

# 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<sup>1)</sup>, 内田英明<sup>2)</sup>, 藤井秀樹<sup>3)</sup>, 吉村忍<sup>4)</sup>

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が期待される。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、観光客が訪れる事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、天気の変わり易さ、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的化している。

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ミクロ交通流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1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ブ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		
道路レベル	1	2	3
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

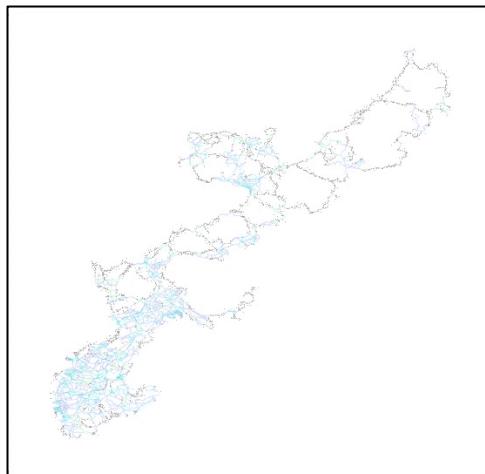


図 1 沖縄の交通ネットワーク 1

## 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了。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。

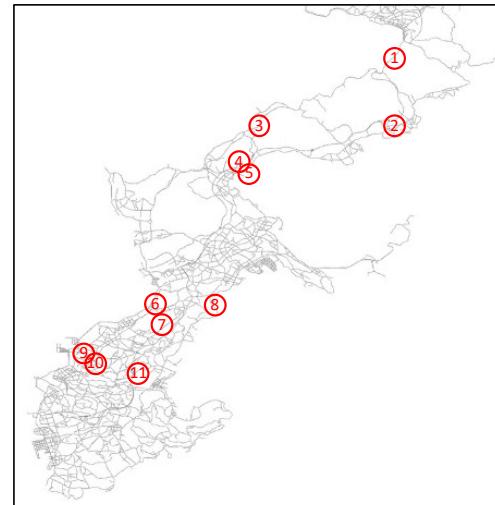


図 2 検証するリンク交通量の場所

シミュレーションを 1 日分行い、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、「時間がかかるない経路」「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、 $\eta$ をエンジンの熱効率、 $G$ [MJ/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]。

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

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。

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

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

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

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

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

ここで、 $\tau$ は転がり摩擦係数、 $m$ は車重、 $g$ は重力加速度、 $\theta$ は勾配角、 $k$ は回転部慣性質量係数、 $\rho$ 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、 $\eta_{ev}$ 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 <sup>3</sup> ]	1.204
空気抵抗係数	0.28
投影面積[m <sup>2</sup> ]	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 <sup>3</sup> ]	1.204
空気抵抗係数	0.28
投影面積[m <sup>2</sup> ]	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も燃費が悪化した。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。この原因是「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。とはいっ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。

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

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、 $w_d$ 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。

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

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 $w_d$ のどちらかが1の際には $w_{fc} = 0$ 、 $w_{fc} = 0$ の際には $w_t$ と $w_d$ 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のうちの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

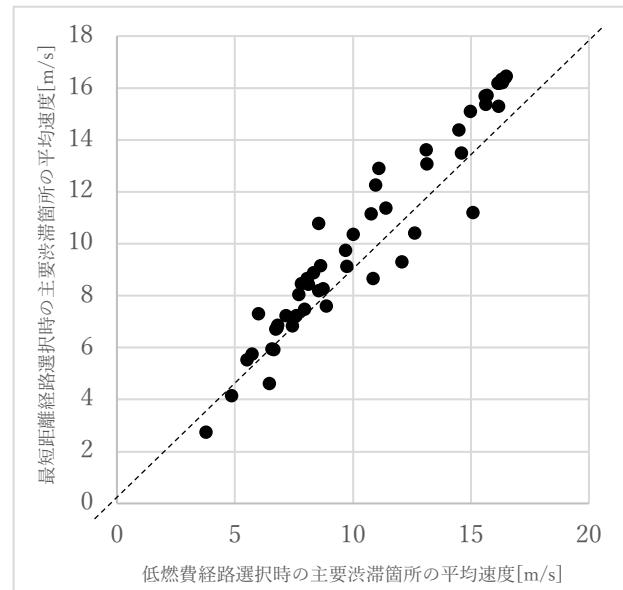


図3 最短距離選択時と低燃費経路選択時の主要渋滞箇所の平均速度

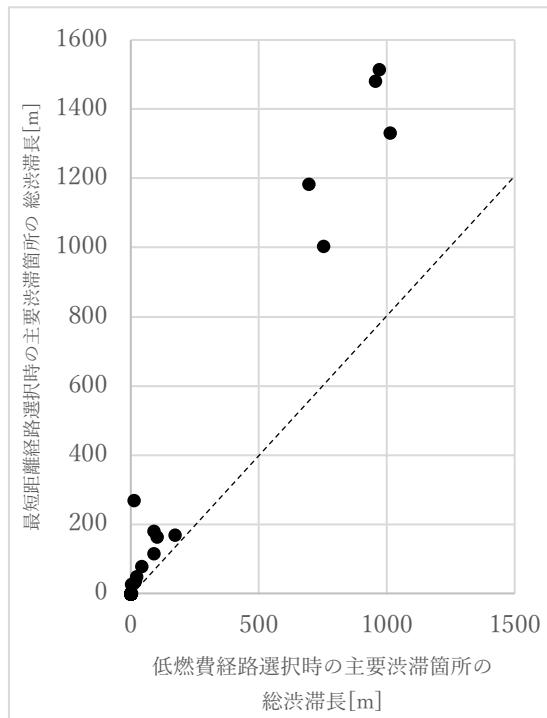


図4 最短距離選択時と低燃費経路選択時的主要渋滞箇所の総渋滞長

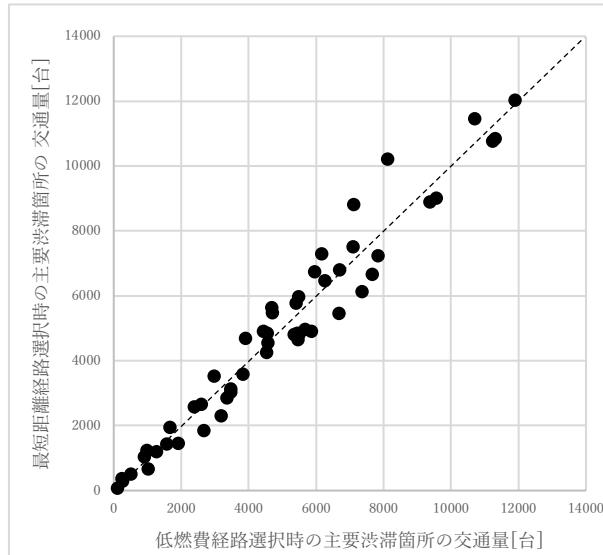


図5 最短距離選択時と低燃費経路選択時的主要渋滞箇所の交通量

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。

今後は交通が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 (WLTP) 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/passo/003\\_p\\_002/4.0/pdf/spec/passo\\_spec\\_202208.pdf](https://toyota.jp/pages/contents/passo/003_p_002/4.0/pdf/spec/passo_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](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