

ネットワークトポロジーを考慮した 均衡配分手法に関する基礎的研究

Incorporating Spatial Recognition Process into Route Choice Model for Transport Network Assignment

羽藤 英二¹, 朝倉康夫²

By Eiji HATO and Yasuo ASAKURA

1. はじめに

本研究ではドライバーの選択肢の認知構造に着目し、ネットワークのトポロジカルな特性を考慮した均衡配分手法の基本特性を明らかにする。

2. 行動モデルと均衡配分

User Equilibrium において、ドライバーの行動は確定的な行動原理を仮定し、Wardrop(1952)の第一原則に基づいて配分がなされる。ここで仮定される経路選択行動モデルは、効用最大理論に基づいた確率的選択モデルの効用関数の確率項をゼロと仮定したモデルと解釈できる。一方 Burrell(1968)による確率利用者均衡配分は経路選択行動原理が確率的であることを仮定している。

MNP(Thurstone,1927)と MNL (Luce, 1959), GEV(McFadden, 1978)などのいくつかの確率的選択モデルを SUE に組み込んだ現実的な解法アルゴリズムがすでに開発されてきた。各モデルの関係性を図-1 に示す。図中に示される GEV モデルの一般系は式(1)で表される。各経路選択肢の誤差項の独立性の仮定を緩和することで、選択肢間の類似性を取り扱ったものである。

$$P(k) = \frac{\exp(V_k) \frac{\partial G(y_1, y_2, \dots, y_n)}{\partial y_k}}{\mu G(y_1, y_2, \dots, y_n)} \quad (1)$$

$$y_k = \exp(V_k), (U_k = V_k + \varepsilon_k, k = 1, 2, \dots, n).$$

GEV モデルは操作パラメータを導入することで、選択肢の類似性の構造化とその記述が可能である(Bately et al, 2001). GEV モデルの中の一つである CNL モデルは G を以下の式(2)で定義する。

$$G(y_1, y_2, \dots, y_n) = \sum_m \left(\sum_k \alpha_{mk} y_k \right)^\mu \quad (2)$$

ここで、 μ はネストであるリンクを k は経路に対応しており、 μ ($0 \leq \mu \leq 1$)はネストの程度、 α_{mk} ($0 \leq \alpha_{mk} \leq 1$)は そのネストへのアロケーションパラメーターを示す。均衡配分への組み込みを前提とした経路選択モデルでは、通常の交通選択モデルの選択肢構造に対して、逆の tree 構造となることに注意が必要である。

関数 G の仮定によりいくつかのモデルが提案されている。一方 Non-GEV モデルの ECL モデルでは、誤差項の定義をセグメントや選択肢毎に詳細に仮定することで、選択肢の類似性と共に、誤差分散の不均一性を取り扱うことが可能である。

誤差構造を操作することでモデルの詳細化が可能になる。しかし、モデルが内包される評価システムとの整合性を考慮する必要がある。一連の GEV ファミリーの確率利用者均衡問題への拡張については Bechor(1999)が定式化しており、兵藤・室町(2000)がこれについて包括的なレビューを行っている。Non-GEV モデルのうち C-Logit, Path-Size Logit は経路を未知変数とするアルゴリズムを用いて配分が可能である。MNP についてはモンテカルロ・シミュレーションを用いた配分アルゴリズムが Daganzo (1979)らにより開発されている。一方、誤差分散の不均一性を取り扱った HEV などのモデルは嗜好の異なるセグメント毎に定数項として経路選択肢に対する嗜好の程度を取り扱うことになる。各選択肢に対する嗜好は、選択肢集合の中で相対的に決定される。選択肢集合の現実的な設定方法が重要といえる。

Key Words: 限定合理性, 経路選択モデル, EBA

¹正会員, 博(工), 愛媛大学工学部 環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3 TEL 089-927-9830 FAX 089-927-9843 e-mail hato@en2.ehime-u.ac.jp)

²正会員, 工博, 同上(Tel 089-927-9829 FAX 089-927-9843 e-mail asakura@en1.ehime-u.ac.jp)

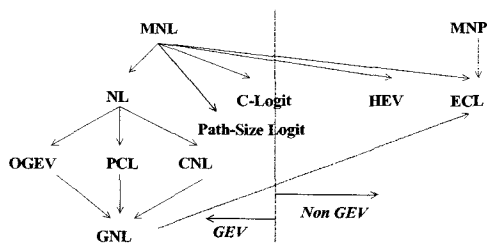


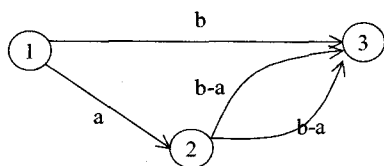
図-1 GEV と non-GEV モデルの関係

3. 確率的 Loading のための行動モデル比較分析

本節では、経路重複のある道路ネットワーク上で、パラメータ構造の異なる複数の経路選択モデルについて、数値計算を行うことで、確率的 Loading のための経路選択モデルの特性について比較分析を行う。

数値計算用のネットワークを図-2 に示す。ネットワークはいずれも 1OD のネットワークで、Network#1 は経路 1 が独立で、経路 2、3 が重複しているネットワークを、Network#2 は経路 1、2、3 が全て重複している Braess のネットワークを示す。それぞれの場合についてリンクの距離比 a/b をパラメータとして、ネットワーク上のノードの位置が空間的に変化した場合の経路の選択確率を計算した。なおコストは Flow Independent として設定している。

Network #1



Network #2

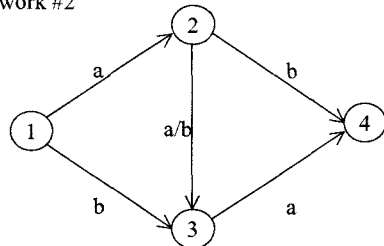


図-2 数値計算用ネットワーク

図-3 にネットワーク#1 を適用した場合のモデルパラメータの構造を示す。経路の重複がみられる実ネットワーク上で確率的 Loading を行う場合、経路選択枝をリンクに分割してその選択枝構造を記述し、リンクとパスの間

の相互関係をパラメータ表現する必要がある。MNL は、経路選択枝間の誤差を独立と仮定しているのに対して、PCL はパス間の誤算分散の相関を σ により直接考慮している。一方 CNL は α を導入することでパスとリンクの構造を考慮し、経路の重複の表現が可能となっている。

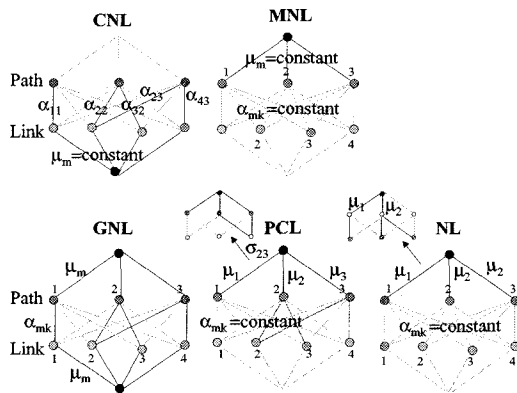


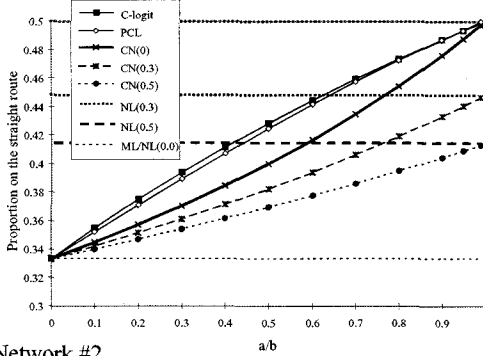
図-3 パラメータ構造

数値計算結果を図-4 に示す。いずれのネットワークにおいても、経路の重複率の変化に対して MNL が感度を持たないことがわかる。NL は誤差分散パラメータ μ を操作することで HIA 特性を考慮することが可能である。しかしリンクと経路の関係が選択枝 tree で構造化されていない場合、ネットワークの経路重複率の変化に伴う経路選択率の変化を取り扱うことができない。C-logit と PCL では同様の感度を示している。また CNL は μ を変化させることで、ネットワークの構成の変化に対する感度をより柔軟に調整することが可能である。

ネットワーク上のノードの空間的な配置変化に対する経路選択行動の変化を GEV タイプのモデルでは記述可能である。しかし、これらのモデルで記述可能な選択枝の類似性と反応の異質性を規定する経路選択枝の認知構造を示す Allocation パラメータ α や μ は実際にはドライバーが考慮する選択集合の構成そのものによって大きく異なる。独立性の高い経路を想起するか、重複する経路を想起するかによって最終的な loading の結果は異なる。また考慮できる選択枝の数が最終的に 2 本などといったケースでは、こうしたモデルは現実的な意味を持たない場合もある。

実際のネットワーク・ローディングにおいても、現実的な選択枝列挙のアルゴリズムの開発が重要であろう。

Network #1



Network #2

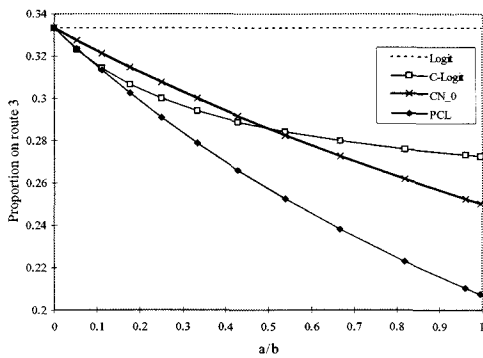


図-4 感度分析結果

4. 経路ベースの配分手法

従来の交通配分手法は経路を列挙することなく行われるケースが少なくない。これは経路列挙のための計算コストや、行動モデルを精緻化することで生じる求解性、あるいはネットワークモデル全体を修正することで生じる他の土地利用モデル等との整合性の確保などの問題に拠る。一方、現実の交通流パターンでは、限られた本数の経路に需要が流れていると考えられる。一般的に利用者の経路選択行動は不確実性を含むので、時間最短経路のみが利用されるわけではない。利用者の経路選択行動に関わる要因は、時間コストの他に様々なものが考えられる。経路に固有の属性も要因のひとつとして考えることができる。このため、経路に着目してネットワークフロー分析を行う際は、配分対象となる経路選択肢集合を決定しなければならない。その際にも、時間コストとそれ以外の経路に固有の属性を考慮することが望ましい。乗り継ぎ問題や、経路固有の課金システムといった経路に固有の属性を考慮するために、

本研究では経路の列挙を前提とした均衡配分手法の基本特性について数値解析を通じて分析を行う。

2 定式化とアルゴリズム

経路交通量を明示的な未知変数とした均衡配分のアルゴリズムとして **Simplicial Decomposition** 法がある。Damberg et al.(1996)により提案された本アルゴリズムは Hearn et al.(1987)が開発した従来のアルゴリズムを拡張したものである。経路交通量を明示的に扱うため、大規模なネットワークへの適用は難しいとされているが、計算機能力の向上で、適用範囲が広がることが期待できる。経路を明示的に取り扱うことで経路の重複問題を取り扱うことが可能となる。

経路の重複問題は例えば以下のように PCL モデルを用いて確率利用者均衡問題として以下の式(3)で定義できる⁴⁾。

$$\min. Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 \quad (3)$$

$$Z_1 = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(w) dw$$

$$Z_2 = \frac{1}{\theta} \sum_{rs} \sum_k \sum_{j \neq k} \beta_{kj} f_{k(kj)}^{rs} \ln \left[\frac{f_{k(kj)}^{rs}}{\beta_{kj}} \right]$$

$$Z_3 = \frac{1}{\theta} \sum_{rs} \sum_k \sum_{j \neq k} (1 - \beta_{kj}) (f_{k(kj)}^{rs} + f_{j(kj)}^{rs}) \ln \left[\frac{f_{k(kj)}^{rs} + f_{j(kj)}^{rs}}{\beta_{kj}} \right]$$

$$x_a = \sum_{rs} \sum_k f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall a \in A$$

$$q_{rs} = \sum_k f_k^{rs} \quad \forall rs \in W$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k \in K_{rs}, \forall rs \in W$$

ここで、

$t_a(x_a)$: リンク a のリンクコスト

x_a : リンク a の交通量

q_{rs} : OD ペア rs 間の交通量

$f_{k(kj)}^{rs}$: OD ペア rs 間で経路 k と経路 j の重複に着目するときの経路 k の交通量

$\delta_{a,k}^{rs} = 1$: OD ペア rs 間 k 番目経路がリンク a を含むとき

$= 0$: 含まないとき

σ_{kj} : 経路 k と経路 j の重複に関する指標 ($0 \leq \sigma_{kj} < 1$)

$$\beta_{kj} = 1 - \sigma_{kj}$$

目的関数(1)について、第1項は Wardrop 均衡配分に、第2項と第3項は確率的配分にそれぞれ相当す

る。MNL 型確率的利用者均衡配分と同様に、この最適化問題を用いれば、確率的利用者均衡配分が Wardrop 均衡配分の一般化となっていることも容易にわかる。上記最適化問題の解である経路交通量とリンク交通量の一意性は保証されている。

式(1)は経路交通量を含み、経路ベースの解法が必要となる。経路交通量を未知変数とする **Simplicial Decomposition** 法は、経路集合を特定した限定親問題を解くフェイズと経路集合を拡張する経路生成のフェイズより構成されている。通常の確率的利用者均衡モデルでは物理的利用可能全経路に交通量が配分されるため、厳密解を求めるためには全ての経路を生成しなければならない。一方、現実の交通量パターンでは、限られた本数の経路に交通量が流れていると考えられ、非現実的な経路の列挙に計算コストを費やすことは現実的といえない。

本アルゴリズムでは現実的な経路選択肢集合の列挙が課題となることが Damerg et al (1996) により指摘されている。Hato & Asakura (2000) はメンタルマップと非補償型の経路選別アルゴリズムを適用することで多数の経路選択肢から現実的な選択肢集合に絞りこむ現実的なアルゴリズムを提案している。以下に計算例を示す。

3. 数値計算例

数値計算に用いたネットワークはノード数 9、リンク数 12 で構成される 1OD の仮想ネットワークである。BPR 関数のパラメータは、 $\alpha=1$ 、 $\beta=3$ 、交通容量=1000 台とし、OD ペア間の需要 2000 台を発生させた。従来の PCL 型確率的利用者均衡配分と、経路所要時間の他に右左折数を考慮した非補償型の経路選別を考慮した確率的利用者均衡配分結果を比較する。

表-1 経路列挙パターン

経路kと経路j	L_k	L_j	L_{kj}	σ_{kj}
k=1, j=2	20.0	35.0	0.0	0.000
1, 3	20.0	25.0	10.0	0.447
2, 3	35.0	25.0	0.0	0.000
経路kと経路j	L_k	L_j	L_{kj}	σ_{kj}
k=1, j=2	25.0	40.0	0.0	0.000
1, 3	25.0	25.0	5.0	0.200
2, 3	40.0	25.0	5.0	0.158
1, 4	25.0	30.0	5.0	0.183
2, 4	40.0	30.0	10.0	0.289
3, 4	25.0	30.0	0.0	0.000

Note: 上段：従来のアルゴリズム。
下段：右左折数を考慮した PCL 型確率利用者均衡モデル

Loading において列挙された経路数は従来のアルゴリズムで 2 本、右左折数を考慮したアルゴリズムでは 4 本となった。提案した計算アルゴリズムの適用結果では、経路に固有の属性を考慮したため、最短コスト経路よりもコストの高い経路を選択する場合がある。その結果、既に経路集合に含まれる経路と同一であるような経路が生成されにくく、4 本の経路が生成されている。PCL 型確率的利用者均衡配分では、必ずしも経路コストが小さいほど、多くの交通量が負荷されるわけではない。

選択肢決定プロセスの交通量配分問題への導入は、情報提供による需要の分散などの施策を評価する上で本質的な問題であり、選択肢生成の現実的なプロセスモデルの必要性は高い。

参考文献

1) Burrell, J.E.(1968) Multiple route assignment and its application to capacity restraint. In Leutzbach, W. and Baron, P.(eds) 4th ISTTT, Karlsruhe, 1968.

2) Hato, E. and Beckor, S. Adavenced route choice model for MITSIM, MIT Research Seminaor, 2000.

3) McFadden, D.(1978) Modelling the choice of residential location. In Karlqvist, A. et al(Eds) Spatial Interlocation Theory and Residential Location, pp.75-96. North-Holland (Amsterdam).

4) Luce, R.(1959) Individual Choice Behavior: A Theoretical Analysis. John Wiley (New York)

5) Wardrop, J. G. (1952) Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings of the Institution of Civil Engineers 2, 1, pp325-378.

6) Thurstone, L.(1927) A law of comparative judgement, Psycholgical Review, 34, pp.273-286

7) 兵藤哲朗・室町泰徳(2000). 個人選択行動モデルの最近の開発動向に関する研究のレビュー, 土木計画学研究・公園集, 23(2), pp.275-278

8) Daganzo,C(1979) Multinomial Probit: The theory and its Application to Demand Forecasting. Academic Press (New York)

9) Hearn, D.W., S.Lawphongpanich . and J.A. Ventura (1987); Restricted Simplicial Decomposition : Computation and Extensions. Mathematical Programming Study, 31, pp.99-118.

10) Schlomo Bekhor and Joseph N.Prashker(1999) ; FORMULATIONS OF EXTENDED LOGIT STOCHASTIC USER EQUILIBRIUM ASSIGNMENTS. Transportation and Traffic Theory, Ceder, A. (ed.), PergamonPress,pp.351-372.

11)Hato, E. and Asakura, Y. (2000) Incorporating Bounded Rationality Concept into Route Choice Model for Transport Network Analysis. European Transport Conference 2000 in Cambridge, Behavioural Modelling, Vol.441, pp.1-12..

12)Batley, R. and Fowkes, T., Watling, D., Whelan, G., Daly, A. and Hato, E. (2001) Models for analysing route choice, Transportation Research B.(in Submitting)

13)Damberg, O., Lundgren, J. T. and Patriksson, M. (1996) An algorithm for the sthochastic user equilibrium problem, Transportation Research, Vol.30B, No.2, pp.115-131.