

マルチレイヤネットワークを用いた社会 ダイナミクスシミュレーションの豊橋市への適用

中谷 春貴¹・杉木 直²・倉内 文孝³・松尾 幸二郎⁴

¹学生会員 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学専攻 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail: nakatani.haruki.pm@tut.jp

²正会員 豊橋技術科学大学准教授 建築・都市システム学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail: sugiki@ace.tut.ac.jp

³正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: kurauchi@gifu-u.ac.jp

⁴正会員 豊橋技術科学大学准教授 建築・都市システム学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail: k-matsuo@ace.tut.ac.jp

交通サービスレベルや施設配置が土地利用や立地に与える影響や効果は、従来マイクロ経済学等の行動規範に基づいたモデルによって表現されてきた。しかし、社会の様相は個人や世帯などの意思決定主体の行動により絶えず変化しており、そのダイナミクスを表現するためには、そうした主体の属性変化や、それを前提とした土地利用の変化を理解し記述する必要がある。そこで先行研究では、仮想都市におけるマルチレイヤネットワークモデルを用いた社会ダイナミクスの表現の妥当性を検証した。本研究では、先行研究で得られた知見を生かし、実都市に適用させ、主体属性や土地利用の変化、施設アクセスをネットワークで記述する。また、マイクロシミュレーションによって都市の経年変化を実施することで、都市の将来予測に関する検証を行う。

Key Words : *Multi layer network, Social Dynamics, Land use change*

1. はじめに

我が国では、急速な人口減少や少子高齢化に伴う中心市街地の衰退や都市機能の低下、およびモータリゼーションの進展による公共交通の衰退と都市の郊外化など、多くの社会問題が顕在化している。また、高齢者を中心とした交通弱者の増加、都市サービスコストや都市施設の維持管理コストの増大などが課題となっており、持続可能な都市実現のための政策立案の必要性が高まっている。

こうした中、都市構造や社会構造の表現、分析、評価を行うモデルに関する研究が蓄積されている。特に欧米諸国では、土地利用と交通の相互作用を考慮した都市政策評価ツールとして、様々な都市モデル(土地

利用-交通モデル)が開発されてきた¹⁾。中でも、土地利用と交通の変化を経年的に記述するための分析手法として、近年ではマイクロシミュレーションを用いた都市モデルの開発が積極的に行われている^{2), 3), 4), 5), 6), 7)}。マイクロシミュレーション型の都市モデルは、分析の最小単位として個人や世帯(意思決定主体)のマイクロデータを用いており、個人単位で属性変化や選択行動を確率的にモデル化するため、個人や世帯の属性を考慮した綿密な都市分析や政策評価に対する期待が高まっている。

また、社会構造の表現にネットワークを用いる研究も活発である。特に、人や組織どうしの関係性(人間関係、企業間関係、個人-コミュニティ間関係など)を

ネットワークによりモデル化し、Graph Topology（ネットワーク形状論）やNetwork Science（ネットワーク科学）の観点から分析する試み（社会ネットワーク分析）が数多く行われている^{8), 9), 10), 11)}。社会ネットワーク分析とは、主体の属性だけではなく、その関係性に着目して現象をとらえようとする方法論であり、ネットワークを用いることで主体間の複雑な関係性を数学的に表現し考察することが可能となる。さらに、人や組織間関係の表現のみならず、特に土木計画の分野においては、道路ネットワークの表現と評価、地域コミュニティや施設アクセス性の分析など、幅広い対象にネットワークが適用されている^{12), 13)}。

以上を踏まえて、都市空間内の主体間の相互関係性をネットワークで記述することで、複雑かつ大規模な都市構造を簡便に表現し、ネットワーク形状論からの評価が可能になると考えられる。また、マイクロシミュレーション型都市モデルを援用することで、ネットワーク上で社会のダイナミクスを表現可能なモデルを構築し、持続可能な都市の実現に向けた様々な政策を評価する手法の構築が有用であると考えられる。先行研究である長尾ら^{14), 15), 16)}の研究では、マルチレイヤネットワークを用いて社会ダイナミクスの表現を可能なモデルを構築し、仮想都市への適用を行っている。施設アクセスネットワークに着目し、固有ベクトル中心性を算出し、その結果、個人ノードの固有ベクトル中心性は、都市内の相対的なアクセシビリティを表現することが確認された。しかし、実際の都市を対象とした手法の有効性については検証はなされていない。

そこで本研究では、社会ダイナミクスシミュレーションモデルの実都市への適用として、愛知県豊橋市を対象としてマイクロシミュレーションを適用し、4次メッシュごとの将来的な人口・世帯を予測し、将来的な公共交通の需要予測を行う。具体的には、仮想都市を対象に構築された社会ダイナミクスシミュレーションモデルを実都市に適用するために改良し、固有ベクトル中心性によるアクセシビリティ指標の算出結果より有用性について検討する。

2. マルチレイヤネットワークによる社会ダイナミクスの記述

(1) 都市空間の記述

ある特定時点のマルチレイヤネットワークによる都市空間の記述イメージを図-1に示す。マルチレイヤネットワークにおいて、個人属性、世帯構成、立地、施設アクセスはノードどうしの接続関係で表現する。また、人口動態や土地利用変化は、ライフイベント生起確率や立地選択モデルによる確率的なノードの消滅・生成、リンクの付け替えで表現する。特に、個人の施設選択は個人ノードと施設ノードの接続で表現し、施設へのアクセシビリティは施設アクセスリンクの重みとしてアクセシビリティ指標（以下ACC指標）を付与することで表現する。ACC指標については、いくつかの指標が提案されているが、本モデルでは、個人の選択行動のモデル化により得られる最大効用の期待値（ログサム）を用いる。

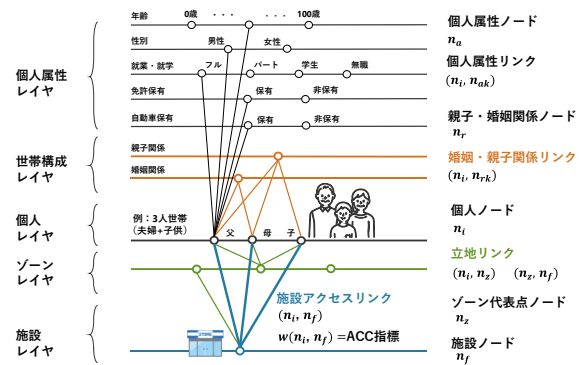


図-1 マルチレイヤネットワークによる都市空間の記述

(2) 社会ダイナミクスシミュレーションモデル概要

本モデルでは、マイクロシミュレーションによる人口・世帯の変動と交通アクセシビリティモデルによるアクセシビリティと固有ベクトル中心性の算出を並行して行う。シミュレーションのフローを図2に示す。

交通・アクセシビリティモデルでは、シミュレーションタイムステップごとの居住分布および個人の交通手段選択を考慮した交通を表現し、施設（目的地）アクセスに関するアクセシビリティ指標を算出する。

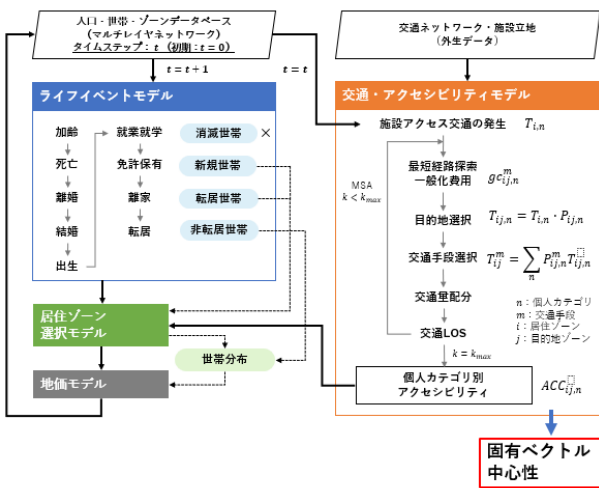


図-2 シミュレーションフロー

(3) ライフイベントモデル

シミュレーションタイムステップごとに、ノード間のリンクの付け替えなどの処理を行い、マルチレイヤネットワークの形状を変化させることで、都市構造の遷移を表現する。ライフイベントモデルでは、シミュレーションタイムステップごとにライフイベント(加齢・死亡・離婚・結婚・出生・就業・就学・免許保有状態・独立(離家)・転居)を確率的に発生させることで、個人・世帯の属性変化や、その下での離家・転居を表現する。ライフイベントモデルは、既構築のマイクロシミュレーション型都市モデル^{7),8)}を参考とする。また、転居世帯の立地変化は、居住ゾーン選択モデルにより表現する。一方で、個人の施設選択およびアクセス性は、アクセシビリティモデルにより表現する。アクセシビリティモデルでは、シミュレーションタイムステップごとの都市内人口・世帯分布および交通ネットワークを考慮し、利用者均衡配分により交通量を配分する。これにより、交通LOSおよび個人の施設(目的地)アクセスに関する一般化費用を算出する。さらに、交通手段選択モデルをベースとしたアクセシビリティ指標を算出し、これを施設アクセスリンクの重みとして付与する。また、マイクロシミュレーションのライフイベントモデルについて詳細を下記に示す。

a) 加齢

加齢イベントは、個人ノードに確定的に生じる。シミュレーションタイムステップを Δt とすると、個人の年齢に Δt が加えられる。個人属性(年齢)レイヤと個

人レイヤ間の個人属性リンクが付け替わることで加齢を表現する。以降のライフイベントは、加齢後の年齢にも基づく生起確率にしたがって確率的に生じる。

b) 死亡

死亡イベントは、すべての個人ノードに対して確率的に生じる。累積生存関数にワイブル分布を仮定した生存時間解析によって性別年齢別に死亡確率を定義する。ワイブル分布の累積生存関数 $S(t)$ は次の通りである。

$$S(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right\} \quad (t \geq 0) \quad (1)$$

ここで、 t は年齢(生存時間)、 α 、 β はパラメータである。式(1)は生命表の統計データを基に推定可能である。死亡確率は $1 - S(t)$ で定義され、確率的に死亡判定がなされる。死亡判定された個人ノードは消滅し、接続している各リンクもすべて消去される。

c) 離婚

離婚イベントは、婚姻関係リンクを持つ既婚の個人ノードに対して確率的に生じる。統計データより男性の年齢を基準として定義される離婚確率に基づき、離婚判定がなされる。離婚判定された個人ノードに接続している婚姻関係リンクおよび婚姻ノードは削除される。婚姻関係リンクが削除された場合、男女どちらかが離家し転居するため、立地リンクにも接続関係の変化が生じる。また、親子関係リンクが存在する場合は、簡単のため、母親側の親子関係を保持し、父親側のリンクを削除する。

d) 結婚

結婚イベントは、婚姻関係リンクを持たない未婚の個人ノード(男性18歳以上、女性16歳以上)に対して確率的に生じる。統計データより定義される性別年齢別結婚確率に基づき、結婚判定がなされる。男女のマッチングは統計データより定義される年齢別夫婦の年齢差の分布に基づき行われる。域内の男女のマッチングが優先されるが、域内にマッチング該当者が存在しない場合に限り、域外から当該年齢の配偶者を転入させる。結婚判定された個人ノードには、共通の婚姻ノードに接続する婚姻関係リンクを生成する。世帯の合流・分離については、①夫の世帯に合流、②妻の世帯に合流、③どちらの親とも同居しないの3パターンを考慮する。①、②の場合、立地リンクの接続が合

流される側の世帯と同様になるように付け替える。③の場合は、後述する転居と同様に、立地リンクの付け替えを行う。

e) 出生

出生イベントは、婚姻関係リンクを持つ既婚女性（16～49歳）の個人ノードに対して確率的に生じる。統計データより定義される母親の年齢別出生順位別の出生確率に基づき、子供の出生判定がなされる。出生確率は次に示す一般化対数ガンマ分布を用いて定義する。

$$g_n(x) = \frac{C_n |\lambda|}{b_n \Gamma(\lambda_n^{-2})} (\lambda_n^{-2})^{\lambda_n^{-2}} \exp \left[\lambda_n^{-1} \left(\frac{x - u_n}{b_n} \right) - \lambda_n^{-2} \exp \left\{ \lambda_n \left(\frac{x - u_n}{b_n} \right) \right\} \right] \quad (2)$$

ここで、 $g_n(x)$ は x 歳の女性の第 n 子の出生確率、 Γ はガンマ分布であり、 C_n 、 u_n 、 b_n 、 λ_n はパラメータである。式(2)は国勢調査および人口動態調査の統計データを基に推定可能である。出生が判定された場合、0歳の個人ノードを新規に追加し、親子関係リンク、立地リンクを付与する。

f) 就業・就学状態の更新

就業・就学状態の更新は、個人ノードに確率的に生じる。統計データより定義する進学率・就職率に基づき、個人属性（就業・就学）レイヤと個人レイヤ間の個人属性リンクが付け替わることで就業・就学状態の更新を表現する。また、進学・就職時の離家判定を行い、離家する場合は、後述する転居と同様に、立地リンクの付け替えを行う。

g) 免許保有状態の更新

免許保有状態の更新は、18歳以上の個人ノードを対象として確率的に生じる。運転免許の取得率・返納率は、統計データより定義される性別年齢別運転免許保有率を1年スライドし、ある年齢階層における保有率の上昇を取得率、減少を返納率として設定する。こうして定義された運転免許の取得・返納率に基づき、個人属性（免許保有）レイヤと個人レイヤ間の個人属性リンクが付け替わることで免許保有状態の更新を表現する。

h) 離家（独立）

離家イベントは、個人ノードに確率的に生じる。離婚、就職・進学による離家とは別に、性別年齢別離家

率を定義し、それに基づき個人の離家判定がなされる。離家判定された個人ノードは立地リンクの付け替えを行う。

i) 転居

転居イベントは、同一世帯に属する個人ノードに確率的に生じる。世帯主年齢別世帯人数別の転居率に基づき、世帯の転居判定がなされる。転居判定された個人は同一世帯単位で立地リンクが付け替わる。新たな立地リンクによるゾーンノードとの接続は、世帯の立地ゾーンの選択を表し、後述する世帯の居住地選択モデルによって接続先を決定する。

(4) 居住ゾーン選択モデル

転居する世帯に属する個人ノードを対象に、立地リンクの付け替えを行う。本モデルでは、対象地域内の各ゾーンから1つのゾーンを選択する多項ロジットモデルにより、転居先ゾーンを選択する。また、世帯 h の居住ゾーンの選択集合を Z_h としたとき、ゾーン i の選択確率についての多項ロジットモデルおよび効用関数は次のとおりである。

$$V_{ih} = \sum_k \alpha_k X_{ik} + \gamma LP_i + c \quad (3)$$

$$P_{ih} = \frac{e^{V_{ih}}}{\sum_{i' \in Z_h} e^{V_{i'n}}}, \quad (i \in Z_h) \quad (4)$$

ここで、 α_k 、 c はパラメータであり、効用関数における説明変数として、交通条件、土地条件、アクセシビリティなどのゾーン属性(X_{ik})および地価(LP_i)を考える。

(5) 地価モデル

シミュレーションタイムごとに、ゾーン i の属性値としての地価を回帰モデルによって算出する。地価モデルは次のとおりである。

$$LP_i = \sum_k \gamma_k X_{ki} + \delta D_i + c \quad (5)$$

ここで、 γ_k 、 δ 、 c はパラメータであり、都心距離や最寄駅距離などのゾーン条件(X_{ki})および、立地密度(D_i)を考慮して地価(LP_i)を更新する。これにより、次期の居住ゾーン選択モデルで用いる地価を更新する。

(6) 交通・アクセシビリティモデル

ここでは、アクセシビリティ指標を算出するため、利用者の交通手段選択をロジット型とした交通ネットワーク利用者均衡配分モデルを定式化する。また、先行研究で用いた仮想都市のモデルでは、交通目的を考慮せず、すべての住民が仮想都市内の施設へ向かうモデルであったため、本研究では、目的別に交通手段選択確率に基づく交通量を算出し、全目的による交通状況下でのアクセシビリティを算出する。

公共交通については、実際の頻度、料金ではなく、距離やターミナルごとにチャージが発生し、利用者量に応じて頻度を可変するモデルとなっている。以上より、個人カテゴリ別の交通手段別一般化費用を考慮した交通手段選択モデルをベースに、アクセシビリティ指標を算出する。

本モデルにおいて、個人カテゴリ n の選択可能な交通手段は、 $m \in M_n$ {自動車; *Auto*, 公共交通; *PT* (バス・鉄道), 徒歩; *Walk*, 世帯内同乗; *RS*} とする。また、ここでの個人カテゴリ n は、個人の属性 (年齢, 利用可能交通手段など) によって分類される。さらに、都市空間内の交通ネットワークは外生的に与えられるものとする。これにより、交通手段別 OD 交通量を都市空間内の交通ネットワークに配分することで LOS を算出し、個人カテゴリ n の OD 経路に対する一般化費用およびアクセシビリティ指標を算出する。

まず、個人は OD (ij) 間の一般化費用が最小となる経路を選択することとし、リンクコストを重みとした最短経路を交通手段別に算定する。また、この時の OD 経路コストを、個人カテゴリ n の交通手段 m 利用時の一般化費用 $gc_{ij,n}^m$ とし、リンクコストの和として次式で表す。

$$gc_{ij,n}^m = \sum_a \delta_a^{ij} c_{a,n}^m + \zeta_n^m \quad (6)$$

ここで、

$c_{a,n}^m$: 交通手段 m , 個人カテゴリ n , 道路リンク a のリンクコスト

δ_a^{ij} : ij 間の経路接続行列

ζ_n^m : 交通手段 m , 個人カテゴリ n の定数項 (自動車の維持費・保険料, カテゴリ n 別の交通手段 m 利用に対する抵抗)

また、交通手段別のリンクコスト $c_{a,n}^m$ は以下である。

$$c_{a,n}^{Auto} = \tau_n t_a^{Auto} + cf d_a \quad (7)$$

$$c_{a,n}^{RS} = \tau_n t_a^{Auto} + cf d_a \quad (8)$$

$$c_{r_l,n}^{PT} = \tau_n \left(t_{r_l}^{PT} + cc_{r_l} + \frac{1}{2f_l} \right) + ca_{r_l} + ct_{r_l} \quad (9)$$

$$+ cd_{r_l}, (r_l \in a)$$

$$c_{a,n}^{Walk} = \tau_n t_a^{Walk} \quad (10)$$

ここで、

τ_n : 個人カテゴリ n の時間価値

t_a^{Auto} : 道路リンク a の乗車時間

d_a : 道路リンク a の距離

cf : 自動車の走行経費原単位

r_l : 系統 l の公共交通リンク ($r_l \in a$)

$t_{r_l}^{PT}$: 公共交通リンク r_l の乗車時間

cc_{r_l} : 公共交通リンク r_l の混雑 (時間コスト)

f_l : 系統 l の運行頻度

ca_{r_l} : 公共交通リンク r_l への乗り換えペナルティ (第 1 番目の公共交通リンクにのみ考慮)

ct_{r_l} : 系統 l , 公共交通リンク r_l のターミナルチャージ (第 1 番目の公共交通リンクにのみ考慮)

cd_{r_l} : 系統 l , 公共交通リンク r_l の距離チャージ

t_a^{Walk} : 道路リンク a の徒歩時間

以上を踏まえ、ネットワーク中の目的別交通手段別 OD 交通量を算出する。まず、 ij 間における個人カテゴリ n の目的 k における目的地選択確率 $P_{ij,n,k}$ を次式で表現する。ここでの個人カテゴリ n の ij 間のアクセシビリティ指標 $ACC_{ij,n}$ は、式(16)の交通手段選択モデルにおける ij 間の個人カテゴリ n の交通手段 m 利用時の効用関数 $V_{ij,n}^m$ を用いたログサム変数として次式で表現する。

$$ACC_{ij,n} = \frac{1}{\mu} \ln \left(\sum_{m \in M_n} av_n^m \exp(\mu V_{ij,n}^m) \right) \quad (11)$$

$$V_{ij,n,k} = ps_{n,k} S_{j,k} + pa_n ACC_{ij,n} \quad (12)$$

$$P_{ij,n,k} = \frac{\exp(V_{ij,n,k})}{\sum_{j' \in J_n} \exp(V_{ij',n,k})} \quad (13)$$

ここで、

μ : 分散パラメータ

av_n^m : 個人カテゴリ n の交通手段 m 利用可能性

$S_{j,k}$: 目的 k 別施設 (目的地) j の集客力指標

$V_{ij,n,k}$: 個人カテゴリ n の ij 間の効用

$ps_{n,k}$: 集客力指標のパラメータ

pa_n : アクセシビリティ指標のパラメータ

個人カテゴリ n の目的 k の発生交通量を $T_{i,n,k}$ として, OD 交通量 $T_{ij,n,k}$ は目的地選択確率 $P_{ij,n,k}$ を用いて次式で算定する.

$$T_{ij,n,k} = T_{i,n,k} \cdot P_{ij,n,k} \quad (14)$$

また, ij 間における個人カテゴリ n の交通手段 m の選択確率 $P_{ij,n}^m$ を次式で表現する.

$$V_{ij,n}^m = pgc_n gc_{ij,n}^m \quad (15)$$

$$P_{ij,n}^m = \frac{av_n^m \exp(V_{ij,n}^m)}{\sum_{m' \in M_n} av_n^{m'} \exp(V_{ij,n}^{m'})} \quad (16)$$

ここで,

$V_{ij,n}^m$: ij 間の個人カテゴリ n の交通手段 m 利用時の効用

pgc_n : 一般化費用についてのパラメータ

av_n^m : 個人カテゴリ n の交通手段 m 利用可能性

この時, 交通手段利用可能性 av_n^m は, 個人の交通手段の有無, 徒歩可能距離, 一般化費用の閾値を考慮し, 次式のように表現する. したがって, av_n^m は 0~1 の値をとる.

$$av_n^m = av_w_n^m \times av_m_n^m \times av_c_n^m \quad (17)$$

ここで,

av_n^m : 個人カテゴリ n の交通手段 m 利用可能性

$av_m_n^m$: 個人カテゴリ n の交通手段 m 利用可能性 (交通手段の保有) (利用可能→1, 利用不可能→0, 世帯内同乗→0~1)

av_w_n : 個人カテゴリ n の徒歩可能距離を考慮した徒歩アクセス可能性 (徒歩距離 < 徒歩可能距離→1, 徒歩距離 ≥ 徒歩可能距離→0)

$av_c_n^m$: 一般化費用閾値 $gc_thr_n^m$ を考慮したアクセス可能性 ($gc_{ij,n}^m < gc_thr_n^m \rightarrow 1$, $gc_{ij,n}^m \geq gc_thr_n^m \rightarrow 0$)

施設 (目的地) に対してすべての交通手段利用可能性 av_n^m が 0 となった場合, 当該施設 (目的地) を J_n 選択肢集合から除外することで, アクセス可能施設数を変化させる. 目的別交通手段別 OD 交通量 $T_{ij,k}^m$ は交通手段選択確率 $P_{ij,n}^m$ を用いて次式で算定する.

$$T_{ij,k}^m = \sum_n P_{ij,n}^m T_{ij,n,k} \quad (18)$$

算定した交通手段別 OD 交通量を次式によりリンク交通量 x_a^m に配分する.

$$x_a^m = \sum_k \sum_i \sum_j \delta_a^{ij} T_{ij,k}^m \quad (19)$$

配分後のリンク交通量をベースに LOS を以下の式により算定する. まず, 道路リンク走行時間 t_a^{Auto} は次の BPR 関数により算定する.

$$t_a^{Auto} = t_{a,0}^{Auto} \left(1 + \alpha \left(\frac{x_a^{Auto}}{K_a} \right)^\beta \right) \quad (20)$$

ここで,

$t_{a,0}^{Auto}$: 道路リンク a の自由走行時間

K_a : 道路リンク a の交通容量

α, β : パラメータ

また, 公共交通サービス頻度 f_l は, リンク交通量 (利用者量) および最大・最低頻度を考慮し, 次式で算定する.

$$f_l = \min \left(\max \left(\frac{\max\{x_{r_l}^{PT}\}}{K_l}, \min f_l \right), \max f_l \right) \quad (21)$$

ここで,

$x_{r_l}^{PT}$: 公共交通リンク r_l の交通量

K_l : 公共交通系統 l の容量

$\min f_l$: 公共交通系統 l の最低運行頻度

$\max f_l$: 公共交通系統 l の最大運行頻度

さらに, 公共交通混雑 cc_{r_l} を時間コストとして考慮し, 次式で算定する.

$$cc_{r_l} = \gamma \left(\frac{x_{r_l}^{PT}}{SK_l} \right)^\eta \quad (22)$$

ここで,

SK_l : 公共交通系統 l の着席容量

γ, η : パラメータ

本モデルでは, MSA 法を採用することで交通量を均衡配分する. MSA の反復ごとに以上の計算により, 交通ネットワークの LOS および個人カテゴリ n の交通手段別一般化費用を算定する. なお, リンク交通量の更新は, 次式で実施する.

$$x_a^{m,p+1} = \frac{p}{p+1} x_a^{m,p} + \frac{1}{p+1} x_a^{m,p'} \quad (23)$$

ここで,

p : 反復回数

$x_a^{m,p+1}$: 更新後 ($p+1$) のリンク交通量

$x_a^{m,p}$: 更新前 (p) のリンク交通量

$x_a^{m,p'}$: 反復 p での再配分後のリンク交通量

配分後の交通量および LOS をベースに, 個人カテゴ

リ n の ij 間のアクセシビリティ指標 $ACC_{ij,n}$ を算出し、個人ノードと施設ノードを接続する施設アクセスリンクの重みとして付与する。その際、重みが負となることを避けるため、次式によりアクセシビリティ指標を基準化する。

$$ACC_{ij,n}^{st} = \frac{ACC_{ij,n} - ACC_{ij,n,min}}{ACC_{ij,n,max} - ACC_{ij,n,min}} \quad (24)$$

ここで、

$ACC_{ij,n}^{st}$: 基準化された個人カテゴリ n の ij 間のアクセシビリティ指標

$ACC_{ij,n}$: 個人カテゴリ n の ij 間のアクセシビリティ指標

$ACC_{ij,n,min}$: $ACC_{ij,n}$ の最小値

$ACC_{ij,n,max}$: $ACC_{ij,n}$ の最大値

3. 豊橋市への適用

(1) 対象地域

対象地域は愛知県豊橋市全域とする(図-3)。第五回パーソントリップ調査(H23)によると、豊橋市の自動車の交通手段分担率は69.7%であり、自動車依存が高ことがわかる。また、高齢者の交通事故のうち、車両乗車中が全体の44%を占めており、高齢ドライバーの免許返納を促進させるべきだという声も増えている。PT調査から分かるように、豊橋市では、少子高齢化やモータリゼーション等の影響により、公共交通の衰退、高齢ドライバーの事故、慢性的な渋滞等が起こっている。一方、豊橋市では立地適正化計画の中で、居住誘導地域及び歩いて暮らせるまち区域を設定しており、住民の公共交通圏内での生活を推進している。自家用車に依存せず、公共交通で不自由なく移動できるまちづくりへの取り組みが進められている。

(2) 分析用データ

a) 利用データ

道路ネットワークデータはESRI ジャパンの道路網(2018)を使用して作成する。対象とするバス路線は豊橋鉄道バスと豊橋市コミュニティバスの路線を合わせた計55路線である。

b) ゾーン区分

まず、豊橋市の4次メッシュ(500m×500m)を作成する。4次メッシュのメリットとしては、同一形状の区画を単位としており、メッシュ相互間の計量的比較が容易であること。行政区域の境域変更などの影響を受けることがなく、地域事象の時系列比較が容易であることがあげられる。また、4次メッシュはおよそ徒歩圏内スケールで徒歩圏内環境も考慮できる。シミュレーションは、豊橋市の4次メッシュのうち人口ありの784メッシュを対象として行う。本研究では、各メッシュに重心を与え、住民や施設はすべてメッシュの重心に位置すると考える。

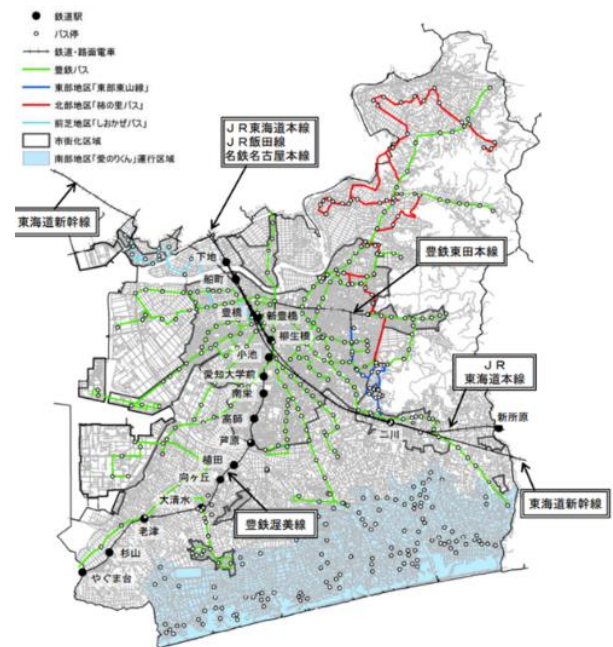


図-3 豊橋市の交通状況

c) 交通ネットワークデータ

ArcGIS を用いて豊橋市の交通ネットワークを作成した。作成したネットワークは、図-4、図-5、図-6に示す徒歩と自動車用の道路、バス路線、鉄道路線のネットワークである。さらに、路線間の乗り換えを表現するためにダミーリンクを追加した。これらのネットワークを用いて、移住地からネットワークを通じ目的施設への移動を表現した。なおシミュレーション期間は2015年から2025年の10年間とした。また、停留所間の移動はノードとリンクで表現した。道路リンクについては、ESRI 全国道路網2015より作成した。

d) 個人カテゴリ別属性データ

表-1, 表-2 に, シミュレーションにおいて利用する個人カテゴリ別交通条件を示す. 個人カテゴリ別に徒歩速度, 徒歩可能距離が設定されており, また, 免許の保有の有無で自動車移動が可能かどうかを判断している. なお, 家族に免許を保有している個人がいる場合は同乗可能とし, 自動車移動を可能とした.



図-4 徒歩・自動車ネットワーク

(3) 結果

a) 人口・世帯の変化

マイクロシミュレーション (MS) の人口変動の結果を下記に示す. なお, 本シミュレーションの元データは国勢調査 2015 年度の人口等基本集計結果である. 国勢調査と MS の推定値の年齢別人口分布の比較を図 7 に示す. 初年度の 2015 年の国勢調査と MS 初期世帯マイクロデータを比較すると, 年齢別人口分布が等しくなっており, 生成した初期世帯マイクロデータが実測値を再現できていることが確認された. 2020 年度では, 2015 年度と比べて高齢者数が増加しており, 少子高齢化が進む豊橋市の現況を表現できているといえる. しかし, 実測値と比べてやや高齢者が多く算出された. 本研究で使用した MS は, 設定された豊橋市人口データフレームに合わせるため, 市外からの転入・転出により市内人口を調整するモデルとなっている. そのため, 実測値よりも推定値の方が高齢者の転入・転出者数が増加したと考えられる. 今後は, 高齢者の転入・転出を抑える形に変更を考慮する必要がある.



図-5 バスネットワーク



図-6 鉄道ネットワーク

次に, MS による年ごとの人口変動と住民基本台帳の比較を図-8, 図-9, 図-10, 図-11 に示す. 結果から, 豊橋市では年々世帯数が増加しており, MS でもその傾向を確認した. なお, 値のずれの原因は, MS の元である国勢調査と住民基本台帳の集計の違いだと考えられる. 国勢調査では市内に住む全住民を集計対象としているが, 住民基本台帳では住民票を移さずに市内に在住している人を集計できていない. そのため, 国勢調査から作られた MS の推定値と住民基本台帳の実測値で誤差が生じたと推察される. 上記の MS により得られた個人データから, 個人カテゴリ別の目的地までのアクセシビリティを算出し, 個人と施設の固有ベクトル中心性をそれぞれ算出し, 講演時に報告する.

表-1 個人カテゴリ別交通条件

個人カテゴリ n	個人カテゴリ ID	徒歩速度 (m/s)	徒歩可能距離(m)
高齢/免許あり	0	40	500
非高齢/免許あり	1	80	1000
高齢/免許なし (同乗可能)	2	40	500
高齢/免許なし (同乗不可能)	3	40	500
非高齢/免許なし (同乗可能)	4	80	1000
非高齢/免許なし (同乗不可能)	5	80	1000
子供/免許なし (同乗可能)	6	80	1000
子供/免許なし (同乗不可能)	7	80	1000

表-2 個人カテゴリ別交通条件

個人カテゴリ n	年齢	交通手段 m 利用可能性(av _m ⁿ)				
		免許保有	自動車運転	公共交通	徒歩	同乗
高齢/免許あり	65~	1	1	1	1	0
非高齢/免許あり	18-64	1	1	1	1	0
高齢/免許なし (同乗可能)	65~	0	0	1	1	0.5
高齢/免許なし (同乗不可能)	65~	0	0	1	1	0
非高齢/免許なし (同乗可能)	18-64	0	0	1	1	0.5
非高齢/免許なし (同乗不可能)	18-64	0	0	1	1	0
子供/免許なし (同乗可能)	6-17	0	0	1	1	0.5
子供/免許なし (同乗不可能)	6-17	0	0	1	1	0

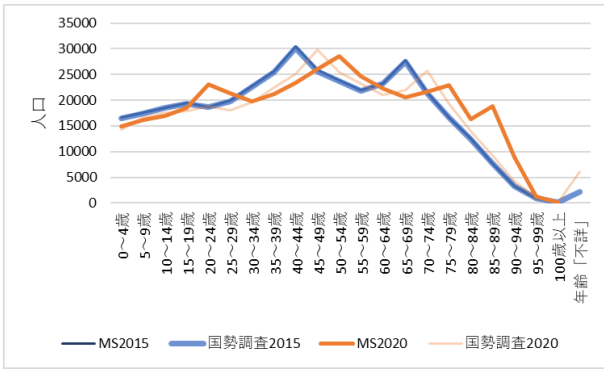


図-7 人口変動

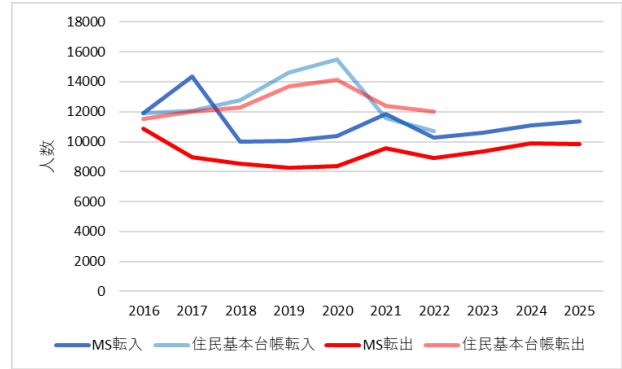


図-11 転入・転出数

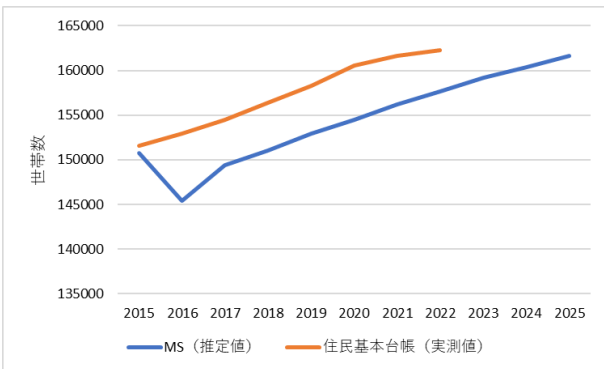


図-8 世帯数

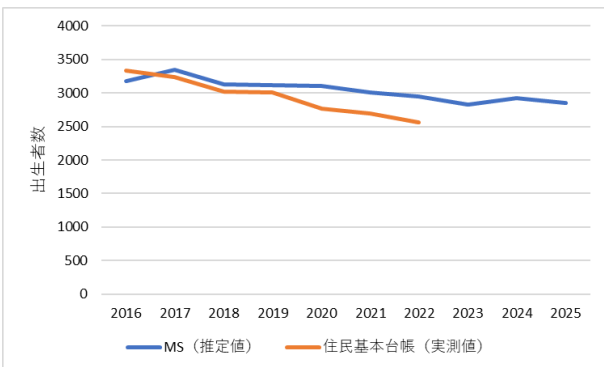


図-9 出生者数

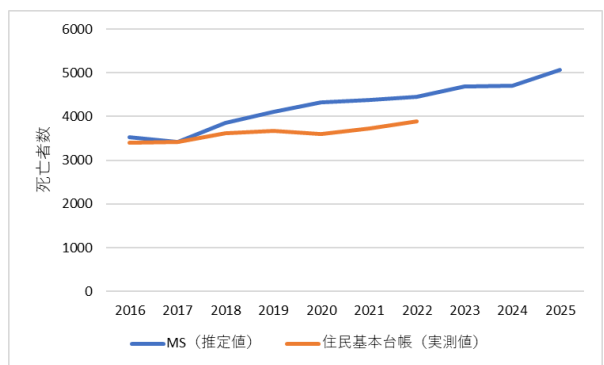


図-10 死亡者数

b) アクセシビリティ

豊橋市における個人カテゴリ別のアクセシビリティの算出を行う。先行研究⁵⁾では、仮想都市において、個人の属性や利用可能な交通手段を反映したアクセシビリティ指標の算出の妥当性が検証された。しかし、仮想都市のモデルでは、交通目的を設定せず、すべての住民が仮想都市内の施設へ向かうモデルであったため、全目的による交通状況下であることを考慮できていない。そこで本研究では、交通目的別に交通手段選択確率に基づく交通量を算出し、全目的による交通状況下でのアクセシビリティを算出する。これらの結果については、講演時に報告する。

4. おわりに

本研究では、大規模ネットワークによる社会のダイナミクス表現が可能なモデルの実都市への適用に向け、マイクロシミュレーションを用いた人口・世帯の変動を推測した。特に個人や世帯の属性変化はライフイベント生起確率により表現し、施設アクセスリンクの重みにアクセシビリティ指標を付与することで表現した。アクセシビリティモデルについては、先行研究で用いた仮想都市のモデルでは、交通目的を設定せず、すべての住民が仮想都市内の施設へ向かうモデルであったため、交通目的別に交通手段選択確率に基づく交通量を算出し、全目的による交通状況下でのアクセシビリティモデルを構築した。マイクロシミュレーションによる人口変動については、傾向はつかめていたものの、転入・転出等のライフイベントにおける実測値との誤差が大きく、改良を検討する必要がある。将来的な公共交通の需要や高齢者が集中する地区の

把握, メッシュごとに公共交通の移動分担率を算出, コミュニティバスの運賃の変動による利用率の変化等, 主に公共交通と高齢者を対象としたアクセシビリティ分析を現在実施しており, これらの分析結果については講演時に報告予定である.

シミュレーションの対象都市である豊橋市は, 公共交通があるにも関わらず, 自動車移動による交通手段分担率が 7 割程度と自動車移動の依存傾向が強い. また, 少子高齢化に伴う高齢ドライバーによる事故も懸念されている. 住民が自動車移動に依存しないまちづくりが必要不可欠となっており, 減少する財源の中で将来を見越したより効果的な政策立案が必要となっている. マイクロシミュレーションによる詳細な都市の将来予測によって, より良い交通政策の立案に寄与することが本研究の最終目標である. 今後は分析手法の実用性や再現性を検討するとともに, 将来のアクセシビリティ改善という課題解決のために, 主に公共交通を対象とした交通政策を立案し, シミュレーション分析により評価を行っていく予定である.

謝辞: 本研究は JSPS 科研費 18H01557 および 20K04721 の助成を受け実施しました. ここに感謝の意を表します.

参考文献

- 1) Wegener M.: Overview of Land-Use Transport Model, Proceedings of CUPUM 2003.
- 2) 林良嗣, 富田安夫: マイクロシミュレーションとランドダム効用モデルを応用した世帯のライフサイクル—住宅立地—人口属性構成予測モデル, 土木学会論文集, Vol.359/IV-9, 1988.
- 3) Hunt, J.D., Donnelly, R., Abraham, J.E., Batten, C., Freedman J., Hicks, J., Costinett, P.J. and Upton, W.J.: Design of a Statewide Land Use Transport Interaction Model for Oregon, Proceedings of 9th World Conference on Transport Research, CD-ROM, 2001.
- 4) Salvini, P. and Miller, E.J.: ILUTE: An Operational Prototype of a Comprehensive Microsimulation Model of Urban Systems, Networks and Spatial Economics, Vol.5, pp.217-234, 2005.
- 5) Simmonds, D.: The design of the DELTA land-use modelling package, Environment and Planning B. Vol.26, pp.665-684, 1999.
- 6) 水流風馬, 平野功真, 鈴木温: オープンデータを用いた初期世帯マイクロデータ生成方法に関する研究, 第 60 回土木学会土木計画学研究・講演集, CD-ROM, 2019.
- 7) 鈴木温, 杉木直, 宮本和明: 空間的マイクロシミュレーションを用いた都市内人口分布の将来予測, 都市計画論文集, Vol.51, No.3, pp.839-846, 2016.
- 8) 内田誠, 白山晋: SNS のネットワーク構造の分析とモデル推定, 情報処理学会論文誌, Vol.47, No.9, pp.2840-2849, 2006.
- 9) 甲村啓伍, 武藤敦子, 松井藤五郎, 森山甲一, 犬塚信博: ネットワーク構造を導入したコミュニティ活動モデル, 情報処理学会論文誌 (数理モデル化と応用), Vol.9, No.3, pp.15-23, 2016.
- 10) 田村聡子, 滑川達, 村上香奈, 山中英生, 澤田俊明, 花岡史恵: 社会ネットワーク分析を用いた市民参加型プロセスにおける関係者間ネットワークのモニタリング, 第 32 回土木計画学研究発表会・講演集, CD-ROM, 2005.
- 11) 村井裕太, 塩谷賢平: 社会ネットワーク分析による地域活性化に関する一考察, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 66 号, 2010.
- 12) 鈴木努: R で学ぶデータサイエンス ネットワーク分析 (第 2 版), 共立出版, 2017.
- 13) 増田直紀, 今野紀雄: 複雑ネットワーク基礎から応用まで, 近代科学社, 2010.
- 14) 長尾将吾, 杉木直, 倉内文孝, 松尾幸二郎: マルチレイヤネットワークを用いた社会ダイナミクスシミュレーション, 土木計画学研究・講演集, Vol.62, 2020.
- 15) 長尾将吾, 杉木直, 松尾幸二郎: 地域メッシュ統計を用いたメッシュベースの初期世帯マイクロデータ推定, 平成 30 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 2019.
- 16) 長尾将吾, 杉木直, 松尾幸二郎: オープンデータを用いたメッシュベースのマイクロシミュレーション型都市モデルの構築, 第 60 回土木計画学研究発表会・講演集, CD-ROM, 2019.

(2022. 9. 30 受付)

SIMULATION OF SOCIAL DYNAMICS MODEL BY MULTI-LAYER NETWORK FOR TOYOHASHI CITY

Haruki NAKATANI, Nao SUGIKI, Fumitaka KURAUCHI and Kojiro MATSUO