

ネットワーク分析とプローブパーソンデータを用いた 都市における歩行空間分析 -横浜中心部を対象として-

斉藤いつみ¹・福山祥代²・羽藤英二³

¹学生員 東京大学大学院（東京都文京区本郷七丁目三番地一号，E-mail:saito@bin.t.u-tokyo.ac.jp）

²非会員 東京大学大学院（東京都文京区本郷七丁目三番地一号，Email:fukuyama@bin.t.u-tokyo.ac.jp）

³正会員 工博 東京大学大学院（東京都文京区本郷七丁目三番地一号，Email:hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp）

本研究では、ネットワーク分析による都市空間のポテンシャル分析とプローブパーソン調査によって得られた実行動データを用いた中心性の分析を行った。ネットワーク分析における空間ポテンシャルの指標としては媒介中心性指標を用い、実行動データでは実際の通過ノードの総和を求めることによって両者の関係を考察した。その結果、ネットワーク上の媒介中心性と実際の中心性には差があり、実際の移動経路は空間特性に大きく影響されることがわかった。

キーワード:媒介中心性, ネットワーク分析, プローブパーソンデータ, 行動分析

1. はじめに

近年の人口、経済、エネルギーの問題転移は、今まで定期的に行われてきた都市空間の機能更新に変化を迫りつつある。特に電気自動車や自転車を用いたモビリティシェアリングや、健康医療福祉を考慮したネットワーク整備、急増するインバウンドへの対処としての歩行環境整備では、街路空間に新たな機能が必要になってきている。従前の自動車交通中心の街路空間構成に対して街路空間の再配分のニーズは高まっており、総体としての交通ネットワークに対する理解の仕方を大きく転換していくことが求められている。

これに対して今までの交通ネットワークのプランニングやデザインでは、渋滞損失のような交通量と所要時間を指標とした自動車中心の交通量配分の評価手法が下敷きとなる。しかし先に述べたような街路空間再配分やネットワーク整備では、様々なコンテキストを重層的かつ定量的に整理していくことが求められている。PT データを用いて行われる交通量配分のような方法では、扱ってきたネットワークが広域であり自動車のネットワーク分析には適しているものの、人間の微視的な行動に着眼したメゾ・ミクロスケールのネットワーク評価が難しい。歩行者や自転車の移動では、所要時間だけではなく、より直接的に空間設計が影響を及ぼすし、そもそもその行動圏域やネットワークのスケールについて十分な知見があるとはいえない。歩行や自転車といった遅い交通に対する人間の行動理解とそれを下敷きにした行動モデル、これらを用いたネットワークの総合理解が必要とされて

いるといえよう。

そこで本研究では、現実の街路ネットワークデータを用いて既存の空間の行動ポテンシャルの指標化と、プローブパーソンデータ（以下 PP データ）を用いて現実の空間行動分析を行うことで、新たなネットワーク行動学的な分析手法の提案とその評価を試みる。

2. 既往の研究

(1) ネットワーク解析に関する研究

街路網をネットワークと捉えて都市解析を行う手法の主なものとして、スペースシンタックス、グラフ理論に基づくネットワーク分析が挙げられる。

スペースシンタックスは、空間の位相関係に着目して都市空間の解析を行う手法である。オープンスペースをコンベックスペースとアクシャルラインという2つの要素に分割してその関係をグラフ化することで都市形態の解析を行う。この手法の特徴としては、空間の幾何位相的な近接性に着目していることがあげられ、解析対象のノードから他のすべてのノードまでの距離（経由するリンクの数）を基に評価指標が構築され、オープンスペースの空間解析に利用されることが多い。一方、街路の実際の長さが解析上考慮されないこと、経路選択が評価できないことが課題として指摘されている。ネットワーク分析は、対象とするものの構成要素相互の関係に着目して構造を分析する手法である。解析には主にグラフ理論が用いられ、ネットワーク内の関係に着目してノードの重要性を評価する様々な指標が提案されている。

(2) ネットワーク上の行動解析に関する研究

ネットワーク上の行動解析に関する研究としては、経路選択モデルがある。経路選択モデルは、人の詳細な移動経路を取得することで、選択肢集合を生成しモデルを構築することでどのような要因が人の経路選択に影響を与えているかを確率的に記述する手法である。自動車の経路選択の理論的なモデルについては古くから蓄積があるものの、現実の行動についてはPTデータなどでも入手不可能であることから研究が難しい。また歩行者や自転車の行動解析では、行動に影響を与える空間的要因が複雑であるなどの問題も存在する。

3. 研究のフレーム

本研究では、ネットワーク解析による空間ポテンシャルの分析とPPデータによる実際のネットワーク上における行動分析を行う。実際の両者を比較することで、ネットワーク構造上の空間ポテンシャルと実際の行動に基づいた空間特性の比較を行うことができ、それらの一体的な分析を行うことで、今後の空間設計において一定の知見が得られるものと考えられる。

本研究では、ネットワーク解析による空間ポテンシャルの分析に際して媒介中心性指標を用いる。媒介中心性とは、ネットワークにおいてある頂点が他の頂点間の最短経路上に位置する程度を表わす指標であり、グラフに含まれる頂点*i*の媒介中心性は式(1)のように定式化される。

$$G_b = \sum_{i \neq j \neq k} \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}}, j < k \quad (1)$$

ここで、 g_{jk} は頂点*j*と頂点*k*の最短経路数であり、

$g_{jk}(i)$ は頂点*j*と頂点*k*の間の最短経路のうち頂点*i*を通るものの数である。媒介中心性の高い頂点は頂点間の移動において中継地点になる可能性が高いという意味で、空間的にポテンシャルが高いと考えることができる。今回は横浜中心部における街路ネットワークを分析の対象とした。さまざまな交通モードを考慮した媒介中心性を考える際には交通結節点や交通のネットワークを加味した中心性を考えることも必要になるが、今回は移動の自由度が高い徒歩トリップのみに着目して、空間ポテンシャルと実際の行動の関係性についての基礎的な分析を行うこととした。

4. データの概要

本研究で用いたデータは、2008年、2009年、2010年に

表1 PPデータ概要

期間	対象者数	トリップ数	ロケーションデータ数
2008/11/08 ~2008/12/24	100名	13808件	2920484件
2009/10/29 ~2009/11/27	50名	2504件	601814件
2010/07/05 ~2010/08/11	40名	3617件	789074件



図1 横浜中心部ネットワークデータ

行ったプローブパーソン調査のデータと、デジタル道路地図をもとにして作成した横浜中心部におけるネットワークデータ(図-1)である。プローブパーソン調査では、移動体通信端末としてGPS携帯電話を用いたトラッキング調査と、個人用のWebページとしてWebダイアリーを使ったダイアリー調査による交通行動調査を行った。表-1に概要を示す。今回は上記のトリップの中から横浜中心部における徒歩移動のみを抽出し、データクリーニングを行った。ネットワークデータのノード数は440、リンク数は1511である。

5. 空間ポテンシャルと実際の空間行動の関係性

(1) ネットワーク上における媒介中心性

3で定義した媒介中心性を今回のネットワークのそれぞれのノードについて計算した結果を図-2に示す。国道16号線沿いと関内に媒介中心性の高い通りが存在することがわかる。みなとみらいは街路ネットワークが疎であり、媒介中心性はあまり高くない結果となっている。

また、図-4(左)には各ノードの媒介中心性指標の頻度分布を示した。横浜中心部ネットワークにおける各ノードの媒介中心性の分布は0~0.2に分布している。その中で、最大値の1/10程度の大きさを持つ(0~0.02に含まれる)ノードが全体の約50%と半数近くを占めており、媒介中心性が大きくなるにつれて指数関数的に出現頻度が減少していることがわかる。

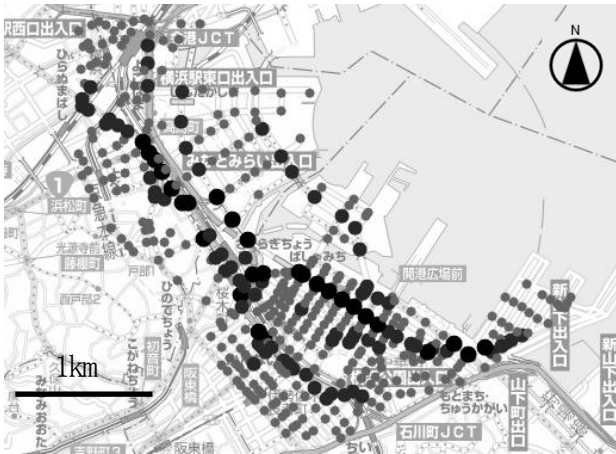


図-2 横浜中心部における空間ポテンシャル (媒介中心性)

● $B_i > 0.1$ ● $0.05 < B_i < 0.1$ ● $B_i < 0.05$

B_i : 各ノードの媒介中心性の大きさ

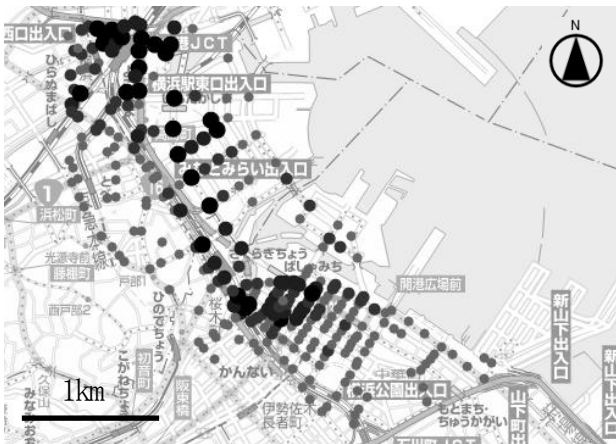


図-3 PPデータ (徒歩トリップ) における中心性

● $C_i > 0.15$ ● $0.1 < C_i < 0.15$ ● $0.05 < C_i < 0.1$ ● $C_i < 0.05$

C_i : 各ノードの中心性の大きさ

(2) 実行動における中心性

次に、PPデータを用いて実際の行動分析を行う。ここでは、実際の移動データから各ノードの総通過回数を計算し、それを全てのODペア数で割って基準化した値を中心性と定義する。PPデータから経路データへの変換には、従来から存在するマップマッチングアルゴリズムを用いた。

図-3に徒歩トリップについて中心性を計算した結果を示す。横浜駅、桜木町周辺で中心性が高いエリアが広がっていることが分かる。また、みなとみらいにおいても中心性の高いノードが存在する。いずれも駅の近くで中心性が高い結果となっており、徒歩移動は他の交通機関と組み合わせて利用されることが多いことから、実際の中心性においては交通結節点などの影響が大きいことがうかがえる。一方で、関内エリアは媒介中心性が低いエリアの広がりもみられ、このエリアの移動においては比

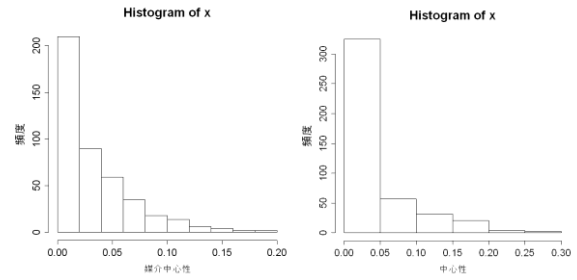


図-4 各ノード中心性指標頻度分布

左: ネットワークデータから算出 (媒介中心性)

右: PPデータから算出

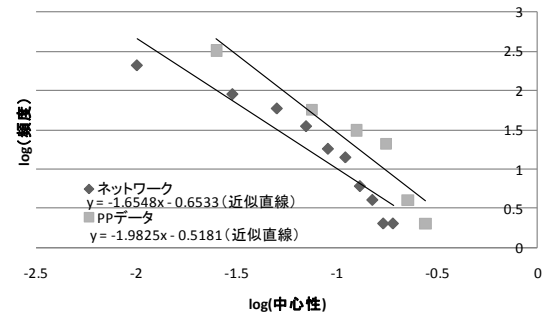


図-5 中心性指標と出現頻度の両対数グラフ

比較的多くの経路が選択されていることが考えられる。図-4 (右) には、PPデータから求めた中心性の頻度分布を示している。PPデータによる中心性は0~0.3の間で分布しており、ネットワークデータと同様に中心性が高くなるにつれて指数関数的に出現頻度が減少していることがわかる。図-5には頻度と中心性それぞれの対数をとったグラフを示した。どちらも分布としては近い値を示しているが、実際に中心性が高くなっているノードには違いがみられる。また両者の近似直線の傾きを比較すると、PPデータの方が傾きが大きく中心性の分布に偏りがみられる結果となった。

以上より、街路ネットワーク上で媒介中心性が高いノードと実際の移動空間における中心性の高いノード (利用頻度の高いノード) には差があることが明らかになった。このようなことが生じる原因の一つは、(1)において全てのODペアを同等に扱っているという点があげられる。実際には施設配置や交通ネットワークの配置などの特性により各OD間の移動量には大きな差があると考えられ、それらを考慮して重みづけした媒介中心性を算出することでより実際の移動空間に即した空間ポテンシャルを評価することができると考えられる。

二つ目に、街路の特性が経路選択に影響していることが考えられる。(1)で求めた中心性は、全てのリンクの距離を等しく考慮した場合の最短経路を求めているが、実際の経路選択の際には街路の幅員や歩きやすさ、快適

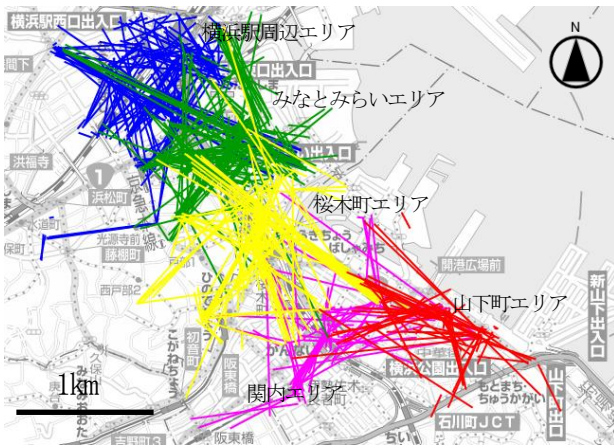


図-6 徒歩トリップの移動特性（クラスター分析）

表-2 各クラスターの構成割合

クラスター	1	2	3	4	5
構成割合 (%)	27.6	13.2	27.1	20.2	11.9

性、自動車交通量などにより物理的な距離に主観的な重み付けがされていることが考えられる。例えば、同じ距離でも歩行者専用道路と自動車交通量の多い街路であれば、前者の方が歩行者から選ばれやすいことが考えられる。つまり、現実の移動に際しては実際の距離以外に何らかの効用を加味して経路選択を行っているといえる。そして場所によってもそういった傾向は異なることが予想される。これらを踏まえ、実際のODペアの組み合わせやそれぞれのトリップの移動特性（行動圏域や移動経路）について細かく分析を行う。

(3) 移動特性分析

ここでは、実際の行動データについて横浜中心部における歩行トリップの行動圏域や移動経路を具体的に分析することで、(1),(2)でみられたような中心性の差がどのように生じるのかを明らかにする。

(a) 行動圏域の同定

まず、トリップごとの移動特性を把握するために対象トリップの出発地座標、到着地座標をトリップ属性として与え、クラスター分析を行った。すると、対象トリップは以下のように5つのベクトル群に分類することができた。以上の分類をまとめると以下ようになる。

- クラスター1：横浜駅を中心とする移動
- クラスター2：みなとみらいを中心とする移動
- クラスター3：桜木町を中心とする移動
- クラスター4：関内を中心とする東西方向の移動
- クラスター5：山下町を中心とする南北方向の移動

また、それぞれのトリップの内訳は以下の表-2ようになっており、横浜駅、桜木町駅を中心とする移動が多いことが分かる。(1)では全てのODを同等に扱ったが、この結果から対象エリア内における歩行移動には大きく5つ

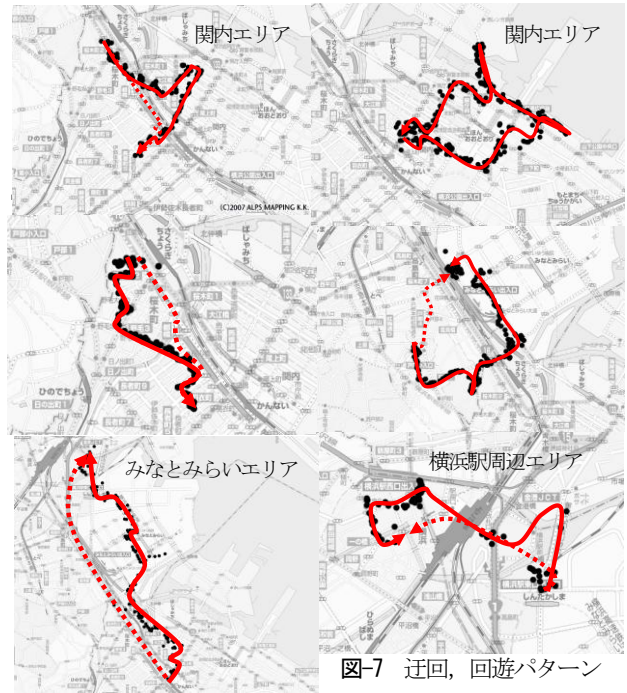


図-7 迂回、回遊パターン

まとまりがあり、それぞれの内訳も表-2のように偏りが生じていることが明らかになった。また、いずれの移動に関しても、おおむねクラスターの重心から1~2km圏内に含まれている。実際の空間のポテンシャルを算出する際には、対象エリア内をさらに細かく区切ったり、各エリアごとのトリップの構成割合で重みづけを行うなどが適当と考えられる。

(b) 移動経路分析

次に、各トリップの選択経路の分析を行う。いずれのエリアにおいても、トリップ距離が短い場合は最短経路が利用されていることが多かったが、トリップ距離が長い場合には迂回や回遊行動がみられた。図-7に観測された迂回パターンと回遊パターンを示す。横浜は海沿いの街路や公園も整備されているため、海沿いの道を迂回するような行動もみられる。またみなとみらい内の移動では、歩行者専用道路を移動する動きも多くみられた。このように、実際の移動では移動文脈によって多様な経路パターンがみられ、選択される経路はその空間特性の影響を大きく受けていることがわかる。特に、回遊行動などを考える際には移動そのものが目的になっていると考えられ、経路選択には距離よりも空間特性が大きく影響していると考えられる。

6. まとめ

本研究では、横浜中心部におけるネットワーク分析とPPデータによる行動分析を行うことで、空間のポテンシャルを指標化することを試みた。その結果、桜木町からみなとみらいへ通じる道はネットワーク、実行動

ータによる中心性がいずれも高い結果となった。一方で、それぞれのエリア内におけるノードの中心性の高さには大きな差が生じた。これは、ネットワーク分析では全てのODを均等に扱っているが、実際の移動では行動圏域やその起点となる交通施設などに重みがあることや、施設配置の影響があると考えられる。距離の短い移動では最短経路を通るような移動も多くみられる一方で、移動自体が目的のトリップや大きく迂回する移動も観測された。このことから、媒介中心性の高いエリアは潜在的なポテンシャルはあるものの、空間的に質が高いことが実際の中心性の高さにつながるということが考えられる。

例えば国道16号線沿いの道はネットワーク的にはポテンシャルが高いものの、実行動データによる中心性はあまり高くない。実際の行動圏域からも、横浜周辺とみなとみらい、みなとみらいと桜木町などの移動は見られるが、桜木町と横浜駅周辺の移動はほとんどみられない。この動線には現在使用されていない東横跡地も存在し、これが新たに歩行者の空間となれば、人の動きは大きく変化することが予想される。

今後の課題としては、歩行者や自転車の移動経路をより正確に推定すること、移動中のたたずみや行ったり来たりといった行動が生じるポイントについても分析を行うこと、経路選択モデルを構築しより定量的に移動に与える影響を分析することなどがあげられる。

7. 参考文献

- 1) 福山祥代, 羽藤英二, 欧州諸都市の歴史的発展過程を考慮した広場-街路空間のネットワーク分析
- 2) 中西雅一, 森貴洋, 羽藤英二, プローブパーソンデータを用いた行動空間を限定した経路選択モデル, 土木学会年次学術講演会後援概要集, 2007, 9月