

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 . 2021-1

研究テーマ

特殊車両の折進可否判定の自動化と特車フリー
道路ネットワーク計画手法の研究開発

研究代表者：立命館大学教授 塩見 康博
共同研究者：京都大学大学院准教授 Ali-Gul Qureshi
京都大学大学院准教授 Jan-Dirk Schmöcker
立命館大学客員教授 島田 孝司
京都大学大学院教授 須崎 純一
愛媛大学准教授 坪田 隆宏
京都大学大学院助教 中尾 聡史
立命館大学教授 服部 宏充
東京大学大学院助教 安田 昌平
京都大学大学院教授 山田 忠史

令和 6 年 5 月

新道路技術会議

目次

研究概要.....	1
第1章 はじめに.....	3
1.1 研究の背景.....	3
1.2 本研究の目的.....	3
第2章 特殊車両通行制度の行政課題に関する研究.....	5
2.1 はじめに.....	5
2.2 都道府県へのアンケート調査.....	5
2.3 行政書士・運送事業者へのヒアリング調査.....	11
2.4 おわりに.....	13
第3章 空中写真に基づく交差点構成要素のセグメンテーション.....	15
3.1 はじめに.....	15
3.2 使用するデータとモデル.....	15
3.3 学習環境と設定.....	17
3.4 推定精度の検証.....	18
3.5 おわりに.....	22
第4章 交差点における特殊車両の折進判定手法の構築.....	23
4.1 はじめに.....	23
4.2 提案システムのユースケース想定と概略.....	23
4.3 マクロ判定モジュール.....	24
4.4 ミクロ判定モジュール.....	26
4.5 判定結果の検証.....	28
4.6 おわりに.....	30
第5章 特殊車両の経路選択モデルの構築.....	31
5.1 はじめに.....	31
5.2 使用データの概要.....	33
5.3 経路選択モデルの構築.....	33
5.4 おわりに.....	39
第6章 道路ネットワーク計画モデル.....	41
6.1 はじめに.....	41
6.2 モデル化と解法.....	41
6.3 解法の改良.....	43
6.4 数値計算例（ケーススタディ）.....	44
6.5 おわりに.....	47

第7章 おわりに.....	50
7.1 本研究の成果	50
7.2 社会実装に向けた課題	51

「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」（令和 3 年度採択）
研究概要

番号	研究課題名	研究代表者
No.2021-1	特殊車両の折進可否判定の自動化と特車フリー道路ネットワーク計画手法の研究開発	立命館大学 教授 塩見 康博

効率的な輸送システムの確立の実現に向け、特殊車両に関わる諸課題の解決に資する技術開発を目的として、特車行政の課題を構造化するとともに、特車に関わるデータベースと可視化システム、空中写真からの交差点構成要素の自動抽出手法、折進条件判定の自動化システム、折進軌跡の自動観測システム、特車の経路選択モデルとそれを包含する道路ネットワーク計画モデルの構築を実施する研究開発。

1. 研究の背景や動機、目的および目標等

車両諸元が一般制限値を超える車両や特殊な形状を有する車両は、**特殊車両（特車）**に分類され、道路の通行にあたっては事前に許可を取得する必要がある。しかしながら、その審査には平均で 28 日を要すほか、通行許可を即時発行できる新しい制度においても道路ネットワーク情報が十分に整備されておらず十分に活用されていないのが現状であり、**効率的な輸送システムの実現を阻害する要因**となっている。本研究では、この改善に向けて、社会的課題の構造化、有効にデータを活用するためのデータベースの構築、通行条件の自動判定技術の開発、道路計画技術の開発を行う。

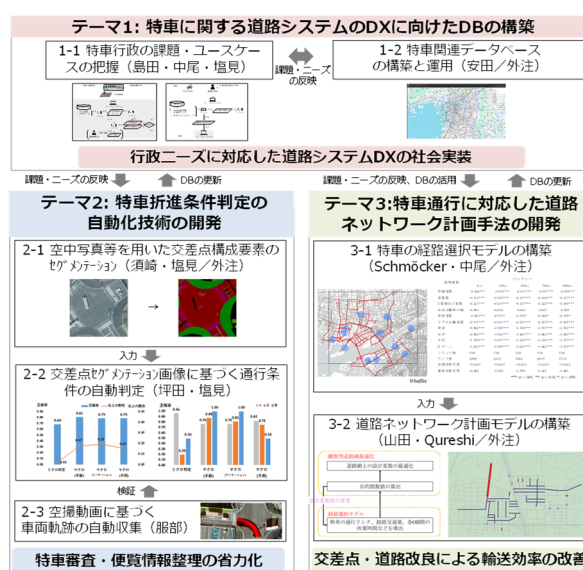


図 1 研究テーマの概要

2. 研究内容

本研究で取り組んだ課題と相互の関係性を図 1 に示す。テーマ 1 は本研究全体の位置づけを明確化するものであり、ヒアリング・アンケート調査に基づいて特車に関する行政課題の精査・本研究で開発する技術のユースケースの確立を行った（1-1）とともに、特車関連データのデータベースと可視化システムを開発（1-2）した。テーマ 2 は交差点における特車の折進条件判定の自動化に取り組むものであり、モデルへの入力として用いる交差点構成要素を識別した画像データの生成（2-1）、教師データを用いたニューラルネットワークに基づく折進条件判定システムと Path finding アルゴリズムによってミクロに折進条件を判定するシステムの開発（2-2）、折進軌跡観測の自動化手法の開発（2-3）を行った。テーマ 3 は特車運行の効率化のための道路計画技術を開発するものであり、特車の経路選択モデルの構築（3-1）とそのモデルを内包した道路ネットワーク計画モデル（3-2）を構築した。

3. 研究成果

1-1 特殊車両通行制度の行政課題に関する研究

ヒアリング調査・アンケート調査に基づき、市区町村道で道路情報便覧の登録が進まない要因として、担当者の知識、人員不足だけでなく、登録するための動機や方針が不明確であることなどを明らかとした。

1-2 特車関連データベースの構築と運用

特車に関わるデータベースとそれを可視化する特車データビューアーを開発し、行政へのヒアリングにより、開発したツールが業務遂行上有用であることを確認した。

2-1 交差点構成要素の自動セグメンテーション手法の構築

空中写真にセマンティックセグメンテーションを適用し、道路・歩道・停止線・車道外側線などの交差点構成要素を識別する手法を開発した。また、歩道橋などのオクルージョンを3次元点群データで補完する手法を開発した。

2-2 交差点構成要素セグメンテーション (SS)

画像に基づく通行条件の自動判定

ニューラルネットワーク (NN) により交差点諸元値と折進条件の組み合わせを学習するモデル (マクロ判定)、および交差点内の通行可能空間内の折進経路を Hybrid A* Path Planning により探索して折進条件を判定するモデル (ミクロ判定) を開発した (図2)。また、両モデルを用いた折進条件判定業務へのユースケースを提案した。

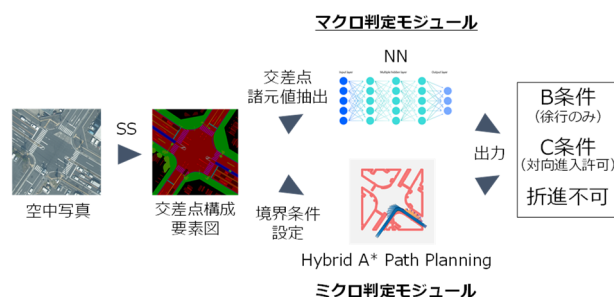


図2 折進条件判定のフロー

2-3 空撮動画に基づく特殊車両軌跡の自動収集

UAV 画像から特殊車両を検出し、その筐体形状と走行軌跡を自動抽出する手法を開発した。

3-1 特車の経路選択モデルの構築

商用車データや ETC データを対象に、多項ロジットモデル、Path Size Logit Model、C-Logit Model、再帰型ロジットモデルを用いて車種・OD 特性ごとの経路選択行動をモデル化した。

3-2 道路ネットワーク計画モデル

上記の経路選択モデルを内包し、特車通行を可能とするようにリンク・ノードを改良すべき地点を分散型道路網最適化により求解する手法を開発した。実道路網に適用した結果、施工費用の低廉な郊外部、あるいは主要な OD 間の連結性を確保するリンクやノードを改良するのが望ましいことを示した。

4. 主な発表論文

- ・ 島田孝司, 塩見康博, 中尾聡史: ヒアリング調査に基づく地方自治体における特殊車両通行許可制度の実務課題に関する研究-都道府県を対象に-, 第 68 回土木計画学研究・講演集, 2023.
- ・ 志野有, 塩見康博: 交差点における特殊車両の折進条件の自動判定アルゴリズム, 第 20 回 ITS シンポジウム 2022. (ベストポスター賞)
- ・ 塩見康博, 出口智宏: セマンティックセグメンテーションによる交差点構成要素抽出手法のモデル間精度比較, 第 35 回日本道路会議, 2023.
- ・ 坪田隆宏, 島津弘輝, 藤村和紀: 特殊車両の交差点折進可否自動判定手法の検討と考察, 第 35 回日本道路会議, 2023.
- ・ Wang Junnan, 塩見康博: UAV 観測による特殊車両の交差点折進軌跡の分析, 第 35 回日本道路会議, 2023.
- ・ Yue Ma, J.-D. Schmöcker, Wenzhe Sun, Satoshi Nakao: Estimating Oversized Truck Route Choice Behavior Using GPS Trajectory Data and Recursive Logit Models, Proceedings of the 103rd TRB annual meeting, 2024.
- ・ 池宮大智, 山田忠史, Ali Gul Qureshi, 村上裕樹: 特殊車両を対象とした粒子群最適化法による道路網の最適化, 第 68 回土木計画学研究・講演集, 2023.

5. 今後の展望

本研究で構築したデータベースと可視化システム, 折進条件判定システム, 経路選択行動を考慮した道路ネットワーク計画モデルなど, それぞれの精度を高める取り組みを進める。折進条件判定システムでは牽引車挙動を考慮できるよう拡張を行う。

6. 道路政策の質の向上への寄与

本研究で開発する諸システムは、都道府県の担当者へのヒアリングを通して高いニーズがあることを確認している。今後は各モデルの精度向上を進めながら、産学官の体制を築き、スマート物流研究小委員会をプラットフォームとして、可能な部分から社会実装に向けた取り組みを行う。

7. ホームページ等

土木計画学研究委員会 スマート物流研究小委員会 <http://shiomi.rits-ese.jp/smart-logi/>

第1章 はじめに

1.1 研究の背景

近年、物流需要は増加傾向にあるものの、ドライバーの高齢化などの労働者不足を受け、貨物車量は大型化しつつある¹⁾。一定の車長・重量の基準を超える特殊車両（以下、特車）は、道路への負荷が大きだけでなく、物理的に通行できない道路区間が存在する。そのため、運行にあたっては、事前に道路管理者の許可を得る必要があるが、審査完了には令和元年8月時点で平均28.5日を要しており²⁾、物流の効率化を大きく毀損しているのが現状である。

一方、令和4年4月からは、オンラインのみで審査を完結できる通行確認制度が開始された。しかしながら、この制度は道路情報の道路情報便覧への収録が前提となっているものの、ファースト・ラストマイルに相当する市町村道を中心に、未収録道路も多く、かつ収録されている道路の連続性が損なわれていること、提示される経路に合理性がないことなど、課題も多い。そのため、道路情報便覧の収録作業を支援する仕組みづくりや、効率的な収録道路の選定方法、妥当な経路の抽出方法の確立などを進めていく必要がある。

本研究は、これらの根源的な課題を明確化するとともに、課題に対処するための諸技術の開発を行うものである。

1.2 本研究の目的

全体の構成は図-1の通りである。本研究では大きくテーマ1～テーマ3に取り組んだ。

- ・ テーマ1：特車に関する道路システムのDXに向けたデータベース（DB）の構築
- ・ テーマ2：特車通行許可判定の自動化に資する技術の開発
- ・ テーマ3：特車フリー道路ネットワーク計画手法の開発

テーマ1では、特車申請に関わる道路管理者・運送

事業者へのヒアリングに基づいて実務上のニーズを把握し（1-1）、さらに道路システムのDXを視野に入れ、ニーズを考慮した特車行政の効率化に資するDBを構築する（1-2）。

テーマ2では、衛星画像等を用いた交差点平面図生成手法の開発（2-1）、交差点平面図データを用いた折進可否と通行条件の自動判定手法の開発（2-2）、UAV画像に基づく車両筐体を含む折進軌跡の自動抽出手法の構築（2-3）を行った。

テーマ3では、特車申請データと特車フリーETC2.0データ等を用いた経路選択行動モデルの構築（3-1）、特車の経路選択行動を考慮した特車フリー道路ネットワーク計画モデルの開発（3-2）に取り組んだ。

1.3 本稿の構成

第1章では、本研究の背景と目的を述べた。第2章では、特車に関わる行政課題を包括的に整理するとともに、技術的・制度的なニーズについて考察する。

第3章と第4章はテーマ2に関わるものであり、まず第3章では、第4章で開発する折進条件判定システムの入力値である交差点構成要素を識別したセグメンテーション画像の生成方法を述べる。その上で第4章にて、折進条件判定システムの概要とその妥当性について検証を行う。

第5章と第6章はテーマ3に関するものであり、前者ではプローブデータを用いた大型車の経路選択モデルについて述べる。後者では、経路選択モデルを内包した道路ネットワーク計画モデルを開発し、実際規模のネットワークに適用した結果を述べる。

最後に、第7章にて本研究の成果を取りまとめるとともに、今後、道路行政に反映していくために取り組むべき課題を述べる。

なお、1.2に記載したテーマ1-2と2-3は紙面の都合上、本稿からは割愛する。

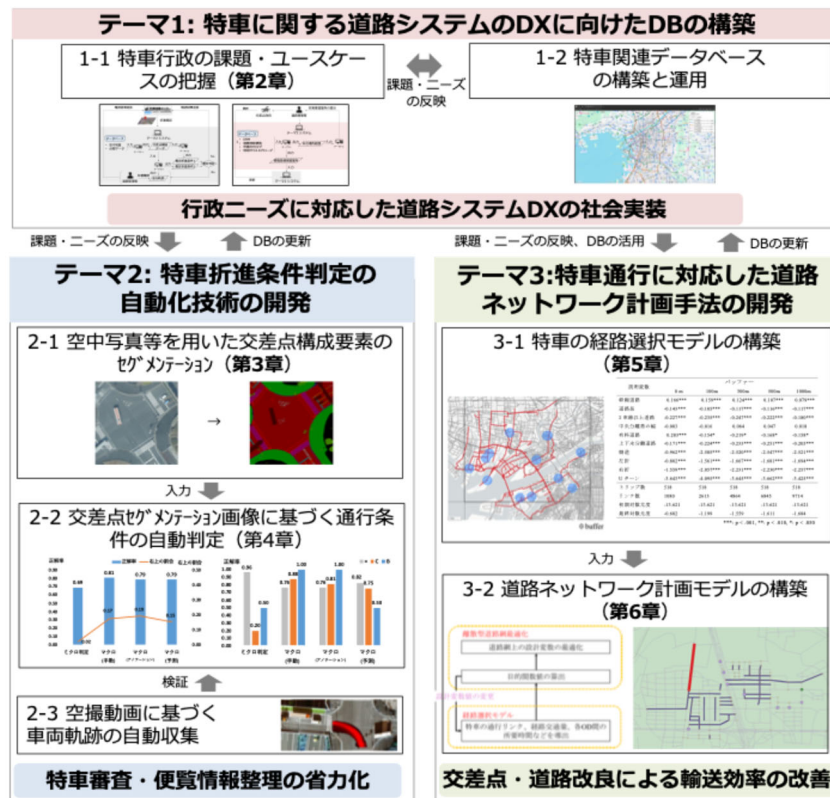


図-1 本研究の全体構成

参考文献

- 1) 池田武司: 特殊車両の通行許可に関する最新事情, 国際交通安全学会誌 Vol.41, No.1, pp.38-46, 2016.
- 2) 国土交通省: 特車通行許可制度の改善, <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001315290.pdf>, 2023年10月3日閲覧.

第2章 特殊車両通行制度の行政課題に関する研究

2.1 はじめに

特車の通行許可審査の迅速化、および令和4年度のから開始された特車確認制度の普及に向けては、道路情報便覧の整備が必要不可欠である。しかしながら、道路情報便覧への登録作業は、各道路管理者が実施する必要がある一方で、市町村レベルでは必ずしもその作業が進んでいないという実態がある。

特車の運行に関わるステークホルダーとしては、図-1に示す通り、審査主体と申請主体に大きく分類できる。国土交通省は特車制度や、それに関わるツールやシステムの設計や運用を担っている。その枠組みの中で、各段階の道路管理者が、道路情報便覧への登録情報の収集や整理を行うと共に、申請者からの協議への対応を行っている。特車を実際に運用するのは運送事業者であるが、協議申請を行う際には行政書士が代行するケースも少なくない。また、運送事業者の業界団体であるトラック協会などは、運送事業者に対して特車制度の履行を求めると共に、その制度運用主体である国交省に要望を提出するなどの関係性がある。

そこで本研究では、特車通行許可制度に関して、道路管理者として通行許可の協議や道路情報便覧収録を行い、かつ包括する市町村との調整を行う都道府県、特車を用いて事業を行う運送事業者、および申請代行を行う行政書士を対象に、ヒアリング調査やアンケート調査を通じて、特車制度に関わる諸機関の実務上の課題を明らかにすることを目的とする。

2.2 都道府県へのアンケート調査

(1) 事前ヒアリング調査

a) 調査方法

全都道府県を対象としたアンケート調査を実施するにあたり、まず特車制度に関わる課題を抽出し、アンケート設計に反映させるためのヒアリング調査を行った。

ヒアリングの実施に当たっては、ヒアリング対象とした全都道府県の担当者に、ヒアリングの可否について電話で打診をした後に、順に担当者を訪問して本調査の意図や調査項目の説明を行った。その結果に基づいて、ヒアリング項目の修正を行い、発言とこちらの解釈に齟齬がないよう、書面での回答を依頼した。また、回答の正確性を担保するために、回答を得たあとに補足確認を行ったほか、取りまとめ内容についても最終的な確認を行うこととした。

b) ヒアリング対象の選定

本ヒアリング調査では、担当者の忌憚のない回答を促すため、具体的な都道府県の名称を匿名化して集計することを事前に担当者に説明した。ただし、国土交通省のHP^{注1}に掲載されている「自治体申請システム」での提出先の記載に従って、都道府県を「タイプA：本庁一括管理型」と「タイプB：地方組織分散対応型」に分類した。以降、本文中では「タイ

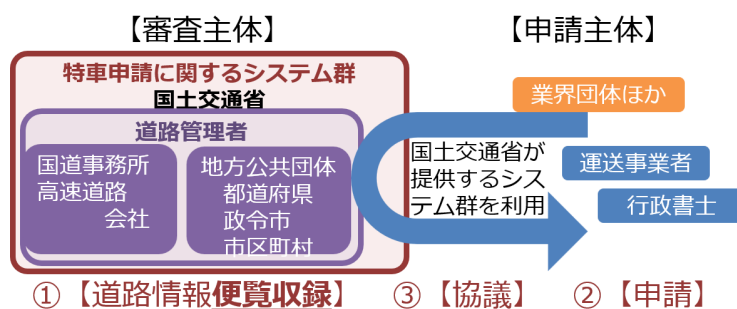


図-1 特車申請手続きの全体像とステークホルダーの位置づけ

都道府県名	申請書提出先(部署名)	オンライン申請	備考
	兵庫県道路公社総務部業務管理課		
奈良県	奈良県道路管理課		
和歌山県	伊都振興局管理保全課		
	那賀振興局管理保全課		
	海草振興局管理保全課		
	有田振興局管理保全課		
	日高振興局管理保全課		

図-1 国土交通省のHPに掲載の都道府県別自治体申請システムの申請先(抜粋)

表-1 ヒアリング調査の具体的な選定

地方整備局 の括り	地方整備局を括った都道府県の数			架電により依頼 した数	ヒアリングでき た数
	タイプA	タイプB	小計		
北海道・東北	1	6	7	5	3
関東	7	2	9	4	3
北陸・中部	1	6	7	3	3
近畿	3	4	7	3	3
中国・四国	2	7	9	5	3
九州・沖縄	1	7	8	4	4
全国計	15	32	47	24	19

表-2 事前ヒアリングでのヒアリング項目の更新プロセス

訪問した月	6月	7月	8月	9月
訪問した都道府県数	4	5	8	2
説明資料の版数	01版	02版	03版・04版	05版
ヒアリングの熟度	準備・試行	熟成	充足	仕上げ

「タイプA」「タイプB」と表し、図中では特に個々の都道府県を識別する必要がある場合にのみ、A-1～A-7、B-1～B-12と表する。

ここで「自治体申請システム」の具体例(抜粋)を図-2に示す。この例では、例えば奈良県はタイプA、和歌山県はタイプBに分類することになる。全47都道府県について、タイプAに分類されたのが15自治体、タイプBに分類されたのが32自治体であった。これを、開発局・各地方整備局ごとに分類すると表-1の様に括られ、それぞれに属する都道府県数は7つ～9つの自治体が含まれることとなる。全国を合計すると、タイプAとタイプBの都道府県数の比率は概ね1:2となっていることから、地方整備局の括りごとにおよそこの比率に従って調査対象を抽出できるように架電でのアポイントを行った。最終的に19都道府県をヒアリング対象として確定した。内訳は、タイプAが15都道府県中7都道府県(47%)、タイプBが32都道府県中12都道府県(37.5%)であり、全都道府県のうち約40%に相当する都道府県を調査対象とした。

c) 調査項目の作成プロセス

事前ヒアリングは表-2の通り、2023年6月～9月の4ヶ月間にかけて実施した。都道府県の担当者は通常業務で多忙であり、ヒアリング項目に書面での回答を依頼することが大きな業務上の負担となると考えられる。そのため、回答に必要な十分な準備期間を設け、かつ、調査者とヒアリング担当者の間に

表-3 令和4年度実施の事前ヒアリング項目の一覧

分類	項目の概要
I 基礎的情報	便覧収録数、協議・申請数、職員数
II 課題	① 便覧収録 市区町村道の交差点の課題、付随的な課題、道路台帳状況
	② 協議・申請 便覧収録不足の影響、超寸法などの状況
III 事例	課題となっている具体的な交差点、市区町村の収録課題
IV 技術開発	折進判定の自動化ツール・便覧登録箇所選定ツールによる作業軽減の可能性
V その他	確認制度の影響・期待、全般的な課題

信頼関係を築き、研究の意義を理解してもらうこととした。また、個別のヒアリング項目についても、時間をかければ回答が可能なものか否かについても、具体的な回答方式や設問の表現を各都道府県の担当者と摺り合わせを行った。

その結果、例えば、道路情報便覧収録の収録件数の状況に関しては、殆どの都道府県が全ての詳細は道路局の提供するツールに入力するのが精一杯の様子で、残っている記録はメモ程度のものしか無い事が判明したことから、そのメモから回答可能な簡易

的な情報のみを記入して貰うことにした。また、

- ・管理台帳（道路台帳、橋梁台帳）の活用可能性
- ・自衛隊への対応状況
- ・超寸法車/新規格車への対応状況
- ・クレーン/農耕トラクタへの対応状況
- ・右折/左折が困難な交差点の対応状況

について、一部の都道府県の担当者より、各都道府県の担当者が抱えている課題を共有し他の都道府県での対応方法を共有するのが有益だろうとの示唆をいただいたことから、これらの項目を補足説明書・ヒアリング項目に取り込んでいくことにした。最終的に2023年10月17日に確定版（第10版）のヒアリング項目を各担当者に送付し、回答を求めた。

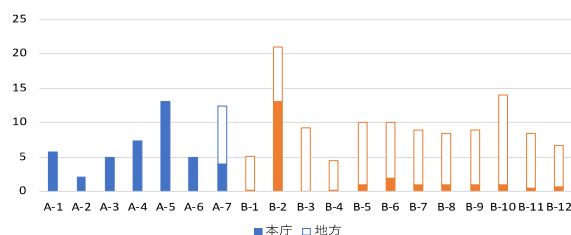
最終的に確定したヒアリングの主要な項目の一覧を表-3に示す。今回のヒアリングでは、回答の自由度を高めるため、基礎的情報以外に項目について、自由に回答を求めることとした。

d) ヒアリング対象都道府県の業務体制と業務負担

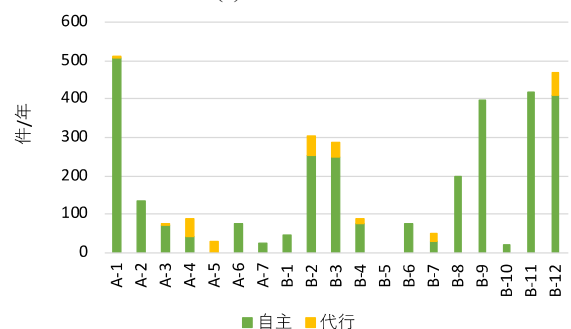
本節では、ヒアリング対象とした各都道府県の業務体制と業務負担について確認する。

各都道府県の特車に関わる情報便覧収録業務、協議・申請受け付けへの対応業務に従事している職員数を図-3に示す。なお、図中では本庁勤務職員人数と地方事務所勤務職員人数を明示的に分けて表示している。また、1名の職員が兼務として特車業務に従事している場合には、当該業務に割いている時間に応じて按分している。これより、ばらつきはあるものの、概ね10人程度の職員数で業務にあたっていることが分かる。タイプBでは本庁勤務の担当者数は1名以下である場合が多く、地方事務所の職員が実働していることが推測される。

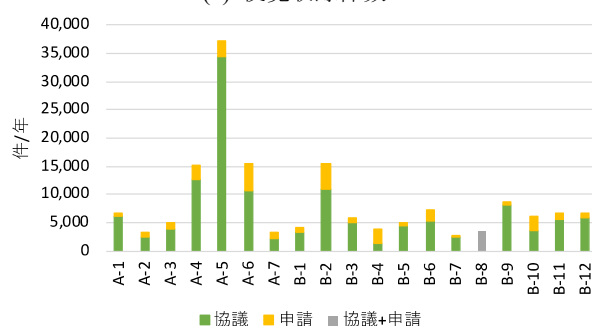
次に、各都道府県での令和3年度における情報便覧収録箇所数を自主収録・代行収録に分けて図示したものを図-3図-(b)、および協議・申請件数の過去3年間の平均を図-3(c)に示す。これより、都道府県によって収録件数にはばらつきがあるものの、コンサルタントによる代行収録ではなく自主収録が進められていることが分かる。また、協議・申請業務に関しては、主に協議業務が多く、申請受付自体は多くはない。これらを基準化して比較するため、担当職員1名あたりの収録件数と申請・協議件数を図-3(d)に示す。これより、申請・協議件数が極めて多いA-4、A-5、A-6を除いては、概ね一人あたりの情報便覧収録件数と申請・協議件数は正比例の傾向にあるといえる。これは、ある程度の申請・協議がある場合には、協議件数を減らすために情報便覧への収録を進めるのが有効であるため、収録業務に一定のリソースを割いている結果であると考えられる。その一方で、一人あたりの年間の申請・協議件数が2000件を超える都道府県A-4、A-5、A-6では、情報便覧への収録が多くはない。この3都道府県はいずれもタイプAに属するものであり、本庁内で申請・協議と収録業務を担うことになるため、申請・協議



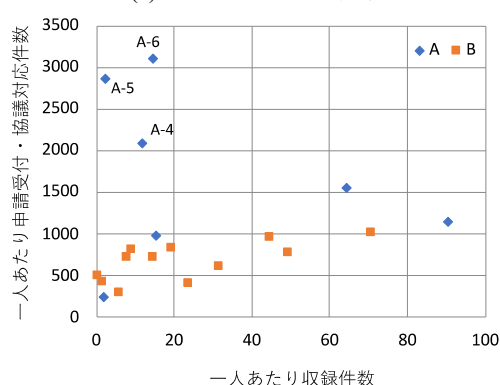
(a) 担当職員数



(b) 便覧収録件数



(c) 協議・申請対応件数



(d) 職員1人あたりの申請・協議件数

図-3 都道府県ごとの業務体制と業務負担

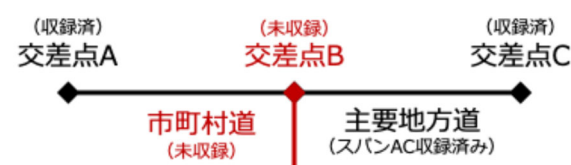


図-4 市町村との連携が必要となる事例

件数が多い場合には、情報便覧収録業務に職員を回していない実態がうかがえる。申請・協議を地方事務所が担うタイプBでは特車の業務内容が本庁と地方事務所分担され、その効率的な運用がなされて

表-4 令和5年度実施のアンケート項目

アンケート項目分類		アンケート項目の概要
I	基礎的な情報	都道府県のタイプ（A/B）、職員数
II	(1) 便覧収録	交差点収録の課題、付随的な課題、道路台帳の整備状況、国からの支援のあり方、法定協議
	(2) 協議・申請	超寸法・新規格車の状況
III	具体的な事例	先進的取り組みをしている市区町村、市区町村における便覧収録の課題など
IV	その他	確認制度への意見、自由回答

いるものと考えられる。

e) 市町村との連携の必要性

上記のヒアリングを通じて、浮かび上がってきた典型的な課題として、主要地方道のスパン A-C 上に市区町村道との交差点 B が実在するが、便覧には収録されていないケースが挙げられる（図-4）。また、上位機関である都道府県が交差点 B を収録し、市区町村が下に伸びる市区町村道部分について同期をとって収録する必要があるが、市区町村側が収録しない、あるいは迅速に対応しないことが課題となっていることが確認できた。こうしたことから、主要地方道において、都道府県と市町村の協力体制が極めて重要であることが考えられる。

(2) アンケートの設計と実施

前節のヒアリング結果に基づき、全都道府県を対象としたアンケート調査を実施した。本アンケートで設定した設問項目を表-4 にまとめる。アンケート項目における法定協議とは、令和5年度に実施された「道路法第47条の11第1項の規定に基づく道路管理者への道路構造情報提供依頼」を差している。これは道路法第47条の11第1項の規定に基づき、道路局から各地方整備局を経由して全国の道路管理者宛に4月上旬に以下2点を依頼したものである。

＜依頼1＞ 配布資料に基づき重点収録区間に対する収録スケジュールを令和5年度及び令和6年度に予定する区間を回答

＜依頼2＞ 道路情報便覧に未収録の道路法上の道路の通行可能経路の判定に係る道路構造情報（管内図、道路台帳、附図平面図など）の提供

アンケートは国土交通省の道路局から各地方整備局を経由して全47都道府県の特車担当者に対してメールでアンケートへの回答協力の案内を送り、その後、web 回答フォームへの入力、あるいは、回答後の pdf ファイルのメール添付での回収を行った。なお、アンケートへの回答は令和5年11月30日を期限として設定した。その結果、北海道・東北地方で7件、関東地方で9件、北麓・中部地方で7件、近畿地方で7件、中国・四国地方で9件、九州・沖縄地方で8件の回答を得た。これら全30件のうち、本庁一括管理型(A)の体制をとっている自治体が13件、地方組織分散対応型(B)の体制を取っている自治体が17件であった。

(3) アンケート結果

実施したアンケートの結果について、今後の確認制度の普及に向けて解決が必要となる情報便覧収録に関する課題を中心に、以下に整理する。

a) 都道府県の抱える課題

都道府県が情報便覧収録を行うにあたっての課題を整理したものを図-5 に示す。これによると、「システムを利用しての便覧更新作業負担」、「便覧情報収集の負担」「異動による人材育成・引き継ぎ」、「市区町村との連携」に課題を感じている都道府県が多いことが分かる。システムに関して、道路情報便覧収録に当たっては、多くの資料が必要となり、それを収録システムに入力することが求められる。その作業に当たっては、知識や経験が必要となるため、システムのユーザーインターフェースやユーザーエクスペリエンスに課題があるといえる。

また、「便覧収録するより、その都度協議を行う方が労力が小さい」について8都道府県が回答しており、利用頻度の低い道路では、収録作業による審査の負担が必ずしも軽減しない場合に、収録の動機が下がる傾向がうかがえる。

2.(1) e)でも指摘されたように、都道府県道と市町村道の交差点の情報を道路情報便覧に収録する際には、市町村の協力が必要不可欠となる。それに関わって、都道府県が、市区町村の対応に関して感じている課題を図-6 に示す。これより、「市区町村側の動機・認識不足」「市区町村職員の職員不足」「都道府県側の負担が大きい」に課題を感じている都道府県が多いことが分かる。一方で、市区町村との信頼関係が構築できていないと回答した都道府県は、特にタイプAでは少ない。すなわち、市区町村とのコミュニケーション関係は構築できているものの、市区町村側に対応可能な人材が不足している実態がうかがえる。

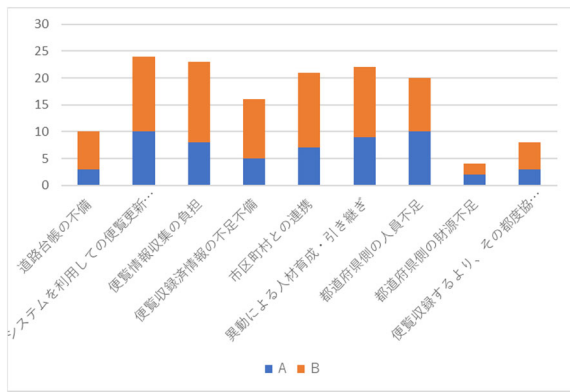


図-5 都道府県道の便覧収録にあたっての課題

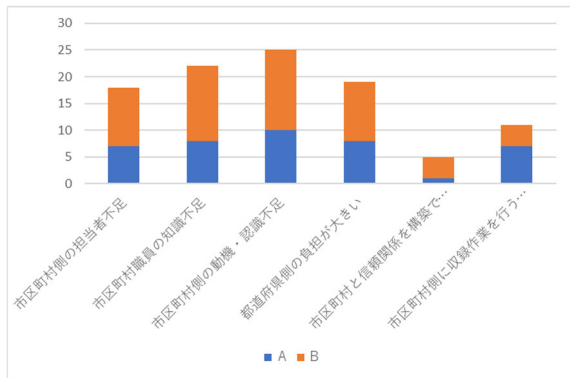


図-6 都道府県道の交差点収録に係る市区町村の課題

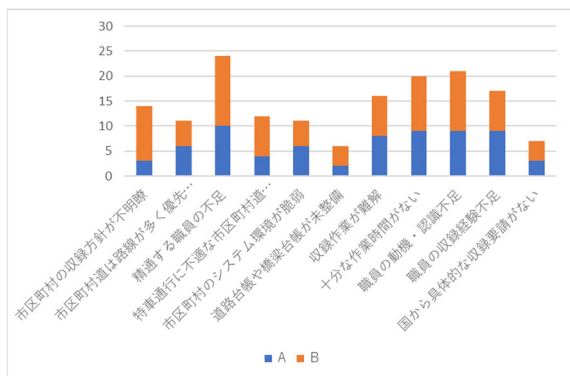


図-7 市区町村道の収録が進まない理由

これに関わって、都道府県の担当者が考える、市区町村で収録が進んでいない理由について整理したものを図-7に示す。これより、図-6と同様、「精通する職員の不足」「職員の動機・認識不足」「十分な作業時間がない」といった人材に関わる項目が多く挙げられているが、その他にも「収録方針が不明瞭」であることも比較的多く指摘されている。一方で、情報便覧の収録にあたって必要となる道路台帳や橋梁台帳は整備されていると見られるため、必要なデータを有効に活用するためのツールの必要性が指摘されるほか、道路情報便覧に収録することの意義や求められる収録方針を明確化し、少ない人材でも対応できるような環境整備が必要不可欠であると考えられる。

b) 法定協議への評価

令和5年度の法定協議は、過去の申請実績の多かった区間を収録する、という明確な方針のもとで進められた。これに対する都道府県担当者の認識は図-8の通りである。まあまあ有益・とても有益とする意見が全体で50%、あまり有益でない・全く有益でないとする意見は全体で20%であり、概ね有益であると評価されていることが分かる。なお、AとBでは、その評価の内訳に有意差は見られなかった。自由回答と併せてみると、従来の便覧更新作業では作業手順が複雑で手つかずの部分に対応できた、「資料作成がサポートされ情報の確認作業のみ行えばよく資料作成の負担が軽減された」など4都道府県が「とても有益」と高評価したものの、「まあまあ有益」と評価した都道府県では具体的な効果が記載されていないものも多い。逆に「どちらともいえない」とした都道府県からは「一回でも申請があった地点が洗い出されているが実際に許可されたのか不明」、「(事前に入力されている諸元値である)仮値には正しい数字が入っておらず、いい加減な値」、「地方整備局は本省の指示を左から右に流すだけになっている」など事務作業の運営面・情報の品質面などに関して厳しい判断をしているところもあった。

c) 確認制度への評価

都道府県の担当者が確認制度に対する評価を整理したものを図-9に示す。「現状では効果・影響は無い」、「制度活用状況が分からない」、「収録促進が前提となっている」という意見が約6割になっている。これはラストマイル問題が解決できていないことが背景にあると考えられる。一方、「申請件数減少等を期待」している都道府県も少なくない。また、「人員配置には影響しない」と回答した都道府県は2割程度と少なく、確認制度が普及すれば申請件数が減少し、それによって人員配置を調整できることへの期待を持っていると解釈できる。しかしながら、「制度の活用状況が分からない」と懸念も示されている。実際に、令和5年11月時点では、確認制度の利用状況について公式に発表された資料はなく、適切な情報開示の必要性もうかがえる。

d) 自由回答結果の分析

以上のアンケート結果に加え、令和4年のヒアリング調査で得た自由回答を踏まえ、現状の特車行政の抱える課題を構造化し、今後の課題について考察を行う。

特車行政の課題にみる「社会的ジレンマ」

特車行政における最大の課題がラストマイルである市区町村道の情報便覧収録不足の解消にある点は全てのステークホルダーの共通認識である。それに加えて、本アンケート調査からは、多くの市町村において、特車業務を専任とする職員がおらず、人手や知識の不足により、便覧収録を行えないことや、そもそもPCを所有しておらず、便覧収録する手段

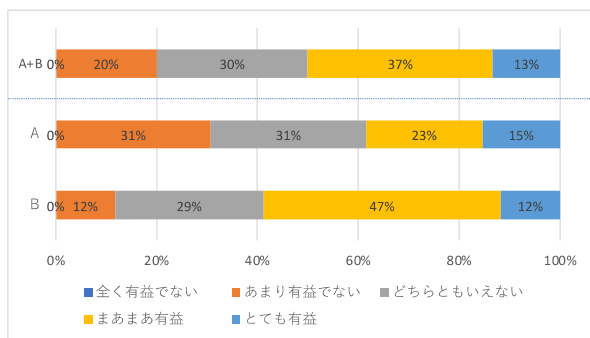


図-8 令和5年度法定協議への評価

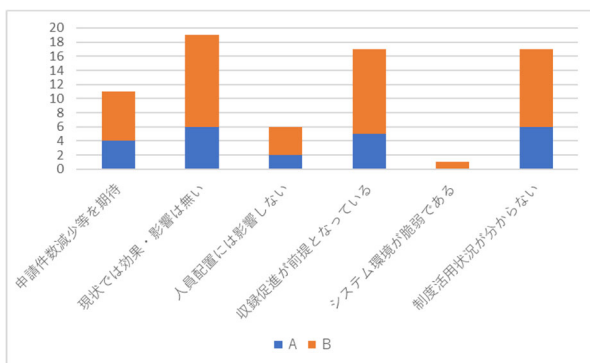


図-9 確認制度の認識

がない実態が分かってきた。それゆえに都道府県が市町村に対して便覧収録の働きかけを行えていないという課題があると考えられる。こうした理由から、便覧収録便覧収録を「する」「しない」のジレンマの中で、都道府県において便覧収録の働きかけを行わない、もしくは行えない傾向にあることが確認された。

この便覧収録を「する」「しない」という問題には、社会的ジレンマの一類型が内在化していると考えられる。社会的ジレンマとは Dawes が提唱した概念であり、「長期的には公共的な利益を低下させてしまうが短期的な私利の増進に寄与する行為」か「短期的な私利の利益は低下してしまうものの長期的には公共的な利益の増進に寄与する行為」のどちらかを選ばなくてはならない、という社会的状況のことを言う¹⁾。

便覧収録を行うことは、将来の特車業務の軽減化や物流の円滑化など長期的・公共的なメリットをもたらすことが考えられる一方で、「協議の労力よりも収録の働きかけの労力の方が大きい」と回答した都道府県も多く、短期的な視点から考慮するとコストのかかる行動であると言える。逆に言えば、便覧収録を行わないことは、短期的な視点から考慮するとコストの小さい行動であると言える。特車行政においては、こうした社会的ジレンマ状況において、先述した理由から、便覧収録を「行わない」という行動を選ばざるを得ないのが現状であることがアンケート結果から読み取れた。

こうした社会的ジレンマの解決策としては、人々の行動変容の要因として、外的な環境的要因に働きかける「構造的方略」と、内的な心理的要因に働き

かける「心理的方略」の2つが提案されている。そして、人々の行動の規定因は外的・内的要因双方から作用を受けることから、社会的ジレンマの解決には心理的・構造的方略の双方を組み合わせる用いることが効果的であるとされている。次に、この枠組みを用いて、アンケート回答からどのような方略が有効であるかを検討する。

便覧収録に向けた構造的方略

構造的方略とは、法規制やハード的・ソフト的なシステムの導入などにより、環境の整備を行うことで、社会的ジレンマを創出している社会構造の変革を目指すものである。便覧収録を行うための労力（コスト）を低下させるための便覧登録簡易システムの開発は、まさに構造的方略であり、技術開発へのニーズであるといえる。登録簡易システムの開発を望む声は、アンケートでも多く確認されており、「本研究には特車審査の窓口として期待している。具体的に活用可能になれば、審査担当者の事務負担軽減につながる事と思う。（タイプA）」「交差点の折進判定にあたっては、従来、道路台帳や電子データ収集支援ツールで折進可否を判定しているところであり、判定が自動化されるメリットは大きいと考える。（タイプB）」といった意見が多数、確認された。

こうしたシステムの開発以外にも、外部事業者による収録の支援なども構造的方略の一つとして挙げられる。いくつかの都道府県では、委託事業者が市町村道の収録を行っていることから、外部委託の予算をつけるなどの支援によって労力（コスト）の低下を促進することも必要であると考えられる。

加えて、「通過するだけの大型車は国管理の国道などを通過すべき（タイプA）」や「オンラインでの協議システムも存在するが現状有効に活用されていない（タイプA）」、「新規格車のように国道が申請不要になると申請先が都道府県に偏重することになり負担増につながる（タイプB）」、「協議元が過去の協議実績から収録が必要とされる箇所を抽出し収録の依頼をすることで国・都道府県・市町全体で収録促進に繋がる（タイプB）」、「行政間に跨る路線について隣接の市区町村との調整が不足し収録状況に濃淡が出る（タイプB）」、「新規供用区間は未収録道路としての対応が必要で審査時間が増大となる（タイプA）」といった回答が多数あり、規制（ルール）の整備も必要であると考えられる。

便覧収録に向けた心理的方略

外的な環境を整備する構造的方略に対して、心理的方略では、環境要因には手を加えず、人々の心理的側面に働きかけることを通じて行動変容を促す方略である。様々な社会的ジレンマ問題において、構造的方略に比して、心理的方略は軽視されがちであるが、その有効性はこれまでの社会的ジレンマの研究において確認されている。

本アンケートにおいても、心理的方略の有効性を示す回答が得られており、特に、ある都道府県では、

信頼関係をベースに市町村に依頼を重ねることで、順調に収録数を増やしている。「市町の担当者が事務の進め方や収録作業で困っている場合は積極的にフォローするなど、県と市町で信頼関係を築くことができれば収録の依頼にも応じてもらいやすい」と回答しており、市町担当者が道路情報便覧の収録作業に慣れていない場合、システムの使い方を丁寧にフォローするなどの対応を行っている。こうした対応は、心理的方略のコミュニケーション法と呼ばれるものであり、コミュニケーションを通じて協力行動への変容を期待する方法である。中でも、便覧登録のやり方を丁寧にフォローする対応は、協力行動の行い方をアドバイスするアドバイス法に該当する。

他の都道府県でも、「市区町村担当者と都道府県担当者との間で、収録の促進に向けた連携がとれていないこと」が問題として挙げられており、都道府県と市町村のコミュニケーションや信頼関係の不足が、便覧収録が遅れている一つの要因とも考えられる。他にも、「折進先が市町村道の場合、関係自治体に収録の同意を得られないケースがあると収録作業が進まない要因となる。」と回答している都道府県があるが、足並みをそろえなければ便覧収録できないという点からも明らかなように、便覧収録の促進には、円滑なコミュニケーションが重要であることが窺える。一方で、「収録してほしい箇所が多くあるためそのことを伝えると収録を見送られてしまう」という回答をしている都道府県もあり、コミュニケーションの失敗によって、収録が見送られてしまうことが窺える。また、「現状の収録マニュアルはボリュームが多すぎるので簡易版のマニュアルの作成は必須と考える」という回答に見られるように、簡易版のマニュアルの作成やそれを用いたコミュニケーションが有効であると考えられる。

コミュニケーションによる行動変容において、規範活性化理論が有用であることが知られているが、そこでは、協力行動が行われる最初のきっかけは、協力行動についての「重要性認知」が形成されることであると指摘されている。アンケートでは、「市町担当者の収録に対する認識が乏しい」という回答が幾つか見られたが、便覧登録の重要性認知が形成されていないこともまた便覧収録の進まない一つの要因と考えられる。便覧収録することによって、長期的・公共的にいかなるメリットがあるかといった情報の収集、その共有が極めて重要であるといえる。その一例として、ある都道府県が回答しているように「自衛隊はあらかじめ、道路管理者に対し、「通知」を行うことで通行することができるため、便覧収録により申請が減少する」といった便覧収録による長期的な労力（コスト）削減についての情報などが挙げられる。

構造的方略が、行動変容を「誘導する」という特徴を持っている一方で、心理的方略は意識に働きかけ、実際に意識の変容を導き、それを通じて「自発的な行動変容」を期待する方法である点に特徴がある。また、構造的方略として、登録簡易システムの

開発、外部委託による収録、申請や収録についての規制（ルール）の整備を挙げたが、これらの構造的方略を実際に行っていくには、時間やコストがかかるため、今すぐにはできるものではない。その一方で、心理的方略で取り上げた、都道府県と市区町村とのコミュニケーションの促進、便覧収録作業の簡易版マニュアルの作成、便覧収録がもたらす長期的公共的メリットに関する情報提供などは、時間やコストのかかるものではなく、今すぐに取り組めるものであると言える。便覧収録の促進に向けて、こうした構造的方略、心理的方略の両方を組み合わせた取り組みが今後、必要であるといえる。

e) 考察

ここまで、市区町村における道路情報便覧収録を促進する施策を「社会的ジレンマ」の枠組みを利用して検討してきた。この施策は道路情報便覧が市区町村の管理するラストマイルの全てを常時包摂することによって特車確認制度に移行することで、現在の特車申請を審査する道路管理者の負担を大幅削減する目的を持っている。特車行政全般についてのヒアリングの回答においても、特車確認制度に期待する声もあるが、限定的である。

むしろ、「許可の条件通りに走行しているかの検証はどこが行うのか曖昧なままである（タイプB）」「道路管理者側で膨大な事務処理が必要となる制度設計自体が疑問（タイプB）」という様な向かうべき目標やその実現ステップの明示を要求する意見、「現在便覧収録の対象外である道路法外道路、特に臨海道路、農道は申請頻度の高いスパンが多数存在しているので、今後どのように整理していくのか疑問である（タイプB）」と道路管理者が縦割りのままでは根本的に解決できないと危惧する意見など、制度そのものに対する不信感を抱いている声がある。

また「全国の道路管理者に跨がった手続きであるため全国統一ルールが事務処理の効率化に繋がるが、地域性に起因して各道路管理者によって審査内容や方法が不統一な面をどうするのか（タイプA）」という不透明な面を持つ制度であることへの不信感を露呈する意見、「交差点データ、曲線障害データを実情に即した形に収録し直すことで協議件数が激減できるなど、そもそも現制度の精度を高める（タイプB）」ことを求める意見など、制度そのものの在り方を疑問視する声も多い。これらは、早急に抜本策を打たないと多くの都道府県が審査事務を行えなくなるリスクを抱えているアラートであると思われる。

2.3 行政書士・運送事業者へのヒアリング調査

特車通行許可を申請する側の主体として、運送事業者、および申請手続き業務を代行する行政書士を対象にヒアリング調査を行った。行政書士事務所に対しては令和3年12月に1事務所、令和5年7月～令和6年1月にかけて7事務所を対象に行った。

また、運送事業者については、令和3年11月～令和4年2月にかけて4社を対象に実施した。

(1) 行政書士へのヒアリング

運送事業者の中では運行管理者の設置は義務付けられているが、特車申請に関しては専門性の高さと常時必要な手続きではないことから、行政書士を代理人とする代理人申請の制度が用意されている。

a) 令和3年のヒアリング

令和3年には、国際海上コンテナ車（40ft 背高）が多い神戸港に焦点を当て、兵庫県行政書士会から特車申請に精通した行政書士法人として推薦を受けた神戸市内を本拠地とする行政書士法人Aにヒアリングを行った。

神戸における特車申請の実情として海上コンテナが多いが、海コン用セミトレーラは規格通りであり特車申請に関わる折進判断に関する実務上の負担は少ない。一方、重量物運搬用セミトレーラも多く、これらはオーダメイドで個体差が大きく規格外なため折進判断が困難なケースが多い。特に積載貨物情報を入力して軌跡図を描く場合、車両本体の軌跡の上に積載貨物の軌跡が加わるので非常に手間のかかる作業となる。道路情報便覧の収録状況に関して神戸近郊では未収録の路線が多く、経路作成時に相当負担が大きい模様である。

特車申請に関する課題の一つ目は、神戸港と神戸市内の拠点を結ぶ経路なら2週間で審査が完了する一方、広域にわたる経路の場合国道事務所間での協議が長引き2-3ヶ月かかるケースもあり、運送事業者の実需要に応えられないケースが多い点である。

二つ目は、国道の場合は許可証が電子化されているものの、地方公共団体の場合は紙ベースになる。いずれの場合でも許可証は電磁的又は紙媒体での携行が義務付けられるが、電磁的にタブレット端末を利用してもドライバーが高齢で操作に長時間要することが多く、紙媒体では経路が多い場合書類の厚みが10cmを超えることになり、ドライバーがその場で明示できず違反となるなど運用面で実用的でない面もある。

三つ目は、橋梁の劣化が進んでおり耐荷重が制限される例が多くなり通れる経路が減ってしまうという事情がある。例えば車検証上では積載重量が30tとなっても、現実に特車申請し経路が確定した場合に、積載重量が22tに制限されてしまうケースがある（全ての経路上の最小値で制限されるため）。このような場合運送事業者の効率を落とさず通行可能にする方式を官民連携して確立する必要がある。

b) 令和5年のヒアリング

ここでは、まず首都圏・近畿圏・その他地方に拠点を置く行政書士事務所をwebで約20事務所を検索し電話で面談のアポイントをとり、その中で許可を得た7事務所に対し、ヒアリングを実施した。こ

のうち、2事務所は特車の申請に特化した業務を行っているが、それ以外は特車業務の割合は約15%～約60%とばらつきがある。また、事務所あたりの行政書士人数も1人～5人と規模自体にもばらつきがある点に注意が必要である。

まず、道路情報便覧の収録不足によるラストマイルについて、申請する経路を選択する上で影響がある程度を聞いた。これによると、かなり影響を受けると認識している事務所が4つある一方で、2つの事務所はほとんど影響を受けない、と認識していることが分かった。これは、物流事業者を顧客と持つ場合には申請経路が固定化されていることによる。逆に言うと、ラストマイルの影響を受けるのは、工事車両など、目的地が期間ごとに変更される場合であると考えられる。そのような場合には、利用経路が道路情報便覧に登録されていないことが多く、申請内容にも影響が及んでいると考えられる。

次に、特車確認制度に関する意識に関して、ヒアリングを行った7つの全ての事務所がこの制度に対してネガティブと宣言している。特に「ラストマイル問題」、「料金の高さ」のために普及をしないと考えており、さらにもし普及した場合には、「行政書士としての活躍の場が制限」されると認識している。また複数の都道府県トラック協会から、本制度に対してネガティブなベクトルでの講演依頼を受けている事務所もあり、道路局が目指している確認制度への移行促進の抵抗勢力になっている。

最後に、特車行政全般について、行政書士の業務の中で特車通行手続きは、利益率が高くかつ、業務的に難易度が高く他の行政書士が入れないという参入障壁の高さもある特殊な業務の様である。難易度が高くなっている原因は行政の縦割りの影響で明確な筈のことが不明確になっている点にあり、道路管理者が2-3年で異動するためその場凌ぎの連続になっている旨辛辣な意見を持った事務所もある。全ての事務所の申請は「オンライン」「特車ゴールド」で対応しており窓口申請は10%以下である。国土交通省から提供されるツールでしか手続きが出来ないのでその範囲で純粋に申請処理を行っており、一般企業のような生産性向上の策が取りにくいことも指摘されていた。

(2) 運送事業者へのヒアリング

ヒアリング調査を行った運送事業者Aは全国系大手で全国に車両拠点があるが、今回は近畿圏にある拠点でヒアリングさせて頂いた。他拠点が管轄するトレーラも牽引することがあり、特車申請における車両管理対象となっている。運送事業者Bは地域特化の中堅として事業拡大を図りつつある。今回は本社のある拠点でヒアリングさせて頂いた。運送事業者Cは地域特化の中堅でクレーン事業も行っている。今回ヒアリングさせて頂いた拠点では、クレーンとトラクタ・トレーラが管理されている。これらの運送事業者はいずれも、デジタルタコグラフやETC2.0を積極的に導入する先進的で真面目な事業者であり、

特車申請制度にも極めて真摯に取り組んでいる。しかしながら、各運送事業者は共通して、

- ・ 道路情報便覧に収録されている市町村道の割合が極めて少なく、また起終点や立ち寄り地ではなく交差点ベースで管理されている
- ・ 交差点の折進が「個別」審査になっている箇所が多く、迂回できないケースも多い
- ・ 審査に要する時間が長く実務上の要請に間に合わないケースが多い
- ・ 例えば誘導車が必要となる C 条件の交差点が全経路のほんの一部に必ずあるが、誘導車を付けることは体制の確保や費用面での負担が大きい

など 100%遵守するのが難しい制度であると認識されていた。また新車購入し自動車登録番号がとれた後、特車申請に 2 ヶ月を要することによる損失を誰も補償しない制度への不満はたいへん大きいことも明らかとなった。

ETC2.0 に関しては高速道路の料金値引きについては関心があるものの

- ・ 高速道路を使わない近距離輸送に特化した車も多い
- ・ 大都市圏以外を走行する車では ETC2.0 搭載の必要性がない

などの理由で全ての車が ETC2.0 を搭載しているわけではなく、ETC2.0 を前提にした優遇措置制度のみが具体化している点で魅力をあまり感じていないようであった。

一方、現時点で他事業者のトレーラを牽引することは限定的だが、今後ドライバー不足もあり相互にトレーラを牽引し合うケースも急増するので、それに耐えられる制度を求めている。具体的にはトラクタ+トレーラの組合せは爆発的に増加し運行前のタイミングで有料の特車申請をすることはその申請費用だけで非現実的なものになると懸念している。それを回避するため特車の通行実績で費用負担するような制度への転換を求めている。

(3) 考察

道路を利用する立場である運送事業者や業界団体は総じて特車申請の制度に対して少なからず抵抗感を抱いていることが判明した。

特に、運送事業者は通行許可申請を「する」「しない」のジレンマ状況に置かれていることが読み取れる。この通行許可申請を「する」「しない」という問題にも、社会的ジレンマの一類型が内在化していると考えられる。通行許可申請を行うことは、社会の公共財である道路や橋梁の長寿命化を図ることや重大な交通事故を未然に防止することなど長期的・公共的なメリットをもたらすことが考えられるが、先述したように、運送事業者にとって、通行許可申請を行うことは、取得までに時間を要するため、コストのかかる選択とも言える。その一方で、無許可の走行に対して、十分に取り締まりが行われていない現状において、通行許可申請を行わないという

ことは、短期的にはコストの小さい選択となっている。そのため、通行許可申請を行わない運送事業者が得をする構造になっていることは、十分に留意が必要であると言える。

この解決方策として、構造的方略に関していえば、まず、無許可での走行に対する取り締まりや罰則を強化することで、許可申請を行わないという選択を行わないような規制を整備することが重要であると言える。一方、心理的方略としては、社会の公共財である道路や橋梁が無許可の走行によって大きなダメージを受ける可能性があること、それによって、運行事業者が公道でビジネスを行っている以上、長期的には運行事業者がその影響を受けることを周知していく必要がある。

また、今回のヒアリングでは、運送事業者にとって、交通事故を起こしてしまうことは、荷主に多大な迷惑をかけてしまうことから、最も避けるべき事態であるという回答があった。無許可の走行による交通事故の発生リスクについての情報を提示することも今後、有効であると考えられる。

ただし、こうした運送事業者の社会的ジレンマが解消され、すべての運行事業者が通行許可申請を行った場合、申請数の増加に対して、現行の特車行政では十分に処理できるとは考えられず、その観点からも、協議プロセスの簡易化や便覧収録の促進が重要であると言える。

2.4 おわりに

2024 年問題として認識されているように、物流業界における生産性の向上は喫緊の課題である。その一端を担う特殊車両の運行に当たっては、通行許可の取得に多大な時間を要することで、効率的で機動的な輸送システムの妨げとなっている。その解消に向けて、国土交通省では令和 4 年 4 月より、情報が登録されている道路に関しては、即時的に通行許可が取得できる確認制度の運用を開始したが、道路情報便覧に登録されている道路が、ラストマイルに相当する市区町村道において不足しており、確認制度の利用が進んでいない実態にある。そこで本研究では、これらの課題に関わるステークホルダーである都道府県の特車担当者へのヒアリング調査・アンケート調査、および通行許可申請を代行する行政書士、実際に運送事業を営む運送事業者へのヒアリング調査を行った。その結果に基づき、特車に関わる課題の構造化とそれに基づく解決方策を考察した。

得られた主な知見は以下の通りである。

- ・ 主要地方道に市町村道が交差している場合、市区町村との協力が必要であること
- ・ 市区町村道で道路情報便覧の登録が進まない要因として、担当者の知識、人員不足だけでなく、登録するための動機や方針が不明確であること
- ・ 都道府県の担当者は確認制度を一定程度評価し

ているものの、ラストマイル情報が不足していることによる課題を認識していること

- ・令和5年の法定協議はラストマイル情報の補完に有益であるが、その運用については改善の余地があること
- ・許可申請手続きを代行する行政書士は、確認制度が普及した場合に、業務がなくなると認識をしているものの、現状として確認制度が普及する見込みは低いと見積もっていること
- ・運送事業者は、通行許可を得るまでの期間で減価償却費の損失を被っている一方、許可を取得せず通行した方が全体のコストは低くすむことに不満を感じており、適切な取り締まりを求めていること
- ・市区町村道の道路情報便覧登録や運送事業者の通行許可取得に関わる課題は、いずれも社会的ジレンマとして捉えることができ、構造的方略・心理的方略の両アプローチでの改善が有効であること

本研究では、アンケート・ヒアリングによって定性的な観点から課題の抽出、改善案の考察を行ったが、その実効性を得るためには、技術的なアプローチは必要不可欠である。そのため、例えば、特車に関わる多様なデータを一元管理するデータベース構築、道路情報の簡易な抽出による折進条件や通行条件の自動判定手法、道路情報便覧への収録優先度を決定する方法などは、直接的な業務改善に繋がると考えられる。これらにより、今後の確認制度の普及を促すことが重要となる。

注釈

注1) https://www.tokusya.ktr.mlit.go.jp/PR/download/04_jichitai-01.pdf, 2024年5月24日閲覧。

参考文献

- 1) 藤井聡：社会的ジレンマの処方箋，ナカニシヤ出版，2003.

第3章 空中写真に基づく交差点構成要素のセグメンテーション

3.1 はじめに

本研究では交差点情報のデジタル化に向け、空中写真に基づくセマンティックセグメンテーションによる車道や歩道、区画線などの交差点構成要素の自動判別を行うとともに、推定精度への影響要因を明らかにしたものである。

現在整備・活用されている主な道路に関するデータベースとしてはデジタル道路地図、道路基盤地図情報、道路情報便覧や高精度3次元地図（High Definition Map, HDマップ）が挙げられる。デジタル道路地図は道路のネットワーク構造がデータ化されており、それに紐づく形で道路諸元のデータも整理されているが、交差点に関してはリンクの接続関係が記述されているに留まる。道路基盤地図情報は区画線や停止線などの線要素も含む詳細な道路情報データベースであるが、道路工事完成図に基づいてデータ収集がなされるため、平成18年度の運用開始から、直轄国道でもその整備率は3割〜4割にとどまっている⁴⁾。道路情報便覧は特車の走行に関する道路条件を道路ネットワークベースで整理したものであり、車両分類ごとに折進時の通行条件がデータ化されている。しかしながら、これらは人手を介したデータ整理がなされており、直轄国道や主要地方道ではデータ整備が進められているものの、市町村道など下位に位置づく道路では十分な取り組みがなされていないのが現状である。自動運転に用いられるHDマップは、さらに詳細なLiDARなどを用いて道路情報がデジタル化されたものであるが、データの整備にはコストがかかるため、下位の道路をあまねくデータ化していくのは難しい。

このように、交差点構造や平面図のデジタルデータ化が進まない理由は、そのデータ化に多大なコストや人的作業を要する点にある。その効率化に向けては、作業工程の自動化を進めることが求められる。

そこで本研究では、空間的な網羅性の高い空中写真に対して深層学習のセマンティックセグメンテーション手法を用いて、道路境界、区画線、路面表示

など、詳細な交差点構成要素を識別した交差点のデジタル情報を自動生成する手法を構築するとともに、推定精度への影響要因を明らかにすることを目的とする。また、google mapの衛星画像を適用した場合、あるいは、3次元点群データによる保管を行った場合の精度評価も併せて行う。

空中写真から道路上の地物や複数種類の区画線を識別する取り組みとしてはAzimi et al.¹⁾が挙げられる。しかしながら、このモデルはCNN系のモデルをエンコーダーとして用いているが、近年、画像処理の分野ではTransformer系のモデル²⁾がCNNを凌駕する精度での推定を可能としており、それを適用することによる精度向上の程度は明らかとなっていない。加えて、上記の取り組みは全て日本国外の画像に基づいており、画像内の地物や地勢の見え方が異なる日本への適用可能性は自明ではない。また、交差点の特徴が推定精度に及ぼす影響や、オープンデータの空中写真への適用性、他のデータとの融合活用についても明らかにはされていない。

3.2 使用するデータとモデル

(1) SegFormerの概要

本研究では、SS モデルとして、Xie et al.³⁾によるImageNet で学習済みのSegFormer をファインチューニングしたものを用いる。SegFormer は Encoder-Decoder 構造をもつが、畳み込み層を一切用いず、Attention 機構を用いた Transformer を取り入れたものである。Transformer はもともと自然言語処理のために開発されたモデルであるが画像分類タスクにも援用されている。

学習の流れとしては、最初に入力画像を 4×4 のパッチサイズに分割し、それらをエンコーダーへの入力とする。エンコーダー部では Mix Transformer を取り入れ、複数の解像度の特徴量を出力する。ここでは一辺が入力画像の $1/4, 1/8, 1/16, 1/32$ が出力される。デコーダー部では、異なる層からの情報を集約する

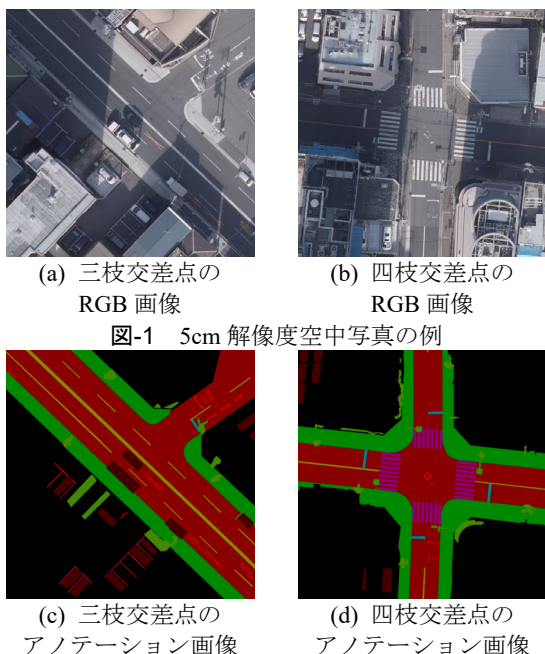


図-1 5cm 解像度空中写真の例

図-2 教師データの例

ことにより、局所的な注意点と大域的な注意点の両方を用いる構造となっている。本研究では、エンコーダーのサイズの大きい SegFormer-B5 を用いる。

なお、SegFormer を適用するにあたっては、他の SS モデルとの比較で優位性があることを事前に確認した。

(2) 使用する空中写真

本研究では、国際航業株式会社が販売する高解像度オルソ画像を使用した。本データは地上解像度 5cm の空中写真で、1 メッシュ当たり 8000×6000 (pixel) の画像となっている。また、対象地域としては、都心部から郊外部まで幅広い土地利用特性に対応させるため、大阪府内の大阪市西区、大阪市中央区、高槻市、東大阪市、枚方市とし、合計 99 メッシュを取得した。その中から、交差点部分をトリミングした画像を学習データとした。

トリミング作業にあたっては、元データを TIF 形式から JPG 形式に変換を行ったのち、1 枚の画像に 1 交差点が含まれるように 1024×1024 (pixel) のサイズに切り取った。その際、位置ずれに対するロバスト性を考慮して、必ずしも交差点中心部を画像の中央には持てこなかったが、停止線や横断歩道等、交差点平面図において重要だと思われる情報については必ず 1 枚の画像中に収めるようにした。また航空カメラ等によって撮影された画像では、レンズの中心から対象物までの距離の違いによって画像の中心から外側へ行くにつれて歪みが生じる。本データでは、それらに対して正射変換することで、歪みを修正するオルソ補正がなされている。しかし、一部の画像において歪みやノイズが含まれていたため、トリミング時点でそれらの画像を除外した。交差点形状については、環状交差点のような特殊な形状の交差点については含めていない。以上の結果、合計

で 498 枚の画像を用いた。図-1 に使用した交差点画像の例を示す。

(3) 教師データの作成

教師データを作成するにあたって、まず分類すべきクラスを決定した。対象として、自動車が通行するゾーンとそうでないゾーン、レーンマーキング、そしてそれらにアノテーションする上で弊害となるオクルージョン部分に大別した。具体的には、車両走行挙動に影響を及ぼすと考えられる要素を明示化するため、車道、歩道、区画線、中央分離帯、横断歩道、停止線、ゼブラゾーン、自動車、その他白線、オクルージョン部分、そして上記のどれにも該当しない部分としての背景の 11 クラスとした。白線や路面標示などは、かすれて見えなくなっている部分が存在したが、補完はせず、目視で確認できる部分のみをアノテーションするようにした。アノテーションの際には、データ容量を削減するため、視覚的に分かりやすい Pascal VOC 形式のインデックスカラーによってアノテーションを行い、PNG 形式で保存した。

交差点の RGB 画像とそれに対応するアノテーション画像の例を図-2 に、分類クラスとそれぞれの R, G, B 値の対応、および全教師データに占める各クラスのピクセルの割合を表-1 にそれぞれ示す。また、全データのうち、学習用に 400 枚、検証用に 50 枚、テスト用に 48 枚の画像を重複なくランダムに抽出した。その際、三枝交差点と四枝交差点、片側 1 車線以下の交差点と 2 車線以上の交差点など、その割合に比して特定のデータ群に偏って含まれないよう配慮した。以降の本研究での推定精度の検証は、テスト用の 48 枚の画像に対して行う。

(4) データ拡張

入手した学習用画像データは 400 箇所の交差点しかなく、SS を学習するには不十分である。そのため、データ拡張を適用し、精度向上と過剰学習の防止を図る。本研究では、多様な交差点形状、交差点規模、空中写真の撮影時刻による色調の際や影の影響、異なる解像度の画像に対応するため、左右反転・上下反転、0.5 から 2.0 倍までのスケーリング、コントラスト調整、ぼかし、90 度までの回転を行った。具体的には、予備的な感度分析の結果に基づき、事前に全画像に対して左右反転、上下反転処理を行って画像数を 1600 枚に増やしたのち、学習時のバッチごとに 50% の確率でスケーリング、コントラスト調整、0~90 度までの範囲で 15 の倍数に相当する角度でのランダムな回転、カーネルサイズ 5×5 で画素の平均を取るぼかしを適用した。

表-1 教師データの分類クラス

クラス	色 (RGB)	全教師データ画像に占めるピクセル数の割合 (%)	備考
0 背景		(0, 0, 0) 51.19	
1 車道		(128, 0, 0) 26.47	・ アスファルト舗装部分 ・ 駐車場部分は含めない
2 歩道		(0, 128, 0) 11.07	・ 路側帯や自転車道, グリーンベルトを含む ・ 車道中央線, 車線境界線, 車道外側線を対象とする
3 区画線		(128, 128, 0) 0.90	・ 白色の実線, 白色の破線, 黄色の実線を含む ・ 交差点内の白線も含む
4 中央分離帯		(0, 0, 128) 0.53	・ 中央分離帯上の歩行者空間については歩道クラスとする
5 横断歩道		(128, 0, 128) 1.21	・ マンホール等により途切れている部分は含めない
6 停止線		(0, 128, 128) 0.18	・ 自動車等により隠れている場合は, 見えている部分のみ
7 ゼブラゾーン		(128, 128, 128) 0.11	・ 白線部分のみ
8 自動車		(64, 0, 0) 2.28	・ 車種は問わず, すべて統一クラス ・ 二輪車については含めない
9 その他白線		(192, 0, 0) 0.82	・ 道路標示 (文字, 数字, 矢印等) ・ 交差点外の駐車場の白線等
10 オクルージョン部分		(64, 128, 0) 5.22	・ 街灯や電柱, 街路樹, 植生, 歩道橋, 信号等

3.3 学習環境と設定

(1) プログラム実行環境

本研究では, データサイエンスで広く使用されている Python3.7.12 を用いて学習環境を整える.

学習にあたっては, クラウドでのディープラーニングの開発環境である Google Colaboratory と Amazon Web Services が提供する Amazon SageMaker を用いた. また, 各ライブラリのバージョンとして, CUDA は 11.1, cuDNN (CUDA Deep Neural Network Library) は 7.6.5, ディープラーニングのフレームワークとして PaddlePaddle 2.2.1, および PaddlePaddle-GPU は 2.2.1 をそれぞれ用いた.

(2) 評価指標

SS モデルにより推定した画像の精度を数値的に評価するために, 正解率 (Accuracy) と Intersection over Union (IoU), mean IoU (mIoU) を精度指標として用いる.

ここで, M を分類クラスの集合とすると, 教師データの画素行列においてクラス $i \in M$ に関して 2 値化した行列を S_{gt}^i , 推定データに関しても同様に 2 値化した行列を S_{ps}^i とすると, 混同行列における各要素数は,

$$C_{ij} = |S_{gt}^i \circ S_{ps}^j| \quad (1)$$

と表される. ただし, C_{ij} はクラス i をクラス j と推定した場合の要素数を表し, $(\circ)$ はアダマール積の記号, $(|\cdot|)$ は L1 ノルムの演算記号をそれぞれ表す.

Accuracy (正解率) は推定領域全体の中の正解の割合を表したものであり, 式(2)の通りに表される.

$$\text{Accuracy} = \frac{\sum_{i \in M} C_{ii}}{\sum_{i \in M} \sum_{j \in M} C_{ij}} \quad (2)$$

Accuracy では対象クラス間の割合が不均衡であれば, 必ずしも正しい指標とは言えない. 例えば, 画像の 9 割を背景クラス, 残りの 1 割が白線クラスだったとすると, 仮に画像全体を背景と推定したとしても Accuracy が 90% となってしまう. つまり特定のクラスの性能が悪くても, 大きいピクセル数のクラスを推定できれば良い性能が出やすいという欠点がある.

一方, IoU は対象クラス毎に, 正解領域と推定領域がどの程度重なっているかを表す指標であり, 式(3)で表記される.

$$\text{IoU} = \frac{C_{jj}}{\sum_{i \in M} C_{ij} + \sum_{i \in M} C_{ji} - C_{jj}} \quad (3)$$

これに対し, 全てのクラスの平均をとった指標が mIoU である. 先ほどの例と同様に, 画像の 9 割を背景クラス, 残りの 1 割が白線クラスだった場合, 背景クラスが $\text{IoU}=90\%$, 白線クラスが $\text{IoU}=0\%$ となり, mIoU は 45% となる. これらの指標は Accuracy と異なり, ピクセル数の大小にかかわらず, 推定しすぎの状態 (前述の例で言うと背景クラスを推定しすぎることによって精度が落ちている) を考慮しているため, より厳しい評価指標と言える.

さらに, 交差点における車両の走行空間を抽出することの重要性に鑑み, 各クラスの IoU だけではなく, 車道と, 歩道・その他背景部分の境界線を抽出し, その境界線の IoU (ここでは, edgeIoU と表記する) 値も評価対象とする. edgeIoU の算出方法は以下の通りである.

教師データ, および推定データそれぞれに関して, クラス i に関して 2 値化した上で膨張処理を行った画素行列を $D_{gt}^i(k)$ と $D_{ps}^i(k)$ とする. ただし, k はカーネルサイズを表す. このとき, 教師データ, 推定データの境界線を表す画素行列 $E_A(k)$, ($A \in \{gt, ps\}$) は,

$$E_A(k) = D_A^i(k) \circ (D_A^0(k) \oplus D_A^2(k)) \quad (4)$$

と書ける．ただし、 $\oplus$ は行列要素ごとの論理和を求める演算記号、上付き添え字 0, 1, 2 はそれぞれ背景、車道、歩道のクラスを表す．このとき、edgeIoU は式(5)で定義される．

$$\text{edgeIoU}(k) = \frac{|E_{gt}(k) \circ E_{ps}(k)|}{|E_{gt}(k) \oplus E_{ps}(k)|} \quad (5)$$

なお、カーネルサイズ k を大きくするほど、評価に当たって誤差を許容することを意味する．例えば、エッジが直線であり、教師データと推定データで 1 ピクセル分（実空間の 5cm に相当）ずれていたとした場合、 $k = 1$ とした場合には edgeIoU は 0.33 となる一方、 $k = 2$ とした場合には、edgeIoU は 0.6 となる．

(3) 損失関数

損失関数は教師データの正解値と、モデルから出力された推定値との誤差を表した指標であり、この値を最小化することでモデルの最適化を行う．分類問題の損失関数には一般的には Cross entropy loss が用いられることが多いが、ここでは IoU を明示的に考慮できる Lovasz-Softmax loss⁴⁾、および両者を混合した Mixed loss の適用についても検討を行った．その上で、予備検討の結果に基づいて Lovasz-Softmax loss を採用した．Lovasz-Softmax loss は式(6)の通りに表される．

$$L = \frac{1}{|C|} \sum_{c \in C} \overline{\Delta}_c(\mathbf{m}(c)) \quad (6)$$

$$\text{with } m_i(c) = \begin{cases} 1 - f_i(c) & \text{if } c = y_i^* \\ f_i(c) & \text{otherwise} \end{cases}$$

ただし、 L は損失関数の値、 C と c はクラスの集合とその要素、 $\overline{\Delta}_c(\cdot)$ はジャッカード指標の Lavasaz 拡張を計算する演算子、 $f_i(c)$ は画素 i がクラス c に属する確率の推定値、 y_i^* は画素 i が属するクラスの正解値をそれぞれ表す．ジャッカード指標は上述の IoU に一致し、それを連続値に拡張したものであり、この損失関数を用いることで、IoU を最大化する形でモデルが学習されることになる．

(4) 最適化アルゴリズム

損失関数を最小化するアルゴリズムとして、本研究では Momentum SGD, Adam, AdamW を対象として予備検討を行った結果、AdamW を採用することとした．SGD は損失関数の勾配に対して学習率分だけパラメータを更新するアルゴリズムであり、Momentum SGD はそれに慣性項を追加したものである．Adam も同じく勾配更新に慣性項を考慮したものであるが、勾配要素の 2 乗値で慣性項を除すことで広範囲にパラメータが更新されるように工夫したものである．AdamW は、Adam に L2 正則項を追加することで過学習が抑制されることとなる．

(5) ファインチューニング

ファインチューニング (Fine-tuning, FT) とは、既

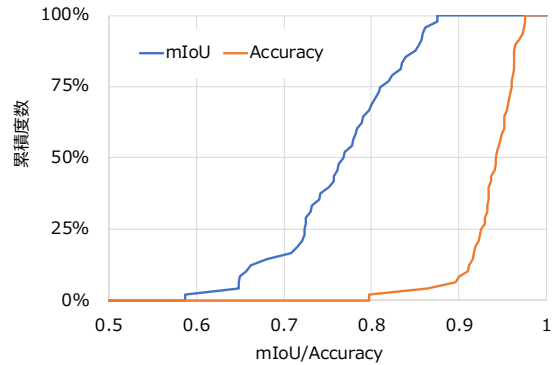


図-3 テスト画像に対する Accuracy・mIoU の分布

存のモデルに何らかのデータを学習させたモデルの重みを初期値として、モデル全体を再学習する方法である．本研究では、SS モデルのバックエンドには、PaddlePaddle が提供している ImageNet の半教師あり学習によって得られた事前学習済みモデルを使用した．なお、予備検討の段階で、事前学習済みモデルなしの場合と FT を行った場合とで精度を比較した結果、FT によって大きく精度が改善されることを確認している．

(6) その他のハイパーパラメータ

上記の設定のもと、予備検討の結果に基づき、学習率を 0.001、バッチサイズを 1、繰り返し計算回数を 80000、AdamW における慣性項の係数 β_1 を 0.9、L2 正則化項の係数 β_2 を 0.999 とそれぞれ設定した．

3.4 推定精度の検証

本章では、上述の設定のもとでの推定精度の検証を行う．その際、推定精度の影響要因や入力画像の性質の違いによる推定精度への影響について分析を行う．

(1) AccuracyとmIoUに基づく推定精度評価

テスト用画像 48 枚に対し、構築したモデルを用いて推定を行い、各画像の Accuracy 値、mIoU 値を算出した．その累積分布を図-3 に示す．これより、Accuracy は 0.797~0.975 (平均: 0.936, 標準偏差: 0.037)、mIoU は 0.588~0.875 (平均: 0.762, 標準偏差: 0.072) に分布していることが分かる．Accuracy については、画像による差異は小さいのに対し、mIoU はやや広く分布しており、画像に含まれるクラスの割合などの特徴によって精度が異なることが考えられる．Azimi et al.¹⁾では、mIoU は 0.401 であり、本研究では大幅な改善が見られることが分かる．これは、定義されたクラス数が本研究では 11 なのに対し、Azimi et al.¹⁾では 20 と多いことも影響していると考えられるが、本研究で学習に用いている画像数が少ない (本研究は 400 枚に対し、Azimi et al.¹⁾は 7 万枚) 点に留意すると、SegFormer を用いたことによ

る精度向上効果が顕著であった可能性がある。

図-4 には、mIoU が最小値の交差点、中央値の交差点、最大値の交差点の RGB 画像、セグメンテーションの Grand Truth 画像、および推定画像を例として示す。これより、全体的に精度よく各クラスを識別できていることが分かる。また、ここに示した画像はいずれも影を含んでいるものの、影による推定精度への影響はほぼ見られず、頑健な推定ができていることが確認できる。Accuracy と mIoU では必ずしも評価結果が同一ではない。これは、画像によって含まれるクラスの画素数の比率が異なるためであると考えられる。両者に共通する事項としては、交差点サイズが小さい、歩道や区画線がなく道路部分が明確でない、さらには背景に相当する部分が建物以外である割合が多いといった点が挙げられる。

クラスごとの精度を比較するため、図-5 にはクラス別の IoU 値の平均値を示す。これより、背景部分、道路部分、自動車に関しては高い値を示しているが、ゼブラゾーン、中央分離帯、その他白線、オクルージョン部分では比較的精度が低いことが分かる。これは、ゼブラゾーンや中央分離帯は、規模の大きい交差点に限られるため、これらが含まれている学習用の画像が少ないことに起因すると考えられる。その他白線やオクルージョンに関しては、いろいろな種類のものが存在するため、識別が困難であることが予想される。クラスを細分化することにより精度を向上させる可能性があるが、そのためには学習デ

ータの拡充が必要である。ただし、クラスを細分化する場合に、アノテーションデータを作成するのは人間の目視判断であるため、空中写真上での見え方によっては必ずしも正しく判別できる訳ではない（作業する者によって判断が分かれる可能性がある）点に注意が必要である。加えて、白線に関しては、本研究では、かすれている場合には当該箇所は道路としてアノテーションを行った。しかしながら、白線の形状はある程度のパターン性があり、かすれ箇所を補完して白線としてアノテーションする必要性があった可能性がある。これらの最適なクラス数やアノテーション方法については、今後の課題である。

最後に、対象画像の立地特性が推定精度に及ぼす影響を明らかにするため、mIoU を目的変数、画像に含まれる特徴量を説明変数とする決定木回帰を行った。ここで説明変数としたのは、主道路車線数、従道路車線数、角地・沿道に駐車場が含まれていることを示すダミー変数（駐車場 D）、対象交差点が住宅地・商業地に立地することを示すダミー変数（住宅・商業地 D）、工業地域に立地することを示すダミー変数（工業地域 D）、角地・沿道に公園や農地などの緑地帯が存在することを示すダミー（公園・緑地帯 D）、周辺の建物が低層であることを示すダミー（低層 D）、路面標示のかすれ度合いを目視判断で 0（かすれなし）、1、2（かすれあり）で表した変数である。分岐の最小データ数を 5、cp（complexity parameter）値を 0.04 として決定木回帰を行った結果を図-6 に示す。

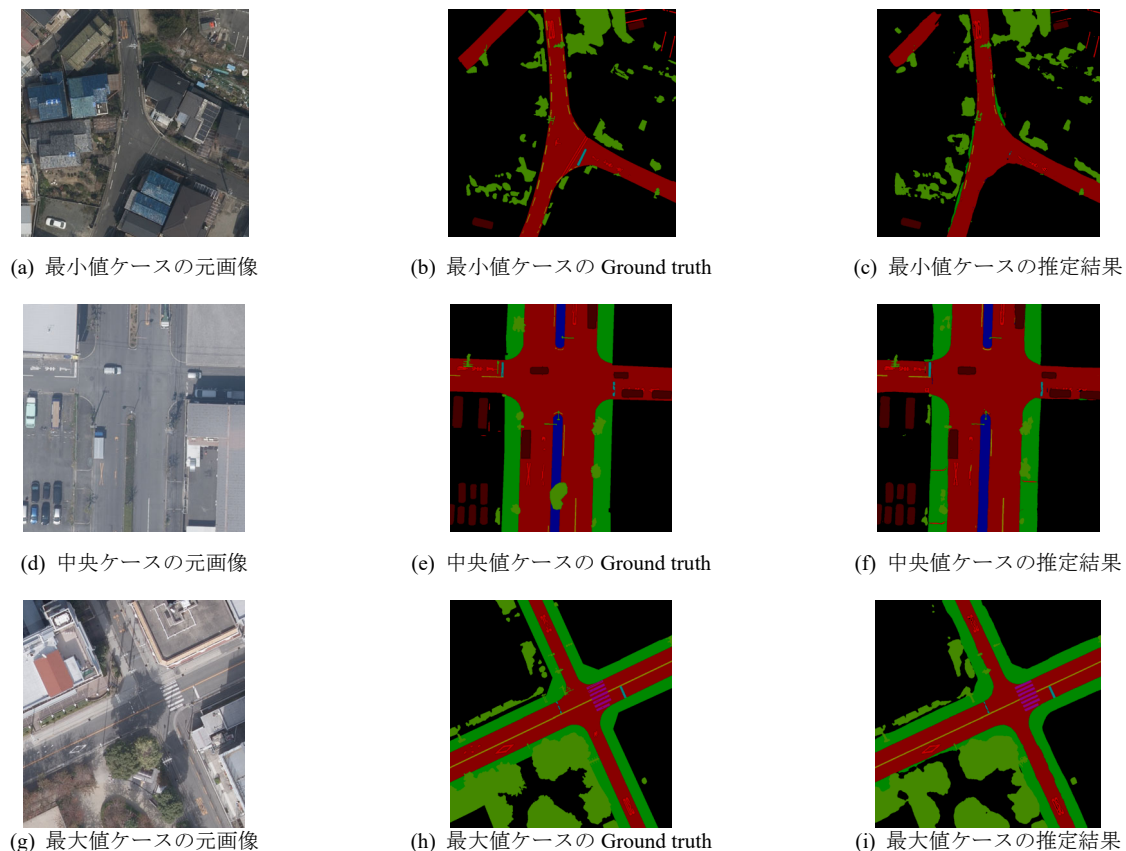


図-4 mIoU の最小値・中央値・最大値に対応する交差点画像の例

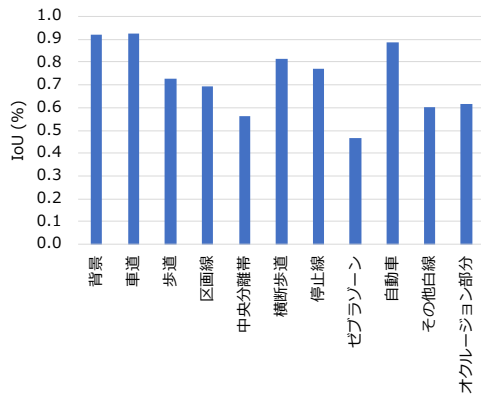


図-5 クラスごとの IoU

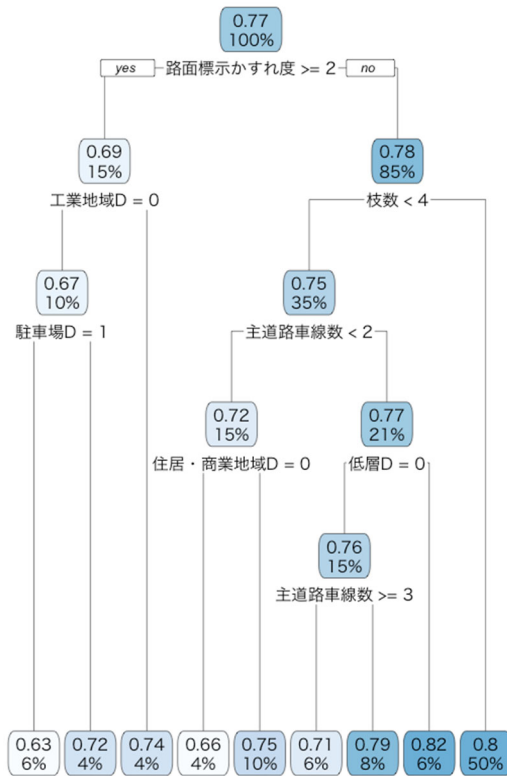


図-6 mIoU に対する決定木回帰の結果

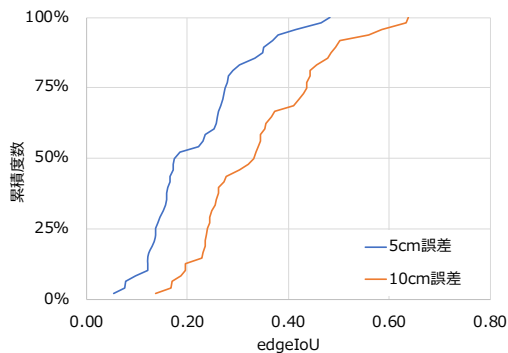


図-7 edgeIoU の分布

分岐の上位にある変数に着目すると、路面標示がかすれている交差点では推定精度が低い傾向にあることが分かる。また、4 枝以上の交差点、工業地域に位置する交差点、主道路車線数が 3 以上の交差点、角地・沿道に駐車場が存在しない交差点ほど、推定精度が高い。よって、学習データを追加する場合には、これらの点を考慮して地点選定を行う必要があると考えられる。

(2) edgeIoUに基づく推定精度評価

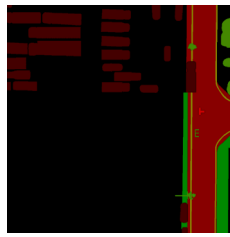
次に、道路部分と歩道・背景部分の境界線の識別精度を示す指標である edgeIoU による推定精度評価を行った。図-7 には、許容誤差を 5 cm (1 ピクセル相当) と 10 cm (2 ピクセル相当) に設定したときの、edgeIoU 値の画像ごとの分布を示す。これより、5 cm しか誤差を許容しない場合には、最小値が 0.053, 中間値が 0.174, 平均値が 0.219, 最大値が 0.482 と低いことが分かる。このことを具体的に確認するため、edgeIoU が最小値, 中間値, 最大値に対応する推定画像を図-8 に示す。

これより、edgeIoU が最小のケースであっても、概ね道路部分の境界を抽出できていることが分かるが、Grand truth と比較すると数ピクセル程度のずれが生じており、それによって精度が低下していることが分かる。なお、図-8(c)では、右上部分に推定結果では境界線が抽出されているものの、Grand truth では抽出されていない箇所がある。これは、Grand truth では当該部分の白線より右側部分を背景とアノテーションしてしまっているためであり、道路と背景・歩道の境界線としては識別されていないことに起因する。これについては、アノテーションが不正確であり、推定結果の方が正確に判別できたものと考えられる。図-7 をみると、許容誤差 5cm と 10cm の edgeIoU の改善度合いは、精度が低い画像に対しては小さいのに対して、精度が高い画像に対しては大きくなっている。これは、edgeIoU 値が小さい画像に関しては、同様のアノテーションミスが影響している可能性があり、人間によるアノテーションの精度向上も必要不可欠であると推察される。

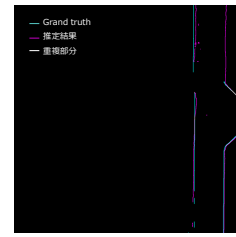
一方、推定精度が高い画像であっても、道路空間内でノイズのように境界線と認識している箇所がある。これについて詳しくみると、路面標示の境界や内部を部分的に背景として誤認識しているケースが多く存在した。この原因は不明確ではあるが、白線と道路と背景はピクセル上で隣接していることが多いと考えられ、白線や道路と隣接するピクセルを背景と誤認識している可能性がある。そのため、学習データを増加させて推定精度を向上させる他、同様の誤認識はノイズと判定して除去するなどの対策を取ることも有効であると考えられる。



(a) 最小値ケースの元画像



(b) 最小値ケースの Grand Truth データ



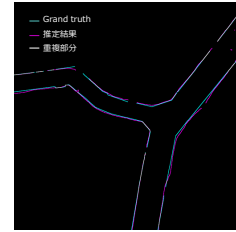
(c) 最小値ケースの抽出結果



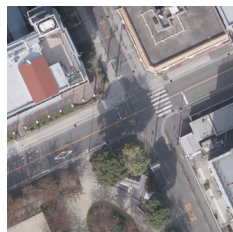
(d) 中央値ケースの元画像



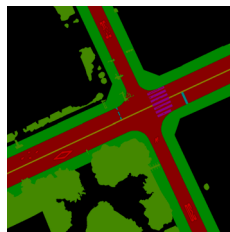
(e) 中央値ケースの Grand Truth データ



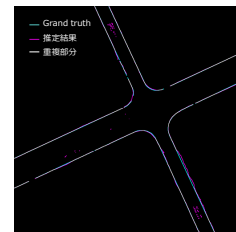
(f) 中央値ケースの抽出結果



(g) 最大値ケースの元画像



(h) 最大値ケースの Grand Truth データ



(i) 最大値ケースの抽出結果

図-8 境界線の抽出結果

(3) 汎用的な空中写真への適用

これまで使用したデータはいずれも国際航業株式会社が商用として提供するものであるが、色調やオルソ補正の方法が異なれば、推定精度に影響を及ぼす可能性がある。そこで、Google map による空中画像データに対して推定を行い、それぞれの精度を目視により評価した。また、google map の画像 40 枚を追加で学習させたモデルを作成し、それについても同様の検証を行った。

図-9 にそれぞれの推定結果をまとめる。元のモデルに Google map 画像で推論を行った場合、道路部分の誤検出、ノイズの激しい結果となっている。これらは、解像度を正確に特定できていないこと、独自の画像処理が施されていることによって推定精度が低下した可能性が考えられる。一方で、google map 画像で追加学習を行った場合には大幅に精度が向上していることが分かる。

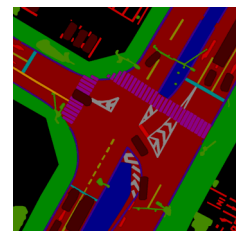
このように、ベースとなるモデルに対し、性質の異なる画像を追加学習してファインチューニングすることが、汎用性を高めるために重要であることが分かる。

(4) 点群データとの併用

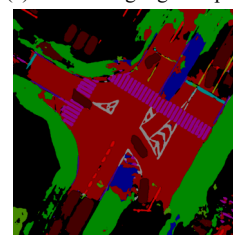
歩道橋などのオクルージョンが存在する場合、その周辺領域でのセグメンテーション精度は大幅に低下する。そこで、当該交差点において取得された 3



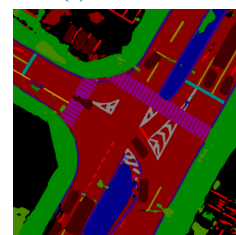
(a) 元画像 (google map)



(b) Grand truth



(c) 元モデル



(d) 追加学習モデル

図-9 google map 画像への適用結果

次元点群データを併用し、移動経度情報からオクルージョン物体を特定し、空中写真画像内の対応するピクセルを白色でマスクすることの効果を検証した。ただし、オクルージョンは、道路地面から 4.5m 以上の高度に存在するものと定義した。また、電線などセグメンテーション精度に及ぼす影響の少ないものを識別するため、各点群から半径 5cm の球体内に存在する点群数が 30 点未満のものにはマスク処理を行わなかった。

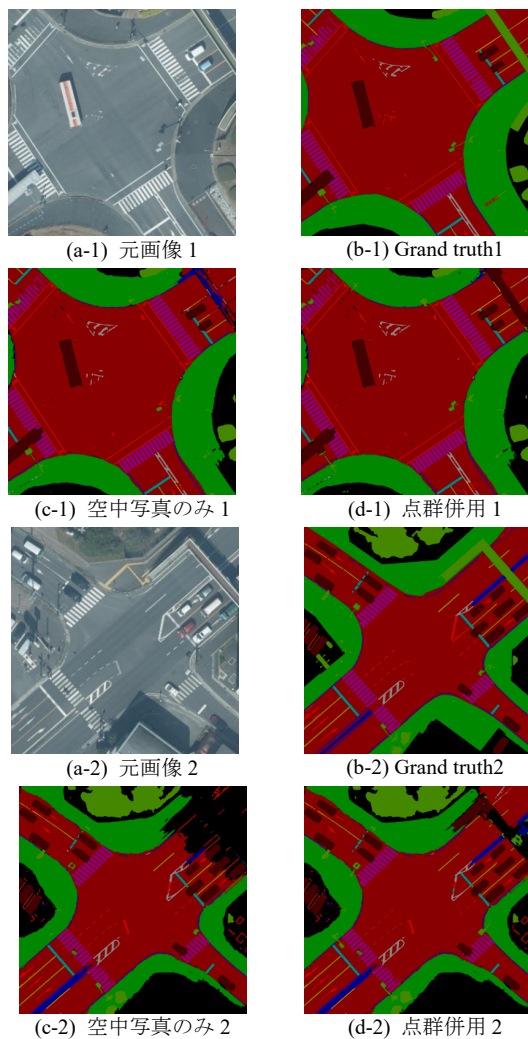


図-10 点群データ併用によるセグメンテーション

推論の結果を図-10 に示す。これにより、オクルージョンの周辺領域において、セグメンテーション精度が大きく改善されていることが分かる。

3.5 おわりに

本研究では交差点情報のデジタル化に向け、セマンティックセグメンテーションにより空中写真から交差点の構成要素を判別する手法を構築した。得られた知見は以下の通りである。

- SegFormerB5 モデルを用いることで、高精度に交差点構成要素の識別が可能であること。
- 推定精度は、交差点の形状や立地特性によって異なり、学習データの拡充が必要であること。
- 追加学習を行うことで、google map のような汎用性の高い画像に対しても精度の高いセグメンテーションが可能となること
- 点群データを用いて歩道橋などのオクルージョンを補完することで精度の改善が図れること

これらのセグメンテーション精度は、図面の用途

によって異なるはずである。また、セグメンテーション後にノイズが含まれることも少なくない。今後は用途に応じて求められる精度水準を満たすよう、改善する必要がある。

参考文献

- 1) Azimi, S.M., Henry, C., Sommer, L., Schumann, A. and Vig, E.: Skyscapes - fine-grained semantic understanding of aerial scenes, Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision 2019, pp. 7392-7402, 2019.
- 2) Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Llion, J., Gmez, A. N., Kaiser, L. and Polosukhin, I.: Attention is all you need, Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems, pp. 6000-6010, 2017.
- 3) Xie, E., Wang, W., Yu, Z., Anandkumar, A., Alvarez, J. M. and Luo, P.: SegFormer: simple and efficient design for semantic segmentation with transformers, *NeurIPS*, pp.1-14, 2021.
- 4) Berman, M., Triki, A.R., and Blaschko, M. B.: The Lovasz-Softmax Loss: A Tractable Surrogate for the Optimization of the Intersection-Over-Union Measure in Neural Networks, 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 4413-4421, 2018.

第4章 交差点における特殊車両の折進判定手法の構築

4.1 はじめに

道路情報便覧では狭小幅員、曲線障害、上空障害、橋梁、交差点折進などの障害情報を収集する必要がある。これらの多くは道路台帳や橋梁台帳のデータに基づいて整理することが可能である。しかし、交差点の折進については、その構造の多様性ゆえに、担当職員による目視確認に依存している。そのため、通行判定や道路情報便覧収録の効率化を図るためには、交差点における折進可否判定の省力化が必要不可欠である。

そこで、本研究では地方部も含めて広域的なデータ収集のしやすい空中写真の利用を念頭に、交差点における特殊車両の折進条件を推定する手法を構築することを目的とする。ここでの折進条件は、特殊車両通行ハンドブック¹⁾に基づいて通行条件B、C、および折進不可の3つのパターンに分類し、それぞれは表-1の通りに定義されるものとする。構築するシステムは、道路管理者の担当者が折進条件判定をする際に用いることを想定し、交差点の空中写真をインプットすると、折進条件をアウトプットするものとする。この際、推定結果の信頼性を担保するため、手法の異なる2つのモジュール（以降では便宜上、マクロ判定モジュールとマイクロ判定モジュールと称する）を提案し、各モデルの推定結果の傾向や、両者の整合性について分析を行う。

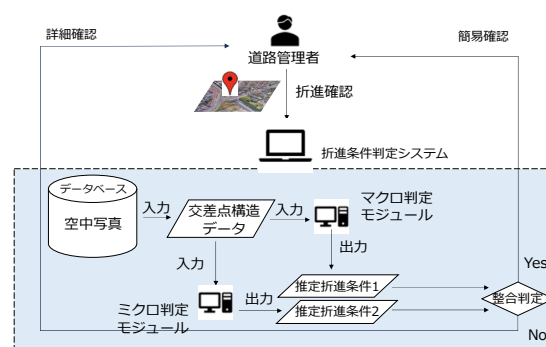
4.2 提案システムのユースケース想定と概略

提案するシステムのユースケースのイメージ、およびシステム内のモジュールの構成概要を図-1に示す。

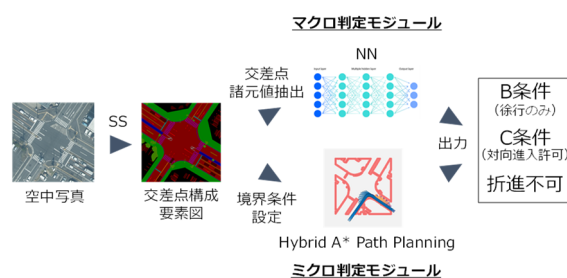
本システムは、道路管理者が交差点における特定諸元の車両の折進条件を判定し、通行許可協議、あるいは道路情報便覧の更新を行う際に活用されることを想定している。図-1(a)に示す通り、道路管理者が本システムに対象交差点、車両諸元を指定すると、

表-1 折進条件の定義

判定	条件
B	対向車線にはみ出すことなく右左折ができる
C	対向車線にはみ出るが、歩道や民地を侵食することなく右左折ができる
折進不可	歩道や民地を侵入しない限りは右左折できない



(a) 提案システムのユースケース



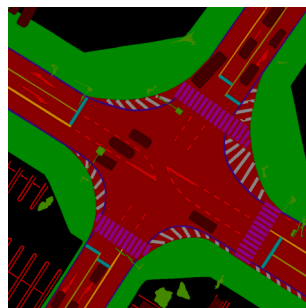
(b) 判定モジュールのフロー

図-1 提案システムの概要

本システムはマイクロ判定モジュールとマクロ判定モジュールによって算出された折進条件を出力する。両者の判定が一致している場合には、その結果の信頼性が高いことが期待されるため、道路管理者は比較的簡易な確認をすることで、判定結果を参照することになる。一方で、両モジュールの結果が異なる



(a) 空中写真



(b) セグメンテーション画像



(c) 占有マップ

図-2 入力画像の例

場合には、その信頼性が低いと考えられるため、より詳細に確認する必要が生じる。このように、システム内で全く異なる方法によるダブルチェック構造とすることで信頼性を高める工夫をしている。これにより、道路管理者が予め規定された折進軌跡を目視で確認する場合に比べて省力化が期待される。

次に、各判定モジュール内での処理（図-1(b)）について概説する。図-1(a)で指定された交差点の空中写真が判定モジュールに入力されると、第3章で開発したセマンティックセグメンテーション（SS）モデルにより、交差点構造要素をピクセル単位で識別した画像が生成される。具体的には、交差点構造要素は、背景、交差点の車道部、歩道部、停止線、車道外側線、横断歩道、車線中央線、中央分離帯、ゼブラゾーン、車線境界線、その他白線、自動車、奥クルージョン部分の13のレイヤにより項正される。これが両モジュールの入力データとなる。

マクロ判定モジュールでは、まず、交差点構造要素が識別された画像から交差点面積、車線幅員、交差点角度などの交差点の特徴量が数値化される。この数値が、交差点特徴量と折進条件の対応関係を学習した多層パーセプトロンニューラルネットワークモデルにインプットされ、より折進条件の予測値が出力されることになる。

ミクロ判定モジュールでは、交差点の構成要素の内、予め定められた要素（例えば、歩道部や停止線など）を車両通行にあたっての障害物と考える。その上で、磁土運転などにおける連続空間上での経路探索・通行軌跡描画に応用される Hybrid A* Path Planning アルゴリズム²⁾を適用し、出発地点（O）から目的地点（D）までの走行軌跡を探索する。もし、OD間の軌跡が探索できた場合には、当該車両は折進可能であると判断される。その一方で、障害物の存在によって折進軌跡が探索できない場合には、順次、障害物を除去していき、折進が可能となる障害物の除去の程度に応じて、折進条件を判定する。

マクロ・ミクロの判定モジュールを同一交差点に適用することで、判定結果の妥当性を評価する。以下では、各モジュールについての詳細を述べる。なお、本研究は各モジュールの要素技術を構築し、その検証をすることを目的としている。そのため、提案システムをパッケージ化することや、具体的な作業負担の軽減の程度などを評価するものではない点

に注意されたい。

4.3 マクロ判定モジュール

(1) マクロ判定モジュールの考え方

マクロ判定モジュールでは図-1(b)の概念図に示すように判定対象の折進に関する交差点諸元の情報を入力とし、当該折進について折進可否判定結果を出力する自動判定モデルの構築を目指す。本章では、はじめにマクロ判定モジュールの入力に使用する交差点諸元の計測方法を説明する。次に、多層パーセプトロンニューラルネットワークモデル（以下、“多層パーセプトロン NN モデル”）を基本構造とするマクロ判定モジュールの構築方法を説明する。

(2) 交差点諸元の計測

特殊車両の折進に関わる交差点諸元として、交差点面積、停止線間距離、道路幅員、折進角度の計測手法を説明する。ここでは、交差点の空中写真（図-2(a)）を交差点構成要素ごとにセグメンテーションした画像（図-2(b)）に対して、OpenCV を活用した画像解析により半自動的に諸元値を収集する。

a) 停止線間距離

停止線間距離とは、交差点内で対向する停止線の距離を指す。入力画像から停止線の輪郭を抽出し、位置座標を特定する。続いて、各停止線を長方形に近似し、頂点の座標を特定する。最後に、停止線間距離の計測に用いる2点を計測者が手動で指定し、2点間の距離を算出する。

b) 交差点面積

交差点面積とは交差点内の車両折進に使用可能な面積を指し、具体的には停止線で囲まれた領域の面積とする。入力画像から停止線を抽出し、各停止線を長方形に近似する。続いて、各停止線の長辺を延長して矩形領域を得る。最後に、矩形領域内に存在する車道領域面積を算出して交差点面積を得る。

c) 道路幅員

道路幅員とは対象交差点に接続する道路の車線幅

員を指し、対象交差点へ流入する道路の幅員を流入幅員、流出する道路の幅員を流出幅員として計測する。入力画像から車道中央線、車道外側線、車線境界線、およびゼブラゾーンを抽出し、車線の輪郭を得る。続いて、交差点面積の計測に用いた停止線延長によって得られる矩形と車線の輪郭との交点を取得する。最後に、任意の交点間の距離を計測し、道路幅員を得る。

d) 折進角度

折進角度とは、判定対象折進の流入道路と流出道路が成す角度である。入力画像の車道外側線から車道の輪郭を得る。続いて、交差点面積の計測に用いた停止線延長によって得られる矩形と車道の輪郭との交点を取得し、車道幅員の両端となる2点の中点を求める。次に、対向する2つの中点を直線で結び、交差する2直線を得る最後に、2直線の交差角度を計測して折進角度を得る。

(3) モデルの構築

a) 入力データの処理方法

マクロ判定モデルの構築に使用する入力データ一覧と処理方法を表-2に示す。入力データのうち、名義尺度データについてはダミー変数化処理を施し、交差点面積、折進角度等のデータは比例尺度であるので、モデルへの入力の際には、データのスケールを整える目的で標準化処理を行う。

b) モデル構造の検討

マクロ判定モデルの検討には多層パーセプトロンNNモデルを採用し、モデルのハイパーパラメータはグリッドサーチにより決定する。グリッドサーチでは、探索対象のハイパーパラメータ候補のリストを準備し、その全ての組み合わせを用いて多数のモデルを構築し、最適な性能を示すパラメータの組み合わせを探索する。グリッドサーチに使用したパラメータリストを表-3に整理する。

c) 評価指標

評価指標としては、分類結果の正誤を示す混同行列と、それに基づく正解率、及び本研究独自の評価指標である危険側誤判定率を採用する。危険側誤判定率とは、本来は通行不可となる折進に対して、C判定やB判定のような折進可能と予測するような危険側の誤判定割合を指す。特殊車両の安全な運行を考える際には、このような危険側誤判定を極力起こさないようなモデルを目指すことが実務上重要であると考えられる。そのため、本研究では正解となる折進条件よりも甘い条件で誤判定する組み合わせ、すなわち（正解、予測）＝（通行不可、C）、（通行不可、B）、（C、B）のいずれかとなる判定割合を危険側誤判定率として採用する。

表-2 入力データの一覧と処理方法

データ名	処理方法
国道(流入)	ダミー変数化 (1: 国道)
主要地方道(流入)	ダミー変数化 (1: 主要地方道)
一般都道府県道(流入)	ダミー変数化 (1: 正一般都道府県道)
市町村道(流入)	ダミー変数化 (1: 市町村道)
国道(流出)	ダミー変数化 (1: 国道)
主要地方道(流出)	ダミー変数化 (1: 主要地方道)
一般都道府県道(流出)	ダミー変数化 (1: 正一般都道府県道)
市町村道(流出)	ダミー変数化 (1: 市町村道)
交差点面積(m ²)	標準化
停止線間距離(流入)	標準化
停止線間距離(流出)	標準化
停止線間距離比(流入距離÷流出距離)	標準化
車線区分の有無(流入側)	ダミー変数化 (0: 無, 1: 有)
車線区分の有無(流出側)	ダミー変数化 (0: 無, 1: 有)
流入幅員(全車線) (m)	標準化
流入幅員(1車線) (m)	標準化
流出幅員(m)	標準化
右左折	ダミー変数化(0: 左折, 1: 右折)
中分侵入可否	ダミー変数化 (0: 不可, 1: 可)
歩道侵入可否	ダミー変数化 (0: 不可, 1: 可)
一方通行による進入可否	ダミー変数化 (0: 進入不可, 1: 進入可)
折進角度(deg)	標準化
進入禁止	ダミー変数化 (0: 無, 1: 有)

表-3 マクロ判定モデルの検討パラメータリスト

パラメータ	値
隠れ層の数	1層, 2層, 3層, 4層, 5層
ユニット数	10, 15, 20
ドロップアウト	0.1, 0.2, 0.3, 0.4
学習率	0.01, 0.001, 0.0001
活性化関数[固定]	ReLU関数
最適化手法[固定]	Adam
損失関数 [固定]	多クラス交差エントロピー

表-4 マクロ判定モジュール評価結果

マクロモデル		予測			正解率
		不可	C	B	
正解	不可	104	7	6	0.88
	C	26	117	11	0.76
	B	2	23	79	0.76

(4) テストデータによる検証

a) 使用データ概要

本研究では、合計 437 交差点から収集した 2,631 の折進データを用いてモデルの構築を行う。分析対象交差点は、愛媛県、香川県、徳島県、大阪府等の道路情報便覧収録済みの交差点より、交差点形状や通行条件などの多様性を考慮して選定した。モデルの構築に使用した交差点の諸元値は、Google Map の計測機能を用いて全て分析者の手作業によって収集した。

学習ではホールドアウト法を採用し、学習データとして 1,579 折進、検証データとして 677 折進、テストデータとして 375 折進に分割した。

b) モデル構築結果

構築したマクロ判定モデルのテストデータによる評価結果を表-4の混同行列に示す。全体正解率は0.8となり、クラス別の正解率も折進不可0.88, C判定とB判定が共に0.76となり、良好な判定結果が得られている。また、危険側誤判定率は0.06と低い水準に抑えられていることが確認できた。

4.4 ミクロ判定モジュール

ミクロ判定モジュールでは、交差点の空中写真(図-2(a))を交差点構成要素ごとにセグメンテーションした画像(図-2(b))を入力として用いる。それに対して、障害物や車両筐体、車両挙動特性を考慮した、連続空間内での経路探索手法であるHybrid A* Path Planningを適用する。具体的には、以下のステップにより、折進条件を判定する。

Step 0. 評価対象とする車両諸元の設定

Step 1. 交差点内進入不可領域の設定と占有マップ(図-2(c))の作成

Step 2. 折進に関わる境界条件(始端条件と終端条件)の設定

Step 3. Hybrid A* Path Planning による折進軌跡の探索

Step 3 において折進軌跡が探索できた場合は計算を終了、探索できなかった場合は Step 1 に戻って進入可領域を拡大して、以降へ進む。これを折進軌跡が探索できるまで、あるいは進入可領域を拡大出来なくなるまで繰り返し、その時点での進入可領域によって折進条件を判定する。

以下ではそれぞれについて詳説する。

(1) 交差点内領域の設定と占有マップの作成

交差点での折進条件は、対向車線へのはみ出しが必要となるか否かで異なる。そこで、表-5に示した各交差点構成要素の内、背景・歩道・中央分離帯・車道外側線・停止線を通行不可領域と設定した上で、折進軌跡の探索に成功した場合を条件 B、そこから

停止線を通行不可領域から除外して折進軌跡の探索ができた場合を条件 C とする。

通行可領域内で Hybrid A* Path Planning を適用するためには、障害物体を定義した占有マップの生成が必要となる。図-2には、交差点の空中写真とそれに対応したセグメンテーション画像、占有マップの例を示す。占有マップ中の黒い線は障害物を、赤く色づけされた部分は障害物への車両マージンを表している。

この例では、背景・歩道・車道外側線のみを通行不可領域と定義している。その上で、まず、通行可不可領域と通行可領域のみを識別した二値画像に変換する。これにモルフォロジー処理を適用して通行可不可領域と通行可領域の境界を抽出し、障害物と設定する。そして、障害物に膨張処理を行い、車両マージンを設定することで、占有マップが生成される。

(2) Hybrid A* Path Planning

Hybrid A* Path Planning は、グリッド上の経路をヒューリスティックに探索する A*アルゴリズムを非ホロノミック拘束、すなわち、物体の運動が空間内の位置や姿勢角のみでは決定されないシステムに拡張したもの²⁾であり、自動運転やロボットの制御の文脈で開発されてきた手法である。

一般的な A*アルゴリズムは、物体の状態空間は離

表-5 セグメンテーション画像内の交差点構成要素

構成要素	画像内の色	条件 B	条件 C
背景	黒	×	×
歩道	緑	×	×
中央分離帯	青	×	×
車道外側線	紫	×	×
停止線	赤	×※	○
車道	黄	○	○
横断歩道	赤	○	○
ゼブラゾーン	黒	○	○
自動車	黒	○	○
その他白線	白	○	○
オクルージョン	黒	○	○
車道中央線	黄	○	○
車線境界線	黄	○	○

×は通行不可と設定する領域を表す。

※ 通行不可とするのは折進流出側の停止線のみとする。

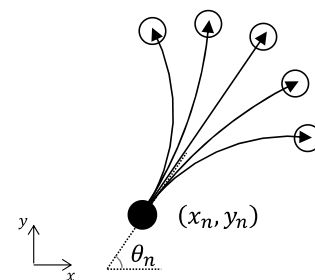


図-3 移動物体とノードの定義

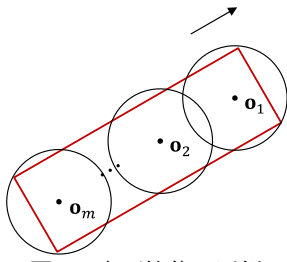


図-4 車両筐体の近似

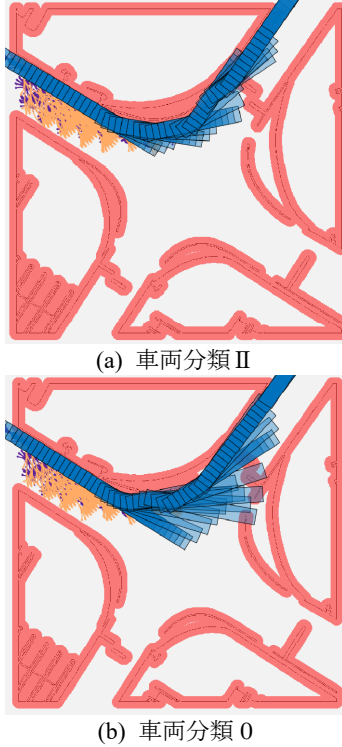


図-5 軌跡探索結果の例

散化された (x, y) で表される。その上で、現在地点から移動拘束条件のもとで到達可能なグリッド n のコストをスタート地点からのコスト $g(n)$ とゴール地点までのヒューリスティックコスト $h(n)$ の和、

$$f(n) = h(n) + g(n) \quad (1)$$

で表し、それを逐次的に更新していくことで、最短経路を探索するものである。

それに対し、Hybrid A*では、物体の状態は物体の向き θ を含む3次元の連続空間 $\mathbf{s}_n = (x_n, y_n, \theta_n)$ で記述される。車両の進行は、図-3に示す通り、最小回転半径による左旋回から右旋回の間を離散化した点に制約される。ここで、車両は一定の速度で進むと仮定し、1 タイムステップで進行する距離は定数となる。その際、左・右旋回にはハンドル操作が必要となることを考慮するため、旋回によるペナルティをパラメータとして設定する。スタート地点からのコスト $g(n)$ は、移動距離と旋回ペナルティの合計によって決定されることとなる。

ヒューリスティックコスト $h(n)$ に関しては、一切の障害物を除去した場合に、現在の車両状態からゴール地点の車両状態 $\mathbf{s}_G = (x_G, y_G, \theta_G)$ までの経路を

Reeds-Shepp path planning³⁾によって探索し、その経路長として定義する。

なお、本モデルは車両筐体が障害物に干渉しないことを保証する必要がある。車両筐体は図-4に示す通り、 m 個の円の集合として近似する。各円の半径を l とすると、図-2(c)に示す占有マップにおける障害物の膨張処理を l に対応させる。式(2)が成立する場合、すなわち、車両筐体を近似する円が膨張エリアに含まれる場合に $f(n) = \infty$ とすることで、障害物への干渉を表現する。

$$\mathbf{0} \subset \Psi \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{0}$ は車両筐体を近似する円の中心点の集合、 Ψ は障害物の膨張エリアの集合を表す。

(3) 境界条件の設定

折進可否を判定するためには、折進の起点・終点の x, y, θ を設定する必要がある。しかしながら、空中写真内での交差点の角度や交差点の各流入路の交差角度はそれぞれ異なることに加え、目測による設定では道路の進行方向と乖離が生じ、折進判定の精度に影響を及ぼす可能性がある。そのため、本研究では以下の通り、交差点に応じて機械的に設定する。

車両角度は、起点側、終点側の道路の交差角度をラドン変換により抽出して設定する。具体的には、まず、セグメント化された画像をグレースケールに変換し、ソーベル近似を用いてエッジの検出を行う。これにより、車道外側線や車線境界線、車道中央線が抽出されることとなる。それに対してラドン変換を行うことで、各線分方向角がピーク値として収集されることとなる。例えば、4 枝交差点であれば、ピーク値を高位から順に4つ抽出することで、各流入出路の方向角が取得される。このうち、折進の起点側・終点側の方向角をそれぞれ境界条件に設定する。

x, y 座標の設定については、対象とする道路部が画像の4 辺と交差していることを前提とする。その上で、対象流入出路の道路部が画像上の辺と交差するピクセルの中で、進行方向に対する最左端点を基準とし、式(3)の通りに設定する。

$$\begin{pmatrix} x_B \\ y_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_L \\ y_L \end{pmatrix} + \left(\frac{w}{2} + s \right) \begin{pmatrix} \cos \left(\theta_f - \frac{\pi}{2} \right) \\ \sin \left(\theta_f - \frac{\pi}{2} \right) \end{pmatrix} \quad (3)$$

ただし、 x_B, y_B は起点・終点の車両最前端中央部 $\mathbf{o}_l$ の座標、 x_L, y_L は道路上の基準点、 w は車幅、 s はバッファ幅、 θ_f は出発時・到着時の車両角度をそれぞれ表す。

(4) 軌跡探索結果の例

図-2の交差点に対し、車両分類IIに相当する車長12m、車幅2.5mの車両と車両分類0に相当する車長18m、車幅2.5mの車両の折進軌跡（西→北）を描画した例を図-5に示す。この場合、車両分類IIでは流出側の停止線に接触することなく折進できているが、

車両分類 0 では車道外側線、停止線に接触していることが分かる。

4.5 判定結果の検証

本章では、マクロ判定・ミクロ判定の両モジュールの判定結果の検証を行う。まずは、それぞれの判定結果の傾向を評価し、その後、同一の交差点を対象とし、両者の整合性を検証する。なお、いずれの評価においても、特殊車両の車両分類 0 (車長 18 m, 車幅 2.5m) を対象とする。一般的に、車両分類 0 の車両はセミトレーラやフルトレーラなどの牽引自動車が該当するが、ミクロ判定モジュールにおいては牽引構造を考慮していないため、便宜上、車長 18 m, 車幅 2.5m, 前方・後方オーバーハングがそれぞれ 1.5m と 4m の単車を仮定して評価を行う。

(1) 使用するデータ

本研究では国際航業株式会社の提供する地上解像度 5cm の空中写真を用いる。各写真は 1 メッシュ当たり 8000×6000(pixel)の画像である。この中から、交差点ごとに 1024×1024(pixel)のサイズにトリミングし、ピクセル単位で表-5 の通りにセグメント化した画像を用いる。

検証に用いる折進条件判定の正解データは、国土交通省の提供する特殊車両通行許可に関する電子データ収集支援ツール^{注1)}(以降、「支援ツール」とする)を用いて作成した。具体的には、図-6 に示す通り、車両分類 0 に対してプリセットされた 30°, 60°, 90°, 120°, 150° 方向への軌跡図(図中赤線)を交差点にあてがい、逐一、手作業・目視判別にて折進条件判定を行った。図の例では、90° の軌跡線において、流出側の対向停止線を踏まずに折進できているため、B 条件と判定される。

(2) マクロ判定モジュール

マクロ判定モジュールの検証に用いるテストデータは、滋賀県草津市周辺と京都府京都市山科区の 34 交差点で収集された折進数 228 個とする。入力に用いる交差点諸元値については手動収集の結果を用いる場合と、4.3(2)で説明した半自動収集で得られる値を用いる場合の比較を行うために、テストデータを Google Earth から手作業で収集したデータ(以下“手動計測データ”)と 4 つの交差点諸元を構築した半自動計測手法で収集したデータ(以下“自動計測データ”)に分ける。自動計測データについては、入力データの 24 項目のうち自動計測で収集した 4 つの諸元に関わる 8 項目を自動計測の結果とし、その他のデータは手動計測の結果と同じものとする。この 8 項目には、交差点面積、停止線間距離(流入・流出)、停止線間距離比、流入幅員(全車線・1 車線)、流出幅員(全車線)、折進角度が該当する。

表-6 と表-7 には手動計測データを入力とする場合

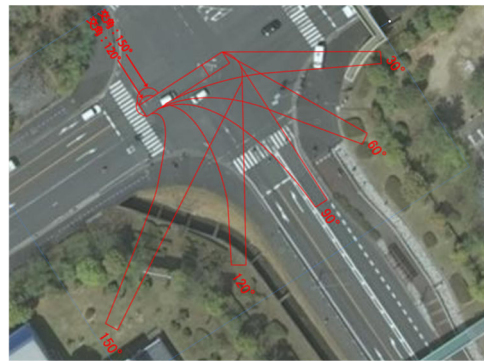


図-6 支援ツールを用いた折進条件判定の例

表-6 マクロ判定モジュールの混同行列(手動計測)

手動計測		予測			正解率
		×	C	B	
正解	×	85	19	16	0.71
	C	5	64	12	0.79
	B	0	2	25	0.93

表-7 マクロ判定モジュールの混同行列(自動計測)

自動計測		予測			正解率
		×	C	B	
正解	×	79	26	15	0.66
	C	6	61	14	0.75
	B	1	2	24	0.89

表-8 ミクロ判定モジュールの混同行列

		ミクロ判定モジュール			
		B	C	通行不可	適用外
支援ツール	B	3	3	3	2
	C	1	1	24	12
	通行不可	1	1	23	8

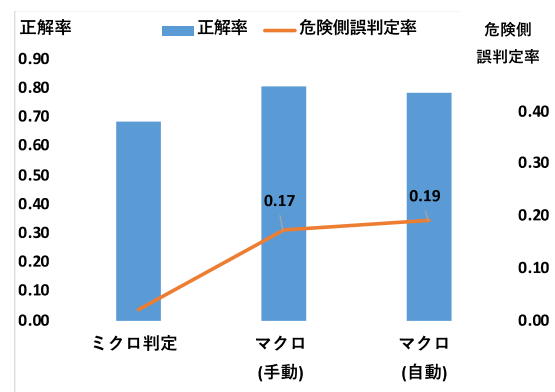


図-7 ミクロ・マクロ判定モジュールの精度評価結果

と自動計測データを入力とする場合の混同行列を示す。この結果から、手動計測データでは 76% の正解率が得られたが、自動計測データでの正解率はどちらも 70% 程度となり、約 5-6% 精度が低下した。また、危険側誤判定率も手動計測データでは約 0.21 であったが、アノテーション画像の自動計測データで

は約 0.24, 予測画像の自動計測データでも約 0.24 と増加し, 通れないものを通れると判定した数が増えていることが分かる。

(3) ミクロ判定モジュール

Hybrid A*を適用するに当たっては, $x \cdot y$ 方向の解像度を 5cm, 角度の解像度を 0.2 ラジアンとし, 後進は考慮しないものとした。

ミクロ判定モジュールの折進条件判定の検証を行うにあたり, 草津市・栗東市・京都市の市道を中心に全 34 交差点 (うち, 3 枝交差点が 4 地点, 4 枝交差点が 41 地点), 82 の折進方向を対象とした。なお, ここでは折進できない交差点を的確に通行不可と判定できることを確認するために, あえて規模の小さい交差点を中心に選定を行っている。

判定結果の混同行列を表-8 に示す。表中の「適用外」はセグメンテーション画像において, 交差点の方向が不適切であり, 起点・終点が適切に定義できない, あるいは, 画像サイズに対して交差点が大きいなどの理由により, 境界条件を適切に設定できなかったものを表している。これらについては, 空中写真に対して交差点部を機械的に抽出するだけではなく, 縮尺や方向を処理するモジュールを追加する必要がある。

この検証の結果, 正解率は 0.63, 安全側に誤った判定をした割合は 0.05 となった。特に通行不可については 92%の精度で判別ができていますが, B 条件については 67%, C 条件の折進についてもほぼ通行不可と判定しており, 安全性は担保できているものの精度の観点では, 極端に厳しめの判定をしていることが分かる。これは, 車両分類 0 を単車で表現しているため, 実際より大回りでの車両軌跡を推定しているためであると考えられる。一方, 図-6 から分かる通り, 支援ツールを用いた条件の判読も曖昧さがあり, 正解データの信頼性についても課題があると言える。

(4) 両モジュールの判定結果の比較

最後に, マクロ判定モジュールとミクロ判定モジュールの判定結果を比較する。なお, マクロ判定モジュールについては, 入力値に手動計測結果を用いる場合 (以下, マクロ (手動)) と交差点のアノテーション画像に基づく自動計測結果を用いる場合 (以下, マクロ (アノテーション)) の 3 種類を比較対象とする。滋賀県草津市周辺と京都府京都市山科区にある 17 交差点 52 折進を対象とする。

図-7 には Path finding algorithm による車両軌跡による自動判定 (ミクロ判定) と, 本章で構築したマクロ判定モジュールによる折進可否判定の正解率と危険側誤判定率を示している。マクロ判定についてはモジュール入力に用いるデータの取得方法により 2 種類 (手動計測, アノテーション画像からの自動計測) の結果を示している。正解率の観点からは, マクロ判定のすべてのケースで 8 割前後の精度を得

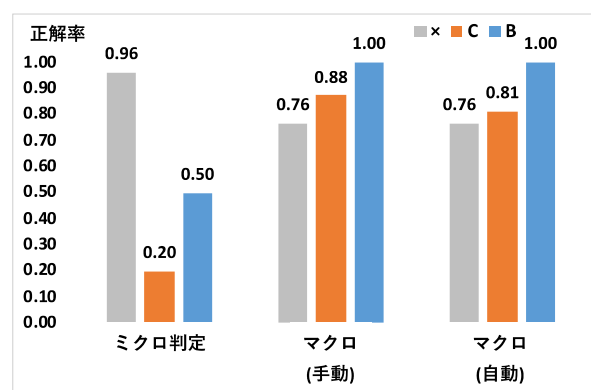


図-8 判定区分別の正解率

ており, ミクロ判定の精度 (70%程度) を上回ることが分かった。一方, 危険側誤判定率を見ると, ミクロ判定は 2%程度と極めて低い結果が得られており, 安全側の結果を出力する傾向にあることが分かった。一方, マクロ判定の同指標は 2 割弱となっており, 通れない折進に対して甘い結果を出力するような誤判定が比較的多いことがわかる。

図-8 には判定区分別の正解率を示している。この結果から, ミクロ判定モジュールは折進不可に対して極めて高い正解率を得ていることがわかる。一方, マクロ判定モジュールはいずれの判定区分に対しても概ね 7 割以上の高い判定精度を確保しているものの, C や B に対する正解率が高い傾向にあることがわかる。ただし, マクロ判定モジュールにおいても, セグメンテーション結果から自動計測を行う場合 (マクロ (予測)) は特に B 判定において精度が下がるとの結果となった, この一因としては検証サンプルの偏りが考えられる。

(5) 考察

折進可否判定モジュール精度の比較から, 手動計測データよりも自動計測データのときに正解率や危険側誤判定率の精度が低下することが分かった。しかしながら, 折進可否判定精度への影響は限定的であり, 本研究で提案した交差点諸元の自動計測手法の有効性を支持する結果が得られたと考えられる。

自動計測データを入力に用いた場合に判定精度が低下する理由としては, 自動計測による誤差がモデルの精度に影響したためであると考えられる。そのため, 自動計測手法のさらなる精度向上が求められる。また, 交差点形状は多種多様であり, すべての交差点に網羅的に対応可能な自動計測手法の開発は非現実的であるとも言える。そこで, 計測の際に重要となる箇所を分析者がクリックするなど, 軽微な手作業を許容した半自動の手法についても同時に検討すべきであろう。

折進可否判定の B 判定の正解率が特に高くなった理由としては, 折進可否判定のデータ数に偏りがあったからだと考えられる。折進不可, C 判定のデータ数に比べて B 判定のデータ数が少ないため, データの不均衡が正解率に影響を与えたと考える。

以上より、マイクロ判定モジュールでは厳しめの判定をする傾向にあること、マクロ判定モジュールではどちらかというと折進を許容する傾向に誤差が生じやすいことが分かった。ここで、各折進について両モジュールの判定結果の包含関係を整理すると、以下の通りとなる。

- ・ マクロ判定が折進不可ならマイクロ判定も折進不可

- ・ マイクロ判定が B or C ならばマクロ判定も B or C

この点を踏まえ、マイクロ判定モジュールとマクロ判定モジュール（ここでは手動計測を入力とする）が一致する場合の正解率を確認すると、以下の通りとなる。

(マイクロ, マクロ) = (不可, 不可) のとき 95% (20/21)

(マイクロ, マクロ) = (C, C) のとき 67% (2/3)

(マイクロ, マクロ) = (B, B) のとき 100% (1/1)

(マイクロ, マクロ) = (B or C, B or C) のとき 83% (5/6)

すなわち、ともに折進不可と判定される場合は通れないこと前提に、ともに B or C の場合は通れること前提に、事後的に目視チェックをすることで、従来の折進判定業務の省力化が図れると考えられる。

4.6 おわりに

本研究では、特殊車両の折進可否判定に関わる作業コストを軽減するためのツールの開発を行った。提案するツールは、判定結果の正確性を担保するためにマクロ判定モジュールとマイクロ判定モジュールの2つのアプローチを採用し、その結果を比較することで、作業による条件判定に供すること想定するものである。

実際の交差点を対象とした検証の結果、全体の正解率はマクロ判定モジュールが上回っているものの、危険側誤判定率に着目するとマイクロ判定モジュールのほうが優れた性能を示すことが分かった。判定区分別の正解率を見ると、マクロ判定モデルは全体的に高い正解率を得ているのに対して、マイクロモデルは折進不可判定の折進に対して極めて高い精度を出すことが分かった。このように、両モデルは相補的な判定能力を有することが確認できたため、両モデルの併用によって真正性の高い通行条件の自動判定が可能になると期待される。

今後、マクロ判定モジュールについては、入力データの事前処理、学習データの拡充やモデルの改善により精度向上を検討する必要がある。マイクロ判定モジュールに関しては、探索された軌跡と実際の軌跡との関係性の検証、牽引車両への拡張が求められる。また、いずれに関しても、正解データの定義、生成方法を検討することも重要である。本研究では、支援ツールを用いて目視判断で正解データを作成したが、本質的には実際に通行できるか否かが正解であるべきである。その上では、車両挙動の計測や通行履歴の分析、そのためのデータベースの構築など

についても取り組む必要がある。

注釈

注1) 国土交通省:特殊車両通行許可に関する電子データ収集支援ツール,
<https://lg47web.tokusya.ktr.mlit.go.jp/binrangis/main.php> (2024 年 5 月 17 日閲覧)。

参考文献

- 1) 中部地方整備局道路部交通対策課：特殊車両通行ハンドブック 2022 年版，2023。
- 2) Dmitri Dolgov, Sebastian Thrun, Michael Montemerlo, and James Diebel: Path Planning for Autonomous Vehicles in Unknown Semi-structured Environments. The International Journal of Robotics Research Vol.29, No.5, pp.485-501, 2010.
- 3) Jim Reeds and Lawrence Shepp: Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards. Pacific Journal of Mathematics, Vol. 145 No.2, pp. 367-393, 1990.

第5章 特殊車両の経路選択モデルの構築

5.1 はじめに

近年，わが国ではトラックドライバーの不足が深刻化している．その一方で，営業用トラックによる輸送トンキロは横ばいの傾向を見せており，ドライバーの一人当たりの輸送量を上げる必要があることから，貨物車の大型化が進んでいる．

一方で，貨物車の大型化に伴う重量の増加による，道路へのダメージの増大や，道路幅に対して貨物車が大きくなることに起因する，交通事故リスクの増加が危惧される．これを防ぐため，高さ，長さ，総

重量などの一定の基準を満たす特殊車両が通行する際は，トラック事業者による道路管理者への特殊車両通行許可の申請が必要である．しかし，トラック事業者はこの申請書類の作成に多くの時間をかける必要があり，申請件数の増加を受けてトラック事業者の負担が増える結果となった．加えて，道路管理者が処理する申請件数も増加し，結果として通行許可の審査日数の長期化が深刻な問題となった．この事態を改善すべく，平成 30 年 3 月に道路法の改正が行われ，重要物流道路制度が創設された．この制度によって道路構造上，特殊車両の通行が支障のない

表-1 データの基本情報

	商用車データ	ETC データ
対象車両	大型車・特大車（区別可）	特車
対象期間	2020 年 9 月 1 日～11 月 30 日	2020 年 7 月 1 日～9 月 30 日
対象エリア	日本全国	ITS スポット周辺（日本全国に配置）
トリップ数	1,966,772（大型車） 322,342（特大車）	21,601（特車）
その他	各トリップの起終点からそれぞれ 500m の軌跡は秘匿される．	-

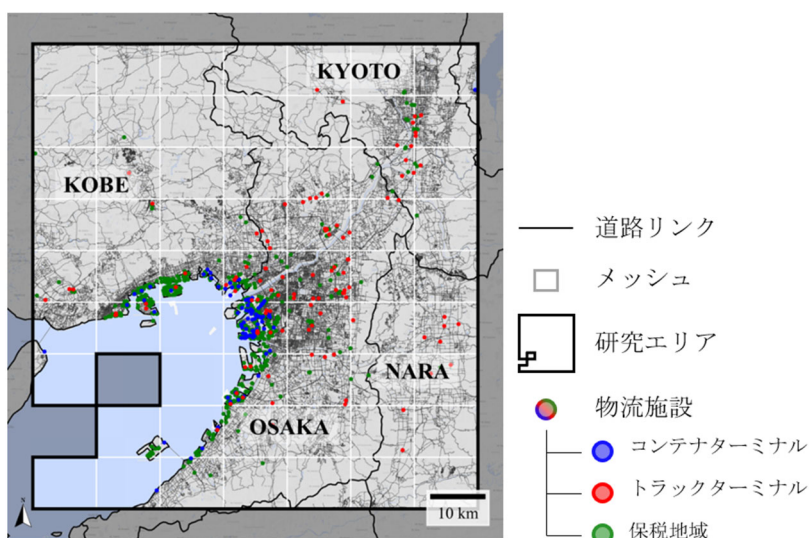


図-1 取得データの対象エリア

表-2 大型車（商用車データ）のOD表

O\D	513563	513573	513574	523501	523502	523503	523504	523514	523515	523525	合計	トリップ数合計
513563	3.94%	2.23%	0.382%	0.149%	0.255%	0.729%	0.389%	0.416%	0.162%	0.114%	8.76%	43,312
513573	2.06%	10.9%	0.890%	0.481%	1.37%	3.13%	1.23%	1.35%	0.334%	0.286%	22.1%	109,008
513574	0.280%	0.811%	1.28%	0.0694%	0.110%	0.551%	0.558%	0.292%	0.0755%	0.0888%	4.11%	20,328
523501	0.148%	0.501%	0.0835%	1.77%	1.16%	0.562%	0.0930%	0.229%	0.0162%	0.0601%	4.62%	22,844
523502	0.265%	1.31%	0.111%	1.13%	6.64%	1.01%	0.296%	0.615%	0.105%	0.239%	11.7%	57,945
523503	0.693%	2.91%	0.428%	0.578%	1.06%	5.81%	1.05%	1.15%	0.179%	0.304%	14.2%	70,032
523504	0.547%	1.17%	0.543%	0.0880%	0.276%	1.06%	3.99%	1.72%	0.255%	0.250%	9.90%	48,929
523514	0.508%	1.42%	0.300%	0.310%	0.852%	1.17%	1.88%	7.84%	0.631%	1.02%	15.9%	78,748
523515	0.152%	0.388%	0.0730%	0.0289%	0.101%	0.175%	0.352%	0.663%	0.560%	0.404%	2.90%	14,317
523525	0.109%	0.348%	0.0795%	0.0615%	0.224%	0.307%	0.371%	1.00%	0.423%	2.92%	5.85%	28,897
合計	8.70%	22.0%	4.17%	4.67%	12.0%	14.5%	10.2%	15.3%	2.74%	5.68%	100%	-
トリップ数合計	42,992	108,766	20,600	23,074	59,557	71,759	50,462	75,510	13,551	28,089	-	494,360

表-3 特大車（商用車データ）のOD表

O\D	513563	513573	513574	523501	523502	523503	523504	523514	523515	523525	合計	トリップ数合計
513563	6.14%	4.38%	0.670%	0.165%	0.252%	0.909%	0.476%	0.433%	0.249%	0.250%	13.9%	12,699
513573	4.41%	22.0%	1.03%	0.412%	1.19%	3.02%	1.34%	1.15%	0.574%	0.666%	35.8%	32,633
513574	0.315%	1.12%	2.05%	0.0548%	0.152%	0.684%	0.434%	0.355%	0.0943%	0.0274%	5.28%	4,820
523501	0.124%	0.555%	0.0285%	3.63%	1.48%	0.505%	0.0515%	0.0493%	0.0153%	0.0373%	6.48%	5,910
523502	0.307%	1.03%	0.0975%	1.54%	4.21%	0.488%	0.122%	0.201%	0.0110%	0.139%	8.14%	7,431
523503	0.864%	2.43%	0.483%	0.443%	0.521%	4.83%	1.07%	0.746%	0.160%	0.398%	11.9%	10,898
523504	0.305%	1.13%	0.560%	0.0296%	0.0515%	0.481%	2.40%	0.671%	0.216%	0.256%	6.10%	5,567
523514	0.479%	1.04%	0.260%	0.105%	0.160%	0.841%	0.745%	2.55%	0.253%	0.409%	6.85%	6,246
523515	0.216%	0.528%	0.0734%	0.0263%	0.0307%	0.164%	0.150%	0.153%	0.615%	0.306%	2.26%	2,065
523525	0.182%	0.488%	0.0822%	0.0680%	0.107%	0.345%	0.127%	0.479%	0.244%	1.14%	3.26%	2,974
合計	13.3%	34.7%	5.34%	6.48%	8.16%	12.3%	6.92%	6.79%	2.43%	3.63%	100%	-
トリップ数合計	12,170	31,625	4,868	5,908	7,441	11,190	6,317	6,197	2,219	3,308	-	91,243

表-4 特車（ETCデータ）のOD表

O\D	513563	513573	513574	523501	523502	523503	523504	523514	523515	523525	合計	トリップ数合計
513563	11.2%	2.06%	0.256%	0.00826%	0.132%	0.149%	0.107%	0.0743%	0.281%	0.190%	14.5%	1,755
513573	8.68%	19.2%	0.272%	0.173%	1.92%	2.35%	0.883%	0.570%	0.380%	0.347%	34.8%	4,216
513574	0.132%	0.528%	0.215%	0.0165%	0.000%	0.149%	0.107%	0.0248%	0.0991%	0.0165%	1.29%	156
523501	0.0578%	0.0743%	0.000%	0.603%	0.338%	0.206%	0.0330%	0.0330%	0.000%	0.0248%	1.37%	166
523502	0.495%	2.34%	0.0660%	0.396%	6.79%	0.875%	0.157%	0.0330%	0.116%	0.0826%	11.4%	1,375
523503	0.677%	2.54%	0.0991%	0.338%	2.87%	7.77%	0.372%	1.06%	0.0495%	0.124%	15.9%	1,926
523504	0.347%	1.07%	0.124%	0.0413%	0.0165%	0.264%	2.30%	0.272%	0.149%	0.107%	4.70%	569
523514	0.330%	0.735%	0.0743%	0.0165%	0.0413%	0.834%	0.140%	4.72%	0.272%	0.545%	7.71%	934
523515	0.0743%	0.570%	0.0330%	0.00826%	0.0330%	0.190%	0.215%	0.405%	1.52%	0.157%	3.20%	388
523525	0.165%	0.438%	0.0330%	0.0413%	0.0330%	0.636%	0.0991%	1.08%	0.0991%	2.56%	5.18%	628
合計	22.2%	29.6%	1.17%	1.64%	12.2%	13.4%	4.42%	8.27%	2.96%	4.15%	100%	-
トリップ数合計	2,687	3,585	142	199	1,475	1,626	535	1,002	359	503	-	12,113

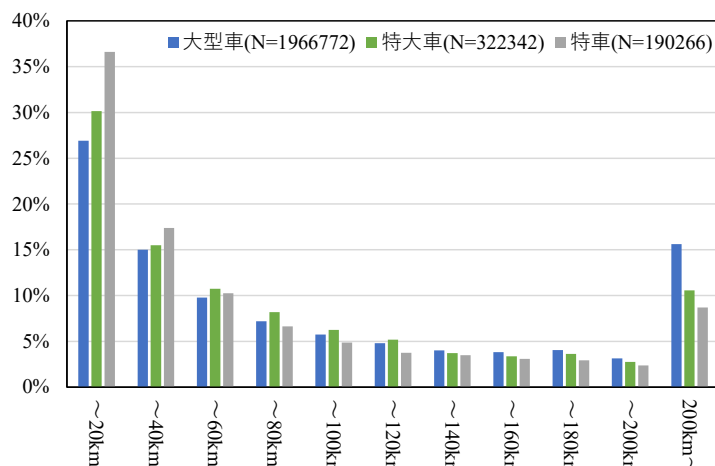


図-2 トリップの経路長分布

区間は通行許可が不要となったが、この制度の対象外の道路では依然として通行許可を申請する必要がある。

このようなトラック事業者と道路管理者の双方に大きな負担がかかっている現状の改善には、道路システムのDXを通じた道路ネットワークの最適化や通行許可の申請プロセスの効率化が求められる。そ

れらの実現に向けて、まず特殊車両の経路選択特性の把握を行う必要がある。そこで本研究では、特殊車両を含む大型車両を対象とした経路選択モデルを構築することを目的とした。

5.2 使用データの概要

特車の経路選択は、車両の違いはもちろん、通行の許可を要するなど、その他の車両とは、経路選択の特性が大きく異なる。特車に特化した経路選択特性について考察を行うため、本研究では、対象車両が異なる2つのデータ（商用車データとETCデータ）を活用し、それぞれのデータに基づいた経路選択モデルを構築することとした。データに関する基本的な情報を表-1に示している。両データの最大の違いは対象としている車両の違いである。

商用車データには高速道路走行における車種区分である大型車と特大車のデータが含まれている。この特大車の区分には特車や大型バスが含まれているが、それらの区別は不可能である。一方で、ETCデータは特車に限定されたデータである。なお、データの対象エリアは、図-1に示す通りであり、両データで同じ範囲のデータを用いている。

続いて、両データの基礎集計について比較を行う。まず、商用車データの大型車、特大車、ETCデータの特車のOD表をそれぞれ表-2～表-4に示す。なお、青く着色しているのは沿岸部のメッシュであることを示しており、緑に着色しているのは、選択率が上位15位に入ることを示している。これらを見ると、大型車のOD表では、内陸部を含むトリップが多く、特大車と特車のOD表では、港などの沿岸部を含むトリップが多い。これは、特車の代表的なものの一つに、海上コンテナ車があることが要因であると考

えられる。次に、トリップの長さごとにトリップ数を集計したものを図-2に示す。これを見ると、特車、特大車、大型車の順に短いトリップが多いことが見受けられる。次に、道路種別や道路管理者ごとの利用割合を表-5と表-6に示す。

表-6を見ると、特車においては、高速自動車国道の割合が大幅に小さく、それ以外の割合は概ね大きいことが見て取れる。この点については、先に確認できた、特車の方が短いトリップが多いことにも関連していると推察できる。すなわち、短い距離の移動が多く、そのため高速道路を使うドライバーが少ないことが推察できる。加えて、表-6では、特車において、中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社（ネクスコ）の割合が低く、阪神高速道路株式会社・本州四国連絡高速道路株式会社の割合が高いことが見受けられる。この傾向は、特大車においても同様である。この点については、先に確認した特車や特大車では沿岸部のトリップが多く、沿岸部を走る高速道路が阪神高速であるためであると推察できる。また、どちらの表においても、全ての項目において、特大車の値は、特車と大型車の間にあることが確認できる。

5.3 経路選択モデルの構築

特殊車両の経路選択特性を把握すべく、先述した商用車データやETCデータに対して、(1)では走行軌

表-5 道路種別ごとの利用割合

道路種別	リンク数割合	ETC2.0 使用回数割合	商用車プローブデータ	
			大型車使用回数割合	特大車使用回数割合
高速自動車国道	2.32%	25.7%	48.5%	37.2%
都市高速道路	0.430%	10.4%	8.17%	10.1%
一般国道	14.8%	36.1%	25.1%	28.1%
主要地方道（都道府県道）	12.7%	13.2%	9.84%	11.9%
主要地方道（指定市）	0.530%	2.30%	1.16%	1.75%
都道府県道	12.6%	2.62%	1.91%	2.07%
指定市道	0.980%	2.79%	1.07%	1.35%
市町村道	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
その他	55.6%	6.90%	4.22%	7.47%
合計	100%	100%	100%	100%

表-6 道路管理者ごとの利用割合

道路管理者	リンク数割合	ETC2.0 使用回数割合	商用車プローブデータ	
			大型車使用回数割合	特大車使用回数割合
中日本高速道路株式会社・ 西日本高速道路株式会社	2.65%	30.3%	53.2%	41.3%
阪神高速道路株式会社・ 本州四国連絡高速道路株式会社	0.380%	11.2%	8.69%	10.6%
道路公社	0.300%	0.294%	0.404%	0.337%
国	7.76%	26.3%	15.8%	18.7%
都道府県	28.5%	12.5%	10.6%	10.8%
指定市	5.66%	12.7%	7.82%	12.0%
市町村	4.53%	0.852%	0.720%	0.724%
その他	0.0300%	0.120%	0.0713%	0.232%
未調査	50.2%	5.76%	2.66%	5.23%
合計	100%	100%	100%	100%

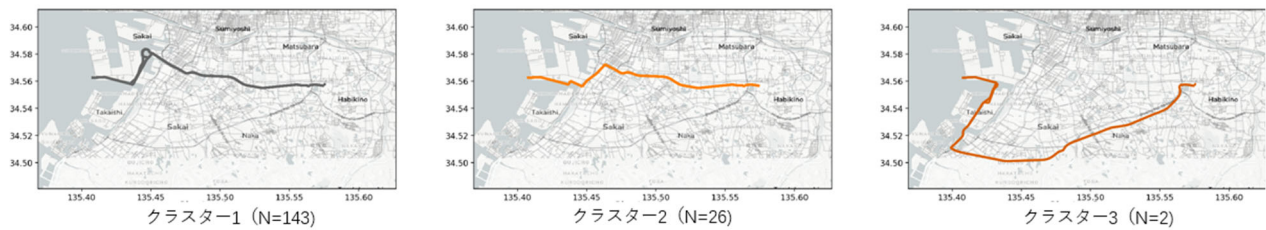


図-3 走行軌跡のクラスタリング結果

表-7 二項ロジスティック分析の結果

説明変数	係数	Z 値	P> z
トリップ長	-0.1858	17.061	0.001
平均車線数	1.1225	25.521	0.001
高速料金	2.2583	22.24	0.001
右左折回数	-0.3813	32.862	0.001
U ターン回数	-0.2921	-5.885	0.001
特大車 (トリップ長)	0.1687	12.476	0.001
特大車 (U ターン回数)	-0.2333	-2.648	0.008
夜間 (高速利用割合)	-0.1613	-0.584	0.559
休日 (高速利用割合)	0.5982	2.827	0.005

N=19092, R²=0.202

***: p<.001, **: p<.010, *: p<.050

跡のクラスタリング分析, (2)では MNL モデル, (3)では再帰型ロジットモデルを適用した。

(1) 走行軌跡のクラスタリング分析

実際の経路を, 選択されやすい経路と選択されにくい経路に分類し, それらの差異の要因について検討を行った。具体的には, 商用車データを用いて, QuickBundles アルゴリズムに基づいて走行軌跡のクラスタリングを行った。その結果を図-3 に示す。3つのクラスターに分類されたが, それぞれのクラスターを選択した車両数を見ると, クラスター1 が非常に多く, クラスター2 とクラスター3 を選択した車両数は少ないことが分かる。そこで, クラスター1 を選択されやすい経路(=1), クラスター2 とクラスター3 を選択されにくい経路(=0)とした。この二値変数を従属変数, 道路の特性を説明変数とした, 2 項ロジスティック回帰分析を行った。

その結果を表-7 に示す。この結果から, 特大車と大型車は, 右左折や交差点が少ない経路, 平均速度が高く平均交通量が少ない経路, 車線数が多く中央分離帯が少ない経路を選択する傾向にあることが確認された。

(2) MNLモデル

a) トリップの抽出

上記の結果から, 選択されやすい経路と選択され

にくい経路を分ける要素が何かを把握したが, より詳細なモデルを構築するべく, 特車の経路選択モデルの構築を行った。具体的には, まず, 下記の手順に基づいて商用車データの分析における対象 OD の選定を行った。①DRM のリンクの情報に基づき, 起終点を 500m メッシュと対応付ける。②トリップごとに, トリップ長に対する, 高速道路の使用距離の割合を算出し, 10%ごとに 10 グループに分類する。③この分類に基づいて 2 つ以下のグループに全てのトリップが分類されている OD を除外する。④特大車のトリップ数が 50 より小さいものと, 特大車のトリップが 5%を下回る OD を除外する。⑤各トリップの出発時刻の幅が 6 時間より小さい OD を除外する。①は OD を詳細に分類するための操作であり, ②, ③, ⑤は OD に含まれるトリップの種類を確保するための操作, ④は特大車の割合を一定以上確保するための操作である。ここで抽出された OD に対して経路選択モデルの構築を行うが, トリップに含まれるリンクのうち, 一つでも異なる場合に, 別の経路として扱っては, 選択肢集合が膨大となるので, 3 トリップ以上の記録がある経路のみを対象とすることとした。

続いて, ETC データの分析における対象 OD の選定を行った。上記①の操作を行い, その結果, 100 トリップ以上が観測された OD を対象とすることとした。なお, ETC データは, 商用車データよりもサンプル数が少ないため, 1 トリップ分でも観測された経路を全て選択肢集合に加えることとした。一方で, 他のメッシュを通過するものの起終点が同一メッシュ内に存在しているケースも幾つか確認されたが, エンジンを入れたまま積み下ろしなどを行うと, 本来は他のメッシュで停車しているにもかかわらず, データ上では, 移動しているように記録されてしまう。こういったケースの分類が困難であるため, 起終点が同一メッシュのデータは除外することとした。また, 同一の物流拠点内にある別のメッシュへの移動といった軌跡も多数確認されたことから, こういったケースに対しては, メッシュを結合し, 単一のメッシュ内での移動として扱うこととした。

以上のプロセスでそれぞれモデルの構築に用いる OD の抽出を行ったが, 商用車データと ETC データではデータの収集方法の違いからか, サンプル数も大きく異なり, 同様の選定基準でデータを選定することが困難であった。一方で, 前項で確認できたように, 沿岸部の OD が多いなど, 特大車と特車で共

表-8 MNL モデルの推定結果（商用車データ）

説明変数	大型車			特大車		
	MNL	PSL	CL	MNL	PSL	CL
経路長	$5.24 \times 10^{-4} **$	$5.21 \times 10^{-4} **$	$5.24 \times 10^{-4} **$	$4.70 \times 10^{-4} *$	$3.90 \times 10^{-4} *$	$3.58 \times 10^{-4} \uparrow$
最小幅員	0.16 **	0.16 **	0.16 **	0.23 **	0.23 **	0.21 *
左折回数	-0.71 **	-0.71 **	-0.70 **	-0.91 **	-0.82 **	-0.78 **
右折回数	-0.33 *	-0.32 *	-0.34 *	0.75 *	0.75 **	0.81 **
Uターン回数	-0.90 **	-0.91 **	-0.89 **	-1.14 **	-1.12 **	-1.15 **
合流部通過回数	-0.87 **	-0.87 **	-0.86 **	-1.07 *	-0.84 $\uparrow$	-0.70 $\uparrow$
補正項		-0.018	0.034		0.194 **	0.188 **
サンプル数	513	513	513	104	104	104
Rho-square	0.052	0.052	0.052	0.080	0.090	0.090
Adj. Rho-square	0.049	0.048	0.049	0.060	0.070	0.070
LL(final)	-1921.99	-1921.93	-1921.73	-352.79	-349.72	-349.33

**: p<.01, *: p<.05, $\uparrow$: p<.10

表-9 全 OD を対象とした推定結果（商用車データ）

説明変数	大型車			特大車		
	MNL	PSL	CL	MNL	PSL	CL
経路長	$5.49 \times 10^{-4} **$	$5.30 \times 10^{-4} **$	$5.52 \times 10^{-4} **$	$2.39 \times 10^{-4} *$	$2.32 \times 10^{-4} *$	$3.58 \times 10^{-4} *$
最小幅員	0.09 **	0.08 **	0.08 **	0.08 **	0.08 **	0.21 **
左折回数	-0.39 **	-0.38 **	-0.39 **	-0.11 $\uparrow$	-0.11 *	-0.78 *
右折回数	0.03	-0.05	-0.02	-0.01	0.00	0.81
Uターン回数	-0.75 **	-0.76 **	-0.74 **	-0.52 **	-0.50 **	-1.15 **
合流部通過回数	-0.68 **	-0.69 **	-0.68 **	-0.29 *	-0.71 *	-0.70 *
補正項		-0.084 $\uparrow$	-0.017		0.057	0.117 *
サンプル数	772	772	772	349	349	349
Rho-square	0.061	0.061	0.061	0.015	0.015	0.017
Adj. Rho-square	0.059	0.058	0.058	0.010	0.009	0.011
LL(final)	-2474.60	-2473.33	-2474.54	-1138.59	-1138.11	-1136.32

**: p<.01, *: p<.05, $\uparrow$: p<.10

通している要素が存在している。この点を踏まえて、商用車データの大型車と特大車との比較を行うこととした。また、この際、抽出された OD のうち、最も多くのトリップが確認された、北大阪トラックターミナルと東大阪トラックターミナルを結ぶ OD を対象としたモデルを構築することとした。これにより、特大車のデータのうち、より特車の割合が高い OD を選出することが出来ていると想定される。これを踏まえて、この比較により、特車の経路選択特性の検討を行うこととした。一方で、この比較においては、明らかに大型車の経路選択には無関係な変数を投入してしまうと、大型車の結果の解釈が困難になることを想定し、特車における交差点の折進条件などは変数として採用していない。そのため、ETC データを用いた分析では、特車に特化した経路選択モデルを構築することとした。

続いて、経路選択モデルを構築するためには、選択肢数が一定数以上存在している必要がある。一方で、ETC データから分かるように、特車を対象とした場合、常に十分にサンプル数が確保できるとは限

らない。このため、本研究では、Ruphail et al.¹⁾が提案している、最短経路に含まれる全てのリンクに対して一定のペナルティを加えることで、少しずつネットワークを変化させていく手法を採用することとした。具体的には、ダイクストラ法により最短経路を導出し、それに含まれている全てのリンクのコストを 1.2 倍し、この操作を 4 回繰り返すことで、5 つの経路を導出している。このようにして生成される 5 つの経路と、実際に選択された経路を合わせたものを選択肢集合として、経路選択モデルの構築を行った。

b) 商用車データ

多項ロジットモデル(MNL)に加えて、Path Size Logit Model(PSL)、C-Logit Model(CL)の 3 種類のモデルを商用車データに適用し、大型車と特大車のそれぞれに対してパラメータ推定を行った。PSL と CL はそれぞれ経路の重複率を考慮出来るモデルになっており、この重複率の捉え方が異なるモデルになっている。

表-8 に商用車データを用いた、北大阪トラックターミナルから東大阪トラックターミナルへの OD についての経路選択モデルの構築結果を示す。これらの結果の対数尤度を確認すると、その差は僅かであるが、CL, PSL, MNL の順に精度が良いことが確認できた。一方で、CL や PSL に特有な要素である補正項の係数が、特大車の結果のみで有意になっている。このことから、特大車を対象とする場合には、重複率を考慮することが望ましいことが示唆されており、さらに解釈すれば、特大車を対象とする場合、申請が必要であることや、物理的に通行可能な経路が少なくなることから、重複した経路が多くなるものと推察できる。また、全てのモデルで経路長の係数が有意に正になっており、一般的な経路選択モデルとは逆の結果となっている。これについては、ダイクストラ法とリンクペナルティ法を用いて生成した経路の経路長が、実際の経路よりも短いことが原因であると推察できる。すなわち、実際の走行においては、最短経路を選択できず、遠回りを余儀なくされていることが示唆される。これを踏まえると、経路長が生成経路の代理指標となっており、その他の推計結果に影響を及ぼす可能性も考えられるが、実際に経路長を除いて推計しても結果に大きな違いは見られなかった。最小幅員の係数については、全てのモデルで有意に正になっている。また、特大車の方が、係数が大きいことが確認できた。すなわち、大型車も特大車も総じて幅広く通行しやすい経路を選択する傾向にあるが、特大車の方がその傾向が強いと言える。次に、右左折と U ターンであるが、これらを回避する傾向にあると推察されるが、特大車の右折以外は回避する傾向にあることが確認できる。特大車の右折に関しては、係数が正に有意となっており、むしろ、右折を含む経路を好む結果となった。これに関しては、特大車の構造上、回転半径を大きくとれる右折の方が好まれることを示唆すると考えられる。また、大型車の結果では、右折の係数が負であるが、最も絶対値が小さくなっており、回避する傾向が小さくなっている。なお、進行方向が 45 度変化した場合を右左折とし、80m 以内に進行方向が 180 度変化している場合を U ターンとしている。

続いて、抽出された全ての OD を対象として推計を行った。その結果を表-9 に示す。先述のとおり、より特車の割合を高くするために、OD を限定していたため、この結果においては、OD についてはより一般的な知見が得られるが、特大車が特車の代表となっていない可能性がより高い結果になっていると言える。

これらの結果のうち、変化した結果についてのみ言及していく。まず、モデルの精度であるが、特大車については、変化が見られなかったが、大型車では、CL と PSL が入れ替わり、PSL の補正項が 10% 水準であるが、有意になるという結果であった。逆に特大車においては、PSL の補正項が有意にはならなかった。特大車においては、CL が最も精度が高く、補正項も有意であるという結果は変化せず、特大車

を対象とする場合は、CL を用いることが最も望ましいという結果は変わらなかった。その他の変化としては、全てのモデルで右折の係数が有意ではなくなっている。一方で、左折や U ターンの係数には変化が無かったため、右折の影響が最も小さいという結果は変化しなかったと言える。

これまでの結果をまとめると、特車の割合が多くなると推察できる OD に限定した推計においては、特大車の経路選択特性として、左折よりも右折への抵抗が小さく、むしろ右折を好む結果となった。また、全 OD を対象としても、右折を好むというほどではないが、右折への抵抗が小さいことを示す結果が得られた。これは、右折の方が、回転半径が大きいために要因であると推察できる。加えて、特大車を対象とする場合、経路の重複率を考慮する補正項が有意であることが確認できた。その理由として、特大車の方が経路に重複が多いことが推察されるが、特大車の方が、自由に経路を選択できないことを示唆していると考えられる。また、大型車にも当てはまることであるが、遠回りを余儀なくされていることを示唆する結果も得られた。

c) ETCデータ

続いて、ETC データを用いて特車の経路選択モデルの構築を行った。まずは、多くのトリップを確保することが可能で、なおかつ、重機などではなく貨物車が多いと推察できる大阪港周辺の OD を対象にモデルの構築を行った。また、選択肢数に差が生じることを考慮し、短距離 (OD 間が 1km 以上 5km 未満) の OD と、長距離 (OD 間が 5km 以上) の OD に分けてモデルの構築を行った。

それぞれの結果を表-10 と表-11 に示す。これらを比較すると、まず、モデルの精度については、短距離の場合は、CL, PSL, MNL の順に精度が良く、特大車の場合と同様の結果が得られた。一方で、長距離の場合は、CL と PSL が入れ替わっているという結果となっている。また、修正項の係数は全てのモデルで有意となっている。経路長の係数については、短距離の結果では、全て正の値であった。また、PSL では有意ではなく、CL と MNL は有意であった。一方で、長距離の結果では、全てのモデルで有意に負であった。このことから、短距離の移動を想定する場合は、少々遠回りになっても通行しやすい道を選択するが、長距離の移動の場合には、距離を短くしようとする傾向があると言える。

高速道路割合に対する係数や、最小幅員に対する係数は、全てのモデルにおいて正に有意であった。次の指定道路割合は、重さ指定道路、高さ指定道路、特車通行許可不要区間のいずれかに指定されている区間の長さの割合であるが、これを見ると、短距離のモデルにおいては、全て正に有意である。長距離のモデルにおいては、全てのモデルで正ではあるが、有意であったのは CL の結果のみであった。この点については、先述した、長距離の経路であれば、距離を短くするように経路を選択すると述べた点に関

表-10 短距離 OD を対象とした推定結果 (ETC データ)

説明変数	MNL	PSL	CL
経路長	$1.02 \times 10^{-4} **$	2.33×10^{-4}	$8.69 \times 10^{-4} **$
高速道路割合	2.33 **	2.67 **	2.59 **
最小幅員	0.29 **	0.31 **	0.31 **
指定道路割合	2.98 **	3.51 **	3.65 **
B条件	-0.13 **	-0.04	-0.08 *
C条件	0.31	0.30	0.14
個別審査条件	1.53 **	1.42 **	1.41 **
補正項		0.383 *	0.837 **
サンプル数	1378	1378	1378
Rho-square	0.247	0.248	0.250
Adj. Rho-square	0.245	0.246	0.248
LL(final)	-2567.47	-2562.91	-2556.68

** : $p < .01$, * : $p < .05$, † : $p < .10$

表-11 長距離 OD を対象とした推定結果 (ETC データ)

説明変数	MNL	PSL	CL
経路長	$-5.03 \times 10^{-4} **$	$-2.10 \times 10^{-4} **$	$-3.27 \times 10^{-4} **$
高速道路割合	30.10 **	30.40 **	28.10 **
最小幅員	0.20 **	0.58 **	0.66 **
指定道路割合	0.94	0.49 **	2.07 **
橋梁割合	-2.58 **	-10.50 **	-7.57 **
B条件	0.75 **	0.67 **	0.68 **
C条件	-0.34 **	-0.38 **	-0.53 **
個別審査条件	-0.34 **	-0.71 **	-0.70 **
補正項		-1.46 **	-2.68 **
サンプル数	2384	2384	2384
Rho-square	0.251	0.285	0.258
Adj. Rho-square	0.250	0.284	0.267
LL(final)	-6249.90	-5960.37	-6108.35

** : $p < .01$, * : $p < .05$, † : $p < .10$

表-12 全 OD を対象とした推定結果 (ETC データ)

説明変数	MNL	PSL	CL
経路長	$-3.76 \times 10^{-4} **$	$-5.28 \times 10^{-4} **$	$-2.34 \times 10^{-4} **$
高速道路割合	5.63 **	4.86 **	5.03 **
最小幅員	0.08 **	0.09 **	0.10 **
指定道路割合	3.15 **	2.70 **	2.34 **
橋梁割合	-0.88 *	-4.32 **	-2.92 **
B条件	0.03 **	0.01	0.01
C条件	-0.21 **	-0.16 **	-0.24 **
個別審査条件	0.22 **	0.21 **	0.25 **
補正項		-0.71 **	-1.40 **
サンプル数	6589	6589	6589
Rho-square	0.147	0.162	0.160
Adj. Rho-square	0.146	0.162	0.160
LL(final)	-17622.60	-17302.43	-17338.78

** : $p < .01$, * : $p < .05$, † : $p < .10$

連すると推察できる。すなわち、指定道路の方が良いが、それよりも、経路が短いものを選択しているのではないかと推察できる。しかしながら、CL だけでは有意になっていることから、さらなる考究が必要である。次に、B 条件、C 条件、個別審査条件の結果を確認する。C 条件については、短距離の場合には全てのモデルで有意ではなく、長距離の場合には、全てのモデルで負に有意であった。長距離の

結果は、C 条件の交差点を避ける傾向を示唆しているため、妥当な結果であると考えられる。一方で、短距離では、有意ではないため、C 条件か否かを気にしないといった結果になっているが、これは、短距離であるがゆえに、そもそも数が少ないことに起因しているとも考えられる。B 条件については、短距離の結果では全てのモデルで係数が負になり、CL と MNL で有意であった。一方で、長距離の結果では、全てのモデルで正に有意であった。個別審査条件については、短距離の場合は、全てのモデルにおいて正に有意であったが、長距離の場合は、全てのモデルにおいて負に有意であった。このように、B 条件と個別審査条件の結果が入れ替わるような結果となっている。これについては、個別審査条件の影響が強いのではないかと考えられる。長距離になると、複数の自治体を跨ぐ可能性が高く、複数の自治体へ個別審査を依頼することに対して抵抗があるのではないかと考えられる。このことから、短距離の場合、B 条件の交差点を通行するよりも、一つの自治体の個別審査を経る方が良いと考え、長距離の場合は、複数の自治体の個別審査を経るよりも、B 条件の交差点を通行する方が良いと考えるのではないかと推察できる。橋梁割合は、短距離の場合は経路ごとにあまり差が無いため、長距離のモデルにのみ投入したが、係数が負に有意となり、橋梁を避ける傾向が見受けられた。このように、対象とする距離が異なれば、経路選択の際に重視する内容が異なる可能性が示唆された。

最後に、抽出された全ての OD を対象とした推計を行った。その結果を表-12 に示す。これを見ると、概ね、短距離の OD の結果と同様の結果になった。これについては、特車ではそもそも短い OD が多いため、総じて短距離の OD の傾向が全体にも見受けられることが示唆された。なお、この推計では、PSL の精度が最も良いという結果となった。また、経路長に関しては、最も精度が高かった PSL では係数が正であり、その他では負であった。精度の高さと、先述の短距離の傾向がみられることを考えると、正が妥当であるとも考えられるが、さらなる考究が必要である。

ここまでの結果をまとめると、経路選択の際には、B 条件の交差点はあまり気にされないが、C 条件は回避しようとする傾向にあり、個別審査条件は、OD が長く、複数の自治体の審査が必要な場合は避ける傾向があるが、OD が短く、単一の自治体内で完結する場合はむしろ率先して選択する傾向が見受けられた。

(3) 再帰型ロジットモデル

MNL, PSL, CL はいずれも、あらかじめ経路の選択肢を用意しておき、そのうちからどれを選ぶかを推計するものであった。この場合、選択肢集合が推

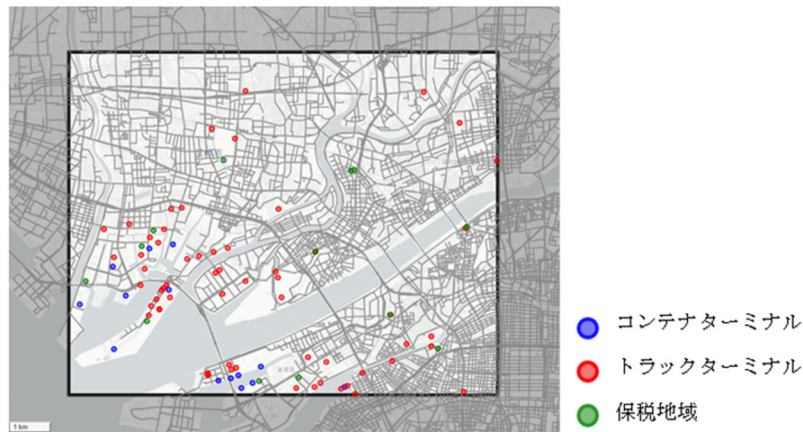


図-4 再帰型ロジットモデルの対象エリア

表-13 再帰型ロジットモデルの推定結果

説明変数	起点:CT	終点:CT	起点:TT	終点:TT	起点:BA	終点:BA
幹線道路	0.166***	-0.106***	-0.039	-0.022	-0.02	-0.021
道路長	-0.143***	-0.087***	-0.137***	-0.119**	-0.128***	-0.088***
2車線以上道路	-0.227***	0.103***	-0.138***	-0.136***	-0.114***	-0.123***
中央分離帯の幅	-0.083	-0.096	0.084	-0.056	-0.02	-0.034*
有料道路	0.283***	-0.467	0.037	-0.383	0.034	-0.183*
上下非分離道路	-0.171***	-0.029	-0.218***	-0.039	-0.062*	-0.125***
側道	-0.962***	-0.662**	-0.581***	-1.203***	-1.048***	-0.901***
左折	-0.802***	-0.760***	-0.667***	-0.857***	-0.951***	-1.125***
右折	-1.559***	-1.486***	-1.471***	-1.468***	-1.702***	-1.659***
Uターン	-3.643***	-0.890***	-1.414***	-0.724***	-2.164***	-1.382***
トリップ数	518	158	210	280	980	882
リンク数	1080	910	1168	1616	2171	2488
初期対数尤度	-13.621	-37.362	-21.144	-29.456	-20.848	-27.664
最終対数尤度	-0.682	-1.620	-1.053	-1.530	-1.435	-2.237

***: $p < .001$, **: $p < .010$, *: $p < .050$

計結果に与える影響を否定できない。一方で、存在し得る全ての経路を選択費に含むこともまた不可能である。そこで、経路の選択肢をあらかじめ用意することなく推計が可能である、Recursive Logit Modelを商用車データに適用した。

再帰型ロジットモデルは、経路選択肢集合を設定する必要がなく、ノードごとに次の選択可能リンクが限定されるため、逐次的な経路選択行動を表現できるモデルである。モデルを推定するにあたり、まず、対象エリアを、大阪府の中心部に位置する10km×10kmメッシュに定めた(図-4)。本エリアは、大阪部の中心部であり、コンテナターミナル、トラックターミナル、保税地域など、大型トラックのための多数の物流施設があるため、大型トラックによるトリップを多く収集することができ、異なる物流施設を発着地とする多様な経路を抽出できる。

コンテナターミナル(CT)、トラックターミナル(TT)、保税地域(BA)を起点、終点とする経路を抽出し、それぞれに対して、パラメータの推定を行った結果が、表-13である。なお、特大車や大型車の通行履歴のない道路を除外した道路ネットワークを対象とした。いずれのモデルにおいても、側道・右

折・左折・Uターンの係数は有意に負であり、トラックが側道や折進を避ける傾向にあることが確認できる。また係数の大きさから、左折よりも右折を避ける傾向にあることが確認できる。なお、道路長が負に有意であるのは、道路長が短い道路(つまり、交差点が頻繁にある、より分断された道路)が好ましいということではなく、むしろ全体的な移動距離が短くなるような道路が好まれるということを示している。

コンテナターミナルを起点とする経路については、有料道路を選択する傾向にあることが確認できる。物流事業者にヒアリングを行ったところ、コンテナターミナルを起点とする経路は、海上コンテナ車によるものであることを確認した。つまり、この結果は、海上コンテナ車がコンテナターミナルを起点とする場合、有料道路を選択する傾向にあることを示すものであると言える。

ここまでの分析では、道路ネットワークは特大車や大型車が一度でも通過した履歴のある道路に基づ

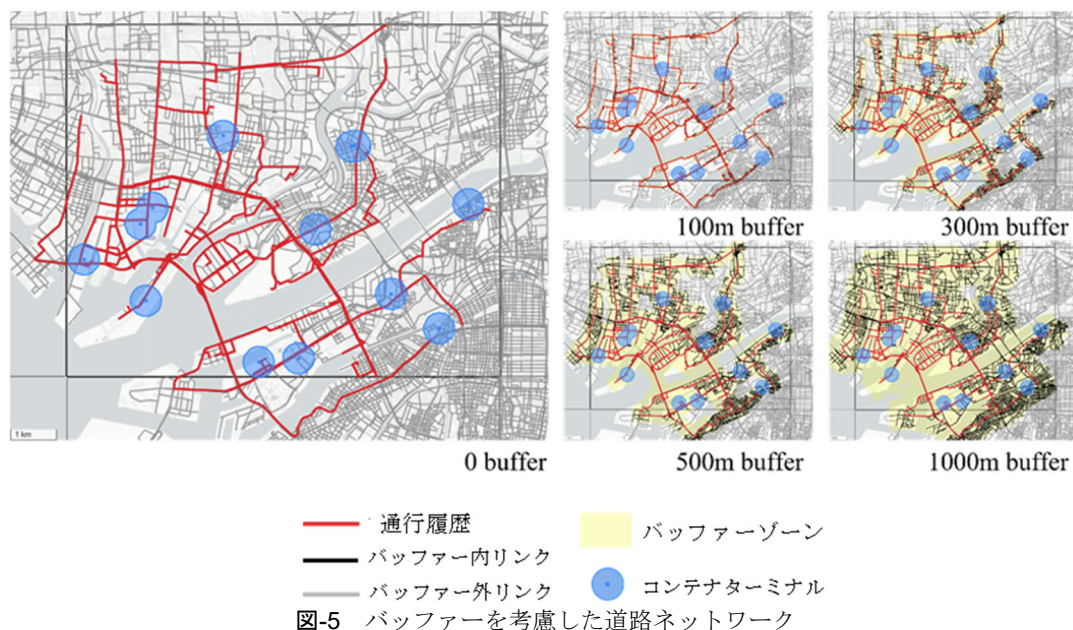


表-14 バッファを考慮した再帰型ロジットモデルの推定結果

説明変数	バッファ				
	0 m	100m	300m	500m	1000m
幹線道路	0.166***	0.159***	0.124***	0.107***	0.079***
道路長	-0.143***	-0.105***	-0.117***	-0.116***	-0.117***
2車線以上道路	-0.227***	-0.235***	-0.247***	-0.222***	-0.180***
中央分離帯の幅	-0.083	-0.016	0.064	0.047	0.018
有料道路	0.283***	-0.154*	-0.219*	-0.168*	-0.158*
上下非分離道路	-0.171***	-0.224***	-0.233***	-0.251***	-0.205***
側道	-0.962***	-2.585***	-2.520***	-2.547***	-2.521***
左折	-0.802***	-1.561***	-1.667***	-1.681***	-1.694***
右折	-1.559***	-2.057***	-2.231***	-2.230***	-2.257***
Uターン	-3.643***	-4.095***	-3.645***	-3.662***	-3.425***
トリップ数	518	518	518	518	518
リンク数	1080	2613	4864	6845	9714
初期対数尤度	-13.621	-13.621	-13.621	-13.621	-13.621
最終対数尤度	-0.682	-1.199	-1.559	-1.611	-1.684

***: $p < .001$, **: $p < .010$, *: $p < .050$

いて作成したが、図-5のように、このネットワークをベースにバッファを設けて通行履歴のない道路を加えながら、モデル推定を行った。通行履歴のない道路をネットワークに含める理由は、トラックが通行したいと考えているにも関わらず、通行できていない道路を加えるためである。コンテナターミナルを起点とした経路に対して、バッファを設けてモデル推定²⁾を行った結果が表-14である。

バッファを大きくしても、側道・右折・左折・Uターンの係数は有意に負であり、トラックが側道や折進を避ける傾向は変わらないことが確認できる。一方で、有料道路については、バッファを設けることで、パラメータが正から負になり、選択されなくなることが分かる。

バッファを増やすと、より多くの非有料道路が含まれるようになるが、有料道路の数の増加は比較的少なく、全体の割合の減少につながるが、この結果をもたらしたと考えられる。このように再帰

型ロジットモデルは使用する道路ネットワークに敏感であり、トラックの走行に無関係な代替道路を過度に含めると、推定結果に影響をおよぼす可能性があるため、走行の可能性のある道路を抽出するなどの対応が必要である。ただし、いずれのモデルにおいても、特大車が折進を避ける傾向にあることが確認できることから、特大車にとって折進が大きな課題であることが読み取れる。

5.4 おわりに

本研究では、商用車データやETCデータを対象に、MNLモデルや再帰型ロジットモデルを適用することで、特殊車両を含む大型車両の経路選択特性の把握を行った。全般的に特殊車両を含む大型車両は折進やUターンを避ける傾向にあり、折進やUターンは非常にコストの大きい選択になっていることが確

認できた。その一方で、高速道路や幹線道路など幅員の大きい経路を選択する傾向にあることが確認された。また、特殊車両に限定すれば、橋梁を避ける傾向にあることが確認できた。これらの結果は、特殊車両を含む大型車両の経路選択特性を把握する上で有用な知見であると考えられる。

ただし、対象とする OD やモデルによって、パラメータの大きさや符号にばらつきがあり、解釈が困難なものも多く存在したことから、モデル推定にあたっては、経路選択枝や道路ネットワークの選定にはさらなる検討が必要であると考えられる。また本研究で使用したデータでは、大型車、特大車といった大きな分類は判別できたが、車両諸元のデータを取得することはできなかった。加えてトレーラヘッドだけで走行しているかどうかについても判別できなかった。今後、より精緻に特殊車両の経路選択特性を把握するには、こうした詳細な車両諸元と走行軌跡が紐づけされたデータの整備は不可欠であると言える。

参考文献

- 1) Ruphail, N.M., Ranjithan, S.R., ElDessouki, W., Smith, T., Brill, E.D.: A decision support system for dynamic pre-trip route planning, Applications of advanced technologies. Transportation Engineering: Proceedings of the Fourth International Conference. pp.325-329, 1995.
- 2) Shelat, S., O. Cats, N. van Oort, and H. van Lint.: Calibrating Route Choice Sets for an Urban Public Transport Network using Smart Card Data, 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), pp.1-8, 2019.

第6章 道路ネットワーク計画モデル

6.1 はじめに

わが国の物流は貨物車に大きく依存しており，貨物の輸送量は増加傾向にある．一方，少子高齢化や物流業界における賃金の低さから，物流の担い手不足が深刻化している．それゆえ，物流業界には，生産性の向上や省人化が求められてきており，海上コンテナ輸送をはじめとする特殊車両（特車）についても例外ではない．特車の輸送円滑化・効率化のために，通行許可不要区間の設定などの施策も講じられてきたが，大幅に迂回している事例が存在するなど，特車の走行経路は，十分に効率化されていない．さらに，近年，道路の老朽化が進行しており，特車に対応した迂回路の設定・整備なども必要であり，特車指向の道路網の設計が有用であると考えられる．

道路網の設計については多くの研究がなされている．例えば，リンク整備に関する離散的な組み合わせ最適化問題については，LeBlanc¹⁾や Drezner and Wesolowsky²⁾などの研究があり，リンク容量などの連続値を決定する研究については，Abdulaal and LeBlanc³⁾などがある．本研究のように物流を対象とした道路網設計については，サプライチェーンを考慮した Yamada et al.⁴⁾の研究や，物流業者の経路選択特性を組み込んだ Meng and Wang⁵⁾の研究などがある．しかし，物流を対象とした道路網の最適設計研究は少なく，特車の行動特性を加味した研究はなされていない．

本研究では，特車の走行経路の改善・円滑化を目指し，特車の経路選択特性を考慮したうえで，道路網を最適化する手法を提案する．図-1に示すように，離散型最適化（上位レベル）に，特車の経路選択モデル（下位レベル）が内包される．さらに，その手法を用いた数値計算を通じて，特車指向の道路網設計に関して基礎的知見を得ることとする．

内包する経路選択モデルについては，手法の開発段階では，関谷ら⁶⁾の重複率最大化モデルを採用する．後述のように，数値計算段階では，再帰型ロジックモデルも適用する．なお，下位レベルの経路選択モデルは，経路選択の結果を上位レベルに返すだけなので，上位レベルの解の精度に影響を及ぼさな

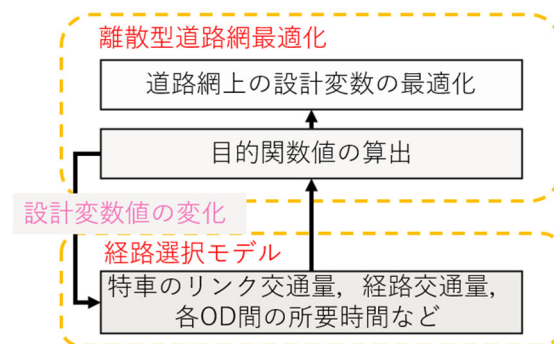


図-1 手法の概要

い．

重複率最大化モデルは，兵藤ら⁷⁾が，第4回東京都市圏物資流動調査の大型車走行経路の結果を用いて開発したものである．各リンクの時間や費用に，道路規格などの要素を加えた認識一般化費用が定義され，認識一般化費用最小経路と実経路の重複が最大となるようにパラメータが推定される．その後，萩野ら⁸⁾は，リンクの折進条件を説明変数に加えており，関谷ら⁶⁾は，交差点の構造規格と車線数を説明変数に採用している．

6.2 モデル化と解法

図-1の上位レベルは，リンクを「改良しない・する」という[0,1]の組み合わせ最適化問題である．一方，下位レベルでは，[0,1]の設計変数の組合せに応じて，各リンクの認識一般化費用が推定され，認識一般化費用最小経路がダイクストラ法によって算定された後，目的関数が計算される．本研究の場合，ダイクストラ法は，以下の式(1)~式(5)で表される．

$$\min \sum_{a \in A_0} M_{a,t} e_{p,a}^t, \forall p \in N_F^t \quad (1)$$

s.t.

$$M_{a,t} = \begin{cases} H_a + \omega t_a(1 + \alpha_L(1 - x_a^t)) & a \in A_{x,t}^l \\ H_a + \omega t_a & a \in A_{d,t}^l \\ H_a + \omega t_a(1 + \alpha_L) & a \in A_{s,t}^l \\ \omega \alpha_N(1 - x_a^t) & a \in A_{x,t}^i \\ \omega \alpha_N & a \in A_{o,t}^i \\ 0 & a \in A_{f,t}^i \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in A_0} e_{p,aij}^t = \sum_{j \in A_0} e_{p,aji}^t, \forall i \in A_0, p \in N_F^t \quad (3)$$

$$\sum_{j \in A_0} e_{p,apoj}^t = 1, p \in N_F^t \quad (4)$$

$$\sum_{i \in A_0} e_{p,aiPD}^t = 1, p \in N_F^t \quad (5)$$

a	リンク番号
α_L	車線数に関するパラメータ (0.195 に設定)
α_N	交差点に関するパラメータ (18.174 に設定)
a_{ij}	ノード ij 間のリンク
p	OD の番号
p_o	p 番目の OD の出発地
p_D	p 番目の OD の到着地
t	期間
$M_{a,t}$	期間 t におけるリンク a の認識一般化費用 (円)
$e_{p,a}^t$	期間 t における p 番目の OD の認識一般化費用が最小となる経路がリンク a を含む場合は 1, 含まない場合は 0 となる [0,1] 変数
A_0	リンク集合 (ノードに相当するダミーリンクを含む)
$A_{x,t}^l$	期間 t におけるリンク改良候補の集合, $A_{x,t}^l \subset A_0$
$A_{d,t}^l$	期間 t における車線数が 2 車線以上のリンク集合, $A_{d,t}^l \subset A_0$
$A_{s,t}^l$	期間 t における車線数が 1 車線のリンク集合, $A_{s,t}^l \subset A_0$
$A_{x,t}^i$	期間 t における交差点 (交差点リンク) 改良候補の集合, $A_{x,t}^i \subset A_0$
$A_{o,t}^i$	期間 t における折進条件のある交差点の集合, $A_{o,t}^i \subset A_0$
$A_{f,t}^i$	期間 t における折進条件のない交差点の集合, $A_{f,t}^i \subset A_0$
x_a^t	期間 t においてリンク a を改良する場合は 1, そうでない場合は 0 の [0,1] 行列
N_F^t	期間 t における OD ペアの集合
t_a	リンク a の所要時間 (改良されたリンクについては, 改良されたときの所要時間)
ω	車両の時間価値 (円/分)
H_a	リンク a が高速道路の場合の利用料金

式(2)は、関谷ら⁶⁾の重複率最大化モデルを、経路ベースの式からリンクベースの式に変換したものである。図-2に示すように、交差点をダミーリンクで

表現するので、リンク (改良候補, 未改良, 改良済) と交差点 (改良候補, 未改良, 改良済) のそれぞれに対して、認識一般化費用が算定される。なお、認識一般化費用と区別するために、経路を走行する際に生じる費用 (式(10)) のみを走行費用とする。目的関数は、特車に着目した費用対効果 (以下、特車費用対効果と称する) とし (式(6))、その分子は、走行費用の総削減額 (式(7)から算定) であり、分母は、リンクや交差点の改良に要する総費用 (式(9)から算定) である。

$$\max \frac{\sum_{t=1}^T \{B^t / (1+r)^{t-1}\}}{\sum_{t=1}^T \{C^t / (1+r)^{t-1}\}} \quad (6)$$

s.t.

$$B^t = B_0^t - \sum_{p \in N_F^t} \sum_{a \in A_0} L_{a,t} f_p^t e_{p,a}^t \quad (7)$$

$$B_0^t = \sum_{p \in N_F^t} \sum_{a \in A_0} L'_{a,t} f_p^t e_{p,a}^t \quad (8)$$

$$C^t = \sum_{a \in A_x} I_a^t x_a^t \quad (9)$$

$$L_{a,t} = H_a + \omega t_a \quad (10)$$

$$L'_{a,t} = H_a + \omega t'_a \quad (11)$$

$L_{a,t}$	期間 t におけるリンク a の走行費用 (円)
$L'_{a,t}$	期間 t におけるリンクや交差点を改良した場合のリンク a の走行費用 (円)
B^t	総走行費用の削減額
B_0^t	期間 t におけるリンクや交差点を改良した場合の総走行費用
C^t	期間 t におけるリンクや交差点の改良に要する総費用
I_a^t	期間 t におけるリンク a の改良に要する費用
$e_{p,a}^t$	リンクや交差点を改良しない場合、期間 t における p 番目の OD の認識一般化費用が最小となる経路がリンク a を含む場合は 1, 含まない場合は 0 となる [0,1] 変数
f_p^t	期間 t における p 番目の OD の交通量
t'_a	期間 t におけるリンク a の所要時間
T	計画期間
r	割引率

上位レベルの組み合わせ最適化問題の解法については、関数の非線形性から、有効な厳密解法が存在しない。それゆえ、本研究では、厳密解法ではなく、近似解法の一つであるメタヒューリスティクスを使用する。具体的には、修正確率的二値粒子群最適化法(modified probability-based discrete binary particle swarm optimization: MPBPSO)を採用する。本研究と類似の問題構造を有している既存研究^{9),10)}を参考にすると、遺伝的アルゴリズム(genetic algorithm: GA)、遺伝的局所探索法(genetic local search: GLS)、離散型二値粒子群最適化法(discrete binary particle swarm optimization: DBPSO)や確率的二値粒子群最適化法

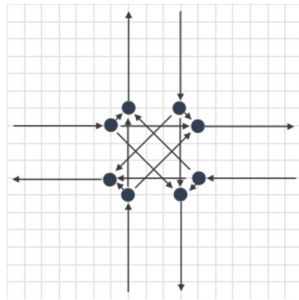


図-2 交差点の表現方法

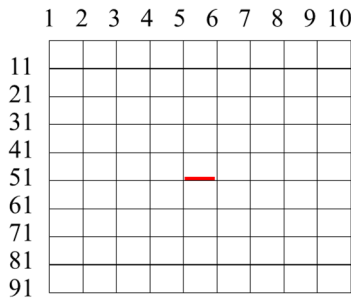


図-3 対象とする仮想道路網と最適解

表-1 パラメータ推定の範囲

$pop \times iter$	10×10000, 50×2000, 100×1000, 200×500, 500×200, 1000×100, 2000×50
$prob_{max}$	10, 20, 30, 40, 50, 60
ω	0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0
θ_1, θ_2	1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0
τ_1, τ_2	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8

表-2 問題設定

OD 交通量	ランダムに生成した 30 の OD ペアについて, 100, 200, 300 台
経路選択	ダイクストラ法
リンク改良費用	各リンクあたり 1
輸送費用	各リンクあたり 1
リンク改良効果	走行費用の 20%削減
目的関数	費用対効果の最大化

(probability-based discrete binary particle swarm optimization : PBPSO)などの有力な手法よりも優れた性能を有しているからである。粒子群最適化法 (particle swarm optimization: PSO) は, Kennedy et al.¹¹⁾によって提案されたメタヒューリスティクスであり, 粒子群の中で最良の目的関数値を記録した座標 (gbest) と, 各々の粒子が最良の目的関数値を記録した座標 (pbest) を考慮した速度ベクトルを生成・更新することにより求解する。MPBPSO は, Yamada and Febri¹⁰⁾によって開発され, 線形の伝達関数に粒子の座標を入力して離散化を実施する PBPSO と, 集中化と多様化のバランスが優れている修正二値粒子群最適化法(modified discrete binary particle swarm optimization: MBPSO)を組み合わせたものである。

既存研究¹⁰⁾と比較して, 本研究の決定変数の次元数が大きいので, 図-3 のような 100 ノード・180 リンクの格子状の仮想道路網を用いた簡便な問題を対象にして, 表-1 や表-2 の設定において, MPBPSO の最適なパラメータ値をあらためて同定した。なお, 改良の対象となるリンク数は 180 であるので, 決定変数の個数 180 が, 本手法の適用可能な最大サイズとなる。格子状の道路網であること, および, 改良効果の設定値から, 迂回が実施されることはなく, 図中に赤色で示された 1 箇所のみを改良するケースが最適であることが明らかな問題とした (図-3)。その際の目的関数の値は 600.0 である。

既存研究¹⁰⁾と同様に, 同一パラメータ値について, 乱数を換えて 10 回の計算を行い, それらの最大値, 最小値, 平均値を基にして, 各パラメータの最適性を評価した。その結果, 反復回数×粒子数 ($pop \times iter$) は 200×500, 離散化に関するパラメータ ($prob_{max}$) は 20, 慣性項に関するパラメータ (ω) は 0.5, pbest へ向かう速度ベクトルに作用するパラメータ (θ_1) は 2.0, gbest へ向かう速度ベクトルに作用するパラメータ (θ_2) は 2.0, 粒子の選択確率に関するパラメータ (τ_1, τ_2) は(0.7,0.3)が, それぞれ最適となった。その際, 最大値は 600.0, 最小値は 560.0, 平均値は 596.0 であり, 最大値と最小値が一致していないことから, 既存の MPBPSO のままでは, 十分な求解性能が保証されないことが示唆された。

6.3 解法の改良

既存研究を参考にすれば, PSO の有効な改良方法として, 1) 慣性項などの改良, 2) 他のメタヒューリスティクスで使用されているオペレータの追加, 3) 連続値を離散化する際の 伝達関数の改良が考えられる。上記 1 については, Xin et al.¹²⁾など, 多数の事例があり, 離散型の PSO が対象になることが多い。上記 2 については, 探索や収束の性能向上が期待できるとされており¹³⁾, 上記 3 については, 離散型の PSO 特有の改良であり, 伝達関数を改良することで探索や収束の性能を高める方法であり, Mirjalili and Lewis¹⁴⁾などの研究が存在する。本研究では, まずは上記 1~3 を実験的に試行し, その結果, 伝達関数の影響が大きいとの結論を得た。伝達関数の改良に際しては, 既存研究¹⁵⁾によって, 決定変数の次元数が大きくなると, 最も高い確率で離散化される解 (中心解) への離散化確率が低下することが示されているので, 中心解への離散化確率を制御する手法として, 改良 1 と改良 2 を適用した。

6.3 解法の改良

改良 1 は, 従来の線形伝達関数 (図-4, $prob_m$: 伝達関数値, w_{mo}^n : 擬確率を用いた速度ベクトルの更新値)に閾値を設定したものである (図-5)。改良 2 は, シグモイド関数に閾値に相当する項を加えたものである (図-6)。いずれも, 既存の MPBPSO¹⁰⁾と比較して, 離散化における感度が高まるとともに, 離散化前の変数が一定の値以上・以下になると離散化確率が一定となる。改良 1 については, 閾値 A (伝達関数に設定した閾値) と $prob_{max}$ (伝達関数の最大値),

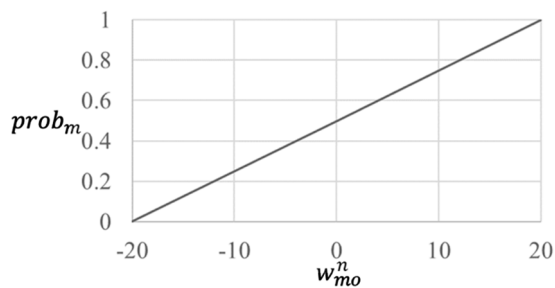


図-4 従来の伝達関数

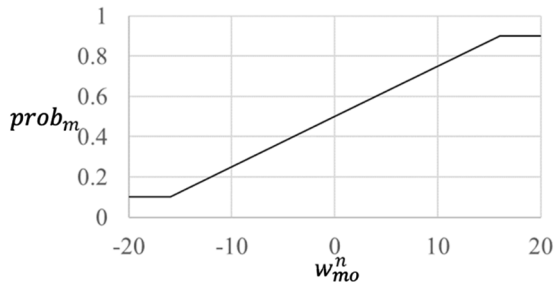


図-5 改良された伝達関数（改良 1）

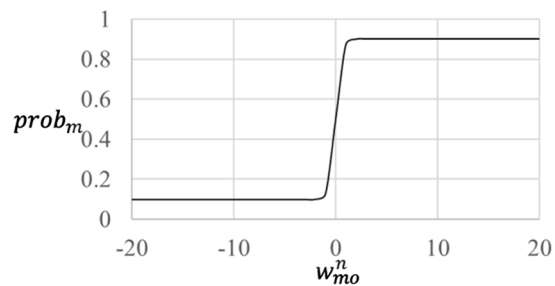


図-6 改良された伝達関数（改良 2）

改良 2 については、閾値 A と B（シグモイド関数の閾値に関するパラメータ）の値を同定する必要がある。それらの結果が、表-3～表-6 である。なお、他のパラメータについては、先述の推定値を採用し、計算時間の計測には Intel Core i9 3.60GHz CPU で 32.0GB RAM の PC を使用した。

改良 1 においては、 $(A, prob_{max}) = (0.005, 30)$ が最適であり、10 回の計算の平均値が 600.0 である。また、改良 2 については、複数の (A, B) において、10 回の計算の平均値が 600.0 となっているが、計算時間が最小であるのは $(A, B) = (0.005, 0.15)$ である。計算結果をまとめた表-7 より、本研究では改良 2 を採用する。改良 1 と 2 のいずれも、 $A=0$ の場合が最適解に含まれていないので、閾値の設定が有効であると考えられる。さらに、図-5 と図-6 から、改良 1 と 2 の相違は、中心解からの乖離であるので、図-6 のように乖離を制御する操作を包含することが望ましいと推察される。

6.4 数値計算例（ケーススタディ）

提案した手法を用いて、(1)では、道路網改良における基礎的知見を得ることを目的に、仮想道路網を

対象として、(2)では、より現実的な知見を得ることを目的に、実際の道路網を対象として、それぞれ数値計算を行った。

(1) 仮想道路網を用いた数値計算

大阪府、および、その周辺地域における高速道路と一般国道に焦点を当てて、それらを部分的に簡略化した道路網を計算対象とした（図-7）。リンク数は 118、交差点数は 76 である。各リンクの旅行速度については、平成 27 年度全国道路・街路交通情勢調査の結果^{注 1)}を参考にして、車線数に応じて表-8 と表-9 のように設定した。高速道路の利用料金については、100 円/km とした。特車の OD については、実際のデータを入手することが難しいことから、本研究の主な対象である、海上コンテナ車のドレイジ輸送を想定して、港湾～トラックターミナル間の OD を生成した。通行許可件数^{注 2)}に大阪港のコンテナ取扱量^{注 3)}を比例配分させることにより、各 OD において 700 台/年とした。

設計変数（決定変数）は、道路拡幅と交差点改良の有無である。具体的には、高速道路と一般国道の全リンクを対象とした道路拡幅（改良候補リンク数：118）と、一般国道が交差している交差点の改良（改良候補交差点数：39）を対象とした。改良に要する費用については、大阪府の道路整備^{注 4)}を参考にして、上記の全箇所を改良する場合の平均値が、道路拡幅においては 70 億円/km、交差点改良においては 2 億円/箇所となるように、地価^{注 5)}に応じた各箇所の改良費用を設定した。その際、各リンクの地価については、各リンクから半径 300m 以内の公示地価の平均値とし、300m 以内の公示地価の記載がない場合は、当該リンク最近傍の公示地価を代用した。

最適解は、図-8 に示す結果となった（ケース 1-1）。郊外部の交差点のみを改良した場合が最適であり、費用対効果は 0.1337 であった。費用対効果を目的関数にしているので、施工費用が低廉で、かつ、特車交通が比較的集中する交差点の改良が望ましくなる。

費用対効果を目的関数とする場合、費用が小さければ、効果が小さくても最適解になる可能性があることから、得られる効果の大きさに下限値（ケース 1-2：3 億円、ケース 1-3：6 億円）を設けることにより、一定程度の効果を有する最適解を探索した（図-9、図-10）。効果の下限値が大きくなるにつれて、改良費用の低廉な郊外部の交差点に加えて、主要 OD 間の連結性担保の観点から、郊外部から中心部に向かう東西と南北方向のリンクを改良することが望ましいとの傾向が見られる。なお、特車費用対効果の値については、表-10 のように、1 を大きく下回る結果となるが、本研究では、特車の走行費用削減のみを効果としており、効果の対象が限定的であるので、1 を下回ることが非効率的を示唆しないと考えられる。

つぎに、最適解に次いで費用対効果が高い解（以降、2 番目の解と称する）について、その傾向を考究した（ケース 1-4：効果下限なし、ケース 1-5：効果

表-3 目的関数の平均値 (改良 1)

prob _{max} A \ A	0	0.005	0.01	0.015	0.02
10	580.0	596.0	596.0	588.0	596.0
20	592.0	592.0	596.0	584.0	582.0
30	584.0	600.0	592.0	588.0	584.0
40	588.0	596.0	566.0	584.0	574.0
50	572.0	570.0	588.0	558.0	572.0
60	570.0	564.0	576.0	560.0	564.0

表-4 平均計算時間 (改良 1)

prob _{max} A \ A	0	0.005	0.01	0.015	0.02
10	292.6	286.4	288.9	300.3	297.8
20	304.5	299.5	301.7	315.4	310.3
30	316.5	317.1	317.4	328.9	322.2
40	329.8	330.4	330.4	342.6	334.6
50	342.1	343.4	344.7	354.1	345.9
60	351.7	351.6	351.6	361.1	352.0

表-5 目的関数の平均値 (改良 2)

A \ B	0	0.005	0.01	0.015	0.02
0.05	570.0	600.0	600.0	580.0	592.0
0.10	564.0	596.0	596.0	580.0	592.0
0.15	576.0	600.0	596.0	592.0	600.0
0.20	586.0	588.0	596.0	584.0	592.0
0.25	580.0	600.0	596.0	600.0	584.0
0.30	572.0	596.0	600.0	588.0	588.0

表-6 平均計算時間 (改良 2)

A \ B	0	0.005	0.01	0.015	0.02
0.05	286.9	267.6	269.4	284.3	282.6
0.10	287.2	267.6	271.4	284.3	282.8
0.15	287.1	267.4	271.8	285.8	283.6
0.20	285.3	269.0	272.3	285.2	283.8
0.25	287.2	269.4	272.8	286.2	284.3
0.30	286.5	270.0	273.0	287.0	284.3

表-7 計算結果の比較

	MPBPSO	改良 1	改良 2
最大値	600.0	600.0	600.0
最小値	560.0	600.0	600.0
平均値	596.0	600.0	600.0
計算時間 [s]	336.4	317.1	267.4

下限 3 億円, ケース 1-6 : 効果下限 6 億円). 算出に際しては, 目的関数の評価時に, 最適解の費用対効果の値を 0 にすることで除外するようにした. その結果 (図-11~図-13, 表-11), 解に含まれるいくつかのリンクやノードだけが, 最適解とは異なる傾向が見られた. すなわち, 最適解が特異な解ではなく, 一定の一般的傾向を有することが示唆された.

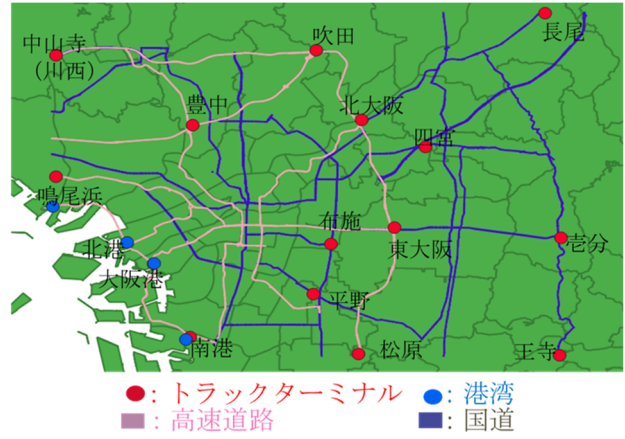


図-7 対象とする仮想道路網

表-8 旅行速度 (一般道, km/h)

1 車線	2 車線	3 車線	4 車線	5 車線
21.5	22.6	27.5	26.2	19.5
6 車線	7 車線	8 車線	9 車線	
28.8	30.6	27.2	32.6	

表-9 旅行速度 (高速道路, km/h)

1 車線	2 車線	3 車線	4 車線	5 車線	6 車線
54.8	54.8	59	65.9	57.3	71.3

(2) 実際の道路網を用いた数値計算

特車指向の道路網改良について, より現実的な知見を得ることを目的として, 京阪神都市圏を対象とした道路網を用いた数値計算を行った. その際, 下位レベルの経路選択モデルには再帰型ロジットモデル¹⁶⁾を採用した. その理由は, 本研究の目的の一つが, 前章で構築した再帰型ロジットモデルの援用であること, および, 重複率最大化モデルの汎用性の問題, すなわち, 近似解法を適用せずに推定できるパラメータ数が 2 つであるという短所のためである.

重複率最大化モデルを用いた場合との差異として, 車線数に関するパラメータについて, 式(2)では所要時間の α_L 倍としていたが, 式(13)では「パラメータ値 $\times$ 時間価値 $\div$ 旅行時間」としている. 交差点に関するパラメータについても, 式(2)では右左折ともに時間価値の α_N 倍としていたが, 式(13)では右折と左折で分けたうえで, 「パラメータ値 $\times$ 時間価値 $\div$ 旅行時間」で表現している.

$$\min \sum_{a \in A_0} M_{a,t}^1 e_{p,a}^t, \forall p \in N_F^t \quad (12)$$

$$M_{a,t}^1 = \begin{cases} H_a + \alpha_H + \omega t_a + \alpha'_L(1 - x_a^t) & a \in A_{x,t}^l \\ H_a + \alpha_H + \omega t_a & a \in A_{a,t}^l \\ H_a + \alpha_H + \omega t_a + \alpha'_L & a \in A_{s,t}^l \\ (r_a \alpha_{NR} + l_a \alpha_{NL})(1 - x_a^t) & a \in A_{x,t}^i \\ (r_a \alpha_{NR} + l_a \alpha_{NL}) & a \in A_{o,t}^i \\ 0 & a \in A_{f,t}^i \end{cases} \quad (13)$$

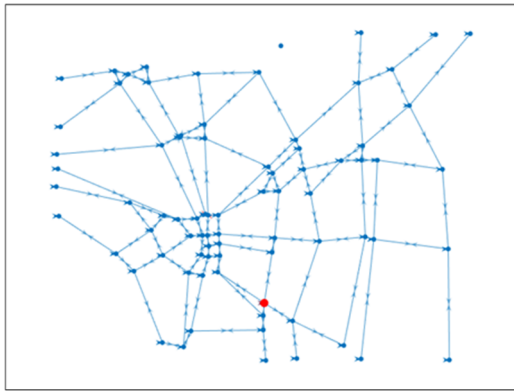


図-8 最適解（ケース 1-1）

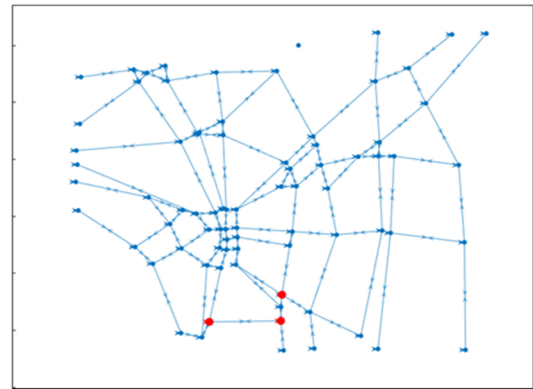


図-11 2 番目の解（ケース 1-4）

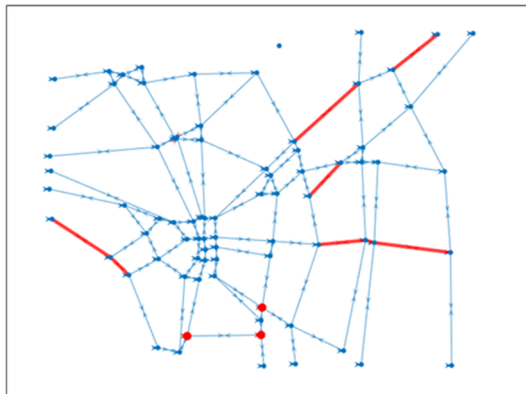


図-9 最適解（ケース 1-2）

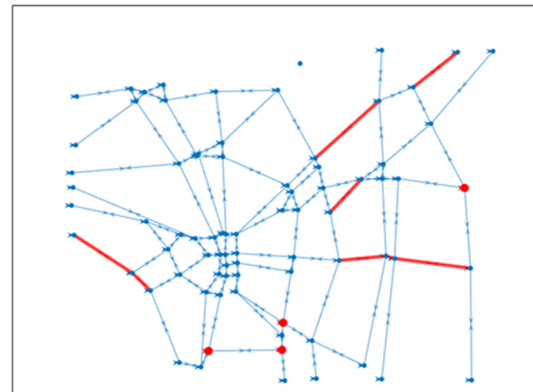


図-12 2 番目の解（ケース 1-5）

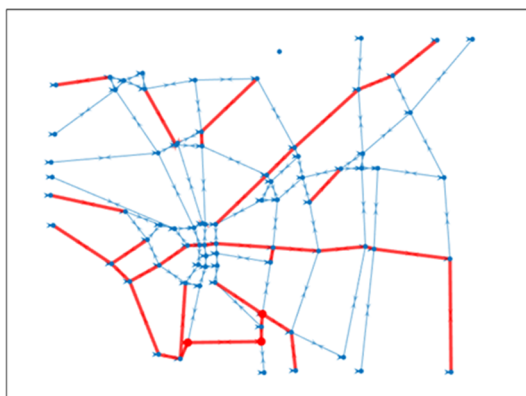


図-10 最適解（ケース 1-3）

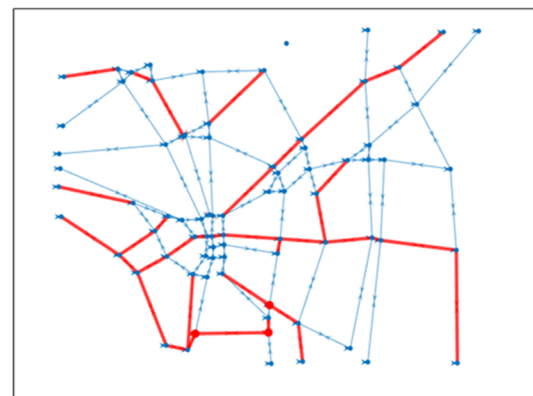


図-13 2 番目の解（ケース 1-6）

表-10 最適解のケース間比較

ケース	1-1	1-2
効果下限値（億円）	なし	3
特車費用対効果	0.1337	4.301×10^{-3}
効果（億円）	0.1515	3.044
ケース	1-3	全箇所
効果下限値（億円）	6	なし
特車費用対効果	1.187×10^{-3}	2.134×10^{-4}
効果（億円）	6.004	6.382

表-11 2 番目の解のケース間比較

ケース	1-4	1-5
効果下限値（億円）	なし	3
特車費用対効果	0.1184	4.300×10^{-3}
効果（億円）	0.4362	3.044
ケース	1-6	
効果下限値（億円）	6	
特車費用対効果	1.185×10^{-3}	
効果（億円）	6.007	

$M_{a,t}^1$	期間 t におけるリンク a の貨幣価値（効用の価値）
α'_L	車線数に関するパラメータ（105.983 に時間価値を乗じて旅行速度で除したものの）
α_H	有料道路に関するパラメータ（481.197 に時間価値を乗じて旅行速度で除したものの）
α_{NR}	右折に関するパラメータ（1358.120 に時間価値を乗じて旅行速度で除したものの）
α_{NL}	左折に関するパラメータ（664.957 に時間価値を乗じ旅行速度で除したものと設定）
r_a	リンク a が右折を表すリンクであれば 1, そうでない場合は 0 の[0,1]変数
l_a	リンク a が左折を表すリンクであれば 1, そうでない場合は 0 の[0,1]変数

道路網（図-14）の作成には、道路情報便覧データを活用した。OD 交通量については、Ma et al.¹⁶⁾が用いた商用車プローブデータを基に作成した。各二次メッシュに代表的な交差点（図-15）を設けて、二次メッシュ間の OD を、それらの代表地点間の OD とみなした。

前述のように、MPBPSO の適用可能サイズに上限があるので、交差点やリンクが多数存在する実際の

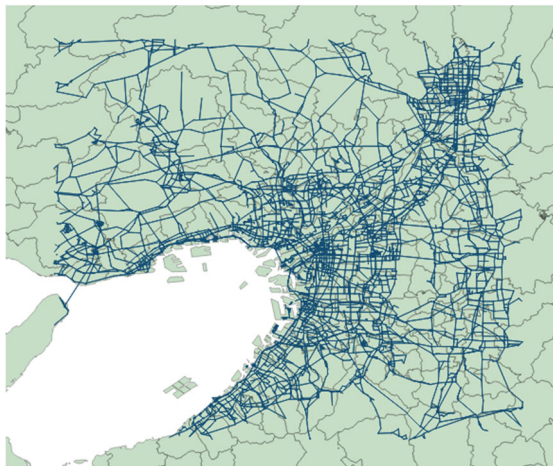


図-14 対象とする実際の道路網

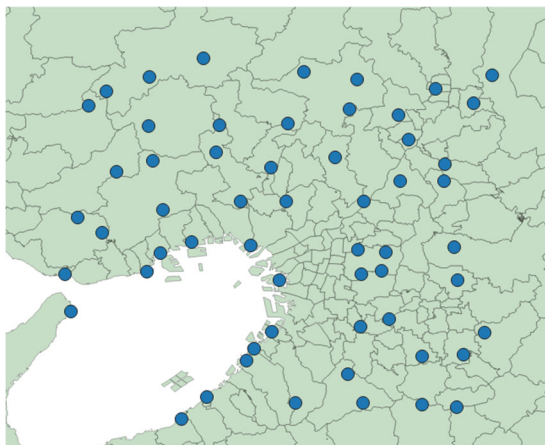


図-15 代表地点となる交差点の位置

な道路網においては、改良候補となる交差点とリンクをあらかじめ選定しておく必要がある。そこで、特車の交通量が大きいと考えられる、神戸港、大阪南港、北大阪トラックターミナル、東大阪トラックターミナルの 4 地点を中心ノードとして、これらのノード間の最短経路上に存在する交差点とリンクを、主たる改良対象とした（図-16）。なお、改良の対象とする交差点は、特車の分類において最も通行条件が厳しい車両分類 0 の車両が、対向車線を侵しても折進できない交差点とし、改良の対象とするリンクは、有料道路ではない 1 車線のリンクとした。改良に要する費用については(1)と同様に設定した。

得られた最適解（ケース 2-1）は、図-17 と図-18 の赤線で示した 1 リンクのみであった。効果に下限値を設けていないため、費用が低廉であることが優先された結果、最適解の選出箇所が少ないと推察される。さらに、1 車線道路や有料道路の貨幣価値が相対的に大きくなるため、それらを避けるような経路選択が反映された結果、迂回を行うものと考えられる。参考のため、2 番目の最適解（ケース 2-2、図-19）を求めたところ、解に大きな変化はなく、交差点改良の 1 箇所が追加されたのみである。

つぎに、有効な道路網改良について、より広範な知見を得ることを目的に、効果に下限値を設けて数値計算を行った。効果下限値なしの場合の効果が約 30 億円であることを考慮して、効果下限値が 35 億円（ケース 2-3）、40 億円（ケース 2-4）、45 億円（ケース 2-5）、50 億円の場合（ケース 2-6）を設定した。それらの最適解を、それぞれ図-20～図-23 に示す。また、それらの費用便益比や効果を表-12 にまとめた。

これらの結果を総括すると、施工費用の低廉な郊外部のリンク、代替経路の少ない幹線道路に含まれるリンク、特車の OD 間や主要な物流拠点を結ぶ経路上のリンクや、交通が集中している交差点を改良するのが望ましいものと考えられる。

6.5 おわりに

本研究では、特車の走行円滑化に資するための道路網改良に焦点を当て、特車の経路選択特性を考慮して、道路網を最適化する手法を提案した。既存の重複率最大化モデルを下位モデルに組み込み、上位レベルを[0,1]の組み合わせ最適化とする問題を定式化し、その解法について検討した。具体的には、既存の MPBPSO を基にして、決定変数の次元数が高い場合に中心解への乖離が小さくなるように、伝達関数の改良を試みた。その結果、解の精度や計算時間において、性能向上が確認できた。

提案した手法を、大阪府の高速道路や一般国道を対象とした仮想道路網、ならびに、京阪神都市圏を対象とした、より実際の道路網に適用した。後者においては下位レベルに、重複率最大化モデルより

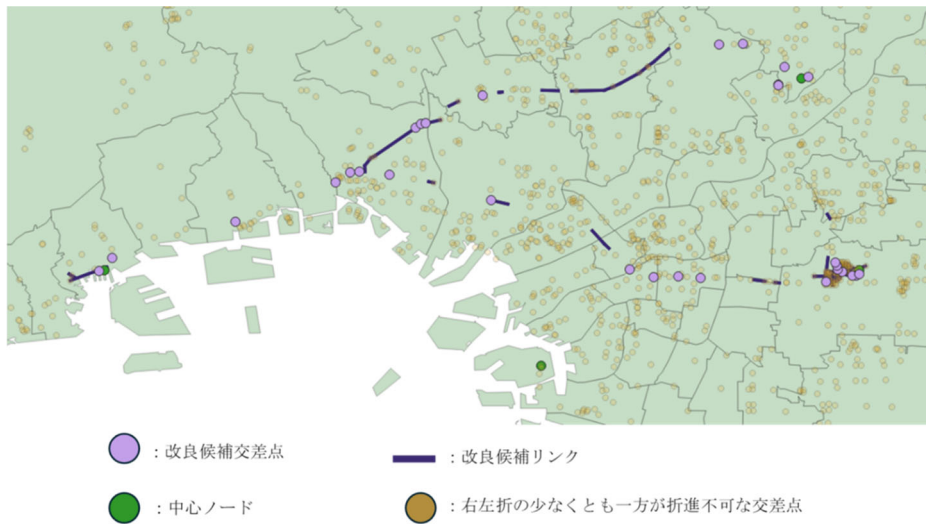


図-16 改良候補となる交差点とリンク



図-17 最適解 (ケース 2-1)

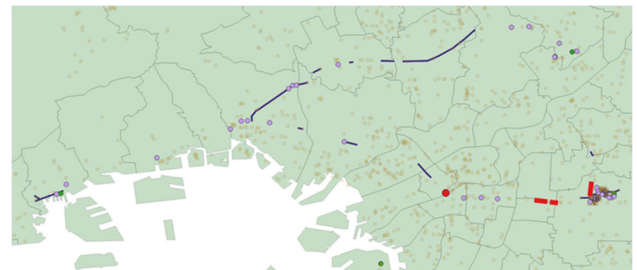


図-20 最適解 (ケース 2-3)



図-18 最適解 (ケース 2-1, 東大阪トラックターミナル付近)

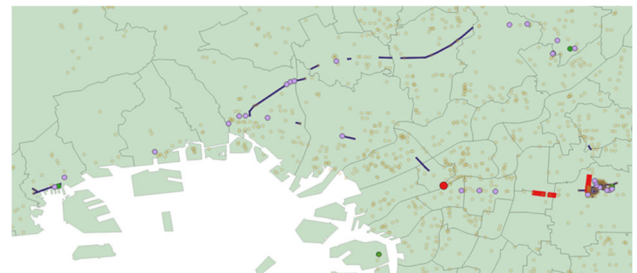


図-21 最適解 (ケース 2-4)



図-19 最適解 (ケース 2-2)



図-22 最適解 (ケース 2-5)



図-23 最適解 (ケース 2-6)

表-12 最適解の比較

ケース	2-1	2-2	2-3	2-4
効果下限値（億円）	なし	なし	35	40
費用便益比	0.6331	0.6080	0.2752	0.2385
効果（億円）	30.09	30.319	39.05	40.72
ケース	2-5	2-6	全箇所改良	
効果下限値（億円）	45	50	なし	
費用便益比	0.1953	0.05626	0.01556	
効果（億円）	45.20	50.65	50.85	

も汎用的である再帰型ロジットモデルの適用も試みた。その結果、費用と効果の関係から、施工費用の低廉な郊外部の交差点やリンクを改良することが望ましいことが示唆された。さらに、主要な OD 間の連結性を確保するために、代替経路の少ない幹線道路に含まれるリンク、特車の OD 間や主要な物流拠点を結ぶ経路上のリンク、交通が集中している交差点を改良するのが望ましいことが示された。

注釈

- 注1) 国土交通省：平成 27 年度全国道路・街路交通情勢調査 一般交通量調査集計表，<https://www.mlit.go.jp/road/census/h27/>，2024 年 5 月 2 日閲覧。
- 注2) 国土交通省：重用物流道路制度における国際海上コンテナ車の運用について，<https://www.mlit.go.jp/common/001248484.pdf>，2024 年 5 月 2 日閲覧。
- 注3) 国土交通省：コンテナ取扱量上位 20 港ランキング，<https://www.mlit.go.jp/report/press/cotent/001515316.pdf>，2024 年 5 月 2 日閲覧。
- 注4) 大阪府：道路の整備に関するプログラム，<https://www.pref.osaka.lg.jp/doroseibi/program/index.htm>，2024 年 5 月 2 日閲覧。
- 注5) 国土交通省：地価公示データ，https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L01-v3_1.html，2024 年 5 月 2 日閲覧。

参考文献

- 1) LeBlanc, L.J.: An algorithm for the discrete network design problem. *Transportation Science*, Vol.9(3), pp.183-199, 1975.
- 2) Drezner, Z., Wesolowsky, G.O.: Network design: Selection and design of links and facility location, *Transportation Research Part A*, Vol.37(3), pp.241-256, 2003.
- 3) Abdulaal, M., LeBlanc, L.J.: Continuous equilibrium network design models, *Transportation Research Part B*, Vol.13(1), pp.19-32, 1979.
- 4) Yamada, T., Imai, K., Nakamura, T., Taniguchi, E.: A supply chain-transport supernetwork equilibrium model with the behaviour of freight carriers, *Transportation Research Part E*, Vol.47(6), pp.887-907, 2011.
- 5) Meng, Q., Wang, X.: Intermodal hub-and-spoke network design: Incorporating multiple stakeholders and multi-

type containers, *Transportation Research Part B*, Vol.45(4), pp.724-742, 2011.

- 6) 関谷浩孝，萩野保克，剣持健，前田雅人，田名部淳：道路構造に着目した一般道における大型貨物車の経路選択モデル，*土木学会論文集 D3（土木計画学）*，Vol.73(5)，pp.I_527-I_536, 2017.
- 7) 兵藤哲朗，シジニィ・シュライナー，高橋洋二：東京都市圏物流流動調査を用いた大型貨物車走行経路のモデル分析，*土木計画学研究・論文集*，Vol.24, No. 3, pp.405-412, 2007.
- 8) 萩野保克，兵藤哲朗，宮原ゆい：特車申請電子データおよび道路情報便覧データを用いた海上コンテナ車の経路選択特性，*土木学会論文集 D3（土木計画学）*，Vol.67, No.5, pp.599-609, 2012.
- 9) Yamada, T., Russ, B.F., Castro, J., Taniguchi, E.: Designing multimodal freight transport network: A heuristic approach and applications, *Transportation Science*, vol.43(2), pp.129-143, 2009.
- 10) Yamada, T., Febri, Z.: Freight transport network design using particle swarm optimisation in supply chain-transport supernetwork equilibrium, *Transportation Research Part E*, Vol.75, pp.164-187, 2015.
- 11) Kennedy, J., Eberhart, R.C.: Particle swarm optimization, *Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol.4, pp.1942-1948, 1995.
- 12) Xin, J., Chen, G., Hai, Y.: A particle swarm optimizer with multi-stage linearly-decreasing inertia weight, *Proceeding of International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*, Vol.1, pp.505-508, 2009.
- 13) Robinson, J., Sinton, S., Rahmat-Samii, Y.: Particle swarm and genetic algorithm, and their hybrids: Optimization of profiled corrugated horn antenna, *Proceeding of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Vol.1, pp.314-317, 2002.
- 14) Mirjalili, S., Lewis, A.: S-shaped versus V-shaped transfer functions for binary particle swarm optimization, *Swarm and Evolutionary Computation*, Vol.9, pp.1-14, 2013.
- 15) 伊原 滉也，加藤 昇平：確率分布に基づく離散粒子群最適化法における Lévy flight の導入，*知能と情報* Vol. 34(1)，pp.511-521, 2022.
- 16) Ma, Y., Schmocker, J.D., Sun, W., Nakao, S., Yamada, T.: Estimating oversized truck route choice behavior using GPS trajectory data and recursive logit models, *Annual meeting of Transportation Research Board*, 2024.

第7章 おわりに

7.1 本研究の成果

本研究プロジェクトでは、特殊車両の運用に関する課題を技術・制度の両面から総合的に検討することを目的に、「テーマ1：特車に関する道路システムのDXに向けた情報収集及びデータ管理手法の検討」、「テーマ2：特車通行許可判定の自動化技術の開発」、「テーマ3：特車フリー道路ネットワーク計画手法の検討」の3つの課題に取り組んだ。

テーマ1では、都道府県などを対象としたヒアリング・アンケート調査により、特車行政に関わる課題抽出と意見収集を行った。加えて、運送事業者からの委託を受けて行政手続きを行う行政書士法人にヒアリング調査を展開した。これらの概要は第2章でまとめている。なお、特車に関わる複数のデータを統合化・可視化するプラットフォームの運用については、本報告書からは割愛している。

テーマ2では交差点における特車の折進条件判定システムの開発に取り組んだ。これは、交差点のデジタル情報をインプットとし、それに対して折進条件を出力するものである。第3章では、航空写真にセマンティックセグメンテーションを適用して交差点構成要素を識別する手法の開発を行った。第4章では、第3章で生成した画像を入力として用いることを前提に、ニューラルネットワークをベースとするマクロ判定モジュールとHybrid A* path planningモデルをベースとするミクロ判定モジュールの開発し、実データへ適用した結果をまとめた。なお、将来的な折進軌跡の検証に用いるデータ収集を簡便化する技術の開発も行ったが、本報告書では割愛している。

テーマ3は、特車運行の効率化に向けた道路ネットワーク計画モデルを構築するものである。特殊車両に特化して構築した経路選択モデルについては第5章、道路ネットワーク計画モデルの概要と結果を第6章にまとめている。

各章で得られた主な成果は以下の通りである。

第2章

- ・ 都道府県は、ラストマイルに相当する道路ネットワークの道路情報便覧への登録に関して、市区町

村の人手・知識不足だけでなく、動機・認識が不足している点を課題としてとらえている。

- ・ 行政書士は、特車確認制度に対して、ラストマイル情報が不足しているため、顧客に利用を促せない状況であると認識している。
- ・ 運送事業者は、ラストマイル情報の整備不足に起因して通行許可申請に時間がかかるとともに、取り締まりが適切になされていない・取り締まられたとしてもペナルティが小さいために、申請を行わない運送事業者が実質的に得をしている構造になっていることを問題視している。
- ・ この状況は、「大型車両が安全に通行できる道路の維持」という制度の目的を達成するにあたって、決して望ましいとはいえず、意識共有のレベルから改善が必要である。

第3章

- ・ 地上解像度 5cm の空中写真において、SegFormer B5 を用いることで高精度のセグメンテーションが可能である。
- ・ MMS データを融合的に活用し、歩道橋などのオクルージョン物体を空中写真内で特定してからモデルの入力値とすることにより、オクルージョン物体周辺の識別精度を大幅に改善できる。
- ・ Google map の衛星画像でファインチューニングをすることにより、google map を用いたセグメンテーション精度を大幅に向上させることが可能であり、高い汎用性が期待できる。

第4章

- ・ 特車に関わる業務の中で、提案する折進条件判定システムのユースケースを具体化した。
- ・ ミクロ判定モジュール・マクロ判定モジュールの枠組みを構築し、その動作の妥当性を確認した。
- ・ マクロ判定モジュール・ミクロ判定モジュールで誤判断の傾向は異なるが、両者の判断結果を統合することで、判定結果の精度が極めて高くなる。

第5章

- ・ 側道・右折・左折・Uターンの係数は有意に負であり、トラックが側道や折進を避ける傾向にあり、特に左折よりも右折を避ける傾向にあるなど、一般ドライバーとは異なる経路選択を行っている。
- ・ 全体的な移動距離が短くなるような道路が好まれる一方、出発地・目的地の特性やトリップ目的に応じて、経路選択の特性が異なる。

第6章

- ・ 特車を対象として費用対効果を最大化しようとした場合、OD間の連結性を担保し、かつ、短距離で交通量が大きいリンク、交通が集中している交差点、施工費用の低廉な郊外部の交差点やリンク、を中心に改良を加えることが、全体的な輸送の効率化に寄与する。

- ・ 経路選択モデルでは、経路選択肢集合や道路ネットワークに関わる変数の選定など、精度向上に向けた、さらなる検討が必要である。また本研究では車両諸元のデータを取得することはできなかったほか、トレーラヘッドだけで走行しているかどうかについても判別できなかった。今後、こうした詳細な車両諸元と走行軌跡が紐づけされたデータの整備を進める必要がある。
- ・ 経路選択モデルは、確認制度における経路提示において、妥当な経路を提示・列挙する上でも必要である。また、道路ネットワーク計画モデルのアウトプットも、道路情報便覧に登録する優先度を決める上で重要な情報であり、それらをもって確認制度の普及やシステムレベルの向上を図ることが求められる。

7.2 社会実装に向けた課題

本研究で開発する各手法は、いずれも都道府県へのヒアリングを通して、方向性としては実務の改善に寄与できることを確認している。今後は、実務に適用できるレベルまで精度改善を行うことが課題となる。具体的な課題は以下の通りである。

- ・ 特車運行の効率化に向けては確認制度の普及が必要不可欠であり、その促進に向けて技術的なツールの開発だけではなく、制度上のボトルネックを特定し、制度の意義を正しく認知し、能動的に取り組むことのできる方策を検討する必要がある。
- ・ 空中写真から交差点構成要素をセグメント化する手法のベースを確立することができたが、ノイズの除去などの課題が残る。新しいセグメンテーションモデルの適用や、停止線や車道外側線など交差点の図面化に必要な情報の抽出に注力したロス関数の定義など、さらなる精度改善に向けた取り組みを進めている。
- ・ マクロ判定モジュールは、現状では車両分類0にしか対応ができていない。道路情報便覧データと統合すれば自動でデータ化できるように見えるが、便覧情報の正確性には疑念がある。実際の車両の通行履歴などを用いて学習データを整理するなどの手法の開発が必要である。
- ・ ミクロ判定モジュールでは、過度に安全側に条件判定をする傾向にあることが分かった。これは、境界条件が適切に設定できていないこと、セミトレーラなどの牽引車に対応できていないことの影響が大きい。牽引車のキネティクスを考慮した経路探索モデルの導入を進めつつ、全自動だけではなく、作業負担を軽減する半自動化のあり方についても検討が必要である。

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
計画手法の研究開発 2024.05 No.2021-1

特殊車両の折進可否判定の自動化と特車フリー道路ネットワーク