軌道最適化と気象条件からみた 航空機からの CO2 排出削減手法に関する研究

平田　輝満[1]・原田　明徳[2]・武市　昇[3]・安ケ平　玲央[4]

[1]正会員　茨城大学教授　大学院理工学研究科都市システム工学領域
（〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1）
E-mail: terumitsu.hirata.a@vc.ibaraki.ac.jp

[2]正会員　高知工科大学准教授　大学院工学研究科システム工学群
E-mail:harada.akinori @kochi-tech.ac.jp

[3]正会員　東京都立大学教授　大学院システムデザイン研究科 航空宇宙システム工学域
E-mail:takeichi@tmu.ac.jp

[4]学生会員　茨城大学大学院理工学研究科都市システム工学専攻博士前期課程

我が国では，運航分野における CO2 削減に向けた取組として SAF の導入が注目されているが，短期的に実行可能性の高い運航方式の改善による削減効果についても十分に検討を行う必要がある．運航方式の改善においては，経路短縮等の飛行経路の改善のみでなく，速度抑制による CO2 削減に関する検討も有益であると考えられるが，その効果や実現性については明らかにされていない．そこで，本研究では動的計画法による軌道最適化を用いて，気象条件を考慮した燃料消費量と飛行時間の関係について分析することとした．その結果，風況や機体性能によって削減効果が異なることを示しつつ，速達性の確保と CO2 削減のバランスに関して考察を行った．

Key Words: CO2emission, trajectory optimization, express delivery capability

1.　研究の背景

2050 年カーボンニュートラルに向けて，2021 年末に国土交通省から航空の脱炭素化推進に関わる工程表 [1]が示された．脱炭素化の方法として，①航空機の技術革新，②管制の高度化など運航の効率化，③SAF（バイオ燃料など，持続可能な航空機燃料）の導入，の大きく３分野に分けて検討されている．この中で③SAF による排出削減に大きな期待が寄せられている一方で，①航空機の新技術は技術開発に時間がかかることや，②運航の効率化はすでに効率的な飛行が一定程度達成されている中で追加的な効率化の余地は必ずしも大きくはないと言われることが多い．

ICAO（国際民間航空機関）による国際航空分野での長期的野心目標(LTAG)[2]でも，野心度からみた 3 つのシナリオで推計値が変わるが，2050 年時点のベースラインと比較した削減比率目標の内訳は，新技術が 20~21%，運航効率化が 4~11%，SAF が 15~55%と示されている（なお，最も野心的なシナリオでも航空分野内だけではネットゼロを達成できないと推計している）．

運航の効率化については，前述の国交省の工程表では 10%程度の削減目標を掲げており，概ね ICAO の LTAG と同程度のオーダーの削減目標とも言える．運航効率化による CO2 削減効果は比較的小さいものの，短期的な実行可能性は高く，また SAF で実質 CO2 削減できるとしてもエネルギーを消費していることには変わらず，それにかかる直接的，間接的な様々なコストやリソースを最小化するためにも運航の効率化は最大限達成を目指すべきである．

我が国の工程表で示される 10%程度の運航効率化でも野心的な目標として設定されたと理解しているが，その達成がどの程度困難な目標なのか，最大でどの程度の削減ポテンシャルがあるのか，どの空域や路線で非効率性が残っているのか，そのような問題意識のもと，本研究では運航の効率化の視点で CO2 削減のポテンシャルについて分析を行う．

航空機の燃料消費（CO2 排出）は，飛行経路，速度，高度，気象条件等の様々な要因によって変化する．現状の航空機は，通常，旅客や貨物に対する速達サービスと機材の稼働率向上（≒運航コスト低減）を考慮して，燃

料消費量を最小化する最適速度よりも若干速い速度で飛行していると考えられている．そのため，あえて速度抑制を行い，最も燃費の良い速度で飛行することでさらなる CO2 排出量の削減を行うことが可能である．実際に，近年では国内航空路線においても，一日の最終便など，機材繰りに影響の少ない範囲で，燃料消費量を最小化する速度に近い速度で飛行する便も存在する．一方で，速達性の緩和は乗客のサービスレベルの低下及び機材の稼働率低下に伴うエアラインの運航コストの増加や空港の開港時間への影響などが懸念される．

2. 既存研究の整理と本研究の目的

航空交通における CO2 排出量削減に関する研究としては，まず航空機運航手法の改善による燃料消費量の削減に関する研究がある．例えば，巡航高度から着陸するまでの降下フェーズで継続的降下方式（Continuous Descent Operation: CDO）を行うための軌道最適化と燃料消費削減効果の推計に関する研究は数多い[3),4)]．平田ら[5)]は，国内航空ネットワークを対象に飛行距離削減による CO2 削減ポテンシャルを簡易に推計している．その結果，経路短縮のみの削減には限界があり，高度や速度等の最適化による CO2 削減の必要性を示している．また，Harada[5)]や宮本ら[7)]は，動的計画法を用いて，燃料消費量と飛行時間（速達性）について両者の重みパラメータである CI（Cost Index）を考慮した航空機の軌道全体の最適化（3 次元の飛行軌跡と各地点の通過時間を考慮した 4 次元の軌跡の最適化）を行う手法を開発した．その結果，現状の飛行軌跡から軌道最適化により改善可能な燃料消費量の削減量について一部のサンプル便を対象に推計している．その他にも，羽田空港到着の交通流全体で到着滑走路の混雑に起因する飛行経路延伸・遅延を抑制するための速度調整手法（あえてゆっくり到着させる方法など）なども提案されている[8)]．橋本[9)]は，国内外の空港を対象として，主に地上付近で発生する CO2 排出量を推計し，空港間の機材構成の比較や運航機材の変更による CO2 排出量への影響の分析を行っている．また，作中ら[10)]は首都圏空域を対象とした Point-merge-system といった先進的管制システムの導入と空域の柔軟活用による効率性・燃料消費等への影響について独自の管制シミュレータの開発と適用により分析している．

以上，航空交通からの CO2 削減に関する研究は様々なされているが，気象条件を考慮した軌道最適化による現状の飛行実態の詳細な分析及び CO2 削減策の検討，またその影響を分析した研究は少ない．

以上の背景と既往研究のレビューをもとに，本研究では，以下の 3 点を目的とした．

表-1 CO2 削減ポテンシャル

滑走路運用の考慮	CO2 削減ポテンシャル[%]	
	国内線全体	福岡→羽田
なし	5.46	11.09
あり	**3.7**	**5.86** **羽田南風時：7.73** **羽田北風時：4.60**

(1) 軌道最適化による燃料消費量と所要時間の関係の分析
(2) 機材別の飛行特性を踏まえた速達性の緩和による CO2 削減可能性の検討
(3) 速達性の緩和が乗客の速達性やエアラインの運航コストに与える影響に関する考察

3. 飛行距離からみた CO2 削減ポテンシャルに関する分析

(1) CO2 削減ポテンシャルの推計方法

CO2 削減ポテンシャルの推計においては，2016 年度 CARATS Open Data を用いる．CARATS Open Data は，国土交通省航空局が一般公開している飛行軌跡データであり，日本のレーダー範囲内の時刻，仮想便名，緯度，経度，高度，型式が約 10 秒間隔で記載されている．記載されているデータは，奇数月 6 ヵ月の，ある 1 週間の計 42 日分のデータである．対象とする便は，簡易に飛行フェーズの分解が可能な国内線 43544 便とする．

筆者らの既往研究[5)]による CO2 削減ポテンシャルの推計方法では，余分に飛行している距離を CO2 削減ポテンシャルとして定義し，その際の基準便として実運航における最短で飛行している便を設定しているが，実際には同路線内でも風向により滑走路の運用方法（離着陸方向）は異なる．そのため，飛行経路が長い運用の際の基準便が，飛行経路が短い運用の際の便から選ばれていた可能性が高いと考えられ，CO2 削減ポテンシャルとして過大評価している可能性がある．本研究では，風況条件による滑走路運用の違いを考慮して再度基準便の設定を行う．推計にあたり，各便の離着陸の方向を離着陸付近の位置データの変化から判別する．路線別滑走路運用別機材別に基準便（最短の飛行経路で飛行している便）を設定し，各便の CO2 排出量との差分を CO2 削減ポテンシャルとして推計を行う．

(2) CO2 削減ポテンシャル推計結果

表-1 に滑走路運用を考慮しない場合と考慮する場合それぞれの CO2 削減ポテンシャルの推計結果を示す．国内線全体では，従来の分析方法（滑走路運用の考慮無

し）と比較すると，滑走路運用の別を考慮すると約 1.8%ポテンシャルが減少することとなることが分かった．つまり，飛行経路短縮のみでは国内で掲げている目標の達成はより困難である可能性が示唆された．また，便数の比較的多い福岡→羽田路線における削減ポテンシャルの計算例をみると，到着空港である羽田の南風運用時が約 7.7%，北風運用時が約 4.6%となった（ここでは，福岡の滑走路運用は平均している）．これは，南風運用時の方が標準到着経路が長いことや，処理容量の違いにより南風時の方が空中待機や迂回が発生しやすいことが要因の一つと考えられる．このように風況による滑走路運用の差異が当然ながら飛行距離および CO2 削減のポテンシャルに影響を与えるため，長期的には気候の変化による滑走路運用の比率の変化も影響し得る．

4. 軌道最適化と風況条件からみた CO2 削減ポテンシャルに関する分析 [13]

(1) 軌道最適化の計算手法

本研究では，動的計画法による軌道最適化を用いて分析を行う．今回は分析目的より，高度と速度の 2 つの変数を最適化している．具体的には，変数を量子化して格子点とし，その点から終端までの評価関数が最小となるように，格子点の組み合わせを探索する．評価関数を調べる方向は順時間あるいは逆時間のいずれも可能であるが，格子点間の状態遷移において方程式の解が確実に得られるように，本計算では時間とともに単調に変化する飛行距離を独立変数として定め，この方向に探索を進めている．また，初期推定解の周りに探索範囲を設け，その中で得られた解より探索範囲を更新し，評価関数が収束するまでこれらを繰り返すという探索領域移動動的計画法（MS-DP 法）[11][12]により計算時間の短縮を図っている．

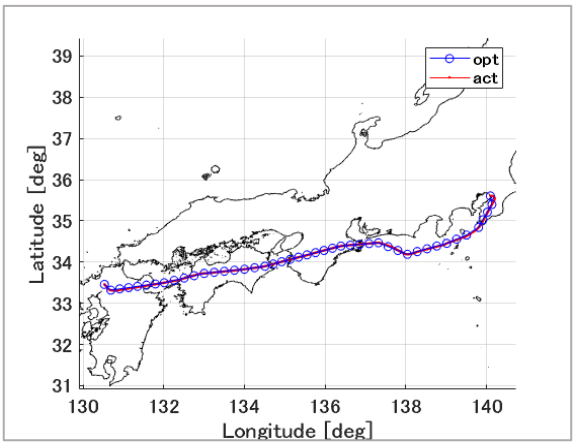
動的計画法は，最適性の原理より導かれる Hamilton-Jsacobi-Bellman（HJB）方程式を数値的に解く手法である．HJB 方程式は空間及び時間に関する 1 階の非線形編微分方程式であり解析解を得るのは極めて困難であるが，解の大域的最適性が保証されている．

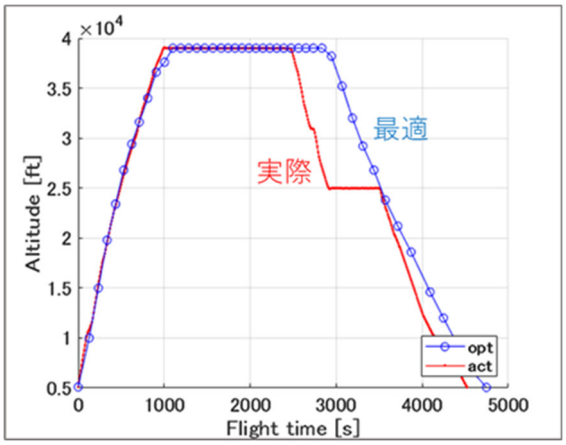
(2) 飛行軌道最適化の例

図-1 は，福岡→羽田路線のとある一便の実際の飛行軌跡データ（Quick Access Recorder データ）と，同じ水平面経路で速度と高度を変化させて燃料消費量を最小化した場合の最適軌道の比較を示している．また，**表-2** に飛行時間及び燃料消費量の比較を実軌道と最適軌道で比較した結果を示す．このケースでは，降下フェーズで一度水平飛行している影響も含むが，飛行時間を約 4 分弱遅らせて飛行をすることで，燃料消費量を削減できることが分かる．このように速達性を緩和することにより CO2 排出量を削減可能な便が存在することが示唆された．

表-2 実軌道と最適軌道の燃料消費量及び飛行時間の比較

	飛行時間[s]	燃料消費量[kg] ①	飛行距離[km] ②	①/② [kg/km]
最適軌道	4745	6999	993	7.05
実軌道	4520	7376	1005	7.33
最適-実際	+225	-367	-12	





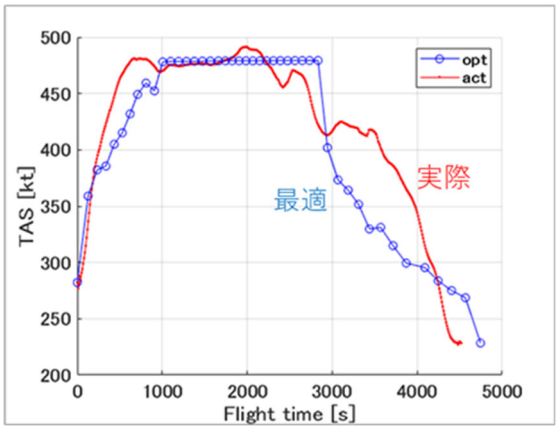


図-1 実軌道と最適軌道の飛行軌跡比較
（上から水平面経路，気圧高度，真対気速度）

(3)　風況別の飛行時間と燃料消費量の関係

一般に航空機の飛行計画はエアラインに委ねられており，気象条件や他の航空機との干渉などを考慮して計画されている．特に，風況が飛行時間に与える影響は大きく，国内線においても往復で飛行時間が異なる路線は多い．

図-2，**図-3** は，**表-3** に示す条件で軌道最適化における評価関数での消費燃料と飛行時間の重みを変化させながら，飛行時間と燃料消費量の関係を分析した結果である．向かい風及び追い風の気象条件は，ジェット気流の強い冬季を想定している．**図-2** は風況条件別の飛行時間と燃料消費の関係を示しており，機体性能上最速で飛行する点から，燃料消費が最小となる速度・高度で飛行する点の範囲で計算した結果である．**図-3** は最速（燃料消費最大）を基準にしたときの所要時間延長による燃料消費削減量を示している．

図-2，**図-3**から，飛行時間は向かい風になるほど増加するのは当然であるが，同じ所要時間変化に対する燃料消費の削減量は向かい風，追い風で大きく異なることが分かる．実際の速度選択や風況に応じた実際の飛行時間の選択状況の詳細は定かではないが，追い風の状況でも最速に近い速度で飛行し，速達性や機材の稼働率を向上させている傾向はあるようである．もしそのような傾向があるのであれば，特にもともと速達性の高い追い風方向のフライトでは，多少の速達性は犠牲にしつつ，CO2 を減らす余地はあると考えられる．飛行距離延伸の削減や，空港での地上走行と待機時間の削減対策を実施しながら，飛行時間は CO2 最小の若干遅い速度で飛行し，総所要時間は現状と変わらないレベルでサービスを行う，ということは十分にあり得ると思われる．また，多少運賃が高くても環境にやさしいフライトや交通機関を選択して移動するという行動が広がりつつあるが，そのような環境意識が高まれば，速達性を多少犠牲にしても環境にやさしい飛び方をしているフライトが社会的に受容されてくる傾向はあると考えられる．

(4)　機体性能による比較

図-4，**図-5** は(3)と同条件で機体モデルを燃費性能の良いA350-900に変更し，同様の分析を行った結果である．

B772 の結果と比較して，風況別の飛行時間と燃料消費量の関係に大きな違いはないものの，各風況における時間の幅（最速と燃料消費最小の飛行時間の差）が広いことが分かる．加えて，同程度の飛行時間延長に対する燃料消費削減量は異なる．例えば，最速と比較して飛行時間を 600 秒遅らせた場合，追い風，向かい風どちらも B772 より約 50kg 削減可能である．現状の飛行が速達性を重視して，最速に近い速度で飛行しているとすると，既存機体より A359 等の燃費性能の良い機体の方が最大

表-3　軌道最適化の計算条件

飛行区間	羽田－福岡間（約 900km）
気象条件	国際標準大気　定常風モデル （向かい風，追い風は高度 12km 以上で西風 100m/s で地上から線形変化）
機体	B777-200　（BADA3.14） （質量は BADA 標準値の 95%）

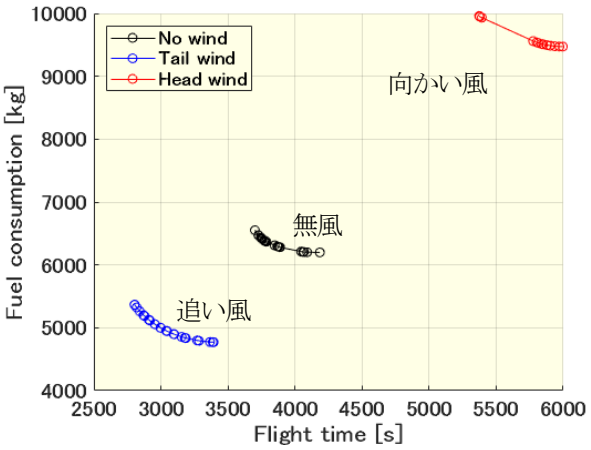


図-2　飛行時間と燃料消費量の関係

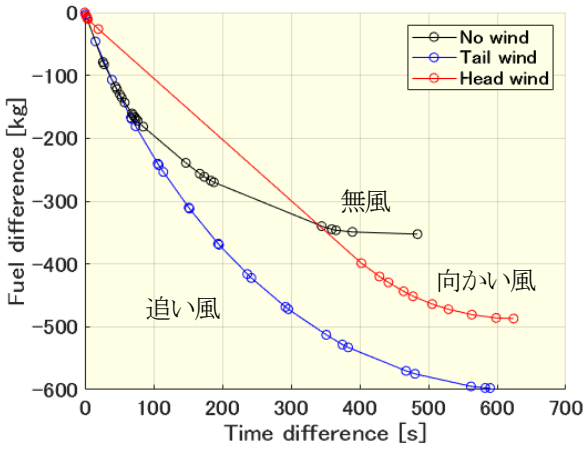


図-3　飛行時間の差と燃料消費量の差の関係

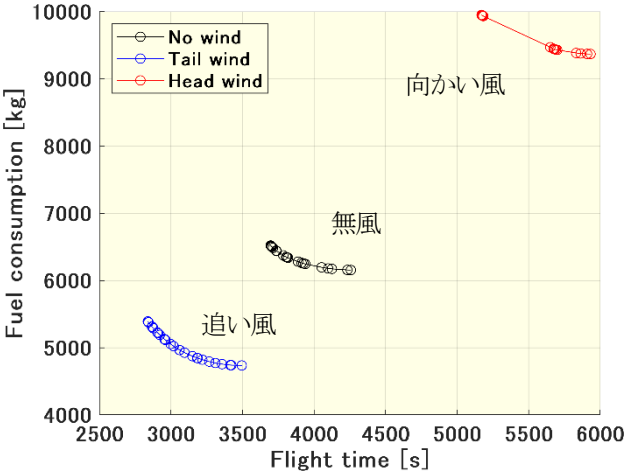


図-4　飛行時間と燃料消費量の関係（A359）

の削減効果が大きいと考えられる．また，今後 A359 をはじめとする燃費の良い機体の導入割合が増加していくことを踏まえると，全体としては燃料が削減できているために，より速達性を重視した飛行が増える可能性がある．現状の航空機の遅延を乗客が受容できているとすると，機材更新による効果を速達性向上ではなく，飛行時間を遅らせることによる燃料削減にあてるということも可能であると考えられる．

5. 速達性低下の影響に関する考察

現実の運航システムにおいて，速度抑制による CO2 削減を行う場合，機材繰りへの影響が考えられる．現実のダイヤ設定を考慮し，1 便当たりどの程度の速度抑制が可能なのかということを検討する必要がある．飛行時間の増加が 1 日の機材繰りの中で累積することを考えると，1 便ごとの飛行時間増加が小さくても，1 日の最終便の到着時刻は大幅に遅れることも考えられるため，速達性の低下が機材繰りに与える影響については特定の路線における試算が必要である．

エアラインの視点から考えると，飛行時間を遅らせることで，1 便あたりの燃料コスト（燃料消費量）を削減することが可能である．一方で，飛行時間の増加は機材繰りの関係上，減便等のダイヤ設定の変更が必要であり，速達性の低下（乗客の利便性低下）により仮に需要が減少すれば，エアラインの利益自体も減少する．

これらを踏まえると，速度抑制による CO2 削減効果だけではなく，飛行時間の増加に伴うエアラインの運航コストの変動及び旅客利便性に与える影響を分析する必要がある．

6. まとめ

本研究では，速度・高度を含めた軌道最適化を用いて，風況別の燃料削減効果と飛行時間の関係について分析し，速達性低下による CO2 削減可能性について検討を行った．その結果，風況及び機体性能により，削減効果が異なることが示唆され，今後の使用機材の動向を踏まえた上での削減可能性について示した．実際には，交通流全体での最適化を図る必要があるため，速達性緩和がエアラインや乗客に与える影響を踏まえた上での検討が必須である．海外では既に低炭素便として，SAF 導入のコストの一部を乗客に負担してもらう取組を始めている．低炭素便のような経済的負担ではなく，速達性緩和による時間的負担が受容される可能性もあると考えている．また，燃料消費量削減による運航コストの減少分を運賃削減に割り当てるなど需要を確保するための方策についても検討が必要である．

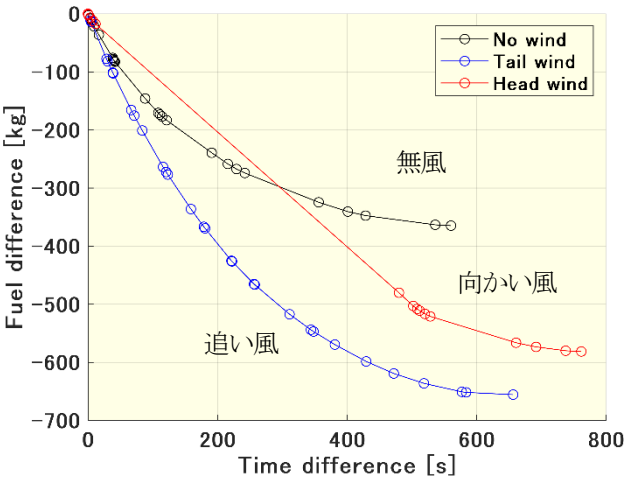


図-5 飛行時間の差と燃料消費量の差の関係（A359）

今後の課題としては，機材別の実軌道の速度選択の把握及び速達性緩和による削減策の検討を上記の分析を踏まえて考えていく．

参考文献

1) 国土交通省：航空機運航分野における CO2 削減に関わる検討会，航空の脱炭素化推進に係る工程表，2021.12，https://www.mlit.go.jp/common/001445923.pdf

2) ICAO：Report on the feasibility of a long-term aspirational goal (LTAG) for international civil aviation CO2 emission reductions, 2022.3，https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Documents/REPORT%20ON%20THE%20FEASIBILITY%20OF%20A%20LONG-TERM%20ASPIRATIONAL%20GOAL_en.pdf

3) J.-P.B. Clarke, N.T. Ho, L. Ren, J.A. Brown, K.R. Elmer, K.-O. Tong, J.K. Wat: Continuous descent approach: design and flight test for Louisville International Airport, J. Aircraft, 41 (5), pp. 1054-1066, 2004.

4) J.-P.B. Clarke, G. Nagle, A. Scacchioli, W. White, S.R. L: Optimized descent arrivals at Los Angeles International Airport, J. Aircraft, 50 (2) , pp. 360-369, 2013.

5) 平田輝満，安ヶ平玲央：飛行距離と機材・便数選択からみた国内航空ネットワークにおける CO2 削減ポテンシャルの推計，土木学会論文集 D3，78 巻，5 号，p.I_753-p.I_759，2023.

6) Akinori Harada, Tooru Ezaki, Tomoaki Wakayama, Koichi Oka: Air Traffic Efficiency Analysis of Airliner Scheduled Flights Using Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems Open Data, Journal of Advanced Transportation, vol. 2018, Article ID 2734763, 14 pages, 2018.

7) 宮本侑斗，原田明徳，ビクラマシンハ　ナヴィンダ　キトマル，宮沢与和，船曳孝三：BADA モデルを用いた旅客機の軌道最適化による運航効率の評価，航空宇宙技術，Vol.13，pp.1-10，2014.

8) Noboru Takeichi,: Nominal flight time optimization for arrival time

scheduling through estimation/resolution of delay accumulation, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 77, pp. 433-443, 2017.

9) 橋本弘樹：航空機の二酸化炭素排出量推計の空港間比較，航空環境研究，No.24，pp.1-8，2020.

10) 作中 祐介，阪本 真，屋井 鉄雄：都心上空到着機の先進的管制処理システム導入効果の分析，土木学会論文集D3（土木計画学），75 巻，6 号，p. I_657-I_666，2019.

11) 宮沢与和，ビクラマシンハ ナビィンダ キトマル，原田明徳，宮本侑斗：到着時刻を指定した旅客機の軌道最適化，航空宇宙技術，Vol. 12，pp.31-38，2013.

12) 原田明徳，小塚智之，宮沢与和，ビクラマシンハ ナヴィンダ キトマル，ブラウン マーク，福田豊：国内定期旅客便の運航効率の客観分析，航空宇宙技術，Vol. 14，pp.171-178，2015.

13) 平田輝満：運航の効率化からみた国内航空ネットワークにおける CO2 排出の削減ポテンシャル，KANSAI 空港レビュー，No.532，pp27-31，2023.

（2023. 10. 13 受付）