

2024（令和6）年度 修士学位論文

航空機の運航効率向上に向けた
直接運航経費の傾向分析

Trend Analyses of Direct Operational Cost for Improvement of
Aircraft Operational Efficiency

2025年2月10日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻
航空宇宙工学コース

1275038 吉川 友佑

指導教員 原田 明德 准教授
岡 宏一 教授

目次

第 1 章 序論	7
1.1 研究背景	7
1.2 研究目的	9
1.3 論文構成	9
第 2 章 利用データおよび機体性能モデル	10
2.1 CARATS オープンデータ	10
2.2 QAR 飛行データ	12
2.3 機体性能モデル	13
2.4 気象データ	13
第 3 章 飛行状態推定 (CARATS)	14
3.1 飛行状態推定の手順	14
3.1.1 対地速度の推定法	14
3.1.2 真対気速度の推定法	15
3.1.3 燃料消費量の推定法	16
3.2 飛行状態推定の精度評価	21
3.2.1 対地速度, 真対気速度の比較	21
3.2.2 燃料流量の比較	21
第 4 章 直接運航経費の推定・精度評価	23
4.1 直接運航経費とコストインデックス CI の関係	23
4.2 直接運航経費の推算	24
4.3 直接運航経費推定の精度評価	26
4.3.1 精度の評価方法	26
4.3.2 比較対象となる直接運航経費の詳細	26
第 5 章 直接運航経費の傾向分析	29
5.1 直接運航経費の年間分布と統計分析	29
5.2 時間帯・曜日・季節ごとの直接運航経費の傾向解析	31
5.2.1 数量化理論 1 類について	31

5.2.2	時間帯ごとの変動傾向.....	31
5.2.3	季節ごとの変動傾向.....	35
5.2.4	月ごとの変動傾向.....	36
5.2.5	曜日ごとの変動傾向.....	37
5.2.6	時間帯・曜日・季節ごとの影響度の比較分析.....	38
5.3	直接運航経費の予測モデル構築.....	41
5.3.1	説明変数間の相関関係.....	41
5.3.2	説明変数の組み合わせと予測精度の変動.....	42
5.3.1	コスト予報モデルの回帰式.....	42
5.3.2	コスト予報モデルの誤差評価.....	45
第6章	結論.....	46
6.1	まとめ.....	46
6.2	今後の課題.....	47
	謝辞.....	48
	参考文献.....	49

図目次

図 1-1	日本の年平均気温偏差の経年変化	7
図 3-1	飛行状態推定	14
図 3-2	対地速度と真対気速度の関係	15
図 3-3	対地速度	21
図 3-4	真対気速度	21
図 3-5	燃料流量	22
図 4-1	飛行時間と燃料消費量の関係 ^[10]	24
図 4-2	真値に対する誤差の分布特性	28
図 5-1	DOC の分布特性	30
図 5-2	便ごとの DOC の傾向	32
図 5-3	各便が及ぼす DOC への影響度	33
図 5-4	高頻度運航便ごとの DOC の傾向	33
図 5-5	グループ分けした便が及ぼす DOC への影響度	34
図 5-6	季節ごとの DOC の年間	35
図 5-7	月ごとの DOC の傾向	36
図 5-8	各月が及ぼす DOC への影響度	37
図 5-9	曜日ごとの DOC の傾向	37
図 5-10	各曜日が及ぼす DOC への影響度	38
図 5-11	各要因が及ぼす DOC への影響度の比較	39
図 5-12	各回帰モデルにおける正確性の比較	40
図 5-13	コスト予報モデルに基づいた 3D 表現	43
図 5-14	予測誤差の分布特性	45

表目次

表 2-1	使用する CARATS オープンデータ 2019 年度の概要.....	10
表 2-2	使用する CARATS オープンデータ 2022 年度の概要.....	11
表 2-3	使用する QAR 飛行データ 2019 年の概要.....	12
表 4-1	DOC の統計量比較 (2019 年度)	27
表 4-2	真値に対する誤差の統計量.....	27
表 5-1	DOC の統計量 (2022 年度)	29
表 5-2	各便の便数 (1 年間)	32
表 5-3	各季節の便数.....	35
表 5-4	各月の便数.....	36
表 5-5	各曜日の便数.....	37
表 5-6	説明変数間の相関関係.....	41
表 5-7	説明変数の組み合わせによる予測精度の違い.....	42
表 5-8	コスト予報モデルの回帰式の詳細.....	43
表 5-9	予測誤差の統計量.....	45

記号一覧

文字	使用単位	説明
a	[kg/s]	飛行時間の重み係数
C_D	[-]	抗力係数
C_{D0}	[-]	有害抗力係数
C_{D2}	[-]	誘導抗力係数ファクタ
C_{f1}	[kg/(s·N)]	第一推力比燃料消費率
C_{f2}	[kt]	第二推力比燃料消費率
C_{f3}	[kg/s]	第一降下燃料流量係数
C_{f4}	[ft]	第二降下燃料流量係数
C_{fcr}	[-]	巡航燃料流量修正係数
C_{fuel}	[\$/lb]	燃料の価格
C_L	[-]	揚力係数
$C_{Tc,1}$	[N]	第一最大上昇推力係数
$C_{Tc,2}$	[ft]	第二最大上昇推力係数
$C_{Tc,3}$	[1/ft ²]	第三最大上昇推力係数
$C_{Tc,4}$	[K]	第一最大上昇推力補正係数
$C_{Tc,5}$	[1/K]	第二最大上昇推力補正係数
C_{Tcr}	[-]	最大巡航推力補正係数
C_{time}	[\$/min]	時間当たりのコスト
CI	[-]	コストインデックス
D	[N]	抗力
F	[kg]	燃料消費量
g_0	[m/s ²]	重力加速度
H	[m]	高度
J	[\$]	直接運航経費
L	[N]	揚力
m	[lb], [kg]	総重量
R	[J/(K·mol)]	気体定数
S	[m ²]	翼面積
T	[K]	大気温度
T_0	[K]	地上における大気温度

文字	使用単位	説明
t	[s]	時間
t_0	[s]	始点時刻
t_f	[s]	終点時刻
Thr_{max}	[N]	最大推力
V_{ES}	[m/s]	慣性速度 (ES)
V_{GS}	[m/s]	対地速度(GS)
V_{TAS}	[m/s]	真対気速度 (TAS)
V_{wind}	[m/s]	風速
α	[deg]	迎角
γ	[deg]	飛行経路角
η	[kg/(s·N)]	比燃料消費率
θ	[deg], [rad]	経度
φ	[deg]	緯度
λ	[deg]	緯度
μ	[kg/s]	燃料流量
μ_{nom}	[kg/s]	ノミナル燃料流量
μ_{min}	[kg/s]	最小燃料流量
ρ	[kg/m ³]	大気密度
φ	[deg]	地理経度

記号一覧 (第 5 章にて統計学使用の際のみ用いる)

文字	説明
$f(x)$	推定した回帰式
k	説明変数の数
n	サンプル数
y	目的変数
x_{wind}	風速
x_{mass}	初期重量

第1章 序論

1.1 研究背景

近年、世界の平均気温は年々上昇を続け地球温暖化問題が深刻化している。環境省の気候変動に関する最新の報告によると、日本の年平均気温は様々な変動を繰り返しながら有意に上昇しており、図 1-1 より 1898～2019 年における上昇率は 100 年あたり 1.24℃である。さらに日本の気温の上昇率は世界平均気温の上昇率（気象庁の解析では 100 年あたり 0.74℃）よりも大きい^[1]。これにより 2022 年 12 月に「航空の脱炭素化の推進」を盛り込んだ改正航空法が施行され、各エアラインや各空港が脱炭素の取り組みを進めることができるよう国土交通省により航空脱炭素推進基本方針が定められた^{[2][3]}。本方針の 6 つの具体的施策のうち、①SAF(Sustainable Aviation Fuel)の導入促進、②管制の高度化などによる運航の改善、③航空機環境新技術の導入の 3 つが航空機の運航による燃料の削減を目的としたものである。カーボンニュートラルを達成するには積極的な利用促進が進められている SAF の購入や新技術などにより化石燃料の消費を極力抑えることが望ましいが多大なコストを要する。そのため環境対策への配慮が必要であり、経済性の観点から運航コスト削減に向けた運航コストの推算が必要である。

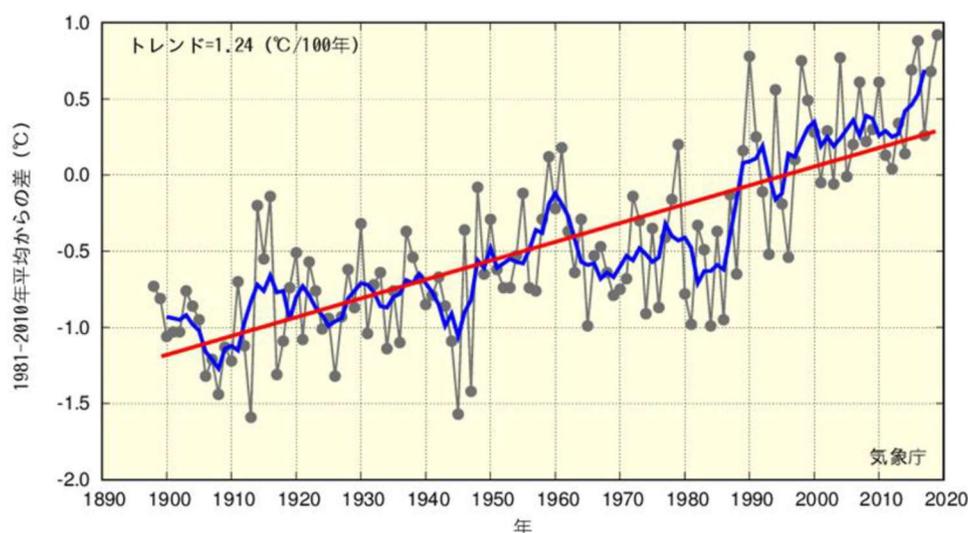


図 1-1 日本の年平均気温偏差の経年変化

この環境への配慮の対応に向けた検討が行われている。国土交通省航空局は「将来の航空交通システムに関する長期ビジョン（Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Management, CARATS^[4]）」を策定し、将来の航空交通システムに向けた研究開発を促進している。運航の効率性向上、環境への配慮など、諸問題に対して様々な目標を定め環境への

配慮をしつつ運航の効率性を向上させる様々な取り組みが促進されている。その 1 つとして研究開発活性化のために国内における定期運航便の時刻・位置などの運用データを基にした大規模な航跡データ「CARATS オープンデータ」が提供されている。

現在国内の定期路線を飛行する大型の旅客機および貨物機には飛行管理システム（Flight Management System, FMS）が装備されており、機体側では経済性を最大化するような飛行が計画されている。経済性の指標は飛行にかかる直接運航経費であり燃料消費量、飛行時間およびコストインデックスで構成されている。

1.2 研究目的

本研究の目的は、CARATS オープンデータを用いて運航コストの定量的推算および傾向分析を行い、「航空会社が運航コスト削減を行う上で助けとなる運航コストの予測モデル」を開発することである。この運航コストの予測モデルとはコスト予報の事であり、天気予報が天気の予報が可能なようにコスト予報とはコストの予報を可能とするモデルである。

運航コストの定量的推算方法としては、燃料消費量、飛行時間およびコストインデックス *CI* から直接運航経費 (Direct Operating Cost, DOC) の定量的推算を行う。直接運航経費とは航空機の飛行状況と直接的に関係する費用のことであり航空機がある空港から空港まで 1 回のフライトに要する費用のことを示している⁵⁾。

この直接運航経費を定量的に推算し、傾向分析を行い予測モデルの開発を行う。開発手法は CARATS オープンデータの航跡データから月や季節、時間帯ごとの直接運航経費の傾向と影響要因を分析し、重回帰分析にフライト数などの要因も加味した高精度な予測を行う。

民間航空機の定期運航便の航跡データが含まれる CARATS オープンデータから多数の便におけるコスト予報のモデルを開発することにより、航空会社は運航計画を策定する際に十分活用が可能である。航空会社が運航コスト削減を可能とすれば、削減したコストをカーボンニュートラル達成のため SAF の購入や新技術開発に充てることができる。最終的には脱炭素化の推進に寄与し、地球温暖化対策へ貢献することが可能である。

1.3 論文構成

2 章では本研究で用いた航跡データから機体の性能モデルなど使用する全てのデータについての詳細を述べる。

3 章では CARATS オープンデータの航跡データから航空機の飛行状態推定、性能評価について述べる。また、性能評価では QAR 飛行データを真値とし、CARATS オープンデータから推定した飛行状態推定の精度評価を行う。

4 章では 3 章で推定した燃料消費量を用い、本研究で目的達成のため用いる運航コスト「直接運航経費 (DOC)」の推算方法について述べる。また、QAR (Quick Access Recorder) 飛行データから推定した DOC を真値と見なし、CARATS オープンデータから推算した DOC の精度評価を行う。

5 章では 4 章で推算した DOC を用いて、年間を通した DOC の傾向分析を行い、各要因における影響度の分析、予測モデルの構築を行う。

6 章では本研究の結論であり、運航コスト予測モデルの必要性和今後の検討課題について述べる。

第2章 利用データおよび機体性能モデル

2.1 CARATS オープンデータ

本研究は、国土交通省航空局が将来の航空交通システムに向けた研究開発の促進のため提供している CARATS オープンデータのうち、2019 年度 6 ヶ月分と 2022 年度 12 ヶ月のデータを用いる。このデータは主に、航空路監視レーダによって取得され、座標変換、統合されたデータで、日本国内の上空を飛行する計器飛行方式による定期便を対象としている^[6]。各年度の各月連続した 7 日間の期間に、飛行する定期運航便の航跡情報（時刻、緯度、経度、気圧高度）、および機種、仮想的に割り付けられた便名が格納されている。本研究では、福岡空港から東京国際空港へ飛行した便について解析を行う。解析に用いた便の概要について 2019 年度を表 2-1 に、2022 年度を表 2-2 に示す。

表 2-1 使用する CARATS オープンデータ 2019 年度の概要

2019 年度			
データ期間（左） および 解析対象便数（右）	2019 年	9 月 9 日～15 日	20
		10 月 14 日～20 日	51
		11 月 11 日～17 日	39
		12 月 9 日～15 日	54
	2020 年	1 月 6 日～12 日	52
		2 月 3 日～9 日	67
		3 月 2 日～8 日	47
			合計
機種		A359	
路線		福岡空港発 東京国際空港着	
データ項目		時刻、緯度、経度、気圧高度、機種、仮想便名	
データ周期		約 10 秒	
範囲	始点	YOKAT	
	終点	ANZAC	

表 2-2 使用する CARATS オープンデータ 2022 年度の概要

2022 年度			
データ期間 (左) および 解析対象便数 (右)	2022 年	4 月 11 日～17 日	55
		5 月 9 日～15 日	60
		6 月 6 日～12 日	69
		7 月 4 日～10 日	67
		8 月 15 日～21 日	77
		9 月 12 日～18 日	62
		10 月 10 日～16 日	63
		11 月 7 日～13 日	64
		12 月 5 日～11 日	70
	2023 年	1 月 9 日～15 日	71
		2 月 6 日～12 日	73
		3 月 6 日～12 日	71
			合計
機種		A359	
路線		福岡空港発 東京国際空港着	
データ項目		時刻, 緯度, 経度, 気圧高度, 機種, 仮想便名	
データ周期		約 10 秒	
範囲	始点	YOKAT	
	終点	ANZAC	

2.2 QAR 飛行データ

本研究は離陸から着陸まで全フェーズにおいて推定した航空機の飛行状態を実際の飛行状態と比較し、推定精度を評価するために日本航空株式会社から提供を受けた QAR (Quick Access Recorder) 飛行データを用いる。これは航空機が機上にて複数のシステムが計測、演算処理したデータを出発から到着までの飛行全体にわたって記録した詳細な高精度データである。具体的には、位置情報のほか対気速度情報や機体質量、燃料流量、姿勢情報など多岐にわたりレーダでは取得ができない詳細なデータが記録されている。また、QAR 飛行データは気密性が高く、一般的に非公開である。

本研究で使った QAR 飛行データの概要を表 2-3 示す。また、表 2-3 で使用する 2019 年度におけるデータは、路線、機種、データの期間および解析対象便数を含め 2019 年度の CARATS オープンデータ (表 2-1) と同一の便である。

表 2-3 使用する QAR 飛行データ 2019 年の概要

2019 年度			
データ期間 (左) および 解析対象便数 (右)	2019 年	9 月 9 日～15 日	20
		10 月 14 日～20 日	51
		11 月 11 日～17 日	39
		12 月 9 日～15 日	54
	2020 年	1 月 6 日～12 日	52
		2 月 3 日～9 日	67
		3 月 2 日～8 日	47
			合計
機種		A359	
路線		福岡空港発 東京国際空港着	
データ項目		時刻, 緯度, 経度, 気圧高度, 真対気速度, 機体重量など	
データ周期		約 4 秒	
範囲	始点	YOKAT	
	終点	ANZAC	

2.3 機体性能モデル

機体性能モデルとして欧州航空航法安全機構（The European Organization for the Safety of Air Navigation, EUROCONTROL）が維持・管理する BADA（Base of Aircraft Data）モデルの Revision 3.14 を利用する^[7]。空力や推力，燃料流量など，どの型式でも共通となる方程式と各型式における係数が機種ごとに与えられている。

2.4 気象データ

気象データは，気象庁が提供する数値予報 GPV（Grid Point Value）データのうち GSM（Global-Spectral Model）（日本域）数値予報モデルを用いる。GSM は地球全体の大気を対象とした気象庁の数値予報モデルであり全世界を対象とした大規模な大気の循環を予報する目的で運用されている^[8]。

第3章 飛行状態推定 (CARATS)

3.1 飛行状態推定の手順

CARATS オープンデータを使用した飛行状態推定の手順を図 3-1 に示す。まず、CARATS オープンデータより得られる航空機の位置の時間変化から対地速度 (Ground Speed, GS) を求める。これに風速の気象データを適用し真対気速度 (True Air Speed, TAS) を求める。その後、機体の性能モデル BADA を用いて推力 (Thrust)、燃料流量 (Fuel flow) を導出する。そして、飛行時間分の積分を燃料流量に施し、燃料消費量を導出する。最後に飛行時間と燃料消費量を用いて DOC の推算を行う。DOC の推算方法については第 4 章に示す。

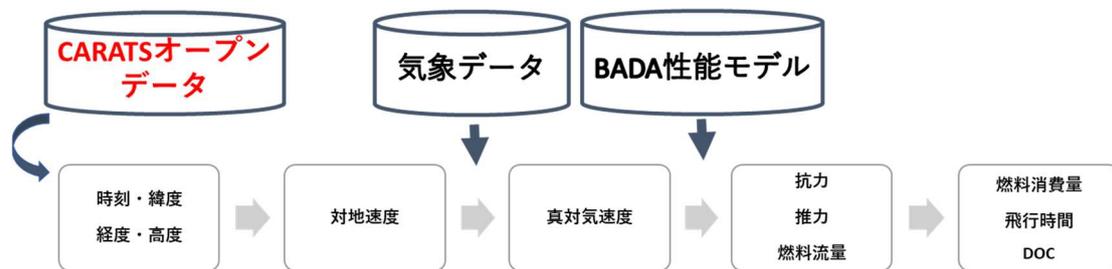


図 3-1 飛行状態推定

3.1.1 対地速度の推定法

対地速度は、地面に対する相対速度の水平方向成分である。航跡データよりまず 2 地点間の地球上での距離を算出し時間で微分することで推定することが可能である。CARATS オープンデータに時間ごとに格納されている緯度、経度、時刻を用い、式(3-1)より導出する。2 地点間の距離の算出方法については地球を回転楕円体と仮定し国土地理院が用いている測地線長の計算式 GSI (Geospatial Information Authority of Japan) を用いる。この 2 地点間の計算方法は GSI が高精度で算出可能であり、より高精度な 2 地点間の計測が可能であるため本研究では GSI 計算式を用いる^[9]。

$$\frac{dx}{dt} = V_{GS} \quad (3-1)$$

3.1.2 真対気速度の推定法

求めた対地速度を用いて真対気速度の推定を行う。真対気速度は、対地速度に風の影響を考慮することで算出することが出来る。対地速度と真対気速度は図 3-1 に示される関係にあることが示されている^[10]。 \vec{V}_{GS} は対地速度ベクトル、 \vec{V}_{TAS} は真対気速度ベクトル、 \vec{V}_{wind} は風速ベクトル、 \vec{V}_{ES} は慣性速度ベクトルを表す。

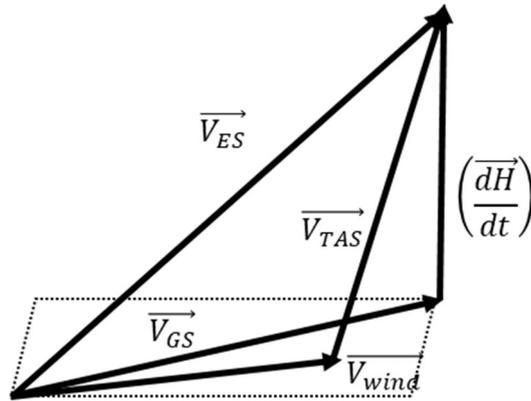


図 3-2 対地速度と真対気速度の関係

慣性速度は地球に対する速度の事であり、対地速度に鉛直方向速度成分も考慮した速度であり、式(3-2)で表される。よって真対気速度 \vec{V}_{TAS} は式(3-3)で表される。

$$\vec{V}_{ES} = \vec{V}_{GS} + \left(\frac{dH}{dt} \right) \quad (3-2)$$

$$\vec{V}_{TAS} = \vec{V}_{ES} - \vec{V}_{wind} \quad (3-3)$$

ここで気象データから用いる風速データは東西成分、南北成分で格子点上の値を知ることが可能であるため成分ごとにベクトルを統一する必要がある。南北成分で対地速度の東西成分および南北成分を算出するために、対地方位角 α を式(3-4)で求める。さらに、対地方位角 α は、真北を 0° とし時計回りを正とした角度である。よって、対地速度の東西成分 $V_{GS,EW}$ および南北成分 $V_{GS,NS}$ は式(3-5)、式(3-6)で表される。

$$\alpha = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sin(\theta_2 - \theta_1)}{\tan \phi_2 \cos \phi_1 - \sin \phi_1 \cos(\theta_2 - \theta_1)} \right\} \quad (3-4)$$

$$\vec{V}_{GS,EW} = \vec{V}_{GS} \cos(90^\circ - \alpha) \quad (3-5)$$

$$\vec{V}_{GS,NS} = \vec{V}_{GS} \sin(90^\circ - \alpha) \quad (3-6)$$

3.1.3 燃料消費量の推定法

燃料流量の推定には、欧州航空航法安全機構 EUROCONTROL が維持、管理をしている機体性能モデルである BADA モデルを用いる。状態変数の気圧高度 H および真対気速度 V_{TAS} は制御変数である飛行計画経路 γ 、推力 T および機体質量 m によって決まる。燃料流量推定には以下の式(3-7)、式(3-8)に示す質点近時の支配方程式を用いる。ただし、機体重量が必要な計算では、CARATS オープンデータには機体重量が格納されていないため、全ての便に対して初期質量に BADA 標準質量を仮定して推算を行う。また、始点時刻以外では時刻毎の燃料消費量を機体の減少した重量とする。

以下に示す支配方程式から燃料消費量を推定する手順を手順 1～手順 6に示す。

支配方程式

$$T = m \frac{dV_{TAS}}{dt} + D + mg \sin \gamma \quad (3-7)$$

$$\left(\frac{dH}{dt} \right) = V_{TAS} \sin \gamma \quad (3-8)$$

手順

手順 1

真対気速度 V_{TAS} を用いて推力 T を制御する支配方程式である式(3-7)から推力 T を算出するため、飛行経路角 γ 、抗力 D を求める。式(3-8)を用い式(3-9)に変換し、飛行経路角 γ を求める。次に、式(3-10)より抗力 D を求める。

$$\gamma = \sin^{-1} \left(\frac{1}{V_{TAS}} \frac{dH}{dt} \right) \quad (3-9)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V_{TAS}^2 S C_D \quad (3-10)$$

ここで、抗力係数 C_D の算出が必要となる。抗力係数 C_D の算出方法を（手順 2）に示す。

手順 2

式(3-10)より抗力 D を求める上で、アプローチ・着陸・それ以外の 3 つのフェーズに分けて抗力係数 C_D を求める必要がある。揚力係数 C_L を用いて抗力係数 C_D を式(3-11)より求めることが可能であり、揚力係数 C_L は式(3-12)より求めることが可能である。ここで翼基準面積 S は BADA 性能モデル記載の値を用いる。

$$C_D = C_{D0} + (C_{D2} C_L^2) \quad (3-11)$$

$$C_L = \frac{2mg_0 \cos \gamma}{\rho V_{TAS}^2 S} \quad (3-12)$$

ここで、各フェーズにおいて与えられている有害抗力係数 C_{D0} 、誘導抵抗係数ファクタ C_{D2} の値は異なり、以下の 3 通りに分けられる。

アプローチ、着陸フェーズ以外

アプローチ、着陸フェーズ以外で式(3-11)は、巡航時有害抗力係数 $C_{D0,CR}$ と巡航時誘導抗力係数ファクタ $C_{D2,CR}$ を用いる。

アプローチフェーズ

アプローチフェーズで式(3-11)は、アプローチ時有害抗力係数 $C_{D0,AP}$ とアプローチ時誘導抗力係数ファクタ $C_{D2,AP}$ を用いる。

着陸フェーズ

着陸フェーズでは，着陸時有害抗力係数 $C_{D0,LD}$ と着陸時誘導抗力係数ファクタ $C_{D2,LD}$ を用い，降着装置による抗力増加により $C_{D0,\Delta LD}$ を考慮する必要があり式(3-13)で表される．

$$C_D = C_{D0,LD} + C_{D0,\Delta LD} + (C_{D2,LD} C_L^2) \quad (3-13)$$

この3パターンフェーズごとに分けられた係数を用い抗力係数 C_D を求め，式(3-10)より抗力 D を求める．

手順3

求めた3フェーズごとの抗力 D を用い，推力 T を算出する．ここでBADAには最大上昇推力および最大巡航推力の記載があるため，求めた推力 T をBADA最大推力で制限を行う．ジェットエンジンの場合，標準大気状態での最大上昇推力 $(Thr_{max,climb})_{ISA}$ は，気圧高度 H を用いて式(3-14)より求める．

$$(Thr_{max,climb})_{ISA} = C_{Tc,1} \times \left(1 - \frac{H}{C_{Tc,2}} + C_{Tc,3} \times H^2 \right) \quad (3-14)$$

最大上昇推力は標準大気からの温度差 ΔT によって式(3-15)のように補正させISAを仮定した場合に ΔT は0であるため式(3-16)で表される．

$$Thr_{max,climb} = (Thr_{max,climb})_{ISA} \times \{1 - C_{Tc,5}(\Delta T - C_{Tc,4})\} \quad (3-15)$$

$$Thr_{max,climb} = (Thr_{max,climb})_{ISA} \times (1 + C_{Tc,4} C_{Tc,5}) \quad (3-16)$$

さらに，最大巡航推力は最大巡航推力補正係数 C_{Tcr} と最大上昇推力 $Thr_{max,climb}$ を用いて式(3-17)で表される．また上昇時の推力は式(3-18)，巡航時の推力は式(3-19)で表される．

$$Thr_{max,cruise} = C_{Tcr} \times Thr_{max,climb} \quad (3-17)$$

上昇時

$$T = \min(Thr_{max,climb}, T) \quad (3-18)$$

巡航時

$$T = \min(Thr_{max,cruise}, T) \quad (3-19)$$

手順4

続いて算出した最大推力で制限をかけた推力 T と燃料消費量率 η を用い、ノミナル燃料流量 μ_{nom} を式(3-20)より算出する。ノミナル燃料はアイドリング状態での降下、巡航している場合を除いて全てのフェーズで用いることが可能である。燃料消費量率 η は式(3-21)より求める。アイドリング状態での降下時に用いることが出来る最小燃料流量 μ_{min} は気圧高度 H を用いて式(3-22)より求める

アイドリング状態を除いた全フェーズ

$$\mu_{nom} = \eta \times T \quad (3-20)$$

$$\eta = C_{f1} \times \left(1 + \frac{V_{TAS}}{C_{f2}} \right) \quad (3-21)$$

アイドリング状態での降下時

$$\mu_{min} = C_{f3} \times \left(1 - \frac{H}{C_{f4}} \right) \quad (3-22)$$

手順5

求めたノミナル燃料流量、最小燃料流量から燃料流量を算出する。アプローチ、着陸フェーズでは、アイドリング状態時の推力での降下が終わりに一般には推力は増加する。これを考慮し、アプローチ、着陸時の燃料流量はノミナル燃料流量を基準に、最小燃料流量を限度として式(3-23)で表される。巡航時の燃料流量 μ は巡航燃料流量補正係数 C_{fcr} を用いて式(3-24)で表される。

アプローチ、着陸時

$$\mu = \max[\mu_{nom}, \mu_{min}] \quad (3-23)$$

巡航時

$$\mu = \mu_{nom} \times C_{fcr} \quad (3-24)$$

手順 6

求めた燃料流量 μ を時間方向に積分を行い式(3-25)より燃料消費量を求める。燃料流量は離散データであるため離散数値積分を行う。離散数値積分には台形則を用いる。

$$F = \int_{t_0}^{t_f} \mu(t) dt \quad (3-25)$$

また、QAR 飛行データには燃料流量のデータのみ格納されているため燃料消費量の算出は式(3-25)同様の台形則の積分を用いた。

3.2 飛行状態推定の精度評価

QAR 飛行データを真値として CARATS オープンデータから推定した飛行状態の精度を比較する。比較については 2019 年度 6 ヶ月分のデータを用い、同時刻における飛行状態の比較を行う。比較する使用データについて QAR 飛行データは表 2-3, CARATS オープンデータは表 2-1 に記載のデータを用い精度評価を行う。この節では、ある 1 便をランダムに抽出し比較を行う。

3.2.1 対地速度、真対気速度の比較

対地速度と真対気速度の時間履歴から比較を行う。青色の線が QAR 飛行データに格納されているデータを示しており、赤色の線が CARATS オープンデータから推定を行った飛行状態のデータを示している。対地速度の比較を図 3-3, 真対気速度の比較を図 3-4 に示す。

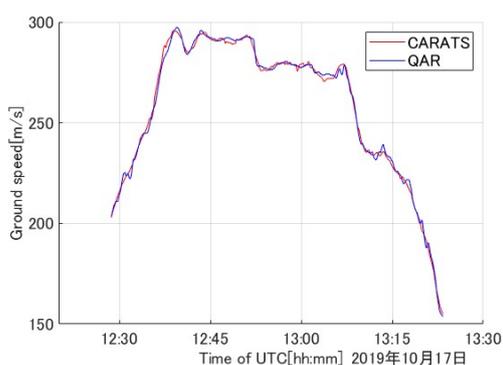


図 3-3 対地速度

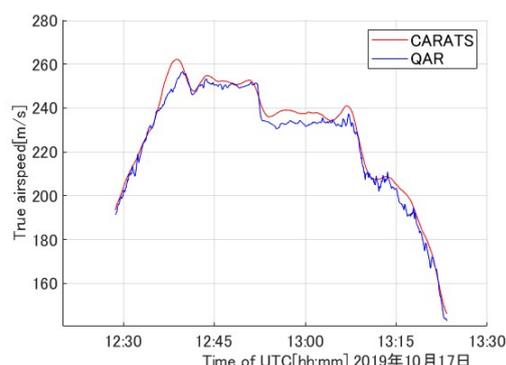


図 3-4 真対気速度

図 3-3 より対地速度は QAR 飛行データの真値と比較し差が小さいため高精度の推定ができているが、図 3-4 の真対気速度は QAR 飛行データの真値と比較し多少の差が生じている。これは風速を気象データより考慮する際に生じた誤差であり、鉛直方向成分に関わる飛行経路角の算出に影響があると考えられる。

3.2.2 燃料流量の比較

燃料流量の時間履歴から比較を行う。青色の線が QAR 飛行データに格納されているデータを示しており、赤色の線が CARATS オープンデータから推定を行った飛行状態のデータを示している。図 3-5 に燃料流量の比較を示す。

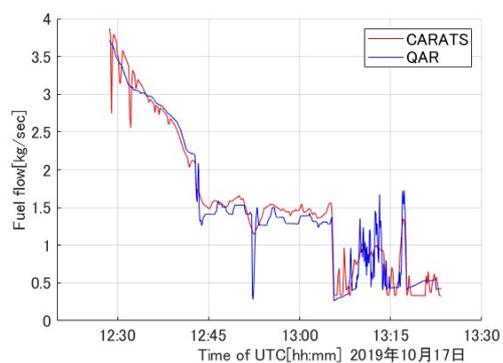


図 3-5 燃料流量

図 3-5 より燃料流量はQAR 飛行データの真値と比較し差が多少生じているが推力を推定する際に最大推力で制限をかけているため、過大に推定された点が改善されていることで精度は向上していると考えられる。フェーズごとの燃料流量推定は高精度で行えていることが分かる。さらに上昇フェーズや降下フェーズといった空力モデルの変化するフェーズにおいても高精度な飛行状態推定が可能であることが確認できる。しかし巡航フェーズでは多少の差が確認された。より真値に近い飛行状態推定を行うためには CARATS オープンデータを用いた燃料流量推定の精度を向上させる必要がある。

第4章 直接運航経費の推定・精度評価

4.1 直接運航経費とコストインデックス CI の関係

航空機の飛行状態と直接的に関係する費用を直接運航経費といい、Airbus で定義されている DOC とコストインデックス CI の関係をこの節では示す。1 回のフライトあたりの DOC[\$]は消費した燃料による燃料コストと飛行時間による時間コストの和として式(4-1)で表される [5]。 (DOC を文字 J で表す)

$$J[\$] = C_{fuel} \int_{t_0}^{t_f} \mu(t) dt + C_{time} \frac{1}{60} \int_{t_0}^{t_f} dt \quad (4-1)$$

C_{fuel} は燃料の価格[\$/lb]であり、 C_{time} は時間あたりのコスト[\$/min]である。 μ は燃料流量[kg/s]である。時間コストには燃料以外の経費、すなわち航空機の減価償却費またはリース費、機体整備費用、着陸料、機内サービス費、乗務員および空港職員の人件費、諸保険料等が含まれる。燃料コストと時間コストのどちらをどれだけ考慮するかを決める指標としてコストインデックス CI がある。Airbus の CI は式(4-2)で定義される。

$$CI[kg/min] = \frac{C_{time}[\$/min]}{C_{fuel}[\$/kg]} \quad (4-2)$$

コストインデックス CI は機種ごとに標準的な値の範囲がメーカーから公表されており航空会社の経営方針や運航乗務員の判断により決定される。

本研究での解析に用いる機種 A359 は CI が 100 で固定されているため、CI=100 で DOC の推算を行う。

4.2 直接運航経費の推算

式(4-1)を重み係数 a [kg/s]を用い、燃料消費量[kg]と飛行時間[s]からなる DOC を最小化していると仮定した式を式(4-3)に示す。

$$J[\$] = C_{fuel} \left(\int_{t_0}^{t_f} \mu(t) dt + a \int_{t_0}^{t_f} dt \right) \quad (4-3)$$

式(4-3)の a は値を変化させることで飛行時間を短くあるいは長くすることができ、図 4-1 に示すようなパレート面が形成される^[10]。横軸が飛行時間、縦軸が燃料消費量を示している。DOC を最小化するような FMS の計算において、燃料最小となる時間よりも長い飛行時間となる飛行は考慮する必要がないので CI に負の値は入力できないようになっている。なお、図 4-1 において、与えられた $a(> 0)$ に対する DOC 一定の直線の傾きは負となり、この直線とパレート面との接点において DOC は最小となる。DOC の最小値は直線の切片の値に等しい^[5]。

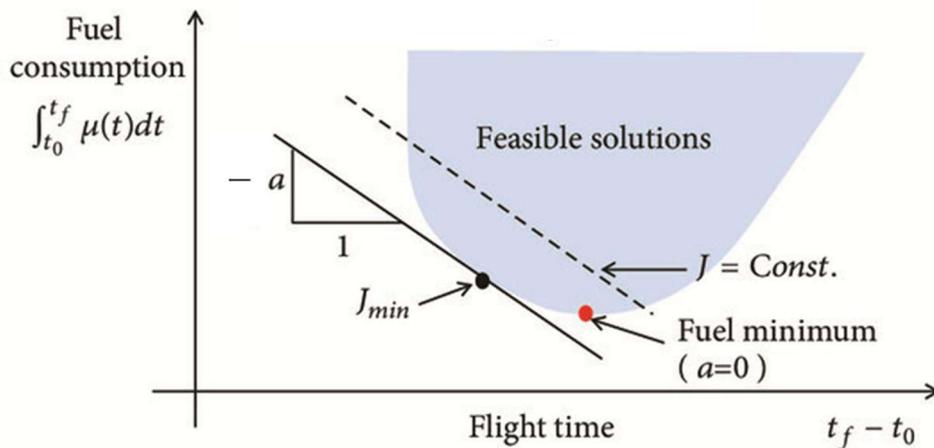


図 4-1 飛行時間と燃料消費量の関係^[10]

パレート面上の点が最適解であり DOC の最小値が得られるが、実行可能領域内の非最適解についても a が与えられれば DOC の値を計算可能である。飛行に要した燃料と時間及びコストインデックス CI が分かれば DOC を求めることができる。

式(4-1)と式(4-2)より、燃料コスト、燃料消費量、時間コスト、飛行時間から DOC を推算する式を式(4-4)に示す。式(4-4)は Airbus の DOC 推定の式である。

$$J[\$] = C_{fuel} \int_{t_0}^{t_f} \mu(t) dt + C_{time} \int_{t_0}^{t_f} dt \quad (4-4)$$

式(4-4)に、コストインデックス CI を導入し DOC を推定する式を式(4-5)に示す。

$$J[\$] = C_{fuel} \left(\int_{t_0}^{t_f} \mu(t) dt + \frac{CI}{60} \int_{t_0}^{t_f} dt \right) \quad (4-5)$$

式(4-5)の右辺 C_{fuel} を除く括弧内は飛行時間を燃料に相当するように変換して足し合わせたもので、飛行にかかるコストを時間まで考慮し表した全燃料といえる。これに燃料価格を乗じることで DOC を貨幣単位で求めることができる。本研究では式(4-5)を使用し推算した DOC を用い精度評価、傾向分析など解析を行う。

また、本研究では使用しないが、Boeing の CI を式(4-6)に示す。

$$\begin{aligned} CI[100\text{lb/h}] &= \frac{3600}{100 \times 0.4536} a \\ &= 79.37a[\text{kg/s}] \end{aligned} \quad (4-6)$$

a は飛行時間の重み係数を表す。

4.3 直接運航経費推定の精度評価

3.1 節で推定した燃料消費量から、4.2 節で DOC の推定を行った。この推定精度の評価を行う。QAR 飛行データを真値として、CARATS オープンデータから推定した DOC を比較する。比較データについては 2019 年度 6 ヶ月分のデータを用い、同時刻間における QAR 飛行データの燃料消費量、飛行時間を用い推算した DOC と CARATS オープンデータの燃料消費量、飛行時間を用い推算した DOC の比較を行う。使用するデータは、QAR 飛行データについては表 2-3、CARATS オープンデータについては表 2-1 の通りである。

本研究では DOC の傾向分析を行うに当たり CARATS オープンデータを使用する。CARATS オープンデータには旅客が利用する極めて数多くの便が格納されている（2.1 節参照）。一方、QAR 飛行データには機上記録データであるため精度は高いが、取得可能な便数が限られる（2.2 節参照）。

そこで極めて数多くの便の航跡データを含む CARATS オープンデータを活用し年間の DOC の傾向分析を行うべく、正確な DOC 推定に向け、QAR 飛行データを用いて推定精度の確認を行う。

4.3.1 精度の評価方法

推定精度については、式(4-7)に示す「推定値－真値」を真値で割った値の絶対値である絶対誤差率 (Absolute Percentage Error, APE) を用いる。真値は QAR 飛行データから求めた DOC の値とする。

$$APE = \left| \frac{J_{CARATS} - J_{QAR}}{J_{QAR}} \right| \times 100 \quad (4-7)$$

4.3.2 比較対象となる直接運航経費の詳細

CARATS オープンデータから推定した DOC の統計量と QAR 飛行データより推定した真値とする DOC の全体データの統計量を表 4-1 に示す。さらに 4.3.1 の評価方法より DOC 推定の真値との誤差比較を行う。誤差の統計量を表 4-2、に、分布特性を図 4-2 に示す。

表 4-1 DOC の統計量比較 (2019 年度)

DOC[\$]		
	CARATS	QAR (真値)
平均値	6661.7	6548.8
中央値	6576.1	6487.6
最小値	5741.5	5571.1
最大値	8556.5	8289.0
範囲	2815.0	2717.9
標準誤差	25.0	24.4
標準偏差	453.5	443.8
データ数	330	330

表 4-2 真値に対する誤差の統計量

DOC 誤差(%)	
平均値	1.73
中央値	1.67
最小値	0.003
最大値	5.39
範囲	5.39
標準誤差	0.05

表 4-2 より 誤差の平均値が 1.73%，さらに中央値が 1.67%であることから精度の高い推定を読み取れる。誤差最小値は 0.003%で最大値も 5.39%の範囲内で推定を可能としている。標準誤差が 0.05%と極めて小さく、真値に近い値を推定できている。

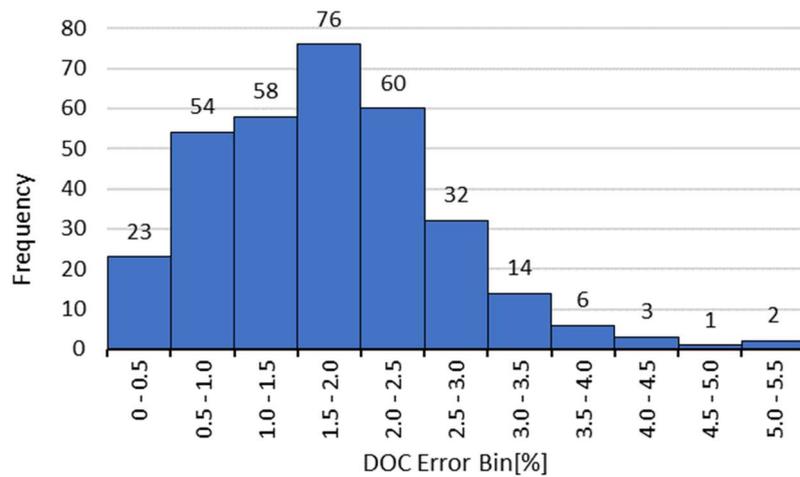


図 4-2 真値に対する誤差の分布特性

図 4-2 真値に対する誤差の最大誤差 5.39%に近い区間の頻度は全体的に見ると少ないが、5.0~5.5%の誤差となったケースが2つ確認できる。また、誤差 1.5%~2.0%の範囲において頂点を持ち正規分布に近い形状を示している。このことから、推定誤差が平均値周辺に集中しており、DOC の推定精度は十分に高いと考えられる。

第5章 直接運航経費の傾向分析

第4章では、CARATS オープンデータから DOC の推定を行い、QAR 飛行データから求めた DOC と比較することで推定精度を確認した。本章では CARATS オープンデータのみを用い、2022 年度 1 年分の DOC を推定し、傾向分析を行う。データについては表 2-2 に示したデータを用いる。

5.1 直接運航経費の年間分布と統計分析

2022 年度 1 年間における DOC の統計量を表 5-1 に、分布特性を図 5-1 に示す。

表 5-1 DOC の統計量 (2022 年度)

DOC[\$]	
平均値	6979.2
中央値	6876.1
最小値	5817.4
最大値	10283.6
範囲	4466.2
標準誤差	20.9
標準偏差	591.5
データ数	802

表 5-1 よりデータ数 802 便における平均値、中央値ともに近い値を示しており、最大値、最小値の範囲については 4466.2 と幅の広い値を示している。標準誤差は 20.9 となり 2019 年度 6 ヶ月分 (表 4-1) と比べ小さい値を示していることが確認できる。それに比べ標準偏差は、2019 年度 6 ヶ月分に比べ大きい値を示している。これはサンプル数を多くしたことにより、検出した大きい外れ値による影響であると考えられる。サンプル数を多くすることにより、大きな外れ値を検出してしまうため最大値と最小値の範囲が大きくなりばらつきの範囲が大きくなることが確認できる。本研究において傾向分析を行う際、データ範囲を年間に拡大することで、より実際の DOC の傾向に近い分布を分析できると考えられる。

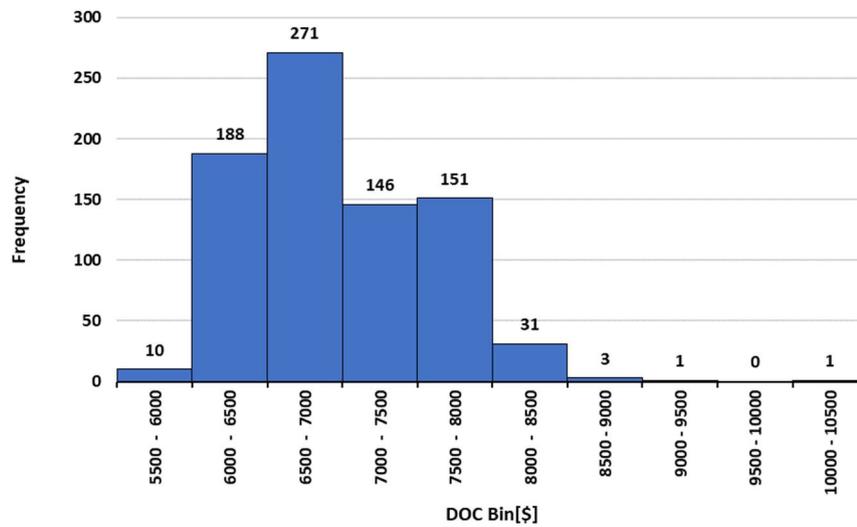


図 5-1 DOC の分布特性

図 5-1 より、DOC が 6500[\$]~7000[\$]の範囲を頂点に持ち、尖度が大きく DOC が 6000[\$]~8000[\$]の範囲に集中していることが確認できる。外れ値に関しては 9500[\$]を超える値が 1 つのみ検出していることが確認することができ、中央値に比べ平均値が高く示されていることから、この外れ値が平均値に影響していると考えられる。

5.2 時間帯・曜日・季節ごとの直接運航経費の傾向解析

時間帯・曜日・季節ごとに分けて、直接運航経費の傾向解析を行う。時間帯・曜日・季節それぞれカテゴリ変数に分類され、それぞれを直接的に数値として表現することは出来ない。そこで、カテゴリ変数を定量的に取り扱うために、回帰分析手法である数量化理論1類^[11]を用い、目的変数（DOC）に対する各カテゴリの影響度の違いを定量的に評価する。

5.2.1 数量化理論1類について

本節で用いる数量化理論1類について述べる。数量化理論1類とはカテゴリ（月、火、水…）のデータを数値に置き換えることによって重回帰分析と同様の方法で目的変数を予測する式を作成できる手法で、要因分析を可能とする手法である^[11]。回帰モデル作成時に説明変数を（時間帯・曜日・季節）をカテゴリ変数と示し、その係数（回帰係数）をカテゴリ・スコアと表す。数量化理論1類における、 p 値、 t 値は目的変数への影響度を正確には表せない。代わりに、カテゴリ・スコアの数量が目的変数への影響度を表す。カテゴリ・スコアが大きいほど目的変数への影響度が大きい。

5.2.2 時間帯ごとの変動傾向

全便のDOCを時間帯別に分け、時間帯ごとの傾向解析を行う。便名は運航時間帯によって異なり、数値が小さいほど早い時間帯の運航を示している。便名ごとのサンプル数を表5-2に、その傾向分布を図5-2に示す。また、各便が及ぼすDOCへの影響度を図5-3に示す。

本項では、年間で運航している各便のサンプル数が極度に異なるため、高頻度運航便、グループ分けした便の2項目に分けた分析も行う。

表 5-2 各便の便数 (1年間)

便名	JAL300	JAL302	JAL304	JAL306	JAL308	JAL310	JAL312	JAL314	JAL316	JAL318	JAL320	JAL322	JAL326	JAL328	JAL330	JAL332	合計
便数	15	83	81	14	76	52	2	70	81	1	83	56	6	76	81	25	802

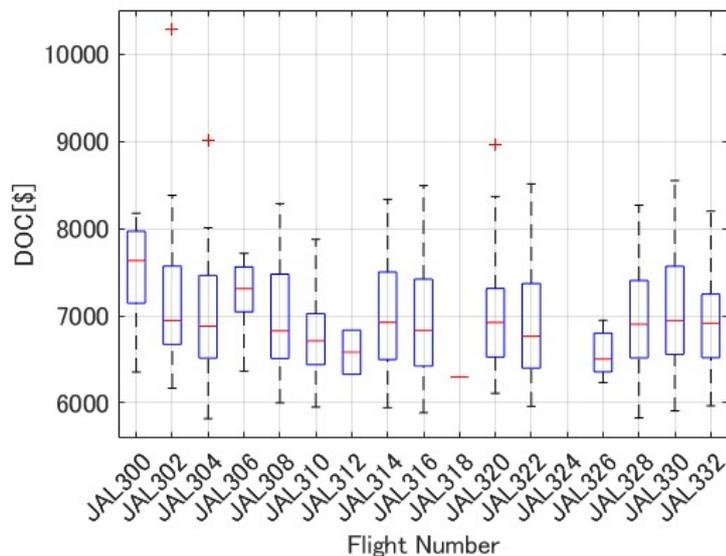


図 5-2 便ごとの DOC の傾向

図 5-2 より, JAL300 の朝に運航する便が高い DOC 分布を示している. 便数の多い JAL302, JAL308, JAL320 を比較すると JAL308, JAL320 に比べて JAL302 の便が高い DOC 分布を示しているように見える. 中央値のみに注目すると, DOC は最も高い朝から昼にかけて低下する傾向を確認できる.

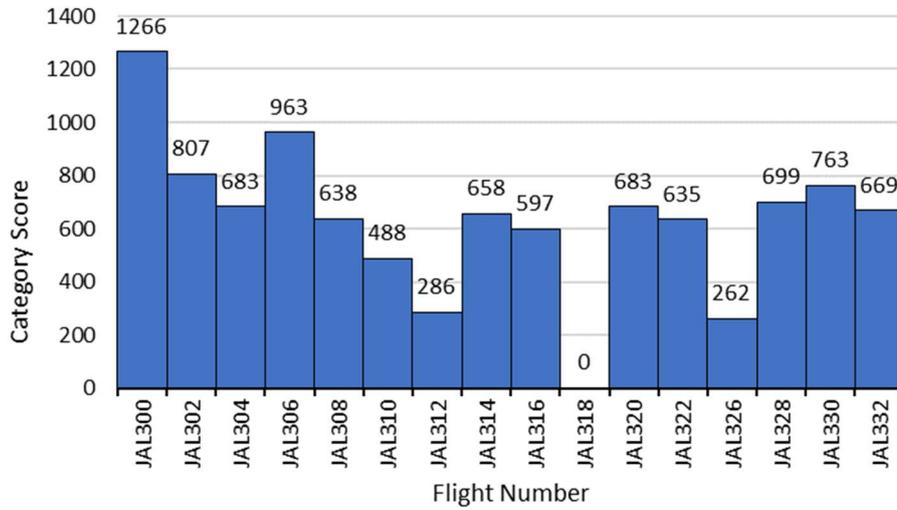


図 5-3 各便が及ぼす DOC への影響度

図 5-3 より、JAL300 便が最も DOC への影響度が高く、次いで JAL306 便の影響度が高いことが分かる。これにより、朝に運航する便の DOC が高くなる傾向があると仮定ができ、サンプル数（年間で運航している便数）が少ないことが分かる。そこでサンプル数が 70 以下の便を除外し、運航頻度の高い便のみの DOC 分布を図 5-4 に示す。

高頻度運航便

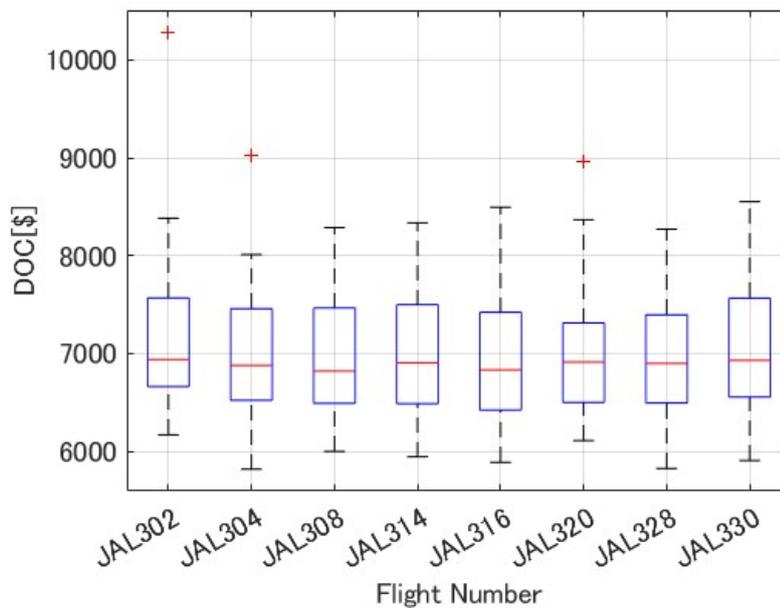


図 5-4 高頻度運航便ごとの DOC の傾向

図 5-4 より、サンプル数が多い便（高頻度運航便）のみ抽出すると時間帯における DOC の変動や傾向は特にないことが確認できる。

ここで、より年間の各時間帯における傾向を明らかにすべく、サンプル数が一定になるように各便を 4 グループに分け、回帰モデルを作成する。各グループが及ぼす DOC への影響度を図 5-5 に示す。

グループ分けした便

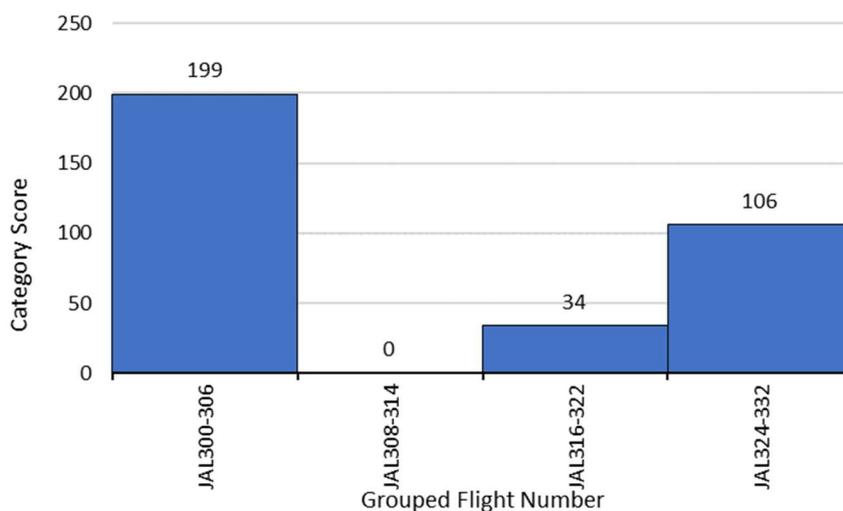


図 5-5 グループ分けした便が及ぼす DOC への影響度

図 5-5 よりカテゴリ・スコアが図 5-3 と比較し全体的に減少しており、サンプル数がほぼ一定になるように間引いたことにより減少したものである。朝に運航する便の DOC が最も高くなる傾向があり、昼から夕方にかけては低下し、夜になると再び高くなることが確認できる。

5.2.3 季節ごとの変動傾向

全便の DOC を季節別に分け、年間の傾向分析を行う。季節ごとのサンプル数を表 5-3 各季節の便数表 5-3 に、その傾向分布を図 5-6 に示す。ここでは 3～5 月を春、6～8 月を夏、9～11 月を秋、12～2 月を冬と季節を月ごとに分け定義する。

表 5-3 各季節の便数

季節	春	夏	秋	冬
便数	186	213	189	214

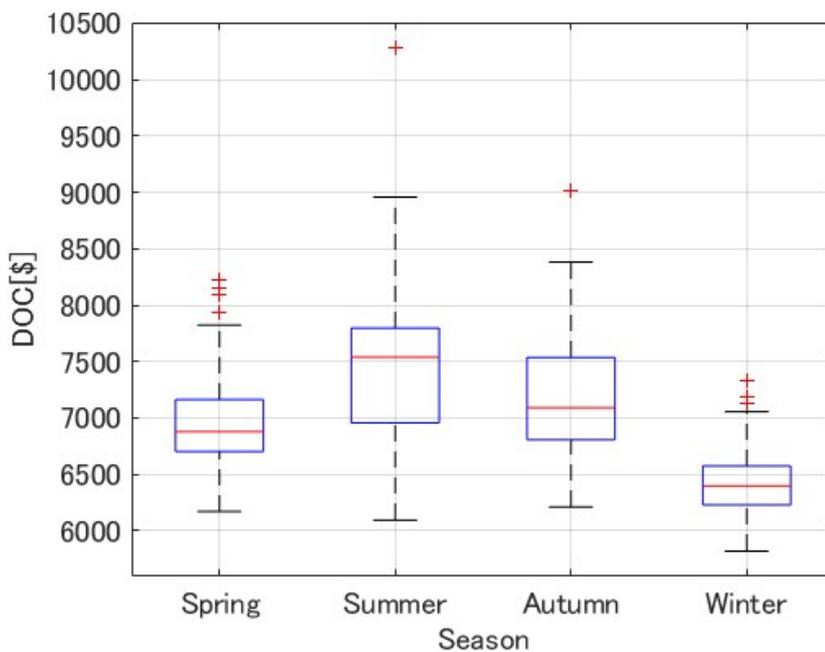


図 5-6 季節ごとの DOC の年間

図 5-6 より夏に DOC が高い傾向があり、対照的に冬は低い傾向が見られる。これは、冬季に強い西風が吹くためであると考えられる。そのため、追い風の影響で燃料消費量が抑えられ、DOC が低下すると予想される。

5.2.4 月ごとの変動傾向

全便の DOC を月別に分け、年間の傾向分析を行う。月ごとのサンプル数を表 5-4 に、その傾向分布を図 5-7 に示す。

表 5-4 各月の便数

2022 年度												
月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月
便数	55	60	69	67	77	62	63	64	70	71	73	71

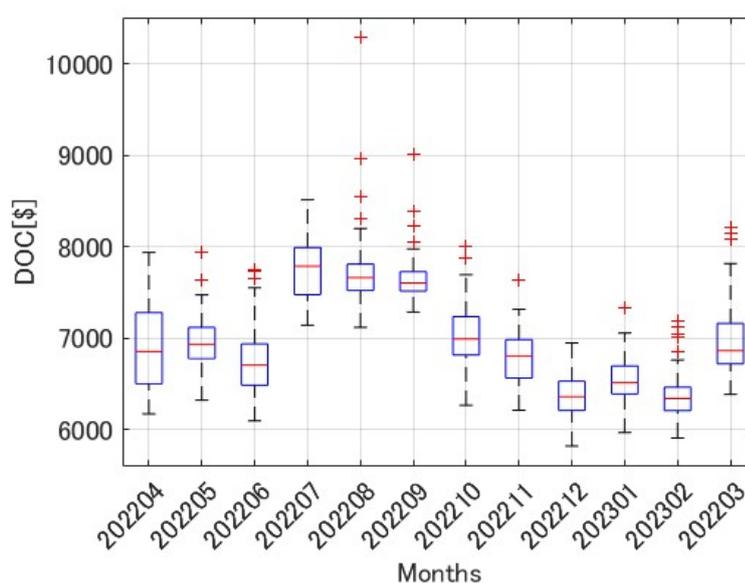


図 5-7 月ごとの DOC の傾向

図 5-7 より 7 月～9 月の DOC が高く、対照的に 12 月～2 月は低くなっており、9 月から 12 月にかけて DOC の減少傾向を確認できる。5.2.3 項で冬から春にかけての DOC 減少傾向について述べたが、月ごとに細分化することにより秋にかけて DOC が減少しており、冬になると DOC が低い値で安定していることが明らかになった。

各月が及ぼす DOC への影響度を定量的に評価するため、回帰モデルを作成しカテゴリごとの影響度を図 5-8 に示す。

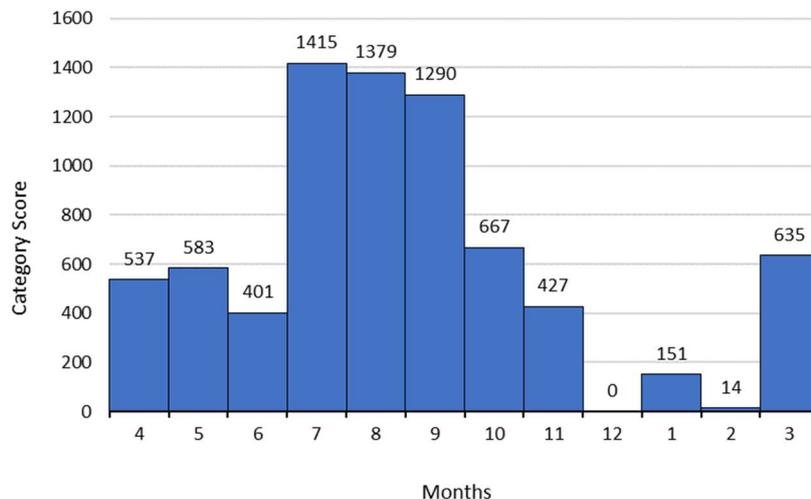


図 5-8 各月が及ぼす DOC への影響度

図 5-8 より 7 月～9 月の係数が高く DOC に大きな影響を与えていることが確認できる。また、12 月と 2 月の影響度は非常に低く、これらの月は年間を通して DOC を抑えられている時期であることが明らかとなった。

5.2.5 曜日ごとの変動傾向

全便の DOC を曜日別に分け、年間の傾向分析を行う。曜日ごとのサンプル数を表 5-5 に、その傾向分布を図 5-9 に示す。

表 5-5 各曜日の便数

曜日	日	月	火	水	木	金	土
便数	110	111	115	116	117	117	116

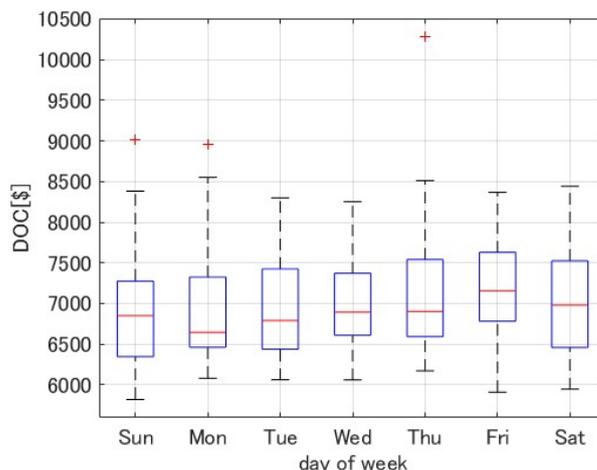


図 5-9 曜日ごとの DOC の傾向

図 5-9 より月曜日が最も DOC が低く、金曜日にかけて増加する傾向が確認でき、金曜日が最も DOC が高いことが確認できる。これは金曜日に航空機を利用する割合が高いことが影響していると考えられる。さらに、月曜日は平日の始まりであり、多くの人にとって勤務日の初日であるため、利用者が少ないことが考えられる。

各曜日が及ぼす DOC への影響度を定量的に評価するため、回帰モデルを作成しカテゴリごとの影響度を図 5-10 に示す。

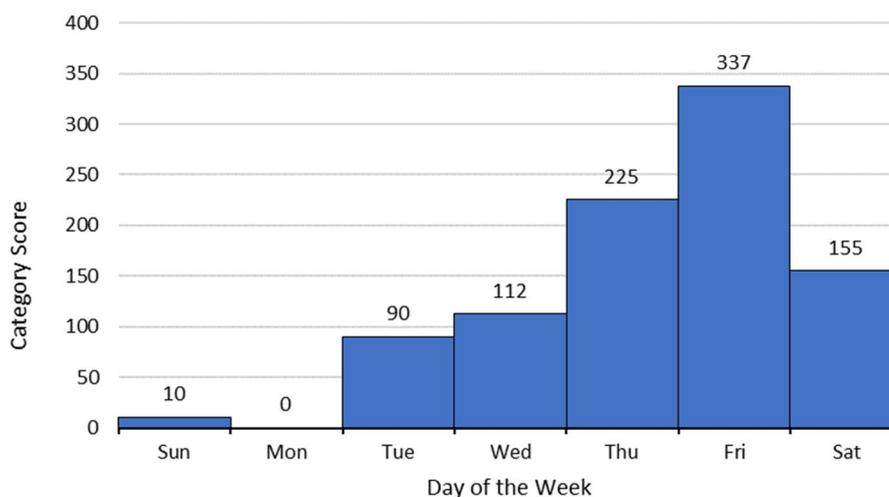


図 5-10 各曜日が及ぼす DOC への影響度

図 5-10 より火曜日から金曜日にかけて、DOC への影響度が増加する傾向が明らかとなった。さら、次に影響を与えている曜日は土曜帯ではなく木曜日であることが確認された。また、金曜日の影響度は木曜日と比較して約 1.5 倍大きいことが確認できる。このことから、火曜日から金曜日にかけて旅客機の利用者が増加し、金曜日に最も多くなり土曜日から火曜日にかけて利用者は減少する傾向があることが明らかになった。

5.2.6 時間帯・曜日・季節ごとの影響度の比較分析

これまでの項にて時間帯・曜日・季節ごとの DOC の傾向、DOC へ及ぼす影響度を示した。本項では解析した全ての影響を総括し、各要因の違いを比較する。各要因間での影響度の比較はカテゴリ・スコアのレンジ（最大・最小値の範囲）を用いる^[11]。レンジが大きい要因ほど、DOC への影響度が高いことを示している。図 5-11 に各要因が DOC へ及ぼす影響度を示す。図 5-12 に回帰モデルの正確性を比較したものを示す。

また、時間帯・曜日・季節ごとのそれぞれの回帰モデルの正確性を示すため、補正決定係数 R^2 を用いて比較を行う。以下に補正決定係数 R^2 について詳細を示す。

補正決定係数 R^2

ここで、予測モデルの妥当性を評価する指標として補正決定係数 R^2 （調整済み決定係数）を用いる [12]。 R^2 は回帰式の当てはまりの良さを示す指標であり、その値が1に近いほどモデルの適合度が高いことを意味する。 R^2 は以下の式(5-1)で表される。また、ここで用いる記号について以下に示す。

$$R^2 = 1 - \frac{\frac{1}{n-k-1} \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2}{\sum_{j=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5-1)$$

k : 説明変数の数

$f(x)$: 推定した回帰式

y : 目的変数

n : サンプル数

右辺第二項の分母が目的変数のトータルのばらつきを表し、分子が回帰モデルと実際のデータの残差の二乗和で表される。つまり、右辺第二項は説明されずに残っている残差の割合を表し、これを1から引くことでデータによって説明された割合を示す。

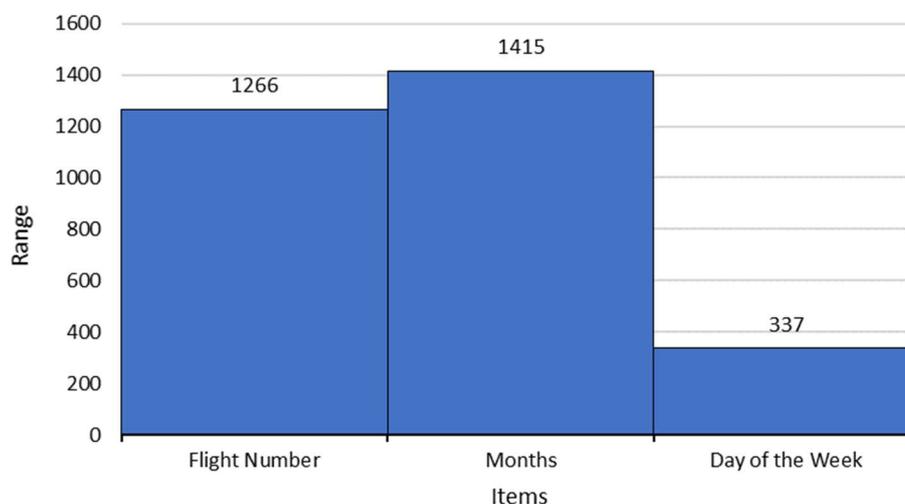


図 5-11 各要因が及ぼす DOC への影響度の比較

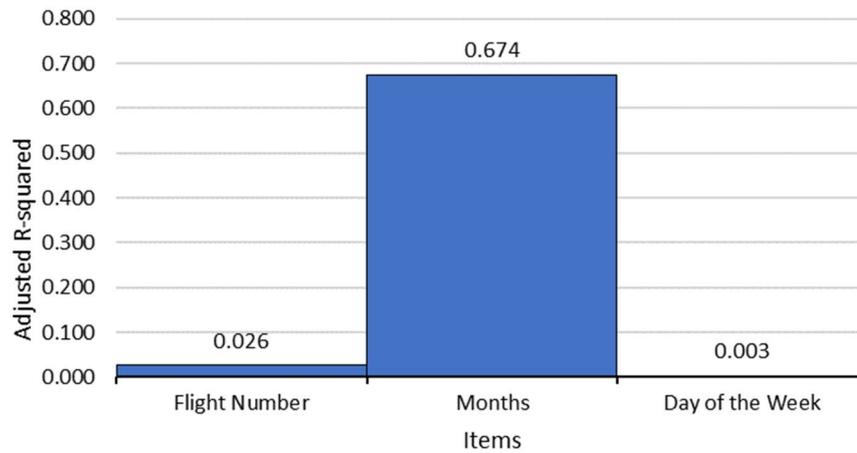


図 5-12 各回帰モデルにおける正確性の比較

図 5-11 より、DOC に対する影響度が最も高い要因は「月」であり、次いで「便名（時間帯）」、最も影響が小さい要因は「曜日」であることが確認された。さらに、曜日の影響度は時間帯、月と比べて極めて小さいことが分かる。この結果より、年間の DOC の傾向を要因別に分析した際、月ごとの変化が最も顕著であることが確認でき、運航する時間帯が及ぼす変動も月ごとの変化ほどではないものの一定の影響を及ぼすことが示されている。しかし、便ごとのサンプル数には極端に少ない便もあり、正確に時間帯における影響があるとは断言できないことが図 5-12 より示された。一方、図 5-11 より曜日による変動は年間を通して非常に小さく、図 5-12 より回帰モデルの正確性も非常に低いため、DOC への影響は限定的であることが明らかとなった。よって、「月」のみが DOC の変動に顕著に影響していることが明らかになった。

5.3 直接運航経費の予測モデル構築

これまでの節で DOC の年間分布や、月や曜日といったカテゴリごとの影響要因について分析し、その傾向を明らかにした。本節では、運航に直接的に影響を及ぼす風速や巡航速度など定量的に表現可能な変数を用いて、DOC を予測するコスト予報モデルを構築する。

5.3.1 説明変数間の相関関係

DOC のコスト予報モデルは、重回帰分析を用い複数の説明変数から構築する。回帰モデルの作成において説明変数同士の相関が過度に強い場合、多重共線性が発生し回帰係数の推定誤差が大きくなる可能性がある。そのため予測モデルを構築するにあたり、まず使用する説明変数間の相関関係を確認するため、説明変数間の相関関係を表 5-6 に示す。相関関係があるとみなされる変数の組み合わせについて、その相関係数を赤色で示す。また相関係数の値はピアソンの積率相関係数を使用し、相関関係の有無は「UMIK 相関判定簡便法」を用い検討する [11][13]。

表 5-6 説明変数間の相関関係

	巡航マッハ数	巡航高度	初期重量	飛行距離
巡航高度	-0.03	-	-	-
初期重量	-0.16	0.07	-	-
飛行距離	-0.22	-0.01	0.09	-
風速	-0.12	0.10	-0.12	-0.21

表 5-6 より、説明変数間で過度に大きな相関関係は存在しないことが確認できる。飛行距離と巡航マッハ数、風速と飛行距離の相関係数は非常に小さいが、今回使用する説明変数間では若干高めの関係が見られるため、最終的なコスト予報モデルにはこの組み合わせは含めないこととする。

5.3.2 説明変数の組み合わせと予測精度の変動

説明変数として風速，初期重量，飛行距離，巡航高度，巡航マッハ数の5つの変数を用い，目的変数をDOCとして最小二乗法により予測モデルを構築する．本項では， R^2 を使用し予測モデルの適合度を分析する．表5-7に説明変数の組み合わせごとの予測精度の違いを補正決定係数 R^2 により示す．

表 5-7 説明変数の組み合わせによる予測精度の違い

モデル	目的変数	説明変数	補正決定係数 R^2
1	DOC	風速，初期重量，飛行距離，巡航高度，巡航マッハ数	0.9984
2	DOC	風速，初期重量，飛行距離，巡航高度	0.9984
3	DOC	風速，初期重量，飛行距離	0.9984
4	DOC	風速，飛行距離	0.9982
5	DOC	風速，初期重量	0.8416
6	DOC	風速	0.6656

表5-7より，モデル1～4の予測精度に大きな差異は見られない．そのため，モデル4の風速と飛行距離を運航前に把握できれば，DOCを高精度で予測することが可能となる．しかし，混雑や悪天回避による経路長の延伸の影響により運航前に飛行距離を高精度に把握することは極めて困難である．そのため，モデル5の赤色で示した風速と初期重量によるモデルが運航前に把握可能な変数を用いた最も正確な回帰モデルである．また，モデル6において説明変数を風速のみに設定した場合，補正決定係数は0.6656と比較的高い値を示した．これにより，風速のみを用いた場合でも，ある程度の予測が可能であることが確認できる．

5.3.3 コスト予報モデルの回帰式

5.3.2項で説明変数を風速と初期重量に設定した場合の回帰モデルが運航前に把握可能な変数を用いた最も高精度な回帰モデルであることを確認した．本項では本回帰モデルの回帰式を以下に示し，その詳細について説明する．各変数の回帰係数およびt値を表5-8に示し，そのモデル式を式(5-2)に示す．さらに，回帰モデル式を用いて推定したDOCを図5-13に示す．

表 5-8 コスト予報モデルの回帰式の詳細

	変数名	係数	t-値
切片		-82218.87	
風速	x_{wind}	-28.89	-63.34
初期重量	x_{mass}	0.43	8.27

$$DOC = -28.89x_{wind} + 0.43x_{mass} - 82218.87 \quad (5-2)$$

この式(5-2)が運航前に把握可能な変数を用いて DOC を予測することのできる実用的に有意なモデルである。また、表 5-8 より風速の t 値が初期重量と比較し高いことから、DOC への影響は初期重量に比べ風速の方が大きいことが分かる。

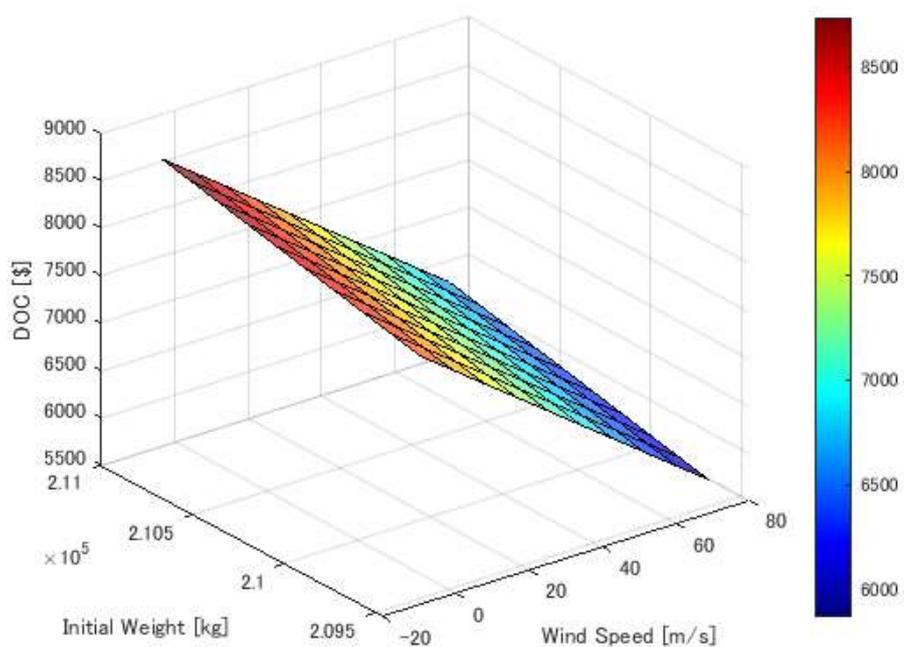


図 5-13 コスト予報モデルに基づいた 3D 表現

図 5-13 は、各変数に対する DOC の変化を回帰式に基づいて 3D 表現したものであり、風速と初期重量に対する DOC の変化を可視化したものである。色の違いによって DOC の大きさを表現しており赤色に近くなると DOC が高く、青色に近いほど DOC が低いことを示している。

図 5-13 より風速が大きいと DOC は低くなり，風速が小さいほど，特にマイナスの値になるほど DOC は高くなることが分かる．初期重量が大きいほど DOC は高くなり，軽いほど DOC は低くなる．今回帰式では，風速が大きく，かつ初期重量が小さい場合に DOC は最も低くなることを意味する．

5.3.4 コスト予報モデルの誤差評価

式(5-2)に示したコスト予報モデルの誤差評価を行う。誤差の評価方法としては4.3.1の評価方法よりモデル式の評価を表2-1のデータを対象に行う。表5-9に予測誤差の統計量を示し、分布特性を図5-14に示す。

表 5-9 予測誤差の統計量

DOC 予測誤差(%)	
平均値	4.32
中央値	4.26
最小値	0.06
最大値	11.49
範囲	11.43
標準誤差	0.14
標準偏差	2.62
データ数	330

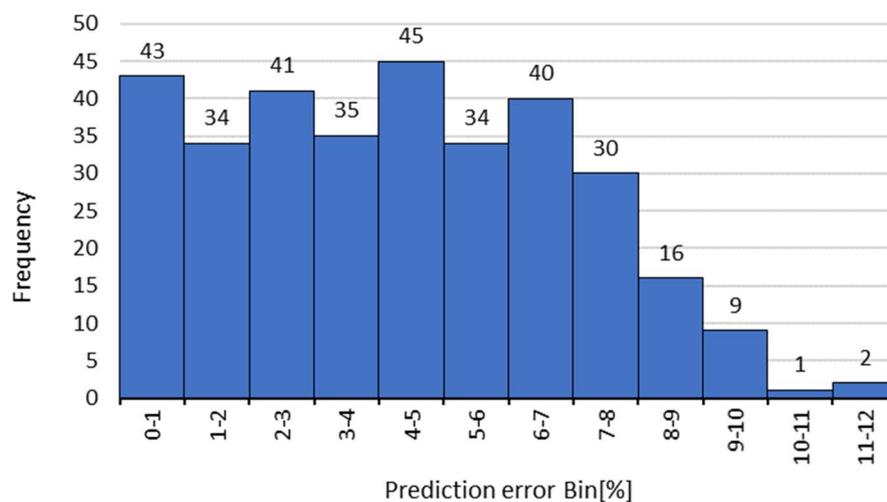


図 5-14 予測誤差の分布特性

表5-9より、予測誤差は平均値が4.32%、中央値4.26%を示しており、標準偏差2.62%の範囲でばらついており一定の精度で予測が可能ある。また、図5-14より8%を超える誤差の頻度は極端に低く、多くの場合8%以内での予測が可能であることが確認できた。

第6章 結論

6.1 まとめ

本研究では CARATS オープンデータから直接運航経費の推算、および傾向分析を行い、運航前に把握可能な変数を用いたコスト予報モデルを提案した。これは、民間航空機の定期運航便を対象に直接運航経費の年間における傾向分析からコスト予報モデルの構築を行ったことで、航空会社が運航計画を策定する際に十分活用可能な成果を得ることができたことを意味する。本研究の目的である「航空会社が運航コストを削減するための支援となる予測モデル」を提案することができた。

本研究で提案したコスト予報モデルは CARATS オープンデータから推算したものである。まず飛行状態推定を行い、推定した燃料消費量を用いてコストインデックスおよび飛行時間から直接運航経費である DOC を推定した。本研究で推算した DOC の推定精度は、機上にて記録されたデータである QAR 飛行データを真値とし比較を行った結果、誤差 0.003%～5.39%内、中央値 1.67%および標準誤差 0.05%と高い精度を示した。これにより、推定値は真値に対してばらつきが少なく、傾向分析を行う際にも問題は無いと考えられ高精度な飛行状態推定が行えていることが確認できた。

年間の DOC の傾向を要因別に、便名（時間帯）・曜日・季節を対象に DOC の変動を確認した。その結果、DOC に対して最も影響度が高い要因は、季節を細分化した「月」であり、次いで「時間帯」、最も影響が小さい要因は「曜日」であることが明らかとなった。これにより、年間を通して DOC は、各月による変化が最も顕著であり、運航計画の策定において、月ごとの計画指針を適切に調整することで DOC の抑制が可能であることが示唆された。

年間を通した各時間帯が及ぼす DOC の影響度分析から、朝に運航する便の DOC が最も高くなる傾向があり、昼から夕方にかけて低下し、夜になると再び高くなることが確認できたことから、各時間帯における DOC 傾向が明らかとなった。

一方、曜日による変動は年間を通して非常に小さく、DOC への影響は限定的であることを明らかにした。

本研究において、年間を通した DOC の要因別の傾向を明らかにし、運航前に把握可能な変数を用いたコスト予報モデルの提案を行ったことで、航空会社が運航計画を策定する際に十分活用可能な成果を得ることができたと考える。さらに、年間を通し DOC は、各月による変化が最も顕著であり、計画指針の調整に適切に組み込むことで DOC の抑制が可能であることが示唆された。これは航空会社が運航コストの削減に大きく活用でき、我が国のより持続可能な社会の実現に向けた脱炭素化の取り組みに貢献する重要な結果である。

6.2 今後の課題

5.3.2 項に示した各説明変数の組み合わせによる予測精度の違いを示す。より、予測精度が最も高い組み合わせは説明変数を飛行距離と風速にしたモデルである。これにより、飛行距離を高精度に運航前に予測できれば、本研究結果を上回る予測精度でDOCの予測が可能となる。さらに、この飛行距離の予測を高精度に行う二段階予測手法をコスト予報モデルに組み込むことで、より高精度なコスト予報が実現できると考えられる。しかし、飛行距離の予測には渋滞の発生可能性等を考慮する必要があり困難である。

したがって、飛行距離を高精度に予測するモデルを提案し、DOCの二段階予測に組み込むことが今後の課題である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、熱心且つご丁寧に指導していただいた指導教員の前田明徳准教授、岡宏一教授に心から感謝いたします。最後に、大学生活を支援し続けてくれた家族に心より感謝いたします。

本研究では、欧州航空航法安全機構が維持・管理する BADA モデルを用い、国土交通省航空局より CARATS オープンデータに提供を受けました。これらの機関が提供する便宜に謝意を表します。

参考文献

1. 環境省. 気候変動影響評価報告書.
URL; <https://www.env.go.jp/content/900516663.pdf>, 2020. 2024年12月20日最終アクセス
2. 国土交通省. 航空脱炭素化推進基本方針の策定について～空のカーボンニュートラルを目指して～.
URL; https://www.mlit.go.jp/report/press/kouku08_hh_000039.html, 2022.
2024年12月26日最終アクセス
3. 国土交通省. 航空脱炭素化推進基本方針.
URL; <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001573999.pdf>, 2022.
2024年12月26日最終アクセス
4. 国土交通省航空局. 将来の航空交通システムに関する長期ビジョン (CARATS) .
URL; <https://www.mlit.go.jp/koku/carats/rdk40188/wp-content/themes/carats/common/pdf/vision.pdf>, 2010. 2025年1月16日最終アクセス
5. 原田 明德, 武市昇. 飛行計画および航跡データを用いた直接運航経費の傾向分析. 日本化学未来館 第54期年会講演会, 2023.
6. 岡 恵, 福田 豊, 上島一彦. 航空交通データ (CARATS Open Data) の提供と研究開発への活用. 日本航空宇宙学会誌, 2020.
7. CENTRE EXPERIMENTALE EUROCONTROL. USER MANUAL FOR THE BASE OF AIRCRAFT DATA (BADA) REVISION 3.14. 2017.
8. 十時寛典, 小塚智之, 宮沢与和, 船曳孝三. 定期便フライトデータと気象庁数値予報 GPV データとの比較評価. 航空宇宙技術, 2013.
9. 菊谷 尚暉, 原田 明德, 岡 宏一. CARATS Open Data と QAR 飛行データを用いた高精度な飛行状態推定法の確立.: 高知工科大学, 2021.
10. Akinori Harada, Tomoaki Wakayama Oka Koichi. Air Traffic Efficiency Analysis of Airliner Scheduled Flights Using Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems Open Data. 2018.
11. 上田 太郎, 小林真紀, 淵上美喜. Excel で学ぶ回帰分析入門. 株式会社オーム社, 2004.
12. 阿部 真人. 統計学入門. ソシム株式会社, 2022.
13. 上田 太郎. 相関があるかを見つける簡便法. 日本 OR 学会「企業事例交流会」, 1997.