

交通計画におけるネットワーク最適化

朝倉 康夫

1. はじめに

交通計画の目的は、地域や都市にとって「最も望ましい」交通施設および交通運用・管理方策を計画・設計することにある。これは、ハード面での交通施設と、ソフト面での運用・管理の質と量の供給水準を、時間・空間軸の中で決定していくことであるともいえる。

交通ネットワークの最適化あるいは最適交通ネットワーク計画とは、ある評価基準からみて「最も望ましい」交通ネットワークを構成することである。狭義に言えばリンクとノードの配置・選択と、容量の決定に関するモデルを数理最適化問題として定式化し、その解を求めることが交通ネットワークの最適化ということになる。

ここでいう最適化の対象は必ずしも物理的にネットワーク構造を有する道路網や鉄道網などの交通施設に限定されない。ネットワークとして表現することが適切であると考えられるものであればどのような施設あるいは運用方策であっても構わない。後に紹介する料金決定問題のように計画変数はネットワーク表現されるものではないがそれによって影響を受ける交通の流れがネットワークフローとして表わされる場合もネットワーク最適化の対象に含めて考えるべきであろう。したがって交通ネットワークの最適化手法は、長期の戦略的な交通施設の建設計画から短期の戦術的な運用・管理計画まで、交通計画の対象領域のかなりの部分に関連しているといえる。

ところで、交通計画の一般的な手順は、システム分析の過程を交通分野へ応用したものと理解することができる。すなわち、交通現象の調査と分析、計画代替案の作成、代替案のもとでの交通需要予測、計画代替案の評価と選択である。交通計画の目的が「最も望ましい」計画代替案を策定することにあるとするならば、交通ネットワークの最適化手法の研究意義は明らかである。もし、最適化モデルが需要予測プロセスを内包しており、評価関数が総合的であれば、ネットワークの最適化は交通計

画の過程に一致するからである。

しかしながら、一般の交通計画では、評価主体が複数で評価指標も多岐にわたるから、そのすべてを目的関数あるいは制約条件として最適化問題に組み込むことはきわめて困難である。少なくとも、現在までに提案されている方法論は、そのような段階には達していない。これは、数学的な取り扱いが複雑であることに加えて、評価項目の計量化自体が難しいことによるものである。したがって、交通計画におけるネットワーク最適化の役割は「特定の制約条件のもとで、ある与えられた評価基準から見て最適な交通ネットワーク計画案を作成すること」にあるとするのが適切であろう。

伝統的な交通ネットワークの最適化モデルは、ネットワークを構成する最適なリンクの組合せ（離散変数）を求めるものであり、整数計画問題として定式化される。従来は、ネットワーク交通流の分析手法に関する研究が十分ではないこともあって、交通フローは必ずしも明示的に扱われておらず、研究の関心は膨大な数の組合せの中から最適解を効率的に発見する解法の開発にあったといえる。取り扱える問題の規模にも限界があり、交通計画におけるモデルの有効性について現実的な視点からの批判もあった。しかし、最近では解法の改良によって、大規模なネットワークを扱うことも可能となってきており、複数の評価指標をもつ場合への展開や計画評価との結合も試みられている[5]。

一方、ネットワーク上の交通流を分析・予測するための方法論は交通量配分手法として研究されてきた。1日の平均的な（あるいは特定時間帯の定常な）交通の流れを対象とする静的な配分手法は、理論的にも計算技術的にもほぼ完成されている。詳細は参考文献[4]、[9]に詳しい。最近では、このような交通フロー分析手法に関する研究の進展とともに、ネットワークの最適化モデルの中で交通流を明示的に扱うことが可能となってきた。

以下では、まず交通システム分析におけるネットワーク最適化モデルの一般的枠組みを述べ、次に典型的な問題として道路網の最適計画モデルの一例を示す。さらに交通計画における2、3の話題と関連してネットワーク

の最適化モデルの展開について述べることにする。

2. 交通システム分析におけるネットワーク最適化

2.1 交通システムの最適計画モデル[2]

交通システムは、ある特定の環境における人と物の移動・輸送にかかわる物理、社会、経済および制度的要素の集合体である。これらを次の3要素、すなわち、経済活動水準(A)、交通システムの供給条件(T)、交通の流れ(F)に集約し、要素間の関係を単純化して記述してみよう。 F は、 A の派生需要である交通需要が T との相互作用により顕在化したものである。一方、 A は、 T と F によって決まる交通サービス水準(たとえば所要時間)の値により変化していく。交通システムの計画・運営者は、このような相互作用を考慮して、利用者の安全で快適な移動を確保するとともに、環境への悪影響を抑制する望ましい供給条件 T を決定する。

交通システム分析の役割は、いくつかのサブモデルを用いて、このような構成要素間の関係を明らかにし、システム供給者の意思決定を支援することにある。サブモデルのひとつは、交通の流れの記述モデルである。これは、経済活動水準 A とシステム供給条件 T が与えられたときに、どのような交通の流れが生起するかを記述・予測するためのモデルで、需要・パフォーマンス均衡モデルとも呼ばれる。このモデルでは、需要関数 $F=D(A, L)$ と、パフォーマンス関数 $L=P(T, F)$ を同時に満足する均衡解(フローパターン F^{EQ} 、サービス水準 L^{EQ})を求めることになる。

交通ネットワークにおける需要・パフォーマンス均衡は利用者均衡とも呼ばれる。この均衡は、個々のネットワーク利用者が自己のトリップ費用を最小にしようと合理的に交通選択を行なうときに到達するであろう状態であり、均衡状態では現在の選択を変更しても自己のトリップ費用を少なくすることができず、利用者は選択を変更する動機が生じない。ある前提条件の下で、利用者均衡は等価な数理最適化問題として定式化できることが知られており、大規模ネットワークに適用可能な解法も示されている。

交通システム分析における他のひとつのモデルが、システム計画モデルあるいは供給モデルと呼ばれるものである。これは、さまざまな制約条件下での供給者の合理的な意思決定に対応したものであり、交通システムにとって望ましい計画変数の値を決定するためのモデルであ

る。このモデルは、ある供給条件 T に対して生起するであろう交通フローパターンを予測し、それによる交通システムへの影響を評価して、最適な T の値を求めるものでなければならない。すなわち、計画モデルは需要・パフォーマンス均衡を内生化した最適化モデルの構造をもつことになる。

このような最適計画モデルをゲーム論的に解釈するとシステム計画・供給者を leader、利用者を follower とする Stackelberg 問題となる。すなわち、利用者は与えられた交通システムの供給条件に対して合理的に行動するが、供給者はそのような利用者の行動を予測して最適戦略となる計画変数の値を決めるといふ計画行為を行なっていると考えられるからである。

2.2 道路網の最適計画モデル

計画変数として道路網の構成や容量を選べば、交通システムの計画モデルは典型的なネットワークの最適計画モデルとなる。以下では、経済活動の土地への投影である土地利用パターンが与えられたときに、それに整合する最適道路網を出力するモデルの例を示す。

モデルの主な前提条件は、以下のとおりである。①ネットワークを構成する道路区間(リンク)の容量を計画変数とする。②道路網整備のための予算制約のもとで、道路網全体の総交通費用の最小化を目的関数とする。③土地利用パターンが与えられたとき、道路網交通流は需要変動型の利用者均衡の概念を用いて記述できる。

このような前提条件を設けたとき、最適道路網計画モデルは次のように定式化できる。

$$\min. \sum_{a \in A} V_a(C) t_a(V_a(C), C_a)$$

sub. to

$$\sum_{a \in A} G_a(C_a) \leq G$$

$$C_a \geq 0 \quad \text{for } a \in A$$

$$\min. \sum_{a \in A} \int_0^{V_a} t_a(x, C_a) dx - \sum_{i \in I, j \in J} \int_0^{T_{ij}} D_{ij}^{-1}(y) dy$$

sub. to

$$\sum_{k \in K_{ij}} h_{ijk} = T_{ij} \quad \text{for } i \in I, j \in J$$

$$V_a = \sum_{i \in I, j \in J, k \in K_{ij}} \delta_{ijka} h_{ijk} \quad \text{for } a \in A$$

$$h_{ijk} \geq 0 \quad \text{for } i \in I, j \in J, k \in K_{ij}$$

ここに C_a :リンク a の容量、 V_a :リンク交通量、 $V_a(C)$:下位問題のパラメトリック最適解としてのリンク交通量、 $t_a(V_a, C_a)$:走行費用関数、 $G_a(C_a)$:建設・改良費用関数、 G :総建設費の上限、 $D_{ij}^{-1}(y)$:ODペア

ij 間の需要関数の逆関数, T_{ij} : OD 交通量, h_{ijk} : OD へ ij 間のバス k の交通量, δ_{ijka} : OD へ ij 間のバス k がリンク a を含むとき 1 そうでなければ 0 である.

各関数の例としては,

$$t_a(V_a, C_a) = t_{a0} [1 + \alpha(V_a/C_a)^\beta]$$

$$G_a(C_a) = g_a C_a$$

$$D_{ij}(y) = A_i B_j \exp(-\gamma y)$$

をあげることができる. ここに t_{a0} : 自由走行速度による走行費用, g_a : 単位建設費用, A_i, B_j : ゾーン ij の土地利用パターン, α, β, γ : パラメータである. このモデルを実用規模のネットワークにも適用するための解法として, 上位と下位の最適化問題を交互に解くヒューリスティックな方法が提案されており, 京阪奈地域の道路網拡張幅を例に適用性の検討がなされている[8].

3. 最近の話題

交通計画における最近の 2, 3 の話題について, ネットワークの最適化モデルからのアプローチについて考えてみる. 以下では, 議論を簡潔化するために特に断らない限り, 料金以外の走行費用は走行時間のみから構成されることと, ネットワーク利用者の経路選択行動が決定論的かつ静的な利用者均衡により記述できるとしておく.

3.1 ロードプライシング

ロードプライシング (road pricing) は, 道路網利用者に料金を課し, 価格メカニズムを通して交通流をコントロールすることによって, 社会的にみてより望ましい交通状態を達成しようとする交通運用の一方策である. ロードプライシングは交通経済学の分野で「混雑料金」の理論として研究されてきたが, 都市中心部の道路混雑が激化してきたことと, 料金徴収に関する技術的課題が克服されつつあることを背景に再び注目を集めている課題である[11]. 道路網を構成する個々のリンクごとに料金 p_a を徴収することができるとし, 利用者は走行時間と料金の和を最小にする経路を選択するとしよう. この時社会的費用は総走行時間であるから, 最適混雑料金問題は以下のネットワーク最適化問題として定式化できる.

$$\min_{\mathbf{P}} \sum_{a \in A} t_a(V_a(\mathbf{P})) V_a(\mathbf{P})$$

sub. to

$$\min_{\mathbf{V}} \sum_{a \in A} \int_0^{V_a} [t_a(x) + w p_a] dx$$

sub. to

交通流の実行可能性条件

ここに, $V_a(\mathbf{P})$ は料金水準が与えられたときの均衡リ

ンク交通量, w は時間価値の逆数である.

この問題では, 料金を調整することにより, 下位の目的関数を上位の目的関数に一致させることができる. すなわち, $p_a = x(dt_a(x)/dx)/w$ と置けば, 問題は単純なシステム最適配分問題に帰着できる. したがって, この問題を解くためには, まず, システム最適配分を行なってリンク交通量 V_a^{SO} を求め, $p_a = V_a^{SO}(dt_a(V_a^{SO})/dx)/w$ によりリンクごとの最適混雑料金を計算すればよい. このことは, 利用者の個人的な走行費用と社会的な限界費用との差額を混雑料金として徴収すれば, 利用者が自由な経路選択を行なった結果生じる均衡状態は社会的費用を最小化するシステム最適交通流にもなることから明らかであろう. しかしながら, このようにして求められた混雑料金はリンク間の相対的な差額のみが意味をもつものであり, 料金の値を一意に定めるためには他の外的条件 (たとえばネットワーク建設費の償還条件) を導入する必要がある.

3.2 都市高速道路の流入制御[6]

都市高速道路において, 平常時の自然渋滞の予防を目的とした流入制御手法のうち, 最も実用的なものは線形計画法を用いた LP 制御である. これは, 各道路区間の交通量が交通容量を超過しないという条件のもとに, 高速道路の利用台数を最大にするようなオンランプからの許容流入交通量を求めるものである. LP 制御は, 都市高速道路のネットワーク構造が単純で OD 間への利用可能経路が 1 本のみであること, 交通量の増加による走行時間の増大を考慮しないことを前提にしている. しかし, 後者の前提は必ずしも現実的ではなく, 前者についても複数経路を取り扱えるような拡張が必要である.

さらに, ネットワークが大規模化するとともに, 利用者に高度な交通情報が提供されるようになるにつれて, 利用者の経路選択行動を考慮した制御への展開が検討されるようになってきている. すなわち, 利用者の自由な経路選択行動を保証しつつ, 交通システム全体としての効率的な運用をねらう制御方式である. ひとつの新たな流入制御モデルは, 従来型の LP 制御の枠組みを継承しつつ, 利用者均衡によりネットワーク交通流を記述するもので, 以下のように定式化できる.

$$\max_{\mathbf{U}} \sum_{i \in I} U_i$$

sub. to

$$0 \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad \text{for } i \in I$$

$$\sum_{i \in I} Q_{ia}(U) U_i \leq C_a \quad \text{for } a \in A$$

and 利用者均衡条件

ここに、 U_i, U_i^{\max} はランプ i の許容流入量および流入需要、 C_a はリンク a の容量である。 $Q_{ia}(U)$ は与えられた流入パターンに対する影響係数で、ランプ i から 1 台の流入があったときにリンク a に生じる交通量を表わす。なお利用者均衡条件のうち、 OD 交通量の保存条件は、流入パターンと目的地選択率を用いて表わされる。

この問題の解法としては、コンプレックス法によるものが提案されているが、計算量の面などで改良の余地が残されている。また、情報提供を受けた利用者の行動に関しては明らかでない部分も多く、情報提供と流入制御の組合せによるネットワークの最適な運用方策についてはきわめて多くの研究課題が残されているといえよう。

3.3 最大容量と容積率[3], [7]

ネットワークの最大容量とは、物理的、経済的、環境的な限界条件下において、ネットワーク全体として受け入れ可能な最大交通量である。最大容量を求めること背景には、高密度な都市地域においては、増大する交通需要に見合うネットワーク整備が容易でないために、長期的な視点から土地利用のコントロールを含む交通需要の制御を検討しなければならないということがある。

方法論としてみた場合、最大容量モデルは LP によるものと配分シミュレーションによるものに大別できる。後者は、 OD パターン一定のもとで総トリップ数を漸増させてネットワークへ OD 交通量を配分し、交通量が容量に達したリンクを除外していった場合、 OD ペア間が非連結になるときの総トリップ数を最大容量とするものである。総トリップ数を上位の決定変数とみなせば、この計算手順は、これまでに示してきたネットワークの最適化モデルと同様の 2 レベル最適化に対応していることがわかる。また、 LP モデルは、都市高速道路の最適流入制御モデルと同様の構造をもつから、 LP 制御モデルからの展開と同様の考え方により、利用者均衡を制約とする最大容量モデルへの拡張が可能である。

ネットワーク容量は、交通施設の容量からみた都市活動の適正な水準の指標の 1 つであるが、これを都市計画側から見ると、容積率の合理的な設定問題に帰着される。従来の容積率設定では、交通施設を含む施設容量との関係が必ずしも明確に織り込まれていないし、一方、ネットワークの最大容量には、土地利用パターンとしての合理性や有効性という視点が欠けている。ネットワークの最大容量と容積率の関係についての研究は、交通ネットワークの最適化と都市モデルの境界領域における新しいテーマであろう。

4. おわりに

本稿では、モデル化の枠組みや定式化を中心に述べてきたため、言及することができなかったが、解法・数値計算法に限ってみても多くの課題が残されている。

ネットワークの最適化は、交通計画の対象とするきわめて多くの課題と密接に関連しており、対象とする交通現象・交通問題の特性からみて最も適切なネットワーク手法および最適化手法の組合せを選び出すことが「交通計画におけるネットワーク最適化」にとって最も重要であることはいうまでもないであろう。

参考文献

- [1] 赤松 隆, 桑原雅夫: 確率的利用者均衡条件下での最適混雑料金. 土木学会論文集, No. 389/IV-8 (1988), 121-129
- [2] 朝倉康夫: 利用者均衡を制約とする交通ネットワークの最適計画モデル. 土木計画学研究・論文集 No. 6 (1988), 1-19
- [3] 朝倉康夫, 柏谷増男, 斉藤道雄, 和田拓也: 配分シミュレーションによる道路網の最大容量推定に関する実証的研究. 交通工学 Vol.27, No.2 (1992) 7-15
- [4] 土木学会編: 交通ネットワークの分析と計画: 最新の理論と応用. 第18回土木計画学講習会テキスト (1987)
- [5] 飯田恭敬, 森津秀夫, 朝倉康夫: 交通ネットワークの最適計画手法の現況と課題. 高速道路と自動車 Vo.31, No.3 (1988), 27-36
- [6] 飯田恭敬, 朝倉康夫, 田中啓之: 複数経路を持つ都市高速道路における最適流入制御モデルの定式化と解法. 土木学会論文集 No.449/IV-17 (1992), 135-144
- [7] 柏谷増男, 朝倉康夫, 斉藤道雄, 加古真一: 道路網容量を考慮した土地利用最適配分モデル. 土木計画学研究・講演集, No.14-1 (1991), 263-270
- [8] 佐佐木綱, 朝倉康夫, 寺本泰久: 発生・集中段階の需要変動を内生化した最適道路網計画モデルの数値計算. 交通工学, Vol.23, No.6 (1988), 9-18
- [9] Sheffi, Y.: *Urban Transportation Networks*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1984