

5. フライトシミュレータによるRTA機能検証結果

航空交通管理領域 ※瀬之口 敦, 福田 豊, 白川 昌之, マーク ブラウン

1. はじめに

航空交通管理 (ATM ; Air Traffic Management) の目指す将来の方向性として、軌道ベース運用 (TBO ; Trajectory-Based Operation) の実現が挙げられる^[1]。これは、航空機の出発から到着までの3次元位置と時刻で表される4次元軌道を早い段階から調整しておき、従来の航空管制 (ATC ; Air Traffic Control) にあたる範囲では航空機が調整された軌道に沿って飛行しているかどうか監視することを主とし、必要に応じて飛行中の軌道を微修正するような運用である。つまり、将来の航空交通管理では軌道計画作成のためにできる限りの情報を共有することによって、運用・運航をより戦略的に、かつ関係者間で協調的に調整して実施することを目指している。これにより空域や空港面の混雑緩和、航空管制官やパイロットの作業負荷の軽減などが見込まれ、航空交通の安全性を維持したままに効率性や環境、定時性を向上させるなど、将来の航空交通需要の増加に対応できるものと期待されている。

TBOの実現に向けては、欧州の SESAR (Single European Sky ATM Research) や米国の NextGen (Next Generation Air Transportation System) と呼ばれる、各地域の実情に即して策定された長期ビジョンに基づき推し進められている^{[2][3]}。我が国においても国土交通省航空局により「将来的航空交通システムに関する長期ビジョン (CARATS ; Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic System)」が策定され、推進するためのロードマップが検討されている^[1]。

初期的な TBO として位置づけられる CARATS の施策の一つに「初期的 CFDT (フィックス離脱時刻 ; Calculated Fix Departure Time) による時間管理」がある。到着機を着陸予定期刻に応じて順序付けし、飛行直後から予め設定された経路上の地点における通過時刻調節を実施するものであり、空港周辺空域における過度な交通の集中を回避し、空中遅延の分散を図る

ことを目的としている。この施策に関連して、平成23年8月より CFDT の指定による航空交通流管理方式 (SCAS ; Specifying CFDT for Arrival Spacing Program) の試行運用が開始された^[4]。

SCAS 試行運用のように特定地点の通過時刻を指定する場合、運航側ではその条件を満たすために RTA (Required Time of Arrival) 機能を使用することが想定される。この機能は FMS (Flight Management System) に入力された特定地点の通過時刻を満足するように自動的に機体を制御し、速度を調整するものである^[5]。スウェーデン・ストックホルムにおける CASSIS (CTA/ATC System Integration Studies) トライアルでは、管制側より機上側へ到着交通流の管理地点における制御時刻 (CTA ; Controlled Time of Arrival) を割り当てる運用が検証された^[6]。トライアルは RTA 機能の搭載／非搭載の混合環境下や交通流密度の大小の状況下にて実施され、その運用状況が確認された。

今回は、RTA 機能の時間調整が可能範囲や速度制御の内容等を確認するために、実環境をフライトシミュレータにより模擬して、実運航では取得し難いデータを取得した。以下、本稿ではその結果について報告する。

2. 検証方法

2.1. RTA 機能使用フライト

巡航区間のみの場合および降下区間を含む場合 (巡航・降下区間) における特定地点での通過時刻を RTA 機能に入力した運航を 1 フライトで模擬し、各種データを取得した。

表 1 にフライト条件を示す。今回の検証実験では上昇・巡航・降下の全飛行区間で RTA 機能が使用可能な機種 B737-800 のフライトシミュレータを使用した。飛行速度は飛行高度や重量、コストインデックス等に基づいて FMS が計算する可変の経済的速度とした。

表 2 に機外大気の設定を示す。フライトシミ

ュレータでは高度3層分の機外大気が設定可能なので、今回は離陸・上昇・巡航および巡航・降下・着陸に分け、巡航区間に設定を切り替えた。また、表3にFMSに入力する降下区間の大気設定を示す。フライトシミュレータの機外大気設定とは別に、FMSには降下区間の大気を高度3層分設定できる。今回は表2に示した機外大気の設定の近似値となるような値をあらかじめ計算しておき、それらをFMSへの入力とした。つまり、機上側で正確な気象予報が得られる状態を模擬した。

2.2. 比較用標準フライト

RTA機能使用フライトと比較するために、特定地点での通過時刻指定や管制からの指示がない場合の運航を模擬し、各種データを取得した。そのため、フライト条件、機外大気の設定、およびFMSに入力する降下区間の大気設定はRTA機能使用フライトと同様にした。

表1 フライト条件

項目	条件
機種	B737-800（全飛行区間でRTA機能使用可）
飛行経路	RJFT - MIFNE - GOKAH - IWATO - <u>DONAR</u> - IGOSO - HALKA - <u>FLUTE</u> - ENSYU - BOKJO - BRIGE - BATIS - DIHVA - <u>ADDUM</u> （通過高度10,000 ftかつ通過速度230 KIAS） - RJTT
離陸重量	121,000 lbs（内、燃料分15,000 lbs） W/Bは標準的な割り当て
巡航区間	巡航高度37,000 ft ECON速度
上昇・降下区間	高度10,000 ft以下では速度250 KIAS以下、 高度10,000 ft以上では速度280 KIAS以下またはM.76以下（切り替えは自動）の制御

表2 機外大気の設定

高度 飛行区間	風速	風向	外気温
0 ft (離陸)	6 knot	350°	10°C
20,000 ft (上昇)	58 knot	276°	-22°C
37,000 ft (巡航)	151 knot	262°	-49°C
10,000 ft (降下)	44 knot 24 knot（降下区間検証用 フライトの場合）	238°	-4°C
0 ft (着陸)	7 knot	258°	14°C

表3 FMSに入力する降下区間の大気設定

高度	風速	風向	外気温
24,000 ft	83 knot	259°	-16°C
18,000 ft	69 knot	242°	
10,000 ft	44 knot	238°	

2.3. 降下区間検証用フライト

今後の運用では、巡航区間の地点だけでなく降下区間に含まれるターミナル空域への入域地点や滑走路への着陸進入地点における通過時刻を指定する時間管理が想定される。管理地点では地形の回避や騒音の低減、安全な着陸間隔の維持等を目的とする通過高度や通過速度の制約が課されていることが多い。そこへさらに時間の制約が課された場合を検討するために、RTA機能使用フライトの条件から運航上の主な外因である風の影響を変化させて、状況がどのように変化するかを観察した。したがって、RTA機能使用フライトと同様のフライト条件、FMSに入力する降下区間の大気設定とし、機外大気のみを変更した。なお、検証時間節約のため経路途中から飛行を開始させた。

3. 検証結果

3.1. イベント内容および結果

フライト中に操作したイベント内容を以下の(1)～(3)に示す。また、各地点の位置を図1に示す。

(1) 運航開始前

離陸・上昇・巡航の機外大気を設定する。また、フライト条件をFMSへ入力する。ただし、降下区間検証用フライトの場合には経路中の航空機を発生させた地点FLUTEにおける状態量を用いた。

(2) 地点DONAR通過時

このイベント内容は巡航区間にに関するものであり、RTA機能使用フライトのみ実施した。まず、RTA機能を用いた場合の目標時刻に対する制御許容誤差を指すRTA精度を30秒に設定する。設定後、地点FLUTEを最も遅く通過するような予測時刻に対して40秒早い時刻をRTAとして入力した。航空機の目的空港が混雑している場合には、安全な着陸間隔を確保するため、しばしば滞留時間が割り当

てられる。今回は、巡航区間での減速による滞留時間の消化を想定し、遅く通過するような時刻を選択した。また、RTAは時刻制御の余裕を想定して決定した。

(3) 地点 FLUTE 通過時

機外大気を巡航・降下・着陸の値に切り替える。航空機の操作として降下区間の大気設定を FMS に入力する。以降のイベント内容は RTA 機能使用フライトおよび降下区間検証用フライトの場合に実施した。RTA 精度を 10 秒に設定した後、地点 ADDUM の予測通過時刻に +3 分した時刻を RTA として入力した。なお、実行不可とならないか結果を確認した上でそのまま実行した。

上記(1)～(3)のイベントを実施した結果について、FMS の RTA 機能の画面上に表示された情報を中心に整理した表 4 を示す。

表 4 の見方を述べる。地点 DONAR 通過時に RTA に関する FMS の設定画面を開いて地点 FLUTE を指定すると、地点 FLUTE の予測通過時刻と地点 FLUTE までの飛行距離および現在速度に加えて、RTA 機能にて実現可能な最短と最長の時刻が表示される。さらに、地点 FLUTE の通過時刻を RTA として FMS に入力・実行すると、それを満足するような制御目標速度が計算されて、画面上に表示される。予測通過時刻は地点 FLUTE を通過するまで更新され続け、実際の通過時刻 (ATA ; Actual Time of Arrival) と入力・実行した RTA との差が最終的な制御誤差になる。

熊本空港から羽田空港へ向かう航空機は、地点 DONAR と地点 FLUTE 間の巡航区間において、地点 FLUTE における標準の予定通過時刻に対して 1 分早く、もしくは 2 分以上遅く飛行することが可能であった。また、指定した RTA の実現精度は 10 秒未満と高い。

地点 FLUTE と地点 ADDUM 間の巡航・降下区間においては、地点 ADDUM の予定通過時刻に対して 3 分以上遅らせる制御が可能であった。また、指定した RTA の実現精度も 10 秒前後が高い。しかし、地点 ADDUM での RTA を満足した上で、さらに地点 ADDUM に課されている高度および速度の制約を全て満足するように制御することは困難だと知らせるメッセージの表示（後述）およびオートパイロットのモード選択（比較用標準フライトの場合は「VNAV Path」が選択され続けたが、RTA を指定すると降下区間の途中から「VNAV SPD」が選択された）が確認された。

3.2. 取得データの比較

電子的に出力可能なデータについて、各フライトを比較した。

図 1 に飛行経路を示す。水色の三角印は経路上の地点または TOC (上昇区間終了点 ; Top of Climb), TOD (降下区間開始点 ; Top of Descent) を表す。各フライトは飛行経路どおりの運航を模擬したので、緯度経度のプロットは重なっている。ただし、巡航区間と降下区間の境界点である TOD の位置が比較用標準フライトと RTA 機能使用フライト、降下区間検証用フライトで

表 4 イベント結果（基本的には RTA 機能使用フライトの場合）

	残り飛行時間	最短／最長実現可能時間	残り飛行距離	現在速度	操作／考慮時間	RTA 入力・実行値	目標速度	制御誤差
DONAR 通過時	24:04 to FLUTE	-1:08 / +2:44	236 NM to FLUTE	M.757	1:41	+2:04	M.674	-0:07
FLUTE 通過時	19:37 to ADDUM	-0:23 / +3:42	165 NM to ADDUM	M.755	0:39 ^{*1} / 0.34	+3:00 ^{*2}	M.651 / 230KIAS ^{*3,4}	-0:09 +0:12 ^{*5}

*1 降下区間の大気設定を FMS へ入力するのに要した時間

*2 「UNABLE 230 KTS AT ADDUM」と表示されたが、直後すぐに消えた

*3 降下区間にあって少し経った後、マッハ数から指示対気速度に自動で切り替わった

*4 降下区間では「VNAV Path」から「VNAV SPD」へのモード変更が発生した

なお、降下区間検証用フライトの場合は地点 ADDUM 直前で「VNAV Path」に復帰した

*5 降下区間検証用フライトの値

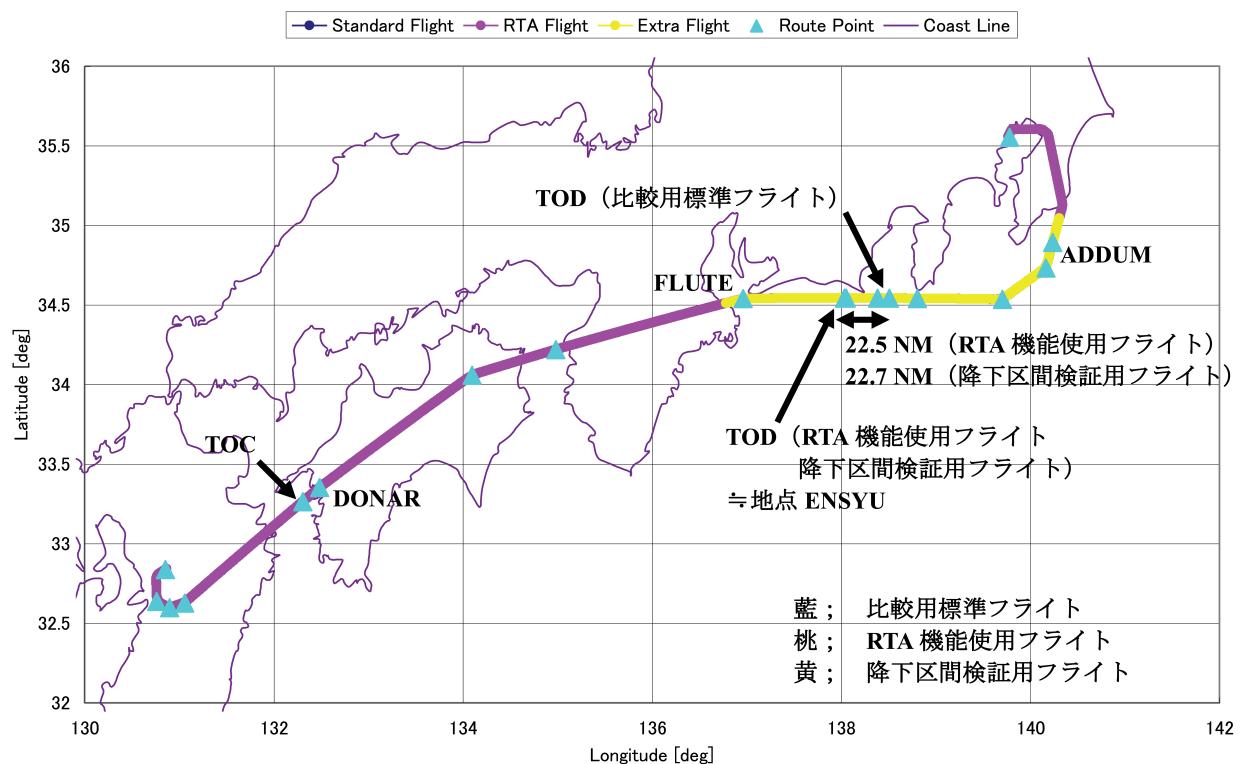


図1 飛行経路

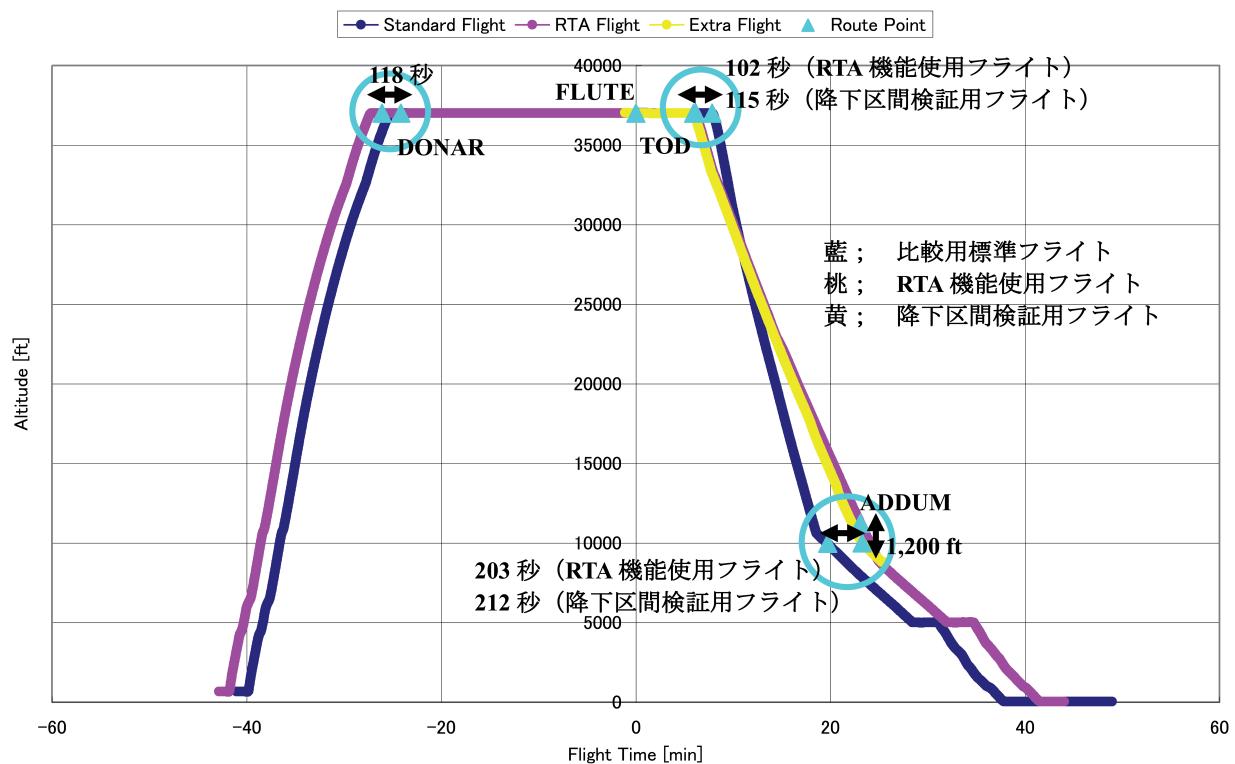


図2 飛行高度

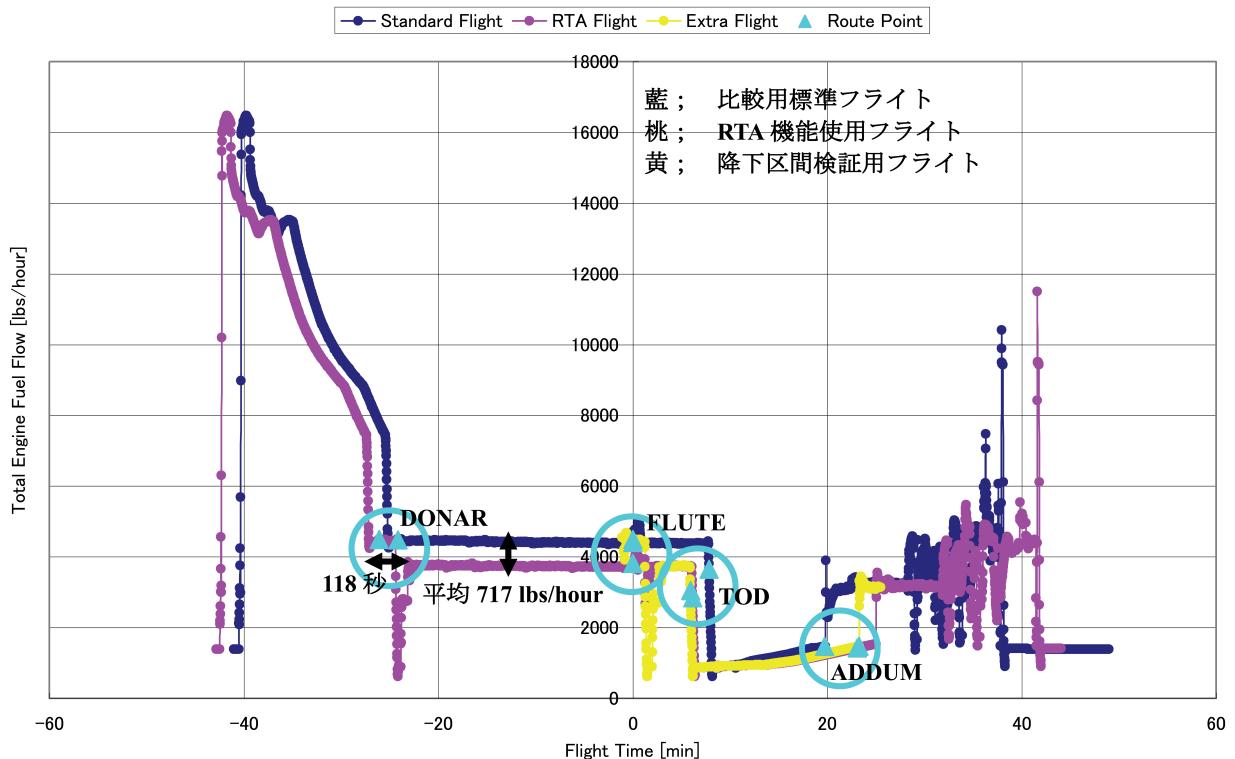


図3 燃料消費率

異なっていた。RTA機能使用フライトおよび降下区間検証用フライトは比較用標準フライトと比べて、22.5 NM および 22.7 NM 手前から降下を開始していた。

図2に飛行高度を示す。横軸は地点 FLUTE の通過時刻を基準とした相対的な飛行時間を表す。地点 DONAR と地点 FLUTE 間をみると、RTA機能によって時間を遅らせた分だけ RTA機能使用フライトの方が比較用標準フライトよりも長く時間がかかっている。TODの時刻を比較すると、図1の傾向と対応するように RTA機能使用フライトおよび降下区間検証用フライトは比較用標準フライトと比べて早く降下を開始していた。逆に、地点 ADDUM 通過時では比較用標準フライトの方が早く通過したことがわかる。したがって、地点 ADDUM のような降下区間上の特定地点の通過時刻を指定する場合、距離がより手前で時刻のより早い段階から降下を開始し、小さい降下率で時間をかけることがわかる。また、RTA機能使用フライトの場合には地点 ADDUM の通過高度制約である 10,000 ft を満足できずにその 1,200 ft 上の高度を通過し

た。降下中に表示された「Drag Required」のメッセージに従ってスピードブレーキを使用すれば満足できたかもしれないが、課題を抽出するためにこのメッセージには従わなかった。

図3に燃料消費率を示す。通過時刻を遅らせて減速した方が燃料消費率の値は低いことがわかる。地点 DONAR と地点 FLUTE 間の巡航区間ににおいて、RTA機能使用フライトは比較用標準フライトに比べて燃料消費率は平均 717 lbs/hour ほど低い。ただし、実際の燃料節約効果は減速による燃料消費の低減量と飛行時間の増加による燃料使用量との差になる。したがって、RTA機能使用フライトは比較用標準フライトに比べて、地点 DONAR と地点 FLUTE 間では 167 lbs、地点 FLUTE と地点 ADDUM 間では 131 lbs の燃料を節約した。

3.3. 機上の予測通過時刻の時間変化

図4にフライトシミュレータのFMSが計算する予測通過時刻(ETA; Expected Time of Arrival)の時間変化について、入力・実行したRTAとの差をとった形で示す。横軸は地点 FLUTE の通

過時刻を基準とした相対的な飛行時間を表す。桃色は RTA 機能使用フライト、黄色は降下区間検証用フライトである。なお、RTA 機能使用フライトの場合、巡航・降下区間の後半の ETA が取得できなかった。

マッハ数に基づいて飛行する区間（主に巡航区間）においては、ETA の値が一定となっている。一方、主に指示対気速度 (IAS ; Indicated Air Speed) に基づいて飛行する降下区間においては（約 8 分以降の区間）、小刻みに ETA が変化している。予測値の変動はあまり好ましくないため、次節にて降下区間における制御性を考察する。

3.4. 降下区間における制御性の考察

図 5 に降下角を示す。降下角は対地速度と高度変化率が成す角から求めた。また、横軸は地点 FLUTE の通過時刻を基準とした相対的な飛行時間であり、降下区間の範囲を取り出した。

比較用標準フライトの場合、指示対気速度に基づく飛行となる約 10 分以降の区間では 2.7~3.1 度の降下角であり、地点 ADDUM を通過す

る約 1 分 30 秒前に降下角を約 1 度へ変更している。一方、RTA 機能使用フライトおよび降下区間検証用フライトの場合、1.7~2.3 度の降下角である。また、RTA 機能使用フライトおよび降下区間検証用フライトの場合、比較標準用フライトに比べて平均の降下角から大きく変化する状況が発生した。なお、マッハ数に基づく飛行と指示対気速度に基づく飛行の境界である遷移高度にて発生する降下角の大きい変化は、全てのフライトで発生している。

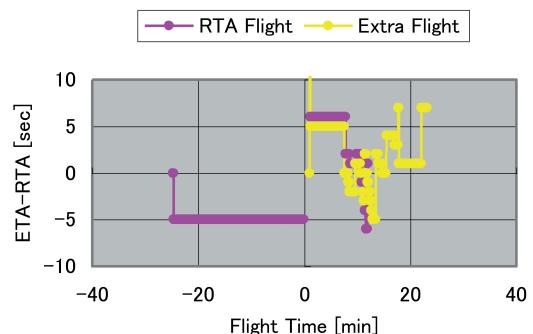


図 4 予測通過時刻の時間変化

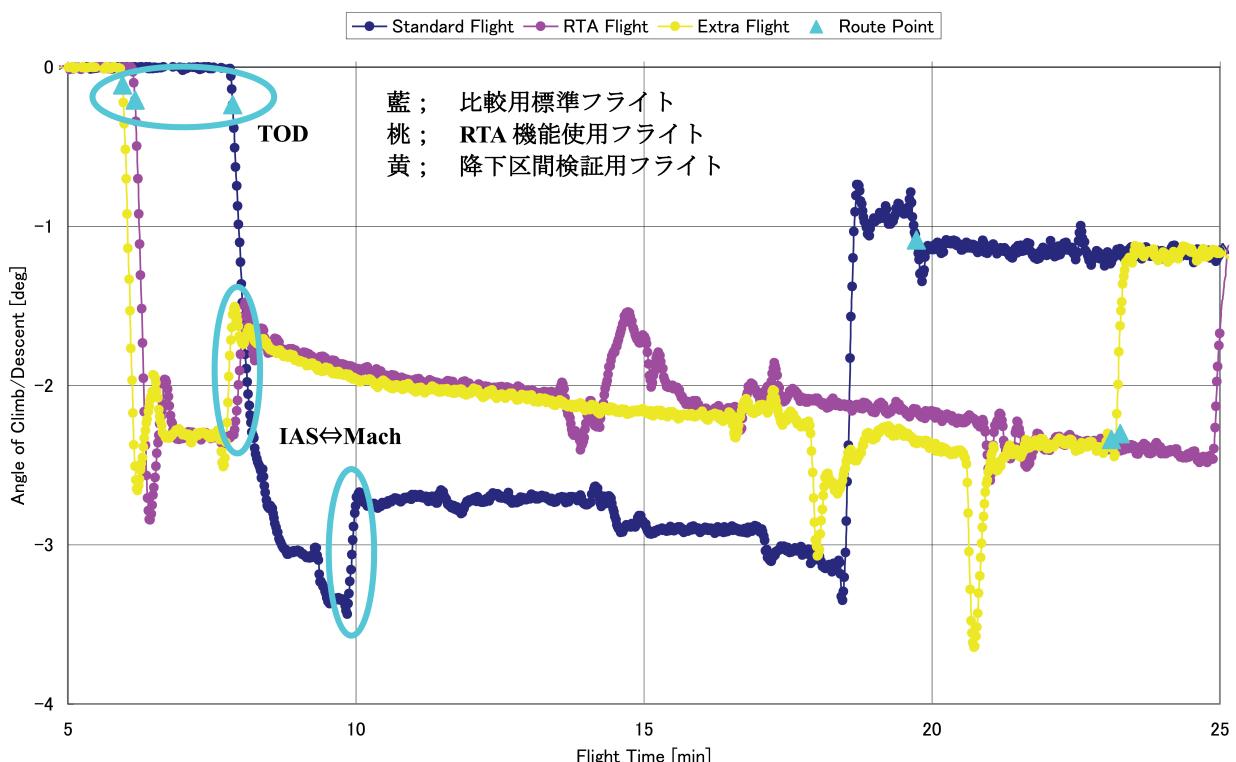


図 5 降下角（降下区間）

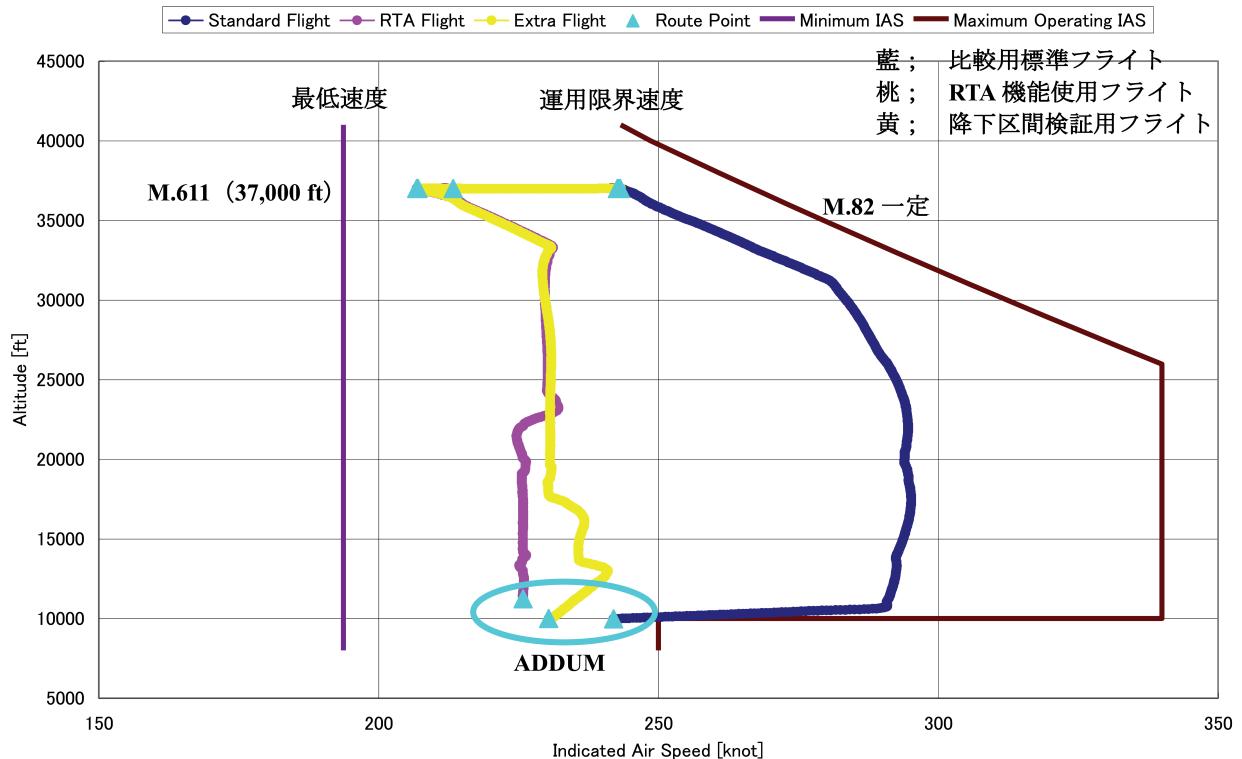


図6 指示対気速度（巡航・降下区間）

次に、横軸に指示対気速度、縦軸に高度をとったグラフを図6に示す。EUROCONTROLが開発している航空機特性データベースBADA(Base of Aircraft Data)を基に算出した限界運用速度および最低速度を図中に併せて示した^[7]。なお、算出には標準大気を用いた。

全てのフライトにおいて巡航高度からの降下は指示対気速度が一定の増加となっており、降下開始時のマッハ数を維持するように飛行していることがわかる。この区間は、マッハ数が高いほど高くなる遷移高度まで続く。遷移高度以下の指示対気速度に基づく降下区間では、風の変化に対応するために目標速度の再計算が行われる。この影響により、比較用標準フライトに比べてRTA機能使用フライトおよび降下区間検証用フライトの場合、再計算された垂直経路に追従できないと判断されるために生じるモード変化が起きやすい。また、全てのフライトにおいて指示対気速度の変化点が見られる。これは風の変化と関係があるのではないかと考えられる。

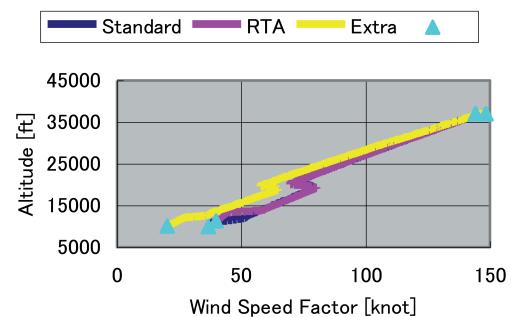


図7 風速の進行方向成分と高度

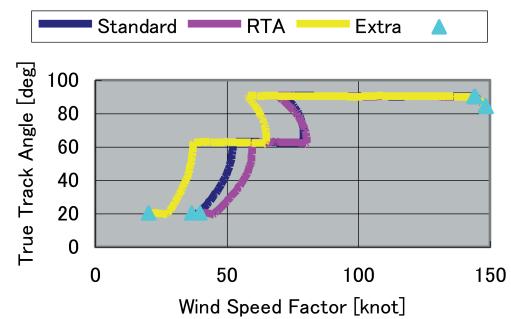


図8 風速の進行方向成分と真トラック角

最後に、風の影響を考察する。横軸に風速の進行方向成分をとり、縦軸に高度をとったグラフを図7、縦軸に真トラック角をとったグラフを図8に示す。風速の進行方向成分は対地速度と真対気速度の差から求めた。

高度19,000 ft付近において、進行方向の変化に伴う風速の進行方向成分の大きな変化が見られる。また、高度12,000～14,000 ft付近においても同様の変化が見られる。

以上より、降下区間を含んで時間調整を行う際には、次の2点に留意することが大事だと思われる。

- (1) 降下区間で想定する速度調整値の範囲は、限界運用速度・最低速度に対して、巡航区間よりも大きいバッファをとること。
- (2) 風の影響が小さくなるような時間管理地点を設定すること。特に、時間管理地点手前において経路上の地点間の成す角の変化が小さくなるように考慮すること。

4. まとめ

本稿では、巡航区間および巡航・降下区間にて予定通過時刻よりも遅い時刻を指定した場合の時間調整について、フライトシミュレータのRTA機能を使用して検証した。

地点DONARと地点FLUTE間の巡航区間においては、地点FLUTEの標準の予定通過時刻に対して2分以上遅く飛行することが可能であった。飛行速度はM.757からM.674に減速し、燃料を167 lbs節約できた。また、地点FLUTEと地点ADDUM間の巡航・降下区間においては、地点ADDUMの標準の予定通過時刻に対して3分以上遅らせる制御が可能であった。飛行速度はM.755からM.651/230 KIASに減速し、燃料を131 lbs節約できた。

降下区間上の特定地点の通過時刻を指定する場合、より手前の距離かつより早い時刻から降下を開始し、小さい降下率で時間をかけて降下する。また、各制約が重なった場合には通常の飛行に少々手を加えないと全ての制約を満足できない可能性がある。そのため、時間管理を実施する場合の運用・運航の手順や制約条件の優先度を明確にすることが望ましい。

謝辞

本検証実験にご協力いただきました日本航空株式会社、および財団法人航空輸送技術センターにおけるCDO/TBOに関する調査・研究ワーキンググループの関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 国土交通省航空局 将来の航空交通システムに関する研究会，“将来の航空交通システムに関する長期ビジョン”，2010年2月，http://www.mlit.go.jp/koku/koku_CARATS.html
- [2] SESAR ホームページ (EUROCONTROL内)，<http://www.eurocontrol.int/content/seesar-and-research>
- [3] NextGen ホームページ (JPDO内)，<http://www.jpdo.gov/index.asp>
- [4] 国土交通省航空局 航空情報業務センター，“フィックス離脱時刻の指定による航空交通流管理方式 (SCAS) の試行運用について”，AIC Japan Nr 029/11, 2011年7月
- [5] 財団法人航空輸送技術センター，“Tailored Arrivalに関する調査研究報告書(その2)”，2011年4月
- [6] LFV et al., “CTA/ATC System Integration Studies (CASSIS) Flight Trials Report”，2009年3月，http://www.eurocontrol.int/tma2010/public/standard_page/CASSIS_flight_trials.html
- [7] EUROCONTROL Experimental Centre，“User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.8”，EEC Technical/Scientific Report No. 2010-003, 2011年4月