

## 2. 軌道ベース運用における二次元飛行経路に関する一考察

航空交通管理領域 ※平林博子，マーク ブラウン，ビクラマシンハ ナヴィンダ キトマル

### 1 はじめに

増加する航空交通需要に対応しつつ，安全かつ効率的な航空交通の運用が求められており，将来の航空交通管理（ATM: Air Traffic Management）においては，航空機の軌道を予測し時間管理も含めて軌道を管理する軌道ベース運用（TBO: Trajectory Based Operation）の役割が期待されている<sup>[1]</sup>。TBOは，1990年代頃の欧米での Free Flight<sup>[2]</sup>，PHARE（Programme for Harmonized ATM Research in EUROCONTROL）等が基になり構築されたコンセプトであり，自由度の高い柔軟な飛行経路の実現が目標のひとつである。

運航者が自由に経路を設定できる運用方式は徐々に世界で取り入れ始めており，欧州ではウェイポイント間で自由に経路を設定することが可能なフリールーティング空域を拡大する計画である<sup>[3,4]</sup>。日本では，交通密度のそれほど高くない洋上空域において一定の運用条件下で運航者が自由に経路を設計できるUPR（User Preferred Route）の運用が実施されている。また，陸域上空高高度において，フリールーティング空域の段階的な導入が検討されており，洋上空域のUPRとの一体的な運用を目指している<sup>[5]</sup>。

近年，RNAV（Area Navigation）の発展に伴い，航空保安施設の位置に縛られない柔軟な経路での飛行が実現されており，日本国内空域の大部分において，円滑な交通流を維持しながら効率的な経路網が形成されつつある。また，航空機の航法精度及び地上の監視システムの向上等により，高密度運航が可能な環境が整いつつある。

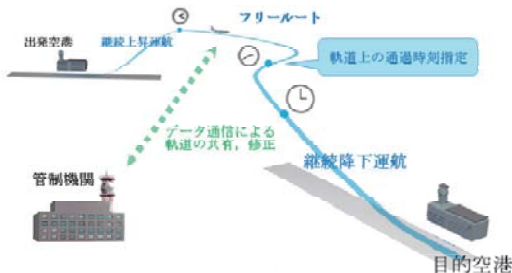


図1 軌道ベース運用の概念図

現在の航空交通サービスでは，運航者は飛行計画に経路情報を記述し，管制機関は飛行計画上の経路情報を基に航空管制を実施している。飛行場から40NM以遠のエンルート空域における飛行経路の飛行距離及び飛行時間の分析結果から，実際の飛行は，レーダー誘導のショートカットにより飛行計画経路よりも短縮されている傾向があり，決して飛行計画経路通りに飛行しているわけではない<sup>[6]</sup>。

本稿では，ファストタイムシミュレーション実験及び経路最適化計算から得られた結果から，現在の運航における飛行経路に関する特徴を抽出し，TBOにおいて情報共有されるべき二次元飛行経路について考察する。ファストタイムシミュレーション実験では，飛行計画に記載された経路と実際の飛行経路との相違を明らかにするために，1日分の飛行に対して飛行計画経路（FPL: Flight Plan）及びレーダー等航空機位置情報から抽出した実際の運用経路（RD: Radar）を飛行経路として設定し，飛行距離及び飛行時間を比較した。最適化経路計算では，7フライトに対し，FPL, RDに加え，最短距離経路（GC: Great Circle）及び風の影響を考慮した燃料最適経路（WO: Wind Optimal）で飛行した場合の，飛行距離，飛行時間及び消費燃料の計算を実行した。

2章でTBOの概念について，3章でファストタイムシミュレーション実験について，4章で最適化計算について説明する。各実験における結果を5章に，結果を踏まえ，TBOにおける二次元的飛行経路について6章で考察する。

### 2 軌道ベース運用（TBO）の概念

「Full 4D」という完全なTBO概念の運用では，飛行前に関係者間で合意された軌道に基づき航空交通サービスが提供される。軌道情報は，出発から到着までの経路及び経路上の通過時刻並びに高度から成り，運航者は合意された軌道上を飛行し，管制機関は軌道に沿った運航がで

きるようサービスを提供する。

TBO では軌道情報を関係者間で情報共有することが重要とされており、国際民間航空機関 (ICAO: International Civil Aviation Organization) では、情報共有の枠組み SWIM (System Wide Information Management) が提唱されている。飛行計画に相当する領域は FIXM (Flight Information Exchange Model) と呼ばれ、XML (Extensible Markup Language) 形式で記述されることとなる。FIXM では、現在使用されている飛行計画をベースにしているが、所有する情報量は膨大である。

### 3 ファストタイムシミュレーション実験

飛行計画に記載された経路と実際の飛行経路との相違を明らかにするために、ファストタイムシミュレーション実験を実施した。

#### 3.1 軌道の作成

飛行軌道はファストタイムシミュレーター AirTop で作成した。AirTop ではフライトシナリオ情報を基に、航空機性能データと気象データを用いて出発空港から到着空港までの軌道を作成する。フライトシナリオは、日本が航空管制を担当する福岡 FIR (Flight Information Region) を飛行する 2013 年の 1 月、9 月のそれぞれ一日分の飛行計画に基づいて作成した。航空機性能データは EUROCONTROL が提供する BADA (Base of Aircraft Data) バージョン 3 の飛行性能データテーブルを利用し、気象データはフライトシナリオの日付に対応する気象庁提供の全球数値予報モデル GPV (GSM) データを使用した。

#### 3.2 飛行経路の設定

飛行計画に記載された経路通りに飛行した場合と実飛行との差を抽出するため、フライトシナリオにおける指定項目 (表 1) の中の飛行経路を飛行計画経路 (FPL) 及び実航跡経路 (RD) の 2 パターンを用意した。図 2 に飛行経路の概要を示す。FPL では運航者が提出した飛行計画に記載されている経路を飛行経路とし、RD では航空路監視レーダー位置情報又は洋上管制システム位置情報があるエリアは 10,000 フィート以上で各位置情報を飛行経路とした。福岡 FIR 外の位置情報がないエリアの飛行経路は、飛行

計画の経路を飛行経路とした。巡航高度は福岡 FIR 最高高度、出発時刻及び FIR 入域時刻は実績値を指定した。

表 1 一飛行での指定項目

呼び出し符号	航空機型式	
出発空港	出発時刻または FIR 入域時刻	
飛行経路	巡航高度	到着空港

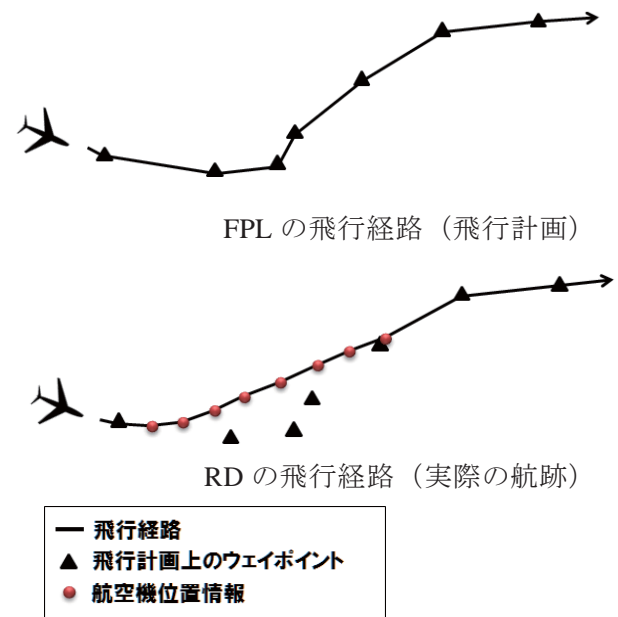


図 2 シナリオにおける飛行経路

#### 3.3 フライトシナリオ

フライトシナリオは、対象日の 0 時 JST (前日 15 時 UTC) から 24 時 JST (当日 15 時 UTC) の間に福岡 FIR を飛行した軍用機を除く計器飛行方式による飛行 (IFR) を対象として作成した。飛行全体が航空機位置情報のない 10,000 フィート未満である飛行を除外した。各日のフライトシナリオ数を表 2 に示す。AirTop でのシミュレーションでは、最終ウェイポイントが空港に近接し過ぎている場合は“overshot (降下し過ぎ)”でシミュレーションエラーが発生する。他にも経路指定条件に無理がある場合はシミュレーションエラーが発生する。発生したシミュレーションエラーはごく少数であり、各日 99.5% 以上のシミュレーションが正常に実行できた。

図 3 に一日のフライトの内訳を示す。国内線

が6割弱、国際線は3割程度、そしてアジア各国から北米方面等、日本国内の空港を発着することはないが福岡 FIR を飛行する上空通過機は14%であった。将来の航空需要予測では、アジア太平洋地域の高い伸び率が予測されており、今後福岡 FIR の飛行は上空通過機及び国際線の割合が高くなると予測されている<sup>[7]</sup>。

表2 フライトシナリオ数

	1月	9月
フライトシナリオ数	3,683	3,918
エラー数	15	18
シミュレーション実行数 (評価対象)	3,668	3,900
シミュレーション実行率	99.6%	99.5%

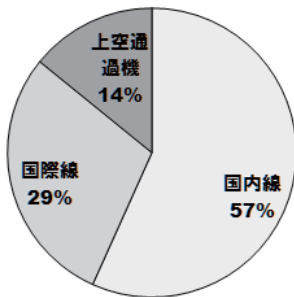


図3 フライトの内訳

#### 4 風最適経路

効率的な飛行経路として最短距離経路が考えられる。しかし、最短距離の飛行が必ずしも最短時間または最少燃料での飛行とは限らない。風の影響を考慮し消費燃料及び飛行時間等を最適化した経路をここでは風最適経路と呼ぶ。風最適経路による飛行経路の効果を測るために、風最適経路を作成し、飛行計画経路、実際の航跡経路及び最短距離経路を飛行した場合のパフォーマンス値（飛行距離、飛行時間及び消費燃料）を比較した。

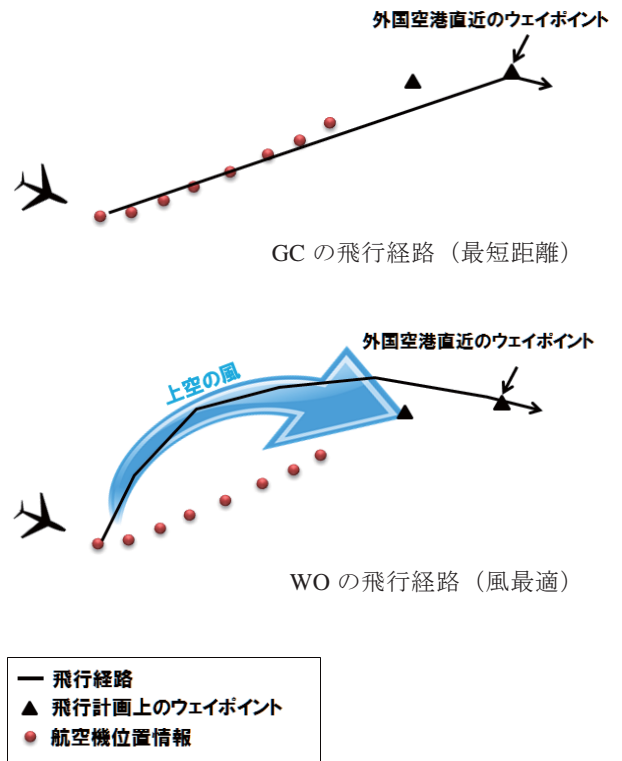
##### 4.1 風最適経路の飛行経路の作成

第3章と同様の1月及び9月のある一日の7フライトに対して、飛行計画経路（FPL）、実際の航跡経路（RD）、大圏経路（GC）及び風最適経路（WO）の4つの経路パターンにおける飛行距離、飛行時間及び燃料消費量を計算した。フライトの内訳を表3に示す。

FPL 及び RD の飛行経路は第3節と同様である（図2）。GC は、国内線においては航空機位置情報の上昇／降下時それぞれ 10,000 フィート地点間の最短距離経路を飛行経路とし、航空機位置情報のない外国空港付近では、外国空港出発機に関してはFPLで指定した最初のウェイポイントを、外国空港到着機に関しては最後のウェイポイントを最短距離の始点または終点に指定した最短距離経路を飛行経路とした。WO は GC の最短距離経路の始点終点間を風最適で飛行する経路を飛行経路とした（図4）。

表3 風最適経路作成対象フライト

ID	型式	出発空港	到着空港	月
Flight01	B763	大阪	羽田	9月
Flight02	B772	福岡	羽田	9月
Flight03	A320	関西	千歳	9月
Flight04	B763	成田	上海	1月
Flight05	B744	バンコク	成田	1月
Flight06	B744	台北	アンカレッジ	1月
Flight07	B744	台北	アンカレッジ	9月



## 4.2 パフォーマンス値計算

航空会社の運航では、時間と燃料の効率性のために FMS (Flight Management System) にコストインデックスを指定する。コストインデックスは、時間コストと燃料コストをどの程度優先して飛行するかを決めるインデックスのことで航空会社の戦略のひとつであるため公表されていない。ここでの風最適経路の計算では、コストインデックスをゼロ(燃料効率を最大とする)と仮定し計算を実行した。

最適化計算では、BADA バージョン 3 の航空機性能特性データ及び気象庁提供の全球数値予報モデル GPV (GSM) データを使用し経路を作成し消費燃料値を計算した。計算の詳細は文献 [7]に記載されている。

## 5 各指標値比較

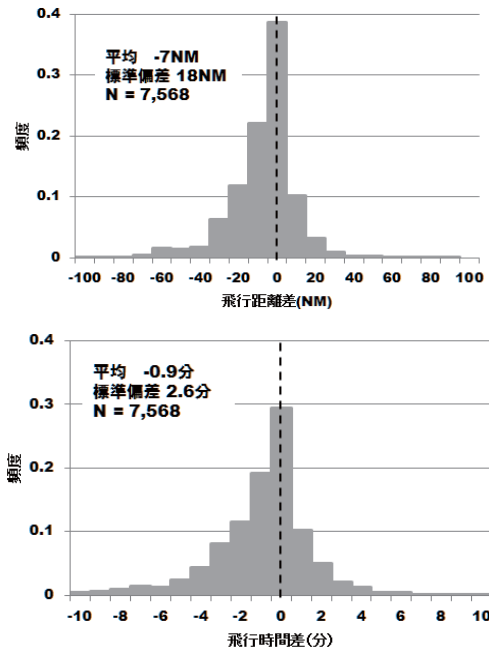
### 5.1 一日分の飛行における飛行距離及び飛行時間比較

一日分のファストタイムシミュレーションの結果から、FPL と RD の飛行距離及び飛行時間を比較した。表 4 には、RD の各指標から FPL の各指標を減じた値の一飛行あたりの統計値を示す。図 5 には分布図を示す。マイナス値は、実際の飛行の方が飛行計画経路よりも、短い飛行距離、飛行時間で飛行したことを意味する。

福岡 FIR において、実際の飛行では平均すると一飛行あたり飛行距離にして約 7NM、飛行時間にして約 1 分短縮されている。いくつかの航跡図から、先のウェイポイントへ直行させるショートカットによるレーダー誘導が実施されていることが確認できている<sup>[8]</sup>。管制運用において、管制間隔設定、交差箇所の減少等のためにショートカットが有効である場合があり、レーダー管制では一般的に行われている。

表 4 一飛行あたりの実飛行と計画飛行の飛行距離差及び飛行時間差の統計値

	飛行距離差 (NM)	飛行時間差 (分)
最大値	214	33.8
中央値	-4	-0.5
最小値	-150	-20.7
平均値	-7	-0.9
標準偏差	18	2.6



上：飛行距離 (NM) 下：飛行時間 (分)

図 5 一飛行あたりの実飛行と計画飛行の飛行距離差及び飛行時間差の分布

### 5.2 FPL, RD, GC 及び WO 飛行経路のパフォーマンス値比較

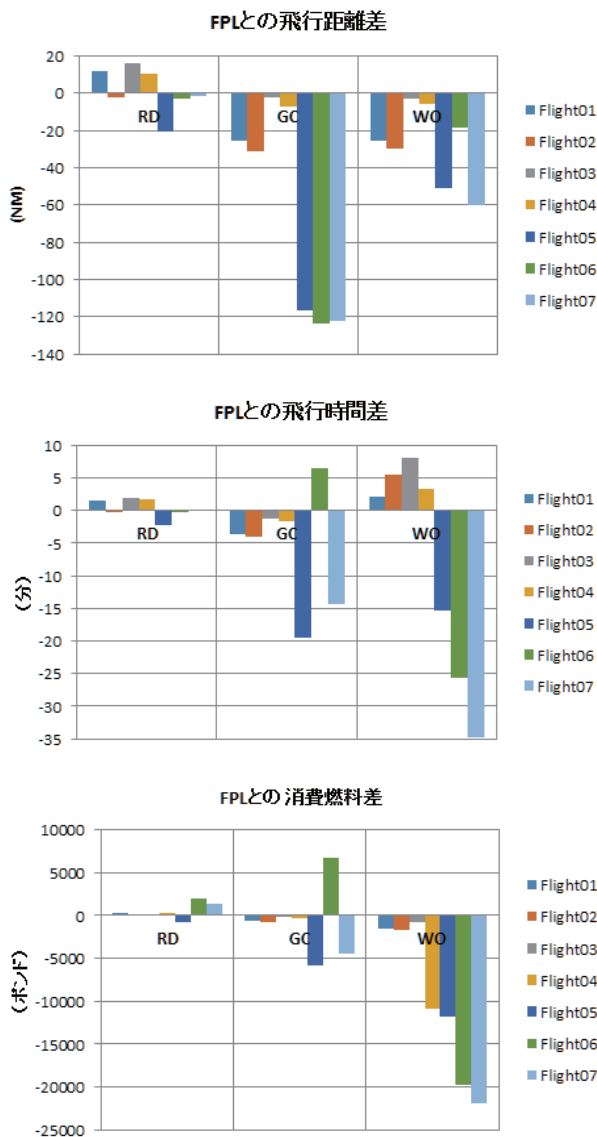
RD, GC 及び WO の飛行経路における各パフォーマンス値と FPL 飛行経路との各パフォーマンス値の差を表 5 及び図 6 に示す。

GC は最短経路であるため、全ての飛行において飛行距離差が短くなるが、飛行時間、消費燃料が少なくなるわけではない。特に長距離飛行になるほど、WO の方が、少ない飛行時間及び消費燃料で飛行する。

図 7 に Flight01 のシミュレーション軌道を示す。RD は羽田空港到着機の順序付けのため飛行距離が延伸されている。GC と WO 飛行距離は同様であるが、飛行時間、消費燃料において差が生じている。これは、飛行高度の差による結果である。FPL, RD 及び GC では、実際の巡航高度 25,000 フィートで飛行したとして計算を実行した。WO では 34,777 フィートが最適高度として計算されその高度で飛行したとし計算を実行した。その結果、GC と WO では二次元的な飛行経路は同様であるが、WO は+2 分及び-967 ポンド GC との間に差が生じた。Flight01 だけではなく、Flight02, 03, 04, 05 においても飛行高度に差があり、WO がその他の飛行よりも高い巡航高度が最適高度であると計算され

た。

図8はFlight06, 07のシミュレーション軌道である。どちらも台北からアンカレッジのフライトである。図9に各日の巡航高度付近の風を示す。風速が速いところが黄色で示されている。1月は北緯30度付近に強風軸があるのに対して、9月の強風軸は北上している。WOの飛行経路が大きく異なるのは上層の風の影響を受けているためである。Flight06のGCは、飛行距離は短いが消費燃料が多くなっており、上層風の影響を大きく受けていることがわかる。

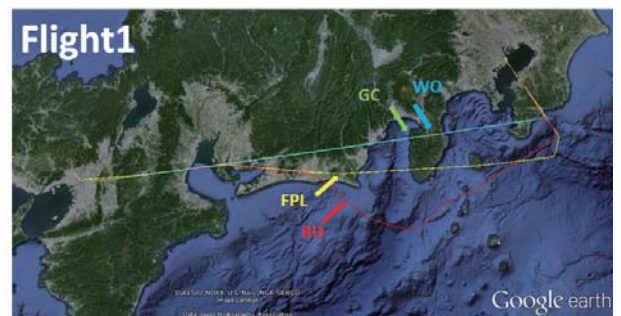


上：飛行距離 中：飛行時間 下：消費燃料

図6 FPL 飛行経路と RD, GC 及び WO 飛行経路との各パフォーマンス値の比較

表5 FPL 飛行経路と RD, GC 及び WO 飛行経路との各パフォーマンス値の比較

	RD-FPL	GC-FPL	WO-FPL	FPL
飛行距離(NM)				
Flight01	12	-26	-26	248
Flight02	-2	-31	-30	504
Flight03	16	-2	-3	552
Flight04	11	-7	-6	921
Flight05	-20	-117	-51	2,538
Flight06	-3	-124	-18	3,991
Flight07	-2	-122	-60	3,977
飛行時間 (分)				
Flight01	2	-4	2	34
Flight02	0	-4	5	64
Flight03	2	-1	8	71
Flight04	2	-2	3	158
Flight05	-2	-20	-15	272
Flight06	0	7	-26	444
Flight07	0	-14	-35	471
消費燃料 (ポンド)				
Flight01	308	-603	-1,570	6,722
Flight02	6	-791	-1,737	13,371
Flight03	169	-69	-752	5,452
Flight04	334	-319	-10,829	31,024
Flight05	-745	-5,790	-11,866	90,418
Flight06	1,963	6,789	-19,812	196,596
Flight07	1,334	-4,383	-21,904	206,309



黄：FPL 赤：RD 緑：GC 青：WO

図7 Flight01のシミュレーション軌道



設定することが可能となると考える。

## 6.2 フリールーティング

近い将来の空域の構想のひとつとして、高高度空域の分離がある。高高度空域でのフリールーティング運用では、運航者は日ごとの風の影響を考慮した最適経路（UPR）を計画することが可能となる。解析結果から、長距離フライトでは風最適の消費燃料における効果が大きくなる。図8の軌道では、FIRの外を飛行する経路が最適とされており、国際的なFIR間の調整を考慮すると現実的であるとは言えないが、福岡FIR高高度の範囲内だけでも柔軟な経路設定が可能となると、現在の運用よりも消費燃料削減効果の高い飛行が可能となることが推察される。より詳細なシミュレーション環境を設定することで、効果の程度を示していくことが今後の課題のひとつである。

## 7 まとめ

TBOにおいて情報共有されるべき二次元飛行経路について考察するために、ファストタイムシミュレーション実験を実施し、パフォーマンス値を比較した。実飛行経路を模擬したシミュレーション結果から、実際の航空交通の運用では、管制間隔設定や交差箇所を減少させるためにレーダー誘導によるショートカットが実施されており、飛行計画経路より短い距離、時間で飛行していることがわかった。将来のTBOにおいて計画される飛行経路では、現在のレーダー誘導に見合うような飛行経路の設定が有効であると考えられるが、そのためには、管制支援機能の発展が望まれる。

風最適経路でのパフォーマンス値比較では、同経路であっても飛行高度の違いにより消費燃料に差があること、そして長距離飛行における風最適経路の消費燃料削減効果が高いことがわかった。今回の風最適経路は空域の制約条件を付加せず柔軟性を最大にして計算したが、今後はより現実的な経路設定として、FIR境界線ルール、軍用空域の回避、高高度空域でのフリールーティング等を制約条件としたシミュレーション環境を設定し、効果を測る予定である。

## 謝辞

運用実績データをご提供いただきました国土交通省航空局の関係者皆様、そして解析ツールの開発にご尽力いただきました海津成男氏に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] ICAO, “Global Air Traffic Management Operational Concept”, ICAO Doc9854, 2005.
- [2] Free Flight Phase 1 Technologies, “Progress To Date and Future Challenges”, FAA Report no. AV-2002-067, 14 December 2001.
- [3] NATS, “Route Free Airspace Consultation”, Issue 1.0, 2014.
- [4] EUROCONTROL, “As the Crow Flies-Free Route Airspace Maastricht”, March 2011.
- [5] 国土交通省将来の航空交通システムに関する推進協議会, ATM検討WG, “平成25年度活動報告書”, 平成26年3月.
- [6] 平林, ブラウン, 福田, “TBOにおけるエンルートの飛行経路に関する検討”, 第46回日本航空宇宙学会年会講演会講演集, D19, JSASS-2015-1094, 2015年4月.
- [7] Wickramasinghe N. K., Brown M, Fukushima S., Fukuda Y. Harada A. and Miyazawa Y., “Correlation between Flight Time and Fuel Consumption in Airliner Flight Plan with Trajectory Optimisation.”, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, SCHITECH2015, Jan 2015.
- [8] 平林, ブラウン, 福田, 井上, 長岡, “航空交通需要予測に基づくフライトシナリオの検討”, 第51回飛行機シンポジウム講演集, 2D03, JSASS-2013-5107, 2013年11月.