

単一ボトルネックの道路におけるバス施策の渋滞緩和への影響分析

宇都宮 宙

筑波大学理工学群社会工学類 社会経済システム専攻

1. はじめに

通勤・通学時の渋滞を緩和する取り組みの1つとしてパークアンドバスライド (P&BR) がある。P&BR は乗用車からバスへの切り替えを促す施策であり、地方都市や工業地域等での効果が期待される。1 台あたりの容量の小さい乗用車から、容量の大きいバスに切り替えることで、交通量が減少するためラッシュ時の渋滞を緩和、もしくは渋滞の発生を防ぐことが期待されている。しかし、バスへの切り替えを行う利用者が少ないとき、P&BR を行っても渋滞の緩和効果が期待できない可能性があることも指摘されている [1]。乗用車からバスへの切り替えは渋滞緩和にどのような影響をもたらすのだろうか。

関連する研究として、乗用車のみが通勤する状況での渋滞発生メカニズムを分析した Hendrickson & Kocur [2] や、Hendrickson & Kocur にバスを導入した坂ら [3] の数理モデルがある。Hendrickson & Kocur は、通勤者の効用関数を定め、ナッシュ均衡となるとき渋滞が発生することを示した。坂らはナッシュ均衡においてバスを導入した際のバス施策の経済効果について分析し、バスの運行時刻が通勤者の効用に影響しないこと、バスの容量 (定員) を増やすことで通勤者全体の効用が高まることを明らかにした。

これらの既存のモデルは、最適反応 (通勤者は他の通勤者の行動を全て把握していること) を仮定した解析的なモデルであった。しかし、現実の通勤行動において、通勤者は他の通勤者の行動をすべて把握することは難しい。また、バスが好ましくない時間帯に出発する場合やバスが定員に達し乗車ができなかった場合、バスへ切り替える効用が低いと考えられる。よって通勤者はその後バスを利用しない可能性があるため、それらの場合を加味したバスの渋滞を最も緩和できるような運行時刻を導出することは重要である。しかし、既存のモデルでは最適な運行時刻の導出は難しい。

従って、通勤者が交通手段選択を行う (学習していく) 状況でのバス施策の影響を分析する必要がある。

2. 本研究の目的

以上をふまえ、本研究では、各通勤者が経験的に自身のコストが小さくなると予測した行動をとるような学習を行う状況で、P&BR によるバスの導入が渋滞や利用者に及ぼす影響の分析を行う。

具体的には、まず、最適反応を仮定しない通勤者同士の相互作用により、通勤者が Hendrickson & Kocur [2] と坂ら [3] の導出した均衡解に近い振る舞いをするようになるの

かを検証する。次に、バス施策として運行頻度 (1 台もしくは 2 台)・時刻や容量 (定員) を変化させることで、各要素が渋滞の緩和にどのような影響を及ぼすかを検証する。このような学習を行う通勤者同士の相互作用の結果を解析的に解くことは難しく、マルチエージェントシミュレーションが好ましいと考えられる。

3. モデル

3.1. モデルの概要

本研究では、坂ら [3] の解析的モデルをマルチエージェントシミュレーションを用いて拡張した。

まず、シミュレーション環境として出発地点から目的地点までに単一のボトルネックがある 61×1 マスの道路を設定した。この道路において、ボトルネック以外は自由流*1とし乗用車とバスは 1 マス/step で進む。しかし、ボトルネックでは 10 台/step の流量制限が設けられているため、渋滞が起こる可能性がある。また、乗用車には通勤者は 1 人しか乗車できず、バスには容量分乗車できるとした。

1 試行は 3000 期から成り立つ。ここで、通勤者 $Q = \{1, 2, \dots, N\}$ [人] が、道路上で左端の出発地点から右端の目的地点まで進み、全員が目的地点に到着するまでを「1 期」とする。また、1 期において時間は離散時間 $t = 0, 1, 2, \dots$ (step) と進む。

3.2. 通勤者の行動

1 期中での通勤者の行動は、行動選択フェイズ、行動フェイズ、行動価値更新フェイズの 3 フェイズで構成されており、1 期ごとにエージェントは自身の選択した出発時間について効用を学習する。図 3.1 に通勤者の行動の流れを示す。

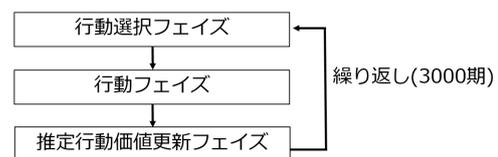


図 3.1 通勤者の行動の流れ

次に、行動選択フェイズ、行動フェイズ、行動価値更新

*1 単位時間当たりの交通容量が S_{max} の道路 S において、 S への単位時間あたり流入台数を x とすると、 $x < S_{max}$ であるとき

フェイズについて順に説明する。

行動選択フェイズ

通勤者は、期の初めに「推定行動価値 (ある行動を行ったときの効用の通勤者による予測値)」をもとに、その期における行動の選択を行う。本研究では、期中の行動を選択する手法として softmax 手法を用いた。行動選択枝の集合を $A = \{1, 2, \dots, n\}$ とする。通勤者 i の l 期目の行動 $a \in A$ の推定行動価値を $V_i^l(a)$ をとする。 $V_i^l(a)$ をもとに通勤者 i が行動 a を取る確率 $p_i^l(a)$ を、

$$p_i^l(a) = \frac{\exp(V_i^l(a))}{\sum_{k=1}^n \exp(V_i^l(k))} \quad (3.1)$$

により決定する。softmax 手法により、推定行動価値が高い行動が選択される確率が徐々に高くなる。ここで、第一期における推定行動価値 $V_i^1(a)$ は 0 であり、1 期目はランダムに行動が選択される。また、softmax 手法のオーバーフロー、アンダーフロー対策として、通勤者 i の l 期の行動の選択枝のうちで最も効用が高かった選択枝 $\max_{a \in A} V_i^l(a)$ と各選択枝 $V_i^l(a)$ との効用の差の絶対値 $|\max_{a \in A} V_i^l(a) - V_i^l(a)|$ を使用した。

行動フェイズ

行動フェイズでは、通勤者が行動選択フェイズで選択した交通手段、出発時刻に出発する。ここで、すべての通勤者は 120 step 目に目的地に到着することを望んでいるとする。120 step 目までに目的地に到着するためには 90 step 目にボトルネックを抜ける必要がある。そこで、希望ボトルネック流出時刻 $B = 90$ とする。

ボトルネックに交通容量以上のエージェントが流入したとき、先に流入した通勤者から順に待ち行列が作られ、1step ごとに最も長い時間待ち行列で待機している通勤者から順にボトルネックから流出する。ここで、同一 step でボトルネックに流入した通勤者については、流出順はランダムとした。

1step 中にボトルネックから流出したエージェントが 10 人であり、流出した後も待ち行列がまだ形成されている状態を渋滞となっている状態と考える。1 期中に、渋滞の状態である step 数の合計を本研究では「渋滞期間」とし、以降渋滞緩和の効果を表す指標として用いる。また、この時の待ち行列は物理的な長さを持たないとしている。

推定行動価値更新フェイズ

推定行動価値更新フェイズでは、行動フェイズでの結果をもとに行動選択フェイズで選択した行動の推定行動価値を評価する。 l 期において、通勤者 i が t step 目にボトルネックに入ったときのコスト関数を $UC_i^l(t)$ とし、

$$UC_i^l(t) = \begin{cases} b_1 r(t) + b_2 (B - t - r(t)) & (t + r(t) \leq B), \\ b_1 r(t) + b_3 (t + r(t) - B) & (t + r(t) > B). \end{cases} \quad (3.2)$$

とした。 $r(t)$ は渋滞時間であり、 b_1, b_2, b_3 はそれぞれ渋滞時間、早着時間 (早く着きすぎた時間)、遅刻時間のパラメータである。また、 B は希望ボトルネック流出時刻とし、 B より遅れてボトルネックを抜けたときは遅刻とした。

そして、(3.2) 式の関数をもとに、通勤者は自身の選択した行動の推定行動価値を非定常の多腕バンディット問題 [4] によって更新する。 l 期目の通勤者 i の選択した行動が $a \in A$ 、効用が u_i^l であったとする。ここで、効用 u_i^l については、 $u_i^l = -UC_i^l(t)$ とした。通勤者 i の $l+1$ 期の推定行動価値 $V_i^{l+1}(a)$ は

$$V_i^{l+1}(a) = \begin{cases} V_i^l(a) + \alpha (u_i^l - V_i^l(a)) & (a_l(i) = a), \\ V_i^l(a) & (a_l(i) \neq a). \end{cases} \quad (3.3)$$

とする。ここで $\alpha (0 < \alpha \leq 1)$ を学習率とし、 α が 1 に近いほど直近の行動を重視する形となっている。本研究では、各通勤者は (3.3) 式を基に行動価値を推定していくものとする。

3.3. モデルパターン

(a) 乗用車だけのモデル

まずは、乗用車だけが通勤を行うモデルを考える。ここで、各エージェントは自分の出発時刻を 5 step 刻みで $\{0, 5, 10, \dots, 90\}$ step までの 19 個の選択枝から選択する。以下でモデルの流れを説明する。

1. 各エージェントは 1 期目の行動選択フェイズで、ランダムに出発時刻を選択する。
2. 各エージェントは行動フェイズで実際通勤を行う。
3. 各エージェントは 2. の結果をもとに、行動価値更新フェイズにて推定行動価値の更新を行う。
4. 各エージェントは推定行動価値をもとに、行動選択フェイズにて次の出発時刻を決定する。
5. 2.~4. を 1 期とし、3000 期繰り返して 1 試行を終了する。

(b) バスを導入したモデル

シミュレーションは (1) 単一時刻にバスが走行する場合、(2) バスが 2 台に分散して走行する場合、の 2 パターンで行った。(1) のとき、通勤者は 1 期の最初に乗用車での出発時刻、もしくはバスへの乗車を選択する。(1) のとき、乗用車を選ぶときの選択枝として出発時刻を $\{0, 5, 10, \dots, 90\}$ step と 5 step 刻みに 19 個から選ぶ事ができる。バスは 1 台で選択枝は 1 つであり、合計 20 個の選択枝となる。(2) のときも乗用車を選ぶときは出発時刻を 19 個の選択枝から選ぶ。バスは 2 台あるため選択枝は 2 つとなり、合計 21 個の

選択肢である。バスの容量は、 $\{80, 160, 240, 320, 400\}$ の5通りとした。ただし、(2)の場合バス1台の容量は(1)の時の半分とした。また、バスが満員となったとき通勤者は後発のバス、もしくはバスが出発する時刻より後に乗用車で出発する選択のみが可能である。以下がモデルの流れである。

1. 各エージェントは1期目の行動選択フェイズで、ランダムに交通手段、出発時刻選択を行う
2. 各エージェントは行動フェイズで通勤を行う
3. 各エージェントは2.の結果をもとに、行動価値更新フェイズにて推定行動価値の更新を行う
4. 各エージェントは推定行動価値をもとに、行動選択フェイズにて、交通手段、出発時刻選択を行う
5. 2~4.を1期とし、3000期繰り返し1試行を終了する

3.4. パラメータ設定

本研究のシミュレーションで値を固定したパラメータの設定を表3.1に要約する。

表3.1 パラメータ設定

項目	設定値
人数 Q	500(人)
ボトルネック容量 g	10台 /step
期 l	3000期
希望ボトルネック流出時刻 B	90step目
渋滞による費用のパラメータ b_1	1.0
早着による費用のパラメータ b_2	0.5
遅刻による費用のパラメータ b_3	1.5
学習率 α	0.1

4. 結果

まず、4.1節で Hendrickson & Kocur [2] と坂ら [3] の導出した均衡解と近い振る舞いをするのかを検証する。そこで、(a) 乗用車だけのモデル、(b) バスを導入したモデルがそれぞれ Hendrickson & Kocur と坂らの導出した解析的均衡解との比較を行う。

次に、4.2節では、(1) バスが単一の時刻に走行する場合、(2) バスが分散して走行する場合の2パターンについて、バス施策としてどのようなときが最も渋滞緩和効果が高いのか、「出発時刻(運行時刻)」と「容量」の2点に着目して分析を行う。

本研究の結果は、1試行について2901~3000期の結果を平均し、それをさらに5試行平均したものである。

4.1. 学習エージェントによる振る舞いの検証

(a) 乗用車だけのモデル

(a) 乗用車だけのモデルと Hendrickson & Kocur の解析的モデルを比較した結果を図4.1に示す。赤線は Hendrick-

son & Kocur によるナッシュ均衡である通勤者の出発時刻の配分「利用者均衡配分 $A(t)$ 」、青線は、渋滞が起きずボトルネックの許容量だけ自動車が行進している、道路のシステム上最適な通勤者の出発時刻の配分である「システム最適配分 $D(t)$ 」に本研究のパラメータを当てはめたものである。

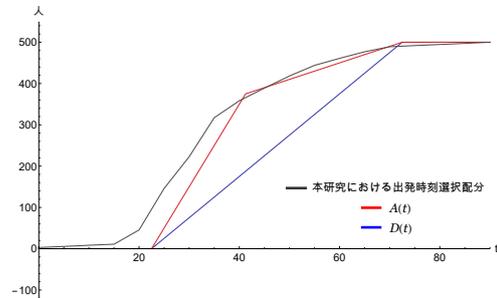


図4.1 エージェントによる出発時刻選択と Hendrickson らのモデルの比較

横軸は時間 t 、縦軸は出発した累積人数を示している。図4.1の通り、(a) 乗用車だけのモデルにおける通勤者は、ほぼ利用者均衡配分と近似した振る舞いを見せることが明らかになった。この結果は、最適反応することを仮定せず、通勤者が自身の UC のみを考えて学習を行う状況でも渋滞が発生してしまうことを表している。また、Hendrickson & Kocur の主張の頑健性を示している。また、(a) における渋滞期間は51.74であった。

(b) バスを導入したモデル

次に、(b) バスを導入したモデルと坂らの解析的モデルを比較した結果を図4.2に示す。図4.2は、バスが1台走行しバス出発時刻 $t_b = 8$ の時、坂らの解析モデルを比較したグラフである。グラフの結果は、バス容量100で2901~3000期の全期間においてバスの遅刻回数が0回であり、バス利用率が100%であったものである。赤線と青線はそれぞれ坂らによる利用者均衡配分 $A(t)$ とシステム最適配分 $D(t)$ に $t_b = 8$ の時の本研究でのパラメータを当てはめたものである。

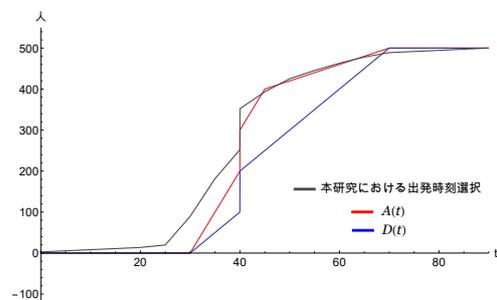


図4.2 エージェントによる出発時刻選択と坂らのモデルの比較

横軸は時間 t 、縦軸は出発した累積人数を示している。(b) バスを導入したモデルにおいても、エージェントが坂らの

利用者均衡配分に近い振る舞いを見せることがわかった。よって、バスを導入したモデルでも、通勤者が自身の UC のみを考えて学習を行う状況で渋滞が発生するナッシュ均衡となる状況が生まれることが明らかになった。

4.2. バスの運行時刻、容量が渋滞期間に与える影響

次に、バスを (a) 単一時刻に走行させる場合、(b) 分散させて走行させる場合の 2 パターンについて運行時刻と容量を変化させたときの渋滞の緩和効果についてそれぞれ分析する。

(1) 単一時刻にバスが走行する場合

まず、(1) 単一時刻にバスが走行する場合について分析を行った結果を以下に示す。4.3 の横軸はバスの容量であり、縦軸は最も渋滞緩和効果の高いバス出発時刻を表している。

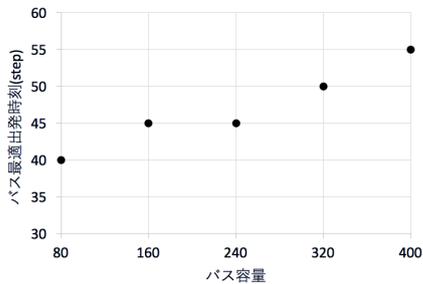


図 4.3 (1) バス容量に対する最も渋滞緩和効果の高いバス出発時刻の変化

図 4.3 より、バスの容量が小さいほど、渋滞緩和効果が高いバスの出発時刻は早めであり、バスの容量が大きいほど、遅い時刻 (希望ボトルネック流出時刻に近い時間帯) となった。

また、図 4.3 におけるそれぞれの容量における渋滞期間を表 4.1 に示す。

表 4.1 (1) の各容量における渋滞期間

バス容量	80	160	240	320	400
渋滞期間	43.94	34.90	26.30	16.42	11.13

表 4.1 より、どの容量でも乗用車のみのモデルにおける渋滞期間を下回っている。したがって、最も渋滞緩和効果の高い状況において、バスの導入は渋滞緩和を促すことが分かった。また、バスの容量が大きいほど渋滞の緩和効果が高いことも明らかとなった。

(2) バスが 2 台に分散して走行する場合

次に、(2) バスが 2 台に分散して走行する場合について分析を行った結果を以下に示す。図 4.4 の横軸はバスの容量であり、縦軸は最も渋滞緩和効果の高いバス出発時刻の組み合わせを表している。また、早発のバス 1 が青色 (四角) の点、後発のバス 2 が赤色 (丸) の点である。

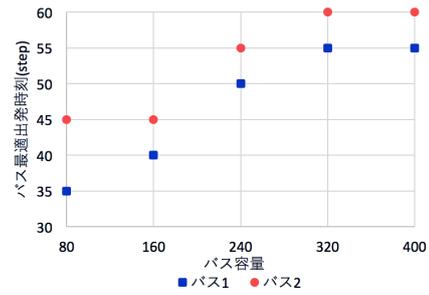


図 4.4 (2) バス容量に対する最も渋滞緩和効果の高いバス出発時刻の変化

図 4.4 より、(1) の時と同様に、容量が小さい (大きい) ほどバスを早めの (遅めの) 時刻に出発させたほうが渋滞緩和効果が高いことが分かった。また、バス同士の出発時刻が最も近いときに渋滞の緩和効果が最も高くなる傾向にあることも明らかになった。

また、図 4.4 におけるそれぞれの容量における渋滞期間を表 4.2 に示す。

表 4.2 (2) の各容量における渋滞期間

バス容量	80	160	240	320	400
渋滞期間	44.94	36.27	25.90	16.39	11.39

表 4.2 でも、表 4.1 と同様の結果が得られた。

5. 考察

本研究の結果として、最適反応を仮定しない通勤者の相互作用でも Hendrickson & Kocur [2]、坂ら [3] と同様の結果が得られた。これは、最適反応を仮定した既存研究よりも現実に近い状況でもナッシュ均衡となり渋滞が発生しているといえ、現実での渋滞発生メカニズムの 1 つではないかと考えられる。

次に、(1) 単一時刻にバスが走行する場合では、バスの容量が小さい (大きい) ほど希望ボトルネック流出時刻に対し早め (遅め) にバスを運行したほうが渋滞の緩和効果が高いことがわかった。

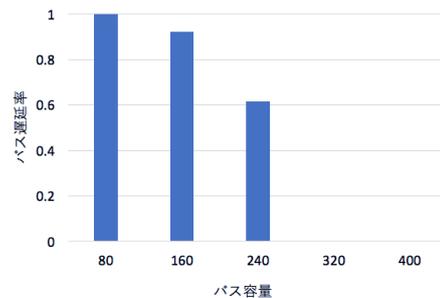


図 5.1 (1) におけるバス出発時刻 55step 目ときのバス遅延率

このような結果となった理由としてバスの遅刻が挙げられる。容量の小さいバスでは、バスに収容できる人数に限りがある。そのため、通勤者がバス容量分だけ乗用車からバスに切り替えを行っても乗用車の数はほぼ変化しない。従って、図 5.1 のように、バスの容量が小さいほどバスの出発時刻が遅いと渋滞に巻き込まれ、遅延する確率が容量の大きいバスに比べ高いと考えられる。これは坂らの数理研究において示されていなかった部分であり、現実にも即した結果となっている。

また、(2) バスが 2 台に分散して走行する場合、バス同士の出発時刻に近いほうが渋滞緩和効果が高い傾向にあることが分かった。

この結果について、2 台のバスが離れた時刻に走行する場合、図 5.2 のときのように先発のバスの需要が減少した例が見られた。バス同士の間隔を空けすぎるとどちらかのバスは通勤者の需要に対応しなくなる可能性があると考えられる。従って、バスの出発時刻を離して走行させるより、需要に合わせてバスを集中して走行させたほうが効果が高いのではないだろうか。

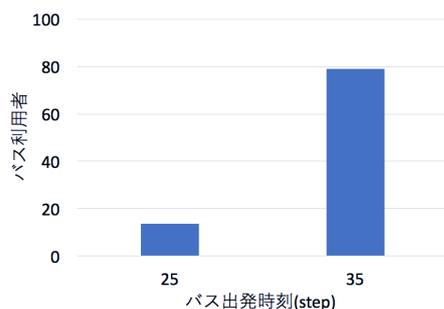


図 5.2 (2) でのバス出発時刻 (35, 40)step 目とバス出発時刻 (25, 40)step 目のときの先発のバス利用者数の比較 (バス容量 160)

本研究は渋滞が起きやすい道路の典型的な例においてバスを導入した時の効果を分析した基礎的な研究である。しかし、現実のバスの運行計画においても需要に対しバスの容量が小さければ早めに運行させるような計画を行うと、渋滞緩和効果が見込める可能性がある。また、本研究を応用することでより二次元マップ上での運行施策など、より現実に近い状況の分析もできると考えられる。

最後に、今後の課題としてバスの料金政策について分析することが必要だと考える。本研究において、バスの料金やその他の通行料金には言及していなかった。しかし、現実ではバス施策として料金施策は重要な要素であり、これを加味した分析が必要であると考えられる。よって、これを本研究における今後の課題としたい。

参考文献

- [1] 佐々木邦明, 西井和夫, 森川健. 甲府 P&BR 社会実験の課題とその評価. 土木計画学研究・講演集, 25.
- [2] Hendrickson, C., and Kocur, G. (1981). Schedule delay and departure time decisions in a deterministic model. *Transportation science*, 15(1), 62-77.
- [3] 坂泰志, 長江剛志. (2015). 乗用車とバスが混在するボトルネック・モデルにおける「無秩序の代償」とバス政策効果. *人工知能学会全国大会論文集*, 29, 1-4.
- [4] Richard S. Sutton, Andrew G. Barto [著], 三上貞芳, 皆川雅章, et al. 強化学習. 森北出版; 2000.