

航空旅客の希望出発時刻分布の逆推定*

Reverse Analysis of Preferred Departure Time of Air Passengers*

木村裕介**・奥村誠***・坂本麻衣子***

By Yusuke KIMURA**・Makoto OKUMURA***・Maiko SAKAMOTO***

1. はじめに

航空に代表される都市間交通は、都市内交通と比べて運行が低頻度である。特に航空の場合は鉄道に比べて運行間隔が広い。加えて複数の会社が参入している路線の場合には、全体の便数は多くても各社の競争の結果として他の会社と出発時刻が似通ってしまう傾向がある（例えば、Borenstein・Netz¹⁾）とされている。また、最近では赤字路線の減便・廃止という傾向も見られ、旅客の利便性の低下が心配される。

運行スケジュールの良さを評価するためには旅客の希望出発時刻の分布が必要である。通常、このような研究では旅客に直接アンケート調査を行うことが多い。しかし、今回は対象が全国の複数の路線であり、もしアンケート調査を実施すると莫大な費用がかかる。また、調査対象者の偏り（利害関係者は進んで回答する）に基づくバイアスやプライバシーの問題等、アンケート調査特有の問題点もある。

そこで、本研究では現状の航空便の設定時刻が旅客の利便性のある程度考慮して設定されているものと仮定し、現状の設定時刻からの逆推定により旅客の希望出発時刻の分布を算出する。また、算出した分布を用い、運行スケジュールが都市間の旅客の航空選択率に与える影響を分析する。

2. 運行スケジュールの定量的な把握方法

(1) 平均スケジュールコスト

本研究では、運行スケジュールの良さを表現できる定量的な指標として旅客の希望時刻と運行スケジュールとの差を平均化した平均スケジュールコスト T_i という概念を導入する。これを(1)式に示す。

*キーワード：公共交通需要，配分交通，公共交通運用，逆推定

**学生員，東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
(宮城県仙台市青葉区川内41番地，
TEL022 795 7567、FAX022 795 7477)

***正員，博士(工学)，東北大学東北アジア研究センター

$$T_i = \sum_{k=1}^{N_i} \left\{ \int_{r_i^{k-1}}^{x_i^k} \sigma(x_i^k - x) f(x) dx + \int_{x_i^k}^{r_i^k} \tau(x - x_i^k) f(x) dx \right\} \quad (1)$$

ただし，

$$\int_0^1 f(x) dx = 1, \quad f(x) \geq 0 \quad (2)$$

$$r_i^k = (\alpha x_i^k + \alpha x_i^{k+1}) / (\sigma + \tau) \quad (3)$$

とする。 x_i^k は路線*i*の第*k*便の出発時刻である。 $f(x)$ は旅客の希望出発時刻の分布で、その形を同定する方法は(2)で示す。また、 r_i^k は旅客の便選択（希望出発時刻より早い便に乗るか遅い便に乗るか）の切り替え時刻を表している。 σ と τ は既知のものとし、その大小関係は $\sigma \geq \tau > 0$ とする。これは、旅客が希望時刻より早い便に乗る方が遅い便に乗るよりもコストが低いと感じるという仮定に基づくものである。

つまり、この平均スケジュールコストは、旅客が自分の希望時刻よりどの程度早い時間、もしくは遅い時間の便に乗るかというスケジュール調整のためのコストを、その時間における基準化された旅客の希望出発時刻の分布で重み付けした値であり、スケジュール調整のための平均的なコストを表している。

Janssenら²⁾の立地競争ゲームに関する研究より、競合する2社が便を運行してシェアをめぐる競争関係にある場合、「それぞれの航空会社は、全ての旅客が自分の会社の便を利用する際の平均スケジュールコストを最小にするように出発時刻の組 X_i を決定する」という定理が成立する。本研究ではこの定理に立脚して、実際の運行スケジュールからの逆解析により希望出発時刻の分布 $f(x)$ を算出する。

(2) 逆解析問題の定式化

会社*i*に関して(1)式の平均スケジュールコストを最小化する問題の1階条件は、

$$\sigma \{F(x_i^k) - F(r_i^{k-1})\} = \tau \{F(r_i^k) - F(x_i^k)\} \quad (4)$$

となる。ただし、 $F(x)$ は $f(x)$ の原始関数である。

時間軸の離散化を行い、次の g_m^k を用いると、希望出発時刻の分布が同一と考えられる路線 $l=1, \dots, L$ について、この条件を満足する f_m を求める逆問題を次のように定義できる。

$$\min_{f_m} \Omega = \sum_{l=1}^L \sum_{i=1,2}^{N_i} \sum_{k=1}^{M} \left\{ \sum_{m=1}^M g_{im}^k f_m \right\}^2 \quad (5)$$

$$s.t. \sum_{m=1}^M f_m = 1, f_m \geq 0 \quad (6)$$

$$g_{im}^k = \begin{cases} 0 & (0 \leq x_m < r_i^{k-1}) \\ \sigma & (r_i^{k-1} \leq x_m < x_i^k) \\ -\tau & (x_i^k \leq x_m < r_i^k) \\ 0 & (r_i^k \leq x_m < 1) \end{cases} \quad (7)$$

逆解析問題では、解の非一意性を解消するため、事前分布への近さを考慮して、数値計算の安定化を図ることが多く行われる。そこで本研究では、(5)式の最小化問題と、路線ごとの平均スケジュールコストの総和との1次結合を最小化するという考え方を導入する。その際、この2項の効果を調整するため、一様分布 \bar{f}_m を用いてそれぞれの項を基準化したものを目的関数とする。

$$\min_{f_m} \Omega' = (1 - \alpha) \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1,2}^{N_i} \sum_{k=1}^M \left\{ \sum_{m=1}^M g_{im}^k f_m \right\}^2}{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1,2}^{N_i} \sum_{k=1}^M \left\{ \sum_{m=1}^M g_{im}^k \bar{f}_m \right\}^2} + \alpha \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1,2}^{N_i} \sum_{m=1}^M |g_{im}^k| |x_m - x_i^k| f_m}{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1,2}^{N_i} \sum_{m=1}^M |g_{im}^k| |x_m - x_i^k| \bar{f}_m} \quad (8)$$

本研究では、この(8)式を最小化することにより旅客の希望出発時刻の分布を求める。ただし、 $M = 24$ 、 $= 0.5$ 、 $\sigma = 2$ 、 $\tau = 1$ とする。

3. 旅客の希望出発時刻の分布の推定

(1) 使用データ

対象とする航空便は、2006年10月1日現在、曜日運休をせずに毎日運行している³⁾⁴⁾ものとした。ただし、区間ごとに別料金を支払わなければならない乗り継ぎ便、離島を順々に経由していく伊豆諸島のヘリコプター航路については対象外とした。また、立地競争ゲームのモデルの性質上扱えない13社以上が運行している路線(競合していない同一グループの会社は1社と考える)も除外した。さらに、同一都市圏にある空港は同じ空港(「伊丹・関空」(以後、大阪)、「中部国際・小牧」(以後、中部国際)「新千歳・札幌丘珠」(以後、新千歳))として扱い、神戸空港(2006年2月16日開港)と北九州空港(2006年3月16日、旧北九州空港より移転)は、十分な数の実績データが存在しないため、分析の対象から除いた。

このような補正を行った結果、対象となる路線は204路線、また、カバーできる旅客数は国内線全体の75%となった。

(2) クラスタ分析による路線の選定

たとえ路線が設定されていても、便数が少ない場合、必ずしも航空会社が旅客の希望出発時刻を完全に考慮し

て時刻を設定しているとは言えない。また、旅客数が少なければ、その路線のニーズよりも機材の運用などで時刻が決められてしまう可能性もある。そこで、クラスタ分析を用いて路線のグループ化を行い、航空会社が旅客の希望を読み、それと合わせて時刻を決めていると考えられる路線を選定する。

分析に用いるデータは、路線ごとの旅客数、座席数、座席利用率⁵⁾、空港乗降客数⁶⁾(以上2005年度)、及び便数³⁾⁴⁾(2006年10月)である。ただし、空港乗降客数は発着地で合算した値を用い、便数が往復で異なる場合は平均を用いた。また、クラスタ分析では、変数をZ得点で基準化し、クラスタ化の方法としてWard法を、非類似度の測定方法として平方ユークリッド距離を用い、分類するクラスタ数を10として分析を行った。

その結果、地方都市間を結ぶ需要の少ない路線が4つのクラスタに分類された。本研究では、これらの路線は分析の対象外とした。また、大阪・新千歳・中部国際・福岡・那覇を相互に結ぶ幹線路線やそれらの都市と関係の深い都市を結ぶ需要の多い路線(大阪・高知、福岡・鹿児島等)が2つのクラスタに、羽田路線が4つのクラスタに分類された。そこで、これら6つのクラスタの路線うち、羽田路線における便数が少ない1つのクラスタを除く5つのクラスタの路線(52路線、国内線全体の旅客数の61%)について、希望出発時刻の分布の推定を行う。

(3) 需要構造による路線の分類

Janssenら²⁾のモデルでは、顧客の分布 $f(x)$ は1つと考えて分析を行っているため、本研究の逆解析問題も分布 $f(x)$ が同一と考えられる路線ごとに適用する必要がある。しかし、前節で選択した52路線には羽田路線から沖縄県内の路線まで様々な路線が含まれており、需要構造が同じであるとは考えにくい。そのため、ここでは52路線の需要構造ごとのグルーピングを行う。

航空路線の性質を決めるものは、発着地の都市規模やその性質である。本研究では、まず東京の特殊性を考えて羽田路線(25路線)を1つのグループとし、方向別にa)羽田出発便とb)羽田到着便の2つに細分した。次に、残る27路線を「全国幹線旅客純流動データ」の「交通機関別移動目的別都道府県間流動表(秋期1日)⁷⁾⁸⁾⁹⁾」を用いてc)ビジネスとd)観光の2つの路線に分類した。ただし、用いたデータは都道府県(ただし、北海道は道北・道東・道央・道南の4地域)間ごとに集計されたデータであるため、各空港がある都道府県間の流動値を路線のデータとして用いた。また、那覇・宮古・石垣は観光路線とした(表1)。

(4) 希望出発時刻の分布の推定

上述した4つのグループのそれぞれを対象に、(8)式

表1 需要構造による路線の分類

羽田路線 (25路線)		ビジネス路線 (19路線)		観光路線 (8路線)
羽田 - 大阪	羽田 - 秋田	大阪 - 福岡	中部国際 - 福岡	大阪 - 新千歳
羽田 - 小松	羽田 - 富山	福岡 - 那覇	中部国際 - 鹿児島	大阪 - 那覇
羽田 - 広島	羽田 - 鳥取	大阪 - 仙台	福岡 - 仙台	福岡 - 新千歳
羽田 - 長崎	羽田 - 米子	大阪 - 福島	福岡 - 宮崎	大阪 - 長崎
羽田 - 熊本	羽田 - 出雲	大阪 - 新潟	大阪 - 出雲	中部国際 - 新千歳
羽田 - 宮崎	羽田 - 岡山	大阪 - 松山	福岡 - 鹿児島	中部国際 - 那覇
羽田 - 鹿児島	羽田 - 山口宇部	大阪 - 高知		那覇 - 石垣
羽田 - 釧路	羽田 - 徳島	大阪 - 熊本		那覇 - 宮古
羽田 - 函館	羽田 - 高松	大阪 - 大分		
羽田 - 旭川	羽田 - 松山	大阪 - 宮崎		
羽田 - 帯広	羽田 - 高知	大阪 - 鹿児島		
羽田 - 女満別	羽田 - 大分	新千歳 - 仙台		
羽田 - 青森		中部国際 - 仙台		

の最小化問題を解き希望出発時刻の分布を求める。ただし、b) 羽田到着便については、東京での業務の約束時刻などを基準として行動している人が多いと考えられるため、出発時刻ではなく羽田到着時刻に対して分析を行った。結果を図1・図2に示す。

a) 羽田出発便は、図1に示すように朝(7~9時)、夕方(16~18時)、夜(20時)の3つの時間帯に分布の集中が見られる。羽田路線はビジネス客が多く¹⁰⁾、朝は地方への出張者、夕方、夜は東京で仕事を終えた地方からの出張者の帰宅のため、出発の希望が多くなっていると考えられる。また、夜については、翌日の朝の地方での仕事に間に合わせるため、前日から東京を出発する旅

客も含まれていると考えられる。

b) 羽田到着便に関しては、出発便に見られるような朝の大きな分布が見られず、午後(13時)と夕方(17時~20時)、そして夜中(23時)に分布の集中が見られる。夕方の集中については地方から東京への帰り客の影響であると考えられるが、出発便に比べて午前中に分布が少なく夜中に多いのは、地方から東京に出てくるビジネス客が前日に移動する割合が高いためと考えられる。

c) 羽田以外のビジネス路線は、図2に示すように午前(9時~11時)に小さな山が、また夕方から夜(17時~21時)に大きな山が見られる。羽田出発便と同様、午前の分布は午後の仕事に間に合わせるため、また夕方から夜の分布は出張からの帰宅、また翌日の仕事に備えての移動であると考えられる。ただし、同じビジネス路線でも、羽田路線では午前から昼過ぎにかけて大きな分布が見られるのに対し、その他の都市間の路線ではそれほど大きい分布は見られない。本来は、羽田路線と同様に午前中のニーズも存在するものの、ナイトステイの制約から航空サービスが提供されないため、顕在化していない可能性がある。

また、d) 観光路線では、他の分類と比べて朝早くや夜遅くではなく、日中に分布が集中している。これは、仕事ができる日中以外に移動しようとするビジネス客と、逆にその時間帯に移動をする観光客との違いを表しているものと考えられる。

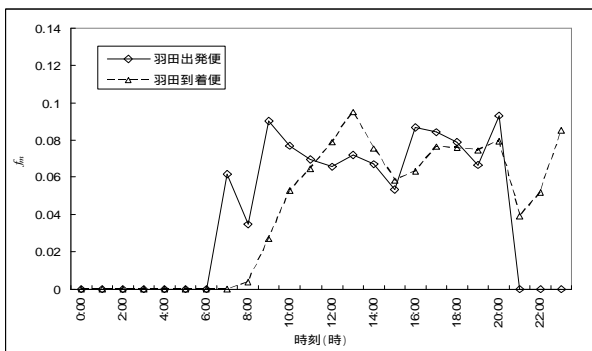


図1 希望出発時刻の分布 (羽田路線)

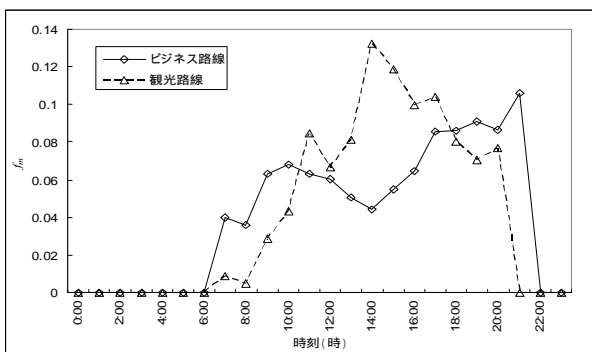


図2 希望出発時刻の分布 (ビジネス路線・観光路線)

4. 運行スケジュールが航空選択率に与える影響

(1) 航空選択率の分析方法

本研究では機関選択のモデルとして航空と鉄道の選択を表す2項集計ロジットモデル^{11) 12)}を用い、各パラメーターを重回帰分析で推定することによりスケジュールコストが航空選択率に与える影響を分析する。効用を表

す指標としては、所要時間、運賃、航空の平均スケジュールコスト、新幹線ダミー（都市間が新幹線で結ばれている路線）を考える。

$$\ln(P_a/1-P_a) = \beta_1 + \beta_{2a}t_a - \beta_{2r}t_r + \beta_{3a}c_a - \beta_{3r}c_r + \beta_{4a}T_a - \beta_{5r}d_s \quad (9)$$

P_a ：航空選択率， a ：航空， r ：鉄道， t ：所要時間

c ：運賃， T ：平均スケジュールコスト

d_s ：新幹線ダミー

航空と鉄道の選択率は「平成12年全国幹線旅客純流動データ」の「代表交通機関別都道府県間流動表（年間）¹³⁾」をもとに算出した。ただし、用いた純流動データは都道府県間（北海道は道北・道東・道央・道南の4地域）ごとに集計されたデータであるため、前述の需要構造による路線の分類と同様、各空港がある都道府県間の流動値を路線のデータとして用いた。また、所要時間と運賃（通常期）はYahooホームページ¹⁴⁾の路線情報を用い、各路線の発着都市がある都道府県の県庁所在地の駅（旭川は旭川駅、函館は函館駅）間の移動に必要な時間と運賃を算出した。

（2）重回帰分析によるパラメーターの推定

クラスタ分析で抽出した52路線のうち、航空と鉄道の競合がないと考えられる那覇5路線、また、1つの県（地域）に2つ以上の空港があり、かつそれらの空港の規模がほぼ等しいため、純流動データと路線との関係が明確でない「鳥取・米子」と「釧路・帯広・女満別」の2地域5路線を除く42路線（国内線全体の旅客数の52%）について、ステップワイズ法により分析を行った。結果を表2に示す。

推定結果では、航空スケジュールコストに関して負の有意なパラメーターが得られた。これは、平均スケジュールコストが増えると航空選択率は減少することを示している。つまり、旅客の希望にそって時刻を決めることで航空選択率が高まると言える。また、新幹線ダミーについては正のパラメーター値が得られた。これは、新幹線があると鉄道の効用が上がり、その結果として航空選択率が減少するという航空と新幹線の強い競合関係を示している。

5. おわりに

今回の分析を通して、旅客のスケジュールコストが上がると航空選択率が下がるという関係が実際のデータから統計的に示された。つまり、旅客の利便性向上のためには多頻度での運行が重要であり、航空会社としては機材小型化などの努力が望まれるほか、発着枠の配分や発着料の設定など政策面での配慮も必要である。

また、今回の分析では航空の運賃が有効に働かなか

表2 パラメーターの推定結果

パラメーター	非標準化係数	標準化係数	t値
1	-0.500		-1.004
2 _r	0.000	0.683	-8.030
4 _a	-11.961	0.243	2.848
5 _r	2.403	0.591	7.450
決定係数：0.762，自由度修正済み決定係数：0.743			

った。この理由としては、割引運賃のデータを入手できなかったことや、ビジネス客と観光客の時間価値の違いを考慮していないことが考えられる。この点や鉄道の平均スケジュールコストのモデルへの導入が今後の課題である。

参考文献

- 1) Borenstein, S. and Netz, J.: Why all the flights leave at 8 am?: Competition and departure time differentiation in airline markets, International Journal of Industrial Organization, 17, pp.611-640, 1999.
- 2) Janssen, M.C.W., Karamychev, V.A., Reeven, P.V.: Multi store competition: Market segmentation or interlacing?, Regional Science and Urban Economics, 35, pp700-714, 2005.
- 3) 創美社編集出版事業部編：航空時刻表（2006.10），創美社編集出版事業部，2006。
- 4) 前一心編：JR 時刻表（2006.10），交通新聞社，2006。
- 5) 国土交通省 HP：航空輸送サービスに関わる情報公開（平成18年度分），http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/12/121201_2_.html（2006.12.5現在）。
- 6) 国土交通省 HP：平成17年度空港管理状況調査，http://www.mlit.go.jp/koku/04_outline/10_data/03_kanrijoukyoucyousyo/h17.pdf（2006.12.12現在）。
- 7) 国土交通省 HP：第1回全国幹線旅客純流動データ交通機関別移動目的別都道府県間流動表（秋期1日），http://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/jyunryuudou/h2/h2_od_6.xls（2006.12.30現在）。
- 8) 国土交通省 HP：第2回全国幹線旅客純流動データ交通機関別移動目的別都道府県間流動表（秋期1日），http://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/jyunryuudou/h7/h7_od_6.xls（2006.12.30現在）。
- 9) 国土交通省 HP：第3回全国幹線旅客純流動データ交通機関別移動目的別都道府県間流動表（秋期1日），http://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/jyunryuudou/h12/h12_od_6.xls（2006.12.30現在）。
- 10) 酒井正子：羽田 日本を担う拠点空港 航空交通と都道府県，成山堂書店，2005。
- 11) 交通工学研究会編：やさしい非集計分析，交通工学研究会，1993。
- 12) 北村隆一，森川高行，佐々木邦明，藤井聡，山本俊行：交通行動の分析とモデリング - 理論/モデル/調査/応用 - ，技報堂出版，2002。
- 13) 国土交通省 HP：第3回全国幹線旅客純流動データ代表交通機関別都道府県間流動表（年間），http://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/jyunryuudou/h12/h12_od_4.xls（2007.1.9現在）。
- 14) YahooHP：路線情報，経路，運賃探索，<http://transit.yahoo.co.jp/>（2007.2.5現在）。