

不確実性を考慮した長距離都市間交通スケジュール決定行動モデルの構築 *Scheduling Behavior Models of Long-distance Intercity Travel Considering Uncertainties*

石川智之** 藤原章正*** 杉恵頼寧**** 李百鎮*****

By Noriyuki ISHIKAWA, Akimasa FUJIWARA, Yoriyasu SUGIE, Backjin LEE

1. はじめに

わが国では、代表的な都市間交通機関である航空において近年大きな変化が見られ、空港施設の改善や空港へのアクセスの向上、使用機材の大型化が図られている。例えば広島について見ると、1993年10月に広島空港が開港しB747やB777等の輸送力の大きな機材が発着可能となった。その結果利用者数は増えつづけ現在もさらに増加の傾向にある。

航空には、速達性が高い反面、所要時間の不確実性（遅延の発生確率）が高い特徴もある。図1は、広島空港発東京国際空港着便のフライト時間の分布を示したものである。定刻フライト時間70分に対して、最大93分、最小60分と大きなばらつきがある。また欠航も1.9%存在する。

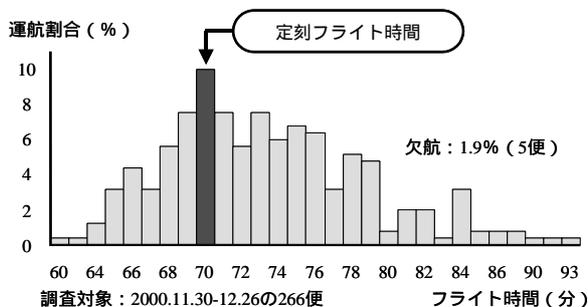


図1 広島～東京間のフライト時間の分布

需要分析の視点からみると、このような所要時間の不確実性に対して、各利用者の認知や反応が異なることが重大な問題となる。例えば、同じ10分の遅延に対しても利用者によってその発生確率やペナルティーの見込みが異なり、それは利用する交通機関

*キーワード：交通行動分析，航空，スケジューリングモデル，安全余裕時間，遅延の主観確率

** 学生員， 広島大学大学院国際協力研究科

E-mail:n0222@hiroshima-u.ac.jp

*** 正会員， 博（工） 広島大学大学院国際協力研究科

E-mail:afujiw@hiroshima-u.ac.jp

**** 正会員， 工 博 広島大学大学院工学研究科

E-mail: ysugie@hiroshima-u.ac.jp

***** 学生員， 修（工） 広島大学大学院国際協力研究科

E-mail: bjlee@hiroshima-u.ac.jp

や便の決定行動の違いにつながる。

そこで本研究では、時間価値の高いと考えられる航空を利用する都市間ビジネスリップ客を主な対象とし、各交通機関の遅延に対する認知の違いを考慮したスケジュール決定行動モデルを構築することを目的とする。各利用者の認知する遅延の表現方法として2種類の変数、遅延の主観確率と安全余裕時間を定義する。また、遅延発生に対する個人の認知が一樣でないことを表現できる Mixed Logit モデルを分析に用いる。そして、遅延を考慮したこのモデルの妥当性を評価するため、遅延を考慮しない従来型のモデル（多項ロジット、以下 MNL）の推定も合わせて行い、2つのモデルの比較を行う。

2. 都市間トリップのスケジュール決定概念



図2 スケジュールの定義と設定

従来の都市間トリップ選択に関する研究では、個々の代表交通機関に着目した機関選択モデルを構築する例が多い。本研究では、図2に示すように、航空を対象として、目的地での到着時刻制約がある場合の「航空便」と「空港までのアクセス便（リムジンバス）」の組み合わせの選択を考える（本研究ではこの組み合わせを「スケジュール」と呼ぶ）。このとき利用者は、航空およびアクセス機関のそれぞれの所要時間に対する不確実性（遅延の発生確率）を見込んで、目的地での到着時刻制約を満たすようなスケジュールを選択することになる。

本研究では、交通機関の遅延に対する利用者の認知の違いを考慮したスケジュール選択行動を表現するため、以下の1), 2)の2点に着目する。

- 1) 遅延発生に対する個人の「主観確率」が異なる
個人の持つ情報（実際の遅延発生確率）に差異があるため、個人の予測する遅延時間が異なる。
- 2) 見込んだ遅延に対する個人の「態度」が異なる
人々の持つ到着時刻に対するペナルティーが異なれば、遅延に対する態度が異なる。

3. 個人の認知を表現する変数

本研究では、スケジュール選択において、交通機関の所要時間の不確実性に対する個人の認知を表現するために、以下の2つの変数をスケジュールリングモデルに取り入れる。

(1) 遅延の主観確率

遅延時間をいくつかのカテゴリにカテゴライズし、その各カテゴリ k について各利用者 n が各交通機関 j に対して主観的に認知している遅延発生確率を p_{jnk} とする。図3はその概念図である。x軸に遅延時間 t をとり、y軸に遅延の発生件数をとると、各利用者がそれぞれ異なるこのような遅延発生分布関数を持つことになる。例えば0分から t_1 分までの主観確率 p_1 は図の斜線部である。ここで、曲線、x軸、y軸に囲まれた部分（主観確率）の総和は1である。

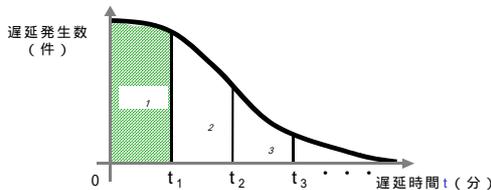


図3 遅延の主観確率 の定義

(2) 安全余裕時間

安全余裕時間 (Safety margin, SM) は、交通の遅延による遅刻を回避するための時間と、次の活動のための準備や余裕のための時間との和であると定義する。本研究では SM について、図2に示す空港での安全余裕時間 (SMA) と目的地での安全余裕時間 (SMD) という2つの SM を定義する。また、各利

用者は、それぞれ希望 SM (SMA 及び SMD) を持っているとする。この希望 SM は0よりも大きな値であり、実トリップにおける SM がこの希望 SM よりも長くなっても短くなっても、個人の効用の低下が見られるとする。したがって、“希望 SM と現実ダイヤ上の SM との差” をスケジュールの効用水準を決める説明変数として見なすこととする。

4. 航空利用スケジュールリング行動に関する調査

分析のためのデータを収集するため、航空利用スケジュールに関する SP 調査を行った。調査の概要を表1に示す。この調査では、図4に示すような複数スケジュールを、SP 調査法で回答者に選択させた。

表1 SP 調査の概要

名称	広島空港利用者の航空・空港利用についての調査
対象	広島空港発 東京国際空港着 航空便利用者
形式	利用者記入方式の無記名調査票を配布・郵送回収
期間	2000年9月25日(月)~9月29日(金) 7:00-17:00
場所	広島空港2F国内線出発ロビー及び1F到着ロビー
結果	配布票数：3371、回収票数：1765、回収率52.4%

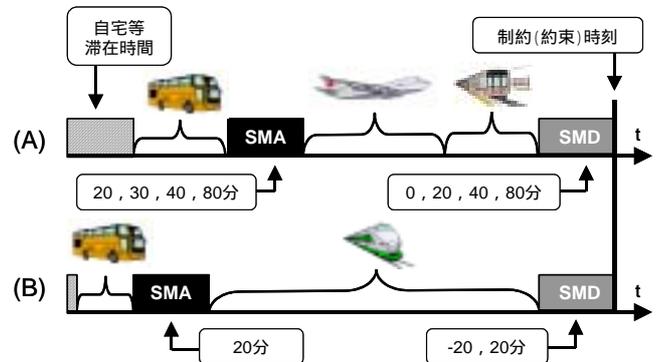


図4 SP 調査での複数スケジュールの定義と設定

提示するスケジュールは、実験計画法を用いて、図2(A)の航空利用スケジュールを7種類、同(B)の新幹線利用スケジュールを2種類の計9種類を設定した。回答者には、その中から、航空機利用スケジュール3本と新幹線利用スケジュール1本の計4本を提示し、望ましい順に数字を記入させた。

遅延の主観確率については、リムジンバス・航空とも、0分（遅れなし）、10分、30分、60分以上の4段階の遅延時間を設定し、それぞれの遅延の発生確率を記入させた。また、SMA、SMDはそれぞれ、調査日当日の希望する空港滞在時間と約束前の目的

地滞在時間を記入してもらった。

図 5 に、交通機関の遅延に対する主観確率の回答値の集計結果を示す。「リムジンバス」は定刻通りが 70%で、10 分程度の遅れまで含むと 9 割以上を占める。一方「航空」は定刻通りが 44%であるが、これは実際の運航実績 32%より 12 ポイントも高く、利用者が定時性について過大評価していると言える。なお、航空の運航実績は、2000 年 11 月 30 日~12 月 26 日の広島発東京（羽田）266 便を対象として、各航空会社のホームページで毎日公開している発着情報をもとにしたものである。

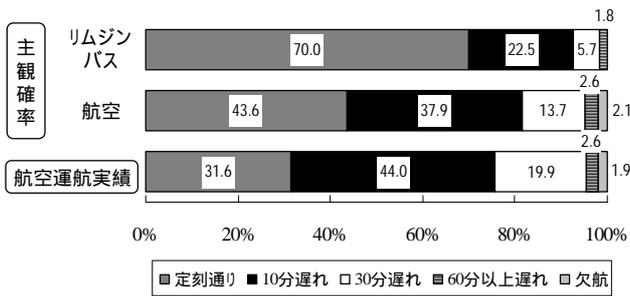


図 5 SP 調査の遅延の主観確率と運航実績値

図 6 に、SP 調査で回答された希望 SMA と希望 SMD の 900 人の分布を示す。

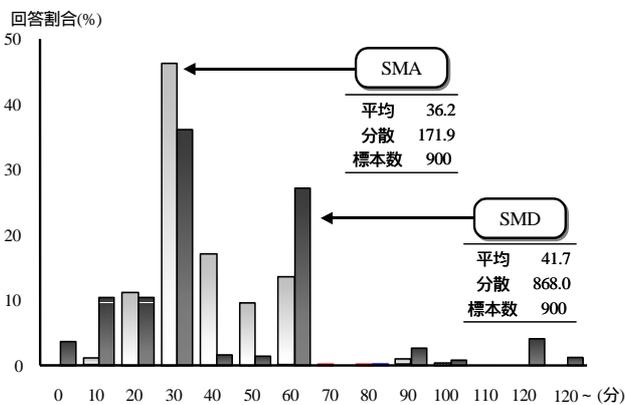


図 6 SP 調査の安全余裕時間 SM の分布

SMA は 30 分をピークに分散の小さな分布であり、そのほとんどが 60 分以下である。一方、SMD は最小 0 分から最大 210 分とかなり分散の大きな分布であり、120 分という回答も約 5%存在する。これは、目的地において会議等の開始前に昼食を取る等、次の活動のための準備の時間が多く含まれたためであると考えられる。

5. スケジューリングモデルの構築

(1) モデルの定式化

3,4 章で述べたような遅延の主観確率や安全余裕時間を用いて、認知の違いさらには態度の違いをモデル上で再現するためには変数パラメータに分布を持たせ確率変動を許す必要がある。そこで本研究では Multinomial Logit model の一般形である Mixed Logit model (以下、MXL) を用いる。なお、目的変数は SP アンケート調査におけるスケジュールの選択結果である。

MXL では、利用者 n の考えるスケジュール i の望ましさを表す関数は式 (1) で表現される。

$$U_{in} = V_{in} + \bar{\varepsilon}_{in} = V_{in} + \eta_{in} + \varepsilon_{in} \quad (1)$$

$$V_{in} = \sum_K \beta_{is} x_{is} \quad (2)$$

ここで、MXL ではさらに、選択肢間の誤差相関を表すパラメータ ((3) 式) をモデル内に明示的に組み込むことが出来る。

$$\eta_{in} = \sum_{j \in J} \mu_{ij} Z_{ij} \quad (i \neq j) \quad (3)$$

U_{in} : 効用関数, V_{in} : 確定項,

$\bar{\varepsilon}_{in}$: 見かけ上の誤差項, ε_{in} : 真の誤差項

$\beta_{is} \sim (\bar{\beta}_{is}, \sigma_{\beta})$: 正規分布するパラメータ s の平均と分散

x_{in} : 説明変数, η_{in} : 選択肢 i の他の選択肢との類似性指標

μ_{ij} : 平均 0 の正規分布に従う確率変数ベクトル

Z_{ij} : 選択肢間の類似性を考慮するダミー変数

いま真の誤差項 ε_{in} がガンベル分布に従うとするとスケジュール i の選択確率 P_{in} は式 (4) のように表現される。

$$P_{in} = \frac{\exp(V_{in} + \eta_{in})}{\sum_{j \in J} \exp(V_{jn} + \eta_{jn})} \quad (4)$$

この選択確率は、シミュレーション法の乱数発生アルゴリズムによる近似解にて算出される。

(2) 効用関数の確定項

本研究では、確定項を式 (5) のように定義する。説明変数を SP 調査で設定した SM と希望 SM の差の 2 乗としている。これにより、パラメータが有意か

つ、絶対値が大きいほど希望 SM の制約が強いこととなる。なお、本研究では新幹線には遅れがないと利用者が認知しているものと仮定し、新幹線利用スケジュールの確定項は、 $air_{1n}=1$ かつ、 $air_{2n}=air_{3n}=air_{4n}=0$ とする。

$$V_{ni} = \sum_{q^{bus}=1}^{n^{bus}} \sum_{q^{air}=1}^{n^{air}} \left[\theta_{q^{bus}_n} \times \beta^A \times \left(SPM^A_i - I^{q^{bus}} - SMA_n \right)^2 + \theta_{q^{air}_n} \times \beta^D \times \left(SPM^D_i - I^{q^{air}} - SMD_n \right)^2 \right] + const_i$$

$$s.t. \sum_{q^m=1}^m \theta_{q^m_k} = 1 \quad (5)$$

ただし、 m : 交通機関 (bus : リムジンバス, air : 航空機)
 q^m : 交通機関 m の遅延時間のカテゴリ ($1 \sim k^m$)
 $\theta_{q^m_n}$: 個人 n の交通機関 m のカテゴリ q の遅延の主観確率
 β^A : SMA に関するパラメータ
 β^D : SMD に関するパラメータ
 SPM^A_i : 選択肢 i における SP 設定上の SMA
 SPM^D_i : 選択肢 i における SP 設定上の SMD
 I^{q^m} : 交通機関 m の $\theta_{q^m_n}$ に対応する遅れ
 SMA_n : 個人 n の希望 SMA, SMD_n : 個人 n の希望 SMD
 $const_i$: 選択肢 i の定数項

なお、従来の MNL モデルでは、効用関数、選択確率はそれぞれ (1), (4) 式において η が無い式形であり、かつ $\sigma_\beta = 0$ に制約してよい。

6. スケジューリングモデルの推定

従来のモデル (MNL) と、不確実性を考慮したモデル (MXL) の推定結果を表 2 に示す。

表 2 モデルの推定結果

説明変数	従来モデル (MNL)		不確実性考慮モデル (MXL)	
	推定値	t値	推定値	t値
A	-1.874E-03	-3.597	-2.944E-04	-1.281
D	-4.641E-04 **	-7.397	-3.959E-04 *	-2.121
分散 A			0.012	0.474
分散 D			0.032	1.672
const (SMA=20, SMD=0)	0.800 **	10.421	1.655 **	3.366
const (SMA=30, SMD=0)	0.858 **	5.896	1.303	1.441
const (SMA=20, SMD=80)	1.959 **	15.046	3.185	1.772
const (SMA=30, SMD=80)	1.161 **	16.600	2.883 **	3.795
const (SMA=40, SMD=20)	1.614 **	19.063	3.748	1.713
const (SMA=80, SMD=20)	4.336 **	11.229	0.103	0.129
const (SMA=40, SMD=40)	1.415 **	19.944	4.377 **	3.715
初期尤度	-1247.7		-1247.7	
最終尤度	-960.0		-917.4	
自由度調整尤度比	0.227		0.262	
赤池のAIC	1942		1788	
サンプル数	900		900	

ただし、類似性指標、 μ の推定値は省略

** : 1%有意 * : 5%有意

ここで、不確実性を考慮しないモデルとは、遅延発生の主観確率と態度は個人間で変動がないと仮定したモデルである。モデルの構造は MNL を基本とし、利用者毎の SM 値を考慮せず、式 (5) 中の SMA_n , SMD_n を 1 つのパラメータとしてモデル内で同時推定し、集団全体の値とする。また、主観確率も取り入れていない。つまり、確定項は式 (5) において、主観確率は定刻通りの q_{ln} を 1 に、他の q_{ln} をすべて 0 とするものである。

表 2 の結果より、従来モデルでは遅延に関するパラメータ A と D に大きな違いがあったのに対し、不確実性考慮モデルでは両者はほぼ同じ値となっている。また、従来モデルにおいては、定数項の t 値が高く、効用の大小が定数項に強く依存する。換言すれば遅延に関するパラメータの感度が相対的に鈍い。これに対して、不確実性考慮モデルでは定数項の t 値は低く、相対的に遅延に関するパラメータの値が増している。このことからスケジュール選択問題を扱う場合、個人の認知する遅延を効用関数の中に明示的に組み込むことが有効であると言える。

7. おわりに

本研究では、MXL を用い、個人の遅延の「認知」に着目して不確実性を考慮した航空を利用するスケジュール決定行動モデルの構築を行った。その結果、航空のような所要時間の不確実性が高い交通機関を含むスケジュール選択問題を扱う場合には、遅延を MXL を用いて表現することが有効であることが確認できた。今後は、実際の運行状況と個人の遅延に対する認知の関係を定式化し、現実の運航スケジュールへのモデルの適用とその政策分析を行うことが課題である。

参考文献

- 1) 広島県空港港湾局：広島空港資料 平成 12 年 8 月, pp1-3, p.8, p.16, 2000.
- 2) 武藤雅威, 内山久雄: 新幹線と航空の競合時代を反映した国内旅客幹線交通の現状と展望, 運輸政策研究会, Vol4, No.1, 2001
- 3) 兵藤哲朗, 章翔: Mixed Logit モデルの汎用性に着目した特性比較分析, 土木学会論文集, No.660, -49, pp.89-99, 2000