

# 自動運転車の走行を考慮したラウンドアバウト 構造・管理に関する基礎実験

宗広 一徳<sup>1</sup>・中村 直久<sup>2</sup>・佐藤 昌哉<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所寒地交通チーム主任研究員

(〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号)

E-mail:k-munehiro@ceri.go.jp

<sup>2</sup>正会員 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所寒地交通チーム

(〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号)

近い将来、自動運転車の普及による公道走行の進展が見込まれるところ、同車両の走行を考慮した道路の構造や管理への影響を把握することが求められている。ラウンドアバウトにおける自動運転車の走行の影響を把握するため、苫小牧寒地試験道路の模擬ラウンドアバウトにおいて、一般交通車両の中に自動運転車が混在する状態を再現し、走行性及び主観評価に関する基礎実験を行った。被験者として、一般ドライバー10名が本実験に参加した。被験者によれば、ラウンドアバウトにおける自動運転車の走行は、一定の安全性が確保されているとの結果が得られた。また、自動運転車のセンサーが区画線・標識を十分認識できるために、ラウンドアバウトの適切な維持管理が求められることが示された。

**Key Words:** *autonomous car, Tomakomai Test Track, road management, roundabout geometry*

## 1. はじめに

近年、日本国内はもとより、米国、欧州等の各地において、自動走行システムに関する研究開発及び公道実証実験が活発に行われている。内閣府による戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）自動走行システムプロジェクト<sup>1)</sup>では、関係省庁、自動車メーカー、学識経験者、自動車関連団体等が参加し、システム実用化や大規模実証実験等に向けての取り組みが着手されている。国土交通省は、2017年度に「中山間地域における道の駅等を拠点とした自動運転サービス実証実験<sup>2)</sup>」として、国内18箇所の道の駅等を拠点とした実験を実施・予定している。2017年12月には、北海道大樹町に位置する道の駅「コスモール大樹」を拠点とする実証実験も行われた。北海道においては、国内最多の28の自動車関連テストコースが立地されており、自動車メーカー等の民間企業によるテストコース及び公道での実証実験<sup>3)</sup>が数多く着手されている。2017年度には、石狩市、上士幌町、札幌市、岩見沢市、美唄市等で公道での実証実験<sup>4)</sup>が行われたことが公表されている。

米国ミシガン州<sup>4)</sup>では、自動走行テストコースにおける「先行技術開発・学術研究」（Mcity）、「実用化技術の検証と認証取得」（ACM）、「公道試験」

（MDOT Connected Corridor）という三層構造で自動走行試験が促進されている。米国ワイオミング州交通局<sup>5)</sup>は、除雪車などの道路管理車両と道路との協調システムに関する研究開発に着手している。

しかしながら、国内において、交差点の構造や道路管理に着目して自動走行実験を行った研究成果については、ほとんど明らかにされていない。また、ラウンドアバウトは、安全で環境にやさしく、かつ災害にも強い新たな交差点構造として、我が国において普及が促進することが見込まれている。これまでに、ラウンドアバウトにおける自動運転車の走行に関する研究は見当たらない。そこで、苫小牧寒地試験道路の模擬ラウンドアバウトにおいて、一般交通車両の中に自動運転車が混在する状態を再現し、ドライバーの走行実験を行った。

## 2. 本研究の目的

国内外における自動運転車に関する研究開発の促進並びにラウンドアバウト交差点の普及を踏まえ、本研究では以下を明らかにすることを目的とする。

- 1) ラウンドアバウトにおいて、一般交通車両の中に自動運転車が混在した状態でのドライバーの主観評価

- 2) 自動運転車の走行を考慮したときのラウンドアバウトの構造・管理面からの課題整理
- 3) 道路階層・自動運転レベルを考慮した道路構造・管理の提案

### 3. 自動運転技術の概要

#### 3. 1 自動運転技術の導入

自動車の自動走行システムは、運転者が行う認知・判断・操作を全てもしくは一部を機械が行うシステムであり、自動車交通への自動化の導入である。すでに、市販車の一部においては、自動ブレーキ、車線維持支援システム（Lane Keeping Assistant System : LKAS）、自動操縦制御（Adaptive Cruise Control : ACC）等の自動走行技術が搭載され、運転者が行う認知・判断・操作の部分的な自動化が導入されている。現在のところ、自動走行システムの段階は以下のように分類されている（表-1）。自動走行システムの導入により、交通事故の低減、渋滞の緩和、少子高齢化への対応が期待されている。さらには、新たなビジネスの創出などによる経済効果も高まっている。すでに、自動走行技術を搭載した市販車による高速道路走行時にLKAS+ACCのようなシステムの複合化、すなわちレベル2までの走行が実現している。

表-1 自動走行システムの段階

レベル分け	内容	技術の例
レベル5 完全運転自動化 (限定条件なし)	システムが全ての運転タスクを実施。	
レベル4 高度運転自動化 (限定条件あり)	システムが全ての運転タスクを実施。	
レベル3 システムの高度化	加速・操舵・制動を全てシステムが行い、システムが要請したときのみドライバーが対応する状態。	
レベル2 システムの複合化	レベル1の組合せ・高機能化	LKAS+ACC
レベル1 単独型	加速・操舵・制動のいずれかの操作をシステムが行う状態。	自動ブレーキ、ACC、LKAS

#### 3.2 自車位置推定技術

自動走行を実現するための自車位置推定技術は、より高精度な自車位置推定が求められる。自車位置推定技術<sup>9)</sup>には、走行ルート上のマクロ的位置推定と複数車線の道路を走行する際にレーン位置推定のミクロ的な自車位置推定が必要とされる。自車位置推定技術の例としては、以下を列挙できる。

##### 1) GNSS (Global Navigation Satellite System)

GNSSは、人工衛星からの情報を利用した測位システムである。GNSS方式は、比較的広域で測位可能である一方、地下、トンネルなどでは使用できない。また、天候による受信可能な衛星数の影響も受ける場合がある。RTK-GPSなどの補正情報を用いて測定精度向上を図る手法も検討されている。

##### 2) 慣性航法

地下やトンネルなどGNSSが使用できない環境において測位を補完する手法が慣性航法であり、ジャイロ、加

速時計、車速センサーを用いて自車の相対的な移動距離を推測する技術である。

##### 3) 磁気センサー

磁石を埋め込んだり貼り付けたりした道路をセンサーでたどるシステム。車両の位置を精緻に把握できる。GNSSの不感地帯や区画線が雪で覆われる圧雪道路などでの活用が期待されている。

#### 3.3 周囲探知技術

周囲探知技術は、センサー類を複合的に活用することにより、自車の周囲360度を必要な距離まで認識する技術である。周囲探知技術の例としては、以下を列挙できる。

##### 1) 前方カメラ

前方カメラにより、種々の対象物を検出・認識することができる。速度制限の標識を認識して速度警告を行う機能、区画線の認識により、その位置から自車の車線逸脱を警報する機能、緊急時には自動ブレーキを掛ける機能など、周囲の車両、交通標識、区画線を検出・認識できる重要なセンサである。

##### 2) ミリ波レーダ

ミリ波と呼ばれる非常に波長の短い電波を照射し、物体に反射されて帰ってくる電波を検出することにより、物体までの距離と方向を検出するセンサである。

##### 3) LIDAR

LIDARは、赤外線レーザー光をパルス状に照射し、物体に反射されて帰ってくるまでの時間から距離を計測するセンサである。道路上の標識や散乱物の検出も可能である。LIDARの検出データを地図の形式でプロットし、自車の走行に応じて逐次更新してゆくことにより、障害物があり走行が危険な領域と物体がなく安全に走行できるフリースペースとを区別して認識することができる。路肩に堆雪した状態、雪に覆われた物体の検知などでの活用も期待されている。

#### 3.4 自動走行車の運転に関する法整備

国際道路交通条約は、1949年8月にジュネーブで開催された「道路輸送および自動車輸送に関する国際連合会議」で採択され、「統一規則を定めることにより国際道路交通の発達及び安全を促進すること」を目的としている。日本は、1964年8月に道路交通条約に加盟した。現在（2017年4月時点）、97ヶ国・地域が加盟している。同条約の第8条第1項で、「自動車には運転者がいなければならない」とし、第8条第5項と第10項で、「運転者によるコントロールがなされなければならない」と規定している。日本の道路交通法では、「車両等の運転者は、当該車両などのハンドル、ブレーキその他の装置を確実に操作し、かつ道路、交通及び当該車両等の状況に応じ、他人に危害を及ぼさないような速度と方法で運転しなければならない」とされている。

このことに関し、国際道路交通条約の改正に関する議論が国連・欧州経済委員会にある道路交通安全作業部会

(WPI) で進められている。2016年3月、WPIは、自動運転の公道実証実験に関し、自動車を制御する運転者は、自動車内にいるか否かを問わないこととし、このような理解は、道路交通条約の改正は要さず、現行の道路交通条約の解釈上可能であることを確認した。本合意により、現行の道路交通条約の下でも、遠隔操作による公道実証実験が可能となった。日本の警察庁では、2016年5月、「自動走行システムに関する公道実証実験のためのガイドライン」を示した。このように、自動走行車の運転に関する法整備も動き出している。

#### 4. 苫小牧寒地試験道路における実験

##### 4.1 実験概要

苫小牧寒地試験道路（苫小牧市柏原）（外周路の延長L=2.7km）の模擬ラウンドアバウト（外径：27m）において、一般車両の走行の中に、自動走行機能を搭載した試験車両（自動運転車）が混在した状態を再現し、実走行させた（図-1）。対象としたラウンドアバウトの構造諸元は、表-2の通りである。実験は平成30年2月6日（水）に実施した。実験概要は、表-3に示す通りである。一般車両は、市販車をレンタルにより10台調達し、ラウンドアバウトの流入及び流出をランダムに繰り返した。自動運転車は、一般車両が走行する中、ラウンドアバウトの流入、流出を繰り返した。自動運転車には、運転操作を行わない状態で担当技術者2名が同乗した。

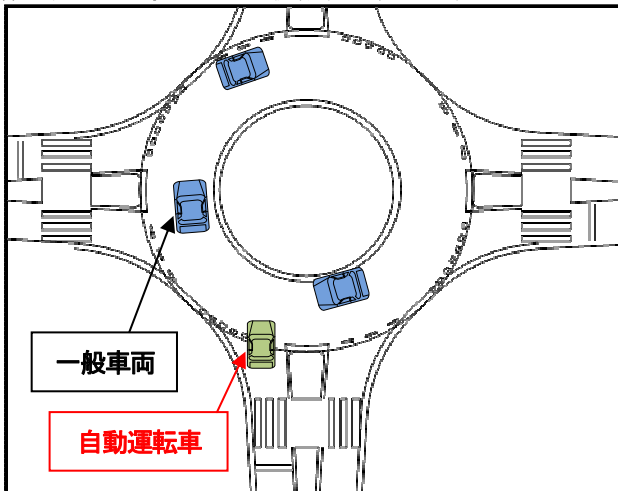


図-1 苫小牧寒地試験道路の全景（苫小牧市柏原）

表-2 ラウンドアバウトの構造諸元

構成要素	諸元
環道外径	27.0m
中央島直径	12.0m
環道幅員	5.0m
環道幅員+エプロン部	7.0m
流入部の半径	13.0m
流出部の半径	15.0m

表-3 実験概要

項目	内容
実験日	平成30年2月6日(水)
時間帯	10時~17時
天候	晴れ
路面状態	乾燥
実験車両	自動運転車 1台 一般車両 10台
走行区間	ラウンドアバウト 直線部

また、ラウンドアバウトの外にも、試験道路の外周路に位置する単路部（直線部）において、一般車両の中に、自動運転車が混在する状態を再現し、走行した。

##### 4.2 主観評価の実施

一般車両の運転者として、普通自動車運転免許を有する一般ドライバー10名が参加した。実験に参加した一般ドライバーの内訳（性別、年代、運転歴、年間走行距離）は、表-4のとおりである。一般ドライバーは、自動運転車が混在した状態のラウンドアバウト（交差点）を走行後、アンケートに回答した。アンケートの設問では、「自動運転車が混在した状態の走行における主観評価（イライラ感、安全性、走りやすさ）」について7段階で評価した。イライラ感については、1：かなりイライラをする～7：全くイライラしない。安全性については、1：たいへん危険である～7：たいへん安全である。走りやすさについては、1：たいへん走りにくい～7：たいへん走りやすい。これらを主観評価点とした（表-5）。

また、同様のアンケートについて、試験道路の外周路の単路部走行においても行った。

表-4 実験概要

項目	内訳
性別	男性8名、女性2名
年代	30代：3名、40代：2名、 50代：4名、60代：1名
運転歴	10～19年：3名、 20～29年：3名、 30～39年：4名
年間走行距離	10,000km未満：1名、 10,000～20,000km未満：5名、 20,000～30,000km未満：4名

表-5 走行後のアンケート票

Q-1 走行中のイライラ感はどうでしたか

1 ← 2 3 4 5 6 7 →

Q-2 走行中の安全性はいかがでしたか

1 ← 2 3 4 5 6 7 →

Q-3 走行中の走りやすさはいかがでしたか

1 ← 2 3 4 5 6 7 →

## 5. 苫小牧寒地試験道路における実験結果

### 5.1 混在交通条件下での主観評価の結果

実験に参加した一般ドライバーによるアンケートの回答結果の主観評価（イライラ感）について集計したところ、**図-2**を得た。交差点部（ラウンドアバウト）と単路部について主観評価（イライラ感）を示したところ、平均値でわずかに交差点部（ラウンドアバウト）が高くなった。すなわち、実験に参加した一般ドライバー10名は、一般交通車両に自動運転車が混在した状態においても、イライラ感を感じることは少なかったと考えられる。

次に、一般ドライバーによる回答結果の主観評価（安全性）について集計したところ、**図-3**を得た。本評価値についても、交差点部（ラウンドアバウト）並びに単路部ともに、平均値で約5が得られた。すなわち、安全性もやや高いことが分かった。

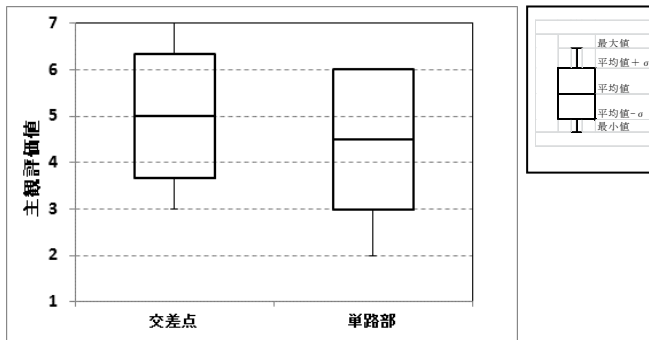


図-2 主観評価（イライラ感）

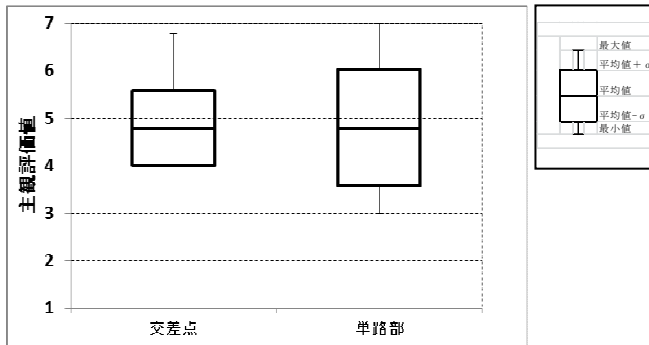


図-3 主観評価（安全性）

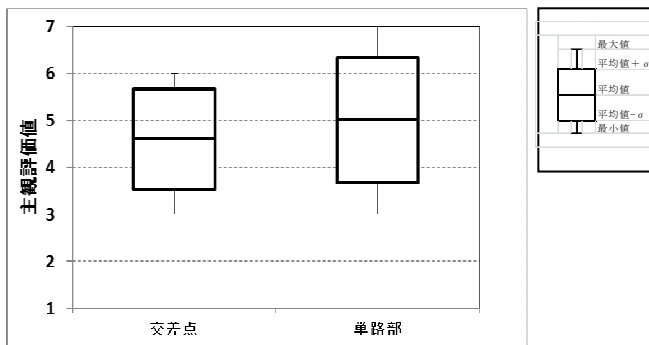


図-4 主観評価（走りやすさ）

また、一般ドライバーによる回答結果の主観評価（走りやすさ）について集計したところ、**図-4**を得た。本評価値についても、交差点部（ラウンドアバウト）並びに単路部ともに、平均値で約5が得られた。すなわち、走りやすさも比較的高いことが分かった。単路部と交差点部（ラウンドアバウト）を比較すると、わずかに単路部の方が評価が高くなった。

### 5.2 自動運転車の走行を考慮したときのラウンドアバウトの構造・管理する上での課題抽出

ラウンドアバウトにおける自動運転車の走行実験を通じ、構造・管理する上での課題を整理すると、以下のとおり列挙できる。

- 1) 自動運転車が、路面標示（区画線）を認識できること。
- 2) 自動運転車が、標識（環状交差点における右回り通行）を認識できること。
- 3) 自動運転車が、ラウンドアバウト内の障害物、歩行者、自転車を認識できること。

今回の実験では、苫小牧寒地試験道路の模擬ラウンドアバウトにおいて、車両のみを対象とした実験を行った。すなわち、歩行者と自転車の混入については、対象としてはいない。よって、歩行者と自転車の混入について、引き続き検討する必要がある。

## 6. 道路階層及び自動運転を考慮した構造・管理

### 6.1 道路の機能

道路は、あらゆる社会経済活動を支える最も基本的な社会資本であり、人や車に対する交通機能に加えて、上下水道や電線類などの公共公益施設を収容し、採光・通風・防災のための空間機能を有している。さらに、都市においては街並みの骨格を構成する基幹施設である。このような道路の多面的な機能により公共の施設に寄与し、国民生活に大きな利益をもたらしている。道路の機能のうち、交通機能（Traffic Function）に着目し、縦軸に連絡スケール、横軸に道路種別を取り、北海道を事例とし道路階層区分<sup>7)</sup>を試案した（**表-6**）。さらに、道路階層同士の接続の可否と道路交差点の構造様式<sup>8)</sup>を整理した（**表-7**）。連絡スケールの大きい階層A・Bの接続方式は、立体交差を標準とする。連絡スケールの中程度以下の階層C・D・Eについては、交差形式として信号交差点、ラウンドアバウト、無信号交差点を許容する。また、その他の道路（私道など）については、無信号交差点を交差形式としている。



表-6 道路階層区分の試案（北海道の場合）

	高規格幹線道路		一般道路			その他
	A 高速道路	B 自専道	C 一般国道	D 道道	E 市町村道	F 私道
I 圏域間連絡	○	○	△	-	-	-
II 圏域内連絡	-	○	○	△	-	-
III 市町村間連絡	-	-	○	○	-	-
IV 市町村内連絡	-	-	-	△	○	-
V 生活道路	-	-	-	-	○	○

注) ○:主に分担している。  
△:現状では部分的に分担している。

表-7 道路階層に応じた接続方式の試案（北海道の場合）

	A 高速道路	B 自専道	C 一般国道	D 道道	E 市町村道	F 私道
A 高速道路	立体	立体	立体	-	-	-
B 自専道	-	立体	立体	-	-	-
C 一般国道	-	-	信号交差 /RAB	信号交差 /RAB	-	-
D 道道	-	-	-	信号交差 /RAB	信号交差 /RAB	-
E 市町村道	-	-	-	-	信号交差/ RAB/無信号 交差	無信号交差
F 私道	-	-	-	-	-	無信号交差

注)RAB:ラウンドアバウト

6.2 求められる道路構造・管理

近い将来の自動走行システムの導入を視野に入れたとき、道路構造・管理にどのようなインパクトがあるかについて検討する。道路階層に応じた自動運転の内容及び求められる道路構造・管理の試案をした（表-8）。道路階層別に見ると、次のとおり考えられる。

(1) 圏域間・圏域内連絡：階層A・B

高速道路（自動車専用道路）における小型車やトラックの隊列走行など物流面での適用が考えられる。また、夜間や深夜などの長距離トリップの移動時における適用も考えられる。すでに、一部の市販車に搭載されたLKAS（車線維持支援システム）及びACC（自動操縦制御）により追従走行、すなわちレベル2の自動走行が実現している。将来的にはレベル3及びレベル4といった

表-8 道路階層に応じた自動走行システムの内容及び求められる道路構造・管理の試案

	自動運転レベル	活用場面	求められる道路構造	求められる道路管理
1) 圏域間・圏域内連絡 (階層A・B)	現行:レベル2 将来:レベル3・4へ	・小型車やトラックの隊列走行(物流) ・除雪車の運転支援	・道路付属物や標識の集約・簡素化	・区画線が常時認識できる高い水準の除雪
2) 市町村間連絡 (階層C)	現行: - 将来:レベル2へ	・公共交通 ・除雪車の運転支援	・道路付属物や標識の集約・簡素化 ・交差点形式の標準化	・高い水準の除雪 ・高い水準の除草
3) 市町村内連絡 (階層D・E)	現行: - 将来:レベル2へ	・公共交通やタクシー ・観光地における送迎車	・交差点形式の標準化	・中～高程度の除雪 ・中～高程度の除草
4) 専用空間 (階層F)	現行: - 将来:レベル4へ	・観光地内の周遊交通	・例えば、磁気センサーの埋設	・適宜、除雪・除草

システム全体が運転タスクを担うことも期待される。これらの自動走行機能は、主として道路の区画線による線形の認識及び前方車両の挙動の認識に基づき達成されている。よって、将来的に道路付属物や標識の集約・簡素化も期待される。

(2) 市町村間連絡：階層C

将来的にレベル2の自動走行システムの実現が期待される。LKAS及びACCといった自動走行技術が機能するための道路構造及び道路管理が求められる。道路構造では、道路付属物や標識の集約・簡素化が必要とされる。さらに、交差点形式の標準化が求められる。変形交差点をラウンドアバウト化することにより、この階層の交差点形式は、平面十字交差点とラウンドアバウトの2種類に集約できる。また、除雪や除草といった道路管理において高い水準が求められる。

(3) 市町村内連絡：階層D・E

この階層の自動走行システムの導入の活用場面としては、公共交通やタクシーの代替や観光地における送迎車な、への適用など限定的な利用が想定される。対象区間の交差点構造の標準化や適切な道路管理が求められる。

(4) 専用空間：階層F

この階層における自動走行システムの活用場面としては、観光地や公園内などの限定された空間における適用が想定される。限定空間であることから、システム全体全ての運転タスクを行うレベル4の自動走行が実現可能となると思われる。

7. おわりに

自動運転車の走行を考慮したラウンドアバウトの構造・管理に関する基礎実験により、以下が明らかになった。

(1)ラウンドアバウトにおいて、一般交通車両の中に自動運転車が混在した状態でのドライバーの主観評価を行ったところ、イライラ感、安全性、走りやすさを評価した。ドライバーからいずれも高い評価が得られ、ラウンドアバウトにおける自動運転車の受容性は高いと考えられる。

- (2) 自動運転車の走行を考慮したときのラウンドアバウトの構造・管理面からの課題抽出を行った。自動運転車が路面標示（区画線）や標識を認識できることが必要とされることが分かった。
- (3) 道路階層及び自動運転レベルを考慮したときに求められる道路構造として、ラウンドアバウトの位置付けについて提案した。

今後、自動走行システム技術の進展を踏まえた道路インフラの構造・管理に与えるインパクトに関する知見を深める所存である。関係する道路管理者（国土交通省北海道開発局，北海道，自治体）や民間企業（自動車メーカー等）・団体との連携を進めていく予定である。

謝辞：本研究の実施に際し、「自動運転技術の活用による除雪車の運転支援と道路構造・管理に関する研究」の共同研究の参加企業からの協力を賜った。ここに謝意を表す。

(2018.4.27 受付)

## 参考文献

- 1) 内閣府：戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）自動走行システム研究開発の取組状況，[http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/miraitoshikaigi/4th\\_sangyokakumei\\_dai3/siryou9.pdf](http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/miraitoshikaigi/4th_sangyokakumei_dai3/siryou9.pdf), 2017.
- 2) 国土交通省：中山間地域における道の駅等を拠点とした自動運転サービス実証実験，<http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j.html/automated-driving-FOT/index.html>, 2017.
- 3) 経済産業省北海道産業局：生産性革命の実現に向けて～AI・IoTの地域社会への実装促進～，2017.
- 4) Mcity：Mcity Test Facility, <https://mcity.umich.edu/our-work/mcity-test-facility/>, 2017.
- 5) Wyoming DOT: Wyoming DOT Connected Vehicle Pilot, [https://www.its.dot.gov/pilots/pdf/CVP\\_WYDOTSystemDesign\\_Webinar.pdf](https://www.its.dot.gov/pilots/pdf/CVP_WYDOTSystemDesign_Webinar.pdf), 2017.
- 6) 橘川 雄樹, 外：自動運転実証実験～位置推定精度の検証, pp.48-53, IATSS Review Vol.42, No.2, Oct., 2017.
- 7) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所寒地交通チーム：安全快適な北の道を目指して, pp.50-56, 交通工学 Vol.43, No.4, 2008.
- 8) 大口 敬：車両の走行道路階層性を考慮した自動運転の適用, pp.25-32, IATSS Review Vol.40, No.2, Oct., 2015.