公共交通機関を考慮した歩行者の都市内アクセシビリティの定量的評価手法

A METHOD FOR QUANTITATIVE EVALUATION OF URBAN PEDESTRIANS
ACCESSIBILITY BY PUBLIC TRANSPORT

レ フォン グエン*, 吉川 徹**

LE Phong Nguyen and Tohru YOSHIKAWA

This research focuses on walkability and accessibility, aims to evaluate travel quality of each public transport in urban areas by using algorithmic models to analyze travelling time as well as physical and mental consumption index of public transport users. In addition, the study also conducts quantitative analysis on travelling quality in order to evaluate accessibility and applies the developed model to the central area of Utsunomiya City in order to verify the model. The study gives specific results in convenience level of each public transport means which can be used as a basis for establishing the assessments and selection of most suitable transports in urban planning.

Keywords : Population ageing, convenience, commuting time, moving cost, Bus rapid transit (BRT), distance between stations

高齢化, 利便性, 移動時間, 移動コスト, BRT, 駅間距離

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

近年、住環境の基本理念の一つである利便性を向上させる政策を国内外の都市が採用している。そのなかでもBRT (Bus Rapid Transit) などの新しい公共交通システムの導入によって、都市内の平均移動時間を短縮し、生活環境を確保しながら交通の利便性を改善する例が多い¹⁾。特に、超高齢社会になった日本においては、人口年齢構成や密度などの変化に対応した公共交通の見直しは必要である。したがって、公共交通の維持・拡充策として、速達性・定時性の確保のみならず都市の規模・形態と需要密度に適合性が高い交通機関の選択は重要である。

都市内移動時間は都市構成の指標の一つである。移動時間短縮には、各交通機関の速度や駅密度の他、各地点と駅の乗降口間の徒歩も大きな影響を及ぼす。さらに、目的地点までの移動距離により、各交通機関の得失も異なる。また、年齢階級ごとの都市内移動に伴う体力的な負担にも大きな相違がある。このことから、公共交通機関を計画する際に、居住者および利用者の年齢階級による身体能力の状態に応じて、利用可能距離を低減させることは、利便性の高い都市環境の実現の上で重要である²⁾。特に、コンパクトシティ形成が重要な施策として注目され、歩行者の立場から徒歩と近距離の公共交通機関を適切に融合させた都市計画が求められている中で、その重要性は高まっている。

本研究では上記の問題意識に立って、利便性の重要な評価要因である、都市内での移動時間および公共交通機関を利用する際の移動負担から見た各公共交通機関の得失を明らかにする。さらに、各交通機関の得失によって移動負担を定量化することにより、都市内アクセシビリティを評価する手法を開発し、これを実際の地方都市に適用して検証することを目的とする。

1.2 研究の位置づけ

徒歩からみた都市内アクセシビリティに関する先行研究を踏まえ、本研究の特徴について述べる。

徒歩距離に関する研究について山埜・吉田・佐土原³⁾は、徒歩とバスと電車でアクセスすると考えて最寄り駅および生活関連施設までのアクセシビリティを評価した。高齢化率が高い、利便性が低い地域では、駅の方角へ誘導するなどの、地域の特徴にあった対策を行っていかなければならないと示唆している。繁野・吉川・讃岐⁴⁾は、「距離、横断、右左折の3つの徒歩移動抵抗と施設立地には大きな相関があり、抵抗の大きさが無目的施設と有目的施設の分布に影響を与えていること」を示した。池田・出口⁵⁾は距離種類として、誘致距離と施設間距離を用いて、高齢者の歩行距離から市街地のコンパクト性を評価する手法を作成した。

年齢階級ごとの歩行のエネルギー消費に関する研究の例としては、歩行運動によるエネルギー消費の側面から効率的な歩行について比較するために、歩行速度や勾配が呼吸・循環機能にどのような影響

* 首都大学東京大学院都市環境科学研究科建築学域
博士後期課程

** 首都大学東京大学院都市環境科学研究科建築学域
教授・博士(工学)

Doctoral Course in Architecture and Building Engineering, Tokyo Metropolitan
University, MEng.

Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Tokyo Metropolitan University,
Dr.Eng.

を及ぼすのか実験した杉山ら⁶⁾や、平地の歩行速度の推定法を検討し、歩行や階段昇降などの運動時による消費カロリーを推定した煤係ら⁷⁾が挙げられる。

移動コストの定量化に関しては、大佛・津田⁸⁾が都市内移動をモデル化し、各移動手段の移動距離、移動手段切り替え回数、坂道抵抗を用いて移動コストを定式化した。一方、佐藤ら⁹⁾は駅内移動の対象として「都市公共交通ターミナルにおける乗換抵抗を時間のみではなく肉体的負担、心理的負担など様々な負担を考慮した乗換行動に起因する単位時間あたりの抵抗を貨幣換算したものを乗換行動コスト」と称した。

以上のように、都市内アクセシビリティの評価要因として徒歩距離・歩行のエネルギー消費・移動コストに関する研究が様々な対象に検討されているが、研究の背景で重要性を指摘した、徒歩と近距離の公共交通機関を適切に融合させる観点から評価した総合的研究は少ない。そこで本研究では、上記の既往研究の成果を踏まえ、歩行者の立場から各公共交通機関による都市内移動に着目し、都市内アクセシビリティを定量化する。特に高齢社会における公共交通機関利用時の徒歩移動抵抗に着目し、市民の都市内移動にどのように影響を与えるのかを検討する。これにより、公共交通機関の都市内への導入がもたらす建築・都市空間におけるアクセシビリティ改善効果を定量化し、それらの比較を行い、適切な公共交通機関の選出とそれによる都市内アクセシビリティ変化の特徴抽出について分析、考察を行う点が、本研究の特徴である。

1.3 対象地域

本研究では宇都宮市の中心部に位置する宇都宮駅周辺の地域を実証研究の対象とする。交通渋滞や都市環境悪化等の問題を解決するために、栃木県と宇都宮市は、平成13～14年度の2カ年で「新交通システム導入基本計画策定調査」を実施した¹⁰⁾。様々な新交通システムの検討がなされた結果、LRT(Light Rail Transit)が採用された。LRTの計画路線約15km付近には、公共交通の拠点となる東武宇都宮駅やJR宇都宮駅があるほか、公共公益施設、大型ショッピングセンターや工業団地などとの連携が計画されている。そこで本研究では、計画路線の一部(約7km)の周辺地域を対象とし、現状人口条件(約15万人)で各公共交通機関による都市内アクセシビリティの評価を行う。

2. 公共交通機関を考慮した都市内アクセシビリティの定量的評価手法の定式化

本章では、都市内アクセシビリティを定量的に評価する手法を定式化して、その基本的性質を確認するために仮想都市に

表1 公共交通機関の仮定条件

交通機関	速度(m/分)	駅間距離(m)
バス	334	300
BRT	501	600
地下鉄	667	1200

表2 年齢段級ごとのエネルギー消費量の係数

年齢(歳)	徒歩速度(m/分)	RMR値	BMR(kcal/kg/日)	体重(kg)
10-14	66.5	2.2	34.2	42.3
15-29	88	3.8	25.5	61.5
30-49	86.1	3.6	22.3	68.5
50-69	70.7	2.5	21.5	65.3
70-	57.4	1.8	21.5	60

図1 都市内移動モデル

適用する。この手法においては、下記のように、都市内移動モデルに基づいて移動時間と身体的なエネルギー消費量を算出することで、都市内アクセシビリティの評価を行う。

2.1 都市内移動モデルと線形都市の概要

対象とする公共交通機関は代表的な都市内公共交通機関である、バス・BRT・地下鉄の3種類である^{注1)}。仮想都市は格子状道路を持ち、1200×1200mの範囲の任意地点から、その外にある目的地点までの徒歩および公共交通機関の利用による移動時間と身体的なエネルギー消費量の解析を行う。目的地点までの移動距離は、地方都市の都市内移動を想定して、1200m, 4800m, 9600mとする。

既往研究^{1,11,12)}により、各公共交通機関の条件を表1のように仮定する。また、徒歩に関する評価を行うため、日本人の年齢別の平均徒歩速度¹³⁾、エネルギー代謝率(RMR)¹⁴⁾、基礎代謝率(BMR)、体重(W)¹⁵⁾を表2のように設定した。仮想都市は図1に示した通りであり、図中にA(x,y)で示した任意地点であるA点から1200, 4800, 9600m距離にある目的駅までの移動時間を計算する。移動時間Tは下記のT₁, T₂の合計時間とする。T₁はA点からS₂駅までの最短移動時間とする。これは、図1の枠内に示すように、A点からS₁駅まで徒歩、S₁駅からS₂駅まで公共交通機関で移動するか、A点からS₂駅まで直接徒歩移動するか、どちらか最短移動時間になる方を選択して求める。T₂は交通機関の利用によるS₂駅から目的駅までの移動時間とする。本章の仮想都市においては、基本的性質を確認するために、単純な線形都市を想定して公共交通機関の待ち時間や階段の上り下りなどは考慮しない。

2.2 移動のエネルギー消費量の定式化

移動時間結果に基づいてバス停や駅などまでの徒歩時と交通機関利用時の2つに段階を分け全体移動時のエネルギー消費量 E=E_w+E_pを算出する。徒歩時間T_wのエネルギー消費量(Kcal)は以下の式1により求める^{7,14,16)}。

E_w = (RMR + 1.2) × BMR × W × T_w (1)

徒歩時の酸素消費量はその速度と関係があるため、同一の徒歩行動においても酸素摂取量に個人差がある。本研究においては、年齢階級ごとの基礎代謝量(BMR)および様々な身体活動時の基礎代謝に対する比率であるエネルギー代謝率(RMR)は、佐藤より人間工学の分野で算出されている代表的なものを使用した(表2)¹⁶⁾。また、公共交通機関の利用時間T_pのエネルギー消費量(KCAL)は式2により求める^{17,18)}。

E_p = 1.05 × METS × W × T_p (安静時 METS=1とする) (2)

図2 年齢階級ごとの移動時間

METS (メッツ) とは「運動や身体活動の強度の単位で、安静時（座っている状態）を1とした時と比較して何倍のエネルギーを消費するかで活動の強度を示す」¹⁹⁾ものである。本研究では、各公共交通機関の利用時は安静状態と想定すれば、消費カロリーは利用時間および体重の比率により求めることができる。

2.3 仮想都市における移動時間による評価

任意地点から目的地点までの徒歩および交通機関の利用による移動時間の平均値および最大値を図2に示す。比較のため、徒歩のみによる値をグラフの下に付記した。徒歩のみによる値に比べて交通機関利用の値は小さく、また移動距離によって各交通機関の得失は相対的に逆転する。

図2中の平均時間結果により、短距離移動範囲（1200m）の場合はBRTと地下鉄よりバスの方が移動にかかる時間が短いことが分かる。理由はバス停の間隔（200～300m）が非常に短いことにより、短時間でバス停まで徒歩移動が可能で、公共交通機関がすぐ利用出来るからだと考えられる。一方、BRTまたは地下鉄を利用する際には、出発地点の位置が全体の移動時間に大きな影響を及ぼす。駅間距離（600m, 1200m）が長い場合、駅までの徒歩移動時間が長く交通機関が利用できるまでの時間が非常にかかる地点がある。このため、短距離移動の場合はバス利用の方が有利である。また、最大値の結果からみると、バス停や駅などの交通機関停留場から離れた場所は地下鉄は他の交通機関よりアクセシビリティが低い。

図3 年齢階級ごとの移動による一日エネルギー必要量に対する割合

移動距離範囲が4800mである場合はBRTと地下鉄よりバスの方が平均の移動時間が長い場合が多い。BRTと地下鉄は、駅までの徒歩距離が他の交通機関に比べて長い、乗車してからは移動距離が長いほどメリットが出てくる。速達性に優れるため、長距離で利用するとバスより移動時間が非常になくなる事が分かる。このことは、9600mの距離範囲で移動する場合にはさらに顕著であり、バスよりBRTと地下鉄を利用した方が早い。特にBRTは地下鉄より駅間の間隔が半分程度と短いことが、長距離移動であっても高い利便性を与えることが分かる。同様に最大値の結果から、最も利便性が低い地点においても移動距離範囲によって公共交通機関の得失も逆転することが分かる。これらの結果から、都市内移動の駅までの徒歩時間が公共交通機関に大きな影響を与えと言え。

各年齢の移動時間については、徒歩速度の相違のため移動時間が年齢階級ごとに大きく変化している。高齢者（70歳以上）の移動時間が他の年齢より圧倒的に大きい。徒歩速度が遅いことが、駅までの徒歩時間が全体の移動時間に大きな影響を与える。さらに、それぞれの移動範囲ごとの平均値と最大値を比較すると、最大値の方が年齢ごとの差が大きい傾向がある。これらのことより、高齢者は、公共交通機関利用時の移動時間に、他の年齢より徒歩時間が大きく影響を及ぼすことが分かり、超高齢社会となった日本では深刻な問題となることが懸念される。

2.4 エネルギー消費量による評価

図4 移動距離による各公共交通機関のメリット

既報²⁰⁾により、一般的に加齢に伴って筋肉などの除脂肪量の低下により、活動時のエネルギー代謝量が低くなることもある。したがって、総エネルギー消費量も加齢に伴い低下していく。本研究の手法においても、バス停や駅までの徒歩によるエネルギー消費量(式1)はエネルギー代謝率(RMR)と比率するため、徒歩速度が早ければ早いほどエネルギー消費量が多いことが示せる。これにより、高齢者の徒歩速度が下がるため、他の年齢に比べて徒歩行動におけるエネルギー消費量も減少する。しかし、高齢者にとってエネルギー消費量が減ることで徒歩行動による体力的負担が小さいとはいえない。加齢に伴い、生命維持のための基礎代謝量も低下することで移動のエネルギー消費量が少なくても、高齢者のエネルギー必要量に対して割合が多いことが考えられる。そこで本研究においては、都市内移動によるエネルギー消費量の算出結果を利用し、厚生労働省の食事摂取基準2015年度版¹⁵⁾に示されている年齢別の一日エネルギー必要量に対する移動エネルギーの割合(%)を算出し、これを用いて都市内アクセシビリティを定量化する。この結果を図3に示す。

図3により、移動時間結果と同様にエネルギー消費量からみても移動距離によって各公共交通機関の得失の変化が激しいことが分かる。短距離移動範囲(1200m)の場合、バス停の密度が非常に高いことにより、バス停までの徒歩距離が短いため歩行のエネルギー消費量が少ない。一方、バスより駅間の間隔が長いBRTまたは地下鉄の

場合は、駅までの徒歩距離の影響で全体移動のエネルギー消費量が多いことが分かる。特に、地下鉄の場合は、長距離範囲でもエネルギー消費量が非常に高く、他の交通機関に比較すると圧倒的に大きいことがみてとれる。また、徒歩時間が長く、体力的負担が支配的となり、高齢者にとって、より利便性が低下する結果となった。さらに、気候条件なども影響を与えると考えられるので気温が高い都市や低い都市などでは、より顕著となると予想される。

移動距離が長くなるほどBRTと地下鉄よりバスの乗車時間のほうが長いため、エネルギー消費量の増加は他の交通機関より大きいことが分かる。平均値の結果から、移動距離範囲4800mの場合はバス利用時のエネルギー消費量がBRT利用時とほぼ同量であるが移動距離範囲9600mの場合、バス利用時のエネルギー消費量がBRTと地下鉄利用時のエネルギー消費量を上回ることが示される。最大値の結果からみると、最も利便性が低い地点は、どの移動距離の場合においても、各公共交通機関利用時の移動エネルギー消費量の差が平均値の場合より大きいことが分かる。

年齢階級ごとの移動による一日エネルギー必要量に対する割合の結果は、加齢に伴って大きくなり、移動行動による体力に及ぼす影響は高齢者が最も大きいことが見てとれる。特に、移動距離範囲9600mの場合は、高齢者の移動によるエネルギー必要量に対する割合が非高齢者の割合の1.5倍であり、移動距離が長いほど年齢階級ごとの差が上昇することが分かる。短移動距離の場合の徒歩距離お

よび、長移動距離の場合の乗車時間、どちらも高齢者にとって都市内移動による体力的負担に大きな影響を与えることが考えられる。

2.5 適用結果および考察

移動時間とエネルギー消費量から見た、移動距離の変化による各公共交通機関の得失を図4に示す。図4は後述の図6の左側の抵抗係数のグラフとは異なり、移動に係るエネルギー消費量および移動時間の総量を示すため、グラフの左端すなわち移動距離が0の場合には、エネルギー消費量、移動時間は0となる。移動距離1200mの地点からは、完全に交通機関利用になるので、この地点を境に各交通機関の移動時間、エネルギー消費量の増加率すなわちグラフの傾きが小さくなる。この結果より、バスは、短距離では徒歩時間が短いため移動時間とエネルギー消費量の利便性が他の交通機関より高いが、移動距離が長いほど不利になる。これに対して地下鉄は、速達性に優れるため移動時間の利便性が高いが、駅間隔が長いことにより体力的負担が高いことも分かる。一方、BRT利用の場合には、移動時間の利便性は地下鉄とほぼ同様であり、エネルギー消費量の利便性も他の交通機関より非常に高いことが見てとれる。

また、各交通機関の利便性が逆転する移動距離（図4の○印）については、エネルギー消費量より移動時間の方が逆転の起こる移動距離が小さいことが分かる。年齢別の結果によると、高齢者の方が、非高齢者よりエネルギー消費量の利便性逆転距離が小さいことが分かる。しかし、移動時間については、逆に非高齢者の逆転距離が小さいことが分かる。この理由は、徒歩距離と交通機関利用時間の影響は非高齢者より高齢者の方が大きいためであると考えられる。このことから、公共交通機関導入時には、地域の人口構成が重要な判断基準になると思われる。なお、本章で定式化されたモデルでは徒歩移動による抵抗は距離に比例するとして計算した。しかし、実際に長距離を徒歩で移動する場合には、疲労によって単位距離当たりの抵抗が増加し、以上の結果よりもさらに徒歩距離の影響が大きくなる懸念がある。これについては、次章の実証研究において考慮することにする。

近年、日本のみならず東アジア諸国では、高齢化問題が顕在化してきており、都市構造の転換が必要になってくると考えられる。日常生活の移動時間が短いことが必要不可欠であるが、移動制約者が増加している新たな社会に適合性が高い交通機関の選択も非常に重要な問題である。以上の分析結果より、地下鉄は、速達性に優れる

図6 徒歩移動抵抗図

ことで大きな移動時間短縮効果が生まれるが、駅から離れる領域に暮らす住民にとって徒歩時間が延び、それによって移動による社会的負担が高齢化によって大幅に増加することが考えられる。一方、既往のバスより性能や運行方針が改善されるBRTは、都市内の日常生活に伴う移動距離に対して駅間も短く速度が速いことにより、快適かつ利便性が高い交通機関となり得る。以上のことと、比較的コストであること、高い柔軟性を持つことから、BRTは注目される公共交通機関となっていると考えられる。

3. 宇都宮駅周辺を対象とした都市内アクセシビリティの定量的評価

本章では、前章で定式化した評価手法を用いて、宇都宮駅周辺を対象とし、移動コストを定量化して都市内アクセシビリティを評価する。

3.1 対象地域の概要

対象地域は、宇都宮駅を中心地とする図5に示す地域とする。平成25年3月に、宇都宮市が策定した「東西基幹公共交通の実現に向けた基本方針」においては、JR宇都宮駅西側の中心市街地と、鬼怒川左岸の工業団地や大規模開発地区を結ぶ「桜通り十文字付近～東武宇都宮駅～JR宇都宮駅～宇都宮テクノポリスセンター地区（約15km、19停留ヶ所）」が計画区間となっている²¹⁾。本研究では、この計画区間の一部（桜通り十文字付近～新4号国道、約6.4km）を対象路線とし、路線を挟んで南北それぞれ1.5km、幅7kmにわたる地域を対象地域とした。各住宅を出発地点とし、目的地は宇都宮駅西口と対象地域内で大型のショッピングセンター（ベルモール）の最寄り交通機関停留場とした。これは、対象地域の中心地と端部の2つの目的地を設け、移動コストの比較を行うためである。

3.2 移動コスト推定方法の概要

対象路線上に、バス・BRT・地下鉄の各公共交通機関を設定した。交通機関のそれぞれ移動速度は前章の解析（表1）と同様、バス停・駅位置は実際のバス停位置およびLRTの基本方針で策定された停留場位置を参照して決めた。バス停・駅の数と駅間の間隔を図5に示す。徒歩速度については、非高齢者（15-29歳）のみを対象とした。

本研究の使用データは、総務省統計局によるH22国勢調査の小地域集計、ゼンリン建物ポイントデータ2013版（建物点）、H21国土数値情報（100mメッシュ土地利用）、ArcGIS Data Collection「道路網2014」とした。これらを用いてArcGISのNetwork Analystツールで全ての建物点から目的地までの道路距離を計測し、総移動時間（徒歩時間＋交通機関利用時間）が最短となる経路での移動時間を算出した。また、地下鉄による移動では、駅のホームが地下2階

図5 対象地域の概要

にあると想定し、地上とホームの間の移動時間は階段上り下りで2分を考慮した。一方、BRTによる移動の場合は、道路中央にバスレーンが設けられると想定し、道路を横断するための信号の待ち時間を30秒とした。

本章の対象地域は、第2章で想定した対象地域の幅である1.2kmよりも大きい1.5kmの幅を想定している。これは、当該地域の特性を踏まえ、また地方都市ではパーソントリップ調査の結果などから遠距離の徒歩移動も少なからず存在することを反映させたものである。前章の解析中、徒歩行動によるエネルギー消費量算出式では、体力的負担は徒歩時間に比例するものと想定した。しかし実際には、

徒歩時間が長くなると身体の抵抗が増加することが考えられる。従って、本章では、徒歩抵抗係数を定数ではなく、徒歩時間の増加に伴って増加する、すなわち身体の抵抗は徒歩時間と非線形関係である方が適切であると考えられる。既往研究においてこのような徒歩抵抗係数を徒歩時間の増加に従って増加させたモデルを詳しく探求したものは見当たらない。松橋²²⁾が紹介するドイツの近距離交通基盤整備の投資基準が2006年版²³⁾においても類似の考え方をを用いているが、算定根拠が示されておらず、かつ40秒以内では徒歩抵抗係数が1を下回る、すなわち徒歩の方がより望ましいことになり、1分以内ではグラフが示されていない。そこで本章では、既往研究の

図7 ショッピングセンターの目的地として各公共交通機関利用時の移動コスト

徒歩抵抗係数と徒歩距離との関係をもとに、徒歩抵抗係数を定式化する。

短距離徒歩の場合は、塚田ら²⁴⁾によれば駅内の乗り換え行動を対象として立位時間を基準とした場合には水平移動の等価時間係数は1.32、加藤ら²⁵⁾によれば乗車時間の基準に対して水平歩行時間パラメータの推定値は1.23となっている。これらの推定値はほぼ等しいが、加藤ら²⁵⁾の条件が本章の設定条件（徒歩時間と乗車時間の条件）に近いことから、1.23を利用することにした。また、既往研究で分析対象となった各駅のレイアウトを検討したところ、乗り換え行動による徒歩距離が概ね200mであった。この距離を徒歩の一般速度

(80m/分)で割り、徒歩時間2.5分に対する徒歩抵抗係数を1.23とする。

一方、長距離徒歩については、大佛・津田⁸⁾が施設の利用者行動を推定するために、移動コストを定式化している。移動コストパラメータの推定数値を移動手段別の速度で割ると、鉄道移動時間の基準に対して水平徒歩コストパラメータの推定数は1.52となった。徒歩距離については既報^{26,27)}が、「300～400m以上になると歩く意欲が減少し、600～800mを越えるとバス等の代替手段が不可欠になること」と示唆している。また、大佛らの分析での対象となった横浜市地域でGISネットワークを用いて住宅から最寄りバス停または駅

までの道路距離を測ったところ、平均徒歩距離が約 800m、すなわち徒歩時間が 10 分になった。そこで、徒歩時間 10 分に対する徒歩抵抗係数を 1.52 とした。

さらに、移動時間が 0 の場合には、徒歩時間と他の時間はほぼ等価と考えられるので、徒歩抵抗係数は 1 に近い値となることが望ましい。

以上の 3 点の徒歩抵抗係数および徒歩時間のデータを用いて、関数として最も単純な線形関数を想定し、図 6 左のように徒歩時間による徒歩抵抗係数の関数を回帰分析により決定した。原点すなわち徒歩時間が 0 の場合には、抵抗係数は 1 をわずかに超えた値となっている。これをもとに実際の徒歩時間と時間換算の結果を示したのが図 6 右である。この縦軸は図 4 の移動時間の縦軸と同じ意味を持っている。したがって、図 4 の左端すなわち移動距離が 0 の場合は、図 6 右の左端すなわち移動時間が 0 の場合に対応し、縦軸の時間換算も 0 となって、図 4 と整合している。この結果により、乗車時間を基準とした場合、各建物点からの徒歩時間を移動コストに換算することができる。

上記の前提に基づき、全ての建物点から目的地まで求めた移動コストを、建物点に付与されている情報である「個人の家屋総面積」によって国勢調査小地域集計の人口を接分し、この按分人口によって移動コストをメッシュ毎で加重平均することで、平均移動コストを求めた。

3.3 移動コストの推定結果

対象地域の端部に位置しているショッピングセンターの目的地として年齢別の各公共交通機関利用時の移動コスト分布を図 7 に示す。全体的に路線沿いおよび目的地周辺の移動コストが小さく、路線から離れた南北部の地域は徒歩距離が長いこと中心部の移動コストの約 3 倍である。各交通機関と比較すると、BRT と地下鉄がバス利用より全体的に移動コストが小さいことが分かるが、駅間隔の影響により建物点の位置によって移動コストが急速で増加することも再現できた。特に、地下鉄利用の場合は、駅周辺の移動コストが同心円状になる一方、駅と駅の中点から移動コストの高い地域が急に広がってくるのが分かる。BRT については、他の交通機関より移動コストの低い地域が広く、路線から離れた場合の移動コストの増加が緩やかである。さらに、移動コストの集計結果により、どの年齢にとっても地下鉄の移動コストは最も高く、BRT の移動コストは最も小さいことが分かる。また、この結果から、移動時間については最大値が平均値の 2 倍以上になり、さらに移動コストの最大値は平均値の約 3 倍であり、差が非常に大きいことがわかる。この理由としては、最も利便性が低い建物点が交通機関路線から離れ、徒歩距離が長いと考えられる。各交通機関別の移動時間をみると、前章の解析結果と同様に、速達性に優れることから、バスより BRT と地下鉄の移動時間のほうが短いことが再現できた。年齢別の結果と比較すると、高齢者は交通機関利用時に非高齢者より圧倒的に移動コストが高く、移動時間が長いことが分かった。高齢者は若者より徒歩速度が遅いことで徒歩時間が非常に長くなる。これによって、高齢者にとって移動行動による精神と体力的負担が他の年齢より大きく、移動コストが非高齢者の結果の 2 倍程度になった。特に、地下鉄利用時は他の公共交通機関より徒歩時間が支配的となり、高齢者にとって利便性が低くなる。

続いて、建物点から対象地域の中心に位置している宇都宮駅西口の移動コスト分布を図 8 に示す。対象地域の中心に立地しているため、移動コストが小さい。しかし、目的地が中心にあることで交通機関の利用時間が減少する、直接に徒歩で向かうことができる建物点以外では、建物点からバス停・駅までの徒歩時間はほぼ変化しない。これによって、建物点の位置によって移動コストの差が大きいたことが分かった。特に、地下鉄は、他の交通機関より利便性が低い地域が多い、図 8 において、移動コストの最大値が大きいたことから確認できる。またバス利用の場合は、移動距離が短いことによりメリットが生じ、BRT と移動コストがほぼ一致し、地下鉄よりやや低い。移動時間については、各交通機関の得失は最大値と平均値では逆転しているが、どの場合にも BRT が均衡が取れた結果を与えることが分かった。年齢別と比較すると、目的地を変えても高齢者は徒歩移動による体力的負担が大きいたことで非高齢者より移動コストが圧倒的に高いことが分かった。

3.4 交通機関、対象施設別比較と考察

図 7 と図 8 の結果を比較すると交通機関と対象施設位置が移動コストに大きな影響を及ぼすことが分かる。施設が地域の中心部にある場合（図 8）、移動距離が短いたため、住宅から乗り場が近く、すぐに乗車できるバスまたは BRT は移動コストが小さくメリットがある。地下鉄は乗車時間が短い駅までの徒歩時間が長く、体力的負担が大きいたことで移動コストが他の交通機関より高くメリットが小さい。一方、移動距離が長く中心部から離れた施設の場合（図 7）は、速達性の高い地下鉄と BRT はバスより移動時間が短く大きなメリットがある。しかし、駅までの徒歩距離が長いことに加えて駅内でもホームまでの移動時間と階段上り下りによる体力的な移動抵抗があることで、地下鉄の移動コストが相対的に高いことが示された。以上の結果から、移動距離によって各交通機関のメリットの変化が生じることが分かった。

4 おわりに

本研究では、公共交通機関整備による住環境の利便性向上を評価するために、都市内移動をモデル化することにより、都市内アクセシビリティを定量的に評価する手法を定式化した。仮想都市における解析結果より、地方都市での都市内の移動時間、特に徒歩時間には、駅間距離が大きな影響を及ぼすことがある。さらに、この影響が年齢階級ごとに、徒歩速度と人間のエネルギー代謝率、基礎代謝率により、異なることが分かった。また高齢化が進む地方都市での都市内の移動時間短縮には、各交通機関の速達性や駅密度を増加させるよりも、各地点から駅までの移動時間を短縮した方が効果的いたことが示唆された。さらに、定式化した手法に基づいて、宇都宮市の中心地域を対象とし、建物点から各交通機関利用時に対象施設別の移動コスト推定の検討を行った。本分析でも仮想都市における解析結果と同様に、移動距離により交通機関のメリットが変化することが再現された。またバス、BRT、地下鉄それぞれの利便性に、移動抵抗の移動距離、徒歩移動と地域の人口分布が及ぼす影響を確認し、新交通システム導入の際に都市の規模・形態と需要密度に適合性が高い交通機関の選択は重要であることを示した。

この結果より今後の課題として、以下が挙げられる。都市内水平移動の障害（幹線道路、ゲーティッドコミュニティ、大規模建築物）、

垂直移動の障害（超高層建築物のエレベータ利用時間）をモデルに組み込んだ場合の影響、さらに実際の都市にとっての新型交通システムの導入の効果や提供の可能性に関する研究を進める必要がある。現在進行している超高層建築物の建設や、横断困難な幹線道路建設、進行待ち時間の増加等による徒歩移動負荷の拡大によって、公共交通機関の導入による負荷低減効果が減少する懸念がある。高齢化や地球温暖化を考慮した場合、現在進行している都市開発プロジェクトが実際に都市内アクセシビリティの向上に向かっているのか、従来に比較して都市内アクセシビリティの分布にどのような偏りが生じるのかを検討することが必要になると考えられ、このために本研究で定式化した評価手法が有効であると期待できる。また、本研究で対象とした移動抵抗としての移動距離、徒歩時間、体力的負担以外の、待ち時間や運賃などの抵抗も検討し、都市内アクセシビリティの定量的評価を精度良く推定することも今後の課題である。なお、本論文は、著者らによるパイロットスタディー²⁸⁾の結果を発展させたものである。

謝辞

本研究は、首都大学東京「アジア人材育成基金」の一環として行われた。

注

注 1) 他の公共交通機関としてモノレール、新交通システム、ガイドウェイバス（名古屋市、ゆとりーとライン、2001 年、など）、LRT などが考えられる。このうち、モノレールや新交通システム、ガイドウェイバスは、駅が立体になっていて軌道が自動車交通と完全に分離されていて性能としては地下鉄に近いが、本研究では地下鉄に類似するものと考えた。一方で LRT は、性能としては BRT に近く、BRT に比較して建設費が非常に高価である。このため、我が国では LRT の最近の設置事例は少ない（富山県富山市など）。これに対して BRT は、定義にもよるが、著名な事例である名古屋市基幹バス（1982 年）以降にも、東日本大震災による鉄道不通区間の代替のみならず、最近の設置事例が増加している。たとえば、茨城県石岡市・小美玉市（かしてつバス専用道、2010 年）、茨城県日立市（ひたち BRT、2013 年）、新潟県新潟市（萬代橋ライン、2015 年）が挙げられる。さらに BRT は開発途上国など海外での事例も多い。そこで本研究では、LRT と BRT を代表して BRT を取り上げることとした。

参考文献

- 1) 神足祐太郎：バス高速輸送システム（BRT）、導入事例と論点、国立国会図書館調査及び立法考査局、レファレンス 63(6)、pp. 43-56、2013. 06
- 2) 佐藤栄治・吉川徹・山田あすか：地形による負荷と年齢による身体能力の変化を勘案した歩行換算距離の検討、地形条件と高齢化を勘案した地域施設配置モデル その 1、日本建築学会計画系論文集、第 610 号、pp. 133-139、2006. 12
- 3) 山崎哲史・吉田聡・佐土原聡：生活関連施設へのアクセシビリティ評価による地域特性分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、F-1、pp. 787-788、2007. 8
- 4) 繁野北斗・吉川徹・讃岐亮：水平方向の徒歩移動抵抗に立脚した中心市街地の施設立地分析、施設訪問行動の目的性に着目して、日本建築学会大会学術講演梗概集、F-1、pp. 1013-1014、2012. 9

- 5) 池田亘・出口敦：高齢化進行地区における徒歩からみた市街地評価に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、F-1、pp. 255-256、2010. 7
- 6) 杉山允宏・桐島日出夫・平谷昭彦・大八木達也：歩行のエネルギー消費、人間工学、第 17 巻、第 6 号、pp. 259-265、1981
- 7) 煤孫光俊・大瀧保明・鈴木明宏・佐川貢一・石原正・猪岡光：移動形態と歩行速度を考慮した消費カロリーの無拘束推定、計測自動制御学会東北支部 第 202 回研究集会、資料番号 202-11、2002
- 8) 大佛俊泰・津田さやか：都市内移動の手段と方向性を考慮した移動コストの施設利用選択行動モデルへの組み込み、日本建築学会計画系論文集、第 77 巻、第 676 号、pp. 1293-1300、2012. 6
- 9) 佐藤寛之・青山吉隆・中川大・松中亮治・白柳博章：都市公共交通ターミナルにおける乗換抵抗の要因分析と低減施策による便益計測に関する研究、土木計画学研究・論文集、第 19 巻、第 4 号、pp. 803-812、2002. 9
- 10) 栃木県：新交通システム、新交通システム導入の検討状況（宇都宮地域）、http://www.pref.tochigi.lg.jp/h03/town/koukyoukoutsuu/shinkoutsuu/lrt_index.html、参照 2014. 7. 14
- 11) 平林英樹：GPS データを用いた駅端末バスの速度低下要因の分析、芝浦工業大学工学部土木工学科卒業論文梗概、2006
- 12) 神奈川県：鉄道と LRT の基本特性の比較：<http://www.pref.kanagawa.jp/cnt/f6601/p19849.html>、参照 2014. 7. 7
- 13) 阿久津邦男：歩行の科学：運動不足克服のために、不昧堂新書、p. 56、1975
- 14) 佐藤栄治：居住者や利用者に着目したアクセシビリティに関する立体的都市空間の分析指標の開発と都市空間再構築手法の提案、博士論文、p. 68、2006. 9
- 15) 厚生労働省：日本人の食事摂取基準（2015 年版）、策定検討会報告書、2006. 3
- 16) 佐藤方彦：人間工学基準数値式便覧、技報堂、p. 204、1992
- 17) 厚生労働省：健康づくりのための運動指針（2006）、p. 6、2006
- 18) 松林静輝・中村嘉隆・白石陽・高橋修：METs エネルギー換算法に基づく生活活動時の消費カロリー計測手法、マルチメディア・分散・協調とモバイル（DICOM2012）シンポジウム論文集、pp. 2161-2169、2012. 7
- 19) 健康用語 Weblio 辞書：<http://www.weblio.jp/content/METs>、参照 2014. 7. 7
- 20) 厚生労働省：生活習慣病予防のための健康情報サイト：<http://www.e-healthnet.mhlw.go.jp/information/exercise/s-02-004.html>、参照 2014. 7. 14
- 21) 宇都宮市：新交通システム、東西基幹公共交通（LRT）の実現に向けた取り組み：<http://www.city.utsunomiya.tochigi.jp/kotsu/shinkotsu/026687.html>、参照 2014. 7. 7
- 22) 松橋啓介：公共交通機関の停留所の立地が徒歩アクセスと替的利用人口に与える影響、日本都市計画学会学術研究論文集、第 37 回、pp. 157-162、2002. 10
- 23) Intraplan Consult GmbH：Standardisierte Bewertung von Verkehrsweginvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs、p. 27、2006
- 24) 塚田幸広、河野辰男、田中良寛、諸田恵：一般化時間による交通結節点の利便性評価手法、国土技術政策総合研究所資料、国総研資料 第 297 号、pp. 35-49、2006. 2
- 25) 加藤浩徳・芝海潤・林淳・石田東生：都市鉄道駅における乗継利便性向上施策の評価手法に関する研究、季刊「運輸政策研究」、Vol. 3、No. 2 2000 Summer（通巻 009 号）、pp. 9-20
- 26) 宮崎正訳：楽しく歩ける街、OECD 編、PARCO 出版局、p. 21、1975
- 27) 紙野桂人：人のうごきと街のデザイン、彰国社、p. 132、1980
- 28) LE PHONG NGUYEN・吉川徹：公共交通機関による都市内移動時間に関する基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、F-1、pp. 995-996、2015. 9

A METHOD FOR QUANTITATIVE EVALUATION OF URBAN PEDESTRIANS ACCESSIBILITY BY PUBLIC TRANSPORT

LE Phong Nguyen * and *Tohru YOSHIKAWA* **

* Doctoral Course in Architecture and Building Engineering, Tokyo Metropolitan University, M.Eng.

** Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Tokyo Metropolitan University, Dr.Eng.

In recent decades, many cities in the world has started to apply policies and development projects that aim to increase their citizens' convenience of life, which is considered one of the most basic criteria to a high quality living environment. The most obvious example is building subway, monorail, LRT (Light Rail Transit) as well as BRT (Bus Rapid Transit) systems to reduce inner city travel time, thus, enhance public transport convenience and quality of life. Especially, for an aging population country like Japan, the switch from using private transport to public transport is necessary in order to adapt to the current rapid change of its population's density and social structure.

Actual urban public transport planning needs to select transport means that not only have appropriate speed and level of punctuality but also are compatible with the scale, structure and the demand of each city's population. Among the above requirements, everyday travel time is one of the most significant criteria to evaluate quality of life. Apart from travel speed and density of public transport terminals, walking time between home and stations crucially affects total travel time within urban areas. Because each person's commuting ability depends on age and physical ability, the sphere of walking should be carefully considered in public traffic transport network planning in order to enhance the living convenience.

This research focuses on walkability and accessibility, aims to evaluate travel quality of each public transport in urban areas by using algorithmic models to analyze travelling time as well as physical and mental consumption index of public transport users. In addition, the study also conducts quantitative analysis on travelling quality in order to evaluate accessibility and applies the developed model to the central area of Utsunomiya City in order to verify the model.

The algorithmic model analyzes three basic public transport means in the city, which are bus, BRT and subway systems. The model assumes that the researched urban area is 1200x1200m wide, public transport routes are arranged horizontally in the center of the area, and the walking routes are arranged horizontally and perpendicularly, which means the walking distances are measured by the Manhattan distance metric. The model will calculate total traveling time of pedestrians including walking time and public transports using time. The sphere of travelling is assumed to be among the three distances that are 1200m, 4800m, and 9600m. Using the total travelling time projected by the model, the study calculates total users' travel energy consumption by age. In addition, based on the algorithmic analysis of the central area of Utsunomiya City including JR Utsunomiya station as the centroid, the study analyzes the impact of walkability on people's travelling quality and research further on evaluating how convenient living environment in Utsunomiya city can be by the implementation of the three basic public transportation means.

Based on the final result, the study elucidates the impact of station distribution in term of density and distance on users' travelling time. Especially, the study analyzes different levels of travelling quality by public transports between ages based on factors of walking speed, weight and resting metabolic rate. The study gives specific results in convenience level of each public transport means which can be used as a basis for establishing the assessments and selection of most suitable transports in urban planning.

(2016 年 1 月 29 日原稿受理, 2016 年 4 月 12 日採用決定)