

変曲点を含む離散-連続パネル調査の最適設計

力石 真¹・藤原 章正²・張 峻屹³

¹正会員 広島大学大学院国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山1-5-1)
E-mail:chikaraishi@hiroshima-u.ac.jp

²正会員 広島大学大学院国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山1-5-1)
E-mail:afujiw@hiroshima-u.ac.jp

³正会員 広島大学大学院国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山1-5-1)
E-mail:zjy@hiroshima-u.ac.jp

本研究では、連続する複数日（連続パネル）の交通行動を複数期間（離散パネル）に渡って調査する離散-連続パネル調査を対象に、非線形に変化する政策反応の検出力最大化問題を定式化し、コスト効率性の高い調査形態（サンプル数、調査時点数、1時点当たりの調査日数）を明らかにする手法を提案する。提案手法を用いて数値解析を行った結果、検出力の最大化の観点からは、非線形性の高い変化が存在する状況下においては、調査時点数や1時点あたりの調査日数を増やした調査形態が望ましいことが示唆された。

Key Words : *Multi-Day and Multi-Period Panel Survey, Power, Survey Designs, Inflection Point*

1. はじめに

交通行動の観測は、交通需要予測のみならず、交通施策評価や外的条件の変化に伴う交通行動の変化を捉える上で不可欠である。なかでもパーソントリップ調査をはじめとするアンケート調査に基づく交通行動の観測は、人の動きを捉える最も基礎的な調査の1つであり、都市計画・交通計画の重要な基礎情報の1つとなっている。一方、社会活動のグローバル化に伴う交通行動の変化、人口減少に伴う交通需要量の増加から減少への転換、調査費用の削減・調査規模の縮小の潮流など、交通行動の観測方法を見直す必要性が高まっている。具体的には、

- 1) ETカードや公共交通カードの履歴データの利活用する方法の検討や、調査精度を確保しつつ調査費用を削減する方法の検討など、コストエフェクティブに交通行動を観測する方法の確立
- 2) 変曲点が存在する状況下での需要予測手法や、それに伴う政策効果の変化の計測方法の確立

が急務の課題と考えられる。このような状況下においては、ある時間断面における交通行動データを膨大に入手する調査形態から、比較的小数のサンプルであっても変化の情報を豊富に含むパネル調査への切り替えが有用な方法の1つと考えられる。

そこで本研究では、コスト効率性に配慮しつつ、政策

への反応が時間軸上に変化する状況下において政策効果を効率的に検出するための交通行動調査の設計手法を提案する。具体的には、連続する複数日（連続パネル）の交通行動を複数期間（離散パネル）に渡って調査する離散-連続パネル調査を対象に、予算制約下において統計的検定における検出力を最大化する最適化問題を定式化し、コスト効率性の高い調査形態（サンプル数、調査時点数、1時点当たりの調査日数）を明らかにする。

以下、第2章では既往研究のレビューを整理し、本研究の位置付けを明確にする。第3章では、変曲点を含む離散-連続パネル調査の最適化問題を定式化する。第4章では、簡単な数値解析を行い、変化の非線形性と最適な調査形態の関係を明らかにする。第5章では、本研究の成果及び今後の課題をまとめる。

2. 既往研究のレビュー

(1) 交通分野における既存調査設計手法

統計的検出力に基づく調査設計方法は、伝統的な調査設計方法の1つであり（例えばHansen et al., 1953; 永田, 2003; 土屋, 2009）、基本的には推定量の分散の最小化に基づく調査設計と同義である。また、推定誤差の最小化に基づく調査設計は、ゾーンの特性別の交通をある一定の精度を確保できるように標本率を設定する国土交通省の指

針（交通工学ハンドブック, 2008）と同様の考え方に基づくものであり、これまでの交通行動調査においては、ゾーン単位のデータ精度を出来るだけ高めるように工夫されてきたという。一方、分析手法の発展やハードからソフトへの政策メニューの変更などに伴い、交通行動データに要求される性能は変化しつつある。具体的には、1) 個人の政策反応を見るなど、ゾーン単位より細やかなスケールの分析に耐えるデータへの要請が大きくなっていること、2) 断面データ内の変動情報に基づく予測・評価から、時系列変化に基づく予測・評価へのシフトの重要性が認識されてきていること、3) 需要が増加から減少に移り変わりつつある状況下においては、ある一断面の情報を密に入手するというよりはむしろ、時間軸上の変化を捉えることのできるデータが必要となっていること、などが挙げられる。以上のような要求は、断面調査から縦断調査への転換の必要性を示唆しているものの、例えば調査間隔や調査期間など、時空間上の交通行動を捉える調査形態は複数存在し、どのような調査形態が上述の要求によりよく応えることができるかについては十分に明らかにされていないのが現状である。Pas (1986)の連続パネル調査の設計方法、北村ら (2001) や Kitamura et al. (2003) による離散パネル調査の設計方法など、これまでも幾つかの縦断調査設計手法が提案されているものの、交通分野において、連続パネル調査と離散パネル調査の比較を行った研究や、離散-連続パネル調査の検出力やコスト効率性に着目した研究は、筆者の知る限り存在しない。

(2) パネル調査設計手法に関するレビュー

交通分野におけるパネル調査設計に関する議論は限られたものであるが、他分野では、教育効果や心理実験効果を統計的に検定する需要が高まってきた背景もあり、パネル調査の設計方法が1950年代より継続的に議論されている。パネル調査設計に関連する初期の研究として、Hansen et al. (1953)の研究がある。Hansenらの研究は、集落抽出法 (Cluster sampling) を採用した際における推定誤差の最小化問題を考えるものである。集落抽出法は、類似した（相関の高い）情報を持つサンプルを複数抽出するため、検出力向上の観点から情報損失が多いと考えられているが（山形, 1983; 土屋, 2009 [p147]），同一集落より複数のサンプルを抽出することによるコスト削減を考慮した場合、ある条件下では、集落抽出法の方が優れていることをHansenらの研究は示唆している。この性質を連続パネル調査の設計に応用したのがPas (1986)の研究であり（この場合、“集落”=“個人”，“サンプル”=“個人の1日の行動”），トリップ発生モデル作成の文脈においては、複数日の交通行動データの方が、一日の交通行動データと同一コストで推定誤差の低いモデルを構築できる

ことを実証的に示している。なお、以上の集落抽出法にコストの概念を加えた研究は、マルチレベル分析の文脈において再整理され、1990年代以降、数多くの発展研究が蓄積されてきている (Snijders and Bosker, 1993; Raudenbush and Liu, 1997; Snijders, 2005; Moerbeek, 2006; Moerbeek et al., 2010)。

以上の研究は、変動を正確に捉えることを主たる目的としており、変化の存在を前提とした調査設計ではない。変化を前提とした調査設計手法の初期の研究として、Schlesselman (1973)の研究がある。Schlesselmanは、時間軸上の変化を観測することを目的とした縦断調査を行う場合、時間依存変数の推定量の分散最小化の観点からは、観測間隔を増加させるよりも観測期間を増加させる方が効率的であることを示している。Raudenbush and Liu (2001)は、Schlesselmanの方法を非線形の時間依存変数を導入することにより一般化している。Winkens et al. (2005)は、様々な共分散構造下におけるパネル調査の間隔と推定量の分散との関係を明らかにすることによりパネル調査間隔について考察を加えている。結果、等間隔に実施するパネル調査は効率の低い調査形態となっている可能性があることを指摘している。Heo et al. (2009)は、施策介入効果が時間軸上に変化する状況下におけるサンプルサイズの決定方法について言及している。

(3) 本研究の位置付け

本研究では、以上にみた他分野での研究蓄積を活用し、複数の交通行動パネル調査の最適設計手法を提案する。具体的には、Pas (1986)が提案している連続パネル調査設計手法と、Raudenbush and Liu (2001)が提案している変曲点を含む離散パネル調査設計手法を融合した離散-連続パネル調査設計手法を提案する。提案手法は、非線形な時間変化を含む3水準のマルチレベルモデルの政策変数への感度を表すパラメータ推定量の分散最小化問題として定式化される (Spybrook et al., 2011)。

3. 離散-連続パネル調査の最適設計手法

(1) 基本的な考え方

本研究では、交通需要や政策の感度は、図1に示すように、変曲点を含みながら時間軸上に変化するものと考え、予算制約下において、政策感度の変化を出来る限り精度良く捉える最適化問題を定式化する。調査設計の決定変数として、総被験者数 N 、調査時点数 T ($T=(F \times G)+1$; F : 調査間隔; G : 総調査期間)、一時点当たりの調査日数 D を設定する。例えば第4回東京都圏パーソントリップ調査の場合 $\{N, T, D\} = \{883044, 1, 1\}$ 、ドイツで行われた6週間の連続パネル調査である Mobidrive 調査

(Schlich and Axhausen, 2003)の場合 $\{N, T, D\} = \{361, 1, 42\}$ 、同じくドイツの1994年より1週間の交通行動調査を毎年行っているGerman Mobility Panel調査 (Zumkeller, 2009)の場合 $\{N, T, D\} = \{1800, 17, 7\}$ といった調査設計となっている。以下では、総被験者数 N 、調査時点数 T 、1時点当たりの調査日数 D の最適化問題を、時間軸上に非線形に変化する政策反応の検出力最大化問題として定式化する。

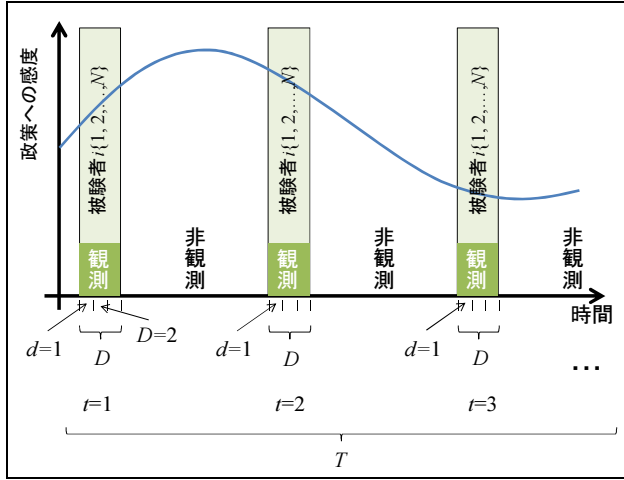


図1. 離散-連続パネル調査設計の概念図

(2) 前提条件

本分析で置く主な仮定は以下の通りである。

- (i) 従属変数は連続量であり、政策介入は無作為に抽出された半数の人々に行われるものとする。
- (ii) データは、個人レベルで無作為に抽出された完全データとする。
- (iii) パネル消耗、回答疲れの影響等のパネル特有の問題は生じないものとする。
- (iv) パネル調査を実施する時点は等間隔に並んでいるものとする。
- (v) 階層的に変量効果を導入した共分散構造を仮定する（自己相関はないものとする）。

もちろん、以上の仮定の緩和については、例えば Hedeker et al. (1999) や Galbraith et al. (2002)、Muthen and Curran (1997) などの研究において行われているが、本研究では以上の仮定のもと議論を単純化し、変曲点を含むパネル調査設計の基本的特性を明らかにする。

(3) モデル式

以下の3水準のランダム変数を持つマルチレベルモデルを考える。

$$Y_{tdi} = \sum_{p=0}^{p-1} \alpha_{pdi} c_{pt} + e_{tdi} \quad (1)$$

$$\alpha_{pdi} = \beta_{pd} + u_{pdi} \quad (2)$$

$$\beta_{pd} = \gamma_{p0} + \gamma_{p1} W_i + v_{pi} \quad (3)$$

ここで、 Y_{tdi} は、調査時点 t ($\in \{1, 2, \dots, T\}$) の d 日目 ($\in \{1, 2, \dots, D\}$) に観測した個人 i ($\in \{1, 2, \dots, N\}$) の従属変数である。 e_{tdi} 、 u_{pdi} 及び v_{pi} は、平均0、分散 σ^2 、 τ_α 、 τ_β の正規分布に従うランダム変数であり、それぞれ繰り返し観測に伴う誤差、個人内変動、個人間変動を表す非観測成分である。また、 W_i は政策介入を表す観測変数であり、以降の計算を簡略化するため、政策介入がある場合1/2、ない場合-1/2となるダミー変数とする。また、 γ_{p0} は p 次の変化の定数項を表すパラメータであり、 γ_{p1} は政策介入の影響を表すパラメータである。 c_{pt} は p 次の変化を表現する係数であり、以下の計算を用意にするため、中心化し直交性を確保した c_{pt} を導入する。具体的には、3次までの係数は以下のように定義される。

- ・0次の項 (変化なし)

$$c_{0t} = 1 \quad (4)$$

- ・1次の項 (線形トレンド)

$$c_{1t} = t - \sum_{t=1}^T t/T \quad (5)$$

- ・2次の項 (変化の速度)

$$c_{2t} = \frac{1}{2} \left(c_{1t}^2 - \sum_{t=1}^T t^2 / T \right) \quad (6)$$

- ・3次の項 (変化の加速度)

$$c_{3t} = \frac{1}{6} \left(c_{1t}^3 - \frac{\sum_{t=1}^T t^4}{\sum_{t=1}^T t^2} c_{1t} \right) \quad (7)$$

本研究では、1次から3次までの変化に対する最適調査設計結果を比較し、変化の複雑さが増すに従って最適な離散-連続パネル調査がどのように変化するかを明らかにする。

(3) 政策介入効果の検定

本研究では、政策介入の影響を表すパラメータ γ_{p1} の検出力を最大化する。具体的には、帰無仮説： $\gamma_{p1} = 0$ 、対立仮説： $\gamma_{p1} \neq 0$ とした場合の検出力を計算し、検出力を最大化する調査設計問題を定式化する。 γ_{p1} の推定量の分散は以下のように計算できる (Spybrook et al, 2011)。

$$Var(\hat{\gamma}_{p1}) = \frac{4[\tau_{\beta p} + (\tau_{\alpha p} + V_p)/D]}{N} \quad (8)$$

$$V_p = \frac{\sigma^2}{\sum_{t=1}^T c_{pt}^2} = \frac{\sigma^2 F^{2p} (T-p-1)!}{K_p (T+p)!} \quad (9)$$

K_p は、 $p=0$ のとき1、 $p=1$ のとき1/2、 $p=2$ のとき1/720と

なる定数である。ここで、検出力 $P_{1-\beta}$ は、対立仮説が成り立っている下で帰無仮説を棄却しない確率であるので、非心 F 分布を用いて以下のように定義できる。

$$P_{1-\beta} = Pr\{F_0 \geq F(1, N-2; \lambda)\} \quad (10)$$

ここで、 λ は非心パラメータと呼ばれるパラメータであり、以下の式により計算できる。

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{\gamma_{p1}^2}{Var(\hat{\gamma}_{p1}^2)} \\ &= \frac{N\gamma_{p1}^2}{4[\tau_{\beta p} + (\tau_{\alpha p} + V_p)/D]} \end{aligned} \quad (11)$$

非心 F 分布の定義より、非心パラメータ λ が大きいほど検定力は大きくなる。このことより、総被験者数が多いほど、1時点当たりの調査日数が多いほど、調査時点数が多いほど、検出力が高くなることが確認できる。

(4) 標準化有効サイズ

式(10)に基づきパネル調査の設計を実行するためには、 γ_{p1} の値を事前に与える必要がある。一方で γ_{p1} のサイズは Y_{it} の測定スケールに依存するため、以下に示すように1標準偏差当たりの政策効果に標準化し、標準化有効サイズのもとで調査表を設計できるようにする。

$$\delta_p = \frac{\gamma_{p1}}{\sqrt{\tau_{\beta p} + \tau_{\alpha p}}} \quad (12)$$

(5) 調査コスト関数の導入

本研究では、以下に示す調査コスト関数を設定する。

$$C = C_0 + C_N N + C_D DN + C_T TN \quad (13)$$

ここで、 C は総調査費用、 C_0 は固定調査費用、 C_N は被験者数の増加に伴う費用（リクルーティング費用など）、 C_D は被験者の総回答日数の増加に伴う費用（調査回答にかかる費用など）、 C_T は調査時点数の増加に伴う費用を表す。実際の調査のコスト関数は、より複雑な形態をとるものと考えられるが、本研究では上記の簡便な費用構造のもとで最適な調査設計を導出する。今後、メタ分析などを通して、コスト関数の構造を明確にする必要がある。

(6) 最適化問題の定式化

以上の定式化をもとに、検出力 $P_{1-\beta}$ の最大化問題を以下のように設定する。

$$Max \quad P_{1-\beta}(N, T, D) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} s.t. \quad & B \geq C, N > 0, T > 0, D > 0 \\ & C = C_0 + C_N N + C_D TDN \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 B は調査に利用できる総予算である。上の最適化問題の解が、予算制約下での検出力の最大化の側面から見た最適な離散-連続パネル調査形態となる。

4. 数値解析

本章では、上で定式化した最適化問題の数値計算を、以下の手順に従って実施する。

- 1) 総調査期間 G または調査間隔 F を定める。
- 2) τ_{ω} , τ_{β} , σ , 及び γ_{p1} を定める。
- 3) C_0, C_N, C_D, C_T, B を定める。
- 4) 式(14)~(15)の最大化問題を解き、最適な被験者数 N 、調査時点数 T 、1時点当たり調査日数 D を求める。

以下では、総調査期間5年、表1のパラメータ設定のもとで行った数値解析結果について考察する。

表2に数値解析結果を示す。結果より、 $p=1$ の線形トレンド型の変化を対象とした最適化計算を行った場合、2時点が最適な時点数として抽出されたのに対し、変化の次元が増加するに従って、調査時点数は大幅に増加していることが分かる。これは、トレンド型の変化を前提とする場合、調査期間の最初と最後の2時点において調査すれば十分である一方、変曲点を含む複雑な変化を前提とする場合、調査間隔を短くし、時間軸上の行動変化を観測することに予算を割り当てた方が効率的であることを示唆している。同様に、変化の複雑さが増すにつれて、1時点当たりの調査日数を増やした方が望ましい調査形態であることが示された。具体的には、本数値解析のパラメータ設定の下では、 $p=1$ のとき約1週間の調査が最適であったのが、 $p=3$ のとき約3週間の調査が最適であることが明らかとなった。また、以上にみた調査時点数や1

表1. 数値解析のパラメータ設定

モデル内パラメータの設定		
繰り返し観測に伴う誤差	σ^2	20
個人内変動	τ_{α}	5
個人間変動	τ_{β}	5
標準化有効サイズ	δ_p	0.2
費用パラメータの設定		
総予算	B	¥1,000,000
被験者数の増加に伴う費用	C_N	¥1,000
回答日数の増加に伴う費用 (円)	C_D	¥250
時点数の増加に伴う費用 (円)	C_T	¥250
固定調査費用 (円)	C_0	¥0

時点当たりの調査日数の増加に伴い、被験者数は約1/3まで減少することが明らかとなった。最適調査設計時の検出力については、変化の複雑さが増すにつれて減少することが示された。

数値解析の結果をまとめると、検出力の最大化の観点からは、変化の複雑さが増すにつれて、調査時点数や1時点あたりの調査日数を増やすことが重要であることが確認された。

表2. 数値計算の結果

		1次の 変化 ($p=1$)	2次の 変化 ($p=2$)	3次の 変化 ($p=3$)
被験者数	N	317.51	230.60	103.13
調査時点数	T	2.00	3.91	12.71
1時点当たりの調査日数	D	6.60	9.44	22.08
最適調査設計時の検出力	$P_{1\%}$	-0.41	-0.30	-0.16

5. おわりに

本研究では、連続する複数日（連続パネル）の交通行動を複数期間（離散パネル）に渡って調査する離散-連続パネル調査を対象に、予算制約下において統計的検定における検出力を最大化する最適化問題を定式化し、コスト効率性の高い調査形態（サンプル数、調査時点数、1時点当たりの調査日数）を明らかにする方法を提案した。また、数値解析を行い、対象とする変化の複雑さと最適調査設計との関係を明らかにした。具体的には、検出力の最大化の観点からは、変化の複雑さが増すにつれて、被験者数を増加するよりもむしろ、調査時点数や1時点あたりの調査日数を増やすことが重要であることが分かった。

本稿では、極めて限られた数値解析例を示すにとどまった。今後、本研究で定式化した最適調査設計手法の特性を詳細に把握する必要がある。特に、調査間隔を極端に短くした場合、変動と変化の分離不可能性の問題に直面する可能性が高い。この点について、理論的かつ実質的な検討を積み重ねていく必要がある。あわせて、実際のデータを用いて現実的な最適調査設計を検討していく予定である。

謝辞：本研究は科研費（22860042）の助成を受けたものである。

参考文献

- Galbraith, S., Stat., M., Marschner, I. C.: Guidelines for the design of clinical trials with longitudinal outcomes, *Controlled Clinical Trials*, Vol. 23, pp. 257-273, 2002.
- Hansen, M. H., Hurwitz, W. N., Madow, W.G.: *Sample Survey Methods and Theory, Volume II (Theory)*, New York, Wiley, 1953.
- Hedeker, D., Gibbons, R. D., Waternaux, C.: Sample size estimation for longitudinal designs with attrition: Comparing time-related contrasts between two groups, *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, Vol. 24, pp. 70-93, 1999.
- Heo, M., Kim, Y., Xue, X., Kim, M. Y.: Sample size requirement to detect an intervention effect at the end of follow-up in a longitudinal cluster randomized trial, *Statistics in Medicine*, Vol. 29, pp. 382-390, 2009.
- Kitamura, R., Yamamoto, T., Fujii, S.: The effectiveness of panels in detecting changes in discrete travel behavior, *Transportation Research Part B*, Vol. 37, pp. 191-206, 2003.
- Moerbeek, M.: Powe and money in cluster randomized trials: When is it worth measuring a covariate?, *Statistics in Medicine*, Vol. 25, pp. 2607-2617, 2006.
- Moerbeek, M., Van Breukelen, G. J. P., Berger, M. P. F.: *Optimal Designs for Multilevel Studies*, In: Leeuw, J., Meijer, E. (eds.), *Handbook of Multilevel Analysis*, Springer, pp. 177-205, 2010.
- Muthen, B. O., Curran, P. J.: General longitudinal modeling of individual differences in experimental designs: A latent variable framework for analysis and power estimation, *Psychological methods*, Vol. 2, pp. 371-402, 1997.
- Pas, E. I.: Multiday samples, parameter estimation precision, and data collection costs for least squares regression trip-generation models, *Environment and Planning A*, Vol. 18, pp. 73-87, 1986.
- Raudenbush, S. W.: Statistical analysis and optimal design for cluster randomized trials, *Psychological Methods*, Vol. 2, pp. 173-185, 1997.
- Raudenbush, S. W., Liu, X.-F.: Effects of study duration, frequency of observation, and sample size on power in studies of group differences in polynomial change, *Psychological Methods*, Vol. 6, 387-401, 2001.
- Schlesselman, J.: Planning a longitudinal study: II. Frequency of measurement and study duration, *Journal of Chronic disease*, Vol. 26, pp. 561-570, 1973.
- Schlich, R., Axhausen, K. W.: Habitual travel behaviour: Evidence from a six-week travel diary, *Transportation*, Vol. 30, pp. 13-36, 2003.
- Snijders, T. A. B., Bosker, R. J.: Standard errors and sample sizes for two-level research, *Journal of Educational Statistics*, Vol. 18, pp. 237-259, 1993.
- Snijders, T. A. B.: Power and sample size in multilevel modeling, In: Everitt, B. S., Howell, D. C. (eds.), *Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science, Volume 3*, Wiley, pp. 1570-1573, 2005.
- Spybrook, J., Raudenbush, S. W., Congdon, R., Martinez, A.: *Optimal Design for Longitudinal and Multilevel Research, Documentation for the "Optimal Design" Software*, 2011.

- 17) Winkens, B., Schouten, H. J. A., van Breukelen, G. J. P., Berger, M. P. F.: Optimal time-points in clinical trials with linearly divergent treatment effects, *Statistics in Medicine*, Vol. 24, pp. 3743-3756, 2005.
- 18) Zumkeller, D.: The Dynamics of Change – latest results from the German Mobility Panel, Paper presented at the 12th International Conference on Travel Behaviour Research, Jaipur, India, December 13-18, 2009.
- 19) 北村隆一, 藤井聡, 山本俊行: 離散時間パネル調査の調査期間, 調査間隔, 標本数の最適化, *土木学会論文集*, No. 681/IV-52, pp. 13-23, 2001.
- 20) 交通工学研究会: 交通工学ハンドブック 2008, 丸善, 2008 (DVD-ROM).
- 21) 土屋隆裕: 概説標本調査法, 朝倉書店, 2009.
- 22) 永田靖: サンプルサイズの決め方, 朝倉書店, 2003.
- 23) 兵藤哲朗: 交通需要予測の課題と展望-新しいデータ, 新しいモデル, そして需要予測不信-, *交通工学*, Vol.37, No.5, pp.15-21, 2002.
- 24) 山形耕一: パーソントリップ調査の調査精度に対する抽出単位の影響について, *土木計画学研究発表会講演集*, Vol. 5, PP. 366-370, 1983.
- (2011.8.5)

Optimal Designs for Multi-Day and Multi-Period Panel Survey: A Case of Nonlinear Change

Makoto Chikaraishi, Akimasa Fujiwara, Junyi Zhang