

経路誘導による交通ネットワーク フローの変化に関する分析

Analysis of traffic network flow
by adapting route guidance

森津 秀夫^{*} 大原 竜也^{**} 多田 典史^{***} 井上 琢弥^{****}
by Hideo MORITSU Tatsuya OHARA Yorihiro TADA Takuya INOUE

Route Guidance System is useful for drivers and agencies which control traffic because the system can show the optimum route and even out car flows to avoid traffic jam by informing drivers traffic condition. The system can catch information from each car through roadside equipment, process the information and give it back to each car to control car flows. We made a simulation model of the system to begin with. We must evaluate on the model the effects which car flows give to road network and decide a direction to make the Route Guidance System as a social basis.

This paper presents the effects and the direction. We showed the effects which route guided cars give to road network and investigated how to supply traffic information to cars. Besides, we suggested a method for renewal of the optimum route and showed the result.

1. はじめに

近年、都市部における交通混雑や渋滞は恒常的なものとなっている。道路建設などのハード面の対応が追いつかない状況下では、ソフト面での対応を行って道路施設の有効利用を図る必要がある。その代表例として車両を適切な経路に誘導して交通流を最適化することを目的とする経路誘導システムが挙げられる。このシステムを導入するには地上側と車載側の設備が必要であり、両者を有機的に結合することで動的な道路交通情報を活用した経路誘導が実現され、道路施設の有効利用、旅行時間短縮、事故減

少、燃料削減等が実現されると考えられる。

このような経路誘導システムを効果的に活用するためには総合的な運用の指針が必要となる。そこで経路誘導システムの運用の指針を明らかにするための基礎研究として、経路誘導を受ける車両がネットワーク上を走行することで交通ネットワークフローにどのような変化が起こるのかをシミュレーション手法を用いて分析する。さらに経路誘導を行うときに提供される道路交通情報の更新周期や情報処理等による情報提供の伝達遅れの影響についても考察する。また誘導を受ける車両の経路変更に関する一方法を提案し考察を行う。

以下、2. において経路誘導システムの概略について述べ、3. において経路誘導による車両の挙動を再現するシミュレーションモデルの構築について述べる。4. では3. で構築したモデルを格子状ネットワークに用いてシミュレーションを行い、結果を検討する。さらに5. においては実際のネットワーク

* 正員 工博 神戸大学助教授 工学部土木工学科
(〒657 神戸市灘区六甲台町1)

** 正員 工修 姫路市役所

*** 日本DEC

**** 正員 工修 住友電気工業(株)

ワークへの適用例として東神戸地区への適用を示す。最後に6. においてはまとめと今後の課題について記す。

2. 経路誘導システムの研究例と現状

(1) 経路誘導システムの概略

経路誘導システムは広義にとらえると、表示板による誘導や路側ラジオによる交通情報提供をも含むと考えることができる。しかし、ここで対象とするのは目的地への最適と判断される経路を車載のディスプレイあるいは音声などによりドライバー（道路利用者）に提示するシステムである。この機能の実現によりドライバーは混雑や渋滞を回避した最適とされる経路を走行でき、道に迷うことによる無駄な走行が減少する。また車内で経路誘導を行うことで、運転者に対する情報を個別にかつ簡潔に提供できる。これにより運転者の受容性が高まり、安全面での寄与も大きいと考えられる。

一方、道路管理者側からすれば各車両を適切に配分することで混雑の回避や解消を図り道路を有効利用できる。間接的にはNO_xの減少や環境問題にも寄与することになる。

(2) 経路誘導システムの研究例

わが国における本格的な経路誘導システムの研究には、1973年に通産省工業技術院によるプロジェクトとして開始されたCACS (Comprehensive Automobile traffic Control System: 自動車総合管制システム) が挙げられる^{1), 2)}。このシステムではパイロットシステムを設置し、フィールドテストの結果、誘導車の旅行時間が自由走行車と比較して平均約11%短縮されることを示した。さらに並行してシミュレーションの手法による研究も進められ、経路誘導利用車が大多数で複数の経路に配分する方式を適用した場合、総走行所要時間で約6%の低減が可能であるとの解析結果が得られた。

近年の研究としてはRACS (Road/Automobile Communication System : 路車間情報システム) およびAMTICS (Advanced Mobile Traffic Information and Communication System : 新自動車情報通信システム) の2つが挙げられる^{3), 4), 5)}。これらの研究における大きな特徴は、エレクトロニクス化の進展に

よりナビゲーション機能を実現できる車載機が開発され、地上側の情報処理負担の軽減を考慮したことである。

RACSは建設省土木研究所と民間企業の共同研究の形式で1987年から開始された。このシステムは車載のナビゲーションシステムの普及を想定して進められ、車載機に位置情報や道路情報、車外との連絡機能を提供することにより案内施設、道路交通情報サービスの充実を図ることを目的とした。既にこれらの基礎実験は終了し、現在普及の初期段階として位置情報などの固定情報を車に送信する位置ビーコンの設置が進められている。

一方、AMTICSでは警察庁の関連のAMTICS実用化推進協議会と民間企業との共同研究により1988年からパイロット実験が開始された。このシステムも前者と同様に車載機の普及を前提とし、詳細なリアルタイムの交通情報を提供し、混雑や事故を回避させ、安全で円滑な自動車交通を実現することを目的としている。このシステムのパイロット実験は1988年に東京で実施され、1990年にはAMTICS関西実験として「国際花と緑の博覧会」の期間に大阪市及びその周辺地域で実施された。また同年には建設省・警察庁・郵政省によりRACS, AMTICSを統合する形でVICS (Vehicle Information Communication System : 自動車情報通信システム) 推進協議会が発足し、インフラ側の整備が進み大きな発展が期待されている。

(3) 経路誘導システムの現状

(2)ではインフラ側の研究開発について示したが、車載側のシステムは自動車メーカーを中心として実用化のプロトタイプともいえるものが製品化されている。経路誘導システムの実現には、基本技術として自車位置を検出するロケーション機能が必要である。現在、車内の表示装置に描画された地図上に検出した位置を表示するナビゲーションシステムが製品化されているが、これは経路誘導システム実現の第1ステップといってよい。

(4) 経路誘導システムの研究課題

(2), (3)で示したように、官民共に経路誘導システムの実現にむけて開発が進められているが、このシステムの公共性ゆえに社会システムとしての検討を行っておく必要がある。経路誘導システムの稼働当初には誘導を受ける車両数も少なく、これらの車両

が交通流全体に与える影響も小さいと考えられる。しかし誘導を受ける車両が増加するにつれて、その影響は無視できないものとなる。車両数の増加に従い誘導を受ける車両の効果が減少するとも言われており、誘導を受けない車両への影響も明らかにする必要がある。またこのシステムの運用時に必要となる交通情報・道路情報の更新周期の設定や情報収集・情報処理にともなう情報伝達遅れの影響についての検討が不可欠である。

これらの課題に対して、あらゆる交通パターンやネットワークパターンに対してフィールド実験を行って検討をする必要があるが、実際には実験を行うことは不可能である。そこで、経路誘導を表現できる交通ネットワークフローのシミュレーションモデルを構築し、シミュレーション的手法を用いて結果を分析、検討するものとする。

3. シミュレーションモデルの構築

(1) 概 説

経路誘導システムを表現できる交通ネットワークフローのシミュレーションモデルの構築時には、誘導を受ける車両の割合、誘導の遵守率、誘導ロジック、非誘導車の経路選択行動、交通情報の収集周期、誘導経路データ更新周期などさまざまな要因を考慮しなければならない。本モデルにおいては誘導に関連する車両の要因に加えて交通情報の収集・管理の運用面を考慮し、システムの最適化を検討できるモデルであることが大きな特徴である。本モデルは図-3.1に示すように交通ネットワーク表現部、ネットワークフロー表現部、経路誘導表現部で構成される。

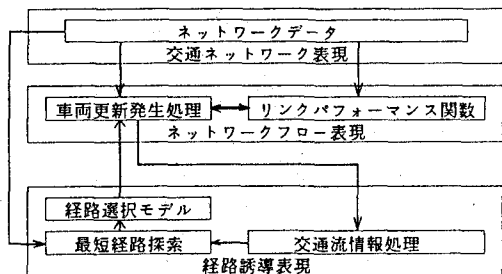


図-3.1 シミュレーションモデルブロック図

交通ネットワーク表現部は道路や交差点およびその接続関係や交通規制を効率よく表現するために森津によるネットワーク表現⁶⁾を用いる。この表現を用いるとリンク間の右左折直進の接続関係を厳密に区別することが可能となり、その必要性がなければ単純化された表現となる(図-3.2, 3.3)。

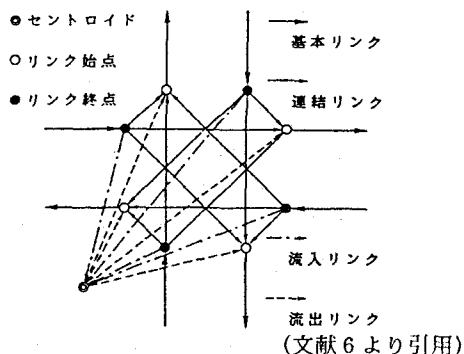


図-3.2 接続距離がすべて異なる交差点の表現

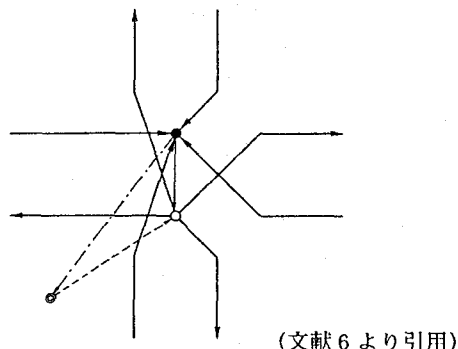


図-3.3 接続関係がすべて同一の交差点の表現

ネットワークフロー表現部では、交通ネットワーク上での車両の走行状況を再現するため、車両を1台単位で離散的に表現する。リンクフローの表現で、各リンクの予定走行時間をリンクパフォーマンス関数だけで表現した場合⁷⁾、リンク上の車両の前後関係や存在台数の取り扱いに不十分な面が認められる。そこで、各リンク上に存在する車両に以下に示す制約①に加えて②～④を設ける。

- ①リンクパフォーマンス関数と流入時刻で求められる流出予定時刻以前には流出できない
- ②前方の車両を追越すことはできない(流入した時刻順に流出)
- ③各リンクの許容存在台数を越える流入は認めない

④直前に流出した車両からの適正な車頭間隔時間を経なければ流出できない

①は車両が群をなしてリンクに流入したときに起こる自然な走行速度低下を再現するもので、修正BPR関数を用いる(式(3.1),式(3.2))。

$$t = \frac{L}{V} \quad (3.1)$$

$$T = t \left\{ 1 + a \left(\frac{q}{c} \right)^b \right\} \quad (3.2)$$

ただし, $a = 2.62$, $b = 5$

ここで, L : リンク長(km)

V : リンクの最高速度(km/h)

t : 自由走行時のリンクの旅行時間(h)

T : リンクの旅行時間(h)

q : 交通量(台/h)

c : 交通容量(台/h)

②は複数車線からなる道路区間を仮想的な各方向1車線道路としてモデル化し, 車両の前後関係を厳密に管理するためのものである。③では車両の道路上的における占有長を設定し, 各リンクごとに存在可能な台数を制限することにより許容存在台数を超える車両が流入する非現実な現象を回避する。④は交差点のボトルネックを表すためのものであり, 複数車線からなる道路に対する適正な車頭間隔時間は, 1車線ごとの限界車頭間隔時間をもとに式(3.3)から求める。

$$T_0 = \frac{T' \cdot t}{n} \quad (3.3)$$

ここで, T_0 : 適正な車頭間隔時間(sec)

T' : 限界車頭間隔時間(sec)

t : 有効青時間(h/h)

n : 車線数

これら①～④の制約を加えることでより現実に忠実な車両の挙動が再現される。

リンクの終点に到着した車両は各車両の経路選択ロジックに従って次に進むリンクを決定する。このとき①～④を満足したときに当該リンクを流出する。

(2) 経路誘導の表現

ネットワーク上の車両を誘導を受ける車両(以下, 誘導車)と誘導を受けない車両(以下, 非誘導車)に分類する。誘導車は最適経路探索を行って走行する経路を決定する。ここでは最適経路を最短時間経

路と設定し, 各リンクのコストを平均旅行時間として探索を行う。ここに示す平均旅行時間は各リンクから車両が流出したときに求められる旅行時間を地上側に送信し, 地上側で収集, 処理し車上側に提供されたもので, 双方向通信の処理を想定している。

一方, 非誘導車の挙動は誘導車両による交通流の変化にともない微妙に変化すると考えられるが, その挙動については明らかになっていない。そこで誘導車を含めて経路選択クラスという概念を導入する。最短距離経路を走行する車両のクラス, 自由走行時の最短時間経路を走行するクラスを設定して非誘導車の挙動を表現する。これらのクラスの存在比率を調整することで現実の挙動に近い表現が可能となる。

(3) 処理の流れ

シミュレーションモデルの概略を図-3.4に示す。

リンクデータ更新処理では設定したシミュレーション周期ごとに各リンクへ流入処理される交通量を集計する。このデータをもとにリンクデータ更新周期ごとに修正BPR関数を適用して各リンクの予定走行時間などを出力する。このとき周期ごとの算出値を単一に採用すると算出値の変動が大きい場合に予定走行時間が大きく変化するなどの不自然な現象を回避するために指数平滑化の処理を行う。

旅行時間の収集方法には図-3.5に示すパラメータについて考慮した。交通流情報更新周期 T は旅行時間データを収集する間隔とし, この間隔の D 周期分を最短経路探索に用いる旅行時間平均化時間とする。さらにデータ処理や通信に要する時間を経路誘導情報伝達遅れとして定義し, 現在の集計時刻からの伝

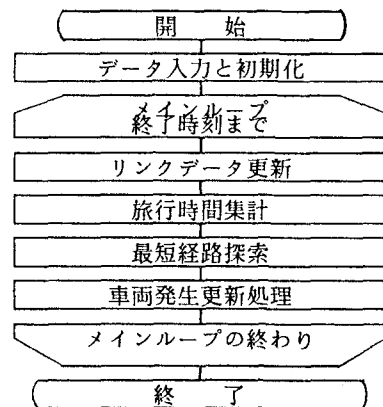


図-3.4 シミュレーションモデルの流れ図

遅延時間としてW周期分を設定できるようにする。ここに示すT, D, Wを自由に設定することで提供される交通情報が処理遅れなどの要因を加味した運用時に近い状況の内容のものとなる。よって各パラメータを変化させて得られた結果を検討することで運用時の指針を得ることができる。

最短経路探索は経路誘導情報更新周期ごとに行い、このとき各セントロイドを根とする最短経路樹を全ての目的地セントロイドについて作成する。

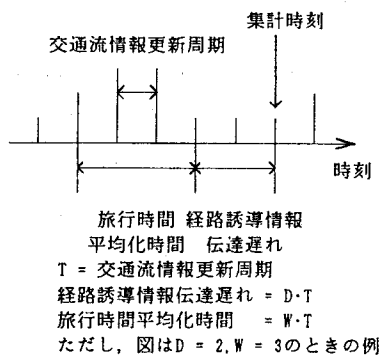


図-3.5 旅行時間の収集方法

4. テストネットワークでの検討

(1) 概説

3. で述べたシミュレーションモデルをテストネットワーク上で適用し、経路誘導効果に影響を与えると考えられるパラメータを変更して検討を行う。ケース1においては誘導を受ける車両の全体に対する割合（以下、誘導率）の変化による経路誘導効果の検討、ケース2では経路誘導情報伝達遅れの違いによる経路誘導効果の差異を、ケース3では経路誘導情報更新周期の違いによる経路誘導効果の差異をそれぞれ検討する。つぎに新たな経路誘導ロジックを導入し、このロジックのパラメータを変化させて経路誘導効果の変化を見る。ここで適用するテストネットワークと諸条件を以下に示す。

テストネットワークは図-4.1に示すようにノード数16、セントロイド数4、リンク数48の格子状である。リンク長は横方向リンク1 km、縦方向リンク2 kmとし、リンクには3種類のランクを設けそれぞれに最高速度と交通容量を設定する。車両は各セント

ロイドからそれぞれランダムに発生するものとし、発生量は時間的変動をしないものとする。誘導率は0~100%の10%単位とする。交差点については直進コストからの差を右左折コストとして定義し、右折コスト、左折コストをそれぞれ一定として与える。これらは最短経路探索時にも利用される。提供される各リンクの平均旅行時間は、交通流情報更新周期、旅行時間平均化時間、経路誘導情報伝達遅れの3つのパラメータに基づき算出される。ここでは想定されている経路誘導情報更新周期として5分を採用し⁸⁾、交通流情報更新周期、旅行時間平均化時間、経路誘導情報伝達遅れについても同様に5分と設定し、これらの設定値を基本設定状態とする。非誘導車は経路選択クラスを最短距離経路を走行するクラス、自由走行時の最短時間経路を走行するクラスの2つとし、同一割合で発生させるものとする。

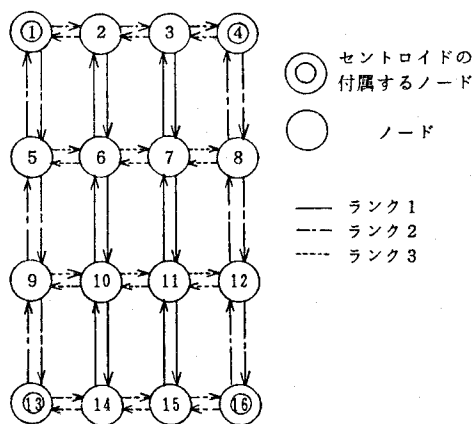


図-4.1 テストネットワーク図

(2) ケース1の結果

上記の条件でシミュレーションを実施した結果のOD別・クラス別の平均所要時間を図-4.2に示す。ここで経路クラス1は誘導車、経路クラス2は非誘導車の最短距離となる経路を走行する車両、経路クラス3は非誘導車の自由走行時の最短時間経路を走行する車両である。図-4.2から判断すると誘導率50%を境として誘導車の有利性が失われているが、これは誘導車による誘導経路への集中がその経路の所要時間を増加させていることによると推測される。

(3) ケース2の結果

ここでは経路誘導情報伝達遅れが経路誘導効果に

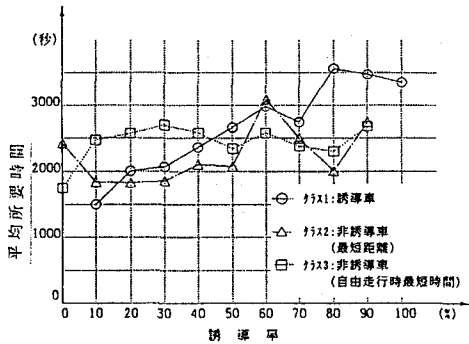


図-4.2 誘導を受ける車両の影響

与える影響を検討する。ケース1のシミュレーションでは経路誘導情報伝達遅れを5分と設定しているこれと比較するために経路誘導情報伝達遅れがない(0分), 10分の2つの条件でシミュレーションを実施した。この結果を全体の平均所要時間として図-4.3に示す。誘導率が高くなるほど経路誘導情報伝達遅れの影響が現れ, この伝達遅れが大きくなるほど全体の平均所要時間が大きくなっている。これは遅れた情報による誘導車の走行が他の車両の走行にも影響を与えているためと考えられる。

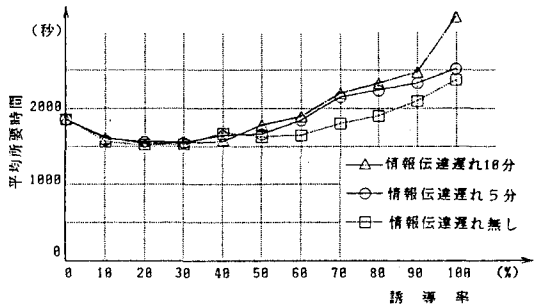


図-4.3 経路誘導情報伝達遅れの影響

(4) ケース3の結果

ここでは経路誘導情報更新周期が経路誘導効果に及ぼす影響を検討する。ケース1においては交通情報に関する3つのパラメータを5分と設定(基本設定状態)したが, 比較のため3つのパラメータもすべて1分, 3分とする2ケースを設定する。そしてこれらの条件でシミュレーションを実施し, その結果を全体の平均所要時間として図-4.4に示す。これによれば, 誘導率が高くなると経路誘導情報更新周期が短い方が平均所要時間が短くなる。これは経路

誘導情報更新周期も情報の遅れをもたらす要因と考えられ, 誘導率が低いときには影響は小さいが誘導率が高くなると誘導効果に影響を及ぼす。また短い周期で誘導経路が変更されるために誘導経路への車両の集中が緩和されていることも一因と考えられる。

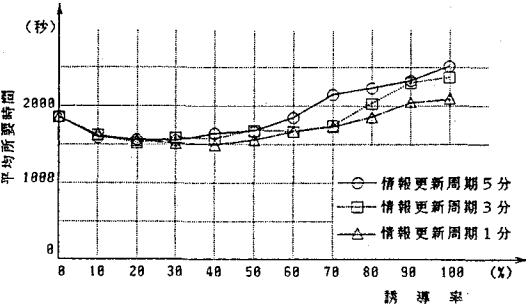


図-4.4 経路誘導情報更新周期の影響

(5) 新たな経路誘導ロジックの導入

ケース1～3においては誘導車は経路変更が可能な地点でつねに最新の情報に基づく最短時間経路を選んでた。そのために場合によっては頻繁に経路を変更することになり, それが誘導の弊害を招くことも考えられる。そこで, ここでは現在予定している経路の所要時間と新しく求められた最短経路の所要時間との経路時間差に着目し, この経路時間差の大きさにより新たな誘導経路を受け入れる割合をロジスティック曲線から求めるものとする。すなわち, 経路時間差が小さい場合は新たな経路への変更を抑制することになる。これは車載機における誘導ロジックの変更ととらえることができ, 誘導ロジックにより経路変更に関する個人差の表現ともとらえることができる。ロジスティック曲線は式(4.1)で示されパラメータ未知数 a , c は任意の2点を与えることで決定されるが, ここでは経路変更率10%, 50%のときの経路時間差から求めることにする(図-4.5, 表-4.1)。ケース1～3では新たな誘導経路の方が早く進めるときは経路変更率100%の割合で経路変更を実施していたことになる。

$$y = \frac{1}{1 + c e^{-ax}} \tag{4.1}$$

ここで, y : 経路変更率

x : 経路時間差

まず, ケース4として基本設定状態のシミュレー

シジョン条件のもとで経路時間差の幅を一定とし、経路変更率50%となるときに経路時間差を変化させたときの平均所要時間の違いを調べた。図-4.6からはロジック変更前と比較して平均所要時間の短縮が図られている。概して経路変更率50%のときの経路時間差を8分としたものが比較的、低誘導率のときに効果があり、高誘導率となると経路時間差を5分としたものが効果的である。

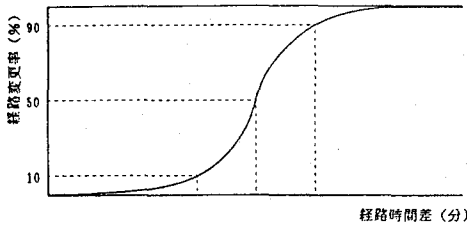


図-4.5 ロジスティック曲線による設定

表-4.1 経路時間差と経路変更率の設定

変更率(%)	10	50	90	備考
ケース				
ケース4	1	5	9	ケ-24-a
	4	8	12	ケ-24-b
	7	11	15	ケ-24-c
ケース5	1	8	15	ケ-25-a
	0 (-2)	8	18	ケ-25-b
	0 (-5)	8	21	ケ-25-c

単位 (分)

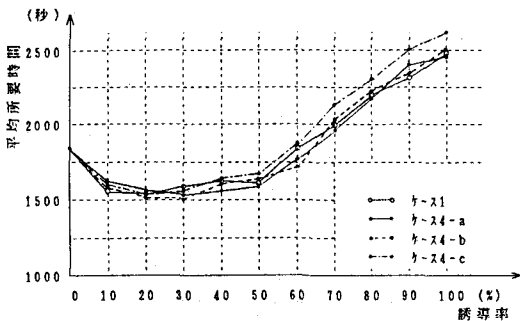


図-4.6 誘導ロジックを導入したときの
平均所要時間 (ケース4)

さらにケース5として基本設定状態のシミュレーション条件のもとで低誘導率のときの効果を検討するために経路変更率50%となる経路時間差を8分に

固定し、経路変更率10%となるときに経路時間差を変化させたときの平均所要時間の違いを調べた (図-4.7)。これによると低誘導率の場合には経路時間差の幅が小さいときに有利性が見うけられ、誘導率が大きくなるにつれて経路時間差の幅を大きくしたときの方が有利である傾向を示している。

これらを総括すると、上記の誘導ロジックを導入することはテストネットワーク上の全体の平均所要時間の短縮に大きく寄与し、経路誘導効果を向上させる一手法であるといえる。

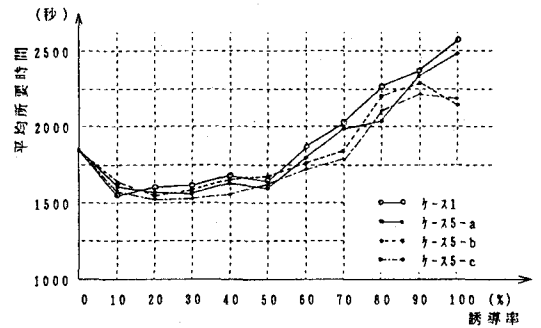


図-4.7 誘導ロジックを導入したときの
平均所要時間 (ケース5)

5. 東神戸地区への適用例

3. で構築したシミュレーションモデルを実際のネットワークに適用したときの効果を検証する。シミュレーション対象地域を図-5.1に示す神戸市灘区、東灘区とし、1995年に想定されるネットワーク (ノード数72, セントロイド数36, リンク数220) と交通需要 (約20000台/時) を与える。シミュレーション実行時の交通情報は4.における基本設定状態とし、これらの条件下でシミュレーションを行い、誘導率と平均所要時間の関係について調べる (図-5.2)。これによれば誘導率が高くなるにつれて平均所要時間は減少する傾向にある。すなわち実際のネットワークと交通需要に対して経路誘導システムを導入することでネットワークの利用効率が向上し、全体として平均所要時間が減少するという結果である。また4.で用いた格子状ネットワークへの適用結果と比較してが特に誘導率が高くなったときの傾

向が異なる。これは東神戸地区のネットワークの方が規模が大きくネットワークを有効活用できること、リンク数が多く混雑地点を避ける適切な誘導経路が設定できたことが原因として考えられる。

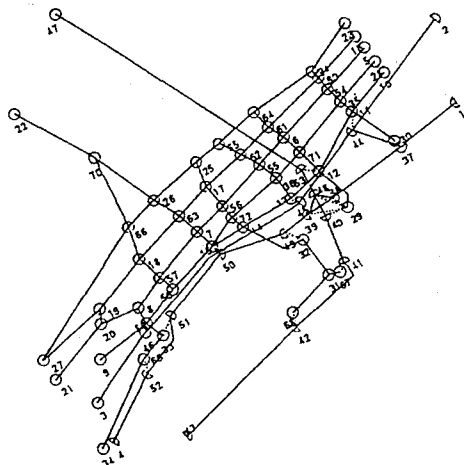


図-5.1 東神戸地区のネットワーク

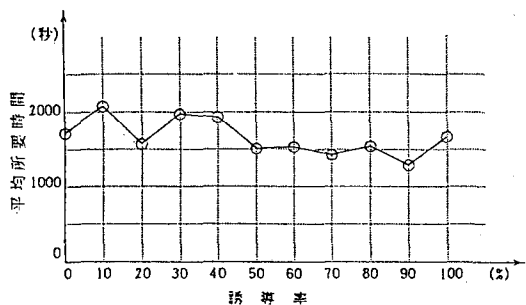


図-5.2 東神戸地区ネットワークでのシミュレーション結果

6. おわりに

経路誘導による効果を解析するために経路誘導を受ける交通ネットワークフローのシミュレーションモデルを構築した。今回構築したモデルの特徴は地上側と車載機で交通情報のやりとりを行う双方向通信を想定したモデルであることで、これは現在実用化への進展が図られている。それゆえシミュレーション的手法を用いての効果の解析に大きな意義があると考えられる。

テストネットワークを用いたシミュレーション結果においては、経路誘導システムの車載率を変化さ

せたとき車載率が70%を超えるような状況下では効果が減少することが示された。また経路誘導情報伝達遅れは効果を減少させ、誘導率が高くなるにつれてその影響は大きくなる。さらに経路誘導情報更新周期は短い方が効果が得られることが示された。さらに新たな経路誘導ロジックの導入により誘導効果を高めるとともに道路ネットワークの有効利用を目指すことができることが示された。

今後の課題としては誘導を受ける車両の誘導ロジックの開発、非誘導車の経路選択行動の表現方法の検討、提供する旅行時間の予測手法、さらには経路誘導の効果を道路利用者、管理者双方を考慮した社会システムとして検討するための手法の開発を進めることがあげられる。最後になりましたが、終始適切なご指導を賜った神戸大学工学部土木工学科枝村俊郎教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松本俊哲, 三上 徹, 油本暢勇, 田部 力: 自動車総合管制システム; 電子通信学会誌, 62巻, 8号, pp. 870~887(1979).
- 2) 越 正毅: 日本における自動車走行情報化システムの展開(CACSからの発展), 財団法人自動車走行電子技術協会 JSK国際シンポジウム情報化・知能化で築く明日の自動車社会, pp. 10~18, 1989年11月.
- 3) 小出公平・鬼頭幸三: 自動車に関する情報通信システムの動向, システム/制御/情報, 第33巻第7号, pp. 321~328, 1989.
- 4) 高田邦彦: 路車間情報システムの開発と総合実験の概要, システム/制御/情報, 第33巻第7号, pp. 329~336, 1989.
- 5) 岡本博之: 新自動車交通情報通信システム(AMTICS)の実験とその概要, システム/制御/情報, 第33巻第7号, pp. 337~345, 1989.
- 6) 森津秀夫: 交通ネットワーク表現と最短経路探索法, 交通工学, pp. 21~30, Vol. 25, No. 6, 1990.
- 7) 大原竜也・森津秀夫: 経路誘導と交通ネットワークフロー, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, 第4部, pp. 512~513, 平成2年9月.
- 8) 松村哲男: 路車間情報システムの開発と展望, 土木技術資料, 32-10, pp. 29~35, 1990.