



航空路利用へのプライシング政策導入についての考察

西澤, 宏員

(Degree)

博士 (商学)

(Date of Degree)

2020-03-25

(Date of Publication)

2021-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7693号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007693>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

航空路利用へのプライシング政策導入
についての考察

2020年1月15日提出

神戸大学大学院経営学研究科

正司健一 研究室

経営学専攻

学籍番号 110B415B

氏名 西澤宏員

目 次

第1章 序論	1
第2章 我が国の航空路	10
2.1 はじめに	10
2.2 航空路の現状	10
2.2.1 航空路とは	10
2.2.2 航空路の利用	11
2.2.3 料金	13
2.3 混雑状況	16
2.3.1 航空路の混雑とは	16
(1) 安全基準からの制約	17
(2) 管制処理容量からの制約	18
(3) 経済性からの制約	18
2.3.2 現状の混雑状況と将来予測	20
2.3.3 対策	25
2.4 配分方法	28
2.4.1 航空管制	28
(1) 垂直間隔（高度調整による間隔）	29
(2) 横間隔（経路調整による間隔）	30
(3) 縦間隔（時間調整による間隔）	30
2.4.2 リアルタイム配分方法	32
2.4.3 事前配分方法	34

2.5	現状の問題点	37
2.5.1	リアルタイム配分の問題点	37
2.5.2	事前配分の問題点	39
2.5.3	料金設定の問題点	40
2.6	まとめ	41
第3章	先行研究からの考察	42
3.1	はじめに	42
3.2	道路交通における混雑への先行研究からの考察	43
3.2.1	静学モデル	43
3.2.2	動学モデル	46
3.2.3	ネットワーク均衡モデル	49
3.3	空港における混雑への先行研究からの考察	53
3.3.1	空港の容量とスロット	53
3.3.2	プライシング政策によるスロット配分	54
3.3.3	実運用での再配分	55
3.4	航空路における混雑への先行研究からの考察	56
3.4.1	現行の料金設定の問題点	56
3.4.2	混雑料金を取り入れた先行研究	58
3.4.3	オークション理論を取り入れた先行研究	61
3.5	まとめ	62
第4章	混雑料金による需要管理についての考察	64
4.1	はじめに	64
4.2	モデルの設定	66

4.3	所要時間最小化	68
4.3.1	各ルートの所要時間	68
(1)	Sルートの所要時間	68
(2)	Rルートの所要時間	69
4.3.2	所要時間に基づいた航空会社の行動	69
(1)	航空会社が進入順位の情報を得られる場合	71
(2)	航空会社が進入順位の情報を得られない場合	71
a.	航空会社が1社の場合(独占)	71
(a)	独占航空会社がSルートに配分する q^S 機分の 総所要時間	72
(b)	独占航空会社がRルートに配分する $q - q^S$ 機分の 総所要時間	72
(c)	独占航空会社の総所要時間と行動	72
b.	航空会社が2社の場合	73
(a)	航空会社1がSルートに配分する q_1^S 機分の総所要時間	73
(b)	航空会社1がRルートに配分する $q_1 - q_1^S$ 機分の 総所要時間	74
(c)	航空会社1の総所要時間と行動	74
(d)	航空会社1と航空会社2の行動	75
4.3.3	所要時間からの考察結果	76
(1)	航空会社の所要時間最小化行動からの考察	76
(2)	ANSPからの考察	77
4.4	費用最小化	78
4.4.1	各ルートの費用	78
(1)	Sルートの費用	79

(2) R ルートの費用	79
4.4.2 費用に基づいた航空会社の行動	79
(1) 航空会社が 1 社の場合 (独占)	81
a. 独占航空会社が S ルートに配分する q^S 機分の費用	81
b. 独占航空会社が R ルートに配分する $q - q^S$ 機分の費用	81
c. 独占航空会社の費用と行動	81
(2) 航空会社が 2 社の場合	82
a. 航空会社 1 が S ルートに配分する q_1^S 機分の費用	82
b. 航空会社 1 が R ルートに配分する $q_1 - q_1^S$ 機分の費用	82
c. 航空会社 1 の総費用と行動	83
d. 航空会社 1 と航空会社 2 の行動	83
4.4.3 費用からの考察	84
(1) 航空会社の費用最小化行動からの考察	84
(2) ANSP からの考察	84
4.5 まとめ	86
第 5 章 オークションによる通行枠配分についての考察	88
5.1 はじめに	88
5.2 航空路の容量と配分方法	89
5.3 我が国におけるスロットオークション議論	90
5.3.1 スロットオークション議論の経緯	90
5.3.2 スロットオークション議論の論点	91
5.4 通行枠オークションの提案と考察	92
5.4.1 通行枠オークション対象の航空路イメージ	92
5.4.2 考察	94

(1) レントの是正と利用者利便性の向上	94
(2) 客観性・透明性の確保	95
(3) 配分の合理性	95
(4) オークションメカニズム導入に係る課題	96
5.4.3 結果	100
5.5 まとめ	101
<補論>	104
第6章 プライシング政策導入に向けての考察	106
6.1 はじめに	106
6.2 プライシング政策の意義と課題	106
6.2.1 航空路利用への混雑料金導入の意義と課題	106
6.2.2 航空路利用へのオークション導入の意義と課題	110
6.3 プライシング政策導入のタイミングに関する考察	115
6.3.1 現行制度と導入するプライシング政策との関係	115
6.3.2 導入する混雑料金を第1段階の配分とした場合	116
6.3.3 混雑料金を第1段階の配分とした場合の課題	117
6.3.4 導入するオークションを第1段階の配分とした場合	120
6.3.5 オークションを第1段階の配分とした場合の課題	121
6.4 混雑料金制度のオークション制度の比較	124
6.5 まとめ	125
第7章 結論	127
参考文献	137

第1章 序論

近年の航空需要の拡大に伴い、航空機の便数が大幅に増加している。国土交通省によると、我が国における1日当たりの航空機需要は、2012年には約3,600機だったものが、2025年には約4,500機と約1.25倍増加し、夏期等繁忙期間には30分を超える遅延が恒常化することにより国内便ではダイヤ通りの運航が困難となり欠航になるケースが発生すると予測している¹。また、航空需要の指標の一つである札幌・東京・福岡・那覇管制部の年間の延べ取扱機数の合計²を見てみると、2012年が約260万機であったのに対し、2017年では約320万機と約1.24倍になっている³。

この背景には、規制緩和によってLCCと呼ばれる低費用航空会社が誕生したことにより新たな路線での航空需要が開拓されたことや、LCCと既存の航空会社との間で起こった価格競争により既存の路線でも航空需要が増大したこと、さらには、LCCに対抗するために既存の航空会社が自らの運航効率を改善する目的で、従来の戦略であった大型機での運航から小型機による多頻度運航に切り替えたことが挙げられる。

航空機の便数の増加、つまり交通量の増加は、他の交通機関と同様に混雑問題を引き起こす。航空交通の場合の混雑問題とえば、まず、空港の混雑問題が挙げられる。例えば、スポットと呼ばれる駐機場にその数以上の到着機が一度に押し寄せた場合、入りきれない航空機はスポットの順番待ちのために他の場所で待機させられることになる。また、出発機が一度に滑走路へと押し寄せた場合、滑走路の手前で離陸の順番待ちの列ができることになる。これらの場合には、混雑のために順番待ちの行列が発生し、待ち行列での遅延時間はそのまま社会的損失となる。

増大する航空需要や需要予測を受け、世界各国では空港の新設や滑走路の増設、さらにはターミナルの増設や改修等といった空港設備の整備が行

¹ 2012年実績及び2025年予測に関しては、国土交通省航空局(2013a)6頁より引用。

² 札幌・東京・福岡・那覇管制部とは、航空路を管理する航空路管制機関である。また、延べ取扱機数は、1機が1回の飛行で東京管制部と福岡管制部の空域を利用すると、それぞれの管制部でカウントされるので、2機となる。

³ 2012年及び2017年の実績は、国土交通省航空局(2018b)より引用。

われている。

空港の新設に関して最も記憶に新しいのは、2019年9月25日に開港した中国・北京市の北京首都第2空港（北京興国国際空港）である。この空港は、既存の北京首都国際空港が手狭となり便数も増やせず遅延も頻発していたことを受け、2空港体制とすることで混雑を解消しつつ国際的競争力を高めるために新設された。渡辺（2019）によると、これにより北京の2空港の旅客数が2025年に約1億5000万人と5割増となり、2018年の都市別の空港旅客数で計算すると、ニューヨーク・東京を抜いて世界2位に浮上するとしている。

また、滑走路の増設については、福岡空港と那覇空港で現在2本目の滑走路の増設工事中であり、ターミナルの増設についても、関西・成田・中部空港においてLCC用のターミナルが整備されている。

これらは、現状の容量を拡大することにより増大する需要に対応することを目的としており、空港施設が増設されればそれに従って容量が増えるという、広く理解されやすい対策といえる。しかしながら、空港施設の新設や増設には長い時間と多額の資本が必要となり、混雑が発生したからといってすぐには対応できるものではない。また、整備後も維持費等の経費が必要となることから、混雑の度合いによっては対応が後回しにされる場合も考えられる。

一方、東京国際空港（以下、羽田空港）においては、滑走路の増設ではなく滑走路の使い方と飛行経路を見直すことにより、容量を拡大する取り組みが行われている。これは、東京湾上空が大変混雑しており、仮に滑走路を増設したとしても飛行経路を適切に設定しなければ便数を増やすことができないとの理由から、飛行経路を検証した結果、都心側からの到着と木更津沖へ出発する方法が最も効率的であり、この方法によって1時間当たりの発着回数を現行の80回から90回まで増やせるとの結果を得たことによる⁴。この対策は、目に見える地上の空港施設の増設の場合とは異なり、東京湾上空で混雑が発生している理由や、この対策で容量が増える仕組みを理解するには専門的な知識が必要となり、世間一般にはなかなか理解されにくい。

⁴ 羽田空港の新飛行経路の詳細については、国土交通省のウェブページ「羽田空港のこれから」から入手可能である。

本論文で取り上げる航空路の混雑も、地上の空港施設とは違い、東京湾上空での出来事の様子に、世間一般に認知されているとは言い難い。よって、議論を進めるに当たっては、まず、空中に設定されている見えない道である航空路とは一体何かというところから説明を行う必要がある。

以上のことより、まず、本章において、航空機を操縦するパイロットが従うべき規定を簡単に紹介し、航空路の利用方法を解説する。その後、航空路の混雑に対する現行の対応策とその問題点を指摘する。そして、他の交通分野も含めた混雑に関する先行研究の整理を行った上で、本論文の目的と貢献を示し、最後に本論文の構成を示す。

最初に、パイロットが従うべき規定について説明する。パイロットが従うべき規定は、航空法をはじめとして多くのものがあるが、ここで取り上げるのは航空路を飛行する際に必要な規定に絞り、簡単に2つの飛行方式（有視界飛行方式と計器飛行方式）についての説明を行う。

まず、有視界飛行方式とは、パイロットが目視によって地上の障害物や他の航空機等と間隔を保って操縦する方式で、それらとの衝突回避に関しては常にパイロットが責任を負わなければならないが、飛行経路や高度、速度等に関しては決められた範囲内においては自由に飛行することができる規定となっている。ただし、この有視界飛行方式で飛行するには定められた気象条件が必要で、雲や地表から一定の距離を保って飛行することが求められている。よって、降雨が激しい時や雲が空一面に広がっているような悪天候においては、飛行することが許されない場合が発生する。

それに対して、悪天候でも飛行が可能な方式が計器飛行方式である。計器飛行方式とは、離着陸時を除いて気象条件による制約が無く、雲の中を飛行せざるを得ないような悪天候が予想されていても飛行を行う航空会社はこの飛行方式を選択している。計器飛行方式で飛行している間は、パイロットの代わりに航空管制官が、航空機と障害物や他の航空機との間隔を確保することになっている。よって、パイロットは飛行中において常に（例えるなら、出発空港でエンジンを始動する時から目的空港でエンジンを停止させるまで）航空管制官の指示に従って飛行することになる。航空路を利用する航空機のほとんどがこの計器飛行方式で飛行していることから、本論文では、航空路の利用者をこの方式で飛行する航空機として議論を進めていく。

さて、計器飛行方式で飛ぶパイロットが操縦する航空機は、常に航空管制官の指示の下で飛行を行うことは既に述べた。これを言い換えれば、航空管制官はすべての航空機に対して常に障害物や他の航空機との間隔を確保する責務を負っていることになる。確かに、飛行する航空機の数（交通量）が少ない場合には航空管制官がすべての航空機の針路や高度、速度等を指示することも可能かも知れないが、交通量が増えるにつれてその作業が困難になっていくのは容易に想像がつく。よって、交通量が増えた場合であってもその作業を航空管制官が行える様に航空機の流れを整える必要性が出てくる。つまり、各航空機がばらばらの針路や高度を飛行することを許すのではなく、ある一定の規則に従って針路や高度を飛行させることができれば、そこに秩序ある航空機の流れが出来上がる。この目的のために設定されたのが、空の道である航空路⁵である。

航空路を飛行する航空機に対し、航空機の流れを整える目的でパイロットが取るべき針路や高度等の利用方法に関する規定が定められている。例として地上の道路交通と比較すると、道路の種類として一方通行の道路や対面通行の道路がある様に、航空路にも一方通行として使われるものもあれば対面通行できる航空路もある。一方通行の航空路の場合には、その航空路を飛行する航空機はすべて同じ方向に向かって飛行させることで航空機の流れが維持しやすくすることができる。それに対して対面通行の場合には、道路の場合では車線によって進行方向が対面となっている様に、航空路の場合には高度によって進行方向を分けている。我が国が採用している高度の単位は feet であり、通常、航空路を飛行する航空機は 1,000feet 単位の高度を利用し、1,000feet 単位で考えて偶数高度は西向きの、奇数高度は東向きの航空機が利用する規定となっている⁶。

なお、航空交通においては、航空機の流れを航空交通流と呼んでおり、この航空交通流を調節するための方法として航空交通流制御と呼ばれる交調整方法がある。これは、航空路を管理する管制当局により航空機がある特定の空港や航空路に同時に集中しないよう離陸時間を指定する方法で、

⁵ 航空路については、第2章において概念の説明を行っている。

⁶ 例えば、偶数高度である 28,000feet, 30,000feet, 32,000feet が西向きの、奇数高度である 29,000feet, 31,000feet, 33,000feet が東向きの航空機に利用されている。なお、feet は高度の単位として世界中で一般的に採用されており、我が国周辺で異なる単位(m:メートル)を採用しているのは中国とロシアと少数である。

これにより事前に混雑を回避し、安全で秩序ある航空交通流の形成を行うことが可能となる。また、これは航空交通流管理と呼ばれる需要管理の一部でもある⁷。

ここまで、航空管制官がすべての航空機に対して常に障害物や他の航空機との間隔を確保する責務を負っていること、そのためには航空交通流を整える必要があり、それを達成するために航空路が設定されていることを説明した。しかしながら、航空路にも様々な技術的制約⁸から一度に処理できる航空機数の上限、つまり、容量が存在し、容量が存在する以上、需要がこの容量を超過する場合には航空路に混雑が発生することになる。

需要が容量を超えると予測された場合、前述の通り航空交通流管理が行われる。その方法とは、航空路に到達する予測時間を基にした先着順により利用する順位を決定し、容量に見合った交通量になる様に航空交通流制御を用いて離陸時間を指定する調整方法である。

ここでいう交通量は航空機数であり、航空機の定員等の情報は加味されない。つまり、数名しか搭乗できない小型機も 500 人以上搭乗可能な大型機も 1 機は 1 機として計算される。同様に、航空会社が航空路を利用する対価として支払っても良いと考える支払意思額や乗客や航空会社の時間価値等も考慮されない。

よって、先着順を原則とした需要管理である現行の方法は、混雑の度合いが高まれば高まるほど混雑によって発生する順番待ちによる死荷重が増すことになり、この順番待ちに巻き込まれる乗客の時間価値等も含めて考えると、経済学的見地から問題があることは、他の交通手段の混雑問題での議論からも明らかである。また、増え続ける交通量への対策として航空路の容量を拡大する設備投資等の政策を行う必要性はあるものの、需要のピークとオフピークに大きな差がある場合には、容量拡大のためにピーク時の交通量に合わせた設備投資が果たして妥当かどうかとも問題となるであろう。ここに、航空路の混雑に対する現行の政策の問題点がある。

以上のことから、航空路の混雑問題に対し、現行の容量を所与としたプライシング政策導入によるアプローチの考察が必要であることは明白である。

⁷ 航空交通流制御や航空交通流管理については、第 2 章で説明を行なっている。

⁸ 技術的制約については、2.3.1 で説明を加える。

さて、交通問題において混雑問題と言うと、需要管理的なアプローチからは、まず混雑料金による対応が連想される。合理的な利用者は、交通サービスからの受益と利用にかかる私的費用とを比較し、受益が大きい場合に交通サービスの利用を選択することになり、混雑が発生している場合においてもこの利用者の選択行動は行われる。しかし、個々の利用者は混雑状況に応じて利用を決定することが想定される反面、他の利用者に与える影響（外部性）を考慮しないので、混雑により社会的限界費用と私的限界費用の乖離が発生する。よって、この乖離を混雑料金として内生化し、利用者の選択行動に反映させることにより、混雑による死荷重の発生を防止し、社会的余剰の最適化を達成することができる。

しかし、混雑という外部性問題に対し混雑料金の課金により解決を図るピグー的補正という従来からのアプローチは必ずしも唯一の解決策ではない。例えば、航空路に容量があることからその容量内で同時に利用できる航空機数分の通行枠を一つの財と捉え、航空路の管理者が航空路の利用を求める航空会社にオークションで販売し、その後の通行枠の移転を当事者間の市場取引に委ねるという方法も考えられる⁹。

これまでも航空路の混雑問題に対する経済学的アプローチによるいくつかの研究成果が報告されてはいるが、これらは理論的な考察が主であり、その考察で得た研究成果を実際に政策として導入する場合の考察を課題として残しているものがほとんどである。また、実際に政策面から見ても、航空路の混雑に対してプライシングによる需要管理の議論は見受けられない。しかし、プライシングによる需要管理の議論については、他の交通分野である道路の混雑問題に関しては数多くの研究成果が報告されており、引き続きより発展した理論での研究もなされている。さらに、政策面から見ても、道路利用にプライシング政策を導入するための議論が行われ、導入済みの事例も報告されている¹⁰。

以上のことから、本論文の目的を、航空路利用にプライシング政策を導入することで混雑の緩和や社会的余剰を改善することが可能であることを示すこととする。そして、本論文で得た研究成果を持って、未だ政策としては手付かずのこの分野の議論に参加することは、増大する航空需要に対

⁹ この考え方は、湧口・西澤 (2005) で示している。

¹⁰ 道路の混雑問題に対する理論と政策については、山田 (2001) や關・庭田 (2007) 等数多くの研究成果がある。

する航空交通産業の発展に寄与するだけでなく、社会全体にとっても大きな貢献となるはずである。

本論文の貢献は、以下の5点である。第1に「未だ議論がなされていない分野への考察」、第2に「経済的アプローチのための配分方法の考察」、第3に「クールノー競争を用いた航空会社間の経路配分モデルによる分析方法」、第4に「シンプルなオークション理論を用いた通行枠配分の実現可能性の考察」、そして、第5に「プライシング導入における政策面での考察」である。

まず、第1の「未だ議論がなされていない分野への考察」とは、前述の通り、未だ政策としては手付かずのこの航空路の混雑に対しての経済学的視点からの議論に、プライシング政策導入の意義を考察するだけでなく、その過程で発生する課題に対して政策面からの考察を加え、実現可能性を高めた研究結果を示したことである。

次に、第2の「経済的アプローチのための配分方法の考察」とは、未だ先行研究がほとんどない航空路の混雑問題を考察するに当たって、研究対象である航空路の運用状態や混雑状況を示しただけでなく、その利用権を通行枠として表し、現状の配分方法を事前配分とリアルタイム配分に分類し、通行枠の配分問題にも経済学的アプローチによる理論的考察を行えることを示したことである。

また、第3の「クールノー競争を用いた航空会社間の経路配分モデルによる分析方法」とは、先行研究において寡占（複占）状態にある航空会社間の競争を分析する際に多く採用されているベルトラン競争を用いるのではなく、航空会社が自社便をどの経路に割り当てるかという経路選択行動に対してクールノー競争を用いた分析を行ったことである。

そして、第4の「シンプルなオークション理論を用いた通行枠配分の実現可能性の考察」とは、同質財・単一需要を想定したオークション理論を適用した通行枠オークションであっても合理的な配分が行えるということを示したことで、そのシンプルさがあるからこそ実現可能性を高めることができるのと政策面からの考察結果を導き出したことである。

そして、第5の「プライシング導入における政策面での考察」とは、プライシング政策を導入する意義と課題をまとめた上で、プライシング政策導入のタイミングやその場合の課題等を挙げ、オークション等のプライシ

ング政策を導入する過程で発生する課題に対して ANSP¹¹ (Air Navigation Services Provider) や航空政策立案者が取るべき政策的対策をより具体的に考察したことである。

本論文の構成は、以下の通りである。

第2章において、航空路の概念や航空路の現状についての解説を行う。加えて、航空路を管理する管制当局の業務と混雑に対する対応を解説し、経済学的アプローチを行うための考察を行う。

第3章において、航空路の混雑に関する先行研究の整理を行う。ただし、航空路に焦点を当てた混雑問題に対する先行研究の成果がそれほど多くないことから、多くの研究成果がある道路交通の混雑問題に関する先行研究と、同じ航空交通でも研究成果が多く報告されている空港の混雑問題に関する先行研究を先に整理する。

第4章において、ボトルネック混雑が発生する混雑航空路とそれに対する迂回経路が存在するモデルを設定し、航空会社が自社便をどの経路に割り当てるかという経路選択行動に対してクールノー競争を用いた分析を行い、混雑料金の必要性を理論的に考察する。

第5章において、空港混雑のスロット（発着枠）配分にオークションを導入する場合と比較し、混雑航空路の通行枠配分にオークションを導入する場合の方が、理論的のみならず政策面から考えてもより効果的であることを示す。そのために、同質財・単一需要を想定したオークション理論を適用した通行枠オークションを設定し、それにより合理的な配分が行えるということを理論的に示す。そして、そのシンプルさにより実現可能性を高めることができるとの政策面からの考察結果を示す。

第6章において、第4章と第5章の考察に基づいたプライシング政策導入の実現可能性を検討し、航空路の混雑問題に対する混雑の緩和と社会的余剰を改善する方法としてのプライシング政策を導入する過程やその際の課題を整理する。また、混雑料金とオークションの性格の違いに注目し、両者を比較して航空路利用へのプライシング政策としての優劣を考察する。

第7章において、本論文のまとめを行う。まず、本論文で導き出した結果をまとめて整理する。そして、前述した本論文の貢献を再度示し、その

¹¹ 航空のナビゲーションサービス（航空保安業務）を提供する組織で、我が国では国土交通省航空局がそれに相当する。

後，考察を通じて浮かび上がってきた課題を整理し，その対策等を挙げながら今後の課題をまとめる。

第2章 我が国の航空路

2.1 はじめに

本章では、航空路の概念や我が国の航空路の現状についての解説を行う。

航空路という概念が社会一般に広まっているとは言い難いことから、まず、2 節において、航空路の概念を整理し、本論文で取り上げる航空路を定義する。併せて、定義した航空路の利用方法・料金体系を取り上げる。次に、3 節において、航空路の混雑の概念を整理し、現状の混雑状況を示し、将来の需要予測とその対策を示す。その後、4 節において、航空路の通行枠の配分方法を航空管制の見地から解説する。そして、5 節において、航空路の混雑に関する現状の問題点を指摘する。最後に、6 節において、本書のまとめを行う。

2.2 航空路の現状

2.2.1 航空路とは

航空路とは、国土交通省航空局の定義において、「地上の航空保安無線施設等¹²を結んで」設定される「航空機の航行に適する空中の通路」とされている¹³。これに沿って設定された航空路は航空路誌（以下、AIP）¹⁴により利用者に公示されている。しかしながら、その AIP では、「地上の航空保安

¹² 航空保安無線施設：電波により航空機の航行を援助するための施設。

¹³ 国土交通省ウェブサイト「用語集」には、「航空路とは、航空機の航行に適する空中の通路として国土交通大臣が指定するものをいう。その幅は原則として 18Km 又は 14Km であり、地上の航空保安無線施設等を結んで全国各地に指定されている。航空路の名称は、英字（A, B, G, R, V, W）及び数字（1～999）により表され、国際航空路については A, B, G, R を、国内航空路については V, W を使用している。」とある。

¹⁴ 航空路誌（AIP：Aeronautical Information Publication）とは、運航に不可欠な永続性を持つ最新の航空情報が収録されており、28 日周期で更新されている。我が国では国土交通省航空局の権限により、『AIP Japan』として発行されている。なお、『AIP Japan』は、国土交通省が管理するウェブサイト AIS JAPAN（Japan Aeronautical Information service Center）で入手可能である。

無線施設等を結んで」設定されている通路として、洋上転移経路¹⁵・直行経路¹⁶と呼ばれるものや、近年の航空機性能の向上により可能となった「地上の航空保安無線施設等を結んで」いない RNAV (Area Navigation) 経路¹⁷と呼ばれるものも公示されている。どの航空路・経路を利用するかは航空機の性能や出発空港から目的空港までの航空交通流を勘案して決定されるが、航空関係者から「エンルート (En route)」と称されるこれらの区間は、航空機の運航上において厳密な使い分けがされている訳ではない。よって、本論文ではエンルートの概念より、航空路とは「巡航部分を主に含む飛行区間の総称」と広義にとらえる¹⁸。

2.2.2 航空路の利用

では、エンルートと呼ばれる航空路がどのように利用されているのか、まずは、利用者の立場から説明を試みる。

航空路を利用するのは、空を飛ぶ航空機である。その航空機を飛ばしているのは航空機を運航する航空会社であり、航空会社は、旅客や荷主等に座席等の輸送空間を提供することにより収入を得ることを目的として航空機を飛ばしている。つまり、航空機を利用して間接的に航空路を利用しているのは旅客や荷主等となる。よって、ここでは、利用者の立場として、最終的な利用者となる旅客、つまりは乗客の立場から説明する。

乗客の立場から、出発空港で航空機に搭乗してから目的空港で降機するまでの流れを例に挙げ、説明する。乗客が出発空港で航空機に搭乗した後、航空機はスポットと呼ばれる駐機場から誘導路と呼ばれる道路を地上走行し、滑走路から離陸する。滑走路から離陸した後、航空機は、徐々に上昇しながら目的空港に向かっての飛行を開始する。悪天候でない限り、上昇

¹⁵ 洋上転移経路：地上の航空保安無線施設の電波が届かないような洋上管制区に設定されている飛行経路と航空保安無線施設とを結ぶ飛行経路。

¹⁶ 直行経路：航空保安無線施設を利用して比較的短距離の直行飛行を行うときの飛行経路であって、航空路、洋上転移経路及び RNAV 経路以外のものであり、AIP に公示されている。

¹⁷ RNAV 経路：航空保安無線施設や GPS、さらには IRS と呼ばれる自蔵航法装置等のデータを元に、自機の位置と次の地点への経路を航法危機が算出して任意の地点間を彷徨する航法概念である RNAV が可能な航空機の用に供するために設定された経路で、レーダー覆域内のみ設定されている。

¹⁸ AIM-JAPAN 編纂協会 (2019) 第 5 章で、エンルートを航行する航空機についての詳しい解説がなされている。

の途中でシートベルトサインが消えて、機内サービスが開始されることになる。そして、航空機はいつの間にか水平飛行に移り、目的空港近くになると、降下を開始しながら高度を下げていく。その後、シートベルトサインが点灯して客室のサービスが終了し、目的空港の滑走路に向かって着陸態勢に入る。目的空港の滑走路に着陸後、航空機が誘導路を地上走行し、スポットまで移動が完了した後に、乗客は降機することになる。

さて、この流れの中でエンルートと呼ばれる航空路の区間は、大雑把に言って、シートベルトサインが消えてから再度点灯するまでの区間だと考えてよい。レガシーキャリアと呼ばれる日本航空や全日本空輸等の航空会社では、通常、この航空路を飛行する時間帯に機内サービスを行っており、言い換えれば、乗客が航空路を利用していると実感できるのは、この機内サービスを受けている時間帯ということになる。

このことをもう少し詳しく説明するために、出発空港から目的空港までの航空機の運航を通して、航空会社の立場から航空路の利用についての説明を試みる。

航空会社が出発空港から目的空港までの飛行を計画する場合、予め管制当局に対し、飛行計画¹⁹を提出しなければならない。この飛行計画とは、航空会社が採用する計器飛行方式²⁰により飛行する航空機に対して義務づけられているもので、便名・航空機型式・出発飛行場・出発予定時刻・巡航高度・速度・飛行経路・目的飛行場および所要時間等を記載し、出発予定時刻の2時間前までに提出することになっている。このうち、飛行経路に関しては、予め管制当局より推奨する経路が公示されており、航空会社はそれに沿って飛行経路を設定することになる。

飛行計画を提出し、出発予定時刻になった航空機は、スポットから滑走路まで地上走行を行い、離陸する。離陸後は、上昇飛行を行いながら飛行計画通りの経路を飛行し、希望高度に到達した後に水平飛行に移行する。そして、目的空港近くで降下を開始し、着陸態勢を整え、目的空港に着陸し、予め決められたスポットまで地上走行を行い、一連の飛行を終了する。

¹⁹ 飛行計画 (Flight Plan) : 飛行に先だって必要事項を記入し国土交通大臣に提出 (通報する飛行計画書。出発地点から目的飛行場までの飛行経路や所要時間等が記載されている)。

²⁰ 計器飛行方式 : 公示された経路または航空管制官の指示による経路のより、かつ、その他の飛行の方法について航空管制官が与える指示に常時従って行う飛行方式。

この流れの中でエンルートと呼ばれる航空路の区間は、前述のシートベルトサインが消えてから再度点灯するまでの区間から考えると、上昇飛行中から着陸態勢を整えるまでということになる。この間を航空路の利用区間と捉えると、航空会社の立場からは次の様なイベントが考えられる。

まず、希望通りの高度を飛行できるかどうかである。飛行計画に希望巡航高度を記載して管制当局にその高度を伝えるのだが、他の航空がその高度を飛行中は、様々な制約によりその高度を飛行できないことがある²¹。

次に、飛行経路についても、他の航空機が同じ飛行経路での飛行を希望する場合には、管制当局から順番待ち等の指示を受けることがある²²。

航空会社が飛行計画を作成する際には、高度については運航効率上で最適な高度を選択しており、その高度以外の飛行を指示された場合には燃料消費率の悪化や所要時間への悪影響が考えられる。また、飛行経路は管制当局が推奨する経路を選択することになっているが、順番待ちが発生する場合には遅延による追加的な費用が発生する。つまり、航空会社の立場から見ると、飛行計画に記載した出発予定時刻・巡航高度・飛行経路・所要時間での飛行が望ましいが、航空路の利用に際して希望通りに行かないことも想定しなければならない²³。よって、航空会社にとって、航空路の利用は運航効率を左右する重要な区間ということになる。

2.2.3 料金

ここでは、航空会社が航空路を利用する際にかかる料金について見る。

航空路等の航空交通に関する料金は、国際連合で設置された国際民間航空に関する専門機関である ICAO²⁴において料金設定に関する方針が示さ

²¹ ここでいう制約については、航空機の流れや安全のための間隔設定に必要な制約のことである。制約についての詳しい解説は、第3章で行う。

²² ここでいう順番待ちとは、空中待機や事前配分等のことである。なお、事前配分については、第3章で解説を行う。

²³ 運航効率を考え、飛行中においてもパイロットから航空管制官に対して、所要時間を短縮できる様に飛行経路をショートカットする要求や、高度変更の要求を行うこともある。これらが受け入れられた場合には、提出した飛行計画より効率的な運航が実現できることもある。

²⁴ ICAO：国際民間航空機関（International Civil Aviation Organization）の略で、1944年に締結された国際民間航空条約（シカゴ条約）に基づき、1947年に発足した。2018年末現在では192の国と地域が加盟している。なお、我が国は1953年に加盟している。

れている²⁵。それによると、航空路を利用する際の料金は、航空路の管理者である ANSP が利用者に対し航空保安業務を提供するための維持・運営に係る費用を回収することを目的として徴収される。そして、「Air Navigation Services Charges」と称されるこの航空路の利用料は、航空機の重量（最大離陸重量）と飛行距離を基にした料金設定方法により算出することを ICAO では推奨している。

例えば、ヨーロッパ上空の空域を管理する EUROCONTROL²⁶では、ICAO の方針に従って航空機の重量と飛行距離を基とし、そこに各加盟国の ANSP が負担する費用と航空路の利用料による収入とを均衡させるために係数をかけ合わせた料金設定を採用している²⁷。

しかし、この ICAO が推奨する方法とは異なった料金設定を行っている ANSP も存在する。例えば、米国の ANSP である米国運輸省航空局（U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration:以下、FAA）では、米国の空港や航空路の維持・運営費用を回収するための主な財源として、米国内の空港を利用する旅客に対して課税する方式（通称、チケット税）を採用しており、その対象者は、米国内線の利用客だけでなく、国際線の利用客も含んだ米国内の空港を利用する全ての旅客となっている。このチケット税は、空港や航空路の整備に係る費用だけでなく、セキュリティーに関する費用等、米国内の航空交通に関する様々な費用を回収する目的で設定され、それらは、Airport & Airway Trust Found（以下、AATF）という米国の航空交通に関する会計制度に組み込まれた後、FAA が管理する航空路の維持・運営費用に充てられる²⁸。また、米国内の空港を利用せず、米国の管轄する空域を通過するのみの利用に対しては、通過する空域（陸上空域と洋上空域）とその飛行距離に応じた上空通過料を設定し、それを航空会社から徴収し、AATF に組み入れた後に FAA の維持・運営費用に配分される。

²⁵ ICAO が加盟国に推奨する空港や航空路の利用料金の方針が ICAO (2012) に、航空路の利用料金の料金設定やその計算方法等が ICAO (2013) に記載されている。

²⁶ 航空航法の安全のための協力に関する EUROCONTROL 国際条約の下でベルギーのブリュッセルに 1960 年に設立され 1963 年に発効した国際組織で、欧州 41 カ国と欧州外の 2 カ国が加盟している。（2019 年 11 月 4 日現在）

²⁷ EUROCONTROL の料金設定に関しては、第 3 章で解説を加える。

²⁸ 米国航空交通の会計制度は、Airport & Airway Trust Found のウェブサイト詳しい解説がある。

一方、我が国の航空路を利用する際の料金は航行援助施設利用料(以下、航援料)と呼ばれ、着陸料等と併せて空港整備勘定に組み入れて航空路整備や維持運営費等に充てられている。我が国の ANSP である国土交通省航空局により設定された航空路の利用料は、長らく ICAO の推奨する航空機の重量と飛行距離に基づく料金設定方法とは異なり、国内線料金・国際線料金・上空通過料という区分に基づいた料金設定方法を採用してきた。この、国内線料金・国際線料金・上空通過料という区分からなる航援料は、国内飛行を行う航空機に対して3段階(400km以下、401～800km、801km以上)の飛行距離に航空機の重量を掛け合わせた料金と、国際飛行を行う航空機に対してその飛行距離にかかわらず航空機の重量に応じた料金と、上空通過飛行を行う航空機に対してその通過区域に対する料金をそれぞれ課していた。

しかし、従来の国内線料金・国際線料金・上空通過料という区分では、上空通過料よりも国内線料金・国際線料金が割高になっている点、さらには国際線料金よりも国内線料金が割高になっている点が問題視される様になり、他の航空関連の利用料や税金等と併せて公租公課のあり方が問われる様になった。それを受けて、2012年から国土交通省交通政策審議会航空分科会基本政策部会において議論された結果、2014年交通政策審議会航空分科会基本政策部会において、航援料について「ICAO(国際民間航空機関)の推奨体系や他国の料金水準等も照らしつつ、必要な見直しを検討することが必要である」²⁹との提言がなされた。そして、2017年4月1日からは、空港料金・航空路(陸上空域)料金・航空路(洋上空域)料金という区分³⁰に再編し、航空機の重量と飛行距離に基づく ICAO の方針に沿った形に変更がなされた。

この空港料金とは、日本国内の空港を離着陸する航空機に対し、それぞれの空港周辺空域である進入管制区の利用料として課せられるもので、その料金は4つのカテゴリーに分けられた空港グループごとに設定されている。また、航空路(陸上空域)料金とは、我が国の領土周辺の上空を飛行

²⁹ この提言は、国土交通省(2014)6頁4～5行目から引用した。

³⁰ この他にも最大離陸重量が15トン未満の航空機に対する料金設定もある。航援料に関しては、国土交通省航空局(2018b)や『AIP Japan』GEN4.2「航空航行援助施設利用料」を参照されたい。なお、2017年4月1日以前の航援料に関しては、国土交通省航空局(2013b)でも確認できる。

する航空機に対して航空路の利用料として課せられるもので、飛行距離と航空機の重量に基づいて算出される。そして、航空路（洋上空域）料金とは、主に太平洋上であって我が国が管轄する空域を飛行する航空機に対して航空路の利用料として課せられるもので、航空機搭載機器によって異なる2種類の定額料金が設定されている。これにより、費用回収を目的とする航援料の徴収は、より利用状況に即した形に改められたのである。

2.3 混雑状況

2.3.1 航空路の混雑とは

今節では、航空路の混雑とはどういったものかについての説明を行う。

まず、航空路にかかわらず、交通の分野において一般的に使われる混雑についての定義を見てみると、山田 (2001) は混雑を「ある容量（キャパシティ）を持つ施設—あるいは限られた空間—で、一定限度（閾値, *threshold*) を超える経済活動が行われるとき、その活動が施設から提供されるサービスの水準の低下する現象」³¹としている。ここでいう「サービスの水準の低下する現象」としてまず浮かぶものは、遅延の発生である。

この定義を航空交通に当てはめ、さらに遅延についての定義を見ると、Brooker (2004) が、遅延を「遅延は需要と容量との間のミスマッチにより発生し、滑走路の混雑による遅延は滑走路を安全に運用できる以上の需要がある場合に発生し、空域での遅延はセクターの管制処理容量³²に限界があることから発生する」³³としている。この、「滑走路の混雑による遅延」は、滑走路を利用する航空機間の安全を担保するために必要な安全基準のための制約である「1本の滑走路を利用できるのは同時に航空機1機のみ」という滑走路を占有する考え方が適用されることから発生する順番待ちによって引き起こされる混雑と整理できる。この混雑及び遅延は、離陸の順番を待つ航空機の列を見ることによって認知することができるので、一般的

³¹ 山田 (2001) 4 頁 12~15 行目から引用。

³² 管制処理容量：管制機関が管制業務を提供することのできる能力又はこれに相当する航空交通量をいう。

³³ Brooker (2004) p8 から引用。

にも理解しやすい現象であると言えよう。一方、「空域の遅延」は、順番待ちの列の様に目に見える現象が起きる訳ではないので、一般旅客だけでなく、航空会社にとっても把握しにくい現象である。

ここで、先述の「セクターの管制処理容量」のセクターとは、航空交通流や航空管制官のワークロードを考慮して設定される空域の一部分で管制部管制管轄区域の空域を細分化したものであり、よって、2.2.1 で示したエンルートの概念から、セクターとは航空機が航行する航空路上に存在するものでその航空路を任意の区間で区切ったものがセクターであると言い換えることができる。つまり、航空路の混雑は、セクターの管制処理容量に限界があることから発生するということになる。よって、航空路にも航空交通流や航空管制官のワークロードから技術的制約があり、管制処理容量が存在する。この航空路における技術的制約は、主に安全基準からの制約や管制処理容量からの制約、経済性からの制約が挙げられる。

(1) 安全基準からの制約

まず、安全基準からの制約とは、安全確保のために必要とされる最低限の間隔を航空機相互間に設定する際に発生する制約である。航空機は他の交通手段（例えば自動車）に比べて遥かに高速で移動し、一旦停止するといった衝突回避のための動作が極めて難しいという特徴がある。よって、予め航空機相互間の最低間隔を設定し、その間隔を確保する様に航空管制官の指示に従って飛行することになっている。

例えば、我が国の空域で適用される航空機相互間の最低間隔は、高度差は 1,000feet（約 300m）であり同高度での距離は 5 海里（約 9km）である³⁴。現時点の旅客機として最大級の A380（全長 72.7m・全高 24.1m・翼幅 79.8m）³⁵を考えれば、物理的にはこの最低間隔の間に複数の航空機が存在することができる。しかしながら、前述の特徴に加え航空機や管制機器の性能を考慮し最低間隔という技術的な制約が加えられている。なお、この最低間隔は、航空機の運航に利用される航空搭載機器や航空管制に利用される設備に合わせて別途、規定がある。

³⁴ 東京管制部等の管制部管制管轄区域でレーダー管制運用時の最低間隔。なお、本論文の航空機相互間の最低間隔については、国土交通省航空局（2018a）にある管制間隔を参考にしている。

³⁵ A380 の諸元数値は、エアバス社のウェブページ「A380 -Innovation」より抜粋。

(2) 管制処理容量からの制約

次に、管制処理容量からの制約とは、全体の効率最大化を考えた航空交通流を維持・促進するために必要とされる制約であり、航空管制官のワークロードという技術的制約に通じる制約である。通常、1 セクターにはレーダー画面を監視しながら対空通信を行う業務（パイロットと無線で交信する業務）担当の航空管制官（以下、レーダーマン）とその業務を行うために必要な様々な調整業務を行う航空管制官（以下、コーディネーター）の2人が配置されるが、ここでいうワークロードはレーダーマンのワークロードが基本となる。

レーダーマンのワークロードには、まず、航空管制官が安全基準からの制約による間隔を維持するために航空機に対して無線を通じて指示を出すためのものが挙げられるが、この他にも航空機に発出する指示を思考する作業、その指示を発出するために必要な調整をコーディネーターに依頼・確認するための調整作業、自身や他の航空管制官が発出した指示通りに航空機が反応しているかの確認作業等様々なものがあり、これは航空路の運用形態や気象条件等で変化する。よって、航空交通流を維持・促進することを目的とする航空路管制業務を担当する航空管制官の処理可能なワークロードを超えることのないよう、つまりは航空路の管制処理容量を超えることのないよう、管制処理容量からの制約は、安全基準からの制約による間隔と比べより大きな間隔が必要とされるのが一般的である。例えば、ある航空路を同方向・同一高度で飛行する航空機相互間の安全基準からの制約による間隔が5海里なのに対し、航空交通流を維持するために航空機相互間の間隔をそれ以上（例えば、10海里）確保する場合がある。これは、航空機の上昇・降下や他の航空機と擦過・合流等のイベントが発生し、航空管制官のワークロードが増えた場合でも航空交通流を維持することができると思われる種の標準的な間隔である。言うまでもなく、この間隔が欠如した場合でも安全確保に関する問題が直ちに発生するということではない。

(3) 経済性からの制約

最後に、経済性からの制約とは、航空機が航行する際に選択する巡航高

度に関する制約である。航空路には地上の障害物等の関係から最低経路高度が定められている。従って、最低経路高度が 6,000feet と定められた航空路では、航空機は 6,000feet 以上の高度ならば利用可能となる。また、航空機の性能から 45,000feet 程度が巡航高度の上限となる。巡航高度として利用できる高度は 1,000feet 刻みの高度であることから、仮に利用を希望する航空路の最低経路高度が 11,000feet、航空機性能による上限高度が 41,000feet とした場合の利用可能な巡航高度は 31 高度となる。よって、他の制約を考えなければ、この場合には同じ航空路を同時に 31 機が利用できる計算になり、この場合の管制処理容量は 31 となる。しかしながら、一般的に高度が低くなればなるほど空気抵抗の影響で所要時間が長く燃費も悪くなるとされており、気象等の諸条件が許せば、エンルート飛行中は運航性能上最も高い高度、もしくは 33,000feet 以上の高度を利用することが航空会社にとって望ましいとされている。これは、飛行機が、吸い込んだ空気をエンジンの中で圧縮・燃焼・爆発させることによって推進力を生み出し、前に進んでいくという乗り物であり、高度が上がるほど空気が薄くなることに伴い空気抵抗も少なくなり前に進みやすくなるからである。よって、航空機の重量等の影響で 33,000feet 未満でしか飛行できない場合には運航性能上最も高い高度を、33,000feet 以上の高度での飛行が可能な場合は 33,000feet 以上の高度を選択することが、航空会社にとって最適な行動となる。飛行高度が低すぎると航空会社にとって不経済な運航を強いられることになる反面、飛行高度が高すぎると別の要因で不経済が生じることもある。これは、高度が高くなりすぎてある程度以上空気が薄くなってしまふと、エンジンを動かすために使用する空気を取り込むことができなくなり、エンジン効率は低下することになるからである。この様に、航空会社は自社の運航する機材の運航性能と運航時の搭載燃料量等から計算される航空機の重量との兼ね合いで最も効率的な高度を選択することになる。特に長距離国際線を運航させる場合、巡航がその区間の運航の大部分を占め、この部分を効率良く飛行することは航空会社の収支に大きな影響を与えることから、単位燃料当たりの飛行距離を大きくするようある程度高い高度を飛行することが望ましく、巡航高度は航空会社にとって大きな関心事になっている³⁶。

³⁶ 経済性からの制約に関する航空会社から見た航空機の運航については、日本航空広報

また、今日のように各航空会社が同性能の航空機を運用している状況では、各社の選択する巡航高度が集中することになる。例えば、ある航空路において各航空会社が自社便の運航に際して受け入れられる高度が 5 高度であった場合、5 機を超える航空機が同時刻にこの航空路を利用したいという希望があっても、この航空路を同時に利用できる航空機は 5 機までとなることから、この時の航空会社から見た航空路の容量は 5 ということになる。また、同じ航空路であっても、別の時間帯に利用する各航空会社の自社便の運航に際して受け入れられる高度が 10 高度だった場合には、この時の航空会社から見た航空路の容量は 10 ということになる。

つまり、経済性からの制約の場合には、その時の航空路の利用者（例えば長距離路線利用者や短距離路線利用者）の特性によって航空路の容量は変化する。しかし、この場合でも、安全性や管制処理容量からの制約がある場合にはそちらが優先されるので、容量の変化はそれらの制約の枠内に収まることになる。

この様に航空路の利用に際してはいくつかの技術的制約が存在し、よって同じ航空路であってもいくつかの容量が存在する。この他にも、航空路の容量は航空機の利用状況や気象条件等で変化することが想定されるが、基本的にはこれらの技術的制約から算出される容量の値のなかから航空路ごとの運用形態にあった値を基準値とした標準的な容量が存在し、その標準的な容量を超える需要が発生した場合に航空路の混雑が発生することになる。

2.3.2 現状の混雑状況と将来予測

それでは、実際に航空路の混雑はどれくらいの頻度でどの程度発生しているのだろうか。それを見るためには、航空機の運航に際して航空路の混雑に起因する遅延を取り上げて分析する必要がある。

諸外国を見ると、EUROCONTROL では Central Office for Delay Analysis (CODA) と呼ばれる航空機の運航に関する遅延情報を収集し分析する部署を設立している。CODA では出発便と到着便を対象に定刻から 5 分以内の早発／早着または遅延を On Time として分類し、早発／早着便について

部 (2014) を参照した。

は5～15分、15分以上の2段階で、また遅延便に関しては5～15分、16～30分、31～60分、それ以上の4段階で分類を行っている。そしてその遅延の主な要因として、航空会社によるもの・空港や航空路の航空交通流管理によるもの・さらには気象や全便の影響によるもの等に分類して情報の収集や分析を行っている。その結果は、「All-Causes Delay to Air Transport in Europe」としてウェブサイト上で公開されている³⁷。よって、EUROCONTROLにおける航空路の混雑状況を知るためには、遅延の主な要因として航空路の航空交通流管理によるものを取り上げればよい。

また、米国では米国運輸省交通統計局（U.S. Department of Transportation, Bureau of Transportation Statistics：以下、BTS）が米国大手航空会社から入手したデータを基にして作成した『Airline On-Time Statistics and Delay Causes』において、米国内線の遅延の発生率や遅延の理由を見ることができる。BTSでは、遅延理由を航空会社によるもの・機材繰り・航空保安上・航空管制上・悪天候と大きく5つに分けた上で、航空管制上の理由で遅延が発生した要因として、天候・交通量・管制機器・滑走路閉鎖・その他の5つに分類している。また、FAAでは自らの業務の成果を測るために「OPSNET」と呼ばれるデータベースを作成している。これは、FAA内の各管制機関からの遅延等の情報を集計したもので、自らの業務成果を分析し自己評価を行うために使われる。加えて、航空利用者に対する情報提供としては『Air Travel Consumer Report』があり、ここでは航空会社別の遅延率や遅延理由だけでなく、ロストバゲージといわれるような手荷物の遅延やオーバーセルといった座席数以上に航空券を発券した際のトラブル等といった旅客サービスに関する情報が公表されている。この他にもFAAの様々な航空管制上の運用に関するデータはウェブサイト上で公開されている³⁸。よって、米国における航空路の混雑状況を知るためには、「OPSNET」等から航空路を管理する機関の遅延データから遅延理由が航空管制上のもののうち交通量であるのを取り上げる等の方法がある。

一方、我が国では、国土交通省が航空輸送サービスに係る情報公開とし

³⁷ 例えば、Eurocontrol (2019a) において、加盟国から報告された2018年の遅延データを集計し、公開している。

³⁸ これらは、FAAのウェブページ「FAA Operations & Performance Data」から入手可能である。なお、米国の航空交通における遅延の発生状況の分析とその手法に関する知識は、平成18年度人事院行政官短期在外研究員としてFAAでの派遣研修により習得した。

て定時就航率や輸送実績に関する情報を国土交通省のウェブサイト上で公開している³⁹。ここでは、出発予定時刻より15分を超えて出発した便を遅延便として取り扱い、その理由を、天候・機材故障・機材繰り・その他の4つに分類している。これらのデータは出発空港での遅延に関する分析にしかすぎず、EUROCONTROL や米国と比較すると、我が国の航空機の遅延に関する分析は、その対象機が限定的なものとなっている。また、遅延理由に関しても航空路の混雑等から実施される航空交通流管理に関するものが欠落している。これらの理由から、我が国でも実施されている航空交通流管理の手法の一つである交通流制御の実績を調べることにより、我が国での航空路の混雑状況を把握することとする。

表2-1は、我が国における2017年9月19日の航空交通流制御の実績である。航空交通流制御とは、航空路の需要が容量を超えると見込まれる場合に管制当局によって行われる航空交通流管理の一つで、航空機にEDCT（Expected Departure Clearance Time：出発制御時刻）を付加し、混雑時の航空機を地上待機させることにより需要管理を行う手法である。つまり、この航空交通流制御の実績を見れば、混雑の発生状況が把握できる⁴⁰。

表2-1では、航空交通流制御の内容から制御対象航空路を3つの区分に分類した。まず、ターミナルとは、特定の空港に着陸する航空機を処理するための空域であり、その容量は機数で表され、スロットに似た容量算出方法になっている。次に、セクターとは、航空交通流や航空管制官のワークロードを考慮して設定される空域の一部分であり、その容量は航空管制官のワークロードとしてどの程度が適正であるかを数値化して表している。最後に、特定航空路とは、海外の管制機関から日本国内から国外へ向かう航空機が利用する航空路に対して航空交通流制御を依頼される特定の航空路で、「特定の地点を8分に1機の間隔で通過させる」といった航空交通流制御が行われており、容量は機数で表せる⁴¹。

³⁹ 定時就航率や輸送実績に関する情報は国土交通省のウェブページ「航空輸送サービスに係る情報公開」から入手できる。これは、特定本邦航空運送事業者（客席数が100又は最大離陸重量が5万kgを超える航空機を使用して行う航空運送事業を営む事業者）に関しては4半期ごとに、それ以外の国内定期航空運送事業者に関しては、半年ごとに実施されている。

⁴⁰ 航空交通流管理については、福島（2003）に詳しい解説がある。また、湧口・西澤（2005）と西澤（2015）においても簡単な説明を行っている。

⁴¹ 例えば、2017年9月19日の特定航空路G585を利用する航空機に対しては、「同高度の航空機間は8分間隔」（NOTAM RJJJ4021/17）の航空交通流制御が実施されていた。

表2-1 航空交通流制御実績（2017年9月19日）

制御対象	対象航空路区分	開始時間	終了予定時間	制御時間
羽田南	ターミナル	6:55	11:00	4:05
羽田南	ターミナル	11:45	13:45	2:00
羽田南	ターミナル	14:30	22:00	7:30
那覇	ターミナル	7:31	9:50	2:19
那覇	ターミナル	11:29	17:00	5:31
南九州東(F08)	セクター	9:28	12:45	3:17
北九州(F03)	セクター	11:00	11:45	0:45
沖ノ南(N02)	セクター	12:20	13:20	1:00
三河(T24)	セクター	19:10	19:50	0:40
四国北(F16)	セクター	18:30	20:30	2:00
G585	特定航空路	7:55	16:00	8:05
G585	特定航空路	21:30	1:40	4:10
G581	特定航空路	9:13	13:00	3:47
G581	特定航空路	18:00	19:30	1:30
B576	特定航空路	10:30	1:00	14:30
A593	特定航空路	16:00	20:00	4:00

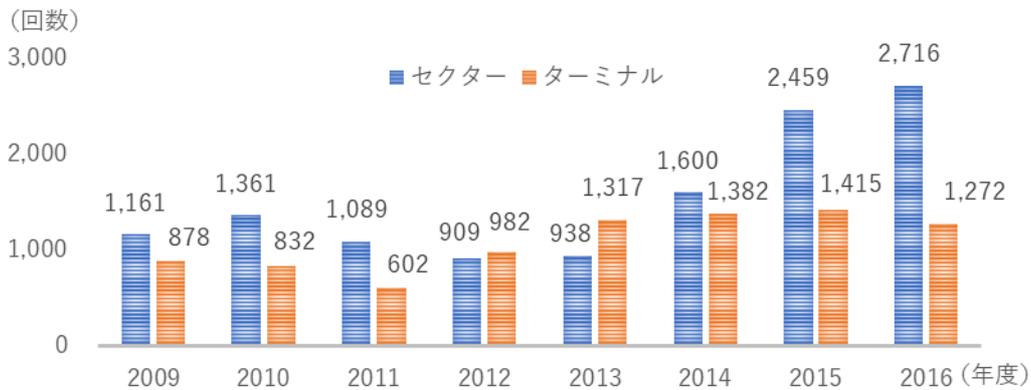
出所：西澤（2018）表1

航空路をターミナル・セクター・特定航空路と3種類に分類したが、これらを対象とした航空交通流制御が実施されたということは、航空路の管理者によりそれぞれの制御対象でそれぞれの容量を超える需要、つまり混雑が予測されたことになる。

次に年度別の航空交通流制御実績を見てみる。図 2-1 は 2009 年度から 2016 年度までのセクターとターミナルを対象とした航空交通流制御実績である。ここで取り上げた 8 年間の航空交通流制御実績回数の最大値と最小値を取り上げると、セクターについては最大値が 2016 年度の 2,716 回で最小値が 2012 年度の 909 回、ターミナルについては最大値が 2015 年度の 1,415 回で最小値が 2011 年度の 602 回となっている。傾向としてはターミナルの航空交通流制御実施回数が 2013 年度から 2016 年度の 4 年間で 1,200

この様な航空機間に時間間隔を設定する方法は、セクターや特定航空路を対象とした航空交通流制御によく見受けられる。

図2-1 航空交通流制御実施回数



出所：航空交通管制協会(2013)より、2009~2012年のデータを、
航空交通管制協会(2018)より、2013~2016年のデータを抜粋し、筆者作成

回を超える実績がありそれ以前と比べて増加していることが、セクターの航空交通流制御実施回数は 2013 年度以降大幅に増加していることが分かる。

また、特定航空路に関しては、G585 と呼ばれる美保上空から韓国の空域に入域する航空路を対象とする制御が、2011 年度に 301 回、2012 年度には 268 回の実績があった⁴²。この G585 は、主に韓国内の空港や、北京・天津・大連等の中国の空港を目的とするもの、さらには中国の空域を通過して中東や南ヨーロッパへ向かう航空機が利用している。

以上のことから、我が国の航空路においてもヨーロッパの上空と同様に航空交通流管理がなされた実績があり、航空路において混雑が発生していることが分かる。

次に、将来の混雑予測について見てみる。表 2-2 は、1 日当たりの航空機需要と航空交通流制御対象機数、並びに平均遅延時間を 2012 年の実績と、2025 年の予測をまとめたものである。それによると、我が国における 1 日当たりの航空機需要は、2012 年に約 3,600 機だったものが、2025 年の予測としては約 4,500 機まで増加すると考えられている。それに伴い、セクターに対する 1 日当たりの航空交通流制御対象機数も約 60 機(2012 年実績)から約 270 機 (2025 年予測) に増加し、併せて 1 日当たりの地上待機の平

⁴² G585 の航空交通流制御の実績データは、航空交通管制協会 (2013) より引用。

表2-2 航空機需要と航空交通流制御対象機数の変化

	航空機需要 (機/日)	航空交通流制御対象機数 (機/日)	平均遅延時間 (分/日)
2012年実績	約3,600	約60	約8
2025年予測	約4,500	約270	25以上

出所：国土交通省航空局 (2013a) より，航空機需要と平均遅延時間のデータを，航空管制協会 (2018) より，航空交通流制御対象機数のデータを抜粋し，筆者作成

均（遅延）時間も約 8 分（2012 年実績）から 25 分以上（2025 年予測）となると予測されている。これらの予測が現実のものとなるなら，2025 年には夏季等の繁忙期には 30 分を超える遅延が恒常的に発生し，国内便では時刻表通りの運航が困難となり機材繰りから欠航となる便が発生することが想定され，現状の航空路の容量のままでは対応できないとしている⁴³。

2.3.3 対策

2025 年の需要予測が現実のものとなれば現行の航空路の容量では対応できないことから，国土交通省では航空路の空域を再編することで航空路の容量を拡大することを計画している。現在，国内の航空管制は主な空港に付帯する管制圏・進入管制区を除く空域を札幌・東京・福岡・神戸⁴⁴の 4 管制部が担当し，高度に関係なく各空域を通る航空機を一括して取り扱っている。これを，上空約 10km までの低高度とそれ以上の高高度との上下分離を行い，低高度の東日本全体を東京，西日本全体を神戸，高高度全体を福岡で航空管制を行う 3 管制部体制に再編することにより，年間管制取扱可能機数を現状の 180 万機から，2025 年時点で 20 万機増加し，200 万機とすることとしている⁴⁵。この他にも，航空流管理の分野では，セクターのような分割された空域での運用から全体を一つの空域としてとらえて出発空港から到着空港までの航空機の軌道を最適化するような運用へ移行することにより高密度運航を実現し，更なる容量拡大を目指す取り組み⁴⁶も行

⁴³ 2012 年実績及び 2025 年予測は，国土交通省航空局 (2013a) 6 頁より引用。

⁴⁴ 神戸管制部は那覇管制部の管制空域を引き継ぐ形で 2018 年 10 月に新設された。

⁴⁵ 管制部体制の再編については，航空交通管制協会 (2018) を参照した。

⁴⁶ この取り組みは，2009 年に国土交通省が設置した，将来の航空交通システムに関する研究会が『CARATS 将来の航空交通システムに関する長期ビジョン』として取りま

われている。

この様に技術的革新により容量を拡大することで、将来の需要量に対応する計画が進められており、これらが実現すれば現状の航空路については10%の容量拡大が見込まれる。しかし、この容量拡大が行われても需要の集中が発生する時間帯においては現状と同じ様に航空交通流制御が実施されることが予想される。実際、航空交通流制御実施回数を見ても、2025年の需要予測がなされた2012年のセクターを対象とした実施回数が909回であるのに対し、2016年には2,716回と約3倍となっており、2025年度にも航空交通流制御対象機数や平均遅延時間が2012年と比べて改善される保証はない。なぜなら、容量を増やしても需要がそれ以上増えれば、混雑は悪化することになるからである。それは、過去に行われた容量拡大の取り組みの結果を見ても分かる。

容量の拡大に関連する過去の代表的な取り組み⁴⁷として、まず1972年に航空路を監視する箱根 ARSR⁴⁸が正式運用されレーダー管制業務が開始したことが挙げられる。これにより、今までパイロットからの位置通報に頼っていた航空機の位置の把握からレーダーによる航空機の位置の補足が可能になり、安全性と管制効率からの制約が大幅に緩和された⁴⁹。次に、1973年に航空路情報処理システム⁵⁰の24時間運用が開始され、航空管制官のワークロードが軽減されたことによりセクターの容量の拡大につながった。

最後に、2000年に導入された Reduced Vertical Separation Minimum (RVSM)により、高度29,000feet以上4,1000feet以下の空域において、航空機の運航性能上の技術革新により安全基準からの制約である最低間隔を2,000feetから1,000feetに短縮し、これにより容量の拡大が図られた。

この様に容量の拡大に関連する過去の取り組みのような増大する航空機需要への対応が行われたにもかかわらず、容量の拡大幅以上の航空機需要が発生すれば、当然ながら混雑は解消せずむしろ混雑は悪化する。航空需

とめており、http://www.mlit.go.jp/koku/koku_CARATS.html で入手可能である。

⁴⁷ 過去の取り組みは、航空管制五十年史編纂委員会(2003)を参照した。

⁴⁸ 航空路監視レーダー(ARSR)の概要と配置及び覆域図については、国土交通省ウェブページ「航空保安無線施設等」から入手可能である。

⁴⁹ レーダー管制業務については、容量拡大を目的とした取り組みだけでなく、航空機と地表の物標(特に山)との衝突を監視する目的とした取り組みの意味合いも大きい。

⁵⁰ 現在ではさらに改良がなされた航空交通管制情報処理システムが構築されている。なお、これについての概念は、国土交通省ウェブページ「航空交通管制情報処理システム」から入手可能である。

表2-3 我が国のジェット機登録航空機数の推移

標準座席数 (国内線仕様)	登録年					
	1968	1978	1988	1998	2008	2018
501席以上	-	29	85	131	74	9
401-500席	-	-	-	30	86	90
301-400席	-	28	32	30	-	106
201-300席	-	-	60	122	136	81
101-200席	50	101	58	113	168	280
100席以下	-	-	-	-	14	54
合計	50	158	235	426	478	620

(単位：機)

出所：国土交通省ウェブページ「登録航空機数の推移」より入手し、筆者作成
http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk1_000040.html (2020年1月4日確認)

備考：各カテゴリー機種は以下の通りである（筆者による分類）

501席以上：B747

401-500席：B777

301-400席：L1011・DC10・MD11・B787

201-300席：B767・A300

101-200席：CV-880・DC8・B727・B737・DC9・A320・MD90

100席以下：ERJ・CRJ

要の場合、空港や航空路の容量に厳しい規制がある場合、航空会社は一度に500人以上の乗客を輸送できるB747のような大型機を利用することで旅客需要に対応してきた。しかし、その規制が緩和され容量が拡大されると、航空会社は大型機を採用するよりも座席数が200席以下の機材を利用して多頻度運航を行い収益率を上げることを選択するようになった。

実際、表2-3の我が国の航空機登録機数⁵¹の推移を見ても、1998年には座席数500席以上のB747の登録が131機であったのに対し、2018年ではB747の後継機であるB777の登録は90機程度、さらにB777より一回り小さいB787でも100機程度になっている。これに対し、101～200席の機種

⁵¹ 登録機数のデータは、国土交通省ウェブページ「登録航空機数の推移」より入手し、席数による航空機機種のカテゴリー分類については、表2-3備考に記載した通りに行った。

の登録数は1998年の113機から2018年には280機で、100席以下のジェット機と併せると、200席以下の機種ジェット機の登録機数は、1998年から2018年の20年間で約3倍になっている。この様に、我が国のジェット機の登録航空機数は、B747が最も多く登録されていた1988年を境に機材の小型化が進み、2018年にはジェット機の登録航空機のうち200席以下の機材の占める割合が半数を超えるまでになったのである。

また、航空路を管理する管制機関の札幌・東京・福岡・那覇管制部の年間延べ取扱機数の合計⁵²を見ると、2012年が約260万機であったのに対し、2017年では約320万機と、約1.24倍になっている⁵³。

以上のことより、我が国の航空路の容量と需要に関しては、航空路の容量の拡大幅以上の航空機需要が発生する可能性は高く、よって、上記のような技術的革新により容量を拡大すると同時に経済学的なアプローチにより混雑問題に対応する取り組みも検討に値すると考える。例えば、混雑問題に対しては混雑料金を設定することで適切な混雑度合いまで需要を押し下げられるし、航空路の通行枠の配分方法を考察する場合にはオークション等も候補に挙げられる。

よって、次節では、経済学的なアプローチによる混雑問題への対策を考えるために、混雑が発生している航空路を利用する航空機に対し、航空路の管理者がどのような方法でその利用者やその順位を決定し、航空路の混雑に対応しているのかを説明し、今後の考察のための準備を行う。

2.4 配分方法

2.4.1 航空管制

前節では、航空路の混雑について説明を行った。今節では、航空路の容量を決定する要因となる技術的制約について、航空路を管理する航空管制の見地から説明を行う。

まず、航空管制について説明を行う。航空管制（正確には、管制業務）

⁵² 1機が一回の飛行で東京管制部と福岡管制部の空域を利用すると、それぞれの管制部でカウントされるので、延べ機数は2機となる。

⁵³ 管制部の年間延べ取扱機数データは国土交通省航空局（2018b）より抜粋。

とは、大まかにいうと「航空機同士の衝突防止」と「航空交通の秩序ある流れを維持し促進する」ことを目的として行われる。

「航空機同士の衝突防止」とは、2.3.1(1)で説明した通り、安全確保のために必要な最低間隔を航空機相互間に設定することである。通常、航空路での最低間隔は、レーダー管制下であれば水平方向に5海里、もしくは垂直方向に1,000feetのどちらかが適用される⁵⁴。言い換えれば、各航空機は自機を中心として半径5海里の水平方向の空域と1,000feetの垂直方向の空域を留保しながら飛行していることになり、その空域の中には他の航空機が進入することがないよう、航空管制官による運用がなされている。

「航空交通の秩序ある流れを維持し促進する」とは、平たく言い換えると「一度にたくさんの航空機を効率よく処理できる様にしておくこと」であり、2.3.1(2)で説明した管制処理容量からの制約に通じるものである。よって、航空路上で考えられる航空機の上昇・降下や他の航空機と擦過・合流等の必要が発生した場合でも、航空交通流を維持するために必要とされる間隔を設定しておく必要がある。また、航空路の利用する航空機の種類等航空機性能の違いやレーダー等使用する管制機器によっても必要とされる間隔は異なり、必要な間隔に加えてある程度の余裕（バッファ）を確保しながら航空管制官が運用を行うことになる。

この様に、航空路においては、航空管制官により航空機相互間にその場面にとって必要な間隔が設定される。その必要な間隔とは、管制用語では垂直間隔・横間隔・縦間隔と呼ばれ、この3つの間隔のうちのどれか一つでも間隔が確保されていれば航空機同士の衝突は避けられる。次に、航空管制官によって行われる管制業務と併せて、垂直間隔・横間隔・縦間隔について簡単に説明する。

(1) 垂直間隔（高度調整による間隔）

複数の航空機が空中に存在する場合、一番確実に衝突を回避するには、航空機の飛行するそれぞれの高度を別々にすることである。安全基準からの制約では、航空機相互間に確保しなければならない最低間隔を1,000feetとしている。よって、空中に存在する各航空機に異なる1,000feetごとの高

⁵⁴ RVSM（Reduced Vertical Separation Minimum：短縮垂直間隔）が適用されない航空機との間隔は、2,000feetとなる。

度を維持する様に指示すれば、各航空機がその高度を維持する限りどのような針路をとろうと衝突は回避できる。この「各航空機に異なる 1,000feet ほどの高度を維持する様に指示する」ことは、「航空機相互間に 1,000feet の垂直間隔を設定する」ことである。つまり、垂直間隔を設定するということは、各航空機に別々の高度を指示することによって高度調整を行うことにより間隔を設定する方法である。

(2) 横間隔（経路調整による間隔）

確かに、各航空機に別々の高度を指示すれば、航空機同士の衝突を防止できることは分かる。しかし、同じ高度による飛行を希望する航空機が複数存在する場合や、航空機の機数が指示できる高度の数を超える場合には、それが不可能となる。この場合、航空機同士の衝突を回避するには、各航空機の針路をコントロールする必要がある。つまり、各航空機に好き勝手な針路をとらせるのではなく、針路が交差しないよう、決められた経路を飛行させればよい。この決められた経路が交差しない限り、同高度を維持する航空機同士であっても衝突することはない。同じ空域に平行の経路があれば、2機の航空機が同高度でも同時に安全に飛行することができ、「秩序ある流れを維持」することも達成できる。安全基準からの制約では、同高度において航空機相互間に確保しなければならない最低間隔は 5 海里であり、よって、同高度を飛行する航空機に対しては、交差しない 5 海里以上離れた別々の経路を飛行する様に指示すれば、安全基準からの制約は確保できる。この様に、同高度の航空機相互間に別々の経路を指示することによって 5 海里以上の間隔を設定することを、横間隔を設定するという。この横間隔を設定するには、決められた経路を別々に飛行させる方法の他に、交差する経路を飛行中の航空機相互間に 5 海里以上の間隔が設定できるよう、航空管制官が航空機に対し針路を指示し、経路を変更させるような経路調整を行うことにより間隔を設定する方法もある。

(3) 縦間隔（時間調整による間隔）

しかしながら、同時刻に複数の航空機が飛行する様になると、どうしても同高度、かつ同経路を飛行せざるを得なくなってくる。この場合に設定されるのが、縦間隔である。縦間隔の概念を説明するために、同高度・同

経路を飛行する際にこのままでは衝突する恐れがある、つまり、安全性から制約である航空機相互間に5海里以上の間隔が設定できない場合を想定し、衝突を防止するにはどうすればよいかを考える。それには、それぞれの航空機の向き、つまり、進行方向が重要になってくる。

まず、お互いの航空機の進行方向が逆向きの場合と進行方向が交差する場合には、ある地点までに別々の高度もしくは経路を指示する、つまり、垂直間隔か横間隔を設定する必要がある。このある地点を定めたのが縦間隔であり、具体的には両機の擦過予定地点からの距離（又は擦過予定時刻からの時間）が決められている。

しかし、同高度であっても同方向の場合には、高度や経路を変更しなくても衝突を回避できる方法がある。例えば、同高度・同経路を飛行中の航空機であっても、両機の速度が同じ場合、時間差を付けて利用させれば、衝突することはない。よって、この航空機相互間に衝突を防止できるような安全基準からの制約である所定の間隔が設定できればよいのである。この同高度・同経路を飛行中の航空機相互間の安全基準からの制約である所定の間隔が縦間隔であり、これは、その際に使用する航空機に搭載された機器や航空管制の機器によって異なる。

また、この両機に管制処理容量からの制約が課せられている場合、縦間隔は管制処理容量からの制約に従った間隔を設定することになり、この場合には、航空機相互間の間隔は距離で表す場合（例えば、10海里間隔）と時間で表す場合（例えば、5分間隔）の2通りが存在する。しかし、どちらの場合でも、同高度・同経路を飛行する各航空機が、その高度・経路を使用する時刻をずらして飛行すればよいことには変わりがない。よって、言い換えれば、縦間隔を設定するとは、同じ高度・経路を飛行するために必要な時間調整を行って間隔を設定する方法のことである。

この様に、航空管制官は、航空機相互間に垂直間隔・横間隔・縦間隔のうちどれかを設定することになる。このことを言い換えると、航空管制官は、航空機相互間に垂直間隔を設定するために高度調整を、横間隔を設定するために経路調整を、縦間隔を設定するために時間調整をそれぞれ行うことにより、「航空機同士の衝突防止」と「航空交通の秩序ある流れを維持し促進する」ことを目的とした管制業務を実施しているのである。よって、

これからは管制用語で表される垂直間隔を「高度調整による間隔」、横間隔を「経路調整による間隔」、縦間隔を「時間調整による間隔」と、より一般的な言い方に近い表現に改めることにする。

ここまでは、航空管制官の立場からの説明であった。航空管制官によって設定される間隔を航空機側から見るならば、航空機は自機の周りに排他的な空域を留保しながら飛行していることになり、その留保している空域の塊を一つの枠として捉えると、この枠は航空機が航空路を飛行するために独占的に利用できる通行枠と言い換えることができる。つまり、航空管制官はこの通行枠を航空機に配分することで、安全で効率的な航空機の運航を維持していることになる。では、同時刻に同じ通行枠の利用を希望する航空機が複数機現れた場合、航空管制官はどのような基準でその通行枠を配分するのであろうか。

2.4.2 リアルタイム配分方法

航空管制官が行う航空管制業務は、一般的には先着順⁵⁵の原則により行われている。よって、同じ通行枠に複数の利用希望者が現れた場合には、一番先にその通行枠に到達する希望者に配分することになる。このことをもう少し詳しく理解するために、同じ通行枠の利用を希望する航空機が 2 機存在する場合を想定し、それぞれを A 機、B 機と置き、いくつかのケースを例に挙げて説明を試みる。

ここに、同高度を飛行中の A 機と B 機が存在し、それぞれの飛行経路がある地点で合流する場合（ケース 1）を仮定する。合流地点での両機の通行枠が重複し、どちらか一方にしか配分できない場合には、その通行枠に到達する予測時刻が早い航空機に配分することになる。仮に A 機の予測到達時刻が早い場合、A 機にその通行枠を配分し、B 機には他の通行枠を配分する。この時、B 機に配分する通行枠は、A 機と時間調整による間隔もしくは高度調整による間隔を設定した通行枠になる。まず、時間調整による間隔を設定した通行枠とは、A 機と B 機の合流地点に到達する時刻に時間差をつけ A 機に配分する通行枠の後の通行枠を B 機に配分すること

⁵⁵ 「first-come-first-served basis」と呼ばれるもので、先着順に航空管制サービスを提供するという考え方。

である⁵⁶。よって、両機が合流地点に到達するまでに B 機の到達時刻を遅らせるよう、航空管制官が B 機に対し減速や遠回りの指示を行い予定到達時刻を調整する。一方、A 機と B 機の間には時間差がつけられない場合には高度調整による間隔、つまり、両機の間には高度差を設定することになる。A 機の予測到達時刻が B 機より早い場合には、A 機に現在飛行中の高度の通行枠を配分し、B 機には他の高度の通行枠を配分する。よって、両機が合流地点に到達するまでに A 機の高度と B 機の高度が異なっている様に、航空管制官は B 機に対し高度を変更する指示を行い、A 機とは異なる高度の通行枠を B 機に配分する。

次に、A 機と B 機のそれぞれの飛行経路がある地点で交差する場合（ケース 2）を仮定する。ケース 1 と同様、交差点での両機の通行枠が重複し、どちらか一方にしか配分できない場合には、その通行枠に到達する予測時刻が早い航空機に配分することになり、仮に A 機の予測到達時刻が早い場合には A 機にその通行枠を配分し、B 機には他の通行枠を配分する。この場合、B 機に配分する通行枠は A 機と経路調整による間隔もしくは高度調整による間隔を設定した通行枠になる。まず、経路調整による間隔を設定した通行枠とは A 機と B 機が交差点に到達するまでに、A 機の通行枠に B 機が侵入しないような通行枠を B 機に配分することを意味する。この場合、両機が交差点に到達するまでに、航空管制官は、B 機に対して B 機の到達時刻をずらすような減速の指示や、B 機に A 機の後方を通過するような進路の指示を行い、B 機に A 機とは異なる通行枠を配分する。一方、両機に高度調整による間隔を設定する場合、ケース 1 と同様に A 機には現在飛行している高度の通行枠を配分し、B 機に対し高度を変更する指示を行うことにより A 機とは異なる高度の通行枠を B 機に配分する。ただし、ケース 1 では両機の飛行経路が合流することを仮定していたが、ケース 2 は飛行経路が交差することを仮定しているため、両機が交差した後には B 機を元の高度に復帰させることが可能となる。

ここまで、航空管制官による通行枠の配分方法について、2 機の航空機の飛行経路が合流、または交差する場合を例に挙げて説明を行った。航空管制官による通行枠の配分は先着順による配分を基本としており、合流地

⁵⁶ ここでは A 機と B 機の間には時間差をつける説明を行ったが、管制処理容量からの制約の説明で示した通り、両機の間には所定の距離差（例えば 10 海里）を設定することでそれぞれに異なる通行枠を配分する方法もある。

点や交差点に先に到達する航空機の通行枠に後から到達する航空機が侵入しないような配分を行っている。この様に航空機が少数の場合には航空管制官が減速や進路変更等の指示を前述の様にリアルタイムで行なうことが可能だが、航空機が増えれば増えるほど航空管制官のワークロードが増大し、やがて航空管制官によるリアルタイムでの通行枠の配分が困難になっていく。次項では、この様な場合、つまり、管制処理容量を超える交通量が予測される場合の通行枠配分方法を取り上げて説明する。

なお、これ以降においては、航空管制官によるリアルタイムでの通行枠の配分を、リアルタイム配分と呼ぶことにする。

2.4.3 事前配分方法

航空機数が増大し管制処理容量を超える交通量が予測され、リアルタイム配分が困難になるような場合に対しては、航空交通流制御による需要管理による対策が講じられている。

2.3.2 でも述べた様に、航空交通流制御とは、航空路の需要が容量を超えると見込まれる場合に管制当局によって行われる航空交通流管理の一つで、航空機に EDCT を付加し、混雑時の航空機を地上待機させることにより需要管理を行う手法である。つまり、予め混雑が予測される航空路の通行枠を航空交通流制御によって航空機の離陸時刻を指定することにより離陸前のタイミングで事前に配分し、混雑航空路において行われるリアルタイム配分方法で対応できる管制処理容量と同等の水準まで需要量を引き下げるのである。この EDCT による航空交通流制御について、簡単な例を挙げて説明する。

ここに、一時間帯当たりの容量が 10 機として表されている航空路に対し、表 2-4a のような、時間帯 1 に 5 機、時間帯 2 に 15 機、時間帯 3 に 10 機、時間帯 4 に 5 機という需要予測がなされたとする。なお、表中の★は、1 機分の需要予測を表す。

表 2-4a を見て分かる様に、この例の場合、容量を超える需要が予測されているのは時間帯 2 のみで、超過需要は 5 機となる。よって、時間帯 2 の需要超過分 5 機に対して EDCT を付加し、時間帯 2 の需要管理を行う。この際にも通行枠は先着順に配分され、この航空路への予測到達時刻順のう

表2-4a 航空交通流制御の例（需要予測段階）

時間帯	需要予測	合計(機)
1	★★★★★	5
2	★★★★★ ★★★★★ ★★★★★	15
3	★★★★★ ★★★★★	10
4	★★★★★	5

表2-4b 航空交通流制御の例（時間帯2の制御後）

時間帯	需要予測	合計(機)
1	★★★★★	5
2	★★★★★ ★★★★★ ◇◇◇◇◇	15→10
3	◆◆◆◆◆ ★★★★★ ★★★★★	10→15
4	★★★★★	5

表2-4c 航空交通流制御の例（時間帯3の制御後）

時間帯	需要予測	合計(機)
1	★★★★★	5
2	★★★★★ ★★★★★	10
3	◆◆◆◆◆ ★★★★★ △△△△△	15→10
4	▲▲▲▲▲ ★★★★★	5→10

ち下位 5 機の航空機に対して次の時間帯 3 の通行枠を配分するための EDCT を付加する。つまり、表 2-4b で◇◇◇◇◇として示す時間帯 2 の下位 5 機に EDCT を付加することにより、◆◆◆◆◆で示す通りに時間帯 3 へ需要を移動させるのである。

ここで、時間帯 3 の元の需要予測は 10 機であったが、時間帯 2 から 5 機流入することにより需要予測は 15 機に変化し、5 機の需要超過となる。よって、時間帯 3 の需要超過分 5 機に対しても EDCT を付加することにより時間帯 3 の需要管理を行う。この際にも通行枠は先着順に配分されるが、時間帯 2 から流入する 5 機には既に時間帯 3 の通行枠を配分するための EDCT が付加されているので、残る時間帯 3 の通行枠は 5 機となる。よって、元の時間帯 3 の需要予測のうち予測到達時刻順の下位 5 機の航空機に対して次の時間帯 4 の通行枠を配分するための EDCT を付加する。つまり、

表 2-4c で△△△△△として示す時間帯 3 の下位 5 機に EDCT を付加することにより、▲▲▲▲▲で示す通りに時間帯 4 へ需要を移動させるのである。

これにより、時間帯 1 から 4 までの需要予測をこの航空路の容量(10 機)以内に抑えることができた。

以上が EDCT による航空交通流制御の簡単な説明である。この様に、EDCT による航空交通流制御とは、混雑時の航空機を地上待機させることにより航空機が離陸する前のタイミングで混雑航空路の通行枠を事前に配分する方法である。なお、これ以降は EDCT による航空交通流制御を事前配分と呼ぶことにする。

この事前配分にさらに説明を加えるのであれば、EDCT とは出発制御時刻のことであり、航空機の離陸時刻を指定することにより離陸前に各航空機の予測到達時刻間に時間差を付けることが目的である。よって、この目的を達成するためには、実際には地上待機の必要ない航空機(表 2-4c 中の★で表す航空機)に対しても EDCT が付加される。先程の説明では、時間帯 3 の需要管理で下位 5 機の航空機に対して次の時間帯 4 の通行枠を配分するような EDCT を付加するとしたが、これに加えて事前配分により時間帯 3 の通行枠を配分する元の時間帯 3 の需要予測のうち予測到達時刻順の上位 5 機の航空機に対しても EDCT を付加する。この EDCT は、事前配分により時間帯 3 の通行枠を配分する航空機に対して、予測到達時刻通りに航空路に到達するような離陸時刻を指定することにより、事前配分通りに時間帯 3 の枠内の通行枠を配分するためである。なぜなら、事前配分で時間帯 3 の通行枠を配分されている航空機の出発時刻が予定より早くなると、実際の到達時刻が時間帯 2 にずれ込むことになり、時間帯 2 の需要が 10 機を超えてしまうことが予測されるからである。反対に、出発時刻が予定より遅くなると、実際の到達時刻が時間 4 にずれ込むことになり、時間帯 4 の需要が 10 機を超えてしまうことになる。

よって、事前の配分は、離陸時刻を指定した各航空機を指定された時刻通りに離陸させることにより、混雑航空路の通行枠を事前配分し、実際に航空路に到達したときに行われるリアルタイム配分に係るワークロードを軽減するという目的を果たすことができる。

2.5 現状の問題点

2.5.1 リアルタイム配分の問題点

ここでは、我が国における現状の航空路通行枠配分方法のうち、リアルタイム配分の問題点を挙げる。

我が国の管制当局が担当する航空路は日本の領空だけでなく、太平洋上の一部にも存在する⁵⁷。これは、我が国がアジアの東側に位置し太平洋に面しているという地理的要因からであり、北太平洋上空の空域は米国と我が国が担当している。レーダー覆域内の航空路では、レーダー管制機器が使用できる際に適用するレーダー間隔が設定されるが、レーダーの電波が届かない洋上空域では洋上間隔を適用する⁵⁸。よって、我が国の領空から洋上に向かう航空機には、航空機相互間の最低間隔が小さいレーダー間隔から最低間隔が大きい洋上間隔に変更される地点で管制処理能力が低下するために、そこにボトルネックが発生する。よって、ボトルネックが発生すると予測される際には、予めレーダー覆域内で洋上間隔を確保するための通行枠を配分することになる。

これらのことを踏まえて、東アジアからハワイ・北米国方面への飛行する航空機の流れを例に挙げて考える。例えば、中国や韓国等の東アジアに位置する国の空港からの出発機は日本の領空を通過して太平洋上に出域していく。これらの航空機は、日本国内の空港からの出発機と同じ航空路を飛行して太平洋上に出域し、ハワイや北米国の目的空港まで向かうことになる。よって、中国・韓国・日本からの出発機は我が国の管制当局によって、洋上間隔が確保できる様に太平洋上空出域以前に通行枠を配分されることになる。仮に成田空港から北米国方面に向かう出発機があるとすると、その出発機は成田空港の地上で飛行計画に基づいた経路の承認を管制当局に要求する。管制当局は、その要求を受けて通行枠の配分を行うが、この

⁵⁷ 国土交通省が発行する『AIP Japan』GEN 3.3「航空交通業務 2.責任空域」において、「航空交通業務は我が国の領域および福岡 FIR 内の公海上空において提供される。」との記載があり、その範囲は『AIP Japan』ENR 2.1「FIR,UIR,TMA」によると太平洋上の公海である東経 165 度までが我が国の管轄空域最東端となっている。

⁵⁸ レーダー間隔が航空機相互間の最低間隔が 5 海里であるのに対し、同高度・同経路を飛行する航空機相互間の洋上間隔は、短いもので 30 海里（約 5 分）、最長だと 15 分となる。

時点での配分は、この出発機が遅滞なく成田空港を離陸した場合に洋上間隔を適用する地点へ到達する時刻を予測し、その予測時間帯に配分可能な高度を与えるというものである。つまり、スポットから滑走路までの移動時間を30分、成田空港から洋上間隔を適用する地点までの所要時刻を1時間と予測した場合、この成田空港出発機に1時間30分後に利用可能な高度を配分することになる。

ここで、管制当局によって利用可能でないと判断される高度を考えると、既にその通行枠を利用する予定の航空機が存在し成田空港出発機に配分することができないと判断する高度ということになる。つまり、成田空港出発機が離陸する以前にその高度を飛行している航空機が存在し、その航空機の洋上間隔が適用される地点の予測到達時刻が成田空港出発機の予測到達時刻と利用希望高度が重複する場合、既に飛行中の航空機が優先的に配分されるということである。このことは、中国や韓国からの通過機が集中する時間帯には我が国からの出発機が希望する高度が配分されにくくなるという、我が国の地理的要因における一つの課題が存在する。希望高度が配分されず、飛行計画より低い高度が配分されるということは飛行中の燃費が低下することを意味し、希望高度から大きく離れた高度しか配分されないとするると予定より多くの燃料を搭載することとなり航空機の重量が増し、さらに燃費が低下するという悪循環に陥る。よって、航空機性能等を加味し、希望高度に近い高度が配分されるまで地上での待機が発生し、遅延による追加的な運航費用も発生することになるのである。

このことは、洋上を飛行する航空機に限ったことではない。なぜなら、既に飛行中の航空機が優先されるという高度の配分方法は、我が国の領空内のみを飛行する国内線が利用する高度にも適用されるからである。仮に我が国の領空を通過する航空機と国内線が同じ混雑航空路を利用し、その利用希望高度が重複する場合には、国内線に希望高度が配分される可能性は大きく低下することになる。国内線の場合、利用希望高度が配分されるまで地上で待機するよりも、非効率な高度を受け入れてでも定時性を確保する方が航空会社全体の運航効率を維持することができる場合が多く、高度配分だけの問題であれば航空会社も受け入れやすいと捉えることもできる。しかしながら、通過機が特定の混雑航空路に集中し、事前配分が実施される場合には、国内線の出発機も地上待機させられることになり、ここ

にもう一つ、事前配分の問題が発生することになる。

2.5.2 事前配分の問題点

事前配分を行う場合、地上待機の対象は日本国内の空港からの出発機のみであり、他国からの通過機や日本国内の空港を目的地とする国際線は対象とならない場合がほとんどである⁵⁹。つまり、我が国が管理する航空路が混雑する場合には、我が国の空港を利用する航空機のみを対象とした事前配分により対応し、同じ航空路を利用する通過機や国際線に対しては、結果として優先的に通行枠が配分されることになる。

また、事前配分の精度にも課題がある。前節で、事前配分は、航空機に離陸時刻を指定し、各航空機の混雑航空路への予測到達時刻に時間差を付けることにより、ピーク時の需要水準を下げ、リアルタイム配分に係るワークロードを軽減するという目的を果たすことができるとした。

よって、このことを達成するには、各航空機が指定された離陸時刻通りに離陸することが前提となる。しかしながら、現実には出発遅延等も発生している。これを見越して、EDCT には有効時間帯が設定されている。国土交通省が発行する『AIP-JAPAN』によると、その有効時間帯は出発する空港ごとに決められており、その幅は、表 2-5 で示す通り短い空港では 11 分、長い空港では 28 分となっている。

つまり、事前配分は、最大で 28 分もの時間的なズレ（予測到達時刻と実到達時刻との時間の差）を許容しているということになり、実運用におけるズレの発生状況により事前配分による需要管理の精度も変化することになる。事前配分による需要管理にもかかわらず、このズレによって需要がある時間帯に集中することになれば、リアルタイム配分に係るワークロードを軽減することができない。反対に、事前配分により容量上限まで通行枠を配分していたにもかかわらず、閑散となる時間帯が発生することも考えられる。

よって、事前配分による需要管理は、混雑が予測される場合に航空路の容量内に需要を抑えることによりリアルタイム配分に係るワークロードを

⁵⁹ 米国で発生した 9.11 テロの際には、米国の管制当局が諸外国から米国が管轄する空域に入域することを禁止する手段が講じられたことがあり、我が国でも災害時や安全上の理由から同様の手段を取る可能性がある。

表2-5 各空港におけるEDCT有効時間帯

出発空港	EDCT有効時間帯の幅
仙台など23空港	11分
中部・大阪・関西・鹿児島	16分
羽田（国内線）	23分
羽田（国際線）	21分
成田・福岡・那覇	28分

出所：国土交通省（2020）『AIP-JAPAN』（2020年1月2日有効分）より，筆者作成

軽減する効果があるが，実運用においては指定した離陸時刻と実際の離陸時刻とのズレによるムラが発生することが課題として挙げられる。

2.5.3 料金設定の問題点

最後に，航空路の利用料金である航援料についての問題点を挙げる。

2.2.3 で説明した通り，我が国の航援料は 2017 年 4 月から航空機の重量と飛行距離に基づいた料金設定に改定された。これにより，従来の料金設定に比べれば，費用回収を目的とする航援料の徴収は，より利用状況に即した形に改められたことになる。

しかしながら，航空路の運営に必要な維持費や今後の需要増大に対して行われる投資は，言うなればピーク時の需要に対しての費用であり，オフピークの利用者にとっては必要のない費用も回収されていることになる。現状の価格設定は，費用回収を目的とした収支均衡条件より，平均費用価格形成となっている。よって，ピーク時の利用者にとって，航援料は割安になっており，進んでオフピークに移動するインセンティブを持たない。

また，航援料が航空機の重量を基にした料金設定になっており，大型機より中型機の方が，中型機より小型機の方が航援料は安く設定されている。このことは，航空会社は使用機材を小型化し，その代りに多頻度運航を行うことで旅客の利便性を高め集客力を強化する戦略を選択しやすくしているとされる。しかし，混雑時の通行枠は航空機の大きさにかかわらず，1機に対し1枠が配分される。よって，改定された航援料の設定方法であっても，航空路の混雑を緩和するどころか，機材の中小型化が進んでいる現状を踏まえれば，逆に混雑を助長することになっているのではという懸念が

ある⁶⁰。もし、同じ通行枠1枠に対する料金が、通行枠を利用する航空会社の機材の大きさで変化するのではなく、プライシング政策で見られるようなその時の需要量によって変化するのであれば、航空会社の戦略にも変化が見られ、航空路の混雑状況も異なる結果が得られるのではなかろうか。

2.6 まとめ

第2章では、我が国の航空路についての説明を行った。

まず、2節では、航空路の概念とその利用状況、さらには利用する際の料金についての説明を行った。そして、3節では、航空路の混雑の概念と混雑が発生する理由、現状の混雑状況と将来予測についての説明を行った。続く4節では、航空路の容量を決定する要因となる技術的制約についての説明を航空管制の見地から行い、航空路の容量を超えない様に需要を管理する方法として、リアルタイム配分と事前配分の方法を挙げた。それを受けて、5節では、現状の問題点として、リアルタイム配分と事前配分の問題点と、料金設定の問題点を指摘した。

空港の混雑問題に対しては、これまで滑走路の増設等容量を拡大することによる解決策と、同時に空港の発着枠であるスロットを限りある資源と捉えた経済学的なアプローチでの議論もなされてきた。特に混雑空港のスロット配分は航空会社だけでなく多くの学識経験者にとっても大きな関心事として捉えられ、その配分方法に関して多くの研究成果が見られる。

一方、航空路の混雑問題に対しては、航法や管制機器等の技術的な研究には多くの成果が挙げられるが、通行枠の配分方法に関する研究は十分ではない。

しかし、前節で挙げた通り、現状の航空路の通行枠の配分方法やその料金設定方法にも少なからず問題がある。よって、本論文では、この問題を解決することにより航空路の混雑を緩和し、社会的余剰を改善させることを念頭に、考察を進めることとしたい。

⁶⁰ このことについては、3.4.1において、Raffarin (2004) の主張として取り扱う。

第3章 先行研究からの考察

3.1 はじめに

本章では、航空路の混雑に対する経済学的アプローチを行った先行研究について整理する。しかしながら、航空路の混雑に関する先行研究がそれほど多くないことから、航空分野における混雑だけでなく、他分野における混雑に関する研究成果を応用した航空路の混雑に対する考察が行われている。よって、本章では、交通混雑での研究成果が多く見られる道路交通における先行研究と、同じ航空交通の分野で混雑問題に関する研究成果の多い空港の混雑問題に関する先行研究を整理した後に、航空路の混雑問題に関する先行研究の整理を行う。

まず、2節において、研究成果が多く挙げられる道路交通における混雑問題への先行研究の成果を整理する。道路交通における混雑問題に対する代表的なアプローチとしては、混雑を引き起こす原因が道路に多数の車が同時に流入することを想定したフロー混雑モデルと、車線の減少等の道路上にボトルネックが存在することを想定したボトルネック混雑モデルとに大別できる。フロー混雑モデルでは、道路や道路利用に対する需要も時間的に均質との仮定が置かれることから、静学モデルとなる。一方、ボトルネック混雑モデルは、道路利用にピークやオフピークがあるような交通混雑が時々刻々に変化する現象を想定した動学モデルである。さらに、道路等のネットワークが複数ある場合を想定し、利用者各個人の費用最小化等の最適化とネットワーク管理者の政策的な最適化という2つの最適化行動があるようなネットワーク均衡モデルについても、ワードロップの原理と2段階最適化問題を例に挙げて整理する。

次に、3節において、同じ航空交通における混雑の先行研究として空港の混雑を例に挙げ、スロットの配分における先行研究を中心に整理する。ここでは、まず空港の容量とはどのようなものであるかという解説と、空港の混雑とスロットの関係性について解説をする。その後、混雑空港のスロットをプライシング政策の一つであるオークションを用いて配分し、資源配分の最適化を図ることを主張した先行研究の成果を取り上げる。

そして、4 節において、航空路における混雑への先行研究について、料金設定と需要管理、数量管理の大きく 3 点に分けて整理する。料金設定に関しては、欧州の航空路の利用料の問題点から、航空会社が機材を小型化し多頻度で運航する経営戦略を取りやすくし、空域の混雑を引き起こす結果となっていると指摘した Raffarin (2004) の主張を考察する。需要管理に関しては、空域ネットワーク上の需要と供給の不均衡を緩和することを目的として、航援料を時間帯ごとに調節し、それが空域利用者にとって費用最小になる方法を欧州の空域を例に挙げて提案した Jovanović et al. (2014) の主張と、ピーク・ロード・プライシングの理論を取り入れることを提案した Bolic et al. (2017) の主張を考察する。数量管理に関しては、欧州の空域に設定された容量を需要が上回るような混雑空域に入域する権利を、繰り返し組み合わせオークションに基づいたプライシング政策で配分することを提案した Castelli et al. (2011) の主張を考察する。

最後に、5 節において、これらの先行研究を航空路の混雑に応用すること想定した整理を行い、本章のまとめを行う。

なお、混雑対策には、容量拡大を図る政策もあるが、航空路の通行枠を上限のある容量と捉えた経済学的アプローチから考察することを主眼としているため、本論文では取り扱わない。

3.2 道路交通における混雑への先行研究からの考察

3.2.1 静学モデル

文 (2005) は「交通経済学における標準的な混雑の理論は、単一の交通施設（例えば 1 本の道路）を対象にした静学分析である」⁶¹としている。この単一の交通施設を一本の航空路と捉えれば、この理論を航空路の混雑にも適用できる可能性がある。よって、道路交通における混雑の先行研究を見る際に、まず、単一の交通施設（ここでは自動車を利用する道路）を対象にした静学分析を整理する。

⁶¹ 文 (2005) 4 頁 6~7 行目から引用。なお、静学モデルについての考察に当たっては、この他にも山田 (2001) や竹内 (2008) を参照した。

通常、静学モデルにおいて、混雑に関する費用曲線を表す際にはフローという単位を用いる。フローは、ある一定時間に道路上のある一点を通過する自動車の台数（交通量）によって計測される。フローが小さい場合には混雑が発生せず、すべての自動車が遅延無くこの道路を利用することができる。しかし、ある一定のフローを超過した場合には混雑が発生し、さらにフローが大きくなればなるほど自動車の速度が低下し、混雑度合いが増していくことになる⁶²。

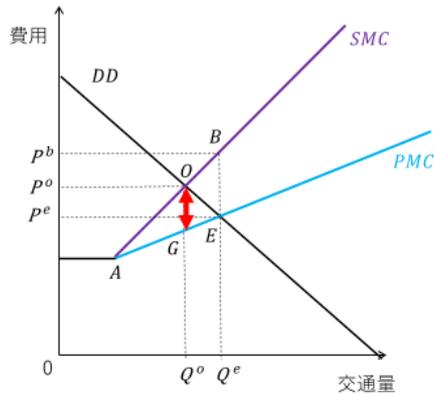
このフロー混雑とも呼ばれる、フローが道路の処理能力である容量を超過したことにより引き起こされる混雑の問題点は、混雑が発生すると発生前には一致していた私的限界費用と社会的限界費用に乖離が生じ、外部不経済として社会的損失を生むことである。よって、混雑を利用者間相互で及ぼしあう外部不経済から生ずる資源配分上の損失として捉え、社会的限界費用と私的限界費用を一致させようとするピグー税による外部不経済の内部化の考え方から、その費用である混雑費用を混雑料金として全ての利用者に課すことで外部不経済の内部化を行い、効率的資源配分を達成すると同時に混雑の緩和を図るという方法がこれまでも主張されてきた。

これを図 3-1 で説明すると、私的限界費用曲線 (PMC) と需要曲線 (DD) の均衡点は交点 E であり、この時の交通量は Q^e 、利用者から見た道路利用での費用は P^e となる。しかし、この時の均衡点は他の利用者に与える効果（外部費用）を含んでいないことから、社会的限界曲線 (SMC) と需要曲線の交点 O 、並びに交通量が Q^e の場合の社会的限界費用曲線から導き出される道路利用での費用 P^b との交点 B と囲まれた三角形の部分 $\triangle OBE$ を死荷重 (*Dead Weight Loss*) とする社会的損失が発生する。効率的資源配分を達成するには、社会的に見た最適な交通量である社会的限界費用と需要曲線の交点 O から導き出される交通量 Q^o に需要を管理する必要がある、そのためには外部費用を内部化する、つまり、交通量 Q^o の場合の私的限界費用と社会的限界費用の差 OG を混雑料金として設定すればよい。

ただし、社会的限界費用と私的限界費用の差である外部費用を混雑料金として徴収することにより、社会的には最適な資源配分が達成されるが、

⁶² なお、フロー混雑では、道路の容量の上限でフローが最大となったあとから、さらに自動車が流入し、最終的自動車の速度がゼロになるまでを「超混雑」と呼び、その状態の研究もなされている。一方、航空路の場合、航空機の速度がゼロになる状態は想定できない。よって、本論文では「超混雑」の状態は考慮しない。

図3-1 混雑料金



出所：文(2005) 5頁 図1-1 より筆者作成

SMC：社会的限界費用曲線
 PMC：私的限界費用曲線
 DD：需要曲線（右下がり仮定）
 $P = A - BQ$ ($A > 0, B > 0$)

各個人は混雑状況に応じて利用を決めるが、他の利用者に与える効果を考慮しないので、PMCとSMCの乖離が発生する。

↓
 交通量 Q^e の費用は、 p^e ではなく p^b が適切

↓
 $\triangle OBE$: Dead Weight Loss の発生

↓
 混雑料金 OG を設定し、交通量を Q^o にする。
 (外部効果の内部化)

混雑が解消する訳ではない。これは、ある程度混雑が発生してもそれによる費用を超える額の利便性を確保できるのであれば、その混雑は社会的に容認されるという考え方からである。

この様な、静学モデルでの研究成果である混雑料金による最適な資源配分の方法を、航空路の混雑に適用することを検討する場合、以下のようなことが考えられる。まず、航空路を単一の交通施設と捉えることに問題はない。また、航空路に制限することなく、セクターや我が国が管轄している空域をそれぞれ単一の交通施設とみなすことも可能である。よって、単一の交通施設を対象にした静学分析を行うことは、航空路だけでなくセクター等にも適用することができそうである。

しかし、静学モデルで取り扱われるフロー混雑と、航空路で発生する混雑が同様であるかは慎重な検討が必要である。静学モデルの混雑は、個々の自動車の速度の低下が発生し、単一の交通施設の密度が濃くなることにより混雑の度合いが増すことを想定している。しかし、航空路の場合、航空機の速度の低下は、無視できる程度しか見られないと考えるのが妥当であろう。

第2章で取り上げた様に、航空路の混雑はその制約から航空路の標準的な容量が設定され、それを超える需要が発生すると予測された場合には事前配分方法により航空路の利用の順位と時間を決定し、混雑の緩和の措置を取る。その順位の決定方法は到着予定時刻に基づく先着順であり、事前配分方法では混雑航空路の入り口を先頭に架空の航空機の待ち行列を作っ

ていると考えられる。また、リアルタイム配分方法では実際に混雑航空路の手前で空中待機等の指示を行うこともあり、航空路の混雑はフロー混雑ではなく待ち行列が発生するボトルネック混雑と捉えるのが妥当である。よって、次項では、ボトルネック混雑を取り扱う動学モデルを見る。

3.2.2 動学モデル

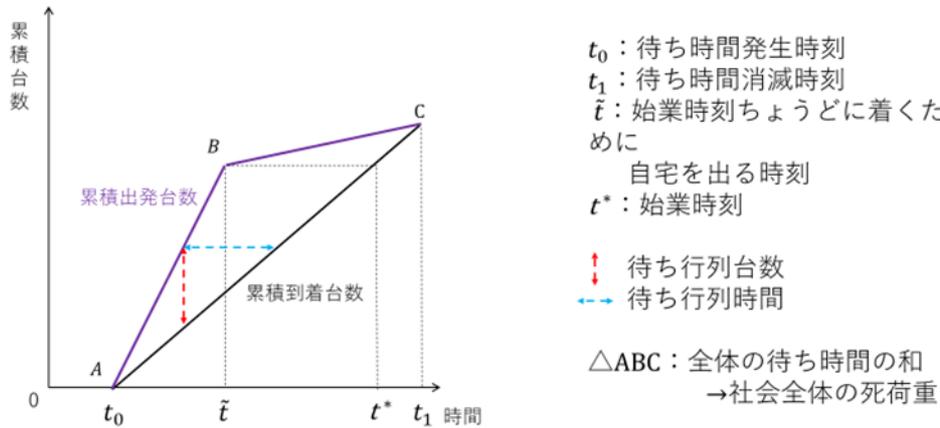
ここでは、ボトルネック混雑への先行研究を整理する。ボトルネック混雑に対しては、時間帯によってピークとオフピークがあることを想定し、動学モデルによる分析がなされている。この、動学分析における代表的な研究成果として、Vickrey (1969) のモデルと Arnott, de Palma and Lindsey (以下、ADL と略記する) (1990) のモデルが挙げられる。

Vickrey モデルとは、通勤者の出発時刻選択行動を定式化し、ラッシュアワー中の交通混雑の時間変動を記述する動学モデルで、ボトルネック混雑を最初にモデル化したものとされる。このモデルの特徴としては、利用者の勤務先への希望到着時刻（始業時刻）からの乖離をスケジュール費用と定義し、これと交通混雑とのトレードオフを通じて利用者の出発時刻分布を内生化したことと、交通混雑をボトルネック後方に伸びる待ち行列として定式化することにより、解析的に取り扱いやすい形で動学的分析を可能にしたことである。

例えば、図 3-2 は、混雑が発生する時間を t_0 、混雑が解消する時間を t_1 とし、混雑が最もひどくなる時間を \bar{t} としたピークのあるボトルネック混雑を表している。そして、それぞれの時間の累積出発台数と累積到着台数との差は、縦軸で待ち行列台数を、横軸で待ち行列時間を表している。出発累計台数と混雑が発生する時間 t_0 の交点を A 、混雑が解消する時間 t_1 の交点を C 、混雑がひどくなる時間 \bar{t} の交点を B と置くと、 $\triangle ABC$ は全体の待ち時間の和、つまり、社会全体の死荷重として表される。

この Vickrey モデルを基に、ADL がスケジュール費用と通勤時間の機会費用の 2 つの費用の総和を最小にする利用者の行動によって、この 2 つの費用の総和が一定になる様にシステム全体の通勤パターンが内生的に決定するモデルに改良したものが、ADL モデルと呼ばれるものである。ADL モ

図3-2 自宅を出発した累計台数，職場に到着した累計台数，及び待ち行列



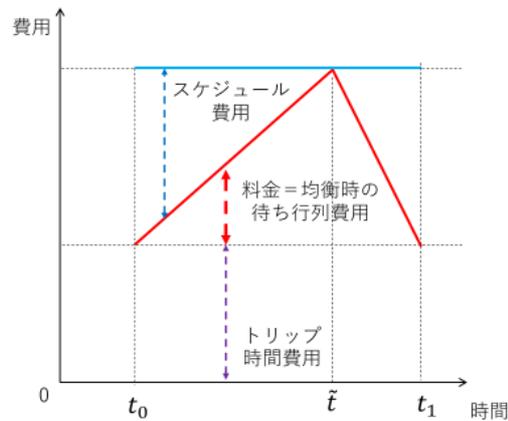
出所：山田(2001) 170頁 図2 より筆者作成

デルでは，利用者のスケジュール費用として始業時刻より早く仕事場に到着する場合は早着費用が，逆に遅く着く場合は遅刻費用がかかるとし，それにボトルネック手前での待ち時間の機会費用を加えた総費用を定式化した。そこから，スケジュール費用がかからない始業時刻ちょうどに到着する利用者は最大の待ち時間，つまり最大の機会費用を支払うこと，逆に機会費用がかからない様に出発する利用者は最大の早着費用もしくは遅刻費用を支払うこと，そして，長期均衡のもとでは，全ての利用者の支払う総費用が等しくなることを示した。

このことを，図 3-3 を用いて考えると，混雑が発生する時間 t_0 に出発している利用者は，待ち行列の先頭に位置することから待ち行列費用はかからない反面，始業時刻よりも最も早く到着するのでスケジュール費用が最大となる。一方，混雑が最もひどくなる時間 \bar{t} に出発する利用者は，待ち行列費用が最大となるが，始業時刻と同時刻に到着するのでスケジュール費用はかからない。以上のことより，長期均衡の下では，全ての利用者の支払う総費用が等しくなることを図 3-3 では表している。

この ADL モデルを通じて社会的に最適な道路利用を達成するための考察を行うと，死重損失である待ち行列の発生をゼロにする必要があることに気づかされる。ボトルネックを通過する交通量がボトルネックの容量を下回ると，全ての利用者が利用し終わる時間が延びるだけで機会費用が余分に増加することになる。また，全ての利用者のスケジュール費用と機会費用の総和が最小となることが社会的には望ましいことから，動学分析か

図3-3 トリップ時間費用、スケジュール費用、及び料金の時間変動



出所：文(2005) 69頁 図3-3 より筆者作成

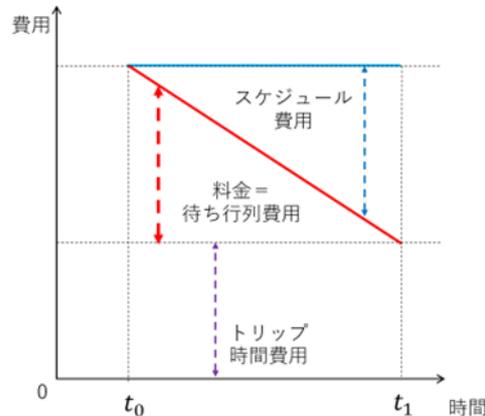
らの社会的に最適な道路利用の条件として、待ち時間の発生を完全に防止すること、出発率をボトルネック容量に一致させること、利用者の費用（スケジュール費用と機会費用）を均衡させることの三つが指摘される。よって、これらの条件を満たすための方法として、時刻ごとに変動するピークロード料金を課すことが考えられている。

これらのことを考慮し、動学モデルでの研究成果を航空路の混雑に適用することを検討する場合、出発率をボトルネック容量に一致させる必要性については、現状実施されている事前配分がこの考え方に沿った方法であると整理できる。

しかしながら、ADLモデルで想定している希望到着時刻よりも早い出発を航空路の場合にも想定する場合、航空機の出発時刻が航空会社の時刻表等を通じて事前に旅客に通知していることから、短期の対応には早発の時間幅に限界がある⁶³。仮に早発を実現させるためにスケジュール設定時等長期での考察を行うとしても、今度は混雑空港でしばしば問題となるスロット問題や、航空会社の機材や乗員の運航面、日々変化する効率的な運航計画等、政策面での課題を考慮する必要がある。よって、ADLモデルでの成果の適用は、短期の均衡を目指す場合には、遅発を想定した全ての利用者である航空会社の費用（スケジュール費用と機会費用）の均衡を目指すべきと考える。

⁶³ 概ね、乗客の搭乗案内は国際線が出発時刻の30分前、国内線は30分から10分前が現状であり、それ以前の出発は現実的ではない。

図3-4 遅発のみを想定したトリップ時間費用、スケジュール費用、及び料金の時間変動



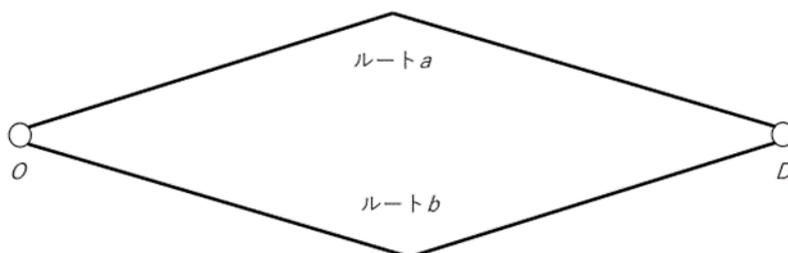
出所：文(2005) 69頁 図3-3 を基にして筆者作成

ここで、航空路の混雑に適用するために、ADLモデルを遅発のみを想定したモデルに改良すると、ボトルネックにすべての利用希望者が同時刻に到着し、ボトルネック容量を上回る交通量の機数分だけ待ち行列を作るという図3-4で表されるような形になる。この時の航空機に課すべきピークロード料金は、待ち行列を作る航空機の待ち行列費用から算出されることになる。この改良モデルによって、理論的には、社会的に最適な航空路利用が達成されるはずである。ただ、ADLモデルから早着を排除したため、ADLモデルと同条件のボトルネック容量や交通量を仮定した場合の、ボトルネックを遅延無しに通過できる航空機に課せられるピークロード料金は、ADLモデルで想定されるピークロード料金の最大値よりもはるかに高いものになる。よって、この一点だけを見ても社会的に受け入れられるかは、政策面での大きな課題となる。

3.2.3 ネットワーク均衡モデル

ここまでの、道路交通における混雑の先行研究として、静学モデルと動学モデルを見てきたが、これらはともに単一の交通施設を対象にした研究である。しかし、出発点から目的地まで自動車を利用して移動する場合、現実的には利用できる道路が複数存在し、それに合わせて複数の経路を選択することが可能な場合が多い。仮に一本の道路に混雑が発生した場合、多くの利用者は、混雑が発生した道路を利用するよりも早く目的地に到着で

図3-5 ワードロップの原理 (ルートの選択)



出所：竹内(2008) 228頁 図10-1 より筆者作成

きるような他の経路を選択する、つまり、所要時間の最小化行動をとるだろう。この所要時間に利用者の時間価値を乗ずれば、利用者の時間費用に変換できるので、これは時間費用の最小化行動となる。よって、利用者が合理的な行動をとると仮定するなら、混雑道路より少しでも所要時間が短くなる経路があるならばその経路を選択することになる。

ここで、選択可能な経路が複数ある場合を想定した道路交通における混雑の先行研究を整理することとする。

まず、最も単純な例として、図3-5のような経路が2つの場合を想定する。出発点を O 、目的地を D と置き、全ての利用者は OD 間を移動とする。そして、 OD 間の交通需要は一定で、全ての利用者が両方の所要時間等の情報について熟知(情報完備)しており、所要時間最小化行動をとるとする。

この状態で、ルート a に混雑が発生し、所要時間がルート b の方が短くなったとする。この場合、合理的な利用者は、ルート b を選択することになり、それが行き過ぎると今度はルート a の所要時間の方が短くなることになる。これを繰り返すと最終的には両方のルートの所要時間が等しくなるような状態に均衡する。この状態を均衡交通量と呼び、これを定式化したワードロップにちなみワードロップの第1原理⁶⁴という。このワードロップの第1原理は「起終点間に存在する可能な経路のうち、利用される経

⁶⁴ ワードロップは Wardrop (1952) でこの原理を主張した。なお、ワードロップの原理については、竹内 (2006) 及び竹内 (2008) を参照した。

路については所要時間がみな等しく、利用されないどの経路のそれよりもみな小さい」と表現され、*OD* 間にルートが 3 つ以上ある場合にも妥当する。なお、ワードロップの定理には第 2 原理もあり、それは「道路網中の総走行時間は最小である」と表現され、航空路の混雑を考察する際に重要な社会全体の最適化（システム最適化）の視点を備えている。

ワードロップの原理においては、出発地から目的地までの経路が複数あり、この間の交通需要は一定で、全ての利用者は出発地から目的地までの利用に関して所要時間を最小にする経路を選択するという仮定がある。また、全ての利用者が選択し得る経路についての完全情報を持っているとし、どの経路でどの程度混雑が発生している等の所要時間を入手した上で経路を選択するものとする。よって、このような条件下では、最終的にどの経路を選択しようとも、出発地から目的地までの所要時間が同じになるよう、交通需要が均衡することになる。

この様に、選択可能な経路が複数ある場合、一つの経路に混雑が発生し所要時間が他の経路より長くなると知っていれば、利用者は所要時間が最小となる他の経路を選択するという行動により、最終的にすべての経路の所要時間が同じになるという原理は、交通混雑を考察する上で非常に興味深いものになる。また、ここで言う所要時間を時間費用等に置き換えることや、複数ある経路を複数の交通機関（モード）に置き換えることも可能である。よって、ワードロップの原理は交通サービス利用者の経路選択の行動原理やモード選択の行動原理を整理するのに役立つ。

ただし、ワードロップの原理で重要な「全ての利用者が選択し得る経路についての完全情報を持っている」という前提条件が常に成り立つとは限らない。よって、交通混雑に関しては、完全情報を持たない利用者が私的費用を基に経路の選択を行うことを想定した考察も必要になってくる。

この様に、利用者が完全情報を持たず自己の私的費用を基に経路選択を行う場合の先行研究としては、2 段階最適化問題⁶⁵での成果が挙げられる。これは、行動を決定するプレイヤーが 2 者のモデルで、道路等交通機関の管理者とその交通機関の利用者による、2 段階での資源配分の最適化を目指すモデルである。この 2 段階は、上位問題として管理者の行動であるシステム最適化問題を、下位問題として利用者の行動であるユーザー最適化

⁶⁵ 2 段階最適化問題については、竹内 (2006) 21~25 頁に詳しい説明がある。

問題を置いたもので、利用者が自己の効用最大化（費用最小化）行動をとると仮定して、管理者が利用料金等の政策決定を行うことにより、社会全体の最適化（システム最適化）を目指すものである。まず、政策決定者の管理者は、利用者が自己の効用最大化行動をとると仮定した上で、システム最適になるような政策決定（例えば通行料金の設定）を行う。次に、利用者が課せられる利用料金を内生化して、自己の効用最大化行動をとる。その結果、管理者の目的であるシステム最適化が達成されることになる。ここでは、管理者がリーダー、利用者がフォロワーとなり、フォロワーがユーザー最適化行動をとってもリーダーのシステム最適化が達成される。

このようなネットワーク均衡モデルを航空路に適用するならば、まず、混雑航空路の他に迂回経路を設定する必要がある。それには、航空会社に推奨経路に従った飛行計画を提出させる現状の運用方式を改め、推奨経路上の航空路に混雑が発生する場合には、混雑を回避できる経路を含んだ飛行計画の提出を認めなければならない。

次に、「全ての利用者が選択し得る経路についての完全情報を持っている」かどうか、つまり管理者が利用者に完全情報を提供するかどうかである。道路交通、特に高速道路を利用する際には、道路上の掲示板やカーナビ等の車載機器等から運転手が直接リアルタイムの情報を得ることができ、それを基に運転手自らが当初の経路とは違う迂回経路を選択することが、現実的に可能になるところまで技術の進歩や整備がなされつつある。よって、道路の管理者が利用者である運転手にリアルタイム情報を提供することが、そのまま、経路の選択行動につながるというよい。しかしながら航空の場合、飛行計画は出発時刻の2時間前に提出され、その飛行計画に従って需要予測を行うことから、完全情報を航空会社の飛行計画に生かすことに矛盾が生じる。それでも、航空会社側に完全情報を与えようとするならば、完全情報を伝える相手は離陸後のパイロットであり、経路選択の判断をするのもパイロットということになる。しかし、離陸後ということは既に事前配分が行われた後なので、これもあまり意味をなさない。よって、航空路では「全ての利用者が選択し得る経路についての完全情報を持っている」という設定自体に無理があり、完全情報の下でのネットワーク均衡は現在の技術では不可能であり、政策として取り得る選択肢ではない。

よって、利用者が完全情報を持たずに経路の選択行動を行うとの仮定で、

2 段階最適化問題での成果を航空路に適用することを考えるなら、この場合、上位問題は航空路の管理者である ANSP⁶⁶のシステム最適化問題であり、下位問題は利用者である航空会社のユーザー最適化問題である。このことは、ANSP が予測した混雑度合いによって通行料金を設定し、それを基に航空会社が経路を選択することになる。しかし、ここでも ANSP の需要予測時期と航空会社の飛行計画提出時期との整合性が取れず、政策的課題は残る。

3.3 空港における混雑への先行研究からの考察

3.3.1 空港の容量とスロット

ここでは、航空交通に関する混雑への先行研究について整理する。航空交通における混雑に関して、空港の混雑に関する研究が数多くなされており、特にスロット配分に関する研究については多くの研究成果がある。よって、空港における混雑への先行研究については、スロット配分に関する研究を中心に整理することとする。そのためにも、ここで、空港の容量としてしばしば取り扱われるスロットについて整理する。

まず、空港の容量とは、滑走路や誘導路、スポット（駐機場）や貨物施設等の処理能力と、空港周辺の飛行経路に関する安全上の制約や環境問題に関する制約等から計算された、空港を安全かつ効率的に運用するための標準的な容量であり、スロットと呼ばれる機数で表される。

空港の混雑は、空港への離着陸の需要がその空港の施設容量を超える場合に発生し、過度な混雑を防ぐために一定時間に離着陸できるスロットを設定する。例えば標準容量が 30 分当たり 15 機の空港なら 30 分当たりのスロットは 15 となる。また、離着陸が可能な時間を指定したスロットは、タイムスロットと呼ばれ、ある一定の時間帯に需要が集中するのを防ぐために使用される。

よって、ある空港での離着陸を希望する場合、その航空会社はスロット

⁶⁶ Air Navigation Services Provider の略。ANSP については、第 2 章 2.2.3 でも触れているので参照されたい。

を確保する必要がある。しかし、混雑空港⁶⁷⁾に指定されているような 1 日または一定時間当たりのスロットが制限されている空港への就航を希望する場合、既にスロット上限まで利用されている時間帯ではスロットを確保できず、新規就航が制限される場合もある。

現状、我が国においては、政府によるスロットの割り当てが行われている。その割り当てルールの中で代表的なものが「use-it, lose-it」と呼ばれるものである。このルールは、一度手に入れたスロットを利用し続けている限りそのまま保持することが認められるという一種の既得権益化していることから、新規参入者がスロットを獲得しにくくなっているとの指摘がなされている⁶⁸⁾。よって、特にスロット獲得が難しい羽田空港に関しては、スロットを自由枠・地方枠・新規優遇枠・政策枠の大きく 4 つに分けて配分し、新規参入会社や地方空港への路線維持等に注意が払われている。

3.3.2 プライシング政策によるスロット配分

ここからは、資源配分の最適化を図るためにスロットをプライシング政策によって配分することを主張した先行研究について整理する。

まず、着陸料や空港施設利用料等の料金を変化させることによって需要管理を行う方法として、ピーク・ロード・プライシングが挙げられる。これは、ピーク時の利用者に長期費用曲線に基づいた料金を設定し徴収するもので、民営会社管理となっている英国ヒースロー空港で取り入れられている。実際には、ヒースロー空港では長期限界費用と需要曲線との交点での価格は採用されておらず、それに比べると低い水準の価格が設定されているため十分に需要が低下しておらず、ピークロード料金を課しながらスケジュール委員会によるスロット調整が行われている状態である。

次に、二次取引による配分である。これは、最大の利益を得る利用者へ

⁶⁷⁾ 我が国で混雑空港に指定されているのは、成田・羽田・関西・大阪・福岡の 5 空港である（2016 年 3 月から）

⁶⁸⁾ 「use-it, lose-it」ルールは、「ヒストリックの優先」と呼ばれる先例優先の原則に基づいたルールで、「ある年の夏期あるいは冬期に運航予定便数の 80%以上を運航した場合、翌年の同期にリクエストすれば優先的に同じスロットが確保される」というものである。既存の航空会社から見れば、安定的・継続的なダイヤの設定ができることになる。スロットに関しては、国際線発着調整事務局（JSC）のウェブサイトに詳しい説明がある。

スロットを再配分することにより、より社会的余剰を向上させることを目的としている。しかし、政府から無償で配分されたスロットを航空会社が売買することになり、スロットの所有権への指摘がなされている。

最後に、近年多くの研究成果が見られるオークション様について整理する。オークションを導入することは、よりスロットの価値を認める者への配分になり資源配分の最適化につながり、オークションで得た収益を容量の拡張等利用者へ還元することができれば、社会的余剰の向上に繋がる。このようなオークションの優位性を榊原 (1981)、中条 (2000)、福井 (2001) が指摘し、松島 (2011) が組み合わせオークションを、坂井 (2014) が同時せり上げオークションを提案している。また、スロットをオークションで配分する際には、単一財オークションのような単純な理論を適用することは相応しくないとの主張もある。これは、時間帯によって、航空需要にもピークとオフピークがあり、時間帯によってスロットの価値も変化すると考えられており、一日をいくつかの時間帯（例えば 15 分）に区切られたタイムスロットして扱うことが相応しいとの考えからである。この場合、スロットをタイムスロットとして取り扱っても、航空会社は混雑空港のスロットを複数（可能な限り）獲得したいと考えており、複数需要の仮定が必要になる。さらに、一つの航空会社が複数のスロットを獲得すればするほど、スロット間に代替性や補完性が発生し、それらを加味したスロットの私的価値を入札額として反映させるには、より複雑なオークション理論が必要となってくる。それに伴い、オークションに係る期間や費用も入札者の航空会社だけでなくオークションにアの ANSP にも、大きな課題となる。

3.3.3 実運用での再配分

最後に、実運用での再配分について触れておく。これは、混雑空港への着陸時刻を再配分する方法であり、スロットの再編成マッチングと呼ばれる方法である。近年、多くの研究がなされているメカニズムデザインの分野では、事前配分の基となった目的地での到着時刻の入れ替えのための方法の提案をしている。

例えば、混雑空港への出発機が、事前配分のため出発空港で待機しているとすると。しかし、同じ空港へ向かうはずの他の便に遅延が発生し、目的

空港に事前配分通りの時刻に到着できなくなったとする。そうすると、その着陸予定時刻のスロットは使われない空きスロットになってしまう。そこで、その無駄を解消するために、空きスロットで着陸可能な後続便にそのスロットを再配分することで、より効率的な配分を達成することを狙っている。大谷・坂井 (2014) の中で、米国の例を挙げてこのメカニズムデザインの解説を試みているが、この方法は結局のところ先着順の改良版であり、航空会社の私的価値に沿ったものではなく、注目すべき方法であるものの、本論文の目的とは異なることから、今回は紹介に留めておく。

3.4 航空路における混雑への先行研究からの考察

3.4.1 現行の料金設定の問題点

ここでは、航空路における混雑への先行研究を整理する。航空路の混雑に関する先行研究はそれほど多くないことから、代表的な先行研究を挙げて整理する。

まず、現行の航援料の問題点を指摘した先行研究を整理する。

Raffarin (2004) は、欧州の航援料の料金設定方法の問題点によって、航空会社が機材を小型化し多頻度で運航する経営戦略を取りやすくし、空域の混雑を引き起こす結果となっていると指摘した。

欧州では、EUROCONTROL によって航援料の料金設定方法が定められており、管制業務を担当する加盟国 (ANSP) は、それに従って利用者から料金を徴収している。その料金は(3.1)式によって定義されている。

$$R_i = T_i \times \frac{D_i}{100} \times \sqrt{\frac{M}{50}} \quad (3.1)$$

加盟国 (i) は、管轄する空域内を航空会社が利用した距離 D_i (単位: Km) と航空機の最大離陸重量 M (単位: トン) を基に料金 R_i を設定する。航援料は、航空路の管理者である ANSP が行う航空管制等の航空保安業務に係る費用の回収を目的として徴収されるが、加盟国によって業務範囲や設備投資等の費用が異なり、徴収すべき金額が異なっている。よって、徴収される収入との乖離を調整するための変数(ユニット・レート)と

表3-1 機種別で見る航援料 (800km)

機 種	最大離陸重量 (トン)	800kmの料金 (T_i)	標準座席数 (席)	1席当たりの料金 (T_i)
B777-200	200	16	375 (国内線)	0.0426
			236 (国際線)	0.0678
B767-300	133	13	252 (国内線)	0.0518
			199 (国際線)	0.0656
B737-800	68	9.33	165 (国内線)	0.0565
			144 (国際線)	0.0648
E170	34.5	6.65	76 (国内線)	0.0648

備考： T_i は、変数(ユニット・レート)を表す。

出所：最大離陸重量と標準座席数は日本航空ウェブサイトを参照し、筆者作成

<https://www.jal.co.jp/5931/seatmap/seatmap.html> (国際線)

<https://www.jal.co.jp/5971/seatmap/seatmap.html> (国内線)

(2020年1月4日確認)

して T_i が設定されており、2002年の値はアイルランドの 22.15 ユーロからベルギー・ルクセンブルグの 90.47 ユーロと幅広い⁶⁹。

Raffarin (2004) は、航空保安業務が費用逦増性を持ち、供給費用回収制約を受けていることから、この様な方式で算出される航援料は、ラムゼイ価格になると指摘している。そして、その結果、大型機や長距離便等価格弾力性が低い便には割高になっていることから、航空会社に小型化・多頻度運航戦略を行わせるインセンティブになっていると指摘し、それが航空路の混雑に繋がっているとした。

この Raffarin (2004) の主張を検証するために、航空機の機種と航援料の関係を検証してみることにする。表 3-1 は、羽田＝新千歳・福岡とほぼ同等の距離である 800km で距離を固定して、航空機の機種と最大離陸重量、国際線・国内線別標準座席数から 1 席当たりの料金を表したものである。

800km の料金だけで比較するなら、大型機の方が重量が重くなる分、航空機 1 機当たりの料金が高くなっているのが分かる。しかしながら、1 席

⁶⁹ ユニット・レートは月ごとに公開されており、Eurocontrol (2019b) によると、2019年10月の値は、最高値はポルトガルの 9.67 ユーロ、最安値はスイスの 97.67 ユーロとなっている。

当たりの料金に直して比較する場合、国内線と国際線の仕様の違いで結果は別れることになった。ただし、同じ機種でも航空会社によって、座席数や1席当たりの販売価格が異なることや、航空機の運航にかかる費用は航援料だけでなく、燃料費や着陸料等様々な費用がかかること、さらには顧客の利便性が影響する搭乗率等収益面からの航空会社の行動を考えると、Raffarin (2004) が主張した現行の料金体制が航空会社に小型化・多頻度運航戦略を行わせるインセンティブになっているとの指摘は、的外れとはいえない⁷⁰。よって、Raffarin (2004) が主張をそのまま受け入れるとするならば、航援料の価格設定から重量を除外し、利用した距離のみで算出されることが、混雑の緩和には望ましい政策と言えるかも知れない。

3.4.2 混雑料金を取り入れた先行研究

混雑料金を取り入れた先行研究の代表例として、Jovanović et al. (2014) を紹介し、加えて Bolic et al. (2017) の提案を挙げる。そして、最後にこれら欧州での先行研究の課題を整理する。

Jovanović et al. (2014) は、空域ネットワーク上の需要と供給の不均衡を緩和することを目的として、航援料を時間帯ごとに調節し、それが空域利用者にとって費用最小になる方法を提案しモデルを発展させようとした。そのために2段階最適化問題として概念化し、ネットワークの管理者(ANSP)と個々の利用者との視点を調整した。そして、欧州では中規模であるワルシャワACC⁷¹のデータを用いて混雑空域ネットワークでの航援料と補助金の税制中立の賦課が、容量の点では現在の需要管理方式より効果的な公平で衡平な経路設定を生じさせる可能性を示唆した。

また、Jovanović et al. (2014) は、効果的な料金制度を利用者自身によって4次元経路選択を行うような制度であるべきとした。そして、燃料費を含む運航費と航援料とのトレードオフになる経路選択(高度を含む3D選択)と地上待機と航援料のトレードオフになる離陸時間の選択の二つの選択を

⁷⁰ 第2章 表2-3を見ると、航空会社がB747をB777に、B767をB737にといった様な、従来の大型機を一回り小さい機材に置き換え、多頻度運航のために保有機数を増やしている様に見て取れる。

⁷¹ ACC : Area Control Center (航空交通管制部) の略。通称、管制部。航空路を主に管轄する管制機関であり、我が国では、東京・札幌・福岡・神戸の4か所に所在している。(2018年10月に那覇ACCは神戸ACCとなった。)

利用者が行うような制度設計を提案した。

そのために、管理者と利用者の二つの視点から満足させる方法を目的として、2段階最適化問題モデルを採用した。ここでは、上位レベルである管理者が、管理するネットワーク利用者の総費用を最小化するシステム最適化行動をとり、下位レベルである個々の利用者が、自身の最適な経路を選択する様な私的費用を最小化するユーザー最適化行動をとるとした。

この場合の2段階最適化問題は、道路混雑問題に対しての議論で用いられる場合と異なり、個々の利用者の経路情報等は提出される飛行計画等を通じて管理者である ANSP によって管理されており、また、個々の利用者である航空会社も道路利用者に比べて経路情報を豊富に所有しており、航援料が値上げされたからといって運航をキャンセルすることはないとしている。

この様な設定の下で、ワルシャワ ACC を通過する1つの飛行に対し、3つの4D経路(実績のある飛行計画と筆者が作成した2つの代替飛行計画)を設定し、システム最適が達成される様に混雑が予測されるセクターの航援料を調整し、それを受けて個々の利用者がユーザー最適を達成する様な経路選択を行う場合の分析を、あるセクターを例に挙げ遅延状況を計算した。そして、管理者が設定した空域の容量内に交通量を抑えた結果として、追加的な通行料を支払って混雑空域を利用する機数より補助金を受け取って迂回する機数の方が若干上回ることを示し、1機当たりの金額としては、混雑空域を利用する航空機の支払額より迂回を選択する航空機の実受額の方が高くなり、その上限が2倍以上になることを示した。

このモデルの課題としては、分析対象としたワルシャワ ACC が垂直方面に空域を区切られておらず、高度による迂回がなされていないことや、ワルシャワ ACC の空域を通過予定の航空機に他国の ACC の空域を通過させることになっていること、また混雑空域を通過する予定のなかった航空機にも補助金が支払われるというフリーライダー問題が発生すること等が挙げられる。また、燃料価格が安い時期には現状の地上待機による需要管理に代わるものとして管理者と利用者双方に魅力的な方法として思われるが、燃料価格が高騰した場合には経路延長のための運航費用増大が懸念され、補助金等迂回のインセンティブが多く必要になるという課題がある。

Bolic et al. (2017) は、EUROCONTROL が管轄する空域にピーク・ロー

ド・プライシングの理論を取り入れることを提案した。これは、2013年にEUで modulation charge が許可されたのを受けて、欧州の空域を管理する中央管理者が、各国の ANSP の収支均衡を保証する前提で各航空路の航援料を設定し、欧州全体の空域の混雑を緩和することを狙っている。それによると、中央管理者が経路と航援料を決定した後に利用者が経路を選択する、中央管理者がリーダー、利用者がフォロワーとなるシュタツケルベルグ均衡になることを主張した。具体的な方法として、中央管理者が経路ごとの航援料を設定した後、利用者は運航の6か月前までにスロットの獲得を含むスケジュールを決定する戦略的決定を、離陸数時間前までに経路や高度等の戦術的決定を行うことを想定している。

これら欧州での空域の混雑に対する先行研究を考えた場合、欧州の空を管理する EUROCONTROL が加盟国の管轄空域を統括して管理することが可能であり、Jovanović et al. (2014) や Bolic et al. (2017) で提案された料金制度は実現可能の様に見える。ワルシャワ ACC の空域管理者にとって航空会社から提出される飛行計画より自空域の需要予測は簡単に行える。また、EUROCONTROL の中央管理者も、加盟国の空域を利用するすべての航空機の情報を入手可能であることから、その情報から需要予測を行い、何らかの方法で各航空路の需要管理を行うことは可能である。

しかし、航空路の維持・運営費と航援料との収支均衡は、EUROCONTROL 全体で行われているのではなく、各加盟国の管轄空域ごとにユニット・レートによる調整によって保たれている。よって Castellia et al. (2013) が指摘した様に、通過機が多くなればなるほど航援料収入が多くなり、ユニット・レートが下がり航援料が値下がりすることになる。また、航空路の維持・管理費には航空路の容量拡大への投資を含めることが認められており、航援料で得た収入を混雑の緩和への投資とすることで利用者へ還元する目的も果たされている。つまり、通過機が増加した加盟国が、ユニット・レートを下げるのではなく、その資金を増加予測に見合った容量拡大への投資に充てる政策をとることも予想される。さらに、自国での資金調達力が乏しく、航空路の維持・運営費を航援料に頼らざるを得ない加盟国は、近隣加盟国の航援料より割安の価格を設定し、混雑が発生するのを承知で自国の空域利用者を確保しようとするかも知れない。よって、これら先行研究で提案は、EUROCONTROL の中央管理者とすべての加盟国との政策が完

全に一致することを前提とすることが求められる。

3.4.3 オークション理論を取り入れた先行研究

Castelli et al. (2011) は、繰り返し組み合わせオークションに基づいたプライシング政策を提案した。これは、混雑空域を対象とした事前配分によって計算された入域時刻を通行枠として、その通行枠配分方式である先着順方式の改善点として、指定された通行枠より早い通行枠を手に入れるために航空会社は喜んで支払いを行うとの仮定の下、さらに遅い通行枠を受け入れた航空会社に遅延費用を補償するモデルを提案した、二次取引市場にオークションを導入する方法である。

Castelli et al. (2011) は、航空路の通行枠や空港のスロットの配分に市場原理に基づいたメカニズムを提案することを目的とし、スロット配分に関する長期戦略としては第1市場で組み合わせ封印オークションを、第2市場でスロット取引を挙げている。一方の通行枠に関しては、現行の通行枠の初期配分が管理者による先着順に基づいた事前配分であることから、航空会社に事前配分後の二次取引を許した市場原理の導入により、より合理性とパレート効率を高められるとしている。

このために、各航空会社の運航費用を最小化する通行枠配分を実現する配分効率を、各航空会社によって異なる時間当たりの運航費用と事前配分の結果から被る遅延時間を基に行うことになる。例えば、少しでも早い通行枠を獲得したい航空会社は、追加的に支払う額（入札額）より時間短縮によって得られる経済的利得がある通行枠の組み合わせがあるならば合理的な判断としてその組み合わせで入札し、逆に事前配分で得た通行枠を売ってそれよりも遅い通行枠を再取得することで経済的利得がある航空会社は、その販売額と再取得できる通行枠の組み合わせ次第では事前配分で得ていた通行枠を喜んで手放すことが合理的になる。このような組み合わせの数が多ければ多いほど二次取引の効果が増し、社会的余剰が改善されることになる。

しかし、このモデルでは空きスロット等の空域の容量を最大に利用しない時間帯が発生することや、一つの空域のスロット配分だけで近隣空域等への迂回は想定されていないという課題がある。また、理論上、事前配分

により指定される離陸時間の取引になっており、実運航上発生する混雑航空路への入域時刻のズレ等の政策的な考慮はされていない。さらには、通行枠の初期配分を事前配分で行った上での二次取引に関する提言であり、初期配分に対する提言を考察することを目的とする本論文とは少なからず目的意識の違いがある。

3.5 まとめ

ここまで、航空路の混雑に関する先行研究だけでなく、道路交通や空港の混雑に関する先行研究も整理してきた。その結果、既存の研究成果を航空路に適用するには次のことに留意すべきとの考えに至った。

まず、2節において整理した道路交通における混雑への先行研究からは、静学モデルで前提とされるフロー混雑よりも、動学モデルで前提とされるボトルネック混雑の方が、航空路の混雑を考察するに当たってはより参考となることを挙げた。航空路の混雑は混雑航空路の入り口をボトルネックとするボトルネック混雑として扱い、時間によってピークとオフピークが存在するという認識が現状の航空路の運用状態から見ても適切である。また、混雑航空路だけでなく迂回経路等他の経路も設定可能なことから、複数の経路があることを想定した上で、使用者の合理的な判断による経路選択行動とすること、そして航空路の管理者は全体の効率化を図ることを考えたネットワーク均衡モデルの考え方を取り入れるべきと考える。しかし、この場合、ADLモデルに見られるような利用者による早発での混雑回避行動が、航空路の混雑の場合には現実的にはそぐわないことを考慮する必要がある。

次に、3節において整理した空港における混雑への先行研究からは、主にスロット配分問題を取り上げ、プライシング政策を利用した配分方法としてピーク・ロード・プライシングや二次取引、オークションを挙げた。この中でも、オークションを用いてスロット配分を行うことに関する先行研究は、我が国においても多くの研究成果が挙げられており、より発展したオークション理論を用いての研究が行われている。航空路にも容量の上限があり、配分できる通行枠に限りがあると捉えれば、このオークション

による配分は大いに参考になる配分方法である。また、実運用での再配分の方法は二次取引等のプライシング政策を用いなくとも最適な配分を達成できる知見を広げてくれるものの、航空路の通行枠での運用例はなく、また初期配分を取り扱うものではない。

最後に、4節において整理した航空路における混雑への先行研究からは、現行の航援料の問題点とそれに代わる料金制度として混雑料金を用いることや、配分にオークションを用いる可能性が示された。距離に基づく航援料は受益者負担の観点からも見合った料金が設定されると言える。しかしながら、先行研究の指摘もさることながら、航空路の容量を決定する要素が航空機の重量ではなく航空機数であることから、航空機の重量を加味することについての必要性については、今後の議論を期待したい。また、混雑料金を導入する際には、欧州の様に自国の空域内の混雑航空路を迂回する航空機が他国の空域を容易に利用できる環境を想定したメカニズムを考察することは、他国の政策を勘案する必要性がある。また、オークションを導入する際には、先行研究のような二次取引に用いることによる合理的な配分を通して社会的余剰の向上を図ることも重要ではあるが、初期配分に導入することによって合理的な配分と合わせて、回収するレントを原資として利用者への還元が実現できることから、初期配分にオークションを導入することを本論文の主たる目的としたい。

以上の先行研究より、本論文で考察するプライシング政策の導入に関しては、混雑航空路と選択可能な迂回経路が同一 ANSP で管理されていることを前提とし、利用者の合理的な経路選択行動を想定した ANSP の用いるべき方法を探ることとする。そのためには、混雑航空路の簡単なモデルやイメージを設定し、それらに対して混雑料金やオークションを導入することを想定し、混雑の緩和と社会的余剰の向上を達成することを目指すこととする。

第4章 混雑料金による需要管理についての考察⁷²

4.1 はじめに

本章では、航空路の混雑問題への対策として、航空路の管理者である ANSP が、現行の航援料とは別に混雑航空路に混雑料金として通行料を課すことにより、交通需要を調整し、混雑の緩和と社会的余剰の改善を達成できることを示す。

なお、本章で示す混雑料金を導入する場合の効果を混雑の解消ではなく混雑の緩和とするのは、ある程度の混雑が発生してもそれによる費用を超える額の利便性を確保できるのであれば、その混雑は社会的に容認されるという考え方からである。つまり、ANSP が混雑料金を導入する目的は、言うなれば、最適な混雑の達成である。

また、混雑航空路に混雑料金を導入することにより、消費者余剰と生産者余剰の合計である社会的余剰が改善できることを示すために、航空会社を消費者、ANSP を生産者とした市場を想定する⁷³。そして、モデルの分析により、混雑料金を課さない場合には過度な混雑が発生し、混雑料金を課す場合に最適配分が達成できる可能性を示す。なお、ANSP が課す混雑料金は航空会社の余剰を減少させることになるが、その減少分はそのまま ANSP の余剰となるので、このことに関しての社会的余剰に変化はない。よって、混雑料金を導入することにより最適配分が達成できれば、過度な混雑により発生する死荷重が解消され、それに相当する分の社会的余剰が改善できることになる。

以上のことを示すために、本章では以下の通り考察を行う。

まず、2 節で混雑航空路と迂回経路が存在するモデルの設定を行い、併

⁷² 第4章は、西澤 (2015) に修正を加えたものである。主な修正点としては、西澤 (2015) では迂回経路を基本とし、混雑航空路を利用した場合に早着が可能となる到着時刻選択モデルとして利潤最大化行動を航空会社のユーザー最適問題としていたものを、本論文では3節や4節の通り所要時間と費用の最小化行動とし、さらなるモデルの簡素化を行い、より理解しやすい形に改めた点である。

⁷³ 航空会社を消費者、ANSP を生産者とした市場は、湧口・西澤 (2005) を基にしている。なお、湧口・西澤 (2005) では、乗客と航空会社の市場（航空輸送市場）と、航空会社と ANSP の市場（航空管制市場）の2つの市場を置いた分析を行っている。

せて考察の前提としていくつかの仮定を設定する。モデルの設定に当たっては現行の航空路の運用の一般性を損なわない様に留意しつつも、混雑料金の導入を念頭に、航空路利用に際しての ANSP による制約を排し、航空会社による経路選択行動を可能とすることを考える。現行の航空路利用に際しては、原則として、ANSP により公示された推奨経路に基づいて航空会社が飛行経路を設定しているが、混雑料金の導入を想定する場合、その価格次第では航空会社が混雑料金を支払わなければ利用できない混雑航空路を避け、混雑料金が課されない経路を利用することが予想される。よって、ここでは混雑航空路の他にも迂回経路を設定し、ANSP の推奨経路によらずに航空会社が自らの判断で飛行経路を選択することを想定し、3.2.3 で紹介したネットワーク均衡モデルを参考に簡素化したモデルを設定する。

次に、3 節で航空会社が所要時間最小化行動を行うことを前提とした考察を行う。混雑航空路と迂回経路が存在するモデルの下で、航空機数と航空会社の所要時間との関係に注目し、航空会社の経路選択行動を簡単なゲーム理論を用いて考察し、ANSP の取るべき行動を導き出す。航空会社の行動を分析するに当たっては、まず、航空会社が1社の場合と複数の場合を分けて考える。そして、すべての航空会社がこの航空路の情報のうち、容量と迂回経路との所要時間の差の情報は事前に知り得られると仮定し、リアルタイム配分の結果である進入順位の情報については完備している場合とそうでない場合に分けて分析する。航空会社が複数存在し、航空会社が進入順位に情報を得られる場合には、ANSP から進入順位の情報を得た後に航空会社が混雑航空路に振り分ける便数を決定することを想定する。また、航空会社が進入順位の情報を得られない場合には、混雑航空路を利用する航空機数と他の航空会社の行動を予測しながら混雑航空路に振り分ける機数を決定することを想定する。なお、この決定は、航空会社が複数ある場合でも、他方の行動結果を知り得てから自身の行動を決定するのではなく、各航空会社とも同時に行うこととする。よって、航空会社間の同時手番ゲームのみのクールノー競争による経路配分を考察する静学モデルを想定する。そして、その結果から、ANSP の目的である最適な混雑の達成には、混雑料金の導入が必要なことを示す。

さらに、4 節で航空会社の費用最小化行動を前提とした考察を行う。ここでは、3 節で求めた混雑航空路と迂回経路の所要時間に航空会社の時間

当たりの運航費用を乗ずることにより航空会社の費用を算出し、それを最小とする経路の選択を行う航空会社の行動を考察する。この場合、まず、ANSP が航空会社に混雑料金の価格を提示し、それを混雑度合いのシグナルとして航空会社が混雑航空路に配分する機数を決定するという動学モデルとなる。なお、ANSP が混雑料金を課す場合には、最適な混雑を達成するために必要な価格を決定するために ANSP が取るべき行動をバックワード・インダクション⁷⁴により考察する。この考察に当たっては、ANSP の行動をシステム最適行動、航空会社の行動をユーザー最適行動として、ANSP の最適化問題を第 1 段階、航空会社の最適化問題を第 2 段階とした 2 段階最適化問題を用いた動学モデルとして考察を行う。そこで、まず、航空会社は混雑航空路の利用に ANSP から混雑料金を課されることを想定した上で、航空会社間の同時手番ゲームのみのクールノー競争による経路配分を行う航空会社の最適化問題を考察する。次に、ここから得られた航空会社の最適化行動の結果を基に、ANSP が最適な混雑を達成できるような混雑料金の価格を設定することを考察する。

最後に、5 節で本章のまとめを行う。ここでは、航空路の混雑問題の対応として ANSP が混雑度合いに応じた混雑料金を課することが有効性であることの結論を示し、この考察での課題を述べる。

4.2 モデルの設定

モデルの設定に際しては、航空路の混雑問題への対策に混雑料金政策が有効であることを示すために、以下の 3 点の仮定を置く。

まず、第 1 の仮定は、航空会社の経路選択行動に関する仮定である。言うまでもなく、航空会社の目的は利潤の追求である。一般的に、利潤は収入から費用を除くことにより算出されるので、航空会社が利潤を高めるためには、収入を高めることと費用を抑えることが求められる。しかし、本章の考察は、混雑航空路に混雑料金を設定することの意義を示すことを目的とすることから、航空会社の収入を固定し、費用を抑えるための航空会

⁷⁴ バックワード・インダクション (backward induction) : 後向き帰納法や後方帰納法と呼ばれ、ゲームの終点に一番近い手番から順々にプレイヤーの最適行動を求める方法。

社の行動を考察することにより利潤を高めることを、航空会社の利潤追求の行動と仮定する。

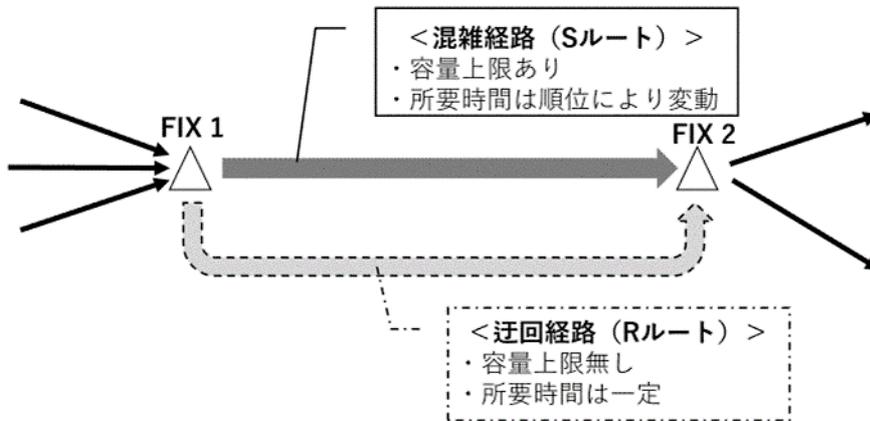
次に、第2の仮定は、モデルに登場する航空機と航空会社に関する仮定である。ここでは、モデルの簡素化を図るために、全ての航空機は同一の性能を持つと仮定する。また、航空会社が複数存在する場合、航空会社ごとに燃料費用や人件費等の運航費用が異なる場合であっても、同一航空会社による運航便は同一の(単位時間当たりの)運航費用であると仮定する。そして、登場する航空会社は、合理的な判断で行動すると仮定する。

最後に、第3の仮定は、混雑が発生する期間の混雑航空路と迂回経路に関する仮定である。航空機が航空路を利用する場合、出発空港から巡航高度への上昇のために利用する「出発」、巡航高度から目的空港に向かって降下するために利用する「到着」、巡航高度のまま航空路を利用する「通過」等が考えられるが、本章で取り上げる航空路モデルでは「通過」のみの利用と仮定し、今後のモデルの簡素化を図ることとする。また、現行の対策である空港の発着枠や航空交通流制御による需要管理、さらには推奨経路等の航空路の選択への制約がないと仮定し、混雑航空路を迂回することができるよう、迂回経路を設定する。なお、現実的には迂回経路は複数設定できる可能性があるが、モデルの簡素化を図るためにここでは一経路のみを仮定し、迂回経路には容量の上限がないものとする。さらに、航空会社は混雑航空路を遅延無しに利用できる場合の所要時間と迂回経路を利用する場合の所要時間の情報を前もって知り得るとする。併せて、混雑航空路の容量は一定で、航空会社が前もって知り得る情報とする。

以上の仮定を基に、図4-1のようなモデルを設定する。

図4-1は、混雑が見込まれる経路(Sルート)と、それを迂回するために設定される経路(Rルート)を表したものである。混雑度合いを考慮しない場合、航空会社にとってSルートを利用するのが最も効率の良い選択であると仮定する。Sルートの始点をFIX1、終点をFIX2とし、航空会社がSルートを利用するにはFIX1からSルートに進入し、FIX2から退出しなければならないとする。また、Sルートの利用権は、「First-come, First-served(先着順)」の原則に従うならばFIX1への到達順位に従って配分されるこ

図4-1 混雑経路と迂回経路モデル



となるが、ここでは、簡素化のために利用を希望する全機が同時刻に到達すると仮定し、Sルートへの進入順位はANSP（リアルタイム配分）により決定されることとする。よって、すべての航空機に同確率で順位付けがなされることとなる。また、Sルートを混雑航空路のモデルとすることから、Sルートにおいては既に混雑が発生していると仮定し、進入順位1位の航空機からSルートの容量に沿った待ち時間が発生することとする。

4.3 所要時間最小化

4.3.1 各ルートの所要時間

この節では、航空会社が自社便をFIX1からFIX2まで飛行させる際の行動について、所要時間を基にした考察を行う。なお、航空会社は、Sルートを利用する際に発生する待ち時間を含んだ自社便のFIX1からFIX2までの飛行に係る所要時間が最小となる経路を選択するという仮定を置く。この時の航空会社の行動を考察するために、まず、FIX1からFIX2までの移動にかかる所要時間を、SルートとRルートに分けて計算する。

(1) Sルートの所要時間

Sルートを飛行する航空機の所要時間は、進入順位とSルートの容量によって待ち時間が決定される。なお、Sルートの容量を m と置き、これは、

「 m 分に 1 機の間隔で S ルートに進入できる」という意味を表すこととする⁷⁵。また、S ルートの待ち時間は交通量に応じて線形に増加すると仮定し、進入順位が 1 番の航空機も S ルートの容量に沿った待ち時間が発生することとする。

$t(i)$ を、FIX1 から S ルートに進入する i 番目の航空機の待ち時間と置くと、

$$t(i) = mi \quad (m > 0, i \geq 0) \quad (4.1)$$

混雑に関係なく S ルート経由で FIX1 から FIX2 まで移動するために必要な時間を $\overline{T^S}$ と置き、 $T^S(i)$ を、S ルートを選択する i 番目の航空機の所要時間と置くと、

$$T^S(i) = \overline{T^S} + t(i) = \overline{T^S} + mi \quad (\overline{T^S} > 0) \quad (4.2)$$

(2) R ルートの所要時間

R ルートを飛行する航空機の所要時間は、R ルートの容量の上限はないとの仮定より、機数にかかわらず一定となる。よって R ルート経由で FIX1 から FIX2 まで移動するために必要な時間を $\overline{T^R}$ と置く。 $(\overline{T^R} > 0)$

4.3.2 所要時間に基づいた航空会社の行動

所要時間に基づいた航空会社の行動を考察するに当たって、表 4-1 に掲げるような場合分けを行う。

まず、航空会社が進入順位の情報を得られる場合と得られない場合に分けて考える。

得られる場合の航空会社の行動としては、初めに①で示す様に進入順位の情報を入力し、その後で②で示す様に得られた進入順位に基づいて S ル

⁷⁵ 飛行中の航空機に対し、混雑空域へ入域させる航空機相互間の間隔等を管制機関が指示する際は、Miles in Trail (例えば、10 海里間隔) や Minutes in Trail (例えば、5 分間隔) 等といった手法がある。(2.3.2 及び脚注 41 を参照されたい。)

本論文では、モデルを同方向の通過機に絞り飛行高度にかかわらず間隔を想定することから、Minutes in Trail の手法を想定し、「 m 分に 1 機の間隔で S ルートに進入できる」(m 分間隔)とした。

なお、FAA のウェブページ「Air Traffic Management Glossary of Terms」によると、それぞれ以下の様に解説がなされている。

Miles in Trail : A specified interval between aircraft expressed in nautical miles.

Minutes in Trail : A specified interval between aircraft expressed in time.

表4-1 所要時間に基づいた航空会社の行動

航空会社が進入順位の情報を得られる場合	
①	進入順位情報を入手
②	進入順位に基づいてSルートに配分する機数を決定
航空会社が進入順位の情報を得られない場合	
航空会社が1社の場合	
	航空路の容量・所要時間に基づいてSルートに配分する機数を決定
航空会社が複数の場合	
	航空路の容量・所要時間、他社の機数に基づいてSルートに配分する機数を決定

ートに配分する自社の航空機数を決定することとする。

また、得られない場合としてさらに、航空会社が1社の場合と複数の場合に分けて考察する。1社の場合には、事前に得られている混雑航空路の容量 m や所要時間 $\bar{T}^S \cdot \bar{T}^R$ の情報に基づいて、Sルートに配分する自社便の機数を決定することとする。複数の場合には、事前に得られている混雑航空路の容量 m や所要時間 $\bar{T}^S \cdot \bar{T}^R$ の情報と、この混雑航空路の利用を希望する他社の機数（つまり、自社便を含む全体の需要量）を考慮して、Sルートに配分する自社便の機数を決定することとする。なお、航空会社が複数ある場合には、全ての航空会社が同じ条件となると仮定し、かつ、他社が決定したSルートに配分する機数を知らない状態で、自社の分数を決定する同時手番ゲームを想定する。

航空会社が合理的な判断の下で所要時間に基づいて行動するためには、FIX 1 から FIX2 までの所要時間の短い経路を選択することが前提となる。その時の航空会社の行動は以下の通りとなる。

$T^S(i) < \bar{T}^R$ のとき	S ルートを選択
$T^S(i) > \bar{T}^R$ のとき	R ルートを選択
$T^S(i) = \bar{T}^R$ のとき	どちらでもよい

ここで、 $T^S(i) = \bar{T}^S + mi = \bar{T}^R$ より $i = \frac{\bar{T}^G}{m}$ ($\bar{T}^G = \bar{T}^R - \bar{T}^S$) となり、

進入順位 i でみると、航空会社の行動は以下の通りとなる。

$i < \frac{\bar{T}^G}{m}$ のとき	S ルートを選択
-------------------------------	----------

$i > \frac{\overline{TG}}{m}$ のとき R ルートを選択

$i = \frac{\overline{TG}}{m}$ のとき どちらでもよい

以上のことを念頭に、所要時間に基づいた航空会社の行動を考察する。

(1) 航空会社が進入順位の情報を得られる場合

航空会社が進入順位 i の情報を得られる場合を考える。この場合、航空会社は進入順位 i の情報を入手してから、自社便の経路の割り振りを決定することができる。

よって、航空会社は、進入順位が、 $i \leq \frac{\overline{TG}}{m}$ の自社便を S ルートに配分することが可能となるので、航空会社は、航空会社数や全体の機数にかかわらず、自社の個々の便の進入順位 i の値に基づいて、所要時間が短い経路を選択することができる。

(2) 航空会社が進入順位の情報を得られない場合

航空会社が進入順位の情報を得られない場合を考える。この場合、S ルートを利用する航空会社が 1 社の場合と複数の場合を考える。また、複数の場合として 2 社による場合を考える。

a. 航空会社が 1 社の場合（独占）

航空会社は、自社が運航する航空機全便の総所要時間が最小となる様に、S ルートを選択する航空機数を決定すると仮定する。
S ルートを利用する航空会社が 1 社の場合、このときの航空会社は S ルートを独占利用することになる。この場合の、独占航空会社のそれぞれの機数を以下の様に置く。

q : 独占航空会社の機数

q^S : 独占航空会社の S ルートを選択した機数

$q - q^S$: 独占航空会社の R ルートを選択した機数

(ただし、 $q > 0$, $q^S > 0$, $q - q^S > 0$)

(a) 独占航空会社が S ルートに配分する q^S 機分の総所要時間

q^S 機分の総所要時間は、待ち時間無しの場合の総所要時間と q^S 機分の待ち時間の和で表される。それぞれを以下の様に置くと、

$T^{S all}(q^S)$: q^S 機分の総所要時間

$\overline{T^S}q^S$: 待ち時間無しの場合の総所要時間

$m \sum_{n=1}^{q^S} n$: q^S 機分の待ち時間

$$T^{S all}(q^S) = \overline{T^S}q^S + m \sum_{n=1}^{q^S} n \quad (4.3)$$

(b) 独占航空会社が R ルートに配分する $q - q^S$ 機分の総所要時間

R ルートを飛行する航空機の所要時間は、仮定より機数にかかわらず一定となる。

$q - q^S$ 機分の総所要時間を、 $T^{R all}(q - q^S)$ と置くと、

$$T^{R all}(q - q^S) = \overline{T^R}(q - q^S) \quad (4.4)$$

(c) 独占航空会社の総所要時間と行動

独占航空会社の q 機分の総所要時間を、 $T^{all}(q)$ と置くと、

$$\begin{aligned} T^{all}(q) &= T^{S all}(q^S) + T^{R all}(q - q^S) \\ &= \overline{T^S}q^S + m \sum_{n=1}^{q^S} n + \overline{T^R}(q - q^S) \end{aligned}$$

よって

$$T^{all}(q) = \overline{T^S}q^S + m \frac{q^S(q^S+1)}{2} + \overline{T^R}(q - q^S) \quad (4.5)$$

$T^{all}(q)$ を最小とする q^S を求めると⁷⁶、

$$\frac{\partial T^{all}(q)}{\partial q^S} = mq^S + \overline{T^S} - \overline{T^R} + \frac{m}{2} = 0$$

より、

$$q^{S*} = \frac{\overline{T^R}}{m} - \frac{1}{2} \quad (4.6)$$

⁷⁶ 二階の条件は、 $\frac{\partial^2 T^{all}(q)}{\partial q^{S2}} = m > 0$

航空会社は FIX 1 から FIX2 までの所要時間の短い経路を選択すると仮定するので、進入順位 i でみると、 $i \leq \frac{\overline{TG}}{m}$ のとき S ルートを選択するという条件を、(4.6)は満たしている。

つまり、航空会社が 1 社の場合は進入順位 i の情報を得られなくとも、FIX 1 から FIX2 までの所要時間の短い経路を選択することができる。従って、航空会社が 1 社の場合、進入順位 i の情報を得られなくとも、S ルートの容量と各ルートの所要時間の情報から算出できる、 $\frac{\overline{TG}}{m}$ の情報を航空会社が前もって知り得るなら、航空会社自らが総所要時間を最小にする S ルートへの配分機数を決定できる。

b. 航空会社が 2 社の場合

S ルートの利用を希望する航空会社が複数存在する場合を、2 社の寡占状態に置き換えて考える⁷⁷。このときの航空会社を航空会社 1・航空会社 2 とし、各航空会社は自社が運航する航空機全便の総所要時間が最小となる様に、S ルートを選択する航空機数を決定すると仮定する。

なお、それぞれの航空会社は、相手の航空会社の決定を知らない状態で、S ルートに配分する便数を決定することとする。よって、ここでは、航空会社 2 社による同時手番ゲームが行われると仮定する。

ここで、それぞれの機数を以下の様に表す。

q_1 : 航空会社 1 の機数 ($q_1 > 0$)

q_2 : 航空会社 2 の機数 ($q_2 > 0$)

q_1^S : 航空会社 1 の S ルートを選択した機数 ($q_1^S > 0$)

q_2^S : 航空会社 2 の S ルートを選択した機数 ($q_2^S > 0$)

$q_1 - q_1^S$: 航空会社 1 の R ルートを選択した機数 ($q_1 - q_1^S > 0$)

$q_2 - q_2^S$: 航空会社 2 の R ルートを選択した機数 ($q_2 - q_2^S > 0$)

(a) 航空会社 1 が S ルートに配分する q_1^S 機分の総所要時間

⁷⁷ 航空会社による寡占理論については、村上・加藤・高橋・榊原（編）（2006）第 5 章を参照した（4.4.2(2)も同様である）。村上・加藤・高橋・榊原（編）（2006）では、航空会社は長期で見ればクールノー型の競争を、短期で見ればベルトラン型の競争を行っている可能性を示しているが、本論文ではクールノー型の競争を参照した。

q_1^S 機分の総所要時間は、待ち時間無しの場合の q_1^S 機分の総所要時間と q_1^S 機分の待ち時間の和で表される。

航空会社が2社の場合、Sルートを利用するための1機当たりの待ち時間は、Sルートの利用を希望する機数によって変わってくる。よって、まず、Sルートを選択する航空機の1機当たりの所要時間を考えると、航空会社が1社の場合のSルートに配分する q^S 機分の総所要時間は(4.3)より、Sルートに配分する航空機の1機当たりの所要時間（平均）を求めると、

$$\frac{T^{S all}(q^S)}{q^S} = \bar{T}^S + m \frac{(q^S + 1)}{2} \quad (4.7)$$

Sルートを選択する機数の和は $q_1^S + q_2^S$ であり、 $q_1^S + q_2^S$ 機数分の待ち時間は、(4.7)の q^S を $q_1^S + q_2^S$ に置き換えると、航空会社が2社の場合のSルートに配分する航空機の1機当たりの平均所要時間は、

$$\bar{T}^S + m \frac{(q_1^S + q_2^S + 1)}{2} \quad (4.8)$$

よって、航空会社1のSルートに配分する q_1^S 機分の総所要時間を $T_1^{S all}(q_1^S)$ と置くと、

$$T_1^{S all}(q_1^S) = \left(\bar{T}^S + m \frac{(q_1^S + q_2^S + 1)}{2} \right) q_1^S \quad (4.9)$$

(b) 航空会社1がRルートに配分する $q_1 - q_1^S$ 機分の総所要時間

Rルートを飛行する航空機の所要時間は、仮定より機数にかかわらず一定となる。 $q_1 - q_1^S$ 機分の総所要時間を $T_1^{R all}(q_1 - q_1^S)$ と置くと、航空会社1のRルートに配分する機分の総所要時間は、

$$T_1^{R all}(q_1 - q_1^S) = \bar{T}^R (q_1 - q_1^S) \quad (4.10)$$

(c) 航空会社1の総所要時間と行動

航空会社1の総所要時間を T_1^{all} と置くと、(4.9)・(4.10)より、

$$T_1^{all} = \left(\bar{T}^S + m \frac{(q_1^S + q_2^S + 1)}{2} \right) q_1^S + \bar{T}^R (q_1 - q_1^S) \quad (4.11)$$

これより、航空会社1の総所要時間を最小とする q_1^S を求めると⁷⁸、

⁷⁸ 二階の条件は、縁つきヘッセ行列となる。

$$\frac{\partial T_1^{all}}{\partial q_1^S} = m q_1^S + m \frac{q_2^S + 1}{2} + \overline{T^S} - \overline{T^R} = 0 \quad \text{より,}$$

$$q_1^S = \frac{\overline{T^G}}{m} - \frac{1}{2} - \frac{q_2^S}{2} \quad (4.12)$$

(d) 航空会社 1 と航空会社 2 の行動

航空会社 2 の総所要時間を最小とする q_2^S を求めると⁷⁹、同様に、

$$q_2^S = \frac{\overline{T^G}}{m} - \frac{1}{2} - \frac{q_1^S}{2} \quad (4.13)$$

(4.12)・(4.13)より、航空会社 1 と航空会社 2 の均衡点を求めると、

$$q_1^{S*} = \frac{2\overline{T^G}}{3m} - \frac{1}{3} \quad (4.14)$$

$$q_2^{S*} = \frac{2\overline{T^G}}{3m} - \frac{1}{3} \quad (4.15)$$

ここで、航空会社は FIX 1 から FIX2 までの所要時間の短い経路を選択すると仮定するので、進入順位 i でみると、 $i \leq \frac{\overline{T^G}}{m}$ のとき S ルートを選択するという条件から、

$$q_1^{S*} + q_2^{S*} = \frac{4\overline{T^G}}{3m} - \frac{2}{3} \leq \frac{\overline{T^G}}{m}$$

が成立しなければならない。よって、

$$\frac{\overline{T^G}}{m} \leq 2 \text{ のとき} \quad \text{成立}$$

$$\frac{\overline{T^G}}{m} > 2 \text{ のとき} \quad \text{不成立}$$

となる⁸⁰。

なお、(4.12)・(4.13)より、最適反応曲線は、図 4-2 と表される。

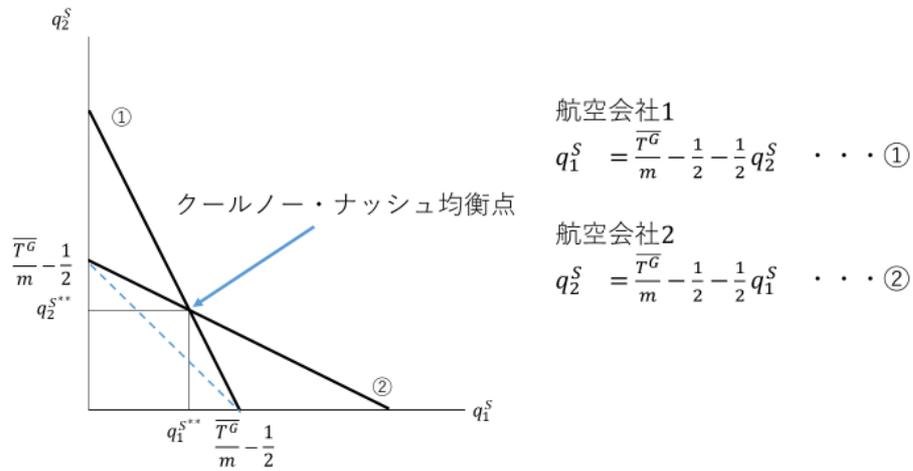
$$\frac{\partial^2 T_1^{all}}{\partial q_1^{S^2}} = m > 0, \quad \frac{\partial^2 T_1^{all}}{\partial q_1^S \partial q_2^S} = \frac{m}{2}, \quad \frac{\partial^2 T_1^{all}}{\partial q_2^S \partial q_1^S} = \frac{m}{2}, \quad \frac{\partial^2 T_1^{all}}{\partial q_2^{S^2}} = 0, \quad m \times 0 - \frac{m}{2} \times \frac{m}{2} = -\frac{m^2}{4} < 0$$

⁷⁹ 二階の条件は、縁つきヘッセ行列となる。

$$\frac{\partial^2 T_1^{all}}{\partial q_2^{S^2}} = m > 0, \quad \frac{\partial^2 T_1^{all}}{\partial q_2^S \partial q_1^S} = \frac{m}{2}, \quad \frac{\partial^2 T_1^{all}}{\partial q_1^S \partial q_2^S} = \frac{m}{2}, \quad \frac{\partial^2 T_1^{all}}{\partial q_1^{S^2}} = 0, \quad m \times 0 - \frac{m}{2} \times \frac{m}{2} = -\frac{m^2}{4} < 0$$

⁸⁰ この場合、自社 2 機目はどちらの経路を選択しても所要時間は同じになる。しかし、相手航空会社も 1 便以上 S ルートに配分することを考えると、2 機目は R ルートを選択すべきである。

図4-2 航空会社1と航空会社2の最適反応曲線



4.3.3 所要時間からの考察

(1) 航空会社の所要時間最小化行動からの考察

所要時間に基づいた航空会社の行動を考察する際、S ルートの利用を希望する航空会社が1社のみの場合と複数社の場合で過度な混雑の発生の可能性が大きく異なる。まず、S ルートの利用を希望する航空会社が1社のみの場合には、 $\frac{\bar{T}^G}{m}$ の情報が得られるならば、航空会社自らの選択で過度な混雑を回避することができることが分かった。次に、S ルートの利用を希望する航空会社が複数の場合には、航空会社の行動は自社便の進入順位や他社のルート選択によって所要時間を最短にするための行動が変化することになる。

S ルートの利用を希望する航空会社が複数の場合、全ての航空会社が自社便の進入順位と $\frac{\bar{T}^G}{m}$ の情報を得ており、所要時間を最短にする選択行動を行うとするならば、航空会社自らの判断で所要時間が最短となるルートを選択することができる。この結果は、ワードロップの原理⁸¹にも一致する。これは、航空会社自らの判断で利用者最適を達成することができ、その結

⁸¹ これは、ワードロップの第1原理に当たる。

果、利用者全体の総所要時間も最小化するシステム最適も達成できることを意味する。一方、自社便の進入順位の情報を得られない場合には、 $\frac{\overline{TG}}{m} > 2$ のとき、仮定が不成立となることから、S ルートの利用を希望する航空会社の航空会社の合計便数が 3 便以上の場合、S ルートでは過度な混雑が発生する可能性を指摘した。これは、進入順位の情報が得られている場合には、ワードロップ均衡になるのに対し、進入順位の情報が得られていない場合には、クールノー・ナッシュ均衡になるためである。

以上から、S ルートの利用を希望する航空会社が複数存在し、かつ、それら航空会社が各航空機の進入順位の情報を得られない場合には、航空会社が S ルートを利用する際に発生する待ち時間を含んだ自社便の FIX1 から FIX2 までの飛行に係る所要時間が最小となる経路を選択する行動を行ったとしても過度な混雑が発生することになり、このような社会的余剰を改善する余地が残されている状態は、航空会社だけでなく航空路の管理者である ANSP にとっても望ましい結果ではない。

(2) ANSP からの考察

一方、航空路の管理者である ANSP は、過度な混雑を回避するために、S ルートの需要管理を行うことを目的とする。よって、S ルートを利用する航空機の所要時間が R ルートを利用する航空機の所要時間を超えないような S ルートの需要管理を行うことになり、これは、ANSP がシステム最適を達成するような需要管理を行うことを意味する。これらのことを念頭に、ここでは、航空会社の所要時間最小化行動からの考察の結果を受けて、ANSP の行動を考察する。

まず、航空会社の所要時間最小化行動によって、ANSP の目標である S ルートの過度な混雑を回避することができる場合を考える。この場合、S ルートの利用者が 1 社であること、もしくは、すべての利用者が $\frac{\overline{TG}}{m}$ の情報と S ルートへの進入順位の情報を得られることが条件となる。ANSP は航空会社から事前に提出される飛行計画から S ルートの利用を希望する航空機を運航する航空会社を特定することができる。よって、ANSP が S ルートの利用者が 1 社であると判断した場合には、航空会社に $\frac{\overline{TG}}{m}$ の情報を提供す

ることにより S ルートの過度な混雑を回避することができ、また、S ルートの利用者が複数の航空会社であると判断した場合には、すべての利用者に $\frac{TG}{m}$ の情報と S ルートの進入順位を伝えることが、ANSP の取るべき行動となる。

しかしながら、S ルートの進入順位は、事実上、航空管制官がその場で判断するリアルタイム配分の結果であり、その結果を事前に伝えるという前提は成り立たない。また、リアルタイム配分の代わりに、航空会社から事前に提出される飛行計画を基にして ANSP が事前に順位を決定することも考えられるが、これは航空交通流制御として EDCT を付加する現状の事前配分とさほど変わらず、2.5.2 で示した問題点を解決できない。

よって、S ルートの利用を希望する航空会社が複数の場合、ANSP は進入順位に代えて何かしらの情報を航空会社に伝えることにより、S ルートの過度な混雑を回避し、システム最適を達成することを目指すべきである。そこで、本論文では ANSP の取るべき行動として、S ルートの混雑度合いを示す進入順位の情報代わりに、S ルートに混雑料金（通行料）を設定することを考察する。よって、次節では ANSP が通行料を設定する場合を想定し、航空会社の行動を運航費用や通行料から考察する。

4.4 費用最小化

4.4.1 各ルートの費用

今節では、航空会社の行動を FIX1 から FIX2 までの移動にかかる費用を基に考察する。なお、混雑航空路である S ルートに通行料を設定することとし、S ルートの通行料を τ と置く。また、ここで言う航空会社の費用とは、航空会社が負担する FIX1 から FIX2 までの移動にかかる航空機 1 機当たりの費用とし、この費用は運航費用と通行料の和とする。また、運航費用⁸²は燃料費用と時間費用からなり、これらは所要時間に対して正の線形

⁸² ここでいう「運航費用」とは、燃料費用だけでなく、時間費用（人件費や機材のメンテナンス費用等の時間に係る費用）も想定している。

で増加すると仮定する。

なお、航空会社の費用は、前節で求められた所要時間に航空会社の時間当たりの運航費用を乗ずることにより計算することとし、設定する通行料には、 $\tau > 0$ の仮定を置く。

(1) S ルートの費用

$C^S(i)$ をSルートを選択する*i*番目の航空機の費用、 w^0 を航空機の1分当たりの運航費用と置くと、(4.2)より、

$$C^S(i) = w^0 T^S(i) + \tau = w^0 (\overline{T^S} + mi) + \tau \quad (w^0 > 0) \quad (4.16)$$

(2) R ルートの費用

C^R をRルートを選択する航空機の費用と置くと、

$$C^R = w^0 \overline{T^R} \quad (4.17)$$

4.4.2 費用に基づいた航空会社の行動

費用に基づいた航空会社の行動を考察するに当たって、表 4-2 に掲げたような場合分けを行う。なお、S ルートの進入順位は、事実上、航空管制官がその場で判断するリアルタイム配分の結果であり、その結果を事前に伝えるという前提は成り立たないことから、費用に基づいた航空会社の行動を考察するに当たっては、航空会社が進入順位の情報を得られないことを前提として行う。また、ANSP が S ルートの利用者に課す通行料はすべての航空会社に同時に公表することとする。

まず、航空会社が1社の場合と複数の場合に分けて考察する。

航空会社が1社の場合の航空会社の行動としては、初めに①で示す様に通行料 τ の情報を入手し、その後で②で示す様に航空会社が前もって知り得る情報である混雑航空路の容量 m や費用 $C^S(i) \cdot C^R$ の情報と①で知り得た S ルートの利用に課される通行料の情報に基づいて、S ルートに配分する自社便の機数を決定することとする。

航空会社が2社の場合の航空会社の行動としては、初めに①で示す様に通行料の情報を入手し、その後で②で示す様に航空会社が前もって知り得る情報である混雑航空路の容量や費用の情報と、この混雑航空路の利用を

表4-2 費用に基づいた航空会社の行動

航空会社が1社の場合
①通行料の情報を入手
②航空路の容量・費用・通行料に基づいてSルートに配分する機数を決定
航空会社が複数の場合
①通行料の情報を入手
②航空路の容量・費用・通行料, 他社の機数に基づいてSルートに配分する機数を決定

希望する他社の機数（つまり，自社便を含む全体の需要量）の情報と①で知り得た S ルートの利用に課される通行料の情報に基づいて，S ルートに配分する自社便の機数を決定することとする。なお，全ての航空会社は，S ルートの通行料の情報を得てから S ルートに配分する自社便の機数を決定することとする。また，航空会社が複数ある場合には，全ての航空会社が同じ条件となると仮定し，かつ，他社が決定した S ルートに配分する機数を知らない状態で，自社の機数を決定する同時手番ゲームを想定する。

航空会社が合理的な判断の下で費用に基づいて行動するためには，FIX1 から FIX2 までの費用が低くなる経路を選択することが前提となる。その時の航空会社の行動は以下の通りとなる。

$C^S(i) < C^R$ のとき	S ルートを選択
$C^S(i) > C^R$ のとき	R ルートを選択
$C^S(i) = C^R$ のとき	どちらでもよい

$C^S(i) = C^R$ のとき，(4.16)・(4.17)より $i = \frac{\overline{TG}}{m} - \frac{\tau}{w^0 m}$ となるので，進入順位 i でみると，航空会社の行動は以下の通りとなる。

$i < \frac{\overline{TG}}{m} - \frac{\tau}{w^0 m}$ のとき	S ルートを選択
$i > \frac{\overline{TG}}{m} - \frac{\tau}{w^0 m}$ のとき	R ルートを選択
$i = \frac{\overline{TG}}{m} - \frac{\tau}{w^0 m}$ のとき	どちらでもよい

よって，航空会社は進入順位 i の値が $\frac{\overline{TG}}{m} - \frac{\tau}{w^0 m}$ までの便を S ルートに，

それを超える便を R ルートに配分することにより、この航空会社の総費用（自社運航便の費用の総和）を最小化できる。（ただし、進入順位は ANSP が決定する。）

以上のことを念頭に、航空会社が進入順位の情報を得られない場合の行動を考察する。考察に当たっては、前節と同様、S ルートを利用する航空会社が 1 社の場合と複数の場合を考える。また、複数の場合として 2 社による場合を考える。そして、航空会社の経路選択行動は、ANSP が S ルートの通行料 τ を示したのちに航空会社のユーザー最適行動として行う。ただし、航空会社間は同時手番ゲームが行われると仮定する。

(1) 航空会社が 1 社の場合（独占）

航空会社は、自社が運航する航空機全便の総費用が最小となる様に、S ルートを選択する航空機数を決定すると仮定する。S ルートを利用する航空会社が 1 社の場合、4.3.2.(2).a と同様、この航空会社は S ルートを独占利用することになる。

a. 独占航空会社が S ルートに配分する q^S 機分の費用

独占航空会社が S ルートに配分する q^S 機分の費用を $C^{S ALL}(q^S)$ と置くと、

$$C^{S ALL}(q^S) = w^O T^{S all}(q^S) + \tau q^S = \left[w^O \left(\bar{T}^S + m \frac{q^S + 1}{2} \right) + \tau \right] q^S \quad (4.18)$$

b. 独占航空会社が R ルートに配分する $q - q^S$ 機分の費用

独占航空会社が R ルートに配分する $q - q^S$ 機分の費用を $C^{R ALL}(q - q^S)$ と置くと、

$$C^{R ALL}(q - q^S) = w^O \bar{T}^R (q - q^S) \quad (4.19)$$

c. 独占航空会社の費用と行動

独占航空会社の q 機分の総費用を $C^{ALL}(q)$ と置くと、

$$\begin{aligned} C^{ALL}(q) &= C^{S ALL}(q^S) + C^{R ALL}(q - q^S) \\ &= \left[w^O \left(\bar{T}^S + m \frac{q^S + 1}{2} \right) + \tau \right] q^S + w^O \bar{T}^R (q - q^S) \end{aligned} \quad (4.20)$$

$C^{ALL}(q)$ を最小とする q を求めると⁸³,

$$\frac{\partial C^{ALL}(q)}{\partial q} = w^0 m q^S + \frac{w^0 m}{2} + \tau - \overline{T^G} = 0$$

よって,

$$q^{S*} = \frac{\overline{T^G}}{m} - \frac{\tau}{w^0 m} - \frac{1}{2} \quad (4.21)$$

航空会社は自社便のFIX1 からFIX2 までの費用が低くなる経路を選択すると仮定するので、進入順位 i で見ると、 $i \leq \frac{\overline{T^G}}{m} - \frac{\tau}{w^0 m}$ のときSルートを選択するという条件を(4.21)は満たしている。

つまり、航空会社が1社の場合は進入順位 i の情報を得ていなくとも、FIX1 からFIX2 までの費用の低い経路を選択することができる。

従って、航空会社が1社の場合、進入順位 i の情報を得ていなくとも、 $\frac{\overline{T^G}}{m} - \frac{\tau}{w^0 m}$ の情報を航空会社が得られれば、航空会社自らが総費用を最小にするSルートへの配分機数を決定できる。

(2) 航空会社が2社の場合

Sルートの利用を希望する航空会社が複数存在する場合を、4.3.2.(2).bと同様、2社の寡占状態に置き換えて考える。なお、2社の航空会社をそれぞれ航空会社1、航空会社2と置く。

a. 航空会社1がSルートに配分する q_1^S 機分の費用

航空会社1がSルートに配分する q_1^S 機分の費用を $C_1^{Sall}(q_1^S)$ と置くと、(4.9)・(4.18)より、

$$C_1^{Sall}(q_1^S) = w_1^0 T_1^{Sall}(q_1^S) + \tau q_1^S = \left[w_1^0 \left(\overline{T^S} + m \frac{q_1^S + q_2^S + 1}{2} \right) + \tau \right] q_1^S \quad (4.22)$$

b. 航空会社1がRルートに配分する $q_1 - q_1^S$ 機分の費用

航空会社1がRルートに配分する $q_1 - q_1^S$ 機分の費用（運航費用と通行

⁸³ 二階の条件は、 $\frac{\partial^2 C^{ALL}(q)}{\partial q^2} = w^0 m > 0$

料) を $C_1^{Rall}(q_1 - q_1^S)$ と置くと, (4.10)・(4.19)より,

$$C_1^{Sall}(q_1^S) = w_1^o \overline{T^R}(q_1 - q_1^S) \quad (4.23)$$

c. 航空会社 1 の総費用と行動

航空会社 1 の q_1 機分の総費用を $C_1^{all}(q_1)$ と置くと,

$$C_1^{all}(q_1) = \left[w_1^o \left(\overline{T^S} + m \frac{q_1^S + q_2^S + 1}{2} \right) + \tau \right] q_1^S + w_1^o \overline{T^R}(q_1 - q_1^S) \quad (4.24)$$

$C_1^{all}(q_1)$ を最小にする q_1^S を求めると⁸⁴, $\frac{\partial C_1^{all}}{\partial q_1^S} = 0$ より,

$$q_1^S = \frac{\overline{T^G}}{m} - \frac{\tau}{w_1^o m} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} q_2^S \quad (4.25)$$

d. 航空会社 1 と航空会社 2 の行動

航空会社 2 の総費用を最小とする q_2^S を求めると⁸⁵, 同様に,

$$q_2^S = \frac{\overline{T^G}}{m} - \frac{\tau}{w_2^o m} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} q_1^S \quad (4.26)$$

(4.25)・(4.26)より, 航空会社 1 と航空会社 2 の均衡点を求めると,

$$q_1^{S**} = \frac{2w_1^o - 4w_2^o}{3w_1^o w_2^o m} \tau + \frac{2\overline{T^G}}{3m} - \frac{1}{3} \quad (4.27)$$

$$q_2^{S**} = \frac{-4w_1^o + 2w_2^o}{3w_1^o w_2^o m} \tau + \frac{2\overline{T^G}}{3m} - \frac{1}{3} \quad (4.28)$$

ここで, S ルートを選択する i 番目の航空機の費用が, R ルートを選択する航空機の費用を超えないことが航空会社の行動の条件となるので, 求めるべき q_1^{S**}, q_2^{S**} は,

⁸⁴ 二階の条件は, 縁つきヘッセ行列となる。

$$\frac{\partial^2 C_1^{all}}{\partial q_1^S} = w_1^o m > 0, \quad \frac{\partial^2 C_1^{all}}{\partial q_1^S \partial q_2^S} = \frac{w_1^o m}{2}, \quad \frac{\partial^2 C_1^{all}}{\partial q_2^S \partial q_1^S} = \frac{w_1^o m}{2}, \quad \frac{\partial^2 C_1^{all}}{\partial q_2^S} = 0, \\ w_1^o m \times 0 - \frac{w_1^o m}{2} \times \frac{w_1^o m}{2} = -\frac{w_1^o m^2}{4} < 0$$

⁸⁵ 二階の条件は, 縁つきヘッセ行列となる。

$$\frac{\partial^2 C_2^{all}}{\partial q_2^S} = w_2^o m > 0, \quad \frac{\partial^2 C_2^{all}}{\partial q_2^S \partial q_1^S} = \frac{w_2^o m}{2}, \quad \frac{\partial^2 C_2^{all}}{\partial q_1^S \partial q_2^S} = \frac{w_2^o m}{2}, \quad \frac{\partial^2 C_2^{all}}{\partial q_1^S} = 0, \\ w_2^o m \times 0 - \frac{w_2^o m}{2} \times \frac{w_2^o m}{2} = -\frac{w_2^o m^2}{4} < 0$$

$$0 \leq q_1^{S^{**}} \leq \frac{\overline{TG}}{m} - \frac{\tau}{w_1^0 m} \quad (4.29)$$

$$0 \leq q_2^{S^{**}} \leq \frac{\overline{TG}}{m} - \frac{\tau}{w_2^0 m} \quad (4.30)$$

となる。

よって、各航空会社の取るべき行動は、この範囲内の機数を S ルートを
選択し、これを超える機数を R ルートに振り分けることである。

4.4.3 費用からの考察

(1) 航空会社の費用最小化行動からの考察

航空会社の費用最小化行動からの考察から、4.3.3.(1)の所要時間最小化行動の場合と同様、S ルートの利用を希望する航空会社が 1 社の場合には、その航空会社自らの行動で総費用を最小化することが可能であることが分かった。また、S ルートの利用を希望する航空会社が複数の場合でも、S ルートの容量 m と通行料 τ の情報を得ることにより、総費用を最小化する S ルートへ振り分ける機数を航空会社自らで判断することができることが分かった。よって、このことを、S ルートの容量と通行料の情報を航空会社に提供する ANSP の見地から見てみる。その際、航空会社の費用最小化行動によって S ルートの過度な混雑を回避することが可能となるために、ANSP が取るべき行動を考察する。

(2) ANSP からの考察

まず、航空会社が 1 社の場合（独占）を考える。

S ルートに過度な混雑が発生する場合、ANSP は混雑料金（通行料）を設定し S ルートの交通量を $\frac{\overline{TG}}{m}$ 以下に抑える行動をとる。

航空会社が 1 社の場合、この航空会社の総費用を最小とする S ルートの機数が q^{S^*} であるなら、ANSP には $q^{S^*} \leq \frac{\overline{TG}}{m}$ となる τ を設定することが求められる。これを満たすのは、

$$q^{S^*} = \frac{\overline{TG}}{m} - \frac{\tau}{w^0 m} - \frac{1}{2} \leq \frac{\overline{TG}}{m} \quad \text{より、} \quad \tau^* \geq -\frac{w^0 m}{2} \quad (w^0 m > 0) \quad (4.31)$$

これより、航空会社が 1 社の場合、進入順位*i* の情報を得ていなくとも $\frac{\overline{T^G}}{m}$ の情報を航空会社が得られれば、 $\tau^* = 0$ の場合においても航空会社自らが運航費用を最小にする S ルートへの配分機数を決定できる。つまり、航空会社が 1 社の場合には、S ルートの容量(*m*)の情報を航空会社に提供することが ANSP の取るべき行動であり、S ルートへの通行料を設定する必要はない。

次に、航空会社が複数 (2 社) の場合を考える。

仮に、ANSP が通行料を設定しない ($\tau = 0$) なら、

$$q_1^{S^{**}} + q_2^{S^{**}} = \frac{2\overline{T^G}}{3m} - \frac{1}{3} + \frac{2\overline{T^G}}{3m} - \frac{1}{3} = \frac{4\overline{T^G}}{3m} - \frac{2}{3} \quad (4.32)$$

となり、 $\overline{T^G} - 2m > 0$ のとき航空会社による行動だけでは過度な混雑が発生する。この、 $\overline{T^G} - 2m > 0$ となるかどうかという仮定は、迂回経路や S ルートの容量を設定する ANSP ならば知り得る情報である。よって、ANSP が通行料を設定することを避けるなら、 $\overline{T^G} - 2m \leq 0$ となるような迂回経路を S ルートの容量を設定することが必要になる。反対に、 $\overline{T^G} - 2m \leq 0$ となるような迂回経路を S ルートの容量を設定することができないのであれば、ANSP は $q_1^{S^{**}} + q_2^{S^{**}} \leq \frac{\overline{T^G}}{m}$ となる様に S ルートに通行料を設定する必要がある。その時の通行料(τ)は、(4.27)・(4.28)より、

$$\tau \geq \frac{(\overline{T^G} - 2m)w_1^o w_2^o}{2(w_1^o + w_2^o)} \quad (4.33)$$

でなければならない。

また、ここでは $\tau \geq 0$ を想定しているので、(4.33)より ANSP は、

$$\overline{T^G} - 2m \leq 0 \text{ のとき} \quad \tau = 0$$

$$\overline{T^G} - 2m > 0 \text{ のとき} \quad \tau \geq \frac{(\overline{T^G} - 2m)w_1^o w_2^o}{2(w_1^o + w_2^o)}$$

となる様に通行料を設定しなければならない。

よって、ANSP が必要最小限の通行料を設定すると仮定すると、それは

$$\tau = \frac{(\overline{T^G} - 2m)w_1^o w_2^o}{2(w_1^o + w_2^o)} \quad (\overline{T^G} - 2m > 0 \text{ のとき}) \quad (4.34)$$

となる。

この場合の航空会社 1 と航空会社 2 が S ルートに配分する機数は、

$$q_1^{S^{***}} = \frac{w_1^O(\overline{T^G} - m) + w_2^O m}{m(w_1^O + w_2^O)} \quad (\overline{T^G} - 2m > 0 \text{ のとき}) \quad (4.35)$$

$$q_2^{S^{***}} = \frac{w_1^O m + w_2^O(\overline{T^G} - m)}{m(w_1^O + w_2^O)} \quad (\overline{T^G} - 2m > 0 \text{ のとき}) \quad (4.36)$$

となる。

以上のことから、ANSP が航空会社による行動だけで過度な混雑が発生することを避けられるような混雑航空路の容量と迂回経路を設定することができるならば、航空会社に混雑航空路の容量の情報を提供することが ANSP の取るべき行動であり、この場合には通行料を設定せずに済む。逆に、上位のことが現実的でないのであれば、混雑航空路に通行料を設定することにより需要管理を行うことが ANSP の取るべき行動となる。

4.5 まとめ

本章では、航空路の混雑問題への対策として、ANSP が航空路に混雑度合いに応じた通行料を設定することにより過度な混雑を回避する方法を考察した。ここで言う過度な混雑とは、迂回経路である R ルートの利用を選択することで待ち行列を含んだ S ルートの所要時間やそれに係る運航費用を軽減できるにもかかわらず、S ルートを選択する航空機が存在することであり、これを回避することは社会的余剰の向上を実現することになる。

ANSP が利用者に推奨経路を公示し航空会社がそれを基に飛行経路を作成するという現行の制度において、ある時間帯・航空路に需要が集中し混雑が発生した場合、ANSP は航空交通流制御を実施し需要管理を行う。これに対し、本章では、推奨経路の制約を無くし、混雑航空路に迂回経路を設定することを前提とした航空会社の行動を考察した。

本章の考察の結果、混雑航空路に迂回経路を設定した場合、航空路の管理者である ANSP が混雑航空路の容量や進入順位の情報を利用者である航空会社に提供するならば、航空会社の所要時間や運航費用を最小化する行動によって過度な混雑を回避しうるワードロップ均衡になることが分かつ

た。しかし、混雑情報である進入順位はリアルタイム配分の結果であり、これを事前に航空会社に周知することは現実的でない。航空会社が事前に進入順位の情報を得られない場合、航空会社の所要時間や費用の最小化行動だけではクールノー・ナッシュ均衡になり、過度な混雑が発生する。よって、過度な混雑を回避するための ANSP の取るべき行動として、混雑航空路に混雑の度合いに応じた通行料を設定し、混雑航空路の需要管理を行うことが必要であるとの結論を得た。

本章のモデルは、相対的に考えることを主眼とし簡素化されたものであり、通行料の設定が過度な混雑を回避し社会的余剰の向上させる可能性を示しただけに過ぎない。また、現実の政策に反映させるならば、混雑料金設定の議論でも数多く指摘されている通り、今回の通行料の設定についても多くの課題が存在する。例えば、(4.34)式で表される通行料を見るならば、ANSP が必要最小限の通行料を設定するとの仮定の下で算出した通行料が、たとえ ANSP が求める S ルートの需要量と一致したとしても、費用面から考えられる最適配分を達成しているとの確証は示せなかった。また、この算出方法では各航空会社の運航費用等の数値が必要となることも、ANSP がその正確なデータを各航空会社から入手するという政策面での課題もある。さらに、モデルの設定においても迂回経路である R ルートの容量に上限を設けてない等、いくつかの課題が残されている。

これらの課題を整理したモデルによる精査が必要ではあるが、本章においては、航空路の過度な混雑への対策として通行料を課すことの有効性を理論的に示すという成果に留める。

第5章オークションによる通行枠配分についての考察⁸⁶

5.1 はじめに

本章では、航空路需要の容量超過を避けるため、航空路容量の初期配分方法にオークションを用いることを考察する。様々な技術的制約により航空路の容量にも上限があり、また、航空機が利用できる通行枠の数にも限界がある。よって、航空路の通行枠も他の財と同じく希少な資源と捉えることが可能である。しかし、その利用者をオークションによって決定するという方法についての研究成果はほとんど見受けられない。

よって、本章では、多くの研究成果が挙げられる空港発着枠配分におけるオークション（以下、スロットオークション）の議論を参考とする。その際、スロットオークションの有効性を理論的に示した研究成果と共に、オークションの有効性を認めつつも政策的な課題から導入を見送っている現状を勘案し、本章では理論と政策の両面から議論を進めることとする。

まず、2節において、航空路の容量の配分方法について簡単に振り返る。

次に、3節において、スロットオークションの議論での論点を整理する。ここでは、我が国のスロットオークションに関する先行研究を代表する3つの研究成果を取り上げ、航空路の通行枠オークションとの比較検討を行うためにその議論から「レントの是正と利用者利便性の向上」、「客観性・透明性の確保」、「配分の合理性」の3つに論点を整理する。

その後、4節において、スロットオークションでの議論を、航空路の通行枠配分におけるオークション（以下、通行枠オークション）を用いる場合に当てはめ、それによる影響を比較することにより、通行枠配分においてもスロット配分と同様に、現行の配分方法よりオークションが効果的であることを示す。そこで、スロットと通行枠のオークションを比較検討するために、通行枠オークションのイメージを最初に示す。そして、スロットオークションでの議論で理論的に有効性を示せた3つの論点について、

⁸⁶ 第5章は、西澤 (2018) に修正を加えたものである。主な修正点としては、5.4.2(4)で考察するオークションメカニズム導入に係る政策的課題についてより詳細な分析を行った点と、今回の考察に関して同質財・単一需要を想定するシンプルなオークション理論を適用したことについての補足として補論を追加した点である。

通行枠の初期配分にオークションを用いた場合にも有効性を認めることを示す。また、オークションの有効性を認めつつも政策的な課題から導入を見送っている現状を説明し、これら課題が通行枠オークションでは政策的に解決可能であることを示す。

最後に、5 節において、通行枠オークションの実現可能性についての考察を行い、航空路の現状と今回の通行枠オークションイメージとの差異等を勘案し、今回の設定の妥当性と課題を示す。

なお、本章で用いる通行枠オークションが同質財・単一需要を想定したシンプルなオークション理論であることから、章末に補論を設け、この点についての補足を行う。

5.2 航空路の容量と配分方法

航空路の容量と配分方法については、既に第2章で説明を行っているが、本章では航空路容量の初期配分方法にオークションを用いることを考察することから、今一度ここでも取り上げる。

航空路の容量は、2.3.1 で説明した通り、様々な制約によりその上限が設定される。需要がその上限を超えないと予測される場合には、2.4.2 で示したリアルタイム配分方法により通行枠が配分されることになるが、上限を超える需要が予測された場合には、2.4.3 で示した事前配分方法により通行枠が配分されることになる。よって、本章で取り上げる航空路容量の初期配分方法とは、航空路の需要がその容量を超えると予測されたときに採用される配分方法である。

また、2.3.2 で航空交通流制御の制御対象航空路をターミナル・セクター・特定航空路と3つの区分に分類し、それぞれの容量を算出する方法にも触れた。本章では、この中でも特定航空路に注目し、特定航空路の運用形態の一般性を失わないような航空路イメージを設定した上で、その容量の初期配分方法にオークションを用いることを考察することとしたい。従って、設定する航空路イメージの容量を機数で表し、その機数分の通行枠の初期配分方法にオークションを用いることにより社会的余剰が改善される可能性について考察を行うこととする。

なお、通行枠オークションの考察にスロットオークションの議論を参考にする場合の特に留意すべき点として、通行枠とスロットの性質の違いがある。航空会社がある都市と都市とを結ぶ路線を開設しようとする場合、少なくとも二つの空港のスロットを確保しなければならず、仮に乗り入れを希望する空港のスロットが確保できない場合には近隣の空港のスロットを確保するか、その路線の開設自体を諦める必要がある。一方、航空会社が通行枠を利用する場合、たとえ希望する通行枠が確保できない場合でも、希望と異なる高度や経路を利用することによりその路線の運航は可能になる。つまり、通行枠には代替となる高度や経路が存在し、迂回が可能であるのに対し、スロットは代替空港を利用するしかなく、この性質の違いは両者の大きな違いであるといえよう。

5.3 我が国におけるスロットオークション議論⁸⁷

5.3.1 スロットオークション議論の経緯

我が国では、需給調整規制の下、スロット配分は路線免許に付随するものと位置づけられ、運輸省（当時）の裁量で配分がなされてきた。しかし、1996年に行政改革委員会規制緩和委員会において、「競争入札制あるいはこれに代わる合理的で透明な発着枠配分方式」を採用するよう勧告がなされ、1997年の羽田空港新C滑走路運用開始に伴う新規スロット配分に関して話し合われた「羽田空港の新規発着枠の配分基準懇談会」や1998年の「スロット配分方式検討懇談会」で、スロットオークションの議論が始まった⁸⁸。この二つの懇談会では、オークションは時期尚早との結論に至り、2012年の羽田発着枠配分基準検討小委員会でもスロットオークションに関して理論的分析が行われ、多くのメリットが示されたにもかかわらず、オークション導入に係る課題をまとめ、導入を見送る結論がなされた。こ

⁸⁷ 原典では、オークション・競争入札制・競売等、また、スロット・発着枠といった複数の表現がなされているが、本論文ではこれらを総称して、オークション、また、スロットと呼ぶ。

⁸⁸ 我が国のスロット配分の議論の経緯については、遠藤（2001）および、山内（1998）を参照した。

れら以外にも、スロット配分に関する研究や政策提言は数多くあるが⁸⁹、未だ我が国においては導入されていない。

これらのことを考慮し、航空路の通行枠配分にオークションを用いる際に考えられる利点と課題を考察するため、数多くの先行研究の中から、1997年以降の羽田空港の新規発着枠配分方法におけるスロットオークションの議論を中心に、得られた成果を基に論点を整理する。

5.3.2 スロットオークション議論の論点

ここではまず、スロットオークションに関する研究の成果から、山内(1998)、中条(2000)、福井(2001)を取り上げ、現行の配分制度よりスロットオークションの方が優れているとする論点を整理する。

山内(1998)は、スロットを航空会社にとって生産をするために必要な一つの投入要素とし、それに何らかの制約や供給不足が生じた場合には市場にゆがみが生じることになるとし、そのゆがみである生産要素が不足しているときに発生する超過利潤(以下、レント⁹⁰)を是正する一番有効な手段が、オークションであるとしている。

中条(2000)は、スロット配分方式に、共通の課題として「航空会社が路線と便数を自由に決定し、変更できる」ことと「透明であり、規制当局の裁量の働かない手法」を絶対的条件として挙げ、スロット配分ルールは、透明性の確保と合理性の点でオークション方式が望ましいと述べている。また、理論的にはすべての配分枠を既存事業者から取り上げて再配分することが望ましいとしながらも、現実的には「use-it, lose-it」と呼ばれる航空会社が利用しなかったスロットは規制当局によって回収されるといったルール⁹¹の下で、「既存枠の一部+新規枠」配分対象総枠とすることが望ましいとし、具体的に、既存枠から5~10%の範囲を回収すること、時間帯区分を30分刻みとした配分対象枠を提案している。

⁸⁹ 例えば、ATRS(国際航空学会)参加の日本人研究者を中心とする有志(2013)が課題をまとめた上で政策提言を行っている。

⁹⁰ 原典では経済的レントと表現されているが、本論文ではレントと呼ぶ。

⁹¹ 「use-it, lose-it」ルールが「ある年の夏期あるいは冬期に運航予定便数の80%以上を運航した場合、翌年の同期にリクエストすれば優先的に同じスロットが確保される」ルールであることから、80%未満の運航実績の場合にのみスロットが回収されるということ。なお、「use-it, lose-it」ルールについては、3.3.1でも触れている。

福井 (2001) は、スロットオークションの利点として、基本的にすべての航空会社に平等な応札機会を提供するため、新規参入の促進という点で優れていることと、スロット配分に政府の意思が反映されなくなることから手続きの客観性・透明性において優れていることを挙げている。そして、オークションがより効率的な経営を行う航空会社がより多くのスロットを獲得する仕組みであること、オークション収入が滑走路容量拡大の資金源となることから利用者利便性を向上させる可能性について言及した上で、航空会社が生産者余剰最大化を図った場合には社会的余剰が向上しないケースを指摘し、利用者利便性の向上については不確実性があるとしている。

以上より、スロットの配分方法にオークションを用いる議論上の論点を、「レントの是正と利用者利便性の向上」、「客観性・透明性の確保」、「配分の合理性」の3点に絞り、航空路の通行枠配分にオークションを用いることに関しての考察を行う。

5.4 通行枠オークションの提案と考察

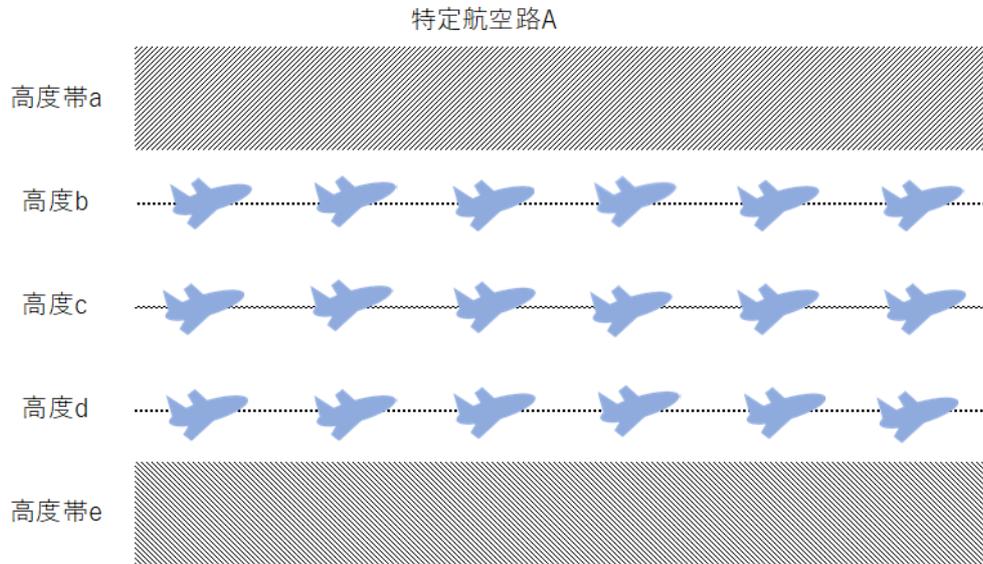
5.4.1 通行枠オークション対象の航空路イメージ

考察に際し、まず通行枠オークション対象として、特定の時間帯に需要が容量を超える特定航空路Aを想定する。想定に際して、前述の「特定航空路」の運用形態の一般性を失わないことに留意しつつ、議論を簡素化するために、図 5-1 で示すような航空路イメージを設定する。

まず、需要が容量を超えると見込まれるのは特定の高度帯(図 5-1 では、高度 $b \cdot c \cdot d$) とし、オークションの対象となる時間帯をある一定の時間(図 5-1 では、30 分)で区切り、その時間帯の容量を機数(図 5-1 では、18 機/30 分)で設定し、その容量は固定されているとする。また、時間帯別交通利用権オークション⁹²を参考に、1 便につき 1 枠を獲得する単一需要とする。ただし、対象時間帯内の通行枠は同質財で、他者との獲得枠の交

⁹² 本論文では原 (2015) の時間帯別交通利用権オークションを参考に、利用者が 1 回以下のトリップを行う単一需要と、利用者を事前に一斉に決定することを想定した。なお、原 (2015)は、利用者は時間帯別に利用権を購入するモデルを提案しているが、本論文では単一時間帯として扱う。

図5-1 通行枠配分オークション対象の航空路イメージ



出所：西澤 (2018) 図1

備考：航空路イメージ

- * 対象航空路：特定航空路A
- * 対象高度帯：3高度（高度b・c・d）
- * 対象時間帯：30分
- * 対象時間帯の容量：同高度上5分に1機（1高度6機）
- * 対象通行枠総数：18機／30分

換は考えないこととする。これは、現状のEDCTの有効時間帯が最大で約30分⁹³であり、航空交通流制御の精度を考えると、配分対象枠内の通行枠を同一財として配分し、その後、管制当局の裁量で便ごとに通行枠を配分することが現実的であるとの判断からである。入札者の単位を航空会社（又は、アライアンスのような共同体）とし、複数需要の形をとることで獲得者に獲得枠の交換を認め効率的な配分を目指すことも考えられるが、より大きな共同体の出現が独占・寡占の発生させる危惧や、管制当局の配分を容易にする等の実現可能性を勘案し、入札者の単位は便とする。さらには、獲得する通行枠の利用権は1日限りとし、ある1日の通行枠の配分は利用当日よりも事前（例えば前日）に一斉に行うことを想定する。なお、オークションによって通行枠を獲得できなかった航空会社は、非効率な運航を

⁹³ 第2章 表2-5に主な空港のEDCT有効時間帯を示している。

強いられるが、他の高度帯（図 5-1 では、高度帯 a・e）か経路を利用（迂回）することが可能とし、このことはスロットオークションと大きく異なる点である。

以上の設定の下、「レントの是正と利用者利便性の向上」、「客観性・透明性の確保」、「配分の合理性」についても、現状の配分方法より通行枠オークションが効果的であることを考察する。

5.4.2 考察

(1) レントの是正と利用者利便性の向上

航空路の利用は、航空会社にとって生産をするために必要な一つの投入要素であり、航空路料金である航援料も費用回収を目的として設定されていることから、需要が容量を上回ればレントが発生し、レントの是正にオークションを用いることは有効である。ただ、1 機当たりのレントの大きさは、スロット配分に比べ、通行枠配分で発生するレントの方が小さくなると考える。なぜなら、乗り入れを希望する空港のスロットを落札しなければ航空会社はその空港への路線を設定できないのに対し、航空路の通行枠を落札しなくとも航空会社は他の高度や航空路を利用すれば希望する路線を設定することが可能だからである。このことは、想定する右下がりの需要曲線の傾きを緩やかにするとともに下方に移動させる働きとなる。よって、通行枠オークションを用いる場合、入札者である航空会社の失う余剰が、スロットオークションを用いる場合に失う余剰と比べ、小さくなる可能性を示唆している。

また、政策面では、オークションにより回収したレントを原資とし、容量拡大への投資を行えば、使用者への還元と利便性の向上を実現でき、社会的余剰を改善させることになる。

しかし、福井 (2001) で指摘された、利用者利便性の向上の不確実性は、通行枠配分の場合でも同様に存在する。福井 (2001) が Borenstein (1998) の指摘として挙げた例を、通行枠オークションを用いた場合に当てはめるなら、入札可能な路線の需要関数が異なっている場合、より社会的余剰を改善する路線とより航空会社の余剰を改善する路線の双方が存在する際の航空会社の利潤最大化行動は、社会的余剰最大化に繋がらず、ここに不確実

性が存在するということになる。ただ、福井 (2001) が述べている様に、この不確実性は配分方法を問わず生ずるものであり、従って、オークションによって回収されるレントにより容量拡大が行われるのであれば、利用者利便性の向上の可能性はあることには変わりはない。

以上のことから、通行枠配分に関してもレントは存在し、レントを是正するためにオークションを用いることが、スロットオークションの場合と同じく効果的であり、社会的余剰の向上の可能性も、回収したレントを容量拡大の原資にするといった政策によって、同様に存在する。

(2) 客観性・透明性の確保

スロットの配分方法に関する客観性・透明性の確保において最も大きな課題は、規制当局の裁量が働くか、であったが、現行の通行枠は先着順での配分であり、規制当局の裁量が働くといった課題は当てはまらないと考える。仮に、規制当局の裁量が働かなら、順位の決定方法とその順序を厳守しているかの点においてである。現状の先着順の結果である EDCT は航空会社が提出する飛行計画を基に計算され、そのことは航空会社も十分に承知している。よって、規制当局の裁量で順位の決定や順序の入れ替えが行われたとすれば、それは航空会社からの指摘により発覚することであろう。従って、規制当局による先着順の決定方法の操作や順位の入れ替えは、現状においても行われているとは思えず、通行枠配分ではオークションの導入にかかわらず客観性は確保されるものと考えられる。しかし、現状では、各便に対し EDCT を通知するのみで全体の順序や順位決定の過程の情報を公開する制度になっていないことから、透明性の確保という点については、オークションによって改善される余地がある。

以上から、スロット配分方法における客観性・透明性の確保の課題は、通行枠配分方法に関しては、規制当局の裁量が現状においても働いていないことから客観性は確保されており、透明性の確保に関してはオークションを用いることにより幾らかの改善が期待される、と整理できる。ただし、航空路の通行枠配分方法に関して規制当局の裁量は存在しなくとも、リアルタイム配分方法における管制当局の裁量は変わらず存在する。

(3) 配分の合理性

スロット配分の合理性を考えた場合の大きな課題は既存枠の存在であったが、通行枠配分の場合には既存枠の概念が当てはまらず、この課題は存在しない。なぜなら、現状の通行枠配分を見ると、昨日獲得した通行枠が今日も獲得できるというルールは存在しないからである。たとえ、1年中航空交通流制御対象になる混雑航空路であっても、航空会社から提出される飛行計画に基づいて配分するという手法が連日繰り返されており、よって、現行の手法によって配分される通行枠の通行権は1日（1トリップ）限りと解釈するのが自然である。以上のことから、通行枠の配分に通行枠オークションを用いた場合、全ての通行枠をオークション対象枠とすることが可能であり、これにより、配分の合理性は確保され、最適資源配分が達成されることになる。

また、オークションの制度設計により、現行の航空交通流制御の問題点を改善することが期待できる。現行の制度には、航空会社が出発遅延・キャンセル等の変更情報を積極的に通報するインセンティブがない。よって、指定されたEDCT有効時間帯ギリギリに離陸した先行航空機とEDCT時刻に離陸した後続航空機が一つの配分枠に重複して進入することがない様に、余裕を持った容量配分を行う必要がある。また、EDCT有効時間帯内に離陸できない航空機の情報得られず、来るべき航空機が所定の時間内に来ない場合には使われない通行枠が発生し、効率的な配分が行われない懸念もある。もし、遅延等の情報がより早く入手できれば、余裕の幅を短縮し、使われないと予測した通行枠を他の航空機に配分する等の効率改善が期待できる。仮に、空域再編等による容量総枠拡大が成ったとしても、航空会社による同等性能の機材の使用や同じ時間帯・方面に路線を設定する戦略の変更がなければ特定時間帯・航空路・高度帯への需要の集中は避けられず、航空交通流制御による通行枠配分は引き続き必要となる。よって、変更情報を速やかに通報することが航空会社にとって有益となるオークション制度の導入により、現状の問題点を改善し、配分の合理性を高めることになる。

以上のことから、配分の合理性については、通行枠配分方法にオークションを用いることは、スロットの場合以上の効果があると言える。

(4) オークションメカニズム導入に係る課題

表5-1 オークションメカニズム導入に係る課題

課 題	必要な検討
① 配分の対象及び入札パッケージの数	時間帯により事業者のニーズに強弱があるため、「タイムスロット」をオークション対象とすることが経済学上は適切だが、その組合せについて航空会社に膨大な作業が課される。
② 入札価格の相場観	入札価格の相場観がないため、オークション実施前に入札価格の相場観を形成する必要。 そのためには、複数のオークションメカニズムを組合せる方法も考えられる。
③ 国際線の取り扱い	羽田国際線については、政府間国際交渉を通じて、相手国に羽田発着枠の権益を認めることが自国の航空会社が希望する外国の空港の発着枠を獲得する前提となっているため、航空交渉で設定された権益の実行を担保するため、タイムスロットを確保しておく必要。
④ 地方路線や新規航空会社に対する配慮	地方路線や新規航空会社等に配慮を行う場合には、オークションのプロセスで特別の配慮をする、オークションの対象外とするなどの検討が必要。
⑤ 入札収入の使途	オークション収入の使途について検討する必要。
⑥ 二次売買の取り扱い	スロットの二次売買を可能とするか検討が必要。国費を投じて整備した羽田空港の発着枠について、航空会社による二次売買を可能とする場合には、発着枠の法的位置づけ、売却益の帰属について整理する必要。

出所：国土交通省(2012)より、筆者作成

最後に、スロットオークションの導入が見送られた理由として挙げられた課題を整理し、それらが通行枠オークションの導入を見送るような課題となるかを考察する。ここでは、これまでスロットオークション導入が見送られた理由として考えられるオークションメカニズム導入に係る課題として、2012年の第1回羽田発着枠配分基準検討小委員会で挙げられた6つの課題を取り上げる。

表5-1は、そのオークションメカニズム導入に係る課題をまとめたものである。

まず、①配分の対象及び入札パッケージの数とは、利用できる時間帯が決められた状態のスロットである「タイムスロット」をオークション対象にするような制度設計を行えば、その組み合わせ数が膨大なものとなり航

空会社に課される作業を懸念することを課題としたことである。また、航空会社はオークションを通じて配分されるスロットを基に運航計画を作成することになるため、スロットオークション対象空港への就航を希望する航空会社はこのオークションを避けることはできない。よって、このような膨大な作業が課されることになるオークションを導入する際には、既に多くのスロット配分を受けている航空会社からの反発が予想される。よって、既存枠をすべて回収することなく既存枠の一部分や新規枠を対象にするならばより単純なスロットオークションの制度設計で済み、航空会社の負担軽減が図れる。しかし、「タイムスロット」オークションであっても、組み合わせオークション等の既存研究により社会的余剰が改善されることが示されており、結局のところ導入を見送る理由は航空会社からの反対ではない。一方、通行枠オークションの場合、通行枠の配分は当日の運航状況と航空管制官の裁量によるところが大きく、最終的な配分はリアルタイム配分に頼らざるを得ない。よって、オークション対象時間帯をスロットオークションの制度設計より広く設定することにより簡素化が図れる。また、今回のイメージの様に同質財・単一需要の制度設計とすれば、作業は単純なものになる可能性がある。それでもなお、航空会社はその作業量を嫌うならば、その航空会社はこの通行枠オークションに応札することなくオークション対象外に通行枠を利用して運航すればよい。よって、①の課題に関しては、スロットオークションと比べ、今回のイメージ設定の様に通行枠オークションの方がより航空会社や管制当局の負担軽減を図れる制度設計が可能であり、併せて独占・寡占を防ぐ機能を持たせやすい。

ここで、独占・寡占問題に言及すると、スロットオークションでは、航空会社が獲得したスロットを自由に利用することを想定することから、体力のある航空会社による独占・寡占が懸念される。一方、通行枠オークションでは、オークション対象通行枠に便を設定する航空会社が入札することになり、スロットオークションに比べ、独占・寡占の懸念は少ない。さらに、入札単位を便とし、獲得枠の交換を禁止する等の制度設計により、独占・寡占の発生防止策とすることができる。

②入札価格の相場観については、そもそもスロットオークションの前例がないために相場観がないのは当然であるが、せり上げオークションを実施する等の制度設計により相場観の形成は早期に可能になると考えられる。

一方、通行枠オークションでは、迂回経路と予測される特定航空路 A との運航費用（例えば人件費や整備費等の時間費用と燃料費用）との差額が価格シグナルとなり、各航空会社の入札額の相場観として形成される。これは、高度や経路の選択によって飛行時間や燃料消費がどの程度変化するかといった運航情報等を、現状でも航空会社が所持しており、この指標となる差額は容易に算出できるからである。よって、②の課題に関しては、通行枠オークションにおいてはそれ程大きな問題にならないと考える。

③国際線の取扱いと、④地方路線や新規航空会社に対する配慮については、迂回が可能というスロットと通行枠の違いから、他の路線同様に通行枠オークション対象にすることが可能である。これは、たとえオークションを通じて通行枠を獲得できなくても、オークション対象通行枠以外の高度や経路を利用することにより路線を維持することは可能であることと、新規航空会社にも平等に応札機会が与えられることを前提とした制度設計が可能であるからである。よって、③と④の課題に関しては、制度設計上の問題はなく、全ての通行枠がオークション対象とすることができることにより配分の合理性が保たれることにもなる。

⑤入札収入の用途については、スロットオークションの場合と同様に、オークションによって回収されるレントを容量拡大への原資とすることにより利用者利便性の向上を図ることで、この課題への対策とすることが考えられる。

⑥二次売買の取り扱いについては、そのメリットとデメリットを考えなければならない。スロットオークションにおける二次売買のメリットの例としては、有効に利用されないスロットが積極的に転売され、有効に利用できる航空会社に移転することにより、スロットが常に高い利用効率を示すことが挙げられる。デメリットの例としては、資金力のある大手航空会社が中小の航空会社から高値でスロットを買い取るにより独占・寡占化が進む懸念が挙げられる。よって、初期配分にのみプライシング政策を導入して、二次配分ではプライシング政策を導入しないという制度も考えられる。例えば、オークションによって配分されるスロットの利用権の期限を予め設定した上で二次取引を禁止し、その期間中においても予め決められた利用効率を満足しなくなったスロットは管理者が回収し再度オークションにより配分する等の方法もある。この場合、スロットの利用権の期

限が短くなればなるほど、二次取引の重要性は低くなる反面、オークションにかかる費用負担は増すことになる。一方、通行枠オークションが対象とする通行枠には既得権の概念がなく、また、航空会社の希望する通行枠も当日の天候や運航状況により変化することが予想される。よって、通行枠の利用権をスロットのような長期間ではなく1日限りというような短期間に設定する制度設計を行えば、二次取引市場を開設する必要性はスロットの場合と比べて大幅に低下する。また、二次取引を禁止とし、遅延やキャンセル等により使われなくなる通行枠を航空会社自らが早めに通報し返納するインセンティブが付加された制度設計を行うことにより、事前配分時やリアルタイム配分時での通行枠の有効利用が可能になる。これらを考えると、通行枠オークションにおいては、二次取引費用とその効果を考えた場合、二次取引ではなく制度設計によって通行枠の有効利用を図ることが望ましく、これによりこの課題への対応となると考える。

以上から、オークションメカニズム導入に係る課題は、通行枠オークションの方が制度設計等により解決される可能性が高く、通行枠オークション導入の有効性が存在する。

5.4.3 結果

今節では、スロットオークションでの論点を、今回設定した航空路での通行枠オークションに当てはめて検討を行った。その結果、通行枠配分方法にオークションを用いることは、レントの是正と透明性の確保、さらには配分の合理性について有効性があり、また、利用者利便性の向上についても、その可能性があることが分かった。そして、スロットオークションでの課題の幾つかは、通行枠に関しては当てはまらず、また、オークションメカニズム導入に係る課題についてもオークションの制度設計等で対応可能となることから、通行枠オークションに有効性があることが分かった。

以上のことから、通行枠配分オークションを導入することは、スロットオークションを導入する際より障壁が少なく、現行の手法と比べても社会的余剰を改善する可能性があると言える。また、スロットオークション導入に関する課題も、通行枠オークションを導入する際には当てはまらず課題となり得ないものや、対応可能であるとの考察結果を得た。

5.5 まとめ

本章では、スロットオークションで用いられた理論を、現状の航空路の運用形態の一般性を損なわない程度に簡素化した航空路イメージに対してオークションを用いる場合に当てはめ、その影響を比較することにより、航空路の通行枠配分方法にオークションを用いることが有益であることを示した。また、オークションメカニズム導入に係る課題に対し、通行枠オークションの方がスロットオークションより障壁が低いこと、併せて、制度設計により現行の航空交通流制御の問題点を改善する可能性等を示した。このことは、航空路の混雑問題に対し、当局による初期配分方法にオークションを用い、現行の先着順から支払意思額に基づいた経済学的視点による配分方法に変更することが、効果的であることを示している。

また、今回のような通行枠オークションの実現可能性については、以下の点から十分にありうると考えている。

まず、今回の通行枠配分対象の航空路イメージの設定においてオークションが成り立つかである。航空会社の応札が通行枠総数より大幅に少なければ、通行枠オークションを用いることそのものを否定することに繋がる。また、オークションに係る費用が得られる便益を上回る場合、オークション制度の維持が難しくなる。しかし、需要が容量を超えている時間帯をオークション対象とし、航空会社に相場観があることから、制度設計を適切に行えば航空会社の応札数は通行枠総数を割り込むとは考えにくく、応札費用もそれほど大きくなると考える。一方、オークションにアはオークションを開催する費用や現行の通行枠配分手法をオークションに変更する費用の差額分を負担することになるが、航空路の管理者は政府であることから、オークション導入により改善される社会的余剰が費用の差額分を上回れば、この負担は受け入れられると考える。

次に、今回の設定が現実と比べて妥当かどうかである。今回の設定は、「特定航空路」の運用形態の一般性を失わない程度に簡素化しているが、現状でも航空会社の高度や経路の選択肢が事実上大きく制限されており、これをオークション対象とした場合、対象通行枠以外の高度・航空路の選択は、航空会社に非効率な運航を強いることになり現実的でないので、今

回の設定が妥当であると考え。例えば、Eurocontrol (2013) によると、スケジュールに組み込まれた予期される（空中での）遅延に対する1分当たりの費用は、燃料費 27.5 ユーロ・メンテナンスコスト 14.4 ユーロ・乗員の費用 8.4 ユーロ・機材所有に関する費用 14.1 ユーロとされており、この合計である 64.4 ユーロは多くの航空会社にとって小さい額とは言い切れないだろう。さらに、今回の設定に近い航空路は、モデルとした特定航空路の他にも現実存在している。『AIP JAPAN』、並びに『UNITED KINGDOM AIP』⁹⁴を見ると、東アジアと北米を結ぶ北太平洋経路や北米とヨーロッパを結ぶ北大西洋経路では、複数の航空路が平行に設定され、それぞれの航空路において複数の高度が選択可能になっている。この北大西洋経路の運用形態は、予め航空会社が希望する飛行経路・高度とその代替経路・予測到達時刻等を管制機関に伝え、それらを基に航空路の通行枠が配分されている。仮に北大西洋経路の中で需要が容量を超えると予測される航空路・高度・時間帯をオークション対象とする設定を行った場合、それは今回の設定に沿った形になる。また、今回の考え方は、航空管制官のワークロードを一定とし、容量を固定すれば、セクターにも応用できる。よって、今回の設定は現実と比べても妥当である。

ただし、今回の考察は、ある一つの通行枠配分対象のイメージに対しての定性的な考察結果であり、より現状の航空路の容量や運用形態に近づけたイメージを設定し、定量的な考察を行うことも必要である。現在、空域を垂直方向に分割することでセクター容量総枠を拡大する方法が国土交通省により進められ、これによる混雑の緩和が期待されている。しかし、多くの航空会社が同等の性能を持つ航空機を使用し、同時帯に同方面への路線を設定する戦略に変更がなければ、航空会社にとっての効率的な経路や高度は集中する。よって、無限に思える空域容量も需要側の選択肢から見れば有限なものとなり、結果的に管制当局の裁量や航空交通流制御による配分が必要となる。特に、離陸時に多くの燃料を搭載しなければならない長距離国際線にとっては、この影響は大きいものとなる。これらのことから、長距離国際線に利用される航空路のイメージ等、他の航空路の容量や運用形態に近づけたイメージを設定し、これに対する定量的な考察を行

⁹⁴ 『UNITED KINGDOM AIP』は、United Kingdom Civil Aviation Authority (CAA) の権限で発行されており、NATS AIS ウェブサイトで入手可能である。

うことが今後の課題として残されている。

また、今回の航空路イメージは、単一対象時間帯における同質財・単一需要の形を考えた。これは、近年、多くの分野で利用され発展を続けているオークション理論の中でも、非常にシンプルな理論を用いた考察となっている。これに対し、空港の混雑に対する解決策としては、より発展したオークション理論を用いたスロット配分方法の研究や提案がなされている。例えば、スロットを時間帯によって異なる財（タイムスロット）とし、入札者の複数需要を前提にして、坂井 (2014) が同時せり上げオークションを、松島 (2011) が組み合わせオークションを提案している。よって、需要が容量を上回る時間帯が長時間となる場合、これらオークション制度による通行枠の配分方法の考察も必要となってくる。

以上のことを考えると、通行枠に対するオークション制度や価格設定については、多くの代替的選択が存在すると思われるが、これらについても今後の課題としたい。

＜補論＞

本論文の目的は、混雑航空路への対策としてプライシング政策を導入することにより混雑の緩和と社会的余剰の向上を図ることであり、また、第5章の目的は、そのプライシング政策としてオークションを用いることによる効果を考察し、社会的余剰が向上することを示すことである。このことから、第5章では、初期配分にオークションを用いることにより社会的余剰が向上する等の効果が多くの先行研究から示されているスロットオークションに関する議論を参考に考察を行った。

よって、航空路容量の初期配分方法にオークションを用いた効果を考察するために、同質財・単一需要という条件の下で行う通行枠オークションを、スロットオークションとの比較対象とした。一方、スロットオークションに関しては、同質財・単一需要というシンプルなオークションだけでなく、時間帯により異なる特性を持つスロットを異質財とした上でそれが複数存在すると捉え、入札者が複数財に対して入札する複数需要を前提とする組み合わせオークションのような、より複雑なオークション理論を用いた研究による多くの成果がある。

以上のことを考慮し、同質財・単一需要というシンプルなオークションによって、複雑なオークション理論での成果があるスロットオークションとの比較の分析の問題点が整理できているかどうか、確認する。

ここで、全ての通行枠に対し個々に異なる私的価値を持つ航空会社があるとするとする。この航空会社が全ての通行枠を同質財として扱うオークションに応札する場合の合理的な行動は、全ての通行枠の私的価値の平均値を入札額とすることである。何故ならば、仮に通行枠を落札したとしても、オークション対象である全ての通行枠のうちどの通行枠が配分されるかは、客観性を持ったリアルタイム配分によって決定することになり、その確率は全ての通行枠に対して同率であると想定することが合理的な航空会社の行動となるからである。この場合、この航空会社の入札額は、個々の通行枠に対する私的価値ではなく、オークション対象となっている経路と時間帯（もしくは経路と時間帯・高度帯）を利用する私的価値とみなすことができる。よって、全ての通行枠を同質財として扱うオークション理論を用いても、混雑航空路の利用に対して私的価値の高い航空会社が落札するこ

とになり通行枠を効率的に配分する目的は達成される。

また、単一需要とした場合、航空会社は混雑航空路を利用する自社便の私的価値を算出し、それを入札額とすることになる。仮に、オークション対象となる通行枠の利用を希望する自社便が複数ある場合、各便の私的価値を算出し、それらを入札額として応札することが、この航空会社の合理的な行動となる。なぜならば、混雑航空路を利用する航空会社は、混雑航空路の通行枠を獲得した後に路線を設定するのではなく、既に就航している（あるいは、就航を予定している）路線の運航のために通行枠オークションに応札するため、各便の私的価値は航空会社が落札する通行枠数によって変化するものではない。よって、例え、複数の通行枠の獲得を希望する航空会社が存在したとしても、単一需要のオークション理論によって効率的な配分が可能となる。

しかしながら、スロット配分に関する議論では、シンプルなオークション理論だけでなく、より発展した複雑なオークション理論での検討がなされている。これは、スロットの私的価値が利用できる時間帯によって大きく異なることや、乗り継ぎや機材の運用等各航空会社によってはスロットに代替関係だけでなく補完関係が存在することを想定しているからである。これらの理由から、スロットを利用できる時間帯によって航空会社の私的価値が大きく異なり、スロットを利用できる時間帯を指定したタイムスロットとして扱うことを前提としたオークション理論を用いることにより、より効率的な配分を図ることを目的とした研究がなされてきたのである。

この様に、スロットの場合、オークション理論の発展と共にそれを適用した新たな研究成果が挙げられている。一方、航空路の場合には、シンプルな理論での説明が可能である。なぜなら、スロットの場合、航空会社の複数需要を前提とした理論の整理が求められるが、航空路の場合は便ごとの整理で良く、単一需要の理論で結果が出せる。そして、航空会社にとって、航空機を運航するためにはスロットの獲得は最大の関心事であり、獲得したスロットの利用については獲得後に検討する事が可能なのに対し、航空路の通行枠はその利用が目的で入札を行うのであって、入札時にはどの便が利用するのかも決定している。よって、航空路の通行枠の方がスロットに比べて、適用するオークション理論に対する制約が少なく、シンプルな理論の適用で合理的な航空路の通行枠配分が達成できるのである。

第6章 プライシング政策導入に向けての考察

6.1 はじめに

ここまでの考察において、航空路の管理者である ANSP が混雑航空路に混雑料金を課することや通行枠の配分にオークションを導入することで、混雑の緩和や社会的余剰の向上を達成しうることを示した。しかしながら、双方のプライシングを導入する際の具体的な政策や課題についての考察は、未だ十分ではない。よって、ここからは、政策面からの考察を主眼に置いたプライシング政策導入に向けての考察を行う。

そのために、2 節において、第4章と第5章の総括を行い、再度、混雑料金とオークションを導入する意義とそのための課題を整理し直す。

次に、3 節において、事前配分やリアルタイム配分が行われている現行の混雑航空路の運用に混雑料金とオークションといったプライシング政策を導入する場合、どのようなタイミングでどの様に導入すべきかを考察する。また、その際に懸念される事項を課題として取り上げ、その対応に関する考察も加えて行う。

さらには、4 節において、混雑航空路に対するプライシング政策としての混雑料金とオークションの比較を行う。ここで、混雑料金とオークションのそれぞれの制度の違いや、プライシング政策の採用を決定する ANSP からの視点からの優劣を示唆する。

そして、5 節において、ここまでの考察を踏まえた上で航空路利用へのプライシング政策導入についての考察をまとめる。

6.2 プライシング政策の意義と課題

6.2.1 航空路利用への混雑料金導入の意義と課題

ここでは、航空路利用への混雑料金導入の意義と課題についてまとめる。混雑航空路に混雑料金を用いることについては、道路混雑での議論で発展

した理論を適用し考察を行った。その際、航空路の混雑の発生原因と航空路の運用状態の2点に注目して混雑航空路と迂回経路のモデルを用いて分析を行い、第4章で航空路利用への混雑料金導入についての意義を示したが、道路混雑での理論を適用する場合の課題も見受けられる。よって、まず、航空路利用への混雑料金導入の意義を先に整理し、その後に道路混雑での理論を適用する場合の課題として3つの課題を挙げて説明を行う。

まず、第4章での考察から得た混雑料金導入の意義を先にまとめる。モデルの設定に際し、現行の管制当局が推奨する経路を航空会社が選択するという制約を解除し、航空会社が自ら最適な経路を選択するために混雑航空路に対して迂回経路を設定した。そして、ある寡占状態の航空路を想定し、混雑航空路の他に設定する迂回経路の容量には上限を設定せず、航空路の利用は通過機のみとしてモデルの単純化を図った。また、既存研究での成果よりネットワーク均衡モデルと2段階最適化問題での分析方法を参考に、ANSPが混雑料金である通行料を課し、航空会社がそれを受けて経路を選択することを仮定し、ANSPが全体の効率を最適化するシステム最適を、航空会社が自身の効率を最適にするユーザー最適を目指すための行動を行うとし、その時のANSPと航空会社の行動をバックワード・インダクションにより考察した。その結果、全ての航空会社がボトルネックの容量や混雑航空路への進入順位等の情報を完備していれば、混雑の最後尾の航空機の所要時間や運航費用が迂回経路を利用する場合と同等となるような、ワードロップ均衡になることが分かった。しかしながら、混雑航空路への進入順位が、ボトルネック到達後に判明するリアルタイム配分によることや、飛行計画上の予測到達時刻と運用上の実到達時刻のズレ等から、航空会社（や飛行中のパイロット）に完全な情報が伝わることは困難であると結論付けた。そして、航空会社が経路の選択に際して進入順位の情報を得られないような情報完備でない場合には、各航空会社のユーザー最適化行動の結果としてクールノー・ナッシュ均衡となり、混雑の最後尾の航空機の所要時間（運航費用）が迂回経路を利用する場合より長くなる（高くなる）過度な混雑が発生するとの結果を得た。この結果より、ANSPの取るべき行動として、混雑の度合いに応じて混雑航空路に混雑料金として通行料を課すことで死荷重となる過度な混雑分の損失分を内生化し、混雑航空路を選択する航空会社に認知させることにより、この過度な混雑を解

消するような需要管理を行うことが必要であるとの結論を得た。つまり、現行の管制当局が推奨する経路を航空会社が選択するという制約を解除し、航空会社が自ら最適な経路を選択するために混雑航空路に対して迂回経路を設定した場合には、過度な混雑を回避し、社会的余剰を最適化するには、混雑料金を課すことが必要なのである。

次に、道路混雑での理論を適用する場合の3つの課題を説明する。この3つの課題とは以下のようなものである。第1には、航空路の混雑の発生原因をボトルネックと捉えてボトルネック混雑の理論を適用した場合の課題である。第2には、ANSPから見た混雑料金の料金設定に関する課題である。第3には、航空会社の行動に関するモデル上の課題である。

では、第1の課題から説明する。本論文では、航空路の混雑をピークとオフピークのあるボトルネック混雑と捉え、ボトルネック混雑の理論を適用した。ボトルネック混雑を扱う場合、道路混雑の既存研究から動学モデルでの分析が有効であることが示されている。例えば、道路交通の混雑問題で取り上げられているボトルネック混雑に対する動学モデル（例えば、ADLモデル）では、混雑道路の交通量をボトルネックの容量と一致させるために、当初の出発時刻から見て早発や遅発等利用者の出発時刻をずらすことを想定している。

これを航空路の利用者に適用するならば、航空会社が当初の出発時刻より早発や遅発させることになるが、時刻表等を通じて乗客に周知している出発時刻を前倒しして航空機を早発させることは現実的ではない。よって、利用者が当初の出発時刻より早発や遅発させることにより混雑道路の交通量をボトルネックの容量と一致させるという方法を、そのまま航空路のボトルネック混雑に適用することは妥当ではなく、道路混雑における動学モデルを航空路の混雑に適用するためには、早発による交通量の調整をどう扱うかが課題となる。この点を解決するために、第4章のモデルでは、全ての航空機が航空路の混雑が発生するボトルネックに同時に到着すると仮定し、ボトルネックの容量に応じて混雑が解消していくことを想定した。これにより、利用者自身が早発や遅発を選択することによって航空路の交通量をボトルネックの容量に一致させるのではなく、ANSPが進捗順位を決定することによって航空路の交通量をボトルネックの容量に一致させることになる。また、この方法は、航空路利用の一般性を崩すことなく実現

可能性を持たせることができると言えよう。

次に、第2の課題について説明する。ANSPの目的は混雑の緩和であり、社会的余剰の改善である。言い換えると、航空会社の経路選択行動に対して通行料を通じて混雑航空路の交通量をANSPの望む水準に抑えることが、この混雑料金導入の目的となる。この場合、ANSPが自らの持つ航空路の容量や混雑航空路と迂回経路との所要時間の差等の情報と、航空会社が持つ運航費用の情報を手に入れることができれば、理論上は最適な交通量配分が可能である。しかしながら、ANSPが航空会社の運航費用の情報を正確に手に入れることは現実的ではなく、ここにANSPから見た料金設定の課題がある。

この点を解決するには、政策上、おおよその金額で代用することになる。例えば、需要予測の中で一番多い航空機の機材を取り出し、その航空機のおおよその運航性能のデータから燃料費用と迂回で生じる遅延時間から迂回費用を算出するのである。この場合、航空会社が持つ実際の迂回費用よりは低く見積もられる可能性があり、ANSPが期待する交通量の水準を超えることが予測される。仮に、混雑料金を第1段階の配分で行った後で、航空路の容量より需要予測が超過している場合には、第2段階の配分である事前配分を行えばよい。このような方法により、その超過分をそぎ落とすことが可能となり、混雑の緩和を達成し得るであろう。

最後に、第3の課題について説明する。第4章のモデルの分析から混雑料金導入の意義を示したが、このモデル上の課題によりANSPが予測する航空会社の行動に不確実性が存在するとの危惧がある。その課題とは、航空会社の経路選択行動についてである。第4章のモデル上では、ボトルネックを通過する順位がリアルタイム配分によって決定されるために、全ての航空機に対して同じ確率で順位が決定されると仮定した。よって、混雑航空路にかかる運航費用は、混雑航空路を選択するすべての航空機の運航費用の平均値を期待値として算出することになり、それにANSPが設定した通行料金を加味した合計額を基に、航空会社は迂回経路と比較を行うことになる。仮に、混雑航空路を選択した全ての航空機に対して同額の通行料を課す場合、ボトルネックを先頭で通過した航空機と最後尾で通過した航空機とでは、ボトルネック混雑に起因する追加的な運航費用に差が出ることになる。今回のモデルでは、ANSPが通行料の金額を航空会社に提示

した後に航空会社はその金額に反応して経路選択を行うことにしており、動学モデルでの考察のような、先頭の航空機には高い通行料を課し、最後尾には低い通行料金を課す（もしくは、課さない）ことができない。つまり、航空会社から見れば、混雑航空路の最後尾と迂回経路との所要時間が同じなら、混雑航空路の方が通行料を課せられる分だけ費用が高くなることになる。よって、航空会社の進入順位を起因としたリスクへの考え次第では、ANSP が想定する航空会社の合理的な行動通りとはならないかも知れないという不確実性が、モデル上の課題として存在することになる。もし、モデルで用いた仮定の様に、航空会社が混雑航空路にかかる運航費用を混雑航空路を選択するすべての航空機の運航費用の平均値を期待値として経路選択の行動をしなければ、ANSP の思惑通りの需要管理が達成できないことになる。

この点を解決するために、混雑料金を変動させるという政策上の方法が考えられる。この課題の問題点は、ANSP の思惑通りに航空会社が行動しなければ、混雑航空路の交通量も ANSP の思惑通りにならないということに帰着する。よって、混雑料金を導入した結果、混雑の緩和の目標として設定した交通量の水準を超過したり著しく下回るといった、ANSP が許容できる範囲からの逸脱があった場合には、混雑料金を変更するという政策上の対策によって、航空会社の行動に変化を与え、交通量を ANSP が許容できる水準に導くことができるであろう。

以上、混雑料金導入の意義と併せて、3つの課題について整理を行った。これらのことを考えると、混雑航空路に混雑料金を用いて需要管理を行う場合の最大の課題は、理論上では導き出される混雑料金を設定することが現実的には困難であることであり、このことは混雑航空路の交通量を ANSP が望む水準に管理できない可能性が残されることになる。よって、このことを解決するには、政策面において何らかの対策をとることが必要となることを踏まえた上で、航空路利用への混雑料金導入の議論を行わなければならない。

6.2.2 航空路利用へのオークション導入の意義と課題

ここでは、航空路利用へのオークション導入の意義と課題についてまと

める。第5章では、混雑航空路の容量管理にオークションを用いることについて考察した。そのために、まず、同じ航空交通分野での既存研究の成果が数多くあるスロット配分にオークションを用いることについての議論の中で示された効果や課題について考察を行った。その結果、スロットオークションの議論との比較より航空路利用へのオークション導入の意義を示すことができたが、いくつかの課題も残された。よって、ここでも、航空路利用へのオークション導入の意義を先に整理し、その後通行枠オークションに既存研究のオークション理論を適用する場合の課題と政策面での課題として3つの課題を挙げて説明を行う。

まず、第5章での考察から分かったオークション導入の意義を先にまとめる。財の配分にオークションを用いる意義としては、限りある財をより高い私的価値を持つ入札者に配分することにより最適配分と社会的余剰の最大化を達成することにある。空港施設や環境や安全面からの制約により、スロットもその配分できる数に限りがあることから、その配分方法にオークションを用いることについての既存研究の成果が数多く報告されている。第5章では、スロット配分にオークションを用いる議論上の論点を整理し、その中で「レントの是正と利用者利便性の向上」、「客観性・透明性の確保」、「配分の合理性」の3点に絞って航空路の通行枠配分にオークションを用いることに関する考察を行った。考察に当たっては、航空路の容量の概念をスロットのような通行枠の集まりと捉えて、需要が集中する一定の時間帯と高度帯に存在するこの通行枠を配分する方法にオークションを用いることを考察した。なお、この考察の際にはオークション対象の通行枠をすべて同質財とし、入札者の航空会社は便ごとに1枠の入札を行う単一需要とするシンプルなオークション理論を適用した。その結果、「レントの是正と利用者利便性の向上」と「配分の合理性」については、スロットオークションと同様にオークション導入の効果が期待でき、「客観性・透明性の確保」については、客観性については現状でもある程度確保できていることと透明性の確保については現行のANSPによって配分されている過程がオークションによって公開されることでの改善がみられるとの結論に達した。つまり、通行枠オークションの導入は、そのオークションニアが配分する通行枠の総数を設定できるという数量管理の性格から混雑の緩和に有効な手段であり、また、合理的配分やレントの是正等から社会的余剰の改善と

いう目的に照らし合わせても有意義な配分方法であるということを示したのである。

次に、通行枠オークションに既存研究のオークション理論を適用する場合の課題と政策面での課題である3つの課題を説明する。この3つの課題とは以下のようなものである。第1には、シンプルなオークション理論を通行枠オークションに適用した場合の課題である。第2には、政策として導入する場合の課題である。第3には、オークションの実現可能性についての課題である。

では、第1の課題から説明を行う。第5章では、シンプルなオークション理論を適用することにより制度設計を単純化し、オークション導入に係る課題の一つであるANSPと航空会社の負担の軽減を図った。一方、スロットオークションの場合、空港を利用できる時間帯によってスロットの私的価値が異なるとの仮定から、全てのスロットを同質財として扱うのではなく、利用できる時間帯が指定されたタイムスロットをそれぞれ異質財として扱う研究がなされてきた。その研究ではより発展したオークション理論を応用し、より効率的なタイムスロットの配分を達成するための制度設計に関する研究成果が報告されているが、それらはシンプルなオークション理論を適用したものより大幅にオークションを開催する費用や時間を必要とするものになっている。タイムスロットの配分に関する研究成果をそのまま通行枠配分に適用することは、タイムスロットと通行枠との性格の違うこともあり、十分慎重にすべきと考える。ただ、通行枠オークションの対象時間帯が長期にわたる場合には、そのすべての通行枠を同質財として扱うことに問題が生じる可能性は否定できず、対象となる通行枠総数の設定基準も難しくなってくる。対象時間帯が短期であれば、運用上発生する到達時刻のズレの幅も小さく、リアルタイム配分で対応可能な交通量に収まる可能性が高い。反対に、対象時間帯が延びれば延びるほどズレ幅は大きくなっていく可能性が高く、この通行枠オークションの対象時間帯と適用するオークション理論との課題は、航空路に混雑が発生する時間帯の幅と、どの時間帯をオークション対象時間帯に設定するかという課題でもある。

この点を解決するためには、混雑の緩和を第一に考え、オークション対象時間帯を長期間設定するための発展したオークション理論の適用を探る

方法と、ANSP と航空会社の負担軽減を第一と考えてシンプルなオークション理論を適用することを維持する方法とに分けられる。まず、オークション対象時間帯を長期間設定するための発展したオークション理論の適用を探る方法としては、混雑が発生する期間をすべてオークション対象時間帯として設定し、その期間をいくつかの期間に細分化することが考えられる。この細分化には、同質財のオークション理論が適用できる様に考えられた時間ごとに区切ることとし、この区切られた期間以外は異質財として扱うことになる。よって、この方法をとれば、区切られた期間の数だけ異なった財があるオークション理論を適用することが求められる。この場合、ある期間に属する通行枠はそれ以外の期間に属する通行枠と代替性や補完性を持つことも考えられるので、同時せり上げオークションのような発展したオークション理論の適用を考察する必要がある。一方、シンプルなオークション理論を適用することを維持する方法としては、同質財・単一需要の前提を堅持するために、同質財をみなせる時間帯のみをオークション対象時間帯とし、それ以外の時間帯はオークションによる通行枠配分以外の方法（例えば、現行の事前配分）に任せるといったことが考えられる。この方法をとれば、通行枠を同質財として扱うことが妥当な時間幅をまず決定し、需要のピーク時に合わせてその時間幅をオークション対象時間帯として設定することになる。よって、ピーク時の通行枠は利用者の私的価値によって決定されることになり、社会的余剰の改善はある程度見込めることになる。また、同質財として扱える時間幅のみをオークション対象とすることで、予測到着時刻と実到着時刻とのズレを現行のリアルタイム配分で対応可能とすることもできよう。

次に、第2の課題について説明する。政策として導入する場合の課題については、第5章でも取り上げた。まず、スロット配分にオークションを導入する場合に課題としては、スロットと通行枠との運用の違いからスロットオークション導入での課題が通行枠オークション導入の場合には当てはまらないものもあるが、入札価格の相場観の形成や二次売買の取り扱いについては考慮が必要な課題と考えた。

この点を解決するには、入札価格の相場観については、オークション対象となる通行枠を無償で通過した場合と迂回を選択した場合との運航費用の差が一つの指標とする方法が考えられ、この方法によりスロットオーク

ションの場合と比べて相場観の形成の必要性がそれほど重要でなくなると考えた。また、二次売買についても、その必要性を抑えることで二次売買を禁止とする方法が考えられる。例えば、落札者の利用権を1回限り（1日限り）とし、落札後であっても使用しない場合には返却可能な制度とすることにより、二次売買の必要性を低下させることができるであろう。この二次売買を禁止し落札者の利用権を1回限り（1日限り）とする方法は、必要な利用者が必要な時に入手することになり、そのときの私的価値により入札額を決定するので結果的に落札額が高騰することを抑えることにもなり、二次売買によって懸念される独占や寡占も防止にもなり得る。

最後に、第3の課題について説明する。オークションの実現可能性についての課題とは、第4章で示した通行枠オークションを実際に政策として導入した場合に、この通行枠オークションが成り立つかという問題である。例えば、ある混雑航空路の需要が集中する時間帯（と高度帯）を対象として通行枠オークションを実施したとする。このオークションが成立するには配分予定の通行枠の総数よりも多い応札数があってはじめてオークションによる配分が成立する。よって、相当数の応札が見込める場合でなければ実現可能性が乏しくなる。同時に、オークションを開催する費用の負担についても検討しておかなければならない。

この点を解決するには、オークション対象とする時間帯（と高度帯）を、航空路の需要が容量を確実に上回る時間帯（と高度帯）に設定することである。これにより、相当数の応札が見込め、オークションが成立する可能性が高くなる。なぜならば、前述の様に航空会社に相場観があることから、この相場観に基づいた金額を入札額として応札することは入札のための費用を除けば航空会社にとって不利益には当たらない。よって、航空会社の応札数がオークション対象の通行枠総数を割り込むことはないと考えられる。

以上、オークションの導入意義と併せて、3つの課題について整理を行った。これらのことを考えると、混雑航空路にオークションを用いて通行枠の配分を行う最大の課題は、対象とする時間帯（と高度帯）の設定方法であり、特にその期間設定には適用するオークション理論も関係することから、より航空路の運用形態と需要を分析する必要があると言えよう。

6.3 プライシング政策導入のタイミングに関する考察

6.3.1 現行制度と導入するプライシング政策との関係

混雑航空路の通行枠配分に混雑料金やオークションといったプライシング政策を導入することにより、混雑の緩和と共に社会的余剰の改善を行える可能性があることは、第4章や第5章で示したとおりである。しかし、混雑航空路にプライシング政策を導入しさえすれば、混雑の緩和が達成される訳ではない。例えば、実際に混雑料金を導入した場合、ANSPが設定する通行料を受けて利用者である航空会社が経路を選択することから、航空会社の選択次第では混雑航空路の需要量がANSPの期待する需要量を超過することも十分考えられる。また、オークションを導入した場合でも、飛行計画から算出した混雑航空路への予測到達時刻と運航上発生する実到達時刻とのズレは避けられない。これらの課題は、例えプライシング政策を導入したとしても、現行の通行枠配分方法である事前配分とリアルタイム配分による2段階の通行枠の配分方法が、通行枠の配分を行うANSPだけでなく航空会社にも有効な手段として活用できることを示唆している。

以上のことから、事前配分とリアルタイム配分による2段階の通行枠の配分方法を生かしつつ、プライシング政策による通行枠の配分方法を導入する場合を考察する。ANSPが需要量を予測する基となる航空会社が提出する飛行計画は、離陸時刻の2時間前までに提出する様に求められていることから、事前配分は混雑が予測される時間帯の2時間前以降に開始されることになる。また、リアルタイム配分は、事前配分が行われた時間帯中でも、通行枠の重複が発生した航空機相互間に対して行われることになる。それに対し、プライシング政策による配分は、事前配分が開始される時間より以前に行われるのが妥当と考える。ANSPは過去のデータや航空会社の定期便情報等から航空路の容量を超過する時間帯等を予測し、その混雑航空路・時間帯をプライシング政策による通行枠の配分対象としてすることが可能である。仮に、混雑料金やオークション等を通じて配分する場合、配分対象となる通行枠を利用しようとする航空機を運航する全ての航空会社に事前にそのことを周知することになり、飛行計画に要する時間を考慮するとその周知時期は、プライシング政策による通行枠配分対象となる時

間帯の前日か、遅くとも長距離国際線の飛行計画を作成する時期以前が妥当であると考えます。

以上のことから考えると、プライシング政策による通行枠の配分を第1段階の配分とし、現行行われている事前配分やリアルタイム配分を第2・第3段階の配分として整理することが望ましい。よって、これ以降は第1段階の配分を混雑料金もしくはオークションによるものとし、それぞれの場合についてこの3段階による配分を考察する。

6.3.2 導入する混雑料金を第1段階の配分とした場合

最初に、混雑料金による通行枠の配分を第1段階の配分とし、事前配分を第2段階、リアルタイム配分を第3段階の配分とした場合を考える。混雑料金による通行枠の配分方法を導入した場合、ANSPが設定した混雑料金を受けて航空会社自らが需要調整を行うことになる。よって、この場合の課題として最終的な混雑航空路の交通量がANSPの許容できるとした交通量を超える可能性がある。

仮に混雑料金を導入後にANSPが許容できるとした交通量を超えるような需要が予測された場合、ANSPは第2段階の配分として事前配分を実施し、我が国の空港からの出発機に対しEDCTを付加することになる。これを受けて航空会社は混雑料金とEDCTから算出される自社便の遅延とを考慮して、再度、混雑航空路を利用するかどうかを選択することになる。

その後、最終的に混雑料金を支払ってでも混雑航空路を利用することを選択した航空機相互間に通行枠の配分が必要となった場合には、第3段階の配分としてリアルタイム配分が実施され、最終的に全ての航空機への通行枠の配分が完了することになる。混雑料金を導入することにより混雑航空路の需要が、ANSPが許容できるとした交通量を超えないような予測となった場合、ANSPは第2段階の配分である事前配分を実施せず、我が国の空港からの出発機もEDCTが付加されることなく離陸することになる。ただし、希望する高度や時間帯が重複した場合には、第3段階のリアルタイム配分が行われることには変わりはない。

以上をまとめると、表6-1の通りとなる。

表6-1 導入する混雑料金を第1段階の配分とした場合

第1段階 (混雑料金)	ANSPは、混雑料金を設定し公示 航空会社は、混雑料金に基づき飛行経路を選択し、飛行計画を提出
第2段階 (事前配分)	ANSPは、提出された飛行計画に基づき需要を予測 ANSPは、許容交通量を超えると予測した場合に事前配分を実施
第3段階 (リアルタイム配分)	航空会社は、事前配分の結果(EDCT)に基づき、飛行経路を再選択 航空管制官は、実到達時刻を基にリアルタイム配分を実施

6.3.3 混雑料金を第1段階の配分とした場合の課題

ANSP が混雑料金を通じて混雑航空路の需要管理を行う場合、大きく3の課題が考えられる。まず、第1に、混雑料金の価格設定に関する課題である。次に、第2には、料金回収に関する課題である。そして、第3には、制度の抜け道に関する課題である。

まず、第1の課題について説明する。混雑料金を算出する方法として、利用者の需要関数を算出し、算出された需要との均衡点である混雑料金を私的限界費用と社会的限界費用の差から導き出すという、道路の混雑問題等でしばしば議論される一般的な方法による混雑料金の価格設定方法が考えられる。ANSP が望む混雑航空路における交通量を数値化することは、現状の混雑航空路の運用形態と管制処理能力等の技術的制限から算出することができるので、そう難しいことではない。しかし、混雑航空路に混雑料金を課す場合において、対象となる時間帯の航空機各便の私的限界費用と社会的限界費用を算出しそこから混雑料金を算出することは、航空会社の運航費用や乗客の時間価値の総和等を基に算出しなければならないことから、そのための費用を考えただけでも現実的ではない。

よって、この問題を解決するには、私的限界費用と社会的限界費用の差から混雑料金を導き出すのではなく、ANSP が混雑航空路と迂回との所要時間の差から迂回を選択した場合に係る追加的運航費用を推測し、混雑料金として代用することが現実的な方法となる。この方法を利用することにより、ある程度の近似値を比較的容易に算出することが可能になる。ただし、この場合には ANSP が望むような交通量になる保証はない。よって、迂回を選択した場合に係る追加的運航費用を混雑料金として代用するとし

ても、その価格を固定するか結果次第で可変させるのかといった混雑料金の見直しについてのあらたな課題が発生する。

この課題については、混雑料金を公示する前と後で異なった対策が考えられる。公示前の場合、これまでの価格と需要のデータを基に価格を調整し ANSP が望むような需要量との均衡点に近づけることは、長期的視点においては十分に検討されるべき手段である。公示後の場合、航空会社が公示された価格を基に混雑航空路を利用するかどうかの選択を既に決定していることから、航空会社が受け入れられるよう価格の再設定の方法を予め決定しておかなければならない。公示後に混雑料金を変更するとすれば、その要因や価格変動の幅等を予め航空会社に示し、価格変更後に再度航空会社に選択する機会が与えられるような配慮は最低限必要となるであろう。公示の前後にかかわらず、混雑料金を可変にした場合には需要を管理する ANSP の視点からはある程度の効果が期待できると考えられる。

一方、混雑料金を固定にするか可変にするかについての議論は、航空会社からの視点においても議論をされなければならない。混雑料金を第 1 段階の通行枠配分方法として導入した場合、航空会社は公示された混雑料金と迂回する場合の追加的費用を比較して飛行計画を提出することになる。よって、公示後に価格が変更されるような場合には飛行計画を再度やり直すことになり、航空会社にとってはこの作業にかかる費用が発生することになる。再提出された飛行計画の結果次第が再度 ANSP の望むような需要量とならず、もう一度変更が行われるような事態になるならば、自らの支払意思額を超えるような混雑料金が設定されるまでは飛行計画を取り下げず、支払意思額を超えた場合位に自動的に飛行計画を変更するような価格変動によって発生する航空会社が負担する費用を少しでも抑えられる制度設計が望ましいと考えるであろう。しかし、これは航空会社の支払意思額を入札額とするオークションによる通行枠の配分を行えば済む話であり、混雑料金による配分を行う方が航空会社にとって変更されることによる作業費用が増えることになる。

混雑料金が公示後に変更されない制度の場合、ANSP の望むような需要量を超えた際には第 2 段階の事前配分が行われることになり、これは混雑料金を支払う意思のある航空会社に対して EDCT による地上待機を課すことである。よって、この EDCT が付加された後に再度航空会社はその EDCT

から算出される遅延情報と迂回を選択した場合に係る追加的運航費用を勘案して飛行経路の再選択を行うことができるような制度であれば、航空会社の選択の余地は確保される。しかし、運航性能上の問題で混雑料金を払ってでも特定高度帯を利用したいと考える航空会社にとっては、混雑料金を課金することにより同じ高度帯の需要が減少することは望ましい効果を得られるが、特定の高度にはこだわらないので少しでも早く出発したいと考える航空会社にとっては、なるべく EDCT による出発時の遅延は避けるべきものとなる。

次に第 2 の課題について説明する。混雑料金の回収については、航空会社が提出する飛行計画に基づいて徴収する方法と、実績に基づいて徴収する方法の 2 種類が想定できる。飛行計画に基づいて徴収する方法では、飛行計画上では利用する計画のなかった航空機が実際には利用する場合が考えられる。また、飛行計画上では利用する計画をしていたが、第 2・第 3 段階において通行枠が配分されず実際には利用しなかった場合や航空会社自ら迂回を選択した場合にも混雑料金を徴収するとなる。このようなことを考えると、実際に利用した航空機から混雑料金を徴収するという制度の導入の方が、航空会社の賛同を得るという点からも望ましい。しかし、混雑航空路を利用したかどうかの確認作業は、混雑料金対象に通行枠を 4 章のモデルの様に全ての高度を含んだ航空路とするか、混雑航空路の中でもある特定の混雑高度帯のみとするのかによって、経路での確認のみか、あるいは高度との両面での確認が必要になるかが変わってくる。

最後に、第 3 の課題について説明する。混雑料金による通行枠の配分対象が混雑航空路の全高度帯である場合には、特定の高度帯の利用を希望する航空会社と出発遅延を避けたい航空会社の両方が同じ様に EDCT による出発待機を命じられることになる。しかし、混雑料金での配分対象の通行枠が混雑航空路の中でも特定の高度帯のみで他の高度帯に対しては混雑料金も事前配分も行われたいとする場合、混雑料金を支払う意思はあるが EDCT による遅延を受け入れたくないとする航空会社は、対象外の高度帯を利用するような飛行計画を提出することにより第 2 段階の事前配分を回避し、離陸後に第 3 段階のリアルタイム配分の際に対象高度帯の利用を申請するという計画を立てる可能性がある。このような「抜け道」は、混雑料金の制度設計や利用する航空会社の特徴によっていくつか存在すること

が考えられる。

ここまでいくつかの課題を挙げ考察を行なったが、混雑料金を第1段階の通行枠配分として導入した場合には混雑料金による配分の対象となる通行枠が混雑航空路の全高度帯とするか特定高度帯に限るのかといった対象の設定方法や、混雑料金の徴収の方法、さらには運用面での「抜け道」の存在等需要管理を行う ANSP が解決しなければならない課題が多いことが分かった。また、混雑航空路と迂回経路との所要時間の差から迂回経路を利用した場合に係る追加的運航費用を混雑料金として代用することが現実的な手段となるが、需要管理の精度を向上させるためにはその価格を固定するのではなく需要予測（又は実績）を基に調整することが望ましく、混雑料金を固定にするかそれとも可変にするのか、またその価格の有効期間や見直し時期等価格の設定方法についても検討すべき課題が残されていることも分かった。

6.3.4 導入するオークションを第1段階の配分とした場合

次に、オークションによる通行枠の配分を第1段階の配分とし、事前配分によるものを第2段階、リアルタイム配分によるものを第3段階の配分とした場合を考える。オークションによる通行枠の配分方法を導入した場合、配分する通行枠はオークション様式である ANSP により設定される。よって、ANSP が許容する交通量を超える通行枠の総数を超えてオークションにかけるというような制度設計をしない限りは、第2段階の事前配分は実施されない。つまり、現行において事前配分で行なっている通行枠の配分をオークションによる配分に置き換えることになる。よって、オークションを通じて通行枠を落札した航空会社は、その通行枠内に自社便が混雑航空路を通過できるよう運航することになる。

ただし、このような運航を行うには航空会社だけでなく、管制当局の裁量も大きな要因となる。例えば、当該機の離陸許可を発出する出発空港の航空管制官は、地上交通や到着機との関係でその離陸許可を発出するため、実際の離陸時刻が航空会社の予測した離陸時刻とずれる可能性がある。また、混雑航空路までの飛行中に管制上の理由で高度変更やレーダー誘導などによる若干の迂回を指示されることも予想され、それによる航空会社の

表6-2 導入するオークションを第1段階の配分とした場合

第1段階 (オークション)	ANSPは、通行枠の総数を設定しオークションにより配分 航空会社は、自社便の運航費用などを勘案し応札
第2段階 (事前配分)	ANSPが許容範囲内の通行枠総数を設定するならば、 事前配分の実施を回避することができる。
第3段階 (リアルタイム配分)	航空会社は、落札した通行枠に応じて自社便を運航 航空管制官は、実到達時刻を基にリアルタイム配分を実施

予測した通行枠への到達予定時刻と実到達時刻とがずれる可能性もある。よって、オークションによる通行枠の配分を第1段階の配分として実施した場合においても、この様なずれに対応するために第3段階のリアルタイム配分は必要となる。

以上をまとめると、表6-2の通りになる。

6.3.5 オークションを第1段階の配分とした場合の課題

ANSPがオークションを用いて混雑航空路の需要管理を行う場合、混雑航空路の通行を許可する通行枠の総枠はオークションによって配分する通行枠の総枠と等しくすることができ、この点においてはANSPが望む需要管理が行える効果は十分期待できる。よって、混雑料金を導入する場合と比較すると、ANSPにとってはオークションを導入する方がより混雑問題への対策としては望ましい様に思われる。しかしながら、もう一方の重要なプレイヤーである航空会社の見地から見るとオークションを導入する場合には、大きく2つの課題が浮かび上がる。まず、第1に、落札した通行枠を確実に利用できるかどうかという運用上の課題である。第2には、落札額の回収についての課題である。これらの課題を説明するために、落札後の流れを想定しながら発生する可能性のある問題を洗い出し、順に説明を行う。

初めに、第1の落札した通行枠を確実に利用できるかどうかという運用上の課題についての説明を行う。第5章において、配分される通行枠を同質財・単一需要とすることでオークションの制度設計の簡素化を図り、オークションの費用を軽減することを提案した。この場合、通行枠を落札し

た航空会社は混雑航空路の通行枠を手に入れることができるが、それを利用する場合の流れとしては次のようなことが想定される。

まず、落札した通行枠は、第5章のイメージに従うと、オークション対象である特定の時間帯（30分）内の特定の高度帯（3高度帯）に設定された複数の通行枠うちの一つの通行枠であり、その一つの通行枠はオークション対象である他の通行枠と同質財として処理されている。よって、このオークションで落札された通行枠を持つ航空会社は、この落札した通行枠を利用するために出発の準備を整えてオークション対象となった特定の時間帯内に到達できるよう自社の航空機を運航することになる。オークションで配分された通行枠は同質財として複数あるので、落札した航空会社が利用できる通行枠も複数存在する。よって、複数の空港から同時にこの通行枠を利用しようとする複数の航空機が、ほぼ同時に特定の時間内に到達できる様にそれぞれ運航されることになる。

しかし、各航空会社が落札した通行枠の時間帯に混雑航空路を利用できるような運航上の努力を行なったとしても、航空会社の起因する遅延だけでなく出発空港の地上走行や途中の航空路の事情により多少なりとも時間的なズレが生じることが想定される⁹⁵。そのズレの影響で特定の時間帯内の一部の時間帯に航空機が集中した場合には配分可能な通行枠が不足することも考えられ、第3段階のリアルタイム配分の結果次第では、オークションの対象であった特定の高度帯を配分されるために空中で待機するようなことが発生する恐れがある。

ここに第1の課題である、落札した通行枠を確実に利用できるかどうかという運用上の課題が発生する。運航性能上、落札した高度帯を利用しなければ予定の運航を行えない航空機の場合は空中待機等の遅延を受け入れてでも希望する高度を配分されるまで待機することを選択せざるを得ないが、落札した高度帯以外の高度を受け入れてでも遅延を回避したい航空機の場合は落札した高度帯以外の非効率な高度の配分を受け入れて運航を続けることを選択するだろう。この様な場合、航空会社からの見地から見ると当日の運航状況という需要の集中度によっては第3段階のリアルタイム配分の結果によっては落札したはずの通行枠を利用することが自社の運航

⁹⁵ 原 (2015) では、このことを「オークション入札時点と利用権利用時点の時間差が生み出す不確実性」としているが、本論文では「ズレ」と表現する。

効率を低下させることに繋がることも想定されるのである。

この課題を解決するには、混雑の集中度に関わらずオークションで落札した通行枠を利用できるような制度設計を行うことが考えられる。つまり、オークション対象の時間帯・高度帯での通行枠の総数を上限まで設定するのではなく、第3段階のリアルタイム配分時に全ての航空機に配分可能となるよう余裕を持たせた配分枠数に留める制度設定を行うことが考えられる。この様にオークションによって配分する容量に余裕を持たすことができれば、落札した航空会社にとっては少なくともオークションを通して配分される通行枠を利用が確約されることになり、この課題自体は解決されるだろう。しかし、この様な落札した航空会社の利用する権利を確保する制度設計を行うと、今度は余裕を持たせた影響で使われない通行枠の発生という配分効率の低下を招くというANSPにとっての新たな課題が発生することになる。このことは、理論面ではオークションを導入すれば需要調整が容易になるはずであったANSPにとって、採用する制度によっては政策面で需要調整に悩まされる可能性を示しており、この課題を解決するための方法を別途検討する必要性が発生する。

次に、第2の落札額の回収についての課題について説明する。落札者からの料金徴収の方法についての課題とは、落札者全てに支払い義務を課すのか、それとも実際に利用した場合に支払う義務を課すのかの2通りの方法によって、航空会社の負うリスクが異なることである。全落札者に支払い義務を課す場合、天候や航空管制上の運用に起因する遅延等、航空会社に起因しない未使用時にも支払い義務が発生することになる。よって、混雑料金の場合と同様、実際に利用した場合にのみ徴収する制度が航空会社の賛同を得やすいと思われる。

しかしながら、落札したのも関わらず、航空会社に起因する理由でそれを利用できない場合には自己申告制度や、未申告の場合には何らかのペナルティーを科す仕組みも考慮すべきと考える。また、空き通行枠が発生した場合には、落札者以外にもその通行枠を解放することも、航空路の有効利用から肯定される方法となる。この場合の料金徴収方法についてもその料金設定方法と併せて議論を行う必要がある。

6.4 混雑料金制度とオークション制度の比較

前節では、混雑料金とオークションを第1段階で導入することを想定し、現行行われている事前配分やリアルタイム配分と組み合わせた政策を取り入れることについての課題を挙げた。その結果、主な課題として混雑料金を導入する際には価格設定と料金回収についての、オークションを導入する際には運航上発生する予測到達時刻と実到達時刻とのズレとオークション対象とする通行枠の総数の設定についての何らかの政策的対策が必要との考えに至った。よって、ここからは、これら混雑航空路にプライシング政策を用いる際の課題を、混雑料金とオークションの制度面からの比較や航空路の容量と航空会社の運航費用に関する情報に注目することにより導き出すことにする。

まず、混雑料金制度では、管理者が混雑度合いに応じて価格を設定し、その価格をシグナルとして利用者が利用の是非を選択することにより最終的な需要量が決定される。一方のオークション制度では、管理者が提供する財の数を決定し、応札者が自身の私的価値に応じて入札額を決定することで財を配分する順位が決定される。このことを航空路の場合にあてはめ、通行料の価格を決定する主体と交通量（需要量）を決定する主体についてまとめると表6-3の様に表される。

表6-3 混雑料金とオークションの比較

	価格決定主体	交通量決定主体
混雑料金	ANSP	航空会社
オークション	航空会社	ANSP

次に、プライシング政策を導入する際に重要な、航空路の容量と航空会社の運航費用に関する情報について注目する。まず、ANSPは航空路の容量を決定する立場にあり、同時に航空路の交通量の完全情報を手に入れられる立場にある。その反面、航空路利用に対する需要関数を完全に把握することは、航空会社に対して強制的にそれら情報を提出させるような規定を設けない限り難しい。一方の航空会社は、自らの運航便に限れば交通量

を把握する立場にあるが、他の航空会社の交通量までは把握しきれない立場にない。しかし、自社便の運航費用に関する情報は十分把握しているはずである。つまり、価格決定に関する情報に関しては航空会社に、交通量を決定する情報に関しては ANSP が、それぞれ優位性を持つことになる。このことを表 6-3 に照らし合わせてみると、航空会社の ANSP の情報量と混雑料金とオークションの制度の性格から、オークションの方が航空路利用にプライシング政策を導入する際の障壁が低くなることが導き出される。

6.5 まとめ

本章では、2 節において航空路利用へ混雑料金とオークションを導入する意義とその課題を整理した。混雑料金であれオークションであれ、航空路の利用にプライシング政策を導入することにより混雑の緩和と社会的余剰向上の可能性を示したが、混雑料金にもオークションにもそれぞれの理論の違いから制度として導入する際には別々の課題があることを整理した。

また、3 節では、プライシング政策を導入するタイミングについて考察した。現行の配分は、事前配分の後にリアルタイム配分が行われていることを踏まえ、それらが行われる時期等も考慮に入れてプライシング制度は現行の手段より前段階で行うことが妥当であるとの結論に達した。つまり、混雑料金を導入する際には混雑料金を第 1 段階の配分として導入し、現行の事前配分を第 2 段階、リアルタイム配分を第 3 段階の配分とすることを、オークションを導入する際には、オークションを第 1 段階の配分として導入し、第 2 段階の事前配分はオークションの制度設計上は行う必要が無く、現行の手段である第 3 段階のリアルタイム配分は必要であることを示した。また、その場合には混雑料金には主に料金設定に関する課題があり、オークションには実現可能性を高めるために適用するシンプルなオークション理論と実運用で懸念される諸問題との関係性についての課題があるとの結論を示した。

最後に、4 節では混雑料金とオークションとの比較から、航空路利用にプライシング政策を導入する場合、オークションを導入する際の方の障壁が低くなることを導き出した。

以上のことをまとめると、混雑の緩和を目的として航空路の容量を超過することなく通行枠を配分するために導入するプライシング政策としては、オークションの方が混雑料金よりも相対的に適していると言えよう。これは、オークションによる通行枠の配分のような航空路の利用者（機数）を航空路の管理者によって厳格に規定する数量的管理と、混雑料金をシグナルとして利用者に選択を任せるような非数量的管理との差が一因ということである。

ただ、航空路の容量は様々な技術的制約から算出される容量であり、それはあくまで標準的な容量であることも政策上は考慮する必要がある。つまり、理論的に定められた容量を超える需要（交通量）が発生したとしても、容量を決定するために想定された航空管制官のワークロードを下回る負担しかかからないような個々の航空機のイベントが発生する場合には、容量として想定された交通量を超える航空機を取り扱うことが可能となる場合が現実には起こりうる。つまり、需給状況に応じて容量に柔軟性を持たせる非数量的管理手法としての混雑料金も、オークションとの比較において劣っているとは言い切れないことになる。しかし、このことはあくまでも結果論であって、通行枠の初期配分からこのことを織り込んで標準容量とは別の容量を算出することはあまりにも条件が多く、また、理論的に定められた標準的な容量を需要予測が超過した場合には、安全基準や管制処理容量からの制約を考えても第2段階の配分である事前配分を実施することが政策的には妥当であろう。また、航空交通の安全を担保するという管制当局の最も重要な任務を考えるならば、標準容量を超過して柔軟な容量の運用を求めるのではなく、むしろ、悪天候等航空管制官のワークロードを増大させる要因を加味し、容量を下げる制度を構築する方が政策としては重要なことだと考える。

よって、ここでは航空路の容量を超過することなく通行枠を配分するために導入するプライシング政策として、オークションの方が混雑料金よりも相対的に適しているとの結果を採用する。

第7章 結論

本論文の目的は、航空路の混雑問題に対する対策として、航空路利用へのプライシング政策導入についての考察を行い、プライシング政策が航空路の混雑を緩和し社会的余剰を改善させることができることを示すことであった。

航空路の混雑問題に対する現行の政策は、航空機の機上設備や管制機器の性能向上、及び、空域再編により航空路の容量を増やすといった技術的アプローチに主眼が置かれている。このことは、国土交通省航空局が事務局となり将来の航空交通システムに関する研究会がとりまとめた『将来の航空交通システムに関する長期ビジョン』⁹⁶を見ても明らかである。

しかし、これら技術的アプローチは、導入まで長期間を要することや、今後の需要予測に基づいて算出されたピーク時の需要に対応するだけの容量を導入後においても確保できる保証をしている訳ではない。

よって、本論文で、航空路の混雑問題に対し、現行の容量を所与としたプライシング政策を導入することで混雑の緩和や社会的余剰の改善の可能性を示したことは、本研究のひとつの貢献である。

本章では、以上のことを踏まえて得られた結果を、まず、3点にまとめて整理する。次に、本論文の貢献として5点を挙げ、最後に本論文において残された問題や今後の課題等を5点に整理し、全体のまとめとする。

ここからは、本論文で導き出した結果を、第1に「混雑料金による需要管理」、第2に「オークションによる通行枠配分」、第3に「プライシング政策導入過程での政策的課題」と3点にまとめ、整理する。

まず、第1の「混雑料金による需要管理」について整理する。

第4章での考察の結果、混雑が予測される航空路に対して航空路の管理者であるANSPが許容できる混雑水準に需要を調整しようとする場合には、ANSPが利用者に混雑料金を課す必要があることが分かった。これは、混雑航空路の代替経路として迂回経路を設定し、ANSPが利用者である航空

⁹⁶ 将来の航空交通システムに関する研究会(2010)では、航空交通量の増大に対応するためには航空交通システムの大胆な変革が必要であるとし、機上、地上及び衛星システムの将来の技術動向を見据えた計画的な新技術の導入を行う必要があるとしている。

会社に混雑航空路の容量に関する情報を事前に与えたとしても、複数の航空会社が利用者として存在する場合には ANSP が許容できる混雑水準を超える需要が混雑航空路に発生するという考察から示された結果である。

この考察では、航空会社の費用最小化行動を念頭に航空会社自らによる経路選択行動を分析するために、現行の ANSP による推奨経路や航空交通流制御等の制約を排した仮定の下、いくつかの条件を設けた上で混雑航空路と迂回経路を設定したモデルを用いることとした。そして、航空会社間のクールノー競争を想定した経路選択行動の分析や、ANSP と航空会社の行動を 2 段階最適化問題による分析から、過度な混雑を回避するためには ANSP が混雑度合いに応じた混雑料金を航空会社に課すことが必要であるとの結果を得た。

次に、第 2 の「オークションによる通行枠配分」について整理する。

第 5 章での考察の結果、混雑航空路の通行枠を配分する方法にオークションを用いることは、レントの是正や透明性の確保に有効であり、配分の合理性も認められ、さらには利用者利便性の向上についてもその可能性があることが分かった。特に、配分の合理性が認められたことは、通行枠という限りある資源の効率的配分が可能になるということであり、現行の先着順の配分に比べて社会的余剰が改善されることを示したものである。また、オークションにより配分する通行枠を ANSP が設定できることから、本論文の目的である混雑の緩和と社会的余剰の改善に一致する結果が得られたことになる。

この考察に当たっては、同じ航空交通の分野でもオークション理論を適用した研究成果が多数報告されているスロット配分での議論を参考にしたが、オークションを政策として導入する議論が未だなされていないことから、導入に際しての政策的課題についても整理し、検討を行った。その結果、スロットと通行枠の違いから、スロットオークションでの政策的課題の多くは通行枠オークションには当てはまらず、残る課題もシンプルなオークション理論を用いた通行枠オークションを政策として導入することにより対応可能との結果を得た。

以上のことから、混雑航空路に通行枠オークションを導入することにより、混雑の緩和と社会的余剰の改善が可能になることが分かった。

最後に、第 3 の「プライシング政策導入過程での政策的課題」について

整理する。

第6章での考察の結果、混雑航空路にプライシング政策を導入する場合、混雑の緩和を確実にものにするためには混雑料金よりもオークションを用いることが相応しいとの結果を得た。これは、混雑料金においては価格設定を行う主体がANSP、交通量(需要)を決定する主体が航空会社であるのに対し、オークションにおいては価格設定を行う主体が航空会社、交通量(需要)を決定する主体がANSPであるからである。なぜなら、ANSPよりも航空会社の方が航空機の運航費用等の情報を所有していることから、料金設定の主体が航空会社の方が、また、混雑航空路の混雑水準を算出し、望ましい交通量(需要)を決定する主体がANSPの方が、混雑の緩和を目的とするプライシング政策としてより相応しいとの判断からである。そして、オークションを政策として導入する場合の政策的課題として、落札した通行枠を確実に利用できるかどうかという課題と落札者からの料金徴収方法における課題の2点を導入過程の課題として整理した。

さらに、第6章では、プライシング政策を導入する場合、混雑料金とオークションを用いる需要管理を第1段階の配分とすることが望ましいとの結果を得た。そして、混雑料金を導入する場合には、混雑料金による配分を第1段階として事前配分を第2段階、リアルタイム配分を第3段階とすることでANSPの求める混雑水準に需要量を抑え、混雑の緩和が達成できることを示した。また、オークションを導入する場合には、オークションによる配分を第1段階とすることにより、第2段階の事前配分を実施する必要がなくなることと、第3段階のリアルタイム配分を実施することで通行枠利用の効率的な配分と、混雑の緩和を達成できることを示した。

以上、3点の結果より、本論文の目的である航空路の混雑問題に対し現行の容量を所与としたプライシング政策、特にオークションを導入することによって混雑の緩和や社会的余剰の改善を達成できることを示すことができた。このことは、本研究の社会的なひとつの貢献であると言えよう。

ここからは、本論文の貢献として、以下の5点を挙げる。その5点とは、第1に「未だ議論がなされていない分野への考察」、第2に「経済的アプローチのための配分方法の考察」、第3に「クールノー競争を用いた航空会社間の経路配分モデルによる分析方法」、第4に「シンプルなオークション理論を用いた通行枠配分の実現可能性の考察」、そして、第5に「プライシン

グ導入における政策面での考察」である。

まず、第1の貢献である「未だ議論がなされていない分野への考察」とは、航空路利用にプライシング政策を導入するための議論が行われていない中で、プライシング政策導入の意義を考察するだけでなく、その過程で発生する課題に対して政策面からの考察を加え、実現可能性を高めた研究結果を示したことである。

我が国だけでなく、世界を見渡しても未だ政策として航空路利用にプライシング政策を導入するための議論を行っている国やANSPは見当たらず、当然のことながら、プライシング政策導入に向けての議論が行われたという話もない。そのような中で、理論的な分析からいくつかの結果を見導き出ただけでなく、理論的分析で発生する政策的課題だけでなく政策として導入する過程での課題に関しても少なくない結果を示したことは、本論文の貢献といえる。

次に、第2の貢献である「経済的アプローチのための配分方法の考察」とは、未だ先行研究が多くない航空路の混雑問題を考察するに当たって、航空路の運用状態や混雑状況を示しただけでなく、その利用権を通行枠として表し、現状の配分方法を事前配分とリアルタイム配分に分類し、通行枠の配分問題にも経済学的アプローチによる理論的考察を行えることを示したことである。

空港の混雑問題は、この分野の研究者や航空関係者だけでなく航空輸送サービスを受ける乗客にも広く認知されていると思われる。一方、航空路の混雑はこの分野の研究者も多くなく、航空関係者や乗客にも広く認知されているとは言い難いのが現状である。よって、本論文で示した通行枠、事前配分、リアルタイム配分の方法や分類は、航空路の混雑問題に対して経済的アプローチを用いようとするこの分野の研究への貢献となるはずである。

また、第3の貢献である「クールノー競争を用いた航空会社間の経路配分モデルによる分析方法」とは、航空会社が自社便をどの経路に割り当てるかという経路選択行動に対して、寡占（複占）状態にある航空会社間の競争をベルトラン競争ではなく、クールノー競争を想定した分析を行ったことである。このことは本論文の特徴であり、既存研究にも例を見ない点である。例えば、村上・加藤・高橋・榊原（編）（2006）は、寡占状態にある

航空会社間では、伝統的な寡占理論として短期的にはベルトラン競争が、長期的にはクールノー競争が行われているとの見解を示し、米国の航空市場を分析することによりそれを証明している⁹⁷。

本論文で取り上げた経路選択行動は1回限りの短期的な航空会社の行動への考察であり、伝統的な理論を適用するならばベルトラン競争を想定したモデルを設定することが一般的であるかの様に思われる。例えば、第4章で設定したモデルにおいて、混雑航空路を利用する進入順位をANSPが決定すると設定し、全ての航空機に同率でその順位が決定されることとした。よって、この場合には、一方の航空会社が混雑航空路に割り当てる便数を増やして割合を高くするならば、自社便を混雑航空路に割り当てる便数を増やし他者と同じ割合にすることが合理的な行動となるようなベルトラン競争で見られる戦略的補完関係がある様に思われる。

しかし、今回の考察では混雑航空路の容量に上限があり、この上限を所与として各航空会社が自社便をどの程度混雑航空路に割り当てるかという行動を分析するモデルを設定した。よって、この場合、一方の航空会社が混雑航空路に割り当てる便数を減らすならば、自社便を混雑航空路に割り当てる便数を他者が減らした便数だけ増やすことが合理的な行動となるようなクールノー競争で見られる戦略的代替関係があるとも考えられる。

以上のことを加味した上で、今回の分析に当たっては、設定上は航空会社間の短期競争でありながらも、クールノー競争を想定した分析を行った。この分析により、混雑料金のない場合には各航空会社の混雑航空路に割り当てる機数がクールノー・ナッシュ均衡点になり過度な混雑が発生するという結果から、ANSPの目的とする混雑水準を達成させるために混雑料金が必要であることを導き出したことは、既存の研究と異なる点である。よって、航空会社が自社便をどの経路に割り当てるかという経路選択行動に対して、クールノー競争を想定した分析から混雑料金の必要性を示したことは、この分野の研究への貢献と言える。

そして、第4の貢献である「シンプルなオークション理論を用いた通行

⁹⁷ 村上・加藤・高橋・榊原（編）（2006）第5章「伝統的寡占理論と航空産業」、99~121項参照。なお、この中で寡占（複占）状態にある航空会社間の競争について、低運賃価格競争を行う場合にはシュタッケルベルグ型の価格競争が行われることや、同規模の航空会社が競争を行う場合には航空会社間で協調戦略がとられる可能性も示唆している。

枠配分の実現可能性の考察」とは、第5章で用いた同質財・単一需要を想定したオークション理論を適用した通行枠オークションであっても合理的な配分が行えるということを理論的に示したことでなく、そのシンプルさがあってこそ実現可能性を高めることができるとの政策面からの考察結果を導き出したことである。

考察に当たっては、通行枠オークションにスロットオークションでの研究成果と同様に、より発展したオークション理論を適用することにより最適配分を達成することも考えた。しかし、スロット（タイムスロット）と今回取り上げた通行枠との性格の違いを整理した上で、通行枠を落札した後の実運航での運用方法等政策面からの考察も行うことを念頭に、同質財・単一需要を想定したオークション理論を適用した分析を行った。

その結果、混雑航空路に通行枠オークションを導入することにより、混雑の緩和と社会的余剰の改善が可能になることを導き出すことができた。そして、通行枠オークションの実現可能性についても考察を加え、オークションの妥当性や現実との比較等からもそれが十分に可能性のあることを示したことは、この分野における貢献と言える。

最後に、第5の貢献である「プライシング導入における政策面での考察」とは、プライシング政策を導入する意義と課題をまとめた上で、プライシング政策導入のタイミングやその場合の課題等を挙げ、オークション等のプライシング政策を導入する過程での課題に対してANSPや航空政策立案者が取るべき政策的対策をより具体的に考察したことである。

今までの数少ない先行研究の中でも、混雑料金やオークションを用いて混雑航空路の混雑緩和や運用の効率化、さらには航空会社や全体の費用の最小化を達成できることを示したものは存在するが、複数のプライシング政策を比較したものは見当たらない。本論文では、プライシング政策を導入するための理論的アプローチだけでなく、理論的な考察時に発生する課題も整理した。そして、特筆すべきは、プライシング政策を導入する過程で発生する課題への対策を考察するために、導入するタイミングを混雑料金とオークションの場合に分けて整理し、その分析を行いやすくしたことである。このことは、既存研究に欠けている政策面からの視点を埋めるだけでなく、現行の需要管理の方法との整合性を考察することにも役に立つ。

そして、その結果を基にオークション等のプライシング政策を導入する

過程での課題に対して、ANSP や航空政策立案者が取るべき政策的対策を具体的に考察した。このことは、第1の貢献でも示した様に、未だ導入への議論すらなされていないこの分野の研究への貢献と言える。

ここからは、本論文での考察において浮かび上がってきた課題を整理する。本論文では、航空路利用にプライシング政策を導入する意義を示すためにモデルやイメージを設定し、それらを分析することで考察を進めてきた。しかしその過程において取り扱えなかった課題や今回の考察では触れられなかった課題等も存在する。それら課題を第1に「混雑航空路と迂回経路モデルに関する課題」、第2に「最適な混雑料金の算出に関する課題」、第3に「オークション対象の航空路イメージに関する課題」、第4に「オークション導入への理論的課題」、そして第5に「オークションの運用に関する課題」と大きく5つに分け、それぞれに対し整理を行う。

まず、第1の「混雑航空路と迂回経路モデルに関する課題」とは、第4章で設定したモデルの仮定に関する課題についてである。

今回は、混雑航空路に対する迂回経路を設定するに当たって、混雑航空路の容量には上限を設けたが迂回経路の容量には上限を設けなかった。しかし、たとえ迂回経路であっても同じ様に技術的制約から容量が決められていると考えるのが現実的であろう。

また、航空路の混雑をボトルネック混雑と捉え、全ての航空機が同時刻にボトルネックに到達すると仮定して分析を行ったことも現実的ではない。よって、これら仮定の設定をより現実的な仮定に置き換えた場合に、今回と同じ結果となるかの分析が必要である。

次に、第2の「最適な混雑料金の算出に関する課題」とは、第4章の(4.32)及び(4.33)式で示した混雑航空路の通行料に関する課題である。

モデルの分析から(4.32)式のような通行料の条件を導き出し、ANSP が設定すべき通行料の最低金額として(4.33)式を示した。これは、ANSP の目的が過度な混雑を解消することであり、それが達成できるならばそれ以上の金額を航空会社に課す必要がないとの判断からであった。しかし、(4.33)式が通行料の下限であるならばその上限も存在するはずであり、その下限と上限の間に最適配分を達成する点が存在する可能性があるにもかかわらず、今回はこの分析については取り扱えなかった。この点を改善することにより最適配分から最適な混雑料金を示すことが可能となることから、今後の

分析面での課題としたい。

また、第3の「オークション対象の航空路イメージに関する課題」とは、第5章5.4.1でオークション対象の航空路イメージとして設定した単一対象時間帯に関する課題である。

ここでは、同質財・単一需要のオークション理論を適用した通行枠オークションの対象として、単一対象時間帯を30分としたイメージを設定した。この30分という時間は、2.5.2で解説を行ったEDCTの有効時間帯の幅の最大値(28分)から見ると、落札者が実際に利用する際に受け取る通行枠をリアルタイム配分で対応できる幅とみなすことができる。

しかし、これ以上の混雑が発生することが予測されている場合に、この30分という幅を延長するか、それともピークの30分を抽出してそれを対象とするか等といった、どの方法がより混雑の緩和や社会的余剰の改善に寄与するのかという分析は取り扱えなかった。

本論文では、混雑が30分を超えるような長期間発生する場合には、全てを単一時間帯として取り扱うか、それとも時間帯を区切って複数の時間帯として取り扱うかによって、適用するオークション理論が変わってくるということには言及したが、このことについても時間帯を何分にするのが適切かといった考察は行っていない。よって、今回の航空路イメージの中で単一時間帯として設定した30分を他の数値に変化させ、それぞれの場合で、どのオークション理論を適用し、どのような結果が得られるかを考察することが、本研究を進めるに当たっての課題と言える。

また、今回の航空路イメージを損なわずにピーク時の30分だけを単一時間帯として抽出する場合においても、他の混雑時間をどう取り扱うかを併せて考察する必要があるだろう。この様な、航空路イメージとして設定した単一対象時間帯に関する課題は、より通行枠オークションの現実可能性を高めるために解決すべき課題であり、今後の課題としたい。

さらに、第4の「オークション導入への理論的課題」とは、今回の通行枠オークションに同質財・単一需要を前提としたオークション理論を適用する際に考察すべき、落札者の支払う額や談合の可能性等の課題である。

今回考察においては、オークションの落札者が支払うべき額や入札談合の可能性について取り扱えていない。落札者が支払う額としては、例えば一位価格や二次(次点)価格等のオークション理論を適用することが考え

られるが、重要なのは、入札者が自らの私的価値を正直に入札額とすることが支配戦略となるようなオークション理論を適用するのか、落札した通行枠が最終的にリアルタイム配分により割り当てられることを加味するために入札額と支払額の間は何らかの調整を行うのかといった、政策的判断についての考察を行うことである。

また、入札談合に関しても、一位価格や二位価格にかかわらずその可能性があることや、入札者全員参加型でない談合についての可能性が Krishna (2010) により示されている⁹⁸。

これらのことは、オークションを政策として導入する際に解決すべき課題であり、本研究を進めるに当たっての今後の課題としたい。

最後に、第5の「オークションの運用に関する課題」とは、ANSPが落札者全員の通行枠利用を担保する方法の課題や、料金徴収の方法に関する課題といった、それぞれオークションを政策として導入した場合の運用上の課題のことである。

ANSPが落札者全員の通行枠利用を担保する方法については、運用上発生する到着時刻のズレにANSPがどう対応するのかという議論の中で、リアルタイム配分による対応を一つの対策として挙げている。本論文の目的である混雑の緩和と社会的余剰の改善を達成するために、効率の良い通行枠の利用を達成することを目指し、可能な限り多くの通行枠を通行枠オークションのみで配分するならば、到着時刻のズレが発生し、需要に偏りが起きた場合には、リアルタイム配分による対応だけでは落札者全員の通行枠利用を担保することができない恐れがある。一方、運用上発生する到着時刻のズレを考慮に入れた余裕のある通行枠オークションを考えた場合、今度は余裕から発生する空き通行枠を埋める何らかの対策が必要となる。

次に料金徴収については、実際に通行枠を利用した落札者から徴収することや、航空会社に起因する理由で利用できなかった場合にはペナルティーを科す等の対策を挙げた。これ以外の場合、つまり天候等の航空会社に起因しない理由で落札した通行枠を利用できなかった場合には、利用可能な通行枠の中で航空会社にとってより有利な通行枠を配分することや、料

⁹⁸ 本論文では応札する航空会社が協調行動をとらないと仮定していたが、配分する通行枠が複数あるような通行枠オークションの場合、一部、もしくはすべての航空会社が協調行動をとる場合には、Krishna (2010) が指摘する様に、産業カルテルのような状態になり、入札談合の可能性が発生する。

金を徴収しない等といった対策を予め組み込むことにより、より実現可能性を高めることが必要となる。

さらに、空き通行枠が発生する場合の対策として、落札者以外の利用を認めることにより効率の良い通行枠の利用を考えた場合、落札者の料金と落札者以外の料金に差をつける等の運用上の制度設計も考察しなければならない。

この様な、オークションの運用に関する課題について、いくつかのケースが考えられるが、本論文においては、混雑の緩和と社会的余剰に改善を達成するための方法としてどのような運用形態がより相応しいかを考察することができなかった。これら課題は、オークションを政策として導入する際の政策的課題として、必ず解決しなければならない課題であり、今後の研究でも引き続き考察を重ねていく必要がある。

ここまで、各章での考察から得られた結果を3点にまとめて整理し、本論文の貢献として5点を挙げた。そして、本論文において残された問題や今後の課題等を大きく5つに分けて整理し、今後、本研究を進めるに当たって必要な分析点や対策等を示した。

本論文の目的は、航空路の混雑問題に対する対策として、航空路利用へのプライシング政策導入についての考察を行い、プライシング政策が航空路の混雑を緩和し社会的余剰を改善させる可能性を示すことであった。この目的は、ここまでに挙げた結果を見ても十分に達成したと考える。また、この成果は、航空路利用にプライシング政策を導入するための研究分野に対する本論文の貢献と言えることから、最後に挙げた課題に対する分析を行い、対策を考察することは、航空路利用へのプライシング政策導入についての議論を呼び、深めることに繋がると確信する。よって、本論文で設定したモデルやイメージを精査し、より現実に近いものへと改良を重ねながら、残された課題に対しての対策を考察し、更なる成果を示せる様に、今後も本研究を推し進めることとしたい。

参考文献

- AIM-JAPAN 編纂協会 (2019) 『Aeronautical Information Manual JAPAN』, 2019 年後期版, 日本航空機操縦士協会.
- ATRS (国際航空学会) 参加の日本人研究者を中心とする有志 (2013) 『日本の混雑空港における発着枠 (タイム・スロット) 配分の在り方: アカデミックな視点からのあるべき姿』.
<http://www.geocities.co.jp/SilkRoad/3841/slot20130820.html> (2020 年 1 月 12 日確認)
- 遠藤伸明 (2001) 「混雑空港における発着枠配分問題の経緯と現状」, 藤井彌太郎・中条潮・太田和博 (編) 『自由化時代の交通政策: 現代交通政策 II』, 東京大学出版会, 第 11 章 11.2(1), 183~185 頁.
- 大谷秀平・坂井豊貴 (2014) 「空港到着枠の再編成マッチング」『メカニズムデザインと意思決定のフロンティア』, 慶応義塾大学出版会.
- 航空交通管制協会 (2013) 『航空管制』, 2013 年第 6 号.
- 航空交通管制協会 (2018) 『航空管制』, 2018 年第 1 号.
- 航空管制五十年史編纂委員会 (2013) 『航空管制五十年史: 航空交通の安全ひとすじに』, 航空交通管制協会.
- 国際線発着調整事務局 (JSC:Japan Schedule Coordination) ウェブサイト.
<http://www.schedule-coordination.jp/> (2020 年 1 月 4 日確認)
- 国土交通省 (2020) 『AIP JAPAN』, Effective 02 JAN 2020.
- 国土交通省 (2012) 「羽田空港発着枠の現状と検討課題」, 第 1 回羽田発着枠配分基準検討小委員会 (2012 年 7 月 27 日開催), 資料 2.
<http://www.mlit.go.jp/common/000219736.pdf> (2019 年 12 月 28 日確認)
- 国土交通省 (2014) 『交通政策審議会航空分科会基本政策部会とりまとめ』.
<http://www.mlit.go.jp/common/001042443.pdf> (2019 年 12 月 28 日確認)
- 国土交通省ウェブページ AIS JAPAN (Japan Aeronautical Information service Center).
<https://aisjapan.mlit.go.jp/> (2020 年 1 月 4 日確認)

国土交通省ウェブページ 「航空交通管制情報処理システム」.
http://www.mlit.go.jp/koku/15_bf_000869.html (2020年1月4日確認)
国土交通省ウェブページ 「航空保安無線施設等」.
http://www.mlit.go.jp/koku/15_bf_000327.html (2020年1月4日確認)
国土交通省ウェブページ 「航空輸送サービスに係る情報公開」.
http://www.mlit.go.jp/koku/15_bf_000727.html (2020年1月4日確認)
国土交通省ウェブページ 「登録航空機数の推移」.
http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk1_000040.html (2020年1月4日確認)
国土交通省ウェブページ 「羽田空港のこれから」.
<http://www.mlit.go.jp/koku/haneda/> (2020年1月4日確認)
国土交通省ウェブページ 「用語集」.
http://210.248.150.32/koku/15_bf_000320.html (2020年1月4日確認)
国土交通省航空局 (2013a) 「航空交通量の増大に対応した管制空域のあり方」, 国土交通省交通政策審議会航空分科会第10回基本政策部会 (2013年10月30日開催), 資料4.
国土交通省航空局 (2013b) 『数字でみる航空2013』, 航空振興財団.
国土交通省航空局 (2018a) 『航空保安業務処理規定 第5管制業務処理規定』. (2018年9月18日改正, 2018年10月11日適用)
国土交通省航空局 (2018b) 『数字でみる航空2018』, 航空振興・環境整備支援機構.
坂井豊貴 (2014) 「政府や自治体によるオークション理論の活用へ」『効率的な政策ツールに関する研究会 報告書』, 財務総合政策研究所, 67~94頁.
榊原胖夫 (1981) 「空港制約と市場原理」『ていくおふ』, 第15号, 23~28頁.
将来の航空交通システムに関する研究会 (2010) 『CARATS 将来の航空交通システムに関する長期ビジョン ~戦略的な航空交通システムへの変革~』.
<http://www.mlit.go.jp/common/000123890.pdf> (2019年12月28日確認)
關哲雄・庭田文近 (編) (2007) 『ロード・プライシング 理論と政策』, 勁草書房.
竹内健蔵 (2006) 『都市交通ネットワークの経済分析』, 有斐閣.

- 竹内健蔵 (2008) 『交通経済入門』, 有斐閣.
- 中条潮 (2000) 「空港発着枠の配分と不採算航空路線の補助制度に関する考察」『三田商学研究』, 第 43 巻・第 3 号, 89~109 頁.
- 西澤宏員 (2015) 「航空路の混雑に対する経済学的アプローチの考察」『海運経済研究』, 日本海運経済学会, 第 49 号, 81~90 頁.
- 西澤宏員 (2018) 「オークションによる混雑航空路の通行枠配分に関する考察 スロットオークションでの議論を応用して」『海運経済研究』, 日本海運経済学会, 第 52 号, 51~60 頁.
- 日本航空ウェブサイト.
<https://www.jal.co.jp/5931/seatmap/seatmap.html> (2020 年 1 月 4 日確認)
<https://www.jal.co.jp/5971/seatmap/seatmap.html> (2020 年 1 月 4 日確認)
- 日本航空広報部 (2014) 『最新 航空実用ハンドブック』, 朝日新聞出版.
- 原祐輔 (2015) 「時間帯別交通利用権オークションに対する選好誘出の効率性に関する研究」『土木学会論文集 D3』, 第 71 巻・第 5 号, I_951~959 頁.
- 福井秀樹 (2001) 「競争入札による空港発着枠 可能性と限界」『公共政策研究』, 第 1 巻, 152~165 頁.
- 福島幸子 (2003) 「航空交通流管理における遅延便交換の検討 航空路セクタ」, 電子航法研究所 2003 年研究発表会.
https://www.enri.go.jp/report/hapichi/pdf2003/20_fukushimasa.pdf (2018 年 12 月 28 日確認)
- 松島斉 (2011) 「組み合わせ入札に関する試案：羽田空港国内線定期便発着枠の効率的配分に向けて」『経済学論集』, 第 76 巻・第 4 号, 2~21 頁, 東京大学経済学会.
- 村上英樹・加藤一誠・高橋望・榊原胖夫 (編) (2006) 『航空の経済学』, ミネルヴァ書房.
- 文世一 (2005) 『交通混雑の理論と政策』, 東洋経済新報社.
- 山内弘隆 (1998) 『混雑空港におけるスロット配分ルールについて』, 航政研シリーズ, 第 360 号, 航空政策研究会.
- 山田浩之 (編) (2001) 『交通混雑の経済分析 ロード・プライシング研究』, 勁草書房.
- 湧口清隆・西澤宏員 (2005) 「空域通過のプライシングに関する一考察」

- 『交通学研究 2004 年研究報』, 日本交通学会, 第 48 号, 229~238 頁.
- 渡辺伸 (2019) 「北京, 旅客数世界 2 位へ 新空港が開業 国際線拡充」, 日本経済新聞. 日本経済新聞電子版, 2019 年 9 月 25 日 20 時 57 分配信,
- <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO50210800V20C19A9FFE000/>
(2019 年 10 月 29 日確認)
- Airbus, A380 -Innovation.
<https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a380/innovation.html> (2019 年 12 月 28 日確認)
- Airport & Airway Trust Fund, Federal Aviation Administration, United States Department of Transportation.
<https://www.faa.gov/about/budget/aatf/> (2019 年 11 月 4 日確認)
- Arnott,R., de Palma, A., Lindsey,R. (1990) “Economics of a bottleneck,” *Journal of Urban Economics*, 27(1), 111–130.
- Bolić,T., Castelli,L., Rigonat,D. (2017) “Peak-load pricing for the european air traffic management system using modulation of en-route charges,” *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 17(1), 136–152.
- Borenstein,S. (1988) “On the efficiency of competitive markets for operating licenses,” *The Quarterly Journal of Economics*, 103(2), 357–385.
- Brooker,P. (2004) “Future air traffic management systems and financial decision-making constraints,” *Transportation*, 31(1), 1–20.
- Castelli,L., Pesenti,R., Ranieri,A. (2011) “The design of a market mechanism to allocate air traffic flow management slot,” *Transportation Research Part C*, 19(5), 931–943.
- Castelli,L., Labbé,M., Violinb,A. (2013) “A network pricing formulation for the revenue maximization of european air navigation service providers,” *Transportation Research Part C*, 33, 214–226.
- Eurocontrol (2013), *Standard Inputs for Eurocontrol Cost Benefit Analyses* (6.0 ed.), September 2013.
- Eurocontrol (2017), *Central Route Charge Office Customer Guide to Charges*.
- Eurocontrol (2019a), *CODA Digest 2018 All-Causes Delay to Air Transport in Europe -2018*.
- Eurocontrol (2019b), *Monthly Adjusted Unit Rates - October 2019*.

- <https://www.eurocontrol.int/publication/monthly-adjusted-unit-rates-october-2019> (2019年12月28日確認)
- ICAO (International Civil Aviation Organization) (2012), *ICAO's Policies on Charges for Airports and Air Navigation Services* (9th ed.), ICAO Doc 9082.
- ICAO (International Civil Aviation Organization) (2013), *Manual on Air Navigation Services Economics* (5th ed.), ICAO Doc 9161.
- Jovanović,R., Tošić,V., Čangalović,M., Stanojević,M. (2014) “Anticipatory modulation of air navigation charges to balance the use of airspace network capacities,” *Transportation Research A*, 61, 84–99.
- Krishna,V. (2010), *Auction Theory* (2nd ed.), Academic press.
- Raffarin,M. (2004) “Congestion in european airspace -a pricing solution?-,” *Journal of Transport Economics and Policy and Practice*, 38(1), 109–126.
- United Kingdom Civil Aviation Authority, *United Kingdom AIP*.
www.nats-uk.ead-it.com/ (2019年12月28日確認)
- U.S. Department of Transportation, *Air Travel Consumer Report*.
<https://www.transportation.gov/individuals/aviation-consumer-protection/air-travel-consumer-reports> (2019年12月28日確認)
- U.S. Department of Transportation, Bureau of Transportation Statistics, *Airline On-Time Statistics and Delay Cause*.
<https://www.bts.gov/topics/airlines-and-airports/airline-time-performance-and-causes-flight-delays> (2019年11月4日確認)
- U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, *Air Traffic Management Glossary of Terms*.
https://www.fly.faa.gov/Products/Glossary_of_Terms/glossary_of_terms.pdf
(2020年1月6日確認)
- U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, FAA *Operations & Performance Data*.
<https://aspm.faa.gov> (2020年1月10日確認)
- U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, *OPSNET*.
[https://aspmhelp.faa.gov/index.php/Operations_Network_\(OPSNET\)](https://aspmhelp.faa.gov/index.php/Operations_Network_(OPSNET)) (2019年11月4日確認)
- Vickrey,W.S. (1969) “Congestion theory and transport investment,” *American Economics Review*, 59(2), 251–260.

Wardrop, J.G. (1952) "Some theoretical aspects of road traffic research,"
Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1(3), 325–378.