

人流  
OPS モデル

重力モデル  
分布交通量

放射モデル  
パーソントリップ調査

## 1. はじめに

近年、我が国のまちづくり政策において、モバイル空間統計をはじめとする人流ビッグデータの活用が進められている。今後、持続可能なまちづくりを進めるうえで、これらの過去実績データの活用に加えて、人流の将来推計の重要性が高まることが予想される。

代表的な人流モデル (Human mobility model) として、重力モデルが知られており<sup>1)</sup>、4 段階推定法における分布交通量の推計などに利用されてきた<sup>2)</sup>。しかし、重力モデルは、過去の人流データによるパラメータ推定が必要であるため、データ精度の低い地域や長期間を対象とする将来推計に適さない可能性がある。

近年、こうしたパラメータ推定上の課題を解決するモデルとして、放射 (Radiation) モデル<sup>3)</sup>や OPS モデル<sup>4)</sup>などのパラメータフリーな人流モデルが提案されている。しかし、放射モデルは、移動距離の短いトリップにおいて、重力モデルよりも推計精度が低くなる<sup>5)</sup>という課題が指摘されている。一方で、OPS モデルは、重力モデルとほぼ同等の推計精度が得られることが確認されている<sup>4)</sup>。これらのモデルの課題として、分布交通量の推計で用いられる二重制約型モデルとして定式化されておらず、モデルの適用範囲が限定されていることが挙げられる。

そこで、本研究では、放射モデルと OPS モデルを、二重制約型モデルとして定式化し、パーソントリップ調査データに基づき、重力モデルとの精度比較を行った。

## 2. 既存モデル

### 2.1. 人流モデル：重力・放射・OPS モデル

重力モデルでは、発地*i*・着地*j*間のトリップ数 $T_{ij}$ が、式 (1) の関係をもつと仮定する<sup>1)</sup>。ここで、質量項にあたる $m_i$ および $n_j$ は、それぞれ発地*i*・着地*j*の人口、 $d_{ij}$ は、移動距離、 $b$ は、距離減衰パラメータである。

$$T_{ij} \propto m_i n_j d_{ij}^{-b} \quad (1)$$

放射モデルと OPS モデルでは、いずれもランダム効用に基いて選択確率が導出されている<sup>3),4)</sup>。しかし、移動者の行動原理に関する仮定はそれぞれ異なり、放射モデルでは、発地よりも効用の高い最寄りの地点が選ばれることを仮定するのに対して、OPS モデルでは、発地よりも効用が高い全ての地点が選ばれる可能性があると仮定す

る。これらの仮定より明らかのように、内々トリップは、両モデルの推計対象外であることに注意が必要である。

放射モデルと OPS モデルにおける、発地*i*の移動者が着地*j*を選ぶ選択確率 $P_{ij}$ は、それぞれ式 (2)、式 (3) の関係をもつ。ただし、 $s_{ij}$ は、発地*i*からみて着地*j*よりも近い (発地*i*を除く) 地点の人口の和を表す。また、これらは発生制約型モデルであるため、トリップ数 $T_{ij}$ は、発生数 $O_i$ を用いて、 $T_{ij} = O_i P_{ij}$ と推計される。

$$P_{ij} \propto \frac{m_i n_j}{(m_i + s_{ij})(m_i + s_{ij} + n_j)}, \quad \sum_j P_{ij} = 1 \quad (2)$$

$$P_{ij} \propto \frac{n_j}{m_i + s_{ij} + n_j}, \quad \sum_j P_{ij} = 1 \quad (3)$$

### 2.2. 二重制約型モデル

二重制約型モデルにおけるトリップ数 $\hat{T}_{ij}$ は、式 (4) のように表される<sup>1)</sup>。ここで、 $A_i$ 、 $B_j$ は、バランス調整項、 $O_i$ 、 $D_j$ は、それぞれ発生数、吸収数、 $f_{ij}$ は空間的相互作用に関する項である。バランス調整項 $A_i$ 、 $B_j$ は、制約条件より式 (5) となり、繰り返し計算により推定される。

$$\hat{T}_{ij} = A_i B_j O_i D_j f_{ij}, \quad \sum_j \hat{T}_{ij} = O_i \wedge \sum_i \hat{T}_{ij} = D_j \quad (4)$$

$$A_i = \left( \sum_j B_j D_j f_{ij} \right)^{-1}, \quad B_j = \left( \sum_i A_i O_i f_{ij} \right)^{-1} \quad (5)$$

### 3. 提案モデル

本研究では、従来手法<sup>1)</sup>と同様に、発地人口 $m_i$ および着地人口 $n_j$ を、それぞれ発生数 $O_i$ 、吸収数 $D_j$ に置き換えた。さらに、 $O_i D_j f_{ij} \propto T_{ij}$ という関係があると仮定すると、重力モデル、放射モデル、OPS モデルにおける空間的相互作用項 $f_{ij}$ は、それぞれ式 (6)、式 (7)、式 (8) のように設定される。ただし、 $s_{ij}$ は、吸収数 $D_j$ より算出した。また、発生数 $O_i$ と吸収数 $D_j$ のいずれかが 0 の場合に計算が発散しないように定式化を行った。

$$f_{ij} = d_{ij}^{-b} \quad (6)$$

$$\begin{cases} f_{ij} = 0, & \text{if } O_i = s_{ij} = D_j = 0 \\ f_{ij} = \frac{1}{D_j}, & \text{if } O_i = s_{ij} = 0 \wedge D_j > 0 \\ f_{ij} = \frac{O_i}{(O_i + s_{ij})(O_i + s_{ij} + D_j)}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} f_{ij} = 0, & \text{if } O_i = s_{ij} = D_j = 0 \\ f_{ij} = \frac{1}{O_i + s_{ij} + D_j}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

#### 4. 人流モデルの推計精度比較

##### 4.1. 推計方法・評価指標

国土数値情報に公開されている三大都市圏パーソントリップ調査の移動目的別 OD 量データを対象として、実績発生数 $O_i$ および吸収数 $D_j$ からトリップ数 $\hat{T}_{ij}$ を推計した。データ概要を Table 1 に示す。ただし、発生数と吸収数がともに0のゾーンは推計対象外とした。また、移動距離 $d_{ij}$ として測地線距離を使用した。さらに、重力モデルの距離減衰パラメータ $b$ は、実績値に対するポアソン回帰（リンク関数：ln）により推定した。

推計精度の評価指標として、先行研究でよく用いられる CPC (Common Part of Commuters) <sup>例えば6)</sup> および決定係数  $R^2$  を使用する。二重制約型モデルの CPC は、式 (9) で表され、0 が完全な不一致、1 が完全な一致を意味する。ただし、 $\hat{T}_{ij}$ 、 $\tilde{T}_{ij}$  は、それぞれ推計トリップ数、実績トリップ数、 $N = \sum_i \sum_j T_{ij} = \sum_i \sum_j \hat{T}_{ij}$  は、総トリップ数を指す。

$$CPC = \frac{2 \sum_i \sum_j \min(\hat{T}_{ij}, \tilde{T}_{ij})}{\sum_i \sum_j (\hat{T}_{ij} + \tilde{T}_{ij})} = 1 - \frac{\sum_i \sum_j |\hat{T}_{ij} - \tilde{T}_{ij}|}{2N} \quad (9)$$

##### 4.2. 推計結果・精度比較

調査種別または移動目的別の CPC および決定係数を、それぞれ Fig. 1, Fig. 2 に示す。Fig. 1 より、モデル間での CPC の差は、異なる調査種別や移動目的間での差と比べて大きいとは言えないものの、OPS モデルの CPC は、他のモデルと比べてやや高い傾向がみられた。また、Fig. 2 より、放射モデルの決定係数が、重力モデルを大きく下回ったことがわかる。これは、移動距離の短いトリップにおいて推計精度が低くなったことが原因であると考えられる。一方で、OPS モデルの決定係数は、重力モデルをやや上回る傾向がみられた。

#### 5. まとめ

本研究では、パラメータフリーな人流モデルである放射モデルと OPS モデルを二重制約型モデルとして定式化し、重力モデルとの精度比較を行った。推計の結果、放射モデルは、重力モデルの推計精度を下回ったが、OPS モデルでは、重力モデルをやや上回る推計精度が得られた。そのため、二重制約型 OPS モデルは、従来、用いられてきた重力モデルを代替しうることが確認された。さらに、本モデルは、重力モデルと異なりパラメータ推定を必要としないため、データ精度の低い地域や長期間を対象とする人流の将来推計にも適していると考えられる。

今後は、道路・鉄道路線距離を考慮した移動距離の精緻化やそれに伴う推計精度向上効果の確認について検討を進めていく予定である。

Table 1 Summary of person trip OD amount data

Area	Year	Zones	Trips to other zones by purpose (million)					Total
			Go to work	Go to school	Free	Business	Go home	
Kanto	2010	601	10.76	2.22	10.49	4.48	18.53	46.48
Chubu	2010	450	3.18	0.78	2.86	1.73	6.01	14.56
Chubu	2013	626	5.80	1.30	7.26	2.83	12.18	29.37
Kinki	2010	302	4.74	1.05	3.82	2.83	8.12	20.55
Kinki	2012	432	4.64	1.04	4.51	2.21	8.46	20.85

Source: Authors' calculations using person trip OD amount data from National Land Information Division.

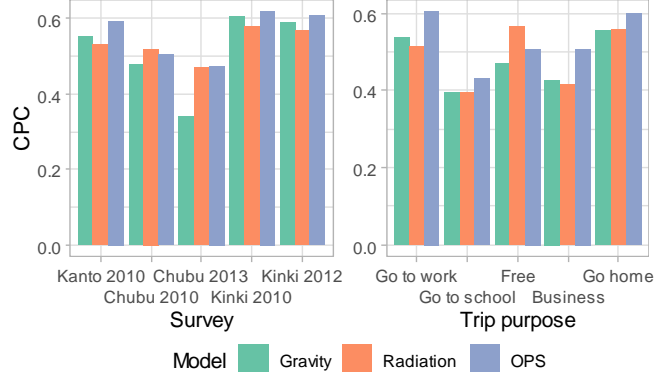


Fig. 1 CPC by survey or trip purpose

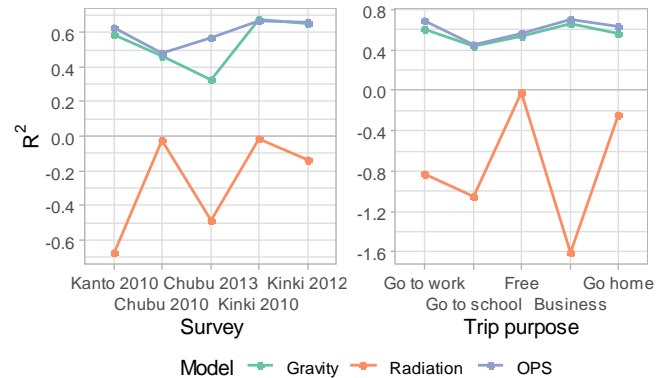


Fig. 2  $R^2$  by survey or trip purpose

#### 参考文献

- 1) 野上道男, 杉浦芳夫: パソコンによる数理地理学演習, 古今書院, Jan.1986.
- 2) 土木学会: 道路交通需要予測の理論と適用 第I編 利用者均衡配分の適用に向けて, 丸善, 2003.
- 3) Simini, F., González, M., Maritan, A., and Barabási, A.: A universal model for mobility and migration patterns, Nature 484, pp.96–100, 2012.
- 4) Liu, E. and Yan, X.: New Parameter-Free Mobility Model: Opportunity Priority Selection Model, Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, Vol.526, 121023, Jul.2019.
- 5) Masucci, A., Serras, J., Johansson, A., and Batty, M.: Gravity versus Radiation Models: On the Importance of Scale and Heterogeneity in Commuting Flows, Physical Review E 88 (2): 022812, 2013.
- 6) Lenormand, M., Bassolas, A., and Ramasco, J.: Systematic Comparison of Trip Distribution Laws and Models, Journal of Transport Geography, Vol.51, pp.158–69, 2016.