

車種を考慮した貨物車経路選択行動の分析

岡 英紀¹・力石 真²・田名部 淳³・大口 敬⁴

¹正会員 一般財団法人計量計画研究所 (〒162-0845 東京都新宿区市谷本村町 2-9)

E-mail: hidekioka@ibs.or.jp

²正会員 広島大学大学院 准教授 国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)

E-mail: chikaraishim@hiroshima-u.ac.jp

³正会員 株式会社地域未来研究所 (〒530-0003 大阪府大阪市北区堂島 1-5-17)

E-mail: tanabe@refrec.jp

⁴フェロー会員 東京大学 教授 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

E-mail: takog@iis.u-tokyo.ac.jp

貨物車は、主に配送に利用される小型貨物車、主に幹線輸送に利用される大型貨物車など、車種によってその使われ方が異なる場合が多い。また、貨物車の経路選択行動は、車両のサイズによる制約を受けるため、車種が異なることによって経路選択行動に違いが生じる点を無視することができない。

そこで本研究では、貨物車のプローブデータを用いて、首都圏を対象に、車種によって異なる貨物車の経路選択特性を分析する。具体的には、選択肢列挙を行う必要がない経路選択モデルである Recursive Logit モデルを適用し、車種ごとに尤度関数を定義することで、車種の特性を反映した経路選択行動をモデル化する。さらに本稿では、構築するモデルのパラメータ推定結果を示すとともに、今後のモデル分析の展望について考察する。

Key Words: vehicle type, route choice, recursive logit, GPS trajectory data, Tokyo metropolitan area

1. はじめに

近年、グローバル・サプライチェーンの深化による物流の国際化への対応や、競争力強化・トラックドライバー不足等による効率的輸送の必要性といった背景から、貨物車の走行円滑化が求められている。特にトラックドライバー不足については、人口減少や少子高齢化といった人口構造の変化に加え、時刻指定や多頻度小口輸送への対応に伴うドライバーの厳しい労働環境などに起因し、労働力不足が顕在化していることがあげられる。国際物流・国内物流を含めた我が国の物流を支えるうえで、貨物車の走行円滑化は極めて重大な課題といえる。

一方、貨物車交通を支える道路ネットワークに着目すると、首都圏では三環状道路の整備が進み、都心を通過する車両が排除されるとともに、利用者に対して多様な経路選択肢が提供されつつある。三環状道路の整備は貨物車交通に大きな影響を及ぼすことが想定されるものの、貨物車の経路選択行動については不明確な部分も多く、道路整備が貨物車交通全体に及ぼす影響を把握するためには、貨物車の経路選択行動をモデル化することが求められる。特に貨物車は、主に配送に利用される小型貨物

車、主に幹線輸送に利用される大型貨物車など、車種によってその使われ方が異なる場合が多い。また、貨物車の経路選択行動は、車両のサイズによる制約を受けるため、車種によって経路選択行動が異なる点を考慮したモデル化が必要である。近年は、情報通信技術の発展に伴い、車両の個々の移動軌跡を観測可能なプローブデータが活用可能となっている。こうしたプローブデータを活用することで、貨物車の移動軌跡を精緻に把握することが期待される。

本研究では、観測された貨物車のプローブデータを活用して車種別に経路選択モデルを構築し、経路選択行動の車種間差異を明らかにする。

2. 既往研究のレビュー

経路選択モデルを構築するにあたり、考慮すべき事項として、経路重複の問題と選択肢集合の問題があげられる。経路重複の問題は、実際の道路ネットワーク上では選択肢間で経路が重複し、IIA 特性が満たされないというものである。これに対して、選択肢間の誤差相関を考

慮する GEV モデルや、Path Size 修正項等の効用関数に補正項を適用する方法が提案されている¹⁾。選択肢集合の問題は、実際の道路ネットワーク上では選択肢の数が莫大となり、選択肢を明示的に列挙することが困難なことから生じる問題である。これは、Dial アルゴリズムをはじめ、選択肢集合を列挙しない方法を適用することでこれを考慮することができる。

経路選択モデルは、こうした課題を考慮するなかで様々なモデルが開発されてきたが、近年は、選択肢集合を定めないモデル化が多く確認される。兵藤ら²⁾は、経路選択モデルにおいて従来から指摘されている、「経路重複の問題」及び「選択肢集合の形成」を考慮した Path Size Dial Logit モデルを提案し、実ネットワークへの適用からモデルの適合性を示し、従来克服されていなかった Dial アルゴリズムの重複経路問題の解決の糸口を見いだしている。こうしたなか、Fosgerau et al.³⁾は、リンクベースの再帰的な経路選択モデルとして、選択肢集合の制約（経路列挙の必要性）がない Recursive Logit Model を提案している。既存モデルと Recursive Logit Model を比較した結果から、Recursive Logit Model の推計精度は MNL と同等であるが、経路を列挙する必要がない点で優れていること、Recursive Logit Model に Path Size Logit Model と同様の考えに基づいた Link Size 項を導入することで経路の重複が考慮でき、さらに推計精度が向上することが示されている。すなわち、Link Size 項を導入した Recursive Logit Model により、経路列挙の必要がなく経路重複も考慮可能なモデルが構築可能となることが示されている。

一方、経路選択モデルに基づき、貨物車の経路選択行動をモデル化した既往研究として、萩野ら⁴⁾や兵藤ら²⁾によるものがあげられる。萩野ら⁴⁾は、重複率最大化モデルを適用して国際海上コンテナ積載車両の経路選択特性を分析し、交差点の曲がりやすさや本線の走行しやすさが、国際海上コンテナ積載車両の経路選択に及ぼす影響を示している。また、兵藤ら²⁾は、第 4 回東京都圏物資流動調査（貨物車走行実態調査）データに基づき、大型貨物車の経路選択特性を分析している。

以上を踏まえ、本研究では、貨物車のプローブデータを用いて、首都圏を対象に、車種によって異なる貨物車の経路選択特性を分析する。具体的には、Fosgerau et al.³⁾によって提案された Recursive Logit モデルを適用し、車種ごとに尤度関数を定義することで、車種の特性を反映した経路選択行動をモデル化する。本研究は、Recursive Logit モデルを大規模ネットワークへ適用して実証的に分析している点、大型貨物車だけを分析対象とするのではなく小型貨物車まで含めたすべての車種を分析対象としている点に大きな特徴がある。

3. データ収集

表-1 に、本研究で用いるデータの概要を示す。本研究では、富士通製のデジタコを搭載し、SaaS 型運行管理システムを利用している車両から収集された商用車プローブデータを用いる。対象範囲は、概ね首都圏三環状を含む 69 メッシュ（二次メッシュ）である。また、対象期間は 2015 年の 7 月 1 週間分である。データから得られるトリップ数は 145,743 トリップであり、十分なサンプル数が収集できているといえる。車種については、高速道路料金の収受情報に基づいて判別しているため、本研究では、デジタコと ETC が連動し、過去に高速道路を利用したことがある車両の走行履歴データのみを利用する。さらに、後述するように、本研究にて用いる経路選択モデルの計算負荷は目的地数に依存する。今回の計算では、計算負荷を抑えるため、平成 22 年道路交通センサスから、普通貨物車の発生集中量が多い 15 のゾーンを選んで分析対象とした（図 1 参照）。

表-1 商用車プローブデータの概要

	内容
対象範囲	概ね圏央道を含む 69 メッシュ
対象期間	2015/07/25（土）～2015/07/31（金）
データの抽出条件	対象期間内に高速道路（会社管理路線）を通過したトリップ
車両台数	17,946 台
トリップ数	145,743 トリップ

4. Recursive Logit モデルの構築

本研究では、Fosgerau et al.³⁾によって提案された、選択肢を列挙する必要がない経路選択モデルである Recursive Logit モデルに基づき、貨物車の経路選択行動を分析する。ここでは、Fosgerau et al.³⁾に倣い、Recursive Logit モデルについて概説する。

Recursive Logit モデルでは、ネットワークの上流側リンク k から隣接する下流側リンク a に移動する際に得られるリンク効用 $u(a|k)$ を以下のように定義する。

$$u(a|k) = v(a|k) + V(a) + \mu \varepsilon(a) \quad (1)$$

ここで、 $v(a|k)$ はリンクペア (k, a) の移動にかかる瞬時効用、 $V(a)$ はリンク a より下流側リンクの期待最大効用、 $\varepsilon(a)$ は標準ガンベル分布に従う誤差項、 μ はスケールパラメータ、 $A(k)$ はリンク k から流出する下流側リンクの集合である。意思決定者は、リンク k からリンク a へ移動する際、当該リンク a よりも下流側の効用（期待効用）の和を最大化するようにリンク a を逐次的に選択する。このとき、下流効用は以下のベルマン方程式によって定

義される。

$$V(k) = E[\max_{a \in A(k)} (v(a|k) + V(a) + \mu \varepsilon(a))] \quad (2)$$

式(1)の効用関数のもとでランダム効用最大化に基づく行動原理を仮定すると、リンク k からリンク a に移動する条件付き確率は以下のロジットモデルにより定義される。

$$P(a|k) = \frac{e^{\frac{1}{\mu}(v(a|k)+V(a))}}{\sum_{a \in A(k)} \delta(a|k) e^{\frac{1}{\mu}(v(a|k)+V(a))}} \quad (3)$$

ここで、遷移確率をロジットモデルとして表していることから、式(2)で定義される期待最大効用は以下のログサム形式に書き換えることができる。

$$V(k) = \begin{cases} \mu \ln \sum_{a \in A(k)} \delta(a|k) e^{\frac{1}{\mu}(v(a|k)+V(a))} & \forall k \in k \\ 0 & k = d \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $\delta(a|k)$ は a が k から流出する下流側のリンクである場合 1、そうでない場合 0 をとるダミー変数、 A は対象道路ネットワーク内全ての実リンク、 d は最終目的地を表現するダミーリンクである。また、以降、両リンクを合わせたリンク集合を $\tilde{A} (= A \cup d)$ と記述する。式(4)をもとに、両辺を指数化すると式(5)となる。

$$e^{\frac{1}{\mu}V(k)} = \begin{cases} \sum_{a \in A(k)} \delta(a|k) e^{\frac{1}{\mu}(v(a|k)+V(a))} & \forall k \in k \\ 1 & k = d \end{cases} \quad (5)$$

さらに、 $\mathbf{z}(|\tilde{A}| \times 1)$ を $\mathbf{z}_k = e^{\frac{1}{\mu}V(k)}$ を要素として持つベ

クトル、 $\mathbf{M}(|\tilde{A}| \times |\tilde{A}|)$ を $M_{ka} = \delta(a|k) e^{\frac{1}{\mu}v(a|k)}$ ($a \in A$), $M_{aa}=0$ (otherwise) を要素に持つインシデンス行列、 \mathbf{b} を $b_k=0$ ($k \neq d$), $b_d=1$ を要素に持つベクトル、 $\mathbf{I}(|\tilde{A}| \times |\tilde{A}|)$ を単位行列とすると、ベルマン方程式は以下の線形方程式とすることができる。

$$\mathbf{z} = \mathbf{M}\mathbf{z} + \mathbf{b} \Leftrightarrow (\mathbf{I} - \mathbf{M})\mathbf{z} = \mathbf{b} \quad (6)$$

行列 $\mathbf{I} - \mathbf{M}$ に逆行列が存在することが解を持つことこの条件であり、これを満たせば、 $V(k)$ を連立一次方程式の解として解析的に求めることができる。

さらに、モデルのマルコフ性により、通過した経路をリンク選択の系列として $\sigma = \{k_0, k_1, \dots, k_n, k\}$ とすると、経路選択確率は以下のように定義される。

$$\begin{aligned} P(\sigma) &= \prod_{i=0}^{l-1} P(k_{i+1}|k_i) \\ &= \prod_{i=0}^{l-1} e^{v(k_{i+1}|k_i)+V(k_{i+1})-V(k_i)} \\ &= e^{-V(k_0)} \prod_{i=0}^{l-1} e^{v(k_{i+1}|k_i)} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、ある出発リンクから到着リンクで定義されるトリップを $n=1, 2, \dots, N$ とすると、対応する尤度関数は以下のように定義される。

$$\begin{aligned} LL(\beta) &= \ln \prod_{n=1}^N P(\sigma_n) \\ &= \ln \prod_{n=1}^N \frac{\prod_{i=0}^{l-1} e^{v(k_{i+1}|k_i)}}{e^{V(k_0)}} \end{aligned} \quad (8)$$

本研究では、瞬時効用 $v(a|k)$ がリンク特性のみに依存すると仮定する。これにより尤度関数は下式で表され、

計算負荷を大幅に削減することができる。

$$LL(\beta) = \ln \frac{\prod_{k \in A} e^{Q_k v(k_{i+1}|k_i)}}{\prod_d \prod_o e^{Q_{od} V_d(k_o)}} \quad (9)$$

ここで、 Q_k は観測されたリンク交通量、 Q_{od} は観測された OD 交通量である。式(8)がトリップ数およびリンク選択回数に依存した尤度関数となっている一方、式(9)はネットワーク規模にのみ依存する構造になっていることが確認できる。したがって、今後蓄積されるであろう膨大な走行履歴データに対しても、計算負荷を増大させることなく経路選択モデルを構築することができる。

パラメータ推定は、Fosgerau et al.³⁾に倣い、Rust⁴⁾が提案している Nested-fixed point algorithm を用いる。Nested-fixed point algorithm は、Inner algorithm と Outer algorithm により構成されており、前者で $V(k_0)$ の計算を行い、後者にて式(6)の対数尤度を最大化する最適化計算を行う。

本研究では、このように構築した Recursive Logit モデルに基づき、車種ごとに尤度関数を定義してパラメータ推定を行うことで、車種によって異なる貨物車の経路選択行動を分析する。

5. Recursive Logit モデルの推定結果

(1) 分析範囲

図-1 に分析対象エリアおよび目的地（平成 22 年道路交通センサスにおいて普通貨物車の発生集中量が多い 15 の B ゾーン）を示す。対象エリアのリンク数は 148,132 リンクとなっており、大規模なネットワーク上の経路選択行動を扱う実証分析といえる。

このような大規模ネットワークを対象に Recursive Logit モデルを適用する際に直面する主要な課題として、膨大な数の Cyclic な経路が発生し計算が不安定になることが指摘できる。Cyclic 経路の発生に伴い生じる計算エラーの多くは、目的地から遠く離れた地域の細街路等の実際にはほとんど選択肢として認識されないであろう経路（リンク）についても、モデルの構造上、旅行者は選択肢の一つとして考慮している、と仮定することに由来している。そこで本研究では、旅行者が考慮する選択肢集合を（観測期間中に）利用されたリンクのみに限定することによって、選択肢集合として認識されている可能性の低いリンクを除外したネットワーク上の経路選択行動をモデル化することにする（図-1 に本研究にて対象とする 15 の目的地までの移動において利用されたリンクを示す）。この方法は、Manski⁵⁾が提案している選択肢集合の考慮過程を、(1) 選択肢（経路）レベルではなくリンクレベルで行い、かつ、(2) 当該目的地までの移動に（観測期間中に）一度でも利用されているリンクであれば確率 1、そうでないリンクであれば確率 0 で旅行

者は選択肢の一つとして（確定的に）認知する，というアドホックな仮定を置いた方法といえる．本仮定の理論的な性質については更なる検討が必要なものの，(1) リンク効用の総和として経路効用を定義する必要がある，(2) 選択肢集合を厳密に定義するためには認知過程に踏み込んだ議論をする必要があるがプローブデータはそのような情報を有さない場合が多い，という 2 点を踏まえると，実際適用上は扱いやすい方法といえる．本仮定の理論的な性質等の整理については今後の課題としたい．

(2) 推定結果

モデルの推定結果を表-2 に示す．以下，得られた主な知見をまとめる．

- ✓ 時間価値は，それぞれ特大車+大型車 24.44[円/分]，中型車 24.23[円/分]，普通車+軽自動車等 10.28[円/分]と推計され，車両が大型であるほど，時間価値が高くなる傾向にあることが確認された．
- ✓ 右折費用は，それぞれ特大車+大型車 50.21[円/回]，中型車 51.69[円/回]，普通車+軽自動車等 72.51[円/分]と推計され，車両が小型であるほど，右折費用が高くなる傾向にあることが確認された．
- ✓ 左折費用は，特大車+大型車 17.33[円/回]，中型車 15.06[円/回]と推計され，また，普通車+軽自動車等については右折ダミーは有意な結果とならなかった．このことから，大型の車両であるほど，左折費用が高くなる傾向にあることが確認された．

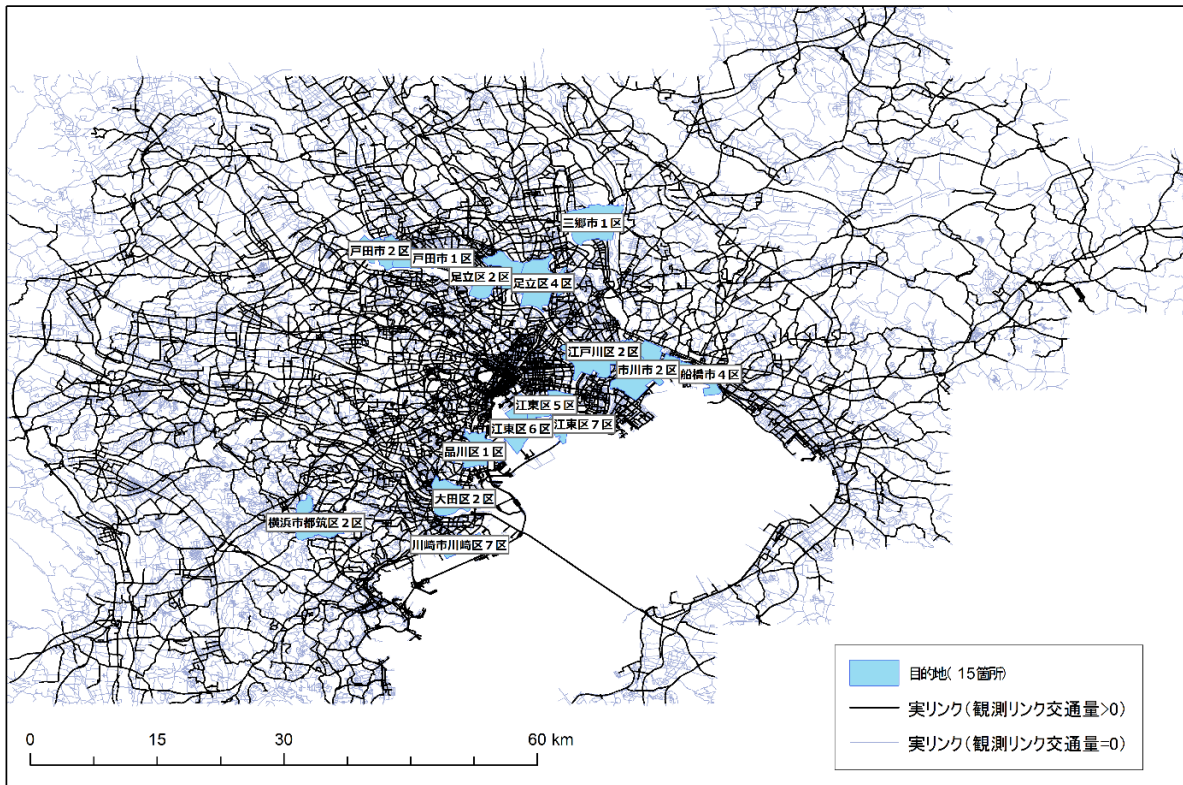


図-1 分析対象エリアおよび目的地

表-2 モデル推定結果

	全データ		特大車+大型車		中型車		普通車+軽自動車等	
	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値	推定値	t値
移動費用 (100円)	-1.845	-1062.4	-1.927	-823.3	-1.744	-647.3	-1.462	-125.6
移動時間 (分)	-0.445	-374.2	-0.471	-293.9	-0.422	-231.6	-0.150	-20.5
Uターンダミー	-0.043	-0.54	0.136	1.29	-0.198	-1.53	-0.256	-0.57
右折ダミー	-0.926	-139.6	-0.968	-106.9	-0.901	-87.9	-1.060	-88.6
左折ダミー	-0.300	-46.4	-0.334	-36.3	-0.263	-27.7	0.006	0.23
リンク数コスト項	-0.263	-526.7	-0.246	-365.4	-0.279	-359.3	-0.266	-105.0
サンプル数 (トリップ数)	11,946		5,961		5,621		364	
サンプル数 (link 選択数)	1,361,713		722,626		601,404		37,683	
最終対数尤度	-135,450.3		-72,014.2		-58,561.3		-3,714.8	
時間価値[円/分]	24.14		24.44		24.23		10.28	
右折費用[円/回]	50.18		50.21		51.69		72.51	
左折費用[円/回]	16.29		17.33		15.06		-0.40	

* 特大車, 大型車, 中型車, 普通車, 軽自動車等の区分は, 高速道路料金の車種区分に基づく.

6. おわりに

本研究では、貨物車プローブデータを用いて車種別に経路選択モデルを構築し、車種毎の時間価値、右折費用、左折費用を算出した。その結果、今回のデータセットおよびモデルの仮定のもとでは、時間価値は、特大車+大型車 24.44[円/分]、中型車 24.23[円/分]、普通車+軽自動車等 10.28[円/分]、右折費用は、特大車+大型車 50.21[円/回]、中型車 51.69[円/回]、普通車+軽自動車等 72.51[円/回]、左折費用は、特大車+大型車 17.33[円/回]、中型車 15.06[円/回]と推計された（普通車+軽自動車等は左折費用は有意とはならなかった）。発表時には推定した経路選択モデルを用いて、各交差点におけるリンク選択確率を詳細に分析した結果を報告する予定である。

謝辞：本研究の一部は、新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技術研究開発：首都圏 3 環状道路の効率的な運用に関する研究開発（代表：大口敬）」の一環として実施したものである。また、Recursive Logit モデルの推定上の課題については、東京工業大学福田大輔准教授、東京海洋大学兵藤哲朗教授より有益な議論と提案をいた

だいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Prato C.G.: Route choice modeling: past, present and future research directions, *Journal of Choice Modelling*, Vol. 2, No. 1, pp. 65-100, 2009.
- 2) 兵藤哲朗, 遠藤弘太郎, 萩野保克, 西隆太: Path Size Dial Logit モデルの提案とその適用可能性, *交通工学*, Vol.44, No.4, pp.66-75, 2009.
- 3) Fosgerau M., Frejinger E., Karlstrom A.: A link based network route choice model with unrestricted choice set, *Transportation Research Part B*, Vol. 56, pp. 70-80, 2013.
- 4) 萩野保克, 兵藤哲朗, 宮原ゆい: 特車申請電子データ及び道路情報便覧データを用いた海上コンテナ車の経路選択特性, *土木学会論文集 D*, Vol.67, No.5, pp. 599-609, 2011.
- 5) Rust, J.: Optimal Replacement of GMC Bus Engines: An Empirical Model of Harold Zurcher, *Econometrica*, Vol. 55, No. 5, pp. 999-1033, 1987.
- 6) Manski, C.: The structure of random utility models, *Theory and Decision*, Vol. 8, No.3, pp. 229-254, 1977.

An analysis of Truck Route Choice Behavior Considering Vehicle Type

Hideki OKA, Makoto CHIKARAIISHI, Jun TANABE and Takashi OGUCHI

Freight vehicles are used differently depending on the vehicle type, such as small-sized trucks used for shipping and large-sized trucks used for trunk transportation. Furthermore, since the route choice behavior of a freight vehicle is subject to the restriction by the size of the vehicle, it can not be ignored that a difference occurs in the route choice behavior due to the different vehicle type.

In this research, we analyze the route choice characteristics of freight vehicles that vary depending on the vehicle type, using GPS trajectory data of freight vehicles in the Tokyo metropolitan area. Specifically, we apply a Recursive Logit model, which is a route choice model that does not need to generate a choice set, and define a likelihood function for each vehicle type, thereby modeling the route choice behavior considering the characteristics of vehicle type. Furthermore, in this paper, we show the parameter estimation results of the model to be built and consider future prospects of model analysis.