

卒業論文要旨

定期旅客便の軌道予測のための3パラメタ法による飛行軌道最適化

Flight Trajectory Optimization using 3-parameter Method for Trajectory Prediction of Passenger Aircraft Scheduled Flight

システム工学群

機械・航空システム制御研究室 1210125 仲村 兼斉

1. 緒言

新型コロナウイルスの拡大により人の流動が減少する以前は世界的に航空機の利用が高まっており日本においても国内の旅客数が増加傾向にあった。航空交通量の増加により、運行者、利用者の多様化、利便性の向上、運航効率の向上、地球温暖化対策など複数の問題に的確に対応していくことが求められている。日本では「将来の航空交通システムに関する長期ビジョン」(Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems, CARATS)を策定し、航空交通管理(Air Traffic Management, ATM)運用概念などの変革に向けた活動が行われている。現在ほぼ全ての定期旅客便に搭載されている飛行管理システム(Flight Management System, FMS)を地上で精度よく再現することで定点通過時刻を予測し、あらかじめ複数の航空機を整然とすることで効率を向上させることが可能であると考えられる。

そこで本研究では3パラメタ法と呼ばれる飛行軌道生成法を用いて最適軌道を算出し、定点通過の時刻予測に用いることができるか検討する。

2. 3パラメタ法による飛行軌道最適化

2.1 3パラメタ法による軌道生成

3パラメタ法とはシミュレータによる飛行試験の結果からFMSが速度パラメタを元に軌道を算出しているという知見から考案された軌道生成法である⁽²⁾。上昇の較正対気速度、巡航マッハ数、降下の較正対気速度の3つの速度パラメタの組み合わせによって軌道を生成する。巡航高度と飛行距離をあらかじめ設定する必要がある。運動モデルは非慣性座標系における質点近似の運動モデルとし、質量変化はないものとする。また、経路角の変化は小さいとした準定常飛行を仮定する。機体性能モデルは欧州航空航法安全機構(the European Organization for the Safety of Air Navigation, EUROCONTROL)から提供されているBADA(Base of Aircraft Data)モデルを用いる。上昇・降下フェーズは、較正対気速度一定とマッハ数一定の速度に従う。上昇・降下のマッハ数は、巡航マッハ数と同じ値を用いる。較正対気速度一定からマッハ数一定へ遷移する点はBADAの技術書記載の式に従う。軌道算出の手順として、はじめに巡航高度から終点までの降下フェーズを

計算し降下開始点を求める。次に飛行開始点から、求めた降下開始点までの上昇と巡航を計算し軌道を生成する。

2.2 軌道最適化

はじめに最適化に用いる評価関数を示す。

$$J = \int_{t_0}^{t_f} f dt + a \int_{t_0}^{t_f} dt \quad (1)$$

燃料流量 f を含む右辺第一項は燃料消費量を表し、右辺第二項は飛行時間に重み付けした値を表している。この a の値は燃料コストと時間コストに関連しており、コストインデックス(Cost Index, CI)と呼ばれる飛行軌道算出に重要なパラメタとも以下の様な関係にある。

$$CI = 79.37a \quad (2)$$

次に、本研究で提案する最適化法について説明する。動的計画法などに用いられている最適性の原理⁽³⁾を用いて最適解を求める。飛行距離を半分にし、2区間で最適解を算出する。初めに降下フェーズと、飛行距離の半分から降下開始点までの巡航フェーズを計算し、これを前半とする。次に上昇フェーズと、飛行距離の半分までの巡航フェーズを計算し、これを後半とする。計算手順を図1に示す。また最適解の探索についての概念図を以下の図2に示す。

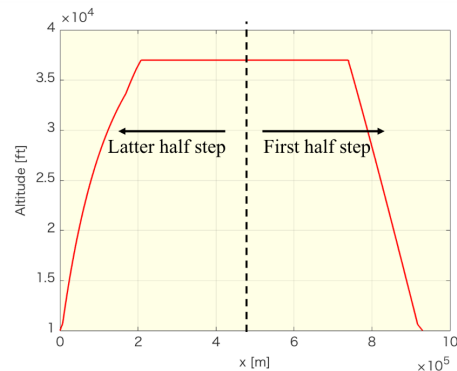


Fig.1 Calculation Order diagram

前半として降下の較正対気速度と巡航マッハ数の最適な組み合わせを探索する。初めに降下フェーズを終点から逆時間的に計算する。次に、飛行距離の半分の位置から降下開始

点までの巡航の飛行を計算し、降下フェーズと加えて比較し巡航マッハ数ごとに最適な降下の較正対気速度と評価関数値を保存する。後半として上昇の較正対気速度と巡航マッハ数の最適な組み合わせを探索するために上昇フェーズと飛行距離の半分までの巡航フェーズを計算し、軌道生成する。比較する際には、巡航マッハ数に先に保存していた飛行距離の半分から降下、終点までの評価関数値を加えて行う。その中で最も小さな評価関数値を与える 3 つのパラメタの組み合わせを最適解とする。

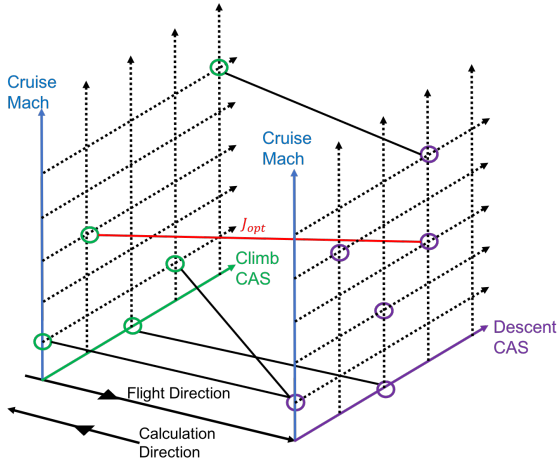


Fig.2 Concept diagram of half range optimize method

これによって組み合わせの数は、前半において（降下較正対気速度の点数）×（巡航マッハ数の点数）、後半において（上昇較正対気速度の点数）×（巡航マッハ数の点数）となる。3つのパラメタの組み合わせを比較する際に、全通りを比較するとその数は、（上昇較正対気速度の点数）×（巡航マッハ数の点数）×（降下較正対気速度の点数）となる。よって以下のように計算量を減らすことが可能となる。n はそれぞれ格子点数を表している。

$$\frac{\text{half range optimize method}}{\text{Full search}} = \frac{n_1 + n_2}{n_1 \times n_2} \quad (3)$$

n_1 : Climb CAS, n_2 : Descent CAS

2.3 数値結果

表 1, 表 2 に最適化に用いる境界条件と速度の範囲を示す。

Table.1 Boundary condition of optimization calculation

	Initial Point	Final Point
Pressure Altitude[ft]	10000	10000
Calibrated Air Speed[kt]	250	230

Table.2 Inequality constraints of optimization calculation

$$V_{min} \leq V_{CAS,clm} \leq V_{max}$$

$$M_{min} \leq M \leq M_{max}$$

$$V_{min} \leq V_{CAS,des} \leq V_{max}$$

V_{max} と V_{min} , M_{max} は BADA の OPF ファイルに記載されている値に従い、較正対気速度の刻み幅は 10kt, マッハ数の刻

み幅は 0.01 とする。また、用いる機体は B777-200 とする。

最適化の正解値として、全ての組み合わせについて比較した全探索の結果と比較する。計算量は $15 \times 26 \times 15$ で 5850 通りとなるが、様々な実飛行データの知見から現実的である較正対気速度とマッハ数の組み合わせに限定したものをを用いる。図 3 にコストインデックスごとに比較した気圧高度、較正対気速度、マッハ数を示す。

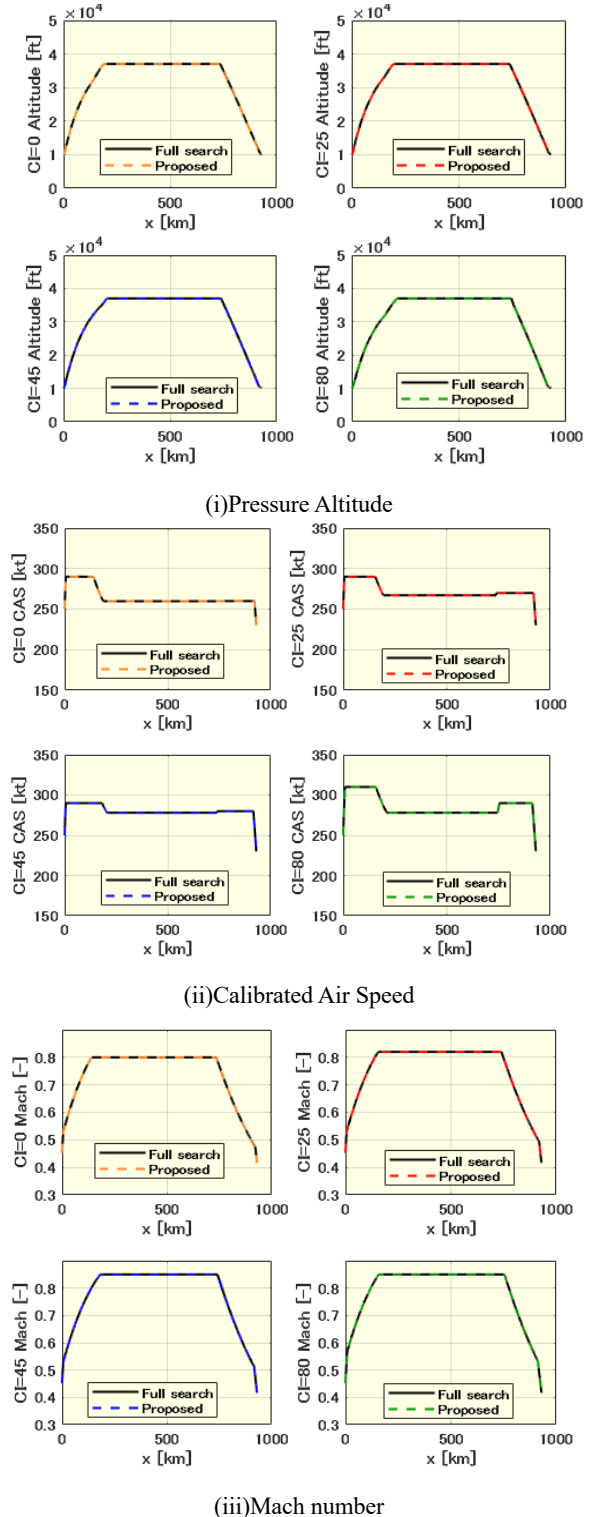


Fig.3 Comparison between Full search and half range optimize method

Table.3 Performance function comparison

CI	Performance index [kg]	Fuel consumption [kg]	Flight time [s]	Performance index error [%]	Fuel consumption error [%]	Flight time error [%]
0	-1.25	-1.25	-1	0.0176	0.0176	0.0236
25	-1.99	-1.67	-1	0.0236	0.0235	0.0241
45	-2.31	-1.74	-1	0.0244	0.0243	0.0248
80	-2.57	-1.57	-1	0.0229	0.0217	0.0252

全てのコストインデックスにおいて、全探索で得られた最適解と一致している。これは最適性の原理から妥当な結果であると考えられる。また、コストインデックスが大きくなるにつれて算出された飛行速度が増加している。これは大きいコストインデックスでは飛行時間を短くする最適軌道を算出するためである。表3には評価関数値、燃料消費量、飛行時間の比較を示した。全探索での結果から1/2飛行距離最適化法での結果を差し引いたものを差とし、その絶対値を全探索の結果で除したものを誤差とした。

差は全てマイナスであり、1/2飛行距離最適化法によって生成した軌道の飛行時間が全探索による軌道より長いことを示している。これによって、燃料消費が多くなる。さらに、評価関数は燃料消費量と飛行時間に重み付けした値によって得られる値であるため、以上のような結果になる。コストインデックスが大きくなると飛行時間による評価関数の変動が大きくなり差が大きくなっている。飛行時間に違いが生じていることは、1/2飛行距離最適化法において、前節紹介の計算手順によって飛行距離の進み方に違いが生じることによるものであると考える。図4に飛行距離の半分付近での計算点を示す。

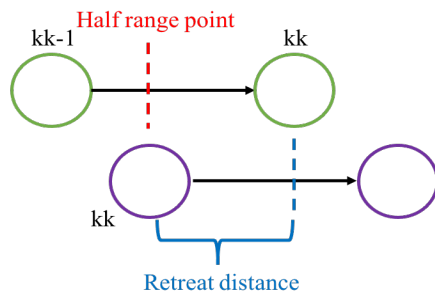


Fig.4 Half range point calculation diagram

緑点は後半の上昇と巡航の計算によって得られる値である。紫点は前半の巡航と降下によって得られる値である。赤点線は飛行距離の半分であり、軌道生成の際に緑点はkk-1で終了し飛行距離の半分からは前半によって得られた紫点に移行する。その際実際の進行距離が後退するため、飛行距離に達するために長く飛行する必要がある。これによって飛行時間に差が生じ、評価関数にも影響していると考えられる。しかし、誤差が全て0.03%未満であることから高い精度で最適解が得られていると考える。

3. 定点通過時刻の比較

3.1. 前提の設定条件

前章記述の軌道最適化法を用いて定点通過時刻の算出を

行う。軌道生成の際に風を入力するため2つのパターンにおいて最適化による軌道生成を実行した。パターン1として、無風状態で3パラメータ法を用いて最適化し得られた値を用いて軌道生成を行う。パターン2として、風を考慮しながら軌道を最適化し、得られた値を用いて軌道生成を行う。実飛行の結果と比較を行うためFlightradar24からダウンロードした定期旅客便の実際の航跡データを使用する。Flightradar24は、航空機の運航情報をリアルタイムで提供するウェブサイト並びにスマートフォン・タブレット向けのアプリケーションでありADB-S(Automatic Dependent Surveillance Broadcast)やMLAT(Multilateration)、レーダーデータを含むいくつかのデータソースからデータを統合したものである⁽⁴⁾。また、風のデータは気象庁の全球数値予報モデルGSM(Global Spectral Model)日本域の現況値⁽⁵⁾を用いる。空間方向に内挿計算を行い任意のポイントにおける風速、気圧、密度を求める。現況値は世界標準時0時から6時間ごとに設定されているため、離陸時間に近いGSMの現況値を用いる。表4に比較するフライトの基本情報を示す。

Table.4 Flight Information

Departure Airport	Fukuoka
Arrival Airport	Tokyo INT
Cruise altitude[ft]	37000
Aircraft model	B777-200
Flight date and time	2020/02/21,02:00(UTC)

初めに、Flightradar24の航跡から飛行開始点と飛行終了点の速度を設定する。一般的に10000ft以下では250kt以下の速度で飛行するという規定を遵守するため、高度10000ft以上の飛行範囲で実飛行との比較を行う。表5に飛行開始高度、速度と飛行終了高度、速度を示す。

Table.5 Boundary condition of optimization calculation

	Initial Point	Final Point
Pressure Altitude[ft]	10150	10050
Calibrated Air Speed[kt]	255	233

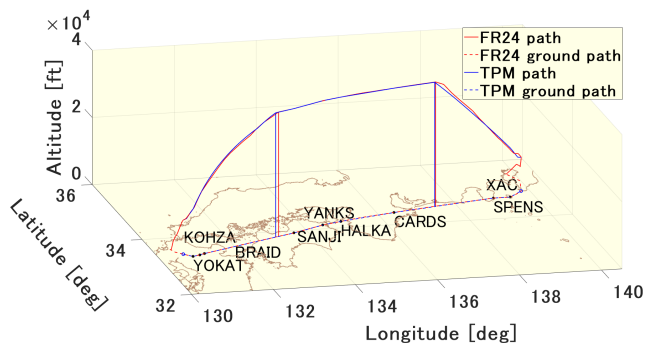
また、通過ウェイポイントについても実飛行データの航跡から通過していると考えられるウェイポイントを決定する。その際AIS Japan⁽⁶⁾に掲載されているフィックスを参照する。通過するウェイポイントを表6に示す。

Table.6 Passing Waypoints

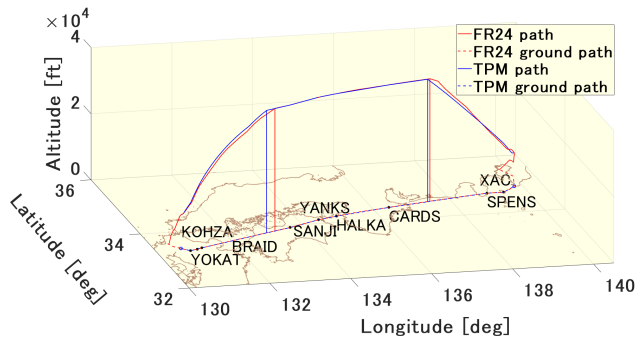
YOKAT
KOHZA
BRAID
SANJI
YANKS
HALKA
CARDS
SPENS
XAC

3.2. 軌道算出結果

3 パラメタ法による速度パラメタの最適解算出においてコストインデックスは 40, 60, 80 と変化させていく. 図 5, 図 6 にウェイポイント通過時刻の差の平均が最も小さかったコストインデックス 60 で得られた軌道を示す. 図 5 はパターン 1, パターン 2 で得られた飛行軌道, 図 6 は 2 つのパターンでの対地速度の比較を示す.



(i)Pattern1



(ii)Pattern2

Fig.5 Flight Trajectory comparing diagram

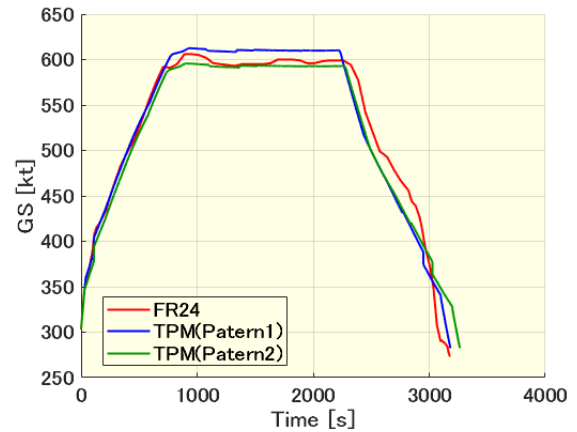
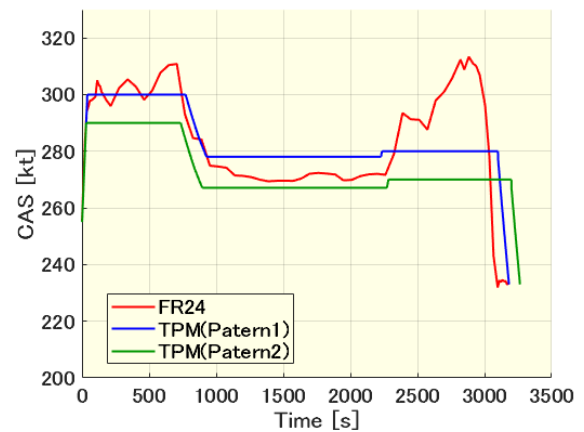
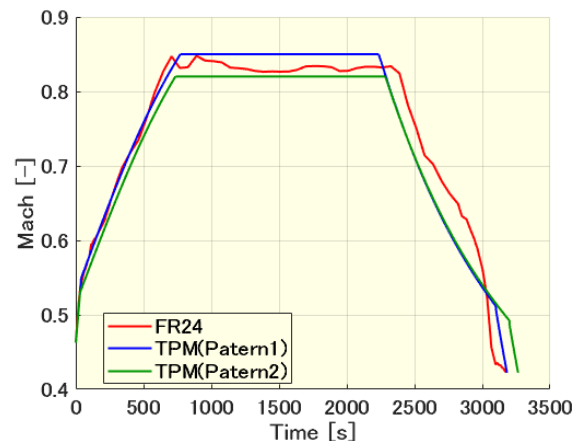


Fig.6 Ground Speed comparing diagram

また,最適化によって得られた3つのパラメタの値を示す. 実飛行データとして使用している Flightradar24 には対地速度のデータのみ格納されているため, 気象庁データから風速を求め, 風力三角形によって真対気速度を得る⁽⁷⁾. また, BADA 技術書記載の真対気速度と較正対気速度の変換式を用いて実飛行の較正対気速度を導く. 図 7 にパターン 1, パターン 2 で得られた較正対気速度, マッハ数を示す.



(i)Calibrated Air Speed



(ii)Mach

Fig.7 Speed diagram

2 つのパターンともに飛行軌道は同じようになっている.

対地速度は、パターン1において上昇フェーズ、パターン2においては巡航フェーズでほぼ一致している。一方、較正対気速度の図では、パターン1は上昇の速度がほぼ一致しており、パターン2では実飛行データより低い速度で最適解が算出された。マッハ数の図では、パターン1において実飛行データより大きな巡航マッハ数が算出され、パターン2では少し低い値が算出されている。これは、最適解を求める際に風を入力した場合、風の進行方向成分によって与えられる速度パラメタに違いがあったことによると考える。低い較正対気速度で飛行しても追い風により対地速度が大きくなり、飛行時間が短くなるためである。

以下の表 7 にウェイポイント通過時刻の差を示す。値はTPM の軌道生成を用いて最適化した軌道での通過時刻から実飛行データでの通過時刻を差し引いたものを示している。プラスだと実飛行が早くウェイポイントに到着し、マイナスだと実飛行が遅くウェイポイントに到着している。

Table.7 Difference in Waypoints passing time

Waypoint	Patern1 [s]	Patern2 [s]
YOKAT	0	2
KOHA	11	15
BRAID	-27	-22
SANJI	5	27
YANKS	13	42
HALKA	-24	9
CARDS	-40	6
SPENS	11	84
XAC	9	87
End	3	85
Ave.	-3.9	33.5

パターン1ではCARDSと呼ばれるポイントでの時間差が大きくなっている。これは図6の対地速度の値が巡航フェーズにおいて実飛行データより速い値が算出されているためであり、マイナスの値となっている。一方SPENS以降は差がプラスの値を算出した。これは巡航フェーズとは逆に降下フェーズで低い対地速度が算出されているためである。対地速度は最適化によって算出された較正対気速度から真対気速度を求めて追い風成分が加わった値であり、算出された較正対気速度の値に違いがあることが図7からも確認できる。パターン2ではほぼ全てのポイントでプラスの値を算出した。これは算出した速度が実飛行の速度より低い値が算出されたためである。

4 結言

3パラメタ法の軌道生成法において、本研究提案の1/2飛行距離最適化法では全ての組み合わせを比較した全探索法と同じ最適解が得られたが、評価関数値は計算手順によって違いが生じた。

計算量は $26 \times 15 + 15 \times 26$ で780通りとなる。これによって、計算量を約87%削減することができた。

以上により1/2飛行距離最適化法は3パラメタ法における組み合わせ最適化において有用な手法であると考えられる。

実飛行データとの比較では飛行開始点、飛行終了点を設定した場合、無風状態で求めた最適解では上昇の速度、風を入力しながら求めた最適解では巡航の速度が実飛行での速度と同じような値が得られた。しかし、降下の速度は実飛行の速度より低くなっている。

今後は、様々なフライトに対してウェイポイント通過時刻の差を求め、3パラメタ法による飛行軌道生成法の有用性を確認する。また、巡航フェーズのみ風を入力しながら最適解を求めるなど、軌道生成方法についても工夫が必要であり、今回用いたパターンとの違いを比較する。

謝辞

本研究を進めるにあたり、熱心かつ丁寧に指導くださった指導教員の原田明徳准教授、岡宏一教授、様々な知識をご教授いただいた研究室の先輩方、同期に感謝いたします。

また、本研究では欧州航空航法安全機構が維持・管理するBADAモデル、Flightradar24が管理する実飛行のデータ、京都大学生存圏研究所が提供する気象数値予報データを使用しました。この機関が提供する便宜に謝意を表します。

文献

- (1) 将来の航空交通システムに関する推進協議会, CARATS 航空交通システムの長期ビジョン, URL: <https://www.mlit.go.jp/common/001260394.pdf>, 2021.1.15 アクセス
- (2) 樋口雄紀, 効率的な到着管理のためのFMSを利用した到着時刻制御の検討, 第54回飛行機シンポジウム, 富山, 2016
- (3) 茨城俊秀, 福島雅夫, FORTRAN77最適化プログラミング (岩波コンピュータサイエンス), 岩波書店, 1991
- (4) 山中春菜, 定期運航便の高精度軌道予測のための飛行解析, 高知工科大学, 平成30年度卒業論文
- (5) 京都大学生存圏研究所, 気象庁データ, URL: <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/gpv-original.html>, 2021.1.20 アクセス
- (6) AIS Japan, Japan Aeronautical Information Service Center, URL: <https://aisjapan.mlit.go.jp>, 2021.1.20 アクセス
- (7) 横山大知, フライトシミュレータソフトX-PLANEによる模擬飛行データの利用可能性の検証, 第58回飛行機シンポジウム, 2020