

人・車シミュレータを用いた 大規模店舗駐車場のレイアウト評価

山田 稔¹

¹正会員 茨城大学 工学部 都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

E-mail:minoru.yamada.civil@vc.ibaraki.ac.jp

大規模店舗の駐車マスのレイアウトの改善を考える際に、車と歩行者の交差に関する状況を評価するためには歩行者が選択する経路を適切に予測する必要がある。筆者らはそのための経路選択モデルの構築と検証を行い有用性を明らかにしてきた。本研究は、駐車場内における車の挙動を再現するシミュレータにこれらの歩行者挙動のモデルを取り入れることで、レイアウト変更に伴う車と歩行者との交差の発生状況の変化や、それが車や歩行者の円滑性指標に及ぼすに影響を評価できるようにしたものである。

さらにこのシミュレータを用いることで、横断歩道当たりの利用歩行者数が過大にならないように適切な数だけ並行設置することによって、車両の円滑性にも良い効果が生じる場合のあることを明らかにした。

Key Words :parking lot, pedestrian simulation, route choice model, improvement

1. はじめに

郊外型の大規模店舗では自動車で来店する利用者の需要を収容するために大規模な平面駐車場を整備するケースが多いが、そこで生じる自動車の動線と歩行者の動線の交差に起因する問題については、歩行者・自動車双方の安全性・利便性の視点で考える必要がある。

筆者らは、これまで駐車場における歩行者の行動特性や経路選択意識に関する研究¹⁾²⁾を行い、歩行者が横断歩道等の安全性が高いと考えられる整備された経路を嗜好する特性を明らかにした。そして比較的高い安全性を確保した横断箇所を、歩行者の経路選択特性に合致させて重点的に設置することが、効果的に安全化を図る上で重要であることを示した。

しかし実際の駐車場は自動車の利便性、特に来店時・退店時の円滑性が高く求められていることから、両者を総合的に評価する方法が求められる。

そこで本研究では車の挙動を再現するシミュレータ³⁾にこれらの歩行者挙動のモデルを取り入れることで両者を同時に評価できるシミュレータを開発することとした。

本稿ではこのシミュレータの概要を示すとともに、横断歩行者が自分に優先権があっても通過車両に対して譲る行動について調査・解析を行い、新たなモデル化を行った結果についても示す。

さらに、横断歩道当たりの利用歩行者数が過大であると通過車両に大きな遅れが生じるため、同一の車両動線

上であっても適切な数の横断歩道を設置して歩行者を分散させることが車両の遅れ時間にとっても有利な場合があることがわかった。そこで本研究ではその効果を明らかにすることをケーススタディとし、開発したシミュレータを用いた評価の有用性を確認することとした。

2. 駐車場に関する人・車シミュレータの概要

(1) 駐車場に関するマイクロシミュレータ

駐車場内では、随所で駐車マスに出入りする挙動によってマス前の通路において走行の障害が生じる。しかし、通過車両が必ずそこに存在して影響されるというわけではない。さらに、駐車場内で利用される通路はマスの混雑度合いや需要の状況に影響を受ける。以上のような状況を表現しつつ各種対策の効果を予測評価するためにはシミュレーションモデルを用いることが効果的であると考えられ、シミュレータが開発されてきた³⁾。

駐車場内の人と車の平面交差箇所では互いが影響を及ぼしあう。しかし、筆者の既存研究¹⁾²⁾では、歩行者が進もうとする横断箇所に車両が接近している場合には、そこを回避して別の箇所を横断しようとする傾向が見られることが明らかになっており、これが交差箇所の影響を小さくする方向に働いていると考えられる。さらには、駐車マスに到着した車両は歩行者の発生源となるといった関係も有している。そのため、これらの要因に配慮しようとする、車と歩行者の両方の挙動を再現し両者の

関係をも配慮できるようなシミュレータを開発することが必要となる。

(2) 本研究で導入する歩行者の挙動モデル

歩行者の経路選択に関しては、すでに筆者らの既存研究¹⁾²⁾でモデルが構築されており、これをそのままシミュレータに導入することが可能である。これらのモデルでは、横断箇所が横断歩道であるか否か、また横断箇所上に車両がすでに存在している場合や接近しつつある場合にはこの横断箇所を使用せず、車道に沿って移動して異なる箇所でも横断する可能性についても再現できるモデルとなっている。

シミュレータのなかでは、まず、駐車マスへの駐車に対応して歩行者を生成させ、あらかじめ設定された歩行者ネットワークに沿って目的地へ移動するものとする。移動中にネットワークの分岐点に達した場合には、前述のモデルにより進行方向の判断を行う。

このほかに、実際の横断場面では、横断することを意思決定した後も接近する車両の関係などで歩行者側にも待ちが生じることが観測されている。そこで本研究ではビデオ調査画面よりその実態を観測し、この挙動もモデルとして組み込むこととした。これについては次章で述べる。

(3) シミュレータの全体構成

今回基礎とした車シミュレータは、すでに車が横断歩行者に対して行う減速・停止挙動までモデル化されているため、これを生起させるような歩行者横断を発生する部分について歩行者挙動モデルの結果を用いるように置き換えることとした。また、歩行者挙動モデルで使用するために、随時車両の現在位置情報を歩行者挙動モデルに伝える機能を追加した。

それ以外には本質的な依存関係がない互いに独立性の高い車シミュレータと歩行者シミュレータで構成することとした。これによって、必要に応じて現象のモデルを追加してをより精緻化するなどシステムの改良が容易になるように配慮した。

3. 横断歩行者の横断開始判断

(1) 調査データ

前述のように、横断することを意思決定した後も接近する車両の関係などで横断待ちが生じることがある。そこで、文献⁴⁾で述べられている筆者が行ったビデオ調査で得られた商業施設駐車場の周回通路の横断歩行者の行動データを用いて、横断時の待ちや譲りの発生状況を分析した。

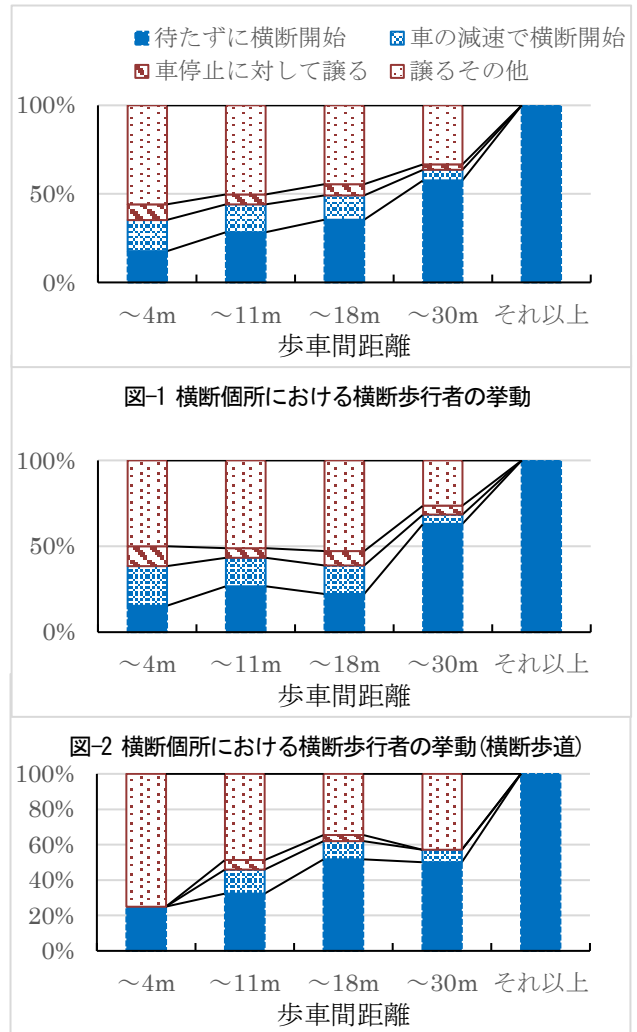


図-3 横断箇所における横断歩行者の挙動(横断歩道以外)

(2) 集計および分析結果

結果を図-1~3に示す。図では横断しようとする歩行者が、横断箇所に到着して直ちに横断を開始したか、それとも接近しつつある車両の減速の兆しを確認しようとしての待ちが生じたかで区別した。さらに後者の場合にはその後に車側が減速したことによって横断を開始した場合、車が減速し停止しても歩行者側がその車を譲った場合、そしてそれ以外、すなわち車が歩行者より先に横断箇所に進み結果的に歩行者が車に譲った形になった場合の3種類に分類した。これを横断歩道の箇所と、そうでない箇所での横断に分け、さらに、最初の瞬間における歩車間の距離でも分類して集計したものである。

これを見ればわかるように、歩車間距離が短い場合には歩行者が譲る傾向が強くなる。また横断歩道であっても多くの歩行者が待ちあるいは譲りの行動を取り、結果的に車が先に進むケースが少なくないことがわかる。横断歩道とそうでない箇所とを比較すると、横断歩道では、歩行者が待った後に車が停止して横断を開始する割合が、横断歩道でない場合に比べてやや高くなる傾向がみられる。

これらの状況が見られたことから、シミュレーションでは横断歩道が完全な歩行者優先の空間と考えることは妥当ではなく、現実に応じた状況を再現できる仕組みを用意しておくことが必要であるといえる。

(3) シミュレータでの扱い

シミュレータ内の歩行者の挙動としては、以上の集計結果のうち横断歩道と横断歩道以外で差が小さかった部分ではそれらを平均化したものをパラメータとし、差が見られた歩車間距離0~18mの場合での歩行者を認識した車が減速するか否か割合についてのみ、観測結果に基づき横断歩道とそれ以外で異なるパラメータの値を用いることとした。

シミュレータで用いるパラメータの一覧を表-1に示す。また、この分岐で結果的に車に先を譲る行動となった歩行者については、その車両の通過を待った後に、次の車両との距離を調べ、再び同じロジックで行動が分かれていくものとした。

4. 横断箇所の歩車交錯の理論モデル

(1) はじめに

先に述べたように、本研究では、横断歩道当たりの利用歩行者数が過大であると通過車両に大きな遅れが生じるため、同一の車両動線上であっても適切な数の横断歩道を設置して歩行者を分散させることが車両の遅れ時間にとって有利となる可能性が考えられるため、この効果を明らかにすることをケーススタディとする。

この章では、このケーススタディのシミュレーションに先立ち、理論モデルを構築してその効果について確認する。

(2) 理論モデルでの考え方と仮定条件

a) 歩行者の重なりを考慮しない場合

一つの横断箇所では、車両または歩行者のどちらか一方しか存在できないことから、両者が一つのサービス窓口に着する待ち行列問題として考えることとした。なお単純化のため、歩行者、車両、それぞれ一つの進行方向のみで考える。

サービス窓口が車両により占有されている状態では、その車両は一定のサービス時間 t [秒]が必要であるものとし、これが終了するまでは次の車両または歩行者はサービス窓口に入ることができないものとする。 t は歩行者がいなくときの車両間の最小ギャップに相当するとともに、車両が通過してから直後に歩行者が横断を開始するまでの時間も同じであるとする。

歩行者がサービス窓口にいる状態では、一定のサービス時間 T [秒]が必要であるとする。これは歩行者が横断

表-1 シミュレータで用いる横断開始判断パラメータ

	歩車間距離	直ちに横断開始	車減速後横断開始	車停止後譲る	その他譲る
横断歩道	0~4m	18%	19%	8%	55%
	~11m	28%	17%	7%	48%
	~18m	35%	15%	6%	44%
	~30m	58%	6%	3%	33%
	それ以上	100%	0%	0%	0%
横断歩道以外	0~4m	18%	14%	6%	62%
	~11m	28%	13%	5%	54%
	~18m	35%	11%	5%	49%
	~30m	58%	6%	3%	33%
	それ以上	100%	0%	0%	0%

を開始してから横断を終了し次の車両が窓口に入るまでの時間となる。さらに単純化のためにここでは歩行者の重なりは生じないものとする。すなわち、歩行者がサービス窓口に着れば次の歩行者は先の歩行者のサービス完了まで窓口には入れないものと仮定する。

以上のような条件では、サービス窓口にいるのが車両か歩行者かによってサービス時間が異なることになるが、どちらが来るかはランダムであることから、サービス時間は車・歩行者の到着割合に応じて確率的に2種類の値のいずれかをとる確率変数であると考え、M/G/1型の待ち行列モデルとして表現する。

車の到着率を λ_c [台/秒]、歩行者を λ_p [人/秒]とし、両者を合計したものを $\lambda = \lambda_c + \lambda_p$ と表す。このとき窓口サービス時間の平均は $1/\mu = (\lambda_c t + \lambda_p T)/\lambda$ となり、 $\rho = \lambda/\mu = \lambda_c t + \lambda_p T$ 、サービス時間の変動係数 c については $c^2 = \{\lambda_c(t - 1/\mu)^2 + \lambda_p(T - 1/\mu)^2\}/\rho$ で与えられる。待ち時間の平均はPollaczek-Khinchineの公式 $W_q = \rho(1 + c^2)/\{2\mu(1 - \rho)\}$ で得られる。

b) 歩行者の重なりを考慮する場合

先の仮定では歩行者もただか一人だけしか横断箇所に存在できないものと考えたが、より現実近づけるために、横断箇所にすでに車が存在している状態でなければ、歩行者は到着後直ちに横断を開始できるものとする。このとき、車両から見れば、相前後して到着する任意の2人の歩行者の到着間隔が T 以上であればその間のタイミングでサービス窓口に入ることができ、そうでない場合には T 以上の間隔が生じるまではサービスを受けることができないものとする。

以降ではこのような「間隔 T 未満で到着する一連の歩行者群」か、あるいは単独の車両のいずれかがサービス窓口を占有するものとする。

ある任意の歩行者が、間隔 T 未満で到着する一連の歩行者群の先頭であって、かつその一群に含まれる歩行者の人数が n [人] (≥ 1)である確率は、 $P(n) = q^{n-1}(1 - q)^2$ である。ただし、 q は任意の歩行者の到着間隔が T 未満である確率であり、ランダム到着のため到着間隔が指

数分布に従うことから $q = 1 - \exp(-\lambda_p T)$ である. 任意の歩行者が何らかの群の先頭である確率は $\sum_{n=1}^{\infty} P(n) = 1 - q$ であるが, これはその歩行者の前の到着間隔が T 以上であることから $1 - q$ であることが得られ, ここから単位時間当たりの群の発生数は $\lambda_p(1 - q)$, 群当たりの人数の平均は $1/(1 - q)$ となる.

次に n [人] で構成される群のサービス時間, すなわちその全員が横断を終えるのに要する時間については次のようにして得られる. これは T 未満で到着する部分の歩行者間隔の合計にさらに最後の歩行者が横断を開始してから車に窓口を明け渡すまでの時間 T の合計である. 前者は, 指数分布に従う到着間隔の $0 \sim T$ の範囲を平均して $T_{qf} = \{1/\lambda_p - (1/\lambda_p + T) \exp(-\lambda_p T)\}/q$ となり, n [人] で構成される群のサービス時間の平均は $T_q = T + (n - 1)T_{qf}$ となる. 分散についても同様にして, $VT_q = (n - 1) \{ [1/\lambda_p^2 - (1/\lambda_p^2 + T^2)(1 - q)]/q - (T_{qf} - 1/\lambda_p)^2 \}$ であることを導くことができる.

さらに, $n=1 \sim \infty$ について集計することで, 各々の群のサービス時間の平均は $\sum_{n=1}^{\infty} T_q P(n) = T + T_{qf} q / (1 - q)$, 分散も同様にして $T_{qf}^2 q / (1 - q)^2 + VT_q q / (1 - q)$ が得られる.

そこでこれらについて先と同様に MG/1 型待ち行列モデルに当てはめることができる.

(3) 理論モデルでの数値計算例と考察

$\lambda_c = 300/3600$ [台/秒], $\lambda_p = 0 \sim 300/3600$ [人/秒] の場合の, 前述の a) b) 2通りで計算した結果を図-4に示す.

いずれも下に凸の線形を示している. このことから, 例えばこの横断箇所を利用する歩行者を2箇所の横断箇所に均等に分散させることができれば, それぞれの横断箇所ですらに生じる遅れ時間は当初の半分よりも小さいものとなる.

従って, 分散後の2箇所で生じる車の待ち行列が相互に影響しないように配置されているのであれば, たとえ両方を通過しなければならぬ車が存在していたとしても合計での遅れ時間は当初のものよりも小さくすることができる.

この場合, 歩行者から見れば利用できる横断歩道の数が増えることから経路選択の自由度が高まり, 場合によっては移動経路長を小さく抑えることも可能と考えられる. したがってこの方策は, 歩行者・車の双方にとって利便性が高まるものといえる.

5. シミュレータによるレイアウト評価

(1) 評価対象

構築したシミュレータのケーススタディは, 図-5に示

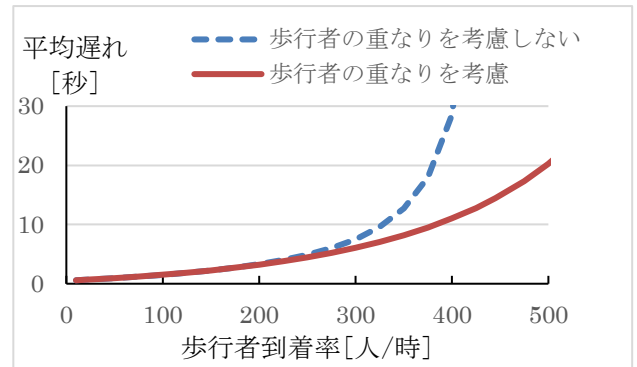


図-4 理論モデルを用いた横断歩行者によって生じる遅れ時間の推計結果

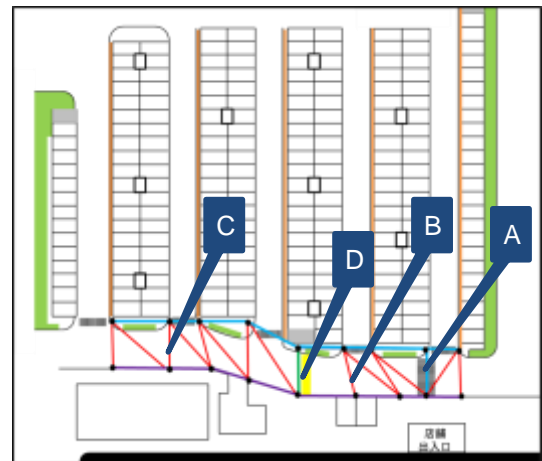


図-5 対象エリアの歩行者経路ネットワーク(横断部分のみを示す)

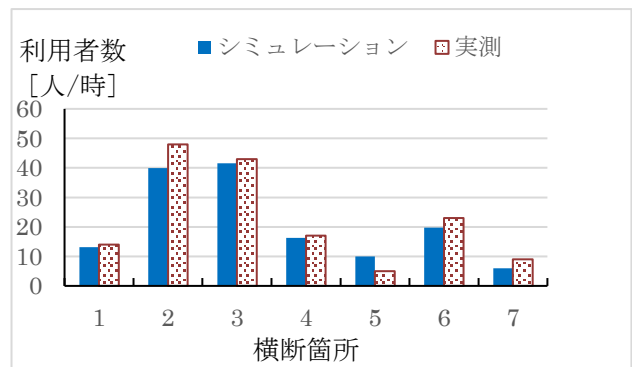


図-6 利用横断箇所の現況再現

す筆者の既存研究5) で調査対象とした大型商業施設の駐車場の一つのブロックを対象とした. その中の周回通路において, 現在は横断歩道が1箇所に設置されているが, そこへ1~2の横断歩道を追加したものとの比較を行う.

(2) 歩行者経路選択モデルの再現性の検証

まず, 現況のネットワークにおいて, 調査時に観測された来店・退店および通過車両数の条件でシミュレーションを行い, 図の横断箇所の利用割合が観測とシミュレーションで乖離していないことを確認する.

図に示す16本の横断箇所を7つにグループ分けし、それぞれのグループの利用割合を求めた。グループは図の横断箇所付近の車道の交差点5か所のそれぞれと、[A]の横断歩道、[D]のハンプの計7グループであり、図-5の右から順に、1~7の番号を付けた。

シミュレータで用いた歩行者経路選択モデルのパラメータは文献1)を基本としつつ、接近車両の影響のパラメータのみこの再現性検証の結果が最もよくなるようにキャリブレーションを行った。

最終結果は図-6のようになり、良好に再現できていることが確認できる。

(3) 横断箇所追加の評価

評価シミュレーションでは、現状1箇所の横断歩道の場合(図-5のA)に、1箇所を追加(図-5のB)した場合、さらにもう1箇所を追加(図-5のC)した場合の3通りについて比較することとした。また、対象エリア内の駐車マスの利用交通量は実測時と同じものを用い、これに加えて発生する周回通路の通過交通量については現況の実測の161[台/時]からその2倍まで増えた場合の範囲でシミュレーションを行った。

先の理論モデルの計算結果の考察では、歩行者の利用を適切に分散できることが前提となっているが、本シミュレータではその部分がうまく機能しているかどうかについても、内包する歩行者経路選択モデルの推計結果を用いて評価される。

シミュレーションの結果を図-7に示す。この図は、歩行者横断によって各車に生じた損失時間について、システム内を走行したすべての車両について平均を取ったものであるが、横断歩道1箇所の増設で、遅れ時間を20~25%程度削減されていることがわかる。理論モデルで示された効果について、より実際に近い状況でも有効に機能することがわかる。

5. まとめ

本研究は、筆者らが既存研究で構築してきた大型商業施設駐車場における歩行者の経路選択行動モデルをシミュレータに組み込むことで、レイアウト改良等を行った場合における歩行者の挙動を予測し、それに基づいて、車と歩行者の交差の発生状況の変化や、交差が車や歩行者の円滑性指標に及ぼす影響を評価できるようにしたものである。

歩行者の行動モデルとして、経路選択モデルに加えて、選択された経路が車道の横断の場合に、接近する車両との関係で生じる待ちあるいは譲りの発生状況についても、調査結果に基づいてモデル化を行った。この調査結果では、横断歩道であっても多くの歩行者は車両が減速して

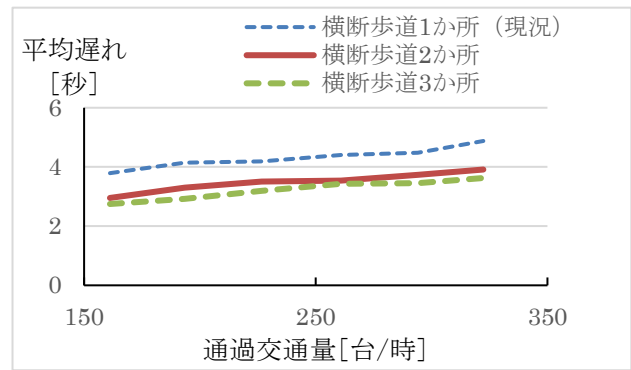


図-7 シミュレーションによる評価結果

くれるかを確認するための待ちの状態になることが確認され、さらにその中の少なからぬ割合で車が減速しない状況が確認された。現実には車両の減速・停止といった安全行動がより多く実行されるようにする方策が期待されるものであるが、シミュレータの構築にあたってはこれらの状況の影響についても評価できるようにした。

シミュレータの構築にあたっては、既存の車シミュレータに対する修正を最小限にとどめ、これとは別の開発プロセスで歩行者挙動のシミュレータを構築できるように、両者の依存関係ができるだけ少なくなるように配慮した。

次に本研究でケーススタディとして考える改善策として、横断歩道当たりの利用歩行者数が過大であると通過車両に大きな遅れが生じるため、同一の車両動線上であっても適切な数の横断歩道を設置して歩行者を分散させることが歩行者の利便性にとっても車両の遅れ時間の削減にとっても効果が期待できるものと考えた。そして、これをMG/1型待ち行列問題に近似させて考えることで、車両の遅れ時間への効果があることを確認した。

その上で構築したシミュレータを使って評価したところ、横断歩道1箇所の増設によって歩行者の横断箇所の選択に変化が起り、それによって横断箇所が分散されることで、車の遅れ時間を20~25%程度削減できる可能性があることを明らかにした。

本シミュレータは駐車場内の周回通路や駐車マス配置のレイアウト変更の効果をも評価することを目指したものであり、今後、ケーススタディとしてそのような改善の評価に活用させることを考えている。

謝辞：本研究の調査実施にあたり、元茨城大学交通・地域計画研究室学生 瀬谷佑太氏、柏 祐樹氏の協力を得た。またシミュレータの仕様に関し赤津典生氏との議論により示唆を得た。ここに記して感謝する。また科研費 15K06245の助成を受けたものである。

【参考文献】

- 1) 山田稔, 赤津典生：「大規模店舗駐車場における利用者の経路選択挙動と安全意識に関する研究」, 都市計画論文集, vol.47, No.3, pp.805-810, 日本都市計画学会, 2012.

- 2) 江刺宏紀, 山田稔: 「大規模店舗駐車場における駐車マス間の通行に着目した歩行者の経路選択モデルの改良に関する研究」, 土木計画学研究発表会・講演集, No.49, pp.287-1~4, 2014.
- 3) 赤津典生: 「大型商用施設改装に伴う駐車場内部レイアウト変更でのシミュレーション技術適用への取り組み」, 都市計画論文集, vol.49, No.3, pp.387-392, 日本都市計画学会, 2014.
- 4) 山田 稔: 「大規模店舗駐車場における退店時の歩行者の経路選択に関する研究」, 土木計画学研究・講演集, Vol.54, pp.1590-1593, 2016.

(2018. 7. 31 受付)

STUDY ON THE EVALUATION OF PARKING LOT DESIGN IN A RETAIL POWER CENTER USING SIMULATION TECHNOLOGY WITH PEDESTRIAN MODEL

Minoru YAMADA