

航空便の欠航・遅延の短期予知と情報提供の可能性*

Pre-hours prediction of cancellation and departure delays of domestic flights and the effect of informing the prediction to the passengers*

木村裕介**・加藤寛道**・奥村誠***・塚井誠人****

By Yusuke KIMURA**・Hiromichi KATO**・Makoto OKUMURA***・Makoto TSUKAI****

1. はじめに

都市間交通の代表的な交通機関である航空は、天候等の影響を受けやすく、時間的な信頼性が低い。Abdel-Atyら¹⁾は米国の1空港における遅れの統計分析を行い、降水量や出発地からの飛行距離に加えて、曜日や季節などの周期的要因が15分以上の遅れの発生に大きな影響を持っていることを示した。さらに、多くの場合1日を単位として航空機が運用されるため、午後や夜間になるほど遅れが累積しやすいと述べている。

本研究では、Abdel-Atyら¹⁾が指摘した1日の中での遅れの伝播・累積過程に着目する。すなわち、国内便では1日の中で同一の飛行機がくり返し同一の路線の便に使われることが多い。このとき、早い時点で発生した遅れは部分的には回復されるものの、次の運用便に波及する。そこで最初の遅れが発生した時点で、以降の便への遅れの波及が予想できる可能性がある。また、ある空港での悪天候は、複数の便に影響を与える。そのため、1つの便の遅れに基づいて、以降の同一空港を用いる便の遅れを予想できる可能性がある。

このような遅延の予想は航空利用者の行動変化を促すために使用できる可能性がある。すなわち、遅延や欠航の可能性が高い便に搭乗を予定している旅客の中には、より早く出発する別の便に変更して、目的地への到着を遅れないようにしたいという旅客が含まれていると思われる。その場合、遅延や欠航の予測に基づいて別の便や別の経路への誘導を行った方が、遅延が発生した場合の事後的な利用者の損失を小さくできる可能性がある。

本研究の目的は、航空便の実発着時刻の履歴の中か

*キーワード：公共交通運用，交通情報，空港管理

**学生員，東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
(仙台市青葉区川内41番地，
TEL022-795-7567，FAX022-795-7477，
E-mail: y_kimura@cneas.tohoku.ac.jp
hkato@cneas.tohoku.ac.jp)

***正員，博士(工)，東北大学東北アジア研究センター
(同上，E-mail:mokmr@cneas.tohoku.ac.jp)

****正員，博士(工)，広島大学大学院工学研究科
(東広島市鏡山1-4-1，TEL&FAX:082-424-7827
E-mail:mtukai@hiroshima-u.ac.jp)

ら遅れ時間に関する法則性を統計的に見出し、短期的な遅れ発生に役立てることにある。具体的には、遅れや欠航という非日常的な要因に起因する現象が正規分布には従わないことに着目し、非正規現象の中の法則性を抽出する手法である独立成分分析(ICA)を用いて仙台空港における遅れデータの分析を行う。一方、仙台空港航空便利用者の出発時刻の分布を推測し、遅延情報提供のタイミングを検討する上で材料を提供する。

2. 仙台空港発着国内便の遅延パターンの分析

(1) 使用データ

本研究では、全日空(以下、ANA)、日本航空(以下、JAL)がWebページ上で提供する運航情報²⁾³⁾を基に、仙台空港を発着する国内線のうち、次に示す分析対象期間中継続して運航されたANA9路線(新千歳・中部国際・伊丹・福岡・那覇・成田・小松・神戸・広島、40便/日)、JAL4路線(JALエクスプレス(以下、JEX)を含む)(新千歳・中部国際・伊丹・福岡、22便/日)の発着時刻データを用いる。遅れ時間として、実際の出発(到着)時刻から予定出発(到着)時刻を引いた値(分単位)を用いる。本研究の分析対象期間は、2006年12月1日から2007年12月31日までとする。ただし、2007年3月3日のデータはwebの不調のため入手できなかったため、この日を除いた395日を分析対象とする。対象データ数は全部で24,490便である。なお、期間中の欠航は193便で、全体の0.79%を占める。

(2) 遅れの原因とその影響パターン

仙台空港を発着する航空便の遅延の原因として、例えば千歳空港滑走路の積雪による離陸待ちや広島空港の濃霧による着陸待ちなど、いくつかの原因が考えられる。それらの原因を、同時に発生するものごとにとまとめる。例えばある空港と別の空港の悪天候が同時に起こる可能性が高ければ、それらをまとめて1つの原因とみなす。その結果、遅延の発生原因はその発生確率が相互に独立となるような、少数のグループにとまとめることができる。対象期間中の各日における各原因の発生強度を

$s_1, \dots, s_j, \dots, s_n$ で表す．それぞれの原因 j により複数の便に遅延が発生する可能性がある．原因 j の第 i 便の遅延への影響力を係数 a_{ij} で表す．各日において観測された各便の遅延を $x_1, \dots, x_i, \dots, x_m$ とすれば，これらの関係は (1) 式のように表すことができる．

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} \\ \vdots \\ a_{i1} \\ \vdots \\ a_{m1} \end{pmatrix} s_1 + \dots + \begin{pmatrix} a_{1j} \\ \vdots \\ a_{ij} \\ \vdots \\ a_{mj} \end{pmatrix} s_j + \dots + \begin{pmatrix} a_{1n} \\ \vdots \\ a_{in} \\ \vdots \\ a_{mn} \end{pmatrix} s_n$$

$$= \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mj} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_j \\ \vdots \\ s_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

$x = As$

A の各列は，ある遅延の要因 s_j が発生した際にどの便が影響を受けるかという遅延のパターンを表す．同時に，原信号 s は遅延の要因の日変動を表しているため，それぞれの遅延のパターンがどの日に強く発生しているかという強度を表すことになる．この中で，既知であるのは x のみであるため，A と s を同時に推定する必要がある．本研究では，その方法として因子に正規性を仮定しない独立成分分析 (Independent Component Analysis) を用いる．

(3) 独立成分分析 (ICA)

独立成分分析 (以下，ICA) とは，多変量の信号を相互に独立な複数の成分に分離する計算手法である．推定にあたって用いる仮定は，原信号 s が各時刻 t において統計的に独立であることと，それぞれ平均0，分散1の分布に従うという仮定である．以下では抽出された原信号 s を独立成分と呼ぶ．

Hyvarinenら⁴⁾ は原信号の尖度を最大化するFastICAと呼ばれるアルゴリズムを提案した．以下の分析では，このアルゴリズムを用いる．

本研究では，ある便 i についての遅れ時間の日変動を観測信号 x_i とみなして ICA を適用し，混合行列 A と独立成分 s を求める．系列は発着便合わせて 62 系列，系列長は 395 日分である．また，欠航便は全て 180 分の遅れと同等であるとみなし，遅れ時間データを補完した．

(4) 仙台空港発着便遅れの分析結果

x から累積寄与率が85%以上となる20の主成分を求め，独立成分 s を計算した．本稿では，そのうち1日の複数の便への影響が見られた8つの独立成分 s_i について考察を行う． s_j が5以上の値を示す日を遅れの要因が強く現れた日と見なし，表1に示す．また，混合行列 A を表

2に示す．なお表2では到着便と出発便に分けて表している．

a) 強風・台風による遅延

s_3 は JEX3171 中部-仙台，ANA365 中部-仙台，JEX2904 新千歳-仙台，ANA361 小松-仙台，ANA366 仙台-中部，ANA719 仙台-新千歳，JEX2903 仙台-新千歳，JEX3170 仙台-中部，ANA362 仙台-小松に遅れが発生するパターンであり，1月7日にのみ強く現れている．この日は発達した低気圧により全国で強風が発生し，遅れや欠航が発生している．

表1 独立成分 s_j の影響が強い日

	s_3	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{12}	s_{13}	s_{14}
2006	12/28							
2007	1/7	7/14	7/15	9/7	7/13	1/29	3/13	3/28
	9/6						4/14	4/14
							6/15	7/4
								10/24

表2 混合行列 A

仙台着		s_3	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{12}	s_{13}	s_{14}
9:00 JEX2201	伊丹	0.1	0.5	0.2	9.3	0.0	-0.6	0.0	0.6
9:05 JEX3171	中部	10.2	1.5	8.8	9.7	1.3	-1.0	0.1	0.3
9:10 ANA 365	中部	9.6	0.3	9.0	9.5	1.7	-0.3	-1.1	0.2
9:15 ANA 731	伊丹	-0.9	0.4	-0.8	9.7	0.8	0.3	-1.4	0.1
9:35 ANA 720	新千歳	-0.7	-0.6	-0.3	9.3	-1.0	0.7	14.6	0.6
10:00 JAL3531	福岡	-0.1	1.1	0.9	9.9	-0.4	0.8	0.8	-1.2
11:00 ANA 733	伊丹	2.3	0.3	0.1	9.4	0.8	-0.7	-0.5	0.6
11:15 ANA 722	新千歳	0.6	0.2	-0.8	9.4	-1.0	11.3	8.1	16.4
11:15 JEX2203	伊丹	0.3	0.1	8.7	9.3	0.4	-0.2	-0.5	0.1
11:35 ANA 3131	成田	-0.5	-0.3	1.4	10.6	4.6	-0.7	-1.5	3.4
11:35 ANA 797	福岡	-0.4	1.3	8.9	9.5	0.0	-0.7	-0.6	0.3
12:15 JEX2205	伊丹	0.9	0.7	9.1	8.8	-0.4	-0.4	0.0	-0.4
12:20 JEX2904	新千歳	9.7	0.6	9.0	9.6	-2.1	1.3	6.7	0.9
13:45 ANA 724	新千歳	1.9	-2.0	-1.0	9.8	-1.4	11.6	4.8	2.8
14:00 ANA 735	伊丹	-0.6	0.0	9.0	9.5	1.8	-0.8	-0.2	0.6
15:25 ANA 802	広島	0.6	0.7	2.6	9.3	-3.8	10.4	4.8	21.3
16:45 JAL3535	福岡	1.2	0.5	9.8	-0.3	1.4	-1.0	0.0	-0.2
16:55 ANA 464	那覇	1.5	2.0	-0.7	8.8	9.7	0.0	0.2	-1.1
17:30 JAL2912	新千歳	3.0	-0.4	9.3	1.5	0.1	10.4	7.4	1.5
18:10 ANA 3235	成田	0.2	-1.4	10.4	0.3	3.8	-0.7	-1.5	0.7
18:10 ANA 737	伊丹	0.4	1.0	8.9	0.7	0.4	0.2	0.0	-0.1
18:15 ANA 361	小松	10.8	1.1	8.7	0.6	6.0	0.3	1.4	2.0
19:00 ANA 799	福岡	-0.5	0.6	10.0	-0.3	-2.2	-0.8	1.0	0.0
19:05 ANA 728	新千歳	-2.1	-1.6	9.2	1.0	0.5	11.0	9.1	4.9
19:30 ANA 369	中部	-0.2	0.8	10.1	-0.4	-1.0	1.4	-1.2	-1.2
19:50 ANA 739	伊丹	0.2	1.9	9.6	0.1	-0.2	-0.3	10.5	-0.6
19:55 JEX2209	伊丹	-0.7	8.9	9.0	2.2	0.0	-0.4	0.8	0.4
20:20 ANA 730	新千歳	2.9	1.2	1.3	0.5	1.8	9.9	5.4	1.4
20:45 JEX2211	伊丹	-0.2	7.1	0.1	-0.2	-0.7	-0.2	0.0	0.3
20:45 JEX3175	中部	-0.5	14.4	9.3	0.1	2.1	-0.5	-0.8	0.1
20:55 ANA 409	神戸	0.1	1.3	0.0	-0.2	1.1	1.2	1.3	1.9
仙台発		s_3	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{12}	s_{13}	s_{14}
8:00 ANA 366	中部	9.5	-3.4	8.7	-0.3	-2.0	-0.1	-1.0	0.7
8:00 JEX2200	伊丹	-0.3	1.1	-0.2	10.2	-3.3	0.7	-0.3	-1.0
8:15 ANA 3232	成田	0.5	-0.5	0.0	9.9	-0.8	0.2	0.5	-0.1
8:25 ANA 732	伊丹	-0.3	0.0	0.3	0.8	0.1	-0.1	-0.2	0.3
8:30 ANA 719	新千歳	10.2	0.8	-0.9	0.6	0.5	-0.7	1.1	3.1
9:00 JEX2202	伊丹	-0.1	0.4	0.0	8.8	-0.2	0.0	0.5	0.5
9:30 JEX2903	新千歳	10.5	1.1	0.5	9.2	-2.0	-0.6	2.0	-1.2
9:40 JEX3170	中部	9.9	1.3	8.9	9.1	0.2	0.4	0.2	-0.2
9:55 ANA 734	伊丹	-0.9	0.3	-0.5	10.1	-0.3	0.1	-1.2	-0.2
10:15 ANA 721	新千歳	-0.4	-0.5	-0.8	9.6	-0.4	0.8	13.5	1.6
10:15 ANA 798	福岡	-3.7	-0.8	9.9	9.3	5.9	-0.7	-3.0	2.4
10:40 JAL2907	新千歳	0.0	1.3	-0.2	9.8	-0.8	10.8	2.5	-1.5
11:40 ANA 463	那覇	3.1	1.6	-1.0	9.9	5.8	0.9	0.4	-0.3
11:50 ANA 801	広島	-0.1	0.3	-0.9	9.6	-0.3	10.9	4.7	17.7
12:10 JAL3534	福岡	1.0	0.1	8.8	8.9	0.1	-0.1	0.1	-0.3
14:30 ANA 723	新千歳	2.7	-0.9	0.1	9.3	-0.4	10.0	-1.0	1.2
14:40 ANA 736	伊丹	0.4	0.5	8.8	8.9	0.5	0.2	0.0	0.3
15:40 ANA 362	小松	10.1	0.3	9.1	9.2	3.8	-0.6	1.4	1.2
16:05 ANA 3134	成田	0.9	0.1	9.1	9.1	-0.4	-0.9	-1.2	0.0
16:40 JEX2206	伊丹	1.2	1.6	9.0	2.9	-1.5	1.9	5.8	-0.4
17:35 ANA 727	新千歳	-0.4	1.5	9.6	0.6	0.6	12.2	3.6	3.2
17:40 ANA 738	伊丹	1.5	1.0	9.6	8.7	3.2	-0.8	1.3	-0.8
17:40 JEX2208	伊丹	0.8	0.2	9.3	-0.2	0.2	-0.1	0.2	-0.2
18:20 JAL3538	福岡	0.3	-0.6	9.5	1.5	-0.2	-0.4	0.7	1.4
18:45 ANA 370	中部	1.4	1.4	8.7	0.0	5.5	9.3	4.9	0.9
18:50 ANA 740	伊丹	-0.1	0.8	8.8	0.7	0.2	0.0	0.0	0.1
19:05 JEX2210	伊丹	2.0	1.0	9.1	-0.1	-0.5	0.8	1.4	-0.5
19:30 ANA 800	福岡	-0.5	1.6	9.3	-0.4	-0.5	0.1	-0.7	0.1
20:00 ANA 410	神戸	3.0	0.3	9.6	-0.1	0.1	0.2	3.0	-0.1
20:00 ANA 729	新千歳	-0.3	0.5	9.7	0.0	-0.4	9.3	-1.6	-1.5
20:30 JEX3176	中部	-0.2	14.3	9.3	1.8	-0.4	-0.5	-0.2	0.0

s_6 は午後8時付近に仙台空港を発着する仙台-中部、伊丹を結ぶ便に遅れが発生するパターンである。このパターンの影響が強いのは2006年12月28日、2007年7月14日、9月6日である。このうち、7月14日は台風4号、9月6日は台風9号が中部国際空港に接近し、遅れや欠航が発生したものである。この台風は、どちらも翌日に仙台空港に接近しており、その日の遅れのパターンを表したものが s_7 と s_8 である。また、台風4号は7月13日に沖縄付近を通過しており、その影響を受けたものが s_9 である。

b) 積雪による遅延とその波及

s_{12} 、 s_{13} は仙台と新千歳を結ぶ便で遅れが発生するパターンである。このパターンの影響が強い日には、新千歳空港の運営時間中に降雪が観測されており、滑走路の除雪待ちによる遅れが原因であると推測できる。また、新千歳便以外にも伊丹、中部国際、広島便でも遅れが発生しているが、一日の中で最初に仙台-新千歳便で遅れが発生している。新千歳での降雪によって発生した遅れや欠航が、これらの便に波及したものと考えられる。

c) 機材運用を通じた遅れの波及

s_{14} はANA722新千歳-仙台と、ANA802仙台-広島、ANA801の広島-仙台に遅れが発生するパターンである。この3便は運用上つながっており、値が徐々に大きくなっていることから、最初に発生した遅れが拡大しながら伝播するパターンである。また、その前の運用便であるANA719ではそれほど大きな値ではないため、この遅れは新千歳空港で発生したものであると考えられる。

3. 空港利用者への遅延予知情報の提供可能性

(1) 仙台空港利用者の空間分布

2005年に実施された全国幹線旅客純流動調査のデータ⁵⁾を用いて、仙台空港の国内航空便利用者の当日のトリップの出発地と目的地を集計した結果を図1に示す。仙台空港の最大の背後地は仙台生活圏であるが、東北全域から旅客を集めていることが分かる。特に、地元空港のサービスレベルが低く、仙台空港へのアクセスが便利な山形、福島、郡山、相双の各生活圏、また、東北新幹線沿いの古川、両磐、北上中部、盛岡の各生活圏からの利用が比較的多い。

平日と休日を比べると、観光客が多いと考えられる休日は、平日に比べてより広域的な地域から利用されており、青森県と秋田県の一部の生活圏を除けば休日の方が仙台空港の利用者が多い。このような他県からの利用者は、仙台空港の利用頻度や経験が少なく、空港施設や周辺の状況に関する知識も少ないと考えられる。したがって、欠航や遅延の発生時には、必要な情報を丁寧に提供する必要があると考える。

(2) 仙台空港利用者の時間分布

上述した全国幹線旅客純流動調査には、旅行者の出発時刻や利用した航空便などの項目が含まれていないため、時間利用特性を直接知ることはできない。そこでここでは、他の交通サービスに関するデータ⁶⁾⁷⁾と組み合わせることによって、仙台空港の利用者の出発地から空港までの所要時間を算出した。結果を図2に示す。

鉄道と道路の所要時間を比較すると、東北新幹線のみで到達できる地域については鉄道利用の方が早いものの、他の多くの地域では道路の方が早く到達できる。特に三陸や日本海岸のように山脈を越えていく必要がある地域では、その差が大きくなっている。

次に、(1)で示した各生活圏の利用者が仮にその中心都市から出発すると考えて、仙台空港までの所要時間を求めた。さらに都市圏を所要時間の短い順に並べ替えることにより、所要時間に関する非超過確率を算出した。計算の際には、仙台空港国内航空便利用者を旅行目的ごとに、(1)仕事目的、(2)観光・私用目的、(3)その他目的に3区分した。2005年の計算結果を図3に示す。図3より、鉄道、道路ともに、仕事目的の旅行者の発着地が仙台市などに集中していることから、同じ所要時間の範囲により多く集中していることがわかる。これに比べ、観光・私用目的、その他の目的の順に発着地から仙台空港までの距離は遠くなっている。鉄道では仙台市から46分の範囲になり、約7割が含まれる。60分の範囲には62~73%程度が含まれ、120分では82~85%となる。その後は160分になるまではほとんど変化が見られない。道路でも60分の範囲にはほぼ同じ割合が含まれているが、100分までの変化が大きく、82~94%が含まれるようになる。その後の変化は小さいが、140分の範囲には95%以上が含まれるようになる。

(3) 情報提供のタイミングに関する考察

鉄道利用者の場合には航空便出発の20分前には到着するようにアクセス鉄道の時刻を選んでいとなると考えると、仙台駅を出る前に情報を受け取るためには60分前に情報提供がなされる必要がある。この場合には全利用者の7割程度、仕事目的に限れば75%程度の利用者が含まれる。現在でも、仙台駅2階の観光案内所には液晶モニターが設置され、空港の発着状況掲示板の画像が表示されている。しかし、空港の発着掲示板における出発便の遅れ表示は折り返し便の到着後に清掃や整備の所要時間を加えて表示されることが多いため、出発時刻60分前の時点では遅れ情報が表示されていないのが普通である。さらに掲示板の場所が鉄道の改札口から離れた反対側にあり目立たない。

前節の分析に基づいて遅延予測情報を提供するとすれば、仙台空港出発便については、その使用機材が前の運

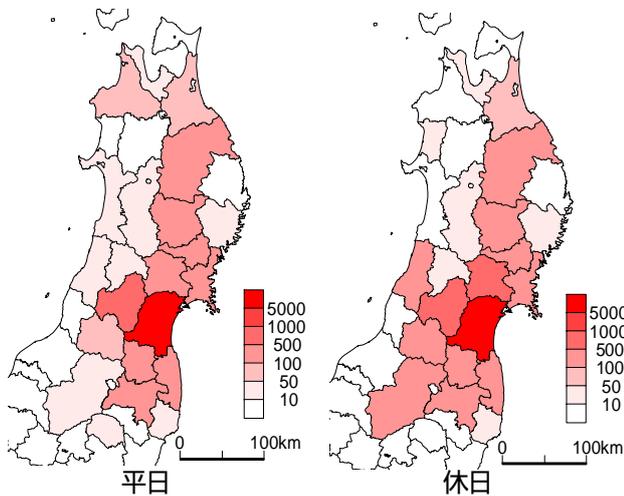


図1 仙台空港利用者(国内線)の出発地・目的地の分布

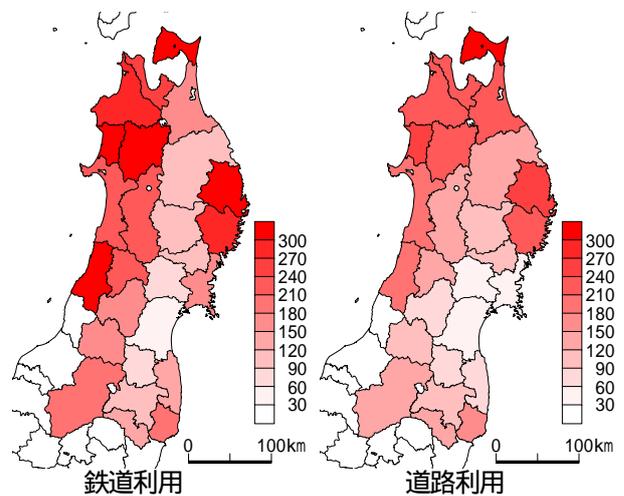


図2 仙台空港までの所要時間(単位:分)

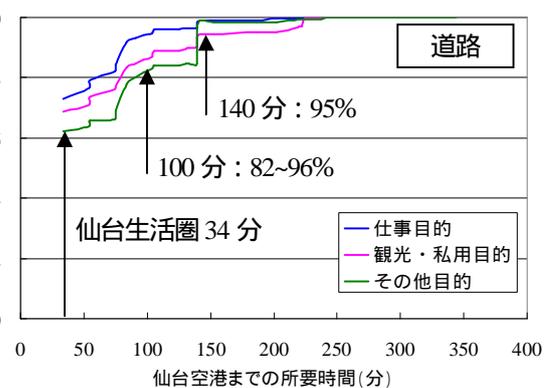
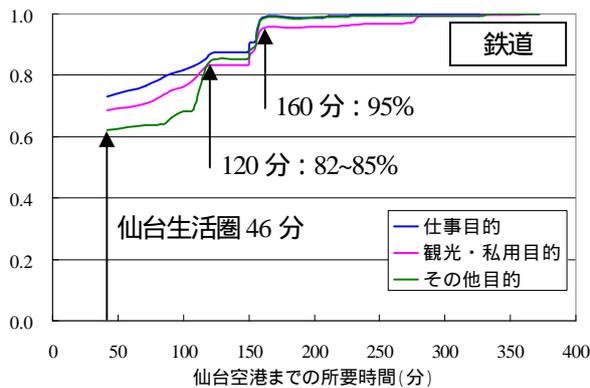


図3 国内便利利用者(2005年平日)発着地から仙台空港までの所要時間

用で仙台空港を出た時点での遅延時間に基づいて予測を行うことになる。その後70分程度のフライト2回と折り返し時間が挟まるので、200分から180分前には遅延予測ができることになる。図3から、鉄道利用者の95%は仙台空港までの所要時間が160分以下であるので、この180分前に情報提供できれば、ほとんどの利用者に対応できると思われる。

一方、道路利用者は、途中の道路混雑の危険性をふまえて余裕を持って行動している。関連研究⁸⁾から、この余裕時間は便によって異なるが、ピークは30分~60分の間にあることがわかっている。したがって情報提供が60分前の場合には、すでに仙台市内を超えて仙台空港に近い場所まで到達している状態であると考えられ、情報提供の効果は大きくない。もし一つ前の運用便の情報に基づいて180分前に情報提供できれば、空港から120分の範囲にある地域からの利用者は出発前に情報を得ることができる。図3から、その割合は90%程度であり、さらに20分程度早く提供できれば95%以上の利用者の出発に間に合わせることができる。

4. おわりに

本研究では、仙台空港を発着する複数の便に共通する遅延のパターンを知るために、航空機の遅延データに

対して独立成分分析を適用して分析した。また、仙台空港利用者の空間分布、時間分布を基に、空港利用者への遅延予知情報提供のタイミングを検討した。その結果、1つ前の運用便の遅れを用いれば、多くの利用者の出発前に情報を提供できる可能性があることがわかった。

今後は、実際に情報提供サービスを受けた時の利用者行動を知るため、仮想的な状況設定の下での調査などを企画していくことが望まれる。

参考文献

- 1) Abdel-Aty, M. et al.: Detecting periodic patterns of arrival delay, Journal of Air Transport Management, Vol.13, pp.355-361, 2007.
- 2) 全日本空輸(ANA) HP, <http://www.ana.co.jp/asw/index.jsp>.
- 3) 日本航空(JAL) HP, <http://www.jal.co.jp/>.
- 4) Hyvarinen, A.: 詳解 独立成分分析, 東京電気大学出版局, 2005.
- 5) 国土交通省: 2005年全国幹線旅客純流動調査.
- 6) yahoo H P 路線情報, <http://transit.yahoo.co.jp/> (2008年3月7日現在).
- 7) 国土交通省東北地方整備局「東北の道路」の総合情報サイト, 道路時刻表簡易検索 <http://www.thr.mlit.go.jp/road/koutsu/jikoku/index.html> (2008年3月7日現在).
- 8) 奥村誠, 塚井誠人, 吉村充功: 仙台空港利用車両の時間分布特性の分析, 交通工学研究会論文報告集, No.27, pp.177-180, 2007.