

# 時間帯別均衡配分モデルの旅行時間の再現性の検証

小池 光右<sup>1</sup>・中山 晶一郎<sup>2</sup>・山口 裕通<sup>3</sup>・高山 純一<sup>4</sup>・藤生 慎<sup>5</sup>

<sup>1</sup>学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科 環境デザイン学専攻(〒920-1192石川県金沢市角間町)

E-mail:kkoike.0601@gmail.com

<sup>2</sup>正会員 金沢大学理工研究域 環境デザイン学系(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:nakayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 金沢大学大学院 自然科学研究科(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:hyamaguchi@se.kanazawa-u.ac.jp

<sup>4</sup>フェロー会員 金沢大学理工研究域 環境デザイン学系(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:takayama@t.kanazawa-u.ac.jp

<sup>5</sup>正会員 金沢大学理工研究域 環境デザイン学系(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:fujiu@se.kanazawa-u.ac.jp

交通ネットワークの状況は時々刻々と変化するため、静的な交通量配分では渋滞などの時間によって変化する現象を反映することができない。このため、一日を複数時間帯に区切って配分を行う、時間帯別均衡配分が考えられている。著者らはこれまで、混雑の時空間移動を扱うことの出来る時間帯別均衡配分モデルを実際規模のネットワークに適用した際に、混雑の時空間移動を記述できることを確認している。一方で、旅行時間が実際よりも小さく算出されるという問題点が明らかとなった。そのためこのモデルを用いた計算時の旅行時間の過小評価問題に焦点を当て、その解決を試みている。

**Key Words :** *semi-dynamic userequilibrium, network analysis, space-time propagation*

## 1. はじめに

近年、実務では交通量の予測を行う場合には、均衡モデルによる日単位の交通量配分が主として用いられている。日単位での交通量配分では、交通量は定常状態であると仮定され、一日の平均的な交通量が算出される。しかし、現実の交通ネットワークでは、朝や夕方の通勤・帰宅ラッシュの時間帯と、日中の閑散時間帯とでは交通量や交通流の方向などが大きく異なる。また、交通渋滞等の時間によって発生する事象もある。一日の交通量を定常状態と仮定した場合、渋滞のような現象を考慮することが出来ない。このため、一日を1つの時間帯で扱う均衡配分では、現実の交通状態を十分に反映できていないと言えよう。少子高齢化の進行により、公共事業に対する効率化が近年益々要求されている。このような状況の中で、効率的な道路事業を実施するためには時間的に精度良く交通量を予測できるモデルが必要となろう。

現実の交通状態を十分に反映するため、時間的に精度

良く交通量を予測できるモデルとして、これまでに動的均衡配分などが提案されている。交通量は動的であるため、動的な配分を行うことで尤もらしい結果を得ることができる。しかし、動的均衡配分は、そのモデルが複雑であることから計算機への負荷が大きく、計算が容易ではないこと、モデルの内容がブラックボックスになりやすく、再現性に疑問が残るなどの問題点がある。動的均衡配分を用いる場合、かなり詳細なODデータを必要とするが、このようなデータは、近年普及が進み、データの公開も進められているプローブカーデータや、ETC2.0のデータなど、ごく限られた区間のODデータしか入手できない。現時点では動的均衡配分に見合うだけの高精度のODデータが十分に整備されていないと言える。実際に入手可能なODデータとしては、パーソントリップ調査や道路交通センサス等で得られる1時間単位の、詳細であっても30分単位程度などの比較的粗いデータであろう。このような場合、交通量を数分単位で算出する動的均衡配分は詳細すぎるため、非合理的である。合理的

に配分を行う場合にはODデータに見合った配分モデルを選択する必要がある。

計算負荷の小さい静的配分の特性を活かしつつ、交通流の時間的な変化などの動的な現象を反映できるモデルとして、時間帯別均衡配分が開発されている。これらは一日を一定時間の時間帯に区切り、各時間帯内で静的な配分を行うものである。このため、静的、動的両方の特徴を持つことから、準動的な配分と呼ばれることもある。時間帯別均衡配分は、各時間帯内にトリップを終了できない交通、いわゆる残留交通量を次の時間帯の交通量として扱うことで、時間帯内のフローのダイナミクスを取り扱っている。時間帯別均衡配分モデルは、この残留交通量の扱い方によってリンク修正法、OD修正法、待ち行列法の3種類に区分することができる。またこのモデルは、現在実務において多用されている静的配分(日配分)のモデルの考え方をベースにしていることから、交通手段選択を内生化するなど、拡張が比較的容易に行えるという特徴を有する。本稿は、時間帯別均衡配分モデルについて既存の研究レビューを行い、混雑の時空間移動を扱うことのできるモデルを実際規模のネットワークに適用した際の結果について考察を行う。

## 2. 既往研究と本研究の位置づけ

時間帯別均衡配分は、渋滞などの時間帯に依存した現象を扱うことが可能であるため、渋滞を扱っている研究が多数ある。また、ネットワーク内に高速道路などの有料道路を組み込んだ拡張型の時間帯別均衡配分モデルも提案されている。藤田ら<sup>1</sup>は、高速道路への転換確率を内生化した時間帯別均衡配分モデルを構築し、従来型の時間帯別均衡配分モデルを高速料金等を考慮できるモデルへの拡張を行っている。この研究では、転換率を内生化したものと転換率を考慮していないモデルを作成しており、転換率を内生化したモデルの方がより現実に近い値が得られる、と結論付けている。

準動的均衡配分のモデルとしては、赤松ら<sup>2</sup>がリンクベースの時間帯別均衡配分モデルを提唱している。このモデルは、従来型の時間帯別均衡配分モデルの問題点を満たす配分モデルと計算方法の確立を行っている。リンクベースの時間帯別均衡配分モデルについてはこのほかにも赤松・桑原<sup>3</sup>、桑原・赤松<sup>4</sup>など、数多くある。しかしいずれの研究でも、解の一意性が検討されていない点が課題として挙げられる。少子高齢化社会の進行に伴い、公共事業に対する投資の効率化や透明化などが求められる現在において、誰が計算しても解が一意に定まるモデルは必要不可欠であると言えよう。そこで中山<sup>5</sup>は、残留交通量を扱うことで混雑の時空間移動を記述し、解が

一意なリンクベースの時間帯別均衡配分モデルを開発した。また小松ら<sup>6</sup>は、このモデルを旅行時間の不確実性を考慮したモデルへの拡張を行っている。この研究では、モデルにリスク態度パラメータを導入し、実際規模のネットワークにモデルを適用している。この研究では、混雑の時空間移動が記述できることや、リスク態度パラメータを変化させることで交通量や旅行時間の変動が変化することが示されている。一方で、旅行時間が実際の値よりも過少に評価されることが課題として挙げられている。本研究では、中山<sup>5</sup>の提案したモデルを実際規模のネットワークに適用し、交通量や旅行時間の計算結果について纏める。また、計算結果と実交通量、実旅行時間と比較を行う。その上で小松ら<sup>6</sup>の研究で課題として挙げられていた、旅行時間を実際の値に近くなるようにする方法論について述べる。

この、旅行時間が過小評価されてしまう課題について、関連する既往研究の抽出を行った。本研究ではこの現象の原因として、信号交差点での停止時間を考慮していないことを挙げている。この内容についての詳細は後述する。信号交差点の影響に限らず、交通ネットワーク上で発生する渋滞現象を考慮する事は、交通渋滞を解消する施策を議論する際の理論的基盤となるため、これまでに数多のアプローチがなされている。この中でも特に信号交差点による待ち時間を考慮した研究は、そのアプローチによって、①マイクロ交通シミュレーション、②リンクコスト関数のチューニング、③ODデータの修正に大別できよう。①では、道路ネットワーク上の車両挙動をシミュレーションを通じて動的に表現した井上<sup>7</sup>の研究等が挙げられる。シミュレーションでは信号交差点による遅れ時間特性をモデルに組み込んでいる。シミュレーションの結果はWebsterの式と比較を行い、交差点での遅れ時間の予測精度について考察を行っている。その結果、交差点付近の一部エリアに限らず、都市圏レベルのネットワークに適用した場合にも良好な精度を担保していることが明らかとなっている。しかしながらこの研究では経路を扱うため、本研究のようなリンクベースのモデルへの適用は現実的でないと思われる。交差点の待ち行列がネットワーク上流側の交差点まで延伸する現象(先詰まり)に対して、ネットワーク全体の旅行時間の最小化について検討した久井ら<sup>8</sup>の研究がある。久井らは、交差点により生じる渋滞リンクのオフセットがネットワークに与える影響を、信号交差点による容量制約下での静的均衡配分と、シミュレーションによる動的利用者最適配分を行っている。静的配分と動的最適配分の双方を通じて影響評価を行う点が特徴的である。これは、静的均衡配分では先詰まりの有無が容量制約が変化する点をモデリングしにくい点、動的最適配分を併用している。仮想ネットワークへの適用の結果、渋滞リンクの相対オ

フセットを最適化する事はネットワーク全体の旅行時間を安定化させることが示唆された。一方で、静的配分と動的最適配分とで結果が異なる点やネットワークの大規模化等に課題が残っている。②のリンクコスト関数に関する研究も多数見受けられる。例えば溝上ら<sup>9)</sup>は、日単位の交通量配分に用いるBPR関数について、所要時間を集計的か非集計的に扱うかの別で異なるリンクコスト関数を定式化している。式中のパラメータは独自の交通調査から推定を行っている。この他にも吉田・原田<sup>10)</sup>の研究などがある。③については、交差点による遅れ時間を組み込んだ配分方法について纏めた高山ら<sup>11)</sup>の研究がある。この研究では、混雑リンクにおけるリンク交通量と旅行時間の間に信号による平均待ち時間を明示的に取り入れたモデルを構築したことに特徴がある。この遅れ時間を考慮して隣り合う時間帯のODの修正を行い、計算を行うものである。モデルを都市圏の一部ネットワークに適用し、午前7時から9時までの3時間帯の計算を行っている。

本研究では、計算の際に与えるリンクの条件を変更し、信号交差点による停止時間の影響を考慮する方法について検討する。具体的には、リンク旅行時間を自由走行時間で無く、一定時間を加算するなどして自由走行時間よりも大きな値を与え、停止時間を内生的に扱おうとするものである。

### 3. モデルの概要

本章では、本研究で用いるモデルの定式化に当たっての仮定、残留交通量の表現、均衡条件などのモデルの概要について述べる。

#### (1) 定式化に当たっての仮定

定式化するに当たり、以下の前提や仮定をおいている。

1. 一日をある一定長の複数時間帯に分割
2. 旅行時間は時間帯内では一定
3. 流入した時間帯内にそのリンクを脱出できなかった交通量は次の時間帯に残留する
4. リンクに流入した交通量は流入した時間帯かその次の時間帯にリンクを流出する
5. リンク旅行時間はそのリンクの流入交通量の関数で与える
6. リンク旅行時間の関数は連続かつ狭義単調である
7. リンク上の残留交通量は、次の時間帯ではそのリンクの終点ノードからの発生交通量として扱う
8. フロー保存条件式が常に成立する

時間帯の区切り幅は、数分単位の詳細なものではなく、30～60分程度の比較的粗い区切り幅での適用を想定して

いる。これは、実務での利用を念頭に置き、実際に入手可能な交通量データの時間の区切り幅に順じているためである。

#### (2) 残留交通量の表現

時間帯幅を $\lambda$ とし、ある時間帯 $t$ におけるリンク $ij$ の旅行時間を $H_{ijt}$ 、流入交通量を $X_{ijt}$ とおくと、単位時間当りのリンク交通量は $X_{ijt}/\lambda$ と表現できる。ここで、リンク $ij$ からの流出交通量を $Z_{ijt}$ で表すと、残留交通量は流入交通量と流出交通量の差で表現できるので、以下のようになる。

$$X_{ijt} - Z_{ijt} = H_{ijt} X_{ijt} / \lambda$$

以降、左辺の流入交通量と流出交通量の差を、 $Y_{ijt}$ として記すこととする。また、添え字は対象とするリンクやノードに応じて変化する。

#### (3) 均衡条件の定式化

均衡状態において、道路利用者がノード $i$ から目的地 $n$ に移動する際にリンク $ij$ を通過する条件は、ノード $i$ からノード $n$ までの最小旅行時間 $\bar{T}_{int}$ が、リンク $ij$ の旅行時間 $H_{ijt}$ とノード $j$ からノード $n$ までの最小旅行時間 $\bar{T}_{jnt}$ との和に等しいことである。また、モデルは準動的であるため、次の時間帯の最小旅行時間の影響も考慮する必要がある。そのため、リンク $ij$ の終端ノード $j$ からノード $n$ までの最小旅行時間 $\bar{M}_{ijnt}$ は、時間帯毎の交通量の比率により内分を行い、以下のように表現する。

$$\bar{M}_{ijnt} = \frac{Z_{ijt}}{X_{ijt}} \bar{T}_{jnt} + \frac{X_{ijt} - Z_{ijt}}{X_{ijt}} \bar{T}_{jnt+1}$$

上記を用いて均衡状態を表現すると、以下のようになる。

$$\begin{cases} \bar{T}_{int} = H_{ijt} + \bar{M}_{ijnt} & \text{if } X_{ijnt} \geq 0 \\ \bar{T}_{int} \leq H_{ijt} + \bar{M}_{ijnt} & \text{if } X_{ijnt} = 0 \end{cases}$$

#### (4) 交通量・旅行時間の表現

ある時間帯 $t$ にリンク $ij$ に流入して目的地ノード $n$ に向かう交通量について考える。ここでは、前述のような交通量を $X_{ijnt}$ と表現する。

本モデルでは、リンク $ij$ の旅行時間 $H_{ijt}$ は、BPR関数を用いて次のように表現する。

$$H_{ijt} = t_{ij0} (1 + \alpha X_{ijnt}^\beta / c_{ij}^\beta)$$

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。 $\alpha, \beta$ はBPR関数のパラメータであるが、本研究では $\alpha = 0.15$ 、 $\beta = 4$ の標準BPR関数のパラメータを用いて計算を行っている。

(5) フローの保存条件

假定8に示したように、配分を行うためにはフローの保存条件が成立する必要がある。フローの保存条件は、「目的地ノード*n*を除く全てのノードについて、ノードに流入する目的地別流入交通量と、流出する目的地別流出交通量が等しくなければならない」と表現する。前述した假定7より、残留交通量はリンク終点ノードからの発生交通量の一部に含まれる。従って、リンク*ij*の始点ノード*i*に関する時間帯*t*における目的地ノード*n*への発生交通量 $Q_{int}$ は、時間帯*t*におけるODペア*in*間の交通量 $D_{int}$ を用いて以下のように表される。

$$Q_{int} = D_{int} + \sum_k Y_{kint-1}$$

以上を踏まえ、フローの保存条件を定式化すると以下のようなになる。

$$\sum_k Z_{kint} + Q_{int} = \sum_j X_{ijnt}$$

(6) 相補性問題としての定式化

これまで述べてきた均衡条件及びフローの保存条件を相補性問題として定式化する。相補性問題として定式化する事で、たとえば2乗FB関数等を用いて解を得ることが可能となる。均衡状態を定式化しなおすと以下のように表現できる。

$$X_{ijnt}(H_{ijt} + \bar{M}_{ijnt} - \bar{T}_{int}) = 0$$

$$\text{但し, } X_{ijnt} \geq 0, H_{ijt} + \bar{M}_{ijnt} - \bar{T}_{int} \geq 0$$

フローの保存条件は以下のように表現される。

$$\bar{T}_{int}(\sum_j X_{ijnt} - \sum_k Z_{kint} - Q_{int}) = 0$$

$$\text{但し, } \bar{T}_{int} \geq 0, \sum_j X_{ijnt} - \sum_k Z_{kint} - Q_{int} \geq 0$$

4. 実ネットワークへの適用

これまで述べてきたモデルを、金沢市の道路ネットワークに適用する。適用するネットワークは図-1に示す通りである。このネットワークは金沢都市圏の主要幹線道路並びに補助幹線道路をほぼ網羅している。ノード数は272、リンク数は964となっている。OD交通量は、平成7年に実施された第3回金沢都市圏パーソントリップ調査の付随調査として実施された自動車通勤実態調査の結果を用いて設定を行う。対象とするODは、6~9時までに出発し、10時までに目的地に到着した交通量とする(表-1)。なお、トリップ時間が異常に長いなど、結果に影響を及ぼすことが考えられるデータについては予め除外して計算を行った。以下、結果の一部として、6時台の

リンク交通量及びリンク旅行時間の計算値と、トラフィックカウンターでカウントされた実交通量、調査から得られた実旅行時間とを比較した図を示す。

表-1 ODのサンプル数

発時間帯	サンプル数			
	6	7	8	9
OD数	404	2840	1773	359

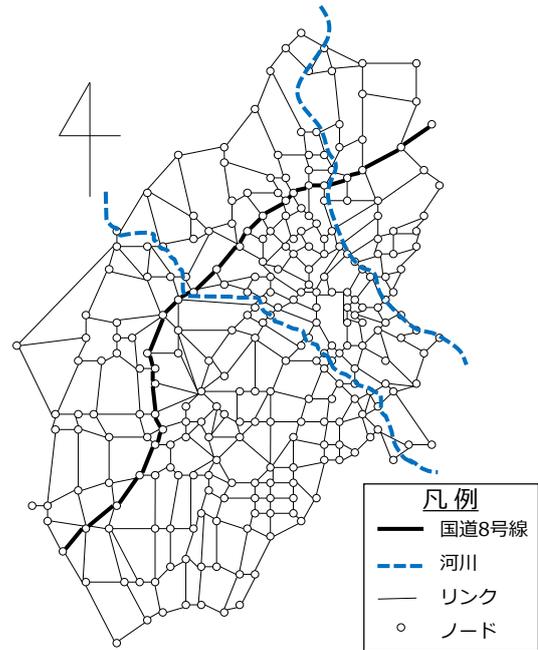


図-1 金沢市道路ネットワーク

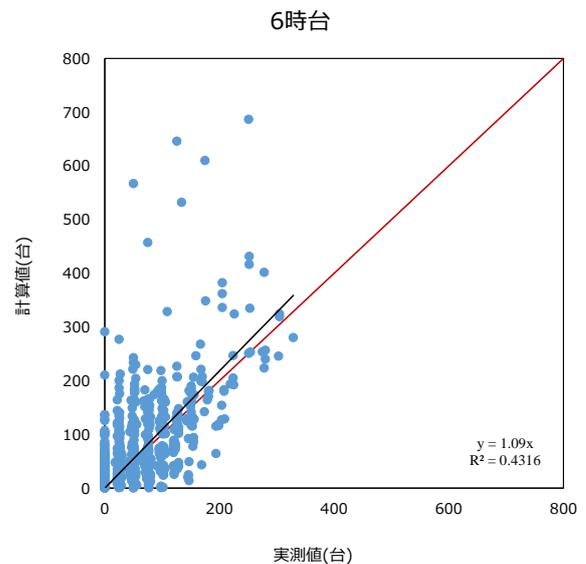


図-2 配分結果と実測値の比較(OD交通量,6時台)

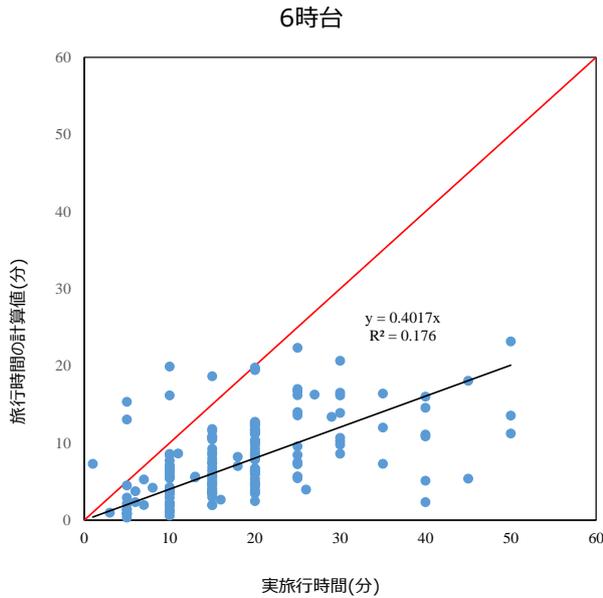


図-3 配分結果と実測値の比較(OD旅行時間,6時台)

結果より、交通量に対する再現性は高いことが言える。しかしながら旅行時間に関しては、ほとんどのODペアで過小評価される結果となった。先に記した結果は6時台の結果であり、この時間帯は交通量が朝の出勤ラッシュ前であるために少なく、リンクの自由旅行時間にほぼ等しい時間でトリップを行うことができる筈である。この図-3に示したような過小評価が起きた原因について考察する。実際のトリップを考えると、信号や工事他なんらかの要因で生じる停止時間が発生する。無論、トリップ長が短ければ影響は少ないが、通過するリンク数が増加すれば影響は大きくなる。計算にあつては、この信号等による停止時間が考慮されていないことが原因として考えられる。

### 5. 旅行時間の評価について

ここで、旅行時間の計算結果を実測値に近づける方法について考察を行う。図-3中には、一次近似線の式と重相関係数が示されている。この一次近似線の傾きは0.4017である。このため、近似線の傾きの逆数(1/0.4017≒2.5)を取り、各リンクの自由走行時間に乗じる。つまり、各リンクの自由走行時間を2.5倍して計算を行う。リンクの条件を変更し、前項と同様に6～9時台について配分計算を実施した。図-4に6時台のOD旅行時間の計算値と実測値の比較の散布図を示す。これを見ると、自由走行時間により計算した場合よりも近似線の傾きが1に近づき、再現性が向上したものといえよう。一方で、相関係数は小さくなっており、説明力が低下したことが読み取れる。

これまでOD交通量やOD旅行時間について分析を行ってきたが、次にリンク交通量とリンク旅行時間の重回帰係数の変化を、それぞれ表-2、表-3として示す。

リンク単位で見ると、リンク旅行時間は全時間帯で重回帰係数が大きくなっていることがわかる。またリンク交通量については、6、7時台が小さくなったものの、8、9時台では大きくなった。

以上より、リンクの自由走行時間に、自由走行時間に近い時間帯のOD交通量の実測値と計算値の近似線の傾きの逆数に乗じることで旅行時間の説明力が向上することが示された。一方で交通量に関しても、時間帯によっては説明力が向上することが明らかとなった。しかし、リンク交通量とリンク旅行時間の双方の説明力を担保しているとは言い難い結果となった。この点については今後改善を行う必要がある。

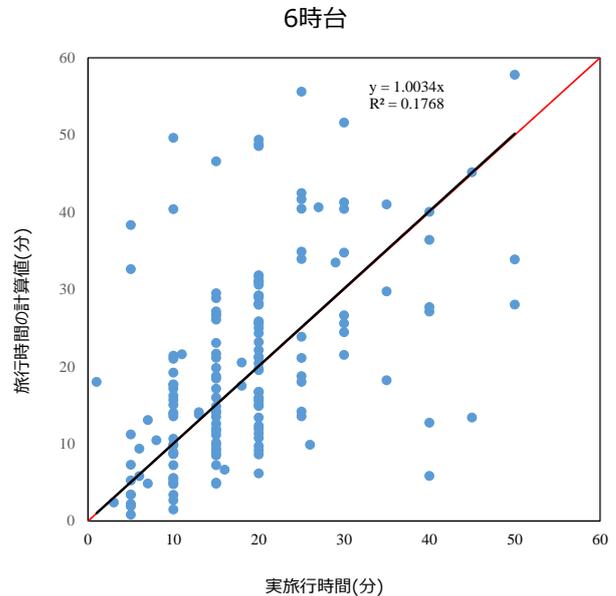


図-4 配分結果と実測値の比較(OD旅行時間,6時台)

表-2 リンク交通量の重回帰係数の変化

時間帯	リンク交通量のR二乗値			
	6	7	8	9
元	0.4588	0.6943	0.635	0.1029
2.5倍	0.2823	0.6911	0.6948	0.1738

表-3 リンク旅行時間の重回帰係数の変化

時間帯	リンク旅行時間のR二乗値			
	6	7	8	9
元	0.176	0.2786	0.2675	0.1808
2.5倍	0.1768	0.3661	0.2722	0.1814

## 6. まとめ及び今後の課題

本研究では、混雑の時空間移動を考慮した時間帯別均衡配分モデルを金沢市ネットワークに適用し、結果の考察を行った。適用の結果、旅行時間が実際よりも小さく算出されていることが判明し、その改善方法として、自由走行時間の状態に最も近い時間帯のOD旅行時間と実旅行時間との散布図から得られる近似線の傾き(回帰係数)の逆数を各リンクの旅行時間に乗じることを提案した。リンク旅行時間を変更して再度配分を行った結果、リンク旅行時間の説明力は向上するものの、一部時間帯ではリンク交通量の説明力が低下することが明らかとなった。本稿では計算条件としてリンク旅行時間を変化させたのみであるが、このほかにも時間帯別配分を行う際のODの与え方などにも課題があるものと思われる。また、ここで論じているような旅行時間の過小評価は一般的に起こりうるものではなく、本研究で用いたモデルが抱える課題である事を記しておく。

### 参考文献

- 1) 藤田素弘, 雲林院康宏, 松井寛: 高速道路を考慮した時間帯別均衡配分モデルの拡張に関する研究, 土木計画学研究・論文集Vol.18,no.3,pp563-572,2001年
- 2) 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配分, 土木計画学研究・論文集No.15,pp535-545,1998年
- 3) 赤松隆, 桑原雅夫: 渋滞ネットワークにおける動的利用者均衡配分-1起点・多終点および多起点・1終点ODペアの場合-, 土木学会論文集, No.488,pp21-30,1994年
- 4) 桑原雅夫, 赤松隆: 多起点多終点ODにおける渋滞延伸を考慮したリアクティブ動的利用者最適交通量配分, 土木学会論文集, No.555,pp91-102,1997年
- 5) 中山晶一郎: 混雑の時空間移動を考慮した準動的配分モデル, 土木学会論文集D, Vol.64, No3, pp340-353, 2008年
- 6) 小松良幸, 中山晶一郎, 高山純一: リスク態度を考慮した準動的配分モデル, 土木計画学研究・論文集, Vol25,no.3,2008
- 7) 井上博司: 交通需要の動的解析 道路網における交通流の動的シミュレーション手法, 土木学会論文集, No470,pp87-95,1993
- 8) 久井守, 南正昭, 福島永士: 交通配分による渋滞リンクのオフセットがネットワーク全体に及ぼす影響分析, 山口大学工学部研究報告, Vol.51, No1, pp25-31, 2000
- 9) 溝上章志, 松井寛, 可知隆: 日交通量配分に用いるリンクコスト関数の開発, 土木学会論文集, No401, pp99-107, 1989
- 10) 吉田禎雄, 原田昇: 均衡配分用BPR式パラメータの推計, 土木学会論文集, No695, pp91-102, 2002
- 11) 高山純一, 亀谷靖文, 中村光生: 信号交差点を組み込んだ時間交通量配分法の改良について, 土木計画学研究・講演集, 1993
- 12) 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, No407, pp129-138, 1989
- 13) 土木計画学研究委員会編: 交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と解法-, 土木学会, 1999
- 14) 土木計画学研究委員会編: 道路交通需要予測の理論と適用 第I編-利用者均衡配分の適用に向けて-, 土木学会, 2003
- 15) 土木計画学研究委員会編: 道路交通需要予測の理論と適用 第II編-利用者均衡配分モデルの展開-, 土木学会, 2006

(2017.? 受付)

## VERIFICATION OF THE REPEATABILITY OF TRAVEL TIME OF TIME-OF-DAY TRAFFIC ASSIGNMENT MODEL

Kosuke KOIKE, Shoichiro NAKAYAMA, Hiromichi YAMAGUCHI, Jun-ichi TAKAYAMA,  
and Makoto FUJII