

貨物車の都市圏内ツアーパターン選択モデルに関する研究

篠原 丈実¹・岡 英紀²・福田 大輔³

¹正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (〒 105-0011 港区芝公園 2-4-1 芝パークビル)
E-mail: shinohara.tak-gn8n@jrtr.go.jp

²正会員 一般財団法人 計量計画研究所 交通・社会経済部門 (〒 162-0845 新宿区市谷本村町 2-9)
E-mail: hidekioka@ibs.or.jp

³正会員 東京工業大学准教授 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-11)
E-mail: fukuda@plan.cv.titech.ac.jp

都市圏内における貨物車の流動については、これまで主にトリップ単位での実証分析が行われてきた。しかし、物流企業による実際の輸送パターンに関しては、各トリップが独立に行われるのではなく、ある拠点をベースとした複数の目的地選択の組み合わせ、すなわち、ツアー単位でパターンの決定がなされると考えるのがより自然である。本研究では、動的離散選択モデルの枠組みのもと、貨物車が都市圏内の複数の目的地を訪問するツアーパターン選択モデルを構築した。第 5 回東京都市圏物流流動調査で収集された貨物車プローブデータの基礎分析を行った上で行動モデルのパラメータ推定を行った。その上で、構築したモデルを用い、都心部における時間帯別課金導入が貨物車のツアーパターンに及ぼす影響に関するシミュレーションを行った。

Key Words: freight trucks, tour-based model, dynamic discrete choice, recursive logit

1. はじめに

現在の日本において、物流はヒトの流動と同様に生活に関わる重要な要素となっている。さらに近年ではネットショッピングの普及により、物流の人々の生活に及ぼす影響はきわめて高くなった。こうしたモノの流れでは、大型トラックをはじめとした貨物車による配送によるものが大半を占めている。そして貨物車の走行形態は道路ネットワークの整備状況や混雑課金を代表とした交通政策に大きな影響を受けると考えられる。特に、首都圏においては、三環状道路の完成が間近であり、首都圏を網羅する十分なネットワークが構築されつつあると言える。

こうした、ネットワークが概成した中での貨物車の広域的な流動を把握し、プライシング等の施策がそのパターンに及ぼす影響を定量的に評価するためには、都市圏内における貨物車の広域的な空間移動パターンを記述可能な実証モデルが必要と考えられる。貨物車による物資の集配送パターンに関する実証モデルとしては、離散選択モデルを基礎とする経路選択モデル¹⁾⁻³⁾が主に検討されてきた。そこでは、物流施設や集配送地点を起終点と見立てトリップ単位での検討が主になされている。しかし、物流企業による実際の集配送パターンは、各トリップが独立に行われるのではなく、複数のトリップがチェーン状に連結されたトリップチェーン

単位で決定されると考えるのが自然である。特に、都市圏における広域的な流動では、ある拠点をベースとして都市内を移動し、最終的にその拠点に戻ってくるような、いわゆるツアーベースでの流動が多く見られる。

ツアーベースで貨物車の時空間的な移動を理解することは、特に時間帯別課金のような施策を考える上で重要であると考えられる。例えば、ある貨物車が橙色の点を拠点とし、**図-1**のようなツアーパターンを行っているとする。ここで、ある地域において午前中のみに混雑課金が設定されると、貨物車は混雑課金時間帯には当該地域への訪問を回避すると考えられる(**図-2**)。こうした行動パターンの変化はトリップ単位のモデル等では表現できない。

以上の問題意識のもと、本研究では、貨物車がある拠点を出発し、連鎖的に複数の目的地を順番に選択し、最終的にその拠点に戻ってくるような時空間的なツアーパターンを記述する行動モデルを構築することを目的とする。このツアーパターン選択行動は、動的離散選択モデルの一つである Recursive Logit (RL) モデル⁴⁾の枠組みのもとで定式化する。構築したモデルを、都市圏内における大型貨物車の実際の流動データ(プローブデータ)に適用し、観測データに適合するようにモデルの未知パラメータを推定した上で、都心部への時間帯別課金政策を念頭においたシミュレーションを行い、貨物車の流動パターンに及ぼす影響について検討する。

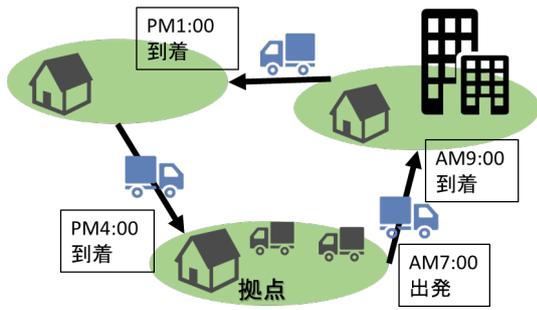


図-1 課金前のツアーパターンのイメージ

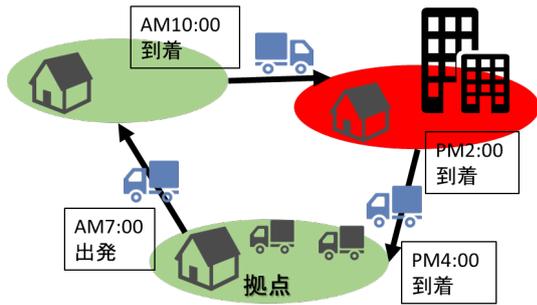


図-2 課金後のツアーパターンのイメージ

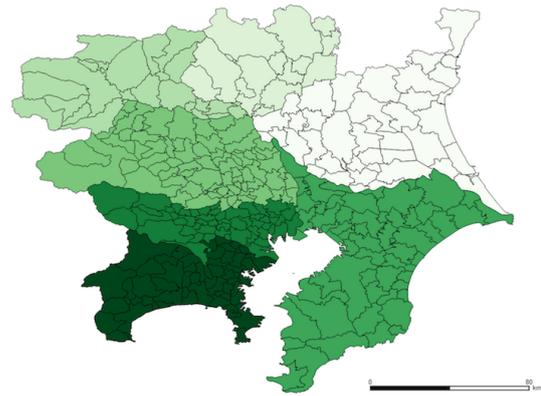


図-3 第 5 回東京都市圏物資流動調査の対象範囲と市区町村ゾーン

- トラック種別
- 時刻 (10 分ごと)
- 位置情報 (緯度・経度)

従来のトリップベースモデルでは、これらのプローブデータなどから作成されたトリップ情報のみを使用して分析を行っていたが、本研究で構築するツアーベースモデルではトリップ情報のみでは不十分であるため、貨物車のトリップチェーンに関する情報を有するデータが必要となる。本研究では、トリップデータに加えて貨物車によるトリップチェーンデータを抽出し、大型貨物車に着目した都市圏内の輸送ツアーパターンに関するモデリングを検討する。目的地選択のモデリングは図-3 に示す市区町村ゾーン単位で実施する。

2. データの概要と基礎分析

(1) 第 5 回東京都市圏物資流動調査・貨物車走行実態調査の概要

東京都市圏物資流動調査は、東京都市圏交通計画協議会によって昭和 47 年に第 1 回目を実施されおよそ 10 年に 1 度の頻度で行われている調査であり、物流の観点から都市計画・交通計画を検討する際の重要な基礎資料となっている。今回使用するデータは最新の 2014 年に実施された第 5 回物資流動調査の結果であり、調査の対象となっている物流企業は図-3 で示されるように東京、神奈川、千葉、埼玉の 4 都県と、茨城県、栃木県、群馬県の一部地域に所属する事業所である。

本調査は大きく分類して「本体調査（事業所機能調査）」と 4 種類の「補完調査」から構成される。本研究では貨物車の輸送ツアーパターンの選択モデルを構築するために、「補完調査」のうち、「貨物車走行実態調査」を活用する。「貨物車走行実態調査」の中には、数種類のデータを利用した調査が含まれているが、本研究では詳細な走行経路などの情報を必要としないこと、東京都市圏全体という広い範囲を分析対象とするため、機器が搭載された走行中の大型貨物車の 10 分ごとの位置情報を収集したプローブデータ（観測台数：20,425 台・日、総観測ドット数：8,564,313）を利用する。このプローブデータに含まれている属性を以下に示す。

- トラック ID

(2) 貨物車による輸送に関連する単語の整理

ここで本論文中に登場する用語の定義を、改めて以下のように整理する。

- トリップ… 車両が立寄地もしくは拠点を出発してから次の目的地に到着するまでの移動
- トリップチェーン… 同一車両によるトリップを連結させたもの
- ツアー… トリップチェーンのうち、特にトリップチェーンの起点と終点が同一地点であるもの

(3) 分析対象ツアーの定義

本項では、都市圏内における輸送の性質を鑑み、モデル構築の対象とするツアーを定義し、プローブデータから抽出する。以下に分析対象とするサンプルの条件を明示する。

- すべてのトリップが対象エリア内で完結する。
- トリップチェーンの起終点は同一ゾーン内とする。
- 各トリップチェーンを構成するトリップの数は 2~10 回とする。

表-1 ツアーデータの概要

サンプルサイズ	1,418 (3,921 トリップ)
調査期間	2014 年 10 月 6 日 ~17 日
含まれる属性	トリップ数, 総走行時間, 総ツアー時間, 総走行距離, 各トリップ OD 各々の日時, 位置情報, トリップ直線距離, トリップ時間

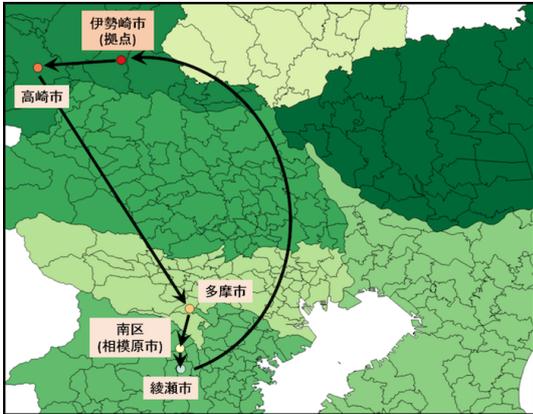


図-4 分析対象ツアー例 1



図-5 分析対象ツアー例 2

- トリップチェーンの総所要時間は 24 時間以内とする。

分析単位は市区町村ゾーンとし、さらに計算負荷を軽減させるため、本研究では 30 分毎に意思決定が行われると仮定する。そのため、データクリーニングに際して以下の条件を付加することにする。

- 全てのトリップ時間が 30 分以上である。
 - すべてのトリップはゾーン境界を越えて移動する。
- 以上の条件を踏まえて抽出したサンプルの概要を表-1 にまとめる。

対象とするツアーの例を図-4・図-5 に示す。いずれも赤点部を拠点とした東京都市圏内における輸送ツアーである。なお、このデータはトリップの起終点のみ把握でき、起終点間の詳細な経路は把握できないことに留意が必要である。

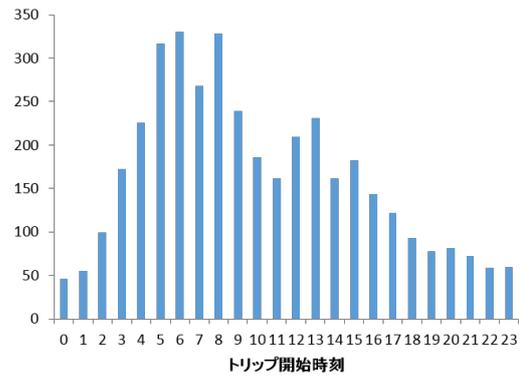


図-6 トリップ開始時刻分布

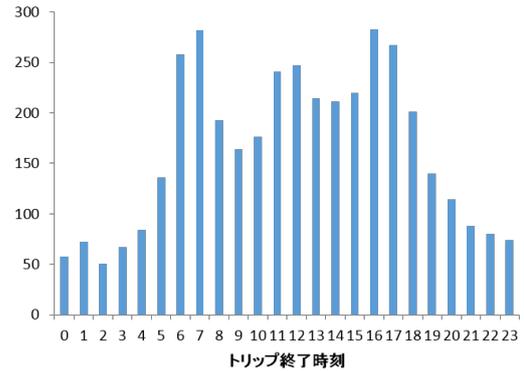


図-7 トリップ終了時刻分布

(4) 分析対象ツアーデータの構築と基礎分析

本項では (3) で定義した分析対象ツアーのデータを利用して基礎分析を行い、モデリングを考える上での基礎知見を得る。

a) トリップ分析

はじめに、都市圏内の輸送と定義されたサンプルのトリップに関する基礎分析の結果を示す。

- トリップ開始・終了時刻 (図-6・図-7)

全体的な分布は朝のピーク時間帯と正午過ぎに出発するトリップ、夕方前後、正午前、早朝に到着するトリップが多くなっている。一方で、深夜に開始および終了するトリップが減少しており、深夜に長距離輸送を行う「都市間輸送」とは異なる性質が表れた分布となっている。

- トリップ距離・トリップ時間 (図-8・表-2・図-9・表-3)

トリップ距離・時間ともに最小値・最大値も東京都市圏に適したものとなっており、都市圏内の輸送トリップ時間の性質が反映された分布となっている。

b) ツアー分析

次に、ツアーに関する基礎分析の結果を示す。

- 拠点分布

定義された都市圏内の輸送ツアーには必ず拠点と

表-2 基本統計量【トリップ距離(km)】

平均	標準偏差	最大	最小
40.0	32.7	171.6	0.068

表-3 基本統計量【トリップ時間(時)】

平均	標準偏差	最大	最小
3.09	2.29	18.8	0.5

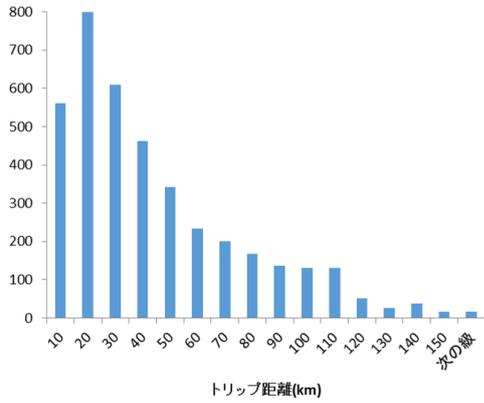


図-8 トリップ距離分布

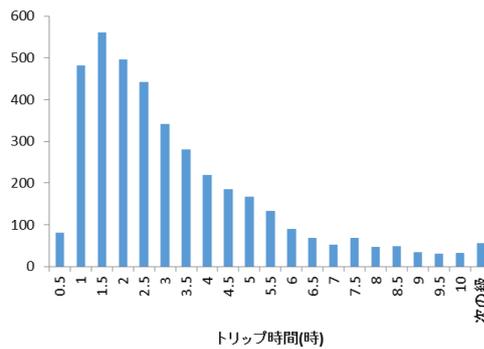


図-9 トリップ時間分布

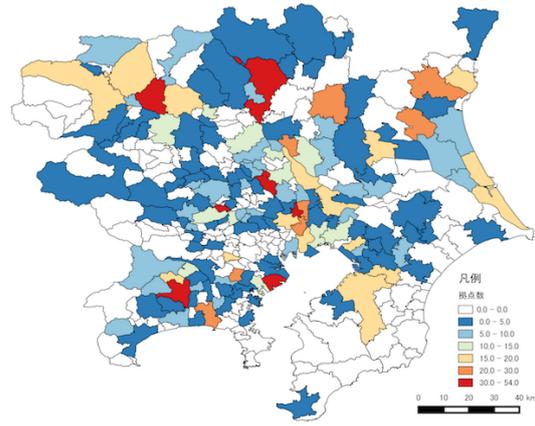


図-10 ツアー拠点の空間分布

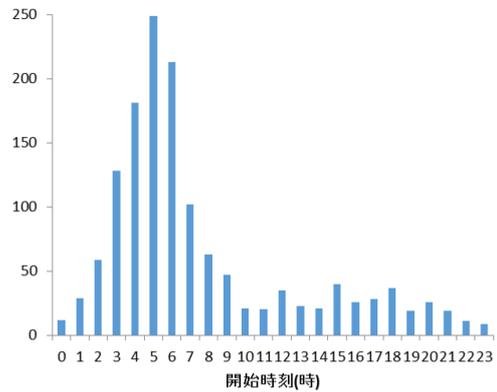


図-11 ツアー開始時刻分布

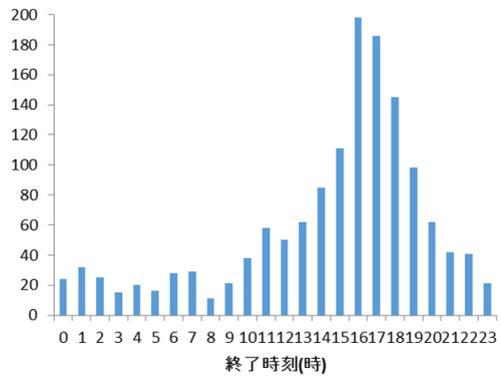


図-12 ツアー終了時刻分布

なる地点が存在する。貨物車による拠点を市区町村ゾーン別に分布を図-10に示した。ツアーの発生場所を示す拠点は東京都市圏において分散していることが明らかになった。最もツアーが発生しているゾーンが栃木市、次いで伊勢崎市、さいたま市岩槻区となり空間的な相関性は低くなっている。

● ツアー開始・終了時刻

図-11はツアー開始時刻、図-12はツアー終了時刻を示す。勤務時間帯が背景に存在する分布になっており、またヒトの流動が盛んになる朝のピーク時間帯を避けた出発時刻分布になっていると解釈できる。

● ツアー距離

図-13、表-4より、ツアー距離は50km程度が最頻値ではあるが幅広い距離分布を示している。最大値は350km弱と都市圏内の輸送ツアーとしては想定可能な領域に分布している。

● ツアー時間

図-14、表-5はツアーの総所要時間、図-15、表-6はツアーの総走行時間を示す。都市圏内の輸送は両者の差異が約2時間となっており、荷卸や集荷・休憩などの停車時間が短いといった性質が示唆された。平均値に着目しても一日の労働時間と比較的近く、適切な分布であると考えられる。

● トリップ数

本研究において、トリップ数が膨大なツアーおよびトリップ数が1のツアーは分析対象外としてい

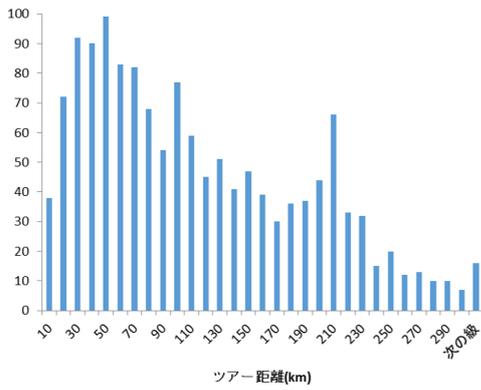


図-13 ツアー距離分布

表-4 基本統計量【ツアー距離 (km)】

平均	標準偏差	最大	最小
110.5	76.7	346.2	0.85

表-5 基本統計量【ツアー所要時間 (時)】

平均	標準偏差	最大	最小
10.48	3.40	20.98	1.17

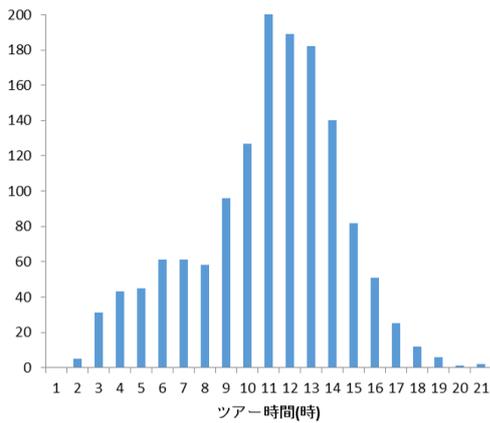


図-14 ツアー所要時間分布

表-6 基本統計量【ツアー走行時間 (時)】

平均	標準偏差	最大	最小
8.54	3.16	20.26	1

表-7 基本統計量【トリップ数】

平均	標準偏差	最大	最小
2.7	0.96	7	2

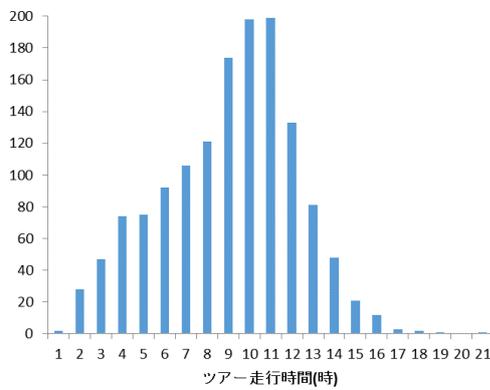


図-15 ツアー走行時間分布

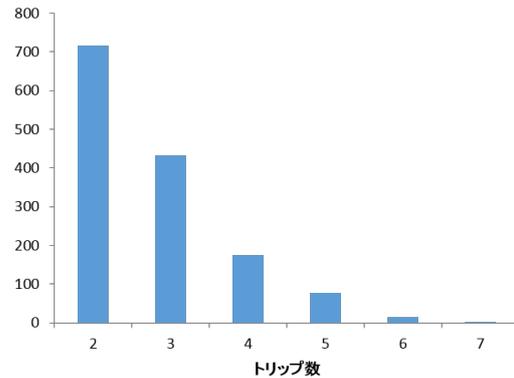


図-16 トリップ数分布

る。その結果、残されたツアーのトリップ数分布は図-16のようになった。概ね半数のツアーはトリップ数が2という往復タイプのツアー形状となっている。

● ツアー起終点間距離

ツアーにおける起終点は同一ゾーンと定めてデータをクリーニングしている。図-17, 表-8に着目すると、ほとんどのツアーは起終点が同一地点とみなせる一方で、ツアーの起終点が同一ゾーンであっても一定の起終点間距離が確認されるツアーが一定数存在することに留意する必要がある。

(5) 集計分析のまとめ

プローブデータより抽出されたデータの基礎分析により、都市圏内輸送の性質について部分的に明らかになった。都市圏内輸送は全サンプルと比較すると夜行ツアーを実施している割合が少なくなっている。またトリップ距離の平均値は約40km, トリップ時間の平均値は約3時間となっている。トリップ数が多く、トリップ時間の少ない端末輸送が除去された結果、平均値が比較的長距離となっていることが考えられる。またツアー分析では、貨物車サンプルの拠点としている地域に偏りがなくも明らかになった。またツアー開始・終了時刻は勤務時間を色濃く反映した分布となっている。一方でツアー距離は平均距離は110kmであるが幅広く分布していることが明らかになった。またツアー時間に関しては走行時間の平均値が8時間30分、総所要時間の平均値が約10時間半となっている。また、平均トリップ数約3であるが、半数近くのツアーが2ト

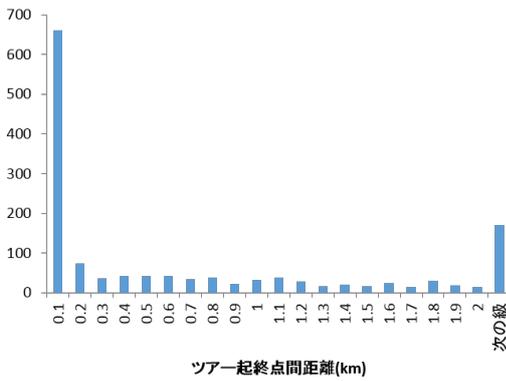


図-17 ツアー起終点間距離分布

表-8 基本統計量【ツアー起終点間距離 (km)】

平均	標準偏差	最大	最小
0.78	1.27	17.7	0

リップをとる形態となっている。

3. 貨物車のツアーパターン決定モデルの構築

本章では, Fosgerau et al.⁴⁾ によって提案された RL モデルを用いて, 貨物車ツアーパターン選択モデルの構築を行う。ツアーパターンを取り扱った既存研究として, Hunt and Stefan⁵⁾ が挙げられるが, 逐次の選択行動が近視眼的でありツアーの開始から終了までを包括的に考慮したモデリングとはなっていない。また, 分析空間単位が増えたときの計算面での課題も残されている。これに対し, 動的離散選択ベースの RL モデルは, 時間軸を見据えた最適なパターン選択行動を記述できると共に, パラメータ推定等における計算効率性も高いという特徴を有している。

(1) モデル化にあたっての仮定

a) 貨物車ツアーの一般的な意思決定プロセス

都市圏内輸送ツアーが図-18のような流れで決定すると想定する。

- (a) 貨物車は黄色の点で示される拠点物流施設に存在し, 全ての貨物車は各拠点をベースとしてツアーを構成する。
- (b) 各物流関連企業には, 青色の点で示される集配送をすべき地点が複数存在し, 彼らは限られた時間の中で訪問可能な地点を赤点で示されるように複数箇所選択する。これにより, この時点で複数のトリップが生成される。
- (c) これらのトリップが連結されることによって, 拠点が起終点となるひとつのツアーが決定される。
- (d) 貨物車は効用最大化理論に基づいて貨物車ツアー

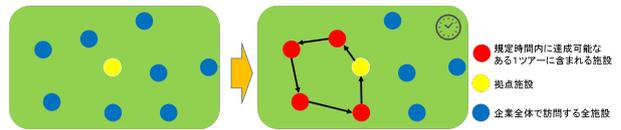


図-18 貨物車のツアー決定プロセスのイメージ

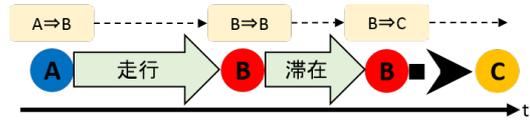


図-19 想定する意思決定タイミング

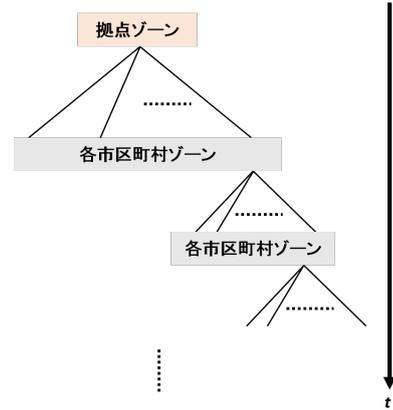


図-20 連続空間選択の構造

パターンを決定する。ツアーを構築する際の選択行動のタイミングのイメージは図-19に示すとおりである。なおこれから貨物車ツアーにおける目的地選択モデルは, 見かけ上は現在地ゾーンにおいて逐次的に実施されているが, 実際には図-18で示したように, すべての立寄り地を訪問可能にするために出発前に貨物車ツアーが決定していると想定することがより自然であることに留意する必要がある。

- (e) 意思決定のタイミングには, (1) 次の目的地ゾーンの選択時, (2) 前トリップにおける目的地ゾーンに到着して, 現在地となったゾーンに滞在するタイミング, の二種類が存在する。ツアーはこれらの意思決定の繰り返し行動であるとみなす。

(2) モデルの定式化

本項では, 前節で述べた意思決定プロセスに沿って貨物車ツアーを RL モデル⁴⁾ として定式化する。RL モデルは状態変数ごとに効用を最大化させる選択肢を決定し, その際の効用は現時点での効用だけでなく将来の効用も考慮する。モデル構造を図-20に示す。

貨物車は現在地ゾーン (状態) s の際に, 次の目的地ゾーン a を選択する。この際, 選択された目的地ゾー

ン a は次の時期において状態変数となるゾーンである。すなわちタイムステップ t において式 (1) が成り立つ。

$$a_t = s_{t+1} \quad (1)$$

貨物車は目的地ゾーンとして、即時効用と目的地に到着するまでの期待最大効用の和である価値関数を最大化する選択枝 a を選択する。このとき、 a の選択枝集合 A は 315 の市区町村ゾーンと、拠点ゾーンに吸収状態となる性質を付加したダミーゾーン d を加えたものとする。したがって $a \in A \cup d$ となる。以降では $A \cup d = \bar{A}$ とする。本研究で構築する貨物車ツアー選択モデルにおいては、あるゾーンに対して拠点とするツアーと拠点としないツアーが混在し、吸収状態 d となるゾーンと同一ゾーンが A にも含まれることに留意が必要である。

状態変数が s の場合の即時効用 $u(a|s)$ は式 (2) の通りである。このときの v は即時効用の確定項、 μ はスケールパラメータ、 ε は誤差項である。

$$u(a|s) = v(a|s) + \mu\varepsilon(a) \quad (2)$$

即時効用の確定項は、目的地ゾーン LOS と現在地と目的地のゾーン間 LOS によって記述することを想定し、式 (3) のように記述することにする。この際、 \mathbf{X}_a は目的地ゾーンとして選択されるゾーン a に関するゾーン LOS マトリクス、 \mathbf{X}_{sa} は現在地ゾーン s と目的地ゾーン a に関するゾーン間 LOS マトリクスを表し、 β_a と β_{sa} は各々に対応する未知パラメータベクトルである。なお、RL モデルにおいて、即時効用の確定項は負の値を取る ($v(a|s) < 0$) と仮定されている。

$$v(a|s) \equiv \beta_a \mathbf{X}_a + \beta_{sa} \mathbf{X}_{sa} \quad (3)$$

状態変数 s における効用は、各貨物車の拠点ゾーンに依存し、拠点を B にもつベルマン方程式によって与えられた式 (4) の価値関数 $V^B(s)$ によって表される。

$$V^B(s) = \max_a [v(a|s) + V^B(a) + \mu\varepsilon(a)] \quad (4)$$

選択確率をロジットモデルとして与えた場合、状態 s における目的地ゾーン a の選択確率は式 (5) で与えられ、価値関数は式 (6) のようにログサムで表される。

$$P^B(a|s) = \frac{\exp\{\frac{1}{\mu}(v(a|s) + V^B(a))\}}{\sum_{a' \in \bar{A}} \exp\{\frac{1}{\mu}(v(a'|s) + V^B(a'))\}} \quad (5)$$

$$V^B(s) = \begin{cases} \mu \ln \sum_{a \in \bar{A}} \exp\{\frac{1}{\mu}(v(a|s) + V^B(a))\} & (\text{if } \forall s \in A) \\ 0 & (\text{if } s = d) \end{cases} \quad (6)$$

(3) パラメータ推定方法

貨物車ツアーパターン選択モデルのパラメータ推定は Nested Fixed Point 法 (NFXP 法) を採用する。NFXP 法は⁶⁾で導入された動的離散選択問題におけるパラメータ推定アルゴリズムであり、「Inner」部分の価値関数の算

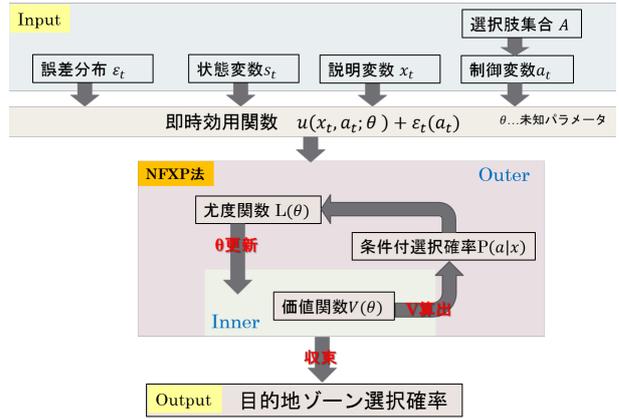


図-21 Nested Fixed Point 法によるパラメータ推定の流れ

出と、「Outer」部分のパラメータ推定の2段階に分割される。本研究におけるパラメータの推定構造を図-21に示す。

a) 価値関数算出部分 (Inner)

本項では、式 (4) で示されたベルマン方程式を解くことによって価値関数を算出する。価値関数は拠点ゾーン B によって異なるため、全ての対象市区町村ゾーンに対して価値関数を計算する。本研究のモデルは、動的離散選択モデルにおいて、(1) 時間割引率を考慮しない、(2) 状態変数と目的地選択によって次の状態が一意に決定する、という性質を持った RL モデルであるため、以下の方法によって価値関数の計算が可能になる。はじめに、式 (6) を指数変換すると式 (7) のようになる。

$$\exp\left\{\frac{1}{\mu}V^B(s)\right\} = \begin{cases} \sum_{a \in A} \exp\left\{\frac{1}{\mu}(v(a|s) + V^B(a))\right\} & (\text{if } \forall s \in A) \\ 1 & (\text{if } s = d) \end{cases} \quad (7)$$

式 (7) がすべての s に対して成立する。ここで、式 (7) を行列形式で記述することにする。はじめに \mathbf{M}^B を拠点ゾーンに B をもつ貨物車のインシデンス行列として即時効用に関する式 (8) を要素にもつ行列とする。なお、 \mathbf{M}_d の行の要素は吸収状態における即時効用であるため 0 となる。

$$\mathbf{M}_{sa}^B = \exp\left\{\frac{1}{\mu}(v(a|s))\right\} \quad (8)$$

次に、 \mathbf{z} を価値関数ベクトルとして式 (9) で表す。

$$\mathbf{z}_s^B = \exp\left\{\frac{1}{\mu}V^B(s)\right\} \quad (9)$$

\mathbf{b} を、 $s \neq d$ において $b_s = 0$ 、 $s = d$ において $b_s = 1$ のベクトルとすると以下の行列方程式が成立する。

$$\begin{aligned} \mathbf{z}^B &= \mathbf{M}^B \mathbf{z}^B + \mathbf{b} \\ \Leftrightarrow \mathbf{z}^B &= (\mathbf{I} - \mathbf{M}^B)^{-1} \mathbf{b} \end{aligned} \quad (10)$$

$\mathbf{I} - \mathbf{M}^B$ が逆行列を持つ場合には \mathbf{z} は解を持つため、拠点ゾーンごとに全ての状態変数における価値関数が

表-9 説明変数一覧

ゾーン間 LOS	平均	標準偏差	最大	最小
距離 (km)	95.0	49.2	315.0	2.7
時間 (時)	1.93	0.81	4.90	0.13
目的地ゾーン LOS	平均	標準偏差	最大	最小
物流施設数	0.32	0.47	3.26	0
物流施設面積 (m ²)	2,443.7	6,706.0	92,092.5	0
可住地面積 (km ²)	0.758	0.208	1	0.057
人口 (人)	4,287	4,928	21,919	67
卸売業市場近接性	41,490,723	330,100,383	4,313,068,400	172,554
業務地近接性	274,791	786,852	8,734,535	4,913
消費地近接性	5,371,379	12,593,786	141,906,350	55,819
最寄 IC までの距離 (km)	8.37	6.85	44.6	0.886
広幅員道路延長 (m)	858.6	1,213.1	9,467.5	0
総道路延長 (km)	12.30	8.69	36.23	1.60
地価 (万円/m ²)	17.48	44.68	526.38	10.06
住宅地域面積割合	0.287	0.249	0.929	0
商業地域面積割合	0.039	0.083	0.697	0
工業地域面積割合	0.065	0.0810	0.549	0

同時に算出される。開始時においては、ある初期パラメータを与えることによって価値関数の初期値が計算される。

b) パラメータ推定部分 (Outer)

本項では、前項で計算された価値関数を利用したパラメータ推定方法について説明する。目的地ゾーンの条件付選択確率は式 (11) で表される

$$P(a|s) = \frac{\exp\{\frac{1}{\mu}(v(a|s) + V^B(a))\}}{\sum_{a' \in \bar{A}} \exp\{\frac{1}{\mu}(v(a'|s) + V^B(a'))\}} \quad (11)$$

ツアーは状態変数のシーケンス σ として式 (12) のように表示される。

$$\sigma = \{s_0, \dots, s_{T_n}\} \quad (12)$$

このとき s_0 は拠点ゾーン、 $s_{T_n} = d$ である。拠点ゾーンが B であるツアー σ の選択確率は式 (13) のように示される。

$$\begin{aligned} P^B(\sigma) &= \prod_{t=0}^{T_n-1} p^B(s_{t+1}|s_t) \\ &= \prod_{t=0}^{T_n-1} \exp\left\{\frac{1}{\mu}(v(s_{t+1}|s_t) + V^B(s_{t+1}) - V^B(s_t))\right\} \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、 $V^B(s_{T_n}) = V^B(d) = 0$ であることにより、ツアー σ の選択確率は式 (14) で示されるようにツアーパターンの選択肢集合が Γ である静的な多項ロジットモデルと同義となる。RL モデルはこの選択肢集合列挙の煩雑

さを解消できる点に最大の特徴がある。

$$\begin{aligned} P^B(\sigma) &= \frac{\exp\left\{\frac{1}{\mu} \sum_{t=0}^{T_n-1} v(s_{t+1}|s_t)\right\}}{\exp\left\{\frac{1}{\mu} V^B(s_0)\right\}} \\ &= \frac{\exp\left\{\frac{1}{\mu} V^B(\sigma)\right\}}{\sum_{\sigma' \in \Gamma} \exp\left\{\frac{1}{\mu} V^B(\sigma')\right\}} \end{aligned} \quad (14)$$

このとき対数尤度関数は式 (15) のようになる。

$$LL(\beta) = \ln \sum_{n=1}^N P^B(\sigma_n) = \frac{1}{\mu} \sum_{n=1}^N \sum_{t=0}^{T_n-1} \{v(s_{t+1}|s_t) - V^B(s_0)\} \quad (15)$$

式 (15) で示された対数尤度関数を最大化することによってパラメータを更新する。更新されたパラメータは **a)** で示した NFXP 法における価値関数の再計算に用いられる。

4. 貨物車ツアーパターン選択モデルの推定結果

本章では、貨物車ツアーパターン選択モデルの推定結果について述べる。本研究におけるモデルの即時効用関数の説明変数としては、市区町村ゾーン単位で得られた結果 (表-9) を使用する。距離と時間はゾーン重心間のアクセス距離と時間を示し、物流施設数および敷地面積はゾーン単位で 1km² あたりの値を使用する。その他の説明変数は、3 次メッシュ (約 1km×1km) 単位で算出され、ゾーン内に所属する全 3 次メッシュにおける LOS の平均値を説明変数の値とする。なお、

表-10 推定モデル一覧表

	$t = 0$ の定義	滞在効用	帰還効用	$t = 0$ での 滞在選択
ツアー				
モデル 1	開始時	×	×	○
モデル 2	0 時	×	×	○
モデル 3	0 時	×	×	○
モデル 4	0 時	×	×	○
モデル 5	0 時	○	×	○
モデル 6	0 時	○	×	×
モデル 7	0 時	○	×	×
モデル 8	4 時	×	○	×

消費地近接性は 3 次メッシュ単位で計算されており、メッシュ i における業務地近接性 ACC_D_i 、卸売市場近接性 ACC_B_i 、消費地近接性 ACC_C_i は兵藤ら⁷⁾に倣い式 (16) のように定義される。ここで D_j はメッシュ j の就業人口、 B_j はメッシュ j の卸売販売額 (万円)、 C_j はメッシュ j の商品販売額 (円)、 d_{ij} は ij メッシュ間の道路距離 (km) である。

$$\begin{cases} ACC_D_i = \sum_{j=1}^J D_j \exp\{-0.5\ln(d_{ij})\} \\ ACC_B_i = \sum_{j=1}^J B_j \exp\{-0.5\ln(d_{ij})\} \\ ACC_C_i = \sum_{j=1}^J C_j \exp\{-0.5\ln(d_{ij})\} \end{cases} \quad (16)$$

また、このときの「物流施設」の定義は、第 5 回東京都市圏物資流動調査の事業所調査における回答者において、施設種類に関する質問項目にて「4. 物流施設」と回答し、かつ敷地面積に関する回答があった事業所を対象としている。

なお、本研究においては、スケールを統一する目的で説明変数はすべて規準化 (平均 0, 分散 1) したものをを用いることとする。

RL モデルでは貨物車ツアーにおける 30 分ごとの選択行動を観測し、目的地の選択確率に関するパラメータを推定する。説明変数としては、目的地ゾーンに関する LOS・現在地と目的地ゾーン間の LOS、現在地ゾーンに関する LOS が存在しそれぞれの推定結果に関して考察する。また、本研究では複数の説明変数セットおよび効用関数でモデル化を行った。一覧を表-10 に示す。

(1) モデル推定結果

a) ツアー時間を対象とした貨物車ツアーパターン選択モデル

本項におけるモデルは各々のツアー開始時刻を 0 分とした上で、ツアーが終了する (吸収状態となる) 時刻までの貨物車による選択行動を 30 分ごとに記述したものである。ツアー時間中のみ貨物車の挙動を記述するモデルであるため、貨物車ごとの出発時刻の差異を反映できないといった欠点がある。例えば、午前中に

表-11 モデル 1 の推定結果

	推定値	t 値
可住地面積	-1.3696	-211.19
人口	-0.7951	-26.03
消費地近接性	0.6690	16.40
最寄 IC までの距離	-0.2706	-26.31
広幅員道路延長	0.2431	12.79
総道路延長	0.6681	25.60
地価	-0.9320	-19.44
住宅地域面積割合	0.5784	29.66
商業地域面積割合	-0.1548	-5.34
工業地域面積割合	0.1143	11.29
距離	-0.1793	-8.43
時間	-0.1187	-5.72
物流施設数	0.3040	5.60
物流施設面積	0.2260	3.92
観測ツアー数	1418	
最終対数尤度	-104778	

出発するツアーと夕方に出発するツアーが存在した時、本モデルでは出発時刻を $t = 0$ とするため、時刻ごとの効用を記述することができない点に留意する必要がある。

以上を踏まえ推定を行ったところ、表-11 に示される推定結果が得られた。説明変数は表の上から目的地ゾーンに関する LOS・現在地と目的地ゾーン間の LOS、現在地ゾーンに関する LOS となる。はじめに目的地ゾーンに関するパラメータは人口が負の値となり、都心部などの人口密集地は目的地として選択確率が低くなること明らかになった。ただ、商品販売額と距離によって示される消費地近接性は正の値を示しており、物資の需要がある地域への目的地選択の可能性が示唆された。また、道路整備状況を示す指標として、高速道路のインターチェンジまでの距離に関するパラメータが負になっており、さらに各ゾーンに属する 3 次メッシュにおける平均の道路延長は正の値を示しており、インフラ整備が貨物車の目的地選択に影響を与えている可能性が明確になった。また、現代における物流施設の立地にも大きな影響を与える地価に関しては有意な負のパラメータを示しており、地価の高い都心部よりも郊外部などをはじめとした地価の安い地域が目的地として選択されやすい結果となった。続いて用途地域に関するパラメータについて考察する。住宅地域面積割合に関するパラメータに関しては有意な正の値をとる結果となった。一方で、工業地域に関するパラメータは有意な正の値となり、物流施設の立地傾向にある工業地域面積が目的地として選択される確率が高いことが推察される。

続いてゾーン間 LOS である距離や所要時間に関するパラメータは双方とも有意な負の値が得られた。こ

れは距離が短く所要時間のかからないゾーンが目的地として選択される傾向を表し、政策分析の際にも重要な指標となる。

現在地ゾーンの説明変数として導入した現在地における物流施設の数と面積は両者とも正の値を示し、現在地が物流施設の量や規模が大きいほど滞在時間が長くなる可能性が明らかになった。

b) 1日における貨物車ツアーパターン選択モデル

本項におけるモデルは a) のモデルと異なり、24 時間を時間軸として都市内輸送ツアーパターンを RL モデルによって記述する。各々の貨物車はすべて 0 時を $t=0$ として観測を開始する。ツアー開始時刻までは拠点ゾーンに滞在し続ける、すなわち現在地ゾーンを選択し続ける。ツアーを開始した貨物車は a) と同様に逐次的に目的地ゾーンの選択行動を繰り返し、ツアーが終了した場合には吸収状態となり、それ以降は翌日深夜 0 時までには選択行動を行わないモデルとなる。

表-12 は有意となった全ての説明変数を使用したモデルとなっている。なお、所要時間と距離は相関係数の全ゾーン平均が 0.94 と大きい値を示したため、以降の推定ではゾーン間 LOS の説明変数として所要時間のみを使用する。また、パラメータ推定のアルゴリズムには大域的な最適解を導出する Simulated Annealing (SANN) を使用した推定結果を初期値として、Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) を使用して局所最適解を算出した。なお、本モデルではゾーンごとのスケールの違いを考慮するために、本モデルでは効用関数に各ゾーンの面積 (S_i) の対数 $\ln S_i$ を加えている。

大半の説明変数は表-11 と同じ傾向を示しており、ゾーン間 LOS としての時間に関するパラメータは有意な負の値を示しており、遠距離のトリップは避けられる傾向が明らかになった。また、交通インフラに関する説明変数としては、IC へのアクセス利便性の高い地域、道路密度の濃い地域が選択されやすい一方で、広幅員道路は表-11 と異なる傾向を示している。表-11 と比較すると、拠点ゾーンに滞在しているサンプルが増えており、拠点ゾーンにおける広幅員道路の整備状況が影響していると推察される。商業地域を避ける傾向や、物流施設の立地が充実している地域を好む傾向などは表-11 と同様となっている。

表-12 の結果を踏まえて説明変数を抽出して構築されたモデルが表-13・表-14 である。なお、統計的に 5% 有意でなかったパラメータについても掲載している。全ての推定結果において時刻に関するパラメータは想定に反することなく有意な負の値になっている。

表-13 に着目すると、製造業近接性や消費地近接性に関するパラメータは有意な正の値が得られた一方で、卸売市場近接性に関するパラメータは有意な負の値となっ

表-12 モデル 2 の推定結果

	推定値	t 値
時間	-0.6254	-32.38
人口	-0.4693	-2.62
IC までの距離	-0.1707	-3.69
広幅員道路	-0.6506	-7.30
全道路	1.5539	18.17
地価	-1.5170	-2.53
商業地域	-1.6017	-4.64
物流施設数	0.5573	15.46
物流施設面積	0.3202	8.87
観測ツアー数	1213	
最終対数尤度	-183463	

表-13 モデル 3 の推定結果

	推定値	t 値
時間	-1.1467	-44.50
製造業近接性	0.0574	2.05
卸売市場近接性	-1.4163	-6.74
消費地近接性	0.2156	4.67
IC までの距離	-0.1372	-2.05
住宅地域	0.1575	5.21
工業地域	0.0926	3.16
観測ツアー数	1213	
最終対数尤度	-159186	

表-14 モデル 4 の推定結果

	推定値	t 値
時間	-1.1061	-38.49
消費地近接性	-0.9265	-4.46
IC までの距離	-0.2058	-3.23
広幅員道路延長	-0.0723	-0.80
住宅地域	0.4496	12.4
工業地域	0.1676	4.25
物流施設面積	0.03620	1.01
観測ツアー数	1213	
最終対数尤度	-162102	

た。また、最寄 IC へのアクセス利便性の高い地域の選択確率が高い傾向は表-12 と同様である。また、用途地域に関するパラメータで表-12 においては有意な値が得られなかった住宅地域、工業地域はいずれも選択確率が高くなる可能性が示唆されている。

表-14 の推定結果は、消費地近接性のパラメータが有意な負の値を示し、消費地に近い地域は目的地としての選択確率は低くなっている。また、表-12 や表-13 と同様に最寄 IC までのアクセスが便利な地域が選択されやすいことが推察される。住宅地域や工業地域を目的地として選択しやすい傾向は表-13 と同様である。

c) 制約条件を付加した貨物車ツアーパターン選択モデル

ここまでは、0時から翌日0時までの24時間を対象として制約条件などを考慮せずに貨物車ツアーパターン選択モデルを構築したが、表-12~表-14のモデルでは、以下のような点を記述することができていない。

- 「滞在」と「次の」目的地選択において等しい即時効用関数が定義されている。
- 0時の時点において吸収状態 d の選択が可能である。
- 「拠点ゾーン」(吸収状態 d) と「拠点以外のゾーン」に同じ効用関数が定義されている。

そこで、以上の点を考慮したモデルの検討を行う。はじめに、本研究で使用するプローブデータから作成された、1日における30分ごとの観測データでは現在地ゾーンと同一ゾーンを次の目的地に選択する「滞在」を選択しているサンプルが50%を超えるため、「滞在」に関する効用関数を新たに構築する必要性は高いと考えられる。そこでインシデンス行列 M を式(17)のように再定義する。なお、 β_{stay} は「滞在」に関するダミー変数である。また、すべての選択肢ゾーン $a \in A$ において $M_{da} = 0$ である。

$$M_{sa} = \begin{cases} \exp\{v(a|s)\} & (\text{if } s \neq a) \\ \exp\{v(a|s) + \beta_{stay}\} & (\text{if } s = a) \end{cases} \quad (17)$$

変更後の効用関数を使用して構築したモデルの推定結果が表-15である。パラメータ推定アルゴリズムにはSANNを使用している。なお説明変数に関しては統計的に有意であったもののみ使用している。

表-15によると、目的地としては所要時間の近いゾーンを選択しやすい傾向が明らかになった。また、人口のパラメータは表-11や表-12と異なり有意な正の値となっている。また、ICまでのアクセスが容易な地域や地価が安い地域の選択確率は想定通りに高くなっている。用途地域に関するパラメータは住宅地域・工業地域ともに表-11や表-12と同様に有意な正の値となっており、これらの地域が目的地となりやすいと推察される。また、新たに導入した滞在ダミーは有意な正の値のパラメータが得られており、滞在時の効用関数と次の目的地ゾーン選択時の即時効用の差を記述することが可能になった。

なお、モデル5では、インシデンス行列を構築する際に状態ごとに選択不可能な選択肢を列挙していない。しかし Fosgerau et al.⁴⁾ では、現在リンク k と接続していないリンクは選択肢集合から除去した上でリンク毎の選択肢集合 $A(k)$ を設定している。 $\delta(a|k)$ は式(18)のように定義される。

$$\delta(a|k) = \begin{cases} 1 & (\text{if } a \in A(k)) \\ 0 & (\text{if } a \notin A(k)) \end{cases} \quad (18)$$

表-15 モデル5の推定結果

	推定値	t 値
時間	-0.3952	-50.67
人口	0.0373	2.00
IC までの距離	-0.1956	-15.91
地価	-0.4447	-17.14
住宅地域	0.1019	7.67
工業地域	0.0375	4.19
滞在ダミー	1.4984	32.15
観測ツアー数	1,213	
最終対数尤度	-143,027	

表-16 モデル6の推定結果

	推定値	t 値
時間	-0.9553	-46.42
人口	-0.3998	-3.65
IC までの距離	-0.1993	-5.04
全道路延長	0.7556	7.64
地価	-2.3088	-9.36
住宅地域	-0.2529	-4.18
工業地域	0.2149	5.85
物流施設数	-0.2138	-4.07
物流施設面積	0.1646	4.92
滞在ダミー	1.0371	5.72
観測ツアー数	1,213	
最終対数尤度	-133,584	

表-17 モデル7の推定結果

	推定値	t 値
時間	-0.2853	-34.78
IC までの距離	-0.0558	-5.36
広幅員道路	-0.0293	-3.07
住宅地域	-0.0522	-5.98
工業地域	0.0339	3.99
物流施設面積	-0.0327	-3.36
滞在ダミー	2.946	84.53
観測ツアー数	1,213	
最終対数尤度	-81,158	

これを利用し、以下では現在地ゾーン s において目的地ゾーンごとに $\delta(a|s)$ を式(19)のように定義し、インシデンスマトリクス M を各々の拠点ゾーン B において式(20)のように作成する。

$$\delta(a|s) = \begin{cases} 0 & (\text{if } s = B \cap a = d) \\ 1 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (19)$$

$$M_{sa}^B = \begin{cases} \exp\{\delta(a|s)v(a|s)\} & (\text{if } s \neq a) \\ \exp\{\delta(a|s)(v(a|s) + \beta_{stay})\} & (\text{if } s = a) \end{cases} \quad (20)$$

以上の条件で構築されたモデル6及びモデル7の推定結果を表-16・表-17に示す。これらの推定においては、統計的に有意な説明変数のみを導入している。

はじめに表-16の結果に着目する。ゾーン間LOSで

ある時間に関しては有意な負のパラメータが得られた。また、その他の説明要因では人口の少なく、道路網が充実しており、地価の安い地域が目的地としての選択確率が高いと推察される。用途地域に関するパラメータは住宅地域が負となり工業地域が正となっている。住宅地域に関しては表-11 - 表-15の結果とは異なる傾向を表している。また、物流施設に関するパラメータは施設数と施設面積において反対の符号を示しており、少数の物流施設が広大な敷地を有するような地域が選択されやすい可能性が示唆されている。また、滞在ダミーは有意な正の値となった。

続いて表-17の推定結果によると、表-16と比較して広幅員道路の多い地域が選択されない傾向が明らかになった。道路整備状況に関する傾向として広幅員道路の充実度は負の効用を与える一方で細街路を含めた道路は目的地ゾーンに必要な要素であると推察される。表-16と表-17は概ね同様の傾向を示しているが、物流施設の面積に関するパラメータのみ反対の性質を示していると言えよう。

d) 拠点への帰還状況の考慮

最後に、吸収状態の効用に関して制約条件を加えたモデル8について検討する。貨物車による移動目的は、大きく分けて「集配送」と「(拠点への) 帰還」に大別される。しかしながらここまでのモデルではこのような違いが考慮されていない。そこでモデル8では、式(21)のように帰還ダミー β_{return} を用いることで、帰還に関する効用を明示的に導入することを試みる。

$$M_{sa} = \begin{cases} \exp\{v(a|s)\} & (\text{if } a \neq d) \\ \exp\{\exp(\beta_{return})v(a|s)\} & (\text{if } a = d) \end{cases} \quad (21)$$

これを反映させた推定したモデル8の結果が表-18である。なお、本モデルでは $t=0$ を午前4時として推定を行っている。表-12~表-14と概ね同様の傾向となった一方、広幅員道路延長に関するパラメータは正となり、想定に合致する結果が得られている。また、帰還ダミーについては、式(21)より得られたパラメータの指数をとることを考慮すると、帰還効用はその他の目的地選択に関する効用の約2倍の値となることが推察される。

(2) モデル推定結果に関する総合考察

本項では貨物車ツアーパターンに関するモデリングとして、はじめにツアー内における第一目的地のみを抽出して目的地選択モデルを構築した。推定結果は、距離と所要時間の短いゾーンが選択されやすい傾向を示すものとなった。交通インフラ整備状況に関連するパラメータは、大型貨物車の通行に必要な広幅員道路の整備が重要な決定要因となっている。また、用途地域

表-18 モデル8の推定結果

	推定値	t 値
時間	-1.0591	-21.36
人口	0.5974	4.74
IC までの距離	-0.1378	-3.48
広幅員道路	0.2234	3.69
全道路	0.5955	7.44
地価	-1.5301	-5.71
住宅地域	-0.6350	-10.14
商業地域	-1.0364	-10.11
物流施設面積	0.1930	7.81
帰還ダミー	0.7140	12.66
観測ツアー数	746	
最終対数尤度	-57,706	

に関しては商業地域を避け、工業地域を好む傾向が推察される。その他の説明変数としては、人口が少ない一方で消費地に近接した地域、地価が安い地域の選択確率が高い可能性が示唆された。

次に各々の貨物車のツアー走行時間を観測対象として動的な貨物車ツアーパターン選択モデルの構築を行った。表-11より、道路インフラ整備に関する説明変数は、最寄ICへのアクセス利便性が新たに有意な正の値となっている。また広幅員道路延長は変わらずに正の値となっている一方で、総道路延長のパラメータも有意な正の値となっている。その他の相違点としては、住宅地域に関するパラメータが動的モデルでは有意な正の値となっている。すなわち貨物車が住宅地域を目的地として選択する確率が高い傾向が示唆された。

続いて24時間の貨物車の挙動を観測したモデルを構築した。このモデルは表-11で示されたモデルの観測時刻を前後に拡張し、深夜0時から翌日0時までの貨物車の目的地選択行動を記述したものである。表-12の推定結果を表-11と比較すると、道路インフラに関連するパラメータとして広幅員道路が有意な負の値となっている。この結果は想定と反するものであるが拠点への滞在するサンプルが増えているモデルであるため、拠点となっているゾーンが広幅員道路延長が短い地域となっていることに起因していると推測される。その他の表-12に示されている説明変数の傾向は表-11と類似したものとなっている。

このモデルを基盤として、説明変数を抽出したモデルの推定結果が表-13と表-14である。いずれのモデルにおいても最寄ICまでの距離や用途地域が有意な説明要因となっている。

都市内物流の性質を考慮して改良したモデルが表-15~表-18である。これらのモデルは「滞在」と「次の目的地選択」における効用関数の差異や、貨物車の移動目的を明示的に考慮したモデルである。こうした変数の導入により、説明性の高いモデルが構築できたも

の、人口、住宅地域、広幅員道路延長、等の影響に関して、それまでモデルの推定結果とは異なる傾向があることも示された。

5. 政策シミュレーション

本章では、構築された貨物車ツアーパターン選択モデル（モデル 8、表-18）を用い、都心部への時間帯別課金制度の導入効果が貨物車の時空間流動パターンに及ぼす影響のシミュレーションを行う。

(1) シミュレーションの方法

RL モデルでは、ツアー σ とは状態変数 s の連続として記述される。すなわち $\sigma = \{s_0, s_1, \dots, s_{T_n}\}$ であり、 s_0 は拠点ゾーン、 $s_{T_n} = d$ である。その際、ツアー σ の選択確率は式 (22) のように表される。

$$P(\sigma) = \prod_{t=0}^{T_n-1} P(s_{t+1}|s_t) \quad (22)$$

式 (22) は式 (1) と式 (5) により、式 (23) のように表される。このとき、ツアー σ の即時効用の確定項は $v(\sigma) = \sum_{t=0}^{T_n-1} v(s_{t+1}|s_t)$ である。

$$P(\sigma) = \prod_{t=0}^{T_n-1} \frac{\exp\left\{\frac{1}{\mu}(v(s_{t+1}|s_t) + V(s_{t+1}))\right\}}{\sum_{s'_{t+1} \in A} \exp\left\{\frac{1}{\mu}(v(s'_{t+1}|s_t) + V(s'_{t+1}))\right\}} \quad (23)$$

$$= \prod_{t=0}^{T_n-1} \frac{\exp\left\{\frac{1}{\mu}(v(s_{t+1}|s_t) + V(s_{t+1}))\right\}}{\exp\left\{\frac{1}{\mu}V(s_0)\right\}}$$

このときの式 (23) は式 (24) と同義であり、ツアーパターンの選択確率となる。

$$P(\sigma) = \frac{\exp\left\{\frac{1}{\mu}v(\sigma)\right\}}{\sum_{\sigma' \in \Gamma} \exp\left\{\frac{1}{\mu}v(\sigma')\right\}} \quad (24)$$

本項では式 (23) を用いてツアーパターンの選択確率を計算することで、都市圏内流動のシミュレーションを実施する。

(2) 都心部の課金シミュレーション

a) 混雑課金の仮定

混雑課金の手法には数種類あるが、本項では課金対象エリア外からエリア内へ進入する際に課金が生じるコードン・プライシング方式を採用する。このシステムは、エリア内の移動およびエリア内からエリア外への移動の際には課金が生じない点に留意が必要である。また、課金額は走行距離に依存せず、一定の金額と定められるものとする。また、課金エリアは、東京都心 23 区とし、図-22 で示される。混雑混雑課金は、午前 7 時から午前 10 時の時間帯のみに導入されるものとする。

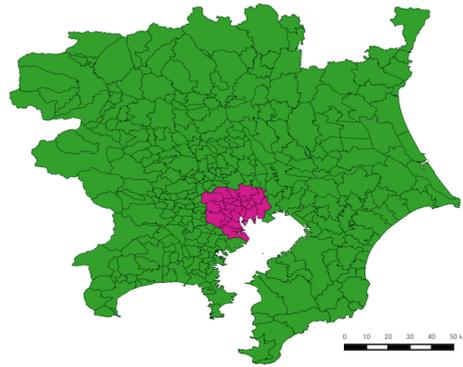


図-22 課金設定エリア（赤色部分）

b) 定式化

本研究では、混雑課金額を時間に交換することにより貨物車の目的地選択行動への影響を検証する。いま、貨物車の目的地選択における現在地ゾーン s における目的地として a が選択された際の「所要時間に関する」効用関数の確定項 $v^{time}(a|s)$ は、パラメータを β 、ゾーン s からゾーン a へ移動する際の所要時間を X_{sa}^{time} とすると式 (25) のように表される。

$$v^{time}(a|s) = \beta X_{sa}^{time} \quad (25)$$

混雑課金によって午前 7 時から午前 10 時の時間帯のみ、 $v^{time}(a|s)$ は式 (26) のように変化すると仮定する。このとき P は課金額、 VTT は貨物車の時間価値である。

$$v^{time}(a|s) = \beta \left(X_{sa}^{time} + \frac{P}{VTT} \right) \quad (26)$$

貨物車の時間価値には国土交通省道路局の費用対効果分析マニュアル（平成 20 年）に示されている 64.18 円/分（普通貨物車）という値を使用する。

c) インシデンス行列の設定

シミュレーションでは、（滞在ゾーン）と（時点）の組み合わせを持つてある意思決定がなされた後の「状態」と見なすこととする。すなわち、価値観数を算出するにあたっての状態空間の次元は（滞在ゾーン） \times （時点）によって与えられ、Ramos⁸⁾と同様、インシデンス行列はこの次元数を持つように設定する。これにより貨物車の時空間流動パターンを明示的に記述できると共に、ゾーン間の距離とタイムステップ幅との関係により、インシデンス行列の要素のうちで有効になるものに制約をかける工夫を行っている。

例として、 $t = 1$ の時に Zone i に滞在している貨物車が $t = 2$ の時に行う空間選択の状況を示そう（図-23）。タイムステップ幅を δt （本研究の実証分析では 30 分）で表すと、この例は、Zone j には $t = 2$ のの期間中に到達できるのに対し、Zone l には物理的に到達できないような状況を表している。この例に対応するインシデンス行列は図-24 のように表される。行列中の黄色は「当

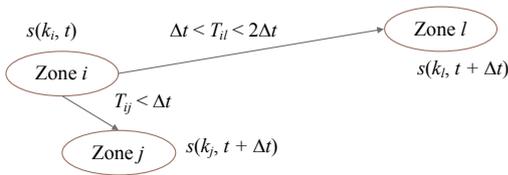


図-23 インシデンス行列設定例～想定する時空間構造

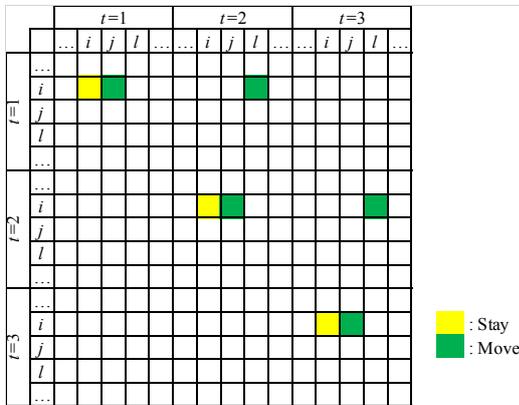


図-24 インシデンス行列設定例～対応するインシデンス行列

該ゾーンに滞在 (Stay) する状態を、緑色は「当該ゾーン (列) へ移動中 (Move)」の状態を表す。他の空白のセルは全て実行不可能な状態である。このように、時間的・空間的な移動制約条件をインシデンス行列中に明示的に導入することにより、計算の効率化を図ると共に、より現況再現性の高い流動パターン予測を行うことができるようになる」と期待される。

(3) シミュレーションの試行結果

式 (13) および式 (14) で示されるようにツアーパターンの選択確率は貨物車の拠点ゾーンに依存する。本研究ではツアー発生量の多い地域として「さいたま市岩槻区」と「川崎市川崎区」を拠点として午前四時を開始時刻とした貨物車ツアーを複数発生させ、各時刻における、都心 23 区に存在する貨物車の、全貨物車 (既に吸収状態となっているサンプルは除く) に対する相対度数を算出した。その際には c) で述べたように、ゾーン間所要時間を考慮した動的なインシデンス行列および価値関数を使用した。混雑課金にはコードン・プライシングを採用し、課金として 3 つのシナリオを検討する。一つ目は課金なし、二つ目は 500 円、三つ目は 1500 円と設定する。図-25 は岩槻区を拠点とした全ツアーに対する 23 区に存在する貨物車の相対度数、図-26 は川崎区を拠点とした全ツアーに対する 23 区に存在する貨物車の相対度数の時間変化を示す。

図-25 および図-26 より、課金時間帯における相対度数は課金額が大きいほど減少する傾向が観測され、課

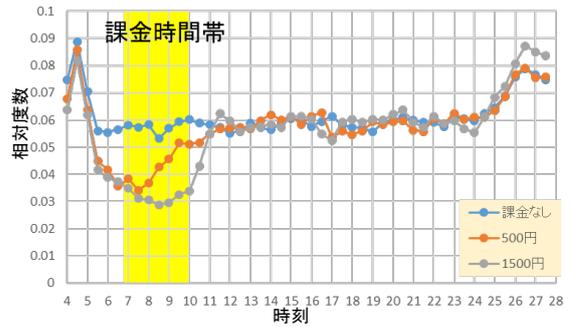


図-25 さいたま市岩槻区を拠点とする貨物車の課金ゾーン (都心部) 訪問率

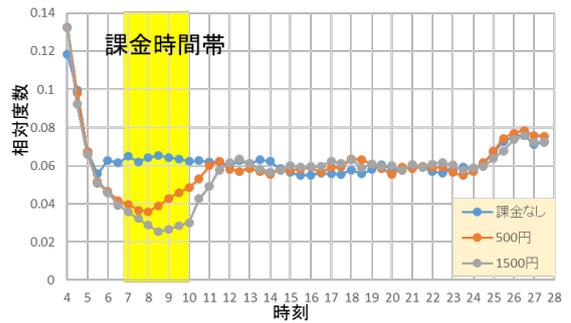


図-26 川崎市川崎区を拠点とする貨物車の課金ゾーン (都心部) 訪問率

金時間帯 (午前 7 時-10 時) 以外の時間帯においては課金額にかかわらず相対度数の変化は同様の傾向を示した。

シミュレーションの結果により、将来効用を考慮した動的モデルにより課金時間帯周辺における都心部への移動を回避するツアーパターン変化の記述が可能になった一方で、課金時間帯以外におけるツアーパターンの変化の記述ができていないといった課題が残されていると考えられる。

6. まとめと今後の課題

(1) 本研究の成果

本研究では、東京都市圏における貨物車の移動軌跡データ (プローブデータ) を解析し、従来のようなトリップ単位ではなく、貨物車が拠点物流施設を出発してから元の拠点に戻ってくるまでの「ツアー」単位での流動分析とモデル化を行った。より具体的には、逐次的に目的地選択を繰り返して最終的に拠点に戻ってくるような貨物車の時空間選択行動を記述する数理モデルを構築し、プローブデータを用いたパラメータ推定を行った上で、都心部への流入抑制施策のシミュレーション分析を行った。

まず、基礎集計分析に基づき、都市圏内輸送トリップ

およびツアーの性質の特性を明らかにした。次に、実際にプローブデータから作成されたツアーデータを使用して貨物車の輸送パターンに関するモデルの構築を行った。モデルの空間単位設定は、第 5 回東京都市圏物資流動調査の対象範囲の市区町村単位で行った。この空間選択肢に対し、貨物車のツアーパターン選択行動を「目的地ゾーン選択行動の繰り返し行動」とみなし、ツアー出発後に再び拠点ゾーンに戻ってきた状態を吸収状態として、各々の時点より吸収状態になるまでの将来効用を含めたモデリングを行った。貨物車ツアーパターン選択モデルは、ツアー中の 30 分ごとの動的な貨物車の選択行動を記述したものであるが、ゾーン間 LOS, 人口や地価などの地域属性, ゾーン内の道路種別総延長, IC の整備状況といった交通インフラ関連の説明変数, 用途地域, 物流施設の立地が目的地選択行動を規定する要因となっている可能性が示唆された。最後に、構築されたモデルを用いて、都心部の時間帯別の混雑課金政策の導入によるツアーパターン変化のシミュレーションを実施した。構築されたモデルにより、混雑課金に対する貨物車ツアーパターンの変化を時間帯別にシミュレーションした。

(2) 今後の課題

本研究では、一定時刻ごとの貨物車の挙動を目的地選択行動の繰り返しとしてモデリングを行った。結果的に Multinomial Logit と等価になる RL モデルでは現在地ゾーンを含めた全てのゾーンを等しいスケールで選択肢としているため、「滞在」と「移動」といった選択行動および移動目的の差異に関してはダミー変数により考慮しているに過ぎず、行動論的論拠が必ずしも高くない。これに対し、Mai et al.⁹⁾ のようにネスト構造を考慮した選択モデルを用いることによりこの課題が克服できると考えられる。

また、本研究では 30 分を観測のスパンとして設定して各時期における「滞在」や「次の目的地」といった選択行動を記述したが、「走行中」の意思決定に関しては記述することができなかった。実際のツアーでは走行中は選択行動を実施していない。そのため、現在地を出発後に即座に目的地に到着するという選択構造を採用しているため、シミュレーションでは実際の時間内に実施不可能なツアーも生成される可能性がある。この「走行中」という概念を含んだモデリングを行う必要があると考えられる。

さらに、シミュレーションにおいては、課金時間帯以外におけるツアーパターンの変化を記述するまでには至らなかった。通常のツアーパターンの変化においては、課金時間帯に都心部を回避するツアーパターンを採用した場合には、混雑税が課されない時間帯に都

心部を訪問する可能性が高まると考えられる。これらをより適切に記述するためには先述の通り、「滞在」や「走行中」といった概念をモデルに付加させることに加え、累積ツアー距離および時間の導入や、同一ツアー内において一度訪れた地域は、以降の選択行動においては効用を低下させるなどといった検討が考えられる。

謝辞 分析に用いたプローブデータは、東京都市圏交通計画協議会よりご提供頂いた。ここに記して感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) Hyodo, T., Hagino, Y. and Endo, K.: Modeling maritime container trailer route-choice behavior using traffic application data for oversize/overmass vehicles, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 10, pp. 864–879, 2013.
- 2) Hess, S., Quddus, M., Rieser-Schssler, N. and Daly, A.: Developing advanced route choice models for heavy goods vehicles using gps data, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 77, pp. 29–44, 2015.
- 3) 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* in press.
- 4) Fosgerau, M., Frejinger, E. and Karlström, A.: A link based network route choice model with unrestricted choice set, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 56, pp. 70–80, 2013.
- 5) Hunt, J. D. and Stefan, K.: Tour-based microsimulation of urban commercial movements, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 41, No. 9, pp. 981–1013, 2007.
- 6) Rust, J.: Optimal replacement of GMC bus engines: An empirical model of Harold Zurcher, *Econometrica*, Vol. 55, No. 5, pp. 999–1033, 1987.
- 7) 兵藤哲朗, 坂井孝典, 河村和哉: 東京都市圏物資流動調査による空間相関を考慮した物流施設立地選択モデルの検討, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol. 71, No. 4, pp. 156–167, 2015.
- 8) Ramos, D. M.: Dynamic route choice modelling of the effects of travel information using RP data, Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, 2015.
- 9) 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.

(2018. 7. 31 受付)