

プローブデータを用いた 貨物車経路選択行動のモデル分析

力石 真¹・田名部 淳²・大口 敬³

¹正会員 広島大学大学院 特任准教授 国際協力研究科 (〒739-8529 東広島市鏡山1-5-1)
E-mail: chikaraishim@hiroshima-u.ac.jp

²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

³フェロー会員 東京大学 教授 生産技術研究所 (〒153-8505 目黒区駒場 4-6-1)
E-mail: takog@iis.u-tokyo.ac.jp

本研究では、2014年、2015年の特定の一週間に首都圏を走行した貨物車のプローブデータ（2014年：約13,500台、2015年：約18,000台）を用いて、道路整備に伴う交通流動への影響を分析する。具体的には、まず、上記2時点の間に開通した中央環状品川線の交通流動の変化を確認する。その後、選択肢を列挙する必要のない経路選択モデルである Recursive logit モデルを用いて、貨物車の経路選択特性の把握を試みる。本稿では、試行的な分析結果を示すとともに、Recursive logit モデルの適用上の課題及び発展可能性について考察する。

Key Words: freight transport, route choice, recursive logit, Tokyo metropolitan area

1. はじめに

首都圏の道路ネットワークでは、環状方向の都市高速道路の整備により、一つの OD に対して多様な経路選択肢が利用者に提供されつつある。このような密な道路ネットワークにおいては、道路の新設に伴う交通流動の変化を予測することは一般に難しい。その原因の一端として、とりわけ密な道路ネットワークの場合、主要な経路選択肢に限定してもその列挙が困難である場合が多く、ドライバーの経路選択特性の把握が難しい点が指摘できる。例えば、アンケート調査に基づく経路選択行動特性の分析は、道路交通情報が経路選択に与える影響を把握するといった目的に対して有効ではあるものの^{1,2)}、一般に、対象経路を限定せざるを得ず、道路の新設が道路ネットワーク全体に及ぼす影響を把握することは簡単ではない。

この問題に対して、近年、少なくとも以下にみるような観測上及び理論上の進展がみられる。第一に、プローブデータの普及に伴い、道路整備前後のドライバーの経路選択行動の変化を直接観測することが可能になってきている。とりわけ貨物車の交通量は当該道路の維持修繕費に大きく影響するため、道路整備後の交通流動をモニ

タリングできるデータが取得できるようになった意義は大きい。一方、このような整備前後の比較は事後評価やモニタリング手段として有用であるものの、将来予測への示唆は限定的であり、予測のためにはドライバーの経路選択行動をモデル化することが求められる。この点に関して、近年、Fosgerau et al.³⁾により選択肢を列挙する必要のない経路選択モデル (Recursive logit モデル) が提案されている。彼らが提案したモデルは、Akamatsu⁴⁾の Markov 連鎖による配分モデルと構造的には等価であり、この点で新しい理論モデルとは言えないものの、プローブデータ等から実際の経路選択結果の情報を入手できれば、実データから道路ネットワーク上の経路選択特性を把握することができることを示した点において実用性の高いモデルといえる。

以上を踏まえて、本研究では、2014年、2015年の特定の一週間に首都圏を走行した貨物車のプローブデータ（2014年：約13,500台、2015年：約18,000台）を用いて、道路整備に伴う交通流動への影響を分析する。具体的には、まず、上記2時点の間に開通した中央環状品川線の交通流動の変化を確認する。その後、Recursive logit モデルを用いて、貨物車の経路選択特性の把握を試みる。本稿では、試行的な分析結果を示すとともに、Recursive

logit モデルの適用上の課題及び発展可能性について考察する。

2. データ概要と集計分析

(1) 商用車プローブデータの概要

表-1 に本研究にて用いるプローブデータの概要を示す。ここで用いる商用車プローブデータは、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データである。対象範囲は、図-1 に示すとおりである。対象期間は、2014 年及び 2015 年各々の 7 月末の一週間である。対象期間を 2 時点に分けることにより、中央環状品川線や圏央道寒川北 IC～海老名 JCT 開通前後の経路選択行動の変化が観測可能なデータとなっている。対象期間・範囲において、2014 年は 117,043 トリップ、2015 年は 145,743 トリップが観測されており、分析を行う上で十分なサンプルが収集されている。

以下では、上記 2 時点間の発生集中量の変化、及び、中央環状品川線開通前後の経路選択行動に関する集計分析結果を示す。

表-1 商用車プローブデータ概要

項目	内容
対象期間	2014 年 7 月 26 日(土)～8 月 1 日(金) 2015 年 7 月 25 日(土)～7 月 31 日(金)
対象範囲	圏央道を包摂する 69 メッシュ
対象トリップの抽出条件	高速自動車国道、都市高速道路、一般国道自動車専用道路 (NEXCO 管理) のリンクを通過したトリップ
車両台数	2014 年: 13,568 台, 2015 年: 17,946 台
トリップ数	2014 年: 117,043 トリップ 2015 年: 145,743 トリップ

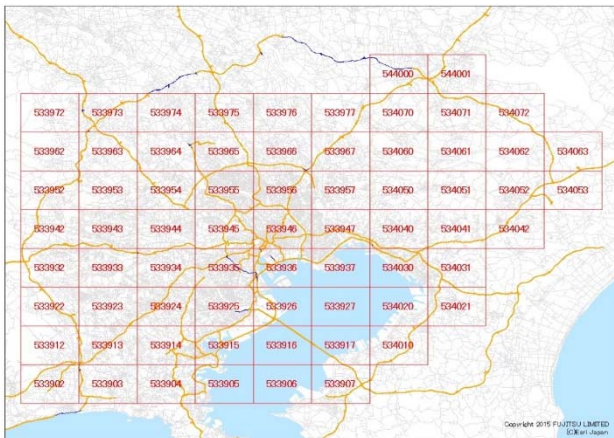


図-1 対象範囲 (69 メッシュ)

(2) 発生集中量

図-2 に、平成 22 年道路交通センサス OD 調査の B ゾーン単位の発生集中量を集計した結果を示す。図より、両時点において臨海部において発生集中量が多くなっていることが確認できる。また、内陸部においても発生集中量が高いゾーンが散見される。なお、2 時点間の発生集中量の空間分布に大きな差異は観測されなかった。このことは、道路の開通が OD パターンの変化に影響しないということを示しているというよりはむしろ、道路が開通してから OD パターンに変化が生じるまでにタイムラグが存在することを示唆している可能性が高い。道路の開通が OD パターンに及ぼす影響を分析するためには、物流施設の立地場所の変化や人口分布の変化を考慮した分析が必要であり、比較的長期の観測データが必要と考えられる。

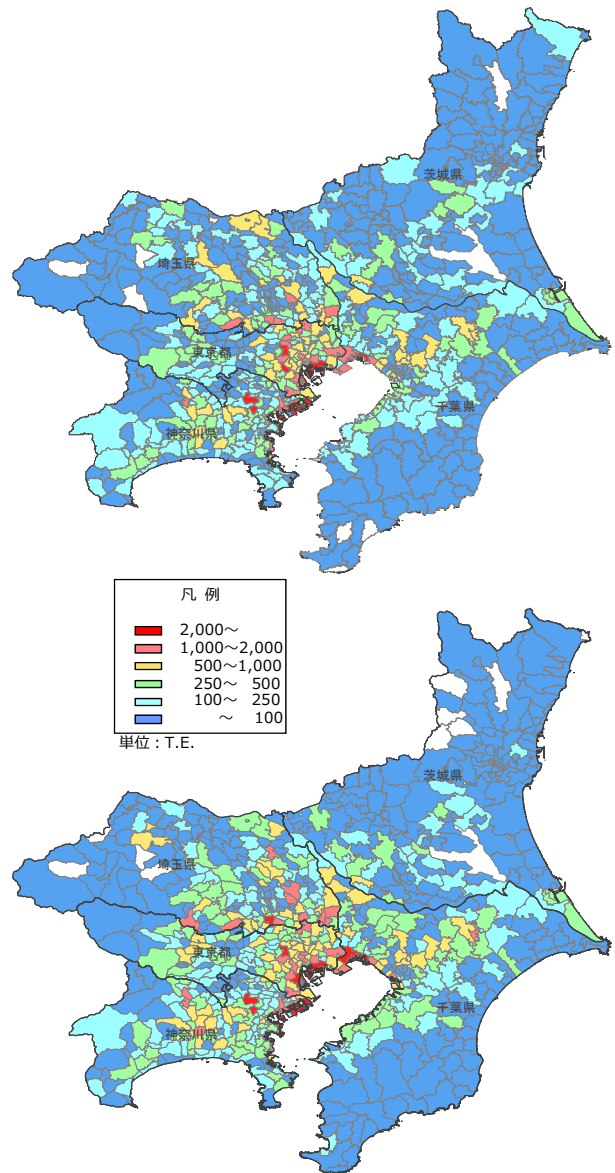


図-2 B ゾーン別発生集中量 (上 : 2014 年, 下 : 2015 年)

(3) 経路選択行動の変化：中央環状品川線

図-3 に、2014 年、2015 年それぞれの時点における 3 号渋谷線（大橋 JCT 以西）→千葉方面（湾岸性・河西 JCT 以東及び京葉道路）のリンクフローを示す。図より、品川線供用後、一部の交通が中央環状線への転換していることが確認できる。一方で、都心環状線を利用する交通も少なからず残っており、環状道路への変更は限定的といえる。

3. Recursive logit モデル

本研究では、Fosgerau et al.⁹⁾により提案された、連続した一連のリンク選択により経路選択を記述する Recursive logit モデルを用いて貨物車ドライバーの行動をモデル化する。以下のモデルの説明は、Fosgerau et al.⁹⁾に従う。

Recursive logit モデルの概念図を図-4 に示す。本モデルでは、リンク k に隣接するリンク a に移動する際に得るリンク効用 $u(a|k)$ を以下のように定義する。

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

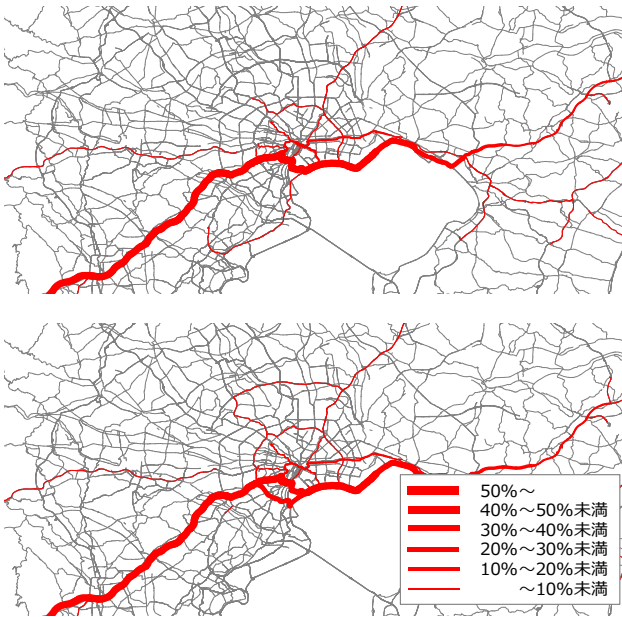


図-3 3号渋谷線→千葉方面のリンクフロー (上:2014年,下:2015年)

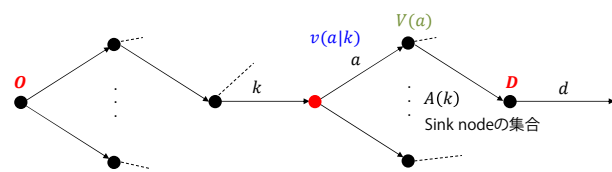


図-4 Recursive logit モデルの概念図

ここで、

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

であり、 $v(a|k)$:リンク k からリンク a に移動する際に得る効用の観測可能な部分 (リンクペア ka の移動にかかる一般化移動費用)、 $V(a)$:リンク a の後に続く選択肢(リンク)の期待最大効用、 $\varepsilon(a)$: 標準ガンベル分布に従う誤差項、 μ : スケールパラメータ、 $A(k)$: リンク k から流出する下流側リンクの集合である。なお、誤差項にガンベル分布を仮定しているため、式(2)で定義される期待最大効用は以下のログサム の形をとる。

$$V(k) = \begin{cases} \mu \ln \sum_{a \in A(k)} \delta(a|k) e^{\frac{1}{\mu}(v(a|k)+V(a))} & \forall k \in A \\ 0 & k = d \end{cases} \quad (3)$$

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。

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。

$$P(a|k) = \frac{e^{\frac{1}{\mu}(v(a|k)+V(a))}}{\sum_{a \in A(k)} e^{\frac{1}{\mu}(v(a|k)+V(a))}} \quad (4)$$

また、通過した経路を $\sigma = \{k_0, k_1, \dots, k_i, \dots, k_l\}$ とすると、経路選択確率は以下のように定義される。

$$\begin{aligned} P(\sigma) &= \prod_{i=0}^{l-1} P(k_{i+1}|k_i) \\ &= \prod_{i=0}^{l-1} e^{v(k_{i+1}|k_i)+V(k_{i+1})-V(k_i)} \\ &= e^{-V(k_0)} \prod_{i=0}^{l-1} e^{v(k_{i+1}|k_i)} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで $V(k_0)$ は、出発リンクから到着リンクまでの (Cyclic な経路を含む) 全て利用可能な経路のリンク効用の総和であり、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 (付録参照)。

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。

$$\begin{aligned} LL(\beta) &= \ln \prod_{n=1}^N P(\sigma_n) \\ &= \frac{1}{\mu} \sum_{n=1}^N (\sum_{i=0}^{l_n-1} v(k_{i+1}|k_i) - V(k_0)) \end{aligned} \quad (6)$$

パラメータ推定は、Fosgerau et al.³⁾に倣い、Rust⁵⁾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。

4. 実証分析

(1) 分析対象地域

以下では、首都高速湾岸線「羽田中央」下り出口を降りた貨物車を対象とした実証分析を行う。対象とする道路ネットワークは、**図-5** に示す範囲に含まれる主要地方道以上のリンクとした。ただし、主要地方道未満の道路であっても、実際に通過したリンクは選択肢に含めている。対象ネットワークに含まれるリンク数は 13,542 リンクである。

分析には 2015 年 7 月 25~31 日分の商用車プローブデータを用いる。「羽田中央」下りを出口とするトリップは計 164 トリップ存在し、観測された総リンク選択回数は 8,362 であった。

(2) 効用関数の設定

本研究では、リンクペア ka の移動にかかる一般化移動費用 $v(a|k)$ を以下のように定義する。

$$v(a|k) = \beta_{time}x_{time} + \beta_{cost}x_{cost} + \beta_{pena}x_{pena} + \beta_{RC}x_{RC} - 20x_{Uturn} \quad (7)$$

ここで、 x_{time} : リンク a の移動時間 (分)、 x_{cost} : リンク a の移動費用 (100 円)、 x_{pena} : 1 (多くのリンクを通過することにより発生するコストを表現)、 x_{RC} : 右折ダミー (1: リンクペア ka の角度の差異が 70-175 度; 0: その他)、 x_{Uturn} : U ターンダミー (リンクペア ka の角度の差異が 175-185 度; 0: その他) であり、 $\beta_{time}, \beta_{cost}, \beta_{pena}, \beta_{RC}$ は未知パラメータである。移動時間については、ESRI ジャパン株式会社道路網データを参考に、道路種別及び幅員に基づき設定した。また、移動費用は、ガソリン代 20 円/km、高速料金 26 円/km、ターミナルチャージ 150 円として計算した。

(3) モデル推定結果

Recursive logit モデルの推定結果を表-2 に示す。いずれの説明変数についてもパラメータの符号条件は論理的に整合していることが確認できる。貨物車の時間価値は 45.3 円/分、右折費用は 166.4 円/回 (時間換算では約 3.5 分/回) と推定された。航空貨物のような付加価値の高い貨物を運搬する車両は、直進性の高い経路を嗜好

する傾向があることが示唆される結果となった。

なお、このパラメータ推定結果は羽田空港を目的地とする極めて限定的なトリップを対象としたものである。今後は、より広範な OD を対象として同様の分析を行って一般的なパラメータを推定することが必要である。また、左折ダミーや目的地までの角度等の変数を追加して、モデルの精緻化を図ることも必要であると考えられる。

また、現時点では、パラメータの推定値は初期値に依存する傾向にあり、今回はグリッドサーチを事前に行い適切な初期値を探す手順を取った。しかしながら、グリッドサーチの時間を含めると 164 トリップに対して 10 時間以上の計算負荷がかかっており、現実的な解法とは言えない。ただし、現在、計算コードの見直しを進めており、計算速度の上昇を図っている。また、安定的に解を得るための計算手順について検討する必要がある。

加えて、Recursive logit モデルは、経路を列挙する必要がない点において優れたモデル構造となっているものの、経路の重複や、旅行時間の増大に伴って認知誤差が増大するといった、経路選択行動を行う際に想定される行動原理を十分に反映できていない面が残る。前者については、例えば Mai et al.⁶⁾によって Nested recursive logit モデルが提案されているものの、後者の認知誤差が旅行時間に依存する問題については十分な検討がなされていない状況にある。今後、以上のような経路選択行動の特性を反映した経路選択モデルの構築、及び、それを用いた実分析の実施が望まれる。



図-5 実証分析対象範囲

表-2 Recursive logit モデル推定結果

	パラメータ	t値
β_{time}	-0.681	-11.89
β_{cost}	-1.504	-7.11
β_{pena}	-0.680	-155.6
β_{RC}	-2.502	-9.13
サンプル数 (トリップ数)	164	
サンプル数 (リンク選択数)	8,362	
最終対数尤度	-1279.05	

5. おわりに

本研究では、2014 年、2015 年の特定の一週間に首都圏を走行した貨物車のプローブデータ (2014 年: 約 13,500 台、2015 年: 約 18,000 台) を用いて、貨物車の経路選択特性を分析した。まず、中央環状品川線開通前後の発生集中量、及び、経路選択行動の変化に関する集計分析を行い、発生集中パターンは短期間では変化が生じないものの、経路選択行動については一定の変化が生じていることを確認した。次に、選択肢を列挙する必要な経路選択モデルである Recursive logit モデルを用いて、貨物車の経路選択特性を分析した。羽田空港にアクセスする貨物車のみを対象とした試行的な分析の結果、貨物車両は直進性の高い経路を選好する傾向があることが示唆された。ただし、今回の分析は極めて限定的なネットワークを対象に行った分析結果であり、今後、より一般的な状況を対象とした分析を行う予定である。

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 の推定上の課題について、東京海洋大学・兵藤哲朗教授、東京工業大学・福田大輔准教授より有益な議論・提案を得た。ここに記して謝意を表す。

付録

ここでは、図-a1 に示す簡便なネットワークを例に、 $V(k_0)$ の計算の手順を示す。

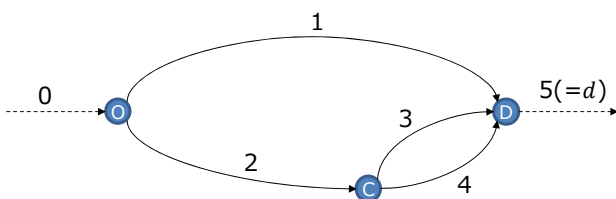


図-a1 サンプルネットワーク

図-a1 に示すネットワークに対応する $k \times a$ (6×6) のインシデンス行列 \mathbf{L} を以下のように定義する。

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (a1)$$

また、リンク k からリンク a に移動する際にかかる一般化移動費用 $v(a|k)$ の指数をとった $\exp(v(a|k))$ を要素に持つ行列を以下のように定義する。ただし、最終目的地を表現するダミーリンク d への一般化移動費用 $v(d-1|d)$ は 0 とする。

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 0 & e^{v(1|0)} & e^{v(2|0)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{v(3|2)} & e^{v(4|2)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (a2)$$

また、各リンク上からみて下流側に該当するリンクの期待最大効用 $V(k)$ の指数を取ったベクトルは、下記のように表現できる。

$$\mathbf{z} = \begin{pmatrix} e^{V(0)} = \sum_{a \in A} L_{0a} \cdot e^{v(a|0)+V(a)} \\ e^{V(1)} = \sum_{a \in A} L_{1a} \cdot e^{v(a|1)+V(a)} \\ e^{V(2)} = \sum_{a \in A} L_{2a} \cdot e^{v(a|2)+V(a)} \\ e^{V(3)} = \sum_{a \in A} L_{3a} \cdot e^{v(a|3)+V(a)} \\ e^{V(4)} = \sum_{a \in A} L_{4a} \cdot e^{v(a|4)+V(a)} \\ e^{V(d)} = 1 \end{pmatrix} \quad (a3)$$

なお、一般的には、 \mathbf{M} 及び \mathbf{z} の要素は以下のように定義できる。

$$z_k = \begin{cases} \sum_{a \in A} L_{ka} \cdot e^{v(a|k)+V(a)} & \forall k \in A \\ 1 & k = d \end{cases} \quad (a4)$$

$$M_{ka} = \begin{cases} L_{ka} \cdot e^{v(a|k)} & a \in A(k) \\ 0 & k = d \end{cases} \quad (a5)$$

なお、 L_{ka} はインシデンス行列 \mathbf{L} の要素を表す。ここで、 $\mathbf{b} = (0, 0, 0, 0, 0, 1)'$ とすると、リンク効用がその後にくるリンク集合の期待最大効用を通じて再帰的に定義されていることから、 $\mathbf{z} = \mathbf{Mz} + \mathbf{b}$ と定義でき、従って、 \mathbf{z} は以下の逆行列を計算することにより求められる。

$$\mathbf{z} = (\mathbf{I} - \mathbf{M})^{-1} \mathbf{b} \quad (a6)$$

なお、式(a6)で定義される一度の逆行列の計算で複数の出発地の期待最大効用を計算することができることから、複数の起点を同時に扱うことができる。複数の起点・終点に拡張する場合、式(a6)で定義される逆行列の計算を終点の数だけ計算する必要がある。

参考文献

- 1) 大口敬, 羽藤英二, 谷口正明, 吉井稔雄, 桑原雅夫, and 森田綽之: 首都高速道路における経路選択行動に関する実態調査, *土木学会論文集* Vol. No.590/IV-39, pp. 87-95, 1998.
- 2) 宇野伸宏, 杉本一走, 飯田恭敬, 山田憲浩, and 中川真治: 経路利用意向に基づく高速道路 2 ルート区間における情報提供効果分析, *土木計画学研究・論文集* Vol. Vol. 21, No. 4, pp. 941-949, 2004.
- 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) Akamatsu, T.: Cyclic flows, markov process and stochastic traffic assignment, *Transportation Research Part B*, Vol. 30, No. 5, pp. 369-386, 1996.
- 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) Mai, T., Fosgerau, M., and Frejinger, E.: A nested recursive logit model for route choice analysis, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 75, pp. 100-112, 2015.

(2016. 7. 31 受付)

A MODEL ANALYSIS OF FREIGHT ROUTE CHOICE BEHAVIOR USING PROBE DATA

Makoto CHIKARAISHI, Jun TANABE and Takashi OGUCHI