

EBA を組み込んだ確率的利用者均衡問題の計算法*

An Algorithm for Stochastic User Equilibrium Combined with EBA(Elimination by Aspects)

大草裕二郎**, 朝倉康夫***

by Yujiro Ookusa and Yasuo Asakura

1. はじめに

交通量配分を中心とするネットワークフロー分析ではリンク単位の分析に主眼が置かれる。実際的な交通ネットワークでは経路の個数は膨大であり、その列挙は難しいことと、通常の道路網計画のための交通需要予測では、リンク交通量が重要なことが多いためである。しかし、リンク単位の分析では経路固有の属性、たとえば経路中の右左折数や距離に比例しない料金体系等、リンクコストでは表現できない経路固有の属性を考慮することは不可能である。これら属性を取り扱う際は経路単位での分析が必要である。

そこで本研究では、経路交通量を未知変数として確率的利用者均衡モデルを解く際、経路に固有の属性をも考慮できる計算法を示し、かつそれが負のコストを持つような場合に対しても適用可能であることを示す。適用例として、観光周遊の例を示す。

2. 計算アルゴリズム

2.1 Simplicial Decomposition 法

時間コストに加えて、経路に固有の属性を考慮する場合について、経路交通量を未知変数とする解法の中でも代表的な Simplicial Decomposition 法を応用する。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フェイズより構成されている。図1に Simplicial Decomposition 法のフローチャートを示す。

限定親フェイズは、限定された経路集合に対する経路交通量を用いて元の問題を表現し、その経路交通量を最適化する問題である。経路交通量及び補助経路交通量は経路コストを説明変数とし、OD 交通量をロジット型配分することにより求める。

経路生成フェイズでは、限定親問題の解である経

路交通量をネットワークに負荷したときのリンクコストを求め、それに対する OD 間の最短経路探索を行う。求めた経路が既に生成された経路集合に含まれていなければ、それまでの経路集合に追加する。経路集合に新たに加える経路がなくなれば経路生成フェイズを終了する。

最短経路探索を用いる従来のアルゴリズムでは、時間コスト以外に考慮すべき経路固有の属性がある場合に対応できない。そこで、本研究では k 番目最短経路を列挙するアルゴリズムである Screening 法と要因により選別を行う EBA(Elimination by Aspects)の概念を経路生成フェイズに組み込む。そして各 OD 間において、条件を満たす経路の中でコストが最短である経路の探索を行う。

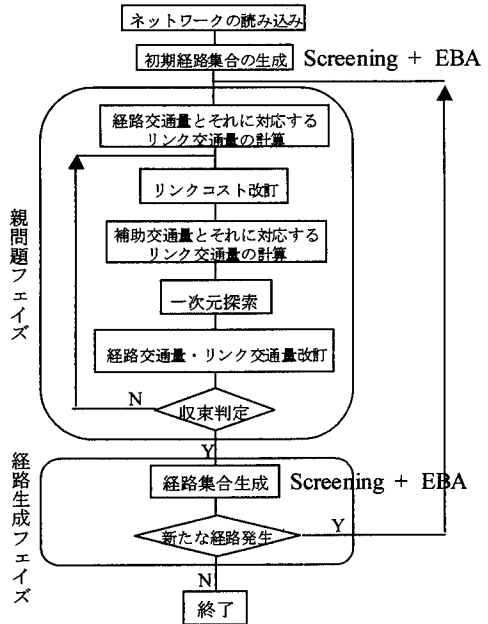


図1. Simplicial Decomposition 法のフローチャート

2.2 経路生成フェイズ

従来の Simplicial Decomposition 法と異なるのは経

*Keywords: 交通ネットワーク, 確率的利用者均衡

**学生員 愛媛大学大学院博士前期課程土木海洋工学専攻

(〒790-8577 松山市文京町, TEL.089-927-9829 ,FAX.089-927-9843)

***正会員 工博 愛媛大学工学部環境建設工学科

路生成フェイズである。ここでは EBA について記し、経路生成フェイズにおける詳細なアルゴリズムを示す。

本研究で用いる EBA とは、選択肢集合は与件とせず、Screening 法で 1 本経路を抽出するごとに、経路固有の属性に関する条件を満足するものを経路集合に追加する方法である。Screening 法と EBA を組み合わせることで、あらかじめ与えた制約を満足する経路のみを順次選択肢集合に加え、集合の拡張を行うことが可能である。ここでいう選択肢集合とは、2.2 で示した経路集合のことである。

【Step1】 $k=1$

【Step2】 Screening 法により、 k 番目時間最短経路の抽出

【Step3】 経路固有の属性 1 に関する制約の判定。

制約を満足しないなら、 $k=k+1$ として

【Step2】へ。

【Step4】 経路集合に加えて経路生成フェイズを終了する。

上記のアルゴリズムでは、時間コストと加法性が成立する必要のない経路固有の属性をひとつとしたが、複数の場合にも対応可能である。各属性の制約を満足するかどうかの判定を【Step3】の後に行えばよい。

Simplicial Decomposition 法は、配分対象となる経路を限定する。すなわち、経路集合に含まれる経路に対してのみ交通が負荷されるという限定的配分パターンである。

3. 観光交通への適用

上記アルゴリズムは、必ずしも時間コストと加法性が成立するとは限らない経路固有の属性を考慮して経路を生成し、交通量を配分するものである。上記アルゴリズムの応用により、時間コストと加法性が成立する属性や負のコストを持つ属性を含む場合でも、適用可能であることを以下に示す。負のコストを含む交通行動として、ある目的地を訪れることによりプラスの効用が得られる行動が考えられる。

これには、観光や娯楽、レクリエーション等の休日交通が該当する。本稿では、負のコストを含む行動として、観光交通を例に説明する。このとき、観光スポットを訪問することにより得られる効用を観光

効用と定義する。

3.1 本研究で設定するいくつかの仮定

観光交通に利用者均衡モデルを適用するため、本研究では新たに 2 つの仮定を設定した。従来、利用者均衡モデルは時間コストをもとに経路やリンクの配分交通量等を求めている。しかし、観光交通は、時間コストと観光効用のバランスによって成り立つものであるから、観光交通への適用の際は時間コストと観光効用の双方を考慮しなければならない。

そこで本研究では、仮定 1 として「時間コストと観光効用は加法性が成り立つ」ことにする。この属性を適当なパラメータ ω によって結合したコストを合成コストと定義する。

$$D_k^{rs} = C_k^{rs} + \omega B_k^{rs} \quad (\omega < 0) \quad (1)$$

D_k^{rs} : ODペア rs 間 k 番目経路の合成コスト

C_k^{rs} : ODペア rs 間 k 番目経路の時間コスト

B_k^{rs} : ODペア rs 間 k 番目経路の観光効用

ここでいう OD ペアとは、トリップの起終点ペアではなく、ツアー（途中で複数の観光スポットへ立ち寄り）の起終点ペアである。経路とは、ツアールートである。

また観光周遊経路として、利用される経路と利用されない経路について、「利用される経路の合成コストは皆等しく、利用されない経路の合成コストよりも小さいかせいぜい等しい。」と仮定する（仮定 2）。これは、Wardrop の第 1 原則に基づくものであり、確率的配分では利用される経路の合成コストは皆等しいというわけではない。

3.2 観光交通に対応した需要固定型確率的利用者均衡モデル

時間コストのみを対象とする場合の需要固定型確率的利用者均衡モデルを観光交通へ拡張する。それは、従来のモデルの時間コスト項の部分を合成コストに置き換えればよい。以下に、観光交通に対応した需要固定型確率的利用者均衡モデルと等価な数理最適化問題を示す。

$$\min . Z(f) = \sum_j \int_0^{q_j} t_j(w) dw + \omega \sum_j \int_0^{q_j} A_j dw + \frac{1}{\theta} \sum_{rs} \sum_k f_k^{rs} \ln \frac{f_k^{rs}}{q_{rs}} \quad (2)$$

subject to

$$x_{ij} = \sum_{rs} \sum_k f_k^{rs} \delta_{ij,k}^{rs} \quad \forall (i, j) \in A \quad (3)$$

$$q_{rs} = \sum_k f_k^{rs} \quad \forall (r, s) \in W \quad (4)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k \in K_{rs}, \quad \forall (r, s) \in W \quad (5)$$

$t_{ij}(w)$: リンク ij のリンクコスト関数

A_{ij} : 観光スポット ij の魅力度 (定数)

q_{rs} : ODペア rs 間の交通量

x_{ij} : リンク ij の交通量

f_k^{rs} : ODペア rs 間 k 番目経路の交通量

$\delta_{ij,k}^{rs} = 1$: ODペア rs 間 k 番目経路がリンク ij を含むとき
 $= 0$: 含まないとき

1つの観光スポットは1本のリンクとしてネットワーク化されていると考える。このモデルでは、道路ネットワーク上の混雑が観光周遊経路の形成に影響を及ぼすことになる。目的関数(2)の第2項で観光効用を考慮する。

3.3 観光交通に対応した Simplicial Decomposition 法

観光交通に対応した利用者均衡モデルを解く際にも、2. で示した計算アルゴリズムは有効である。しかし前述のように、観光周遊経路は時間コストと観光効用によって決まることを考慮して、計算する必要がある。

つまり、限定親フェイズでは、時間コストではなく合成コストを用いて経路交通量を最適化する。

経路生成フェイズでは、時間制約(C_{max})と、観光効用制約(B_{min})の両方を満足する経路の中で、合成コストが最小の経路を抽出し、それが既存の経路集合に含まれていないなら、経路集合に加える。制約を満足するとは、 $C_k^r \leq C_{max}$ かつ $B_k^r \geq B_{min}$ のことである。時間制約の判定は、限定親フェイズ終了後のネットワーク状態で経路を生成する際に行う。よって、経路集合に含まれた経路に対して交通量を配分したときの経路コストが、時間制約を超えることが生じないとは言えない。

4. 計算例

奈良県北部地域のネットワーク(図2)に対して、観光交通に対応した計算アルゴリズムを適用する。東大阪方面から第二阪奈経由で奈良県北部地域に入

り、いくつかの観光スポットを周遊後、西名阪を経由して松原方面へ向かう場合を想定する。このとき、時間コストや効用のEBA条件の変化、及び効用の重み付けパラメータ ω の変化により、経路集合に含まれる経路が変化することを示す。

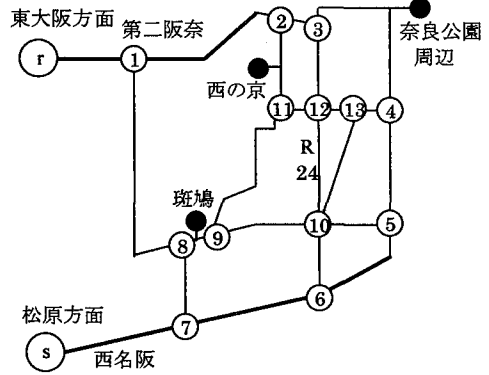


図2. 奈良県北部地域ネットワーク

4.1 前提条件

観光スポットは、奈良公園周辺、西の京、斑鳩の3ヶ所を設定する。表1に各観光スポットの魅力度と滞在時間を示す。これらは交通量によらず一定とする。

表1. 各観光スポットの魅力度と滞在時間

観光スポット	魅力度	滞在時間
奈良公園周辺	45.0	0.012
西の京	30.0	0.007
斑鳩	35.0	0.010

他のリンクについては、容量を5000台とし、コストは以下のBPR型関数を適用する。

$$t_a(x_a) = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha (x_a / C_a)^\beta \right\} \quad (6)$$

$\alpha = 1.0$, $\beta = 3.0$ とする。OD交通量 q_{rs} は6000台とする。経路選択パラメータは $\theta = 0.1$ とする。

各ノード間の距離は実際のものであるが、各リンクの容量や観光スポットでの滞在時間、魅力度については、任意に定めたものである。

4.2 計算結果(観光効用の重み付けによる違い)

EBA条件は、 $[C_{max} = 1.200, B_{min} = 30.0]$ とする。時間コスト、観光効用結合パラメータは $\omega = 0.1$, -0.001 の2パターンを用意する。

$\omega = 0.1$ のとき、効用の重み付けが大きくなるため、観光スポットを訪問することを重視する行動を表現することになる。よって、効用の高い経路、す

なわち魅力度の高い観光スポットやいくつもの観光スポットを訪問する経路が、経路集合に含まれることが予想される。

$\omega=0.001$ のときは、効用の重み付けが低く、観光スポットを訪問することによる効用は、ほとんど考慮されない。すなわち、観光行動よりも移動時間を重視する行動を表現するものと言える。

表 2. $\omega=0.1$ のとき経路集合に含まれる経路、及び経路交通量とコスト等

経路	通過ノード			
経路1	r, 1, 2, 3, 奈良公園, 3, 12, 11, 西の京, 11, 9, 斑鳩, 8, 7, s			
経路2	r, 1, 8, 斑鳩, 8, 7, s			
経路3	r, 1, 2, 3, 奈良公園, 4, 5, 6, 7, s			
経路4	r, 1, 2, 西の京, 11, 9, 斑鳩, 8, 7, s			

経路	f_k^{rs}	C_k^{rs}	B_k^{rs}	D_k^{rs}
経路1	2196.9	1.738	110.0	-9.262
経路2	1131.9	0.872	35.0	-2.628
経路3	1202.6	1.256	45.0	-3.244
経路4	1468.6	1.280	65.0	-5.220

表 3. $\omega=0.001$ のとき経路集合に含まれる経路、及び経路交通量とコスト等

経路	通過ノード			
経路1	r, 1, 8, 斑鳩, 8, 7, s			
経路2	r, 1, 2, 西の京, 11, 12, 10, 6, 7, s			

経路	f_k^{rs}	C_k^{rs}	B_k^{rs}	D_k^{rs}
経路1	3009.5	0.869	35.0	0.833
経路2	2990.5	0.934	30.0	0.904

$\omega=0.001$ のとき、2本の経路が生成されたが、ともに起終点間の最短経路に近い観光スポット1ヶ所しか訪問していない。

$\omega=0.1$ のとき、経路1は全ての観光スポットを訪問し、経路4も2ヶ所の観光スポットを訪問している。経路2,3については、それぞれ1ヶ所のみの訪問となっているが、これは時間制約 $C_{max}=1.200$ のため、より多くの観光スポットを訪問したくても訪問できないという現象を表現している。4.3では時間制約を $C_{max}=1.500$ としたときの結果を示す。

4.3 計算結果(EBA条件による違い)

時間コスト、観光効用結合パラメータは $\omega=0.1$ とする。EBA条件は時間制約に着目して、 $[C_{max}=1.200, B_{min}=30.0]$ と $[C_{max}=1.500,$

$B_{min}=30.0]$ の2種類を設定する。

表 4. $\omega=0.1, C_{max}=1.500$ のとき経路集合に含まれる経路、及び経路交通量とコスト等

経路	通過ノード			
経路1	r, 1, 2, 3, 奈良公園, 3, 12, 11, 西の京, 11, 9, 斑鳩, 8, 7, s			
経路2	r, 1, 2, 西の京, 11, 12, 13, 4, 奈良公園, 4, 5, 6, 7, s			
経路3	r, 1, 2, 西の京, 2, 3, 奈良公園, 4, 5, 6, 7, s			
経路4	r, 1, 2, 西の京, 2, 3, 奈良公園, 3, 12, 10, 6, 7,			
経路5	r, 1, 2, 3, 奈良公園, 3, 2, 西の京, 11, 12, 10, 6, 7, s			
経路6	r, 1, 2, 西の京, 11, 9, 斑鳩, 8, 7, s			

経路	f_k^{rs}	C_k^{rs}	B_k^{rs}	D_k^{rs}
経路1	1320.6	1.712	110.0	-9.288
経路2	951.2	1.493	75.0	-6.007
経路3	954.6	1.453	75.0	-6.047
経路4	948.7	1.514	75.0	-5.986
経路5	951.2	1.484	75.0	-6.012
経路6	873.6	1.360	65.0	-5.140

$C_{max}=1.200$ のときの結果(表2)と比較すると、 $C_{max}=1.500$ のときのほうが集合に含まれる経路数は多く、全ての経路が2ヶ所以上の観光スポットを訪問している。 $\omega=0.1$ で観光効用の重みが高いこと、また時間制約が緩められたことにより、表4に示す観光効用の高い6本の経路が経路集合に含まれることになったと思われる。

5. おわりに

本研究で述べた計算アルゴリズムの特徴は、経路生成フェイズに Screening 法と EBA を組み込んだことである。これにより、右左折数のような時間コストと必ずしも加法性が成立するとは限らない経路固有の属性や観光効用のような負のコストを持つ属性を考慮して、計算を行うことを可能とした。観光交通の事例を示したが、通勤、業務等の交通パターンに対しても有効であると考えられる。

【参考文献】

土木学会(1998) 交通ネットワークの均衡分析—最新の理論と解法—

大草裕二郎・朝倉康夫・羽藤英二(1999)

Screening 法による観光周遊ルート集合の抽出。

土木計画学研究・論文集, No22, pp397-400.