

都市計画論文

2025年11月15日(土) 13:20～14:40 会場②(本部棟2402)

講演番号[20-23]

司会:田村 将太(広島大学)

13:20～13:40

[20]

街歩きガイドツアー中の写真撮影行動が参加者のシーン記憶・エピソード記憶に及ぼす影響

○高橋 南織¹、雨宮 護¹ (1. 筑波大学)

13:40～14:00

[21]

歩行からみた通過量モデルの構築と都市空間の数理的評価

○田中 健一¹ (1. 慶應義塾大学)

14:00～14:20

[22]

建物用途規制の特例許可を受けて立地した施設の地域特性の類型化

ー第一種低層住居専用地域において交通面の影響が課題となった中小規模の施設に着目してー

○安藤 亮介¹、勝又 済¹ (1. 国土交通省 国土技術政策総合研究所 都市研究部)

14:20～14:40

[23]

制限ボルツマンマシンを用いたday-to-dayの動的相互作用の交通配分モデリング

○小川 大智¹、羽藤 英二¹ (1. 東京大学)

街歩きガイドツアー中の写真撮影行動が参加者のシーン記憶・エピソード記憶に及ぼす影響

The effects of photo-taking during city walking guided tours on participants' visual and episodic memories

高橋南織*・雨宮 護**

Miori TAKAHASHI* & Mamoru AMEMIYA**

Photo-taking may have both positive and negative effects on participants' visual memories and episodic memories. This study aims to explore the significance of photo-taking in the context of guided city walking tours, particularly as a means of conveying local characteristics. We conducted an on-site walking experiment in Tsuchiura City, Ibaraki Prefecture, and performed statistical analysis on the data collected through questionnaires completed by participants after a simulated guided city walking tour. Research findings revealed that photo-taking did not have a significant effect on visual memory for either photographed or non-photographed streetscapes and was associated with a decline in episodic memory. Nevertheless, there is a possibility that spontaneous photo-taking may have had a positive effect on visual memory.

Keywords: City walking guided tour, Photo-taking, cognitive offloading, visual memory, episodic memory, experiment
街歩きガイドツアー, 写真撮影, 認知オフローディング, シーン記憶, エピソード記憶, 実験

1. 研究の背景と目的

街歩きガイドツアー（以下、街歩き GT）は、今日、全国的に提供される観光コンテンツとなっている^{1,3)}。街歩き GT では、ガイドにより、地域の歴史や文化、または地域住民の日常生活などの情報が参加者に提供され^{1,3)}、旧跡や名所を巡るだけでは分からない地域の特色が伝えられる。これにより「自然環境や歴史文化など、地域固有の魅力を観光客に伝えることにより、その価値や大切さが理解され、保全につながっていく」⁴⁾と考えられている。

街歩き GT では、一般的に、滞在場所や移動中の景観を参加者に知覚してもらいながら、ガイドが口頭で滞在場所や景観の意味を解説するという形式が取られる^{1,3)}。上記したような街歩き GT の意義を考えると、こうした過程で参加者に提供される景観やその意味は、参加者に伝わる（記憶される）ことが重要である。個人的な出来事や思い出に関する「いつ・どこで」といった特定の文脈情報を伴って想起される記憶は心理学における用語でエピソード記憶と定義されている^{5,6)}。街歩き GT において参加者に提供される情報はエピソード記憶の一種とみなすことができる。本稿では、街歩き GT 中に参加者に提供されるエピソード記憶のうち「街歩き GT の過程で参加者に知覚される景観に関する記憶」と「街歩き GT で解説される景観の意味に関する記憶」を区別して扱うため、既往研究の呼称^{7,8)}を踏まえ、前者を「シーン記憶」、後者を（本研究内での）「エピソード記憶」と呼び、両記憶を議論の対象とする。

ところで、街歩きの際、人々が訪れた場所の風景や街並みを撮影することは、スマートフォンの普及により、多くの人にとって馴染みのある行動となっている⁹⁾。この点は街歩き GT においても同様であり、街歩き GT 中に、参加者がガイドの対象となる景観をスマートフォン等で撮影す

る場面は一般的に見られる。この写真撮影行動を、街歩き GT におけるシーン記憶とエピソード記憶という観点から捉えると、理論的には、写真撮影行動は、両記憶に対して正負両面で影響を与えうると解釈できる。まず、負の側面、すなわち写真撮影行動が記憶に悪影響を与えるという解釈の例としては、「認知オフローディング（以下、認知 OL）」¹⁰⁻¹³⁾によるものがある。認知 OL とは、人が写真を撮影する際、写真を人の認知を記録する外部媒体ととらえ「後で見ることができる」という意識が生じることにより、撮影対象物に対する記憶が薄れる現象を指す。Henkel¹⁰⁾の研究では、美術館に展示された芸術作品の記憶を問う実験の結果から、認知 OL のメカニズムにより、写真撮影が記憶を薄れさせることが示されている。また、白柳ら¹³⁾の研究では、PC を用いた街並み画像の記憶の実験から、写真を撮影すると、撮影対象となった街並み画像の記憶が抑制されることが示され、Henkel¹⁰⁾の実験の結果が追証されている。また、同研究¹³⁾は、認知 OL によって生じた脳の記憶容量の余裕から、撮影対象としない周辺の街並み画像の記憶はむしろ促進されることも示している。

一方、認知 OL による解釈とは異なり、写真撮影行動が撮影対象物に関する記憶を促進するとする見解もある。Barasch *et al.*¹⁴⁾の研究では、人が自発的に写真撮影をする際は、撮影対象物に向けられる視覚的な注意が増加することで、対象の記憶がむしろ向上するとされている。その一方で、同研究¹⁴⁾では、そうした視覚的な注意の増加は、聴覚から得られる情報への注意の低下を招き、聴覚から得られる情報は記憶しにくくなることも示されている。

以上から、街歩き GT の際に行われる写真撮影行動が参加者のシーン記憶に与える影響には、写真撮影の自発性を交絡要因として理論的には正負両面が考えられ、エピソード

* 学生会員・筑波大学大学院理工情報生命学術院システム情報工学研究群社会工学学位プログラム (University of Tsukuba)

** 正会員・筑波大学システム情報系社会工学域 (University of Tsukuba)

ド記憶には、聴覚刺激に対する注意の低下からの悪影響が予測されるが、街歩き GT に焦点を当てた既往研究は見られない。実際の街歩き GT での写真撮影は、認知 OL を発現させる可能性もあるが、多くの場合、写真撮影は自発的なものである。また、実際の街歩き GT で伝えられる情報にはシーン記憶だけでなくエピソード記憶もある。そのため、既往研究の知見をそのまま街歩き GT に当てはめることは適切ではなく、新規の研究が必要である。

本研究では、街歩き GT を対象に、参加者の写真撮影行動が、街歩き GT におけるシーン記憶・エピソード記憶に与える影響を明らかにすることを目的とする。これにより、街歩き GT において重要である地域の特色を参加者に伝達するという観点から、写真撮影行動の持つ意味を考察する。

2. 方法

(1)研究仮説

本研究では、リサーチクエスション(RQ)を2つ設定し、それぞれのRQに対して仮説を3つずつ設定する。

RQ1: 街歩き GT 中に参加者が写真撮影を行うことは、シーン記憶・エピソード記憶にどのように影響するのか。

- ・ 仮説 1-I: 写真撮影を行うことにより撮影対象の景観に関するシーン記憶は抑制される。
- ・ 仮説 1-II: 写真撮影を行うことにより撮影対象以外の景観に関するシーン記憶は促進される。
- ・ 仮説 1-III: 写真撮影を行うことにより撮影対象のガイド内容に関するエピソード記憶は抑制される。

RQ1 は写真撮影の有無と記憶との関係を検討するものである。写真撮影によるシーン記憶への影響については、理論的には写真撮影による正負両面の影響が考えられるが、観光の際に行われる写真撮影は、「旅行者は、出かける前から見ていた画像を自分たちも撮影してきたというのを友達や家族に見せて、自分たちもそこに行ったのだということ(中略)の証拠品を提供するものとなっている」¹⁵⁾とされるように、しばしば観光地に訪れたことの記録の用途として行われる。街歩き GT は観光の一環として行われることが多いため、街歩き GT においても、写真撮影時、撮影者は記録としての用途を第一に意識していると想定される。記録を目的とした写真撮影は、認知 OL の仮定通りの行動であるため、写真撮影をしている間の視覚的な注意の増加によって一時的に記憶が促進されても、事後的には認知OLの発現により衰退すると想定される。つまり、街歩き GT においては、参加者の観光客としての特性に起因して、最終的には認知 OL のメカニズムによってシーン記憶は低下すると推測される。以上のような理論的な予測から、ここでは白柳ら¹³⁾と同様の仮説 1-I と仮説 1-II が成立すると想定する。一方、写真撮影によるエピソード記憶への影響については、旅行の記録を目的とした写真撮影であっても、撮影をしている間は、対象に対して視覚的な注意を向けていることが想定されることから、Barasch *et al.*¹⁴⁾と同様に、撮影をしている間に得られる聴覚的な情報に対する注意は

減少すると考えられる。そのため仮説 1-III が成立すると設定する。

RQ2: 街歩き GT 中に参加者が自発的に写真撮影を行うことは、シーン記憶・エピソード記憶にどのように影響するのか。

- ・ 仮説 2-I: 自発的に写真撮影を行うことにより撮影対象の景観に対するシーン記憶は促進される。
- ・ 仮説 2-II: 自発的に写真撮影を行うことにより撮影対象以外の景観に対するシーン記憶は抑制される。
- ・ 仮説 2-III: 自発的に写真撮影を行うことにより撮影対象のガイド内容に関するエピソード記憶はより強く抑制される。

RQ2 は写真撮影をする条件の中で写真撮影の自発性と記憶との関係を検討するものである。写真撮影の自発性によるシーン記憶への影響については、撮影中、撮影対象をより強い好奇心や自発性を伴って見ることで、Barasch *et al.*¹⁴⁾で示された視覚的な注意の増加のメカニズムにより、より記憶が促進されると考えられる。写真撮影をしている間の視覚的な注意の増加による一時的な記憶力の向上の効果がより顕著に表れるのであれば、仮説 1 で述べた、観光客としての特性に起因する、認知 OL によって生じるシーン記憶に対する悪影響は相対的に小さくなると推測し、仮説 2-I を設定する。またこの際、撮影対象への注意の増加により撮影対象の景観の記憶を促進するのであれば、認知 OL の想定とは逆のプロセスが作動し脳の記憶容量の余裕がなくなることによって撮影対象以外の景観の記憶は抑制されると考え、仮説 2-II を設定する。また、写真撮影によるエピソード記憶への影響については、写真撮影の自発性によって撮影対象への視覚的な注意が一層増加するのであれば、聴覚から得られる情報に向けられる注意が一層減少すると考え、仮説 2-III を設定する。

(2)実験の概要

実際の街歩き GT 場面を模した現場歩行実験(以降、街歩き GT 実験)を実施する。実験参加者には、写真撮影の有無を条件とする疑似的な街歩き GT を体験してもらい、その後のアンケート調査によって街歩き GT 中に得たシーン記憶、エピソード記憶に関するデータを得る。なお、本実験は、筑波大学システム情報系の研究倫理委員会の承認を得て実施した(2024R931号)。

(3)実験の実施場所

本研究は、実際の街歩き GT の状況を想定するものであるため、実験も実際の街歩き GT が行われる空間で行う。本研究では、街歩き GT で度々取り上げられる「歴史的な街」をテーマにする疑似的なツアーを設定した。対象地は茨城県土浦市とし、疑似的な街歩き GT として妥当なものとするために、土浦の観光案内・施設紹介を目的とした書籍や Web ページにおいて紹介されているコースやスポットに関する情報¹⁶⁻¹⁹⁾を参考に、図-1 に示す土浦市の中心市街地を通る約 1.5km のルートと 6 箇所の訪問スポットを設定した。



図-1 街歩き実験の歩行ルート
地理院地図(電子国土 Web)²⁰⁾より加工して作成

(4)手順

(I)介入群と対照群の設定

写真撮影の有無による記憶への影響の検証をするため、街歩き GT 実験を開始する前に、実験参加者の半数を「街歩き GT 実験中に写真撮影を依頼する介入群（以下、撮影あり群）」、半数を「街歩き GT 実験中に写真撮影を禁止する対照群（以下、撮影なし群）」にランダムに振り分けた。

(II)実験参加者に対する実験の事前説明

街歩き GT 実験の実施日の実験開始前に、実験参加者に実験概要を説明した。この際、写真撮影による記憶への影響を調べる目的で行う実験であることを実験参加者に明かすと、写真撮影時に意図的に記憶をしようとするなどのバイアスが生じるため、事前説明においてはディセプション（以下の下線部）を含めた説明を行った。まず、実験の概要として「街歩き中のガイドツアーについて、現場歩行実験から評価を行うことを目的としています。街歩きガイドツアー中に各スポットで私が口頭で説明した内容を含めて、この街への理解を深めていただければ幸いです。」と説明した。その上で、撮影あり群に対しては、「私（著者）が各スポットについて口頭で解説をして立ち止まっている間に、周りを見ながら、皆様が興味深いと思ったものを各スポットで1枚以上、皆様のスマートフォンで写真撮影してください。また、私が各スポットで最初に腕で示す対象物は必ずスマホで全員写真撮影してください。」と説明し、実験参加者の自発性に依存しない形で写真撮影を依頼した。撮影なし群に対しては「今回行う街歩きガイドツアー以外でこの場所の情報を得ることが出来ないように、実験中はスマートフォンを使用することを禁止させていただきます。」と説明し、スマートフォンの使用を禁止するこ

とで間接的に写真撮影を禁止した。

(III) 街歩き GT の実施

事前説明の後、実験参加者はガイド（著者）と共に、図-1に示すルートを徒歩で移動した。途中にある6箇所の訪問スポットでは、実際の街歩き GT と同様の形で、ガイド（著者）が関連書籍等¹⁶⁻¹⁹⁾に記されている各スポットの歴史や見どころ、現在の活用方法といった概要を、場所ごとに約1分間口頭で説明した。ガイドの口頭の説明を参加者が確実に聞き取れるように、1回の街歩き GT あたりの実験参加者数は5名とした。1回の街歩き GT に要した時間は30分程度であった。

(IV) 事後アンケート

街歩き GT の終了後、徒歩で5分程度移動し、公共施設内のフリースペースで事後アンケートを実施した。当該スペースは誰でも自由に利用できる空間であり、タイミングによって実験参加者以外にも少人数の施設利用者が滞在していた回もあったが、各回ともに概ね静かな空間であった。当該スペースには丸机が5台並べられており、机1台に対して椅子が2〜4脚設置されていた。実験参加者には、机1台に対して1人が座り、他者の回答を閲覧したり会話したりせずに回答することを依頼した。実験参加者以外の施設利用者が机を利用しており空き机がない場合は、実験参加者に、1台の机に2人が向かい合って座るように促した上で、相手の回答の閲覧が出来ないようにデスク用の仕切りを置いて事後アンケートを実施した。

シーン記憶とエピソード記憶についての設問は、既往研究^{10,14)}を参考に作成した。ただし、本研究の実験での各スポットへの滞在時間は既往研究よりも長く、単純な滞在時間の長さによる記憶への影響が想定されたため、記憶を問う設問の難易度が高くなるように設定した。具体的には、シーン記憶を尋ねる設問について、既往研究^{10,14)}では、実験参加者は実験中に実際に見た芸術作品の画像とそれに類似した実験中に見ていない芸術作品の画像からなるリストの中から「実験中に見たことがある」と思う画像を1つ選択させているが、本研究では「実験中に見たことがある」と思う画像を全て選択させた。エピソード記憶を尋ねる設問については、既往研究¹⁴⁾では、実験参加者は芸術作品に関する音声ガイドの内容について、4つの文章の選択肢の中から正しい内容だと思う文章を1つ選択させているが、本研究では、街歩き GT 中にガイド（著者）が行った説明の内容について、文章の空欄を埋める形で単語を自由回答させることとした。

シーン記憶を尋ねる設問は、既往研究¹⁴⁾と同様に、訪問



図-2 シーン記憶を尋ねる設問（一部の画像）

- ・大徳は、天明五年(1785年)に創業された①を扱う店でした。
- ・大徳には、蔵造りの②の棟からなり、江戸時代の町家造りの特徴が見られます。
- ・現在は観光案内や観光土産品の販売が行われており、観光周遊に役立つ③の貸し出しも行われています。

①	②(数字のみ)
③	

図-3 エピソード記憶を尋ねる設問（例）

スポット毎にシーン記憶を尋ねる形式とし、6 箇所の訪問スポットとスポット間の道中で見られる景観に関して、計 7 つの設問に分けて実施した。シーン記憶を把握するための呈示画像としては、既往研究^{10),14)}と同様に「実験中に実際に存在した景観」の画像と、それに類似した「実験対象地に存在しない景観」の画像を選定した。実験中に実際に存在した景観としては、著者がスマートフォンを用いて、訪問スポットの景観写真を 10 枚、街歩き GT 中の訪問スポット以外の道中で見られる景観写真を 10 枚撮影したものを用いた。実験対象地に存在しない景観としては、実験中に実際に存在した景観の写真に類似した画像 16 枚を用いた¹⁾。これらの画像 (10+10+16 枚の計 36 枚) を用いて、設問ごとに実験中に実際に存在した景観と実験対象地に存在しない景観の画像の呈示順をランダムにした上で、A4 用紙 3 枚に縦に 3-5 枚、横に 3 枚配置してカラーで実験参加者に呈示し、回答を求めた (図-2)。ただし、各実験参加者に対しては、同一のアンケート票を用い、呈示画像の回答者ごとの提示順のランダム化は行っていない。

エピソード記憶については、関連書籍等¹⁶⁻¹⁹⁾における各スポットの紹介文が記載された文章から引用し、キーワードの穴埋め問題を作成し、計 27 問の問題に対する回答を求めた (図-3)。

(V) データ分析

写真撮影の有無および自発性と、シーン記憶・エピソード記憶の正答率との関係を統計的に検証する。仮説 1-I、仮説 2-I における「撮影対象の景観におけるシーン記憶」を、撮影あり群に対してガイド中に写真撮影を指示した 6 箇所の訪問スポットにおけるシーン記憶とする。仮説 1-II、仮説 2-II における「撮影対象外の景観におけるシーン記憶」を、訪問スポット間を移動する際に見られる景観のシーン記憶とする (訪問スポット間を移動する際は、撮影あり群に対して写真撮影に関する指示は行っていない)。

分析で用いる「シーン記憶の正答率」については、既往研究^{10),13),14)}の定義に基づき「実験中に実際に存在した景観」に対して、実験参加者が、実際に街歩き GT 中に「見た」

と答えたものの割合とする。「エピソード記憶の正答率」については、既往研究¹⁴⁾の定義に基づきエピソード記憶を問う設問の穴埋め箇所すべてに対して正答した割合とする。

まず RQ1 を検証するため、撮影あり群・撮影なし群の 2 群間のシーン記憶の正答率とエピソード記憶の正答率の有意差を検定する。具体的には、2 群の頻度分布の正規性の検定 (Shapiro-Wilk 検定) を行い、正規分布に従わない ($p < .10$) とされた場合は Mann-Whitney の U 検定、従うとされた場合は t 検定を実施する。また t 検定の場合は、Levene 検定の結果により、 $p < .10$ の水準において等分散を仮定できる場合は Student の t 検定、等分散を仮定できない場合は Welch の t 検定を実施する。

RQ2 を検証するために、「自発的な写真撮影」における「自発性」を「実験中に撮影した写真の枚数 (以下、写真枚数)」とみなし、実験参加者のうち撮影あり群の 20 名について、シーン記憶の正答率およびエピソード記憶の正答率と写真枚数の関連について相関分析を実施する。用いるデータが正規分布に従わない場合 ($p < .10$) は Spearman の順位相関係数を求め、正規分布に従う場合は Pearson の相関係数を求める。

(5) 実験参加者

本研究における実験は、撮影ありとなしの被験者間実験として設計しているため、同様に被験者間実験を実施していた Henkel¹⁰⁾の研究における実験参加者の人数を参考にして、実験参加者の人数を設定した。Henkel¹⁰⁾の研究では、2 種類の実験を行っているが、実験 1 については大学生 28 名、実験 2 については大学生 46 名を対象としている。これを踏まえ、本研究では、実験参加者の目標人数を 28~46 名程度とした。実験参加者は、筑波大学の大学生・大学院生を対象として、地域 SNS²¹⁾を通じて募集した。実験参加者は「対象地域 (土浦) を散策したことがない」、「研究の意図を知らない」、「スマートフォンを保有している」、「日常会話程度の日本語の運用が可能」という条件を全て満たす者とし、謝礼として Amazon ギフトカード 2,500 円分を支給した。

表-1 撮影対象の景観におけるシーン記憶の正答率に関する Mann-Whitney の U 検定の結果

	n	中央値(四分位範囲)	検定統計量	U 値	p 値(両側)
撮影あり群	20	0.80 (0.60 - 0.83)	0.81	229	.445
撮影なし群	20	0.80 (0.70 - 0.83)			

表-2 撮影対象外の景観におけるシーン記憶の正答率に関する Mann-Whitney の U 検定の結果

	n	中央値(四分位範囲)	検定統計量	U 値	p 値(両側)
撮影あり群	20	0.60 (0.40 - 0.63)	-0.25	191	.820
撮影なし群	20	0.50 (0.35 - 0.70)			

表-3 エピソード記憶の正答率に関する Student の t 検定の結果

	n	平均値	標準偏差	t 値	p 値(両側)
撮影あり群	20	0.47	0.16	-3.12	.003
撮影なし群	20	0.62	0.14		

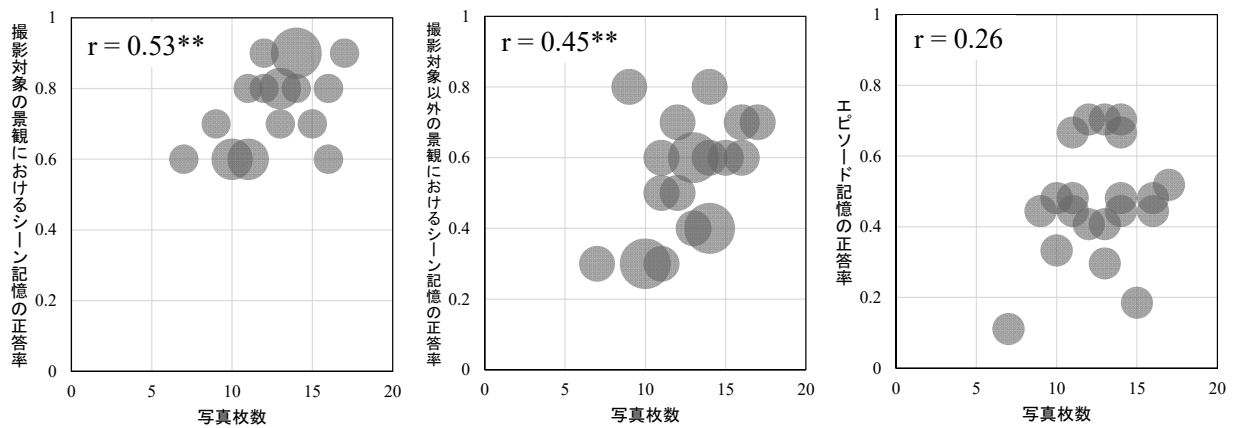


図4 シーン記憶・エピソード記憶の正答率と写真枚数の散佈図

3. 結果

実験は平日の4日間（2024年11月25日、26日、12月4日、6日）にわたって行われ、各日2回ずつ午前11時と正午から開始する形で実施された。実験参加者は筑波大学の大学生・大学院生40名であった（男性21名、女性19名；平均年齢22.18歳、年齢の標準偏差2.05歳、年齢の範囲18-28歳）。実験実施日に降雨はなく、気温は11.9～17.1度であった。

(1) 写真撮影の有無による記憶への影響 (RQ1)

撮影対象の景観・撮影対象以外の景観における2群のシーン記憶の正答率は、撮影あり群のデータが正規分布に従わなかったため、Mann-WhitneyのU検定を行った（表-1、表-2）。表-1、表-2から、撮影対象の景観（ $U=229, p=.445$ ）、撮影対象以外の景観（ $U=191, p=.820$ ）ともに「2群間のシーン記憶のスコアの分布に差はない」という帰無仮説は5%有意水準で棄却されなかった。よって、写真撮影を行うことにより撮影対象の景観に関するシーン記憶は抑制され、撮影対象以外の景観に関するシーン記憶は促進されるという仮説1-I、仮説1-IIは支持されなかった。

2群間のエピソード記憶の正答率については、分布の正規性、等分散性ともに条件を満たしたため、Studentのt検定を行った（表-3）。その結果、5%有意水準で2群間の平均値に有意差があるという結果となった（ $t(38) = -3.12, p = .003$ ）。撮影あり群の正答率の平均値は約0.47、撮影なし群の正答率の平均値は約0.62であり、撮影あり群よりも撮影なし群の正答率の方が高い。よって、写真撮影を行うことにより撮影対象のガイド内容に関するエピソード記憶は抑制されるという仮説1-IIIは支持される結果となった。

(2) 自発的な写真撮影による記憶への影響 (RQ2)

6箇所の訪問スポットにおいて、撮影あり群20名による自発性によらない写真撮影は計120枚であった。一方、自発的な写真撮影は計132枚であり、うち、シーン記憶を問う画像に含まれる対象を撮影した写真は計84枚、含まれ

ない対象を撮影した写真は計48枚であった。撮影あり群20名の撮影対象の景観におけるシーン記憶、撮影対象外の景観におけるシーン記憶、エピソード記憶の正答率と写真枚数の散佈図を図-4に示す。なお、図-4では、同じ位置に重なっている点の個数を面積で表している。

撮影対象の景観、撮影対象以外の景観におけるシーン記憶の正答率と写真枚数について、シーン記憶の正答率のデータは分布の正規性を満たさなかったため、Spearmanの順位相関係数を用いた相関分析を行った。その結果、それぞれのシーン記憶の正答率と写真枚数は5%有意水準で正の相関があるという結果となった。順位相関係数の値は、撮影対象の景観のシーン記憶の正答率と写真枚数と間で0.53（ $p=.017$ ）、撮影対象以外の景観のシーン記憶の正答率と写真枚数との間で0.45（ $p=.048$ ）であった。よって、自発的に写真撮影を行うことにより撮影対象の景観に対するシーン記憶は促進されるという仮説2-Iは支持され、撮影対象以外の景観に対するシーン記憶は抑制されるという仮説2-IIは支持されなかった。

エピソード記憶の正答率と写真枚数については分布の正規性を満たしたため、Pearsonの相関係数を用いた相関分析を行った。その結果、エピソード記憶の正答率と写真枚数は5%有意水準で相関はないという結果となり、Pearsonの相関係数は0.26となった。よって、自発的に写真撮影を行うことにより撮影対象のガイド内容に関するエピソード記憶はより強く抑制されるという仮説2-IIIは支持されなかった。

4. 考察

分析の結果、仮説1-I、仮説1-IIは支持されず、写真撮影が、撮影対象の景観・撮影対象以外の景観におけるシーン記憶の正答率に与える影響は、正負両面において見られなかった。すなわち、街歩きGTの現実に近い場面での写真撮影行動においては、既往研究で示された写真撮影による認知OL^{10), 13)}も、写真撮影による視覚的な注意の増加¹⁴⁾も

引き起こしていない可能性がある。この結果となった理由として、本研究は、既往研究で撮影対象としていた絵画を始めとした芸術作品^{10,14)}や街並み画像¹³⁾とは異なる、実空間の景観そのものを撮影対象としていることが考えられる。一般に3次元物体の形状認知においては複雑な認知メカニズムが働くことが知られており、人の脳において2次元形状と比較して3次元物体に対してより強い活動を示す特性を持つ部位が見られる²²⁾。実空間では景観の認知は3次元のものとなり、2次元に比べてより対象者に認知的な負荷がかかる。その結果、視覚的な情報が果たす記憶への役割が相対的に小さくなり、既往研究で示された写真撮影の有無による視覚的な注意の増加¹⁴⁾及び減少^{10,13)}により生じる効果が検出されにくくなった可能性が考えられる。また、今回の実験で実験協力者に依頼した写真撮影には、既往研究で異なる影響をもたらすとされた記録としての用途^{10,13)}と興味深いものを撮影するという娯楽としての用途¹⁴⁾が混在したため、認知OLと注意の増加が同時に起こることによって正負の影響が互いに打ち消されたという可能性も考えられる。

一方、仮説 2-I は支持され、撮影対象の景観におけるシーン記憶の正答率と、写真撮影の自発性の指標とした写真枚数との間に、有意な正の相関が確認された。よって、理論的予測の通りに、実際の写真撮影の場面でも、好奇心や自発性を伴った写真撮影により撮影対象物に視覚的な注意が向けられ、記憶が促進される可能性がある。一方、仮説 2-II は支持されず、撮影対象外の景観におけるシーン記憶の正答率と写真枚数との間に、有意な正の相関があるという結果になった。これは仮説とは逆の結果であり、仮説で想定された撮影対象物の記憶が促進される代わりに脳の記憶容量の余裕がなくなるというメカニズムは発生しなかったと考えられる。この結果については、認知OLからの予想とは異なり、写真撮影により視覚的な注意を向けるという行動自体の意識が高まり、それが撮影対象以外の景観に対しても同様に視覚的な注意を向けた可能性がある。実際に、自発的な写真撮影においては、約 1/3 (132 枚中の 48 枚) がシーン記憶を問う画像に含まれない対象を撮影した写真であり、これは同じスポットに滞在していてもガイド役が解説している対象だけでなく、それ以外の異なる対象に対しても視覚的な注意を向けていたことを意味していると考えられる。また、本研究では写真枚数を「写真撮影の自発性」の指標としたが、むしろ撮影対象・撮影対象外の景観に対する「撮影者の興味関心や好奇心」の指標となり、撮影者の元々の個人属性である興味関心や好奇心が交絡因子となっている可能性も考えられる。

エピソード記憶については、仮説 1-III は支持され、撮影なし群と比較して撮影あり群は街歩きでのエピソード記憶の正答率が低い傾向にあった。これは、撮影あり群に対しては、ガイド役の解説を聞いている間に写真撮影を行うという行動を求めている間、そのマルチタスクによって聴覚的な情報に注意が向かなくなることでエピソード記憶が抑制

されたためと解釈できる。

仮説 2-I や仮説 2-II に対応する考察で述べたように、好奇心や自発性を伴った写真撮影は、撮影対象物への視覚的な注意をより強く向けさせ、記憶を促進する可能性がある。しかし、エピソード記憶の正答率と写真撮影の自発性については有意な相関は確認されなかった。このことから、視覚的な注意の向上は、エピソード記憶には影響しない、もしくは仮説 1-III で示されたマルチタスクによる記憶の抑制を防ぐものではないと解釈できる。ただし、本研究で記憶の再現の対象としたエピソード記憶が、ガイド役が解説する各スポットの歴史や見どころ、現在の活用方法といった概要に関する内容であり、写真を撮影する対象である景観や建物の形態等の視覚的な情報でなかったことから、自発的な写真撮影の記憶促進が確認されなかった可能性がある。

マルチタスクによる聴覚から得られる情報の記憶の低下という結果は既往研究¹⁴⁾と同様となるが、本研究ではそうした記憶への影響が、街歩き GT 場面において確認されたことと、写真撮影の自発性によらず現れることを示した点に新規性がある。

5. 結論

本研究では、街歩き GT において重要な、地域の特色を伝えるという観点から写真撮影行動の意味を明らかにするため、写真撮影行動の、シーン記憶・エピソード記憶への影響を検証した。分析の結果、写真撮影の有無によるシーン記憶に与えられる影響は正負両面において見られない一方で、写真撮影の自発性が高い場合はシーン記憶が促進されることが示された。また、エピソード記憶について、撮影なし群と比較して撮影あり群は街歩きでのエピソード記憶の正答率が低く、それは撮影の自発性に依存しないということが示された。

本研究の結果から得られる街歩き GT に対する実務的な示唆を述べる。まず、街歩き GT では、移動時間や滞在時間等が細かく指定されることが多いが、シーン記憶を促進するためには、写真撮影のための時間を長く用意したり、街歩き GT 自体を写真撮影を目的として実施したりすることにより、参加者に自発的な写真撮影を促すことが有効と考えられる。参加者が写真撮影を行っている際は、ガイドはエピソード記憶に相当する、言葉による景観の解説は控えめにすることが望ましい。参加者が自発的な写真撮影中にガイドによる解説を行うのではなく、口頭での解説の時間をずらしたり、ツアー以外の時間にエピソード記憶を伝達することができるように、ガイド内容を記したパンフレットなどを参加者に配布したりする等、写真撮影時とは異なるタイミングでガイド内容を参加者に伝えることのできる手段を増やすことが必要となると考えられる。

本研究における実験は茨城県土浦市を対象地として行ったものであり、本研究の結果を一般化するためには、今後他の街歩き GT 対象地での追証が必要である。また、本研

究では、シーン記憶・エピソード記憶に影響を与える変数として「写真撮影行動の有無」に着目したが、屋外空間における記憶には、気温や風向等の環境や街中の交通量等からの影響も想定される。加えて、本研究で写真撮影の自発性の指標とした写真枚数については、撮影者の撮影対象物への興味関心や好奇心といった個人属性が交絡因子となっている可能性も考えられる。そのため、今後様々な要因を加えて、現実場面におけるシーン記憶・エピソード記憶と写真撮影の有無との関連をより精緻に検討していくことが期待される。

<謝辞>

実験に参加して下さった皆様に心よりお礼申し上げます。

【補注】

- (1) 著者が撮影した訪問スポットに関する写真・周辺の街並みに関する写真に類似している画像を、都市計画を専攻する学生 2 名（男性 1 名、女性 1 名）から集め、集められた 151 枚の写真の中からランダムに 16 枚の画像を抽出した。

【参考文献】

- 1) 総務省, 長崎市の歴史や文化を活用したまち歩き「長崎さるく」, https://www.soumu.go.jp/main_content/000063244.pdf, 最終閲覧日 2024.10.20
- 2) すみだ観光サイト, ガイドと歩く, <https://visit-sumida.jp/machiaruki/guide/>, 最終閲覧日 2025.3.30
- 3) 文京区観光協会, ガイド付きツアー, <https://b-kanko.jp/guide>, 最終閲覧日 2025.3.30
- 4) 環境省, エコツーリズムのススメ TOP, <https://www.env.go.jp/nature/ecotourism/try-ecotourism/index.html>, 最終閲覧日 2025.1.20
- 5) 齊藤智(2013), 「記憶の種類」『最新 心理学辞典』(藤永保監修, p.96, 第 1 刷), 平凡社
- 6) 藤田哲也(2018), 「長期記憶」『誠信 心理学辞典[新版]』(下山晴彦他編, pp.122-124, 第 3 刷), 誠信書房
- 7) 河内建・河地庸介(2023), 「シーン記憶の主観的解像度に関する実験心理学的検討」, *北海道心理学研究*, vol.45, p.28.
- 8) Hollingworth, A. (2006), "Scene and position specificity in visual memory for objects", *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, Vol.32, No.1, pp.58-69.
- 9) 公益財団法人日本交通公社 HP, 国内旅行における SNS・写真に対する意識/実態～JTBF 旅行実態調査トピックス～, <https://www.jtb.or.jp/research/statistics-tourist-sns-pictures2022/>, 最終閲覧日 2024.10.20
- 10) Henkel, L. A. (2014), "Point-and-shoot memories: The influence of taking photos on memory for a museum tour", *Psychological science*, Vol.25, No.2, pp.396-402.
- 11) Sparrow, B., Liu, J., & Wegner, D. M. (2011), "Google effects on memory: Cognitive consequences of having information at our fingertips", *Science*, Vol.333, 476-478.
- 12) Risko, E. F. & Gilbert, S. J. (2016), "Cognitive Offloading", *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.20, pp.676-688.
- 13) 白柳洋俊, 野添愛美, 倉内慎也 (2024), 「認知オフローディングによる街並み記憶の抑制及び促進: スマートフォンによる写真撮影が街並みの記憶に与える影響の分析」, *都市計画論文集* Vol.59, No.3, pp. 1044-1051.
- 14) Barasch, A. Diehl, K. Silverman, J. and Zauberman, G. (2017), "Photographic memory: The effects of volitional photo taking on memory for visual and auditory aspects of an experience", *Psychological Science*, Vol.28, No.8, pp.1056-1066.
- 15) Urry, J., Larsen, J./訳 加太宏邦 (2014), 「観光のまなざし 増補改訂版」, 法政大学出版局.
- 16) 地球の歩き方編集室 (2024), 「J18 地球の歩き方 茨城 2025～2026 年版」, 株式会社 Gakken, pp.184-191.
- 17) 土浦市観光協会, モデルコース, https://www.tsuchiura-kankou.jp/model_course/, 最終閲覧日 2025.1.11
- 18) 土浦市, 土浦駅前北地区第一種市街地再開発事業, https://www.city.tsuchiura.lg.jp/data/doc/1511261318_doc_161_0.pdf, 最終閲覧日 2025.1.11
- 19) 土浦市, 土浦市バリアフリー基本構想, https://www.city.tsuchiura.lg.jp/data/doc/1585623794_doc_34_0.pdf, 最終閲覧日 2025.1.11
- 20) 国土地理院ウェブサイト, 地理院地図(電子国土 Web), <https://maps.gsi.go.jp/>, 最終閲覧日 2025.4.23
- 21) 学生団体 C4, つくナビ, <https://tsukunavi.com/>, 最終閲覧日 2025.1.11
- 22) 西野由利恵, 安藤広志 (2008), 「3 次元形状に基づく物体認知の脳機能メカニズム」, *心理学評論* Vol.51, No.2, pp.330-346.

歩行からみた通過量モデルの構築と都市空間の数理的評価

Development of an analytical model for pedestrian traffic flow and mathematical evaluation of urban space

田中 健一*

Ken-ichi Tanaka*

There is growing interest in creating walkable cities where pedestrians can live comfortably and safely. While urban planning has gained valuable insights into walkable design through case studies, mathematical modeling to evaluate walkability and infrastructure remains limited. This study analytically derives pedestrian traffic flow in a rectangular city with a grid network, assuming the probability of walking between two points decays exponentially with distance. The proposed model generalizes continuous traffic flow models by incorporating modal choice between walking and driving. To assess pedestrian safety and comfort, we introduce an indicator defined as the product of pedestrian and vehicle traffic in the same direction, representing potential conflict areas. When integrated across the city, this value grows large where both modes account for a substantial share of trips. The results highlight the need for spatial design strategies that reduce pedestrian-vehicle conflicts and support safer, more comfortable walking environments.

Keywords: 歩行者, 格子状都市, 通過量, 空間設計

pedestrian, rectangular grid city, traffic flow, spatial design

1 はじめに

近年, 世界の多くの都市で, 歩行を促進するまちづくりが注目されている。我が国でも, 快適で活気あるまちなかの再生, 慢性疾患や肥満の予防などの健康促進, 猛暑時の歩行環境改善の必要性など, 様々な観点から歩行が脚光を浴びている。国土交通省の「まちなかウォーカブル推進事業」¹⁾(2020 年から)をはじめとする, 近年の国や自治体の努力により, 実都市への環境整備も進められている。

都市計画学をはじめとする学術分野でも, 歩行に立脚した, まちづくりの事例評価や, 有効な施策の整理・分析を扱った研究が盛んである。例えば, 樋野ら²⁾は, 歩行とまちづくりに関する課題を, 空間デザイン, 土地利用, 目的地へのアクセス性, 安全性, さらにソフト面での歩行促進といった多角的な視点から体系的に整理している。また近年では, 大規模なアンケート調査や GPS データの活用も進展しており, 都市環境や移動者の属性が歩行行動に与える影響について, 定量的な分析が進められている。

一方で, 都市をマクロに捉え, 歩行からみた都市空間の評価やインフラの適正配置を, 単純な数理モデルに基づく解析的アプローチにより追究する試みは, 十分にはなされていない。「歩行からみた都市計画」に寄与する数理モデルを構築し, 事例分析の集積からは得られない, 汎用性の高い知見や分析の枠組みを提示することが求められる。

本稿では, その一つの試みとして, 格子状網を有する矩形都市を想定し, 都市内の各地点における歩行者の通過量を記述する連続近似モデルを提案する。これは, 既存の通過量モデルを, 徒歩と車両の交通手段選択を考慮して一般化したモデルと捉えることができる。今後, 歩行者の視点から都市内移動に基づく様々なモデル分析を行う上での土台となるものと考え。

2 連続近似モデルによる歩行からみた都市分析

歩行者の視点から都市計画上の問題を考える上で, 連続近似モデルの果たし得る役割を述べる。まず, Misaki ら³⁾の歩行選択確率の数理モデルを紹介する。次に, 歩行からみた都市空間の性質を評価する際の基本的問いを設定し, 歩行者の通過量モデルを構築する意義を述べる。

2.1 歩行選択確率の数理モデル

徒歩により移動を行う確率(割合)は, 移動距離 r の増大に伴い減少するのが常である。この減衰の様子を記述するモデルとして, Misaki ら³⁾は, 歩行選択確率 $p(r)$ として, 次の指数減衰の式を用いた:

$$p(r) = e^{-\lambda r}. \quad (1)$$

ここで, λ が大きいほど, $p(r)$ の減少に距離が大きく影響することから, λ を距離抵抗係数と呼ぶことにする。Misaki ら³⁾は, 式(1)が, アンケート調査に基づく実際のデータ(平成 27 年全国都市交通特性調査)によく当てはまることを報告している。

以降では, 令和 3 年全国都市交通特性調査(国土交通省都市局)⁴⁾へ当てはめた結果を示す。この調査は, 全国の 70 都市での, 人の動きの交通実態調査であり, 移動目的や交通手段が, 移動者の各種属性に基づいて整理されている。調査対象都市は, 関東, 関西, 中京の三大都市圏と, 地方中枢都市圏, 地方中核都市圏, 地方中心都市圏などから構成されている。ここでは, 移動距離帯別に, 「交通手段」が徒歩のみから構成されるトリップ割合について, グロス原単位より計算した交通手段分担率を抽出した。距離帯は, 0km から 10km までを対象とした。なお, 「性別」, 「年齢階層」, 「目的種類」は全分類の合計を用いた。

図 1 に, 平日の三大都市圏と地方都市圏の「徒歩のみ」

* 正会員 慶應義塾大学 理工学部 管理工学科 (Keio University)

の距離帯別の移動割合をプロットした。距離の代表値は、各距離帯の中央値に設定している。また、これらのデータに、式 (1) を誤差二乗和最小化により当てはめた結果も示した。歩行選択確率のモデル式 (1) が、距離帯別の「徒歩のみ」の移動割合の傾向をよく捉えている。距離抵抗係数 λ の推定値は、三大都市圏が 0.546 km^{-1} 、地方都市圏が 0.762 km^{-1} であった。自家用車の利用割合が高い地方都市圏の実状がよく反映されている。

この式は、実データの傾向をよく再現でき、パラメータが一つのみで簡潔である。より精緻な交通手段選択モデルに比べて操作性に優れるため、都市空間に関わる各種指標を陽に導出できる強みがある。特に、交通網パターンおよび（人口分布などの）都市活動の分布を連続的に表現する連続近似モデルにおいて、その利用価値は高い。

移動からみた都市空間の性質を分析する枠組みは、腰塚⁵⁾により体系化されている。さらに、鈴木⁶⁾は、3 次元的土地利用の観点から都市のコンパクト性を評価する解析的モデルを提案した。しかしこれらのモデルでは、移動者の交通手段選択は十分に考慮されていない。本研究では、式 (1) の歩行選択確率を、歩行者の視点から都市計画上の基礎的問いを追究する上での基本構成要素と位置付け、都市空間の特性解明に役立てることを目標とする。具体的には、歩行者と車両の通過量分布を導出し、両者の交錯機会を定式化し、都市面積との関係性を評価する。なお今回は、基礎となるモデル構築の観点から、歩行のみを用いる移動と、車両のみを用いる移動に限定して議論する。

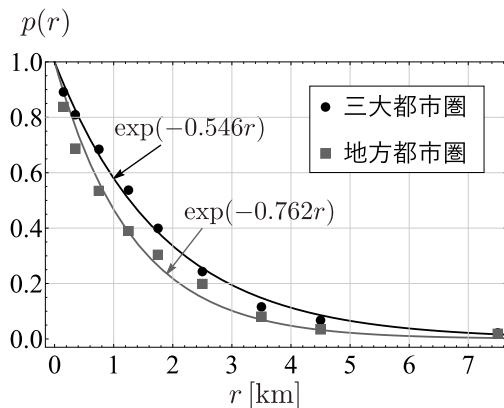


図 1: 歩行選択確率の数理モデル

2.2 歩行者に着目した通過量の数理モデル

歩行者の通過量モデルを構築するに当たり、図 2 の状況を考える。これは、一辺が 5km と 1km の二つの正方形都市であり、移動経路と歩行または車両の選択の様子を表している。総人口は等しく、同数の 100 トリップが生じるものとし、以下を仮定する：(1) 起点と終点は一様かつ独立に生成される、(2) 方向転換を一回のみ行う二つの最短経路のどちらか一方が（等確率で）選択される、(3) 移動距離が r のときの歩行選択確率は $e^{-\lambda r}$ （車両選択確率は $1 - e^{-\lambda r}$ ）である。図 2 では、(1) から (3) の状況を、一様

乱数により表現している。なお、1km の距離を移動する際の歩行選択確率が 0.5 となるように、 $\lambda = \ln 2 \approx 0.693$ を用いた。この値は、図 1 の三大都市圏と地方都市圏の中間的な値であり、意味も非常に分かり易い。歩行の観点から都市構造をマクロに把握する際の値として有用である。

図 2(a) は図 2(b) と比べて、車両による移動割合が圧倒的に高く、また、歩行の多くは、正方形の 1 辺の長さよりも移動距離が短い。一方図 2(b) では、都市内の離れた二点間を徒歩で移動するケースも多い。特に、中心部を通過する歩行者数は、図 2(b) の方がはるかに多い。図 2 の観察を通じて、次のような根本的な問いを設定できる：

- (A) 都市全体での歩行によるトリップ割合は都市面積とどのような関係にあるか；
- (B) 同一面積の都市でも都市の形状により都市全体での歩行によるトリップ割合は異なるか；
- (C) 歩行者と車両移動者はそれぞれどの地点をどのくらい通過するか；
- (D) 歩行者と車両が交錯する機会は都市全体でどのくらいか、またそれは都市面積とどのように関係するか。

「歩行からみた都市計画」の立場からは、都市環境と人々の行動との相互干渉がもたらす性質を体系化することが求められる。そのためには、上記のような根本的な問いに対して、マクロな視点から記述・分析するための基礎的な数理的枠組みの整備が不可欠である。Misaki ら³⁾は、上記の (A) と (B) に着目し、任意の地点間の一様なトリップ密度を想定し、歩行移動者数を最大化する都市形状を求める変分問題を定式化し、数値例を通じて都市形状を分析した。本稿では、(C) と (D) に着目し、歩行から都市空間を評価する新たな通過量モデルを構築し、今後の応用や発展に向けた数理的基盤を構築することを目的とする。

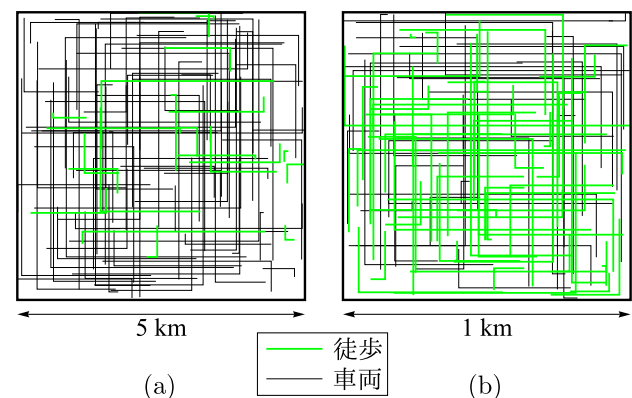


図 2: 面積の異なる正方形都市における歩行と車両の選択

3 先行研究

都市交通の分析に、現実を抽象化した連続近似モデルが古くから活用されてきた。Smeed⁷⁾は、都市インフラの必要量の見積りや道路網の特性解明に連続近似モデルを積極的に活用し、1960 年代の研究の発展に大きく貢献した。Holroyd⁸⁾は、円形都市や正方形都市に種々の移動

パターンを設定し、移動距離の平均値を体系的に整理した。また、都市の地点毎の方向別の交通量が 1960 年代に様々な状況設定の下で導出されている^{7, 9)}。Vaughan¹⁰⁾は、連続近似モデルを用いた、都市内移動に関する数多くの成果を発表し、この分野の研究を体系化して紹介した。

我が国でも、腰塚⁵⁾は、距離分布と通過量分布の重要性を唱え、数多くの独創的研究を行なっている。連続近似による通過量の研究は様々な方向へ展開されてきた。通行不能領域の存在が交通量分布に与える影響の分析^{11, 12)}、所与の到着時刻分布に従う交通量の時空間分布を導出する拡張^{13, 14)}、最短経路以外の経路選択が生じる都市内交通量の記述¹⁵⁾、施設への立ち寄り移動を伴う拡張¹⁶⁾をはじめ、数多くの一般化が試みられている。

一方で、連続近似による通過量モデルに、交通手段選択を取り入れる試みは乏しい。「歩行と都市計画」の問題において、歩行者の通過量分布を扱う基礎モデルの構築が不可欠である。本研究では、格子状都市における Holroyd⁹⁾の通過量モデルに、式(1)の歩行選択確率を導入して、歩行者と車両の通過量を個別に導出する。さらに、歩行者が車両と交錯する機会の量をモデル化し、安全性や快適性から都市空間を評価する。

歩行に関する問題を、連続近似モデルにより追究した研究は少ない。以降では、先述の Misaki ら³⁾以外の関連研究を紹介する。Tirachini¹⁷⁾は、世界の様々な都市の交通調査データを用い、歩行者の距離の分布が指数分布でよく近似できることを指摘した。そして、高速道路などの歩行者の障害となる線的インフラに対する横断施設の配置を数理的に評価した。また、歩行者の健康や安全面に着目した研究も存在する。栗田¹⁸⁾は、1次元都市において、歩行距離と平均寿命の関係を下に、(i)死亡率を低下させるために望ましい徒歩距離を達成する、(ii)住民全体の死亡率の平均値を要求水準まで引き下げる、ための二種類の施設配置問題を提案した。また、副島¹⁹⁾は横断歩道がない場所での道路横断に着目し、横断歩道の配置と、歩行者と車両の接触のリスクの関係を分析した。薄井²⁰⁾は、ベンチなどの休憩施設の配置に着目し、施設密度と継続歩行距離の関係を数理的に追究し、地域の評価を行なった。

道路網をネットワーク表現した、歩行に関わる数理モデルを紹介する。Tanaka ら²¹⁾は、安全性の観点から、児童の徒歩による登下校経路を設計する問題を、一人で歩くことによるリスクと登下校距離の合計の二目的最適化問題として定式化した。道路網に適用した結果から、登下校距離の合計を小さく抑えつつ、リスクを大幅に小さくする経路案を示した。海外では、徒歩による登下校を児童の健康促進の観点から推奨する動きもあり、経路設計のための数理最適化モデルが研究されている²²⁾。Oyama ら²³⁾は歩行者専用区域の整備に着目し、自動車の走行効率の悪化を抑えつつ快適な歩行空間の実現を目指した最適化問題を提案した。車両と歩行者のマルチモーダル均衡配分を下位問題とする二段階最適化問題に対する解法を設計し、実都

市の評価を行なっている。膨大な蓄積を有するネットワーク設計の研究分野においても、歩行者の視点を考慮した研究は一部にとどまっており、今後の展開が期待される。

4 格子状都市における Holroyd の通過量モデル

4.1 格子状網を有する都市モデル

図3の、 $[0, a] \times [0, b]$ で定義され、辺に平行に無限に稠密な格子状網を持つ矩形都市 R を考える。移動の起点の座標を (x_1, y_1) 、終点の座標を (x_2, y_2) と表す。起点と終点の間の経路は、次のルールに従い選択される：

仮定 1 起点と終点の間の最短移動経路が選択される；

仮定 2 方向転換は高々 1 回のみ行われる；

仮定 3 方向転換を 1 回行う場合の 2 通りの経路は等確率で選択される。

最短移動経路の距離 $d(x_1, y_1, x_2, y_2)$ は次の通りである：

$$d(x_1, y_1, x_2, y_2) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|. \quad (2)$$

仮定 2 は、経路選択に関する最も単純な仮定であり、この下での歩行通過量は、基本モデルとして不可欠である。一方で、他の設定も考えられる。例えば、時間的自由度の高い場面では、回遊や施設を経由する経路選択などの多様な行動も観察される。活気あるまちなかの形成や健康促進といった研究課題において、こうした視点を踏まえたモデル構築も重要である。これらは今後の課題としたい。

次に、任意の地点間のトリップの発生頻度を記述するトリップ密度 $\rho(x_1, y_1, x_2, y_2)$ を導入する。これは、地点 (x_1, y_1) 近傍の単位面積を持つ領域から、地点 (x_2, y_2) 近傍の単位面積を持つ領域へのトリップ量を意味する。いま、トリップは起点と終点のペアで与えられるから、 (x_1, y_1, x_2, y_2) と表現されることに注意しよう。ある条件を満たすトリップ全体からなる集合を D とすると、 $\rho(x_1, y_1, x_2, y_2)$ を用いて、対応するトリップの総数は

$$\iiint_D \rho(x_1, y_1, x_2, y_2) dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 \quad (3)$$

によって求められる。地点 (x, y) における方向別の通過量は、式(3)の D を具体的に与えることで導出できる。

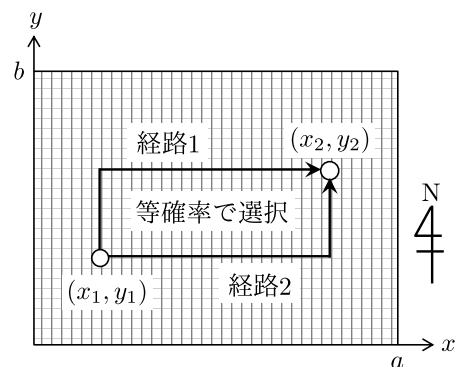


図3: 格子状網を持つ長方形都市

本稿では、起点と終点が都市 R 内において、それぞれ一様に分布し、かつ互いに独立なケースを想定する。この典型的な設定は、これまで様々な既存研究で用いられてきた^{5, 10)}。理論展開が容易で様々な一般化を追究する上での基礎としても重要である。この場合のトリップ密度は、都市内の総トリップ量 N を用いて次の通りとなる：

$$\rho(x_1, y_1, x_2, y_2) = \frac{N}{(ab)^2}. \quad (4)$$

4.2 Holroyd の通過量モデル

格子状都市における、Holroyd⁹⁾ による、任意の地点における方向別の通過量の導出方法を紹介する。これは、地点 (x, y) において移動方向に垂直な単位幅を横切る移動量を意味する。図 4 の (x, y) を、東向きに通過する場合に着目する（他の場合も同様である）。いま、 (x, y) における y 軸に平行な単位幅の線分を東向きに通過するトリップ数を $q_E(x, y)$ と表し、この導出方法を示す。

まず、図 4 の地点 (x, y) と $(x, y + dy)$ を結ぶ微小線分に着目する。この微小線分を東向きに通過する移動パターンには、通過した後 (after) に方向転換を行う図 4(a) と通過する前 (before) に方向転換を行う図 4(b) の 2 通りが存在する。図 4(a) と図 4(b) のような起・終点ペアのうち、微小線分を通過するのは実線のケースである。図 4(a) と図 4(b) に対応する起・終点ペアの集合をそれぞれ D_E^a および D_E^b とすると、 $q_E(x, y)dy$ は以下の通りである：

$$q_E(x, y)dy = \frac{1}{2} \left[\iiint\limits_{D_E^a} \frac{N}{(ab)^2} dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 + \iiint\limits_{D_E^b} \frac{N}{(ab)^2} dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 \right]. \quad (5)$$

右辺の先頭において、後続の式を 2 分の 1 倍する理由は、「方向転換を 1 回行う場合の 2 通りの経路は等確率で選択される」ため、実際の通過量は起・終点ペアの総量の半分になることによる。積分領域 D_E^a と D_E^b は、起点 (x_1, y_1) と終点 (x_2, y_2) の座標を用いて以下の通りとなる：

$$D_E^a = \{(x_1, y_1, x_2, y_2) | 0 \leq x_1 \leq x, y \leq y_1 \leq y + dy, x \leq x_2 \leq a, 0 \leq y_2 \leq b\}, \quad (6)$$

$$D_E^b = \{(x_1, y_1, x_2, y_2) | 0 \leq x_1 \leq x, 0 \leq y_1 \leq b, x \leq x_2 \leq a, y \leq y_2 \leq y + dy\}. \quad (7)$$

D_E^a と D_E^b を、式 (5) に代入すると、以下を得る：

$$q_E(x, y) = \frac{N(a-x)x}{a^2b}. \quad (8)$$

結果は、 $x = a/2$ で最大値を取る 2 次関数となる。起点と終点が独立であるため、結果は x のみに依存する。西向きの通過量 $q_W(x, y)$ も、同様にして計算すると、結果は $q_E(x, y)$ と等しくなる。今回の設定では、東向きと西向きの通過量は、互いに起点と終点を入れ替えた場合に相当することからも、両者の一致は理解できる。

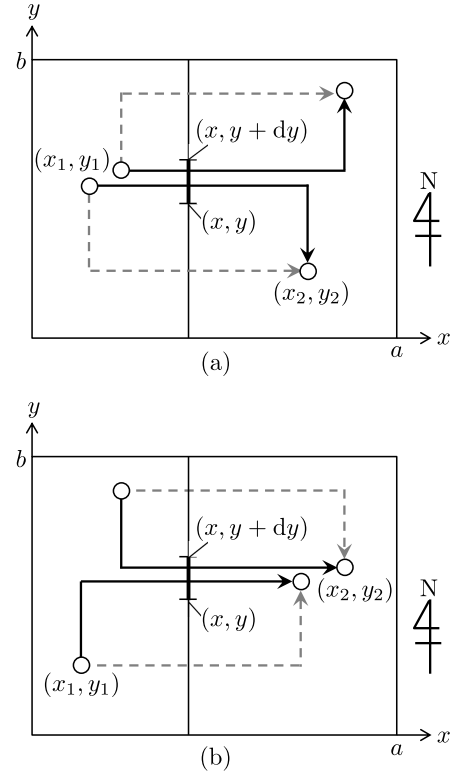


図 4: 東向き移動に対する通過量の導出

南向きと北向きの通過量 $q_S(x, y)$ および $q_N(x, y)$ も、同様の計算を通じて以下の通りとなる：

$$q_S(x, y) = q_N(x, y) = \frac{N(b-y)y}{ab^2}. \quad (9)$$

以上より、地点 (x, y) における全ての方向に対する通過量 $q_{all}(x, y)$ は、 $q_{all}(x, y) = 2q_E(x, y) + 2q_S(x, y)$ を計算すると、次のように表される：

$$q_{all}(x, y) = \frac{2N[ab(x+y) - bx^2 - ay^2]}{(ab)^2}. \quad (10)$$

図 5 と図 6 は、東向き通過量 $q_E(x, y)$ と全方向通過量 $q_{all}(x, y)$ の概形と等高線図である。図では、1 辺 1km の正方形都市 ($a = b = 1\text{km}$) とし、都市全体での総トリップ数は $N = 1$ としている。 $q_E(x, y)$ は移動方向のみに依存する 2 次関数であり、 $(a/2, 0)$ と $(a/2, a)$ を結ぶ軸上で最大値を取る。 $q_{all}(x, y)$ は、中心で最大値を取り、等高線は円（長方形都市の場合は楕円）となる。次章で扱う歩行と車両の通過量は、トリップ長に依存して発生頻度が異なるため、 $q_E(x, y)$ や $q_{all}(x, y)$ とは異なる特徴を持つ。

5 歩行通過量と車両通過量のモデル構築

5.1 歩行通過量の導出

Holroyd⁹⁾ の通過量に基づき、歩行選択確率を用いて、交通モードを考慮したモデルに一般化する。まず、徒歩移動者のみに着目する。例として、図 4 に示す、 (x, y) を東

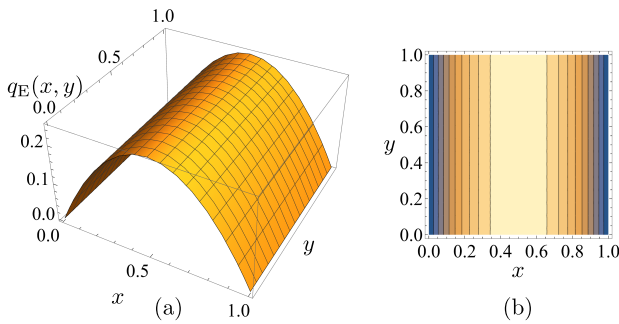


図 5: 東向き移動に対する通過量

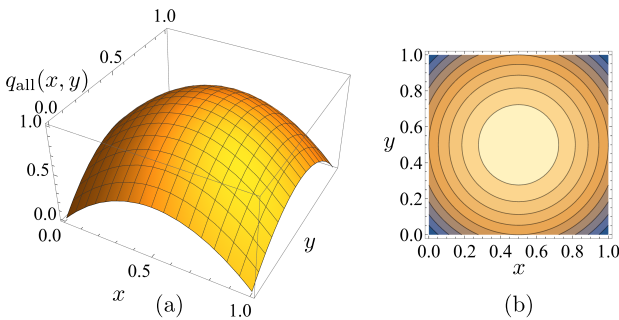


図 6: 全方向移動に対する通過量

向きに通過する場合に着目する（他の場合も同様である）。いま、 (x, y) における y 軸に平行な単位長さの線分を東向きに通過する歩行者数を $q_E^{\text{walk}}(x, y)$ と表す。先に示した、Holroyd⁹⁾ による通過量は、歩行と車両を区別しない全移動者に対するものと見做すことができる。

$q_E^{\text{walk}}(x, y)$ の導出方法を示す。地点 (x, y) と $(x, y+dy)$ を結ぶ微小線分を東向きに通過する、図 4 の移動パターンに着目する。式 (6) と式 (7) に属する各トリップに、その距離 $|x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|$ に応じた歩行選択確率を考慮する。具体的に $q_E^{\text{walk}}(x, y)dy$ は、次の通りとなる：

$$q_E^{\text{walk}}(x, y)dy = \frac{1}{2} \left[\iiint\limits_{D_E^a} \frac{N}{(ab)^2} e^{-\lambda(|x_2-x_1|+|y-y_2|)} dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 + \iiint\limits_{D_E^b} \frac{N}{(ab)^2} e^{-\lambda(|x_2-x_1|+|y-y_1|)} dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 \right]. \quad (11)$$

式 (5) の場合とは異なり、式 (11) の被積分関数は、括弧内の第 1 項は (x_1, x_2, y_2) に、第 2 項は (x_1, x_2, y_1) に依存している。さらに、絶対値記号が含まれることに注意を要する。これらを考慮して場合分けを行った上で、積分計算を具体的に実行すると以下を得る：

$$q_E^{\text{walk}}(x, y) = \frac{N}{\lambda^3 a^2 b^2} \times (e^{\lambda x} - 1)(e^{-\lambda x} - e^{-\lambda a})(2 - e^{-\lambda y} - e^{-\lambda(b-y)}). \quad (12)$$

式 (11) の積分計算は、一見すると複雑であるが、式 (12) の非常に単純な解析的表現が得られる点は注目に値する。これは、 $e^{-\lambda(|x_2-x_1|+|y-y_2|)}$ （または $e^{-\lambda(|x_2-x_1|+|y-y_1|)}$ ）の絶対値を外した後の表現が、各積分変数に関する指数関数の積に分解できるという指数関数の性質による。歩行選択確率の関数型と、格子状距離の性質に起因する特筆すべき特徴であり、格子状都市における種々の計算をする上で大きな利点である。

西向きの歩行通過量 $q_W^{\text{walk}}(x, y)$ は $q_E^{\text{walk}}(x, y)$ と等しくなる。南向きと北向きの歩行通過量 $q_S^{\text{walk}}(x, y)$ および $q_N^{\text{walk}}(x, y)$ も同様の方法で導出できて両者は等しくなる。具体的には以下の通りとなる：

$$q_S^{\text{walk}}(x, y) = \frac{N}{\lambda^3 a^2 b^2} \times (e^{\lambda y} - 1)(e^{-\lambda y} - e^{-\lambda b})(2 - e^{-\lambda x} - e^{-\lambda(a-x)}). \quad (13)$$

全方向の歩行通過量 $q_{\text{all}}^{\text{walk}}(x, y)$ は次の通りとなる：

$$q_{\text{all}}^{\text{walk}}(x, y) = \frac{2N}{\lambda^3 a^2 b^2} \times \left[(e^{\lambda x} - 1)(e^{-\lambda x} - e^{-\lambda a})(2 - e^{-\lambda y} - e^{-\lambda(b-y)}) + (e^{\lambda y} - 1)(e^{-\lambda y} - e^{-\lambda b})(2 - e^{-\lambda x} - e^{-\lambda(a-x)}) \right]. \quad (14)$$

5.2 車両通過量の導出

車両のみの通過量の導出方法を述べる。図 4 の移動方向に垂直な単位幅を、車両により東向きに横切る交通量を $q_E^{\text{car}}(x, y)$ と表す。距離 r 離れた二点間を車両により移動する割合は $1 - e^{-\lambda r}$ で与えられる。 $q_E^{\text{car}}(x, y)$ は、式 (11) の括弧内の第 1 項の例では、 $e^{-\lambda(|x_2-x_1|+|y-y_2|)}$ を $1 - e^{-\lambda(|x_2-x_1|+|y-y_2|)}$ に置き換えて計算すればよい。また、 $q_E^{\text{walk}}(x, y)$ が得られている場合には、交通モードに依らない（車両と歩行の合計の）通過量 $q_E(x, y)$ から、次の関係に従って計算することができる：

$$q_E^{\text{car}}(x, y) = q_E(x, y) - q_E^{\text{walk}}(x, y). \quad (15)$$

地点 (x, y) における、車両による全ての方向の通過量 $q_{\text{all}}^{\text{car}}(x, y)$ も同様に導くことができる。

5.3 数値例と考察

歩行および車両通過量の数値例を示し、得られた知見を整理する。ここでは、1 辺 1km の正方形都市 ($a = b = 1\text{km}$) および、 $\lambda = \ln 2 \approx 0.693\text{km}^{-1}$ と設定する。図 7 と図 8 に、東向き移動に対する歩行通過量 $q_E^{\text{walk}}(x, y)$ と車両通過量 $q_E^{\text{car}}(x, y)$ の概形と等高線図を示す。

Holroyd⁹⁾ の結果の $q_E(x, y)$ とは異なり、 $q_E^{\text{walk}}(x, y)$ と $q_E^{\text{car}}(x, y)$ は、 y 座標にも依存する。 $q_E^{\text{walk}}(x, y)$ は中心で最大値をとるが、これは中心付近を通過する移動は、比較的距離が短い（従って歩行選択確率が高い）移動に限られるためである。一方で、 $q_E^{\text{car}}(x, y)$ は、 y 座標値が中心から離れるほど大きな値をとる。これは、東向き移動者の

移動距離の最大値は $2a$ であり、地点 $(0,0)$ から (a,a) 、または $(0,a)$ から $(a,0)$ へ向かう移動で実現されることによる。これに近い起点と終点のペアを持つトリップは、移動距離が大きい（車両を選択する確率が高い）ため、多くの車両が地点 $(a/2,0)$ および $(a/2,a)$ 付近を通過するのである。このような知見は、歩行者と車両の通過量を個別に導出して初めて判明する。人間の行動と格子状網の性質から生じる、都市空間の興味深い特徴といえる。

次に、全方向の移動に対する、歩行および車両の通過量の概形と等高線図を、図 9 および図 10 に示す。一方方向の移動とは異なり、どちらも中心で最大値を取る。一方で、歩行と車両の傾向の違いも見えて取れる。歩行通過量 $q_{\text{all}}^{\text{walk}}(x,y)$ は、中心付近の集中度合いが車両通過量 $q_{\text{all}}^{\text{car}}(x,y)$ よりも大きい。反対に、 $q_{\text{all}}^{\text{car}}(x,y)$ は正方形の辺の中心付近でも、やや大きな値を持つことが分かる。

6 歩行者からみた車両との交錯機会の解析的評価

歩行者にとって安全で快適な都市空間の設計は、都市計画や交通計画における古くからの中心的な研究課題である。本研究では、この課題に対して、歩行者と車両の交錯機会を評価するための単純な数理モデルを構築し、マクロな視点からその特性を検討する。図 11 のように、歩行者と車両が道路区間を移動する際に、次の二点に着目する：

- (i) 歩行者の交通事故リスクは、車両密度の増加に伴って上昇する；
- (ii) 車両密度の増加は、歩行者に対して心理的圧迫感を与え、移動の快適性にも影響を及ぼす。

この構造を、後述の通り、ある区間を移動する歩行者と車両の積に基づき評価する。まず、地点 (x,y) において南北方向に設けられた単位長さの線分 δ を東向きに通過する歩行者数は $q_{\text{E}}^{\text{walk}}(x,y)$ で与えられる。歩行者一人当たりに対しては、 δ を東向きまたは西向きに横切る車両台数に比例して、交通事故のリスクや心理的圧迫が生じるものと仮定する。東向き歩行者に対するこの不効用の総和（歩行と車両の交錯機会） $r_{\text{E}}^{\text{walk}}(x,y)$ は、次の通りである：

$$\begin{aligned} r_{\text{E}}^{\text{walk}}(x,y) &= q_{\text{E}}^{\text{walk}}(x,y)[q_{\text{E}}^{\text{car}}(x,y) + q_{\text{W}}^{\text{car}}(x,y)] \\ &= 2q_{\text{E}}^{\text{walk}}(x,y)q_{\text{E}}^{\text{car}}(x,y). \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、 $r_{\text{E}}^{\text{walk}}(x,y)$ が歩行と車両の通過量の積の形で記述されるのは、車両通過量が一定の場合、交錯機会は歩行通過量に比例することによる。

同様に、全方向に対する歩行と車両の交錯機会 $r_{\text{all}}^{\text{walk}}(x,y)$ は、次の通りに導出される：

$$\begin{aligned} r_{\text{all}}^{\text{walk}}(x,y) &= 4q_{\text{E}}^{\text{walk}}(x,y)q_{\text{E}}^{\text{car}}(x,y) \\ &\quad + 4q_{\text{S}}^{\text{walk}}(x,y)q_{\text{S}}^{\text{car}}(x,y). \end{aligned} \quad (17)$$

なお、関連指標として、交差量（route-crossings）がある。これは、各地点において互いに直交する方向の通過量

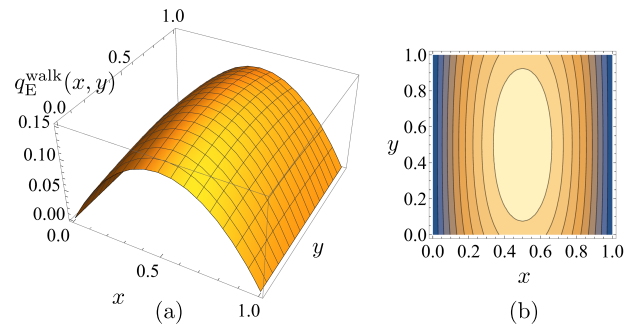


図 7: 東向き移動に対する歩行通過量

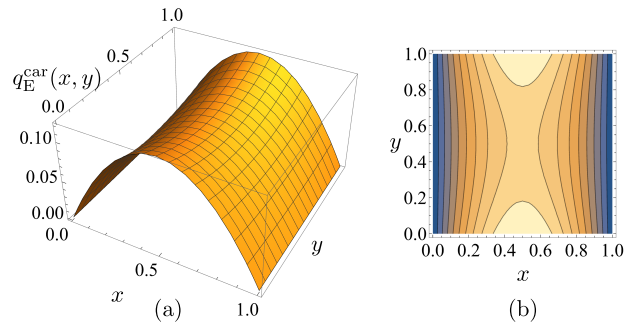


図 8: 東向き移動に対する車両通過量

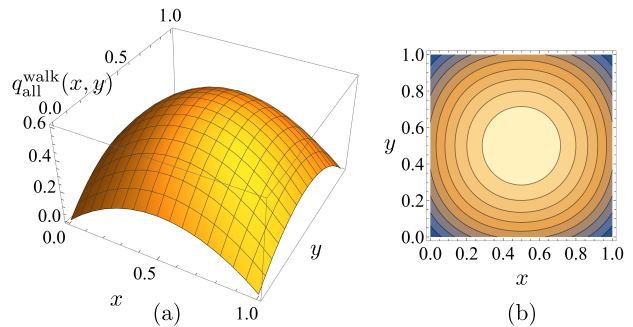


図 9: 全方向移動に対する歩行通過量

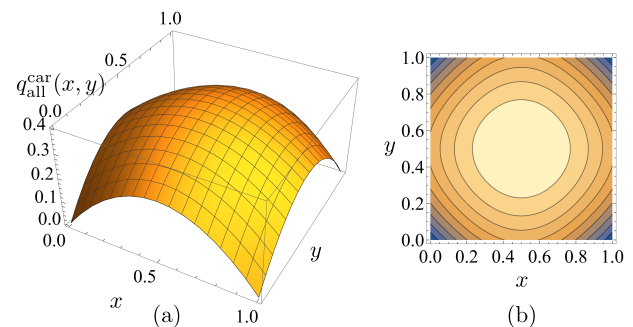


図 10: 全方向移動に対する車両通過量

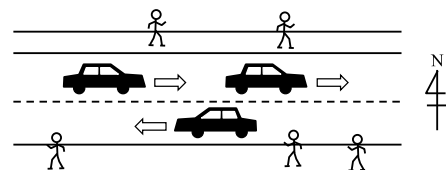


図 11: 歩行者と車両の交錯機会のモデル化

の積で定義される^{9, 24)}。交差量が各交差点（の連続近似）での渋滞の潜在性の高さを表すのに対し、提案指標は、道路に沿って移動する歩行者からみた車両との交錯機会を記述する指標である。本節の内容は、歩行者と車両の二種類の通過量を個別に導出して、初めて分析可能となる。なお、紙面の都合上省略するが、本稿で導出した車両通過量を下に、車両同士の積で定義される既存の交差量を解析することにも意義がある。

簡単な数値例を示す。図 12 は、1 辺 1km の正方形都市（ $a = b = 1\text{km}$ ）において $\lambda = \ln 2 \approx 0.693\text{km}^{-1}$ とした場合の $r_{\text{all}}^{\text{walk}}(x, y)$ の概形と等高線図である。中心で最大値を取り、中心から離れるに従って減少する。

次に、東向きおよび全方向の歩行と車両の交錯機会を、都市全体の総和として解析的に評価するために、 $\gamma_{\text{E}}^{\text{walk}}(a, b, \lambda)$ と $\gamma_{\text{all}}^{\text{walk}}(a, b, \lambda)$ を以下で定義する：

$$\gamma_{\text{E}}^{\text{walk}}(a, b, \lambda) = \int_0^a \int_0^b r_{\text{E}}^{\text{walk}}(x, y) dy dx, \quad (18)$$

$$\gamma_{\text{all}}^{\text{walk}}(a, b, \lambda) = \int_0^a \int_0^b r_{\text{all}}^{\text{walk}}(x, y) dy dx. \quad (19)$$

これらは、 a , b , λ の関数として捉えている。上記の積分は陽に導出でき、 $\gamma_{\text{E}}^{\text{walk}}(a, b, \lambda)$ は次の通りとなる：

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{E}}^{\text{walk}}(a, b, \lambda) = & \frac{2N^2 e^{-2\lambda(a+b)}}{3\lambda^8 a^4 b^4} \left[9 + 3\lambda a \right. \\ & + 12e^{\lambda a} \lambda a + 3e^{2\lambda a} (\lambda a - 3) \\ & - 6e^{\lambda b} (\lambda^2 ab + 4\lambda a + 3\lambda b + 12) \\ & - 3e^{2\lambda b} (4\lambda^2 ab - 7\lambda a + 12\lambda b - 21) \\ & + e^{\lambda(a+b)} (\lambda^4 a^3 b - 36\lambda^2 ab - 96\lambda a - 24\lambda b) \\ & + e^{\lambda(2a+b)} (\lambda^4 a^3 b - 18\lambda^2 ab - 24\lambda a + 42\lambda b + 72) \\ & + e^{\lambda(a+2b)} (\lambda^5 a^3 b^2 - \lambda^4 a^3 b - 12\lambda^3 ab^2 - 36\lambda^2 ab \\ & - 24\lambda^2 b^2 + 84\lambda a + 24\lambda b) \\ & \left. + e^{2\lambda(a+b)} (\lambda^5 a^3 b^2 - \lambda^4 a^3 b - 12\lambda^3 ab^2 + 24\lambda^2 b^2 \right. \\ & \left. + 21\lambda a + 12\lambda b - 63) \right]. \quad (20) \end{aligned}$$

これを用いて、 $\gamma_{\text{all}}^{\text{walk}}(a, b, \lambda)$ は以下のように表現される：

$$\gamma_{\text{all}}^{\text{walk}}(a, b, \lambda) = 2\gamma_{\text{E}}^{\text{walk}}(a, b, \lambda) + 2\gamma_{\text{E}}^{\text{walk}}(b, a, \lambda). \quad (21)$$

上記では、対称性を利用して、 $\gamma_{\text{E}}^{\text{walk}}(a, b, \lambda)$ のみで $\gamma_{\text{all}}^{\text{walk}}(a, b, \lambda)$ を記述した。正方形都市（ $a = b$ ）において、交錯機会を都市スケール a の関数と捉える。図 13 は、 a を 0.2km から 5km まで変化させた場合の $\gamma_{\text{all}}^{\text{walk}}(a, a, \lambda)$ の概形である。この値は、都市スケールが小さい範囲と大きい範囲で小さく、中間的な値で最大値を取る。これは、 a が小さい場合には移動の多くは歩行から構成され、 a が大きい場合には、逆に歩行者が少なくなることによる。

この結果は、都市計画の視点から重要な示唆を与える。ある程度高密度な都市を設計する場合、歩行と車両の双方に

一定以上のトリップ需要が生じるため、都市全体での両者の潜在的な交錯量が大きくなる。従って、車両による移動効率が大きく損なわれないよう配慮しつつ、歩行者にとって安全かつ快適な空間を確保することが求められる。

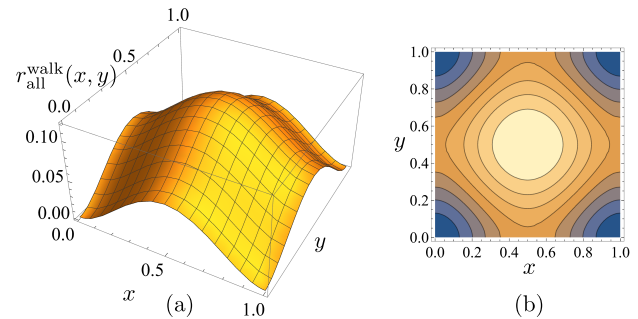


図 12: 歩行と車両の交錯機会

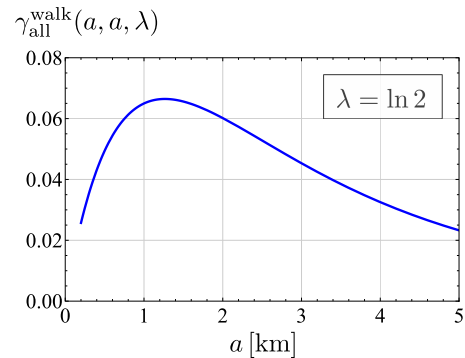


図 13: 正方形都市の辺の長さ歩行と車両の交錯機会の関係

7 まとめと今後の展望

近年、歩行者の視点から都市空間を見直そうとする動きが広がりつつある。こうした流れを受けて、都市計画学をはじめとする学術分野においても、歩行の観点から都市を評価するための研究が活発に行われている。一方で、解析的アプローチにより都市の諸課題を単純化して理解しようとする試みは、まだ始まったばかりである。

本研究では、連続近似による通過量の数理モデルを取り上げ、徒歩と車両の交通手段選択を考慮した一般化を行った。具体的には、移動距離の増大に伴い、歩行を移動手段として選択する確率が指数関数的に減衰する状況を仮定し、格子状網を有する矩形都市における歩行者と車両の通過量を導出した。得られた結果を下に、歩行者の安全や快適性を評価するための数理モデルを提案し、歩行と車両が一定程度以上用いられる都市面積において、この値が大きくなってしまふことを確認した。

歩行通過量モデルを基盤として、さまざまな発展的展開が考えられる。都市空間として、需要がリンクに沿って連続的に分布するネットワークに対しても同様の枠組みを適用することが可能であり、ネットワークの規模や形状に応じた歩行者および車両の通過量の特徴を分析できる。さらに、歩行者に着目した移動距離の分布や平均値による評価

も興味深い展開である。都市に同一人口を収容する場合、都市面積が小さ過ぎると歩行トリップ数は増加するが、移動距離は短くなる。反対に、都市面積が大き過ぎると、車両によるトリップが大多数を占めるため、歩行距離は短くなる。この中間に、歩行移動距離を最大化する都市面積が存在すると考えられる。このトレードオフ構造は、賑わいの創出や健康効果を、マクロな視点から解析的に評価する上での土台となることが期待できる。

今回は、移動手段は歩行のみと車両のみの二種類に限定した。鉄道・バスなどの公共交通手段や、それらを利用する際の一部を担う徒歩移動の考慮は、都市のコンパクト性を議論する上で欠かせない。さらに、冒頭の図 1 で述べた通り、地方都市圏では三大都市圏と比較して、同一距離帯での歩行選択確率が低い傾向がある。都市圏域別の歩行通過量および車両との交錯機会を精緻に把握することで、都市設計に資する知見を提示していきたい。

謝辞

本研究の位置付けや発展の方向性に関わる示唆に富むコメントを下さった匿名の査読者に、感謝申し上げます。また、日本 OR 学会「歩行からみた空間設計と OR」研究部会の第 1 回研究会において、大変有益なご助言を下さった栗田 治教授（慶應義塾大学）に謝意を表します。本研究は、JSPS 科研費（JP25K01455）の助成を受けました。

参考文献

- 1) 国土交通省: ウォーカブルポータルサイト, <https://www.mlit.go.jp/toshi/walkable/> (最終アクセス: 2025 年 8 月 16 日).
- 2) 樋野公宏, 石井儀光, 野原 卓, 花里真道, 吉田紘明 (2022): 身体活動を促すまちづくりデザインガイド, <https://hpd.cpm.s.chiba-u.jp/activeguide/> (最終アクセス: 2025 年 8 月 16 日).
- 3) Misaki, S. and Tanaka, K. (2020): City shapes that maximize the number of walking-only trips based on Manhattan distance, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 14, No. 5, JAMDSM0075 (19 pages).
- 4) 国土交通省都市局: 全国都市交通特性調査 集計データ, 令和 3 年度, https://www.mlit.go.jp/toshi/tosiko/toshi_tosiko_fr_000024.html (最終アクセス: 2025 年 8 月 16 日).
- 5) 腰塚武志 (2022): 距離分布からみる空間, 筑波大学出版会.
- 6) 鈴木 勉 (2008): コンパクト・シティの理念的モデル, コンパクトシティ再考—理論的検証から都市像の探求へ, 玉川英則 (編), 学芸出版会.
- 7) Smeed, R.J. (1963): Road development in urban areas, *Journal of the Institution of Highway Engineering*, Vol. 10, pp. 5–30.
- 8) Holroyd, E.M. (1966): Theoretical average journey lengths in circular towns with various routeing systems, *Road Research Laboratory Report*, 43, Ministry of Transport, UK.
- 9) Holroyd, E.M. (1968): Routing traffic in a square town to minimize route-crossings, *Beiträge zur Theorie des Verkehrsflusses, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, Vol. 86, pp. 175–183.
- 10) Vaughan, R.J. (1987): *Urban Spatial Traffic Patterns*, Pion Limited.
- 11) 田中健一, 栗田 治 (2001): 放射・環状道路網を有する扇形都市平面上の通過交通量の分布, 都市計画論文集, Vol. 36, pp. 865–870.
- 12) Miyagawa, M. (2022): Spatial distribution of traffic flow in a rectangular city with a grid network and a rectangular barrier, *FORMA*, Vol. 37, pp. 21–33.
- 13) 田中健一, 栗田 治 (2003): 領域内通過量からみた放射・環状道路網の数理的解析—通勤時を想定した交通量の空間的・時間的分布—, 日本応用数理学会論文誌, Vol. 13, No. 3, pp. 321–352.
- 14) Tanaka, K. and Kurita, O. (2003): Time-dependent traffic flow in a rectangular city with rectilinear distance, *FORMA*, Vol. 18, pp. 165–186.
- 15) 塩野直志, 鶴飼孝盛 (2022): 格子状交通ネットワークにおける経路選択が交通量に及ぼす影響について, 都市計画論文集, Vol. 57, No. 3, pp. 987–994.
- 16) 金子大悟, 田中健一 (2024): 立ち寄り利用型施設の立地が通過量分布に与える影響, 都市計画論文集, Vol. 59, No. 3, pp. 571–578.
- 17) Tirachini, A. (2015): Probability distribution of walking trips and effects of restricting free pedestrian movement on walking distance, *Transport Policy*, Vol. 37, pp. 101–110.
- 18) 栗田 治 (2024): 歩行による健康効果に着目した都市施設配置モデル—望ましい歩行距離を達成する施設配置と平均死亡率を制御する施設配置—, 都市計画論文集, Vol. 59, No. 3, pp. 1155–1162.
- 19) 副島夕雅, 栗田 治 (2024): 乱横断抑制を目的とした横断歩道配置モデル, 都市計画論文集, Vol. 59, No. 3, pp. 1201–1208.
- 20) 薄井宏行, 樋野公宏 (2018): 総歩行距離と休憩施設の密度基準—東京駅および大手町駅周辺地区を対象に—, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 83, No. 748, pp. 1049–1056.
- 21) Tanaka, K., Miyashiro, R. and Miyamoto, Y. (2016): A bi-objective optimization model for designing safe walking routes for school children, *Geographical Analysis*, Vol. 48, No. 4, pp. 448–464.
- 22) Tresoldi, E., Malucelli, F. and Nonato, M. (2021). A personalized walking bus service requiring optimized route decisions: A real case. *European Journal of Operational Research*, Vol. 289, No. 4, pp. 855–866.
- 23) Oyama, Y., Murakami, S., Chikaraishi, M. and Parady, G. (2024): Designing pedestrian zones within city center networks considering policy objective trade-offs, *Transportation Research Part A*, Vol. 185, No. 4, 104119.
- 24) 鈴木 勉, 三浦英俊 (2016): 都市内の移動経路と流動量密度・交差密度の空間分布, 都市計画論文集, Vol. 51, No. 3, pp. 909–914.

建物用途規制の特例許可を受けて立地した施設の地域特性の類型化

—第一種低層住居専用地域において交通面の影響が課題となった中小規模の施設に着目して—

Classification of Regional Characteristics of Facility Located with Special Permission for Building Use Regulations

- With a Focus on Traffic Influence of Small to Medium-Sized Facilities in Category 1 Low-rise Exclusive Residential Districts -

安藤亮介*・勝又済*

Ryosuke ANDO*, Wataru KATSUMATA*

This study targeted facilities that were located under special permission on proviso of Article 48 of the Building Standards Act. It focused on the regional characteristics around small to medium-sized facilities nationwide that are located in Category 1 low-rise exclusive districts and where the impact on traffic is an issue. The study categorized the location characteristics of the urban environment around the facilities at a wide regional level and presented an image of the urban space. In addition, by analyzing the trends in traffic issues pointed out for each type, reference information was provided for the implementation of deregulation of use regulations.

Keywords: Permission on Proviso Article 48 of the Building Standards Act, Land Use Zones, Regional Characteristics
建築基準法 48 条ただし書許可, 用途地域, 地域特性

1. 研究の背景と目的

コロナ禍を契機とした「新たな日常」への対応が求められる中、郊外住宅市街地における生活利便施設（店舗、医療、福祉、業務等）の立地等、きめ細かい住民ニーズへの対応が重要となっている。さらに、カーボンニュートラルの実現に向けて、既成市街地で増加する空き家等既存ストックを活かしつつ地域の活性化を図ることが喫緊の課題となっている¹⁾。

このような中、住宅地におけるコンビニエンスストアやコワーキングスペース、病院など用途地域で制限されている建物用途の立地ニーズが増加している。これらへの対応は、制度上、特定行政庁が当該施設の立地による周辺市街地への環境影響（交通、騒音、振動、大気汚染等）を事前に審査し、建築基準法第48条ただし書の許可（以下、「特例許可」）を行うことにより可能である。

この特例許可の手続きとして行われる公聴会や建築審査会では、一般的に交通混雑、交通危険に関する意見が多い²⁾。しかし、施設の立地による周辺への影響の定量的評価方法が必ずしも確立されていないため、特定行政庁では、申請者から提出される評価書に対する審査・評価が困難で、その適否の判断に苦慮する場合がある。申請者側も、許可の見通しが立たない状況ではリスクが大きいため申請を見送る傾向にあること等から、許可件数は比較的少なくなっているものと考えられる。生活利便施設等の立地に対する住民ニーズに柔軟に、かつ、きめ細かく対応するためには、特例許可による運用を促進していく必要がある。

こうしたなかで、特例許可を受けた施設（以下、「特例許可施設」）の具体的な立地場所の傾向や、その立地場所に対応した審査の過程で指摘された内容等の情報を事前に把握しておくことは、施設立地に対する地域のニーズに柔軟に

対応し、特例許可の手続きを円滑に進めるあたり重要な情報となる。

また、特例許可の手続きのうち公聴会の開催にあたっては、周辺への影響が想定される範囲の利害関係者に呼びかけが行われるが、その範囲については、許可に係る建築物の敷地の外周およそ 50m（物件によっては 100m）といったミクロな範囲内に土地・建物を所有するものを利害関係者とすることが多い³⁾。しかし、今後増加が見込まれる建物用途の立地ニーズに対応していくにあたっては、無秩序な用途混在を避けるため、目指す都市の将来像に向けた特例許可の計画的な運用の視点も必要と考えられる。その際には、現在、本来制限されている用途がどのような場所で多く許可されているのか、マクロな視点からその地域特性を俯瞰的に把握しておく必要がある。

そこで本研究では、審査の過程で課題となることが多い交通面の影響が課題となった特例許可案件に着目し、許可件数が最も多い用途地域である第一種低層住居専用地域（以下、「一低専」）において立地している、全国の中小規模の特例許可施設周辺の地域特性に焦点を当てる。特例許可施設の立地場所周辺の都市環境について、比較的広域な地域レベルで立地特性を類型化し、どのような場所で特例許可施設が多いかを具体的な空間像とともに示すことで、今後の特例許可の計画的な運用に資する情報を提供する。また、その類型ごとに指摘された交通面の課題の傾向を分析することで、建物用途規制の特例許可の運用に当たっての参考情報を示すことを目的とする。

2. 既存研究と本研究の位置付け

建物用途規制の緩和の運用実態については、国土技術政策総合研究所²⁾が全国の特定行政庁における許可基準や用

*正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所都市研究部

(National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism)

途地域別の許可件数、施設種別、建築審査会等での指摘や意見、具体的な事例等を網羅的に整理している。この研究から、建築審査会等での意見は交通面に関するものが多いことや、特例許可のニーズが高い用途は一低専であることがわかっている。しかし、指定用途地域以外の具体的な周辺地域の情報や空間像までは整理されていない。

特定の施設用途が、周辺の住環境や住民意識に与える影響を分析したものとして、コンビニエンスストアの立地が周辺の住環境に与える影響について分析した見角ら³⁾や、深夜営業型大型小売店舗の出店による住民意識への影響について分析した平井ら⁴⁾の研究がある。自治体の施策に着目したものとしては、東京 23 区におけるワンルームマンションの建設や管理をめぐる周辺影響の問題とそれに対する施策の変遷の特徴を分析した木下ら⁵⁾の研究がある。また、用途混在に対する居住者の心理的評価を分析した石川ら⁶⁾の研究、用途がもたらす外部性の特性とそれに付随して発生する紛争とその調整状況について分析した有留ら⁷⁾の研究がある。これらの研究は、いずれも全国的な立地場所の傾向や施設周辺の具体的な地域特性、及びそれらに関連した課題の傾向について分析したものではない。

以上のことから、本研究の特長を以下に整理する。

- 1) 全国の特定行政庁において特例許可を受けて住居系用途地域に立地した施設のうち、審査の過程で交通面の影響が課題となった中小規模の施設を全数把握している。
- 2) 一低専に立地している施設について、指定用途地域以外の周辺都市環境の情報を分析し、類型化することで、具体的な立地場所のパターンと空間像を明らかにしている。
- 3) 立地場所の類型ごとに、審査の過程で指摘された交通課題を分析しており、地域特性に応じて特例許可において配慮すべき事項に関する情報を提示している。

3. 特例許可の実態調査

建築審査会等、特例許可の審査の過程で出された意見の傾向については、既存研究²⁾により実態調査が実施されている。この既存研究の資料をもとに、建築審査会及び公聴会において出された課題種別ごとに意見数割合を本研究において再整理した結果を表-1に示す。この結果より、交通面の課題が31.0%を占めており、最も大きな割合となっていることが確認できる。よって、本研究では交通面の影響が課題となった特例許可案件に着目する。

全国の特例許可施設のうち、審査の過程で交通面の影響が課題となった施設の具体的な立地場所や施設用途、及びその課題の具体的な内容を把握するため、全国の特定行政庁を対象に実態調査を実施した。調査概要を表-2に示す。

「調査対象案件」の設定にあたって、①については、比較的情報が新しいものを対象とするため、全国の総数が把握できている直近5年間（平成30年度～令和4年度）の案件とした。②については、昨今の住居系用途地域での施設立地のニーズ⁸⁾を踏まえるとともに、既存文献²⁾においてはどの住居系用途地域で交通面の課題が多いかは示されて

いないため、広く住居系用途地域と設定した。③については、現状で住居系用途地域に立地する特例許可施設は中小規模のものが多いこと²⁾や、今後も中小規模の施設立地の増加が想定されること⁸⁾から、大規模小売店舗立地法に該当しない1,000m²以下の施設とした。最後に④として、これらの条件に該当し、さらに審査の過程で交通面の影響が課題となった案件を調査対象として、特定行政庁へ確認と資料の提出を依頼した。各条件に該当する案件数について、国土交通省により集計・公表されている建築基準法施行状況調査⁹⁾を参照し、整理したものを表-3に示す。全ての特定行政庁から該当の有無について回答があり、79件の該当案件に関する資料を収集した。

表-1 建築審査会及び公聴会における意見数

課題の種類	割合
交通面の課題（交通騒音、交通混雑、交通危険）	31.0%
騒音（交通騒音以外）	22.8%
照明・光	4.6%
振動	3.3%
大気汚染	1.6%
臭気	5.9%
火災・爆発	2.2%
その他	28.6%

※参考文献2)をもとに作成

(N=1795)

表-2 実態調査の概要

調査対象団体	東京特別区以外の限定特定行政庁を除く全特定行政庁 307団体
調査期間	令和6年5月30日～令和6年6月28日
調査媒体	電子メールによる配信・回収
調査対象案件	下記の全ての条件に該当する特例許可案件 ①. 平成30年度～令和4年度の期間に建築基準法第48条ただし書に基づく許可を受けた案件 ②. 対象施設について、住居系用途地域 ^{*1} に敷地の一部でも立地する案件 ③. 対象施設の延べ床面積が1,000m ² 以下の案件 ④. 審査の過程で交通面の影響 ^{*2} が課題となった案件 ※1. 第一種・第二種低層住居専用地域、第一種・第二種中高層住居専用地域、第一種・第二種住居地域、準住居地域 ※2. 当該建築物の出入り交通に起因する、騒音、振動、交通安全、交通負荷、駐車アイドリング、ヘッドライト、排気ガス、不特定多数の往来等
収集資料	① 許可の概要が分かる書類（住所、施設用途等） ② 事前相談に係る書類及び議事録 ③ 公開による意見聴取に係る書類及び議事録 ④ 建築審査会に係る書類及び議事録（建築審査会同意を要する場合） ⑤ 申請者から提出された交通面の影響に関する評価書
回答率	100%（該当なしを含む）

表-3 調査対象案件の該当件数

分類	該当件数
H30-R4許可案件総数	1096 件
住居系用途地域に立地	886 件
敷地面積1,000m ² 以下	528 件
審査の過程で交通面の影響が課題となった案件（調査結果）	79 件

4. 調査結果の基礎集計

最初に、住居系用途地域全体の傾向を把握するため、基礎集計を行う。調査によって収集した特例許可案件の用途種別・用途地域別の特例許可件数を表-4に示す。許可件数としては、コンビニエンスストアが最も多く、立地場所の用途地域として一低専に集中していることがわかる。また、コンビニエンスストア以外の用途種別としては、調剤薬局やコインランドリーといった店舗系用途、自動車修理工場、事務所が多いことがわかる。立地場所の用途地域は、全体として一低専が51件と突出して多くなっている。

次に、各特例許可案件について、審査の過程で課題となった交通面の影響の具体的な内容について、事前相談、公開による意見聴取、建築審査会の議事録から読み取り、その意見数⁹⁾を集計した。集計にあたっては、意見の内容を10種類に分類した。下記に分類の種別と意見の例を示す。

- ・混雑：施設への出入りや路上駐車等に伴う渋滞発生への対応要望 等
- ・交通騒音：来客による騒音、夜間配送による騒音への対応要望 等
- ・交通振動：大型車の出入りによる周囲の振動への対応要望 等

- ・駐車アイドリング：夜間にエンジンをつけたまま睡眠等を行っている状況への対応要望 等
- ・ヘッドライト：自動車のヘッドライトが隣接している民家へ入るため、光を透過しない塀の設置の要望 等
- ・排気ガス：住宅付近での前向き駐車への対応要望 等
- ・不特定多数の往来：空地や通路がたまり場になることや通り抜け通行への対応要望 等
- ・交通事故（対自動車）：車両出入り口の場所への配慮、見通しの悪さへの配慮要望 等
- ・交通事故（対歩行者・自転車）：前面道路が通学路となっていることに起因する歩行者への安全対策要望 等
- ・詳細不明：調査への回答はあったが、具体的な課題の内容が判断できる資料がなかったもの。

資料から読み取った交通面の影響に関する許可件数あたりの意見数の平均値を、用途地域別に集計したものを表-5に示す。この結果より、全体的に「混雑」「交通事故（対自動車）（対歩行者・自転車）」に関する意見が多いことがわかる。また、一低専では、他の用途地域では意見が出ていない「交通振動」「ヘッドライト」「排気ガス」を含む全ての項目で意見が出ており、広範囲な対策が求められる可能性があると言える。第二種低層住居専用地域では、「交通

表-4 用途種別・用途地域別の特例許可件数

用途種別	第一種低層住居専用地域	第二種低層住居専用地域	第一種中高層住居専用地域	第一種住居地域	第二種住居地域	準住居地域	総計
店舗(コンビニエンスストア)	20	1	-	-	-	-	21
店舗(調剤薬局)	6	-	-	-	-	-	6
店舗(コインランドリー)	1	1	2	-	-	-	4
店舗(スーパー・菓子店)	1	1	1	-	-	-	3
自動車修理工場	1	-	1	3	5	1	11
自動車車庫	-	-	-	1	-	-	1
事務所	6	-	3	1	-	-	10
都市公園施設	2	-	-	-	-	-	2
保養所	3	-	-	-	-	-	3
学習塾	2	-	-	-	-	-	2
集会所	2	-	-	-	-	-	2
農業用倉庫	-	-	2	-	-	-	2
その他	7	1	3	1	-	-	12
総計	51	4	12	6	5	1	79

※特例許可施設の敷地が複数の用途地域に跨る場合は、過半を占める用途地域に分類

表-5 用途地域別の交通面の影響に関する意見数の平均値

交通課題	用途地域	混雑	交通騒音	交通振動	駐車アイドリング	ヘッドライト	排気ガス	不特定多数の往来	交通事故(対自動車)	交通事故(対歩行者・自転車)	詳細不明	許可件数
第一種低層住居専用地域		1.02	0.31	0.02	0.12	0.06	0.02	0.29	0.65	0.43	0.25	51
第二種低層住居専用地域		0.67	0.67	-	0.33	-	-	0.67	1.67	1.00	0.33	3
第一種中高層住居専用地域		0.46	0.23	-	0.08	-	-	0.23	0.54	0.54	0.31	13
第一種住居地域		0.67	-	-	-	-	-	-	0.17	0.83	0.17	6
第二種住居地域		0.60	-	-	-	-	-	-	0.80	0.20	0.40	5
準住居地域		-	-	-	-	-	-	-	1.00	-	-	1
総計		0.85	0.27	0.01	0.10	0.04	0.01	0.25	0.65	0.48	0.27	79

※特例許可施設の敷地が複数の用途地域に跨る場合は、過半を占める用途地域に分類

事故（対自動車）（対歩行者・自転車）」が多くなっている。

次に、用途種別に交通面の影響に関する意見数の平均値を集計したものを表-6 に示す。コンビニエンスストアに対しては、全ての分類において交通面の影響に関する意見が出されており、特に「交通事故（対自動車）（対歩行者・自転車）」、「混雑」に関するものが多い。表-4 からそのほとんどが一低専に立地していることも関係していると考えられる。調剤薬局やコインランドリー等の店舗系施設、自動車修理工場や自動車車庫、学習塾については「混雑」や「交通事故（対自動車）（対歩行者・自転車）」に関する意見が多く出されていることがわかる。具体的には、店舗系施設においては来客による交通、自動車修理工場や自動車車庫においては自動車の出入りによる交通、学習塾においては送迎による交通や駐車に対する意見が見られた。

5. 特例許可施設の立地場所の類型化

基礎集計の結果から、交通面の影響が課題となった特例許可件数が多い住居系用途地域は一低専であることが明らかになった。以降は、敷地の過半が一低専に指定されている 51 施設を対象に、立地場所周辺の地域特性について分析する。同じ一低専でも、街区レベルよりもマクロな範囲で見た場合、その周辺の地域特性は異なっているため、その類型化を試みる。

特例許可施設の立地場所周辺の地域特性を説明する変数として、交通、施設立地、人口、指定用途地域（土地利用）に関する変数を収集した（表-7）。施設や人口、指定用途地域等の集計範囲については、特例許可施設からの集客範囲と考えられる徒歩圏域 1km を基本として、500m や 2km、3km 圏域も検討し、最も主成分に寄与したものを採用した⁹⁾。これらの地域特性の説明変数を集約するため、主成分分析を行った。その結果から固有値が 1.0 を超える 4 つの主成分により、累積寄与率 72.39%の説明力が得られた。ま

た、成分行列の内容から、各主成分軸について解釈を行い命名した（表-7）。主成分 1 については、鉄道駅からの距離が小さい（近い）ことに加え、施設や人口が多く、住居・商業系地域割合も高いため「都市機能・人口集積軸」とした。主成分 2 については、鉄道駅からの距離が大きい（遠い）一方で、国道からの距離が小さく、住居専用系地域割合のみが低い「国道近郊用途混在軸」とした。主成分 3 については、国道からの距離が大きく、用途未指定地域割合が高い「用途地域縁辺地域軸」とした。工業系地域割合が低くなっているが、これは国道からの距離が遠く、交通利便性が低いためと考えられる。主成分 4 については、鉄道駅からの距離が大きい一方で国道からの距離が小さく、小学校が 500m 圏内に存在する傾向があり住居専用系地域割合が高い「小学校近郊住宅専用地域軸」とした。

次に、特例許可施設ごとの主成分得点を用いて、立地場所周辺の地域特性を類型化するため、クラスター分析を行った。クラスター分析の手法として階層型クラスター分析を採用し、クラスター間の距離計算方法にはウォード法を使用している。距離尺度としては、平方ユークリッド距離を用いている。また、クラスター数はデンドログラムによって判断した⁹⁾。その結果を表-8 に示す。あわせて、各類型において都市機能・人口集積軸が中央値である立地場所の空間像を図-1 に示す。なお、特例許可施設から約 1km の範囲を示しており、特例許可施設の具体的な位置については特定できないよう図示していない。各類型における考察を下記に整理する。

- 1) クラスター1 は、都市機能・人口集積軸が非常に高い値を示しており、「都市中心部・商業地域近郊エリア」と考えられる。図-1-①では、近郊に鉄道駅およびその周辺の近隣商業地域があり、集合住宅も多いことが見て取れる。
- 2) クラスター2 は、都市機能・人口集積軸、国道近郊用途混在軸の値が比較的高く、用途地域縁辺地域軸の値が低い

表-6 用途種別の交通面の影響に関する意見数の平均値

施設用途	混雑	交通騒音	交通振動	駐車アイドリング	ヘッドライト	排気ガス	不特定多数の往来	交通事故（対自動車）	交通事故（対歩行者・自転車）	詳細不明	許可件数
店舗（コンビニエンスストア）	0.86	0.67	0.05	0.19	0.10	0.05	0.48	1.00	0.71	0.14	21
店舗（調剤薬局）	2.00	0.17	-	-	0.17	-	0.67	0.33	0.33	0.17	6
店舗（コインランドリー）	1.00	0.50	-	0.50	-	-	0.25	1.50	0.25	0.25	4
店舗（スーパー・菓子店）	0.67	0.33	-	-	-	-	-	1.00	1.00	-	3
自動車修理工場	0.45	0.09	-	-	-	-	-	0.73	0.27	0.27	11
自動車車庫	1.00	-	-	-	-	-	-	1.00	2.00	-	1
事務所	0.70	0.10	-	-	-	-	0.20	-	-	0.40	10
都市公園施設	2.00	-	-	-	-	-	-	-	-	0.50	2
保養所	0.33	-	-	-	-	-	-	0.33	-	0.67	3
学習塾	3.00	0.50	-	1.00	-	-	-	2.00	2.00	-	2
集会所	0.50	-	-	-	-	-	-	-	-	0.50	2
農業用倉庫	0.50	-	-	-	-	-	0.50	0.50	-	-	2
その他	0.42	-	-	-	-	-	0.17	0.33	0.67	0.42	12
総計	0.85	0.27	0.01	0.10	0.04	0.01	0.25	0.65	0.48	0.27	79

※特例許可施設の敷地が複数の用途地域に跨る場合は、過半を占める用途地域に分類

ことから、道路交通の利便性が比較的高くある程度人口や都市機能が集積していると考えられるため、「ある程度人口・都市機能が集積した生活利便性が高いエリア」とした。図-1-②では、低層住宅専用地域が中心となりつつ、近郊に近隣商業地域が分布していることがわかる。

- 3) クラスター3 は、小学校近郊住宅専用地域軸で比較的高い値を示し、国道近郊用途混在軸で低い値を示している。また、都市機能・人口集積軸が他と比較して中程度であることから、「まとまった人口を有する住宅中心のエリア」と判断できる。図-1-③では一低専の他に第一種中高層住居専用地域の面積が多く、集合住宅が多く立地していることがわかる。
- 4) クラスター4 は、小学校近郊住宅専用地域軸で高い値を示しており、図-1-④では、郊外開発住宅地であることが

わかる。また、小学校などの都市機能がある地域の中心部に位置していることから、「郊外低層住宅地中心部」と判断した。

- 5) クラスター5 は、用途地域縁辺地域軸が高い値、都市機能・人口集中軸が低い値を示していることから、「郊外住宅地縁辺部」とした。図-1-⑤から、クラスター4 とはことなり、郊外住宅地でも用途地域指定地域と用途未指定地域の境界付近となっていることがわかる。

6. 立地場所の類型ごとの課題分析

各類型において指摘された交通面の課題の傾向を分析する。各類型における交通面の影響に関する意見の内容ごとに許可件数あたりの意見数の平均値を集計したものを表-9 に示す。また、全体としてコンビニエンスストアの許

表-7 主成分分析に用いる変数と分析による成分行列

主成分及び詳細 説明変数	主成分				データ出典	備考
	1 都市機能・人口集積軸	2 国道近郊用途混在軸	3 用途地域縁辺地域軸	4 小学校近郊住宅専用地域軸		
最寄り鉄道駅からの距離(km)	-0.3277	0.4285	0.1620	0.3780	国土数値情報(鉄道2023年度版)	対象施設から最寄りの鉄道駅までの直線距離を計測
最寄り国道からの距離(km)	0.0246	-0.5518	0.5222	-0.3086	地理院地図(2025.2月時点)	対象施設から最寄りの国道までの直線距離を計測
施設周辺の日用品買い物施設数(軒)	0.8477	0.0591	0.2193	0.0305	RESAS事業所立地分析(2024年)	対象施設から半径1km圏内の「デパート・スーパー・ディスカウントショップ」「コンビニエンスストア」「食料品・嗜好品」の事業所数を集計
施設周辺の小売業売場面積(千㎡)	0.7721	0.0723	0.1614	-0.1366	商業統計(H26)500mメッシュデータ	対象施設から半径1km圏内の数値を集計。メッシュが境界を跨る場合、面積案分にて補正
施設周辺の夜間人口(人)	0.8675	-0.0354	0.1797	0.1603	国勢調査(R2)500mメッシュデータ	
施設周辺の従業人口(人)	0.8760	0.1780	0.1698	0.0381	経済センサス-基礎調査(H26)500mメッシュデータ	
施設周辺の小学校の有無	0.2665	0.4518	0.0629	0.6071	国土数値情報(学校2023年度版)	対象施設から半径500m圏内の有無を判定し、ダミー変数として使用
施設周辺の用途未指定地域割合(%)	-0.7168	0.3847	0.4989	-0.1153	国土数値情報(用途地域2019年度版)	対象施設から半径1km圏内の指定用途地域の面積割合を計測 住居専用系:第一種・第二種低層・中高層住居専用地域 住居系:第一種・第二種住居地域、準住居地域 商業系:近隣商業地域、商業地域 工業系:準工業地域、工業地域、工業専用地域
施設周辺の住居専用系地域割合(%)	0.4380	-0.7100	-0.3782	0.3690		
施設周辺の住居系地域割合(%)	0.5280	0.4125	-0.2667	-0.3492		
施設周辺の商業系地域割合(%)	0.7650	0.2301	0.0838	-0.2437		
施設周辺の工業系地域割合(%)	-0.0128	0.3574	-0.6377	-0.2606		
固有値	4.584	1.737	1.315	1.052	※	:0.3以上 : -0.3以下
寄与率	38.20%	14.47%	10.96%	8.77%		
累積寄与率	38.20%	52.67%	63.63%	72.39%		

表-8 類型別主成分得点中央値

主成分 クラスター		N	都市機能・人口集積軸	国道近郊用途混在軸	用途地域縁辺地域軸	小学校近郊住宅専用地域軸	主な施設の用途 ()内は施設数
1	都市中心部・商業地域近郊エリア	6	4.149	0.999	0.734	-0.023	コンビニエンスストア(2) 薬局(2) 事務所(1) 集会所(1)
2	ある程度人口・都市機能が集積した生活利便性が高いエリア	9	0.337	0.490	-0.842	-0.840	コンビニエンスストア(2) 薬局・スーパーマーケット(2) その他(5)
3	まとまった人口を有する住宅中心のエリア	17	-0.012	-1.270	-0.525	0.415	コンビニエンスストア(7) 事務所(2) 都市公園施設(2) その他(6)
4	郊外住宅地中心部	13	-1.053	0.386	0.352	0.824	コンビニエンスストア(5) 薬局・コインランドリー(2) その他(6)
5	郊外住宅地縁辺部	6	-2.265	0.366	1.275	-1.032	コンビニエンスストア(4) 事務所(2)

※ :0.4以上 : -1.0以下

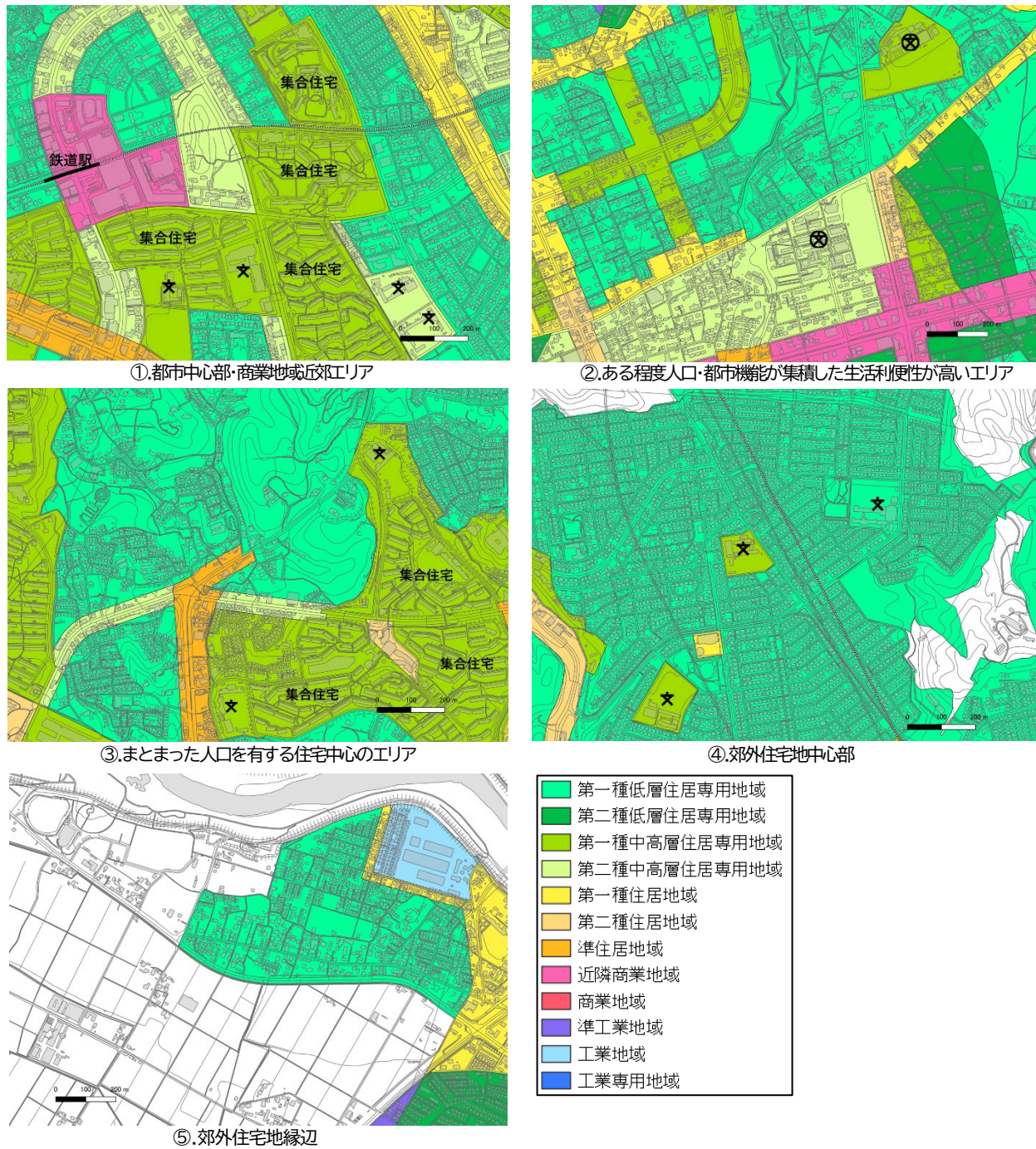


図-1 各類型における典型的な地域イメージ

可件数が多いことから、コンビニエンスストアのみに対する意見数の平均値を集計したものを表-10 に、コンビニエンスストア以外の施設に対する意見数の平均値を集計したものを表-11 に示す。この結果から、特例許可にあたって配慮すべき観点についての考察を以下に示す。

1) 表-9、10、11 より全体に共通した傾向として、平均総意見数がクラスター1、2で多く、クラスター3、4では少ないことがわかる。クラスター1、2については、商業施設や交通量の集中により、意見数が多くなっていると考えられる。また、クラスター3、4では、住宅以外の都市機

能が少ないことや住民の高齢化等の理由から、コンビニエンスストアや郵便局等について立地計画そのものに対する抵抗が少ないことが公聴会や建築審査会の議事録から読みとることができた。

2) クラスター1 では、表-9 より全体として混雑の意見数が多く、表-10 よりコンビニエンスストアでは交通騒音や交通事故（対自動車）も多くなっているが、個別の詳細を確認したところ特定の施設に意見数が偏っておりクラスター共通の課題は確認できなかった。クラスター1 では共通的な課題があるというよりも、人口が集積してい

表-9 類型別交通面の影響に関する平均意見数（全体）

クラスター	交通課題	N	混雑	交通騒音	交通振動	駐車アイドリング	ヘッドライト	排気ガス	不特定多数の往来	交通事故（対自動車）	交通事故（対歩行者・自転車）	詳細不明	平均総意見数	合計意見数
1	都市中心部・商業地域近郊エリア	6	2.33	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67	0.67	0.33	0.17	4.83	29
2	ある程度人口・都市機能が集積した生活利便性が高い住宅エリア	9	1.44	0.56	0.00	0.33	0.00	0.00	0.33	1.33	0.67	0.22	4.89	44
3	まとまった人口を有する住宅中心のエリア	17	0.88	0.24	0.00	0.06	0.06	0.06	0.12	0.59	0.24	0.24	2.47	42
4	郊外住宅地中心部	13	0.46	0.08	0.00	0.15	0.08	0.00	0.23	0.23	0.31	0.38	1.92	25
5	郊外住宅地縁辺部	6	0.67	0.33	0.17	0.00	0.17	0.00	0.50	0.67	1.00	0.17	3.67	22

表-10 類型別交通面の影響に関する平均意見数（コンビニエンスストア）

クラスター	交通課題	N	混雑	交通騒音	交通振動	駐車アイドリング	ヘッドライト	排気ガス	不特定多数の往来	交通事故（対自動車）	交通事故（対歩行者・自転車）	詳細不明	平均総意見数	合計意見数
1	都市中心部・商業地域近郊エリア	2	1.50	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	2.00	1.00	0.00	7.50	15
2	ある程度人口・都市機能が集積した生活利便性が高い住宅エリア	2	2.00	1.50	0.00	0.50	0.00	0.00	0.50	2.00	0.50	0.00	7.00	14
3	まとまった人口を有する住宅中心のエリア	7	0.71	0.57	0.00	0.14	0.14	0.14	0.29	0.86	0.43	0.00	3.29	23
4	郊外住宅地中心部	5	0.20	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.20	0.20	0.20	0.60	1.60	8
5	郊外住宅地縁辺部	4	1.00	0.50	0.25	0.00	0.25	0.00	0.50	1.00	1.50	0.00	5.00	20

表-11 類型別交通面の影響に関する平均意見数（コンビニエンスストア以外）

クラスター	交通課題	N	混雑	交通騒音	交通振動	駐車アイドリング	ヘッドライト	排気ガス	不特定多数の往来	交通事故（対自動車）	交通事故（対歩行者・自転車）	詳細不明	平均総意見数	合計意見数
1	都市中心部・商業地域近郊エリア	4	2.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.25	3.50	14
2	ある程度人口・都市機能が集積した生活利便性が高い住宅エリア	7	1.29	0.29	0.00	0.29	0.00	0.00	0.29	1.14	0.71	0.29	4.29	30
3	まとまった人口を有する住宅中心のエリア	10	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.10	0.40	1.90	19
4	郊外住宅地中心部	8	0.63	0.13	0.00	0.13	0.13	0.00	0.25	0.25	0.38	0.25	2.13	17
5	郊外住宅地縁辺部	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.50	1.00	2

ることから、課題が指摘された場合にその課題数が多くなる傾向があると考えられる。

- 3) クラスター2 では、表-9 より混雑や交通事故（対自動車）に関する指摘が全体として多い。また、交通事故（対歩行者・自転車）、交通騒音も比較的意見が多いことがわかる。
- 4) クラスター3 については、表-9 より全体として混雑が課題となっており、表-10 から交通騒音、交通事故（対自動車、対歩行者・自転車）はコンビニエンスストアで課題となる傾向が強いことがわかる。
- 5) クラスター4 では、表-9 より全体として意見数が少ないが、表-11 からクラスター内ではコンビニエンスストア以外の施設で、混雑、交通事故（対歩行者・自転車）が比較的多くなっている。コンビニエンスストアでは、共通して意見が出されている項目は確認できなかった。
- 6) クラスター5 では、表-10 よりコンビニエンスストアで、混雑、交通事故（対自動車、対歩行者・自転車）が課題となっていることがわかる。コンビニエンスストア以外では共通する課題は見られなかった。

7. まとめと今後の課題

本研究では、交通面の影響が課題となった特例許可案件に着目し、一低専において立地している中小規模の施設を

対象に、立地場所周辺の都市環境の類型化を行った。また、類型ごとに指摘された交通面の課題の傾向を分析し、類型ごとに配慮すべき事項について整理した。

分析の結果、特例許可を受けて立地している施設周辺の地域特性を5つに類型化することができた。また、各類型における具体的な空間像の例を示した。これにより、これまで特例許可施設の立地場所については、指定用途地域に関する情報のみであったが、より具体的な立地場所の傾向を示すことができた。地方公共団体のなかには、土地利用の方針において、目指す都市像を実現するツールとして建築基準法 48 条ただし書許可を位置付け、計画的な運用を行っている事例もあり¹⁰⁾、そういった方針を検討する際に、本研究の成果が参考となると考えられる。また、審査の過程で出された交通面の影響に対する意見について、施設立地場所の類型ごとにその傾向が異なることが明らかになった。施設の立地を計画する場合や特例許可を検討する場合には、配慮すべき事項の違いについて留意する必要があることがわかった。

今後の課題として、以下があげられる。

- 1) 本研究では交通面の影響が課題となった特例許可案件について把握したが、課題とならなかった案件については把握できていない。課題とならなかった案件との違いが、どのような要因で発生しているかが明らかになれば、特

例許可の計画的な運用にあたって、より有用な情報となると考えられる。

- 2) 交通面の影響に関する意見について、今回は数をカウントしているが、対応の困難さといった意見の重みについては考慮していない。また、今回の収集された特例許可案件は、あくまで審査の過程で交通面の影響が課題となったものであり、実際に立地した後にその課題が顕在化したかは把握できていない。この点については特定行政庁へ調査を行ったが、やはり追跡調査までは行っておらず、施設側でしかわからないという回答であった。施設側と連携し、意見の重みや実際に立地した後の課題について実態を明らかにしていく必要がある。
- 3) 今回収集した一低専における特例許可案件については、コンビニエンスストアが多かったが、他の用途種別について引き続き事例を収集・蓄積し、課題や立地特性の傾向を継続的に分析していく必要がある。

<謝辞>

特例許可の実態調査の実施にあたっては、全国の特定行政庁の担当者の方々に資料提出についてご協力いただいた。記して、謝意を申し上げる。

【補注】

- (1) 課題数のカウント方法として、課題として挙げられた事象の数をカウントするものとし、同じ発言者が同様の事象に関し複数回発言した場合や、同様の事象に関し複数人が発言した場合のいずれも、課題数としては「1」としてカウントしている。
- (2) 表-7の他に検討した変数候補としては以下のとおり（（ ）内はデータ出典）。最寄りバス停からの距離（国土数値情報）、前道路車線数（Google map）、施設周辺道路延長（Open street map）、第3次産業従業人口（経済センサス活動調査 H28）、就業人口（国勢調査 R2）、幼稚園・保育園の有無（国土数値情報）、周辺施設の小売業年間販売額（商業統計 H26）
- (3) クラスタ分析のデンドログラムは図-A のとおり。

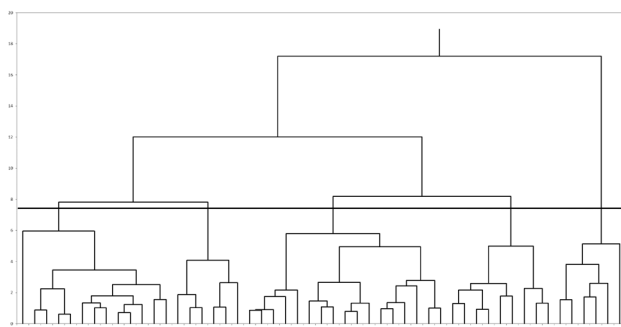


図-A デンドログラム

【参考文献】

- 1) 国土交通省：住生活基本計画（全国計画），https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/jutakukentiku_house_tk2_000032.html，令和3年3月

- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所(2020)：建物用途規制緩和の運用実態とその解説，国土技術政策総合研究所資料 No.1123.
- 3) 見角一郎，中出文平(1995)：住居系地域へのコンビニエンスストア立地が周辺住環境に与える影響に関する研究，都市計画論文集，No.30，pp.163-168
- 4) 平井亮雄，後藤春彦，佐久間康富，上原佑貴(2005)：「深夜営業大型小売店」への住民意識とその要因について－東京都西東京市における店舗立地を事例として－，日本建築学会計画系論文集，No.587，pp.97-104.
- 5) 木下龍二，大月敏雄，深見かまり(2008)：東京都23区にみるワンルームマンション問題と対応施策の変遷に関する研究，日本建築学会計画系論文集，Vol.73，No.624，pp.263-270.
- 6) 石川徹，浅見泰司(2017)：居住環境と利便性を考慮した住宅地への用途混在に対する居住者の評価，都市計画論文集，Vol.52，No.3，pp.1298-1303.
- 7) 有留健太郎，有田智一，藤井さやか，大村謙二郎(2010)：現行の用途規制制度下における用途に起因する紛争の発生要因と対策に関する実態と課題－用途に係る請願・陳情に着目して－，都市計画論文集，No.45-3，pp.709-714.
- 8) 国土交通省：建築物の用途制限等に係るまちづくり手法の柔軟な運用について（技術的助言），chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.mlit.go.jp/toshi/city_plan/content/001412246.pdf，令和3年6月
- 9) 国土交通省：建築基準法施行状況調査，https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/jutakukentiku_house_tk5_000006.html，最終閲覧2025.3.30.
- 10) 町田市：町田市土地利用に関する基本方針及び制度活用の方策，https://www.city.machida.tokyo.jp/kurashi/sumai/toshikei/toshikeikaku/machidasi_tochiriyoukihonhoushin.html，最終閲覧2025.3.30
- 11) 島崎勉(1992)：工場の実態から見た建物用途規制別表の分析と評価，都市計画論文集，No.27，pp.103-108.
- 12) 石川徹，浅見泰司(2013)：都市における用途混在および形態規制に対する居住者の意識と評価－嫌悪要因解消の効果と性能規定の可能性についての考察－，都市計画論文集，Vol.48，No.1，pp.1-8.

制限ボルツマンマシンを用いた day-to-day の動的相互作用の交通配分モデリング

Day-to-day Traffic Assignment Model with Dynamic Multimodal Interaction Using Restricted Boltzmann Machine

小川 大智*, 羽藤 英二**
Daichi OGAWA*, Eiji HATO**

The road space reallocation is one of the important topics to achieve the high utility for multiple transportation modes. The route choice model based on utility theory provides a criterion to assess the performance of the network, and the traffic assignment methods are helpful to discuss the flow capacity of the network. There are methodologies to obtain the equilibrium state in a congested network, but, in the multimodal network, the asymmetric interaction among transportation modes can result in multiple equilibria and existing estimation and simulation methods are not necessarily applicable. In this study, we propose a day-to-day assignment method invoked from Restricted Boltzmann Machine (RBM), and computational feasibility is indicated.

Keywords: Multimodal network, Traffic assignment, Markov game, Day-to-day, Restricted Boltzmann Machine

複数交通手段, 交通量配分, マルコフゲーム, 動的モデル, 制限ボルツマンマシン

1. はじめに

複数交通手段の結節する交通拠点空間やその周辺の街路空間では、複数交通手段に対する道路空間の配分が重要である。例えば、歩道は混雑している一方で車道は空いている、あるいは逆の状況では空間の再配分により他の交通手段の効用を犠牲にせずにある交通手段の効用を高めることができると考えられる。交通容量の評価手法として、均衡配分をはじめとする交通量配分アルゴリズムを用いることにより、与えられた交通容量のもとで利用者間の均衡状態を求めることができ、ネットワークのボトルネックの解析などが可能である。

しかし、歩行者や車が比較的接近しているようなネットワークでは、それぞれの交通手段の混雑が同一交通手段の一般化費用あるいは効用に影響を与えるだけでなく、隣接する交通手段にも影響を与える可能性がある。自動車交通の均衡配分ではリンクパフォーマンス関数としてBPR関数¹⁾がよく使われるが、歩行者交通量が自動車の一般化費用に与える影響やその逆は一般的には明らかになっていない。例えば、商店街のように空間的に歩行者が広がっている場所では車両は大きな負の相互作用を受けるはずである。複数の交通手段の間の相互作用を定量的に求めることで、負の相互作用が大きい場所から相互作用が小さい場所へ交通量を再配分するような問題が立式可能となる。

複数交通手段の交通量と一般化費用の関係を考えるにあたり、行動モデル的な視点に立てば、交通量を説明変数の一つとした経路選択モデルが考えられる²⁾³⁾。通常、交通量配分では等時間原則を仮定することが多いが、非対称な関係を持つ複数の交通手段が存在する場合には解の一意性が保証されないことや⁴⁾、歩行者のように旅行速度にばらつきが大きい場合には必ずしも等時間原則が成り立たな

いことが課題として考えられる⁵⁾。

また、複数交通手段が存在する場合には、交通状態が均衡状態に至る動的な過程を考えると、必ずしも一点の静的な均衡状態に収束しない可能性がある⁷⁾。観測されたデータが複数の選択確率、あるいは配分交通量の元で生成された可能性を考慮しつつ、推定やシミュレーションを行う必要がある。しかし、非対称な相互作用の存在下ではday-to-day 動学におけるポテンシャル関数を一般的には構成することができず、解の定性的な解析が困難である⁸⁾。

上記の課題に対応するため、本研究では、非集計の効用理論に基づきつつも、均衡状態の動学的な安定性や非一意性を解釈可能な day-to-day のモデルを提案する。具体的な適用対象としては、複数交通手段のサンプリングされた経路選択行動を観測した上で、配分交通量と配分交通量を説明変数に含む経路選択モデルを同時に推定することを目的とする。本研究では day-to-day の経路選択行動を扱うが、経路選択確率と配分交通量の関係の複雑さや、day-to-day の行動の変化を考える上で初期の配分交通量を求めることができないという問題に対処するため、制限ボルツマンマシン (RBM) ⁹⁾を援用した経路選択モデルを考える。これにより、同一タイムステップでの均衡状態の一意性を保証しつつ、未知変数を考慮した動学が定式化できる。本研究では、提案モデルの推定の安定性および推論過程において得られる情報を確かめるため、簡単なネットワークを用いて数値実験を行った。本研究で提案するモデル推定のフレームワークの概要を図-1に示す。図-1では観測である軌跡データ τ 、それを可視層として本研究がRBMMに基づき定式化を行う経路選択モデル(3.2節)、モデルの経路選択確率から計算される配分交通量(3.3節)の関係を表している。第 t 日目の観測 $\tau^{(t)}$ が各交通手段の経路選択の軌跡データ $\tau^{(t)}$

* 学生会員 東京大学大学院 工学系研究科 (The University of Tokyo)

** 正会員 東京大学大学院 工学系研究科 (The University of Tokyo)

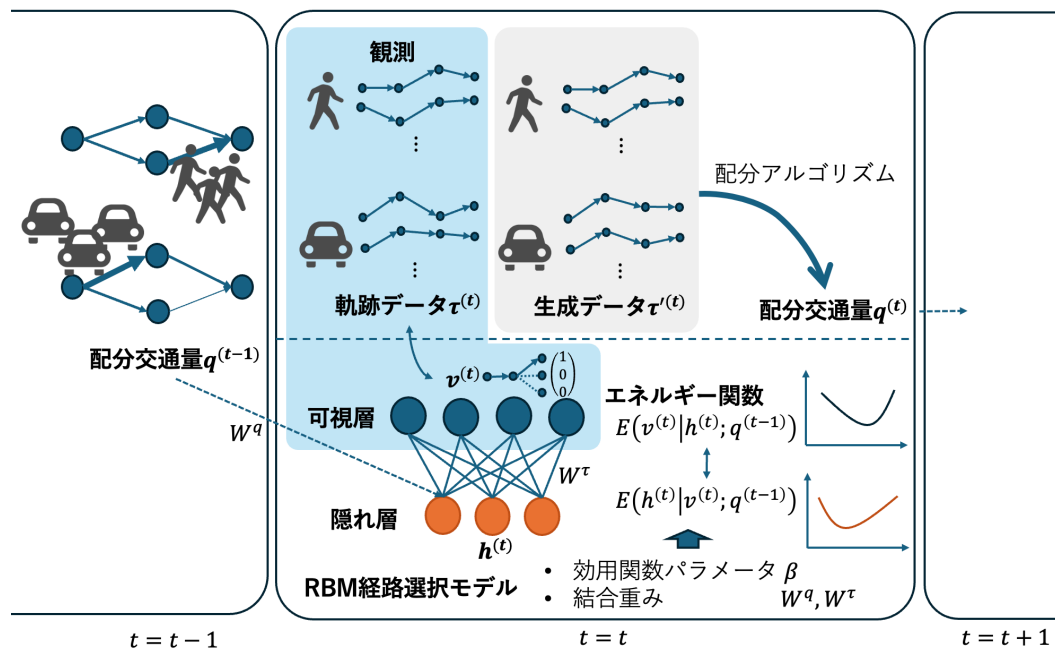


図-1 RBMを用いて複数交通手段の配分モデル推定の概要

を整形することで与えられ、RBMに基づく経路選択モデルは第 $t-1$ 日目の配分交通量 $q^{(t-1)}$ を用いて経路選択確率の計算およびパラメータ更新を行う。得られた経路選択確率は交通量配分アルゴリズムに入力され、第 t 日目の配分交通量 $q^{(t)}$ を得る。また、交通量が得られない第 1 日目については、RBMの潜在ベクトル h を全て 0 にすることで交通量の影響をなくした設定が可能である。以上を全期間について繰り返し適用することでモデルの推定を行う。

2. 本研究のフレーム

2.1. 交通量を考慮した経路選択モデル

本研究では、配分交通量が経路選択確率に影響を与えるような経路選択モデルを考える。ランダム効用理論¹⁰⁾に基づく経路選択モデルでは、誤差項にガンベル分布を仮定することにより、経路選択確率が効用の確定項の指数に比例するようになる。交通量が外性的に与えられている場合、経路選択モデルは交通量を他の説明変数と同様に扱い、選択確率を計算することができるが、ネットワークにおける交通量は、データとして与えられていないか、あるいは与えられても欠損値を含むことが多い。その場合、説明変数としての交通量を何らかの配分原理に基づき予測する必要がある。

まず、未観測の交通量を説明変数に取る経路選択モデルを推定することを考える。軌跡データと OD 需要を所与として経路選択モデルを推定する場合、パラメータ推定と交通量配分を交互に繰り返し、収束させる方法がある。これは擬似最尤法¹¹⁾と呼ばれ、配分交通量の暫定値のもとでの尤度関数を最大化させる方法である。パラメータ更新時に配分交通量を固定することで、説明変数とモデルの誤差項

の相関をなくし、バイアスのない推定が可能である。しかし、パラメータの更新に対して配分交通量が滑らかに変化するとは限らず、推定値が振動したり、収束が遅くなったりする場合がある。一方で、機械学習モデルを援用した方法としては、スパースに観測された交通量と整合性が取れるように経路選択のマルコフ決定過程を構築する方法¹²⁾が提案されている。この方法ではモデル学習のための目的関数が固定であり、かつ勾配降下法によりモデルを効率的に推定することが可能である。

さらに、交通量配分の場合も、選択確率と配分交通量を整合させる必要があるため、選択確率の計算と配分計算の交互の繰り返しが必要である。代表的な方法として逐次平均化法などがあるが、配分量の更新幅が固定であるため、収束が遅くなったり、非均衡点で計算が止まったりする可能性がある。

2.2. 複数交通手段の交通量配分モデル

複数の交通手段が相互作用し合いながら行動する場合、交通量のような未観測量が存在しない場合でも複数の均衡状態が存在する可能性がある。Nash 均衡¹³⁾では、各交通手段は他の交通手段の行動の分布を既知とするため、未観測量としての交通量と同様に全ての交通手段の選択確率の整合性を取る形で決定されるからである。仮に相互作用の影響と交通量の両方が未観測量として与えられている場合は、単一交通手段の場合よりも多くの変数間の関係を整合させなければならないので、より多くの繰り返し計算が必要になる。また、パラメータの推定やシミュレーションに際して、与えられたモデルに複数の均衡状態が存在する場合には、いずれの均衡状態を計算に利用すれば良いのか不明で

あるという問題がある。

また、Nash 均衡を緩和した概念として相関均衡¹⁴⁾や質的応答均衡¹⁵⁾がある。相関均衡では、他者との行動の独立性の仮定を排し、確率的な共通観測信号を導入することで交通手段間の相関する行動を表現可能である。ここでいう共通観測信号とは全ての交通手段から観測可能であり、それぞれの行動間に相関を与えるような変数を表す。また、質的応答均衡では、Nash 均衡に誤差の概念を導入し、他者の行動に対して確率的に行動を選択する均衡が表現されている。また、質的応答均衡は展開型ゲームにも拡張可能¹⁶⁾であり、ノイズ付きの最適反応で行動が更新されていくという意味で部分ゲーム完全均衡の拡張と見なすことができる。これらの概念を用いることで、複数交通手段がそれぞれの配分交通量を介して相互作用するときの均衡状態をより柔軟に表現できる可能性がある。

2.3. 動的交通量配分

利用者が経路選択を行う上で、交通量のような内生的な変数は、日々の経験によって少しずつ学習されると考えるのが妥当である。Day-to-day の動学を解析する上で、ポテンシャルゲーム¹⁷⁾としての定式化が代表的である。ポテンシャルゲームでは、任意の利用者が行動を変えた場合の一般化費用の増加分がその関数の増加分と等しくなるようなポテンシャル関数を用意することができる。その場合、ポテンシャル関数の停留点であることが利用者間の Nash 均衡であることの条件になっていることが示される。単一交通手段の均衡配分や確率的均衡配分では、それぞれ Beckmann et al.¹⁸⁾と Fisk¹⁹⁾による最適化問題の目的関数をポテンシャル関数とおくことにより、ポテンシャルが停留点まで減少し続ける動学を考えれば、長い時間の後に均衡状態が得られることが証明される。例えば、Smith dynamics²⁰⁾では、ある配分状態から各経路の需要の一部が一般化費用を小さくする方向へ経路を交換するような動学が考えられており、均衡状態へ収束することが示されている。また、ロジット型の動学⁸⁾では離散的な利用者を考えており、ノイズがない場合には Smith dynamics と同様の確定的な動学に、ノイズがある場合は、全ての状態にポテンシャルの指数の逆数に比例する確率が割り当てられる定常分布が得られることが知られている。

加えて、ロジット型の動学における定常分布はポテンシャルをエネルギー関数と読み替えた場合のボルツマン分布となっている。ボルツマン分布は、エネルギーが低い状態ほど高い確率で生じる定式化となっており、エネルギーが系の状態を特徴づけていると言える。例えば、統計力学におけるイジング模型ではボルツマン分布に従うスピン状態の熱平衡状態を求めるために MCMC (Markov Chain Monte Carlo) シミュレーション²¹⁾が実施される。MCMC では現在状態によって条件づけられた遷移確率から次状態を次々にサンプリングしていくことで、高次元で複雑な分布を計算的に扱いやすくしている。交通量配分問題においても、ポ

テンシャル関数が存在する場合は、MCMC シミュレーションに準じた動学を考えることで、ポテンシャル関数の形に依存した定常分布を得ることが可能である。また、機械学習モデルの一つであるボルツマンマシン⁹⁾は、各層の値に応じてネットワークのエネルギーが計算され、そのエネルギーに対するボルツマン分布に従って値が生成されるようなモデルである。ボルツマンマシンは内部で Gibbs サンプリング²²⁾の近似に相当する計算を行っており、MCMC シミュレーションとも関連がある。

しかし、複数の交通手段が存在し、その間に非対称な相互作用が存在するとき、すなわちある交通手段の利用者がネットワーク上に追加された際の一般化費用の増加分が交通手段ごとに異なるとき、ポテンシャル関数は一般には存在しない。そのため、ポテンシャル関数という静的な実体を用いて動的なゲームの解の性質を評価することが困難となる。

2.4. 本研究のフレームワーク

本研究では、ボルツマンマシンの一種である、制限ボルツマンマシン (RBM) を援用して、複数交通手段の動的な交通量配分手法を提案する。軌跡データおよび OD 需要を所与とし、RBM を用いて可視空間上の軌跡データと潜在空間上の共通観測信号を学習する。このモデルでは、潜在空間の信号が交通手段間の相関均衡の共通観測信号となっており、その生成確率が全交通手段の交通量と相関を持っているとする。また、信号が所与の元での各交通手段の利得関数にノイズが付加されていると仮定し、day-to-day の動的ゲームを実装する。交通量の変動が経路選択確率に影響しない場合は、共通観測信号は一定値を取るか潜在空間と可視空間の結合パラメータが 0 に近づくことから、共通観測信号は、経路選択行動を予測する文脈のもとで全交通手段の交通量の状態を表現したものであると解釈できる。このゲームには交通量が所与の場合に軌跡と共通信号のポテンシャル関数を定義することができ、交通量が潜在空間の分布に与える影響や潜在空間と可視空間の結合パラメータを調べることで解の性質の解析に役立つと考えられる。

3. モデル定式化

3.1. 制限ボルツマンマシン

制限ボルツマンマシン (RBM)⁹⁾では、可視層と隠れ層の 2 つのベクトルの生成確率がモデル化される。ただし、要素間の結合は可視層の要素と隠れ層の要素のペアにのみ存在し、同一層内の要素には存在しないものとする。いま、可視層のベクトルを $v \in \{0,1\}^{N_v}$ 、隠れ層のベクトルを $h \in \{0,1\}^{N_h}$ とする。この RBM のエネルギー関数 E は、パラメータ $W \in \mathbb{R}^{N_v \times N_h}$ 、 $a \in \mathbb{R}^{N_v}$ 、 $b \in \mathbb{R}^{N_h}$ を用いて、式(1)のように表される。

$$E(v, h) = -v^T a - h^T b - v^T W h \quad (1)$$

この RBM によって (v, h) が生成される確率 $P(v, h)$ は、ボルツマン分布に従うため、式(2)のように表される。

$$P(v, h) = \exp(-v^T a - h^T b - v^T W h) / Z \quad (2)$$

ただし、 Z は分配関数であり、パラメータ a, b, W に依存するスカラーである。

いま、隠れ層 h が与えられたときの可視層 v の条件付き確率を考える。可視層 v の第 i 成分が 1 である確率は、生成確率が $\exp(-E)$ に比例することに注目すると、式(3)のようになる。

$$\begin{aligned} P(v_i = 1, v_{-i} | h) &= \frac{\exp(-E(v_i = 1, v_{-i}, h))}{\sum_{v'_i \in \{0,1\}} \exp(-E(v_i = v'_i, v_{-i}, h))} \\ &= \frac{\exp(a_i + W_i h)}{1 + \exp(a_i + W_i h)} \\ &= \text{Sigmoid}(a_i + W_i h) \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 W_i は W の第 i 行をとった行ベクトルである。

また、この式には v_i 以外の可視層の要素が含まれないことから、可視層の要素の値は互いに独立であることも確認できる。同様に、可視層が与えられた場合の隠れ層の条件付き分布も式(4)のように与えられる。

$$P(h_j = 1 | v) = \text{Sigmoid}(b_j + W_j^T v) \quad (4)$$

ただし、 W_j^T は W^T の第 j 行の行ベクトルである。

以上の選択確率から、パラメータ W_{ij} は $v_i = 1, h_j = 1$ の共起しやすさを、 a_i, b_j はそれぞれ $v_i = 1, h_j = 1$ の生起しやすさを表すパラメータであることがわかる。

RBM の効率的な学習法の一つに Contrastive Divergence (DC) 法がある。CD 法では、可視層 v に対する最尤推定法を行う。尤度関数 $\mathcal{L}$ は式(5)のように表される。

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\theta | v) &= \frac{1}{Z} \sum_h \exp(-E(v, h)) \\ &= \frac{\sum_h \exp(-E(v, h))}{\sum_v \sum_h \exp(-E(v, h))} \end{aligned} \quad (5)$$

対数尤度関数の微分は、式(6)のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln \mathcal{L}(\theta | v)}{\partial \theta} &= \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\ln \sum_h \exp(-E) \right) \\ &\quad - \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\ln \sum_{v, h} \exp(-E) \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= - \sum_h p(h | v) \frac{\partial E}{\partial \theta} + \sum_{v, h} p(v, h) \frac{\partial E}{\partial \theta} \\ &= - \sum_h p(h | v) \frac{\partial E}{\partial \theta} \\ &\quad + \sum_v p(v) \sum_h p(h | v) \frac{\partial E}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (6)$$

しかし、 $\sum_v p(v)$ は可視層の次元数が大きい場合には計算困難である。そこで DC 法では、1 ステップの Gibbs サンプリングによって第二項を近似する。それにより、対数尤度関数は式(7)で表される微分値を用いて更新可能となる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln \mathcal{L}(\theta | v)}{\partial \theta} &= - \sum_h p(h | v) \frac{\partial E(v, h)}{\partial \theta} \\ &\quad + \sum_h p(h | v^1) \frac{\partial E(v^1, h)}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、 v^1 は、観測データ v による条件付けの元でサンプリングし、その h を用いてサンプリングされたデータである。

加えて、DC 法は RBM の可視層が Softmax 関数に従う場合も適用可能である²³⁾。その場合は、考慮する v の集合を v の一要素のみが 1 であるものに限定すれば良い。ただし、この場合には可視層の要素間に相関が生じてしまうことに注意が必要である。

3.2. 制限ボルツマンマシンに基づく経路選択モデル

いま、単一交通手段、単一起終点のパス選択モデルを考える。経路の本数を N_l 、経路選択を観測された利用者の数を N_u 、このときの各パスの交通量を $q \in \mathbb{R}^{N_l}$ とする。また、各パスの説明変数として $x \in \mathbb{R}^{N_l \times d_x}$ の行列を与え、あるパラメータ $\beta \in \mathbb{R}^{d_x}, W^\tau \in \mathbb{R}^{N_l \times N_H}$ に対して、式(8)の選択確率に従って経路が選択されるとする。

$$\begin{aligned} P(v_i = 1, v_{-i} = 0 | h) &= \frac{\exp(-(x_i \beta + W_i^\tau h))}{Z} \end{aligned} \quad (8)$$

ただし、可視層 $v \in \mathbb{R}^{N_l}$ 、隠れ層 $h \in \mathbb{R}^{N_H}$ をそれぞれ利用者がどのパスを選んだかのダミー変数、観測不能な経路選択の潜在変数とし、 v_{-i} は可視層の要素 i を除いた要素のベクトル、 W_i^τ は W^τ の第 i 行の行ベクトル、 Z は分配関数としている。

この定式化は、 $x_i \beta + W_i^\tau h$ を効用関数とするランダム効用理論における選択確率と同一である、 β を効用関数のパラメータ、 $W_i^\tau h$ を選択肢固有のバイアスと考えることがで

きる。

いま、式(9)のようなエネルギー関数を考えると、 $v_i = 1, v_{-i} = 0$ となる確率は、可視層が Softmax 関数の RBM による生成確率と一致する。

$$E(v, h) = -v^T(x\beta) - (q^T W^q)h - v^T W^r h \quad (9)$$

ただし、交通量 q と隠れ層 h の結合を表すパラメータ W^q を導入した。図-2 にエネルギー関数の符号を反転させたものをテンソルネットワークの形式で示す。

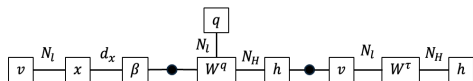


図-2 $-E$ のテンソルネットワーク表現

このエネルギー関数は $a = x\beta, b = q^T W^q$ とすれば通常の RBM と同様である。従って、 N_u 人の利用者の選択結果を可視層の観測データとすることにより、DC 法を用いてパラメータ β, W^q, W^r を推定することが可能である。また、パラメータ W^r, W^q はそれぞれ、 v と h 、 q と h の結合を表しており、 h を介して q が選択確率に与える影響を定量的に評価可能である。この h は相関均衡における共通観測信号と同じ意味を持っていると考えられる。

しかし、実際にはタイムステップ t の交通量 $q^{(t)}$ は同日の経路の選択確率から配分アルゴリズムによって計算され、翌日の経路選択確率は $q^{(t)}$ に依存する。そこで、本研究では次状態の $h^{(t+1)}$ が現在の $q^{(t)}$ に依存するものとして式(10)のようなエネルギーを考える。

$$\begin{aligned} E(v^{(t+1)}, h^{(t+1)}) = & -v^{(t+1)T}(x\beta) \\ & - (q^{(t)T} W^q) h^{(t+1)} \\ & - v^{(t+1)T} W^r h^{(t+1)} \end{aligned} \quad (10)$$

図-3 に動学化した交通量配分モデルのエネルギー関数を示す。

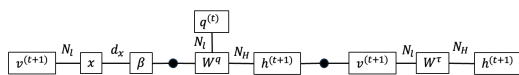


図-3 動学化した交通量配分モデルの $-E$ のテンソルネットワーク表現

この定式化により、現在状態の選択確率により配分交通量が変化し、それに伴い隠れ変数の分布が変化することにより、次状態の選択確率の変化を記述することができる。配分交通量は選択確率から、OD 需要となんらかの配分アル

ゴリズムを用いて計算するものとする。

3.3. 複数交通手段の動的交通量配分モデル

3.2 のモデルは複数交通手段に容易に拡張可能である。考慮する交通手段の数を N_m とし、可視層、交通量、各パラメータの要素数を N_m 倍に増やして、各成分を各交通手段に割り当てることで同様のエネルギー関数が構築可能である。ただし、可視層にはマスク付きの Softmax 関数を考え、対象とする利用者と異なる交通手段のパスが選択されないようにする。

この定式化では、パラメータ W^r, W^q はそれぞれ全交通手段の v と h 、全交通手段の q と h の結合を表しており、他の交通手段の交通量が経路選択確率に与える影響を評価可能である。隠れ変数を介さない定式化では、均衡状態は選択確率と配分交通量が効用関数と配分原理の両方を同時に満たす必要があるが、この定式化では、効用関数が確率変数である h に依存することにより制約が弱まっている。前者の場合、効用関数と配分原理の連立方程式の解の数だけ均衡解が存在することになるが、後者では、隠れ変数と選択確率が一対一に対応するため、複数存在する均衡解の個数や性質が明確である。一般的に観測される交通状態は安定的な均衡状態の近傍であると仮定すると、有限個の潜在変数でも選択確率が精度よく近似できると期待される。

4. 数値実験

4.1. 実験設定

本研究では、RBM に基づく動的交通量配分モデルの推定および推論の性能を検証するために、簡単なネットワークでの双子実験を行った。双子実験ではパラメータを設定したモデルでシミュレーションを行い、得られたデータから設定したパラメータの復元を試みることで、手法の妥当性を検証する。ネットワークは単一の起終点ペアを持ち、リンクの重複を持たないパスで結ばれているとする。複数の交通手段がネットワークを共有しており、それぞれの交通量がそれぞれの交通手段の効用関数に影響を与えるとする。本実験で想定する状況の概要を図4 に示す。

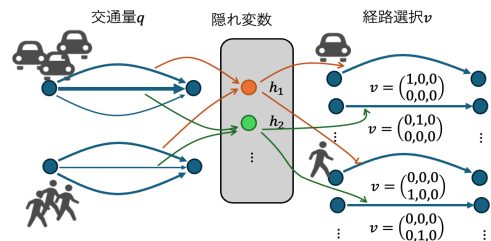


図4 本実験で想定する経路選択モデルの概要

以下の実験では、以下の記号を用いる。交通手段の数を N_m 、行動を観測された交通手段ごとの利用者の数を $N_u \in \mathbb{N}^{N_m}$ 、各パスの説明変数を $x \in \mathbb{R}^{N_l \times d_x}$ 、各交通手段の効用

表-1 数値実験における変数の設定：(設定 1) 交通量の影響が小さい, (設定 2) 交通量の影響が大きい

変数	説明	設定 1	設定 2
N_m	交通手段数	2	
N_u	観測利用者数	(100, 100)	
N_{od}	OD 需要	(1, 1)	
N_l	パス数	5	
d_x	説明変数次元	3	
d_h	隠れ変数次元	1	
T	タイムステップ数	10	
W^q	q, h 間の RBM パラメータ	$[[0.1], [0.2]]$	$[[1.0], [2.0]]$
W^r	v, h 間の RBM パラメータ	$[[-0.2], [-0.1]]$	$[[-2.0], [-1.0]]$

関数のパラメータを $\beta \in \mathbb{R}^{N_M \times d_x}$, 交通手段ごとの OD 需要を $N_{od} \in \mathbb{N}^{N_M}$, 交通手段ごとの配分交通量を $q \in \mathbb{R}^{N_l \times N_M}$ とする. なお, RBM のパラメータについては, パスを跨いだ交通手段間の相互作用が存在しないと仮定し, パスごとに交通量と隠れ変数が同一の結合度で結ばれているとすることにより, $W^q \in \mathbb{R}^{N_M \times d_h}$, $W^r \in \mathbb{R}^{N_M \times d_h}$ とする. また, 隠れ変数は, $h \in \mathbb{R}^{N_l \times d_h}$ とする. 図-5 にパス内で同一のパラメータを共有する場合としない場合の RBM のエネルギー関数を示す.

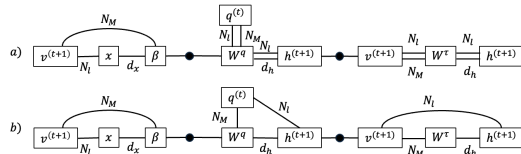


図-5 複数交通手段の動的配分モデルの $-E$ のテンソルネットワーク表現：a) パスを跨いだ結合を許容する場合, b) パス内の結合のみ考慮する

数値実験は, シミュレーションと推定の二部からなる. まずパラメータ真値を与えたモデルを用いて経路選択確率を計算し, 経路選択のサンプルデータ $v^{(t)}$ を作成する. その際, 経路選択確率から交通量 $q^{(t)}$ を計算し, 翌日 $(t+1)$ 分の経路選択確率 $v^{(t+1)}$ に反映させることで, day-to-day のデータを得る. 次に, 上記のシミュレーションにより得たデータを用いてモデルの推定を行う. 推定には経路選択のサンプルデータのみを使用し, 交通量は毎日に暫定モデルパラメータを用いて更新する. 実験では 10 日分のデータをシミュレーションしたが, 10 日分のデータに対してモデルパラメータの更新を行うことを一ステップとして 100 ステップのパラメータ更新を行うことで推定を行った.

また, 表-1 に実験で設定したパラメータ値をまとめる. 本実験は, 提案手法を用いて経路選択パラメータの真値が推定可能であること, 交通量の影響が強い場合に隠れ変数とその影響を捉えられることを確認することを目的とする.

従って, 交通手段数, パス数, 隠れ変数次元数は最小構成とした. 説明変数は真値と推定値の比較が可能な次元, タイムステップ数は選択確率のばらつきを表現できるという条件を満たすように設定した. また, 交通量の影響の程度が異なる場合に隠れ変数の時間発展がどのように変化するか調べるため, 交通量と選択確率の間に強い結合がある場合と弱い結合しかない場合を考え, 2 種類の RBM のパラメータを用意した. なお, 本研究では連続的な交通量配分を考える. RBM および効用関数のパラメータは学習率 0.01 の Adam optimizer を用いて学習された.

4.2. 結果

本研究では, あるパラメータのもとで経路選択の観測データを人工的に作成し, そのデータをランダムに初期化されたモデルに学習させることで, モデルの学習可能性および予測性能の評価を行った. 図-6 に学習過程の損失関数の推移を, 図-7 に学習された効用パラメータの真値との比較を示す. ここでは, 損失関数の微分値が式(6)の対数尤度関数の微分値と一致するように損失関数を設定しており, 具体的には, 観測された選択確率の元でのエネルギーの期待値と再サンプルされた選択確率の元でのエネルギーの期待値の差分を考えている. ただし, 可視層に属する選択確率から隠れ層の値をサンプルする際の計算で生じる勾配については考慮していない. 学習過程の中で一度損失関数が小さくなるタイミングがあるが, これは勾配をカットしている項の影響によるものであり, 最終的には損失関数が 0, すなわち観測データを初期値とするマルコフサンプリングによってデータの分布が変化しないようなパラメータが学習できている. モデルの学習は概ね安定しており, 推定されたパラメータがほぼ真値を復元できていることも確認できる. ただ, 設定 2 における効用パラメータ 0, 1 についてはやや推定誤差が生じている. 効用パラメータ 0, 1, 2 は 1 つ目の交通手段に, 3, 4, 5 は 2 つ目の交通手段に対応しており, v, h 間の結合が 2 つ目の交通手段よりも大きく設定されていることが原因と考えられ, h のサンプリングが確

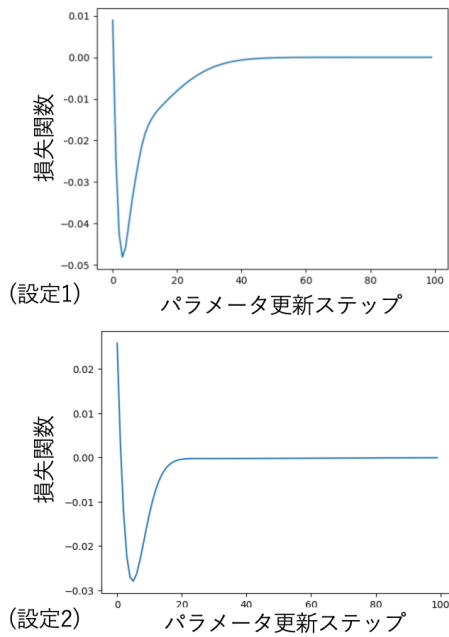


図-6 モデル学習過程における損失関数の推移

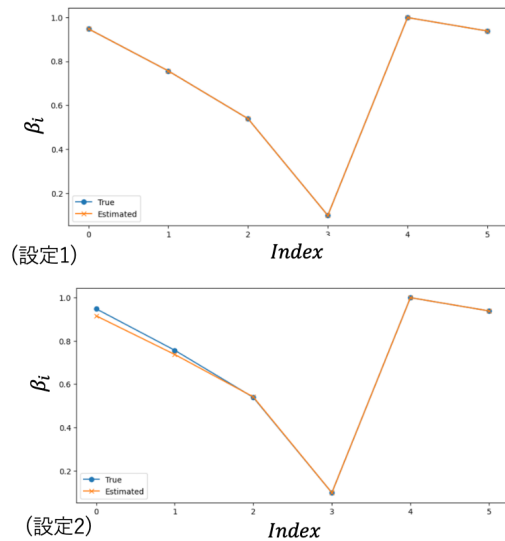


図-7 効用関数パラメータの真値および推定値の比較

率的である影響が発生していると考えられる。この影響はデータ数を増やすことで小さくすることができる。加えて、図-8に各設定のパラメータセットの元で交通量配分のシミュレーションを行った際にサンプルされた隠れ変数の時間発展を示す。シミュレーションにおける隠れ変数の時間発展からは、設定2の方が設定1よりも全ての隠れ変数が1となっている時間が長いことがわかる。配分交通量と選択確率の間の相互作用が大きい場合には、より一つの状態に長く留まる傾向があることが見て取れ、強い相互作用の存在が各交通手段の利用者が経路を変更することを抑えているという作用が働いていると考えられる。モデル上では選択確率の変更は h の変化と一対一対応するが、

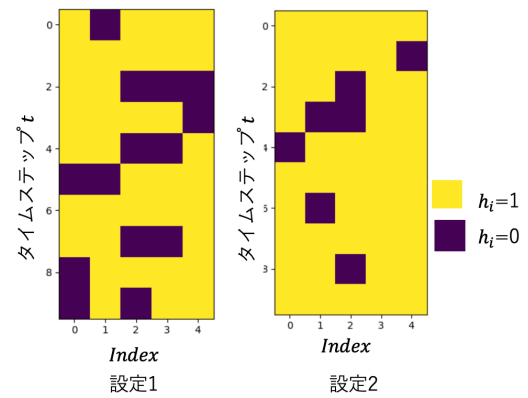


図-8 学習済みモデルによるシミュレーション結果（隠れ変数の時間発展）

q, h の結合が大きいことは h が従うロジスティック分布が一つの値に偏りやすくなることに対応しているためである。本研究では解釈の可能な day-to-day モデルの構築が目的となっていたが、交通量と経路選択確率の間に異なる強さの結合がある場合、潜在変数に異なる分布が現れることが確認された。一般に複数交通手段の間に非対称な相互作用がある場合、均衡解の性質は解析的にはわからないが、そういった状況下でも本研究の手法では、潜在変数の分布と W^T の値を調べることで経路選択確率の分布が得られるため、解の性質が解釈可能である。

5. 結論

本研究では、RBM を援用した動的交通量配分モデルを複数交通手段混在の条件の下で定式化した。RBM は効率的な学習方法が知られており、数値実験からもモデルが安定的に推定可能であることが示された。また、配分交通量と選択確率の間に解釈可能なパラメータを設定することにより、動的な交通量の変化を定性的に解釈しうることも確認された。具体的には、交通量と経路選択確率への影響の大きさが潜在ベクトルの分布に影響を与え、さらに、潜在ベクトルと可視層である経路選択行動が両者の結合パラメータによって特徴づけられている。

今後は、より定量的な相互作用の評価の方法の開発や、都市計画的な政策評価の可能な実ネットワークへの適用を行う予定である。実ネットワークへの本モデルの適用のためは、通常の経路選択モデルと同様に選択肢集合の列挙あるいは再帰的な期待効用の計算が必要であるが、潜在ベクトルと交通量、選択確率の関係は本研究のモデルと同様である。

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費 JP25KJ0974 の助成を受けたものです。

【参考文献】

- 1) Branston, D. (1976 年). Link capacity functions: A review.

Transportation research, 10(4), 223-236.

2) Broach, J., Gliebe, J., & Dill, J. (2009 年). Development of a Multi-Class Bicyclist Route Choice Model Using Revealed Preference Data. Urban Studies and Planning Faculty Publications and Presentations.

3) Tarkkala, K., Vossough, S., West, J., & Roncoli, C. (2024 年). Evaluating the influence of cyclists' route choices incorporation into travel demand modelling: A case study in greater Helsinki. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 27, 101224.

4) Guarda, P., & Qian, S. (2024 年). Statistical inference of travelers' route choice preferences with system-level data. Transportation Research Part B: Methodological, 179, 102853.

5) Mehr, N., & Horowitz, R. (2020 年). How Will the Presence of Autonomous Vehicles Affect the Equilibrium State of Traffic Networks? IEEE Transactions on Control of Network Systems, 7(1), 96-105.

6) Lilasathapornkit, T., Rey, D., Liu, W., & Saberi, M. (2022 年). Traffic assignment problem for footpath networks with bidirectional links. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 144, 103905.

7) Iryo, T., & Watling, D. (2019 年). Properties of equilibria in transport problems with complex interactions between users. Transportation Research Part B: Methodological, 126, 87-114.

8) Sandholm, W. H. (2010 年). Population games and evolutionary dynamics. MIT press.

9) Ackley, D. H., Hinton, G. E., & Sejnowski, T. J. (1985 年). A learning algorithm for Boltzmann machines. Cognitive science, 9(1), 147-169.

10) McFadden, D. (1977 年). Modelling the choice of residential location.

11) Aguirregabiria, V., & Mira, P. (2007 年). Sequential Estimation of Dynamic Discrete Games. Econometrica, 75(1), 1-53.

12) Zhong, M., Kim, J., & Zheng, Z. (2023 年). Estimating link flows in road networks with synthetic trajectory data generation: Inverse reinforcement learning approach. IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems, 4, 14-29.

13) Nash, J. F. (1950 年). Equilibrium points in n -person games. Proceedings of the National Academy of Sciences, 36(1), 48-49.

14) Aumann, R. J. (1974 年). Subjectivity and correlation in randomized strategies. Journal of mathematical Economics, 1(1), 67-96.

15) McKelvey, R. D., & Palfrey, T. R. (1995 年). Quantal response equilibria for normal form games. Games and economic behavior, 10(1), 6-38.

16) McKelvey, R. D., & Palfrey, T. R. (1998 年). Quantal response equilibria for extensive form games. Experimental economics, 1, 9-41.

17) Sandholm, W. H. (2001 年). Potential games with continuous player sets. Journal of Economic theory, 97(1), 81-108.

18) Beckmann, M., McGuire, C. B., & Winsten, C. B. (1956 年).

Studies in the Economics of Transportation.

19) Fisk, C. (1980 年). Some developments in equilibrium traffic assignment. Transportation Research Part B: Methodological, 14(3), 243-255.

20) Smith, M. J. (1984 年). The Stability of a Dynamic Model of Traffic Assignment—An Application of a Method of Lyapunov. Transportation Science, 18(3), 245-252.

21) Hastings, W. K. (1970 年). Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications.

22) Geman, S., & Geman, D. (1984 年). Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 6, 721-741.

23) Hinton, G. E., & Salakhutdinov, R. R. (2009 年). Replicated softmax: An undirected topic model. Advances in neural information processing systems, 22.