

時間効率と空間効率に着目した 自動バレーシステムの導入効果の分析

関口 雄也¹・土井 健司²・葉 健人³・猪井 博登⁴

¹ 学生員 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)
E-mail: sekiguchi.yuya@civil.eng.osaka-u.ac.jp

² 正会員 大阪大学大学院 教授 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)
E-mail: doi@civil.eng.osaka-u.ac.jp

³ 学生員 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)
E-mail: yoh.kento@civil.eng.osaka-u.ac.jp

⁴ 正会員 富山大学 准教授 都市デザイン学部 (〒930-8555 富山県富山市五福 3190)
E-mail: inoi@sus.u-toyama.ac.jp

現在、自動車関連メーカーは、自動バレーシステムの開発を進めている。自動バレーシステムとは、乗降場と駐車マスとの間の運転と入出庫を自動で行うというもので、これの導入により駐車場内での運転や歩行に要する時間の削減、都市における駐車場による空間占有の緩和、場内での事故の減少が期待される。本研究では、MAS モデルを用いて駐車場における自動バレーシステムの with/without でシミュレーションを実施する。滞在時間と流入台数をシナリオ的に与え、入場待ち時間、運転や歩行に要する時間、呼び出し待ち時間を時間効率の指標、入場待ちを発生させないために必要となる降車場の数を空間効率の指標として比較分析する。最後に、流入台数と滞在時間および算出された時間効率と空間効率をもとに将来的な自動バレーシステムの導入に適した場所を提案する。

Key Words: autonomous valet system, autonomous driving, first (last) one mile mobility, planning of parking lots

1. 序論

現在、情報化が進展し、自動車産業では自動運転技術が発展してきている。そのなかで、自動車関連メーカーは、駐車支援に特化した自動バレーシステムの開発を進めている。自動バレーシステムとは、駐車場内において乗降場と駐車マスとの間の運転と入庫、出庫を車両が自動で行うというものである(図-1)。自動バレーシステムは、自動車移動におけるファースト・ワンマイルあるいはラスト・ワンマイルの端部を改善しうる新たな移動サービスであり、駐車場内での運転や歩行に要する時間を削減し、利用者の利便性向上につながることを期待されている。加えて、自動バレーシステムの導入によって、都市における駐車場による空間占有の緩和と、駐車場内での事故の減少も期待されている。

現在、都市空間に占める駐車場の割合が大きいという問題がある。大沢²⁾は、首都圏の業務核都市において、都市空間の15%~18%を駐車場が占有していることを概

算した。また、本研究において Google Earth 上で測定したところ、大阪市中心部の約17%を駐車場が占有していることが明らかになった。これらに加えて道路率が20%とする³⁾と、都市空間のうち約40%が車両のための空間になってしまっている。駐車場や道路が占有する面積の割合が大きいと、都心部への人口や都市機能の集約が効

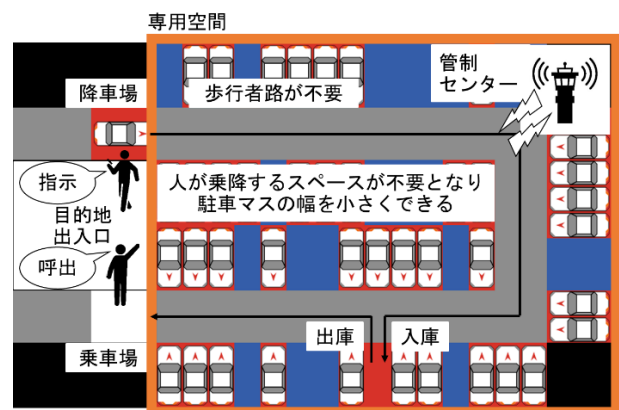


図-1 自動バレーシステム

率的に行えず、コンパクトシティの実現に向けて支障となりうる。自動バレーシステムでは人の乗り降りが乗降場でのみ行われるため、これの導入によって、駐車マスの幅を小さくできる分と歩行者路が必要でなくなる分の駐車場面積を削減し、都市における駐車場による空間占有の緩和につながることを期待されている。

また、日本損害保険協会東北支部が実施したモニタリング調査⁹⁾によると、東北 6 県における全車両事故のうち約 30% が駐車場内で発生している。駐車場内では車両の走行速度が小さいにもかかわらず多くの事故が発生している原因として挙げられることが、駐車マスを探すことに集中して周囲の人や車両への注意がおろそかになる、誤った駐車操作などといったヒューマンエラーである。自動バレーシステムでは運転と入出庫を車両が自動で行うため、これの導入によって、システムが正常に動作する限りにおいて、ヒューマンエラーに起因する駐車場内の事故の減少が期待されている。

坂井ら¹⁰⁾は、自動運転の発展は、システムが運転操作を制御するがドライバーが最終的な責任を負う SAE⁵⁾ Level 2 が高度化したもの、または、Level 4 が走行できる環境が広がったものに二極化したあと、Level 5 に集約すると考察した。そのなかで、Level 4 などの車両が普及すると、移動コストが低下し、居住地が分散する可能性を示唆した。津川¹¹⁾は、早期に導入が可能な自動運転の一つとして、路車協調型システムの範囲内での移動に限定した小型低速車両を挙げている。これの導入によって、ファースト・ワンマイルあるいはラスト・ワンマイルの移動手段の提供が可能になると述べている。安藝ら¹²⁾は、パーク・アンド・ライドにおいて乗り換え拠点である駅周辺から離れた場所に駐車場を整備する場合に、駅と駐車場との間を鉄道の高架下を利用して車両を自動走行させることを考えた。しかし、この研究は路面形状による車両の誘導を検討したもので、自動バレーシステムとは異なる。田中ら¹³⁾は、駐車場 ITS の一つとして自動バレーシステムを挙げているが、現在ホテルなどのスタッフによって行われているバレーパーキングと比較して、人件費が削減されることと、自動走行による安全面の向上を定性的に考察しただけにとどまる。

このように、自動運転の社会的な導入に関する研究が進むなか、自動バレーシステムの導入効果を具体的に評価した研究は見られない。そこで、本研究は、マルチエージェント・シミュレーションモデルの Net Logo を用いて、従来の駐車場と自動バレーシステムとの比較分析をし、自動バレーシステムの導入効果を明らかにすることを目的とする。具体的には、時間効率に着目して移動時間の削減、空間効率に着目して空間占有の緩和を評価する。なお、本研究では、自動バレーシステムが正常に動作し、事故が起こらないという想定の下でシミュレーシ

ョンを実施するため、事故の減少に関する評価は対象外とする。

2. シミュレーションモデルの構築

(1) 従来の駐車場のシミュレーションモデル

従来の駐車場は、駐車場設計の指針⁹⁾を参考に、図-2 のように空間を設計する。駐車場入口から出口へ至る一方通行で幅 4.0m の車路を設け、その両側に幅 1.0m の歩行者路を設置する。また、店舗など目的地の出入口を図右上に設け、その手前に横断歩道を設置する。歩行者路と横断歩道を設置することにより、駐車マス付近の歩行者路に人が存在する場合には入庫、出庫を開始しない、横断歩道に人が存在する場合にはその手前で車両は停止する、などといった駐車場内の人の往来とそれに伴う車両の挙動を再現する。駐車マスの大きさは、人が乗り降りすることを考慮して幅 2.5m×奥行 5.0m とする。また、駐車場に入場した車両はランダムに駐車マスを選択するようにシミュレーションモデルを構築する。

(2) 自動バレーシステムの概要

自動バレーシステムのシミュレーションモデルを構築するにあたって必要な情報を得るために、その技術開発において先行しているアイシン精機株式にヒアリング調査を実施した。アイシン精機株式の自動バレーシステムのコンセプトは、利用者の費用負担を減らすために、車両には専用の装置を設置することなく、駐車場インフラの管制センターと協調することで適材適所の自動運転を実現するというものであった。このほか、ヒアリング調査で得られた知見を以下に示す。

a) 車両の役割

- 搭載されたセンサーで周辺を感知しながら、自動運転技術を用いて運転操作を行う。

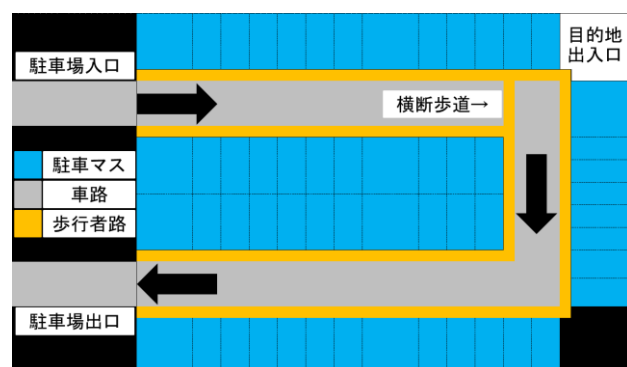


図-2 従来の駐車場の空間設計

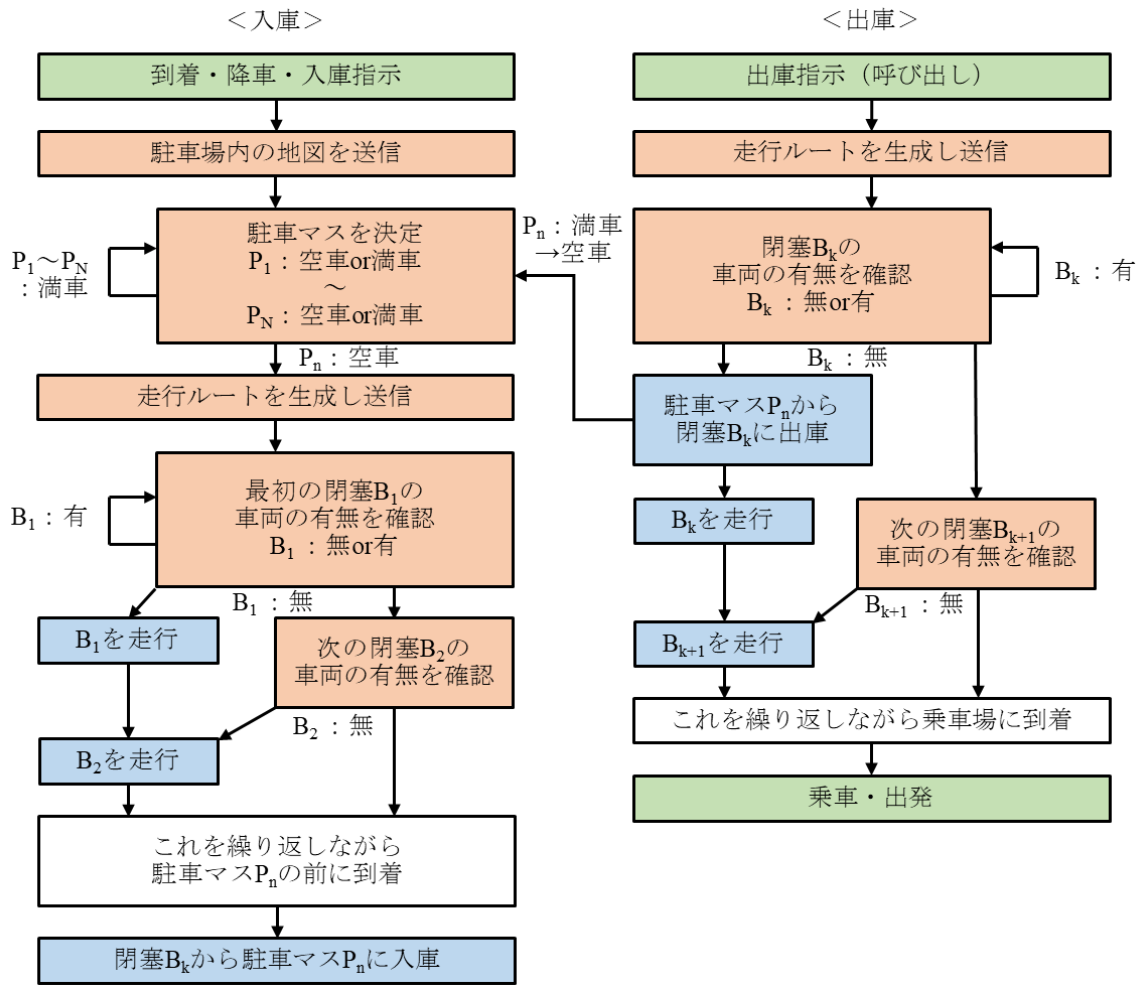


図-3 自動バレーシステムのフロー

b) 管制センターの役割

- 駐車場内の地図を車両に送信する。
- 最適な駐車マスを決定し、そこまでの走行ルートを生成して車両に送信する。
- 駐車場内に設置されたセンサーで車両の正確な位置の把握、人や車両の進入の感知などを行い、異常を検知した場合にはすべての車両を緊急停止させる。

c) 安全性の確保

- 駐車場全体を自動バレーシステムの専用空間とし、人や手動運転の車両は排除する。
- 車両同士の接触を防止するため、駐車場内は一方通行とし、各ゾーンには同時に複数の車両が存在しない閉塞ゾーンを仮想する。
- 車両と管制センターの両者のセンシングにより、安全と判断されたときのみ車両は走行する。

これらの知見をもとに作成した自動バレーシステムのフローが図-3である。

(3) 自動バレーシステムのシミュレーションモデル

自動バレーシステムは、図-4のように空間を設計する。従来の駐車場と同様に、駐車場入口から出口へ至る一方通行で幅 4.0m の車路を設置する。駐車場入口に降車場、出口に乗車場を設け、これらに隣接するように店舗など目的地の出入口を図左に設置する。自動バレーシステムでは人の乗り降りが乗降場でのみ行われることを考慮して、乗降場の大きさは幅 4.0m×奥行 5.0m とし、駐車マ

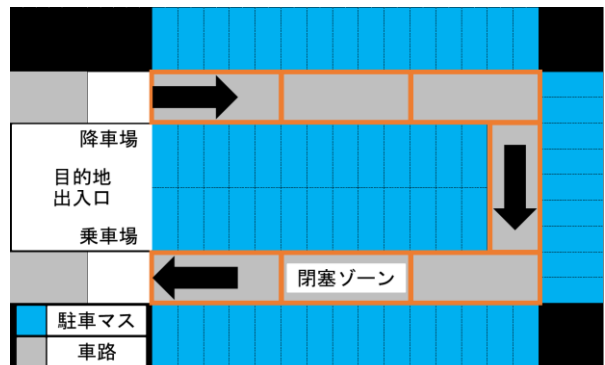


図-4 自動バレーシステムの空間設計

スの大きさは幅 2.0m×奥行 5.0m とする。車路については、一区間 10m の他車が進入しない閉塞ゾーンを仮想する。また、入出庫中の車両が他の車両の走行を極力妨げないような駐車マスを決定するようにシミュレーションモデルを構築する。

3. 時間効率と空間効率の評価手法

(1) シミュレーション条件の設定

シミュレーション条件の設定を表-5 に示す。従来の駐車場については、手動駐車と自動駐車との2つの条件を設定する。従来の駐車場+手動駐車では、駐車操作を人が行うため入庫時間を 30 秒に設定する。一方、従来の駐車場+自動駐車と自動バレーシステムでは、駐車操作を車両が行うため入庫時間を 20 秒に設定する。従来の駐車場+手動駐車、従来の駐車場+自動駐車、自動バレーシステムについてそれぞれ 10 回ずつシミュレーションを実施する。

(2) 分析シナリオの設定

駐車場利用者の目的地での滞在時間と、1 時間あたりの駐車場への車両の流入台数から、分析シナリオを設定する。滞在時間は①平均 30 分、標準偏差 7.5 分、②平均

60 分、標準偏差 15 分、③平均 120 分、標準偏差 30 分のいずれかを正規分布で与え、流入台数は①25 台/時、②50 台/時、③100 台/時のいずれかをポアソン分布で与える。滞在時間の3通りと流入台数の3通りを組み合わせた9つのシナリオのうち、滞在時間が 120 分、流入台数が 100 台/時のシナリオを除いた8つのシナリオについて、自動バレーシステムの導入効果を分析する。

また、滞在時間と流入台数から駐車場内に存在する車両の期待値を算出し、それにピーク率の 1.25 を掛け合わせたものとして、駐車場の収容台数を決定する。このピーク率は、経済産業省の必要駐車台数の指針¹⁰では 14.4%、名古屋市の独自基準¹⁰では 15.7% などとしていることから、これに余裕を持たせて設定したものである。最後に、駐車場の空間設計と合致するように、算出された収容台数を切り上げる。分析シナリオと収容台数を表-6 に示す。

(3) 時間効率と空間効率の評価指標

以上の条件およびシナリオ下でのシミュレーションにより、1)従来の駐車場については駐車場内での運転や歩行に要する時間、2)自動バレーシステムについては呼び出し待ち時間、また、3)双方に共通した時間要因として入場待ち時間の試算値が得られる。従来の駐車場において、入場時間は利用者が駐車場内での運転、入庫、降車、駐車場内での歩行に要する時間の合計、出場時間は利用者が駐車場内での歩行、乗車、出庫、駐車場内での運転に要する時間の合計として表される。自動バレーシステムにおいて、入場時間は利用者が降車に要する時間、出場時間は利用者が呼び出し待ち、乗車に要する時間の合計として表される。合計時間は入場待ち時間、入場時間、出場時間を足し合わせたものである。そして、従来の駐車場と比較して自動バレーシステムの導入によって車両 1 台あたり平均して削減される合計時間の比率を、時間効率の評価指標とする。また、従来の駐車場と比較して自動バレーシステムの導入によって削減される駐車場面積の比率を、空間効率の評価指標とする。

表-5 シミュレーション条件の設定

	従来の駐車場 +手動駐車	従来の駐車場 +自動駐車	自動バレー システム
観測時間	6 hours		
車両の速度	6.0 km/h		
人の速度	3.0 km/h		なし
入庫時間	30 sec	20 sec	
降車時間	20 sec		
乗車時間	20 sec		
出庫時間	10 sec		

表-6 分析シナリオの設定

	滞在時間	流入台数	収容台数
シナリオ1	30 min	25 cars/h	17 cars
シナリオ2	30 min	50 cars/h	33 cars
シナリオ3	30 min	100 cars/h	65 cars
シナリオ4	60 min	25 cars/h	33 cars
シナリオ5	60 min	50 cars/h	65 cars
シナリオ6	60 min	100 cars/h	125 cars
シナリオ7	120 min	25 cars/h	65 cars
シナリオ8	120 min	50 cars/h	125 cars

4. 自動バレーシステムの導入効果

(1) 入場待ち時間の削減効果

従来の駐車場と比較して自動バレーシステムの導入によって車両 1 台あたり平均して削減される入場待ち時間を図-7 に示す。シナリオ 1 の入場待ち時間の削減効果は特に大きく、自動バレーシステムでは従来の駐車場+手動駐車と比較して入場待ち時間が 72 秒削減される。一方で、流入台数が多いシナリオほど、入場待ち時間の削減効果が小さくなる傾向が見てとれる。流入台数が 100

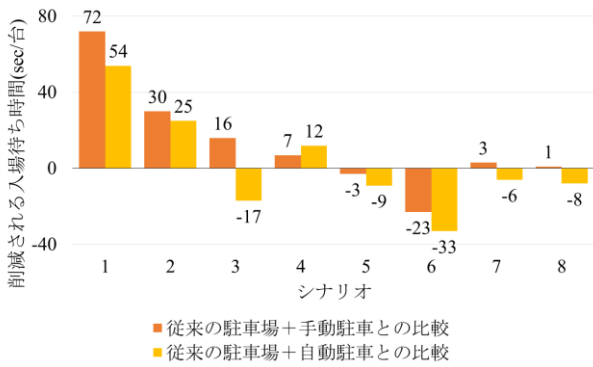


図-7 削減される入場待ち時間

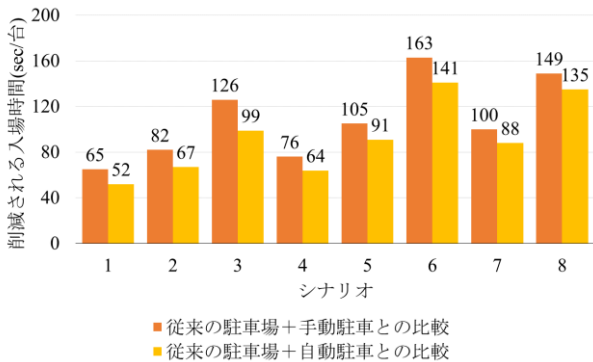


図-8 削減される入場時間

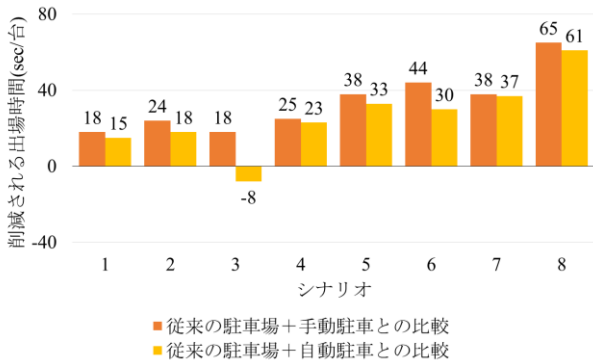


図-9 削減される出場時間

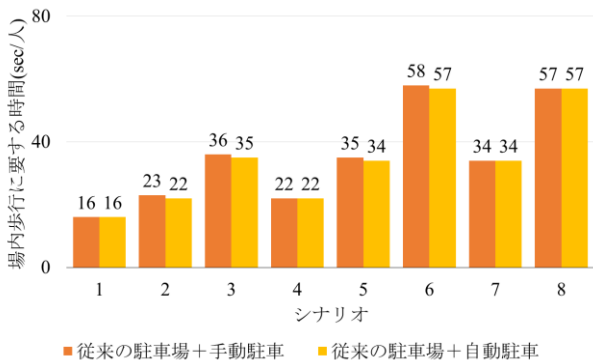


図-10 出場のとき場内歩行に要する時間

台/時のシナリオ 3 とシナリオ 6 などでは、入場待ち時間の削減量が負値をとる、すなわち従来の駐車場よりも自動バレーシステムの方が入場待ち時間が長くなっている。これは、自動バレーシステムにおいて駐車場入口に設置した降車場で一定の降車時間を要するため、流入台数が多いほど後続の車両が詰まりやすく、入場待ちが発生しやすいことに起因している。

(2) 入場時間の削減効果

従来の駐車場と比較して自動バレーシステムの導入によって車両 1 台あたり平均して削減される入場時間を図-8に示す。自動バレーシステムの利用者は、降車場で車両から降りるとすぐに目的地に向かうことができる。そのため、駐車場内運転、入庫、駐車場内歩行に要する時間が削減され、すべてのシナリオについて入場時間が削減されることが明らかになった。また、収容台数が 125 台のシナリオ 6 やシナリオ 8 などでは、入場時間の削減効果が特に大きく、自動バレーシステムでは従来の駐車場と比較して入場時間が 135 秒以上削減される。収容台数が多くなるほど、すなわち駐車場の規模が大きくなるほど、従来の駐車場では場内運転と歩行に要する時間が長くなるので、自動バレーシステムの導入によってこれらの削減効果が大きくなると考えられる。

(3) 出場時間の削減効果

従来の駐車場と比較して自動バレーシステムの導入によって車両 1 台あたり平均して削減される出場時間を図-9に示す。ほぼすべてのシナリオについて、出場時間が削減されることが明らかになった。ここで、従来の駐車場で出場のとき場内歩行に要する時間の 1 人あたりの平均を記した図-10 を見ると、削減される出場時間と場内歩行に要する時間が概ね一致しており、出庫と場内運転に要する時間が削減されないことがうかがえる。このような傾向が見られるのは、従来の駐車場で出庫と場内運転に要する時間を足し合わせたものに相当する呼び出し待ち時間が、自動バレーシステムの利用者が発生するからである。また、流入台数が 100 台/時のシナリオ 3 とシナリオ 6 では、削減される出場時間が従来の駐車場内での歩行に要する時間よりも小さいことが見てとれる。これは、自動バレーシステムにおいて駐車場出口に設置した乗車場で一定の乗車時間を要するため、流出台数 (= 流入台数) が多いほど後続の車両が詰まりやすく、呼び出し待ち時間が長くなることに起因している。

(4) 時間効率に着目した導入効果

従来の駐車場+手動駐車、従来の駐車場+自動駐車と比較して自動バレーシステムの導入によって車両 1 台あたり平均して削減される合計時間の比率を、それぞれ図

-11, 図-12 に示す. 図-11, 図-12 には, 自動バレーシステムについて, 最大入場待ち台数分の降車場を増設して入場待ち時間をゼロと考える場合の合計時間の削減率も示している. 降車場が一つの場合の削減率に着目すると, 入場待ち時間や出場時間の削減量では負値をとるシナリオでも入場時間の削減量が大きく, ほぼすべてのシナリオについて合計時間が 50%以上削減されることが示された. 次に, 降車場が一つの場合の合計時間削減率と降車場を増設する場合の合計時間削減率を比較すると, 流入台数が 25 台/時のシナリオ 1, 4, 7 や 50 台/時のシナリオ 2, 5, 8 では, 降車場を増設しても約 5%しか合計

時間が削減されない一方で, 流入台数が 100 台/時のシナリオ 3 とシナリオ 6 では, 降車場を増設するとさらに 10%以上の合計時間が削減されることが見てとれる. このことから, 降車場を増設する場合でも, 流入台数が多くなることに伴い, 時間効率が上がることが示唆される.

(5) 空間効率に着目した導入効果

従来の駐車場と比較して自動バレーシステムの導入によって削減される駐車場面積の比率を図-13 に示す. 図-13 には, 自動バレーシステムについて, 最大入場待ち台数分の降車場を増設して駐車場面積が増加する場合の面積削減率も示している. 降車場が一つの場合の削減率に着目すると, ほぼすべてのシナリオについて, 駐車場面積が 20%以上削減されることが示された. これは, 自動バレーシステムでは従来の駐車場と比較して駐車マスの幅を 20%削減できることに加えて, 歩行者路が必要でなくなることに起因するものである. 次に, 降車場を増設する場合の削減率に着目すると, シナリオ 1 では-9%とむしろ駐車場面積が増加する. また, シナリオ 2, 3, 4 では駐車場面積は約 2.5%しか削減されず, 駐車場の空間効率はほとんど変わらない. 一方で, シナリオ 5, 6, 7, 8 では駐車場面積が 10%以上削減される. 以上のことから, 降車場を増設する場合でも, 駐車場の規模が大きくなることに伴い, 空間効率が上がることが明らかになった.

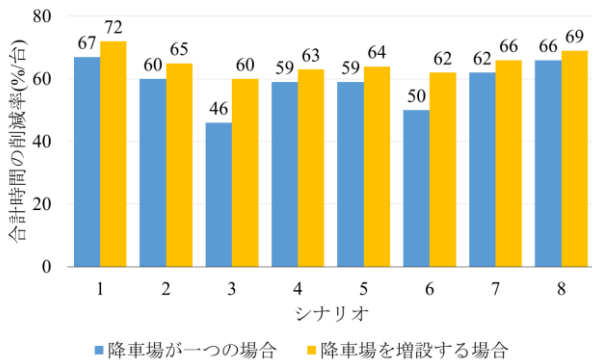


図-11 従来の駐車場+手動駐車と比較した合計時間の削減率

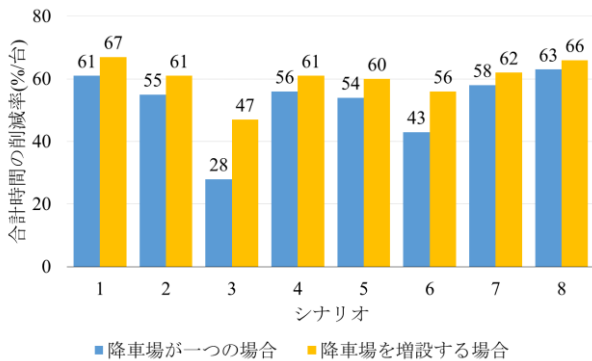


図-12 従来の駐車場+自動駐車と比較した合計時間の削減率

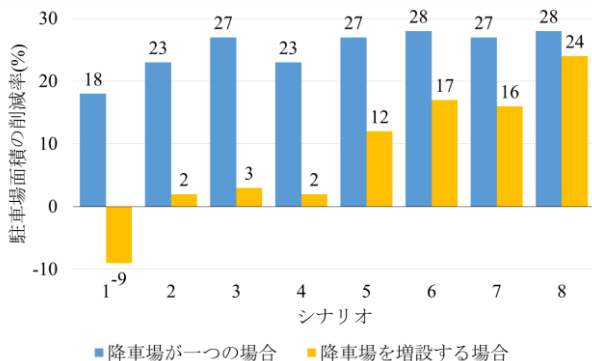


図-13 駐車場面積の削減率

5. 結論

本研究では, 滞在時間と流入台数をシナリオ的に与えたシミュレーションを実施し, 時間効率と空間効率の観点から従来の駐車場と比較した自動バレーシステムの導入効果を分析した. この結果, すべてのシナリオについて自動バレーシステムの導入によって, 時間効率と空間効率が上がることが明らかになった.

滞在時間が 120 分, 流入台数が 50 台/時のシナリオ 8 では, 合計時間の削減率が 66%, 駐車場面積の削減率が 28%であり, 時間効率と空間効率の双方の観点から自動バレーシステムの導入に適したシナリオであることが示された. シナリオ 8 に該当する具体的な場所として, 大型ショッピングセンターに付随する駐車場が挙げられる. この利用者にとって, 移動時間の削減効果が大きいことは利便性の向上につながると考えられる. また, 滞在時間が 30 分, 流入台数が 25 台/時のシナリオ 1 では, 入場待ち時間の削減量が 72 秒と特に大きく, 入場待ちの発生を抑制し, 外部への交通負荷を最も軽減することができるので, 自動バレーシステムの導入の優先度が高いシナリオと言える. シナリオ 1 に該当する具体的な場所

として、都心部の市役所やオフィスビルに付随する駐車場が挙げられる。こうした駐車場の一つ一つの面積削減効果は小さいが、都心部に点在する多くの駐車場に自動バレーシステムを導入すれば、都心部における駐車場による空間占有は十分に緩和され、コンパクトシティの実現に貢献すると考えられる。また、自動運転技術が発展し、Level 4、Level 5 の車両が実装されるときに、都心部に多数の乗降場を設置して利便性を図り、点在する多くの駐車場を数ヶ所に集約することで、よりコンパクトなまちづくりが可能になるであろう。

ただし、以上の考察は、自動バレーシステムの整備費用を考慮していないことに留意しなければならない。利用者には整備費用をまかなうために料金負担が求められるであろう。利用者が許容できる料金負担を考慮しながら、限られた整備費用で自動バレーシステムを社会実装させる必要がある。また、自動バレーシステムでは、ヒューマンエラーによる事故が起こりえない一方で、システムの誤作動による事故が発生する可能性がある。このことを考慮した事故減少便益を提示し、自動バレーシステムの導入のハードルを下げる必要がある。

最後に、本研究では、自動バレーシステムについて、最大入場待ち台数分の降車場を増設する場合を考え、合計時間と駐車場面積の削減率を再算出したが、乗車場を増設する場合については考慮していない。また、降車場や乗車場を増設すると、入場待ち時間や呼び出し待ち時間が短くなり合計時間が短縮される分、時間効率は上がるが、駐車場面積が増加する分、空間効率が下がることに留意する必要がある。このトレードオフの関係を表現し、その場所の交通事情に応じた自動バレーシステムを整備することが望まれる。

なお、駐車場の管制技術の向上により、自動バレーシステムはGPSなどによる正確な車両測位が困難な立体駐車場や地下駐車場などへも導入が見込まれ、本研究で示したシミュレーション方法はそうした環境での活用も視野に入れている。

謝辞：本研究において、アイシン精機㈱には自動バレーシステムに関する貴重な情報をご提供頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大沢昌玄：駐車場という土地利用 —都市と交通の狭間に立って再考する—, 土地総合研究 2014 年冬号, pp.26-34, 2014
- 2) 加藤博和, 林良嗣：都市交通と環境 ケーススタディー 名古屋一, 運輸政策研究 2003Summer, Vol.6, No.2, pp.48-55, 2003
- 3) 一般社団法人 日本損害保険協会東北支部：駐車場事故の実態, <http://www.sonpo.or.jp/news/publish/safety/traffic/pdf/0016/parking.pdf>, 2018 年 4 月 24 日閲覧
- 4) 津川定之：自動運転の課題, IEICE Fundamentals Review, Vol.10, No.2, pp.93-99, 2016
- 5) 坂井康一, 大口敬, 須田義大：自動走行システムの高度化・普及展開の姿およびその社会的・産業的インパクトに関する検討, 生産研究 70 巻 2 号, pp.69-74, 2018
- 6) SAE International : J3016 "Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicle", 2016
- 7) 安藝雅彦, 亀井潤也, 平沢隆之, 須田義大：既存自動車のインフラ設備による自動運転 —パーク・アンド・ライドへの適用に関する基礎的検討—, 生産研究 64 巻 2 号, pp.215-218, 2012
- 8) 田中伸治, 須田義大, 牧野浩志, 平沢隆之：駐車場 ITS の研究開発, 生産研究 63 巻 2 号, pp.271-274, 2011
- 9) 国土交通省：駐車場設計・施工指針について, <http://www.mlit.go.jp/road/sign/kijyun/pdf/19920610tyuusyajou.pdf>, 2018 年 4 月 24 日閲覧
- 10) 経済産業省：大規模小売店舗を設置する者が配慮すべき事項に関する指針, http://www.meti.go.jp/policy/economy/distribution/daikibo/download-files/sisin_saikatei.pdf, 2018 年 4 月 24 日閲覧
- 11) 名古屋市：必要駐車台数算出式テキスト版, <http://www.city.nagoya.jp/shiminkeizai/cmsfiles/contents/0000056/56345/motorpool-mono.pdf>, 2018 年 4 月 24 日閲覧

ANALYSIS ON TIME-SPACE EFFICIENCY OF AUTONOMOUS VALET SYSTEM

Yuya SEKIGUCHI, Kenji DOI, Hiroto INOI and Kento YOH