

Thu. Jun 1, 2023

Room A

OS07 社会・環境・防災シミュレーション

[A-06] OS07 社会・環境・防災シミュレーション (6)

座長:北 栄輔(名古屋大学)

9:00 AM - 10:15 AM Room A (1F Conference Room 101)

[A-06-01] 沖縄交通デジタルツインの構築と観光課題への適用

*丹司 尊¹、内田 英明²、藤井 秀樹¹、吉村 忍¹ (1. 東京大学、2. 大阪大学)

9:00 AM - 9:15 AM

[A-06-02] EVを介した交通と電力のインフラ協調シミュレーション

*田中 瑞基¹、内田 英明²、吉村 忍¹、藤井 秀樹¹、丹司 尊¹ (1. 東京大学、2. 大阪大学)

9:15 AM - 9:30 AM

[A-06-03] 移動制約者を考慮したオンデマンドバス停留所の最適配置

*大島 航星¹、長谷川 浩志¹ (1. 芝浦工業大学)

9:30 AM - 9:45 AM

[A-06-04] レベル4の MaaS実現に向けた複合領域最適化の一試行

*小幡 快世¹、鈴木 隆介¹、長谷川 浩志¹ (1. 芝浦工業大学)

9:45 AM - 10:00 AM

[A-06-05] 渋滞吸収運転による交通渋滞緩和シミュレーション

Firdaus Sukarman¹、山田 修也¹、玉城 龍洋²、*北 栄輔¹ (1. 名古屋大学、2. 沖縄工業高等専門学校)

10:00 AM - 10:15 AM

OS07 社会・環境・防災シミュレーション

[A-07] OS07 社会・環境・防災シミュレーション (7)

座長:藤井 秀樹(東京大学)

10:30 AM - 11:30 AM Room A (1F Conference Room 101)

[A-07-01] 被災地の復旧フェーズを考慮した交通流シミュレーションに基づく深層強化学習による道路修復計画策定

*今井 星太¹、宮村 倫司¹ (1. 日本大学)

10:30 AM - 10:45 AM

[A-07-02] ミクロ交通流シミュレータへの CAV挙動の実装

*稲葉 陽樹¹、藤井 秀樹¹、吉村 忍¹ (1. 東京大学)

10:45 AM - 11:00 AM

[A-07-03] 高速道路合流部における動的ハイブリッド交通流シミュレーション

今井 陽¹、*藤井 秀樹¹、吉村 忍¹ (1. 東京大学)

11:00 AM - 11:15 AM

[A-07-04] 自動運転を考慮したワンウェイ型カーシェアリングの最適配置と可視化シミュレーション

*惣野 源也¹、長谷川 浩志¹ (1. 芝浦工業大学)

11:15 AM - 11:30 AM

OS07 社会・環境・防災シミュレーション

[A-06] OS07 社会・環境・防災シミュレーション (6)

座長:北 栄輔(名古屋大学)

Thu. Jun 1, 2023 9:00 AM - 10:15 AM Room A (1F Conference Room 101)

[A-06-01] 沖縄交通デジタルツインの構築と観光課題への適用

*丹司 尊¹、内田 英明²、藤井 秀樹¹、吉村 忍¹ (1. 東京大学、2. 大阪大学)

9:00 AM - 9:15 AM

[A-06-02] EVを介した交通と電力のインフラ協調シミュレーション

*田中 瑞基¹、内田 英明²、吉村 忍¹、藤井 秀樹¹、丹司 尊¹ (1. 東京大学、2. 大阪大学)

9:15 AM - 9:30 AM

[A-06-03] 移動制約者を考慮したオンデマンドバス停留所の最適配置

*大島 航星¹、長谷川 浩志¹ (1. 芝浦工業大学)

9:30 AM - 9:45 AM

[A-06-04] レベル4の MaaS実現に向けた複合領域最適化の一試行

*小幡 快世¹、鈴木 隆介¹、長谷川 浩志¹ (1. 芝浦工業大学)

9:45 AM - 10:00 AM

[A-06-05] 渋滞吸収運転による交通渋滞緩和シミュレーション

Firdaus Sukarman¹、山田 修也¹、玉城 龍洋²、*北 栄輔¹ (1. 名古屋大学、2. 沖縄工業高等専門学校)

10:00 AM - 10:15 AM

沖縄交通デジタルツインの構築と観光課題への適用

Construction of the Okinawa Traffic Digital Twin and Its Application to Sightseeing Issues

丹司尊¹⁾, 内田英明²⁾, 藤井秀樹³⁾, 吉村忍⁴⁾

Takashi Tanji, Hideaki Uchida, Hideki Fujii, and Shinobu Yoshimura

- 1) 学(工) 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: t_tanji@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp)
- 2) 博(工) 大阪大学大学院工学研究科 助教 (〒565-0871大阪府吹田市山田丘2-3, E-mail: uchida@see.eng.osaka-u.ac.jp)
- 3) 博(環境) 東京大学大学院工学系研究科 准教授(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: fujii@sys.t.u-tokyo.ac.jp)
- 4) 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: yoshi@sys.t.u-tokyo.ac.jp)

We have been constructing the Okinawa Traffic Digital Twin to solve multiple social problems related to traffics in Okinawa. For this purpose, we employ the microscopic multi-agent-based traffic simulator ADVENTURE_Mates, together with real data in Okinawa's traffic situation. As one of examples, we show simulations employing different route search algorithms including Eco-driving.

Key Words : Traffic digital twin, ADVENTURE_Mates, Route search, Eco-driving

1. はじめに

沖縄県は2018年度に国内700万人、外国人300万人の計1,000万人もの観光客が訪れ、7,340億円の観光収入を計上した[1]。さらに年々外国人観光客の人数も増加しており、さらなる盛り上がり期待される。一方、観光に関する様々な問題が生じている。沖縄旅行の満足度に関する調査結果によると、食事や宿泊施設、環境の美しさでは「大変満足」「やや満足」が9割を超えているのに対し、渋滞状況や運転しやすさなどについては6割程度に留まっており、交通状況が大きな観光課題となっている[2]。混雑の激しい地域では、損失時間が年間100万人時間以上になっており、観光客が訪れることのできる施設数も減少し、観光客消費額の損失にも影響を与えている。

沖縄本島での慢性的な渋滞の要因は「交通容量の不足」「交通需要の超過」の2つの軸で考えられる。沖縄の道路改良済み延長は、本土復帰以降2.65倍になり交通容量は増大している一方で、近年の道路整備費は減少傾向にある。加えて、沖縄には本島の面積の15%を占めるほど広く米軍基地が存在し、東西を結ぶためには広大な敷地を有する基地を迂回する必要がある。これらの事情から沖縄の交通容量は頭打ちとなっている。

交通需要を「域内の移動人数」「自動車の分担率」「経路選択率」の観点から検討する。沖縄県の人口及び入域観光客数は返還以降増加傾向にあり、域内を移動する人数は年々増加傾向にある。沖縄の公共交通はモノレール、タクシー、バスのみであり、近年はバス専用レーンが整備され改善されたもののバスは道路混雑により定時性が失われている。また、沖縄都市モノレール線は那覇空港からてだこ浦西までの限られた地域でのみ運行している。自転車の普及率も起伏の多さ、気候の変わり易さ、気温の高さから全国基準でも極めて低いため、自動車の分担率が非常に高く、全国平均が66%程度であるのに対し沖縄では90%を占めている[1]。

最後に「経路選択率」の観点から検討する。「経路選択率」とはある地点からある地点へ移動する際に特定の経路を選択する割合を指し、特定の経路のみを全員が選択する場合にその経路の経路選択率は100%、その他の経路の経路選択率は0%となるようなものと定義する。沖縄には数多くの道路が存在しているが、南北を結ぶ三本の主要道路のうち沖縄自動車道のみ交通需要が低いなど経路

選択率の偏りが起こっている。バイパスに関しても新たなバイパスができたことにより自動車が集中し、他の経路は空いているにも関わらず混雑が起こる事態が生じている。以上の理由から交通需要が増大しており、その結果沖縄では渋滞が慢性化している。

沖縄における交通の不便さは、沖縄観光の大きな障壁になっており改善が急務である。本研究では沖縄観光を促進するため交通問題の解決策を検討するための基盤を整備し、特に「慢性的な交通渋滞」の解消により域内移動を効率化することを目的とする。

具体的には、著者らの研究室で長年研究開発を進めているマルチエージェントモデルに基づくマイクロ交通シミュレータであるADVENTURE_Mates（以下MATESと呼ぶ）[2][3]を用いて沖縄の交通状況を再現し（沖縄の交通デジタルツインの構築）、渋滞軽減の糸口を探る。MATESにおいては、道路空間は信号、速度制限や一方通行も再現されており高い精度で道路環境を再現できる。個々の車両エージェントは経路探索を行い移動するため、経路探索の方法による交通状況の変化を観測する本研究での活用に適している。車両エージェントはエージェント毎に設定された出発地から発生し、目的に到着すると消滅する。その際の経路は、移動距離、移動時間、右左折回数、車線数を重み付けして足し合わせたコストが最小化するようにA*アルゴリズムを用いて探索する。

先に述べたように、沖縄本島の交通渋滞の原因には、「道路整備予算の減少」「米軍基地の存在」「沖縄の人口及び入域観光客数の増加」「自動車分担率の高さ」「経路選択率の偏り」などが複合的に影響を及ぼしているが、本研究では「経路選択率の偏り」に着目し、「低燃費経路」という経路に自動車を誘導することで経路選択率を変化させ、それが交通にどのような変化があるかを評価する。

2. 沖縄本島の交通の再現

2.1 手法の概要

まずオープンソースであるOpenStreetMapのデータを用いて沖縄本島全域の交通網を再現する。加えて、燃費を計算するためには道路勾配の情報も必要であることから、各ノードの標高を取得し入力する。信号の現示パターン

や秒数のデータについては、いずれは地元警察より提供いただけるように交渉する予定であるが、本研究では、第一ステップとして、著者らが実際に沖縄に赴き、主な交差点をピックアップし計測して、その結果を用いた。交通量については、レンタカーの交通量と乗用車の交通量を分けて設定し、レンタカーの交通量はレンタカーのプロープデータ等から推定したものを、乗用車の交通量は平成27年の交通センサスのデータを用いた。

2.2 道路ネットワークの設定

沖縄本島の交通ネットワークは、OpenStreetMap から取得したデータを ADVENTURE_Mates のデータ形式に変換して用いる。表1に示すように、3種類の詳細度の道路ネットワークを用意した。図1にはネットワーク1を示す。

表1 再現レベルを変えた道路ネットワーク

道路	ネットワーク		
	1	2	3
道路レベル			
自動車専用道、高速・有料道路	○	○	○
高速道路への接続路	○	○	○
国道で、主要道路のうち、高速道路でないもの	○	○	○
国道への接続路	○	○	○
地方自治体に管理されている主要道路	○	○	○
主要道への接続路	○	○	○
補助的な主要道路など	○	○	×
一般道(2車線以上)	○	×	×
一般道(2車線未満)	×	×	×
居住区域内道路	×	×	×
ノード数	11560	6292	4462
リンク数	12850	6641	4650

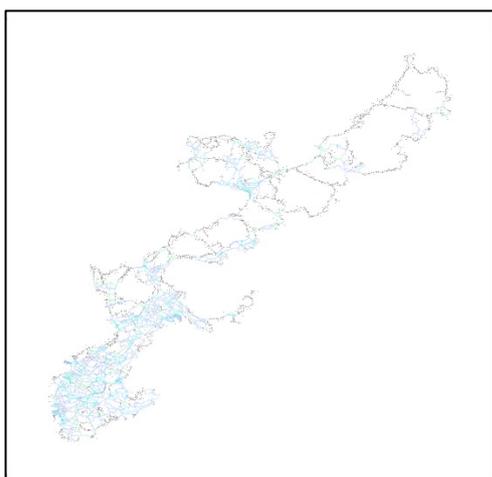


図1 沖縄の交通ネットワーク1

2.3 標高の設定

燃費を計算するためには道路の傾斜角が必要になる。しかし、OpenStreetMapには標高データが存在しない。そこで、国土地理院の標高APIを用いて標高データを取得した。国土地理院の標高データのデータソースは等高線から得られた10m DEM (Digital Elevation Model) データであり、10m四方の正方形の中心に標高データを持たせた形式である。

2.4 信号の設定

現実の信号現示データは公開されていないため、一部の交差点を除き MATES が保有するテンプレートの信号データを用いる。テンプレートは交差点の数によって異なり、2叉路から6叉路までの5パターンを用意する。一方、観光地周辺と沖縄地方渋滞対策推進協議会の発表する主要渋滞箇所を中心

に61箇所のデータを抽出し、現地で計測しデータを取得し実装した。

2.5 交通量の設定

沖縄本島の交通量をレンタカーとレンタカー以外に分けて設定する。レンタカー以外には乗用車類、小型貨物車、普通貨物車が含まれ、国土交通省道路局企画課道路経済調査室より提供していただいた平成27年の全国道路・街路交通情勢調査の自動車起終点調査の結果を利用する。ODデータは本島を199のエリアに分割し、そのエリア間の1日の交通量をまとめた。各エリア内のノードをODノードとして設定し、すべての交通量が199個の点から発生・消滅するように設定した。ただし、出発ノードと到着ノードが同一の場合にはエラーになるため、同一エリア間のODデータには別のサブODノードを設定し対応した。表2にトリップ数を示す。

表2 自家用車のトリップ数

種別	トリップ数
乗用車類	1,569,428
小型貨物車	343,601
普通貨物車	107,384
全車種計	2,020,413

全国道路・街路交通情勢調査の自動車起終点調査ではレンタカーを調査対象としていないため、レンタカーの交通量に関しては、一般財団法人計量計画研究所が推計を行ったレンタカーODデータを用いた。

2.6 交通量の妥当性検証

設定した交通量の妥当性検証には、リンク交通量が実際の交通量と一致するかどうかを確認した。比較にあたり、図2に示す11箇所のリンク交通量を用いた。

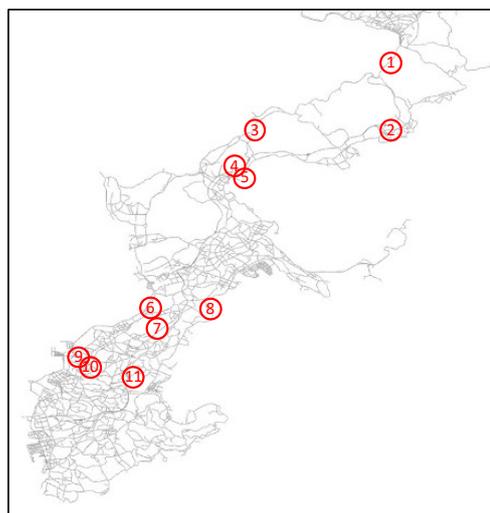


図2 検証するリンク交通量の場所

シミュレーションを1日行い、各リンクの交通量を求め、実測値のリンク交通量と比較した。その結果を表3に示す。ただし、このシミュレーションにおいては、自動車エージェントは最短距離経路優先で探索を行うこととした。

表3 各リンクの交通量の比較

リンク	リンク交通量		誤差
	実測値 [台/日]	シミュレーション[台 /日]	
1	41,742	43,343	4%
2	11,610	10,015	-14%
3	17,959	18,758	4%
4	30,285	25,427	-16%
5	14,461	13,683	-5%
6	31,589	33,569	6%
7	25,451	12,751	-50%
8	27,461	30,629	12%
9	22,086	23,021	4%
10	13,884	12,225	-12%
11	37,135	23,352	-37%

表3より実測値とシミュレーションのリンク交通量は、概ね誤差15%以内に収まっているものの、リンク4、7、11においては実際よりも少ない値となっている。リンク4、7、11はすべて沖縄自動車道（高速道路）上のノードである。この理由としては、高速道路を利用した経路が最短距離経路ではないものの最短時間経路である場合に、最短時間経路を選好するドライバを再現できていないことが考えられる。一方、その他のリンクにおいては、沖縄の交通量をほぼ良好に再現できていることが確認できた。

3. 低燃費経路による交通状況の変化

2章で構築した沖縄交通デジタルツインを用いて、低燃費経路に自動車を誘導することにより、交通状況がどのように変化するかをシミュレーションする。ドライバが目的地まで移動する際の経路としては、「時間がかからない経路」「交通料金が安い経路」「ガソリン代がかからない経路」などが中心であるが、近年では環境への配慮も重視されておりガソリン代のかからない環境負荷の小さいルートへの需要も高まっている。

3.1 燃費・電費の算出方法

本研究では以下に述べる燃費・電費の推定モデルを用いる。燃費は消費した燃料に対して走行した距離を指し、[km/l]の単位で表される。 W_{all} を走行エネルギー、 d [km]を走行距離、 η をエンジンの熱効率、 G [M]/lをガソリンの標準発熱量とすると、燃費 FC は次式で表される[9]。

$$FC[\text{km/l}] = \frac{\eta G d}{W_{all}} \quad (1)$$

また、走行エネルギーは転がり摩擦抵抗 F_{roll} 、慣性抵抗 F_{ine} 、空気抵抗 F_{aer} 、勾配抵抗 F_{gra} を用いて以下のように表される。また、加速エネルギーが負の際には加速エネルギーは0として計算する。

$$W_{all} = (F_{roll} + F_{ine} + F_{aer} + F_{gra})v\Delta t \quad (2)$$

$$F_{roll} = \tau mg \cos\theta \quad (3)$$

$$F_{ine} = (1+k)ma \quad (4)$$

$$F_{aer} = \frac{1}{2}\rho C_d A v^2 \quad (5)$$

$$F_{gra} = mg \sin\theta \quad (6)$$

ここで、 τ は転がり摩擦係数、 m は車重、 g は重力加速度、 θ は勾配角、 k は回転部慣性質量係数、 ρ は空気密度、 C_d は空気抵抗係数、 A は前面投影面積、 v は車速である。

電費は、一定の距離を走行するために消費した電力量を指し、[Wh/km]の単位で表される。走行エネルギーに関しては電気自動車EVに関してもガソリン車と同様の式を利用することができるが、EVには回生という機能があり、これは下り坂などで加速度が負である際にモータを逆回転させることで運動エネルギーから電気エネルギーを生み出す機能である。そのため、EVの電費 EC はガソリン車と異なり走行エネルギーが非負かどうかで分かれた以下の式で表される。

$$EC = \begin{cases} \frac{1}{\eta_{ev}}(F_{roll} + F_{ine} + F_{aer} + F_{gra})SOC & (\text{走行エネルギーが非負}) \\ \eta_{ev}(F_{roll} + F_{ine} + F_{aer} + F_{gra})R(a) & (\text{走行エネルギーが負}) \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 η_{ev} は機械損失率、 SOC は充電残量、 $R(a)$ は回生率、 a は加速度を表す。また、回生率は以下の式で表される。

$$R(a) = \left(\exp\left(\frac{0.0411}{|a|}\right) \right)^{-1} \quad (a < 0) \quad (8)$$

以上の式から、ガソリン車・EVともに車重や前面投影面積などの車両の属性に加えて、経路での速度、傾斜角、加速度がわかれば燃費と電費を計算することができる。なお、電飾やエアコンによる消費エネルギーも生じるが、カタログ値に考慮されないため、本研究でも考慮しない。

3.2 計算式の妥当性検証

前節で述べた燃費と電費の計算式の妥当性検証を行う。カタログ値の燃費はWLTCモード[4]で測定されるため、本研究でもWLTCモードでの検証を行った。WLTCモードとは、「市街地(Low)モード」「郊外(Medium)モード」「高速(High)モード」「超高速(Extra-high)モード」から構成される速度プロファイルで走行させた場合の燃費を算出するものである。なお日本では超高速モードでの計測は不要とされているため、「市街地モード」「郊外モード」「高速モード」で走らせた際の計算値とカタログ値を比較した。車両パラメータには、ガソリン車はトヨタのパッソ、電気自動車は日産のリーフのデータを用いた。その結果を表4、表5に示す。これらは車両カタログの諸元表及びパラメータチューニングから得た値である。

表4 ガソリン車(トヨタ パッソ)のパラメータ[5]

空気密度[kg/m ³]	1.204
空気抵抗係数	0.28
投影面積[m ²]	1.79
転がり抵抗係数	0.018
重量[kg]	1101.25
回転部慣性質量係数	0.34
エンジンの熱効率	0.3
ガソリンの標準発熱量[MJ/L]	33.37

表5 電気自動車(日産リーフ)のパラメータ[6]

空気密度[kg/m ³]	1.204
空気抵抗係数	0.28
投影面積[m ²]	2.47
転がり抵抗係数	0.0129
重量[kg]	1811.25
回転部慣性質量係数	0.25

機械損失率	0.83
SOC	1 (固定)

このパラメータ及びWLTCモードの速度プロファイルに沿ってガソリン車と電気自動車を走らせた際の燃費と電費はそれぞれ表6と表7のようになった。

表6 ガソリン車の燃費のカタログ値と計算値

	カタログ値	計算値
市街地 (Low) モード	15.7[km/ℓ]	18.4[km/ℓ](+14%)
郊外 (Medium) モード	20.4[km/ℓ]	18.3[km/ℓ](-12%)
高速 (High) モード	20.5[km/ℓ]	19.6[km/ℓ] (-5%)

表7 電気自動車の電費のカタログ値と計算値

	カタログ値	計算値
市街地 (Low) モード	133[Wh/km]	138[Wh/km](+4%)
郊外 (Medium) モード	145[Wh/km]	146[Wh/km](+1%)
高速 (High) モード	171[Wh/km]	155[Wh/km](-9%)

ガソリン車では、市街地モードではカタログ値よりも燃費がよく、郊外モードと高速モードではカタログ値より燃費が悪化した。これは低速で走行している間は効率の良いエンジンの回転域に到達しないことが原因であり、本シミュレーションでは回転数によらず熱効率が一定であるとしたことによる誤差である。

EVに関しては、実際よりも燃費がややよくなっている。この原因は「SOCを1で固定していること」「走行抵抗以外の消費エネルギーを考えていないこと」などが挙げられる。SOCは本来消費エネルギーとともに減少し、それに伴い消費電力も変化する。走行抵抗以外の消費電力に関しては、ライトなどの電飾やエアコンなどの消費が考えられる。とはいうものの、ガソリン車、電気自動車どちらにおいても計算式により燃費、電費を15%以内の誤差で求めることができていることが確認された。

なお、今回は、平成26年時点での電気自動車普及率は1,000世帯あたり52台と全国平均の半分以下であり、あまり浸透していなかった[7]ため、すべての車両エージェントをガソリン車として実装し、数値実験を行った。

3.3 低燃費経路選択アルゴリズムの実装

次に、低燃費経路選択アルゴリズムを実装した。MATESでは、リンクの端点において接続するリンクが1本であるノードがODノードに選ばれる。車両の発生や消滅はすべてODノードで行われる。現状のMATESの経路選択は内生的なものであり、シミュレーションの内部状態によって経路が決定する。各経路は各車両エージェントが一般化コストを最小化するように最適経路探索アルゴリズムによって経路探索し走行する。MATESでは最適経路を探索するアルゴリズムとしてA*アルゴリズムを採用しており、一般化コスト $C(r)$ を次式に示す。

$$C(r) = \sum_{i \in L_r} \frac{w_a d_i}{16.7} + w_t t_i \quad (9)$$

ここで、 L_r は経路 r が通過予定のリンクの集合、 $d_i[m]$

はリンク i の道のり、 $t_i[s]$ はリンク i を通過するための所要時間であり、 w_a と w_t は重み係数である。16.7は16.7m/sすなわち時速60kmに由来しており、経路選択時に各リンクを車両は時速60kmで通過するものと仮定している。リンクを通過するための所要時間 $t_i[s]$ は直近100秒にリンク i を通過した車両の平均所要時間を用いる。今回は一般化コストに式(10)に示す燃料消費量のパラメータを追加し低燃費経路選択アルゴリズムを実装した。

$$C(r) = \sum_{i \in L_r} \frac{w_a d_i}{16.7} + w_t t_i + w_{fc} \frac{W_{all}}{\eta G} 10^6 \quad (10)$$

ここで、 w_{fc} は燃料消費量の重み係数であり、本研究では距離優先や時間優先のパラメータと同時に用いることはないため、 w_t と w_a のどちらかが1の際には $w_{fc} = 0$ 、 $w_{fc} = 0$ の際には w_t と w_a のどちらも0となる。

4. 沖縄での低燃費経路の有用性分析

すべての自動車が低燃費経路選択アルゴリズムを選択した場合と距離優先アルゴリズムを選択した場合でシミュレーション結果(シミュレーション時間は8時間)がどのように変化するかを検証する。なお、低燃費経路選択が渋滞改善に寄与するかは全車両の平均速度及び主要渋滞箇所うちの51箇所における交通量、渋滞長、平均速度を比較し評価する。結果を表8と、図3~5に示す。

表8 低燃費経路選択の有無による結果の比較

	低燃費経路選択	最短距離経路選択
シミュレーション時間	480min	480min
のべ車両数	431,498台	411,365台
平均旅行距離	19.0km	22.3km
平均旅行時間	56.3min	58.0min
平均速度	20.2km/h	23.1km/h

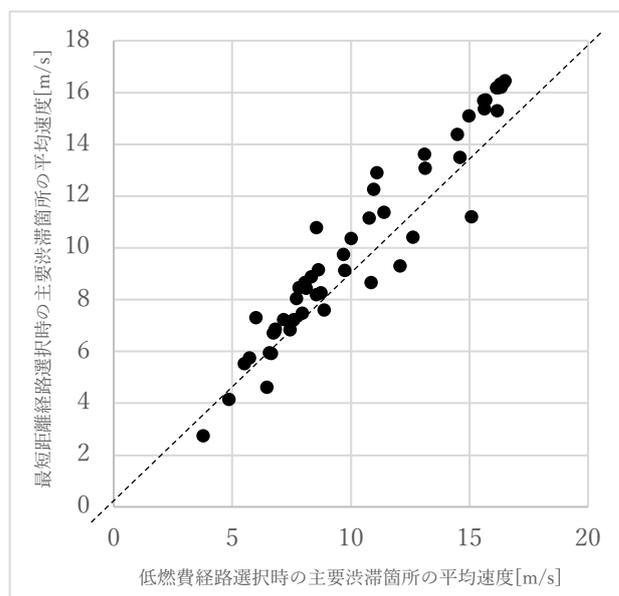


図3 最短距離選択時と低燃費経路選択時の主要渋滞箇所の平均速度

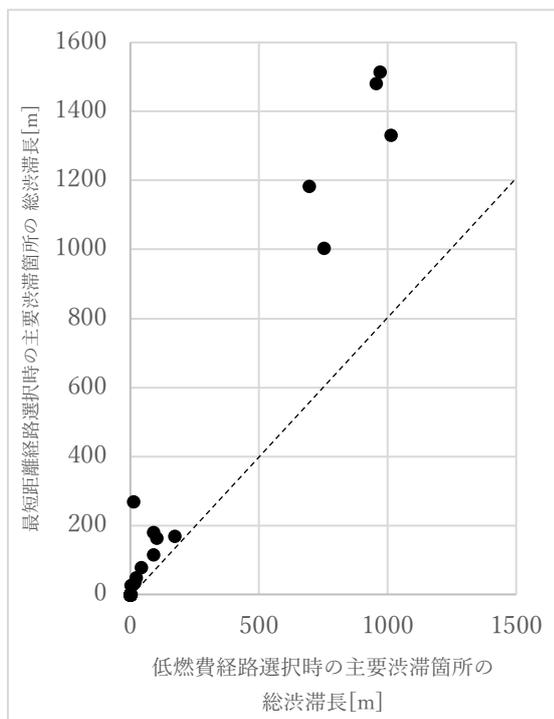


図4 最短距離選択時と低燃費経路選択時の主要渋滞箇所
の総渋滞長

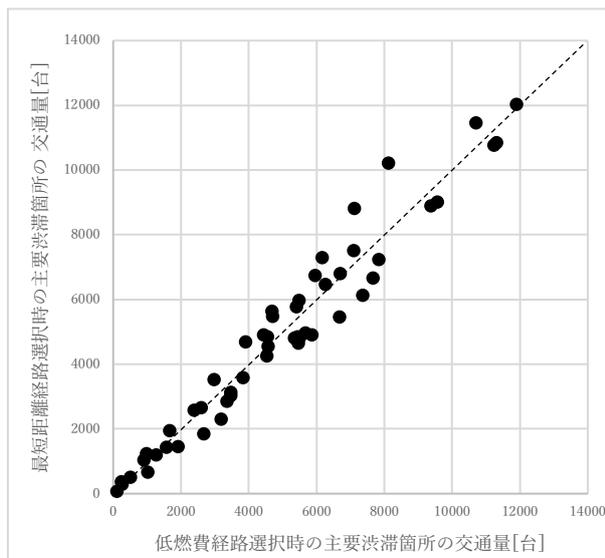


図5 最短距離選択時と低燃費経路選択時の主要渋滞箇所
の交通量

表8を見ると、低燃費経路選択では低燃費経路では平均速度は14%ほど増加するが、混雑を避け迂回するため平均旅行距離が17%ほど長くなる。図3~5は最短距離選択時と低燃費経路選択時の主要渋滞箇所の平均速度、総渋滞長、交通量を表しており、経路選択によって平均速度と交通量は大きく変化しないものの、渋滞長が43%改善していることがわかる。那覇市近辺は主要渋滞箇所が多く、それらすべてを回避して経路を選ぶことは不可能に近いため主要渋滞箇所での渋滞を完全になくすことはできず、平均速度や交通量からも渋滞が依然として発生していることがわかる。しかし、渋滞長を見比べると大幅に改善しており、低燃費経路選択によって渋滞の発生を防ぐこと

はできないが渋滞の程度を4割程度軽減する効果があることが示唆された。

5. おわりに

本研究では沖縄本島の交通ネットワーク、標高、信号、交通量を入力することにより、沖縄本島の交通状況を再現できる交通デジタルツインを構築した。これを用いて沖縄本島をまるごとシミュレーションできるようになり、渋滞軽減をはじめ、MaaSの検証、電気自動車のCSの配置、デマンドバスの経路探索など様々な交通問題を検証する上での基盤を整備することができた。

構築した沖縄交通デジタルツインに低燃費経路選択アルゴリズムを実装することにより、低燃費経路選択が渋滞軽減へ寄与するかを検証した。低燃費経路を選択することによって完全に渋滞を防ぐことは不可能であったが、渋滞長を4割程度減少させ、渋滞の程度を軽減する効果があることを示すことができた。

今後は交通に関連する幅広いジャンルに本手法を適用していく。

謝辞

本研究を推進するにあたり、琉球大学の富山潤教授、神谷大輔教授、一般財団法人計量計画研究所の北村清州様、沖縄総合事務局の村田太紀様に、意見交換やデータ提供など様々な場面でご協力いただきました。記して謝辞を申し上げます。

参考文献

- [1]沖縄県，“平成30年版観光要覧”，2019
- [2]S. Yoshimura, “MATES : Multi-Agent based Traffic and Environment Simulator -- Theory, Implementation and Practical Application”, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, Vol. 11, No. 1, p. 17-26, 2006
- [3]吉村忍, 西川紘史, 守安智, “知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATESの開発”, *シミュレーション*, Vol. 23, No. 3, pp. 228-237, 2014
- [4]国土交通省, “乗用自動車等の国際調和排出ガス・燃費試験法 (WLTTP) の概要について”, 2015
- [5]トヨタ自動車, “トヨタ パッソ 主要諸元表”, https://toyota.jp/pages/contents/pass0/003_p_002/4.0/pdf/spec/pass0_spec_202208.pdf
- [6]日産自動車, “日産リーフ 主要諸元”, https://www3.nissan.co.jp/content/dam/Nissan/jp/vehicles/leaf/2109/pdf/leaf_specsheet_01.pdf
- [7]沖縄県企画部統計課, “平成26年全国消費実態調査 (沖縄県版) 主要耐久消費財に関する結果 結果の概要”, 2014

EVを介した交通と電力のインフラ協調シミュレーション

Simulation of infrastructure coordination between transportation and electricity via electric vehicles

田中瑞基¹⁾, 藤井秀樹²⁾, 内田英明³⁾, 丹司尊⁴⁾, 吉村忍⁵⁾

Mizuki Tanaka, Hideki Fuji, Hideaki Uchida, Takashi Tanji and Shinobu Yoshimura

- 1) 学(工) 東京大学大学院工学系研究科(〒113-0023 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: m_tanaka@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp)
 2) 博(環境) 東京大学大学院工学系研究科 准教授(〒113-0023 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: fujii@sys.t.u-tokyo.ac.jp)
 3) 博(工) 大阪大学大学院工学研究科 助教 (〒565-0871大阪府吹田市山田丘2-3, E-mail: uchida@see.eng.osaka-u.ac.jp)
 4) 修(工) 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-0023 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: t_tanji@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp)
 4) 工博 東京大学 工学系研究科 教授(〒113-0023 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: yoshi@sys.t.u-tokyo.ac.jp)

With the spread of variable renewable energy sources such as wind and solar power, a low-cost leveling method has been proposed by utilizing EVs as storage batteries. To achieve this, it is necessary to coordinate transportation and electric power, and for this purpose, a coupled simulation that unifies transportation and electric power is important. In this study, a coupled simulator that links an existing traffic simulator and an electric power simulator is constructed, and the extent to which EVs actually affect both is examined.

Key Words : EV, Transportation, Electric power, Coordination simulation

1. はじめに

近年, 地球温暖化に伴う異常気象が全世界における課題となっており, その原因となる二酸化炭素に代表される温室効果ガスの排出量を減らすことが共通目標となっている. そのため, 太陽光発電をはじめとした変動型再生可能エネルギー (Variable Renewable Energy [VRE]) の導入が促進されている[1].

変動型再生可能エネルギーは発電量が時間帯や天気等に大きく依存して変動するため, その大量導入は, 需給バランスが必須となる電力系統に不安定をもたらすことが懸念されている. 電気自動車(electric vehicle, EV)を蓄電池として活用して, 低コストで電力需給の平準化を図り電力系統の安定性を向上させる手法が提案されている[2].

今後EVを介した道路交通網と電力系統間での相互の結びつき(インフラ協調)がより強くなると考えられている. EVが双方に与える影響を評価するには交通網のメカニズムと電力系統のメカニズムを一元的に考えることが必要となる.

本研究では, 著者らの研究室で開発してきている知的マルチエージェント交通流シミュレータ ADVENTURE_Mates (以下MATES) [3]と米国電力研究所EPRIが開発し公開している電力シミュレータOpenDSS (Open Distribution System Simulator) [4]とを組み合わせることで道路交通網メカニズムと電力系統メカニズムに与える影響を一元的に評価する連成シミュレータを構築することを目的とする.

2. 手法

(1) MATES

MATESは車両移動を詳細に表現することが可能なミ

クロ型交通流シミュレータである. MATESではマルチエージェント等の交通主体はエージェントとして実装され, それらは周囲の状況を知覚し自律的に行動する. そして, エージェント1つ1つの行動が周囲に存在するエージェントに影響を与えるという環境を構築している. これにより, エージェント間での相互作用を実現し, 複雑な交通現象の再現が可能となっている.

本研究では, 従来のMATESに対してEVのバッテリー容量出力, 充電ステーション (charging station, CS) における充電行動を追加実装したバージョンを使用した[5].

(2) OpenDSS

OpenDSSはEPRIによって開発された配電シミュレータであり, 現状及び将来の配電システムの課題に対応するために作られた柔軟でカスタマイズ可能なプラットフォームを利用し, エンジニアが複雑な分析を行うことを可能としている.

OpenDSSの内部では潮流計算が行われている. 潮流計算とは, 電力系統においてそれぞれの発電機から供給される電力が送電線や変圧器を通してそれぞれの負荷に流れていく状態を求める計算であり, 以下の式を用いて計算される. ここで Y_{system} は各回路に固有の行列, V_n は n 回目に計算された電圧, $I_{\text{PC}}(V_n)$ は V_n をもとに計算される電流である.

$$I_{\text{PC}}(V_n) = Y_{\text{system}} V_n \quad (1)$$

$$V_{n+1} = [Y_{\text{system}}]^{-1} I_{\text{PC}}(V_n) \quad (2)$$

V_n の値が収束するまで繰り返し計算され, それにより得られた値を V として出力する.

(3) 連成手法

連成シミュレーションを行う際には、2つのシミュレータ間でファイルの受け渡しを行う必要がある。EVが充電を行うと充電器部分の運用条件が変化し、その結果潮流計算の計算結果が変化する。そして、その計算結果をもとに充電料金にインセンティブをかける等の行為により経路選択部分に影響が生じる。本研究ではこのフローをもとに連成シミュレータを構築しており、これをまとめたものが図1および図2である。

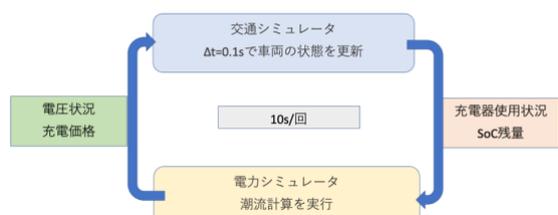


図 1 データ連携の概要

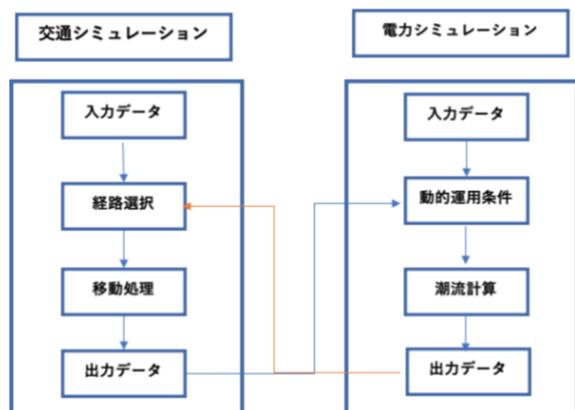


図-2 シミュレーションフロー

3. シミュレーション設定

(1) MATES

MATESを実行する際にはEVエージェントに関連する情報を設定する必要がある。実際のEV車両に基づき表1のように設定している。

表 1 EV エージェント諸元表

車両総重量	1811.25[kg]
転がり摩擦係数	0.00129
空気密度	1.204[kg/m ³]
空気抵抗係数	0.28
前面投影面積	2.47[m ²]
最終減速比	8.193
駆動系効率	0.87
充電容量	62[kWh]
一充電走行距離	458[km]

(2) OpenDSS

潮流計算を行うOpenDSSにおいては変圧器が導入されており、現実的でない電圧が出力されないように電圧の上限・下限が設定されている。そのため、実データに基づくデータを入力することが必要となる。今回はCREST126モデル[6]を利用し、それに基づくネットワークを図3のように作成した。

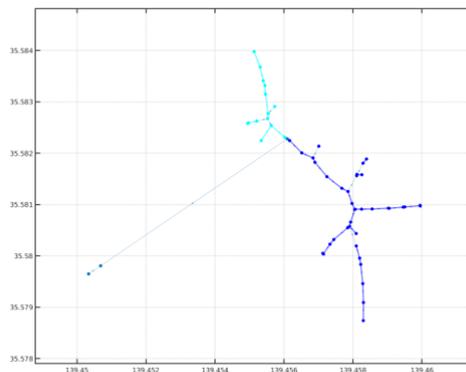


図 3 電力ネットワーク

ここで、各ノードは高圧需要家と対応しており、本研究ではこれを急速充電器として扱っている。MATESではこれに対応する道路ネットワークを構築した。

4. 結果

連成させない状態で電力シミュレーションを用いて計算した電圧の値が図4であり、連成させてシミュレーションを実行したものが図5である。ここでいずれも横軸は時間、縦軸は電圧を意味しており、各線が需要家の電圧に対応している。

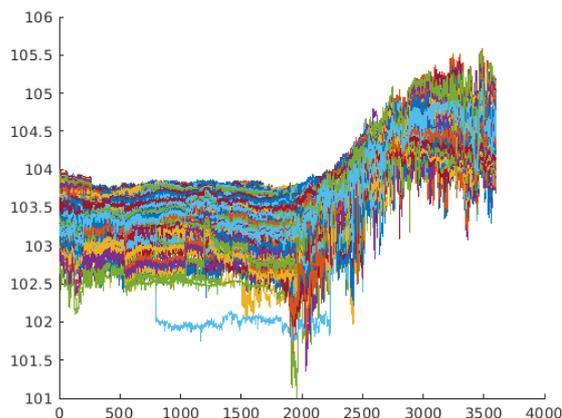


図 4 無連成状態における電圧変化

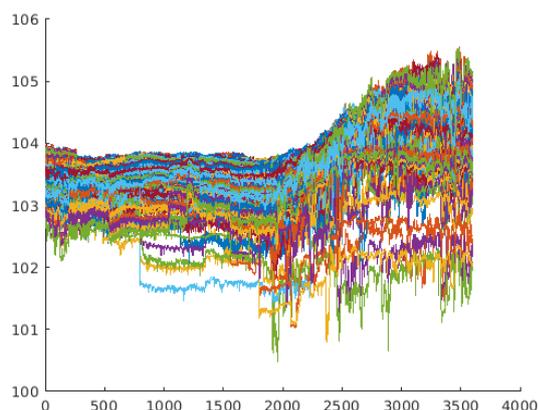


図 5 連成シミュレーションにおける電圧変化

図4と図5を比較すると、2000ステップ程度までは大きな違いはないものの、時間が経過するにつれ需要家ごとの電圧の値にズレが生じていることがわかる。これは鍊成シミュレータにおいては、充電行動を開始するEVエージェントが多くなったことで利用されている充電器では電圧降下が生じているためであると考えられており、EVが電力システムに与えている影響を再現することができていると考えている。

5. まとめ・今後の展望

今回はCREST126モデルをベースとした簡単なネットワークを作成し、それに対する連成シミュレータの実装及びその動作確認を行った。

今後は相互作用の部分に関しての感度解析を行なった上で、実地域の道路ネットワークに対して適切に電力ネットワークを対応させることで、その地域全体に対して連成シミュレータを実装し、EVの影響を評価したい。

参考文献

- [1] 小島康弘: 再生可能エネルギー導入を支える蓄電池制御技術. 計測と制御, Vol. 55, No. 7, pp. 609-612, 2016.
- [2] Zhang B., *et al.*: Optimized Operational Cost Reduction for an EV Charging Station Integrated With Battery Storage and PV Generation, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol.10, pp.2096-2106, 2019.
- [3] 内田英明ら: マルチエージェント交通流シミュレーションにおける充電を考慮したEVの経路選択, 人工知能学会論文誌, Vol. 32, No. 5, pp.AG16-I_1-9, 2017.
- [4] Q Hu., *et al.*: The Prediction of Electric Vehicles Load Profiles Considering Stochastic Charging and Discharging Behavior and Their Impact Assessment on a Real UK Distribution Network. *ScienceDirect*, Vol158, p.6458-6465, 2019.
- [5] H. Uchida, H. Fujii, S. Yoshimura. "Multiagent Coupled simulation of a Transportation System and Power Grid." 2018 21st International Conference on Intelligent

Transportation Systems (ITSC), pp.460-466, 2018.

- [6] 早稲田大学スマート社会技術融合研究機構
<https://www.waseda.jp/inst/across/news/501>.

移動制約者を考慮したオンデマンドバス停留所の最適配置

Optimal Placement of On-demand Bus Stops for Persons with Mobility Constraints

大島航星¹⁾, 長谷川浩志¹⁾

Kosei Oshima and Hiroshi Hasegawa

1) 芝浦工業大学 大学院理工学研究科 システム理工学専攻 (〒337-8570 埼玉県さいたま市見沼区深作307)

In rural areas, transportation is essential for daily life. However, the fixed-route bus system has become inefficient due to declining demand caused by depopulation in rural areas. Therefore, on-demand buses, which operate by aggregating the small-scale demand in rural areas, are getting attention. In this study, we create, compare, and evaluate several models of bus stop locations from the perspective of persons with mobility constraints who have difficulty getting to on-demand bus stops.

Key Words : on-demand bus, persons with mobility constraints, facility location problem

1. はじめに

地方では日常生活を送るうえで車やバスなどの交通手段が必須となっている。しかしながら、過疎化による需要減少により定時定路線型のバスは非効率的になってしまっている。こうした背景の中、地方の小規模需要を集約した形で運行するオンデマンドバスが注目されている。

オンデマンドバスは運行方式の違いで図1のように分類できる^[1]。地域構造ごとに適した運行方式が存在しており、本研究の対象地である栃木県那須町では自由経路ミーティングポイント型のデマンド型交通が導入されている^[2]。

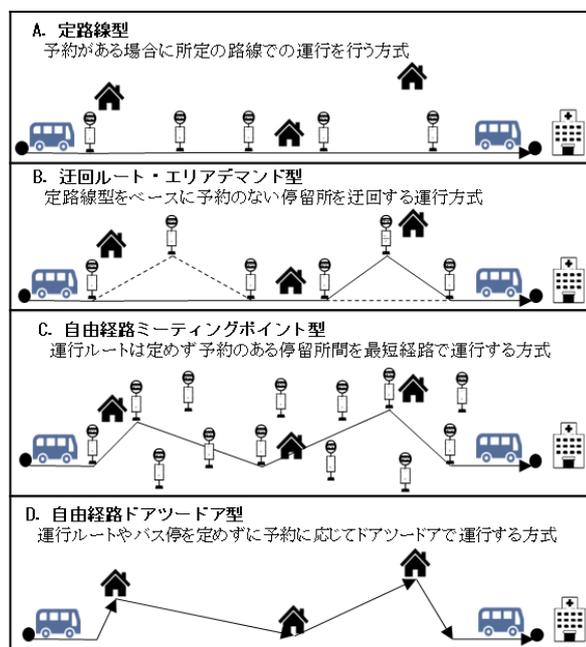


図-1. オンデマンドバスの運行方式による分類^[1]

平岡らは、利用者の住所から目的地までの方向ベクトルを用いたリアルタイムでの予約と公共交通機関への

シームレスな乗り継ぎを考慮した自由経路ドアツードア型のオンデマンドバスのルート最適化手法を提案した^[3]。

本研究では、平岡らの自由経路ドアツードア型の研究で得られた知見をもとに那須町で運行されている自由経路ミーティングポイント型についての研究を行う。

自由経路ミーティングポイント型は自由経路ドアツードア型と異なり、バス停までの移動が必須である。那須町のデマンド型乗合交通のバス停設置の目安は500mであるが、図2のように那須町のデマンド型乗合交通の登録者対象のアンケートによると登録者の22%は500mの移動が困難であると回答している。

そこで、より多くの移動制約者がオンデマンドバスを利用できるような複数のバス停の配置モデルを作成し、それらの比較・評価を行う。

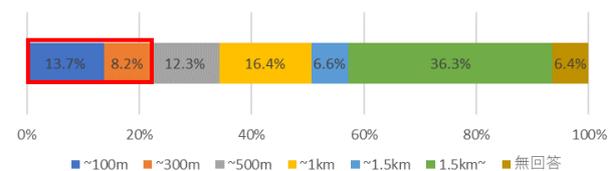


図-2. 那須町デマンド型乗合交通登録者の休まず歩ける距離^[4]

2. シミュレーション概要

本研究では国勢調査の最小単位である那須町の250mメッシュの人口分布を用いて3つのモデルを作成する。

(1) p-メディアンモデル

p-メディアンモデルとは、需要点から施設までの距離(移動距離)と需要量の積の総和が最小になるようにp個の施設を配置するモデル。以下の式(1)~(4)のように定式化される。

$$\min \sum_i (w_i \sum_j d_{ij} x_{ij}) \quad (1)$$

$$\text{subject to } \sum_i x_{ij} = 1, \forall i \in N \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq y_j, \forall i, \forall j \in N \quad (3)$$

$$\sum_j y_j = p \quad (4)$$

w_i : 需要点*i*における需要量 p : バス停の数
 d_{ij} : 需要点*i*からバス停*j*までの距離 N : バス停候補地の集合
 x_{ij} : 需要点*i*におけるバス停候補地*j*への割当てを表す二値変数
 y_j : バス停候補地*j*におけるバス停の有無を表す二値変数

(2) p-センターモデル

p-センターモデルとは、移動距離の最大値が最小になるようにp個の施設を配置するモデル。式(2),(3),(4)に式(5),(6)を加え、以下のように定式化される。

$$\min Z \quad (5)$$

$$\text{subject to } \sum_j d_{ij} x_{ij} \leq Z \quad (6)$$

(2), (3), and (4)

Z: 最大移動距離

(3) 最大被覆モデル

最大被覆モデルとは、施設から距離以内に可能な限り多くの需要が収まるようにp個の施設を配置するモデル。式(2),(3),(4)に式(7)を加え、以下のように定式化される。

$$\min \sum_i \sum_j a_{ij} x_{ij} \quad (7)$$

subject to (2), (3), and (4)

a_{ij} : バス停*j*から距離以内でカバーできる需要点*i*の需要量 ($d_{ij} \leq u$ ならば w_i ,さもなければ0)

3. シミュレーション条件

今回のシミュレーションでは前述した3つのモデルと比較用としてバス停を均等に配置したモデルを作成する。条件は表1に示す。

表-1 シミュレーション条件

対象地	栃木県那須町高久乙地区
バス停候補	250mメッシュの各グリッド
バス停数	34
需要点	250mメッシュの各グリッド
需要量	250mメッシュの各グリッドの65歳以上の人口分布 ^[4]

4. シミュレーション結果

シミュレーションで作成したp-メディアンモデル, p-センターモデル, 最大被覆モデルと比較として均等にバス停を配置したモデルを図3に示す。また、それらの比較を表2に示す。

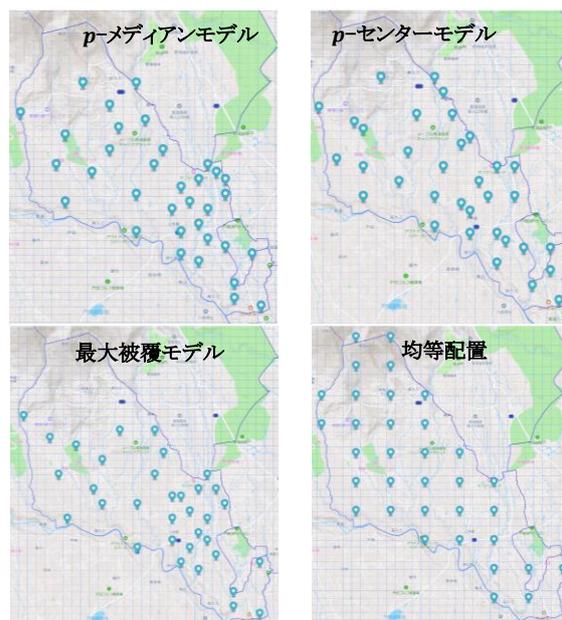


図-3. 作成したモデル

表 2. シミュレーション結果比較

	pメディアン	pセンター	最大被覆	均等配置
バス停数[カ所]	34	34	34	34
総移動距離[m]	203289.4	295337.2	264475.7	527709.4
最大移動距離[m]	840.0	538.5	1605.3	957.7
300m以内のバス停の割合[%]	80.9	61.2	89.1	30.4

作成したモデルのうち、最大被覆モデルのカバー率が最大となり、バス停を均等に配置した場合と比べカバー率は2.9倍になった。しかし、p-メディアンモデルと比較してカバー率は1.1倍であるのに対し、総移動距離が1.3倍、最大移動距離が1.9倍になってしまっている。

5. おわりに

今回作成したモデルの中で最適なモデルは最もカバー率が高い最大被覆モデルであると考えられる。しかしながら最大被覆モデルは総移動距離や最大移動距離が大きくなってしまった。これは制約条件に距離の数値を含まないことが原因であると考えられる。そのため、制約条件に移動距離を含むp-メディアンモデルと最大被覆モデルのパレート解を用いることでより移動制約者に適したバス停配置モデルの作成ができるようになると思われる。

参考文献

- [1] 国土交通省: デマンド型交通の手引き, 2013.
- [2] 那須町: 令和3年度 那須町公共交通に関する現地調査結果, 2020
- [3] 平岡優希ら: MaaSを考慮したオンデマンドバスのルート最適化, 計算工学講演会論文集 Vol.26, 2021
- [4] 那須町: 令和3年度 那須町公共交通に関するアンケート調査結果, 2020
- [5] 総務省統計局: 2020年度国勢調査結果, 2020

レベル4のMaaS実現に向けた複合領域最適化の一試行

On Trial of Multidisciplinary Optimization to Actualized Level 4 MaaS Platform

小幡快世¹, 鈴木隆介¹, 長谷川浩志¹

Kaisei OBATA, Ryusuke SUZUKI and Hiroshi HASEGAWA

¹ 芝浦工業大学 大学院理工学研究科 システム理工学専攻 (〒337-0003 埼玉県さいたま市見沼区深作 307)

Mobility as a Service (MaaS) is a service that aims to provide seamless mobility to users and bring economic, social, transportation, and environmental benefits to cities. In this study, we will optimize tourist routes from pre-determined tourist attractions, and pre-determined departure and arrival points, taking into account customer needs, which include qualitative data, and quantitative data, such as travel distances, and the benefits on the part of the stakeholders. This will enable System of Systems design for level4 MaaS realization.

Key Word: MaaS, level4, Mobility, Optimization, Multidisciplinary optimization

1. 緒言

近年, Mobility as a Service(MaaS)と呼ばれる公共バスや電車といった公共交通機関を複合的に捉え, 検索・予約・購入・決済までを提供する新たなサービスが提供され始めている. これを受けて, 観光分野や地方都市などでの様々な実証実験が展開され, MaaSを導入するための課題が顕著化してきた⁽¹⁾. この実証実験から, 「移動+α」といった移動以外の付加価値を提供し, 利用ユーザーの利便性を高める必要があることが分かった. これは, 新たな価値創生と掛け合わせなければ, MaaS 単独での持続可能な運営が難しいことを示したものである. また, 実際に幹線バスなどの二次交通が運行しているものの, 利用者の制限があり, 顧客側のニーズに応えきれず, 管理・運営側も十分な利益が出ないという状況も多い. そのため, 双方の需要を考慮しながら改善する必要がある.

一方, 鈴木らの研究では, 定性的な顧客ニーズ, 移動距離, 運賃といった定量的データ, 管理・運営側の利益を考慮した観光ルート最適化を行った. この研究によって, 観光客だけでなく, 運営・管理側を考慮することができ, MaaS の実現に大きく近づいた.

本研究では, 鈴木らの研究の協調的最適化のフレームワークを用いて, 提案されたフレームワークの妥当性確認を行い, この結果を報告する. なお, 観光ルートを構成する際に必要な観光地, 発着地点を, 栃木県那須町の那須高原地域から選出する.

2. 協調的最適化のフレームワーク

図1に, 利用者側の2つのサブシステム(顧客ニーズと定量的データ)と, 管理・運営側の最適化サブシステム, 事前決定済観光群, 飛び込み発着スポット群, 発着スポット群を連成変数として加えた協調的最適化のフレームワークを示す. このフレームワークを用いることで, 選ばれた, 発着地点, および観光スポットを基に協調的最適化を行いルートと移動手段を決定できる.

2.1 協調的最適化 協調的最適化は問題が大規模, かつ分散環境下に存在する解析領域を対象とした複合領域最適化手法である. 初めに, 各システムにて, ウェイトを算出する. 次に, 観光地*i*の基準ウェイトの初期値 A_i を設定し, 各サブシステムに送る. 各サブシステムにて得られたウェイト $W_{S,i}$, $W_{N,i}$, $W_{Q,i}$ と基準ウェイト A_i の二乗和誤差が最小となる値を各サブシステムで求め, 得られた各サブシステムの最適ウェイトをメイン

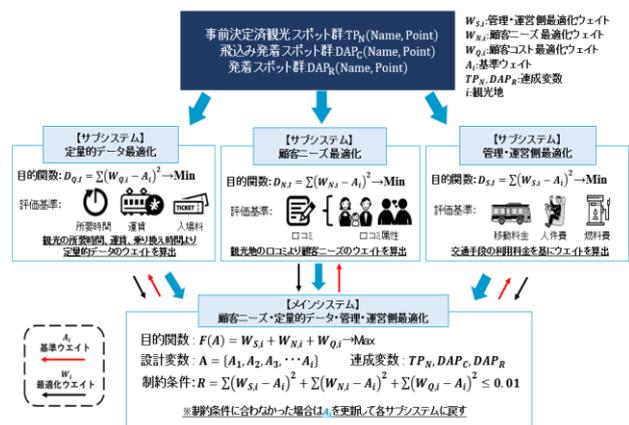


図1 3つのサブシステムによる協調的最適化

システムに返す. メインシステムでは, 3つのサブシステムから受け取ったウェイトが制約条件を満たした上で最大化するように最適化する. 制約条件は各サブシステムから算出された観光地のウェイトと基準ウェイトの二乗和誤差であり, 最適化手法の都合上 0.01以下として用いる. 目的関数が制約条件を満たした場合, 3つのサブシステムのウェイトの合計が最も高い観光地が次に進む観光地のルートとなる. 制約条件を満たさない場合には基準ウェイト A_i を更新し, 最適化を続行する. 以上の処理を繰り返すことで移動ルートと用いる移動手段が決定する.

2.2 発着地点, 観光スポットの設定



図2 事前決定済スポット群

本研究では, まず初めに図2に示すスポットのリストから, 発着地点及び, 任意の数の観光スポットを選択する. 選ばれた発着スポット DAP_R , 事前決定済観光スポット TP_N を連成変数として各サブシステム間に受け渡す.

2.3 観光ニーズ把握システム 連成変数値の観光地ごとに口コミを抽出し, 投稿者の属性を分類する.

さらに抽出された口コミを無作為に選択し、テキストマイニングを用いることで観光地ごとの評価点を算出する。評価方法は口コミデータを形態素解析し、解析結果の単語を点数化することで評価点を算出した。なお、今回評価の対象とした単語と点数については鈴木らの研究⁽²⁾と感動語分類表を基に設定した。

2.4 定量的データ最適化システム 連成変数値から入場料、移動にかかる運賃、移動時間を用いてウェイトを算出し、AHPによる評価点と掛け合わせることで各観光地の評価点を算出する。

2.5 運営・管理側最適化システム 連成変数値の発着地点、観光スポットから、各交通手段を用いた際の移動料金や利益を計算し、式(1)を用いて観光地のウェイトを算出する。

$$W_{S,i} = \frac{F_{S,i}}{S_F} - \left(\frac{C_{p,S,i}}{S_{C_p}} \cdot W_{p1} \cdot W_{p2} + \frac{C_{f,S,i}}{S_{C_f}} \cdot W_{f1} \cdot W_{f2} \right) \quad (1)$$

ここで、 s は交通手段、 i は観光地、 $W_{S,i}$ は各観光地のウェイト、 $F_{S,i}$ は各交通手段で各観光地まで移動する際の料金、 $C_{p,S,i}$ は観光地まで移動する際に発生する人件費、 $C_{f,S,i}$ は観光地まで移動する際に発生する燃料費、 W_{p1} は交通会社が希望する人件費の重み、 W_{p2} は交通会社が実際に充てている人件費の重み、 W_{f1} は交通会社が希望する燃料費の重み、 W_{f2} は交通会社が実際に充てている燃料費の重み、 S_F は各交通手段の料金の総和、 S_{C_f} は各交通手段の人件費の総和と設定している。得られたウェイトが一番大きいスポットに移動する。以上の処理を選択された到着地点に到達するまで行う。

3. 妥当性確認

本フレームワークの妥当性を確認するために、発着地点を那須塩原駅、観光地を那須どうぶつ王国、那須ハイランドパークに設定し、最適化を行った結果を以下に示す。これらの結果はそれぞれ図3に、管理・運営側を考慮した結果と、定量的データ、顧客ニーズ把握システムより顧客側を考慮した結果を示し、全体システムで最適化された結果を図4に示す。管理・運営側最適化システムでは、運営会社の利益を確保するため、一番利用料金が高いタクシーのウェイト $F_{S,i}$ が高くなったためタクシーのみが使われる結果となった。また、顧客側観光ルートでは、AHPの結果より、移動料金のウェイトが高かったため、一番移動料金が安くなるよう、無料で乗れる施設バスやレンタサイクルを使用したルートとなったと考えられる。また、図4の複合領域最適化の結果は移動時間と移動料金が、その双方を考慮したような、間を取った結果となった。

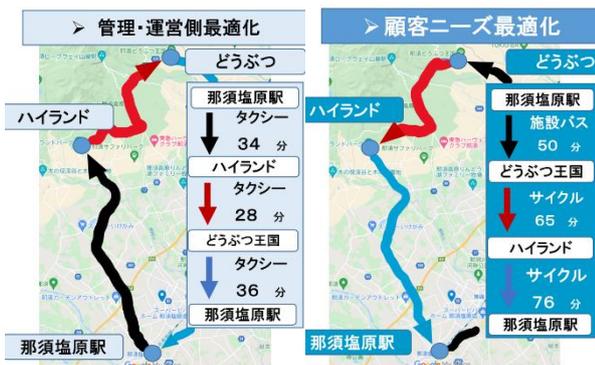


図3 管理・運営側、顧客側観光ルート



図4 複合領域最適化後のルート

表1 移動時間と料金

移動時間と移動料金	
管理・運営側	
98分	¥5,505
顧客側	
191分	¥3,840
複合領域最適化	
120分	¥4,700

これらの結果が利用者のニーズに答えられているかの妥当性を確認するために、実際の利用者である若者がどの観光ルート、移動手段を使うのか27名の20代男性にアンケートを行った。以下の図5にその結果を示す。レンタサイクルでの長時間の移動は回避したく、タクシーだけの移動では料金が高くなってしまいう理由から、間を取った複合領域最適化のルートを選択した人が66%であった。

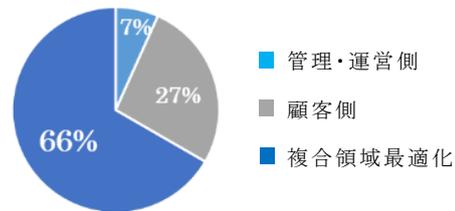


図5 妥当性確認の結果

また、選択する発着地点・観光地を変えて同様に最適化を行い、妥当性確認を行った。そのケースにおいても、最終的に利用者と管理・運営側の折り合いをつけた複合領域最適化後のルートを選択する人が同様に6割程度いた。また、移動手段は問わず、移動料金をできる限り抑えたいという理由で、顧客側の観光ルートを選択した人も同様に3割程度いた。

4. 結言

本研究では、鈴木らの研究で考案した、協調的最適化のフレームワークの妥当性確認を行った。複数の観光ルートで、利用者と管理・運営側の折り合いをつけた複合領域最適化後の観光ルートを選択した人が6割程度いた。このことから、鈴木らの協調的最適化のフレームワークの妥当性を確認することができた。

参考文献

- (1) 経済産業省, 新しいモビリティサービスの社会実装に向けた知見集 (令和2年度版), 2021.04
- (2) 鈴木隆介, 長谷川浩志, MaaSに向けた口コミ情報とステークホルダーを考慮した観光ルートの最適化, 計算工学講演会論文集 Vol26, 2021.
- (3) 平岡優希, 長谷川浩志, MaaSを考慮したオンデマンドバスのルート最適化, 計算工学講演会論文集 Vol26, 2021.

10:00 AM - 10:15 AM (Thu. Jun 1, 2023 9:00 AM - 10:15 AM Room A)

[A-06-05] 渋滞吸収運転による交通渋滞緩和シミュレーション

Firdaus Sukarman¹、山田 修也¹、玉城 龍洋²、*北 栄輔¹ (1. 名古屋大学、2. 沖縄工業高等専門学校)

OS07 社会・環境・防災シミュレーション

[A-07] OS07 社会・環境・防災シミュレーション (7)

座長:藤井 秀樹(東京大学)

Thu. Jun 1, 2023 10:30 AM - 11:30 AM Room A (1F Conference Room 101)

[A-07-01] 被災地の復旧フェーズを考慮した交通流シミュレーションに基づく深層強化学習による道路修復計画策定

*今井 星太¹、宮村 倫司¹ (1. 日本大学)

10:30 AM - 10:45 AM

[A-07-02] ミクロ交通流シミュレータへのCAV挙動の実装

*稲葉 陽樹¹、藤井 秀樹¹、吉村 忍¹ (1. 東京大学)

10:45 AM - 11:00 AM

[A-07-03] 高速道路合流部における動的ハイブリッド交通流シミュレーション

今井 陽¹、*藤井 秀樹¹、吉村 忍¹ (1. 東京大学)

11:00 AM - 11:15 AM

[A-07-04] 自動運転を考慮したワンウェイ型カーシェアリングの最適配置と可視化シミュレーション

*惣野 源也¹、長谷川 浩志¹ (1. 芝浦工業大学)

11:15 AM - 11:30 AM

被災地の復旧フェーズを考慮した交通流シミュレーションに基づく深層強化学習による道路修復計画策定

今井星太¹⁾, 宮村倫司²⁾

Shota Imai and Tomoshi Miyamura

1) 日本大学大学院工学研究科 大学院生 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1, E-mail: cesh22004@g.nihon-u.ac.jp)

2) 工博 日本大学工学部 准教授 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1, E-mail: miyamura.tomoshi@nihon-u.ac.jp)

During a disaster, routes to destinations may be blocked due to road damage, making repairs necessary. Emergency activities in a disaster-stricken area involve three phases: saving lives, transporting emergency supplies, and restoring traffic for general vehicles. In this study, a traffic flow simulator was used to simulate traffic flows during each phase, and vehicle arrival times were evaluated. Based on the simulations, deep reinforcement learning was used to determine where road repairs are necessary for each phase, and a repair plan was designed accordingly.

Key Words : Traffic Flow Simulation, Deep Reinforcement Learning, Disaster Recovery

1. はじめに

地震などの被災地で道路が破損した際には、被災地へ出入りするルートを確認することが困難になるため、修復が必要となる。災害時の被災地での応急活動には3つのフェーズがあり、人命救助、緊急物資輸送、一般車両通行の順に進められる^[1]。各フェーズにおいて、破損した道路をどのような順番で修復するのかについての計画を立案する必要がある。

交通流には様々な要因が複合的に関連している。交通現象そのものが異なる属性や目的をもつ多数の車両の相互作用の結果である。この問題に対して吉村ら^[2]、藤井ら^[3]はマルチエージェントシミュレーションによるアプローチを提案した。また、藤井らは知的マルチエージェント交通流シミュレータ ADVENTURE_Mates^[4]を開発している。

強化学習とは教師あり学習、教師なし学習と並ぶ機械学習の分類の一つである。強化学習では、タスクを実行する上で、単体の行動結果ではなくタスク全体の行動結果を評価することにより、一連の意思決定を学習する。深層強化学習は強化学習の一種であり、強化学習の行動結果の評価にニューラルネットワークを適用した学習手法である^[5]。近年、深層強化学習を用いた行動計画作成の研究が行われている^[6]。荻野は強化学習を粒子の充填問題に応用した^[7]。また、小寺等は強化学習をトラス構造物の施工経路生成に応用した^[8]。

本研究では藤井らが開発した交通流シミュレータを用いて災害時の交通流をシミュレートし、車両の到達時間を評価する。それに基づいた深層強化学習により破損した道路の修復の順番を決めることで、修復計画の作成を行う。

2. 被災地の応急活動フェーズ

災害時の被災地での応急活動には3つのフェーズがある。フェーズは図1のように遷移していく。災害後72時間後程度までは、人命救助フェーズと呼ばれる。傷病者が多数発生し、早期の救出救助活動が開始され、救助された多数の傷病者を医療機関に搬送される。また、ライフラインや交通機関が途絶し、被災地外からの支援の受け入れが少ない状態である。72時間~1週間後程度までは緊急物資輸送フェーズと呼ばれる。このフェーズでは、ライフライン等が復旧し始め、人的・物的支援の受入体制が確立されている状態である。これ以降は一般車両通行フェーズと呼ばれ、地域医療やライフライン機能、交通機関等が徐々に復旧している状態である。

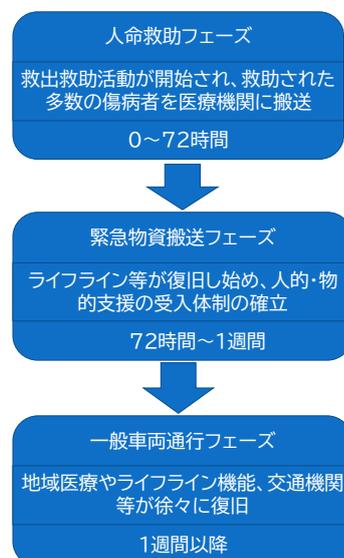


図-1 応急活動フェーズ

3. 交通流シミュレータ

(1) ADVENTURE_MATES

ADVENTURE_MatesはADVENTUREプロジェクト⁹⁾において開発されたモジュールのひとつであり、知的マルチエージェントモデルに基づく交通流シミュレータである。知的エージェントとしてモデル化された車両は道路環境中で他の車両エージェントと相互作用しながら自律的に意思決定(経路探索, 加速度決定)をする。複雑な交通現象は知的エージェント同士の相互作用の結果として創発するよう設計されている。

(2) 設定可能な情報

シミュレーションを行う際、信号や交通量を設定する必要がある。ADVENTURE_Matesでは、信号ごとに信号パターンを決定できる。また、各ネットワークの端点が流入流出点となっているため、そこからの車両発生台数を設定することで交通量を制御できる。

(3) osm2mates

OSMとは、OpenStreetMap¹⁰⁾の略称である。OpenStreetMapとは、自由に利用でき、なおかつ編集機能のある世界地図を作る共同作業プロジェクトである。osm2matesはADVENTURE_Matesを実行するための地図データ(mapPosition.txt, network.txt)をOpenStreetMapから自動的に作成するプログラムである。

4. 強化学習

強化学習は行動心理学者であるスキナーが動物の行動を説明する基本原理として唱えた強化に由来する考え方である¹¹⁾。代表的な例であるスキナー箱を用いて、基本的な考え方を説明する。図-2のネズミは最初、無造作な行動をする。しかし、ある時偶然電源スイッチを押し、レバーを押したことで餌(報酬)を得ることができる。このような動作を繰り返すうちにネズミはスイッチの状態によって、餌(報酬)を得るために適切なレバーやスイッチを押すこと(行動)を覚える。強化学習はこれを確率的動的計画法の枠組みで定式化したものである。

強化学習では環境という行動と行動による状態の変化が定義されており、ある状態への到達に対し報酬が与えられる空間がある。この環境が開始されてから終了されるまでを1エピソードといい、この1エピソードの中で得られる報酬を最大化することが強化学習の目的である。

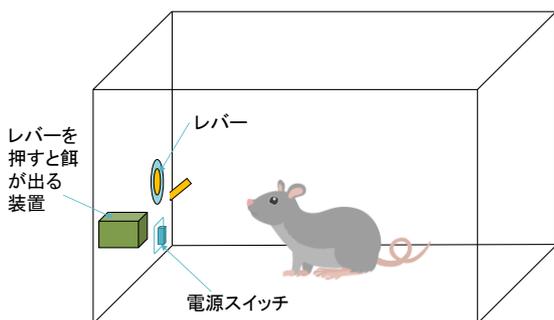


図-2 スキナー箱

(1) Q学習

状態による行動価値(価値関数)をQ値と呼ぶ。Q値はQテーブルと呼ばれる表に記録をし、行動をするたびに該当するQ値を更新する。状態 s_t 、行動 a 、報酬 r 、学習率 α 、割引率 γ としたとき、Qテーブルの更新にはベルマン方程式に基づく式(1)を用いる。

$$Q_{(s_t, a)} = (1 - \alpha)Q_{(s_t, a)} + \alpha(r + \gamma Q_{(s_{t+1}, a')}) \quad (1)$$

(2) 深層強化学習 (Deep Q Network (DQN))

Deep Q Network (DQN)とは、Q学習のQ値をQテーブルではなく、ニューラルネットワークで計算する学習方法である。ニューラルネットワークとは、人間の脳を模した数理モデルである。ニューラルネットワークは入力層と一つ以上の中間層、出力層を含む、複数のノード層で構成されている。各ノードは別のノードに接続し、重みと閾値を持つ。深層強化学習では、ニューラルネットワークの入力を状態とし、出力を各行動のQ値とする。Q学習におけるベルマン方程式を教師データとすると、損失関数を二乗誤差により定める。これを最急降下法を基にしたアルゴリズムにより最小化することでQ値を算出する関数として使えるニューラルネットワークを生成する。

5. 深層強化学習による道路修復計画の作成

(1) 深層強化学習による災害時道路修復計画の作成手法の概要

修復途中の道路の評価はADVENTURE_Matesを用いて行う。いくつかの地点で発生させた車両が目的地に到達するのにかかる時間を基に報酬に計算する。一方、道路の修復費用を負の報酬として評価する。これらの報酬の和が大きくなるように、図-3のような深層強化学習によって道路の修復の順番を決定することで道路修復計画を作成する。

シミュレーション上ではフェーズの表現を車両の種類と流入点の数によって表現する。車両は目的地が病院の緊急車両と目的地がランダムな一般車両の2つを用意する。人命救助フェーズでは、傷病者を搬送する緊急車両の交通流を再現する。緊急物資搬送フェーズでは、ボランティアや物資の受け入れを再現する。一般車両通行フェーズでは、平常な交通流を再現する。フェーズが進むにつれ、流入点の数とそれぞれの流入点から発生する車両の数を増やす。また、それぞれのフェーズで修復できる道路の数に上限を設ける。

破損した道の数を n 個としたとき n 個の各道路の状態は未修復と修復の2個であるため、全ての修復パターンの状態は 2^n 個となる。また、フェーズの状態は3個である。1エピソード内での行動の上限を m としたとき、修復を

行った回数の状態は m 個となる．そのため，状態の総数は $2^n \times 3 \times m$ となる．状態は $s_1 \sim s_{2^n \times 3 \times m}$ となる．行動はそれぞれの道の修復をするという行動と現在のフェーズの道の修復を終了するという行動とし， $a_1 \sim a_{n+1}$ とした．1 エピソードは 3 フェーズ目の道路の修復を終了したとき，行動の数が m を超えたときに終了するようにした．

報酬は以下のように与えた．修復を行ったときに工事費を表す報酬を与えた．修復したときに現在のフェーズ中に修復できる道路の上限を超過していたら一定の負の報酬を与えた．フェーズを終了するという行動をとったときは車両全体に対して，(修復後の経済的損失-初期状態の経済的損失)の報酬を与える．経済的損失 L はフェーズの日数 d ，総走行時間 t ，人口 p ，平均時給 w ，1 時間当たりのガソリン代 c により式(2)で求める．

$$L = dtp(-w - c) \quad (2)$$

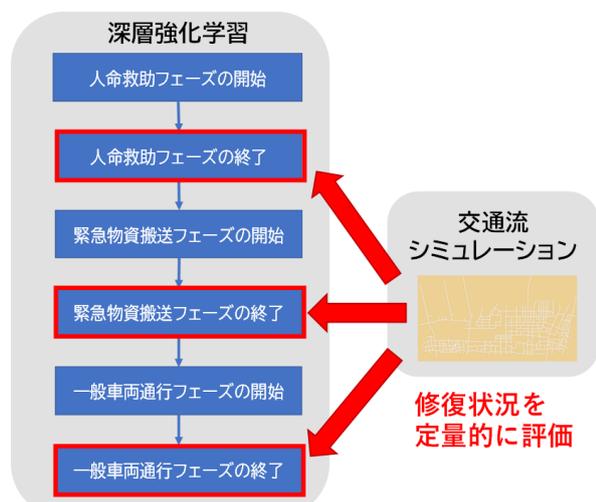


図-3 深層強化学習でのシミュレーション結果の利用

(2) DQN 用ニューラルネットワークの概要

ニューラルネットワークでは入力層のノード数を $n+2$ 個，中間層のノード数を 128 個で層は 3 層，出力層のノード数を $n+1$ 個とする．中間層の活性化関数には ReLU を使用する．Optimizer には adam を使用する．ニューラルネットワークへの入力， n 番目の入力ノードまでは対応する道路が修復されていれば 1，修復されてなければ 0 を入力する．また， $n+1$ 番目の入力ノードには現在のフェーズが何フェーズ目かを入力し， $n+2$ 番目の入力ノードには現在のフェーズで道路を修復した回数を入力する．

(3) 実装

本研究では，Python と Tensorflow を用いて実装を行う．深層強化学習での行動選択や報酬の計算，強化学習部分については Tensorflow の強化学習用ライブラリ TF-Agents を用いて実装する．Q 学習を行う深層学習部分について

は Tensorflow により実装を行う．交通流シミュレーションの入力データとなるマップの修復状況の変化に応じた書き換えや，交通流シミュレーションの実行といった深層強化学習以外の部分も Python により実装する．

6. 郡山駅周辺の道路修復計画作成への応用

(1) 問題設定と入力データの作成

郡山駅周辺が被災したと仮定し，その道路修復計画を提案手法により作成する．交通流シミュレーションの入力データとなるマップは，osm2mates により OpenStreetMap を基に作成した．郡山駅周辺から開成山公園周辺までを対象としている．ここでは，図-4 のように 11 本の道路が破損したと仮定して，それらの道路を削除した初期状態のマップを作成した．図-4 の中の赤の線が引かれている道が破損している道である．本研究ではすべての車線は片側 1 車線であると仮定している．また，信号に隣接している交差点の数ごとに，デフォルトの信号パターンを設定した．報酬の計算には郡山市のデータを基に作成した表-1 の値を使用する．修復箇所数の上限は人命救助フェーズでは 2，緊急物資搬送フェーズでは 4，一般車両通行フェーズでは 10 とし，1 エピソード内での行動の上限 m を 50 とする．また，人命救助フェーズでは図-5，緊急物資搬送フェーズでは図-6，一般車両通行フェーズでは図-7 のマップを使用する．車両の流入点を大きな青の点とし，救急車の目的地である病院は大きな緑の点で表している．

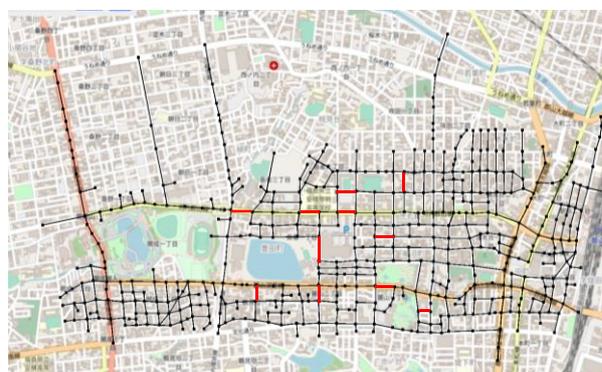


図-4 郡山駅前のマップ

表-1 報酬の計算に使用した値

項目	数値
道路の修復費用	60 万円
範囲内の人口	3 万人
平均時給	2440 円
1 時間当たりのガソリン代	495 円
人命救助フェーズの日数	3 日
緊急物資搬送フェーズの日数	4 日
一般車両通行フェーズの日数	20 日

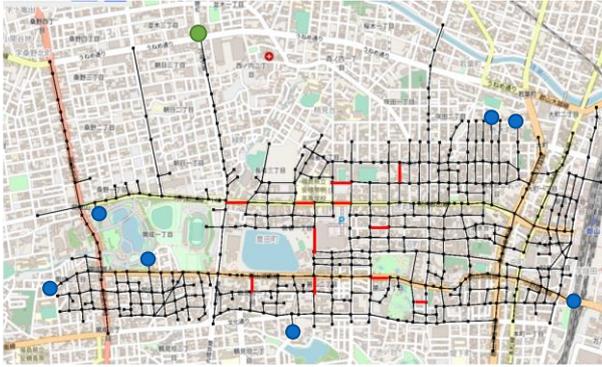


図-5 人命救助フェーズのマップ

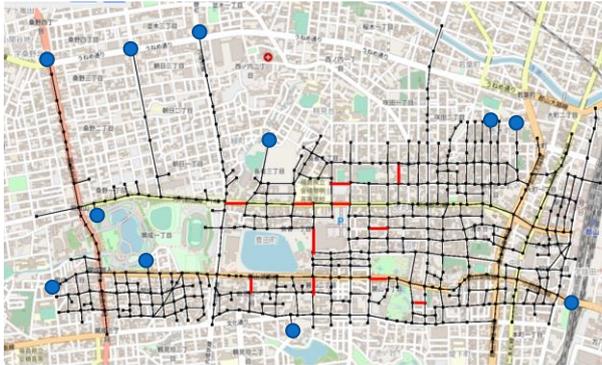


図-6 緊急物資搬送フェーズのマップ

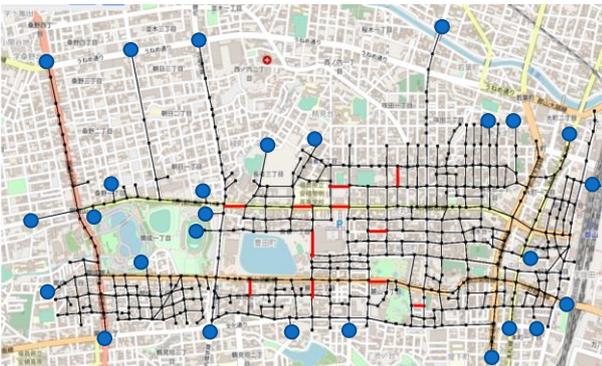


図-7 一般車両通行フェーズのマップ

(2) 深層強化学習による道路修復計画作成の結果

ここでは、予め修復過程の道路の全パターンマップによるシミュレーションをシミュレーション内時間で1200s分行って結果データを保存し、学習においてはそのデータを用いる。シミュレーションは3フェーズごとに 2^{11} パターンあるため、全6144パターンとなる。シミュレーションの実行時間は人命救助フェーズでは約35s、緊急物資搬送フェーズでは約40s、一般車両通行フェーズでは、170[s]となった。エピソード数2000、エポック数50で実行をしたところ、計算時間は5508.9s、2000エピソード目の報酬が122.65、使用されたシミュレーションは2093パターンとなった。各エピソードの報酬は、図-8のようになった。人命救助フェーズのシミュレーションが514パターン、緊急物資搬送フェーズのシミュレーションが861パターン、一般車両通行フェーズのシミュ

レーションが718パターン行われた。また、人命救助フェーズの修復箇所を図-9、緊急物資搬送フェーズの修復箇所を図-10、一般車両通行フェーズの修復箇所を図-11に示す。修復箇所を青い線、破損箇所が赤い線で表す。

学習により作成した修復計画では、修復されない道路があった。この原因は本研究で使用したマップには迂回路が多く存在するためだと考えられる。また、シミュレーションは、シミュレーション内時間で1200sを1回のみしか行っていないため、目的地がランダムな車両の走行時間を十分に評価できていないと考える。

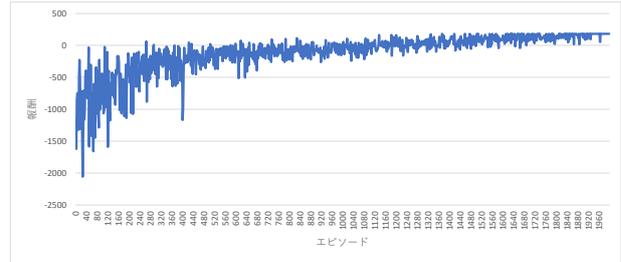


図-8 1エピソード毎の報酬



図-9 人命救助フェーズの修復箇所



図-10 緊急物資搬送通行フェーズのマップ



図-11 一般車両通行フェーズのマップ

7. おわりに

本研究では車両の到達時間の評価に基づいたDQNとQ学習により破損した道路のフェーズごとの修復箇所を決めることで修復計画の作成をした。報酬が高くなり易い道路は早いフェーズで修復されることが確認できた。修復計画の作成時間の大半をシミュレーションの計算が占めているため、その高速化が必要である。

また、フェーズごとの交通量や車両のパラメータに実際に計測したデータを使う必要があると考える。

謝辞: 本論文の作成にあたり、ご協力ご助言頂いた学部生には感謝いたします。

参考文献

- [1] 国土交通省: 災害時の通行可能な道路の確保と情報の取扱.
- [2] 吉村忍, 西川紘史, 守安智: 知的マルチエージェント交通流シミュレータMATESの開発, シミュレーション.23(3), 2004, pp.58-67.
- [3] 藤井 秀樹, 仲間 豊, 吉村 忍: 知的マルチエージェント交通流シミュレータMATESの開発 第二報: 歩行者

エージェントの実装と歩車相互作用の理論・実測値との比較, シミュレーション, vol. 25, no. 4, pp. 274-280, 2006.

- [4] <https://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/download/Mates.html>
- [5] 牧野浩二, 西崎博光: TensorFlowによる深層強化学習入門 —OpenAI Gym+PyBullet によるシミュレーション—, 2021年, オーム社.
- [6] 松原崇充: 強化学習による行動学習—未知問題を閉じる道具—, 日本ロボット学会誌Vol.36, 2018.
- [7] 荻野正雄: 深層強化学習を用いた粒子ランダム稠密充填の検討, 計算工学講演会論文集, Vol. 26 (online), 2021.
- [8] 小寺 正也, 大崎 純, 林 和希: 強化学習とグラフ埋め込みによるトラスの安定な施工経路生成, 日本建築学会大会[東海], 2021年09月09日.
- [9] <https://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/>
- [10] <https://openstreetmap.jp/>
- [11] 吉本 潤一郎, 銅谷 賢治, 石井 信: 強化学習の基礎理論と応用, 計測と制御, 第44巻, 第5号 2005年5月号.

ミクロ交通流シミュレータへのCAV挙動の実装

Implementing CAV Behavior on the Micro-Traffic Simulator

稲葉陽樹¹⁾, 藤井秀樹²⁾, 吉村忍³⁾

Haruki Inaba, Hideki Fujii and Shinobu Yoshimura

1) 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: h.inaba@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 博(環境) 東京大学大学院工学系研究科 准教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: fujii@sys.t.u-tokyo.ac.jp)

3) 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: yoshi@sys.t.u-tokyo.ac.jp)

Autonomous Vehicles (AV) and connectivity technologies have been on the rise these days. On April 1st, 2023, LEVEL4 AV has been legalized to drive on public road in Japan. AV has a lot of features to contribute to social problems such as social welfare for vulnerable road users, lack of labor force, and alleviation of traffic jams etc. In this study, the mixed-Autonomy condition: an environment that both AV and Human-Driven Vehicles run around the network, is in focus. To evaluate the influence of CAV on the traffic network, altruism in the route choice process is implemented on the microscopic traffic simulator.

Key Words : Connected-Autonomous Vehicle, Micro-Traffic Simulator, Mixed-Autonomy

1. はじめに

日本では2023年4月1日に改正道路交通法が施行され、自動運転レベル4の公道走行が解禁された。近年は自動車業界の100年に一度の大変革期と言われ、CASE (Connected, Autonomous, Shared, Electronic) の4つの要素が注目を浴びている。本論文ではコネクテッド技術を活用する自動運転車両 (Connected Autonomous Vehicle, CAV) を対象とする。

自動運転車の普及により期待される効果には、自家用車に代わる交通弱者の移動手段になるという社会福祉の側面、路面状況を踏まえた運転や運転行動の標準化といった制御・安全の側面、人件費削減・人手不足解消といった経済的側面・交通容量増加による渋滞削減などの交通インフラの効率化の4つが考えられる。このうち交通インフラの効率化に関しては、車間距離を極めて小さくして一つの隊列として振る舞うプラトーン走行の実現によって交差点容量が増加し、都市部の交通量を倍増させられるとする先行研究[1]があり、この他にも自動運転車の優れた特性によって交通のパフォーマンスが向上するとする研究は数多く存在する。

一方で、Wu et al. [2] や Di et al. [3] は自動運転車の普

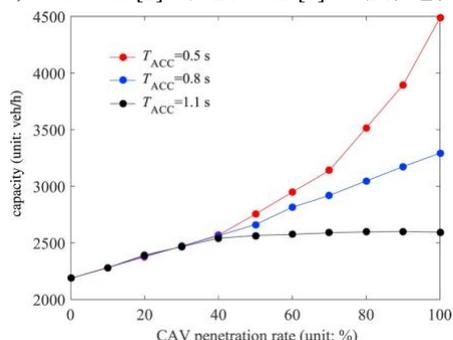


図-1 CAV 普及率と交通容量の関係 [4]

及率が低く人が運転する手動運転車が混在している環境 Mixed-Autonomy [2] についても研究しており、Ye et al. [4] では、セルオートマトンの一種である TSM (Two-state Safe-speed Model) に対し ACC (Adaptive Cruise Control) による車間距離の短縮効果と狭域通信 (Detected Short-Range Communication, DSRC) による認知可能距離の拡大のメカニズムを反映させ、CAVの普及率が30%を超えるとネットワークのパフォーマンスが普及率向上にほぼ比例して向上することが示された (図1)。

以上はミクロな観点での効果の整理であるが、経路選択行動というマクロな観点においてもCAVは交通ネットワークの効率向上に貢献する可能性があることがわかっている。例えば、自動運転車に乗る人の時間価値が低いという特徴を考慮したときに User Equilibrium と System Optimum の関係性がどう変化するかについてまとめた先行研究[5]や、マクロな経路選択結果を運転手間のナッシュ均衡として考えてCAVに利他性を持たせて手動運転車よりもコストの大きい経路に分配することで安定しロバストで社会的コストも小さい状態を実現することができるとする研究[6]もある。

本研究では、高速道路等の簡単な環境で行われていたCAV挙動の交通ネットワークへの影響評価を、市街地を含む複雑かつ現実的な環境にまで拡張し、次世代交通の可能性について示すことを目的とする。そのための最初の一步として本論文では、CAVにより実現されると考えられる利他性を表現する経路選択行動の実装に取り組んだ。

2. ミクロ交通流シミュレーションの概要

(1) ADVENTURE Mates

本研究ではミクロ交通流シミュレータとして

ADVENTURE_Mates[7][8]を使用する。ADVENTURE_Matesはマルチエージェントシステムとして交通流を模擬するもので、各車両エージェントが自律的に認知・判断・行動を行い、創発現象を表現することができる。実際に、現実の大規模かつ複雑な交通流の分析や再現に利用された例もあり、信頼性の高いシミュレータである。

(2) CAVの利他性の表現

Buyik et al. [6]ではCAVの利他性を表現するパラメータ κ を定義している。これは利用可能な最短経路でかかる所要時間の κ 倍の遅延まで許容するという特性を表している。またこの研究ではゲーム理論のナッシュ均衡の考え方を用いて実現しうる均衡状態を整理しており、自由流時の所要時間の異なる複数の経路が存在するような出発地と目的地の組み合わせに対し、CAVをどの経路に割り当てればロバスト性の向上・社会的コストの低減につながるかについて考察している(図2)。

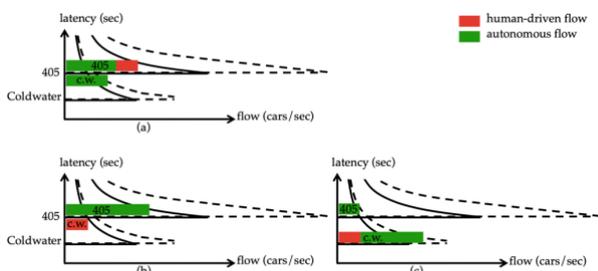


Fig. 5: (a) and (b) represent two selfish equilibria with the same social cost. The equilibrium with all autonomous flow on the 405 freeway (b) is more robust to additional unforeseen flow demand. Solid (resp. dashed) lines characterize the road with only human drivers (resp. autonomous vehicles). The 405 has maximum flow that benefits more from autonomy than the canyons – by routing all autonomous traffic onto the 405, a social planner can make the routing more robust to unforeseen demand. If some autonomous users are altruistic, a social planner can send them on the 405 while Coldwater is uncongested (c), leading to a lower overall travel time.

図-2 交通量と遅延の関係とCAVの分配について[6]

本研究では利他性を表すパラメータとして κ を採用しつつ、遅延以外のコストに拡張し、複数の起終点(origin-destination, OD)が存在する環境においても機能する手法を検討する。

(3) K-shortest path problem

ADVENTURE_Matesでは選好プロファイルに応じて最も好ましい最短経路を採用する。しかし今回は利他性の表現のため、許容できる範囲内の迂回路を選択するために最短経路以外の経路候補を取得する必要がある。つまり、ある文脈でK番目に短いパスを見つけるK-shortest path problemを解くアルゴリズムを実装する必要がある。このアルゴリズムとしてYenのアルゴリズム[9]を採用した。これは探索済みのリンクを適切に削除しつつ経路探索を繰り返すもので、計算量は $O(KN^3)$ 程度である。

3. 利他的経路選択の実装と検証

(1) シミュレーション環境

迂回路を選択する行動が実装できているかどうかを検証するため、図3の通りに一車線の直線とコの字型の迂回

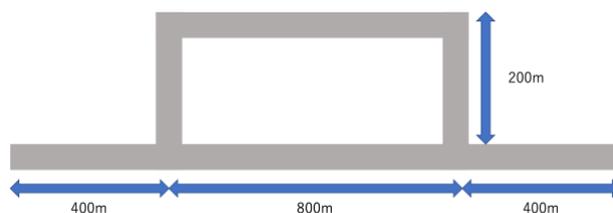


図-3 シミュレーション環境の模式図

路からなる簡単なネットワーク環境を設定した。交通需要のほとんどは左端から右端へと向かうものとした。

(2) 検証

各車両エージェントに異なる κ 値を与えてシミュレーションを実施した。CAVエージェントは二番目の経路まで探索し十分大きな κ 値を設定した時には渋滞がなくても迂回路を選択することを確認し、正しく機能していることがわかった。一方でCAVエージェントがない場合、十分に車両密度が高くない限り最短経路である直進以外を選ぶエージェントは存在しなかった。

4. おわりに

CAVと手動運転車両の混合環境において、CAVが社会全体の効率・パフォーマンスを向上させるためにどのようなマクロ挙動を実現できるかについて考察するために利他的な経路選択行動を実装することができた。

今後の課題としては、複雑なネットワークや複数のODが存在する環境でのシミュレーションの実施、複数存在する迂回路のうちどれを選ぶようにするべきかという分配問題などが考えられる。エージェントごとの判断に依拠する分散型が良いか、ある一定の規模のネットワークごとに中央集権的に需要を分配する方が良いかについても検討をしていきたい。

参考文献

- [1] Lioris J. et al.: Platoons of connected vehicles can double throughput in urban roads, *Transportation Research Part C*, Vol. 77, pp. 292-305, 2017.
- [2] Wu C. et al.: Emergent behaviors in mixed-autonomy traffic; *Conference on Robot Learning*, pp. 398-407, 2017.
- [3] Di X. et al.: A survey on autonomous vehicle control in the era of mixed-autonomy: from physics-based to AI-guided driving policy learning; *Transportation Research Part C*, Vol. 125, p. 103008, 2021.
- [4] Ye et al.: Modeling connected and autonomous vehicles in heterogeneous traffic flow; *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 490, pp. 269-277, 2018.
- [5] Wu W. et al: Modelling the traffic in a mixed network with

- autonomous-driving expressways and non-autonomous local streets, *Transportation Research Part E*. Vol. 134, p. 101855, 2020.
- [6] Bryk, E. et al.: Altruistic Autonomy: Beating Congestion on Shared Roads. *Algorithmic Foundations of Robotics XIII*, pp. 887-904, 2018.
- [7] Yoshimura S.: MATES : Multi-Agent based Traffic and Environment Simulator - Theory, Implementation and Practical Application, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, Vol. 11, No. 1, pp. 17–26, 2006.
- [8] Fujii H., et al.: Agent-based Simulation Framework for Mixed Traffic of Cars, Pedestrians and Trams, *Transportation Research Part C*, Vol. 85, pp. 234-248, 2017.
- [9] Yen, J.-Y.: Finding the k shortest loopless paths in a network. *Management Science* Vol. 17, No. 11, pp. 712-716, 1971.

高速道路合流部における 動的ハイブリッド交通流シミュレーション

Dynamic Hybrid Traffic Simulation at Highway Merging Section

今井陽¹⁾ 藤井秀樹²⁾ 吉村忍³⁾

Yo IMAI, Hideki FUJII and Shinobu YOSHIMURA

¹⁾修(工) 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: y_imai@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp)

²⁾博(環境) 東京大学大学院工学系研究科 准教授 (同上, E-mail: fujii@sys.t.u-tokyo.ac.jp)

³⁾工博 東京大学大学院工学系研究科 教授 (同上, E-mail: yoshi@sys.t.u-toyo.ac.jp)

Traffic simulations are useful tools for quantitatively assessing various traffic measures, including planning expressway maintenance. The authors previously proposed a dynamic hybrid traffic simulation model to achieve local high-resolution and calculation speed. This study extends this model to be applicable to expressway merging sections. Algorithms to reproduce the car merging behavior have been newly implemented to both the macroscopic and microscopic models composing the hybrid model. The result of the simulation targeting an actual merging section showed that the model could accurately reproduce the observed traffic jams' length, start time, and end time.

Key Words : Traffic Simulation, Multi-agent Model, Cell Transmission Model, Hybrid Model

1. 序論

日本を含む先進国では高速道路の老朽化が進んでおり、メンテナンスが欠かせない。渋滞を発生させないような工事計画が必要であり、このような交通施策の事前評価手法として交通流シミュレーションが用いられる。

交通流シミュレーションで使用されるモデルは、車両表現の粒度によって微視的(ミクロスコピック)モデル、巨視的(マクロスコピック)モデルの2種に大別される。以下、それぞれをマイクロモデル、マクロモデルと呼ぶ。マイクロモデルは個々の車両挙動を扱い、これに起因する複雑な交通現象の再現に向くが計算コストが高い。一方でマクロモデルは交通流を流体近似するモデルであり、計算コストが低いため大規模ネットワークのシミュレーションに向くが車両間相互作用から創発される交通現象を再現できない。

そこで、マイクロモデルとマクロモデルを統合したハイブリッドモデルにより両モデルの欠点を補う手法が提案されている。なかでも、高橋ら[1]は渋滞の発生や解消の状況に応じ、シミュレーション中に動的にマクロモデルとマイクロモデルの適用領域を決定する動的ハイブリッド交通流シミュレーションモデルを提案した。高負荷のマイクロモデルを必要最小限の領域に適用することで、着目領域の解像度を高く保ちつつ全体の計算コストを抑制できることを確認した。

本研究では高速道路の分合流部、とく合流部にも高橋らのモデルを適用できるよう拡張することで、インターチェンジやパーキングエリアで発生する渋滞を評価できるようにすることを目的とした。また、実際に高速道路の合流部で発生した渋滞をシミュレーションで再現し、観測値と比較することで提案モデルの検証

や性能評価を行った。

2. 研究手法

(1) マクロモデルの合流部への拡張

a) Cell Transmission Model

本研究でマクロモデルとして採用する Cell Transmission Model (CTM) [2] はシミュレーション対象の道路をセルに分割し、タイムステップごとに隣のセルへの流量を決定する。時刻 t においてセル i へ流入する交通量 $y_i(t)$ は、その上流のセル $i-1$ から送り出せる流量 $S_{i-1}(t)$ 、および、セル i が受け取れる流量 $R_i(t)$ をもとに以下の式で決定される。

$$y_i(t) = \min\{S_{i-1}(t), R_i(t)\} \quad (1)$$

ここで、 $S_{i-1}(t)$ および $R_i(t)$ はそれぞれ、

$$S_{i-1}(t) = \min\{uk_{i-1}(t), Q_{i-1}(t)\} \quad (2)$$

$$R_i(t) = \min\{w(K_i(t) - k_i(t)), Q_{i-1}(t)\} \quad (3)$$

で求められる。 $k_i(t)$ はセル i の密度、 $K_i(t)$ は渋滞時の最大密度、 Q_i は交通容量、 u は forward wave 速度、 w は backward wave 速度である。

b) 合流モデル

合流部においては、合流前の2つのセルから送り出せる流量を S_1, S_2 、合流後のセルへ流入する交通量を y_1, y_2 として、次のルールを適用する。

$S_1 + S_2 < R$ (空いているとき)

道路が空いている場合は本線を走行する車両と加速車線を走行する車両との干渉は顕著でなく、合流前のそれぞれのセルから流出可能な車両がそのまま合流後のセルに流入するため、以下の式が成り立つ。

$$y_1 = S_1, \quad y_2 = S_2 \quad (4)$$

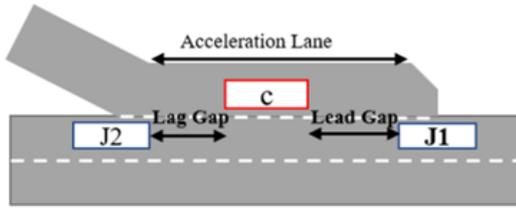


図-1 合流車・先行車・後続車

$S_1 + S_2 > R$ (渋滞しているとき)

S_1 および S_2 がともに十分大きいとき、優先度を表す定数 p_1, p_2 ($p_1 + p_2 = 1$) を用い、次の式で流入量を求める。 p_1, p_2 は合流比とも呼ばれ、道路形状などによって決定される。

$$y_1 = p_1 R, \quad y_2 = p_2 R \quad (5)$$

一方、 $S_1 < p_1 R$ または $S_2 < p_2 R$ が成立するとき、式(5)のままでは $y_1 + y_2 < R$ となってしまう。この場合には、以下のように流入量を決定する。

$$\begin{cases} y_1 = S_1 \\ y_2 = R - S_1 \end{cases} \quad \text{あるいは} \quad \begin{cases} y_1 = R - S_2 \\ y_2 = S_2 \end{cases} \quad (6)$$

(2) ミクロモデルの合流部への拡張

a) Intelligent Driver Model

ミクロモデルにおいては、追従モデルとして Intelligent Driver Model (IDM) [3] を採用する。以下の式を用い、自動車と先行車との距離や速度差に応じて加速度を決定する。

$$\frac{dv_n}{dt} = a \left[1 - \left(\frac{v_n}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n} \right)^2 \right] \quad (7)$$

$$s^*(v_n, \Delta v_n) = s_0 + v_n T + \frac{v_n \Delta v_n}{2\sqrt{ab}} \quad (8)$$

ここで、 v_n は車両 n の速度、 v_0 は希望速度、 a は最大加速度、 b は快適減速度、 s_n は先行車との車間距離、 s^* は車両速度 v_n および先行車と速度差 Δv_n に応じた最適車間距離、 s_0 は停車時の最小車間距離、 T は安全車頭時間である。

b) 合流モデル

合流モデルは Al-Obaedi&Yousif の合流モデル [4] を改変して用いた。この合流モデルでは、次に示す gap acceptance モデルによる先行車とのギャップ (lead gap) および後続車とのギャップ (lag gap) の判断と、合流開始の判断および加減速を各タイムステップで実行する。

gap acceptance モデルでは先行車、後続車とのギャップ G_{J1} および G_{J2} を求め、これらが次の式で表される最小値 $\bar{G}_{J1}, \bar{G}_{J2}$ を上回っているかどうかを判断する。 $C, J1, J2$ はそれぞれ図1における合流車、本線の先行車、後続車に対応する。

$$\bar{G}_{J1} = \alpha \tau v_C + \max \left[0, \left(\frac{v_C^2}{2b'_C} - \frac{v_{J1}^2}{2b'_{J1}} \right) \right] \quad (9)$$

$$\bar{G}_{J2} = \alpha \tau v_{J2} + \max \left[0, \left(\frac{v_{J2}^2}{2b'_{J2}} - \frac{v_C^2}{2b'_C} \right) \right] \quad (10)$$

ここで、 τ はドライバーの反応時間、 b'_n は車両 n の最大減速度である。 α は合流の積極性あるいは緊急性を表す係数であり、値が小さいほど積極的に合流しようとする。

合流開始の判断と加減速

ギャップの大きさに応じ、以下の4パターンの行動を選択する。

- G_{J1} および G_{J2} を両方とも許容できる場合は、その場で合流する。
- G_{J2} のみ許容できない場合は、 $J2$ から離れるために加速する。さらに $J2$ に協調行動を取ってもらう。
- G_{J1} のみ許容できない場合は、そのままでは合流できないので減速する。
- G_{J1} および G_{J2} を両方とも許容できない場合は、合流車はどうにもできないので $J2$ に協調行動を取ってもらう。

単純化のため、本ルールにおける加速度は 1.4 m/s^2 、減速度は -3 m/s^2 で固定した。協調行動を行う本線車両は、その場で追い越し車線への車線変更を試みる。十分なスペースがなく、車線変更ができなければ減速する。

ジッパー合流

Al-Obaedi&Yousif の合流モデルに加え、加速レーンにおいて加速できず時速 40 km/h 以下となった車両はジッパー合流を行うよう下記のルールを定めた。

1. 加速レーンの先頭車両しか合流できない。ただし、一定の確率 P_z でこのルールを無視した合流を行う。
2. 合流しようとする車両は本線の後続車に対し、自車の次に進行できる“優先権”を付与する。
3. 本線後続車にすでに優先権が付与されていた場合、合流を行わない。

ジッパー合流の概要を図2に示す。第2、第3のルールによって合流車と本線車両が交互に進むようになる。第1のルールにより基本的には車両は加速レーンの先頭で合流を行うが、先頭まで待てずに途中で合流する車両も確率的に発生する。実データをもとにした予備実験により $P_z = 0.05$ と定めた。合流部の可視化の様子を図3に示す。

(3) モデル切り替えの基準の合流部への拡張

高橋らのモデル [1] では1本の道路を連続したセルで表現し、セルの密度情報およびその変動係数をもとに各セルに適用するモデルを決定した。合流部では2本の道路が関わるため、密度の扱い方を工夫する必要がある。本研究では本線側のセルの密度を考慮する際に、合流車線に相当するセルの密度と足し合わせて扱うものとした。

また、加速レーンと本線の一方がマクロモデル、もう一方がミクロモデルという状況であると、ミクロモデル側の車両が合流に伴う速度調整を実行できず、それに起因する渋滞の形成や延伸を再現できない。そのため、加速レーンのセルと本線のセルは同じモデルを適用するルールを定めた。どちらか一方にミクロモデルが適用されたら、他方にもミクロモデルが適用される。

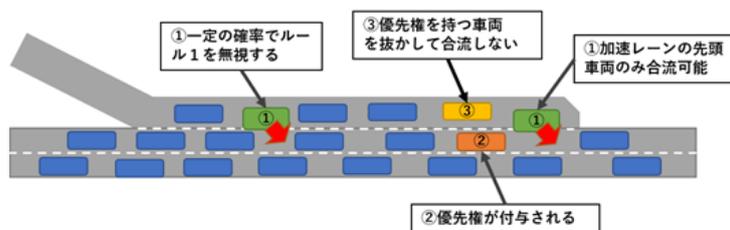


図-2 ジッパー合流の概要

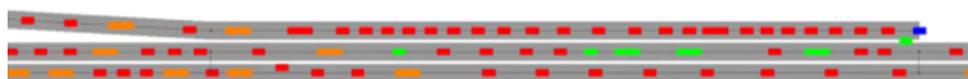


図-3 合流部の可視化

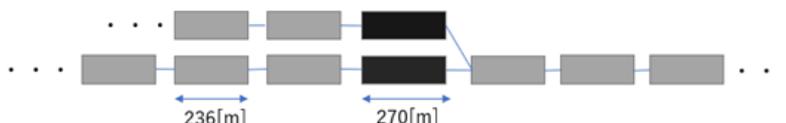


図-4 道路ネットワークのセルによる表現

3. 高速道路合流部を想定したシミュレーション

(1) シミュレーション条件

提案モデルを用いて実在する高速道路の合流部を含む区間のシミュレーションを実施した。全長は約 26 km であり、本線は 3 車線、合流車線は 2 車線である。合流車線では加速レーンより上流に約 1 km の道路を設置した。図 4 は対象区間をセルで表現したものであり、マクロモデルでシミュレーションする際に使用する。セルの長さは $u\Delta t_{\text{macro}} \approx 236.1$ m に設定する。ただし、自由流速度 u を 85 km/h、マクロモデルのタイムステップ幅 Δt_{macro} を 10 s とする。例外として合流部のセルの長さのみ現実の合流車線の長さに合わせて 270 m に設定した。上流端点から流入する交通量には観測値から推定した値を使用した。

CTM で使用するパラメータを表 1 に、IDM で使用するパラメータを表 2、表 3 に示す。モデル切り替えに関する閾値は $K_{\text{th}} = 18.0$, $CV_{\text{th}} = 0.05$ とした。モデル切り替えのアルゴリズムについては高橋らの研究 [1] を参照されたい。

(2) シミュレーション結果

シミュレーションによって得られたセルごとの空間平均速度と観測値を図 5 に示す。比較のため、全域にミクロモデルを適用した場合の結果も示した。速度と色の対応は表 4 のとおりである。なお、全域にミクロモデルを適用した場合と比べて提案モデルによるハイブリッドシミュレーションでは計算時間が 1/15 ~ 1/13 程度まで短縮されたことを確認している。

図 5 を見ると、渋滞長、渋滞開始時刻、渋滞解消時刻は観測値と近い結果になっている。観測値では合流

表-1 CTM のパラメータ

臨界密度 k_c [veh./km]	20.0
最大密度 K [veh./km]	124.0
交通容量 Q [veh./h]	1700
forward wave 速度 u [km/h]	85.0
backward wave 速度 w [km/h]	16.3

表-2 IDM のパラメータ (普通車)

希望速度 v_0 [km/h]	100
加速度指数 δ	4
最小車間距離 s_0 [m]	2.0
安全車頭時間 T [s]	1.6
最大加速度 a [m/s ²]	1.4
快適減速度 b [m/s ²]	2.0
車両の長さ l [m]	4.4

表-3 IDM のパラメータ (大型車)

希望速度 v_0 [km/h]	80
加速度指数 δ	4
最小車間距離 s_0 [m]	4.0
安全車頭時間 T [s]	2.1
最大加速度 a [m/s ²]	0.7
快適減速度 b [m/s ²]	2.0
車両の長さ l [m]	8.5

部より下流でも 40 km/h 以下の低速領域がしばらく続いている。実際の高速道路では合流部より下流にも他

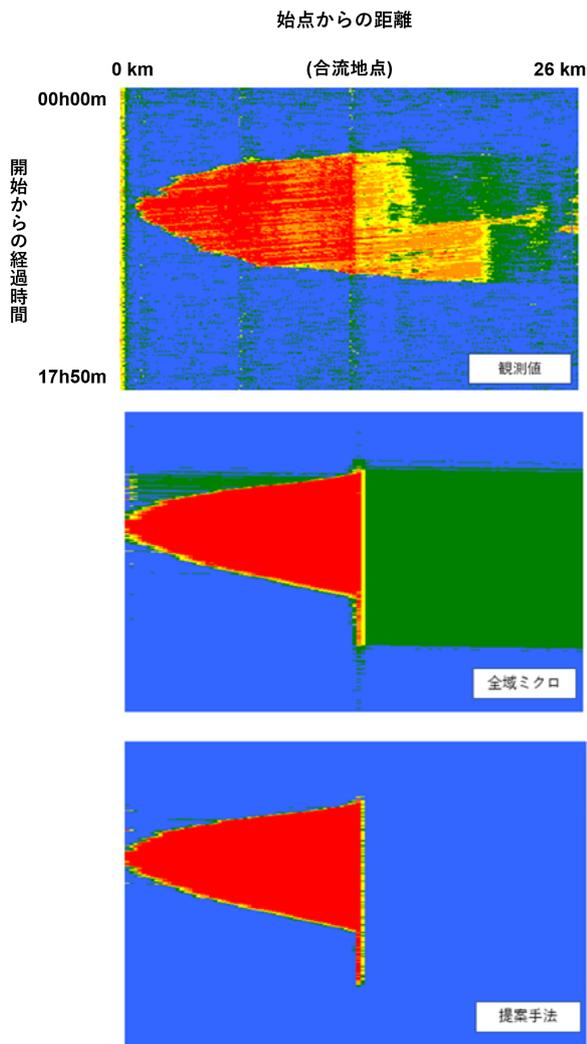


図-5 空間平均速度の比較

空間平均速度 [km/h]	色
0 ~ 20	赤
20 ~ 40	オレンジ
40 ~ 60	黄
60 ~ 80	緑
80 ~	青

のボトルネックが存在するが、本シミュレーションでは合流部以外のボトルネックは考慮していないため再現できていない。

4. 結論

本研究では、高橋らの提案した動的ハイブリッド交通流シミュレーションモデルを高速道路の合流部に適

用できるよう拡張した。とくに、マイクロモデルについて Al-Obaedi&Yousif の合流モデルやジッパー合流モデルを実装した。これに加えて合流部におけるモデルの動的な切り替えで発生するいくつかの問題点に対応することで、動的ハイブリッド交通流シミュレーションモデルを合流部に適用可能にした。実際的高速道路合流部における渋滞を再現するシミュレーションによって提案モデルの検証では、渋滞長や渋滞開始・終了時刻が観測値とよく一致しており、提案モデルが想定どおり機能することが確認できた。

Al-Obaedi&Yousif の合流モデルは比較的シンプルな合流モデルであったが、合流挙動を表現するマイクロモデルは数多く提案されており、用途によってはより複雑なモデルが必要になるかもしれない。たとえば、実際の分合流部付近では車線利用率が均等ではなく、車線利用率を正確に再現するにはより詳細な合流モデルやモデル切り替え時の車両変換処理の改善が必要になる。また、高速道路の工事計画の検討の際には車線規制のシミュレーションが不可欠であるが、本研究の合流モデルを車線規制部分に適用できるかどうか確認が必要である。

なお、本研究では各交通流モデルで使用するパラメータやモデル切り替え基準のパラメータの多くを固定していたが、より適切なパラメータを使用することでさらなる性能向上が期待できる。

上記と並行し、動的ハイブリッド交通流シミュレーションモデルの活用方法も検討する必要がある。たとえばシミュレーションの計算速度を活かしたパラメータ探索や、大規模ネットワークにおけるシミュレーションが想定され、これによりシミュレータやモデルがクリアすべき新たな課題が見つかる可能性がある。

参考文献

- [1] 高橋徹, 阿部和規, 藤井秀樹, 伊加田恵志, 松平正樹: 動的ハイブリッド交通流シミュレーションモデルの開発と速道路の実データを用いた検証, 日本シミュレーション学会論文誌, Vol. 13, No.1, pp. 37-47, 2021.
- [2] Daganzo C.F.: The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory, *Transportation Research Part B*, Vol. 28, No. 4, pp. 269-287, 1994.
- [3] Treiber, M., Hennecke, A. and Helbing, D.: Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations, *Physical Review E*, Vol. 62, pp. 1805-1824, 2000.
- [4] Al-Obaedi, J. and Yousif, S.: Microsimulation Model for Motorway Merges With Ramp-Metering Controls, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 13, No. 1, pp. 296-306, 2012.

自動運転を考慮したワンウェイ型カーシェアリングの最適配置と可視化シミュレーション

Optimal Placement of One-way Carsharing Based on Autonomous Car and Visualization Simulation

惣野源也¹⁾, 長谷川浩志¹⁾

Genya Sono and Hiroshi Hasegawa

1) 芝浦工業大学 大学院理工学研究科 システム理工学専攻 (埼玉県さいたま市見沼区深作307)

Car sharing services have become a sharing service that is attracting attention all over the world. However, one-way car sharing requires relocation due to uneven distribution of vehicles, and it is necessary to guide the optimum station layout at the introduction stage. In addition, it is expected that Autonomous cars will be introduced for car sharing in the future. Therefore, the purpose of this paper is to reduce costs and improve the utilization rate in consideration of relocation by Autonomous operation and station placement based on users. In addition, visualization simulations are performed.

Key Word: MaaS, Autonomous Car, Car Sharing, Optimization, Visualization

1. はじめに

近年、カーシェアリングは世界的に注目されつつある。2020年3月には日本でのステーション数は約2万カ所、会員数は200万人を超えた^[1]。さらに、自動車に関しては、自動運転レベル3の販売が開始し、自動運転の普及が本格化しようとしている。

中でも海外で、普及が進んでいるのがワンウェイ型カーシェアリングである。ワンウェイ型カーシェアリングは、車両の貸出場所と返却場所が異なるものである。しかし、利用したいがステーションが近辺になく借りることができない、返却できない問題が生じてしまう。この問題を解消するためには、ステーションの再配置、自動運転を考慮した、車両の再配置が必要となる。

川上らは、貪欲法を用いた再配置の最適化、ダイナミックプライシングによって利用者自身による再配置を行った^[2]。ステーションは、互いに等間隔の距離間で既存する施設を仮想のステーションとして設定した。

本研究では、自動運転による再配置や利用者に基づくステーション配置を考慮したコストの削減、利用率の向上を目的とする。また、自動運転への適用も考慮するため、EV車におけるバッテリーの要素と自動運転車による流しの活用も加味して各車ごとの再配置を行う。さらに、時間帯ごとの利用率からステーション配置を定式化して求める。

2. システム構成

本研究のシステム構成を図1に示す。本研究では、栃木県那須町にてワンウェイ型カーシェアリングサービスの導入を想定する。ステーションは、川上らの研究と同様に那須町のある地域を一定範囲とした中で、既存する施設を仮想のものとして設定した。



図1 システム構成

3. 再配置のながれ

図2では利用者はステーションAから車両を利用し、ステーションBで車両を返却したい。また、ステーションAは空車、ステーションDは満車の状態である。そのため、ステーションDもしくは利用可能な車両が存在するステーションCから車両をステーションAへ再配置を行う。このとき、どちらのステーションから車両を移動させるかを価値関数 $V_{i,j}$ にて判断する。式(1)に価値関数 $V_{i,j}$ について示す^[2]。

$$V_{ij} = \frac{1}{E - G + 1} + \Delta + w_t t_{ij} \quad (1)$$

ここで、Eは再配置によって取り除かれる要求拒否の数、Gは新たに生成される要求拒否の数である。また、 Δ はE、Gが発生する間にかかる時間、 w_t 、 t_{ij} は移動時間の重み、ステーション i 、 j 間を表す。

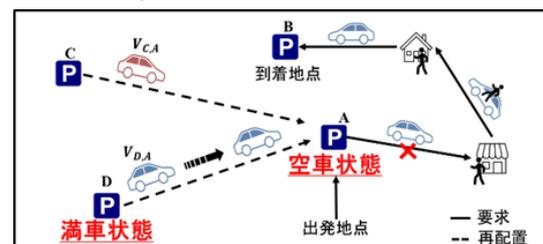


図2 再配置の流れ

4. p -メディアンモデルによるステーション配置

p -メディアンモデルを導入することにより、自動運転によるステーションから需要地までの移動コスト最適化を行う。 p -メディアンモデルとは、需要の分布が所与の場合、需要地から施設までの総距離が最小になるように、 p 個の施設を新たに配置するモデルである。 p -メディアンモデルは、以下のように定式化される。

$$\min \sum_i \left(w_i \sum_j d_{ij} x_{ij} \right) \quad (2)$$

$$\text{subject to } \sum_j x_{ij} = 1, \forall i \in N \quad (3)$$

$$x_{ij} \leq y_j, \forall i, j \in N \quad (4)$$

$$\sum_j y_j = p \quad (5)$$

w_i は需要*i*における需要量、 d_{ij} は需要*i*から施設*j*までの距離、 x_{ij} は需要*i*における施設*j*への割当を表す決定変数、 y_j は施設*j*における施設の有無を表す決定変数、 p は施設数、 N は施設の集合を表す。

5. p -メディアンモデルによるステーション選択

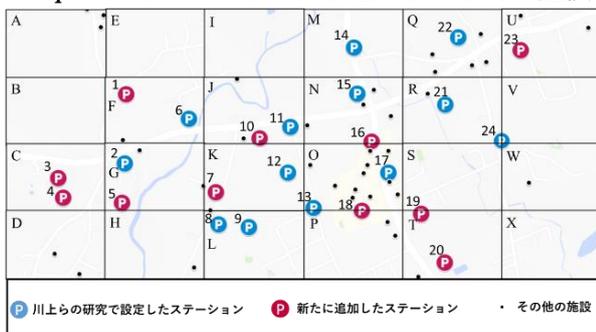


図3 仮想ステーション

図3では、川上らの研究で設定したステーション、新たに設定したステーション、その他の施設を示している。川上らの研究では、ステーションをランダムに選択している。新たにステーションを設定した理由としては、川上らの研究で設定した13個のステーションが最適な配置とは限らないので、 p -メディアンモデルで最適な配置を導くためである。 p -メディアンモデルを行う際、ステーション数と需要地の数を同じにしなければならないため、使用する需要地は、全体のエリアを24分割し、各エリアの施設間の中心点とした。また、需要地の時間帯混雑率はGoogle mapから取得し、時間帯ごとのステーション利用率とする。これらのデータを基に、ステーション配置の最適化を行う。

6. ステーション配置の検討及び考察

ステーション利用率、需要地とステーション間との距離を基に、図3で設定したステーションから、 p -メディアンモデルで選択されたステーションと先行研究で設定したステーションとで、各時間帯における1台当たりの移動距離と再配置回数の比較を行う。各時間帯における1台当

りの移動距離と再配置回数の結果を図4、表2に、初期条件を表1に示す。

表1 初期条件

ステーション数	13個
車両台数	312台
時間帯	6:00~24:00
利用人数	1000人/日
初期台数割合	全体の2/3

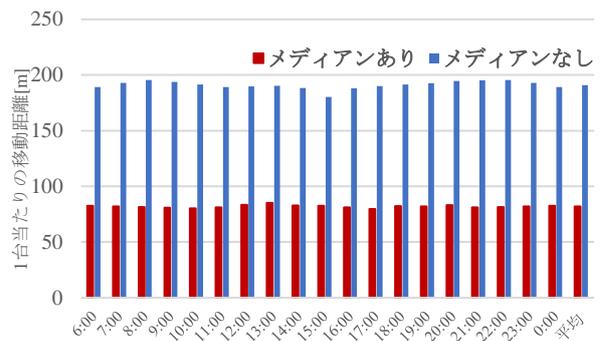


図4 移動距離比較

表2 再配置回数比較

メディアンなし	メディアンあり	改善後
253回	163回	106回

図4、図5から、 p -メディアンモデルにより選択されたステーションの方が先行研究のステーションより、1台当たりの移動距離が約120m短縮された。また、再配置回数に関しても p -メディアンモデルを導入することにより、削減を行えたが再配置回数の偏りが出てしまった。これらを踏まえて、空車要求拒否が出たステーションを満車要求拒否が出たステーションに近づけ再度、再配置回数比較を行った。結果を表3に示す。

表3 再配置回数

改善後	メディアン
106回	163回

改善後のステーションでは、さらなる再配置回数の削減を達成した。

7. 自動運転車への適応

(1) バッテリー残量

利用者が自動運転車両を使用するとき、バッテリー残量が一律に充電されている必要がある。再配置によりバッテリー残量に偏りが起きると、充電時間が足りず、顧客が自由に利用できない要求拒否が起きる場合がある。よって、充電残量が最も多い車を自動運転させるシステムをさらに組み込んだ。バッテリー残量が最も多い車と、ランダムな車でのバッテリー残量比較を図5に示す。

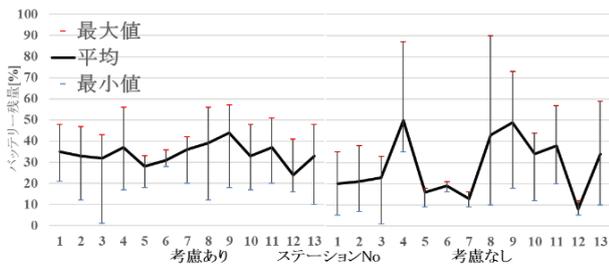


図5 バッテリー残量比較

バッテリー残量を考慮しない場合では、バッテリー残量差が大きくなってしまい要求拒否が出やすくなってしまふことが分かる。

(2) 流しへの応用

「流し」とは、タクシーの営業で用いられるもので、タクシーを走らせながら利用者を探す方法である。普通車のカーシェアリングでは、運転手が利用者のため「流し」を行えないが、自動運転車の場合は運転手を必要としないため、「流し」へ応用が可能となる。そこで本節では、自動運転車でシステムの運用する際の、流しへの応用を考慮するためバッファの追加を行った。バッファとは、自動運転車両が仮想的に存在する位置である。p-メディアモデルによって選択された仮想ステーションに5通りのバッファを追加した。それぞれのバッファを追加した場合で時間ごとの需要点から仮想ステーションまたはバッファまでの移動距離比較を行う。結果を図6に示す。

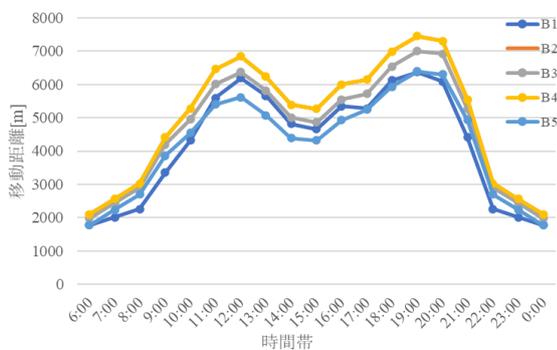


図6 時間帯ごとの移動距離比較

図7より6:00~10:00, 19:00~0:00の間ではバッファB1, 11:00~18:00の間ではバッファB5が最適だと分かった。それぞれの時間帯で最適なバッファを取り入れた場合の総距離比較を表4に示す。

表4 総距離比較

	バッファあり	バッファなし
総距離[m]	77578.87	81994.22

バッファを追加したことによって、総距離が短くなったのが示された。

8. 可視化シミュレーション

7章までの結果やシミュレーションの動きを可視化させる環境構築に取り組んだ。

本論文では、本研究のシステムをアプリケーション化し、実証実験を行うことを目標に、プロトタイプを作成を行った。これにより、カーシェアリング導入を検討する際のシミュレーションとしてこのシステムを操作する場合に開発者以外でも仕様検討を行うことができると考えた。

9. GoogleAPI×MapBoxによる可視化

位置情報をGoogleMap, 可視化ツールにはMapBoxを使用し、車両の移動と各ステーションへの再配置の様子を可視化させた。GoogleAPIは、地図上の位置情報をデータとして読み込むのに利便性が良く、移動するステーション間の道順を緯度経度で取得できるため利用した。MapBoxはMapBox社が提供するリアルタイムで更新されるライブロケーションマップの開発プラットフォームである。時間帯ごとに様々な数値が変動するシステムには最適なため、これを利用した。

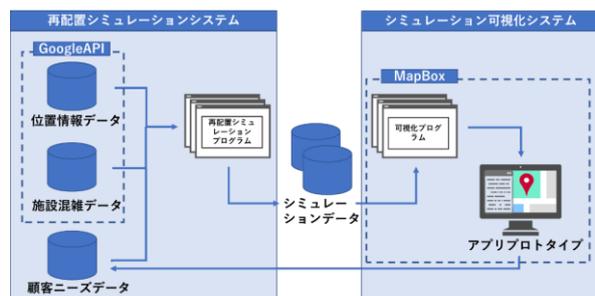


図7 可視化システム構成

図7は、2章から6章の再配置システムを、MapBoxを使用した可視化システムに組み込んだ構成図である。可視化システムのアプリケーションで顧客データを入力し、再度再配置シミュレーションを行いことで、フロントシステムからシミュレーションの値を変化させて結果を可視化させられる構成とした。

10. 今後の展望

ワンウェイ型カーシェアリングのシミュレーションにステーション最適化を含めることで、移動距離におけるコスト、再配置回数を削減できることが示された。さらに、自動運転要素を考慮することでシステム運用を現実的なものにすることができる。またシミュレーションを可視化することで、車両の動き、混雑率など妥当性を確認できた。

参考文献

- [1] 公益財団法人エコロジー・モビリティ財団, http://www.ecomo.or.jp/environment/carshare/carshare_top.html, 最終閲覧日: 2021年6月5日.
- [2] 川上悟・長谷川浩志, "ダイナミックプライシングを考慮したワンウェイ型カーシェアリングの再配置最適化", 2021, 第26回日本計算工学講演会論文.