

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究終了報告書】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)		所属		役職	
	布施 孝志 (ふせ たかし)		東京大学大学院 工学系研究科		教授	
②研究 テーマ	名称	学習型モニタリング・交通流動予測に基づく観光渋滞マネジメントについての研究開発				
	政策 領域	[主領域] AIを活用した交通分析・予測 ・マネジメント手法の開発		公募 タイプ	IV	
		[副領域]				
③研究経費 (単位:万円)	平成30年度	令和元年度	令和2年度	総合計		
※端数切り捨て。実際の研究期間に応じて記入欄を合わせる こと	3,050	3,066	2,582	8,698		
④研究者氏名	(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)					
氏名	所属・役職 (※令和3年3月31日現在)					
福田 大輔	東京大学 工学系研究科 教授					
円山 琢也	熊本大学 くまもと水循環・減災研究センター・准教授					
市村 強	東京大学 地震研究所・教授					
村上 大輔	統計数理研究所 データ科学研究系・助教					
瀬尾 亨	東京大学 工学系研究科・助教					
田名部 淳	(株)地域未来研究所 交通情報研究室・室長					
⑤研究の目的・目標	<p>学習型の交通状態モニタリング・予測手法、および両者の統合手法により、エリア内の交通流動を改善するための適応型交通需要マネジメントに関する研究・技術開発を行う。また、提案手法を観光交通イノベーション地域等でのデータに適用し実効性を確認する。具体的には、以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・テーマ1：学習型モニタリングシステムの構築 <p>定点型・移動型観測データによる車・人の認識や交通状態モニタリングの手法を開発し、それらを統合したモニタリングシステムを構築する。さらに予測システムとの連携を図る。</p>					

・テーマ2：交通状態予測システムの構築

モニタリングシステムで得られたデータを活用して、エリア内における車・人の交通状態・渋滞発生を予測する機械学習ベースの交通行動モデルを構築する。

・テーマ3：モニタリング・予測に基づくエリア内の交通流動マネジメントスキームの構築

前2テーマを踏まえつつ、旅行時間や交通量等のモニタリング情報と予測を考慮し、課金制度等の適応型エリア内交通流動マネジメントのためのスキームを検討する。

・テーマ4：テーマ間連携のための基盤技術の開発

各テーマで得られる異種情報を融合した交通状態補間手法を開発するとともに、全テーマを包括的に検討するための解析基盤を開発する。

⑥これまでの研究経過・目的の達成状況

テーマ1:学習型モニタリングシステムの構築

車・人の移動観測に資する手法に関しての最新動向を調査・整理し、定点カメラ、GNSS、Wi-fi、衛星を対象として特定した。全ての対象に対して、データ同化に基づく統一적アプローチによるモデル開発を行った。定点カメラによる車・人の認識・追跡に対して、観測モデルに畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を導入したモデルを開発し、物体数・追跡の同時推定手法への拡張を行った。次に、GNSSとWi-fiデータを統合し、保存則に基づくメッシュ単位での滞在人数・移動人数の同時推定モデルを開発した。また、パラメータをリカレントニューラルネットワーク（RNN）により推定する手法への拡張を行った。さらに、超小型衛星を見据え、深層学習による車両密度推定手法、高分解能・高画質化手法の開発を行った。いずれの手法においても、実データへの適用を通して、その有効性が確認された。

[H30] 学習型モニタリングの基礎モデルの構築

[R1] 学習型モニタリング手法の拡張

[R2] 学習型モニタリングシステムの検証および改良

テーマ2:交通状態予測システムの構築

鎌倉市中心部における車両の時間的な集中度合いを短期（30～90分後）で予測するための深層学習による分析枠組みを構築した。交通量等のデータは、時間方向に強い依存性を持つ時系列データであるため、深層学習において時系列データの予測に適しているモデルであるLSTM（Long Short-Term Memory）をベースとした。入力データの検討も行い、鎌倉市中心部に位置する下馬交差点とそこへ繋がる周辺部複数地点の交通量や走行速度、降水量、市内で開催されるイベントの有無等を入力データとした。実データに対して、季節ごとに設定したモデルの予測精度、降水量や社会イベントの影響、混雑時期の予測精度に関して検証を行い、車両流入が多い時間帯において、誤差率が低くなることを確認した。

[H30] AIベースでの交通状態予測の基礎モデルの検討

[R1] 日常・非日常を考慮した予測システムの拡張

[R2] 学習型予測システムの検証および改良

テーマ3: モニタリング・予測に基づくエリア内交通流動マネジメントスキームの構築

前述のテーマ1, 2を考慮した動的課金の枠組みの整理を行い、基本トレンド（季節、平休日、時間帯等）に基づくベース課金と、リアルタイム観測情報に基づく課金調整に大別した。トレンド・ベースのベース課金においては、時間帯別需要変動型利用者均衡配分が有効と考えられ、課金による需要の変化を考慮できるモデルへ展開した。さらに、動的な混雑現象を表現するボトルネックモデルによる分析も行った。鎌倉市内へのコードン課金施策を対象とした試算結果からは、(1) ピーク時間帯の最適課金額が高く、課金による社会的余剰の改善も高いこと、(2) 夜間は無課金とすることが望まれること、(3) 需要弾力性が高いほど最適化金額は高く、余剰改善も大きいこと、などの知見を得た。リアルタイム観測情報による課金調整においては、トライ&エラーによる課金調整に対して強化学習を導入した手法を開発した。開発手法を、実験経済学の方法論に基づく室内実験を実施し、その性能を検証した。

[H30] 学習型モニタリング・交通状態予測に基づくエリア内の交通流動マネジメントの検討

[R1] 課金およびリアルタイム観測情報に関するマネジメントルールの算出

[R2] 試行を通じたスキームの改良

テーマ4: テーマ間連携のための基盤技術の開発

テーマ1, 2で推定された情報は、いずれもその特性が異なる。また、観測データが得られない部分での状態推定も必要になる。各種情報を融合し、任意リンクにおける補間をするための動的時空間モデルを開発した。説明変数として携帯GNSSデータ、日別メッシュ人口密度を用いて、任意地点・時点の交通量予測を行い、十分な精度があることを検証した。さらに、モニタリング、予測、補間において得られるリンク上での交通状態から、リアルタイムに個別車両の行動等を推定する手法を開発した。ここでは、データ同化の導入を進め、観測データとシミュレーションの差異を効率的に解消するための深層学習を用いた大規模解析に基づく最適化手法を開発した。開発手法を、OD逆推定問題に対して適用し、手法の有効性を確認した。

[H30] 空間統計に基づく基礎モデルと解析基盤プロトタイプ構築

[R1] 時空間統計モデルとデータ同化・深層学習による解析基盤への拡張

[R2] 時空間統計モデルと解析基盤の検証および改良

⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

1年目の指摘事項および対応【指摘1】

【指摘1】交通状態モニタリングシステムおよび交通流動予測システムと、交通流動マネジメントとの関係性を明らかにするとともに、これらを連携させ、一体化した枠組みを明確に示していただきたい。このために必要であれば、研究計画を修正いただきたい。

【対応】研究全体の枠組みを再構成した（⑧研究成果の図1）。また、交通流動マネジメントにおける各課金パターンに対して、モニタリングおよび予測から得られる関係を、インプットおよびパラメータの視点から整理した。さらに、全テーマにわたって、機械学習を基礎手法に据えることにし、研究テーマの政策領域に整合性のある内容とした。

【指摘2】研究対象としている鎌倉の道路交通は、他都市とは異なる性格を有しているため、開発し

ているシステムの汎用性について確認することが望ましい。

【対応】本研究で構築した手法について、汎用性に関する整理を行った。今回構築したモニタリング・予測手法、およびテーマ間連携の手法は、一般的に利用可能なデータを基本にしているため、汎用性の高いものと言える。ただし、コードン課金については、その領域等の設定が異なるため、他都市へ適用する場合には、都市ごとの特徴を考慮する必要がある。

【指摘3】エリア内課金など、観光渋滞マネジメント施策につながる実務上有益な示唆が得られることを大いに期待する。

【対応】鎌倉市内での試算を行い、(1) ピーク時間帯の最適課金額が高く、課金による社会的余剰の改善も高いこと、(2) 夜間は無課金とすることが望まれること、(3) 需要弾力性が高いほど最適化金額は高く、余剰改善も大きいこと、等の知見を得た。

2年目の指摘事項および対応

【指摘4】個別研究項目それぞれ、さらには一連の研究全体について、しっかりと成果をまとめること。その際、「交通状態補間」や「解析基盤」について、その位置付けや効果、価値を合わせて説明すること。

【対応】交通状態補間により、任意地点・時点の交通状態を把握することが可能である。また、どの変数が推定に有意であるかを確認できるため、例えば、予測における変数選択にも用いることができる。解析基盤においては、OD推定への適用を行ったが、これにより、課金計算において用いるインプットとして、観測されていないODも用いることができるようになる。これらの有効性も確認した。

【指摘5】テーマ3の交通流動マネジメントスキームの構築がシミュレーション実験にとどまるようなら、テーマ1をより充実させ、テーマ1に焦点を当てた研究計画とすることも検討すること。

【対応】リアルタイム観測情報による混雑課金において、実験経済学の方法論に基づく室内実験を行った。実験のためのスマホアプリを開発し、100名程度の被験者に対して、100日分の実験を行った。実験結果から、日数の経過に伴って社会的余剰が増加するとともに、出発時間が分散していき、課金手法として混雑を解消していけることを確認した。

【指摘6】鎌倉観光渋滞の実態を十分に勘案しつつ、検討を進めること。特に、今年度は車の流動に着目しているが、人の交通量が車の渋滞に大きく影響を与えているところが鎌倉の特色とも考えられるため、留意して研究を進めること。

【対応】モニタリング手法として、固定カメラからの人物密度推定手法を開発するとともに、GNSS・Wi-fiの統合により人の移動状況を推定できる手法を開発した。また、予測手法においても、人の混雑度を導入可能な枠組みに改良した。

⑧研究成果

まず、本研究の全体像を図1において示し、各テーマ間の関係を明確化する。その後、テーマごとの研究成果を示す。

テーマ1: 学習型モニタリングシステムの構築

1-1 観測手法別にみたデータ特性の整理

車・人の移動観測に資する観測手法に関して国内外の研究および実務の最新動向を調査し、観測機

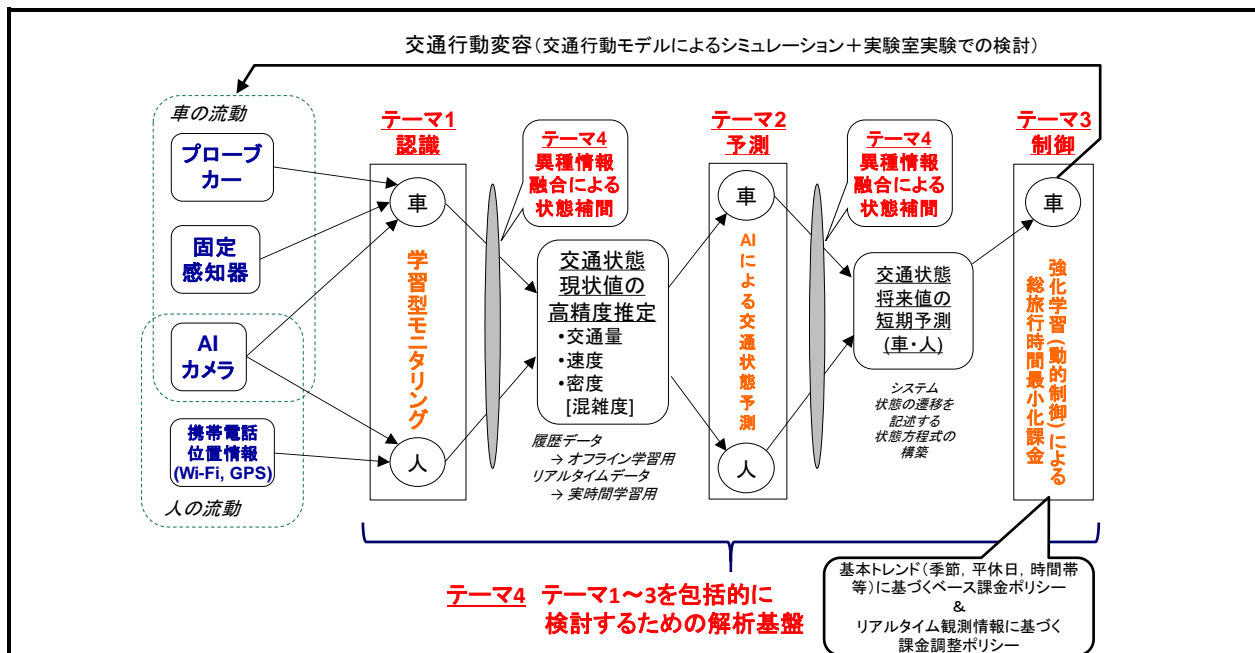


図1 研究の全体像

器やデータ特性について整理を行った。その上で、定点カメラ、GNSS、Wi-fi、衛星を本研究で対象とする観測手法として特定した。また、以下に示す通り、全ての対象に対して、データ同化に基づく統一のアプローチによるモデル開発の可能性を確認した。

1-2 定点カメラを用いた車・人の認識・追跡モデルの開発

定点カメラから得られる動画像に対して、車・人の軌跡取得のための認識・追跡のためのモデルを開発した。これは、データ同化を基本的な枠組みとしている。本研究では、深層学習の一種である畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: CNN) を組み込んだモデルを開発した。CNNとして、画像認識分野で高い評価を得ているInception-v3のネットワーク構造をベースに、転移学習により車両認識・人物認識それぞれに対するモデルを構築し、初期値設定(検出)および観測モデルへ導入した。それぞれの観測モデルで高い認識性能を示した(図2, 3)。各認識モデルを導入したデータ同化手法の解法として、パーティクルフィルタによる逐次推定手法を実装した。鎌倉に設置された定点カメラの実データに対して適用し、その有効性を確認した。



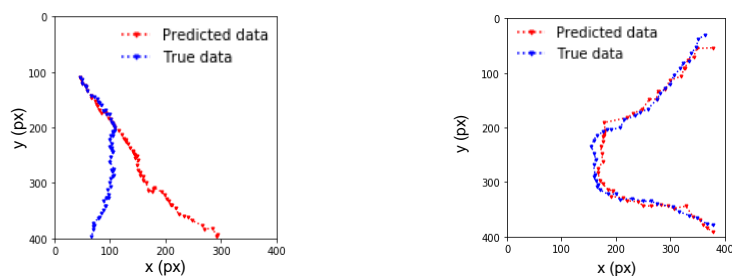
図2 車両認識モデルに基づく車両確率



図3 人物認識モデルに基づく人物確率

車の認識・追跡の基礎モデルに対して、その頑健性を検証するために、長時間の画像への適用と精度検証を行った。鎌倉に設置された8箇所の定点カメラに対して、約1週間分の動画画像に提案手法を適用し、誤差10%程度の認識率を確認した。最終的には3ヶ月分の解析を実施した。また、テーマ2の予測に利用するために、画像内の混雑度の指標を新たに定義し、その自動処理手法を構築した。これにより、定点カメラ画像から、断面交通量、速度、混雑度の推定が可能になった。

人の認識・追跡の基礎モデルにおいては、人の移動の複雑性、および追跡対象数の増加による計算量の増加が課題となっていた。これに対し、PHD (Probability Hypothesis Density : 確率仮説密度) に基づくフィルタをモンテカルロ実装した。PHDフィルタにおいては、対象物体を個別に追跡するのではなく、追跡対象数も推定し(追跡対象の出現・消失をモデルに導入)、複数対象の同時追跡を行う。これにより、人物間の相互作用を考慮した追跡精度の向上(位置精度は2倍に向上)、さらに同時追跡による計算量の抑制を行うことが可能になった(図4)。



(a) 改良前 (PHDなし) の適用結果例 (b) 改良後の適用結果例

図4 PHDによる改良手法の適用結果例

さらに、人物密度推定手法を開発し、それにより低品質な動画画像であっても人流推定に活用できるようにすることを目指した。提案手法は、個別の歩行者を追跡するのではなく、画像に含まれる人物数を深層学習により直接推定し、人物密度を推定するものである。鎌倉に設置された固定カメラ画像に適用し、その有効性を確認した(図5)

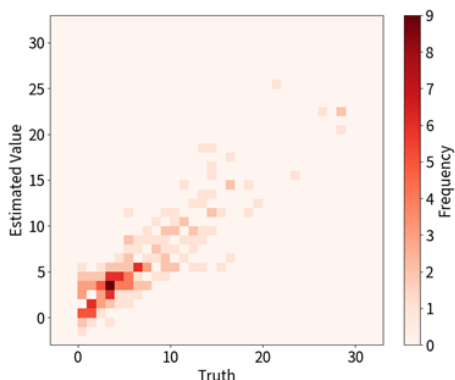


図5 人物密度推定の適用結果例

1-3 GNSS・Wi-fiデータを用いたメッシュ滞在人数・移動人数の同時推定モデルの開発

移動軌跡が取得可能であるがサンプル数が少ないGNSS（携帯GPS），および多数のサンプルが取得可能であるが移動軌跡が取得困難であるWi-fiを統合した，メッシュ単位での滞在人数と隣接メッシュへの移動人数の同時推定モデルを開発した．新規性として，観測ベクトルとしてのGNSSとWi-fiデータを統合していること，および滞在人数に加えてメッシュ間移動人数の同時推定を行うことが挙げられる．本モデルも，データ同化を基本的な枠組みとしている．全メッシュの滞在人数・移動割合を状態ベクトルとし，システムモデルにメッシュごとの保存則を適用した．提案手法をシミュレーションデータに適用し，有効性を確認した（図6）．さらに，鎌倉におけるGNSSおよびWi-fiデータを用いて，適用可能性を検証した（図7）．なお，システムモデルにおけるトレンド項の推定に対して，リカレント・ニューラルネットワークによる推定手法の検討も行った．

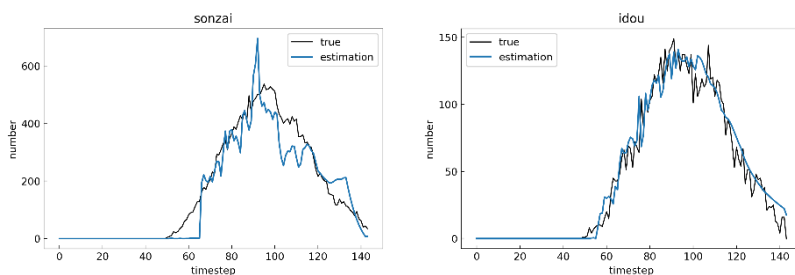


図6 1メッシュにおける滞在人数（左）と1方向移動人数（右）の精度評価



図7 鎌倉における滞在人数推定結果

1-4 衛星画像を用いた交通状態推定モデルの開発

今後多数の打ち上げが計画されている超小型衛星を見据え，広域を同時観測可能である衛星画像を用いた手法を開発した．超小型衛星では，空間分解能が1～3m程度となるため，個別車両の認識・追跡は困難である．そのため，画像からの特徴量を用いて道路リンク上における密度推定を行う画像処理手法を開発した．本モデルは，プローブデータを統合して広域交通状態推定を行うデータ同化手法に対する情報を生成するためのモデルにあたる．道路領域を抽出した衛星画像に対し，オリジナルに構築したCNNにより，直接，密度を推定するモデルを開発した．様々な状況に対応できるよう，シミュレーション画像を準備し，その有効性を確認した（図8）．

また，個別車両の認識可能性を向上させるため，衛星画像に対して，高分解能化・高画質化を行うための深層学習手法を開発した．提案手法では，画像の生成器と識別器を統合したGAN（Generative Adversarial Nets）をベースとした．高画質化に対しては，より画質の良い航空写真を参照データとして衛星画像から航空写真への変換関数を深層学習により推定する．一方の，高解像度化に対しては，解像度を低下させた航空写真を元の解像度に復元させる変換関数を深層学習により推定する．提案手法では，両者を統合して同時学習させるモデルを構築した．適用結果では，航空

写真レベルの高解像度化を達成し、画質評価指標において大幅な画質向上が確認された（図9）。高解像度化・高画質化を行った画像に対して、車両認識手法の適用も行った。

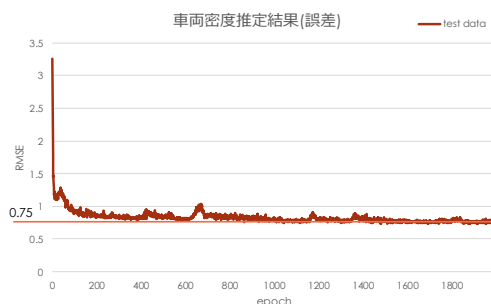


図8 車両密度推定結果



(a) 元画像：衛星画像

(b) 提案手法適用後画像

図9 深層学習による高解像度・高画質化

テーマ2: 交通状態予測システムの構築

2-1 短期渋滞・混雑予測に利用可能なデータ特性の整理

過去の交通状態履歴を踏まえつつ、直近のリアルタイム観測情報を用いて学習が行われた短期での渋滞・混雑の予測モデルに対し、データの活用可能性の整理を行った。入力データとして、鎌倉への主要流入道路に設置されたAIカメラ及びナンバープレート認識用カメラから抽出された「交通量」、「区間旅行時間」等の交通状態変数を想定する。これに加えて、「降水量」、「市内で開催される主要イベント（の有無）」、「交通事故」などの交通に影響を与えると考えられる他の因子に関するデータも確認した。

2-2 交通状態予測モデルの検討

鎌倉市中心部における車両の時間的な集中度合いを短期（30～90分後）で予測するための深層学習による分析枠組みを構築した。交通量等のデータは、時間方向に強い依存性を持つ時系列データであるため、深層学習において時系列データの予測に適しているモデルであるLSTM（Long Short-Term Memory）をベースとした。学習におけるデータ分割手法にはホールドアウト法を採用し、1月から9月までを訓練データ、10月から12月までをテストデータとした。走行速度データは、ETC2.0プローブデータのデータベースよりクレンジングを行った、鎌倉市内のリンク平均速度を用いた。また、気象庁の降水量データ、および社会イベントデータ（あじさい祭り等）を追加した。社会イベントデータについては、来訪者が特に多い行事を鎌倉市観光課から情報を得て、それぞれ個別の

ダミー変数として導入している。これらの実データに対して、季節ごとに設定したモデルの予測精度、降水量や社会イベントの影響、混雑時期の予測精度に関して検証を行い、車両流入が多い時間帯において、誤差率が低くなることを確認した（図10）。

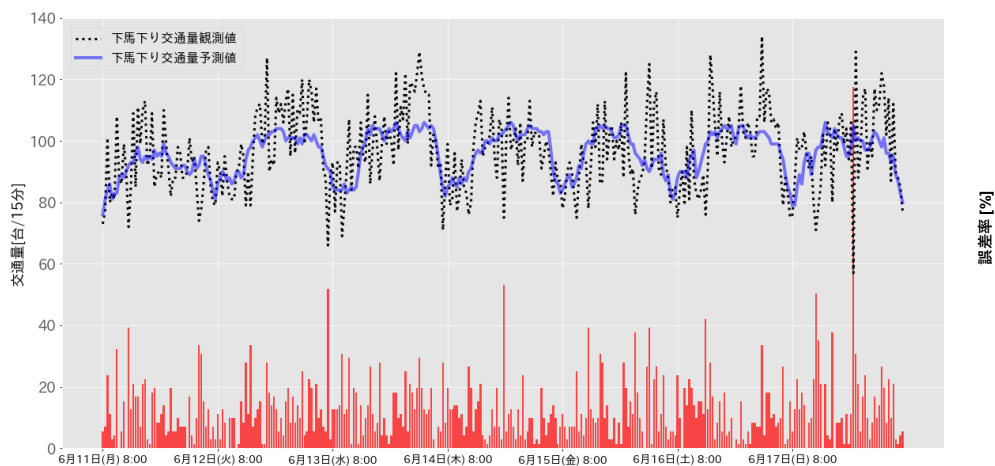


図10 交通状態予測結果

テーマ3: モニタリング・予測に基づくエリア内交通流動マネジメントスキームの構築

3-1 エリア内課金の特徴整理

エリア内課金に焦点を当て、古典的エリア内課金の特徴整理を行った。その上で、発展型のエリア内課金例として、二重コードン／エリア課金、およびコードン内走行距離比例課金の可能性を検討した。単純に距離依存の場合、最短距離経路に交通が集中し、混雑解消につながらない可能性があるため、タクシー料金に見られるような距離依存かつ走行時間に依存した課金について検討を行った。これを距離依存の折れ線と単位走行時間あたりの課金額の組み合わせ最適化問題として定式化した。非加法料金を考慮した確率的利用者均衡配分を制約条件として考慮すれば、この最適化問題は、所与のコードン領域に対しての次善課金を与えることになる。

また、前述のテーマ1、2を考慮した動的課金の枠組みの整理を行い、基本トレンド（季節、平休日、時間帯等）に基づくベース課金と、リアルタイム観測情報に基づく課金調整に大別し、関係性を整理した（表1）。

表1 テーマ間のデータ関係

課金パターン		インプット(テーマ1)	パラメータ	テーマ2
ベース課金	トレンド・ベース	交通量パターン (1時間, リンクごと: 集計) イベント, 平休日(連休, 季節)	時間価値 交通流モデル	
	トライ&エラー (前日実績)	交通量パターン (1時間, リンクごと: 非集計)		
課金調整	現状-トレンド 差分	交通量パターン (1時間, リンクごと: 非集計) イベント, 平休日(連休, 季節)	時間価値 交通流モデル	1時間先予測
	トライ&エラー			

3-2 トレンド・ベースのベース課金の検討

トレンド・ベースのベース課金においては、時間帯別需要変動型利用者均衡配分が有効と考えられ、課金による需要の変化を考慮できるモデルへ展開した。さらに、動的な混雑現象を表現するボトルネックモデルによる分析も行った。鎌倉市内へのコードン課金施策を対象とした試算結果から、課金区域内の交通量厳守音速度向上を確認した(図11)。時間帯別の社会的余剰の計算結果ら、(1) ピーク時間帯の最適課金額が高く、課金による社会的余剰の改善も高いこと、(2) 夜間は無課金とすることが望まれること、(3) 需要弾力性が高いほど最適化金額は高く、余剰改善も大きいこと、等の知見を得た(図12)。また、ピーク時は課金額の範囲が広く頑健であることに対して、オフピーク時は範囲が狭く慎重な設定を要することが確認された。さらに、一定の余剰改善を実現する課金額の範囲という新たな概念を提示し、ピーク時はその範囲が広いことなどを具体的に示した。

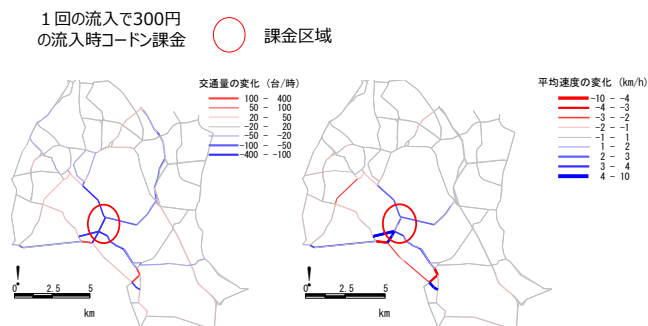


図11 コードン課金効果の試算例

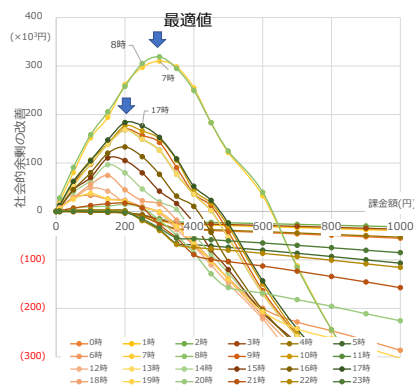


図12 時間帯別の社会的余剰改善

3-3 トライ&エラーによる課金調整の検討

課金額の調整、すなわち動的混雑課金は、ラッシュアワー混雑の対策として理論上有効とされている。しかし、最適課金のためには時間価値等の潜在情報を知る必要があるため、その適用が限定的になる。課金額と交通量は相互に連動するため、トライ&エラー課金により課金額を調整することにより、最適な課金額と交通量に収束することが期待される。ここでは、強化学習を導入することにより、潜在情報を知ることなく最適課金を達成する手法を開発した。対象を単一ボトルネック

における出発時刻選択問題とし、前日の渋滞状況に基づき、当日の時間帯別課金額を決定することにした。行動空間として時間帯別の課金額の増減値に、状態空間として時間帯別の到着流率に、報酬として総待ち時間の変化量として設定した。学習法は、短期的な報酬ではなく、長期的な意味での価値を持つ関数（Q関数）を用いたQ-learningとし、さらに、ある確率でランダム行動を選択する ϵ -greedy法を組み合わせた。これにより、Q関数の初期値に依存することなく、様々な行動に対する適切な学習が可能となる。提案手法を適用した結果、200日程度でほぼ最適課金を達成し、渋滞を減少させることができた（図13）。また、時間価値、早着コスト、希望到着時刻が変化しても、最適課金をほぼ達成することを確認した。

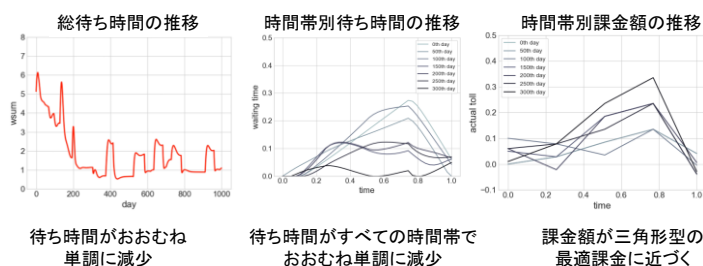


図13 強化学習によるトライ&エラー課金の結果

さらに、強化学習による動的混雑課金手法の適用可能性を実験経済学的に検証した。実験のためのスマホアプリを開発し（図14）、100名程度の被験者に対して、交通シミュレータ内で提案手法による制御のもと交通行動をしてもらう実験を行い、実際の人間が提案手法に示す反応を検証した。実験結果から、日数の経過に伴って社会的余剰が増加するとともに、出発時間が分散していき、課金手法として混雑を解消していけることを確認した（図15）。また、個人ごとに提案手法に対する反応が異なり、獲得する効用に大きな違いが発生することがわかった。



図14 アプリの画面遷移例

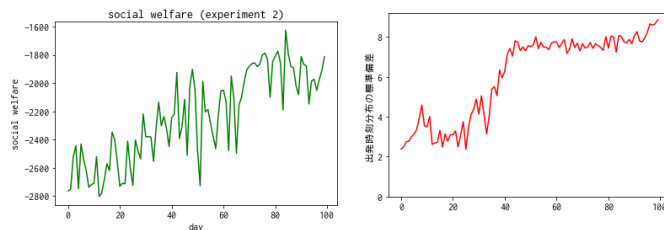


図15 社会的余剰と出発時刻分布の標準偏差の推移

テーマ4: テーマ間連携のための基盤技術の開発

4-1 異種情報を融合した交通状態補間手法の開発

テーマ1, 2で推定された情報は、いずれもその特性が異なる。また、観測データが得られない部分での状態推定も必要になる。各種情報を融合し、任意リンクにおける補間をするための動的時空間モデルを開発した。説明変数として携帯GNSSデータ、日別メッシュ人口密度を用いて、時間帯・道路リンク・方向別の交通量予測を行い(図16)、十分な精度で予測できることを確認した。これは、高質低密度なデータと低質高密度なデータを融合することを意味する。時空間モデルは、大域変動、局所変動、ノイズから構成され、局所変動においては空間相関を考慮している。

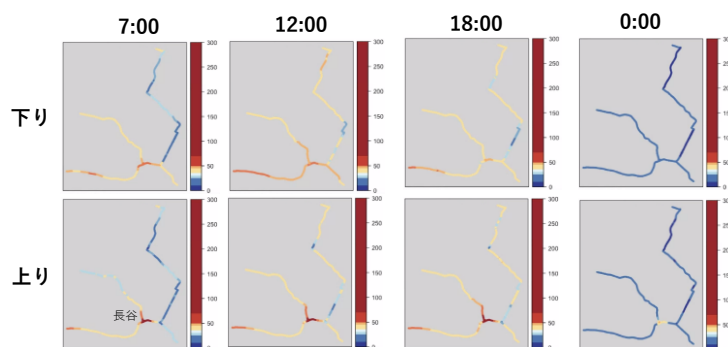


図16 鎌倉における任意リンクでの交通量推定例

4-2 解析基盤の開発

解析基盤として、モニタリング、予測、補間において得られるリンク上での交通状態から、リアルタイムに個別車両の行動等を推定する手法を開発した。ここでは、データ同化の導入を進め、観測データとシミュレーションの差異を効率的に解消するための深層学習を用いた大規模解析に基づく最適化手法を開発した。深層学習によりサロゲートモデルを構築し、ネットワーク最適化を行っている点は、新規性の高いものである。開発手法を、鎌倉におけるOD逆推定問題に対して適用し、手法の有効性を確認した(図17)。

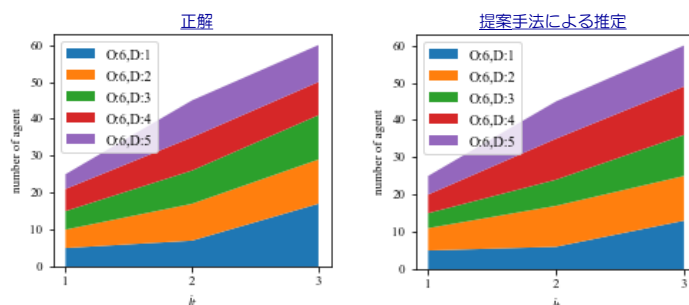


図17 OD交通量推定結果

⑨研究成果の発表状況

- [1] Sakai, K., Seo, T., and Fuse, T: Traffic density estimation method from small satellite imagery: Towards frequent remote sensing of car traffic. IEEE 22nd International Conference on Intelligent Transportation Systems, pp.1776-1781, Auckland, New Zealand, 2019.

- [2] 酒井健吾, 瀬尾亨, 布施孝志: 超小型衛星画像を想定した車両密度推定. 日本写真測量学会令和元年度秋季学術講演会, 広島市, 2019.
- [3] 石井健太, 瀬尾亨, 布施孝志: 深層学習を導入したデータ同化による動画像からの複数物体追跡手法の構築. 土木計画学研究・講演集, Vol. 60, 富山市, 2019.
- [4] 米澤実保, 瀬尾亨, 布施孝志: 携帯電話のGNSSとWi-Fiデータの統合による滞在人口分布と移動人口の同時推定手法の構築. 土木計画学研究・講演集, Vol. 59, 名古屋市, 2019.
- [5] Ogawa, K. and Fukuda, D.: Short-term traffic state prediction using the framework of gated recurrent unit: A case Study in Kamakura, Japan. The 24th International Conference of the Hong Kong Society for Transportation Studies (HKSTS), Hong Kong, 2019.
- [6] Qian, Q., Fukuda, D., Han, K. and Song, W.: Reservoir-based surrogate modeling of dynamic user equilibrium. The 23rd International Symposium on Transportation and Traffic Theory (ISTTT23), Lausanne, 2019.
- [7] 小川晃平, 福田大輔: LSTMの枠組みによる交通量短期予測の検討: 鎌倉市中心部を事例として, 土木計画学研究・講演集, Vol. 60, 富山市, 2019.
- [8] Yu, D., Murakami, D., Zhang, Y., Wu, X., Li, D., Wang, X., and Li, G.: Investigating high-speed rail construction's support to county level regional development in China: An eigenvector based spatial filtering panel data analysis. Transportation Research Part B: Methodological, 133, pp.21-37, 2020.
- [9] Murakami, D. and Griffith, D.A.: A precompression approach for fast spatial mixed effects modeling. Spatial Statistics 2019, Sitges, Spain, 2019.
- [10] Murakami, D., Matsui, T., Yoshida, T., Yamagata, Y.: A GPS-based simple evaluation simulation approach: Case study in Joso, Japan. IGARSS 2019, Yokohama, Japan, 2019.
- [11] Ichimura, T., Fujita, K., Yamaguchi, T., Hori, M., Wijerathne, L. and Ueda, N.: Fast multi-step optimization with deep learning for data-centric supercomputing, 4th International Conference on High Performance Compilation, Computing and Communications, 2020.
- [12] Dantsuji, T., Hirabayashi, S., Ge, Q. Fukuda, D.: Comparison of spatial partitioning methods for an urban transportation network, International Journal of Intelligent Transportation Systems Research 18, s412–421, 2020.
- [13] Sato, K., Seo, T., Fuse, T.: A reinforcement learning-based dynamic congestion pricing method for the morning commute problems, Transportation Research Procedia, Vol.52, pp.347-355, 2021.
- [14] 佐藤公洋, 瀬尾亨, 布施孝志: 強化学習を用いたデータ駆動型の動的混雑課金の最適化手法, 土木学会論文集D3, Vol.76, No.5, pp. I_1273-I_1285, 2021.
- [15] 佐藤公洋, 瀬尾亨, 田子裕亮, 田名部淳, 布施孝志: 強化学習を用いた動的混雑課金額決定手法の実験室実験による検証, 土木計画学研究・講演集, Vol.63, 2021.

⑩研究成果の社会への情報発信

- [1] 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, 2019年2月22日, 学習型モニタリング・交通流動予測に基づく観光渋滞マネジメントについての研究開発, 200名
- [2] 成果報告会: 自動運転社会の実現に必要な道路技術研究開発, 2020年2月12日, 学習型モニタ

リング・交通流動予測に基づく観光渋滞マネジメントについての研究開発，200名

[3] 令和2年度 第1回DRMセミナー，2020年12月14日，交通渋滞マネジメントに向けた学習型モニタリング・状態予測，50名

[4] 成果報告会：自動運転社会の実現に必要な道路技術研究開発，2021年3月1日，モニタリング・交通流動予測に基づく観光渋滞マネジメントについての研究開発，200名

⑪研究の今後の課題・展望等

- ・本研究では，学習型の手法として各テーマにおける開発を行ってきた．いずれも，学習データを確保することが必要になるため，その方法論を検討することも重要になる．本研究で用いた深層学習一般の問題として，解釈困難性，すなわち，望む精度が出ていない場合に，モデルのどの部分が影響しているのかが解明できないという問題が存在する．この問題に対して，説明可能なAI手法を導入することにより，モデルと結果の解釈を可能にすることが期待される．また，説明変数の自動選択の仕組みを導入し，解釈と推定精度の両者を向上するための拡張が考えられる．
- ・多様な現象を記述するために，高次元データ分析や非線形性を導入したモデルが一般的になる．そのための解析基盤の開発を行い十分な成果を得られたが，提案手法の性能を向上させるために例えば学習データのサンプリング結果をより踏まえたデータ生成を検討する等が挙げられる．また，より頑健な解析基盤を開発していくためには，例えば，信頼性の高い順解析を入れ込むとともに，異種データを統合していくことがあげられる．さらに，提案手法は高い汎用性を有していることから，他の問題への適用も考えられる．
- ・予測においては，交通量データのみを使用している．そのため，渋滞の発生をデータ内から判断することができず，詳細な交通混雑の状況を把握するまでには至っていない．今後は，ETC2.0プローブデータ等より得られる（リンク）旅行速度等のデータを併用してモデルを拡張し，混雑/非混雑の判定も行うことが可能な短期交通状態予測モデルへと展開していくことが必要である．
- ・マネジメントにおいては，モデルの入力データ等を精査することで，現実の課金施策立案でも参照可能なように結果の精度を高めることが今後求められる．また，実験経済学の枠組みで検証した個人の行動変容に対して，個人ごとの獲得効用と個人属性の関係の分析，他の状況のもとでの実験が考えられる．

⑫研究成果の道路行政への反映

1. テーマ1：学習型モニタリングシステム

固定カメラ，GNSS・Wi-fi，衛星画像によるモニタリング手法は，いずれも地域を特定せず様々な地域での適用が可能である．解析プログラムは公開可能であることから，別地域の展開も可能である．今後は，さらなる精度向上・安定化・高速化により，その利用可能性が益々高まることが期待される．また，本研究で得られた成果から，観測機器のスペック等を特定するための知見が有用となる．

2. テーマ2：交通状態予測システム

学習型の予測システムのため，適用地域に応じた再学習が必要になる．しかしながら，本研究において学習した結果は，転移学習等のアプローチを提供することで他地域へ転移可能であり，

効率的なモデル構築につながる。短期予測の困難さも指摘されているところであるが、より現実に即した予測手法として活用が期待できる。

3. テーマ3：モニタリング・予測に基づくエリア内の交通流動マネジメントスキーム

これまでは、モニタリングと予測に基づく動的課金の適用はみられないが、シミュレーションによる検証では、その効果が確認できる。トレンド・ベース課金においては、(1) ピーク時間帯の最適課金額が高く、課金による社会的余剰の改善も高いこと、(2) 夜間は無課金とすることが望まれること、(3) 需要弾力性が高いほど最適化金額は高く、余剰改善も大きいこと等、政策に資する知見が得られている。また、トライ&エラー課金により、日数の経過に伴って社会的余剰が増加するとともに、出発時間が分散していき、課金手法として混雑を解消していけることが確認でき、こちらも実務に資する内容と考えられる。今後は、さらに、実証実験等による効果検証が必要になる。これらの実現のためには、長期間安定的にモニタリング・予測を行う手法とセットでの枠組みが必要である。その結果を踏まえ、課金方法や運用方法等の詳細を検討する必要がある。

4. テーマ4：テーマ間連携のための基盤技術

本研究で開発した異種情報を融合した交通状態補間手法、解析基盤は汎用性を持つものであり、他の地域や他の対象に対しても適用可能である。課題に対して、個別設定が必要になるものの、その展開可能性は非常に高いものである。

⑬自己評価

- ・いずれのテーマも、概ね順調に進行していると自己評価している。研究計画、実施方法、体制等も妥当であると考えている。具体的には、以下の通りである。
- ・テーマ間の関係性、特に情報の観点から整理を行い、全体の見通しを示した。これにより、テーマ間連携の可能性が明確化された。特に、各テーマを統合して全体の研究の見通しをより明確化することを目的に、また、テーマ間連携に関する研究を追加的に行った。テーマ間連携のためのプラットフォームとして、異種情報を融合した交通状態補間手法の開発、および解析基盤の開発を行ったが、当初予定を大幅に上回る進捗状況であると自己評価している。これにより、研究全体の幅が広がるとともに、テーマ間連携の見通しが向上した。また、混雑課金に対する知見も得られ、政策等への寄与も期待される。
- ・観光交通イノベーション地域である鎌倉における実データ（AIカメラ画像、およびGNSS・Wi-fiデータ）は、「地域道路経済戦略研究会」および「交通マネジメント新技術評価委員会」との連携により実現に至ったものである。今後の観光交通イノベーション地域の動向を注視するとともに、これまで同様に両委員会との連携を継続することで、本研究で開発した手法・スキームの実現可能性を高めることが可能であると考えられる。
- ・これまでの評価結果を踏まえ、研究全体の枠組みを再構成した。ここでは、鎌倉市における実証実験が困難になった状況から、課金の効果については、シミュレーションや実験経済学的手法で検証した。また、全テーマにわたって、機械学習を基礎手法に据えることにし、研究テーマの政策領域に整合性のある内容とした。