

平成 22年 5月 25日現在

研究種目：若手研究(スタートアップ)  
 研究期間：2009～2010  
 課題番号：20810023  
 研究課題名(和文) 連鎖的流動を考慮した分布交通量の推定アルゴリズムの構築と都市分析への応用  
 研究課題名(英文) Efficient Algorithms for Spatial Interaction Models for Trip-chaining Behavior and Its Application to Urban Analysis  
 研究代表者  
 本間 裕大 (YUDAI HONMA)  
 首都大学東京・大学院システムデザイン研究科・助教  
 研究者番号：40514055

研究成果の概要(和文)：本研究では、連鎖的な空間相互作用を前提とし、地域内流動を効率的に推定・分析するための新たな手法を提案した。本研究の対象は、都市における周回行動といった、よくある連鎖的な流動であるが、この種の流動は極めて自由度が高いことが特徴として挙げられる。この点に鑑み、本研究では特に計算量の抑制に焦点を当て、過大なパラメータや複雑な構造を持たない明解なモデルを構築し、また、種々の都市分析への応用を試みた。

研究成果の概要(英文)：In this study, new spatial interaction models are proposed in order to deal with trip-chains which consist of a sequence of movements. In particular, entropy models for circular trip-chains is formulated. These models allow us to consider touring behavior between destinations and to treat more realistic travels. Furthermore, efficient algorithms to estimate parameters are also discussed. These models can be applied to several practical issues in urban analysis

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,330,000	399,000	1,729,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計			

研究分野：社会システム工学

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学, 社会システム工学・安全システム

キーワード：交通工学・国土計画, 都市計画・建築計画, 人文地理学, 空間相互作用モデル

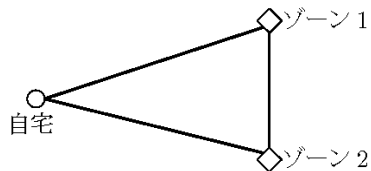
## 1. 研究開始当初の背景

人やものの流れは、我々の日常を振り返るまでも無く、都市を成立させるための根幹に関わるものである。試しに具体的な例をいくつか挙げてみても、通勤や通学の人の流れ、商品の流通、郵便、各種の情報流等々枚挙に暇が無い。このような“空間相互作用”を数学的に記述する試みは“空間相互作用モデ

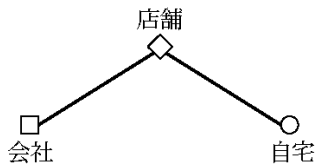
ル”と総称され、数多くの先行研究で提案・分析されてきた。これらの先行研究に共通する特徴として、発生から集中という2地点間で定義される流動を分析の対象としていることが挙げられる。

しかしながら、殊に都市における交通行動に着目すると、ある目的での移動が独立して発生しないことも多い。例えば会社からの帰

宅の途中で店舗に立ち寄るとき、立ち寄る店舗の選択は、その後の帰宅のし易さも考慮に入れた上で行われるに違いない。すなわち“会社から店舗へ”というトリップは、“店舗から帰宅へ”というその後のトリップに、強く影響を受けていることが容易に想像される。また、複数の観光地を訪問する旅行を計画する際には、移動行動全体を(何らかの規準に従って)大域的に最適化することも多い。この場合、旅行を構成する複数の移動が、互いに影響を及ぼしあうことになる。交通工学分野では、このような連鎖的な移動(トリップ)を“トリップチェーン”と定義し、図1に示したような様々なトリップチェーンについて、マルコフモデルや、非集計行動モデルに基づいた分析が行われてきた。しかしながら、これらの既存研究では多くの場合、その意思決定プロセスに重点が置かれ否応無く複雑化する傾向にあり、操作性の高い、かつ、記述力に優れたモデルの開発に成功しているとは言えない。



(a) 周回トリップチェーン



(b) 立ち寄りトリップチェーン

図1：連鎖的流動の一例

## 2. 研究の目的

以上のような背景から、本研究では、まず連鎖的移動であるトリップチェーンを前提とし、トリップチェーン数に関する種々の制約条件の下で、その分布交通量を推定するための新たな手法を構築することを目的とした。具体的には、通常の2地域間で記述される流動のみならず、任意個数の地域を経由するような連鎖的流動も同時に推定し得るように、Wilsonの2重制約つきエントロピー最大化モデルを一般化することを試みた。本研究の枠組みによって、複数箇所の訪問を前提とした各ゾーンの発生・集流量が判明しているという制約の下、その分布交通量を統計力学的概念に基づき推定することが可能となった。

その上で、上述で提案した、連鎖的流動の

ためのエントロピーモデルの構造を分析し、分布交通量を効率的に導出するための方法論を模索した。具体的には、申請者が提案したエントロピーモデルが、マルコフ性を有するために必要な諸条件について分析を行った。マルコフ過程を用いて、連鎖的流動を記述する試みは、交通工学分野における周回行動を想定した一連の研究が挙げられる。したがって、本研究が提案したエントロピーモデルと、マルコフモデルの理論的關係についても考察を行っている。

さらに、構築した連鎖的流動のための空間相互作用モデル、ならびにその効率的計算アルゴリズムを、様々な社会システム分析へと応用することも試みた。

以上のように本研究では、(1)連鎖的流動を記述するためのエントロピーモデルの提案、(2)当該モデルを用いた分布交通量の効率的推定アルゴリズムの構築、(3)社会システム分析への応用、の3項目を研究的として設定した。

## 3. 研究の方法

上述した研究目的の3項目それぞれについての、具体的な研究方法について述べる。

### (1) エントロピー・モデルの提案

まず、連鎖的流動をエントロピー・モデルの枠組みに実装するための方法論について述べる。具体的にはエントロピー・モデルにおける(i)尤度関数と、(ii)制約条件の2つが、いかに一般化されるかについて説明する。古典的なエントロピー・モデルでは、起こり得る2地域間の流動の候補を全て列挙した上で、多項係数に相当する尤度関数を最大化している。このアイデアを踏襲し、本モデルでは、起こり得る連鎖的流動の候補を全て列挙した上で、その多項係数を導出し尤度関数と見做した。一方、制約条件については特にゾーン制約の一般化が焦点となるが、基本的には想定する(連鎖的)流動を各ゾーンについてもれなく足しあげるよう記述すれば良い。ただし、具体的な制約式は相当に煩雑となることが予想されるため、制約条件ならびに調整係数の数学的に合理的な取り扱いが本研究の重要なポイントとなった。

### (2) 効率的アルゴリズムの構築

研究項目(1)で提案したエントロピーモデルは、制約式・調整係数の数学的取り扱いが相当に煩雑であるため、具体的な分布交通量を導出するための計算量が長大となる問題点を抱えていた。同様の問題は、交通行動分析に近年用いられている、非集計行動モデルに基づく定式化でも指摘されている。そこで、当該項目では、提案した連鎖的移動のた

めのエントロピー・モデルを拡張し、より効率的に分布交通量を計算・推定するための手法を模索した。トリップチェーン行動を、マルコフモデルを用いて記述する試みは、特に交通工学の分野で、古くは1960年代から行われてきた。トリップチェーン行動にマルコフモデルを適用することは、その理論的根拠が脆弱であるという問題点こそ抱えているものの、逆行列計算など比較的簡潔な方法で分布交通量が推定できる利点をもっている。したがって、提案したエントロピーモデルが、何らかの形でマルコフ性を有していることを明らかにできれば、調整係数の計算やパラメータ推定などを行うにあたり、マルコフモデルに関する研究蓄積が、提案したエントロピーモデルへと適用できる可能性がある。加えて、トリップチェーンにおけるエントロピーモデルとマルコフモデル、更には非集計行動モデルとの繋がりをも明らかにし、互いの問題点をうまく回避できるものと思われた。このような背景から、特に調整係数のマルコフ構造に着目し、逆行列計算による新たな計算アルゴリズムの構築を試みた。当該議論を通して、実データへの適用が現実的な時間で実行可能になることについても確認している。

### (3) 社会システム分析への応用

本研究の具体的な応用例として、連鎖的流動のための空間相互作用モデル、ならびにその効率的計算アルゴリズムを、様々な社会システム分析へと応用することを試みた。具体的な研究項目は、①周回行動を考慮した施設配置問題、②産業連関構造を考慮した都市構造のダイナミクス分析、③経路選択を考慮した情報ネットワークにおけるマルチパス・ルーティング技術の構築、の3点から分析した。なお、それぞれにおける着目点は、①周回行動の実施が、最適施設立地点に与える影響の考察、②連鎖的流動による産業連関構造を導入した複数都市活動分布の相互関係の分析、③連鎖的流動ならびにその効率的アルゴリズムの活用による、新たなマルチパス・ルーティング技術の分析である。

## 4. 研究成果

3項目それぞれについての、具体的な研究成果について述べる。

### (1) エントロピー・モデルの提案

上述の「研究方法(1)」に基づき、(i) 尤度関数と、(ii) 制約条件の2つの観点からWilsonのエントロピー最大化モデルの拡張を行い、見通しの良いモデルを提案することに成功した。様々な定式化を行ったが、ここでは、最も代表的なモデルとして設定した「二重制約付き周回エントロピーモデル」の

定義式を以下に記載する：

$$t_{ij} = A_i O_i \left( \prod_{l=1}^A B_{j_l} D_{j_l} \right) p_{ij} \exp[-\gamma c_{ij}]$$

$$A_i^{-1} = \sum_{j \in \Phi} \left( \prod_{l=1}^A B_{j_l} D_{j_l} \right) p_{ij} \exp[-\gamma c_{ij}]$$

$$B_j^{-1} = \sum_{i=1}^L \sum_{l=1}^I \sum_{\{j \in \Phi | j_l = j\}} A_i O_i \left( \prod_{l' \neq l} B_{j_{l'}} D_{j_{l'}} \right) p_{ij} \exp[-\gamma c_{ij}]$$

当該定義式は、トリップチェーンを対象として過去に提案されたエントロピーモデルと比較し、その数学的明解さや、Wilsonモデルとの関係性の高さにおいて優れている。空間相互作用モデルにおいて、Wilsonのエントロピー最大化法が空間相互作用モデルの飛躍的な展開を促した事実からしても、当該エントロピーモデルの提案は極めて重要な意味を持つものと考えられる。

### (2) 効率的アルゴリズムの構築

上述の「研究方法(2)」に基づき、エントロピー・モデルのマルコフモデルの等価性について、議論を行った。その結果、「トリップチェーンの移動コストが、各トリップの和に分解される」という自然な条件の下で、その等価性が明らかとなり、さらには(1)で提案したエントロピー・モデルの調整係数に関する効率的推定アルゴリズムの構築に成功した。構築したアルゴリズムの概要は以下の通りである：

「計算アルゴリズムの概要」

i) 以下の2数列を定義する。

$$X_{ij}^0 = A_i O_i C_{ij}$$

$$X_{ij}^{n+1} = \sum_{j^*} X_{ij^*}^n B_{j^*} D_{j^*} C_{j^*j}$$

$$Y_{ji}^0 = C_{ji}$$

$$Y_{ji}^{n+1} = \sum_{j^*} B_{j^*} D_{j^*} C_{j^*j} Y_{j^*i}^n$$

ii) 以下の2つを逆行列を用いて導出する。

$$\sum_{n=0}^{\infty} X_{ij}^n, \quad \sum_{n=0}^{\infty} Y_{ji}^n$$

iii) 以下を計算する。

$$A_i^{-1} = \sum_j \sum_{n=0}^{\infty} Y_{ji}^n$$

$$B_j^{-1} = \sum_i \left( \sum_{n=0}^{\infty} X_{ij}^n \times \sum_{n=0}^{\infty} Y_{ji}^n \right)$$

iv) 以上を、 $A, B$ が収束するまで繰り返し計算する。

なお、従来から断片的に知られていた、エントロピー・モデルと非集計行動モデルの等価

性にも着目し、エントロピー・モデルと、マルコフモデル、さらには、非集計行動モデルの3者間での等価性についても基礎的な議論を行うことに成功している。

### (3) 社会システム分析への応用

以下に、種々の社会システム分析への応用に関する研究成果を述べる。

#### ① 周回行動を考慮した施設配置問題

上述の研究項目(1)・(2)で構築した、人々のトリップチェーン行動の記述モデルを基礎とした、競争的施設の最適立地問題への応用をおこなった。具体的な定式化については割愛するが、周回行動を考慮することによって、立地点の性質が大きく変化し、場合によっては、既存施設の中心が最適となることも判明した(図2)。

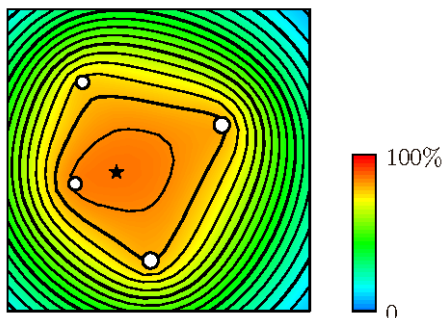


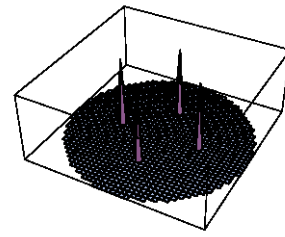
図2：周回行動を考慮した最適配置

#### ② 産業連関構造を考慮した都市構造のダイナミクス分析

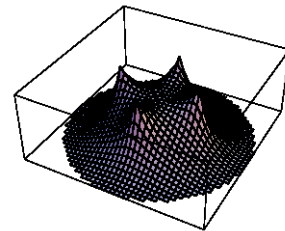
エントロピー・モデルをはじめとする空間相互作用モデルを、都市活動の生成メカニズムと仮定して、都市活動分布の形成ダイナミクスを追求する試みは、数多く行われている。そこで、このような都市活動分布の形成モデルの一つとして、Harris-Wilsonによって提案されたバランス・メカニズムに着目し、周回行動の観点から一般化することを行った。当該分析によって、従来では困難だった産業連関による複数都市活動分布の相互依存構造の解析が可能となった。仮想都市における数値例を図3に示す。これをみると、(a)で示した業種1の集積によって、(b)で示した業種2も集積が起きていることが確認できよう。これは、周遊による業種1→業種2への移動、言い換えると産業連関構造が発生しているからに他ならない。当該モデルは、さらに解析することによって、国土レベルでの産業分布の解析や、輸送機関の影響分析などへの展開が期待できるものと考えられる。

#### ③ 経路選択を考慮した情報ネットワークにおけるマルチパス・ルーティング技術の構築

連鎖的流動の新たなる適用先として、情報ネットワークへのルーティング制御への展開も試みた。具体的には、経路の明示的な考



(a) 業種1 ( $\alpha = 1.1$ )



(b) 業種2 ( $\alpha = 0.9$ )

図3：複数都市活動分布の相互連関

慮が必要となるマルチパス・ルーティングの新たなる制御技術を提案した。この際「研究項目(2)」で判明した非集計行動モデルとマルコフモデルの等価性に着目することによって、各ルータ(ノード)が自立的に動作しつつ、全体での秩序を保証し得る制御方式を提案することに成功した。図4に仮想ネットワークにおいて、提案方式と既存方式を平均遅延時間の観点から比較した結果を示す。

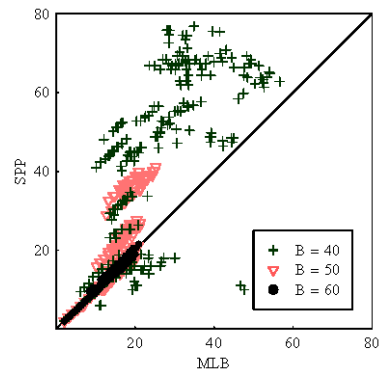


図4：提案方式と既存方式の比較

#### ・研究全体の成果

本研究の特色は、社会システム内の様々な流動を推定するにあたり、連鎖的な空間相互作用を明示的に考慮した点にある。これまで連鎖的流動が直接的に分析されることが少なかった理由の一つに、対象となる移動行動の候補が膨大となり計算が困難であることが挙げられる。したがって本研究によって、これら連鎖的移動の候補全てを考慮しつつ、かつ効率的に分布交通量を推定する枠組み

が整備された結果、トリップチェーン行動を前提とした分析全般に対して貢献できるものとする。さらには、関連モデルとの包括的な議論を行うことによって、連鎖的流動に関する理解が進み、結果として、施設配置問題や情報ネットワークなど種々の流動を想定した数多くのトピックへと応用できる可能性についても示した。その意味において、本研究の成果は、連鎖的流動に関する社会システム全般に対する貢献も視野に入れたものであると考える。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① Honma, Y. and Kurita, O. (2009) : The Dynamics of Urban Activity Distribution with Respect to the Advance of High-Speed Transit Systems, FORMA, Vol.23, pp.51-58. (査読-有)
- ② 本間裕大, ``周回行動を考慮した競争的施設の最適立地問題—周遊がもたらす集積効果の分析—'', 都市計画論文集, 44, pp.763-768, 2009年11月. (査読-有)
- ③ Honma, Y., Aida, M., et al., ``A New Multi-path Routing Methodology Based on Logit Type Assignment'', In Proceedings of the 2nd International Workshop on the Network of the Future (FutureNet II), pp. 21-26, Honolulu, HI, December 4, 2009. (査読-有)
- ④ 栗田 治, 本間裕大, ``高速輸送機関が都市活動施設の集積に与える影響—バランス・メカニズムの日本列島への適用—'', 「世界のインフラストラクチャー」2007年度報告, 「世界のインフラストラクチャー」研究部会社団法人日本オペレーションズ・リサーチ学会, pp. 119-130, 2008. (査読-無)
- ⑤ 本間裕大, 会田雅樹, 下西英之, 岩田淳, ``非集計ロジットモデルを用いたマルチパスルーティング制御技術の提案'', 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 信学技報 NS2009, vol.109, no. 273, pp. 11-16, 2009. (査読-無)

[学会発表] (計6件)

- ① Honma, Y. : A Facility Location Problem with Respect to Trip Chaining Behaviors, 22nd EURO Working Group on Locational Analysis, Elche, Spain, September 19, 2008.
- ② Honma, Y. and Kurita, O. : Markov Property of Discrete Choice Model for Trip Chaining

Behavior, INFORMS Annual Meeting 2008, Washington D.C., USA, October 15, 2008.

- ③ Honma, Y., Aida, M., et al., ``A new multi-path routing methodology based on logit type assignment'', The 2nd International Workshop on the Network of the Future (FutureNet II), Honolulu, USA, December 4, 2009.
- ④ 本間 裕大, ``周回行動を考慮した競争的施設の最適立地問題—周遊がもたらす集積効果の分析—'', 都市計画学会, 第44回学術研究論文発表会, 長岡技術科学大学, 2009年11月15日.
- ⑤ 本間 裕大, 会田 雅樹, 下西 英之, 岩田淳, ``非集計ロジットモデルを用いたマルチパスルーティング制御技術の提案'', 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会, NS2009-105, 金沢工業大学, 2009年11月12日.
- ⑥ 本間裕大, ``高速輸送機関が都市活動施設の集積に与える影響—日本列島におけるバランス・メカニズム—'', 南山大学数理情報研究科・数理情報研究センターオープン・リサーチ・センター「都市の持続可能な繁栄のためのインフラストラクチャーの最適運用計画の策定と普及」2009年度第2回公開研究会 『リニア新幹線のもたらす効果』, 南山大学, 2009年7月18日. (招待講演)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

本間 裕大 (HONMA YUDAI)

首都大学東京・大学院システムデザイン研究科・助教

研究者番号 : 40514055