

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（2年目の研究対象）】

①研究代表者	氏名（ふりがな）	所属		役職
	（いりょう たかまさ） 井料 隆雅	東北大学 情報科学研究科		教授
②研究 テーマ	名称	ETC2.0データの活用と評価を通じた次世代ETCの基本設計提案		
	政策 領域	[主領域] 領域2 [副領域]	公募 タイプ	タイプIV-1
③研究経費（単位：万円） ※R1は精算額、R2は受託額、 R3は計画額を記入。端数切捨。	令和元年度	令和2年度	令和3年度	総合計
	4,199	4,775	4,800	13,774
④研究者氏名	（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）			
氏名	所属・役職			
宇野 伸宏	京都大学 ・ 教授			
吉井 稔雄	愛媛大学 ・ 教授			
倉内 慎也	愛媛大学 ・ 准教授			
坪田 隆宏	愛媛大学 ・ 講師			
西内 裕晶	高知工科大学 ・ 准教授			
嶋本 寛	宮崎大学 ・ 准教授			
神谷 大介	琉球大学 ・ 准教授			
瀬谷 創	神戸大学 ・ 准教授			
安田 昌平	神戸大学 ・ 特命助教			
⑤研究の目的・目標	（提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。）			
<p>本研究では次世代ETCシステムの基本設計の提案を、ETC2.0データ等を活用したケーススタディによる要件抽出、新観測技術の実道実験、匿名化や外部データ連携技術等の開発を基に、要件を満たすに必要かつ十分に現行ETC2.0と連続性がある形で行うことを目指す。このために「テーマ1:アプリケーションを通じた要件抽出」「テーマ2:各種観測技術の実用可能性検討」「テーマ3:マップマッチングと匿名化手法の開発」「テーマ4:外部データ連携技術の開発」「テーマ5:次世代ETCシステムの基本設計案の提案」の5つのテーマの研究を3年間で実施する。本年度は、(1)ケーススタディのフォローアップ（テーマ1）、(2)経路データと交通シミュレーションとの連携（テーマ1）、(3)実走実験による観測技術検討（テーマ2）、(4)マップマッチングおよび匿名化の技術調査と開発の着手（テーマ3）、(5)外部データのうち人流データの情報収集と開発着手（テーマ4）を行う。</p>				

⑥これまでの研究経過

(研究の進捗状況について、これまでに得られた研究成果や目標の達成状況とその根拠(データ等)を必要に応じて図表等を用いながら具体的に記入。)

⑤で示した今年度実施中の5つのトピック(①～⑤)について進捗と見通しを報告する。なお、来年度実施予定の「テーマ5:次世代ETCシステムの基本設計案の提案」の展望については⑧に示した。

(1) 過年度のケーススタディで得た調査結果の分析を通じた要件抽出

本研究の目的の1つである「アプリケーションを通じた次世代ETCが持つべき要件の抽出」の一環として、本年度は東日本も含めたケーススタディを実施する予定であったが、新型コロナウイルスの拡大によりこれが不可能となった。これに代え、今年度は、昨年度実施のケーススタディ(高知市での国道56号線石立交差点における混雑分析、沖縄県での訪日外国人観光客のレンタカーによる観光行動分析)のフォローアップ分析による要件抽出を行った。これら2点は、地方における道路混雑問題の解決と観光振興といった、次世代ETCによる貢献が期待できる重要な分野を対象としており、要件抽出に適したものである。以下詳細を述べる。

(a) 国道56号線石立交差点東行の混雑分析

当該交差点は朝ラッシュ時に恒常的に混雑が発生する場所であり、左折車線の増設の計画があるが、その効果を評価するためには事前の交通状況の詳細を把握することが欠かせない。これに関し、すでに、現行のETC2.0データでも全レーン合計の飽和交通流率が推計できることを昨年度明らかにしている^[1]。一方、ETC2.0データではどの車線を走行しているかがわからず、交差点改良で重要な情報となるレーン別の数字の推計が困難であることも指摘した。

飽和交通流率は交差点の性能を示す重要な値であるが、車線の増設に限らない多様な改良方策を検討するのであれば、交差点付近での車両軌跡の詳細分析も欠かせない。交差点での飽和交通流率を決定する要因についてはよくわかっていないことも多く、交差点付近での追従挙動を対象地点ごとに詳細に調べることは、その交差点でどのような対策が有効かを考察するために重要な情報となるであろう。このためには現行のETC2.0よりも短い間隔で測位を行う必要があることはほぼ自明である。しかし単に測位間隔を短くすることは次世代ETCシステムのコストを引き上げる要因となり、必ずしも望ましいことではない。このため、できるだけ長い測位間隔で必要な情報を得るための方法論の開発と、その方法論が必要とする測位間隔の見積もりが、次世代ETCの要件抽出に欠かせない。

上記の目的の達成のため、今年度は、昨年度ビデオカメラ映像を用い計測した車両軌跡を次世代ETCによる車両軌跡と見立てた分析を行っている。例として、図1に、約6分間にわたって停止線上流部約60mの区間で観測した連続する車両2台の車頭間距離と後続車の速度の関係を示す。元の計測は1/30秒単位で行なっているが、ここでは、次世代ETCでの観測を想定し、GPSで一般的な1秒間隔とさらに長い5秒間隔の計測を想定した結果を示した。図1からは、1秒間隔であれば、速度と車頭間距離の関係がよく観測できる一方、5秒間隔では多くのデータが欠落していることが読み取れる。このようなデータの欠落は、高速で交差点直近を走行する車両が観測間隔のあいだに交差点直近の観測対象区間で全く測位されないことにより発生していると考えられる。

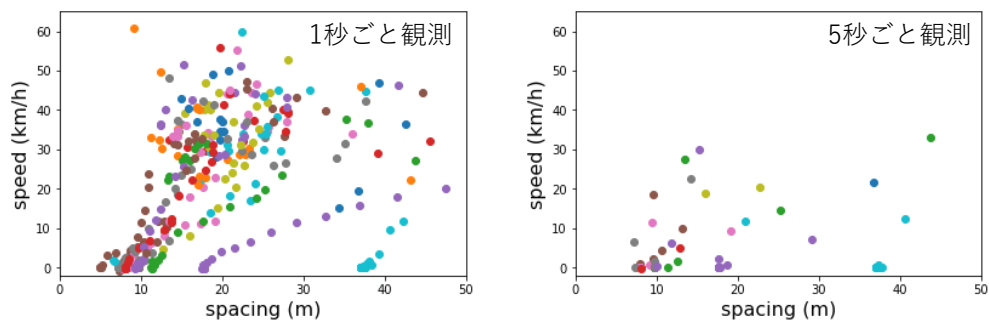


図1 石立交差点で観測した車頭間隔と速度の関係. 左：1秒ごとの観測による値，右：5秒ごとの観測による値. 欠測した車両があるため，車頭間隔は必ずしも前車に対するものとは限らない.

計測間隔による情報欠落の問題については，ETC2.0ですでに実現している大量観測による解決が期待できる. 実際，昨年度の飽和交通流率の推定は，月単位の観測期間のデータを用いることにより，非常に多くの数の車両が交差点前後のさまざまな位置で残した測位情報を組み合わせることにより成功している. 次世代ETCにより多数の車両のデータが観測されることを前提に，できるだけ長い計測間隔でより多くの車両軌跡に関する情報を得るための方法論を開発中である.

(b) 訪日外国人観光客のレンタカーによる観光行動分析

沖縄県の訪日外国人観光客が借用するレンタカーの利用実態の分析を，地域道路経済戦略研究会と連携し行なっている. このケーススタディでは，昨年度の中間報告以降に，ETC2.0とカーナビによるGPSロガーの車両軌跡の比較を行い，GPSロガーに比べてETC2.0による車両軌跡には欠落が相当量あることを示した(表1). また，GPSロガーのデータを用いて経路トポロジー^[2]を用いた回遊行動分析を行い，レンタカー貸出日数と回遊性の正の相関などの特性を明らかにし(図2)，次世代ETCにおいて車両軌跡の把握率を向上させることのメリットを示した.

今年度は，研究トピック(5)の外部データ連携技術の開発と連携し，レンタカーの回遊行動の行動モデル(特に目的地選択モデル)を用いた分析への準備をしている. 観光振興政策の立案や事前評価には，観光客の行動の特性を(経路トポロジーのような記述統計量などで)単に記述するだけでなく，行動モデルのような政策介入効果の評価が可能なツールを構築することが欠かせない. このためには選択肢集合としての観光スポットを列挙する必要があるが，そのためには，観光客が実際に滞在している場所を抽出する必要がある. 詳細については(5)の欄であわせて説明する.

表1 ETC2.0データとカーナビGPSデータとの観測結果の比較.

期間	車両総数	ツアー総数	観測あり ツアー数	観測総数	GPS 観測総数	ETC 観測総数	GPS-ETC 同時観測総数
2018/4/1 ~2019/3/31	30	2,787	2,539	204,259	199,752	38,252	33,633

- 「ツアー」は貸出1回に相当.
- 観測回数は「10分間に1回以上測位データが存在する」ことを1回として計算

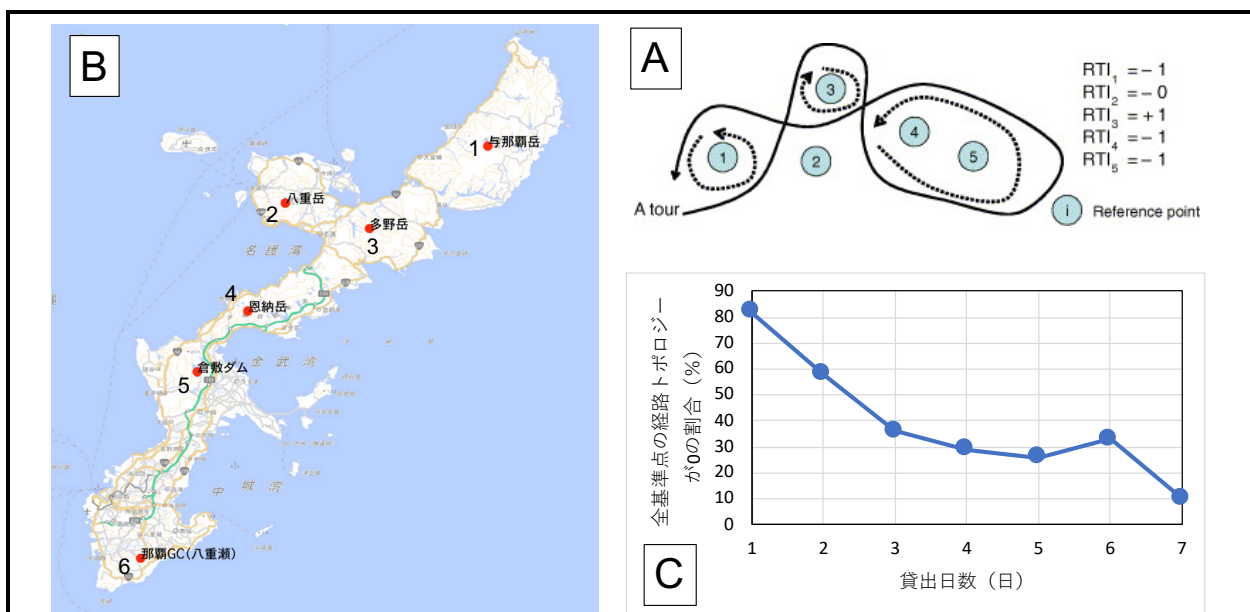


図2 経路トポロジーによるレンタカー利用客の回遊行動分析. A: 経路トポロジーの概念図^[2]. 基準点 (Reference point) を周回すると, その回数だけその基準点の経路トポロジーが1増える (左回り) か1減る (右回り). B: 分析時に沖縄本島内に設置した基準点. C: 経路トポロジーによる分析結果の例 (貸し出しごとの経路トポロジーの値がどの基準点でも0であった割合と貸出日数の関係).

(2) 軌跡データと交通シミュレーションの連携による施策検討と要件抽出

車両軌跡データは道路交通の現況とその問題点を知るために重要なものであるが, それに対する何らかの施策を検討するためには, 現況を知るだけでは不十分であり, 施策を行った結果を予想し, 行わなかった結果との差異を比較検討しなくてはならない. このために, 本研究ではETC2.0データと交通シミュレーションを連携する技術の開発とそれによる施策検討を試行し, その結果を基に次世代ETCの要件抽出を行う. 特に, ETC2.0および次世代ETCは交通状況を全国規模で収集するという特徴があるため, これを活かした広域な政策評価も可能とすることを目標としている.

開発中の技術の主な特徴は「1. ETC2.経路データから主要道路を自動抽出し, シミュレーション用のネットワークを自動生成する」「2. リンク旅行時間と一部のリンクの容量をETC2.0データから推定し, それをOD (起終点) 交通量とシミュレーションのパラメータ推定に活用する」「3. 高並列計算により全国規模での高速計算を可能にする」である. 1点目と2点目は, 過去に開発した車両軌跡の階層型データベースの技術と連携して新規開発している. 3点目は, 研究代表者が他プロジェクトで開発した動的利用者均衡配分型 (Dynamic User Equilibrium: DUE) の高並列交通流シミュレータ FastDUE^[3]を元に開発している. 現在プロトタイプが完成しており, 道路交通センサスのOD交通量を用いた計算を試行している. 図3に計算結果例を示す. この例では, リンク数は14万本程度, OD交通量は1億台程度と, 相当な規模の計算を実施している (計算上は10台を1パケットにまとめている). 今後, 今年度と次年度に渡って施策検討のケーススタディを実施し, それを通じて, 開発中技術の実務活用に向けた次世代ETCの要件抽出を実施する予定である.

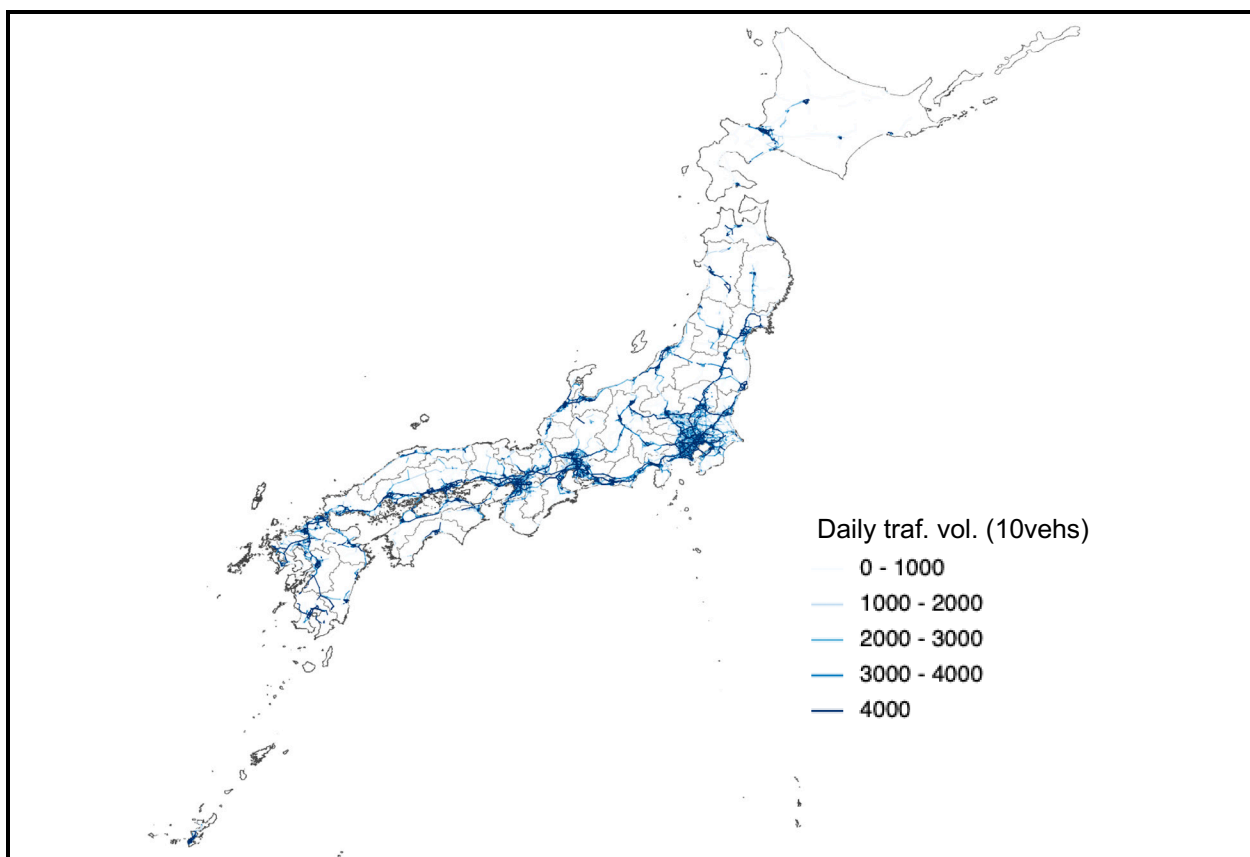


図3 FastDUE+ETC2.0全国道路シミュレータのプロトタイプでの計算結果. このプロトタイプでは地方部の主要道路が過剰に省略されネットワークの接続性が担保できない問題がある. この問題については主要道路抽出のための交通量しきい値の調整などにより対応予定である.

(3) 実車を用いた実験による各種観測技術の実用可能性検討

ETC2.0では困難だが実務上の要請が大きいものとして走行車線の特定があることについては、すでに各所でのヒアリング等により把握しており、昨年度よりそのための各種観測技術の実用可能性の検討を行ってきた。昨年度は予備調査としてGPS/GNSSによる測位技術とLiDARによる測距技術を検証し、特に高性能のGNSS機器によって、センチメートル級精度の位置特定による走行車線位置の特定が観測条件によっては可能であることを示した。しかし、これらの機器は概して非常に高価であり、技術的検討の必要はあるにしても、次世代ETCへの採用としてそのまま提案するには問題が多い。この点は国土技術政策総合研究所からのヒアリングでも指摘を受けたところである。

今年度は「1.市場に普及している比較的安価なGPS/GNSSを採用した機器での観測技術の実用可能性検討」「2. 市中に普及している外部デバイスの活用」の2点のアプローチから観測技術の実用可能性検討を行なっている。1. について、今年度は千円～数千円程度で市販されるGNSS/GPSデバイスを試用している。2. については「ドライビングレコーダー」と「スマートフォン」の2種を外部デバイスとして想定した。特に、Android OSを用いたスマートフォンでは、一般的なGNSS機器では不可能な衛星からの擬似距離の取得が可能であり、今回はこれの活用可能性を検証する。

これらの機器を搭載した実験車両を指定経路で走行させる実験を、12月に仙台市内で実施し、その結果を検討した上でさらに2月に名古屋市内で実施する予定である。指定経路は、特に多車線の交差点を各方向に複数回通過するように設定し、上述の機器により交差点における走行車線特定がどこまで可能かを検討できるようにしている。

現時点では仙台市内で実施したデータを取りまとめている。最初にドライブレコーダーによる走行車線特定の事例を報告する。提案手法では、ドライブレコーダーの画像の特定の（路面を捉える）横1ピクセルの画像をフレームごとに切りだして90度回転させて横方向に貼り付け、横軸が時間軸、縦軸が道路の横方向位置となる画像を作成している（図4）。これにより、少なくとも路面が見えている時間帯であれば、画像から車線を目視にて特定することが可能となる。図5で示す例では、広瀬通交差点に進入する車両が第2車線から第1車線に車線変更し左折する状況を確認することができる。この方法はフレームあたり1ライン分の画像しか必要とせず、画面全体に比べてデータサイズを大幅に削減できるという特徴を持つ。

フレーム(1/30秒)ごとに画面下部の1ラインを切り出し、それを連結すると、あたかも路面をスキャンしたような画像が得られる。

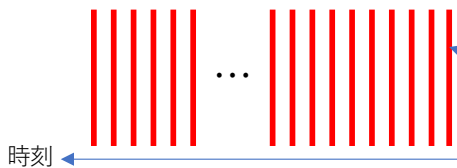


図4 ドライブレコーダによる路面スキャンの概念図

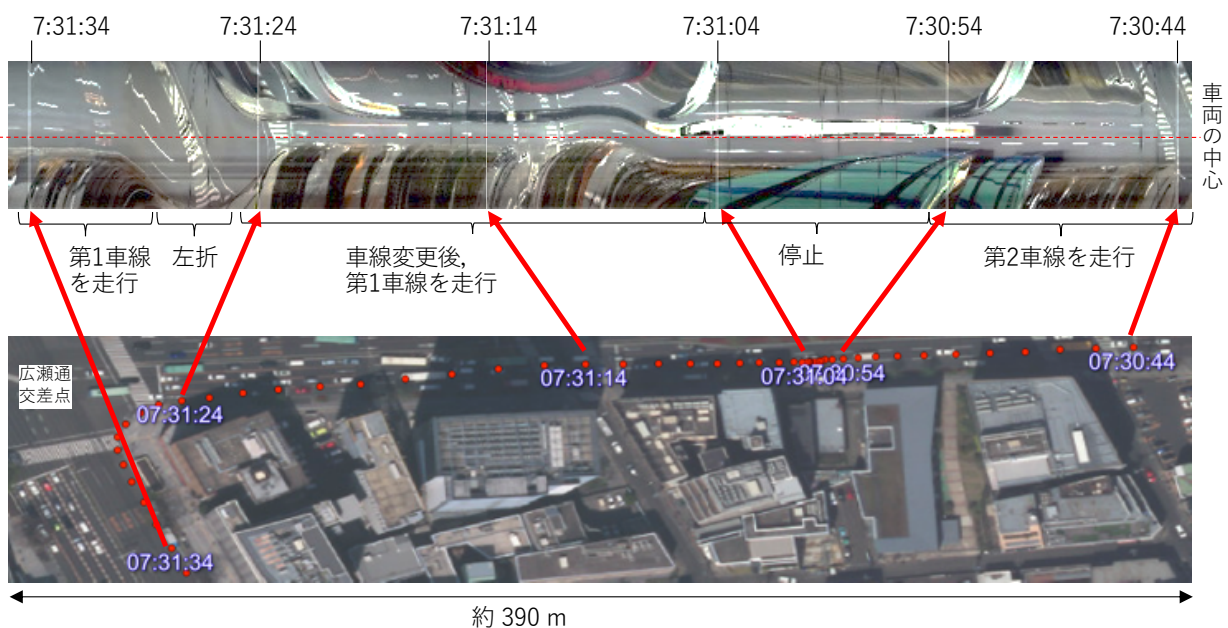


図5 実走実験によるドライブレコーダによる路面スキャンと車線特定の例

次にGNSS/GPSによる走行車線特定の可能性の検証について現時点での結果を報告する。仙台市内での実験走行路は、衛星の捕捉状況に関して多様な環境を試行することを意図し、(1)ビルが立て込んでいる市街地の交差点 (2)高層の建物がなく空が大きく開けた郊外の国道バイパス上の交差点 (3)高速道路の高架橋の下部に設けられた交差点 の3つの状況を含むように設定した。図6に、これらの交差点のうち、(1)と(2)における右折車と左折車の実験車両の走行軌跡を示す ((3)については航空写真を用いた走行位置の照合ができないため、ドラレコ画像による走行位置特定を実施中である)。(2)では右折/左折レーン上に概ねそった軌跡が取得されており、GNSS/GPSにより走行レーンを一定の精度で特定できることが期待できる。一方で(1)においては、右左折レーンはいずれも1本ずつであり、中間に複数の直線レーンがあるものの、右折車両と左折車両の軌跡を明確には分離できておらず、また、軌跡によっては大幅に位置をずらしているものも存在する。実際、GNSS/GPSで取得したNMEAフォーマットのデータにより、測位に使用した衛星の数が、(1)においては(2)に比べてかなり少ない傾向があることを確認している。このようにGNSS/GPSによる走行車線特定は、衛星の捕捉状況によってその精度が大きく変わることがわかる。

市街地での測位のずれの原因としてもっとも大きいのは、建物等での電波の反射によるマルチパスと呼ばれる現象であることが知られている。測位対象は必ず道路上にあることを前提としたうえで、マルチパスの影響のある衛星を測位時に除去することができればこのようなずれを緩和できる可能性がある。この点については、実験時にAndroid OSを用いたスマートフォンで取得した各衛星からの擬似距離のデータを用いて検証を行っている。

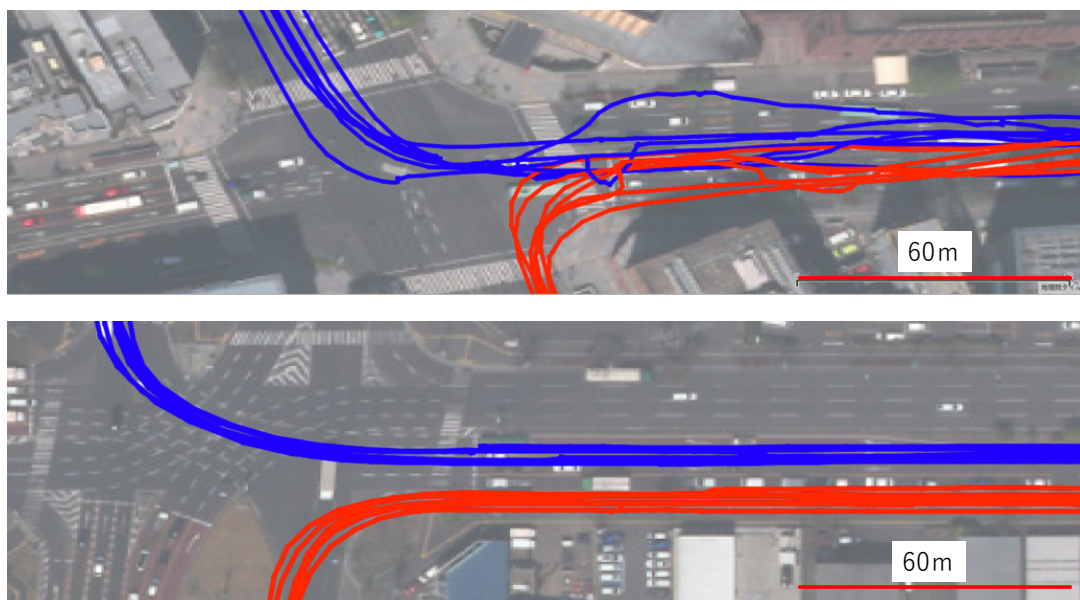


図6 実走実験で取得された交差点付近での車両走行軌跡の例。

上：市街地（広瀬通交差点付近），下：郊外部（国道4号箱堤交差点付近）

青線：東方向から北方向（右折），赤線：東方向から南方向（左折）

(4) 匿名化・マッチングアルゴリズム決定のための技術情報収集と開発着手

この技術情報収集は昨年度から継続して行っており、今年度は実装による性能検証を通じた開発着手も実施している。以下ではすでに一定の進捗のあったマップマッチングについて説明する。

車両軌跡の記録の際の位置情報の観測間隔は、広ければデータ量の節約に有利だが、道路が密な場所では経路を一意に特定できなくなる。この問題には最短経路探索で経路を補間する方法^{[4][5]}が有効である。しかしこの方法は計算コストが高く、また補間された経路は常に正しいとは限らない。今回は、この方法と、より狭い観測間隔を前提とした少ない計算量で実現可能な方法（Yang and Gidofalvi^[6]）の両方を実装し、観測間隔とマッチングの精度の関係を調査した。

図7に結果の例を示す。観測間隔が短いときはYang and Gidofalviの方法が、長いときは最短経路によるものが有利となった。この結果は特定の車両軌跡（実測）に対するものだが、次世代ETCにおける観測間隔の決定に活用できる定量的な資料を提供のために、包括的な分析を実施中である。

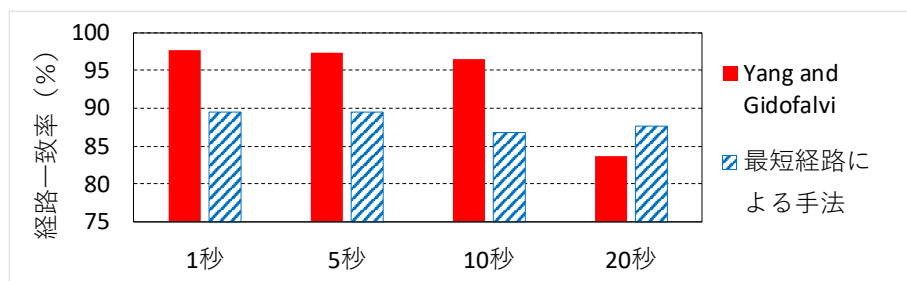


図7 GPS 観測間隔とマップマッチングによる経路一致率の関係

(5) 外部データ連携技術の開発のための技術情報収集

外部データとして特に人流データを対象とした技術情報収集を、具体的にデータを調達し沖縄県のケーススタディと連携し行った。人流データとしては、スマートフォンのアプリ利用者から許諾を得て取得した位置情報を匿名化したものを、沖縄県内について民間業者より調達して用いた。

調達したデータから沖縄県外居住者で一定数の観測点があるものを抽出し、そのデータに移動滞在判別（15分以上滞在）を実施し、滞在点の座標をその平均値として取得し、その結果を集計した上で空間的に連続する滞在点をクラスタリングし滞在スポットとして抽出する方法を考案した。その結果を沖縄本島全体で可視化したものが図8である。この方法論は国際通りのような大規模な歩行者空間は1個のスポットとして抽出してしまうが、互いの距離が一定程度ある島内の他のスポットでは有効に機能することを確認している。図8を見ると、少数かつ大規模な滞在スポットと、多数かつ小規模な滞在スポットが存在することがわかる。これらの滞在スポットは観光客の目的地の候補とみなせよう。当該データからは、個々の観光客の滞在スポットの訪問順や滞在時間を知ることも可能であり、ケーススタディで用いた訪日外国人レンタカーGPSデータを次世代ETCにより得られる車両軌跡データと見立てて、それを例えば図9のように重ね合わせることによる回遊モデルの構築を通じたケーススタディを今後（来年度にかけて）予定している。図10には、特定の場所において、滞在回数が多かった場所の概略位置と、同じレンタカーGPSデータから得られたの滞在点を重ねたものを示す。この例のように、人流データによる滞在箇所と駐車場との差が明確に出ている事例も多い。

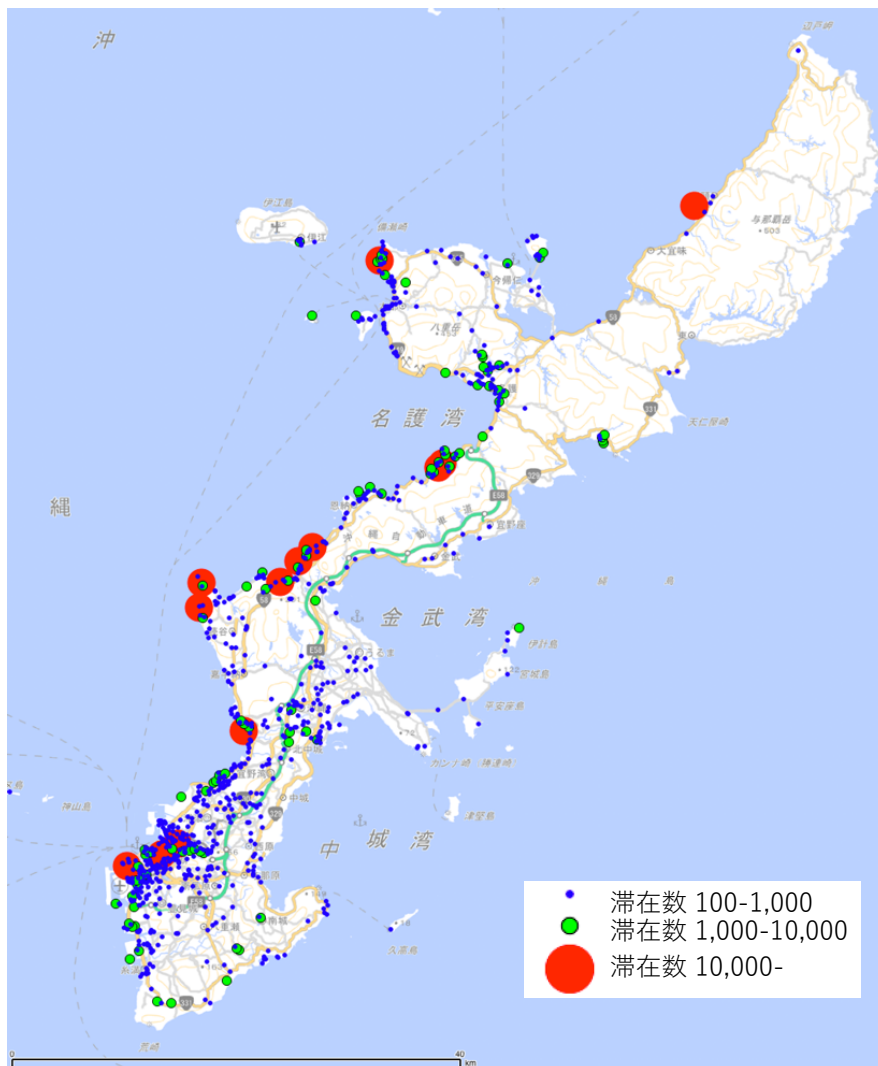


図8 人流データより抽出された滞在スポット

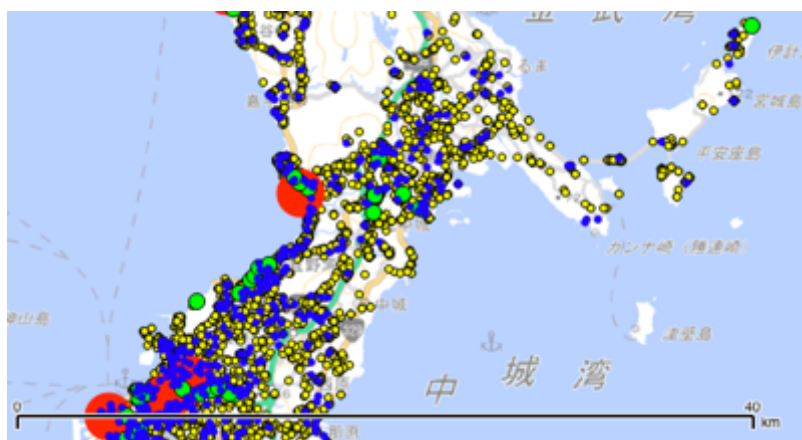


図9 人流データより抽出された滞在スポットとレンタカー滞在位置の重ね合わせ

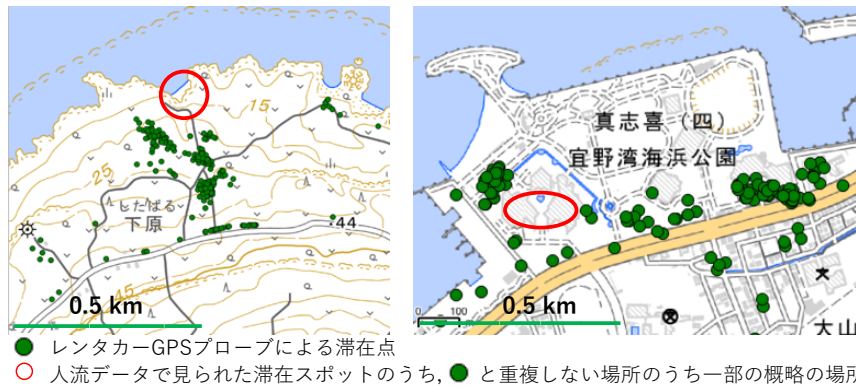


図10 人流データによる滞在点とカーナビ GPS データによる滞在点の比較の例

今回の分析結果は次世代 ETC と人流データの連携活用について複数の重要な知見を示している。第 1 に空間精度とサンプル数の重要性である。観光振興においては小規模だが多数ある滞在スポットの把握が欠かせない。今回の結果は、一定の空間精度とサンプル数を確保すればそれが可能となり、観光振興上重要な情報を得られることを示している。第 2 に車両と人の滞在位置には一定の差異があることである。図 8 の事例が示すように、ETC2.0 や次世代 ETC でも車両の滞在を把握することはできるが、滞在スポットとその特徴を正しく抽出できるとは限らない。人流データを活用して特定した滞在スポットとその特性をバックデータとして持つことにより、次世代 ETC で把握される車両の移動滞在と観光行動を関連づけて回遊モデルを構築し、観光振興施策の適切な評価が可能になることが期待できる。上述のような考え方を基本方針とし、来年度にかけて外部データのうち人流データとの連携技術の開発を行う予定である。

(参考文献)

- [1] 福嶋他：プローブカーデータを用いた信号交差点のパラメータ推定，第 60 回土木計画学研究・講演集
- [2] Asakura Y. and Iryo, T., Analysis of tourist behaviour based on the tracking data collected using a mobile communication instrument. Transportation Research Part A, 41(7), 684-690, 2007.
- [3] Iryo, T. et al. Fast calculation of dynamic traffic assignment by parallelised network loading algorithm, ISTS and IWTDCS 2018, Matsuyama, Japan, 2018, 6.
- [4] 朝倉康夫ほか,PHS による位置情報を用いた交通行動調査手法. 土木学会論文集, 653, 95-104, 2000.
- [5] Dalumpines, R., and Scott, D. M, GIS-based map-matching: Development and demonstration of a postprocessing map-matching algorithm for transportation research. In: Advancing geoinformation science for a changing world, 101-120, Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [6] Yang, C., and Gidofalvi, G., Fast map matching, an algorithm integrating hidden Markov model with precomputation. International Journal of Geographical Information Science, 32(3), 547-570, 2018.

⑦研究成果の発表状況

(本研究から得られた研究成果について、学術誌等に発表した論文及び国際会議、学会等における発表等があれば記入。)

- [1] Yasuda Shohei, Iryo Takamasa, Sakai Katsuya, Fukushima Kazuya: Data-oriented network aggregation for large-scale network analysis using probe-vehicle trajectories. IEEE ITSC, pp. 1677-1682, Auckland, Oct., 2019.
- [2] 福嶋一矢, 安田昌平, 井料隆雅：プローブカーデータを用いた信号交差点のパラメータ推定, 第60回土木計画学研究・講演集, CD-ROM, 富山, 2019年11月.
- [3] 松原大雅, 浦田淳司, 井料隆雅: 動的利用者均衡配分による平成30年7月豪雨後の広島都市圏における交通混雑評価, 第60回土木計画学研究・講演集, CD-ROM, 富山, 2019年12月.
- [4] 安田昌平, 井料隆雅, 坂井勝哉：車両軌跡データを用いたネットワーク集約手法, 交通工学論文集, Vol. 6, No. 2, pp. A_310-A_316, 2020年2月.

⑧研究成果の活用方策

(本研究から得られた研究成果について、実務への適用に向けた活用方法・手段・今後の展開等を記入。また、研究期間終了後における、研究の継続性や成果活用の展開等をどのように確保するのかについて記述。)

本研究は次世代ETCの基本設計提案を目指しており、本研究の成果は次世代ETCを設計し実装する際に活用されることを想定している。これまでの研究成果で得られた知見は、次世代ETCにおいて、(1)車両軌跡の欠測をできるだけ減らし、(2)測位頻度をできるだけ向上し、(3)走行車線を特定する精度を持つ、の3つの要件を提示している。一方で、要件を決定する際には、得られる便益とコストとのバランスが重要であり、これを考慮した諸元の設定が必要である。本研究の成果は、この諸元決定において、複数の視点から各諸元の向上の便益を定量的に示すものになると期待できる。

本研究では、特にETC2.0データによる飽和交通流率の推定技術に代表されるように、データの諸元が理想的でなくても、大量観測という、ETC2.0がすでに実現している特長を活かして詳細な情報が得られる可能性を示した。このような技術は、現行のETC2.0データの有効活用という点で早期に実務展開が可能である。また、次世代ETCの諸元を過剰に設定する必要性を減ずることにもなるので、実装コストを下げることに寄与する。

研究期間後の展開として、過去の新道路技術会議の研究課題として開発した階層型データベースと合わせた統合的な車両軌跡データ活用システムの開発を考えている。ETC2.0や次世代ETCの車両軌跡データを用いた交通需要および交通状態推定および外部データと交通シミュレーションとの連携を中心とした、道路インフラのための包括的な施策評価プラットフォームの構築を目指したい。

⑨特記事項

(本研究から得られた知見、学内外等へのインパクト等、特記すべき事項があれば記入。また、研究の目的・目標からみた、研究成果の見通しや進捗の達成度についての自己評価も記入。)

研究で得られた知見：ETC2.0データを用いた全国規模の動的利用者均衡配分型の交通流シミュレータについて、プロトタイプではあるものの1千万パケット程度の計算を実施し、実際に計算が可能であることを示した。改良すべき点はまだ多いものの、最終的にはETC2.0データの活用事例として大きいインパクトを与えることが期待できる。

外部データとの連携において使用した人流データについては、空間精度が十分にあるデータを用いることにより、提案した手法により大規模施設から小規模店舗まで多様な滞在スポットを抽出することが可能であることがわかった。目的地の選択肢集合となるべき箇所を、実データを元にこれだけ網羅的に取得できることは、目的地選択モデルのような交通行動モデルの方法論の研究にも一定のインパクトを与えることが期待できよう。

研究の見通しおよび進捗の自己評価：新型コロナウイルスの影響を受けたケーススタディを除き概ね計画通り進んでいると自己評価している。実走実験については、実験計画の改良を意図し2都市を分割して実施したためにやや遅くなっているが、これについても分析を含め契約期間内に終了できる見込みである。ケーススタディについては、新型コロナウイルスの状況を見ながら、アフターコロナ後の交通問題などの新しい実務課題も考慮しつつ、来年度できるだけ早期に実施したい。