

国内エアラインにおける SAF 導入の費用便益分析

東京大学公共政策大学院
公共政策の経済評価 2024 年度
最終報告書

紺野 誉（東京大学公共政策大学院経済政策コース 修士 1 年）
鈴木 元（東京大学公共政策大学院経済政策コース 修士 1 年）
張 雨瀟（東京大学公共政策大学院経済政策コース 修士 1 年）
藤澤 実波（東京大学公共政策大学院経済政策コース 修士 1 年）

目次

要旨	3
はじめに	4
1. 現状分析と問題意識	4
1.1. 現状分析	4
1.1.1. カーボンニュートラル目標と SAF	4
1.1.2. SAF の種類と概要	5
1.1.3. 日本政府の方針	6
1.1.4. 世界の SAF 推進施策	8
1.1.5. 日本と世界での SAF 製造の取り組み	9
1.2. 問題意識：採算性の課題	10
2. 先行研究および本研究の位置づけ	11
2.1. 先行研究	11
2.2. 本研究の位置づけと新規性	12
3. 分析のフレームワーク	12
3.1. モデル化	12
3.1.1. シナリオの設定	12
3.1.2. 2つの市場における余剰の変化	13
3.1.3. 市場ではとらえきれない費用、便益	14
3.2. 前提条件の整理	15
3.2.1. SAF の導入割合	16
3.2.2. SAF の製造コストの推移	16
3.2.3. SAF の原料調達	16
3.2.4. 管理費用の扱い	17
3.3. SAF を全て輸入する際の費用便益分析	18
3.3.1. 市場での余剰の変化	18
3.3.2. オフセット義務量減少便益	22
3.3.3. 燃料供給者の管理費用	23
3.3.4. 初期費用	24
3.4. SAF を全て自国生産する際の費用便益分析	25
3.4.1. 市場での余剰の変化	25
3.4.2. 燃料供給者の管理費用	26
3.4.3. 初期費用	26

3.5.	感度分析の設定	28
3.5.1.	SAF の製造コスト	28
3.5.2.	需要曲線	29
3.5.3.	CORSIA の適格クレジット価格	29
3.5.4.	当事者適格	30
4.	分析結果.....	31
4.1.	基本分析の結果.....	31
4.1.1.	SAF を全て輸入する場合（with-A）	31
4.1.2.	SAF を全て自国生産する場合（with-B）	31
4.2.	感度分析の結果.....	32
4.2.1.	SAF を全て輸入する場合（with-A）	32
4.2.2.	SAF を全て自国生産する場合（with-B）	33
5.	まとめ	33
5.1.	結論	33
5.2.	政策提言	34
5.3.	分析の限界と今後の研究課題.....	34
	謝辞	35
	参考文献.....	36

要旨

航空業界のカーボンニュートラル実現に向け、持続可能な航空燃料（Sustainable Aviation Fuel, SAF）の導入が各国政府や国際機関により推進されている。日本でも脱炭素化の一環として SAF の活用が進められているが、生産技術や設備は未成熟であり、製造コストが従来燃料より高く、燃料価格の上昇や航空業界の負担増などの課題が指摘されている。こうした状況を踏まえ、本研究では、SAF の導入が単なる環境対策にとどまらず、日本経済全体にとって実益に見合うかを定量的に検証する。

本研究では、国内エアラインの燃料を SAF に置き換えた場合の費用便益を評価するため、SAF を 100%輸入するケース（with-A）と 100%自国生産するケース（with-B）の 2 つのシナリオを設定し、費用便益分析を実施した。また、感度分析では、SAF の製造コスト、需要の価格弾力性、カーボンクレジットの価格変動を考慮し、ベストケースとワーストケースにおける費用と便益を比較した。

SAF 導入に伴う航空燃料調達コストの上昇による消費者余剰の減少が非常に大きなものとなり、全てのケースで純便益が負となった。また、自国生産型の with-B ケースのように SAF を自国生産する場合でも、原材料を海外に依存する場合、日本の純便益は SAF を輸入する場合と比較して大きく改善しないことが示された。これは、国内生産による付加価値が、原材料の輸入に伴う海外への支払いによって相殺されるためである。

これらの結果から、SAF の製造コストの低減が極めて重要であり、そのための政策的介入の必要性が示唆された。また、自国生産を推進する場合には、原料の国内調達や、国産化が比較的容易な製造技術の導入を検討する必要がある。さらに、これらの手法によるコスト削減が、自国生産に伴う初期投資の増加を上回るかどうかについては、SAF の製造コストの将来的な変動を精緻に予測し、社会的便益と費用を総合的に評価した上で、経済合理性に基づいた政策決定を行うことが求められる。

表 1：費用便益分析結果まとめ（上段：社会的純便益(NSB)（億円）下段：B/C）

	基準ケース	変動ケース			
		当事者適格：国		当事者適格：政府など	
		ベスト ケース	ワースト ケース	ベスト ケース	ワースト ケース
with-A (100%輸入)	-16373.94 (0.02)	-7453.08 (0.21)	-26988.88 (0.00)	-15967.03 (0.11)	-51589.93 (0.00)
with-B (100%自国生産)	-19287.29 (0.01)	-11258.07 (0.15)	-29381.32 (0.00)	-19813.59 (0.09)	-52736.68 (0.00)

出典：著者作成

はじめに

航空業界における温室効果ガス排出の削減は、カーボンニュートラル実現に向けた喫緊の課題であり、各国の政策や業界の取り組みが加速している。特に、化石燃料の代替として期待される持続可能な航空燃料（Sustainable Aviation Fuel, SAF）は、従来のジェット燃料と比較して CO2 排出量を大幅に削減できることから、航空業界の脱炭素化を推進する上で不可欠な技術とされている。日本においても、政府が「2050 年カーボンニュートラル」目標を掲げる中、航空業界における SAF 導入が政策課題として位置付けられ、多額の予算が投じられている。

本研究では、国内エアラインの燃料を SAF に置き換えることの費用便益を分析する。まず、航空業界の現状や SAF 導入の課題を整理し、既存研究との比較から本研究の位置づけを明確にする。その上で、SAF の「輸入」と「自国生産」の 2 シナリオを設定し、それぞれの経済的影響を評価する。さらに、感度分析を通じてコスト変動などが費用便益に与える影響を検討し、政策的示唆を導出する。

1. 現状分析と問題意識

1.1. 現状分析

1.1.1. カーボンニュートラル目標と SAF

航空業界では、現在も石油由来のジェット燃料が主流として使用されている一方で、地球温暖化対策が喫緊の課題となっている。2021 年には、世界の航空会社で構成される業界団体である国際航空運送協会（IATA）、2022 年には国連の専門機関である国際民間航空機関（ICAO）がそれぞれ、2050 年までに CO2 排出量をネットゼロにする長期目標を設定した。この目標の達成に向け、ICAO は「4 つの対策（Basket of Measures）」として、①持続可能航空燃料（SAF）の導入、②新技術の開発、③運航方式の改善、④市場メカニズムの活用を掲げており、これらを包括的に組み合わせる必要があると提言している¹。ICAO による野心的なシナリオでは、2050 年時点での CO2 削減寄与度は SAF が 55%と最も高く、新技術が 21%、運航改善が 11%となっており、SAF の導入は航空業界の脱炭素化において最も効果的な手段であると位置付けられている²。2023 年 11 月に開催された ICAO の代替燃料に関する第 3 回会合では、2030 年までに SAF の利用による 5%の炭素削減を目指す中間目標が設定されるなど、SAF 導入を加速させる必要性が各国に改めて示された³。

日本国内においても、SAF の導入はカーボンニュートラル達成に向けた重要な要素として注目されている。JAL（日本航空）と ANA（全日本空輸）の共同レポートでは、日本がカー

¹ ICAO Secretariat (2019)

² ICAO (2022a)

³ 資源エネルギー庁 (2024a)

ボンニュートラルを実現するために必要な SAF の供給量は最大で約 2,300 万キロリットルに達すると試算されており、量産化と普及が急務とされている⁴。

1.1.2. SAF の種類と概要

SAF とは、廃食油、微細藻類、木くず、さとうきび、古紙などを主な原料として製造される、「持続可能な航空燃料」である。例えば、バイオジェット燃料は、燃焼させると CO₂ を排出するが、そのもととなるバイオマスは CO₂ を吸収するため、製品サイクル全体で見た際に、化石燃料から製造した従来のジェット燃料と比べて CO₂ 削減効果がある。SAF には主に 4 つの精製手法があり、それぞれによって原材料や、製造コストなどが変わってくる。この節ではそれぞれの手法についての概要を説明する。

HEFA

HEFA(Hydro processed Esters and Fatty Acids)とは、廃食油、牛脂、ポンガミア、微細藻類などを原料とする製造方法である。それらの原料から採取した油脂を、高温高压の水素を用いて分子を適切な大きさに分解することでジェット燃料を製造する。運輸総研のレポートによると、廃棄油脂由来の SAF のライフサイクル GHG 削減量は 84%であり、油糧作物由来のそれは 75%となっている⁵。現状の SAF 生産の大部分はこの製法によって行われている⁶。

ATJ

ATJ(Alcohol to jet)とは、さとうきび、とうもろこし等から作られる第一世代バイオエタノールと、非可食植物、古紙、廃棄物等から作られる第二世代バイオエタノールなどを原料とする製造方法である。農業残渣由来の SAF のライフサイクル GHG 削減量は 67%であり、森林残渣由来のそれは 91%となっている⁷。現状この製法による生産量は少ないが、将来的に生産量が増加することが見込まれている⁸。

PtL

PtL(Power to liquid)とは、e-fuel と呼ばれており、二酸化炭素と水素を原材料とする製造方法である。現在は水素を化石燃料から生成し、CO₂ は工場から排出されるものを回収しているが、将来的に水素は水を電解することで調達し、CO₂ は大気中から収集することで、GHG 排出量を大幅に削減することができるとされている。水素と二酸化炭素を合成ガス化し、FT 合成を行うことで、ジェット燃料を生成する。PtL の SAF のライフサイクル GHG 削減量は 69%となっている⁹。現状この製法による生産量は少ないが、将来的に生産量が増加することが見込まれている¹⁰。

⁴ 全日本空輸株式会社、日本航空株式会社 (2021)

⁵ 運輸総合研究所 (2022a)

⁶ 資源エネルギー庁 (2024a)

⁷ 運輸総合研究所 (2022a)

⁸ 資源エネルギー庁 (2024a)

⁹ 運輸総合研究所 (2022a)

¹⁰ 資源エネルギー庁 (2024a)

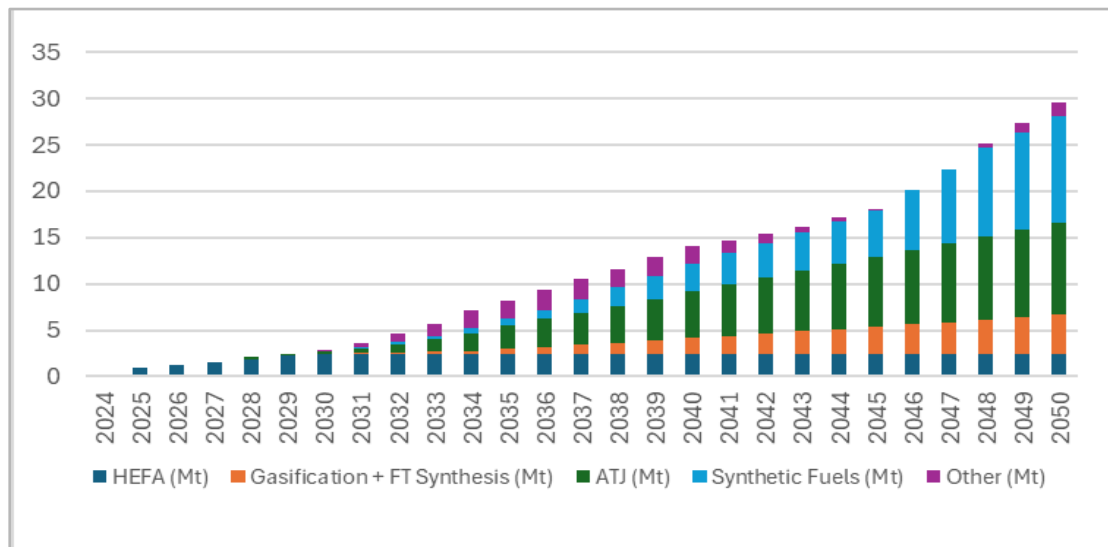
ガス化・FT 合成

原料は廃木材や林地残材、農業廃棄物、紙ごみなどバイオマス全般が想定されている。これらの原料を蒸し焼きにしてガスにしたあと、フィッシャー・トロプシュ法（FT 合成法）という方法でガス分子を結合させて、灯油と同じパラフィン構造の液体燃料にする方法である。この方法は炭素や水素を多く含んで複雑な構造をしたバイオマスを、炭素 1 個の分子と水素分子にいったんしたうえで、再びつなぎ合わせて液体の燃料とするものである。ガス化・FT 合成の SAF のライフサイクル GHG 削減量は 75%となっている¹¹。

各手法の今後の製造量予測

各手法の製造量の予測は以下のグラフのとおりである。（ただし、正確な数値のデータが入手できなかったため、グラフから目測で読み取り、それによる大まかな数値で代用した。）

図 1：SAF の技術ごとの製造量予測



出典：資源エネルギー庁.(2024).「2030 年における持続可能な航空燃料（SAF）の供給目標量の在り方」をもとに著者作成

1.1.3. 日本政府の方針

SAF の導入割合は世界的な議論の的となっており、世界経済フォーラムで設立された“Clean Skies for Tomorrow Coalition”では 2021 年 9 月に「世界の航空業界で使用する燃料における SAF の割合を、2030 年までに 10%に増加させること」が宣言された¹²。これを受け、日本政府は同年 12 月の「航空機運航分野における CO2 削減に関する検討会」において、国全体として「本邦エアラインによる燃料使用量の 10%を SAF に置き換える」旨を確認した¹³。

¹¹ 運輸総合研究所 (2022a)

¹² 資源エネルギー庁 (2024b)

¹³ 資源エネルギー庁 (2024a) p.6

日本政府は、SAF 導入には「原料調達」「製造」「利用」の 3 フェーズがあり、図 2 のように一つひとつのフェーズに複数の政策手法を検討している。各手法は表 2 のように内容や政策効果が異なるが、いずれも単独で実行されるよりは複数の政策を同時に展開することが通常である。政策効果が高いと見込まれる「直接的手法」について、すでにノルウェーやスウェーデンなどがジェット燃料メーカーに導入義務を課した例はあるが、現在の日本では導入義務を課していない。

なお、本レポートではいずれの政策オプションも原則実行しないケースを想定しているが、後述する SAF 製造技術開発や製造設備にかかる「初期投資費用」は政府が負担すると仮定していることから、製造面で経済的手法が活用されたと仮定することができる。

図 2：SAF の導入プロセスと政策手法の例¹⁴



出典：著者作成

表 2：代表的な政策オプションの概要¹⁵

手法	政策オプション	内容	効果
R&D 支援	原料調達実証/ 技術開発実証	新たな原料調達手法・技術の開 発に対する実証支援・補助	中
直接的手法	需要者・供給者に 対する導入義務	ジェット燃料市場の プレイヤーに対する SAF 導入割合の義務付け	高
経済的手法	建設支援/ 税制優遇	政府などの公的機関による 金銭的支援	中～高
誘導的手法	SAF 利用時の CO2 削減カウント	SAF 利用時の CO2 排出量を 0 とする	低

出典：著者作成

¹⁴ 運輸総合研究所 (2022a) p.16 をもとに著者作成。

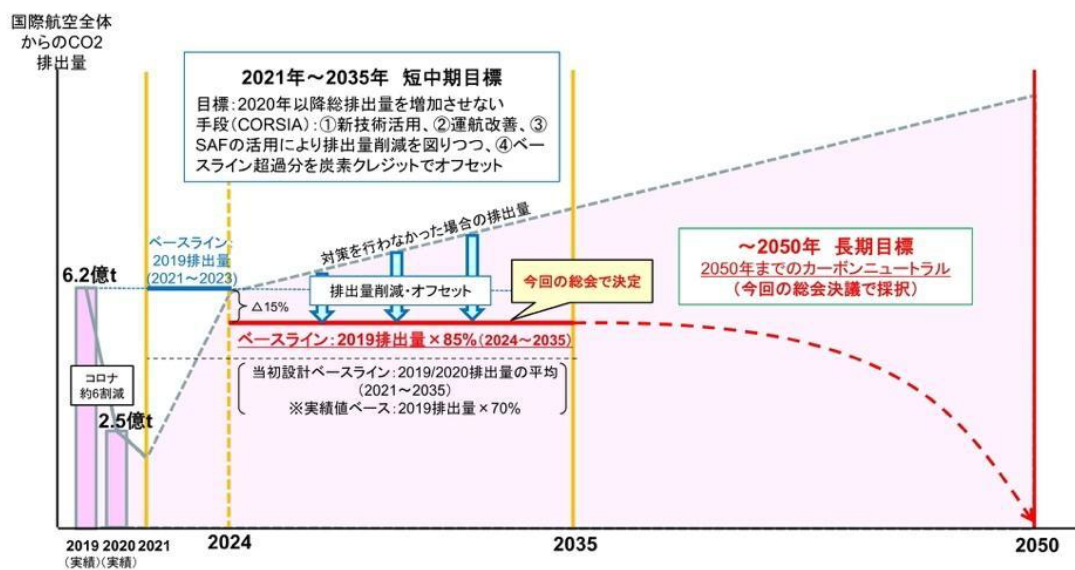
¹⁵ 運輸総合研究所 (2022a) p.28-29 をもとに著者作成。

1.1.4. 世界の SAF 推進施策

国際的な枠組み：CORSIA

SAF の普及に向けた国際的な枠組みは大きく進展している。ICAO は、市場メカニズムを活用した排出削減スキーム「CORSIA（Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation）」を 2016 年に採択し、2021 年に運用を開始した。この制度では、免除対象国¹⁶を除き、参加国の航空会社にカーボンオフセットの義務が課されている。具体的には、SAF の活用などによる排出量削減を図りつつ、2019 年の排出量基準の 85%を超過した国際線の CO₂ 排出量は、カーボンクレジット¹⁷を購入しオフセットする必要がある（図 3 参照）。2026 年までは ICAO 加盟国による自発的な参加を原則としており、現在、日本を含む 126 カ国が参加している。2027 年以降は制度が第 2 フェーズに移行し、免除国を除くすべての ICAO 加盟国（計 193 カ国）が対象となる予定である。この拡大により、現在は参加していない中国やロシアなどの主要排出国も含めた大規模な取り組みが進むことが期待され、SAF およびカーボンクレジットの需要は大幅に増加すると予測されている¹⁸。

図 3：カーボンオフセットのイメージ



出典：国土交通省（2022）「航空脱炭素化の取組の進捗について」

¹⁶ 小島嶼開発途上国（SIDS）、後発開発途上国（LDCs）、または内陸開発途上国（LLDCs）はオフセット要件から免除されている（ICAO, 2024）。

¹⁷ 使用できるクレジットは、ICAO によって承認された「CORSIA 適格排出ユニット」のみとなっている。日本において普及が進められている J-クレジット制度は適格排出ユニットとなるための申請が 2022 年から行われているものの、未だ承認を得ることができていない。クレジット制度に関する最近の動向・課題は、下記を参照されたい。

経済産業省(2024) カーボン・クレジット・レポートを踏まえた政策動向

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_credit/pdf/006_03_00.pdf.

¹⁸ 資源エネルギー庁（2024a）

主要国の SAF 政策の動向

SAF 普及のため、各国政府は様々な施策を導入している。アメリカでは、インフレ抑制法（IRA）などを通じて、税制控除や設備投資支援など大規模な経済的インセンティブを提供している。例えば、GHG 削減率に応じて最大 1.75 ドル/ガロン（約 70 円/L）までの控除や約 360 億円以上の補助金措置を行なっているほか、既存のクレジット制度を活用し、SAF 製造業者が排出削減クレジットを他の燃料事業者に売却することで収益を得られる仕組みを整備している¹⁹。これらの支援策により、SAF の実質的な費用は石油由来の従来型ジェット燃料と同水準に抑えられているとされている²⁰。一方、欧州連合（EU）では、SAF の生産と利用を促進するための規制強化に重点を置いている。2024 年 1 月に施行された「RefuelEU Aviation」では、燃料供給事業者に対し、EU 域内の空港で供給される全ジェット燃料に一定比率以上の SAF および航空用合成燃料を混合することを義務付けている（表 3 参照）。また、航空会社に対しては排出量取引制度への参加を義務付けているほか、SAF の使用量・価格差に応じて排出枠の追加配布（自身で使用または市場で売却可能）を行うなどの支援策も併用している²¹。このように、アメリカと EU は、それぞれのアプローチで SAF の量産と安定供給を積極的に推進しながら、価格競争力のある燃料市場の形成に向けた動きを加速させている。

表 3：RefuelEU Aviation における SAF の混合義務割合

	2025 年	2030 年	2035 年	2040 年	2045 年	2050 年
SAF	2%	6%	20%	34%	42%	70%
うち合成燃料	-	1.2%	5%	10%	15%	35%

出典：資源エネルギー庁（2024）「2030 年における持続可能な航空燃料（SAF）の供給目標量の在り方」をもとに著者作成

1.1.5. 日本と世界での SAF 製造の取り組み

世界的に SAF の需要が拡大する中、現在その製造は主に欧米の企業を中心に進められている。フィンランドの Neste は年間 33.8 億リットルという圧倒的な生産能力を誇り、アメリカの Diamond Green Diesel（17.8 億リットル/年）、World Energy（11.6 億リットル/年）、フランスの Total Energies（10.3 億リットル/年）といった主要企業が現在 SAF 市場を牽引している²²。さらに、中国やカナダ、ブラジルでも生産能力の拡大が進行中で、中国では現在設計・建設中の 4 つの製造拠点が完成すれば 19.4 億リットル、カナダでは 13.5 億リット

¹⁹ 資源エネルギー庁（2024a）を参照。なお、金額は為替 150 円/\$ で計算されている。

²⁰ 資源エネルギー庁（2023）

²¹ 資源エネルギー庁（2024a）

²² 各企業の生産能力は、ICAO が公開しているデータベース「ICAO tracker of SAF facilities（<https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Production-Facilities.aspx>）」を参照した。なお、データベースの情報は企業等による過去の公開値に基づいており、最新の状況とは異なる場合がある。

ルの生産能力が見込まれている²³。また、ブラジルの ECB Group はパラグアイ政府とのフリーゾーン契約を活用したバイオ燃料生産プロジェクトを推進し、SAF 供給の増強を目指している²⁴。さらに、各国では自国内での生産拡大に加え、原料調達の安定性を確保するための拠点展開が強化されている。資源エネルギー庁（2024）によると、原料調達ポテンシャルの高い東南アジアなどでは製造プラントの設置が進められ、穀物メジャーや油脂開発企業との連携も深化しているなど、SAF 市場の競争は製造能力だけでなく、原料調達においても激化している。

日本における SAF 製造の取り組みは、国際的な動きと比較すると依然として遅れが目立っている。国内では石油元売り企業 5 社が SAF 生産に取り組んでおり、例えば ENEOS 株式会社は和歌山製油所跡地で HEFA 技術を活用した製造プロジェクトを進め、2027 年以降に年間約 4 億リットルの生産を目指している²⁵。しかし、欧米諸国では既に商用化が進み、供給体制が確立されている一方で、日本の燃料メーカーによる製造・供給は未だ開発・実証段階にとどまっており、日本の航空会社は当面、海外で製造された SAF への依存を続けざるを得ない状況にある²⁶。

政府は 2030 年の国内供給見込み量を約 192 万キロリットルと試算しており、これは需要量を上回るとされている一方で、その実現には原料確保や技術開発の進展といった多くの課題が残されている²⁷。特に、2030 年までの国内 SAF 生産能力は需要量のわずか約 7%にとどまるとの推定もあり、中国や東南アジア、オーストラリア、アメリカといった余剰生産が見込まれる地域からの輸入に依存せざるを得ない状況も考えられる²⁸。

このように、国際的な SAF 製造競争が激化する中で、日本は安定的かつ効率的に SAF を供給・利用できる仕組みを構築することが喫緊の課題となっている。国内生産能力の向上を図るだけでなく、輸入 SAF を含めた供給網の整備やコスト競争力の確保が、日本の航空業界の脱炭素化を実現するために不可欠となっている。

1.2. 問題意識：採算性の課題

ここまで SAF の特徴やジェット燃料に対する導入意義を論じてきたが、導入にあたって解決する必要がある問題は先述した「採算性」にある。

表 4 では、2025 年時点における製造技術別の SAF 製造コスト予測と従来燃料の製造コストを比較している。SAF の生産技術・設備が成熟していないことから、従来燃料に混合した際にはジェット燃料の製造コストの高騰が予想される。今後、SAF の導入割合が高まること

²³ 同上

²⁴ Woodcote Media Ltd (2020)

²⁵ 資源エネルギー庁 (2024a)

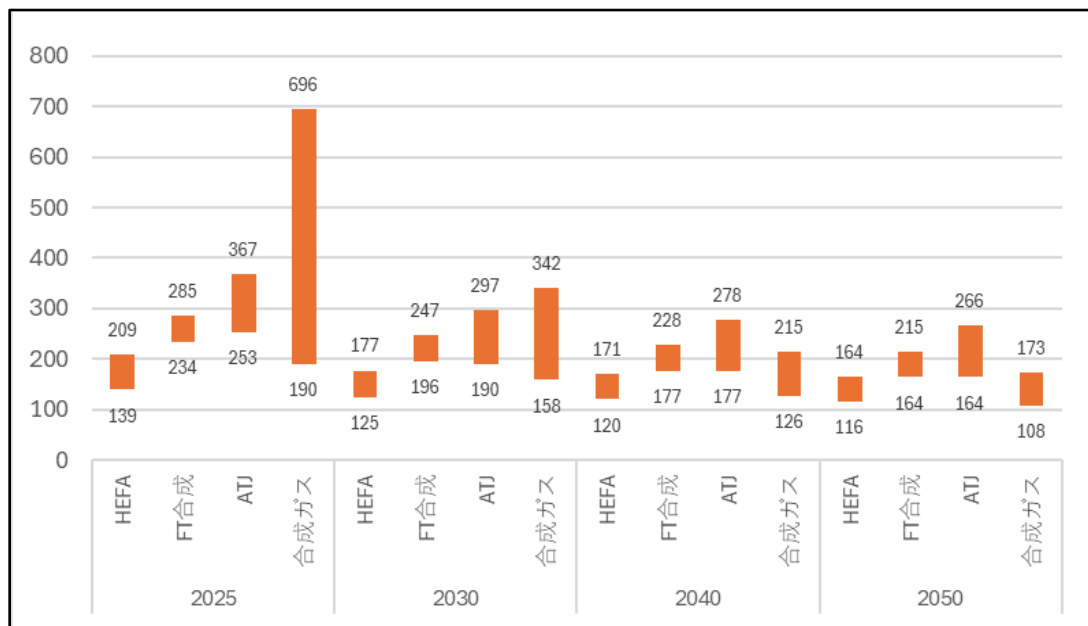
²⁶ 例えば、ANA は 2020 年に世界最大手であるフィンランドの Neste と中長期的な SAF の調達に関する覚書を締結し、日本発の定期便にて使用するとしている (ANA, 2020)。

²⁷ 資源エネルギー庁 (2024a)

²⁸ SkyNRG (2024)

からも SAF の製造コストの低減は喫緊の課題となる。また、上述の通り日本では石油元売り企業に対する政府支援も実施されており、資源エネルギー庁の「持続可能な航空燃料（SAF）の製造・供給体制構築支援事業」には国庫債務負担含め総額 3,368 億円の予算が充当されている²⁹。したがって、単にカーボンニュートラルの利益のみを追求せず、SAF の導入が徴税を受ける日本国民・日本国全体の実益に見合うか否か、定量的に考察する必要があると考える。

表 4：各 SAF 技術の生産コスト予測（縦軸の単位は円/リットル）³⁰



出典：脚注 30 のデータを用いて著者作成

2. 先行研究および本研究の位置づけ

2.1. 先行研究

SAF（持続可能な航空燃料）に関する費用便益分析の先行研究は数少ないものの、注目すべき二つの事例がある。

一つ目は、イギリスの Department for Transport（2024）による研究であり、英国の SAF 供給義務化政策に焦点を当てている。この研究では、原料の入手可能性、輸入依存度、技術展開の進展状況などを考慮した 3 つのシナリオを設定し、詳細な費用便益分析を実施してい

²⁹ 資源エネルギー庁（2024） p.16

³⁰ 従来のジェット燃料の製造コストは 100 円/L（産業技術環境局, 2022, P41）である。各 SAF 製造技術の生産コスト予測はデロイトトーマツコンサルティング合同会社（2024, p.132-134）を参照し、為替レートは米ドルの年間平均 TTB150.58 円/ドルを使用した（参照元：三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社（n.d.））。ジェット燃料の密度は NEDO 新エネルギー部（2020, P16）を参照した。

る。しかし、同研究では、英国特有の制度的背景や市場条件を前提としており、その結果をそのまま日本に適用することは難しい。

二つ目は、米国における ATJ (Alcohol-to-Jet) SAF 製造に関する研究である (Charles River Associates, 2024)。この研究では、米国内の再生可能エネルギー企業が行う具体的な SAF 製造プロジェクトを対象に、外部便益 (温室効果ガス削減、健康改善、地域経済への影響など) を定量化し、それが連邦および州のインセンティブを上回るかどうかを評価している。一方で、この研究の対象は単一技術および単一プロジェクトに限定されており、全国規模での SAF 供給拡大に関する包括的な視点が不足しているという課題がある。

2.2. 本研究の位置づけと新規性

こうした先行研究を踏まえ、本研究の新規性は次の三点にある。第一に、日本における SAF 供給拡大の費用便益分析を行う点である。これまで日本では、SAF 導入に伴う費用対効果の検証が十分に行われてこなかった。本研究では、輸入に頼る場合の輸送コストを考慮したシナリオと、国内製造に完全移行した場合のシナリオを設定し、日本における SAF 導入が経済的にどのような利益をもたらすのかを定量的に評価する。第二に、製造技術別のコストおよび将来の導入割合を考慮した分析を行う点である。製造技術が成熟している HEFA に加え、今後市場拡大が期待される ATJ や PtL 技術など、複数の技術の生産コストと導入可能性を比較・評価する。第三に、社会的余剰の変化を定量化し、市場への影響を評価する点である。これまでの先行研究では十分に言及されてこなかった社会的余剰の変化を定量化することで、SAF 導入が市場や経済に与える影響を経済学的に検証する。

本研究は以上の新規性を通じて、日本国内の SAF 導入に関する実践的な知見を提供するとともに、政策立案に資する具体的な分析を行うことを目指している。

3. 分析のフレームワーク

3.1. モデル化

3.1.1. シナリオの設定

本研究では、図 4 のように 3 つのシナリオを設定する。

まず、SAF を導入せずに航空業界で利用する燃料が変化しない状態を without ケースに設定し、次に 2025 年から従来燃料に SAF を混合させる場合を with ケースとした。ここで、SAF の供給方法は海外輸入、あるいは自国生産の 2 通りが考えられる。

with-A ケースでは、SAF は現状日本で商用化されていないことを考慮し、すべて海外から輸入することと仮定する。なお、輸入 SAF については、①ニート SAF を輸入し国内で混合するルート ②海外で混合済みの SAF を輸入するルートの 2 つの選択肢が存在するが、本研究では、環境面および経済面で優位性が示されている①のルートを対象とする。これは、2022 年度に実施された輸入ニート SAF 実証事業の成果に基づいており、同事業では、①のルートが② (EU で混合) に比べ、GHG 排出量を約 7 割削減し、海上輸送費も約 53%削減できるこ

とが明らかとなった³¹。これらの結果を受け、政府も①のルートを推進する方針を示している。

with-B ケースでは、SAF を全て国産化することを想定する。ただし、SAF の原料であるさとうきびやとうもろこし、水素などは基本的に海外からの輸入に頼っており、廃食油などは国内での調達なものの、それによって生成できる SAF の量は多くない。そのため、原材料は全て海外から輸入することを仮定する。

また、without のみの便益と費用は計算せず、「with-A と without の差分」と「with-B と without の差分」を計算している。さらに、1-1-3 節で挙げられるように多岐にわたる政策オプションの組合せを網羅することが求められるが、個別政策の効果を捉えることは困難であるため、今回は政府が導入義務などを課すことで目標が達成されることを想定する。

図 4：想定するシナリオ

シナリオ	内容
without	従来ジェット燃料のみを使う (任意の政策を実施しない)
with-A	従来燃料に SAF を混合させ、必要量の SAF を 100%輸入する
with-B	従来燃料に SAF を混合させ、必要量の SAF を 100%自国生産する

出典：著者作成

今回の分析では、費用便益項目として SAF の導入による社会的な便益と費用を計上する。SAF の導入によっておこる変化としては、主に航空機による炭素排出量の減少、航空燃料の製造コスト上昇に伴う市場の余剰の変化、SAF の製造及び輸入体制を整えるための体制構築の 3 つがある。そのため、①製造コスト上昇に伴う市場での余剰の減少、②炭素排出量削減に伴う便益、③SAF の導入体制構築のための費用の 3 点を費用便益項目として計上する。

3.1.2. 2 つの市場における余剰の変化

本節では市場で発生する市場での余剰について分析する。まず、航空燃料の取引に関わるアクターとしては、燃料製造を行う石油元売り会社、航空会社、航空サービスを利用する乗客、の 3 主体がある。航空燃料市場では、石油元売り会社が燃料を供給し、航空会社はその消費者となる。航空サービス市場では航空会社がサービスを提供し、乗客がその需要者となる。

³¹ 国土交通省 (2023a)

今回の SAF の導入は、新たな SAF の市場が設けられるというよりも、航空会社の購入する航空燃料の価格が上昇するという捉え方が適切である。したがって SAF を導入することは、航空燃料市場における石油元売り会社の限界費用の増加として捉えられる。

今回の分析では両市場が完全競争市場だと仮定し、航空燃料市場では限界費用が一定だと仮定する。この時、完全競争市場では、航空会社の利潤は 0 となるため、航空サービス市場での消費者余剰の減少は、航空燃料市場の消費者余剰の減少と一致するため、市場全体での余剰の変化としては以下の式ようになる。これを図示すると、以下の図

$$\Delta CS = - \sum_{t=2024}^{2050} \beta^{t-2025} \int_{MC_{2024}}^{MC_t} D_t(P) dP$$

ΔCS : 消費者余剰の変化

β : 社会的割引率

$D_t(P)$: 航空燃料価格 P を所与とした際の、 t 年の航空会社の燃料需要

MC_t : t 年の航空燃料製造の限界費用

3.1.3. 市場ではとらえきれない費用、便益

3.1.2 での余剰分析によって捉え切れていない費用便益の変化を補足する。前節での市場の余剰分析で捉えたものは、製造コストの上昇とそれに伴う航空燃料の取引量の減少による航空会社及び航空サービス利用者の便益の減少である。この市場では、SAF の導入義務が課されたことによる価格上昇のみが反映されており、SAF に代替されたことによる炭素削減の効果と、限界費用に反映されない設備投資や体制構築のコストなどは考慮されていない。したがってこれらは別の費用便益項目として計上する必要がある、①カーボンオフセット義務量減少による便益、②燃料供給者の管理費用、③初期費用、の 3 項目を計上する。

①カーボンオフセット義務量の減少とは、1.1.4 節の説明にもあるように、各航空会社が炭素排出量を削減することによって減少する、CORSIA でのオフセット義務量、すなわちクレジット支払いの減少額である。炭素排出削減に関わる便益を社会的費用で捉える場合、それは世界全体への便益となってしまうため、日本国を当事者適格とした際には、その外部性を内部化したものであるオフセット価格で補足することが適切であると考えた。

②燃料供給者の管理費用、③初期費用はともに、日本で SAF を製造するためのコストである。詳細な説明は 3.3 節及び 3.4 節に譲るが、限界費用に反映されないコストとして計上する必要がある。

3.2. 前提条件の整理

分析にあたって必要な前提条件や仮定を表5に示す。これらに従って以降の便益・費用の計算を実行する。

表5：費用便益分析に必要な前提条件・仮定

条件	内容
単位量あたりの SAF 製造コスト	現状の製造設備の充実度にかかわらず、全世界で共通とする
SAF 製造に必要な原料の調達方法	サトウキビや水素などの原料は全て海外から輸入する
ジェット燃料需要量に対する SAF の導入割合	2024 年を 0%として、2030 年に 10%、2035 年に 25%、2040 年に 50%を達成するように段階的に引き上げる。2040 年以降は 50%に固定する
カーボンニュートラルの定義	オフセット義務量が 0 になること、すなわち日本の航空業界に許可された排出量を超過しない状態とする
カーボンニュートラルの達成時期	2050 年に達成すると仮定する
ジェット燃料需要の変化	燃料価格の変化によらず外生的に変化する
管理費用の扱い	ジェット燃料供給事業者に発生する管理費用のみ考慮する
分析期間	2024 年から 2050 年までとする
社会的割引率	全期間を通じて 4%を採用する

出典：著者作成

3.2.1. SAF の導入割合

まず、2030 年の導入割合をジェット燃料需要量の 10%に設定した理由は、先述の通り日本政府がすでに「国全体として本邦エアラインによる燃料使用量の 10%を SAF に置き換える」方針を定めているためである。次に 2035 年および 2040 年の導入割合は、ヨーロッパ州における SAF の導入割合の指標を参考にした³²。なお、導入割合の推移は表 6 のように、2024 年～2030 年までは 1.67%ずつ、2030 年から 2035 年までは 3%ずつ、2035 年～2040 年までは 5%ずつであると仮定した。

表 6：SAF 導入割合の推移

年	導入割合	年	導入割合	年	導入割合
2024	0.00%	2033	19.00%	2042	50.00%
2025	1.67%	2034	22.00%	2043	50.00%
2026	3.33%	2035	25.00%	2044	50.00%
2027	5.00%	2036	30.00%	2045	50.00%
2028	6.67%	2037	35.00%	2046	50.00%
2029	8.33%	2038	40.00%	2047	50.00%
2030	10.00%	2039	45.00%	2048	50.00%
2031	13.00%	2040	50.00%	2049	50.00%
2032	16.00%	2041	50.00%	2050	50.00%

出典：著者作成

3.2.2. SAF の製造コストの推移

1.1.5 節で述べたように、SAF の生産技術は成熟した状態ではなく、世界的に見ても製造コストに差がある現状である。そのため、同じ原料を用いた場合に生産コストが他国に比べて過大になると予想されるが、本レポートでは議論の簡略化のために製造コストは全世界で共通と仮定する。

3.2.3. SAF の原料調達

日本で SAF を生産する場合、生産設備のみならず原料調達も必要となる。しかし SAF の原料は多岐にわたり、かつその調達費用を明示した文献は管見の限り見当たらなかった。そこで本レポートでは、with-A、with-B 両ケースで原料は海外から全て輸入することとして分析を実行している。そのため、両ケースで算出したジェット燃料の限界費用の相違点は、生産国から日本へ SAF を運搬する費用の有無のみとなる。

³² World Economic Forum (2021)

3.2.4. 管理費用の扱い

管理費用については、燃料供給事業者が発生するコストを対象とする。CORSlA の枠組みでは、政府および航空会社に対して義務が課されており（表 7 参照）、日本は既に CORSlA に参加しているため、SAF 導入の有無に関わらずこれらの義務を履行しなければならない。したがって、これらのコストは従来燃料を使用する場合（without ケース）でも SAF を導入する場合（with ケース）でも共通して発生するため、今回の分析では計上していない。

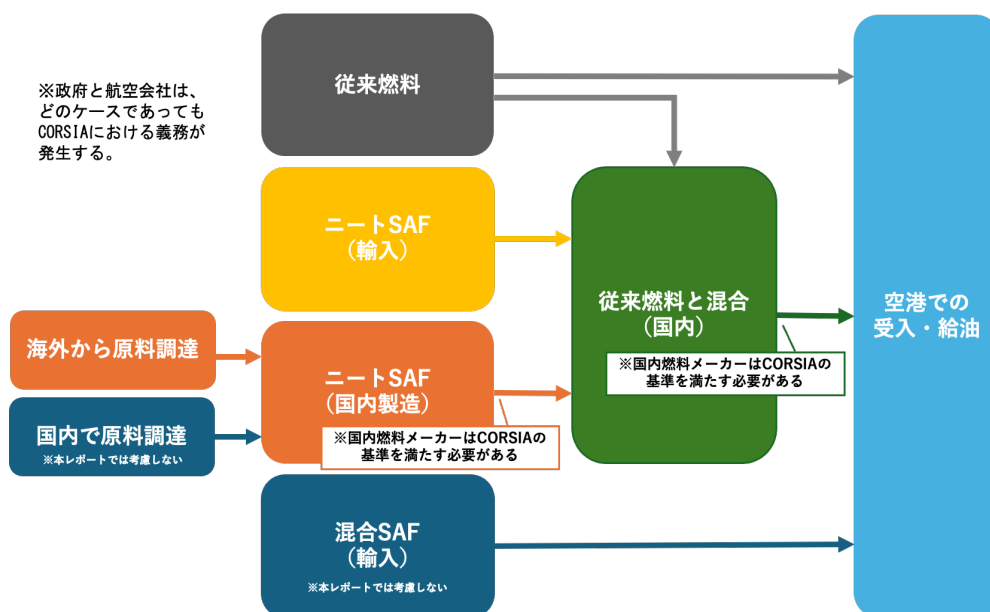
一方で、SAF 導入に特有の費用として、ジェット燃料供給事業者が発生する管理費用がある。供給事業者は、国内で製造または混合した SAF が CORSlA の基準を満たしていることを証明する必要があり、これに伴う事務管理コストが発生する。この費用は、輸入したニート SAF を国内で従来燃料と混合するケース（with-A ケース）および国内でニート SAF を製造するケース（with-B ケース）の両方に該当するため、本調査ではこれらを費用として考慮している。

表 7：CORSlA における各ステークホルダーの義務

政府	エアライン
- 航空運送事業者の体制整備確認 - エアラインの報告取り纏め - エアラインのオフセット義務量の算出 - ICAO への報告	- 排出量のモニタリング計画の策定、政府への提出 - CO2 排出量の把握、削減 - オフセット義務の履行

出典：国土交通省（2021）「航空分野における CO2 削減に向けた取組」をもとに著者作成

図 5：SAF 受入までの流れ



出典：国土交通省（2021）「航空機運航分野における CO2 削減に関する検討会（第 3 回）」、運輸総合研究所（2022）「我が国における SAF の普及促進に向けた課題・解決策」をもとに著者作成

3.3. SAF を全て輸入する際の費用便益分析

3.3.1. 市場での余剰の変化

3.3.1.1. 供給曲線の導出

導出には、2024 年～2050 年における、HEFA/ガス化・FT 合成/ATJ/合成燃料の 4 種類の製造技術別の SAF 製造コストの予測データ・割合を用いた³³。そして従来燃料の製造コスト³⁴と合わせて加重平均を各年ごとに計算し、その値を限界費用とした。なお、3.5.1 節で述べるように基準・高位・低位の 3 ケースの限界費用を計算した。

すると、 x 年の供給曲線の計算式は以下の通り表される。

$$P = sP_{original} + (1 - s)\{aP_{HEFA} + bP_{Gas} + cP_{ATJ} + dP_{syn}\} + l$$

HEFA の製造コスト (円/L) : P_{HEFA} ガス化・FT 合成の製造コスト (円/L) : P_{Gas}

ATJ の製造コスト (円/L) : P_{ATJ} 合成燃料の製造コスト (円/L) : P_{syn}

従来燃料の製造コスト (円/L) : $P_{original}$ 輸入コスト (円/L) : l

従来燃料の含有率 : s ($0 \leq s \leq 1$)

SAF における HEFA の割合 : a SAF におけるガス化・FT 合成の割合 : b

SAF における ATJ の製造コストの割合 : c SAF における合成燃料の製造コストの割合 : d

ただし、 $a + b + c + d = 1$

輸入コストは SAF 生産国から日本への運搬にかかる費用であり、本レポートでは表 8 のように「日本における原油の輸入価格³⁵」と「ドバイ原油の取引価格（生産国における原油の輸入価格）³⁶」の差分の平均値と設定した。

表 8：輸入コストの算定（単位は円/L）

³³ デロイトトーマツコンサルティング合同会社 (2024) p.117,132-134

³⁴ 産業技術環境局 (2022) p.41

³⁵ 資源エネルギー庁 (2024c)

³⁶ 世界経済のネタ帳 (2025)

	原油輸入価格 (A)	ドバイ原油取引価格 (B)	輸入コスト (A) - (B)
2023/03	72.49	65.26	7.23
2023/02	72.05	67.72	4.33
2023/01	73.34	65.61	7.73
2022/12	82.55	65.4	17.15
2022/11	92.42	77.51	14.91
2022/10	96.76	83.77	12.99
2022/09	97.57	81.68	15.89
2022/08	95.66	83.15	12.51
2022/07	99.56	91.56	8
2022/06	95.82	97.39	-1.58
2022/05	87.62	87.81	-0.19
2022/04	83.29	81.52	1.77
2022/03	66.94	84.31	-17.37
2022/02	62.73	67.49	-4.76
2022/01	57.63	60.04	-2.41
2021/12	59.01	52	7.01
2021/11	58.85	57.23	1.62
2021/10	53.89	57.79	-3.9
2021/09	51.05	50.08	0.97
2021/08	51	47.56	3.44
2021/07	49.9	50.58	-0.68
2021/06	47.61	49.14	-1.53
2021/05	44.88	45.28	-0.4
2021/04	45.71	42.81	2.9
2021/03	41.55	43.7	-2.15
2021/02	36.69	40.01	-3.33
2021/01	32.65	35.32	-2.67
		平均	2.87

出典：著者作成

よって、2024 年～2050 年における with-A の基準ケース・高位・低位は以下のように計算される。

表 9：with-A ケースでの限界費用の推移（単位は円/L）

100%輸入 (with-A)			
年	基準	高位	低位
2024	102.87	102.87	102.87
2025	103.81	104.69	103.52
2026	104.67	106.28	104.08
2027	105.48	107.67	104.54
2028	106.64	109.71	105.44
2029	107.31	110.67	105.70
2030	107.79	111.29	105.83
2031	110.25	115.02	107.32
2032	111.40	117.44	108.46
2033	113.55	121.27	110.13
2034	115.25	124.26	111.35
2035	118.34	129.45	113.48
2036	121.78	135.02	115.83
2037	126.38	142.24	118.58
2038	130.93	149.09	121.26
2039	135.07	155.04	123.61
2040	139.00	160.46	125.77
2041	140.68	163.13	126.67
2042	141.58	164.62	127.07
2043	142.27	165.82	127.33
2044	142.30	166.01	127.18
2045	142.42	166.39	127.09
2046	141.89	164.94	125.77
2047	141.08	163.17	124.44
2048	139.50	160.27	122.80
2049	138.14	157.98	121.59
2050	136.87	155.86	120.47

出典：著者作成

3.3.1.2. 需要曲線の導出

モデルの構築

この節では、ジェット燃料の需要曲線の導出について述べる。

ジェット燃料需要の価格弾力性を把握するために、需要曲線の対数型モデルを構築した。その背景には、SAF の導入に伴う航空燃料の価格上昇と消費者余剰の減少が挙げられ、その影響を定量的に評価するためには価格変化に対する反応を明らかにする目的がある。モデルの構築にあたっては、運輸総合研究所が公表した報告書「航空分野の長期的な排出削減対策見通し」³⁷の内容を参考にした。

³⁷ 運輸総合研究所 (2022b)

燃料需要量と価格の関係を分析する際には、これら 2 つの変数のみを考慮すると内生性の問題が生じる可能性がある。燃料需要量と価格の関係をより適切に分析するために、本稿では、燃料需要量を被説明変数とし、説明変数として燃料価格に加え、輸送量（旅客キロ数と貨物キロ数）および GDP 成長率を取り組んで以下のモデルを構築した。全ての変数について、2006 から 2023 年までの月次データを収集した³⁸。

$$\ln(Q) = \alpha + \beta_1 \ln(P) + \beta_2 \ln(RPK) + \beta_3 \ln(FTK) + \beta_4 \text{GDP}_{\text{growth}} + \varepsilon$$

Q： ジェット燃料消費量（万キロリットル）

P： ジェット燃料価格（円/リットル）

RPK： 旅客輸送量を表す旅客キロ数（人キロリットル）³⁹

FTK： 貨物輸送料を表す貨物キロ数（トンキロリットル）⁴⁰

GDP_{growth}： GDP 成長率

ここで、 ε はモデルで説明できない要因を含む誤差項である。また、 $\ln$ は各変数間の弾力性を分析するために、変数に対数を取ったことを意味する。なお、 β_1 はジェット燃料需要の価格弾力性を表す。

分析結果

最小二乗法（OLS）を用いて推定を行った結果、以下の需要曲線が得られた。

$$\ln(Q) = \begin{matrix} -7.15 \\ (-13.74) \end{matrix} - \begin{matrix} 0.14 \ln(P) \\ (-3.51) \end{matrix} + \begin{matrix} 0.47 \ln(RPK) \\ (18.95) \end{matrix} + \begin{matrix} 0.08 \ln(FTK) \\ (2.47) \end{matrix} - \begin{matrix} 0.01 \text{GDP}_{\text{growth}} \\ (-2.65) \end{matrix}$$

* ()内は t 値である

推定された需要曲線モデルの結果から、燃料価格、旅客キロ数、貨物キロ数、GDP 成長率の各説明変数が燃料需要に与える影響が明らかになった。特に、燃料需要の価格弾力性は -0.14 であり、燃料価格が 1%上昇した場合、燃料需要量が 0.14%減少することを示しており、燃料需要が価格に対して低い弾力性を持つことを意味する。これは、燃料が航空輸送にとって不可欠な要素であるため、価格変動に対する需要の反応が限定的であると考えられる。

³⁸ ジェット燃料消費量：経済産業省資源エネルギー庁. 給油所小売価格調査(ガソリン、軽油、灯油). https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/petroleum_and_lpgas/pl007/results.html

ジェット燃料価格：総務省統計局. 航空輸送統計調査. 第 7 表 航空運輸事業・航空機使用事業月別、油種別、燃料消費量. https://www.e-stat.go.jp/stat-search/database?page=1&statdisp_id=0003173887

旅客キロ数&貨物キロ数：総務省統計局. 航空輸送統計調査. 第 2 表 国内定期航空月別運航および輸送実績. https://www.e-stat.go.jp/stat-search/database?page=1&statdisp_id=0003173921

GDP 成長率：内閣府経済社会研究所. 国民経済計算(GDP 統計).

<https://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/menu.html>

³⁹ 旅客キロ数 = 有償搭乗者 × 移動距離

⁴⁰ 貨物キロ数 = 輸送された貨物量 × 輸送距離

また、本稿では燃料需要と価格の関係に焦点を当てるため、需要曲線をさらに簡略化した。具体的には、その他の説明変数である旅客キロ数、貨物キロ数および GDP 成長率を一定値に固定することで、以下の式が得られる。

$$\ln(Q) = \gamma + \beta_1 \ln(P)$$

ここで、 γ は次の式で計算される。

$$\gamma = \alpha + \beta_2 C_1 + \beta_3 C_2 + \beta_4 C_3$$

α' の計算には、 C_1 、 C_2 、 C_3 がそれぞれ旅客キロ数、貨物キロ数、GDP 成長率の対数平均値として使用される。計算した結果は次のように表される。

$$\ln(Q) = 4.91 - 0.14 \ln(P)$$

この式を指数関数の形式に変換すると、以下のようになる。

$$Q = e^{4.91} P^{-0.14}$$

したがって、燃料価格と需要の関係を簡略化した形で表現することができた。

3.3.2. オフセット義務量減少便益

この節では、SAF の導入がもたらす便益について述べる。

ICAO は、2020 年以降、CO₂ 排出量を増加させることなく、燃料効率を毎年 2% 向上させるという目標を設定した。また同時に、2050 年までに航空業界におけるカーボンニュートラルを達成するための目標と炭素の基準排出量を設定している⁴¹。この目標を達成するために考えられる対策の一つは、カーボンオフセットの導入であり、GHG 排出量に見合った GHG 削減活動に投資することで、GHG 排出量を実質ゼロに近づける取り組みである。

カーボンオフセットを推進するために、CORSIA は 2021 年から運用が開始されており、各航空会社には定められたルールに従い必要な排出枠を購入し、オフセットする義務が課されている。この義務は、制度導入初期には 2020 年以降の排出量増加分に基づいて割り当てられるが、2030 年以降は各航空会社の CO₂ 削減量に応じた割り当て方式に移行する予定である⁴²。

特に、SAF の製造技術が発展して導入が進むことで、航空会社は目標達成のために必要となるオフセット義務量が減少し、その分クレジット購入費用が削減される。この削減された費用が、航空会社にとっての経済的便益として位置づけられ、以下の式を用いて算出した。

オフセット義務量減少の便益 = オフセット義務量の減少分 × CORSIA 適格クレジット価格

⁴¹ 資源エネルギー庁 (2024a)

⁴² 炭素市場エクспレス. (n.d.)

本研究では、2024 年から 2050 年までの各年の便益を合計し、社会的割引率 4%を用いて 2024 年時点の便益に換算した。その結果を表 10 に示す。

表 10：オフセット義務量減少便益の推定結果

	オフセット義務量減少の便益
合計	2.67 億ドル
円に変換 ⁴³	290.41 億円

出典：著者作成

この結果から、約 290 億円の便益が得られることが明らかとなった。

3.3.3. 燃料供給者の管理費用

輸入した SAF は国内のジェット燃料メーカーによって従来のジェット燃料と混合されるが、その際、各燃料メーカーは ICAO によって承認された持続可能性認証スキーム（Sustainability Certification Schemes, SCS）に基づいて認証を取得し、製造する SAF を CORSIA 適格燃料⁴⁴として認定する必要がある。また、SAF のライフサイクル全体での GHG 排出量を算出し、CORSIA が定める削減基準（化石由来のジェット燃料と比較して最低 10% の GHG 削減）を満たしていることを証明しなければならない。

これらのプロセスにより、燃料供給事業者には追加的な費用が発生することが予想されるが、現時点では CORSIA への対応にかかる具体的なコストの算出は行われていない。そのため、本レポートでは、再生可能エネルギー関連制度に企業が対応する際のコストという観点で類似性のある事例として、イギリスにおける再生可能燃料導入義務（Renewable Transport Fuel Obligation, RTFO）の実施後レビュー（Department for Transport, 2014）におけるデータを参照する。RTFO は輸送用燃料の供給者に対し、バイオ燃料などの再生可能エネルギー由来の燃料を一定割合含めることを義務付ける制度である。実施後レビューでは、義務対象となる大規模企業 1 社あたりの年間管理費用は約 50 万ポンドと試算されており、この費用には、報告、取引、検証、政策、監査、マーケティング、一般管理、および技術的な対応に関連するコストが含まれる（Department of Transport, 2014）。日本における SAF 供給事業者の管理コストを試算するため、イギリスの消費者物価指数（CPIH）を基準にインフレを考慮し、2024 年 11 月時点の購買力平価（1 ポンド=80 円）で換算した結果、1 社あたりの管理費用は約 5,372 万円となる。さらに、資源エネルギー庁（2024）の報告によれば、日本における主な SAF 製造事業者数は石油元売り 5 社と想定される。この条件を基に累積費用を試算すると、年間で約 2 億 6,860 万円、2050 年までの累積費用は割引率 4%で約 43 億円となる。

⁴³ 2024 年 11 月時点の購買力平価 1 ドル=108.8 円を用いて計算。

⁴⁴ 航空事業者がカーボンオフセット義務を果たすための燃料として使用可能な CORSIA SAF、もしくは CORSIA 持続可能性基準を満たす化石由来の航空燃料を指す（国土交通省, 2024）。

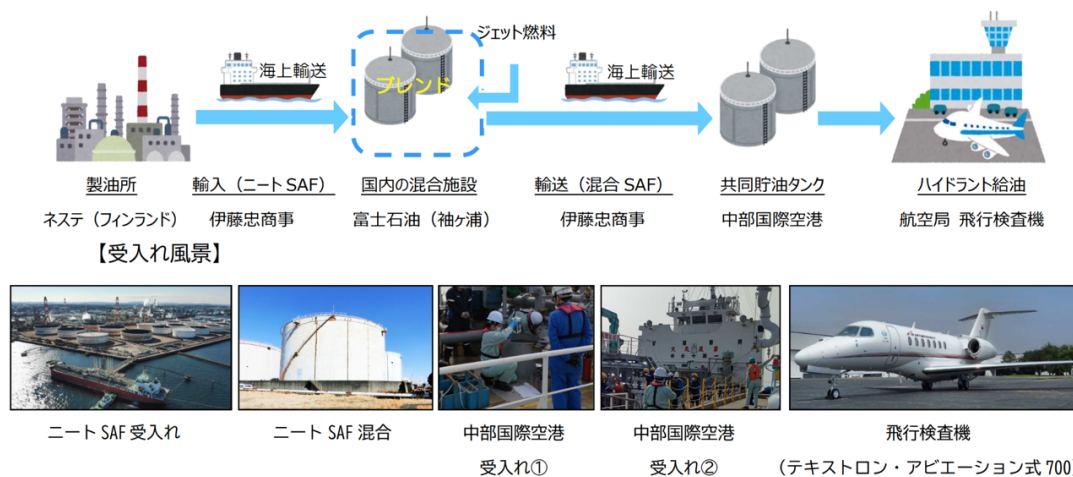
3.3.4. 初期費用

輸入に 100%依存する場合、国内での製造拠点整備は不要であるが、図 7 のような輸入から給油までのサプライチェーンを整備する必要がある。しかしながら、多くのインフラは既存の設備を活用可能であるため、本レポートでは with-A ケースにおける初期費用を 0 と仮定している。

国土交通省（2021）によれば、SAF を輸入する際に追加的に整備が必要となる項目として、(1) ニート SAF を従来燃料と混合するための混合施設の整備、(2) 国内での ASTM 規格⁴⁵の検査体制拡充を挙げている。まず、(1)については、混合施設として既存のジェット燃料用設備の活用が可能であることが示されている。実際、2022 年度に実施された国土交通省ニート SAF 輸入実証事業では、輸入された Neste 社（フィンランド）のニート SAF が富士石油株式会社の袖ヶ浦製油所（千葉県袖ヶ浦市）において既存のジェットタンクを利用して従来ジェット燃料と混合された（富士石油株式会社, 2023）。この事例から、新規に多額の設備投資が必要とされる可能性は低いと考えられる。次に、(2)については、2021 年度予算ですでに検査体制の整備が完了しているとされており、今後この分野における初期費用の発生は見込まれない。

さらに、先行研究（E4tech Ltd, 2019）においても、サプライチェーン構築にかかるコストは 1 トンあたりの単位で見た場合、比較的低コストであるとされている。これらの点を踏まえると、輸入に 100%依存するケースでは、新たに発生する初期費用を 0 と見なすことは正当化される。

図 6：サプライチェーンイメージ図



出典：国土交通省（2023b）

⁴⁵ 燃料としての安全性・性能を定めた規格であり、これを満たしていなければ航空機燃料として使用することは出来ない。輸入したニート SAF を国内で混合する場合、ASTM 規格の検査を国内で行う必要が出てくるが、検査に必要な検査機器が一部未導入であった。

3.4. SAF を全て自国生産する際の費用便益分析

3.4.1. 市場での余剰の変化

3.4.1.1. 供給曲線の導出

with-B ケースでの供給曲線は、3.3.1.1 で導出した with-A の供給曲線から「輸入コスト」を除いたものとなる。

$$P = s \cdot P_{original} + (1 - s) \{ a \cdot P_{HEFA} \cdot x + b \cdot P_{Gas} \cdot x + c \cdot P_{ATJ} \cdot x + d \cdot P_{Syn} \cdot x \}$$

HEFA の製造コスト (円/L) : $P_{HEFA} \cdot x$ ガス化・FT 合成の製造コスト (円/L) : $P_{Gas} \cdot x$

ATJ の製造コスト (円/L) : $P_{ATJ} \cdot x$ 合成燃料の製造コスト (円/L) : $P_{Syn} \cdot x$

従来燃料の製造コスト (円/L) : $P_{original}$

従来燃料の含有率 : s ($0 \leq s \leq 1$)

SAF における HEFA の割合 : a SAF におけるガス化・FT 合成の割合 : b

SAF における ATJ の製造コストの割合 : c SAF における合成燃料の製造コストの割合 : d

ただし、 $a + b + c + d = 1$

よって、2024 年～2050 年における with-B の基準ケース・高位・低位は以下のように計算される。

表 1 1 : with-B ケースでの限界費用の推移 (単位は円/L)

100%自国生産（with-B）			
年	基準	高位	低位
2024	100.00	100.00	100.00
2025	100.94	101.82	100.65
2026	101.80	103.41	101.21
2027	102.61	104.80	101.67
2028	103.77	106.84	102.57
2029	104.44	107.80	102.83
2030	104.92	108.42	102.96
2031	107.38	112.15	104.45
2032	108.53	114.57	105.59
2033	110.69	118.40	107.26
2034	112.38	121.39	108.48
2035	115.47	126.58	110.61
2036	118.91	132.15	112.96
2037	123.51	139.37	115.71
2038	128.06	146.22	118.39
2039	132.20	152.17	120.74
2040	136.13	157.59	122.90
2041	137.81	160.26	123.80
2042	138.71	161.75	124.20
2043	139.40	162.95	124.46
2044	139.43	163.14	124.31
2045	139.55	163.52	124.22
2046	139.02	162.07	122.90
2047	138.22	160.30	121.57
2048	136.63	157.40	119.93
2049	135.27	155.11	118.72
2050	134.00	152.99	117.60

出典：著者作成

3.4.2. 燃料供給者の管理費用

ニート SAF を国内で製造する場合、その製造事業者も 3.3.3 で述べた輸入 SAF を従来のジェット燃料と混合する際と同様に、CORSIA の認証プロセスを遵守する必要がある。これらの手続きにかかる管理コストは輸入 SAF のケースと同水準であると仮定する。したがって、国内製造であっても輸入 SAF と同様の管理費用が発生すると見込まれる。

3.4.3. 初期費用

次に、自国生産による SAF 供給に必要な初期費用について考察する。日本国内で SAF を供給するためには、未成熟な製造技術の研究開発や大規模な製造設備の整備が必要であり、こ

これらの先行投資は政府による大規模な補助を受けている。経済産業省が公開している「分野別投資戦略」⁴⁶によると、支援の枠組みは大きく以下の2つに分類できる。

① **グリーンイノベーション（GI）基金による研究開発支援：**

一つは、グリーンイノベーション（GI）基金⁴⁷を活用し、将来的な SAF 供給のポテンシャルが高いと見込まれている ATJ 技術の開発や FT 合成を用いた合成燃料の製造技術の研究開発を支援するものである。具体的には、以下の事業が進行中である⁴⁸：

- ATJ 実証設備の開発と事業化（2022～2026 年の 5 年間で約 457 億円）
- 合成燃料の製造技術開発（2022～2028 年の 7 年間で約 558 億円）

また、2025 年度以降に計画されている新規事業は、2025～2029 年の 5 年間で約 50 億円の規模であることが公表されている⁴⁹。

② **GX 移行債による製造・供給体制構築支援**

もう一つは GX 経済移行債を活用した先行投資支援であり、これは SAF の大規模製造設備の構築や安定的な原料確保のためのサプライチェーン整備等を対象としている。2024 年度の予算額は 276 億円であり、2028 年までの 5 年間で合計 3,368 億円が計画されている。上記をまとめると、表 1 2 のようになる。

表 1 2：国内 SAF 製造のための先行投資支援

	① GI 基金による研究開発支援	② GX 移行債による製造・供給体制構築支援
主な支援対象	- エタノールから大量の SAF を製造する ATJ 技術（Alcohol to Jet）の開発 - FT 合成等を用いた合成燃料の大規模かつ高効率な製造技術の開発	- 大規模な SAF 製造（例：10 万 KL/年以上）を行うための投資案件 - 中・長期的な原料の安定調達に向けた取組
時期	2022 年度～	2024 年度～
事業規模	ATJ ：2022～2026（5 年間で約 457 億円） 合成燃料 ：2022～2028（7 年間で約 558 億円） 2025 年度以降事業 ：2025～2029（5 年間で約 50 億円）	2028 年までの 5 年間で合計 3,368 億円（2024 年度の予算額は 276 億円）

出典：著者作成

⁴⁶ 経済産業省（2023 年 12 月 22 日）。
⁴⁷ 政府は 2050 年カーボンニュートラル目標に向けて、令和 2 年度第 3 次補正予算において 2 兆円の「グリーンイノベーション基金」を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）に造成している。SAF 製造技術開発はその中の「CO2 等を用いた燃料生産技術開発プロジェクト」において進められている。
⁴⁸ 各事業の詳細は、（矢野 貴久, 2023）を参照されたい。
⁴⁹ NEDO（2024）「2025 年度以降の新規事業について」

これらの事業規模を基に実施年数で平均化し、2024 年度以降の年間費用をそれぞれ算出し、割引率 4%を適用して試算した結果、2030 年までの累計費用は約 3,759 億円となった（表 1 3 参照）。

表 1 3：初期費用の計算

年	GI基金による研究開発支援(億円)			GX移行債による製造・供給体制構築支援(億円)	合計	割引率＝4%	割引後費用(億円)
	2024年度までに計画された事業		2025年度以降				
	AtJ 実証設備	合成燃料製造					
2024	91.4	79.7	0	276	447.1	1	447
2025	91.4	79.7	10	773	954.1	0.96153846	917
2026	91.4	79.7	10	773	954.1	0.92455621	882
2027	0	79.7	10	773	862.7	0.88899636	767
2028	0	79.7	10	773	862.7	0.85480419	737
2029	0	0	10	0	10.0	0.82192711	8
2030	0	0	0	0	0.0	0.79031453	0
合計	274.2	398.5	50	3388	4091		3759

出典：著者作成

3.5. 感度分析の設定

この節では、SAF の製造コスト、燃料需要の価格弾力性、CORSIA 適格クレジット価格、および当事者適格に関する感度分析の設定について説明する。

3.5.1. SAF の製造コスト

本研究の基本分析では、2024 年から 2050 年における SAF の製造コストを算出し、そのコストを燃料価格に反映させた。特に、技術の進展によって製造プロセスが毎年進化し、技術ごとの製造コストや各技術によって生産された SAF の総生産量に占める割合は年々変動する。このような動的要因を取り入れることで、将来的な燃料価格の変動をより現実に即した形で分析することを試みた。

基準として、「中コストシナリオ」を設定し、以下の燃料価格の範囲が得られた。

表 1 4：SAF 製造のコストシナリオ（中）

中コストシナリオ	全て輸入の場合	102.9～136.7 円/L
	自国生産の場合	100～133.8 円/L

出典：著者作成

ここで、SAF を全て自国生産する場合の燃料価格が全て輸入する場合より低い背景には、輸入コストの削減や供給の安定といった国産燃料の優位性が考えられる。

しかし、将来的な技術進展や市場動向に基づく不確実性を考慮する必要があるため、本研究ではさらに「低コストシナリオ」および「高コストシナリオ」を設定し、それぞれの条件下での SAF 製造コストを再計算した。それを燃料価格に反映し、表 1 5 にまとめた。

表 1 5 : SAF 製造のコストシナリオ (高・低)

高コストシナリオ	全て輸入の場合	102.9~155.7 円/L
	自国生産の場合	100~152.8 円/L
低コストシナリオ	全て輸入の場合	102.9~120.3 円/L
	自国生産の場合	100~117.5 円/L

出典：著者作成

3.5.2. 需要曲線

3.3.1.2 で行った需要曲線の推定では、データの前処理やモデルの設定によって誤差が生じることが予想される。また、燃料需要の価格弾力性が低い場合、燃料価格の変動に対して消費者余剰はあまり変化しない。したがって、ここでも他の推計方法を用いて需要曲線を導出する。

感度分析では、線形仮定に基づく以下の需要曲線モデルを使用した。

$$P = \alpha + \beta Q$$

$$\beta = \frac{dP}{dX} = \frac{Q}{P} \varepsilon$$

P：ジェット燃料価格（円/リットル）

Q：ジェット燃料消費量（万キロリットル）

ε ：航空燃料需要の価格弾力性

このモデルを用い、2014 年から 2016 年の燃料消費量と燃料価格のデータを基に、近似する直線を導出した結果、以下の需要曲線が得られた。

$$P = -0.518Q + 571$$

この結果から、燃料価格が 1 円増加すると、燃料需要が約 1.93 万キロリットル減少するとわかる⁵⁰。

3.5.3. CORSIA の適格クレジット価格

ICAO の報告書⁵¹から、カーボンマーケットにおけるカーボンクレジット価格は取引の種類（義務的または自発的）や取引量の影響を大きく受けることが示される。

⁵⁰ 上の式を変形すると、 $X=1.93 \times (571-P)$ となる。

⁵¹ ICAO (2022 b)

本研究の基本分析では、CORSIA 適格クレジット価格として中位価格を 3.08 ドル/t-CO₂ を使用した。一方、感度分析では、価格変動の影響を考慮し、低位価格 1.19 ドル/t-CO₂ および高位価格 20.67 ドル/t-CO₂ を使用した計算を行い、価格の変動が結果に与える影響を評価した。

表 1 6 は、基本分析および感度分析における各価格設定をまとめたものである。

表 1 6：使用した CORSIA 適格クレジット価格

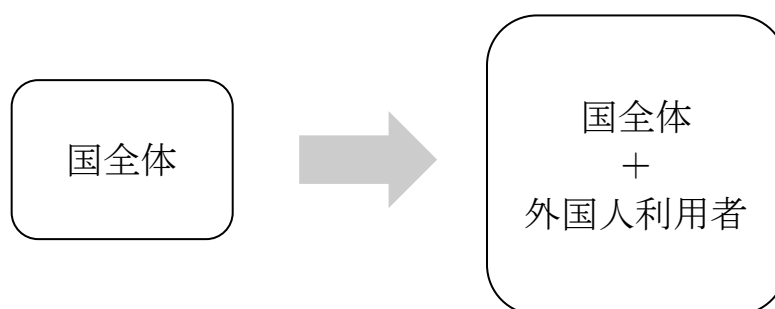
基本分析	中位価格	3.08 ドル/t-CO ₂
感度分析	低位価格	1.19 ドル/t-CO ₂
	高位価格	20.67 ドル/t-CO ₂

出典：著者作成

3.5.4. 当事者適格

当事者適格について、基本分析では「国全体」を当事者適格とした。この設定では、日本人の消費者余剰の減少のみを考慮している。そこで、感度分析では、日本人と外国人双方の消費者余剰の減少を考慮し、当事者適格を「国全体＋外国人利用者」の合計とした。

図 7：当事者適格の整理



出典：著者作成

ここで、成田空港のアンケート調査における日本人の回答割合 0.523⁵²を用いて、以下の式に基づきそれぞれの余剰の変化分を計算する。

$$\text{当事者適格が「国全体」である場合の消費者余剰減少分} = \\ (\text{当事者適格が「国全体＋外国人利用者」の場合の消費者余剰減少分}) \times 0.523$$

⁵² 成田空港における利用実態調査 (2018). <https://www.narita-airport.jp/ja/company/airport-operation/>

4. 分析結果

4.1. 基本分析の結果

4.1.1. SAF を全て輸入する場合（with-A）

表 1 7 の結果から、燃料市場外で発生する燃料供給者の管理費用に加え、SAF を全て輸入する場合（with-A）では消費者余剰の減少が大きく、オフセット義務量削減による便益ではその費用の合計の補填が困難であることが確認された。そのため、純便益はマイナスとなり、B/C 比率も 0.02 と非常に低い水準であることが示されている。

表 1 7：with-A ケースの費用便益分析結果

with-A		ベースライン (単位：億円)
燃料市場内で発生 する費用	消費者余剰の減少	16621.42
	生産者余剰の減少	0
燃料市場外で発生 する費用	燃料供給者の管理費用	42.93
	初期費用	0
費用の合計		16664.35
燃料市場外で発生 する便益	オフセット義務量減少に よる便益	290.41
便益の合計		290.41
純便益		-16373.94
B/C		0.02

出典：著者作成

4.1.2. SAF を全て自国生産する場合（with-B）

一方、SAF を全て自国生産する場合（with-B）、結果は表 1 8 の通りである。

with-B では、初期段階における設備投資や技術開発に関するコストが発生するため、燃料供給者の管理費用と合わせると、初期費用は全体の費用を押し上げる要因となっている。B/C 比率は with-A よりさらに低く、経済的実現性は極めて低いと言える。

表 1 8：with-B ケースの費用便益分析結果

with-B		ベースライン (単位：億円)
燃料市場内で発生 する費用	消費者余剰の減少	15775.48
	生産者余剰の減少	0
燃料市場外で発生 する費用	燃料供給者の管理費用	42.93
	初期費用	3759.29
費用の合計		19577.70

燃料市場外で発生 する便益	オフセット義務量減少に よる便益	290.41
便益の合計		290.41
純便益		-19287.29
B/C		0.01

出典：著者作成

4.2. 感度分析の結果

次に、感度分析の結果について述べる。なお、表 19 において Max は最善の条件下での結果、Min は最悪の条件下での結果を示す。

4.2.1. SAF を全て輸入する場合（with-A）

with-A では、当事者適格に応じて消費者余剰が大きく変動した。

当事者適格が「国全体」である場合、最善の条件では消費者余剰の減少がある程度抑えられ、オフセット義務量減少による便益が最大となり、B/C 比率は 0.21 と結果が得られた。一方で、最悪の場合では、消費者余剰の減少が大きく、B/C 比率は 0.00 と極めて悪い結果が示された。

表 19：with-A ケースの感度分析結果

with A		ベースライン	当事者適格：国全体		当事者適格：国全体＋外国人利用者	
		(単位：億円)	Max	Min	Max	Min
燃料市場内で発生 する費用	消費者余剰の減少	16621.42	9359.09	27043.08	17873.04	51644.13
	生産者余剰の減少	0	0	0	0	0
燃料市場外で発生 する費用	燃料供給者の管理費用	42.93	42.93	42.93	42.93	42.93
	初期費用	0	0	0	0	0
費用の合計		16664.35	9402.02	27086.01	17915.97	51687.06
燃料市場外で発生 する便益	オフセット義務量減少 による便益	290.41	1948.94	97.13	1948.94	97.13
便益の合計		290.41	1948.94	97.13	1948.94	97.13
純便益		-16373.94	-7453.08	-26988.88	-15967.03	-51589.93
B/C		0.02	0.21	0.00	0.11	0.00

(表中の網掛部分は、最善シナリオと最悪シナリオの純便益と B/C である。)

出典：著者作成

また、当事者適格が「国全体＋外国人利用者」の場合、消費者余剰の減少が国全体を当事者適格とした場合と比較して大きくなることが分かる。便益の合計には大きな変化は見られないものの、費用の増加により純便益がさらに減少し、特に最悪の条件下では純便益が大幅なマイナスの値となることがわかる。

さらに、最善の条件下で、どの当事者適格でも純便益がマイナスの値となることがわかる。

4.2.2. SAF を全て自国生産する場合（with-B）

一方、with-B の場合では、当事者適格に応じて消費者余剰が大きく変動する点は with-A と共通であった。しかし、自国生産に伴う初期段階での設備投資コストや技術開発コストが発生するため、全ての条件下で費用が with-A よりも大きく上回る結果となった。

表 2 0：with-B ケースの感度分析結果

with B		ベースライン	当事者適格：国全体		当事者適格：国全体+外国人利用者	
		(単位：億円)	Max	Min	Max	Min
燃料市場内で発生する費用	消費者余剰の減少	15775.48	9404.79	25673.74	17960.31	49029.10
	生産者余剰の減少	0	0	0	0	0
燃料市場外で発生する費用	燃料供給者の管理費用	42.93	42.93	42.93	42.93	42.93
	初期費用	3759.29	3759.29	3759.29	3759.29	3759.29
費用の合計		19577.70	13207.01	29475.96	21762.53	52831.32
燃料市場外で発生する便益	オフセット義務量減少による便益	290.41	1948.94	94.64	1948.94	94.64
便益の合計		290.41	1948.94	94.64	1948.94	94.64
純便益		-19287.29	-11258.07	-29381.32	-19813.59	-52736.68
B/C		0.01	0.15	0.00	0.09	0.00

(表中の網掛部分は、最善シナリオと最悪シナリオの純便益と B/C である。)

出典：著者作成

5. まとめ

5.1. 結論

基準ケースおよび感度分析の結果をまとめると、表 2 1 のようになる。両ケースにおいて、いかなる感度分析によっても損失が発生することが示された。特に燃料市場内における消費者余剰の減少は「オフセット義務量の減少便益」だけでは回収が困難であるほど過大である。

また、燃料市場での消費者余剰の減少については、3.1.1 で導出したジェット燃料の需要曲線の価格弾力性は -0.14 であるため、ジェット燃料の限界費用の上昇が消費者余剰減少に直結した。

表 2 1：費用便益分析結果（上段：NSB（億円）下段：B/C）

	基準ケース	変動ケース	
		当事者適格：国全体	当事者適格：国全体+外国人利用者

		ベスト ケース	ワーストケー ス	ベスト ケース	ワーストケー ス
with-A (100%輸入)	-16373.94 (0.02)	-7453.08 (0.21)	-26988.88 (0.00)	-15967.03 (0.11)	-51589.93 (0.00)
with-B (100%自国生 産)	-19287.29 (0.01)	-11258.07 (0.15)	-29381.32 (0.00)	-19813.59 (0.09)	-52736.68 (0.00)

出典：著者作成

5.2. 政策提言

政策へのインプリケーションとしては、大まかに 3 点を挙げる。

1 点目に、SAF はその製造コストの大きさが市場での余剰の大きさに強く影響を与えるため、可能な限り低コスト化を早く、大きく行うことが重要である。現状の航空燃料の取引量が膨大であることから、僅かな限界費用の上昇でも消費者余剰の減少に与える影響の大きさは、他の費用項目や便益項目と比べても非常に大きい。そのため、社会的な便益を考慮するのであれば、SAF が安価な製造を行えるように最大限の支援をすべきである。

2 点目に、SAF を自国生産する場合、海外からの輸入よりもコストを低く抑える必要がある。SAF の生産コストと、初期投資額の大きさが純便益に与える影響はかなり大きい。そのため、SAF の自国内生産によるコスト低下が輸入 SAF のそれを上回るのか、あるいはそのコスト低下による社会的費用の低下が非常に大きい初期投資額と釣り合うかどうか、慎重に検討する必要がある。

3 点目に、航空業界におけるその他の炭素排出削減策に注力する方が費用効率が良い可能性がある。感度分析の結果のとおり、SAF の生産コストが最低かつ、カーボンクレジットの価格が高い場合のみ純便益が正となり、ベースラインケースでも B/C が 0.02 と非常に低い。一方、1.1.1 節で紹介したもののうち、運行方法の改善などは既存の資源を効率的に利用する施策であり、SAF よりも費用効率が高い可能性がある。

5.3. 分析の限界と今後の研究課題

まず分析の限界について述べる。

1 点目に SAF の採算性の試算を行う上で、今後の SAF の製造コストの予測をより精緻に行うことが重要である。上述の通り、SAF の導入によって航空燃料調達のコストが上昇することの純便益への影響は非常に大きく、現在の価格予測を用いた推計では、消費者余剰減少の費用が非常に大きなものになってしまう。

2 点目に、カーボンオフセット価格の不確実性だ。これは純便益の大きさに強く影響を与える。今回は 3.08 ドル/t-CO₂ という値を用いたが、CARBONcredits.com での Aviation

Industry Offset の価格は 0.19 ドル/t-CO₂ となっており、非常に低い。一方で CORSIA の将来推計では 27~91 ドル/t-CO₂ となるとされており、どのケースの実現可能性が高いかが分からず、推計の精度が低くなってしまう。

さらに、今回の分析では、SAF 導入に関する政策オプションを精緻にモデル化していくための時間がなかったため、非常に簡単な定式化にとどまった。また、公開情報では SAF の生産コストや導入割合、具体的な導入方法などを特定することが難しかった。

今後の研究課題については、前節での通り、SAF の生産コスト、カーボンクレジットの価格、SAF の導入割合は、より精緻なリサーチを行った数値を用いることで、現実 に即した純便益を図ることにつながる。加えて、今回は航空燃料市場、航空サービス市場ともに完全競争を仮定したが、航空燃料市場は実態としては独占市場に近い可能性もあり得る。政策オプションには、飛行機価格への価格転嫁を進めるための制度や、SAF 生産や SAF 導入に対する補助金なども存在するため、それらも含めたモデル化を進めていくべきである。

謝辞

本稿の執筆にあたり、2024 年度秋学期講義「公共政策の経済評価」において貴重な助言を賜った岩本康志教授ならびにティーチングアシスタントの遠藤瑞季氏に深く感謝する。また、同講義内の報告会では、受講生の皆様から示唆に富む意見をいただき、本分析の精度を高めることができた。厚く御礼申し上げる。

なお、本稿における推定結果および提言は筆者個人の見解であり、誤りがある場合、その責任はすべて筆者に帰する。

参考文献

- ANA. (2020). 再生可能エネルギー大手 NESTE と 中長期的な SAF の調達に関する覚書を締結.
参照先: ANA Group: <https://www.anahd.co.jp/group/pr/202010/20201026-2.html>.
- ICAO. (2022a). REPORT ON THE FEASIBILITY OF A LONG-TERM ASPIRATIONAL GOAL (LTAG) FOR INTERNATIONAL CIVIL AVIATION CO2 EMISSION REDUCTIONS. 参照先: LTAGReport: https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Documents/REPORT%20ON%20THE%20FEASIBILITY%20OF%20A%20LONG-TERM%20ASPIRATIONAL%20GOAL_en.pdf.
- ICAO. (2022b). Analysis in Support of the 2022 CORSIA Periodic Review: Focus on costs to States and operators.
[https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/2_CAEP_CORSIA%20Periodic%20Review%20\(C225\)_Focus%20on%20Costs.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/2_CAEP_CORSIA%20Periodic%20Review%20(C225)_Focus%20on%20Costs.pdf)
- ICAO. (2024). CORSIA Newsletter. 参 照 先 : https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Newsletter_Mar%202024_ENV.pdf.
- ICAO. (n.d.). ICAO tracker of SAF facilities. 参照先: ICAO: <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Production-Facilities.aspx>.
- NEDO. (2024). 2025 年度以降の新規事業について. 参照先: NEDO: <https://www.nedo.go.jp/content/800017716.pdf>.
- NEDO 新エネルギー部 (2020) 「バイオジェット燃料生産技術開発事業」(中間評価) 分科会資料 5 「バイオジェット燃料生産技術開発事業」(中間評価) (2017~2024 年度 8 年間) プロジェクトの概要 (公開) <https://www.nedo.go.jp/content/100925276.pdf>.
- SkyNRG. (2024). SUSTAINABLE AVIATION FUEL MARKET OUTLOOK. 参 照 先 : <https://www.efuel-alliance.eu/fileadmin/Downloads/SAF-Market-Outlook-2024-Summary.pdf>.
- Woodcote Media Ltd. (2020 年 1 月). Paraguayan Government grants 'free zone regime' for Omega Green biofuel plant. 参 照 先 : biofuels international: <https://biofuels-news.com/news/paraguayan-government-grants-free-zone-regime-for-omega-green-biofuel-plant/>.
- World Economic Forum. (2021). EU Policy Briefing 2021. Retrieved from https://www3.weforum.org/docs/WEF_CST_EU_Policy_2021.pdf.
- 運輸総合研究所. (2022a). 我が国における SAF の普及促進に向けた課題・解決策.
- 運輸総合研究所. (2022b). 航空分野の長期的な排出削減対策見通し.
https://www.jttri.or.jp/pdf/aviation_portal-05.pdf.
- 経済産業省. (2023). GX 実現に向けた投資促進策を具体化する「分野別投資戦略」を取りまとめました. <https://www.meti.go.jp/press/2023/12/20231222005/20231222005.html>.
- 経済産業省. (2024). カーボン・クレジット・レポートを踏まえた 政策動向. 参照: https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_credit/pdf/006_03_00.pdf.
- 経済産業省資源エネルギー庁. 給油所小売価格調査(ガソリン、軽油、灯油). Retrieved from https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/petroleum_and_lpgas/pl007/results.html.
- 国土交通省. (2021 年 3 月). 航空機運航分野における CO2 削減に関する検討会 (第 3 回). 参

照先: <https://www.mlit.go.jp/common/001427236.pdf>.

国土交通省. (2021 年 9 月). 航空分野における CO2 削減に向けた取組. 参照先: <https://www.nite.go.jp/data/000129943.pdf>.

国土交通省. (2022). 航空脱炭素化の取組の進捗について. 参照先: 国土交通省: <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001571738.pdf>.

国土交通省. (2023a). 3 アプローチの取組状況. 参照先: 国土交通省: <https://www.mlit.go.jp/koku/content/001600749.pdf>.

国土交通省. (2023b). 日本初! 国内ブレンドの航空燃料で空を飛びました～S A F の サプライチェーン構築に向けた実証事業は最終段階～. https://www.mlit.go.jp/report/press/kouku08_hh_000043.html.

国土交通省. (2024). CORSIA 適格燃料 登録・認証取得ガイド. 国土交通省 航空局 カーボンニュートラル推進室.

産業技術環境局 (2022) 「第 3 回 産業構造審議会 産業技術環境分科会 グリーントランスフォーメーション推進小委員会/総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 2050 年カーボンニュートラルを見据えた次世代エネルギー需給構造検討小委員会 合同会合」資料 2「エネルギーを起点とした産業の GX (グリーントランスフォーメーション) について」p.41, https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/green_transformation/pdf/003_02_00.pdf.

資源エネルギー庁. (2023 年 5 月). 持続可能な航空燃料 (SAF) の 導入促進に向けた施策の方向性について (中間取りまとめ (案)) . https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/saf/pdf/003_07_00.pdf.

資源エネルギー庁. (2024a). 2030 年における持続可能な航空燃料 (SAF) の供給目標量の在り方. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen_nenryo/nenryo_seisaku/pdf/016_04_00.pdf.

資源エネルギー庁. (2024b). SAF 製造に向けて国内外の企業がいよいよ本格始動. https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/saf_2024.html.

資源エネルギー庁. (2024c) 「石油製品需給動態統計調査 石油統計 年報」, <https://www.e-stat.go.jp/dbview?sid=0003171973>.

世界経済のネタ帳 (2025) 「ドバイ原油価格の推移」, https://ecodb.net/commodity/crude_dubai.html, 参照日 2025 年 1 月 26 日

全日本空輸株式会社、日本航空株式会社. (2021). 共同レポート 2050 年 航空輸送における CO2 排出実質ゼロへ向けて. <https://www.anahd.co.jp/group/pr/pdf/20211008-1-1.pdf>.

総務省統計局. 航空輸送統計調査. 第 7 表 航空運輸事業・航空機使用事業月別、油種別、燃料消費量. https://www.e-stat.go.jp/stat-search/database?page=1&statdisp_id=0003173887.

総務省統計局. 航空輸送統計調査. 第 2 表 国内定期航空月別運航および輸送実績. https://www.e-stat.go.jp/stat-search/database?page=1&statdisp_id=0003173921.

炭素市場エクспレス. (n.d.) 国際航空セクターにおける取り組み. CORSIA 導入の背景. <http://carbon-markets.env.go.jp/mkt-mech/climate/icao.html>.

デロイトトーマツコンサルティング合同会社 (2024) 「農林水産省 農林水産技術会議事務局 研究開発動向等調査委託事業 (海外・異分野動向調査) 2023 成果報告書」, https://www.affrc.maff.go.jp/docs/innovate/attach/pdf/R5_seika.pdf.

内閣府経済社会研究所．国民経済計算（GDP 統計）．
<https://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/menu.html>.
三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社（n.d.）「外国為替相場市場－前年の年末・年間平均 2024」，
https://www.murc-kawasesouba.jp/fx/year_average.php.
矢野 貴久. (2023). 2022 年度成果報告会「バイオジェット燃料生産技術開発事業」の概要，
<https://www.nedo.go.jp/content/100957715.pdf>.