



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
N o . 28-2

研究テーマ

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

研究代表者：神戸大学教授	井料 隆雅
共同研究者：東北大学教授	桑原 雅夫
東北工業大学教授	菊池 輝
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
名古屋大学特任准教授	金森 亮
国立台湾大学助教	坂井 勝哉
Singapore-MIT Alliance for Research and Technology center • Postdoctoral Associate	原 祐輔

令和元年7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	3
1. 2 研究の目的	3
1. 3 本報告書の構成	4
第 2 章 既存研究および既存事例の調査	5
2. 1 国内の既存研究のレビュー	5
2. 2 海外の既存研究のレビュー	8
2. 3 海外におけるプローブデータの活用事例	11
2. 4 既存文献と事例調査のまとめ	12
第 3 章 車両軌跡データに対する行政ニーズ調査	13
3. 1 はじめに	13
3. 2 各局のヒアリング結果	13
3. 3 まとめ	14
第 4 章 車両軌跡データの品質検証とその改善・管理	16
4. 1 はじめに	16
4. 2 車両軌跡データと道路交通センサデータの比較分析による品質検証	16
4. 3 実走実験による車両軌跡データ取得	24
4. 4 実走実験データによる品質検証	25
4. 5 車両軌跡データの品質を改善・管理するための方法論の提案	26
第 5 章 車両軌跡データの集計操作の提案と階層型データベースの実装	28
5. 1 提案する集計操作の方法	28
5. 2 階層型データベースの概要	29
5. 3 階層型データベースの仕様	30
5. 4 全国データを用いた階層型データベースによる車両軌跡データの集約性能の検証	31
5. 5 階層型データベース GUI およびクエリ用の関連機能の実装と評価	32
第 6 章 階層型データベース活用のケーススタディ	38
6. 1 ケーススタディの概要	38
6. 2 神戸市における ETC2.0 データからの起終点情報の抽出例	38
6. 3 ETC2.0 データからの降雪時における異常な軌跡の抽出例	40
6. 4 階層型データベースを活用した ETC2.0 と外部データの比較分析	41
6. 5 平成 30 年大阪府北部地震時の交通分析	43
第 7 章 研究成果のまとめと今後の課題	49
参考文献	51

**「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(平成 28 年度採択)
研究概要**

番号	研究課題名	研究代表者
No.28-2	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に関する研究開発	神戸大学 教授 井料隆雅

近年蓄積が始まっている車両軌跡データの潜在価値は大きいですが、この種のデータは巨大かつ品質が不安定になりがちであり、ナイーブな方法で扱っていると早晚破綻を見る。本研究では、品質を管理し集計単位で階層化された車両軌跡データベースを構築し、その活用例を示す。

1. 研究の目的と背景

本研究では、品質を管理し集計単位で階層化された車両軌跡データベースを構築し、その活用例を示すことを目的とする。近年、個々の自動車の移動軌跡の継続的取得が技術的に容易になり、そのようなデータが ETC2.0 などによって継続的に蓄積されてきている。しかし、このようなデータ量は膨大であり、またその質は必ずしも期待できるものとは限らないため、これらのデータをナイーブな方法で取り扱っていると早晚破綻を見ることは明らかである。

質の問題を解決するためには、軌跡データの質の程度の検証と質の劣化を補完または管理する方法の開発が必要となる。量の問題を解決するには集計操作が有効であるが、集計は車両軌跡データの最大の特色である時間および空間双方の高解像度性を損ねる操作でもあり、その実施には細心の注意が必要である。しかしこのような問題意識に基づいて、車両走行軌跡をどのように集計すべきかを論ずる研究は現状では見当たらない。

2. 研究内容

以下の3テーマについて研究を実施した：

【テーマ1: 品質検証と改善】実際の車両軌跡データの品質が理想的なレベルからどの程度劣化しているかを定量的に検証し、それがどのようにデータ解析に影響を与えるかを評価する。あわせて、品質を改善ないし管理するための方法論を開発する。

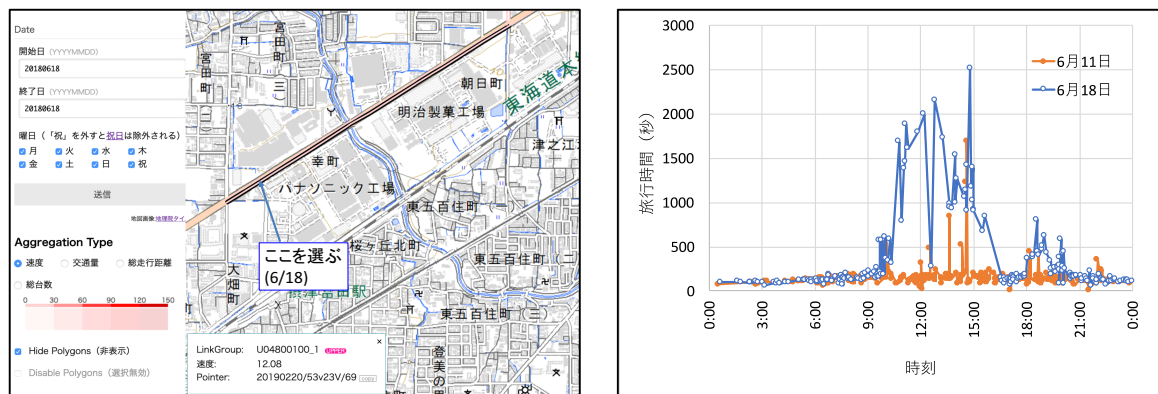
【テーマ2: 集計操作】実際の車両軌跡データの分布がどのような統計学的特性を持っているかを解析し、それに基づいて、適切な集計操作の方法論を開発する。

【テーマ3: 階層型 DB の実装とケーススタディ】テーマ1と2の成果を用いて階層型データベースを実装し、それを用いてケーススタディを行い、その結果を基に、ETC2.0 をはじめとする車両軌跡データの活用方法について提案を行う。

3. 研究成果

テーマ1「品質検証と改善」においては、ETC2.0 プローブデータ等について、各種の統計量を道路交通センサスのデータと比較して品質の評価を行い、特にサンプル率のバイアスについての問題点を指摘した。サンプル率のバイアスの主な原因は、車載器の普及状況の地方による差異と、ITS スポットを通過しない車両のデータが喪失することの2点であると見られる。テーマ1においては、車両軌跡データの品質検討と改善手法の検討のため、松山市において ETC2.0 搭載車の実走調査も行っている。この結果を用いてマップマッチングの評価と改善を行い、また、ETC2.0 プローブデータが得られやすい車両と得られにくい車両があることを確認した。

テーマ2の「集計操作の開発」においては、まず、道路ネットワークや車両軌跡データのもつ強い不均一性の存在をデータの分析により確認した。そして、その特性を活用し、ネットワークを上位・下位ネットワークへと階層化する手法を考案した。上位ネットワークについては、その構造の特徴を残したまま効果的に縮約する手法を開発した。下位ネットワークについては、ネットワーク構造は捨象し、エリア単位で車両軌跡データを集計することを提案した。開発した手法はデータ量を70%以上削減できることを実際の ETC2.0 データを用いることにより示した。



図：開発した階層型データベースを操作する GUI のスクリーンショット例（左）。平成 30 年 6 月 18 日大阪府北部地震時の交通渋滞の分析の例。上位ネットワークのリンクを画面上で選んで通過車両のデータをすぐに取得できる。右はそのデータを用いて作成した旅行時間のグラフ。リンクの選択からグラフ描画まで 10 分もかけずに行うことができる。

テーマ 3 の「階層型データベースの実装とケーススタディの実施」においては、階層型データベースの構築を行い、構築した階層型データベースを用いたケーススタディを行った。本研究で実装した階層型データベースは、車両軌跡データの抽出の効率を飛躍的に高める。これまでは圧縮ファイルの解凍だけでも多くの時間を要していた一次データから、さらに必要なデータを取得するのに多くの労力と処理時間を必要としていた。今回実装した階層型データベースは、分析対象箇所を GUI により直感的に選定し、そこから迅速に分析対象となるデータを抽出しすぐに分析を実施できる（図）。さらに、集約の際には複数の車両をまとめて集計することは行わず、空間単位の集約だけを行うことにより、一次データへのアクセスを容易に可能にしている。

階層型データベースは、階層化のプロセスで行ったネットワークの集約そのものにも利用価値がある。複雑なネットワークを簡略化したエリアで集計することにより、大局的な特性の分析が可能となる。この点については、エリア単位の集計についてはすでに集計 **QK** という形で知られているが、縮約された上位ネットワークも大局的な特性分析に有用であることを示した。

4. 主な研究成果発表（研究代表者は Arial、研究分担者は 下線）

- Yasuda, S., Iryo, T., Sakai, K., and Fukushima, K., Data-oriented network aggregation for large-scale network analysis using probe-vehicle trajectories, 22nd Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), 2019, 10. (採択済)
- Sakai, K., Koyama, Y., Yasuda, S., and Iryo, T., Investigations of electronic toll collection (ETC) 2.0 system for validation of map matching algorithm and analysis of spatial deviation in observed data, ISTS and IWTDCS 2018, Matsuyama, Japan, 2018, 6.
- Yasuda, S., Iryo, T., Koyama, Y., and Sakai, K., Characteristics of ETC2.0 probe data compared to road traffic census data, ISTS and IWTDCS 2018, Matsuyama, Japan, 2018, 6.

5. 今後の展望

本研究で開発した階層型データベースをアプリケーションとして多くの利用者が利用しやすいように実装し、活用事例を蓄積することができれば、その課題を抽出することも可能となり、より利便性の高いデータベースの構築が可能になることが期待できる。また、本研究における ETC2.0 プローブデータの品質検証の結果は、今後、ETC2.0 のシステムを更新する際の重要な参考資料となる。

6. 道路政策の質の向上への寄与

本研究で明らかにした ETC2.0 プローブデータの品質の問題の知見を活用することにより、ETC2.0 プローブデータをより正確な形で道路政策の立案や評価に活用可能となる。また、本研究で開発した階層型データベースにより ETC2.0 プローブデータの活用が促進されることが期待できる。

7. 研究成果の社会への発信

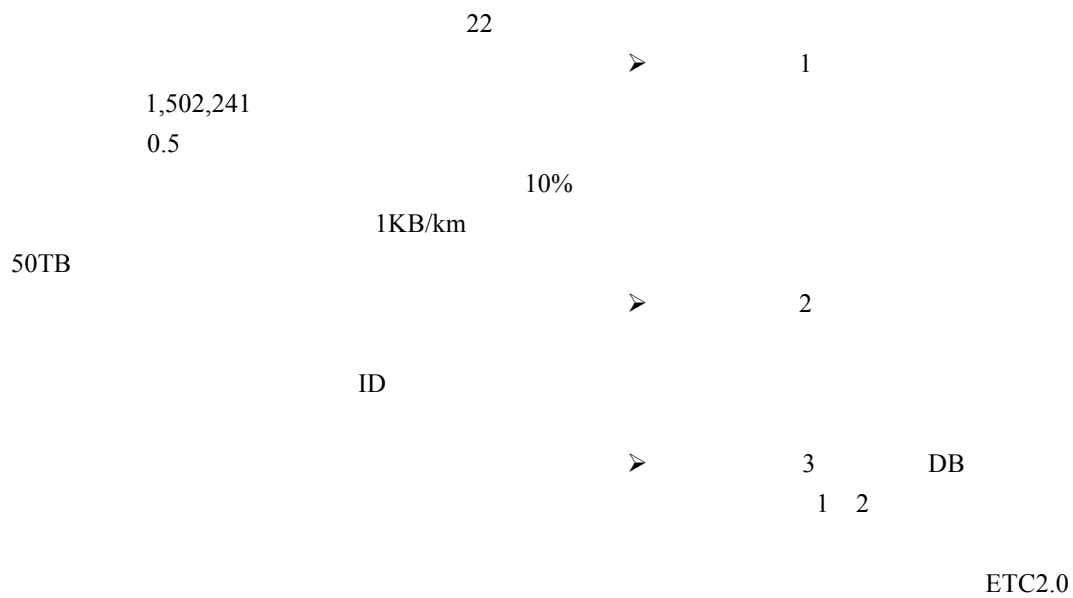
平成 31 年 2 月 22 日に成果報告会「多様なビッグデータを活用した道路技術研究開発」を他の研究者と合同で開催し、研究成果を一般に発信した。参加者は概ね 250 名程度だった。

第1章 はじめに

1.1 研究の背景

ETC2.0

1.2 研究の目的



5

6

ETC2.0

7

ETC2.0

2

ETC2.0 GPS

GPS

ETC2.0

2

OD

2

3

1.3 本報告書の構成

7

1

2

3

4

4

第2章 既存研究および既存事例の調査

2.1 国内の既存研究のレビュー

プローブデータは国内でも以前より存在し、それに関する研究も多数存在する。ただし、ETC2.0のようにプローブデータが全国的なレベルで継続的に取得されるようになったのはここ最近のことである。そのため、既存研究では広域の道路ネットワークを評価する目的よりも、狭域の道路ネットワークを評価する目的にデータが用いられることがほとんどである。以下では、

- (1) 信号や交差点に関する研究
- (2) 交通状況の推定に関する研究
- (3) 経路選択・交通行動に関する研究
- (4) データの補正に関する研究
- (5) バスのプローブデータに関する研究
- (6) 貨物車のプローブデータに関する研究
- (7) 災害に関する研究

に分類して整理する。

(1) 信号や交差点に関する研究

橋本ら³⁾は、「交通円滑化対策のためのプローブデータの分析方法に関する研究」において、ボトルネック交差点の特定やボトルネック交差点における速度低下の発生時間帯、速度低下延長などの交通円滑性の時間変動の分析と交通円滑性の季節変動の分析を行っている。

橋本ら³⁾は、「プローブデータを利用したボトルネック交差点とその影響範囲の特定方法」において、ボトルネック交差点とその影響範囲の特定方法を提案している。この方法により、複数ボトルネックが近接している場合のボトルネック相互の影響関係などを把握することが可能であることを示している。

水木ら⁴⁾は、「常時観測道路交通データを用いた渋滞状況の動的変化に関する分析～ボトルネック交差

点とその影響範囲の特定」において、道路を交差点などで区切り、区間内の旅行速度および隣接する区間との旅行速度の相関からボトルネック交差点とボトルネック交差点が影響を及ぼす範囲を特定することが可能であることを示している。

橋本ら³⁾は、「プローブデータを用いた交差点における交通動向分析のケーススタディ」において、デジタル道路地図区間単位で整理されている個別車両の旅行速度データから交差点の交通状況を分析し、交差点での右左折直進の算定が可能であることや交差点の上流側と下流側との旅行速度比較を行うことで、下流側の先詰まり状況を把握することが可能であることを示している。

丹下ら⁵⁾は、「車両プローブ情報に基づく信号待ち車列長変動の分析モデル」において、赤信号での車列の増大と青信号での車列の減少についてモデル化し、プローブデータの走行履歴情報を活用することで、各サイクルの最大車列長および捌け残り車列長を推定し、流入交通量の変化を検知する手法を提案している。

大畑ら⁶⁾は、「プローブ車両軌跡データのみを用いた停止領域の推定手法に関する研究」において、プローブデータの走行履歴情報のみを活用し、対象区間の信号制御パラメータの推定を行うことで各信号交差点における停止領域を把握することができる可能性を示している。

(2) 交通状況の推定に関する研究

瀬尾ら⁷⁾は、「車間距離を計測するプローブカーを前提とした交通状態の推定手法」において、GPSと車間距離計測を搭載したプローブカーを想定し、そのプローブカーによる移動体観測のみにより交通状態を推定する手法を提案している。また、GPSのみを搭載したプローブカーを用いて推定した結果と比

較を行い、精度の検証を行っている。

三輪ら⁹⁾は、「プローブカーの速度情報を用いた動的 OD 交通量の推定可能性に関する研究」において、プローブデータの観測速度情報を用いて、リンク交通量の推定を行うことで、動的 OD 交通量の推定可能性を示している。リンク交通量については、プローブカー観測数や推定リンク交通量の標準偏差を信頼性指標として用いることで、OD 交通量推定に利用可能であることを示している。

伏木ら¹⁰⁾は、「プローブカーを利用した交通情報予測方式の検討」において、プローブカーの普及率とエリアカバー率の関係を定式化している。また、リアルタイムにデータが取得できない区間に対しての交通情報予測方式を検討し、実車走行実験を実施することで精度評価を行っている。

菊池ら¹¹⁾は、「道路交通安全対策事業における急減速挙動データの活用可能性に関する研究」において、プローブデータから車両の減速度の算定を行い、急減速挙動の発生地点などを把握した。これを用いて、交通安全対策事業が行われた区間において事業の前後での急減速挙動の発生状況を比較し、事業の評価を行っている。

清水ら¹²⁾は、「生活道路における街路特性や沿道特性が走行速度に及ぼす影響に関する研究」において、タクシーのプローブデータの生活道路走行履歴を用いて速度と街路特性と沿道特性の関係を分析し、生活道路における走行速度抑制施策の効果を検証している。

増本ら¹³⁾は東名高速道路の東名川崎 IC～厚木 IC を対象として、道路線形・構造および交通状態が交通流の速度低下に及ぼす影響を明らかにした。具体的には、速度コンター図により基礎分析を行い、その結果を踏まえ重回帰分析により勾配の継続や分合流による速度変動の影響を検証した。さらに、ETC2.0 プローブ情報の走行履歴を直接使い、ベイジアンネットワークを適用して、速度低下の確率を高める要因について明らかにした。

谷村ら¹⁴⁾はプローブカーデータと気象データから、OD 区間の旅行時間分布を予測する手法を提案した。具体的には、気象条件と旅行時間の関係性を重回帰モデルとして表し、プローブカーデータから得られた交通情報を基に、各道路リンクにおける旅行時間分布を予測する。道路リンク毎で得られた旅行時間分布を互いに掛け合わせることで、OD 旅行時間分布を予測した。実際の札幌市内のケーススタディでは OD 旅行時間を平均 4.6 秒の誤差で予測した。

瀬尾ら¹⁵⁾はプローブカーを念頭に置き、移動体観測によって収集されたデータに基づき FD を推定す

る方法を提案している。シミュレーションで得た交通データに提案手法を適用した結果、推定された FD が実現象に近いことを確認している。

和田ら¹⁶⁾は複数のプローブ車両軌跡データのみを用いて交通の量的把握を可能とする手法を提案している。具体的には、プローブ車両間の交通状態を Kinematic Wave 理論により補完している。日本国内およびバンコクにおける実データを用いた検証により、混雑している道路においては最大 30 分程度の間隔の車両軌跡から交通の量的把握が可能であることを示している。

日下部ら¹⁷⁾はプローブカーデータを用いた突発事象検出手法の提案を行っている。具体的には、プローブカーにより渋滞の末尾を抽出し、衝撃波の伝播速度に基づいて交通容量の低下を検知することで突発事象を検出している。また、交通流シミュレータによる検証において、交通集中による渋滞に対する誤検出が減少した一方で、検出にはプローブカーの混入率が 5%程度必要であることが示された。

樋口ら¹⁸⁾はマルチエージェントシミュレーションを用い、プローブカーデータと交通センサスにより得られた OD 情報を組合せて、プローブカーデータの拡張を行った。その拡張されたデータを用いて交通渋滞の伝播現象の分析を行っている。

秋山ら¹⁹⁾は道路の混雑状況を時間的かつ空間的に分析し、渋滞現象の時空間的な伝播に基づいて、各渋滞現象のボトルネック箇所と発生時刻を検出する方法を提案している。また、北京市のタクシープローブデータを用いて検証を行い、有効性を確認している。

(3) 経路選択などの交通行動に関する研究

三輪ら²⁰⁾は、「プローブカーデータを用いたドライバーの選択経路データの収集と分析」において、静的な経路認知モデルと経路選択モデルを作成し、モデルの推定を行っている。また、動的な経路選択行動を再現するためのモデル構造についての考え方を示している。

内田ら²¹⁾は、「都心部における道路プローブの適用に関する課題と解決法に関する一考察」において、都市部に着目して ETC2.0 プローブデータを用いた交差点方向別流動と利用経路に関する集計を試みた際に直面した課題と、それに対する解決法を示している。

平井ら²²⁾は ETC2.0 プローブデータの走行履歴情報を利用したトリップ毎の休憩行動データベース構築手法を検討し、休憩行動抽出に際しての走行履歴情報の特性把握、休憩行動の定量的な把握、基礎分

析を通してモデル化に向けた知見の整理を行った。データベース構築にあたっては非渋滞時では高い精度で休憩行動を抽出でき、渋滞時に対しても、簡易な判定方法を示した。

三好ら²³⁾は首都高速道路の川口パーキングエリアをケーススタディとして、ETC2.0プローブ情報を用いて当該パーキングエリアに立ち寄った車両の滞在時間などを試行的に分析した。この結果を他調査から得られたデータと比較している。

(4) データの補正に関する研究

上杉ら²⁴⁾は、「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」において、区間旅行時間の期待値と分散を推定する際に、対象区間を完全に通過する情報のみを用いる場合と、対象区間を部分的に通過する断片的な情報も考慮する場合について各ケースの比較を行っている。その結果、プローブ車両の混入率が低い場合には、断片的な情報を用いる手法が有効であることを示している。

関谷ら²⁵⁾は、「プローブ旅行時間データの取得状況と旅行時間信頼性指標値の信頼度との関係」において、プローブ旅行時間データの取得状況と旅行時間信頼性指標値の信頼度との関係を分析している。一定の信頼度で指標を算定するために、旅行時間のばらつきの大きな区間の場合や評価対象日数が増加した場合などで必要なデータ取得日数がどのように変化するかを示している。

堀場ら²⁶⁾は、「サンプリングと観測誤差がプローブデータに基づく経路交通量推定値に与える影響」において、総交通量と経路交通量を同時に推定するモデルを2種類構築している。そのモデルを簡単なネットワークに適用した結果、総交通量を変化させることで最適な総交通量を求めることが可能であることを示している。また、入力時と推定時でODパターンが異なる場合の検証を行っている。

堀場ら²⁷⁾は、「プローブデータに基づく推定経路交通量への観測誤差の影響分析と推定交通量の更新手法」において、プローブデータと車両感知器のデータを用いて、経路交通量を推定するモデルを2種類定式化し、モデルによる差異を分析している。また、観測リンク交通量とプローブデータを用いた総交通量修正手法および事前OD交通量修正手法や観測リンク交通量とOD交通量を用いた経路利用率の修正手法を提案している。

王ら²⁸⁾は、「プローブカーデータとVICSデータの融合による旅行時間推計に関する研究」において、プローブデータとVICSデータの比較を行い、両データに差が存在することを明らかにしている。また、

プローブデータとVICSデータを融合させることによって、VICSデータよりも高い精度の情報をもたらすことを示している。

三谷ら²⁹⁾は、「パーティクルフィルタを用いた空間データの自動作成法」において、様々な位置精度を持つデータを想定した上で、自動車交通に関してパーティクルフィルタによる位置補正を行い、交差点部の動的な交通状況のパラメータリゼーション可能性の検討を行っている。

坂本ら³⁰⁾は一般車プローブデータのサンプル不足という問題に対して、バスプローブデータを活用してデータを補完することで交通状況の推定手法を提案した。一方でこれらの補正により、実走行と推定走行軌跡上とで交通状況に格差が生じることが課題であったが、各時空間メッシュに平均旅行速度を補完設定した上でタイムスライス法を適用することで格差を抑制することが可能になった。

原ら³¹⁾は過去に蓄積された道路リンク速度データから多次元正規分布の平均・分散共分散行列を推定し、リアルタイムの観測リンクデータを用いて未観測リンクの補間を行った。本手法ではグラフィカルラッソという学習アルゴリズムとそのEMアルゴリズムによる拡張を行っている。また、バンコク中心部の1ヶ月間のプローブカーデータを用いて精度の検証を行っている。

(5) バスのプローブデータに関する研究

坂本ら³²⁾は、「バスロケーションシステムデータとデジタルタコグラフデータによる一般車両の走行軌跡推定」において、バスロケーションシステムデータと、それにより時刻補正したデジタルタコグラフデータとを統合利用し、バス停付近での加減速やバス停での停止などを補正することで、一般車両の走行履歴の推定を行っている。その結果、低速な、あるいは渋滞状況で推定精度が高いことや、デジタルタコグラフデータに補正を重ねるにつれて一般車旅行速度の推定精度が向上することなどを示している。

松中ら³³⁾は、「バスプローブデータを用いた一般車両走行速度の推計方法に関する研究」において、正確かつ詳細に都市内道路交通状況を把握するために、バス停停車挙動を除去するプログラムを開発し、一般車両走行速度推定式を提案している。

村上ら³⁴⁾は、「所要時間変動評価を目指したバスプローブデータ補正方法」において、バスと一般車両の所要時間の違いについて検討を行い、バスプローブデータの所要時間を補正することで一般的な交通状態を評価する手法を提案している。

宇野ら³⁵⁾は、「バスプローブデータを利用した所要時間信頼性評価手法の構築」において、バスが運行されている道路網の任意の OD 間の所要時間分布を推定することで、所要時間信頼性に評価手法の提案を行っている。

(6) 貨物車のプローブデータに関する研究

横田ら³⁶⁾は、「貨物車のプローブデータ処理による都市高速道路の利用有無と旅行速度の異方性の評価」において、大阪・南港発のトリップを例に方向別の道路ネットワークサービスレベルの格差を調べる試みを行っている。また、トリップの起終点に対して都市高速道路の利用の有無と、その結果得られる旅行速度の関係を調査し、都市高速が旅行速度の向上に大きく貢献していることを示している。

玉川ら³⁷⁾は、「プローブデータおよび ETC データを活用した都市内定期集配車両の行動特性に関する分析」において、定期集配車両に着目し、日々の道路交通状況や道路ネットワークの条件などと集配送行動の関係の分析を行い、貨物車の道路利用に関する行動特性および行動意思決定要因の解明を行っている。

田中ら³⁸⁾は、「プローブデータを用いた都心部の貨物車による配送活動の分析」において、貨物車の詳細な配送実態を明らかにするとともに、貨物車の走行経路に沿って、区間別・時間別の走行速度の違いを示している。

田中ら³⁹⁾は、「プローブデータを活用した貨物車による配送活動の実態分析」において、中長距離による 2 地点間輸送と都市内における多地点配送を行う 2 種類の輸送形態について、貨物車の配送活動を詳細に把握することを試みている。その結果、走行速度の変動、目的施設への到着時刻の分布、荷捌き所要時間の分布と目的地到着時刻の定時性確保について明らかにしている。

(7) 災害に関する研究

金ら⁴⁰⁾は、「集計・観測データを用いた交通避難シミュレーションの検証」において、交通避難シミュレーションを用いて東日本大震災を再現し、実際のプローブデータと比較を行うことでシミュレーションの再現精度とシナリオの妥当性を検証している。また、プローブデータとシミュレーション結果のリンクの平均速度を比較することで、交通避難シミュレーションにおける道路パフォーマンスの変化を確認している。

門間ら⁴¹⁾は、「プローブデータを用いた震災直後の都内の道路サービス状況の分析」において、プロ

ーブデータをもとに加工した旅行速度データを活用して、東日本大震災前後の東京都内の交通サービスについて分析を行っている。その結果、道路交通サービスの影響がある程度把握することができることを示唆している。

長尾ら⁴²⁾は、「大規模地震時における自動車避難行動を考慮した避難施策の評価」において、2012 年三陸沖地震時における石巻市の交通渋滞の実態をプローブデータや車両感知器データにより詳細に分析し、石巻市の災害時避難における問題・課題を明らかにしている。また、避難行動シミュレーションを構築し、実際の地震発生時の交通状況と比較・検証を行っている。

清田ら⁴³⁾は、「東日本大震災時の都区内道路のグリッドロック現象に関する基礎的考察」において、東日本大震災で発生したグリッドロック現象に着目し、グリッドロック現象の時空間的拡大のプロセスの分析、ボトルネック箇所の抽出を行っている。また、グリッドロック構造の考察も行っている。

秦ら⁴⁴⁾は、「新潟県中越沖地震における通れた道路マップの提供とプローブカー情報の減災利用実現に向けた課題と展望」において、プローブカー情報から道路状況の把握の可能性について検討し、一定の限界はあるものの概ね災害時の判断に資する道路情報を生成することが可能であることを示している。

2.2 海外の既存研究のレビュー

海外におけるプローブデータに関する研究を紹介する。海外でも多くの研究事例が存在する。国内の研究に比べると方法論に関する研究事例が比較的多い。以下では、

- (1) 信号に関する研究
 - (2) 旅行時間推定に関する研究
 - (3) 交通状態推定に関する研究
 - (4) バスのプローブデータに関する研究
 - (5) データの補正およびその他の研究
- に分類して整理する。

(1) 信号に関する研究

Comert ら⁴⁵⁾は、「Analytical Evaluation of the Error in Queue Length Estimation at Traffic Signals From Probe Vehicle Data」において、プローブデータの位置情報と時刻情報のみを用いて、信号交差点におけるリアルタイムの車列の長さを推定するモデルを提案している。また、定常状態かつ車両の到着割合が既知の

場合の誤差解析について示している。

Comert ら⁴⁶⁾は、「Effect of stop line detection in queue length estimation at traffic signals from probe vehicles data」において、停止線検知器とプローブカーの情報からリアルタイムな信号交差点における車列の長さを推定するモデルを提案している。停止線検知器を推定に加えた結果、推定の精度が向上していることを確認している。

(2) 旅行時間推定に関する研究

Herring ら⁴⁷⁾は、「Estimating arterial traffic conditions using sparse probe data」において、まばらにしか得られていないプローブデータを用いて、主要道路の旅行時間分布の推定・予測を行う確率的なモデルを提案した。そのモデルをサンフランシスコの 500 台のタクシーから得られたデータを用いて評価したところ、基礎アプローチと比べて誤差が小さくなったことを確認している。

Hunter ら⁴⁸⁾は、「Path and travel time inference from GPS probe vehicle data」において、幹線道路において、断片的でノイズの混じっているプローブデータからリアルタイム交通状況の推定を行っている。そのため、旅行時間分布を算出するだけでなく、プローブカーが走行すると考えられる経路を同時に推測するアルゴリズムを提案している。

Chen ら⁴⁹⁾は、「Dynamic Freeway Travel Time Prediction Using Probe Vehicle Data: Link-based vs. Path-based」において、再帰的な交通状況下では、リンクベースよりパスベースの方が正確な旅行時間を予測できることを示している。また、その要因についての解析も行っている。

Jenelius ら⁵⁰⁾は、「Travel time estimation for urban road networks using low frequency probe vehicle data」において、リンク旅行時間と信号や交差点による遅れ時間を考慮したモデルを用いて、取得頻度の低いプローブデータから都市部の道路における旅行時間を推定するモデルを構築している。

Jenelius ら⁵¹⁾は、「Probe vehicle data sampled by time or space: Consistent travel time allocation and estimation」において、時間間隔で取得されたプローブデータと距離間隔で取得されたプローブデータの旅行時間分布について推定を行っている。その結果、それぞれに特徴があることが判明し、プローブデータを用いて旅行時間を推定する際は、データの取得基準を考慮する必要があることを明らかにしている。

Gühnemann ら⁵²⁾は、「Monitoring Traffic and Emissions by Floating Car Data」において、タクシーのプローブデータを用いて都市内の旅行時間推定や

環境に与える影響の算出などを行っている。速度の情報から排気ガスの排出量を算出することで環境に与える影響を推定することが可能になると示している。

Feng ら⁵³⁾は、「Probe vehicle based real-time traffic monitoring on urban roadways」において、幹線道路の旅行時間特性を把握するために、EM アルゴリズムとベイズアルゴリズムを用いて旅行時間分布の推定を行っている。

Hellinga ら⁵⁴⁾は低頻度プローブデータに対して、シンプルな確率分布に基づく時間進展を考慮し、各リンク所要時間の予測手法を開発している。提案手法はシミュレーションデータを用いて検証し、Benchmark deterministic method よりも優れており、平均して各リンクの旅行時間は 90%の精度までに改善したことを示している。

Wang ら⁵⁵⁾は道路リンク、ドライバー、時間で構成された三次元テンソルに対してテンソル分解を行うことでリンク別所要時間や経路別所要時間を算出する方法を提案した。2 ヶ月間で 32000 台のタクシーの位置軌跡データを用いて精度の検証を行っている。

Fusco ら⁵⁶⁾は広大なネットワークにおいてプローブカーデータを用いて短期的な速度予測を行う方法の比較を行っている。ベイジアンネットワークは標準的な状況下で有効である一方で、頻繁には発生しない混雑などの状況においては時系列モデルが有効であることを示した。この結果から、交通状況に応じて予測方法を選択するというフレームワークの導入が必要であることを示唆している。

Wang ら⁵⁷⁾は上海のプローブデータ、ランダム変数を有する階層モデルを用いて旅行速度の変動幅に与える影響要因を分析している。その結果、車線数の増加、バスの停留所の存在、平均速度の増加などが速度変動幅の増加に関連し、交通量の増加と信号の青時間の増加は変動幅の減少と関連していることが示された。

Pascale ら⁵⁸⁾はプローブデータを用いるために必要なデータ処理アルゴリズムを提案している。その処理方法を用いて、イタリアの高速道路の大型車の速度のパターン判別を行っている。

Zheng ら⁵⁹⁾は都市内の完全なリンク旅行時間を推定するための 3 層ニューラルネットワークモデルを提案している。シミュレーションにより、2008 年に Hellinga らによって提案された解析的推定モデルと比較した結果、提案手法がより優れていることが確認されている。

(3) 交通状態推定に関する研究

Nanthawichit ら⁶⁰⁾は、「Application of Probe Vehicle Data for Real-Time Traffic State Estimation and Short-Term Travel Time Prediction on a Freeway」において、車両検知器データとプローブデータを組み合わせて交通状態の推定を行う手法を提案した。シミュレーションソフトを用いて検証を行ったところ、マクロ交通流モデルと比べて推定誤差が改善されたことを確認している。

Herring ら⁶¹⁾は、「Real-Time Traffic Modeling and Estimation with Streaming Probe Data using Machine Learning」において、固定センサーを使用せずにプローブデータのみを用いて交通状態の推定を行っている。また、機械学習と交通流理論の進歩を活かしたハイブリッドアプローチの提案を行っている。

Zhang ら⁶²⁾は、「Urban Traffic Situation Calculation Methods Based on Probe Vehicle Data」において、平均速度と平均旅行速度による誤差分析に基づいてプローブデータを用いた都市部の交通状況を推定する方法を提案している。また、その方法を実際に適用した結果、実用的であることを確認している。

Zhu ら⁶³⁾は、「A Compressive Sensing Approach to Urban Traffic Estimation with Probe Vehicles」において、欠損を含むデータを処理するアルゴリズムに基づく圧縮センシングを提案している。このアルゴリズムを実際のプローブデータに適用したところ、他のアルゴリズムより優れていた。また、プローブデータの80%が欠損していた場合であっても、20%の誤差で推定できることを確認している。

Zhao ら⁶⁴⁾は、「Sample Size Analysis of GPS Probe Vehicles for Urban Traffic State Estimation」において、Curve-Fitting Estimation Modelで推定精度を十分に確保するために必要なプローブカーの台数を示している。また、上海のネットワークでモデルを検証し、プローブカーのサンプルの割合がサンプルのサイズに大きな影響を与えることを示している。

Qiu ら⁶⁵⁾は、「Estimation of Freeway Traffic Density with Loop Detector and Probe Vehicle Data」において、検知器とプローブデータの両方を用いて、高速道路の交通密度を推定する手法を提案している。この手法を用いることで早退誤差を検知器のみを用いた場合の30%から4~6%に改善することを可能としている。

Sunderrajan ら⁶⁶⁾は交通状態を再構築するためにプローブカーを用いて分析を行っている。高速道路のエージェントベースのミクロシミュレーションを使用して、プローブカーデータから交通状態を推定している。また、推定に必要なプローブカーの混入

率も示している。

Du ら⁶⁷⁾はプローブデータを用いてMFDを推定する方法と、検知器データからプローブ車両の浸透率を推定する方法をあわせて提案している。具体的には、プローブ車両の移動時間および距離を重みとして重み付き調和平均を用いて浸透率を決定し、MFDを推定している。シミュレーションによる検証の結果、プローブデータに取得のバラツキがある程、単純平均を取る方法よりも優れていることが示されている。この提案方法にはプローブの浸透率を与える必要があるため、検知器データから浸透率を推定する方法を提案している。

Asakura ら⁶⁸⁾は、交通事故時の交通流の特性を分析し、GPSが搭載されたプローブカーから得られたデータを用いて交通事故を検出する方法を提案している。この方法では、交通事故が原因の渋滞の時間・場所を推定することができる。

Yang ら⁶⁹⁾はプローブデータを用いて2次の事故を特定する方法を提案している。シミュレーションを用いて検証した結果、最大で95%まで再特定することができることを示している。この提案方法の精度はプローブデータの数に依存するが、比較的少ないデータでも良い性能で結果を示すことができる。

Mei ら⁷⁰⁾は Constrained-K-Means (CKM), the Seeded-K-Means (SKM), and the Semi-Supervised Fuzzy c-Means (SFCM)の3つを強化した半教師付きクラスタリングアルゴリズムを提案し、プローブ車両の軌跡をリアルタイムで判別を行っている。上海のプローブデータで検証を行った結果、SFCMが非混雑時はほぼ100%、混雑時でも80%以上のクラスタリング純度であり、最も良い結果を示した。

Rahmani ら⁷¹⁾はプローブデータから経路旅行時間の分布を推定するためのノンパラメトリック手法を提案している。その中で、プローブデータが持つバイアスを修正するための方法も提案している。スウェーデンのタクシープローブを用いて推定し、Automatic Number Plate Recognition (ANPR)の旅行時間と比較している。

(4) バスのプローブデータに関する研究

Hall ら⁷²⁾は、「Buses as a Traffic Probe」において、バスと自動車のプローブデータを比較し、渋滞の検知方法を提案している。自動車が大幅に遅れている場合、バスのプローブデータも自動車と同じようになることを示している。

Bejan ら⁷³⁾は、「Evaluation of Velocity Fields via Sparse Bus Probe Data in Urban Areas」において、都市部の渋滞を評価し、道路利用者や交通管理者にとつ

てより良い情報を提供するために、バスのデータなどの公共交通機関のデータを使用する方法を調査している。また、交通体系の知識と紹介した手法の成果を比較する例を考察している。

(5) データの補正やその他の研究

Sethi ら⁷⁴⁾は、「Arterial incident detection using fixed detector and probe vehicle data」において、車両検知器データ、プローブデータそれぞれのデータから都市内の幹線道路における事故を検出する並列アルゴリズムを改良し、検証した。シミュレーションで生成したプローブデータを用いて検証を行ったところ、検出率は高く、誤警報率は低かったが、検知器データを用いたものよりも精度は低いことを確認している。

El Faouzi ら⁷⁵⁾は、「Data fusion in intelligent transportation systems: Progress and challenges – A survey」において、既存の検知器データとプローブデータなどを結合するための方法について記載している。また、異なる地域のデータをどのように結合するかについても調査を行っている。

Tong ら⁷⁶⁾は、「Traffic Information Deriving Using GPS Probe Vehicle Data Integrated with GIS」において、GIS と統合された GPS 受信機を用いて交通情報を抽出する方法について提案している。この方法と検知器を用いた方法とでの差異についてなどを述べている。

Mandal ら⁷⁷⁾は、「Road Traffic Congestion Monitoring and Measurement using Active RFID and GSM Technology」において、プローブデータを用いて、道路の混雑を観測または計測する方法を提案している。平均的な待ち時間を考慮することで事故の発生している地点を特定することが可能であることなどを示している。

Hunter ら⁷⁸⁾は、「The path inference filter: model-based low-latency map matching of probe vehicle data」において、断片的な GPS の連続的な位置情報から車両の軌跡を再構築する問題について検討している。その中で、サンフランシスコ等のタクシーから得られた GPS プローブデータをリアルタイムでマップマッチングする新たなアルゴリズムを提案している。

Dia ら⁷⁹⁾は、「Development and evaluation of arterial incident detection models using fusion of simulated probe vehicle and loop detector data」において、検知器とプローブデータを用いて、幹線道路における事故検出モデルの改良と評価を行っている。速度のデータを融合することによってモデルの性能が改良され

ることが確認されている。

Xuan ら⁸⁰⁾は、「Lane Change Maneuver Detection from Probe Vehicle DGPS Data」において、プローブデータの DGPS データを用いて、車両の車線変更を検知する方法を提案している。プローブ車両の車線を追跡することができたが、他の車両による車線変更操作の検出には、プローブ車両の周囲の車両の位置を正確に測定できる追加のセンサーが必要となることを示している。

Furtlehner ら⁸¹⁾はプローブカーデータを用いた交通状態推定において、マルコフ確率場におけるビリーフプロバケーションを用いて空間的補間を行っている。

Wan ら⁸²⁾は低頻度で取得されるプローブデータ間の車両の軌跡を推定する方法を提案している。具体的には過去のプローブデータから交差点での待ち行列パターンなどから旅行時間を推定し、EM アルゴリズムによってそれを道路セグメントに割り当てる。そして最大尤度となる軌跡を採用する。また、実際の高頻度で取得したデータと比較し、提案方法の有効性を確認している。

Ran ら⁸³⁾は低頻度のプローブカーデータから精度の高い交通状態を推定する方法としてテンソル補完法を用いる方法を提案した。検証した結果、プローブカーデータのサンプル率が 1% 程度であっても高い精度で推定することが可能となった。

Donovan ら⁸⁴⁾はタクシーなどのプローブ車両から得られた GPS データを用いて、交通システムの復元力を定量的に測定する方法を提案している。ケーススタディとして、ハリケーンサンディが発生した際の分析を行っている。

Kim ら⁸⁵⁾は車両軌跡データをマップマッチングせずに分類するクラスタリングアルゴリズムを提案している。また、ニューヨークのデータを用いて検証している。

Rahmani ら⁸⁶⁾はまばらなプローブデータから旅行経路を推定する方法を提案している。また、その性能を評価するため、グラウンドトゥルースデータを用いた最近の手法と比較をしている。

2.3 海外におけるプローブデータの活用事例

プローブデータを活用した海外事例としてタイにおける事例を調査したのでここで紹介する。タイにおいては、全ての商用車を対象とした GPS ロガーなどによるリアルタイム観測が行われている。法律により全ての商用車を対象に通信機能付き GPS ロガー

等の設置が義務付けられており、各車両の位置情報をはじめとした様々なデータが取得されている。

運転を開始する際に免許証の磁気ストライプ（タイでは全ての免許証に付いている）を車両端末に通すことによってその時々の運転者が把握されている。速度超過や運転時間超過など、安全性に関するデータも取得されている。これらのデータは2分間隔で更新され、観測値に基づいてドライバーへ警告を行うことができる。なお、視察を行った際（現地時間2017年8月21日13時頃）の速度超過率は、観測されている台数に対してわずか0.3%程度であり、本システムにより速度制限の遵守が促進される環境ができていくといえる。

データ量は1年間で現在2TBとETC2.0プローブデータに比して小さいが、対象が増えるにつれて蓄積されるデータ量も増えることが想定されており、データベースの構築する手順には、様々な分析をスムーズに行うための工夫がなされている。それは、観測データを蓄積せず、プローブデータを観測した直後に処理を行い、それぞれの目的に合わせたデータ形式でデータベースへ蓄積するものである。このことは、ひとつの生データに基づくデータが複数のデータベースに同じものを格納することを意味しているが、各分析で使用するデータベースをすぐに構築できるというメリットがある。

タクシーに関しては”TAXI OK”とよばれるシステムも運用されている。上述したデータのうち、タクシーに関するものがTaxi digital centerへ送られ、管理する体制が整えられ始めている。このシステムはタイ全体でのタクシーサービスの品質向上を目的としている。なお、ITS consultancy limitedが経営するALL THAI TAXI（タクシー会社の1つ）では、全車両の運行状況を管理するシステムをすでに構築しており、GPS情報に加え、車内防犯カメラの映像・乗客の有無・勤務（運転）時間などが取得されている。車内にはタブレット端末が設置されており、経路案内システムを利用した運行が可能であったり（タイでは運転手が道を知らないことが多々ある）、タクシーメーターと連動してよりわかりやすく料金を表示したりするなど、タクシーの品質向上に関する活動がされている。

統計分析のひとつの例として、タイ全土における商用車の起終点分布がなされている。トリップの起終点を分析するには、実際によく起終点とされるスポットをあらかじめ設定し、その周辺のデータを集約することにより、大まかな傾向を知ることができる。この方法は、国土全体を俯瞰する観点からは効率的な手法であり、本研究の階層型データベース

のひとつの階層として、起終点を集約することが考えられる。また、空港からのリムジンタクシーの目的地分布などの特定の起点からの終点分布を知ること、需要予測や配車計画にも有益であるとのことである。今後、物流分析、行動分析・旅行時間予測・ネットワーク分析・サプライチェーン分析などが行われる予定である。

以上の事例で用いられているプローブデータと比較したETC2.0データのメリットは、商用車だけではなく個人車もデータを取得できている点にある。トリップ目的が商用の場合と私用の場合には時間価値が異なり、また、運転頻度も商用車と個人車とは異なるなど、商用車と個人車のあいだでは差異も多い。危険個所の抽出を行った際にも両者を比較することにより新たな知見が得られる可能性がある。

2.4 既存文献と事例調査のまとめ

既存文献の調査を行なった結果、プローブデータを活用しようとする研究はすでに非常に多くのものが出てきていることがわかった。これは、プローブデータの活用可能性の高さを示唆しているものといえる。一方で、プローブデータのサイズが膨大になることを予想し、そのための対策を考慮しようとする研究は見た限りではみあたらない。一方、タイで調査した事例においては、全国すべての商用車を対象としているという巨大なデータセットが扱われている。このため、膨大なデータによるデータベース構築に対する工夫がすでになされているようである。

タイの事例は今後参考になる可能性はあるものの、現状では利用目的をあらかじめ想定することを前提とした実装となっている。一方、蓄積車両軌跡データは、それを蓄積する時に明確な利用目的がなく、あとから何らかの利用目的がついてくることも多い。より汎用性の高いデータベースの構築手法を考えることにはなお新規性があるものと考えられよう。

第3章 車両軌跡データに対する行政ニーズ調査

3.1 はじめに

車両軌跡データに対する行政ニーズを調査することを目的に、国土交通省道路局、東北地方整備局（道路計画第二課）、中部地方整備局（地域道路課）、近畿地方整備局（道路計画第二課）、四国地整整備局（道路計画課）を平成28年度に訪問し、主に

- ▶ 道路ネットワークの現状に対してどのような問題意識を有しているか（例えば、ミッシングリンクの存在、混雑や安全など道路交通における諸問題、など）。
- ▶ ETC2.0 データを含む車両軌跡データを現在どのように活用しているか、また、どのような活用を予定しているか、あるいはどのような用途に使いたいと考えているか

という点についてヒアリングを行った。なお、以下で示すヒアリング結果は、各局でヒアリングに対応いただいた方の回答を、研究代表者が独自の考えに基づき取りまとめたものであり、文章の内容について一切の責任は研究代表者にある。各局の公式な見解を示すものではないことに注意されたい。また、ヒアリング結果は平成28年度の状況に基づくものであり、その後の状況の変化により情報が古くなっているものもありうることに注意されたい。

3.2 各局のヒアリング結果

(a) 国土交通省道路局

道路局においては、ETC2.0データの将来の活用方法の案についてヒアリングを行った。その結果として、道路交通センサスにおける調査手段としての活用、生活道路の交通安全および適正利用のための実態把握（抜け道として使用される実態の把握など）、

沿道施設や観光地等の主要目的地が道路の利用とどう関連しているか、などを考えているという意見を得ることができた。

(b) 東北地方整備局

道路整備としては三陸沿岸道路に力を入れている。東北内の都市間の高規格ネットワークの整備は不足している。東西を結ぶ高規格道路の整備も途上である。降雪や豪雨などの気象災害による交通障害や渋滞も問題である。ETC2.0についてはまだ車載器を積んでいる車が少なく、分析するにはデータ数が少ない状況である。例えば2016年11月22日の福島沖を震源とする地震（M7.4）においては、津波警報時の車での避難による渋滞が発生したことが報道等で指摘されており、民間プローブデータでも把握できたが、ETC2.0ではデータ数が少なく把握が難しかった。一方で民間プローブ1か月遅れで提供されるため、特に災害時のような即時性が必要な場合には使いづらい。災害時は迂回行動を把握できる経路情報も重要であるが、民間プローブは経路情報を出してくれないという問題もある。ETC2.0は災害時の活用が重要と考えている。

(c) 中部地方整備局

中部地方では製造業がさかんであり、自動車中心の生活が浸透しており自動車利用も多い。渋滞もそうだが、交通事故件数がワースト1の愛知県を抱えているという問題もある。国土軸の中心に位置し広域ネットワークという意味でも重要な地位にある。観光についても、歴史や文化が深い土地柄であり関連が深い。一方で中山間地の問題や、特に南海トラフ地震のような災害の問題も抱える。道路行政に関する課題としては、都市型もそれ以外も重視をしている。今後の道路整備については、東海環状道路や

名古屋第二環状道路のようなミッシングリンクもあるものの、全体的に見れば高速道路のネットワークが早期に進んだ地域である。渋滞対策については、三重方面、静岡県内の1号線、内陸と港湾を結ぶ路線が主要なポイントである。製造業が中京全体に分布しており大型車が多いところも特徴である。交通事故対策については幹線道路のほか、交通対策課ではエリアごとの対策も行っている。交通事故対策におけるプローブデータ活用については大垣、豊田、多治見などで事例がある。ETC2.0データ活用については、高速道路においてはデータ数が多いことを考慮し、例えば高速道路インターチェンジの選択状況の分析のようなことをすでに行っている。新東名延伸部分での効果測定にも活用している。しかしサンプル数についてはまだ民間プローブと比べると少ない。ITSスポット周辺のデータは多く出る印象はある。OD交通量の分析の試みはまだない。浜松でカーシェアリングの使われ方を見るのに特定プローブを用いている。ETC2.0はデータ量が多すぎてその処理に苦労しているということを経営会社から聞いている。処理に時間がかかると行政で必要なスピード感にマッチしない。このためETC2.0データをルーチンワークで活用するにはいたっていない。将来的には使用車線まで判別できるような精度が出るとよい。多車線道路がどう使われているか、左折だけ混んでいるなどの詳細な情報、付加レーンの効果検証などに使いたい。問題が発生している場所で（スポットが近辺になく）ETC2.0のデータがあまり取れないことがある。例えば、港や空港周辺、混雑が発生する渡河断面など、そのようなところでもっとデータを取りたい。観光地（高山、白川郷、富士山、伊豆、伊勢など）における滞在時間分析も同様である。例えば駐車場のようなところにスポットがあればデータが取れるのだろうが、道路整備により観光地の日帰り圏がどう拡大したかもETC2.0データから取れるとよい。

(d) 近畿地方整備局

近畿地方ではミッシングリンクの整備が大きな課題である。整備は順次されているものの、淀川左岸線、大阪湾岸道路西伸部、京奈和道、新名神高速道路などの主要なミッシングリンクが複数残っている。これらのミッシングリンクの解消効果の解析や、ミッシングリンク周辺の交通課題を抽出に ETC2.0 データを用いた分析を行っている。前者については最近整備された京都縦貫道における分析事例や、阪神高速道路3号神戸線に並走する一般道における分析事例がある。一般的には ETC2.0 データは渋滞や速

度の状況のモニタリングやそれによる効果測定に使用している。OD 交通量のような量的な解析はまだ例がない。ほかに道路行政において重要な課題には生活道路における交通安全対策がある。ETC2.0 データを用いた問題個所の抽出を試みており、交通安全対策へ展開することを考えている。防災に関しては南海トラフ地震に関する国道42号の整備はあるが、データの活用とそれほどはリンクしない。豪雨等の気象災害であれば国道168号線などの山間部で課題となる。ETC2.0 データのサンプル数は増えてきていると感じる。特に高速道路であれば民間プローブデータを代替できるところまで来ている。ただし一般道ではまだまだである。

(e) 四国地方整備局

道路行政の課題としてはまずは防災がある。特に南海トラフへの問題意識が大きい。徳島から佐多岬までが特に被害が大きいと予想されるが、国道が海沿いであり、それが寸断すると沿道地域の孤立が懸念される。高速道路の整備により、四国南部の横軸のネットワークが津波の浸水で寸断しないようにしたい。瀬戸内海側から太平洋側へのリンクも脆弱である。山間部のため事前規制区間が多く、地震後に使えなくなる可能性が高い。これらについては台風等の気象災害にも弱い。これら道路が災害時にどう通れるのかを迅速に知りたいという需要がある。渋滞はそれほどではないが、徳島市が四国内ではもっとも渋滞する都市である。一般に大きな河川の橋の部分で容量が不足する。香川県、徳島県の交通事故が多いことも課題である。観光についてはインバウンドに注目している。関西国際空港から貸し切りバスで直接やってくるほか、高松空に上海からLCCが就航している。観光ルートとしては四国島内での8の字ルートや瀬戸内海沿いが考えられる。前者についてはミッシングリンク解消が重要となる。各観光地のほか地域での観光資源創出の取り組みもある。最近では課題抽出にETC2.0を使用しているもののサンプル数が少ないのがネックである。新規供用後の旅行速度の変化や加速度等のヒヤリハット系の分析事例はあるが、まだ政策までの適用には入り切れていない。OD交通量の分析もまだない。道路交通センサスのような公的保証がないので対外的にまだ使いつらいという問題点もある。ETC2.0についてはまずは使い慣れたいと思っている。断面交通量やOD交通量の分析も整備効果評価の中で今後はしようとも考えている。

3.3 まとめ

ミッシングリンクの解消についてはどの地方でも程度の差こそあれ課題として挙げられている。ミッシングリンクの解消時の効果測定はどの地方でも必要となってくると考えられる。

防災についても各地方で課題として示されているが、特に南海トラフ地震に対する道路整備と、山間部の豪雨発生時における迂回行動の把握が挙げられている。後者は民間プローブデータではリアルタイムの取得ができず、今後、ETC2.0による取得が出来るようになることが期待されている。

観光行動の把握についても需要がある。回遊経路や滞在時間、日帰り圏の把握などはプローブデータで初めて可能になるといえる。

生活道路の交通安全対策についても必要性が多く指摘されており、すでに分析がなされている事例もある。

ETC2.0についてはサンプル率が少ないことが課題として頻繁に指摘されている。特に、中部地方整備局、近畿地方整備局からは、高速道路やITSスポット周辺ではよく取得されているが、それ以外で不足している、という具体的な指摘がある。民間プローブデータは数としては多いものの、経路データが取得できない、1か月後のデータしか取得できず行政のスピードに追いつかないという問題が指摘されている。

いっぽう、ETC2.0はデータ量が多すぎて、その処理に時間がかかりすぎるという意見がある。不要な情報をそぎ落として行政のスピードに対応できるような方法論の開発が望まれている（このことは、本研究における階層型データベースが目指すことでもある）。

速度や渋滞のようなサービスレベルに関する分析の事例は複数あるが、交通量（特にOD交通量）の分析の事例はない。サンプル数が少ないことも問題であるが、道路交通センサスのような対外的な保証がないことも施策実施の際にはネックになるとのコメントもあった。この問題については、本省道路局のコメントにある、道路交通センサスにおけるOD交通量調査をETC2.0データで実施することが実現すればそれが解決策となることが期待できよう。

第4章 車両軌跡データの品質検証とその改善・管理

4.1 はじめに

本章では、本研究の【テーマ1】として掲げた車両軌跡データの品質の検討および評価の方法と結果を示す。また、その結果を元に、品質の改善や管理の方策の提案を行う。

品質の検討は2つのアプローチにより行う。1つめは、車両軌跡データと道路交通センサデータとの比較分析（4.2節）である。車両軌跡データとしてはETC2.0によるデータを主に分析対象とするが、民間プローブデータを対象とした分析も実施する。

2つめのアプローチは、ETC2.0とGPS端末の双方を搭載した車両の実走実験で得られる車両軌跡データの比較（4.3-4.4節）である。この実走実験は、備車による起終点を指定した実験とモニター実験の2種類の実験からなっている。GPS端末により取得された車両軌跡をETC2.0のそれと比較分析する。さらに備車実験においては、通過経路を確実に把握するために、ドライビングレコーダーによる映像を用いた目視による真の通過経路の確認も行なっている。

品質改善と管理については4.5節で示す。品質改善可能なものについてはその方法論を提案する一方で、それが原理上困難なものについては、改善に代わって品質を管理する方法を示す。

4.2 車両軌跡データと道路交通センサデータの比較分析による品質検証

本節では、車両軌跡データと道路交通センサデータを集計的に比較分析して車両軌跡データの品質を検証する。集計比較の際の集計単位としては「発生集中交通量」と「起終点交通量」を主に用いる。「経路選択行動」も、高速道路を選ぶか否かという

着眼点により分析する。車両軌跡データとしてはETC2.0車両軌跡データを主に用いるが、民間プローブデータも一部で用いる。「旅行時間分布」についても、ETC2.0と民間プローブデータの間で比較する。

道路交通センサデータとしては、研究実施時に入手可能であった平成22年度のデータを用いている（一般交通量調査は平成27年度を用いる）。ETC2.0データや民間プローブデータには平成27年度分のものを用いるため、統計年が異なるデータを止むを得ず比較することになっている。結果の解釈の際にはこの点に留意する必要がある。

(1) ETC2.0車両軌跡データとその前処理

今回の分析では、道路交通センサと季節を合わせるために、平成27年10月1日から12月31日までのETC2.0車両軌跡データ（ドットデータ）を用いた。使用したドットデータは車両および日付ごとにランダムに付与されたID（運行ID）に紐づけられている。各運行IDには自動車の車種および用途が紐づけられている。車種と用途の組み合わせにより、当該の車両を「大型車」、「小型車」、「その他」のいずれかに区分する。「その他」に区分される車両は今回の分析からは除外している。具体的には、車種・用途が「大型・乗用 or 貨物 or 特殊」または「普通・貨物 or 特殊」のものを大型車に、それ以外のものを普通車に分類している。なお、車種が軽二輪か未定義のもの、用途が乗合か未定義のものはすべて「その他」に分類した。

ドットデータにはトリップに関する情報は含まれていないため、なんらかの基準を適用することによりそれを推定するしかない。この操作を以下ではトリップ判別と呼ぶ。具体的な手順は以下のとおり：

1. ドットデータの2点間の時間差と距離差を算出し、それを用いて2点間の速度を算出する。

2. 2点間の速度に150km/hを超えるものが1個でもあれば、該当する運行IDのデータはすべて削除する。この操作は、同時間帯に運行IDが重複する車両をデータから排除するために実施している。
3. 2点間の時間差があらかじめ設定したしきい値（大型車15分、小型車30分）以上で、なおかつ、速度が20km/h以下であれば、その点の間で滞在したとみなしてトリップを分割する。

ドットデータに含まれる空間座標（緯度経度）には誤差が含まれるため、ドットデータからその車両が通過した道路や経路を特定するためには、DRM（デジタル道路地図）に含まれる道路ネットワークの幾何構造を用いてその誤差を補正しなくてはならない。この操作は一般にマップマッチングと呼ばれる。本研究では、観測された点列を経路に変換するために、以下の手順を行なっている。なお、この手順は、朝倉らによる方法⁸⁷⁾を元に行なっている。本研究ではDRMの基本道路ネットワークへのマップマッチングを行なっている。

1. 起点から終点までの利用リンクを特定するとともに、トリップに含まれる各ドットデータをリンク上に補正する。
2. ドット周囲のリンクを抽出して経路の候補となるネットワークを構築する（サブネット）。ドットからの距離や道路種別の走行速度などをそれぞれのリンクに重みとして設定して、ダイクストラ法により最短経路探索を行い、経路を特定する。

この方法を適用するためには各トリップの起終点が特定されていることが必要である。

ドットデータとトリップ判別を経て得られたトリップデータは、トリップの起終点を座標として含むが、これらを道路交通センサスのOD交通量データと比較するために、起終点の座標をあらかじめBゾーンコードに変換しておく。Bゾーンコードは平成22年度道路交通センサスに準ずるように付している。

(2) 民間プローブデータの概要

ETC2.0データとは異なるプローブカーデータとして、富士通株式会社より販売される商用車プローブデータを用いる。このデータは同社が提供する商用車の運行記録システムから得られる車両軌跡等の情報を、同社が秘匿化およびDRMへのマッチング等の処理を行うことにより生成されている。ドット単位でのデータは提供されていないが、DRMノード単位で通過時刻を追跡することは可能である。トリ

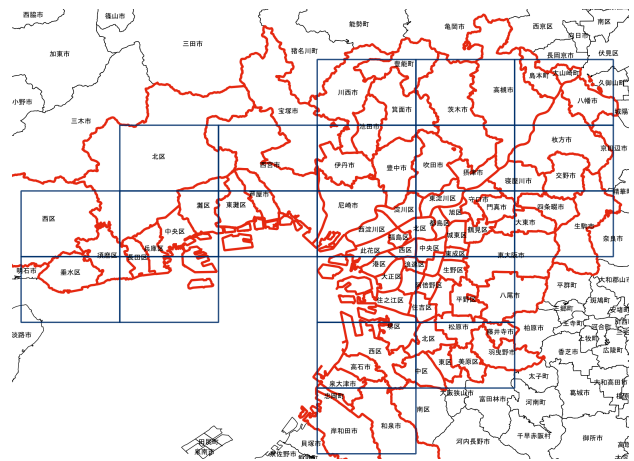


図-4.1 商用車プローブデータの取得範囲（青枠の範囲内の通過トリップを取得）

ップについてはあらかじめ判別された状態で提供される。使用したデータの範囲は

- ▶ 期間：2015年10月1日から12月31日の3か月間。
- ▶ 空間領域：図-4.1で示される範囲を通過したトリップ

である。

商用車には定義上軽自動車から特大車までのサイズの車両が含まれるが、一般的にはその多くがトラックであることが予想される。実際、使用したデータにおける車種の内訳は

- ▶ 軽自動車：18台（0.17%）
- ▶ 普通車：202台（1.9%）
- ▶ 中型車：3,430台（32%）
- ▶ 大型車：5,574台（52%）
- ▶ 特大車：1,521台（14%）

であり、過半数が大型車以上、98%程度が中型車以上である。道路交通センサス、ETC2.0いずれでも、軽自動車以外の貨物車はすべて大型車として扱っている。よって、今回は、使用する商用車プローブデータに含まれる車種をすべて大型車とみなして分析を行う。

(3) 発生集中交通量の比較

各地方および各市区町村からの発生交通量および集中交通量に関する分析を行う。地方別での比較をグラフにより行ったのちに、市区町村間の比較を地図上で可視化により行う。あわせて、ETC2.0による平日日平均交通量を道路交通センサスによる交通量で除した値（ETCサンプル率）が市区町村の平均課税所得とどのような相関があるかの分析と、都道府県単位でのセットアップ率とETCサンプル率との相関分析をあわせて行う。商用車プローブによ

る交通量については、特に関西圏に限定した分析を一部で行う。

図-4.2, 4.3 に、大型車・小型車の別と地方別で集計した発生交通量をグラフで示す。これらのグラフにおいては、道路交通センサスによる交通量は実数で示されているが、ETC2.0 による交通量については、全国平均の ETC サンプル率 (小型車では 0.138%, 大型車では 0.108 %) で除することによって、合計がセンサスの実数にあうようにあらかじめ拡大してある。

これらの図を見ると、大型車と小型車の間には大きな差があることがわかる。小型車においては、三大都市圏を含む関東地方、中部地方、近畿地方で ETC2.0 による交通量が平均以上である一方で、それ以外の地方では平均以下である。このことは、ETC2.0 サンプル率は都市圏で高くそれ以外で低いことを示している。一方、大型車においては、東北地方、北陸地方、中国地方で ETC2.0 による交通量が平均以上である一方で、それ以外の地方では平均以下である。特に東北地方でこの傾向が顕著である。

小型車における結果は、ETC2.0 の車載器が都市部でより普及していることが理由と推測することができる一方で、大型車における結果は明確であるとはいえない。例えば

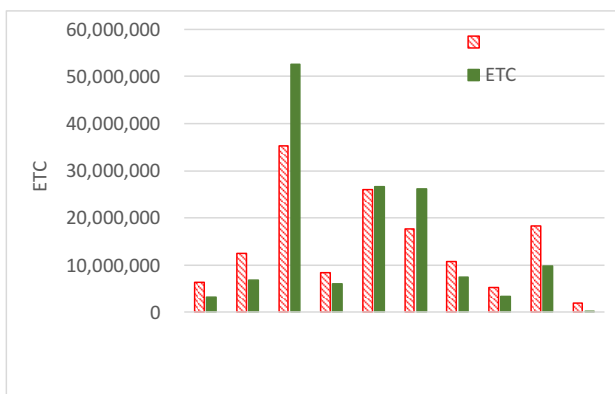


図-4.2 各地方からの日発生交通量 (小型車)

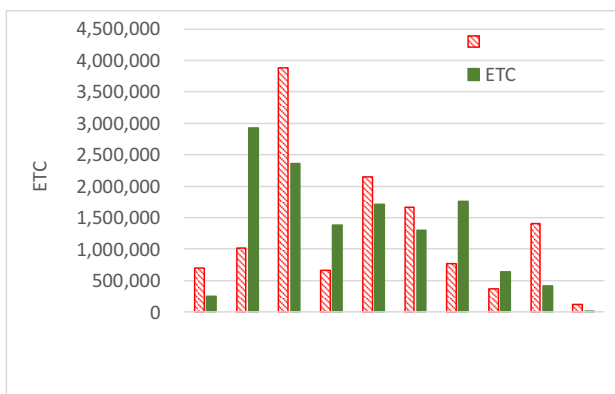


図-4.3 各地方からの日発生交通量 (大型車)

▶ 道路交通センサスは平成 22 年度実施である一方で、ETC2.0 による交通量は平成 27 年度のものである。この間には東日本大震災があったほか、公共投資に関する政治的環境が大きく変わった時期でもあった。これらの事情は地方部、特に東北地方における建設需要に大きな影響を与え、その結果大型車交通量が大きく増加した。

▶ ETC2.0 の車載器の搭載について、個々の消費者が判断して搭載することが多いと思われる小型車と異なる理由で大型車への搭載が進んだ。その理由が上記で示す地方において、他の地方に比べて大きく影響した。

が理由として考えられるが、これらが実際に正しいかどうかの判断は難しいといえよう。

市区町村別の ETC サンプル率を評価する。あわせて、商用車プローブデータの交通量を道路交通センサスの大型車の交通量で除したものを商用車プローブサンプル率とし、これも評価する。これらの評価は発生交通量に対してのみ行う。図-4.4 と図-4.5 に小型車と大型車の ETC サンプル率を、図-4.6 に商用車プローブサンプル率 (関西圏のみ) を示した。

ETC サンプル率の傾向は小型車と大型車で大きく異なる。小型車を見ると、サンプル率は、まず、三大都市圏においてほかに比べて大きいほか、山梨県および群馬県の一部でも大きい値が見られる。三大都市圏において大きいという結果は、地方別の発生集中交通量の分析でも出てきた結果であり、これらの都市圏で ETC2.0 車載器が小型車に普及していることが原因であると考えられる。山梨県および群馬県で ETC サンプル率が高くなる原因は明確でない。これら県内の休憩施設で休憩するドライバーが多く、ここでトリップが切れてしまっている可能性もあるし、三大都市圏からこれらの県内を訪問する車両が多いことが原因であることも考えられる。

大型車の ETC サンプル率は三大都市圏では他の地域に比べても低い。ETC サンプル率が高いのは、東北地方から北陸地方にかけてと瀬戸内海沿いである。地方別の分析で、東北地方、中国地方、四国地方で ETC2.0 による交通量が全国平均よりも高いことと整合している。原因についての考察は地方別の分析のときと同様のものを考えるべきであろう。

商用車プローブサンプル率についてはあまり明確な傾向は見当たらない。今回使用した商用車プローブデータの取得範囲は都市部のみであり、都市部と地方部の差異がデータの中でほとんど存在しないことも明確な傾向が出ない理由であるかもしれない。

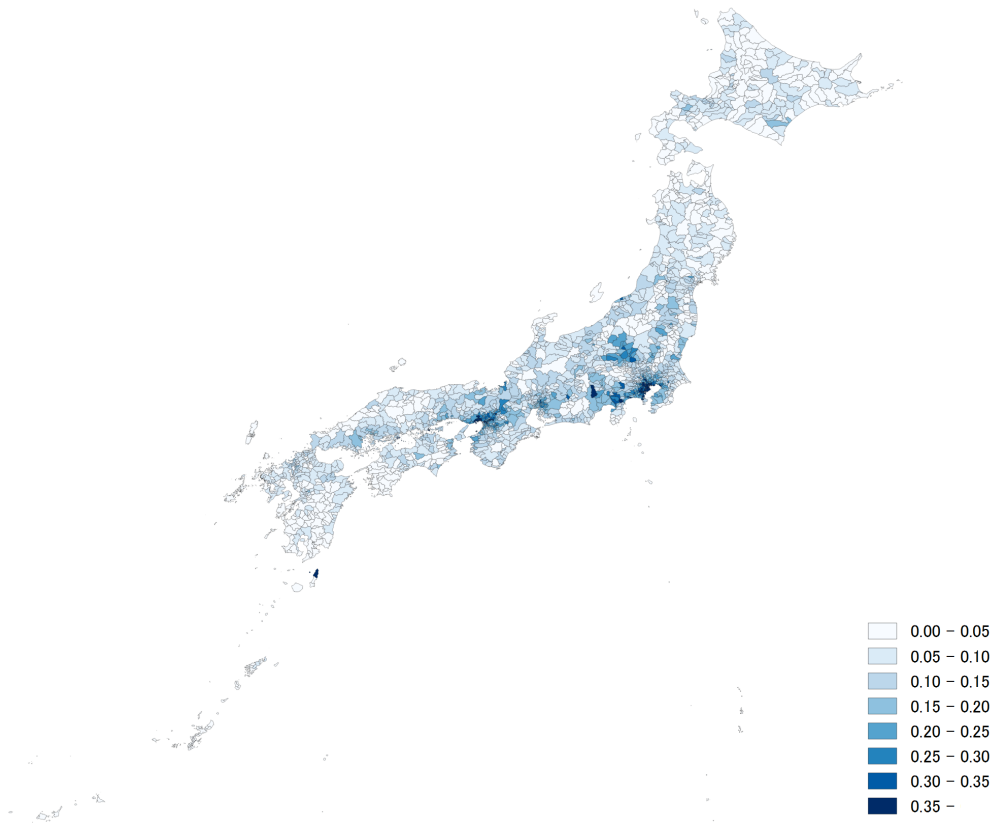


図-4.4 ETC サンプル率（発生交通量，小型車，パーセント）

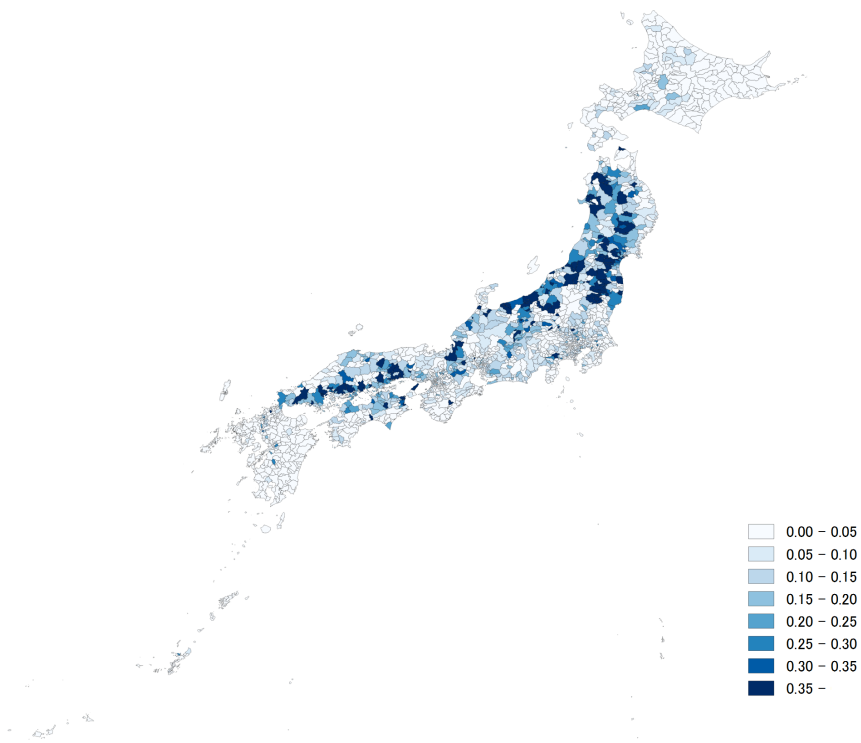


図-4.5 ETC サンプル率（発生交通量，大型車，パーセント）

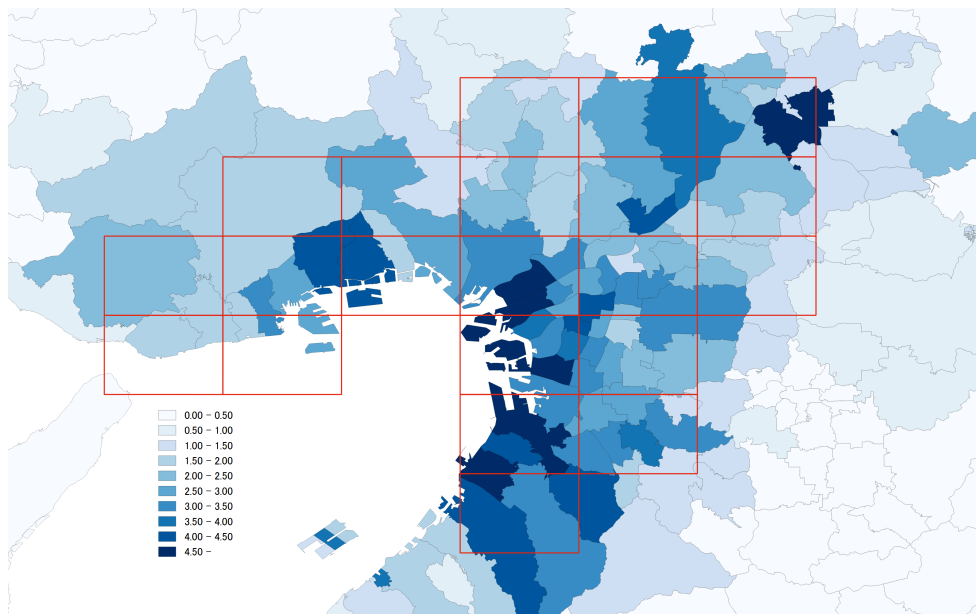


図-4.6 商用車プローブサンプル率（発生交通量，パーセント）

これまでの分析結果を見ると、小型車に関して言えば、三大都市圏のような大都市においてETCサンプル率が高くなる傾向があるようである。ETC2.0車載器を新たに搭載するには費用がかかることを考慮すれば、市区町村ごとの発生交通量は、その市区町村の所得レベルと相関があることが推測できる。所得レベルを示す指標としては、内閣府が提供する「納税義務者1人あたり課税対象所得額」を用いる。このデータは市区町村ごと（区は特別区のみ）に提供されている。統計年としては道路交通センサと同じ平成22年度を選定している。

図-4.7に、横軸を納税義務者1人あたり課税対象所得額の低い順とし、縦軸をサンプル率としたグラフを示す。所得の順番が上がるにしたがってETCサンプル率が向上する様子を読み取ることができる。

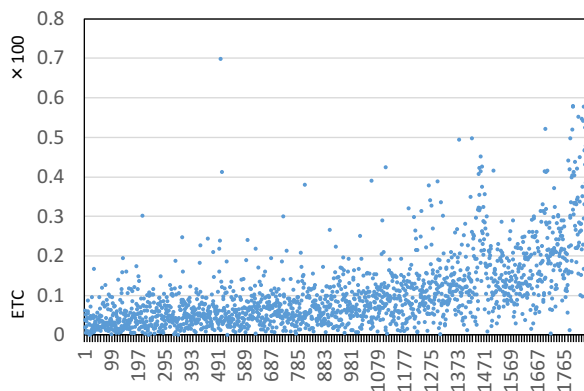


図-4.7 市区町村課税所得順とETCサンプル率（小型車）の関係

都道府県別セットアップ率と都道府県別のETCサンプル率の相関を分析する。これらに相関があることは明白ではあるが、実際にそうであることを確認する。この関係を確認しておくことで、ETC2.0車載器の普及率が向上したときにどの程度ETCサンプル率が上がるかを見つめることが可能になる。図-4.8に、都道府県別のセットアップ率（平成27年10月）とETC発生交通量サンプル率の関係を示す。回帰直線は切片を0に固定して計算した。これは、セットアップ率が0であれば、ETC発生交通量サンプル率は常に0であることを反映している。このグラフで示される相関関係は以下の2点を示唆する：

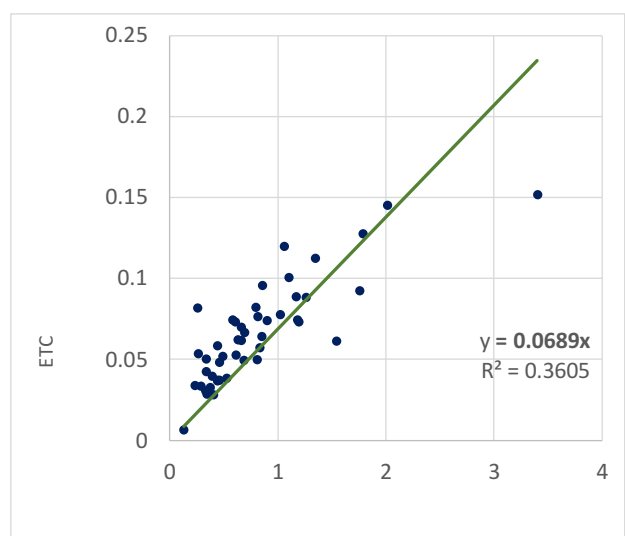


図-4.8 セットアップ率と発生交通量のETCサンプル率との関係。セットアップ率、交通量とも大型車と小型車の合計で計算

1. セットアップ率と ETC サンプル率のあいだには相関がある。
2. セットアップ率が1ポイント増えても、ETC サンプル率が1ポイント増えるわけではない。増加率は0.07倍に過ぎない。

これらのうち2点目は、ある車両1台に ETC2.0 をセットアップしても、その車両の全てのデータがサーバまで上がって来ていない(平均して7%くらいしかきていない)ことを示唆する。これは、**図-4.8**の直線を外挿し、ETC2.0のセットアップ数が車両保有台数に一致したとしても、ETC サンプル率は7%程度にしかならないことを示唆する。

(4) 起終点交通量の比較

地方間の起終点交通量に対して ETC サンプル率を計算した結果を表-4.1と表-4.2に示す。特に小型車において、内々ODペアよりも異なる地方間のODペアのほうが顕著に高いサンプル率の値となっている。特に本州と四国ないし九州間のサンプル率は数%から10%以上とかなり高い値になっている。大型車についてはこのような傾向はあまり見られないが、隣接する異なる地方間のETCサンプル率は0.5%から1%と比較的高い値になるところが多い。この結果は、長距離のトリップのETCサンプル率が短距離のそれよりも高いことを示唆する。

表-4.1 地方間起終点交通量のETCサンプル率（小型車、パーセント）

小型	北海道	東北	関東	北陸	中部	近畿	中国	四国	九州	沖縄
北海道	0.07	0.59	2.08		1.99	2.41				
東北	0.42	0.07	0.58	0.42	0.55	0.59	0.44	9.20	2.78	
関東	1.23	0.52	0.20	1.00	0.93	2.06	1.55	13.53	10.68	
北陸	3.79	0.33	0.92	0.09	0.52	0.37	0.68	2.93	0.94	
中部	2.27	0.51	0.99	0.52	0.13	0.58	1.15	2.87	5.81	
近畿		1.07	1.93	0.39	0.56	0.19	0.69	0.86	3.08	
中国		0.52	2.06	0.99	1.91	0.55	0.09	0.47	0.33	
四国		2.46	11.54	3.78	2.97	0.76	0.62	0.08	0.59	
九州		3.16	11.55	0.64	7.75	4.00	0.34	0.75	0.07	
沖縄										0.01

表-4.2 地方間起終点交通量のETCサンプル率（大型車、パーセント）

大型	北海道	東北	関東	北陸	中部	近畿	中国	四国	九州	沖縄
北海道	0.04	0.25	0.00		0.00	0.00				
東北	0.14	0.30	0.74	0.91	0.10	0.05	0.03	0.00	0.07	
関東	0.00	0.76	0.06	0.55	0.21	0.03	0.00	0.01	0.02	
北陸	0.00	0.83	0.58	0.21	0.56	0.80	0.06	0.11	0.05	
中部	0.00	0.12	0.19	0.50	0.08	0.23	0.02	0.26	0.05	
近畿		0.03	0.02	0.73	0.23	0.07	0.82	0.51	0.19	
中国		0.01	0.03	0.16	0.13	0.56	0.24	0.50	0.29	
四国		0.00	0.02	0.50	0.29	0.55	0.78	0.17	0.22	
九州		0.00	0.01	0.01	0.04	0.11	0.40	0.33	0.03	
沖縄										0.01

(5) 経路選択行動の比較

道路交通センサスデータと ETC2.0 プローブデータ、商用車プローブデータそれぞれの経路選択行動を分析し、その差異を比較する。道路交通センサスデータには、分析可能な経路選択の情報としては、高速道路を使用したか否かの情報のみ含まれる。このため本研究では、もっぱら、各トリップで高速道路を使用するか否かのみを経路選択行動の分析として実施する。

3種類のデータを同時に分析でき、なおかつ都市高速道路が発達していて高速道路を使用する機会が多い関西圏における分析を行う。大阪市内から各市区町村へのトリップにおける高速道路分担率を地図上で可視化し、その空間的分布の特性を確認する。

図-4.8~4.10に、それぞれ、センサス、ETC2.0の大型車、商用車プローブデータにおける各市区町村を終点とするトリップの高速道路分担率を示した。センサスによる結果では、大阪市内では高速道路分担率はおおむね10%未満であるが、周辺部において上昇し、特に神戸方面では50%を超える状況が見取れる。商用車プローブデータによる結果も同様の傾向である。ただし、商用車プローブデータのほうが、センサスに比べて周辺部における高速道路分担率が高く出る傾向がある。特に神戸市中央区以西へのトリップでは90%を超える分担率が見られる。

ETC2.0による結果においても、相対的に見て大阪市内を目的地とするトリップの高速道路分担率が低く、周辺部へ向かうトリップの高速道路分担率が高くなる傾向は変わらない。しかし、大阪市内を目的地とするトリップの高速道路分担率が他のデータに比べてかなり過大に出ていることが確認できる。この地域には阪神高速道路があるものの、大阪市内での移動というトリップの距離を考えれば、ここで示される高速道路分担率は実態よりも過大な値になっている可能性が高い。ETC2.0のデータでは、高速道路を使用しないトリップを観測し損ねている可能性を示唆する結果といえよう。

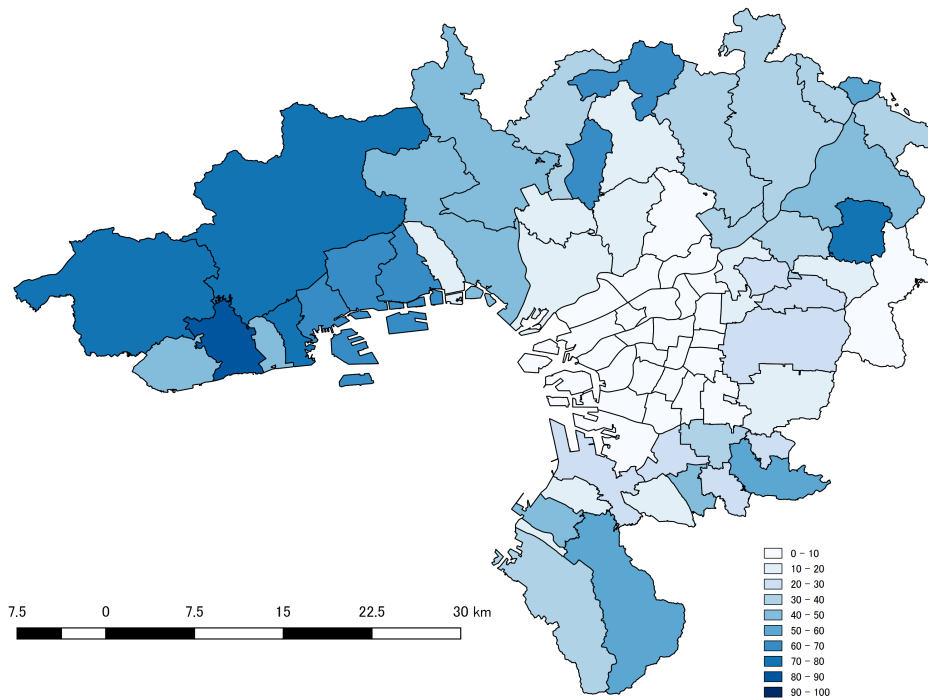


図-4.8 大阪市内から関西圏各市区町村へのトリップの高速道路分担率（センサス大型車，％）

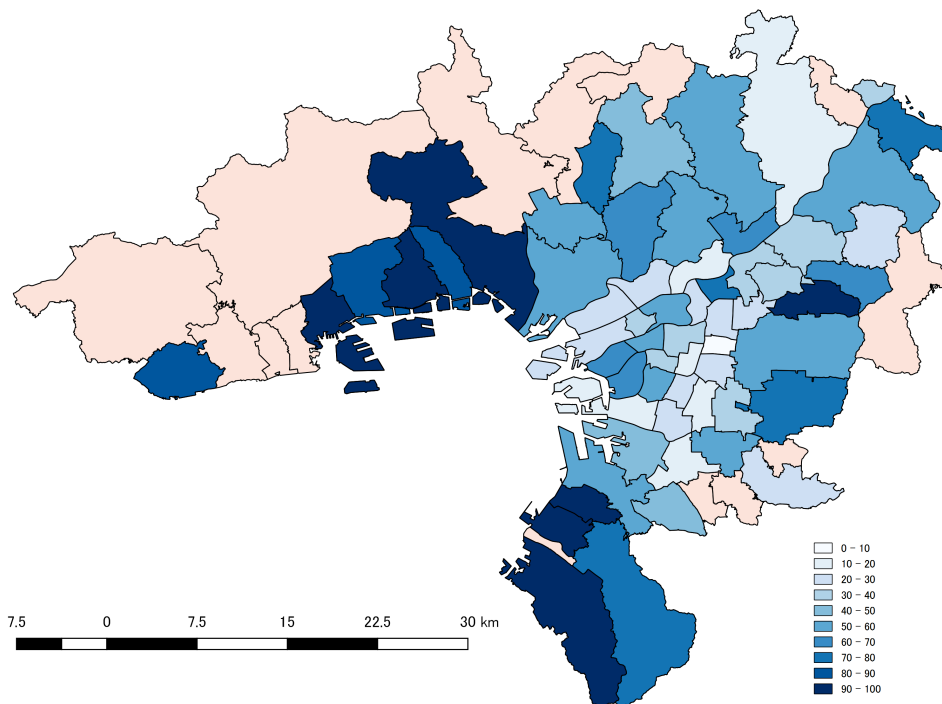


図-4.9 大阪市内から関西圏各市区町村へのトリップの高速道路分担率（ETC2.0大型車，％）
（ピンク色のところはETC2.0大型車の交通量が0の市区町村）

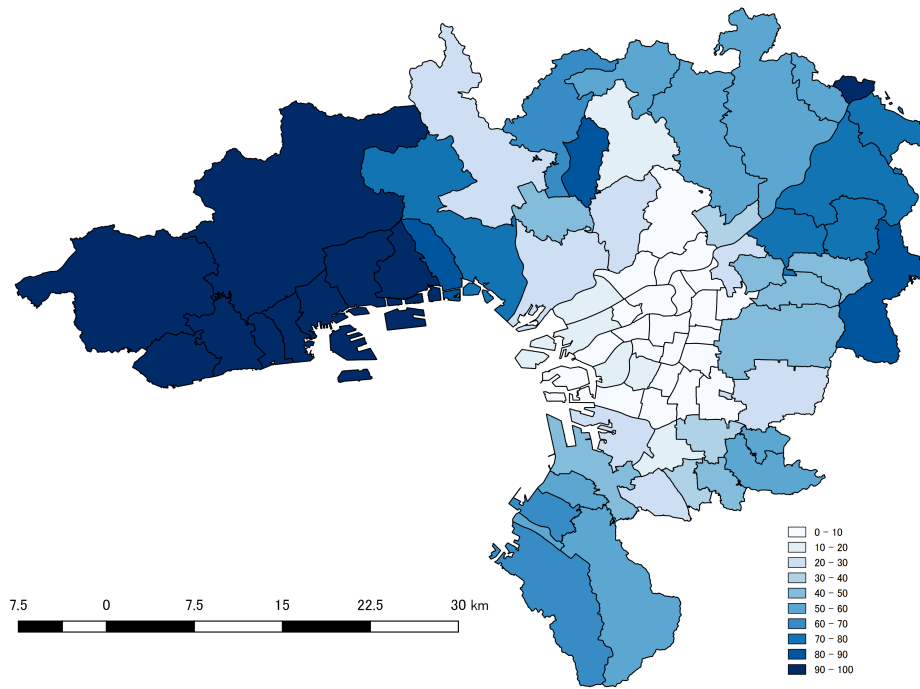


図-4.10 大阪市内から関西圏各市区町村へのトリップの高速道路分担率（商用車プローブ，％）

(6) リンク交通量の比較

道路交通センサス（平成 27 年度）の一般交通量調査によるリンク交通量を用いて、リンク交通量のサンプル率（ETC2.0 プローブデータの各リンクの通過台数を道路交通センサスのリンク交通量で除したものを）を計算する。これにより、サンプル率が道路によりどのように異なるかを知ることができる。

本稿では、特に、サンプル率が ITS スポットからの距離にどのように依存しているかを知るために、サンプル率と ITS スポットまでの直線距離の関係を分析結果を示す。図-4.11,4-12 にその結果を示す。前者は高速道路(DRM 道路種別 1 および 2 に相当)、後者はその他の道路 (DRM 種別 3 以上) を分析している。サンプル率は距離帯 (1km 単位で設定) ごとの平均値を示している。

図-4.11,4-12 の結果を見ると、サンプル率は高速道路のほうがそれ以外の道路よりも大きく、また、ITS スポットに近いほうが遠いよりも大きくなることわかる。ITS スポットで車両軌跡データを収集する ETC2.0 の仕様と、高速道路に ITS スポットがより多く設置されていることを直接反映した結果であるといえよう。

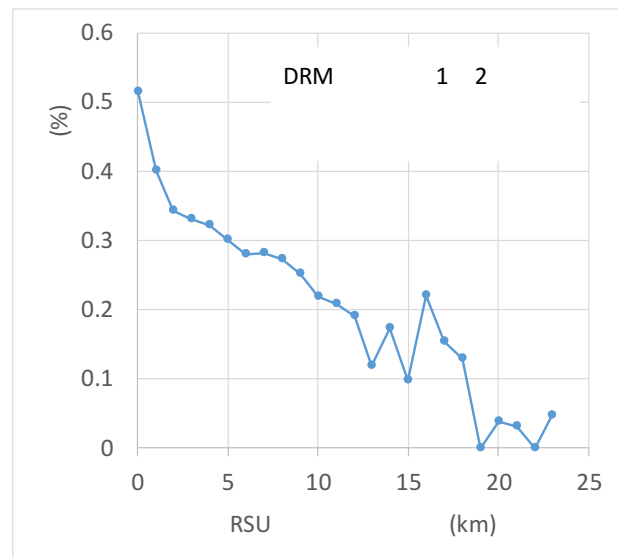


図-4.11 ITS スポット (RSU) までの直線距離と平均サンプル率との関係 (DRM 道路種別 2 以下)

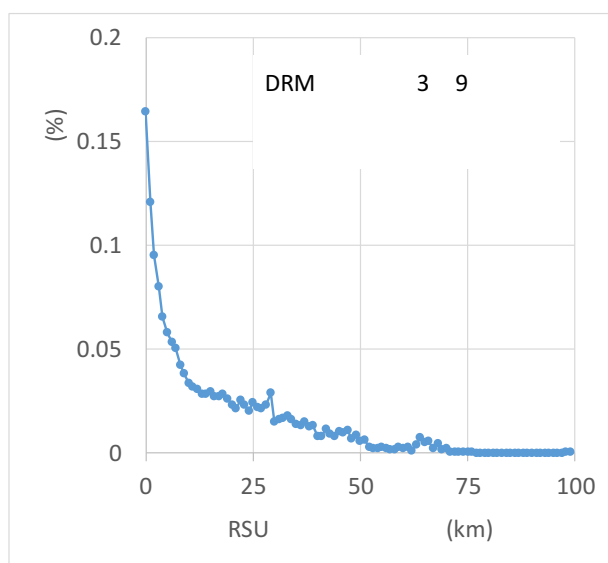


図-4.12 ITSスポット（RSU）までの直線距離と平均サンプル率との関係（DRM 道路種別 3 以上）

(7) 旅行時間分布の比較

ETC2.0プローブデータおよび商用車プローブデータから観測される各トリップの旅行時間分布を算出し、その比較を行う。この比較は、短いトリップの観測状況を検証することを目的としている。ETC2.0プローブデータは、データの匿名性を確保するために、エンジンの入切前後の軌跡を数百メートル程度切り落とす仕様となっている。一方この処理は、1km程度の短いトリップを正しく把握することを妨げる副作用も持つ（商用車プローブではこれと異なる匿名化処理をするためこのような問題は発生しないとされている）。実際にどの程度の問題が発生しているかを上述の比較により検証する。なお、商用車プローブデータは関西圏にしかないため、ETC2.0プローブデータについても、同一の範囲となるデータのみを抽出し分析対象としている。

図-4.13に結果を示す。分析の目的を考慮し、ここでは20分以下の旅行時間の結果のみを示している。2つのデータから得られる分布は明らかに異なる。いずれが真の値に近いかの判断はこの結果から直接はできないものの、この分布の差が、匿名化処理におけるETC2.0データの軌跡の切り落としにより発生していると考えerことは自然である。このことは、匿名化処理が短いトリップの抽出に大きな影響を及ぼしていることを示唆する結果であると解釈することができよう。

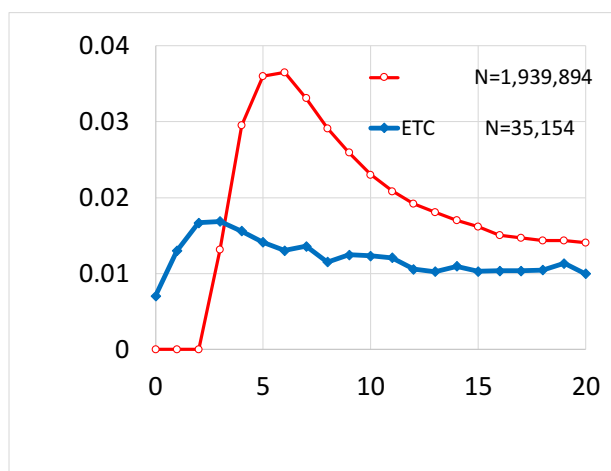


図-4.13 旅行時間分布の比較

4.3 実走実験による車両軌跡データ取得

ETC2.0プローブデータの車両軌跡の品質を詳細に確認するためのデータを収集するために、ETC2.0車載器（特定プローブに指定したもの）と、秒単位の間隔で測位を行えるGPSの双方を搭載した車両を用いた実走実験を実施した。実験を実施した場所は愛媛県松山市，時期は平成29年11月である。実験は備車による起終点を指定した実験とモニター実験の2種類のからなっている。前者はETC2.0プローブデータによる車両の走行経路の推定制度の検証と改善策の検討を目的として行う。後者においては、ETC2.0プローブデータにより車両の実際のトリップやその起終点がどの程度把握されているかを知るために行う。

(1) 備車を用いた実走実験によるデータ取得

レンタカーおよび運転手を雇用し、事前に多数の目的地を設定し、それを運転手に指示して走行させた。実験は平成29年11月3日から28日まで（土休日を含め）実施した。松山市内に121箇所の目的地（図-4.14）を設定し、それぞれの日において、指定された順番で目的地を訪問させた。なお、ETC2.0プローブ情報を取得するために、80km走行するまでに必ず1度はITSスポットを通過させるようにした。レンタカーにETC2.0発話型（業務用）車載器を搭載し、特定プローブに指定し、車両を特定した上で車両軌跡データを収集した。実際に通過した経路を正確に特定するために、GPSに加えて、ドライブレコーダーで前方風景を収録し、GIS上で人間の目によって正しい経路が特定されているかを確認し、間違っている場合はその都度修正して真の通過経路を特定した。図-4.15に実験で得られたデータの例を示す。

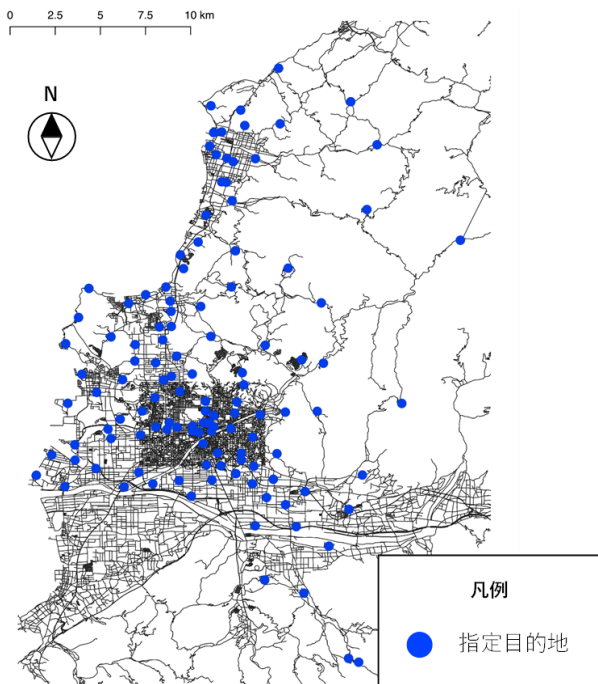


図-4.14 備車実験の指定目的地

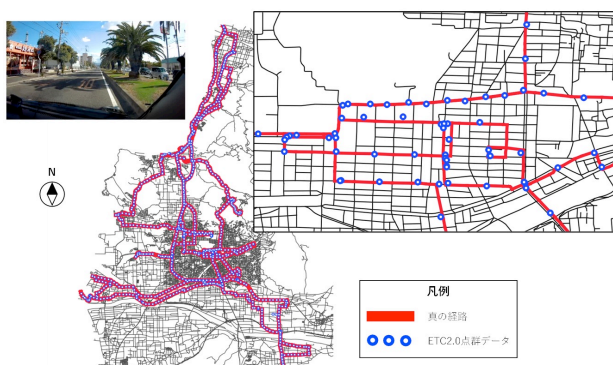


図-4.15 備車実験の結果例. 左上囲いはドライブレコーダーの画像の例.

(2) モニター実験によるデータ取得

愛媛県松山市内を中心に運行されている車両の管理者（個人，法人，官公庁等）に個別にモニターとしての実験参加を依頼し，モニターが運行する車両（30台）に搭載した ETC2.0 車載器と GPS を用いて位置情報を収集した。モニター協力依頼の際には参加同意書を取り交わしている。観測対象期間は 11 月 1 日から 30 日の 30 日間であった。いずれの ETC2.0 車載器も特定プローブとして指定している。実験結果は次節で示す。

4.4 実走実験データによる品質検証

4.3節で取得方法を説明した実走データを用いて，ETC2.0プローブデータの品質検証を行う。まず，備車実験のデータを用いて，マップマッチングにより ETC2.0プローブデータからどれだけ車両が実際に通過した経路（真値経路）が正しく推定されているか，その精度を定量的に検証する。次に，モニター実験による ETC2.0と GPS の軌跡を比較する。これにより，ETC2.0における車両軌跡データがどの程度どのように欠落しており，結果として車両の実際のトリップやその起終点がどの程度把握されているかを確認できる。

(1) マップマッチングの精度検証

真値経路と ETC2.0 プローブデータに基づくマップマッチングによる推定経路を比較し，マッチングアルゴリズムの精度検証を行った。検証では，「経路距離合致率」と「経路リンク合致率」の 2 つの指標を用いる。

経路距離合致率は，同一トリップ（指定目的地間の移動）の真値経路データとマッチング経路データにおいて，経路の距離が一致しているかどうかを示す。同一のリンクを通ることは求めていないため，並走道路にマッチングした場合でもよい。これにより，起点から終点までの経路がおおよそ一致しているかを判定することができる。

経路リンク合致率は，同一トリップの真値経路データとマッチング経路データにおいて，経路に含まれるリンクが一致しているかどうかを示す。出現順は考慮していない。この指標は真値経路リンクと完全に一致しないと 100%とにならない。

備車実験データのうち比較に適する合計 186 トリップ分についての結果は以下の通りであった：

- 経路距離合致率
 - 92.5%未満： 4 トリップ
 - 92.5～97.5%： 11 トリップ
 - 97.5～102.5%： 164 トリップ
 - 102.5%以上： 7 トリップ
- 経路リンク合致率
 - 80%未満： 6 トリップ
 - 80%～90%： 18 トリップ
 - 90%～95%： 24 トリップ
 - 95%～100%： 138 トリップ

いずれの指標を見ても，完全一致を示す 100%から一定以上離れているトリップが少数ながらある。ETC2.0 プローブデータによる経路特定の精度に限界があることを示す結果といえる。

(2) モニター実験によるETC2.0とGPSの軌跡の比較による精度検証

モニターが自由に走行したときに、ETC2.0プローブデータにおいてもっとも発生することが予想される問題は、車両がITSスポットを一定の距離以上通過しないことによる車両軌跡データの喪失である。このことを定性的かつ視覚的に見るために、実験期間中の全モニター車両について、松山市中心部においてGPSドットとETC2.0の測位点をそのまま描画したものを図-4.16に示す。一見して、ETC2.0による軌跡データにはGPSと比較して欠落があることがわかる。このことより、ETC2.0プローブデータは、車両の実際の走行軌跡の一部分しか把握できていないことが明確にわかる。

モニターごとに、実験期間全体における、ETC2.0プローブデータによるトリップの起終点の把握率を算出した。結果は以下の通り：

- 0%： 11台
- 10%未満： 4台
- 20～40%： 5台
- 40～60%： 2台
- 60～80%： 3台
- 80%以上： 5台

明らかに、異なる車両間で把握率が大きく異なることがわかる。10%未満という把握率が非常に小さい車両が半分を占めることにも注意したい。一方で80%以上の高い把握率の車両も存在する。これらの車両の軌跡を個別に観測すると、ITSスポットが存在する経路を日々利用している（通勤経路等であると思われる）ことを見ることができた。

4.5 車両軌跡データの品質を改善・管理するための方法論の提案

(1) マップマッチング手法の改善

マッチングの手法の改善については、アルゴリズムそのものの改善と、アルゴリズムにおけるパラメータの改善の2種を行なっている。このうち前者については、実走実験の結果を用いずに、明らかに不自然なマッチングが発生する状況（多くの場合、最短経路から大きくはずれる迂回を伴う経路である）に対処する種々のアルゴリズムを追加することにより対応している。この追加アルゴリズムは、4.4(1)節の検証の際にすでに適用をしている。なお、追加アルゴリズムの詳細については煩雑になるためここでは割愛する。

アルゴリズムのパラメータ改善は、4.4(1)節で示

した指標をよりよくするように行なっている。パラメータ改善ののちに得られた指標は以下のとおり（カッコ内は改善前の数字）：

- 経路距離合致率
 - 92.5%未満： 3 トリップ (4)
 - 92.5～97.5%： 7 トリップ (11)
 - 97.5～102.5%： 172 トリップ (164)
 - 102.5%以上： 4 トリップ (7)
- 経路リンク合致率
 - 80%未満： 4 トリップ (6)
 - 80%～90%： 6 トリップ (18)
 - 90%～95%： 18 トリップ (24)
 - 95%～100%： 158 トリップ (138)

いずれの指標も改善しており、特に、完全一致（100%）から5%以内のずれに収まるトリップ数が大きく増加していることがわかる。このことは、パラメータ改善により推定経路の品質が向上することを示している。

(2) 車両軌跡データの品質管理

ETC2.0で観測される車両軌跡データの品質は、改善の処置をしたとしても完璧なものとするのは原理上不可能である。また、常に一定の品質が保たれるわけでもなく、さまざまな条件によって変動してしまう。このことは、車両軌跡データからマップマッチングによる推定された経路データを活用する際には、その品質情報をあわせて管理する必要があることを示唆する。管理する情報としては、具体的には以下のようなものを考えることができる：

- 各移動の終点からITSスポットまでの距離：これが十分近い場合（概ね200m以下）には、その移動の終点から下流側の車両軌跡データは、車載器のメモリー制約により失われた可能性が高い。
- 各移動の起点から直下流のITSスポット通過地点までの累積走行距離：これが80km以上であれば、その移動の起点より上流側の車両軌跡データは、車載器のメモリー制約により失われた可能性が高い。
- 滞在の起点と終点のあいだの距離：これが十分長い場合（概ね1km以上）には、この滞子の起点と終点のあいだには、車両軌跡データからは特定できない移動が1個以上存在する。

これらを必要に応じて分析者が容易に参照できるようにすることにより、分析結果の品質を常にモニタリングし、その結果を適切に応用することが可能になることが期待できる。

サンプル率に関する品質管理のためには、平均的

なサンプル率を道路交通センサスのデータを元に算出しておくことが望ましい。道路交通センサスが5年に一度しか実施しないことを考えれば精度には問題が残るが、傾向を知ることは可能である。一方で、この方法ではサンプル率を集計的に管理できにすぎない。非集計的なサンプル率は、4.4(2)節で示し

たように、個々の車両がどのように走行しているか（具体的には、ITSスポットを経路に習慣的に含むかどうか）に依存してしまう。ETC2.0プローブデータは個々の車両を追跡できないので、非集計的なサンプル率の管理はほぼ不可能である。この点はETC2.0プローブデータの限界であるといえる。

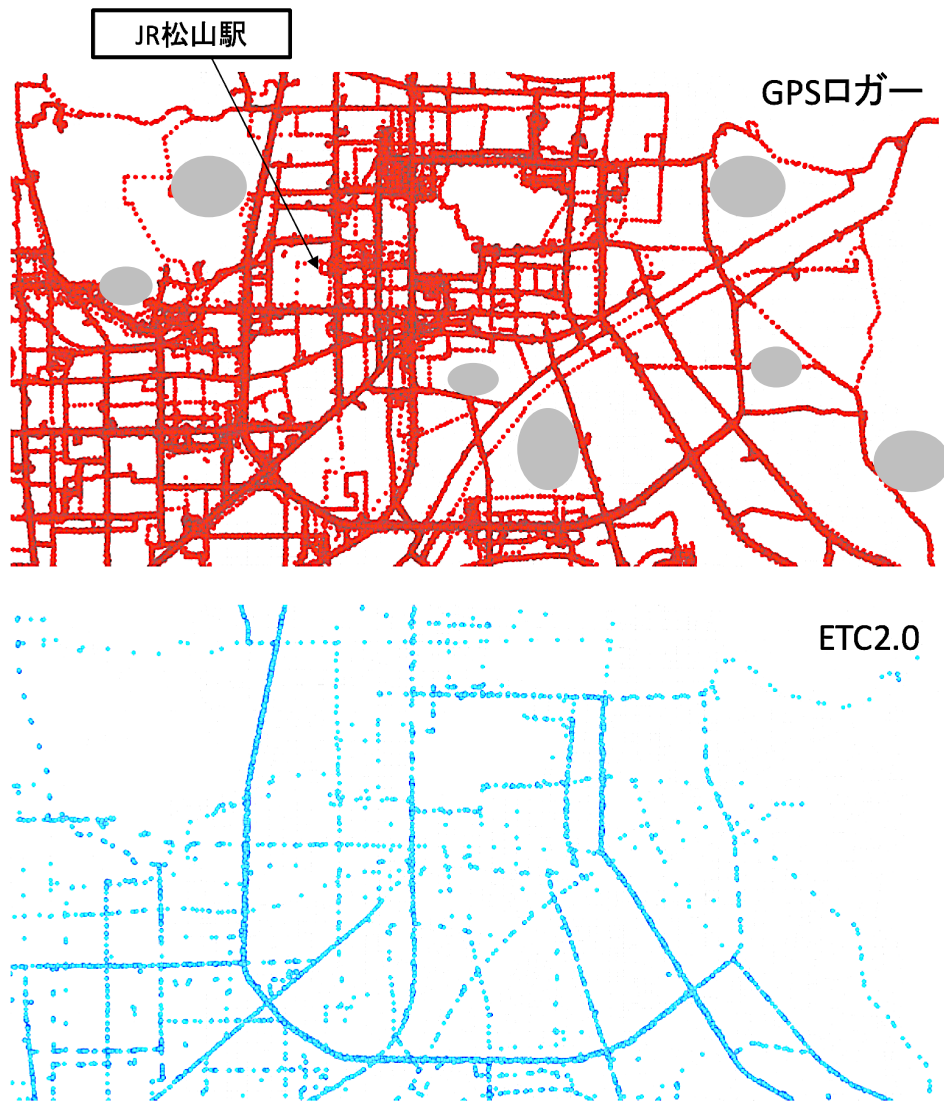


図-4.16 松山市中心部におけるGPSとETC2.0の測位点（2017/11/1-11/30，全車両）

※ 個人情報保護のために画質を意図的に劣化させて、一部を灰色でマスクしているが、観測点はマスクされた部分を除き、欠落なく画像上に示されている。

第5章 車両軌跡データの集計操作の提案と階層型データベースの実装

5.1 提案する集計操作の方法

本研究で開発する集計操作においては、集計を「空間」単位でのみ実施することを基本とする。それ以外の単位での集計は一切行わない。例えば、複数の車両の軌跡データを束ねる集計や、時間分解能を低くする集計は行わない。このようにする主な理由は2つある。ひとつは、空間はさまざまな方法で直感的に階層化が可能である一方で、時間や車両の階層化は必ずしも直感的にはできないことである。もうひとつは、交通量の空間的な分布には大きな偏りがあるため、交通量の多いところを上位の階層とし、少ないところを下位の階層として、下位の階層の情報を捨象することにより、データのサイズを大幅に削減することが期待できることである。

後者の「偏り」の実例を実データにより確認する。まず、道路種別ごとのリンク数がどのように分布しているかを、DRMを基に計算し図-5.1に示した。これからわかるように、下層の道路種別ほどリンク数が多い（例えば一般国道以上のリンク数は全体の13%に過ぎない）ことがわかる。次に、ETC2.0で観測されたリンク交通量の分布を図-5.2に示す。ほとんどのリンクは1台から数台程度の交通量しかなく、交通量の多いリンクはごく少数であることがわかる。このように両対数グラフで概ね直線に沿う分布は多くの自然現象や社会現象において観測される。このような法則はZipfの法則と呼ばれる。

車両軌跡データを経路データとして保管する際には、車両が経路内の各リンクに流入・流出する時刻のみを保持すればよい。データ量はリンク数に比例する。上層の道路種別や、交通量の多いリンクについてだけ空間構造を保持し、それ以外のリンクについては集計対象として空間構造を捨象することにより、重要なリンクにおける空間構造を保持したまま、データ量を大幅に削減することが可能となる。

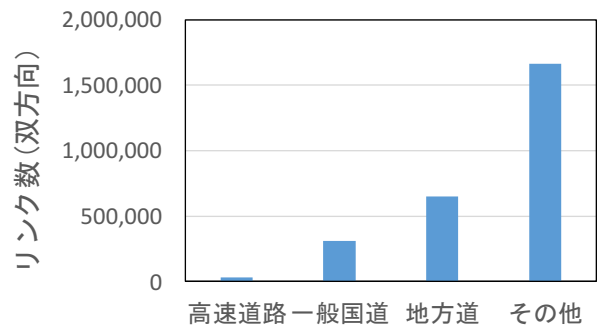


図-5.1 DRM (2603 版, 基本道路) の道路種別ごとのリンク数. 高速道路=種別 1 と 2, 一般国道=種別 3, 地方道=種別 4~7, その他=種別 9

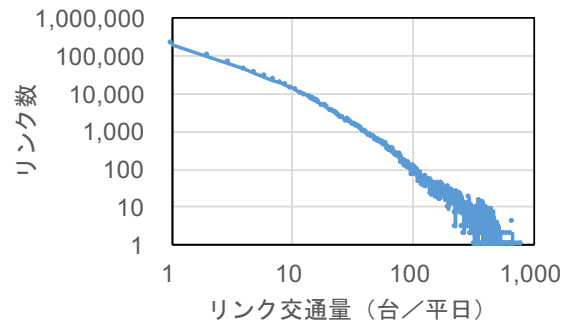


図-5.2 リンク交通量分布 (1 台以上, 1 台単位) ETC2.0 で観測, H27/10-12 月の平日小型車平均値

集計対象となったリンク（以降では下位リンクと呼ぶ）は、地理的に近い複数の他のリンクとともにひとかたまりに集約される。その「かたまり」を、以降では「リンク集合」と呼ぶ。リンク集合は一種のサブネットワークである。集計対象とならなかったリンク（以降では上位リンクと呼ぶ）についても、接続リンクを2個しか持たないノードはすべて削除することにより、交差点や合分流出点以外で分断され

ているリンクをすべて1本にまとめる（インターチェンジ等の実務上重要なノードは削除しない。DRMのデータ構造との互換性を考慮し、2次メッシュの境界にあるノードも削除しない）。図-5.3に上位リンクとリンク集合の概念図を簡単な例により示す。この図では、黒点線で示される下位リンクが、赤外枠で囲った範囲で定義される2つのリンク集合（リンク集合AとB）のいずれかに集約される。

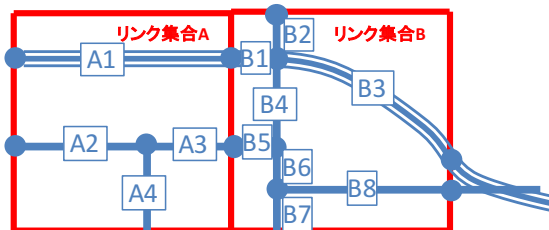
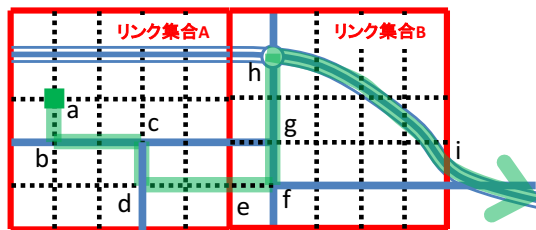
各車両の経路データは、上位リンク、リンク集合、いずれにおいても、各リンク（集合）への流入時刻と流出時刻として記録される。このほか、流入および流出地点の位置を記録（DRMのノード番号として記録する）し、リンク（集合）内での走行特性の集計値（走行距離と異常な加減速のイベント数を想定している）を記録する。これらの記録データのサイズはリンク集合の集計単位をどれだけ大きくしても変わらないため、集計単位を大きくすれば、それに比例して、記録するデータのサイズを削減することができる。具体的にどのような形で経路データが記録されるかを、図-5.3のケースを例として同図にあわせて示す。

5.2 階層型データベースの概要

階層型データベースは、膨大なサイズとなる車両軌跡データを効率的に管理するためのものである。

各種の必要なデータを、時間をかけることなく即座に抽出できるようにすることが、階層型データベースを構築するもっとも大きな目的である。また、車両軌跡データを一定のルールで集約することにより、データそのものを扱いやすくするほか、一次データを用いなくても良い用途であれば、集約されたデータのみで運用することにより、可搬性や匿名性を高めることも意図している。

本研究では、データの集約において複数車両のデータを集計することは行わず、空間的な集計のみとする。複雑な道路ネットワークを上位層と下位層に階層化し（階層の仕切りは複数種類のものを設定できる）、上位層は単純化されたネットワークへ、下位層は適当なサイズ（例えば二次メッシュなど）に区分けされたエリアにその幾何構造を集約する、という方針で空間集約を行う。このような設計であれば、単純化された上位層のネットワークや、エリアで集計された量のみで分析するのであれば、集約されたデータだけを用いれば分析できる。また、集約前の一次データへの迅速なアクセスを目的として、車両を特定するキーによって一次データを整列および圧縮し、それに対応するインデックスを作成する。これにより、膨大なサイズとなる一次データを、その量を削減しながら、なおかつ必要なデータへの高速なアクセスを実現できる。



英数字: 上位リンクのリンク名

車両軌跡のデータベースへの格納イメージ

No.	リンク	流入地点, 時刻	流出地点, 時刻	距離 (m)	加減速数
1	集合A	a, 10:00:00	b, 10:01:05	120	0
2	A2	b, 10:01:05	c, 10:03:22	1,056	0
3	A4	c, 10:03:22	d, 10:03:55	335	0
4	集合A	d, 10:03:55	e, 10:07:22	1,289	1
5	集合B	e, 10:07:22	f, 10:08:01	322	0
6	B6	f, 10:08:01	g, 10:10:02	450	0
7	B4	g, 10:10:02	h, 10:14:00	2,210	0
8	B3	h, 10:14:00	i, 10:21:22	8,518	0

図-5.3 (上) 上位リンク、下位リンクとリンク集合の概念図
(下) 上図の例における経路データのデータベースへの格納イメージ。
各上位リンクのリンク名は左図により示されている。

5.3 階層型データベースの仕様

階層型データベースは、データサイズが膨大になる傾向があるプローブデータについて、利用目的に応じて必要な情報を残しつつデータサイズを集約することにより、ユーザーがアクセスしたい情報へ高速に到達できるよう設計されたデータベースである。集約対象とするプローブデータはマップマッチング処理によってネットワークデータに紐付いているものとし、このネットワークを集約することにより同時にプローブデータの集約を行う。ネットワークの集約規則や集約後ネットワークへの属性、集計値の設定は、各リンクに紐づいた観測データに応じて行われる。具体的には、まず各リンクの道路種別やプローブデータの観測頻度に基づきネットワークを上位ネットワーク（上位層）と下位ネットワーク（下位層、あるいは下位エリア）に分割し、それぞれに応じた集約レベルを設定する。多くの車両軌跡データが観測される主要道路は、上位ネットワークとして主要交差点間を結ぶリンク単位で集約し、各集約リンクについて方向や平均速度などの属性が再計算される。一方、車両軌跡データの観測が疎で主な分析対象とされない道路については、下位ネットワークとしてエリア単位（下位エリア）で集約し、エリア毎に平均速度などの集計値が計算される。ユーザーは、これら上位・下位ネットワークの境目を決定する指標を目的に応じて変更することにより、利用用途に応じた集約結果を得ることができる。

本データベース構築における集約とは空間的なものに限定しており、車両単位の集約は一切行わないため、各集約リンクまたはリンク集合を通過した車両の ID（より具体的には、ID とトリップ番号を結合した「IDTrip」）を個別に特定することが可能であり、この IDTrip を元に集約データを辿ることで、分析対象としたい車両やトリップについて無圧縮の情報を迅速に取得することができる。以下、階層型データベース構築に用いるデータの形式、上位・下位ネットワークおよび車両軌跡情報の集約規則について述べる。

(1) インプットデータの形式

階層型データベースは、ネットワークデータと車両軌跡データを同時に集約することで構築される。集約対象となるネットワークはノードとリンクから構成されており、各ノードは ID と座標情報を、各リンクは ID と両端ノードの ID、およびリンク長の情報を持つものとする。車両軌跡データは、車両 ID、トリップ番号、通過したリンク ID、それぞれのリン

クへ流入した日時、各リンクを走行した時間と平均速度等の情報を持つものとする。

(2) 上位ネットワークおよび対応する車両軌跡の集約

上位ネットワークは、主要交差点間のリンク集合に含まれる連続リンク、平行リンク、短リンクを一定のルールで簡略化することにより 1 本の集約無向リンクとして集約した後、観測データに基づき有向リンクとして方向を振り直すことで集約を行う。ここで主要交差点とは、上位ネットワークに含まれるリンク同士が交差する点、または上位ネットワークに含まれるリンクと下位ネットワークに含まれるリンクのうち重要度の高いリンクとが交差する点のことである。この主要交差点を定義するため、下位ネットワークに含まれるリンクを重要度の高いリンクとそうでないリンクに分割する必要がある。これは上位ネットワークと下位ネットワークを分割した際と同様の規則により行われる。主要交差点間のリンクが集約されるイメージを図-5.4 に示す。

主要交差点間のリンク集合の簡略化は、三種類のシンプルな処理（連続リンクの一本化、平行リンクの一本化、短リンク集合のノード化）を、対象となる箇所がなくなるまで再帰的に行うことで実現される。それぞれの処理のイメージを図-5.5 に示す。これらの処理を行うことにより、上位ネットワークは無向集約リンクで構成されたネットワークへと簡略化される。

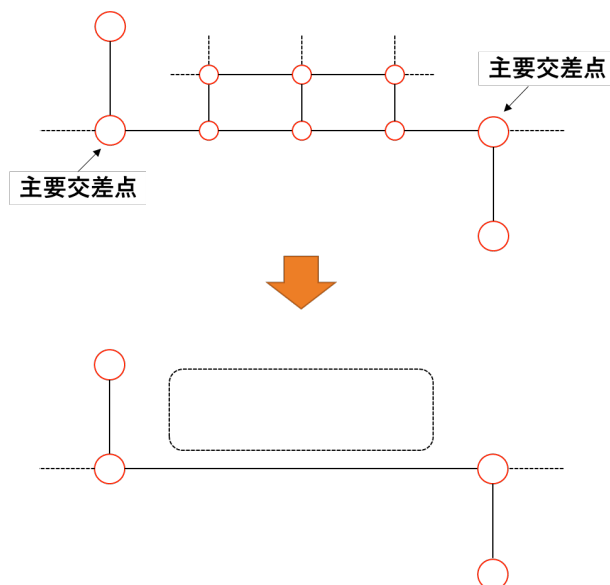


図-5.4 主要交差点間が集約されるイメージ

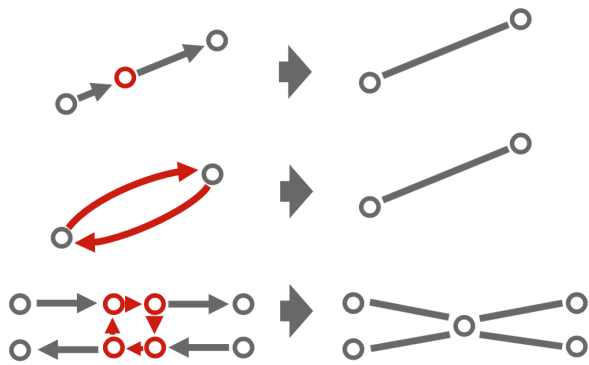


図-5.5 上位ネットワークの簡略化処理

これら無向集約リンクを観測データに応じて有向化し、さらに各種集計値を計算する。この具体的な手順として、まずそれぞれの無向集約リンクへと集約された各オリジナルリンクを特定し、当該リンクを走行した車両軌跡を抽出する。これにより各無向集約リンクを走行した全ての車両軌跡データが抽出され、各車両軌跡について無向集約リンクをどちらの方向へ走行したか判定する。車両が無向集約リンクの両端点を走行していた場合方向は一意に決まるが、車両が集約リンク内部でトリップを終了、または別の集約リンクや下位ネットワークとの移動があった場合、集約後の走行方向を決める規則が必要である。ここでは、集約リンクにおける端点ノードを結んだベクトルと、当該リンク内を走行したと判定されたオリジナル軌跡の端点を結んだベクトルの成す角度を用いて集約後の方向判定を行った。なお、集約リンク内部を短距離のみ走行した車両軌跡については方向を割り当てず、集約リンク内走行トリップとして別途フラグ付けしている。これにより、それぞれの無向集約リンクの各方向に対して観測された車両軌跡データが割り当てられ、それぞれの方向に対応した車両軌跡データから交通量や平均速度などの集計値を取得することができる。また、集約無向リンクを走行した車両軌跡が、単一方向側のみ観測されていた場合、その集約リンクはそちらの方向にしか走行できないリンクであるとみなし、一方向リンクと判断することができる。オリジナルの観測車両軌跡を、対応する集約リンクへ方向別に割り付けるイメージを図-5.6に示す。

ここまでのネットワーク集約プロセスで、オリジナルネットワークの各リンクに対応する方向付き集約リンク、および方向別車両軌跡を決定づけることができるため、この対応を元に車両軌跡を同様に集約することができる。ここで集約された車両軌跡について、オリジナルリンク毎に保持していたリンク

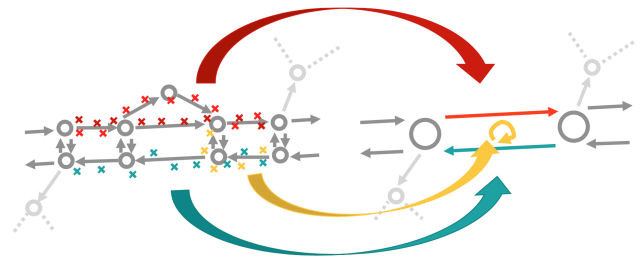


図-5.6 各車両軌跡の方向別集約のイメージ

内平均速度や走行時間などの情報が集約リンク毎に集計されることになるが、前述の通り車両の IDTrip については一切集約していないため、集約後の結果で特定した IDTrip に関する詳細な情報を取得したい場合はオリジナルのデータまで辿ることができる。

(3) 下位ネットワークの集約

下位ネットワークの集約はリンク集合を一定のルールでエリアに区切り、その中で集約することにより行う。下位ネットワーク内を走行した車両軌跡は、各トリップについて当該ネットワークへの流入、流出地点および時刻、下位ネットワーク内の総走行距離、総旅行時間の情報を保持するよう集約される。これにより、オリジナルネットワークにおいて各リンクをどのように走行したかという情報は失われるが、当該ネットワーク内での集計量は残る。例えば、各トリップについてエリア内を走行した総走行距離、総旅行時間が得られるため、エリア内の平均速度を算出できる。また、車両軌跡が1トリップの内に上位ネットワークと下位ネットワークのどちらも走行している場合、その連続性は保たれているため、どの上位ネットワークから下位ネットワークへと流入したか、またどの上位ネットワークへ流出したかという情報も特定できる。

5.4 全国データを用いた階層型データベースによる車両軌跡データの集約性能の検証

前節で説明した階層型データベースを実装しその性能を評価する。前節で述べた通り、階層化ネットワークの設定として、上位ネットワークと下位ネットワークの分割、および主要交差点特定が必要であり、この設定を変更することで、ネットワークの集約レベルが変化する。

今回は道路種別を上位ネットワークと下位ネットワーク分割の基準として用いる。ネットワークデー

タとして用いるデジタル道路地図 (DRM) データでは各リンクが道路種別情報を保持しており、具体的には、「高速自動車国道、都市高速道路、一般国道、主要地方道 (都道府県道)、主要地方道 (指定市道)、一般都道府県道、指定市の一般市道、その他の道路」という 8 つの道路種別に分類されている。主要交差点の指定も同様に道路種別により定義する。

下位ネットワークについて集約エリア単位の設定をする必要がある。今回は、単純に、2 次メッシュ単位毎にエリアを区切っている。

実データを用いた階層型データベース構築のテストケースについて、車両軌跡データがどれだけ集約できたか (すなわち、どれだけサイズを削減できたか) を確認する。今回のテストケースでは、2018 年 3 月に日本全国で観測された ETC2.0 プロブデータを用いた。上位ネットワークと下位ネットワークの境目は、「道路種別 1~2 までを上位、それ以外を下位としたもの (ケース 1)」と、「道路種別 1~3 までを上位、それ以外を下位としたもの (ケース 2)」の二つの設定を用いた。なお、主要交差点の指定についてはどのケースにおいても、「道路種別 9 以外の道路が交差した点」を主要交差点としている。

図-5.7 にケース 1 における車両軌跡データの集約状況を、図-5.8 にケース 2 における集約状況を表したグラフを示す。いずれにおいても 70~80 パーセント減という大幅なデータの削減が実現できている。

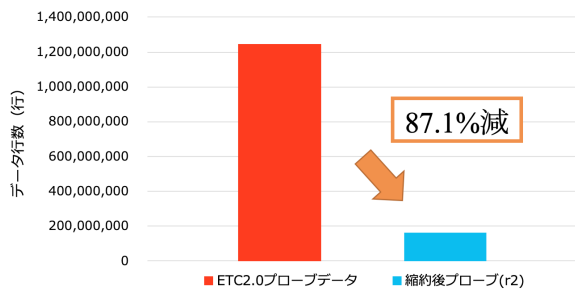


図-5.7 データ集約割合 (ケース 1)

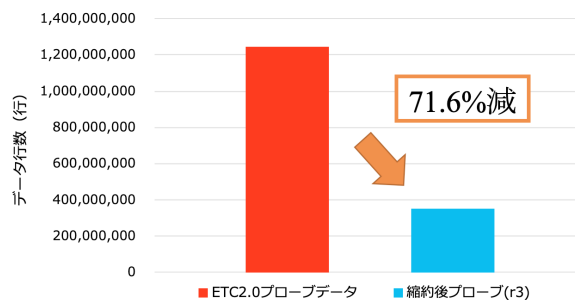


図-5.8 データ集約割合 (ケース 2)

5.5 階層型データベース GUI およびクエリ用の関連機能の実装と評価

(1) 概要

階層型データベースからデータを取り出すための GUI (グラフィカル・ユーザ・インタフェース) システムを試験実装し、それにより、階層型データベースがどのように活用できるかの使用例を示す。なお、今回の GUI の実装はあくまでも階層型データベースの評価のための試験実装であり、本格的な実務での使用を想定した実装とはしていない。

GUI は「ネットワークビューア」「ポインタパーサ」「デコーダ」の 3 つのコンポーネントからなる。それぞれの役割は下記の通り：

- ネットワークビューア：上位・下位リンクの指定された期間の基礎的な集計量 (平均速度、交通量等) 地図上に表示する。また、それぞれのリンクを地図上で選択し、そのリンクの指定された期間の詳細データを指し示す「ポインタ」を発行する。
- ポインタパーサ：ネットワークビューアで発行されたポインタを解読し、選択されたリンクを指定された期間に通過したすべての車両の「IDTrip」(日付+日内 ID+トリップ番号)、リンク流入時刻、流出時刻、走行距離を出力する。ここで、「日内 ID」は、各車両に日毎にランダムかつユニークに割り当てられる匿名 ID のことを示す。
- デコーダ：IDTrip を指定することにより、その IDTrip、あるいは ID に対応する一次データ (ドットデータなど) を圧縮ファイルから抽出し出力する。

このうち、本研究では前者 2 個を Web アプリケーションとして実装している。後者 1 個については、GUI としての実装は行っていないが、コマンドラインからコマンド 1 回で簡単に実行できるように実装してある。

図-5.9 に、上記の GUI システムを中心とした、車両軌跡データを階層型データベースで処理して活用する際の一般的なデータフローを示す。ここで、一次データは必ず ID が割り振られた非集計データであることが要求される。また、必ず車両軌跡の点群 (日付、日内 ID、時刻、緯度、経度を含むデータ) が一次データとして提供されなくてはならない。トリップ番号はマップマッチング時にトリップ分割処理による付加される。

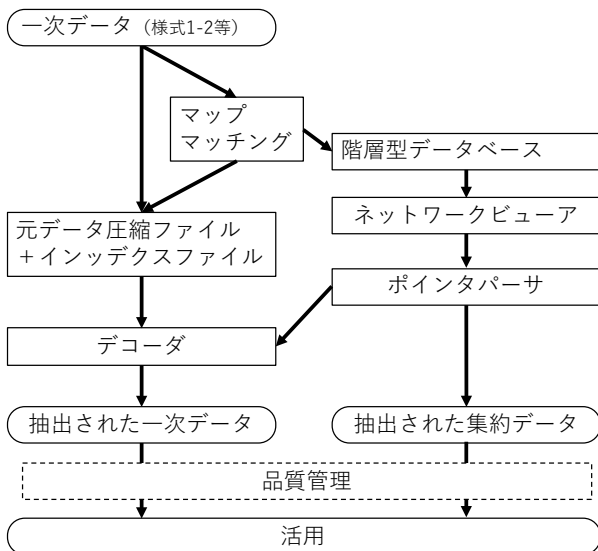


図-5.9 車両軌跡データ（特にETC2.0データ）を階層型データベースで処理して活用する際のデータフロー

(2) ネットワークビューア

図-5.10 にネットワークビューアのスクリーンショットを示す。左側にデータ選択用のメニューが、右側に地図がある。地図は自由に拡大縮小できる。データ選択用のメニューでは：

- 階層（上位ネットワーク道路種別）の選択
- 日付（開始日と終了日）と曜日を選択することによる分析対象日の指定
- 分析対象のデータベースを指定できる。「送信」ボタンを押すと、ネットワークビューアはバックエンドの描画エンジンにこれらの情報を渡すようになっている。

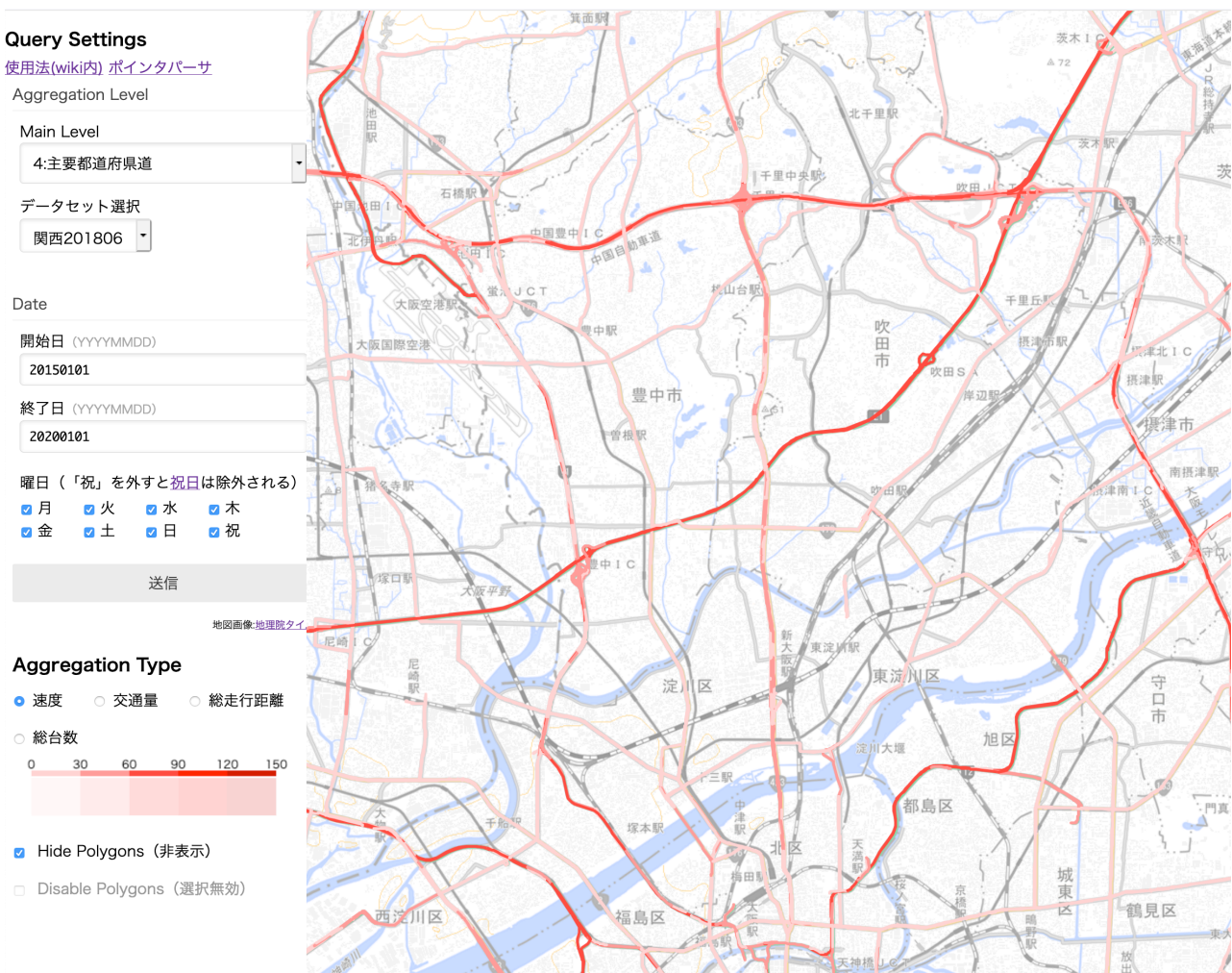


図-5.10 ネットワークビューア全体図

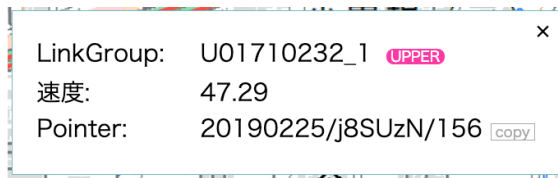


図-5.11 リンクのヘポインタ

描画エンジンは、これらの情報を利用して、地図に表示されている範囲の上位リンク・下位リンクの基礎集計量（速度・交通量等）をデータベースから取得し、それを地図上に可視化して出力する。あわせて、それらのリンクを指し示すポインタを発行する。ポインタの実態はサーバ内に作成されるファイルである。このファイルの中には、ポインタパーサがデータを抽出するために必要な情報（分析対象日やリンク番号など）が含まれている。

地図上に出力された上位リンク・下位リンクはマウスで直接選択することができるほか、そのリンク

のポインタが出力される（図-5.11）。ポインタの右側の「copy」と書かれたボタンを押すと、ポインタがコピーバッファにコピーされるので、ポインタパーサや、そのほかメモ帳等に直接ペーストすることが可能である。

可視化に用いる基礎集計量はあらかじめ日単位の平均値を計算し、データベースに格納しておく必要がある。階層型データベースは車両単位のデータの集計は一切行わないため、あるリンクの日単位の平均値を知りたいときには、データベースからその日の全ての車両のデータを取得し、それを平均しなくてはならない。この計算を、GUIで可視化の指示が出されるたびに実施すると、交通量の多いリンクの可視化がスムーズにできなくなる。可視化では日単位平均値しか用いないため、事前にそれを計算しデータベースに登録しておくことにより、GUIを効率よく操作できるようにしてある。

ETC2.0階層型DB ポインタパーサ

GUIで表示される集計リンクないし下位リンクへのポインタを1個以上入力値として受け取り、以下の処理のうちいずれかを行います。

- リンクデータをそのまま出力します
- 各リンクを走行する車両のIDTRIPを表示します

複数リンクがあるときには、以下のルールでIDTRIPを絞り込めます

- 全データ
- すべてのリンクを走行したIDのデータのみ（TRIPは区別されません）
- すべてのリンクを走行したIDTRIPのデータのみ

ポインタ入力フォーム

- ポインタ（例：20190212/nlfu6Q/162）を指定します。改行かスペースで区切ります。
- 異なるクエリIDのポインタを混在させることもできます。
- ポインタの後に:を入れると、続けてコマンドを入れることができます。複数指定可能（ANDで適用されます）。
 - :ALLと入れると、そのリンク（上位でも下位でも）の含まれるメッシュ全部のデータが出力されます。
 - :Pxxと入れると、上位リンク内走行距離の割合がXX%以上のデータのみが抽出されます。
 - 距離が未登録の上位リンクではこのコマンドは機能しません。
 - :Dxxと入れると、リンク内走行距離がXX(m)以上のデータのみが抽出されます。
 - :L0と入れると小型車のみ、L1と入れると大型車のみ抽出されます。

Submit

図-5.12 ポインタパーサの全体図

```

# 21:07:08 20190225
# TakeAndBy:NONE
# sql{(select date,id,vehdtype,vehpurpose,trip,Link_ID,datetime_in,datetime_out,tttime,dist from Kansai.resu
# tbl{Kansai.result_probe_523514_201806_r4},nwt{Kansai.result_upper_NW_523514_201806_r4_with_distance}
# lk{L4:U01710232_1},qry{2015-01-01:2020-01-01:11111111},dur{1:30d},stat{T=734.34:S=47.29:N=22055:TD=1317}
# TotalOutput:22055
# Link_ID,IDTRIP,vehdtype,vehpurpose,datetime_in,datetime_out,tttime,dist,road type
U01710232_1,2018-06-01.37671.1,2,1,2018-06-01 00:12:32,2018-06-01 00:13:06,33.84,598,3
U01710232_1,2018-06-01.558840.1,3,2,2018-06-01 00:18:06,2018-06-01 00:18:41,35.81,598,3
U01710232_1,2018-06-01.221153.1,2,1,2018-06-01 00:23:52,2018-06-01 00:24:20,28.2,598,3
U01710232_1,2018-06-01.80445.1,3,1,2018-06-01 00:24:56,2018-06-01 00:25:28,31.46,598,3
U01710232_1,2018-06-01.102845.1,3,1,2018-06-01 00:32:22,2018-06-01 00:32:46,24.61,598,3
U01710232_1,2018-06-01.193098.1,2,1,2018-06-01 00:35:32,2018-06-01 00:35:58,25.3,598,3
U01710232_1,2018-06-01.37857.1,3,1,2018-06-01 00:41:33,2018-06-01 00:42:00,26.85,598,3
U01710232_1,2018-06-01.83939.1,2,1,2018-06-01 00:41:40,2018-06-01 00:42:08,27.78,598,3
U01710232_1,2018-06-01.852.1,2,1,2018-06-01 00:44:00,2018-06-01 00:44:29,28.48,598,3
U01710232_1,2018-06-01.262466.1,3,1,2018-06-01 00:47:04,2018-06-01 00:47:38,33.79,598,3
U01710232_1,2018-06-01.72520.1,2,3,2018-06-01 00:51:54,2018-06-01 00:52:18,23.75,598,3
U01710232_1,2018-06-01.6613.1,3,1,2018-06-01 00:53:35,2018-06-01 00:54:04,28.79,598,3
U01710232_1,2018-06-01.157564.1,2,1,2018-06-01 00:53:47,2018-06-01 00:54:19,32.53,598,3
U01710232_1,2018-06-01.40188.1,3,1,2018-06-01 01:18:45,2018-06-01 01:19:18,32.24,598,3
U01710232_1,2018-06-01.70421.1,3,1,2018-06-01 01:22:37,2018-06-01 01:23:09,31.84,598,3
U01710232_1,2018-06-01.447245.1,2,1,2018-06-01 01:25:12,2018-06-01 01:25:36,24.01,598,3
U01710232_1,2018-06-01.327432.1,2,1,2018-06-01 01:46:54,2018-06-01 01:47:17,23.51,598,3
U01710232_1,2018-06-01.2523.1,2,3,2018-06-01 01:53:10,2018-06-01 01:53:38,27.41,598,3
U01710232_1,2018-06-01.350845.1,2,1,2018-06-01 02:12:04,2018-06-01 02:12:24,20.12,598,3
U01710232_1,2018-06-01.73612.1,3,1,2018-06-01 02:18:16,2018-06-01 02:18:48,31.36,598,3
U01710232_1,2018-06-01.11470.2,3,2,2018-06-01 02:19:18,2018-06-01 02:20:02,44.17,598,3
U01710232_1,2018-06-01.11577.2,3,2,2018-06-01 02:26:48,2018-06-01 02:27:18,30.15,598,3
U01710232_1,2018-06-01.17000.2,3,2,2018-06-01 02:31:23,2018-06-01 02:32:09,46.36,598,3
U01710232_1,2018-06-01.295260.1,2,1,2018-06-01 03:05:41,2018-06-01 03:06:05,23.57,598,3
U01710232_1,2018-06-01.10361.1,3,2,2018-06-01 03:28:10,2018-06-01 03:28:42,31.82,598,3
U01710232_1,2018-06-01.213674.1,4,2,2018-06-01 03:28:22,2018-06-01 03:28:55,32.91,598,3
U01710232_1,2018-06-01.6540.2,2,3,2018-06-01 03:34:56,2018-06-01 03:35:22,25.53,598,3
U01710232_1,2018-06-01.17306.3,2,2,2018-06-01 03:52:39,2018-06-01 03:53:03,24.48,598,3
U01710232_1,2018-06-01.455415.1,2,1,2018-06-01 03:55:51,2018-06-01 03:56:11,20.35,598,3
U01710232_1,2018-06-01.94071.1,2,3,2018-06-01 03:57:58,2018-06-01 03:58:30,31.08,598,3
U01710232_1,2018-06-01.29395.1,2,1,2018-06-01 03:58:31,2018-06-01 03:58:55,24.35,598,3
U01710232_1,2018-06-01.39342.1,2,3,2018-06-01 04:08:00,2018-06-01 04:08:32,32.4,598,3

```

図-5.13 ポインタパーサの出力例

(3) ポインタパーサ

ポインタパーサは、Web 上の CGI プログラムとして実装されている。図-5.12 にスクリーンショットを示す。この Web ページでは、ポインタのほか、

- 出力の種類
- 複数のポインタを入力した時の処理

をページ下部の枠内に入力するようになっている。また、それぞれのポインタの後ろに、コロンで始まる文字列を入れることにより、追加の指示を発行できるようにになっている。

複数のポインタを入力した時には、以下の3種類の処理が可能となっている：

- 各ポインタで示されるリンクに登録されているすべてのデータをそのまま出力。
- 各ポインタで示されるリンクの全てに登録されている ID (日付+日内 ID) のデータのみを出力。
- 各ポインタで示されるリンクの全てに登録されている IDTrip のデータのみを出力。

後者 2 個を用いることにより、複数のリンクを全て通過した車両やトリップのみを抽出することが可能となる。この機能は、特に、経路旅行時間を測定しようというときに有用である。

図-5.13 に出力例を示す。最初の数行 (# で始まる行) は、ポインタパーサへの入力事項を記録するものであり、その後出力行が続く。出力結果は、そのままコピー&ペーストすることにより、テキストファイルとしての保存や、表計算ソフトでの処理がそのまま可能となっている。

(4) デコーダ

デコーダは、Linux のコマンドライン上のプログラムとして実装されている。本研究では実装していないが、CGI を介して Web から実行するように拡張することも比較的容易に可能である。コマンドライン上では

```
./decode 元データ圧縮ファイル名 インデックスファイル名 IDTrip
```

と入力して実行する。なお、IDTrip に文字「- (マイナス)」を指定すると、標準入力から複数の IDTrip を受け取ることもできる (事前に昇順にソートしておく必要がある)。結果は自動的に展開されて標準出力に出力される。

「元データ圧縮ファイル」「インデックスファイル」は、経路データやドットデータなどの一次データから事前に作成する。経路データ、ドットデータとしては、マップマッチング後のデータ (経路データでは DRM リンク単位、ドットデータでは GPS 測位点単位で、各車両の経路がトリップ単位に追跡されているもの) を用いることを想定している。ドットデータについては、様式 1-2 に準拠した形で各種のデータも格納されている。他の様式のデータについても、これらに準じた形で一次データとして使用可能である。ただし、トリップが特定されていないデータでは、IDTrip 単位ではなく、ID 単位でデータが解凍される。

「元データ圧縮ファイル」「インデックスファイル」の構造の詳細は以下の通りである。一次データはまず IDTrip 単位で整理し、次にその単位で圧縮する。圧縮したファイルは一定の単位でまとめて 1 個のバイナリファイルにする。まとめる単位は少なくとも日単位 (ID が日付依存なので、日をまたいだ単位でまとめる意味はあまりない) とし、必要に応じて一次メッシュや地方等の比較的大きい空間単位でまとめる。なお、空間単位についての分割はせずに、1 日に全対象範囲を 1 個のファイルにまとめてしまってもよい。インデックスファイルは、各 IDTrip のデータが、元データ圧縮ファイル全体の何バイト目から何バイト目までのあいだに存在するかを記録する。このインデックスファイルによって、必要な IDTrip の圧縮データへのランダムアクセスが可能となっている。

(5) GUI システムの使用例

構築した GUI システムがどのように機能するか、また、それにより ETC2.0 データを用いた分析がどれだけ簡便であるかを見るために、以下で 2 種類の簡単な使用例を示す。1 つめは、高速道路の旅行時間を測定する例、もう 1 つ目は、ある道路を通過した車両のドットを抽出し可視化する例である。デコーダ用の一次データとしてはドットデータ (マッチング済) を実装している。テキストデータで 509GB の一次データが、103GB の元データ圧縮ファイルと 0.8GB のインデックスファイルに変換されているため、一次データの圧縮率は約 80% となっている。

高速道路の旅行時間の測定の例として、豊田ジャンクションから草津ジャンクションまでを伊勢湾岸道路を經由した車両の旅行時間の分析を行う。ネットワークビューアを用いて、豊田ジャンクションの直下流のリンクと、名港西大橋 (西行) 上のリンク、さらに、草津ジャンクション直上流のリンクを選択する (図-5.14)。これらをポインタサーバに入力し、「リンクデータをそのまま出力」「すべてのリンクを走行した IDTRIP のデータのみ」を選んで出力を得る。これを Excel のシートにそのまま貼り付け、必要な列を選択して列名を付した上で、フィルタ機能により、豊田ジャンクションと草津ジャンクションに相当するリンク ID のデータを抽出して) 別のシートに貼り付ける。IDTrip でソートした上で 2 つのジャンクションのデータを並べ (いずれのリンクのデータも、同一の IDTrip の車両のみ含んでいることに注意)、豊田ジャンクション側のリンクの流入時刻を草津ジャンクション側のリンクの流出時刻から引くことにより、各車両の旅行時間を得る。その結果を

ヒストグラムとして整理した結果を図-5.15 に示す。なお、この結果は同一の IDTrip のまま当該区間を走破した車両のデータであるため、サービスエリア等で休憩した車両は含まれていないことに注意したい。以上の作業にかかる所要時間はせいぜい 10 分間程度である。そのうち、ポインタパーサでのデータ抽出にかかる時間は数秒程度である。

ドットデータをデコーダから抽出する例として、先ほどの例の名港西大橋 (西行) を 2018/3/1 に通過した車両のドットを GIS 上で可視化することを試みる。まず、名港西大橋のリンクを選択し、2018/3/1 のみを日付として指定してネットワークビューアでポインタを取得し、ポインタパーサで IDTrip のみを取得する。取得された IDTrip の数は 614 個であった。その IDTrip をテキストファイルに保管し (ファイル名を IDlist.txt としている)、Linux 上で以下のコマンドを実行する。

```
cat IDlist.txt | sort -t. -k1,1 -k2,2n -k3,3n | ./decode 20180301_Dot.bin 20180301_Dot.tbl -> out.txt
```

これにより、これらの IDTrip に対応するドットデータを取得できる。なお、このコマンドの実行時間は 14 秒であった。出力ファイルの行数は 392,090 行であった。GIS によるドットの可視化の例を図-5.16 に示した。

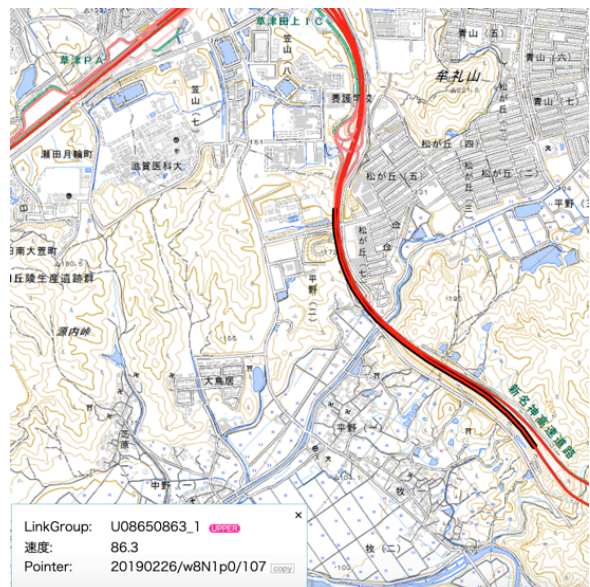


図-5.14 ネットワークビューア上で選択したリンク (黒色) 草津ジャンクション付近の例

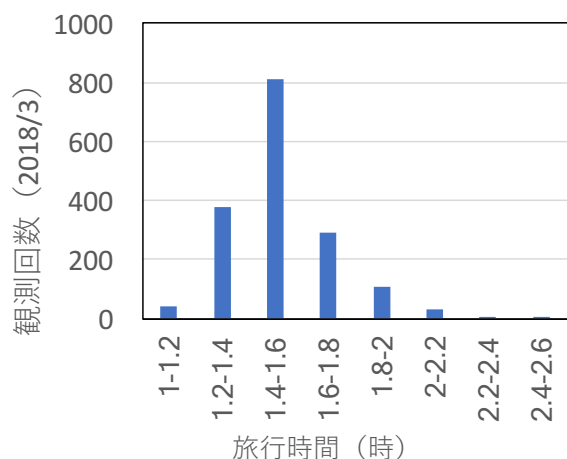


図-5.15 旅行時間のヒストグラム (2018年3月の全日)

(6) データの品質管理

ETC2.0 データには、さまざまな理由によってサンプル率が安定していないという品質上の問題がある。また、個々の車両軌跡に着目しても、軌跡がトリップの途中で切れてしまい、正確なトリップの起終点を把握できないという問題があることがわかっている。データの活用にあたっては、これらの問題を考慮しつつ、品質の管理を行うことがきわめて重要である。

階層型データベースにおいては、品質は、データベースそのもので管理するのではなく、階層型データベースから出力された軌跡データに対してその品質を管理することで行う。このような実装にした理由は3つある。1つ目は、品質管理用のインデックスを階層型データベース構築時に計算して保管すると、その計算時間と保管用の容量を多く必要としてしまうためである。2つ目は、品質管理は集約されたデータに対してだけでなく、デコーダで出力される一次データに対して直接行いたい場面も多くあるためである。3つ目は、要求されるデータの品質は分析の目的により異なるためである。例えば、旅行速度を知るためにはサンプル率にムラがあることはあまり問題にならないが、交通量を知るためにはこれは問題となりうる。第4章のケーススタディにおいては、品質を考慮した分析項目を設定し、必要と認められる場合においては、そのケーススタディに適した品質管理を他のデータも活用しつつ必要な程度だけ行うようにする。



図-5.16 デコーダで出力したドットをGISにより可視化した例

第6章 階層型データベース活用のケーススタディ

6.1 ケーススタディの概要

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
6. GPS

ETC2.0

ETC2.0

4

6

5

ETC2.0

ETC2.0

ETC2.0

30

6.2 神戸市における ETC2.0 データからの起終点情報の抽出例

2018

IDTrip

図-6.1

IDTrip

20

2018 6 3

1605

1581

図-6.2

ETC2.0

図-6.3

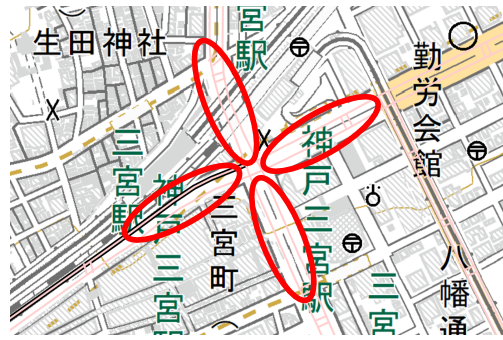


図-6.1 抽出対象リンク（赤丸で囲った部分にある8本）

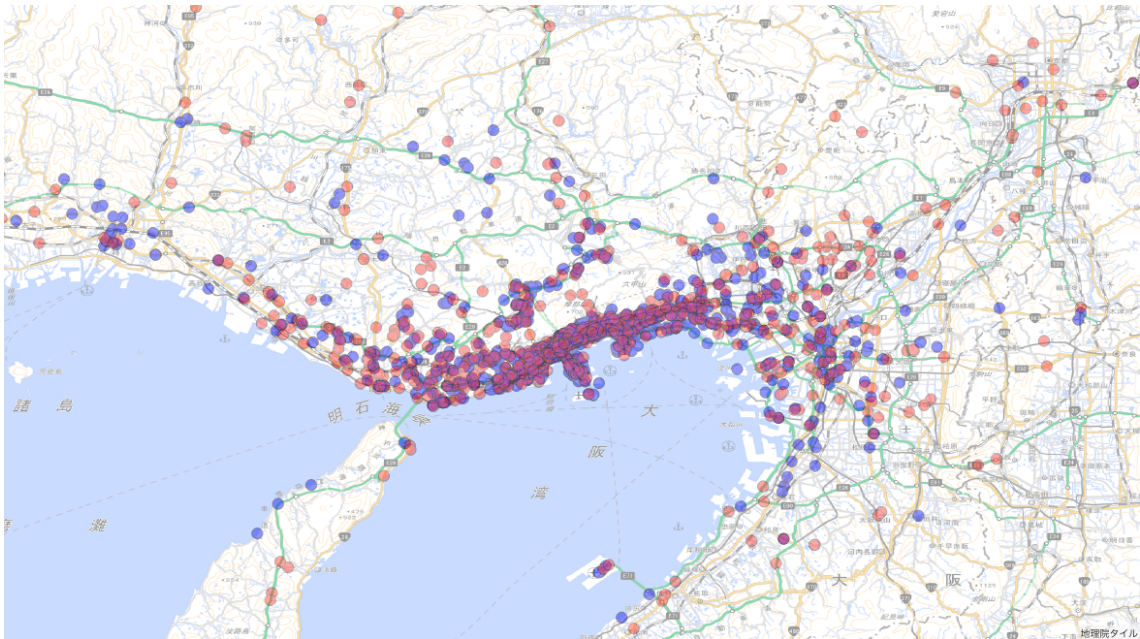


図-6.2 三宮駅前交差点を通過するIDTripの起終点の分布（阪神間拡大）

青：平日（2018/6/20） 赤：休日（2018/6/3）

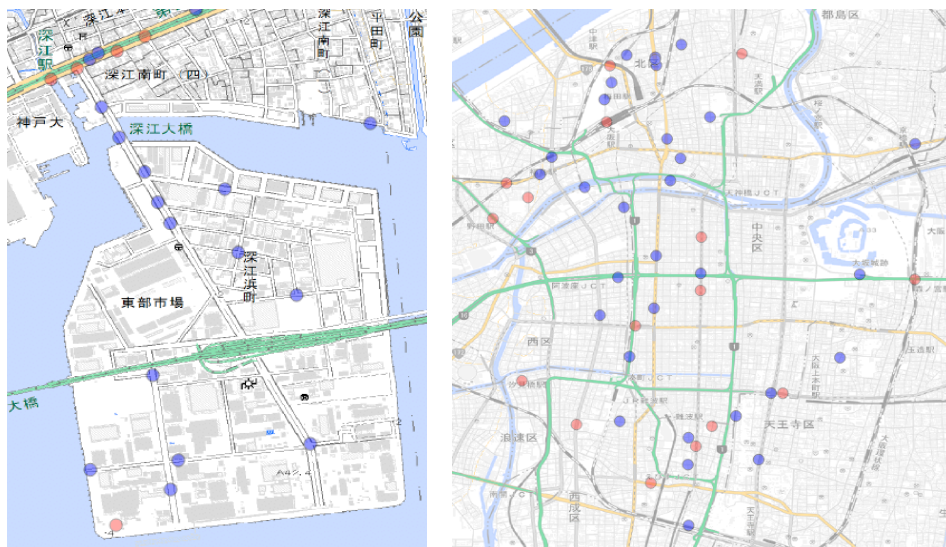


図-6.3 図-6.2の拡大図

左：神戸市東灘区深江浜町の拡大， 右：大阪市中心部拡大（休日16個，平日31個）

6.3 ETC2.0 データからの降雪時における異常な軌跡の抽出例

8 30 2 6
 1500 8
 46
 24
 ETC2.0

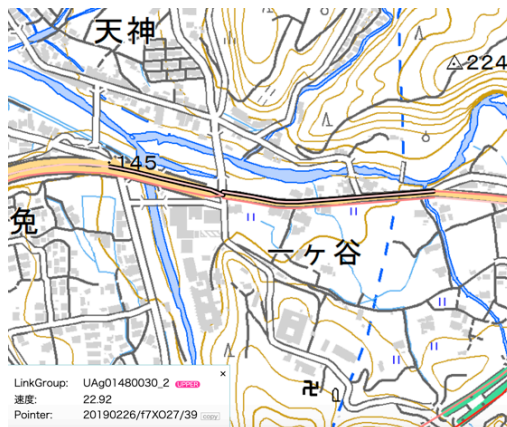


図-6.4 国道11号線愛媛県東温市天神大橋交差点付近のリンクのGUIでの選択状況

11
 Twitter 2018 2 1 11

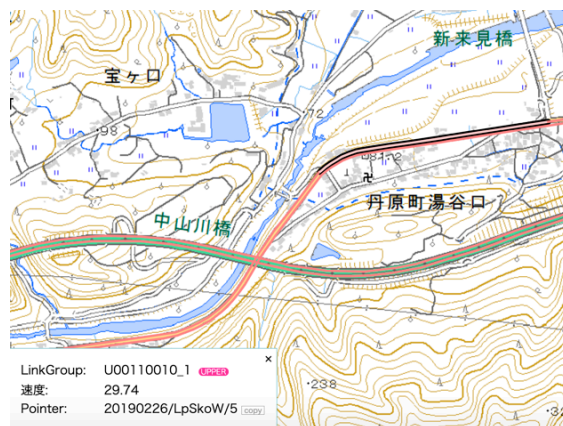


図-6.5 国道11号線愛媛県西条市湯谷口交差点付近のリンクのGUIでの選択状況

2018 2 1 11

図-6.4, 6.5

21

図-6.6

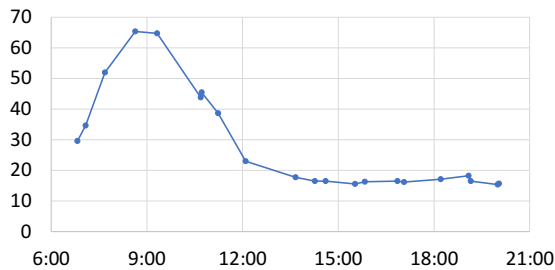


図-6.6 対象車両の対象区間の旅行時間

10

8 30

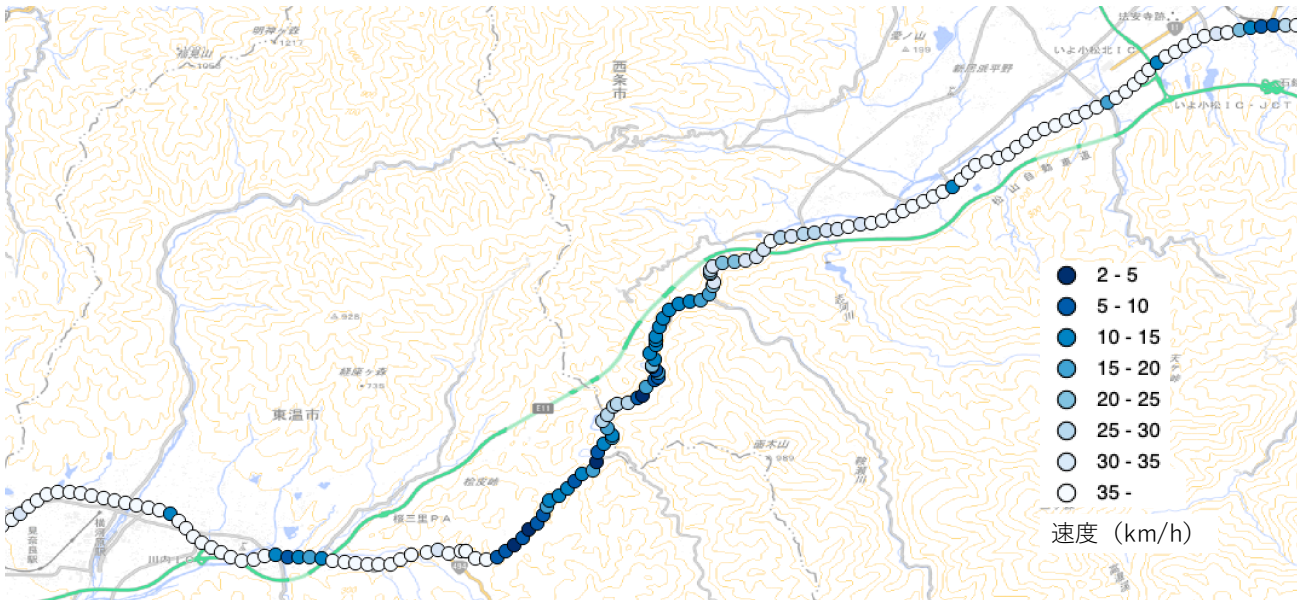
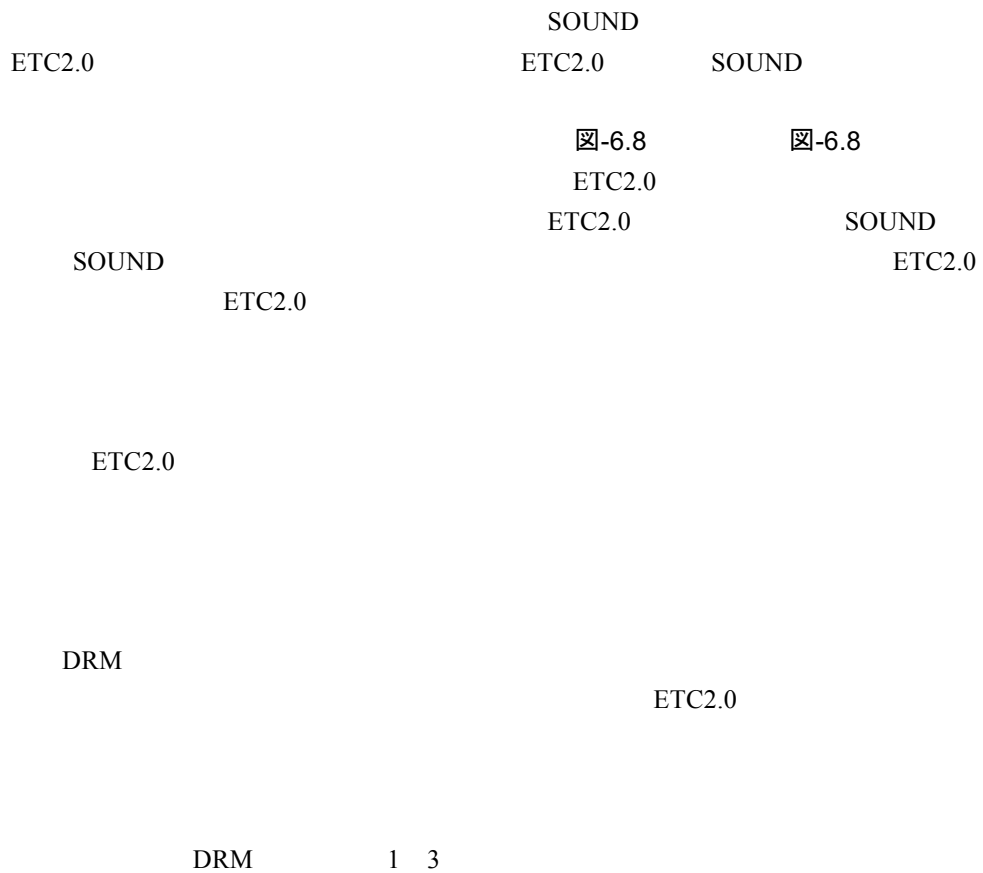


図-6.7 午前8時30分ごろに国道11号の分析対象区間に流入した車両の走行速度
 (走行方向は東向き (図中左から右方向))

6.4 階層型データベースを活用したETC2.0と外部データの比較分析

DRM



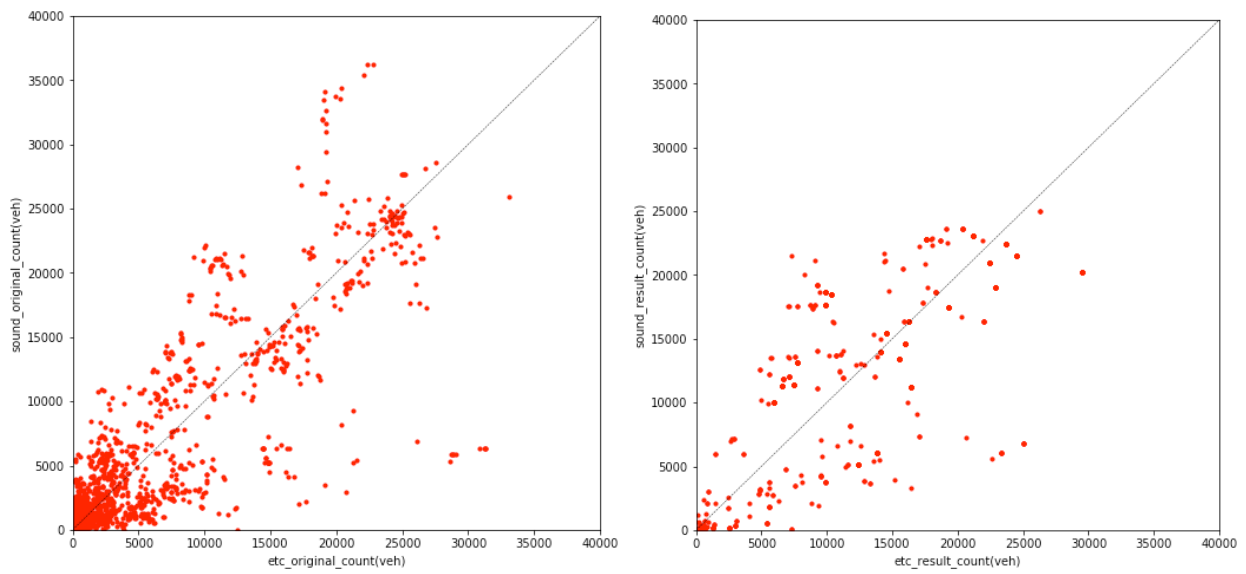


図-6.8 ETC2.0 交通量データ（横軸）と SOUND 交通量データ（縦軸）の比較
 左：DRM リンク単位での比較 右：縮約後ネットワークのリンク単位での比較

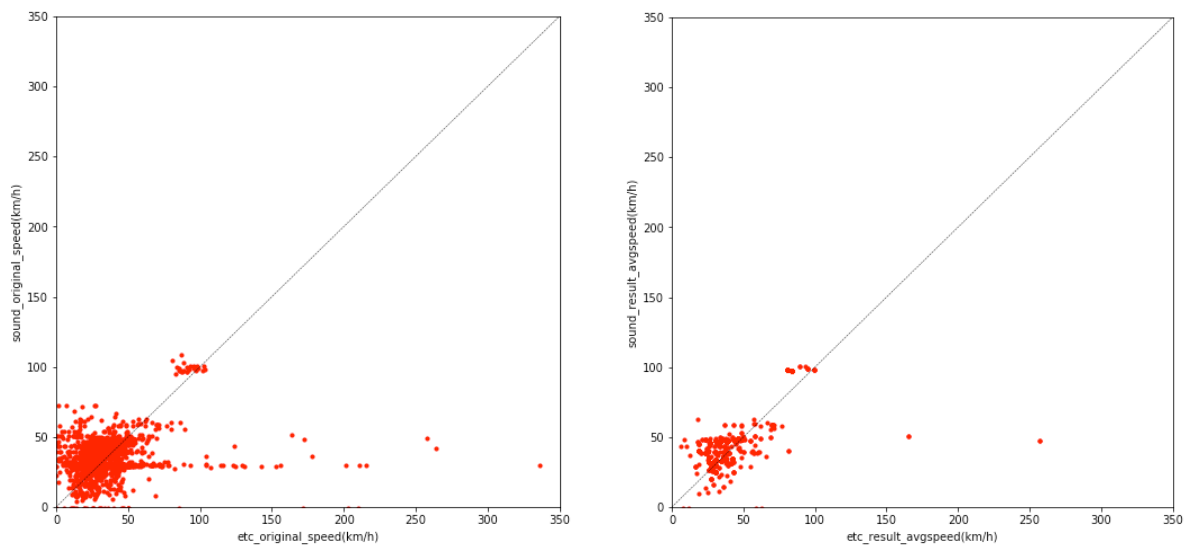


図-6.9 ETC2.0 旅行時間データ（横軸）と SOUND 旅行時間データ（縦軸）の比較
 左：DRM リンク単位での比較 右：縮約後ネットワークのリンク単位での比較

6.5 平成30年大阪府北部地震時の交通分析

(1) 上位階層およびGUIの活用による災害時の交通状態把握

2018 6 18

2018 6 18

図-6.10

GUI
図-6.11

GUI (1)

図-6.12

(2)

QK

図-6.13

8

13

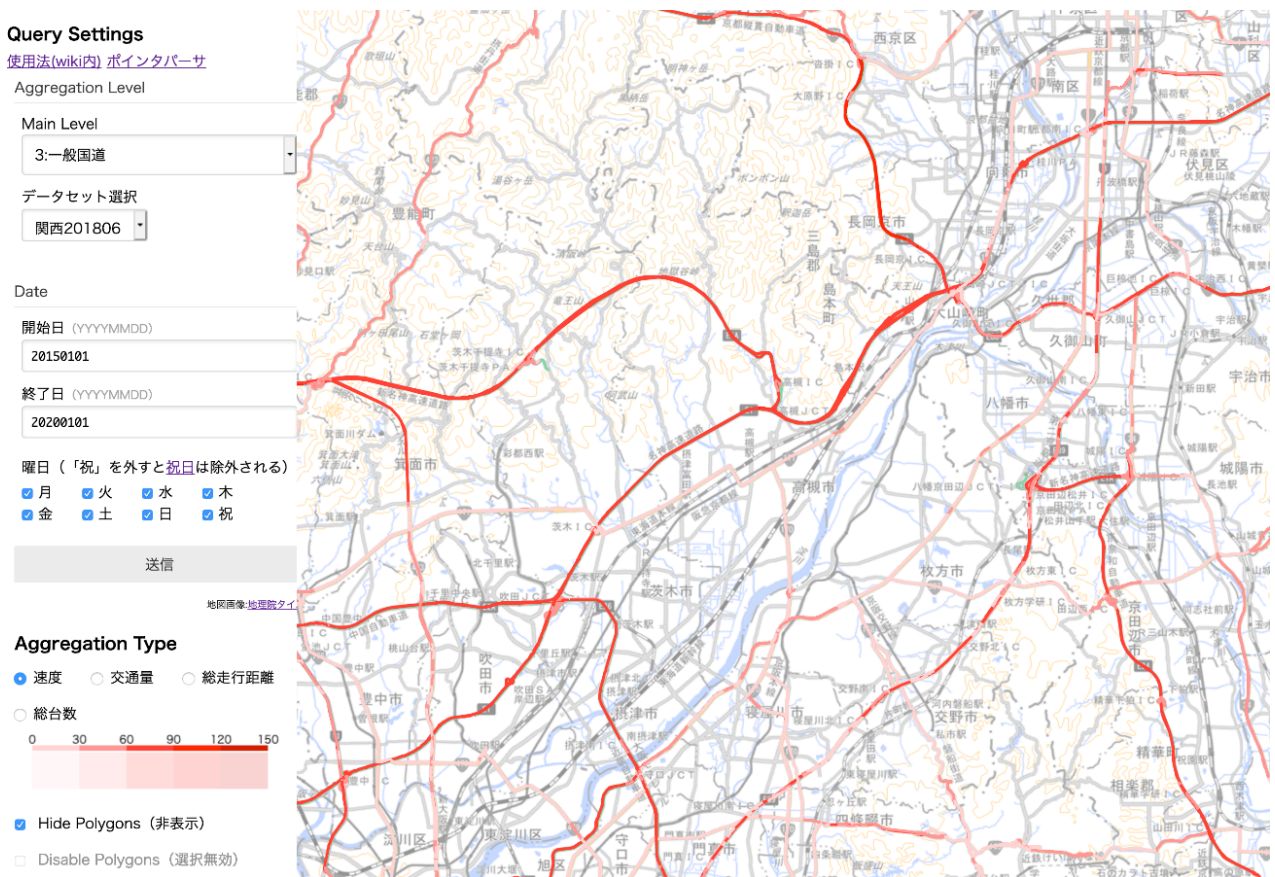


図-6.10 京阪間ネットワークの階層化データベースGUIによる表示

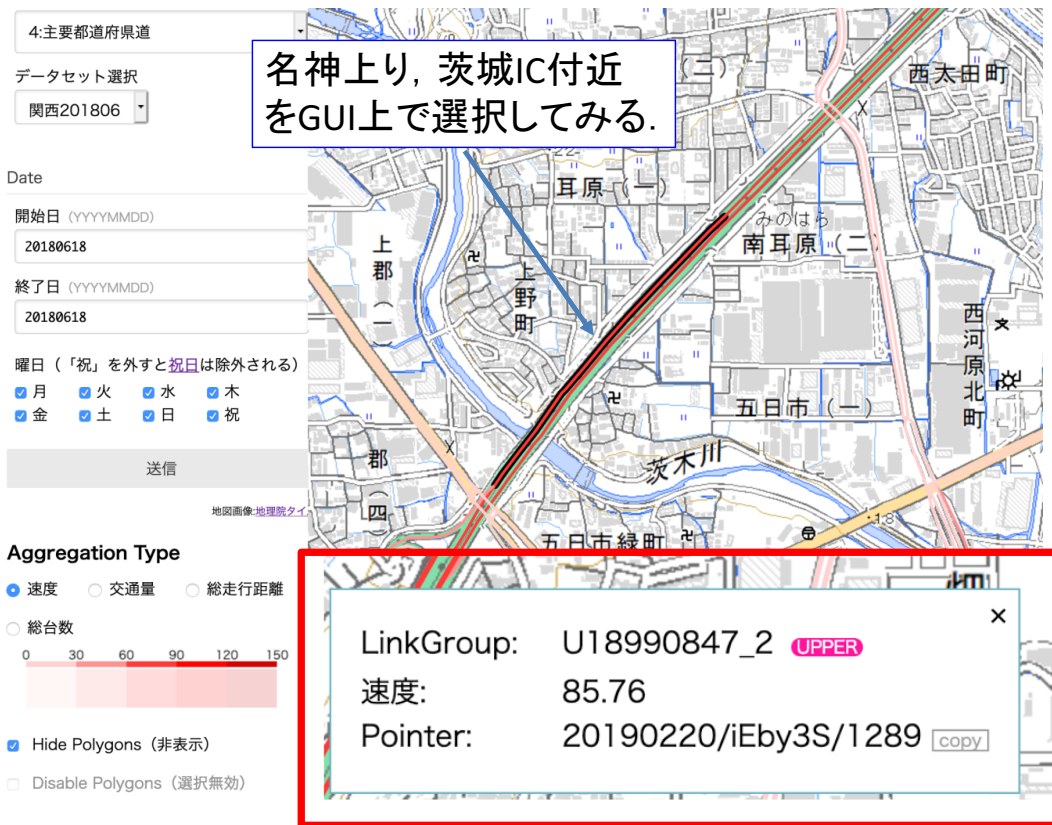


図-6.11 着目するリンクの選択状況

ETC2.0階層型DB ポインタパーサ

GUIで表示される集計リンクないし下位リンクへのポインタを1個以上入力値として受け取り、以下の処理のうちいずれかを行います。

- リンクデータをそのまま出力します
- 各リンクを走行する車両のIDTRIPを表示します

複数リンクがあるときには、以下のルールでIDTRIPを絞り込みます

- 全データ
- すべてのリンクを走行したIDのデータのみ (TRIPは区別)
- すべてのリンクを走行したIDTRIPのデータのみ

ポインタ入力フォーム

- ポインタ (例: 20190212/nifu6Q/162) を指定します。
- 異なるクエリIDのポインタを混在させることもできます。
- ポインタの後に:を入れると、続けてコマンドを入れることができます。複数指定可能 (ANDで適用されます)。
 - :ALLと入れると、そのリンク (上位でも下位でも) の含まれるメッシュ全部のデータが出力されます。
 - :Pxxと入れると、上位リンク内走行距離の割合がXX%以上のデータのみが抽出されます。
 - 距離が未登録の上位リンクではこのコマンドは機能しません(警告が出力されます)。
 - :Dxxと入れると、リンク内走行距離がXX(m)以上のデータのみが抽出されます。
 - :LOと入れると小型車のみ、L1と入れると大型車のみ抽出されます。



図-6.12 着目するリンクのポインタのポインタパーサへの入力状況

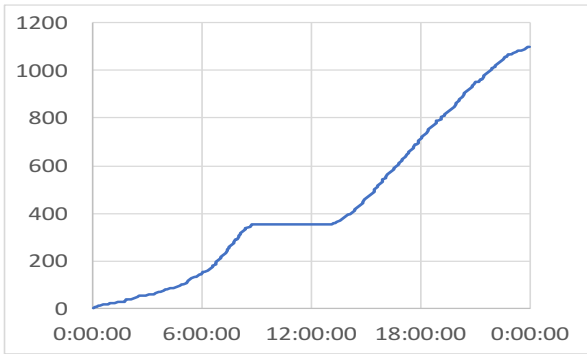


図-6.13 ポインタから取得したデータによる累積曲線
(横軸：時刻，縦軸：ETC2.0車両軌跡の累積台数)

-6.16 図-6.17 10

2 1 2 2 2

図-6.18

ID

2

2

図-6.19

図-6.14, 6-15

1 6 11 2018 6 18
171 GUI 208

2

IDTrip

IDTrip

3

図-6.20

QGIS

GUI

図

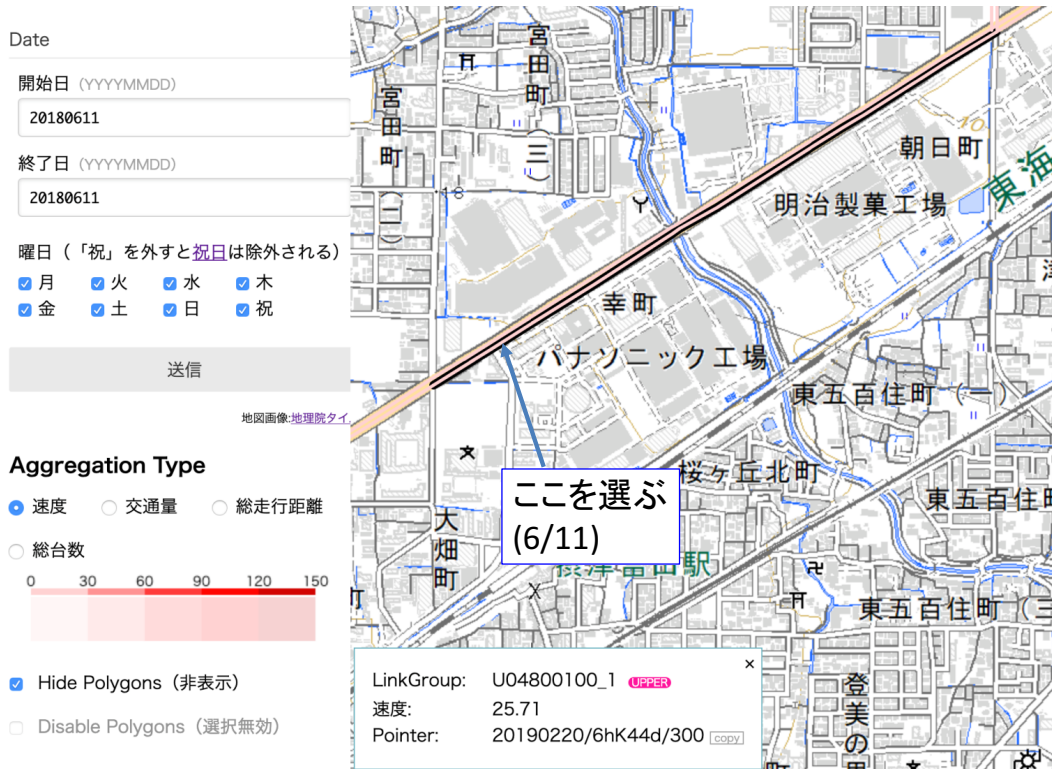


図-6.14 対象リンクの平均速度のGUIによる表示 (2018/6/11：平常時)

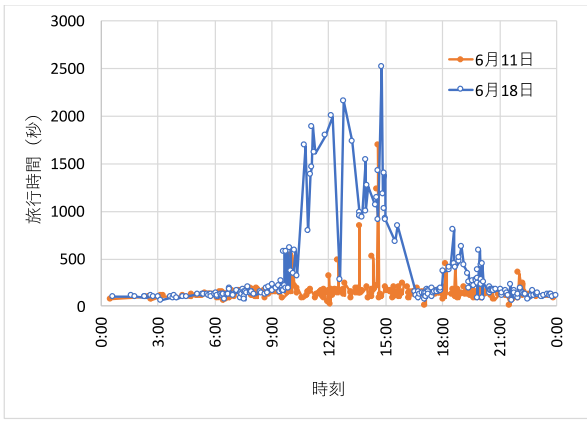


図-6.17 対象リンクの旅行時間比較

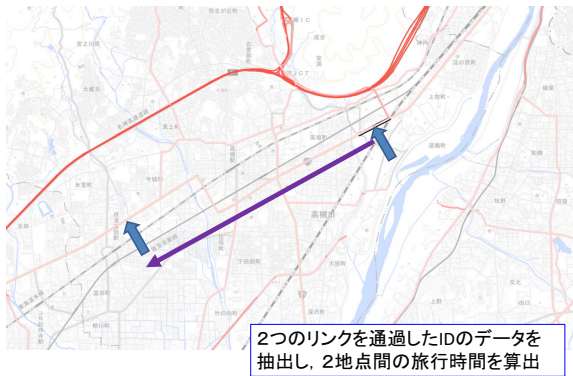


図-6.18 2リンクを通過したIDのデータを抽出

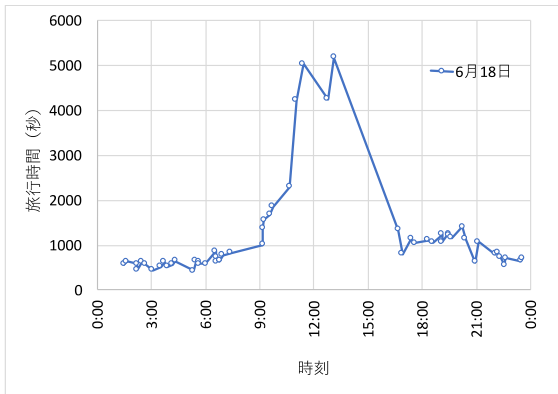


図-6.19 2地点間の旅行時間

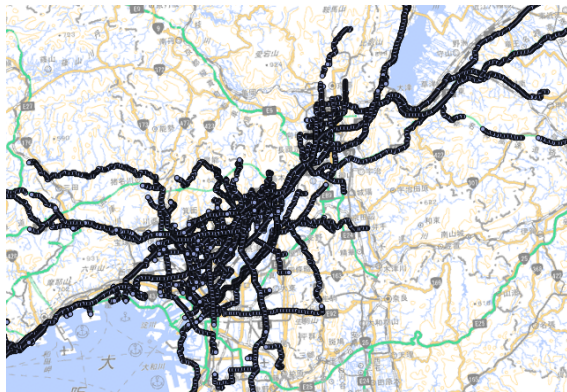


図-6.20 2地点間を通過した車両軌跡データの抽出結果

(2) 下位階層の活用のための集計QKを用いた分析

図-6.21 10 km 2
523594

QK 2018 6 18
QK Q 5

QK

K
5

図-6.22
5

Through_put
Accumulation

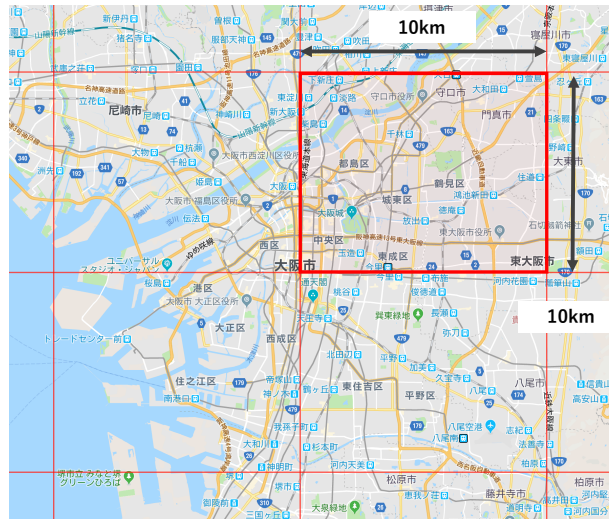


図-6.21 集計QKの分析対象エリア

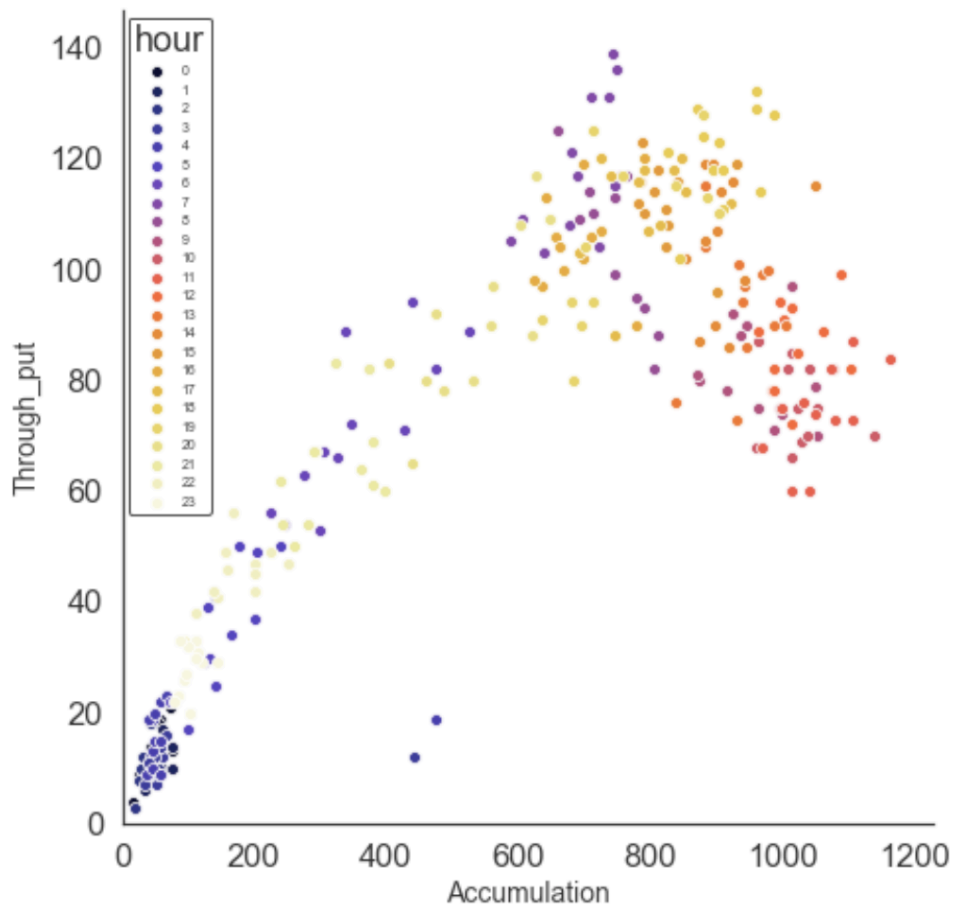


図-6.22 集計QK. 横軸：存在台数, 縦軸：5分あたりトリップ完了数

第7章 研究成果のまとめと今後の課題

本研究課題では、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を目指し、

- ▶ テーマ1：品質検証と改善
- ▶ テーマ2：集計操作の開発
- ▶ テーマ3：階層型データベースの実装とケーススタディの実施

の3つのテーマについて研究を行った。結果として、ほぼ当初想定通りの成果を得ることができた。

テーマ1「品質検証と改善」においては、ETC2.0プローブデータ、商用車プローブデータについて、各種の統計量を道路交通センサスのデータと比較して品質の評価を行い、特にサンプル率のバイアスについての問題点を指摘し、その原因についての整理を行った。また、車両軌跡データの品質検討と改善手法の検討のため、松山市においてETC2.0搭載車の実走調査を2種類行った。1つ目は、レンタカーおよび運転手を雇用し、事前に多数の目的地を設定し、それを運転手に指示して走行させた。このデータを用いてマップマッチングの評価と改善を行った。2つ目は、30台のモニター（一般ドライバー）に協力を依頼し、ETC2.0車載器とGPSロガーをモニターが運行する車両に搭載してもらい、それらが観測する位置情報を収集した。これにより、車両によってETC2.0による走行軌跡のサンプル率が大きく異なることを確認した。

テーマ2の「集計操作の開発」においては、まず、道路ネットワークや車両軌跡データのもつ強い不均一性の存在をデータの分析により確認した。そして、その特性を活用したネットワークの階層化と縮約の手法を開発した。ネットワークは道路種別にしたがって上位ネットワークと下位ネットワークに分割される。上位ネットワークの構造は縮約される。下位ネットワークはエリアに集約される。開発した手法はデータ量を70%以上削減できることを実際の

ETC2.0データを用いることにより示した。

テーマ3の「階層型データベースの実装とケーススタディの実施」においては、テーマ1と2で得た知見を活用しつつ、本研究課題の最終目標である階層型データベースの構築を行った。また、構築した階層型データベースを用いたケーススタディを行った。ケーススタディが示すように、本研究で実装した階層型データベースは、ETC2.0データをはじめとする車両軌跡データの活用に多大な威力を発揮する。これまでは圧縮ファイルの解凍だけでも多くの時間を要していた一次データから必要なデータを取得するだけでも多くの労力を必要としていた。今回実装した階層型データベースは、分析対象箇所をGUIにより視覚的かつ直感的に選定し、そこから簡便かつ迅速に分析対象となるデータを抽出することを可能とする。このことは各ケーススタディにおいて実例をもって示したとおりである。さらに、集約の際には車両を集約することは行わず、空間の集約だけを行うことにより、一次データへのアクセスを容易に可能にするという点も重要なポイントであると考えている。

階層型データベースは、車両軌跡データの抽出の効率性の飛躍的向上に加え、階層化のプロセスで行ったネットワークの集約そのものにも利用価値があることがケーススタディから明らかになった。複雑なネットワークをそのまま分析するのではなく、簡略化したり、あるいはエリアで集計してしまったりすることにより、大局的な特性の分析が可能となる。この点については、エリア単位の集計についてはすでに集計QKという形で知られているが、縮約された上位ネットワークも大局的な特性分析に有用であることを示した。以上のことは、一次データ（これは、圧縮して整理しておいたとしても、相当のサイズとなってしまふ）を伴わずとも、階層型データベ

ースの活用が可能であることを示す。このことは、データベースの可搬性を高めるという意味で非常に有用である。例えば高速道路会社のような上位ネットワークへの興味が大きい主体であれば、都市高速道路未満を下位層とした階層型データベースを保持しておけば、一次データへのアクセスが限定される状況でも、さまざまな分析が可能となると予想できる。地方整備局や国道事務所においても、国道の管理を中心とした分析が主であれば、国道未満を下位層とした階層型データベースを対象となる地方について準備しておけば、小回りのきく車両軌跡データ活用が可能となるであろう。

国土交通省道路局や各地方整備局等とのヒアリングを通じてテーマを設定し実施したケーススタディにより、ETC2.0 データの道路行政での活用可能性を様々な角度から示すことができた。サンプル率のバイアスの影響への注意は必要なものの、特に、その影響をあまりうけない分析（ITS スポットの設置密度が高い高速道路上の分析、サンプル率の変動の影響を受けづらい旅行時間分析、異常事象検知など）に対する活用可能性は高いといえる。また、バイアスの影響が想定される場合であっても、本研究で明らかにしたその性質に配慮し、必要に応じて外部データと連携することにより ETC2.0 データの活用は十分に可能であろう。

今後の課題について述べる。本研究で提案した手法は、そのほとんどの部分をマップマッチング処理に依存している。マップマッチング処理は、その品質の向上を試み、一定程度それに成功している。しかし、マップマッチング処理は非常に計算負荷および工数の大きい作業であり、道路管理者の迅速な活用（特にリアルタイムでの活用）の大きな障害となる。本研究では、ネットワークの集約において軌跡データの特徴を直接用いて集約されたリンクの方向を決めるデータオリエンテッド型の方法論を採用した。マップマッチングにおいても、DRM のような静的なデータへの依拠度を減らした、よりデータオリエンテッドな方法論が必要となろう。本研究で構築した GUI は、あくまでも階層型データベースの性能を評価し、その有用性を示すための仮実装であり、一般的なユーザを想定した実装にはなっていない（そもそも、もともとの研究計画においても、GUI の構築は直接の研究目標として組み込まれてはいない）。階層型データベースの実務への展開のためには、一般ユーザを想定したソフトウェアとしての GUI の構築が必要である。ただこの点は、交通工学の研究業務というよりは、むしろ研究成果の実務展開に必要なソフトウェア開発業務とみなすことが妥

当であろう。

以上の課題を解決すれば、本研究で提案した階層型データベースの実務展開の実現可能性はかなり高いと考える。提案した方法論の改良のためには、道路管理者等が実務において試用できるようにした上で、問題点や要望を整理することが望ましい。それにより、階層型データベースを用いた車両軌跡データの本格的な活用が実現することが期待できよう。

参考文献

- 1) 国土交通省, 平成22年度全国道路・街路交通情勢調査 (道路交通センサス) 一般交通量調査集計表, <http://www.mlit.go.jp/road/census/h22-1/>
- 2) 橋本浩良, 河野友彦, 門間俊幸, 上坂克巳, 交通円滑化対策のためのプローブデータの分析方法に関する研究, 国土技術政策総合研究所 道路研究部 道路研究室, 国土交通省国土技術研究会 2010.
- 3) 橋本浩良, 水木智英, 高宮進, プローブデータを利用したボトルネック交差点とその影響範囲の特定方法, 土木学会論文集 D3, 70 (5), I_1159-I_1166, 2014.
- 4) 水木智英, 橋本浩良, 門間俊幸, 上坂克巳, 中西雅一, 常時観測道路交通データを用いた渋滞状況の動的変化に関する分析～, ボトルネック交差点とその影響範囲の特定～, 土木計画学研究・講演集, 45, 2012.
- 5) 橋本浩良, 水木智英, 門間俊幸, 上坂克巳, 田名部淳, プローブデータを用いた交差点における交通動向分析のケーススタディ, 土木計画学研究講演集, 45, CD-ROM, 2012.
- 6) 丹下智之, 廣森聡仁, 梅津高朗, 山口弘純, 東野輝夫. 車両プローブ情報に基づく信号待ち車列長変動の分析モデル, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム2014論文集, 1751-1759, 2014.
- 7) 大畑長, 桑原雅夫, プローブ車両軌跡データのみを用いた停止領域の推定手法に関する研究, 土木計画学研究講演集, 45, CD-ROM, 2012.
- 8) 瀬尾亨, 日下部貴彦, 朝倉康夫, 車間距離を計測するプローブカーを前提とした交通状態の推定手法, 土木学会論文集 D3, 69 (5), I_809-I_818, 2013.
- 9) 三輪富生, 山本俊行, 竹下知範, 森川高行, プローブカーの速度情報を用いた動的OD交通量の推定可能性に関する研究, 土木計画学研究論文集, 64 (2), 252-265, 2008
- 10) 伏木匠, 岸野清孝, 山根憲一郎, 横田孝義, 権守直彦, 石田康, 伊藤彰朗, プローブカーを利用した交通情報予測方式の検討, 情報処理学会論文誌, 43(12), 3801-3808, 2002.
- 11) 菊地春海, 岡田朝男, 水野裕彰, 絹田裕一, 中村俊之, 萩原剛, 牧村和彦, 道路交通安全対策事業における急減速挙動データの活用可能性に関する研究, 土木学会論文集 D3, 68(5), I_1193-I_1204, 2012.
- 12) 清水和弘, 岡村敏之, 中村文彦, 王鋭, 生活道路における街路特性や沿道特性が走行速度に及ぼす影響に関する研究, 土木学会論文集D3, 68(5), I_1237-I_1242, 2012
- 13) 増本裕幸, 宇野伸宏, 山崎浩気, 亀岡弘之, 山本浩司, 山本隆. ETC2.0 プローブ情報を用いた都市間高速道路における速度低下に関する分析. 交通工学論文集, 3(4), A_74-A_83, 2017.
- 14) 谷村亮介, 廣森聡仁, 梅津高朗, 山口弘純, 東野輝夫, 気象状況とプローブカーデータの解析に基づく積雪都市における OD 旅行時間分布の予測手法. マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2016 論文集, 2016, 624-630, 2016.
- 15) 瀬尾亨, 日下部貴彦, 朝倉康夫, 車両軌跡に基づく流量密度関係の推定法—基本的な枠組みと数値実験. 交通工学論文集, 2(2), A_1-A_10, 2016.
- 16) 和田健太郎, 小林桂子, 桑原雅夫, プローブ車両軌跡データのみを用いた交通の量的把握. 生産研究, 67(2), 143-147, 2015.
- 17) 日下部貴彦, 牛木隆匡, 朝倉康夫, 衝撃波速度を用いたプローブカーデータによる突発事象検出手法. 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 71(5), I_827-I_837, 2015.
- 18) 樋口彰, マルチエージェントシミュレーションによる拡張プローブカーデータを用いた局所交通現象の分析. 京都大学修士論文, 2015.
- 19) 秋山高行, 大橋洋輝, 山本正明, 佐藤暁子, O-012 カープローブデータによる渋滞ボトルネック検出方式の提案と評価 (O 分野: 情報システム, 一般論文). 情報科学技術フォーラム講演論文集, 13(4), 325-330, 2014.
- 20) 三輪富生, 森川高行, プローブカーデータを用いたドライバの選択経路データの収集と分析, 交通工学, 39 (2), 49-56, 2004.
- 21) 内田佳希, 都心部における道路プローブの適用に関する課題と解決法に関する一考察, 平成27年度近畿地方整備局研究発表会論文集 (新技術・新工法部門), 2015
- 22) 平井章一, 甲斐慎一郎, 堀口良太, 宇野伸宏, ETC2.0 プローブデータを活用した都市間高速道路における休憩行動実態把握. 交通工学論文集, 3(4), A_36-A_45, 2017.
- 23) 三好孝明, 長谷川栄一, 田中伸治, ETC2.0プローブ情報を活用したパーキングエリア利用状況の試行的分析. 交通工学論文集, 3(2), B_6-B_12, 2017.
- 24) 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, 20, 923-929, 2003.
- 25) 関谷浩孝, 諸田恵士, 高宮進. プローブ旅行時間データの取得状況と旅行時間信頼性指標値の信頼度との関係, 土木学会論文集 D3, 70 (5), I_559-I_568, 2014.
- 26) 堀場庸介・松本幸正・松井寛・黒川卓司, サンプリングと観測誤差がプローブデータに基づく経路交通量推定値に与える影響, 土木計画学研究講演集, 30, CD-ROM, 2004.
- 27) 堀場庸介, 松本幸正, 松井寛, 高橋政稔, プローブデータに基づく推定経路交通量への観測誤差の影響分析と推定交通量の更新手法, 土木計画学研究論文集, 22(3),

- 495-505, 2005.
- 28) 王立暁, 姜美蘭, 山本俊行, 森川高行, プローブカーデータとVICSデータの融合による旅行時間推計に関する研究, 土木計画学研究論文集, 23, 1011-1018, 2006.
- 29) 三谷卓摩, 羽藤英二, パーティクルフィルタを用いた空間データの自動作成法, 土木計画学研究講演集, 40, 2009.
- 30) 坂本勇太, 南部繁樹, 財津陽亮, 赤羽弘和, 大野直輝, 路線バスの法定プローブデータを活用した交通状況の推定. 交通工学論文集, vol.3(4), pp. A_7-A_14, 2017.
- 31) 原祐輔, 花岡洋平, 桑原雅夫, 道路ネットワーク内の関係性に着目した長期観測プローブデータによるプローブ未観測リンクの交通状態補間. 交通工学論文集, 2(1), 1-10, 2016.
- 32) 坂本勇太, 松尾春香, 財津陽亮, 赤羽弘和, バスロケーションシステムデータとデジタルタログラフデータによる一般車両の走行軌跡推定, 交通工学研究発表会論文集, 34, 293-296, 2014.
- 33) 松中亮治, 谷口守, 端戸裕樹, バスプローブデータを用いた一般車両走行速度の推計方法に関する研究, 土木計画学研究・論文集, 23, 871-877, 2006.
- 34) 村上則男, 宇野伸宏, 飯田恭敬, 中川真治, 所要時間変動評価を目指したバスプローブデータ補正方法, 土木計画学研究・講演集, 30, 286, 2004.
- 35) 宇野伸宏, 永廣悠介, 飯田恭敬, 田村博司, 中川真治, バスプローブデータを利用した所要時間信頼性評価手法の構築, 土木計画学研究・論文集, 23, 1019-1028, 2006
- 36) 横田孝義, 貨物車のプローブデータ処理による都市高速道路の利用有無と旅行速度の異方性の評価, 土木学会論文集D3, 68 (5), I_649-I_657, 2012.
- 37) 玉川大, 横田孝義, 前川和彦, 河本一郎プローブデータおよびETCデータを活用した都市内定期集配送車両の行動特性に関する分析, 土木学会論文集 D3, 67 (5), I_715-I_726, 2011.
- 38) 田中康仁, 小谷通泰, 中村賢一郎, プローブデータを用いた都心部の貨物車による配送活動の分析, 第30回土木計画学研究発表会・講演集, 30, 347-350, 2004.
- 39) 田中康仁, 小谷通泰, 中村賢一郎, プローブデータを活用した貨物車による配送活動の実態分析, 土木計画学研究・論文集, 30, 715-722, 2005.
- 40) 金進英, 桑原雅夫, 花房比佐友, 今井武, 集計観測データを用いた交通避難シミュレーションの検証, 土木計画学研究発表会・講演集, 47, CD-ROM, 2013.
- 41) 門間俊幸, 橋本浩良, 上坂克巳, 酒井大輔, 丹下真啓. プローブデータを用いた震災直後の都内の道路サービス状況の分析, 土木計画学会研究発表会・講演集, 44, 2011.
- 42) 長尾一輝, 大畑長, 柿元祐史, 花房比佐友, 二上洋介, 江藤和昭, 桑原雅夫. 大規模地震時における自動車避難行動を考慮した避難施策の評価, 土木学会論文集 D3, 71(5), I_53-I_68, 2015.
- 43) 清田裕太郎, 岩倉成志, 野中康弘, 東日本大震災時の都区道路のグリッドロック現象に関する基礎的考察, 土木計画学研究発表会・講演集, 46, CD-ROM, 2012.
- 44) 秦康範, 鈴木猛康, 下羅弘樹, 目黒公郎, 小玉乃理子, 新潟県中越沖地震における通れた道路マップの提供とプローブカー情報の減災利用実現に向けた課題と展望, 日本地震工学会論文集, 9(2), 148-159, 2009.
- 45) Comert, G. and Cetin, M., Analytical evaluation of the error in queue length estimation at traffic signals from probe vehicle data, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 12(2), 563-573, 2011.
- 46) Comert, G., Effect of stop line detection in queue length estimation at traffic signals from probe vehicles data, European Journal of Operational Research, 226(1), 67-76, 2013.
- 47) Herring, R., et al., Estimating arterial traffic conditions using sparse probe data, 2010 13th, International IEEE Conference on. IEEE, 929-936, 2010.
- 48) Hunter, T., et al, Path and travel time inference from GPS probe vehicle data, NIPS Analyzing Networks and Learning with Graphs, 12(1), 2009.
- 49) Chen, M. and Hien, S., Dynamic freeway travel time prediction using probe vehicle data link-based vs. path-based, In: Transportation Research Board 80th Annual Meeting, 2001.
- 50) Jenelius, E. and Koutsopoulos, H. N., Travel time estimation for urban road networks using low frequency probe vehicle data, Transportation Research Part B: Methodological, 53, 64-81, 2013.
- 51) Jenelius, E. and Koutsopoulos, H. N., Probe vehicle data sampled by time or space: Consistent travel time allocation and estimation, Transportation Research Part B: Methodological, 71, 120-137, 2015.
- 52) Gühneemann, A., Schäfer, R.-P., Thiessenhusen, K.-U., and Wagner, P., Monitoring traffic and emissions by floating car data, Working paper, ITS-WP-04-07, Institute of Transport Studies, 2004.
- 53) Feng, Y., Hourdos, J., and Davis, G. A., Probe vehicle based real-time traffic monitoring on urban roadways, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 40, 160-178, 2014.
- 54) Hellinga, B., Izadpanah, P., Takada, H., Fu, L., Decomposing travel times measured by probe-based traffic monitoring systems to individual road segments. Transportation Research Part C: Emerging Technologies,

- 16(6), 768-782, 2008.
- 55) Wang, Y., Zheng, Y., Xue, Y., Travel time estimation of a path using sparse trajectories, Proceedings of the 20th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, pp.25-34, 2014.
 - 56) Fusco, G., Colombaroni, C., Natalia Isaenko, Short-term speed predictions exploiting big data on large urban road networks, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.73, pp.183-201, 2016.
 - 57) Wang, X., Fan, T., Li, W., Yu, R., Bullock, D., Wu, B., Tremont, P., Speed variation during peak and off-peak hours on urban arterials in Shanghai, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 67, pp.84-94, 2016.
 - 58) A. Pascale, F. Deflorio, M. Nicoli, B. Dalla Chiara, M. Pedroli, Motorway speed pattern identification from floating vehicle data for freight applications, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.51, pp.104-119, 2015.
 - 59) Zheng, F., Zuylen, H., Urban link travel time estimation based on sparse probe vehicle data, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.31, pp.145-157, 2013.
 - 60) Nanthawichit, C., Nakatsuji, T., and Suzuki, H., Application of probe vehicle data for real-time traffic state estimation and short-term travel time prediction on a freeway transportation research record, Journal of the Transportation Research Board, 1855, 49-59, 2003.
 - 61) Herring, R. J., Real-time traffic modeling and estimation with streaming probe data using machine learning, Ph.D. Thesis, UC Berkeley, 2010.
 - 62) Zhang, W., Xu, J., and Wang, H., Urban traffic situation calculation methods based on probe vehicle data, Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 7(1), 43-48, 2007.
 - 63) Zhu, Y., et al., A compressive sensing approach to urban traffic estimation with probe vehicles, IEEE Transactions on Mobile Computing, 12(11), 2289-2302, 2013.
 - 64) Zhao, Q., et al., Sample size analysis of GPS probe vehicles for urban traffic state estimation, In: 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE, 272-276, 2011.
 - 65) Qiu, T., et al., Estimation of freeway traffic density with loop detector and probe vehicle data, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2178, 21-29, 2010.
 - 66) Sunderrajan, A., Viswanathan, V., Cai, W., Knoll, A., Traffic state estimation using floating car data. Procedia Computer Science, 80, 2016.
 - 67) Du, J., Rakha, H., Vikash V. Gayah, Deriving macroscopic fundamental diagrams from probe data : Issues and proposed solutions, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.66, pp.163-149, 2016.
 - 68) Asakura, Y, Kusakabe, T., Nguyen, L., Ushiki, T., Incident detection methods using probe vehicles with on-board GPS equipment, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.81, pp.330-341, 2017.
 - 69) Yang, H., Wang, Z., Xie, K, Dai, D., Use of ubiquitous probe vehicle data for identifying secondary crashes, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.82, pp.138-160, 2017.
 - 70) Mei, Y., Tang, K, Li, K., Real-time identification of probe vehicle trajectories in the mixed traffic corridor, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.57, pp.55-67, 2015.
 - 71) Rahmani, M., Jenelius, E., Koutsopoulos, H., Non-parametric estimation of route travel time distributions from low-frequency floating car data, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.58, pp.343-362, 2015.
 - 72) Hall, R., and Vyas, N., Buses as a traffic probe demonstration project, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1731, 96-103, 2000.
 - 73) Bejan, A. I., and Gibbens, R. J., Evaluation of velocity fields via sparse bus probe data in urban areas, In: 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE, 746-753, 2011.
 - 74) Sethi V., et al., Arterial incident detection using fixed detector and probe vehicle data, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 3(2), 99-112, 1995.
 - 75) El Faouzi, N., Leung, H., and Kurian, A., Data fusion in intelligent transportation systems: Progress and challenges – A survey, Information Fusion, 12(1), 4-10, 2011.
 - 76) Tong, D., Merry, C. J., and Coifman, B., Traffic Information deriving using GPS probe vehicle data integrated with GIS center for urban and regional analysis and department of geography. The Ohio State University. Ohio, USA.[Links], 2005.
 - 77) Mandal, K., et al., Road traffic congestion monitoring and measurement using active RFID and GSM technology, In: 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 1375-1379, 2011.
 - 78) Hunter, T., Abbeel, P., and Bayen, A. M., The path inference filter: model-based low-latency map matching of probe vehicle data, In:Algorithmic Foundations of Robotics X. Springer Berlin Heidelberg, 591-607, 2013.
 - 79) Dia, H. and Thomas, K., Development and evaluation of arterial incident detection models using fusion of simulated

- probe vehicle and loop detector data, *Information Fusion*, 12(1), 20-27, 2011.
- 80) Xuan, Y. and Coifman, B., Lane change maneuver detection from probe vehicle DGPS data, In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference.*, 624-629, 2006.
- 81) Furtlehner, C., Lasgouttes, J.M., De La Fortelle, A., A belief propagation approach to traffic prediction using probe vehicles, *Proceedings of 10th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp.1022-1027, 2007.
- 82) Wan, N., Vahidi, A., Luckow, A., Reconstructing maximum likelihood trajectory of probe vehicles between sparse updates, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.65, pp.16-30, 2016.
- 83) Ran, B., Song, L., Zhang, J., Cheng, Y., Tan, H., Using tensor completion method to achieving better coverage of traffic state estimation from sparse floating car data. *Plos one*, 11(7), e0157420, 2016.
- 84) Donovan, B., Work, D., Empirically quantifying city-scale transportation system resilience to extreme events, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.79, pp.333-346, 2017.
- 85) Kim, J., Mahmassani, H., Spatial and temporal characterization of travel patterns in a traffic network using vehicle trajectories, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.59, pp.375-390, 2015.
- 86) Rahmani, M., Koutsopoulos, H., Path inference from sparse floating car data for urban networks, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.30, pp.41-54, 2013.
- 87) 朝倉康夫, 羽藤英二, 大藤武彦, 田名部淳, PHSによる位置情報を用いた交通行動調査手法. *土木学会論文集*, 653/IV-48, pp. 95-104, 2000.