

最適交通網構成手法とその応用*

A Study on Optimal Transportation Planning

森津 秀夫**

By Hideo MORITSU

The common practice in the transportation planning has been to select a plan of network out of several alternatives. However, the selected plan does not always mean the optimal, for the alternatives are limited in number in most cases, and the selection is not immune to the subjectivity of the planner. And so the problem of optimal transportation network design was studied. Exact and approximate algorithms were improved.

Nevertheless, for the practical use, there are subjects to be solved. In this paper, I show the effective application of the optimal transportation network design method in the realistic transportation network planning.

1. はじめに

交通網を計画するとき、何らかの意味において最適計画の作成を目指している。そこで、交通網計画問題を最適化問題として定式化したのが最適交通網構成問題であり、このようにして交通網を定めようとするのが最適交通網構成手法である。ここでは、最適交通網構成問題とその解法の概要について述べ、さらに実際の問題にどのように応用すればよいかを示す。

2. 最適交通網構成問題の定式化

交通網計画案を策定するとき、一般に使われる手法は少数の代替案を比較、検討し、ひとつの案を選定するものである。まず比較の対象となる代替案を

*キーワード：交通網計画

*正会員 工博 神戸大学講師 工学部土木工学科
(〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

作成し、それぞれの代替案の評価指標を計算する。そして、それをもとに代替案の優劣を判定する。評価指標の計算以外は作業である。場合によっては、これらの作業を試行錯誤により繰り返すこともある。代替案の作成は計画者の主観によることになる。そのため、この手法は次に示す欠点をもつ。

- ① 作成した代替案よりも良い交通網案が存在する可能性がある。
- ② 代替案になり得る交通網が多数あるとき、少数の代替案を求めることが困難である。

これらの欠点を除くには、交通網計画案の策定を最適化問題として整理し、数理計画手法を適用しなければならぬ。すなわち、客観的な基準を設け、それを最適にする交通網を求める問題を考えなければならぬ。そして、交通網案は問題の内部で作成されるようにする。このような問題を解けば、ある基準においては最適であることが保証された交通網案が得られる。そして、問題を解く段階で交通網案

が作成されるため、代替案の選択に困ることもない。

交通網の最適化問題は、制約条件を満たし、最適な目的関数値を与えるネットワークを求めるものである。目的関数は最小化するものがひとつであるとすると、次のように表わせる。

$$\min f(x) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } g(x) \begin{cases} \geq 0 \\ \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 f ：目的関数

g ：制約条件

x ：ネットワークの状態を表わす変数

この定式化は数理計画問題の一般的表現と変わらない。これを交通網の最適化問題として特徴づけるのは、決定変数がネットワークを表わすことである。そして、最短距離のようにネットワークが定まって決まるものを目的関数か制約式に含むことにおいて、他の数理計画問題と異なる。この問題が最適交通網構成問題である。

この問題の決定変数と目的関数、制約条件を定めれば、具体的に最適交通網構成問題を定式化できる。これらにどのようなものを用いるかについては、すでに述べられている。一般的に、決定変数はリンクに関する計画の採否を表わすように定式化され、問題は整数計画問題の一種になる。そして、通常は交通網の変化による交通需要の変化は考慮しない。すなわち、従来の交通網計画の手法と同様に交通需要はあらかじめ与えられるものとして解を求めることが多い。

このような最適交通網構成問題の解法を考えると、もっとも基本的な問題を対象にすべきである。決定変数のもっとも簡単な場合はリンクを建設するか否かである。目的関数としては総走行距離の最小化が考えられる。そして、需要交通量がすべてのノード間で等しいとすれば、最短距離の和を求めるだけでよい。制約条件には交通網の建設費の予算制約が考えられる。だが、リンクの建設費がリンクの長さに比例するとすれば、これもネットワークの総延長の制約に置き換えられる。すなわち、最適交通網構成問題としての特徴を有するもっとも単純な問題は、ネットワーク長の制約下で最短距離の合計を最小にするネットワークを求めるものである。これは、次のように定式化できる。

$$\min Z = \sum_i \sum_j d_{ij}(x) \quad (3)$$

$$\text{s.t. } \sum_k l_k x_k \leq L \quad (4)$$

$$x_k = 0 \text{ or } 1 \quad (5)$$

ここに、 Z ：ノード間の最短距離の合計値

d_{ij} ：ノード i と j 間の最短距離

$x = \{x_1, x_2, \dots, x_k, \dots\}$

：ネットワークの状態を表わし、リンク k がネットワークに含まれるとき $x_k = 0$ 、ネットワークに含まれるとき $x_k = 1$ とする。

l_k ：リンク k の長さ

L ：ネットワークの総延長の制約値

この問題はScott³²⁾やHoang⁴⁾の研究でも使われているものである。問題の構造が簡単であるため、解法の検討に適している。しかも、最適交通網構成問題の基本的な特徴を備えている。そのため、この問題に対して開発した解法を他の問題に応用することが可能である。そこで、この問題を最適交通網構成問題の基本問題とよぶことにする。

3. 最適交通網構成問題の解法

最適交通網構成問題は個々のリンクの計画をもとに最適なネットワークを求めるものである。数理計画問題としてみれば、整数計画問題の一種である。とくにリンクの計画の採否を決定変数とした場合は0-1整数計画問題となる。したがって、最適交通網構成問題の解法は0-1整数計画問題や整数計画問題の解法を基礎にでき、陰的列挙法を用いて解ける。陰的列挙法では解を系統的に列挙するために探索木を使い、分枝操作を繰り返す。この分枝手法と解の探索範囲を限定する手法の違いにより、さまざまな解法がある。これらの解法が通常の0-1整数計画問題と異なるのは、交通網を最適化する問題の性質を利用していることである。たとえば、基本問題を解くとき、あるネットワークからリンクを除けば、目的関数値は変わらないか増加するかのどちらかであるという性質が使える。

最適解を求めるための解法は、解の探索順序が異なる分枝限定法と分枝後退法とに分けられる。それゆえに長所、短所があるが、実際的な問題の解法へ

の応用を考えると分枝後退法の方が使いやすい。そこで、これまでに記載されている分枝後退法を使う解法についてみる。

最適交通網構成問題の解法の発展は、一般的な0-1整数計画問題に対するのと変わらないものを、最適交通網構成問題の性質を生かした解法にすることであった。もっとも基本的なものはScottのアルゴリズム³⁾である。これは、通常の0-1整数計画問題の解法とあまり変わらない。そして、目的関数値の下限値を導入して計算の効率化を図ったのがHoang⁴⁾である。さらに、実行可能解まで一度に分枝する方法や非連結網をつくらない分枝方法により、解を求めるのに必要な計算時間を短縮することができた⁵⁾。

0-1整数計画問題は、変数が多くなれば解である変数の組み合わせの数が急激に増大し、解を得るのが困難になる。これは、最適交通網構成問題の場合にはさらに深刻な問題である。最適交通網構成問題の解を評価するには最短経路探索や交通配分を行わなくてはならない。変数が多いことは、リンクの多い複雑なネットワークを扱うなければならないことを意味している。そのようなネットワークでは最短経路探索に要する計算時間は大きい。よって、個々の解を評価するのに必要な計算時間が増大する。したがって、最適交通網構成問題の規模が大きくなったとき、解を求めるための計算時間は極めて大きくなるのがわかる。これは、解法の改良によって解決できる問題ではない。

最適交通網構成問題は数学的な関心の対象となるだけのものではない。交通網計画と密接に結びついた問題である。そのために、問題の規模が大きくなることは避けられない。そこで、得られる解は必ずしも最適解でなくてもよいから、大きな問題を短い計算時間で解ける実用的な解法が研究されてきた。最適解が必ず求まる解法を厳密解法と呼び、解の厳密性を捨てた解法を近似解法と呼んでいる。

近似解法においても、実際的な交通網計画問題を扱うために計算時間の短縮を図らなければならないことは同じである。そして、得られる解は最適解でなくてよいとしても、できるだけ良い解であることが望ましい。近似解法の開発に際しては、このふたつが課題である。しかし、どちらをも同時に解決することは容易ではない。それぞれの場合に要求される

解の精度を満たす範囲で、可能な限り計算時間を短くするか、許される計算時間内でできるだけ最適解に近い解が得られるようにするかである。

近似解法の基本的なものは、Scottのforward法とbackward法である。その後の研究はこれらよりも解の精度を高めることを主な目的としていた。たとえば、DP的探索法を用いる飯田の近似解法⁶⁾や、Hoangの分枝後退法を改良したDionne-Florianの近似解法⁷⁾がある。そして、われわれは最適解と簡単な近似解法の解との比較を行い、得られた結果を利用したものを提案した。すなわち、厳密解法を使ってリンクの段階的削減を行う解法とbackward法の近似解の近傍で局所最適化を行う解法である。これらは、パラメータの値を変えて解の精度と計算時間を制御できる特徴を持ち、これまでの近似解法よりも優れている。

また、簡単なリンク評価値を使う簡易forward法、簡易backward法を提案した。これは、従来は考えられていなかった、より規模の大きい問題を扱うことを主目的として作成したものである。そして、これらと段階的削減法や局所最適化法を組み合わせたものは、現在の時点では解の精度と計算時間の両面でもっとも優れた近似解法であると言える。

4. 基本問題の拡張

最適交通網構成問題の基本問題は現実的なものではなく、そのままの形で実際の交通網計画に使用することはほとんどない。応用に際しては、それぞれの交通網計画問題に合わせて定式化し直す必要がある。このとき、基本問題の拡張はいくつかに分類できる。基本問題の拡張はその定式化の際の前提条件や仮定を除くことであり、次に示すことが考えられる。

- ① 需要交通量の導入
- ② ネットワーク長制約の建設費制約への変更
- ③ 固定リンクの導入
- ④ 制約条件が複数の問題への拡張
- ⑤ 多目的計画問題への拡張
- ⑥ 段階建設問題への拡張
- ⑦ 需要交通量の不確定性の導入
- ⑧ 0-1整数計画問題から整数計画問題への変更
- ⑨ 複数の交通機関を扱う問題への拡張

①～③は軽易な拡張で、解法は基本問題とほとんど変わらない。一般に拡張として考えられているのは④～⑨のものである。これらのいくつかについては森津がまとめている。

基本問題の制約条件はネットワークの筋延長に関するものだけである。しかも、この制約式はナップザック問題と同じものであり、実行可能解を求めるときには扱いやすい。これに対し、さまざまな形の複数の制約式がある場合には、基本問題と同じ解法が使えないことが多い。いろいろな場合の解法の見通しをたてると、基本問題と類似の解法が使えるのは、リンクを除けばすべての制約式の値が実行可能な方向へ変化する場合だけである。代表的な例は、制約式が多次元ナップザック問題と同じ形をしている場合である。この問題には、多次元ナップザック問題の近似解法を応用した解法が考えられる。それ以外の問題においては、比較的簡単に解を求められそうなのは、リンクの組み合わせに関する制約式だけからなる場合のみである。

数理計画問題の多くは、ただひとつの目的関数を最適化するものである。しかし、現実の問題では複数の目的関数を考えなければならぬことがある。そのため、多目的計画問題の解法が研究されている。これは、交通網計画においても同じである。複数の目的関数をもつ最適交通網構成問題を解くことが必要になる。この場合、0-1整数計画問題であることが選好解の決定を困難にしている。実用的な水準で解を得るには、あらかじめ解の探索範囲を限定したうえで、非劣解の集合を求めておく方法が考えられる⁹⁾。すなわち、図-1に示すような手順で選好解を求めるのである。

制約式の複数化や多目的化以外の拡張についても、解法をどうすればよいか検討した。だが、実際にはこれらの拡張が個別にあるのではなく、組み合わせて考えなければならぬことが生じる。そのような場合、解を求めることの困難さは一層増大するであろうが、個々の拡張における解法の改良を基礎に考えればよい。

5. 最適交通網構成手法の応用化

実際の交通網計画に最適交通網構成手法を適用しようとする場合、4. で述べたような問題の拡張を

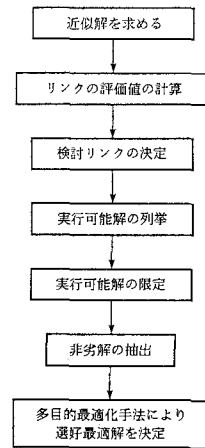


図-1 多目的最適交通網構成問題の計算手順

組み合わせ、複雑な問題を扱わなければならない。そのためには解法を改良してゆくことが必要であるが、それとは異なる実用化の際の障害がある。ここでは、最適交通網構成手法を実際の交通網計画に使用できるようにするために解決しなければならない問題を検討する。

最適交通網構成問題は目的関数を設定し、客観的な基準で最適な交通網計画案を求めようとするものである。目的関数は必ずしもひとつでなくよく、多目的の場合にも解を求めることは可能である。しかし、実際にはあらかじめ目的関数あるいは制約式として定式化しておけない項目により、交通網案の取捨選択をしなければならないことが多い。むしろ、そのようなことの方が、計画の決定に重要なかもしれない。このような場合、最適交通網構成問題の解として計画案を得ることはできない。

最適交通網構成手法を使わずに従来の方で計画案の策定を行おうとすれば、代替案の作成から始めなければならない。このときに期待するような代替案ができるとは限らないことや、多数の代替案を調べなければならないことは、最初に述べたとおりである。そこで、選好決定者が詳細に検討することが可能な数の代替案を作成する作業に最適交通網構成手法を適用することが考えられる。本来は最適化ひとつの交通網案を求めるものであるが、目的関数の上位の交

通網案を列挙させることも、若干の手直しでできる。ちょうど多目的最適交通網構成問題の解法で、非劣解集合を求めた方法のようにするのである。すなわち、交通網の評価に欠かせない評価値を与えるひとつあるいは複数の目的関数を定め、その基準によって適当な数の交通網案を求め、その後は意志決定者に選択を任せる方法である。

最適交通網構成手法をこのような目的で使用するとき、これまでには必要なかったことを新たに考慮しなければならない。たとえば、ある目的関数を基準に上位の交通網案を列挙すると、それらは互いに少数のリンクの組み合わせが異なるだけであることが起きる。これでは、意志決定者の選択の範囲が狭まり、最適交通網構成問題を解いた結果だけを使って決定するのと同じことになる恐れがある。つまり、選ばれる交通網は単に目的関数値の良いものであるだけでなく、ネットワークのパターンが変化に富んだものであることが望ましい。相互に類似度の低い交通網案が列挙されるのがよいのである。どのような基準でそのような交通網を選べばよいのか、列挙するための探索法をどうすればよいかを検討しなければならない。

最適交通網構成手法は、交通網の評価基準を内生化したモデルにより、最良の交通網案を作らせるものである。したがって、人間の行う評価、判断をモデル化することが基礎となる。このような手順で計画案の策定を行ったとき、あらかじめ定式化していないものを使ったとしても、最終的にはそれぞれの交通網を評価し、判断を下したことになる。何らかの評価、判断が下されたのであれば、その分析によって評価構造をより表現できるようになる可能性がある。当初は意志決定者に任せていたことを、最適交通網構成手法で捉えるようになるかもしれないのである。そのために用いることができるのが、代替案の比較結果から評価構造を分析し、内生化してゆく方法である³⁾。これを使った交通網計画支援システムを作成することが、現在の時点で最適交通網構成手法をもっとも有効に応用する方法である。

以上の最適交通網構成手法の実用化についての考察をまとめると、次のようになる。

- ① 最適交通網構成手法の果たす役割は、交通網の代替案の作成である。

- ② 代替案を列挙する場合、設定した目的関数値だけで選択するのではなく、類似度の低い交通網を選ぶことが必要である。

- ③ 意志決定者が下した判断を分析し、最適交通網構成手法でできることを広げてゆかなければならない。

6. おわりに

ここでは、最適交通網構成問題の厳密解法と近似解法がどのように発展してきたかを述べた。そして、実際の交通網計画を扱うための問題の拡張についても簡単に述べた。さらに、実際の交通網計画において使用される道具としてどのような役割を果たせるか、またどのようなことを考えてゆかなければならないかを検討した。その結果、代替案を作成するのに使えること、代替案から意志決定者が計画案を選んだ過程からその評価構造を分析し、最適交通網構成問題に組み込んでゆくことが重要であることを述べた。

更務的に使われなければならない、これまでの成果を生かさないものであり、今後とも実用への障害を取り除いてゆく必要がある。

参考文献

- 1) 西村 昂・日野泰雄：最適ネットワーク構成に関する一考察，土木学会論文報告集，第250号，pp.85~97，1976年6月。
- 2) Steenbrink, P. A. : Optimization of Transport Networks, John Wiley & Sons, 1974.
- 3) Scott, A. J. : The optimal network problem : some computational procedures, Transportation Research, Vol. 3, pp.201~210, 1969.
- 4) Hoang, H. H. : A computational approach to the selection of an optimal network, Management Science, Vol. 15, No. 5, pp.488~498, January, 1973.
- 5) 枝村俊郎・森津香夫：最適交通ネットワーク問題の厳密解法と近似解法，土木学会論文報告集，第262号，pp.113~127，1977年6月。
- 6) 飯田恭敬：最適道路ネットワークの構成手法，

土木学会論文報告集，第241号，pp.135～144，
1975年9月。

7) Dionne, R. and M. Florian: Exact and approximate algorithms for optimal network design, Networks, Vol. 9, No. 1, pp.37～59, 1979.

8) 森地 茂：通勤鉄道ネットワーク決定方法に関する研究，土木学会論文報告集，第254号，
pp.73～80，1976年10月。

9) 枝村俊郎・森津秀夫・土井元治：最適ネットワーク問題の列車運行パターン最適化への応用，建設工学研究所報告，第20号，pp.81～90，昭和53年11月。

10) 村若善彦・森津秀夫：複数目標下の最適道路網計画モデル，土木学会第37回年次学術講演会講演概要集，第4部，pp.397～398，昭和57年10月。

11) 枝村俊郎・森津秀夫・龜山寿仁：交通ネットワークの最適段階建設，建設工学研究所報告，第22号，pp.255～265，昭和55年12月。

12) 枝村俊郎・森津秀夫・富村彰廣：不確定性下における最適交通ネットワークの採択について，土木学会第32回年次学術講演会講演概要集，第4部，
pp.56～57，昭和52年10月。

13) 村若善彦・森津秀夫：代替案比較結果を用いた評価構造の分析の手法，土木学会第39回年次学術講演会講演概要集，第4部，pp.403～404，昭和59年10月。