

確率的利用者均衡配分の集計アルゴリズム*

An Aggregation Algorithm for Stochastic User Equilibrium Assignment*

勝呂純一*、本多建**

By Junichi KATSURO, Ken HONDA **

1. はじめに

交通量推計の実務では、道路の利用交通量を推計し、さらにその利用交通の内訳を示すことが求められる。利用交通の内訳は、交通の質的な機能を評価する指標値であり、例えば、OD内訳、トリップ長分布、IC利用圏域などが用いられる。近年の道路網計画等の実務では、この交通の質による分析が重要となっている。

交通量配分は今日まで主に分割配分を用いてきたが、近年均衡配分を採用するための検討が進められている。均衡配分手法にも確率的利用者均衡配分は経路交通量に一意性がなく、交通の質を求めることはできない。一方、確率的利用者均衡配分は経路交通量が一意的であり、従って路線交通量も唯一解であり、交通の量と質を算出することができる。そこで、確率的利用者均衡配分で推計した交通流の集計が求められる。

分割配分や確定的均衡配分は、経路をノード・リンク列で表し、この経路を辿ることで交通量配分および集計が可能である。一方、確率的利用者均衡配分における交通流動の表現は、経路の分岐毎に確率的に交通を分配するため、実用規模のネットワークで経路を明示的に数え上げることはほとんど不可能であり、経路を陽に用いる集計方法は適用できない。すなわち、経路を用いない、全く別の集計アルゴリズムの開発が必要である。

本稿は、確率的利用者均衡配分に用いられるDialアルゴリズムで配分した結果の集計アルゴリズムを示す。また、実務規模のデータセットを用いて交通量推計と集計を行い、実務での利用の観点で、十分に実用的な時間内に実行できることを示す。

なお、実務においては、方向規制のあるネットワークを扱うのが普通であることから、本稿では最初にDialのアルゴリズムを方向規制のある場合に拡張し、そのネットワークにおける集計アルゴリズムを示す。

2. 進行方向規制を含むDialのアルゴリズム

交通量推計の実務においては、交差点での右左折禁止のように、進行方向規制のある道路網での交通量推計が行われる。そこで、確率的利用者均衡配分に用いられているDialのアルゴリズム¹⁾を方向規制のある場合に拡張する。なお、以下の記号表記は文献1に準じている。

連続する3ノードの進行可能・不可を記号 imj (ノード列 $i \rightarrow m \rightarrow j$ を通行可能のとき1、不可のとき0) を用いると、Dialのアルゴリズムのリンクウェイトを求める前進処理と交通量を配分する後退処理は次のようになる。着目ノードがセントロイドの場合には、そこにリンクがあるように扱えば1つの式で表現できる。

以下の確率的利用者均衡配分の集計アルゴリズムは、進行方向規制のある場合も含む形で示す。

【step0:準備】

(a) 起点 r から全てのノードへの最小交通費用 $c(m)$ を計算する。

$$c(m) \leftarrow c_{\min}(r \rightarrow m)$$

(b) 全リンクについて、リンク尤度 $L[i \rightarrow j]$ を計算する。

$$L[i \rightarrow j] = \begin{cases} \exp\{\theta\{c(j) - c(i) - t_{ij}\}\} & (c(i) < c(j)) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

【step1:前進処理】 起点 r から近い順に、リンク尤度 $L[i \rightarrow j]$ からリンクウェイト $W[m \rightarrow j]$ を計算する。

$$W[m \rightarrow j] = \begin{cases} L[m \rightarrow j] & (m = r) \\ L[m \rightarrow j] \sum_i W[i \rightarrow m] \cdot \delta_{imj} & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

【step2:後退処理】 起点 r から遠い順に、各ノード m に流入する交通量 x_{im} を計算する。

$$x_{im} = \sum_{j'} \left(x_{mj'} \times \frac{W[i \rightarrow m] \delta_{imj'}}{\sum_{i'} W[i' \rightarrow m] \delta_{i'mj'}} \right)$$

図 - 1 Dial のアルゴリズム (方向規制のある場合)

*キーワード：配分交通、均衡配分、集計

**正員、株式会社 長大 社会計画事業部

東京都北区東田端 2-1-3、

TEL：03-3894-3249

e-MAIL:katsuro-j@chodai.co.jp

honda-k@chodai.co.jp

3. 確率的利用者均衡配分の集計の基本的アルゴリズム

以下に示す後退配分と前進配分を単独に、あるいは組み合わせて用いることにより、確率的利用者均衡配分の

集計が可能である。

後退配分は、Dialのアルゴリズムを特定の交通に限定して適用する配分である。方向規制がない場合の前進配分は、先行して行った後退配分をパターンとして用いるだけで可能であるが、方向規制がある場合には、さらにリンクウエイトを用いて逐次的に逆算する配分である。

4. ではこれらを用いた具体的アルゴリズムを示す。

(1) 後退配分

確率的利用者均衡配分の集計アルゴリズムには、Dialのアルゴリズムの次の性質を用いる。

a) 1 O Dの配分

Dialのアルゴリズムは、1つの起点から複数の終点への交通量配分を一度に行うことが出来る。これにより、効率のよい方法であるが、1 O Dだけの配分を繰返し行うことも可能である。集計計算では、基本的方法の1つとしてこれを利用する。

b) リンクから始める配分

Dialのアルゴリズムは、特定のリンク(複数でもよい)のみに交通量を設定し、それ以降の配分処理を行うことも可能である。

a)b)を合わせて「後退配分」と定義する。

(2) 前進配分

後退配分の b) リンクから始める配分は、起点から着目するリンクまでの配分である。これに対し、前進配分は、着目リンクを利用する交通の終点までの配分である。

実際の交通の流れでは、ある区間を流れた交通が目的地に至る状況を集計するのは、当該区間を通過した車両を追跡すればよいので自然である。しかし、配分計算の経路は逆向きの終点から起点に向かう形で表現されている。Dial のアルゴリズムによる配分も終点側から起点に向かう順である。

配分計算で『ある区間を利用する交通』と表現した場合には、それに先立つ配分を行っている。この先行する配分を利用することで、「着目リンクから終点に至る経路」を求めることができる。着目する区間を利用する交通は先行して配分した交通の一部であり、従って先行する配分結果をパターンとして用いることができる。

前進配分のアルゴリズムは以下のように導ける。

リンク im とリンク mj の交通量を x_{im} 、 x_{mj} とする(パターンとする後退配分の交通量)。Dial のアルゴリズム(進行方向規制のある場合)から、ノード列 $i m j$ と流れる交通 x_{imj} は、次のように表せる。

$$x_{imj} = x_{mj} \times \frac{W[i \rightarrow m] \delta_{imj}}{\sum_i W[i' \rightarrow m] \delta_{i'mj}} \dots \text{(式-1)}$$

ノード i のさらに上流で、条件により交通を分けたとき(例えば、上流で分岐がありその一方の交通のみを集計するなど)、そのときのリンク im の交通量を X_{im} とすると、リンク im からリンク mj への交通量 X_{imj} は次のよ

うに表せる。交通量 X_{imj} を i について累計すればリンク mj の交通量 X_{mj} が求まる。

$$X_{imj} = X_{im} \times \frac{x_{imj}}{\sum_{j'} x_{imj'}} \dots \text{(式-2)}$$

$$= x_{mj} \times \frac{W[i \rightarrow m] \delta_{imj}}{\sum_{i'} W[i' \rightarrow m] \delta_{i'mj}} \times \frac{X_{im}}{x_{im}}$$

方向規制がない場合には、

$$x_{im} = \left(\sum_j x_{mj} \right) \times \frac{W[i \rightarrow m]}{\sum_{i'} W[i' \rightarrow m]} \dots \text{(式-3)}$$

の関係から、次のように簡略化できる。

$$X_{imj} = x_{mj} \times \frac{X_{im}}{\sum_{j'} x_{mj'}} \dots \text{(式-4)}$$

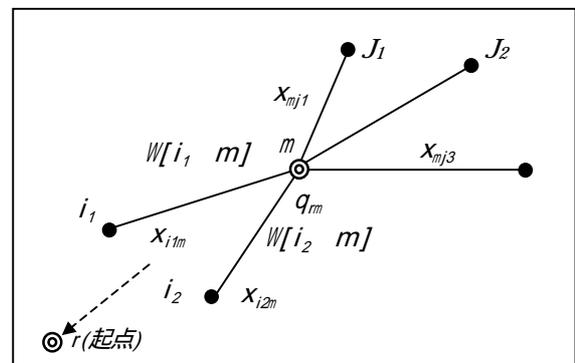


図 - 2 前進配分の定義式の記号

4. 確率的利用者均衡配分の集計アルゴリズム

確率的利用者均衡配分の集計方法について、簡単なものから順に示す。実務で通常用いている集計を想定し、かつ基本的な方法を示しているので、これらの応用でほとんどの集計は可能である。また、それぞれの箇所では、集計方法の特性を利用した高速化の方法についても述べる。

(1) ノードの方向別交通量

ノードの方向別交通量は、Dial アルゴリズムの Step2 の『下流側リンクの交通量を上流側リンクに分配する』部分の、ノード列【 $i m j$ 】の交通量 x_{imj} を集計して求める。

$$x_{imj} = x_{mj'} \times \frac{W[i \rightarrow m] \delta_{imj'}}{\sum_{i'} W[i' \rightarrow m] \delta_{i'mj'}} \dots \text{(式-5)}$$

ノードの方向別集計は、配分計算と同じように「OD表の一行を一括」して処理が出来るので、高速の集計が可能である。

(注：本稿では、「高速な集計」とは交通量を求める配分計算とほぼ同等の時間という意味で用いる。)

(2) リンクのOD内訳

リンクのOD内訳の集計は、分割配分や確定的な利用者均衡配分ではOD間の経路を辿るとき指定リンクを通る毎に交通量を累加して求めている。確率的利用者均衡配分のリンクのOD内訳集計では『1つのOD交通量のみを後退配分で配分し、このときの指定したリンクの交通量を集計する』方法で行う。

配分交通量を求める計算ではOD表の一行を一括して処理できるのに対し、リンクのOD内訳集計ではODペア毎に配分・集計するので、OD表の充填度合いに応じて計算時間が長くなる。ただし、リンクのOD内訳は、元とするゾーン区分のまま集計することはまれで、通常はゾーンを集約したゾーンブロック単位で求めることが多い。したがって、1ODペア毎に配分するのではなく、ゾーンブロック分をまとめて処理することで、大幅な高速化が可能である。

(注：「大幅な高速化」も相対的なものであり、「ODペア数回必要な手間を1/5～1/10程度に短縮できる」意味で用いている。)

(3) リンクのトリップ長分布

分割配分や確定的な利用者均衡配分では、リンクのトリップ長分布の集計はOD内訳と同様に集計できる。確率的利用者均衡配分では、道路網上に交通が分布するように流れるため、トリップ長について正確に集計することは、原理的に極めて困難である。そこで、全ての経路について最短経路のトリップ長を集計する近似計算が考えられる(最短経路の距離を集計に用いるので短い側への近似であり、通常的平均的な値という意味の近似ではない)。現実社会でも発達したネットワークの鉄道料金の計算では最短経路の距離で料金を設定しており、この考え方は全く不自然というわけではない。この仮定の下で、『1ODについて配分し、集計対象リンクについて、配分された交通量をトリップ長別に集計する』ことで、トリップ長分布の集計が出来る。なお、トリップ長分布の集計では、トリップ長ランク別に集約するので、同じトリップ長ランクのODペアをまとめて処理することで高速化が可能である。

1ODペアの交通を配分する。

の結果で、集計対象リンク(スクリーンを構成する複数のリンク)に流れる交通量を残し、他の全てのリンクの交通量を0に置き換える。

の状態から起点に向かって後退配分を行う。この後退処理の過程で他の集計対象リンクに達する場合は、交通量の累加を行わない。

後退処理が起点に達したとき、起点に集まる交通がスクリーンを少なくとも1回通過する交通量となる。

図-3 スクリーンのOD内訳、トリップ長分布の集計アルゴリズム

(4) スクリーンのOD内訳、トリップ長分布

河川断面を横断する交通のように、複数のリンクを通行する(1回以上利用する)交通のOD内訳、トリップ長分布の集計は、図-3に示す方法で行なう。

集計対象として指定する複数のリンクは、断面を構成するものばかりでなく、様々な形のリンク群を対象とすることが出来る。高速道路網全体を対象に集計すれば、高速道路利用交通のOD内訳、トリップ長分布を集計することが出来る。

(5) 特定のリンクを利用する交通の経路の集計

「特定のリンクを利用する交通が、その前後でどのような経路をたどるか」の集計は、当該リンクの影響範囲を見るうえで有用な集計である。例えば図-4のように、着目リンクを流れる交通の、起点からそのリンクまでの流動、そのリンクから終点までの経路を求める集計である。

この集計は、「着目リンクからの後退配分と、着目リンクからの前進配分を行い、両者を合わせる」ことで集計できる。

この集計も起点から全てのゾーンへの交通(OD表の1行分)の処理を同時に行うことが出来るので、高速の処理が可能である。

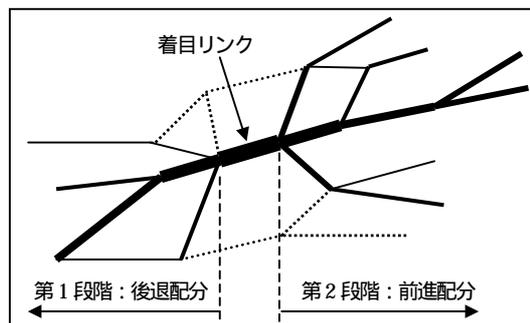


図-4 着目リンクの利用交通の経路交通量の集計
(交通量の大小を線の太さで表示した集計イメージ)

(6) 複数のリンクを利用する交通の経路の集計

実用場面の集計では、特定の路線(複数のリンク)を利用する交通の経路の集計が必要となる。例えば、高速道路のICの影響圏を求める集計などである。これは、前項の「特定のリンクを利用する交通の経路の集計」の拡張であり、前進配分と後退配分を応用して集計する。

1リンクの利用経路集計の場合には、前進配分と後退配分で求まるが、複数のリンクの利用経路の集計では、前進配分と後退配分の両方で重複して集計される交通が生じるので、この重複分を除く必要がある。図-5の場合には、の交通が着目リンクAの後退配分と着目リンクBの前進配分で集計される。すなわち、重複して集計される交通を求めれば(これを【着目リンク間の交通】とする)、複数のリンクを利用する交通は(式-6)のように表せる。

複数リンクの利用交通 = 【前進配分】 + 【後退配分】
 - 【着目リンク間の交通】 ... (式-6)

複数のリンクを利用する交通の経路の集計は、1 起点から全終点への後退配分の結果に対して、まず集計対象のリンクの交通量を固定して、後退配分、前進配分を行う。次に図 - 6 の方法で着目リンク間の交通の集計を行う。最後に式 - 6 により、複数のリンクを利用する交通の経路交通量を求める。

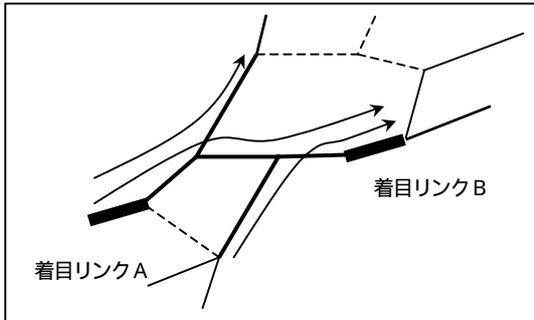


図 - 5 着目リンク間の交通

(この交通は前進配分と後退配分の両方で集計される。【着目リンク間の交通】は、その経路を求めるものであり、図 - 6 の手順が必要である。)

集計対象リンクから後退配分を行う。同時に、このときの途中に経由したリンクの交通量を記憶する(これをパターンに用いる)。
 このステップで他の集計対象リンク到達した交通だけを残し、他のリンク交通量を 0 にする。これにより集計対象リンク間の交通量が求まる(経路は定まっていない)。
 で求めた交通量について、このパターンによる前進配分を行う。この交通は必ず最初のリンクに戻ることが出来て、これが着目リンク間の経路交通である。

図 - 6 着目リンク間の交通の集計アルゴリズム

5. 集計に要する時間

確率的利用者均衡配分の集計のアルゴリズムが構成できたととしても、許容できる時間で計算できなければ実用性はない。そこで、ここで示したアルゴリズムのプログラムを作成し、所要時間を計測した(表 - 2)。計算時間は、対象とするネットワークの規模、ゾーン数、OD 表の充填度合いにより、また、実行するシステム環境によるのであくまでも参考値であるが、確率的利用者均衡配分の計算時間(繰返し 20 回で 6 分弱)との比較で、簡単な集計の場合には 2 ~ 3 倍、複雑なものでも 5 倍程度の時間(同 23 分)で処理できるので、十分に実用的である。

表 - 1 所要時間測定条件

項目	条件
ネットワーク	C 地域の道路網 28,270 リンク 9,629 ノード リンクは全て一方通行
OD 表	946 ゾーン 交通量のある OD ペア数は、 94,386 ペア
実行環境	OS: Windows XP CPU: Pentium4 2.8GHz メモリ: 1GB

6. まとめ

本稿では、確率的利用者均衡配分の集計について論じた。まとめると、以下のとおりである。

確率的利用者均衡配分の集計に必要な基本的なアルゴリズム「後退配分」と「前進配分」を示した。

後退配分を用いて、あるいは後退配分と前進配分を組み合わせることで、分割配分・確定的利用者均衡配分で通常行われている集計のほとんどが可能であることを示した。

実用規模のネットワークに対して確率的利用者均衡配分の集計を行い、十分に許容できる時間内で実行可能であることを示した。

参考文献

- 1) 土木学会：交通ネットワークの均衡分析、1998
- 2) 土木学会：道路交通需要予測の理論と運用、2003

表 - 2 所要時間

配分の種類	配分計算の所要時間	集計内容と所要時間
転換率併用分割配分 5 分割 パフォーマンス関数は QV 式	77 秒	ノードの方向別交通量：78 秒(10ノード) リンクの OD 内訳：78 秒(10リンク, 10ゾーン別リンクに集約) スクリーンの OD 内訳：78 秒(2リンクのスクリーンが 2 つ) リンクのトリップ長分布：78 秒(10リンク, トリップ長リンクは 14 段階) 複数リンクを利用する交通の経路の集計：82 秒(4リンクの利用交通) * 外部に経路表は作成せずに、配分計算と同時に集計計算を実行したときの所要時間
確率的利用者均衡配分 繰返し回数は 20 回 パフォーマンス関数は BPR 関数	340 秒	ノードの方向別交通量：530 秒(10ノード) リンクの OD 内訳：970 秒(10リンク, 10ゾーン別リンクに集約) スクリーンの OD 内訳：1408 秒(2リンクのスクリーンが 2 つ) リンクのトリップ長分布：1802 秒(10リンク, トリップ長リンクは 14 段階) 複数リンクを利用する交通の経路の集計：664 秒(4リンクの利用交通)