

# マルチレイヤネットワークを用いた 社会ダイナミクスモデルのシミュレーション

長尾 将吾<sup>1</sup>・杉木 直<sup>2</sup>・倉内 文孝<sup>3</sup>・松尾 幸二郎<sup>4</sup>

<sup>1</sup>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: nagao.shogo.dd@tut.jp

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>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

<sup>4</sup>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。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が表現可能なモデルの構築を見据え、個人や世帯が立地する都市空間を対象としたマルチレイヤネットワークモデルを構築し、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、仮想都市を対象にモデルを適用し、シミュレーションを実施することで、ネットワークの表現方法に関する検証を行う。

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

## 1. はじめに

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。こうした中、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が必要とされている。

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、こうした社会のダイナミクスを表現するためには、交通行動や立地選択行動を行う主体の属性変化や、それを前提とした土地利用や立地の変化を記述する必要がある。したがって、主体の属性変化、土地利用、施設配置および交通サービスの相互関係性をネットワークとして考慮し、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手法を構築することが有用であると考えられる。しかし、現実の都市を対象とした実用的な分析手法を構築するためには、大規模ネットワークに適用可能な簡便な手法が必要である。

そこで本研究では、大規模ネットワークによる社会のダイナミクスが表現可能なモデルの構築に向け、個人とその集合体である世帯、それらが立地する都市内の空間を対象としたマルチレイヤネットワークモデルを構築し、主体属性変化やその下での立地および施設アクセスの記述を行う。また、仮想都市を対象としてモデルを適用し、人口動態と施設アクセスのそれぞれについて、表現方法の基礎的な検討を実施する。

## 2. マルチレイヤネットワークモデル

### (1) 個人・世帯と都市空間の表現

ある特定の時点における、マルチレイヤネットワーク

による都市空間の表現イメージを図-1に示す。マルチレイヤネットワークモデルでは、個人とその集合体である世帯、それらが立地する都市内の空間を複数のレイヤで表現する。

個人の属性は、個人レイヤ上の個人ノードと、個人属性レイヤ上の属性ノードとを接続することで表現する。世帯構成は婚姻関係および親子関係により表現し、単純化のためその他の個人間の関係は省略する。婚姻関係は個人ノードが同一の婚姻ノードに接続することで表現し、親子関係は個人ノードが同一の親子ノードに接続することで表現する。ゾーンレイヤにおいて、都市空間は有限個のゾーンに分割されており、それぞれのゾーンにノードとして取り扱われる代表点が存在するものとする。同一世帯内の個人ノードは同一ゾーンノードに接続することで世帯立地を表現する。また、施設ノードとゾーンノードの接続により施設立地を表現する。マルチレイヤネットワークにおいて人口動態や土地利用変化は、ライフイベント発生確率や立地選択モデルによる確率的なノード消滅・生成、リンクの付け替えによって表現される。

## (2) 施設アクセスの表現

マルチレイヤネットワークモデルでは、施設アクセスリンクを介した個人ノードと施設ノードの接続により、個人の施設選択および施設へのアクセス性を表現する。ここでの施設は個人の確率的な選択行動の目的地とし、各個人は個人ノードの属性から判断される利用可能な交通手段により、施設へのアクセスが可能であるものとする。施設アクセス性は、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を付与することで表現する。

アクセシビリティ指標については、これまでに多くの研究が蓄積されており、その計測手法によりいくつかの指標に分類される<sup>9)</sup>。中でも効用理論に基づく指標は、ランダム効用論を基礎として、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）をアクセシビリティと定義するものであり<sup>23)4)</sup>、式(1)のように表される。

$$ACC_n = \frac{1}{\mu} \ln \left( \sum_{j \in J_n} \exp(\mu V_{nj}) \right) \quad (1)$$

ここで、

- $ACC_n$  : 個人 $n$ のアクセシビリティ指標
- $V_{nj}$  : 選択肢 $j$ から個人 $n$ が得る効用
- $J_n$  : 個人 $n$ の選択肢集合
- $\mu$  : 分散パラメータ

一般に、効用関数は選択肢の特徴や魅力、一般化費用、地域特性、個人属性などの関数として定式化される。そのため、効用理論に基づくアクセシビリティ指標は地域特性や個人属性などの影響度を考慮することができる。

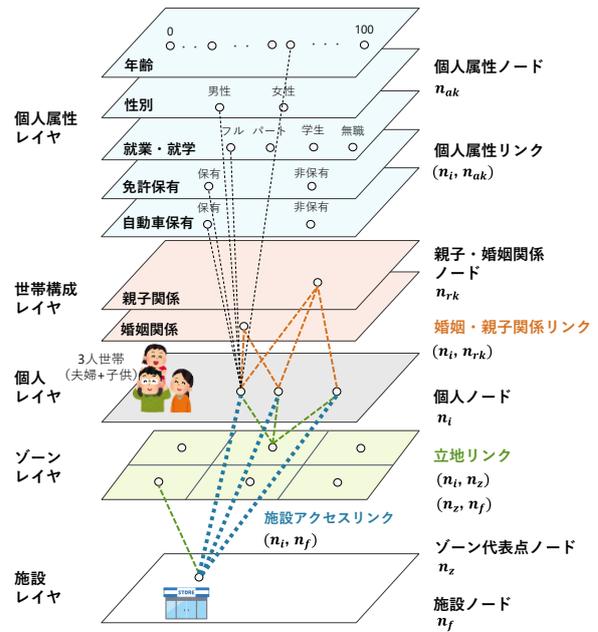


図-1 マルチレイヤネットワークモデルのイメージ

本研究で構築するマルチレイヤネットワークモデルでは、この効用理論に基づくアクセシビリティ指標を施設アクセスリンクの重みとして付与する。特に、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。算出方法についての詳細は3章で述べる。

## 3. ネットワークダイナミクス

### (1) ネットワークダイナミクスの基本構造

本研究で構築するマルチレイヤネットワークモデルにおけるネットワークダイナミクスの基本構造を図-2に示す。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<sup>20)</sup>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。

(2) ライフイベントモデル

a) 加齢

加齢イベントは、個人ノードに確率的に生じる。シミュレーションタイムステップを $\Delta t$ とすると、個人の年齢に $\Delta t$ 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。

$$S(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right\} \quad (t \geq 0) \quad (2)$$

ここで、 $t$ は年齢（生存時間）、 $\alpha$ 、 $\beta$ はパラメータである。式(2)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、

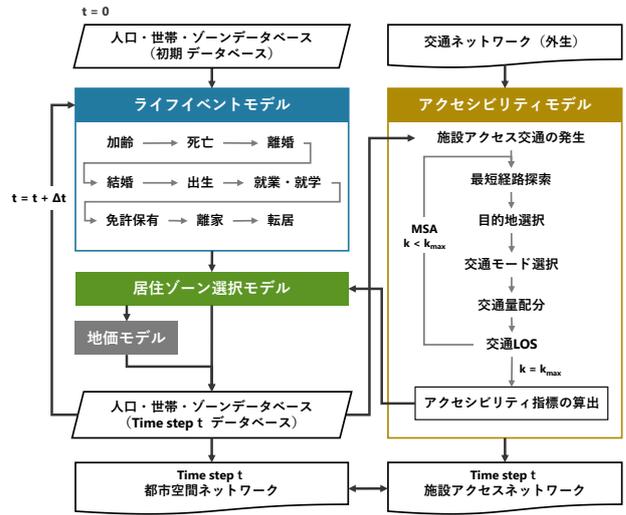


図-2 ネットワークダイナミクスの基本構造

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。

$$g_n(x) = \frac{C_n |\lambda|}{b_n \Gamma(\lambda_n^{-2})} (\lambda_n^{-2})^{\lambda_n^{-2}} \exp\left[\lambda_n^{-1} \left(\frac{x - u_n}{b_n}\right) - \lambda_n^{-2} \exp\left\{\lambda_n \left(\frac{x - u_n}{b_n}\right)\right\}\right] \quad (3)$$

ここで、 $g_n(x)$ は $x$ 歳の女性の第 $n$ 子の出生確率、 $\Gamma()$ はガンマ分布であり、 $C_n$ 、 $u_n$ 、 $b_n$ 、 $\lambda_n$ はパラメータである。式(3)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。

### (3) 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。

$$V_{ih} = \sum_k \alpha_k X_{ik} + \gamma LP_i + c \quad (4)$$

$$P_{ih} = \frac{e^{V_{ih}}}{\sum_{i' \in Z_h} e^{V_{i'h}}}, \quad (i \in Z_h) \quad (5)$$

ここで、 $\alpha_k$ 、 $c$ 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。

#### (4) 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。

$$LP_i = \sum_k \gamma_k X_{ki} + \delta D_i + c \quad (6)$$

ここで、 $\gamma_k$ 、 $\delta$ 、 $c$ 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。

#### (5) アクセシビリティモデル

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、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。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利用者均衡配分モデルを定式化する。

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。また、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。

$$gc_{ij,n}^m = \sum_a \delta_a^{ij} c_{a,n}^m \quad (7)$$

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

$\delta_a^{ij}$  :  $ij$ 間の経路接続行列

また、交通手段別のリンクコスト $c_{a,n}^m$ は以下である。

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

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

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

$$c_{a,n}^{RS} = \tau_n t_a^{Auto} \quad (11)$$

ここで、

$r_l$  : 系統 $l$ の公共交通リンク ( $r_l \in a$ )

$t_a^{Auto}$  : 道路リンク $a$ の乗車時間

$t_{r_l}^{PT}$  : 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

$ac_{r_l}$  : 公共交通リンク $r_l$ へのアクセスダミー  
(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

$\tau_n$  : 個人カテゴリ $n$ の時間価値

以上を踏まえ、ネットワーク中の交通手段別 OD 交通量を算出する。まず、 $ij$ 間における個人カテゴリ $n$ の目的地選択確率 $P_{ij,n}$ 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。

$$ACC_{ij,n} = \frac{1}{\mu} \ln \left( \sum_{m \in M_n} av_n^m \exp(\mu V_{ij,n}^m) \right) \quad (12)$$

$$V_{ij,n} = ps_n S_j + pa_n ACC_{ij,n} \quad (13)$$

$$P_{ij,n} = \frac{\exp(V_{ij,n})}{\sum_{j' \in J_n} \exp(V_{ij',n})} \quad (14)$$

ここで、

- $\mu$  : 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
- $S_j$  : 施設 (目的地)  $j$ の集客力指標
- $pa_n$  : アクセシビリティ指標のパラメータ
- $ps_n$  : 集客力指標のパラメータ
- $V_{ij,n}$  : 個人カテゴリ $n$ の $ij$ 間の効用

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

$$T_{ij,n} = T_{i,n} \cdot P_{ij,n} \quad (15)$$

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。

$$V_{ij,n}^m = pgc_n gC_{ij,n}^m + \zeta_n^m \quad (16)$$

$$P_{ij,n}^m = \frac{av_n^m \exp(V_{ij,n}^m)}{\sum_{m' \in M_n} av_n^{m'} \exp(V_{ij,n}^{m'})} \quad (17)$$

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
  - $\zeta_n^m$  : 交通手段 $m$ に関する選択肢固有ダミー
  - $av_n^m$  : 個人カテゴリ $n$ の交通手段 $m$ 利用可能性
- 交通手段別OD交通量 $T_{ij}^m$ は交通手段選択確率 $P_{ij,n}^m$ を用いて次式で算定する。

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

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。

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

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
- $\alpha, \beta$  : 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
- $\gamma, \eta$  : 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。

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

ここで、

- $k$  : 反復回数
- $x_a^{m,k+1}$  : 更新後 ( $k+1$ ) のリンク交通量
- $x_a^{m,k}$  : 更新前 ( $k$ ) のリンク交通量
- $x_a^{m,k'}$  : 反復 $k$ での再配分後のリンク交通量

配分後の交通量およびLOSをベースに式(12)により、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、式(24)によりアクセシビリティ指標を基準化する。また、施設アクセスリンクのイメージを図-3に示す。

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

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

#### 4. 仮想都市を対象としたモデルの適用

##### (1) モデル適用の概要

構築したマルチレイヤネットワークモデルを仮想都市に適用する。ここでは、モデル検証の第一段階として、人口動態と施設アクセスについて別々に条件を設定し、シミュレーションを実施する。それぞれのシミュレーションにおける条件および結果については以下に記す。

仮想都市の形状を図4に示す。仮想都市は  $9 \times 9 = 81$  ゾーンからなり、各ゾーンは1辺が 1km の正方形とする。都市内居住者は各ゾーンの重心に居住していると仮定する。また、仮想都市内の交通ネットワークとして、道路、公共交通（鉄道・バス）を考慮する。隣接するゾーン重心を双方向リンクで接続することで道路ネットワークを表現する。バスは道路ネットワーク上を走行し、ゾーン重心にバス停を設置する。鉄道は鉄道リンクにより構成されるネットワーク上を走行し、ゾーン重心に鉄道駅を設置する。仮想都市での交通量配分、アクセシビリティ指標の算出は、以上の交通ネットワークをベースとして実施する。さらに、仮想都市には個人の目的地となる施設を配置する。なお、现阶段では、施設の集客力指標は考慮していない。

##### (2) 人口動態の表現

ここでは、ライフイベントモデル、居住ゾーン選択モデル、地価モデルを仮想都市に適用することで、仮想都市内の経年的な人口動態に限定したシミュレーションを実施する。初期時点には、各ゾーンに 25 歳の夫婦世帯が 100 世帯、計 8100 世帯が存在するものとする。シミュレーション期間はタイムステップを 1 年として 100 年間とする。また、ライフイベントの発生確率は、既構築のマイクロシミュレーション型都市モデル<sup>9)</sup>に倣い、国勢調査、人口動態調査等の各種統計調査を用いて設定する。なお、設定したライフイベントの発生確率は愛知県豊橋市を対象としたものである。また、居住ゾーン選択モデルの効用関数の説明変数として、地価、都心距離、最寄駅距離を加え、现阶段では施設に対するアクセシビリティは考慮していない。さらに地価モデルの説明変数として、都心距離、最寄駅距離、立地密度を加えた。仮想都市内全域の人口・世帯数について、シミュレーション結果を図5に示す。人口・世帯数の増減は、設定したライフイベント発生確率に対して合理的な結果が得られ、構

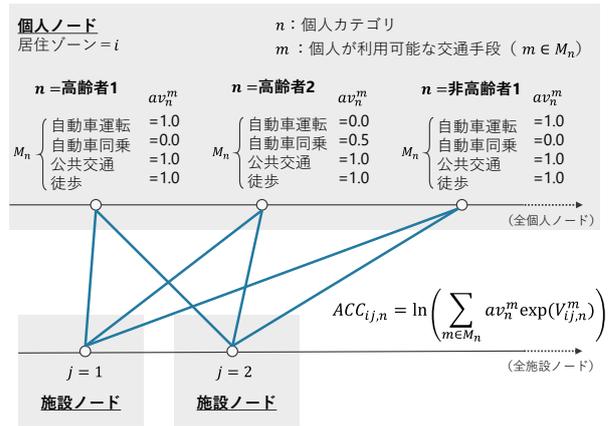


図3 施設アクセスリンクのイメージ

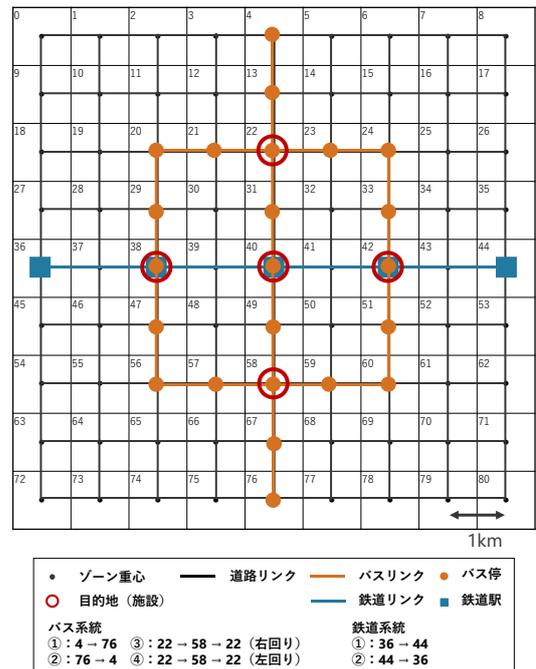


図4 仮想都市の形状

築したモデルによって人口動態が表現可能であることを確認した。

一方、個人レイヤと世帯構成レイヤで形成されるネットワークを対象に、世帯タイプ別にネットワーク指標について検討を行った。対象とするネットワークの例は図6の通りであり、各世帯は、婚姻・親子関係リンクによって接続される独立したネットワークである。個人ノード、婚姻関係ノード、親子関係ノードについて、次数、近接中心性、媒介中心性、固有ベクトル中心性を算出し、世帯構成を表現する指標となり得るかを検討した。以下に、それぞれの指標に対する解釈についてまとめる。

- ・個人ノードの次数：  
個人に対する、夫婦関係・親子関係の数。
- ・親子関係ノードの次数：  
上下1世代間の人数。子供の数。

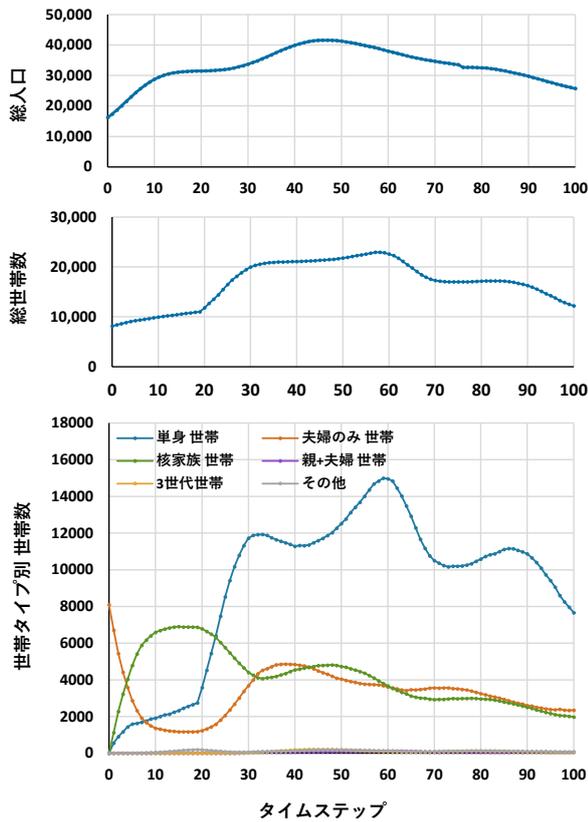


図-5 仮想都市シミュレーションにおける人口・世帯数変化

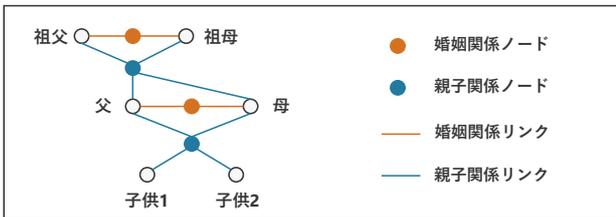


図-6 世帯構成ネットワークの例 (両親+夫婦+子供2人)

- ・個人ノードの近接中心性：  
個人に対して他の世帯構成員までの世代間距離。
- ・個人ノードの媒介中心性：  
個人が世帯内において中間的な世代にある程度。  
他の世代をつなぐ役割にある程度。
- ・個人ノードの固有ベクトル中心性：  
個人が世帯内において中間的な世代にある程度。

以上の検討より、それぞれの指標について漠然とした解釈は得られるものの、世帯構成の特徴を明確に表現できるとは言えない。一方、世帯構成の表現は、個人ノードの属性を集計することで可能である。また、現段階では世帯ごとに独立したネットワークを対象に検討したが、友人関係、家族・親族関係など、世帯内の繋がりに限定しないソーシャルネットワークを構築することで、都市構造をより社会的に評価できる可能性があると考えられる。

個人カテゴリ		交通手段利用可能性				
		免許保有	自動車運転	公共交通	徒歩	同乗
Eld_1_0	高齢 (免許あり) ○	1	1	1	0	0
Eld_0_1	高齢 (免許なし   同乗可能) ●	0	0	1	1	0.5
NEld_1_0	非高齢 (免許あり) □	1	1	1	0	0

図-7 アクセシビリティ分析における居住者の概要

表-1 個人カテゴリ・交通条件

個人カテゴリ	徒歩速度 (km/h)	徒歩時間価値 (円/分)	待ち時間価値 (円/分)	乗車時間価値 (円/分)	乗換時間価値 (円/分)	一般化費用 パラメータ	自動車 固有ダミー	徒歩 固有ダミー
		$\tau_{walk}$	$\tau_{wait}$	$\tau_{ride}$	$\tau_{tran}$	$pgc_n$	$\zeta_{Auto}$	$\zeta_{Walk}$
Eld_1_0	2.4	300	75	50	50	-1	-3000	0
Eld_0_1	2.4	300	75	50	50	-1	-3000	0
NEld_1_0	4.8	150	75	50	100	-1	-1000	0

系統ID	最大容量 (人/便)	着席容量 (人/便)	最低頻度 (便/時)	最高頻度 (便/時)	ターミナル チャージ (回/円)	距離 チャージ (円/km)	混雑 パラメータ
	$K_l$	$SK_l$	$minf_l$	$maxf_l$	$ct_r$	$cd_r$	$\gamma$
バス 1-4	60	30	2	10	100	30	0.5
鉄道 1-2	200	100	2	10	100	20	1.0

表-2 個人カテゴリ別交通手段分担率

交通手段	Eld_1_0	Eld_0_1	NEld_1_0
自動車	0.775	0.000	0.861
同乗	0.000	0.741	0.000
公共交通+徒歩	0.218	0.253	0.115
徒歩	0.006	0.007	0.024

### (3) 施設アクセスの表現

ここでは、アクセシビリティモデルを適用することで、個人の施設アクセスに限定した分析を実施する。したがって、現段階では個人・世帯属性や立地の経年的なシミュレーションとは切り離し、以下のような居住者を設定することでアクセシビリティモデルを適用した。仮想都市交通ネットワークに対して均衡配分を実施することで、施設アクセスリンクの重みとなるアクセシビリティ指標を算出した。この際、アクセシビリティ指標における分散パラメータ ( $\mu$ ) は1とする。また、算出したアクセシビリティ指標を施設アクセスリンクの重みとして付与し、個人ノードおよび施設 (目的地) ノードの固有ベクトル中心性を算出することで、ネットワーク指標の面から施設アクセスに関する分析を行った。分析において設定した居住者 (個人ノード) を図-7に示す。各ゾーンに、2人世帯×600世帯=1200人が居住していることし、各個人カテゴリの属性は、図-7に示すとおりである。また、個人カテゴリ別のパラメータおよび交通ネットワーク条件を表-1に示す。

均衡配分 (MSA による反復=30 回) の結果、個人カテゴリ別の交通手段分担率の平均値は、表-2の通りとなった。自動車分担率は、自動車保有者でおよそ8割となり、非高齢者の分担率が高齢者に対して大きくなった。また、同乗可能な高齢者の同乗分担率は7割程度となった。一方、公共交通分担率はいずれの個人カテゴリにお

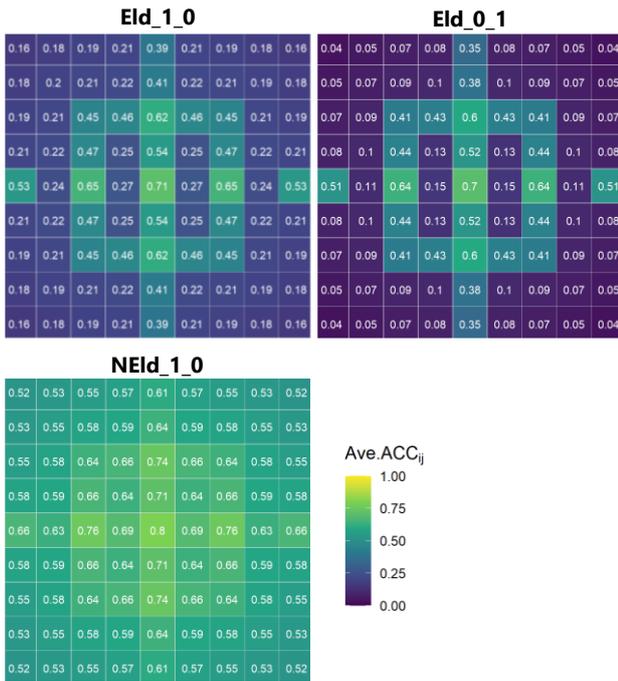


図-8 メッシュ別個人平均 ACC

いても 1~2 割ほどであり、徒歩分担率は極めて小さくなった。また、式(12)、式(24)で表されるアクセシビリティ指標（以下 ACC）のメッシュ別個人平均を図-8 に示す。特に、非高齢者は相対的に ACC が大きく、他の個人カテゴリに対して自動車の効用が大きいことが考えられる。また、いずれの個人カテゴリにおいても、施設（目的地）に近いゾーンおよび、公共交通周辺ゾーンの ACC は大きく、多様な交通手段が利用可能なゾーンほど ACC が大きくなることを確認できる。以上より、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を算出することができた。さらに、個人レイヤ、施設レイヤで形成される施設アクセスネットワークを対象に、ネットワーク指標を用いて分析を実施した。具体的には、算出した ACC を施設アクセスリンクの重みとした場合の、個人ノード、施設ノードにおける固有ベクトル中心性を算出した（図-9）。個人ノードに着目すると、ACC が大きいノードほど固有ベクトル中心性が大きくなることを確認した。これより、個人ノードの固有ベクトル中心性は、都市内における相対的なアクセシビリティを表すと考えられる。一方、施設ノードの固有ベクトル中心性に大きな違いはなかった。これは、現在のネットワークでは、全ての個人ノードと施設ノードが接続しており、施設ノードの次数に差がないためと考えられる。

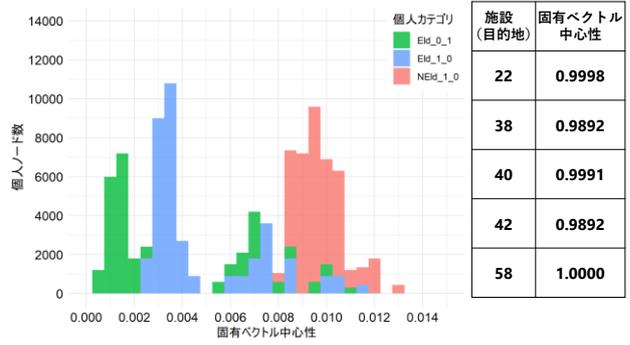


図-9 個人・施設（目的地）ノードの固有ベクトル中心性

## 5. 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構築に向け、個人とその集合体である世帯、それらが立地する都市内の空間を対象としたマルチレイヤネットワークモデルを構築した。また、大規模ネットワークへの適用を見据えてた簡易なモデルにより、個人や世帯の意思決定主体の属性変化や立地変化および施設アクセスを、ノードとリンクの変化として記述する手法を提示した。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。

さらに、仮想都市を対象にマルチレイヤネットワークモデルの適用を適用した。具体的には、モデル検証の第一段階として人口動態と施設アクセスに関して別々に条件を設定し、シミュレーションを実施した。まず、人口動態については、マイクロシミュレーション型都市モデルの援用により、主体の属性変化を表現可能であることを確認した。また、ネットワーク指標を用いた世帯構成の評価を試みたものの、世帯構成の違いによる特徴的なネットワーク指標の差異は確認できなかった。施設アクセスについては、施設アクセスリンクの重みに、アクセシビリティモデルより算出されるログサム変数を用いることで、個人の属性や利用可能な交通手段を考慮したアクセシビリティを表現した。また、ネットワークによる施設アクセス評価の第一歩として、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た。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を確認した。

一方、本稿ではマルチレイヤネットワークモデルの概念は記述したものの、ネットワークの側面から見た主体間の関係性の意義や評価手法の体系化には大きな課題が残る。特に、モデルの表現方法および評価手法については、さらなる検討を重ね、講演時に言及する予定である。

謝辞：本研究はJSPS 科研費 18H01557 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) 谷本圭志, 牧修平, 喜多秀行：地方部における公共交通計画のためのアクセシビリティ指標の開発, 土木学会論文集D, Vol.65, No.4, pp.544-553, 2009.
- 2) 寺山一輝, 小谷通泰, 秋田直也：高齢者・非高齢者別にみた生活関連施設へのアクセシビリティ評価に関する研究-滋賀県東近江市を対象として, 都市計画論文集, Vol.48, No.3, pp.171-176, 2013.
- 3) 原田昇：非集計行動モデルによる多次元選択行動の分析, 土木計画学・論文集, No.4, pp.15-27, 1986.
- 4) Ben-Akiva,M. and Lerman,S.R. : Discrete Choice Analysis, MIT Press, 1985.
- 5) 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.
- 6) 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.

(Received October 2, 2020)

## SIMULATION OF SOCIAL DYNAMICS MODEL BY MULTI-LAYER NETWORK

Shogo NAGAO, Nao SUGIKI, Fumitaka KURAUCHI and Kojiro MATSUO