

ネットワークの閉路特性に着目した 駅周辺街路の回遊性分析

永杉 博正¹・羽藤 英二²

¹正会員 東日本旅客鉄道株式会社 事業創造本部 (〒151-8578 東京都渋谷区代々木二丁目2-2)
E-mail:nagasugi@jreast.co.jp

²正会員 東京大学大学院 教授 工学系研究科社会基盤専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)
E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp

歩行者の回遊性向上は、都市や地域の身近な課題の一つである。しかし、それを定量的に評価する手法は定着していない。鉄道の駅は、回遊行動のスタートする、代表的な起点であり、また戻ってくる終点にもなる。この行動特性を、ネットワークにおける閉路と捉え、街路のもつ回遊ポテンシャルを定量的に評価することを目指す。本研究では、中央線の複数駅を対象に、駅周辺の街路ネットワークの構造を分析した。回遊を意図して設計された施設と比較し、媒介中心性を用いて、その特性を明らかにした。そして、駅を起点・終点とする、回遊のルート数を算出し、回遊性の定量評価指標として提案した。

Key Words : *rambling activity, network analysis, closed walk, betweenness centrality*

1. 研究の背景と目的

都市や地域の魅力向上に関する身近な課題の一つとして、歩行者の回遊性の向上が挙げられる。しかし、回遊性向上は、言葉では頻繁に用いられるものの、それを定量的に評価する手法は定着していない。回遊性の観点から歩行者ネットワークを考えるにあたり、鉄道の駅という場所は、多くの人が利用する代表的なエントリー地点であり、戻ってくる地点でもある。それを所与とした街路のネットワークデザインのあり方を検討することは、効果的な社会資本整備の方法の一つといえよう。駅周辺の街路整備に伴い、人の行動は、その街路の構造に規定され、経路を選択する。人の行動が蓄積し、一定の歩行者流動が生じる。そして、街路沿いの土地利用が行われ、定着していく。その結果、駅周辺には一定規模の市街が形成されている(図-1)。本研究では、駅周辺の街路をネットワーク構造として分析し、その特性を明らかにする。そして、駅を起点・終点とする回遊行動の特性に着目し、回遊性の定量評価指標を提案する。分析対象は、複数の駅周辺街路に加えて、人の回遊を意図して設計された施設(以下、「回遊施設」という)と比較することで、駅周辺街路の持つ特性を浮き彫りにしていく。そして、定量評価指標を用い、今後の駅周辺の街路整備計画が、効果的に回遊性向上につながることを目指す。

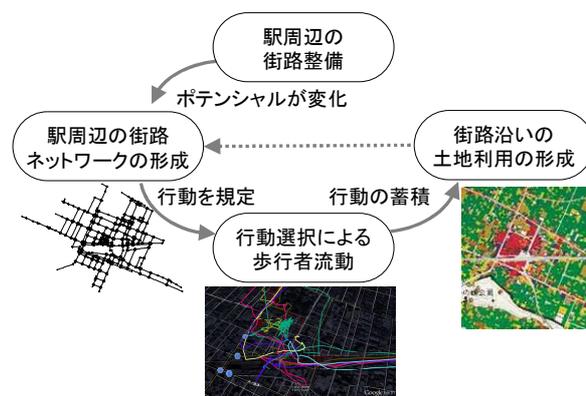


図-1 街路ネットワークの構成概念

2. 既往研究と本研究の位置づけ

街路ネットワークに関する既往研究としては、Space Syntaxによる解析(以下、「SS理論」という)が数多くなされている。SS理論は、ロンドン大学のHillierら¹⁾が提唱した空間解析手法であり、空間の可視不可視に基づく位相幾何学的分析である。建物、街路、景観など様々な分野に適用され、街路に関するものとしては、木内ら²⁾による東京の街路の変遷に関する研究や、高野ら³⁾によるSS理論と形態的指標を用いた地区特性を分析した研究がある。また西村ら⁴⁾や溝上ら⁵⁾は、SS理論とGISを用

いたフレームワークを提案している。SS理論は距離が位相数に置換えられており、回遊性分析に際しては、歩行経路の長さ、周遊性といった点が考慮できないことが課題として挙げられる。SS理論以外の既往研究として、グラフ理論に基づく媒介中心性指標を用いた福山ら⁶⁾による研究がある。欧州都市の街路や広場の歴史的変遷について、歩行者の距離や、行動圏域を考慮したネットワーク分析によりその特性を明らかにしている。駅周辺街路に着目した研究については、福山ら⁷⁾による渋谷駅周辺の行動データによる歩行者特性を考慮したネットワーク分析がある。行動データを用いることで、より精緻な分析が可能となる一方で、大量のデータ収集を伴い、様々な駅を横断した比較分析は困難となる。

以上、既往研究では、回遊性の観点から、複数の駅周辺街路を比較分析した研究はなされていない。本研究では、鉄道駅周辺のネットワーク構造が持つ固有の特性を横断的に明らかにすることを目標とし、グラフ理論に基づくネットワーク解析を行う。データの比較的入手しやすい街路ネットワークを用いることで、多様な種類の駅周辺を同一手法で分析しその特性を明らかにする。第二に駅を起点とした境界を周遊する行動を想定した回遊性分析として、これまで定量的に分析されていないルート数を取上げる。回遊行動の始点と終点と同じであるという特性に着目し、ルート数という直観的に把握しやすい指標を用いることで、今後の整備計画に適用しやすい、新たな評価手法として提案する。

3. 分析データ

本研究では、街路ネットワークをグラフとして扱う。歩行者が通行可能な通路をリンク（辺）、交差点をノード（頂点）と定義する（図-2）。ノード間のリンクを「隣接行列」で記述し、回遊の対象となる街路範囲を特定した「有限グラフ」とする。歩行者を対象とした場合、一方通行のような制約は考えられないことから、辺の向きを考慮しない「無向グラフ」とみなしている。リンクの緯度経度をGISにより取得し、緯度経度から各リンクの距離を算出する。リンク距離は、隣接行列の重みと

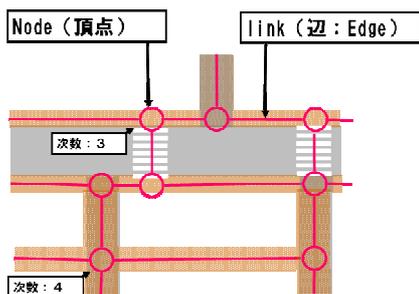


図-2 ノードとリンク

して与えることにより考慮可能となる。なおペデデッキなどと地上部を結ぶ、階段などの垂直移動については、等価時間係数などを参照し、便宜的に水平移動の2倍の距離にて、重みづけを行うこととする。なお、データ処理の複雑さを回避するため、階段、エスカレータ等の区別は行わない。本研究で用いる「閉路」とは、出発点と終点と同じであり、同じノードを2回以上通らない路のことを指し、グラフ理論や位相幾何学において用いられている。とくにすべてのノードを1回通る閉路を「ハミルトン閉路」という（図-3）。駅を起点とする回遊行動は、駅から駅に戻る閉路と捉えることができる。

分析対象を図-4に示す。首都圏を代表する鉄道路線であるJR中央線から、地上駅、高架駅などのバランスを考慮し9駅を対象とした。また、駅周辺の特性をより明らかにするため、“駅が中心でない”市街地を形成している代表例として、「原宿・表参道周辺」を追加した。一方、回遊施設として、最近の代表的なショッピングセンターから、クローズド・モールとオープン・モールを各1個所、テーマパークの代表として「東京ディズニーランド」、回遊式庭園の代表として「浜離宮恩賜庭園」の計14か所のネットワーク解析を行うこととする。

回遊対象となるネットワーク構造を抽出するにあたり、駅周辺の市街地として形成されている範囲を、実際の土地利用の状況から客観的に抽出する必要がある。

「H18東京都土地利用現況調査」において、商業用途(事務所建築物を除く)がおおむね50%以上の街路を対象街路とした（図-5）。なお、50%未満の街路のうち、自由通路、ペデデッキ、横断歩道など、対象街路どうしを結ぶ機能を有する通路も対象としている。

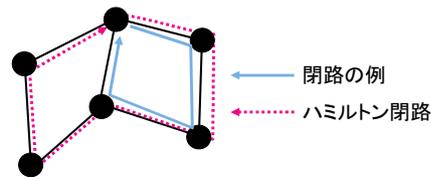


図-3 閉路とハミルトン閉路

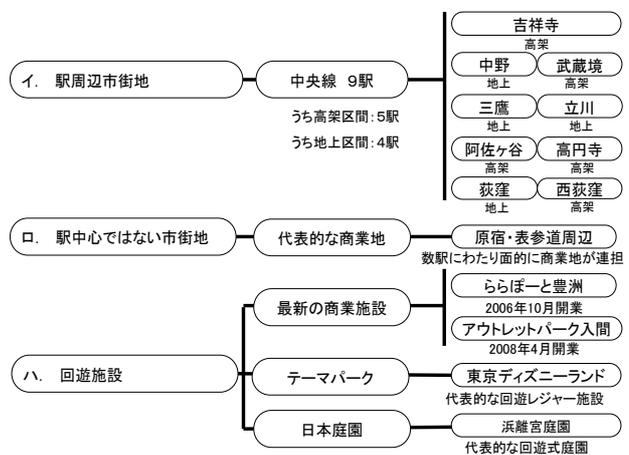


図-4 分析対象

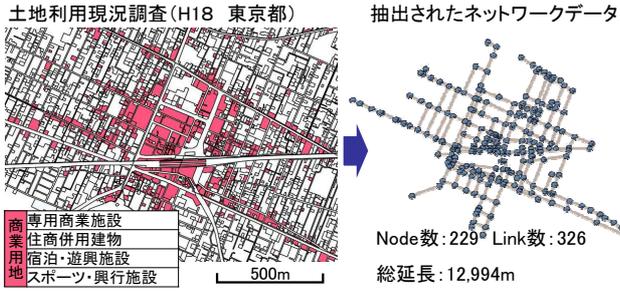


図-5 ネットワークデータの抽出 (吉祥寺の例)

4. ネットワーク中心性分析

(1) 媒介中心性

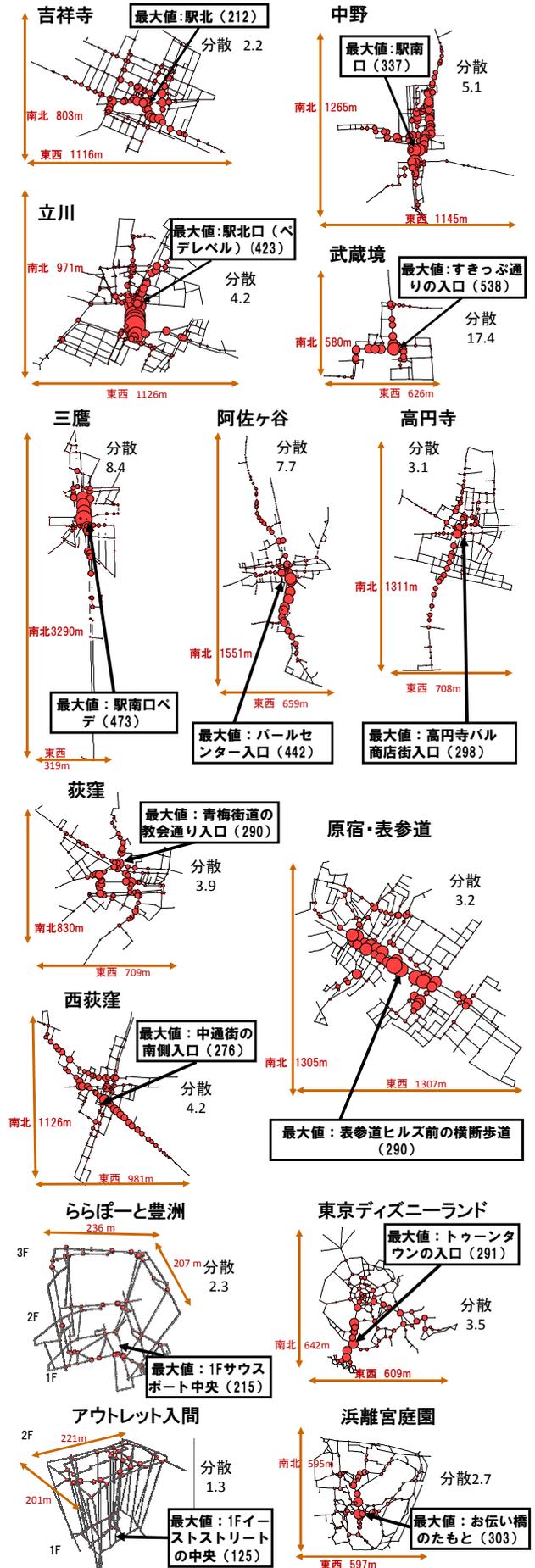
ネットワークの中心性指標としては、次数中心性、離心中心性、近接中心性、情報中心性、媒介中心性などがある。歩行者の行動特性として、2地点間の移動では最短経路を選択するという、規範的な特性に着目し、ネットワーク内の任意の2点を結ぶ最短経路上に位置する度合いを示す指標である、媒介中心性を用いて評価する。媒介中心性は、Freeman⁹⁾によって提案され、以下の式で算出される。

$$C_b(i) = \sum_{i \neq j \neq k} \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}} \quad (4.1)$$

ここで、 $C_b(i)$ は頂点*i*の媒介中心性、 $g_{jk}(i)$ は頂点*i*から頂点*j*から頂点*k*への最短経路数、 g_{jk} は頂点*j*から頂点*k*への最短経路数のうち頂点*i*を通るものの数を示す。

(2) 中心性分析の結果

分析結果を図-6に示す。各ノードの媒介中心性の高さを円の大きさに表しており、円が大きい場所は、回遊行動が集中しポテンシャルが高い場所といえる。媒介中心性の最大値のノードを吹き出して示しているが、殆どの駅において駅前が高くなった。ただし「原宿・表参道」においては、表参道に沿って線形に高い場所が分布しており、表参道ヒルズの前の横断歩道が最も高い場所となった。商業施設の場合はエスカレータなどの縦動線のある部分が比較的高く、東京ディズニーランドはパレードルートの媒介中心性が高くなった。浜離宮庭園は二つの潮入りの池の交点で、八の字の回遊路の交点部分が最も高い媒介中心性となった。いずれも駅周辺とは異なり、駅前のような極端に高い場所は少なく、比較的に均衡している。媒介中心性のバラつき度合を、分散でとらえることとし、横軸に媒介中心性の最大値、縦軸に媒介中心性の分散をプロットしたものが図-7である。この散布図左下は、面的にポテンシャルが分散し、右上は一極集中が強いといえる。左下の方が回遊しやすい構造といえる。



図中の数値は媒介中心性(単位: $\times 10^3$)
図-6 中心性分析の結果

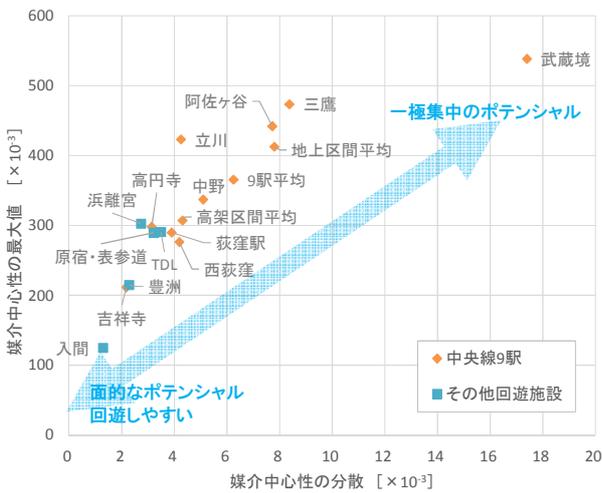


図-7 媒介中心性の分散と最大値

回遊施設の分散値はすべて 4.0×10^3 以下となり、原宿・表参道、吉祥寺、高円寺は、回遊施設に近い特徴が見られた。また中央線9駅では、鉄道駅の類型でみると、地上区間より高架区間の平均の方が、面的にポテンシャルが均衡している。相対的に吉祥寺は商業施設と同レベルの均衡化が図られ、回遊しやすい構造と見て取れる。

5. 閉路特性からの回遊性分析

(1) 辺媒介に基づくコミュニティ分析

駅から駅に戻ってくる回遊ルートを分析するにあたり、街路の単位で分析すると、何万、何億通りもの周遊ルートがあり大変に膨大な数となる。また微妙に異なるルートの違いを評価することも困難である。よって街路ネットワークを、あるまとまりをもった境界に分節することができれば、その境界をめぐる閉路数として数量化した方が合理的である。今回、ネットワークの密度が高い場所を抽出するアルゴリズムである「辺媒介に基づくコミュニティ分析」を用いる。この手法はネットワークの相互関係が密実に築かれたまとまりを取り出す指標として GirvanとNewman⁹⁾により提唱された指標である。コミュニティ分析の手順を以下に示す。

$$Q = \sum_i (e_{ij} - a_i^2) = \text{Tr}(e) - \|e^2\| \quad (5.1)$$

Q : モジュラリティ値

e_{ij} : コミュニティ*i*に属する頂点とコミュニティ*j*に属する頂点の間に張られる辺の数が、グラフ全体の辺の数に閉める割合を示した対象行列

$a_i = \sum_j e_{ij}$: 行列*e*の行和

$\text{Tr}(e)$: 行列*e*の対角行列の和 (コミュニティ内部に張られた辺の比率)

$\|e^2\|$: 行列*e*を二乗した行列成分の和

媒介中心性の大きいリンク(Edge)から順にグラフを分割し、モジュラリティ値(分割されたコミュニティ内の辺の数と、コミュニティ間の辺の数の比)が最大になるまで分割を繰り返す。これにより街路ネットワークを一定の合理的にまとまったコミュニティの単位に縮約する。これをコミュニティ・ネットワークと呼ぶこととする。図-8に抽出手順を示す。2つのコミュニティ間を結ぶ街路がある場合、コミュニティどうしをコミュニティ・リンクで結ぶ。吉祥寺のコミュニティは図-9のようになった。これはおおよそ現実の境界の感覚と一致している。図-10は雑誌「hanako」の吉祥寺特集で紹介されていたエリアとの重ね合わせである。コミュニティは、おおよそ雑誌で紹介されているエリア内に収まっており、雑誌の紹介エリアより、やや細かく、さらに2~3つに分割されたエリアになった。

(2) コミュニティ・ネットワークの閉路カウント

規範的な回遊行動として、駅からスタートし、途中、同じコミュニティを重複して通らないで、駅に戻ってくるルートを想定し、これを閉路と捉え、何通りあるかを数える。図-10に吉祥寺のカウント結果を示す。図中のstartは閉路始終点を意味する。図中の折れ線グラフは、訪れたコミュニティ数ごとのルート数の度数分布を示している。グラフが右に行くほど、訪れたコミュニティの数が多く、深い回遊ルートである。吉祥寺のコミュニティ数は13だが、中道通り付近のコミュニティが、行止まりとなっており、いわゆる一筆書きが不可能であり、閉

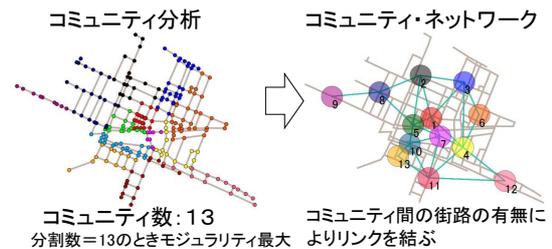


図-8 コミュニティ・ネットワークの抽出 (吉祥寺の例)

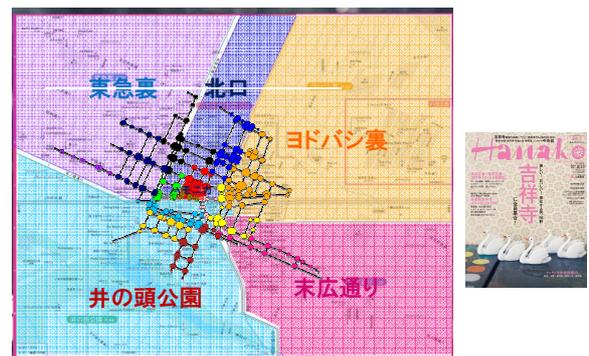


図-9 コミュニティと境界性 (出典: マガジンワールドHP)

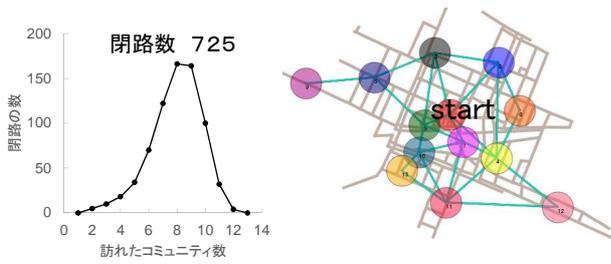


図-10 吉祥寺のカウント結果

路の最大位数は 12 になっている。スタート地点の違いによる閉路数を比較すると、駅北口のコミュニティを起終点とする閉路数が最も多い。これは駅北口に媒介中心性の最大の地点が属していることと一致している。

(3) カウント結果

分析結果を図-11に示す。浜離宮が1559通りと圧倒的に多く、次いで吉祥寺が725通り、高円寺が313通り、立川が258通りと続く。これら駅周辺の街の特徴を考察するために、各駅について、飲食ポータルサイトに掲載されている駅から500m以内の飲食店数とそのうちのカフェ喫茶の比率を示したのが図-12である。カフェ比率については、吉祥寺、高円寺の順に高く、閉路数の1位、2位の順位と一致している。カフェが回遊性の高い街に多く立地しているという感覚と一致しているといえる。

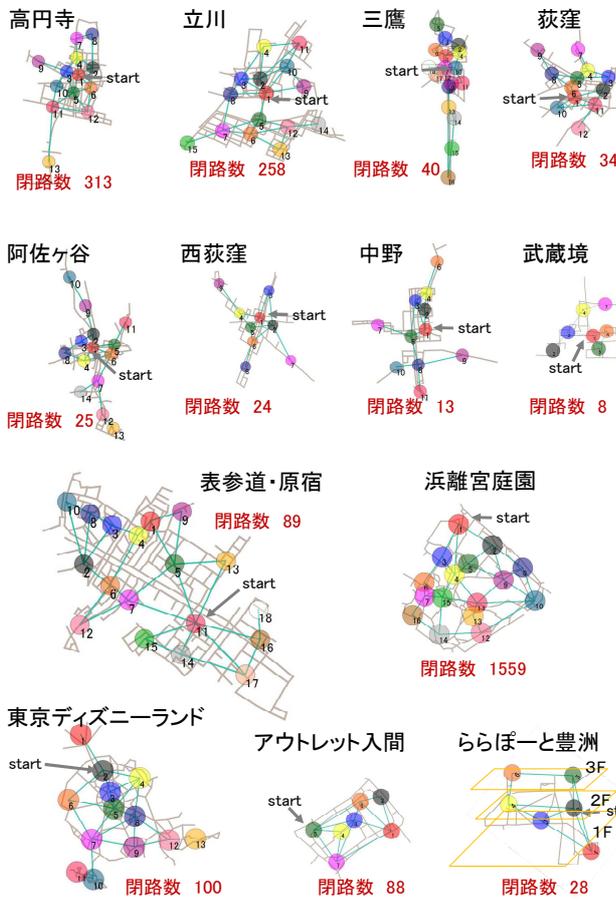


図-11 コミュニティ・ネットワークと閉路数カウント結果



(出典) 飲食店数及びカフェ数は、食べログの駅から500m以内の掲載件数より (H25.6末時点)

図-12 駅からの閉路数と駅周辺のカフェ比率

(4) 回遊性分析結果の考察

第4章で求めた媒介中心性の分散を横軸に、閉路数を縦軸にプロットしたものが図-13である。なお縦軸は対数目盛としている。閉路数を回遊性の深さとして捉え、上側が深い回遊性、下側が浅い回遊性と表現した。左側の回遊しやすいものでも回遊性の深さには幅があることが分かる。商業施設は、面的ポテンシャルが高く、回遊性が浅い。一極集中をさせて流動が少なくなる場所をできるだけ発生させないように設計する傾向が表れている。施設をまんべんなくシンプルに回遊させるゾーニングに起因している。言い換えれば、ハミルトン閉路のような回遊を意図しているといえる。一方、吉祥寺などの街の回遊は、多様な来街者に対し、多様な街の境界があり、多様なルートが存在し、来訪者ごとに異なるルートを構成可能である。街を訪れるたびに違うルート選択ができるといった、新たな発見があることも、街の回遊の楽しさの一つであるといえる。一方、回遊の分かりやすさをいかに構成する必要も指摘できる。

(5) ネットワーク構造からの考察

すべてのノードが相互に完全結合したグラフをクリークと呼び、そのうち3つのノードからなるクリーク構造は三角形となる(図-14)。地理空間上のネットワークは、空間的制約から、接続可能な次数に限界が生じ、接

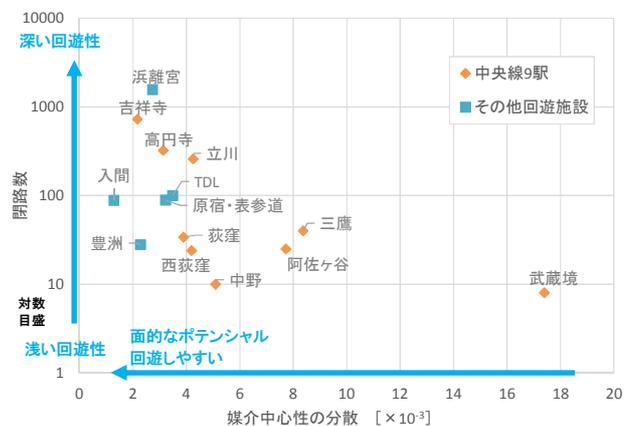
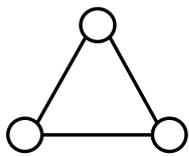
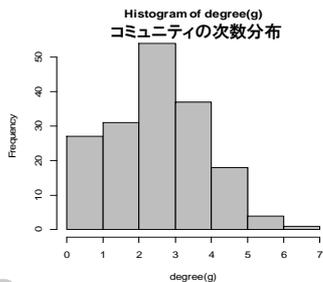


図-13 媒介中心性の分散と閉路数

クリーク構造



3つのノードが完全結合したとき、
三角形のクリーク構造となる



コミュニティの平均次数は3
最大次数は5が多い

図-14 クリーク構造とコミュニティの次数分布

続次数の平均は3で、駅などが属するコミュニティがエリアでの最大次数となり、その次数は殆どが5、最大でも7である（図-14の右側）。街路ネットワークは、他の社会ネットワークなどと異なり、最大次数に空間的制約を受けるため、発達できるクリーク構造にも限界が生じる。抽出したコミュニティ・ネットワークの構造を、一般無向グラフを描写するアルゴリズムであるkamada-kawai¹⁰⁾の力学モデルを用いて記述したものが、図-15である。なお線の太さは、閉路数が多いところを太く表した。閉路数の少ないものから並べているが、浜離宮、吉祥寺、高円寺などの閉路数の多いネットワークになるほど、三角形のクリーク構造が多く検出された。閉路数が100以上になると、徐々にある核を中心とした五角形の構造が浮かび上がってくる。五角形であるのは、最大次数に関係している。5つの三角形のクリーク構造が、あるコミュニティを中心にクラスターを形成し五角形を形成している。吉祥寺や高円寺のように2つの五角形が重複し、密実にコミュニティが連結されると、閉路数が格段に増える。一方、商業施設は閉路グラフになっており、シンプルな幾何学模様である。閉路数の少ない駅は、回遊には向かない放射型のツリー構造の部分が目立つ。回遊性向上のためには、ツリー構造からクリーク構造にネットワークを改変していくことが必要だと理解できる。

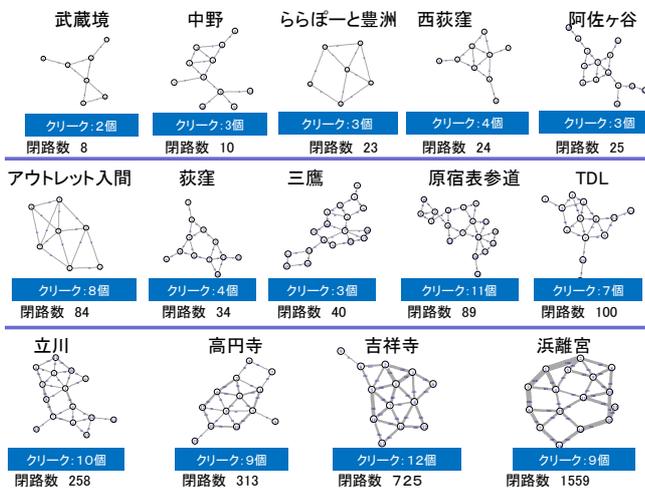


図-15 kamada-kawaiの力学モデルによる描写とクリーク構造

6. 結論と今後の課題

本研究では、中央線の駅周辺と回遊施設を比較し、回遊の閉路特性に着目した新たな回遊性分析手法を提案した。媒介中心性の均衡性、回遊ルート数を用い、回遊しやすさと深さにより、回遊性を定量的に評価した。本指標を用いることで、将来の駅周辺整備計画がどのように回遊性向上につながるか定量評価ができる。例えば、今回、吉祥寺駅の自由通路整備によりクランクが解消され、南北の動線が改善した。これを本指標で評価すると、回遊ルート数は変わらず、媒介中心性の分散値が約10%低下した。回遊の深さは変わらず、より均衡化が図られ、回遊しやすくなったと評価できる。

本研究は、2地点間の最短経路の選択ならびに回遊行動の閉路特性といった、歩行者の代表的な規範行動に限定しネットワーク解析を試みたが、実際の行動データを用い、これらの仮定の検証や、実際の行動圏域や、行動目的ごとの違いにより本モデルの有用性を高めていくことが課題といえる。閉路数は多ければ多いほど良いのではなく、実際の滞留時間・空間分布などをもとに人間の行動に適したサイズを検証していくことが求められる。

参考文献

- Hillier, B., Hanson, J.: *Social Logic of Space*, Cambridge University Press, 1984
- 木内 優美, 大口 敬, 高松 誠治: 東京の街路ネットワークの変遷に関する研究, 土木史研究 講演集 30, pp.179-185, 2010
- 高野 裕作, 佐々木 葉: 街路パターンの位相幾何学および形態的指標による地区特性分析に関する基礎的研究, 都市計画論文集 No.46-3, pp.661-666, 2011
- 西村 卓也, 高松 誠治, 大口 敬: GISを活用した東京の街路構造変遷に関する研究, 土木学会論文集 D3, Vol.68, No.5, pp.407-416, 2012
- 溝上 章志, 高松 誠治, 吉住 弥華, 星野 裕司: 中心市街地の空間構成と歩行者回遊行動の分析フレームワーク, 土木学会論文集 D3, Vol.68, No.5, pp.363-374, 2012
- 福山 祥代, 羽藤 英二: バルセロナの歴史的発展過程と歩行者の行動圏域を考慮した広場-街路のネットワーク分析, 土木学会論文集 D1, Vol.68, pp.13-25, 2012.
- 福山 祥代, 羽藤 英二: 行動データに基づく歩行者行動特性を考慮した街路ネットワーク分析-渋谷駅歩行圏を対象として, 都市計画論文集, No47-1, pp.62-67, 2012
- Freeman, Linton C.: A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, volume40, number1, pp.35-41, 1977
- M. Girvan and M. E. J. Newman: Community structure in social and biological networks, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 99, pp.7821-7826, 2002
- Kamada, T. and S. Kawai.: An Algorithm for Drawing General Undirected Graphs, *Information Processing Letters* 31, 7-15, 1989