に占有空域が小さくなっている。そして滑走路末端付近では横幅が約100m程度となる。一方、RWY24Lへの着陸便は滑走路末端から約15kmの地点ではRWY24Rへの着陸便よりも横幅が狭いものの、そこからさらに滑走路に近づくにつれて横幅は急激に小さくはならず、変化率は小さい。そして、滑走路末端から7.5kmの位置で水平方向の広がり急激に減少し、最終的に滑走路末端付近では幅は約100mとなり、RWY24Rへの着陸便と同等となる。

99%の占有空域を見ると、RWY24Rの占有空域は95%の場合と同様の傾向を示し、滑走路末端から15kmの位置から単調に減少している。一方、RWY24Lへの着陸便は95%の場合よりも占有空域が広くなり、特に泉大津市の沿岸部の陸地と近くなっている。このため、eVTOLが泉大津市の沿岸部周辺を飛行する場合は注意が必要である。

以上、RWY24を用いた場合とRWY06を用いた場合の95%と99%の占有空域から見る限り、大阪沿岸部をeVTOLが飛行する際には、空港の南西側の方が北東側よりも既存の航空機に干渉せずにeVTOLが飛行できる空域が広いのではないかと考えられる。

6. eVTOLの離着陸パターン

6.1 RWY06を用いる場合

これまでの議論は、関西国際空港周辺において既存の航空機の占有空域と干渉せずにeVTOLがどこを飛行できるかというものであったが、実際にeVTOLが関西国際空港に離発着する場合には、既存の航空機の占有空域の下側を飛行する必要がある。よって、この章ではeVTOLが関西国際空港に離発着する場合にどのような飛行パターンが考えられるかを示した。検討にあたっては、以下の仮定を設定した。① 空港の上空は飛行しない。② 既存の航空機の占有空域の下限高度が300m以上の際にその下を通過できる。これは現状の航空法ではVFR機は高度29000ft以下ではIFR機と高度方向に約150m(500ft)の間隔を空ける必要があり、それを考慮した上でもかつ海面から150mの範囲を飛行できるということで、下限高度が300m以上のときその下を飛行できると仮定した。ただし、eVTOLは航空法上で明確な記述が無く、セパレーションをもっと狭くできる可能性があるが、それについては今後の課題とし、今回の検討では高度方向のセパレーションについては航空法のVFRに関する記述を参考にした。図 11、図 12に、南西からのアプローチ(RWY06を使用)の下限高度の変化を、95%と99%の占有空域それぞれについて色分けして示した。また95%の占有空域には、eVTOLの離着陸パターンを示した。

RWY06を用いた場合は、高度変化の色ごとの長さが等しくなっており(下限高度が400m以下の範囲で)、高度変化から見ても直線的に着陸してくることが読み取れる。滑走路末端から約6.7kmの地点より滑走路に近い側で占有空域の下限高度が300m以下であるため、その位置より離れた位置でなければ上述の仮定の下では、既存の航空機の占有空域の下側を通り抜けることは出来ないが、図 11のようにウェイポイン

ト(丸で示した)を通るようにeVTOLが飛行することで、関西国際空港への離着陸が可能ではないかと考えられる。また、RWY06RとRWY06Lへの着陸便の占有空域の間には2.2km程度の間隔があり、離着陸で別々の経路を設定することでより効率的な運航が可能である。

一方、99%の占有空域の下限高度を見ても、95%と同様の傾向を示すが、RWY06Lの占有空域は下限高度が300m以下の空域が滑走路末端から7.2km程度まで延びてしまうため、eVTOLの離陸経路についてはさらに滑走路末端から遠い位置まで飛行しなければならないが、同様にウェイポイントを設定することで離着陸の経路が設定可能である。

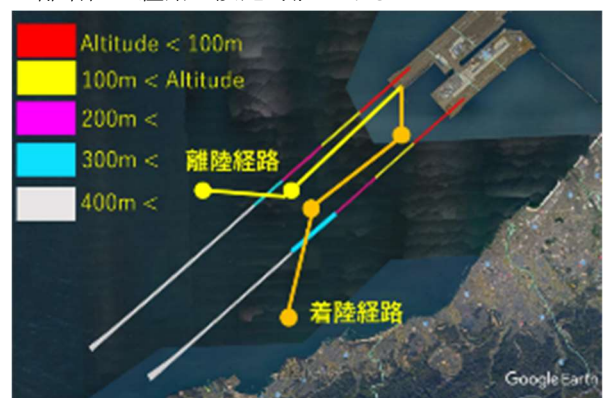


図 11 RWY06への着陸便の占有空域の下限高度(95%)

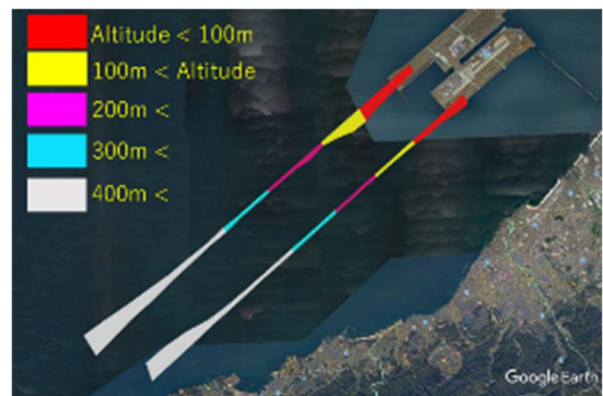


図 12 RWY06への着陸便の占有空域の下限高度(99%)

6.2 RWY24を用いる場合

次に、既存の航空機がRWY24を用いる(南西風が吹く)場合について考察を行う。次頁の図 13、図 14にRWY24への着陸便の下限高度の変化及び、eVTOLの離着陸パターンについて示した。

RWY24への着陸便は陸地を避けるため旋回しながらの着陸であり、旋回が終了してから直線着陸での態勢を整えるため水平飛行の区間があり、そのため

下限高度が300m以下(特に200mから300m)の空域が広がっている。この傾向はより陸地に近い側を飛行するRWY24Lへの占有空域で顕著に見られる。RWY24Lの占有空域では、95%の占有空域に比べて99%の占有空域では滑走路末端からさらに遠くの位置まで300m以下の低高度空域が延びている。

95%の占有空域にはRWY06の場合と同様にウェイポイントを用いたeVTOLの離着陸経路が示されているが、特にRWY24Lの下限高度の下を通る(図13で示した着陸経路)場合は下限高度が低い領域が続くため、空港の南西側から飛び立つ(RWY06の占有空域の下側を通る)場合に比べて経路設定が難しい。

RWY24RとRWY24Lの占有空域の間隔は2.2kmほどあるため、この中で離陸経路と着陸経路を設定することは十分可能ではないかと考えられる。

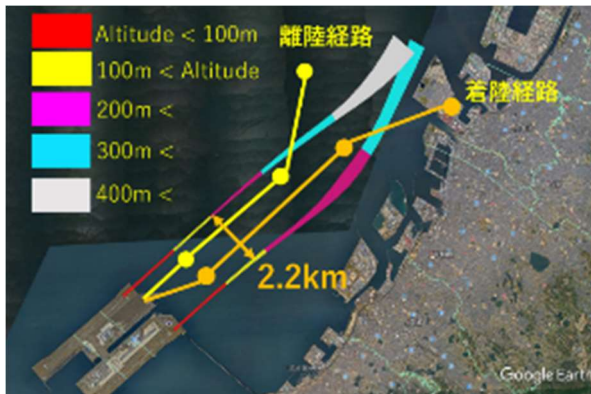


図13 RWY24への着陸便の占有空域の下限高度(95%)

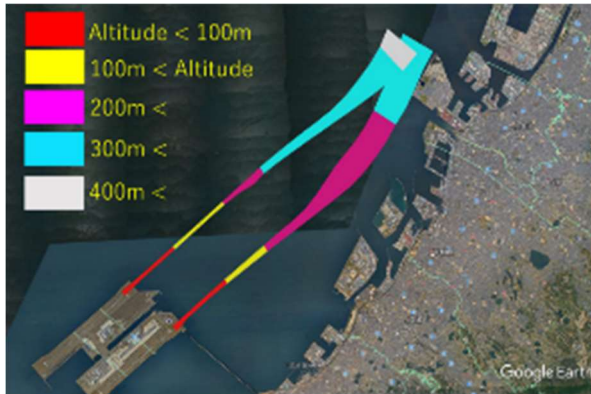


図14 RWY24への着陸便の占有空域の下限高度(99%)

7. 結論と今後の課題

本研究では、大規模空港周辺でのeVTOLの運航モデル作成のために、既存の航空機の占有空域に干渉せずにeVTOLが飛行可能な空域を把握することを目的とし、それに至るまでの過程として関西国際空港の着陸便の占有空域を評価した。その結果として、関西国際空港周辺においてeVTOLの運航を考えた場合、

既存の航空機の占有空域に干渉しないという点で、空港の北東側よりも南西側の方がeVTOLに使用可能な空域が広いということが分かった。また、関西国際空港に直接eVTOLが離着陸する場合には、既存の航空機の下限高度の下を通り抜けなければならないが、その際に下限高度を考慮した離着陸経路を示すことが出来た。ただし、このように占有空域の下を飛行する経路は、既存の航空機との距離が近くなりやすく、通常利用を行うにはより厳密なeVTOLと航空機のセパレーションの検討が必要であり、運航の初期段階では、eVTOLが空港などに離着陸する場合に限りべきである。

今後は占有空域評価手法の精度を向上させるとともに、既存の航空機とeVTOLの間に設定されるべきセパレーションについて検討を行うことで、さらに詳細なeVTOLに使用可能な空域が評価できると考えられる。

参考文献

- [1] D. P. Thippavong, et al, "Urban Air Mobility Airspace Integration Concepts and Considerations," AIAA Aviation forum, Atlanta, GA, 2018.
- [2] P. D. Vascik, R. J. Hansman, N. S. Dunn, "Analysis of Urban Air Mobility Operational Constraints," Journal of Air Transportation, October, 2018.
- [3] 空の移動革命に向けた官民協議会, "空の移動革命に向けたロードマップ," 2018.
- [4] UBER Elevate, "Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation," 2016.
- [5] Y. Choi, B. Robertson, Y. Choi, D. Mavris, "Amulti-Trip Vehicle Routing Problem for Small Unmanned Aircraft Systems-Based Urban Delivery," Journal of Aircraft, Atlanta, Georgia, 2019.
- [6] N. Polaczyk, E. Trombino, P. Wei, M. Mitici, "A review of current technology and research in urban on-demand air mobility applications," 8th Biennial Autonomous VTOL Technical Meeting and 6th Annual Electric VTOL Symposium 2019, 2019.
- [7] M. Shamiyeh, R. Rothfeld, M. Hornung, L. Bauhaus, "A Performance Benchmark of Recent Personal Air Vehicle Concepts for Urban Air Mobility," 31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Belo Horizonte, Brazil, 2018.