東京都市圏における鉄道通勤経路選択の統計力学的モデル
GPS データによる実証分析

鄭　軼璇（テイ　イーシャン）*・高安秀樹・高安美佐子*****

Statistical Mechanics of Urban Mobility
- A Canonical Ensemble Model of Route Choice in Tokyo

Yixuan Y. Zheng*, Hideki Takayasu**, Misako Takayasu***

Abstract: This study applies a multinomial logit (MNL) framework to analyze railway commuters' route choices using a large-scale dataset of smartphone GPS trajectories. We design a data processing pipeline that extracts structured commuting paths, including transport mode and transfer information, from raw location traces. The model highlights key behavioral patterns in commuter decision-making, such as the substantial disutility associated with transfers and the influence of station capacity on route attractiveness. Our findings demonstrate that passively collected GPS data can support robust revealed-preference modeling at metropolitan scale, offering new opportunities for understanding commuter route choice and informing transit planning.

Keywords: 都市交通（Urban mobility），経路選択モデル（Route choice modeling），GPS 軌跡（GPS trajectories），離散選択分析（Discrete choice analysis），統計力学（Statistical mechanics）

１．はじめに

高度に発展した鉄道網の上では、個人の出発地と目的地が仮に同じであっても、それらの間の通勤ルートは複数ありうる。そこで、出発地と目的地が与えられたとき、どのような要因がルート選択に影響を与えているかを定量化することは、通勤人流のモデル化や、都市計画や交通政策の立案において極めて重要である[1]。特に東京都市圏は世界最大級の鉄道ネットワークを有し、約 3,800 万人の居住者のうち、日々1,000 万人以上が鉄道通勤を行っている。本研究は東京都市圏（東京都、神奈川県、埼玉県、千葉県）における通勤人流をスマートフォン GPS データから取得し、鉄道による通勤を対象に絞り、ルート選択のモデルを構築した。

従来の経路選択研究は、主に個人の効用最大化理論（Random Utility Maximization: RUM）に基づく離散選択モデルを用いてきた [2, 3]。個人にとって、通勤は他の移動と比べて特殊な移動である。東京の通勤システムは以下の特徴的な制約を持つ：

- 定期券制度：多くの企業が通勤定期代を支給し、経路が事実上固定される
- 固定的な勤務時間：朝夕の通勤ラッシュが極めて集中的
- 高密度な鉄道網：同一 OD 間に複数の実行可能な経路が存在

これらの制約により、通勤行動は個人の自由な選択というより、システム全体が制約下で平衡状態に達した集団現象として理解する方が適切である。

1.2 研究目的と貢献

本研究では、約 100 万人/日のスマートフォン GPS データを用いて、一年間十二ヶ月分通勤者の経路選択行動を統計物理学の正準集団（カノニカル・アンサンブル）モデルとして分析する新しいアプローチを提示する。主な貢献は以下の 3 点である：

一、 理論的貢献：離散選択モデルのスケールパラメータを物理学的な再解釈
二、 実証的貢献：乗り換えペナルティの定量化
三、 方法論的貢献：大規模 GPS データから通勤パターンを抽出する包括的な分析パイプライン

２．データと方法論

２.１　使用データの概要

本研究では、Agoop 社提供の匿名化された GPS 位置情報データを使用した。データの特徴は以下の通り：

対象期間：2023 年 1 月～12 月の平日（週末・祝日を除く）

対象地域：首都圏（東京都、神奈川県、千葉県、埼玉県）

*　学生会員　東京科学大学工学部（Institute of Science Tokyo）
〒226-8501 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259　E-mail: yixuan.z.5b0a@m.isct.ac.jp
***　非会員　東京科学大学情報理工学部（Institute of Science Tokyo）
〒226-8501 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259　E-mail：hideki.takayasu@gmail.com
**　非会員　東京科学大学情報理工学部、工学部（Institute of Science Tokyo）
〒226-8501 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259　E-mail：takayasu@comp.isct.ac.jp

サンプル数：約 100 万人/日のスマートフォンユーザー
時間解像度：約 1 分間隔での位置記録
空間精度：約 10 メートル
データには以下の制約が存在する：

1. プライバシー保護のため、ユーザーID は日次でリセット
2. 13 歳未満と 65 歳以上の利用者が過少代表
3. 居住地の正確な位置は 100m グリッドの中心点に集約

2.2 GPS データ処理パイプライン

2.2.1 活動状態の分類

各 GPS 点を以下の 5 つの状態に分類した：

状態	定義	判定基準
home（自宅）	居住地での滞在	4 時間以上滞在、午前 5 時の最初の記録
work（職場）	勤務地での滞在	5 時間以上滞在、自宅以外の場所
move（移動）	高速移動状態	速度 8km/h 以上、停止時間 4 分未満
stroll（立ち寄り）	短時間の停止・低速移動	速度 8km/h 未満、滞在時間 4 分以上 30 分未満
stay（滞在）	長時間の滞在	1km グリッド内に 30 分以上継続滞在

2.3 カノニカルモデルの定式化

経路選択を統計力学の正準集団として扱い、通勤者 n が経路 j を選択する確率を以下のボルツマン分布で表現した：

$$P_{nj} = \frac{\exp(-\beta E_{nj})}{\sum_{k \in C_n} \exp(-\beta E_{nk})}$$

ここで：
E_{nj}：経路 j のエネルギーコスト（負効用）
β：逆温度パラメータ（スケールパラメータ）
C_n：通勤者 n の選択可能経路集合
エネルギー関数は経路属性の線形結合として定義：

$$\mathrm{E_{nj}} = \boldsymbol{\omega} \,.\, \mathbf{X_{nj}^{T}}$$

説明変数X_{nj}は六次元のベクトル、構成要素は：

変数	解釈
通勤時間	分単位、ドア・ツー・ドア
通勤距離	限界効果の逓減を考慮
乗換回数	通勤モチーフから抽出
ラッシュ通勤	ダミー変数 1 か 0
第 1 乗換駅容量	最大時間帯利用者数
第 2 乗換駅容量	同上

3 主要な結果

3.1 経路選択安定性

12 ヶ月間の月次推定により、パラメータの時系列安定性を検証した。
特に、スケールパラメータ β 値の月次変動：
年間平均：0.90
変動範囲：0.85-0.95
最小値：6 月（梅雨期、0.85）
最大値：9 月（秋の安定期、0.95）
この安定性は、研究地域の通勤システムが統計的温度とする平衡状態にあることを示唆している。

3.3 行動的洞察

$\frac{\omega_{NT}}{\omega_{CT}}$ によって、1 回の乗換は約 20 分の追加移動時間に相当する心理的負担を生じさせる。これは交通計画者にとって重要な閾値である。
乗換駅容量の非対称効果については
第 1 乗換駅（正の係数）：高容量駅での混雑を忌避
第 2 乗換駅（負の係数）：高容量駅の利便性を評価
この非対称性は、通勤者が旅程の最終段階の快適性を重視することを示している。第 2 乗換駅は多くの場合、新宿や渋谷などの主要ターミナル駅であり、高頻度運行や充実した設備が混雑のデメリットを上回る。

3.2 モデル性能

McFadden の疑似 R^2は 0.160、的中率は 51.8%を達成した。これは平均 6 つの選択肢からのランダム選択（17%）を大きく上回る予測能力を示している。

4. 考察と今後の課題

本研究は、通勤経路選択を物理学的枠組みで捉える新たな方法を提示し、集団的平衡現象として通勤パターンを理解できることを示した。一方で、(1) GPS 点分類の閾値が経験的であること、(2) 運賃変数を含めていないこと、といった限界がある。

今後は、混合ロジットによる異質性の考慮、経路間相互作用や非定常性の分析などが重要な拡張課題となる。

参考文献

[1] Zheng YY, Shida Y, Takayasu H, Takayasu M. Enhancing the gravity model for commuters: Time-and-spatial-structure-based

improvements in Japan's metropolitan areas. PLoS One. 2025 Aug 12;20(8):e0329603. doi: 10.1371/journal.pone.0329603.
[2] 近藤恵介 (2019).「構造推定による通勤不効用の評価」RIETI Discussion Paper Series 19-J-014. 経済産業研究所
[3] Kaneko, N., Oka, H., Chikaraishi, M., Becker, H., & Fukuda, D. (2018). Route choice analysis in the Tokyo Metropolitan Area using a link-based recursive logit model featuring link awareness. Transportation Research Procedia, 34, 251–258. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.11.042