

旅行時間の不確実性を考慮に入れた準動的配分モデルの構築

Semi-dynamic assignment model considering uncertain travel time

小松良幸³, 中山晶一郎¹, 高山純一²

Yoshiyuki Komatsu, Shoichiro Nakayama, Jun-ichi Takayama

1. はじめに

通勤時等のピーク時における交通流は、短時間で大きな変動が生じている。そのため日単位レベルでの均衡配分モデルでは、ピーク時や夜間等の時間帯別に異なる交通流を厳密に把握することは困難である。そこで、従来から時間帯ごとに交通フローを把握する時間帯別交通量配分モデルの提案がされている^{1),2)}。さらに、ピーク時における交通の多くは通勤や業務目的トリップであり、到着時刻制約のある場合が多く、確実に時間内に到着することが求められる。つまり、日々変化する旅行時間のばらつきがどれほどであるのかを考慮に入れた行動を行っている可能性がある。したがって、時間帯別の旅行時間および交通量の変動を正確に表現することが重要であるといえる。

しかし、従来の時間帯別交通量配分モデルでは、OD修正法の適用に関するものが多く、各リンクでの交通量の変化や不確実性の表現がされているものが少ない^{3),4)}。さらに、これらの研究では、交通量の変動や不確実性を考慮に入れたものではない。また、目的地までの所要時間の取り扱いは、交通流が起点を出発した時間帯における旅行時間を用いたものが多く、実際に経験する旅行時間を取り扱ったものは少ない。

そこで、本研究では、旅行時間に関する不確実性を考慮に入れた実効旅行時間による準動的配分モデルの提案を行う。ここで、本研究で扱う実効旅行時間とは、「道路利用者が各リンクおよび目的地までの所要時間を期待値として捉えるのではなく、そのリンクおよび目的地までの所要時間の不確実性(ばらつき)も考慮に入れた旅行時間」である。そして、このモデルを単純ネットワークへ適用し、旅行時間の不確実性による期待交通量の変動や期待旅行時間の変化を比較する。これによって、旅行時間の不確実性を考慮することによる交通流の変化の把握および不確実性を考慮したことによるネットワークの信頼性の変化を把握することが可能となる。

2. 実効旅行時間を用いた準動的配分モデルの定式化

(1) 交通需要の変動と不確実性の表現

本研究では、リンク交通量を確率分布によって表現することを考える。目的地ノード n へ向かう任意のノード i からの集中交通量が潜在的に定まっていると仮定し、均衡状態において、各道路利用者は時間帯ごとに任意のノード i から目的地ノード n へ移動するために利用する経路(利用リンクの順番)を定めているものとする。そして、道路利用者がそのトリップを行う確率が正規分布に従うものとする。よって、目的地ノード n へ向かう各リンク交通量は、任意のリンクを利用する経路交通量の和として表現することができる。ここで、実際のネットワークでは、対象とするリンク交通量と対象リンクの周辺におけるリンク交通量との間には相関関係があるのだが、実際のネットワークへ適用やモデルの簡便化、計算量を削減するために「リンク交通量間で独立である」ことを仮定する。よって、各時間帯における目的地ノード n に関するリンク交通量は独立な正規分布に従うものとする。なお、この仮定より、時間帯間において発生する各リンクに関する残留交通量も独立な正規分布に従うことになる。従って、時間帯 t において目的地をノード n とするリンク ij 間を通過する交通量の確率変数 X_{ijnt} (以降、大文字で表される変数は確率変数を意味することとする)は、独立な正規分布 $N[E[X_{ijnt}], Var[X_{ijnt}]]$ に従うと仮定する。ここで、 $E[X_{ijnt}]$, $Var[X_{ijnt}]$ は目的地をノード n とするリンク ij 間の交通量の期待値および分散である。また、本研究では、交通量の不確実性の度合いの大きさを表現するために分散を用いている。したがって、本来ならば確率分布を仮定している各リンクの交通量について平均及び分散を与件とする必要がある。しかし、平均についてはこれまでの確定的な OD 交通量を用いることで算出することが可能であるが、その分散の値は分からないことがほとんどである。そこで、リンク交通量の期待値に比例して分散が決定されると仮定し、分散の算定を行う。よって、目的地をノード n とするリンク ij 間の交通量の分散を以下の式によって表現する。

$$Var[X_{ijnt}] = \eta E[X_{ijnt}] \quad (1)$$

ここで、 η は、正のパラメータである。

Key Words : 確率的 OD 交通量, 時間帯別均衡配分

1 正会員, 博(工), 金沢大学大学院自然科学研究科

〒920-1192 金沢市角間町

TEL : 076-234-4613, Fax : 076-234-4613

2 フェロー会員, 工博, 金沢大学大学院自然科学研究科

3 学生員, 金沢大学大学院自然科学研究科

(2) 旅行時間の変動と実効旅行時間の表現

本研究では、リンク旅行時間の不確実性を考慮に入れた実効旅行時間を用いているため、リンク旅行時間の期待値およびその変動を表現することが必要となる。ここで、各リンクに関する旅行時間の変動としては分散を用いている。また、各リンク旅行時間の分散を算定するためには、各リンク旅行時間の期待値が必要となる。そこで、リンク ij 間の旅行時間の期待値 $E[H_{ijt}]$ は、BPR 関数を用いて以下のように表現する。

$$E[H_{ijt}] = t_{ij0} (1 + \alpha E[X_{ijt}^\beta] / c_{ij}^\beta) \quad (2)$$

ここで、 t_{ij0} はリンク ij の自由旅行時間であり、 c_{ij} はリンク ij の交通容量である。式(2)の計算を行うためには、 $E[X_{ijt}^\beta]$ を計算しなければならない。そこで、 $E[X_{ijt}^\beta]$ を計算するために積率母関数を用いることになる。次に、リンク旅行時間の分散 $Var[H_{ijt}]$ は以下の式によって算定する。

$$Var[H_{ijt}] = E[H_{ijt}^2] - (E[H_{ijt}])^2 \quad (3)$$

式(2)、(3)を用いて各リンクにおける実効旅行時間 v_{ijt} を式(4)のように表現する。

$$v_{ijt} = E[H_{ijt}] + \gamma \cdot Var[H_{ijt}] \quad (4)$$

ここで、 γ は、リスク態度を表すパラメータである。なお、配分計算の際には、式(4)で表現されるリンク実効旅行時間の値を用いて計算を行っている。

(3) リスク均衡配分モデルの定式化

本研究では、リンク旅行時間の不確実性を考慮するモデルとして、リスク均衡配分モデルの定式化を考える。リスク均衡配分モデルとは、「目的地へ移動する最中に得られる目的地までの最小実効旅行時間(実最小実効旅行時間)に基づいて意思決定を行っていくことにより成立する交通流の状態」である。

a) 均衡条件の定式化

本研究において、道路利用者がノード i からノード n へ向かって移動する際、リンク ij を通過する条件は、図1に示すように、「ノード i から目的地 n までの実最小実効旅行時間 w_{int} が、リンク ij 間の実効旅行時間 v_{ijt} とノード j から目的地 n までの実最小実効旅行時間 μ_{jnt} の和と等しい」場合である。

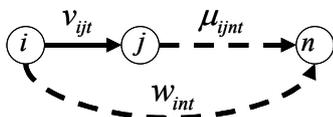


図1 均衡条件の概念図

なお、本研究で取り扱っている実最小実効旅行時間とは、「各車両が目的地へ到着するまでに実際に経験した最短の実効旅行時間」である。したがって本研究で扱っている実最小実効旅行時間とは、その時間帯におけるリンク実効旅行時間の和として得られる名目最小実効旅行時間(ダイクストラ法などによって算出される値)ではなく、図2に示すようにそれ以降の時間帯におけるリンク実効旅行時間の影響を考慮に入れた値となる。つまり、ダイクストラ法等の計算法を用いることによって実最小実効旅行時間は算定することが出来ない。よって、未知変数として計算をしなければならない。

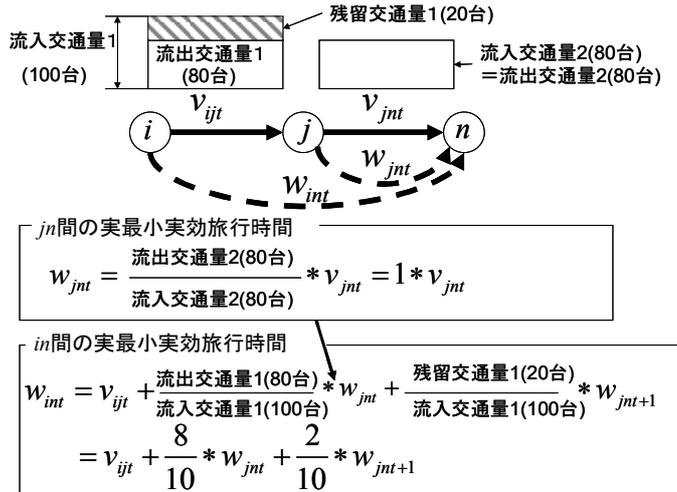


図2 実最小実効旅行時間の表現

また、図2で示したように任意のリンク末端ノードからの実最小実効旅行時間は、時間帯 t と次の時間帯 $t+1$ におけるリンク末端ノードから目的地までの実最小実効旅行時間を時間帯別にそのリンクを通過した交通量の比率によって内分した値で表現される。これは、本研究では、「時間帯 t にリンク ij へ流入した交通量は時間帯 t もしくは時間帯 $t+1$ でリンク ij を通過する」ことを仮定している。したがって、時間帯 t に関するノード j からノード n への実最小実効旅行時間のみではなく、次の時間帯 $t+1$ に関するノード j から目的地 n への実最小実効旅行時間の影響も考慮しなければならない。よって、リンク ij の終端ノード j から目的地 n までの実最小実効旅行時間は、 w_{jnt} 、 w_{jnt+1} を統一した形で以下のように表現する。

$$\mu_{jnt} = \frac{E[Z_{ijt}]}{E[X_{ijt}]} w_{int} + \left(1 - \frac{E[Z_{ijt}]}{E[X_{ijt}]} \right) w_{int+1} \quad (5)$$

ここで、 μ_{jnt} は時間帯 t におけるノード j から目的地ノード n までの実最小実効旅行時間であり、 λ は時間帯の幅、 $E[Z_{ijt}]$ は時間帯 t 内にリンク ij 間を通過するリンク交通量である。通過リンク交通量の期待値 $E[Z_{ijt}]$ は実際に時間帯 t においてリンク ij 間を通過した交通量であるので、式(4)で表現されるような実効旅行時間を用

いて算出されるのではなく、式(2)で表現される期待リンク旅行時間を用いた式によって算出されることになる。よって、式(6)のようになる。

$$E[Z_{ijt}] = E[X_{ijt}] \left(1 - \frac{E[H_{ijt}]}{\lambda} \right) \quad (6)$$

実最小実効旅行時間を用いた均衡条件の定式化を行うと以下の式となる。

$$\begin{aligned} v_{ijt} + \mu_{ijnt} &= w_{int} & \text{if } E[X_{ijnt}] > 0 \\ v_{ijt} + \mu_{ijnt} &\geq w_{int} & \text{if } E[X_{ijnt}] = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

b) フロー保存条件の定式化

配分を行うためには、フロー保存条件も成立しなければならない。フロー保存条件とは、「目的地ノード以外の任意のノードに関して流入交通量と流出交通量が等しくなる」ことである。本来であればフロー保存条件は常に成立しているのですが、確率変数による表記にしなければならないが、本研究で提案したモデルを実際のネットワークに適用する際に利用する OD 交通量は PT 調査で得られた値であり、これは、確定的な OD 交通量となる。つまり、OD 交通量の期待値である。したがって、確率変数を近似的に表現する期待値によって成立することを仮定する。また、本研究では、図3に示すように「時間帯内にリンク ij 間を通過できなかったリンク交通量(残留交通量)の期待値は、次の時間帯に残留し、その残留交通量の期待値は次の時間帯における着ノード j からの発生交通量の一部として扱う」ことを仮定する。

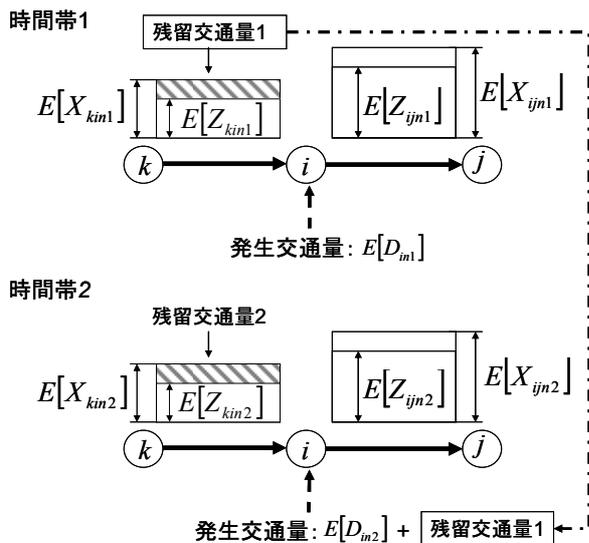


図3 発生交通量の表現

よって、ノード i に関する時間帯 t における目的地 n への発生交通量の期待値 $E[Q_{int}]$ は以下の式によって表現される。

$$E[Q_{int}] = E[D_{int}] + \sum_k (E[X_{kint-1}] - E[Z_{kint-1}]) \quad (8)$$

ここで、 $E[D_{int}]$ は、時間帯 t における OD ペア in 間の交通量の期待値である。式(8)を考慮してノード i に関するフロー保存条件を定式化すると下記の式で表現することができる。

$$\sum_k E[Z_{kint}] + E[Q_{int}] = \sum_j E[X_{ijnt}] \quad (9)$$

ここで、 k はノード i へ流入するノードを示し、 j はノード i から流出するノードを示している。

c) 相補性問題による表現

定式化した均衡状態とフロー保存条件を基に以下に示すような相補性問題による定式化が可能となる。

$$\begin{aligned} E[X_{ijnt}] (v_{ijt} + \mu_{ijnt} - w_{int}) &= 0 \\ E[X_{ijnt}] \geq 0, v_{ijt} + \mu_{ijnt} - w_{int} &\geq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} w_{int} (\sum_k E[Z_{kint}] + E[Q_{int}] - \sum_j E[X_{ijnt}]) &= 0 \\ w_{int} \geq 0, \sum_k E[Z_{kint}] + E[Q_{int}] - \sum_j E[X_{ijnt}] &\geq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\forall (i, j) \in A_n, n \in B, t \in T$$

ここで、 A_n は、始点が n 以外リンクに関する始点終点ノードペアであり、 T は時間帯の集合である。

3. 単純ネットワークへの適用

2 節において提案を行ったリスク均衡配分モデルを図4に示すような単純ネットワークに適用する。なお、各リンクの諸条件は、表1に示した通りである。また、期待 OD 交通量はノード1からノード2へ120台、ノード1からノード3へ30台流れているものとし、時間帯の幅を60分として計算を行うものとする。

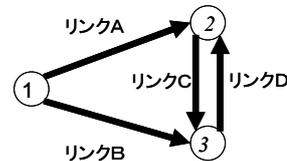


図4 単純ネットワーク

表1 リンクの諸条件

	交通容量	旅行時間
リンクA	50台	10分
リンクB	100台	5分
リンクC	100台	5分
リンクD	100台	5分

計算結果の比較を行うために、分散パラメータを $\eta = 0.5, 2$ と設定し、さらに、リスク態度に関するパラメータを $\gamma = 1, 10, 100$ と設定して得られた結果を表2, 表3, 表4に示す。

表2 交通量の変化

η	0.5			2			
	γ	1	10	100	1	10	100
リンクA		44.7	42.2	40.7	42.4	40.2	39.7
リンクB		105.3	107.8	109.2	107.6	109.8	110.3
リンクC		0	0	0	0	0	0
リンクD		67.9	70.0	71.2	69.7	71.5	71.9

表3 期待旅行時間の変化

η	0.5			2			
	γ	1	10	100	1	10	100
リンクA		11.0	10.8	10.7	10.8	10.7	10.6
リンクB		6.0	6.0	6.1	6.0	6.1	6.1
リンクC		5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
リンクD		5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2

表4 旅行時間の分散の変化

η	0.5			2			
	γ	1	10	100	1	10	100
リンクA		0.18	0.12	0.10	0.13	0.09	0.08
リンクB		0.07	0.08	0.09	0.08	0.09	0.09
リンクC		0	0	0	0	0	0
リンクD		0	0	0	0	0	0

※リンクC,Dの分散値は微小な値であるので0とした。

表2より、交通量は、リスク態度の値が大きくなることで、交通容量の大きなリンク、すなわち、時間信頼性の高いリンクへ移行している。さらに、分散パラメータの増加によっても同様の結果が得られている。これらは、交通容量の大きなリンクほど交通量の不確実性の増加によるリンク旅行時間の変動が小さいためである。

表3より、旅行時間の変化は、交通容量の小さいリンクAについてのみ、変化が見られる。これは、交通容量が小さいために交通量の不確実性の増加によりリンク旅行時間の変動が生じたためである。すなわち、時間信頼性が低いリンクであると考えられる。これに対して交通容量の大きなリンクB,Dについては、交通量の不確実性の増加によって、リンク旅行時間の変動が生じていない。これより、時間信頼性が高いリンクであると考えられる。

また、表4より γ の値が増加するに従いリンクA,Bに関する旅行時間の分散が等しくなっていく。さらに、分散パラメータが $\eta=2$ で、リスク態度が $\gamma=100$ では、交通容量の小さなリンクAと交通容量の大きなリンクBの時間信頼性(旅行時間の分散)が逆転している。これらは、旅行時間の不確実性を考慮したためである。したがって、 γ の値が大きくなることで、目的地までの不確実性は各経路において均等な値もしくは逆転した値となる。

4. おわりに

本研究では、リンク旅行時間の不確実性を考慮した準動的均衡モデルについてのモデルの定式化を行った。そして、提案したモデルを用いて単純ネットワークに適用した。これらより、リスク態度を考慮することによって、

リンク旅行時間の分散値(信頼性)が各経路別に均等になるもしくは、交通容量の大きなリンクの時間信頼性が増加することがわかった。さらに、交通量の不確実性(分散パラメータ η)が大きくなるもしくはリスク態度 γ が大きくなることによって、交通容量の大きなリンク(信頼性の高いリンク)へ交通量が移行していくことがわかった。

今後の課題としては、より詳細なフロー条件式の提案および目的地までの最短旅行時間情報の把握の違いを考慮したモデルの定式化とリスク均衡配分モデルとの比較、金沢ネットワーク等の実際の道路ネットワークへの適用、目的地までの所要時間情報の提供による効果分析やリスク態度の違いを考慮した配分モデルの開発等が挙げられる。

参考文献

- 1) 藤田素弘, 松井寛, 溝上章志: 時間帯別交通量配分モデルの開発と実用化に関する研究, 土木学会論文集, No.389/IV-8, pp.111-119, 1988.
- 2) 宮城俊彦, 牧村和彦: 時間帯別交通量配分手法に関する研究, 交通工学, Vol.26/No.2, pp.17-28, 1991.
- 3) 藤田素弘, 山本幸司, 松井寛: 渋滞を考慮した時間帯別交通量配分モデルの開発, 土木学会論文集, No. 407/IV-11, pp. 129-138, 1989.
- 4) 赤松隆, 牧野幸雄, 高橋栄行: 時間帯別 OD 需要とリンクでの渋滞を内生化した準動的交通配分, 土木計画学研究・論文集, No. 15, pp. 535-545, 1998.