

信号交差点を考慮した DUO 配分に関する基礎的研究

A basic study on Dynamic User Optimal assignment considering signal intersection

高橋 信義*・内田 賢悦**・加賀屋 誠一***・萩原 亨****

By Nobuyoshi TAKAHASHI, Ken-etsu UCHIDA, Seiichi KAGAYA, Toru HAGIWARA

1. 背景と目的

近年、静的交通配分に代わり、時間帯別交通配分（準動的交通配分）や動的交通配分とよばれる配分モデルが現れてきた。このようなモデルが現れてきた背景には、以前より発展してきた静的交通配分モデルが抱える本質的な問題点である渋滞状態を適切に表現できない¹⁾ということがあげられる。

本研究では、桑原ら²⁾が提案している DUO 配分をベースとし、これに信号交差点を表現することを試みる。桑原らのモデルは、高速道路のランプ部を対象としており、信号交差点は表現されていない。その他、動的なモデルを扱っている論文には、赤松隆の交通ネットワーク・フロー・モデル分析とデータ革命¹⁾や鈴木祐介らの都市交通シミュレーションモデルの適用³⁾などの論文がある。しかし、どれにも信号交差点を含んだものはなかった。だが、地区内交通を考える上では信号交差点の影響は無視できないほど大きい。よって、本研究では、こうしたミクロ的なネットワークを対象としたモデル構築を行う。

2. DUO (Dynamic User Optimal) 配分⁴⁾

(1) DUO 配分原則

DUO 配分は、各瞬間の状況についてのみ完全な情報を持つ利用者が、時々刻々、将来の変化の先読みはせず、“瞬間的な最短経路”を選択するという原則に基づいたモデルである。ITS 技術が発展していくと、このような状況が成立するものと予測される。

(2) 動的なネットワーク・フローの条件

動的なネットワークは、以下の条件を満たす。

(a) 各ノードでのフロー保存則

ネットワーク上の各ノード k では、任意の時刻 t において、以下のフロー保存則の式(1)が成立しなければならない。この式は、ノードで交通が発生・吸収されることを示している。

$$\sum D_{ik}^d(t) - \sum A_{ij}^d(t) + Q_{kd}(t) = 0 \quad (1)$$

$A_{ij}^d(t)$: 終点 d を持つ車両のうち時刻 t までにリンク (i, j) へ流入した累積台数

$D_{ij}^d(t)$: 終点 d を持つ車両のうち時刻 t までにリンク (i, j) から流出した累積台数

$Q_{kd}(t)$: 時刻 t までにノード k から発生し、終点を d とする累積台数

(b) 各リンクでの状態方程式

各リンクでは、以下の関係式(2)が成立する。この式は、リンクにおいて交通の発生や吸収が起こらないことを示している。

$$X_{ij}^d(t) = A_{ij}^d(t) - D_{ij}^d(t) \quad (2)$$

$X_{ij}^d(t)$: ネットワーク上の各リンク (i, j) に存在する車両の台数

終点を区別しない存在台数にも同じ式を当てはめることができる。

(c) 各リンクでの First-In-First-Out 条件

道路交通では、追い越しがなければ、各リンクの入口への車の到着順序と出口での退去順序は同じである。この原則の下では、流入交通量と流出交通量は、次の関係式(3)を満たさなければならない。

$$A_{ij}^d(t) = D_{ij}^d(t + C_{ij}(t)) \quad (3)$$

$C_{ij}(t)$: 時刻 t にリンク (i, j) へ流入した交通流がそのリンクを流出するまでに要する旅行時間

(d) DUO 配分基本式

DUO 配分の基本式は、以下の式(4)、式(5)で表される。

キーワード DUO 配分、渋滞、信号交差点

* 学生会員 北海道大学大学院都市環境工学専攻

(札幌市北区北13条西8丁目 TEL 011-706-6212 FAX 011-706-6211)

** 正会員 博(工) 北海道大学大学院都市環境工学専攻

*** フェロー 学博 北海道大学大学院都市環境工学専攻

**** 正会員 工博 北海道大学大学院都市環境工学専攻

- ・ リンク ij が時刻 t におけるノード i からノード d までの最短経路上にある場合

$$\pi_{id}(t) - \pi_{jd}(t) = \tau_{ij}(t) \quad (4)$$

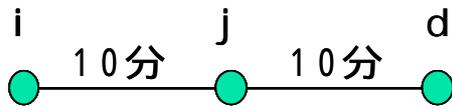


図1 経路図1

- ・ それ以外の場合

$$\pi_{id}(t) - \pi_{jd}(t) \leq \tau_{ij}(t) \quad (5)$$

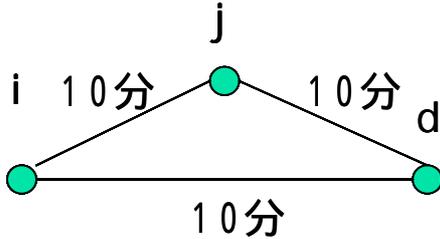


図2 経路図2

$\pi_{id}(t)$ は時刻 t に実現しているリンク・コスト・パターンで計算されるノード i から終点 d までの最短旅行時間（あくまでも、時刻 t の“瞬間的”な最短旅行時間）、 $\tau_{ij}(t)$ はリンク ij を通過する旅行時間を意味している。図1、図2は、これらの式の状況を示している（各リンクの旅行時間を10分とした場合）。式(4)が図1、式(5)が図2の状況と対応している。DUO配分では、目的地 d を目指す交通がリンク ij を選択した場合、リンク ij がノード i から目的地 d までの最短経路上にあることを意味する。それを式で表すと式(4)のようになる。式(5)は、交通が目的地 d までの最短経路としてリンク ij を選ばなかったことになるので、リンク ij を通過しての目的地 d までの旅行時間は最短旅行時間よりも多くかかることを示している。

3. 渋滞表現

本研究でも、桑原らが示した Shock Wave の考えを適用し、渋滞を表現している。Shock Wave を説明する前にまず Wave について説明する。Wave とは、道路区間上において交通密度 (k) (と交通流率 (q)) が微小変化する点の軌跡を表したものをいう。また、Wave には、交通の進行方向と同じ方向に進む Forward Wave (自由流領域で発生) と、逆方向に進む

Backward Wave (渋滞領域で発生) の二つに分類される。交通密度 k が変化する点の軌跡であるので、Wave 上では密度が一定である。つまり交通密度が一定な部分が移動する軌跡を示したものであることになる。

次に、図3に示す $q-k$ カーブにおける Wave の速度について述べる。本来、道路上で実現する $q-k$ カーブは交通流理論で表されるような上に凸となる曲線となるが、その $q-k$ カーブを簡易化し、原点・最大交通流率 f_j^{max} ・最大密度 (飽和密度) k_j^{max} を各点とする図3に示す三角形として扱うことにした。これは、三角形で扱うことにより Forward Wave の速度 W_{ij} と Backward Wave の速度 $-W'_{ij}$ が各流率や密度の変化によって変化しないものとして扱うことができるためである。

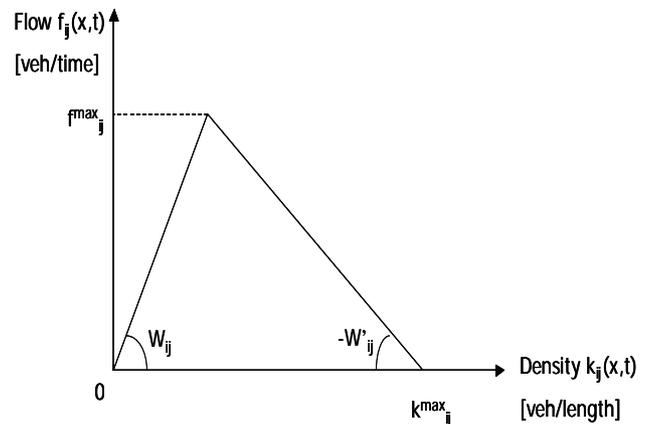


図3 $q-k$ カーブ

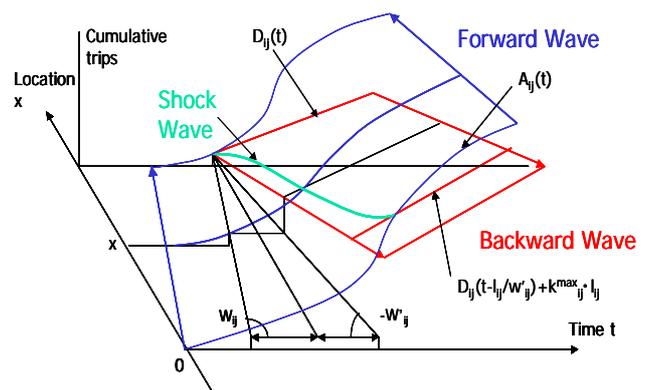


図4 リンク上の Wave 伝達の3次元表現

最後に、図4に3次元図で示した Shock Wave について述べる。Shock Wave とは、速度や向きが異なる Wave が交わった点で生じ、そこでは交通密度が不連続となる。すなわち、Shock Wave は渋滞の最後尾の軌跡を示すものである。Forward Wave、つまり車

のリンク内での移動の軌跡と一定の速度を持っている Backward Wave 平面とが交差するところに渋滞が発生する（図4）。また、Shock Wave が発生した後は、車の移動は Backward Wave 平面の影響を受けるため、リンク流出交通量 $D_{ij}(t)$ は、図4に示したようになる。よって、Shock Wave が発生する条件は、 $D_{ij}(t - l_{ij}/w'_{ij}) + k^{max}_{ij} \cdot l_{ij}$ を超える $A_{ij}(t)$ が流入している場合となる。

4. 信号交差点の表現

本研究では、信号交差点内をダミーリンクで表している。そして、各ダミーリンクにおいて信号の現示のパターンを各ノードに与えている。現示1を赤・青・赤・青・・・、現示2を青・赤・青・赤・・・のように表し、赤の現示では、次のリンクに車両が進めないようにした。また、スプリットを変えることで信号が青になるタイミングを変える時差式信号も表現可能とした。図5は、ノード a、b、c、d により作られる信号交差点内のダミーリンクを示している。

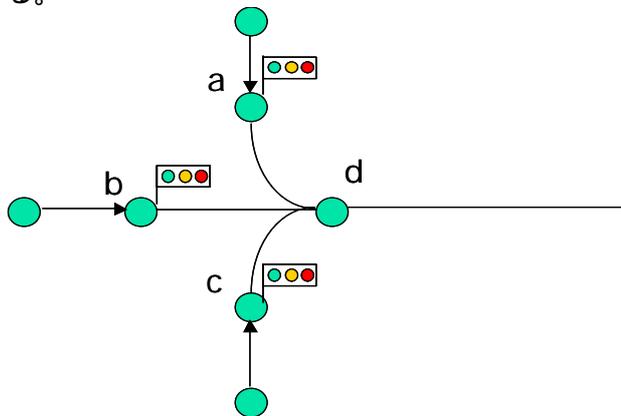


図5 信号交差点内のダミーリンク

信号交差点内に流入した車両がそこに停滞している場合は、その後車両が交差点に流入することが出来ない。そのため、信号交差点を表現するダミーリンクに流入した車両は現示に関係なく次のリンクに通過していけるようにした。よって、信号制御を行うのは、図5に示しているように、ダミーリンクの手前のリンクの終端 a,b,c で行うことになる。交差点内に流入した車両は、そのまま次のリンクに通過していくのでノード d において3つの方向から交通が流入する状況が出てくる。その場合、先のリンクの許容受け入れ流率の 1/3 の交通流が、それぞれの交

差点ノードから流入できると考える。また、それぞれから流入できる交通流率に満たない交差点リンクでは、すべての交通流が流入する。そして、流入できる交通流率と実際に流入した交通流の差が、他の2つの交差点リンクに割り振られる。それにより、他のリンクでは、割り振られた分だけ多くの交通が流入できることを表現している。また、分流部においては、最短経路にすべての交通流が流れる。そのため、合流部のような計算は必要としない。

また、特に交通流が信号交差点に流入しようとする時、交差点内の渋滞により、流入できない場合が考えられる。そのため、各リンクに入る時に次のリンクの許容受け入れ交通流率を超える交通流は、次の時間に持ち越されることになる。たとえば、図5でノード a についたとしても、交差点内リンク ad の許容受け入れ流率を超えるものは次の時間に持ち越される。

リンクの先の信号ノードが赤信号であるリンクでは、その青信号にならなければ、その先のリンクに進めない。そのため、瞬間的な最短経路選択を行う際には、赤信号のリンクには、その旅行時間にリンクの赤の残り時間を足したものを旅行時間として用いている。このように計算して、信号交差点の影響を考慮して、時々刻々、“瞬間的な最短経路”を選択する DUO 配分モデルを作成した。

5. 計算結果

図6は、本研究で扱った仮想ネットワークを示している。図6は、ノード A からノード B で経路選択を行い、ノード D に向かって交通が流れるようにしてある。また、ノード C は4章で説明した信号交差点ノードである。

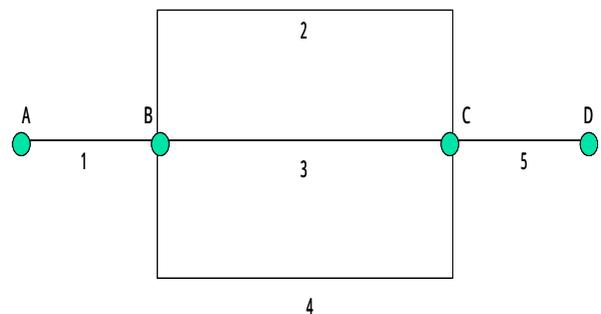


図6 本研究で扱った仮想ネットワーク

表1は、それぞれのリンクのリンクデータである。今回の計算においては、図6の仮想ネットワークに表1のようなリンクデータを与え、その信号のサイクル時間は60秒、スプリットは0.5と与えた。また、OD交通量は、流率1.7台/秒とし、120秒間与えた。

図7、図8、図9は、それぞれ今回の計算で得られた累積流入交通量、渋滞長、旅行時間を示している。図7を見ると、最初リンク3に交通が流れるが、信号により交通の流れが止められてしまうため、最短経路が変化し、経路を変更している。その後も、信号が変わるたびに最短経路が変化して交互に経路を変更していることがわかる。また、図8、図9を比べると、渋滞長と旅行時間の図の形が同様な形状をしており、渋滞長が伸びたことによりリンクの旅行時間が長くなっているのがわかる。交通流は最短経路に流れていく。しかし、赤信号になることにより、リンクを通過できず、渋滞が発生する様子が見られる。また、信号が青になり渋滞が解消していくということが繰り返されている。

6. まとめ

本研究の成果としては、信号制御を導入したDUO配分を構築した点にある。それによって、細街路を含む道路ネットワークの交通流解析への発展が可能となった。今回の計算において、各リンクの旅行時間は、渋滞長の変動や信号制御により流動的に変化する。実際の道路においても、多くの利用者が信号の影響を考えて経路選択を行っていると考えられる。本研究の成果としては、信号制御の影響を表現できたことである。

今後は、現実の道路状況に近づけて、より大規模な都心ネットワークを対象に交通施策の評価や、信号制御に関する評価に利用できるようにしていきたい。

参考文献

- 1) 赤松 隆：交通ネットワーク・フロー・モデル分析とデータ革命, 交通工学 Vol.37 No.5, 2002, P22-37
- 2) Masao Kuwahara, Takashi Akamatsu: Dynamic user optimal assignment with physical queues for a many-to-many OD pattern, Transportation Research

Part B 35, 2001, P461-479

- 3) 鈴木祐介, 森田緯之, 原隆広, 吉井稔雄, 桑原雅夫: 都市交通シミュレーションモデルの適用, 交通工学 Vol.38 No.1, 2003, P56-65
- 4) 交通ネットワークの均衡分析 最新の理論と解法, 社団法人 土木学会, 丸善, 1998

表1 リンクデータ

リンク番号	リンク長 (m)	速度 (km/h)	最大密度 (台/km)	最大流入交通量 (台/h)
1	120	30	600	7200
2	150	60	600	7200
3	140	40	600	7200
4	160	45	600	7200
5	100	45	600	7200

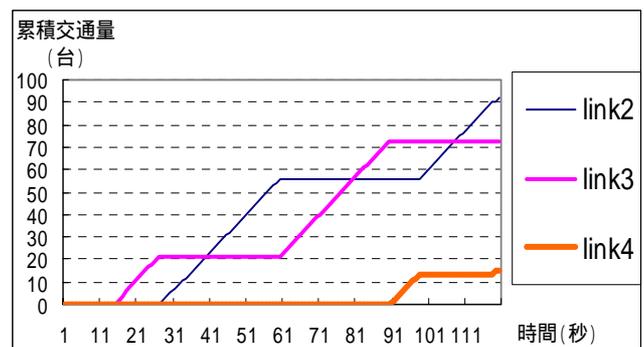


図7 流入交通量

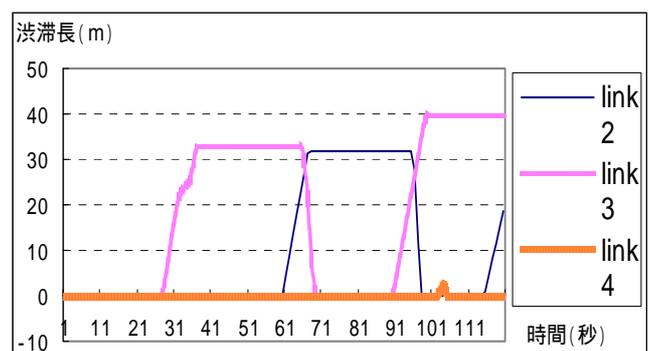


図8 渋滞長

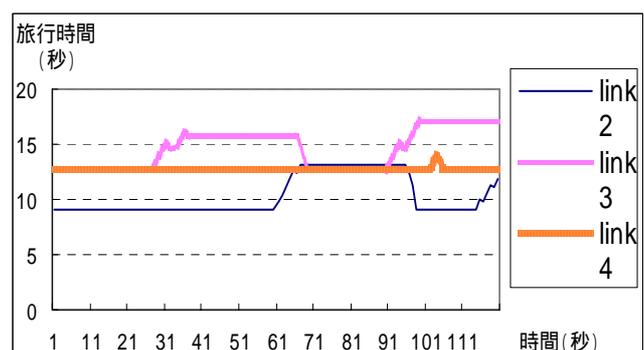


図9 旅行時間