

自転車交通を考慮した 応用都市経済モデルの開発

小池 淳司¹・宮本 佳直²・山崎 清³

¹正会員 神戸大学教授 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail:koike@lion.kobe-u.ac.jp

²学生会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail:154t141t@stu.kobe-u.ac.jp

³正会員 株式会社価値総合研究所経済社会政策グループ
(〒100-0004 東京都千代田区大手町2-2-1 新大手町ビル8階)

本稿は、神戸市で計画されている自転車道整備計画が土地利用及び交通体系に与える影響を応用都市経済 (CUE) モデルを用いて分析し、予想される効果を計測するものである。まず、本研究で用いるCUEモデルの構造、前提条件に付いて示し、モデルの定式化を行う。次に、パラメータを各種統計資料から求め、最後にそれを用いて実証分析を行う。結果として、土地利用に関しては自転車道の整備はほとんど影響を与えないことを示した。交通体系に関しては、自転車道の効果は整備されている区域の東西端部周辺および海沿いの地域において主に表れ、特に長距離において効果が大きく算出されたことに加え、移動手段を乗用車から自転車に移行することによるCO₂削減の効果を示した。一方で、自転車道の整備を進めることによる追加的な効果や便益は逡減していくことを示した。

Key Words :computable urban economic model, land-use transport model, bicycle lane, utility maximization, benefit

1. 序論

自転車は、手軽で便利な乗り物として、多くの人々の日常生活において幅広く利用されている。また、自転車は、5km程度の短距離の移動において鉄道や自動車をはじめとしたどの交通手段よりも所要時間が短く、都市内交通として非常に効率的な移動手段でもある。さらに、近年では、排気ガスや騒音を出さない環境負荷の低い交通手段として見直され、健康志向の高まりなどを背景に、その利用ニーズが高まっている。その一方で、交通事故のうち自転車事故の割合は増加し、特に歩行者と自転車の交通事故が急増している。このような状況を踏まえ、平成23年には、警察庁が自転車の原則車道走行を促すことを柱とする「自転車交通総合対策」をまとめ、全国の警察本部に到達するとともに、平成24年には、国土交通省と警察庁が設置した有識者会議「安全で快適な自転車利用環境の創出に向けた検討委員会」が「みんなにやさしい自転車環境」とする提言をまとめ、両省庁に提出された。このように、近年自転車に対する人々の関心が増えつつあり、それに伴い、自転車に関する施策が全国的

に進められてきた。神戸市においても平成24年6月に「神戸市自転車利用環境総合計画」¹⁾を策定しており、自転車の利用環境について対策を考案している。

これまで、自転車道整備の効果を評価することを目的として、多くの研究が行われてきた。例えば、味水[2012]²⁾では、アンケート調査から得られた自転車道整備に対する支払意思額を算出することで便益を計測しているが、他の交通機関に与える影響までは分析していない。自転車道を整備すると交通事故が減るだけでなく、他交通手段から自転車に移行する人が増えることで、例えば交通利便性の向上による移動時間の短縮や、本研究では対象としていないが交通混雑の緩和など自転車道の整備による経済的な効果も期待されるはずである。しかし、そういった観点から自転車道整備の影響を分析した事例は少ない。また、一般的に交通需要予測において自転車を考慮する例は少なく、自転車とその他の交通機関がそれぞれに及ぼす影響を分析した研究も多くない。本研究で用いる応用都市経済 (Computable Urban Economic) モデル (以下、CUEモデル) (例えば、上田, 堤, 武藤, 山崎[2009]³⁾) は、1980年代初頭にかけて世界的に注目

表-1 モデルの仕様

項目	内容
対象範囲	神戸市
ゾーン分割	27ゾーン
土地利用モデル	立地均衡モデル(土地市場における需給が一致)
交通モデル	交通量発生, 目的地選択, 交通手段選択の三段階からなるモデル 特に, 目的地選択モデルと交通手段選択モデルは二段階ネスティッドロジットモデルとする
旅客・貨物	旅客のみ扱う
平日・休日	平日を考慮
交通手段	自動車, 公共交通(鉄道, バス), 自転車, 徒歩の 4 手段を考慮
交通量配分	All or Nothing 配分(混雑の変化は考慮しない)
旅行目的	通勤, 通学, 業務, 私事, 帰宅
立地主体属性	人口:年齢 2 階層(65 歳未満, 65 歳以上) 従業者:産業 3 分類(第一次~第三次産業)

を集めた土地利用・交通モデルを起源としたモデルであり、現実的な国土・地域・都市計画、交通政策、環境政策等の横断的な検討を行い、政策を統一的に予測するために、開発されたモデルである。その特徴として、CUEモデルは社会資本整備事業を客観的・科学的に評価できるよう、ミクロ経済学に忠実に構築されているということが挙げられ、価格と需要・供給の関係を表現することで市場と立地の均衡がモデル化されている。そのため、既存の費用便益分析の枠組みと理論的に整合しており、施策を費用便益分析の論理体系によって評価できる。しかし、神戸市においてCUEモデルを適用した研究はされておらず、また、CUEモデルによって自転車道整備事業の評価を行った事例も存在しない。

本研究では、自転車交通を考慮した神戸市のCUEモデルを構築し、神戸市で現在進行中である「神戸市自転車利用環境総合計画」の中で提示されている自転車道をモデルに組み込むことで、整備された自転車道が神戸市の土地利用と交通体系に及ぼす影響及び便益を定量的、空間的に計測、分析することを目的とする。

2. 本研究で扱う応用都市経済モデル

(1) モデルの仕様

本研究で扱うモデルの仕様は表-1の通りである。ゾーン分割においては、H22近畿圏PT調査における第5回小ゾーンを採用しており、郵便番号をもとにした分類である。モデルは土地利用モデルと交通モデルに分けられ、土地利用モデルは土地市場における需要と供給がバランスし、交通モデルは交通量発生、目的地選択、交通手段選択の3段階からなるモデルとなっている。本研究ではモデルの単純化のため混雑を考慮しておらず、対象範囲である神戸市内における移動のみを仮定している。そのため、神戸市に流入、あるいは神戸市を横断する貨物のような

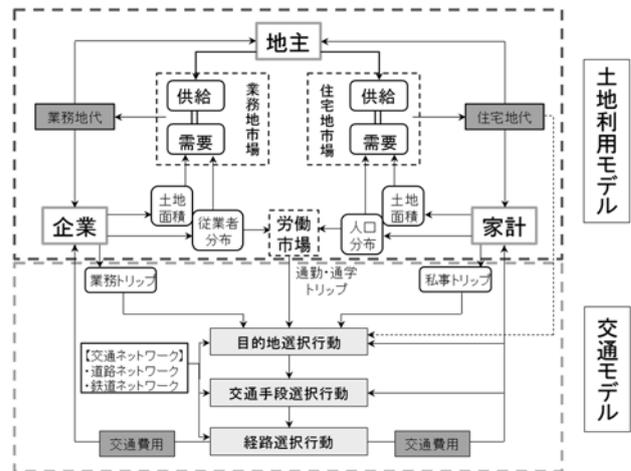


図-1 CUEモデルの全体構造

交通は考慮していない。また、本来であれば利用者均衡配分によって交通量配分を行うが、交通容量を無限大に設定していることから、本研究ではAll or Nothing配分を用いている。

(2) 応用都市経済モデルの全体構造

CUEモデルの全体構造は図-1の通りである。CUEモデルでは家計、企業、地主を主体として想定しており、それぞれが自身の効用を最大化するように行動する。土地市場および交通市場で決定される価格（地代、交通費用）にしたがって、財（トリップ数、土地面積）の消費、投入量が決定されるモデルであり、各ゾーンにおける土地市場とゾーン間を結ぶ交通市場が同時に均衡する多市場同時均衡モデルである。モデルの前提条件はのとおりである⁴⁾。

- i) 経済主体は同一の選好を持つ人口当たりで捉えた家計、職業・産業別の区分のない従業者1人当たりで捉えた企業、そして不在地主を考えている。
- ii) 対象地域の空間は27個のゾーンに分割されており、各ゾーン内における同一用途内は同質である。

- iii) 構築モデルは閉鎖都市モデルであり、対象地域の総人口、総従業者数は外生的に与えられ、対象地域外との交流は考慮しない。
- iv) 土地市場は等効用原則に基づく均衡土地利用を確率的に拡張し、交通市場は等時間原則に基づく利用者均衡を確率的に拡張しており、土地市場と交通市場が同時に均衡するモデルである。
- v) 家計は効用最大化行動に従い、企業は利潤最大化行動に従って立地選択を行うものとし、立地の変化による追加的な費用は一切考慮しない。

(3) 土地利用モデル

土地利用モデルは土地の需要と供給が合致する土地市場の均衡モデルである。主体は家計、企業、地主の3主体、土地市場は業務地と住宅地の2市場である。家計は代表的1人であり、予算制約下で効用最大化問題を解くことで、1人当たりの立地ゾーン及びトリップ数を選択する。また、立地に関する効用最大化問題を解くことで、立地ゾーンが選択される。そして、立地ゾーンにおける人口と敷地面積を乗じることで住宅地の需要量が選択される。一方、企業も代表的1人の従業者であり、生産技術制約化で利潤最大化問題を解くことで1人当たりの面積が導出され、家計と同様に立地ゾーンが選択される。そして、立地ゾーンにおける従業者数と1人当たり面積を乗じることで業務地の需要量が出される構造である。

地主は土地の価格に応じて住宅地と業務地の土地の供給量を決定する。家計と企業の土地需要量と地主の決定する土地供給量が合致するところが均衡状態であり、変化が生じた際には均衡状態に至るまで計算される。

(4) 交通モデル

交通モデルは、交通量発生モデル、目的地選択モデル、交通手段選択モデルの三段階からなる。目的地選択モデルでは、交通手段選択モデルで算出される各 OD のアクセシビリティ指標がゾーン間の「移動のしやすさ」として

て反映される。目的地選択モデルと交通手段選択モデルに関しては、2段階ネスティッドロジットモデルとなっている。交通手段選択では、「自動車」、「公共交通」、「自転車」、「徒歩」の4つの交通手段を扱う。

3. データセットの整備

(1) データセットの概要

CUEモデルの構築に当たり土地利用データセット、交通データセットの整備を行う。それぞれのデータセットの整備に利用したデータは表-2の通りである。

(2) 土地利用データセットの整備

神戸市モデルのゾーン数は図-2に示す通り27ゾーンであり、H22年近畿圏PT調査の第5回小ゾーン単位である。また、ゾーン中心点（セントロイド）に関しては、本来であればそのゾーンにおいて最も人が集まりやすい地点をゾーン中心として設定するべきであるが、本研究では簡単のため各ゾーンの面積重心をゾーン中心点として設定している。

各ゾーンごとに統計資料を用いて、表-2における土地利用データセットを整備した。

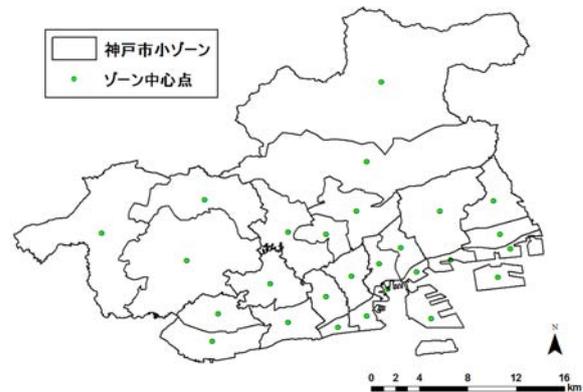


図-2 ゾーン分割とゾーン中心

表-2 整備するデータセット

分野	項目	利用データ, 作成方法等
土地利用データセット	人口	H22 国勢調査(町丁目集計)データ ⁵⁾
	従業者数	H21 経済センサス ⁶⁾
	地価	H22 地価公示 ⁷⁾ , H21, H22 都道府県地価調査 ⁸⁾⁹⁾ から作成(地価ポイントのない場合にはクリギング ¹⁰⁾ で補正)
	宅地面積・利用可能面積	H18 国土数値情報土地利用細分メッシュデータ ¹¹⁾ から作成
	域内総生産(GRP)	市区町村別の域内総生産(GRP)を従業者数で按分して推計
交通データセット	目的別手段別 OD	H22 近畿圏 PT 調査から作成
	道路ネットワーク	デジタル道路地図(DRM) ¹²⁾ から作成
	公共交通ネットワーク	鉄道: 国土数値情報から作成 バス: デジタル道路地図, 国土数値情報 ¹³⁾ から作成

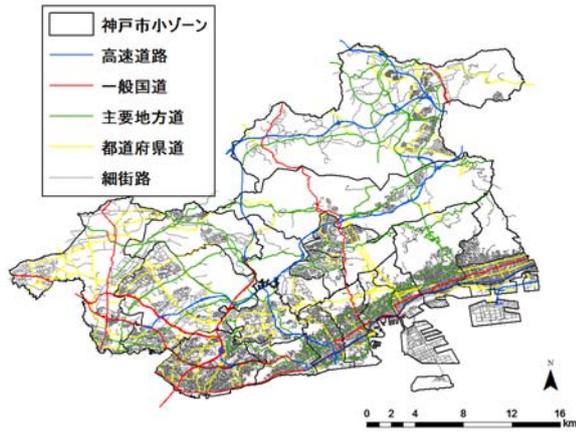


図-3 道路ネットワーク

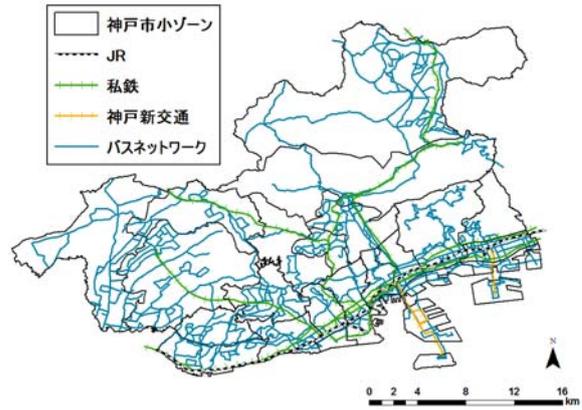


図-4 公共交通ネットワーク

(3) 交通データセットの整備

a) 道路ネットワーク

デジタル道路地図 (DRM) ¹²⁾ をもとに、図-3のように本研究ゾーン中心からのアクセス・イグレスリンクと一体的な道路ネットワークを構築した。各リンクの速度設定に関しては、DRMに設定されている規制速度を用い、速度が0のリンク (細街路) に関しては、速度を10km/hとして与えた。また、簡単化のため交通混雑を考慮しないという仮定を置いており、各リンクの交通容量を無限大に設定している。なお、高速道路を用いた神戸市内の移動は考慮しないものとし、高速道路、と有料道路に対して道路ネットワーク上において通行規制を行った。

b) 公共交通ネットワーク

国土数値情報¹³⁾、デジタル道路地図をもとに、図4のような鉄道ネットワークとバスネットワークを構築し、本研究ゾーン中心からのアクセス・イグレスリンク、鉄道駅乗換リンクおよびバス停留所鉄道駅乗換リンクを一体的なネットワークとし、公共交通ネットワークを構築した。道路ネットワークと同様に、各リンクの交通容量に関しては、道路ネットワークと同様に無限大に設定しているまた、高速道路、新幹線を用いた神戸市内での移動を考慮しないものとしているため、高速道路を利用しているバスネットワーク、新幹線を利用している鉄道ネットワークに対して通行規制を行った。

c) ゾーン間一般化費用

作成した交通ネットワークをもとに、乗用車、公共交通 (鉄道、バス)、自転車、徒歩の4手段について、ゾーン間一般化費用を算出した。一般化費用は、本来は旅行にかかる運賃のほか、待ち時間や交通利便性などのサービス変数を貨幣換算したものであるが、本研究では、旅行時間に運賃を時間価値で除したものと待ち時間を加味したものとして計算しており、運賃のかからない乗用車、自転車、徒歩に関してはゾーン間の所要時間に等しくなる。

d) 目的別手段別OD表

H22近畿圏PT調査をもとにODトリップを目的別手段別に集計し、本研究ゾーン単位での交通手段別トリップデータを整備した。通勤、通学、業務、帰宅に関しては全年齢を対象に集計を行い、私事に関しては年齢2階層 (65歳未満、65歳以上) において集計を行い、交通手段4種、目的5種の計20種のゾーン間OD表を作成した。

4. CUEモデルの構築

(1) 土地利用モデルの定式化

以下のように変数を設定し、各行動主体においてそれぞれ定式化を行う。

- i : ゾーンを表すラベル
- T : 全ゾーンを表すラベル
- n : 年齢階層を表すラベル
- s : 産業分類を表すラベル
- H : 住宅を表すラベル
- B : 業務を表すラベル
- C : 通勤を表すラベル

a) 家計の行動モデル

家計の効用関数を対数線形にて特定化し、時間資源を含む総所得制約化の効用最大化問題として家計の財消費行動モデルを定式化する。

$$V_i^n (q_i^H, r_i^H, I_i^n) = \max [\alpha_z^n \ln(Z_i^n) + \alpha_x^{Hn} \ln(x_i^{Hn}) + \alpha_l^{Hn} \ln(l_i^{Hn})] \tag{1a}$$

$$s.t. \quad Z_i^n + q_i^H x_i^{Hn} + r_i^H l_i^{Hn} = w\Omega^n - q_i^C = I_i^n \tag{1b}$$

ただし、 V_i^n : 間接効用関数、 Z_i^n : 合成財消費、 x_i^{Hn} : 一人当たり私事トリップ消費量、 l_i^{Hn} : 一人当たり住宅

地消費量, q_i^H : 私事トリップ費用, q_i^C : 通勤トリップ費用, r_i^H : 住宅系地代, I_i^n : 所得, w : 家計の賃金率, Ω^n : 一人当たり総利用可能時間, $\alpha_Z^n, \alpha_x^{Hn}, \alpha_t^{Hn}$: 支出配分パラメータ ($\alpha_Z^n + \alpha_x^{Hn} + \alpha_t^{Hn} = 1$) .

式(1a), (1b)の効用最大化問題を解くことで, 各財の需要関数, 間接効用関数が導出される.

$$I_i^{Hn} = \frac{\alpha_i^{Hn}}{r_i^H} I_i^n \quad (2)$$

$$V_i^n = \ln(I_i^n) - \alpha_x^{Hn} \ln(q_i^H) - \alpha_t^{Hn} \ln(r_i^H) + C^n \quad (3)$$

$$C^n = \alpha_Z^n \ln(\alpha_Z^n) + \alpha_x^{Hn} \ln(\alpha_x^{Hn}) + \alpha_t^{Hn} \ln(\alpha_t^{Hn}) \quad (4)$$

ここで, 私事トリップ費用と通勤トリップ費用は, 発生ベースの費用をトリップ数で重みづけした加重平均を用いて下式の通りとする.

$$q_i^H = \frac{\sum_j Q_{ij}^H \left(\frac{\sum_k Q_{ijk}^H \cdot w t_{ijk}}{Q_{ij}^H} \right)}{Q_i^H} \quad (5)$$

$$q_i^B = \frac{\sum_j Q_{ij}^B \left(\frac{\sum_k Q_{ijk}^B \cdot w t_{ijk}}{Q_{ij}^B} \right)}{Q_i^B} \quad (6)$$

ただし, q_i^H : 私事トリップ費用, q_i^B : 業務トリップ費用, Q_i : i発のトリップ数, Q_{ij} : ij間のトリップ数, Q_{ijk} : ij間の交通手段kのトリップ数, w : 家計の賃金率, t_{ijk} : 一般化費用 とする.

立地選択行動はロジットモデルにより下記のように定式化する. これにより求まる立地選択確率を総人口に乗じることで, ゾーン別人口を算出する.

$$P_i^{Hn} = \frac{\exp \theta^{Hn} (V_i^n + \tau_i^{Hn})}{\sum_i \exp \theta^{Hn} (V_i^n + \tau_i^{Hn})} \quad (7)$$

$$POP_i^n = P_i^{Hn} \cdot POP_T^n \quad (8)$$

ただし, P_i^{Hn} : 立地選択確率, V_i^n : 間接効用関数, θ^{Hn} : ロジットパラメータ, τ_i^{Hn} : 間接効用に含まれない要因, POP_i^n : ゾーン人口, POP_T^n : 総人口.

家計の土地需要量は, (8)式のゾーンの立地者数に一人当たりの土地面積を乗じて以下のように表わされる.

$$D_i^{Hn} = I_i^{Hn} \cdot POP_i^n \quad (9)$$

b) 企業の行動モデル

企業は代表的1人の従業者とし, 土地(業務用地), 業務トリップを投入して, 生産技術制約のもとで利潤が最大になるように生産を行っているものとし, 生産関数をコブ・ダグラス型技術により記述している.

$$\Pi_i^{Bs} = \max_{l_i^{Bs}, x_i^{Bs}} [Z_i^{Bs} - r_i^B l_i^{Bs} - q_i^B x_i^{Bs}] \quad (10a)$$

$$s.t. \quad Z_i^{Bs} = \eta_i^s (l_i^{Bs})^{\beta_l^s} (x_i^{Bs})^{\beta_x^s} \quad (10b)$$

ただし, Π_i^{Bs} : 利潤, Z_i^{Bs} : 合成財生産量, l_i^{Bs} : 業務地投入量, x_i^{Bs} : 業務トリップ消費量, r_i^B : 業務地代, q_i^B : 業務トリップ費用, η_i^s : 生産効率パラメータ

β_l^s, β_x^s : 産業の配分パラメータ .

(10a), (10b)式の利潤最大化問題を解くことにより, 企業の生産要素需要である土地投入量が以下のように求められる.

$$l_i^{Bs} = \left\{ \frac{1}{\eta_i^s} \left(\frac{r_i^B}{\beta_l^s} \right)^{1-\beta_l^s} \left(\frac{\beta_x^s}{q_i^B} \right)^{-\beta_x^s} \right\}^{\frac{1}{\beta_l^s + \beta_x^s - 1}} \quad (11)$$

(11)式を生産関数に代入すると, 利潤関数が下式のように導出される.

$$\Pi_i^{Bs} = (1 - \beta_l^s - \beta_x^s) (\eta_i^s)^{\frac{1}{1-\beta_l^s-\beta_x^s}} \times \left\{ \left(\frac{r_i^B}{\beta_l^s} \right)^{\beta_l^s} \left(\frac{q_i^B}{\beta_x^s} \right)^{\beta_x^s} \right\}^{\frac{1}{\beta_l^s + \beta_x^s - 1}} \quad (12)$$

ここで, 業務トリップ費用は, 家計と同様に発生ベースのそれぞれの費用をトリップ数で重みづけした加重平均を用いて, 下記の通りとする.

$$q_i^B = \frac{\sum_j Q_{ij}^B \left(\frac{\sum_k Q_{ijk}^B \cdot w t_{ijk}}{Q_{ij}^B} \right)}{Q_i^B} \quad (13)$$

ただし, q_i^B : 業務トリップ費用, Q_i : i発のトリップ数, Q_{ij} : ij間のトリップ数, Q_{ijk} : ij間の交通手段kのトリップ数, w : 家計の賃金率, t_{ijk} : 一般化費用.

立地選択行動はロジットモデルにより下記の通り定式化する. これにより求まる立地選択確立を総従業者数に乗じることで, ゾーン別の従業者数を算出する.

$$P_i^{Bs} = \frac{\exp \theta^{Bs} (\Pi_i^s + \tau_i^{Bs})}{\sum_i \exp \theta^{Bs} (\Pi_i^s + \tau_i^{Bs})} \quad (14)$$

$$EMP_i^s = P_i^{Bs} \cdot EMP_i^n \quad (15)$$

ただし、 P_i^{Bs} : 立地選択確率、 Π_i^s : 利潤関数、 θ^{Bs} : ロ

ジットパラメータ、 τ_i^{Bs} : 利潤関数に含まれない要因、

EMP_i^s : ゾーン従業者数、 EMP_i^n : 総従業者数。

企業の土地需要量は、(15)式のゾーンの立地者数に(11)式の一人当たり土地面積を乗じて以下のように表わされる。

$$D_i^{Bs} = I_i^{Bs} \cdot EMP_i^s \quad (16)$$

c) 地主の行動モデル

不在地主は、家計および企業に対して、それぞれ住宅地および業務地を供給する。その際、地主の土地供給関数は、利潤最大化問題を解くことで下記のように導かれる。

$$y_i^H = \left(1 - \frac{\sigma_i^H}{r_i^H}\right) Y_i^{HO} \quad (17)$$

$$y_i^B = \left(1 - \frac{\sigma_i^B}{r_i^B}\right) Y_i^{BO} \quad (18)$$

ただし、 y_i^H : 住宅地供給量、 y_i^B : 業務地供給量、

Y_i^{HO}, Y_i^{BO} : 土地供給可能面積、 r_i^H : 住宅地代、 r_i^B : 業

務地代、 σ_i^H, σ_i^B : パラメータ。

d) 均衡条件

住宅地、業務地それぞれの市場における均衡条件は以下のとおりである。

i) 住宅地市場での需給一致

$$y_i^H = \sum_n D_i^{Hn} \quad (19)$$

ii) 総家計数制約

$$\sum_i POP_i^n = POP_T^n \quad (20)$$

iii) 業務地市場での需給一致

$$y_i^B = \sum_s D_i^{Bs} \quad (21)$$

iv) 総従業者数制約

$$\sum_i EMP_i^s = EMP_T^s \quad (22)$$

(2) 交通モデルの定式化

以下のように変数の設定を行い、交通量発生モデル、目的地選択モデル、交通手段選択モデルについて、それぞれ定式化を行う。

i : ゾーンを表すラベル

j : 全ゾーンを表すラベル

n : 年齢階層を表すラベル

m : 目的を表すラベル

k : 交通手段を表すラベル

$\in \{P \text{ (公共交通)}, C \text{ (乗用車)}, B \text{ (自転車)}, W \text{ (徒歩)}\}$

a) 交通量発生モデル

目的別のゾーン毎の発生交通量(トリップ数)は、一人(通勤、通学、私事では人口、業務では従業者数)当たり発生交通量を現況で固定とし、(23)式、(24)式により求める。なお、式中のゾーン人口またはゾーン従業者数は、土地利用モデルで出力される値を用いる。一人当たり発生トリップ数はH22近畿圏PT調査をもとに算出しており、年齢のデータはあるが、産業分類のデータは存在しないため、通勤、通学、私事に関しては年齢階層別の人口、業務に関しては全産業の従業者数を入力値として目的別発生トリップ数を算出している。

$$\text{(通勤, 通学, 私事)} \quad Q_i^{nm} = POP_i^n \cdot Q_{i_out}^{nm} \quad (23)$$

$$\text{(業務)} \quad Q_i^m = EMP_i^n \cdot Q_{i_out}^m \quad (24)$$

ただし、 Q_i^{nm} : 目的別トリップ数、 $Q_{i_out}^{nm}$: 目的別一人

当たりトリップ数、 POP_i^n : 土地利用モデルで出力され

た人口、 EMP_i^n : 土地利用モデルで出力された従業者

数。

b) 目的地選択モデル

目的地選択の確率選択式を(25)式の通りとする。ただし、年齢階層 n 別目的 m 別の ij 間の間接効用に関して、通勤、私事、業務にでは、企業の多い場所や第3次産業の集中している場所を選好すると考え、目的地ゾーンの従業者数を説明変数とし、通学に関しては学校が住宅地にあることが多く、人の少ない場所には少ないと考え、目的地ゾーンの人口を説明変数とした。なお、式中のアクセシビリティ指標は、交通手段選択モデルで算出されるログサム変数であり、(28)式で求められる。

$$P_{ij}^{nm} = \frac{\exp(V_{ij}^{nm} + \tau_{ij}^{nm})}{\sum_j \exp(V_{ij}^{nm} + \tau_{ij}^{nm})} \quad (25)$$

$$V_{ij}^{nm} = \theta_{iS}^{nm} \ln S_j^{nm} + \lambda^{nm} ACC_{ij}^{nm} \quad (26)$$

$$V_{ij}^{nm} = \theta_{iN}^{nm} \ln N_j^{nm} + \lambda^{nm} ACC_{ij}^{nm} \quad (27)$$

$$ACC_{ij}^{nm} = \ln \sum_k \exp(V_{ijk}^{nm} + \tau_{ijk}^{nm}) \quad (28)$$

P_{ij}^{nm} : 目的地選択確率, V_{ij}^{nm} : 目的地選択の間接効用関数, V_{ijk}^{nm} : 交通手段選択の間接効用関数, τ_{ijk}^{nm} : 目的地選択の間接効用関数に含まれていない要因, τ_{ijk}^{nm} : 交通手段選択の間接効用関数に含まれていない要因, S_j^{nm} : 目的地の集客力指標 (従業員数), N_j^{nm} : 目的地の集客力指標 (人口), $\theta_{iS}^{nm}, \theta_{iN}^{nm}$: 集客力指標のパラメータ,

ACC_{ij}^{nm} : アクセシビリティ指標, λ^{nm} : アクセシビリティ指標のパラメータ.

c) 交通手段選択モデル

交通手段選択モデルの選択確率式を(29)式の通りとする. 間接効用関数に関しては, 各交通手段のゾーン間一般化費用を説明変数としている. 前述したように, ここでの一般化費用は時間単位で表現されており, 運賃のかからない乗用車, 自転車, 徒歩に関してはゾーン間一般化費用はゾーン間所要時間に等しい. 基本的にはゾーン間の距離が長いほど一般化費用は大きくなり, 遠いゾーンを選択する確率が低くなるためには, 一般化費用のパラメータが負の値になることが期待される.

$$P_{ijk}^{nm} = \frac{\exp(V_{ijk}^{nm} + \tau_{ijk}^{nm})}{\sum_{k'} \exp(V_{ijk'}^{nm} + \tau_{ijk'}^{nm})} \quad (29)$$

$$V_{ijP}^{nm} = \theta_2^{nm} t_{ijP} + a_P^{nm} \quad (30)$$

$$V_{ijC}^{nm} = \theta_2^{nm} t_{ijC} + a_C^{nm} \quad (31)$$

$$V_{ijB}^{nm} = \theta_2^{nm} t_{ijB} + a_B^{nm} \quad (32)$$

$$V_{ijW}^{nm} = \theta_2^{nm} t_{ijW} \quad (33)$$

P_{ijk}^{nm} : 交通手段選択確率 (機関分担率), V_{ijk}^{nm} : 交通手段選択確立の間接効用関数, τ_{ijk}^{nm} : 交通手段選択の間接

効用関数に含まれていない要因, t_{ijk} : 一般化費用,

θ_2^{nm} : 一般化費用のパラメータ, a_k^{nm} : 定数項.

(3) 土地利用パラメータの設定

各種統計資料を用いることにより, 土地利用モデルの変数に係るパラメータの推定を各行動主体において行う.

a) 家計の行動モデルのパラメータ

家計の行動モデルで利用するパラメータの設定値は表-3のとおりである. 土地の支出配分パラメータはH22家計調査年報¹⁴⁾, 交通の支出配分パラメータはH22国調査, H22近畿圏PT調査データ, H22NHK国民生活時間調査¹⁵⁾を用いて, キャリブレーションにより作成した. また合成材の支出配分パラメータは, 1から土地と交通の支出配分パラメータを引くことで作成した.

b) 企業の行動モデルのパラメータ

企業の行動モデルで利用するパラメータの設定値は表-4の通りである. 土地の支出配分パラメータはH22県経済計算¹⁶⁾, 交通の支出配分パラメータはH21経済センサス, 毎月勤労統計調査¹⁷⁾, H22NHK国民生活時間調査よりキャリブレーションにより作成した. また, 生産効率パラメータは, (5.10)式の利潤最大化問題の解として得られる合成材生産量が域内総生産 (GRP) に等しくなるように設定する.

c) 地主の行動モデルのパラメータ

住宅地, 業務地のパラメータは, 下式より求める. 説明変数の宅地供給面積, 宅地供給可能面積, 住宅地の地代 (初期値) は実測値 (2010年) を用いる.

$$\sigma_i^H = \left(1 - \frac{y_i^H}{Y_i^{HO}} \right) r_i^H \quad (34)$$

$$\sigma_i^B = \left(1 - \frac{y_i^B}{Y_i^{BO}} \right) r_i^B \quad (35)$$

表-3 家計の土地利用パラメータ

	記号	65歳未満	65歳以上
合成財消費	α_z^n	0.815	0.702
土地消費	α_i^{Hn}	0.172	0.267
交通消費	α_x^{Hn}	0.013	0.031
C	C	-0.526	-0.709

表-4 企業の土地利用パラメータ

	記号	設定値
土地消費	β_i^s	0.041
業務消費	β_x^s	0.011
生産効率	η_i^s	※

※ゾーンごと, 産業ごとに算出するため省略

(4) 交通パラメータの設定

H22 近畿圏 PT 調査データを用いて、最尤推定法により目的地選択モデル及び交通手段選択モデルの変数に係るパラメータの推定を行う。

a) 目的地選択モデルのパラメータ

交通手段選択モデルで推定したパラメータを用いて算出したアクセシビリティ指標と集客力指標（通勤，私事，業務は従業者数，通学は人口）の現況のデータから，(26)，(27)式におけるアクセシビリティ指標のパラメータと集客力指標のパラメータを推定する．結果は表-5の通りである．推計されたパラメータの妥当性を表す尤度比は，0.2~0.3 でもかなり良好な結果であると言われている¹⁸⁾．今回の結果では通学の尤度比が低い，他は概ね妥当な結果であると考えられる．

b) 交通手段選択モデルのパラメータ

交通手段選択モデルの手段別に，間接効用関数の変数を選定し，(30)~(33)式における時間に係るパラメータと定数項を推定した．結果は表-6の通りである．時間に関する変数としては交通手段別のゾーン間一般化費用を用いている．交通手段選択モデルのパラメータに関しては，t 値，尤度比ともに良好な値であるといえる．また，一

般化費用のパラメータはどの交通手段においても負の値で算出されており，一般化費用（運賃+所要時間）が増えると間節効用が減少することを示している．

なお，目的地選択モデル，交通手段選択モデルのパラメータに関する尤度比については McFadden の擬似決定係数を用いており，モデルの最終尤度と初期尤度を用いて(36)式で表される．

$$R_{Mc}^2 = 1 - \frac{\ln L(\hat{\beta})}{\ln L(0)} \tag{36}$$

ただし， R_{Mc}^2 : McFadden の擬似決定係数， $\ln L(\hat{\beta})$: モデルの最終尤度， $\ln L(0)$: モデルの初期尤度．

(5) 便益の計測

神戸市全体の便益を消費者余剰を用いて，以下の式で計測する．

$$B = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j (OD_{ij}^{Bw} + OD_{ij}^{Bo}) (t_{ij}^{Bw} - t_{ij}^{Bo}) \tag{37}$$

表-5 目的地選択モデルのパラメータ

		θ_{1s}^{nm}	λ^{nm}	尤度比
通勤	パラメータ	1.176	0.711	0.178
	t 値	156.5	54.9	
通学	パラメータ	0.677	0.918	0.086
	t 値	36.3	32.1	
私事 (65 歳未満)	パラメータ	0.929	1.276	0.178
	t 値	115.8	82.2	
私事 (65 歳以上)	パラメータ	0.981	1.489	0.202
	t 値	98.9	74.4	
業務	パラメータ	1.075	0.984	0.184
	t 値	79.1	40.9	

表-6 交通手段モデルのパラメータ

		θ_2^{nm}	a_p^{nm}	a_c^{nm}	a_B^{nm}	尤度比
通勤	パラメータ	-1.21	3.92	-0.85	-1.58	0.693
	t 値	32.7	93.1	11.6	23.7	
通学	パラメータ	66.65	182.47	24.22	49.12	0.772
	t 値	100.5	271.7	36.7	74.4	
私事 (65 歳未満)	パラメータ	134.5	361.03	49.29	99.8	0.344
	t 値	168.4	450.3	61.8	125.1	
私事 (65 歳以上)	パラメータ	202.35	539.58	74.36	150.52	0.406
	t 値	236.2	628.8	86.8	175.8	
業務	パラメータ	270.20	718.13	99.43	201.22	0.324
	t 値	304.1	807.4	111.9	226.5	

ただし、 B : 神戸市全体の便益, OD_{ij}^{Bw} : 施策後の自転車トリップ数, OD_{ij}^{Bo} : 施策前の自転車トリップ数, t_{ij}^{Bw} : 施策後の自転車の一般化費用, t_{ij}^{Bo} : 施策前の自転車の一般化費用。

5. シミュレーション分析

(1) 施策の設定

モデルで想定する施策を表-7のように設定した。神戸市で進められている「自転車利用環境総合計画」では、整備対象路線をその特性から以下の3種類に分類している。図-5は同計画における自転車道整備対象区間を示したものである。

優先度 1 :

自転車交通量が 1,000 台/h 以上で市内を東西につなぐ幹線的な路線, 及び『「港都 神戸」グランドデザイン』の自転車動線のうち、現状で整備が可能な路線 (約 21km)

優先度 2 :

自転車交通量が 1,000 台/12h 以上の路線 (約 48km)

優先度 3 :

自転車交通量が 500 台~1,000 台/12h の路線, 及びネットワーク化を考慮して追加した路線 (約 55km)

整備対象路線は優先度順に分類されているため、本研究で設定した施策 Case1~Case3 は、神戸市における自転車道の時系列的な整備状況を表現しているといえる。整備対象路線長としては、Case2 では Case1 の 3 倍程度, Case3 では Case1 の 6 倍程度となっている。

(2) 計算結果

本モデルによる土地利用及び交通に関する計算結果を以下に示す。

a) 土地利用の変化

土地利用に関しては図-6のような結果が得られ、人口分布の変化において自転車道周辺において効果が表れていることが確認できるが、自転車道をすべて整備した場合

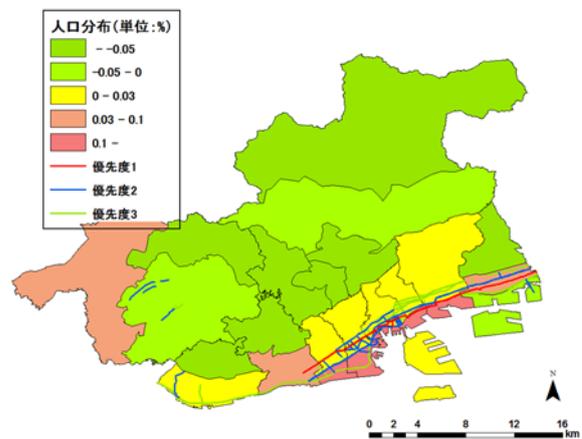


図-6 ゾーン別人口分布の変化 (現況 - Case3)

表-7 モデルで想定する施策の設定

	内容	整備対象路線長	神戸市自転車利用環境総合計画における呼称
Case1	整備対象路線の速度 +10km/h	21km	“優先度1”の路線
Case2	整備対象路線の速度 +10km/h	68km	“優先度1”および“優先度2”の路線
Case3	整備対象路線の速度 +10km/h	123km	“優先度1~3”の路線



図-5 「神戸市自転車利用環境総合計画」における自転車走行空間整備路線 (出典：神戸市, 「神戸市自転車利用環境総合計画」)

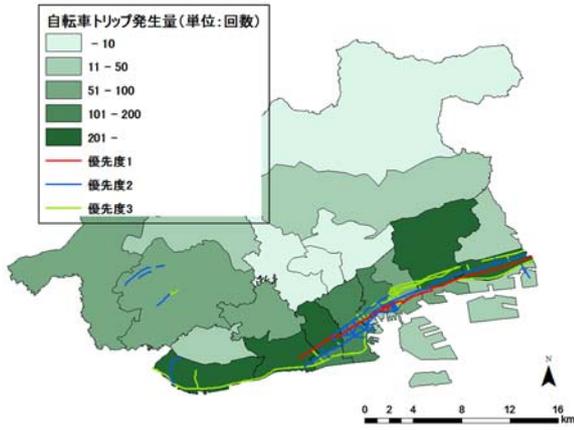


図-7 ゾーン別自転車トリップ発生量の変化
(現況 - Case3)

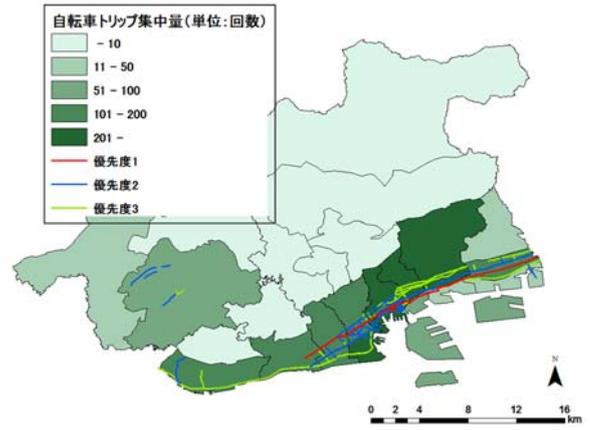


図-8 ゾーン別自転車トリップ集中量の変化
(現況 - Case3)

合でも、現況からの割合で見ると多くても 0.1%ほどしか変化しておらず、従業者分布に関しては、1 人の分布の変化も見られなかった。このことから、自転車道の整備は土地利用に大きな変化を与えるものではないということがわかる。

b) 自転車道整備による人流の変化

まず図-7の自転車トリップ発生量を見ると、その特徴として自転車道整備区域において自転車トリップ発生量が増加しており、特に自転車道整備区域の両端の地域で発生交通量が顕著に増大しているが、自転車道の中心部である三宮の周辺地域ではそれほど増えていないことがわかる。次に、図-8の自転車トリップ集中量について見てみると、発生量とは逆に三宮や海沿いのメリケンパーク、ハーバーランド周辺を中心に自転車の集中交通量が増加していくことがわかる。

このことから、目的地として選択されやすい三宮では発生交通量が少なく、三宮から離れた自転車道の両端部で自転車交通量が増加したと考えられる。三宮周辺地域における自転車利用量が両端部ほど増加しない原因としては、モデルの特徴として、交通手段選択に作用するのはどれだけ所要時間が短縮されたかであり、三宮を目的地とする場合は、その効果が小さく自転車への転換が起きにくいためだと考えられる。

c) 自転車道整備効果の減衰

図-9を見ると、神戸市全体の交通手段別トリップ発生量は、施策を進めるごとに自転車以外の交通手段においては減少し、自転車の交通量においては増加していることから、他の交通手段から自転車に移行する人々が増えたことが見て取れる。また、神戸市全体での便益を消費者余剰の増加分として計算すると、図-10のように算出され、施策を進めるごとに増大していくことがわかる。ただし、Case1~Case3の整備総路線長はそれぞれ約21km

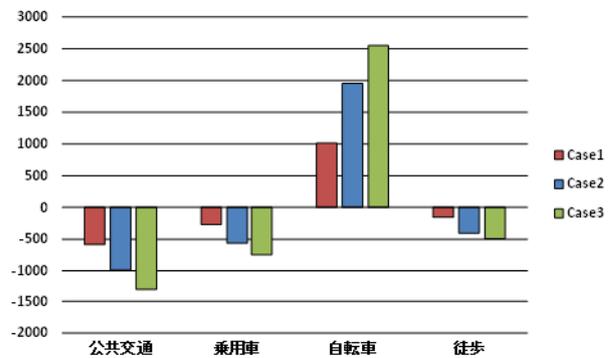


図-9 交通手段別トリップ発生量の変化 (現況比)

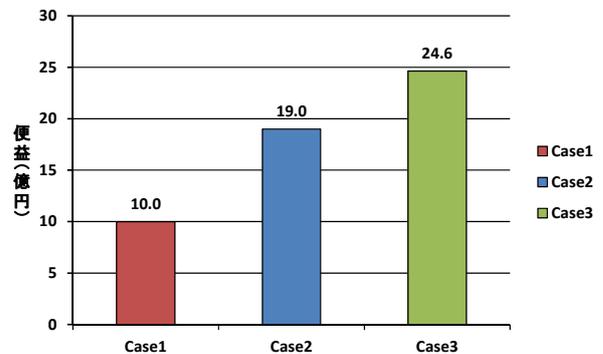


図-10 自転車道整備による便益 (年間)

約 69km, 約 124km であり、Case2, Case3 に関しては、Case1 と比較して、それぞれ 3 倍、6 倍程度の距離の路線を整備しているにもかかわらず、自転車の発生トリップ数、便益はそれほど増加しておらず、1km あたりの便益を算出した図-11 を見ると、自転車道整備の効果が減衰していくことが見て取れる。

この理由としては、3 種類の自転車道の性質の類似性が考えられる。ここでの自転車道の性質とは、自転車道の整備されている主な「方角」とそれぞれの自転車道間

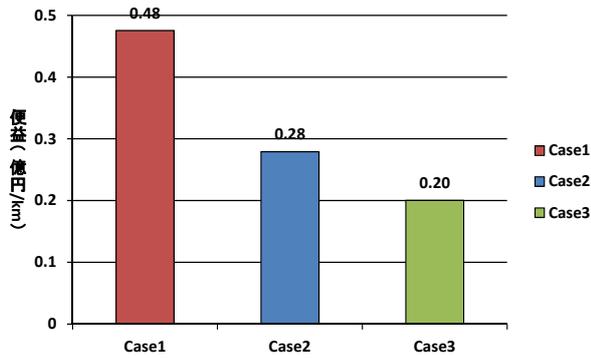


図-11 自転車道整備の単位距離当たり便益 (年間)

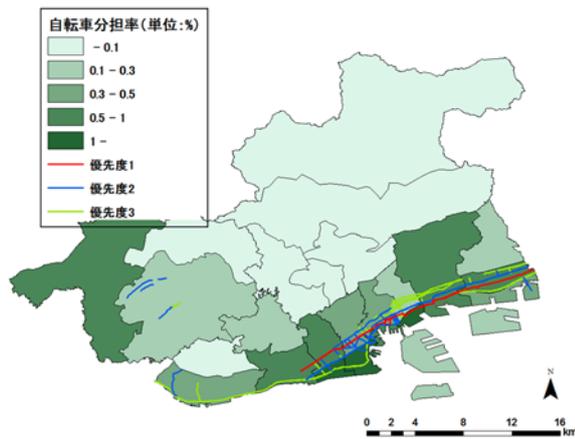


図-12 ゾーン別自転車分担率の変化 (現況 - Case3)

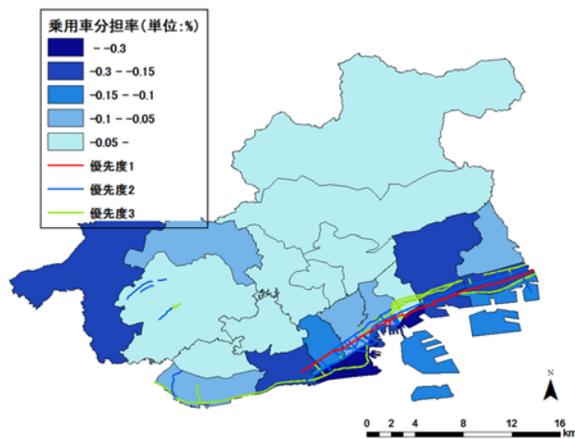


図-13 ゾーン別乗用車分担率の変化 (現況 - Case3)

の「距離」を意味している。前述したように、施策が進むにつれて自転車道間のネットワーク化が促進されることにより、南北方向のトリップ量は顕著に増加しているが、自転車道の整備区域は主に東西方向であるにもかかわらず、東西方向のトリップ量については、さほど変化が見られない。つまり、3種類の自転車道の整備されて

いる方向が主に東西方向であり、それぞれが近接していることから、東西方向のトリップにおいて自転車道を利用する際に発生する一般化費用に大きな違いが見られず、自転車道を整備することにより追加的に発生する効果が減衰しているのだと推測される。

d) CO2 の削減

次に、各ゾーンの交通手段の分担率がどのように変化したかを見てみると、自転車と乗用車について図-12、図-13 のような結果が得られた。自転車道が整備されたことにより、先に述べた自転車トリップ発生量と同じように主に自転車道の東西端部周辺において自転車の分担率が増加していることがわかる。しかし、自転車の分担率の変化では自転車道の東西端部以外に海沿いの地域についても大きな増加傾向がみられる。この理由としては、三宮以南の海沿い地域では主要な幹線道路や公共交通が整備されていないため、自転車道の効果が大きく出たものと考えられる。それに加え、図-6.13では自転車の分担率が増加した地域において、乗用車の分担率が減少していることから同地域において乗用車から自転車への移行が発生することがわかる。自転車道の整備によって、自転車に移行する乗用車トリップ数 (人トリップ) は1日当たり約750回であり、年間27万回の乗用車によるトリップを減らすことができるため、CO2の削減効果も見込まれると考えられる。

6. 結論

(1) まとめ

本稿では、神戸市における自転車道整備による土地利用及び交通体系における効果を応用都市経済モデルを用いて分析を行った。

第2章では、本研究で扱うCUEモデルについて、その構造と考え方を示した。本研究におけるモデルの仕様を示したのち、CUEモデルの全体構造とモデルの前提条件、最後に本モデルを構成する土地利用モデル及び交通モデルについてその理論的枠組みを示した。

第3章では、本モデルを構築するに当たり整備したデータセットについて示した。土地利用モデルでは、各種統計資料を用いてゾーン別にデータセットの整備を行い、交通モデルでは、整備した交通ネットワークの設定について言及し、それにより求められる本研究における一般化費用の考え方及び目的別手段別OD表の集計区分について示した。

第4章では、CUEモデルの構築についてその定式化、パラメータの推定方法及び推定結果を示し、さらに便益の計測方法を示した。土地利用モデルに関しては、家計、企業、地主についてそれぞれの効用最大化問題を記述し、

さらにモデルの均衡条件に付いて整理した。交通モデルでは、交通量発生モデル、目的地選択モデル、交通手段選択モデルについて定式化を行った。土地利用モデルにおける各行動主体の支出配分パラメータをキャリブレーションにより、交通モデルにおける目的地選択モデル及び交通手段選択モデルのパラメータを最尤推定法により推定し、その結果を示した。便益の計測については自転車道が整備されたことによる消費者余剰を用いて行うことを示した。

第 5 章では、神戸市で計画されている「神戸市自転車利用環境総合計画」において提示されている自転車道の整備段階ごとに構築したモデルにより分析を行い、その結果を示した。分析の結果、土地利用に関しては、大きな変化が算出されず、今回の施策では家計や企業の立地に大きな影響は与えないことを示した。交通面に関しては、神戸市で進められている自転車道整備計画のように、東西方向に並走する自転車道を順に整備を行った場合、自転車道の整備による交通体系への影響及び便益は減衰していくことを示した。また、自転車道を整備すると、自転車道が整備されている区域の東西端部周辺および海沿いの地域において主に効果が表れ、また長距離において効果が大きく出ること示した。最後に、交通手段分担率に着目すると、乗用車から自転車に移行することによる CO2 削減の効果があることを示した。

(2) 今後の課題

最後に、今後の課題について以下に示す。

a) 交通混雑の考慮

本研究では、交通混雑を考慮しておらず、自転車道整備による渋滞の緩和などの影響を無視している。自転車道を整備すると、今まで自動車を利用していた人が自転車に移行することで混雑が緩和され、さらにそれが他の交通機関にも影響を与えることが予想される。

b) 坂道の考慮

神戸市の大きな特徴として、坂道が多いということが挙げられ、徒歩や自転車の場合に、東西方向と南北方向の移動の際、それぞれの分担率が変わることが予想される。神戸では、東西方向には自転車での移動が楽であっても、北には山があるため自転車での移動は容易ではない。したがって、神戸市の交通を表現する上で坂道をモデルに組み込むことは非常に重要なことだと考えられる。

c) 端末交通の考慮

本研究では、発ゾーンから着ゾーンまでのトリップを代表交通手段のみによって行われたものとして OD 表を集計しているため、駅まで使用した自転車交通などの端末交通について考慮できていない。モデルの精度を上げるためには、短距離、中距離の移動以外の長距離移動における端末交通を考慮することが重要だと考えられる。

d) 天候の考慮

本研究では現況での各交通手段の 1 日当たりトリップ数を H22 近畿圏 PT 調査の拡大係数を集計することで推計しており、この結果には天候が考慮されていない。したがって、本研究における自転車道整備による自転車の交通需要予測結果が天候によらず普遍的なものであり、H22 近畿圏 PT 調査の実施時期の気象状況に依存した結果であることに注意が必要である。

e) 駐輪場の考慮

乗用車から自転車への移行が発生すれば、余分な駐車スペースが発生することにより、居住地面積の増大などの効果が考えられるが、本研究ではこのことを考慮できていない。

f) ゾーンの細分化

本研究では、神戸市を 27 ゾーンに分割して分析を行ったが、今後はさらに細分化したゾーンで研究を行う必要がある。交通モデルにおいては、ゾーン内交通を考慮しないが、自転車は 5km 以内の近～中距離での利用が多く、それを考慮すると本研究のゾーン分割では、ゾーン内交通に自転車交通の多くが含まれており、結果に大きな影響を及ぼしている可能性がある。今後は、ゾーンをさらに細かくし、ゾーン内交通を考慮しないことによる誤差を少なくする必要がある。

g) セントロイドの修正

本来はトリップが最も発生、集中する点をセントロイドとして設定すべきである。本研究では、セントロイドを各ゾーンの面積重心として設定しており、面積の多い北区のゾーンにおいては、交通量のあまり多くない地点をセントロイドとして設定しているため本研究で算出された一般化費用が本来算出されるべき値と剥離している可能性がある。今後は、Google Map などを活用しつつ、より適切な位置にセントロイドを設定する必要がある。

参考文献

- 1) 神戸市[2012], “神戸市自転車利用環境総合計画”, <http://www.city.kobe.lg.jp/life/town/road/20123003082901-35.pdf>, 2014 年 1 月 26 日アクセス。
- 2) 味水佑毅：自転車走行空間の整備に関する経済評価、地域政策研究会（高崎経済大学地域政策学会），第 14 巻，第 4 号，pp1-16，2012。
- 3) 上田孝行，堤盛人，武藤慎一，山崎清：わが国における応用都市経済モデル—特徴と発展経緯—，計画・交通研究会，ワーキングペーパーシリーズ，WP09-04，2009。
- 4) 山崎清，武藤慎一：開発・誘発交通を考慮した道路整備効果の分析，運輸政策研究，vol.11，No.2，2008。
- 5) 総務省統計局：国勢調査，2010。
- 6) 総務省統計局：経済センサス，2009。
- 7) 国土数値情報：地価公示，2010。
- 8) 国土数値情報：都道府県地価調査，2009。
- 9) 国土数値情報：都道府県地価調査，2010。

- 10) 間瀬茂：地球統計学とクリギング法:R と geoR によるデータ解析，オーム社，2010.
- 11) 国土数値情報：土地細分メッシュデータ，2006.
- 12) 一般財団法人日本デジタル道路地図協会：デジタル道路地図.
- 13) 国土数値情報：バスルート，2010.
- 14) 総務省統計局：家計調査年報，2010.
- 15) NHK 放送文化研究所：NHK 国民生活時間調査，2010.
- 16) 内閣府：県民経済計算，2010.
- 17) 厚生労働省：毎月勤労統計調査，2010.
- 18) 交通工学研究会：やさしい非集計分析，社団法人交通工学研究会，1993.
- 19) 上田孝行：Excel で学ぶ地域・都市経済分析，コロナ社，2010.
- 20) 山崎清，上田孝行，岩上一騎：開発人口及び誘発・開発交通を考慮した東京湾アクアラインの料金値下げ効果の計測，高速道路と自動車，第 51 巻，第 6 号，2008.
- 21) 小池淳司，石倉智樹，堤盛人：特集『土木計画学に A おける経済均衡モデル研究の最新動向：応用一般均衡モデルと応用都市経済モデル』，土木学会論文集 D3 (土木計画学)，Vol.68, N0.4, pp285-290, 2012.
- 22) 堤盛人，山崎清，小池淳司，瀬谷創：応用都市経済モデルの課題と展望，土木学会論文集 D3 (土木計画学)，Vol.68, No.4, pp344-357, 2012.
- 23) 元田良孝，宇佐美誠史，村松里沙：自転車交通需要と気象の関係の地域性に関する研究，第 31 回交通工学研究発表会論文集，2011.
- 24) 阿部宏史，栗井睦夫，山根浩三，藤井真紀子：地方都市における自転車利用環境の整備が通勤交通に及ぼす影響，土木計画学研究・論文集，No.17, 2000.

Development of a Computable Urban Economic model in the context of bicycle behavior

Atsushi KOIKE, Yoshinao MIYAMOTO and Kiyoshi YAMASAKI

Recently, the bicycle has been used more widely in people's daily life as an easy and convenient transport mode and now in Kobe the bicycle lanes are being planned. This paper developed the Computable Urban Economic model in the context of bicycle behavior in order to evaluate above policy. As a result, we found that the improvement of bicycle lanes has some benefit and its additional effect will decrease. In terms of transportation, the effect is mainly seen in the areas of edge of bicycle lanes and in the seaside areas, especially it is apparent in the long distance. In addition, it also contributes to the reduction of CO₂ since more people choose the bicycle instead of car. On the other hand, we also found that the improvement of bicycle lanes has little effect on land use.