

時刻の効用と日々の活動再帰性を同時に取り入れた活動・移動連鎖のモデリング*

Modeling of Activity-Trip Chaining Behavior Simultaneously Incorporating the Utility of Timing and Recursivity of Daily Activity Participation *

力石真**・張峻屹***・藤原章正****

By Makoto CHIKARAISHI **・Junyi ZHANG ***・Akimasa FUJIWARA ****

1. はじめに

近年、生活様式の変化に伴い、個人が選択可能な活動の幅は広がりを見せている。活動の選択は、活動種類の選択に対してだけでなく、その活動遂行時刻の選択や目的地選択に対する広がりをも有すると考えられ、これらの変化を捉えるため、交通行動のより詳細な記述手法に関する研究が近年頻繁に行われている。中でも個人の活動の遂行に着目するActivity-basedアプローチは、交通行動の多様化を表現するのに有効な手法である。しかしながら、既往研究では、モデリング作業を簡略化するために時間軸を考慮しない、又はそれを離散化して扱う手法が中心である。これらの方法は、計算負荷を減らすことができる反面、連続時間軸上の情報を多く失うため、人々のモビリティの実態に合った交通施策の提案、そして、その効果の適切な評価を行うことができない可能性がある。

効用理論の枠組みのなかで連続時間軸上における交通行動を記述する主な既往研究は、時刻の効用を導入したものが中心的であり、ベル型関数形¹⁾⁴⁾を用いたものとガンマ確率密度関数形⁵⁾⁷⁾を用いたものがある。本研究では、活動・移動の連鎖行動のモデル化を理論的に構築・推定したZhangら⁵⁾⁷⁾のモデルを、実務的に多用されているパーソントリップ (PT) データに適用し、ガンマ確率密度関数の代わりに推定が比較的容易かつ扱いやすい正規分布により時刻の効用を表現する。また、活動の再帰性を取り入れることの有効性を確認すると同時に、政策の実施によるモビリティ水準の変化の計測を試みる。

2. 活動・移動連鎖モデルの導出

ある1日において発生する、活動・移動から個人 n が享受する総効用を、個人 n の i 番目に行う活動・移動に対する効用 U_m の総和で表されると仮定する。

$$\text{Max } U_n = \sum_i U_{ni} = \sum_i \int_{t_{ni-1}}^{t_{ni}} u_{ni}(s) ds \quad (1)$$

$$u_{ni}(s) = \exp\left(-1/2(s - b_{ni}/a_{ni})^2\right) / a_{ni}\sqrt{2\pi} \quad (2)$$

ここで、 $u_{ni}(s)$ は個人 n の i 番目に行う活動・移動の時刻 t に対する限界効用であり、正規分布により表現する。

式(1)の最大化を満たす活動・移動時刻の最適解は以下のとおりである。

$$t_{ni} = \frac{(A_{ni} - \sqrt{B_{ni}})}{(a_{ni}^2 - a_{ni+1}^2)} + e_{ni} = V_{ni} + e_{ni} \quad (3)$$

$$A_{ni} = a_{ni}^2 b_{ni+1} - a_{ni+1}^2 b_{ni} \quad (4)$$

$$B_{ni} = a_{ni}^2 a_{ni+1}^2 b_{ni}^2 - 2a_{ni}^2 a_{ni+1}^2 b_{ni} b_{ni+1} + a_{ni}^2 a_{ni+1}^2 b_{ni+1}^2 + 2a_{ni}^4 a_{ni+1}^2 \ln(a_{ni}) - 2a_{ni}^2 a_{ni+1}^4 \ln(a_{ni}) - 2a_{ni}^4 a_{ni+1}^2 \ln(a_{ni+1}) + 2a_{ni}^2 a_{ni+1}^4 \ln(a_{ni+1}) \quad (5)$$

$$a_{ni} = \exp\left(\sum_k A_{ik} x_{nik} + \varepsilon_{ni}\right), \quad b_{ni} = \sum_l B_{il} x_{nil} + \delta_{ni} \quad (6)$$

ここで、 t_{ni} は個人 n の i 番目に行う活動・移動の開始時刻であり、 V_{ni} は確定項、 e_{ni} は誤差項である。また、時刻の効用における個人の異質性を表現するために、 a_{ni} 、 b_{ni} を(6)式のように定義する。 a_{ni} は正規分布の分散を表すため、本研究では指数関数として非負の条件を満たす。

*キーワード：時刻の効用、活動再帰性、アクティビティ分析

**学生会員、修(工)、広島大学大学院国際協力研究科 (東広島市鏡山1丁目5番1号, Tel&Fax: 082-424-5971, E-mail: chikaraishi@hiroshima-u.ac.jp)

***正会員、博(工)、広島大学大学院国際協力研究科 (東広島市鏡山1丁目5番1号, Tel&Fax: 082-424-6919, 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 (東広島市鏡山1丁目5番1号, Tel&Fax: 082-424-6921, E-mail: afujiw@hiroshima-u.ac.jp)

限界効用:u

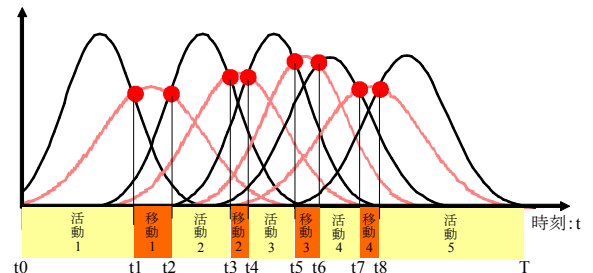


図1. 活動・移動連鎖の表現

上述のような時刻の効用の導出手法は、時刻の効用は正規分布に従って変化するという条件を与えなければならぬ一方で、 t_{ni} が前後の活動・移動の効用により決定されるため、連続時間軸上における活動・移動順序を内生的に表現することが可能である。

本研究では、前述で求めた活動・移動時刻関数を推定するにあたり、幾つかの時刻制約を満たす必要がある。その一つとして、 t_{ni} に開始される活動は、 t_{ni-1} より後、かつ、 t_{ni+1} よりも前に行われる点を考慮する必要がある。また、本研究では1日の活動・移動を調査したパーソナルトリップデータを用いるため、一番目の活動の開始時刻及び最後の活動の終了時刻を観測できないことがある。さらに、観測日の活動が日々繰り返されると考えられるため、活動の再帰性を表現する必要がある。具体的には、1日の最後の活動と次の日の最初の活動は同一であるとみなし、時刻の制約条件に加える(式(7)と図2)。

$$\begin{cases} t_{nJ} - T < t_{n1} < t_{n2} \\ \vdots \\ t_{ni-1} < t_{ni} < t_{ni+1} \\ t_{ni} < t_{ni+1} < t_{ni+2} \\ \vdots \\ t_{nJ-1} < t_{nJ} < t_{n1} + T \end{cases} \quad (7)$$

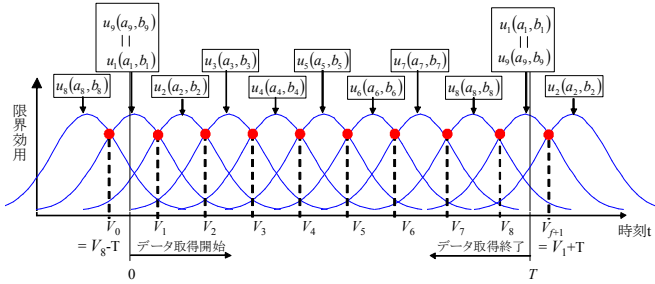


図2. 活動再帰性の表現

以上の時刻の制約条件のもと、前後の活動・移動開始時刻(t_{ni} , t_{ni+1})に相関があると考え、両誤差項が2変量正規分布に従うとすると、以下の尤度関数が導かれる。

$$\begin{aligned} & \text{Prob}(t_{ni-1} < t_{ni} < t_{ni+1}, t_{ni} < t_{ni+1} < t_{ni+2}) \\ &= \text{Prob}\left(\begin{matrix} t_{ni-1} - V_{ni} < e_{ni} < t_{ni+1} - V_{ni} \\ t_{ni} - V_{ni+1} < e_{ni+1} < t_{ni+2} - V_{ni+1} \end{matrix}\right) \quad (8) \\ &= \int_{t_{ni-1} - V_{ni}}^{t_{ni+1} - V_{ni}} \int_{t_{ni} - V_{ni+1}}^{t_{ni+2} - V_{ni+1}} f(e_i, e_{i+1}) de_i de_{i+1} \\ & f(e_{ni}, e_{ni+1}) = \frac{\exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\left(\frac{e_{ni}}{\sigma_i}\right)^2 - 2\rho \frac{e_{ni}}{\sigma_i} \frac{e_{ni+1}}{\sigma_{i+1}} + \left(\frac{e_{ni+1}}{\sigma_{i+1}}\right)^2 \right]\right\}}{2\pi\sigma_i\sigma_{i+1}\sqrt{1-\rho^2}} \quad (9) \end{aligned}$$

式(8)では2重積分が必要となるため、ここで、座標回転により2重積分を1重積分に変換する手法⁸⁾を用いる。その結果、式(8)をもとにした対数尤度関数は下記の下

うになる。

$$\begin{aligned} \log L = & \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{f-1} \log \left\{ \Phi\left(\frac{T+t_{i1}-V_{nf}}{\sigma_f\sqrt{1-\rho_{i1}^2}}\right) - \Phi\left(\frac{t_{nf-1}-V_{nf}}{\sigma_f\sqrt{1-\rho_{i1}^2}}\right) \right\} \\ & \left\{ \Phi\left(\frac{t_{n2}-V_{n1}}{\sigma_{n1}\sqrt{1-\rho_{i1}^2}}\right) - \Phi\left(\frac{t_{i8}-T-V_{n1}}{\sigma_{n1}\sqrt{1-\rho_{i1}^2}}\right) \right\} \quad (10) \\ & + \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{f-1} \log \left\{ \Phi\left(\frac{t_{ni+2}-V_{ni+1}}{\sigma_{ni+1}\sqrt{1-\rho_{i+1}^2}}\right) - \Phi\left(\frac{t_{ni}-V_{ni+1}}{\sigma_{ni+1}\sqrt{1-\rho_{i+1}^2}}\right) \right\} \\ & \left\{ \Phi\left(\frac{t_{ni+1}-V_{ni}}{\sigma_{ni}\sqrt{1-\rho_{i+1}^2}}\right) - \Phi\left(\frac{t_{ni-1}-V_{ni}}{\sigma_{ni}\sqrt{1-\rho_{i+1}^2}}\right) \right\} \end{aligned}$$

式(10)は、1日における活動・移動間の連鎖を同時に表現している。そして、通常の最尤推定法により、この活動・移動連鎖モデルの推定を行うことができる。

3. 使用データ

本研究では、PT データを用いた活動・移動連鎖モデルの開発を行う。ケーススタディとして、JICA が 1996 年に調査したマニラの PT 調査 (Metro Manila Urban Transportation Integration Study) を用いる⁹⁾。PT データは詳細な活動データは含まないものの、多くの都市のデータが揃う点や、膨大なデータを有し、空間情報が扱いやすいというメリットを持つ。そこで本研究では、空間情報をモデルに取り込む一つの手段として、重力モデルにより算出したアクセシビリティを説明変数に加える。以下にアクセシビリティの算出式を示す。

$$Q_{od} = \omega G_o^\alpha A_d^\beta / \tau_{od}^\theta \quad (11)$$

$$ACC_i = \sum_d (A_d / t_{od}^\theta) / TT \quad (12)$$

ここで、 Q_{od} はゾーン o からゾーン d への分布交通量、 G_o は発生交通量、 A_d は集中交通量、 τ_{od} はゾーン間平均移動時間、 ACC_o はゾーン o のアクセシビリティ、 $\omega, \alpha, \beta, \theta$ はそれぞれ未知パラメータ、 TT は全トリップ数である。

4. モデルの推定・考察

前述のPT調査により、231,889人のデータが得られているが、計算の都合上、トリップ数が4トリップの1086サンプルをランダム抽出し使用する。理論上、トリップ数の異なる個人を含めた状態で推定することは可能であるが、第*i*番目の活動を同一の説明変数を用いて表現するため、トリップ数が異なると推定、考察が非常に複雑となる。そこで、本研究では4トリップを行った個人を対象として限定した。また、時刻の効用の分布を正規分布により表現したため、時刻のスケールの取り方により推定結果は異なってくる。そこで、様々な値を試し、最終的に1日1440分を10として設定した。また、正規分布の $-\infty \sim \infty$ の積分値は1であるため、各個人の総効用の最大値は8となる。

上記のような条件のもとで推定したモデルの結果を表1に示す。尤度比は0.339と高い値を得た。なお、初期尤

表 1. 活動・移動連鎖モデル推定結果

| 説明変数 | 1番目の移動 | | 2番目の活動 | | 2番目の移動 | | 3番目の活動 | | 3番目の移動 | | 4番目の活動 | | 4番目の移動 | | 1番目の活動 | |
|--|----------|----------|----------------|---------|----------|---------|--------|----------|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|----------|
| | a2 | b2 | a3 | b3 | a4 | b4 | a5 | b5 | a6 | b6 | a7 | b7 | a8 | b8 | a1 | b1 |
| 世帯人数 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | -0.032+ | 0.188** |
| 職場・学校が住居と同ゾーン (Yes: 1, No: 0) | - | 0.002 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 就業ダミー(Yes: 1, No: 0) | - | - | 0.05** | 0.594** | - | - | 1.076 | 0.959** | - | - | -0.214 | 1.304** | - | -0.745* | -0.005 | -2.529** |
| 学生ダミー(Yes: 1, No: 0) | - | - | 0.081** | 1.847** | - | - | 5.693* | -0.879** | - | - | 1.12** | 1.337** | - | -0.096 | 1.453* | 5.786** |
| 主婦ダミー(Yes: 1, No: 0) | - | - | 1.81** | 1.157** | - | - | -1 | 0.088 | - | - | -0.036 | -1.197** | - | 1.605** | 0.017 | 0.685 |
| 買物活動ダミー(Yes: 1, No: 0) | - | - | 2.E-04 | 0.389** | - | - | -3.248 | 3.141** | - | - | 0.302* | 0.647** | - | - | - | - |
| 必須活動ダミー(Yes: 1, No: 0) | - | - | 0.006 | 0.854** | - | - | - | 4.036** | - | - | - | 0.487** | - | - | - | - |
| 自由活動ダミー(Yes: 1, No: 0) | - | - | -0.144** | 0.067* | - | - | 1.156 | 5.094** | - | - | -0.334** | -1.403** | - | - | - | - |
| 非動力交通ダミー(Yes: 1, No: 0) | -0.002 | - | - | - | -0.029** | - | - | - | -3.991 | - | - | - | 0.581** | - | - | - |
| 動力交通ダミー(Yes: 1, No: 0) | -0.001 | - | - | - | 0.015** | - | - | - | -1.207** | - | - | - | -0.664** | - | - | - |
| 特殊交通ダミー(Yes: 1, No: 0) | -0.004 | - | - | - | -0.011** | - | - | - | -1.227** | - | - | - | -0.32** | - | - | - |
| 公共交通ダミー(Yes: 1, No: 0) | - | -0.036 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Travel Time Ratio | - | -0.052** | - | - | - | 2.701** | - | - | - | -0.532** | - | - | - | - | - | - |
| 自宅ゾーンのアクセシビリティ | -1.091** | - | - | - | 0.03 | - | - | - | -0.157 | - | - | - | 1.023 | - | - | - |
| 定数項 | - | - | 0.182** | 0.318** | - | - | 3.864* | 2.907 | - | - | 0.55 | 2.315** | - | 9.017** | 0.463** | 0.445+ |
| 1番目の活動開始時刻の分散 | 1に固定 | | 3番目の活動開始時刻の分散 | | | | 13.34 | ** | 注) a1-a8 限界効用の分布形状を表すパラメータ | | | | | | | |
| 1番目の移動開始時刻の分散 | 2.218 | ** | 3番目の移動開始時刻の分散 | | | | 13.58 | ** | b1-b8 限界効用が最大となる時刻を表すパラメータ | | | | | | | |
| 2番目の活動開始時刻の分散 | 3.732 | ** | 4番目の活動開始時刻の分散 | | | | 5.004 | ** | Travel Time Ratio 移動時間(移動時間+活動時間) | | | | | | | |
| 2番目の移動開始時刻の分散 | 85.71 | ** | 4番目の移動開始時刻の分散 | | | | 3.418 | ** | **1%有意 *5%有意 +10%有意 | | | | | | | |
| 相関パラメータ(活動-移動) | 0.962 | ** | 相関パラメータ(移動-活動) | | | | 0.960 | ** | | | | | | | | |
| 初期尤度 -50036.7 最終尤度 -33094.2 尤度比 0.339 サンプル数 1086 | | | | | | | | | | | | | | | | |

度は分散パラメータ、定数項に推定値を代入、その他のパラメータに0を代入した場合の尤度とした。

相関パラメータについてみると、活動-移動、移動-活動ともに高い値で有意となっており、1日の活動・移動の連鎖を表現したモデルの妥当性が確認できる。また、移動開始時刻は、移動の目的となる活動の開始時刻との関係だけでなく、1つ前に行っていた活動にも影響を受けることがわかる。

次に移動に関するパラメータの考察を行う。なお、個人属性や活動種類に関しては、推定を容易に行うため、次の活動の属性・活動種類パラメータと共通とした。交通手段ダミーに関してみると、交通手段の違いが1番目の移動開始時刻に与える影響はほとんどない一方で、3、4番目の移動開始時刻は、交通手段の影響を受けやすいと考えられる。また、自宅ゾーンのアクセシビリティについては、1、4番目の移動開始時刻に大きく影響すると考えられる。1番目の移動は、朝の通学・通勤が主な移動であるため、交通手段よりもアクセシビリティが移動開始時刻に影響を与える結果は妥当であると考えられる。

5. モデルの現況再現性

図3に活動・移動連鎖モデルの推定結果を用いた時刻分布と実データを用いた時刻分布を示す。1番目の移動開始時刻、1番目の活動開始時刻の精度が低くなっている。これは、1番目の活動の時間長が長いことが原因であると考えられ、同時に正規分布を時刻の効用として仮定する限界を示唆する結果である。本研究では、Johら¹⁾が提案したベル型効用関数、Zhangら^{5)~7)}が適用したガンマ確率密度関数形とともに、推定は困難であるから正規分布を採用したが、分布形の自由度が比較的低いため、最適計算により現況にあまり合わない結果を推定してしまうと考えられる。同様に、3番目の活動開始時刻に関

しても、現況とはかけ離れた値となっており、現況再現面において信頼性は低い結果となった。これは、推定結果からも2番目の移動開始時刻の分散、3番目の活動開始時刻の分散、3番目の移動開始時刻の分散が大きく推定されており、これらの時刻が前後2つの活動・移動の時刻効用分布から決定することを考えると、精度の低い推定結果同士で決定される3番目の活動開始時刻に誤差が生まれたと考えられる。

一方で、4番目の移動開始時刻のように、比較的良好な結果を得ている点もあることから、説明変数及び時刻の効用分布の選定により改善の余地はある。

6. シミュレーションによる交通施策の影響分析

モデルの改善余地は残るものの、モデルで推定したパラメータをそのまま使用し、交通施策の影響分析をシミュレーションにより行う。

ケース・スタディの対象地域であるマニラ都市圏では、JeepneyやTricycleといった特殊交通手段が発達しており、利用交通手段の50%近くを占める最も主要な交通手段である。また、今後インフラの整備が進むであろうことを考え、以下の2つのシナリオを設定する。

【シナリオ1：インフラ整備が進んだ場合】インフラ整備の進展により、全てのゾーンのアクセシビリティが現在の最高水準を有するゾーンまで上がった場合。

【シナリオ2：特殊交通手段の撤廃】特殊交通手段の撤廃により特殊交通手段利用者が公共交通に変更した場合。

表2にシミュレーション結果をまとめたものを示す。シナリオ1においては、比較的長距離の移動である可能性の高い1番目の移動開始時刻、4番目の移動開始時刻に対して変化が見られるものの、その他の活動・移動開始時刻への影響は小さいことから、他の活動の開始時刻を維持したまま、交通渋滞ピーク時間帯の移動に対する影

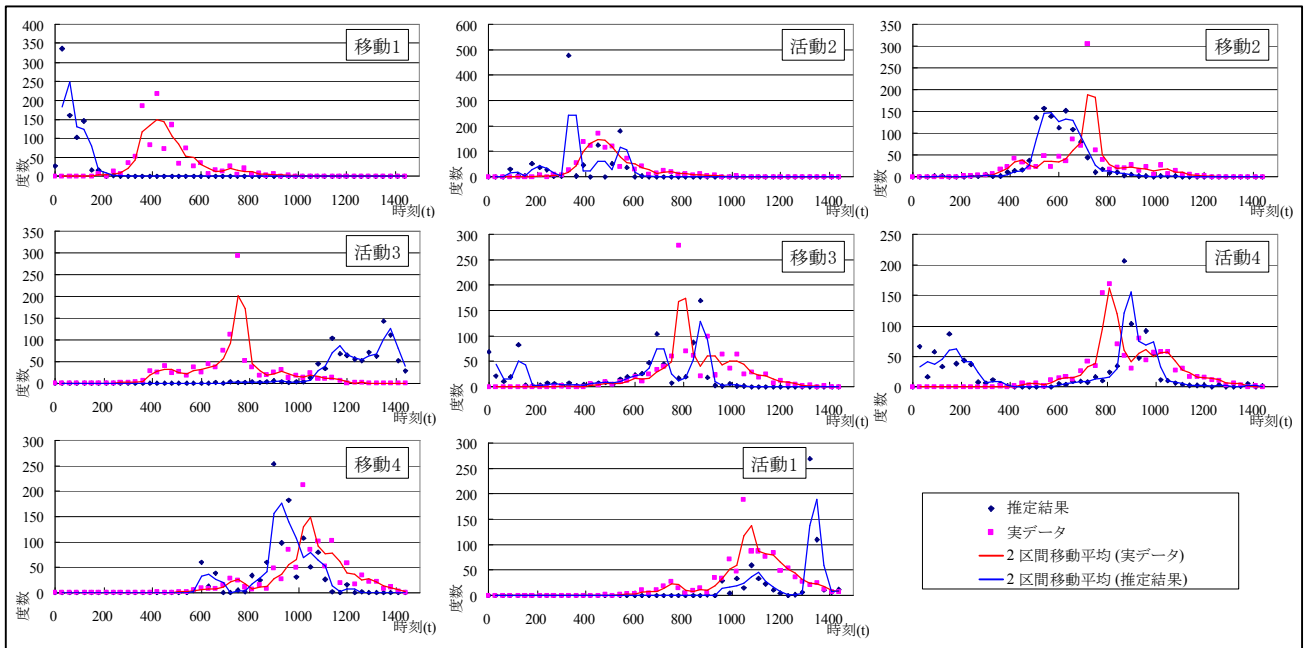


図3. 活動・移動連鎖モデルの現況再現性

響を与えることができる可能性があると考えられる。

一方、シナリオ2においては1番目の移動開始時刻・2番目の活動を除くすべての活動・移動開始時刻へ影響を与えるため、特に公共交通が未発達な途上国都市における強制的な手段変更を促す施策は十分な計画の下、慎重に実行する必要があると考えられる。

表2. シミュレーション結果

| | 平均※ | | | 分散 | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 現況再現 | シナリオ1 | シナリオ2 | 現況再現 | シナリオ1 | シナリオ2 |
| 移動1 | -0.01 | 0.04 | -0.03 | 0.71 | 0.61 | 0.73 |
| 活動2 | 2.54 | 2.54 | 2.52 | 0.65 | 0.62 | 0.65 |
| 移動2 | 4.04 | 4.04 | 3.96 | 0.47 | 0.46 | 0.40 |
| 活動3 | 9.41 | 9.41 | 9.66 | 13.39 | 13.41 | 13.16 |
| 移動3 | 2.99 | 3.00 | 2.32 | 7.55 | 7.54 | 10.51 |
| 活動4 | 4.19 | 4.18 | 4.76 | 6.93 | 6.92 | 9.59 |
| 移動4 | 6.28 | 6.24 | 6.11 | 0.81 | 0.82 | 0.71 |
| 活動1 | 9.63 | 9.63 | 9.69 | 2.33 | 2.42 | 2.47 |

※ 分/144(1440分=10)

7. おわりに

本研究では、1日における活動・移動間の連鎖を同時に表現し、特に活動の再帰性を取り入れた新たなモデルを構築した。実務的に最も多用されているパーソントリップデータ（マニラ都市圏）を用いてモデルの有効性を実証した。また、交通施策分析への適用可能性についても、シミュレーション分析により確認した。今後、時差出勤やフレックスタイム施策など、時刻制約のかかる施策の影響評価を行う必要がある。また、交通行動の空間性を考慮し、構築したモデルをネットワークモデルと融合し、行動メカニズムを合理的に取り入れた動的なネットワークモデルを開発することも重要な研究課題である。

参考文献

- Joh, C-H., Arentze, T. A., Timmermans, H. J. P., (2001) Understanding activity scheduling and rescheduling behavior: Theory and numerical illustration, *GeoJournal* 53, 359-371.
- Joh, C-H., Arentze, T. A., Timmermans, H. J. P., (2002) Modeling Individuals' Activity-Travel Rescheduling Heuristics, *Transportation Research Record*, No. 1807, Washington, D. C., 16-25.
- Ashiru, O., Polak, J. W., Noland, R. B., (2003) The Utility of Schedules: A Model of Departure Time and Activity Time Allocation, 10th International Conference on Travel Behavior Research (CD-ROM).
- Ettema, D., Ashiru, O., Polak, J. W., (2004) Modeling Timing and Duration of Activities and Trips in Response to Road-Pricing Policies, No. 1894, *Transportation Research Record*, Washington, D. C., 1-10.
- Zhang, J., Fujiwara, A., Ishikawa, N., (2005) Developing a New activity-Trip Scheduling Model based on Utility of Timing Incorporating Timing Constraints, Censored Timing and Sequential Correlation, *Proceedings of the 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington DC, January 9-13 (CD-ROM).
- Zhang, J., Fujiwara, A. and Sawara, J. (2005) Multi-dimensional timing decisions: A case study in tourism behavior analysis, In: *Consumer Psychology of Tourism, Hospitality and Leisure*, Volume 4, Mazanec, J.A., Crouch, G.I., Brent Ritchie, J.R. and Woodside, A.G.
- Zhang, J., Fujiwara, A., Timmerman, H., Lee, B., Arentze, T., (2006) Multi-Dimensional Timing Decision Model of Household Activity-Travel Behavior with Endogenous Coupling Constraints, 11th International Conference on Travel Behavior Research (CD-ROM).
- 張峻屹, 杉惠頼寧, 藤原章正, (1998) 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. 629-637.
- 中村明, 兵藤哲朗, 山村直史, 紺屋健一, (2004) JICA 都市交通開発調査データベースの紹介—世界11都市のパーソントリップデータ—, *交通工学増刊号*, Vol.39, 39-43.
- Dijkstra, M., Vidakovic, V., (2000) Travel time ratio: the key factor of spatial reach. *Transportation*, 27, 179-199.