

CARATSオープンデータ活用促進フォーラム
2022.12.14

飛行距離と機材・便数選択からみた 航空機からのCO₂削減ポテンシャルに関する分析

平田輝満 (茨城大学大学院)
安ヶ平玲央 (茨城大学大学院)
原田明德 (高知工科大学大学院)

問題意識

- 運航の改善に向けた工程表（2021） 1）
→ 運航改善で**10%程度**のCO2削減を目指す

どのくらい大変な目標なのか？

最大でどの程度の削減ポテンシャルがあるのか？

どの空域に非効率が残っているか？

- エアラインの使用機材と便数
→（他社との競争の中で）需要規模・サービスレベル・運航コストなどから設定

CO2ミニマムの機材・便数と比べると、現状はどうか？

（正確には運航改善分野ではないが）

研究の目的

国内航空ネットワークを対象として

- 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し、機材・便数選択によるCO₂削減可能性の検討
- 3 軌道最適化による燃料削減ポテンシャルへの効果に関する事例分析
(将来研究に向けた簡易分析)

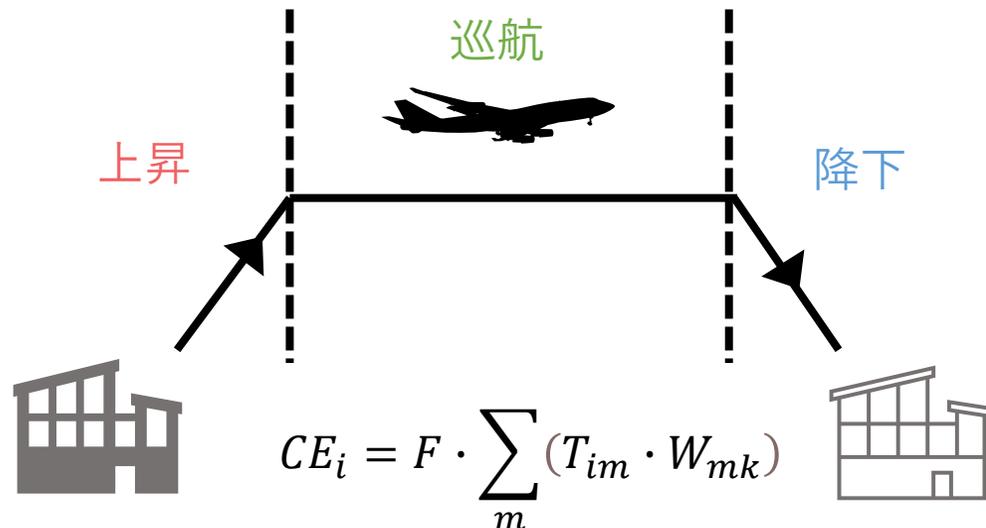
CO₂排出量の推計手法

使用データ：飛行軌跡データ（CARATS Open Data2016）

国内全路線（169路線）

CO₂排出量を簡易に推計するため、機種及び3つの飛行フェーズ（上昇・巡航・降下）ごとに燃料流量原単位を使用して推計

→高度変更状況から各便ごとに飛行フェーズを分解



便*i*のCO₂排出量 = CO₂排出係数 × 各飛行フェーズの飛行時間 × 機材別の燃料流量（3.16 kg-CO₂/kg-燃料）

機種別・飛行フェーズ別の燃料流量⁵⁾

| 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 |

* 高度変化が多数で複雑な便は分析対象から除外

飛行経路短縮によるCO₂削減ポテンシャルの推計手法

飛行距離の削減ポテンシャル推計のための基準便

路線別・機材別に以下の基準便を設定

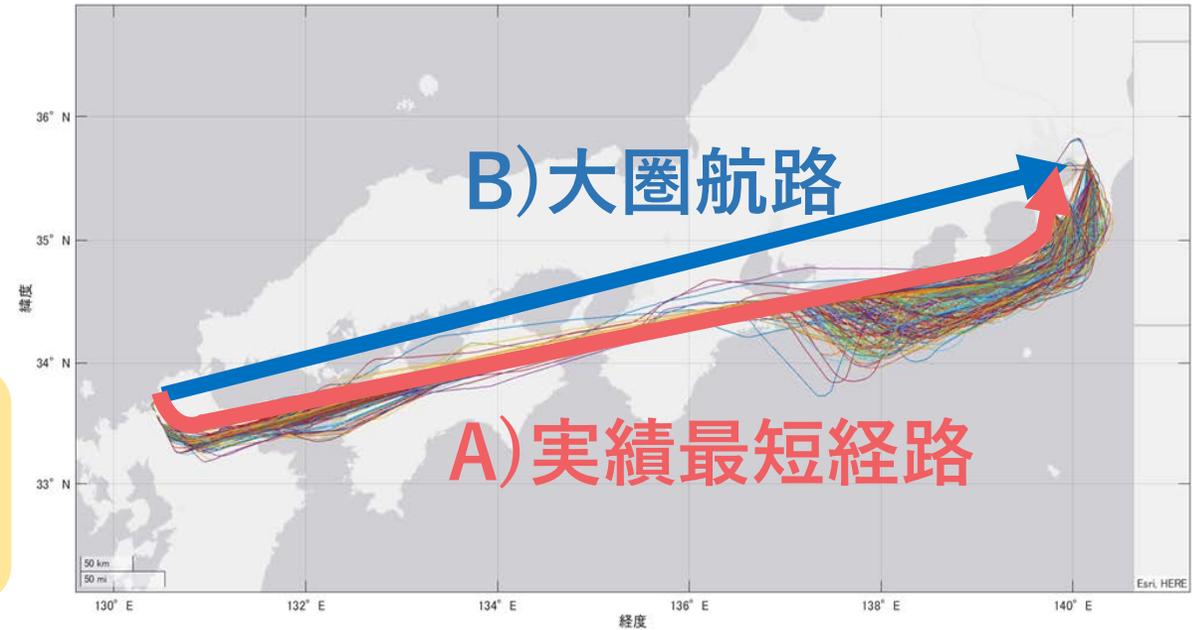
A) 実運航データにおいて最短の飛行経路

→ 空中待機や迂回飛行のない飛行（実現性高）

B) 大圏航路（空港間の最短距離）

→ 飛行経路短縮による最大の削減効果（実現性低）

飛行距離と路線別・機材別の平均対地速度から飛行時間に換算し、CO₂排出量を推計



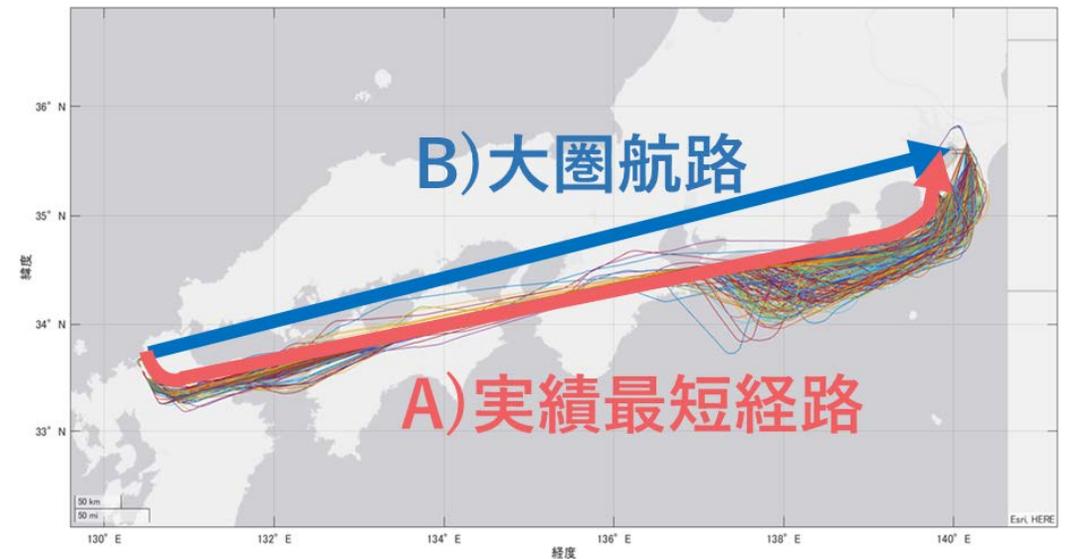
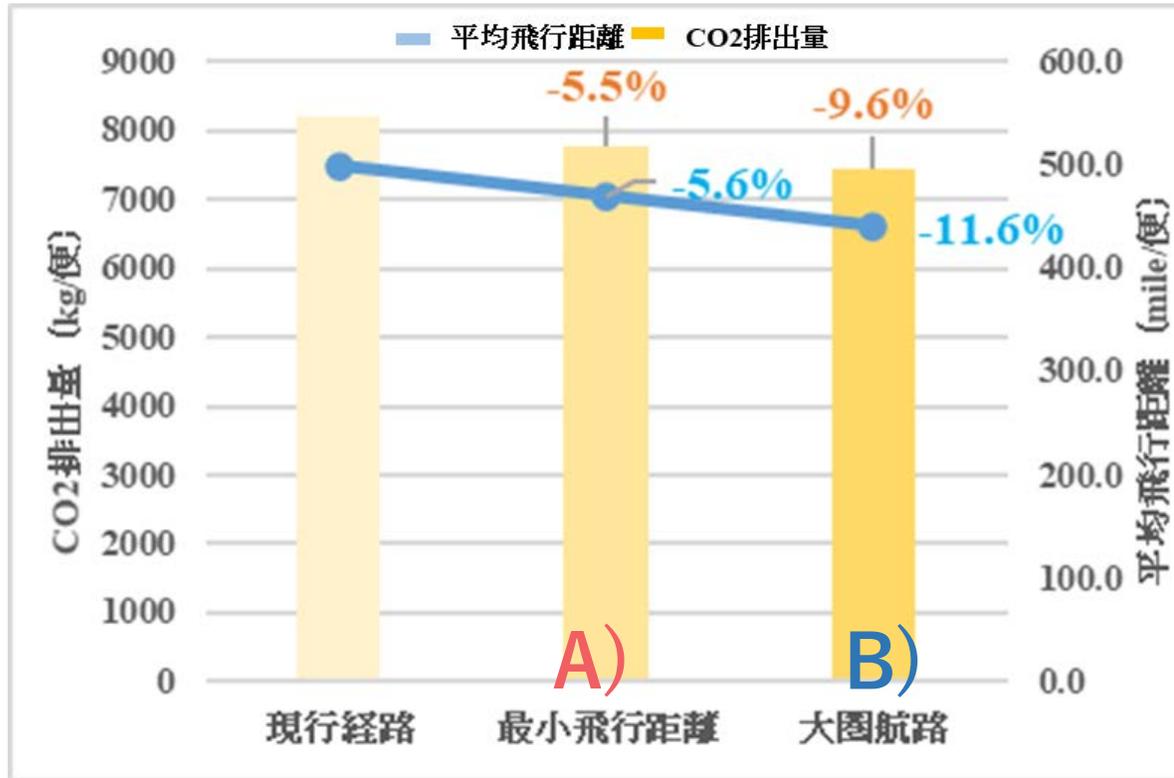
福岡→羽田路線の飛行軌跡図

基準便と実運航データの便のCO₂排出量の差
= CO₂削減ポテンシャル

CO₂削減ポテンシャルの推計結果

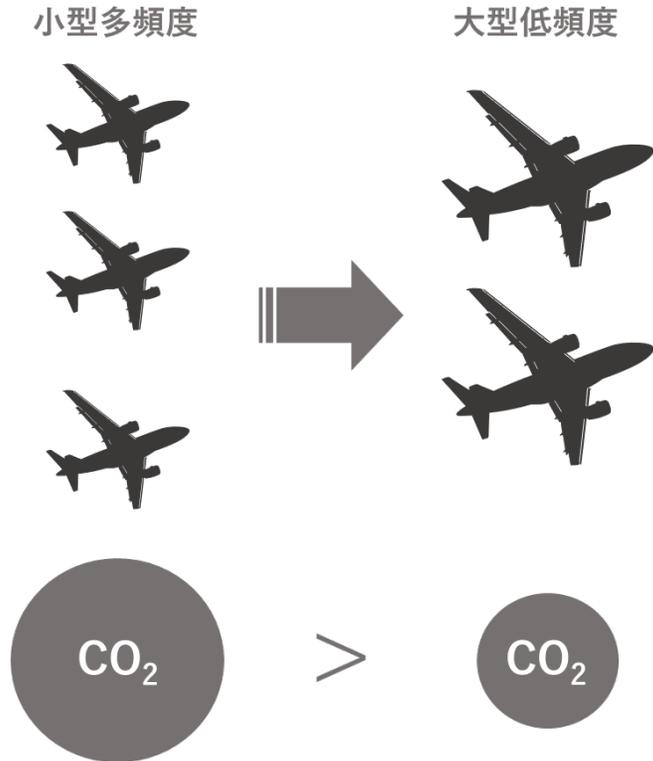
～飛行経路短縮～

飛行経路短縮によるCO₂削減ポテンシャル推計結果



- 飛行経路短縮によるA)最短飛行経路の場合は5.5%、B)大圏航路の場合は9.6%削減可能
- CO₂削減ポテンシャルは、飛行距離短縮分とおよそ同程度

機材・便数選択からみたCO₂削減ポテンシャルの推計手法



- 機体サイズごとに運航機材を右表のように4分類に集約し、各機体サイズにおいて最も着陸回数が多い機材で代表（色付き）
- 機材・便数選択によるCO₂排出量の推計には代表機材のCO₂排出量や座席数の値を用いる

サイズごとの機材分類

| 分類 | 機材名 |
|-------------------------|-------------|
| Wide 300席以上 | B772 |
| | B773 |
| Semi Wide 200～300席以上 | B763 |
| | B788 |
| | B789 |
| Narrow 100席～200席 | B738 |
| | B734 |
| | B735 |
| | A320 |
| | A321 |
| Regional Jet 100席以下 | E170 |
| | DH8 |
| | CRJ2 |
| | SF34 |

機材・便数選択からみたCO₂削減ポテンシャルの推計手法

各路線における1日あたりのCO₂排出量 CE_i^{All} を
 各機体サイズ k の便数 f_{ik} を整数変数とした
 整数線形計画法による最小化問題として算出

$$\min_{f_{ik}} CE_i^{All}$$

$$CE_i^{All} = \sum_k CE_{ik} \cdot f_{ik}$$

制約条件

- 1) 現状の需要を満たすこと
- 2) 最低限の運航頻度（2便/日）を確保すること

$$s. t. Q_i = LF \sum_k S_k \cdot f_{ik} \geq Q_{i0}$$

座席利用率 LF は70%に設定

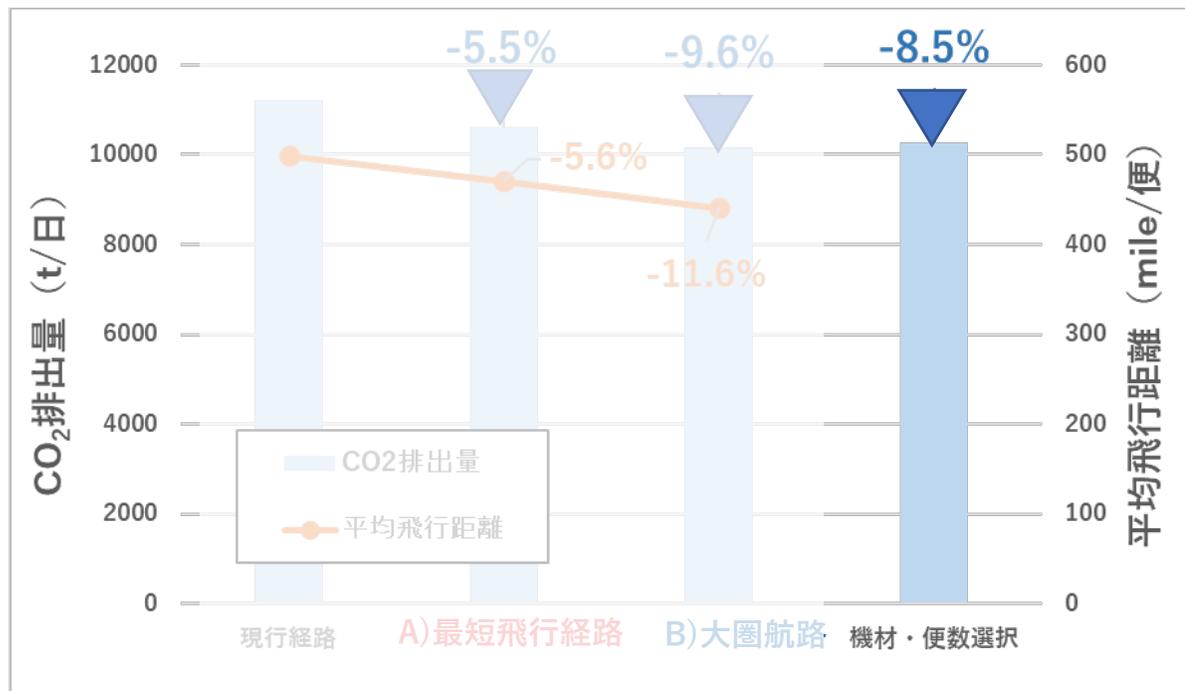
最適化の例) 羽田→福岡 (HND to FUK)

| | 各機体サイズの便数(便/日) | | | | 運航頻度 (便/日) | CO ₂ 総排出量 (t/日) | CO ₂ 削減ポテンシャル (t/日) |
|------|----------------|----|----|----|---------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| | W | SW | N | RJ | | | |
| 現状 | 15 | 8 | 17 | 0 | 40 | 459 | 32 [7.0%] |
| 最適化後 | 26 | 2 | 0 | 0 | 28 | 427 | |

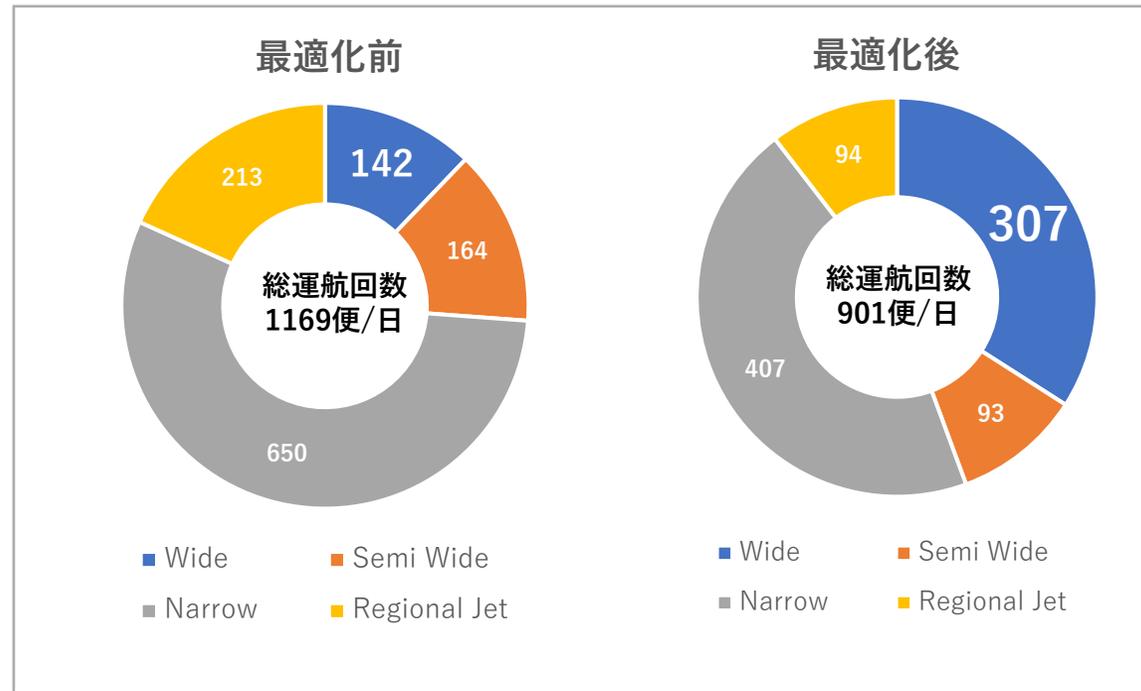
CO₂削減ポテンシャルの推計結果

～機材・便数選択～

飛行経路短縮及び機材・便数選択によるCO₂削減効果



機材・便数選択による運航回数の変化

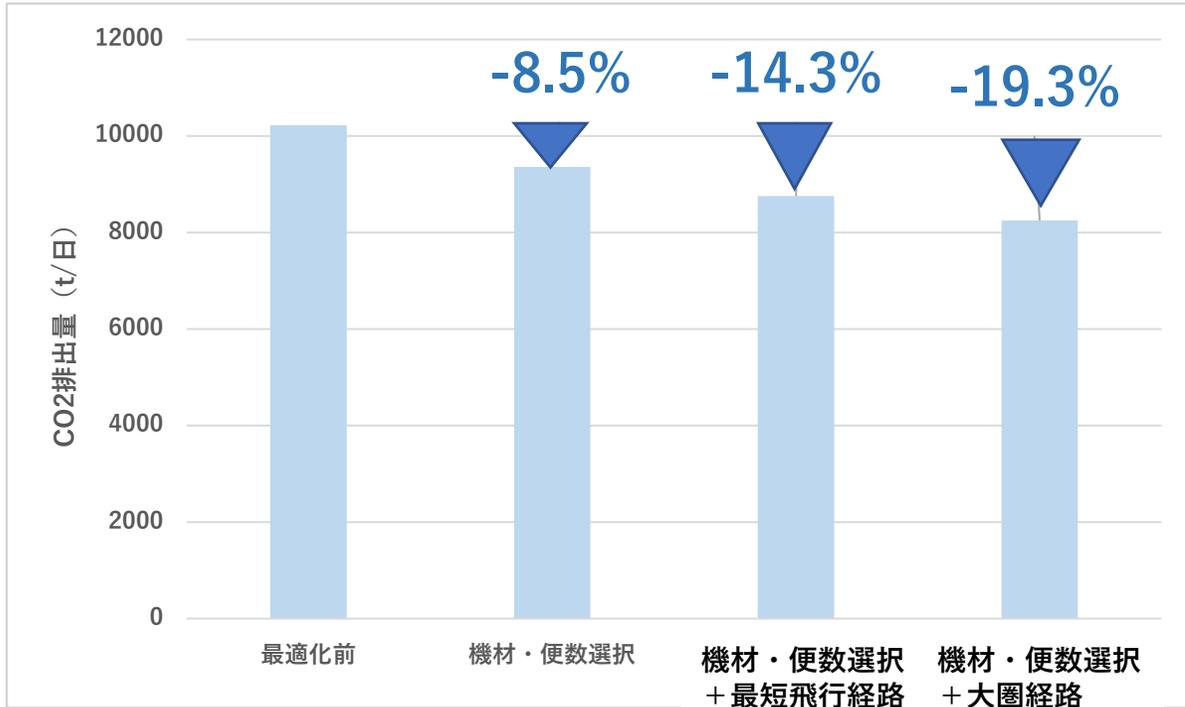


- 機材・便数選択により、**8.5%**削減可能
- Wide機の運航回数の増加→CO₂排出量を考慮すると国内全体で**大型化・低頻度運航**する傾向

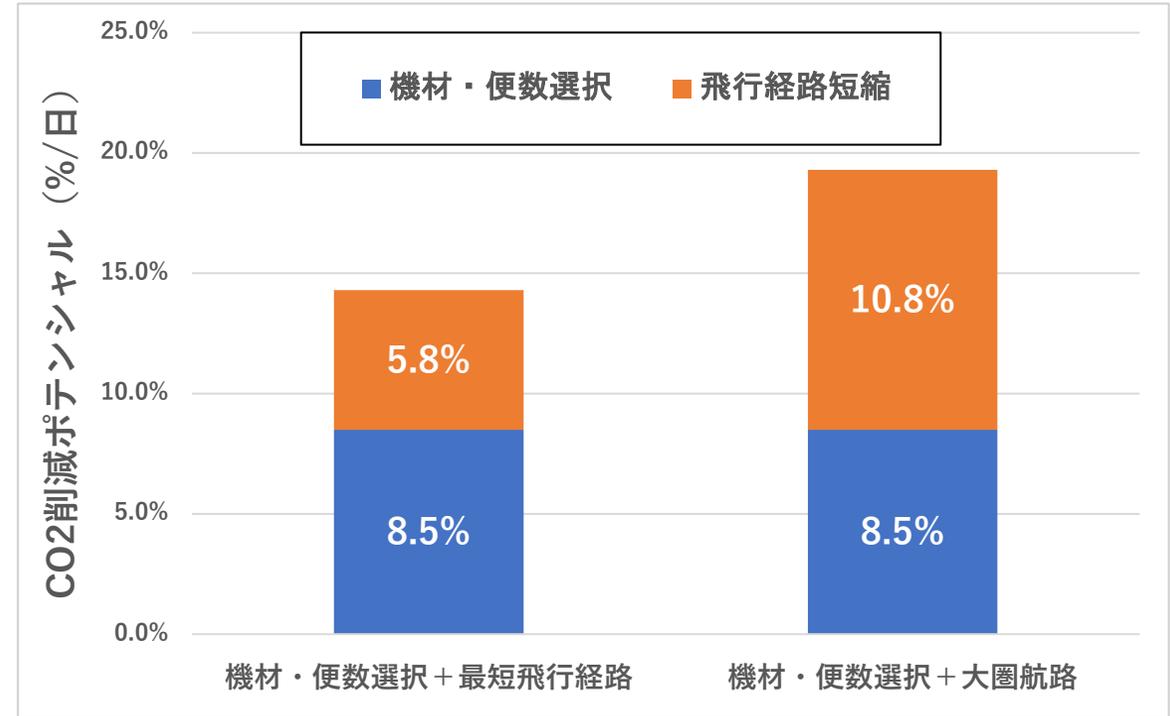
CO₂削減ポテンシャルの推計結果

～飛行経路短縮＋機材・便数選択～

飛行経路短縮＋機材・便数選択によるCO₂削減効果



CO₂削減ポテンシャルの内訳



- 国内全路線で飛行経路短縮と機材・便数選択を同時に行うと、**最大で19.3%**削減可能
- **現状の飛行経路・空域設定下**では飛行経路短縮のみでは限界がある

機材・便数選択が乗客・航空会社に与える影響の計測手法

👤 乗客の利便性の低下（便数減の不便益）

$$UB_i = Q_i \cdot A \cdot \ln(F_i^1 / F_i^0)^6$$

UB_i : 運航頻度の変化に係る便益(円)

Q_i : 対象路線の需要(人)

A : 運航頻度効果原単位(3300円/人)

F_i^1 : 最適化後の運航頻度(便/日)

F_i^0 : 最適化後の運航頻度(便/日)

⇨ CO₂削減量を貨幣価値換算

CO₂貨幣価値原単位 10600 円/t-C⁶⁾

✈️ 航空会社の運航コスト⁷⁾

| 費用の種類 | 影響を与える要因 |
|-------------------|-------------|
| 機材費 | 機材の購入価格 |
| 燃料費 | 飛行距離、燃費 |
| 整備費 | 機体サイズ |
| 着陸料 ⁸⁾ | 機材の重量 |
| 人件費 | パイロット、CAの人数 |

・運航距離や機材別の諸元を加味して
各路線・各機種¹の1便当たりの

運航コストを算出

・最適化前後の運航コストの差を
航空会社の便益として計測

6) 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.

7) 株主プロ：スカイマーク株式会社有価証券報告書

8) 国土交通省：空港使用料について

CO₂削減効果と乗客・航空会社の便益の比較

国内線全体で最適化した場合の現状と比較した各種便益の推計結果（万円/日）

| |  乗客の便益 |  航空会社の便益 |  CO ₂ 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 | | -110.8 | +35.1 | -140.4 |
| 便数・機材選択 + 大圏航路 | | -104.7 | +39.3 | -130.2 |

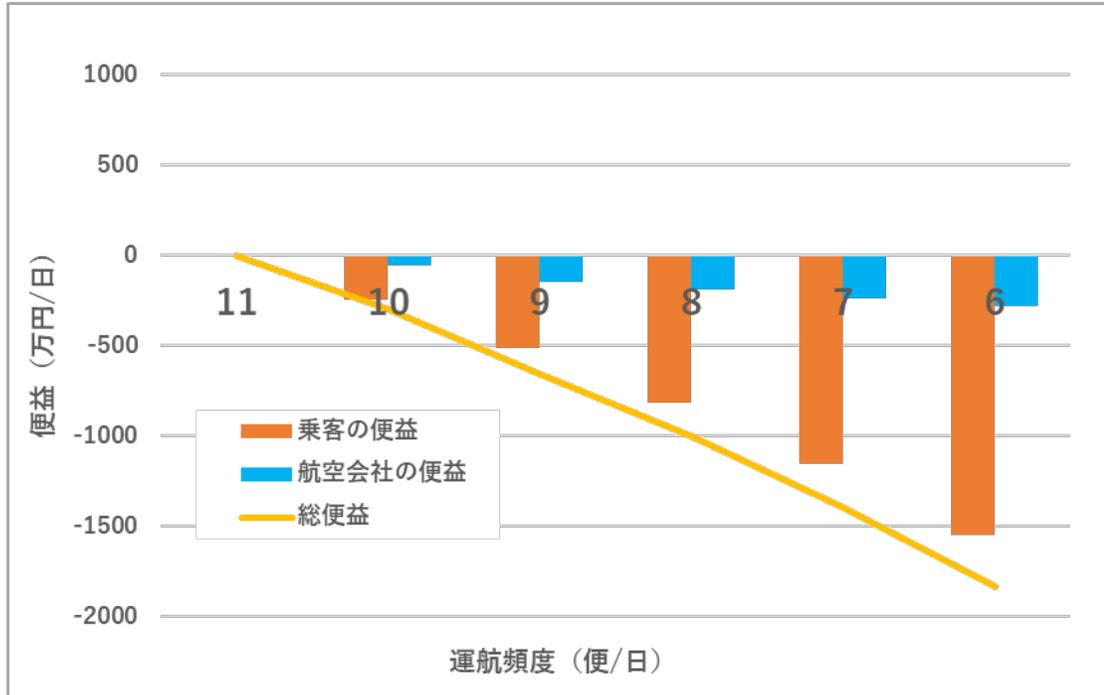
乗客及び航空会社の便益の低下がCO₂削減効果を上回る

→現状では機材・便数選択によるCO₂削減は難しいが、

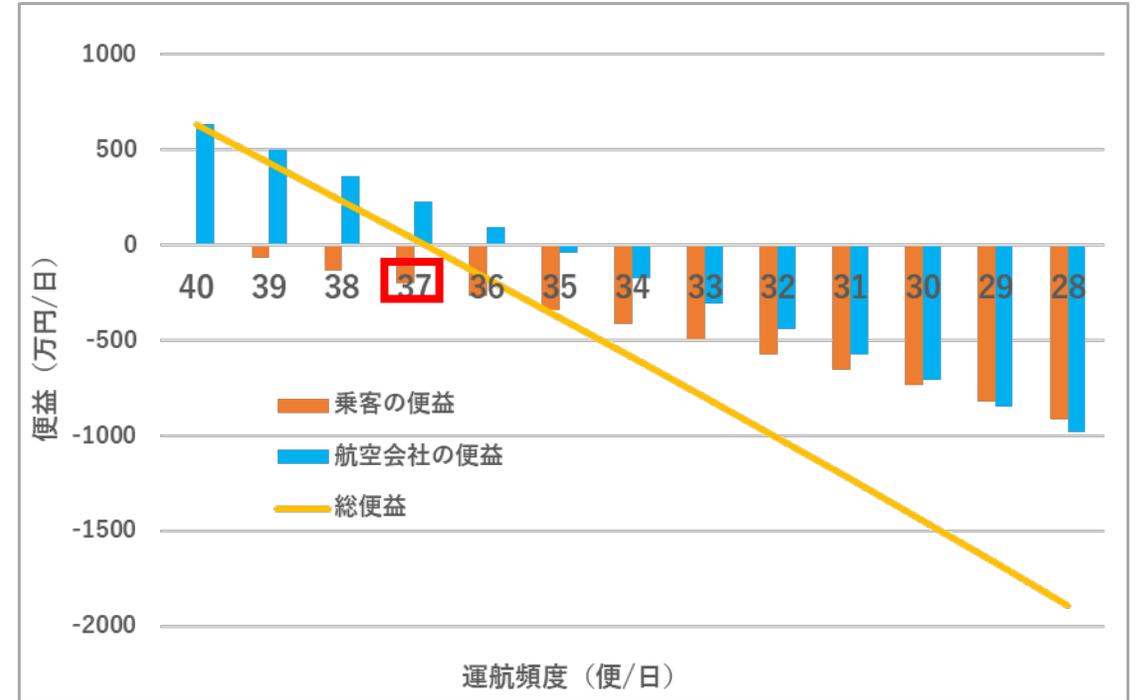
今後のCO₂排出に係る費用（排出権取引コストや炭素税）の上昇によっては
便益が逆転する可能性がある

便数別CO2最小化時の総便益：路線別の例

中程度の頻度：広島→羽田路線



高頻度：羽田→福岡路線



➤ 高需要路線では、乗客・航空会社の便益の和である総便益が+になる運航頻度が存在

→ 航空会社の便益をすべて乗客の運賃削減に割り当てられるとすると

総便益が0になる運航頻度まではCO₂削減のために大型低頻度化することが可能か

軌道最適化による燃料消費量の削減効果の推計手法

飛行経路短縮だけでなく、**速度や高度、降下開始点等の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がある

使用するデータ

QAR (Quick Access Recorder) : 旅客機に搭載されているフライトデータ
緯度、経度、気圧高度、真対気速度、重量等

機体性能モデル

BADA (Base of Aircraft Data) : 空力や燃料流量等のモデルとパラメータ

最適軌道は5000ft以上を対象にし、Cost Index (時間単価と燃料単価の比率) を0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 (動的計画法) を算出

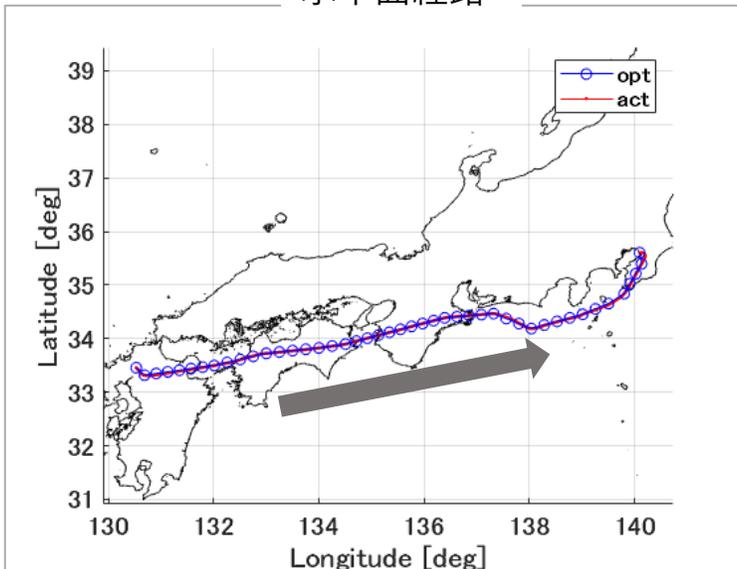
→ **水平面経路, 気圧高度, マッハ数, 燃料流量の時間履歴**

軌道最適化による燃料消費量の削減効果の例1

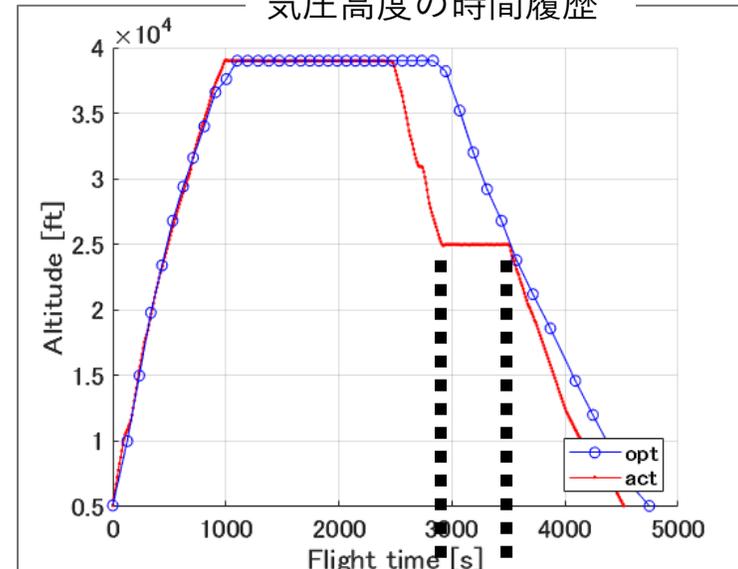
水平面経路が等しい飛行①：福岡→羽田

| | 飛行時間[s] | 燃料消費量[kg] | 飛行距離[km] | 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 | |

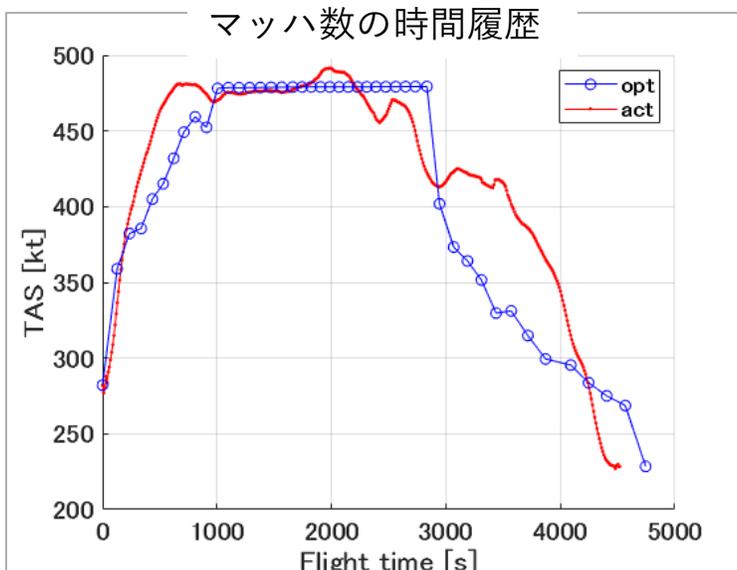
水平面経路



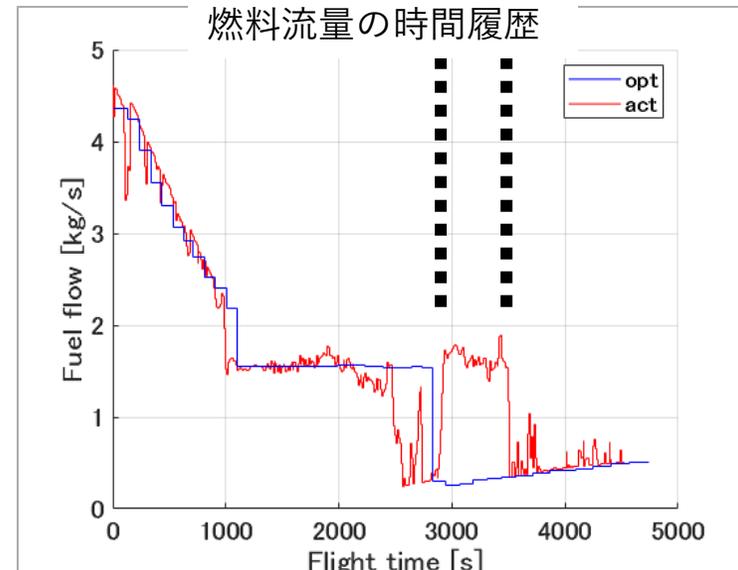
気圧高度の時間履歴



マッハ数の時間履歴



燃料流量の時間履歴



- ・ 約5%の燃料削減
- ・ 降下中の水平飛行による燃料消費量の増加
- 最適軌道の降下開始点より、浅い降下角で最低限の推力で降下することが望ましい

飛行時間の増加により、燃料消費量を削減可能な便が存在

軌道最適化による燃料消費量の削減効果の例 2

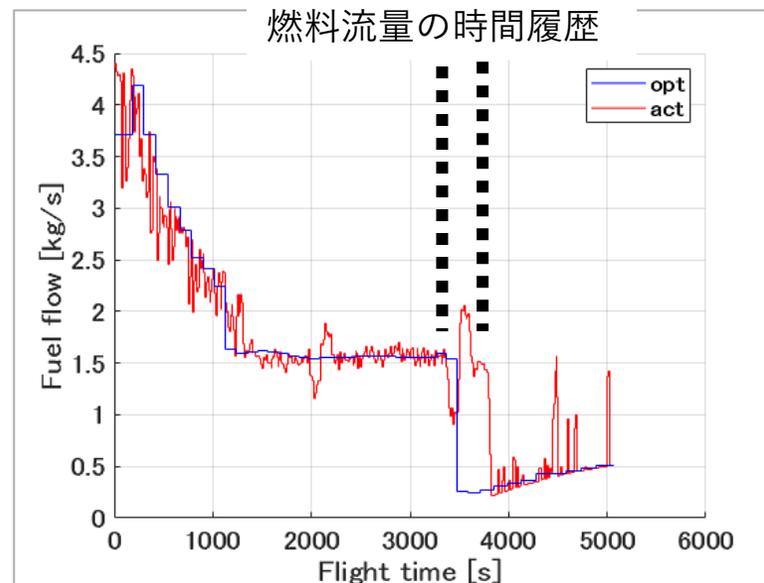
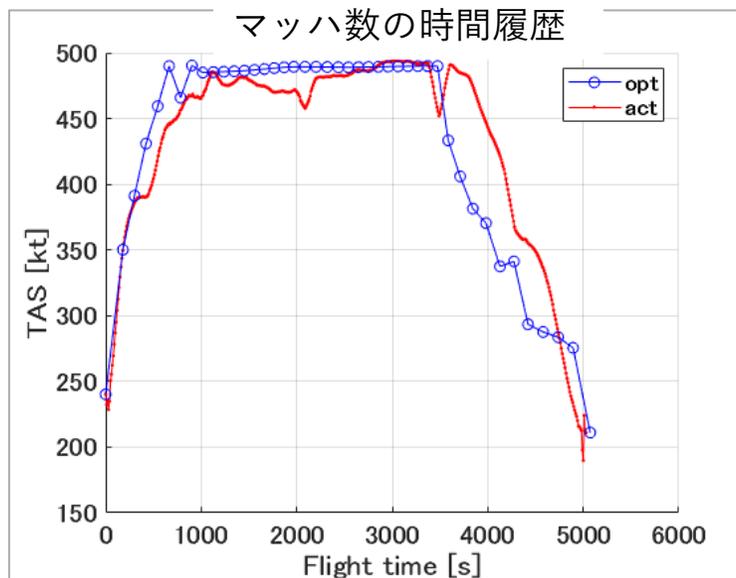
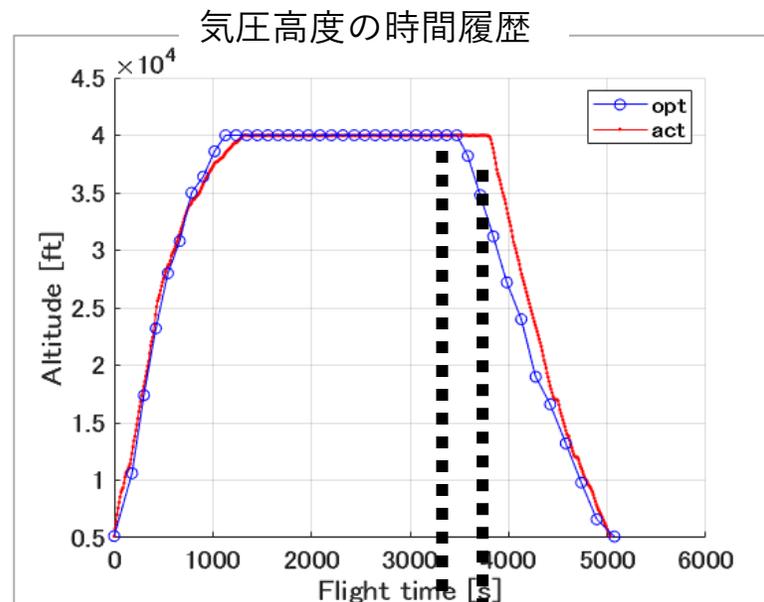
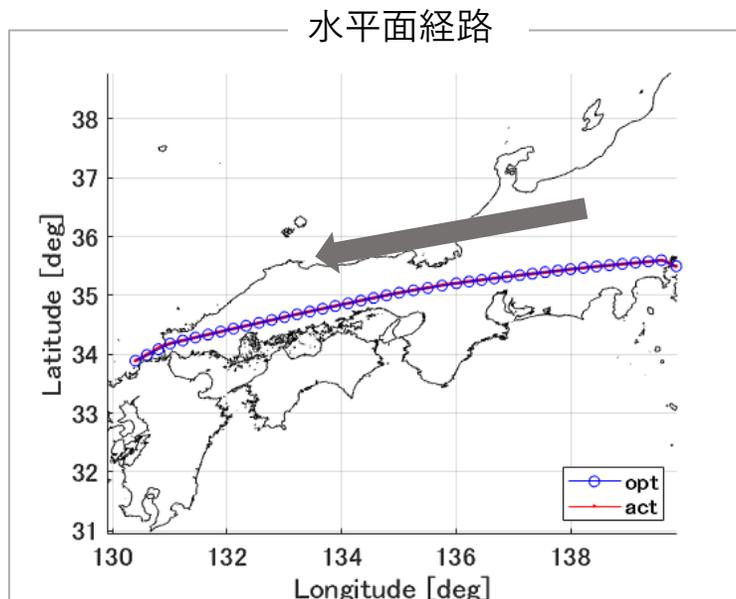
水平面経路が等しい飛行②：羽田→福岡

| | 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 | |

- ・ 約3%の燃料削減
- ・ 降下中のマッハ数が実軌道の方が大きい
- 余分な推力を発生している

- ・ 西行き（羽田→福岡）の方が燃料消費量が多い
- 偏西風の影響の可能性

今後、風等の気象条件や高度、速度、降下開始点の最適化がCO₂削減ポテンシャルに与える影響を分析する必要がある



研究のまとめ

- (1) 飛行距離の短縮及び機材・便数選択によるCO₂削減ポテンシャルを定量的に把握
- (2) 現状の標準飛行経路・空域設定下での飛行距離短縮の観点からのみでは、10%の削減目標達成は容易ではない可能性
- (3) 機材便数選択の変更で、一定のCO₂削減も可能。一方で、乗客やエアラインのコスト増とのバランスを考慮する必要がある。高需要路線ではCO₂削減の可能性も存在。
- (4) 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さらにCO₂排出量を削減可能

今後の課題

- ・基準便の設定や、軌道最適化を含めたCO₂排出削減量推計の精緻化
- ・運航頻度の変化に伴う需要の変化を考慮した便益の計測