

ネットゼロ下の航空ネットワーク に関する一考察

竹林幹雄¹

¹ 正会員 神戸大学教授 大学院海事科学研究科 (〒658-0022 兵庫県神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

E-mail:takebaya@kobe-u.ac.jp

本研究はネットゼロ実現を目指した環境重視型社会における航空輸送のあり方について、ネットワークモデルを用いたモデル分析を通じて検討を加える。特に、燃油費の高騰と環境意識の高まりという 2 つの今日的ファクターに関して、ネットワークの構造変化をゲーム論の視点から論じる。モデルは既開発の Bi-level モデルを用い、近距離輸送では高速鉄道が存在するネットワークに対して分析を行う。今回の分析では機材選択、環境を重視するキャリアの存在など複数のシナリオについて検討し、Nash 解の特性などについてシナリオ別の比較を行うことを想定している。

Key Words: Net Zero, aviation network, fuel price

1. はじめに

地球環境問題、とりわけ温暖化に関わる諸問題は、国際輸送のあり方に大きく影響を与えている。国際エネルギー機関 (IEA) は従来の温暖化問題に対する取り組みから一歩進んだ“Net Zero by 2050”を提案し、化石燃料に依存した社会のあり方に根本的な変革を迫っている。とりわけ航空輸送、海上輸送と行った輸送産業は化石燃料に依存する割合が極めて高く、その変革が急務と言われてきた。航空輸送については国際機関である IATA や ICAO が温暖化ガス (GHG) の削減に向けた提案を Net Zero が採択される以前から行ってきたものの、ここに来てさらに積極的に取り組む必要に迫られているといえる。

Net Zero あるいはその少し前まで一般的に知られていた Carbon Neutral 実現についての航空輸送における変革への努力は、コロナ禍による経済への打撃やその後発生したロシアによるウクライナへの軍事侵攻などで、動きとしては目立たなくなっている。2050 年までに GHG の排出量を実質ゼロとする目標実現のためのロードマップが IATA によって示されている¹。しかし、当座はカーボン・オフセットや GHG の排出権取引など、既存のエネルギー消費パターンを補填する方法が主流となると考えられる。また植物油の廃油などから作られる、いわゆる「持続可能な航空燃料 (SAF)」の混入使用を義務づける動きも欧州を中心に起こっている。

こういった流れの中で、英国は Fly Zero/ Jet Zero といっ

た航空機の技術革新による Net Zero の推進を目指す国家プロジェクトを進めている。基本は水素燃料の利用であり、実現すれば GHG 削減の切り札となり得る。しかし、その実現 (商用利用開始という意味で) には少なくとも 2030 年代後半まで待たなくてはならない。この英国の方法論に対して批判的な評価もなされている。エネルギーコンサルタント会社の Elementenergy 社のレポート²によれば、英国の Fly Zero 政策は技術進歩に楽観的、かつ SAF の供給問題などの見込みも甘い¹、など多くの問題点を指摘している²。

このように、将来的には技術的な面を中心にまだ未確定な部分も多い Net Zero ではあるものの、その推進は世界的に取り組む、ということに現時点ではなっている。しかし、実際 Net Zero に向けた取り組み、特に SAF など燃油の転換は大きなコストとなり、利用者のコストにも跳ね返ってくる。また、コスト上昇による需要の減退もあり得るものであり、これは航空業界における Net Zero 推進のための財務にも影響すると考えられる。

¹ SAF 使用については 100%SAF に頼った場合、現在のケロシン燃料の 3-5 倍の価格になる、と報告している。

² 当該レポートは英国の NGO である The Aviation Environment Federation (AEF) 向けに提出されたものである。Elementenergy 社の主張については、楽観的な技術論を議論するよりもむしろ現在の航空需要を見直し、需要削減についても真剣に議論すべきだと主張している点は注目に値する。

本研究は以上述べた問題意識に則り、航空燃料の上昇と利用者の環境意識の高まりとの関係を数理モデルを元に分析を試みるものである。

2. モデル

モデルは既開発の Bi-level モデル¹⁾を適用する。モデルの詳細は既発表論文^{3) 4)}に詳しいため、ここでは変更点のみ記すこととする。なお、本研究では国際輸送は航空輸送のみとするが、国内(短距離)輸送に関しては、高速鉄道(HSR)も選択可能であるとしている。

(1) 旅客の行動

旅客の行動は間接効用関数によって表現されるものとする。本研究では環境を重視する旅客の存在を前提としているが、実際の行動からその値を推定することは現時点では困難である。このため、環境重視の度合いに対するパラメトリックな分析を行うことを前提とし、政策パラメータ ω (値は与件)を導入して、その反応を表すものとする。

このような変更を反映した旅客の間接効用関数は次のように表されることとなる。

$$u_k^{rs} = \alpha_1 l_k^{rs} + \alpha_2 p_k^{rs} + \sum_{l \in I^{AV}} \frac{\alpha_3}{f_l} \delta_l^{rsk} + \omega \quad (1)$$

ここで、 r : 発地、 s : 着地、 k : rs OD ペアにおける第 k 番目経路、 l : 航空ないしは HSR が運航するリンク、 I^{AV} : 旅客が選択可能なリンクの集合、 f_l : リンク l での運航頻度、

δ_l^{rsk} : rs OD ペアにおける第 k 番目経路の構成要素としてリンク l が含まれている場合 1 を取り、それ以外はゼロとなる 2 値変数、 α_i ($i=1, 2, 3$) は要素のウェイトである。なお、 ω に関しては、環境重視の度合いと考えるために基本的に負の値を取るものとするが、敢えて環境負荷が大きくなるような方法をとるキャリアが存在する場合は正の値を取ることもできるものとする。

(2) 航空会社の行動

航空会社はリンクの頻度ならびに運賃を制御するが、本研究ではさらに投入機材の選択についても検討可能とする。すなわち、通常 C_l と表現されているリンク l の運航費用は、投入機材に依存する形式となる。すなわち、

$$C_l = C_{lv} \quad (2)$$

と書き換えられる。ここで v^n は航空会社 n の機材構成パターンを表す。ゆえに航空会社 n の目的関数は

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{f}^n, \mathbf{p}^n, \tilde{\mathbf{f}}^{-n}, \tilde{\mathbf{p}}^{-n} | \mathbf{v}^n} \pi^n(\mathbf{f}^n, \mathbf{p}^n, \tilde{\mathbf{f}}^{-n}, \tilde{\mathbf{p}}^{-n} | \mathbf{v}^n) \\ = \sum_{rs} \sum_k \sum_{l^n \in I^n} p_{l^n} \hat{x}_k^{rs} \delta_{l^n}^{rsk} - \sum_{l^n \in I^n} C_{l^n, v}^{OP} f_{l^n} \end{aligned} \quad (3)$$

と書き換えられる。ここで p_{l^n} : エアライン n が運航するリンク l^n での運賃、 \hat{x}_k^{rs} : rs OD ペアにおける第 k 番目経路における均衡交通量である。

3. 数値計算

(1) 設定

本研究における設定を述べる。まずネットワークの構成に関しては文献 1 に示した構造と同じであり、Zone 1, 2, 3 は国内輸送に加えて HSR が利用可能である。Zone 4 は海外であり、航空輸送のみが利用可能であると設定している。なお、HSR は CBD に直結していると考えているが、空港は Zone 1-3 については CBD とのアクセスに 30 分必要としている。

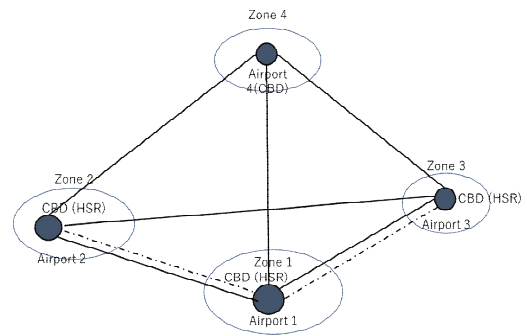


図-1 ネットワークの概念図

次に機材構成については narrow (200 席), wide (300 席) のいずれかが選択できるものとする。なお、narrow 機については Airbus 社などの資料から燃費が wide 機と比較して 10%改善されると言うことを反映した数値としている³⁾。パラメータの値に関しては文献 3) で使用したものを基本的に用いているが、郊外立地空港選択を表す

³⁾ ここでの機材の分類はあくまでも伝統的な定義 (narrow: single aisle, wide: twin aisle) によるものである。近年は機材の発達により single aisle であっても 200 席を優に超える機材 (B-737 MAX) が登場し、2 世代前の wide 機 (例えば A-330 など) に近い席数を供給できるように

ダミー変数については使用していない。ωについては0.5を与えたものについての結果を掲載する。なお、燃油費ならびにωの影響以外の要素をできる限り排除するため、空港での容量制約は設定していない。このため、例えばわが国の状況と比較すると短距離輸送における航空の占める割合が大きく上昇する傾向にあることに注意が必要である。旅行時間に関しては航空に関しては短距離は50(2-3は100)、長距離は一律240とした。HSRのそれは一律で120とした。計算の初期値に関しては航空の運賃を短距離120、長距離500、HSRのそれを140とした。また頻度は、航空は全て15、HSRは固定で150とした。

なお、ODフローは表-1の通りである。

表-1 ODフロー

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
Zone 1	0	30000	30000	8000
Zone 2	30000	0	2500	1000
Zone 3	30000	2500	0	1000
Zone 4	8000	1000	1000	0

(2) 結果の概略

a) 燃油費高騰の影響

ここではGHG排出規制のため、SAFなどの低炭素燃料の混入を行うため、燃油費の高騰が生じるというシナリオによる分析結果を示す。ここではエアラインは両者ともに低炭素燃料の混入を選択する、という仮定の下に分析を進める。このとき、「より環境に優しい輸送を行う」という意味で、HSR利用者(短距離ならびに長距離輸送のフィーダーでの利用)について $\omega = -0.5$ として計算を行った。

機材選択の結果に関しては全ての燃油費のパターンでall narrowという結果を得た。このため、結果についてはall narrowに絞って基本的に提示する。

図-2は燃油費の高騰の収益性への影響を示したものである。なおエアラインは対象な戦略となるため、収益は両者とも同じである。一見して燃油費の高騰の影響がエアラインには生じていることが明らかである。これは運賃上昇による短距離輸送のシェアの下落(50%からcase 50の場合は46%に減少)したことに加え、2-4、3-4のフライトが運賃の高騰により大幅に減少し、旅客需要を失ったことによる。一方、HSRは短距離輸送のシェアが増加するに加えて、運賃も同時に上昇させるため、相対

なっている。

的に収益性が向上することがわかる。このことから、一般的に認識されているように、環境重視で燃油費が高騰する場合、HSRの利用が促進され、またその収益も向上すると言うことが裏付けられるといえる。このことは旅客数の推移によっても確認できる。

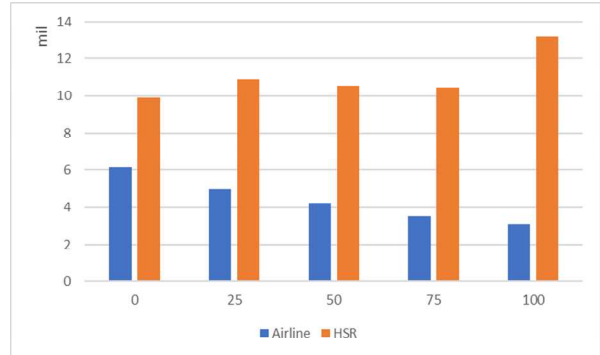


図-2 燃油費の高騰の収益性への影響

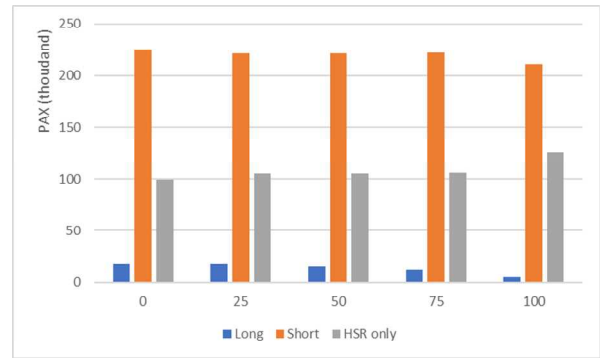


図-3 燃油費の高騰と旅客数の推移(往復)

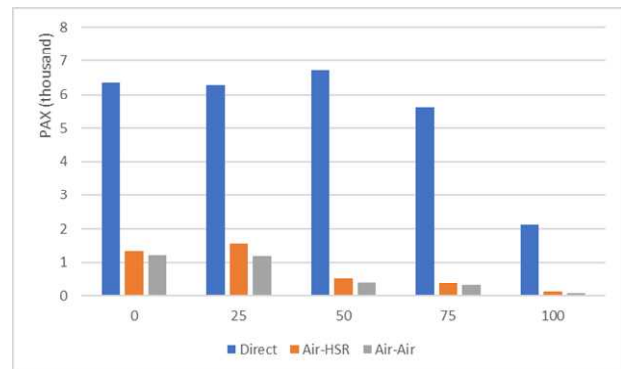


図-4 長距離輸送における輸送パターン別旅客数の推移 (アウトバウンド)

図-3は旅客数と燃油費の高騰との関係を示すものである。燃油費の高騰に従い、航空運賃が高騰し、航空旅客数は減少する。一方で、環境重視の点に加え運賃の上昇も急激ではないHSRに旅客はシフトすることがわかる。この燃油費高騰により航空利用者が減少するという傾向は長距離輸送においても認めることができる(図4参照)。図4では25%上昇の場合、Air-HSRの分担割合が

上昇しているが、これは HSR 利用が環境重視であることに加え Air-Air が運賃上昇により選択されにくくなった結果であると推定できる。一方、50%上昇以降ではダイレクト便、特に空港 2, 3 発着のダイレクト便の頻度が燃油費の高騰のため極端に減少し、結果として長距離便の絶対数が減少したためいずれの乗り継ぎパターンでも大幅に減少するという結果となったと考えられる。

b) SAF を使用しないキャリアの存在

a)での検討ではエアラインは全て SAF を使用する、という仮定の下で行ったため、エアライン間に差異はない。しかし、諸々の事情から SAF を敢えて投入しない、と選択するエアラインの存在も想定は可能である。この場合、環境の観点から旅客側から「好ましくない」と評価されることになる。一方で、SAF を使用しないため、コストの上昇はないと考えられる。すなわち、旅客の選択が環境と運賃上昇のバランスでどのように変化するかをここでは見ることになる。なお、旅客の環境に対する評価に関しては SAF を使用しない、ということから当該エアライン選択の差異には ω を正の値（コスト）として加算するものと設定した。

ここでは ω について 0.5, 0.75, 1.0 の 3 つの値について感度分析を行った。

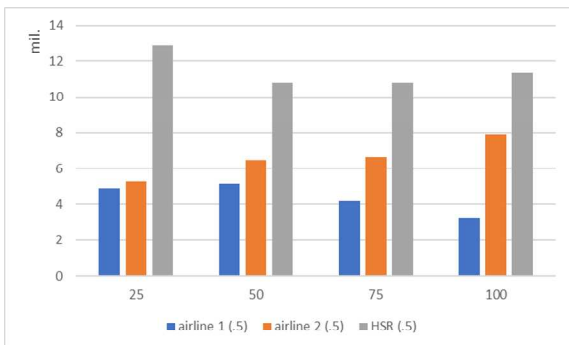


図-5 SAF 使用の有無が利潤に及ぼす影響 (0.5)

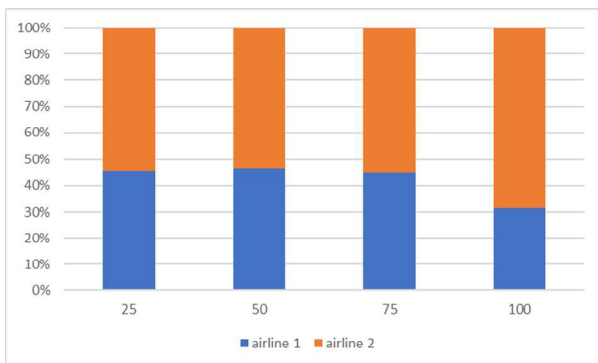


図-6 SAF 使用の有無が旅客シェアに及ぼす影響 (0.5)
注:内際合計でのシェア

図-5、図-6 より、環境への意識の違いが利潤に大きく影響することがわかる。環境意識が 0.5 の場合、いずれの場合も SAF 未使用の低コストエアラインが多く利潤を得ることがわかる。旅客シェアでも SAF 未使用のエアライン 2 のシェアが高い。すなわち、旅客は環境よりもコストの方を結果として選択しているといえる。

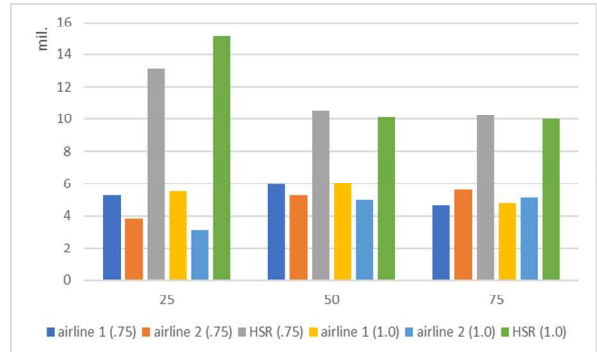


図-7 SAF 使用の有無が利潤に及ぼす影響 (0.75, 1.0)

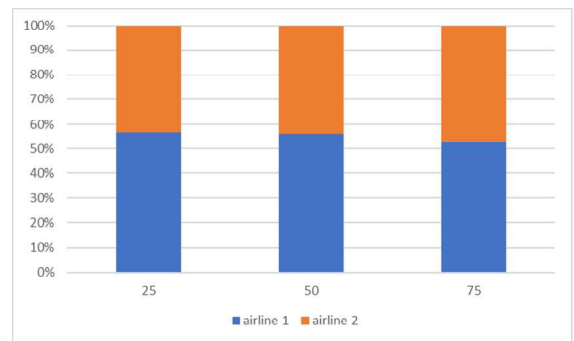


図-8 SAF 使用の有無が旅客シェアに及ぼす影響 (0.75)

注:内際合計でのシェア

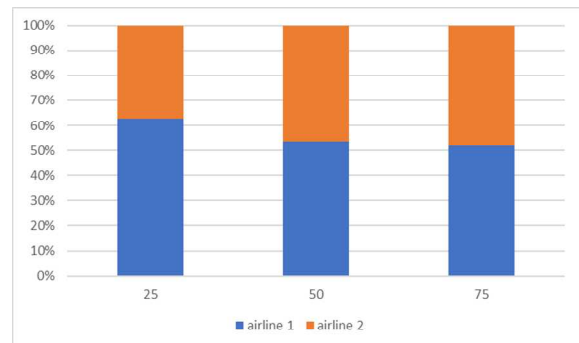


図-9 SAF 使用の有無が旅客シェアに及ぼす影響 (1.0)

注:内際合計でのシェア

一方、この ω の値を増加させていくことにより、旅客の環境に対する指向性の感度分析を行うことができる。 ω が 0.75 のもとでは燃油費 50%上昇の時点までエアライン 1 は 50%以上のシェアを維持し、かつ収益もエアライン 2 を上回っている。しかし、75%の時点ではかろうじてシェアは維持しているものの、収益性の点でエア

ライン 2 には及ばないという結果を得ている。この傾向は ω が 1.0 に上昇した場合もほぼ同じである。

以上の結果から、旅客の環境重視の傾向が（啓蒙活動などで）強化されれば、環境を重視した SAF の使用についてエアラインは積極的に採用する行動を取る可能性があるといえる。しかし、SAF 使用によるコスト上昇がさらに高くなると、結果的に競争上不利となり、SAF 使用のインセンティブを失う、といえる。

4. おわりに

本稿では航空燃料の上昇と利用者の環境意識の高まりとの関係を数理モデルを元に分析を試みた。その結果、燃油費の上昇とともに HSR の利用者が増加すると同時に、長距離輸送におけるダイレクト便の頻度が減少する、すなわち輸送の絶対量は減少するという結果を得た。また、SAF 使用の有無についても、旅客の環境意識を高く導くことで SAF 使用のインセンティブをエアラインに持たせることは可能ではあるが、燃油費の高騰が著しい場合、その効果は大幅に減殺される可能性があることを示した。SAF 使用に対してエアラインがインセンティブを持ち続けるためには、一定の価格上昇にとどめる必要があるといえ、この意味では現在 IATA や特に欧州を中心に議論されている SAF 使用への補助金導入は一定の意味があるといえる⁴。

一方で、SAF を使用しないエアラインに対してペナルティをかける、ということも考えられ、その一つの手段としての課税は（炭素税の形として）既に実施されている。しかし、この課税・課金の方法が適正であるのか、については議論の余地がある。なぜなら、課金による収益性の低下は市場の縮小をもたらすことは今回の思考実験からも示されるためである。また、その課金の根拠についても十分に議論する必要があるといえるが、これに関しては今後の検討課題としたい⁵。

なお、本稿の結果はあくまでも厳しい仮定の元に行われたものであり、今後より現実的な仮定の設定などについて議論が必要であることを断っておく。

参考文献

- 1) IATA, 2021. Net-Zero carbon emission by 2050 (<https://www.iata.org/en/pressroom/2021-releases/2021-10-04-03/>).
- 2) Elementenergy, 2022. The role of aviation demand reduction in UK Decarbonisation, (<http://aef.org.uk/uploads/2022/05/The-Role-of-Aviation-Demand-in-Decarbonisation-Full-Report.pdf>).
- 3) Takebayashi, M., 2018. Managing airport charges under the multiple hub network with high speed rail: considering capacity and gateway function, *Transportation Research A* 112, 108-123.
- 4) Takebayashi, M. 2021. Workability of a multiple-gateway airport system with a high-speed rail network, *Transport Policy* 107, 61-71 (<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.04.019>).
- 5) Jiang, C., 2021. Aviation tax and railway subsidy: An integrated policy, *Transportation Research Part-B* 146, 1-13.

(2022.9.1 受付)

⁴本文中で述べたように IATA では政府などによる SAF 購入補助を念頭に置いた政策がマイルストーンに挙げられている⁹。しかし、補助金政策の有効性に加えて、補助金が税金から投入されることから、最終的に補助金を上回る効果の現出が国あるいは国民経済に対して発生しないと政策の正当性が問われることになる。

⁵航空利用者に課金した場合の収益の利用については Jiang (2021)⁹による Air-HSR 利用促進への補助金投入に関する理論的検討がある。ただし、Jiang の視点は「航空需要そのものの抑制」の点から議論されている点に注意が必要である。

AVIATION NETWORK UNDER NET ZERO

Mikio TAKEBAYASHI

This paper discusses the structural change in aviation under the policy of Net Zero. We adopt the bi-level network optimization model with modification on passenger's utility function to reflect the effect of preference of carbon dioxide reduction. We carry out the model analysis using four-nodes network; HSR is available for the short haul transport, while aviation can be used for long haul transport. The results suggest that when the fuel price is going up due to the use of SAF, airlines of course lose their profits a lot and the passenger flow is also decreasing. However, when passengers becomes more sensitive to the environmental load by travel, airlines can have incentive to use SAF for gaining more passengers if the fuel cost does not have sharp rise.