

貨物車の経路選択行動の分析とモデリングに関する研究

Study on Analysis and Modeling of Freight Trucks' Route Choice Behavior

岡 英紀¹ 剣持 健² 茂木 渉³ 笹 圭樹³ 廣瀬 健³ 加藤桃子⁴ 北村清州¹ 加藤昌樹⁵
萩野保克⁶

By Hideki OKA, Takeshi KENMOCHI, Wataru MOGI, Keiju SASA, Takeshi HIROSE, Momoko KATO, Seishu KITAMURA, Masaki KATO and Yasukatsu HAGINO

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。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、道路利用者に対して多様な経路選択肢が提供されつつある。一方、貨物車の経路選択行動については不明確な部分も依然として多く、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。

こうした背景から、貨物車の経路選択メカニズムを明らかにすることを目的に、R&Dとして、貨物車経路選択行動の分析・モデリング、諸外国における貨物車交通施策に関する情報収集、学識経験者との意見交換、国際会議での情報収集・情報発信などに取り組んできた。本稿では、このうち、貨物車の経路選択行動の分析とモデリングに関してその成果を紹介する。

2 本研究の位置付け

貨物車の経路選択に関する実証研究として、萩野ら¹⁾、Oka et al.²⁾等があるが、乗用車の経路選択行動のモデル化に比べて研究の蓄積は少ない。貨物車の経路選択行動に着目すると、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といったように、車種や輸送距離帯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、車種による経路選択行動の相違を明示的に考慮した検討が必要である。

本研究では、経路を特定する必要のないRecursive

Logitモデル (Fosgerau et al.³⁾) を基礎モデルとして、貨物車の特性を反映した経路選択モデルを構築する。具体的には、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(時間価値、右左折費用等)を分析する。本研究では、プローブデータから得られる膨大な経路データを扱う必要があることから、ベルマン方程式に従うリンク効用に基づき、発地から着地までリンクを繰り返し選択すると仮定するRecursive Logitモデルとして経路選択行動を定式化することは妥当であると考えられる。

3 データの概要

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。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が連動して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、分析には1トリップ当たり50リンク選択以上行っているデータのみを利用する。最終的に、トリップ数11,946、リンク選択回数1,361,713のプローブデータを用いてモデル分析を進める。表-2に車種別・距離帯別トリップ数を示す。これより、大型貨物車と小型貨物車では、車両の使われ方が大きく異なることがデータからも確認できる。

表-1 使用する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69二次メッシュ
対象期間	2015/07/25~2015/07/31
データの抽出範囲	対象期間内に高速道路を通過したトリップ
トリップ数	11,946トリップ

¹交通・社会経済部門 グループマネジャー ²交通・社会経済部門 グループマネジャー 博士(社会経済) ³交通・社会経済部門 研究員
⁴都市地域・環境部門 研究員 ⁵交通・社会経済部門 担当部門長兼グループマネジャー ⁶業務執行理事、研究本部執行管理部長 博士(工学)

表-2 車種別・距離帯別トリップ数と構成比

	~10km	10~30km	30km~
特大+大型	1,080 (18%)	2,672 (45%)	2,209 (37%)
中型	1,319 (23%)	2,930 (52%)	1,372 (24%)
普通+軽	111 (30%)	201 (55%)	52 (14%)

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。

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。

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

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、 $V^d(a)$ はリンク a から目的地 d までの期待最大効用、 $\varepsilon(a)$ 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。ただし、本研究では、 μ は1に基準化するものとする。

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多項Logitモデルにより与えられる。

$$P(a | k) = \frac{e^{\frac{1}{\mu}(v(a | k) + V^d(a))}}{\sum_{a' \in A(k)} \delta(a' | k) e^{\frac{1}{\mu}(v(a' | k) + V^d(a'))}} \quad (2)$$

本モデルの特徴は、意思決定者は、リンク k からリンク a へ移動する際、当該リンクペア (k, a) の移動にかかる瞬時効用に加えて、リンク a より続く下流側の期待最大効用 $V^d(a)$ を考慮してリンク a を逐次的に選択すると考える点にある。これにより、出発地から目的地までの経路選択問題を、再帰的なリンク選択問題に分解することができるため、動的計画法の考え方を援用することで効率的にネットワーク上の経路選択問題を解くことができる。

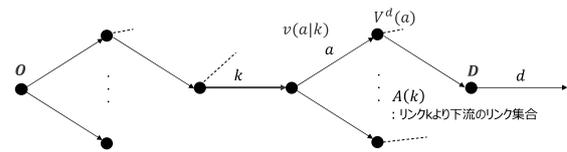


図-1 Recursive Logitモデルのイメージ

具体的には、まず、下流側の期待最大効用を以下のベルマン方程式によって定義する。

$$V(k) = E \left[\max_{a \in A(k)} (v(a | k) + V^d(a) + \mu \varepsilon(a)) \right] \quad (3)$$

ここで、遷移確率をLogitモデルとして表していることから、式(3)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。

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

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。

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

さらに、 $\mathbf{z}(|\tilde{A}| \times 1)$ を $\mathbf{z}_k = \exp(\frac{1}{\mu} V^d(k))$ を要素として持つベクトルとし、また、 $\mathbf{M}(|\tilde{A}| \times |\tilde{A}|)$ を、

$$M_{ka} = \begin{cases} \delta(a | k) \exp\left(\frac{1}{\mu} v(a | k)\right) & (a \in A) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

を要素に持つインシデンス行列とする。加えて、 \mathbf{b} を $b_k = 0 (k \neq d)$ 、 $b_d = 1$ を要素に持つベクトルとし、 $\mathbf{I}(|\tilde{A}| \times |\tilde{A}|)$ 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により表現される。

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

行列 $\mathbf{I} - \mathbf{M}$ に逆行列が存在することがベルマン方程式が解を持つこと条件であり、これが満たされれば $V^d(k)$ が連立一次方程式の解として求められる。

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 $\sigma = \{k_0, k_1, \dots, k_i, \dots, k_j\}$ と表すと、経路選択確率は以下のように定義される。

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

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。

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

5 Recursive Logit モデルの推定結果と解釈

(1) 推定上の工夫

本研究では、Fosgerau et al.³⁾ の定式化とは異なり、瞬時効用 $v(a | k)$ がリンク特性のみに依存すると仮定し、尤度関数を下式で表す。これにより、計算負荷を大幅に削減することができ、大規模ネットワークへの適用が容易となる。この定式化により、実務への貢献も期待できる点は、本研究における大きな特徴のひとつであるといえる。

$$LL(\beta) = \ln \frac{\prod_{k \in A} \prod_{a \in A(k)} \exp\left(\frac{Q_{ak}}{\mu} v(a | k)\right)}{\prod_d \prod_o \exp\left(\frac{Q_{od}}{\mu} V^d(k_o)\right)} \quad (9)$$

ここで、 Q_{ak} は隣接するリンクペア (k, a) を通過する観測交通量、 Q_{od} は観測 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、式 (9) を用いれば、今後蓄積される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。

分析対象範囲は、平成 22 年度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 ゾーンを目的地とするトリップとする。分析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 な経路の発生により I-M の逆行列が求められず、結果的に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、と仮定することによって由来している。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とする。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、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こと、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こと、という二点を踏まえると、実用上は扱いやすい方法と思われるためこれを用いることとする。

(2) 説明変数の定義

説明変数として、移動費用、移動時間、右左折ダミー、U ターンダミーを設定する。移動費用には、ガソリン代と高速道路料金を含むものとし、ガソリン代を 20 円/km、高速道路料金を 43.8 円/km、ターミナルチャージを 150 円とした。また、移動時間は、午前 10 時台の平均旅行速度とした。右左折ダミー及び U ターンダミーは、上流側と下流側のリンクの角度が 22.5 ~ 157.5 度の場合に右折、185 ~ 337.5 度の場合に左折、175 ~ 185 度の場合に U ターンと定義した。

(3) 推定結果

車種別にモデルを推定した結果を表-3に示す。得られた主な知見は以下の通りである。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、左折ダミーは有意な結果とならなかった。このことから、大型の車両ほど左折費用が高くなる傾向にあることが確認された。

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Recursive Logit型の経路選択モデルを構築し、車種毎の時間価値、右折費用、左折費用等を算出し、比較を行った。その結果、今回のデータセットおよびモデルの想定のもとでは、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、車両が大型であるほど時間価値や左折費用が高くなる傾向にあることなどが明らかとなった。今後は、非合理的な経路選択肢のより合理的な除去手法等を含めたCyclicな経路への対応などを行うことが必要である。

謝辞: 本研究は、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)」と連携して実施したものであり、そのデータの一部を共有している。

また、本研究の関連研究として、岡・力石・田名部・福田・大口⁴⁾も参照されたい。ここに記して関係の方々には謝意を表します。

参考文献

- 1) 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D3、Vol.67、No.5、pp.1_599-1_609、2011。
- 2) Oka, H., Hagino, Y., Kenmochi, T., Tani, R., Nishi, R., Endo, K. and Fukuda, D.: Predicting travel pattern changes of freight trucks in the Tokyo Metropolitan area based on the latest large-scale urban freight survey and route choice modeling, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2018, forthcoming.
- 3) Fosgerau, M., Frejinger, E. and Karlstrom, A.: A link based network route choice model with unrestricted choice set, Transportation Research Part B: Methodological, Vol.56, pp.70-80, 2013.
- 4) 岡英紀・力石真・田名部淳・福田大輔・大口敬：車種及び距離帯を考慮した貨物車経路選択行動のモデル分析、土木学会論文集D3、Vol.74、No.5、2018。

表-3 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nda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		5621		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	

注) 特大車、大型車、中型車の区分は、高速道路料金の車種区分に基づく。