

これからの広域ネットワーク解析－静から動への転換*

A Wide-Area Network Analysis from Now - from Static to Dynamic Models*

桑原雅夫**, 堀口良太***

By Masao KUWAHARA** and Ryota HORIGUCHI

1. 渋滞という動的現象

道路には交通容量があり、それを上回る需要がやってくると、容量を上回る超過需要がその地点に滞留して渋滞が発生する。例えば、容量 2000 [台/時] の道路に 10%増の 2200 [台/時] の需要がやってくる場合には、1 時間後には 200 台の車両が滞留して渋滞列を作る。もう 1 時間この状態が続けば、滞留台数は 400 台に増加してしまう。このように、渋滞はネットワーク上に車両が滞留する現象で、同じ需要レートがやってきたとしても滞留台数は継続時間とともに累積していくので、渋滞現象は動的である。渋滞による旅行費用の増加は大きく、ネットワーク解析を行う場合には、これを適切に扱うことがきわめて重要である。

この例のように同じ需要レートが 2 時間続く場合にも、旅行時間は最初は短いが滞留台数が増えるにつれて、時間とともに単調増加を続ける。従来型の交通量配分モデルのように静的なモデルでは、結果として出てくるのは、たった 1 つの交通状態であり、このように時間的に変化する状況は再現できないことは周知の通りである。

2. 交通流モデル

(1) 静的モデル

静的配分の交通流モデルは、各リンクに決められているリンクパフォーマンス関数に従って交通量

をネットワークにロードするという方法である。リンクパフォーマンス関数は、横軸にリンクの交通需要、縦軸に旅行費用（あるいは旅行時間）をとって、交通需要によって旅行費用が変化する関係を表す関数である。

静的配分では、対象時間として 1 日あるいは数時間を取ることが一般的であるので、リンクパフォーマンス関数では、「対象時間帯における平均的な旅行費用」を「対象時間帯の総需要」の関数として表す。同量の総需要があるリンクにやってきたとしても、対象時間帯を通して均一にやってくる場合とあるピークをもってやってくる場合には、平均的な旅行費用は大きく異なる。従って、現象的に（需要と容量値などのリンク属性から決まる交通工学的な現象に基づいて）リンクパフォーマンス関数を求めようとするれば、そのリンクにやってくる需要の時間分布パターンが必要となる。

リンクパフォーマンス関数は、当該リンクの交通観測に基づいて、需要と平均的な旅行費用の関係をプロットすることができれば求められる。しかし、観測できる総需要はそれほどバラツキがなく、したがって旅行時間もごく限られた範囲にしか分布しないことが一般的である。よって、現在観測されていない総需要がやってきたときのパフォーマンス関数は、現象的には求められない。他の方法としては、需要の時間分布を現在観測されているパターンに固定して、総需要が変化した場合の旅行時間変化を簡単な計算で求めて、リンクパフォーマンス関数を決めることもある。しかし、この場合にも総需要が変化した場合に需要の時間分布パターンが変化するという効果を取り入れることが難しい。

したがって、多くの場合リンクパフォーマンス関数は、配分計算の結果であるリンク交通量が、観測交通量とよくあうように、キャリブレートして求められている。すなわち、現象的に決定することが

*キーワード：静的交通量配分，動的交通モデル，交通シミュレーション

**正員，Ph.D.，東京大学国際産学・共同研究センター

（東京都目黒区駒場 4-6-1，TEL:03-5452-6418，

E-mail: kuwahara@iis.u-tokyo.ac.jp）

***正員，工博.，（株）アイ・トランスポート・ラボ

難しいので、モデルに内在する一種のパラメータとしてキャリブレートされている。このように静的モデルのリンクパフォーマンス関数は、道路の幾何構造や交通運用から外生的に決めることが非常に難しい面があり、このことはたとえ現況再現性が確保されたとしても、将来などに需要レベルが変わってしまった場合に適切な結果が得られるとは限らないことを示唆している。

(2) 動的モデル

動的な交通流モデルについても、リンクパフォーマンス関数に相当する交通流の性質を表すモデルが必要である。大別すると、待ち行列モデル、S Vモデル、車両追従モデルに分けられる。

待ち行列モデルは、容量上のボトルネックに着目し、そこを待ち行列のサービス窓口として扱うモデルである。渋滞の場合は、需要が容量を超えるので、一般的には決定論的な待ち行列理論が使われる。車両の微細な挙動を表現することは必要なく、ボトルネックの容量と需要だけから時間的な旅行費用（時間）を求めることができるといった点で、ロバストなモデルである。ただし、待ち行列の延伸を表現するためには、道路区間の交通流率－交通密度関係といったマクロ的な関係が必要になる。（ここでいうマクロ的とは、個別の車両1台1台の関係ではなく、数分間程度の車両群の平均的な関係を指す。）

S Vモデルは、ある速度（V）で走行している車両が、どのくらいの車間距離（S）を保とうとするのかというS V関係を利用したモデルである。車両感知器などから得られるマクロ的な交通流率－交通密度関係から、S V関係を決めることが多い。これをさらに個別の車両の関係まで微細にしたものが、車両追従モデルである。S Vモデルと車両追従モデルを組み込んだ動的分析では、個別の車両を数秒程度の短いスキャンインターバルで移動させながら交通状態の変化を評価している。

静的なモデルに対する、これら動的モデルの長所は、上記3種類いずれのモデルであっても、交通現象と密接に結びついた関係を用いているために、現象を観測することによって、交通流モデルを外生的に決めやすいことである。静的なモデルでは、現象

との結びつきが希薄であるのでパラメータとしてリンクパフォーマンス関数を同定する必要があったが、動的モデルでは現象に基づいて交通流モデル構築することが可能である。このことは、動的モデルで得られる結果は、交通現象的に論理性があつて、現在観測されていない需要が発生した場合にも、適切な結果を出力できると期待される。

3. 経路選択モデル

利用者の選択行動のうち、現在のところ静的モデルはもちろん、動的モデルも経路選択行動モデルが組み込まれているものが多い。静的モデルでは、有名な Wardrop の利用者均衡原理が基本になっている。すなわち、各利用者は、自分の費用を最小にするように経路を選択するという原理である。この原理を確率的に拡張した確率均衡原理も提案され、何種類かの確率モデルも使われている。利用者均衡原理はシンプルで理解しやすいことから、これまで実務でも多大な貢献をしてきたことは事実である、しかし、経路選択原理は結果への影響がきわめて大きく、より現実的な利用者の多様性を考慮した選択モデルの提案が、静的・動的モデルを問わず待たれるところである。

4. 計算アルゴリズム

静的モデルの計算アルゴリズムとして、実務に最も広く使われてきた方法が、分割配分法である。この方法は、近似的に均衡解を求める方法で、アルゴリズムが単純なので、我が国でも30余年実務に使われている。一方、より厳密に均衡解を求める、いわゆる均衡配分があり、最近では分割配分から均衡配分への移行が求められている^{1,2)}。（アルゴリズム的には Frank-Wolfe 法などが適切な表現ではあるが、本稿では分割配分に対比したアルゴリズムとして「均衡配分」という言葉を用いる。）

しかし、分割配分も均衡配分も結果に大きな差はなく、結果の解釈のしやすさも大差はない。均衡配分の方が、利用者の行動を厳密に表現しようとするアルゴリズムなので、結果の説明がしやすいと見る向きもあるが、両者ともパラメータ的にキャリブ

レートされたリンクパフォーマンス関数を用いている以上、アルゴリズムの違いによる結果の差、説明のしやすさの差、解釈の差は、ほとんど出てこない。筆者は従って、静的配分を行うのであれば、分割配分で十分であると考えている。

一方、動的なモデルにおいては、大きく2つのアプローチが試みられてきた。1つは「動的配分」と言われるアプローチで、動的利用者均衡配分、動的利用者最適配分のように、数理的に解を求めようとする方法である（注）。これまでも Many-to-One のODにおける動的利用者均衡配分³⁾や、渋滞延伸を考慮した動的利用者最適配分⁴⁾などが提案されている。しかし、利用者均衡原理にしたがった一般ODを扱う方法は、まだ研究段階にある。

2つ目は「交通シミュレーション」である。これは前述の交通流モデルと経路選択モデルを繰り返して実行するヒューリスティックな方法である。計算アルゴリズムも相対的には単純で、従って様々な交通運用策や TDM 政策などをモデルの中に取り込んでシミュレートすることができる。ただし、多様な個別ケースについては結果を出すことができるが、汎用性のある法則・方針を見つけることについては必ずしも得意とするものではない。むしろ、理論的な「動的配分」の方がそれには向いているといえ、その意味でこの両者はお互いに補完しあう関係を維持していくべきである。

5. 出力の解釈

前節2でも述べたように、静的配分では現況の再現性確保はできるかもしれないが、リンクパフォーマンス関数には現象論的な論理性に欠けるので、政策評価のために状況を変化させたときに妥当な結果を表現できるのかどうかについては疑問が残る。少なくとも、静的配分の結果から得られる速度あるいは時間/費用は、（たとえ交通量が正しくても）適切な量を出力する保障はあまりない。これは、リンクパフォーマンス関数を、その縦軸方向に移動させても同じリンク交通量を出力させることができってしまうからである。

この点、動的モデルでは、交通現象から交通流モデルを組み立てているので、出力される旅行時間や

渋滞長などは、より信頼性の高いものと期待できる。しかも、これらの時間的な変化が再現できるという大きなメリットがある。

ただし、動的モデルも万能ではなく、あくまで現実の複雑な世界を簡潔にモデル化しているのだから、利用目的に対して適切にモデル化されている動的モデルを選択することと、そのモデル化の前提条件を理解して出力を解釈することは必要である。

6. 必要データ

動的モデル、特に交通シミュレーションについては、必要なデータが多様でしかも多量になるために使いにくいとする意見が多い。たしかに、隅々まで詳細な分析を行おうとする場合には、静的モデルでは必要とされない信号制御パラメータ、交通規制データ、道路の車線に関するデータなどが必要になる。ただし、このような追加データは、動的モデルだから必要と言うことではなく、詳細な交通解析を行うためには本来必要なデータであって、モデルが静的・動的ということとは関係ないところの問題である。逆に言えば、静的モデルではこれらを使わずに、モデルのどこかにこれらの影響を潜り込ませて使ってきたわけである。

したがって、動的モデルであっても、すべての適用においてこれらの追加データが必要なのではなく、場合によっていわゆる「やりよう」がある。広域ネットワークを対象にして、全体の交通状況をマクロ的に評価したい場合には、信号制御パラメータは簡略化して交差点に接続するリンクの容量値をスプリット分だけに割引する、車線数も明示的に考慮するのではなく、リンク容量として考慮するなどの工夫がありえる。

よって、静的モデルとほとんど同じデータ量、あるいはそれほど労力をかけずに入手できるデータであっても、動的シミュレーションを動かすことは十分に可能である。ただし前述の通り、そのためにはいくつかの簡略化の過程をおく必要があるので、結果の解釈もそれなりに行う必要はある。

詳細なデータという観点から言えば、最近では道路デジタル地図の普及によって、道路幾何構造屋規制データがデジタルデータとして入手可能になっ

てきた。また、VICS旅行時間データやプローブデータなど、交通状況を把握するためのデータも計測されつつあり、動的シミュレーションを支援する環境が整備されてきている。今後は、これらのデータの横のつながりを持たせて、すぐにリンクできるような仕組みが望まれる。

7. これからの展望

これからの広域ネットワーク解析の進め方としては、以上のように広域な大規模ネットワークであっても、静から動への転換を促進させたい。動的配分については、若手研究者の養成を計って継続的な研究環境を整えるべきである。また、交通シミュレーションについては、適切な利用促進を図って、実務に積極的に普及させるべきである。繰り返しになるが、本稿の主張を整理する：

- (1) 動的モデルは、時間的な交通状況を評価でき、特に渋滞という動的な現象を正しく評価することは、政策的要請とも一致している。
- (2) 動的な交通流モデルは、交通現象と密接につながっているため、静的モデルに比べて結果の論理性が高い。
- (3) 動的モデルは、同様の理由で結果の解釈がしやすい。
- (4) 道路デジタル地図、VICSデータなど、入力およびモデル検証に必要なデータ整備が整いつつあること、計算機の能力が静的配分計算を始めた当時に比べると飛躍的に高まっており、動的モデルの利用環境が整って来つつある。

動的シミュレーションは、動的配分に比べて実務者にも扱いやすいので、局所的な道路区間への適用だけでなく、広域ネットワーク解析への実用化を積極的に行う時期に来ている。リンク数が数万リンク程度のネットワークであれば、パソコンでも計算は可能であり、横浜エリアにおけるSOUNDモデルを用いた実績、東京23区を対象にした計算実績⁵⁾などがある。

より大きなネットワークにおいては、静的配分と交通シミュレーションの組み合わせ等も最初は考

えらよう。たとえば、東京大都市圏全体の日配分（静的配分）を先ず行い、その結果から高速道路のランプ間の時間帯別のOD交通量を推計する。次にそのOD交通量を入力として、高速道路だけのネットワークで交通シミュレーションを行う、といった組み合わせ方法である。首都高速道路公団では、SOUNDをベースにしたTRANDMEXモデルを使って、このような日配分との組み合わせを検討しているところである⁶⁾。積極果敢に動的なネットワーク解析の実務への導入に踏み切る時期に来ているのではないだろうか。

(注) 動的利用者均衡配分とは、利用者が実際に通った経路費用が最少になっている均衡状態を求める動的配分である。この状態を求めるためには、将来を予測することが必要となるので、Predictive配分とも言われる。一方、動的利用者最適配分は、ある現在時刻における目的地までの最短経路を利用者が選択することを、時々刻々と繰り返す動的配分である。時刻ごとの交通状態を参照して経路が決定されるので、Reactive配分とも言われる。

参考文献(青字はURLへリンク)

- 1) 国土交通省道路局都市・地域整備局：費用便益分析マニュアル，2003.8.
- 2) 土木学会：道路交通需要予測の理論と適用 第一編 利用者均衡配分の適用に向けて，2003.8.
- 3) Kuwahara M. and Akamatsu T. : Dynamic Equilibrium Assignment with Queues for a One-to-Many OD Pattern, Proceedings of the 12th ISTTT, pp185-204, Elsevier, Berkeley, 1993.7.
- 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, 土木学会, 1997.1
- 5) 小根山裕之, 井料隆雅, 桑原雅夫：東京23区を対象とした需要の時間分散施策の効果評価, 第24回土木計画学研究・講演集, 2001.11.
- 6) 酒井浩一, 田沢誠也, 吉田克明:都市内高速道路シミュレーションモデルの開発と検証, 土木学会第53回年次学術講演会 第一部門論文集, pp686-687, 1998