

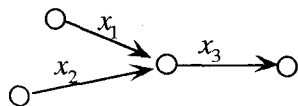
動的配分理論の現状と役割

赤松 隆 (豊橋技術科学大学知情報工学系)

(1) 静的配分の問題点と動的配分

本節で述べる“動的配分”とは、交通ネットワーク上の時々刻々の交通流の変化を追えるような配分方法を指す。なお、“動的配分”は、広義には、より長い時間間隔、例えば、day-to-dayの交通変化を追ってゆくようなものも含まれるが、ここでは、狭義の(i.e.“時々刻々の”)動的配分に絞って議論する。また、“動的配分”は、そのモデリング/分析アプローチの違いから、数理(理論)モデルとシミュレーション・モデルに分類できる。本節では、主に前者のみについて述べる。

動的配分理論の内容の議論に入る前に、まず、静的配分の抱える根本的矛盾点を下図の簡単な例で考えよう。動的配分が理論的に必要とされる最も基本的な理由のエッセンスは、この例に含まれている。



通常の静的な配分では、リンク3の交通量 x_3 は、フロー保存則により $x_1 + x_2$ として計算され、リンク3のコストは $C_3(x_1 + x_2)$ として評価される。しかし、ここで、 x_1 、 x_2 が各々、8時から9時までの1時間にリンク1、2へ流入した交通量であるとし(9時以降にはリンク1、2とも流入しない)、各リンクの通過所要時間が10分、70分であるとしよう。この場合、リンク1、2からの交通量は全く重なることがない。つまり、どのように交通量観測時間帯をずらしても、リンク3の交通量は $x_1 + x_2$ とはならない。従って、そのような場合には、静的な配分におけるリンク・コスト関数の評価は全く無意味な操作をしていることになる。これは、動的配分の研究が始まる以前から度々指摘されてきた静的配分の根本的な欠陥である。もちろん、静的配分では“定常流”の仮定がおかれているが、仮にOD/リンクフローが定常的であるとしても、各リンク内に存在する車の台数は時間的に変化する^{*1}。この存在台数は混雑した状態(特に、渋滞状態)では、リンク・コストに非常に大きな影響を与えるから、やはり、静的なフローのみでリンクコストを評価することの意味は極めて曖昧なものとなってしまう。

以上のような矛盾点は、フローを時刻別に記述し、

空間移動(および滞留)と時間経過の概念をモデル内に明示的に取り入れなければ解消できない。これが、理論的に動的配分が必要とされる最も根本的な理由である^{*2}。

(2) 動的配分理論の現状

現在まで、様々な“動的配分モデル”が提案されている。それらのモデルの分類は、a)動的なネットワークフローの表現、b)配分(経路選択)原則；の2つの軸で分けて考えるとわかりやすい。

a)については、動的配分の数理型モデルの草分けともいえるMerchant and Nemhauser (M&N) 以来、様々な表現がなされてきた。なかでも最も混乱が大きかったのはリンクの流入・流出フローの関係の表現方法である。M&N model は、各リンクでのFirst-In-First-Out (FIFO) 原則が成立しないため、そのままでは実際の動的交通流を分析するモデルとしては不適当である。このことが本格的に認識・議論され始めたのは意外に最近である^{*3}。1980年代末から1990年代初頭に現れた動的配分モデルの多くは M&N modelに引きずられた不適切なモデリングを受け継いでいるか、あるいは静的配分モデルと同様の変数でモデリングを試みている。動的配分モデルを利用する基本的な目的は、(1)で述べたように、空間移動と時間経過の関係を正しく考慮した交通状況の把握である。従って、そのモデル構成変数として、最低限でも、各リンクにおける流入率、流出率、存在台数の3種類の変数が用いられるべきである。そして、各リンクでのFIFO原則等を含むネットワークフローとしての各種保存則が記述されていなければモデル構築の意味がない^{*4}。ここ数年になって、ようやく、この観点から見て妥当な/許容できるモデルの定式化とそれに対応した理論的解析が進み出したという状況である。

次に、b)の配分原則については、現在、ある程度の理論的知見が得られ、かつ今後拡張モデルを構築してゆく上でも基本的と考えられるものは以下の3つであろう：①動的利用者均衡配分(DUE: Dynamic User Equilibrium)、②動的利用者最適配分(DUO: Dynamic User Optimal)、③動的システム最適配分(DSO: Dynamic System Optimal)。

ここにあげた DUE、DUO、DSOの各配分原則の定義は以下の通りである^{*5}：①DUE：全ての時刻、

全ての利用者に対して、各利用者が自分だけ経路を変更することによって、事後的に経験するODペア間の所要時間が減らせないような動的フロー・パターン、②**DUO**：全ての利用者が、目的地までの通過ノード毎に、その通過時点で実現している目的地までの所要時間が最小になる経路を選択した結果として成立する動的フローパターン、③**DSO**：ある計画時間内におけるネットワーク全体での利用者の総走行時間を最小化する動的フロー・パターン。

以上の配分原則のうち、②の**DUO**は、その定義から明かなように、配分計算も極めて容易である。**DUE**と**DSO**については、信頼性のある計算法は、未だ開発途上段階にある。**DUE**は、1起点多終点/多起点1終点ODペアの場合については、理論的特性の解明も進み、ある程度信頼できる計算法も開発されている。しかし、多起点多終点ネットワークについては理論的に不明な点が多く、実用的計算法も開発されていない。また、**DSO**については、いくつかのヒューリスティクスは提案されているが、信頼性のあるアルゴリズムは開発されていない^{*6}。

なお、以上で述べた動的配分原則の他にも、動的な確率的均衡配分の様に、より実際の利用者の行動記述を行うことを意図したものもある^{*7}。しかし、その種の配分原則では、数理モデルの重要な役割の一つである理論的特性の解明や信頼性のある計算アルゴリズムの開発は、ほとんど進展していない。

また、以上の“ネットワーク配分理論(モデル)”とはやや異なった系譜として、出発時刻選択の動的均衡問題を扱った一連の研究がある。これは、フレックス・タイムやロード・プライシングの様な交通政策分析のためのツールとして、その発展が期待されるものである。しかし、現状では、これらの研究は、一般ネットワークを対象としたモデリングがされておらず、非常に限られた状況しか扱うことができない。将来的には、出発時刻選択と経路選択の同時均衡型の一般ネットワーク・モデルの研究が進展することが期待される。

(3) 動的配分理論の意義と役割

上に述べられたことから明かなように、動的配分理論は、静的ネットワーク・フロー理論に比べて極めて多くの未解明事項が残されている。また、動的配分適用の“環境条件”を構成する最近の情報技

術の進展と交通管理への応用、あるいは動的ネットワーク流の実証的な側面についても未だ不確定・未解明な点が多い。従って、ここでは、具体的な適用状況を考えた議論ではなく、一般的方向付けとしての動的配分理論の意義・役割を述べるにとどめる。

理論モデルの第一の意義・役割は、理論(数理)モデルとシミュレーション・モデルとの対比から言える以下の点であろう^{*8}：a)モデル構築の仮定が単純・明快で、その意味が説明・理解しやすいこと、b)アドホックなシミュレーション等による様々な予測結果に対する基本的かつ汎用的な参照点となりうること。この2点は、動的配分理論に限らず、一般的な理論全般についてあてはまることである。

動的配分理論の第二の役割は、規範的モデルと記述的モデルの特性比較/関係の導出である。これにより、路車間通信等を利用した動的な経路誘導のあり方や混雑料金制度等の交通管理政策の方向付けに貢献することができるであろう。現状では、**DUE**や**DUO**と**DSO**との関係の理論的解析はあまり進んでいないが、今後、交通管理政策的な含意を持った理論の進展が期待される^{*9}。

ところで、静的配分モデル以来の慣習に従えば、**DUE**、**DUO**配分＝予測(記述的)モデル、**DSO**配分＝制御(規範的)モデルの観点で理解されがちである。しかし、ここで、路車間情報通信により全利用者が経路誘導情報を受け、その通りに経路選択を行う様な状況を想定してみよう。その場合、もし経路誘導情報として**DUE**配分計算結果を用いるなら、**DUE**配分は予測モデルというよりも制御手法となる^{*10}。実際、制御手法として**DSO**と**DUE**を比較すると、システムの安定性および制御操作に必要な情報等の観点からは、むしろ**DUE**配分の方が優れた制御手法であるといえる^{*11}。従って、動的配分理論は**DSO**に限らず、ネットワーク・フローの動的制御・誘導のプロトタイプ・モデルとしての役割も持っていると言えるだろう^{*12}。これは、理論を操作的に扱える可能性のある動的配分と、それが困難な静的配分理論との大きな相違点である。

第四の役割は、各種モデルの関連づけ/体系化を行うことであろう。第一の意義・役割とも関連するが、シミュレーション・モデルでは、モデル間の本質的な関係が不明なことが往々にして生じる。その整理は、動的配分理論の役割である。また、この結

果として、シミュレーション・モデルでアドホックに行われていた手続き(eg. ある種の収束を意図した繰返し計算手続き等)の正確な意味付けや効率的な計算アルゴリズムの開発等が可能となるであろう。

最後に、以上に述べられた動的配分理論の役割を見れば、その限界も自ずと明らかになる。例えば、道路状態や利用者行動の細部をモデルに組み込み、現実と適合させることは、動的配分理論の基本的な目的から困難である(モデルを複雑にした結果、理論的解析が全くできなくなれば、それはシミュレーションモデルと変わりがなく、数理論モデルの意義は薄れる)。従って、シミュレーション・モデルと数理論モデルは、対立するものではなく、状況／目的に応じて相補的に利用されるべきものであるといえよう。

※1 例えば、リンクの容量を超えた交通量が常に流入していれば、時間を追うにつれてリンク内に存在する台数は増加する。

※2 この問題点を静的配分モデルに近い枠組で簡便に改善する方法が、第2節で述べられた“時間帯別配分”である。しかし、残念ながら、時間帯別配分は各時間帯内では静的な分析枠組みとなっているため空間的移動と時間経過の関係を明示的に取り扱えず、矛盾の根本的解消は困難である。

※3 M&Nモデルの不適切さ自体は、かなり以前から良識的研究者には認識されていたと思われるが、“正しいモデル”における理論的解析の困難さから議論されず放置されていたのであろう。動的なネットワーク交通流では、a) リンクの流入率と流出率の関係を定める“リンクサービス基準”(例えば、FIFO原則)、b) リンクの存在台数(交通密度)、流入率、流出率の関係;の2つを決めれば、それらに基づいてリンク通過所要時間が決まる、にもかかわらず、多くの研究では、これとは不整合なリンクコスト関数等からリンク通過所要時間を決定していた。

※4 適切なシミュレーション・モデルでは当然のこととして導入されていたことがらが、数理モデルでは数理的解析の便宜から犠牲になっていた。

※5 ここで、①②はいずれも利用者が“最短所要時間”の経路を選択する(あるいは、そうなる様に誘導・制御される)と考えた場合の配分原則である。両者の違いは“最短所要時間”の定義にある。①では、目的地に到着するまでの将来時間内において自分が選択する経路上で実現する所要時間を完全に予想した上での最短経路を選択する。それに対して、②では、時々刻々変化する所要時間を“近視眼的に”見て“最短経路”を選択するため、事後的に見ると必ずしも最短所要時間経路を選んだことにならない。この違いから、①は“予測型利用者最適配分”、②は“瞬間の利用者最適配分”と呼ばれることもある。

※6 DUEでは、配分原則の特性から、ある種の分解原理

が適用できる。一方、DSOでは、その種の分解特性が無いため、理論的に厳密・効率的な計算法の開発は、DUEに比べ困難であろう。

※7 単にモデルを定式化し、アドホックな解法を提案するだけなら極めて容易であり、困難な点は特に無い。

※8 a)は、シミュレーション・モデルの典型的な欠点の裏返しである。シミュレーション・モデルを現実と適合させようとすれば、非常に多くのパラメータ、仮定、ルール等を含んだものとなり、モデル作成者以外には、その内容が非常に見えづらくなってゆくのが常である。また、いわゆる over-fitting 状態になり、モデル作成時と異なった状況での予測や政策分析に利用できないという事態にも陥りやすい。これに対して、より本質的な箇所のみに絞った簡明な仮定・原則のみで現象を表現し、本質的な結果の方向を与えるのが理論モデルである。ただし、動的配分モデルの利用目的からみて、理論が意味あるものとなるためには、空間的移動と時間経過の表現が明示的かつ無矛盾に行われていなければならない。また、(2)で述べた動的ネットワークフローの表現則等は最低限備えるべきであろう。

b)は、シミュレーション利用の際の理論モデルの相補的な利用法を意味している。シミュレーションでは、パラメータ設定による結果の違いや、異なったモデル間での比較が難しく、モデル利用者も“どの結果を信じればよいのか分からない”という状況がしばしば生じる。数理モデルおよびそこから導かれる理論は、そのような状況に対する一種の“ベンチマーク”としての役割を果たすべきである。

※9 なお、計画／管理／政策評価システム全体の整合性を考える場合、動的配分モデルは、単に、現象に適合することだけをその目標とするべきではない。むしろ、計画／管理／政策に関わる便益計算等を統合的に行えることが重要である。そのためには、予測手続き・変数間に矛盾がないことや一貫した行動モデルに立脚している必要がある。これは、動的配分理論が果たすべき重要な役割であり、規範的モデルと記述的モデルの関係解析は、その様な観点からの理論の応用の一つの例である。

※10 通常の規範的モデルの定義では“社会的最適”の最適性は“効率性”でとらえられるが、これを“公平性”で考えるなら、DUE配分は最も公平な“社会的最適配分”を達成する規範的モデルである。

※11 DUE配分では、全利用者が誘導経路通りの選択をすれば各自が経路変更をする動機付けがなくなるため、システム構成要素の運動原理から見て安定的な制御手法である。一方、DSOは、情報による誘導のみでは安定性がないため、完全自動運転のような状況あるいは適当な混雑料金を用いなければ実現可能性が無い。また、DUEは、1起点多終点ネットワークでは、将来のOD交通量の予測なしに時々刻々配分できるという特性を持っていることが理論的に明かにされている。従って、計画時間帯全ての交通情報が必要とするDSOに比べて現実的な制御方法と考えられる。

※12 まさに、ここでやっている様な議論・考察をより進めるための道具建ての提供も動的配分理論の役割である。