

# 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 CO<sub>2</sub>削減ポテンシャルの推計

安ヶ平 玲央<sup>1</sup>・平田 輝満<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 茨城大学工学部 都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

E-mail: 18t5055y@vc.ibaraki.ac.jp

<sup>2</sup>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 (同上)

E-mail: terumitsu.hirata.a@vc.ibaraki.ac.jp (Coresponding Author)

我が国では、飛行経路短縮等の運航方式の改善によって、航空分野において 10%程度の CO<sub>2</sub>削減を目標にしている。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、CO<sub>2</sub>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。そこで、本研究の目的を飛行経路の短縮及び機材・便数選択による CO<sub>2</sub>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分析することとした。その結果、国内航空ネットワークを対象に飛行経路の短縮及び機材・便数選択による CO<sub>2</sub>削減ポテンシャルを定量的に把握した。また、それらの削減策が乗客や航空会社に与える影響を比較し、高需要路線に機材・便数選択による CO<sub>2</sub>削減可能性があることを明らかにした。

**Key Words:** CO<sub>2</sub>emission, shortest route, minimum distance route, number of flight

## 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CO<sub>2</sub>削減を目指している<sup>注1)</sup>。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CO<sub>2</sub>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、羽田空港の発着容量の増加やLCCの参入により、機材の小型化・多頻度運航が一般的になりつつある。しかし、環境負荷の観点から考えると、燃料効率の良い機材を最低限の頻度で運航させることが最大のCO<sub>2</sub>削減効果をもたらすと考えられる。そのため、CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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

宮本ら<sup>2)</sup>は、動的計画法を用いて、燃料消費量を最小化する旅客機の軌道最適化を行った。その結果、対象とする機材を変えることにより、各機材における最適な軌道を把握することで、航空交通全体としての燃料消費の削減効果を定量化することができることを示している。しかし、空域や空港の混雑による飛行距離延伸を考慮した燃料消費削減効果や国内航空ネットワークを対象とした燃料消費量の削減効果の推計は行われていない。竹林<sup>3)</sup>は、エアラインの機材選択を考慮して、羽田滑走路容量拡張の影響を分析している。滑走路容量の拡張に伴う発着枠の増加により、機材は小型化し、運航頻度は大幅に増加することが示唆されている。機材・便数選択は、エアラインだけでなく乗客の利便性にも影響している。そのため、乗客とエアラインの影響を比較し、事業や施策の評価指標とすることが重要であると考えられる。丹生<sup>3)</sup>は、航空機のCO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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<sup>4)</sup>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。しかし、運航機材の変更による CO2 排出量の削減は長期的なアプローチである。短期的なアプローチとして、飛行経路の短縮や運航時間の削減等の運航方式の改善による CO2 削減効果も推計する必要があると考える。

以上の背景をもとに、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3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を分析する。
- (3) CO2 削減効果と乗客や航空会社に与える影響を踏まえて、機材・便数選択による CO2 削減可能性の検討する。

## 2. 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。

### (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

表-1 機材別・飛行フェーズ別の燃料流量<sup>注2)</sup>

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

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<sup>注2)</sup>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

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<sup>注3)</sup>を各機体サイズの代表機種に設定する(太字表記)。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<sup>注3)</sup>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。

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

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

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

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<sup>注4)</sup>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))。

最適化前と最適化後の 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。

(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<sup>注5)</sup>である。

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

表-2 機材の分類と代表機材の設定

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

表-3 着陸料<sup>注7)</sup>

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

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<sup>注6)</sup>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<sup>注7)</sup>。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)<sup>注5)</sup>を用いて、貨幣価値に換算する。

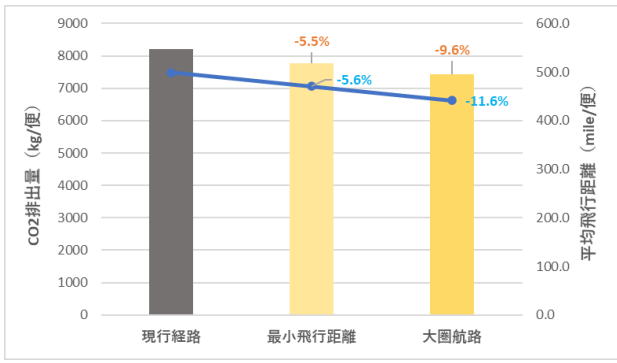


図-1 飛行経路短縮による CO2 排出量と飛行距離の変化

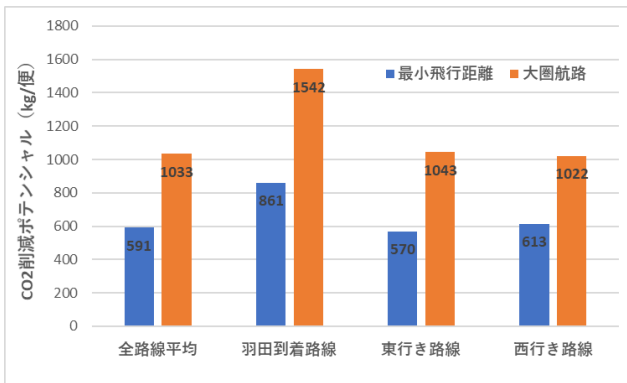


図-2 CO2 削減ポテンシャルの比較

### 3. 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

図-1 に飛行距離短縮による CO2 排出量及び飛行距離の変化, 図-2 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-3 に便数・機材選択の最適化を行った場合の CO2 排出量の変化と飛行距離及び機材・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. 図-1 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. また, 平均飛行距離の変化から, CO2 削減ポテンシャルは, 飛行距離の短縮分とおおよそ同程度であることが示唆される. 図-2 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. 東西路線に関しては, 出発空港の経度が到着空港の経度より小さい路線を東行き, 大きい路線を西行きとして定義した. 東行きと比較して西行

表-1 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/day)

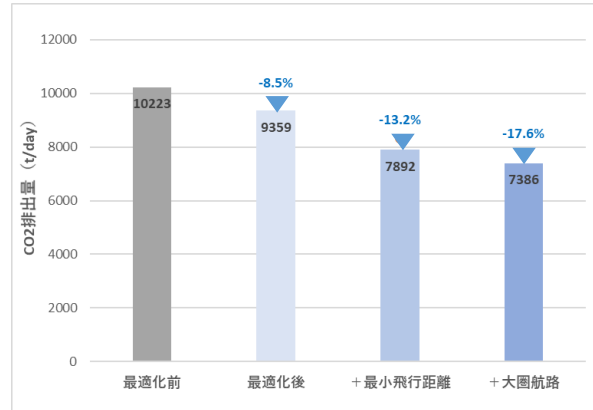


図-3 機材・便数選択及び飛行距離短縮による CO2 排出量の変化

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.

図-3 より, CO2 排出のみを考慮して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. 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・便数選択の効果が高いことが示唆される.

#### (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-1 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-1 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,

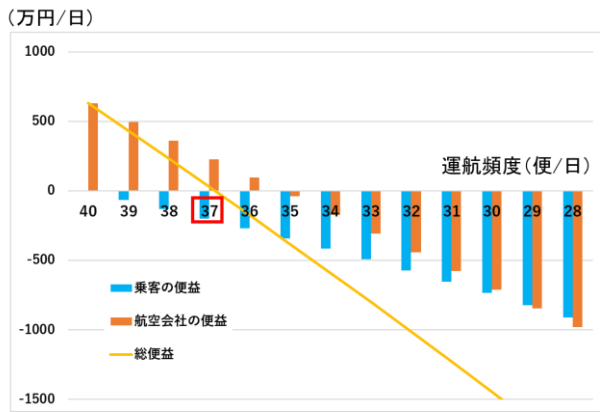


図-4 大型低頻度化に伴う便益の推移 (HND to FUK)

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HND to 福岡FUK)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+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。運航コストの削減効果をすべて運賃削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、CO<sub>2</sub>を削減できるとも考えられる。運航頻度が少ない路線は、これ以上の大型低頻度化は乗客の利便性低下の影響が大きい、CO<sub>2</sub>の削減が難しいと考えられる。

## 5. 結論

飛行軌跡データを用い、国内航空ネットワークを対象に、飛行経路の短縮や便数・機材の選択によるCO<sub>2</sub>削減ポテンシャルを定量的に把握した。また、CO<sub>2</sub>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、高需要路線におけるCO<sub>2</sub>削減可能性が高いことが明らかになった。

### NOTES

- 注1) 国土交通省：航空機運航分野におけるCO<sub>2</sub>削減に係る検討会  
 注2) ICAO Aircraft Engine Emissions Databank (Civil Aviation Author)  
 注3) 経済産業省：航空機に係る排出量  
 注4) 国土交通省：航空輸送統計調査  
 注5) 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  
 注6) 株主プロ：スカイマーク株式会社 有価証券報告書  
 注7) 国土交通省：空港使用料について

### REFERENCES

- 1) 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. [Miyamoto, Y. Harada, A. Kitomaru, N. Miyazawa, Y. Funabiki, K.: Evaluation analysis on Airliner Operational Performance with flight trajectory optimization using BADA aircraft performance model, Vol.13, pp.1-10, 2014.]
- 2) 竹林幹雄：滑走路容量の影響を考慮した航空会社の機材選択・ネットワーク形成に関する研究、土木計画学研究論文集、Vol.27, pp803-810, 2010. [Takebayashi, M: Airlines' Behavior on Choice of Aircraft Size and Network Design under Runway Capacity Constraint: Application to Haneda Airport, Vol.27, pp803-810, 2010.]
- 3) 丹生清輝：空港からのCO<sub>2</sub>排出量の算定と削減方策、国総研資料、Vol.524, 2009.
- 4) 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.

(Received March,?, 2020)

(Accepted March,?, 2009)

## ESTIMATION OF THE POTENTIAL OF CO<sub>2</sub> REDUCTION FROM DOMESTIC AVIATION NETWORK IN JAPAN CONSIDERING FLIGHT DISTANCE AND FLEET/FREQUENCY CHOICE

Reo YASUGAHIRA and Terumitsu HIRATA