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による都市政策評価

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ケ丘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ケ丘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ケ丘1-1）
E-mail: k-matsuo@ace.tut.ac.jp

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．しかし，社会の様相は個人や世帯などの行動により絶えず変化しており，そのダイナミクスを記述する必要がある．先行研究では，マルチレイヤネットワークモデルにマイクロシミュレーション型都市モデルを援用した社会ダイナミクスシミュレーションを構築し，仮想都市において表現の妥当性を検証するとともに，実都市を対象とした適用を行った．本研究では，豊橋市において構築されたシミュレーションを用いて，4 次メッシュごとの人口・世帯分布や交通需要の将来予測を行う．また，公共交通に着目した都市政策を考慮した将来シミュレーションを実施し，固有ベクトル中心性によるアクセシビリティ指標を用いた評価を行う．

Key Words : *Multi layer network, Social Dynamics, Micro Simulation, policy evaluation, Eigenvector Centrality*

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に行われている．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．また，公共交通に着目した都市政策を考慮した将来シミュレーションを実施し，固有ベクトル中心性によるアクセシビリティ指標を用いた評価を行う．

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，施設へのアクセス性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．

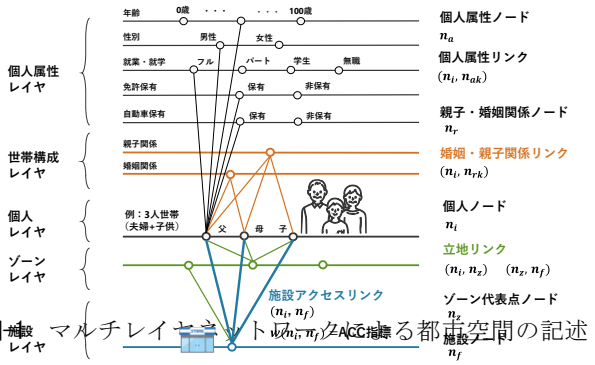


図-1 マルチレイヤネットワークによる都市空間の記述

(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．

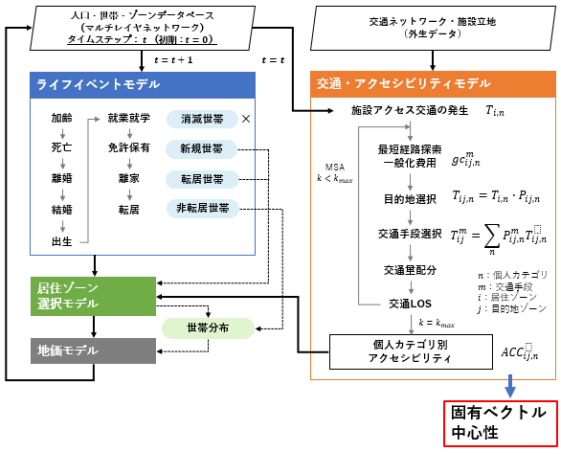


図-2 シミュレーションフロー

(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．ライブイベントモデルは，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．

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

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．

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

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．

$$V_{ih} = \sum_k \alpha_k X_{ik} + \gamma\, LP_i + c \tag{3}$$

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

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．

$$LP_i = \sum_k \gamma_k X_{ki} + \delta D_i + c \tag{5}$$

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．

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

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．

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

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

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

$$c_{a,n}^{Walk} = \tau_n \, t_a^{Walk} \tag{10}$$

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．

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

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

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

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．

$$T_{ij,n,k} = T_{i,n,k} \cdot P_{ij,n,k} \tag{14}$$

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．

$$V_{ij,n}^{m} = pgc_n \, gc_{ij,n}^{m} \tag{15}$$

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

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．

$$av_n^m = av_m_n^m \times av_w_n^m \times av_c_n^m \tag{17}$$

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（$gc_{ij,n}^m < gc_thr_n^m \rightarrow 1$，$gc_{ij,n}^m \geqq gc_thr_n^m \rightarrow 0$）

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．

$$T_{ij,k}^{m} = \sum_n P_{ij,n}^{m} T_{ij,n,k} \tag{18}$$

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．

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

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．

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

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．

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

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

$minf_l$ ：公共交通系統lの最低運行頻度

$maxf_l$ ：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. 豊橋市を対象とした将来予測への適用

(1) シミュレーション概要

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)を使用して作成した．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 路線についてネットワークデータを作成した．

b) 概要

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(**図-3**)．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仮定する．これらのメッシュの中心から，市内 23 か所の大型小売店舗までの経路探索により，市民の買い物行動を表現する．また，マイクロシミュレーションにより都市を経年変化させる．分析期間は，2015 年から 2025 年までの 10 年間とする．

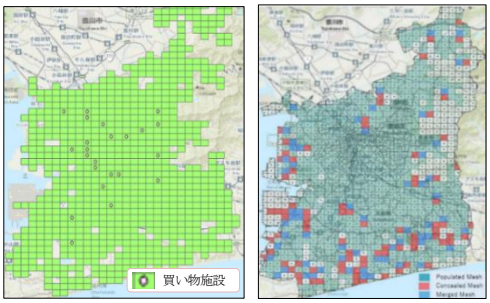


図-3 豊橋市人口有メッシュと買い物施設

表-1 個人カテゴリ別交通条件

個人カテゴリn		徒歩速度 (km/h)	徒歩可能距離 (km)	徒歩時間価値 (yen/Min)	待ち時間価値 (yen/Min)	乗車時間価値 (yen/Min)	走行経費（燃料）原単位 (yen/km)	乗換抵抗費用 (yen/times)
高齢者｜免許あり	0	2.4	1	30	5	20	20.8	10
非高齢者｜免許あり	1	4.8	3	15	5	20	20.8	5
高齢者｜免許なし(同乗可能)	2	2.4	1	30	5	20	20.8	10
高齢者｜免許なし(同乗不可能)	3	2.4	1	30	5	20	20.8	10
非高齢者｜免許なし(同乗可能)	4	4.8	3	15	5	20	20.8	5
非高齢者｜免許なし(同乗不可能)	5	4.8	3	15	5	20	20.8	5
子ども｜免許なし(同乗可能)	6	4.8	3	15	5	20	20.8	5
子ども｜免許なし(同乗不可能)	7	4.8	3	15	5	20	20.8	5

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	自動車同乗
高齢者｜免許あり	0	65～	1	1	1	1	0
非高齢者｜免許あり	1	18～64	1	1	1	1	0
高齢者｜免許なし(同乗可能)	2	65～	0	0	1	1	0.5
高齢者｜免許なし(同乗不可能)	3	65～	0	0	1	1	0
非高齢者｜免許なし(同乗可能)	4	18～64	0	0	1	1	0.5
非高齢者｜免許なし(同乗不可能)	5	18～64	0	0	1	1	0
子ども｜免許なし(同乗可能)	6	6～17	0	0	1	1	0.5
子ども｜免許なし(同乗不可能)	7	6～17	0	0	1	1	0

表-2 一般化費用閾値

交通手段 m	一般化費用閾値 $gc_thr_m^n$(円)
自動車	500
自動車同乗	500
公共交通	5000

(2) シミュレーション条件

表-1 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．また，**表-2** のように一般化費用の閾値を設定した．

(3) 将来予測シミュレーション結果

マイクロシミュレーション(MS)による将来人口推移の予測結果として，国勢調査とシミュレーションの推定値の年齢別人口分布の比較を**図-4** に示す．なお，本シミュレーションにおいて初期時点である 2015 年のデータは国勢調査 2015 年度の人口等基本集計結果と同一である．国勢調査と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．また，世帯人数別世帯数では，少人数世帯の数が増加し，大人数世帯の数が減少する傾向が見られた．

個人カテゴリ 0 と 2 における各メッシュのアクセシビリティ（ACC）のシミュレーション結果を**図-5** に示す．

いずれの結果からも ACC が都心部で高いことが確認できる．また，個人カテゴリ 0（高齢者免許あり）が個人カテゴリ 2（高齢者免許なし）よりも ACC が高くなっていることが確認できる．しかし，豊橋市臨界部にあたる一部のメッシュの ACC が非常に高い値を示しており，現実的でない結果が得られたので改善が必要である．

交通分担率の推定値と実測値の比較を**図-6** から**図-8** に示す．シミュレーションにおける推定値と第五回中京パーソントリップ調査の結果を個人カテゴリ別に比較した．なお，本モデルでは，買い物行動に着目した交通分析を行うため，第五回中京パーソントリップ調査における 5 つの行動目的（出勤，登校，自由，業務，帰宅）のうち，買い物行動を含む自由目的のデータのみを実測値として利用した．

免許を保有する個人カテゴリ 0, 1 において，自動車依存の傾向がシミュレーション上でも確認できた．しかし，個人カテゴリ 0 の推定値において，徒歩による買い物行動を選択する割合が実測値と比べて非常に少ない結果となった． また，個人カテゴリ 1, 2 の推定値において，公共交通利用の割合が実測値と比べて非常に高くなっていることが確認できた．以上より，個人カテゴリ別の交通分担率は，現段階では正しく表現できておらず，今後シミュレーション条件の感度分析を行う必要がある．

個人カテゴリ別の固有ベクトル中心性と度数の関係を**図-9** に示す．固有ベクトル中心性とは，個人の中心性を表しており，ACC と度数により算出される．ここで度数とは，個人からアクセス可能な施設の数を表す．高齢者にあたる個人カテゴリ 0, 2 の度数が低く，高齢者はアクセス可能な施設の数が少ないことが示されている．一方，非高齢者の度数と EC は高いことが確認できる．

次に施設における固有ベクトル中心性と次数の関係を**図-10** に示す．円のサイズによって固有ベクトル中心性の大きさを表し，色の濃さによって次数の大きさを表した．また，各メッシュを人口規模ごとに色分けした．豊橋市で人口が多い中心部に位置する施設ほど次数と固有ベクトル中心性が大きくなることが確認できる．2015 年と 2025 年を比較すると，全体的に度数が少なくなっていることが確認できる．これは人口減少により，施設へアクセス可能な人数の減少によるものと考えられる．

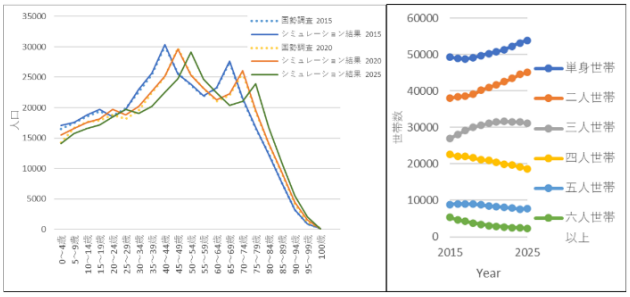


図-4 世帯・人口変動

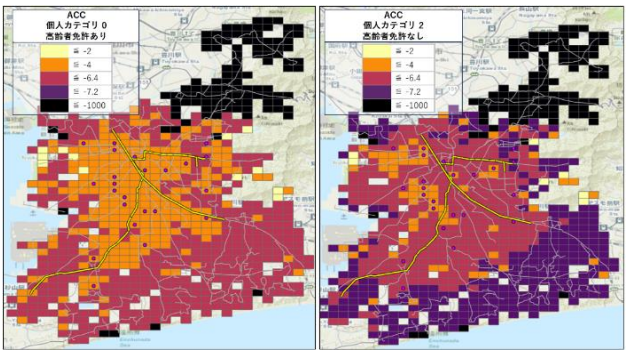


図-5 豊橋市メッシュごとの ACC

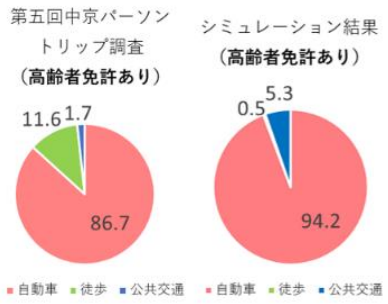


図-6 個人カテゴリ 0 の交通分担率

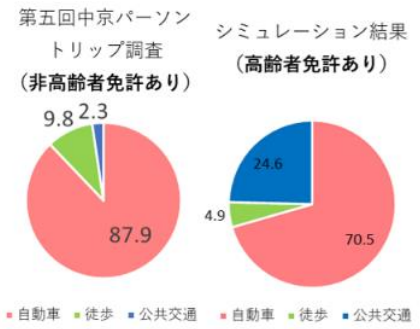


図-7　個人カテゴリ 1 の交通分担率

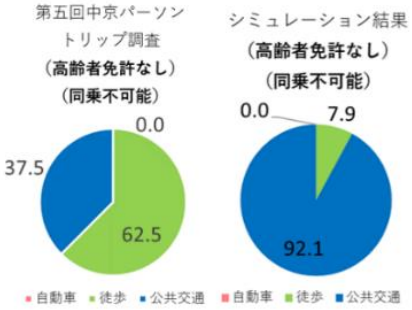


図-8　個人カテゴリ 2 の交通分担率

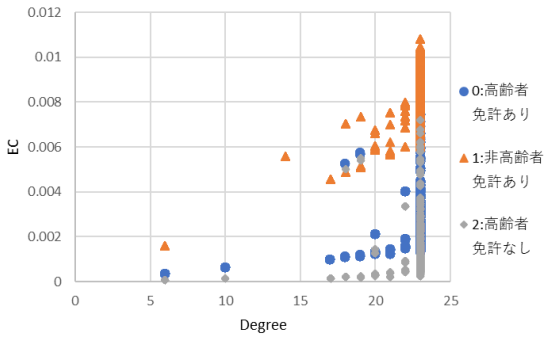


図-9　個人の度数と EC

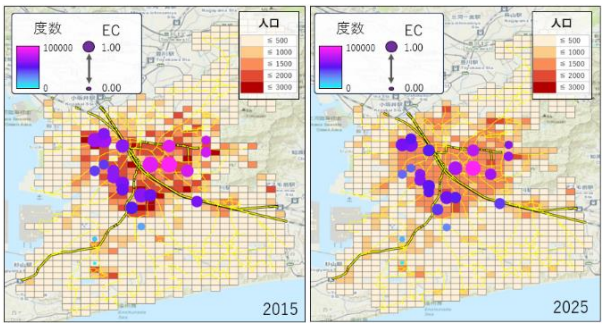


図-10　施設の度数と EC

4. 都市政策評価への適用

(1)　豊橋の都市政策

a) 豊橋市都市交通計画 2016-2025

・公共交通幹線軸の強化

沿線に住みたくなる魅力ある公共交通とするため，バス路線を利便性の高い公共交通幹線軸として強化を行う．集約型都市構造への転換に向けた都市づくりと連携して構築する．具体的な取り組み内容としては，増便や運行時間帯の拡大，定時性や速達性を確保する走行環境の改善や待ちやすい環境整備など，利便性の向上につながる事業を展開している．

・交通結節機能の強化

各公共交通機関が連携した公共交通ネットワークを構築するため，交通結節点では公共交通相互や公共交通と徒歩・自転車・自家用車との円滑で利便性の高い乗換機能と待ちやすい環境をつくり，様々な交通が結節する場所として整備を推進している．

b) 豊橋市立地適正化計画

・市街地の集約化

人口減少・高齢化が進むなか，便利な生活をおくることができる都市機能誘導区域の周辺や高度なサービス水準が確保された公共交通幹線軸の沿線へと，高密度な人口集積を図り，居住誘導区域を設定．加えて，居住を積極的に誘導すべき区域として「歩いて暮らせるまち区域」を設定している(図-11)．

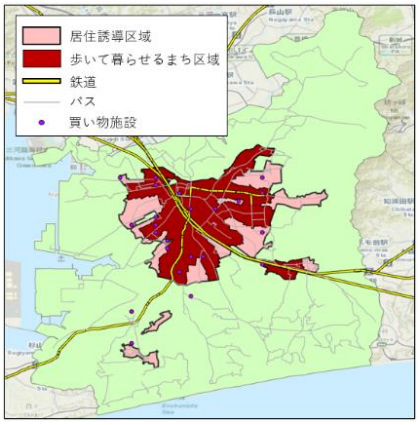


図-11　居住誘導区域

(2)　評価する都市政策の内容

豊橋市の都市・交通施策より，本モデルで評価可能な 3 つの施策を対象に分析する．ここでは，今後どのように都市政策評価を行うのか，シミュレーション上での設定についてなどの考えを述べる．

a) 市街地の集約化

本研究で使用するモデルは，個人が居住地のアクセシビリティや地価を考慮し，居住選択を行うモデルとなっている．これにより，豊橋市の将来的な人口分布を推定し，居住誘導区域への居住誘導効果を評価する．また，居住誘導地域における買い物施設へのアクセス性を，交通・アクセシビリティモデルにより算出し，居住誘導区域外のアクセス性と比較することで，居住誘導区域における交通利便性を評価する．

b)　公共交通の強化

バス路線の維持・運行本数の増便により，住民の公共交通利便性がどの程度変化するのか評価を行う．シミュレーション上においては，鉄道・バス路線の運行本数を増加させ，バス路線を新たに加えることによって，公共交通を強化した場合の住民のアクセス性を推定する．

c)　公共交通利用者への支援

公共交通利用者（高齢者・子育て世帯など）への支援や運賃の低廉化により，住民の公共交通利便性がどの程度変化するのか評価を行う．シミュレーション上においては，高齢者・子ども世代の運賃無償化により表現する．

(4)　評価指標（固有ベクトル中心性）

アクセスネットワークは図-12 に示すように 2 部ネットワークとしての解釈が可能であり，これを平面化したグラフを考えることで隣接行列を定義できる．この隣接行列に対して固有ベクトル中心性（以下，EC）を算出し，その経年的な変化に着目した考察を実施する．なお，EC（式(25)）は対象ノードの中心性に隣接ノードの中心性を反映させた指標であり，次数やリンクの重みを考慮可能である．つまり，個人および施設ノードの EC に対してそれぞれ表-3 に示すような要素が考慮可能となる．ここで，$\boldsymbol{A}=(a_{ij})$ は隣接行列，λは$\boldsymbol{A}$の最大固有値，$\boldsymbol{c}=(C_{ev}(i))$は中心性を成分とするベクトルである．

$$C_{ev}(i)=\frac{1}{\lambda}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}\,C_{ev}(j),\quad \boldsymbol{c}=\frac{1}{\lambda}\boldsymbol{A}\boldsymbol{c} \qquad (25)$$

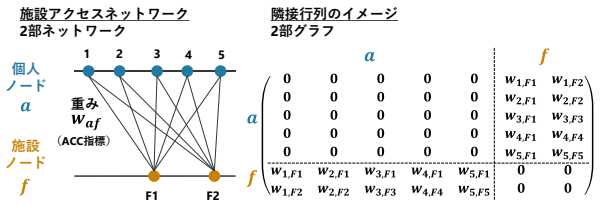


図-12　施設アクセスネットワークの形状

表-3　固有ベクトル中心性の考慮可能要素

要素	個人ノードのEC	施設ノードのEC
次数	アクセス可能施設数	アクセス可能個人数
重み	個人～施設ACC指標	個人～施設ACC指標
隣接ノードEC	施設ノードのEC 施設のアクセス性	個人ノードのEC 個人のアクセス性

5.　おわりに

先行研究において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することができた．しかし，交通・アクセシビリティモデルにおける交通分担率に関して，現段階では正しく表現できておらず，今後シミュレーション条件の感度分析を行う必要がある．

マイクロシミュレーションを用いた本モデルの強みとして，個人属性を考慮した交通シミュレーションを行うことが可能であることが挙げられ，市民の個人属性を経年変化させることで，より詳細な将来都市における個人ごとの交通シミュレーションが実施可能である．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．

今後の研究展望としては，交通・アクセシビリティモデルの感度分析を行い，より実測値に近い交通シミュレーション結果での将来予測を行う．またその結果を用いて，4 章で記載した都市政策評価を行い，社会ダイナミクスシミュレーションによる都市政策評価の有用性について検討したい．

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．

REFERENCES

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.
17) 豊橋市都市計画部 都市計画課：豊橋市立地適正化計画,2018
18) 豊橋市都市計画部 都市交通課：豊橋市都市交通計画 2016-2025,2016

(Received August 30, 2023)
(Accepted October 13, 2023)

FUTURE POLICY EVALUATION BY SOCIAL DYNAMICS SIMULATION USING A MULTI-LAYER NETWORK

Haruki NAKATANI, Nao SUGIKI, Fumitaka KURAUCHI and Kojiro MATSUO