



# 卒業論文

日本における航空業界の二酸化炭素排出に関する取り組み

—SAF 利用についての考察とその将来性—

慶応義塾大学経済学部

大沼あゆみ研究会第 16 期

学籍番号 21806801

川野真如

*“Life is a journey to be experienced, not a problem to be solved.”*

*Winnie the pooh*

## <要旨>

本論文では航空業界における二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出削減の取り組みに関して、特に新たな代替燃料として注目されている持続可能な航空燃料 (Sustainable Aviation Fuel : SAF) の将来性について論じる。

グローバル化の進展や近年の航空機の小型化とともに、航空需要は将来的に増えていくと言われている。それに伴い、航空機由来の温室効果ガス排出量も右肩上がりに増えていくという予測がされている。一方、世界的にも環境問題に対する取り組みが注目されている近年、航空業界に対しても CO<sub>2</sub> 排出削減を含め環境への配慮の在り方が強く求められている。これらの状況を踏まえて、国際航空運送協会 (International Air Transport Association : IATA) は 2050 年までに航空業界における CO<sub>2</sub> 排出量を実質ゼロにするという目標を打ち出した。さらに今後、世界中の航空会社に対して CO<sub>2</sub> 排出に関する規制も導入していく見通しが立っている。そこで、各航空会社は CO<sub>2</sub> 排出削減に向けて様々な取り組みを行っている。その中でも、特に注目されているものが SAF の利用である。SAF は生物由来の資源を原料として燃料を精製する。その製造過程で CO<sub>2</sub> を吸収するため、従来の化石燃料由来のジェット燃料に比べて CO<sub>2</sub> 排出削減効果期待されている。しかし、現在この SAF は技術開発の段階にあり生産量が少なく製造コストが高いという課題点も存在する。

2022 年現在、CO<sub>2</sub> 排出量削減への取り組みが民間航空においても必要とされている。このような時代背景からも、SAF を段階的に導入していくことを考慮に入れて将来的な航空の CO<sub>2</sub> 排出量を算出することは重要であると考えられる。

そこで、本論文では SAF が導入された際の CO<sub>2</sub> 排出削減効果について分析した。また、SAF 導入時にかかる追加費用の一部を航空利用者が負担することを考えた場合に、航空利用者は一人当たりどの程度の追加コストがかかるのかについても分析を行った。その結果、全ての国内定期運送便の半分の燃料を SAF に置き換えた場合、航空の CO<sub>2</sub> 排出原単位はバスと同等のものとなり、利用客一人当たりおよそ 1,200 円の追加コストがかかることが分かった。全ての国内定期運送便における全ての燃料が SAF に置き換えられた場合、航空の CO<sub>2</sub> 排出原単位は鉄道に近い値となり、利用客一人当たりにおよそ 2,400 円の追加コストがかかることが分かった。

本論文では環境に優しいバイオジェット燃料を搭載して飛ぶ航空機 (SAF 便) を提供する供給サイドからだけではなく、SAF 便が導入されたときに高い追加コストを支払ってでも利用したいと考えるのかについて航空利用者の需要サイドからも分析した。分析手法として、航空利用者を対象にしたアンケート調査を実施した。全有効回答者数 77 人の内、現役大学生の回答 52 人のデータを集計して分析を行った。その結果、環境に優しい SAF 便というサービスに対して航空利用者はどの程度の追加金額であれば、自ら喜んで利用したいと考えるのかという支払意思額

(Willingness to Pay : WTP) は、「環境問題に対する自身の意識が比較的低いと答えた学生」に比べて「環境問題に対する自身の意識が比較的高いと答えた学生」の方が約 3 倍高い数値となった。このことから、環境問題に対する回答者の意識の程度は SAF 便に対する WTP に大きく反映されることが分かった。また、学生に比べて社会人の WTPの方がより高くなる傾向になることが分かった。

# 目次

序章.....	6
<b>第 1 章 現状分析.....</b>	<b>7</b>
1.1 航空業界のコロナ禍における現状とその先.....	7
1.1.1 コロナ禍の現状 .....	7
1.1.2 ポストコロナの将来予測 .....	8
1.2 CO2 排出の現状 .....	10
1.3 CO2 排出削減の取り組み .....	11
1.3.1 新技術の導入 .....	11
1.3.2 運航方式改善 .....	13
1.3.3 代替燃料と経済的手法の活用 .....	14
1.4 航空機に使われる燃料 .....	16
1.4.1 現在の航空用燃料～ケロシン～ .....	16
1.4.2 水素 .....	17
1.4.3 電気 .....	18
1.4.4 バイオ燃料 .....	19
1.5 持続可能な航空燃料 (SAF) .....	20
1.5.1 SAF とは .....	20
1.5.2 SAF の認証制度 .....	21
<b>第 2 章 問題提起.....</b>	<b>23</b>
2.1 SAF 導入に関する課題.....	23

2.1.1	SAF の大量生産・大量供給 .....	23
2.1.2	SAF の販売価格低減 .....	23
2.2	問題提起 .....	24
<b>第 3 章</b>	<b>政策提言 .....</b>	<b>25</b>
3.1	航空利用者に対する負担 .....	25
3.1.1	導入コストの負担の仕組みとその理由 .....	25
3.1.2	SAF 便導入時の CO2 削減効果 .....	25
3.1.3	SAF 便導入に伴う追加コスト .....	27
3.1.4	100%SAF の航空機の場合 .....	28
3.2	計算についての考察 .....	29
<b>第 4 章</b>	<b>経済学的分析 .....</b>	<b>30</b>
4.1	シミュレーション分析 .....	30
4.1.1	航空利用者（需要サイド） .....	30
4.1.2	航空会社（供給サイド） .....	31
4.1.3	均衡価格 .....	32
4.2	アンケート調査 .....	33
<b>終章</b>	<b>.....</b>	<b>35</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>36</b>
<b>あとがき</b>	<b>.....</b>	<b>39</b>

## 序章

本論文はSDGsの17の目標における、7（エネルギーをみんなにそしてクリーンに）、9（産業と技術革新の基盤をつくろう）、13（気候変動に具体的な対策を）の3つの目標に該当する。

近年、SDGsの定めた目標を実現するために世界中の国、企業、そして多くの人々が、環境への関心を高めている。特に一度のフライトで莫大な量の化石燃料を利用して航空機を飛ばす航空業界においては、温室効果ガス排出量の多い飛行機利用を恥として鉄道や船などの他の交通機関の利用を進める活動（フライト・シェイミング）がヨーロッパを中心に広がるにつれて、各航空会社の対策が迫られている状況にある。

日本における大手航空会社2社である日本航空株式会社(Japan Airlines Co., Ltd. : JAL)と全日本空輸株式会社(All Nippon Airways Co., Ltd. : ANA)は、環境問題について大きく以下の4つの取り組みを行っている。省燃費機材の導入、運航方式改善、代替燃料（バイオジェット燃料）の開発促進、経済的手法（排出権取引やカーボンオフセット）の利用である。それぞれの取り組みの詳細に関しては1.3で述べる。

本論文では、航空業界におけるCO<sub>2</sub>排出削減目標達成のために特に不可欠なSAFの導入に注目する。SAFは日本においては現時点で研究開発の真ただ中であり、市場流通量はたったの0.03%と言われている。近い将来、このSAFが十分に普及し航空機に使われるようになれば、環境に対する厳しい目を向ける人々を含め多くの利用客が長距離移動の際に利用してみようと考え、環境に配慮した代替燃料で飛ぶ航空機需要が伸びると考えられる。需要が増えることに伴い、航空チケットを通常料金よりも高い価格で売ることも航空会社が採りうる選択肢の一つだと考えられる。

SAFは製造プロセスに応じて明確な規定が定められているが、既存の航空ジェット燃料と混合して利用することが大半である。その混合率がどの程度であればどのくらいのCO<sub>2</sub>排出削減に繋がるのか、またその混合率に応じてどの程度の追加コストが利用者一人にかかるのかを分析し考察を行う。さらに、航空利用者に対してSAF便を利用したいと思うかどうかの調査を実施した。

最終的に航空業界の持続可能な発展に繋がるよう、航空業界と脱炭素型社会が共存していくための在り方を提案していくことが本論文の目的である。

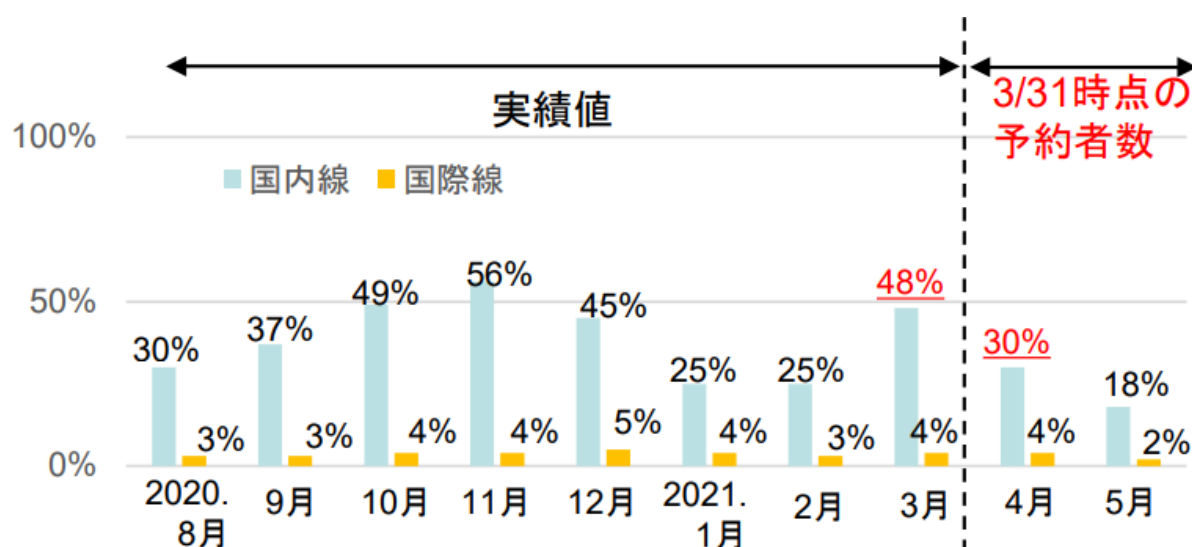
# 第1章 現状分析

## 1.1 航空業界のコロナ禍における現状とその先

### 1.1.1 コロナ禍の現状

2022年1月現在、新型コロナウイルス感染症による世界的な影響を受け、航空業界は深刻な打撃を受けている。IATAは、新型コロナウイルス感染症のパンデミックによる航空業界の損失額は日本円にして合計約22兆円に達すると発表した（2021年10月4日）。日本におけるコロナ禍での航空需要については国土交通省がパンデミック以前の2019年同月比と比較した輸送人員データを示している（表1）。国内線に関しては、2021年3月における輸送人員は48%となっている。また、国際線の輸送人員に関しては4%と厳しい状況が続いている。2009年のリーマンショック時の輸送人員は、国内線85%（2009年2月）、国際線78%（2009年6月）であり、2011年の東日本大震災時の輸送人員は、国内線76%（2011年3月）、国際線66%（2011年4月）であった。これらの過去のデータと比べてみても、今回の新型コロナウイルスによる航空業界への影響は甚大なものだと分かる。

表1 輸送人員（2019年同月比）



出典：国土交通省 航空局 航空を巡る最近の状況（2021）

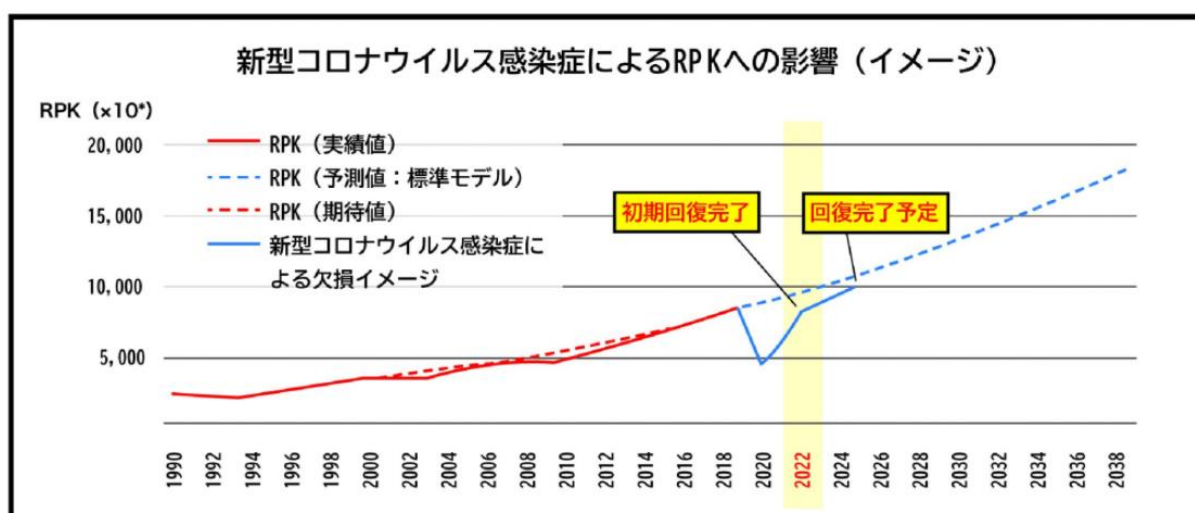
### 1.1.2 ポストコロナの将来予測

2022年における世界の航空需要に関してIATAは、コロナパンデミック以前の2019年に比べ39%減になるとの見通しを発表した（2021年10月4日）。

しかし今後、ポストコロナの航空需要復活の予測も期待されている。実際に2021年5月26日に発表したIATAの発表した予測によると、今後の航空需要の回復に関して2023年には、世界の航空機乗客数が新型コロナウイルス感染症の流行拡大以前の2019年を超えて、105%になるとしている。

もともとコロナウイルス感染症による航空需要の著しい低迷以前は、グローバル化の進展に伴いアジアをはじめ世界的に航空需要の大幅な増加が予想されていた。また、国際線のみならず国内的にも旅客需要を中心に増加の予測がされており、航空機の離着陸回数が右肩上がりに増加していくと考えられていた。このグローバル化の進展は、新型コロナウイルス感染症というパンデミックによって一時的に大打撃を受けたのは確かだが、感染症の収束後は再び航空業界は拡大していくと考えられる。過去に起きた新型コロナウイルス感染症と同等の世界的な感染症によるパンデミックには、2003年のSARSと2009年の新型インフルエンザ感染症などがあり、どちらも航空業界に大きな影響を及ぼした。しかしいずれの事態も収束後、航空需要は数年も経過しないうちに確実に回復している。日本航空機開発協会の市場予測に関する資料によると、過去のSARSと新型インフルエンザ感染症の回復過程パターンから今回の新型コロナウイルス感染症の回復パターンを推測したデータがある（表2）。RPKとは旅客輸送量のことである。

表2



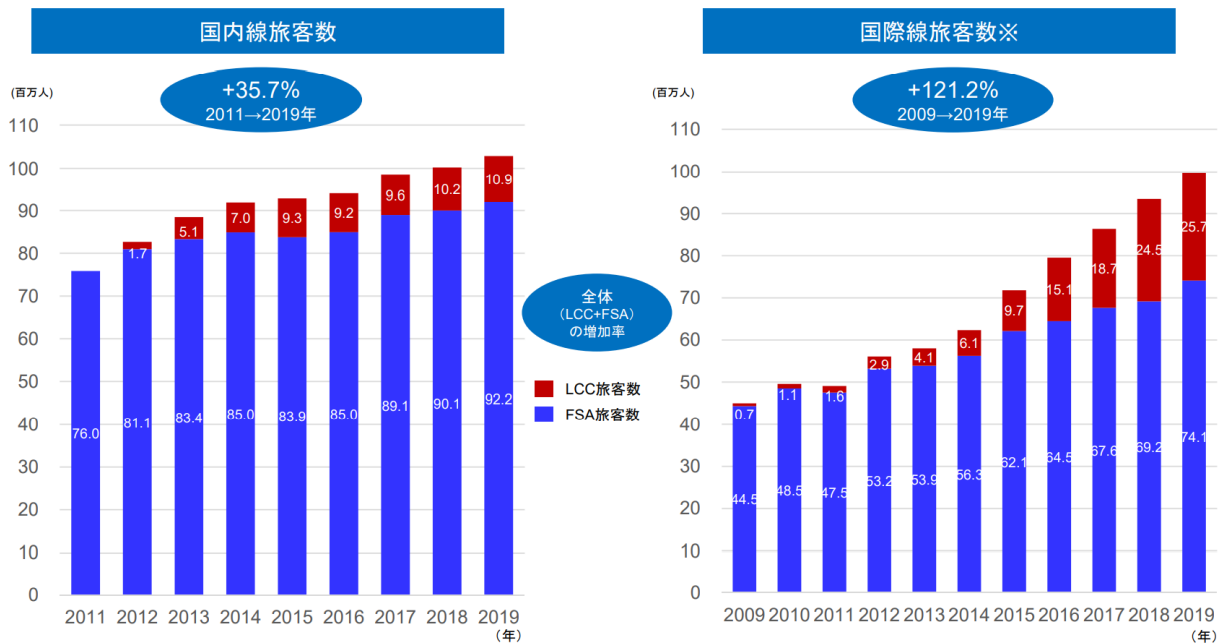
出典：一般財団法人 日本航空機開発協会 民間航空機に関する市場予測 2020-2039 p.15



表2 から、新型コロナウイルス感染症からの初期回復完了は 2022 年を見込んでいることが分かる。

先程述べた、グローバル化の進展の他にも航空需要が伸びている理由の一つに航空機の小型化がある。近年、世界中の航空自由化や規制緩和に伴い、格安航空会社（Low Cost Carrier : LCC）を含めて多くの航空会社が誕生している。

表3 航空旅客数（国内線・国際線）の推移



出典：国土交通省航空局作成 我が国の LCC 旅客数の推移（2020）

表3 は新型コロナウイルス感染症拡大前のデータにはなるが、LCC は JAL や ANA に代表される従来の航空会社（Full Service Airline : FSA）の旅客数の大きな減少を生じることなく、航空旅客数の増加を牽引していることを示している。このように航空の LCC 化が進んだことで、航空利用者にとって低価格で飛行機の移動を楽しめるようになり、路線数の急激な増加に繋がった。

今後もこの傾向が続き、グローバル化の進展とともに航空の需要は増えていくと考えられる。これに伴い、航空機由来の温室効果ガス排出量も右肩上がりに増えていくことが見込まれている。そのため、新型コロナウイルス感染症による航空需要の低迷から回復した時に必要とされるのは、地球温暖化防止に繋がる環境に優しい SAF 便だと考えられる。次の 1.2 からは CO2 排出の現状について、1.3 からは排出削減に向けた具体的な航空会社の取り組みについて述べる。

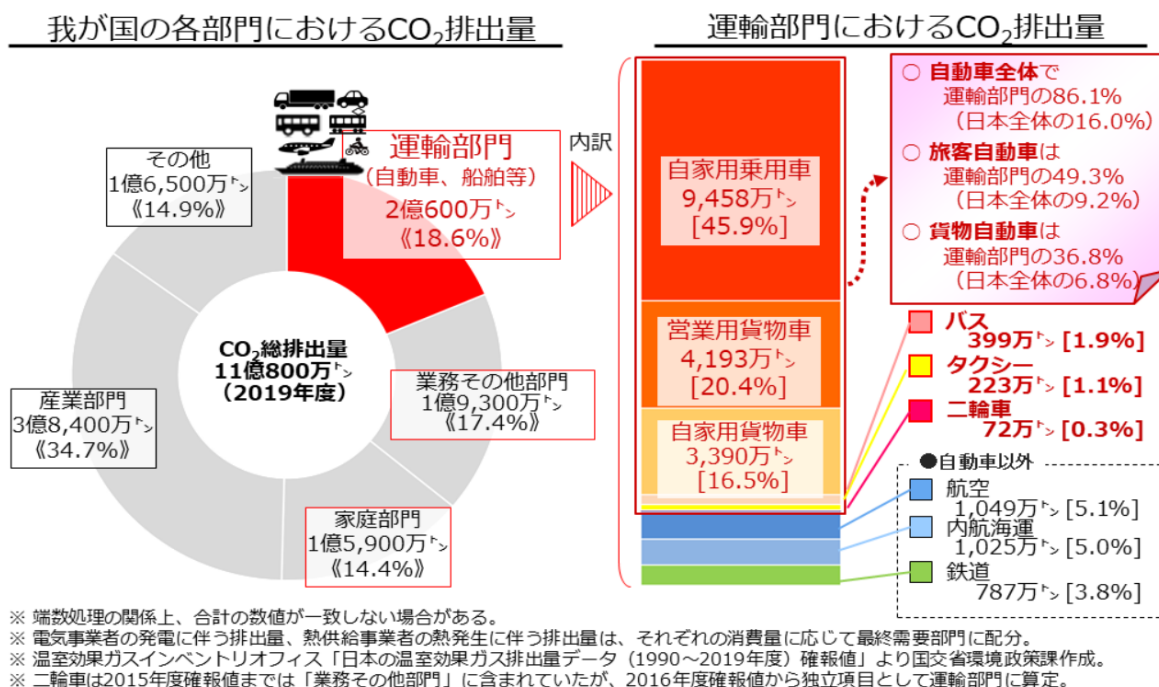
## 1.2 CO2 排出の現状

1.1 で述べたように、現在日本を含め世界中の航空会社に求められていることは環境に配慮した航空機の運用である。

航空分野の CO2 排出削減に関して、世界的枠組みが存在する。その枠組みでは、国内航空と国際航空を区別して削減追求を目指すように規定されている。国内航空の CO2 は各国の排出量に計上し、各国の責任において削減を追求する。一方、国際航空の CO2 はセクターの特殊性から排出の国別割当が困難なため、国際民間航空機関（International Civil Aviation Organization : ICAO）を通じて削減を追求する。ここでのセクターの特殊性とは、国際航空は国境を越え公海上で排出を行うことやコードシェア便の実施などを指している。

日本国内における運輸部門の CO2 排出量の割合を示したものが下記の図 1 である。この図 1 から分かる通り、CO2 排出量において全体の 18.6%が運輸部門からの排出である。さらにその運輸部門の内、航空の占める割合は 5.1%である。すなわち、2019 年度における航空の CO2 排出量割合は、日本全体総排出量の約 0.9%となる。

図 1 日本の運輸部門における CO2

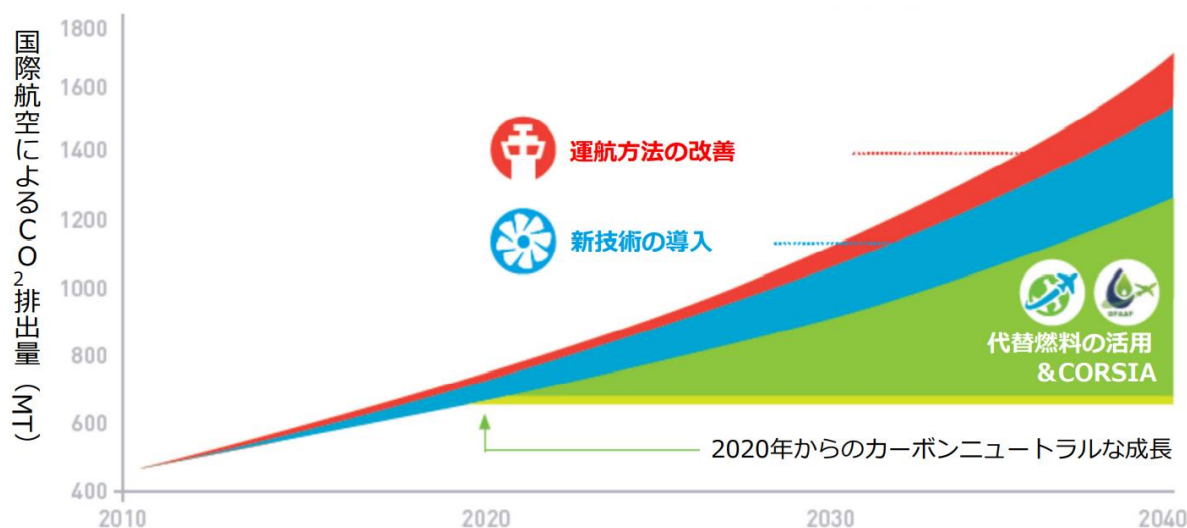


出典：国土交通省 運輸部門における CO2 排出量

### 1.3 CO2 排出削減の取り組み

2010年にICAOにより決議されたグローバル削減目標がある。一つ目は2050年までに年平均2%の燃費効率改善させること。二つ目は、2020年以降は温室効果ガスの排出を増加させないこと。すなわち、2020年以降は国際航空部門からの排出量を前年の排出レベルにとどめつつ炭素中立的成長を目指すというものである。その目標達成のために、4つの対策①新技術の導入②運航方式の改善③代替燃料の活用④経済的手法の活用が設定された。これら4つの対策のイメージが下記の図2である。航空分野におけるCO2排出の基本的な対策は、国際線はもとより国内線においてもこれら4つの対策の組み合わせにより実施している。

図2 CO2 排出量削減方法



出典：ICAO ホームページ <https://www.icao.int/Pages/default.aspx>

#### 1.3.1 新技術の導入

4つの対策のイメージの中で最も想起しやすいものは、新技術の導入だと考える。新技術とはすなわちエコな省燃費機材の導入のことである。

現在までに実際に定期便運航に利用されているエコな航空機の代表例として、つい先日(2021年11月1日)就航10周年を迎えたボーイング787型機(B787)が挙げられる(画像1)。この機体は、ANAが2004年に世界で初めて発注し、機体部品の内35%以上を日本のメーカーが手掛けているため純国産機と呼ばれるほど日本にゆかりのある機体である。この機体は炭素繊維複合材を多用することで大幅な軽量化を実現するとともに、シェブロンノズルと呼

ばれる特徴的なエンジンを採用して性能が向上したことで、従来の中型機に比べて燃費を20%も削減することに成功した。下記の画像1は、2020年3月に筆者が羽田から伊丹空港に向かう際に搭乗したB787である。

低燃費機材として注目されている機体はB787だけでなく、今後も更なる低炭素な機体やエンジンの技術開発が世界的に期待されている。その例としてボーイング777X (B777X)がある(画像2)。このB777Xは現在世界中の多くの航空会社が導入しているボーイング777シリーズにおける最新機種に当たり、その最大の特徴は主翼の長さが世界最大の71.8mもあり、主翼の先端(ウイングチップ)が折りたたみ可能な仕組みになっている点である。この大きな主翼によってグライダーのように機体の浮力が増して燃費が向上し航続距離が伸びるとされている。大きな主翼は環境に優しい点で利点となるが、大きすぎて駐機場に収まりきらない場合を考慮して主翼を折りたためる構造になっている(折りたたみ時の幅は64.8m)。翼はカーボン製、胴体はアルミ製の新設計の機体であり、エンジンには新型のゼネラル・エレクトリック社製を採用し、現行機より20%の燃費向上が見込まれている。

画像1 ボーイング787



筆者が伊丹空港で撮影した写真

画像2 ボーイング777X



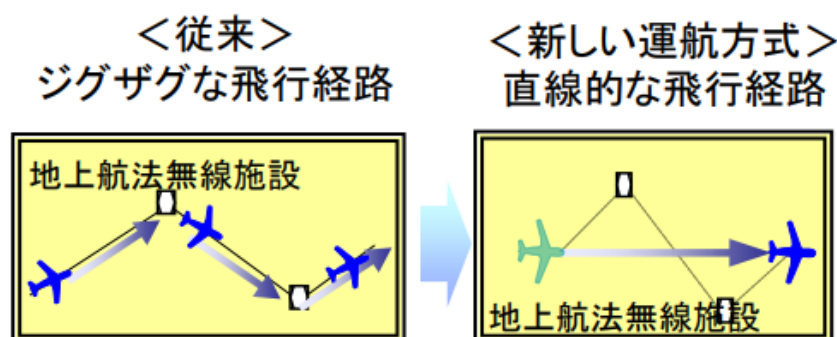
筆者所有の1/200サイズの模型

### 1.3.2 運航方式の改善

運航方式の改善は、飛行距離の削減や、経済性・気象条件に適した飛行ルートを選択、運航時間の短縮等を意味する。

まず、航空交通システムの高度化による運航方式の効率化について述べる。従来は、地上後方無線施設をポイントとしてジグザグな飛行経路を飛んでいた。しかし、航空交通システムが高度化したことで、地上電波標識の位置に制約を受けない運航方式が可能となりルートの短縮が可能になった（図3）。今後とも、引き続き新しい効率的な運航方式の導入が期待されている。

図3



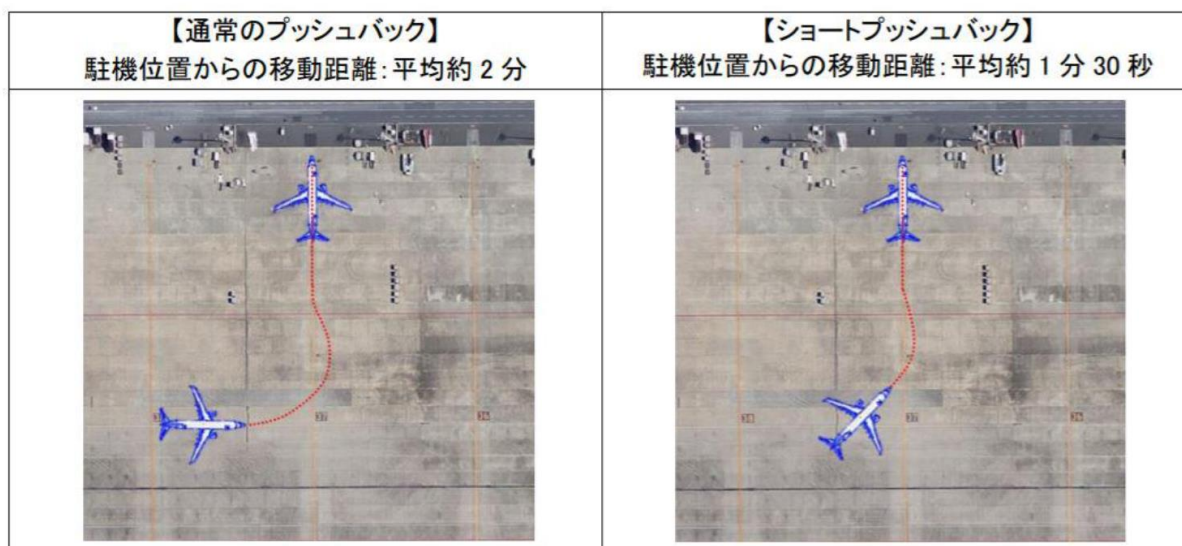
出典：国土交通省 航空局

燃費の良い飛行高度や飛行経路の選択自由度の向上によっても、飛行中の消費燃料は削減されている。従来の高度選択は、限定的であり航空機同士の高度と前後方向の間隔の確保必要範囲が大きかった。しかし、監視技術の高度化や航空機の高性能化により燃費の良い効率的な飛行高度と飛行経路の選択肢の幅が広がった。

さらに、地上においてもオペレーション上の改善が日進月歩で行われている。直近の地上走行時におけるCO2排出削減を目的とした改善点の例としては、ショートプッシュバックというものがある。これは2021年6月1日に羽田空港を出発する国内線の一部で開始されたもので、駐機場から航空機をトーイングカーで押し出すプッシュバック時に、距離を短縮するという取り組みである。この方式を採用するのは羽田空港に就航している航空会社の中では、今回のJALの試みが初めてである。従来は駐機場から90度のところにあるプッシュバックレーンと呼ばれる場所まで平均2分程の時間をかけて機体を押し出していたが、今回のショート

プッシュバックでは 45 度のところまで押し出すだけで機体からトーイングカーを切り離すことで、およそ 30 秒程度時間を短縮することが可能になる（図 4）。

図 4 プッシュバック時の方法の違い



出典：JAL ホームページ <http://www.jal.com/ja/>

このショートプッシュバックにより、APU という補助動力装置の使用時間を短縮することができ、CO2 排出を年間でおよそ 21.5 トン削減する。それに加えて、牽引車のプッシュバック距離短縮による CO2 排出量削減は年間でおよそ 1 トンも可能になる。すなわち、このショートプッシュバックを行うことで年間 22.5 トンもの CO2 排出を削減することが可能になる。JAL によると、CO2 排出削減量 1 トンあたり、1 リットルのペットボトル 500,000 本の体積と同等であるという。これは、地上走行時における CO2 排出削減の取り組みにおける具体例の一つであり、そのほかにも多くの取り組みがなされている。一見すると、少し機体を動かす時間が減少しただけの些細な変更のように思われるが、このような小さな取り組みを増やしていくことが現在、飛行機を運航する者にとって非常に重要になってくるのだと考える。

### 1.3.3 代替燃料と経済的手法の活用

2015 年 12 月に開催された国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議（COP21）ではパリ協定が成立した。これを受けて国際航空に関しては、国連の下部組織である ICAO に加え、IATA が CO2 排出削減のための目標と対策を示している。IATA は 2050 年時点における航空業界の CO2 排出量を 2005 年比で半減させるという目標を掲げていた。しかし直近の年次総会（2021 年 10 月 4 日）において IATA は、2050 年までに排出量を実質ゼロ化する目標を打ち出

した。これまでの2005年比から半減させる目標よりもさらに高いレベルの目標に設定し直した。このことからわかるように、航空のCO<sub>2</sub>排出削減の取り組みは現在進行形で進んでおり、環境に配慮した経営がより求められるような時代になっていることがうかがえる。

この目標達成のための削減対策として、1.3.1で述べた新技術の導入と1.3.2で述べた運航方式の改善だけでなく、更なる対策の柱としてICAOは国際民間航空のためのカーボン・オフセットおよび削減スキーム(Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation : CORSIA)を設定した。

この制度の将来展望についてSustainable Japanでは以下のように述べている。まず、2021年から2026年の第1段階では、自発的に参加意思を表明する国の航空会社に対してCO<sub>2</sub>排出量が割り当てられ、割当量より多くの温室効果ガスを排出した場合、排出権を購入する義務が課せられる。2027年から2035年の第2段階では、小規模排出国や後発開発途上国等の免除対象国を除いたすべてのICAO加盟国が参加を義務付けられる。2030年からは、CO<sub>2</sub>排出割当量の算出において、各航空会社の個別の削減努力が段階的に反映される仕組みに移行する予定となっている。このようにCORSIAはSAFの導入に加えクレジット購入等の経済的手法の活用を通して、二段階で導入されることになっている。(sustainablejapan.jp (2016))

## 1.4 航空機に使われる燃料

前節では航空業界のCO<sub>2</sub>排出削減の取り組みについて述べた。そもそも、航空業界がCO<sub>2</sub>の排出削減に取り組む必要があるのは、航空機を運航するために大量のCO<sub>2</sub>を排出しているためである。航空機に限らず自動車や電車も同様であるが、輸送機関はその大きな物体を動かすための動力源が必要である。航空機の場合は、今現在エネルギー効率が最も優れていると考えられる化石燃料由来のエネルギーを航空ジェット燃料として広く利用されている。既存の化石燃料に代わる環境に優しい新たなエネルギー源として将来的に期待され、開発が進められているものも多く存在する。

本節では、現在の航空用ジェット燃料に加えて、それ以外の代表的な代替燃料についてそれぞれ検討していく。

### 1.4.1 現在の航空用燃料～ケロシン～

現在世界中の定期輸送便に広く用いられている航空機燃料は、原油由来の燃料が用いられている。この化石燃料由来のジェット燃料は、原油から蒸留された油のなかでは灯油に近い性質を持ち、「ケロシン」と呼ばれる。

民間航空用ジェットエンジンに利用されるジェット燃料の規格としては、基本的に Jet-A と Jet-A 1 がある。実際の航空機の安全運航のためにジェット燃料は、アメリカ合衆国の標準化団体である米国試験材料協会（ASTM International）によって定められた ASTM D-1655 の規定に従う必要がある。規格の内訳としては、芳香族成分・硫黄分・引火点・氷点・発熱量・粘土・密度などで構成されている。この規格は化石燃料由来の燃料であることが前提条件として定められている。例えば、引火点は取り扱い上の安全を考慮した要件である。また、航空機は上空 10,000 メートルの氷点下の中を飛行するため、低温環境でも燃料が利用できる状態である必要があるため氷点に関しても規定がされている。また、特に国際線に関しては国をまたいだ運航がなされ、世界中の複数の事業者によって燃料を供給することになるため、このように世界基準の規定が定められていることは安全上必要な要件となっている。

### 1.4.2 水素

既存の化石燃料由来のジェット燃料は、昨今の原油供給における価格の不安定要因に加え、CO<sub>2</sub> 排出による環境負荷への影響に関する世界的な関心度の高まりから、航空ジェット燃料についても多様化が模索されている。1.4.1 で見てきた既存のジェット燃料は原油を精製して作られる化石燃料由来のものであるが、それ以外の方法で製造される燃料は代替燃料と呼ばれる。

そのうちの一つに水素がある。水素燃焼時の CO<sub>2</sub> 排出はゼロなので、水素を燃料とした航空機が最良の低炭素排出航空機として考えられる。しかし、水素を燃料とした航空機は実用化されていない。これにはいくつかの理由が存在する。一番の理由としては、エネルギー密度が低いことが挙げられる。液体水素の体積当たりのエネルギー含有量は 8.5(kJ/L)であり、既存のジェット燃料の 34.6(kJ/L)と比較すると、エネルギー密度はおおよそ 4 分の 1 である。二つ目の理由として、液体水素の保存管理方法が難しいことが挙げられる。液体水素の保存方法は超低温状態である必要がある。さらに、水素を航空機燃料として普及させるためには既存のサプライチェーンを一新する必要があることも大きな導入障壁となっている。航空機エンジンだけでなく、燃料の精製、輸送、貯蔵を含め全ての取り換える必要があるが、この転換を進めるためには莫大なコストがかかることが予想される。



水素燃料は、上記で示してきたように導入時の大きな壁が存在するため近い将来での定期運送便への普及は難しく、中長期以上の展望を要する燃料であると考えられる。しかし、水素燃料は実現できれば燃焼時の環境負荷が小さく、環境に配慮した最良の航空機燃料となりうる。時間をかけて開発が進み、技術的課題が解決されれば、液体水素燃料ジェット機の導入の可能性は充分にあると考えられる。

実際に大手航空機メーカーの一つであるエアバスは2020年9月に新たなゼロエミッション航空機「ZEROe」を発表した。これは、水素を燃料として飛行する航空機である（画像3）。まだコンセプト段階ではあるが水素が環境に優しい燃料として注目されていることは確かであり、定期運送便に導入されることもそこまで遠い未来の話ではないのかもしれない。

画像3



出典：Airbus ホームページ

<https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe>

### 1.4.3 電気

昨今の自動車業界においては、新たな形としてハイブリットカーや電気自動車が普及しており、私達の暮らしの中でも電気自動車専用の充電スタンドをよく目にするようになってきた。このように乗り物の電化が進む時代において、航空機に関しても電力で動く機体があるのではないかと考えるのは当然であり、数ある航空機代替燃料の中でも想起しやすい燃料の代表例だと考える。

現在、定期輸送便に用いられる大型の航空機には電力で動くものは利用されていないが、すでに小型飛行機においては電気を動力として用いることが可能である。実際に小型機に限定されるが、電気飛行機による飛行実験も行われている。

小型飛行機では電力を用いることが可能であり、それをそのまま大型航空機に応用すればいいのではないかと考えられるが、それ程単純なものではないと言われている。それにはいくつかの理由があり、最も大きな技術的課題はエネルギー密度である。最新のリチウムイオンバッテリーを利用したとしても、既存のジェット燃料に比べて30分の1程のエネルギー密度しかないとされている。既存のジェット燃料の体積と同じ大きさだけリチウムイオンバッテリーに置き換えたとしても、飛行に必要なエネルギーを供給することが出来ないという問題が生じる。

具体例として2021年1月現在において、世界最大の旅客機であるエアバス380(A380)にリチウムイオンバッテリーを搭載する場合を考える。このA380は、1度のフライトでおよそ600人の乗客を乗せて1万5000キロの距離を飛行することが可能である。しかし、ジェット燃料をそのままバッテリーに置き換えたとすると、たったの1000キロ程しか飛行できないとされている。また、既存のジェット燃料で飛行可能な従来の航続距離を保つためにバッテリーの体積を30倍にしたとしても、逆に重量が重くなりすぎて離陸することが出来ない計算になるとされている(Duncan Walker 2019)。

上記のエネルギー密度の技術的課題の他にも、水素燃料の場合と同様にサプライチェーンを一新する必要があり、莫大なコストを要することも大きな導入障壁の一つである。

#### 1.4.4 バイオ燃料

1.4.2や1.4.3で検討してきた通り代替燃料には水素・電気等もあるが、それぞれ解決すべき大きな課題があり、近い将来における中大型機を利用する定期輸送便への導入は難しいと考えられている。そのため、このような状況下で当面の間、中大型機の航空機に関しては従来と同様の液体ジェット燃料が必要となる見通しである。代替燃料として最も期待されているものの一つがバイオ燃料である。

バイオ燃料とは微細藻類や木質系セルロース(木材チップ、製材廃材や林地残渣)、などのバイオマス原料をもとに製造される燃料のことを指す。このバイオ燃料は、燃料の生成過程で生物が取り込んだCO<sub>2</sub>を燃料燃焼時に大気中に排出するため、大気中のCO<sub>2</sub>濃度を変化させない。いわゆるカーボンニュートラルで、既存の化石燃料由来の燃料の利用に比べて、CO<sub>2</sub>削減効果が期待されている。

1.3.3 で述べた通り、IATA は 2050 年での航空輸送における CO2 排出を実質ゼロにすることを目標として掲げているが、この目標の実現を目指す上で SAF のような環境負荷の小さい液体ジェット燃料の普及は不可欠であるとされている。次節では、この SAF に注目して詳しく検討する。

## 1.5 持続可能な航空燃料 (SAF)

### 1.5.1 SAF とは

SAF はケロシンと比べて、原材料の生産収集から、製造、燃焼までのライフサイクルの中で CO2 排出量を大きく削減させる効果を持つとされている。ICAO による実際の SAF の評価を見ると、化石燃料と比べた削減率は原料と製造プロセスの種類によって 26～94%と差があることが示されている (三菱総合研究所)。

また、現在実用段階に入っている SAF は既存のインフラをそのまま活用することができるドロップイン型のものであり、この点において SAF は導入しやすい特徴の一つである。

そもそも、航空代替燃料はドロップイン型と非ドロップイン型に区別される。ドロップイン型は、従来の航空ジェット燃料と同様の化学組成であり既存の機体やエンジンを含め全く同じサプライチェーンを利用することが出来る燃料である。このドロップイン型の航空代替燃料は開発が進み、近い将来定期運航便にも導入が期待されている。一方、非ドロップイン型は、既存の機体やエンジンなどをそのまま利用することが出来ない燃料である。この非ドロップイン型の航空代替燃料を普及させるためには既存のサプライチェーンを一新する必要があり、それには大きなコストもかかる。短期間での導入は困難であり、導入のためには長期的な展望を想定する必要がある。

### 1.5.2 SAF の認証制度

バイオジェット燃料が飛行機の燃料として利用されるためには、代替航空燃料の認証制度である ASTM International D7566 で認められている変換プロセスに該当するものでなければならない。国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) がまとめた技術戦略研究センターレポートによると、この認証制度でまだ認められていない新たなプロセスで生成される代替燃料を開発する場合はこの認証を取得する必要があり、その評価に 2、3 年を要するため、商用化に至るには数年先になるとされている。そのため現在、商用化に近い段階にあ

る代替燃料は全て ASTM International D7566 で認証されているプロセスから生成される燃料ということになる。現在この ASTM International D7566 で認証されている変換プロセスをまとめたものが下記の表4である。

表4 代替航空燃料認証制度 ASTM International D7566 認証状況

認証済 ANNEX NO.	変換プロセス	概要	申請企業
ANNEX 1	Fischer Tropsch (FT) FT法により精製される。	2009年9月 GTL (Gas to Liquid) 50%混合が承認された	SASOL(南アフリカ) Rentech (米国)
ANNEX 2	Hydroprocessed esters fatty acids (HEFA) 植物油などの水素処理により精製される。	2011年7月 Bio-SPK (Bio Synthetic Paraffin Kerosene) 50%混合が承認された  海外では商用化段階にある。	Chevron (米国) BP (イギリス) Phillips 66 (米国)
ANNEX3	Synthetic Iso-paraffin(direct sugar) (SIP) 発酵水素化処理糖類由来のイソ・パラフィン。	2014年6月 10%混合が承認された	AMYRIS (米国) TOTAL (フランス)
ANNEX4	Synthesized paraffinic kerosine plus aromatics (SPK/A) 有機物全般を対象とし、芳香族が入っているものをアルキル化するプロセス。(バイオ原油等)	2015年11月 非化石資源由来の芳香族をアルキル化した合成ケロシン	SASOL (南アフリカ) Rentech (米国)
ANNEX5	Alcohol to Jet (ATJ) アルコール・ジェット由来の合成パラフィンケロシン。	2016年1月 ブタノールto JET 30%混合が承認された 2018年4月 エタノールto JET 50%混合が承認された	GEVO (米国) Lanza Tech (米国)
ANNEX6	Catalytic hydrothermolysis jet (CHJ) 廃食油や植物油を超臨界水熱分解による不飽和脂肪酸の環化反応後、水素化処理及び脱酸素化することで燃料油を製造される。	2020年1月 50%混合が承認された	Chevron Lummus Global & Applied Research Associates(ARA) (米国)
ANNEX7	HydroCarbon-Hydroprocessed Esters Fatty Acids (HC-HEFA SPK) バイオ由来炭化水素の水素化処理により精製される。	2020年5月 10%混合が承認された	IHI (日本)

出典:NEDO 技術戦略研究センターレポート TSC Foresight (2020)

この ASTM International D7566 で認証されている7つの変換プロセスはそれぞれ異なるが全て航空ジェット燃料に利用される代替燃料であり、変換プロセスごとに混合率などの様々な規定が決められている。1.5.1で述べた通り、ドロップイン型の燃料は従来のインフラをそのまま活用することができる。この表4の混合率とは従来の化石燃料由来のジェット燃料に最大での割合まで SAF を混合させることができるかを示す規定である。現在の最大混合率は50%と定められている。というのも、特に航空機は地上約10,000メートルもの上空を多くの乗客を乗せて運ぶものであり、安全面が最も重視される。そのため、安全面を考慮して各変換プロセスにはそれぞれ適当な混合率が定められているのだ。

2021年12月1日にユナイテッド航空はエンジン2基のうちの1基に SAF を100%搭載した旅客便の運航を成功させた(この場合の SAF 搭載量は規定混合率における最大値である50%)。このように SAF を100%搭載したエンジンでの民間航空会社による旅客便の運航はこ

の運航が世界初とされている。SAF を 100%使用したエンジンによるフライトが成功したことで、従来の化石燃料由来のジェット燃料と差がないことが証明された。今後、技術的な進歩や SAF の安全性がさらに認められると、徐々に混合率の規制は緩くなり最終的には 100%SAF で飛ぶ航空機が旅客定期運送便にも登場することは十分に考えられる。

また、表 4 からわかる通り申請企業の多くは海外企業であり日本企業が少ない。そのような状況の中、2020 年 5 月に株式会社 IHI が日本企業の申請者として初の ASTM D7566 規格を取得した。これは高速で増殖する微細藻類を大量培養し、その微細藻類が生成する藻油をジェット燃料に変換するものであり、国際規格 ASTM D7566 Annex7 として認証された。このように日本の法人が申請した国際規格 ASTM D7566 を取得したことは日本のエネルギー産業において大きな一歩である。今後、徐々に世界中の航空会社が SAF を導入していくことが予想されるが、SAF の供給には限りがある。このように SAF が不足する状況はしばらく変わらないと予想されるため、今後世界中の航空会社が SAF を求めるときに供給量の少ない SAF の争奪戦が繰り広げられると想定される。だからこそ、国産 SAF の存在は日本の航空業界を発展させていくためにも重要な意味を持つことになると考えられる。

## 第 2 章 問題提起

### 2.1 SAF 導入に関する課題

#### 2.1.1 SAF の大量生産・大量供給

先述した通り、SAF は CO2 排出削減対策の柱として期待されているが、導入が本格的に進むためにはいくつかの課題がある。そのうちの 하나가、大量生産・大量供給である。

序章でも述べた通り、現在の SAF の供給量はジェット燃料需要全体の内たったの 0.03%であり、希少価値の高いものであることが分かる。SAF の大量生産に関しては ASTM International D7566 で認められている変換プロセスごとに課題点は異なるが、ほとんどのプロセスに共通する課題点として大規模生産が挙げられる。

## 2.1.2 SAFの販売価格低減

また SAF の製造コストは高く、それに伴い SAF の販売価格も割高である点も大きな課題の一つである。実際に現段階における SAF の販売価格はケロシンのおよそ 5~6 倍にもなると言われている。ケロシンの価格は、国際情勢や時期によって多少前後はするがおよそ 60 円/リットル程度であることを考えると、現時点における SAF の価格はおよそ 300 円台/リットルであることが分かる。

現在、日本では NEDO が製造コスト 120 円/リットルを目標とする技術開発を行っている。この目標が達成されたとしても、SAF はケロシンのおよそ 2 倍のコストはかかることになる。

## 2.2 問題提起

1.3.3 で述べた通り、ICAO や IATA は CO<sub>2</sub> 排出削減の目標を掲げ、世界中の航空会社に対して具体的な規制を要請している。2027 年からは CORSIA 制度への参加が義務化されることになり、ますます各国の航空会社は SAF の普及を進めていかなければならない状況になる。

しかし 2.1 で述べたように、SAF には大量生産や販売価格低減といった、大きな課題点が存在する。例えば油脂を生産する微細藻類からバイオジェット燃料を製造するプロセスを考えると、成長速度の速い藻体の開発と微細藻類の大量培養が今後の課題であり、これらの課題が解決され生産方法が確立されれば、燃料生産コストの低減に繋がるとされている。つまり、SAF の大量生産と販売価格の低減という 2 つの課題は切っても切れない関係性にあり、課題解決は技術的要素が多く含まれているため数年単位の時間を要するものであることが分かる。

実際に SAF がどのように定期運送便に導入されていくのかについて考えると、段階的なものになると予想される。そこで、今後 SAF をジェット燃料として搭載した航空機が実際に国内定期航空輸送に利用されるようになったときに、燃料調達コストはどのように賄うのがいいのかを次節から検討する。

## 第3章 政策提言

### 3.1 航空利用者に対する負担

#### 3.1.1 導入コストの負担の仕組みとその理由

SAFを導入する際にかかる燃料の調達コストをどのように賄うのが良いのかに関して私が考えた案は、航空会社がSAFの導入を普及させるためにかかる諸々のコストの一部を航空利用者が航空券購入の際に負担する仕組みの採用である。

航空利用者がSAFのコストの一部を負担する仕組みを提案する理由としては、乗客もSAF便を利用することで恩恵を受けるためである。先述の通り、現在世界中で環境に配慮した取り組みや経営が求められている流れがある。このような状況下でCO<sub>2</sub>排出が少ない航空機としてSAF便が運航されるようになると、利用客も移動手段として飛行機を利用することでCO<sub>2</sub>を多く排出させてしまっているという罪悪感が軽減される。それどころか飛行機のCO<sub>2</sub>排出が低減され環境に優しい移動手段であるということが証明されそのようなイメージが浸透すれば、環境に厳しい意見を持つ利用客も移動の際に率先して飛行機を利用するようになると考えられる。

このようにSAF便の利用客は一種の免罪サービスという形で恩恵を受けることになると考えられる。従来の化石燃料由来の燃料で飛んでいる便の航空券の料金よりもSAF便の航空券を高い料金設定にしても需要があると見込まれるため、SAFの導入コストの一部を航空利用者に負担してもらおうシステムを提案する。

#### 3.1.2 SAF便導入時のCO<sub>2</sub>削減効果

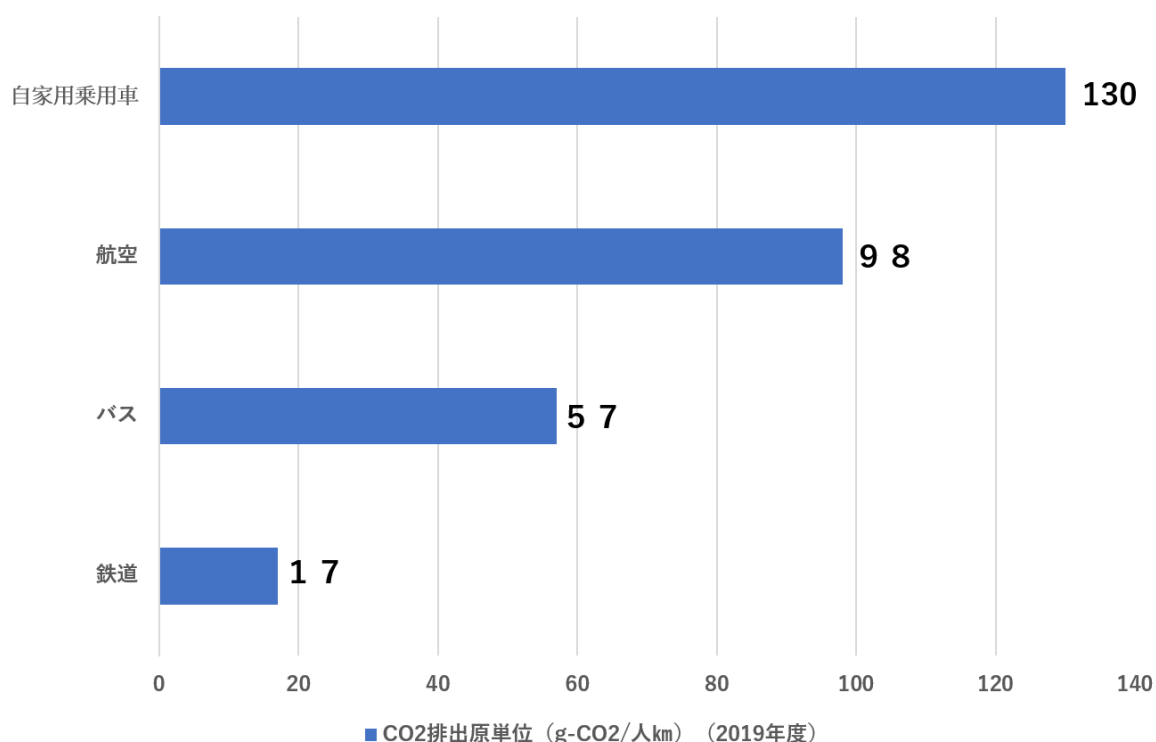
SAF便を導入した時に、化石燃料由来の燃料で飛ぶ従来便に比べてどの程度のCO<sub>2</sub>削減効果があるのかを検討する。

CO<sub>2</sub>削減効果を計算する際に、鉄道・バス・自家用乗用車など他の交通機関との比較を行いたい。また、できるだけシンプルで分かりやすい式で示したい。そこで、今回の削減効果の計算では、CO<sub>2</sub>排出原単位 (g-CO<sub>2</sub>/人km) を利用する。CO<sub>2</sub>排出原単位とは、一人を1km運ぶ際にどの程度のCO<sub>2</sub>を排出するのかという単位輸送量当たりの排出量のことである。

技術発展に伴い機体の軽量化やエンジン性能の向上などが起こると、今後 CO2 排出原単位は下がっていくと予想されるが、2019 年度における原単位のデータを今回の計算では利用する。

最新のデータを利用するのが適切だが、2020 年や 2021 年のデータだとコロナパンデミックの影響があり例年通りの値にならないため、新型コロナウイルス感染症の影響を受ける直前の 2019 年または 2019 年度のデータを利用する。

図 5 輸送量当たりの CO2 排出量 (旅客)



出典：国土交通省 運輸部門における CO2 排出量

求めたい CO2 排出原単位を X (g-CO2/人km) とすると、

$$X = 98 \times (1 - a/100 \times b/100) \dots \textcircled{1}$$

この式に出てくる 98 は、基準となる 2019 年度における航空の CO2 排出原単位である (図 5)。また a は SAF の CO2 削減率を指し、b は既存ジェット燃料に対する SAF の混合率を指している。

ここで、具体的な数値を用いて計算する。

CO2 削減率 80% の SAF を現時点における最大の混合率である 50% で混合する場合を考える。

a=80、b=50 を式①に代入すると、X=58.8(g-CO2/人km) となる。



この計算をより分かりやすく説明すると、CO<sub>2</sub>削減率 80%の SAF を 50%利用するので、 $98 \times 0.8 \times 0.5 = 39.2$ (g-CO<sub>2</sub>/人km) だけ CO<sub>2</sub> 排出原単位が削減される。そのため、CO<sub>2</sub> 排出原単位は  $98 - 39.2 = 58.8$ (g-CO<sub>2</sub>/人km) になるというものである。図 5 のデータからバスの CO<sub>2</sub> 排出原単位は 57(g-CO<sub>2</sub>/人km) なので、この場合の航空の CO<sub>2</sub> 排出原単位はバスの値と同等のものとなることが分かる。

### 3.1.3 SAF 便導入に伴う追加コスト

前項では、SAF 便導入時にどの程度の CO<sub>2</sub> 削減効果があるのかを示す計算方法を検討した。この項では SAF の調達コストを航空利用者に負担してもらう際、どの程度の航空券の販売価格増加が必要になるのかを検討していく。

航空利用者一人当たりどの程度の追加コストがかかるかを計算する際のデータに関しては、前項の計算と同様に新型コロナウイルス感染症の影響を受ける直前の 2019 年または 2019 年度のデータを利用する。また SAF の導入に際して、燃料貯蔵施設や運搬など燃料自体以外にも様々なコストがかかると予想されるが、本論文におけるコスト計算ではケロシンと SAF の 1 リットル当たりの価格差のみを対象として検討する。

求めたい SAF 導入に伴う利用客一人当たりの追加コストを Y (円/人) とすると、

$$Y = 426(\text{万 kL}) \times b / 100 \times c (\text{円/L}) \div 10,678(\text{万人}) \cdots \textcircled{2}$$

この式に出てくる 426(万 kL)は、基準となる 2019 年の国内定期航空輸送における年間ジェット燃料消費量である。また、b は前項と同様に既存ジェット燃料に対する SAF の混合率を指している。c は既存ジェット燃料と SAF の 1 リットル当たりの燃料価格差を指している。10,678 (万人) は、2019 年の国内定期航空輸送における年間旅客数である。年間ジェット燃料消費量と年間旅客数のデータは、いずれも国土交通省の航空輸送統計速報 (令和元年分) に掲載されている値を利用した。

旅客数とジェット燃料消費量は正の相関がある。すなわち国内定期航空輸送の利用者数が増加すれば、それに伴い必要なジェット燃料も増加する。そこでこの式②では基準となる年を 2019 年として設定することで、将来的に SAF が導入された時の利用客一人当たりの追加コスト Y (円/人) を検討する。

ここで、具体的な数値を用いて計算する。

3.1.2 の具体的数値と同様に、CO<sub>2</sub>削減率 80%の SAF を現時点における最大の混合率である 50%で混合する場合を考える。また 2.1.2 で述べた通り、日本では NEDO が製造コスト 120 円 /リットルを目標とする技術開発を行っているため、ケロシンと SAF の 1 リットル当たりの燃料価格差を 60 円として考える。

$b=50$ 、 $c=60$  を式②に代入すると、 $Y=1,197$  (円/人) となる。

以上、式①と式②の具体的数値を用いた計算からわかる通り、CO<sub>2</sub>削減率 80%の SAF を現時点における最大の混合率である 50%で混合する場合を考えると、CO<sub>2</sub> 排出原単位はバスの値と同等のものとなり、利用客一人当たりにかかる追加コストはおよそ 1,200 円ということになる。

#### 3.1.4 100%SAF の航空機の場合

この項では式①と式②を利用して、純粋な SAF 便すなわち 100%SAF を燃料として搭載した航空機が全ての国内定期航空輸送に使われた場合を検討する。

まず、CO<sub>2</sub> 排出削減効果について検討する。CO<sub>2</sub>削減率 80%の SAF を 100%搭載する場合なので、 $a=80$ 、 $b=100$  となる。これらを式①に代入すると  $X=19.6$  (g-CO<sub>2</sub>/人km) となる。図 5 のデータによると鉄道の CO<sub>2</sub> 排出原単位は 17(g-CO<sub>2</sub>/人km) なので、この場合の航空の CO<sub>2</sub> 排出原単位は鉄道の値と同等のものとなることが分かる。

次に、100%SAF 旅客機の導入に伴う利用客一人当たりの追加コストについて検討する。SAF を 100%搭載する場合なので、 $b=100$  となる。1 リットル当たりの燃料価格差  $c$  は前の計算と同様に 60 円として計算する。これらを式②に代入すると、 $Y=2,393$ (円/人)となる。

以上のように、CO<sub>2</sub>削減率 80%の SAF を 100%搭載した純粋な SAF が全ての国内定期航空輸送に使われた場合を想定すると、CO<sub>2</sub> 排出原単位は鉄道の値と同等のものとなり、利用客一人当たりにかかる追加コストはおよそ 2,400 円ということになる。

## 3.2 計算についての考察

3.1 では、SAF の導入を普及させるためにかかる諸々のコストの一部を航空利用者が航空券購入の際に負担する仕組みについて計算を用いて検討してきた。これらの計算から分かることを、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、3つの変数に分けてそれぞれ分析する。

まず、CO<sub>2</sub>削減率である  $a$  に関して検討する。この変数  $a$  は CO<sub>2</sub> 排出削減効果（式①）に影響を及ぼす値である。今回の計算では、全て SAF の CO<sub>2</sub> 排出削減率  $a=80$  として計算したが、1.5.1 で述べた通り原料と製造プロセスの種類によって 26~94%と大きな差があることが分かっている。これは技術的な問題にはなるが、CO<sub>2</sub> 排出削減効果に直結するものなので、今後実際に SAF が定期航空輸送に使われ始める際には、この CO<sub>2</sub> 削減率についても注視する必要がある。SAF の普及が進み技術開発が進み、削減率の高い原料を用いたプロセスが承認され大量生産されることが、今後期待される。

次に、SAF の混合率である  $b$  に関して検討する。この変数  $b$  は CO<sub>2</sub> 削減効果（式①）と SAF 導入に伴う利用客一人当たりの追加コスト（式②）のいずれにも影響を与える値である。今回の計算では 50%と 100%の 2 パターンでの計算をそれぞれ行った。1.5.2 で述べた通り、安全性の観点から現在最大混合率は 50%と定められているが、今後 SAF の安全性が証明されプロセスが承認されれば、その混合率の規制は弱まっていくと予想される。3.1.4 の計算で示した通り、将来的に 100%の SAF を搭載した航空機が実現されれば、鉄道と同等の CO<sub>2</sub> 排出原単位の値となる。この結果から、この混合率  $b$  は航空の CO<sub>2</sub> 削減効果に大きな影響を与えるものだと私は強く感じた。今後、100%SAF を搭載した旅客機が広く普及することが期待される。

最後に、既存ジェット燃料と SAF の 1 リットル当たりの燃料価格差である  $c$  に関して検討する。この変数  $c$  は SAF 導入に伴う利用者一人当たりの追加コスト（式②）に影響を及ぼす値である。今回の計算では、全て燃料価格差  $c=60$  として計算した。これは (2.1.2) で述べた通り、NEDO が製造コスト 120 円/リットルを目標とする技術開発を行っているためである。現在 SAF は十分に市場流通段階にあるわけではなく価格も高いため、将来的に普及が進んだ段階における予想にはなってしまう。しかし、今回の計算から分かる通り  $c=60$  の場合、SAF 導入に伴う利用客一人当たりの追加コストは、混合率にもよるが 1,000 円から 2,000 円程度であることが分かった。これは、十分に利用客も利用したいと思うような追加価格帯だと考えられる。

## 第4章 経済学的分析

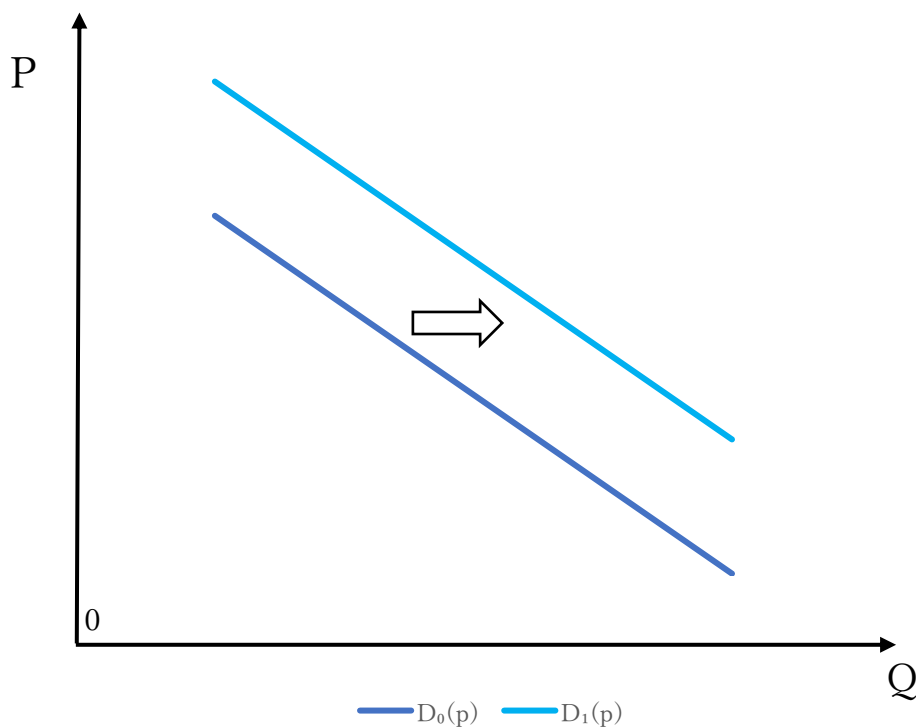
### 4.1 シミュレーション分析

本章では、前章で述べてきた SAF 便の CO2 排出削減効果と利用客一人当たりの追加コストに基づいて、SAF 便を導入した場合の経済学的分析を行う。航空利用者（需要サイド）と航空会社（供給サイド）の両面からパラメータを用いてシミュレーション分析を行い、その結果について考察を行う。

#### 4.1.1 航空利用者（需要サイド）

まず、SAF 便を利用する航空利用者（需要サイド）における分析を行う。従来の航空機（ケロシンを搭載した航空機）における、需要関数を  $D_0(p) = -ap + b$  とする。その上で、SAF 便を利用したいと考える環境意識の高い利用客の場合を考える。この時、航空券の価格が少し上がったとしてもその分だけ CO2 排出が減り環境に優しくなるのであれば利用したいと考えたと予想されるため、需要関数を  $D_1(p) = -ap + b + g(\theta)$  とする。この式における  $g(\theta)$  は SAF 便を利用することで変化する分の変数を表す。このように SAF 便を利用したいと考える人考えた場合、右肩下がりの需要曲線は右にシフトすることになる(図6)。

図 6



出典：筆者作成

#### 4.1.2 航空会社（供給サイド）

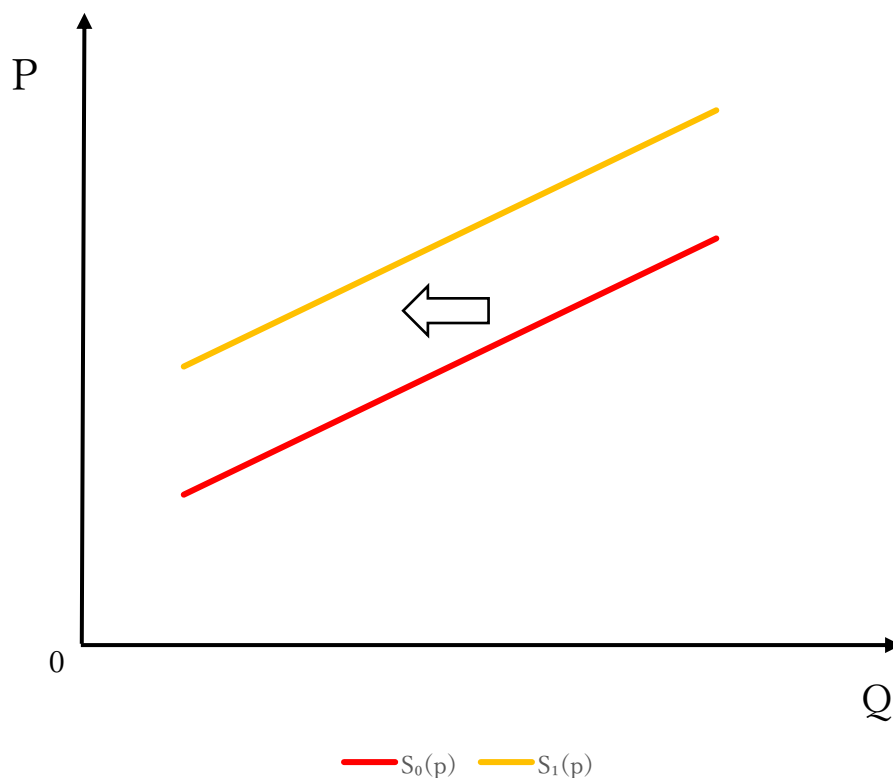
この項では、SAF 便を提供する航空会社側（供給サイド）における分析を行う。

まず従来の航空機における、限界費用を  $MC = c p - d$  とする。

この限界費用は供給関数であり  $S_0(p) = c p - d$  となる。

その上で、SAF 便の提供における供給関数は  $S_1(p) = c p - d - e(\theta)$  とする。ここで新しく出てきた  $e(\theta)$  という変数は、ジェット燃料を SAF に変換したことで生じる追加コスト分を指している。このように SAF 便の提供を考えた場合、右肩上がりの供給曲線は左にシフトすることになる（図7）。

図7



出典：筆者作成

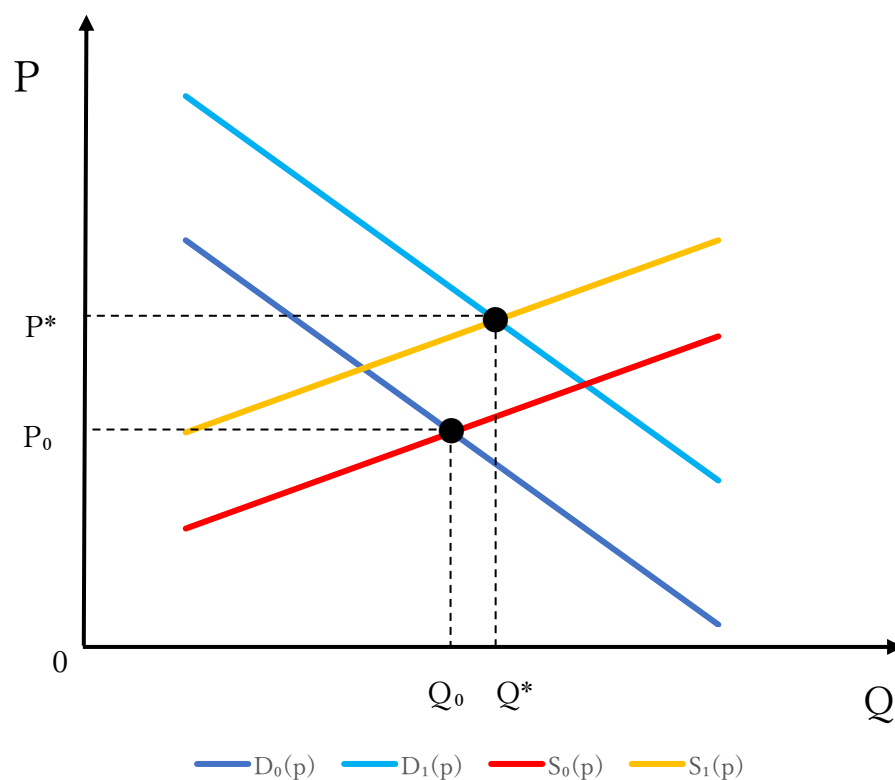
### 4.1.3 均衡価格

前項までは需要曲線と供給曲線をそれぞれ分けて考えたが、この項ではこれらを合わせて均衡点を求める。まず、従来の航空機における均衡点は  $D_0(p) = -ap + b$  と  $S_0(p) = c p - d$  が交わる点である (図 8)。この点における均衡価格を  $P_0$ 、均衡取引量を  $Q_0$  とする。  $D_0(p)$  と  $S_0(p)$  の 2 式より、  $P_0 = (b + d) / (a + c)$ 、  $Q_0 = -a \{(b + d) / (a + c)\} + b$  となる。

次に、SAF 便を導入する際の均衡点を求める。これは  $D_1(p) = -ap + b + g(\theta)$  と  $S_1(p) = c p - d - e(\theta)$  が交わる点である (図 8)。この点における均衡価格を  $P^*$ 、均衡取引量を  $Q^*$  とする。  $D_1(p)$  と  $S_1(p)$  の 2 式より、  $P^* = (b + d + g(\theta) + e(\theta)) / (a + c)$ 、  $Q^* = -a \{(b + d + g(\theta) + e(\theta)) / (a + c)\} + b + g(\theta)$  となる。

$P_0$  と  $P^*$  を比較することにより、環境意識の高い利用客が SAF 便を利用し航空会社が SAF 便を提供することで、均衡価格は  $(g(\theta) + e(\theta)) / (a + c)$  だけ上昇する。また、均衡取引量は  $-a \{(g(\theta) + e(\theta)) / (a + c)\} + g(\theta)$  だけ変化する。

図 8



出典：筆者作成

価格に関して、SAF 便を導入することで需要曲線は右にシフトし供給曲線は左にシフトするため自ずと均衡価格は上昇する ( $P_0 < P^*$ )。一方取引量は、図 8 における需要曲線と供給曲線の傾きにより均衡取引量  $Q_0$  と  $Q^*$  の大小関係は変化する。

前章の政策提言における計算より、SAF を 50% 混合させた場合は利用客一人当たり 1,200 円の追加コスト、SAF を 100% 混合させた場合は 2,400 円の追加コストがかかることが分かった。一方、需要関数において環境意識の高い人がどのくらいの追加コストを支払って SAF 便の利用を考えるのかについて検討するために航空利用者に対するアンケートを実施した。このアンケート調査に関しては次節で述べる。

## 4.2 アンケート調査

前節のシミュレーション分析において、パラメータを利用した均衡価格と均衡取引量を求めた。これに対して、実際の航空利用者はどの程度の追加コストを支払って SAF 便の利用を考えるのかという需要サイドにおける具体的な分析を行う。環境に優しい SAF 便というサービスに対して、航空利用者はどの程度の追加金額であれば、自ら喜んで利用したいと考えるのかという WTP を求める。

この WTP を求める手段として、「Google フォームを利用した航空利用者へのアンケート」を実施した。日本における航空利用者全体の縮図となるような高度なアンケート調査を実施することは難しいと考えたため、私の身の回りにいる知り合いから直接回答を集めた。今回集計するデータは全有効回答者数 77 人の内、現役大学生の回答 52 人を扱うものとする。

その調査結果をまとめたものが下記の表 5 である。

表 5

	グループ A (22 人)	グループ B (30 人)	合計 52 人
50%SAF 便	490 円	1,600 円	1,130 円
100%SAF 便	927 円	2,640 円	1,915 円

出典：筆者作成

表5の結果は全て各グループの平均値を記載している。グループA「環境問題に対する自身の意識が比較的低いと答えた学生」は22人、グループB「環境問題に対する自身の意識が比較的高いと答えた学生」は30人であった。

・50%SAF便（50%のSAFを搭載することでCO2排出量がバスと同程度まで下がる航空機）の場合のWTPは、Aグループが490円、Bグループが1,600円、全体で1,130円という結果になった。

・100%SAF便（100%のSAFを搭載することでCO2排出量が鉄道と同程度まで下がる航空機）の場合のWTPは、Aグループが927円、Bグループが2,640円、全体で1,915円という結果になった。

今回の調査結果から、環境問題に対する回答者の意識の程度はSAF便に対するWTPに大きく反映されることが分かった。また、学生に比べて社会人のWTPの方がより高い値となる傾向にあることが分かった。この理由の一つとして、単純に社会人は学生に比べて環境意識が高まる傾向になることも考えられる。また、学生に比べて自ら働き稼ぐ社会人の方が所得に余裕があることも理由の一つではないかと考えられる。実際に、学生の回答者の中からは「費用は可能な限り抑えて飛行機を利用し旅行を楽しみたい」という意見が多く寄せられた。



## 終章

世界的な環境問題に対する取り組みの注目度が高まる状況の中、航空業界も CO2 排出量削減のために様々な取り組みを行っている。本論文では、特に SAF と呼ばれるバイオジェット燃料に関する将来性について CO2 排出削減効果と導入に伴う追加コストを、経済学的分析を交えて分析した。

本論文の分析を通して、全ての国内定期運送便の半分の燃料を SAF に置き換えた場合、航空の CO2 排出原単位はバスと同等のものとなり、利用客一人当たりおよそ 1,200 円の追加コストがかかることが分かった。また、全ての国内定期運送便におけるすべての燃料が SAF に置き換えられた場合、航空の CO2 排出原単位は鉄道に近い値となり、利用客一人当たりにおよそ 2,400 円の追加コストがかかることが分かった。将来的に SAF の製造が拡大し、大量生産・大量供給が可能になった場合の分析を行った。もちろん、SAF のみを頼って CO2 排出実質ゼロという目標を達成することは不可能であるため、1.3 で述べた通り複合的な取り組みが航空業界には求められている。

実際の航空利用者はどの程度の追加コストを支払って SAF 便の利用を考えるのかという需要サイドにおける WTP の分析は、大学生に限定した回答を集計して計算した。本来であれば日本における航空利用者全体の縮図となるような形でアンケート調査を実施することがベストであると考えられるため、今回のアンケート結果のみから WTP を正確に分析することには限界がある。しかし今回のアンケート調査を通して、グループ B「環境問題に対する自身の意識が比較的高いと答えた」は WTP が高くなることが分かった。

また本論文で詳しくは触れなかったが、飛行機は移動に要する時間がバスや電車に比べてはるかに短いという点も重要な要素である。例えば、東京-大阪間、東京-福岡間などの国内長距離移動の際、バスや電車ではなく飛行機を利用することで時間の節約になることは確実である。すなわち、飛行機ではなくバスや電車を選択したことで生じる機会費用も考慮に入れて移動手段を選択するのが良いのではないかと考える。利用者が“時間”・“お金”・“環境”等のような要素を重視するのかによって移動手段は変わってくる。今後、航空業界で SAF が順次導入されていくことで飛行機の環境負担レベルはバスや電車の値に近いものとなっていく。こうなることで、長距離移動者の移動手段の選択肢も現在とは変わってくるのではないだろうか。

SAF が十分に普及していくまでにはある程度の時間がかかるため長期的な展望が必要とされるが、本論文の考察が航空業界における CO2 排出削減への取り組みの一助になり、今後の航空業界の持続可能な発展に繋がることを祈って本論文を締めくくる。

## 参考文献

### 【WEB】

- ・国土交通省 航空局 航空分野の低炭素化（CO2 排出削減）について（2014）  
<https://www.mlit.go.jp/common/001027544.pdf>  
参照 2022.3.6
  
- ・国土交通省 航空局 航空分野における CO2 削減の取組状況（2021）  
<https://www.mlit.go.jp/common/001403136.pdf>  
参照 2022.3.6
  
- ・国土交通省 航空局 航空を巡る最近の状況（2021）  
<https://www.mlit.go.jp/common/001403131.pdf>  
参照 2022.3.6
  
- ・国土交通省 我が国の LCC 旅客数の推移（2020）  
<https://www.mlit.go.jp/koku/content/001403295.pdf>  
参照 2022.3.6
  
- ・国土交通省 羽田空港のこれから  
<https://www.mlit.go.jp/koku/haneda/>  
参照 2022.3.6
  
- ・国土交通省 運輸部門における二酸化炭素排出量  
[https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei\\_environment\\_tk\\_000007.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html)  
参照 2022.3.6
  
- ・国土交通省 航空輸送統計速報（令和元年（2019 年）分）  
<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001333684.pdf>  
参照 2022.3.6
  
- ・公益財団法人 航空機国際共同開発促進基金 航空機燃料の将来  
<http://www.iadf.or.jp/document/pdf/21-5.pdf>  
参照 2022.3.6
  
- ・Sustainable Japan 最新ニュース（国際）ICAO 総会、国際線への温室効果ガス排出削減制度で画期的な合意。排出権購入を義務化（2016.10）  
<https://sustainablejapan.jp/2016/10/24/icao-gmbm-corsia/24018>  
参照 2022.3.6

・ ICAO ENVIRONMENT Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) ICAO

<https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>

参照 2022.3.6

・ 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センターレポート TSC Foresight (2020年7月)

<https://www.nedo.go.jp/content/100920836.pdf>

参照 2022.3.6

・ 一般社団法人 日本航空機開発協会 (2020) 「民間航空機に関する市場予測 2020-2039」

[http://www.jadc.jp/files/topics/157\\_ext\\_01\\_0.pdf](http://www.jadc.jp/files/topics/157_ext_01_0.pdf)

参考 2022.3.6

・ 川崎重工技報・179号 (2018年5月) 技術解説 最新鋭大型旅客機「ボーイング777X」

<https://www.khi.co.jp/rd/magazine/pdf/179/n17903.pdf>

参考 2022.3.6

・ Duncan Walker(2019) 「Electric planes are here – but they won't solve flying's CO<sub>2</sub> problem」

<https://theconversation.com/electric-planes-are-here-but-they-wont-solve-flyings-co-problem-125900>

参考 2022.3.6

・ 全日本空輸株式会社、日本航空株式会社共同レポート 2050年 航空輸送におけるCO<sub>2</sub>排出実質ゼロへ向けて (2021.10) <https://www.anahd.co.jp/group/pr/pdf/20211008-1-1.pdf>

参照 2022.3.6

・ 三菱総合研究所 「成長を続ける航空輸送産業とバイオジェット燃料の可能性」

<https://www.mri.co.jp/knowledge/column/20200227.html>

参照 2022.3.6

・ 日本航空大学校北海道新千歳空港キャンパス 「コロナを乗り越えた先にある航空業界大躍進」

<https://www.jaa-tech.jp/information/15775/>

参照 2022.3.6

**【論文】**

・原太智、増田和央、茅野昭、稲葉敦「エコツーリズムの CO2 排出量の計算」  
『第 5 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集』 p.2-70,2010 年 3 月

・鈴木崇正、室町泰徳「定期民間航空による CO2 排出量の現状と将来予測に関する基礎的研究」『土木  
計画学研究・論文集』 26 巻 3 号,2009 年 9 月

**【書籍】**

・赤木功・石見俊久・徳永俊二・葭田雄二郎・天岡和昭, 新航空工学講座 第 4 巻 航空機材料, 社団法人  
日本航空技術協会, 2001.

・松岡増二, 新航空工学講座 第 8 巻 ジェット・エンジン (構造編), 社団法人 日本航空技術協会,  
1993.

## あとがき

私は幼いころから空が好きで、いつしかパイロットになることが将来の夢になっていました。自らの将来の仕事に関わることである上、何よりも心から自分が楽しんで取り組めると思い、卒業論文のテーマは航空機に決めました。論文でも述べたように、各分野で環境への取り組みが重要視されている 2022 年現在、航空業界においても CO2 排出削減は世界中で興味や関心を持たれているとてもホットな話題です。自然環境に対する航空業界の新しい在り方が問われているこの時期に、自らの興味のある内容と合致し本論文を執筆することができ、とても良かったと改めて感じます。

進学の関係で私は一足先にゼミを離れることになり最後の授業に参加することはできませんでしたが、先生は最後まで論文に関する相談をオンラインで対応してくださいました。論文作成にあたって幾度もアドバイスをくださった大沼あゆみ先生に感謝を申し上げます。またゼミの授業では、卒業論文の進捗発表を通してゼミ生から多くの建設的な意見や指摘を受けたことで、より良い形で本論文を完成させることができました。ゼミの授業でともに同じ時間を過ごした先輩、後輩、同期の皆さん、さらに本論文作成にご協力してくださいました全ての方にも心から感謝を申し上げます。ありがとうございました。