

道路利用者のリスク態度に対する異質性を考慮した交通ネットワーク均衡モデル

A Stochastic Network Equilibrium Model Considering Heterogeneity Over A Road User's Risk Attitude

長尾一輝¹, 中山晶一郎², 高山純一³

Kazuki Nagao, Shoichiro Nakayama, Jun-ichi Takayama

1. はじめに

道路利用者は単に旅行時間のみならず, その不確実性も考慮して経路を選択していると考えられる. 例えば, 通勤時や予定のあるときはなるべく時間に遅刻しないようにするため, 遅刻の可能性の低い経路, つまり旅行時間のばらつきの小さい道路を選択する確率が高くなるはずである.

そこで著者らは, 期待旅行時間だけではなく分散も算出することによって, 道路利用者の旅行時間の不確実性への態度(リスク態度)を考慮した確率ネットワーク均衡モデル¹⁾を提案した. このモデルは, まず OD 交通量が正規分布に従うと仮定し, 正規分布に従う交通量を配分することによって期待旅行時間だけではなく旅行時間の分散(不確実性)を表現する. そして, 算出した旅行時間の分散を用いて, 道路利用者の旅行時間の不確実性への態度(リスク態度)を考慮した「実効旅行時間」を計算し, 配分を行うものである.

1)のモデルは, 全 OD, 全道路利用者が同様のリスク態度の基で行動するという考え方に基づくモデルであった. しかし, リスク態度は本来道路利用者それぞれのトリップ目的等によって異なる方が自然であろう. また, 少し単純化して考えると, 少なくとも同一 OD 内にリスク態度の異なる複数のクラスが存在するとも仮定できる.

そこで, 本研究では著者らが以前提案した確率ネットワーク均衡モデル¹⁾を道路利用者のリスク態度に対する異質性を考慮したマルチクラスモデルに拡張する.

Key Words: 交通ネットワーク均衡, 確率的 OD 交通量, マルチクラス配分

1 正会員, 修(工), (株)オリエンタルコンサルタンツ東北支社
〒984-0065 宮城県仙台市若林区土樋 104 OC
仙台ビル

Tel: 076-215-5522, Fax: 022-215-5622

2 正会員, 博(工), 金沢大学大学院

3 フェロー会員, 工博, 金沢大学大学院

マルチクラス配分モデルは, 車種や交通目的, 道路利用者の属性の違いを明示的に考慮して, 配分交通量を推計する配分モデルである²⁾. 既往研究として, 本田ら³⁾は, 道路利用者を VICS の利用可否による 2 種のセグメントに分割し, これらの経路選択規範の相違を考慮に入れたモデルを構築している. 岡田ら⁴⁾は, OD 間距離に着目したトリップ属性の違いによる認知誤差の違いを考慮した確率的利用者配分モデルを構築している.

本研究では, 道路利用者の属性の違いとして, 道路利用者のリスク態度に対する異質性を明示的に考慮したマルチクラスモデルを構築する. そして, 提案したモデルを仮想ネットワークに適用し, リスク態度を考慮する道路利用者の比率の変化によるネットワークの状況の変化等を示す. それによってモデルの特徴を明らかにするとともに実際のネットワークへの適応可能性を探ることが本研究の目的である.

このような均衡モデルによって, 道路利用者のリスク態度に対する異質性を考慮することが可能となり, より現実の交通ネットワークの状況に適合した交通量配分や時間信頼性の評価等が可能になると考えられる.

2. 基本概念

(1) 実効旅行時間

本研究のモデルは, 期待旅行時間の代わりに以下に示す実効旅行時間 V_j^i を用いることで, 道路利用者の旅行時間の不確実性への態度(リスク態度)を考慮したモデルを構築する. 実効旅行時間は期待旅行時間に加え旅行時間の分散に関するものが含まれており, これは遅刻を回避するために必要な旅行時間(セイフティ・マージン)と解

積することができる⁵⁾。

$$V_j^i = E[T_j^i] + \text{Var}[T_j^i] \quad (1)$$

V_j^i は OD ペア i , 経路 j の実効旅行時間, $E[T_j^i]$ は期待旅行時間, $\text{Var}[T_j^i]$ は旅行時間の分散, はリスク態度を考慮する大きさを表すパラメータである。 >0 の場合はリスク回避, $=0$ の場合はリスク中立, <0 の場合はリスク選好である。

(2) 均衡概念

ワードロップ均衡の基本的な考え方は, 利用される経路の旅行時間は皆等しく, 利用されない経路の旅行時間よりも小さいかせいぜい等しいというものである。交通量や旅行時間を確率変数と考え, このワードロップ均衡の考え方を適用すると, 利用される経路の「実効旅行時間」は皆等しく, 利用されない経路の「実効旅行時間」よりも小さいかせいぜい等しい, という均衡を考えることは極めて自然なことである⁶⁾。これが, 著者らが以前提案した確率ネットワーク均衡モデル¹⁾の基本的な考え方である。

本研究では, このモデルを拡張し, 同一 OD 内にリスク態度の異なる複数のクラスが存在すると仮定する。そして, 各クラスについて利用されている「実効旅行時間」が等しいという均衡条件が成立すると考える。これが本均衡モデルの基本的な考え方である。

(3) 交通量の分布

本研究では正規分布の OD 交通量を正規分布の交通量として配分する。このような配分を実際のネットワークに適用する場合, 一つの問題が生じる。現在のところ, 確定的な OD 交通量のデータは各種調査結果から算出することが可能であり, それを OD 交通量の平均に適用することができる。しかし, OD 交通量の分散に関しては, データを得ることが極めて困難である。そこで, 本研究では, OD ペア $i (\in U)$ の OD 交通量の分散 $(\sigma^i)^2$ は $\eta\mu^i$ と仮定する。ただし, η は正のパラメータ, μ^i は OD 交通量の平均である。つまり, 本研究では, OD 交通量について, 平均に比例して分散が決ま

ると仮定する。なお, 分散 $(\sigma^i)^2$ を $\eta(\mu_j^i)^{\alpha}$ とより複雑な式に仮定することも可能であり, そのように仮定しても以下, 同様なモデル化が可能であるが, 本稿では単純化のため上のように仮定する。また, 経路交通量 (OD ペア i の経路 j の交通量) についても, その分散 $(\sigma^i)^2$ は $\eta\mu_j^i$ と仮定する。ここで, μ_j^i は経路交通量の平均である。このとき, $\mu^i = \sum_j \mu_j^i$, $(\sigma^i)^2 = \sum_j (\sigma_j^i)^2 = \eta \sum_j \mu_j^i$ である。

$$F_j^i \sim N[\mu_j^i, \eta\mu_j^i] \quad (2)$$

以上に加えて, 各経路交通量は独立と仮定する。このとき, リンク a の交通量 X_a は正規分布に従う (独立な) 経路交通量 F_j^i の和 $\sum_i \sum_j \delta_{aj} \cdot F_j^i$ であるため, それは以下の正規分布となる。

$$N[\sum_i \sum_j \delta_{aj} \cdot \mu_j^i, \sum_i \sum_j \delta_{aj} \cdot \eta \cdot \mu_j^i] \quad (3)$$

なお, 経路交通量は独立と仮定したが, リンク間で, 特に隣接するリンク間では同一の経路交通量が流れることがあるため, リンク交通量は独立ではない。

3. 期待旅行時間や旅行時間の分散の算出

リンク走行時間が BPR 関数に従うと仮定すると, リンクの旅行時間 t_a は $t_{a0} \{1 + \alpha(x/C_a)\}$ で表される。ただし, t_a はリンク a の旅行時間, t_{a0} は自由走行時間, C_a は交通容量, x は交通量である。したがって, 期待リンク旅行時間を計算するためには $E[X]$ が計算できれば良い。ここで, X は交通量の確率変数である。 $E[X]$ の計算には積率母関数 $M(s)$ を用いることができる。積率母関数の性質から $E[(X_a)]$ は $\frac{d^\beta M_a(s)}{ds^\beta} \Big|_{s=0}$ として計算される。ゆえに期待リンク旅行時間は以下の式となる。

$$E[T_a] = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha \frac{1}{C_a} \cdot \frac{d^\beta M_a(s)}{ds^\beta} \Big|_{s=0} \right\} \quad (4)$$

ただし, T_a はリンク旅行時間の確率変数である。

前節で述べたように交通量は前節で述べたように交通量は正規分布に従うため, X_a は正規変数

であり、その積率母関数 $M_a(s)$ は $\exp(\mu_a s + \sigma_a^2 s^2 / 2)$ である。ただし、 $\mu_a (= \sum_i \sum_j \delta_{a,j} \cdot \mu_j^i)$ は正規分布の平均、 $\sigma_a^2 (= \eta \mu_a)$ はその分散である。ゆえに期待リンク旅行時間関数 g_a は μ_a の式で表される。 $\beta=4$ のとき、 g_a は次式となる。

$$g_a(\mu_a) = t_{a0} [1 + \alpha \{3(\eta \cdot \mu_a)^4 + 6\mu_a^2(\eta \cdot \mu_a)^2 + \mu_a^4\} / C_a^4] \quad (5)$$

経路旅行時間の期待値 $E[T_j^i]$ は $\sum_a \delta_{a,j} \cdot E[T_a]$ となる。

リンク旅行時間の分散 $\text{Var}[T_a]$ は $E[(T_a)^2] - E[T_a]^2$ であり、 $E[(X_a)^2]$ 、 $E[X_a]$ を用いれば計算することができる。

また、経路旅行時間の分散 $\text{Var}[T_j^i]$ も以下の式のように計算できる。

$$\text{Var}[T_j^i] = \sum_a \delta_{a,j} \cdot \text{Var}[T_a] \quad (6)$$

リンク交通量の独立性を仮定しない場合、上式の右辺に共分散の項が付加される。しかし、そうすると経路旅行時間の分散はリンク単位に分解できない。ゆえに、コストに実効旅行時間を用いると計算が大変煩雑になる。そのため本研究では共分散の項を無視して考える。つまり、リンク交通量は独立と仮定している。著者らが以前提案した確率ネットワーク均衡モデル¹⁾を金沢道路ネットワークに適用した際、共分散の項を考慮した場合(リンク交通量の独立を仮定しない場合)と共分散を考慮しない場合での旅行時間の分散の相関係数は0.85と比較的高く、ある程度の信頼性はあるものと推測することができるため、実用的な適用を考えると共分散の除外はやむをえないと考えられる。

上記の手法によって算出された期待旅行時間、旅行時間の分散を用いて、式(1)に示した実効旅行時間 V_j^i を算出する。

4. 定式化

前節までに述べたように、OD 交通量が正規分布に従うとし、同一 OD 内にリスク態度の異なる複数のクラスが存在すると仮定すると、実現される交

通ネットワークの状態は以下のように表現できる。

$$V_j^{iM} = \lambda^{iM} \quad \text{if } \mu_j^{iM} > 0 \quad \forall j \in J^{iM} \quad \forall i \in U \quad (7)$$

$$V_j^{iM} \geq \lambda^{iM} \quad \text{if } \mu_j^{iM} = 0 \quad \forall j \in J^{iM} \quad \forall i \in U \quad (8)$$

V_j^{iM} は OD ペア i 、リスク態度のクラス M 、経路 j の実効旅行時間、 λ^{iM} は OD ペア i 、クラス M の最短の実効旅行時間である。

5. 射影法を用いた計算アルゴリズム

リスク態度が異なる各クラスのリンクコスト関数が対称ならば、上式は数理最適化問題として定式化が可能となる²⁾。しかし、本研究の場合は双方のリンクコスト関数は非対称となる。よって数理最適化問題としては定式化できず、緩和法、射影法、Gap 関数を用いた方法等を用いて解く必要がある。本研究では射影法を用いて解くこととする。射影法についての詳細は土木学会⁷⁾を参照されたい。本研究では OD に2つのクラスが存在するため、7)で示されている解法に若干の改良を施す。

射影法を用いた、本研究のモデルのアルゴリズムは以下のとおりとなる。

ステップ 0: 初期許容解を求める

繰り返し回数 $m=1$ 、定数 Q 、初期許容解(リンク交通量パターン) $X_a^{M(1)}$ を設定する。ここで $E[X_a^M]$ はそれぞれクラス M のリンク交通量の期待値であり、自由走行時間を用いて all or nothing 配分を行った値を用いる。

ステップ 1: 実効旅行時間の更新

期待旅行時間、旅行時間の分散を計算し、実効旅行時間を計算する。

ステップ 2: 射影問題を解く

式(9)の射影問題を解く。そして、その解をそれぞれ $X_a^{M(m+1)}$ とする。

$$\begin{aligned} \min . Z(X^M) = & E[V(X^{M(m)})] \cdot (X^M - X^{M(m)}) \\ & + \frac{1}{2\rho} (X^M - X^{M(m)}) \cdot Q (X^M - X^{M(m)}) \end{aligned} \quad (9)$$

ステップ 3: 収束判定

$X_a^{M(m+1)}$ が前回の解と一致していれば終了。そうでなければ $m=m+1$ とし、ステップ 1 へ戻る。

6. 仮想ネットワークへの適用

1OD2 リンクの単純な仮想ネットワークに、上述の確率ネットワーク均衡を適用した。リンクパフォーマンス関数には BPR 関数 ($\alpha=0.15, \beta=4$) を用いる。リンク 1 の自由走行時間は 10 分、交通容量は 1000 台、リンク 2 の自由走行時間は 20 分、交通容量は 2000 台とする。すなわち、リンク 1 は旅行時間の不確実性が高い道路、リンク 2 は旅行時間の不確実性が低い道路となる。OD 交通は平均 2500 台、分散 25000 台の正規分布に従うとする。

OD の中にはリスク回避クラス(クラス A)とリスク中立クラス(クラス B)が存在するとし、クラス A のリスク態度のパラメータは $\theta=1$ 、クラス B は $\theta=0$ とする。なお、クラスの種類をさらに複雑化することも可能であるが、本適用では単純化のため、クラス A とクラス B の 2 つのクラスを仮定する。

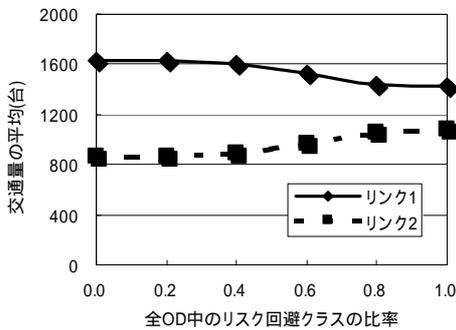


図 1 全 OD 中のリスク回避クラス(クラス A)の比率と経路交通量の平均の関係

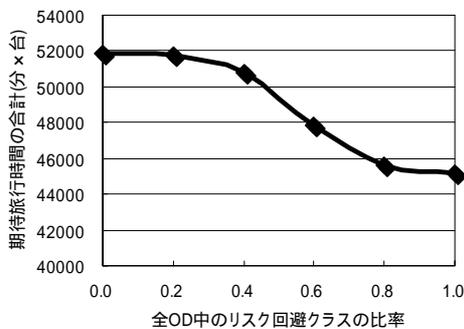


図 2 全 OD 中のリスク回避クラスの比率と期待旅行時間の合計の関係

図 1 は、全 OD 中のクラス A の比率と経路交通量の平均の関係である。リスクを回避するクラス A の比率が高くなるほど、旅行時間の不確実性が低いリンク 2 を通る車が増加している。

図 2 は、クラス A の比率とリンク 1、リンク 2 の総期待旅行時間の関係である。リスクを回避するクラス A の比率が高くなるほど、ネットワークの総期待旅行時間が減少する結果となっている。

7. おわりに

本研究では著者らが以前提案した確率ネットワーク均衡モデル¹⁾を道路利用者のリスク態度に対する異質性を考慮したモデルに拡張したモデルを提案した。そして提案したモデルを仮想ネットワークに適用し、リスク回避を行う道路利用者の比率の変化による道路ネットワークの状況の変化を示した。今後の課題としては、以下のような内容が挙げられる。

- ・ 金沢道路ネットワーク等の、実際のネットワークへの適用による有用性の確認および計算結果についての考察
- ・ 道路利用者のリスク態度の異質性についての、現実の交通ネットワークとの整合性の検証

参考文献

- 1) 中山晶一郎, 高山純一, 長尾一輝: 道路利用者のリスク態度を考慮した金沢道路ネットワークの均衡分析, 第 59 回土木学会年次学術講演会講演概要集, on CD-ROM, 2004.
- 2) 土木学会土木計画学研究委員会交通需要予測技術検討小委員会: 道路交通需要予測の理論と適用-第 1 編 利用者均衡配分の適用に向けて, 丸善, 東京, 2003.
- 3) 本田秀太, 溝上章志: 多種流確率均衡モデルに基づいた VICS 情報の利用率予測と便益評価, 土木計画学研究・講演集 No.23(2), pp. 759-762, 2000.
- 4) 岡田良之, 三輪富生, 森川高行: 認知誤差を考慮したマルチクラス確率的利用者均衡配分モデルに関する研究, 第 24 回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 157-160, 2004.
- 5) 飯田恭敬, 内田敬: リスク対応行動を考慮した道路網経路配分, 土木学会論文集 No.464/IV-19, pp. 63-72, 1993.
- 6) Nakayama, S. and J. Takayama: Traffic Network Equilibrium Model for Uncertain Demands, Presented at the 82th annual meeting of Transportation Research Board, on CD-ROM, 2003.
- 7) 土木学会土木計画学研究委員会「交通ネットワーク」出版小委員会: 交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と解法-, 丸善, 東京, 1998.