

タイミングの効用を考慮した活動・移動スケジューリングモデルの開発^{*}

Development of Activity and Travel Scheduling Model Considering Utility of Timing^{*}

張峻屹^{**}・藤原章正^{***}・石川智之^{****}・李百鎮^{*****}

By Junyi ZHANG, Akimasa FUJIWARA, Noriyuki ISHIKAWA and Backjin LEE

1. はじめに

近年、環境への配慮や、財源の制約、都市の過密化などに伴い、個人の行動変化を促すソフト面からの交通政策が重要視されている。そのため、交通基盤整備、あるいは交通政策を評価する手法として、従来の交通速度や交通容量といった交通の側面だけではなく、「いつ」、「どこで」、「どのような」行動が「なぜ」行われるかといった、個人の活動の遂行に着目する必要性が高まっている。

このような、個人の活動の遂行に着目する代表的な手法として、Activity-based アプローチと呼ばれるものがある。これは、交通行動は人間の意思によって何らかの目的のために派生的に起こるものであると捉え、活動面から交通行動を記述しようとする手法である。このようなアプローチからの交通行動分析では、時間利用データなどの活用により、都市システムや交通施設の整備による人々の生活行動の変化を明示的に考慮することが可能になるといった特徴を有する。

しかし、Activity-based アプローチには大きな課題点も存在する。それは、行動原理に基づくある一定期間での一連の活動遂行、すなわち、活動スケジューリングのモデル化が行えていないということである。具体的には、既存のモデルでは次のような問題点が存在する。

① 活動・移動の遂行効用は時刻により変化しない

② 時刻の制約条件が考慮されていない

③ 活動・移動の順序が内生化されていない

そこで、本研究では、「活動・移動の効用が時刻によって変化」することを前提として、「時刻の制約条件」及び「活動・移動の順序の内生化」を考慮した、活動・移動スケジューリングモデルの開発を目的とする。その際、タイミングの効用という概念を導入する。

また、本研究では対象スケジュールとして、航空利用スケジューリング行動をとりあげ、提案したモデルの適用可能性を検証する。これは、航空便による時刻制約が強く、タイミングの影響が顕著に現れる可能性があるためである。

2. スケジューリングモデルの導出

(1) 効用関数の特定化

ある期間内において発生する、移動も含めた全ての活動を行うことにより、個人 n が享受する総効用を、個人 n の i 番に行う活動・移動に対する効用 U_{ni} の総和で表される¹⁾と仮定する。

$$U_n = \sum_i U_{ni} = \sum_i \int_{t_{i-1}}^{t_i} u_{ni}(t) dt \quad (1)$$

ここで、 i 番に行う活動・移動の限界効用 $u_{ni}(t)$ の時刻分布形状をガンマ確率密度関数で表現する。これは、ガンマ確率密度関数が様々な分布形状を表現でき、スケジューリング行動をより柔軟にモデリングすることが可能であると判断したためである。

$$u_{ni}(t) = \frac{\beta_{ni}^{\alpha_i} t^{\alpha_i - 1}}{\Gamma(\alpha_i)} \cdot \exp(-\beta_{ni} t) \quad (2)$$

ここで、 α と β は形状と尺度パラメータ、 Γ はガンマ関数である。

(2) タイミングの決定メカニズム

本研究では、各個人は、自分のスケジュールの総

^{*}キーワード：活動・移動スケジューリングモデル、交通行動分析、タイミング

^{**} 正会員，博（工）広島大学大学院国際協力研究科
E-mail: zjy@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，修（工）東京都水道局

E-mail: ishikawa-noriyuki@waterworks.metro.tokyo.jp

^{*****} 非会員，博（工）オランダアインホーベン理工大学
E-mail: b.lee@bwk.tue.nl

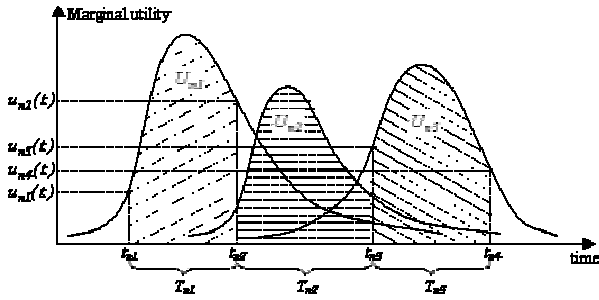


図1 個人のタイミング決定メカニズム

効用が最大となるように、各活動の移行タイミングを決定しているという効用最大化仮説から、最適な活動・移動の移行時刻を求めることを考える。つまり、図1の例において、斜線部又は横線部で示された部分が最大となるように、人々は各活動・移動の移行時刻を決定していると捉えるものである。

(3) 定式化

上述したタイミング決定メカニズムより、個人の最適化行動を定式化すると式(3)のようになる。

$$\text{Maximize } U_n = \sum_i U_{ni} = \sum_i \int_{t_{ni-1}}^{t_{ni}} u_{ni}(t) dt \quad (3)$$

ここで、 n は個人、 i は順番、 u_{ni} は個人 n による i 番目の活動の限界効用、 Γ はガンマ関数、 t は時刻、 t_i は i 番目の活動を終了する時刻、 t_{i-1} は i 番目の活動を開始する時刻を表す変数である。

式(3)の最大化に関する式を解くと、タイミングを表現する式は式(4)のようになる。

$$t_{ni} = \frac{\ln \left[(t_{ni})^{(\alpha_{ni+1}-\alpha_{ni})} \frac{\Gamma(\alpha_{ni+1})}{\Gamma(\alpha_{ni})} \frac{(\beta_{ni})^{\alpha_{ni}}}{(\beta_{ni+1})^{\alpha_{ni+1}}} \right]}{(\beta_{ni+1} - \beta_{ni})} \quad (4)$$

ここで、 α 、 β はガンマ確率密度関数の特性上、それぞれ、正の値でなければならない。そのため、以下のような α と β の定義式を提案する。

$$\alpha_{ni} = \exp \left(\sum_k A_{ik} X_{nik} + e_{ni}^\alpha \right) \quad (5)$$

$$\beta_{ni} = \exp \left(\sum_q B_{iq} Y_{niq} + e_{ni}^\beta \right) \quad (6)$$

ここで、 A, B はパラメータ、 k, q は説明変数の番号、 X, Z は個人や活動・移動の属性、 e はスケジューリング行動の不確定性や非観測要因などの影響を表す誤差項である。

新しい誤差項 e の影響を考慮し、式(4)は以下のよ

うに変形する。なお、 $\tilde{\alpha}$ と $\tilde{\beta}$ は誤差項の影響を除いたガンマ確率密度関数のパラメータである。

$$t_{ni} = \frac{\ln \left[(t_{ni})^{(\tilde{\alpha}_{ni+1}-\tilde{\alpha}_{ni})} \frac{\Gamma(\tilde{\alpha}_{ni+1})}{\Gamma(\tilde{\alpha}_{ni})} \frac{(\tilde{\beta}_{ni})^{\tilde{\alpha}_{ni}}}{(\tilde{\beta}_{ni+1})^{\tilde{\alpha}_{ni+1}}} \right]}{(\tilde{\beta}_{ni+1} - \tilde{\beta}_{ni})} + e_{ni} \quad (7)$$

3. 各種時刻制約の表現

航空利用スケジューリングモデルの推定において、必然的に考慮しなければならない制約条件がある。それは、「活動・移動の順序」の制約と「フライト時刻」の制約である。また、観測期間中に1番目の活動・移動が開始し、最後の活動・移動が終了する保証がない。このようなデータのセンサーリングをモデルの中で表現する必要がある。

(1) 活動・移動順序制約の表現

時刻を基準点（観測開始時刻）からの時間の長さとして表現する。そのため、時刻は必ず正の値を取らなければならない。また、前の時刻が次の時刻の値より大きくなることはありえない。この関係式を表現すると式(8)のようになる。

$$t_{ni} > 0, \quad t_{ni+1} > t_{ni} \quad (8)$$

n と $n+1$ 番目の活動・移動のタイミングを表す式の誤差項間(e_{ni} と e_{ni+1})において相関があると考えられる。本研究では、両誤差項が以下の確率密度関数をもつ2変量正規分布に従うと仮定する。なお、記述を簡略化するため、添字の個人 n を省略する。

$$f(e_i, e_{i+1}) = \frac{\exp \left\{ -\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\left(\frac{e_i}{\sigma_i} \right)^2 - 2\rho \frac{e_i}{\sigma_i} \frac{e_{i+1}}{\sigma_{i+1}} + \left(\frac{e_{i+1}}{\sigma_{i+1}} \right)^2 \right] \right\}}{2\pi\sigma_i\sigma_{i+1}\sqrt{1-\rho^2}} \quad (9)$$

ここで、 σ_i と σ_{i+1} は分散、 ρ は誤差間の相関である。

以上の仮説に基づき、 $t_i > 0$ 、 $t_{i+1} > t_i$ の同時生起確率は以下のように求められる。

$$\begin{aligned} \text{Prob}(t_i > 0, t_{i+1} > t_i) &= \text{Prob}(e_i > -V_i, e_{i+1} > t_i - V_{i+1}) \\ &= \int_{-V_i}^{\infty} \int_{t_i - V_{i+1}}^{\infty} f(e_i, e_{i+1}) de_i de_{i+1} \end{aligned} \quad (10)$$

式(9)は2重積分の計算が必要となるため、ここで、座標回転により、2重積分を1重積分に変形する手法²⁾を用いる。その結果、式(9)は以下のようになる。

$$\text{Prob}(t_i > 0, t_{i+1} > t_i) = S(V_i, t_i - V_{i+1})$$

$$= \left\{ 1 - \Phi \left(\frac{t_i - V_{i+1}}{\sigma_2 \sqrt{1 - \rho^2}} \right) \right\} \left\{ 1 - \Phi \left(\frac{V_i}{\sigma_1 \sqrt{1 - \rho^2}} \right) \right\} \quad (11)$$

(2) フライト時刻制約の表現

ある順番 i の活動・移動の次の活動・移動がフライトだった場合、次の活動・移動の開始時刻、つまり、希望するフライト時刻 t_{i+1} は、ダイヤ上のフライト時刻 t_{i+1}° と前の活動・移動の開始時刻 t_i との間に式(12)のような関係を有し、希望するフライト時刻 t_{i+1} は、その次の活動・移動の開始時刻 t_{i+2} との間に式(13)のような関係を有する。

$$\begin{cases} t_i > 0 \\ t_{i+1}^\circ > t_{i+1} > t_i \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} t_{i+1}^\circ > t_{i+1} > t_i \\ t_{i+2} > t_{i+1} \end{cases} \quad (13)$$

(3) センサーリングデータの表現

本研究では、活動・移動スケジュールの調査期間はフライトを利用する前日正午から翌日正午までである。このため、1番目の活動・移動の開始時刻及び最後の活動・移動の終了時刻を観測できない場合がある。

1番目の活動・移動が観測されない場合、タイミング式は以下の条件を満たす必要がある。

$$t_{n1} < 0, \quad t_{n1} < t_{n2} \quad (14)$$

1番目の活動・移動が観測されない場合、タイミング式は以下の条件を満たす必要がある。

$$t_{n1} \leq 0, \quad t_{n1} < t_{n2} \quad (15)$$

1番目の活動・移動が観測されず、2番目の活動・移動にフライトのような時刻制約がかかる場合、タイミング式は以下の条件を満たす必要がある。

$$t_{n1} \leq 0, \quad t_{n2}^\circ > t_{n1} > t_{n1} \quad (16)$$

$$t_{n2}^\circ > t_{n2} > t_{n1}, \quad t_{n3} > t_{n2} \quad (17)$$

最後の活動・移動が観測されない場合、タイミング式は以下の条件を満たす必要がある (I が活動・移動の数、 T^o は観測終了時刻)。

$$t_{nI-1} > 0, \quad t_{nI} > T^o \quad (18)$$

前述のフライト時刻とセンサーリングデータを

表 1 空港調査概要

目的	広島空港利用者の航空・空港利用についての調査
対象	国内線全便の搭乗者
形式	自己記入方式の無記名調査票を配布・郵送回収
期間	2003年9月29日(月)~10月2日(木) 7:00-20:00
場所	広島空港・国内線出発ロビー
結果	配布票数：2,347, 回収票数：724, 回収率30.8%

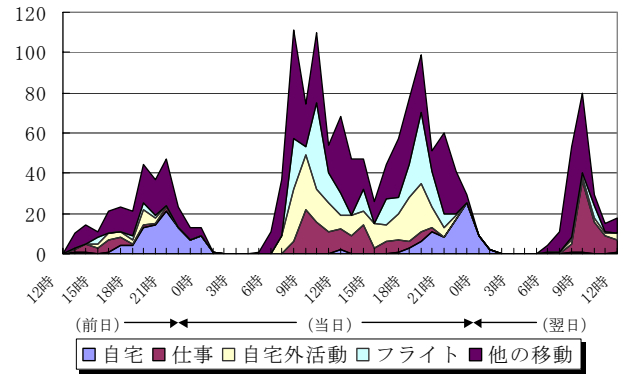


図 2 時間帯別の活動・移動発生タイミングの分布

考慮するため、活動・移動の順序制約と同じような表現方法を用いる必要がある。つまり、関係する誤差項間が2変量正規分布に従うことを仮定する。紙面上の制限で、展開式を示すことを割愛する。

前述の各種制約を同時に考慮した対数尤度関数を定義することにより、通常最尤推定法でパラメータを推定することができる。

4. 航空利用スケジュール行動実態に関する調査

分析のデータを収集するため、広島空港において、航空利用スケジュールリング行動の実態把握に関する活動日誌調査を行った。その概要を表1に示す。

本調査では、移動も含めた活動の種類を①自宅及び宿泊施設での活動、②仕事、③仕事外の自由活動、④フライト、⑤フライト以外の移動の計5種類に分類した。また、対象スケジュールの期間を、搭乗日前日正午~翌日正午までの48時間として設定した。これは、航空のような長距離都市間トリップでは、目的地での宿泊を前提として、前日入りするケースも存在するためである。

図2は搭乗日前日正午~翌日正午までの48時間における活動別の活動実施タイミングの度数分布を示したものである。フライト利用には2度ピークが存在し、搭乗日当日には午前中に仕事を行う利用客

表2 航空利用スケジューリングモデルの推定結果

説明変数	形状パラメータ α		尺度パラメータ β	
	推定値	t値	推定値	t値
【航空利用行動】				
チケットの金額 (万円)	-17.39	-8.04 **	-4.90	-7.23 **
航空の利用頻度 (月1回以上1,他0)	0.63	0.62	4.56	3.77 **
情報の利用状況 (利用1,他0)	3.07	8.02 **	-1.41	-9.29 **
【活動ダミー変数】				
仕事 (Yes1, No0)	-5.03	-4.13 **	7.21	8.48 **
自宅外の自由活動 (Yes1, No0)	-21.46	-13.46 **	1.93	9.58 **
フライト (Yes1, No0)	1.07	1.05	1.15	1.15
フライト以外の移動 (Yes1, No0)	-17.16	-10.26 **	-2.50	-3.15 **
遅刻ペナルティ (Yes1, No0)	-21.22	-19.62 **	6.51	8.41 **
【フライト以外活動への移動時間の影響】				
移動時間 (分)	-30.81	-10.60 **	5.98	8.75 **
【アクセス交通機関のサービス水準】				
ログサム変数	-0.47	-0.47	3.73	5.65 **
【フライトのサービス水準】				
フライトの時間帯別便数	0.63	0.62	4.56	3.77 **
最終アクティビティのパラメータ	-4.84	-6.73 **	1.24	12.53 **
初期対数尤度	-4307.90			
最終対数尤度	-3164.47			
自由度調整済み尤度比	0.250			
サンプル数	175			

** : 1%有意

表3 誤差項の相関及び分散パラメータの推定結果

	共通パラメータ	t値
誤差項間の相関パラメータ	0.27	8.79 **
【誤差項の分散パラメータ】		
(1番目のアクティビティの分散を固定)		
2番目のアクティビティの分散	939.79	8.19 **
3番目のアクティビティの分散	229.84	4.50 **
4番目のアクティビティの分散	121.85	5.02 **
5番目のアクティビティの分散	124.37	5.26 **
6番目のアクティビティの分散	248.85	4.87 **
7番目のアクティビティの分散	146.24	5.76 **
8番目のアクティビティの分散	116.52	8.64 **
9番目のアクティビティの分散	248.11	5.33 **
10番目のアクティビティの分散	379.02	5.95 **
11番目のアクティビティの分散	308.71	5.48 **
12番目のアクティビティの分散	556.46	6.58 **
13番目のアクティビティの分散	501.32	5.24 **
14番目のアクティビティの分散	460.59	5.96 **
15番目のアクティビティの分散	420.06	6.92 **
16番目のアクティビティの分散	252.58	6.41 **
17番目のアクティビティの分散	1627.64	7.59 **
18番目のアクティビティの分散	398.09	4.39 **
19番目のアクティビティの分散	4630.08	8.27 **

** : 1%有意
ただし、誤差項 ϵ_1 の分散パラメータ σ_1 を1と基準化して推定を行っている

が比較的多いことが確認できる。また、その他の知見として、航空利用スケジューリングでは、多くの移動が伴うことが分かる。このことから、移動時間は活動の実施タイミングの決定に大きく影響を及ぼしている可能性があることが推測される。

5. 航空利用スケジューリングモデルの推定

集計分析の結果、ほとんどの被験者が広島発 - 東京 (羽田) 着便のビジネス客であったことから、モ

デル推定に際して、これらのサンプルのみを採用した。観測期間中、活動・移動の数は最大で18であった。推定結果を表2のように示す。同表から、大多数のパラメータの推定値が1%水準で有意となり、自由度調整済み尤度比も0.25と高い値を得たことが分かる。

各種時刻制約を表現する際に定義した、活動・移動のタイミング式における誤差項の相関パラメータ及び分散パラメータの推定結果を表3に示す。ここで、分散パラメータについては、活動・移動間において異なり、相関パラメータについては同じであると仮定した。前後の活動・移動タイミング式の、誤差項間の相関及び分散パラメータが有意となっていることから、前後の活動・移動間で相関が存在していることが証明された。また、同時に、前後の誤差項が2変量正規分布に従う仮定の有効性も確認することができた。

6. おわりに

本研究では、確率効用最大化理論の枠組みの中で、タイミングの効用を導入することにより、今までのActivity-basedアプローチで難題として残されていた、活動・移動スケジューリングモデルの定式化を理論的に行った。そして、活動・移動の遂行に関わる各種時刻制約を表現するために、前後の活動・移動のタイミング式の誤差項が2変量正規分布に従うことを提案した。航空利用スケジュール行動実態データを用いて検証した結果、提案したスケジューリングモデルの有効性を確認した。

謝辞 調査に多大な協力をいただいた、国土交通省大阪航空局広島空港事務所、広島空港ビルディング株式会社、全日本空輸株式会社、日本エアシステム、全日警、広島空港警備警察官派出所の関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) Winston, G.C.: The timing of economic activities, Cambridge University Press, Chapter 8, 1982.
- 2) 張峻屹・杉恵頼寧・藤原章正: 週末買物交通発生モデルに関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.15, pp.629-638, 1998.