

交通ネットワーク研究は宝の山か？

—交通ネットワークの分析と計画方法論に関する今日の課題—

Can Transport Network Researchers Strike a Vein of Ore ?

- Current Research Topics in Transport Network Analysis and Planning Methods -

朝倉康夫**, 溝上章志***

By Yasuo ASAKURA & Shoshi MIZOKAMI

It has passed 5 years since JSCE organized the 18th lecture series of infrastructure planning and management, and published the text titled "Transport Network Analysis and Planning Methods : the Latest Theories and Applications". After that, enormous academic works and practical studies have brought a lot of important results. However, several conventional problems remain unresolved and new dimensions have been added in the list of research subject. This short paper intends to discuss up-dated research topics in the field of transport network analysis and planning methods. Dynamics and informatics are the keywords of the network flow analysis. Both demand and performance models available for those situations should be further studied. Network evaluation and optimization are indispensable for planning tools, however limited theoretical works have been made before. Can transport network researchers strike a vein of ore ?

Keywords : Transport Networks, State-of-Arts, Flow Analysis and Planning

1.はじめに

昭和62年11月に、土木学会主催による第18回土木計画学講習会「交通ネットワークの分析と計画：最新の理論と応用」が開催されてから5年以上が過ぎた。この間、交通ネットワークに関する数多くの研究論文が発表され、多大な成果を挙げてきたことは言うまでもない。しかしながら、研究と実務との乖離を始め、従来から指摘されておりながら解決されていない問題も依然として多く残されている。また、交通の情報化に関する話題を例に挙げるまでもなく、社会情勢の変化を背景として新たな課題も少なからず生じてきている。このような時代にあって、現象分析のためのネットワークフロー研究の精緻化だけではなく、交通ネットワーク研究の社会的意義や位置づけの再検討に至るまで、

* Keywords : 交通ネットワーク, 研究課題

** 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部土木海洋工学科 (〒790 松山市文京町)

*** 正会員 工博 九州東海大学助教授 工学部土木工学科 (〒862 熊本市渡鹿9-1-1)

議論すべき重要な話題がきわめて多いように思われる。交通ネットワークをめぐる研究課題に新たな金の鉱脈は潜んでいるのだろうか？

このような問題意識の下に、著者らは、交通ネットワークの分析と計画に関する研究課題を継続して議論する場を求めて、1992年度に「交通ネットワーク勉強会」を組織し、これまでに3回の自主的勉強会を開催してきた。93年夏以降はワークショップ『交通ネットワークスタディ (TNSG: Transport Network Studies Group) 』として活動を始めた。本稿は、著者らを含む勉強会のコアメンバー6名 (赤松隆[野村総合研究所], 高山純一[金沢大学], 藤田素弘[名古屋工業大学], 若林拓史[大阪府立工業高等専門学校]) の考える研究課題を著者が集約したものであるが、必ずしも全員の統一の見解を示しているわけではない。紙幅の制約から個々の課題についての詳細な説明を加えることはできなかったが、新たな議論を行なうための叩き台となれば幸いである。

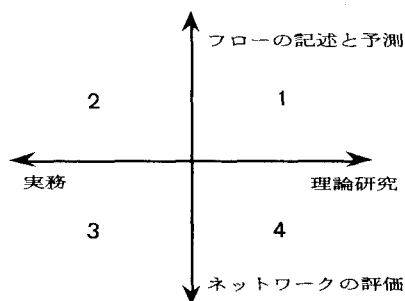
2. 検討課題の分類軸

広範な領域にわたる交通ネットワーク研究の課題を体系的に示すことはそれほど容易ではない。以下では、図1に示すように、(1) 理論研究 v.s. 実務 を第1軸とし、(2) ネットワーク交通流の記述 v.s. ネットワーク評価 を第2軸として課題を整理することを考える。さらにこれらの軸に加えて、都市地域研究との関連から見た課題の抽出を行なうこととする。3. に示す検討課題の大分類(I-VII)のうち、II(需要モデル)、III(パフォーマンスモデル)、IV(ネットワークフローの分析と予測: 需要/パフォーマンスモデル)は第1象限、V(評価と最適化)は主に第4象限、VII(実務への応用)は第2、3象限にそれぞれ対応している。I(研究の意義)とVI(都市モデルとの関連)は、すべての象限に関係している。

もう少し詳細に述べると、II, III, IVはネットワーク交通流の現象分析と予測の方法論に関する課題であって、交通ネットワーク上での需要とパフォーマンスのモデル化および両者の相互作用としての交通流のモデル化という視点で課題をとらえている。これらは必ずしも需要/パフォーマンス均衡の枠組でのみ扱われるものではないことに注意する必要があるが、従来のネットワーク交通流モデルに関する研究の蓄積を踏まえた上で、発展的に今日的課題を考えるための課題のくくりであると考えて欲しい。

Vはネットワークの評価と最適化に関する課題であり、そのうち一部はネットワーク交通流の現象分析と予測を内包する規範的モデルであるが、必ずしもすべてがフロー分析を前提とするものではない。今日的課題としては、むしろ、需要と距離を置いたネットワーク計画論が待たれている。

IIからVは、都市活動/土地利用を交通ネットワークの分析と計画の与件とするという狭義の交通計画の範囲での課題の整理であるのに対し、VIは土地利用/都市モデルとの関連から交通ネットワーク研究の課題を考えるという視点である。



3. 検討すべき課題の整理

個々の検討課題をIからVIIの項目に大きく分類する。それぞれの項目ごとの意義づけや役割の明確化が重要な課題であることは明らかであるが、ここではそれらを個々に課題として取り上げてはいない。

I. ネットワーク研究の意義

交通施設の特徴は、それが空間的な広がりを持ってネットワークとして機能することを期待されている点にあり、その意味では交通ネットワーク研究の意義は交通計画研究の意義に他ならない。第18回土木計画学講習会において、加藤教授はネットワーク研究の目的を次のように述べている。「交通ネットワーク研究の目的は、ネットワークを媒介として移動する人(物)の特性、ネットワークそれ自体の特性を明らかにすると同時に、それらの相互関連のメカニズムの実態と特質を解明することにある。」この目的は、ネットワークの種類や規模、個々の研究課題によらず共通するものであり、きわめて一般的なものであるといえよう。

しかしながら、一見自明であるように思われる交通ネットワーク研究の意義や目的について、社会的背景の変化の中でそれを再度確認しておくことは重要なことであろう。社会のパラダイムシフトの中であって、交通計画の社会的意義も改めて問われている。現象論としてだけではなく、計画論的視点からの交通ネットワーク研究の役割についての議論を充実させる必要があるものと思われる。

II. 交通ネットワーク上での行動分析: 需要モデル

交通ネットワーク上での行動分析の役割は、ネットワーク交通流の現象記述および予測のために、ネットワーク上での利用者(手段を問わない)の交通行動を説明できるモデルを構築することにあると考えられる。ネットワーク交通流を需要とパフォーマンスの相互作用の結果として記述する立場に立てば、ここでの狙いは『需要モデル』の構築にある。

交通行動をトリップメーカーの選択行動としてとらえたとき、最も狭義の(交通ネットワーク上の)需要モデルは『経路選択』モデルである。従来より、最短経路選択仮説を代表としていくつかの仮説が提唱されているが、必ずしもそれらが厳密に検証されてきたとはいえない。また、直感的には、選択肢の種類を特定化しない交通行動モデルの成果がそのまま経路選択にも適用できそうであるが、『ネットワークの上での選択』に固有の特性が存在するのではないだろうか。以下では、まず、経路選択の範囲に限定して課題を探っ

てみよう。

検討されるべき最も興味ある話題は、やはり情報化と動学化であろう。これらは本来独立に議論されるべき性質のものではないが、便宜的に分けて課題を考えることにする。

実際のところ、高度な交通情報が利用者の経路選択にどのような影響を及ぼすかについて何が明らかになっているだろう？情報の種類を所要時間に限定しても、情報を得ることが経路選択の際にどのように考慮されるのか？情報提供によりトリップの不確実性が減少するとしても、それをどのように記述するか？明確な解答を用意できない課題は少なくない。ハードな提供技術の高度化が先行している感のある現在、情報提供に関連する交通政策の評価のためにも、トリップメーカーの学習と認知機構の解析を始め、提供される情報の種類と質による行動の相違の評価など検討されるべき課題は多岐に渡っている。

動学化に関する話題は、後述の『動的配分』でも改めてふれるが、需要サイドで議論しておくべきものは、次の二点であろう。一つは時間的に需要そのものが変化する場合のモデル化である。これには一日の中での需要の時間的変動（within-day dynamics）と日々の変動（day-to-day dynamics）があるが、これらの需要変動メカニズムに関して解析されるべき課題は多い。他の一つは、状態の動的変化に対して、ネットワーク上での経路選択行動がどのように変化するかである。動的な経路選択と静的な経路選択の違いをトリップ途中での経路変更の有無にあるとするなら、経路変更の動機と条件を明確に示すべきであろう。

狭義の行動モデルである経路選択モデルからただ一つの次元を拡張するだけでも、『経路と出発時刻』、『経路と交通手段』、『経路と駐車場』、『経路と目的地』のように多くの輻輳した選択の断面が表れる。これらすべてがネットワーク上での行動分析の対象である。ここでは新たに生じる個々の課題について取り上げることはしないが、多くの検討課題が埋もれていることだけは明らかであろう。

上記の内容とも重複するが、ふれることのできなかった課題をキーワード的に列挙しておこう。距離（時間）の認知、公共交通の経路選択、時差出勤やフレックスタイムの評価。また、多少主題から外れるかもしれないが、新たな政策変数（たとえば情報提供）の出現に伴って、政策変数のネットワーク行動モデルへの組み込み方が改めて議論されるべきであろう。

III. 交通ネットワークのパフォーマンス評価：

パフォーマンスモデル

交通ネットワークのパフォーマンス評価とは、交通流とサービス水準の物理的関係を記述することに他ならない。最も狭義にはネットワークを構成する個々のリンクのパフォーマンスをモデル化することであり、広義にはネットワーク全体の集計的な意味でのパフォーマンスのモデル化を含む。

リンクのパフォーマンスモデルは、リンク交通量とサービス水準の関係をリンクコスト関数で表現したものである。ここでの課題は、関数型とパラメータの同定に関するものである。経験的なQ-V式はもちろん、BPR関数などにも共通するが、従来のリンクコスト関数の理論的根拠は必ずしも明確ではなかった。最近ではより合理的な関数の作成を目的として、時間帯ごとの交通量の変化を考慮したモデルなどが提案されている。しかしながら、動的な問題に対応できるリンクパフォーマンスモデルは示されていない。より適切に表現するなら、動的な問題では取り扱われる詳細さのレベルに応じて用いられるパフォーマンスモデルが異なってくるが、それが整理されていないということである。交通の単位がマクロな量であれば交通密度とサービス水準の関係がモデル化されることになるが、よりミクロに車両単位を扱うのであれば追従モデルによるパフォーマンス評価が必要になる場合もある。ボトルネックでの待ちの表現も工夫を要する点であろう。必ずしもネットワークとは直接結びつけられていない交通流理論の成果を『ネットワークにおけるリンク』のパフォーマンス評価にどのように活用するかが鍵となりそうである。

さらに、個々のリンクコスト関数の同定のためには、ネットワーク全体のパフォーマンスから見た検討が必要となる。たとえば、リンク所要時間といった個々の要素は集計的なネットワークからの出力であるOD間所要時間と整合していなければならない。また、コスト関数のパラメータの感度もネットワークフローを通して調べるべき要素である。

ネットワークそのものの表現や記述をパフォーマンス評価の範疇に含めることには問題がないわけではないが、需要とパフォーマンスの相互作用としてネットワーク交通流をとらえる立場からはパフォーマンスモデルの中で議論しておくのが都合がよい。ネットワークの集計化に関する課題は一段落したようにも思われるが、計画課題に応じたネットワークの表示方法について理論的にアプローチできる課題は残されている。いずれにしても、ネットワークのパフォーマンス評価

に関する課題は、実務との関連においてとりわけ重要であると思われる。

なお、公共交通の場合は、混雑下でのサービス水準を何で計測するかという本質的な課題が依然として残されていることは、ネットワーク評価とも関連するが特記しておくべきであろう。

IV. ネットワーク交通流の分析と予測：

需要／パフォーマンス（均衡）モデル

(1) 静的配分

ネットワーク交通流を解析するためには、与えられたサービス水準に対する利用者の行動すなわち需要のモデル化と、利用者行動を集計した交通量の変化に伴うサービス水準の変化のモデル化（パフォーマンスモデル）を踏まえて、両者の相互作用を記述しなければならない。このような枠組でネットワーク交通流をとらえようとする最も伝統的かつ狭義のモデルは『交通量配分』モデルである。静的で決定論的な配分モデルは、需要が固定型であれ変動型であれ『利用者均衡』の枠組の範囲では理論的に完成されたといえる。

静的な配分モデルで検討されるべき点の一つは、不確実性の取り扱いであろう。『確率的利用者均衡(SUE)』は配分にかかわる複数の不確定要素のすべてを取り込んでいるわけではない。一方、ネットワークに展開されるには至っていないが、『合理的期待均衡(REE)』の概念は情報の不確実性（の差異）を評価できるものであり、パフォーマンスモデルへの非線形性の取り込みも含めて、その展開が期待される。

その他の課題としては、モデルパラメータの感度と誤差分析のための方法論が示されるべきであるし、アウトプットの評価という視点からは、フローが事前に仮定した経路選択規範を満足しうるかを検証するための方法論を開発する必要がある。これらはいずれもモデルの信頼性を検討するために重要である。

(2) 動的配分

近年、様々な動的な配分モデルが提案されるようになったが、それらを体系的に理解するための視点は必ずしも明確ではない。その理由は、研究状況自体が動的であることにもあるが、現象記述を至上とする傾向があるために、交通政策評価から見たときのモデルの役割が必ずしも十分に検討されていない点にあるようにも思われる。何をどこまで組み込むか、評価の対象としている交通政策は何であるかなどを始め、モデルフレームを明確にすべきであろう。モデルの分類軸として考えられるものは、シミュレーションか数理モデルか、制御（あるいは計画／運用）モデルか記述／予

測モデルか、交通流モデル（フローとパフォーマンス）の表現、時間／時刻の表現、待ち行列の表現などであるが、モデルの役割に応じた適切な条件の組み合わせが検討されなければならない。

予測タイプの静的モデルでは1950年代以降長く受け入れられてきた『均衡』の概念が動的な場合へ拡張できるとしても、どのような前提条件の下でそれが成立するかについては検討すべき課題が多い。ネットワークの利用者に完全な（将来の）情報を与えることはほとんど不可能であるから、与えることのできる情報の種類と精度に応じて利用者が自由に経路選択を行なうとすれば、どのような状態が生じるのか、それが安定的かなどについて調べる必要がある。均衡（あるいは不均衡）に至るプロセス／メカニズムのモデル化も重要な課題である。

以上の議論は、均衡仮説の枠組の範囲ないしは近傍でモデルのフレームをとらえるものであった。しかしながら、交通情報の提供や経路誘導を前提にしたとき、均衡論に代わる新たなパラダイムが模索される時期にきているように思われる。

(3) 観測交通量による交通流解析

観測交通量を用いたネットワーク交通流の解析手法のうち、観測リンク交通量による静的なOD表の推計に関しては、既に多くの方法が提案されている。それらの精緻化が研究課題の一つであることは確かであるが、動的配分と関連してOD予測の動学化が新たな課題となってきている。

一方、計測技術や双方向通信技術の高度化により、交通流の解析／予測に用いることのできる観測交通量は質量ともに増加しつつある。従来のネットワーク交通流予測手法は、少ないインプットで多くのアウトプットを得ようとする立場のものが多く、豊富な観測交通量を活用しようとするものは少ない。しかしながら、観測データの充実を背景に、それらを有効に利用する新たな方法論が開発されるべきである。観測データを利用したモデルと行動論にベースを置くモデルとのハイブリッドモデルが検討されるべきかもしれない。とくに、ごく近い将来（たとえば10分後）の交通流予測モデルの開発は、交通情報提供のためにもきわめて重要である。

(4) RTI／IVHS技術との関係

RTI(Road Transport Informatics) や IVHS(Intelligent Vehicle Highway Systems) 技術など、車両と道路インフラの高度情報化に関する技術革新をネットワーク交通流モデルの中にどのように反映させるかは大きな課題である。逆に、道路交通情報システムの中で、ネッ

トワーク交通流モデルがどのような役割を果たすことが可能であるかを検討しなければならない。

システム導入の事前評価モデルとして位置づけるなら、導入効果を計量化するために、行動分析の項でも述べたような情報のレベルに差のあるネットワーク利用者の行動を説明しうるモデルが必要である。交通状況をネットワークレベルで予測するためにネットワーク交通流モデルが利用できるなら、情報提供における主要な役割を果たすことができるであろう。

V. ネットワーク評価と最適化

交通計画全般において、計画論よりも現象解析に研究者の興味が偏りがちであることと同様に、フロー分析／予測に比較してネットワークの評価や計画手法に関する研究が充実していないことは従来からの大きな問題点であった。以下では、交通機能から見たパフォーマンス評価、必ずしもフローに基づかない構成や形態の評価、最適化の視点で計画プロセスを抽象化してとらえたネットワーク最適化モデルの3点から課題を示そう。

(1) ネットワーク全体のパフォーマンス評価

ネットワークの整備水準評価のために、走行時間や費用を始めとするいくつかの指標が提案されてきたが、価値観の多様化や社会的背景の変化を反映しうる評価指標の開発が望まれている。たとえば、ネットワークの信頼性指標はそのような新たな指標の一つである。個々の視点からの評価指標の開発が必要であることは言うまでもないが、ネットワーク構造を前提とした総合評価指標が検討されるべきであろう。

一方、これまでに提唱されてきた評価指標の相互関係（たとえば、代替、補完関係）を明らかにすることも重要である。その関係はネットワークの構造やフローパターンによって異なるかもしれない。シミュレーションの有効性は否定しないが、解析的な関係性の検討も試みられるべきであろう。

(2) ネットワーク構成論／形態論

フローに基づく評価を補完するものとして、必ずしもフローに基づかないネットワーク評価モデルを議論すべきと考える。需要が多すぎるためにそれに見合った供給が困難である場合やその逆の場合など、交通量から供給の必要性を言うのが必ずしも適切ではない場合に、ネットワーク計画代替案を策定しなければならないとすれば、構成論、密度論や形態論に計画案の根拠を求めることも考えられよう。そもそもフローを流すことだけが交通ネットワークの役割ではないので、フローから離れてネットワーク評価を議論することは

計画論的に意義深いものとも考える。

(3) ネットワークの最適化

ネットワーク利用者の経路選択行動を計画／管理主体が直接コントロールすることはできないという前提に立てば、ネットワークの最適計画モデルはフロー記述モデルを制約条件のひとつとして持つ2レベル最適化の構造を持つことは既に知られている。一般的なネットワークを対象にしたとき、特殊な条件設定を除けば、利用者の行動モデルを簡略化しない限りこの問題を厳密に解くことはきわめて難しい。最近、均衡問題の感度分析の成果を用いていくつかの問題が解けることが示されているが、必ずしもすべてに通用するわけではない。

解法が存在するか否かの検討は別にして、理論モデルとして検討されるべきものを列挙すると以下の通りである。経路誘導、情報提供の最適化（制御モデル）への展開。ネットワークからみた都市の最大容量モデル。

VI. 土地利用／都市モデルと交通ネットワーク

冒頭に述べたように、ⅡからⅤの内容は都市地域活動の水準を固定してネットワーク交通流の分析と予測およびネットワークの計画と設計を行う際の課題を考えるものであった。ここでは、交通ネットワーク研究の新たな展開を考える上で重要であると思われる土地利用／都市地域モデルとの関連から研究課題を列挙してみたい。

(1) 交通／流通／土地利用モデルの関係と統合

輸送問題やデポの配置問題など、ロジスティクスモデルの多くはネットワークモデルである。しかしながら、（少なくともわが国の）交通ネットワーク研究ではロジスティクスに関する分野が勢力的に研究されてきたとは言えない。また、土地利用モデルと交通モデルの統合については、従来より大規模モデルなどの構築が行なわれているが、それらの多くは結合モデルであって、理論的な意味では必ずしも統合モデルとは言えないように思われる。

交通ネットワークモデル研究の成果を応用することにより、これらの領域への展開が試みられるべきであろう。統合することの意義を明確にすることはもちろん必要であるが、土地利用（立地）均衡、交通均衡、空間価格均衡のそれぞれの関連／接点を明らかにすることにより、土地利用／交通／流通の（部分的あるいは総括的な）統合モデルのフレームが構築できるのではないだろうか。価格や時間の均衡から量の均衡への展開も興味深い課題である。

(2) 都市開発と交通ネットワーク

高密度な都市圏において、新たに交通空間を確保することは容易ではないから、交通施設とくにネットワークに大きな負担をかける大規模な都市開発に対しては適切なコントロールが必要であろう。しかしながら、このような視点で検討されている大規模都市（再）開発の交通インパクトアセスメントの方法論には改良の余地が残されている。交通ネットワークが処理可能な都市の最大容量に関する研究や、それと容積率規制／成長管理などとの関連も重要な検討課題である。

VII. 実務への応用

1960年代以降、交通ネットワーク研究の学問的成果のいくつかは交通計画実務へ着実に応用されてきたが、いわゆる『分割配分』以降の展開は必ずしも著しいとはいえないように思われる。実務への応用が妨げられている理由は様々であろうが、研究者と実務担当者との間の率直な意見交換が不足していることが最も大きな理由ではなからうか。以下では、主に、大学研究者サイドから見た実務への応用に関する課題を考えてみたい。実務から見た交通ネットワーク研究への要望という側面は、本スペシャルセッションにおいて、（株）長大の堀江氏より示されているので併せて参照されたい。

(1) インプット、アウトプット、精度評価

結果が前提条件によって異なることは誰も認めることであるにもかかわらず、インプット条件の統一的な設定基準が明確でないように思われる。交通量配分に限定しても、リンクコスト関数（ $Q-V$ 条件）、ネットワークの抽出と表示、ゾーニング、OD表などの設定基準は曖昧である。計画内容と規模に応じてこれらの条件が適切に設定されなければ、結果の妥当性は保証できない。経験的に行なわれている部分のすべてをマニュアル化することが望ましいとは考えないが、少なくとも合理的に説明できる説得力ある条件設定を示さない限り交通量配分の信頼性は失われる。そのことが配分を含むネットワーク研究そのもの、あるいは交通計画そのものが疑わしいと判断されかねないと危惧する。

アウトプットの評価、特に精度評価の指標と基準についても十分な議論がなされていないように思われる。インプット条件やモデルの精度に限界があるかぎり、アウトプットの精度にそれを越えるものを期待することができないのは言うまでもないが、過度な精度（精度と呼ぶかどうか？）を追及する余り、非合理的な作業を余儀なくされているのではないだろうか。先に述

べたように、計画の内容、規模、タイムスパン、費やすことのできるコストに応じた精度評価の基準を明確化することが必要であろう。

(2) 計算システム

実務への応用を考える上で、効率的な計算システムの開発は極めて重要である。関連する課題のうち、最も重要であるのはソフトウェア開発であろう。英国ではSATURNやCONTRAM、カナダなどではEMME-IIなどの配分ソフトが供給されているが、わが国では標準的なソフトウェアが流通しているようには思われない。WSやPCへのダウンサイジング、並列化処理による効率化なども併せて検討されるべきであろう。さらに、インプット条件の効率的設定とも関連するが、交通調査データのデータベース化、デジタルマップの利用、GISとの統合なども急がれよう。これらの一部は既に試みられているが、地図などのデジタル化の先進国であるわが国での開発が期待される。

4. おわりに

本論では、従来の交通ネットワーク研究の枠組みに対応させて研究課題の整理を試みた。フロー分析の項でも述べたが、従来から残されてきた課題を解決する方向と併せて、従来の枠組にとらわれることなく新たなパラダイムを模索するべき時期であることは明らかであり、それだけに多くの魅力的な課題が山積みであると考えるよいであろう。交通ネットワーク研究に脈ありというのが試掘調査の報告である。

以下に、個々の項目の中でふれることができなかった課題のいくつかを列挙しておわりとしたい。

(1) 一般的なネットワークに関して提案されている最新の方法論であるGA(Genetic Algorithm)、ニューロネットワーク等の手法を『交通ネットワーク』へどのように取り込んでいくかは興味ある課題である。

(2) 情報が提供されるという状況での行動のモデル化、これは広く交通行動のモデル化としてとらえるべきかもしれないが、ネットワークを介した（あるいはネットワーク上での）行動の記述という点からの考察が重要であろう。

(3) ネットワーク化されること自体の評価について、指標の開発、メリットとデメリット、帰属主体の明確化等の検討がなされるべきである。