

航空ネットワーク上の波及遅延の解析と費用対効果分析・管制運用への活用に関する研究

古田土 渉¹・平田 輝満²・二見 康友³・又吉 直樹⁴

¹正会員 東日本旅客鉄道(株) 水戸支社 水戸土木技術センター (〒310-0015茨城県水戸市宮町1-1-20)

²正会員 茨城大学 工学部都市システム工学科 (〒316-0033茨城県日立市中成沢町4-12-1)
E-mail: terumitsu.hirata.a@vc.ibaraki.ac.jp

³正会員 日本工営(株) (〒102-0083東京都千代田区麹町5-4)

⁴非会員 宇宙航空研究開発機構航空技術部門 (〒181-0015 東京都三鷹市大沢6-13-1)

航空路線や各便は一つの機材を連続的に使用して構成・運用されるため、ある便で遅延が生じると、次にその機材を使用する便にも遅延が波及する可能性がある。このような航空機遅延の波及現象を解析するためのデータは我が国では整備されておらず、これまでその現象の実態を詳細に解析した事例はない。本研究では一般に公開されている航空関連データを収集・統合し、大規模なデータベースを作成するとともに、波及遅延の実態解析と波及遅延を定量化・予測するモデルを開発した。さらに、空港整備などの費用対効果分析やリアルタイムの航空交通管制の運用に、遅延の波及現象をどのように考慮・活用するかについて考察を行った。

Key Words : aviation network, delay propagation, cost-benefit-analysis

1. はじめに

我が国では増加する航空需要や利用者の多様なニーズに対応するため、効率的な航空交通システムの構築が求められている。2010年には国土交通省航空局が航空政策の長期ビジョンである「CARATS」を策定し、航空輸送の効率化・利便性向上等を図る長期的目標が定められた。一部の空港では滑走路新設等の整備計画も進行しており、ハード・ソフトの両面から航空システムの高度化を図る動きが見られている。

航空関連施策の実施にあたっては他の一般的な公共事業と同様に事業の各段階(計画・採択・施行中・完了後など)にその評価を行うことが求められる。特に「費用便益分析」は事業全体の投資効率性を定量的に説明する手法として、事業評価の手法の一つに位置付けられており²⁾、航空分野においても空港整備や保安システム整備といった主要な事業に関して費用便益分析の手法を定めたガイドラインが制定されている。また CARATS においても施策の事業の各段階において実施する費用対効果分析について、その手法が具体的に定められている。

現在の航空関連事業における費用便益分析のうち、空港での航空機遅延削減に関する分析では、削減施策を施した空港を発着する各便に対する遅延軽減量を算出した

うえで、それに時間価値や燃料消費量等の便益の原単位を掛け合わせることで便益を算出している。しかし、当該空港の処理能力の向上に伴ってその空港を発着する各便の遅延時間が削減されれば、同一機材を使用する後続便の遅延時間(以下「波及遅延」)も削減されると考えられる。このような波及遅延の削減効果については、一部の費用対効果分析において「事業による定性的効果」のひとつとして言及されているが³⁾、その効果を便益として定量的に評価する手法に関する研究や実務への適用は我が国において進んでいない。これは我が国において航空機遅延に関するデータ公開レベルが米国などに比べて低いことも原因として考えられる。そこで本研究では、Web 上で入手可能な航空機の運航関連データを収集・統合することで、我が国の航空市場における航空機遅延データベースを独自に作成し、航空機遅延の波及現象の実態を把握するとともに、主に費用便益分析で活用する際に運航環境変化の影響も簡易に推計可能な新たなモデルを開発することを目的とする。さらに、次便への波及遅延の予測モデルによる管制運用の高度化に関する考察を行う。

2. 既存研究の整理と本研究の位置づけ

特に米国においては航空機遅延に関するデータベースの公開が進んでいることもあり、古くから航空機遅延の波及現象を解析している研究は多く存在する。Boswell and Evans (1997)⁴⁾は前便の到着遅延時間の量に応じた後続便への波及到着遅延時間の量をマルコフ連鎖の推移確率で表現して、米国内の平均的な遅延波及乗数 (multiplier) を算出しており、下流 (downstream) への波及遅延を考慮した総遅延削減量の便益推計を行っている。Zhang and Nayak (2010)⁵⁾, Nayak and Zhang (2011)⁶⁾ではラガーディア空港やオヘア空港といった特定の空港の遅延がそれ以外の空港へどのように影響 (波及) し、またその逆の影響についても同時にマクロに軽量化するために2段階または3段階最小二乗法により統計解析を行っている。計量経済的な分析手法以外にはPyrgiotis et al. (2013)⁷⁾が各空港の処理容量と離着陸需要の関係から時間帯別の各空港のローカルな遅延量をマクロに推計する待ち行列モデルエンジンと、その遅延量を各フライトへ割り当て・波及させ、各空港への需要をアップデートするモデルを相互に繰り返すネットワークモデルを開発し、米国内の空港ネットワークに適用し、波及遅延による需要の平準化効果などを分析している。Hao et al. (2014)⁸⁾は Zhang and Nayak (2010)⁵⁾のようなマクロに遅延波及を分析する計量経済モデルと FAA (Federal Aviation Administration) で開発された1便1便のフライトの飛行や気象による空港・空域容量への影響も加味できるファストタイムシミュレーションモデル (SWAC) の2つの方法により、NY3 空港の遅延が全米の他空港にどの程度影響を与えているかを定量比較している。本研究ではまず、我が国の波及遅延の実態とメカニズムを統計的に詳細に把握しつつ、主な運航条件 (エアラインのダイヤ設定など) が遅延波及に与える影響を簡易に推計するための方法開発を主眼においており、そのために実際に観測される遅延から波及遅延を分離する方法にまず着目した。その参考にした研究が以下のWelman et al (2010)⁹⁾と Kafle et al. (2016)¹⁰⁾である。Welman et al.⁹⁾は各空港で生じた航空機の実遅延を当該空港に起因する「オリジナルの遅延」と「前便以前からの波及遅延」の2つに分離する手法を提示したうえで、それらの比率からなる「遅延波及乗数(Delay Propagation Multiplier; DPM)」を提案した。DPMは空港整備により削減されるオリジナル遅延から波及遅延も含めた総遅延削減量を算出することが可能な指標である。しかし当該研究における分析は当時の運航データを用いたDPMの算出に留まっており、遅延の波及現象のメカニズム等に関しては言及していない。また、Kafle et al.¹⁰⁾は航空会社が運航スケジュールに挿入するバッファの効果に言及し、航空機の運航スケジュールにおけるバッファの量を説明

変数に含む離散 - 連続モデルにより波及遅延を予測するモデルを作成した。そのうえで離散 - 連続モデルの係数を比較することで環境要因が遅延の波及に与える要因を定量的に評価しているが、費用対効果分析への具体的な適用手法に関しては言及しておらず、モデルの変数構造が費用対効果分析上は活用しづらい部分も見られる。

我が国の航空市場を対象にした研究としては、坂下ら⁴⁾は羽田空港における遅延の実態を分析しており、その中で折返し便における波及の遅延についても言及し、折返し時間が長くなるにつれ前便の到着遅延が次便の出発遅延へ波及しにくくなる傾向にあることを示した。また、分析にあたっては我が国では個別便の航空遅延に関するデータが公表されていないことを踏まえ、本研究と同様に航空会社の公式 Web サイト等から情報を収集して独自にデータベースを構築している。

既存の研究では我が国における航空機遅延の波及現象を航空ネットワーク全体を俯瞰して分析したものは見られず、本研究ではそのためのデータベースを独自に作成し、さらに既存研究で開発されている波及遅延の分離方法とバッファの推計方法、さらに波及遅延量に関する計量経済モデルをベースにしつつ、航空市場環境・運航条件の変化による遅延波及率の変化を簡易に推計可能で、費用便益分析にも適用しやすいモデル開発を行う点に新規性がある。さらに、空港折返しに着目した遅延波及予測のターミナル空域の管制運用への活用に関しても分析した事例は過去にない。

3. 運航実績データベースの構築

(1) 取得対象の情報の整理

本研究の遂行にあたって最低限必要な情報は、各便の遅延時間および各便で使用された機材を特定する情報である。前者に関しては航空会社の公式 Web サイトにおいて各便のゲート発着時間が公開されており、その値から遅延時間を計算することが可能である。後者に関しては航空機軌跡の公開サイトである「Flightradar24(以下FR24)」を使用することで取得可能である。FR24は航空機から送信されたADS-B^{脚註1)}信号を収集・再公開するWebサイトである¹²⁾。各便の軌跡の他、充当された機材の登録記号(機材固有の文字列)等の取得が可能であることから、登録記号が同一のフライト情報を辿れば機材繰りの追跡が可能である。また、FR24では離着陸時刻も記載されていることから、空港発着の実績時刻と離着陸時刻を組み合わせることで各空港における地上走行時間等も算出することが可能である。更に取得した軌跡の解析を通して各便の使用滑走路や飛行コースの情報を付与すれば将来的には遅延の分析をより多面的な視点から行うことも可能であると考えられる。

一方で、FR24 は ADS-B 装置から発信された情報を有志が設置した受信機で捉えて公開するというシステムの特性上、地理的あるいは時系列的に比較した情報の均質性は損なわれていると考えられる。つまり、ADS-B 非搭載と思われる旧式機材や小型機材を使用した便に関しては登録記号の情報が表示されないことから、そのような機材を多数使用する路線ほど機材繰りの追跡が困難であることや、日ごとの情報収録率のばらつきが大きくなることが想定される。

(2) 情報の取得とデータベースの構築

(1) で示した Web サイトから情報を取得したうえで、日付と便名の一致で FR24 から収録したデータとマッチングし、機材繰りの追跡が可能なオリジナルの運航実績データベース(以下 DB)を構築した。構築した DB の概要を表-1 に示す。なお、データ取得の対象とした航空会社はデータ取得の容易さを考慮して表-1 に示す 6 社を選定した。また、DB の構築にあたっては機材の運用を 1 日単位で追跡し、同日中で連続する 2 便の着空港と発空港の一致を確認することで 1 日の機材繰りの連続性を確認した。

(3) オリジナル DB の収録率

航空会社公式 Web サイトからの情報取得は表-1 に示した国内の主要航空会社のみを対象に行っている。さらに航空会社公式 Web サイトから情報を取得した便に関しても FR24 から取得した登録記号情報のエラーにより DB では情報が欠損する可能性がある。よって本 DB は全数データとはならずサンプルデータとして扱う。そこで公表されている過去の実測値と比較することでおよその収録率を算出した。なお情報取得の手法は逐次改善を行っていたため、情報の取得手法が安定した 2016 年 9 月~11 月を対象に収録率を算出した。比較対象とする過去の実績値は国土交通省航空局発行の「空港管理状況調書¹³⁾」に記載された 2015 年 9 月~11 月の国内線着陸数である。なお、同調書における着陸数の集計基準に関しては国土交通省 Web サイト等を参照しても明示されていないが、八尾空港(大阪府)等の国内線定期旅客便が就航していない空港の集計表にも着陸数が計上されていることから、官公庁所有のヘリコプター等も着陸数の集計に含まれていると考えられる。また、三沢飛行場や百里飛行場といった共用飛行場の集計表を確認した限りでは当該飛行場に着陸した自衛隊や米軍の航空機数は計上されていないと推測される。よって、DB の最新の収録率を算出する母数として空港管理状況調書を使用する場合、同調書が 1 年前の集計結果であることに加え、いわゆるセスナ機やヘリコプターといった定期旅客便以外の航空機の着陸数も含まれている可能性があることを留意しなければならない。

表-1 運航実績データベース(DB)の概要

収録期間	2016/2/1~2016/10/31
収録航空会社	JAL グループ・ANA グループ AIRDO(ADO)・Starflyer(SFJ) ジェットスター(JJP)・ピーチ(APJ)
収録便数(※1)	261,451 便
各便収録項目(※2)	発着空港・発着時刻(予定・実績)・ 離着陸時刻*・使用滑走路*・ 遅延理由・登録記号・機材型式等
(※1) 機材登録記号が付与され、かつ 1 日の機材運用が連続しており情報の欠損が無い便の便数。 (※2) *付与は ADS-B 搭載機に限る。	

収録率算出の結果として、全空港ベースでの収録率は 44%(10.5 万便/23.9 万便)であった。また、主要空港別の集計では関西国際空港が最も高位で 67%であり、次いで羽田空港が 62%であった。最も低位であったのは鹿児島空港で 28%であった。空港ごとに収録率が大幅に変動する要因として、空港に就航する各航空会社のシェアの違いと就航機材の違いが挙げられる。つまり、元々 DB に収録していない航空会社が多く就航している空港や、航空会社公式 Web サイトでは情報が取得できているものの、就航機材が小型あるいは旧式等の理由により ADS-B を搭載しておらず、FR24 に登録記号が収録されていないことなどが想定される。鹿児島空港に関しては日本エアコミューター(JAC)が後者に該当していることから、収録率が低位に留まったと考えられる。よって情報の収録状況によっては特定の空港において機材構成比や航空会社シェアの現況再現性が低くなる可能性があることに留意すべきである。

4. バッファ時間から見た航空機遅延の波及現象の解析

(1) 航空スケジュールにおけるバッファの意義

Kafle et al.は航空機の運航時間や空港での折り返し時間には航空会社が独自に設定する余裕時間(バッファ)が設定されており、このバッファは当該バッファ以前で発生した遅延を吸収することで遅延の波及現象を抑制する効果があることを指摘している。遅延の波及を防止する観点からは十分なバッファを設定することが望ましいが、一方で、バッファの長時間化は機材の運用効率の低下をもたらす。よって機材の効率的な運用が求められる航空会社においては各便や各空港の特長を踏まえたバッファ設定に加えて、遅延の波及度合と機材の運用効率というトレードオフの関係のもとで戦略的なバッファの設定も行っていると考えられる。そこで本研究では航空会社が自社の経営方針と経営環境を踏まえてバッファを設定していると捉え、ひいてはバッファ自体を遅延の波及現象に影響を与える総合的な環境変数として扱う。

(2) 予定折返し時間と遅延の波及現象の関数の分析

折返し時間に含まれるバッファの効果およびバッファの設定に影響を与える要因を確認することを目的として、予定折返し時間と遅延の波及状況の関係について分析を行った。ここで、分析にあたってはある便の到着遅延に対する次便の出発遅延の比率の期待値を示す値として下式で定義する D_D/D_A を定義した

$$D_D/D_A = \frac{\sum_{n=1}^N \frac{n \text{ 便目の出発(Departure)遅延 } D_{Dn}}{n \text{ 便目の到着(Arrival)遅延 } D_{An}}}{D_{An} > 0 \text{ の折返し便数 } N} \quad (1)$$

例えばある条件下で $D_D/D_A = 0.5$ を得た場合、その条件下で折返した場合の出発遅延時間の期待値は、前便の到着遅延時間の半分の値であることを示す。なお指標の特性上、早着・定時着便に対する折返し後の出発遅延の期待値は表現できないため、必要であればその条件下での遅延波及状況を確認したうえで別途表現方法の検討が必要である。

図-1 は機材規模(座席数)に着目して折返し時間ごとに D_D/D_A を算出したものである。機材規模に応じてグラフが左右にシフトし、到着遅延が出発遅延に波及しなくなる目安である $D_D/D_A = 1$ となる折返し時間が機材ごとに異なっている。よって、折返し時間の基準値は機材規模によって明確に異なるうえ、基準値以上の折返し時間が設定された便は折返し時間のバッファの効果により明確に遅延の軽減効果が見られることが明らかとなった。

図-2 は同一規模(B737-800またはA320-200といった定員 165 人程度のナローボディ機)の機材を対象に航空会社ごとに予定折返し時間の分布を示したものである。LCC2社(JJPおよびAPJ)の折返し時間の最頻値は35分で、30分での折返しも多く観測されている。また、ANAも同様に最頻値は35分である一方、JALは40分・45分が多く観測されている。同一規模の機材においても航空会社によって予定折返し時間の傾向に明確な差異があることが明らかとなった。また、図-3 は上記と同様の同一規模機材の折返し時間別 D_D/D_A を会社別に比較したものである。LCCの折返しが多い予定折返し時間「30分」「35分」においては全社とも D_D/D_A は比較的高位な傾向にあり、LCCは遅延が波及しやすい環境で運航していると考えられる。一方でJALが多くアサインする「45分」において同社の D_D/D_A は1を下回っていることから、遅延して到着した場合でも次便の出発遅延の期待値は前便の到着遅延よりも小さいと考えられる。また「35分」において各社を横断的に比較してもLCCはFSCと比べて D_D/D_A が大きい。以上より、航空会社により同一の折返し時間であっても折返し時の遅延吸収能力の違いがあることが示唆された。

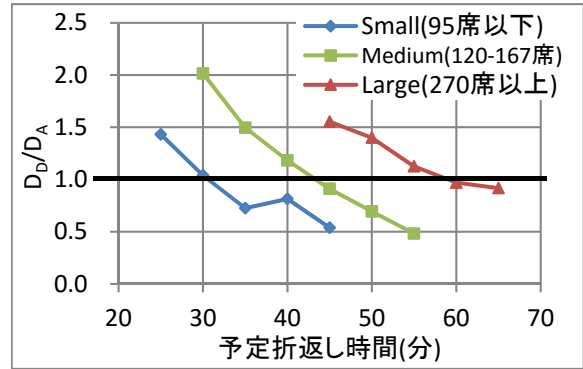


図-1 機材規模・予定折返し時間別 D_D/D_A

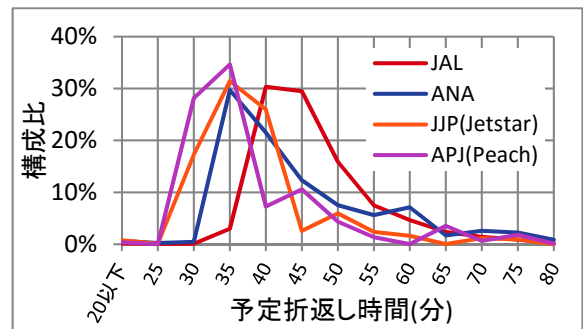


図-2 同一規模機材・会社別予定折返し時間分布

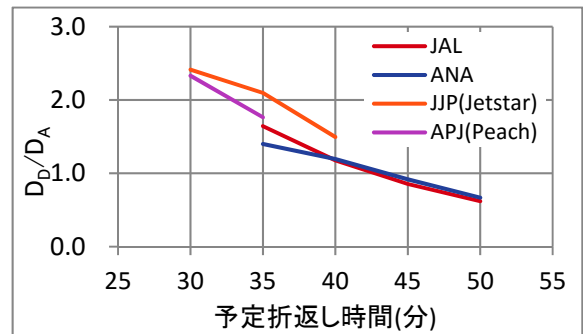


図-3 同一規模機材における会社別 D_D/D_A
(各社 1000 便以上のサンプルがある折返し時間のみ)

(3) バッファの算出手法

Kafle et al.は実際の運航時間および折返し時間の集計値からそれぞれの標準時間を定め、その値と予定運航時間および予定折返し時間を比較することで航空会社が挿入したバッファを推測する手法を提案・使用した。本研究もこの手法に倣い、バッファの算出を行った。その際に使用した標準時間の具体的な算出手法を以下に示す。なお、下記2つの標準時間の算出にあたって航空機規模や季節等、一部の集計項目はサンプル数の適正化を図るためKafle et al.の分類を改変した。また、本標準時間はバッファを算出するという目的の下に定めるものであり、故にそれぞれの条件における「最短運航時間」および「最短折返し時間」としての意味合いが求められる。よって、遅延便のみを対象に集計を行うことで、航空会社等の運

航当事者が最短でのオペレーションを行おうとした結果を反映した。

a) 運航における標準時間

路線・航空会社・航空機規模・季節(夏ダイヤ・冬ダイヤ)ごとに出発遅延便の実際の実運航時間を算出し、その 5 パーセンタイル値を標準の運航時間とした。標準時間の一例として、JAL の羽田~福岡線における標準時間の算出結果を図-4 に示す。図より、まず季節間において約 5%~10%程度の変動が見られるが、これは季節風の変動が表されたものと考えられる。また、航空機規模で比較した場合、Wide 機材の方が 5%ほど短い時間で飛行する傾向にある。これは航空機ごとの巡航速度の違いが表現されたものと考えられる。

b) 折返しにおける標準時間

航空会社・航空機定員ごとに到着遅延便の実際の折返し時間を算出し、その 25%タイル値を標準の折返し時間とした。実際の算出結果を図-5 に示す。航空機定員と標準の折返し時間の関係は概ね線形の関係が見られた。

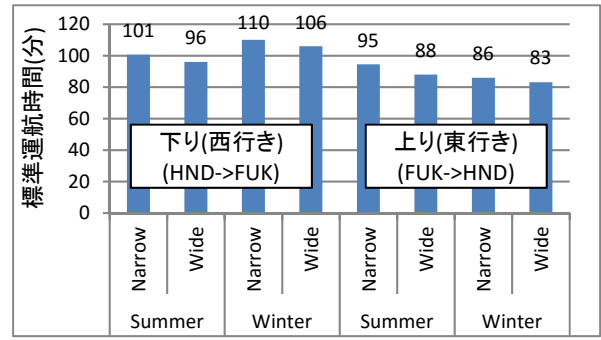


図-4 JAL の羽田~福岡線における標準時間

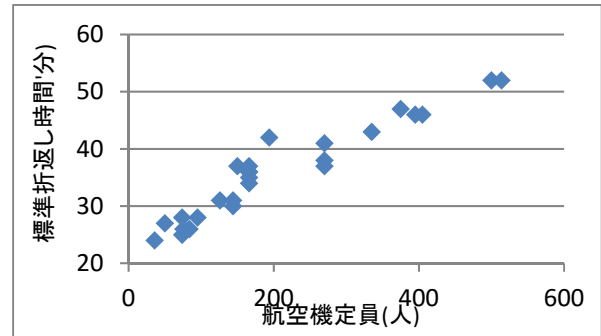


図-5 航空機定員と標準折返し時間の関係

(4) バッファの算出結果

バッファを算出した結果から得られた傾向の例として表-2 および表-3 を示す。表-2 は各航空会社ごとに運航バッファの分布を示したものである。LCC の方が長時間の運航バッファを設定する傾向が見られたが、これは地上走行時間が他空港より長時間化しやすい成田空港路線の影響を受けていると考えられる。別途計算した結果、LCC2 社の運航バッファの平均値は 12.0 分であったが、そのうち成田発路線の運航バッファの平均値は 17.3 分であった。また、表-3 は航空会社別・空港別に折返しバッファ平均値を示したものである。全空港の総計において LCC2 社の方が FSC2 社より短い時間で折り返す傾向にあることが示された。一方で LCC は関西や成田といった拠点空港では多くのバッファを設定する傾向が見られた。

5. 便益評価を念頭に置いた波及遅延モデルおよび波及乗数

(1) 遅延の分離

既存の遅延波及遅延モデルの開発の際には、データベースに収録されている 1 便ごとの遅延を「各空港に起因する遅延(オリジナル遅延)」と、そのオリジナル遅延に付随する「波及遅延」に分離したうえで解析を行っていた(第 2 章参照)。本研究でもこれに倣い、DB に収録されている遅延を各空港に起因する「オリジナル遅延」と、それに付随する「波及遅延」に分離したうえで分析を行った。分離手法は以下の通りである。なお、ある 1 日の航空機の機材繰りと各便の発着遅延をノードとリンクで

表-2 航空会社ごと運航バッファ分布

運航バッファ (分)	JAL	ANA	JJP	APJ	総計
0-5	4320	5719	301	428	10768
5-10	34086	48057	3644	3211	88998
10-15	24180	37436	2744	2064	66424
15-20	3795	13819	1938	1081	20633
20-25	638	3325	667	240	4870
25-30	82	719	328	26	1155
>30 or 不明	13	218	71		302
総計	67114	109293	9693	7050	193150

表-3 会社別・空港別の折返しバッファ平均値(分)

	JAL	ANA	JJP	APJ	総計
羽田	15.0	27.0			21.2
成田	56.9	87.8	30.8	3.2	35.3
福岡	11.1	20.9	1.8	0.6	15.0
関西	13.6	6.3	47.4	30.4	25.6
伊丹	23.7	18.4			20.1
那覇	26.3	20.4	9.1	37.5	21.3
新千歳	17.8	20.1	2.9	1.0	16.5
中部	42.8	18.3	7.3		20.8
鹿児島	14.3	6.8	0.5	0.0	8.1
仙台	19.2	12.1		0.0	12.3
その他空港	9.5	9.3	0.1	0.2	9.1
総計	15.2	17.8	14.4	13.6	16.6

表現する下記の手法は Kafle et al¹¹⁾が用いていた考え方を適用した。まず、ある航空機の 1 日の機材繰りで観測された出発または到着を時系列順にノード $i(i=1, \dots, J)$ する。よって i が奇数のノードは空港出発時のノード、偶数のノードは空港到着時のノードを表す。また、リンク $i, i+1$ は空港での折返しもしくは空港間を結ぶフライトとする。また、ノード i における実遅延を d_i 、オリジナル

遅延を o_i 、ノード k で発生しノード i で観測された波及遅延を $p_{k,i}$ とする。オリジナル遅延と波及遅延の定義を以下に示す。

a) 当日 1 便目 ($i=1$) のオリジナル遅延に関して

波及遅延は観測されていないので

$$o_1 = d_1 \quad (1)$$

b) ノード $i=2, \dots, I$ において

ノード $i-1$ からノード i への波及遅延は 2 つの遅延の比率に応じて定義する。

$$p_{i-1,i} = o_{i-1} \times \min(1, d_i/d_{i-1}) \quad (2)$$

ノード $k=1, \dots, i-2$ からノード i に波及した遅延も同様にして

$$p_{k,i} = p_{k,i-1} \times \min(1, d_i/d_{i-1}) \quad (3)$$

ノード i でのオリジナル遅延は

$$o_i = d_i - \sum_{k=1}^{i-1} p_{k,i} \quad (4)$$

(2) 既存の波及乗数による評価

波及乗数を求める既存の手法として、Welman et al. の DPM を用い、我が国の主要空港における波及乗数の算出を行った。空港 a における Welman et al. の DPM $_a$ の定義は以下のとおりである。ただし、空港 a で生じたオリジナル遅延の総和を O_a とし、 O_a に起因する波及遅延の総和を P_a とする。

$$\text{DPM}_a = \frac{O_a + P_a}{O_a} \quad (5)$$

なお、式(5)における P_a に関してある 1 便の出発時と到着時の両方で遅延量を計上することは、当該航空機に搭乗した旅客の時間短縮便益を評価するうえでは遅延のダブルカウントにあたる。よって DPM 計算上の波及遅延の総和 P_a に関しては到着時に観測された遅延のみを対象に計上する。

DB を用いて我が国における空港ごとの DPM $_a$ を算出したところ羽田空港で 1.47、那覇空港で 1.66 といった値を得た。つまり羽田空港に起因する 1 分の遅延が生じた場合、0.47 分の波及遅延が生じていることを示す。空港整備事業によって羽田空港の遅延が 1 分削減された場合、航空ネットワーク全体では 1.47 分の遅延が削減されたと考えることができる。

(3) 本研究における波及遅延モデルと波及乗数の概要

本研究で新たに算出する波及乗数の考え方は Kafle et al. による波及遅延の Multiplier 算出の考え方に類似する。すなわち、現状でのオリジナル遅延と波及遅延の関係について、波及現象へ影響を与えると考えられる環境要因を環境変数に含めた離散一選択モデルを推測する。そのうえで推定されたモデルのオリジナル遅延に付属するパラメータ値からオリジナル遅延と波及遅延の関係を考察

すると共に、オリジナル遅延を 1 分削減した際の波及遅延の変動量の期待値を算出し、これを波及遅延乗数 (DPM) とする。なお、「波及現象へ影響を与えると考えられる環境要因」に関しては旅客数のマクロな変動をはじめ、FSC と LCC の比率の変化、機材規模の変化等が考えられるが、これらの変動は概ねスケジュール上のバッファの大小で表現が可能であると考えられる。よって、環境変数としては運航時のバッファおよび折り返し時のバッファの 2 種類を考慮した。また、モデルの被説明変数である波及遅延量に関しては Welman et al. が指摘した利用者便益の推定上除外すべき遅延のダブルカウント (本章(2)参照) を除外した値を使用し、費用便益分析への対応が可能な DPM の推測を行う。

(4) 波及遅延モデル

モデルの被説明変数はオリジナル遅延に付随する総波及遅延である。また、被説明変数である総波及遅延は波及遅延量の 0 以下の値を取り得ないことから、本研究で使用するモデルとして $y > 0$ の打ち切り回帰モデル (タイプ 1 Tobit モデル) を選定した。

モデルの主たる説明変数はオリジナル遅延 O_i である。なお、ある 1 日の航空機の機材繰りを想定すると、より上流で生じたオリジナル遅延に付属する総波及遅延が多くなると想定される。この点を考慮し、本研究においては 1 日 (6:00~22:00) を 4 時間ごとに 4 つの時間帯セグメント t に分割したうえで、オリジナル遅延が観測されたセグメントを判別するダミー変数 δ_t^i ($t = 1, \dots, 4$) を導入した。また、遅延の波及現象に対して運航時間におけるバッファの効果が大きいことを考慮して「ノード i より後で観測される運航バッファの総和 (B_i^O)」および「ノード i より後で観測される折返しバッファの総和 (B_i^G)」を導入した。そのうえで時間帯判別ダミー δ_t^i およびバッファ $B_i^O \cdot B_i^G$ をオリジナル遅延 O_i との交差項とすることで波及遅延と環境要因の複合的な関係を表現した。上記を踏まえ、本研究で想定する Tobit モデルを改めて整理する。

$$y = \begin{cases} y^* & y^* > 0 \\ 0 & y^* \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$y_i^* = \beta_0 + \left(\sum_{t=1}^4 \beta_t \delta_t^i + \beta_5 B_i^O + \beta_6 B_i^G \right) O_i + \varepsilon_i \quad (7)$$

ここで y は目的変数 (波及遅延量) であり、 y_i^* は潜在変数である。また式(7)に関して

O_i : 当該ノード i で観測されたオリジナル遅延 (分)

δ_t^i ($t = 1, \dots, 4$) : O_i が時間帯 t で観測されたことを示すダミー変数

B_i^O : 当該航空機が運用された当日のノード i より後で観測される運航バッファの総和 (分)

B_i^G : 当該航空機が運用された当日のノード i より後で

観測される折返しバッファの総和(分)

$\beta_i (i = 0, \dots, 6)$: パラメータ

ε_i : 誤差項

である。

Tobit モデルから導出される対数尤度関数から最尤法により各パラメータ β の推定を行う(式 8)。なお、パラメータ推定にあたってはフリーの統計分析ソフトウェアである「R」を使用した。また Tobit モデルの最尤推定はパッケージVGAM¹⁴⁾に収録されている `vglm()`関数を使用した。

$$\beta = \operatorname{argmax}_{\beta} \{ \log L \} \quad (8)$$

$$= \operatorname{argmax}_{\beta} \left\{ \sum_{y_i^* \leq 0} \log \left[1 - \Phi \left(\frac{x_i \beta}{\sigma} \right) \right] + \sum_{y_i^* > 0} \log \left[\frac{1}{\sigma} \phi \left(\frac{y_i - x_i \beta}{\sigma} \right) \right] \right\}$$

(5) 波及乗数

標準的な Tobit モデルで推定される係数 β_i は、説明変数のうちの対応する変数が 1 単位増加するときの潜在変数 y_i^* の期待値の増分を表しており、標準的な重回帰モデルであればこの増分が被説明変数 y_i^* の増分である。しかし Tobit モデルにおいて潜在変数が負の値を取る場合には、被説明変数がゼロに繰り上げられることから説明変数が 1 単位増加する際の被説明変数の増分期待値は該当するパラメータ β_i と一致しない。一方で、潜在変数 $y_i^* (y_i^* = x_i \beta + u_i)$ を有する Tobit モデル y_i において説明変数 x_k が 1 単位増加する際の期待値は $\beta \Phi(\bar{x} \beta / \sigma)$ であることが明らかにされている¹⁵⁾。ここで $\Phi(\cdot)$ は標準正規分布の累積分布関数、 σ は誤差項の標準偏差、 \bar{x} は説明変数 x の平均値である。本研究でもこれに倣ってパラメータの解釈を行う。つまり、バッファの条件が現況と同一の場合、時間帯 t においてオリジナル遅延 1 分を削減した場合に削減される波及遅延量 D_p^t は

$$D_p^t = (\beta_1 + \beta_5 + \beta_6) \Phi \left(\frac{\beta \bar{x}}{\sigma} \right) \quad (9)$$

である。よって時間帯 t においてオリジナル遅延 1 分を削減した場合の総遅延削減量を示す波及遅延乗数を DPM_t とすると

$$DPM_t = 1 + D_p^t \quad (10)$$

と表現される。

また、ノード i より後で観測される運航バッファ B_i^O が 1 分増加した場合に削減される波及遅延量 D_p^S 、同折返しバッファ B_i^G が 1 分増加した場合に削減される波及遅延量 D_p^G は(式 9)と同様の考え方で

表-4 全空港出発遅延を対象としたモデル推定結果と DPM_t

項目	β_i	Signif.	Dp	DPM_t
β_0 切片	-8.612	***	—	—
β_1 時間帯 t=1	2.164	***	0.677	1.677
β_2 時間帯 t=2	1.961	***	0.609	1.609
β_3 時間帯 t=3	1.442	***	0.437	1.437
β_4 時間帯 t=4	1.236	***	0.368	1.368
β_5 運航バッファ	-0.123	***	-0.041	—
β_6 折り返しバッファ	-0.004	***	-0.001	—

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
サンプル数 84850 便

$$D_p^S = \beta_5 \Phi \left(\frac{\beta \bar{x}}{\sigma} \right) \quad (11)$$

$$D_p^G = \beta_6 \Phi \left(\frac{\beta \bar{x}}{\sigma} \right) \quad (12)$$

と表される。よって、各バッファが ΔB_i^O 分または ΔB_i^G 分変動した場合の DPM_t 'は

$$DPM_t = 1 + D_p^t + (\Delta B_i^O \beta_5 + \Delta B_i^G \beta_6) \Phi \left(\frac{\beta \bar{x}}{\sigma} \right) \quad (13)$$

と表現される。

(6) モデル式の推定結果

表-4はDBで観測された全ての出発遅延を対象に、モデル推定と波及遅延乗数 DPM の算出を行った結果である。 β_0 はモデルの切片を表し、 β_i は式(7)における係数である。また、表中の Dp は時間帯 t においてオリジナル遅延 1 分を削減した場合に削減される波及遅延量(分)を示し、 DPM_t は(式 10)で求められる波及遅延乗数である。時間帯別のオリジナル遅延に直接乗ずるパラメータ $\beta_1 \sim \beta_4$ の大きさと符号はおおむね遅延の波及現象を説明するうえで尤もらしいものであると考えられる。つまり、同一量のオリジナル遅延 O_i であっても朝(時間帯 1)に観測された遅延の波及量が最も大きく時間帯が進むにつれてその量は減少する傾向が観測された。また、バッファに関するパラメータ β_5 および β_6 の符号は負であり、バッファが増大するに連れて波及遅延の量が削減される傾向が観測された。

なお、上記の推定結果は我が国の航空ネットワーク全体での波及現象の傾向を示したものである。特定の空港における施策に対する費用便益分析を行う場合、当該空港に起因するオリジナル遅延を元にモデル分析を行わなければならない。

6. 実際の遅延軽減施策を対象としたケーススタディ

(1) 対象とする施策の概要

羽田空港における遅延軽減施策を対象に、DPMを使用した総遅延削減量の推定を行った。今回推定の対象とする施策は羽田空港において RECAT(後方乱気流区分の細分化)および AMAN/DMAN/SMAN(空港運用の効率化)を導入した際の遅延削減量である。本施策によって削減されると想定される遅延量は CARATS が取りまとめた報告書¹⁶⁾に記載されている。表-5 にそのシミュレーションの概要と結果を示す。本施策をケーススタディとして波及遅延量を含めた総遅延削減量の推計を行った。

(2) 羽田空港を対象としたモデル推定

実際の費用便益分析へモデルを適用するにあたり当該空港の遅延を対象としたモデル推定を行う必要がある。今回の施策では羽田空港出発便の遅延軽減がシミュレートされていることから、本研究では羽田空港出発時のオリジナル遅延に起因する波及遅延のモデル推定を行った。

モデル推定の結果を表-6 に示す。例えば羽田空港の時間帯 1 における DPM_t は 1.575 であり、空港整備事業により当該時間帯における出発遅延を 1 分削減した場合、波及遅延も含めた総遅延の削減量は 1.575 分であると推定される。また、全空港を対象に分析した結果である表-2 と同様にバッファに関する 2 つのパラメータの符号は負であった。なお、第 5 章(2)で示した羽田空港における Welman の DPM は 1.47 であったが、この値は本研究における時間帯別 $DPM_t(t=1, \dots, 4)$ の平均値と概ね一致する。特定の時間帯における施策の効果の評価を行う場合、本研究の DPM_t のようにオリジナル遅延の発生時間帯を考慮した指標を設計すべきであると考えられる。

モデル推定の結果を表-6 に示す。例えば羽田空港の時間帯 1 における DPM_t は 1.575 であり、空港整備事業により当該時間帯における出発遅延を 1 分削減した場合、波及遅延も含めた総遅延の削減量は 1.575 分であると推定される。また、全空港を対象に分析した結果である表-2 と同様にバッファに関する 2 つのパラメータの符号は負であった。なお、第 5 章(2)で示した羽田空港における Welman の DPM は 1.47 であったが、この値は本研究における時間帯別 $DPM_t(t=1, \dots, 4)$ の平均値と概ね一致する。特定の時間帯における施策の効果の評価を行う場合、本研究の DPM_t のようにオリジナル遅延の発生時間帯を考慮した指標を設計すべきであると考えられる。

(3) 事業による総遅延削減量の推定

施策によって回避された時間帯別の年間遅延量と、該当する時間帯の DPM_t を掛け合わせることで 2020 年における波及遅延を含む年間総遅延削減量を算出する。施策によって削減された遅延は時間帯 $t=1$ および $t=3$ の時間で計上されていることから、両時間帯における総遅延削減量の総和は

$$214 \text{ 時間} \times 1.575 + 756 \text{ 時間} \times 1.411 = 1403.8 \text{ 時間} \quad (14)$$

であり、波及遅延を考慮しない場合の年間遅延削減量である 970 時間に比べて総遅延削減量はおよそ 1.4 倍に上ることが示された。

(4) 外部環境の変化による総遅延削減量の変動の試算

本研究で開発した DPM_t は、将来的な LCC シェアの変化や、機材の運用の高効率化(≒バッファの短縮)といった航空市場の環境変化を踏まえた総波及遅延量の変化を

表-5 施策によって回避された遅延量とシミュレーションの概要¹⁶⁾

	2014~2019 年	2020~2033 年
夕方 3 時間で回避された年間遅延(h/年)	642	756
朝 1 時間で回避された年間遅延(h/年)	214	214
上記の合計(h/年)	857	970
【シミュレーションの概要】		
<ul style="list-style-type: none"> ・夕方 3 時間、朝 1 時間の合計 4 時間のピーク時間帯において、2019 年までは 80 回/時の発着シナリオ、2020 年以降は、朝のピーク 1 時間(80 回/時)、夕方のピーク 3 時間(90 回/時)の発着シナリオ。それ以外の時間帯については効果がゼロとした ・北風運用、南風運用の割合は年間を通じて 1 : 1 と仮定。 ・ピーク時間帯の遅延時間は同一シナリオでは一定と想定。 ・評価期間は 2019 年から 5 年、10 年、15 年とする。 		

表-6 羽田空港出発便を対象としたモデル推定結果と DPM_t

項目	β_i	Signif.	Dp	DPM_t
β_0 切片	-8.545	***	—	—
β_1 時間帯 $t=1$	1.846	***	0.575	1.575
β_2 時間帯 $t=2$	1.798	***	0.560	1.560
β_3 時間帯 $t=3$	1.320	***	0.411	1.411
β_4 時間帯 $t=4$	1.164	***	0.363	1.363
β_5 運航バッファ	-0.114	***	-0.036	—
β_6 折り返しバッファ	-0.002	***	-0.001	—

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
 32514 便
 (参考) 羽田空港における Welman の DPM: 1.47 (第 5 章(2)参照)

表-7 航空各社別のバッファ(分)

		JAL	ANA	JJP	APJ	平均
LCC 参入前 (現状)	折返し バッファ B_i^G	40	58	—	—	$\overline{B_i^G}=49.3$
	運航 バッファ B_i^O	40	46	—	—	$\overline{B_i^O}=43.1$
LCC 参入後	折返し バッファ B_i^G	40	58	45	50	$\overline{B_i^G}=48.4$
	運航 バッファ B_i^O	40	46	40	34	$\overline{B_i^O}=39.9$

※JAL および ANA は DB における羽田発着路線で集計。
 ※JJP および APJ は 2017 年現在で羽田発着の国内線に就航していないため、両社全路線の平均値である。
 ※「平均」は就航各社を均等に重みづけした平均値。

推計することが可能である。そこで本稿では将来的な航空市場の環境変化として LCC シェアの増加を仮定し、そのような環境下における波及遅延量の推計手法を例示する。具体的には羽田空港の国内線発着便の 50% が LCC に代替された環境を想定し、前項までに示した羽田空港における RECAT および AMAN/DMAN/SMAN を導入した際の遅延削減量その際の影響を推計する。なお、羽田

空港においては現在国内線 LCC が就航していないことから、バッファ B_i^G および B_i^O の変動により LCC における遅延の波及を表現する。まず、現状において羽田空港を使用する主要な FSC2 社(JAL および ANA)のバッファ B_i^G および B_i^O を表-7 の「LCC 参入前」に示す。両社の就航比率を 1:1 と仮定し平均値をとると $\overline{B_i^G}=49.3$ 分、 $\overline{B_i^O}=43.1$ 分である。次に LCC50%参入後の状態を仮定する。羽田空港に乗り入れる LCC としては JJP および APJ を仮定し、FSC2 社と LCC 社が均等に就航したと仮定すると、LCC 就航後のバッファの平均値は $\overline{B_i^G}'=48.4$ および $\overline{B_i^O}'=39.9$ となる。よって、LCC 参入前後を比較すると折返しバッファの変動 $\Delta B_i^G=-0.9$ 分、および運航バッファの変動 $\Delta B_i^O=-3.2$ 分である。これと式(15)より、LCC

参入後の DPM_t' を得ることができる。 DPM_t' の算出結果を表-8 に示す。LCC 参入後の DPM_t' は参入前の DPM_t (表-6)と比較して大きい値を得ており、LCC 参入により各バッファが短縮され遅延が波及しやすくなった状態が表現されている。

施策によって回避された時間帯別の年間遅延量と、該当する時間帯の DPM_t' を掛け合わせることで 2020 年における LCC 参入後の波及遅延を含む年間総遅延削減量を算出すると

$$214 \text{ 時間} \times 1.691 + 756 \text{ 時間} \times 1.527 = 1516.3 \text{ 時間} \quad (15)$$

であり、LCC 参入前の年間総遅延削減量(1403.8 時間)と比べて総遅延削減量は 8%増加することが推測された。

7. 空港折返しにおける波及遅延予測とターミナル空域の管制運用に関する考察

前節までは波及遅延の費用対効果分析への活用を主に検討してきたが、本節では管制運用面での活用方法を検討する。空港の滑走路配置と運用方法によって離陸と着陸の経路が交差したり、または同一の滑走路を離着陸共用で使用したりする。その場合、離陸と着陸が相互に従属運用になり、別の言い方をすると、2 機の着陸機の間には離陸機を何機挟んで処理するか、という管制官の意思決定が発生し、それが滑走路の処理効率に一定程度影響する。例えば、羽田空港の南風運用時には D 滑走路着陸機の間には A・C 滑走路から離陸機を処理する必要があり(図-6)、その際、D 滑走路着陸機の間隔設定を周辺のターミナル空域と呼ばれる飛行エリアで管制官が調整しており、離陸機を多く挟むときは着陸間隔を伸ばし、逆の際は縮めるといった処理を行っている。到着機がターミナル空域に入ってから着陸まで 15~20 分程度かかるため、ターミナル空域に入域時に 20 分後の離陸機数を想定して、着陸間隔設定を行うことになるが、ここで2つ

表-8 LCC シェア変動後の羽田空港の DPM_t'

時間帯	LCC 参入後 DPM_t'
時間帯 1(6:00~10:00)	1.691
時間帯 2(10:00~14:00)	1.676
時間帯 3(14:00~18:00)	1.527
時間帯 4(18:00~22:00)	1.479

の検討課題があると考えている。1 つ目はターミナル空域内で調整可能な間隔には限界があるため、より早期から(空港から離れた地点から)調整ができた方が滑走路処理効率を上げるチャンスが広がるのではないかという点、2 つ目はより早期に着陸間隔調整するためには関連する離陸機数を予測する行為が必要になるのではないかという点である。詳細は割愛するが、二見(2017)¹⁷⁾における羽田空港の南風時を対象にした分析では、1 つ目の「早期の間隔調整」、つまり着陸間隔調整の幅上限を広げることで処

理効率が上がる可能性があること、離陸機数の予測精度を上げると処理効率が上がる可能性があることをシミュレーションにより示している。ここで、離陸機数の予測精度向上のためには、該当する離陸機が旅客ターミナルを何時にスポットアウトするかを予測する必要があり、そのために本研究で分析している波及遅延について、該当する離陸機の前便となる羽田到着機の到着遅れ時刻から折返しの出発時刻を予測することが精度高くできれば、上記のような管制運用上の滑走路処理効率を上げられる可能性がある。このような空港での折返し時の波及遅延については本研究で示したような帰帰モデルでも一定程度の精度で予測することが可能である。詳細は講演時に報告したい。

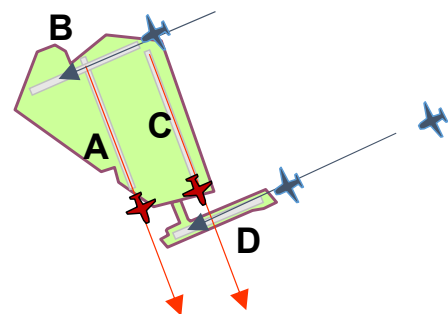


図-6 羽田空港の南風時の滑走路運用

8. まとめ

本研究を遂行するにあたっては、現在 Web 上で取得可

能な航空運航情報を収集・統合したうえで機材繰りの追跡が可能な独自の運航実績データベースを構築した。データベースの収録率を暫定的に算出したところ、2016年9~11月において全空港合計の収録率はおおむね44%であった。航空機の遅延に関するデータ公開量が乏しい我が国において独自の運航実績データベースを構築する可能性を示したことで、今後の航空関連施策に関する研究を進展させるうえで有益な知見を提供したと考えられる。

また、構築したデータベースを用いて空港での折返しにおける遅延の波及現象に影響を与える要因について分析を行い航空会社が設定する予定折返し時間が空港での遅延の波及に対し明確な影響を与えていることを示した。

最後に我が国の空港整備事業の費用便益分析に波及遅延の考え方を導入する指標(DPM_t)の検討を行った。本DPM_tは特定の空港に起因する遅延の削減量から波及遅延の削減量を算出するという点で既存の指標と類似した使用法が可能であるが、利用者便益の評価に供することを念頭に置いたモデル推定と環境変数の変化に対応可能な変数設計を両立させたことに新規性がある。また、DPM_tを実際の事業に適用するケーススタディとして羽田空港の整備に伴う直接的な遅延削減量に対し、波及遅延を含む総遅延削減量の推定を行った。結果として総遅延削減量は直接的な遅延削減量の約1.4倍に上ることが明らかとなった。最後に、波及遅延予測モデルによる管制運用の効率化に関する考察を行った。

謝辞：本研究は、平成27、28年度「JAXA航空技術部門公募型研究」の支援を受けて実施した研究の一部である。ここに記して、感謝の意を表す。

脚注1：ADS-B(放送型自動従属監視)航空機が自機の情報(識別、GNSS座標、速度、経路意図等)を一括送信する装置および機構の名称。本来は航空機相互間の衝突防止や、航空管制の効率化を図るために使用されている。

参考文献

- 1) 国土交通省: 将来の航空交通システムに関する推進協議会, http://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr13_000006.html, 2016/11/20 閲覧。
- 2) 国土交通省: 公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針(共通編), p.3, 2009.
- 3) CARATS推進協議会費用対効果分析手法検討分科会: CARATS 費用対効果分析の考え方, p.37, 2012.
- 4) Boswell, S., Evans, J., : Analysis of Downstream Impacts of Air Traffic Delay. Project Report ATC-257. MIT Lincoln Laboratory, Cambridge, MA., 1997.
- 5) Zhang, Y., Nayak, N., 2010.: Macroscopic tool for measuring delay performance in national airspace system. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2177, pp. 88–97, 2010.
- 6) Nayak, N., Zhang, Y., : Estimation and comparison of impact of single airport delay on national airspace system with multivariate simultaneous models, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2206, pp. 52–60, 2011.
- 7) Nikolas Pyrgiotis, Kerry M. Malone, Amedeo Odoni: Modelling delay propagation within an airport network, Transportation Research Part C, ol.27, pp.60-75, 2013.
- 8) Lu Haoa, Mark Hansena, Yu Zhangb, Joseph Postc: New York, New York: Two ways of estimating the delay impact of New York airports, Transportation Research Part E 70, pp.245–260, 2014. Stephen Welman et al., Calculating Delay Propagation Multipliers for Cost-Benefit Analysis, MITRE PRODUCT, MP100039, 2010.
- 9) Nabin Kafle, Bo Zou: Modeling flight delay propagation: A new analytical-econometric approach, Transportation Research Part B 93, pp.520–542, 2016.
- 10) 坂下文規, 森地茂, 日比野直彦: 羽田空港における航空遅延および出発時地上走行遅延に関する研究, 第40回土木計画学研究会発表会・講演集, 2009.
- 11) Flightradar24.com: About, <https://www.flightradar24.com/about> (2017/4/24閲覧)。
- 12) 国土交通省: 平成27年空港管理状況調書(PDF形式), <http://www.mlit.go.jp/common/001141842.pdf>(2017/1/29閲覧)。
- 13) Thomas W. Yee : Package ‘VGAM’, <https://cran.r-project.org/web/packages/VGAM/VGAM.pdf>(2017/2/6閲覧)。
- 14) Wooldridge: Introductory Econometrics: A Modern Approach, 2006.
- 15) CARATS推進協議会ATM検討WG: 平成26年度 活動報告書, <http://www.mlit.go.jp/common/001041606.pdf>(2017/2/10閲覧)。
- 16) 二見康友, 羽田空港における滑走路使用効率の実態と向上策に関する研究, H28年度茨城大学大学院修士論文, 2017.

Analysis of delay propagation in aviation network for cost-benefit-analysis and ATC operations

Wataru KODATO, Terumitsu HIRATA, Yasutomo FUTAMI, Naoki MATAYOSHI