

# 需要・交通量を連続時間で扱う時間帯別配分

小池 光右<sup>1</sup>・中山 晶一郎<sup>2</sup>・高山 純一<sup>3</sup>・藤生 慎<sup>4</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:ko\_c-deletar-now@hotmail.co.jp

<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>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>4</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、時間を離散的に扱う時間帯別均衡配分が考えられている。しかしこれまでの時間帯別均衡配分は、ある時間帯内では交通状態は一定であると仮定しているため、時間帯の刻み幅が大きくなると交通状態を詳細に記述することが出来ない、という欠点がある。そこで、時間を離散的に扱い、交通需要を連続量で扱う、リンクベースの準動的配分モデルが構築された。この準動的配分モデルを仮想ネットワークに適用し、均衡の成立について確認した。

**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。

現実の交通状態を十分に反映するため、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、動的な現象を反映できるモデルとして、時間帯別均衡配分などが開発されている。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物である。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。

本研究では、交通量を連続量で扱い、時間帯はある程度の長さで区切って時間帯別に交通量配分を行うモデル

を構築する。このモデルでは、時間を離散的に扱うことで、計算負荷を低減できるほか、交通流は連続量として扱うために先述した時間によって発生する事象を詳細に記述することが可能となる。このモデルを単純仮想ネットワークに適用し、配分の成立を確認する事でモデルの整合性を明らかにする。

## 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。リンクベースの準動的配分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>などがある。

また、これらのモデルの基本的な考え方を共通とした中山<sup>5</sup>のモデルがある。このモデルでは、実務での利用を考慮し、解が一意であり、かつリンクベースでの準動的配分モデルを構築している。このモデルの特徴としては、残留交通量が適切に扱えること、混雑の空間移動を考慮できること、解が一意であること、リンクベースで計算が可能であることが挙げられる。本研究では、このモデルを単純仮想ネットワークに適用し、均衡の成立について確認を行う。

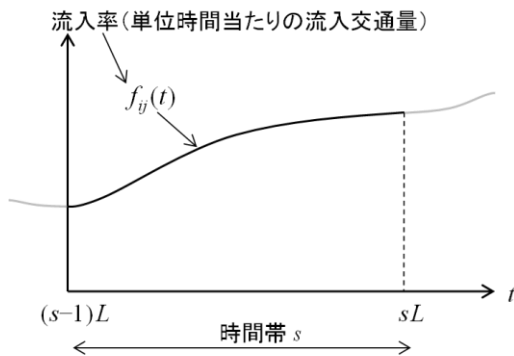


図-1 時間帯sでの流入率関数

## 3. 定式化

定式化に当たり、以下の3点の仮定を置いてある。

- A1. 各リンクでの旅行速度は時間帯内では一定
- A2. フローは連続時間で連続的に動く
- A3. 各リンクへの流入フローは流入した時間帯かその次の時間帯で流出する

このモデルでは、時間帯の長さを一定値の $L$ として、時間帯 $s \in S$ は連続時間 $(s-1)L$ から $sL$ までとする。ここで、 $S$ は時間帯の集合を表している。以後、時間帯は $s$ と表記し、連続時間は $t$ で記述することとする。またリンクについては、ノード $i$ からノード $j$ に至るリンクをリンク $ij$ と表記する。リンク $ij$ 上ではフローはノード $i$ からノード $j$ へのみ移動しその逆には動かないこととする。図-1に示すように、連続時間 $t$ でリンク $ij$ に流入するフローを $f_{ij}(t)$ とし、これを流入率関数と呼ぶ。これを用いると、時間帯 $s$ でリンク $ij$ に流入する交通量 $u_{ijs}$ は以下のよう

$$u_{ijs} = \int_{(s-1)L}^{sL} f_{ij}(t) dt$$

仮定A1より、時間帯内ではフローは定速でリンク上を移動するため、速度を $\rho_{ijs}$ とすると図-1のような流入率関数で流入したフローはある時刻 $t = sL$ では図-2のようになっている。図-1と図-2は丁度左右対称の形となっている。図-2中の $d_{ij}$ はリンク $ij$ の距離である。図-2において、 $100(L - d_{ij}/\rho_{ijs})\%$ のフローは時間帯内にリンクを流出し、残りの $100d_{ij}/(\rho_{ijs}L)\%$ は次の時間帯で流出する。仮定A3より、フローは流入した時間帯かその次の時間帯で流出する。ここで、時間帯 $s$ の開始時刻を0とした時刻を $t_s$ とおくと、 $t_s = t - (s-1)L$ が成り立つ。旅行速度を考慮すると、図-2中の灰色矩形部分は時間帯 $s$ 中に距離 $\rho_{ijs}t_s$ だけ進む。時間帯 $s$ の終了時刻では、矩形の部分のリンク終点までの距離は $d_{ij} - \rho_{ijs}t_s$ である。

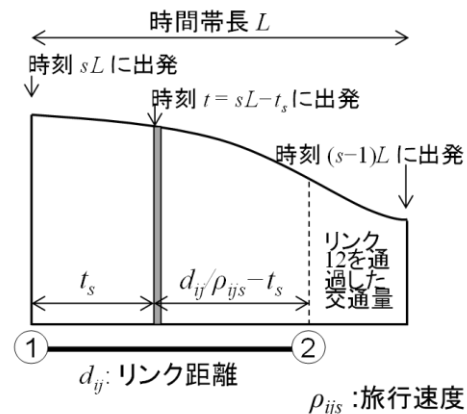


図-2 時間帯sでのリンクij上のフロー

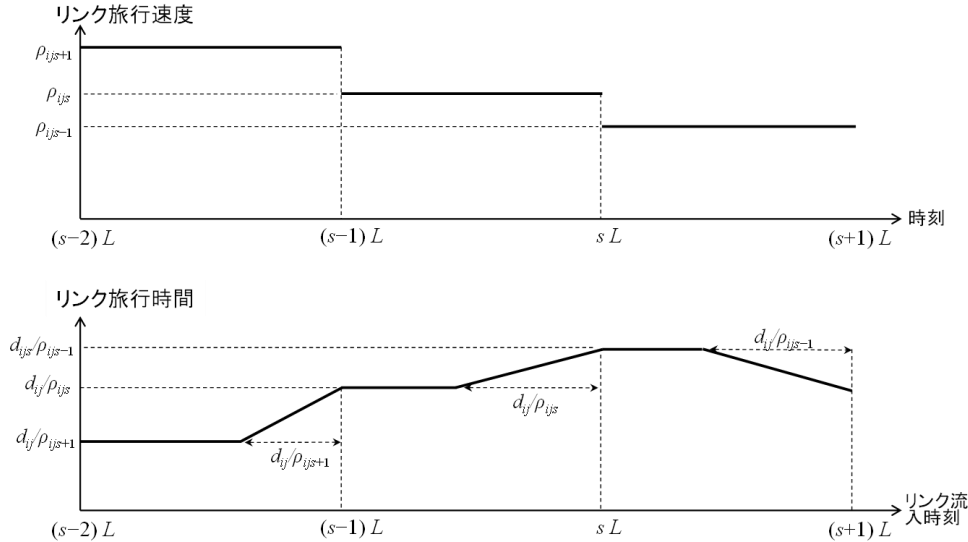


図-3 旅行速度とリンク通過に要する時間

次の時間帯  $(s + 1)$  での矩形のフローのリンク  $ij$  上の移動距離は  $d_{ij} - \rho_{ijs}t_s$  であり、旅行速度は  $\rho_{ijs+1}$  である。このことから、リンクを流出するのに要する時間は、

$$t_s + (d_{ij} - \rho_{ijs}t_s)/\rho_{ijs+1} = (1 - \rho_{ijs}/\rho_{ijs+1})t_s = (1 - \rho_{ijs}/\rho_{ijs+1})(sL - t) + d_{ij}/\rho_{ijs+1}$$

と表せる。以上より、リンク通過に要する時間は、以下のようになる。

$$c_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{d_{ij}}{\rho_{ijs}} & (s-1)L \leq t < sL - \frac{d_{ij}}{\rho_{ijs}} \\ \left(1 - \frac{\rho_{ijs}}{\rho_{ijs+1}}\right)(sL - t) + \frac{d_{ij}}{\rho_{ijs+1}} & sL - \frac{d_{ij}}{\rho_{ijs}} \leq t < sL \end{cases}$$

ここで、 $c_{ij}(t)$  は時刻  $t$  にリンク  $ij$  に流入したフローがリンクを脱出するまでに要した時間なので、以後、旅行時間と記すこととする。図-3には、時間帯  $s-1, s, s+1$  での旅行速度と旅行時間  $c_{ij}(t)$  である。仮定より、時間帯内で流出するフローの旅行時間は一定であるが、時間帯内に流出できず、次の時間帯でもそのリンク上を移動する場合、次の時間帯での旅行速度は異なっているので、次の時間帯での移動距離に応じた旅行速度となる。このようにして旅行時間が算出できると、流出率関数  $g_{ij}(t)$  が以下のように定義される。

$$f_{ij}(t) = g_{ij}(t) + c_{ij}(t)$$

時間帯  $s$  にリンクに流入しその時間帯内に流出するフローについてはそのまま考えれば良いが、次の時間帯に流出するフローや前の時間帯から残留しているフローの扱いは別途考えてやる必要がある。先述の通り、図-2中の矩形部分は時間帯  $s$  内でリンク  $ij$  上を距離にして  $\rho_{ijs}t_s = \rho_{ijs}(sL - t)$  だけ進むことになる。つまりリンク  $ij$  の  $100\rho_{ijs}t_s/d_{ij}\%$  だけ走行する。よって矩形部分のリンク  $ij$  への負荷を  $100\rho_{ijs}t_s/d_{ij}\%$  とする。このようにリ

ンクへのフロー負荷を足し合わせると以下ようになる。

$$x_{ijs} = \int_{(s-1)L}^{sL - \frac{d_{ij}}{\rho_{ijs}}} f_{ij}(t) dt + \frac{\rho_{ijs}}{d_{ij}} \int_{sL - \frac{d_{ij}}{\rho_{ijs}}}^{sL} \frac{d_{ij}}{\rho_{ijs}} (sL - t) f_{ij}(t) dt + \int_{(s-1)L - \frac{d_{ij}}{\rho_{ijs-1}}}^{(s-1)L} \left[1 - \frac{\rho_{ijs-1}}{d_{ij}} ((s-1)L - t)\right] f_{ij}(t) dt$$

第1項は時間帯  $s$  内でリンク  $ij$  を通過するフローの負荷分で、この部分は100%負荷する。第2項は時間帯  $s$  内でリンクを通過できなかったフローの負荷分であり、リンク  $ij$  を時間帯  $s$  内で走行した割合のみを負荷する。第3項は前の時間帯でのリンク負荷量である。この  $x_{ijs}$  を用いて以下の仮定を置く。

A4. 旅行速度は  $\rho_{ijs} = h_{ij}(x_{ijs})$  によって与えられる

配分を考える上で、フロー保存条件が必要である。ノード  $i$  に関して、ノードに流入する交通量と流出する交通量は等しくなければならない。このため、

$$\sum_{k \in N_i^{in}} g_{ki}(t) + \sum_{n \in D} q_{in}(t) = \sum_{j \in N_i^{out}} f_{ij}(t)$$

が成立する。また、

$$f_{ij}(t) = \sum_{n \in D} f_{ijn}(t) \text{ and } g_{ij}(t) = \sum_{n \in D} g_{ijn}(t)$$

である。ここで以下のような  $U_{in}(t)$  を定義する。

$$U_{in}(t) = \sum_{k \in N_i^{in}} g_{kin}(t) + q_{in}(t) = \sum_{j \in N_i^{out}} f_{ijn}(t)$$

このモデルはリンクベースであるため、リンク選択率ベクトル  $\mathbf{p}$  を考える。この要素は  $p_{ijns}$  で、ノード  $i$  を出発・通過するフローである  $U_{in}(t)$  が時間帯  $s$  でノード  $i$  を始点とするいずれかのリンクを通過する割合である。

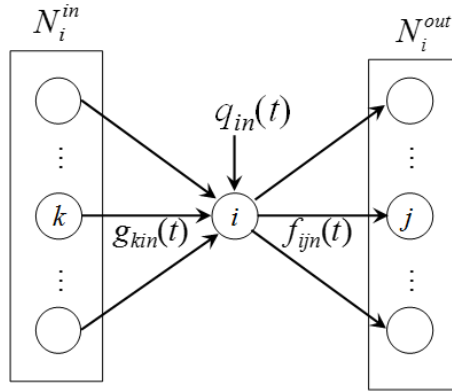


図-4 ノード*i*でのフローの保存

これを用いると、

$$f_{ijn}(t) = p_{ijns} U_{in}(t) \quad (s-1)L \leq t < sL$$

となる。また、

$$\sum_{j \in N_i^{out}} p_{ijns} = 1 \quad \forall i \in N, \forall n \in D, \forall s \in S$$

である。この  $p$  は以下の準動的均衡により与えられる。

時間帯  $t$  にノード  $i$  を通過してノード  $n$  へ向かう交通量及び、ノード  $i$  から発生しノード  $n$  へ向かう交通量は、リンク  $ij$  が最小旅行時間経路上にあればリンク  $ij$  を通過する事になる。ノード  $i$  から目的地ノード  $n$  への最小旅行時間  $\tau_{int}$  が、リンク  $ij$  の旅行時間  $c_{ijt}$  とノード  $j$  からノード  $n$  間での最小旅行時間  $\tau_{jnt}$  との和に等しければ、リンク  $ij$  はノード  $j$  とノード  $n$  間の最小旅行時間経路上にあるため、リンク  $ij$  上にノード  $n$  へ向かう交通量が存在しうる。よって  $x_{ijt} > 0$  ならば  $c_{ijt} + \tau_{jnt} - \tau_{int} = 0$  が成立し、 $c_{ijt} + \tau_{jnt} - \tau_{int} > 0$  ならば  $x_{ijt} = 0$  となる。このモデルは準動的配分であり、1つの時間帯内であってもリンク旅行時間は変化する。なので配分で用いる時間帯  $s$  でのリンク  $ij$  の旅行時間は、以下のような旅行時間の平均値を使用する。

$$\bar{c}_{ijs} = \frac{\int_{(s-1)L}^{sL} c_{ij}(t) f_{ij}(t) dt}{\int_{(s-1)L}^{sL} f_{ij}(t) dt}$$

仮定A3より、時間帯  $s$  にリンク  $ij$  に流入した交通量は時間帯  $s$  もしくは  $s+1$  にそのリンクを流出する。このため、最小旅行時間は時間帯  $s$  内のみで考えればよいわけではない。そのためこのモデルでは最小旅行時間を算出する際に、残留交通量と時間帯内で流出した交通量の重み付き平均として求めている。時間帯  $s$  にリンク  $ij$  に流入した交通量に関して、ノード  $j$  からノード  $n$  への最小旅行時間  $\mu_{ijns}$  を次のように定義する。

$$\mu_{ijns} \equiv r_{ijs} \tau_{jns} + (1 - r_{ijs}) \tau_{jn(s+1)}$$

ここで、 $r_{ijs}$  は時間帯  $s$  でリンク  $ij$  へ流入したフローの内その時間帯内で流出する割合である。この  $r_{ijs}$  は次のよ

うに与えられる。

$$r_{ijs} = \frac{\int_{(s-1)L}^{sL} \rho_{ijs} f_{ij}(t) dt}{\int_{(s-1)L}^{sL} f_{ij}(t) dt}$$

以上から、準動的均衡配分は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \bar{c}_{ijs} + \mu_{ijns} - \tau_{ins} &= 0 \quad \text{if } p_{ijns} > 0 \\ \bar{c}_{ijs} + \mu_{ijns} - \tau_{ins} &\geq 0 \quad \text{if } p_{ijns} = 0 \end{aligned}$$

相補形式で表せば、 $\forall ij \in A, n \in D, s \in S$  で以下のようにになる。

$$\begin{aligned} p_{ijns} (\bar{c}_{ijs} + \mu_{ijns} - \tau_{ins}) &= 0 \\ p_{ijns} \geq 0, \bar{c}_{ijs} + \mu_{ijns} - \tau_{ins} &\geq 0 \end{aligned}$$

また、 $p$  は割合なので、 $\forall ij \in A, n \in D, s \in S$  で以下の条件を満たす。

$$\begin{aligned} \tau_{ins} \left( \sum_{j \in N_i^{out}} p_{ijns} - 1 \right) &\geq 0 \\ \tau_{ins} \geq 0, \sum_{j \in N_i^{out}} p_{ijns} - 1 &\geq 0 \end{aligned}$$

#### 4. 仮想ネットワークへの適用

先述したモデルを、2OD8リンクの仮想ネットワークに適用した。適用したネットワークは図-5に示したものである。図中のノード1から  $q(t)$  の、ノード2から  $z(t)$  の需要が発生する。目的地ノードはノード6である。これに本モデルを適用して計算を行う。リンクパラメータは表-1に示したとおりである。モデルを適用した結果は表-2に示すようになった。

$$q(t) = \begin{cases} 5t, & 0 \leq t < 1 \\ 10 - 5t, & 1 \leq t < 2 \end{cases}$$

$$z(t) = \begin{cases} 3t, & 0 \leq t < 1 \\ 6 - 3t, & 1 \leq t < 2 \end{cases}$$

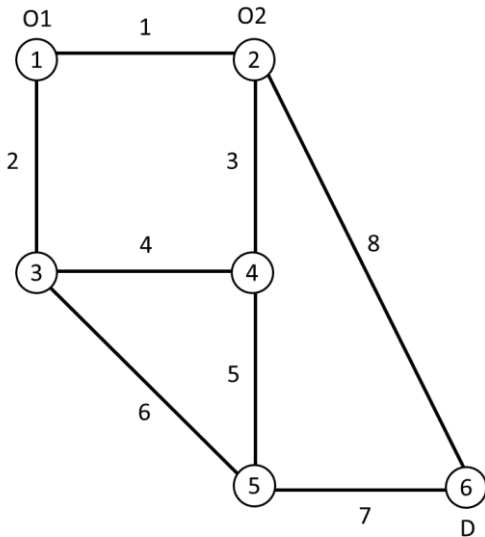


図-5 20D8 リンク仮想ネットワーク

表-1 リンクパラメータ

リンク	1	2	3	4
距離(km)	10	10	10	10
最高速度(km/hr)	60	100	60	100
交通容量(pcu/hr)	5000	6000	5000	6000
リンク	5	6	7	8
距離(km)	10	14	10	22
最高速度(km/hr)	60	100	60	100
交通容量(pcu/hr)	5000	6000	5000	6000

表-2 適用結果(リンク速度)

リンク	1	2	3	4	5	6	7	8
時間帯1	63.7	61.0	72.6	75.0	77.9	53.6	67.2	54.1
時間帯2	76.7	69.8	72.6	79.9	77.9	54.1	67.2	51.2
時間帯3	50.1	80.0	72.6	80.0	77.8	79.6	67.2	79.4

単位: km/hr

表-3 適用結果(リンク選択確率)

リンク	1	2	3	4	6	8
時間帯1	0.05	0.96	0.68	0.12	0.88	0.32
時間帯2	0.97	0.03	0.12	0.03	0.97	0.88

### 5. 今後の課題

4章で示した計算結果について、流入関数と流出関数の図化を行う。また、均衡が成立している事を確認し、本モデルを金沢都市圏などのより拡張したネットワークに適用して計算を行う。また、実際のネットワークでは、公共交通を含むネットワークが形成されているため、公共交通を含むネットワークへこのモデルを適用すべく、モデルの拡張方法の検討を進めていく。

謝辞: 本研究は国土交通省・道路政策の質の向上に資する技術研究開発の支援を受けて実施した。ここに記して感謝致します。

### 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) 中山晶一郎: 需要・交通量を連続時間で扱う準動的交通量配分, 土木計画学研究・講演集, CD-ROM, 2013年
- 7) 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

(2016.? 受付)

## TIME-OF-DAY TRAFFIC ASSIGNMENT WITH CONTINUOUS-TIME TRAVEL DEMAND AND FLOW

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