

径路誘導の手法とシステム

高羽 禎 雄

1. はじめに

自動車を運転し、あるいはタクシーを利用する際に道に、迷ったり、遠回りをしたりすることは誰もが経験することである。たとえ行先までの道を知っていても、交通渋滞に遭遇して適当な代替径路を知りたいと思うこともまた、しばしばあるであろう。径路誘導は、広義に言えば運転者がその目的地へのより良い、あるいは最適の径路を選択するよう援助し、勧告し、または指示することであって、道路があり、自動車またはこれと同様の乗り物がある限り、欠くことのできない技術である。

現代の都市道路網においては、限られた都市空間の中であって人々の活発な社会活動・生産活動を支える必要に迫られて、交通の運用と管制の技術が発達しつつある。東京では約4000の、またニューヨークでは約1500の交差点の交通信号が電子計算機で制御され、交差点での信号待ちによる遅れの改善に貢献している。交通信号の電算機制御による社会的便益は、東京の約8000交差点を対象とするシステムを想定した場合、年間約300億円と試算(1972)[1]されている。

しかし、交通信号制御は信号による交通阻害の程度を軽減するいわば受身の制御であって、交差点の容量を越える交通需要に対しては対処できな

い。このような場合に、自動車をその目的地に応じて容量に余裕のある径路に誘導して、道路網の限られた交通処理能力を積極的に活用することが考えられている。本特集において後に紹介されるように、東京都区部約1500交差点を対象として径路誘導を行なうものとする、走行所要時間短縮による便益が年間約800億円に上ると推定されており、その社会的意義は少なからぬものがある。

このように、都市における自動車の径路誘導は、交通管理者の目的と運転者の利益との融合をはかった重要な制御手法の1つである。ここでは、径路誘導制御の考え方と方法、その基礎となる交通流配分計算の手法、自動車・地上間通信による各種の径路誘導システムの比較等についてふれることとしたい。

2. 交通流と径路誘導制御

道路上を走行する多数の自動車によって形成される流れは交通流とよばれ、多くの観測結果の積重ねから帰納され、導かれた交通流理論によって説明されている。たとえば、交通量・密度・速度の3つを基本的変数としてとらえると、密度に応じて平均速度が低下し、その結果として交通量を最大とする最適密度が存在することが示されている。また、街路では、信号によって形成される車群波の伝播によって待行列の消長が求められる。

交通流は、しかし同時に自動車利用者の目的に従った行動の帰結であって、その交通需要に従っ

て出発地と目的地(ODと略称される), 時間帯, 径路等が定められる. これらの多くは単なる交通流観測からは知ることの困難なものがあリ, アンケート等による調査や既存の統計データの分析, 理論モデル等にもとづいて推定される.

街路にしても, 高速道路にしても, 過度の渋滞は道路網の交通処理能力の低下を招くので, 交通需要の抑制, たとえば高速道路の入路における閉鎖や流入調整等が必要とされる. 街路においても直接的な流入制御ではないが, 車線規制や信号制御のやり方によって類似の効果をあげることが可能である.

径路誘導制御は, 従来個々の利用者が走行径路を判断し, 選択していたのに対し, 道路交通システムにとってより望ましい径路をとるように誘導・指示するものであつて, 局地的に見れば渋滞地点・地域への交通需要の抑制であり, 全体として見れば道路網の交通処理能力に余裕のある部分の活用をはかることになる.

径路誘導制御を行なうには, 一般につきの3段階を必要とする.

1) OD別交通需要の推定

出発地と目的地の定まった交通需要すなわちOD交通量が, 時間帯ごとにどれだけ発生するかを推定する.

2) OD交通量の各径路への配分

システムで定められた評価関数(たとえば総旅行時間)が最適となるようにOD交通量の各径路への配分量を算出する.

3) 配分を実現するための自動車の径路誘導

2)で算出された配分量を実現するために, 個々の自動車に対し, 取るべき径路を誘導・指示する.

図1は, これらの各段階を実現するための種々の方法とその組合せを示したものである.

しかしながら, 現実の道路網にあつてこの3段階を忠実に辿ることは困難が多い. 仮りに個々の

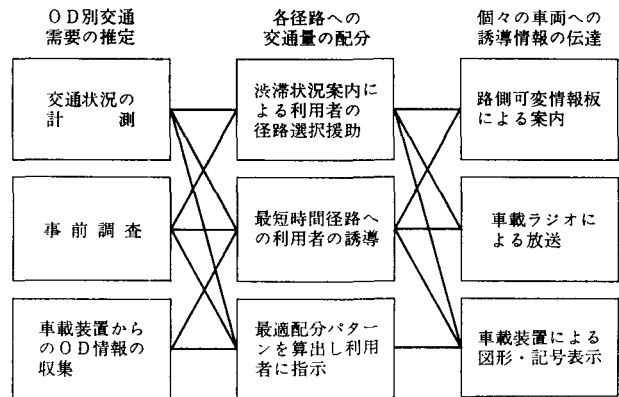


図1 径路誘導制御の方法

自動車の出発時刻にそのODが把握でき, 的確な径路指示が可能であつても, 個々の車両の移動を考えに入れた最適運行計画の決定はおそらく困難であり, もう少し巨視的に見ても, 交通需要の時間的変動とそれに伴う待行列長等の状態変化, 車両の走行に伴う時間遅れ等を考慮すると, 動的なマルチコモディティフローとして取扱う必要があり, 大規模な道路網における蔽密解を得ることは事実上不可能である. また, 実際問題としてその結果通りに個々の自動車を走行させる手段を欠いていることも考慮しなければならない.

道路に設置された車両感知器等により交通状況を計測して現状を把握し, 道路前方の渋滞状況を電光式や字幕式の可変情報板で文字または図形表示して知らせたり, 渋滞地点や路線をラジオの交通情報放送で報じたりすることは現在も広く行なわれている. 渋滞地点が限定され, 迂回路が取りやすい場合には有効な方法であり, たとえば首都高速道路の利用者を対象としたアンケート調査では, 利用者の59%が事故による渋滞を知らされた時には利用を断念し街路を走行すると答える等[2], 径路選択に活用されている.

同様の手段で推奨径路を知らせることも, たとえば横浜では市内を通過する2つの主要径路について矢印と“こんざつ”の文字で表示する電光式可変情報板が使用され, ポルチモアでも実験され

ている。東関東自動車道の延長を機会に成田空港から都心への2つの主要径路についての広域的な情報を提供しようとする計画[3]が進められており、ニューヨーク州のロングアイランドでもIMISとよばれるシステムによって道路網の総合的運用に関する情報提供を行なう計画がある等、このような方法での径路制御は今後も発展してゆくものと思われる。

自動車総合管制システムにおいて取られたような、車載装置と地上のシステムとの間の情報交換による個別径路誘導は、装置を搭載する自動車の比率がかなりの割合を占めるに至った実用化の段階では、対象道路網における総旅行時間の減少効果が期待できるが、このシステムは車載ラジオや可変情報板を用いるシステムに比してつぎのような利点を有している。

- 1) 大規模で複雑な道路網についての径路誘導を行なうことができる。
- 2) 個々の自動車の目的地に応じた個別的な径路誘導を行なうことができる。
- 3) 同一方面に向かう自動車を異なる径路に誘導することによって交通量配分を実現することができる。
- 4) 自動車と地上との間の情報交換によってOD、径路選択の結果、道路区間および径路の交通量、旅行時間等の情報を収集することができ、誘導結果、制御効果等の評価を行なうことができる。

3. 最短径路誘導と交通流配分

自動車を旅行時間の最も少ない径路へ誘導するには、道路網を有向アークとノードの集合としてとらえ、各アークの所要走行時間を与えて最短径路問題を解き、その結果を指示すればよい。

最短径路問題は古くから多くの分野で興味もたれ、本特集でも述べられているように種々の解法が知られている。たとえばネットワーク中の特定ノード間あるいは特定ノード対全ノード間の最

短径路探索には Dijkstra 法が、また全ノード間では Floyd 法等が有効とされている[4]。

街路網における誘導の場合には、走行時間の一部は交差点での待ち時間を含み、しかもその値は直進・右左折等の行動によって異なる。したがって、道路網のモデル化に当っては交差点をノードとみなさず、有向アークの集合体として取り扱う必要があり、自動車総合管制システムでは道路リンクの片側をノードとみなす方法を取っている。

道路網の交通状況は時々刻々変化するので、それに応じて動的に最短時間径路を指示するためには、各アークの所要走行時間の推定・予測を行なわねばならず、さらにそれぞれの自動車が各アークに到着するまでの時間遅れを考慮する必要がある。時間遅れを取り扱う方法として時間入り最短径路探索のアルゴリズムが知られているが[4]、本特集で紹介されるハードウェア・シミュレータのように経過時間に従って演算が進行するやり方は1つの適切な方法であるといえよう。

個々の自動車が最短径路誘導に従うと、道路網における交通流の総旅行時間も減少する効果を生ずる。これには、誘導に従った自動車の旅行時間短縮ばかりでなく、渋滞区間における需要交通量の減少による他の自動車の遅れの改善も寄与する。その反面50%以上の自動車が最短径路誘導に従うと、その結果が最短径路そのものに反映してハンチング現象をおこすことになる。その対策としては、現在の最短径路と1誘導周期前に算出された最短径路との間で適当な比率で交通流を配分する指数平滑型最短径路誘導が効果のあることが知られている[5]。第 k 番目までの最短径路を求めるアルゴリズム[4]により、複数の代替径路を指示する方法も提案されている。

道路網で、いくつかの起終点間(ODペア)に需要交通量が与えられた時、これをある最適基準に従って各径路に振り分ける問題は交通流配分問題とよばれている。たとえば、新しい道路を建設すると交通流が全体でどう変わるかを考えるには、

個々の利用者が学習の結果、自己の旅行時間を最小とするよう径路選択を行なうものとする、同一のODペアをもつ径路の旅行時間は径路交通量が0でない限りすべて等しい均衡状態に到達するので、このような解を求めることが重要であり、等時間配分問題とよばれて交通計画の分野で古くからその解法が研究されている。一方、道路網における総旅行時間を最小とする配分は、最適配分とよばれ、つぎのように定式化される[7]。

道路網が有向グラフ $G=[N, L]$ (ただし $n \in N$, $l \in L$ はノードおよび有向アークとその集合) で表わされ、ODペア $w \in W$ ごとの需要交通量 q_w が各径路 $p \in P_w \subset P$ (ただし P_w は w を起終点とする径路の、または P 全体の径路の集合) に径路交通量 F_p として配分されるものとする。ここで各アークの旅行時間 T_i がアーク交通量 f_i の関数、

$$T_i = T_i(f_i) \quad (1)$$

で与えられるとすると、最適配分は総旅行時間

$$Z = \sum_{i \in L} f_i T_i(f_i) \quad (2)$$

を最小とする問題に帰着する。ただし、制約条件

$$f_i = \sum_{p \in P} \delta_{ip} F_p, \quad 0 \leq f_i \leq U_i \quad l \in L \quad (3)$$

$$q_w = \sum_{p \in P_w} F_p \quad w \in W \quad (4)$$

であり、 U_i はアーク l の容量、 δ_{ip} は径路 p がアーク l を含む時1、それ以外の時0である。

この場合 F_p が求める変数となるが、径路の交差・合流を考え、同一のODペアまたは目的地Dをもつ流れを1つの品種(コモディティ)とみなすと変数の数はそれに応じて減少する。何を変数とするかは径路誘導の方法とも関連がある。

Dafermos[7]等はこの最適配分問題と、前述の等時間配分問題とが適当な条件のもとで互いに等価変換できることを示している。すなわち、アークの旅行時間 T_i の代わりに限界径路コスト

$$d_i(f_i) = \frac{d}{df_i} [f_i T_i(f_i)] \quad (5)$$

を用いると、最適配分問題は等時間配分問題に変換され、逆に目的関数として、

$$Z = \sum_{i \in L} \int_0^{f_i} T_i(f) df \quad (6)$$

を(2)式の代りに用いると、等時間配分問題は最適配分問題に変換される。

これらの問題は、アーク旅行時間 T_i が一定の場合は線形計画問題、単調増加関数の場合は凸計画問題として種々の解法が研究されている。たとえば交通量対旅行時間 $(f_i - T_i)$ 特性が線形または区間線形の場合に代数方程式を用い有限回の繰返し演算で厳密解を求める方法[8]があり、非線形の場合にも非線形計画法により最適解を求める方法[9]がある。

等時間配分を求める能率の良い方法として、分割法[10]が知られている。これは、需要交通量を n 等分し、前回までに配分されたアーク交通量から定まるアーク旅行時間にもとづいて最短径路を探し、つぎの $1/n$ の交通量を割付ける方法であって、近似解ではあるが収束演算を含まないために計算時間が早い。分割の大きさを可変にして計算時間を短縮する方法[11]も試みられている。

暫定的な割付けの後、最長径路の交通量の一部を最短径路へ移してゆく方法(Dafermosの方法[7])や、IA法により、暫定的な可能解の一部を差引いてこれを最短径路に再配分することを繰返す方法[12]等も考えられている。

以上にあげたような交通流配分の手法を実際に適用して径路誘導制御を行なうことを考えると、つぎのような問題点が存在する。

- 1) 配分計算の基礎となる需要交通量について精度の良い推定が必要である。
- 2) 所要計算時間が最短径路誘導の場合に比べて1桁程度以上長くなる。
- 3) 配分計算の結果を個々の自動車の径路誘導に反映させる方法がやや複雑になる。
- 4) 需要交通量・待行列等の時間的変動、信号機の影響、走行時間遅れ等、動的なシステムとしてとらえるべき要因が考慮されていない。

信号制御と径路誘導制御相互の関係についてはいくつかの検討がなされ、2径路への配分のよう

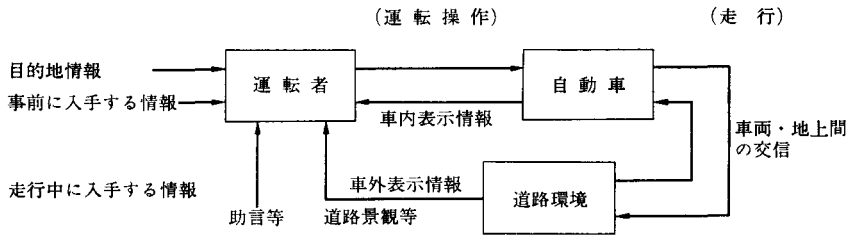


図 2 人間—自動車系における径路誘導情報の流れ

な簡単な問題については動的な性質を考慮した取扱い[13]も試みられている。筆者らも2), 3)の問題点の解決のための1つのOD交通量またはD交通量を単一の径路に配分する方法[14], 4)の問題点を考慮した時間拡張ネットワークによる動的交通流配分[15]等の提案を行なっているが、今後さらにシステムの具体的な形態を念頭に置いた理論の展開が要望される。

4. 自動車・地上間通信による径路誘導システム

人間が自動車を運転して道路を走行する場合、その情報伝達系を図2のようにとらえることができる。この際に利用される情報の種類は、

- 1) 目的地点・現在地点を同定するもの
- 2) 道路網・交通状況・道路環境に関するもの
- 3) 目的地までの方向・距離・予測旅行時間等
- 4) 目的地までの推奨径路
- 5) 現土地点における行動指示

等が考えられる。また、これらの情報の発生・伝達的手段としては、

- 1) 運転者の知識・従来の経験、他人の助言、地図、旅行案内書
- 2) 道路・建物等の景観、道路標識、可変情報板
- 3) ラジオ放送、車両・地上間通信
- 4) 距離計、方位計、時計等による計測

等があげられる。

運転者はこれらの情報を図2に示すように事前に、あるいは走行中に入手して行動を決定し、運転操作を行ない、その結果を確認しつつ最終目的

地に到達することになる。この際に径路誘導に必要な情報処理過程は図3のように考えられる。

近年、世界各国では表1に示すように自動車・地上間通信による各種の径路誘導システムの開発が進められた。これらの方式を上記の情報処理過程に照らしてその特徴をあげるとつぎのようになる。

DAIR および AWARE が地上から受け取る情報は地点情報その他、いわば可変標識の範ちゅうにとどまるものであって、個別性に乏しい。DAIR の与える行動指示情報は予め車上で用意されたものであって動的な径路誘導機能に欠けるうらみがある。Delft 工大方式のものは地上から行動指示情報が送られる点で、ERGS 以下の諸方式と同様であり、送信情報量、換言すれば所要帯域幅の負担において、単方向通信を用いることによる通信手順と機器の簡単化をはかったものといえる。以上3方式はいずれも地上—車上の単方向通信によるものであって、その共通する問題点としては地上において個々の自動車からの情報を

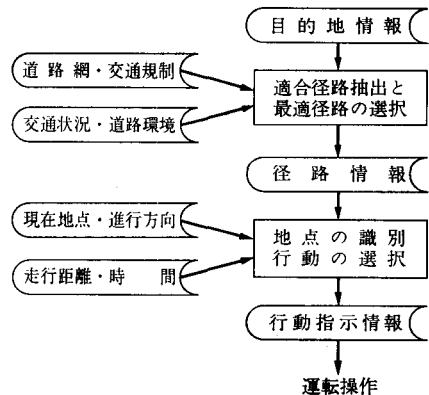


図 3 径路誘導のための情報処理過程

表 1 自動車・地上間通信による径路誘導システムの実例

方 式	国・機関・開発年	機 能 ・ 特 徴
DAIR ^[16]	米国・GM 1966	各交差点での行動指示情報を車上の磁気カードに記憶し、道路上に埋設された永久磁石の極性で示される交差点番号を読み取って右左折等を表示
Delft ^[17] 工大方式	オランダ 1971	地上からすべての目的地についての行動指示情報を送出し、車上で自己の目的地に対応する情報を選択して右左折等を表示
AWARE ^[18]	英国・TRRL 1974	地上から前方または交差道路での障害や予想される遅れ、代替推奨径路等の情報を送出し、車上で表示
ERGS ^[19]	米国・DOT 1967~70	車上から目的地コードを送出、地上で誘導テーブルを検索して行動指示情報を返送、車上で16のセグメントの組合せで右左折等を表示
PDS ^[20]	西独・Siemens 1970	同上、信号機と連動した速度表示を行ない、また、中央の計算機で直接制御した点が異なる。
Aachen ^[21] 工大方式	西独 1972	同上、高速道路を対象とした動的径路誘導をねらいとしている
CACS ^[22] ^[23]	日本・通産省 1973~79	同上、街路を対象として最短径路計算にもとづく動的径路誘導を行ない、また、交信地点と別の地点で行動指示情報を表示できるようにしている。
ALI ^[24]	西独・研究技術省 1977~	同上、高速道路を対象とし、交通流計測機能、車間距離監視、警告機能等と組合せている。

リアルタイムに収集する機能に欠けることがあげられる。

ERGS 以下の5方式はいずれも地上・車上間の双方向個別通信を利用したものであり、昨今のLSI技術の進歩が機器の価格の負担を軽くしていることから、この方式の有利性が高まりつつある。問題点としては、地上から自動車には行動指示情報のみが与えられ、運転者が交通の状況や選択された径路の全容を把握することが困難な点で、現状との整合性や誤動作の影響という観点からはAWAREのような方式に劣ることがあげられる。この点についての懸念は、自動車総合管制システム(CACS)のパイロット実験では表示板のデザインと表示地点の選択等の工夫により解決され、払拭された観もあるが、なお今後も、行動指示情報のみならず、関連道路の交通状況や径路情報あるいは複数代替径路情報をも車上に伝達し、運転者に行動選択の余地を残す方式等についても検討することが望ましいと思われる。

5. おわりに

昭和52年10月から1カ年にわたって行なわれた

1980年4月号

自動車総合管制システムのパイロット実験は、都市における自動車の個別径路誘導の実現可能性と有用性を実証するとともに、車載電子機器という道具によって多くの新しい交通流データを残した。

このようなプロジェクトに参加し、あるいは触発されて、昭和47年から約4年半の間にわが国では径路誘導制御・交通流配分に関して50編の論文が電気・電子通信・土木・交通工学等の各学会で発表された[27]。

径路誘導制御は可変情報板等を用いる従来からの方法でも、また、自動車と地上との個別通信を用いる新しい方法によっても、今後一層の発展を遂げると考えられるので、交通流の特性や制御システムの機能、さらには自動車利用者の人間工学的・社会的行動を含めた問題について、オペレーションズ・リサーチの分野での理論的研究がますます活発になることを期待してやまない。

参 考 文 献

- [1] 岡本：街路網における交通制御システムに関する研究，東京大学学位請求論文，1972，6。

- [2] 交通工学研究会：首都高速道路の将来管制システムに関する研究，1978. 3.
- [3] 高速道路調査会：広域交通情報システムの運用手法と機器構成のあり方に関する研究，1979. 3.
- [4] S. E. Dreyfus : An Appraisal of Some Shortest-Path Algorithm, Opns. Res. 17, 395-412. 1969.
- [5] 工業技術院研究開発官室：通産省大型工業技術研究開発「自動車総合管制技術」，システム設計および交通制御方式の研究の概要，1979. 4.
- [6] 高羽，佐々木：交通流配分のための複数経路指示のアルゴリズムとその評価，電子通信学会技術研究報告，CST 75-119, 1976. 3.
- [7] S. C. Darfermos, F. T. Sparrow : Traffic Assignment Problem for General Networks, J. Res. of Nat. Bur. Stds. 73 B, 91-118, 1969.
- [8] 中堀，西川：交通流配分問題の均衡解を求める新しいアルゴリズム，電子通信学会論文誌，J 59-A, 3, 192-199, 1976.
- [9] 浜田，藤田：交通流の経路指定のための最適配分アルゴリズム，生産研究，25, 4, 17-19, 1973.
- [10] 佐々木，井上：等時間原則による交通量配分計算の実用化，交通工学，6, 6, 10-18, 1971. 11.
- [11] 最首：等時間原則に従う交通流配分について，交通工学，11, 5, 23-30, 1976.
- [12] 森口，伊理，長谷川：多種流輸送問題の一つの近似解法，日本OR学会，1970年度秋季研究発表会アブストラクト集，1-1-7.
- [13] 中崎，中堀：動的交通流配分，交通工学，11, 2, 25-31, 1976.
- [14] 最首，高羽：交通流の一経路配分，電子通信学会技術研究報告，CST 78-107, 1978. 11.
- [15] 小林，高羽：時間拡張ネットワークによる動的交通流配分，電気学会システム制御研究会，S C-77-2, 1977.
- [16] E. A. Hynsz et al. : DAIR A New Concept in Highway Communications for Added Safety and Driving Convenience, IEEE Trans VT-16, 1, pp. 33-45, 1967. 10.
- [17] Transport and Road Research Laboratory : AWARE, Advance WARning Equipment - Technical Descriptions, Leaflet LF 398, 1974, 4. : --General Descriptions, Leaflet LF 399, 1974. 4.
- [18] J. A. M. Nijhof : Een elektronisch verkeers informatie en routierings systeem, Afstudeerverslag, Technische Hogeschool Delft, 1971, 6.
- [19] PB Report No. 197090, 1968.
- [20] D. Bornewasser : Elektronische Einrichtungen für die Fahrzeugführung, Der Elektroniker, Heft 4, 1970.
- [21] G. Groth and O. Pilsak : An Electronic System for Individual and Active Route Guidance on Motorways, Preprint of the 2nd IFAC/IFIP/LFORS Symposium, pp. 273-284, 1974. 9.
- [22] 五十嵐：自動車総合管制技術の開発，交通工学，9. 2. 35-41, 1974. 3.
- [23] 松本，三上，油本，田部：自動車総合管制システム，電子通信学会誌，62, 8, 870-887, 1979. 8.
- [24] F. Boltze et al. : ALI, Autofahrer-Leit und Informations system, 1977.
- [25] 高羽：これからの交通流制御技術とその課題，昭和50年電気四学会連合大会，953-956.
- [26] 高羽，浜田：道路交通の制御手法，電気学会雑誌，9, 11, 983-988, 1976.
- [27] S. Takaba and T. Hamada : Bibliography on Road Traffic Information and Control in Japan, MIPC Report 77-4, IIS Univ. of Tokyo, 1977. 12.

会員名簿ができました

先に皆様よりお送りいただいた名簿作成資料にもとづき昨年12月に会員名簿を作成いたしました。

頒布は希望者のみです。ご入用の方は学会事務局までお申込みください。

(頒布価格 1000円)