

進化ゲーム理論による所要時間変動および交通障害を考慮した経路選択モデルに関する研究*

A route choice model based on evolutionary game theory considering the travel time reliability and traffic impediments *

内山 直浩**・谷口 栄一***

By Naohrio UCHIYAMA**・Eiichi TANIGUCHI***

1. はじめに

物流事業者物流事業者では現在、ジャストインタイム輸送等の進展に伴い、輸送先への遅刻が許されない状況であり、交通渋滞や交通事故等による所要時間の変動を考慮し、平均的な所要時間よりも時間に余裕をもって運行している。

一方、経路選択行動を推計するモデルの多くは、起終点間の平均所要時間の短縮効果にもとづいたモデルであり、定時性・信頼性の向上効果が含まれていない。

所要時間の不確実性を考慮したモデルの構築は、長尾ら(2007)¹⁾など、主に旅客交通における検討が多い。貨物交通に焦点をあてた研究では、谷口ら(2001)²⁾が、所要時間の不確実性を考慮した配車配送計画モデルを構築している。

また、交通事故等の突発事象に対するリスクを回避するモデルとしては、Bell(2004)³⁾が、ゲーム理論を用いて、配車係とリンクに障害を起こす悪魔とのゲームとしてモデル化している。

本研究では、所要時間の不確実性と交通事故等の突発事象に対するリスクを回避する経路選択モデルの構築を検討した。進化ゲーム理論を用いて、配車係が毎日の経路所要時間の変動や交通障害の状況を考慮し、利用経路を決定するモデルをプローブ調査にて得られた配送トラックの実データを元に構築した。

本モデルは、過去の経験をもとにする、余裕時間を考慮する、という、実際に配車係が行う経路決定過程をモデル化しており、モデルを用いることで、経路選択行動の変化について、実際の意志決定過程に即した分析を行うことが出来る。

*キーワード：交通行動分析、経路選択

**正員、工修、京都大学大学院工学研究科
(京都市西京区京都大学桂、
TEL075-383-3231、FAX075-950-3800)

***フェロー、工博、京都大学大学院工学研究科
(京都市西京区京都大学桂、
TEL075-383-3229、FAX075-950-3800)

2. モデルの構築

(1) モデルの構築方針

配車係が毎日の経路所要時間の変動や障害の状況を考慮し、利用経路(戦略)を決定するモデルを構築する。

配車係とリンクに障害(事故等)を起こす悪魔のゲームを想定した進化ゲーム理論を用いて、経路選択戦略推計モデルを構築した。進化ゲーム理論は、実際にある戦略を取った後に、それがうまくいったかどうかによって戦略が変化すると仮定したモデルであり、最良の経路を探し、リスク回避を考える配車係の経路決定の過程に似ていると考えられる。

モデルに用いる経路所要時間はプローブデータを用いた道路区間ごとの所要時間分布から作成する。豊田市田原市のルートについてモデルを構築し、所要時間のばらつきの経路選択への影響を分析した。

また、本研究のモデル構築においては、国土交通省中部地方整備局において物流事業者4社、合計579台から取得した、平成20年10月の1ヶ月のプローブデータを利用した。

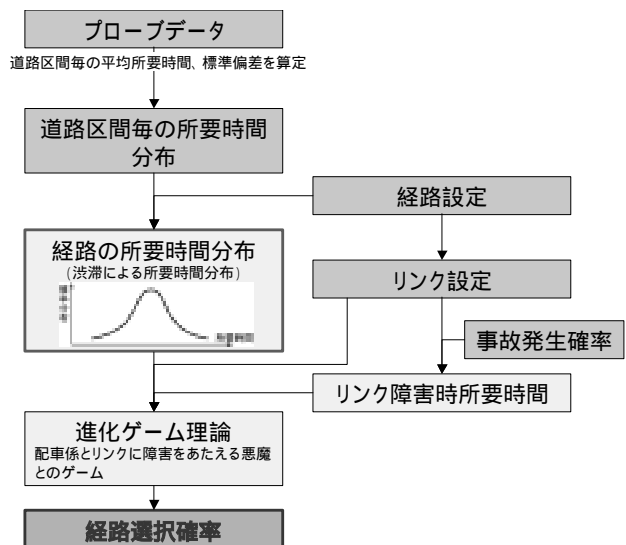


図 - 1 モデルフロー

(2) モデルの概要

a) 構築する進化ゲームモデルの概要

検討対象とする事象が比較的短いタイムスケールの社会現象であり、物流事業者は他者の行動というよりも、過去の自分の行動から戦略を決定すると考えられることから、本研究では、進化ゲーム理論モデルのうち、試行錯誤型学習ダイナミクスモデルを用いた。

このモデルでは、プレイヤーはある戦略を採ろうとする「傾向」を持つものと考え、プレイヤーがある戦略を実際に採ってみて、結果が良かったときには、その戦略に対する評価が上がり、その戦略を採ろうとする「傾向」が大きくなる。結果が悪かったときには、評価が下がり、その戦略を採ろうとする「傾向」が小さくなる。

b) モデル化の内容

進化モデルは動学化されたゲーム理論であり、戦略の分布や組合せの変化を分析する。本モデルでは、下記の設定により分析を行う。得られるゲームの結果は、プレイヤーの戦略の収束値を求めるものであり、1つの戦略に収束する場合、ある戦略のシェアに収束する場合等が考えられる。

ア. プレーヤーの設定

プレーヤー1：配車担当者（貨物事業者）

プレーヤー2：障害（交通事故等を想定）を起こす悪魔

イ. プレーヤーの戦略

プレーヤー1の戦略： n 個の経路のうち一つを選択する。
プレーヤー2の戦略： m 個のリンクのうち一つに障害を起こす。

ウ. 定式化

試行錯誤学習を仮定するモデルの代表として挙げられる、ロス・エレブのモデルを用いる。ロス・エレブモデルの基本方程式は下記のように、強化と忘却という過程を取り入れて、ある戦略を採ろうとする「傾向」の変化を次のようにモデル化したものである。

プレイヤーは、時刻 t に採用した戦略の良し悪しで、戦略 j を採用する傾向性に強化値を与えて時刻 $t+1$ の戦略 j を採用する傾向性を更新し、試行錯誤しながら戦略を収束させるモデルである。強化値は前回の行動の際の戦略の評価を表し、本モデルでは得られた利得とした。

$$p_{ij}(t+1) = (1-\phi)p_{ij}(t) + R_{ij}(t) \quad \dots \text{式1}$$

$P_{ij}(t)$ ：時刻 t にプレイヤー i が戦略 j を採用する傾向性

$R_{ij}(t)$ ：時刻 t に $P_{ij}(t)$ に与えられる強化

：忘却の速さを表すパラメータ ($0 < \phi < 1$)

このとき、プレイヤー i の戦略 j を採用する確率は以下のように定式化される。

$$x_{ij}(t) = p_{ij}(t) / \sum_j p_{ij}(t) \quad \dots \text{式2}$$

$x_{ij}(t)$ ：時刻 t にプレイヤー i が戦略 j を採用する確率

ただし、 $\sum_j x_{ij}(t) = 1$

また、強化 ($R_{ij}(t)$) はプレイヤー毎に設定する。

プレーヤー1

時刻 $t+1$ に戦略 j を選択する傾向性に与えられる強化値 = 時刻 t の利得によって与えられると仮定し、強化値を以下のように設定した。

$$\begin{aligned} R_{ij}(t) = 0; \quad r_j(t-1) &= (TC_b + RC_b) - (TC_j(t-1) \\ &\quad + RC_j(t-1) + \alpha \cdot T_j(t-1) + \beta \cdot D) < 0 \\ R_{ij}(t) = 1; \quad r_j(t-1) &= (TC_b + RC_b) - (TC_j(t-1) \\ &\quad + RC_j(t-1) + \alpha \cdot T_j(t-1) + \beta \cdot D) \geq 0 \end{aligned} \quad \dots \text{式3}$$

$r_j(t-1)$ ：時刻 $t-1$ の戦略 j による利得（標準的な所要時間でのコストから節約できたコスト）

TC_b, RC_b ：標準的な所要時間での時間コスト、走行コスト（標準的な所要時間は事業者のダイヤ表より150分と設定した。）

TC_j, RC_j, T_j, D ：時刻 $t-1$ 、戦略 j での所要時間での時間コスト、走行コスト、有料道路料金、豊川橋通行ダミー、 α, β ：パラメータ（それぞれ、実際の経路選択の状況より設定した。）

プレーヤー2

学習しないと仮定 ($R_{ij}(t)=0$) した。したがって、時刻 t にプレイヤー i が戦略 j を採用する傾向性、時刻 t にプレイヤー i が戦略 j を採用する確率は不変である。

$$p_{ij}(t+1) = p_{ij}(t), \quad \Delta x_{ij} = 0, \quad x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) \quad \dots \text{式4}$$

エ. 経路の所要時間

プローブデータから経路毎に下式で所要時間および標準偏差を集計する。所要時間分布は求めた平均所要時間と標準偏差の正規分布に従うとして、経路の時刻 t の所要時間を推計する。

経路の平均所要時間

$$\mu_i = \sum_i \mu_i \quad \dots \text{式5}$$

経路の所要時間の標準偏差

$$\sigma_i = \sqrt{\sum_i \sigma_i^2 + 2 \sum_i \sum_{j=i+1}^n COV(X_i, X_j)} \quad \dots \text{式6}$$

μ_i ：区間 i の平均所要時間、 σ_i ：区間 i の標準偏差、 μ_j ：区間 j の平均所要時間、 σ_j ：区間 j の標準偏差、 $COV(X_i, X_j)$ ：区間 i 、区間 j の所要時間の共分散

オ. プレーヤー1が選択する経路

プレイヤー1が選択する経路は、実際の走行経路をもとに6つの経路を設定した。また本研究では、さまざまな経路を検討するため、豊田市から田原市まで実際に通して走っている経路だけではなく、組み合わせて設定した。

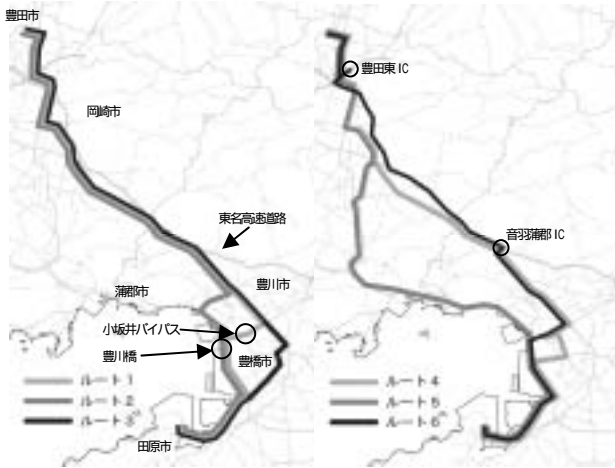


図 - 2 設定ルート

キ．プレイヤー2が障害を起こすリンク

6つのルートを構成する17リンクを設定した。

ク．障害確率

リンク毎に愛知県の6～9時の道路種別交通事故発生率をもとに、下記式によって設定した。

$$\text{リンクの障害確率} = \sum (\text{道路種類の交通事故発生率} \times \text{道路種類のリンク長})$$

したがって、プレイヤー2が各リンクに障害を起こす確率は、下記式によって与えられる。

$$\text{各リンクの障害確率} = \frac{\text{リンク延長}}{\sum (\text{リンクの道路種類の事故発生確率})}$$

ケ．障害による影響

第3次渋滞対策プログラム実施箇所における最大渋滞長の平均値による遅れ時間をもとに、障害が発生したリンクには一般道で10分、高速道で30分の追加時間がかかると仮定した。

3．現況条件での試算結果

2で示した設定にプローブデータで得られた所要時間分布を用いた試算を行った。

a) 所要時間分布と設定パラメータ

強化値の推計等に用いる経路の時刻tの所要時間は、東名集中工事期間外の平日7～9時台のプローブデータを用いて設定した。道路区間毎の平均所要時間、所要時間

の標準偏差、隣り合う道路区間の共分散を算出した。

各ルートの平均所要時間、標準偏差は表-1の通り。平均所要時間、標準偏差ともに、高速道路を利用するルート6が最も小さい結果となった。高速道路を利用しないルートの中ではルート1が平均所要時間も標準偏差も最も小さい結果となった。

また、プローブデータから得られた、実際の経路選択確率をもとに式3の、をそれぞれ4、70に設定した。

表 - 1 各ルートの条件

	距離 (km)	平均所要時間 (分)	標準偏差 (分)	参考) 95% 所要時間 (分)
ルート1 (豊川橋通過、小坂井ハイパス利用)	60.0	127.4	7.6	139.9
ルート2 (豊川橋通過)	60.5	132.7	8.8	147.1
ルート3 (豊川橋迂回、豊橋市中心部通過)	59.5	152.2	11.6	171.2
ルート4 (豊川橋迂回)	64.8	132.8	7.7	145.4
ルート5 (東名集中工事期間に利用されたルート)	62.3	139.3	8.0	152.4
ルート6 (高速利用、豊川橋通過)	62.9	101.8	7.2	113.6

注) 95%所要時間 = 平均所要時間 + 1.64 × 標準偏差

東名集中工事期間外 平日、7～9時台のデータを用いた値

b) 推計結果

1,000回の繰り返し計算の結果、ルート2の選択割合が64%と最も高く次いでルート4の34%、ルート1の2%、ルート3、5、6は選択されない結果となった。特にルート3では実際には12%の利用があるが、所要時間および所要時間のばらつきとも大きく、モデル計算上では選択されない結果となった。

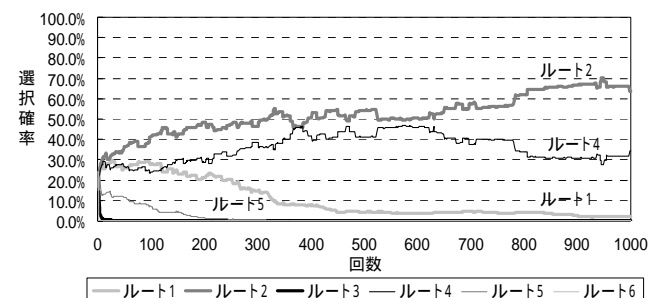


図 - 3 現況条件での推計結果

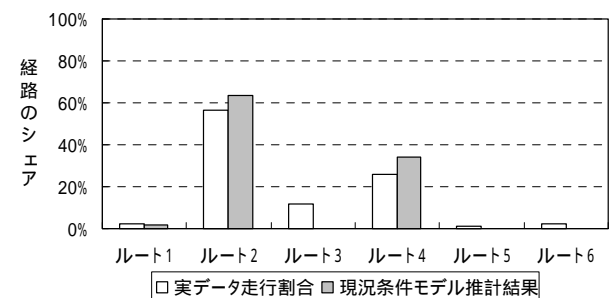


図 - 4 実データと現況条件での推計結果との比較

4. ケーススタディ

道路改良等によって、豊川橋を經由しないルートにおいて、所要時間のばらつきが小さくなった場合を想定し、ルート選択のシェアに与える影響を分析した。ルート3および4において、標準偏差が2/3になった場合について試算した。

a) 所要時間分布

高速道路利用のルートを除くと、ルート3、4の標準偏差が短縮されたことにより、平均所要時間ではルート1が最も小さいが、標準偏差ではルート4が最も小さくなった。ただし、95%所要時間ではルート1が最も小さい。

表 - 2 各ルートの条件

	距離 (km)	平均所要時間 (分)	標準偏差 (分)	参考) 95% 所要時間 (分)
ルート1 (豊川橋通過、小坂井ハイパス利用)	60.0	127.4	7.6	139.9
ルート2 (豊川橋通過)	60.5	132.7	8.8	147.1
ルート3 (豊川橋迂回、豊橋市中心部通過)	59.5	152.2	7.7	164.8
ルート4 (豊川橋迂回)	64.8	132.8	5.1	141.2
ルート5 (東名集中工事期間に利用されたルート)	62.3	139.3	8.0	152.4
ルート6 (高速利用、豊川橋通過)	62.9	101.8	7.2	113.6

b) 推計結果

ルート3、4の標準偏差が短縮されたことで、ルート4の選択率が上昇し、1,000回の繰り返し計算の結果では、ルート4が98%、ルート2が2%となった。

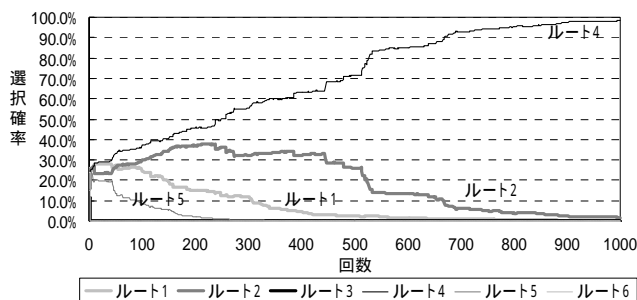


図 - 5 ケーススタディでの推計結果

5. 結果のまとめと今後の課題

a) 結果のまとめ

貨物事業者が走行経費と時間経費と有料道路料金の和の差異を利得と考え、利得によって次の行動を強化するモデルを構築した。モデルでは現在の所要時間分布、交通事故確率を考慮し、プローブデータで得られた経路選択率にあうように利得におけるパラメータを設定した。

また、仮に、豊川橋を通過しないルート3、4の標準偏差が2/3になったとすると、ルート4が約98%の

シェアとなった。ルート3は0%であるが、これはルート3のもともとの平均所要時間および標準偏差が大きく、標準偏差が短縮されても影響がなかったためである。

b) 今後の課題

今回は、豊田市～田原市間のみで、ある仮定の下に、利得構造や経路選択の考え方（すなわち、過去の経験に伴う、ある戦略を選択する傾向性への強化の考え方）を記述し、モデル構築を行い、経路選択のシェアを推計した。今後は複数の起終点間でのモデルを構築し、それぞれの実際の経路選択結果を踏まえて、利得構造や強化値、その他のパラメータの設定について検討し、再現性を確保した上で、実際に計画されている道路施策による平均所要時間や定時性・信頼性の向上による経路選択行動への影響を分析する必要がある。

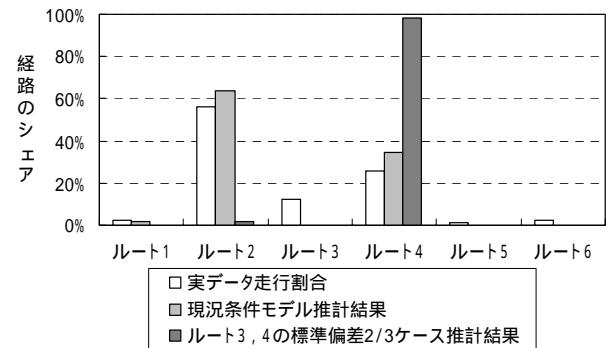


図 - 6 推計結果の比較

6. 謝辞

本研究を行う上で、国土交通省中部整備局からプローブデータをご提供いただきました。感謝申し上げます。なお、プローブデータは、(株)三菱総合研究所のPhoneGPSによって収集されています。ご協力いただきました、(株)三菱総合研究所、目黒様、佐藤様にも感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 長尾、中山、高山：旅行時間の不確実性を考慮した確率ネットワーク均衡モデルを用いた時間信頼性評価手法：金沢道路ネットワークを例に、2007
- 2) 谷口、山田、柿本：所要時間の不確実性を考慮した都市内集配トラックの確率的配車配送計画，土木計画学論文集，No.674，pp.49-61，2001
- 3) Micheal G.H.Bell：Games, Heuristics, and Risk Averseness in Vehicle Routing Problems, J.Urban Planning & Development, pp.37-41, 2004
- 4) 大浦宏邦：社会科学者のための進化ゲーム理論，勁草書房，2008