

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360226

研究課題名(和文) 一般街路を対象とした時空間上の車両走行軌跡・CO<sub>2</sub>排出量観測及び現象解析

研究課題名(英文) A Field Observation and an Analysis of Vehicle Trajectories and CO<sub>2</sub> Emission on Time-Space Diagram for an Arterial Road

研究代表者

小根山 裕之(Oneyama, Hiroyuki)

首都大学東京・都市環境科学研究科・教授

研究者番号：90313105

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,700,000円、(間接経費) 2,910,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、一般街路区間を走行する走行軌跡及びCO<sub>2</sub>排出量をビル高所からの複数ビデオ観測及び軌跡読み取り、結合及びスムージングにより観測・データ化し、時空間上の加減速挙動及びCO<sub>2</sub>排出量の特性を明らかにした。また、観測データと同条件でのマイクロ交通流シミュレーションを実行して加減速挙動及びCO<sub>2</sub>排出量を再現し、これらのバラツキや時空間的な広がりについて、実軌跡とシミュレーションの特性の違いを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to obtain data for vehicle trajectories on arterial roads and clarify the reproducibility of microscopic traffic simulators using this dataset. A field survey was conducted using several video cameras located at higher positions on two buildings and a probe vehicle. Then, vehicle trajectories were generated using semi-automatic vehicle tracking, projective transformation, and a Kalman smoothing method using the data obtained by the field survey. High accuracy was confirmed to some extent by comparison with the probe vehicle trajectories. Furthermore, a precise microscopic traffic simulation was performed using the detailed dataset. The simulation results and actual data were compared, and the feature of reproducibility of the simulation was investigated.

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：土木計画学・交通工学

キーワード：車両軌跡 CO<sub>2</sub>排出量 交通流シミュレーション 加減速挙動 検証

## 1. 研究開始当初の背景

交通工学分野では、交通流率 - 密度 - 平均速度の関係や、ショックウェーブの発生と伝搬、車群の拡散といった交通流特性や、車両の追従挙動、車線変更挙動などのミクロな走行挙動特性については多くの知見が得られている。一方、時空間上における車両の加減速挙動の実態、すなわち実交通における速度・加速度のバラツキおよび交通流状態との関係、無理な割り込みや沿道からの流入などの擾乱要因に伴う加減速挙動の時空間上の影響などは未解明である。

車両の加減速挙動が特に関係するのが、自動車からのCO<sub>2</sub>排出量や燃料消費量などである。一般に、交通流中の自動車からのCO<sub>2</sub>排出量は観測できないが、加減速挙動が再現できればCO<sub>2</sub>排出量はある程度推計できる<sup>1)</sup>。しかし、これまでは時空間上の加減速挙動のデータ蓄積がないため、CO<sub>2</sub>排出量についても実態を的確に表現した推計値が得られなかった。

交通施策に伴うCO<sub>2</sub>排出量の推計に、交通流シミュレーションの車両挙動にCO<sub>2</sub>排出モデルを組み合わせる方法がよく用いられている。これまでも検証の試みはなされているが<sup>2)</sup>、リファレンスとなるCO<sub>2</sub>排出量データがないため、実現象との比較に基づく妥当性の検証ができなかった。

これらの課題に対応する一つの大きな方策として、時空間上の全車両の走行軌跡をある程度速度・加減速の精度でデータ化すること、それに基づくCO<sub>2</sub>排出量データの作成が望まれる。

しかし、調査手法の限界により、時空間上の全車両の走行軌跡をある程度速度・加減速の精度でデータ化することは困難であった。

一方、複数ビデオによる比較的長区間(数百m以上)の車両軌跡の全車両観測を、速度・加速度の精度を確保しつつ可能とする方法論も開発されており<sup>3)</sup>、自専道において数例実施された実績があるが、一般街路への適用事例はない。現在は軌跡推定精度が格段に向上し、なおかつ実験車やプローブカーの技術向上により車両軌跡やCO<sub>2</sub>排出量(燃料消費量)の計測も容易になった。これらを踏まえ、高所ビデオ観測と実験車による観測を組み合わせた新たな観測調査を実施し、時空間上の加減速挙動とCO<sub>2</sub>排出量についてのデータを得るに、機は熟したと判断し、本研究を提案するに至った。

## 2. 研究の目的

本研究では、一般街路の調査対象時空間内における全車両の走行軌跡及びCO<sub>2</sub>排出量をビルからの複数カメラによる観測からデータ化し、時空間上の加減速挙動やCO<sub>2</sub>排出量のバラツキ等の特性を明らかにすること、及

びそれらのデータを用いて、交通流シミュレーションモデルを用いたCO<sub>2</sub>排出量推計手法の妥当性を明らかにすることを目的とする。

本研究の目的、到達点は2つある。まず、一般街路の信号交差点周辺の一定区間の車両軌跡を観測・データ化し、さらに車両軌跡からCO<sub>2</sub>排出量を算出することにより、時空間上の加減速挙動やCO<sub>2</sub>排出量の特性を可視化することである。もう一つは、このようにしてデータ化した車両軌跡とCO<sub>2</sub>排出量をリファレンスとして、交通流シミュレーションモデルを用いたCO<sub>2</sub>排出量推計や、それに影響を与える加減速挙動について妥当性を検証することである。

## 3. 研究の方法

### (1) 高所からのビデオ観測調査および実験車による走行調査

信号交差点を含む街路として外堀通り(虎ノ門交差点~新橋)を対象区間として取り上げ、複数ビデオによる観測調査を実施した。主な概要は以下の通り。

- ・調査対象区間：外堀通り(虎ノ門交差点~新橋)を対象とした(図-1)。区間長は約1km、対象区間内に信号交差点を計7カ所含む。本区間を選定した理由は、一定距離に渡って直線であること、両端にビデオ設置可能な高層ビルがあること、比較的信号間距離が短いこと、一定の交通量あること、などの理由による。ビデオ設置箇所のビルは、当該区間を挟んで相対する、霞ヶ関ビル(35F)及びパナソニック電工ビル(24F)とした。

- ・調査対象日及び時間帯：2011年11月22日(火)及び12月2日(金)、いずれも9:30~12:30に実施した。

- ・ビデオの設置：ビデオ設置それぞれのビルにおいて4台ずつ、計8台設置した。用いたビデオは、ハンディタイプのフルハイビジョ



図 - 1 調査対象箇所



図 - 2 ビデオ画像例(霞ヶ関ビル3台目)

ンビデオカメラ (SONY HXR-NX5J) である。なお、ビデオの画角設定に当たっては、各ビデオ画像間において重複が発生するように設定した。撮影画像例を図-2に示す。

・実験車等によるプローブ走行調査：計5台のプローブ走行調査を実施した。うち、1台は東京大学生産技術研究所が所有する実験車 MAESTRO<sup>5)</sup>、4台はレンタカー (トヨタコーラフィルター) である。それぞれ、車内にGPSセンサーを搭載し、1秒毎に測位を行った。

・信号現示等読取調査：対象区間内の信号交差点7カ所において調査員を配置し、信号現示及び信号切替タイミングを目視にて1秒単位で読み取った。

・ビデオカメラ設置位置の測量調査：ビデオカメラ設置位置については、測量業者に委託し、調査日毎に多角測量において実施した。  
・道路座標の測量：ビデオ画像から実座標への射影変換を行うための折れ面座標設定のため、アジア航測(株)のMMS<sup>6)</sup>によるレーザー測量を行った。これにより、道路上の任意点の座標を読み取ることができる。

## (2)ビデオ画像からの車両軌跡読み取りと車両軌跡導出

ビデオ画像から車両軌跡を読み取り、小宮ら<sup>7)</sup>が開発した複数ビデオ軌跡の結合とカルマンスムージングによる軌跡の同定を行った。また、得られた車両軌跡データをtime-space上に展開し、速度・加速度を分析するとともに、走行軌跡からCO<sub>2</sub>排出量の推計し、その分布を推計した。主な概要は以下の通り。

・ビデオ画像の読取り：ビデオ観測調査を実施した2日間のデータのうち、ビデオ画像の質や交通条件等が最もよい、12月2日11:30~を対象として、ビデオ画像から車両軌跡を読み取った。虎ノ門交差点から新橋駅日比谷口交差点までの約850m、虎ノ門交差点を起点とする方向を対象とした。虎ノ門交差点を基準として2サイクル分を対象として、下流側交差点まで追いかけてトラッキングする形式をとった。なお、当該時空間に途中で流入・流出した車両も対象とした。当該区間を撮影していない1台を除く7ビデオ画像について、計185台の車両を読み取り対象とした。

・折れ面の設定：ビデオ画像から実座標への射影変換を行うため、折れ面の設定を行った。具体的には、ビデオ座標上の特徴点 (路面標示の端点、道路の縁石など) について、ビデオ画像及びレーザー測量による実座標を読み取り、できるだけ均一かつ鋭角三角形となるように折れ面を設定した。

・射影変換及びカルマンスムージング：小宮ら<sup>7)</sup>が開発した手法による。具体的には、折れ面を用いたビデオ画像から実座標への射影変換を行い、車両毎・ビデオ毎に実座標系での車両軌跡を生成した。それにより撮影されているビデオ台数分の軌跡が生成される

ことから、それらの複数ビデオ軌跡を結合するとともに、カルマンスムージングによる位置・速度・加速度・加減速度の整合性を図ったスムージングを行った。

これらの走行軌跡をタイムスペース図上に図示するとともに、加減速度の比較、CO<sub>2</sub>排出量の推計等を行い、特性を考察した。

なお、CO<sub>2</sub>排出量の推計は、JCAP詳細排出量モデル<sup>1)</sup>を用いた。乗用車については、2.0L乗用車の排出マップを用いている。

## (3)マイクロ交通流シミュレーションの再現性分析

観測データと同条件で交通流シミュレーションを適用して、実測データとの比較分析を行った。シミュレーションの概要は以下の通り。

・使用シミュレーション：マイクロ交通流シミュレーション VISSIM<sup>9)</sup>を用いた。本モデルは世界中で最も用いられている商用モデルの一つであり、車両挙動モデルとしては追従型で街路ネットワークの分析に適している Weidemann<sup>74)</sup>を用いている。

・対象ネットワーク：対象区間のうち、虎ノ門交差点~新橋駅日比谷口交差点間の全長約838mとする。その間の信号交差点数は5つである。また、交通需要は各交差点の端点のみから発生するものとする。発生ゾーン数は12である。対象交通は両方向とする。ただし、以降の分析においては虎ノ門 新橋駅日比谷口方向のみを評価対象とする。以降、この方向を「順方向」ということがある。また、逆の方向を「逆方向」と言う。

・対象時間帯：平成23年12月2日11時~12時(1時間)とする。本シミュレーションではシミュレーション開始時の交通はない。そのため、シミュレーション開始時間帯は交通を導入するための時間も兼ねており、実際の交通とは異なる。

・車種：乗用車、大型貨物車、バスの3種類を対象とする。なお、バスについては、VISSIMのPT(Public Transport)機能を用いて、バス停(3バス停×2方向=6カ所)、2路線(都01, 渋88)を設定した。バイクは対象としていない。

・交通需要の観測とOD交通量の算出：以下の手順により行った。

ビデオデータから、交差点の方向別交通量をサイクル毎に読み取る。

順方向について、交差点で右左折により流入、流出した車両については、1台毎に流入時刻と起終点を読み取る。これにより、対象区間を直進で通過した車両以外の需要はすべて把握できる。

順方向については、のデータより対象区間を直進で通過した車両以外のOD交通量をサイクル毎に集計する。このデータをのデータから差し引いたものを、直進方向のOD交通量として設定する。

逆方向については、交差点の方向別交通

量より分岐率を設定して、起点となる交差点の交通量に分岐率を乗じて算出する。

・シミュレーションのための OD 交通量の設定：シミュレーションの OD 交通量は、時間帯別 OD 表の形式で与える。以下の3種類を設定した。

Cycle 毎：前節で作成した OD 交通量をそのまま用いる。なお、Cycle の切れ目はオフセットの影響により交差点により異なる。また、サイクル長も時間的に変動している。そのため、OD 表は各交差点を流入ゾーンとする OD 毎に分けて設定している (case 名=cycle)

15 分毎：Cycle 毎の OD 交通量を 15 分毎に集計したもの (case 名=15min)

1 時間毎：Cycle 毎の OD 交通量を 1 時間毎に集計したもの (case 名= 1hr )

OD 表にて需要を設定する車種は、乗用車、大型貨物車の 2 車種とする。バスについては、VISSIM の PT (Public Transport) 機能を用いて、路線を設定する。また、流入時刻については実際の観測データを元に設定している。VISSIM の機能により、バス停において停車及び乗降扱いを行っている。

・信号パラメータの設定：観測した信号パラメータを用いて、以下の 2 つの信号パラメータを設定した。

観測した信号パラメータをそのまま用いる (case 名= real)

観測した信号パラメータを 1 時間帯で平均して、算出したサイクル長、スプリット、オフセットを用いる (case 名= fix)。なお、今回のケースでは、平均サイクル長は  $C=140$  秒であった。

・その他の設定：乱数シードは 5 種類設定した。各種パラメータの設定については、Desired Speed を旅行時間の整合性を考慮して 45~55km/h に設定した以外は、基本的にデフォルト値のままとした。

#### 4. 研究成果

(1) ビデオ画像からの車両軌跡読み取りと車両軌跡導出

今回の軌跡推定において、運動モデルに組み込んだ加加速度成分まで組み込んでいるが、速度が 0 となる状況では観測誤差の影響を除去しきれず、推定誤差が発散してしまった。これは、信号による停止・発進挙動が発生する一般道路特有の課題である。この対策として、本研究では軌跡推定プログラムへの入力データとなる走行車両の画面座標データセットを停止ごとに分けて作成した。これによって、停止時の推定誤差発散は無くなったが、平滑化処理の特性上、データセットの始点と終点では推定精度が低下するため、停止前後で軌跡が得られなかったサンプルが多数生じた。

これらの課題により、結果的には当初目標としていた全車両の精緻な走行軌跡のデー

タ化には至らず、一部データの軌跡化にとどまる結果となった。なお、推定された車両軌跡については次節の図 - 7 に示す。

推定された車両軌跡の精度を確認するため、軌跡化したプローブ車両について、当該プローブ車の軌跡を安定して推定できた霞が関ビル側 0m 地点から約 160m 地点まで 30 秒間について、プローブ車が取得した GPS 測位値、速度と、画面座標から得られた軌跡推定結果を、両者のタイムスタンプをキーに比較した。図 - 3 に速度の比較結果を示す。プローブ車の速度低下時に走行位置が 10m 程度乖離している以外は、概ね両者は一致している。

今後に向けて想定される技術開発項目を以下に列挙する。

・画面座標読み取り効率と精度

本研究では、対象車両を 1/30 秒ずつ、手作業で画面座標を取得した。動体検知アルゴリズムで移動体を認識し、特徴点の時間軸上の画素情報の相関関係を利用することで、車両のトラッキングが可能である。ただし、時々刻々変化する車両とカメラの位置関係から、長区間に渡って全て同一の車両上の一点を認識することは困難であるため、手作業による追跡点の修正を加える必要がある。手作業による修正を前提とした自動追跡プログラムの開発と、動体検知アルゴリズムの最適パラメータの調整が今後の技術開発課題である。

・路面標定点データセットのエラーチェック

軌跡推定アルゴリズムでは路面を三角形メッシュで近似し、画面座標を地上座標に変換している。この時、地上座標の測量値や画面座標の読み取り、両者の対応付けにミスがあった場合、推定精度の低下を招く。従来は車両軌跡推定の段階で、多数の車両の同地点での推定精度低下によって、上記の不整合を発見していたが、検算プログラム等を開発することで、軌跡推定作業の前にデータセットの不整合を発見することが望まれる。

・停止時の推定精度安定性向上

現在は一定値として与えている観測誤差共分散値、状態変動誤差共分散値を観測時刻に対して動的に与えられるよう、推定手法の見直しが必要である。上記誤差分散を動的に与えることにより、停止時は直前の観測誤差

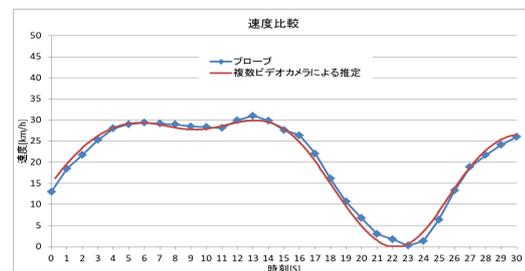


図 - 3 車両軌跡推定結果の精度検証 (速度比較)

0とし、スムージングアルゴリズムで推定される推定誤差共分散値の変動を無くし、推定精度と安定性が向上すると考えられる。

・推定パラメータの調整

軌跡推定にあたり観測誤差分散の設定等のパラメータ調整作業が必要となる。このパラメータは主として観測誤差に基づき設定されるが、推定結果を確認しながら試行錯誤的に決定しており、多数の車両の軌跡推定では効率的な作業が難しい。動体検知アルゴリズムの内部パラメータ等を参照し、観測誤差を動的に把握する技術開発が今後の課題である。

(2) マイクロ交通流シミュレーションの再現性分析

(1)で示したとおり全車両軌跡のデータ化ができなかったため、推計した軌跡を用いた分析は主に定性的な車両軌跡の比較にとどめ、プローブカーデータによる定量的な比較を行う。また、紙面の都合上、シミュレーションの各ケース間の比較についての分析・考察は最小限にとどめる。

シミュレーションの再現性検証

まず、シミュレーションの再現性について記す。交通量は概ね再現されているが、cycle ケースではサイクル毎の交通量の再現性が高いのに対し、集計した平均交通量を与えたケース(1hr, 15min ケース)では、時間帯によるバラツキが再現されていない箇所が見られた。旅行時間については、real-cycle ケース(つまり、交通量及び信号現示を可能な限り詳細に再現したケース)の結果の一例を図-4に示す。おおきくずれているが、その原因は路上駐車の影響による容量低下を十分に反映させていないことによるものと考えられる。なお、信号現示パターンについては、real ケースと fix ケースでは旅行時間に差が見られた(real ケースを基準とすると fix ケースでは平均で 2.4%減)。なお、乱数系列によるバラツキは、変動係数で 1.4%であった。

車両軌跡の比較検証

図-7は、ビデオ観測から生成した車両軌跡、プローブ車両軌跡、VISSIMの車両軌跡を表したものである。虎ノ門交差点からの流入において、シミュレーションでは青現示の前半部分に流入が集中しているのに対し、実軌跡では後半部分にも集中している。実軌跡では、虎ノ門交差点で後半部分に流入した車両が、下流の交差点で捌け残り、滞留列を形成しているが、シミュレーションではその部分に滞留列は発生していない。全体的に、シミュレーションでは赤信号による停止波が発生しない限り、追従中に大きな減速波は発生していない。一方、実軌跡では、途中速度が低下し、多くの車両が減速してい

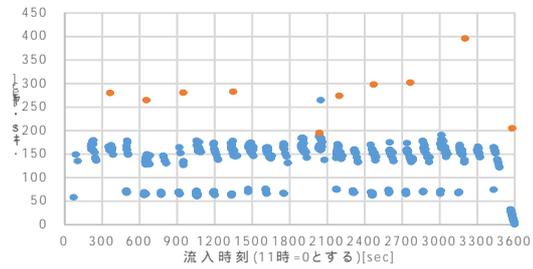


図-4 旅行時間

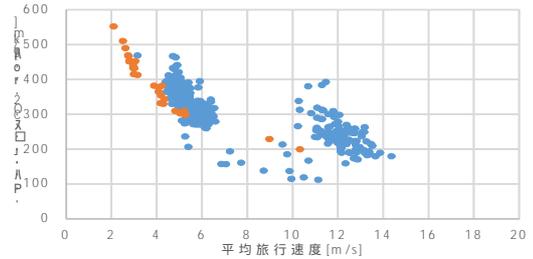


図-5 単位距離あたりCO2排出量

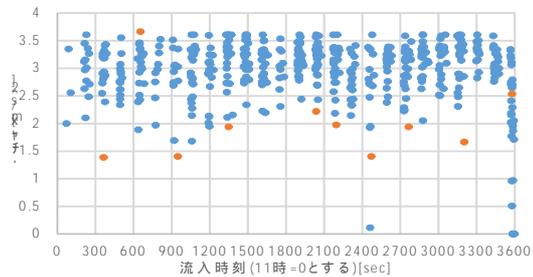


図-6 加速度

(いずれも、青：VISSIM、橙：シミュレーション)

る箇所がある。そのため、シミュレーションにおいて、青現示の後半部分に流入する場合にも、下流の信号において停止せずに進行している。それに対し、実軌跡では前方車両の影響を受けて速度が低下し、信号を通過できずに停止している。

このような現象はビデオ等による現象観察や、プローブ車両などによる解析からも把握できるが、このように全車両を軌跡化することにより、現象の時空間的な推移が非常によく解明できる。また、それによる車両軌跡への影響や、CO2排出量への影響は、全車両を軌跡化することにより初めて明確に見えてくるものである。ただし、今回は実軌跡のデータ化が断片的であるので、全貌は判断できない。これは今後の課題である。

加減速度、CO2排出量の比較検証

CO2排出量は、旅行時間の再現性を反映して、観測データの方が多かった。一方、単位距離あたりCO2排出量は図-5に示すとおり、シミュレーションの方が大きい。また、加速度の違いを図-6に示すが、シミュレーションの方が大きくなっている。また、減速度についてもシミュレーションの方が大幅に大きい場合がある。単位距離あたりのCO2排出

量については、これらの加減速度の違いを反映しているものと考えられる。

まとめと今後の展望

今回の研究では、観測調査はこれまでにない規模と精度で、複数ビデオによる長区間の調査が実施できた。しかし、対象とした方法論が停止発進の多い一般道路に対して十分に対応できなかったため、全車両の軌跡化ができなかった。しかしながら、部分的に軌跡化できたものをシミュレーションと比較することにより、断面による交通観測やプローブ車両による軌跡の観測では得られない変化が示された。今後、先に掲げた問題点等を踏まえて方法論を改良する上で、CO2 排出量や加減速などのシミュレーションにおける再現性の比較検証を行っていくことが必要である。

- 1) 林：過渡排出量推計モデル+走行風による初期拡散モデル構築，JCAP 技術報告書，PEC-2004AQ-03，2005
- 2) 小根山裕之・松田啓・大口敬・鹿田成則：マイクロ交通流シミュレーションによる車両挙動及びCO2 排出量の再現性比較検証，土木学会論文集 D3, Vol.68, , 2012, Dec.
- 3) Akahane, Hatakenaka, "Successive Observations of Trajectories of Vehicles with Plural Video Cameras", International Journal of ITS Research, Vol.2, No.1, pp.47-53,2004

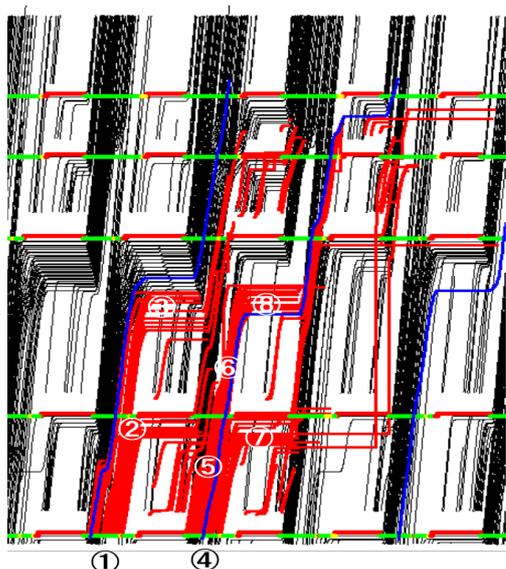


図 - 7 走行軌跡のタイムスペース図

(赤：ビデオ観測から生成した車両軌跡，青：プローブ車両軌跡，黒：VISSIM の車両軌跡 (cycle\_real ケースの一例)，緑 - 赤の水平線：各交差点での信号現示；下から順に虎ノ門，西新橋一丁目，西新橋，新橋二丁目，新橋駅日比谷口前)

4) 武藤・赤羽：車両の走行軌跡の精密観測に基づくサグ渋滞の分析，土木計画学研究・講演集，Vol.40，CD-ROM，2009

5) 須田義大・椎葉太一・檜尾幸司・桑原雅夫・小根山裕之・西川功：ITS 研究用実験車両の開発，日本機械学会交通・物流部門大会講演概要集，Vol.9，No.00-50，pp.63-64，2000

6) アジア航測 HP：  
<https://www.ajiko.co.jp/product/list/CT1/SC41/>

7) 小宮・大口・赤羽・堀口・桑原：車両間および車両と道路構造との相互作用の連続観測用実験車の開発，交通工学，Vol.44，No1，pp.71-80，2009

8) PTV Vision：<http://www.ptv-vision.com/>

9) Wiedemann, R.: Simulation des Strassenverkehrsflusses (in German), University Karlsruhe, 1974

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計1件)

Hiroyuki Oneyama, Asako Kikuchi and Masao Kuwahara: Verification of Vehicle Acceleration Behaviors Using Microscopic Traffic Simulation Model, Proceedings of 20th World Congress on Intelligent Transport Systems (Tokyo Big Sight, Tokyo), 15, Oct., 2013.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

小根山 裕之 (ONEYAMA, Hiroyuki)  
首都大学東京・都市環境科学研究科・教授  
研究者番号：90313105

### (2)連携研究者

大口 敬 (OGUCHI, Takashi)  
東京大学生産技術研究所・第5部・教授  
研究者番号：90281245

鹿田 成則 (SHIKATA, Shigenori)  
首都大学東京・都市環境科学研究科・助教  
研究者番号：30094270

赤羽 弘和 (AKAHANE, Hirokazu)  
千葉工業大学・工学部・教授  
研究者番号：60184090