国内航空ネットワークにおける
航空機の波及遅延と遅延要因に関する実態分析

高倉　信一[1]・平田　輝満[2]

[1]非会員　千葉県庁（元 茨城大学工学部都市システム工学科）
[2]正会員　茨城大学准教授　工学部都市システム工学科（〒316- 8511茨城県日立市中成沢町四丁目12-1）
E-mail:terumitsu.hirata.a@vc.ibaraki.ac.jp

我が国の航空機遅延は年々悪化傾向にあり，2010年の航空交通システムに関する長期ビジョンCARATSの目標値である2008年度比10%削減を達成するどころか，その達成は年々厳しくなっている．航空交通量の増加や，競争環境の中での機材の稼働率向上（運航上の余裕削減）などが影響しているとも考えられるが，遅延発生の要因分析をより精緻に行うことで，今後の遅延軽減対策の効果的な立案が可能となると考え，本研究では我が国の国内航空ネットワークにおける航空機の遅延発生実態について，特に前便から後続便に波及する遅延（機材繰り遅延）に着目して分析を行い，さらにこれまで「機材繰り」として分析がされてきた遅延要因について，その元々の真の遅延要因を紐づけ，国内線の航空機遅延の真の発生要因や発生個所を定量的に推計した．

Key Words : *Domestic Air Transport Network, Delay propagation, Delay Cause*

1.　はじめに

我が国では，2010年に策定した将来の航空交通システムに関する長期ビジョンCARATSにおいて，航空交通の運用改善を図るための様々な施策の導入に向け，産学官で検討を行っており，この検討した施策の導入効果を確認する観点から，様々な指標を設定し測定を行っている[3)]．この指標のひとつである航空機遅延については、2008年度比10%の削減を達成することを目標としているところ、残念ながら年々悪化する傾向にあり，目標達成が厳しい状況にある[2)]．ここで遅延要因については，出発遅延便を対象とした分析によると遅延理由は「機材繰り」が約70%（便数ベースの集計）を占めている[3)]（図-1）．機材繰りとは前便の到着遅れによるもので波及的に伝わる遅延だが機材繰り発生要因に関しては究明されていない．

この現状に対して航空局では15分以上の出発遅延便のみを対象にその発生割合に関する分析を行っているが，遅延時間の大きさ自体は詳細に分析されていない．また，遅延理由に関しても出発時遅延理由の分析のみとなっており，到着時の遅延理由の分析は行われていない．さらに遅延悪化の問題となっている「機材繰り」の発生要因に関する分析も行われていない．遅延時間に着目していないことで遅延理由ごとの平均遅延時間が分からないことから遅延時間が長い場合の理由の把握などが困難である．波及遅延の研究については古田土ら[4)]が行っており，我が国において，ある空港で発生した遅延が航空ネットワーク全体にどのような影響を与えるのかを明らかにした．しかし，サンプルデータによる分析に留まるとともに，ある空港で発生した遅延がどの程度どこの空港へ波及するのか(波及遅延の空間的な把握)や遅延要因に関する分析は行われていない．特に個々の便の遅延理由をもとに波及遅延の元要因として紐づけして航空市場全体における遅延要因を分析した例はない．

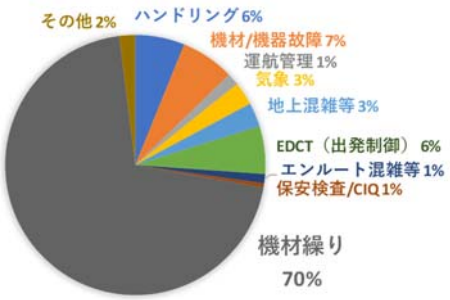

図-1　出発遅延便の遅延理由（H26年度：15分以上遅延便を便数ベースで集計）[3)]

そこで本研究では，これまで明らかにされていない我が国の国内航空ネットワーク上における航空遅延の波及現象の実態把握と波及遅延を考慮した遅延発生要因の分

析を行う．特に，1)我が国における波及遅延発生の空間的把握，2)機材繰り遅延（波及遅延）の元要因への分解と真の遅延要因の分析を目的とする．

2. 分析データの構築

本研究においては国土交通省航空局から提供を受けた2013 年度と 2016 年度の国内線運航実績データ（民間航空に関するデータ）を用いて分析を行う．また，波及遅延に関する分析を行うため，前便の到着空港と当該便の出発空港が一致していないデータは欠損データとして，当該機材・当該日の運航データを除外し使用しないこととした．分析に用いるデータ数は，波及遅延の分析に使用するデータとしては約 79.1 万便（2013 年度）・約 81.0 万便（2016 年度）と国内全便のうち 95%以上の便であり，遅延理由に関する分析を含む場合は約 58.7 万便（2016 年度）と国内全便のうち 70%弱となった．

3. 遅延時間分布と標準的運航時間の変化の概要

(1) 遅延時間分布の変化（2013，2016年）

まず，2016年度の各到着遅延時間区分における便数のシェアを集計し，2013年度のものと比較することで，到着遅延時間の推移を示す(図-2)．これにより定刻（早着を含む）で到着する便数のシェアは減少しており，遅延時間が増加するにしたがって便数のシェアは増加傾向である．ここで，航空局では必ずしも分析の対象となっていない15分以下の軽微な遅延が従来から大きなシェアを占めており，これが将来より大きな遅延になるポテンシャルであり，さらにこれら軽微な遅延が波及遅延として次便以降に影響を与えることで，より大きな遅延が生じていることも考えられる．このため，遅延悪化原因を把握するためには，航空局が分析を行っている15分以上の遅延便のみではなくシェアが高い15分以下の遅延についても分析が必要であると考えられる．また今回分析対象としたデータに関して15分以下の遅延便も含めて，かつ時間ベースで遅延理由を集計すると，そのシェアは15分以上遅延便を対象に便数ベースで集計した結果と異なることが分かる（図-3）．以降の分析では，基本的にすべての便について遅延時間ベースで集計した結果を示す．

(2) 標準的運航時間（ターンアラウンド，飛行時間）の変化

次に表-1に示す条件から標準折り返し時間（ターンアラウンドタイム），標準運航時間の算出を行った．また，実折り返し時間，実運航時間と標準折り返し時間，標準運航時間の差より折り返し時間バッファ，運航時間バッファの算出を行い，航空会社の運用実態の把握を行った．標準時間の算出には最短時間でのオペレーション時間が必要であるため，表-2 の集計対象に絞り込み，さらにパーセンタイル値を用いることでデータ上の計測誤差を緩和した．これらの計算より我が国における主要空港での平均折り返し時間は25~45分減少していることがわかった．しかし，折り返し時間バッファや運航中バッファに大きな変化は見られず，折り返し能力が大幅に向上し，機材の効率的運用のために折り返し時間を短縮する傾向があることがわかった．事前の予想では航空市場における競争の激化により折り返し時間が短縮され，波及遅延が生じやすくなり，結果として遅延が悪化していると思われたが，バッファという視点でみると必ずしもそうとは言い切れないことが分かり，この点についてはより深い分析が必要と考えられる．

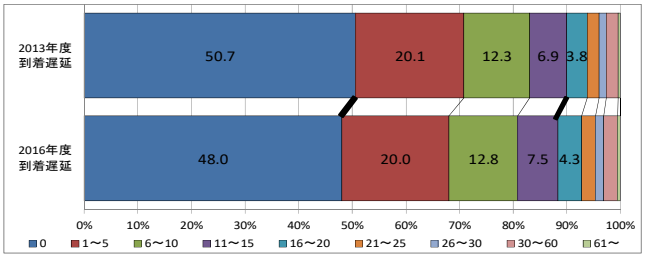

図-2 各到着遅延時間の便数シェアの比較(2013 年;上段→2016 年:下段)

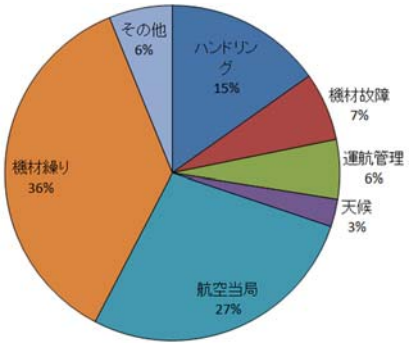

図-3 全便を対象とした遅延理由のシェア(2016 年度:時間ベースで集計)

表-1 標準時間算出条件

	標準折り返し時間	標準運航時間	標準走行時間
集計対象	前便到着遅延便	出発遅延便	全データ
集計区分	出発空港 航空会社 座席数 季節	路線 航空会社 航空機カテゴリー 季節	出発(到着)空港 使用滑走路 出発(到着)スポット
パーセンタイル値	25	5	20

4. 波及遅延の分解とオリジナル遅延への紐づけ

次に各遅延をオリジナル遅延と波及遅延に分離し，ある空港で生じた遅延がどの空港で波及遅延として観測されやすいのかを分析する． まず，オリジナル遅延と波及遅延の定義や算出手法を示す．波及遅延とはある空港で発生した遅延が波及的に伝搬していく現象である．また，オリジナル遅延とは当該便で発生した遅延である．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,…,I)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（総遅延）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．また，そのイメージ図を**図-4** に示す．

a) 当日 1 便目(i=1)のオリジナル遅延o_1

当日 1 便目では波及遅延は観測されていないので，o_1 は実遅延そのものとなる．

$$o_1 = d_1 \tag{1}$$

b) ノードi=2,…,Iにおいて

ノードiに対して直近の上流ノードi-1で発生したオリジナル遅延の波及遅延$p_{i-1,i}$は，両ノードの実遅延の比率に応じて下記の通り計算する．つまり実遅延が増加時はそのままの時間が波及し，減少時は実遅延の減少率で波及遅延も減少させる．

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

また，より上流ノードk=1,…,i-2で発生したオリジナル遅延からノードiに波及した遅延$p_{k,i}$も同様にして下式で計算する．

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

そして，ノードiでのオリジナル遅延は，ノードiでの実遅延から全波及遅延を引くことで計算できる．

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

これらの計算を行い，各空港で観測された遅延のうち，どの空港が発生源になっているのかをその比率で示した結果を**表-2** に示す．その結果，例えば，当然ながら同じ空港をベースに機材を使用することが多いことからオリジナル遅延が生じた空港自身に波及遅延は返ってきやすい傾向があることや，便数の多い羽田空港などが波及遅延の原因となることが多いことが分かった．しかしながら便数シェアとの比較をみると，羽田空港や伊丹空港は便数の割には他空港への波及遅延は低く，逆に那覇空港などは他の主要空港と比べると便数は少ないが他空港への波及遅延が多いことが分かる．波及のしやすさに影響する要因はまだ解析していないが，今後，その視点からの分析も行いたいと考えている．

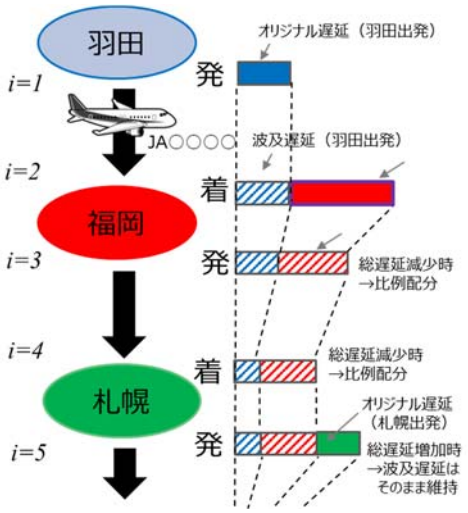

図-4 オリジナル遅延と波及遅延の分解手法のイメージ

表-2 2016年度遅延発生空港と波及遅延観測空港

		原因空港											
		伊丹	羽田	関空	鹿児島	新千歳	成田	仙台	中部	那覇	福岡	その他
観測空港	伊丹	31.3	13.8	0.2	5.6	4.5	1.3	2.0	0.7	7.6	5.2	27.9
	羽田	3.2	37.2	1.3	3.1	8.1	0.0	0.0	0.3	6.5	9.4	30.8
	関空	0.6	8.4	30.9	3.2	11.8	6.8	3.6	0.2	14.1	10.5	10.0
	鹿児島	12.4	16.3	2.2	32.4	0.8	1.4	0.4	5.1	0.6	3.6	24.6
	新千歳	5.6	24.0	4.3	0.5	29.7	5.2	2.5	5.8	3.5	4.5	14.3
	成田	1.7	0.1	8.7	1.0	12.4	26.0	2.0	4.1	11.9	17.7	14.5
	仙台	12.6	1.2	3.4	0.2	21.1	2.4	21.7	10.1	5.5	14.9	6.7
	中部	1.2	2.1	0.5	7.6	10.2	3.6	1.9	26.9	15.6	15.7	14.6
	那覇	3.3	12.3	4.5	0.9	1.2	2.4	0.3	3.4	40.5	8.6	22.5
	福岡	4.0	17.7	3.1	1.4	2.3	4.4	1.3	3.6	13.0	32.9	16.3
	その他	6.9	25.7	1.1	3.1	3.9	1.1	0.4	1.9	11.3	6.3	38.1
原因遅延発生割合		7.5	14.4	5.5	5.4	9.6	5.0	3.3	5.7	11.8	11.8	20.0
出発便割合(%)		8.2	22.3	2.8	3.5	7.6	3.0	2.2	3.5	6.8	7.8	32.4

5. 機材繰り遅延と到着遅延を考慮した遅延発生要因に関する分析

(1) 到着遅延要因のデータ化

本研究においては到着遅延時間に着目して分析を行う．使用データでは出発遅延理由のみしか分からず，到着遅延理由は不明であるため，出発遅延理由ごとの遅延時間を比例配分することや「不明」「Dep不明」「運航中」という新たな遅延理由項目を追加することで到着時の遅延理由ごとの遅延時間の算出を行った． 「不明」とは「機材繰り」による遅延時間が増加していた場合にその差分をこの理由に振り分けることで「機材繰り」による

遅延時間が増加することを防いだ（機材繰り遅延が増加することは現実におかしいがデータ上，このようなケースが存在するため）．「Dep不明」とは個別の遅延理由ごとの遅延時間の合計が別途データとしてある（トータルの）出発遅延時間よりも少ない際にその差分をこの理由に振り分けることで遅延理由ごとの遅延時間と出発遅延時間が一致するようにした．また，到着遅延が出発遅延よりも大きい際にその差分を「運航中」に振り分けることで， ブロックアウト後の遅延に理由付けを行った．これらを用いて遅延理由の分析を行った．これにより，詳細は割愛するが，到着遅延理由の大半は「運航中」「機材繰り」であることが明らかになった．さらに「機材繰り」の発生要因を把握する必要があることがわかった．

⑵ 「機材繰り」遅延の元要因への分解

「機材繰り」遅延の元要因への分解は，出発時の「機材繰り」遅延時間について，前便の到着遅延理由を，その理由ごとの遅延時間比率で比例配分することで算出した．到着時の「機材繰り」を分解する際には，「機材繰り」分解後の出発遅延理由ごとの遅延時間を比例配分することで算出した．ここで1日の初便においても機材繰り遅延が記載されているデータも一部存在するため，これらはそのまま「機材繰り」遅延として残している．結果を図-5に示す．大括りの要因項目では機材繰り分解前の要因シェアと大きくは差異はないことが確認できるが，到着機に関わる「運航中」遅延を加えていることで，最終的な遅延である到着遅延の真の要因では，運航中遅延（主に空港空域の運航環境や気象などが影響していると考えられる）が大きく影響していることが示唆され，より正確に真の要因が把握ができる可能性があると考えられる．

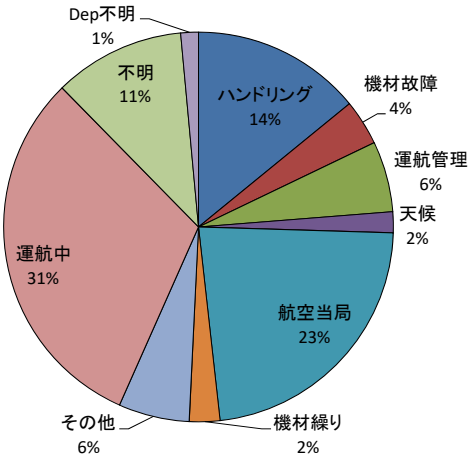

図-5 「機材繰り」遅延の分解結果（機材繰りの内訳）

⑶ 「機材繰りの内訳」を反映させた総到着遅延の要因分析

最後に，前節の「機材繰り」の内訳と「機材繰り」以外の遅延理由ごとの遅延時間を足すことで，総到着遅延の要因を算出する．結果を図-6に示す．「航空当局」「運航中」が半数以上を占めていることがわかる．「運航中」遅延については，前述の通り，その発生原因は今回の分析では解明できていないが，3(2)で紹介した実績データから推計した標準運航時間（＝基準となる時間）からの差分により地上走行・飛行中の遅延時間として，その内訳を分析したり，気象条件データと併せた分析をしたりすることで，よりその真の要因を推測することが可能であり，これらについては今後の課題としたい．一方で，そのような課題はあるものの，今回，運航中遅延という項目を追加し，到着時の遅延要因を推計することで，従来，出発の遅延要因を単純に集計していた結果とは異なる傾向がみえることが示唆される．例えば，運航中の遅延が前述の通り空港空域の混雑や気象の影響が主たる要因だとすれば，管制系の航空交通システムの運用改善により，遅延軽減が達成できるエリアがより多いという考察も可能となる．冒頭の使用データに記載した通り，今回の分析のためにすべてのデータを活用して遅延要因の分析をできているわけではないため，全体傾向を示せているかの検証も別途必要であるが，今後，個別空港個別空域，また個別要因に関するミクロな分析も行うことで，より正確な遅延要因の把握と効果的な遅延軽減対策検討への応用も可能と考えられる．

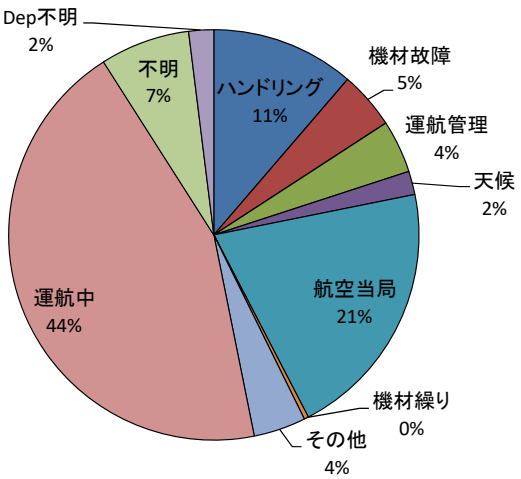

図-6 「機材繰りの内訳」を反映させた総到着遅延の要因別シェア

6. おわりに

本研究では，我が国の航空機遅延の発生に関して，波及遅延と遅延要因を統合して分析し，真の遅延要因の把

握を試みた．前章で述べた課題など，残される課題は多いが，今回のような分析は，我が国の航空機遅延の軽減対策を検討する上で，より効果的な対策が何かを検討したり，航空ネットワーク上への波及を考慮して，ある個所で行った対策が，ネットワーク全体でどのような効果が生じるかを予測・推計したりするうえで，有益な情報となり得ると考えている．

謝辞：本研究を実施するにあたり国土交通省航空局より航空機遅延に関する実績データの提供を受けた．ここに記して感謝の意を表する．

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(2018/02/02 閲覧).
2) 国土交通省航空局：第８回　将来の航空交通システムに関する推進協議会～資料２：平成２９年度の主要な活動の成果　，[3] 横断的取組 http://www.mlit.go.jp/common/001230544.pdf
3) 国土交通省航空局：第 6 回　将来の航空交通システムに関する推進協議会～費用対効果・指標分析検討分科会平成 27 年度　活動報告書，http://www.mlit.go.jp/common/001125076.pdf
4) 古田土渉，平田輝満，二見康友，又吉直樹：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，第 55 回土木計画学研究・講演集, 2017.

(2018. 4. 27 受付)

ANALYSIS OF FLIGHT DELAY PROPAGATION AND DELAY CAUSE IN JAPANESE DOMESTIC AIR TRANSPORT NETWORK

Shin-ichi TAKAKURA and Terumitsu HIRATA

The purpose of this study is to quantify the propagation delay and specify the root cause of the propagation delay by using the actual delay data from Japanese civil aviation bureau (JCAB). First, we developed the calculation method for separating the original and propagated delay. Then, by integrating the propagated delay data and delay cause data from JCAB, we analyzed the factors affecting delay propagation and root delay cause of the propagated delay.