

# 都市・交通・環境モデル RAUM の GIS 実都市シミュレーションへの展開\*

Development of GIS-based urban-transportation-environment model RAUM

小出 智士<sup>†</sup> , 大森良太<sup>‡</sup>  
Satoshi Koide<sup>†</sup> , Ryota Omori<sup>‡</sup>

## 1. はじめに

近年の地理情報データ（GIS データ）の整備およびコンピュータの処理能力の向上に伴って、既に存在するいくつかの都市シミュレータ<sup>2, 3, 4, 5)</sup>においては GIS データが利用可能であり、都市計画・交通計画などで実際に利用され始めている<sup>9)</sup>。

一方、我々は都市経済学における Alonso のモデル<sup>1)</sup>をベースに、都市の構造を単純化してモビリティの使われ方や環境に与えるインパクトなどを体系的に分析するためのツールとして都市・モビリティ・環境モデル RAUM を開発してきた<sup>13)</sup>。これまでの RAUM では仮想的な正方形の均質な領域、単純な公共交通ネットワーク構造（東西南北に計二本+環状線）、および格子状の道路ネットワーク構造などの構造の単純化の仮定の下で実装してきた。これらの仮想的な都市構造を用いて分析を行った場合においても、体系的な知見を得ることができた<sup>14)</sup>。他の多くの都市経済学のモデルにおいても、やはり仮想的な空間を仮定するケースが多く、その中から有益な知見が得られている。

一方で、実際の都市を対象とした都市・交通シミュレーションに対する要望も強い。実都市シミュレーションを行うことの利点は、まず第一には具体的な都市・交通計画に対するケーススタディを可能とすることである。それ以外にも妥当性の検証のフェーズにおける実データとの比較やより説得力のある提言を行うことを可能にするなどの利点が考えられる。

そこで本研究では都市シミュレータ RAUM を GIS データを用いた実都市シミュレーションへ展開する。実都市シミュレーションを行うためには、膨大なデー

タが必要となるが、これは近年、GIS データとして入手可能となりつつある。しかしながら、以上の構造の単純化の仮定を外すためには、

- GIS データを活用可能な形へのモデルのデータ構造の変更
- 新しいデータ構造に適合したアルゴリズムの大幅な変更

が必要である。以降では実都市シミュレーションを行うためのデータ構造およびアルゴリズムを提案する。

## 2. モデルの概要

本節では従来のモデルから引き継いだモデルの仮定などの概要について述べる。

### (1) 特徴

RAUM は都市・交通・環境を一体的に考えるためのエージェントベースのシミュレータであり、その主な特徴としては以下のようなものが挙げられる：

- 各エージェント（家計）の住居選択や交通行動選択を同時的に考慮することで、ミクロ行動から形成される都市における様々なマクロ構造を分析可能とする。
- エージェントの収入格差や選好の違いなどの異質性を表現可能である。
- モビリティに着眼点を置き、さまざまなモビリティを考慮可能である。

RAUM は Alonso による都市経済モデルを基礎とし、居住地区と通勤行動の関係を分析するモデルである。以降、エージェントの交通行動に関する言及

\*キーワード：都市シミュレーション, GIS

<sup>†</sup>正員 (株) 豊田中央研究所 (愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道 41-1, TEL 0561-71-7275, FAX 0561-63-6507)

<sup>‡</sup>正員, 工博 (株) 豊田中央研究所

はすべて通勤行動を指すものとし、それ以外の交通行動は考慮しないものとする。

Alonso のモデルが連続的な空間上の人口分布などを取り扱ったのに対して、RAUM は離散的な都市空間を考え、各家計についても異質性をもつ一つのエージェントとみなすエージェントベースのモデルである。各エージェントは利己的、合理的に効用関数の最大化を行う。この効用最大化プロセスにおいては

- 交通混雑
- 地代の上昇

という二つの要因によって相互作用が生まれるため、このプロセスは各エージェントが非協力ゲームを行っていることとみなすことができる。RAUM のアウトプットはそのような意思決定プロセスの均衡点であると定義されるが、これは ナッシュ均衡、すなわち各エージェントの効用がこれ以上改善不可能な状態である。また、RAUM の内部で意思決定を行うエージェントは家計のみであり、企業などの立地、分布および交通ネットワークは外生的な条件として与えられる。

## (2) RAUM の入出力

図 1 に RAUM の入出力関係を示す。入力としては、エージェントの属性、交通インフラ、交通コスト、各モビリティのスペックの他、政策や規制なども入力可能である。出力としては、最終状態、すなわち家計のナッシュ均衡状態を各家計について集計することで、人口分布、交通分担率、自動車の利用距離分布、および CO<sub>2</sub> 排出量など様々な統計量が得られる。

## (3) 家計の意思決定モデル

次に、エージェントの意思決定モデルについて述べる。各エージェント（家計）は収入、選好係数、就業地区を不変な属性としてもち、効用関数

$$U(Z, S, T) = \alpha \log Z + \beta \log S + \gamma \log T \quad (1)$$

$$\text{所得制約} \quad Z + qS + M \leq I \quad (2)$$

を最大化する。ここで  $Z$  は合成財の消費、 $S$  居住スペースの広さ、 $T$  は余暇時間、 $M$  はモビリティ関連費用、 $I$  は収入、 $q$  は地代である。また、 $\alpha, \beta, \gamma > 0$  は  $\alpha + \beta + \gamma = 1$  を満たす選好係数であり、これら

は数百万のエージェントにランダムに割り当てられる。各エージェントは (1) 通勤手段 (2) 居住ゾーン (3) 居住スペース広さ  $S$  (4) 合成財消費  $Z$  を選択することで効用関数 (1) を最大化する。通勤手段や居住ゾーンによって通勤時間や通勤コストが変化し、それが余暇時間や財消費に影響を与える。さらに自動車の利用者が増加すると交通混雑が発生し、それが通勤時間に影響を与えるというモデル化がなされている。また、人口密度の高い地域ほど地代が高くなるような地代メカニズムが採用されている。これらの {交通混雑, 地代の上昇} という二つの要因が RAUM におけるエージェント間の相互作用である。

## (4) 利用可能なモビリティ

通勤手段として利用可能なモビリティとしては、徒歩・自動車・公共交通機関を考慮している。また、その他のモビリティへの拡張も容易に行うことができる。実際<sup>14)</sup> ではクリーン自動車という第二の自動車を導入し、都市や環境へのインパクトを評価するケーススタディを行った。

## (5) 求解アルゴリズム

エージェントは通勤手段、合成財消費、居住スペース広さ、居住地区を選択することによって効用関数 (1) を最大化する。このミクロな決定を繰り返し行うことで均衡状態へ収束させる。ただし、エージェントのミクロな決定は道路の混雑や地代市場にフィードバックされるため (Fig. 1 の「Feedback」部分)、均衡に収束するまでにはある程度の時間を要する。

実際のフローチャートは以下のように行われる。

Step 1. ネットワークと経済・モビリティなどのパラメータの初期化。およびエージェントの生成。

Step 2. エージェントをランダムに選択し、効用最大化を行う。

Step 3. 地代と交通混雑の状態を更新する。

Step 4. 収束条件を満たしていなければ Step 2 へ戻る。

## 3. データ構造

本研究では実際の都市を交通機関まで含めた形でモデル化するために、三つのデータレイヤー

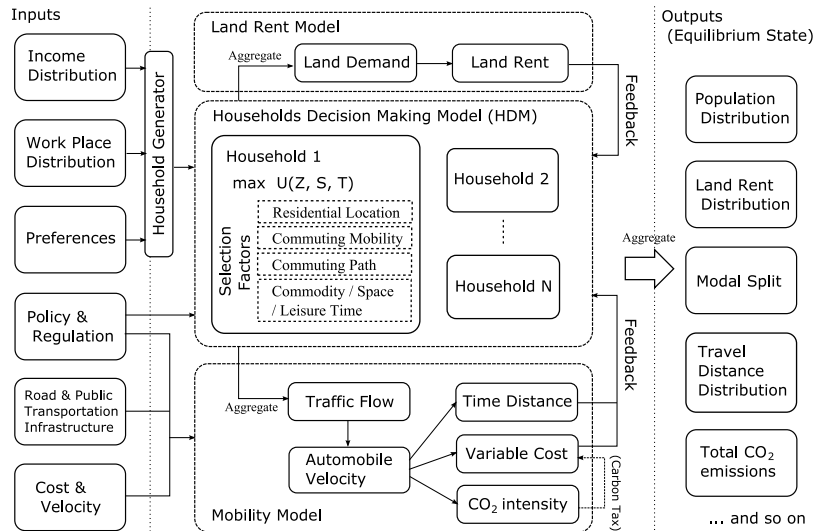


図 1: RAUM の入出力およびサブモデルの概略

- 土地利用レイヤー
- 道路ネットワークレイヤー
- 公共交通ネットワークレイヤー

を考える。本節ではこれらのデータ構造について述べる。

### (1) 土地利用

土地は離散化され、メッシュもしくはゾーンで表現される。土地利用分類は国土交通省の数値地図に対応可能となるように 7 種類に分類した（開発可能、住宅地、業務用地、道路用地、公共施設、水域、その他）。

### (2) 道路ネットワーク構造

道路ネットワークはグラフ  $G_r = (V_r, E_r)$  で表現される。ここで  $V_r$  はノードの集合、 $E_r$  はリンクの集合である。これは交通配分計算などで用いられるデータ構造と等価なものであり、各リンク  $e \in E_r$  には、リンク長さ  $d_e$ 、自由走行速度  $v_e$ 、交通容量  $C_e$  が設定されている。

### (3) 公共交通ネットワーク構造

公共交通ネットワークもグラフ  $G_p = (V_p, E_p)$  で表現される。具体的には図 2 のようなグラフを考える。ここで、灰色のノードは改札口の外を表し、白色のノードは改札口の中を表している。従って、灰色-白色のリンクでは初乗り料金と待ち時間が設定されている。白色のノード間では距離に応じた料金と所要時間が設定されている。このネットワークは非常に

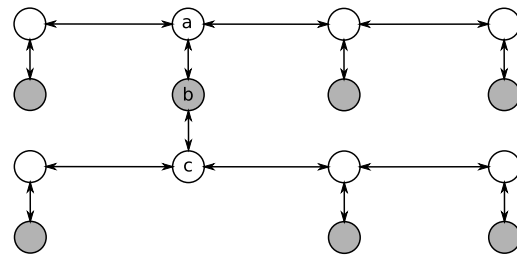


図 2: 二路線公共交通ネットワークの例。

単純な二路線の公共交通ネットワークであるが、三路線以上であったり、特急列車と普通列車が並行する路線、あるいは乗り換えに際して初乗り料金がかからない場合など、複数の構造パターンを実装した。

一般に、任意の二駅  $s_1, s_2 \in V_p$  間には通常、コストと所要時間を考慮した場合、パレート効率的な複数の経路が考えられうる（簡単な例では特急列車を

使うか普通列車を使うかということ). 従って  $s_1, s_2$  間には (コスト, 所要時間) の二次元ベクトルが複数個格納されている (これらは  $s_1, s_2$  間の経路のパレート解集合である). パレート解集合の計算方法については次節で述べる.

#### 4. アルゴリズム

本節では道路ネットワークおよび公共交通ネットワークの利用時に生じる所要時間とコストを計算するためのアルゴリズムについて述べる.

##### (1) 自動車所要時間・コスト

自動車を通勤手段として用いるエージェントを集計することで OD 行列を生成することが可能となる. これを用いて交通配分計算を行う. 今回は通常の確定的静的配分を実装し, Wardrop 均衡を求めた<sup>6, 7, 10</sup>. すなわち, 与えられた OD を満たすという制約条件の下で目的関数

$$F(x) = \sum_{a \in E_r} \int_0^{x_a} t(x_a) dx_a \quad (3)$$

を最小化する. ただし,  $x_a$  はリンク  $a \in E_r$  の交通量,  $t(x)$  は BPR 関数によって表現される混雑関数である. この配分計算は一度のシミュレーションの内部で数百回~数千回ほど計算する必要があるため, 非常に高速な実装が必要となる. 今回は Frank-Wolfe 法を修正したものをを用いた. 自動車のガソリン費用は各リンク  $e_r \in E_r$  ごとに定まる速度  $v = v(e_r)$  を用いて

$$a/v + b + cv + dv^2 \quad (4)$$

という三次式で表現したものを基に算出した. この式は<sup>12)</sup>で推定されたものであり,  $(a, b, c, d) = (802.8, -1.0, 0.0084, 70.0)$  である. CO<sub>2</sub> 排出量に関しても同様に (4) 式で表され, パラメータは  $(a, b, c, d) = (1864.3, -2.3201, 0.02007, 166.85)$  である.

##### (2) 公共交通所要時間・コスト

先にも述べたとおり二駅間の経路は複数存在し, この内, 有効な経路はパレート効率的な経路である. これらの経路を求めるために, 今回は以下のようにコ

ストと所要時間を同時に最小化するような公共交通ネットワーク上の二目的最短経路問題を定式化した.

$$\underset{P}{\text{minimize}} \quad \sum_{e \in P} C(e) \quad \text{and} \quad \sum_{e \in P} T(e) \quad (5)$$

$$\text{subject to} \quad P \in \Pi_{ij} \quad (6)$$

ここで  $C(e), T(e)$  はリンク  $e$  におけるコストと所要時間である. また,  $\Pi_{ij}$  は駅  $i, j$  間のすべての経路を含む集合,  $P \subset E_r$  は経路である. これを次のようなアルゴリズムで解く. まずコスト関数を重み  $\alpha$  で線形結合した問題

$$\underset{P}{\text{minimize}} \quad \sum_{e \in P} \left\{ \alpha C(e) + (1 - \alpha) T(e) \right\} \quad (7)$$

$$\text{subject to} \quad P \in \Pi_{ij} \quad (8)$$

を考える. これは通常の最短経路問題であり, Dijkstra 法を用いて容易に解くことができる. これを  $0 \leq \alpha \leq 1$  となる (可能な限り多くの)  $\alpha$  に関して解くと, 駅  $i, j$  間に経路集合が得られる. こうして得られた経路集合は多目的最適化の理論における supported-solutions set というパレート解の部分集合であることが証明される. Supported-solutions set の概念を Fig. 3 に示す.

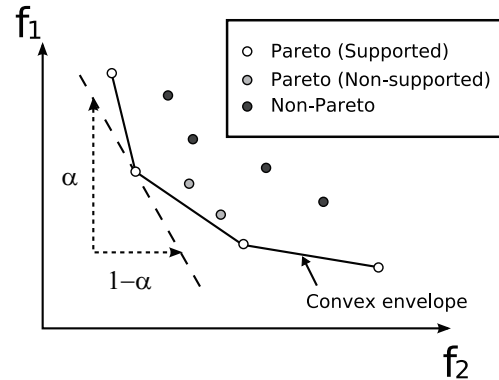


図 3: Supported-solution の図示.  $f_1, f_2$  は目的関数の値.

以上のプロセスをすべての 2 駅間について繰り返し得られた解集合をデータベースへ格納し, エージェントは最適化の過程でこのデータベースを参照する.

#### 5. テスト計算

本節では擬似的に作成した GIS データを用いてテスト計算を行う. 都市境界のシェープファイルはイン

表 1: 計算により求めたパレート解集合の要素数  $\#S_{ij}$  の分布

パレート解の数	1	2	3	4	5	6	合計
対応する駅の組み合わせ数	2466	2078	762	93	2	1	5402

ドのムンバイ市のものを用いた<sup>1</sup>。ただし、道路ネットワークに関してはギブス点過程<sup>11)</sup>を用いて適当に一様な点を発生させ、それをノードとみなしたガブリエルグラフ<sup>8)</sup>を利用した擬似的なものである。また公共交通ネットワークデータに関しては、Google Maps および Wikipedia の情報をもとに、鉄道 GIS データを構築した(図 4)。ただし、バス交通は考慮していない。図 5, 6 に 100 万世帯の家計を擬似的に

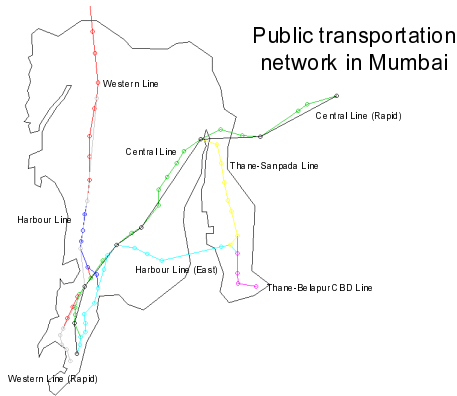


図 4: 公共交通ネットワーク

生成して計算した均衡結果の人口分布および交通混雑の状況を示す。人口が(ランダムな 8 箇所)に設定された)就業地区の周辺に集中し、その周辺で交通混雑が発生する様子が観察された。次に図 5, 6 の結果では明示的に示されなかった公共交通のパレート解探索の結果について述べる。駅数は全部で 74 通りであるので、 $74 \times 73 = 5402$  通りの駅の組み合わせ全てについてパレート解を探索した。なお、 $\alpha$  の離散化は  $0 \leq \alpha \leq 1$  を 100 の区間に等分割した。以上の設定の下で計算を行うことにより、各駅間  $(i, j)$  にパレート解集合  $S_{ij}$  が設定された。表 1 に 5402 通りの  $\#S_{ij}$  (集合の大きさ)の分布を示す。これによれば、多く駅間で 1 通りもしくは 2 通りのパレート解となっている。これは 1 通りのものについては普通列車のみが利用可能である場合であると考えら

<sup>1</sup>ムンバイ市を選択した理由は都市が海と山に囲まれており、都市の境界を定義しやすかったからである。

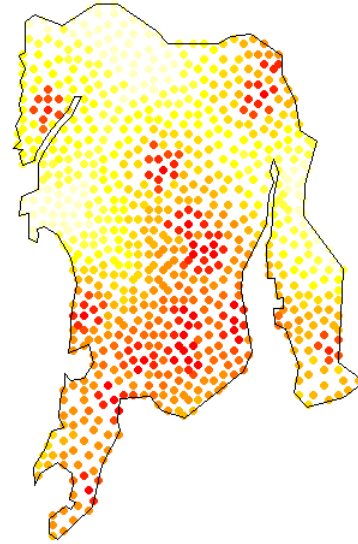


図 5: 人口分布

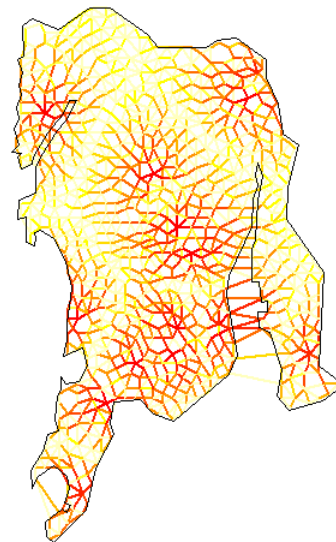


図 6: 交通混雑

れ，2通りのものについては普通列車を利用するか急行列車を利用するかを選択肢が存在する場合であると考えられ，直感と一致する．それ以上の大きさのパレート集合は乗換えやループの多い地区での経路の多様性に起因すると考えられる．

## 6. まとめと今後の展開

本研究では我々が開発してきた都市シミュレータ RAUM を GIS 実都市シミュレーションへ展開するための基本的な要素を示した．また，今回は擬似的に生成したデータでモデルの動作確認を行ったが，今後は実データを用いた展開および，分析を行っていく予定である．

## 参考文献

- 1) Alonso, W. : Location and Land Use, Harvard University Press, 1964.
- 2) Miyamoto, K., Vichiensan, V., Sugiki, N., and Kitazume, K. : Theoretical rebuilding of RURBAN and the application to a metropolis with detailed area unit of analysis, Paper for the 9th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, 2005.
- 3) Salvini, P. and Miller, E. J. : ILUTE: An Operational Prototype of a Comprehensive Microsimulation Model of Urban Systems, Networks and Spatial Economics 5, 217-234, 2005.
- 4) Waddell, P., Ulfarsson, G. F., Franklin, J. P., and Lobb, J. : Incorporating land use in metropolitan transportation planning, *Transportation Research Part A* 41, 382-410, 2007.
- 5) T. de la Barra, : Integrated land use and transport modelling, Cambridge University Press, 1989.
- 6) Beckmann, M., McGuire, C. B., and Winsten, C. B. : Studies in the Economics of Transportation, Yale University Press, New Haven, CT, 1956.
- 7) Wardrop, J. G. : Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Proceedings, Institution of Civil Engineers* 11(1), 325-378, 1952.
- 8) Bivand, R. S., Pebesma, E. J. and Gomez-Rubio, V. : Applied Spatial Data Analysis with R, Springer, ISBN 0-387-78170-6, 2008.
- 9) 宮本和明 : 世界における実用都市モデルの実態調査とその理論・機能と適用対象の体系化，平成18年度～平成19年度科学研究費補助金（基盤研究（C））研究成果報告書，2008.
- 10) 土木学会 土木計画学研究委員会 : 交通ネットワークの均衡分析 - 最新の理論と解法，土木学会，ISBN 4-810-60223-0, 1998.
- 11) 間瀬茂，武田純 : 空間データモデリング - 空間統計学の応用，共立出版，ISBN 4-320-12006-X, 2001.
- 12) 自動車走行時の燃料消費率と二酸化炭素排出係数 : 大城温，松下雅行，並河良治，大西博文，土木技術資料，Vol. 43, No. 11, 50-55, 2001.
- 13) 大森良太，小出智士，山崎哲 : QOLに準拠した都市・モビリティシステムの自己組織化シミュレーション (1) 都市構造・モビリティ・QOL・環境シミュレーションコード RAUM の開発，土木学会平成20年度全国大会 予稿集，2008.
- 14) 小出智士，大森良太，山崎哲 : クリーン自動車の影響を考慮した都市均衡モデルによるモビリティ選択・エネルギー消費の分析，エネルギー資源学会第25回エネルギーシステム・経済環境コンファレンス 研究発表 予稿集，2009.