

修士学位論文

広域物流施設の利用を考慮した
都市圏内外貨物シミュレーションモデルの開発

2024 年度

(2025 年 3 月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

海運ロジスティクス専攻

田中慎也

修士学位論文

広域物流施設の利用を考慮した
都市圏内外貨物シミュレーションモデルの開発

2024 年度

(2025 年 3 月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

海運ロジスティクス専攻

田中慎也

目次

第1章	序論	1
1.1	背景と目的	1
1.2	本研究の構成	1
第2章	既往研究のレビュー	2
2.1	都市貨物シミュレーター	2
2.2	中継施設利用を考慮した貨物モデル	3
2.3	本研究の狙い	3
第3章	本研究の枠組み	4
3.1	モデルの枠組み	4
3.2	利用データと調査エリア	6
3.2.1	利用データ	6
3.2.2	調査対象エリア	10
第4章	都市間貨物発生・集中モデル	12
4.1	貨物の発生・集中量の決定	12
4.1.1	事業所における発生集中量の決定	12
4.1.2	都市圏内外輸送重量の決定	14
4.2	都市圏内外貨物輸送事業所の決定と発生集中量の割り当て	17
4.2.1	都市圏内外貨物輸送事業所の決定	17
4.2.2	事業所への発生量集中量の割り当て	18
第5章	サプライヤー選択モデル	20
5.1	受取需要への分割	20
5.2	サプライヤー選択	21
5.2.1	使用データとデータ加工	21
5.2.2	サプライヤー選択モデル(搬入)	22
5.2.3	サプライヤー選択モデル(搬出)	28
第6章	輸送形態選択モデル	31
6.1	データの加工	31
6.2	モデルの概要	37
6.3	結果と解釈	39
第7章	モデルの検証とシナリオ分析	41
7.1	精度検証	41
7.2	従来モデルと提案モデルとの比較	43
7.3	シナリオ分析	44
第8章	終わりに	47
8.1	本研究のまとめ	47
8.2	今後の課題	47
	謝辞	48

参考文献	48
------------	----

第1章 序論

1.1 背景と目的

近年、エージェントベースモデルの都市貨物シミュレーターに関する研究が進展している。(de Jong et al., 2021) エージェントベース貨物交通シミュレーションを用いることで、貨物関連の活動に従事する複数のエージェントの行動や相互作用をシミュレートできるため、従来の四段階推定法を用いたモデルよりも詳細なシミュレーションすることが出来る。これらの貨物交通シミュレーターはゼロエミッションやロードプライシング、土地利用施策など様々な施策評価のために活用されている。(de Bok et al.,2022 ; Jing et al.,2024 ; Sakai et al.,2019) しかし、いままでに提案されてきた貨物交通シミュレーターでは、ロジスティクスにおけるいくつかのメカニズムが十分に考慮されていない。都市圏内外輸送時に利用される中継施設の考慮はその一つである。従来の貨物モデルでは、貨物が生産場所から消費場所まで直接輸送されるという仮定が置かれており、中継施設を経由するケースを考慮していない。この仮定により、中継施設の利用によって発生する交通量を捉えることができないという問題がある。

さらに、近年では物流業界における深刻な人手不足が課題となっており、これに対処するための新たな施策が提案されている。例えば、自動運転車両を活用した都市間貨物輸送の実現や、フィジカルインターネットを用いた共同配送が挙げられる(国土交通省 2024)。自動運転車両の普及を進めるためには、自動運転と手動運転を切り替えるための拠点整備が必要である。このような拠点の需要予測や評価を行うにあたり、従来の中継施設を考慮しないエージェントベースモデルでは十分に対応することが難しい。

本研究ではこのようなりサーチギャップを埋め、社会的な需要にこたえるため、エージェントベースモデルを用い中継施設の利用を考慮したモデルフレームワークの提案をする。

1.2 本研究の構成

本論文の構成を以下に示す。

第1章 序論

本研究の背景と目的、そして論文の構成を述べる

第2章 既往研究

過去提案された貨物モデルにおいて中継施設の利用考慮について整理し、本研究の狙いを述べる

第3章 研究の枠組み

本研究で提案するモデルフレームワークについての説明と使用データ、設定について述べる。

第4章~第7章

本研究で提案するモデルフレームワークの構成要素についてそれぞれ詳細を述べる。

第8章

構築したシミュレーションモデルを実行し、シナリオ分析を行う。

第9章

本研究で得られた知見、および今後の課題等を述べる。

第2章 既往研究のレビュー

本章では、現在提案されている貨物シミュレーションにおいて、都市圏内外輸送の取り扱いについて既往研究に対するレビューを通じて明らかにしていく。2.1 では現在提案されているエージェントベースを用いた都市貨物シミュレーターにおける都市圏内外貨物輸送についての扱いをレビューする。2.2 ではエージェントベースを用いていない貨物モデルにおいて中継施設の利用を考慮した貨物モデルについてレビューを行う。2.3 では既往研究のレビューを踏まえ本研究の目的を述べる

2.1 都市貨物シミュレーター

SimMobility Freight は Sakai et al. (2020) によって提案されたエージェントベースの貨物交通シミュレーションモデルである。この SimMobility Freight は、Long-term (LT)、Mid-term (MT)、Short-term (ST) の 3 つの時間軸で構成されており、それぞれの時間軸でエージェントの意思決定を行う。LT では都市内の貨物フローを決定し、MT では貨物車の運行計画を予測し、ST ではメゾスコピックシミュレーションを用いて貨物車の詳細な動きをシミュレーションする。SimMobility Freight は、対象都市圏内にある事業所データをインプットとして使用する。そのため、都市圏外に所在する事業所は貨物の生産や消費が発生しない。従って都市圏内と都市圏外を結ぶ輸送は考慮されていない。ゆえに、SimMobility Freight では中継施設への経由なども考慮されていないと考えられる。

TRABAM は、Mommens et al. (2017) で提案されたエージェントベースのフレームワークであり、オープンソースソフトウェア MATSim を用いて開発された。このフレームワークでは、運送業者をエージェントとしてシミュレーションを行う。エージェントには輸送タスクが割り当てられ、貨物の発着、車種、出発時間などの指定を行うが、中継施設の経由やそこでの貨物積み替え行動はシミュレートされていない。

CRISTAL は、Stinson et al. (2022) によって提案されたフレームワークである。CRISTAL では、対象とする特定の地域については高精度でモデルの適用が行われる一方で、地域外では粒度を低く設定することで、都市圏外からの搬入や外国からの貨物輸入も捉えることができる。したがって、このフレームワークは、都市圏内外の貨物にも適用することができ、都市圏内の分析を行う際に内々輸送のみならず、内外輸送も考慮することができる。また、都市間輸送においては、輸送機関が切り替わる乗換拠点や配送センターの利用も考慮する設定となっている。しかし配送センターは、サプライチェーンの中で保管や出荷頻度の調整を行うため、輸送中に使用する中継施設とは性質が異なる。そのため、CRISTAL では本研究が対象とするような中継施設の利用は考慮されていない。

このように世界各地で提案されているエージェントベースモデルを用いた貨物モデルについて中継施設の利用を考慮したモデルは限られている。

2.2 中継施設利用を考慮した貨物モデル

エージェントベースモデルを用いていない貨物モデルの中で、都市圏内外貨物輸送において中継施設の利用を考慮した貨物モデルとその適用はいくつか研究がなされている。

Horowitz & Melendez (2011) は、オンタリオ州が実施する都市間トラックの運送活動調査であるオンタリオ商業車両調査 (CVS) を活用し、貨物車の中継施設経由について分析を行った。CVS は、貨物車の発着地、積載品目、利用した中継施設およびそこで行われた作業内容を記録した調査である。その結果、輸送において中継施設を経由する貨物の割合が多く品目で高いことが明らかになり、中継施設を考慮した貨物モデルの開発が重要であることを指摘した。また CVS で得られた中継施設への経由のパターンを 8 つに類型化し、中継施設の経由パターンを選択する多項ロジットモデルを構築した。

Davydenko & Tavasszy (2013) は、従来の四段階モデルを用いた貨物モデルでは、積み替え等のために物流拠点を経由する貨物フローの変化を正確に捉えることが難しい点を指摘した。これを踏まえ、彼らは Tavasszy (2006) で提案された物流チェーンを考慮した 5 段階物流予測モデルフレームワークを用いた研究を行った。このモデルでは、オランダ統計局が大型貨物車を所有する事業者に対して実施した貨物車の運行状況を記録した輸送調査データを活用し、オランダ国内の貨物輸送において倉庫の経由を考慮した地域間流動を推定した。

小池ら(2015)は Davydenko & Tavasszy (2013) で提案された手法を用い、日本における倉庫スループットを推計するために全国貨物純流動調査と貨物地域流動調査の二つの統計調査を用いることで、都道府県単位の貨物スループット交通を推計し、物流拠点を經由する都市間物流モデルの構築を行った。

2.3 本研究の狙い

現在までに提案されている中継施設の経由を考慮した貨物モデルは、Davydenko & Tavasszy(2013)によって提案された手法は四段階推定法を拡張したモデルで集計モデルであるため、地域間の貨物フローを推計するにとどまる。エージェントベースモデルを用いた都市間貨物のフレームワークに中継施設の利用を考慮したモデルを組み込むことによって従来の地域単位で集計された貨物フローと比較して、より詳細に中継施設を利用することで生じる交通インパクトを捉えることが出来る。

そのため、本研究ではエージェントベースモデルを用い、中継施設の利用を考慮した都市圏内外貨物輸送のモデルフレームワークを提案し、中継施設を利用することによって生じる交通インパクトを明らかにする。

第3章 本研究の枠組み

3.1 モデルの枠組み

本章では、提案するエージェントベースモデルを用いた中継施設の経由を考慮した都市圏内外モデルの枠組みについて紹介をする。

はじめに、本研究が対象とする中継施設の定義は以下の通りである。

- ・ 集配センター、荷捌き場、またはトラックターミナルのうち、都市圏内外輸送を行う際に使用される施設全般。
- ・ 機能的には、都市間輸送を担う大型貨物車から都市圏内配送を行う貨物車へ貨物の積み替え、もしくは都市圏内から集荷された貨物を都市間輸送を行う貨物車への載せ替えを行う施設。

次に、提案するフレームワークのフローを図1に示す。本モデルは事業所データを入力として、中継施設を経由する出荷データが出力される。主にエージェントとは事業所であり、事業所が貨物の生産や消費、商品契約を締結し、事業所間で貨物のやり取りを行う。本フレームワークは3つのモデルから構成される。

都市間貨物発生集中モデルは都市圏内の事業所において品目ごとに、都市圏外からの貨物の集中量、および都市圏外の事業所への貨物の発生量を決定する。加えて都市圏外の事業所についても同様に、都市圏内の事業所への貨物発生量・事業所への集中量を決定する。また本研究で用いる品目分類を表1にまとめる。

サプライヤー選択モデルは前段階で決定した事業所ごとの集中量を、貨物の受取需要に分割する。その後、各受取需要に対して、その商品を供給する事業所(以下：サプライヤー)を決定する。このステップで貨物の発地と着地が決定される。

輸送形態選択モデルでは、貨物の発着地間の輸送について直接輸送と中継輸送のどちらを利用するかを選択と、中継輸送を行う場合には利用する中継施設を選択を行う。

これら3つのステップを通して、中継施設を経由する貨物のお荷データをアウトプットとして得られることが出来る。

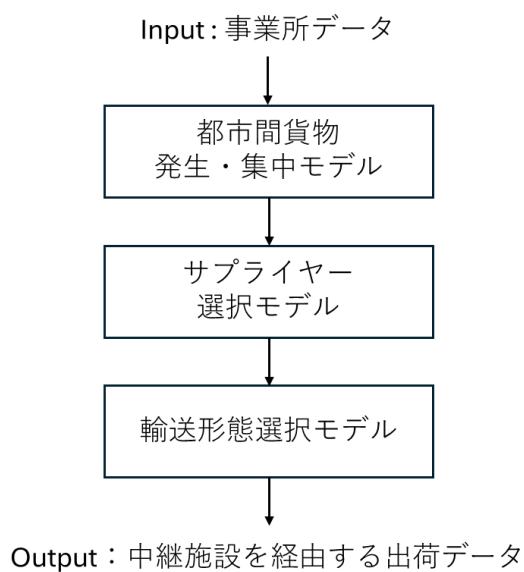


図 1: モデルフレームワーク

表 1: 本研究における品目の分類表

	品目名
品目 1	農産品
品目 2	食料品
品目 3	家庭用・軽工業
品目 4	木材・紙製品
品目 5	鉱物・鉱石・石材・セメント・陶磁器・ガラス
品目 6	金属・金属製品
品目 7	機械・器具・機械部品
品目 8	化学薬品・ゴム・プラスチック
品目 9	混載貨物・小荷物

3.2 利用データと調査エリア

3.2.1 利用データ

本研究では第10回全国貨物純流動調査(2015年実施)(以下:物流センサス)と第5回東京都市圏物資流動調査(2013年実施)(以下:東京都市圏物資流動調査)の二つの調査データを用いる。以下ではそれぞれの調査について、調査概要についてまとめる。

1) 全国貨物純流動調査

物流センサスは、貨物の出発点から到着点まで、輸送手段横断的に荷主側から貨物の純流動を把握することを目的とした、統計調査であり、1970年以来5年ごとに国土交通省が実施している。物流センサスは標本調査であり、調査対象となる民間事業者が調査票の記入、提出を行う。調査票回収後、国土交通省が母集団推計を実施し、この拡大推計値に基づき報告書・集計表を作成する。物流センサスにおける調査対象は鉱業、製造業、卸売業、倉庫業の事業所となっている。調査対象の母集団事業所数と調査対象事業所数、回収数などの結果を第10回2015年調査の結果概要から引用する。

表2: 全国貨物純流動調査の調査事業所数と回収結果

調査対象事業所数と調査票の回収結果

対象産業	調査対象事業所	母集団事業所数	調査対象事業所数		最終調査対象事業所数	回収数	回収率	集計対象事業所数
			抽出率					
鉱業	全6業種〔金属、石炭・亜炭、原油・天然ガス、採石・砂利・砂・玉石採取、窯業原料用鉱物、その他鉱業〕の鉱業所	2,109	1,344	63.7%	1,230	635	51.6%	623
製造業	従業者数4人以上の民営の工場・作業所〔武器製造業を除く24業種〕	208,029	39,976	19.2%	39,415	14,362	36.4%	14,092
卸売業	16業種の事業所	365,071	20,471	5.6%	18,699	6,327	33.8%	6,142
倉庫業	全7種類〔1・2・3類、野積、貯蔵、そう、危険品(建屋)、危険品(タリ)、水面、冷蔵〕の倉庫	9,632	3,126	32.5%	2,993	1,422	47.5%	1,411
合計		584,841	64,917	11.1%	62,337	22,746	36.5%	22,268

注) 最終調査対象事業所数は、調査対象事業所数から調査票の未着事業所、工場閉鎖、廃業などを除いたものです。

「第10回2015年調査 物流センサス 全国貨物純流動調査の結果概要」から抜粋

物流センサスでは「年間調査」と「3日間調査」の二種類の調査が行われており、本研究では「3日間調査」を用いる。「3日間調査」は2015年10月20日(火)から、2015年10月22日(木)の3日間において貨物の出荷1件ごとの「品目」、「荷受人業種」、「届先地」、「重量」、「輸送経路」、「出荷時刻」、「所要時間」、「輸送費用」など詳細な流動実態を調査している。物流センサスにおける品目分類を表3に示す。

表 3：物流センサスにおける品目分類

品 目 分 類 表

品類	品 目	内 容 例	品類	品 目	内 容 例
農 水 産 品	麦	大麦、裸麦、小麦、えん麦、ライ麦、精麦	化 学 工 業 品	L N G ・ L P G	LNG, LPG
	米	もみ、玄米、精米、白米		その他の石油製品	石油アスファルト、石油コークス、グリース、ワセリン
	雑穀・豆	どもちし、落花生、そば、大豆、えんどう豆		コークス	コークス、コーライト
	野菜・果物	野菜、果物、いも類、きのこ、山菜、薬		その他の石炭製品	焦炭、豆炭、ピッチコークス
	羊	羊毛		化学薬品	ソーダ、硫酸、カーバイド、無機工業薬品、高圧ガス、エチルアルコール
	その他の畜産品	家畜、牛肉、鶏卵、ペット用動物、はちま、原毛皮、蛋、未加工乳		化学肥料	硫安、りん肥、カリ質肥料、配合肥料、化成肥料
	水産品	魚介類（活魚、生鮮、冷凍、塩蔵、乾燥）、昆布、のり、鱈黄魚、真珠		染料・顔料・塗料	合成染料、有機・無機顔料、油性塗料、エナメル、カーボンブラック
	綿	棉花		合成樹脂	ウレタン樹脂、ポリエチレン、ポリビニルアルコール、プラスチック、合成ゴム
林 産 品	その他の農産品	花き、てん菜、茶、薬たばこ、種子、芝草、むしろ、コーヒー豆、さとうきび	動植物性油脂	牛脂、魚油、大豆油、オリーブ油、硬化油、ろうそく、肥防酸	
	原木	製材用原木、パルプ用原木、足場丸太、電柱用材	その他の化学工業品	化粧品、医薬品、石ケン、洗剤、農薬、殺虫剤、印刷インキ、接着剤	
	製材	板、角材、フローリング	パルプ	製紙パルプ、溶解パルプ	
	薪	薪、木炭、黒炭、加工炭、かいり灰、たどん	紙	洋紙、板紙、和紙、新聞用紙、建材原紙、カーペ紙、段ボール原紙、繊維板	
鉱 産 品	樹脂類	天然ゴム、生松やに、生うるし、天然樹脂	工 業 品	糸	化学繊維糸、綿糸、撚糸、紡織半製品、より糸、毛糸
	木材チップ、竹材、苗木、果樹、樹皮	木材チップ、竹材、苗木、果樹、樹皮		織物	ニット生地、化学繊維織物、綿織物、レース、漁網
	石炭	石炭、亜炭、無煙炭、せん石、泥炭、草炭		砂糖	粗糖、上白糖、糖みつ、水あめ、水砂糖、黒糖
	鉄鉱石	鉄鉱石、硫化鉄鉱、磁鉄鉱		その他の食料工業品	牛乳、小麦粉、香辛料、めん類、パン、製茶、弁当、冷凍食品、水、たばこ
	その他の金属鉱	マンガン鉱、クロム鉱、銅鉱、アルミニウム鉱、砂金		飲料	ビール、清酒、洋酒、清涼飲料水、茶飲料、ミネラルウォーター
	砂利・砂・石材	川砂、建設用岩石、庭石、墓石		書籍・印刷物・記録物	新聞、書籍、地図、記録済みDVD、記録フィルム
	石灰石	石灰石		がん具	各種がん具、人形、ぬいぐるみ
	原油・天然ガス	原油、天然揮発油、天然アスファルト、天然ガス		衣服・身の回り品	下着、外衣、寝具、帽子、靴下、カーペット、タオル、かばん、傘、靴、宝飾品
	りん鉱石	りん鉱石		文房具・運動娯楽用品	筆記用具、製図器、ノート、事務用接着剤、運動競技用品、絵画用品、楽器
	原塩	岩塩、にがり		家具・装備品	たんす、机、テーブル、ベッド、金庫、仏具神具、ロッカー、キャビネット
その他の非金属鉱物	けい砂、陶土、耐火粘土、石粉、硫黄、ほたる石、ボーキサイト	その他の日用品	温水器、ストーブ、調理器具・食卓用品、歯ブラシ、紙おむつ、ボタン、絵画		
金 属 機 械 工 業 品	鉄	鉄鉄、粗鋼、鋼塊、鋼材、鋼管、鍛鋼品、めっき鋼材、線材鋼線品、針金	排 出 物	木製品	単板、合板、新建材、建具、ベニヤ板、コルク製品、チップボード
	非鉄金属	銅、アルミニウムなどの棒・線材・板、銅線、電線、光ファイバーケーブル		ゴム製品	ゴムタイヤ、チューブ、ゴムホース、工業用ゴム製品、医療用ゴム製品
	金属製品	缶、鉄骨、サッシ、釘、刃物、木工道具、鋳物、金属構、鉄柱、橋梁		その他の製造工業品	皮革製品、畳表、造花、つり具、紙、斧、医療用品（ガーゼ、脱脂綿等）、
	産業機械	ボイラ、エンジン、工作機械、紡績機械、半導体製造装置、トラクタ、パルプ		廃自動車	使用済みの自動車
	電気機械	発電機、変圧器、照明器具、家電、携帯電話、通信装置、パソコン、IC、電池		廃家電	使用済みの家電製品
	自動車部品	完成車（四輪自動車、自動二輪車）		金属スクラップ	有価の鉄くず、鉄スクラップ、アルミくず、鋼くず
化 学 工 業 品	その他の輸送機械	鉄道車両、船舶、自転車、フォークリフト、ゴルフカート	金属製容器包装廃棄物	使用済みのスチール缶、アルミ缶	
	精密機械	計量器、時計、顕微鏡、望遠鏡、デジタルカメラ、光学レンズ、医療用機械	使用済みガラスびん	使用済みのガラスびん	
	その他の機械	電卓、複写機、シュレッダー、自動販売機、信号装置、温水暖房装置	その他容器包装廃棄物	使用済みのペットボトル・プラスチック容器・飲料用紙パック、段ボール容器	
	セメント	各種セメント	古紙	製紙原料故紙、古紙、使用済み段ボール	
	生コンクリート	生コンクリート	廃プラスチック類	合成樹脂くず*（ポリウレタン、スチロール、包装材料、合成皮革）	
	セメント製品	コンクリート製品、セメントモルタル製品、石綿セメント製品	燃え殻	石炭がら、焼却炉の残灰、炉清掃排出物、クランカー	
	ガラス・ガラス製品	板ガラス、ガラス棒、ガラス管、理化学用ガラス器具、ガラスビン、ガラス繊維	汚泥	有機性汚泥、無機汚泥	
	陶磁器	磁器、タイル、セラミックブロック、浴槽、便器、ユニットバス	鉱さい	高炉、転炉、電気炉などの残さい、不良石炭、粉炭がら、廃神物砂	
	その他の窯業品	レンガ、瓦、石灰、石綿製品、炭素電極、耐火ボード、石膏、研磨材	ばいじん	煤煙発生施設又は焼却施設で発生するばいじん	
	重油	A重油、B重油、C重油	その他の産業廃棄物	廃油、紙くず、無価の金属くず、ガラスくず、廃タイヤ、コンクリートくず	
揮発油	各種ガソリン、ベンジン	動植物性飼肥料	骨粉、魚粉、牧草、配合飼料、たい肥、大豆かす		
その他の石油	灯油、軽油、ジェット燃料油、潤滑油	金属製輸送用容器	コンテナ、ドラム缶、石油缶、ボンベ		
			その他の輸送用容器	段ボール箱、木箱、紙袋、麻袋、ざる、たる	
			取り合せ品	各種商品積合せなど	

「第10回 2015年調査 物流センサス 全国貨物純流動調査の結果概要」から抜粋

2) 東京都市圏物資流動調査

東京都市圏物資流動調査(以下：物資流動調査)は東京都市圏交通計画協議会によって概ね10年おきに調査を実施されてきた、東京都市圏に発生・集中する「モノ」の動きを捉えることを目的とした調査である。物資流動調査は事業所機能調査(本体調査)と補完調査から構成される。事業所機能調査(本体調査)の調査項目は、施設の種類、物流発生量、搬出先・搬入元の3つに区分されている。各調査項目の詳細が記された表を表4に示す。調査対象時期は2015年秋期における平均的な搬出・搬入が行われた任意の1日を各事業所が選定して回答を行う。事業所機能調査(本体調査)の調査エリアは東京都(島しょ部を除く)、神奈川県、千葉県、埼玉県の全域と、茨城県南部・中部、栃木県南部、群馬県南部が対象となっている。調査エリアの地図を図2に示す。調査対象は約20万事業所で、有効回答数は4万4千事業所である。回収サンプルの分布を図3に示す。

表4：事業所機能調査(本体調査)の調査内容

調査項目		集計可能な主要な指標	
施設の種類	施設立地	事業所名、所在地(住所)、事業所開設年、立地に際して重要視した要因、 物流施設の建設年、物流施設の建物構造(鉄筋コンクリート(RC)造、鉄骨(S)構造等)	・開設年代別の物流施設立地分布 ・物流施設の立地要因 等
	施設規模等	従業員数、敷地の状況、土地の所有形態、敷地面積、延床面積、 トラック駐車可能台数	・物流施設の規模 ・土地所有形態別(賃貸・所有別)の物流施設数 等
	施設種類	施設種類(事務所、工場、倉庫、集配センター、トラックターミナル等)、施設機能(集配送、保管、流通加工等)、流通加工機能の内容(組立、詰合せ、包装、値札付け、検品等)	・施設種類別の事業所数 ・物流施設の保有機能の種類 等
	施設の物流特性	物資の搬出入の有無、顧客の特性(不特定多数の荷主用、特定荷主用)、代表的な取扱品目、物資の種類(原料・素材、最終消費財・製品等) 物資の搬出・搬入圏域(近隣市区町村以内、東京都市圏全域等)、国際海上コンテナ利用の有無	・取扱品目別の物流施設数 ・輸送圏域(広域・配送)別の物流施設数 ・国際海上コンテナ利用の物流施設数 等
	搬出物資の在庫量等	平均の在庫量、平均的な在庫期間(品目別)、最大時の在庫量(品目別)	・物流施設の地域別・業種別・品目別在庫量 等
物流発生量	搬出・搬入物資量等	搬出重量、搬入重量(利用手段別、車種別) 搬出台数、搬入台数(車種別)	・地域別・業種別・品目別等の貨物発生集中量 等
	搬出・搬入物資の特性	着時刻指定の有無・割合、貨物車の平均積載率(重量・制約と容量制約別、自営別、車両サイズ別)	・物資の着時刻指定割合 ・貨物車の平均積載率 等
搬出先・搬入元	搬出先・搬入元の住所(市区町村別)・箇所数・業種・施設種類、搬出・搬入物資の重量・品目・輸送手段・ 中継地点名(鉄道貨物駅、港湾、空港等) ・貨物車台数・国際海上コンテナ利用の有無	・業種別・品目別の純流動 OD、施設間 OD(重量ベース・貨物車台数ベース)	

「第五回物資流動調査データ利用の手引き」より抜粋

「第五回物資流動調査データ利用の手引き」より抜粋



図 2：事業所機能調査(本体調査)の調査対象圏域

「第五回物資流動調査データ利用の手引き」より抜粋

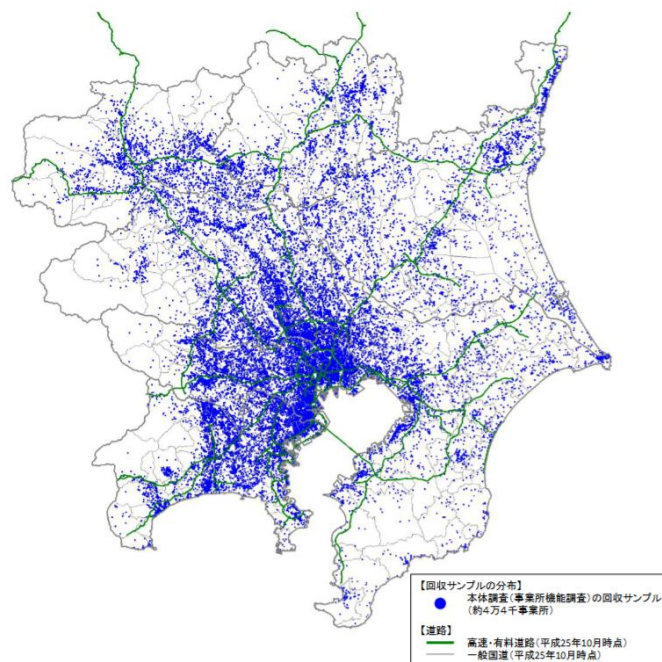


図 3：事業所機能調査(本体調査)の回収サンプルの分布

「第五回物資流動調査データ利用の手引き」より抜粋

3.2.2 調査対象エリア

調査エリアは第 5 回東京都市圏物資流動調査での調査エリアと同様とする(以下東京都市圏)。東京都市圏の面積は約 23,000km²であり、総人口は約 4,280 万人である。交通の面で東京都市圏を見ると、東京湾周辺は多くの国際港が集積しており、国際貨物の輸出入が行われている。東京都大田区には東京国際空港、千葉県成田市には成田空港が所在し旅客のみならず、航空機を利用した貨物輸送についても行われている。

高速道路ネットワークに着目すると、東京都市圏では 3 環状 9 放射道路が整備されている。環状道路は内側から首都高速中央環状線、東京外かく環状道路、首都圏中央連絡自動車道がそれぞれ都心から半径 8km、15km、40-60km の位置に敷かれている。

放射道路では、館山自動車道、東関東自動車道、常磐自動車道、東北自動車道、関越自動車道、上信越自動車道、中央自動車道、東名高速道路、第三京浜道路、首都高速湾岸線の 9 つの放射道路が存在し、そのうち常磐自動車道、東北自動車道、関越自動車道、上信越自動車道、中央自動車道、東名高速道路の 6 つの高速道路が主に東京都市圏の内外を接続する高速道路になっている。

本研究では東京都市圏外を次に示す 6 地域に分割をした。6 地域は東京都市圏内外を結ぶ高速道路を基準に市町村単位で分割を行った。地域の分割に当たってはその市町村に貨物を搬入・搬出する際に利用すると考えられる高速道路をもとに分類を行った。また、本章以降においては、各高速道路上で東京都市圏と各地域の境界に該当する地点を、「地域の結節点」として表現することとする。市町村ごとの地域分割の結果を図 4 に示す。

東北道・常磐道エリア/上信越・中央道エリア/中央道・東名エリアについては市域にアクセスする際に複数の道路の利用が想定されたため、搬入・搬出の際利用する高速道路の決定には確率を 50% ずつに設定し確率的に決定した。また本章以降のモデル構築においては各エリアを表 5 に示す番号を用いて変数やパラメータの表記を行う。

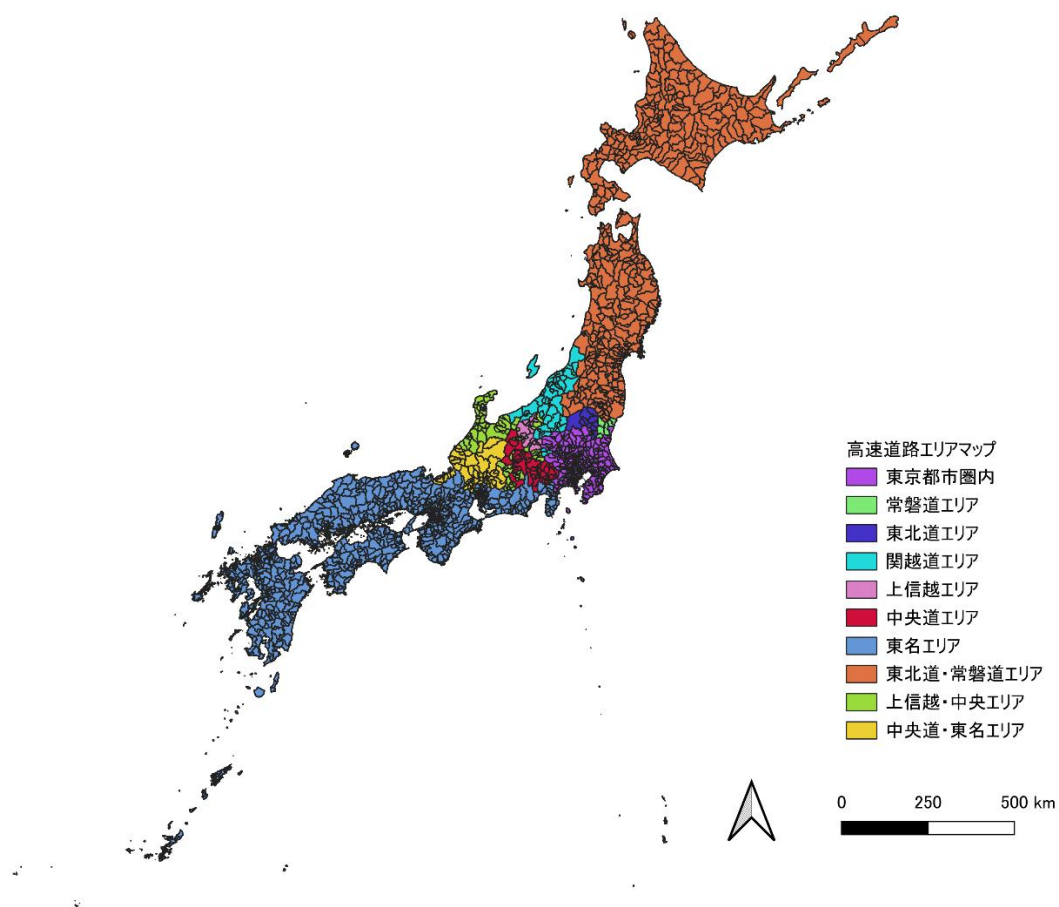


図 4 : 市町村別のエリア分類

表 5 : モデル内でのエリア名称

	エリア名
地域 1	常磐道エリア
地域 2	東北道エリア
地域 3	関越道エリア
地域 4	上信越道エリア
地域 5	中央道エリア
地域 6	東名エリア

第4章 都市間貨物発生・集中モデル

本章ではモデルフレームワークの1段階目である都市間貨物発生・集中モデルについて説明を行う。ここでは都市圏内外貨物輸送において、事業所ごとの貨物の発生量、集中量を重量ベースで決定する。都市間貨物発生・集中モデルは大きく2つのステップに分割される。

1. 都市圏内外輸送の発生量・集中量の決定
2. 都市圏内外貨物輸送事業所の決定と発生集中量の割り当て

この2つのステップについて以下に説明を行う。

4.1 貨物の発生・集中量の決定

4.1.1 事業所における発生集中量の決定

ここでは東京都市圏内外の貨物発生量及び集中量を決定する。都市圏内外の貨物発生・集中量を求めるにあたり、初めに、東京都市圏内の各事業所における貨物の生産量及び消費量を決定する。この時点で決定される生産量・消費量は東京都市圏内々輸送と内外輸送の双方を含む。決定の手順は SimMobility Freight で提案された Freight generation Module を用いる。モデル式は Sakai et al.(2019)で紹介された手法を用いる。パラメータは東京都市圏物資流動調査を用い東京都市圏向けに調整されたものを用いる。本論文では Freight generation Module での貨物生産量及び消費量の決定プロセスを簡単に説明する。Freight generation Module は大きく3つのステップに分割できる。

- (1) Active supplier/receiver identification
- (2) Outbound/inbound commodity type
- (3) Production/consumption

(1) Active supplier/receiver identification

初めに、東京都市圏内の事業所が貨物輸送活動を行う事業所か否かを決定する。決定には二項ロジットモデルを用いる。産業タイプ ind 、施設タイプ fnc の事業所 n が貨物輸送活動を行う効用 $U_{n,active}$ は確定項 $V_{n,active}$ とランダム項 $\varepsilon_{n,active}$ を用いて次のように表せる。

$$U_{n,active} = V_{n,active} + \varepsilon_{n,active} \quad (1)$$

$$V_{n,active} = \beta_{const}^{ind,fnc} + \beta_{floor}^{ind,fnc} \ln floor_n + \beta_{emp}^{ind,fnc} \ln enp_n \quad (2)$$

ここで

enp_n : 事業所 n の従業員数

$floor_n$: 事業所 n の床面積

$\beta_{const}^{ind,fnc}, \beta_{floor}^{ind,fnc}, \beta_{emp}^{ind,fnc}$: モデルパラメータ

そのため、事業所 n が貨物輸送活動を行う確率は次のように表現できる。

$$P_{n,active} = \frac{\exp(V_{n,active})}{1 + \exp(V_{n,active})} \quad (3)$$

(2) Outbound/inbound commodity type

次に貨物輸送活動を行う事業所に対して、多項ロジットモデルを用いて、生産及・消費する品目の決定を行う。

初めに、事業所 n が生産する品目を決定する。事業所 n が生産する品目 com を選択する効用 $U_{n,com_{prod}}$ は確定項 $V_{n,com_{prod}}$ と独立同一なガンベル分布に従うランダム項 $\varepsilon_{n,com_{prod}}$ を用いて次のように表現できる。

$$U_{n,com_{prod}} = V_{n,com_{prod}} + \varepsilon_{n,com_{prod}} \quad (4)$$

$$V_{n,com_{prod}} = \beta_{const}^{com_{prod},ind,fnc} + \beta_{emp}^{com_{prod},ind,fnc} \ln emp_n \quad (5)$$

ここで

$\beta_{const}^{com_{prod},ind,fnc}$, $\beta_{emp}^{com_{prod},ind,fnc}$: 推定されるモデルパラメータ

また、事業所 n が各品目を選択する確率 $P_{n,com_{prod}'}$ は次のように表現できる。

$$P_{n,com_{prod}'} = \frac{V_{n,com_{prod}'}}{\sum_{com_{prod}} \exp(V_{n,com_{prod}})} \quad (6)$$

続いて、消費品目を決定する。消費品目の決定には前ステップで決定した生産品目を考慮した多項ロジットモデルを用いる。事業所 n が消費する品目 com を選択する効用 $U_{n,com_{cons}}$ は確定項 $V_{n,com_{cons}}$ と独立同一なガンベル分布に従うランダム項 $\varepsilon_{n,com_{cons}}$ を用いて次のように表現できる。

$$U_{n,com_{cons}} = V_{n,com_{cons}} + \varepsilon_{n,com_{cons}} \quad (7)$$

$$V_{n,com_{cons}} = \beta_{const}^{com_{cons},ind,fnc} + \beta_{emp}^{com_{cons},ind,fnc} \ln emp_n + \beta_{com_{prod}}^{com_{cons}} dum_n^{com_{prod}=com_{cons}} \quad (8)$$

ここで

$dum_n^{com_{prod}=com_{cons}}$: 生産の品目と消費の品目が同一の場合 1 をとり、それ以外は 0 をとるダミー変数

$\beta_{const}^{com_{cons},ind,fnc}$, $\beta_{emp}^{com_{cons},ind,fnc}$, $\beta_{com_{prod}}^{com_{cons}}$: モデルパラメータ

$$P_{n,com_{cons}'} = \frac{V_{n,com_{cons}'}}{\sum_{com_{cons}} \exp(V_{n,com_{cons}})} \quad (9)$$

(3) Production/consumption

最後に事業所 n が生産・消費する年間の重量を決定する。決定には一般化線形モデルを用いて決定される。それぞれの生産量 $prod_n$ 、消費量 $cons_n$ は次の式 10 と式 11 で決定される。

$$prod_n = \beta_{const}^{prod,com,ind,fnc} + \beta_{floor}^{prod,com,ind,fnc} floor_n + \beta_{emp}^{prod,com,ind,fnc} emp_n + \beta_{floor \cdot emp}^{prod,com,ind,fnc} floor_n \cdot emp_n \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
cons_n = & \beta_{const}^{cons,com,ind,fnc} + \beta_{floor}^{cons,com,ind,fnc} floor_n + \beta_{emp}^{cons,com,ind,fnc} emp_n \\
& + \beta_{floor \cdot emp}^{cons,com,ind,fnc} floor_n \cdot emp_n
\end{aligned} \tag{11}$$

ここで

$\beta_{const}^{prod,com,ind,fnc}$, $\beta_{floor}^{prod,com,ind,fnc}$, $\beta_{emp}^{prod,com,ind,fnc}$, $\beta_{floor \cdot emp}^{prod,com,ind,fnc}$, $\beta_{const}^{cons,com,ind,fnc}$, $\beta_{floor}^{cons,com,ind,fnc}$, $\beta_{emp}^{cons,com,ind,fnc}$, $\beta_{floor \cdot emp}^{cons,com,ind,fnc}$: モデルパラメータ

4.1.2 都市圏内外輸送重量の決定

前節では、東京都市圏における内々および内外を含む事業所の貨物生産量と消費量を推計した。本段階では、都市圏内外間輸送における貨物の発生量および集中量を決定する。

まず、東京都市圏物資流動調査のデータを用いて、東京都市圏内で消費される貨物重量のうち都市圏外から搬入される割合、および東京都市圏内で生産される貨物のうち都市圏外へ搬出される割合を算出した。この結果を基に、東京都市圏内で生産される貨物量に対する品目・地域別の搬出割合を表 6 に示すとともに、東京都市圏内で消費される貨物量に対する品目・地域別の搬入割合を表 7 に示す。

次に表 6 の搬出割合に東京都市圏内の貨物発生量を品目別に乗じることで、東京都市圏内から都市圏外へ搬出される貨物発生量と、都市圏外での集中量を算出する。同様に、表 7 の搬入割合に東京都市圏内の貨物消費量を乗じることで、都市圏外での貨物発生量および都市圏内での消費量を算出する。

品目・地域別の東京都市圏への貨物の発生量を表 8 に示す。また品目・別地域別の東京都市圏から集中量を表 9 に示す。

表 6：東京都市圏外への搬出割合

	地域 1	地域 2	地域 3	地域 4	地域 5	地域 6
品目 1	5.2%	5.4%	1.7%	0.7%	1.1%	7.2%
品目 2	1.3%	1.4%	0.4%	0.6%	1.6%	8.0%
品目 3	3.0%	3.8%	2.0%	1.1%	1.9%	19.5%
品目 4	1.8%	1.8%	0.2%	0.7%	1.1%	6.9%
品目 5	0.6%	0.6%	0.1%	0.0%	0.2%	1.0%
品目 6	0.9%	1.0%	0.6%	0.3%	0.6%	7.1%
品目 7	2.4%	2.6%	0.5%	0.5%	1.3%	15.4%
品目 8	1.0%	1.0%	0.7%	0.2%	0.9%	10.9%
品目 9	3.6%	4.5%	1.1%	1.0%	1.0%	2.9%

表 7：東京都市圏外からの搬入割合

	地域 1	地域 2	地域 3	地域 4	地域 5	地域 6
品目 1	5.1%	6.1%	2.7%	1.4%	1.9%	5.9%
品目 2	5.3%	5.5%	2.3%	1.1%	2.0%	12.9%
品目 3	3.9%	4.9%	2.1%	0.6%	1.6%	16.7%
品目 4	2.4%	2.1%	1.1%	0.5%	0.8%	4.9%
品目 5	0.8%	2.0%	0.5%	0.2%	0.6%	1.2%
品目 6	5.4%	5.9%	1.1%	1.5%	3.6%	21.7%
品目 7	3.0%	3.0%	2.2%	1.1%	1.6%	17.4%
品目 8	3.4%	3.6%	2.7%	2.5%	3.7%	51.4%
品目 9	3.4%	5.9%	2.5%	0.8%	0.6%	7.1%

表 8 : 東京都市圏外への搬出重量(千トン/年)

	地域 1	地域 2	地域 3	地域 4	地域 5	地域 6
品目 1	26,841	28,143	8,906	3,407	5,511	37,268
品目 2	8,937	9,722	2,905	4,090	10,898	53,740
品目 3	38,187	47,236	24,865	13,554	24,320	245,252
品目 4	5,138	5,372	553	2,168	3,230	20,222
品目 5	5,531	6,195	815	202	2,185	9,867
品目 6	3,294	3,501	2,140	1,150	2,073	25,841
品目 7	23,681	24,800	5,122	4,921	12,418	149,690
品目 8	3,467	3,589	2,599	638	3,098	39,094
品目 9	8,870	11,145	2,741	2,458	2,447	7,025

表 9 : 東京都市圏外からの搬入重量(千トン/年)

	地域 1	地域 2	地域 3	地域 4	地域 5	地域 6
品目 1	26,138	31,583	13,937	7,236	10,017	30,735
品目 2	35,801	36,980	15,473	7,632	13,756	86,841
品目 3	48,889	61,772	26,403	7,837	20,213	210,317
品目 4	6,852	5,988	3,193	1,333	2,336	14,241
品目 5	8,008	19,159	4,860	2,183	5,838	11,678
品目 6	19,779	21,486	4,040	5,518	12,982	79,006
品目 7	28,727	29,291	21,538	11,043	15,969	169,033
品目 8	12,221	12,796	9,810	8,812	13,169	184,360
品目 9	8,502	14,646	6,096	1,924	1,478	17,549

4.2 都市圏内外貨物輸送事業所の決定と発生集中量の割り当て

この節では、都市間貨物輸送に従事する事業所を決定し、その事業所の都市圏内外の貨物生産量および集中量を決定する。

4.2.1 都市圏内外貨物輸送事業所の決定

初めに都市間貨物輸送に従事する事業所を決定する。決定のプロセスは鷹野(2023)で提案された手法を用いる。本節では鷹野(2023)で提案したモデルを簡単に説明する。

鷹野(2023)では都市圏内外貨物輸送事業所を搬入と搬出の場合でそれぞれ次のように定義している。

- ・搬入：事業所に集中する貨物車の出発地に東京都市圏外の物を含む事業所
- ・搬出：事業所から発生する貨物車の到着地に東京都市圏外の物を含む事業所

鷹野(2023)は東京都市圏物資流動調査(2015)のデータから事業所ごとに都市圏内外貨物輸送事業所であるか否かを判別するモデルを構築した。モデルには二項ロジットモデルを用い、事業所の機能ごとに、工場・物流施設・事務所のそれぞれに対してモデルを構築した。式 12 に工場 n 、式 14 に物流施設 n 、式 16 に事務所 n が、都市圏内外貨物事業所である効用関数 $V_{n,1}$ 、都市圏内外貨物事業所でない効用 $V_{n,0}$ をそれぞれ定める。

(1)工場の効用

$$\begin{aligned}
 V_{n,1} = & \beta_{\text{weight}} \ln(\text{Weight}_n) + \beta_{\text{Food}} \text{Food}_n + \beta_{\text{Bulk}} \text{Bulk}_n + \beta_{\text{Machine}} \text{Machine}_n \\
 & + \beta_{\text{Food} * \ln(\text{Weight})} \text{Food}_n * \ln(\text{Weight}_n) + \beta_{\text{Bulk} * \ln(\text{Weight})} \text{Bulk}_n * \ln(\text{Weight}_n) \\
 & + \beta_{\text{Machine} * \ln(\text{Weight})} \text{Machine}_n * \ln(\text{Weight}_n) + \varepsilon_n
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$V_{n,0} = 0 \tag{13}$$

ここで

Weight_n ：事業所 n の搬入または搬出重量

Food_n ：事業所 n の主要な品目が食品であれば 1、それ以外であれば 0 のダミー変数

Bulk_n ：事業所 n の主要な品目がバルク品であれば 1、それ以外であれば 0 のダミー変数

Machine_n ：事業所 n の主要な品目が機械品であれば 1、それ以外であれば 0 のダミー変数

$\beta_{\text{weight}}, \beta_{\text{Food}}, \beta_{\text{Bulk}}, \beta_{\text{Machine}}, \beta_{\text{Food} * \ln(\text{Weight})}, \beta_{\text{Bulk} * \ln(\text{Weight})}, \beta_{\text{Machine} * \ln(\text{Weight})}$ ：モデルパラメータ、搬入・搬出それぞれで推定される

(2)物流施設の効用

$$\begin{aligned}
 V_{n,1} = & \beta_{\text{weight}} \ln(\text{Weight}_n) + \beta_{\text{Food}} \text{Food}_n + \beta_{\text{Bulk}} \text{Bulk}_n + \beta_{\text{Machine}} \text{Machine}_n \\
 & + \beta_{\text{manufacture}} \text{Manufacture}_n + \beta_{\text{Transport}} \text{Transport}_n \\
 & + \beta_{\text{Warehouse}} \text{Warehouse}_n + \beta_{\text{Wholesale}} \text{Wholesale}_n + \beta_{\text{Food} * \ln(\text{Weight})} \text{Food}_n \\
 & * \ln(\text{Weight}_n) + \beta_{\text{Bulk} * \ln(\text{Weight})} \text{Bulk}_n * \ln(\text{Weight}_n) \\
 & + \beta_{\text{Machine} * \ln(\text{Weight})} \text{Machine}_n * \ln(\text{Weight}_n) + \varepsilon_n
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$V_{n,0} = 0 \tag{15}$$

ここで

$Manufacture_n$: 事業所 n の主要な業種が製造業であれば 1、それ以外であれば 0 のダミー変数

$Transport_n$: 事業所 n の主要な業種が運輸業であれば 1、それ以外であれば 0 のダミー変数

$Warehouse_n$: 事業所 n の主要な業種が倉庫業であれば 1、それ以外であれば 0 のダミー変数

$Wholesale_n$: 事業所 n の主要な業種が卸売業であれば 1、それ以外であれば 0 のダミー変数

$\beta_{weight}, \beta_{Food}, \beta_{Bulk}, \beta_{Machine}, \beta_{manufacture}, \beta_{Wholesale}, \beta_{Food*ln(Weight)}, \beta_{Bulk*ln(Weight)}, \beta_{Machine*ln(Weight)}$

:モデルパラメータ、搬入・搬出それぞれで推定される

(3)事務所の確率効用

$$V_{n,1} = \beta_{weight} \ln(Weight_n) + \varepsilon_n \quad (16)$$

$$V_{n,0} = 0 \quad (17)$$

ここで

β_{weight} : モデルパラメータ、搬入・搬出それぞれで推定される

また事業所 n が都市圏内外貨物輸送事業所である確率は次の式 18 で求まる。

$$P_{n,1} = \frac{\exp(V_{n,1})}{1 + \exp(V_{n,1})} \quad (18)$$

本研究では式 18 で定められる確率と、鷹野(2023)が構築したモデル、並びに推定したモデルパラメータをもとに都市圏内外貨物輸送を行う事業所を確率に基づき決定する。

4.2.2 事業所への発生量集中量の割り当て

最後に東京都市圏内の事業所に対して、都市圏内外輸送の発生量及び集中量の割り当てを行う。本研究では、事業所の都市間輸送活動について次の仮定を設ける。

- ・ 東京都市圏外から貨物を搬入する事業所は、貨物を東京都市圏外からのみ搬入し、東京都市圏内からの搬入は行わない。
- ・ 東京都市圏外へ貨物を搬出する事業所は、貨物を東京都市圏外へのみに搬出し、東京都市圏内への搬出は行わないものとする。
- ・ 東京都市圏外から貨物を搬入する事業所は、都市圏内にのみ搬出を行う。
- ・ 東京都市圏外へ貨物を搬出する事業所は、東京都市圏内からのみ搬入を行う。

これらの仮定の下で、各事業所の都市間貨物輸送における発生量および集中量を次の条件をもとに決定する。都市圏搬入事業所については、品目ごとに、4.2.1 で決定した都市圏外から貨物の搬入を行う都市圏内外輸送事業所の中から、4.1.2 で決定した都市圏内の搬入重量を満たすように消費量が多い事業所から順に選定する。また都市圏搬出事業所については、品目

ごとに、4.2.1で決定した都市圏外へ搬出を行う都市圏内外輸送事業所の中から、4.1.2で決定した都市圏内の搬出重量を満たすように生産量が多い事業所から順に選定する。

第5章 サプライヤー選択モデル

本章では4章の結果として出力された都市圏内外貨物輸送における貨物の生産量、消費量をもとに、貨物を仕入れるサプライヤーを選択する手順を説明する。

サプライヤー選択モデルは大きく2つのステップから構成される。

- ・ 受取需要への分割
- ・ サプライヤー選択

1つ目の受取需要への分割では、4章で決定した事業所の年間消費量を契約に基づく貨物の受取需要へと分割をする。

2つ目のサプライヤー選択では、分割された各貨物の受取需要に対してサプライヤー選択モデルを適用して、商品を仕入れるサプライヤーを決定する。

5.1 受取需要への分割

本章では、都市圏内外で貨物輸送に従事する事業所の消費量を、貨物の受取需要として分割する手法を説明する。

はじめに、物流センサス（3日間調査）のデータを基に、品目ごとの平均出荷重量を算出した。各事業所の消費重量を平均出荷重量で割り、各事業所の消費量がいくつの契約で構成されるかを算定した。

次に、出荷サイズが対数正規分布に従うと仮定し、契約ごとの出荷重量をランダムに決定した。品目ごとの出荷重量の分布平均出荷重量と標準偏差を表10に示している。

最後に、ランダムに決定された出荷重量の総和が事業所の消費量と一致するよう、契約重量を圧縮または拡大の補正処理を施した。

表 10：搬入・搬出時の出荷サイズ

	搬入		搬出	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
品目 1	4.70	2.51	5.29	2.37
品目 2	4.85	2.65	5.02	2.51
品目 3	3.31	2.49	2.40	2.36
品目 4	3.63	2.97	6.94	2.92
品目 5	9.43	3.62	8.71	1.87
品目 6	4.28	2.86	5.05	3.15
品目 7	3.48	2.75	3.22	2.54
品目 8	3.98	2.69	4.16	2.72
品目 9	4.03	2.86	5.90	2.47

5.2 サプライヤー選択

本節では 5.1 で分割した貨物の受取需要に対して、その貨物を供給するサプライヤーを選択するサプライヤー選択モデルを構築する。

サプライヤー選択モデルについては数多くの手法が提案されている Sakai et al.(2020)は送り手と受取手の事業所の機能間でサプライヤー選択行動に影響を及ぼすことに着目し、東京都市圏物資流動調査を用い東京都市圏内の貨物輸送におけるサプライヤー選択モデルを構築した。都市間貨物輸送におけるサプライヤー選択の適応例として、Ben-Akiva et al.(2008)は提案された ADA プロセスの中で地域間の生産消費フローから企業間のフローに細分化する手法を提案している。経済統計から得られた地域間の生産消費フローと Commodity flow survey などの企業間の貨物取引について調査された調査データを用い事業所間のフローを拡大することで貨物フローを決定している。また Pourabdollahi et al. (2017) は、サプライヤー選択を行う際に重要となる要素について調査し、商品価格/サプライヤーの金融的信用度/納期/距離/過去の取引関係に基づくロイヤリティ/提供されるサービスの質/サプライヤーの生産能力とその信頼性/商品の品質や技術的な優位性がサプライヤーの 8 つの項目が重要であることを示した。

本研究では

- (1)東京都市圏内で貨物を消費する際の東京都市圏外のサプライヤー選択(サプライヤー選択モデル(搬入))
 - (2)東京都市圏外で貨物を消費する際の東京都市圏内のサプライヤー選択(サプライヤー選択モデル(搬出))
- についてそれぞれモデル構築を行う。

5.2.1 使用データとデータ加工

サプライヤー選択モデルの構築には物流センサスの 3 日間調査を用いる。物流センサスを用いて都市圏内外の搬入・搬出データを作成するために表 11 に示す条件で抽出を行った。抽出した後の品目ごとの搬入・搬出のサンプル数と拡大係数を考慮したサンプル数について表 12 にまとめる。

表 11：サプライヤー選択モデル データの抽出条件

	搬入	搬出
条件	1. 東京都市圏外から貨物が出荷 2. 東京都市圏内で貨物を受取 3. 主たる輸送機関が自家用トラック/営業用トラック(宅配便等混載)/営業用トラック（一車貸切）/トレーラー	1. 東京都市圏内から貨物を出荷 2. 東京都市圏外で貨物を受取 3. 主たる輸送機関が自家用トラック/営業用トラック(宅配便等混載)/営業用トラック（一車貸切）/トレーラー

表 12：品目別の搬出・搬入サンプル数

	搬入	搬出(拡大済み)	搬出	搬出(拡大済み)
品目 1	3,284	104,691	2,508	43,206
品目 2	75,48	277,119	5,483	164,560
品目 3	25,211	518,515	22,185	324,396
品目 4	1,377	117,042	178	2,220
品目 5	112	1,257	179	5,832
品目 6	9,566	75,277	6,521	109,797
品目 7	19,252	234,018	19,328	359,699
品目 8	21,127	190,564	26,667	326,878
品目 9	699	59,349	739	57,039

5.2.2 サプライヤー選択モデル(搬入)

本節では、都市圏搬入の受取需要に対してサプライヤーを選択するモデルを構築する。図 5 は東京都市圏外から都市圏内に搬入される貨物のフローの概念図である。本モデルでは各地域に所在するサプライヤーの選択確率を集計し、それぞれの地域の選択を行うモデルを構築する。モデルの行う選択行動の概念図を図 6 に示す。

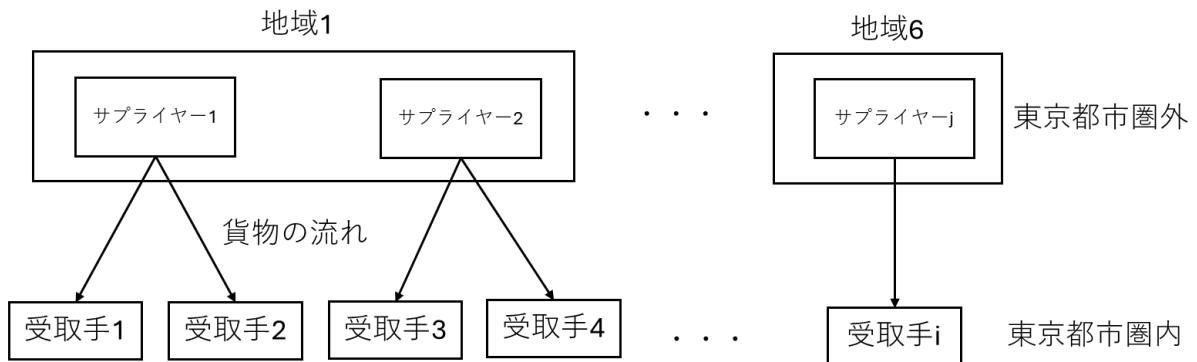


図 5：物流センサスで観測される都市圏搬入貨物の流れ

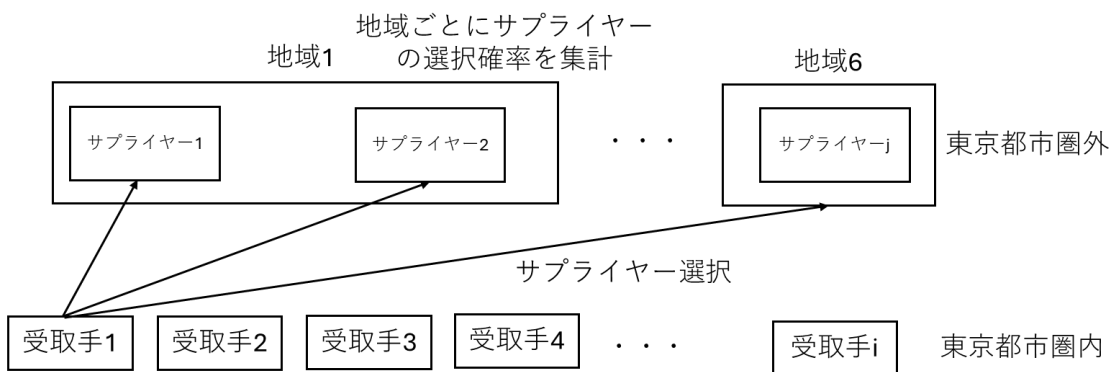


図 6：サプライヤー選択モデル(搬入)の概念図

1) モデルの定式化：サプライヤー選択モデル(搬入)

サプライヤー選択モデル(搬入)には多項ロジットモデルを用いる。

ここで、実際のサプライヤー選択を行う意思決定者は個々のサプライヤーが存在する中から一つのサプライヤーを選択するが、今回構築するモデルのように個々のサプライヤーの選択確率を集約し、各地域を選択するモデルを構築する場合には、地域への集約時に各サプライヤーの選択確率の総和と地域の確率に変化が生じないような処理を行う必要がある。Ben-Akiva and Lerman(1985)らはこうした問題に対して対処方法を提案しており、本研究でもその手法を用いてモデル構築を行う。本研究における効用関数の導出を以下に示す。

まずゾーン i に所在する個々のサプライヤーの集合を J_i とし、個々のサプライヤーの選択効用をそれぞれ v_j とする ($j \in J_i$)。そのためゾーン i の選択確率は式 19 で表現することができる。

$$P_i = \frac{\sum_{j \in J_i} \exp(v_j)}{\sum_n \sum_{k \in J_n} \exp(v_k)} \quad (19)$$

$$= \frac{\exp(V_i)}{\sum_n \exp(V_n)} \quad (20)$$

ただし、期待最大効用から

$$V_i = \ln \sum_{j \in I_i} \exp(v_j) \quad (21)$$

とおける。

ここでゾーン i 内に所在するサプライヤーの平均効用関数 \bar{v}_i を導入する。

$$\bar{v}_i = \frac{1}{M_i} \sum_{j \in I_i} v_j \quad (22)$$

M_i はゾーン内に所在するサプライヤーの数とする。

この平均効用関数 \bar{v}_i を用いて式(21)を以下のように変形する。

$$V_i = \ln \left[\exp(\bar{v}_i) \sum_{j \in I_i} \exp(v_j - \bar{v}_i) \right] \quad (23)$$

$$= \bar{v}_i + \ln \left[\sum_{j \in I_i} \exp(v_j - \bar{v}_i) \right] \quad (24)$$

$$= \bar{v}_i + \ln \left[\frac{1}{M_i} \exp(v_j - \bar{v}_i) \right] + \ln(M_i) \quad (25)$$

式(25)の第3項はそれぞれのゾーン内のサプライヤー数に自然対数を取った項であり、そのゾーンにおける規模を表す項と考えることができる。第2項は各ゾーン内に所在するサプライヤーの効用関数の変動を表した項である。第1項と第2項は同様にゾーン i の特性変数を用いた関数として説明できると仮定すれことにより、ゾーン i を選択する確率は次のように書くことができる。

$$P_i = \frac{\exp(\bar{v}_i + \ln(M_i))}{\sum_j \exp(\bar{v}_j + \ln(M_j))} \quad (26)$$

ここで \bar{v}_i は式(25)の第1項と第2項の和を表し、ゾーン i を選択することの効用を現す。

さらに、 M_i をゾーン i の観測可能な規模変数である、貨物生産量(Freight Production) FP_i を用いて次のように表現できると仮定する。

$$M_i = \alpha \cdot FP_i \quad (27)$$

これを式(26)に代入すると、式を変形することにより、ゾーン i を選択する確率は式(28)のように表現することができる。

$$P_i = \frac{\exp(\bar{v}_i) \cdot \alpha \cdot FP_i}{\sum_j [\exp(\bar{v}_j) \cdot \alpha \cdot FP_j]} \quad (28)$$

$$P_i = \frac{\bar{v}_j + \ln FP_i}{\sum_j (\bar{v}_j + \ln FP_j)} \quad (29)$$

したがって今回の個々のサプライヤーを各地域に統合し、地域を選択モデルを行うときには通常の効用関数に加えて、地域内に含まれるサプライヤーの貨物生産量に対数をとったものを加えることで効用関数を定義することが出来ることが分かる。

効用の説明変数としては各地域における定数項と、受取事業所から結節点までの距離、地域内の貨物生産量を用いて式(32)のように定義する。

$$U_{i,j} = V_{i,j} + \varepsilon_{i,j} \quad (30)$$

$$V_{i,j} = \beta_{const,j}^{com} + \beta_{dist}^{com} \ln dist_{i,j} \quad (31)$$

$$P_{i,j} = \frac{\exp(V_{i,j} + \ln FP_j^{com})}{\sum_{j' \in j} \exp(V_{i,j'} + \ln FP_{j'}^{com})} \quad (32)$$

ここで

$U_{i,j}$: 受取需要 i がサプライヤーの所属する地域 j のサプライヤーを選択する効用

$V_{i,j}$: 受取需要 i がサプライヤーの所属する地域 j のサプライヤーを選択する効用の確定項

$\varepsilon_{i,j}$: 受取需要 i がサプライヤーの所属する地域 j のサプライヤーを選択する効用のランダム項

$dist_{i,j}$: 受取手 i から地域 j の結節点までの直線距離(km)

FP_j : 地域 j の年間貨物生産量(t)

$\beta_{const,j}^{com}$: 品目、地域ごとの定数項

$\beta_{dist,j}^{com}$: 距離のパラメータ

なお、地域・品目ごとの貨物生産量は物流センサスの3日間調査の値を年間の貨物出荷重量に拡大して求めた。地域、品目ごとの貨物生産量を表 13 に示す。

表 13：品目・地域別の年間貨物生産量(千トン/年)

	地域 1	地域 2	地域 3	地域 4	地域 5	地域 6
品目 1	10,687	10,119	1,422	1,258	1,456	56,013
品目 2	8,027	7,633	4,339	2,876	6,439	80,584
品目 3	7,593	6,969	6,334	1,414	4,905	63,991
品目 4	3,713	2,417	3,399	666	880	37,662
品目 5	53,132	46,127	19,921	9,486	29,566	234,145
品目 6	11,953	11,653	4,940	4,099	6,031	177,964
品目 7	4,015	4,113	2,032	1,951	5,338	87,344
品目 8	37,313	44,506	12,135	10,288	18,045	420,998
品目 9	9,935	8,394	2,010	1,435	2,353	75,736

表 14：品目・地域別の出荷件数(件/3日間)

	地域 1	地域 2	地域 3	地域 4	地域 5	地域 6	合計
品目 1	9,705	10,911	7,668	2,441	8,934	70,583	110,242
品目 2	27,620	16,774	6,115	33,680	21,905	180,392	286,486
品目 3	25,558	27,770	11,852	6,808	44,002	419,265	535,255
品目 4	3,489	4,443	10	11,656	8,854	88,769	117,221
品目 5	59	35	9	18	41	1,150	1,311
品目 6	3,438	3,460	2,758	16,104	9,696	40,678	76,133
品目 7	15,633	17,367	5,573	11,463	58,728	130,705	239,470
品目 8	11,142	10,912	4,672	4,595	8,658	154,066	194,045
品目 9	161	281	250	184	1,105	57,403	59,384
合計	96,805	91,953	38,907	86,950	161,923	1,143,010	1,619,548

2) 結果と考察

品目別に推定したモデルパラメータを表 15 に示す。品目 2,5,8 については β_{dist}^{com} のパラメータが負で推定されたため、 $dist_{i,j}$ の変数を除き再推定した。調整済み尤度比では品目 9 が最も高く、品目 8 が最も低い値をとった。それぞれの品目に対して個別にモデルを推定しているため、品目間でパラメータの大小を比較することはできない。しかし、 $\beta_{const,5}^{com}$ の推定結果については、同品目のほかの地域と定数項と比較しても高い値をとっている。中央道エリアはほかの地域と比較しても貨物生産量が多いわけではないが出荷件数は多くなっており、小規模な出荷を多く扱っていることを現している。そのためサプライヤー選択を行う際に中央道エリアはほかの地域と比較しても高く選択されている。

表 15：サプライヤー選択モデルのパラメータ推定結果

	品目 1		品目 2		品目 3		品目 4		品目 5		品目 6		品目 7		品目 8		品目 9	
	係数	t-値	係数	t-値	係数	t-値	係数	t-値	係数	t-値	係数	t-値	係数	t-値	係数	t-値	係数	t-値
$\beta_{const,1}^{com}$	-0.28	-21.7	-0.05	-6.2	-0.63	-85.6	-0.35	-19.0	-1.74	-9.30	0.34	18.6	1.13	132.7	-0.37	-36.0	-3.65	-46.5
$\beta_{const,2}^{com}$	-0.08	-7.31	0.09	10.9	-0.77	-109	-0.41	-22.8	-1.74	-9.33	0.15	8.7	0.89	101.0	-0.46	-43.8	-3.08	-50.2
$\beta_{const,3}^{com}$	1.75	141.6	-0.46	-35.6	-1.15	-122	-6.48	-34.9	-2.02	-6.00	0.91	46.6	0.67	48.9	0.05	3.4	-1.64	-25.8
$\beta_{const,4}^{com}$	0.68	33.1	1.43	222.3	0.05	4.4	2.33	196.7	-0.78	-3.22	2.68	268.1	1.51	153.6	0.49	32.5	-1.68	-22.1
$\beta_{const,5}^{com}$	2.24	244.4	0.63	97.05	0.20	35.1	1.41	91.6	1.35	21.4	2.27	222.4	2.07	368.9	0.10	9.0	-1.05	-26.0
β_{dist}^{com}	-0.34	-49.2			-0.25	-58.3	-0.54	-30.3					-0.05	-9.5			-0.36	-18.0
$L(0)$	-172636		-348273		-453017		-135034		-1597		-136255		-376206		-154537		-21794	
$L(\bar{\beta})$	-136148		-326048		-421908		-101849		-1153		-100929		-301080		-151482		-9840	
尤度比	0.2114		0.0638		0.0687		0.2458		0.2783		0.2593		0.1997		0.0197		0.5485	
調整済み尤度比	0.2113		0.0638		0.0687		0.2457		0.2745		0.2592		0.1997		0.0197		0.5482	
サンプル数	3033		7282		24580		1346		83		9359		18533		20688		694	

5.2.3 サプライヤー選択モデル(搬出)

本節では、東京都市圏内から東京都市圏外へ搬出される貨物におけるサプライヤー選択モデルについて説明する。図 7 は、物流センサスで観測された貨物フローの概念図を示している。この図から、各サプライヤーはそれぞれ特定の受取手に向けて貨物を搬出する。本モデルでは、同一品目を搬出するサプライヤーを選択肢集合とし、その中から実際に選択されたサプライヤーを説明する選択モデルを構築する。

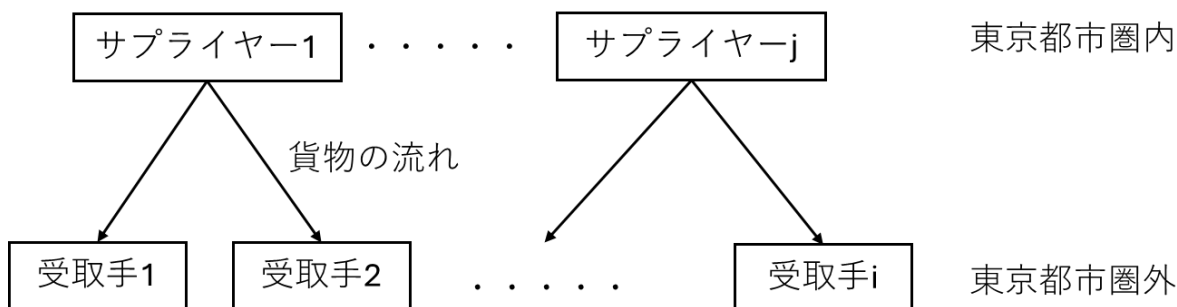


図 7：物流センサスにおける貨物フローの概念図(搬出)

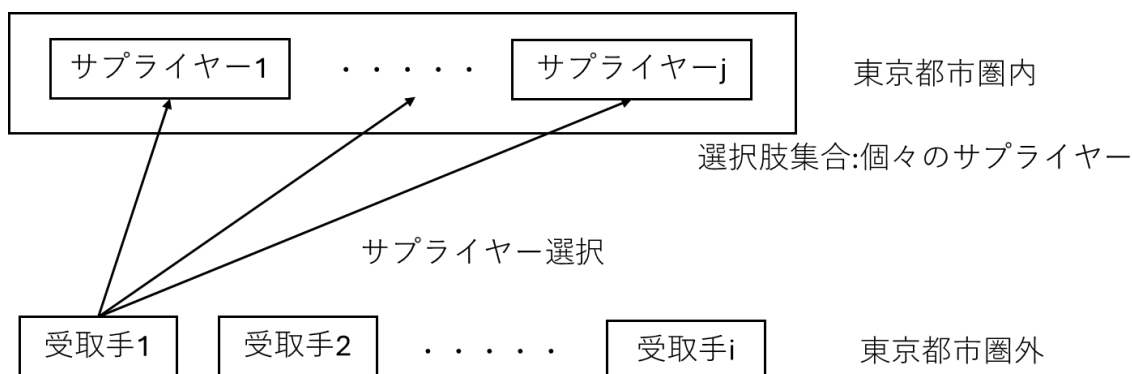


図 8：サプライヤー選択モデルにおける選択行動の概念図(搬出)

1) モデルの定式化：サプライヤー選択モデル(搬出)

モデルには、搬入モデルと同様に多項ロジットモデルを用いる。説明変数として、サプライヤーから受取手が所属する地域への接続部までの距離と各事業所の年間貨物生産量を用いる。距離は輸送費やリードタイムの代替変数であり、物流の費用最小化の原則から考えると推定されるパラメータは負であると考えられる。次に事業所ごとの年間貨物生産量は、事業所の生産する製品の品質や価格、サービスレベルや信頼性などを代替する変数とする。年間の貨物生産量が増加することで品質やサービスレベル、信頼性は高くなりサプライヤーとしての評価が高くなる。また事業所の貨物生産量が増加すると規模の経済性から製品単価を下げることにつながるため、物流費用最小化の原則から事業所を選択することの魅力は高くなる。そのため年間貨物生産量の推定されるパラメータは正である。

貨物生産量に対して搬入モデル推定時とは異なり、搬出モデルでは個々のサプライヤーを選択しているため年間貨物生産量について特別な扱いは必要ではない。そのため受取需要 i がサプライヤー j を選択することの効用は式(34)のようにあらわすことが出来る。

$$U_{i,j} = V_{i,j} + \varepsilon_{i,j} \quad (33)$$

$$V_{i,j} = \beta_{dist}^{com} \ln(dist_{i,j}) + \beta_{FP}^{com} \ln(FP_j) \quad (34)$$

$$P_{i,j} = \frac{\exp(V_{i,j})}{\sum_{j' \in J} \exp(V_{i,j'})} \quad (35)$$

ここで

$U_{i,j}$:受取需要 i がサプライヤー j を選択することの効用

$V_{i,j}$:受取需要 i がサプライヤー j を選択することの効用の確定項

$\varepsilon_{i,j}$:受取需要 i がサプライヤー j を選択することの効用のランダム項

$dist_{i,j}$:サプライヤーから受取手が所属する地域の結節点までの距離

FP_j :事業所ごとの年間貨物生産量(t)

$P_{i,j}$:受取需要 j がサプライヤー i を選択する確率

2) 結果と考察(搬入)

表 16 に品目ごとに推定したモデルの推定結果を示す。

品目 1,5,8 は距離のパラメータが正で推定されたため、説明変数から除外した。調整済み尤度比は、品目 4 で最も高く、品目 9 で最も低いが全体を通して調整済み尤度比は低い傾向にあった。この原因として品目ごとに東京都市圏内に所在するすべてのサプライヤーを選択肢集合にしたことによって選択肢集合の数が多くなったことが原因であると考えられる。

品目ごとにモデル推定を行っているため、品目間で直接パラメータを比較することはできない。品目 2,3,4,9 については β_{dist}^{com} の絶対値が β_{FP}^{com} よりも大きく推定された。このことからこれらの品目は距離が遠くにあり、貨物生産量の大きいサプライヤーよりも距離が近くにあり生産量が比較して少ないサプライヤーを選択する傾向にあることが分かった。食料品や日用品、印刷品、排出品などは重量当たりの価値が低いと考えられるため、遠くのサプライヤーから仕入れることによる輸送費の増加に対し感度が高いとし、より近くのサプライヤーから仕入れることを好むと考えられる。

逆に品目 6,7 については、 β_{FP}^{com} のパラメータの絶対値が β_{dist}^{com} の絶対値よりも大きい。これらの金属工業品や機械工業品などは重量当たりの価値が高く、輸送にかかる費用よりも、より信頼できるサプライヤーからの仕入れを行いたいと受取事業所が考えているためであると考えられる。

表 16：サプライヤー選択モデルパラメータ推定結果

	品目 1		品目 2		品目 3		品目 4		品目 5		品目 6		品目 7		品目 8		品目 9	
	係数	t-値	係数	t-値	係数	t-値	係数	t-値	係数	t-値	係数	t-値	係数	t-値	係数	t-値	係数	t-値
β_{dist}^{com}			-0.18	-10.5	-0.31	-32.6	-0.86	-4.95			-0.16	-10.6	-0.11	-9.84			-0.23	-5.29
β_{FP}^{com}	0.25	27.93	0.173	30.5	0.292	131.9	0.271	8.47	0.322	8.63	0.232	51.2	0.219	82.68	0.250	109.1	0.140	9.53
L(0)	-11,938		-30,480		-156,103		-566		-585		-39,144		-133,192		-175,601		-3,384	
$L(\bar{\beta})$	-11,518		-29,910		-145,953		-519		-541		-37,610		-129,393		-169,187		-3,324	
尤度比	0.0352		0.0187		0.0650		0.0822		0.0744		0.0392		0.0285		0.0365		0.0175	
調整済み尤度比	0.0351		0.0186		0.0650		0.0787		0.0727		0.0391		0.0285		0.0365		0.0169	
サンプル数	2,598		5,742		26,109		178		184		6,743		20,736		28,036		770	
選択肢数	99		202		395		24		24		332		616		525		81	

第 6 章 輸送形態選択モデル

前章では都市圏内外貨物輸送を行う各受取需要に対して、その貨物を供給するサプライヤーを決定した。本章ではサプライヤーと受取手の間の輸送において、途中で中継施設を経由するか否かを決定するモデルを構築する。

6.1 データの加工

はじめに、東京都市圏物資流動調査の搬入搬出調査を用い東京都市圏内外輸送のうち、東京都市圏内の中継施設を利用した輸送(以下：中継輸送)と、東京都市圏内の中継施設を利用しない輸送(以下：直接輸送)のデータをそれぞれ抽出する。東京都市圏内へ搬入される貨物の流れを図 9 に示す。中継輸送の場合は、東京都市圏外の事業所から中継施設を経由し、東京都市圏内の事業所へ運ばれる。直接輸送については東京都市圏外の事業所から東京都市圏内の中継施設ではない事業所へ直接運ばれる。そのため都市圏搬入における、中継輸送レコードは図 9 の①の搬出レコードに当たる。都市圏搬入における直接輸送のレコードは図 9 の③の搬入レコードに当たる。同様に、東京都市圏外へ搬出される貨物の流れを図 10 に示す。中継輸送の場合は、東京都市圏内の事業所から中継施設を経由し、東京都市圏外の事業所へ運ばれる。直接輸送については東京都市圏内の中継施設でない事業所から東京都市圏外の事業所へ直接運ばれる。そのため都市圏搬入における、中継輸送レコードは図 10 の①の搬出レコードに当たる。都市圏搬入における直接輸送のレコードは図 10 の③の搬入レコードに当たる。搬入・搬出における中継輸送と直接輸送の抽出条件をそれぞれ表 17 と表 18 に示す。また抽出された出荷データについて品目ごとにそのデータ数を集計し、**エラー! 参照元が見つかりません**。に示す。また拡大係数を考慮した後の直接輸送と中継輸送のデータ数を**エラー! 参照元が見つかりません**。にまとめる。**エラー! 参照元が見つかりません**。より、搬入における品目 5 および、搬出における品目 9 については、中継施設を経由したレコードが存在しないため、本研究ではモデル構築は行わずに、直接輸送を行うと仮定する。

また、東京都市圏物資流動調査は施設間の流動を捉えているため、各中継施設を経由するデータにおいて、貨物の真の生産地並びに消費地を知ることが出来ない。搬入・搬出の地域ごとで貨物輸送における需要の多寡により中継輸送の利用率に変化があると考えられる。そのため本モデルでは東京都市圏物資流動調査の施設間流動データに対して、搬入の場合は東京都市圏外の生産地を、搬出の場合は東京都市圏外の消費地を予測する。搬入の場合、図 9 に示す②の東京都市圏外から中継施設に搬入される同一品目の貨物のうち一番出荷重量が近い搬入レコードの出発地を生産地と仮定する。搬出の場合も同様に、図 10 に示す②の中継施設から東京都市圏外に搬入される同一品目の搬出レコードのうち一番出荷重量が近いレコードの出発地を消費地と仮定する。地域・品目ごとの中継・非中継のサンプル数を表 19 に示す。

次に、中継輸送を行う際に利用された中継施設のデータを作成する。中継輸送を利用した搬出・搬入データから、施設調査に含まれる所在地情報や床面積などの施設情報を組み合わせることで中継施設データを作成した。作成した中継施設データをもとに、搬入側の中継施設の分布を図 11 に、搬出側の中継施設の分布を図 12 にそれぞれ示す。それぞれの中継施設の施設数は搬入側が 40、搬出側が 79 施設である。搬入・搬出の両中継施設は、圏央道沿線や国道 16 号

沿線、東京湾湾岸エリア、各放射高速道路の沿線に広く分布しており、特に圏央道の東京・埼玉区間と東京湾湾岸エリアに集中している傾向が見られる。この立地傾向は、萩野ら（2007）が第4回東京都市圏物資流動調査を基に構築した大規模広域的物流施設の立地選択モデルにより推計された、立地ポテンシャルの高い地域に集積している。

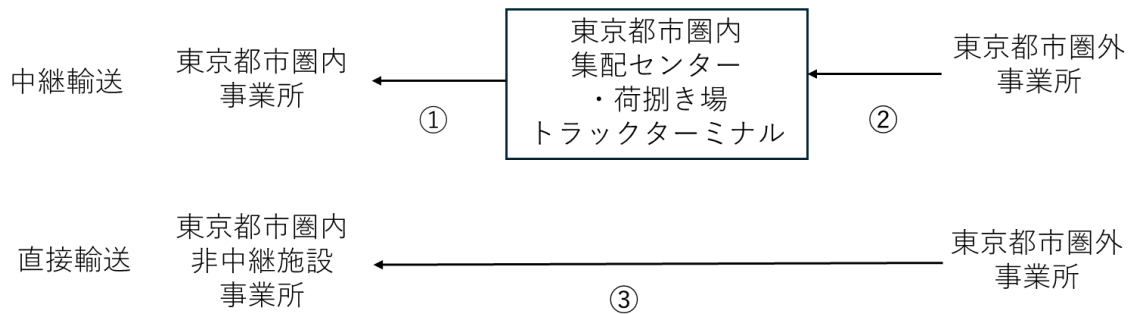


図 9：都市圏搬入輸送の貨物フロー

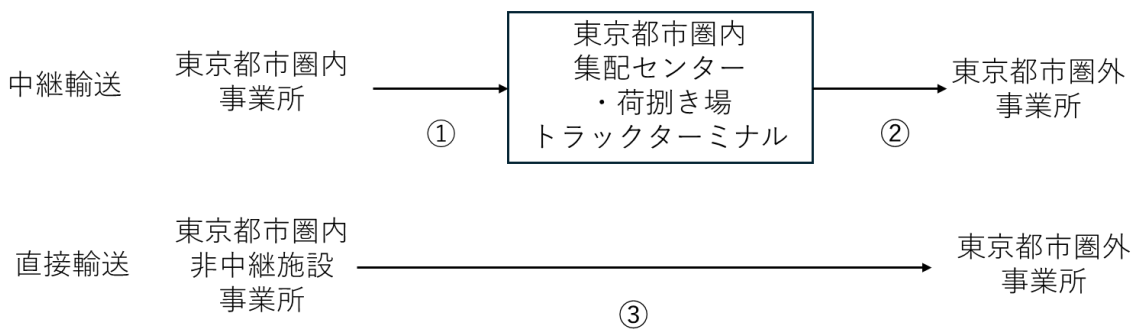


図 10：都市圏搬出輸送の貨物フロー

表 17：中継輸送のデータ抽出条件

搬入	搬出
<ol style="list-style-type: none"> 1. 東京都市圏内から搬出を行う 2. 東京都市圏内へ搬入を行う 3. 搬入される施設の施設種類が集配センター・荷捌き場/トラックターミナルに含まれる 4. 搬入される施設が回答した搬出票の中に、同一品目の東京都市圏外への搬出が記録されている 5. 輸送手段が自家用トラック/営業用トラック(一車貸切)/ 営業用トラック(宅配便等混載)のいずれかに含まれる 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 東京都市圏内から搬出を行う 2. 東京都市圏内へ搬入を行う 3. 搬出される施設の施設種類が集配センター・荷捌き場/トラックターミナルに含まれる 4. 搬出される施設が回答した搬入票の中に、同一品目の東京都市圏外からの搬入が記録されている 5. 輸送手段が自家用トラック/営業用トラック(一車貸切)/ 営業用トラック(宅配便等混載)のいずれかに含まれる

表 18：直接輸送のデータ抽出条件

搬入	搬出
<ol style="list-style-type: none"> 1. 東京都市圏内から搬出を行う 2. 東京都市圏外へ搬出を行う 3. 発地の施設種類が集配センター・荷捌き場/トラックターミナルに含まれない 4. 輸送手段が自家用トラック/営業用トラック(一車貸切)/ 営業用トラック(宅配便等混載)のいずれかに含まれる 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 東京都市圏外から搬出を行う 2. 東京都市圏内へ搬出を行う 3. 着地の施設種類が集配センター・荷捌き場/トラックターミナルに含まれない 4. 輸送手段が自家用トラック/営業用トラック(一車貸切)/ 営業用トラック(宅配便等混載)のいずれかに含まれる

表 19 : 地域別の直接輸送・中継輸送のサンプル数(搬入)

	地域 1		地域 2		地域 3		地域 4		地域 5		地域 6	
	直接	中継	直接	中継	直接	中継	直接	中継	直接	中継	直接	中継
品目 1	694	48	507	52	195	0	127	0	164	0	1,260	467
品目 2	850	187	675	148	205	6	161	11	472	645	3,797	1,136
品目 3	733	7	616	10	221	83	304	105	617	181	5,828	271
品目 4	301	0	281	2	53	0	86	0	162	10	1,069	334
品目 5	297	0	175	0	73	0	59	0	121	0	1,110	0
品目 6	739	11	662	21	509	57	327	55	673	64	3,262	80
品目 7	1,005	0	1,241	11	441	25	300	7	841	9	5,226	174
品目 8	638	15	440	13	232	0	159	0	391	7	4,710	251
品目 9	267	0	331	0	86	0	85	0	119	0	604	2
合計	5,524	268	4,928	257	2,015	171	1,608	178	3,560	916	26,866	2,715

表 20 : 地域別の直接輸送・中継輸送のサンプル数(搬出)

	地域 1		地域 2		地域 3		地域 4		地域 5		地域 6	
	直接	中継	直接	中継	直接	中継	直接	中継	直接	中継	直接	中継
品目 1	870	117	880	49	320	3	131	5	322	19	1,368	92
品目 2	1,624	90	1,475	297	752	40	513	0	1,194	247	5,931	353
品目 3	2,850	22	2,429	34	1,124	22	704	9	1,701	21	12,543	269
品目 4	614	49	726	62	189	6	154	0	391	2	2,245	62
品目 5	689	0	638	7	216	0	175	0	335	6	1,286	5
品目 6	2,190	0	2,035	0	735	8	555	0	1,378	23	6,704	26
品目 7	3,482	47	2,895	44	953	7	873	11	2,029	79	14,585	246
品目 8	2,289	30	2,042	16	888	0	655	0	1,330	3	8,898	53
品目 9	456	0	462	0	145	0	86	0	121	0	861	0
合計	15,064	355	13,582	509	5,322	86	3,846	25	8,801	400	54,421	1106

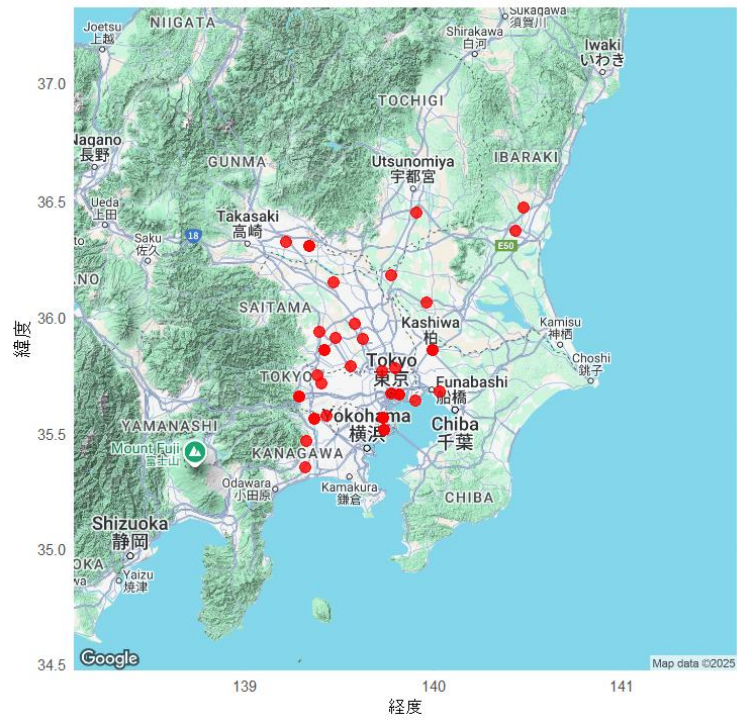


図 11：中継施設の立地（搬入）

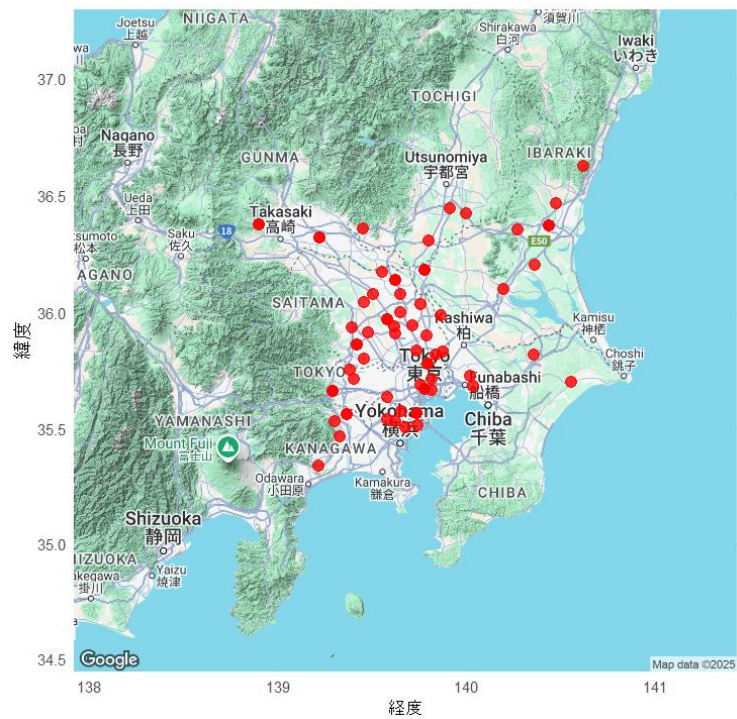


図 12：中継施設の立地（搬出）

6.2 モデルの概要

ここでは受取需要に対して、直接輸送・中継輸送の選択と、中継輸送を選択した際の利用する中継施設を選択するモデルを構築する。中継施設間の誤差項には相関があると考えられるため、ネステッドロジットモデルを用いた選択モデルに対して構築を行った。ただし、搬出においてはログサム項のスケールパラメータが 1.14 で推定され 1 よりも大きな値で推定された。そのため、ネステッドロジットモデルの構造は適さないと判断し、搬出においては多項ロジットモデルを用いてモデルを定式化した。搬入におけるモデル構造を図 13 に、搬出におけるモデル構造を図 14 に示す。またモデル式を式 36 から式 44 に示す。

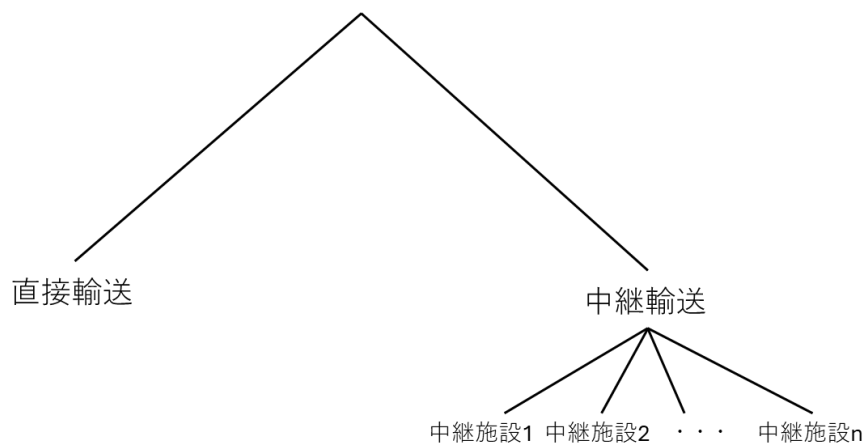


図 13：輸送形態選択モデルの構造（搬入）

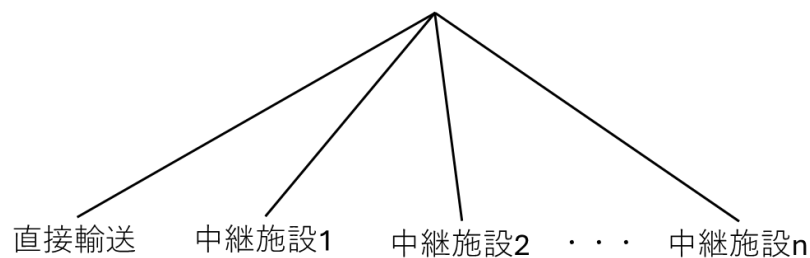


図 14：輸送形態選択モデルの構造（搬出）

(1) 搬入におけるモデル式

受取需要が選択肢 j を選択することの効用 $U_{n,j}$ は確定項 $V_{n,j}$ と、同一ネスト内で相関する誤差項 $\xi_{n,k}$ と独立同一分布(i.i.d)に従う $\varepsilon_{n,j}$ との和で表される。

$$U_{n,j} = V_{n,j} + \xi_{n,k} + \varepsilon_{n,j} \quad (36)$$

ネスト k に所属する選択肢 j を選択される確率はスケールパラメータ λ_k を用いて次の式で表せ

る。

$$P(j|k) = \frac{\exp\left(\frac{V_{n,j}}{\lambda_k}\right)}{\sum_{j' \in j_k} \exp\left(\frac{V_{n,j'}}{\lambda_k}\right)} \quad (37)$$

またネスト k を選択される確率 $P(k)$ は

$$P(k) = \frac{\exp\left(\lambda_k \ln\left(\sum_{j' \in j_k} \exp\left(\frac{V_{n,j'}}{\lambda_k}\right)\right)\right)}{\sum_{k'} \exp\left(\lambda_k \ln\left(\sum_{j' \in j_k} \exp\left(\frac{V_{n,j'}}{\lambda_k}\right)\right)\right)} \quad (38)$$

そのため、最終的に選択肢 j を選択する確率は次の式で求められる。

$$P(j) = P(k)P(j|k) \quad (39)$$

直接輸送を選択することの効用関数 $V_{n,1}$ を次のように定める。

$$V_{n,1} = \beta_1 + \beta_2 \ln(ss) + \beta_3 dummy_{area1} + \beta_4 dummy_{area2} + \beta_5 dummy_{area3} + \beta_6 dummy_{area4} + \beta_7 dummy_{area5} + \beta_8 dummy_{com1} + \beta_9 dummy_{com2} + \beta_{10} dummy_{com3} \quad (40)$$

また各中継施設を選択することの効用 $V_{n,j \in k}$ を次のように定める。

$$V_{n,j \in k} = \beta_{11} \ln(dist_{ID}) + \beta_{12} \ln(dist_{ic}) \quad (41)$$

ここで

ss : 出荷重量(kg)

$dummy_{area}$: 地域 1~5 のダミー変数

$dummy_{hinmoku}$: 品目 1,2,3 のダミー変数

$dist_{OI}$: 発地から中継施設までの距離(km)

$dist_{ID}$: 中継施設から着地までの距離(km)

$dist_{ic}$: 中継施設の最寄りの高速道路インターチェンジまでの距離(km)

β : 推定されるパラメータ

(2) 搬出におけるモデル構造

受取需要 n が直接輸送・各中継施設を選択することの効用 $U_{n,j}$ は確定項 $V_{n,j}$ と誤差項 $\varepsilon_{n,j}$ の和で表すことができる。

$$U_{n,j} = V_{n,j} + \varepsilon_{n,j} \quad (42)$$

受取需要 n が直接輸送を選択することの効用 $V_{n,1}$ を次の式で定める。

$$V_{n,1} = \beta_1 + \beta_2 \ln(ss_n) + \beta_3 dummy_{area1} + \beta_4 dummy_{area2} + \beta_5 dummy_{area3} + \beta_6 dummy_{area4} + \beta_7 dummy_{area5} + \beta_8 dummy_{com1} + \beta_9 dummy_{com2} + \beta_{10} dummy_{com3} \quad (43)$$

受取需要 n が中継施設 j を選択することの効用を次のように定める。

$$V_{n,j \in \{1,2,..,n\}} = \beta_{11} dist_{OI} + \beta_{12} dist_{ID} + \beta_{13} floor_j \quad (44)$$

6.3 結果と解釈

搬入・搬出のパラメータ推定結果を表 21 に示す。搬入における発地→中継施設までの距離、各中継施設のサービスレベルを代替する床面積は想定する符号条件を満たさなかったため除外した。同様に搬出において、中継施設の最寄り IC までの距離についてもモデルから除外した。構築した二つのモデルを通して、尤度比は高くならなかった。このことは二つの要因が考えられる。一つは直接輸送・中継輸送のサンプル数の偏りである。二つ目は各中継施設で特徴づけられているものが発着地からの距離や床面積といったもののみであることである。実際の中継施設選択では自社保有の施設であるか否か、同一方向へ向かう貨物量や車両の空き状況などといった要素が複雑に絡み合っていることが考えられるが本研究で提案するモデルではそういった要素は考慮に入れることが出来てはいない。そのため、この点を本研究の今後の課題とする。

モデルの各パラメータについて確認をしていく。定数項が正であることから多くの場合において、直接輸送を選択することの効用が高い。これは東京都市圏物資流動調査において中継施設を利用するサンプルが十分に確保できなかったことが要因であると考えられる。また地域ごとのダミー変数はその地域に出荷される/その地域から入荷される品目の中継割合を表している。品目ごとのダミー変数について、重量に対する価値が比較的低い、農産品・食料品・日用品はほかの品目と比較しても中継輸送を選択して効率的に輸送を行っていることが見て取れる。搬出における発地から中継施設までの距離よりも、中継施設から目的地までの距離を重視する傾向があることが明らかになった。

表 21：輸送形態選択モデル パラメータ推定結果

	搬入		搬出	
	係数	t-値	係数	t-値
定数項	8.69	3.797	4.32	7.0
出荷重量	-0.21	-2.916	-0.25	-14.5
地域 1 ダミー	1.48	2.55	-0.48	-3.5
地域 2 ダミー	1.50	2.44	-0.84	-7.4
地域 3 ダミー	-0.29	-0.771	0.68	2.4
地域 4 ダミー	-0.43	-1.104	1.55	2.7
地域 5 ダミー	-1.50	-3.139	-0.28	-2.0
品目 1 ダミー	-1.99	-2.796	-2.23	-15.3
品目 2 ダミー	-4.14	-3.18	-1.90	-17.9
品目 3 ダミー	-1.64	-3.167	-1.08	-8.0
距離	発地→中継		-0.64	-19.4
	中継→着地	-0.67	-21.541	-1.04
	最寄り IC	-0.17	-2.83	
床面積			0.081	2.7
スケールパラメータ	0.51	3.223		
初期尤度	-7,244		-4,774	
最終尤度	-7,002		-4,799	
尤度比	0.033		-0.0053	
調整済尤度比	0.032		-0.0081	
サンプル数	12,348		27,307	

第7章 モデルの検証とシナリオ分析

本章で4章から6章までで構築したそれぞれのモデルを組み合わせることで出力される中継施設の利用を考慮した出荷データに対して以下の3点の分析を行う。

- 1) モデルの出力と東京都市圏物資流動調査での観測値を比較し提案するモデルフレームワークの精度を検証する。
- 2) 中継施設の利用を考慮することによって、今まで観測することのできなかった中継施設の利用に伴う交通需要について知見を得る。
- 3) 自動運転導入時を想定したシナリオ分析を行い、各切替施設の需要について知見を得る。

本章ではモデルのインプットデータとして、東京都市圏物資流動調査をもとに作成した、東京都市圏内の仮想事業所データを用いる。

7.1 精度検証

本節では、提案した中継施設を考慮した、貨物モデルが観測データをどの程度捉えることが出来ているのかについて検証を行う。観測データには、東京都市圏物資流動調査の搬出搬入調査を用いる。貨物モデルでは東京都市圏物資流動調査の調査期間が1年の中での平均的な1日であることを踏まえ、シミュレーションの実行期間を1日に設定した。検証する項目として、中継施設の利用によって生じた東京都市圏内の貨物フローについて、観測データとシミュレーション結果を比較する。図15と図16に搬入・搬出それぞれの中継施設の利用によって生じた都県間の貨物流動量希望線図を示す。また図17と図18に搬入・搬出それぞれについて、中継施設の利用によって生じた都県間の貨物流動量の観測値とシミュレーション値のそれぞれの値をプロットした散布図を示す。

検証の結果から搬入においては、一部の都県間フローにおいてシミュレーション値が過大に推計されている傾向はあるものの、おおむね45度線の付近に集中しており、提案したモデルの枠組みは観測値の傾向を捉えることが出来ている。搬出においては多くの都県間フローの値が45度線の下側に集まっていることから、全体的にシミュレーション結果が観測データと比較して、過大に推計されている傾向があった。中継施設の利用に伴う交通影響について正しくシミュレートするためには、モデルの出力が観測データをより精度高く再現することが求められる。そのため本研究で提案したモデルパラメータのキャリブレーションを今後の課題とする。

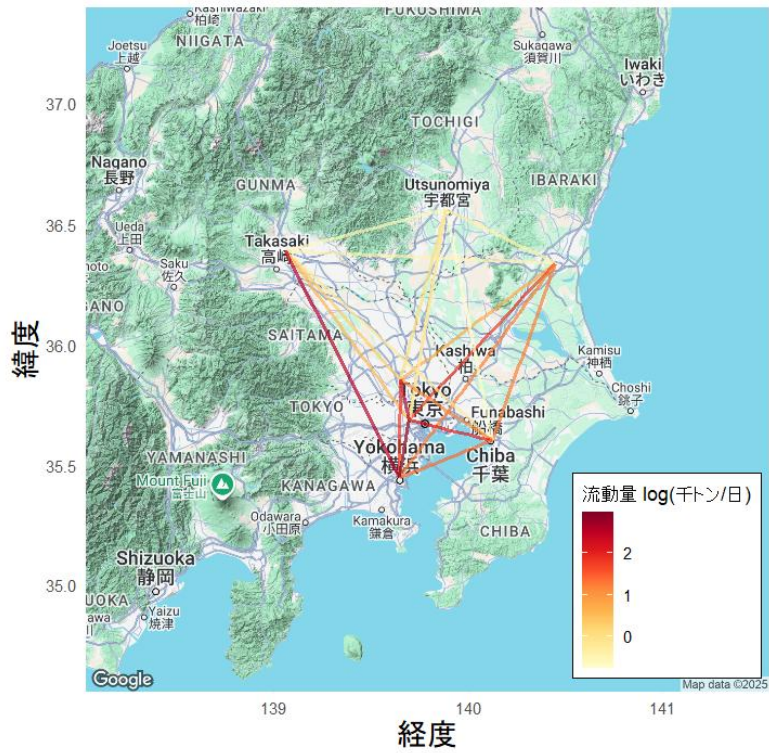


図 15 : 中継施設の利用によって生じた都県間貨物流動量の希望線図(搬入)

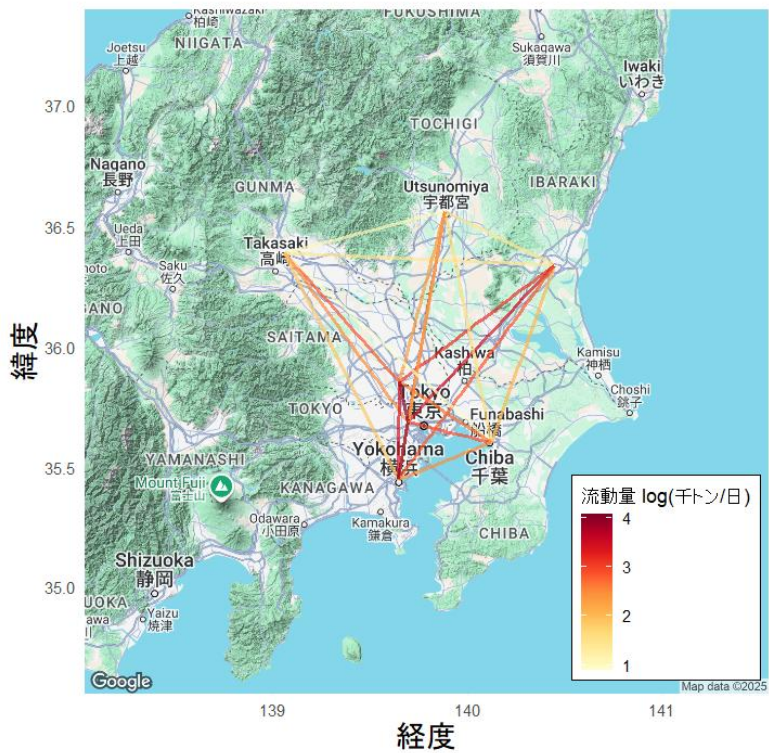


図 16 : 中継施設の利用によって生じた都県間貨物流動量の希望線図(搬出)

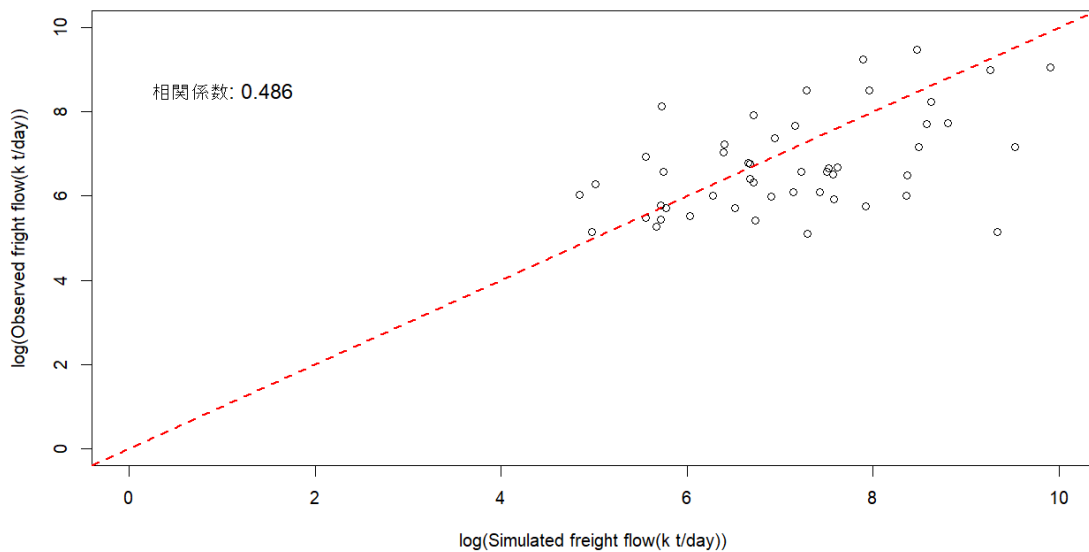


図 17 : シミュレーション結果と観測値の比較(搬入)

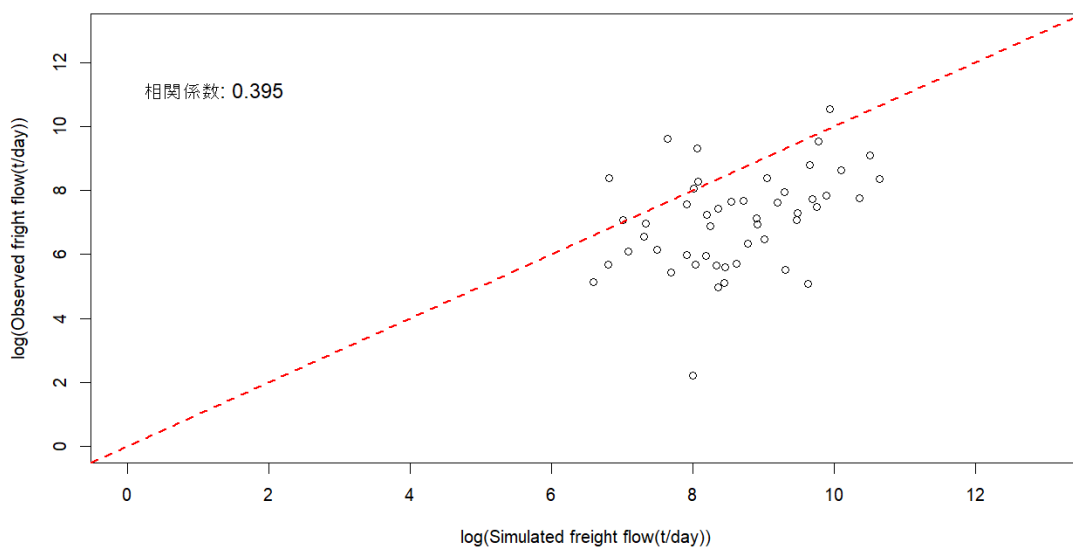


図 18 : シミュレーション結果と観測値の比較(搬出)

7.2 従来モデルと提案モデルとの比較

本節では従来の貨物モデルでは考慮されて来なかった、中継施設の利用によって生じる交通需要を明らかにすることで中継施設の利用を考慮した都市圏内外貨物モデルの重要性を明らかにする。シミュレーションの実行期間は1日とし、需要の繁閑などを考慮せず1年の中で平均的な1日を仮定しシミュレーションを実行する。交通量の評価指標として輸送距離と、輸送重量に輸送距離を乗じたトンキロを使用する。搬入および搬出の双方におけるシミュレーションの実行結果を表 22 に示す。

中継施設の利用を考慮しない従来モデルでは、中継施設を考慮した本モデルと比較して、1日当たりの交通需要を過少に評価していた。その差は、搬入で全体のトンキロの5%に相当す

る 477 万トンキロ、搬出で 10%に相当する 1,950 万トンキロにのぼる。

また、出荷件数全体に占める中継輸送の割合は、搬入で 6.4%、搬出で 7.2%である。これらの中継輸送に着目すると、中継施設の利用を考慮しない場合と比較して、搬入では 20.4%、搬出では 14.6%のトンキロ増加が確認された。

この結果から、中継輸送の割合が増加するにつれて、従来モデルの交通量の過少推計量も急速に増加することが明らかとなった。今後自動運転自動車やフィジカルインターネットを始めとした輸送の高度化が進み、出発地から到着地までの間で中継施設の経由する割合が増加することが見込まれる。そのような状況下で貨物車の交通需要を正確に把握するためには中継施設の利用を考慮したモデルの枠組みが重要であることを、本分析では明らかにした。

表 22：従来モデルと提案モデルでの交通需要量（千トンキロ）

	輸送区間	提案モデル		従来モデル
		中継輸送	直接輸送	直接輸送
搬入	発地⇒中継施設	12,989	-----	-----
	中継施設⇒着地	4,595	-----	-----
	発地⇒中継施設⇒着地	17,584	-----	-----
	発地⇒着地（直接輸送）	-----	101,624	114,439
	合計	119,208		114,439
搬入	発地⇒中継施設	24,550	-----	-----
	中継施設⇒着地	46,603	-----	-----
	発地⇒中継施設⇒着地	71,153	-----	-----
	発地⇒着地（直接輸送）	-----	141,997	193,651
	合計	213,150		193,651

7.3 シナリオ分析

本節では、本研究で提案したモデルの適用可能性を示すため、シナリオ分析を実施する。本モデルは、自動運転導入時の切替拠点の需要把握をはじめ、さまざまな都市圏内外輸送の物流施策評価に活用されることを想定している。また本節では、都市間貨物輸送における自動運転トラックの導入を想定し、手動運転と自動運転の切り替えを行う切替拠点の需要を把握する。想定するシナリオを表 23 に示す。本来、自動運転導入の評価には、自動運転の利用意向や利用拠点の選択に関する調査データを基にモデルを構築する必要がある。しかし、本節ではモデルの適用可能性を示すことを主眼とし、第 6 章で提案したモデルの枠組みとモデルパラメータをそのまま用いてシナリオ分析を行う。また切替拠点としては各高速道路のサービスエリア (SA)・パーキングエリア (PA)のうち、首都高速道路上の各 PA および東京湾アクアライン海ほたる PA は切替拠点から除いた。

表 23 : 各シナリオの設定

シナリオ	シナリオ設定
BASE シナリオ	現状の中継施設の配置で中継施設の利用が生じる
SAPA 集約シナリオ	各高速道路のサービスエリア (SA)、パーキングエリア (PA) に自動運転と手動運転の切替拠点を配置

表 24 にシナリオごとの輸送需要を示すトンキロの表を示す。また図 19 と図 20 に搬入・搬出における各 SA・PA の一日当たりの切替需要を示す。

現状の中継施設配置と比較すると、SAPA シナリオでは搬入時の中継輸送件数がわずかに増加する一方、搬出時の中継輸送割合は減少することが分かった。

また、SAPA ごとの需要を確認したところ、東京都心部の首都高速道路には切替拠点が設置されていないため、需要が外環道周辺の切替拠点到集中している。このことから、都心部にも適切に切替拠点を配置しなければ、都心部近郊の切替拠点到周辺で交通混雑の悪化や施設供給の不足が発生する可能性がある。

さらに、現時点では実装していないが、本モデルの出力に各貨物の受取時間選択モデルや出発時間選択モデル、貨物の貨物車への割り当てプロセスを適用することで、各切替拠点到の時間帯別の需要を把握することが可能となる。その結果、より細かい粒度で切替拠点到の需要を分析でき、今後の切替拠点到の整備計画に必要な知見を提供できると考えられる。

表 24 : シナリオごとの交通需要 (千トンキロ)

	輸送区間	BASE シナリオ		SAPA 集約シナリオ	
		中継輸送	直接輸送	中継輸送	直接輸送
搬入	出荷件数 (千件)	199	2,875	205	2,869
	発地⇒中継施設	12,989	-----	13,992	-----
	中継施設⇒着地	4,595	-----	7,173	-----
	発地⇒中継施設⇒着地	17,584	-----	21,165	-----
	発地⇒着地 (直接輸送)	-----	101,624	-----	101,637
	合計	119,208		122,802	
搬出	出荷件数 (千件)	296	3,771	224	3,843
	発地⇒中継施設	24,550	-----	31,255	-----
	中継施設⇒着地	46,603	-----	36,093	-----
	発地⇒中継施設⇒着地	71,153	-----	67,347	-----
	発地⇒着地 (直接輸送)	-----	141,997	-----	152,417
	合計	213,150		219,764	

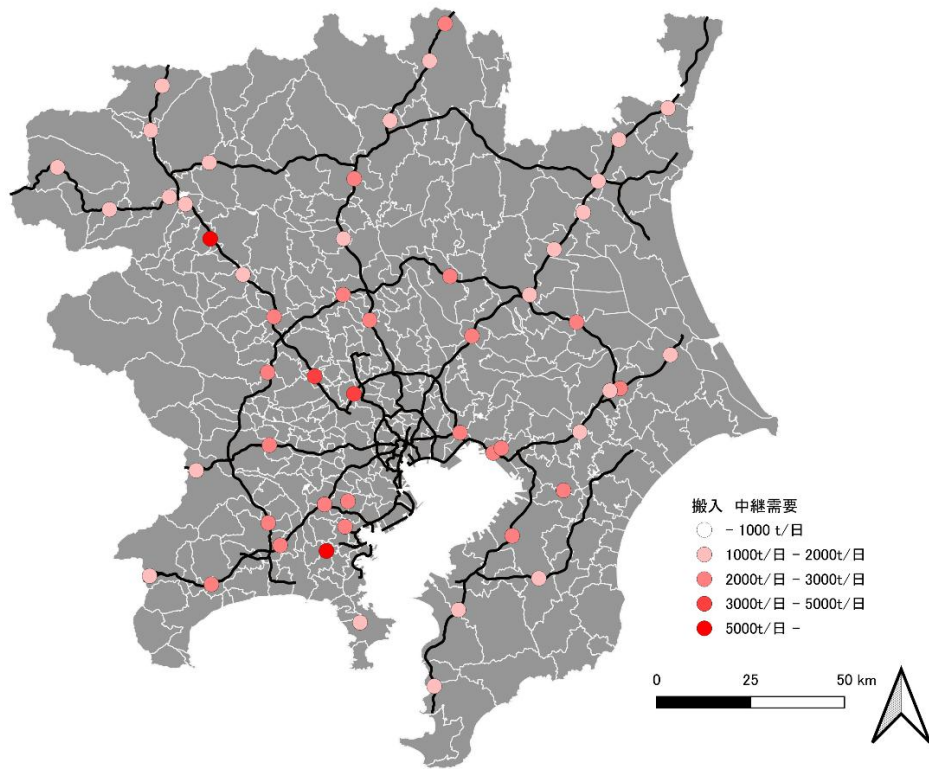


図 19 : SAPA 集約シナリオにおける搬入切替拠点の利用需要(搬入)

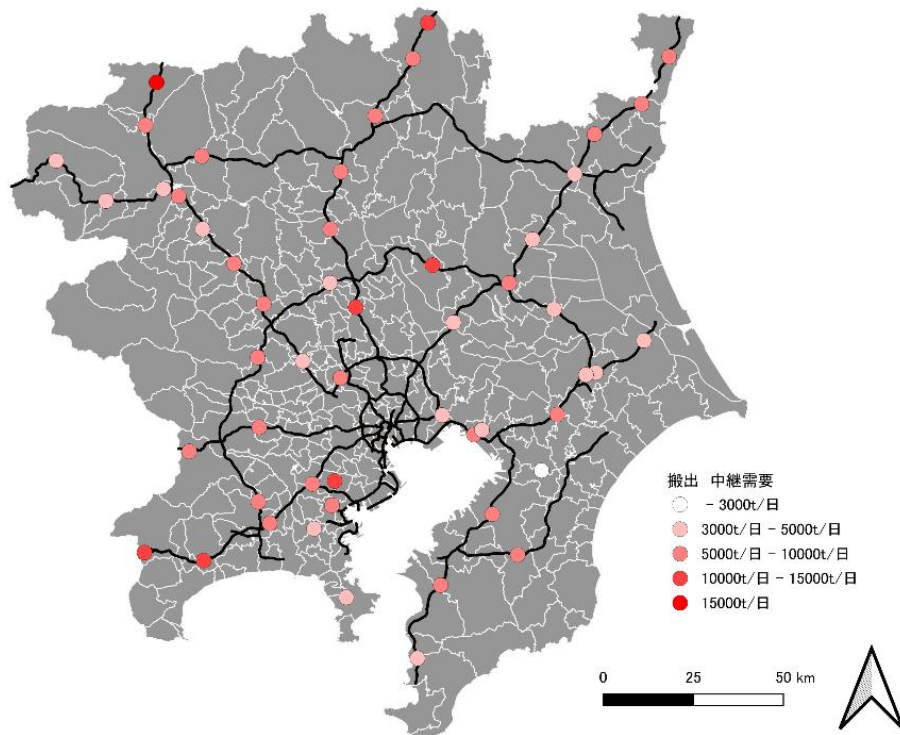


図 20 : SAPA 集約シナリオにおける搬入切替拠点の利用需要(搬出)

第8章 終わりに

8.1 本研究のまとめ

本研究では、中継施設の利用を考慮した貨物モデルのフレームワークについてエージェントベースを用いて提案した。本研究で得られた知見を次にまとめる。

1)

従来までの都市圏内外貨物輸送モデルでは考慮されて来なかった中継施設の利用を考慮したエージェントベース都市圏内外貨物シミュレーションモデルの枠組みとそれに係るモデルの開発を行った。一連のモデルはキャリブレーションの必要性はあるものの、おおむね都市圏内外貨物輸送における中継施設の利用を捉えることを可能にした。

2)

提案した貨物モデルを活用し、自動運転の切替拠点の立地をシナリオごとに設定した場合についての、各中継施設の利用重量の把握をすることを可能にした。また関連して、本研究で提案したモデルの枠組みを使用することによって、中継施設の立地や中継輸送にかかわる意思決定に影響を与える要因を変化させた際に生じる交通インパクトなどを把握することが可能であることを明らかにした。

8.2 今後の課題

本研究のフレームワークでは貨物の出荷に対して、貨物車への割り当てなどを行っていない。中継施設の利用を行う運送業者へのメリットとして、幹線輸送を大型貨物車で行うことで効率的な輸送を行うことが出来る点があげられる。車両への貨物の割り当てを行うことで中継輸送に伴うトラック運転手の削減や車両の総走行距離といった評価指標を用いて中継輸送を評価することが出来るようになる。今後、本研究で提案したフレームワークを用いて車両への割り当てを行い車両ベースで中継輸送の影響を捉えるなどを行うことを期待したい。

謝辞

本研究を行うにあたりご指導いただきました、坂井孝典准教授、兵藤哲朗教授、並びに地域計画研究室の皆様にご感謝申し上げます。

参考文献

- 1) de Jong, G., de Bok, M., & Thoen, S. (2021). Seven fat years or seven lean years for freight transport modelling? Developments since 2013. *Journal of Transport Economics and Policy*, 55(2), 124–140.
- 2) De Bok, M., Tavasszy, L., & Thoen, S. (2022). Application of an empirical multi-agent model for urban goods transport to analyze impacts of zero emission zones in The Netherlands. *Transport Policy*, 124, 119-127.
- 3) Jing, P., Seshadri, R., Sakai, T., Shamshiripour, A., Alho, A. R., Lentzakis, A., & Ben-Akiva, M. E. (2024). Evaluating congestion pricing schemes using agent-based passenger and freight microsimulation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 186, 104118.
- 4) Sakai, T., Kawamura, K., & Hyodo, T. (2019). Evaluation of the spatial pattern of logistics facilities using urban logistics land-use and traffic simulator. *Journal of Transport Geography*, 74, 145-160.
- 5) Davydenko, I. Y., & Tavasszy, L. A. (2013). Estimation of warehouse throughput in freight transport demand model for the Netherlands. *Transportation research record*, 2379(1), 9-17.
- 6) 国土交通省「RoAD to the L4 テーマ3 について」(<https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/jido-infra/pdf01/06.pdf>) 2025年1月27日確認
- 7) Sakai, T., Alho, A. R., Bhavathrathan, B. K., Dalla Chiara, G., Gopalakrishnan, R., Jing, P., ... & Ben-Akiva, M. (2020). SimMobility Freight: An agent-based urban freight simulator for evaluating logistics solutions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 141, 102017.
- 8) Mommens, K., Van Lier, T., & Macharis, C. (2016). Belgian carriers as agent in a national agent-based freight transport model. In *14th World Conference on Transport Research, Shanghai, China*.

- 9) Stinson, M., & Mohammadian, A. K. (2022). Introducing CRISTAL: A model of collaborative, informed, strategic trade agents with logistics. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 13, 100539.
- 10) Tavasszy, L. A. : Freight Modeling - An Overview of International Experiences, Freight Demand Modeling Tools for Public – Sector Decision Making Summary of a Conference C. P. 40, pp. 47-54, 2008.
- 11) 小池淳司, 片山慎太郎, & 古市英士. (2015). 物流拠点を經由する都市間物流モデルの構築. *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, 71(5), I_533-I_545.
- 12) 第 10 回 2015 年調査 物流センサス 全国貨物純流動調査の結果概要(最終確認日 2025 年 1 月 19 日) <https://www.mlit.go.jp/common/001184113.pdf>
- 13) 東京都市圏物資流動調査 データ利用の手引き (最終確認日 2025 年 1 月 19 日) https://www.tokyo-pt.jp/static/hp/file/data/tebiki_pd.pdf
- 14) 鷹野由利香(2023) 事業所における貨物交通発生集中に関する研究:東京都市圏を対象とした経年分析. *東京海洋大学 卒業論文*
- 15) Moshe Ben-Akiva and Steven R. Lerman. 1985. *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*. Cambridge, Massachusetts, The MIT Press
- 16) Sakai, T., Bhavathrathan, B. K., Alho, A., Hyodo, T., & Ben-Akiva, M. (2020). Commodity flow estimation for a metropolitan scale freight modeling system: Supplier selection considering distribution channel using an error component logit mixture model. *Transportation*, 47(5), 997–1025.
- 17) Ben-Akiva, M., & de Jong, G. (2013). The aggregate-disaggregate-aggregate (ADA) freight model system. In *Freight transport modelling* (pp. 69-90). Emerald Group Publishing Limited.
- 18) Pourabdollahi, Z., Karimi, B., Mohammadian, K., & Kawamura, K. (2017). A hybrid agent-based computational economics and optimization approach for supplier selection problem. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 6(4), 344-355.
- 19) 萩野保克, & 遠藤弘太郎. (2007). 立地選択モデルを用いた東京都市圏における物流施設の立地ポテンシャル分析. *土木計画学研究・論文集*, 24, 103-110.