

## 仙台空港発着便における遅れ・欠航の分析\*

### Analysis of Flight Delays and Cancellations at Sendai Airport\*

加藤寛道\*\*・木村裕介\*\*・奥村誠\*\*\*・塚井誠人\*\*\*\*

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

#### 1. 航空便の遅れと本研究の目的

##### (1) 航空便の遅れとその波及

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いため、鉄道に比べて遅れが多く、時間的な信頼性が低いという問題がある。Abdelghanyら<sup>1)</sup>は、航空の遅れの75%は悪天候に関連していることを指摘したが、Golaszewski<sup>2)</sup>の分析では、悪天候による航空の遅れは巡航中に起こるのではなく、むしろ悪天候により空港の容量が低下し、集中する需要に対応できなくなることによって起こるとしている。Abdel-Atyら<sup>3)</sup>は一つの空港における航空便の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分以上の航空便の遅れの発生に大きな影響を及ぼすことを示した。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。

そこで、航空便の遅れを防ぐための中長期的な対策として、空港容量を増加すること、管制方式の改良等により天候の影響による容量低下を防ぐことが有効であると考えられる。また短期的には機材の運用に余裕を持たせて、遅れの波及を防ぐという対策<sup>4)</sup>が考えられるが、機材の稼働率が低下する問題とのトレードオフが生じる上、空港スポット数の制約により実行が難しいという問題がある。

一方、遅れや欠航による影響を大きく受けるのも空港であり、集中する需要によってサービスが低下するとともにカウンターや荷物の搬送の混乱が、遅れをさらに拡大させてしまう可能性もある。したがって、空港の管理

者の立場を考えると、航空の遅れや欠航という事象が短期的にどのように推移していくのかを予想し、空港の混乱を防ぐための対応を考える必要がある。

##### (2) 本研究の目的

本研究では、Abdel-Atyらが指摘した1日の中での遅れの伝播・累積過程に着目する。すなわち、国内便は路線ごとの需要の大きさに応じて機材を割り当てているため、1日の中で同一の機材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の遅れに波及する。そこで最初の遅れが発生した時点で、以降の関連する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による遅れは、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。

限られた情報と不確実な知識のもとでは定量的な遅れ時間の予測は困難であるが、空港管理者にとって1日の中の早い時点で遅れの発生を予測できれば、人員配置の変更などの対策に役立つと考えられる。

本研究の目的は、空港管理者が容易に知ることができる航空便の実発着時刻の履歴の中から、遅れ時間に関する法則性を統計的に見出し、遅れ発生の短期的な予想に寄与することにある。具体的には、遅れや欠航という現象が非日常的な要因に起因するため、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い、その傾向を明らかにする。

#### 2. 仙台空港国内線発着便の遅れの概要

##### (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行情報<sup>5) 6)</sup>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

\*キーワード: 公共交通運用, 空港管理, ICA

\*\*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: hkato@cneas.tohoku.ac.jp

y\_kimura@cneas.tohoku.ac.jp)

\*\*\*正員, 博士(T), 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(T), 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)

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24490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) 出発便と到着便の遅れの比較

表1に出発便、到着便の遅れ時間の基本統計量を、また図1に遅れ時間ごとの便数の分布を示す。表1のように、出発便、到着便ともに歪度が正で尖度が大きい。尖度とは、式(1)のように4次のモーメントを正規化したもので、-2から無限大までの値をとる。

$$kurt(y) = E\{y^4\} - 3\{E\{y^2\}\}^2 \quad (1)$$

尖度が正の大きな値を取っていることは、図1のように、正規分布に比べて分布が正の方向に歪んでおり、平均値の直近に分布が集中すると同時に平均値から遠く離れた値をとるケースも少なくないことを示している。D'Agostino<sup>7)</sup>による歪度の検定、尖度の検定により、いずれも正規分布がもつ値(0)とは有意に異なることから、遅れ時間の分布が正規分布であるという仮説は棄却される。

図1より、出発便、到着便とも最も多いケースは1分から5分の早着・早発である。また、到着便には10分以上早着するケースが見られるのに対し、出発便は旅客の集まりが条件となるため、10分以上の早発は見られない。一方、遅れに着目すると、遅着に比べて遅発の頻度は少ないが、分布の形状は類似している。

以上の傾向は、出発便の方が到着便に比べて早発がない分、遅れの平均は大きい、分散が小さいという表1の結果にも表れている。

(3) 機材滞在時間と遅れの波及

日中に仙台空港に到着する多くの機材は、到着後30分から1時間滞在した後、次の目的地へのお出発便として運用されている。ここでは、機材の空港滞在時間によって、到着便の遅れがその機材を用いる出発便の遅れにどのように波及するかを分析する。

ここでは運用が大きく変化しなかった2007年4月から10月の期間について、機材の運用の関係をJR時刻表<sup>8)</sup>より推定した結果、仙台空港での滞在時間は30分以上に設定されていることがわかった。そこで、滞在時間が30分の便と45分以上の便についての到着遅れと出発遅れの関係を図2、図3に示す。ただし、図中の直線は到着時の遅れと出発時の遅れが等しい線を示している。図2より

表1 出発便と到着便の遅れに関する統計量

	便数(欠航)	平均	分散	歪度	尖度
出発	12150(95)	2.0	98.3	8.4	123.5
到着	12147(98)	1.2	154.4	8.6	201.9

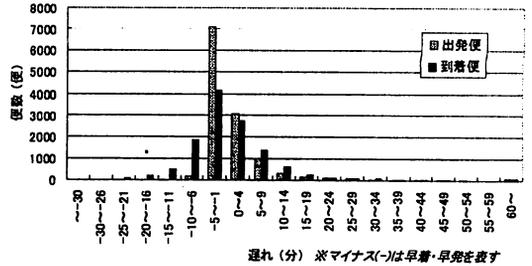


図1 出発便と到着便の遅れの比較

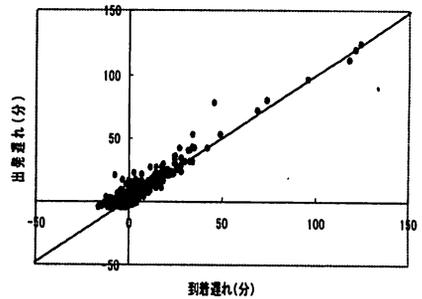


図2 滞在時間30分の便の到着・出発遅れ

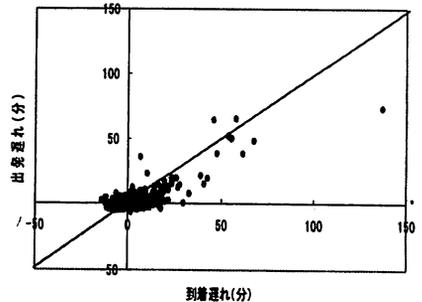


図3 滞在時間45分以上の便の到着・出発遅れ

滞在時間が30分の場合は仙台空港で遅れが回復することは少なく、逆に拡大している便が多い。一方滞在時間が45分以上の場合は、ほとんどの便のプロットは右下に位置し、仙台空港滞在中に遅れが減少していることがわかる。

3. 遅れの法則性の分析手法

(1) 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れの原因として、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、遅れ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れが発生する可能性がある。原因  $j$  の第  $i$  便の遅れへの影響力を係数  $a_{ij}$  で表す。各日において観測された各便の遅れを  $x_1, \dots, x_i, \dots, x_m$  とすれば、これらの関係は式(2)のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} \\ \vdots \\ a_{i1} \\ \vdots \\ a_{m1} \end{pmatrix} s_1 + \dots + \begin{pmatrix} a_{1j} \\ \vdots \\ a_{ij} \\ \vdots \\ a_{mj} \end{pmatrix} s_j + \dots + \begin{pmatrix} a_{1n} \\ \vdots \\ a_{in} \\ \vdots \\ a_{mn} \end{pmatrix} s_n \quad (2)$$

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

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s}$$

$\mathbf{A}$  の各列は、ある遅れの要因  $s_j$  が発生した際にどの便に影響を受けるかという遅れのパターンを表す。同時に、 $\mathbf{s}$  は遅れの要因の日変動を表しているため、それぞれの遅れ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  $\mathbf{x}$  のみであるため、 $\mathbf{A}$  と  $\mathbf{s}$  を同時に推定する必要がある。

## (2) 独立成分分析

式(2)のように観測データを複数の構成要素が混ざり合ったものと考え、個々の要素を逆に求めようとする統計的手法として因子分析がある。因子分析では、得られる因子に正規性を仮定し、2次の誤差を最小にするように計算を行う。しかし、図1に示したように、遅れや欠航という現象は非日常的な要因に起因すると考えられるため、その要因に正規性を仮定することには問題がある。

そこで本研究では、因子に正規性を仮定しない独立成分分析 (Independent Component Analysis) (以下ICA) を用いる。推定にあたって用いる仮定は、原信号  $\mathbf{s}$  が各時刻  $i$  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  $\mathbf{s}$  を独立成分と呼ぶ。

Hyvarinenら<sup>9)</sup>は原信号の独立性の基準として、尖度を用いる方法を提案した。この方法は「独立な確率変数の和の平均の分布は、和をとる変数の数が増えるに従って正規分布に漸近する」という中心極限定理を踏まえて、非正規的な分布を探索することで、最も独立な分布を探索するという考え方に立脚している。

先に述べたように正規分布では尖度は0であることから、観測データ中で尖度の絶対値を最大化する方向に軸をとることで、最も非正規的な分布を得ることができる。Hyvarinenらは、観測信号の線形加重和として独立成分を表すときの復元行列  $\mathbf{W}$  ( $\mathbf{W} = \mathbf{A}^{-1}$ ) を求めるアルゴリズムを提案した。このアルゴリズムはFastICAと呼ばれており、次のような手順からなる。

(i) 観測データ行列  $\mathbf{x}$  から標本の平均値を引き、平均0に正規化された行列  $\mathbf{x}'$  を求める。

(ii)  $\mathbf{x}'$  について固有ベクトルを各列に持つ行列  $\mathbf{E}$  と固有値の対角行列  $\mathbf{D}$  を用いて白色化を行い、白色(無相関で分散が1)な行列  $\mathbf{z}$  を得る。この白色化の計算は主成分分析に他ならない。このとき、累積寄与率などに制限をかけて採用する行列  $\mathbf{z}$  の次元を制限することにより、求める独立成分の個数を限定することができる。

$$\mathbf{z} = \mathbf{V}\mathbf{x}' \quad (3)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{D}^{-1/2}\mathbf{E}^T$$

(iii)  $\mathbf{y} = \mathbf{w}_i^T \mathbf{z}$  において尖度の絶対値が急激に増大する方向を計算し、その勾配方向

$$\mathbf{w}_i \leftarrow \mathbf{E} \left\{ \mathbf{z} \left( \mathbf{w}_i^T \mathbf{z} \right)^3 \right\} - 3\mathbf{w}_i \quad (4)$$

を繰り返し探索することによって、復元ベクトル  $\mathbf{w}_i$  を求める。

(iv)  $\mathbf{B} = (\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_m)^T$  とおき、 $\mathbf{W} = \mathbf{B}^T \mathbf{V}$  により復元行列  $\mathbf{W}$  を求める。また線形結合  $\mathbf{s} = \mathbf{W}\mathbf{x}$  により独立成分  $\mathbf{s}$  を得る。さらに  $\mathbf{A} = \mathbf{V}^{-1}\mathbf{B}$  より混合行列  $\mathbf{A}$  を求める。

## (3) 遅れ時間データへの適用

以下の分析では、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  $\mathbf{A}$  と独立成分  $\mathbf{s}$  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。

遅れ時間のデータでは、欠航便の値は欠測となっている。欠航は遅れの要因が非常に強く現れた際に、大幅な遅れを抱えたまま出発させるよりも欠航させた方が損失

表2 固有値と累積寄与率

固有値表	固有値	寄与率	累積寄与率
主成分No.1	5944.0	26.163%	26.163%
主成分No.2	2684.9	11.818%	37.981%
主成分No.3	1732.8	7.627%	45.608%
主成分No.4	1174.4	5.169%	50.777%
主成分No.5	1071.6	4.717%	55.493%
主成分No.6	940.1	4.138%	59.631%
主成分No.7	772.5	3.400%	63.031%
主成分No.8	728.1	3.205%	66.236%
主成分No.9	575.7	2.534%	68.770%
主成分No.10	531.1	2.338%	71.108%
主成分No.11	469.4	2.066%	73.174%
主成分No.12	407.7	1.794%	74.968%
主成分No.13	367.8	1.619%	76.587%
主成分No.14	349.5	1.538%	78.126%
主成分No.15	306.0	1.347%	79.473%
主成分No.16	282.4	1.243%	80.715%
主成分No.17	264.8	1.165%	81.881%
主成分No.18	246.7	1.086%	82.967%
主成分No.19	238.4	1.049%	84.016%
主成分No.20	231.0	1.017%	85.033%
主成分No.21	226.9	0.999%	86.031%
主成分No.22	219.7	0.967%	86.998%
主成分No.23	201.5	0.887%	87.885%
主成分No.24	183.8	0.809%	88.694%
主成分No.25	177.7	0.782%	89.476%
主成分No.26	167.9	0.739%	90.215%
主成分No.27	165.4	0.728%	90.943%
主成分No.28	152.1	0.669%	91.613%
主成分No.29	140.7	0.619%	92.232%
主成分No.30	135.1	0.595%	92.826%
主成分No.31	124.0	0.546%	93.372%
主成分No.32	115.5	0.509%	93.881%
主成分No.33	113.3	0.499%	94.380%
主成分No.34	109.0	0.480%	94.859%
主成分No.35	97.7	0.430%	95.290%
主成分No.36	94.0	0.414%	95.703%
主成分No.37	84.9	0.374%	96.077%
主成分No.38	80.6	0.355%	96.432%
主成分No.39	74.3	0.327%	96.759%
主成分No.40	69.8	0.307%	97.066%
主成分No.41	62.1	0.274%	97.340%
主成分No.42	57.4	0.252%	97.592%
主成分No.43	52.5	0.231%	97.823%
主成分No.44	46.9	0.207%	98.030%
主成分No.45	42.9	0.189%	98.218%
主成分No.46	39.0	0.172%	98.390%
主成分No.47	38.2	0.168%	98.558%
主成分No.48	37.0	0.163%	98.721%
主成分No.49	36.9	0.162%	98.883%
主成分No.50	32.9	0.145%	99.028%
主成分No.51	30.7	0.135%	99.163%
主成分No.52	25.8	0.113%	99.277%
主成分No.53	24.4	0.107%	99.384%
主成分No.54	22.3	0.098%	99.483%
主成分No.55	20.5	0.090%	99.573%
主成分No.56	19.0	0.083%	99.656%
主成分No.57	16.0	0.070%	99.727%
主成分No.58	14.1	0.062%	99.788%
主成分No.59	13.0	0.057%	99.846%
主成分No.60	12.8	0.056%	99.902%
主成分No.61	11.4	0.050%	99.952%
主成分No.62	10.9	0.048%	100.000%

が少ないと航空会社が判断した結果であると解釈できる。そのため欠航日を除外すると遅れの要因が最も強く現れた日を除外することになる。そこで、欠航による欠測値に何らかの値を補完することが望ましい。欠航便に乗るはずであった利用者の行動としては、同路線の次の便を待つ場合と、代替交通手段を利用する場合が考えられる。ここでは、どちらの場合でも元々の予定プラス3時間あれば目的地に到着できると想定して、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

$\mathbf{x}$  に主成分分析を適用した結果、表2のような固有値が得られた。これから寄与率が1%以上の20の主成分までで累積寄与率が85%を越えたため、以下では20の主成分に基づいて20個の独立成分 $\mathbf{s}$ を計算した。

$s_j$  は平均0分散1に正規化されているが、先述したように正規分布に比べて尖度が大きく、0から外れた値をとる確率が正規分布よりも大きい。そこで各独立成分について、絶対値が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たところ、表3のように395日中1日から5日の割合で特異日を抽出できた。正規分布では $5\sigma$ の超過確率は $2.9 \times 10^{-7}$ であるから、それに比べて外れ値を取る確率が大きいことが確認できる。さらに、混合行列Aの各要素の値を表4に示す。なお表4では到着便と出発便に分けて表しており、要素の値の絶対値が5および10を超える場合に表示を変更している。

以下では、遅れや欠航の実際の原因を調べるために、全日空と日本航空が提供する運航情報に加えて、朝日新聞<sup>10)</sup>と河北新報<sup>11)</sup>、気象庁<sup>12)</sup>が提供するweb上のデータベースを用いて考察を行っている。また、日付の表記において2007年は年号は省略する。

##### (1) 特殊な事象の発生による遅れ

$s_1$ はANA797福岡-仙台、ANA735伊丹-仙台、ANA464那覇-仙台、ANA799福岡-仙台、ANA463仙台-那覇、ANA3134仙台-成田、ANA738仙台-伊丹、ANA800仙台-福岡に遅れが発生するパターンであり、この遅れのパターンは5月27日にのみ強く現れている。この日は全日空の国内線予約・発券システムに障害が発生しており、羽田、伊丹発着便を中心に遅れや欠航が発生して、それが仙台発着便に波及したものと考えられる。同様に、 $s_2$ はANAの仙台と福岡、小松、中部を結ぶ便で4月11日に遅れが発生するパターンであるが、この日は全日空系列4社の労働組合によるストライキが行われている。つまり、これら2つの成分は特異な日の遅れのパターンである。

表3 独立成分  $s_j$  の影響が強い日

	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$	$s_6$	$s_7$	$s_8$	$s_9$	$s_{10}$	$s_{11}$	$s_{12}$	$s_{13}$	$s_{14}$	$s_{15}$	$s_{16}$	$s_{17}$	$s_{18}$	$s_{19}$	$s_{20}$
			12/29 12/28						12/10 12/21						12/8 12/5		12/28			
2006	5/27	4/11	1/7	12/31	7/14	7/15	9/7	7/13	3/14	12/23	1/29	3/13	3/28	7/9	5/13	3/28	1/30	4/3	3/6	
2007					9/6				12/14			4/14	4/14	7/28	6/7	7/25	5/29	4/2		
	※裏線で囲われた日はマイナスの影響が強い日														7/4	10/26	12/27			

表4 混合行列A

仙台着	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$	$s_6$	$s_7$	$s_8$	$s_9$	$s_{10}$	$s_{11}$	$s_{12}$	$s_{13}$	$s_{14}$	$s_{15}$	$s_{16}$	$s_{17}$	$s_{18}$	$s_{19}$	$s_{20}$
9:00 JEX2201 伊丹	-0.3	0.0	0.1	-0.6	0.2	0.5	0.2	0.3	0.0	-0.1	0.4	-0.6	0.0	0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-1.0	-1.4	-0.8
9:05 JEX3171 中部	0.4	-0.1	10.2	8.4	0.5	1.5	8.8	8.7	1.3	-0.8	-0.7	-1.0	0.1	0.3	0.3	0.0	-0.5	-0.6	0.0	-2.4
9:10 ANA 365 中部	1.0	4.2	8.8	8.5	8.2	0.3	8.0	8.5	1.7	-0.2	-0.8	-0.3	-1.1	0.2	-0.1	0.3	-0.5	-1.1	-0.5	0.4
9:15 ANA 731 伊丹	3.5	0.5	-0.9	0.5	0.4	0.4	-0.8	8.7	0.8	0.2	0.9	0.3	-1.4	0.1	0.8	0.0	-1.1	-1.3	-0.9	-4.2
9:35 ANA 720 新千歳	2.8	0.2	-0.7	-0.5	0.7	-0.6	-0.3	8.3	-1.0	8.2	-0.1	0.7	1.8	0.6	1.2	-0.6	3.6	1.9	1.0	-0.2
10:00 JAL3531 福岡	0.1	-0.3	-0.1	0.9	0.6	1.1	0.9	8.9	-0.4	-0.4	0.0	0.8	0.8	-1.2	2.0	5.8	1.2	-0.8	-1.3	-0.6
11:00 ANA 733 伊丹	3.3	0.3	2.3	0.0	0.1	0.3	0.1	8.4	0.8	0.6	0.3	-0.7	-0.5	0.6	-0.2	-0.7	-0.1	-0.6	-0.2	0.6
11:15 ANA 722 新千歳	3.4	-0.8	0.6	-0.8	-0.5	0.2	-0.8	8.4	-1.0	1.8	-1.7	1.8	8.1	1.8	2.3	-1.8	4.2	-0.1	-0.3	-1.6
11:15 JEX2203 伊丹	0.3	-0.2	0.3	-0.3	0.3	0.1	8.7	8.3	0.4	0.2	-0.1	-0.2	-0.5	0.1	0.2	0.3	0.0	-0.4	-0.5	0.3
11:35 ANA 3131 成田	-0.8	-1.4	-0.5	-2.4	0.3	-0.3	1.4	10.2	4.8	0.1	-1.1	-0.7	-1.5	3.4	-0.5	-0.4	0.4	-0.6	0.5	-3.8
11:35 ANA 797 福岡	5.4	8.8	-0.4	-0.3	-0.1	1.3	8.8	8.5	0.0	-0.4	-0.1	-0.7	-0.8	0.3	-0.7	-0.5	-1.3	-0.7	-0.1	-2.0
12:15 JEX2205 伊丹	0.2	-0.3	0.9	0.5	0.4	0.7	8.1	8.8	-0.4	-0.2	-0.1	-0.4	0.0	-0.4	-0.2	0.5	0.8	-0.2	0.1	0.9
12:20 JEX2804 新千歳	-0.4	-0.8	8.7	-1.1	0.1	0.6	8.0	8.8	-2.1	1.8	1.8	-0.4	1.3	8.7	0.9	1.5	-1.1	0.6	0.3	0.0
13:45 ANA 724 新千歳	2.0	-0.4	1.9	0.7	-0.1	-2.0	-1.0	8.8	-1.4	8.8	5.8	1.8	4.8	2.8	2.8	-2.3	2.1	1.8	0.9	-2.0
14:00 ANA 735 伊丹	7.1	1.2	-0.8	-0.1	0.0	0.0	8.0	8.5	1.8	-0.2	0.0	-0.8	-0.2	0.6	0.3	0.1	-0.7	-0.2	-0.2	-1.2
15:25 ANA 802 広島	2.8	-1.4	0.8	-0.8	-0.2	0.7	2.8	8.3	-3.8	-1.8	-0.3	1.8	4.8	1.8	1.1	-1.6	-1.6	-0.5	-0.9	0.6
16:45 JAL3535 福岡	-0.8	0.8	1.2	-1.4	-0.1	0.5	8.8	-0.3	1.4	-0.5	0.3	-1.0	0.0	-0.2	1.4	-1.0	-0.5	-0.3	-0.5	-0.5
16:55 ANA 484 那覇	8.4	-1.2	1.5	-0.9	-0.7	2.0	-0.7	8.8	8.7	0.0	-1.8	0.0	0.2	-1.1	0.1	0.3	-0.8	0.5	-0.7	0.5
17:30 JAL2912 新千歳	0.6	-1.0	3.0	-2.1	1.4	-0.4	8.3	1.5	0.1	8.8	5.3	1.8	7.4	1.5	-3.7	1.8	-4.0	-1.3	-0.5	-1.5
18:10 ANA 3235 成田	-0.4	-2.5	0.2	-3.7	7.8	-1.4	10.2	0.3	3.8	0.4	0.7	-0.7	-1.5	0.7	-1.8	0.5	5.9	0.1	-1.9	-3.1
18:10 ANA 737 伊丹	0.9	-0.3	0.4	-0.4	0.0	1.0	8.8	0.7	0.4	-0.2	-0.1	0.2	0.0	-0.1	0.1	-0.7	-0.1	-0.9	-0.5	-0.4
18:15 ANA 361 小松	-3.4	18.2	10.8	-3.4	2.1	1.1	8.7	0.6	8.0	-2.2	-0.5	0.3	1.4	2.0	0.6	-0.4	0.3	-0.3	1.6	-2.4
19:00 ANA 799 福岡	7.8	10.0	-0.5	0.1	-0.5	0.6	10.2	-0.3	-2.2	1.2	-0.4	-0.8	1.0	0.0	-0.3	0.1	0.5	0.0	-1.5	1.0
19:05 ANA 728 新千歳	0.7	-1.4	-2.1	0.1	10.2	-1.6	8.2	1.0	0.5	2.0	-0.5	1.8	8.1	4.9	0.4	-1.7	-6.8	-0.3	3.7	-2.4
19:30 ANA 369 中部	0.3	-0.8	-0.2	-1.1	2.1	0.8	10.2	-0.4	-1.0	1.7	0.8	1.4	-1.2	-1.2	1.2	-1.1	-2.4	-0.7	-0.4	0.5
19:50 ANA 739 伊丹	0.7	-0.9	0.2	-0.6	-0.5	1.9	8.8	0.1	-0.2	-0.7	8.4	-0.3	10.2	-0.6	-0.4	-0.2	-2.0	0.2	-1.4	-0.9
19:55 JEX2209 伊丹	-0.8	0.0	-0.7	-0.2	7.8	8.8	8.0	2.2	0.0	0.7	10.2	-0.4	0.8	0.4	-0.4	-0.1	2.1	-1.2	1.8	1.3
20:20 ANA 730 新千歳	0.4	-1.0	2.9	0.3	0.1	1.2	1.3	0.5	1.8	1.1	1.0	8.8	5.4	1.4	0.3	-0.8	0.7	-0.7	1.9	-0.1
20:45 JEX2211 伊丹	0.3	-0.4	-0.2	-1.4	0.9	7.1	0.1	-0.2	-0.7	1.5	1.5	-0.2	0.0	0.3	0.3	-0.1	0.2	-0.7	-0.4	0.2
20:45 JEX3175 中部	0.2	-0.3	-0.5	0.1	8.1	10.2	8.3	0.1	2.1	0.2	-2.8	-0.5	-0.8	0.1	0.4	0.3	-1.7	7.2	0.2	-1.6
20:55 ANA 409 神戸	1.4	-1.1	0.1	-0.2	-0.1	1.3	0.0	-0.2	1.1	3.3	1.7	1.2	1.3	1.9	3.0	-1.6	-3.5	-1.5	3.6	-2.2
仙台発	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$	$s_6$	$s_7$	$s_8$	$s_9$	$s_{10}$	$s_{11}$	$s_{12}$	$s_{13}$	$s_{14}$	$s_{15}$	$s_{16}$	$s_{17}$	$s_{18}$	$s_{19}$	$s_{20}$
8:00 ANA 368 中部	2.7	-0.5	8.8	-0.9	10.2	-3.4	8.7	-0.3	-2.0	-0.4	1.1	-0.1	-1.0	0.7	0.2	-0.4	2.5	4.0	0.4	1.3
8:00 JEX2200 伊丹	-1.4	-0.4	-0.3	-2.2	0.4	1.1	-0.2	10.2	-3.3	-0.9	-0.7	0.7	-0.3	-1.0	-0.4	-1.0	-0.7	-1.2	0.0	-0.7
8:15 ANA 3232 成田	0.5	-0.3	0.5	-2.6	0.5	-0.5	0.0	8.8	-0.8	-0.7	-0.7	0.2	0.5	-0.1	-0.9	-0.1	-0.8	-0.1	-0.2	8.7
8:25 ANA 732 伊丹	1.8	0.0	-0.3	-0.2	0.3	0.0	0.3	0.8	0.1	0.3	-0.4	-0.1	-0.2	0.3	-0.4	-0.5	0.2	-0.4	-0.3	0.0
8:30 ANA 719 新千歳	3.7	-0.2	10.2	-0.3	3.8	0.8	-0.9	0.6	0.5	8.4	0.9	-0.7	1.1	3.1	-0.6	0.4	-0.7	-1.9	-0.3	-1.1
9:00 JEX2202 伊丹	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	0.1	0.4	0.0	8.8	-0.2	-0.2	-0.1	0.0	0.5	0.5	-0.2	0.1	0.5	-0.5	-0.6	-0.2
9:30 JEX2803 新千歳	-0.5	-0.4	10.2	-1.7	-0.4	1.1	0.5	8.2	-2.0	11.2	-0.6	-0.6	2.0	-1.2	0.1	-1.0	0.6	-0.8	-0.5	0.5
9:40 JEX3170 中部	0.0	0.4	8.8	7.8	0.7	1.3	8.8	8.1	0.2	-0.6	0.3	0.4	0.2	-0.2	-0.3	0.8	0.5	-0.6	-0.5	-1.1
9:55 ANA 734 伊丹	4.4	0.3	-0.9	0.7	0.5	0.3	-0.5	10.2	-0.3	0.3	1.5	0.1	-1.2	-0.2	1.1	-0.6	-0.1	-1.9	-1.0	-5.0
10:15 ANA 721 新千歳	2.4	0.2	-0.4	0.0	8.2	-0.5	0.8	8.8	0.4	8.4	-0.7	0.8	1.8	1.6	-1.8	-0.8	3.4	1.2	1.0	0.9
10:15 ANA 798 福岡	-3.6	3.7	-3.7	7.5	-0.1	-0.8	8.8	8.3	5.9	3.6	2.6	-0.7	-3.0	2.4	-1.7	-0.4	-0.1	-0.4	0.3	4.3
10:40 JAL2907 新千歳	-0.4	-0.1	0.0	0.9	0.5	1.3	-0.2	8.8	-0.8	0.2	0.4	10.2	2.5	-1.5	0.7	8.3	2.2	-1.1	-1.0	0.1
11:40 ANA 463 那覇	5.8	-0.2	3.1	-0.4	0.4	1.6	-1.0	8.8	5.8	-0.5	-0.1	0.9	0.4	-0.3	1.0	-0.9	0.0	-1.0	-0.7	7.1
11:50 ANA 801 広島	3.2	-1.1	-0.1	0.0	0.0	0.3	-0.9	8.8	-0.3	0.4	-0.4	10.2	4.7	1.8	-1.3	1.5	-1.6	-0.6	6.2	6.2
12:10 JAL3534 福岡	0.0	-0.3	1.0	0.0	0.8	0.1	8.8	8.8	0.1	-0.1	0.0	-0.1	0.1	-0.3	0.9	0.2	-0.1	0.0	-0.3	1.7
14:30 ANA 723 新千歳	2.0	-0.4	2.7	-0.3	0.1	-0.9	0.1	8.3	-0.4	-0.4	8.1	10.0	-1.0	1.2	0.2	-0.7	-0.5	10.2	-0.3	-1.3
14:40 ANA 736 伊丹	1.0	-0.2	0.4	0.1	-0.1	0.5	8.8	8.9	0.5	1.4	0.1	0.2	0.0	0.3	0.6	0.2	-0.6	-0.4	-0.1	-1.1
15:40 ANA 362 小松	-2.9	10.2	10.2	-2.5	3.6	0.3	8.1	8.2	3.8	-1.9	-0.5	-0.6	1.4	1.2	-0.1	-0.1	0.1	0.3	1.0	-2.0
16:05 ANA 3134 成田	8.7	0.0	0.9	1.8	1.0	0.1	8.1	8.1	-0.4	-0.9	0.5	-0.9	-1.2	0.0	-0.7	1.7	2.3	-0.5	10.2	-0.5
16:40 JEX2206 伊丹	0.3	-0.3	1.2	-1.2	0.7	1.8	8.0	2.9	-1.5	0.7	10.2	1.9	5.8	-0.4	-1.1	2.5	1.0	-0.8	0.1	-0.8
17:35 ANA 727 新千歳	1.0	-1.9	-0.4	0.3	-0.7	1.5	8.8	0.6	0.6	-0.3	-1.5	10.2	3.6	3.2	0.6	-1.1	7.2	-2.2	0.2	-2.6
17:40 ANA 738 伊丹	5.0	-1.5	1.5	-0.8	-1.0	1.0	8.8	8.7	3.2	-1.2	-1.9	-0.8	1.3	-0.8	-0.9	-0.3	-0.6	1.7	-1.1	-0.5
17:40 JEX2208 伊丹	-0.3	-0.1	0.8	-1.1	-0.3	0.2	8.3	-0.2	0.2	0.4	1.0	-0.1	0.2	-0.2	5.8	0.0	-0.5	-0.9	-0.5	0.2
18:20 JAL3538 福岡	-0.3	-0.8	0.3	-0.1	0.7	-0.6	8.5	1.5	-0.2	1.0	-1.8	-0.4	0.7	1.4	8.8	10.2	0.2	1.5	0.9	0.2
18:45 ANA 370 中部	-1.3	11.2	1.4	-2.5	4.3	1.4	8.7	0.0	5.5	-1.7	-0.1	8.3	4.9	0.9	-0.1	-0.5	-1.1	-0.5	1.4	-1.7
18:50 ANA 740 伊丹	2.7	0.1	-0.1	-0.3	0.0	0.8	8.8	0.7	0.2	-0.2	-0.1	0.0	0.0	0.1	-0.1	-0.4	0.2	-0.2	0.1	-0.4
19:05 JEX2210 伊丹	0.7	-0.9	2.0	0.2	8.8	1.0	8.1	-0.1	-0.5	0.3	1.6	0.8	1.4	-0.5	0.1	-0.5	-1.4	-0.4	4.9	-0.3
19:30 ANA 800 福岡	7.3	8.7	-0.5	-0.1	2.6	1.6	8.3	-0.4	-0.5	0.6	0.3	0.1	-0.7	0.1						

ーンの影響が強いのは2006年12月28日、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、 $s_7$ および $s_8$ のような遅れのパターンをもたらした。台風接近のタイミングの違いがパターンの違いを引き起こしたと考えられる。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。

### (3) 積雪による遅れとその波及

$s_{10}$ はANA720、722、724、719、721とJAL2912、JEX2904、2903といった、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。これと同様に、新千歳での降雪が原因と考えられるものとして、 $s_{11}$ 、 $s_{12}$ 、 $s_{13}$ がある。この3つは、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。同様の原因であっても、新千歳便の欠航や機材運用の変更などによりその後の波及が異なってくることがわかる。

### (4) 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。

$s_{15}$ はJAL3535福岡-仙台、JEX2208仙台-伊丹、JAL3538仙台-福岡で遅れが発生するパターンであり、2006年12月8日、7月9日に強く現れている。どちらも、JAL3535が機材故障のため欠航となっており、折り返し運用便のJEX2208と、同区間の逆方向の便であるJAL3538がその影響を受けたものである。

$s_{16}$ はJAL3531福岡-仙台、JAL2912新千歳-仙台、JAL2907仙台-新千歳、JAL3538仙台-福岡で遅れが発生するパターンである。この遅れのパターンが強く影響する日は、機材繰りのために運用が連続しているこれらの便に遅れや欠航が発生している。

$s_{17}$ はANA727仙台-新千歳で正の方向に、ANA728新千歳-仙台で負の方向に大きい係数をもつパターンである。このパターンは正の方向だけでなく、負の方向に影響が強い日も存在する。このことから、ANA727とANA728は一方が遅れるともう一方が早着・早発する関係にある

ことがわかる。また、ANA3235成田-仙台も係数の値が大きいため遅れが発生しているように見えるが、成田空港誘導路の混雑による離陸待ちを見込んで余裕を持った時間設定を行っているために、平常時は大幅な早着であることが多い成田便が、予定時間通りに到着したものであり、実際には遅れはほとんど発生していない。

$s_{18}$ はANA724新千歳-仙台、JEX3175中部国際-仙台、ANA723仙台-新千歳、JEX3176仙台-中部国際で遅れが発生するパターンである。このうち、ANA724と723は折り返し便であるため、遅れが伝播したものである。また、JEX3175と3176は機材繰りのために欠航となる日が確認できた。

### (5) その他の遅れ

$s_{19}$ はANA3134仙台-成田で遅れが発生するパターンであり、成田空港での混雑がその原因であると考えられる。成田空港の発着枠は限界にあるため、着陸が見込めるまで仙台空港からの出発を遅らせたものと推測できる。

$s_{20}$ はANA3232仙台-成田、ANA463仙台-那覇、ANA801仙台-広島で遅れが発生するパターンである。しかし、このパターンが強く現れている日のうち3月6日と4月2日は、ANA463とANA801ではほとんど遅れは観測されていなかった。

## 5. 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れのパターンを知るために、航空機の遅れデータに対してICAを適用して分析した。その結果、いくつかの典型的な遅れの伝播・波及のパターンを抽出できた。さらに、各遅れのパターンが強く現れる日を確認した結果、予約システムや機材の故障、ストライキのほか、強風や台風、積雪などが原因となっていること、同一の原因でもいくつかの異なる波及パターンが発生していることが分かった。

空港管理者にとって、遅れ原因の発生状況を詳しく知ることには困難であるが、航空便の遅れや欠航の実績データは比較的手に入れやすいものと考えられる。そのため、典型的な遅れの波及パターンを用意しておき、1日の中の各便の遅れを注意深く観察することにより、どの波及パターンに従って推移しているのかを判別できれば、午前中のある便が遅れた際に、それ以降のどの便が遅れる可能性が高いかを予想でき、遅れを回復させるか、少なくとも拡大させないような対策を検討できる。また、将来的には、航空利用者にこの情報を提供することにより、遅れる可能性の低い便への乗換えを促すことにより、実際に遅れが発生した場合の利用者の損失を小さくできる可能性がある。

本研究で得られた独立成分の中には、 $s_{20}$ のように、実際には遅れが発生していない日に大きな値を示すものもあった。独立成分の数を限定するために主成分分析により次元を縮約したことの影響である可能性が大きい。成分の数と求められる成分のパターンとの関係を検討しておくことが望ましい。

本研究では、空港管理者の利用を念頭に置き、独立成分の値が特異な値をとった日を抽出し、その日にどのような原因が発生した可能性があったかを考察した。逆に、このような定性的な事象が発生した日と発生しなかった日を区別しておき、独立成分の値を比べることによって、各成分の発生原因をより詳細に確認できる可能性がある。航空会社の立場からみれば、このような分析は、遅れや欠航の管理に役立つ可能性がある。なおこのとき、各独立成分が正規分布に従わないことから、検定などの一般的な差の検定法が利用できないことに注意が必要である。

#### 参考文献

1) Abdelghany, K.F. et al.: A model for projecting flight delays during irregular operation conditions, *Journal of Air Transport Management*, Vol. 10, pp. 385-394, 2004.

2) Golaszewski, R.: Reforming air traffic control: an assessment from the American perspective, *Journal of Air Transport Management*, Vol. 8, pp. 3-11, 2002.  
3) Abdel-Aty, M. et al.: Detecting periodic patterns of arrival delay, *Journal of Air Transport Management*, Vol. 13, pp. 355-361, 2007.  
4) Abdelghany, K.F. et al.: An integrated decision support tool for airlines schedule recovery during irregular operations, *European Journal of Operational Research*, Vol. 185, pp. 825-848, 2008.  
5) 全日本空輸 (ANA) HP, <http://www.ana.co.jp/asw/index.jsp>.  
6) 日本航空 (JAL) HP, <http://www.jal.co.jp/>.  
7) 箕谷千風彦: 金融データの統計分析, 東洋経済新報社, 2001.  
8) 交通新聞社: JR時刻表2007.4, 2007.  
9) Hyvarinen, A.: 詳解 独立成分分析, 東京電気大学出版局, 2005.  
10) 朝日新聞オンライン記事データベース, <http://database.asahi.com/library2/>.  
11) 河北新報データベース, <http://newkd.kahoku.co.jp/Default.htm>.  
12) 気象庁HP, <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>.

---

### 仙台空港発着便における遅れ・欠航の分析\*

加藤寛道\*\*・木村裕介\*\*・奥村誠\*\*\*・塚井誠人\*\*\*\*

本研究は、航空便の遅れや欠航による空港のサービスレベルの低下を回避する上で、空港管理者が実績の発着時刻に基づいてその後の遅れの発生を短期的に予測することが役立つと考え、過去の遅れ時間データから統計的な法則性を見出す手法を検討した。仙台空港における13ヶ月間の遅れデータの分析から、非日常的な要因に起因する遅れや欠航の現象は正規分布には従わないことを示し、独立成分分析(ICA)を用いた分析を行い、典型的に見られる遅れの要因とその波及パターンを考察した。

---

### Analysis of Flight Delays and Cancellations at Sendai Airport\*

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

Flight delays and cancellations lower the service level of an airport through congestion and confusion. This paper provides a statistical method to grasp typical coincident/ defusing patterns of flight delays and cancellations, which becomes a basement for within day prospecting for airport managers. Independent Component Analysis (ICA) is applied to the flight time data of 13 months at Sendai Airport, and picked up 20 patterns of flight delay occurrence and diffusion, due to bad climate, airport congestion and other accidents.

---