都心滞在効用と駐車場位置を考慮した均衡配分モデル

大山雄己[1]・羽藤英二[2]

[1]学生会員　東京大学大学院　工学系研究科（〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1）
E-mail: oyama@bin.t.u-tokyo.ac.jp
[2]正会員　工博　東京大学大学院　工学系研究科　教授（〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1）
E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp

都市が縮退を迎えようとする中，欧州の諸都市を例に，我が国においても歩行者空間を生み出して都心を再生しようとする動きが見られる．そのための都市政策としてフリンジパーキングや都心の街路空間整備を考えた時，領域の設定が施策の効果を大きく左右する．本研究ではこの問題を駐車場の配置問題として置き換え，異なる 2 種類の駐車場に対する均衡配分モデルとして定式化した．その際，コストのみならず都心滞在から得られる効用を考慮し，空間改変による駐車場・滞在時間選択結果の変化を記述するモデルを構築した．

Key Words : *City Center, Equilibrium Assignment Model, Parking Location, Duration Utilities*

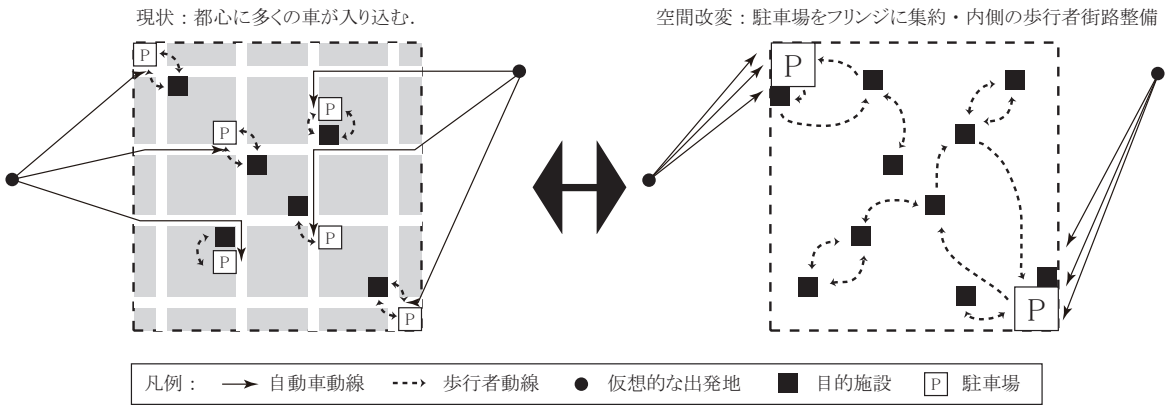
1. はじめに

近年，人口減少や少子高齢化に伴う都市縮退の流れの中で，歩行者を主体とした公共空間整備の動きが見られる．健康医療福祉の観点からも，歩きを主眼においた都市政策及びその効果分析の重要性は高い．一方で，住民の生活の大部分は未だ自動車に依存しており，入と出が同じことや，滞在時間に比例して駐車料金が増すことなど，回遊行動にとって大きな制約を与えている．そのため，都心の地区計画の展開において歩行者空間の整備と自動車交通の制御は一体的に行う必要がある．

歩行者と自動車の公共空間を一体的に考える計画手法として，都心駐車場の再配置を考える．多くの地方都市では都心部に分散して存在する駐車場が来訪者の回遊範囲や滞在時間を限定するだけでなく，土地利用や景観面においても歩行者に対して大きな影響を与えている．それらを集約化してフリンジ部に配置し，内側を歩行者空間として整備することは回遊パタンの変化に一定の効果をもたらすと考えられている (**図–1**：詳細は後述)．一方でフリンジ位置の設定，つまり都心の歩行者空間の領域設定が総合的な効果を大きく左右すると考えられるものの，その設定に対する明確な根拠や手法は明らかとされていない．本研究では歩行者空間の大きさを決定する問題を駐車場配置・選択問題として置き換え，都市政策へのインプリケーションを得ることを目的とする．

駐車場選択行動に関する既往研究は数多く存在する．Arnott とその研究グループは長期間に渡って都心の駐車場施策について研究を行なってきた（Arnott et al. 1991[1)], Arnott and Rowse, 1999[2)], Arnott and Inci, 2010[3)]）．Vickrey(1969)[4)]のスケジューリングモデルに駐車場探索コストや待ち行列を入れて駐車場施策を考慮した研究は多くなされてきており，Zhang et al.(2008[5)], 2011[6)]) では通勤交通に対してボトルネックの動学性を仮定して駐車料金変更・駐車場許可証といった施策を考慮し，鉄道への手段変更も考慮した統合的な分析を行なっている．Quan et al.(2012)[7)]では，ボトルネックを持った 1OD の単純ネットワークに対して，料金・容量・目的地とのアクセス距離の点で異なる属性を持った 2 つの駐車場クラスタを考え，利用者の選好によって 5 段階の均衡パタンを算出している．Lam et al.(2006)[8)]は異なる属性の旅行者・駐車場に対して確率的な出発時刻・滞在時間選択を含む時間依存の段階的な選択行動を仮定し，均衡モデルを変分不等式問題として表現することによって解を求めている．

一方で，個人の複雑な駐車場探索・選択行動を非集計モデルを用いて分析するアプローチがある．特に駐車場の選択においてはあらかじめ選択肢集合を特定することが難しい．Thompson and Richardson(1998)[9)]や室町 (2000)[10)]は駐車場の探索行動に焦点を当て，駐車場を見つける度に駐車するか新たな駐車場を探すかを選択するモデルを構築し，動的に選択肢集合が形成されていく過程を表現した．張ら (2004)[11)]は，相対性効用の概念を導入して選択肢集合の形成を内生化した駐車場選択モデルを構築している．また，三輪ら (2009)[12)]



図–1 本研究で想定する都市政策

は駐車場選択行動と駐車後の回遊行動の関係に着目し，駐車場選択－滞在時間選択モデルを離散連続モデルを用いることで個別にモデルを構築した場合のバイアス除去に成功している．さらに料金を変更したときの滞在時間の変化をシミュレーションによって検証し，料金割引施策の効果を示している．

こうした研究で考えられている駐車場施策の多くは，渋滞・混雑緩和を目的としたものである一方で，近年の都市政策では，冒頭に述べたように歩行者の回遊性を生み出すことを最終的な目的として計画が進められることが多い．しかし，駐車場施策と回遊行動との関係性に着目した研究は非集計モデルの中でわずかに存在するのみであり，それらも料金割引等の効果検証に限られている．駐車場の再配置と合わせて考えられる内側の空間改変効果までを考慮している例は戸叶ら (2011)[13] を除けば今までにないと言えよう．

本研究は，都心の歩行者空間の領域設定という視点から駐車場位置の変更及び都心投資の効果検証を行なうことを考える．その際，都心滞在から得られる効用を考慮し，均衡配分モデルの枠組みによって来訪者の総効用を最大化させる駐車場の配置パタンを検討する．2 章において本研究のベースとなる概念・定義を提示後，3 章で均衡配分モデルとして定式化を行なう．4 章では単純なネットワークを用いて数値計算を行い，結果と考察を示す．5 章では，本均衡モデルを変分不等式問題として定式化を行い，その解法アルゴリズムを紹介し，6 章で本論文の結論を述べる．

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 本研究の視点

駐車場の再配置を用いた空間改変の効果を具体的に考える．設定したフリンジの内側の街路空間を再配分し，歩行者空間として整備すれば，回遊により得られる効用は増すだろう．一方で，目的施設から離れた駐車場に車を駐めなければならず，アクセス距離の増加によって損失を被る恐れが生じる．滞在時間や歩行距離が増加すれば，訪問施設数の増加や健康の増進につながるものの，その分駐車料金は増す．来訪者にとっての制約である料金も，駐車場事業者にとっては収益の増加につながり，公共駐車場であれば都心投資のための費用を賄うことができることも考えられる．つまり，フリンジパーキングや歩行者空間の創出といった都心空間改変は，その結果として多様な主体の効用と不効用に対してさまざまな影響を与え得るが，こうした効果を総合的に左右しているのがフリンジ位置の設定であると考えられる．

均衡配分モデルを用いたこれまでの研究では，移動者は自らのコストを最小限にさせるよう意思決定を行なうと仮定している．Lam et al.(2006) では，移動者のスケジューリングコスト $C(t)$ は以下のように定義される．

$$\begin{aligned} C(t) = \; & T(t) + \alpha_1 d(t + T(t)) + \alpha_2 z(t + T(t)) \\ & + \alpha_3 w + \Theta(t + T(t) + d(t + T(t)) + w) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで，t は出発時刻，α はパラメータである．右辺第 1 項は旅行時間コスト，第 2 項は駐車場探索コスト，第 3 項は駐車料金に関するコスト，第 4 項は駐車場から目的地までのアクセス時間コスト，そして第 5 項は到着希望時刻 t^* に対するマージナルコルトをそれぞれ表している．なお，第 5 項については希望希望時刻に対する許容範囲 $[t^* - \Delta, t^* + \Delta]$ からのずれによって以下のように定義される．

表–1 計画者の制御変数

政策	制御変数
駐車場位置の設定	自動車規制範囲面積：$w^2(m^2)$
駐車システムの変更	駐車料金：p(円/h),
	割引率：θ(円/m),
	容量：c(台)
都心空間への投資	街路空間の魅力度：β
(目的施設/街路整備)	

表–2 来訪者の回遊パタン

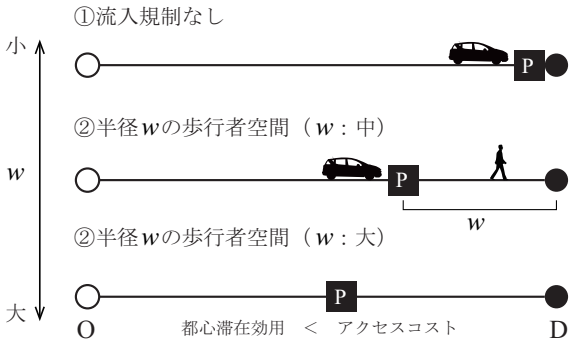
選択行動	回遊指標
駐車場選択	目的施設までの 1 次距離：w'(m)
回遊パタン選択	都心滞在時間：τ(h),
	移動時間パラメータ：r

$$\Theta(t+T(t)+d(t+T(t))+w) = \begin{cases} \tau[t^* - (t+T(t)+d(t+T(t))+w)], \\ if\ (t+T(t)+d(t+T(t))+w) < t^* - \Delta \\ \lambda[(t+T(t)+d(t+T(t))+w) - t^*], \\ if\ (t+T(t)+d(t+T(t))+w) > t^* + \Delta \\ 0,\ otherwise \end{cases} \quad (2)$$

式 (1)(2) に見られるように，既往のスケジューリングモデルは施策による効果として，駐車場の料金，容量，配置（目的地からの距離）の変更から受けるコストの増減のみを考慮している．もちろん，駐車場の課金や容量制限によって都心の渋滞・混雑を緩和することは重要な問題であり，その分析には大きな意義がある．しかし，縮退を迎えようとしている我が国の都市において，政策の効果として都心の歩き，回遊行動への波及効果を考えることは，重要な課題であると考えられる．本研究では，自動車を駐車後の歩行者の回遊行動から得られる効用を考慮して，歩行者空間の領域決定理論を構築することを試みる．

(2) 政策の決定と回遊パタンの変化

再び**図–1** の都市政策を考える．計画者は，来訪者の回遊性を高めるために，都心部に流入する車両を空間的に，あるいはシステムによって制限し，内側の空間改変に対して投資を行なう．**表–1** に示すように，この際の制御変数として主に w, p, θ, c, β の 5 つの指標を考える．例えば**図–1** の左の図に示すように，現状の都心来訪者は，自らの目的施設に対して最も近い駐車場に車を駐めて，施設に滞在後すぐに帰宅するパタンが多い．そこで，計画者は内側の駐車場を排除し，中心から距離 w のフリンジ部に集約させるとともに内側を歩行者



図–2 フリンジ距離 w とアクセスコスト

空間として整備することで，都心の回遊性（滞在時間）を高めることを考える．一定距離まではその効果が現れても，w を大きくしすぎると目的地までのアクセスにかかるコストが増加し，いくら駐車料金 p を安くしたり，回遊路に投資を行なったり（β）しても都心から来訪者が減少する恐れがあることは容易に想像できる．そのため，計画者は来訪者の行動を予測し，最適な政策を決定する必要がある (**図–2**)．

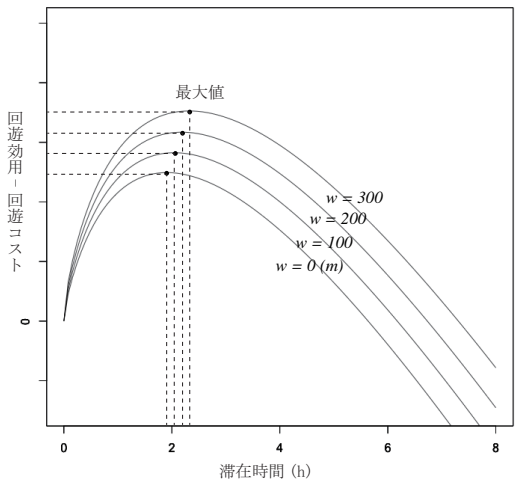
一方，来訪者は都心の状況と自身の目的に応じて自らの効用を最大化させる戦略を決定する．本研究ではこのときの戦略の組を「回遊パタン」と定義する．今回想定する回遊パタンは,「滞在時間」及び「回遊時間」とする．このとき，来訪者の戦略に応じて**表–2** に示す回遊指標が決定される.「回遊時間」は都心滞在時間に移動時間パラメータ r を乗じた形で表され，r が小さいほど 1 箇所の施設で滞在している割合が高い．こうした計画者の決定する政策，そして来訪者が選択する回遊パタンに応じて変化する都心滞在中の効用・不効用を「都心滞在効用」として定義し，次節で定式化を行なう．

(3) 都心滞在効用

本研究は，Vickrey(1969) に端を発し，式 (1)(2) のように定式化されてきたスケジューリングモデルに対して，都心滞在中の回遊行動までを考慮して空間改変の評価を行おうとする点に特色がある．**表–1,2** の変数を用いて，都心滞在効用を設定する．来訪者が都心滞在によって得られる効用は,

$$U_i(\tau, r) = \alpha_1 u_{stay}(\tau, r) + \alpha_2 \beta u_{move}(\tau, r) - \alpha_3 r\tau \quad (3)$$

$U_i(\tau, r)$ ：駐車場 i を選択した時の，滞在時間 τ，
移動時間 $r\tau$ の回遊パタンに対する効用
$u_{stay}(\tau, r)$ ：施設滞在効用



図–3 滞在時間に関する効用とコストの考え方

$u_{move}(\tau, r)$ ：都心回遊効用
β ：街路整備による移動コスト緩和率
α, θ ：パラメータ (> 0)

ここで，式 (3) の左辺は都心滞在から得られる総効用を表し，右辺第 1 項は目的施設に滞在することで得られる効用 (施設滞在時間 $(1-r)\tau$)，第 2 項は都心を回遊することで得られる効用，そして第 3 項は滞在中の移動コスト，をそれぞれ示している．なお，効用関数 u_{stay}，u_{move} は，限界効用逓減の法則に従う凹関数として仮定する．つまり，はじめのうちは時間の増加に応じて獲得できる効用が大きいものの，次第に効用の増加率が低下していく．

時間を変数とする以上の都心滞在効用，及び駐車料金コストの関係を**図–3** を用いて考える．式 (3) で定義した都心滞在効用及び駐車料金コストはいずれも滞在時間に対して単調増加する関数であるが，施設滞在・都心回遊効用については滞在時間が増加するにつれて変化量が減少していく一方で，移動コスト・駐車料金コストは滞在時間に比例して一定割合で増加し続ける．**図–3** はその合計値のグラフを，フリンジ距離 w を変化させて表示したものである．つまり，両者の差（滞在時間から得られる総効用）は滞在時間がある一定の値までは増加するものの，それ以降は減少し続け，滞在時間が長くなりすぎればコストの方が大きくなり総効用がマイナスの値をとることがわかる．なお，**図–3** については r，p が一定のときのグラフを表しており，これらの値が変化すれば総効用が最大値及び 0 となるときの滞在時間の値が変化することに注意されたい．

以上を都心の空間改変及び来訪者の回遊戦略（パタン）によって変化する「都心滞在効用」として定義し，以降のモデルで用いることとする．

3. 均衡配分モデルの定式化

(1) 問題の仮定

計画者の政策決定に対して回遊パタンを変化させる移動者の均衡問題を定式化するにあたり，本論文ではいくつかの仮定を置く．

(a) 来訪者は，自身の確率的意思決定に基づいて段階的な選択を行なう．
(b) 来訪者は，上位として滞在時間 τ と移動時間割合 r の組である回遊パタン $m(\tau, r)$ の選択を行なう．
(c) 来訪者は自身の選択する回遊パタンに従い，下位として駐車場 i を選択する．
(d) 駐車場選択を行なう来訪者の属性は，回遊パタン m によって特徴づけられる．また，各駐車場は料金 p 及び都心中央部からの距離 l，駐車容量 c において異なる特徴を持つ．

(2) コスト関数の設定

属性 m の移動者が駐車場 i を選択した際のコスト関数を，式 (1)(3) を用いて以下のように定義する．

$$C_i^m = \alpha_4 p_i \tau + \alpha_6 d_i^m(\boldsymbol{f}) + \alpha_5 w_i^m(\boldsymbol{f}) \qquad (4)$$

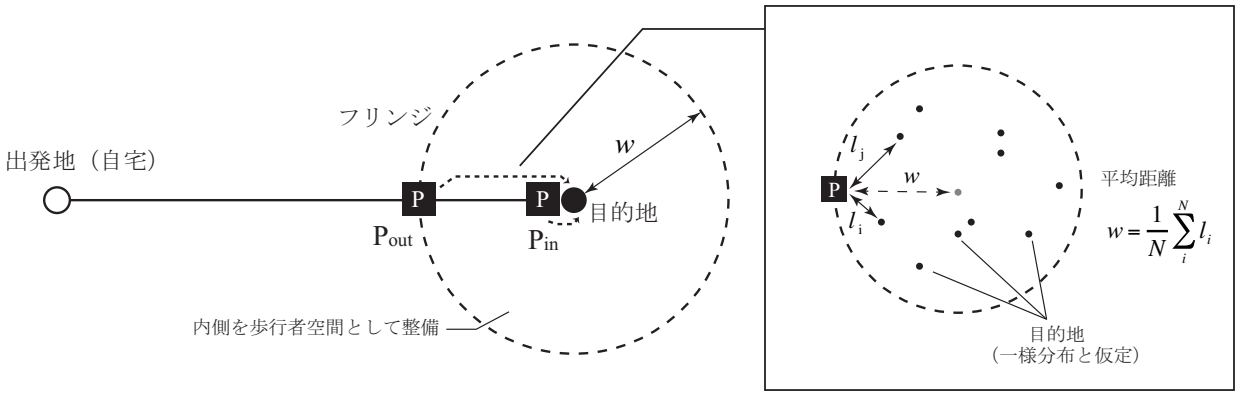
ここで，f_i は駐車場 i を選択した移動者の総数であり，$\boldsymbol{f}$ はそのベクトルを表す．右辺第 1 項は駐車料金コスト，第 2 項は駐車場探索コスト，第 3 項は目的施設までのアクセス時間コストをそれぞれ表す．本論文では非義務目的の来訪者のみを想定しており，通勤交通は対象にしていないため希望到着時刻に対する厳密さや道路混雑の可能性は低いと考える．そのため，式 (1) における第 1 項の旅行時間コスト，第 5 項のマージナルコルトについては省略した．式 (4) において，第 2 項の駐車場探索コストについては，以下の BPR 関数によって定義する (Lam et al., 1999)．

$$d_i^m(f_i) = d_i^{m,0} + a(\frac{f_i}{c_i})^b \qquad (5)$$

なお，$d_i^{m,0}$ は自由走行時の探索コスト，c_i は駐車場 i の容量，a, b は非負のパラメータである．移動者（来訪者）は自身の回遊戦略をもとに，式 (4) で表されるコストを最小とする駐車場 i を選択する．

(3) 来訪者の意思決定構造

OD ペア (o, d) を移動する来訪者の選択行動は，上位階層を回遊パタン選択，下位階層を駐車場選択とする Nested Logit モデルによって表現されるとする．



図–4 1OD の単純ネットワーク図（左）及びアクセス距離の考え方（枠内）

$$P(i|od,m) = \frac{exp(-\theta_1 C_{i,m}^{od})}{\sum_i exp(-\theta_1 C_{i,m}^{od})} \quad \forall od,m,i \tag{6}$$

$$P(m|od) = \frac{exp(-\theta_2[S_m^{od} + C_m^{od}])}{\sum_i exp(-\theta_2[S_m^{od} + C_m^{od}])} \ \forall od,m \tag{7}$$

$$S_m^{od} = -\frac{1}{\theta_1} ln \sum_i exp(-\theta_1 C_{i,m}^{od}) \quad \forall od,m \tag{8}$$

ここで，C_m^{od} は回遊パタン m について一定で駐車場 i によらないコスト，$C_{i,m}^{od}$ は回遊パタン m と駐車場 i の組み合わせによって変化するコストであり，S_m^{od} は回遊パタン m の駐車場選択に関する期待最小費用を表す．また，θ_1，θ_2 はそれぞれ駐車場選択，回遊パタン選択に関するパラメータであり，来訪者のコストに対する認知のばらつき具合を表している．したがって本研究では式 (3)(4) を用いて，

$$C_m^{od} = -U(\tau, r) \ \forall od,m \tag{9}$$

$$C_{i,m}^{od} = C_i^m \ \forall od,m,i \tag{10}$$

である．このとき，OD 交通量 q_{od} を所与とした際の回遊パタン m の期待交通量 q_m^{od}，及び駐車場 i の期待交通量 $f_{m,i}^{od}$ は，

$$q_m^{od} = q_{od} P(m|od) \quad \forall od,m \tag{11}$$

$$f_{m,i}^{od} = q_m^{od} P(i|od,m) \quad \forall od,m,i \tag{12}$$

となる．また，これらの交通量の間には以下のフロー保存則及び非負制約が成立する．

$$\sum_m q_m^{od} = q_{od} \quad \forall od,m \tag{13}$$

$$\sum_i f_{m,i}^{od} = q_m^{od} \quad \forall od,m,i \tag{14}$$

$$q_m^{od} \geq 0 \quad \forall od,m \tag{15}$$

$$f_{m,i}^{od} \geq 0 \quad \forall od,m,i \tag{16}$$

以上 (6)〜(16) の条件を満たす期待回遊パタン交通量，及び期待駐車場交通量を求めることが本研究における均衡モデルであり，得られる均衡解が計画側の政策によってどのように変化するのかを分析することで，都心空間改変の効果を検証する．

4. 数値計算

(1) 1 次元都市の単純ネットワーク

本章では，**図–4** のような 1 つの OD ペア，2 種類の駐車場クラスタを持つ 1 次元都市を仮定する．それぞれの駐車場は駐車料金，容量及び目的地からの距離において異なる．全ての移動者は同一の出発地 (自宅) から目的地 (都心) まで移動する．都心部から距離 w の位置にフリンジを設定し，その内側の回遊路は投資によって街路整備が行われているとする．計画側が行なう政策は，大きく (1) フリンジ位置の設定 (w) 及び内側の街路整備 (β)，(2) 駐車システムの変更 (p_i, c_i) の 2 つである（$i \in (in, out)$ は駐車場属性である）．なお，目的

施設は半径 w の都心部に一様に分布しているものとする．来訪者は，計画側の決定する政策に基いて，自身の回遊パタン（滞在時間）を選択する．さらに，その回遊パタンに従い，自身の効用を最大化させる駐車場 i を選択する．各駐車場の目的地からのアクセス距離については，内側の駐車場を 0，外側の駐車場を w として扱う（**図–4** 枠内）．属性（回遊パタン）の異なる来訪者の，この 2 種類の駐車場に対する選択結果に均衡を仮定し，フリンジ距離 w や駐車料金 p をはじめとした制御変数を変化させた時のネットワークの状態を検証することで，都心の空間計画の評価を行なう．

(2) 計算結果と考察

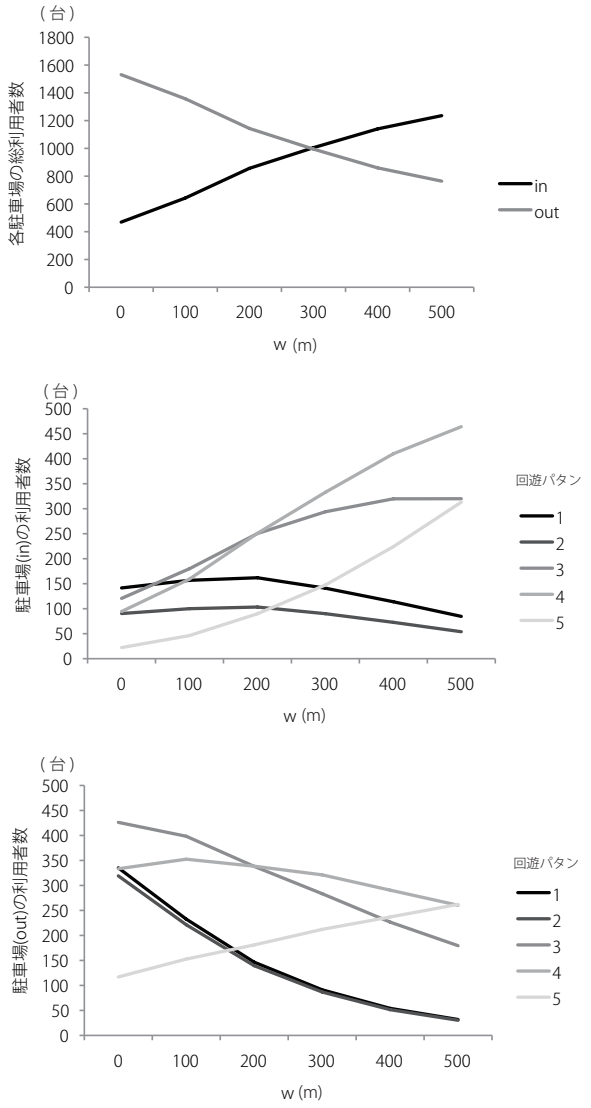
ここでは，簡単な例として計算を行なった結果を示す．上位階層である来訪者の回遊パタン選択については，$(\tau, r) = (1, 0.0)$，$(2, 0.0)$，$(2, 0.1)$，$(2, 0.2)$，$(3, 0.3)$ の 5 肢の選択肢を考え（それぞれを順に回遊パタン 1, ..., 回遊パタン 5 とする），下位階層の駐車場選択 ($i \in \{in, out\}$) とのネスト構造を構成した．これは，都心の空間計画によって，現在の消費的な過ごし方 ($(1, 0.0)$ や $(2, 0.0)$) から，滞在時間や回遊時間がどのように変化するかを検証するためである．

a) シナリオ 1：料金・容量を固定した状態で w を変化させたとき

まず，2 種類の駐車場の単位時間あたり駐車料金及び駐車容量をフリンジ距離 w に依らず一定の値を与えた状態で，w を 0〜500 m まで 100 m ごとに変化させた場合の効果を検証する．なお，都心投資効果 β は，

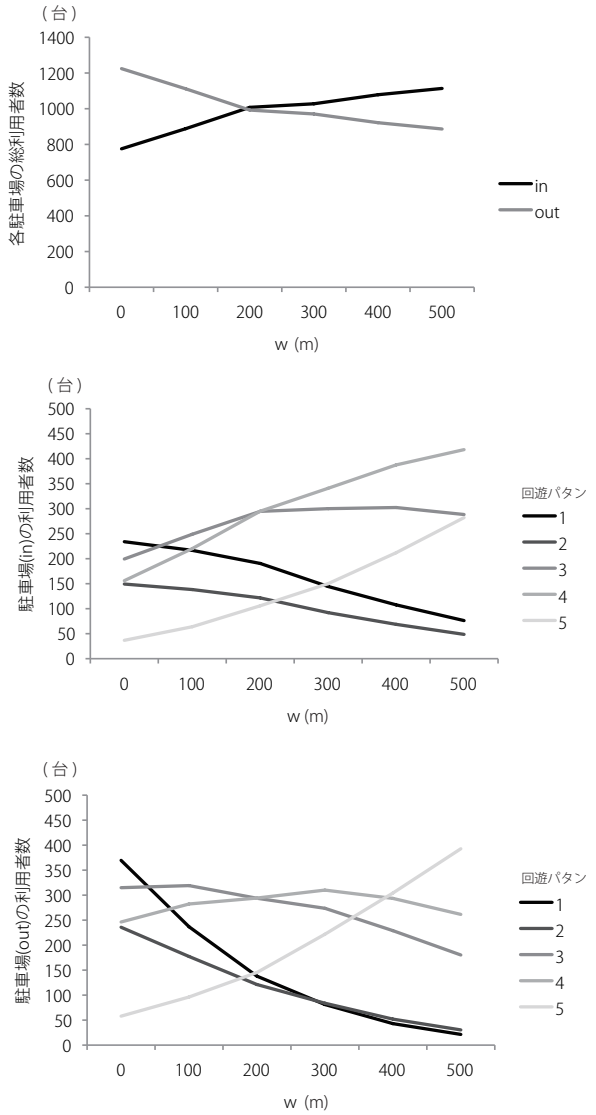
$$\beta = 1 + w/300 \tag{17}$$

とし，都心を回遊する効用（u_{move}）に乗じることで，歩行者空間半径 (w) が拡大するほど都心投資によって歩くことによる効用が増加することを表現した．駐車料金は内側 (p_{in}) を 400(円/h)，フリンジ駐車場 (p_{out}) を 300(円/h) とし，駐車容量はそれぞれ 1500 台 (c_{in})，2000 台 (c_{out}) とした．このネットワークに，2000 人 (q_{od}) の来訪者を需要として与えたときの計算結果を**図–5** に示す．なお，凡例の 1〜5 の数字は回遊パタンの番号を示している．



図–5 シナリオ 1 の数値計算結果

図–5 の上段のグラフを見ると，w の増加にしたがってフリンジ部の駐車場利用者が減少し，およそ 300 m を境に利用者数が逆転している．これより，シナリオ 1 の条件下では来訪者は歩行者空間が 300 m までは，料金の値下げや都心投資効果を勘案し，フリンジ部の駐車場を利用するものの，目的地からの距離が離れすぎると（300 m を超えると），次第にアクセスコストが増加して内側の駐車場を利用してしまうことがわかる．また，空間改変が回遊パタンの選択結果に及ぼす影響を示したものが**図–5** の中・下段のグラフである．中段のグラフは内側の駐車場を利用する，回遊パタンごとの交通量を表示したものであり，下段のグラフは外側の駐車場に関するものである．グラフから，w（歩行者空間半径・フリンジ距離）が小さいときは，滞在時間及び移動時間割合の小さい回遊パタン 1,2 の交通量が多いものの，w の増加に伴って比較的長く都心に滞在し，複数の施設を回遊するパタンが増加することが見て取れる．特に，移動時間パラメータ r の大きい回遊パタン 4,5 の来訪者が増加し，回遊パタン 5 ではフリンジ駐車場の利用者についても増加を続けるなど，都心の空間改変が来訪者の回遊性の向上に寄与していると言えよう．



図–6 シナリオ 2 の数値計算結果

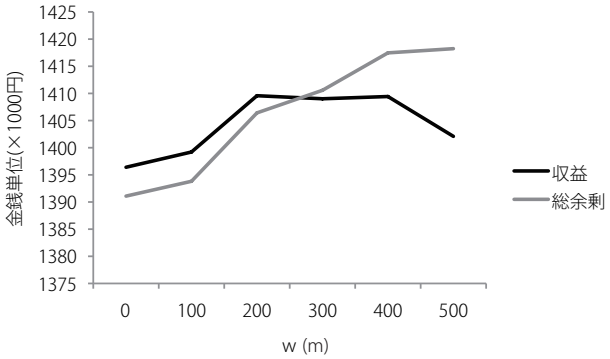
b) シナリオ 2：駐車料金を w に応じて変化させたとき

次に，フリンジ駐車場の駐車料金を距離 w に応じて変化させたときの政策評価を行なう．具体的には，フリンジ駐車場の料金 p_{out} は，

$$p_{out} = p_{in} - 0.4w \tag{18}$$

で表される．なお，その他駐車容量等の数値はシナリオ 1 と同じとする．駐車料金を距離に応じて値下げしたときの計算結果を**図–6** に示す．

図を見ると，それぞれの駐車場に対する回遊パタン交通量（中・下段のグラフ）に関してはシナリオ 1 と大差がないように見える一方で，その合計値である上段のグラフはシナリオ 1 の場合と大きく異なる．シナリオ 2 の各駐車場の総交通量はおよそ 200 mのところで



図–7 駐車場事業者の収益と社会的総余剰

交わったあと，交わる前の傾きに対して小さい変動しかせずに，どちらも w を増加させても 1000 台前後の交通量で収まっている．これは，フリンジ駐車場を利用する回遊パタン 5(滞在時間：3h，移動時間パラメータ：0.3) の来訪者が，w の増加に伴い急速に増加し続けているためである．このことは，都心空間に，距離に応じた料金のフリンジ駐車場を設けることで，1 つの施設にとどまらずに都心を回遊する来訪者が増加し，そうした滞在時間及び移動に制約の少ない来訪者は，駐車料金の割引・値下げが行われれば目的地から距離の離れた駐車場を利用することを表している．

さらに，**図–7** はシナリオ 2 において w を変化させたときの駐車場事業者の収益及び社会的総余剰を表している．フリンジ駐車場を設置して歩行者空間を生み出すことで，来訪者の滞在時間・滞在効用が増加して社会的余剰が増加するだけでなく，一定の距離まではたとえ駐車料金を値下げしたとしても，フリンジ駐車場に投資することで駐車場事業者は収益を増加させることができることを示している．これは，これまで個別の事業主が小規模の駐車場を都心に分散して持っていた状況に対して，それらを集約してフリンジ部に集約する施策が来訪者の回遊性を高め，結果として駐車場事業者の収益増加につながることを表しており，都心の空間計画に対して従来とは異なる示唆を得られたといえよう．

5. 変分不等式を用いた定式化

(1) 変分不等式問題としての表現

前章までの均衡モデルは，それぞれのコスト関数が他の駐車場交通量に対して独立であったため等価な最適化問題を構成することができた．しかし，他の交通量との間に非対称な相互作用が存在する場合，等価な最適化問題が構成できない．具体的には，式 (4) の右辺

第 3 項で示した歩行者のアクセス時間コストが，同一リンク上に存在する自動車交通量の影響を受ける場合を考える．これは，歩行者空間化を考える上で，自動車交通量は街路の歩きやすさや自由度に対して大きな影響を与えると考えられるからである．つまり，フリンジ駐車場を利用した来訪者は，内側の駐車場を利用する交通量から非対称に影響を受ける．こうした均衡問題はそのままではモデル特性の解析を行なうことができないため，本章ではこれまで定式化した均衡問題を変分不等式問題（VIP: Variational Inequality Problems）として表現する (Lam et al., 2006, 赤松ら, 1998[14], 長尾ら, 2009[15])．均衡条件 (6)〜(16) より，本均衡問題は以下の変分不等式によって表現することができる．

Find $(\boldsymbol{q}^*, \boldsymbol{f}^*) \in \Omega$ such that,

$$\begin{aligned}\frac{1}{\theta_2}\sum_m lnq_m^{od*}(q_m^{od}-q_m^{od*})+\sum_m C_m^{od}(q_m^{od}-q_m^{od*})\\ +\frac{1}{\theta_1}\sum_m\sum_i lnf_{m,i}^{od*}(f_{m,i}^{od}-f_{m,i}^{od*})\\ +C_{m,i}^{od*}(f_{m,i}^{od}-f_{m,i}^{od*})\geq 0\end{aligned} \tag{19}$$

where,

$$\begin{aligned}\Omega=\{(\boldsymbol{q},\boldsymbol{f}|\boldsymbol{E}\boldsymbol{q}^m=\boldsymbol{q}^{od},\boldsymbol{M}\boldsymbol{f}_i^m=\boldsymbol{q}^m,\\ \boldsymbol{q}\geq 0,\boldsymbol{f}\geq 0\}\end{aligned} \tag{20}$$

Ω ：回遊パタン m の移動者数，駐車場 i の利用者数の実行可能解の集合

$\boldsymbol{E}$ ：回遊パタンと OD 間フローの接続行列

$\boldsymbol{M}$ ：駐車場属性と回遊パタンの接続行列

変分不等式によって表現された式 (19) を解くことにより，本研究の均衡解を求める．

(2) 解法アルゴリズム

変分不等式問題の解法としてはいくつかの方法が存在するが，本論文ではアルゴリズム構造が比較的単純かつ収束条件も明確な，射影法（線形近似法）[17]を用いる．射影法のアルゴリズムは以下で示される．なお，$\boldsymbol{X}$ は許容領域内の変数（本研究では $(\boldsymbol{q}\ \boldsymbol{f})^{\mathrm{T}}$），$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X})$ は $\boldsymbol{X}$ を $\boldsymbol{X}$ の許容領域内の点に写す写像である．

STEP 1 初期解の生成

繰り返し回数 $n:=0$，及び定数 $\rho, \boldsymbol{Q}$ を設定．初期実行可能解 $\boldsymbol{X}^{(n)}$ の設定を行なう．

STEP 2 補助問題 VIP$(\hat{\boldsymbol{F}}, \Omega)$ を解く

$\boldsymbol{X}^{(n)}$ を既知として，以下の写像 $\hat{\boldsymbol{F}}(\boldsymbol{X})$ を考える．

$$\hat{\boldsymbol{F}}(\boldsymbol{X})=\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}^{(n)})+\frac{1}{\rho}\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{X}-\boldsymbol{X}^{(n)}) \tag{21}$$

この写像 $\hat{\boldsymbol{F}}(X)$ による補助的な変分不等式問題

Find $\boldsymbol{X}^* \in \Omega$ such that,

$$\hat{\boldsymbol{F}}(\boldsymbol{X}^*)(\boldsymbol{X}-\boldsymbol{X}^*)\geq 0, \forall \boldsymbol{X}\in\Omega \tag{22}$$

を解くことを繰り返す．Ω は解くべき主問題 VIP$(\boldsymbol{F}, \Omega)$ の許容集合 Ω と同じである．ここで，射影法による補助問題 VIP$(\hat{\boldsymbol{F}}, \Omega)$ は，以下の不動点問題 (FPP: Fixed Point Problems) を解くことと同値である．

$$\boldsymbol{X}^*=Proj_{\Omega,Q}[\boldsymbol{X}^{(n)}-\rho\boldsymbol{Q}^{-1}\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}^{(n)})] \tag{23}$$

また，不動点問題 (23) は，次の二次線形問題に帰着する．

$$\begin{aligned}\min_{\boldsymbol{X}\in\Omega}.Z(\boldsymbol{X})=\ &\frac{1}{2\rho}(\boldsymbol{X}-\boldsymbol{X}^{(n)})\cdot\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{X}-\boldsymbol{X}^{(n)})\\ &+\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}^{(n)})(\boldsymbol{X}-\boldsymbol{X}^{(n)})\end{aligned} \tag{24}$$

この最小化問題を解いて得られる解を $\boldsymbol{X}^{(n+1)}$ とし，STEP 3 へ進む．

STEP 3 収束判定

次の収束基準，

$$\|\boldsymbol{X}^{(n+1)}-\boldsymbol{X}^{(n)}\|\leq\varepsilon \tag{25}$$

を満たしていれば終了．そうでなければ $n:=n+1$ として，STEP1 へ戻る．

以上のアルゴリズムに従って変分不等式 (19) を解く．

6. おわりに

本論文は，都心の歩行者空間の領域設定問題を駐車場配置問題として置き換え，均衡配分モデルによって定式化を行なった．その際，従来のモデルでは考慮されてこなかった都心滞在中の効用を考慮し，都心の空間改変が回遊行動に与える影響をモデル化した．中心市街地の計画において，フリンジ距離と駐車料金，及び都心回遊路への投資を上位問題に，下位に来訪者の滞

在時間・駐車場という回遊戦略の選択をおいて，その選択結果に均衡条件を仮定することで空間計画と行動の関係性を考慮した．簡単な数値計算結果からは，フリンジ駐車場を設けて都心の回遊路に投資を行なうことで来訪者の回遊性を高めることができること，そして駐車場事業者はフリンジ駐車場に投資を行なうことで，単位時間あたりの駐車料金の値下げを行なった場合でも収益を増加させることができることを明らかにした．

今後の課題としては，リンク間に非対称の相互作用がある場合の均衡問題を変分不等式によって計算し，解を求めることでより詳細な分析を行なうことが挙げられる．また，施策評価を明確にするため，計画側の目的関数を用いてその最適化問題を上位問題，来訪者の均衡問題を下位問題とする均衡制約付き最適化問題 (MPEC) としての記述，及びメタヒューリスティクスなどを用いたその計算手法や，実際のデータを用いたパラメータ推定や，実ネットワークへの適用を行なうことで，より有用性の高いモデルの開発と空間計画の評価を行なうことが課題である．

参考文献

1) Arnott, R., de Palma, A., Lindsey, R.: A temporal and spatial equilibrium analysis of commuter parking, *Journal of Publics Economics*, Vol.45, pp.301-335, 1991.
2) Arnott, R., Rowse, J.: Modeling parking, *Journal of Urban Economics*, Vol.45, pp.97-124, 1999.
3) Arnott, R., Inci, E.: The stability of downtown parking and traffic congestion, *Journal of Urban Economics*, Vol.68, pp.260-276, 2010.
4) Vickrey, W.: Congestion theory and transport investment, *American Economic Review*, Vol.59, pp.251-261, 1969.
5) Zhang, X.N., Huang, H.J., Zhang, H.M.: Integrated daily commuting patterns and optimal road tolls and parking fees in a linear city, *Transportation Research Part B*, Vol.42, pp.38-56, 2008.
6) Zhang, X.N., Yang, H., Huang, H.J.: Improving travel efficiency by parking permits distribution and trading, *Transportation Research Part B*, Vol.45, pp.1018-1034, 2011.
7) Qian, Z., Xiao, F., Zhang, H.M.: Managing morning commute traffic with parking, *Transportation Research Part B*, Vol.46, pp.894-916, 2012.
8) Lam, W.H.K., Li, Z.C., Huang, H.J., Wong, S.C.: Modeling time-dependent travel choice problems in road networks with multiple user classes and multiple parking facilities, *Transportation Research Part B*, Vol.40, pp.368-395, 2006.
9) Thompson, R.G., Richardson, A.J.: A parking search model, *Transportation Research Part A*, Vol.32, pp.159-170, 1998.
10) 室町泰徳: 駐車場情報がドライバーの駐車場探索行動に与える影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集，No.660, Vol.4-49, pp.15-25, 2000.
11) 張峻屹，藤原章正，日下部達夫: 選択肢集合の形成を内生化させた新たな離散選択モデルの開発及び都心回遊行動分析への応用，土木計画学研究・講演集，No.30, CD-ROM, 2004.
12) 三輪富生，山本俊行，森川高行: 駐車場所－駐車時間選択行動への離散－連続選択モデルの適用と駐車料金施策分析, 都市計画論文集, No.43-1, pp.34-41, 2008.
13) 戸叶洋道，北澤俊彦，羽藤英二: 駐車と回遊行動を考慮した一次元都市における静的配分, 土木計画学研究・講演集, No.44, CD-ROM, 2011.
14) 赤松隆，牧野幸雄，高橋栄行: 時間帯別 OD 需要とリンクでの渋滞を内生化した順動的交通配分, 土木計画学研究・論文集, No.15, pp.535-545, 1998.
15) 長尾一輝，中山晶一朗，高山純一，円山琢也: 旅行時間の不確実性を考慮した分担・配分統合交通ネットワーク均衡モデルに関する研究：金沢都市圏への軌道系公共交通導入時の道路交通への影響分析を例に, 土木学会論文集 D, Vol.65, No.1, pp.12-25, 2009.
16) Lam, W.H.K., Tam, M.L., Yang, H., Wong, S.C.: Balance of demand and supply of parking spaces, *Transportation Research Part A*, Vol.32, pp.159-170, 1998.
17) 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と解法-, 丸善，1998.

Equilibrium Assignment Model based on Duration Utilities and Parking Location in the City Center

Yuki OYAMA and Eiji HATO

In recent years, public space for pedestrians have been gained considerable attention in the urban design. In this paper, we propose the way of deciding the scale of a pedestrian area using the equilibrium assignment model. We consider a traveler's choice of parking location and duration in networks based on the utility which they gain with duration in the city center. The model provides a useful tool for the evaluation of the urban design and parking systems.