

無人運転技術を用いた車両共有システムの導入に伴う環境影響に関する分析

ENVIRONMENTAL IMPACT BY COMMON VEHICLE SYSTEM WITH UNMANNED CRUISING SYSTEM

谷本 圭志¹・川村 周平²

¹博士(工学) 鳥取大学大学院准教授 社会基盤工学専攻 (E-mail: tanimoto@sse.tottori-u.ac.jp)

²鳥取大学大学院博士前期課程 社会基盤工学専攻 (E-mail: m08t7008b@edu.tottori-u.ac.jp)

無人で車両が走行する技術が確立されれば、車両を共同利用することによって様々な人々の移動の機会を確保しうるシステムを構築しうる。しかし、このようなシステムの実現を検討するためには、その導入が社会にどれだけの影響を与えるのかの把握が必要である。そのための基礎情報を得ることを目的として、本研究では資源・エネルギーという環境的な側面に焦点を当て、システムのもとで所与のトリップ需要に対してどれだけの資源、すなわち車両の投入が必要か、また、車両の走行にどれだけのエネルギーを要するかについて定量的に評価するモデルを数理計画法を用いて構築する。その上で、ある地区を対象にいくつかのモデルを想定して実証的に検討する。

キーワード：無人運転技術，車両共有システム，割り当て問題

1. はじめに

交通システムの技術開発が着実に進展している。遠くない将来において、現在とは異なった自動車の利用環境が出現し、新たな車社会が実現する可能性は少なくない。その可能性を広げる有望な技術の一つとして、自動車の無人運転技術がある。

この技術と自動車との遠隔通信技術を組み合わせることで、地域に存在する車両の活用が容易となる。例えば、現在では、通勤等の目的で利用された車両は、職場や駅・空港などの様々な場所の駐車場で遊休しているが、上記の技術を用いて車両を管理するシステムを構築・運用することで、運転手がいなくてもそれらの車両を無人のタクシーのように活用することができるようになる。このような車社会が実現すれば、上記のように活用される自動車は、世帯が独占する財ではなく、地域社会が共有する財との位置づけになろう。

無人運転技術を用いて上記のような車両の共有システム(以後、このシステムを単に「システム」と略す)が導入されれば、車を運転できない人々であっても車での移動が可能となる。その一方で、社会に対する副次的な影響も想定されるため、このようなシステムの実現に向けて技術の進展を目指すのかを議論をしていくためには、その導入が社会にどれだけの影響を与えるのかについて様々な観点からの検討が必要である。

そのための基礎的な情報として、本研究では、システ

ムが資源・エネルギーという環境面に及ぼす影響に焦点を当て、それを評価するモデルを構築する。具体的には、システムが導入されたもとで、所与のトリップ需要に対してどれだけの資源、すなわち、車両の投入が必要か、また、システムの運用にどれだけのエネルギーを要するかという二点に着目し、それらを定量的に評価するモデルを数理計画法を用いて構築する。その上で、鳥取県のある地区を対象にいくつかのモデルを想定して実証的に検討する。

2. 本研究の基本的な考え方

2.1. 技術開発の動向

運転を自動化するための技術は、1939年にニューヨーク世界博において、ゼネラルモーターズ(GM)からの提案が最初である。ただし、あくまで夢として示されたものであり、技術的な裏づけはなされていなかった。その後、関連技術の進展とともに研究が進み、ハンドル操作の自動化から前車への追従走行や、磁気マーカールなどを用いた自動運転システムへと発展し、1990年代後半には専用コースや未供用の高速道路などを用いた大規模な実験が実施されるようになった¹⁾。

日本では、1991年より旧運輸省によるASV(Advanced Safety Vehicle: 先進安全自動車)推進計画が開始された。国土交通省による2006年～2010年の第4期では、一部

の要素技術ではあるが市販車両での実用化を目指している²⁾。わが国における自動運転の実用化の例としては、専用道路上ではあるが、2005年に愛知県で開催された愛・地球博のIMTS (Intelligent Multimode Transit System) があり、道路上に埋め込んだ磁気マーカーを用いて $\pm 10\text{cm}$ の精度でバスの自動運転を行った³⁾。

地上のインフラに依存しない自動運転システムとしては、米国 DARPA (国防高等研究計画局) が開催した DARPA・グランドチャレンジがよく知られている。2004年および2005年は砂漠で実施され、自律自動走行が可能であることが技術的に示された。その後、2007年には、市街地をコースとする DARPA アーバンチャレンジが開催され、総延長 96km のコースを平均時速 22km で完走している^{4) 5)}。2008年には、GM が自動運転車の開発計画を発表し、それによると 2015年までに技術を完成させ、2018年には市場に投入するとしている⁵⁾。

2.2. 社会問題の解決の可能性

運転の自動化技術の開発によって様々な社会問題の解決が期待されている。交通事故や交通渋滞の解決が期待されてきたことは言うまでもないが、現在においては、経済産業省の「エネルギーITS」⁶⁾に見られるように、環境対策としても注目されている。

この技術には、様々な主体が様々な観点から期待をしていると考えられるが、本研究で着目している車両の共有化を想定すれば、上記にとどまらない大きな社会的な貢献が期待できる。すなわち、運転手になれない人々にも移動の機会を確保することが可能になる。この点は、現行の様々なシステムが抱える限界を克服することが可能となる。例えば、カーシェアリング^{7) 8)}は車両を共有するという点では本研究で想定しているシステムとの共通性を有しており、本システムの代替案と一見考えられるシステムであるが、このシステムはそもそも運転できる人を対象として車両を共有するシステムであり、運転手になれない人への移動機会の確保は不可能である。また、公共交通システムはそのような人々に移動機会を確保するという点で本システムとの共通性を有するが、路線やダイヤが限定されるといった利便性の問題やとりわけ地方で生じているように公共交通システム自体が衰退しているという事実がある。

以上のように、人々への移動の機会の確保という観点において、無人運転技術を活用した車両の共有システムには大きな貢献が期待できる。しかしその一方で、本システムが環境に与える影響については必ずしも肯定的ではない。すなわち、ある人の移動に用いられた車両はその用を終えると他の人の移動需要を満たすために無人で回送される。回送が生じる分、走行に要するエネルギーは現在よりも増加する。また、現在公共交通を利用して

いる人々が本システムに転換したりトリップ需要そのものが増加すればシステムの運用に必要な車両の数が減るとは限らず、現在よりも多くの資源を投入して車両を生産しなければならないかもしれない。このため、それらの影響を定量的に評価しうるモデルとそれを用いた分析が必要となる。

2.3. 本研究で想定する状況

2.1で述べたように、2018年に自動運転車を市場に投入する予定とのことではあるが、本システムの実現には遠隔通信技術との統合や運用のための制度的・技術的な検討などが必要であることから、システムの導入は少なくとも今から20~30年後となろう。その頃には、人口減少に伴い、都市域が(コンパクトシティのように意図的かどうかは別として)縮小するといったように、国土・都市構造が現在とは異なる可能性があり、また、それ以外にも社会を取り巻く状況の変化には様々な可能性が考えられる。しかし、技術の進展や地球環境の変化に代表されるように不確定な要因も多く、現時点においてその社会を正確に想定することは本研究の手に余る。このため、現在での状況をベンチマークとしつつ、感度分析的な検討を行うことがむしろ有効であろう。本システムが導入される社会の正確な想定は、その技術の供用の見通しがたった時点で改めて検討すればよいと考える。

また、実証分析では人口減少や高齢化が進む鳥取県におけるある地域を取り上げるが、そこでの人口構成は他の都市の20~30年後の姿であるかもしれない。もちろん、実証分析の対象地域と他の都市との地理的な条件は異なるものの、いたずらな将来予測をするよりは、将来像の候補となりうる実在する地域を対象とした分析も着目に値すると思われる。

以上のことから、本研究では、現在の都市構造およびトリップ需要をベースに検討を行う。その際、トリップ需要については感度分析を行い、需要量の変化についての考察を行うことで現在とは異なりうる社会の状況下での分析を断片的にはあるが試みる。また、20~30年後において、自動車交通が本システムに完全に移行するかは定かではないが、以下では、システムの影響を過小に評価することを避けるために完全に移行した状況のもとで検討を行う。なお、システムをどのような主体が運営するか、また、その動力源が何かなどに影響の度合いは異なりうるが、システムが実用化段階にはない現在においてそれらの想定を無理にすることは議論にかえて不利益が生じる。このため、本研究では、それらの詳細な設定はあえて行わない。その代わりに、環境への影響、すなわち、資源量、消費エネルギー量と密接に相関する指標である車両の必要台数および走行時間を算出する。そうすることにより、システムが実用化する時代の技術

水準が何らかの形で与えられ、それに基づいて一台あたりの車両の生産に必要な資源量や走行時間あたりに要するエネルギー量を見積もることができた段階で、本研究の結果にそれらに乗じることで資源量やエネルギー量が直ちに算出できるようになる。

2.4. システムの概要と研究の方向性

本システムは、移動を必要とする人が事前にシステムの運営主体に予約を入れ、その予約に応じた移動サービスを車両が無人で走行して供給するものであり、無人のタクシーサービスに近いイメージとなろう。なお、運営主体は、民間企業であっても自治体であっても構わず、本研究ではそれを特定化しない。

車両を共有化するという点で、本システムとカーシェアリングは類似性を有するものの、両者は同一ではない。カーシェアリングは現在既に供用が開始されているため、当然のことながら、現在の技術を前提として成立している。これに対し、本研究では無人運転技術を前提としているため、そのもとでの車両の運用はカーシェアリングでのそれとは異なる。具体的には、ある利用者のトリップを充足した後、車両は別の利用者のもとへ無人で回送される点で大きく異なる。現在では、異なる人々が共同で車を利用できるようにするために、車両の貸出返却場所を予め決めておかなければならず、例えば、Barth and Todd⁹⁾、島崎ら^{10), 11), 12)}、Nakayama *et al.*¹³⁾、中山ら¹⁴⁾、山本ら¹⁵⁾といった既往の研究ではその状況を想定している。しかし、本システムのもとでは車両の貸出返却場所は不要である。車両の運用において本研究での想定とカーシェアリングのそれとは大きく異なるため、本システムの分析には別のモデル化が要請される。

また、カーシェアリングが現在供用されているという状況にあることから、その研究も必然的に現在の法的、経済的、心理的な条件を与件として検討が蓄積されている。例えば、竹内・谷口¹⁶⁾や石坂・福田¹⁷⁾は、現在の潜在的な利用者の料金への評価やシステムに対する意識などを実証的に検討している。これに対して本システムは幾分遠い将来時点における導入を想定していることから、これらの条件を与件とするのではなく、むしろ本システムの導入にはどのような社会的な影響があり、それを解決するために上記の与件を含めてどのような付加的な改善・修正を要するかについての議論の材料を提供することに目的がある。この目的のもとでは、現状をあえて与件とはせず、本システムによる物理的な可能性を評価するアプローチが求められるが、その視点に基づいた既存研究は見当たらない。

そこで本研究では、現在のトリップ需要を本システムで充足するという想定をベースとし、最低限必要となる車両台数および走行時間を定量的に評価するモデルをグ

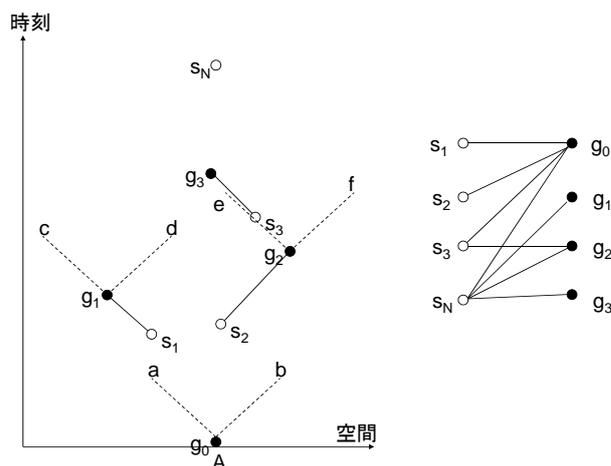


Fig. 1 時空間パスと二部グラフとの対応関係

ラフ理論におけるマッチング問題、割り当て問題を援用して構築する。また、そのモデルを用いてシステムの有効性を実証的に確認する。なお、2.2で述べたように、運転手になれない人々にも移動の機会を確保するという点で、本システムと他のそれとの代替は困難である。このため、本システムとその代替案との比較ではなく、現状との比較において有効性を確認するアプローチに基づく。

3. モデル化

3.1. 車両の割り当てとマッチング問題

所与のトリップ需要を満たすために最低限必要となる車両台数や走行時間を評価するためには、トリップ需要に対する車両の割り当てを導出するモデルが必要である。そのモデルとして、グラフ理論におけるマッチング問題、割り当て問題が有用である。それらの考え方と車両の割り当ての関係を時間地理学における時空間パスを用いて説明する。

Fig.1には、左側に時空間パス、右側にそのパスに対応したグラフを例示している。なお、ここでは議論の単純化のため、車両が走行する空間は西から東にといったように一次元に広がっているものとする。時空間パスはトリップの時空間的な軌跡を表すもので、縦軸を時刻、横軸を空間とする座標平面内に記される。Fig.1における3つの実線が時空間パスである。なお、縦軸は、原点に近いほど早い時刻である。横軸は、原点に近いほど空間の端（例えば対象地域における最も西側の地点）に近いことを示している。

図中の○、●印のノードはそれぞれ人々が移動する際の起点、終点であり、それぞれを起点、終点ノードと呼ぶ。なお、それらは車両を回送する際の終点、起点でもある。起点ノードと終点ノードの間に結びれている実線がトリップ需要である。任意のノードの番号を n 、起点、

終点ノードをそれぞれ s_m, g_n で表すと、任意のトリップは (s_m, g_n) で表すことができる。Fig.1 では $(s_1, g_1), (s_2, g_2), (s_3, g_3)$ の3つのトリップ需要があることになり、それぞれが一つの時空間パスと対応する。一台の車両が車庫に相当する地点 A にあるとすると、このことは地点 A に g_0 というノードがあることで表現される。なお、この車両は、この日の終わりには地点 A にもどらなければならないとすると、このことは、地点 A にノード s_N があることで表現される。

車両の走行速度には上限があるため、ある時間内に到達可能な空間の範囲は限定される。所与の走行速度のもとで g_0 から到達可能な空間の範囲は、 g_0 と a, b を結ぶ点線およびその延長の内部で示される。

車両をノード g_0 から s_1 に回送させ、トリップ需要 (s_1, g_1) を充足するとする。このとき、車両はノード g_1 において遊休する。 g_1 から到達可能な空間の範囲に起点ノードは s_N を除いて一つもないことから、遊休した車両はノード s_N に向かうより他ない。これは、車両が車庫にもどることを意味する。一方で、車両をノード g_0 から s_2 に回送させ、トリップ需要 (s_2, g_2) を充足するとする。このとき、車両はノード g_2 において遊休する。上述と同様の議論により、 g_2 と e, f を結ぶ点線およびその延長の内部に s_1 がいないためノード g_2 からノード s_1 へは到達不可能であり、トリップ需要 (s_1, g_1) に遊休した車両を充てることはできない。しかし、ノード g_2 からノード s_3 には到達可能であるため、ノード g_2 において遊休した車両を回送させてトリップ需要 (s_3, g_3) を満たしうる。

以上より、1 台の車両では3つのトリップ需要を満たすことができない。一方、容易に推測されるように、2 台の車両があればすべてのトリップ需要を満たすことができる。

以上に示した状況やそのもとでの車両の割り当ての検討は、グラフを用いて解析できる。Fig.1 の左側に記されている時空間パスは、Fig.1 の右側に記されているグラフで表すことができる。このグラフは、左側に起点ノード、右側に終点ノードから構成されるグラフであり、二部グラフと呼ばれる。グラフに記されているリンクは実行可能なリンクと呼ばれ、それで結ばれるノード間は到達可能である。すなわち、任意の二つのノードの間に実行可能なリンクがあれば、当該のノード間に車両が回送できることを表している。例えば、ノード g_2 からは s_3, s_N への実行可能なリンクがあるが、これはノード g_2 で遊休した車両をノード s_3, s_N に回送できることを表している（もし、 s_N に回送した場合、ノード s_3 を起点とするトリップ需要は満たさないことになる）。一方で、実行可能なリンクで結ばれていないノード間に車両は回送できない。

どのトリップ需要にどの車両を割り当てるかは、実行可能なリンクのうちどのリンクに実際に車両を回送させ

るかと同じ問題である。ここに、少なくとも何台の車両があれば（つまり、Fig. 1 においてはノード g_0 の位置に起点ノードが何個あれば）すべてのトリップ需要を満たすことができるかという問題として定式化すれば、すべてのトリップ需要を満たすための車両の必要台数を求めるモデルとなる。一方、リンクに車両を回送させる際のコストを与え、すべてのトリップ需要を満たすための最小のコストを求める問題として定式化すれば、コストを最小化するモデルを導きうる。そのコストを走行時間で与えれば、コスト最小化は走行時間最小化の問題となる。

上記のそれぞれのモデルは数理計画におけるマッチング問題、割り当て問題に属する。したがって、時空間パスとして表されたトリップ需要を二部グラフ上における問題に対応づけることで、マッチング問題、割り当て問題における知見や計算アルゴリズムをそのまま本研究の車両の割り当て問題に援用することができる。なお、以後の検討においては複数のトリップ需要を一つの車両で充足することはないものとする。すなわち、相乗りはないものとする。

3.2. 定式化

任意の起点、終点ノードをそれぞれ i, j で表す。実行可能なリンクの集合を L で表し、その任意の要素を $(ij) \in L$ で表す。リンク (ij) に車両を回送させるか否かを表す変数 x_{ij} を以下のように定義する。

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & ((ij) \text{ に回送させる場合}) \\ 0 & (\text{その他の場合}) \end{cases} \quad (1)$$

また、リンクのコスト c_{ij}^* を次式のように定義する。

$$c_{ij}^* = \begin{cases} c_{ij} & ((ij) \in L \text{ の場合}) \\ M & (\text{その他の場合}) \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 c_{ij} はリンク (ij) に車両が回送した際のコストである。車両の台数を最小化するモデルにおいては起点ノード i が車両の車庫 (Fig.1 における g_0 の位置に存在するノード) である場合に 1、そうでない場合に 0 のコストが与えられる。また、走行時間を最小化するモデルにおいては、リンク (ij) を回送する際に生じる走行時間が与えられる。 M は禁止的に大きな数値であり、実行不可能なリンクに車両が回送されることがないようにするための技術的工夫である。すると、車両の割り当て問題は次式のように定式化できる。

Table 1 目的別トリップ原単位 (上/下段: 男性/女性)

目的	10代	20代	30代	40代	50代	60代	70代以上
通勤	0.458	0.789	0.872	0.832	0.814	0.546	0.272
	0.615	0.614	0.595	0.615	0.609	0.265	0.450
通学	0.208	0.040	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0.154	0.059	0.000	0.002	0.003	0.000	0.000
買物	0.083	0.033	0.050	0.048	0.061	0.156	0.218
	0.038	0.230	0.250	0.356	0.320	0.291	0.050
通院	0.000	0.008	0.008	0.011	0.021	0.077	0.128
	0.077	0.032	0.034	0.046	0.038	0.103	0.200
A	0.009	0.009	0.030	0.041	0.041	0.027	0.093
	0.000	0.000	0.113	0.080	0.080	0.077	0.093
B	0.010	0.010	0.043	0.011	0.011	0.041	0.024
	0.000	0.060	0.060	0.074	0.074	0.019	0.005
C	0.003	0.003	0.011	0.004	0.004	0.010	0.034
	0.004	0.004	0.025	0.012	0.012	0.003	0.033
D	0.027	0.027	0.018	0.024	0.024	0.024	0.041
	0.033	0.033	0.083	0.046	0.046	0.057	0.011
E	0.031	0.031	0.025	0.024	0.024	0.022	0.025
	0.032	0.032	0.034	0.029	0.029	0.028	0.006
F	0.026	0.026	0.057	0.037	0.037	0.023	0.040
	0.052	0.052	0.039	0.028	0.028	0.025	0.022
G	0.024	0.024	0.014	0.032	0.032	0.023	0.009
	0.022	0.022	0.018	0.017	0.017	0.012	0.000
H	0.013	0.013	0.008	0.014	0.014	0.010	0.024
	0.002	0.002	0.010	0.015	0.015	0.017	0.020
人口	136	255	328	247	401	229	144
	133	265	383	260	397	250	196

単位 原単位: トリップ数/日, 人口: 人
 ※目的 A~H は Table 2 を参照

Table 2 比較的小さな需要規模のトリップ目的の種類

A	各種会合やイベント(週末や夏休みの学習講座や公民館での集いなど)への送迎
B	雨や雪の日に家族の送迎をする
C	病院への搬送(例: 急病の子供を小児科に連れていく)
D	銀行, 郵便局, 市役所での用事
E	美容院や理髪店
F	本屋・レンタルビデオショップへ行く
G	急な買い物で夜や早朝にスーパーやコンビニなどに行く
H	灯油を買いに行く

$$\sum_i \sum_j c_{ij}^* x_{ij} \rightarrow \min \quad (3)$$

$$\sum_j x_{ij} \geq 1 \quad (\forall i) \quad (4)$$

$$\sum_i x_{ij} \leq 1 \quad (\forall j) \quad (5)$$

ここに, 式(3)はトリップ需要の充足条件を, 式(4)は車両の配車制約 (1 台で複数の需要を充足できない) を表している. この問題の数値的解法としてはハンガリーのアルゴリズムが提案されている¹⁸⁾.

4. 事例分析

4.1. 対象地域および計算の想定

鳥取県のある地区にシステムを導入した場合を想定し, 必要となる車両の台数, 走行時間を最小化するモデルをそれぞれ計算する. なお, いかなる車両の割り当てにおいてもすべてのトリップ需要を満たすことを前提としているため, 最小化の対象となる走行時間は実質的には回送時間である. このため, 以後では, 走行時間最小化と回送時間最小化は区別なく用いる.

パーソントリップ調査および当該地区へのアンケート調査結果により平日一日あたりのトリップ需要の原単位を Table 1, 2 のように与えた. パーソントリップ調査に当該地区のデータがなかったため, 鳥取県内の別の都市のデータで代用した. パーソントリップ調査からは, 通勤, 通学, 買い物, 通院といった比較的大きな需要規模のトリップ目的, アンケート調査からは, 「各種会合やイベント(週末や夏休みの学習講座や公民館での集いなど)への送迎」「雨や雪の日に家族の送迎をする」「病院への搬送(例: 急病の子供を小児科に連れていく)」「銀行, 郵便局, 市役所での用事」「美容院や理髪店」「本屋・レンタルビデオショップへ行く」「急な買い物で夜や早朝にスーパーやコンビニなどに行く」「灯油を買いに行く」といった比較的小さな需要規模のトリップ目的の原単位を得た. これらについては, データの制約上, 10代と20代, 40代と50代の原単位は等しいものとして算出した. トリップの発生時間や目的地の分布についてもこのアンケート調査に基づいて設定した. 次いで, これらの原単位に当該地区の人口規模を乗じ, トリップ需要を想定した. 人口規模を Table 1 の最下行に記す.

この地区は, 通勤・通学は概ね 10km 圏内, 買い物は 5km 圏内であり, 道路に大きな渋滞は発生しない. また, この地区から 10 分圏内に大学や空港, 病院があることから, そのゾーンに車両の車庫があることを想定した. ま

た、車両は出庫した後にトリップ需要を充足するが、深夜には車庫に必ず帰還するものとした。

一日当たりの人々の総トリップ数は 7,594 トリップである。なお、現在においてはそれを 2,832 台でまかなっており、回送時間は当然のことながら 0 分であるが、実車の走行時間は 227,302 分である。

4.2. 計算結果と考察

それぞれのモデルの計算結果をTable 3に示す。なお、いずれのモデルにも複数の解がありうるため、例えば必要台数を最小化する場合には、必要台数の最小値を求めた上で、その値を所与として回送時間最小化のモデルを下位問題として求めた。回送時間を最小化する場合についても同様の考え方に基づいた。

必要台数最小化の計算結果より、少なくとも1,174台の車両があれば7,594トリップを充足しうることが明らかとなった。現在においては2,832台でトリップ需要を満たしていることから、それと比べて半数以下の台数があれば十分で対応できることが明らかになった。1台当たりのトリップ充足数では6.47トリップ/台であり、台数を抑えた運用を行えば1台で多くのトリップを満たしうると言える。ただし、必要台数最小化のもとでの1台あたりの回送時間は、回送時間最小化のそれと比べて2倍以上となっている。これは、必要台数最小化では少ない台数で所与のトリップ需要を満たさなくてはならないため、車両の回転を高めているためである。このことは、回送最小化における1台当たりのトリップ数が必要台数最小化のそれと比べて1/2程度となっていることから裏付けられる。

消費エネルギーについては回送時間が少ないほど望ましく、この時間がどの程度のエネルギー消費量に対応するのかについてはシステムが導入される時点でのエネルギー効率に依存する。ただし、現在における車両の走行時間が227,302分であるのに対して、システムの導入時におけるそれ（導入時においては回送が生じるため、実車と回送時間の合計）は少なくとも311,986分（回送時間最小化における回送時間を実車の走行時間に加えた値）であり、1.37倍の走行時間となっている。このため、走行時間の増分を相殺するほどのエネルギー効率を達成していなければ、環境負荷は増大するということが示される。逆に、システムの導入に伴う負荷を増大させないためには、1.37倍の走行時間の増加を相殺するエネルギー効率の改善技術が必要である。

実車、空車台数の数を時系列で整理したのが Fig.2 である。この図から、回送時間最小化においては朝の通勤・通学ピークの後のしばらくの間、車庫からの車両の供給が急増していることが分かる。これは、必要台数最小化においては出庫する台数を最小化するために通勤・通学

Table 3 計算結果

モデル	回送時間 最小化	必要台数 最小化
必要台数 (台)	2,054	1,174
回送時間 (分)	84,684	106,318
1 台当たりの回送時間 (分/台)	41.23	90.56
1 台当たりのトリップ 充足数 (トリップ/台)	3.70	6.47
1 トリップ当たりの回 送時間 (分/トリップ)	11.15	14.00

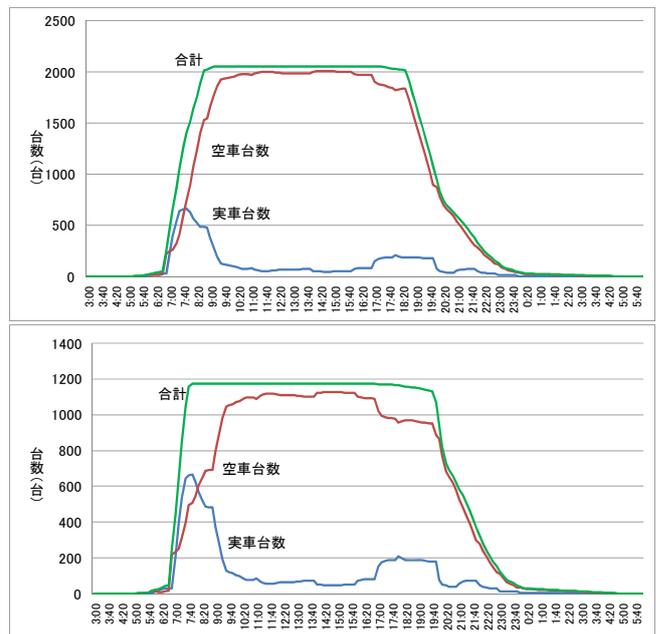


Fig. 2 実車、空車台数の時系列変化
(上/下段:回送時間最小化, 必要台数最小化)

のトリップ需要を充足した後にその車両を他の目的の充足のために回送するのに対し、回送時間最小化においては、回送時間を抑えるために台数の供給を増やすという運用が行われるためである。

4.3. 感度分析

本システムを導入した場合にはシステムそのものが交通行動に大きな変化をもたらすことが考えられ、トリップ原単位も現在のそれとは異なる可能性がある。そこで以下では、トリップの原単位を変化させて感度分析を行う。その際、通勤や通学、通院といった必須的な社会的活動のトリップよりは買い物のように選択的な活動の方がより大きな影響を受ける可能性があると考えられるため、買い物を対象として、その原単位を現在の1.5, 2.0倍とした場合について感度分析を行う。トリップ原単位を

Table 4 計算結果 (買い物目的のトリップ原単位 1.5 倍)

モデル	回送時間 最小化	必要台数 最小化
必要台数 (台)	2,075	1,174
回送時間 (分)	87,012	109,066
1 台当たりの回送時間 (分/台)	41.93	92.90
1 台当たりのトリップ 充足数 (トリップ/台)	3.95	6.90
1 トリップ当たりの回 送時間 (分/トリップ)	10.60	13.29

Table 5 計算結果 (買い物目的のトリップ原単位 2.0 倍)

モデル	回送時間 最小化	必要台数 最小化
必要台数 (台)	2,096	1,174
回送時間 (分)	90,036	112,540
1 台当たりの回送時間 (分/台)	42.96	95.86
1 台当たりのトリップ 充足数 (トリップ/台)	4.18	7.45
1 トリップ当たりの回 送時間 (分/トリップ)	10.29	12.86

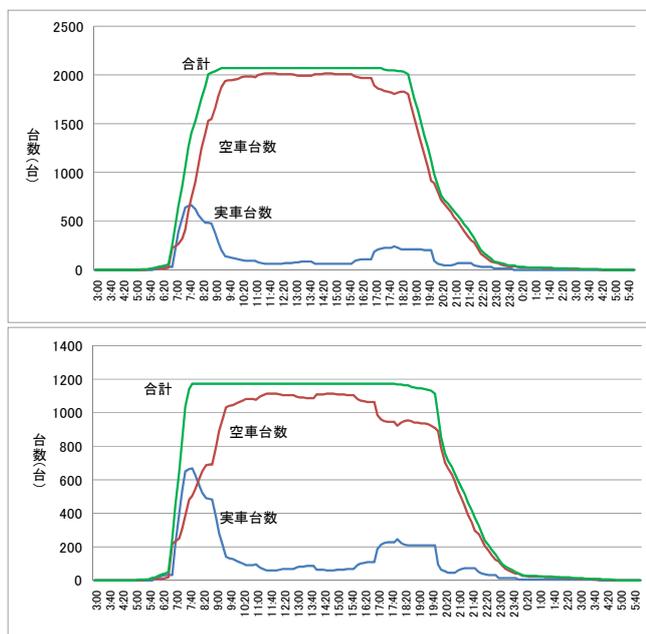


Fig. 3 買い物目的のトリップ原単位を1.5倍した場合の
実車、空車台数の時系列変化
(上/下段：回送時間最小化，必要台数最小化)

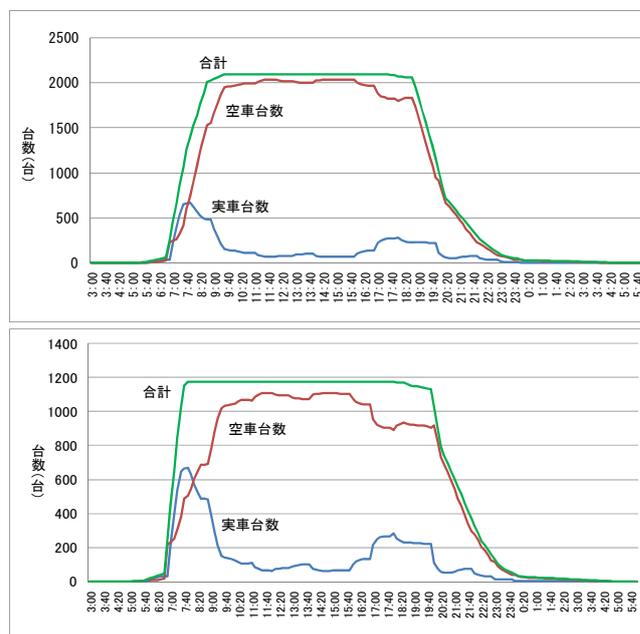


Fig. 4 買い物目的のトリップ原単位を2.0倍した場合の
実車、空車台数の時系列変化
(上/下段：回送時間最小化，必要台数最小化)

現在の1.5, 2.0倍とした場合の総トリップ数はそれぞれ 8,206, 8,752 トリップである (現在のトリップ原単位のもとでは7,594トリップである)。その結果, Table 4, 5およびFig.3, 4を得た。

これらによると, トリップ原単位が増えても, 必要台数最小化においては車両の台数がまったく変化しないことが分かる。回送時間最小化においても車両の台数は増えるもののその増加分はわずかである。これは, 必要台数は朝の通勤・通学のピーク時のトリップ需要でほぼ決定されており, それ以降の時間帯についてはピーク時に車庫を発った車両を運用すればトリップ需要が充足可能であるためと考えられる。実際, 買い物トリップが倍増しても通勤のトリップ原単位にはまったく及ばないことはTable 1から確認できる。

回送時間最小化においては, トリップ原単位が増えても, その増加分比べて回送時間の増加はわずかである。実際, 買い物目的のトリップ原単位を1.5, 2.0倍としても回送時間は1.03, 1.06倍になるだけである。

車庫を発った車両は, 朝のピーク以降の時間帯に (買い物のトリップ原単位が1.0倍である場合と比べて) より多くの需要を充足するよう運用がなされるため, 1台当たりの回送時間は増え, また, 1台当たりのトリップ充足数も増える。このことは, 必要台数最小化, 回送時間最小化に共通した傾向である。ただし, 1トリップ当たりの回送時間は原単位が増えると減少する結果となった。このことは, トリップ数の増加に比べて回送時間の増加が少ないことと等価である。この原因については以下のように考えられる。先述のように, 朝の通勤・通学の需要に

対応するために出庫した車両の台数は日中の需要を満たすのに十分である。このため、日中の買い物のトリップ数が増えても追加的な車両を多く出庫させる必要はなく、遊休状態となっている車両で買い物の需要を満たすことができる。また、今回の計算における地理的な条件により、車庫から車両を回送させる時間に比べてトリップ需要を充足して遊休している車両を回送させる方が短い場合が多く、回送時間を最小化するという意味においても買い物の需要の増加に対して追加的な車両を多く出庫させることは有利ではない。以上より、1トリップ当たりの回送時間は原単位が増えると減少する結果になったと考えられる。

Fig.3, 4には、感度分析における実車、空車台数の時系列変化を示しているが、Fig.2と比べて大きな定性的な変化は見られない。すなわち、買い物目的のトリップ原単位が増えても、一日における実車、空車台数の時系列変化には質的な変化は生じないものと考えられる。

以上より、通勤・通学の需要量やそのパターンが現在と変わらなければ、多少のトリップの増加に対するシステムの影響はほとんど変わらない。なお、この結果は、朝に通勤・通学のトリップ需要が大量に発生しているという検討地区の特徴によるためである。その特徴を有していない地区においては、時系列変化に質的な変化が生じる可能性があることに留意を要するものの、多くの都市において見られる特徴であるのも事実である。

通勤・通学で用いられた車両でその後の時刻に発生する様々な活動に割り当てていくという姿が分析によって明らかになったことを踏まえると、通勤・通学活動の時空間的な分布やトリップ需要量が本システムの環境負荷の支配的な要因と考えられる。このことから、本システムの環境影響を小さくするには、エネルギー効率だけではなく、都市もシステムに適合した構造にすることが有効となる。具体的には、人々の移動の範囲が小さい、通勤・通学先と居住地が近いといった構造が適していると考えられる。ただし、後者については、いわゆる職住近接ということではなく、ある人の通勤・通学目的地の周辺に別の人の居住地があるというように、ある人がトリップを終える場所が他の人にとってトリップを始める場所であるということに留意を要する。より一般的には、通勤・通学の目的地がある場所を起点として回送が少なくなるよう外出目的地と居住地が順次配列されている都市構造が望ましいということになる。

5. おわりに

本研究では、無人運転技術を用いた車両の共有システムが導入されたもとで、システムの運用に際して資源の

投入量および消費エネルギー量といった環境影響がどれほど生じるのかという二点に着目し、それらを定量的に評価するモデルを数理計画法を用いて検討した。具体的には、グラフ理論におけるマッチング問題、割り当て問題を援用して車両をトリップ需要に割り当てるモデルを構築した。その上で、鳥取県のある地区を対象にいくつかのモデルを想定して実証的に検討し、現在と比べてどれだけの環境負荷の増減が生じるのかを明らかにした。

また、買い物を対象としてトリップ需要が現在のそれよりも大きくなった場合について感度分析を行った。その結果、投入する資源や消費エネルギーに大きな変化がないことを明らかにした。また、その結果を踏まえ、通勤・通学の需要量やパターンがシステムの環境負荷に対して支配的であることを明らかにした。

ここでの計算結果はあくまで検討対象地区の都市構造のもとでの結果であり、それぞれのモデルの計算結果の差異は前提とする都市構造によって異なりうる。しかし、本システムに伴う環境負荷を減じるためには、本システムの特徴である車両の回送がなるべく生じない都市構造が有効であることは自明である。すなわち、ある人がトリップを終える場所が他の人にとってトリップを始める場所となるような構造である。現在の都市構造は、車両が回送されることを想定して形成されているわけではないことから、上記の構造が現在備わっているとは考えにくい。具体的に本システムのもとでどのような構造が望ましいのかは、今後の検討を要する事項である。

また、今回の計算は車庫が一箇所であるという想定であったが、より広い地域を対象として検討する場合にはその想定を変更する必要がある。例えば、域内に複数の車庫があるという想定が求められる。また、公共交通システムのように人々の乗りあいを認めることで移動の機会を効率的に確保する可能性も考えられる。いずれについても、モデルの定式化、計算方法等について拡張が必要となる。この点についても、今後の課題としたい。

本システムを実用化するには、本研究で焦点を当てた環境面に加えて様々な観点に基づいた社会的な影響の検討が必要となる。その一つとして、人々の生活パターンや交通行動の変化がある。無人運転技術のもとでは、人々が移動して財やサービスを調達せずとも財やサービスを移動させて調達することが可能になる。そうすると、人々は移動しないと調達できない場合のみに移動するということになるかもしれない。それに伴い、人々の間のつきあいのあり方やその変化に伴う副次的な問題が生じる可能性もあり、交通に限定されない幅広い分野から構成される学際的な研究が今後必要になると考えられる。

参考文献

- 1) 津川定之 (2006)「自動車の運転技術の変遷」,『自動車技術』, Vol.60, No.10, pp.4-9.
- 2) 田路龍吾 (2006)「先進安全自動車 (ASV) 推進計画について -第3期の主な内容と第4期の概要-」,『自動車技術』, Vol.60, No.12, pp.10-15.
- 3) 橋彰英, 田口康治 (2006)「実用に供された IMTS」,『自動車技術』, Vol.60, No.10, pp.29-33.
- 4) Buehler, M., Iagnemma, K. and Singh, S. (2007). “The 2005 DARPA Grand Challenge: The Great Robot Race”, Springer-Verlag.
- 5) 濱坂隆 (2008)「DARPA アーバンチャレンジ調査レポート」,『自動車研究』, Vol.30, No.3, pp.29-32.
- 6) 日刊自動車新聞記事, 2008.1.13.
- 7) 交通工学 (2001)「交通社会における新しいクルマの使われ方 -共同保有・共同利用の取組み-」, Vol.36, No.2, pp.1-42.
- 8) 平石浩之, 中村文彦, 大蔵泉 (2005)「カーシェアリング社会実験の現状と導入に向けた計画手法の課題」『土木学会論文集』, No.786/IV-67, pp.3-10.
- 9) Barth, M. and Todd, M. (1999). “Simulation Model Performance Analysis of Multiple Station Shared Vehicle System”, *Transportation Research Part C*, Vol.7C, pp.237-259.
- 10) 島崎敏一 (2001)「車輛共同利用システムの車輛配備台数の最適化」,『土木計画学研究・講演集』, No.24 (2), pp.309-312.
- 11) 下原祥平, 島崎敏一 (2001)「車両共同利用システムにおける車両の最適配車」,『土木計画学研究・講演集』, No.24 (2), pp.317-320.
- 12) 島崎敏一, 下原祥平 (2002)「車両共同利用の配車のシミュレーションモデル」,『土木計画学研究・講演集』, No.25, CD-ROM.
- 13) Nakayama, S., Yamamoto, T. and Kitamura, R. (2002). “A Simulation Analysis for the Management of an Electric-Vehicle Sharing System: The Case of the Kyoto Public-car System”, *Transportation Research Record* 1791, pp.99-104.
- 14) 中山晶一郎, 山本俊行, 北村隆一 (2002)「再配車によらない電気自動車の共同利用システムの効率化に関する研究」,『土木計画学研究・論文集』, Vol.19, pp.481-487.
- 15) 山本俊行, 中山晶一郎, 北村隆一 (2005)「再配車を用いない複数ステーション型自動車共同利用システムの挙動に関するシミュレーション分析」,『土木学会論文集』, No.786/IV-67, pp.11-20.
- 16) 竹内新一, 谷口栄一 (2005)「業務交通を対象としたカーシェアリング実証実験」,『土木学会論文集』, No.786/IV-67, pp.21-30.
- 17) 石坂哲宏, 福田敦 (2005)「大学キャンパスを中心とする電動アシスト自転車による共同利用の取り組み」,『土木学会論文集』, No.786/IV-67, pp.31-38.
- 18) アラン・ドーラン, ジョーン・オールダス(2003)『よくわかるネットワークのアルゴリズム』(大石康彦訳) 日本評論社.

謝辞

本研究の遂行においては、構想から計算に至る様々な面で(株)豊田中央研究所の中野道王氏に貴重なアドバイスをいただいた。また、アンケートの配布に際しては鳥取市末恒公民館館長に協力をいただいた。ここに感謝の意を表します。

ENVIRONMENTAL IMPACT BY COMMON VEHICLE SYSTEM WITH UNMANNED CRUISING SYSTEM

Keishi TANIMOTO¹, Syuhei KAWAMURA²

¹Dr. of Eng., Associate Professor, Department of Social Systems Engineering, Tottori University
(E-mail: tanimoto@sse.tottori-u.ac.jp)

²Department of Social Systems Engineering, Tottori University
(E-mail:m08t7008b@edu.tottori-u.ac.jp)

When unmanned cruising technique of vehicles is developed, new transportation society will be emerged. Given this technique, it is possible to design new system in which vehicles are used as common resources in the society to meet the trip demand without the drivers by automatic controller. However, this system may increase environmental burden. This study constructs the model to evaluate the environmental impact such as energy consumption by mathematical programming methods. Then the model is applied to case study area in order to analyze how the impact is and discuss how the impact is mitigated.

Key Words: Unmanned cruising technique, common vehicle system, assignment problem