

都市高速道路乗り継ぎ制における 最適設定方法についての研究

秋山 孝正¹・安田 幸司²・奥嶋 政嗣³・椎谷 拓也⁴

¹正会員 工博 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

²正会員 工修 (社) システム科学研究所 (〒604-8223 京都市中京区新町四条上ル小結棚町 428)

³正会員 工修 岐阜大学助手 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

⁴学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

都市高速道路の都心部の混雑緩和方策として、一般道路との関係を考慮した乗り継ぎ制が検討されている。これは、都市高速道路の均一料金制を前提とした特別措置である乗り継ぎ制を混雑部分の迂回促進を意図した交通管理に応用しようとするものである。本研究では、現実的な道路網を対象として検討を行う。このため、まず乗り継ぎ制の基本的概念について述べるとともに、乗り継ぎ制に関する既存研究の整理を行う。つぎに、現実的な例として阪神高速道路および関連道路網をとりあげ、交通均衡状態を基本とした乗り継ぎ制の最適導入ランプペアの設定について検討する。このとき、乗り継ぎ制の運用計画面で重要となる乗り継ぎ地点の最適配置の問題を具体的に検討するため遺伝的アルゴリズムを利用する。

Key Words : urban expressway, diversion system, genetic algorithm, traffic assignment

1. はじめに

本研究では、都市道路網の効率的運用を目指した都市高速道路乗り継ぎ制の導入に関する検討を行う。ここで、乗り継ぎ制とは新規路線建設が継続的に行われ、交通の非連続的な利用が生じる場合に導入される均一料金制度の特別措置である。近年、この制度を混雑緩和の意味から利用することが提案されている。また、乗り継ぎ制導入では、ETC による自動的な料金算定機能が有効となり、料金による交通調整機能と情報提供による交通誘導機能を有機的に組み合わせ、利用者の自律的な交通調整を目指すものである。これより、従来の強制的な交通制御と連動した合理的な混雑緩和方策を求めることができる。

これまでの関連研究として、モデル化の記述方法や現実道路網を対象とした導入効果についての検討が行われている^{1), 2)}。また、平常時、緊急時を対象とした乗り継ぎ制の検討が行われている^{3)~5)}。さらに、乗り継ぎ制を複数ランプペアで導入する場合についても検討が行われている⁶⁾。ここで、混雑緩和効果が単一ランプペアで得られる効果の和ではなく、相互作用が存在し、設定ランプペア数や組合せによってその有効性が異なることが示されている。このため、その適切な導入

ランプペアの組合せについての検討が必要である。

2. 都市高速道路乗り継ぎ制の概要

(1) 都市高速道路乗り継ぎ制の理念

現在の均一料金制度においては、交通需要の増大に伴って、継続的に新規路線建設が行われる場合、交通の非連続的な利用が生じるため均一料金制度の特別措置として導入されている乗り継ぎ制がある。ここでいう乗り継ぎ制は、高速道路の特定オフランプから流出した交通に対し、経路上の特定オンランプから高速道路を再利用した場合に料金を課さない制度である。

本研究で取り扱う乗り継ぎ制は、この制度を高速道路の混雑区間の迂回促進を意図した交通管理として利用しようとするものである。これは、一般道路に若干交通量に余裕がある場合、混雑区間を迂回した高速道路の再利用に適用するものである。このため、混雑区間の迂回が容易になり交通混雑が緩和される。この乗り継ぎ制を図示したものが図-1である。これは、都市高速道路と一般幹線道路で構成される都市道路網の一部を表現したものである。ここで、

表-1 既存研究の整理

	NM1	NM2	NM3	NM4	NE1	NE2	EM	EE
①交通状態	平常時	平常時	平常時	平常時	平常時	平常時	緊急時	緊急時
②分析フレーム	モデル分析	モデル分析	モデル分析	モデル分析	実証的分析	実証的分析	モデル分析	実証的分析
③乗り継ぎペア	単一	単一	単一	複数	単一	単一	単一	単一
④需要量	固定	固定	変動	固定	固定	固定	固定	固定
⑤均衡状態	UE	SO	UE	UE	UE	SUE	UE	UE
⑥アルゴリズム	FW法	FW法	FW法	FW法	IA法	MSA法	FW法	IA法

たとえば①～⑥のOD間の交通が、「リンク1→リンク7→リンク5→リンク8→リンク3」を通過した場合が、乗り継ぎ交通に対応する。このとき、各車両はリンク1、リンク8のオンランプを2回通過する。そのため、均一料金の場合、2度の料金徴収により、2倍の料金を支払う必要がある。これに対し、乗り継ぎ制が適用された場合には、乗り継ぎ経路を利用する場合、リンク8のオンランプでは再流入となるため料金徴収されない。

また、高速道路上で突発的な交通障害が発生した場合、交通流の適正化が必要である。このため、従来、強制流出による交通制御が行われてきた。この場合、均一料金制度が導入されている都市高速道路においては強制流出させられた利用者が再び高速道路を利用すると料金を2度支払う必要がある。このため、料金制度の適切な利用を考慮すると、緊急時においても乗り継ぎ制導入の検討が可能である。

(2) 乗り継ぎ制に関連する既存研究の整理

ここでは、都市高速道路の乗り継ぎ制に関する既存研究の整理を行う。表-1は既存研究を項目ごとに整理したものである。まず、それぞれの既存研究を分類するため、6種類の項目について説明する。①交通状態は、「平常時」と「緊急時」の2分類を示している。②分析フレームは、分析に用いたネットワーク規模により分類している。モデル分析では、理論的に乗り継ぎ制の有効性を検証し、実証的分析では大規模なネットワークで立証を行っている。実証的分析とモデル分析では、モデル構造に大きな相違はない。ただし、実証的分析では、実用的な計算時間を考慮して、アルゴリズムの改良が必要とされる。③乗り継ぎペアは、同時に設置される乗り継ぎペアの設定数の分類を示す。④需要量は、需要関数の導入の有無を表す。⑤均衡状態は、配分原則を表している。⑥アルゴリズムは、均衡状態算定に用いる計算方法を示している。このように、さまざまな視点から乗り継ぎ制の導入効果について検討されている。

つぎに、それぞれのモデルの関係について説明する。すべてのモデルの基本型として、モデルNM1が位置づけられる¹⁾。平常時におけるモデル分析は、このモデルNM1を含めて、4種類のモデルに分類できる。モデルNM2では、モデルNM1の目的関数のみを変更して、システム最適状態(SO)を算出している³⁾。また、モデル

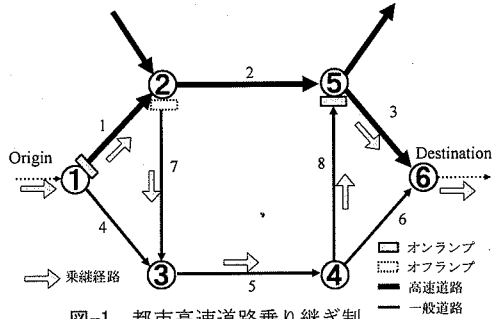


図-1 都市高速道路乗り継ぎ制

NM3では、モデルNM1に対して、需要関数を組み込み、需要の変動を考慮した乗り継ぎ制の導入効果について検討している³⁾。また、モデルNM4では、モデルNM1に対し、乗り継ぎランプにおけるネットワーク表現を工夫し、計算システムにおいても最短経路探索を複数乗り継ぎペアに対応可能としている。一方、大規模なネットワークでの実証的分析として、対象を阪神高速道路として、2種類のモデルが検討されている。モデルNE1は、モデルNM1に対して、一次元探索を省略し、分割配分法を導入している²⁾。また、モデルNE2は、モデルNE1に、dial法による経路選択と逐次平均化法による収束計算のアルゴリズムを導入することで、確率的均衡状態(SUE)を算定可能としている^{7), 8)}。

つぎに、緊急時の分析について、モデルの関連性を説明する。モデルEMでは、モデルNM1に対して、事故発生による容量低減を表現可能としている⁴⁾。さらに、モデルEEは、モデルNE1に対して、モデルEMの緊急時の状況設定方法を機能追加している。ここでは、現実道路網を対象とした緊急時の乗り継ぎ制についての検討を行っている⁹⁾。

基本となるモデルNM1では、平常時における乗り継ぎ制導入時の交通流解析として、均衡配分法(FW法)を用いたモデルにより、利用者均衡状態から評価を試みている¹⁾。また、同研究では「リンクの相互作用を考慮した配分法」(Traffic assignment with link interaction)を提案している。この結果、通常の配分法と同じくFW法を用いることができ、具体的な計算が可能となる。

交通量配分では一般に時間を単位としての交通現象を記述している。そのため、高速道路の通行料金を「料金相当分の所要時間」として表現する。すなわち、オンランプのリンクに対して、走行時間の項に加えて、料金

相当の時間を定数で与えている。

一方、乗り継ぎ経路の所要時間算定では、乗り継ぎオンランプのリンクに対して、走行時間の項に、料金相当の時間を加算しない。これにより、乗り継ぎ制の適用の有無による経路所要時間の相違を表現している。

本研究の対象とする平常時の分析結果について整理しておく。システム最適状態からは、経路誘導的に乗り継ぎ交通の約4%の促進が、都市道路網の効率化に有効であることが示される。また、需要変動を考慮した乗り継ぎ制の導入効果については、約3%の総所要時間の短縮効果を示している。さらに、サービスレベルの向上により需要が喚起され、約6%の増収が見込まれ、料金収入面でも優位となることが報告されている。また、複数ランプペアに乗り継ぎ制を実施した場合には、混雑緩和効果が、単一ランプペアで得られる効果の和ではなく、向上する場合と低下する場合があることが確認されている。このため、乗り継ぎ制を複数ランプペアで運用する場合には、相互の導入効果を勘案した配置を議論する必要がある。さらに、阪神高速道路での実証的分析では、例えば阿波座—福島の乗り継ぎ制適用で1,367台・時間の走行時間短縮が算定されている。このように、環状線通過交通に対して効果が確認されている。これらの成果をまとめると、以下の3点があげられる。

- ①交通均衡による理論分析により、乗り継ぎ制の導入により、高速道路の渋滞緩和だけでなく、総所要時間の短縮効果、料金収入の増収の可能性も期待できる。
- ②乗り継ぎランプペアにより乗り継ぎ制導入効果はことなり、とくに環状線通過交通に対して効果が高い。
- ③複数ランプペアでの運用は、相互の導入効果を勘案した配置の組み合わせを検討する必要がある。

ここで、本研究の主題の1つである「ネットワーク最適化問題」についての、文献について整理する。「ネットワーク最適化問題」は、共通して交通均衡条件を制約条件にもつ数理最適化問題である。「ネットワーク最適化問題」の中心的課題として、道路整備順位決定問題がある。この道路整備順位決定問題の解法に、遺伝的アルゴリズム(GA)が適用され、厳密解法およびランダムサーチとの比較から、GAの有効性が示されている¹¹⁾。このとき、適応度をあらゆる関数の設定方法により、局所解への収束を防止している。

また、これまで様々な対象に関して定式化が示され、解法が提案されている。例えば、予算制約の中で効果的な除雪実施位置把握のために、最適除雪実施道路の組み合わせ最適化問題の定式化がなされている¹²⁾。また、主要交差点の観測交通量から、OD交通量を逆推定することを目的とし、GAを利用した最適化問題の解法が示されている¹³⁾。また、物流ターミナルの最適規模・配置決定問題が、輸送台キロの最小化により定式化され、

GAを用いた解法が提案されている¹⁴⁾。

これらの研究に共通して、フローディペンデントな交通均衡条件を下位問題にもつ、組み合わせ最適化問題を検討している。そのため、高度な非線形最適化問題であり、厳密な求解が困難な問題となっている。そのため、いずれの研究でも、メタヒューリスティクスの1手法である遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて、最適解の近似解を求めている。

本研究でも同様に、交通均衡状態を制約条件として、計画変数を乗り継ぎランプペアとしたネットワーク最適化問題として、最適な乗り継ぎランプペアの組み合わせを検討する。具体的には、平常時の実証的な分析の枠組みにおいて、以下の3点について検討する。

- ① 複数の乗り継ぎランプペアの最適な導入箇所の組み合わせ問題を、交通均衡条件を制約としたネットワーク最適化問題として定式化する。
- ② 複数の乗り継ぎランプペアをネットワーク計画変数としたネットワーク最適化問題の解法として、遺伝的アルゴリズムを適用する。
- ③ 現実道路網において、最適な乗り継ぎ箇所の組み合わせを算定し、その導入効果について分析する。

3. 現実道路網における乗り継ぎ制の検討

ここでは、乗り継ぎ制の適切な導入ランプペアの組み合わせの検討を行うまえに、現実道路網を対象とした乗り継ぎ制の導入効果の検討について整理する^{7), 8), 10)}。

(1) 対象道路網

ここでは、均一料金制を採用している都市高速道路の例として、阪神高速道路・阪神東地区を対象とする。すなわち対象路線は10路線(環状線、守口線、松原線、堺線、西大阪線、大阪港線の各全線、池田線の環状線—豊中南間、東大阪線の環状線—東大阪JCT間、神戸線の西長堀—尼崎東間、湾岸線の中島—大浜間)である。また、対象道路網には、60オンランプ、58オフランプが含まれる。

一方、一般道路に関しては、乗り継ぎ制の導入前後の交通流動変化に対応する高速道路環状線部付近あるいは乗り継ぎ時の代替的経路となる可能性の高い主要幹線道路を対象とする。道路網の関連地域としては、高速道路環状線を包含する大阪市全域および隣接都市が対象となる。

(2) 配分計算のためのデータ整備

a) 乗り継ぎ箇所の設定

乗り継ぎ箇所の設定方法について説明する。具体

的にはオフランプ、オンランプからある1ランプペアを選定し、乗り継ぎランプペアとする。すなわち、オフランプ、一般道路、オンランプと続く、乗り継ぎパターンを規定することに等しい。ここでは、設定したそれぞれのランプペアについて、個別の効果を検討する。

本研究で取り扱う乗り継ぎ制は、環状線の混雑緩和を目指すものである。このため、次の①～④の条件に基づいて対象ランプペアを設定する。

- ①環状線通過経路上のランプペア
- ②高速道路の現実的利用経路上のランプペア
- ③本線下流に渋滞区間が存在しないオンランプ
- ④代替経路の代表区間の混雑度が1.5以下

以上の設定条件に適合する乗り継ぎランプペアは177組となった。

b) ゾーン区分

大阪市内については、行政区分を参考として、27ゾーンに区分した。一方、周辺地域については、「全国道路交通センサス」におけるゾーン区分を参考として、都心部に流入する交通量を考慮し、方面ごとに市町村を9ゾーンに集約した。最終的に大阪市区：27ゾーン（ゾーンNo. 1～27）、周辺地域：9ゾーン（同18～37）の計36ゾーンと設定された。

c) ネットワーク表現

対象地域各ゾーンに対応して、高速道路および一般道路のネットワークを構成した。一般道路のネットワークを図-2に示す。一般道路については、主要幹線道路を集約して、構成している。そのため、一般道路網のリンクはすべて両方向通行可能となっている。また図-2において◎印のノードは発生集中交通量をもつノード（セントロイド）を示す。各ゾーンにはそれぞれ1セントロイドのみが設定され、セントロイドのノード番号がゾーン番号と共通となるように割り当てられている。

つぎに、高速道路のネットワークを図-3に示す。ここでは乗り継ぎによる交通量変化を詳細に検討できるように、高速道路上の分岐、合流、オフランプ、オンランプ、および車線数増減がある地点についてもネットワーク表現した。また対象地域内のオン・オフランプはすべて表現している。高速道路ネットワークにおけるノードは、●また○で表現している。一般道路ネットワークと高速道路ネットワークを接続するリンクが高速道路ランプに相当する。ここで、●に接続するリンクがオンランプ、○に接続するリンクがオフランプに相当している。また、各ランプに付された番号は図-2の平面街路網での接続ノード番号を示している。

これらの検討から交通量配分に用いるネットワークとして、平面道路がノード数99、リンク数354、高速道路がノード数142、リンク数276、合計でノ

ード数241、リンク数630の規模となった。

d) OD表

本研究では「平成6年度全国道路交通センサス」OD表を参考とした¹⁵⁾。ここで発生・集中交通量は、b)で設定したゾーンを単位とする。大阪市内の各ゾーン（ゾーン番号1～27）相互および大阪市内と周辺ゾーン（ゾーン番号28～36）間のODペアについては、センサスのOD交通量を用いた。周辺ゾーン間のODペアのうち、22ODペアは、隣接した位置関係にあるため、大阪市内を通過する交通が極めて少数と考えた。また、配分交通量は大型車を含む車種別合計台数により算定している。

e) リンクデータ

ここではリンクデータの構成について説明する。リンクは、通常の走行リンクと、オンランプ、オフランプを示すダミーリンクの2種類が規定される。通常の走行リンクでは、走行時間関数として、式(1)に示す修正BPR関数を用いる。

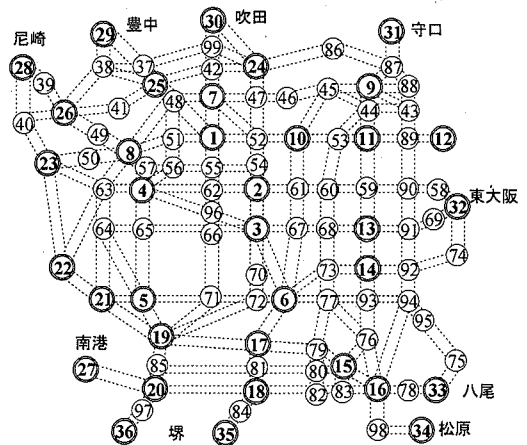


図-2 一般道路ネットワーク

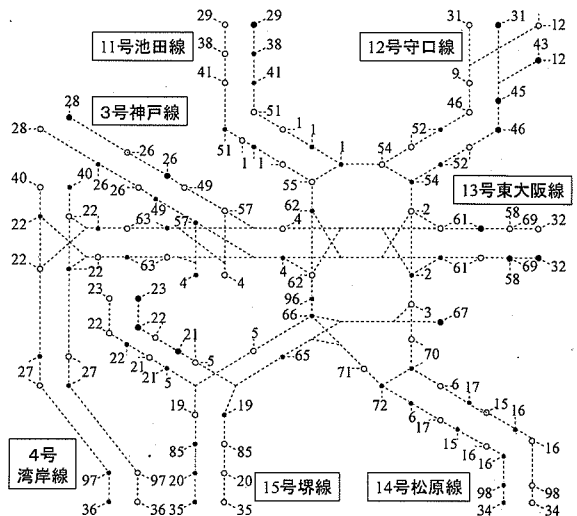


図-3 高速道路ネットワーク

$$t_a(x_a) = t_a^0 [1 + 0.15(x_a/Q_a)^4] \quad (1)$$

x_a : リンク a の交通量, Q_a : リンク a の交通容量,

t_a^0 : リンク a のゼロフロー時の所要時間

ゼロフロー時の所要時間 t_a^0 はリンク距離を自由流速度で除して求めた。また交通容量 Q_a は可能交通量設定値を用いた。

一方、オンランプ、オフランプを示すダミーリンクの所要時間は、交通量に依存しない値とした。

また、各オンランプに対しては、高速道路の料金額を時間評価値で除して、料金額相当分の所要時間が算定される。この料金相当の所要時間を、交通抵抗として、オンランプのリンク所要時間に加算した。このときのパフォーマンス関数を式(2)に示す。

$$t_a'(x_a) = t_a^0 + c_a/\gamma \quad (2)$$

c_a : リンク a' の料金額, γ : 時間評価値

したがって、オンランプのリンク所要時間および高速道路の料金額とも、フローデペンデントであるため、交通量配分では初期設定ステップにおいて算定される。これは最短経路探索において、通常のリンク所要時間と同様に扱われる。ここで時間評価値は、80 円/分・台とした。これは平成 6 年の阪神高速道路節約時間便益計算における時間評価値である。したがって、阪神東線の高速道路料金 600 円（西大阪線 200 円）より、600/80=7.5 の時間抵抗が付加される。

(3) 確率的均衡配分による交通均衡分析

現実道路網では、完全情報のもとで交通行動が行われると考えにくいことから、本研究では確率的利用者均衡に基づく交通均衡分析を行う。ここでは、乗り継ぎ制を考慮した確率均衡配分法の構成について記述する。確率的利用者均衡は、Logit 型交通負荷のプロセスと、均衡状態への収束計算のプロセスで構成される。Logit 型交通負荷法として、その代表的な方法である Dial 法を利用する^{16), 17)}。また、均衡状態への収束計算アルゴリズムには逐次平均化法を用いる。逐次平均化法は、方向ベクトルを確定した後の一次元最適化を簡略化した一次元探索法である。

Dial 法は、合理的経路の利用確率に応じて交通量を配分する多経路配分法である¹⁷⁾。ここで Dial 法のアルゴリズムにおいて乗り継ぎ制を考慮する方法を考える。ここでは、乗り継ぎ利用による料金相当の時間減少を考慮して最短経路探索を行う。

ここでは、乗り継ぎ制を考慮した最短経路探索方法を

考える。この最短経路探索方法は、Dial 法だけでなく、分割配分法や利用者均衡配分法でも利用可能である。

具体的には、Dijkstra 法による最短経路探索の過程で乗り継ぎ制を考慮する。このとき、各リンクに対して、乗り継ぎチェック用のフラグを 2 種類用いる。1 つは設定された乗り継ぎランプを表すフラグ $Flg1$ であり、もう一方は乗り継ぎオフランプ通過の有無を表すフラグ $Flg2$ である。これらをまとめて、 $(Flg1, Flg2)$ と表現する。

- ① 全リンクに対して $(0,0)$ が初期設定される。
- ② 乗り継ぎ指定ランプのリンクについて、 $(1,0)$ が設定される。
- ③ 最短経路探索の過程において、探索対象リンクは以下の 3 種類に分類される。いずれの分類に属するかをフラグにより判別する。
 - $(0,0)$: 乗り継ぎと無関係なリンク
 - $(1,0)$: 乗り継ぎオンランプおよび乗り継ぎオフランプに相当するリンク
 - $(0,1)$: 当該リンク探索前に乗り継ぎオフランプを通過している経路に属するリンク
 - $(1,1)$: 乗り継ぎ経路上の乗り継ぎオンランプに相当するリンク
- ④ 当該リンクの分類により、候補リンクに対する更新を以下のように行う。
 - $(0,0)$: 候補リンクのフラグ $Flg2=0$ とする。
 - $(1,0)$: 候補リンクのフラグ $Flg2=1$ とする。
 - $(0,1)$: 候補リンクのフラグ $Flg2=1$ とする。
 - $(1,1)$: 候補リンクのフラグ $Flg2=0$ とする。
- ⑤ 当該リンクのフラグ $(1,1)$ の場合、料金相当分の所要時間が、オンランプの所要時間定数に負荷されない。

この方法により、ネットワーク記述の特別な修正をすることなく最短経路探索のステップで乗り継ぎ制を考慮することができる。

次に、乗り継ぎ交通量の算定方法について整理する。乗り継ぎ制を考慮した最短経路探索アルゴリズムにより、形成された最短経路木を、リンク尤度の計算に用いる¹⁶⁾。このリンク尤度を基に、オンランプとオフランプの 2 点を通過するすべての経路の交通量を算定する。

このように、Dial 法の合理的経路の決定ステップを改良することにより、確率的均衡配分を用いて、乗り継ぎ交通量を算出することが可能となる。

(4) 乗り継ぎ制の導入効果についての考察

確率的利用者均衡配分においては、分担パラメータ (scaling parameter): θ の、妥当な値の設定が重要である^{16), 17)}。 θ の値が大きいかほど最短経路を利用する確率が高くなり、利用者均衡状態に近づく。ここで既存研究において、本研究と同様なネットワークにより、 θ の値について、0.1~1.0 で分析がなされている¹⁰⁾。このとき、

配分結果に大きな相違が見られなかったことから、中間的な値として $\theta=0.5$ での検討を行っている。本研究でも、同様な設定により、確率的均衡状態を算出する。

このときの評価指標には、総走行時間（高速道路、一般道路、都市道路網全体）、料金収入、乗り継ぎ交通量を用いる。また、直接的な便益にあたる所要時間、交通費用に対する社会的便益（総走行時間の変化分×時間価値+料金収入の変化分）による評価も行う。この社会的便益が大きくなる状態のことを、都市道路網の効率性が高いと定義する。これら指標について乗り継ぎ制を導入しない状態（現行の均衡状態）と比較検討する。

まず、基本ケースの現況再現性について確認しておく。都市高速道路のリンク交通量について、実績と比較すると、相関係数0.91となっている。このことから、配分結果と現実の交通状況に大きな乖離はないと判断される。

つぎに、3.(2).a)で示した条件にしたがって、同一路線内を除く構造的に乗り継ぎ可能な177組の乗り継ぎランプペアを対象とした。それぞれの乗り継ぎランプペアについての配分計算を、対象とするすべてのケースに対して行った。均衡状態において、料金項を含まない経路所要時間で比較して、乗り継ぎ経路よりも、高速道路本線経路が短い場合、乗り継ぎ交通は発生しない。そのため、乗り継ぎ交通量の発生したランプペアの設定は、合計36組となった。このうち、25組については、総所要時間の変化が 10^3 台・分以下であったので、分析の対象外とした。残る11組のランプペアについて、乗り継ぎ制の導入効果を表-2に整理した。この表-2に示した11組のランプペアが乗り継ぎ制の導入効果のあったすべてのランプペアである。

これら各ランプペアの算定結果から、乗り継ぎ交通量と都市道路網の効率化の程度とは必ずしも比例的ではないことがわかる。例えば、乗り継ぎラン

プペア2と乗り継ぎランプペア5を比較すると、乗り継ぎ交通量は250台、2670台であるが、総走行時間の減少分は1,113,000台・分、132,000台・分であり、前者の方が大きいことがわかる。この場合、乗り継ぎランプペア5では、乗り継ぎ交通量が多く混雑区間の迂回が与える一般道路網上の他の交通流への時間損失がかえって大きくなったものと考えられる。

本例で示されたように、乗り継ぎ制は乗り継ぎ交通量の大きさだけでは、都市道路網の効率化の評価ができないことがわかる。乗り継ぎ制導入は代替経路となる一般道路の存在が前提であり、その道路が主要幹線道路である場合には、他の道路交通への影響も大きい。したがって、乗り継ぎ制の導入には一般道路の交通状況を十分考慮する必要がある。

4. 高速道路乗り継ぎ制の最適導入箇所の設定

ここでは、現実道路網を対象とした乗り継ぎ制導入についての実証的検討として、乗り継ぎ区間の配置問題について考える。このとき、道路網上の交通流動変化を考慮する必要があり、既存研究における各種の検討結果を踏まえて分析を行う。

(1) 近似的均衡配分による交通均衡分析

ここでは、複数ペアの乗り継ぎ割引が同時に適用された場合の、乗り継ぎ交通量の算定方法を選定する。ここで、解法に収束計算を含む配分方法の場合、計算時間が分割配分法(IA法)と比較して増加する。このとき、複数のランプペアについての組み合わせ最適化問題となるため、均衡状態への収束計算を含むアルゴリズムでは計算時間が膨大になることが考えられる。本章では、交通状況の算定に、配分方法の近似的計算法として等時間配分で実用的に最も知られたIA法を用いた。

表-2 計算結果の整理

NO.	乗り継ぎランプ		乗り継ぎ交通量(台)	総走行時間(10 ³ 台・分)			社会的費用の減少分(10 ³ 円)	料金収入(10 ³ 円)	利用者便益(10 ³ 円)
	オフランプ	オンランプ		高速道路(A)	一般道路(B)	(A)+(B)			
	基本ケース(乗り継ぎなし)		0	35271	73995	109268	0	562153	0
	基本ケースとの変化分								
2	R1なんば	R3西長堀	250	△ 231	△ 881	△ 1113	89040	△ 2961	92001
3	R11福島	R3西長堀	62	△ 232	△ 889	△ 1122	89760	△ 2623	92383
5	R12南森町	R11中之島	2670	50	△ 181	△ 132	10560	309	10251
8	R14平野	R3西長堀	1	2	△ 1	1	△ 80	45	△ 125
11	R15芦原	R11福島	151	△ 1	△ 21	△ 23	1840	344	1496
12	R15芦原	R3西長堀	466	△ 29	△ 23	△ 54	4320	675	3645
28	R3海老江	R11福島	24	126	△ 153	△ 28	2240	20	2220
31	R3中之島西	R12扇町	26	2	5	7	△ 560	563	△ 1123
34	R3西長堀	R11福島	476	45	57	100	△ 8000	866	△ 8866
35	R3西長堀	R12扇町	37	△ 44	32	△ 13	1040	△ 33	1073
36	R3西長堀	R15汐見橋	739	△ 57	111	54	△ 4320	22	△ 4342

この IA 法は厳密な意味では交通均衡状態を与えない。しかしながら、この最適化問題の目的関数の性質から、都市道路網全体の効率性についての大小比較が与えられればよい。そのため実用上、厳密な均衡解を求める必要はない。この前提において、確率的利用者均衡(SUE)と同程度に交通現象記述が可能である。したがって、計算効率を優先させ、本章の最適導入箇所の設定についての検討に対しては、この IA 法を用いることとした。

まず、IA 法における乗り継ぎ制の表現方法について説明する。具体的には、最短経路探索ステップにおいて、乗り継ぎ指定オフランプを通過するような経路を特定する。ここで、最短経路探索方法は、3.(3).b)で記述した乗り継ぎ経路を考慮した最短経路探索方法を用いる。この方法は、最短経路探索の過程において、乗り継ぎ指定オンランプの料金相当の所要時間を加算しないことで、乗り継ぎ経路を含めた最短経路探索を可能としている。この方法により、当該 OD 交通量に対する最短経路として乗り継ぎ経路が選ばれた場合には、この分割交通量分の乗り継ぎ交通が発生したことになる。

つぎに、IA 法における妥当な分割比の設定を行う。本研究では、つぎのような分割比を設定した²⁾。

{0.35, 0.20, 0.15, 0.20, 0.10}

この分割比を用いて、交通量配分計算を行う。

(2) 乗り継ぎ導入ランプペアの最適設定

現実道路網を対象にした乗り継ぎ制に関して、単一ランプペアについての乗り継ぎ制を導入することにより、主として環状線の混雑緩和効果が得られることが確認されている。また、高速道路だけでなく都市道路網全体における総走行時間の減少効果がみられ、都市道路網の効率的な運用としても有効であることが確認されている²⁾。ここで、都市道路網の効率性については、直接的な便益にあたる所要時間、交通費用に対する社会的便益(総走行時間の変化分×時間価値+料金収入の変化分)が大きくなる状態のことを示す。しかしながら、単一ランプペアでの乗り継ぎ制の導入は、道路網全体に与える効果は大きいとはいえない。乗り継ぎ制を複数ランプペアで導入する場合には、混雑緩和効果が増加する場合と増加はするものの相殺効果がある場合が推測される⁶⁾。これはネットワーク上の交通流動が相互に関係をもつことによる。ここで相殺効果は、複数ランプペアを同時に設置した場合に定義できる。都市道路網における総走行時間の短縮便益が、個々のランプペアを設置した場合の走行時間短縮便益の和と比較して、小さくなることを指す。すなわち、ネットワークにおいて、乗り継ぎ経路が輻輳することにより、所要時間の短縮効果が減耗してしまう。このため、都市高速道路網全体に対して乗り継ぎ制の効果的な導入を考える

場合、その適切な導入ランプペアの組み合わせについて検討する必要がある。

a) 乗り継ぎ制の導入ランプペアの設定方法

本研究では、乗り継ぎ制の導入ランプペアの設定問題をネットワーク最適化問題として定式化する。ネットワーク最適化問題は、フローインディペンデントな交通均衡条件を制約条件に含む。このとき、与えられた目的関数を最大あるいは最小にするネットワーク計画変数を、決定変数とする数理最適化問題である¹⁷⁾。そのため、高度な非線形最適化問題でもあり、離散的な組み合わせ最適化問題でもあるため、通常最適化アルゴリズムを適用するのが困難となる。ここで、乗り継ぎ制の導入ランプペアをネットワーク計画変数と考える。したがって、この問題は複数の乗り継ぎ区間の最も効率的な配置方法を検討することに対応している。このとき、いくつかの計画目標を考えることができる。数理計画問題としての目的関数として次のものを考えた。

① 総走行時間最小化(社会的便益の最大化)

都市道路網の効率的運用を目指した乗り継ぎ制の導入ランプペアを決定するため時間効率からみた最良化を考える。いわゆるシステム最適化のことである。

② 料金収入の最大化

この場合、高速道路管理者の便益の最大化である。均一料金制のもとでは、この基準は高速道路の利用台数を最大にするための乗り継ぎ制の導入ランプペアの決定と等価である。このとき、最適化の目的は有料道路の利用台数最大化であり、都市道路網の効率的運用は保証できない。

③ 利用者便益の最大化

乗り継ぎ制の導入前後の時間的便益(総走行時間の変化分×時間価値)と料金収入の変化分を利用者便益として、最大化するものである。

ここでは、計画変数を乗り継ぎ制の導入ランプペアと考える。これにより、ネットワークに最適な乗り継ぎ制の導入ランプペアを選択するという組み合わせ最適化問題と考えることができる。

b) 乗り継ぎ制導入ランプペアの組み合わせ問題の定式化

本研究では、ネットワーク全体の総走行時間を最小にする乗り継ぎ制の最適な導入ランプペアの設定について検討する。この場合のネットワーク最適化問題は、つぎのように定式化できる。

$$\min Z = \sum_{a \in A} v_a t_a(v_a) - \sum_{n \in N} w_n c_n x_n \quad (1)$$

subject to

$$w_n = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K_{ij}} \varepsilon_{nkij} h_{kij} \quad (n \in N) \quad (2)$$

$$\sum_{n \in N} x_n \leq nsum \quad (3)$$

$$x_n = 0 \text{ or } 1 \quad (4)$$

$$\min Z_p = \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} t_a(w) dw \quad (5)$$

subject to

$$v_a = \sum_{i \in I, j \in J} \sum_{k \in K_{ij}} \delta_{akij} h_{kij} \quad (a \in A) \quad (6)$$

$$q_{ij} = \sum_{k \in K_{ij}} h_{kij} \quad (n \in N) \quad (7)$$

$$h_{kij} \geq 0 \quad (i \in I, j \in J, k \in K_{ij}) \quad (8)$$

v_a : リンク a の交通量

q_{ij} : OD ペア ij の OD 交通量

$t_a(v_a)$: リンク a の所要時間

w_n : 第 n 番目の乗り継ぎランプペアを利用した交通量

$$\delta_{akij} : \begin{cases} 1 : \text{リンク } a \text{ が OD ペア } ij \text{ の第 } k \text{ 番目の経路上にある} \\ 0 : \text{リンク } a \text{ が OD ペア } ij \text{ の第 } k \text{ 番目の経路上にない} \end{cases}$$

$$\varepsilon_{nkij} : \begin{cases} 1 : \text{OD ペア } ij \text{ の第 } k \text{ 番目経路交通量が第 } n \text{ 番目の乗り継ぎを利用する} \\ 0 : \text{OD ペア } ij \text{ の第 } k \text{ 番目経路交通量が第 } n \text{ 番目の乗り継ぎを利用しない} \end{cases}$$

h_{kij} : OD ペア ij の第 k 番目の経路交通量

$$x_n : \text{乗り継ぎ制実施の決定変数} \quad \begin{cases} 1 : \text{実施する} \\ 0 : \text{実施しない} \end{cases}$$

c_i : 料金相当の所要時間

$nsum$: 乗り継ぎ実施可能ランプペア数

ここで式(1)の目的関数は、乗り継ぎ制を考慮した総走行時間を表している。すなわち、この第1項は、ネットワーク全体の総走行時間の算出式である。このとき、高速道路オンランプに相当するリンクの所要時間は、料金相当の所要時間を含んでいる。また第2項は、乗り継ぎ導入による交通費用減少分である。すなわち、乗り継ぎ交通は、高速道路を再度利用する場合に料金を支払わないため、(乗り継ぎ交通量) × (料金相当の所要時間) の走行費用の減少が算定できる。この項において、 x_n は乗り継ぎ制の導入の有無を決定する計画変数である。また、この問題の挙動変数は利用者均衡フローであるため、以下の制約条件は交通均衡配分のために式(5)～式(8)の制約条件を含んでいる。また、式(2)は利用者均衡の解として算出された乗り継ぎ交通量の算定式である。さらに式(3)は施設計画上の予算等に対応する乗

り継ぎ導入ランプペア総数に関する制約条件である。

このように、乗り継ぎ導入ランプペアの組み合わせ最適化問題は、交通量配分問題を下位問題とする複雑な非線形問題となっており、通常の方法では最適化することが困難である。そこで、本研究では組み合わせ問題の解法として有効な遺伝的アルゴリズムを利用する。

c) 遺伝的アルゴリズムの概要

本研究では、乗り継ぎ導入ランプペアの組み合わせ最適化問題の解法に遺伝的アルゴリズムを利用する。遺伝的アルゴリズム(GA)は、生物進化の原理に着想を得た最適化・探索アルゴリズムの一種である^{18), 19)}。一般に数理最適化問題にGAを用いる場合、遺伝子の集合である染色体が解集合を表現している。とくに個体の染色体の内部的表現を遺伝子型という。また、このとき個体の適応度とは目的関数の値を表現するものである。GAでは仮想的な染色体によって生物集団を設定し、あらかじめ設定した環境に適応する個体が、子孫を残す確率が高くなるよう世代交代シミュレーションを実行する。この遺伝子変化により生物集団の進化するプロセスを一つの求解手順と考えることができる。GAの最も基本的な単純GAアルゴリズムは、次のようになっている。

- ① 遺伝子要素の内部表現である遺伝子型、および遺伝子を持つ個体の集団を設定する。
- ② 集団を構成する各個体に対して、適応度に応じて次世代に生き残る個体を選ぶ(選択)。
- ③ 2つの個体の遺伝子型をランダムな位置で部分的に入れ替える(交差)。
- ④ ある文字のビットを対立するビットに置き換える(突然変異)。
- ⑤ 集団が評価基準を満たしていれば終了し、そうでなければ②以降を繰り返す。

①における、「遺伝子型」は0と1からなる遺伝子のビット列として表現される。②における適応度は、各個体の遺伝子に対応した評価値であり、数理最適化問題においては各解集合による目的関数の値となる。

d) GAによる乗り継ぎ制導入箇所との組み合わせ最適化

ここでは、b)において定式化した問題をGAに適用する方法を考える。GAを数理計画問題に適用する場合、適応度の定義および遺伝子型の表現方法が問題となる。本研究では、ネットワーク全体の総走行時間を適応度と考える。また、遺伝子型で表現するものは、乗り継ぎランプペアの組み合わせパターンである。本研究では、これらのモデル記述方法について、つぎのように考えた。

本問題では、適応度にネットワーク全体の総走行時間を用いることを考える。本問題のような目的関数の最小化問題にGAを用いる場合、適応度には目的関数の逆数(1/Z)を用いることが多い。しかしながら、本研究では、大規模ネットワークを対象としており総交通量の値は

大きい (約 30×10^5 台)。このため、ネットワーク全体の総走行時間の値は大きい。目的関数の値 (総走行時間の値) が大きい場合、目的関数の逆数の値はいずれも小さくなり (10^{-5} の程度)、適応度の上位と下位の差が小さくなる。このように、適応度の値が小さい場合に、適応度に比例させて選択をおこなうような方法 (たとえば、ルーレット法) で、淘汰を行うと個体の選択確率に大きな差がなくなり、収束性が悪くなる。そこで、本研究では、各世代における目的関数値の最大値 (Z_{\max}) と各個体の目的関数値 (Z) の差を各個体の適応度 (F) とする。本研究では、エリート保存戦略により選択しているため、 Z_{\max} は、つねに世代間で保存することができる。

遺伝子型については、本問題では、0-1 遺伝子型を用いる。ここでは、組み合わせの検討対象となる乗り継ぎランプペアをあらかじめ設定し、その中から乗り継ぎ制の導入ランプペアを選択する。すなわち遺伝子長は、当初に設定する乗り継ぎ制導入可能なランプペア数となる。たとえば、検討対象となる乗り継ぎ可能ランプペアが 10 ランプペアである場合、以下のように表現できる。

遺伝子型: 1001010010

この場合は、「1」となっているランプペアが乗り継ぎ制の導入対象ランプペアとなる。」という意味である。したがってこの例では (1, 4, 6, 9) の地点が乗り継ぎ設定ランプペアとなる。以上の表現を用いて乗り継ぎ制導入ランプペアの組み合わせ最適化問題を以下のような手順で計算する²⁰⁾。また、GA における計算課程を図-4 に示す。

- 手順1 初期化: 各個体の乗り継ぎ制導入箇所をランダムに初期化する。step=0
- 手順2 適応度の計算: 各個体の設定に応じて総走行時間の算出をおこなう。
- 手順3 淘汰・選択: 淘汰率 S_t の割合で適応度の低い個体を淘汰する (エリート保存型戦略)。このとき、選択方法にはルーレット型を用いる。
- 手順4 交差: 選択された個体を対象に交差率 C_c に応じて交差を行う。ここでは一様交差を用いる。
- 手順5 突然変異: すべての個体のうち突然変異率 M_t に応じて突然変異を行う。このとき、該当する個体の遺伝子の 1 ランプペアを対象にする。
- 手順6 終了判定: step 数が設定した世代数になった場合、計算を終了する。そうでない場合、step=step+1 として手順2に戻る。

(3) 遺伝的アルゴリズムを用いた最適化

ここでは、阪神高速道路を取り上げ、乗り継ぎ制の最適導入ランプペアを決定する。このとき、組み合わせの対象となる乗り継ぎランプペアをあらかじめ設定する。本研究では、既存研究で得られた単独ランプペアとして

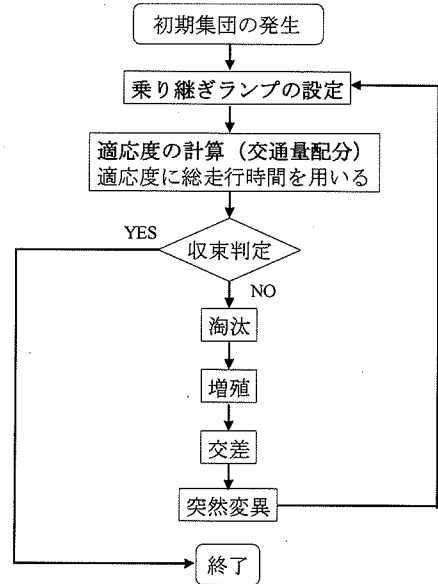


図-4 計算アルゴリズム

乗り継ぎ実施効果が観測された (乗り継ぎ交通量が発生した) ランプペアをオンランプ、オフランプの集合とする^{7), 8), 10)}。これより、対象となる乗り継ぎランプのペアの数は、合計 36 ペアである。このような設定にもとづき、GA を用いて総走行時間を最小にする乗り継ぎランプペアの最適配置パターンを探索する。

このとき、GA の各パラメータは、個体数: 40、世代数: 50、淘汰率: 0.8、交差率: 0.6 とした。また、突然変異率については、0.4 と 0.6 の場合について計算した。この計算における最適解の収束状況を図-5 に示す。このとき、いずれの突然変異率を用いた場合も同じ最適解が得られ、116,812,977 台・分となった。

つぎに、GA による解の有効性を検討するため、ランダム探索との比較を行う。2,000 個のランダムな組み合わせによる計算結果と GA による探索結果を比較したものが図-6 である。これは、2,000 個のランダムな組み合わせによる計算結果をヒストグラムにしたものである。縦軸は計算した組み合わせの数であり、横軸がそれら

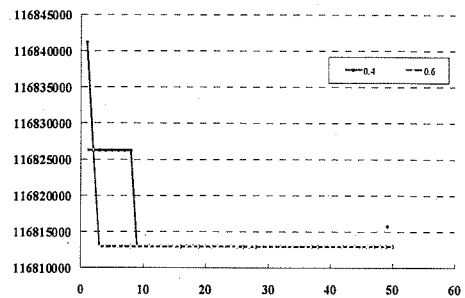


図-5 探索解の収束状況 (各世代の最良個体)

表-3 各評価指標の整理

評価指標	乗り継ぎ制の実施の有無		
	なし(A)	全対象ランプで実施	最適配置で実施(B)
総走行時間 (10 ³ 台・分)	高速道路	36,911,965	36,290,302
	一般道路	82,384,068	81,324,517
	合計	119,296,034	117,614,819
料金収入 (10 ³ 円)	486,800,140	487,326,410	487,080,090
社会的便益 (10 ³ 円)	-	135,023,470	198,924,510

組み合わせによる総走行時間の計算結果である。

このヒストグラムをみると、2,000個のランダムな組み合わせによる計算では、118,500,000～19,000,000台・分の範囲の計算結果が最も多いことがわかる。2,000個のランダムな組み合わせによる計算において、もっと小さい総走行時間は116,812,977台・分であり、GAによる最適解と同じである。しかしながら、2,000個のランダムな組み合わせによる計算では、2,000回の計算中この値を算出したのは、6回である。これに対してGAでは10～20世代で最適解を探索することができ、GAによる探索の有効性を示している。

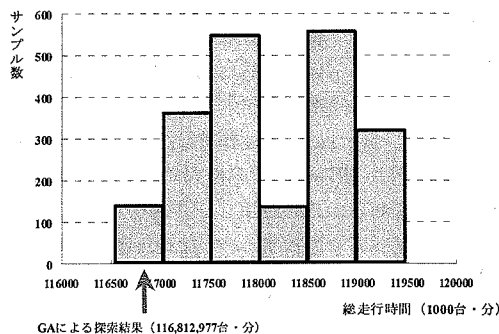


図-6 ランダム探索とGAによる計算結果の比較

表-4 乗り継ぎ制の最適導入ランプペア

(4) 最適導入ランプペアの設定に関する考察

つぎに、乗り継ぎ制を最適導入ランプペア (GAによる解) で実施した場合の効果について検討する。ここでは総走行時間、料金収入、社会的便益 (総走行時間の変化分×時間価値+料金収入の変化分) の各評価指標を用いて検討を行う、これら評価指標の算定結果を整理したものが表-3である。

まず、乗り継ぎ制を導入しない場合と比較して最適化による効果を検討する。総走行時間についてみると、高速道路は392,476台・分、一般道路は2,090,579台・分といずれも減少している。つぎに、料金収入についてみると279,950円増収している。また、社会的便益についてみると、その便益額は198,924,510円である。

つぎに、全ての対象とした乗り継ぎランプペアで乗り継ぎ制を導入した場合と比較する。全対象ランプペアで導入した場合、高速道路の総走行時間は、最適導入ランプペアで実施した場合よりもより小さい。一般道路の総走行時間については、最適導入ランプペアで実施した場合に比べて大きくなっている。また、ネットワーク全体の総走行時間について比較すると、当然ながら乗り継ぎ制の最適導入ランプペアで実施した場合は、801,842台・分だけ小さい値となっている。これは、乗り継ぎ制導入ランプペアの数と導入効果は必ずしも相乗的では無いことを示している。

つぎに、料金収入についてみると、全検討対象ランプペアで乗り継ぎ制を導入した場合のほうが、801,842円だけ増収となることがわかる。また、社会的便益は、時

NO.	乗り継ぎランプ 組み合わせ後		迂回する渋滞発生地点
	オフランプ	オンランプ	
1	71 R1なんば	63 R16波除	阿波座下り合流
2	71 R1なんば	57 R3西長堀	阿波座下り合流
3	51 R11福島	57 R3西長堀	阿波座下り合流
4	52 R12南森町	51 R11福島	守口環状線合流
5	52 R12南森町	1 R11中之島	守口環状線合流
6	16 R14平野	19 R15津守	えびす合流
7	16 R14平野	22 R16天保山	阿波座下り合流、えびす、四つ橋
8	16 R14平野	57 R3西長堀	阿波座下り合流、えびす、四つ橋
9	16 R14平野	26 R3海老江	阿波座下り合流、えびす、四つ橋
10	19 R15津守	51 R11福島	四つ橋、信濃橋
11	5 R15芦原	51 R11福島	四つ橋、信濃橋
12	5 R15芦原	57 R3西長堀	四つ橋、信濃橋、阿波座下り合流
13	5 R15芦原	49 R3中之島西	
14	63 R16波除	52 R12扇町	四つ橋、信濃橋
15	63 R16波除	57 R3西長堀	
16	4 R16阿波座	51 R11福島	
17	4 R16阿波座	52 R12扇町	四つ橋、信濃橋、阿波座下り合流
18	4 R16阿波座	65 R15汐見橋	阿波座上り
19	4 R16阿波座	57 R3西長堀	
20	4 R16阿波座	49 R3中之島西	
21	4 R16阿波座	26 R3海老江	
22	22 R17弁天町	57 R3西長堀	(四つ橋、阿波座下り合流)
23	22 R17弁天町	26 R3海老江	(四つ橋、阿波座下り合流)
24	23 R17安治川	51 R11福島	
25	23 R17安治川	57 R3西長堀	(四つ橋、阿波座下り合流)
26	23 R17安治川	49 R3中之島西	(四つ橋、阿波座下り合流)
27	23 R17安治川	26 R3海老江	
28	26 R3海老江	51 R11福島	
29	26 R3海老江	1 R11中之島	阿波座上り、信濃橋、四つ橋
30	26 R3海老江	52 R12扇町	阿波座上り、信濃橋、四つ橋
31	49 R3中之島西	52 R12扇町	
32	49 R3中之島西	65 R15汐見橋	
33	49 R3中之島西	22 R16天保山	阿波座下り合流、四つ橋
34	57 R3西長堀	51 R11福島	四つ橋、信濃橋
35	57 R3西長堀	52 R12扇町	四つ橋、信濃橋
36	57 R3西長堀	65 R15汐見橋	

間的便益 (総走行時間の変化分×時間価値) と料金収入額の変化分の総和として計算できる。最適導入ランプペアで乗り継ぎ制を実施した場合には、社会的便益は

198,924,510 円となり、全検討対象ランプペアで導入したときのそれよりも63,008,525 円上回っている。これにより、乗り継ぎ制の最適なランプペアへの導入が社会的効率からも評価できることがわかる。

つぎに、都市道路網の効率的運用を目指した乗り継ぎ制の最適導入ランプペアについて考察する。表-4は、最適導入ランプペアとして選択されたランプペアを示したものである。網掛けとなっているランプペアは、最適導入ランプペアとして選択されなかったランプペアである。ここでは、設定された乗り継ぎランプペアが迂回すると思われる渋滞発生地点について整理した。迂回対象となる渋滞発生地点の中で最も多く存在するものは「阿波座下り合流」である。これは、阪神高速道路において最も自然渋滞が発生する地点である。また、16号大阪港線から11号池田線、12号守口線方向への乗り

継ぎ交通が多いことがわかる。これは、この区間が構造的制約（16号大阪港線上りから11号池田線方面へ向かう場合、環状線南部を經由しなければならない）を持つため、乗り継ぎをする効果が大いことによるものと思われる。

つぎに、ネットワークの交通量の変化から考察する。乗り継ぎ制導入前後の各リンクの交通量変化を图示したものが図-7から図-10である。太実線で描かれたリンクは、交通量が減少したリンクであり、一方、太斜線で描かれたリンクは、交通量が増加したリンクである。とくに、図-7および図-8は、高速道路の交通量変化を描いたものである。図-7は、最適導入ランプペアで乗り継ぎ制を実施した場合、図-8は、全対象ランプペアで乗り継ぎ制を実施したものである。本図によれば最適導入ランプペアで乗り継ぎ制を導入した場合、環状線を

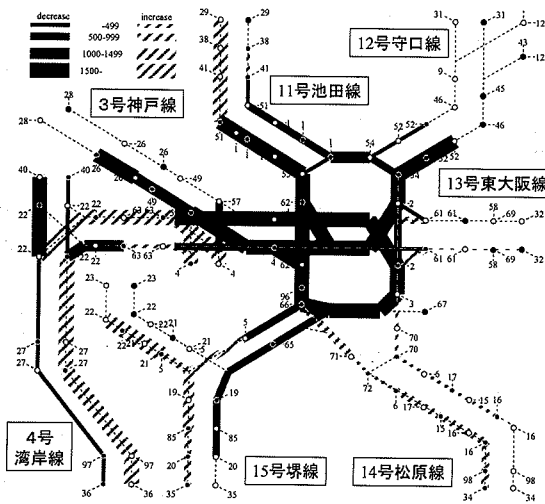


図-7 最適導入箇所での乗り継ぎ制導入結果（高速道路）

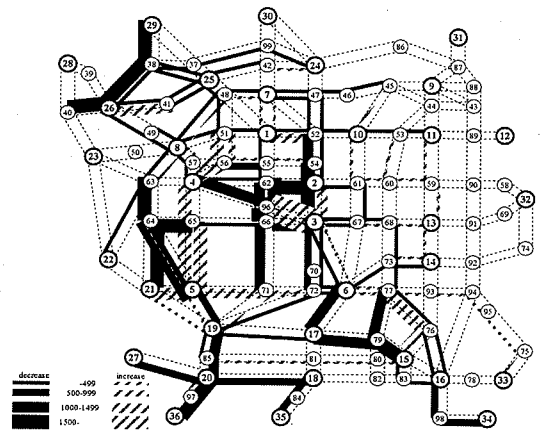


図-9 最適導入箇所での乗り継ぎ制導入結果（一般道路）

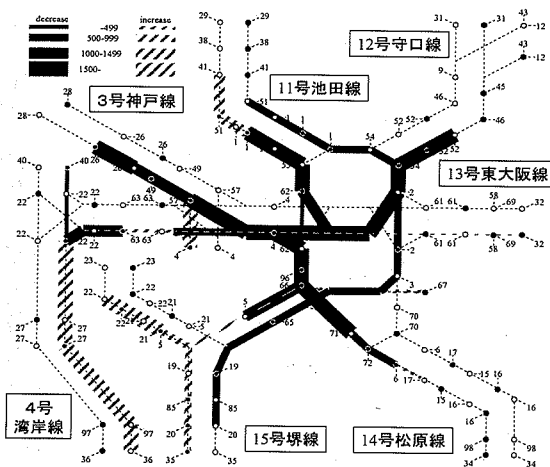


図-8 全対象箇所でも乗り継ぎ制を導入した結果（高速道路）

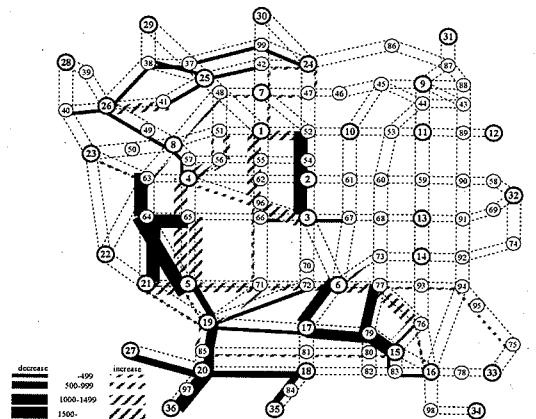


図-10 全対象箇所でも乗り継ぎ制を導入した結果（一般道路）

中心に11号池田線下り、16号大阪港線上り、4号湾岸線上りにおいて1,500台以上の交通量の減少がみられ、広い範囲で交通混雑緩和効果が得られることがわかる。一方、全対象ランプペアにおいて乗り継ぎ制を導入した場合、環状線を中心に交通量の減少がみられるが、その範囲は最適導入ランプペアの場合よりも小さい。

さらに、一般道路の交通量変化を描いたものが図-9および図-10である。図-9は、最適導入ランプペアで乗り継ぎ制を実施した場合、図-10は、全対象ランプペアで乗り継ぎ制を実施したものである。本図をみると、最適導入ランプペアで乗り継ぎ制を実施したほうが、交通量の減少するリンクが多いことがわかる。これは、最適ランプペアでの乗り継ぎ制の導入が、一般道路の交通緩和にも有効であることを示している。

ここでは、乗り継ぎ制の最適導入ランプペアについて検討した。本研究では、この問題を乗り継ぎ制導入ランプペアの組み合わせ最適化問題として定式化した。とくに、ネットワーク全体の総走行時間を最小にする組み合わせについて検討を行った。この結果、主要な混雑区間を迂回する乗り継ぎランプペアの組み合わせが効果的であることがわかった。今回は、単独ランプペアの導入において乗り継ぎ効果のあったランプペア(前章で抽出されたランプペア)のみを検討対象としている。しかしながら、単独では乗り継ぎ効果が算定されなくても、組み合わせを考慮することで新規に効果が期待できることもありうる。そこで、初期の乗り継ぎ可能ランプペアとして多数のランプペアを含んだ形の定式化も可能である。

5. おわりに

乗り継ぎ制は、現行では料金制度における特別措置であり基本的には、料金徴収上の不公平を是正するための措置として実施されている。したがって、本来的に交通調整を意図したものではないが、この運用方法によれば、料金額相当分の時間費用の減少による交通流動変化を生じる効果があると考えられる。この料金の持つ交通調整機能を工学的に検討し、交通制御の補助的機能を持つ混雑緩和のための都市道路網の円滑化策を検討することが本研究の目的である。ここでは、本研究での検討結果を整理するとともに、この研究目的に関連する知見を述べる。

まず、都市高速道路乗り継ぎ制の基本的概念について整理した。また、都心部の混雑緩和を意図した乗り継ぎ制の基本的概念について整理した。つぎに、乗り継ぎ制に関する従来の研究について整理を行い、本研究の課題点を明らかにした。ここで、個別の乗り継ぎ区間ごとに

交通流動に与える影響は異なることから、妥当な乗り継ぎシステム形成のためには、これらの配置や周辺の影響範囲を検討する必要があることがわかった。

つぎに、乗り継ぎ制を複数ランプペアに導入した場合の乗り継ぎ区間の最適配置問題を検討した。これは、乗り継ぎ制を大規模道路網の各所で設定した乗り継ぎシステムとして運用を行う場合に、複数区間で同時に実施する際の相互の影響力を考慮して最適な実施ランプペア数やその適切な配置を考えるためのものである。ここでは、既存研究の検討によって得られた有効な乗り継ぎ地点の組み合わせ最適化問題として、特に遺伝的アルゴリズムを用いた近似解の探索方法を紹介した。これにより、複数ランプペアの乗り継ぎ制導入効果は、道路網全体で考える際には、優加法的(相乗的)に作用する場合と、劣加法的(相殺的)に作用する場合があることがわかった。このとき、劣加法的とは、都市道路網における総走行時間の短縮便益が、個々のランプペアを設置した場合の走行時間短縮便益の和と比較して、小さくなることを指す。また広域道路網においては、必ずしも多数の乗り継ぎ区間を同時に設定することが有効ではなく、適切な配置を行うことで、効率的なネットワーク利用が可能となることが示された。

最後に、乗り継ぎ制を体系化し、乗り継ぎシステムを運用するためにはいくつかの検討課題が残されている。これらはつぎのようにまとめられる。

1) 交通情報を考慮した乗り継ぎ制の検討

乗り継ぎ制を導入時の一般道路における迂回経路は現実には多数存在する。このため、必ずしも迂回による時間短縮を期待できない、一般道路に新規の交通渋滞を発生する可能性もある。そこで高速道路・一般道路における情報提供により運転者を経路誘導して適切な経路選択が実現される情報伝達方式を考える必要がある。これは、VICSの具体的な運用方法とも密接に関連するため、実用的価値が高いものと思われる。

2) 現行の交通制御を考慮した乗り継ぎ制の検討

現在の交通渋滞策として、流入制御が実施され極めて多大な効果を得ている。したがって交通混雑緩和という意味では乗り継ぎ制導入は、補助的手段であると考えられる。しかしながら、乗り継ぎ制は自律的な混雑回避方法であり、流出促進の意味を持つ。交通制御としても、複合的な適用方法について検討することで都市道路網の円滑化が可能となるものと思われ、特に導入地点や時間帯の考慮が重要な課題である²¹⁾。ここで、ETCによる自動的な料金徴収機能を利用すれば、料金による交通調整機能と情報提供による交通誘導機能を組み合わせ、利用者の自律的な交通調整が可能であると考えられる。

謝辞：本研究で用いたデータの収集にあたっては、阪神高速道路公団にご協力いただいた。また、研究の遂行にあたり、阪神高速道路公団交通渋滞対策委員会における議論が大いに参考となった。関係者各位に対し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 秋山孝正, 佐佐木綱：都市高速道路乗り継ぎシステムの定式化, 第13回交通工学研究発表会論文集, pp.125-129, 1993.
- 2) 秋山孝正, 大谷茂樹：都市高速道路乗り継ぎ制に関する交通均衡分析, 第14回交通工学研究発表会論文集, pp.21-24, 1994.
- 3) 安田幸司, 秋山孝正：都市高速道路乗り継ぎ制に関するモデル分析, 第15回交通工学研究発表会論文集, pp.105-108, 1995.
- 4) 安田幸司, 大藤武彦, 秋山孝正：高速道路乗り継ぎ制の適用性に関する検討, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.893-900, 1996.
- 5) Akiyama, T., Yasuda, K. and Itoh, T. : A Theoretical Model of Transfer System for Expressway Networks, Research Report of The Faculty of Engineering, Gifu University, No.47, pp.9-19, 1997.
- 6) Akiyama, T. and Yasuda, K. : Descriptive Models of a Transfer System for Urban Expressway Networks, Urban Transportation, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.2, No.3, pp.765-776, 1997.
- 7) 秋山孝正：料金自動收受システム導入時の都市高速道路交通管理についての考察, 交通学研究(1999年研究年報), pp.9-18, 日本交通学会, 2000.
- 8) Akiyama, T. and Yasuda, K. : Practical Application of Transfer System for Urban Expressway Networks, Proceeding of the 10th International Conference on Road Transport Information and Control, pp.116-120, 2000.
- 9) 秋山孝正, 安田幸司, 橋本州平：都市高速道路乗り継ぎシステムによる緊急時交通管理についての検討, 第19回交通工学研究発表会論文集, pp.53-56, 1999.
- 10) 秋山孝正：混雑緩和のための都市高速道路乗り継ぎシステム, 平成7年度・平成8年度科学研究費補助金基盤研究(C)(2)研究成果報告書, 1997.
- 11) 田村亨, 杉本博之, 上前孝之：遺伝的アルゴリズムの道路整備順位決定問題への適用, 土木学会論文集, No.482/IV-22, pp.37-46, 1994.
- 12) 有村幹治, 上西和弘, 杉本博之, 田村亨：最適除雪道路選択モデルに関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.16, pp.387-392, 1999.
- 13) 高山純一, 杉山智美：吸収マルコフ連鎖を用いた観測交通量からのOD推計法に関する研究, 土木学会論文集, No.569/IV-36, pp.75-84, 1997.
- 14) 谷口栄一, 則武通彦, 山田忠史, 泉谷透：物流ターミナルの最適規模および配置の決定法に関する研究, 土木学会論文集, No.583/IV-38, pp.71-81, 1998.
- 15) 建設省近畿地方建設局：平成6年度全国道路交通センサス, 近畿地区OD調査報告書, 1994.
- 16) Sheffi Yosef : Urban Transportation Networks, Chapter 8, pp.203-230, Prentice-Hall, 1985.
- 17) 土木学会土木計画学研究委員会編：土木講習会テキスト 交通ネットワークの分析と計画：最新の理論と応用, pp.67-74, 1987.
- 18) 安居院猛, 長尾智晴：ジェネティックアルゴリズム, 昭晃堂, 1993.
- 19) 伊庭斉志：遺伝的アルゴリズムの基礎-GAの謎を解く-, オーム社, 1994.
- 20) 笠原哲也, 秋山孝正：遺伝的アルゴリズムを用いた幹線道路網の交通安全対策立案, 第3回ファジィ建築土木応用シンポジウム講演論文集, pp.21-30, 1996.
- 21) 椎谷拓也, 秋山孝正：都市高速道路の時間帯別乗り継ぎ制に関するモデル分析, 第21回交通工学研究発表会論文集, pp.45-48, 2001.

(2002.10.30 受付)

OPTIMAL ALLOCATION PROBLEM IN THE DIVERSION SYSTEM ON URBAN EXPRESSWAY

Takamasa AKIYAMA, Koji YASUDA, Masashi OKUSHIMA and Takuya SHITANI

The diversion system on urban expressway has been proposed as a measure to dissolve the traffic congestion in city centre. The system can be determined as a method of traffic management with the promotion for detour from congested sections. Firstly, the fundamental concept of diversion system is described. Impact of the diversion system implementation can be evaluated with the stochastic traffic assignment. Secondly, the optimal implementation of diversion system would be discussed with empirical studies. The diversion system on Hanshin Expressway is assumed as a real size network. The genetic algorithm is applied to search the optimal solution of allocation for the diversion system. It would be concluded that the optimal implementation of the diversion system can provide the efficient traffic as a practical traffic management method.