

# 3 パラメタ最適化による飛行軌道予測と QAR 飛行データを用いた精度評価

## Flight Trajectory Prediction by Three Parameters' Optimization Method and Accuracy Evaluation by QAR Flight Data

航空宇宙工学コース

機械・航空システム制御研究室 1255037 仲村 兼斉

### 1. 緒言

新型コロナウイルスの拡大により一時的な変化はあったものの、世界的に航空機輸送の需要が高まっており、日本国内の貨客数も増加傾向にある。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 System, 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<sup>(1)</sup>。時間管理に基づいた航空交通流管理のためには、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秩序だてて乱れなく整列して飛行させ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。

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、その軌道をもとに定点通過時刻の予測を行う方法を提案する。また、実飛行データと比較することで時刻の予測精度の評価を行う。

### 2. 3つの速度パラメタ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<sup>(2)</sup>。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は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)が維持、管理するBADA(Base of Aircraft Data)モデル<sup>(3)</sup>を用いる。上昇・降下フェーズは、較正対気速度一定、巡航フェーズはマッハ数一定の速度に従う。較正対気速度一定からマッハ数一定へ遷移する点はBADAの技術書記載の式より求める。遷移点より高高度の巡航以外の部分においては、巡航マッハ数と同じ一定のマッハ数で上昇、降下を行う。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の比であるコストインデックス(Cost Index, CI)と呼ばれる実運航上重要なパラメタと以下の関係にある。

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

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<sup>(4)</sup>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。

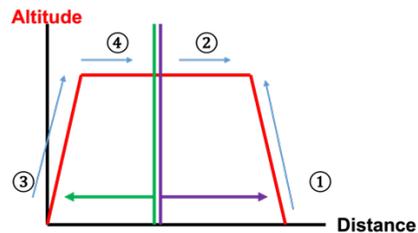


Fig.1 Calculation Order diagram

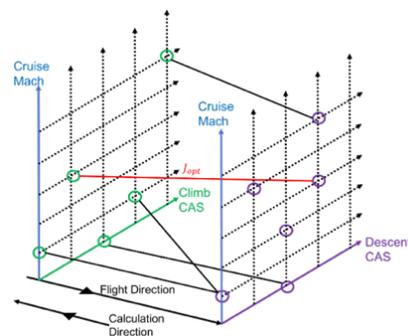


Fig.2 Concept diagram of 1/2 range optimize method

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。上昇の較正対気速度ごとに最適な巡航マッハ数を探索する。各マッハ数には前半で求めた降下較正対気速度との組み合わせが保存されており、3つのパラメタを決定することができる。

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。

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。

$$\frac{1/2 \text{ half range optimize method}}{\text{Full search}} = \frac{n_1 + n_2}{n_1 \times n_2} \quad (3)$$

$n_1$ : 上昇較正対気速度の点数,  $n_2$ : 降下較正対気速度の点数

### 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 trajectory optimization

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

Table.2 Inequity constraints of optimization

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

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

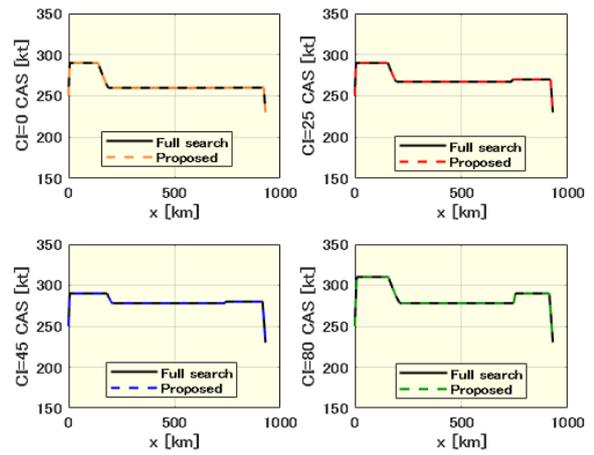
$$V_{\min} \leq V_{CAS,des} \leq V_{\max}$$

$V_{\max}$  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。

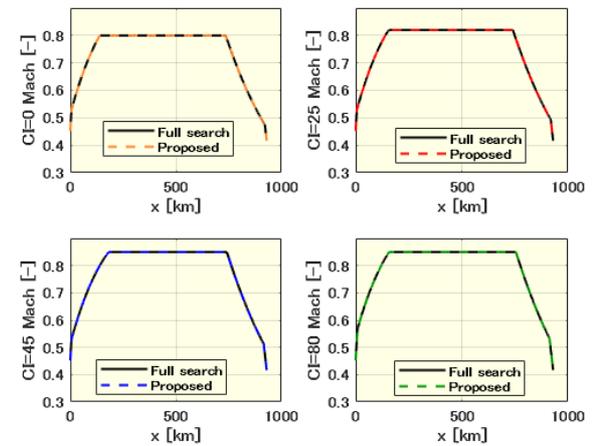
提案手法により得た解の精度を確認するため、全ての組み合わせについて比較した全探索の結果と比較する。今回の制約のもとで全ての格子点の組み合わせを調べた全探索の計算量は  $15 \times 26 \times 15$  で 5850 通りとなる。図 3 にコストインデックスごとに比較した較正対気速度, マッハ数を示す。

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。これはより大きいコストインデックスでは飛行時間をより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。1/2 飛行距離最適化法の結果から全探索の結果を差し引いたものを差とし、全探索の結果で除したものを誤差とした。

差は全てプラスであり、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。飛行時間に差異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。



(i) Calibrated Air Speed



(ii) Mach

Fig.3 Comparison between Full search and 1/2 range optimization

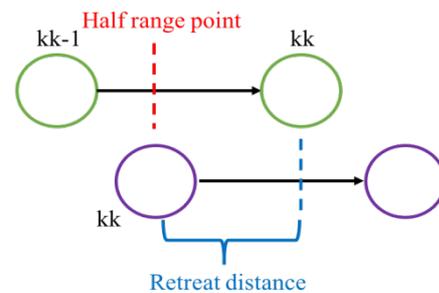


Fig.4 Calculation point of 1/2 range optimization

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、全探索の結果と比較して誤差が全て 0.03% 未満、計算量を約 87% 削減され、高精度かつ高速な計算が可能であることから実用上強力な計算手法であると言える。

Table.3 Comparison of performance function and fuel consumption

CI	Performance index	Fuel consumption	Flight time	Performance index	Fuel consumption	Flight time error
	[kg]	[kg]	[s]	error [%]	error [%]	[%]
0	1.13	1.13	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

3. QAR 飛行データと最適化した軌道の比較

3.1 使用データと設定条件

QAR 飛行データ

最適化によって得られた飛行軌道の精度を比較は、飛行機上の QAR(Quick Access Recorder)により記録された飛行データを用いる。データの詳細を表 4 に示す。

Table.4 Concept of QAR flight data

Data duration	Apr.2017~Mar.2018	
Route	Fukuoka - Haneda	
Aircraft	B777-200	
Data	ADIRU	15
	FMCF	9
	MCP	11
	ND	8
	Flight control	23
	AP,AT	7
	Other	17
	合計	90
Sampling time	1.0 s	

気象データ

気象データは気象庁が発表している数値予報 GPV データの GSM(Global Spectral Model)<sup>(5)</sup>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、空気密度を求める。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、時間についても線形補間を行う。

設定条件

最適化する飛行範囲は高度 10000ft 以上の飛行フェーズとする。また、飛行ルートは QAR 飛行データの航跡からウェイポイントの通り方を 7 通り設定する。その中から最も近いルートを選択し、その便の飛行ルートとする<sup>(6)</sup>。

対象便

本研究では、飛行開始点から飛行終了点まで速度と高度の変更がない便、比較定点において速度と高度の変更がない便、速度と高度の変更を認める便の 3 つのデータ群について実飛行データとの比較を行う。表 5 に群分けを示す。

Table.5 Number of extracted flights

Data 1	No change in speed and altitude	10
Data 2	No change in speed and altitude (at the comparison points)	123
Data 3	Includes speed and altitude changing	518

軌道生成

最適化によって軌道を生成する際に必要であるコストインデックスは 40, 60, 80 の 3 つを設定する。また、最適化を行う際の気象データの考慮について 3 つのパターンに分ける。表 6 に示すように、パターン 1 では気象データを入力しない。パターン 2 では巡航中のみ入力する。パターン 3 では飛行開始から飛行終了まで気象データを入力して最適軌

道を算出する。気象データとは風速風向のことを指す。

Table.6 Entering weather data by pattern

Pattern 1	Pattern 2	Pattern 3
×	○ (only cruise)	○

その後、軌道を再生成する際は、パターンによらず気象データを入力する。その際に用いるデータは、風速風向、気温、空気密度のことを指す。

3.2 軌道算出結果

実飛行の航跡データから飛行ルートを設定し、通過する定点を設定する。その定点通過時刻の差を用いて実飛行データとの比較を行う。データ群ごと、気象の適用パターンごとに定点通過時刻差を算出し、設定した全定点の平均値と標準偏差を算出する。表 7, 表 8, 表 9 にデータ群ごとに全定点における時刻差の平均値、標準偏差を示す。

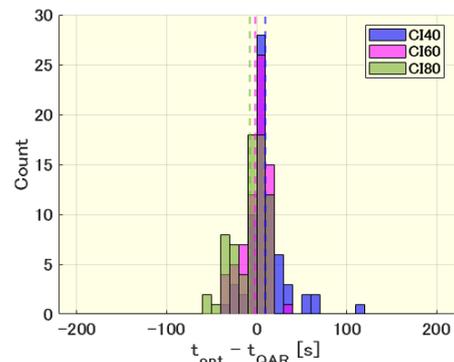
Table.7 Difference in points passing time (Data 1)

CI	Pattern 1		Pattern 2		Pattern 3	
	Ave. [s]	Std. [s]	Ave. [s]	Std. [s]	Ave. [s]	Std. [s]
40	41.2	33.8	51.6	41.2	10.0	22.0
60	31.3	28.7	43.8	33.6	-1.26	14.2
80	29.2	24.5	37.0	25.3	-7.46	17.8

Table.8 Difference in points passing time (Data 2)

CI	Pattern 1		Pattern 2		Pattern 3	
	Ave. [s]	Std. [s]	Ave. [s]	Std. [s]	Ave. [s]	Std. [s]
40	38.5	32.7	50.8	42.2	12.6	26.3
60	25.3	27.6	43.2	36.6	3.49	22.5
80	22.4	24.2	35.4	30.9	-3.86	20.9

データ群に関わらず、パターン 3 による軌道最適化が最も平均値が小さい。全飛行フェーズで風を考慮した最適軌道を算出することが軌道を予測する際に最も有効な手段であると考えられる。図 5 にパターン 3 の定点通過時刻差のヒストグラムを示す。



(i)Data 1

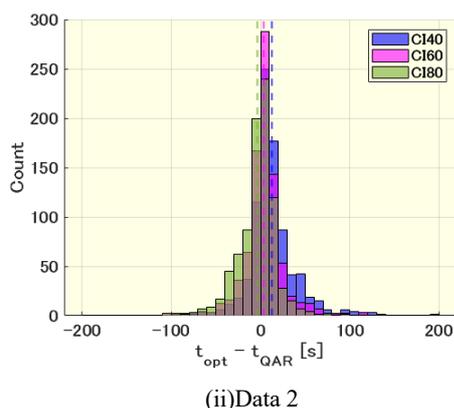


Fig.5 Difference in points passing time (Pattern 3)

データ群1とデータ群2の結果を見るとヒストグラムの分布や平均値、標準偏差の統計量が同等であった。比較定点以降の速度変化はそれ以前に影響を及ぼすものではなく、独立して扱うことができることがわかった。

表9、図6にはデータ群3の定点通過時刻差の平均値、標準偏差とヒストグラムを示す。データ群3はパターン3の結果のみを示す。

Table.9 Difference in points passing time (Data 3)

CI	Pattern 3	
	Ave. [s]	Std. [s]
40	11.0	31.1
60	1.11	27.3
80	-6.13	25.0

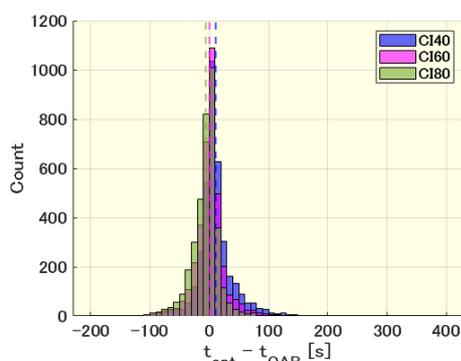


Fig.6 Difference in points passing time (Data 3, Pattern 3)

速度と高度の変更を含むデータ群3も、データ群1、2と平均値の指標から、同等の精度で軌道予測が可能であることが確認できた。これは、速度や高度の変更のある便が少ないことによると考えられる。旅客機のcockpit内では、オートパイロットが機能している間でも、乗員がMCP (Mode Control Panel)の値を変えることにより速度や高度を変更することがある。図7に高度10000ft以上から比較定点の終点 (FLUTE) までの間、MCPによって速度を変更した時間の割合を示す。その使用頻度は、0~0.01が最頻値であった。全体の平均は0.153であり、MCPの使用頻度が低い便が多く存在することを表しており、データ群3でもデータ群1、2と同等の精度で軌道予測が可能であることがわかった。

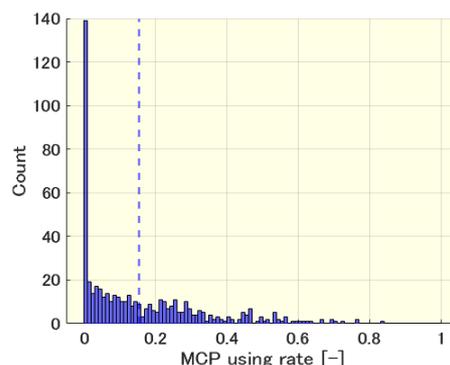


Fig.7 the account of speed change by MCP

#### 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計算量を約7分の1に抑えつつ、全ての組み合わせを比較した全探索法と同一の最適解が得られた。したがって、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言える。

実飛行データとの比較では、QAR飛行データを用いて比較を行った。全518のうち、3つのデータ群に分け、気象データの inputs を3つのパターンに分け、コストインデックスを3通り設定した。飛行開始点、飛行終了点、巡航高度、飛行経路を飛行データから設定し、3パラメタ法を用いて軌道最適化を行い、実飛行の定点通過時刻との差について比較を行った。

データ群によらず、パターン3での定点通過時刻差の平均値、標準偏差が小さく、全飛行フェーズで風を考慮した最適化が重要であることがわかった。また、速度や高度の変更がある便においても、変更のない便と比べて平均値の指標では同等の結果を示した。対象とした路線の区間では、速度や高度を変更するMCPの使用頻度が低い便が多く存在することによると考えられる。

#### 謝辞

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、京都大学生存研究所が管理する気象庁数値予報データを使用しました。また、QARデータに関しては、日本航空株式会社から提供を受けました。これらの機関が提供する便宜に感謝の意を表します。

#### 文献

- (1) 将来の航空交通システムに関する推進協議会, CARATS, URL : <https://www.mlit.go.jp/common/001260394.pdf>, 2021年8月16日アクセス
- (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の検討, 第54回飛行機シンポジウム, 富山, 2016年10月.
- (3) USER MANUAL FOR THE BASE OF AIRCRAFT DATA(BADA) REVISION 3.14
- (4) Bellman, R.: Dynamic Programming, Princeton Univ. Press, 1957.
- (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年8月16日アクセス
- (6) 原田明德, 武市昇, 岡宏一, QAR飛行データによる高精度軌道予測手法の開発, 第58回飛行機シンポジウム, オンライン, 2020年11月