

都市マイクロシミュレーションモデルを用いた 多様な政策手段の組合せ選択

大谷 紀子¹・杉木 直²・宮本 和明³

¹正会員 東京都市大学准教授 環境情報学部 (〒224-8551 神奈川県横浜市都筑区牛久保西3-3-1)
E-mail: otani@tcu.ac.jp

²正会員 株式会社ドーコン 交通部 (〒004-8585 北海道札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1)
E-mail: ns1491@docon.jp

³正会員 東京都市大学教授 環境情報学部 (〒224-8551 神奈川県横浜市都筑区牛久保西3-3-1)
E-mail: miyamoto@tcu.ac.jp

都市の総合計画においては多種多様な政策実施手段が存在し、その実施による効果影響は多様なステークホルダーに対して多彩に及ぶ。今後の人口減少社会における財政状況の下では、複数政策による政策パッケージ構築の必要性がますます増大すると考えられる。しかし、従来はパッケージ構築に関してほとんど体系的な検討はなされていない。本研究は、都市シミュレーションモデルを用いて、提供する公共サービスの最低水準を保ちつつ、財政支出を最小化する政策手段の組合せおよびそれらの諸元を決定する方法の構築を目的とする一連の研究を構成するものである。その際、政策手段の多様さに加えて、各政策手段の設定値も多段階であるため、必然的に候補となる政策手段パッケージの組合せ数は膨大となり、全探索による最適解の導出は困難である。それに対して、簡素な問題を対象として、最適な政策手段の組合せをハーモニーサーチにより実時間で探索する手法を提案している。本稿においては、マイクロシミュレーションによる立地主体の移動をも組み込んだ形式に拡張し、ハーモニーサーチにより解を探索する手法を提案し、仮想都市を対象とした実験により実時間で妥当な結果が得られることを確認した。

Key Words : *Urban Microsimulation, Policy Measures, Harmony Search*

1. はじめに

わが国をはじめ先進諸国の多くの都市では人口減少段階に移行し、都市の縮退が進行しつつあることから、従来の人口増を前提とした計画パラダイムから、提供する公共サービス水準を与件として、できるだけ財政支出を抑制する新しいパラダイムへの変革を迫られている。

市民が求める公共サービスの質と量はその人の年齢や属する世帯構成等の個人属性に大きく依存し、またその住居と施設の立地分布と交通状況がその費用を大きく規定する。従って、「公共サービス需要管理 (Public Service Demand Management)」の視点から、適切な立地誘導を政策に含めた、効率的な手段の実施が求められる。この視点に立った政策手段の効果予測においては、従来用いられてきた立地主体をグループ化したメゾスケールのモデルでは原理的に対応できず、個人を考慮した世帯単位でのマイ

クロシミュレーションモデルが不可欠であると考えられる。

これまで数多く開発されてきた土地利用モデルあるいは都市モデル¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾においても、いくつかの個別政策手段の代替案に対するシミュレーション結果の比較による計画案の検討や、複数の政策手段の組合せの代替案、あるいはより広範なシナリオの代替案に対するシミュレーション結果を比較が実施されているが⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾、これらの適用においては、あくまでもアドホックに準備された代替案の優劣の比較指標をモデルが提示してきたに過ぎない。

一方、本研究では、これらの既存のアプローチではなく、都市モデルのシミュレーションを一連の計算過程に組み込んだ上で、縮退状況下の都市において最適な政策手段の組合せを見つけるというこれまでにないアプローチに着目している。このアプローチでの主要問題は考慮すべき政策手段の候補とそれぞれの設定値のすべての組合せの中から、サービス

水準の条件を満たし、かつ最小費用の組合せを探索する問題として定義されるが、各政策手段が多様であり、またそれらの設定値も多段階であるため、必然的に候補となる政策手段パッケージの組合せ数は膨大となり、全探索による最適解の導出は現実的には不可能である。

以上を踏まえ本研究グループでは、都市シミュレーションを一連の計算過程に組み込んだ上で、最適な政策手段の組合せを見つける手法の開発に取り組んでいる¹⁰⁾。複数の政策手段の組合せを同時に決定する必要性に着目し、政策手段パッケージ探索問題として定義した上で、最適な政策手段の組合せを実時間で探索する手法として、ハーモニーサーチに基づく手法を提案している。しかし、既存研究では、簡素な問題を対象とした検証による探索手法の計算可能性の確認にとどまっていた。

そこで本稿では、より現実的な都市シミュレーションモデルとして、マイクロシミュレーションによる立地者の移動の表現の下で、ハーモニーサーチによる政策手段探索を行う手法へと改良し、仮想都市を対象とした実験により、計算の実行可能性や、解探索結果の特性について考察を行う。

2. 政策手段パッケージ探索問題

本節では、先行研究¹⁰⁾における政策手段パッケージ探索問題を都市マイクロシミュレーションモデルによる立地者の移動を組み込んだ形式により再定義し、問題の一例を示した上で、全探索による解法の計算量について問題点を指摘する。

(1) 定義

政策手段パッケージ探索問題は、複数政策による政策パッケージの構築において、最も望ましい政策手段の組合せを決定するための最適化問題である。提供する公共サービスの最低水準を保つことを制約条件とし、財政支出を算出する関数を目的関数とする。財政支出は、ある政策手段の組合せを講じたと仮定してマイクロシミュレーションを用いた立地主体の移動を実行し、得られた立地主体分布の結果に基づいて算出される。制約条件を満たしつつ、目的関数の値を最小とするような政策手段の組合せが最適解となる。

(2) 高齢者介護福祉サービス問題の設定

本研究では、立地主体として高齢者を取り扱い、移転補助金に関する政策手段によりその移転行動が

変化する状況下での、高齢者の介護福祉サービスに関する行政費用の最小化問題を設定する。以下では、評価実験で使用する本問題について詳細を述べる。

高齢者介護福祉サービスにおける行政費用最小化問題では、介護福祉施設の配置 W および都心ゾーンへ移転した際に支給される補助金 C_m という2つの政策手段 $p = \{W, C_m\}$ を決定する。問題設定と目的関数、制約条件を以下のように定義する。

【問題設定】

- ・ 図-1 に示すような $X \times Y$ メッシュの2次元仮想都市に、 N 個の介護福祉施設を配置する。 $X \times Y$ 個のゾーンのうち、 $X_c \times Y_c$ 個を都心ゾーン、残りの $(XY - X_c Y_c)$ 個を周辺ゾーンとする。
- ・ 1 ゾーンあたり P_0 人の高齢者が居住しており、補助金額に関する施策に応じて、周辺ゾーンに居住する高齢者が都心ゾーンへ移転するものとする。1 人あたりの移転補助金が C_m 円の場合の移転確率 $R_m\%$ は、移転補助金が高いほど移転する確率は高くなるものとして式(1)で表す。ここで、 α 、 β 、 γ はパラメータである。

$$R_m = \frac{\alpha}{1 + \exp(-\beta \cdot C_m + \gamma)} \quad (1)$$

- ・ 周辺ゾーンに居住する高齢者の都心ゾーンへの移転は、移転確率 $R_m(C_m)$ に基づくマイクロシミュレーションで決定される。移転するか否かを確率 $R_m(C_m)$ に基づいてモンテカルロ法で決定し、移転する場合は移転先の都心ゾーンをランダムに選択する。シミュレーションの結果、移転した高齢者の総数を $P_m(R_m(C_m))$ 、移転後の各ゾーンの高齢者分布を $P(C_m)$ で表す。
- ・ 高齢者は、 R_w (回/人・日) のサービス受給率で最寄りの介護福祉施設に移送サービスを利用して通う。最寄り施設が複数ある場合は、ゾーン内の全高齢者を各施設に均等に割り当てる。
- ・ 図-1 に示すように、縦横の隣接ゾーンを結ぶ道路が格子状に配置されており、隣接ゾーンへの移動には T 分、同一ゾーン内の移動には $T/2$ 分かかる。1 分あたりの移送サービス費用は C_w 円

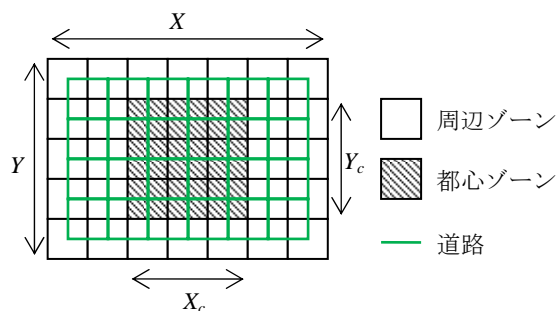


図-1 2次元仮想都市

である。

- 介護福祉施設の新設および10年間の維持管理には C_b 円かかるものとする。

【目的関数】

- 移転補助費用 $C_M(C_m)$ は、移転高齢者の総数 $P_m(R_m(C_m))$ により、式(2)で算出される。

$$C_M(C_m) = C_m \cdot P_m(R_m(C_m)) \quad (2)$$

- 各ゾーンから施設までの移動時間は介護福祉施設の配置 W により決定される。施設までの移動時間と居住者数の積を、すべてのゾーンに関して合計した値を $T(W, P(C_m))$ とすると、10年間の移送サービス費用の総和 $C_w(W, C_m)$ は式(3)で求められる。

$$C_w(W, C_m) = T(W, P(C_m)) \cdot C_w \cdot R_w \times 2 \times 365 \times 10 \quad (3)$$

- 移転補助費用 $C_M(C_m)$ 、10年間の移送サービス費用 $C_w(W, C_m)$ 、配置 W の下での $N(W)$ 箇所の介護福祉施設の新設および10年間の維持管理費用 $C_b \cdot N(W)$ の財政支出合計を求める関数を本問題における目的関数 $E(W, C_m)$ とする。

$$E(W, C_m) = C_M(C_m) + C_w(W, C_m) + C_b \cdot N(W) \quad (4)$$

【制約条件】

- 介護福祉施設までの移動時間は T_{max} 分を上限とする。
- 1施設あたりの受入れ高齢者数は P_{max} 人を上限とする。

(3) 計算量

政策手段パッケージ探索問題の最適解を求めるには、すべての政策手段の組合せに関して制約条件の充足を確認するとともに、財政支出を算出しなければならない。前節で示した高齢者介護福祉サービス問題の解探索手順を図-2に示す。ここで、政策手段集合 $PSET$ は、施設配置の集合 $WSET$ と移転補助金額の集合 $CMSET$ の直積であり、 N_{C_m} は移転補助金額の種類数を表す。

$$WSET = \{W_i \mid 1 \leq i \leq 2^{XY}\} \quad (5)$$

$$CMSET = \{C_{m,i} \mid 1 \leq i \leq N_{C_m}\} \quad (6)$$

$$PSET = \{p_i \mid 1 \leq i \leq 2^{XY} N_{C_m}\} = WSET \times CMSET \quad (7)$$

移転補助金を0円から100万円まで5万円ごとに変化させるとすると、移転補助金額の種類数 N_{C_m}

は21通り、介護福祉施設の配置の数 $|WSET|$ は 2^{XY} 通りなので、政策手段の組合せは 21×2^{XY} 通りとなる。 $X=5, Y=5$ と小さな値を設定しても、704,643,072通りと膨大な組合せ数となる。財政支出の算出にはマイクロシミュレーションに基づくシミュレーションの実行が必要になるので、1つの政策手段の組合せに関する処理にもある程度の時間を要する。実問題への適用を視野に入れると、全探索による解法は現実的ではなく、実時間での探索を可能とする手法が必要不可欠であるといえる。

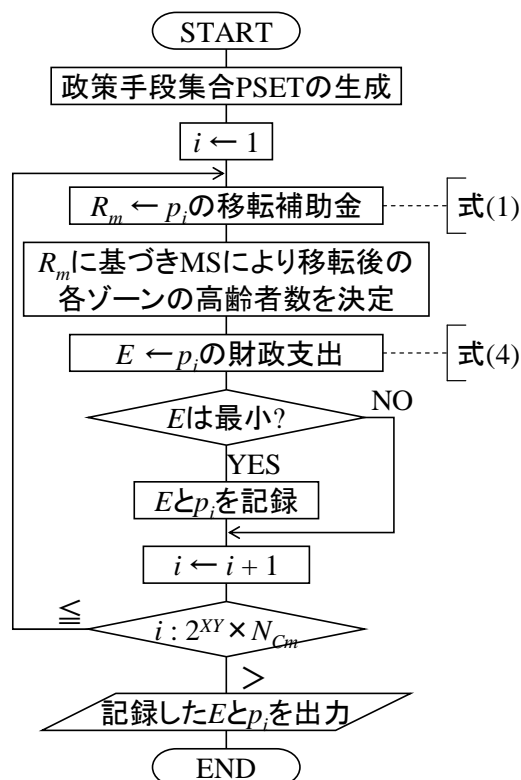


図-2 高齢者介護福祉サービス問題の解探索手順

3. 最適解探索手法

本研究では、政策手段パッケージ探索問題の実時間での解探索手法として、ハーモニーサーチに基づく手法を提案する。以下、提案手法で使用するハーモニーサーチアルゴリズムの概要と、提案手法の詳細について述べる。

(1) ハーモニーサーチ

ハーモニーサーチは音楽家の即興過程を模倣した最適解探索アルゴリズムである¹¹⁾。音楽家が即興演奏する際には、一般に次のいずれかの方法を採用する。

1. 既知のフレーズをそのまま奏でる
2. 既知のフレーズの一部を変更して奏でる
3. 新しいフレーズを作成して奏でる

ハーモニーサーチでは、解候補をハーモニー、解候補集合をハーモニーメモリ (Harmony Memory; HM) と呼ぶ。上記の演奏方法に対応する以下の3つの手法により新しいハーモニーを生成する。

1. HMから1つのハーモニーを選択する
2. HM内の1つのハーモニーを調整する
3. 新しいハーモニーをランダムに生成する

最適化アルゴリズムには多様性と収束性が不可欠であるが、ハーモニーサーチでは、ハーモニーの調整とランダム生成により多様性を維持し、HMにより収束性を保証する。ハーモニーサーチの疑似コードを図-3に示す。ここで G は解候補生成の繰返し回数、 R_c はHM内のハーモニーを選択する確率、 R_a はHMから選択したハーモニーを調整する確率、 $f(x)$ は目的関数である。

(2) ハーモニーサーチに基づく解探索

ハーモニーサーチを政策手段パッケージ探索問題に適用する際には、決定目標である複数の政策手段を1つのハーモニーとして表現する。例えば、高齢者介護福祉サービスにおける行政費用最小化問題では、ハーモニーは図-4に示すような要素数 $X \times Y + 1$ 個の配列として表される。 $X \times Y$ 個の要素には0または1の値が入り、 $X \times Y$ 個の各ゾーンにおける介護福祉施設の有無を示す。0は当該ゾーンに施設がないことを、1は施設があることを意味する。残りの1個の要素は移転補助金を表す数値である。例えば、移転補助金を0円から100万円まで5万円ごとに変化させる場合には、21通りの移転補助金が考えられるので、0以上20以下の整数が入る。

各ハーモニーは目的関数の値により評価する。値が小さいほど評価が高いと判断する。ただし、制約条件を満たさないハーモニーについては、処理し得る最大の値を評価値として付与し、当該ハーモニーが解候補から外れるようにする。高齢者介護福祉サービスにおける行政費用最小化問題では、介護福祉施設までの移動時間や各施設の受入れ高齢者数が上限を上回ったときは最大値、それ以外の際には式(3)の値が評価値となる。

HMから選択したハーモニーを調整するときには、各要素を制限の範囲内で変化させる。高齢者介護福祉サービスにおける行政費用最小化問題では、要素の種類に応じて以下の変更を施す。

- ・ 介護福祉施設配置を表す要素では、0と1を反転する。
- ・ 移転補助金を表す要素では、値を1増やす、もしくは1減らす。

ハーモニーサーチによる高齢者介護福祉サービス問題の解探索手順を図-5に示す。

```

HMの初期化;
worst:=HM内の最悪ハーモニー;
worstfit:=f(worst);
for i:=1 to G {
  r1:=0.0~1.0の乱数;
  if(r1<Rc) {
    new:=HMからランダムに選択したハーモニー;
    r2:=0.0~1.0の乱数;
    if(r2<Ra) {
      new:=制限内で調整されたnew;
    }
  } else {
    new:=新たに生成したハーモニー;
  }
  newfit:=f(new);
  if(newfitがworstfitより高評価) {
    worstをnewで置き換える;
    worst:=HM内の最悪ハーモニー;
    worstfit:=f(worst);
  }
}

```

図-3 ハーモニーサーチの疑似コード

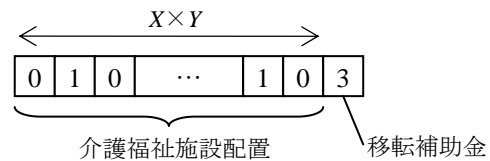


図-4 ハーモニーの構造

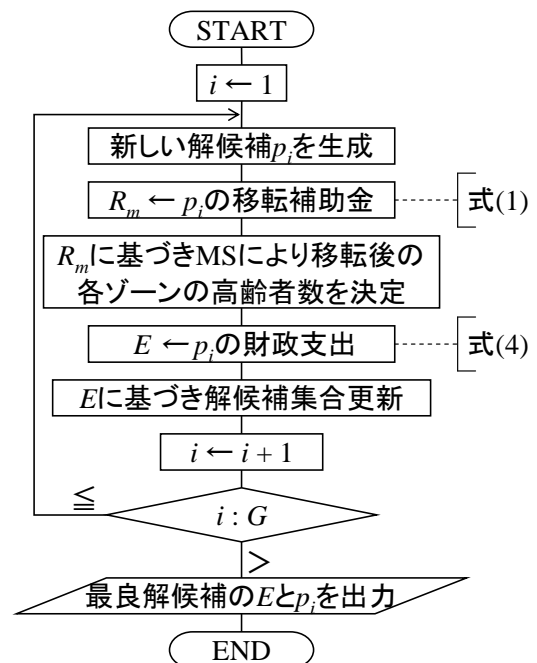


図-5 ハーモニーサーチによる高齢者介護福祉サービス問題の解探索手順

4. 評価実験

提案手法の有用性を示すために、高齢者介護福祉サービスにおける行政費用最小化問題を対象として検証を行なった。

(1) 設定条件

実験では、表-1に示したパラメータでのハーモニーサーチにより解を探索した。処理対象は、中心部に3×3の都心ゾーンがある9×9の2次元仮想都市である。探索対象とする政策手段については、移転補助金 C_m は0円から100万円まで5万円ごとに変化させるものとし、これらの補助金額の設定に応じて変化する式(1)の移転確率に応じた各高齢者の都心ゾーンへの移動を、モンテカルロ法を用いてシミュレートする。介護福祉施設の配置については、9×9ゾーンごとに配置の有無を探索する。移転確率式(1)のパラメータは表-2に示すように設定した。その他のシミュレーション条件については、表-3に示す5種類のパラメータセットを用いて、得られる政策手段を比較する。パラメータセット(1)を基準として、(2)と(3)では介護福祉施設までの移動時間の上限 T_{max} 、(4)と(5)では1施設あたりの受入れ高齢者数の上限 P_{max} に関する制約条件の変更による政策手段パッケージ探索結果の変化を確認する。

表-1 ハーモニーサーチのパラメータ

| パラメータ名 | 値 |
|-----------------------|-------------|
| 繰返し回数 G | 200,000,000 |
| HM 内のハーモニーの選択確率 R_c | 0.85 |
| HM 内のハーモニーの調整確率 R_a | 0.35 |
| HM 内のハーモニー数 | 1,000 |

表-2 移転確率式のパラメータ

| パラメータ名 | 値 |
|----------|------|
| α | 100 |
| β | 0.25 |
| γ | 10 |

表-3 比較実験用パラメータセット

| | パラメータセット番号 | | | | |
|-----------|------------|-----|-----|-----|-----|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) |
| P_0 | 20 | | | | |
| R_w | 0.1 | | | | |
| T | 10 | | | | |
| C_w | 50 | | | | |
| C_b | 8,000 万 | | | | |
| T_{max} | 50 | 40 | 60 | 50 | 50 |
| P_{max} | 50 | 50 | 50 | 30 | 70 |

(2) 結果

Intel Xeon 2.66GHz CPU、4GB RDIMMのワークステーションにより解探索を実行した結果、解が出力されるまでの処理時間は7,500秒程度であった。各パラメータセットに対して10回ずつ解探索を実行して得られた政策手段の補助金、介護福祉施設数、および財政支出の平均を表-4に示す。また、10回のうち財政支出が最小となったときの補助金、介護福祉施設数、および財政支出を表-5に示す。

住民へのサービスの観点では、(3)より(2)、(5)より(4)の方が質が高いといえる。表-4の結果では、質の高いサービスの提供を前提とする方が、施設数が多く、財政支出の多い政策手段が得られている。表-5の結果では、(1)と(4)の財政支出が逆転しているものの、その他の財政支出や施設数に関しては同様の傾向がみられる。特に、介護福祉施設までの移動時間に関する制約を緩和すると、介護福祉施設数の少ない政策手段が得られるといえる。また、1施設あたりの受入れ高齢者数に関する制約を緩和すると、高齢者を移転させることなく、すなわち補助金を上げることなく、財政支出を低く抑えることができることがわかる。

表-4の(1),(4),(5)における介護福祉施設配置を図-6～8に示す。各図の太線で囲まれたゾーンが都心ゾーンであり、塗りつぶされたゾーンが施設を配置するゾーンを表している。(1)と(4)の施設数は等しいが、1施設あたりの受入れ高齢者数が少ないため、いずれのゾーンにおける高齢者も上限以下の時間で施設まで移動できるように、施設が都心ゾーンを含んだ散らばり度合いの高い配置になっている。

表-4 政策手段と財政支出の平均

| パラメータセット | 補助金 | 施設数 | 財政支出 |
|----------|---------|------|------------|
| (1) | 12.5 万円 | 11.4 | 179,276 万円 |
| (2) | 11.5 万円 | 11.7 | 180,890 万円 |
| (3) | 17.0 万円 | 11.0 | 178,563 万円 |
| (4) | 10.0 万円 | 11.8 | 180,022 万円 |
| (5) | 8.5 万円 | 11.2 | 178,197 万円 |

表-5 財政支出最小時の補助金と施設数

| パラメータセット | 補助金 | 施設数 | 財政支出 |
|----------|-------|-----|------------|
| (1) | 10 万円 | 12 | 178,547 万円 |
| (2) | 10 万円 | 12 | 179,258 万円 |
| (3) | 10 万円 | 10 | 177,090 万円 |
| (4) | 5 万円 | 12 | 177,783 万円 |
| (5) | 10 万円 | 11 | 176,695 万円 |

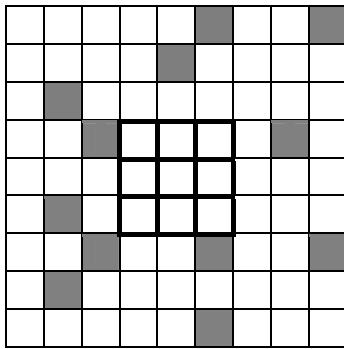


図-6 パラメータセット(1)での施設配置

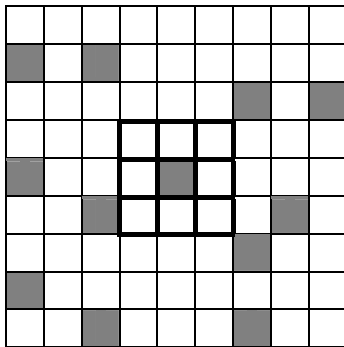


図-7 パラメータセット(4)での施設配置

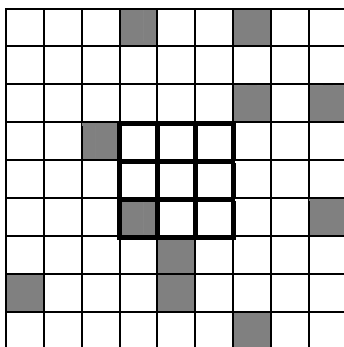


図-8 パラメータセット(5)での施設配置

いずれのパラメータセットに対しても、それぞれの設定に相応した妥当な結果が実時間内に得られているといえる。

5. おわりに

本研究では、最適な政策手段の組合せを実時間で探索する手法として、ハーモニーサーチに基づく手法を提案し、簡素化した問題に適用した既存研究を、マイクロシミュレーションによる立地行動を含む都市シミュレーションへ拡張し、政策手段パッケージ探索問題を定義するとともに、仮想都市を対象とし

て適用実験を行った。その結果、実時間内に妥当な解が得られることが確認された。

今後は、シミュレーション試行回数を重ねて、確率的なシミュレーション下での最適解の出現特性を検証する予定である。また、費用最小化以外の目的関数の導入、高齢者福祉サービス以外の多様な政策手段を対象とした現実的な都市政策の総合パッケージに対する検討、実都市を対象とした検討などに取り組む予定である。

謝辞：本論文は、平成23～25年度科学研究費補助金（基盤研究(B)、課題番号: 23360228, 研究課題名: 縮退状況における都市マネジメントのための世帯マイクロシミュレーションシステム）の研究成果の一部を取りまとめたものである。ここに記して謝意を表したい。

参考文献

- 1) Wegener, M. : Overview of Land-use Transport Models, *Proc. of CUPUM'03*, 2003.
- 2) Hunt, J. D., Kriger, D. S. and Miller, E. J. : Current Operational Land-use Transport Modeling Frameworks: a Review, *Transport Research*, Vol.25, No.3, pp.329-376, 2005.
- 3) 宮本和明, 北詰恵一, 鈴木温 : 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 18～19 年度科学研究費補助金(基盤研究(C), 課題番号:18560524)研究成果報告書, 2008.
- 4) 北詰恵一, 杉木直, Varameth VICHENSAN, 宮本和明 : マイクロシミュレーション都市モデルの現状と課題, 土木計画学研究・講演集, Vol.37, 2008.
- 5) 鈴木温, 北詰恵一, 宮本和明 : 土地利用・交通統合型計画プロセスにおける都市モデル活用の現状と課題, 土木計画学研究・講演集, Vol.37, 2008.
- 6) Bartholomew, K. : Integrating Land Use Issues into Transportation Planning: Scenario Planning, Report Funded by the Federal Highway Administration under Cooperative Agreement, No.DTFH61-03-H-00134, 2005.
- 7) Sacramento Region BluePrint (<http://www.sacregionblueprint.org/>)
- 8) Burbidge, S.K., Knowlton, T. and Matheson, A. : Wasatch Choices 2040: A New Paradigm for Public Involvement and Scenario Development in Transportation Planning, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol.1994/2007, pp.147-153, 2007.
- 9) Cambridge Futures (<http://www.cambridgefutures.org/>)
- 10) 大谷紀子, 杉木直, 宮本和明 : 都市シミュレーションモデルを用いた多様な政策手段の組合せ選択と詳細設計, 土木計画学研究・講演集, Vol.45, 2012.
- 11) Geem, Z., Kim, J. and Loganathan, G. : A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search, *Simulation*, Vol.76, pp.60-68, 2001.