

確率的利用者均衡配分を用いた整備効果の計測に関する実証研究*

A Study on Evaluation of Road Investment by Stochastic User Equilibrium Assignment Model*

吉田禎雄**, 原田昇***

By Yoshio YOSHIDA**・Noboru HARATA***

1. はじめに

利用者均衡配分 (UE) の利用が実務で本格化してきた。しかし、UE は、実際の道路利用者が情報を完全に把握しているとの強い仮定を持つ。一方、確率的利用者均衡配分は、利用者が持っている不完全な情報による経路選択行動のばらつきを考慮できる上に、経路交通量が一意に求められるという特徴がある。

また、実務では配分結果を得ると同時に道路関連プロジェクトの投資効果を計測する要請が高く、我が国では、効果計測の容易性から時間短縮効果、走行費用減少効果といった直接便益を計測することが多い¹⁾。中でも時間短縮効果は総便益額に占める割合が高く重要な評価指標となっている。確率的利用者均衡配分を用いた道路整備効果の計測事例では、配分モデルとの整合性の面から期待最小コスト²⁾による利用者便益の算定を実施しているものが多くなっている。しかし、整備効果を期待最小コストによって評価しようとした場合、予想されるような整備効果が得られないといった便益計測上の問題が実務で多く発生している。

そこで、本研究では道路の整備効果のうち時間短縮便益を取り上げ、確率的利用者均衡配分を用いた利用者便益の算定における期待最小コストの挙動を実際のネットワークにより示し、便益計測上の問題点を明らかにした。さらに、期待最小コストについて、不安定となる問題の原因を演算アルゴリズム別に検討し、より安定した便益計測を可能とする課題を提示した。なお、検討に用いた確率的利用者均衡配分の解法は、実務で多く用いられている確率配分にDial法²⁾を用いた部分線形化法³⁾(以後「Dial法」と記す)とSimplicial Decomposition法(以後「SD法」と記す)⁴⁾の2種類である。

*キーワード：整備効果計測法，配分交通，経路選択

**正員，株式会社インテルテック研究所

(〒169-0075 東京都新宿区高田馬場 2-14-6
TEL：03-3203-9241，FAX：03-3203-9246
E-mail：yoshida@intel-tech.co.jp)

***正員，工博 東京大学大学院新領域創成科学研究科
環境学専攻

2. 利用者便益

(1) 消費者余剰と利用者便益

整備効果として計測される便益は、道路の利用者が負担する時間的、金銭的な全ての費用(一般化費用)が軽減されることから生じるものと定義できる¹⁾。そのため、便益は道路利用者が整備前に負担している一般化費用から整備後に負担する額の差分の総和(消費者余剰)として推計される(図-1の $P_{without} - P_{with} - A - B$ の面積)。なお、一般的にはODペア毎に一般化費用を算定する必要がある。

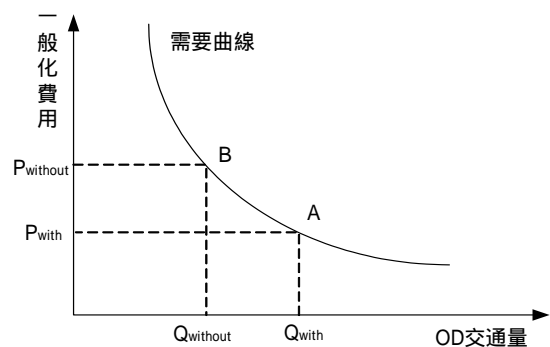


図-1 消費者余剰の概念図

(2) 一般化費用

ロジット型の確率的利用者均衡配分で算定できるODペア毎の一般化費用の指標は、最小コスト、期待最小コスト及び平均コストの3種類が考えられる。

(a) 最小コスト

最小コストは、配分終了時におけるODペア間の最短経路上のコストとして求められるものである。利用者均衡配分(UE)の場合、「利用される経路の一般化費用は全て等しく、利用されない経路の所要時間よりも短い」ため最小コストを用いることで配分モデルと整合の取れた評価指標として利用者便益の算定が利用可能である。しかし、確率的利用者均衡配分(SUE)の場合では最小コストは単に選択された経路の中で一般化費用が最小であるというだけであり、様々な経路を選択する利用者を統一的に示す指標とは成り得ない。

(b) 平均コスト

平均コストは、利用された経路に沿った一般化費用を経路交通量で加重平均したものととして次式で定義する。

$$P_{rs} = \frac{\sum_k f_k^{rs} \cdot c_k^{rs}}{Q_{rs}} \quad (1)$$

この平均コストは、経路を明示的に扱う SD 法においては選択された全経路について式(1)をそのまま適用することで簡単に求められる。

経路が明示されていないロジック型確率配分の Dial 法では部分線形化法で用いる発ノード別交通量を用いて算定する必要がある。すなわち、線形近似に際し、目的関数の経路交通量で表現されたエントロピー項は発ノード別リンク交通量で表現でき、発ノード別・着ノード別リンク交通量 x_{IJ}^{rs} を算定しておけば、次式で平均コストを算定できる。

$$P_{rs} = \frac{\sum_k f_k^{rs} \cdot c_k^{rs}}{Q_{rs}} = \frac{\sum_{IJ} x_{IJ}^{rs} \cdot t_{IJ}(x_{IJ})}{Q_{rs}} \quad (2)$$

また、需要固定型の配分モデルの場合、経路交通量とリンク交通量の関係から、平均コストを用いた総走行台時の値は、リンク毎に旅行時間を求めこれにリンク交通量を乗じて全リンクの総和を求めた場合と同一となる。

平均コストは、確率的利用者均衡配分 (SUE) で得られる OD ペア-の全ての経路について経路交通量で加重平均したものであるため、最小コストを用いた場合よりも大きなコストとして算定される。

(c) 期待最小コスト

期待最小コストは、確率的配分モデルと整合の取れた利用者便益の算定に用いることができる指標であり、ログサム関数として知られる次式で求められる。

$$S_{rs}(c^{rs}) = -\frac{1}{\theta} \ln \sum_k \exp(-\theta c_k^{rs}) \quad (3)$$

ここで、 θ は分散パラメータ、 c_k^{rs} は OD ペア- rs 間の経路 k 経路上のリンクコストの和である。

SD 法による配分では、列生成フェイズにおいて経路を明示的に追加することを繰り返して収束計算を実行しているため、得られた経路集合に含まれる全ての経路に対し、経路コストが求められる。そのため、式(3)を用いて直接的に期待最小コストを算定できる。

一方、Dial 法による部分線形化法における期待最小コスト S_{rs} の算定は、収束計算が終了した時点で次式で求められる。

$$S_{rs} = -\frac{1}{\theta} \ln \left\{ \sum_{m \in M_s} W[m \rightarrow s] \right\} + c_{rs} \quad (4)$$

ここで、 θ は分散係数、 M_s は集中心 s に流入するリンクの始点集合、 c_{rs} はゾーン rs 間の最小費用、 $W[\]$ は Dial 法によるノードウェイトである。ただし、収束の最終回で期待最小コストが求められるのは経路集合が収束過程で変化しないとの仮定の上になり立つものであることに注意する必要がある。

3. 整備効果の算定事例

実ネットワークを用いて行った整備効果の算定事例を示す。検討対象ネットは、沖縄本島の幹線道路網で約 850 リンク、114 ゾーンのものである。また、道路整備として幹線道路に延長 0.8km~10.3km の整備を行った 4 ケースを設定し、総走行台時の減少量を整備効果と考えた。結果は、図-2~4 に示すとおりである。

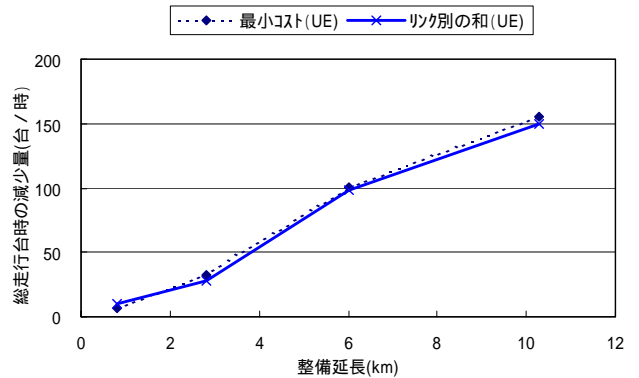


図-2 整備延長別整備効果 (UE)

UE の場合、集計誤差による相違はあるが、リンク別の総和と最小コストを用いた場合とでは同じ値となっている。

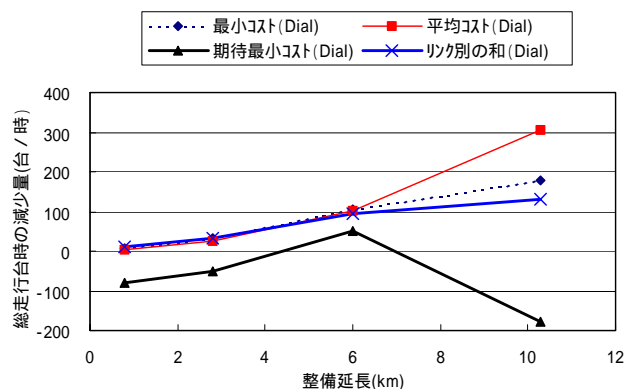


図-3 整備延長別整備効果 (Dial 法)

Dial 法の場合、期待最小コストは他の指標に比べ大きく異なる結果を示している。特に整備延長 6km のケースを除き、全てマイナス値となっている。また他の指標では、整備延長 10km の場合に大きく異なっているが、整備延長 6km 以下では概ね同じ整備効果が得られており、

整備延長 10km の場合には期待最小コストに重要な問題が含まれていると考えられる。

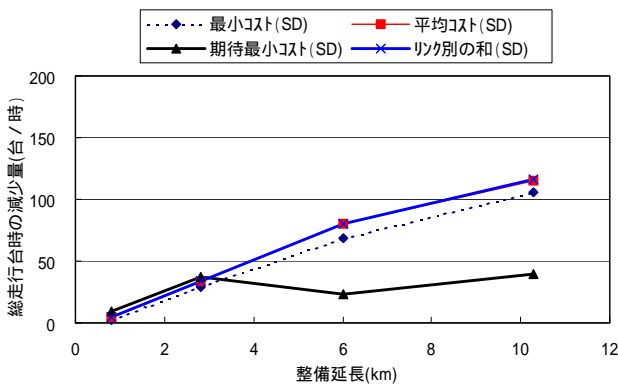


図-4 整備延長別整備効果 (SD 法)

SD 法ではリンク別の総和と平均コストがほぼ同じ値であり、最小コストではこれより全体的に少ない効果を示している。しかし、期待最小コストについては整備延長 2.8km 以上では整備延長に関係なく小さな値となっているとともに、他の指標と大きな差が生じている。

前節では、固定需要の場合には従来から行われているリンク別の総和を求める方法が、UE の場合は OD ペア一別の最小コスト、SUE の場合は平均コストがそれぞれ理論的に等しくなることを示した。リンク別の総和を用いた場合、整備距離にほぼ比例した便益が得られており、確率的利用者均衡配分 (SUE) による便益の近似値として用いることが可能と思われる。しかし、SUE を Dial 法で解く場合には、平均コストも期待最小コストと同様に不安定となる問題がある。

一方、期待最小コストを用いた便益計算では、Dial 法も SD 法も安定した便益が得られていないという問題がある。

なお、均衡配分における Braess のパラドクス⁶⁾⁷⁾、あるいは羽藤・村上の示す整備容量によるパラドクス⁸⁾の影響については検討していないが、配分アルゴリズムの影響が大きいのではないかとと思われる。

4. 期待最小コストの再検討

期待最小コストは理論的には利用者便益の評価に利用できるが、評価結果があまりにも不安定である。そこで、算定される期待最小コストの問題点を実証的に検討する。

(1) Dial 法による検討

整備効果の算定事例と同様の沖縄本島のネットワークを用いて事例示す。対象ネットワークにおいて、ゾーン間距離が大中小のゾーンペア A, B, C について収束回毎の期待最小コストの変化を示したものが図-5 である。この配分では、OD 交通量は対称行列としたものを用い

ているため、理論的には OD の方向に関わらず期待最小コストは同じ値となるべきものである。実際、小規模なネットワークを用いた検討では、対称ネットの場合は上下方向とも同じ期待最小コストが得られるが、非対称ネット、あるいは一部に料金抵抗を課した場合などは上下方向で異なる期待最小コストが得られる。また、期待最小コストの差は、分散係数が小さくなる (認知誤差が大きくなる) に従って大きくなっている。

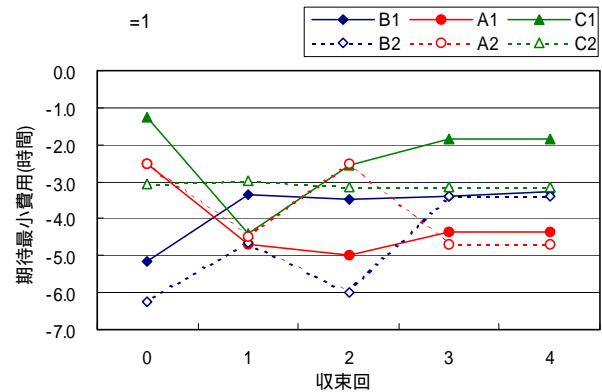


図-5 期待最小コストの変化 (沖縄ネット)

つづいて、全ての OD ペア一について、同一 OD ペア一毎に方向別に算定された期待最小コストの差を求め、これを上下方向の平均期待最小コストで除した誤差率を求めると、図-6 に示すとおりとなる。これによると、距離が 10 km 程度を中心に全距離帯にわたって誤差が発生している。また、期待最小コストのみならず理論的に対称であるべき最小コストにも方向による誤差が発生している。最小コストに差がでるのは、確率配分による配分交通量が方向によって異なるため上下方向のリンクコストが異なることから最短経路が異なってくるためと考えられる。さらに、距離帯が 10 km 程度で最も大きな誤差率となっているのは、距離が短い OD ペア一では選択できる経路が少なく、距離が長い時には選択された多くの経路に比べ欠落する経路が相対的に少ないため、中間的な距離帯で誤差が大きくなったものと考えられる。

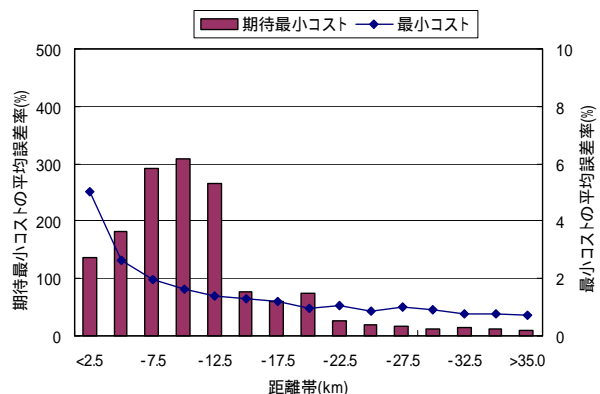


図-6 距離帯別期待最小コスト及び最小コストの誤差

Dial 法を用いた確率的利用者均衡配分では、期待最小コストがネットワーク及び OD 交通量のわずかな非対称性により大きく変化することが分かった。この原因として、Dial 法ではノード i から j に進むとき、起点からの最短経路で考えて後戻りするようなリンク $i \rightarrow j$ のリンク尤度は 0 となる。そのため、最短経路とならない経路が無視される（経路として処理されない）という問題が発生する。また、Dial 法による確率配分では、その収束計算回毎に異なる経路集合が得られる可能性が非常に高く、各回の経路集合の影響が最終回の交通パターンから得られる期待最小コストに反映されていない。

なお、これらの問題に対処するため、Leurent⁹⁾ は経路集合を初期状態で作成し、以後この経路集合に配分するという Dial 法を改良した配分方法を提案している。この方法を用いた場合、経路集合が初期値で決まっているため期待最小コストが計算過程で振動することは避けられるが、初期の準備作業で経路に加えられなかった「明らかに経路となり得る」経路については、最後まで採用されることはない。ただし、例えば往復で選択された経路（リンク）を合成して利用可能経路集合を規定した後、Leurent と同様の方法で計算することで経路の欠落と振動をある程度防止できると考えられるが、その有効性については今後の課題である。

(2) SD 法による検討

SD 法でも列生成フェイズにおいて経路を追加する際、追加経路として最短経路を対象とする場合にはあり得る経路が無視されてしまうのは Dial 法と同様である。しかし、SD 法では経路集合は増加するだけで減少しないため、振動は発生しない。

SD 法による期待最小コストが不安定となる原因を見るため、整備延長 10km の場合について、整備前後の OD ペア一別経路数を調べた結果が図-7 である。図-7 は、交通量のある OD ペア一について整備前後の経路数別 OD ペア一の割合を示したものであり、整備後は全体に得られる経路数が減少している。これは、道路整備により一般化費用が小さくなった整備道路を利用する経路を持つ OD ペア一では、整備前に比べ複数の経路が選定されにくくなったためである。また、期待最小コストは、幾つかの特徴的性質を持っているが、中でも「経路集合のサイズに関して単調減少関数」とであるという性質がある。そのため、最短経路により経路集合を増加させるという計算アルゴリズムでは、整備後に経路集合が小さくなり、期待最小コストが増加することで便益がマイナスとなる OD ペア一が出現する。このことが、便益計算において問題が発生する原因と考えられる。また、この影響は経路数が少ない場合に大きく、経路数が増加するに

従って経路数の差による影響は小さくなる。そのため、SD 法ではいかにして多くの経路を抽出するか、あるいは整備前後の経路集合の変化をいかに抑えるかが今後の課題となる。

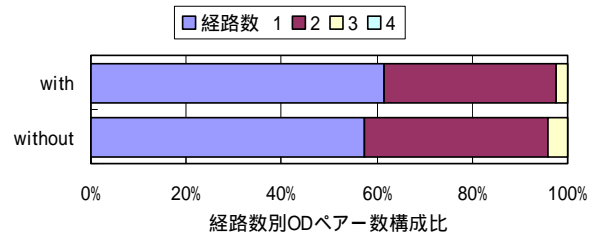


図-7 経路数別 OD ペア一数構成比

5. おわりに

確率的利用者均衡配分による整備効果の計測にあたって期待最小コストがモデルと整合が取れた指標として利用されるが、整備量に比べ大きく変動して不安定な状態になることが多いことを実証的に示した。また、その原因の 1 つとして解法にあることも示した。ここで示した期待最小コストの計測上の問題点については、固定需要のモデルのみならず需要変動型となる時間帯配分モデルや統合モデルにおいてもあてはまるものであり、これを実証的に確認したことの意義は大きい。

今後、需要変動型の統合モデルも多く利用されると考えられるが、そこに現れる期待最小コストをより安定した状態で算出できる計算方法を検討することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 道路投資の評価に関する指針検討委員会編：“道路投資の評価に関する指針案”，1998.
- 2) Dial: A Probabilistic Multipath Traffic Assignment Algorithm Which Obviates Path Enumeration, *Transportation Research* 5, pp.83-111, 1971.
- 3) 赤松隆, 土屋裕二, 河上善博: 確率的均衡配分のいくつかの計算アルゴリズムとその比較, 土木計画学研究・論文集 7, pp.89-96, 1990.
- 4) Damberg, J.T.Lundgren, M.Patricksson: An Algorithm for the Stochastic User Equilibrium Problem, *Transportation Research* 30, pp.115-131, 1996.
- 5) 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析, 1998.
- 6) Braess D.: Uber Ein paradoxon der Verkehrsplanung, *Unternehmensforschung* 12, pp.256-268, 1968.
- 7) Murchland J. D.: Braess's Paradox of Traffic Flow, *Transportation Research* 4, pp.391-394, 1970.
- 8) 羽藤英二, 村上公一: 道路容量のパラドクスに関する再考察, 土木計画学研究講演集 No.26, No.182, 2002.
- 9) Leurent F.: Curbing the Computational Difficulty of the Logit Equilibrium Assignment Model, *Transportation Research B*, Vol.31, No.4, pp.315-326, 1997