

航空機旅客輸送における環境効率性に関する トレードオフ構造の分析

森長 誠¹・松井 孝典²・月岡 秀文¹・篠原 直明³

¹非会員 防衛施設周辺整備協会 第一調査研究室 (〒105-0014 東京都港区芝3-41-8)

E-mail: morinaga@dfeia.or.jp, tsukioka@dfeia.or.jp

²正会員 大阪大学大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: matsui@see.eng.osaka-u.ac.jp

³非会員 成田国際空港振興協会 環境部 (〒289-1601 千葉県山武郡芝山町香山新田字雨堤76)

E-mail: shino@napf.or.jp

本研究は、航空機旅客輸送という経済活動と、運用に伴う各種環境負荷のトレードオフ構造を評価するためのモデル開発を目的とし、とりわけ本稿では、航空機種ごとに環境効率性指標として、単位環境資源投入あたりの旅客輸送数と航続距離を設定し、騒音・大気汚染物質・地球温暖化ガスに関する環境効率性のトレードオフ構造を分析した結果を報告する。環境負荷指標のみで評価した場合には全ての環境要素間で正の相関がみられたが、座席数という部分的な経済性を考慮した場合、騒音とNO_xでトレードオフの傾向が見られた。さらに機種ごとの飛行実績による航続距離を考慮した環境効率性の評価では結果が大きく異なった。

Key Words : aviation transportation, resource efficiency model, trade-off analysis

1. はじめに

国内・国際航空とも需要が増加する中、航空機からの二酸化炭素 (CO₂) 排出量は今後とも増加が見込まれている¹⁾。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の報告によると、1992年の化石燃料からのCO₂排出量全体に占める航空機からの排出量は2.4%と推定されていたが、現在はそれを上回る値となっていることが見込まれている²⁾。このため、技術的対応策としてはCO₂排出量のより少ないエンジン開発などが³⁾、また炭素管理のための制度設計として、EUの空港は排出権取引制度の運用を開始⁴⁾、消費者サイドでは航空機搭乗に伴うCO₂オフセットモデルなどが展開されている⁵⁾。しかし、航空機による環境負荷は二酸化炭素排出だけではなく、炭化水素 (HC)、窒素酸化物 (NO_x)、一酸化炭素 (CO)、騒音などのLocal Air Qualityに関する環境負荷もあり、国際民間航空機関 (ICAO)ではこれら複数の環境側面の相互依存性を考慮した総合的な管理が重要であると述べている⁶⁾。その一方で、大陸間移動や辺境地へのアクセス、大陸間物資輸送、遠隔地への短時間での輸送など、他の交通機関にはない航空機のみが達成しうる様々な機能による経済的要求も同時に満足する必要がある、環境-経済統合評価モデル

の開発が求められる。このような背景の中、本研究は、航空機旅客輸送という経済活動と、運用に伴う各種環境負荷のトレードオフ構造を評価するためのモデル開発を目的とし、とりわけ本稿では、航空機種ごとの環境効率性指標として、単位環境資源投入あたりの旅客輸送数と航続距離を設定し、騒音・大気汚染物質・地球温暖化ガスに関する環境効率性の相関を分析した結果を報告する。

2. 本稿で用いる評価モデルの考え方

(1) モデルの概要

大気汚染物質や地球温暖化ガス、騒音などの環境負荷が少ない機種ほど評価が高くなるモデルを考える場合、環境負荷量のみに着目するとすれば、まず「モデル1: 環境負荷量の逆数」で評価する方法が考えられる。一方で、1回の飛行で収容できる人数は機種ごとに異なり、経済性と環境負荷低減の両側面から考えれば1度に多くの人を運べる機種は飛行回数を削減することができるため高い評価が与えられるべきである。従ってこの場合「モデル2: 座席数を環境負荷量で割った評価」という考え方が必要である。しかしながら、ここまでは航空機

本体の性能レベルでの評価である。地域ごとの人口分布や地域特性などの航空需要を反映し、それら個々の航空機をどの区間で何機を運用していくかという総合的な航続実績も社会的便益の生産と地球温暖化ガスの排出に大きく関連するため、モデルに含められるべき要素である。そこで「モデル3：座席数と航続距離実績の積を環境負荷量で割った評価」をさらに設定する。

(2) 環境負荷量の設定

環境負荷の変数には、ICAOが設定しているHC、NO_x、CO、CO₂、騒音の5項目を対象とした。航空機から排出されるHC、NO_x、COなどの大気汚染ガスや騒音は、主に地域環境へ負荷を与えるという側面を有する。これらは、上空での排出が人体に与える影響は殆ど無いと考えられるため、主に空港を離着陸する際の空港周辺への影響を境界として、1機が滑走路に向かって着陸し、滑走路を走行してそのまま離陸するまでのサイクル（LTOサイクル）を考える必要がある。一方でCO₂などの地球温暖化ガスは全球への蓄積が問題となるため、空港周辺を飛行する際の排出量のみならず全移動区間における排出量を評価する必要がある。ここで、機種ごとの移動区間は「どの機種がどの空港で何回使用されるか」という航空需要に関連する。我々は、モデル3のような航空需要の現状を踏まえた評価モデルを提案する必要があると考えているため、CO₂排出量の算定では機種ごとの単位期間中の飛行実績（移動距離×回数）から総飛行距離を考慮した。具体的には、本稿では例として1年間を単位期間とする。このため、HC、NO_x、CO、騒音などの地域環境に係る排出物に関しては、CO₂とのトレードオフが検討できるよう、1年間における機種ごとの離着陸回数を考慮する。

(3) 経済性変数の設定

上述の通り、機種ごとの座席数は異なる。より多くの

旅客を輸送するという経済性を高めるためには座席数の多い機種を用いればよい。また、何人の乗客をどのくらいの距離だけ輸送したか考える必要があるため、ここでは、航空分野における経済性を表す指標として知られる「座席キロ」を用いる⁹⁾。これは座席数×飛行距離(km)で算出され、何人の乗客を何km運ぶ事が出来るかという指標である。

(4) 評価量の算出

本稿で対象とした航空機の機種を表-1に示す。これらは我が国の国内旅客輸送で用いられているジェット機の主な機種である。HC、NO_x、CO、CO₂はICAOのAircraft Engine Emission Databankをもとに機種ごとの排出量を算定した⁷⁾。また騒音値に関しては、EASA Noise Type Certificatesのデータベースをもとに算出した⁸⁾。両データベースは、LTOサイクルにおける排出量をエンジン型式ごとに整理したものである。それぞれの機種に搭載されるエンジンは複数のパターンが存在するため、機種ごとの環境負荷量の算定には、エンジン型式ごとの負荷量の平均値を用いた。これらのデータベースはLTOサイクルでの排出量に限定されるため、運航距離によって異なる巡航時のCO₂の排出量は別途計算する必要がある。このため、CO₂に関しては「LTOサイクルでの排出量×年間総飛行距離」で算出した。地域環境負荷の大気汚染物質は「LTOサイクルでの負荷量×年間飛行回数」とした。機種ごとの飛行回数は、まず、平成24年7月現在の国内の全空港における時刻表と使用機種を整理することで、1日当たりの全国レベルでの機種飛行割合を算出した。この飛行割合と、国土交通省による空港管理状況調査⁹⁾に示された年間の総飛行回数を掛け合わせて、年間の機種ごとの飛行回数を推定した。なお、空港管理状況調査は実績であるため最新のものとして平成22年の飛行回数を使用している。

表-1 機種ごとの座席数と飛行実績および環境負荷の推定値

Aircraft	Number of engine	Sheet [person]	Estimated flight distance in 2010 [km]	LTO Total mass					Estimated CO ₂ in 2010 [kg]
				IIC [g]	CO [g]	NO _x [g]	kg-CO ₂ [kg]	Noise EPN [dB]	
B747-400	4	565	11,580	4,037	27,428	65,615	11,003	298	1,742,743
B777-300	2	514	114,547	526	12,145	62,190	7,865	285	3,319,155
B777-200	2	387	62,709	2,125	26,312	40,813	6,476	281	5,049,540
B767-300	2	242	114,547	2,551	15,022	26,903	5,075	284	6,025,043
B737-400	2	150	52,247	768	12,534	7,879	2,510	275	1,559,925
B737-500	2	128	51,116	768	12,534	7,879	2,510	271	1,110,080
B737-700	2	120	23,047	1,078	11,627	8,626	2,461	278	506,400
B737-800	2	171	180,549	1,071	11,780	10,039	2,675	276	6,519,805
A320	2	157	50,889	1,717	14,695	9,457	2,617	274	1,367,716
EMBRAER 170	2	76	27,982	36	4,092	4,641	1,515	273	363,536
CRJ-200	2	60	47,513	626	6,700	2,274	1,028	254	375,182
B787-8	2	264	11,448	261	10,428	29,163	2,769	275	576,576

3. 分析結果

(1) 環境負荷のみに着目した分析（モデル1）

表-2に航空機の機種（エンジン）の環境性能レベルでの分析結果を示す。社会・経済動向に起因して変化すると考えられる機種ごとの飛行回数や飛行距離を考慮せず、機種（エンジン）が有する物理的な環境性能のみに着目し、「各種環境負荷量」におけるの相関分析を実施した。全ての相関係数は5%水準で有意であった。いずれの組み合わせも中～高水準で正の相関があることが分かる。

(2) 機種の座席数を考慮した分析結果（モデル2）

次に、「座席数/各種環境負荷量」を指標とした相関分析を実施した。その結果を表-3に示す。（1）で検討した環境負荷量のみでの分析とは結果が大きく異なり、より多くの人を運べるという経済性を考慮したこの指標ではいくつかの項目間でトレードオフが生じた。より顕著なものとして、騒音とNO_xの間では強い負の相関が生じている。機種ごとの散布図を図-1に示す。この評価モデルを用いた場合、環境負荷の側面として騒音による影響とNO_xによる両立が問題となる。

(3) 座席・キロを考慮した分析結果（モデル3）

「座席・キロ/各種環境負荷量」を指標とした相関分析を実施した結果を表-4に示す。この指標は実態の航空需要を反映したものである。モデル2における経済性のパラメータとして座席数のみを考慮したモデルでは環境負荷の側面でトレードオフが生じるが、航空需要に基づく機種構成を検討することにより、現状の我が国における機種配備は比較的社会的・経済性と環境負荷のバランスがとれた構成になっていることを示すことが出来る。一方、とりわけNO_xと他の環境項目の間で、環境負荷のみに注目した場合の正の相関関係が薄れる傾向となっているが、例えば図-2に示すように、NO_x-Noiseの間で、B737-800が相関関係を弱めている。B737-800は小型のジェット機で、近年、急速に需要が増加している機種であ

表-2 モデル1による相関分析結果

		環境負荷 ¹ ・LTO ¹				
		Noise	HC	CO	Nox	CO ₂
環境負荷 ¹ ・LTO ¹	Noise	-				
	HC	0.69	-			
	CO	0.70	0.86	-		
	Nox	0.80	0.56	0.68	-	
	CO ₂	0.87	0.74	0.80	0.95	-

表-3 モデル2による相関分析結果

		座席数・環境負荷 ¹ ・LTO ¹				
		Noise	HC	CO	Nox	CO ₂
座席数・環境負荷 ¹ ・LTO ¹	Noise	-				
	HC	-0.05	-			
	CO	0.63	0.41	-		
	Nox	-0.79	-0.07	-0.48	-	
	CO ₂	0.13	-0.09	0.46	0.24	-

表-4 モデル3による相関分析結果

		座席数・環境負荷 ¹ ・LTO ¹ or 飛行 ¹ ・yr ¹				
		Noise	HC	CO	Nox	CO ₂
座席キロ・環境負荷 ¹ ・LTO ¹ or 飛行 ¹ ・yr ¹	Noise	-				
	HC	0.83	-			
	CO	0.91	0.90	-		
	Nox	0.62	0.85	0.82	-	
	CO ₂	0.41	0.47	0.48	0.75	-

る。NO_xの評価は高いが騒音排出量が多くなっているが、これは座席数の少なさに対して、騒音排出量が他の機種と大きく異なることによると考えられる。航空需要に基づいた機種配備を考える際に、ここで示した「座席・キロ/環境負荷量」のマトリクスにおける相関係数が最適化される必要がある。

4. 考察

(1) まとめ

本稿では、国内旅客のデータに基づき、経済性と環境負荷を同時に評価するモデルの重要性について検討した。環境負荷のみに着目したモデル1では環境負荷項目間で

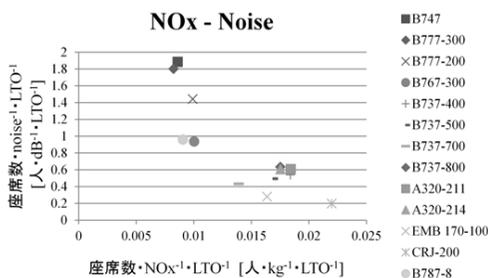


図-1 モデル2によるNO_xと騒音の対応関係

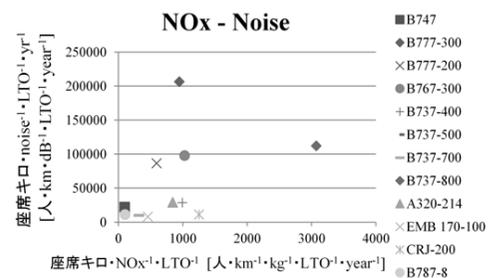


図-2 モデル3によるNO_xと騒音の対応関係

のトレードオフはみられなかったが、同じく機種の性能レベルでの評価である座席数のパラメータを導入して経済性の一部を考慮をしたモデル2の結果は大きく異なっている。特に、NO_xと騒音との間で強い負の相関が得られており、機種の性能レベルではこのようなトレードオフ問題が発生することが明らかとなった。しかしながら、機種そのものの特性としてはこのようなトレードオフの性質を有するものではあるが、更なる経済性指標として航続距離も含めて評価した場合には決してトレードオフ構造にはなっていないという見方ができる。機種の組み合わせの最適化を考える場合は、モデル3で示したように、航空需要の実態（あるいは予測）を踏まえた座席キロと各々の環境負荷量との間の相関をシミュレーションし、トレードオフが生じていないか確認する事が重要であると考えられる。

(2) 国際線および貨物航空への適用における課題

本稿では国内旅客に限定した検討を実施した。国内旅客の場合は離島などを除き、道路交通や鉄道交通の代替による機会費用とのトレードオフを念頭に置いた上で、他の交通モードにおける座席キロと環境負荷原単位との比較を行い、国内旅客全体の最適化を考える必要があるだろう。一方で国際旅客（国内の離島を含む）については船舶移動以外の代替案がない。しかしながら、例えば福岡県と釜山を結ぶ高速ジェット船はわずか3時間での移動を可能とする。このような近距離移動については国際線といえども船舶への代替も含めた戦略が本来必要であり、これについても座席キロと環境負荷原単位との比較が必要である。常識的に考えると国際旅客で船舶移動できる地域はごく限られており、人々の需要は航空移動を選択すると考えられる。機会費用はそれぞれの利用者のライフスタイルや移動目的によって異なるが、航空需要自体をマネジメントすることも重要である。国内およ

び国際貨物は輸送物資によって短時間輸送が不可欠なものとならないものがある。座席キロの代わりに積載量と航続距離を用いた検討が必要であり、これらについて他の交通モードとの比較を行うべきである。

(3) 機会費用を考慮したモデルに向けて

例えば東京-大阪間の航空機での移動は約1時間だが新幹線では2.5時間を要する。この1.5時間の差による機会費用の差は非常に多様な要因で構成される。少なくとも本稿で示したモデル3では機会費用が含まれておらず、今後は「座席・キロ/時間」のモデル化に向けた検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 丹生清輝，磯部賢：空港からの二酸化炭素排出量の算定と削減効果の推計，国総研資料，Vol.524，2009。
- 2) 財団法人空港環境整備協会，財団法人運輸政策研究機構：国際航空からのCO₂排出抑制策に関する報告書，2007。
- 3) 久野正雄：ボーイング787型機の低騒音技術と低燃費技術，航空環境研究，Vol.16，pp.47-52，2012。
- 4) 日原勝也：国際航空交通と地球環境問題に関する最近の状況，航空環境研究，Vol.16，pp.10-17，2012。
- 5) 全日空：アニュアルレポート，2011。
- 6) 山田一郎：航空機と空港の騒音問題に関する出来事と今度の課題，騒音制御，Vol.30，No.4，pp.301-302，2006。
- 7) ICAO：Aircraft Engine Emission Databank，<http://easa.europa.eu/environment/edb/aircraft-engine-emissions.php>
- 8) European Aviation Safety Agency：EASA Noise Type Certificates，<http://www.easa.europa.eu/certification/type-certificates/noise.php>
- 9) 国土交通省：暦年・年度別空港管理状況調書，2010。

(2012. 7. 18 受付)

TRADE-OFF ANALYSIS OF RESOURCE EFFICIENCY IN AVIATION PASSENGER TRANSPORTATION

Makoto MORINAGA, Takanori MATSUI, Hidebumi TSUKIOKA
and Naoaki SHINOHARA

The purpose of this study is developing a model which could be used to evaluate the economic aspect and the environmental burden simultaneously toward sustainable aviation transportation. In this paper, seating capacity and/or flight distance per unit environmental burden emission such as HC, CO, NO_x, Noise and CO₂ was calculated in order to evaluate resource efficiency for each aircraft type. It was suggested that the all emissions were positively correlated with each other when the seating capacity and/or flight distance were not included in the evaluation model. However, it was also suggested that the comparison between NO_x and Noise was trade-off when the seating capacity was included in the model. Additionally, in the case of including flight distance, the trade-off was canceled. As a near future task, the model considered with opportunity cost for transportation is needed.