

1. はじめに

現実の交通ネットワークでは、様々な不確実性によって、交通量や旅行時間は変動している。事故や災害などが発生していない通常の交通状況において、不確実性の主要な要因として交通需要の変動が挙げられる。特に、ピーク時においては交通需要の変動により短時間ではあるが渋滞が生じ、円滑な交通流が妨げられてしまう。

また、ピーク時における交通の多くは通勤や業務目的のトリップであり、到着時刻制約のある場合が多い。よって、確実に時間内に到着することが求められる。したがって、そのような場合ドライバーは、旅行時間の不確実性を考慮して交通行動を行うと考えられる。また、情報提供などの交通施策の効果分析のためには、道路ネットワーク上で時々刻々と変化する様々な不確実性を計測・評価することが必要であり、不確実性を考慮することができる配分モデルが有効であると考えられる。

以上のことから、道路ネットワークの旅行時間の値そのものだけではなく、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把握することや時間帯別の交通量の変化を正確に表現することは極めて重要であるといえる。しかし、従来の時間帯別均衡配分モデルでは、交通量や旅行時間は確定値として扱っているために交通需要の変動による不確実性を表現することはできない。

そこで、本研究では、時間帯別の交通需要が正規分布に従って確率変動するとともに配分された交通量も正規分布に従う時間帯別確率均衡配分モデルを提案する。そして、提案したモデルを通勤時における金沢市道路ネットワークに適用し、その妥当性や実用性などを確認する。このモデルによって、時間帯によって変化する交通量や旅行時間の把握および交通ネットワークの不確実性や時間信頼性の評価が可能となる。

2. 本モデルの基本な考え方

(1) 均衡概念

本モデルにおける均衡状態は、「ある時間帯において利用されている経路の平均旅行時間はみな等しく、利用されていない経路の平均旅行時間よりも小さいもしくは等しくなる」というものである。これは、日々の時間帯において実現する交通流は必ずしも均衡状態となっているものではなく、平均的に時間帯別に均衡状態が成り立っていることを表現している。

(2) 交通量の表現

本研究では、交通量を確率分布で表現する。ここで、各経路交通量は正規分布に従うと仮定する。よって、本研究で用いる OD ペア ij 間第 k 経路の経路交通量は、次の正規分布に従う。

$$N(\bar{F}_{ij}^m, \text{Var}[F_{ij}^m]) \quad (1)$$

ここで、 F_{ij}^m は、OD ペア i 間第 j 経路の交通量の確率変数であり、 \bar{F}_{ij}^m と $\text{Var}[F_{ij}^m]$ はその期待値と分散を表す。また、各経路交通量が独立な正規分布に従っているものであると仮定することにより、その和である OD 交通量も正規分布の再生性より正規分布に従う。よって、次式が成立する。

$$Q_i^m = \sum_j F_{ij}^m \quad (2)$$

$$\bar{Q}_i^m = \sum_j \bar{F}_{ij}^m \quad (3)$$

$$\text{Var}[Q_i^m] = \sum_j \text{Var}[F_{ij}^m] \quad (4)$$

ここで、 Q_i^m は m 時間帯における OD ペア i 間の OD 交通量の確率変数であり、 \bar{Q}_i^m と $\text{Var}[Q_i^m]$ はその期待値と分散である。さらに、リンク交通量は、経路交通量より次式のように表現できる。

$$X_a^m = \sum_i \sum_j \delta_{a,j}^i F_{ij}^m \quad (5)$$

ここで、 X_a^m は m 時間帯におけるリンク a の交通量の確率変数である。よって、リンク交通量も正規分布の再生性より正規分布に従い、次式が成立する。

$$\bar{X}_a^m = \sum_i \sum_j \delta_{a,j}^i \bar{F}_{ij}^m \quad (6)$$

$$\text{Var}[X_a^m] = \sum_i \sum_j \delta_{a,j}^i \text{Var}[F_{ij}^m] \quad (7)$$

ここで、 \bar{X}_a^m と $\text{Var}[X_a^m]$ はリンク交通量の期待値と分散である。

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

3. 本モデルの定式化

(1)定式化の視点

本研究では、以下の2つの視点による定式化が考えられる。

視点 1: 任意の時間帯でネットワーク上に存在する交通量の期待値が道路のパフォーマンスと均衡する。

視点 2: 任意の時間帯でネットワーク上の目的地に吸収される交通量の期待値が道路のパフォーマンスと均衡する。

ここで、定式化の視点の違いは、残留交通量の取り扱いにある。視点1では時間帯の終端時刻において道路ネットワーク上に存在している交通量の平均値としており、視点2では、時間帯の終端時刻において目的地に到着できていない交通量としている。

(2)視点1による定式化

藤田ら²⁾の提案したモデルであるOD修正法による時間帯別均衡配分モデルの定式化を参考に本モデルに適用すると、以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \min Z &= \sum_a \int_0^{x_a} t_a(w)dw - \sum_i \int_0^{\bar{A}} \frac{2T_w}{Q_i^m} \left\{ \frac{\lambda_i^{m-1}}{T_w} \bar{Q}_i^{m-1} + \bar{Q}_i - z \right\} dz \\ \text{s.t.} \quad & \sum_j \bar{F}_{ij}^m = \bar{Q}_i^m, \quad \sum_i \sum_j \delta_{a,j}^i \bar{F}_{ij}^m = \bar{X}_a^m \\ & \bar{F}_{ij}^m \geq 0, \quad \bar{Q}_i^m \geq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 \bar{A} は m 時間帯におけるODペア i 間の修正交通量であり、 λ_i^{m-1} は $m-1$ 時間帯のODペア i 間の最短旅行時間である。また、 T_w は時間帯の幅であり、 $t_a(\cdot)$ はリンクコストを表す。

(3)視点2による定式化

宮城ら³⁾の提案したモデルの定式化を参考に本モデルに適用すると、以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \min Z &= \sum_a \int_0^{E(x_a)} t_a(w)dw - \sum_{ij} \int_0^{\bar{A}} \frac{T_w}{Q_{ij}^m} \left\{ \frac{\lambda_{ij}^{m-1}}{T_w} \bar{Q}_{ij}^{m-1} + \bar{Q}_{ij} - \eta \right\} d\eta \\ \text{s.t.} \quad & \sum_j \bar{F}_{ij}^m = \bar{Q}_i^m, \quad \sum_i \sum_j \delta_{a,j}^i \bar{F}_{ij}^m = \bar{X}_a^m \\ & \bar{F}_{ij}^m \geq 0, \quad \bar{Q}_i^m \geq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

4. 不確実性の表現

(1)交通量に関する不確実性の表現

本研究では、交通量の不確実性を表現するために2節(2)で記述した分散を用いる。しかし、本来ならば、OD交通量について平均及び分散を予見とする必要がある。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対応可能であるが、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、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。ここで、式(4),(7)より経路交通量の分散が得られることにより、他の交通量の分散が求められる。よって、以下の式より経路交通量の分散を算定する。

$$\text{Var}[F_{ij}^m] = \eta^m F_{ij}^m \quad (10)$$

ここで、 η^m は、 m 時間帯における正のパラメータである。これは、時間帯ごとに交通量の変動が同様であるとは考えにくく、特にピーク時においては、その変動は大きく変化していると考えられるためである。

(2)旅行時間に関する不確実性の表現

本研究では、旅行時間の不確実性を表現するために旅行時間に関する変動係数を算定する。変動係数を算定するためには、旅行時間の期待値および分散を算定することが必要となる。旅行時間の期待値をBPR関数によって以下のように表現する。

$$E[t_a^m] = t_{a0} \left(1 + 0.15 (\bar{X}_a^m)^4 / C_a^4 \right) \quad (11)$$

ここで、 $(\bar{X}_a^m)^4$ に積率母関数を用いると以下の式となる。

$$E[t_a^m] = t_{a0} \left\{ 1 + 0.15 \left\{ \text{Var}[X_a^m]^2 + 6\text{Var}[X_a^m] \bar{X}_a^m + (\bar{X}_a^m)^4 \right\} / C_a^4 \right\} \quad (12)$$

ここで、 t_{a0} はリンク a の自由旅行時間であり、 C_a はリンク a の交通容量である。次に、分散を以下のように算定する。

$$\text{Var}[t_a^m] = E[(t_a^m)^2] - (E[t_a^m])^2 \quad (13)$$

ここで、 $E[t_a^m]$ 、 $\text{Var}[t_a^m]$ は m 時間帯におけるリンク a の旅行時間の期待値と分散である。次に、式(12)、(13)より各リンク旅行時間の変動係数を算定する。

$$v_a^m = (\sigma_a^m / E[t_a^m]) \quad (14)$$

ここで、 v_a^m は、 m 時間帯におけるリンク a の変動係数であり、 σ_a^m は、リンク a の旅行時間の標準偏差である。この変動係数によって、各リンク旅行時間に関する不確実性の大きさを評価する。

5. 金沢市ネットワークへの適用

(1)概要

本研究の均衡モデルを金沢都市圏の道路ネットワークに対して適用する。

図1は金沢道路ネットワークを表したものである。このネットワークは金沢都市圏の主要幹線道路と補助幹線にほぼ対応しているものである。ノード数は272でリンク数は964であり、全ノードがセントロイドを兼ねることとする。

OD交通量は平成7年度・第3回金沢都市圏パーソナルトリップ調査の中で行われた通勤時におけるドライバーが起点から終点まで移動する際に利用した道路区間を調査した「自動車通勤実態調査」のデータ(経路データ数:6367)のうち朝の通勤時間帯である5時から10時までのデータを用いている。また、このデータのうち旅行時間が明らかに大きなデータなど計算時に誤差につな

がる恐れのあるデータは削除した。時間帯の設定については時間帯幅を60分とし、5時から6時、6時から7時、7時から8時、8時から9時、9時から10時の5時間帯とした。各データ数については、5時から6時が93、6時から7時が389、7時から8時が2433、8時から9時が1661、9時から10時が372である。また、計算の際に用いる入力のためのODデータは、発時間ODを用いることとする。OD交通量の分散はリンク交通量の実測値よりパラメータ η を推定することによって設定する。本研究では以下の表に示すような値を用いた。なお、この表にある「上り」は上り車線に関するデータの平均値であり、「下り」は下り車線に関するデータの平均値である。「全平均」はすべての車線に関するデータの平均値である。

表1 計算に用いる分散パラメータの推定値

	上り	下り	全平均
5時	2.58	4.20	3.23
6時	13.31	9.61	11.83
7時	20.90	8.97	16.13
8時	31.40	11.45	23.42
9時	36.35	23.87	31.36

ここで、本モデルでは、残留交通量が考慮されており、その分散パラメータは現時間帯の分散パラメータとは異なっている。よって、厳密には最適化問題として定式化することはできない。しかし、本研究においては、残留交通量の期待値のみを確定値として扱うこととし、近似的に最適化問題として解を求めることとする。なお、残留交通量に関する分散の取り扱いについては今後の課題である。

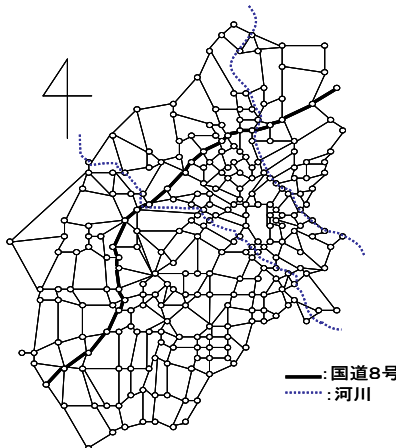


図1 金沢都市圏道路ネットワーク図

(2) 交通量の比較

時間帯の概念(残留交通量の取り扱い)が無い従来の配分法であるWardrop均衡による交通量配分と本研究の時間帯別確率利用者均衡による交通量配分を行う。それによって得られたリンク交通量の期待値を実測値と比較する。表2は各モデルでの交通量配分で推定されたリンク交通量と観測されたリンク交通量との相関係数であり、表3が推計されたリンク交通量をy軸に、実測値を

x軸としてデータをプロットした際に得られた近似直線の式を示したものである。

表2 各モデルにおける相関係数

	5時	6時	7時	8時	9時	平均
Wardrop	0.874	0.835	0.887	0.866	0.816	0.855
定式化1:上り	0.872	0.825	0.898	0.865	0.831	0.858
定式化1:下り	0.872	0.825	0.900	0.865	0.829	0.858
定式化1:全平均	0.872	0.825	0.900	0.866	0.830	0.859
定式化2:上り	0.829	0.759	0.895	0.870	0.835	0.838
定式化2:下り	0.829	0.758	0.896	0.871	0.834	0.838
定式化2:全平均	0.829	0.759	0.895	0.871	0.833	0.837

ここで、定式化1・2の後に記載されている「上り」・「下り」・「全平均」は表1に記した分散パラメータの「上り」・「下り」・「全平均」を意味している。表2よりWardrop均衡による交通量配分での相関係数は平均値で0.855であり、定式化1では0.858から0.860である。また、定式化2では0.836から0.838である。よって、わずかではあるが定式化1はWardrop均衡よりも精度が向上している。しかし、定式化2については精度が悪化している上に、近似直線式からもわかるが実測値と大きく離れた値となっている。

表3 各モデルにおける近似直線式

	5時	6時	7時	8時	9時
Wardrop	$y=0.89x+2.69$	$y=1.44x+3.7$	$y=1.04x+68.27$	$y=0.71x-2.54$	$y=0.79x+2.06$
定式化1:上り	$y=0.81x+2.63$	$y=1.32x+3.96$	$y=0.88x+7.44$	$y=0.78x+3.33$	$y=1.00x+7.28$
定式化1:下り	$y=0.81x+2.63$	$y=1.32x+4.03$	$y=0.88x+7.27$	$y=0.78x+3.15$	$y=1.01x+6.87$
定式化1:全平均	$y=0.81x+2.63$	$y=1.32x+3.99$	$y=0.89x+8.31$	$y=0.78x+3.3$	$y=1.00x+7.24$
定式化2:上り	$y=0.87x+4.70$	$y=1.68x+14.76$	$y=1.34x+26.46$	$y=0.62x-9.54$	$y=1.26x+11.29$
定式化2:下り	$y=0.87x+4.7$	$y=1.68x+14.80$	$y=1.35x+29.35$	$y=0.62x-8.52$	$y=0.76x+10.80$
定式化2:全平均	$y=0.87x+4.70$	$y=1.68x+14.78$	$y=1.35x+28.95$	$y=0.62x-8.92$	$y=0.77x+11.15$

ここで、表3の式はリンク交通量をy軸に、実測値をx軸としてデータをプロットした際に得られた近似直線の式である。よって、傾きが1より小さい場合には推計値は過小評価となり、傾きが1より大きい場合には推計値が過大評価となる。表3を見ると、5時台の交通量配分結果が全てのモデルで過小評価となっており、6時台の交通量配分結果では全てのモデルにおいて過大評価となっていることがわかる。これは、データ数が少ないことによる影響であると考えられる。それ以外の時間帯では、Wardrop均衡による交通量配分、本研究のモデルによる交通量配分のうち定式化1による交通量配分結果が $y=x$ (実測値=推計値)に近い分布となっている。よって、定式化1についてはある程度ではあるが、時間帯を考慮した現実の交通流を表現できていないのではないかと考えられる。しかし、定式化2については6時台の誤差が大きい上に、他の時間帯においても過大評価もしくは過小評価が顕著となっている。これは、実測値を着時間にしたことによる影響である。最初の時間帯(5時~7時)では、前の時間帯に到着できなかった交通量と現時間帯で到着できた交通量の和が解となるわけであるが、ODデータ数に大きな差があるため、着時間ODのほうが小さな値になってしまう。また、逆に後の方の時間帯(8時・9時)では、入力されるODデータは少ないが、実測値である着時間ODが大きな値となっているため誤差が生じていると考えられる。よって、その時間帯に目的地に到着できなかった実測値のOD交通量の

扱い方を考える必要がある。

(3) 道路の時間信頼性評価

図2、図3は、9時から10時の時間帯における配分の結果より旅行時間の変動係数が大きなリンクをピックアップしたものである。旅行時間の変動係数が大きいということは旅行時間の信頼性が低いことと解釈することができる。よって、この図で挙げたリンクは、今回の配分条件の下で旅行時間の信頼性の低いリンクと考えることができる。

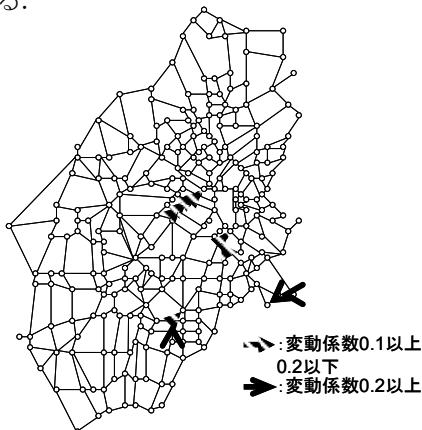


図2 定式化1における時間信頼性評価

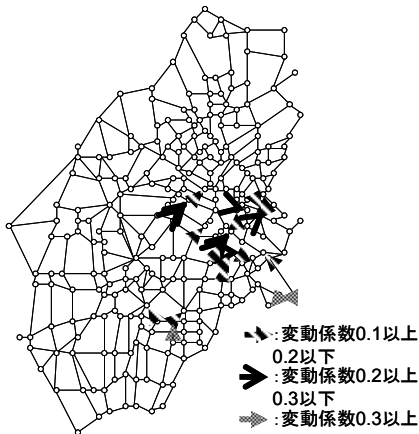


図3 定式化2における時間信頼性評価

旅行時間の不確実性は、道路容量の大小などのリンクパラメータのみによって決まるものではなく、OD交通量の値や分散が密接に関連してくると考えられる。本研究のリンク旅行時間の変動係数は、それらの影響をある程度反映して出た結果であり、これによって旅行時間の信頼度を測ることができると考えられる。計算によって得られたリンク旅行時間の変動係数の平均値を表4に示す。

表4 リンク旅行時間の変動係数の平均値

	5時	6時	7時	8時	9時
平均値(定式化1:上りパラメータ)	0.000	0.002	0.097	0.075	0.006
平均値(定式化1:下りパラメータ)	0.000	0.002	0.061	0.042	0.004
平均値(定式化1:全平均パラメータ)	0.000	0.002	0.086	0.063	0.005
平均値(定式化2:上りパラメータ)	0.000	0.002	0.091	0.086	0.010
平均値(定式化2:下りパラメータ)	0.000	0.001	0.058	0.049	0.007
平均値(定式化2:全平均パラメータ)	0.000	0.001	0.080	0.073	0.009

表4にあるように5時台では、全パラメータで0であり、6時台より変動係数の平均値が得られている。上

り車線による分散パラメータ η を用いた場合、一番変動係数が大きく、下り車線による分散パラメータ η を用いた場合、一番変動係数が小さいことがわかる。よって、分散パラメータ η を変化させることにより解が変化することがわかる。さらに、この分散パラメータ η の値は実際には各道路区間によって異なっていると考えられるので、今後、さらに様々な道路区間において分散パラメータ η の分析を行い、各道路区間における分散パラメータ η を用いて推計を行う必要があると考えられる。

現在の段階では旅行時間の変動係数が実際にはどのくらいの値を取るのか分からない。ゆえに実際に旅行時間を計測するなどして実際の値を調査し、現実のネットワークとの比較を行う必要がある。

6. 終わりに

本研究では、OD交通量が正規分布に従うとした交通需要の不確実性を考慮した時間帯別均衡配分モデルの定式化を均衡状態の考え方より、2つの方法で行った。その上で、金沢市ネットワークへの適用を行った。その結果、定式化1においては実際の交通量とモデルより得られた交通量との相関係数が平均で0.858となり、わずかではあるが、従来のWardrop均衡よりも良い結果が得られたということが示された。

本研究のモデルの大きな特色は、正規分布に従っているOD交通量を時間帯別に配分することによって、時間帯別の交通流の変化を把握することができ、さらに、旅行時間の分散や変動係数を計算できる点である。これによって、時間帯ごとの旅行時間の信頼性を計算結果として表現できる。

今後の課題としては、計算で用いているOD交通量の確率分布と現実のOD交通量の確率分布の比較を行うことや、実際のリンクにおける不確実性と計算で得られたリンクの不確実性の評価が正しいものであるのかという検討を行う必要がある。また、リスク態度を考慮したモデルの開発やリンク修正法を用いた時間帯別確率利用者均衡モデルの作成を行う必要がある。さらに、残留交通量の分散を考慮に入れた時間帯別均衡配分モデルの作成を行う必要がある。

参考文献

- 1) 中山晶一郎, 高山純一, 長尾一輝: 道路利用者のリスク態度を考慮した金沢道路ネットワークの均衡分析, 第59回土木学会年次学術講演会講演概要集, on CD-ROM, 2004.
- 2) 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.
- 3) 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.