

軌道最適化と機材・便数選択からみた 航空機からの CO2 削減効果に関する分析

安ヶ平 玲央¹・平田 輝満²・原田 明徳³

¹ 学生会員 茨城大学大学院 都市システム工学専攻 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

E-mail: 22nm841h@vc.ibaraki.ac.jp

² 正会員 茨城大学准教授 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 (Coresponding Author)

³ 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 (〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185)

E-mail: harada.akinori@kochi-tech.ac.jp

我が国では、飛行経路短縮等の運航方式の改善によって、航空分野における CO2 を 10%削減することを目標にしている。しかし、実際にどの程度の削減効果が見込めるかということは定量的に明らかにされていない。また、CO2 排出量を考慮すると、現状よりも最適な機材・便数の選択が必要になる可能性もある。そこで、本研究では飛行経路の短縮及び機材・便数選択による CO2 削減ポテンシャルの推計、加えて乗客・航空会社に与える影響を同時に分析することとした。その結果、国内航空ネットワークでは現実的な飛行経路短縮のみでは 10%削減の達成は容易ではない可能性を示しつつ、抜本的な経路・空域設定の改善の必要性や機材・便数選択による CO2 削減のポテンシャルおよびその改善の必要性を定量的に示した。

Key Words: CO2emission, domestic aviation network, trajectory optimization, flight frequency

1. 研究の背景

近年、航空交通システムにおいても脱炭素社会に向けた取り組みは加速しており、わが国では飛行経路短縮等の運航方式の改善によって、2050年を目標に10%程度のCO2削減を目指している¹⁾。しかし、実際に航空分野における運航上の改善によって、最大でどの程度のCO2削減効果が見込めるかということについては定量的に評価されていない。

また、羽田空港等の混雑空港の発着容量の増加やLCCの参入、エアライン間の競争の中で、機材の小型化・多頻度運航が進展してきている。しかし、環境負荷の観点から考えると、必ずしも最適な機材・便数の選択になっているとは限らない。そのため、CO2排出を考慮した最適な機材・便数選択及びその削減効果を定量的に推計することも重要と考えた。一方で、便数・機材選択は、乗客の利便性・エアラインの運航コストに影響を与える。これらの影響を総合的に分析し、今後のCO2削減に向けた運航改善策を検討する必要があると考えられる。

2. 既存研究の整理と本研究の位置づけ

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降下の推計に関する研究は数多い^{2,3)}。また、Harada⁴⁾や宮本ら⁵⁾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⁶⁾。丹生⁷⁾は、航空機のCO2排出量の算出に燃料流量と飛行時間を用いる方法を提案している。しかし、飛行中のCO2排出量を算出する場

合は、飛行フェーズの分解方法及び各飛行フェーズの飛行時間の算出方法を検討する必要がある。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⁹⁾は首都圏空域を対象とした Point-merge-system とし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。

機材・便数選択と CO2 排出量・燃料消費量の削減に関する研究としては、Morrell¹⁰⁾は路線距離帯別に機材の大型化による CO2 削減の特性や今後の機材導入動向との統合分析により長期の CO2 削減ポテンシャルの予測をしている。また、近年注目度が急速に上がっている航空代替燃料の活用による CO2 削減量に関する分析も Staples¹¹⁾ら¹¹⁾などで行われている事例がある。

以上、航空交通からの CO2 削減に関する研究は様々ななされているが、我が国の国内航空ネットワーク全体で現状の飛行実態を基準として、将来の CO2 の削減ポテンシャルを推計した事例はなく、さらに飛行距離の削減（無駄の削減）と、機材・便数の選択およびそれに応じた便益変化の両面から同時に CO2 削減ポテンシャルに関して分析した事例もない。

以上の背景と既往研究のレビューをもとに、本研究では、国内航空ネットワークにおける飛行中の CO2 排出量に着目して、以下の 4 点を目的とした。

- (1) 飛行経路の短縮及び機材・便数選択による CO2 削減ポテンシャルの推計。
- (2) CO2 排出量を最小化する機材・便数選択が乗客や航空会社に与える影響の分析。
- (3) CO2 削減効果と乗客や航空会社に与える影響を踏まえた機材・便数選択による CO2 削減可能性の検討。
- (4) 軌道最適化による燃料削減ポテンシャルへの影響に関する考察。

3. 飛行中の削減ポテンシャルの推計手法

(1) 推計に用いるデータ

本研究では、国土交通省航空局が一般公開している飛行軌跡データ (CARATS Open Data) を用いた。飛行軌跡データには、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、2016 年度奇数月 6 か月のある 1 週間の計 42 日分のデータである。対象路線は、国内全路線とし、2016 年時点で 169 路線である。

(2) 飛行中の CO2 排出量の推計手法

航空機の CO2 排出量は、上昇中や降下中などの飛行フェーズによって燃料流量が異なるため、飛行フェーズ

表-1 機材別・飛行フェーズ別の燃料流量¹²⁾

機種	燃料流量 (kg-燃料/s)		
	上昇	巡航	降下
B772	2.58	1.09	0.84
B773	3.00	1.40	0.96
B762	2.10	0.93	0.68
B763	2.10	0.93	0.68
B737	0.91	0.40	0.32
B738	0.91	0.40	0.32
A320	0.86	0.38	0.29
A321	1.08	0.48	0.38

ごとに CO2 排出量を推計する必要がある。各便の飛行中の CO2 排出量の算出を行うためには、各飛行フェーズにおける飛行時間を算出する必要がある。そのため、飛行中のフェーズを上昇中、巡航中、降下中の 3 つに分解し、飛行時間を推計する。CARATS Open Data に記載されている緯度、経度、高度のデータから飛行フェーズの分解を行う必要がある。そこで、10 秒間隔で記載されている高度を利用し、10 秒前からの変化高度を各データで算出した。この高度変化が+の場合は、機体は上昇し、-の場合は降下していることを示している。そのうえで、飛行フェーズが切り替わる条件を以下のように設定した。

a) 上昇中から巡航中に切り替わる時刻

基本的に、航空機は巡航高度に達するまで上昇し、巡航高度に達した後は水平に飛行する。そのため、高度変化が 30 秒間 100ft 以下になった時、巡航中に切り替わったと仮定し、最初に 100ft 以下になった時刻を飛行フェーズが切り替わる際のデータとして抽出した。100ft 以下に設定した理由は、基本的に上昇中は高度変化が 100ft を上回っており、巡航中の微々たる上昇などは、100ft を下回ることが軌跡データから確認できたためである。

b) 巡航中から降下中に切り替わる時刻

基本的に、航空機は、巡航中は水平に飛行し、降下中は高度が下がり続ける。そのため、高度変化が 30 秒間-100ft 以下になった時、降下中に切り替わったと仮定し、最初に-100ft 以下になった時刻を飛行フェーズが切り替わる際のデータとして抽出した。-100ft 以下に設定した理由は、基本的に降下中は高度変化が-100ft を下回っており、巡航中の微々たる降下などは、-100ft を上回ることが軌跡データから確認できたためである。

各便の CO2 排出量は、各飛行フェーズの飛行時間に機材別に異なる燃料流量を乗じることで消費燃料を算出する。消費燃料に CO2 排出係数を乗じて、飛行中の CO2 排出量を算出する。燃料流量は、表-1 に示す機材別・

飛行フェーズ別の 1 秒当たりの燃料流量が記載されているデータ^{12,13)}に基づいて、その値を使用した。また、燃料流量は本来、外気圧や湿度などの影響を受ける可能性があるが、ここでは考慮していない。

(3) 飛行距離を考慮した CO2 削減ポテンシャルの推計手法

図-1 に CARATS OPEN DATA から作成した福岡—羽田路線の実際の飛行軌跡図の一例を示す。図-1 より、空域制限や到着空港の混雑のために空中待機や迂回飛行が発生していることが分かる。国内線のすべての便が、空中待機や迂回飛行のない飛行をした場合と、大圏航路（空港間の最短距離）を飛行した場合の CO2 削減ポテンシャルを推計する。そのため、A) 飛行軌跡データにおいて飛行距離が最小の便と B) 大圏航路を飛行する便を基準便に設定した。大圏航路を飛行する便は、上昇・降下の飛行距離は、A) と同じであると仮定し、巡航中の飛行距離は、空港間の大圏距離から A) の上昇・降下の飛行距離を引いた距離とする。各飛行フェーズの飛行時間は、便によって異なる気象の影響を考慮するため、飛行距離を平均対地速度で除すことで求める。基準便は、路線別・機材別に設定する。この基準便と飛行軌跡データに含まれる実際に飛行している便の CO2 排出量の差を求めることで、CO2 削減ポテンシャルを推計する。

(4) 機材・便数選択からみた CO2 削減ポテンシャルの推計手法

国内の全路線で CO2 排出量を最小化するための便数・機材選択を行った場合の CO2 削減効果を推計する。CO2 排出量は、機体サイズによって異なるため、座席数を参考に使用機材を 4 種類に分類した。表-2 に示すように座席数が 400 席以上の機材を Wide 機、200~400 席の機材を Semi Wide 機、100~200 席の機材を Narrow 機、100 席以下の機材を Regional Jet 機とした。国内線における着陸回数が最も多い機材¹³⁾を各機体サイズの代表機種に設定する（太字表記）。各路線で運航していない機体サイズの航空機がある場合、その代表機種の CO2 排出量を推計する必要がある、そのため、国内路線を運航距離 200 mile ごとに分類し、同じ運航距離帯の中で代表機種各飛行フェーズの平均対地速度を算出した。その平均対地速度に対象路線の運航距離を乗じることで運航時間を推計した。同じ運航距離帯の中に、運航していない機体サイズの航空機がある場合は、対象路線に最も近い運航距離帯の平均対地速度を用いた。最適化後の路線*i*における 1 日あたりの CO2 排出量 CE_i^{All} は、式(3)のように機体サイズ*k*の代表機種の平均 CO2 排出量 CE_{ik} をもとに便数 f_{ik} を変数とした線形計画法による最小化問題として算出する。

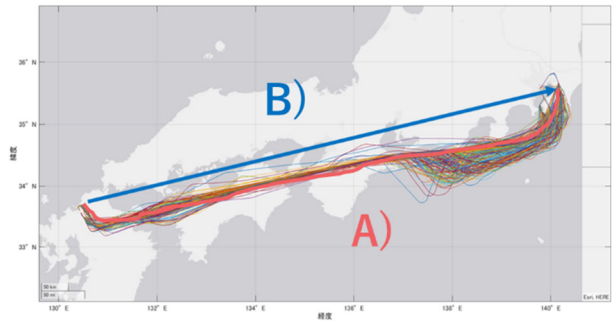


図-1 福岡—羽田路線の飛行軌跡図

表-2 機材の分類と代表機材の設定⁸⁾

分類	機材名
Wide 300 席以上	B772
	B773
Semi Wide 200~300 席	B763
	B788
Narrow 100~200 席	B738
	B735
	A320
	A321
Regional Jet 100 席以下	E170
	DH8
	CRJ2
	SF34

$$\min_{f_{ik}} CE_i^{All} \quad (1)$$

$$CE_i^{All} = \sum_k CE_{ik} \cdot f_{ik} \quad (2)$$

$$s. t. Q_i = LF \sum_k S_{ik} \cdot f_{ik} \geq Q_{i0} \quad (3)$$

CO2 排出量を最小化するための便数・機材選択を行った場合の CO2 削減効果を推計することが目的であるため、航空輸送統計年報¹⁴⁾より座席利用率 LF を 70%に設定し、各機体サイズの座席数 S_{ik} を用いて、最適化後の供給座席数 Q_i が現状の需要 Q_{i0} 以上であることを制約条件とする (式(3))。

(5) CO2 削減効果と乗客の利便性・エアラインの運航コストへ影響の比較分析手法

CO2 排出量を考慮して、機材・便数選択を行った場合、一般的には大型低頻度の輸送形態となることが予想され、乗客の利便性は低下する。エアライン側は使用機材の変更と減便による運航コストへの影響が考えられる。各路線の運航頻度の変化に係る便益 UB_i は、対象路線*i*の需要 Q_i と運航頻度効果原単位 A （2016 年度価格で 3300 円）から、式(4)を用いて計測することが可能¹⁵⁾である。

$$UB_i = Q_i \cdot A \cdot \ln(F_i^1 / F_i^0) \quad (4)$$

また、運航コストについては、主に機材費、燃料費、整備費、着陸料、人件費が考えられる。航空会社の個別

路線の運航コストについては、一般的に公表されていない。そのため、これらの運航コストは、スカイマークの有価証券報告書¹⁶⁾を利用し、機材が B737 の場合の各費用を推計した。機材費は機材のカタログ価格を参考に推計した。燃料費は、機材の燃費や飛行距離によって異なるため、機材別路線別に推計する。整備費は、本来機体サイズによって異なるが、機材別の比較が難しいため、B737 と同様に 10 万円/便と仮定した。着陸料は、機材の重量によって異なり、表-3 のように国土交通省によって定められている¹⁷⁾。人件費は、パイロットと客室乗務員のみを考慮する。これらの費用をもとに各路線における 1 便当たりの運航コストを機材別に推計する。また、CO₂ の削減効果についても貨幣換算原単位 (10600 円/t-C)¹⁸⁾を用いて、貨幣価値に換算する。

4. CO₂ 削減ポテンシャルと便益の推計結果

(1) 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結果

表-4に経路短縮及び機材・便数選択をした場合のCO₂排出量とCO₂削減ポテンシャルを示す。国内全便を対象に、経路短縮 A)が迂回や空中待機のない飛行を行う場合であり、経路短縮 B)が大圏航路を飛行した場合である。表-5に羽田到着路線及び東西行き路線のCO₂削減ポテンシャルの比較、図-2に機材・便数選択による機材構成の変化、図-3に飛行距離及び機材・便数選択を同時に考慮した場合のCO₂排出量の変化を示す。表-4より、国内線のすべての便で迂回飛行や空中待機が全くない飛行が可能だとすると、現状と比較してCO₂排出量を5.5%削減できることが分かる。また、仮にすべての便が各路線の大圏航路を飛行できた場合、飛行中のCO₂排出量を9.6%削減できる可能性があることが分かる。これらから、現在国土交通省で目標としている運航改善による10%のCO₂削減については、現在の標準飛行経路・空域設定下での飛行距離短縮の観点からのみでは、その達成は容易ではない可能性が示唆される。そのため、本分析で考慮できていない速度や高度を含めた最適軌道での飛行や、大圏経路になるべく近づけるための空域制約の抜本的緩和による標準飛行経路の短縮などが必要と考えられる。表-5より、羽田着路線は全路線の平均値と比較して、CO₂削減ポテンシャルが大きく、羽田空港及びその周辺の空域の混雑の影響が大きいことが示唆される。また、伊丹―熊本路線を往復で比較すると、東行きと比較して西行き路線のCO₂削減ポテンシャルが若干大きい。これは、西行き路線は偏西風(向かい風)による遅延の影響が一つの要因であると考えられる。しかし、これらのCO₂削減ポテンシャルは絶対量であり、飛行距離や運航機材の影響もあるため、正確には精査が必要である。また、表-4より、CO₂排出のみを考慮して

表-3 着陸料¹⁷⁾

航空機重量 (トン)	1トン当たりの料金 (円)
25以下	950
26~100	1,380
101~200	1,650
201以上	1,800

表-4 CO₂排出量とCO₂削減ポテンシャル

	CO ₂ 排出量 (kg/day)	CO ₂ 削減ポテンシャル (kg/day)
実データ	11214	
経路短縮 A)	10602	612 (5.5%)
経路短縮 B)	10143	1071 (9.6%)
機材・便数選択	10261	953 (8.5%)

表-5 路線別CO₂削減ポテンシャルの比較

	最小飛行距離[kg/便]	大圏航路[kg/便]
全路線平均	591(5.5%)	1033(9.6%)
羽田到着路線	861(6.5%)	1542(11.7%)
熊本→伊丹	61(2.5%)	292(11.0%)
伊丹→熊本	422(10.3%)	584(15.3%)

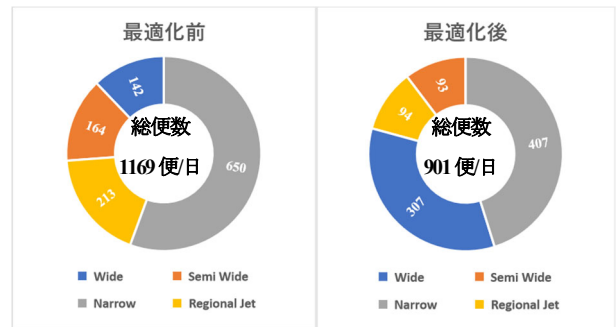


図-2 機材・便数選択による機材構成の変化

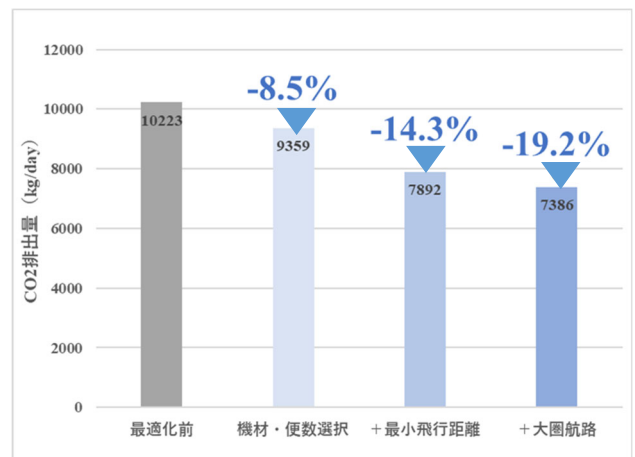


図-3 機材・便数選択及び経路短縮によるCO₂排出量の変化

国内の全路線で便数・機材選択を行った場合、飛行中のCO2排出量を8.5%削減することが可能であることが分かる。また、図-2より、CO2排出量を最小化する機材・便数選択を行った場合、Wide機の運航割合が増加し、他の機体サイズの航空機の運航機数は減少することから、国内全体では大型低頻度化する傾向があることが分かる。図-4より、飛行距離短縮によるCO2削減ポテンシャルが機材・便数選択の最適化によるものより小さく、機材・便数選択によるコストの影響等を考えない場合は、機材・便数選択の効果が大きいことが分かる。

(2) CO2削減効果と乗客の利便性・エアラインの運航コストの影響の比較分析

表-6に国内線の便数・機材選択の最適化及び飛行距離短縮による各コストの影響を示す。表-6より、CO2排出量が最小になる機材・便数選択を行ったうえで、最大限飛行経路を短縮したとすると、CO2削減の効果よりも乗客とエアラインの便益の低下が上回ることが分かる。ただし、今後のCO2排出に係る費用（排出制限に伴う排出権取引コストや炭素税、SAFを含めた燃料費など）の上昇によっては、便益が逆転する可能性もある。なお、エアラインの運航コストが増加する要因としては、小型機に比べて大型機の方が、1便あたりの機材費が大きく、乗客あたりの運航コストとして比較すると、大型機の方が大きいためであると考えられる。

図-4に高需要路線（羽田→福岡）における大型低頻度化に伴う便益の推移、図-5に低需要路線（広島→羽田）における大型低頻度化に伴う便益の推移を示す。図-4より、高需要路線は、総便益が正になる運航頻度が存在するため、運航コストの最小化よりも乗客の利便性を優先、またエアライン間の競争の中で便数・機材選択が行われていると示唆される。ここで、仮に、エアライン側の運航コストの削減効果をすべて運賃低減に割り当てることができるかとする、このような路線は、総便益が0になる運航頻度までは、乗客・エアラインに不利益なく、CO2を削減できるとも考えられる。このことから、機材・便数選択によるCO2削減可能性がある路線は、需要が大きく、エアライン間の競争が激しい路線であると考えられる。このような路線は、今回の計算結果では169路線のうち4路線と限られていた。図-5より、運航頻度が少ない路線は、減便による乗客の利便性低下の影響が大きいので、機材・便数選択によるCO2の削減が難しいと考えられる。

以上のように、需要を固定した上ではあるが、機材・便数の最適化によりCO2削減の効果は路線によって有意に存在するが、乗客の利便性を維持しながらCO2削減も行うには、限界があることも示唆された。ただし、CO2削減による気候変動の抑制の重要性や、それに対応

表-6 国内線の便数・機材選択の最適化及び飛行距離短縮による各コストの影響

	乗客の便益	エアラインの便益	CO2削減効果	総便益
便数・機材選択	-64.7	-142.8	13.0	-194.5
便数・機材選択+ 最小飛行距離	-64.7	-110.8	35.1	-140.4
便数・機材選択+ 大圏航路	-64.7	-104.7	39.3	-130.2

(万円/日)

(万円/日)

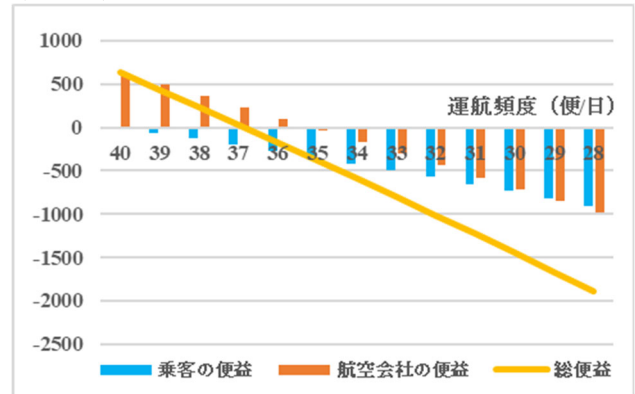


図-4 大型低頻度化に伴う便益の推移（羽田→福岡）

(万円/日)

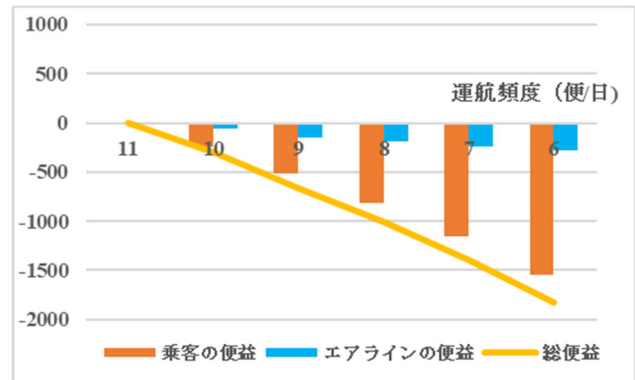


図-5 大型低頻度化に伴う便益の推移（広島→羽田）

した経済政策も急速に加速しており、今後、CO2削減の経済的な価値、逆に言えばCO2排出のコストが急速に高まる可能性も十分にある。そのようなことを考慮すれば、今回試算した結果のような機材・便数の変更によるCO2削減という視点も、より現実的になってくとも考えられる。

5. 軌道最適化による燃料消費量の削減効果

前章までは、簡易な手法により、主に水平方向の飛行距離の短縮による燃料消費削減ポテンシャルを推計し、さらに機材選択の効果も併せて推計を行った。しかしながら、実際には、仮に同じ飛行距離（水平方向の飛行距離）であっても、選択する高度や速度のプロファイル、

つまり 4 次元飛行軌道の最適化により、さらに燃料消費を削減できる可能性もある。そこで、本章では、まず、軌道最適化の燃料消費および CO2 削減ポテンシャルに与える影響について、いくつかの飛行事例から考察を行う。その結果をもとに、ネットワーク全体でのポテンシャル推計を簡易に行う方法の検討と適用を今後行いたいと考えている。

図-6～図-10 に福岡→羽田路線における実際の飛行とその飛行を高度と速度も考慮して軌道最適化⁴⁾を行った場合の結果を示す。なお、最適軌道は、5000ft 以上を対象にし、コストインデックスをゼロとすることで飛行時間は考慮せず、燃料消費を最小にする最適軌道を算出する。図-6 は水平面経路、図-7 は気圧高度の時間履歴、図-8 はマッハ数の時間履歴、図-9 は燃料流量の時間履歴、図-10 は経路方向の風成分の時歴を示している。また、表-7 に燃料消費量を実軌道と最適軌道で比較した結果を示す。水平面経路が等しい場合でも、速度や高度、降下開始点を最適化することにより、飛行時間の減少に加えて、約 5%の燃料を削減できることがわかる。また、実飛行では最適軌道と比較して早く降下しているものの、長い水平飛行を行っており、その区間は巡航中と同程度の燃料消費量となっている。この実飛行のように、管制により降下中に水平飛行を指示され、推力を増加させるために燃料を消費する。そのため、軌道最適化により決まる降下開始点より、浅い降下角で最低限の推力で降下することが望ましい。

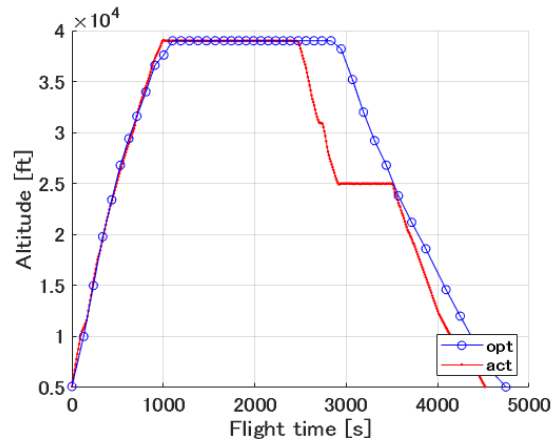


図-7 気圧高度の時間履歴

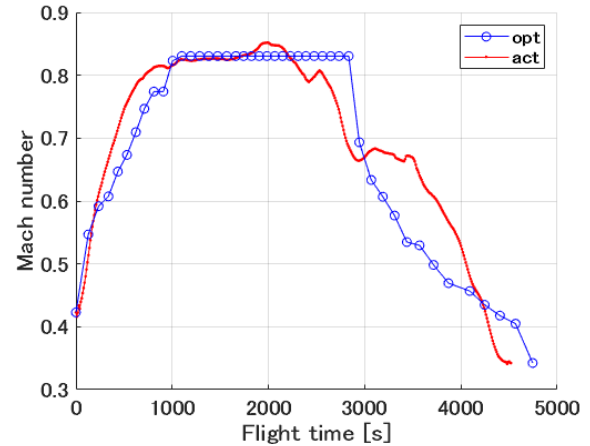


図-8 マッハ数の時間履歴

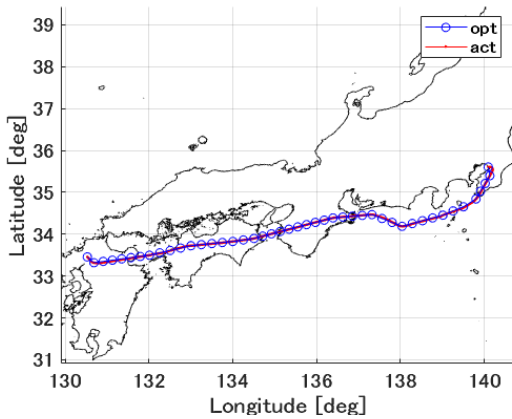


図-6 水平面経路

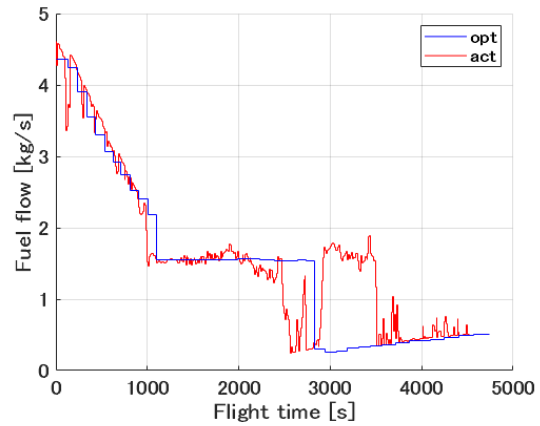


図-9 燃料流量の時間履歴

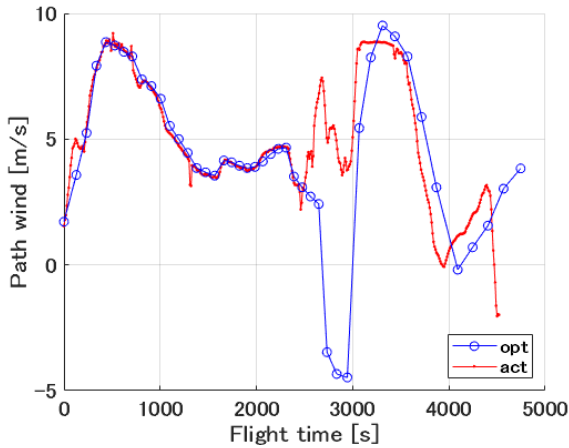


図-10 経路方向の風成分の時歴

表-7 燃料消費量の比較

	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
実飛行	4520	7366	1005	7.33
最適-実際	+225	-367	-12	

図-11～図-15に羽田→福岡路線におけるある飛行と同様に最適化を行った場合の結果を示す。図-11は水平面経路、図-12は気圧高度の時間履歴、図-13はマッハ数の時間履歴、図-14は燃料流量の時間履歴、図-15は経路方向の風成分の時歴を示している。また、表-8に燃料消費量を実軌道と最適軌道で比較した結果を示す。実飛行がおおよそ最適に近い飛行をしているが、最適軌道と比較して降下開始点が遅く、降下角が深い。その分、実飛行の方が多くの燃料を消費していることが分かる。また、降下フェーズでは実軌道のマッハ数が最適軌道よりも大きい値で飛行しており、余分な推力を発生させて飛行していることが要因の1つであると考えられる。コストインデックスを0に設定したが、飛行距離や飛行時間に大きな影響を与えずに、降下開始点や速度を最適化することで燃料消費量を削減可能な路線が存在することが示唆される。

以上のように、飛行距離短縮に加えて、高度、速度、降下開始点等の最適化をすることで、飛行中のCO2排出量をさらに削減可能であることが示唆される。ただし、本研究で考慮できていない風等の気象が飛行に与える影響は大きく、追い風か向かい風かによっても最適な速度や降下開始点は変化すると考えられる。本研究で考察を行った飛行事例においても経路方向に対して追い風か向かい風かによって、燃料消費量が大きく異なることが分かる。また、これらの風の種類によって最適な速度や高

度は大きく異なるため、余分な推力を発生させて飛行している路線も存在することが考えられる。本研究では、軌道最適化による燃料消費とCO2削減の典型的な事例をいくつか分析、考察を行ったが、今後は、このようなCO2削減効果が大きい軌道最適化のポテンシャルに特に着目して、風等の気象条件や高度、速度、降下開始点の最適化がどの程度CO2削減ポテンシャルに影響を与えているかということ进行分析し、削減効果が大きい路線や季節、機材等を検討する。その上で、軌道最適化をすべての便に適用せず、ネットワーク全体で簡易にそのポテンシャルを推計する方法を検討し、適用・計算する予定である。

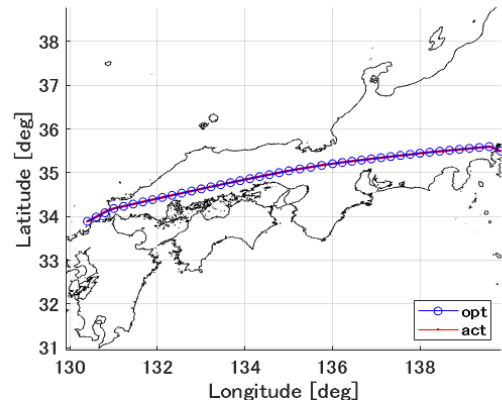


図-11 水平面経路

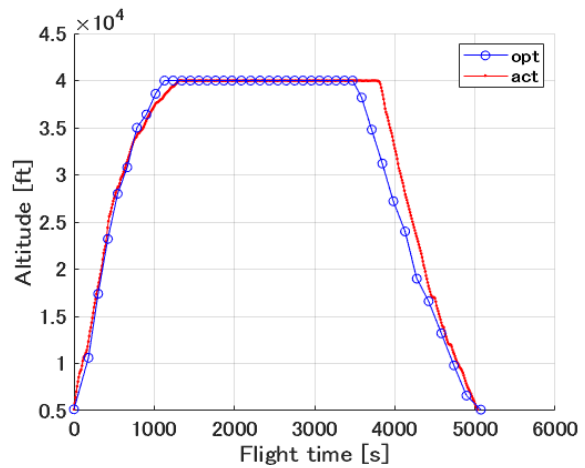


図-12 気圧高度の時間履歴

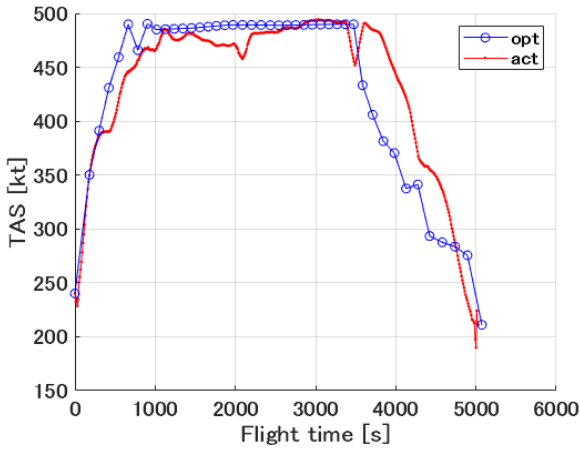


図-13 マッハ数の時間履歴

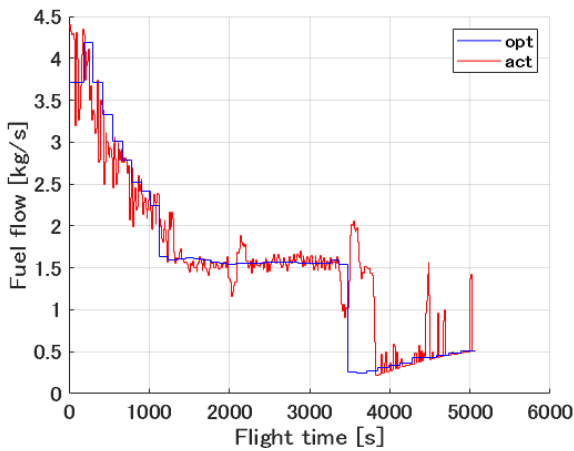


図-14 燃料流量の時間履歴

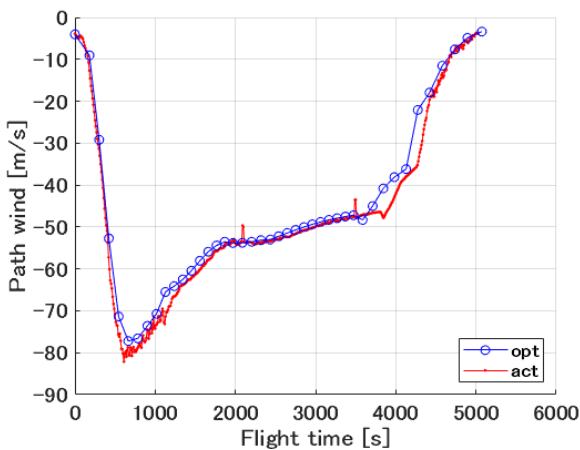


図-15 経路方向の風成分の時間履歴

表-8 燃料消費量の比較

	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	5073	7849	891	8.8
実飛行	5030	8116	892	9.1
最適-実際	+43	-267	-1	

6. 結論

本研究では、我が国の国内航空ネットワークにおけるCO2 排出削減ポテンシャルを推計するために、実際の飛行軌跡データを用い、飛行経路の短縮や便数・機材の選択による CO2 削減ポテンシャルを定量的に把握した。その結果、現在国土交通省で目標としている運航改善による 10%のCO2 削減については、現在の標準飛行経路・空域設定下での飛行距離短縮の観点からのみでは、その達成は容易ではない可能性が示唆され、速度や高度を含めた最適な軌道での飛行や、大圏経路になるべく近づけるための空域制約の抜本的緩和による標準飛行経路の短縮などの必要性について示した。また、機材・便数選択の変更による CO2 削減効果と乗客の利便性・エアラインの運航コストへの影響を比較し、その有意な効果を確かめつつ、乗客への不利益やトータルの便益の観点からは高需要路線における CO2 削減可能性が高いことなどを明らかにした。

今後の課題としては、気象条件も考慮した最適軌道に加え、CO2 削減ポテンシャルの推計や、機材・便数変化に伴う需要自体への影響の分析などが挙げられる。

謝辞：本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (B)22H01608 の成果の一部である。

参考文献

- 1) 国土交通省：航空機運航分野における CO2 削減に係る検討会，2021。
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 宮本侑人・原田明徳・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。
- 6) 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.
- 7) 丹生清輝：空港からの CO2 排出量の算定と削減方策，*国総研資料*，Vol.524，2009。

- 8) 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.
- 9) 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 卷, 6 号, p. I_657-I_666, 2019.
- 10) Peter Morrell: The potential for European aviation CO2 emissions reduction through the use of larger jet aircraft, Journal of Air Transport Management, Volume 15, Issue 4, Pages 151-157, 2009.
- 11) Mark D. Staples, Robert Malina, Pooja Suresh, James I. Hileman, Steven R.H. Barrett: Aviation CO2 emissions reductions from the use of alternative jet fuels, Energy Policy, Volume 114, Pages 342-354, 2018.
- 12) ICAO Aircraft Engine Emissions Databank (Civil Aviation Author), 2021.
- 13) 経済産業省：航空機に係る排出量, 2016.
- 14) 国土交通省：航空輸送統計調査, 2016.
- 15) 国土交通省航空局：空港整備事業の費用対効果分析マニュアル Ver4, 2006.
- 16) 株主プロ：スカイマーク株式会社 有価証券報告書, 2015.
- 17) 国土交通省：空港使用料について, 2021.

(2022. 9. 30 受付)

RESEARCH ON CO2 EMISSION REDUCTION FROM AIRCRAFTS BY FLIGHT TRAJECTORY OPTIMIZATION AND FLEET/FREQUENCY CHOICE

Reo YASUGAHIRA, Terumitsu HIRATA and Akinori HARADA

Japan aims to reduce CO2 emissions by about 10% in the aviation sector through flight path shortening and other improvements in flight operation methods. However, it has not been quantitatively clarified how much reduction can actually be expected. In addition, considering CO2 emissions, it is necessary to select the optimal aircraft and number of flights compared to the current situation. Therefore, the purpose of this study was to estimate the CO2 reduction potential by shortening flight routes and selecting aircraft and flight numbers, and to analyze the effects on passengers and airlines. As a result, the CO2 reduction potential of shortening flight routes and selecting aircraft and number of flights was quantitatively determined for the domestic airline network. The impact of these reduction measures on passengers and airlines was compared, and it was clarified that high-demand routes have the potential to reduce CO2 emissions by selecting aircraft and number of flights.