

道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成果報告レポート
No. 31-1

研究テーマ

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

研究代表者：	東北大学	教授	井料	隆雅
共同研究者：	京都大学	教授	宇野	伸宏
	愛媛大学	教授	吉井	稔雄
	愛媛大学	准教授	倉内	慎也
	愛媛大学	特任講師	坪田	隆宏
	高知工科大学	准教授	西内	裕晶
	宮崎大学	准教授	嶋本	寛
	琉球大学	准教授	神谷	大介
	神戸大学	准教授	瀬谷	創
	東京大学	助教	安田	昌平

令和4年5月

新道路技術会議

目次

研究概要	1
第1章 はじめに	3
1.1 研究の背景と目的	3
1.2 本成果報告レポートの構成	4
第2章 各種観測技術の検証	5
2.1 はじめに	5
2.2 衛星測位技術に関する文献調査	5
2.3 高性能観測機器の性能検証	6
2.4 ドライビングレコーダによる車線特定手法の検証とGPS/GNSS 測位端末の性能検証 のための実走実験	7
2.5 まとめと考察	12
第3章 新しいマップマッチング技術の開発	13
3.1 はじめに	13
3.2 提案手法	14
3.3 提案手法の評価	14
3.4 ケーススタディ	15
第4章 データベースと外部データ連携システムの開発	17
4.1 はじめに	17
4.2 様式1-2活用システムの実装	17
4.3 様式2-1活用システムの実装	19
4.4 地域メッシュ連携システムの実装	22
第5章 車両軌跡データの匿名化技術の開発	25
5.1 はじめに	25
5.2 提案手法の概要	26
5.3 トリップ情報匿名化手法の詳細	26
第6章 ケーススタディを通じた要件抽出	28
6.1 沖縄県における観光回遊行動分析	28
6.2 宮崎市における都市部での区間旅行時間観測	30
6.3 高知市石立交差点での車両軌跡データ分析	31
6.4 車両軌跡データを用いた飽和交通流率の推定	32
6.5 車両滞在データを用いたテレワーク率推計	33
6.6 観測旅行時間を用いた交通シミュレーション	37
6.7 細街路におけるETC2.0 サンプル率	39
6.8 ドライビングレコーダによる積雪状況把握	42
6.9 次世代ETC システムに求められる要件	43
第7章 次世代ETC システムの基本設計案の提案	45
7.1 次世代ETC システムの収集系	45
7.2 次世代ETC システムの蓄積系	47
7.3 次世代ETC システムの集計系	47
7.4 次世代ETC システムの活用系	48
7.5 社会実装のためのビジネスモデル案	49
第8章 成果発表と今後の展開	51
参考文献	53

**「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(平成31年度採択)
研究概要**

番号	研究課題名	研究代表者
No.31-1	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	東北大学 教授 井料隆雅

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。

1. 研究の背景・目的

既存のETC2.0が収集し続けている車両軌跡データ(ETC2.0データ)は豊富な情報を有しており、行政や学術での複数の活用例が現れてきている。一方でデータの品質上の問題も明らかになってきている。本研究の代表研究者は「蓄積車両軌跡データの効率的活用のための階層型データベースの構築」(道路政策の質の向上に資する技術研究開発 H28-30)を過去に実施したが、この研究の中で、ETC2.0データには欠測、不安定なサンプル率、匿名化処理の問題など多くの問題があることを発見している。また、各地方整備局等のヒアリングを通じ、例えば「交差点付近での利用車線の把握」のような、ETC2.0では観測不可能である事項に関する要望も聞いている。

次世代ETCシステムはこれら既知の問題点や要望を高いコストパフォーマンスで満たすことが求められる。そのためには実際のアプリケーションを通じた要件抽出が不可欠である。実道実験を通じた新しい観測技術の検討もその導入の検討には欠かせない。外部データとの連携も重要である。本研究は、要件抽出と要素技術開発を通じて、次世代ETCシステムの基本設計の提案を、抽出された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。

2. 研究内容

以下の5テーマについて研究を実施した。最後のテーマ5にて研究の最終目的を達成する。

- ✓ 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」

3. 研究成果

テーマ1「アプリケーションを通じた要件抽出」では、旅行時間データを活用する全国規模の交通シミュレーション(図1)から交差点の車両軌跡解析までの広範な空間スケールかつ全国各地のケーススタディを実施した。ETC2.0データを活用するほか、次世代ETCシステムを想定したデータの使用(観測も含む)を行った。これらにより、要件として「限定された測位点だけでもいいので欠測を解消する」「複数の観測間隔を設定しアプリケーションで使い分ける」「車線を特定できるようにする」「外部データと連携させる」などを(観測間隔については具体的な値も含めて)抽出できた。

テーマ2「各種観測技術の実用可能性検討」では、GPS/GNSSも一定の観測精度があることは示したものの、走行車線の特定にはやや力不足であることもわかった(図2)。一方、ドライビングレコーダ画像の特定のラインを切り取って並べるだけで、画像の容量を大幅に削減した上で走行車線や積雪などの路面状況を把握できるようになり、走行車線の特定もより確実にできることがわかった。

テーマ3「マップマッチングと匿名化手法の開発」では、Recursive Logitモデルを応用した新しいマップマッチング手法を提案し、都市高速での実測データなどでその性能を示した。次世代ETCシステムの要件として重要な経路特定に必要な測位間隔も定量的に示せた。匿名化においては、k-匿名化を確保して特定の車両を3次メッシュ単位で追跡する方法論を提案し、その性能を実データで示した。

テーマ4「外部データ連携技術の開発」では、地域メッシュと連携することにより多様なデータと連携できるシステムを、車両軌跡データを管理するデータベースシステム（様式1-2活用システム）とあわせて提案し、新型コロナウイルスによるテレワーク率の推計などのケーススタディに応用した。非集計の人流データと次世代ETCシステムのデータを個人情報の問題なく連携する方法の一つとして、観光行動を対象とした目的地の場所とその滞在時間の特徴を抽出する技術を開発した。

テーマ5「次世代ETCシステムの基本設計案の提案」では、ケーススタディによる要件を現実的なコストで満たすような基本設計案を提案できた。収集系では複数の測位間隔の設定による欠測の抑制と、ドライビングレコーダやスマートフォンと連携し収集データの量と質の向上を目指すことを提案した。蓄積系では提案したマップマッチング手法のほか様式1-2/2-1活用システムを提案し、膨大なデータへのアクセスを容易にした。集計系では旅行時間や滞在データなどケーススタディで有用性を示した項目のほか、提案手法で匿名化されたトリップ情報も集計項目とした。活用系に外部データ連携と交通シミュレーションを組み込み、データの活用が容易かつ広範に行える枠組みを提案した。



図1 全国規模シミュレーションによる高速道路料金変更時の交通量変化の計算（首都圏拡大）

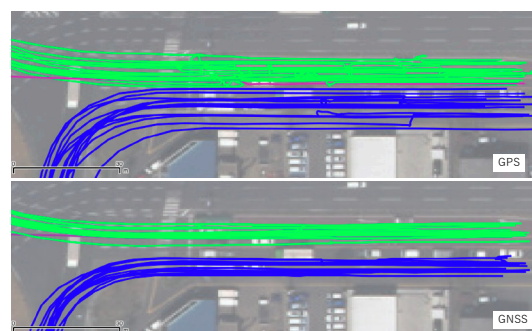


図2 GPS/GNSSの車両軌跡精度比較例

4. 主な研究成果発表

- 岩原雄大, 西内裕晶, 井料隆雅: 車両走行軌跡データを用いた信号交差点における交通状況の推定に関する研究, 土木学会論文集F3 (土木情報学), pp. I_65-I_72, 2022.
- 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, Vol. 60, 2019/12.
- 井料隆雅, 神谷大介: 車両走行軌跡データを用いた回遊行動と滞在目的地の特徴の記述的分析, 土木計画学研究・講演集, Vol. 63, 2021/6.
- 安田昌平, 井料隆雅: 観測データの統計誤差を考慮したMacroscopic Fundamental DiagramのWell-definednessの評価, 土木計画学研究・講演集, Vol. 63, 2021/6.
- 橋口剛, 瀬谷創, 安田昌平, 井料隆雅: 隠れマルコフモデルに基づくマップマッチングの適用性の検証, 土木計画学研究・講演集, Vol. 63, 2021/6.
- 益野日乃美, 井料隆雅, 神谷大介: 移動体データと地図情報に基づく観光地における目的地候補の抽出, 土木計画学研究・講演集, Vol. 64, 2021/12.

5. 今後の展望

次世代 ETC システムの基本設計案提案という目的は達成したものの、開発した要素技術においては改良の余地があるものも複数存在する。ドライビングレコーダの画像処理の自動化や、旅行時間データを活用する交通シミュレータを、交通量変動による旅行時間変動の評価を可能にするように拡張するなどがある。

6. 道路政策の質の向上への寄与

次世代 ETC システムの開発への成果の反映、開発した要素技術の ETC2.0 データへの応用などを通じた道路政策の質の向上を見込んでいる。

7. 関連ホームページ: <http://web.tohoku.ac.jp/iryolabo/misc/20220311-Shindoro.html>

第1章 はじめに

1.1 研究の背景と目的

ETC2.0 車載器から収集される車両の走行履歴をはじめとする ETC2.0 データは、近年、道路行政や学術の分野で広く活用され、いくつもの活用事例が示されている。

一方、ETC2.0 データの欠測、サンプル率の変動、トリップの欠落等の品質上の問題や、走行車線の把握等の現状の ETC2.0 データでは収集できない新たなデータの追加要望も生じている。具体的な品質上の問題としては、例えば井料らによる研究レポート¹⁾では、

- 欠測が多く、全く軌跡データが観測できていない（100%欠測）車両も珍しくない。
- 日や場所によりサンプル率が大きく変動し、量的な分析（経路選択率など）に困難が伴う。
- 匿名化処理により、相当量のトリップのデータが欠落している可能性がある。

のような問題が指摘されている。また、同レポートでは、各地方整備局等で行った ETC2.0 データの活用に関するヒアリングを通じて同様のデータに関するニーズの把握にも務めている。この際、例えば「交差点付近での利用車線の把握」のような、ETC2.0 では観測不可能である事項に関する要望があることも把握している。

ETC2.0 システムの後継となる次世代 ETC システムの仕様を検討の際には、これら既知の問題点や要望を考慮することは当然重要であろう。一方で、次世代 ETC システムは ETC2.0 と同様に全国規模かつ全車種を対象に運用されるシステムであり、費用対効果を見捨てずに高い仕様を設定することは当然ながら許容されない。費用対効果の高いシステムを構築するためには：

- 実際の道路行政や研究開発において想定されるアプリケーションを通じたシステムに対する適切な要件の抽出

- 車両の走行軌跡データを収集したあとの、データの蓄積と集計、さらには活用までにいたるフロー全体を考慮した要件の抽出
- 上記の蓄積～活用のステージにおいて必要な各種の要素技術（マップマッチング、匿名化、外部データとの関係）の構築とそれらの連携方法の提案
- コスト制約等も考慮した新しい観測技術の検討

が欠かせない。これらを行うことにより、特に費用を要する収集系に過度の負担をかけることなく、かつ、実際の道路行政や研究開発においての活用可能性が高い次世代 ETC システムの開発が可能となろう。

本研究は、次世代 ETC システムの基本設計提案を、必要とされる様々な要件を十分に満たし、かつ現行 ETC2.0 と連続性がある形で行う。この目的を達成するために、本研究では、

- テーマ1：ケーススタディを通じた要件抽出
- テーマ2：各種観測技術の検証
- テーマ3：マップマッチングと匿名化技術の開発
- テーマ4：外部データとの関係技術の開発
- テーマ5：次世代 ETC システムの基本設計案の提案

の5つのテーマに関する研究を行う。テーマ1では道路局、国土総合技術研究所、各地整（沖縄総合開発局を含む）等とも連携しつつ、実際の道路行政や研究開発におけるアプリケーションを想定したケーススタディに対し、ETC2.0 データまたは次世代 ETC システムで取得が期待できるデータを活用する。それを通じて次世代 ETC システムに必要な要件を抽出する。また、料金等の施策検討に次世代 ETC データを活用する際の要件抽出を目的とし、ETC2.0 データを活用した全国レベルの交通シミュレーションを行う。テーマ2では、主に走行車線特定を目的とした高精度の測位技術の利

用可能性を、実道実験を通じて検証する。GPS や GNSS のような衛星測位にくわえ、そのほかの手法（測距技術やドライビングレコーダによる画像の活用）についてもその応用可能性を検証する。テーマ 3 では、既存手法の解析と改良を行い、次世代 ETC システムの仕様と最終的に整合するマップマッチング手法を開発する。また、匿名化は軌跡データの活用に欠かせない処理であるが、現行の処理方法では短トリップ情報が完全に欠落するなど問題も多い。匿名性の担保とトリップ情報の確保を両立させる新たな匿名化手法を開発する。テーマ 4 では、各種の外部データと次世代 ETC によるデータを効果的に連携（外部データ連携）させ、次世代 ETC データの活用価値を高める技術を開発実装する。テーマ 5 では、テーマ 1 から 4 の成果を統合し、次世代 ETC の基本設計案を提案する。テーマ 1 で示すアプリケーションで必要とされる要件が、テーマ 3 と 4 で開発した各種技術の活用によって効率的に満たせるように、テーマ 2 で得た知見を元に、必要かつ十分で、なおかつ ETC2.0 との連続性がある仕様の策定を行う。

している。このため、テーマ 3 のマップマッチング技術と匿名化技術の開発については、それぞれについて異なる章で報告し、匿名化技術の報告がデータベースシステムの報告のあとになるように順序を入れ替えている。

1.2 本成果報告レポートの構成

このレポートは以下で示すように構成される（番号は章番号にそのまま対応する）：

1. 研究の背景と目的
2. 各種観測技術の検証（テーマ 2）
3. 新しいマップマッチング手法の開発（テーマ 3）
4. データベースと外部データ連携システムの開発（テーマ 4）
5. 車両軌跡データの匿名化技術の開発（テーマ 3）
6. ケーススタディを通じた要件抽出（テーマ 1）
7. 次世代 ETC システムの基本設計案の提案（テーマ 5）
8. 成果発表と今後の展開

上記の第 2～7 章は第 1.1 節で示した 5 つの研究テーマをすべて含んでいるが、その報告の順番は第 1.1 節で各テーマを示した順番と異なる。このようにした理由は、一部のケーススタディについては研究テーマ 2, 3, 4 の成果を活用したり、あるいはそれらと関連したりするものがあり、これらの成果を説明したあとに報告するほうがわかりやすいからである。また、車両軌跡データの匿名化技術は、外部データ連携システムと同時に開発している車両軌跡データのデータベースシステムを前提として実装

第 2 章 各種観測技術の検証

2.1 はじめに

本章では衛星測位技術およびその他の観測技術についての検証結果を報告する。現行の ETC2.0 では GPS (Global Positioning System) により観測された位置座標と走行速度が車両軌跡データとして収集されている。これらのうち特に位置座標はその精度が問題となる。現行の ETC2.0 における測位の精度は、適切なマップマッチング技術の存在を前提とすれば走行した経路の特定には概ね十分である。しかし走行車線を特定するに十分に測位精度を有しているとはいえない。走行車線の特定のためには少なくとも車線幅 (概ね 3m 程度) よりも小さい観測誤差を持つ測位技術を用いなくてはならない。近年は GPS を運用する米国以外の国が同様のシステムを運用しており、総称して GNSS (Global Navigation Satellite System) と呼ばれる。複数のシステムが運用する測位衛星を同時に使用して測位に使用する衛星数を増やしたり、あるいはそのほかの技術を用いれば、次世代 ETC システムにおいて、走行車線の特定に十分な観測精度を確保することを可能にすることができるかもしれない。一方で走行車線の特定は GPS や GNSS による測位による方法以外に、ドライビングレコーダのような車載カメラによる画像を活用することにより可能となることも期待できる。特にドライビングレコーダは近年普及が進んでおり、すでに多くの数の車載器が普及している ETC2.0 をベースとする次世代 ETC との連携には適していると言うことができよう。

本研究では高精度測位技術に関する文献調査を行った上で、高性能観測機器の性能とその利用可能性について実車を用いた検証を行った。高性能観測機器としては、みちびきのセンチメートル級測位補強サービスに対応した高精度測位端末である AQLOC-Light と、レーザーにより対象物までの距離を測定する装置 (LiDAR: Light Detection and Ranging) を用いた。これに加えて、一般に普及しているドライビングレコーダを用いた車線特定技

術と、市場で安価に入手可能な GPS および GNSS 測位端末による車線特定技術の両方を検証するための実走実験を各地 (4 つの都市: ドライビングレコーダについては 2 ヶ所のみ) で実施した。

2.2 衛星測位技術に関する文献調査

(1) 衛星測位技術の分類

衛星測位の方式は、大きく単独測位と相対測位に分類される (例えば、久保²⁾, 2018)。単独測位とは、測位衛星からの情報だけを用いて、受信機単独で測位を行う方式であり、擬似距離を用いる「単独測位」と搬送波位相を用いる「高精度単独測位」に分類できる。周囲の開けたオープンスカイ環境で、前者は数 m、後者は数 cm の精度を持つ。高精度単独測位 (Precise Point Positioning (PPP) 方式) は、衛星を通して衛星の精密暦や時計情報等を入手し、これを持ちいて単独測位における位置情報を補正する方式である。PPP 方式では、整数値バイアスと呼ばれる搬送波の波数の決定、すなわち初期化のために、10~20 分の時間を要するという欠点がある。初期化 (波数決定) 前の段階では数 m~20cm 程度の精度となり (Float 解)、初期化後は cm 級の精度を達成できる (Fix 解)。

一方、相対測位は近接の基準局の精密位置を用いて、測位精度を向上させる方式である。受信機と近接の基準局で類似する誤差、例えば衛星の軌道や時計の誤差、電離層遅延誤差等をよく補正できる。大きく分けて、擬似距離を用いる Differential-GNSS (D-GNSS) と、擬似距離に加えて搬送波位相を用いる干渉測位がある。周囲の開けた環境で、前者は約 1m、後者は数 mm~1cm の精度を持つ。干渉測位のひとつであるキネマティック方式において、測位時間を実時間化したものは、RTK (リアルタイムキネマティック) 方式と呼ばれる。RTK 方式によって、精度の高い位置情報をほぼリアルタイムに近い時間で得ることが可能となった。しかし、RTK 方

式は、基準局から受信機までの距離（基線長）に精度が依存する点に欠点があり、久保²⁾ (2018) によれば、RTK 測位の利便性（24 時間のうち何 % 可能か）は、10km 程度まではほぼ 100% であるが、20km 程度では 80~90% 程度になり、そこから一気に低下すると指摘されている。

このように、PPP 方式は、RTK 方式と比較すると、初期化時間が長いという欠点があり、RTK 方式は、基準局から 10km 以上距離が離れると精度が低下してしまうという欠点がある。このような背景から、PPP 方式と RTK 方式を組み合わせた PPP-RTK 方式と呼ばれる測位方式に注目が集まり、研究開発が急速に発展した。PPP-RTK 方式では、配信事業者から提供される衛星の精密暦や時計情報等を用いて、RTK による干渉測位を行う。これにより、RTK 方式に比べ格段に少ない計算負荷で匹敵する精度を出せることが示されている。

(2) 準天頂衛星システム「みちびき」による測位

準天頂衛星システム「みちびき」は、2010 年 9 月 11 日に初号機を打ち上げ、その後 2011 年 9 月の閣議において、「4 機体制を整備し、7 機体制を目指す」ことが決定された。政府は追加 3 機（準天頂軌道 2 機、静止軌道 1 機）の開発を決定し、2017 年度に打ち上げ、2018 年 11 月から 4 機体制での運用を開始した。2015 年 1 月に策定された新たな「宇宙基本計画」においては、「2023 年度をめどに持続測位可能な 7 機体制での運用を開始する」と決定されている (https://qzss.go.jp/overview/services/sv02_why.html)。

衛星測位では、上空の DNSS と通信を行う必要があるが、海上と異なり、陸上ではビル等の障害物により空が隠れ、精度の高い測位に十分な衛星数が相対的に確保しにくい。これに対して、みちびきは、準天頂軌道と呼ばれる軌道を通ることによって日本の天頂付近に長く留まり、建物や山の影になりにくい位置から信号を送信して、24 時間サービスを提供する。すなわち、みちびきによって受信機が通信可能な測位衛星の数が大きく増え、かつそれらが高仰角に位置するため、DOP (Dilution of Precision, 測位精度劣化係数) が改善され測位精度が向上することが各種検証で示されている (https://qzss.go.jp/technical/technology/qz1_150611_1.html, 梶田 (2013)³⁾, 江守ら⁴⁾ (2017), 中島ら⁵⁾ (2018) など)。

みちびきによりセンチメートル級測位補強サービス CLAS に対応した受信機のうち、本研究開発では、三菱電機の AQLOC (AQLOC-Light / AQLOC-VCX) を使用することとした。萩藤⁶⁾ (2018) によれば、AQLOC シリーズは、2005 年にサブメートル級

測位端末として開発された。その後、L6 受信機が開発され、測位方式としては PPP-RTK もしくは PPP-RTK-INS を選択できる。後者は PPP-RTK に車速パルスと慣性計測装置 (IMU) を組み合わせたもので、衛星測位信号が途切れた場合でも、推測航法により自律測位が可能とされている。カタログ測位精度は、CLAS のそれと同等である。

2.3 高性能観測機器の性能検証

本節では高性能観測機器のうち、主に高精度測位端末である AQLOC-Light の性能検証結果について詳細に報告する。LiDAR による検証についてはその概要について簡単に報告する。

(1) AQLOC-Light の性能検証

AQLOC-Light は、2019 年 11 月に発売開始のみちびきのセンチメートル級測位補強サービスに対応した測位端末である（詳細：https://qzss.go.jp/usage/products/melco_200120.html）。国土交通省国土地理院が全国に整備している電子基準点のデータにより計算されたセンチメートル級測位補強情報を用い、センチメートル級の精度の測位を実現するものとされている。

性能検証のために車載による簡単な走行実験を実施した。AQLOC-Light は電波の受信状況等に依拠して「単独測位」「RTK 測位 (FIX)」「RTK 測位 (FLOAT)」の 3 つのモードのいずれかで測位する。このうち、みちびきのセンチメートル級測位補強サービスによる補正が完全に有効となっているのは RTK 測位 (FIX) である。それ以外では測位精度が低下することが予測される。

走行実験を行ったところ、RTK 測位 (FIX) ではセンチメートル単位での測位が実現するものの、RTK 測位 (FIX) が実現できる条件は限定されることがわかった。図-2.1 にオープンスカイの狭域における観測結果の例を示す。ほとんどの測位が RTK 測位 (FIX) モードで、測位の精度はよく、走路の左端、中央、右端のどこを走行したかが明確に判別できることがわかる。一方、走路が樹木に隠れるような、オープンスカイの条件が満たされないところではほとんどが「RTK 測位 (FLOAT)」か「単独測位」となってしまうことが確認された。このような場所では測位点が道路から外れるなど、必ずしもよい精度が確保できているとはいえない結果になった。

今回の予備評価の結果、AQLOC-Light は RTK

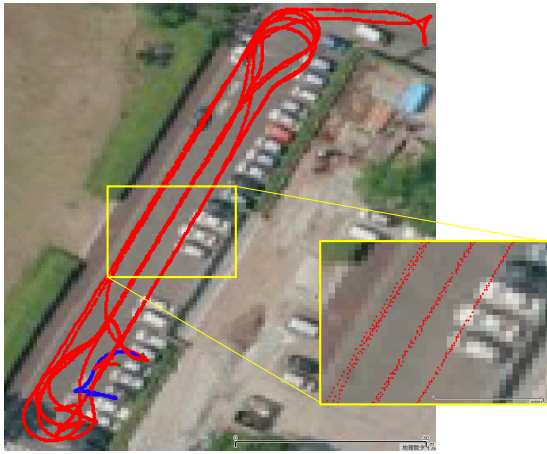


図-2.1 AQLOC-Light 走行実験による測位点. 青：単独測位，赤：RTK 測位 (FIX)

測位 (FIX) が有効となる好条件であれば走行車線の特定に十分な精度を発揮するものの、その精度が得られる状況は常に得られるわけではないことがわかった。自動運転車などのようにすでに観測機器を搭載しているものを別にすれば、装置の価格を考慮しても、次世代 ETC システムにおける測位を直接の目的として高精度測位端末を用いることは必ずしも合理的でないことが示唆される結果となった。

(2) LiDAR の性能検証

LiDAR の例として、Velodyne 社の VLP-16 を車両に設置した走行実験を行った。ここではその結果の概要のみを報告する。この装置は他車との位置関係を観測し、それにより交通状況を把握するための手段として用いることができる。走行実験を行った結果、車両以外の地物との見分けが必ずしも簡単ではないことがわかった。このことは、観測結果を他車との位置関係の情報に正しく変換するにはかなりの手間がかかることを示唆する。自動運転車であればそのような処理はすでになされていることが期待できるが、次世代 ETC システムに単独で搭載するには負荷が大きいことを示す結果となった。

2.4 ドライビングレコーダーによる車線特定手法の検証と GPS/GNSS 測位端末の性能検証のための実走実験

本節では、一般に普及しているドライビングレコーダーを用いた車線特定技術と、市場で安価に入手可能な GPS および GNSS 測位端末による車線特定技術の両方を検証するための実走実験の詳細を報

告する。本研究では、宮崎県宮崎市、高知県高知市での実走実験を令和元年度に、宮城県仙台市、愛知県名古屋での実走実験を令和2年度に実施した。このうちドライビングレコーダーの検証を行ったのは令和2年度の2ヶ所のみである。本節ではこれら2ヶ所の詳細のみを報告する。前者2ヶ所での知見は後者2ヶ所のものと大差ないため、本報告書ではその詳細を割愛する。

以下では、ドライビングレコーダーによる車線特定手法と、検証に用いた市場で安価に入手可能な GPS および GNSS 測位端末の詳細について先に説明する。そのあとに、実走実験の実施要領を説明する。最後に実験結果およびその考察を示す。

(1) ドライビングレコーダーによる車線特定

国土交通省自動車局の2019年の調査によると、ドライビングレコーダーの普及率は46%となっており⁷⁾。すでに多くの自動車に普及しているといえる。ドライビングレコーダーで得られる動画は運転や道路に関するさまざまな情報を含んでおり、走行車線の特定にも当然有効であると考えられる。次世代 ETC にドライビングレコーダーを連携させることが可能となれば、有用な情報を多く蓄積できるようになることは明白といえる。

次世代 ETC にドライビングレコーダーとの連携には課題も多い。そのなかの1つに動画の容量の問題がある。一般に動画の容量は、現行 ETC2.0 で蓄積されている GPS の測位による車両軌跡のデータに比べるとはるかに大きい。例えば、本研究で用いたドライビングレコーダーで録画した動画ファイルのサイズは、10分で500MB程度に達する(画面サイズ:1920x1080, 30fps)。このままでは、車載器そのものの記憶容量が不足するだけでなく、そこからサーバへの転送の通信路も大きなボトルネックとなるし、その後の蓄積に要する記憶容量も非常に膨大なものになってしまう。

本研究では、ドライビングレコーダーの画像のごく一部だけを抽出することにより、車両が走行した路面の状況を把握できるようにする方法論を提案する。この方法論はいたって単純であり、「ドライビングレコーダーの画像の高さ1ピクセル分だけを各フレームで切り出し、それを連続して貼り付ける」だけである(図-2.2)。このようにしてできた画像は、片方の軸が時間軸、もう片方の軸が道路の横断方向の軸となり、ちょうど切り出した高さの位置で撮影された道路の表面をスキャンしたような画像を得ることができる。ドライビングレコーダーの画像は高さ数百から千ピクセル程度あることが一般的で

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。

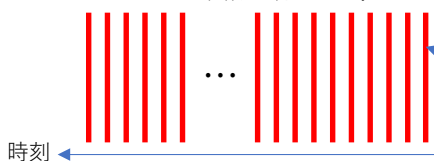


図-2.2 ドライブレコーダーによる路面スキャン画像生成の概念図

あり、この方法であれば、画像の容量は（圧縮による効果の差異を無視すれば）数百分の1程度の容量になる。

本研究では、このようにして得られた画像から走行車線を目視で判定することが可能かを、実走実験によって得られたデータを用いて検証する。本研究では目視判定を超えた自動化は試みないが、それが容易にできることがわかれば、分析が必要な場所と期間を定めることさえできれば、現実的な量の人的リソースを投入すれば実行可能であると考えることができよう。多大なコストのかかる現地調査を実行することなく分析が可能だけでも大幅なメリットが提案手法にはあるといえよう。

(2) 市場で安価に入手可能な GPS および GNSS 測位端末

GPS は元々米国（アメリカ合衆国）が実装した技術であったが、近年では米国以外の各国が GPS と同様なシステムの実装を行い実際に運用している。GNSS はこれらを総称したものである。現時点で運用されているのは、GLONASS(Global Navigation Satellite System, ロシア), Galileo（欧州連合）, QZSS（日本）, BeiDou（中国）が知られる。GPS 以外の GNSS システムに対応する測位端末は、どれか1つのシステムだけではなく、複数のシステムが運用する人工衛星を同時に活用することによって測位精度を向上させようとするものが多い。そのような測位端末も最近では比較的安価に入手が可能となっており、次世代 ETC に組み込む測位装置の候補としてあげることができよう。

今回の検証で実際に用いた GPS/GNSS 端末のうち、本報告書では、GPS 端末その1(GPS):GR-7BN (DOCTORADIO 社製:内蔵チップ=u-blox UBX-G7020-KT), GPS 端末その2(GPS2):GR-701U (Navisys 社製:内蔵チップ=u-blox7), GNSS 端末 (GNSS):GR-A013U (Navisys 社製:SiRF Star

V) による検証結果を示す。以降ではカッコ内の略称 (GPS, GPS2, GNSS) を用いる。

GPS/GNSS 端末から得られた「時刻」「緯度経度」のデータから車両走行軌跡を構築し、それを可視化して、GPS/GNSS 端末からどの程度走行車線を特定できるか見る。一部の車両走行軌跡データに対しては走行車線と横断方向の観測位置の定量的関係も分析する。

(3) 実走実験の実施要領

実走実験は宮城県仙台市と愛知県名古屋市の2つの都市で実施した。実施した時期は、仙台市が2020年の12月、名古屋市が2021年の2月であった。実走実験では、車両（仙台では2台、名古屋では4台）とそれを運転するドライバーを手配し、それらの車両に観測機器を搭載し、指定する経路を走行させた。実験装置のうち、GPS/GNSS はダッシュボードに設置し、データロガーとその駆動用バッテリーはケースに入れて助手席に固定した。アンテナをダッシュボードに設置すると、車両後方に位置する衛星の電波取得には支障があるため、本来は車の屋根等に設置することが望ましいが、現状のETC2.0の端末はダッシュボードに設置されており、次世代ETCでのそのような設置方法が想定されるため、今回も同様の設置をしている。ドライブレコーダーは、通常設置される場所である、バックミラーの裏側のフロントガラスに設置した。

仙台市での実走実験は、仙台市街地（青葉区内）と東部2箇所（東部A、東部B:宮城野区と若林区）の合計3箇所に設定した6種類の経路（各箇所に2経路）で実施した。市街地の経路は、広瀬通交差点（国道48号線と国道286号線の交差点）を含む経路である。東部Aの経路は、箱堤交差点（国道4号（重複して国道6号））を含む経路である。東部Bの経路は、仙台東部道路の仙台港IC付近にある交差点である中野石橋交差点を含む

経路である。広瀬通交差点周辺は中層以上のビルが立ち並び、GPS/GNSSの衛星からの信号受信の条件は悪い。箱堤交差点周辺の多くは低層の建物で、GPS/GNSSの衛星からの信号受信の条件はよい。中野石橋交差点は仙台東部道路と2層構造になっており、GPS/GNSSの衛星からの信号受信の条件は悪い。走行車線特定を含めた詳細な分析は、広瀬通交差点、箱堤交差点、中野石橋交差点（仙台港IC付近）の3箇所を実施する。

名古屋市内での実走実験は、名古屋市内中心部に設定した4種類の経路で、いずれの日も4経路を4台の車両で走行させた。この経路は、小川交差点（国道19号と国道153号の交差点、桜通沿い）、高岳交差点（国道19号線の交差点）、西大須交差点（国道22号線の交差点）の3つの交差点を、各経路で分担することにより含んでいる。各経路は名古屋市中心部を含み、名古屋高速の下層部に位置する区間も多く、全体的には周辺に多くの建物を持つ経路である。ただし、小川交差点は中心部からやや東に外れたところに位置し、周辺の建物の高さはそれほどでもない。高岳交差点の東西方向には上層に名古屋高速があり、上空は全く空いていない。西大須交差点は中心部のやや南側に位置するが、周辺の建物の高さは小川交差点よりは高い。走行車線特定を含めた詳細分析は、小川交差点、高岳交差点、西大須交差点の3箇所を実施する。

(4) 実験結果

提案手法によりドライビングレコーダーによる交差点付近の車線特定が実行可能かを検証する。GNSSを搭載した車両を対象とし、GNSSの測位点を用いて対象交差点近辺の道路区間への流入流出時刻と進行方向（例えば、南側から交差点に進入して東側に流出する、など）を特定し、交差点を通過する前後の時間帯について画像を作成した。その画像を目視することにより走行した車線を判定した。ドライビングレコーダーの動画は、縦800ピクセル×横450ピクセルに解像度を落としてからフレームごとに画像に分割する。ただし、車両通行帯の設定により、進行方向が決まれば走行した車線が直ちに特定できる場合は、ドライビングレコーダーから作成した画像は用いずに、車両通行帯の設定で定まる車線を走行した車線としている。

提案手法で生成した画像のうち2例を以下で紹介する。いずれの画像も、下側が早い時刻、上側が遅い時刻に対応する。すなわち、車両は画像下から上方向に走行している形になる。また、道路の断面方向は画像横方向に対応する。左右はそのままの

東部02_2.20201217_164433.20201217_164453.397-NE-SW.330.jpeg

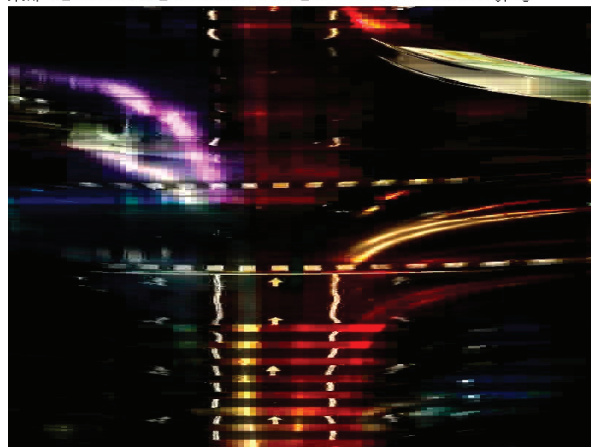


図-2.3 提案手法で生成した画像例（仙台中野石橋交差点 北東から南西 12/17 16:44:53）

名古屋1_1.20210202_100300.20210202_100311.4-桜通小川-E-W.310.jpeg

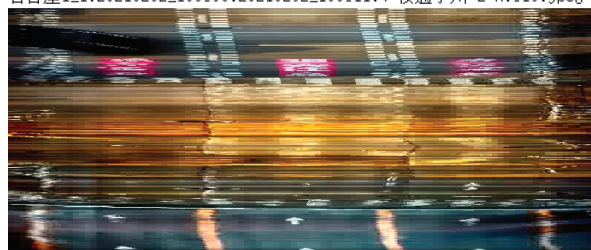


図-2.4 提案手法で生成した画像例（名古屋小川交差点東から西 2/2 10:03:11）

で、画像左側は路肩側、右側は中央線または中央分離帯側になる。時刻はすべて画像生成開始時刻であり、画像の下端に車両が到達したときの時刻に相当する。どの画像においても、撮影をしている車両は画像内では中心を走行している。

図-2.3に、仙台中野石橋交差点を北東から南西方向に走行した車両から生成した画像を示す。日没後の例ではあるが、それでも車の照明（この例では前車のテールライトと思われる）から路面表示がはっきりと見えることがわかる。この例では、左折直進レーンのひとつ右側を走行していることがわかる。当該交差点の車両通行帯構成とこの結果を照合することにより、この車両の走行車線（第2車線）を特定できる。

図-2.4に、名古屋小川交差点を東から西方向に走行した車両から生成した画像を示す。この画像にははっきり写っているのは3本の直進専用車線のみである。もしこの交差点に4本以上の直進専用車線があれば、走行車線の特定は難しいものとなる。しかし、当該交差点には直進専用車線は3本しかなく、その結果、当該車両はその2本目の車線を走行していることがわかる。これにより、この車両は第3車

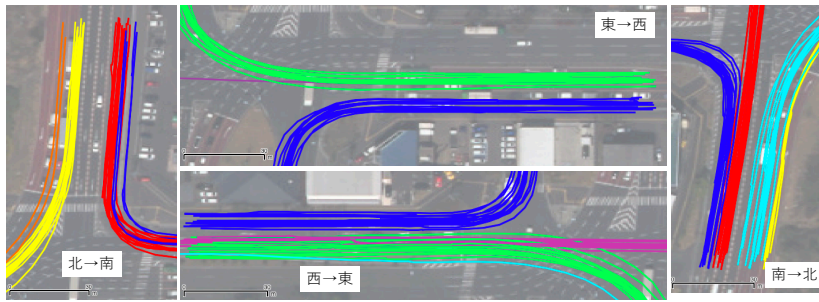


図-2.5 走行車線別の車両走行軌跡（箱堤交差点）

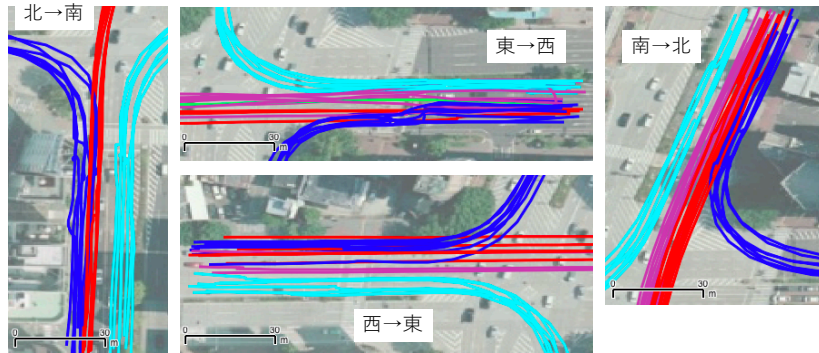


図-2.6 走行車線別の車両走行軌跡（小川交差点）

線を走行していることがわかる。

上記で示した2例と同様の方法により、GNSS搭載車両について、6交差点すべてについて走行車線の特定を試み、すべてのケースについて特定をすることができた。特定数は仙台で合計473個、名古屋で合計321個であった（これらの数字には、進行方向が決まれば走行した車線が直ちに特定できる場合のために、画像を用いずに走行車線を決定したものも含んでいる）。

走行車線が特定できている交差点のGNSS（一部ではGPS）による車両走行軌跡を航空写真上に可視化し、車両走行軌跡が実際に走行したレーンを反映しているかどうかを定性的に見る。GNSSによる車両走行軌跡がどの程度実際の走行レーンを反映しているかは検証対象の6交差点ごとによりかなり異なる。ここでは、比較的良好に反映できている例として、仙台市の箱堤交差点（図-2.5）と名古屋市の小川交差点（図-2.6）を、定性的に見ても走行車線の特定は不可能とみられる例として、仙台市の広瀬通交差点（図-2.7）と名古屋市の高岳交差点（図-2.8）の結果を示す。これらの図では、走行軌跡を航空写真上に図示するのに、第1車線から順に、青、赤、紫、緑、水色、黄色、橙色を用いている。箱堤交差点と小川交差点においても、異なる写真を走行する車両の軌跡に一部重複が見られるため、走行車線の特定は必ずしも容易にできるものではなさ

そうなることが想像される。広瀬通交差点と高岳交差点では車両軌跡が交差点から大きく外れるところもあり、走行車線の特定をすることは困難であることがわかる。

車両走行軌跡の状況が比較的良いと見られる、箱堤交差点の東から西方向を例として、同一車両が取得したGPSとGNSSの車両軌跡の比較を行った結果を図-2.9に箱堤交差点（東側）に示す。GPSのほうがGNSSに比べて同一車線を走行する車両走行軌跡の幅が広く、かつ、一部で軌跡が大きく乱れる事象が発生している。これらの例は、GPSによる車両軌跡による走行車線特定は、GNSSの軌跡を用いるよりも難しいことを示唆する。

比較的観測結果が良好であった、箱堤交差点東側と小川交差点の南側におけるGNSSによる測位結果を用いて、道路の横断面に沿った測位の分布を確認し、条件が良い時にどの程度の横断方向の精度が確保できるかを見る。対象交差点の対象流入枝について、停止線から上流側50mの区間で観測された測位点の横断方向の位置を、路側側から近い順に並べてその累積分布を作成した。横断方向については、箱堤交差点については南北方向に、小川交差点については東西方向とした。路側端は航空写真を用いて概ね車道の端となる場所を原点とした。

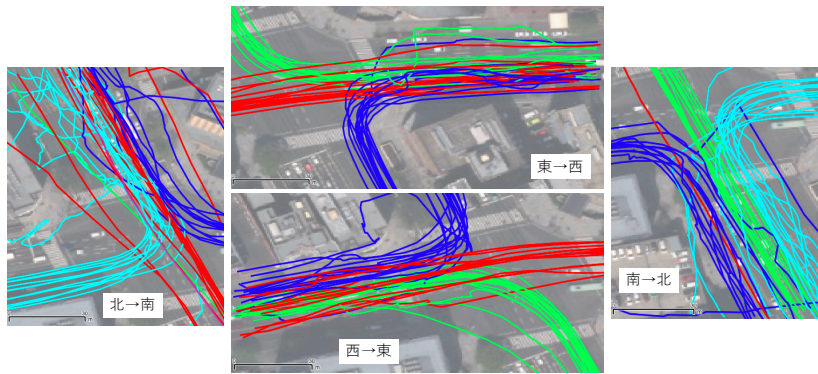


図-2.7 走行車線別の車両走行軌跡（広瀬通交差点）

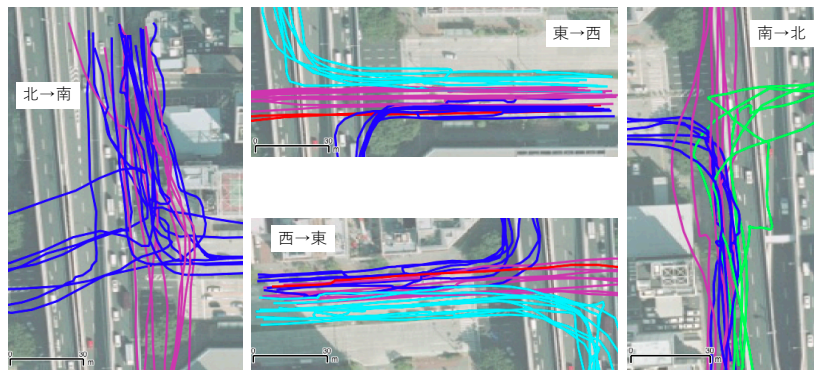


図-2.8 走行車線別の車両走行軌跡（高岳交差点）

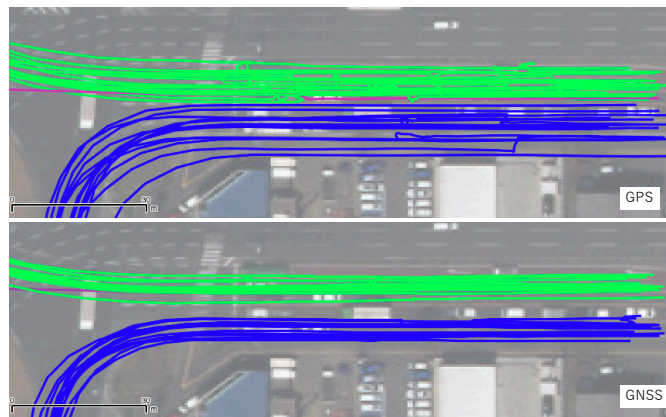


図-2.9 GPS と GNSS による走行車線別の車両走行軌跡（箱堤交差点東側）

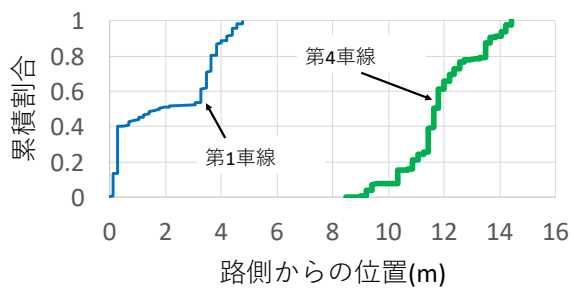


図-2.10 車両走行軌跡の横断位置分布（箱堤交差点東）

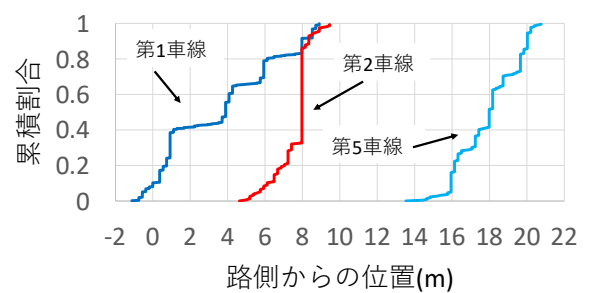


図-2.11 車両走行軌跡の横断位置分布（小川交差点南）

図-2.10 に箱堤交差点（東側）の例を，図-2.11 に小川交差点（南側）の結果を示す．場所にもよるが，車両の走行軌跡は 4m 程度の範囲で 8 割程度が分布しているケースが多いことがわかる．

2.5 まとめと考察

本章では特に交差点付近での走行車線特定を目標とし，実走実験により各種観測技術の実用可能性の検討を行なった．今回検証した方法の中では，ドライビングレコーダーによる方法がもっとも確実に走行車線を特定できる．今回検証した GNSS（SiRF Start V 内蔵）については，条件が良好であれば，4m 程度での誤差で道路の横断方向の走行位置の特定が可能であることがわかった．3m 程度である車線幅を考えれば 4m はやや長いですが，走行車線の推定には有用な情報を提供することが期待できる程度の精度といえる．一方，この結果は，確実な特定に十分な精度を得ることは難しいことも示唆している．今回検証した GPS については，GNSS ほどの精度はなく，車線特定への活用は難しいことがわかった．以上の結果は，次世代 ETC への実装という観点からいえば，GNSS がもっとも現実的である一方，ドライビングレコーダーの画像を活用する可能性も検討する価値はあることを示唆している．

第3章 新しいマップマッチング技術の開発

3.1 はじめに

(1) 背景

マップマッチングは、GPS/GNSS を搭載した自動車が走行した道路網の経路を特定する技術である。ETC2.0 や次世代 ETC システムが GPS/GNSS 装置によって収集する車両軌跡はデータは、座標（経度緯度）とデータを取得した時間により構成され、それ自身はどの道路区間を走行したかの情報を直接は含んでいない。マップマッチング技術により、車両軌跡データに道路区間を走行したかの情報を付与することが初めて可能となる。

特に ETC2.0 や次世代 ETC システムにおいて想定される「オフラインマッチング」、すなわち蓄積データに対する事後のマップマッチングにおいては、測位間隔が大きい車両軌跡データに対してもできるだけ正確な結果を得ることができるマップマッチング技術を適用することが望ましい。ETC2.0 や次世代 ETC システムのように全国規模のスケールを持つ蓄積データは、その収集、蓄積、活用に莫大な費用がかかる。そのためデータサイズを小さくすることがシステム内で要求されることが一般的であり、その要求には測位間隔を大きくする、というものも含まれる。

測位点間のギャップが大きい疎な軌跡データに適したマップマッチングアルゴリズムの一つとして、隠れマルコフモデル(HMM)がある。HMMを用いたマップマッチングの初期の試みには、Hummel⁸⁾、Newson and Krumm⁹⁾、Lou et al.¹⁰⁾ のものがある。HMMは、古典的な幾何学的アプローチのマップマッチングのようにノイズを含む点を直接つなげるのではなく、道路上の投影された（つまりフィルタリングされた）点のつながりをモデル化しているため、外れ値に強いという特徴がある。そのため、疎な計測区間や計測誤差に対してロバストな手法として勢いを得ている。

しかし、HMMに基づくマップマッチングでは、ドライバーの経路選択の意図、つまり、できるだけ

早く目的地に着きたいというドライバーの意図を明示的に取り込んでいない。この点を考慮しないと、観測ノイズが全く無意味に見えても、ノイズとしてではなく、ドライバーの意図として認識されることがあるため、アルゴリズムが観測ノイズに弱くなる。最も典型的な例は、目的地と反対方向に走行し、突然通常方向に戻る、いわゆる逆走¹¹⁾である。この問題を緩和する試みとしては、curve-to-curve マップマッチング¹²⁾ や、最短経路探索ベースのマップマッチング¹³⁾ などが提案されている。しかし、これらのアプローチは外れ値の存在に対してロバストではなく、観測が必ずしも理想的でない実用的な目的にはまだ困難がある。

(2) 本研究での提案手法

本研究では、既存研究の欠点を克服した新しいオフラインマップマッチング法を提案する。提案手法は、状態空間モデルの理論に基づき、軌跡データにおける測定誤差の存在を明示的に考慮したものである。提案モデルの新規性は、状態空間モデルのシステムモデルとして、確率的経路選択モデルとしてよく知られている Recursive Logit (RL) モデル¹⁴⁾ を採用した点である。

RLモデルを取り入れることで、3つの大きな利点がある。まず、提案手法では、ドライバーの短距離経路選択意図を組み込み、経路選択行動に対する確率的効果を考慮する。これは逆走を回避するために非常に重要である。広く受け入れられているドライバーの行動原理に基づいているため、逆走を回避するためのアドホックなロジックを考慮する必要がなくなっている。第2に、最尤法を用いて、RLモデルに含まれるシステムパラメータである分散パラメータを推定している。これにより、提案モデルの頑健性が強化される。また、推定されたパラメータはドライバーの行動に関する情報を提供し、これもモデルの出力とみなすことができる。最後に、提案手法はオフラインマッチングであるため、軌跡全体の情報を取り込んで地図とマッチングさせることが

できる。これは、過去の軌跡データのみで、車両が存在するリンクを特定できるオンラインマッチングと大きく異なる点である。これは、より正確な経路推定を行うための利点となる。

なお、本章で示す内容については、研究代表者である井料との連携のもと、共同研究者である神戸大学瀬谷准教授が主に担当しているが、特に提案マップマッチング技術の開発については、同大学の瀬木准教授の貢献を得て成果を創出したものである。

3.2 提案手法

前述のとおり、提案手法では RL モデルをシステムモデルとする状態空間モデルを用いる。車両がある測位時刻にあるリンクにいるときに、その車両が次の測位時刻に各リンク（現在位置から最高速度で到達可能なリンクの集合であるため、必ずしも隣接リンクではないことに注意）に存在する確率をロジットモデルで定式化する。ロジットモデルにおける一般化交通費用は、次の時刻に車両が存在するリンクまでの距離と、そのリンクにおける価値関数（車両軌跡の終点までの距離）の合計と定義される。分散パラメータはロジットモデル内では定数として与えられるが、実際には、最尤法を用いることにより、車両軌跡データにもっとも整合する値として推定することが可能であるため、提案手法を実際に用いる際に外生的に与える必要はない。車両軌跡の終点における価値関数を 0 とし、このロジットモデルの式に後方帰納法を適用することにより、すべての測位時刻での価値関数を計算する。

観測モデルとしては、GPS 測位誤差が正規分布に従うと仮定して与える。GPS 測位誤差の標準偏差は定数として外生的に与える。ただし、確率の計算にあたっては、リンク上のどの地点に車両がいるかを正確に評価することはせず、観測点からもっとも近い点に車両が存在するという近似を行っている。提案手法の適用の際には観測誤差に比して長すぎるリンクを先に分割して与えることにより、この近似による誤差を緩和できる。

システムモデルと観測モデルの定式化ができれば、状態空間モデルの理論に従ってマップマッチングの計算を行うことができる。具体的には、一段先行予測 (one-step-ahead prediction) とフィルタリングを順方向に計算し、そのあと後ろ向きに平滑化とマッチングの計算を行う。

提案手法においてロジットモデルにおける一般化交通費用を計算するには最短経路探索を行う必

要があるが、この計算はかなりの頻度で行わなくてはならない。最短経路探索には一定の計算コストが必要となるため、事前にテーブルとして計算し記憶させる (Upper Bound Origin-destination Table (UBODT)¹¹⁾)。あわせて、提案手法のコンピュータ上への実装に Cython (C-Extensions for Python) を用いて、可読性と計算速度を両立できるようにした。

3.3 提案手法の評価

提案手法の経路推定性能を、既存の HMM モデル (Yang and Gidófalvi¹¹⁾ が開発したオープンソースの Fast Map Matching と呼ばれる実装) と比較することで検証した。本手法の検証には、オープンソースで提供される世界規模の車両軌跡データを用いた¹⁵⁾。このデータセットは、オフライン MM アルゴリズムのテストと比較のためのベンチマークとなることを目的としており、既存の研究でも使用されている¹⁶⁾。

精度評価の指標を計算するために、

- 真の経路に含まれるがマッチング結果に含まれないリンクの長さの合計 (ミス長)
- 真の経路に含まれないがマッチング結果に含まれるリンクの長さの合計 (余分長)

の 2 つの長さを使い、

- $CMR = 1 - \text{ミス長} / \text{経路長}$
- $UR = 1 - \text{余分長} / \text{経路長}$
- $SR = 1 - (\text{ミス長} + \text{余分長}) / \text{経路長}$

の 3 つの指標を定義する。ここで、CMR は「Correct Matching Ratio」、UR は「Undeviating Ratio」、SR は「Similarity Ratio」の略である。

オープンソースによるベンチマークを用いた評価のうち、本報告書では特に Huntsville, Alabama, USA におけるデータを用いた結果について詳述する。このデータの誤差 (絶対偏差の中央値) は 3.795m、経路長は 9253.9m、測位点は 3093 個、平均観測インターバルは 3m である。誤差の標準偏差として 20m を指定してマップマッチングの計算を実施した。その結果、精度指標として

- $CMR:RL=0.961, FMM=0.988$
- $UP:RL=0.992, FMM=0.821$
- $SR:RL=0.953, FMM=0.809$

を得た (RL=提案手法, FMM=比較手法 (Fast Map

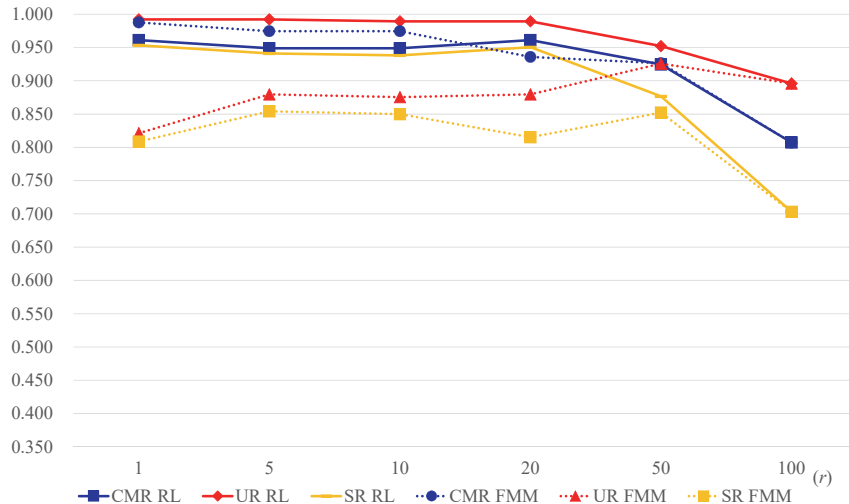


図-3.1 サンプルレート r (横軸) と精度指標 (縦軸) の関係. RL:提案手法, FMM:比較手法

Matching). 分散パラメータは $0.2509(/m)$ であった. 提案手法は CMR については比較手法に対する優位性は見られないものの, UP と SR は比較手法に対して相当の改善が見られる. これは, UP と SR に影響する余分長が提案手法では短い一方で比較手法では長いことを反映している. この結果は, 提案手法がドライバーの経路選択の意図を反映し, 途中で無駄に折り返す経路をマッチング結果として出力することを抑制できていることを示唆している.

観測頻度を減らすことによる影響を評価する. 図-3.1 に, r 点 ($r = 1, 5, 10, 20, 50, 100$) ごとに観測値からサンプルを採取したときの各精度指標の値を, 提案手法 (RL) と比較手法 (FMM) の両方で示した. 提案手法は FMM より指標 UR, SR について優れており, かつ, 数十程度まで間引いても精度指標があまり劣化しないことがわかる. 当該データの平均観測インターバルは $3m$ なので, インターバルを数十~ $100m$ 程度まであけても精度の大きな劣化を招かないことを意味する.

3.4 ケーススタディ

ケーススタディとして, 阪神高速道路において実際に車両を走行させて取得した車両軌跡データに対して提案手法を適用した. このデータセットには, 一般道路沿いを並走する阪神高速道路を走行する車両の軌跡が含まれており, GPS/GNSS では各車が

走る道路を明確に区別することができない部分が多く含まれている. 提案手法が意図する「観測に近くかつ経路選択として自然な経路を出力する」がこのような悪条件下でも機能するかどうかを確認するのがこのケーススタディの目的である.

分析対象区間は阪神高速道路 3 号神戸線の概ね芦屋市~神戸市兵庫区にあたる区間とし, この区間内の全部または一部において神戸線または国道 (43 号線または 2 号線) のいずれかまたは双方を交互に通過する経路を合計 28 通り準備した (図-3.2). 各経路は 2 回走行しているため, 取得できた車両軌跡の数は 56 経路である. この区間は特に東部で神戸線と国道が完全に一致するが, 西部ではこれらが離れて走行する場所もある. 西部を通過する経路であれば, 離れて走行する場所を手がかりに神戸線と一般道のどちらを用いたかを判定できる可能性がある.

56 経路すべてにマップマッチングを行った結果, 精度指標は

1. CMR: 0.95 以上=41 個, 0.90 以上=45 個, 0.70 以上=54 個
2. UR: 0.95 以上=23 個, 0.90 以上=31 個, 0.70 以上=46 個
3. SR: 0.95 以上=23 個, 0.90 以上=29 個, 0.70 以上=44 個

となった. 対象区間の大半が並走している困難な状況であるにもかかわらず, 半分以上の経路でいずれの指標も 0.9 以上を, 8 割程度以上の経路で 0.7 以上を達成できており, このような状況でも提案手法

が一定の精度を確保できることを示唆する結果となった。

ただし、特に対象区間の東部のみを含む経路において、精度指標がかなり悪くなるケースもあった。精度指標のうちSRが0.2未満となることがあった経路を図-3.3に示す。いずれも対象区間の東部のみを走行している。提案手法はあくまでもGPS/GNSSにより得られる座標のみを手がかりとするので、このように完全に並走してしまうとどちらの道路を使ったかの区別は原理的に不可能である。この問題はマップマッチング技術をどう改良しようとも回避しようがなく、ドライビングレコーダ

や、有料道路と一般道路であればETCによる料金収受の記録を活用するなど、別のデータと組み合わせる必要がある。



図-3.2 阪神高速での分析対象経路（すべて）



図-3.3 阪神高速での分析対象経路（精度のよくなかった経路のみ抽出）

第4章 データベースと外部データ連携システムの開発

4.1 はじめに

本章では、膨大な量の車両軌跡データそのものを管理するためのデータベースと、それと連携して使用される外部データとの連携技術およびそのシステムの構築について報告する。実際の実装においては、車両軌跡データについてはETC2.0データを想定している。外部データについては、地域メッシュで与えられるものを基本とする。加えて、市区町村名、緯度経度の点群の形式で与えられるデータも対象とする。さらに人流データのような非常に密な測位データの集合との連携方法についても提案する。

本研究ではETC2.0データのうち、特に様式1-2の形で提供されるマッチング前の測位点データ、および、様式2-1の形で提供されるマッチング済みの経路データの2つをとりあつかう。様式1-2については元々のデータをそのまま抽出し活用できるシステムのほか、そこから抽出した車両の滞在点を抽出し活用するシステムを含む。様式2-1については階層化技術¹⁾を、近年のETC2.0のデータ量の増大にあわせて拡張および改良したシステムを実装している。このシステムは、経路情報を階層化されたネットワーク上に集約して保管する機能を持つ。個々の車両の経路情報だけでなく、それを集計することにより得られるリンクや経路の旅行時間や交通量も同時に蓄積される。以上のシステムのうち、様式1-2に属するものは「様式1-2活用システム」、様式2-1に属するものは「様式2-1活用システム」と名付ける。

外部データについては「地域メッシュ連携システム」が主軸となる。地域メッシュ連携システムでは、車両感知器データ (Macroscopic Fundamental Diagram による¹⁷⁾: 本報告書ではスペースの都合上詳細は掲載しない) のほか、国土交通省や内閣府統計局などから提供されている地域メッシュ単位での統計データと車両軌跡データとの連携を行う。また、このシステムの付加機能として「市区町村データ活用システム」と「点群データ活用システム」を

構築している。ここで言う点群データは、たとえば気象観測点のように、互いの距離がキロメートル単位で離れている空間的に疎な点を想定している。

外部データには上記のようなメッシュ、市区町村、点群のほか、人流データのような非常に密な位置情報からなるものもある。このようなデータを上記の「地域メッシュ連携システム」でそのまま処理するのは、元のデータのもつ空間精度を損ねてしまうことになる。一方、「点群データ活用システム」をそのまま適用しても、観測点が膨大であり、そこから有効な活用を行うことが難しくなってしまう。本研究では、人流データ活用のための技術のひとつとして、人流データから滞在点抽出とそのクラスタリングおよび特徴付与を行うための方法論を構築した。クラスタリングと特徴付与を行うことにより、先述の「点群データ活用システム」を経由して、ETC2.0ないし次世代ETCデータとの連携を可能にしている。この技術の実装と評価については、沖縄県でのケーススタディの一環として行っており、その詳細については本章ではなく第6章で記述している。

4.2 様式1-2活用システムの実装

(1) はじめに

本節では、様式1-2を最大限に活用するために開発実装した「様式1-2活用システム」について詳細を述べる。このシステムは、次節で説明する「様式2-1活用システム」とあわせ、次章以降で報告する本研究の各トピックで活用される。

様式1-2活用システムは、膨大な量となるETC2.0による測位データを、必要に応じて即座に抽出して活用するためのシステムである。本報告書では現行のETC2.0を想定して「様式1-2活用システム」と名付けているが、より一般的な表現をすれば、いわゆるドットデータと呼ばれる測位点からなるデータセットを活用するためのシステムということができよう。

本システムは、国土交通省から zip 形式で圧縮されて提供される ETC2.0 データを直接の入力とする。データはサーバ上で変換されて容量を削減した中間ファイルとして保管される。ここまでが準備フェーズである。その中間ファイルから必要なデータを抽出し一般的な活用へ供する部分と、さらに車両滞在データを生成し活用可能な形式で保存する部分が活用フェーズである。これら3点について以下の各節で詳述する。いずれのフェーズも Linux 上にて実装する。Linux で一般的に使用可能なプログラムは適宜活用する。

(2) 準備フェーズ

準備フェーズは以下のプロセスからなる：

1. zip ファイルを解凍し、不要な引用符を削除する
2. 運行日、車種と用途、ID の組み合わせ（以降では「日付 ID」と呼ぶ）ごとにインデックスを付与する。
3. 日付 ID と、その中の分類であるトリップに対して基礎集計量を与える。
4. データを圧縮し保存する。

以下ではそれぞれについて詳述する。

zip ファイルの解凍には一般的なプログラム（unzip）を用いる。様式 1-2 は CSV ファイル形式となっている。各カラムのデータは引用符を含むが、データの利用時には引用符は不要である。このため、解凍した zip ファイルのデータに対して最初に行うことは引用符の削除である。

膨大なサイズの様式 1-2 を活用するためには、そこから必要な場所を迅速に抽出するための工夫が必要である。今回構築したシステムでは、車両軌跡データそのものが圧縮されて保管されているファイル（以下ではエンコードファイルと呼ぶ）のほか、1 行あたりに日付 ID 1 個分の情報を記録するインデックスファイルを準備フェーズで作成する。このファイルは、「日付 ID」「その日付 ID のエンコードファイルでの保管位置（ファイル起点からのバイト数）」のほか、後で説明する当該日付 ID の軌跡の基礎集計量を記録する。このインデックスファイルはエンコードファイルよりもサイズが大幅に小さいため、このファイルから抽出したいデータの日付 ID を検索し、それから保管位置を特定することにより、エンコードファイルから必要な日付 ID の車両軌跡データを迅速に抽出することが可能となる。

様式 1-2 からデータを抽出するには日付 ID を手がかりにすることもあるが（これは、特に様式 2-1 活用システムとの連携でありうる活用事例である）、

実用上では、特定の場所を走行した日付 ID の車両軌跡データだけを抽出したいという場面が非常に多い。この需要に応えるために、今回構築したシステムでは、インデックスファイルの各行に、該当する日付 ID の車両軌跡データを内包する四角形の緯度経度の最大値と最小値を記録するようにしている。この値が示す四角形と分析対象としたい領域が重複する日付 ID のデータのみを抽出することにより、全国すべての車両軌跡データを含むエンコードファイルから特定地域のデータのみを迅速に取り出すことが可能となる。

上記以外に、インデックスファイルには、軌跡の基礎集計量として、その日付 ID が含むトリップ数、測位点の間の最大速度と、測位点の出現順番が時刻順と整合していないことを示すフラグなどを加える。これらは、当該の日付 ID のデータに異状があるかどうかを判定するのに用いる。特に後者の異状がある場合は、同一日に同一の ID をもつ車両が走行していることが強く推測される。このようなデータが分析に適さないことはかなり多く、そのようなデータをあらかじめ排除するためにこれらの情報を活用することを想定している。

基礎集計量は個々の日付 ID が含むトリップ（様式 1-2 に付されているトリップ番号に基づく）単位でもあらかじめ計算し、インデックスファイルとは別のファイル（トリップファイル）に保管する。トリップ単位の統計を必要とするときには有用である。なお、このファイルはインデックス機能は持ち合わせていない。

エンコードファイルはテキストファイル形式である。様式 1-2 は次行の内容が前の行の内容と重複することが多い（例えば日付や ID はかなりの行数にわたって同一の内容が連続する）ことを利用し、重複行を*（アスタリスク）で置き換えたり、座標や時刻の変わらない部分を省略するなどして容量を削減している。例えば 2020 年 1 月 1 日のデータであれば、展開時のデータが 35GB であるのに対し、エンコードファイルは 9.6GB まで容量を削減できている。また、圧縮方法は極めて単純であり、必要な際に迅速な展開をすることが可能となっている。

エンコードファイルには様式 1-2 のすべての内容は登録していない。日付、ID、車両の種類と用途のほか、利用頻度が多い緯度経度と観測時刻、トリップ番号、速度、データを収集した RSU の情報などを格納している。

インデックスファイルとトリップファイルは通常の CSV ファイルであり、特段の圧縮はしていない。リレーショナルデータベースに登録することに

より、軌跡の基礎集計量から該当する日付 ID を検索するような操作の利便性を高めることも可能である。もっとも、テキストファイルをそのまま処理しても相応の利便性を得ることはできる。

(3) 活用フェーズ：車両軌跡データの抽出

車両軌跡データの抽出はエンコードファイルから今回作成したプログラム (decode) を用いて行われる。特定の日付 ID を指定する場合には、インデックスファイルも用いる。特定の日付のすべての車両軌跡データ、あるいは特定の日付 ID の車両軌跡データを抽出するためのスクリプト (autodecode.pl) を使うことにより、より簡便に必要な車両軌跡データを抽出することができる。例えば

```
autodecode.pl 日付 ID > 出力ファイル
```

とすることにより、日付 ID の車両の軌跡ファイルをすぐに取り出せる。取り出しのための待ち時間は十分無視できる時間である。もちろん、取り出す車両 ID の数が膨大になれば、それなりに時間はかかるが、検索にはほとんど時間はかからない。

(4) 活用フェーズ：車両滞在データの生成

様式 1-2 のデータは膨大な量であることは変わりなく、前節までの工夫をしたとしても全国レベルの長期間におけるデータの活用のようにその分量が大きくなると、扱いに非常に時間がかかるようになる。一方で、車両軌跡データの活用時には、車両がどこを走行したかよりも、車両がどこに滞在したか (すなわちどこを起終点としたか) に興味があることも多い。車両の走行時のデータはネットワークに紐づけて活用すべきことも多いが、このためにはネットワークへのマッチング処理が必要である。それであれば、マッチング後のデータを管理したほうが早い (後述の様式 2-1 活用システムはこれを目的としている)。

様式 1-2 の活用フェーズでは、マップマッチングを行う前のデータから抽出した車両の滞在データを生成し、それを蓄積して活用する機能も実装している。具体的には、個々の日付 ID に属する車両が 10 分以上滞在した場所を事前に抽出し、その結果を蓄積して活用する機能を実装している。車両の走行時のデータを省くことによりデータ量が大幅に削減されており、さまざまな用途に応用が可能である。

車両滞在データの生成は以下の手順で行う：

1. すべての日付 ID の車両軌跡について、2 点間の距離が 1500m 以内で、かつそのあいだの時

間ギャップが 10 分以内の箇所を抽出する。

2. その箇所の直近の車両の平均走行速度を計算する。
3. 2 点間の距離を速度で除した時間を、2 点間の時間ギャップから引いて、その時間がなお 10 分以上となる場合、2 点間の中間の点を滞在した点とする。また、その時間を滞在時間とする。

この手法のポイントは、2 点間の距離が 1500m を超える部分は、すべて「欠測」として扱い、その部分での滞在を推定することを行わないことにある。ただし、ETC2.0 での匿名化処理 (エンジン ON/OFF 時におおむね前後 500m のデータを削除する) を考慮し、しきい値を 1500m という比較的長い値にとる必要がある。この場合、単に 2 点間の時間ギャップを滞在時間とするのは、そのあいだの走行時間を無視することになり適切とは言えない。上記の手法では、この走行時間を前後の軌跡の平均速度を用いて推定し、その分を 2 点間のギャップ時間から控除することを行っている。滞在点の推定は 2 点間の単純な中間点としている。この推定は常に正しいわけではなく、特に、滞在前後で逆方向に移動する軌跡 (単純な往復トリップでは頻発しうる) であれば、500m 程度の誤差が出ることが予想される。もっともこの推定精度を向上させることは、匿名化処理の効果を減じることになってしまうので、今回はそのような精度向上につながる処理はあえて行っていない。

車両の滞在は同一の日だけでなく、日をまたぐものももちろんある。日をまたいだときは ID が変わることもあるので、すべての日跨ぎの滞を検出できるわけではないが、ID が変わらなかった場合についてはその分も検出する。ただし、日が離れた場合は異なる車両を検知している可能性を否定できないので、日跨ぎの滞在については 1 週間以内のものだけを滞在とするようにしている。

抽出結果は CSV ファイルで保管される。日付 ID (日跨ぎの場合は ID のみ)、推定滞在点の緯度経度、滞在開始時刻と終了時刻、滞在時間が保管される。

4.3 様式 2-1 活用システムの実装

(1) はじめに

車両軌跡データを DRM (デジタル道路地図) の基本道路にマップマッチングしたあとのデータを格納する様式 2-1 は、すべての測位点を格納する様式 1-2 に比べて容量はかなり少ないものの、それを

そのまま活用するのは、その容量の大きさから容易とはいえない。DRMへマッチングしているとはいえ道路密度は都市部ではかなり濃密であり、データの量は非常に多くて活用にはまだ障害がある。特にETC2.0が得意とする広域の交通現象の把握を迅速に行うにはまだ工夫が必要であるといえよう。

本研究で提案する様式2-1活用システムは、研究代表者らが過年度に開発した階層型データベース技術¹⁾を改良して実装したものである。当初の階層型データベースは2018年度までに開発したものであり、それ以降のETC2.0データの急増に対して改良を要するところがあった。このため、本研究では、様式2-1を前提とした改良型の階層型データベースのための方法論を開発した。この実装は本研究では交通シミュレーションを用いたケーススタディで活用しているほか、最終的に提案する基本設計案のコンポーネントとしても含めている。なお、ここでは様式2-1の利活用を前提にしているが、他のマップマッチング手法によるマッチング結果であっても、様式2-1に準拠するフォーマットでその結果を出力することにより、そのままこのシステムに適用することが可能である。

(2) 実装アルゴリズム

マップマッチング処理が施された軌跡データ（例えば様式2-1データ）と、その対象となった所与のネットワークデータ（例えば、DRMネットワークデータ基本道路）を入力とし、実際に観測された走行軌跡に基づくネットワークデータを生成するアルゴリズムを実装した。実際に観測された軌跡に基づいて、観測の多い道路網については詳細に、観測の少ない道路網は疎に表現することで、所与のネットワークデータの道路密度に依存する非効率的なデータ量の増加を抑えることを目的としている。

このアルゴリズムで生成されるネットワークデータはノードデータとリンクデータで構成される。ネットワークデータの生成手順は、「入力軌跡データのソート」、「主要ノードの抽出」、「集約リンクの定義」、「主要リンクの定義」、「代表経路の定義」、「サブ主要ノードの定義」、「主要リンクの再定義」である。各用語の定義を下表に示す。主要ノードは、異なる3つのノードと一定の交通量で結ばれているノードのことであり、入力である所与のネットワークデータのノードから抽出される。図-4.1のAに主要ノードのイメージを示す。集約リンクは、軌跡データをベースに主要ノード間を結ぶ複数のリンクを集約することで、新たに生成されたリンクである。図-4.1のBに集約リンクのイメージを示

す。集約リンクの中でも特に交通量が多いリンクを主要リンクとする。主要リンクは、2つの主要ノード間を結ぶ概念的な有向リンクとして定義される。図-4.2のCに主要リンクのイメージを示す。

主要リンク（集約リンク）は、入力である所与のネットワーク上では、主要ノードペア間を結ぶ異なる経路（リンク集合）から構成される可能性があるため、その中から代表経路を一つ選定する。代表経路の選定基準は任意に設定可能だが、本プログラムでは主要ノードペア間をリンクの断絶なく走行可能であり、実際に走行された軌跡の本数が最も多かった経路を選定している。図-4.2のDに代表経路のイメージを示す。異なる主要リンクの代表経路が、入力である所与のネットワーク上で空間的に重複する場合、サブ主要ノードを新たに定義することで、それらの重複区間を新たな主要リンクとして定義する。これにより、一部の主要リンク及び代表経路は新たな主要リンク及び代表経路として再定義される。サブ主要ノードと再定義された主要リンクのイメージを図-4.2のEに、再定義された主要リンクの代表経路のイメージを図-4.2のFに示す。ここまでで定義された主要ノード及びサブ主要ノードの集合をノードデータとし、最終的に定義（再定義）された主要リンクの集合をリンクデータとするネットワークデータを基準として、入力としたオリジナルの軌跡データを生成し、これを集約軌跡データとする。各主要リンク（集約リンク）の観測情報（例えば、交通量や平均速度など）は、事前に指定した時間解像度に基づいて、対応する走行軌跡から取得・推定される。ただし、対応する走行軌跡とは、主要リンクの端点（主要ノードまたはサブ主要ノード）間を他の主要ノード（サブ主要ノード）を介さずに連続して走行した軌跡を指す。例えば、主要リンクの端点（主要ノードペア）間を連続して到達した車両ではなく、対応する代表経路の一部区間のみを走行した車両の走行（軌跡）情報は、当該主要リンクの状態量の計算において一切用いられない。

(3) データベースとしての実装

上記のアルゴリズムで生成した主要ノード、主要リンク、集約軌跡、各主要リンクの状態量等を、実行パラメータや対象とした空間毎に階層的なディレクトリ構成を持つデータベースとして整理することで、様式2-1に関連した情報を効率的に活用できるシステムを実装した。データベースの構成を大きく分けると、上位から「1 実行ファイルや共通データ（複数の処理プログラムで共通して使用されるデータ）に関する部分」、「2 ノードの計算に関する

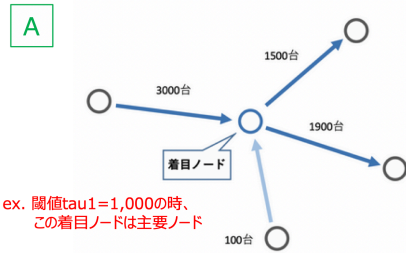
部分」, 「3リンクの計算に関する部分」に分けられる。なお, ここでのリンクは, 以降で説明する「集約リンク」と「主要リンク」を意味する。ノードの計算結果によって, リンクの計算結果が変化するため, 2の下層に3を作成する構成としてある。

このデータベースを用いると, 例えば以下のようなことが可能となる:

1. 主要交差点の抽出 (主要ノードをそのまま用いる)
2. 主要交差点間の時間帯別平均旅行時間の算出 (分割前の主要リンクの旅行時間を用いる)
3. 主要リンクからなる上位ネットワークの抽出
4. 主要リンク時間帯別平均旅行時間の算出

主要ノード

- 着目ノードが異なる3つのノードと一定 (τ_1 台/日) 以上の交通量で結ばれているノード



集約リンク

- 主要ノード間のリンクを集約して, 生成した1本のリンク (集約リンク)
- 特に交通量が多い (τ_2 台/日以上) 集約リンクを**主要リンク**と定義

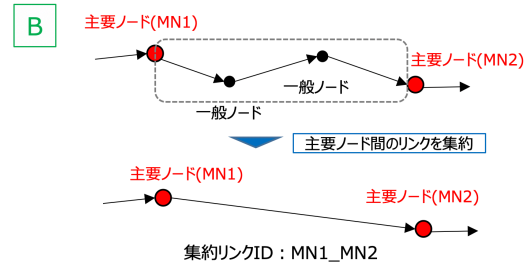
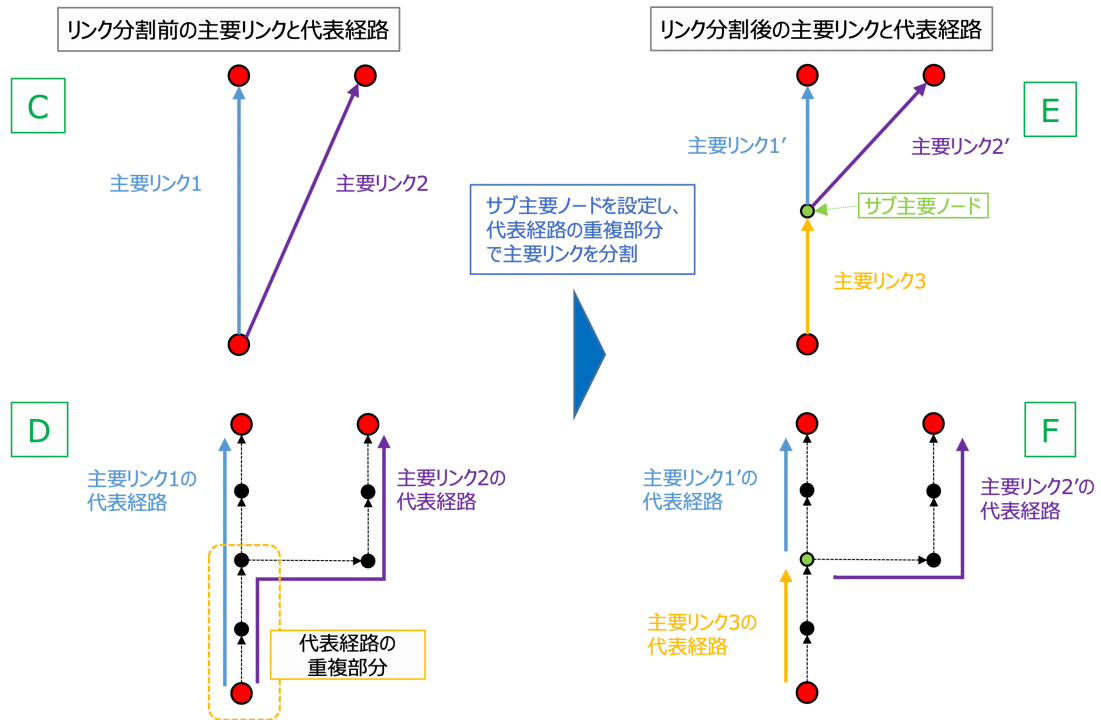


図-4.1 主要ノードと集約・主要リンクのイメージ

サブ主要ノードと主要リンクの分割

- 複数の主要リンクの代表経路が重複がする部分で主要リンクの分割を行う
- 分割箇所となるノードをサブ主要ノードと定義
- なお, サブ主要ノードは主要リンクの代表経路をベースとしたネットワークを用いて, 主要ノードと同様の方法により抽出



※再定義された主要リンクの番号には「'」を付与して表現している

図-4.2 サブ主要ノードと主要リンク分割イメージ

特に3と4は、交通シミュレーションの計算対象とするネットワークを、観測旅行時間とともに抽出することに応用可能である。これについては第6章のケーススタディでも用いている。一方で、リンクを特定せずに主要交差点間の旅行時間だけを、車両がどこを経由したかに関係なく実績値として知りたい場合には、主要リンクを分割する必要はない。これは2に相当する。このような実績値は、道路ネットワーク内の主要地点間をどれだけの旅行時間で移動できたかという、個々のリンクではなく道路ネットワーク全体のサービスレベルを評価するのに有用である。

4.4 地域メッシュ連携システムの実装

(1) はじめに

外部データとの連携を考えるとときには、外部データがどのような位置情報を伴って提供されるかを考えなくてはならない。位置情報の管理方法は外部データによりさまざまな方法があるが、もっともロバストでかつ利用例が多いのは「地域メッシュ」による方法である。地域メッシュは国土を一定のルールでメッシュに区切るものである。その単位としては、もっとも大きい1次メッシュ（緯度40分ごと、経度1度ごと）から、もっとも小さい8分の1メッシュ（緯度3.75秒ごと、経度5.625秒ごと）までである。今回構築したシステムでは、提供事例が多く、ETC2.0データによる滞在点抽出で想定される誤差（数百メートル程度）と整合する、2分の1メッシュ（あるいは4次メッシュとも：緯度15秒ごと、経度22.5秒ごと、1辺約500m）を最小単位としている。

地域メッシュを単位に外部データとの連携を行うことには多くのメリットがある。地域メッシュは日本の地理情報データにおいて標準となっており、特別に変換をすることなくそのまま連携できることは重要な利点である。また、DRM(デジタル道路地図)のようにコード体系が頻繁に更新されることがないので、数年に1回しか調査されない統計で統計年をそろえられないような場合であっても、コード体系の不整合を気にする必要がない。このことは外部データとの連携技術の実務上の有用性を大きく高める。車両軌跡データを、マップマッチングを経ずに外部データと連携できることも大きいメリットである。車両軌跡データの活用において、通過した道路を特定するマップマッチング技術は重要ではあるものの、マップマッチングはあくまでも「もっともらしい」経路を特定する技術であり、常に一定の

誤りを含む。また、車両軌跡データをオープンデータとして公開する際には、プライバシー保護の観点から個々の車両のデータをそのまま出すことが難しく、何らかの集計操作をする必要があることも多い。そのときもっとも標準的なのはマップマッチングにより各道路へ紐付けて集計する操作であり、これは様式2-1活用システムでも行っているが、当然ながらマップマッチングの性能に依存する結果になってしまう。マップマッチングを行わずに集計を行う方法としてもっともシンプルなのは地域メッシュ単位に集計することである。地域メッシュ単位への集計は、様式1-2活用システムの出力を用いれば容易に可能である。そのようにして得たデータと外部データとの連携を地域メッシュ単位で行うことは、データの匿名性と分析の利便性の双方を確保するのに有効な手段である。

(2) 地域メッシュ連携システムの基本実装

地域メッシュを用いた連携は技術的に難しいことはなく、単に地域メッシュ番号を用いてデータを紐付けるのみである。具体的には「地域メッシュ番号、データ」の形式を持つCSVファイルにより、様式1-2システムが出力する車両軌跡データと外部データを取得し、それらを、同一の地域メッシュ番号を持つデータを同一行につなげて出力するスクリプトを用いて紐付けを行う。

地域メッシュの単位としては4次メッシュを基本としているが、データによってはより大きい単位のメッシュで提供されることもある。異なるメッシュサイズのデータを直接比較出来るように、小さいメッシュサイズのデータを大きいメッシュサイズに平均値あるいは合計値によって集約するスクリプトを用意している。なお、この集約はメッシュデータを可視化するときにも有用である。4次メッシュのサイズで全国データを可視化すると、メッシュサイズが小さすぎて見づらかったり、あるいは出力に時間がかかったりする。上記の集約化により全国規模でのデータの可視化をスムーズにすることが可能となる。

(3) 市区町村データ活用システムの実装

統計データの多くは地域メッシュのようなシステムティックな形ではなく、市区町村名ごとの値で整備されている。このようなデータを連携させるためには、市区町村名と地域メッシュ番号との変換を行わなくてはならない。市区町村名と地域メッシュ番号の関係については、総務省統計局が平成27年度時点での市区町村名を対象に、3次メッシュ単位ま

での対応表を公開している¹⁸⁾。これを用いて市区町村単位のデータを4次メッシュ単位に按分するスクリプトを作成し、上記の地域メッシュ連携システムに適用できるようにした。

作成したスクリプトは、「市区町村名、データ」の形式のCSVファイルを読み込み、「4次メッシュ番号、データ」の形式のCSVファイルを出力する。データの按分の方法には、平均値と合計値の2つのいずれかを指定して用いる。按分の重みは、均等に割るか、4次メッシュごとに指定した重みで割るか、いずれかを選べる。一部のメッシュは複数の市区町村が重複して共有しているが、そのような場合は重複を単に無視するか、各市区町村での重みを重複数分で割るかいずれかの処理を選べる。

(4) 点群データ活用システムの実装

統計データの中には、観測点が粗に存在し、それらの位置座標が与えられた形式で提供されるものもある。気象データはこの類いのデータに該当する。例えば気象庁は気象台等やアメダスでの過去の観測データをWebサイトで公開しており¹⁹⁾、その観測点の座標も公開している²⁰⁾。このようなデータを地域メッシュデータ単位で連携させるためには、各観測データに特化した方法で補間を行うことが望ましいが、多様なデータを扱おうとするときには特別な方法を個々に用いることは煩雑なことも多い。

今回構築したシステムでは、上記のような点群データを地域メッシュ(4次メッシュ)単位に補間する簡便な手法によるスクリプトを実装している。この手法は、各地域メッシュの中心点から各座標までの距離の関数として算出される重み付け値による重み付け平均値を算出する。関数には指数関数を用いる方法をデフォルトとしているが、これについては、距離=0で有限の値をとり、かつ、距離に対して単調減少な任意の関数で置き換えることも可能である。作成したスクリプトは、「座標、データ」の形式のCSVファイルを読み込み、「4次メッシュ番号、データ」の形式のCSVファイルを出力する。

(5) 地域メッシュ連携システムの活用事例

活用事例のひとつとして、道路交通センサスODデータとETC2.0車両滞在データの連携による詳細ODデータ生成を紹介する。道路交通センサスのODデータは、その発着地がBゾーン単位で指定されているため、交通シミュレーションのようなより高い空間精度を前提とするアプリケーションで用いるには、各トリップの起終点をより小さい単位に按分することが望ましい。ここでは、様式1-2活

用システムで作成したETC2.0滞在データを用いた按分による、4次メッシュ単位での詳細な時間帯別OD交通量の生成の事例を紹介する。なお、ここで作成した時間帯別OD交通量は、そのまま第6章での全国規模シミュレーションの入力としている。

時間帯別OD交通量の作成手順は以下の通りである：

1. 平成27年OD調査データ(OD集計用マスター)の各レコードから起終点の市区町村、出発時間帯、拡大係数を取得する。出発時間が不明なものは省いている。
2. 様式1-2活用システムで作成したETC2.0滞在データを用いて、3次メッシュ単位の滞在数(日内と日跨ぎの両方)を作成する。対象期間は2020年11月とした。
3. 市区町村データ活用システムを用いて、拡大係数分の車両を、市区町村に含まれる3次メッシュ単位に2.の滞在数の重みに従って按分する。按分は、重みに比例した確率による乱数で行う。この按分は起点側と終点側の両方で独立に行う。
4. 配分された3次メッシュの中に含まれる4個の4次メッシュの中から任意の1個を選択する。このとき、起点終点の3次メッシュが同一であれば、異なるメッシュが選択されるようにする。

この手順は、同一市区町村内であればETC2.0のサンプルの偏りは無視できることを前提としている。このことは、市区町村レベルであってもよく成り立つかどうかは自明ではなく、特にETC2.0のサンプル率が高くなりがちな高速道路に道路ネットワーク的に近いところが過剰に選ばれる可能性は残っている。それでもなお、全国レベルでの偏りに比べれば問題にならない程度であることは期待できるので、今回は市区町村内でのサンプルの偏りは無視している。

作成したOD交通量を可視化した例を示す。図4.3と4.4は、6時と16時において、東京中心部の2次メッシュである533945,533946,533935,533936の4つの2次メッシュを終点とする車両が存在する3次メッシュの分布を地図上に示したものである。各メッシュのOD交通量はほとんど1で最大でも5程度である。朝のほうが夕方に比べてより多くのメッシュから東京中心部に車両が向かっていることわかる。

もうひとつの活用事例として、気象データのひとつである積雪量とETC2.0車両滞在数の比較を行った例を紹介する。東北地方(青森, 秋田, 岩手,

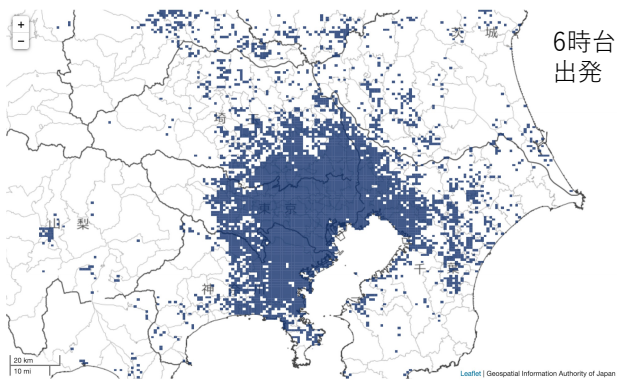


図-4.3 東京中心部を終点とする車両の存在するメッシュ
(色部分) 6 時台出発

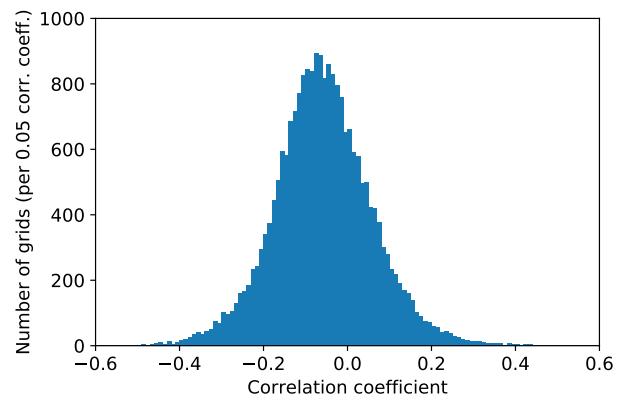


図-4.5 降雪量と滞在数の相関係数の分布

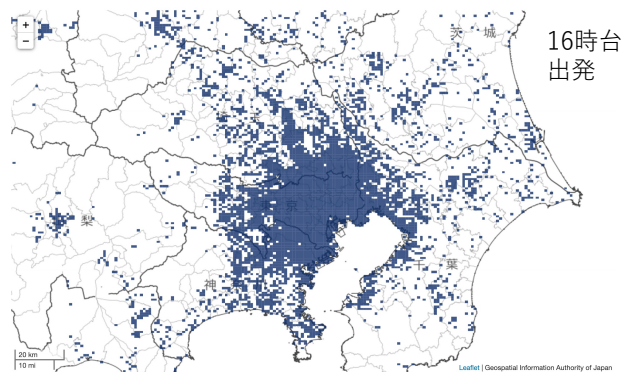


図-4.4 東京中心部を終点とする車両の存在するメッシュ
(色部分) 16 時台出発

今回の分析は気象データを ETC2.0 データと連携して使用する簡単な例であり、積雪以外の滞在数の変動要因を全く考慮していない。他の変動要因を考慮することにより、積雪が与える交通需要への影響をより精緻に分析できることが期待できよう。

宮城、山形、福島各県)を対象に、アメダス等の観測点(79ヶ所)で観測されている日降雪量と、3次メッシュ単位の日単位の車両滞在数(日内のものに限る)を比較した。分析期間は2020年10月から2021年3月までの121日である。各観測点の重み付けの関数には、

$$f(x) = 0.5^{x/5} \quad (4.1)$$

を用いた。ただし x は距離で単位は km である。すなわち、この重み付けの関数は、5km 離れるごとに重みを半分にする。

3次メッシュごとの降雪量と滞在数の関係を簡便に調べるために、メッシュごとに121日分ある降雪量と滞在数の相関係数を計算し、そのヒストグラムを作成した。期間中12台以上の滞在数があったメッシュのみを対象としている。対象となったメッシュ数は22750個である。

結果を図-4.5に示す。メッシュごとの相関係数がやや負によって分布していることがわかる。このことから、降雪量と滞在数のあいだに負の相関がある傾向があることがわかる。平均値は-0.0577であった。

第5章 車両軌跡データの匿名化技術の開発

5.1 はじめに

車両軌跡データの広範な活用のためには、オープンデータ化により多くの人々がデータを使用可能にすることが必要となる。一方、車両軌跡データには個人の習慣、興味、行動、交際範囲等プライバシーに関する情報が潜在的に含まれ、それらが悪意のあるデータの使用（このような使用法を以降では「攻撃」と呼ぶ）により明らかになる危険がある（南²¹⁾, 2018)。そのため、位置情報の安全な2次利用には匿名化と呼ばれる個人の識別情報を取り除くデータ加工が不可欠となる。ここで、位置情報活用とプライバシー保護にはトレードオフの関係があり（井料ら²²⁾, 2014)、いかに「有益なデータ分析」に堪える形でデータを匿名化するかがポイントになる。

匿名化においては、データを意図的に劣化させて個々人の情報を判別不可能にし、個人情報抽出の可能性を低くする集計操作が行われることが一般的である。小栗²³⁾ (2019)によれば、プライバシー保護の文脈における「特定」は「ある情報が誰の情報であるかがわかる」ことであり、「識別」は、「社会的に誰であるかが判明しない場合でも、あるパーソナルデータの中において、その1名が存在することが判明する」こととである。匿名化の基礎としてまず識別子 (identifier) と準識別子 (quasi-identifier) を定義する。識別子は、例えば氏名のように、その項目単体で個人の識別を可能にするユニークな属性のことである。一方準識別子は、その項目自体は識別子ではないが、複数組み合わせることで識別子となる属性で、例えば郵便番号と生年月日等が挙げられる。匿名化にあたっては、識別子を削除するだけでは不十分であり、準識別子による識別の可能性も検討しなければならない。複数のレコードにおいて、準識別子に同じ値をもつ群を等価クラス (equivalence class) と呼ぶ。また、データ主体を特定・識別された状態で公開されることが望ましくない属性をセンシティブ属性と呼ぶ。匿名性の指標としては、 k -匿名性 (k -anonymity) が有名であ

る。 k -匿名性とは、準識別子の値が同一のレコードがテーブル内に少なくとも k 人存在する状態を指す。言い換えれば、各等価クラスが、少なくとも k 人のレコードを含む状態である。 k -匿名性の拡張として、各等価クラスにおいて、センシティブ属性がテーブルの中に少なくとも l 人いる状態を l -多様性 (l -diversity) と呼ぶ。他に、各等価クラス内のセンシティブ属性の分布とデータベース全体におけるセンシティブ属性の分布の距離が閾値 t 未満となるかに着目する t -近接性 (t -closeness) などよく知られている。

軌跡データ匿名化に関するレビュー論文としては、Chow et al.^{24, 25)} (2011a,b), Li et al.²⁶⁾ (2019) 等が存在する。後者によれば、軌跡データの匿名化の手法は、大きく、1) Generalization (汎化), 2) Inhibition method, 3) False data method に分類できる。1) は、例えば点をメッシュで集計するように、データの解像度を落とす方法である。2) は、リリースするデータから一部を除外する方法である。3) は、データにバイアスや人工的なノイズを混入させる方法である。同様に高橋²⁷⁾ (2014) は、移動履歴・位置情報加工の基本技法を以下のように整理している：

1. 位置情報のより広いエリア・時間帯への一般化
2. 位置情報の違う位置・時間へのランダムな置き換え
3. 移動履歴を構成する位置情報の一部の削除 (例, 生活圏)
4. 移動履歴の分割 (例, 10日分の履歴を1日単位に分割する)
5. 移動履歴の間引き (例, 1分単位の時間分解能を1時間単位にする)
6. 移動履歴のサンプリング
7. 移動履歴の削除

これらの技法のうち、ETC2.0の経路データで用いられているものは3.と4.である。1.はリンクやメッシュ単位での集計操作に相当し、ETC2.0でも

そのような集計されたデータが提供されている。第4章で提案した様式 1-2 活用システムにおける「車両滞在データ」や、様式 2-1 活用システムにおける「主要リンク旅行時間」も一種の集計操作であり、それ自身が匿名化の機能を持っている。2. は非集計性を保ったままの匿名化を行いたいときに適用可能である。一方、特に位置にランダム性を人為的に加えることは、道路のどの区間を走行したかの特定に悪影響が及ぶ可能性があり、車両軌跡データの活用という文脈では必ずしも得策とはいえない。6 や 7 は削除されなかったデータの個人情報保護されないという問題がある。

5.2 提案手法の概要

本研究では、 k -匿名性を匿名性の指標とし、空間的な集計操作により「経路情報」「トリップ情報」の非集計的な形での確保を目標とした匿名化手法を提案する。いずれの提案手法も様式 1-2 活用システムまたは様式 2-1 活用システムの出力をそのまま活用するものである。これらのシステムにおけるデータフローの最下流に各手法を実装することにより、単なるリンクやメッシュ単位での集計にとどまらない非集計ベースで匿名化されたデータを各システムの出力として追加できるようになる。

経路情報を確保する手法では、様式 2-1 活用システムにおける「主要ノード」のうち車両の通過台数が特に多いところのみを選び、車両の軌跡をそれらのノード間の移動として記述する。これにより、同一のノードのシーケンス(=ノードを捨象した上での同一の経路)を持つ車両は唯一ではなく多数存在することが期待できるので、一定の k 以上の経路データだけを残せば k -匿名性を担保できることになる。ただこの手法は経路を越えて複数トリップを追跡しようとする k -匿名性が難しくなるという欠点がある。この方法の詳細については本報告書ではスペースの都合上割愛する。

本報告書ではトリップ情報を確保する手法について詳細を説明する。この方法では、車両軌跡データのマップマッチングを前提とせず、地理的な集計を地域メッシュを用いた車両軌跡データの集約を行う。また、経路情報については保持せず、滞在データのみを用いてトリップチェーンの情報を取得する。トリップチェーンの情報を保持するため、例えば観光地での回遊行動の分析など、車両軌跡データの部分的な情報だけでは分析ができないようなアプリケーションにも適用可能である。これらの方法は

様式 1-2 活用システムと整合しており、実装も運用も一体化して行うことができる。

5.3 トリップ情報匿名化手法の詳細

(1) 方法論

提案手法では、様式 1-2 活用システムを用いて以下の手順で各車両のトリップ情報を抽出する：

1. 各車両の滞在情報から、ID、滞在点の属する 3 次メッシュ番号と、滞を開始した日時を抽出する。ID は日付 ID ではなく ID(車種と匿名化された ID 番号の組み合わせ)であることに注意。
2. 1. で抽出した情報を ID ごとにとりまとめ、さらに滞在開始日時でソートする。
3. 滞在開始日時の情報から時刻を除去する

日付 ID でなく ID により滞在情報のシーケンスを作成しているため、ID が付け変わらない限りは同一車両を追跡できる。

上記の手順で抽出されたトリップ情報の匿名性について検討する。あるデータについて匿名性がどの程度担保されているかを考えるには、そのデータに対してどのような攻撃(データに具体的な個人のラベルを付与してしまうこと)が可能であるかを考える必要がある。いま、ある特定の車両のトリップ情報が上記の形式で存在し、攻撃者はそれが入手可能であるとしよう。また、攻撃者は、トリップ情報が含むメッシュのどこかで、車両が滞在した日に、その車両のナンバープレートを観測したとしよう。このとき、もし当該日に当該メッシュに滞在した車両が 1 台しかいなければ、その時点で攻撃は成功(すなわち、トリップ情報とナンバープレートの紐付けに成功した)ことになる。これに対して k -匿名化の考え方を適用すれば、「ある日の滞在数が k 個未満のメッシュ番号は、そのまま出現してはならない」ことがわかる。

「ある日の滞在数が k 個未満のメッシュ番号は、そのまま出現してはならない」は k -匿名化の考えに基づく匿名化の必要条件であることは上記の検討から明らかであるが、逆に、そのようなメッシュ番号を削除することが匿名性の担保の十分条件になるであろうか? 上記の匿名化がなされた場合に、攻撃者が k -匿名性を破るには、1 個のメッシュにおけるナンバープレートの観測だけでは不十分で、別のメッシュでもナンバープレートを観測しなくてはならない。これは、言い換えれば「攻撃者は、攻撃

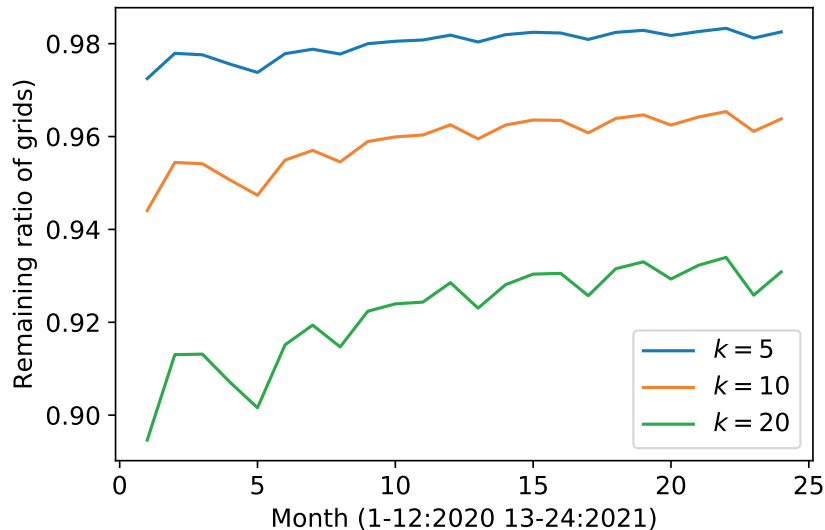


図-5.1 トリップ情報内の滞在メッシュ数の匿名化による残存率

対象の車両のトリップチェーンの一部について実際に追跡をしなくてはならない」ことを意味する。しかし、そのような追跡を行うのであれば、そもそもETC2.0や次世代ETCにより得られるトリップ情報に頼ることなく追跡が出来ていることを意味する。攻撃者が追跡ではなく複数のメッシュで観測するとなればどうだろうか？メッシュ1個での観測だけで特定が可能であれば、「たまたま見かけた車両のトリップ情報」がそれこそ気軽に（たまたま見かけた車両のナンバープレートを抑えるだけでよい）取得できるケースが頻繁に発生しうるが、メッシュ2個以上の観測で同様のことが起こるには、それぞれのメッシュで「たまたま同じ車両を観測する」ことが起きる必要がある。そのような可能性は、メッシュ1個だけでたまたま観測するのに比べて十分小さいと考えられる。もし意図的に観測しようとしても、2個以上のメッシュにおいて網羅的かつ継続的な観測が必要である。3次メッシュは概ね1km四方のサイズがあることを考えれば、その手間はかなり大きい。これらの理由により、攻撃者がトリップ情報を用いることによる追加的なプライバシー保護へのダメージは、社会的にはほぼ問題にならないことが予想される。

提案手法では、3次メッシュの匿名性確保を「当該日の3次メッシュに滞在したIDの数が k 未満の場合は、そのメッシュについては削除か2次メッシュ番号に置き換える」で行う。 k の値は k -匿名化の k なので、匿名性の程度をどこまで担保したいかによって設定する。これはもちろんデータの質とのトレードオフになる。次節では実際のデータを用いて

どの程度匿名化処理が必要となるかを検証する。

(2) 匿名性とデータの質のトレードオフの検証

2020/1/1 から 2021/12/31 の様式 1-2 データから、様式 1 - 2 活用システムにより抽出した滞在データ（10 分間以上の滞在）に対して提案手法を適用した。 k -匿名化の k については、5,10,20 の3つの値を適用した。集計を日単位で行うとし、提案手法によってすべてのトリップ情報に含まれる滞在メッシュのうち何割が削除されずに残るかを月ごとの平均値として算出した。

算出結果を図-5.1 に示す。 $k=20$ のもっとも厳しい例でも9割は削除されず、 $k=5$ であれば、トリップ情報に含まれる滞在メッシュのうち98%以上が残ることがわかった。以上により、提案手法は、追跡を伴わない攻撃を前提とした上でプライバシーを保護しつつ十分なトリップ情報を提供することがわかった。

第 6 章 ケーススタディを通じた要件抽出

本章では全国各地（あるいは全国規模）における政策課題に関連するケーススタディの成果の概要と、それに基づいて抽出された、次世代 ETC システムに求められる要件のまとめを報告する。ケーススタディは交差点のような狭域から、都市や都道府県規模、さらには全国規模のような広域にわたる多様なものを実施した。また、国土交通省道路局、国土技術政策総合研究所、各地方整備局、沖縄総合事務局、国道事務所等の地方組織、地域道路経済戦略研究会から随時情報収集を行い、実際の政策課題の解決に資するようなテーマを選定した。

本研究では多数のケーススタディを実施し、それぞれのケーススタディはさまざまな政策課題等の背景、独自のデータ取得、外部データの活用など、多くの内容を含んでいる。すべてのケーススタディにおいてこれらの詳細をすべて報告するのは報告書のスペースの都合上不可能である。本報告書では、各ケーススタディについて、要件抽出に重要となる知見を中心にその要点のみを説明する。多くのケーススタディは外部において既発表あるいは今後発表予定であり、詳細はそれらの発表において詳述している。

6.1 沖縄県における観光回遊行動分析

観光客の観光行動を知るために GPS/GNSS のような位置情報を用いる試みは 2000 年代から行われており²⁸⁾、方法論としてはすでに一般的なアプローチとなっており。近年ではソーシャルメディアデータなどを活用するようなビッグデータアプローチの研究例も出ている^{29, 30, 31)}。ETC2.0 や次世代 ETC システムは車両の軌跡データを収集するものであり、観光客個人個人の観光行動を直接観測するものではない。しかし自家用車やレンタカーでの移動が主な観光地であれば、観光客の観光行動の調査のための有効なデータソースとなるであろう。

本研究では ETC2.0 や次世代 ETC システムによ

る観光行動把握のケーススタディを、沖縄県を対象に行った。ケーススタディの狙いは、(a)ETC2.0 データによる回遊行動の把握状況の調査、(b) 訪日外国人の回遊行動分析、(c) 外部データとしての人流データを活用した滞在点データ抽出方法の提案、である。(a) では、ETC2.0 車両軌跡データの問題点としてしばしば指摘される欠測の問題が実際にどれだけ発生しているか、別途取得された基本的には欠測がない車両軌跡データと比較することにより見る。(b) では、欠測がないデータを用いて観光回遊行動の分析を行い、それにより次世代 ETC システムにおいて欠測の問題を解決することのメリットを示す。(c) では人流データを外部データとして連携する方法のひとつとして、人流データから滞在点データを抽出する方法を提案する。これは「車両軌跡データは個々の観光客の行動を直接は観測しない」という問題点を緩和するアプローチのひとつと捉えている。

いずれの分析においても、地域道路経済戦略研究会の沖縄地方部会によってすでに継続的に実施されている訪日外国人の観光客のレンタカーを対象とした調査で得られたデータを用いる。レンタカーを用いる訪日外国人の観光客の行動把握は効果的な観光施策の立案（沖縄本島東側などの新たな地域での観光進行など）に重要である。現状では対象車両は数十台程度しかなく限定的なデータしかとれていないが、この問題は次世代 ETC システムによってより多くの車両のデータが収集できるようになることで緩和されるであろう。

上記の調査は沖縄ツーリスト株式会社が運営するレンタカーサービスである OTS レンタカーの協力のもと実施されている。レンタカーを利用する訪日外国人から許諾をとり、ETC2.0 特定プローブデータと、レンタカーに内蔵されたカーナビゲーションシステムが取得し蓄積する GPS ベースのプローブデータ（カーナビ GPS データ）を継続的に収集している。本研究の (a)(b) ではこのデータを用いている。

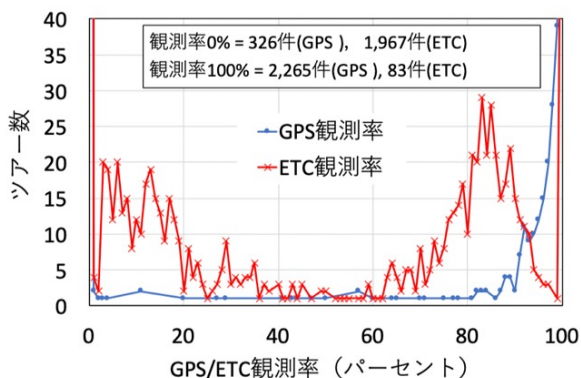


図-6.1 カーナビ GPS と ETC2.0 の車両軌跡の観測率
(1 ツアー = 1 貸出)

(1) ETC2.0 データによる回遊行動の把握状況

訪日外国人レンタカーから許諾を得て収集した ETC2.0 特定プローブデータとカーナビ GPS データの観測回数（10 分単位の時間帯で 1 回でも観測された回数）を比較し、それぞれのデータが実際の車両軌跡をどれだけ把握しているかを見る。ただし、いずれのデータも欠測が完全にはないので、いずれかのデータで観測された時間帯の和集合を擬似的に真値とみなし、それに対して各データが観測された時間帯の割合を観測率とする。結果を図-6.1 に示す。カーナビ GPS ではほぼすべてが把握率 80% 以上であり、100% であるものが大半を占める。一方で ETC2.0 は把握率 0% のものが卓越している。この結果は、現状の ETC2.0 では沖縄県の観光回遊行動の把握をすることにかかなりの困難があることを示している。次世代 ETC システムにおいては、このような欠測の問題を緩和することが強く望まれる。

(2) 訪日外国人の回遊行動分析

車両軌跡の把握率の高いカーナビ GPS データを次世代 ETC システムによるデータと見なし、それを用いて訪日外国人の回遊行動分析を行い、次世代 ETC システムにおける把握率の向上のメリットを示すことを行った。ここでは「経路トポロジー」による回遊行動の幾何的特徴の分析と、各目的地を訪問したタイミングの分析の 2 つの結果例を示す。これらの分析の詳細は井料・神谷³²⁾ に詳しい。

経路トポロジーは、回遊対象地域にいくつかの基準点を置き、回遊経路がその基準点を右回りに n 回だけ回れば n 、左回りであれば $-n$ とする指標である（図-6.2）³³⁾。今回は図-6.3 のように 6 ケ所の基準点を配置し、貸出ごとの経路トポロジーを基準

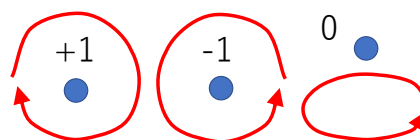


図-6.2 経路トポロジーの例

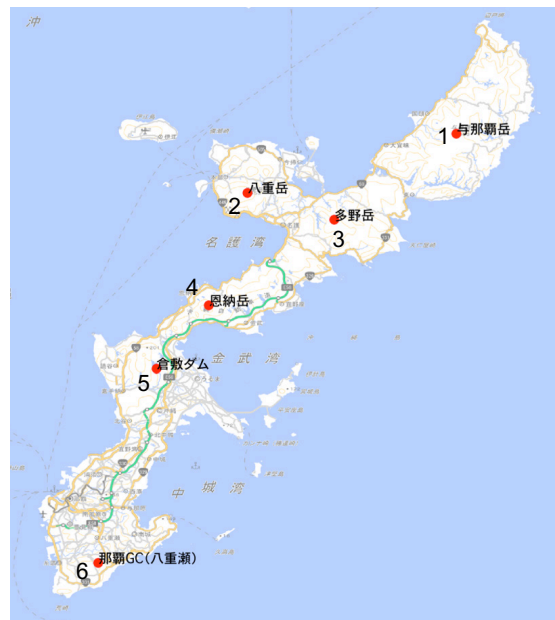


図-6.3 基準点の場所³²⁾

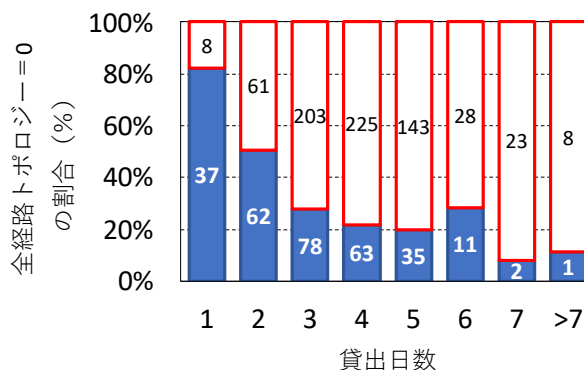


図-6.4 貸出日数と全経路トポロジーが 0 となる貸出数との関係³²⁾

点ごとに計算した。経路トポロジーがすべての基準点で 0 であれば、これらの基準点のいずれに対しても周回となる回遊行動をしていないことになる。このような貸出は回遊性が低いと見なすことができよう。

図-6.4 に、貸出日数と全経路トポロジーが 0 となる／ならない貸出数との関係を示した。貸出日数が長いほど、全経路トポロジーが 0 とならない貸出数が増える傾向があることがわかる。滞在日数を長く

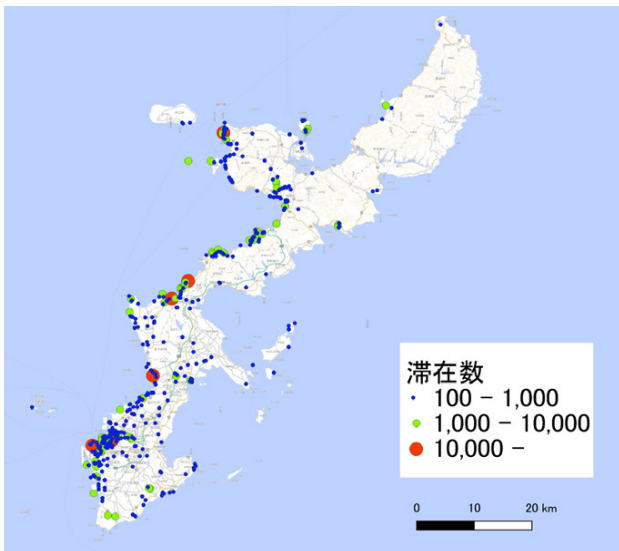


図-6.5 抽出された目的地と滞在数（8週間分）³⁴⁾

すれば回遊性が上がるという、直感的に理解しやすい傾向があるといえよう。

(3) 人流データによる目的地情報の抽出

位置情報を含むビッグデータとして最近よく用いられるものが人流データである。人流データは、スマートフォンが取得した位置情報から生成されるデータである。スマートフォンは通常は個人が常時携帯するものであり、このようなデータは個人の人々の移動に関する情報を提供するものと考えられる。この特性は観光回遊行動の観点からいえば有利である。また、スマートフォンの普及率を考えれば相当のサンプル率を期待することもできることも有利な点である。一方でこのようなデータは個人情報保護の観点からデータの流通に制約があるし、車両軌跡データと合わせることに個人情報に対する攻撃の懸念も高い。そのため十分な集計処理を経た利用を行うことがのぞましい。

本研究では、特に観光回遊行動の分析に適した人流データの集計方法のひとつとして、滞在目的地の抽出手法を提案する。この手法では、非集計の人流データの個々の移動軌跡から一定の時間だけ一定の領域にとどまった滞在点を、その滞在時間帯とともに抽出する。滞在点の集合に対して平面直角座標系上のユークリッド距離を用いてクラスタリングを行い、一定以上の数の滞在点が集まったクラスターを滞在目的地と見なす。図-6.5に抽出した滞在目的地を示す。

滞在目的地は滞在時間に関する特徴（何分滞在したか、どの時間帯に何人滞在したか）と紐付けられる。たとえば昼食時に滞在者数が増えれば飲食店

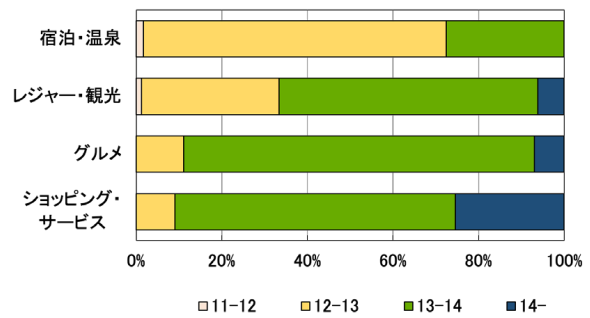


図-6.6 POI の大分類ごとの平均滞在時刻の分布³⁴⁾

の可能性があるなど、滞在時間の特徴は滞在目的地の特性と強く関係することが予想される。このことが実際にどの程度いえるかについて確かめるために、滞在目的地データを別途入手した POI (Point of interest) データと位置情報により照合することも行った。POI は大分類により分類されており、今回は「宿泊・温泉」「レジャー・観光」「グルメ」「ショッピング・サービス」の分類を用いた。

本節の分析の詳細の一部は益野ほか³⁴⁾に詳述している。本報告書では、特に滞在時間帯と POI の大分類の関係を例として紹介する。図-6.6に、POI の大分類ごとの平均滞在時刻の分布を示す。ここで平均滞在時刻は、時間帯別の滞在者数分布の重み付き平均であり、目的地に属する複数の滞在点ごとに滞在した平均的な時刻を示す。結果を見ると、レジャー・観光は相対的に早い時刻に、ショッピング・サービスは相対的に遅い時刻に平均滞在時刻が偏っている一方、グルメはあまり偏っていないことがわかる（宿泊・温泉は、チェックアウト前の滞在のみ切り出されたケースに影響を受けて、早い時刻が多くなっている）。

以上のような滞在時間によって特徴づけられた滞在目的地の座標データを外部データとして持てば、例えば車両軌跡データでの滞在点を滞在目的地に紐付けるなどの方法により、車両軌跡データの滞在点に目的地としての情報を付加することが可能となる。これにより観光回遊行動の分析がより容易になる。また、観光回遊行動の離散選択モデルを構築する際の選択枝集合生成のベースとなるデータとして用いることも可能となろう。

6.2 宮崎市における都市部での区間旅行時間観測

国道 220 号線の宮崎市中心部にある橋である橘橋の前後の道路区間の混雑の分析をケーススタディと

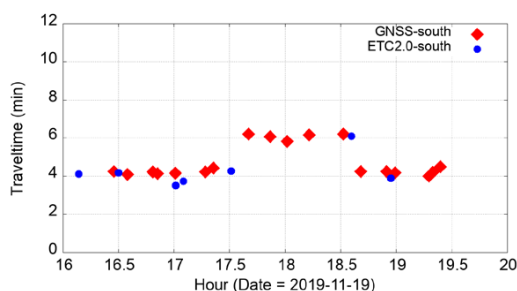


図-6.7 観測旅行時間（橘橋前後 1.5km 南行）

して取り上げた。国道 220 号線橘橋は宮崎市中心部を南北に分断する大淀川の数少ない渡河地点であり混雑ポイントとなっている。特に平日の夕方においては、県庁等がある中心部から住宅街方面への南方向の交通により混雑がしばしば発生している。このような都市部の一般道路の旅行時間は走行レーンや右左折時の待ち時間に影響されることが多く、交差点間の旅行時間を合計するだけでは特定の経路の正確な旅行時間を得られるとは限らない。このような問題とそれへの対応策は過去にも提案されている³⁵⁾が、主要な経路の旅行時間であれば、その経路内のリンクをすべて通った車両の旅行時間を直接観測するほうが正確であることは言うまでもない。このケーススタディでは、第 2 章で示した観測機器の性能評価のための実走実験とあわせて旅行時間の観測を行い、ETC2.0 での観測結果と比較した。5 日間の観測対象日の午後 4 時ごろから 8 時ごろまでのあいだに、橘橋前後と、橘橋の東側にある大淀大橋前後の各 1.5km の区間の旅行時間を観測した。

結果の一部を図-6.7 と 6.8 に示す。南方向の混雑が ETC2.0 でも実走実験によるものでも一定頻度（4 時間で概ね 10~20 個程度）取得できていることがわかる。一方、概ね等時間間隔で走行させた実走実験によるものは対象時間帯内の旅行時間をまんべんなくとれているが、ETC2.0 では相当の長さ（場合によっては 1 時間以上）の時間帯で旅行時間が得られていないところがある。ETC2.0 データはプローブデータであり、ドライバーが選ばない経路の旅行時間は取得できない。また、今回のケースで当てはまるかどうかは不明であるが、一般論として、観測しようとする経路を選ぶ車両（ETC2.0 の搭載有無にかかわらず）が、混雑の影響により非常に少なくなる可能性への注意が必要である。

ただ「実際に使用されない経路の旅行時間」の情報は現実の道路のサービスレベルを示すものではなく、実務的には必ずしも重要とはいえない。このこ

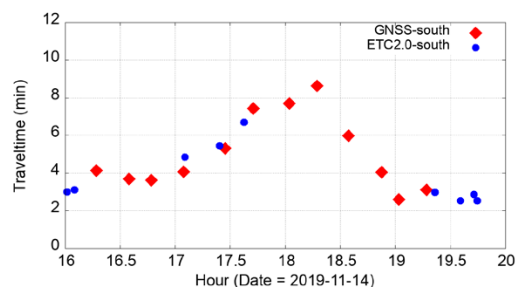


図-6.8 観測旅行時間（大淀大橋前後 1.5km 南行）

とと、上記で示した経路ごとの ETC2.0 での旅行時間観測における欠測の可能性を考慮すると、旅行時間データを任意の 2 地点間の「経路を特定しない」旅行時間としてデータベース上で管理することに一定の合理性があることがわかる。これは第 4 章で提案した様式 2-1 活用システムに「主要ノード間の旅行時間の管理機能」を実装した根拠となっている。

6.3 高知市石立交差点での車両軌跡データ分析

本節では国道 56 号線石立交差点における交差点改良工事前後の車両軌跡データの比較を行った。国道 56 号線は高知県の西部から高知市内方面を結ぶ道路であり、石立交差点はこの国道 56 号線の高知市内西部に位置する交差点である。高知市西部における東西方向の交通を担う重要な道路であり、特に東方向については、朝ピーク時に郊外から市街地に向かう交通で混雑が発生する。石立交差点を西側から東方向に通過する道路の交差点の直前における断面構造は、路肩側から直進左折、直進、右折の 3 つの車線で構成されていた。（図-6.9）用地取得は行わずに断面構造を見直し、左折、直進、直進、右折の 4 つの車線となるような改良工事が行われ、2020 年度末までに完了した。

交差点の改良工事はその交差点を通過する車両の挙動を変える可能性がある。ETC2.0 データはこのような狭域の車両軌跡データを細かく取得することはできないが、次世代 ETC システムによってその



図-6.9 石立交差点の車線構成（改良前）

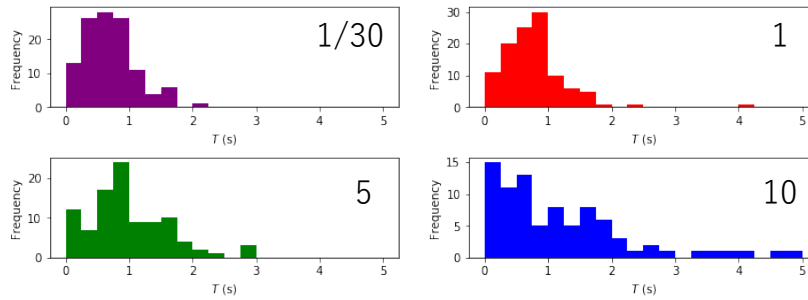


図-6.10 異なる測位間隔での IDM のパラメータ T の推定結果（車両ごとの推定のヒストグラム）。グラフ右上の数字は観測間隔，横軸単位は秒

ようなことが可能となれば，交差点改良工事の効果測定や事前評価に有用なデータを得ることが期待できる。

本研究では（株）道路計画のビューポールを用いたビデオカメラ観測を改良工事前後に行い，そこから 1/30 秒間隔の車両軌跡データを交差点上流側約 70m にわたって取得し，追従モデル（Intelligent Driver Model (IDM)³⁶⁾ のパラメータ推定を行い，それが改良工事前後で変化するかどうかを見た。あわせて，車両軌跡データの測位間隔を間引くことによる影響の見積もりも行った。これは次世代 ETC システムで必要な測位間隔を推定する際に重要な情報となる。

本節の内容の多くは岩原ら³⁷⁾ に詳述している。また，改良工事前後の差については，IDM のパラメータの多くに有意な差が見られたものの，その変化には明確な傾向はなかった。

以降では，特に次世代 ETC システムの要件を決めるのに重要となる，車両軌跡データを間引き測位間隔を長くすることによる影響についてその概要を報告する。IDM は前方車両との相対速度から適切な車間距離 s^* を計算し， s^* と希望速度から加速度を計算するモデルである。本研究では

$$\dot{v}_\alpha = a \left[1 - \left(\frac{v_\alpha}{v_0} \right)^4 - \left(\frac{s^*(v_\alpha, \Delta v_\alpha)}{s_\alpha} \right)^2 \right] \quad (6.1)$$

$$\text{where } s^*(v_\alpha, \Delta v_\alpha) = s_0 + v_\alpha(T + \beta \Delta v_\alpha) \quad (6.2)$$

の式を用いた。 v_0 は希望速度であり，本研究では当該区間の規制速度に相当する 13.89m/s に固定する。 s^* は必要とされる車間距離である。 s_α は $s_\alpha = x_{\alpha-1} - x_\alpha - l_{\alpha-1}$ で計算され， x は基準点からの距離， α は α 番目の車両で自車両を指す。 l は車両長である。推定すべきパラメータは， s_0 （最小車間距離）， T （希望ヘッドウェイ）， a （最大加速度）， β （最大加速度と最大限速度の積の $-1/2$ 乗）の 4 つである。推定は推定対象となった車両ごとに

個別に行っている。パラメータのうち T を例に，複数の測位間隔でのパラメータ推定結果の分布を図-6.10 に示す。観測間隔 1 秒では 1/30 秒と大差ないが，5 秒ではやや異なる分布形になり，10 秒ではだいぶ異なる分布になっている。 T 以外でも同様の特徴が見られた（一部，10 秒でもあまり異なる分布形のものもあった）。10 秒は分析対象区間を自由流速度で走行するのに要する時間に概ね一致しており，かなり少ない観測点数でパラメータを無理に推定せざるを得ないことが多くなる。分析対象区間（今回は約 70m）を長くすれば点数は増えるだろうが，交差点付近でないデータも含まれてしまう。このことは必要な観測間隔は区間長に比例することを示唆するが，交差点付近の解析をすることを考えれば 70m でも相当の長さといえるので，観測間隔は長くても数秒，できれば 1 秒を確保すべきといえるだろう。一方で 1/30 秒のような高頻度まで確保する必要はなさそうである。

6.4 車両軌跡データを用いた飽和交通流率の推定

(1) はじめに

本節では，現行の ETC2.0 データを用い，信号交差点手前の最大密度を所与とした上で，その信号交差点における飽和交通流率を推定する手法について提案する。飽和交通流率は交差点の性能を示す重要な指標であり，その把握は交通流シミュレーションのパラメータ設定やボトルネック交差点の改良方策の検討など交差点に関する多くの分析や施策検討において必須となる。飽和交通流率を直接観測するには車両感知器やビデオカメラのような断面交通量の全数調査が可能な手段が必要であり，ETC2.0 のような限られた車両の情報しかとれない手段は飽和交通流率の観測には必ずしも向かないと考えられてきた。しかし，最大密度，すなわち信号待ち等ですべ

表-6.1 飽和交通流率の推定値および観測結果

単位：台 / 分 / 車線，カッコ内は平均値の標準誤差

交差点名	ETC2.0 推定値	観測値 (直進車線)	観測値 (直進左折車線)	観測値 (平均値)
瀬戸	25.3	24.9 (0.3)	20.9 (0.3)	23.6 (0.3)
住吉東町5	29.3	28.9 (0.5)	-	28.9 (0.5)
住吉	29.3	29.1 (0.5)	-	29.1 (0.5)

での車両が停止している際の交通密度は、どの道路でも概ね安定した値として定まることが期待できる（大型車混入率の影響は受けるが、大型車換算係数を考慮済みの値と考えればこの点も特に問題とならない）。本節では、最大密度で停止している車両群が青信号で出発して停止線を通る軌跡を、ETC2.0 で得られた車両走行軌跡（具体的には位置と速度）のデータを元に再構築し、それにより飽和交通流率を求める手法について、その概要と適用例を紹介する。本節の内容の詳細については福嶋ほか³⁸⁾で報告している。

(2) 方法論の概要

提案手法は、交差点手前で停止した ETC2.0 搭載車の走行軌跡を再構築し、それと信号交差点手前の最大密度を用いて全車両の発進時の走行軌跡を推計することにより飽和交通流率を推定する。提案手法では、Fayazi ら³⁹⁾が提案した「車両が交差点で停止したかどうか」「停止した時間」「交差点を出発した時間」を推定する手法を用いて分析対象車両を特定する。これに等加速を仮定した車両軌跡の曲線をあてはめ、そのパラメータを推定し、それから飽和交通流率を求める。ETC2.0 の測位間隔は状況によるものの 200m 程度とされており、交差点下流側での測位はせいぜい 1 回程度と見込まれる。よって、曲線のあてはめは車両単位ではなく、その交差点を一定期間のあいだに通過する多数の車両に対する平均的なものとしてまとめる。

(3) 結果

国道 43 号線および 2 号線の神戸市内の 3 つの交差点（瀬戸交差点、住吉交差点、住吉東町 5 交差点）を対象にビデオカメラによる現地調査を行い、その結果と ETC2.0 による推計の結果を比較した。ビデオカメラによる調査では直進専用車線と直進左折車線を区別して飽和交通流率を観測した。ETC2.0 からは使用車線がわからないので全車線の平均値しか推計できないことに注意したい。表-6.1 に結果を示す。ここで平均値は単純平均であり、交通量の

重みはかけていないことに注意が必要である。提案手法により飽和交通流率がよい精度で推計されていることがわかる。瀬戸については若干過大推計であるが、直進左折車線から直進する車両の台数が少なく、ETC2.0 での推計にそれが反映されていないことが原因のひとつと考えることができよう。

本節の結果は、プローブデータから飽和交通流率を推計するという、ETC2.0 や次世代 ETC システムにおける新たなアプリケーションを示すものである。ただし現行 ETC2.0 では車線の判別は難しいことに注意したい。次世代 ETC システムで車線判別が可能となればその活用可能性はさらに広がる。確実な車線判別には第 2 章で示したドライビングレコーダの活用が必要となるので、それが限定的にでも可能とすることを、次世代 ETC システムの要件のひとつとしてあげることができよう。ただし車両軌跡データをそのまま使うのに比して手間はかなり増えることが考えられる。モニタリングは車両軌跡データで車線を区別せずに行い、必要な際にドライビングレコーダを活用した詳細調査を行うような枠組みが現実的であろう。

6.5 車両滞在データを用いたテレワーク率推計

(1) 研究の背景と目的

本節の研究（以下、本研究とする）では、様式 1-2 活用システムから得られる滞在データと外部データとの関係技術を組み合わせて、新型コロナウイルスによる需要変動の分析と、それを用いた業種別テレワーク率の推定の試みを行った。交通量分析については、国土交通省道路局においても、断面交通量のような従来から常時観測しているものについては詳細かつ継続的な分析を行って Web サイトで公開されている。一方で、発生集中交通量については技術的限界もあり、分析の試みは行っているものの包括的な詳細分析には至っていないこともヒアリングを通じてわかった。本研究の試みは、単に非常時における交通需要の変動を ETC2.0 や次世代 ETC

で分析する方法論を提供するだけでなく、そのようなデータを外部データと連携させることにより、ETC2.0 や次世代 ETC システムからは知ることが出来ない社会属性（ここでは就業している業種）に依存する交通需要への影響要因を知ることができることを示す。特に、外部データとの連携技術が具体的にどのような効用をもたらすかを示す好例であるということも出来よう。

本研究での解析は以下の手順によっている：

1. 2020年1月から2020年6月までの半年間、全国のETC2.0データセットから乗用車の軌跡を抽出し、同一日以内に10分以上滞在した地点を抽出する。各日の滞在回数は、500m四方のメッシュに集約される。このメッシュの大きさは空間統計で使用するメッシュに準じて決定する。
2. ステップ1で得られたデータに非負行列分解法(NMF)を適用し、滞在数の時空間パターンを少数の空間成分と日内変動成分に分解する。
3. 各メッシュの業種別就業者数から業種別の1日当たりの滞在数を推定するモデルを構築する。そして、ステップ2の結果を用いて、モデルパラメータを推定する。
4. パンデミック発生前と発生時を比較し、業種別テレワーク実施率を推計する。

推定結果は、本研究とは別に国土交通省が実施したテレワークに関するアンケート調査から得られたテレワーク率と比較し、妥当性を確認した。

(2) COVID-19による交通量等変動の既存研究

COVID-19のパンデミック時に、交通量や速度などの交通パターンの変化を、交通感知器や交通流データを収集した他のデータセットから調査した研究はすでに数多くある。Liu and Stern⁴⁰⁾はミネアポリス・セントポールの交通量データを用いた解析を行った。Parr et al.⁴¹⁾は、フロリダ州全体の高速道路交通量データの分析を用い2019年と2020年の交通量を比較した。Goenaga et al.⁴²⁾は、ノースカロライナ州とバージニア州での交通パターンの変化を評価した。Muley et al.⁴³⁾は、カタールの24の交差点の交通量の比較を行った。Li et al.⁴⁴⁾は、Baidu Mapの道路交通速度データを用い上海における道路交通渋滞の分析を行った。Loo and Huang⁴⁵⁾は、香港でTomTomの速度データから渋滞指標を分析した。Wang et al.⁴⁶⁾はカリフォルニア州パサデナで観測した車両台数と平均速度から交通パターンの変化を分析している。Simunek et al.⁴⁷⁾はチェコ共和国の全道路の66%の交通デー

タでの分析を行った。

スマートカードデータや、交通機関/オペレーターが収集した交通ビッグデータ、さらには携帯電話等の他のデータを使用した例も多い。Bucsky⁴⁸⁾はハンガリー・ブダペストの交通手段別、道路交通、公共交通利用者、自転車、自転車共有利用者の交通量を用いたGoogleのモビリティレポートを含む複数データソースを用いて分析した。Padmanabhan et al.⁴⁹⁾はニューヨーク、ボストン、シカゴの自転車シェアリングデータを分析した。Aloi et al.⁵⁰⁾は、スペインのサタンデル北部の移動の変化を、車両感知器、公共交通、交通管制カメラ、環境センサーからの記録に基づき分析した。Zhang et al.⁵¹⁾は、Mass Transit Railway Corporationのシステムから取得したスマートカードデータを用い、香港での旅行行動の変化を分析した。スマートカードデータを使用して、COVID-19の影響下における1週間の時空間的な駅間移動パターンの詳細な分析を行っている研究もある⁵²⁾。交通安全に関するデータセットも、パンデミック時の道路交通の変化を理解するために分析されている^{53, 54, 55)}。Arimula et al.⁵⁶⁾は、札幌市の人口密度の変化をモバイル空間統計のビッグデータを用いて分析した。Hara and Yamaguchi⁵⁷⁾は、携帯電話ネットワークの運用データを用いて、非常事態宣言発令時の全国規模での行動変化について実証的な事実と知見を提示した。Gu et al.⁵⁸⁾は、中国の都市間高速道路における旅行パターンを携帯電話ネットワークベースのデータセットから分析した。Heiler et al.⁵⁹⁾はオーストリア全土の携帯電話データを用いて人々の移動の変化を分析した。Chen et al.⁶⁰⁾は人工衛星画像を利用して交通密度を検出し移動パターン変化を評価し、既存の公表されている交通量等のデータと一致する傾向があることがわかった。

上記の研究は、パンデミック時の交通・旅行パターンの変化を発見したものである。しかし、パンデミックに対する政策を評価するために重要な情報である、旅行者の社会・人口統計学的特性との関連付けを行った研究はほとんどない。その中で、携帯電話会社の契約情報から収集した年齢・性別と関連づけた結果を出しているのはHara and Yamaguchi⁵⁷⁾のみである。Loo and Huang⁴⁵⁾はテレワークを推進すると混雑が緩和されることを発見し、ビジネス街や都心部だけでなく、一部のニュータウン地域でも混雑指数が有意に低くなることを発見しているが、定量的な知見にはなっていない。Molloy et al.⁶¹⁾は、スイスの住民1,439人のGPS追跡パネルとオンラインアンケートに基づい

て、厳しい措置がスイスの移動行動に与える影響を調査した。GPSで追跡された人を対象としたパネル調査は、詳細な移動データと社会・人口統計データの両方を収集できる強力なツールである。しかし、パネルの維持には膨大な労力がかかり、サンプル数も限られる。

交通ビッグデータから旅行者の属性を推測する方法はいくつかの研究により提案されている。Kusakabe and Asakura⁶²⁾は、スマートカードデータに含まれない利用者属性を、旅行調査データを組み合わせて推定するナイーブベイズ分類器に基づくデータ融合法を提案している。Alsger et al.⁶³⁾は、クイーンズランド州ブリスベンにおいて、世帯旅行調査データ、起終点調査データ、スマートカード料金データなどの異なるデータソースを統合して旅行目的を推論する方法の提案、キャリブレーション、検証を行った。これらの研究はいずれも旅行調査データに依存したものである。Zhu et al.⁶⁴⁾は、長期のGPSデータセットを用いて、個人の社会的・人口動態的役割を予測した。本論文で行ったように、長期追跡は旅行者を社会的・人口統計的カテゴリーに内生的に分類する大きな可能性を持っている。しかし、日々の継続的な観測に依存するため、プライバシー保護やパネルの品質維持のためのコストの問題から、交通ビッグデータの文脈では困難である場合が多い。他に、2020年の春と秋にスウェーデンのストックホルムを対象とした、スマートカード所有者がCOVID-19の影響で公共交通機関の利用をやめる傾向について分析した研究がある⁶⁵⁾。ここでは二項ロジットモデルを用いて、地域ごとの社会経済データと旅行データを結びつけている。本研究では、スマートカードデータと社会経済データの関連付けのために、旅行者の居住地の駅を推定し、日帰り追跡可能なデータを用いている。これは、本研究が意図するものに最も近いと思われる。一方、日次データを用いて居住地を推定することは、プライバシー上の問題があり、交通ビッグデータとして常に利用できるわけではない。

本研究の既存研究と比べた新規性は、ビッグデータによる変動から業種別テレワーク率という旅行者の属性に関する情報を抽出するところにある。テレワークそのものについての社会調査は行われている^{66, 67, 68)}。一方、本研究で提案するような、アンケート調査によらないビッグデータでの推計手法は、調査コストや迅速性において優れ、COVID-19のような非常時における応用性は高いといえるだろう。

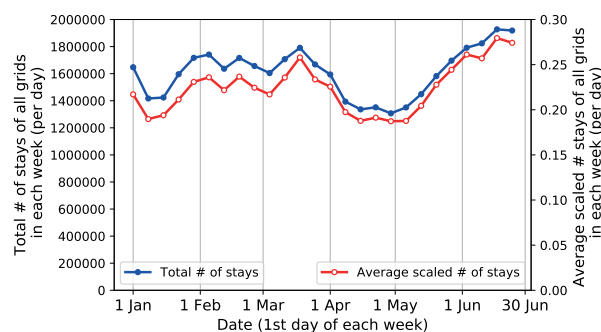


図-6.11 各週の滞在数。グラフの各点は週の初日を表し、1月1日(水)より開始

(3) 利用データ

本研究では空間情報を4次メッシュ単位ですべて集計する。平成28年経済センサスによる各メッシュの業種別就業者数(農業、漁業、政府は含まれない)⁶⁹⁾と、様式1-2活用システムの滞在データを分析に用いる。推計結果の妥当性確認のために国土交通省によるテレワークに関するアンケート調査を用いる⁷⁰⁾。2019年と2020年の業種別のテレワークを「しない」率の比を、NTRP(非テレワーカー比率)と定義する。この数字が小さいほど、2020年に新規にテレワークをした就業者数が「多い」ことを意味する。

滞在データは2020/1/1から2020/6/30のものを用いる。滞在数は4次メッシュごとおよび日ごとに集計されている。1台でも滞在有る日数が18日未満のメッシュは分析から除外する。このデータでは、10分以上の停止をしていると推定される点を滞在と定義している(移動中の車両軌跡は一切カウントされないことに注意)。同日の最初の起点と最後の終点は滞在点とはみなさない。滞在数はメッシュごとに大きく変わるので、メッシュ単位で滞在数を正規化(滞在数から期間中最小滞在数を引いたものを、最大滞在数と最小滞在数の差で割ったもの)した値を多くの分析では用いる。これをScaled number of staysと呼ぶ。各週の滞在数の合計は図-6.11のとおりである。

(4) 分析手法

4次メッシュごとの滞在数の時系列成分を切り出すために負行列分解法(NMF)を用いた。NMFは、行数が「4次メッシュ数」、列数が「日数」のデータを、「4次メッシュ数」×「成分数」、「成分数」×「日数」の2つのより小さい行列の積に分解する。前者の行列(基底行列)が滞在数の空間的構造を成分ごとと与える。後者の行列(混合行列)は滞在数の合

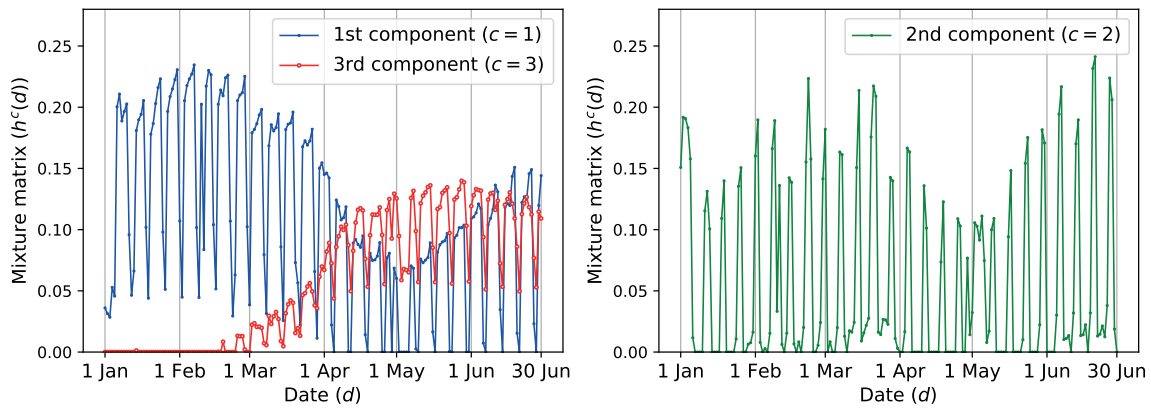


図-6.12 NMFにより分解された時系列成分. 左：第1，第3成分，右：第2成分

計の時系列的構造を与える．時系列成分の数は，残差の改善程度とのバランスを見て3個と設定している．3つの時系列成分を図-6.12に示す．曜日と比較すると，図の左側は平日，右側は休日に相当することがわかる．平日の2個の成分を見ると，成分1はCOVID-19前の，成分3はその後の滞在数の状況を代表すると解釈できる．

業種別のテレワーク率は，4次メッシュごとの滞在数の変化と業種別就業者数を用いて推計する．簡単な需要モデルとして，ある日 d のメッシュ i の業種別の滞在数が

$$x_i(d) \simeq \sum_{s \in S} b_s(d) \gamma_{is} \phi(y_i) + g_i, \quad (6.3)$$

と示されるものを考える．ここで S は全業種， $b_s(d)$ は業種 s の係数（テレワーク率も含む）で未知数， γ_{is} はメッシュ i の就業者数の業種別割合， y_i は就業者数合計， ϕ は所与の関数である． ϕ は車の分担率を簡便に表現する（就業者数が多いほど分担率は下がると考える）もので，今回は $\phi(y_i) = y_i^{0.55}$ としている．

式(6.3)を変形することにより（詳細は省略） $b_s(d)$ を推計できる．これをCOVID-19前後で比較することにより，NTRP（非テレワーカー比率）を推計した．図-6.13に結果を示す．このグラフの横軸（NTRP in survey）は国土交通省によるテレワークに関するアンケート調査から計算したものであり，縦軸がETC2.0データより推計したものである．業種は3文字の略語で示しており，建設(Con)，製造(Man)，電気ガス(Utl)，情報通信(Ict)，運輸(Trp)，卸小売(Rtl)，金融保険(Fin)，不動産(Res)，学術研究等(Aca)，宿泊飲食(Are)，娯楽等(Ent)，教育(Edu)，医療福祉(Med)である（名称は略称）．鉱業はサンプル数が極端に少ないため，複合サービス・その他は統計により集計単位が異なったためこ

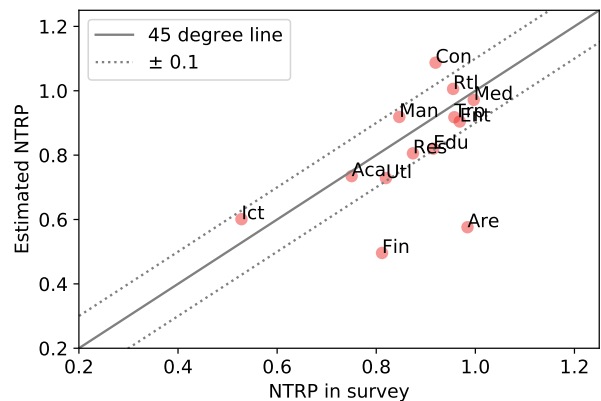


図-6.13 アンケート調査によるNTRP（非テレワーカー比率）と推定NTRPの関係

こには含んでいない．金融保険と宿泊飲食以外はすべて45度線から ± 0.1 に収まっており，全体として業種別のNTRP（非テレワーカー比率）をよく推計できている．2つの業種で外れた理由は不明だが，就労者より顧客のインパクトが大きいことが理由である可能性はあろう．

(5) まとめ

本節では，日本全国のプローブ車データであるETC2.0データと，政府が保有する既存の社会空間データを組み合わせることで，COVID-19パンデミック時の産業分野別テレワーカー比率の全国規模での推計を試みた．筆者の知る限り，この研究は，日常的な追跡を伴わない交通ビッグデータと，政府が既に作成している全国規模の空間統計とを組み合わせることでテレワーカーの割合を推計した初の試みである．ETC2.0や次世代ETCシステムによるデータの広範な領域にわたる活用可能性を示す好例であるといえよう．

本研究で用いた滞在数はETC2.0によるものであ

り、6.1 節で指摘した欠測による問題の影響を受ける。次世代 ETC システムにおいては、このような欠測の問題を緩和すれば、分析の信頼性の向上が図れるだけでなく、メッシュ間の滞在数の比較や空間成分での回帰分析が可能となることが期待できる。これによりより多くの知見を得ることが出来るであろう。

本研究は、メッシュ単位の（10 分以上の停止を伴う）滞在数という、プローブデータとしてはかなり情報を削いだ限定的なデータの活用可能性を示しているともいえる。また、このような値は社会活動を反映する値であり、4 次メッシュ単位かつ適当な時間幅で集計した上でオープンデータの社会統計して公開することにより、幅広い活用がなされることも期待できよう。

6.6 観測旅行時間を用いた交通シミュレーション

(1) はじめに

ETC2.0 や次世代 ETC システムによる旅行時間や交通量のデータは、交通シミュレーションのパラメータ設定をより適切に行う際に有用であることが予想される。また、特に旅行時間データはサンプル率が不安定かつ不明であっても比較的正確にとれるため、それを前提としたデータ指向型のシミュレーションを、ETC2.0 や次世代 ETC システムを前提に行い、より精度の高い施策検討を行うことも可能になることが期待できる。本研究では、全国の主要道路ネットワークを対象とし、交通流モデルを用いる一般的な交通シミュレーションと、旅行時間を所与とするデータ指向型のシミュレーションの 2 つを行い、それぞれについて異なる事例について施策検討を行った。ここではスペースの都合上後者について詳細を紹介する。

交通シミュレーションの計算結果は与えるパラメータに当然ながら依存するが、精度の高い結果を与えるようなパラメータを設定することは非常に手間がかかる。特に交通容量や飽和交通流率の設定は、ボトルネックが顕在化していなかったり、あるいは別のボトルネックの待ち行列の延伸の影響を受けているときにはその推定が困難となることも多い。また、ETC2.0 では交通量の直接観測は出来ず、次世代 ETC システムでもこの問題を信頼できる方法で解決することは容易ではない。

本節では ETC2.0 により実測された時間帯別旅行時間を交通シミュレーションにおける旅行時間としてそのまま使用し、それに、第 4 章で計算方法を

詳述した、道路交通センサスと様式 1-2 活用システムの滞在データにより与えられる OD 交通量を配分する、全国規模の交通シミュレーションを紹介する。また、これを用いて、高速道路の料金の距離単価を変えることによる交通パターンや収入の変化を検討することを施策検討例として行った。時間帯別旅行時間を与えることにより、交通流理論によるリンク旅行時間の計算は全く不要になる。もちろん交通量の変化による旅行時間の変動を評価できないため、現状の交通パターンから外れれば外れるほど計算結果の信頼性は下がる。ただし現況再現性は非常に高く、旅行時間がそこから大幅に変わらないのであれば、推定精度の悪い交通容量や飽和交通流率を用いるよりはむしろ信頼できる結果を得ることが出来るだろう。このような考え方を基に、データオリエンテッドな交通流理論としての定式化を図る研究も見られる⁷¹⁾。特に設定すべきパラメータが多数にわたる大規模なネットワークにおいては、交通シミュレーションの手法として有力な方法といえよう。

(2) 方法論の概要

交通シミュレーションの実装としては、高並列計算が可能な動的交通量配分シミュレータである「FastDUE」⁷²⁾を用いた。このシミュレータは交通流モデルを用いる通常のシミュレーションのほか、旅行時間を所与のものとするシミュレーションも使用可能なように拡張されている。計算負荷の大半は経路探索となるが、ここは並列化が比較的容易であり、全国規模であっても現実的な計算時間で計算が可能である。

主要道路ネットワークとその上の各リンクの時間帯別旅行時間は、様式 2-1 活用システムを用いて生成している。観測旅行時間には 2020/11/4 からの同月の水曜日（計 4 日間）の平均を用いた。なお、地方部では ETC2.0 で観測される交通量が少なく、ネットワークの網羅性に問題があるため、すべての国道を交通シミュレーションの計算対象として加えている。追加した国道における自由流旅行時間は便宜的に一定値に固定している OD 交通量には第 4 章で示した方法で得た 3 次メッシュ単位の時間帯別 OD 交通量（1 時間単位）を適宜 4 次メッシュに配分したものを用いた（この際できるだけ内々 OD が出ないようにしてある）。OD 交通量の総数は約 1.4 億台であったが、主要道路ネットワークのリンクから離れて発着したり、あるいはネットワークの密度が薄く同一ノードの発着となってしまう OD もあり、それらを除いた台数は約 1.1 億台であった。シ

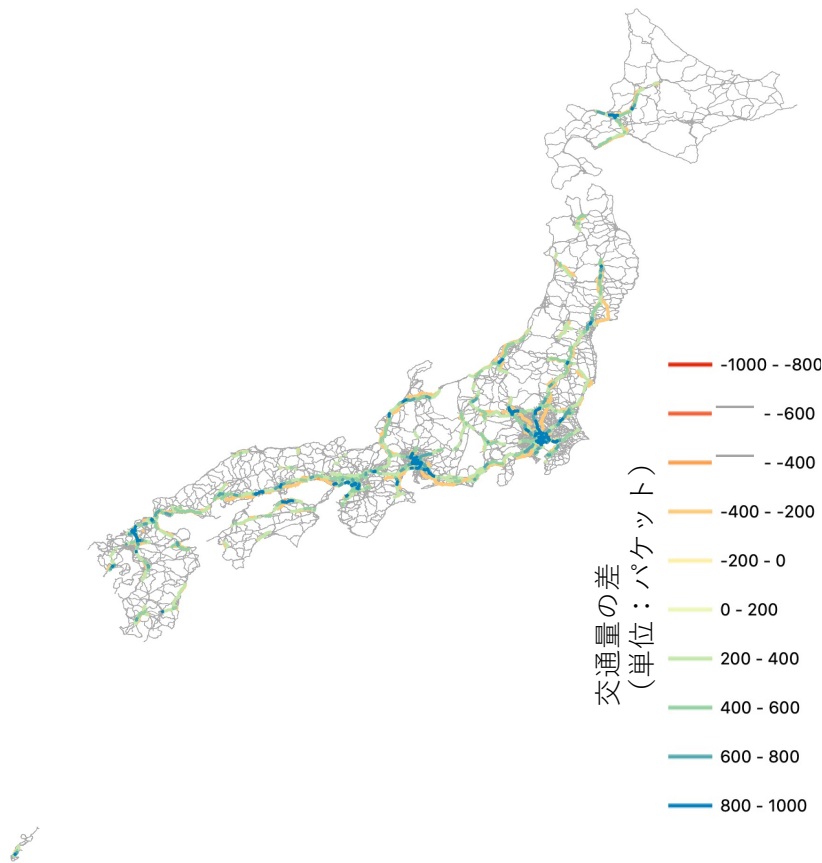


図-6.14 リンク交通量の変化 (25 円/km → 20 円/km, 確定的経路選択)

シミュレーションでは1パケット10台の単位で計算を行っている。

最短経路探索は確定的な経路選択と確率的な経路選択(各リンクの旅行時間の20%の揺らぎをランダムに与えた上で最短経路探索を行う)の両方を行っている。有料道路の料金は、DRMの道路種別1,2について一律25円/kmを負荷することにより近似的に再現している。時間価値は40円/分とした。車種についての区分けは今回は行っていない。

施策検討の例としてとりあげた高速道路の料金調整の効果は、一律25円/kmの料金を、最大で一律12.5円まで減額した上でシミュレーションを実施することによって評価した。評価指標としては、

1. 高速道路(DRM道路種別1,2)と一般道(その他の道路種別)の総走行距離、およびそれらの合計
2. 同 総旅行時間
3. 高速道路の総料金収入

の3つを用いた。

(3) 結果

図-6.14に、料金を25円/kmから20円/kmに減額したときのリンク交通量パターンの変動を示す。この結果は確定的経路選択のときのものである。図-6.15は首都圏の拡大である。図-6.14と図-6.15を見ると、高速道路の交通量が増える一方でそれに代替的な一般道路の幹線の交通量が減っていることが確認できる。この料金施策がどの一般道路の交通量の減少に貢献するかも個別の道路について見ることができる。

料金の変更が総走行距離、総料金収入、総旅行時間にもたらす変動をグラフにして示したのが図-6.16, 6.17, および6.18である。料金を安くする(グラフ上では右から左に移動する)ことにより、総走行距離は増え、料金収入は減り、総旅行時間は減ることがわかる。この傾向は経路選択が確定的であっても確率的であっても同じである。経路選択が確率的になると、総走行距離と総旅行時間が多くなるのは直感と一致する。総料金収入が減るのは、ドライバーが高速道路を含む、より旅行時間が短い経路を正確には認知できていないことが原因と思われる。

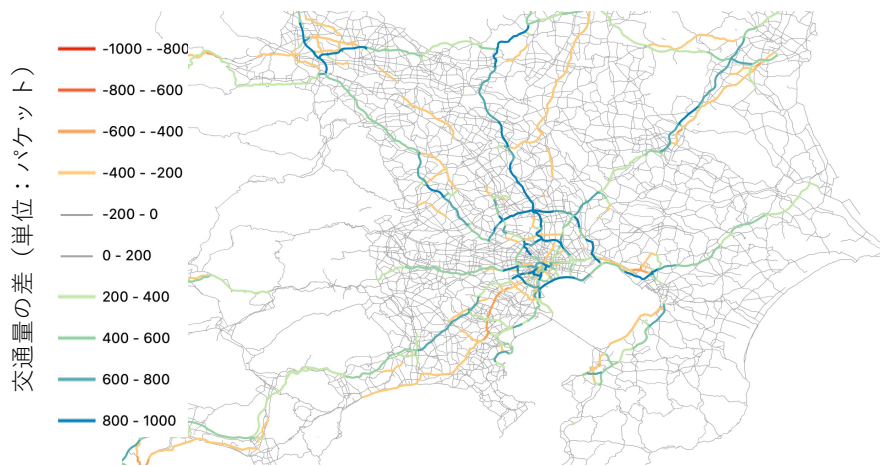


図-6.15 リンク交通量の変化 (25 円/km → 20 円/km, 確定的経路選択) 首都圏拡大

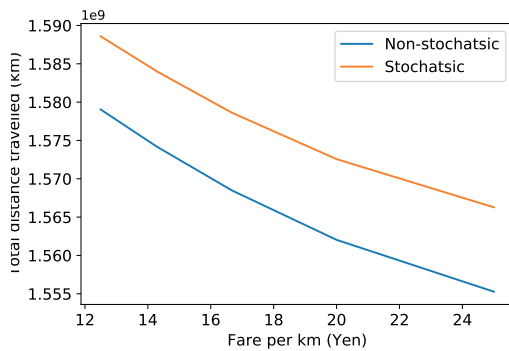


図-6.16 料金と総走行距離の関係

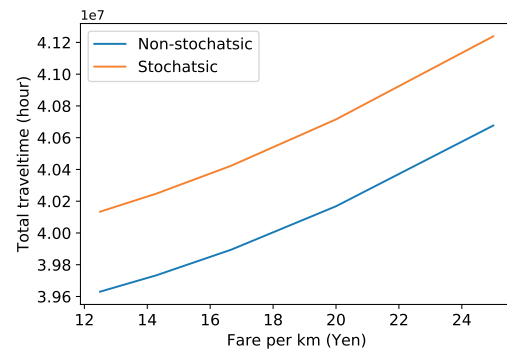


図-6.18 料金と総旅行時間の関係

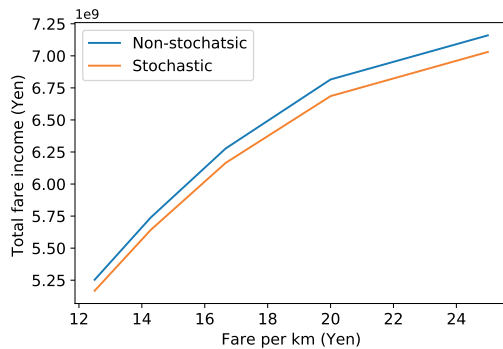


図-6.17 料金と総料金収入の関係

6.7 細街路における ETC2.0 サンプル率

細街路における交通安全対策については、その必要性は従来からあったものの、近年細街路における交通事故が社会問題として強く認知されるようになっており、道路管理者側からの対策も求められている。ETC2.0 や次世代 ETC システムで細街路のデータが一定の量で収集できれば、細街路における

交通安全対策が必要な場所を全国規模かつ低コストで発見することが可能となろう。一方で、ETC2.0 は高速道路や幹線道路に設置される ITS スポットを経由してデータを収集するため、細街路のデータのサンプル率は幹線道路のそれよりも低くなると考えられている。

本節では、現行の ETC2.0 によって、細街路を走行する車がどのくらい把握されているかを、国土地理院が撮影した航空写真によって把握できる車両の台数を参照値として推定する。特に、幹線道路と細街路とのあいだでその把握率に著しい差があるかに着目する。その結果から、現行 ETC2.0 によって細街路の交通状況を把握することについての現状と課題を整理し、さらに、次世代 ETC に求められる諸元を提案することを行う。

(1) データと方法論

本ケーススタディでは、データとして、国土地理院撮影の航空写真と、ETC2.0 データによる車両軌跡データ (様式 1-2) を用いる。まず、分析対象地

域の航空写真に写っているすべての車両（道路上を走行していると判断できるものに限る）の位置座標を取得する。次に、ETC2.0 データから、写真撮影がされた時間帯（サンプル数を増やすために、同一日以外に近隣の同一曜日も含める）での分析対象地域で観測された各車両の測位点を抽出する。2つの手法で収集された車両の測位点を用い、分析対象地域内での把握率を推定する。把握率は車両の存在台数により比較されることに注意したい。これは、交通工学的には、車両密度での把握率を比較していることを意味する。

分析対象地域としては、愛知県名古屋市中心とする概ね 10km 程度四方の領域を選定した。この領域では、2020 年 9 月 5 日（土）に国土地理院による航空写真の撮影が行われている。建築物の影の方向から午前 9 時から正午ごろの撮影と推測した。この写真から、車両の位置のほか、車両が他の地物に隠れて見えないと判断される場所（名古屋高速道路を含む）を特定した。図-6.19 に、航空写真により特定されたすべての点を示す。位置が特定された車両の総数は 39,995 台であった。

ETC2.0 データについては、様式 1-2 活用システムから、航空写真がカバーする領域を通過した車両の車両軌跡を抽出したものをを用いた。航空写真をとった 2020 年 9 月 5 日の午前 9 時、10 時、11 時、12 時ちょうどと、翌週 2020 年 9 月 12 日の午前 9 時、10 時、11 時、12 時ちょうどの 8 個のスナップショット（ETC2.0 データから推定される各時刻における車両の推定存在位置）を分析に用いる。図-6.20 に、ETC2.0 により特定されたすべての点を示す。



図-6.19 航空写真により特定されたすべての車両



図-6.20 ETC2.0 により特定されたすべての車両

航空写真の結果と ETC2.0 データによる結果の比較は、緯度経度とも 1/1000 度単位のメッシュを分析対象地域に切り、各メッシュで感想された車両数を比較することにより行う。ただし、車両を隠し得る地物が存在するメッシュは分析対象から除いた。また、2020 年 9 月 5 日および 2020 年 9 月 12 日のいずれかを運行日とする車両 ID の観測点の観測回数を各メッシュでカウントし、そのカウント数が 100 を超えたメッシュを「幹線道路を含むメッシュ」と見なす。「幹線道路を含むメッシュ」「含まないメッシュ」ごとに、航空写真で観測された車両カウント数と、ETC2.0 による車両カウント数を比較する。

比較の際には航空写真と ETC2.0 のデータは同一時刻のものではないことに注意しなくてはならない。特に、航空写真が 1 回だけの観測であるのに対して、ETC2.0 については、サンプル数を増やすために 1 日 4 回あたり合計 8 回の観測結果をすべてあわせて用いている。このことは、単にそれぞれの方法でのカウント数をメッシュごとに比較することは適切ではないことを意味する。

上記の問題点を解決するために、今回の分析では「航空写真でのカウント数ごとに、ETC2.0 データでのカウント数を集計する」ことを行う。これは、航空写真で多くカウントされているところ（=1 回の観測でカウントされたところ）では、ETC2.0 でもカウントされる確率が高いだろう、という考え方である。統計学的に厳密に分析するのであれば、航空写真でのカウント数は 1 回のサンプルであり、これを事後確率としたベイズ統計を用いることが望ましい。しかし今回はメッシュ数も相当量あるので、上記の簡便な方法でも、幹線道路と細街路間に差異がどの程度あるかを調べるには十分であると考えられる。

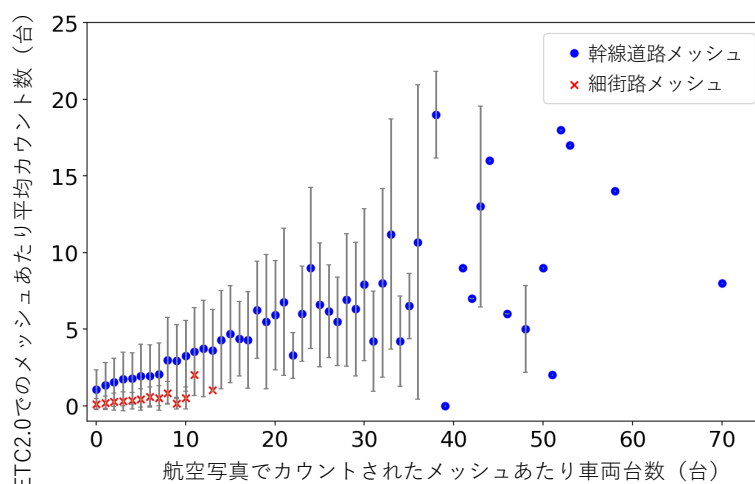


図-6.21 航空写真でのカウント数と ETC2.0 データでのカウント数の関係（誤差棒は観測数の標準偏差であり、平均値の推定誤差ではない）

表-6.2 ETC2.0 によるメッシュ種類ごとのサンプル率（1～10 は航空写真でのカウント数）

種類	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
幹線道路	0.166	0.095	0.072	0.055	0.049	0.041	0.036	0.046	0.041	0.041
細街路	0.023	0.017	0.012	0.010	0.010	0.012	0.009	0.013	0.002	0.006

分析結果は、航空写真でのカウント数を横軸に、各カウント数に含まれるメッシュについて、ETC2.0でのメッシュあたり平均カウント数を縦軸に示したグラフに表示することにより視覚的にまとめる。このグラフは、幹線道路と細街路の両方の区分のメッシュについて、それぞれ別個に作成する。それにより、それぞれの区分において、交通密度ベースでのサンプル率に差があるかどうかを視覚的に判定することができる。また、幹線道路と細街路のいずれでも一定量のカウントがされた部分については、サンプル率がどの程度異なるかを分析する。

(2) 結果

図-6.21 に、航空写真でのカウント数と ETC2.0 データでのカウント数の関係を示す。図から、ETC2.0 により観測される交通密度は、細街路のあるメッシュのほうが、幹線道路があるメッシュに比べて相当量低いことが確認できる。幹線道路と細街路とのいずれにおいてもデータが取られている、航空写真でのカウントが 1 から 10 までについて、航空写真でのカウントを基準に計算したサンプル率をまとめたものが表-6.2 である。このサンプル率の計算のときには、ETC2.0 でのカウントが 8 回分であることを考慮して、ETC2.0 での平均カウント数を 8 で割っている。この結果を見ると、幹線道路では概ね 5% 前後のサンプル率が実現している一方

で、細街路では概ね 1% 程度のサンプル率であることがわかる。

(3) まとめと今後の課題

本節の分析により、細街路での ETC2.0 による交通密度ベースでのサンプル率は、細街路に比べて数倍程度、概ね 5 倍程度の差があることがわかった。このことは、現行 ETC2.0 では、細街路の車両の把握が幹線道路に比べて相当低いことを意味している。ただそれでも 1% 程度の把握はできているので、適切な方法により（例えば対象期間を長期間とすることなど）、分析に耐えるだけのサンプル数を取得することは可能であると考えられよう。

細街路におけるサンプル率の低さは、ITS スポットがある場所を通らない車両を把握できていないことにある。このことは単にサンプル率が低いだけでなく、サンプルの偏りが発生している可能性を示唆する。細街路におけるデータは、交通安全のための道路改良などへの活用が想定されるため、リアルタイムよりは蓄積されたものとしての活用がおそらく多いと考えることができる。ITS スポットでなくモバイル通信ネットワークを用いたり、あるいはスマートフォンと連携し、スマートフォンが自宅の Wi-Fi に接続しているときにアップロードさせるなどの工夫は有効であろう。ただ、特に後者の場

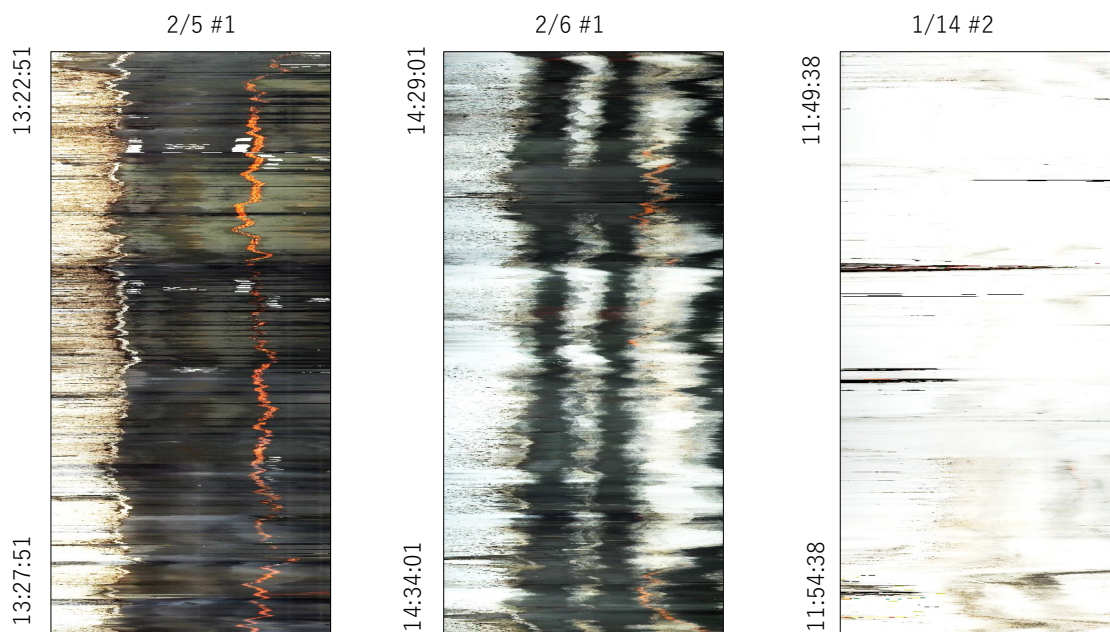


図-6.22 路面画像の例（左：積雪がない，中：多少積雪がある，右：かなり積雪がある，#のあとは車両番号）

合は，利用者に能動的操作をしてもらう必要があるため，インセンティブを付与することが必要であろう。一方で，モバイル通信やWi-Fiなどの，DSRC以外の通信手段を想定せず，現行ETC2.0が用いているITSスポットを用いる前提であれば，車載器の記憶容量を増やす程度しか対策が見当たらない。細街路は一般にネットワーク密度が高いため，記録する測位を間引くことによる対処も簡単とはいえない。

以上をまとめると，細街路の交通状況把握を考慮した上での次世代ETCの諸元を決定する際に注意すべきポイントは：

1. 現行でのサンプル率は1%程度は確保されているので，ETC2.0の諸元のままでも，車載器の普及が図られれば，比較的長期間の蓄積を前提としてそのまま活用できると考えられる
2. サンプル率の向上や想定される偏りの解消を考えると，DSRC以外の，車載器搭載車両の道路利用状況に依存しない通信手段の確保が望ましい。
3. 2.以外については，車載器の記憶容量を単に増やす以外に，有効な対策は見当たらない。

となろう。2については，車載器のコストを押し上げるモバイル通信のサポートよりは，スマートフォン連携の一環として取り入れることが現実的かもしれない。

6.8 ドライビングレコーダによる積雪状況把握

第2章で提案したドライビングレコーダによるレーン判別方法と同じ画像は路面状況のモニタリングにも用いることができると思われる。細かい変化を捉えるのは難しいかもしれないが，積雪状況の把握のような路面全体が変化するものへは適用可能であろう。本節ではこの手法が積雪状況の把握にどれだけ適用可能かを，宮城県と山形県を結ぶ国道48における実走実験（2022/1月と2月に実施）により調査した結果を示す。

国道48号線は，宮城県と山形県の県境において山間部を走行し，冬期にはしばしば大雪に見舞われる。この国道は宮城県と山形県を結ぶ一般道としてもっとも重要なものであり，交通量は冬期でも多く，大型車の通行も多い。東北地方整備局にヒアリングを行ったところ，当該区間には監視カメラが多く設置されており除雪のタイミングの決定に活用されているが，大型車がスタックすることにより通行止めとなる状況も冬期には多く発生しているとのことである。

第2章で提案した方法をそのまま適用して得た画像の例を示す。図-6.22の左は，積雪がまったくない状況の例である。画面中央付近にアスファルトの黒色が見えており，右側に中央線が，左側に路側の積雪が見える。図-6.22の中は，積雪が少しだけある状況である。他の交通が形成したわだちが見えるものの，そのあいだに積雪が始まっている状況

を見ることができる。図-6.22の右は、積雪が比較的多くある状況である。この状況では、わだちはかなり目立たなくなっている。以上のように、今回の提案手法で得た画像で、車両が走行した道路の路面の状況を比較的容易に知ることができることがわかった。

6.9 次世代 ETC システムに求められる要件

本研究で行ったケーススタディは、空間スケールから概ね「広域」「都道府県域」「地区・狭域」の3つに分類できる。以下では、これら分類それぞれへの応用において、どのような要件が次世代 ETC に求められるかをとりまとめる。

広域の分析においては、メッシュ単位（3次～4次メッシュ）の車両滞在データ（テレワーク率推計）と、主要道路の旅行時間（交通シミュレーション）を用いていた。車両滞在データはそれぞれのメッシュでの交通需要や経済活動を直接反映するものであり、それと外部データとを連携することにより、交通需要が社会的要因によりどう変動するかなど、さまざまなことを知ることができる。一方で、車両の滞在数はサンプルの偏りの影響を直接受ける。COVID-19に関するケーススタディでは、メッシュ間の滞在数の絶対量を直接比較することを避け、個々のメッシュ内での変動を手がかりにした分析を行った。このような工夫を行えばサンプルの偏りにもある程度は対処可能である。しかし、例えば本研究で行った交通流シミュレーションへの適用など、交通需要の絶対量を知ることが必須であるアプリケーションも多く存在する。本研究では、この問題を回避するために道路交通センサデータと連携して算出した OD 交通量を用いたが、道路交通センサの実施頻度を考えれば将来的に継続すべき方法論とはいえない。このようなケースを含めて応用範囲を広げるためには、ETC2.0において車載器のメモリ容量とデータ伝送の機会が限定されることに起因する車両軌跡データの欠測と、それにより発生するサンプルの偏りを、その改善によってできる限り緩和することを次世代 ETC システムの要件とすることが重要である。サンプル率の向上は一般的には好ましいものの偏りの改善ほど重要そうではない。ただし、国道のような主要ネットワークにおいても、地方部では時間帯別旅行時間の生成に支障があるほどデータの絶対数が少ないところも多くあった。ケーススタディにおいては交通シミュレーションの実施時にこの点が問題となった。この問題は、

サンプルの偏りの改善（地方部の一般道路ではサンプル率が低いと見られるので）である程度の改善が期待できるが、全体的なサンプル率の向上も有効であることは言うまでもない。

COVID-19 に関するケーススタディでは、ETC2.0 データとメッシュ単位で集計される社会統計との連携により、交通需要、さらには社会活動一般について多様な分析が可能であることがわかった。このことは、外部データとの連携により、各種の社会的イベントが道路交通にどのように影響するかを迅速に分析できることを意味する。次世代 ETC システムで外部データとの連携機能を組み込むことの重要性を示す好例といえよう。

都道府県域の分析の一つとして沖縄県を対象に観光回遊行動のケーススタディを行った。車両の追跡により観光回遊行動の特徴を把握できることを示した。一方で、現行 ETC2.0 はレンタカーによる観光行動の大半を欠測していることも示した。観光振興のようなアプリケーションを考えると、現行 ETC2.0 の問題点の一つである大規模な欠測が発生しないことは重要な要件となる。また、観光回遊行動という観点からは車両でなく人の移動を把握できる人流データを外部データとして連携することが望ましいが、その継続的な入手にはコストがかかり、かつ個人情報保護の問題もある。しかし、ある一定期間の蓄積データから、本研究の提案手法を用いて目的地抽出とその特徴付けをおこない、それを連携させることにより、これらの問題を緩和しつつ、歩行による回遊を考慮した分析も可能になることが期待できる。

積雪状況の把握の広域交通にも影響するが基本的には都道府県域レベルの課題である。積雪による交通障害は通常から積雪が多い地域で発生しているとは限らず、監視カメラでカバーできない分をドライビングレコーダの活用によりカバーできることをケーススタディにより示した。ドライビングレコーダは走行車線の特定にも有効であることと併せ、GPS/GNSS 以外の収集手段を持つことの重要性を、このケーススタディは示している。積雪状況はリアルタイムに把握することが望ましい。本研究での提案手法では転送データ量を大幅に削減することができ、リアルタイム収集には適している。とはいえ位置情報に比べてはデータ量は多く、スマートフォンのような外部のデータ収集系との連携が必要となろう。

広域～都道府県域の分析で抽出された要件のうち特に重要なものは「欠測を減らすかなくすこと」である。これの解決策としては「車載器のメモリ増強」

「データ転送経路の多様化」のようなハード的な対策もある一方で、「観測間隔を長くする」というソフト的な対策もある。後者はいわば「要件の引き下げ」でありデータの質にももちろん影響する。一方、広域分析のケーススタディの成果は、車両の滞在点の情報さえあれば実施可能なアプリケーションも多いことを示唆している。滞在点の下図は1日にどんなに多くともせいぜい数十個程度である。現行ETC2.0と同様に欠測をやむなしとする短い観測間隔と、欠測を極力避け連続した追跡を可能とするための限定した点での観測とを組み合わせ、これらをアプリケーションの特徴に応じて使い分ければ、低コストで欠測に関わる問題を緩和できることが期待できよう。

地区や狭域に関する分析においては、交差点における交通流解析を主として行ったほか、細街路におけるETC2.0データの活用可能性の検討をあわせて行った。また、宮崎市内を例に、地区ベースでの旅行時間がどの程度取得できているかの検討も行っている。地方都市では比較的狭域での交通混雑が問題となっていることが多い。広域ネットワークを対象とした旅行時間分析だけでなく、数個の主要交差点間程度のレベルの旅行時間がどの程度把握できているか、どのような改善が必要かを知ることは、次世代ETCに必要な要件を検討する際に重要である。

交差点交通流の解析においては、まず、飽和交通流率のような巨視スケールの値であれば、現行ETC2.0でも推定が可能であることを示した。ただし現行ETC2.0では走行車線の特定制が行えていない。多車線道路での交差点改良を考えると走行車線の特定制は重要であり、次世代ETCに望まれる要件のひとつと考えるべきであろう。車両追従モデルのパラメータのようなより微視的スケールの知見を得るためには、現行ETC2.0よりも高頻度の位置情報の取得が必要となる。一方で、交差点交通流の詳細分析では、広域分析のアプリケーションに必要な追跡性は全くもって要求されないため、欠測の存在は問題にならない。欠測によりサンプル率が低くなっても、飽和交通流率のケーススタディで示したように、長期にわたるデータを蓄積しサンプル数を増やすことで分析可能となることも多く、それほど問題にはならないと考える。

細街路における交通状況の把握は、交通安全の観点から最近急速に必要性が高まっている。一方で、今年度実施した検討の結果、細街路を走行する車両の把握率は、幹線道路のそれにくらべて数分の1程度であることが、名古屋市におけるケーススタディでわかった。把握率そのものは1%程度はあるの

で、現行ETC2.0データの活用ももちろん可能ではある。しかし交通安全対策においては、幹線道路の交通との関係性（例えば抜け道としての細街路の使用状況分析）を知りたいことも多く、そのような場合にはこのサンプルの偏りは障害がある。次世代ETCでは、幹線道路に偏らないデータ収集を可能とする手段を持つことが要件として望まれる。

地区レベルでの旅行時間の把握については、宮崎市内でのケーススタディにより、現行ETC2.0でも十分できていることを確認できた。もっとも個々の都市におけるサンプル率の差については注意が必要である。ただし、宮崎市内で問題となっていたバスレーンの混雑のような問題の分析においては、走行車線の特定制できないETC2.0では限界がある。地区レベルでは車線特定の重要性は広域ネットワークに比べてその重要性が高くなることには注意したい。

以上のケーススタディの結果から得られた、次世代ETCに求められる要件（特に、ETC2.0に比較して改良が必要な要件）は、以下の通りになる：

1. 滞在点のような限定的なデータでもよいので、欠測をできるだけなくしてサンプルの偏りを解消する。
2. 欠測の可能性とのトレードオフを考慮して複数の観測間隔を設定しアプリケーションで使い分ける。
3. 地方部であっても主要道路で一定のサンプル数を確保する。
4. 必要な際には車線の特定制できる観測手段を備える。
5. GPS/GNSS以外にも、ドライビングレコーダを活用できるようにし、走行車線の特定制や路面の状況把握など、位置情報だけでは難しいアプリケーションへの適用可能性を確保する。
6. 外部データとスムーズに連携して、自動車に限らず、人流データや社会統計なども含めた分析を容易にできるようにする。

2. の観測間隔の具体的な値としては、マップマッチング技術の結果も考慮すれば、例えば「狭域アプリケーション：1～数秒程度、リンクや地点間の旅行時間の把握：100m程度かそれ以下、広域の交通需要や回遊行動分析：滞在点のみ」という設定がよいだろう。上記のほか、全国規模も含めた多様なスケールでの分析をスムーズに行うには、マップマッチングを含めたデータ蓄積系および集計系を、データハンドリングのための技術を導入して整備する必要がある。本研究のケーススタディでも、本研究で開発した複数の技術を組み合わせて活用している。

第7章 次世代 ETC システムの基本設計案の提案

前節で示した要件をできるだけ満たすような次世代 ETC システムの基本設計案の提案を、以下の点に注意しつつ行う：

1. コスト面からみて要件を可能な限り効率的に満たすようにする。
2. 現行 ETC2.0 との連続性を確保する。
3. 次世代 ETC が社会実装されるためのビジネスモデルへの橋渡しを示唆する。
4. 本研究で開発ないし調査した各種技術をどのように活用するかを示す。

以下、基本設計案を「収集系」「蓄積系」「集計系」「活用系」の4つの系と、さらには「社会実装のためのビジネスモデル案」の計5個の要素にそって、以下の各小節で説明する。

7.1 次世代 ETC システムの収集系

提案システムにおける収集系のフレームワークを図-7.1に示す。この図では、車載器が収集する情報、外部デバイスでのデータの取得、それらの蓄積系のサーバへの送信手段について整理してある。図

のうち、青色の太枠で示しているものは、本研究で開発実装した技術であったり、あるいは本研究での検証や試行に基づく技術提案であり、本研究の成果が基本設計案の提案に直接反映されているところを示している。同様の図は以降でも出てくるが、基本的には、データは図の左から右に流れるようになっている。

収集系においてもっとも重要なのは、サンプルの偏りをいかに少なくしつつサンプル率を上げてデータを収集するかである。現行 ETC のサンプルの偏りや収集率の低さの多くは、車載器が収集した車両軌跡をすべて蓄積系のサーバに送信できていないことを理由とする。これを解決するには、車載器の記憶容量を大きくするか、あるいは、ITS スポットを通過しないと行えない DSRC だけでなく、ほかの通信手段に頼ることである。前者については、物理的にメモリを大きくすればいいものの、コスト面や、通信経路の容量を考えると、それだけで解決するのは無理が生じることが容易に想像できうる。メモリ容量に制限があるときに長期間の車両軌跡データを蓄積するには、測位間隔を長くするしかない。

必要な測位間隔については、本研究のケーススタ

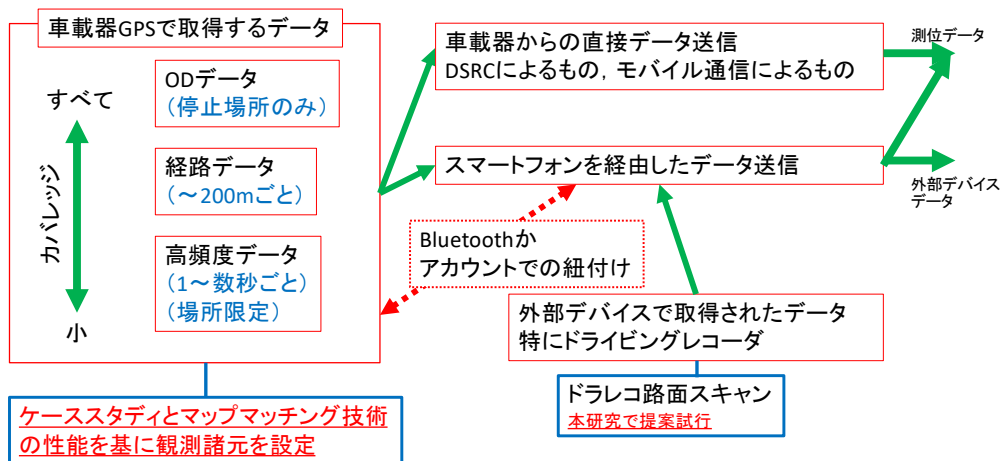


図-7.1 提案システムにおける収集系のフレームワーク

ディヤマップマッチング技術の開発の中で示している。まず、観光回遊行動のような長期追跡を行う場合は、車両が滞在した場所だけでも観測できればかなりのことがわかるようになる。その容量は車両軌跡データ全体に比して無視できるほど少ない。一方で欠測は許されないの、滞在箇所のデータは車両軌跡データとは別に記憶し、メモリ不足のときでも、例えば過去1週間程度の期間のデータは消去せずに保管しなくてはならない。

通過経路を特定したい場合は、マップマッチングの性能を参照しつつその頻度を決める必要がある。第3章での提案手法 (Recursive-Logit Map-Matching) の性能を参照すると 100m 以下の測位が好ましいが、現行 ETC2.0 は 200m の測位に交差点等での加減速や方向変化での測位を加える方法を用いており、基本的には問題はないと考える (ゆるやかなカーブ等での測位を加えるなどの調整は検討すべきである)。経路を特定するという目的からは、少なくとも直近数個程度のトリップの経路が蓄積できる程度の記憶容量はほしい。現行 ETC2.0 での記憶容量は 80km 程度とされている。データ送信の機会の頻度によるが、この値はそれほど問題はないと思われる。

交差点のような狭域での交通流の特性を知るには、1秒から数秒程度の間隔での取得が必要になる。メモリへの負担はかなり大きいことが予想され、このような高頻度データをすべての走行において保管することは不可能であろう。双方向通信により高頻度データを保管する緯度経度の範囲を都度指定し、そこだけで収集するなどの方法により、収集する場所を限定することが一つの方策である。

上記の方法のうち、特に経路データについては、通信手段が長時間確保できないときには欠測が起こることが避けられない。他のデータについても、現行 ETC2.0 では、ITS スポットを通過する機会のない車両については、それこそ永遠にその車両のデータを得ることはない。この問題を解決するには、DSRC 以外の通信手段を確保するしかない。もっとも確実なのは、車載器にモバイル通信機能を持たせることである。この場合は民間のモバイルネットワークを使用する必要があるため、そのコストをどうするかが問題となる。これについては以下の2つの解決策を考えることができよう：

1. モバイルネットワークがすいている時間帯に集中して送信を行う。
2. 車載器に Bluetooth 通信でペアリングされたドライバーのスマートフォンを経由した送信を

行う。

1. は、モバイルネットワークには道路と同様に時間帯によって回線が混雑するときとしないときがあり、すいている時間の帯域を安価に仕入れることが可能であれば、コスト面での問題が解決できる見込みがあることを狙っている。災害時などの緊急事態においては、被災地など重要箇所について、優先的にデータを送信させる機能を持たせることもできれば、より応用が広がることが期待できる。2. については、車両軌跡データは容量も少なく、スマートフォンが扱う巨大なデータに比べれば無視できるほどなので、ドライバーの回線契約に相乗りしてしまおう、という案である。こちらについては、当然ながらドライバーへのインセンティブが必要となる。これについては、後述する「ビジネスモデル」に関する節でそのアプローチを提案する。なお、スマートフォンによるデータ通信は、モバイル通信だけではなく、自宅の Wi-Fi から光回線を経由する方法もある。この方法を用いれば、リアルタイム性には劣るが、ドライバーの負担する追加的な通信コストを実質的に0にすることが可能である。

収集系でもうひとつ重要なのが、ドライビングレコーダをはじめとした外部デバイスで取得されたデータである。これについては、データ量を考えてもスマートフォン経由での通信のみとするのが現実的である。これだけだと ETC 車載器、あるいは各車両との紐付けが行われないので、以下のいずれかの方法をあわせて用いる：

1. ETC 車載器と Bluetooth 通信によりペアリングし、データと車両を自動的に紐付ける。
2. 車両と紐付いたアカウントを発行し、そのアカウントでデータを送信する。

システムの実装としては、前述のスマートフォン経由での車両軌跡データ送信とほとんど変わりががないため、同一のものとして実装することになる。ドライバーへのインセンティブが必要となることも同様である。現在普及しているドライビングレコーダとそのまま連携するには、メモリーカードを経由したオフラインでのデータ転送が必要になることも考えられる。このときもアカウントがあれば車両との紐付けが可能となる。

走行車線の特定については、GPS/GNSS によって直接走行位置を特定する方法には限界があることが本研究の成果からわかっている。もっとも、測位誤差は時間帯によってゆっくりドリフトする形で現れているため、多数の車両のデータがとれれば、そ

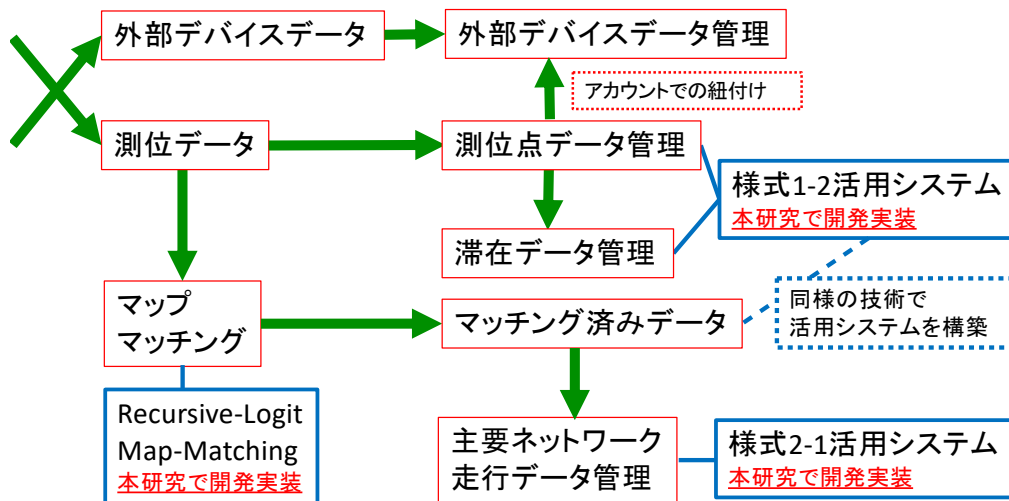


図-7.2 提案システムにおける蓄積系のフレームワーク

これらの車両間の相対的な位置関係からの推定が可能になるかもしれない。ただし、車両によりアンテナの設置状況が一致しているわけではないので、測位に使用する衛星が安定して定まるとも限らない。狭域での高頻度観測については、測位データの保管の際の有効桁を増やし、かつ、測位につかった衛星の情報を保管すれば、将来的に有用となることもありうるが、優先順位はそれほど高いとはいえない。走行車線の確実な特定が必要な際には、ドライビングレコーダとの連携を用いるのが確実であろう。

7.2 次世代 ETC システムの蓄積系

提案システムにおける蓄積系のフレームワークを図-7.2 に示す。蓄積系は測位データ系と外部デバイスデータ系からなる。外部デバイスデータ系については、測位点のデータと時刻および車両 ID で紐付けることにより管理する。

測位データの蓄積は大きく分けて「マップマッチング前のデータ」「マップマッチング後のデータ」の2つに分けられる。マップマッチング前のデータ（測位点データ）については、本研究で実装した様式 1-2 活用システムをそのまま利用可能である。また、膨大な量となる測位点データと、それに比べれば量の少ない（かつ、収集系で別途収集される）滞在データは分けて管理する。本研究で提案したマップマッチング手法（Recursive-Logit Map-Matching）を経てマッチングしたデータは、そのままの形と、主要道路分だけ切り出した主要ネットワーク走行データの2つとして蓄積管理される。後者については本研究で実装した様式 2-1 活用システムをほぼ

そのまま利用可能である。前者については、本研究では直接の管理システムを提案していないが、様式 1-2 活用システムの実装を流用することにより容易に実装が可能である。

7.3 次世代 ETC システムの集計系

提案システムにおける集計系のフレームワークを図-7.3 に示す。集計系は、蓄積系で管理されるデータを利用しやすくするとともに、xROAD のようなプラットフォームを経由して公開可能な形に集計することを役割としている。蓄積系と収集系の区分（図-7.3 の青い点線）は、個車データと集計データを区分けするものであり、データの管理体制等を考えるときの境界としての意味を持つことも考えられよう。集計系はメッシュ集計、交差点集計、リンク収集系の3つの単位からなる。

メッシュ集計では、3 次ないし 4 次メッシュの単位で交通量、交通密度、平均速度、および滞在数の諸量を集計し保管する。前者 3 個は日単位で MFD（Macroscopic Fundamental Diagram）の形でさらに集計され、交通状況の日変動を示す指標として活用する。トリップ情報は本研究で開発した匿名化手法により匿名化し保存する。OD 交通量については、トリップチェーンまで保持するために日単位での管理にとどめているトリップ情報と異なり、時間帯別の管理を行う。道路交通センサとの連携は、次世代 ETC でのサンプルの偏りが解消されるまでは必要な場面も多いと思われる。現行 ETC2.0 との連続性を確保するためにこの機能を保持するこ

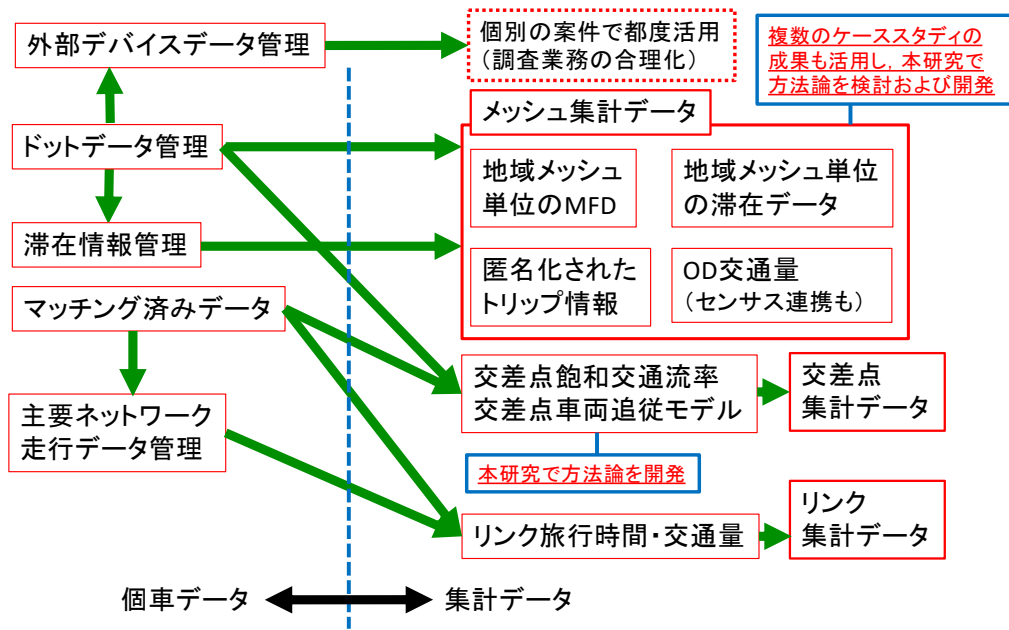


図-7.3 提案システムにおける集計系のフレームワーク

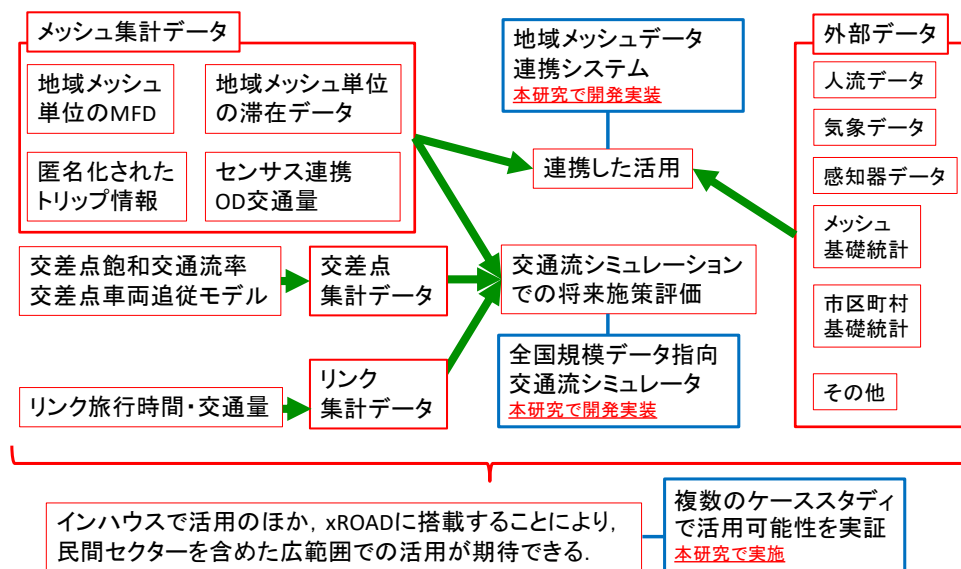


図-7.4 提案システムにおける活用系のフレームワーク

とを提案する。

交差点集計では、本研究で提案した飽和交通流率の推定方法による推定飽和交通流率と、交差点車両追従モデルで推定したパラメータの推定量の2つを集計系で管理する。前者は経路データから、後者は高頻度データから集計する。交差点の箇所の特定のためにマップマッチングの結果も用いる。

リンク旅行時間やリンク交通量はそれぞれリンク単位で集計する。主要ネットワークでの集計と、全ネットワークでの集計の2つを行う。前者は本研究で実装した様式 2-1 活用システムに含まれる。

7.4 次世代 ETC システムの活用系

活用系は、集計系までで得られたデータを活用するものである。そのフレームワークは図-7.4 で示される。活用系は、集計系で集計したデータ群と、それらと外部データとを連携するシステムであり、本研究で実装した「地域メッシュ連携システム」、さらにこれらのデータを入力とする交通流シミュレーションであり、本研究でも提案した「全国規模データ指向交通流シミュレーション」からなる。外

部データと組み合わせたこれらデータおよびシステム群は、国土交通省内でのインハウスの活用はもとより、xROADのようなプラットフォームに搭載することにより、民間セクターを含めた広範囲での活用が期待できる。本研究では、複数の具体的な活用例をケーススタディとして挙げることににより、その活用可能性を実証している。

7.5 社会実装のためのビジネスモデル案

前節までで提案した次世代 ETC システムを社会実装し継続的に運用するためのビジネスモデルの一案を提案する。本研究はもとよりビジネスモデルそのものを提案することを課題として含んでおらず、そのために特化した調査は行ってないため、ここでの提案はエビデンスを伴って行われるものではない。ただ、何らかの案を提案することにより、その社会実装の可能性や、今後実装のために必要な要件、市場調査、技術開発などが見えてきて、具体的なビジネスモデルへの橋渡しになるかもしれない。本節はこのことを目指してひとつの案を提案する。なお、次世代 ETC は国土交通省が道路行政のために実装管理するものであり、それによる営利行為を行うことがもとより想定されていないと考えるべきである。この小節では、「ビジネスモデル」という言葉を、営利を得ることではなく、システム全体をドライバーや民間セクター、さらには国民全体を巻き込んで持続可能なものとするモデル、と解釈している。

提案システムを実装する場合にもっとも大きい問題となるのが収集系におけるドライバーの協力である。今後のビジネスモデルとしての持続可能性を考えると、この点についてはある程度の改善が必要である。まず、蓄積系と集計系を分別し、集計系についてはプライバシー保護を考慮した上で、さらにそのオープンデータ（あるいはそれに準じるアクセス可能性）を担保することが重要であると思われる。オープン化により公共財としての価値が発生し、公共への貢献という意味でデータ収集の公益性を担保できる。新型コロナウイルスの発生中（特に外出自粛が自治体等から要請されている期間）は、携帯電話会社が公表する滞在人口データ（人流データ）が、外出自粛の実施状況をモニタリングし社会で共有する手段として広く認知された。これに対する反発は、少なくともプライバシー保護の観点からはほぼ聞かれず、集計データかつ公共財として共有することについてはコンセンサスがすでにあるものと考え

えられよう。

以上の点を抑えて、ドライバーの明示的な協力を得やすい環境を構築したあとに必要なと思われるのが、データ提供へのインセンティブの設定である。これについては、データ収集と送信の機能を車載器のみで行っている場合は、ドライバーの手間もコストも発生せず、現状と同様に特段の必要性はないと考える。一方で、スマートフォン連携を行う場合は、ドライバーの手間やコスト（十分少ないものではあるが）が発生する。このためには一定のインセンティブの付与が必要となる。

インセンティブ付与の一案としては、例えば「道路の賢い利用を推進する」などの目的をもったシステムを構築し、その中で各ドライバーの道路の利用状況（走行記録と料金支払）を管理するというものがある。短期的には、次世代 ETC の外部デバイス連携システムを用いた交通調査への協力をシステム上で依頼し、それに対するインセンティブを、ETC の支払いに用いることができるポイントで還元するなどの方法が考えられる。また、そのような調査協力がなくても、自身の走行ログの保管や管理と、次世代 ETC システムの集計系がもたらすデータを基にしたよりよい経路や出発時刻の提案や、ルートプランナーの機能提供などによる継続的なアカウント維持への動機付けを与えることも有用であろう。以上の機能については、国土交通省内では API のみ保持し、外側のサービスについては民間セクターが提供するという方法も考えられる。例えば交通調査コンサルタントや、ジャーニープランナー（カーナビゲーションなど）のサービスをスマートフォン等で提供している既存企業などが想定される。これらの企業の需要とマッチするようなシステム設計ができれば、持続的にシステムを維持することも可能になることが期待できよう。このシステム内では、収集系に対するインセンティブ付与を、ポイントだけではなく、集計系が保持するデータの活用によるサービス提供によっても行っていることに注意したい。

上記のシステムは、長期的には、道路利用に対する包括的なプライシングと一括のものとする方向性で発展させることも考えられる。ダイナミックプライシングの浸透と電気自動車の普及は、これまでの燃油税による一律な利用料賦課を不合理なもの、あるいは全く不可能なものとする。ETC の普及の成功例をみならい、初期にはシステムに参加すること自体が有利になるようにインセンティブを調整することにより、長期的には多くの車両の道路利用状況がこのシステムを通じて管理され、利用状況や外部

不経済に応じた負担をするようになることが期待できよう。それを通じることにより、次世代 ETC システムがまずは目指す「データの収集と活用」だけではなく、それを活用したインフラの有効活用のための制御が可能となるであろう。さらには、MaaS (Mobility-as-a-Service) の実現のためのプラットフォームとして、民間セクターが道路インフラを適正に活用しさまざまなビジネスを展開したり、あるいは地方部におけるモビリティの確保に活用することも期待できよう。

第 8 章 成果発表と今後の展開

本研究の成果の一部については、以下の方法です
で公開している。

1. Shohei Yasuda, Takamasa Iryo, Katsuya Sakai, Kazuya Fukushima: 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, Vol.60, 2019/12.
3. 岩原雄大, 西内裕晶, 井料隆雅: 車両走行軌跡データを用いた信号交差点における交通状況の推定に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), pp. I.65-I.72, 2022. ※同内容で 2021 年の土木情報学シンポジウムでも講演を行った。
4. 岩原雄大, 西内裕晶, 井料隆雅: オプティカルフローによる信号交差点における車両走行軌跡データの抽出, 土木学会四国支部第 27 回技術研究発表会, 2021/5.
5. 井料隆雅, 神谷大介: 車両走行軌跡データを用いた回遊行動と滞在目的地の特徴の記述的分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.63, 2021/6.
6. 安田昌平, 井料隆雅: 観測データの統計誤差を考慮した Macroscopic Fundamental Diagram の Well-Definedness の評価, 土木計画学研究・講演集, Vol.63, 2021/6.
7. 橋口剛, 瀬谷創, 安田昌平, 井料隆雅: 隠れマルコフモデルに基づくマップマッチングの適用性の検証, 土木計画学研究・講演集, Vol.63, 2021/6.
8. 益野日乃美, 井料隆雅, 神谷大介: 移動体データと地図情報に基づく観光地における目的地候補の抽出, 土木計画学研究・講演集, Vol.64, 2021/12.

9. 鐘恒毅, 中西航, 安田昌平, 井料隆雅: 大規模車両軌跡データのみを用いた主要交差点抽出, 土木計画学研究・講演集, Vol.64, CD-ROM, 2021/12.
10. 町田宗瞭, 神谷大介, 井料隆雅: レンタカープローブと携帯電話 GPS データによる訪問地特性に関する一考察, 土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会, 2022/1.

ただし(*)では、本研究の前の新道路による研究¹⁾の成果を拡張したものを発表しており、本研究の成果には一部のみが反映されている。このため別様式の研究成果には含めていない。

また、以下の原稿を国際ジャーナルに投稿している。

1. Shunsuke Segi, Hajime Seya, Takamasa Iryo, and Shohei Yasuda: Recursive-logit map-matching method based on hidden Markov model, submitted to Transportation Research Part C.
2. Takamasa Iryo, Inferencing teleworking rate by industrial sectors from transport big-data and spatial statistics in Japan during COVID-19, submitted to Transportation Research Part A.

2022/5/25 現在で前者はレビュー中、後者は編集者より別の雑誌 (Journal of Transport Geography) を推薦され再投稿を準備している。そのほか、MFD によるメッシュ単位での交通状況解析に関する論文と、沖縄県における人流データ活用のケーススタディに関する論文については、国際ジャーナルへの投稿を準備している。また、次世代 ETC システムの提案という本研究のメインとなる成果については、国土交通省国土技術政策総合研究所と連携して国内あるいは国際ジャーナルでの発表をすることを目指している。

本研究の成果のまとめを、令和 4 年 3 月 11 日に

研究代表者らが企画して実施したオンラインシンポジウム「新道路シンポジウム 2022「次世代 ETC が切り拓くデータプラットフォームと xROAD の展望」」において口頭発表として報告している。国際シンポジウムの開催は検討したものの新型コロナウイルスによる入国制限により不可能であったため、代替として、上記のシンポジウムの内容の抄録を英語版にしたものをウェブサイトに掲載している (<http://web.tohoku.ac.jp/iryolabo/misc/20220311-Shindoro.html>)。一方、ETC2.0 については国際的な認知は発展途上であり、対面による直接の発信が必要であることはいうまでもない。国際展開については当面は国際ジャーナルのほか、4 月以降対面開催の事例が出つつある国際会議での発表も活用しつつ継続的に進めることを目指している。

本研究で提案した要素技術の活用による実務的アウトカムの創出も目指している。提案したマップマッチングアルゴリズムについては、国土交通省国土技術政策総合研究所と連携して次世代 ETC システムでの実装可能性の検討も含めた性能評価を継続することを協議している。平成 31 年に始まった「大学とのデータの共有・分析による新サービス提案」における学での分析において様式 1 - 2 活用システムの成果を活用しているほか、地域道路経済戦略研究会における分析での活用を目指している。ETC2.0 で利用できる技術は交通シミュレーションに関連するものも多く、さまざまな規模の課題の解決案の評価に使える交通シミュレーションの継続的開発を目指したいと考えている。

参考文献

- 1) 井料隆雅ほか: 蓄積車両軌跡データの効率的活用のための階層型データベースの構築, <https://www.mlit.go.jp/road/tech/jigo/h28/pdf/report28-2.pdf>, 2018.
- 2) 久保信明: 衛星測位と位置情報, 日刊工業新聞, 2018.
- 3) 梶田洋規: 衛星測位技術「RTK-GNSS」の出来形管理への適用に向けた計測精度確保の方策, 土木技術資料, Vol.55, No.11, pp.19–24, 2013.
- 4) 江守央, 佐田達典: 3D都市モデルを用いた衛星の可視性評価に基づく衛星選択による測位精度向上手法, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.74, No.2, pp.II.55–II.62, 2018.
- 5) 中島和希, 佐田達典, 江守央: QZSSの機数と仰角に応じたGPS・QZSS測位の精度変化検証, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.74, No.2, pp.II.63–II.70, 2018.
- 6) 萩藤裕一: 準天頂衛星対応高精度測位端末”AQLOC”(特集進化する宇宙利用への貢献), 三菱電機技報, Vol.92, No.2, pp.117–120, 2018.
- 7) 国土交通行政インターネットモニターアンケート自動車用の映像記録型ドライブレコーダー装置について, <https://www.mlit.go.jp/monitor/R1-kadai01/24.pdf> (2021/3/9閲覧).
- 8) Hummel, B.: Map matching for vehicle guidance, *Dynamic and Mobile GIS: Investigating Space and Time*, pp. 437–438, 2006.
- 9) Newson, P. and Krumm, J.: Hidden markov map matching through noise and sparseness, *Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, pp. 336–343, 2009.
- 10) Lou, Y., Zhang, C., Zheng, Y., Xie, X., Wang, W., and Huang, Y.: Map-matching for low-sampling-rate gps trajectories, *Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, pp. 352–361, 2009.
- 11) Yang, C. and Gidófalvi, G.: Fast map matching, an algorithm integrating hidden markov model with precomputation, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol.32, No.3, pp.547–570, 2018.
- 12) Kubička, M., Cela, A., Mounier, H., and Niculescu, S. I.: Comparative study and application-oriented classification of vehicular map-matching methods, *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, Vol.10, No.2, pp.150–166, 2018.
- 13) Dalumpines, R. and Scott, D. M.: Gis-based map-matching: Development and demonstration of a postprocessing map-matching algorithm for transportation research, *Advancing Geoinformation Science for a Changing World*, pp. 101–120, 2011.
- 14) Fosgerau, M., Frejinger, E., and Karlstrom, A.: A link based network route choice model with unrestricted choice set, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.56, pp.70–80, 2013.
- 15) Kubička, M., Cela, A., Moulin, P., Mounier, H., and Niculescu, S.: Dataset for testing and training of map-matching algorithms, *Proceedings of the 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pp. 1088–1093, 2015.
- 16) Tanaka, A., Tateiwa, N., Hata, N., Yoshida, A., Wakamatsu, T., Osafune, S., and Fujisawa, K.: Offline map matching using time-expanded graph for low-frequency data, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.130, pp.103265, 2021.
- 17) 安田昌平, 井料隆雅: 観測データの統計誤差を

- 考慮した Macroscopic Fundamental Diagram の Well-definedness の評価, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol.63, 2021.
- 18) 内閣府統計局: 市区町村別メッシュ・コード一覧, <https://www.stat.go.jp/data/mesh/mitiran.html>.
 - 19) 気象庁: 過去の気象データ・ダウンロード, <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/>.
 - 20) 気象庁: 地域気象観測所一覧, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownamedas/ame_master.pdf.
 - 21) 南和宏: 位置情報軌跡の統計的プライバシー保護, *統計数理*, Vol.66, No.2, pp.225–233, 2018.
 - 22) 井料隆雅, 原祐輔, 日下部貴彦: 交通行動データ活用とプライバシー保護のトレードオフ:理論モデルによる解析, 第49回土木計画学研究発表会・講演集, 2014.
 - 23) 小栗秀暢: プライバシー保護データ流通のための匿名化手法, *システム/制御/情報*, Vol.63, No.2, pp.51–57, 2019.
 - 24) Chow, C.-Y. and Mokbel, M. F.: Trajectory privacy in location-based services and data publication, *ACM Sigkdd Explorations Newsletter*, Vol.13, No.1, pp.19–29, 2011.
 - 25) Chow, C.-Y. and Mokbel, M. F.: Privacy of spatial trajectories, *Computing with spatial trajectories*, pp. 109–141, Springer, 2011.
 - 26) Li, S., Shen, H., and Sang, Y.: *A survey of privacy-preserving techniques on trajectory data*, Springer, Singapore, 2019.
 - 27) 高橋克巳: 個人の移動履歴の保護: プライバシーリスクを明らかにした利活用 (特集パーソナルデータの利活用における技術および各国法制度の動向), *情報処理*, Vol.55, No.12, pp.1373–1380, 2014.
 - 28) Shen, L. and Stopher, P. R.: Review of GPS travel survey and GPS data-processing methods, *Transport Reviews*, Vol.34, No.3, pp.316–334, 2014.
 - 29) Kádár, B.: Measuring tourist activities in cities using geotagged photography, *Tourism Geographies*, Vol.16, No.1, pp.88–104, 2014.
 - 30) Vu, H. Q., Li, G., Law, R., and Ye, B. H.: Exploring the travel behaviors of inbound tourists to Hong Kong using geotagged photos, *Tourism Management*, Vol.46, pp.222–232, 2015.
 - 31) Shao, H., Zhang, Y., and Li, W.: Extraction and analysis of city’s tourism districts based on social media data, *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol.65, pp.66–78, 2017.
 - 32) 井料隆雅, 神谷大介: 車両走行軌跡データを用いた回遊行動と滞在目的地の特徴の記述的分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.63, 2021.
 - 33) Asakura, Y. and Iryo, T.: Analysis of tourist behaviour based on the tracking data collected using a mobile communication instrument, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.41, No.7, pp.684 – 690, 2007.
 - 34) 益野日乃美, 井料隆雅, 神谷大介: 移動体データと地図情報に基づく観光地における目的地候補の抽出, 土木計画学研究・講演集, Vol.64, 2021.
 - 35) 上杉友一, 井料隆雅, 小根山裕之, 堀口良太, 桑原雅夫: 断片的なプローブ軌跡の接合による区間旅行時間の期待値と分散の推定, 土木計画学研究・論文集, Vol.20, pp.923–929, 2003.
 - 36) Treiber, M., Hennecke, A., and Helbing, D.: Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations, *Physical review E*, Vol.62, No.2, pp.1805–1824, 2000.
 - 37) 岩原雄大, 西内裕晶, 井料隆雅: 車両走行軌跡データを用いた信号交差点における交通状況の推定に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), pp. I.65–I.72, 2022.
 - 38) 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, 土木計画学研究・講演集, Vol.60, 2019.
 - 39) Fayazi, S. A., Vahidi, A., Mahler, G., and Winckler, A.: Traffic signal phase and timing estimation from low-frequency transit bus data, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.16, No.1, pp.19–28, Feb 2015.
 - 40) Liu, Z. and Stern, R.: Quantifying the traffic impacts of the COVID-19 shutdown, *Journal of transportation engineering, Part A: Systems*, Vol.147, No.5, pp.04021014, 2021.
 - 41) Parr, S., Wolshon, B., Renne, J., Murray-Tuite, P., and Kim, K.: Traffic impacts of the COVID-19 pandemic: statewide analysis of social separation and activity restriction, *Natural hazards review*, Vol.21, No.3,

- pp.04020025, 2020.
- 42) Goenaga, B., Matini, N., Karanam, D., and Underwood, B. S.: Disruption and recovery: Initial assessment of Covid-19 traffic impacts in north carolina and virginia, *Journal of transportation engineering, Part A: Systems*, Vol.147, No.4, pp.06021001, 2021.
 - 43) Muley, D., Ghanim, M. S., Mohammad, A., and Kharbeche, M.: Quantifying the impact of COVID-19 preventive measures on traffic in the State of Qatar, *Transport Policy*, Vol.103, pp.45–59, 2021.
 - 44) Li, J., Xu, P., and Li, W.: Urban road congestion patterns under the COVID-19 pandemic: A case study in Shanghai, *International Journal of Transportation Science and Technology*, Vol.10, No.2, pp.212–222, 2021.
 - 45) Loo, B. P. and Huang, Z.: Spatio-temporal variations of traffic congestion under work from home (WFH) arrangements: Lessons learned from COVID-19, *Cities*, p. 103610, 2022.
 - 46) Wang, X., Zhan, Z., Williams, E. F., Herráez, M. G., Martins, H. F., and Karrenbach, M.: Ground vibrations recorded by fiber-optic cables reveal traffic response to COVID-19 lockdown measures in Pasadena, California, *Communications Earth & Environment*, Vol.2, No.1, pp.1–9, 2021.
 - 47) Simunek, M., Smutny, Z., and Dolezel, M.: The impact of the Covid-19 movement restrictions on the road traffic in the Czech Republic during the state of emergency, *Journal of advanced transportation*, Vol.2021, 2021.
 - 48) Bucsky, P.: Modal share changes due to COVID-19: The case of Budapest, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, Vol.8, pp.100141, 2020.
 - 49) Padmanabhan, V., Penmetsa, P., Li, X., Dhondia, F., Dhondia, S., and Parrish, A.: COVID-19 effects on shared-biking in New York, Boston, and Chicago, *Transportation research interdisciplinary perspectives*, Vol.9, pp.100282, 2021.
 - 50) Aloï, A., Alonso, B., Benavente, J., Cordera, R., Echániz, E., González, F., Ladisa, C., Lezama-Romanelli, R., López-Parra, Á., Mazzei, V., et al.: Effects of the COVID-19 lockdown on urban mobility: Empirical evidence from the city of Santander (Spain), *Sustainability*, Vol.12, No.9, pp.3870, 2020.
 - 51) Zhang, N., Jia, W., Wang, P., Dung, C.-H., Zhao, P., Leung, K., Su, B., Cheng, R., and Li, Y.: Changes in local travel behaviour before and during the COVID-19 pandemic in Hong Kong, *Cities*, Vol.112, pp.103139, 2021.
 - 52) Mützel, C. M. and Scheiner, J.: Investigating spatio-temporal mobility patterns and changes in metro usage under the impact of COVID-19 using Taipei Metro smart card data, *Public Transport*, 2021.
 - 53) Katrakazas, C., Michelaraki, E., Sekadakis, M., and Yannis, G.: A descriptive analysis of the effect of the COVID-19 pandemic on driving behavior and road safety, *Transportation research interdisciplinary perspectives*, Vol.7, pp.100186, 2020.
 - 54) Rapoport, M. J., Chee, J. N., Aljenabi, N., Byrne, P. A., Naglie, G., Ilari, F., Elzohairy, Y., Vingilis, E., and Mulsant, B. H.: Impact of COVID-19 on motor vehicle injuries and fatalities in older adults in Ontario, Canada, *Accident Analysis & Prevention*, Vol.157, pp.106195, 2021.
 - 55) Adanu, E. K., Brown, D., Jones, S., and Parrish, A.: How did the COVID-19 pandemic affect road crashes and crash outcomes in Alabama?, *Accident Analysis & Prevention*, Vol.163, pp.106428, 2021.
 - 56) Arimura, M., Ha, T. V., Okumura, K., and Asada, T.: Changes in urban mobility in sapporo city, japan due to the Covid-19 emergency declarations, *Transportation research interdisciplinary perspectives*, Vol.7, pp.100212, 2020.
 - 57) Hara, Y. and Yamaguchi, H.: Japanese travel behavior trends and change under COVID-19 state-of-emergency declaration: Nationwide observation by mobile phone location data, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, Vol.9, pp.100288, 2021.
 - 58) Gu, M., Sun, S., Jian, F., and Liu, X.: Analysis of changes in intercity highway traffic travel patterns under the impact of COVID-19, *Journal of Advanced Transportation*,

- Vol.2021, 2021.
- 59) Heiler, G., Reisch, T., Hurt, J., Forghani, M., Omani, A., Hanbury, A., and Karimipour, F.: Country-wide mobility changes observed using mobile phone data during COVID-19 pandemic, *2020 IEEE International Conference on Big Data*, pp. 3123–3132, IEEE, 2020.
 - 60) Chen, Y., Qin, R., Zhang, G., and Albanwan, H.: Spatial temporal analysis of traffic patterns during the COVID-19 epidemic by vehicle detection using planet remote-sensing satellite images, *Remote Sensing*, Vol.13, No.2, pp.208, 2021.
 - 61) Molloy, J., Schatzmann, T., Schoeman, B., Tchervenkov, C., Hintermann, B., and Axhausen, K. W.: Observed impacts of the Covid-19 first wave on travel behaviour in Switzerland based on a large GPS panel, *Transport Policy*, Vol.104, pp.43–51, 2021.
 - 62) Kusakabe, T. and Asakura, Y.: Behavioural data mining of transit smart card data: A data fusion approach, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.46, pp.179–191, 2014.
 - 63) Alsgjer, A., Tavassoli, A., Mesbah, M., Ferreira, L., and Hickman, M.: Public transport trip purpose inference using smart card fare data, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.87, No.December 2016, pp.123–137, 2018.
 - 64) Zhu, L., Gonder, J., and Lin, L.: Prediction of individual social-demographic role based on travel behavior variability using long-term GPS data, *Journal of Advanced Transportation*, Vol.2017, 2017.
 - 65) Almlöf, E., Rubensson, I., Cebecauer, M., and Jenelius, E.: Who continued travelling by public transport during COVID-19? Socioeconomic factors explaining travel behaviour in Stockholm 2020 based on smart card data, *European Transport Research Review*, Vol.13, No.1, 2021.
 - 66) Beck, M. J. and Hensher, D. A.: Insights into the impact of COVID-19 on household travel and activities in Australia—the early days of easing restrictions, *Transport policy*, Vol.99, pp.95–119, 2020.
 - 67) Hensher, D. A., Beck, M. J., and Wei, E.: Working from home and its implications for strategic transport modelling based on the early days of the COVID-19 pandemic, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.148, pp.64–78, 2021.
 - 68) Hensher, D. A., Balbontin, C., Beck, M. J., and Wei, E.: The impact of working from home on modal commuting choice response during COVID-19: Implications for two metropolitan areas in Australia, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.155, pp.179–201, 2022.
 - 69) Portal Site of Official Statistics of Japan (e-Stat): Number of offices and workers by industry, in economic census of japan in 2016, <https://www.e-stat.go.jp/gis/statmap-search?page=1&type=1&toukeiCode=00200553&toukeiYear=2016&aggregateUnit=H&serveyId=H002005112016&statsId=T000918>, 2019.
 - 70) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan: 2020 telework population survey -results-, <https://www.mlit.go.jp/toshi/daisei/content/001392107.pdf>, 2021.
 - 71) Tsanakas, N., Ekström, J., Gundlegård, D., Olstam, J., and Rydergren, C.: Data-driven network loading, *Transportmetrica B*, Vol.9, pp.237–265, 2021.
 - 72) Fast calculation of dynamic traffic assignment by parallelised network loading algorithm, 2018, ISTS and IWTDCS 2018, Matsuyama, Japan.