航空機遅延の波及現象の解析と空港整備事業の評価手法に関する研究

交通・地域計画研究室　古田土 渉
指導教員　平田 輝満 准教授

【目次】

第1章　序論
1－1 研究の背景
1－2 本研究の目的
1－3 用語の定義と解説

第2章 既存研究の整理と本研究の位置付け
2－1 我が国における航空機遅延を対象とした調査研究
2－1－1 CARATS 推進協議会による調査結果
2－1－2 国交省 定時就航率輸送実績に関する情報
2－1－3 羽田空港を対象とした遅延に関する研究
2－1－4 遅延の発生局面に着目した研究
2－2 航空機遅延の波及現象の分析と便益評価への適用に関する既存研究
2－2－1 空港起因の遅延と波及遅延の関係を定量的に示した研究
2－2－2 運航中の余裕時間(バッファ)と遅延の波及現象に関する研究
2－3 本研究の位置づけ

第3章 機材繰り情報を付与した運航実績データベースの構築
3－1 独自データベース構築の背景
3－2 Web 上で取得可能な情報の整理
3－2－1 航空会社公式 Web サイトの運航情報
3－2－2 空港公式 Web サイトにおける発着情報
3－2－3 航空機軌跡公開ウェブサイトの情報
3－2－4 その他 遅延要因等の分析へ適用可能な Web 上の情報
3－2－5 搭乗時の実測データを用いた Web 取得データの検証
3－3 情報の取得手法
3－3－1 使用する情報の選定
3－3－2 情報取得プログラムの概要
3－4 データベース構築
3－4－1 機材マッチング
3－4－2 データベースの構築
3－5 データベースの収録率に関する集計
3－5－1 公式 Web サイト情報からの情報取得状況
3－5－2 公式 Web サイト情報に対する登録記号付与状況
3－5－3 連続性照査の結果と最終的な DB 収録便数
3－5－4 収録便数と収録率に関する集計

第4章 空港での折返しにおける遅延の波及現象の分析
4－1 折返しにおける到着遅延と出発遅延の関係
4－1－1 折返し時間に着目した分析
4－1－2 航空会社別に着目した分析
4－1－3 空港別に着目した分析
4－2 出発時刻推定モデルの構築による分析
4－2－1 モデルの概要
4－2－2 説明変数と使用データ
4－2－3 モデルの推定結果と考察

第5章 波及遅延量の予測モデルの構築
5－1 既存研究における評価指標
5－1－1 Welman による DPM
5－1－2 Kafle による Multiplier
5－2 既存指標を用いた我が国における波及遅延の実態分析
5－3 総遅延削減量を推定する指標の検討
5－3－1 指標の設計
5－3－2 モデル式の推定結果

第6章 結論
6－1 結論
6－2 今後の課題

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[1]．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．この他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上で，それに時間価値や燃料消費量等の便益の単価を掛け合わせることで便益を算出している．しかし，当該空港の処理容量の拡大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は我が国には導入されていない．

一方で，米国においては航空機遅延の波及現象を考慮した費用便益分析を実施する動きも見られている．Welman et al.[4]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上で，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．連邦航空局(FAA)は本指標を航空事業における費用便益分析に用いているとされている．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の算出までに留まっており，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[5].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．その上で離散‐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好ましくない部分も見られる．

上記の米国における波及遅延分析の知見を踏まえ，我が国においても空港整備事業による波及遅延の削減量を算出することが可能となれば，当該事業により生じる便益をより精緻に評価することが可能になると考えられる．また，遅延の波及度合いは空港や空域の混雑状況のみならず，運航者(航空会社)のスケジューリングやオペレーションの方針に影響を受けると考えられる．よってそれらの影響要因を環境変数として考慮した波及遅延の予測モデルを構築することで，航空情勢の変化を考慮した波及遅延の予測が可能になると考えられる．更に運航者に対しても遅延の波及を抑止させるための知見を定量的に提供することで，空港整備事業とあわせて航空ネットワーク全体の更なる高度化を図ることが可能になると考えられる．

2. 本研究の目的

本研究の目的を以下に示す．本研究の最終的な目的は，我が国の航空関連施策の費用便益分析において考慮されていなかった遅延の波及現象についてそのメカニズムを解析すると共に，今後の費用便益分析において波及遅延の削減効果を考慮する際に必要な知見を提供することにある．また，目的を実現するための具体的な目標として以下の2点を掲げる．

① 運航中や空港での折返しにおける遅延の波及(回復)現象に関して，航空会社の違いや機材の違い，折返し時間ごとに分析を行い，遅延の波及現象に影響を与える要因について整理する．

② 波及遅延を評価した既存の研究の知見を元に，①で明らかにした影響要因を考慮した波及遅延量予測モデルを構築する．また，空港整備に伴う波及遅延量も含めた総遅延削減量を示す指標を提示する．

なお上記目的を実現する上では機材繰りの追跡が可能な運航実績データベースが必要不可欠である．しかし，我が国においてはそのようなデータベースは一般に公開されていない．そこで本研究の副次的な目標として下記の点を掲げる．

③　現在Web上で入手可能な運航データを収集・統合したうえで分析に資する運航実績データベースを構築すると共に，その方法論を示す．

3.　データベース構築

(1) 取得対象の情報の整理

本研究で必要とされる情報は主に①航空会社公式Webサイトで公表されている運航情報，および②航空機軌跡公開サイト(Flightradar24 ;以下「FR24」)で取得することができる．前者は各便の発着時刻の予定値と実績値を入手可能であり，それらの時刻を元に各便のゲートにおける遅延が算出できる．後者は航空機から送信されたADS-B [脚注2]情報を収集・再公開する Web サイトである．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，同一登録記号の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を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．

(2) 情報の取得とデータベースの構築

(1)で示した Web サイトに定期的にアクセスするプログラムを構築し，情報の取得を継続的に行っている．また，航空会社公式 Web サイトに収録されたデータを日付+便名一致で 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データベース(以下「DB」)を構築する．現在までに構築した DB の概要を**表-1** に示す．なお，DB の構築にあたっては機材の運用を 1 日単位で追跡し，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照査した．

(3) オリジナル DB の収録率

公式 Web サイトでの情報取得は**表-1** に示した国内の航空会社のみを対象に行っていることから，本 DB はサンプルデータである．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およその収録率を試算した．なお情報取得の方法は逐次改善を行っていたため，取得手法が安定した 2016 年 9 月~11 月を対象に試算している．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[6]」に記載された 2015 年 9 月~11 月の国内線着陸数である．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，①空港に就航する各航空会社のシェアの違いと②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高経年等の理由により 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．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ので留意すべきである．

表-1　オリジナル DB の概要

収録期間	2016/2/1~情報収集継続中 (統合処理済みは~2016/10/31 まで) (2017/2/10 現在)
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 (※1)
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 [脚注2] 搭載機に限る

4.　航空機遅延の波及現象の解析

(1) 既存の指標 DPM の算出による波及遅延の現状評価

空港で発生した遅延が波及して航空ネットワークに与える影響の度合いを定量的に示す指標としては，先述した Welman の DPM の考え方が適していると考えられる．そこで遅延の波及現象のメカニズム解析に先立ち，我が国における波及遅延の現状を把握するため DPM の算出を行った．

DPM の算出にあたっては，まず DB に収録されている遅延をオリジナル遅延と波及遅延に分離する必要がある．

遅延の分離手法は以下の通りである．まず各空港での出発もしくは到着をノードiとし，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である．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は以下の通りである．

①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$O_1 = D_1$ (1)

②ノード$i = 2, \ldots, I$において

ノード$i-1$からiへの波及遅延；

$$p_{i-1,i} = O_{1-1} \times \min(1, D_i/D_{i-1}) \quad (2)$$

ノード$k = 1, \ldots, i-2$からノードiに波及した遅延；

$$p_{k,i} = p_{k,i-1} \times \min(1, \mathrm{D}_i/\mathrm{D}_{i-1}) \quad (3)$$

ノードiでのオリジナル遅延；

$$\mathrm{O}_1 = \mathrm{D}_1 - \sum_{k=1}^{i-1} p_{k,i} \quad (4)$$

また Welman の DPM の定義は

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

ただし，

O_a: 空港aで生じたオリジナル遅延の総和

P_a : O_aに起因する波及遅延の総和(到着時観測)

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上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 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ことと同義である．

(2) 空港における波及現象の分析

メカニズム解析の過程で，航空機の運用状態を「運航中」と「駐機中(=折返し待機中)」に二分すると，駐機中の方が遅延は回復する傾向にあることが明らかとなった．これは空港における折返し時間が遅延を吸収するバッファとして機能していることに起因すると考えられる．そこで空港における航空機の折返しに着目し，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を用いて折返し時間のバッファ効果に関して評価を行った．

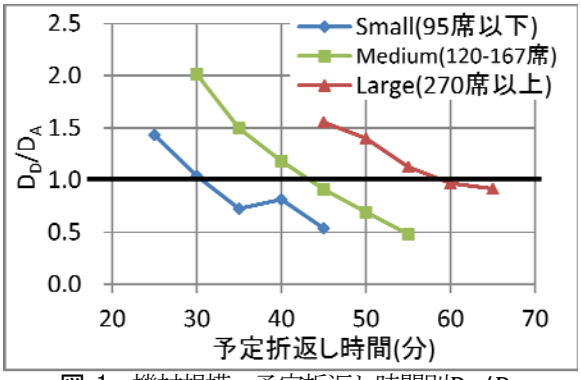

図-1　機材規模・予定折返し時間別D_D/D_A

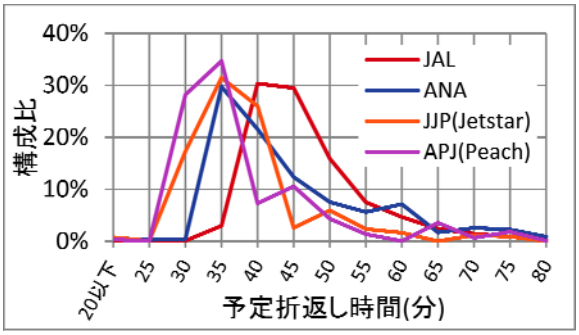

図-2 同一規模機材における会社別予定折返時間分布

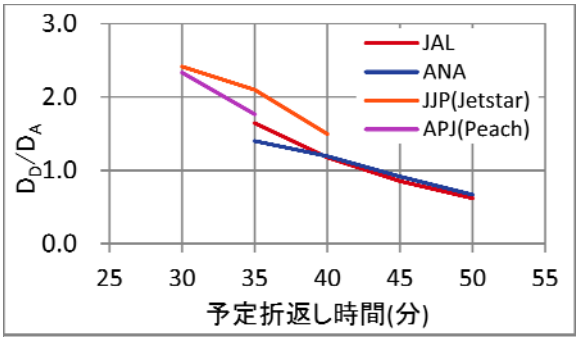

図-3　同一規模機材における会社別D_D/D_A
(各社 1000 便以上のサンプルがある折返し時間のみ)

$$D_D/D_A = \frac{\sum_{n=1}^{N} \frac{n\text{便目の出発(Deperture)遅延}D_{D_n}}{n\text{便目の到着(Arrival)遅延}D_{A_n}}}{D_{A_n} > 0 \text{ の折返し便数} N} \quad (6)$$

例えばある条件下でD_D/D_A =0.5 を得た場合，その条件では到着遅延時間の半分の値が出発遅延時間の期待値であることを示す．また，指標の特性上，早着・定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上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，折返し時間と遅延波及の関係に影響を与える要因の一つとして機材規模が挙げられることが示唆される．

図-2 は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・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おり，LCC および ANA と比べて余裕のある機材繰りがなされていることが分かる．また，**図-3** は航空会社別に同一規模機材の駐機時間別D_D/D_Aを比較したものである．LCC の折返しが多い「30 分」「35 分」において全社とも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 便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，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．

5. 総遅延削減量を推定する指標(Multiplier)の推定

(1) Multiplier の概要

空港整備事業によって削減された総遅延削量を推定する指標値(Multiplier)の検討を行う．ここで「総遅延削減量」とは空港整備事業によって削減された遅延と，それに付随して削減された波及遅延の合計値である．

本研究における Multiplier の考え方は Kafle による Multiplier 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要因を環境変数に含めた離散ー選択モデルを推測する．その上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，Multiplier を求める．なお，モデルの被説明変数である波及遅延量に関しては Welman 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(4.(1)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 Multiplier の推測を行う．

(2) モデルの設計

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．

説明変数としては第一にオリジナル遅延O_iを挙げる．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 時間ごとの 4 つのセグメントに分割した上で，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$\delta_i^t(t=1,\dots,4)$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)」を説明変数として与える．各リンク(折返しまたは運航中)におけるバッファの算出方法は Kafle らに倣い，運航，折返しそれぞれの標準時間を算出した上で，予定された時間から標準時間を減ずることでバッファとする．またバッファの増減とオリジナル遅延O_iおよび総波及遅延の複合的な関係を考慮するため，説明変数における運航バッファB_i^Oおよび折返しバッファB_i^Gに関しては，それぞれオリジナル遅延O_iと掛け合わせた値を使用する．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．

$$y_i^*=\beta_0+(\beta_1\delta_i^1+\beta_2\delta_i^2+\beta_3\delta_i^3+\beta_4\delta_i^4)O_i+(\beta_5B_i^O+\beta_6B_i^G)O_i+\varepsilon_i \tag{3}$$

$$y=\begin{cases}y^* & y^*>0\\ 0 & y^*\leqq 0\end{cases} \tag{4}$$

ただしyは目的変数(波及遅延量)であり，y_i^*は潜在変数，$\beta_i(i=0,\dots,6)$は各変数に付随するパラメータ，ε_iは誤差項である．また，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を$D_p^t=(\beta_t+\beta_5+\beta_6)\Phi(\beta\bar{x}/\sigma)$と定義し，総遅延削減量を推定する$\mathrm{Multiplier}_t$を

$$\mathrm{Multiplier}_t=(1+D_p^t)/D_p^t$$

とする．($\Phi(.)$は準正規分布の累積分布関数)

(3) モデル式の推定結果

モデル推定の具体例として羽田空港出発便を対象としたモデル推定結果を**表-2** に示す．時間帯別のオリジナル遅延に直接乗ずるパラメータβ_1~β_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上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．また，時間帯 1 における$\mathrm{Multiplier}_1$は 1.677 であり，空港整備事業により当該時間帯における遅延を 1 分削減した場合，波及遅延も含めた総遅延削減量は 1.677 分と推定される．

なおこれらのモデル推定をエアラインごとに行った結果を**図-4** に示す．図より FSC より LCC の方が遅延が波及しやすい状況であることが読み取れる．

6. 結論

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・統合した上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方法論を示したことで，今後の航空関連施策に関する研究を発展させる上で有益な知見を提供したと考えられる．

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見出した．また，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(Multiplier)の検討を行った．本 Multiplier 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たことに新規性がある．また，Multiplier の推定を行った結果，マクロな視点においても LCC の遅延が波及しやすい傾向にあることを示した．

表-2 羽田空港出発便を対象としたモデル推定結果

対象空港		羽田空港		
発着		発		
航空会社		全社		
その他				
β_0	(Intercept):1	-8.545	***	Dp
β_1	Time1_OriDly	1.846	***	0.677
β_2	Time2_OriDly	1.798	***	0.609
β_3	Time3_OriDly	1.320	***	0.437
β_4	Time4_OriDly	1.164	***	0.368
β_5	Orig*運航 Buff	-0.114	***	-0.041
β_6	Orig*折返 Buff	-0.002	***	-0.001
	疑似 R2 値	0.694		
	最終尤度	-57366		
	サンプル数	32514		
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '†' 0.1 ' ' 1				

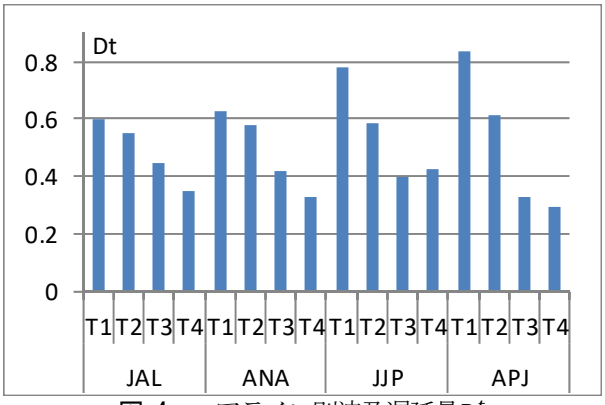

図-4 エアライン別波及遅延量D_p^t

脚注 1)Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems(将来の航空交通システムに関する長期ビジョン)
脚注 2) 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) Stephen Welman et al., Calculating Delay Propagation Multipliers for Cost-Benefit Analysis,MITRE PRODUCT, MP100039, 2010.
5) Nabin Kafle, Bo Zou: Modeling flight delay propagation: A new analytical-econometric approachTransportation Research Part B 93 (2016) pp.520–542.
6) 国土交通省航空局: 平成27年空港管理状況調書（PDF形式）, 2016/8/17)http://www.mlit.go.jp/common/001141842.pdf(2017/1/29閲覧)