

研究成果報告書

早稲田大学理工学術院創造理工学部経営システム工学科／

創造理工学研究科経営デザイン専攻

准教授 鬼頭 朋見

研究課題：

マルチモーダル・交通ネットワークの構造的特徴に関するネットワーク解析と
地域課題への影響の追究

1. 概要

鉄道網や道路網といった交通ネットワークは、私達の生活を支える社会基盤の一つである。交通ネットワークの構造を理解し、より良い設計を実現することは、単なる日常生活の利便性向上だけでなく、コンパクトシティのように都市全体を効率的で持続可能性の高いものにしたがり、災害など非常時に必要な物資・施設へ確実にアクセス可能にするためにも、非常に重要である。しかし交通ネットワークは、誰かが全体を俯瞰しトップダウン的に全体を同時に設計することは出来ない難しさがある。地理的条件や予算その他の制約もある上、人々の利用（どこに住みどこに移動し、どこにどのような需要生まれ...）も常に変化する。そのため、特に既にある程度発達した都市においては、交通網の開発・改善はともすれば対症的であり、局所的最適化の繋ぎ合わせの結果、全体最適化からかけ離れてしまっているケースも多々見受けられる。全体最適化に近づくことを見据え、交通網の利便性を定量的に評価する指標を確立することは非常に重要である。

そのためのアクセシビリティ指標は複数提案されているが、既存の指標は単一の交通モードのみに着目したものが多く、マルチモダリティを考慮した指標は少ない。特に東京のような都市部では、鉄道網と道路網のどちらも発達しており、両モードを考慮に入れてアクセシビリティを評価し、また両者がどのように相互補完的に機能しているかを理解することは、各路線の便益や都市全体の効率性向上にも寄与すると考えられる。

そこで本研究では、まず(i) RREDI (Road-Railway Detour Index)という、2地点間の移動に鉄道か道路のどちらが優位かを定量的に示す指標を提案した。さらにそれを応用し、(ii) RRA (Road-Railway Accessibility)という、マルチモダリティを考慮した上で各地点のアクセシビリティを測る指標を提案した。次に、(iii)東京の鉄道と道路の経路データを収集し、交通ネットワークモデルを構築した。このネットワークに対し、(iv)提案指標を適用し、また既存指標も同様に適用し比較することで、提案指標がどのようなアクセシビリティを捉えているのかを考察した。この分析の結果、提案した RREDI、RRA から得られる東京圏の鉄道駅のアクセシビリティ評価は、我々の日常的な感覚に近いことが分かった（後述）。

本研究ではさらに、(v) 提案指標を活用することで、公共バス路線が鉄道網を補完し、都市部のアクセシビリティを向上させていることを定量的に示した。この結果は、提案指標が新設路線のもたらす便益や都市全体の交通網の効率性評価にも活用できる可能性を示唆していると言える。

本報告書では、以下、2章で上記(i)~(v)の内容を簡潔に述べる。3章では、現在までの研究成果の発信状況と、研究助成の使途についてまとめる。

0

2. 研究成果

2.1 RRDI (Road-Railway Detour Index)と RRA (Road-Railway Accessibility)の提案

既存のアクセシビリティ指標は、大きく分けると、周辺施設の魅力度を考慮に入れたものと、純粋な交通網の構造のみに着目しているものの2種類ある。前者は、ある地点のアクセシビリティ評価は、他の地点にある「機会」（例えば商業施設、企業、文教施設など）にどの程度アクセスできるかを評価している。この際に、どのような機会を対象とするか、移動距離や時間に制約を設けるか、また近くに存在する機会に対して比重を重くして計算するか、といった様々なバリエーションが有る。

一方で後者は、交通網の構造の効率性のみを考慮している。交通網のデータのみから算出可能であり、かつ魅力度のような個人依存性の高い曖昧な情報を用いる必要がないというメリットがある。本研究では、後者のアプローチをとる。

後者において、既存研究で用いられる効率性の基本指標が Detour Index (DI)であり、次式で定義される：

$$DI(i, j) = \frac{d_R(i, j)}{d_E(i, j)} \quad (1)$$

ここで $d_R(i, j)$ は i, j 間の最短道路距離であり、 $d_E(i, j)$ は i, j 間のユークリッド距離である。すなわち、ユークリッド（直線）距離に対して、対象とする経路がどの程度遠回りをしているかによって、その経路の効率性を数値化するものである。この指標を用い、ある地点 i のアクセシビリティ指標 $A(i)$ は、次の式で定義されている：

$$A(i) = \frac{1}{N-1} \sum_j DI(i, j) \quad (2)$$

ここで N は、対象とする交通ネットワークを構成するノード（節点、主要地点、駅など）集合である。

本研究では、この指標を2つの点において拡張した。1つ目はマルチモダリティの考慮、2つ目はネットワーク上での各ノードの位置づけの考慮である。

まず RRDI (Road-Railway Detour Index) を次のように提案した。

$$RRDI(i, j) = \frac{d_{road}(i, j)}{d_{rail}(i, j)} \quad (3)$$

ここで $d_{road}(i, j)$ は地点*i*から地点*j*までの最短路距離、 $d_{rail}(i, j)$ は地点*i*から地点*j*までの最短線路距離である。各地点の組み合わせにおいて $RRDI$ を測定することにより、 $RRDI(i, j) > 1$ では鉄道経路優位、 $RRDI(i, j) < 1$ では道路経路優位というように、地点間での交通手段の優位性を測定することができる。

図1は、渋谷駅と東京駅間の最短ルートを、鉄道と道路の両方のモードについてそれぞれ算出した例である。図中の青線で示されたルートが道路経路での最短経路、赤線で示されたルートが鉄道経路による最短経路であり、最短路距離から最短鉄道経路距離を割ったものが渋谷駅～東京駅の $RRDI$ である。最短路距離のルート算出、距離データ取得には、NAVITIME APIを用いた。

次に、マルチモダリティを考慮したアクセシビリティ指標である RRA (*Road-Railway Accessibility*) を以下に提案する。

$$RRA(i) = \frac{1}{N-1} \sum_{j \in E} \frac{(RRDI(i, j) - 1)C_i}{n(i, j)} \quad (4)$$

N : ノード数

C_i : ノード i の中心性

$n(i, j)$: i, j 間のステップ数

RRA は鉄道の優位性が高いノードほど値が高くなる。さらに、ノードの中心性やステップ数を考慮していることから、交通網における各地点の“重要性”を考慮したアクセシビリティ指標であるといえる。

また、式(4)中の C_i はノード i の中心性と先述したが、 C_i にはネットワークの構造を把握するためにネットワーク分析によって用いられるさまざまな中心性を当てはめることができる。具体的には、次数中心性、媒介中心性、近接中心性、ページランク、固有ベクトル中心性の5種類の中心性を本研究では考慮することにした。中心性指標の説明はここでは省略する。

2.2 東京の交通ネットワークのモデル構築

東京の交通ネットワークのデータを収集し、データベースおよびモデル構築をおこなった。手順を付録Aに記した。この結果、東京圏にある527駅をノードとしたネットワークとその特徴を捉えるデータベースが作成された。この交通ネットワークを可視化した図を図2に示す。

2.3 分析結果

作成した交通ネットワークの分析をおこなった。まず表1に、各中心性の上位10駅をまとめた。

次に図3には、RRDI算出の結果を示した。この図から分かる通り、RRDIはユークリッド距離の増加に伴い1付近に収束した。また、RRDI>1となった駅の組み合わせは52424件、RRDI<1となった組み合わせは86151件となり、今回のデータでは鉄道路線距離より道路経路距離が短い道路経路優位の区間が多い結果となった。そして、算出したRRDIをノードごとに合計し、道路経路優位と鉄道優位の件数を比較すると、他のノードとの組み合わせ526件のうちRRDI>1となる経路の件数が7割以上となるノードは、図4のようになった。図4のネットワーク図の中で赤いノードが道路経路優位の割合が高いノードであり、赤く表示された駅は鉄道路線よりも道路経路による距離的移動性が特に高いといえる。図より、道路経路優位の割合が高いノードはネットワーク中央付近にも存在していることが分かる。この結果は、ネットワークの端の方が自動車での移動が鉄道よりしやすいという当初の予想に反する結果となった。

次に、算出したRRDIを利用して、提案したRRA指標値を各駅について算出した。式(6)中の中心性を、次数中心性、媒介中心性、近接中心性、ページランク、固有ベクトル中心性の各中心性に変更して算出した計算結果は、表2のようになった。表には、上位10駅のみを表示している。また、pythonライブラリFoliumを使用して、各中心性におけるRRAの値をヒートマップに表した。結果を図5~9に示した。

RRDIやRRAの適用結果は、おおむね我々の感覚に沿っていると言える。しかし、RRA上位10駅でも、鉄道の一日の利用者数ランキングの上位に入っていない駅(秋葉原駅など)や、東京都心から大きく外れ、感覚的にあまりアクセシビリティが高くない駅(千葉ニュータウン中央駅など)など、一部でそれらに反する結果が表れている。このような現象がみられる原因として主なものが2つ挙げられる。1つ目は、ネットワーク形状である。今回は東京都心を中心とした駅ネットワークを作成しており、データ範囲が限定されているため、現実の鉄道ネットワーク形状の全体を反映していない。また、今回の研究ではNAVITIME APIが出力した駅データをそのままノードとしており、徒歩移動が可能なほど距離が極めて近いノードは同一の駅とみなすといったデータの整形をしていない。本来徒歩移動ができる鉄道駅間は、乗り継ぎなどのために徒歩移動することが容易に推測できる。そのような至近距離にある鉄道駅は、今回のような分析を行う場合、同一の駅とみなすことが望ましい。2つ目は鉄道路線の建設目的である。鉄道には、利便性向上のために2地点を道路経路より短距離で結ぶものや、新たな交通オプションの1つとして既に存在した道路に沿うように建設されるものなどがある。建設目的の違いがRRDIの値に大きな影響を及ぼすことが予想されるが、本研究ではこの点を考慮できていなかった。

また、RRAの適用の結果を中心性毎に示したが、中心性の違いによって注目している要素が異なる。次数中心性の場合には鉄道駅の接続数に注目し、媒介中心性の場合には路線の接続が少ない路線と他の路線を接続している駅を重要とし、注目している。近接中心性の場合にはノードのネットワーク内での位置を重要視しており、固有ベクトル中心性とPageRankは接続している駅に注目した指標と言える。実際に表2やヒートマップを見ると、次数中心性の場合には接続路線数の多

い駅、媒介中心性は郊外へ延びる路線の分岐点、近接中心性の場合はネットワークの地理的に中央に存在する駅、固有ベクトル中心性と PageRank は次数の多い駅に接続している駅の *RRA* が高いことが分かる。

2.4 アクセシビリティの検証

今までの指標計算結果および実データから、アクセシビリティの検証を行った。具体的には、鉄道でのアクセシビリティがよくない駅間の交通を補完するように、道路の公共交通機関であるバスのルートが組まれているのかを、今までのネットワークにバス路線データを導入することで分析した。まず、バス路線データを鉄道ネットワークに反映し、可視化すると以下の図 10 のようになった。図中のネットワークの直径は、鉄道網のみの場合は 49 に対し、バスデータ追加後は 43 となり、バスが公共交通網の利便性を向上させていることが分かった。また、ノード間の最短経路長の分布は図 11,12 のようになり、全体のステップ数の短縮にも寄与している。また、詳細にバスデータに注目すると、バス路線はアクセシビリティの低い駅間よりも、アクセシビリティの低い駅と高い駅を結ぶものが多かった。これは、アクセシビリティの高い駅には商業施設や学校など人の多く集まる施設が存在するため、人の移動が多い区間であり、鉄道路線に加え駅間を結ぶバス路線が存在することで駅間の輸送力を強化しているためと考えられる。

3. 研究成果の発信状況と、研究助成の使途

ここまでの研究成果のうち、RRDI および *RRA* の指標提案と *DI* 値の分析に関しては、複雑ネットワーク科学の主要学会である NetSci-X 2020 にてポスター発表をおこなった。それ以降の成果については、現在さらなる分析・拡張を進めており、まだ外部発信していない。今年度中に、国内あるいは海外の学術論文誌への投稿を目指している。

貴財団より頂いた助成金は、主にデータ収集に用いた API の利用料・収集データ量に応じた課金、およびデータ収集・分析に用いたワークステーションの購入費に充てさせて頂いた。

申請時には、国際会議発表のための渡航旅費を計上していたが、コロナウイルス感染拡大の影響により、海外渡航は叶わなかった。しかし、データ収集には予想を大きく超える金額が必要となったため、結果的には予算をほぼ使い切ることとなった。少額の残金については、情報収集のためのワークショップ参加費、研究補助者の雇用費に充てた。（研究補助者雇用に際しては、私が別で獲得した学内研究資金で補填した。）

以上、採択を賜りました研究助成を活用させて頂き、得られた成果の報告とさせて頂きます。本研究はまだ改善の余地が大いにありますが、今回貴重な機会を頂いたことで、このような探索的研究に着手することが出来ました。

御支援に心より感謝申し上げます。

図表



図 1 渋谷駅～東京駅間の RRDI 算出ルート

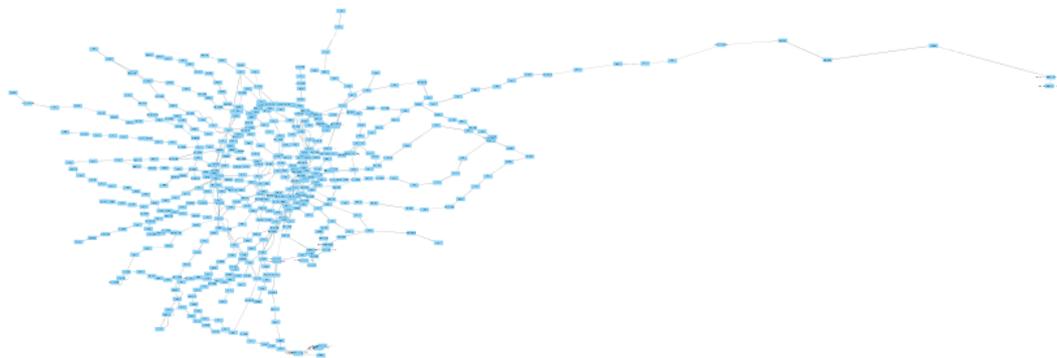


図 2 東京近郊の鉄道ネットワーク

ノードは鉄道駅であり、ノード間を繋ぐエッジは線路である。図中のノードの位置は、駅座標を反映している。

表 1 鉄道ネットワークの各中心性上位 10 駅

順位	次数中心性	近接中心性	媒介中心性	ページランク	固有ベクトル中心性
1	新宿	上野	池袋	池袋	池袋
2	池袋	東京	上野	新宿	新宿
3	渋谷	池袋	東京	渋谷	赤羽
4	上野	尾久	新宿	北千住	渋谷
5	東京	新橋	新橋	赤羽	尾久
6	新橋	赤羽	渋谷	上野	笹塚
7	大手町（東京都）	新宿	日暮里	東京	要町
8	飯田橋	品川	赤羽	新橋	恵比寿（東京都）
9	日暮里	大崎	尾久	大崎	板橋
10	秋葉原	渋谷	品川	品川	椎名町

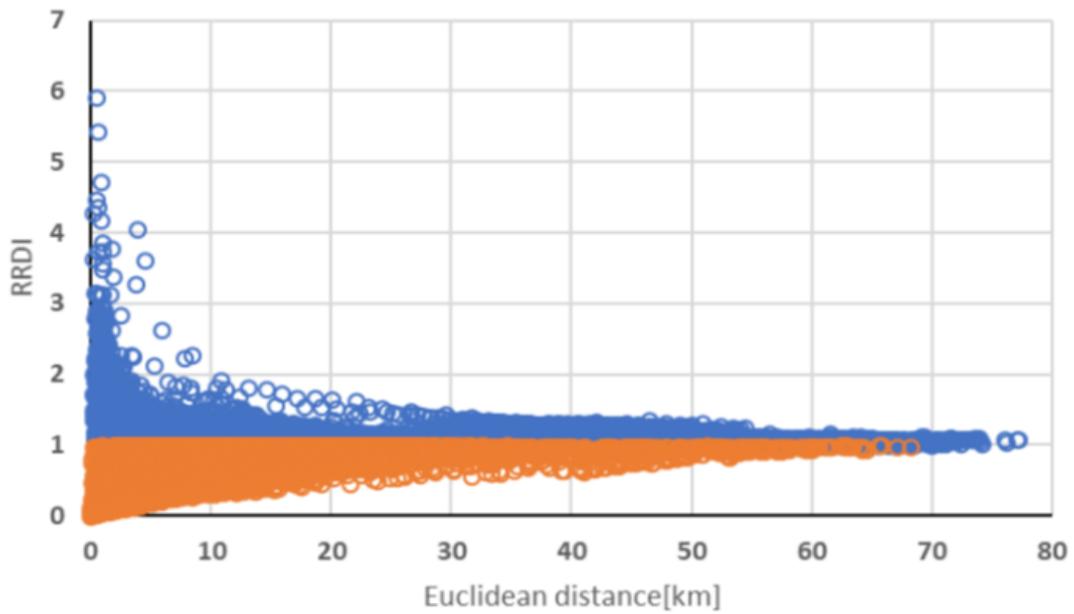


図 3 ユークリッド距離に対する $RRDI$ の散布図

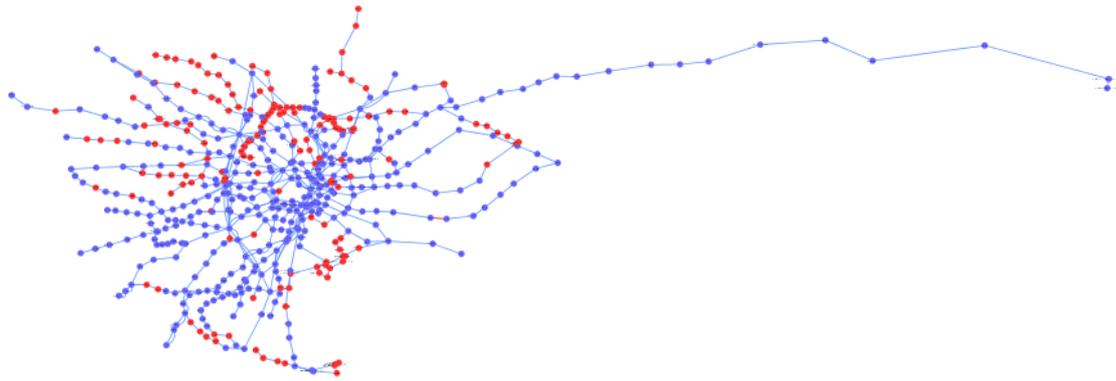


図 4 道路経路優位なノード可視化

表 2 各中心性を用いたときの *RRA* 上位 10 駅

順位	次数中心性	近接中心性	媒介中心性	ページランク	固有ベクトル中心性
1	新宿	渋谷	新宿	新宿	新宿
2	渋谷	新宿	渋谷	渋谷	池袋
3	池袋	明大前	池袋	池袋	渋谷
4	新橋	高田馬場	上野	明大前	目白
5	高田馬場	目白	新橋	高田馬場	上野
6	上野	池袋	東京	新橋	代々木
7	東京	新橋	明大前	上野	初台
8	明大前	永田町	高田馬場	東京	新大久保
9	飯田橋	神泉	中井	飯田橋	表参道
10	永田町	銀座	巣鴨	千葉ニュータウン中央	東京

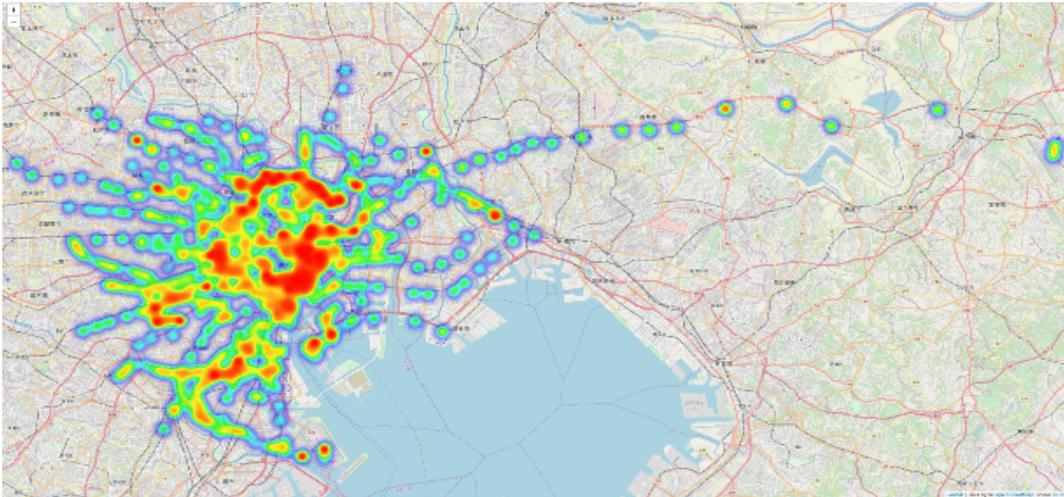


図 5 *RRA* ヒートマップ (次数中心性)

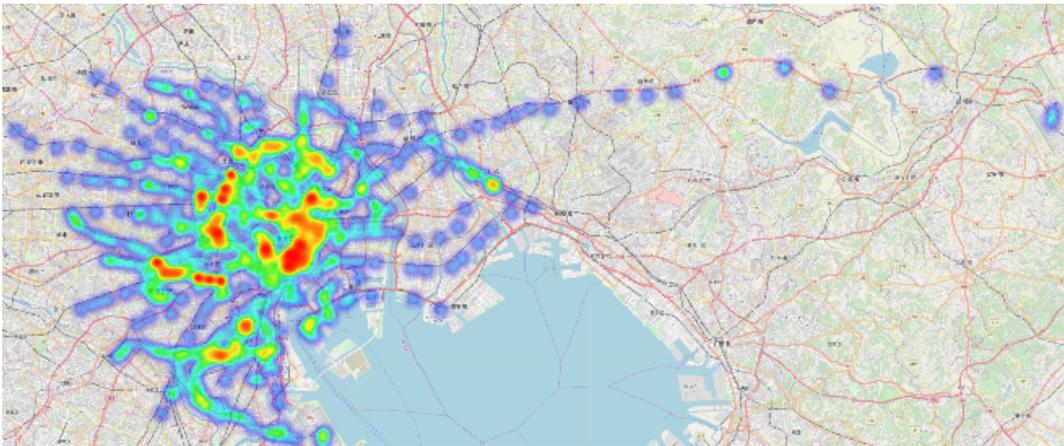


図 6 *RRA* ヒートマップ (近接中心性)

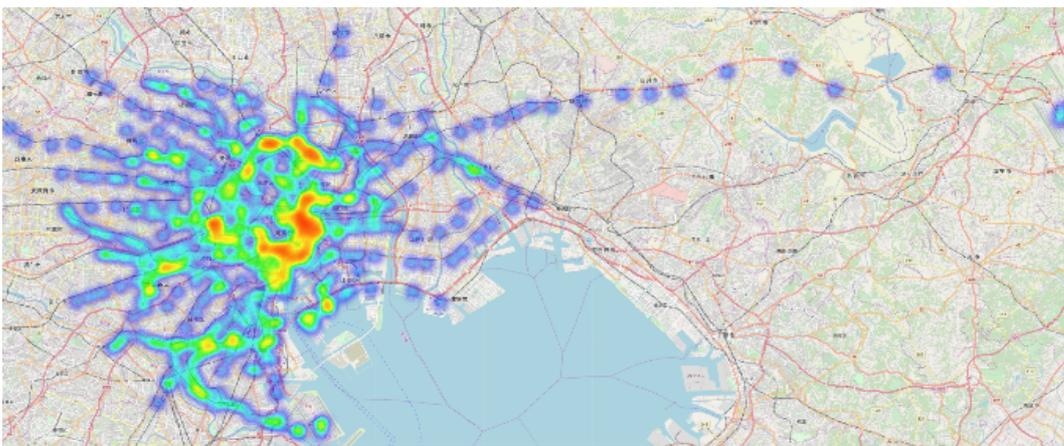


図 7 *RRA* ヒートマップ (媒介中心性)

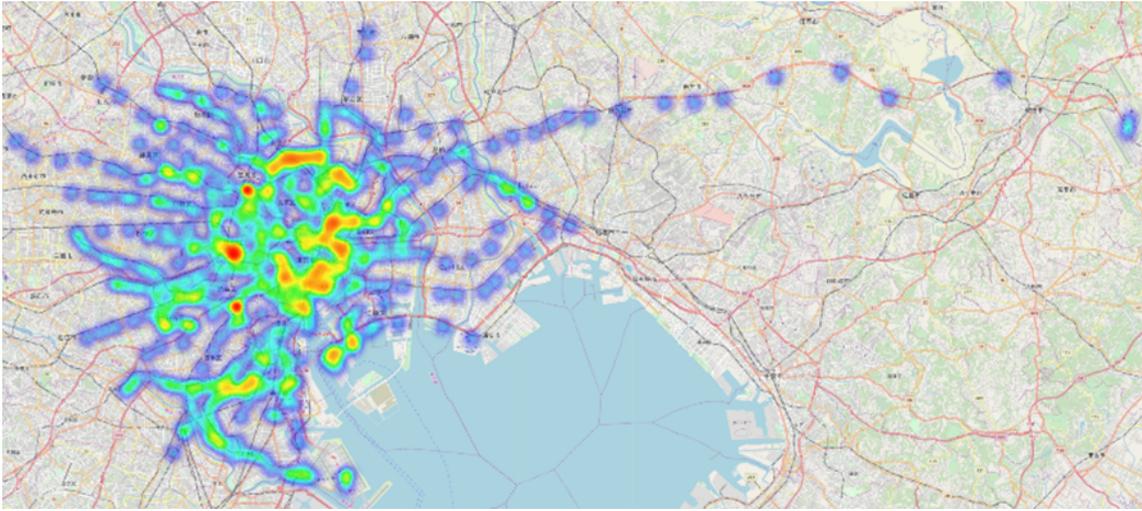


図 8 RRA ヒートマップ (Pagerank)

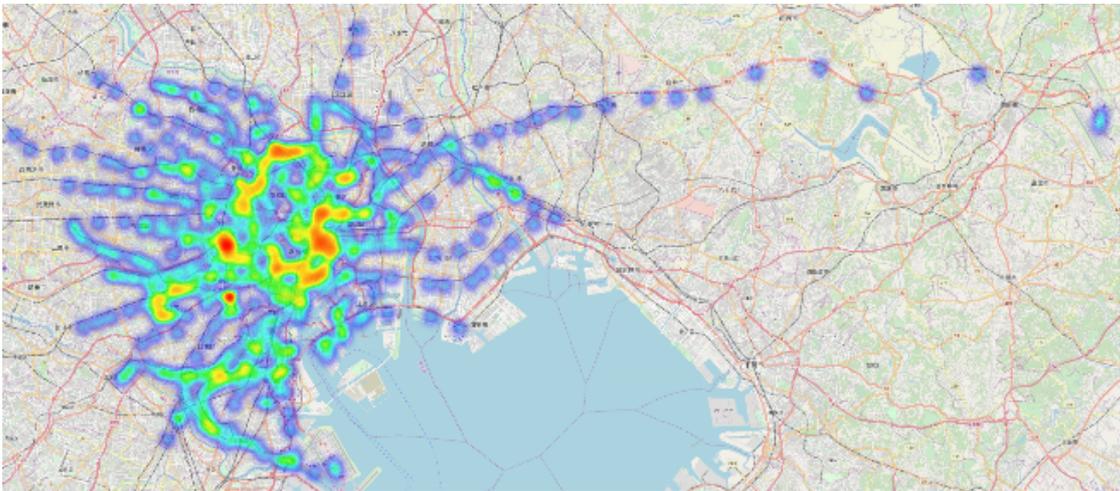


図 9 RRA ヒートマップ (固有ベクトル中心性)

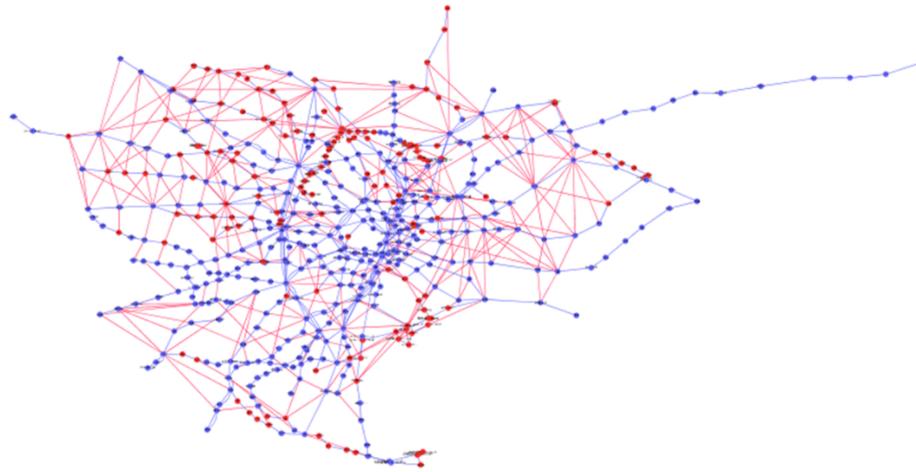


図 10 バス路線データを導入した東京近郊の交通網

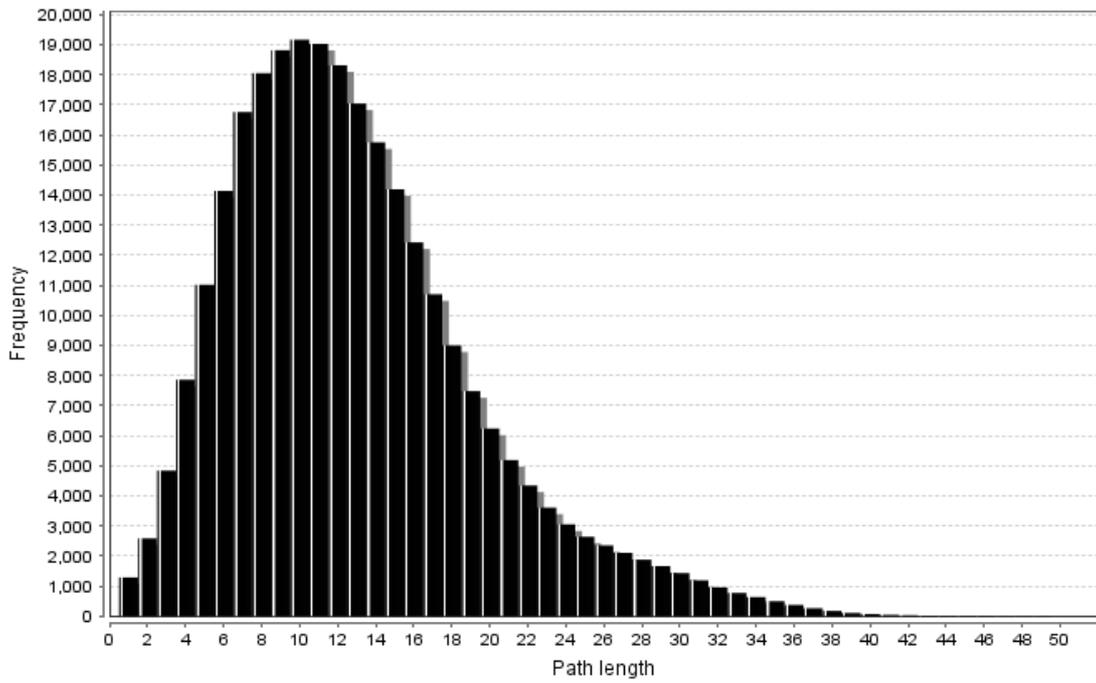


図 11 鉄道ネットワークの最短経路長分布

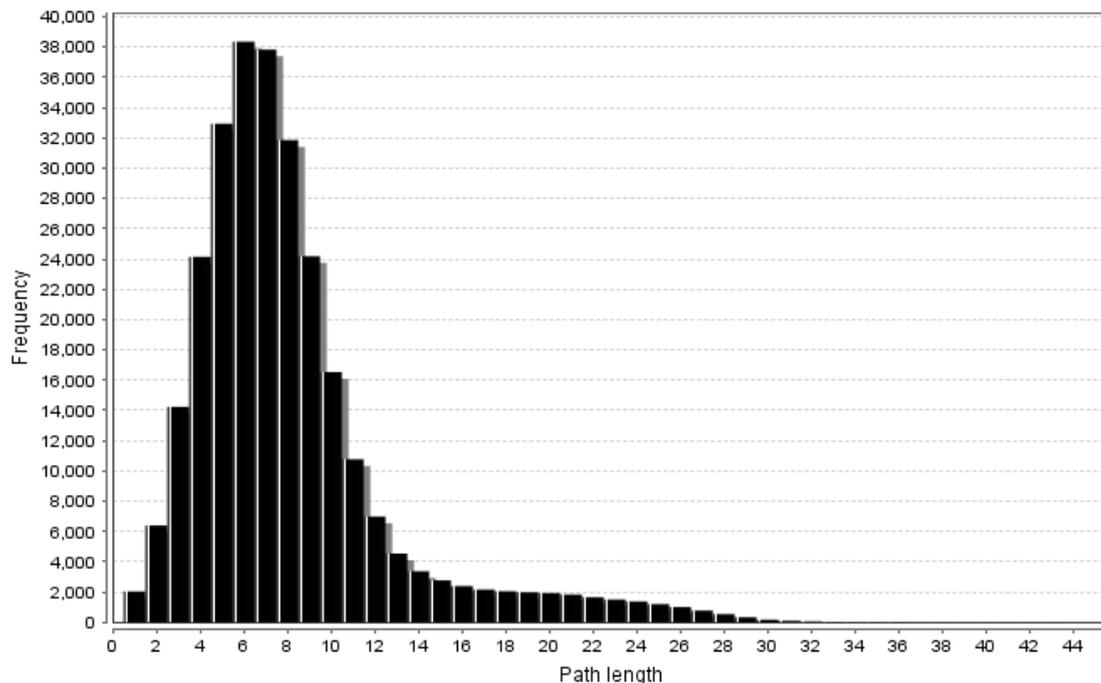


図 12 バス路線を含めた公共交通網の最短経路長分布

付録 A. データ収集・交通ネットワークモデル構築の手順

分析を行うにあたり、データの収集を行い、必要なデータを格納するデータベース構築を行った。データ収集には経路探索 API である NAVITIME API を用いた。今回使用する API によって収集できるデータは以下の通りである。

1. 駅情報（駅 ID, 駅名, 駅座標）
2. 鉄道路線データ（交通機関会社 ID, 交通機関会社名, 路線 ID, 路線名, 駅 ID, 駅名）
3. 道路経路データ（出発地点, 目的地, 総経路距離, 総移動時間, 経路座標）
4. 鉄道経路データ（出発地点, 目的地, 総経路距離, 総移動時間）
4. バス停データ（バス停 ID, バス停名, バス停座標）
5. バス路線データ（路線 ID, 路線名, バス停 ID, バス停名）

これらのデータのうち、鉄道路線、バス路線については東京都に鉄道駅、バス停を持つ路線を対象にデータを取得し、データベースを構築した。そして、構築したデータベースをもとに分析範囲を定め、鉄道ネットワークを作成した。今回は、東京 23 区を中心とした北緯 35.539497 から北緯 35.825027, 東経 139.536944 から東経 140.390751 をデータ範囲とした。この情報を用いてマルチモーダル交通ネットワークを作成した手順を以下に説明する。

① 東京都を通過する鉄道路線データの収集

NAVITIME API の路線検索機能を用いて東京都を路線駅に持つ鉄道路線データの収集を行った。路線データ検索は検索時のパラメータとして交通モード、都道府県の指定が可能である。今回のデータ収集では交通モードを鉄道、都道府県を東京都として東京都に関連する鉄道路線データを収集した。

②接続駅データ整形

収集した路線データをもとに駅の接続データを作成した。データの要素は路線 ID, 路線名, 駅 ID, 駅名, 駅座標である。

③データ範囲絞り込み

整形したデータは東京都内の駅を通過駅に持つすべての鉄道路線データであるが、ネットワークとして孤立している路線や東京 23 区から大きく離れている路線については本研究では取り扱わないこととし、整形データの削除を行った。削除後のデータは北緯 35.539497 から北緯 35.825027, 東経 139.536944 から東経 140.390751 までの範囲となり、駅数は 527 駅となった。

④接続情報取得

絞り込んだ鉄道網情報の中で、接続している駅間に対し、接続情報を取得する。取得には NAVITIME API の経路探索機能を活用し、接続する駅間を出発地、目的地、路線 ID をパラメータに指定し、線路距離、移動時間を取得した。

⑤道路経路情報取得

本研究での分析対象である 527 駅の全ての 2 駅の組み合わせ 138601 件について、道路経路探索を行った。検索にあたって組み合わせとなった 2 駅の座標を出発地、目的地に、交通手段は自動車のみ、有料道路を含む最短経路をパラメータとして設定し道路距離、移動時間情報を取得した。

⑥鉄道経路情報取得

道路経路情報を取得した 2 駅間の組み合わせ 138601 件について鉄道経路の情報も取得する。取得にはこれまでの鉄道ネットワークのデータを Python ライブラリの NetworkX を用いることでネットワーク化し、各組合せの最短経路長を計算することで取得する。

同様の手順でバス路線データも取得した。また、2 駅の座標から 2 駅間の直線距離を Vincenty 法によって計算し、データに含めた。