

# 阪神高速道路の将来交通量推計における利用者均衡配分の導入

阪神高速道路(株)計画部調査グループ 石橋 照久  
阪神高速道路(株)情報システム部情報企画グループ 北澤 俊彦  
阪神高速道路(株)計画部調査グループ 飛ヶ谷 明人

## 要 旨

阪神高速における交通量配分手法は、従来より分割配分手法を採用しており、転換率式などの更新はあったものの、この数十年間手法そのものに大きな変化はなかった。

従来の分割配分では、OD交通量の分割回数や分割比を客観的に決められない要素があり、配分結果としては種々の検討によるパラメータ設定や現況再現性の確認を行っており、実用的には十分ではあったが、論理性・客観性という部分に検討の余地がある。一方、利用者均衡配分においては、任意のODペアについて、利用される経路の旅行時間はすべて等しくなるよう収束計算するものであり、配分結果が等時間原則に従うという単純明快な原則に従っていることから、分割配分より論理性が高いと言える。

利用者均衡配分の実用化に向けては、平成16年度より、交通量と所要時間の関係をQV式からリンクコスト関数への見直し、有料道路と一般道路との分担率について転換率式から料金負荷モデルや転換率内生モデルへの見直し、収束計算の条件などを検討してきた。

本稿では、阪神高速における均衡配分手法の導入について詳述し、現況ネットワークでの現況再現性について報告するものである。

**キーワード:** 交通量推計, 利用者均衡配分, 転換率内生モデル

## はじめに

阪神高速の交通量推計手法は、これまで「分割配分手法」を採用してきた。しかし、この手法は分割回数や分割比率等の設定に客観的に決められない要素を含んでいることから、実用的には十分ではあるが、配分手法としての透明性や費用便益分析との整合性の問題から改善の余地があることが指摘されてきた。

昨今では、このような状況をふまえ、透明性と

論理性の高い利用者均衡配分へ移行する動きにあり、阪神高速においても平成16年度より、利用者均衡配分の導入に向けた検討を行ってきた。利用者均衡配分では、後述のWordropの第一原則に従っており、①入力データが同じであれば、誰が配分しても同じ解を得ることができる、②設計要素によって定まる道路特性を反映した適切なリンクパフォーマンスを設定することにより、路線の交通量と旅行時間の両方を精度高く推計することができる、③配分以外の段階における需要変動を

考慮したモデルや多様な施策の評価に対応したモデルなどモデルの拡張性が高い、という特徴を有しており、利用者均衡配分を用いることが適切であると言える。

## 1. 利用者均衡配分の概要

### 1-1 利用者均衡配分の基本的な考え方

利用者均衡配分は、分割配分法と同様に、下記の Wordrop の第一原理が満たされた状態における交通量を求める手法である。

#### Wordrop の第一原理（等時間原則）

「それぞれのドライバーは自分にとって最も旅行時間の短い経路を選択する（最短経路選択ルール）。その結果として、起終点間に存在する経路のうち、利用される経路の旅行時間は皆等しく、利用されない経路の旅行時間よりも小さいか、せいぜい等しいという状態となる。」

言い換えれば、「利用者が利用する経路は常に最短経路のみであり、最短経路以外の経路が利用されることは一切ない」ということである。利用者均衡配分モデルでは、ドライバーは旅行時間のより短い経路があればそちらに移ろうとし、その結果最終的には、どのドライバーも自分の旅行時間をそれ以上改善できないような均衡状態（Wordrop の第一原理が満たされた状態）に辿り着くという考え方をモデル化したものである。図-1 に利用者均衡状態の例を示す。

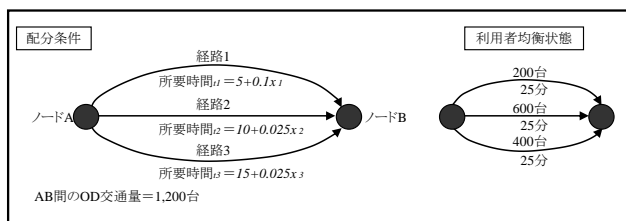


図-1 利用者均衡状態の例

### 1-2 利用者均衡配分と分割配分の違い

分割配分法では、配分対象 OD 表を  $n$  分割し、その条件下で高速道路を利用する最短経路と一般道路のみを利用する最短経路を求める。転換率式によってこの 2 つのルートに配分し、 $Q-V$  曲線と配分交通量によって各リンクの走行速度を修正するプロセスを繰り返す手法である。

等時間原則に従った方法という点では、利用者均衡配分法と同様である。しかし、分割配分では、初めの方の配分手順で選択された経路が、最終配分段階では最短経路とはなっていないことがあり、分割回数や配分比率の決定には十分な検討が必要であるとともに、実務者の十分な経験が必要である。また、得られた配分結果は等時間原則が満たされた均衡状態になるとは限らないという弱点を包含している。

## 2. 利用者均衡配分モデルの構築

利用者均衡配分の配分フローを図-2 に示し、解法に関する考え方を以下に示す。

### 2-1 リンクパフォーマンス関数

利用者均衡配分に用いるリンクパフォーマンス関数は、理論上、狭義の単調増加の速度関数であることと、リンク交通量の全領域で定義されていることが必要である。また、妥当な推計結果を得るためには、交通量と速度の関係を適切に表現した関数を用いることが求められる。

代表的なものとしては、BPR 関数（式(1)）と Davidson 関数（式(2)）が知られている。両者の概形を図-3 に示す。Davidson 関数では強い容量制約がかかっており、容量を超える交通量が配分されることはない。また、配分される交通量が容量に近づくと、そのリンクの旅行時間が無限大になるため、旅行時間が過大に推計される危険性がある。

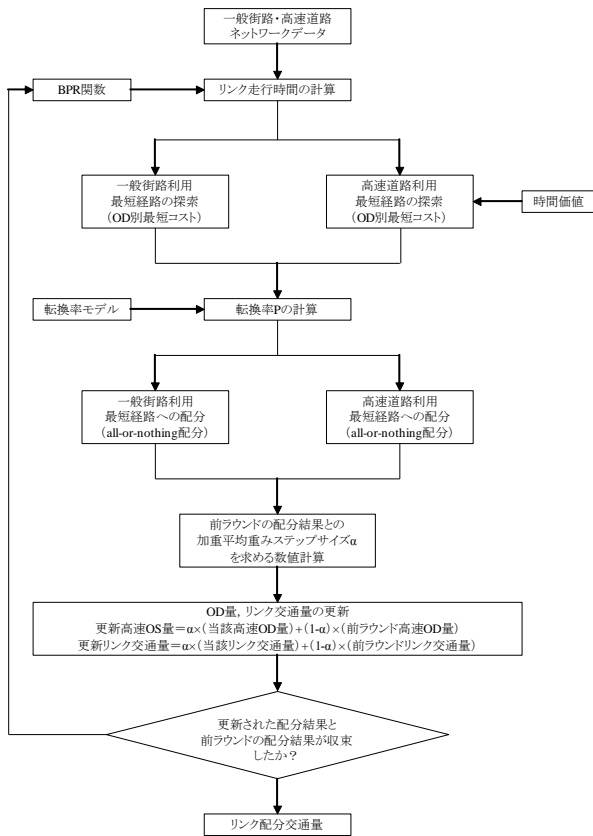


図-2 利用者均衡配分の概略フロー

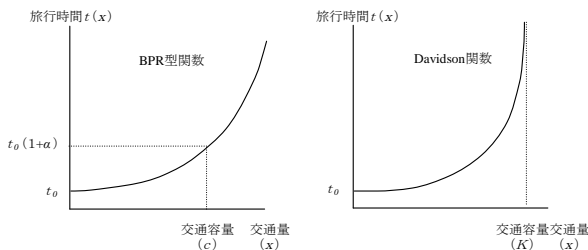


図-3 BPR関数とDavidson関数

●BPR関数

(米国道路局 (US Bureau of Public Roads) が 1964 年の交通配分マニュアルで示した関数)

$$t_a(x_a) = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha \cdot \left( \frac{x_a}{c_a} \right)^\beta \right\} \quad (1)$$

●Davidson関数

(K. B. Davidson が待ち行列理論を援用して提案した関数)

$$t_a(x_a) = t_{a0} \left( 1 + J \frac{x_a}{c_a - x_a} \right) \quad (2)$$

ここに,

$t_a$  : リンク  $\alpha$  の旅行時間 (分)

$t_{a0}$  : リンク  $\alpha$  の自由旅行時間 (ゼロフロー時の旅行時間) (分)

$x_a$  : リンク  $\alpha$  の交通量 (台/時または日)

$c_a$  : リンク  $\alpha$  の交通容量 (台/時または日)

$\alpha, \beta$  : BPR 関数のパラメータ

$J$  : Davidson 関数の遅れパラメータ

阪神高速では、より多くの適用事例があり、また、旅行時間の推計精度がよいと考えられている BPR 関数を採用する。BPR 関数で用いる変数及びパラメータの性質を表-1 に示す。また、BPR 型関数と QV 式の概形の比較を図-4 に示す。分割配分における QV 式では、リンク旅行速度と交通量の関係を表して利用するが (図-4 左図)、利用者均衡配分に用いるリンクパフォーマンス関数は、リンク旅行時間 (リンク旅行速度の逆数) と交通量の関係を表して用いる (図-4 右図)。

なお、BPR 関数のパラメータとしては、阪神高速では 2003 年の土木学会標準パラメータ ( $\alpha = 0.48, \beta = 2.82$ ) を用いる。

2-2 有料道路の取り扱い方

阪神高速道路などの有料道路を含んだネットワークにおいては、道路利用者の経路選択要因として旅行時間と道路料金の二つが主要なものと考えられる。

複数の経路選択要因を考慮する場合、それらを利用者均衡配分モデルにおいてどのように表現するかが問題となり、旅行時間と道路料金の両方を考慮できるように利用者均衡配分モデルを拡張している。

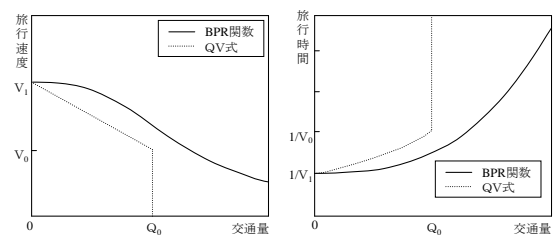


図-4 BPR型関数QV式の概形

表- 1 BPR 関数の変数・パラメータの性質

変数, パラメータ	性 質
$\alpha$	<ul style="list-style-type: none"> <li>・交通量が交通容量に達した時に、走行時間が自由走行速度の何倍になるかを示す。例えば、2倍であるとすると、<math>\alpha</math>は1となる。</li> <li>・<math>\alpha</math>が小さいと交通量が交通容量に達してもあまり旅行時間が増加しない関数となる</li> <li>・道路のサービス水準をどの程度に設定するか、すなわち、交通量が交通容量に達した時に、走行時間をどの程度に想定するか、によって設定する考え方もある。</li> </ul>
$\beta$	<ul style="list-style-type: none"> <li>・BPR 関数の立ち上がり（傾き）の度合いを示す。</li> <li>・交通量が交通容量を超えた領域は、<math>\beta</math>の影響が支配的になる領域であるが、この領域は、交通量が多くなればなるほど、理論上は実測のデータを観測できない領域である。この領域は、単調増加関数を必要とする配分計算のために設定する領域ともいえる。</li> <li>・<math>\beta</math>が小さいと、混雑による影響が小さくなるため、特定のリンクに交通量が過剰に流れる可能性がある。<math>\beta</math>の値は、混雑による容量制約が十分に影響するような値が望まれる。</li> </ul>
自由旅行時間( $t_0$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>・交通量がゼロの場合の旅行時間。</li> <li>・基本的には、リンクのハード面の特性（信号交差点や中央分離帯、車線数など）や交通規制（指定最高速度など）が影響する変数である。</li> </ul>
時間交通容量( $c$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>・交通量配分において必要なのは、各リンクのハード面の特性を反映したパフォーマンス関数であり、その意味から、可能交通容量（台/時）が適切である。</li> </ul>

(1) 料金負荷モデル

均衡配分の最もシンプルなモデルである料金負荷モデルは、有料道路の道路料金を等価な旅行時間に時間評価値を用いて換算し、それをリンク旅行時間に加算することによって、リンクコストの違いとして道路料金を反映させる配分モデルである。このモデル自体は基本的な利用者均衡配分モデルであり、最も素直で説明しやすいモデルといえる。

リンクパフォーマンス関数にBPR関数を用いた場合、有料道路のリンクパフォーマンス関数は式(3)の関数型となる。

$$t_a(x_a) = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha \left( \frac{x_a}{C_a} \right)^\beta \right\} + \frac{\xi_a}{\omega} \quad (3)$$

ここに、

$t_{a0}$  : リンク  $a$  の自由旅行時間  
(ゼロフロー時の旅行時間)

$C_a$  : リンク  $a$  の交通容量 (台/日)

$x_a$  : リンク  $a$  の交通量 (台/日)

$\xi_a$  : リンク  $a$  の通行料金

$\omega$  : 時間評価値

$\alpha, \beta$  : パラメータ

(2) 高速転換率内生化学モデル

1) モデルの考え方

有料道路料金を時間に換算してリンクコストに加算する方法による料金負荷モデルでは、経路選択要因として旅行時間と道路料金の2つを考慮している。また、時間評価値は地域差や所得差なしに全ドライバーで同一と仮定している。すなわち、配分モデルとして、いくつかの前提条件をおいたモデルとなっているため、高速道路と一般道路の分担関係を必ずしも適切に推計できているとは言えない場合がある。このような問題への対応方法の一つである転換率内生化学モデルの考え方の模式図を図-5に示す。

OD間の経路選択肢を「高速道路を利用する経路」と「高速道路を利用しない経路」の2つに分け、「高速道路を使う/使わない」の選択はロジットモデルの確率的選択モデルで表すこととしたモデルが、「高速転換率内生化学モデル」である。

転換率内生化学モデルは、分割配分の転換率配分法の考え方を取り入れつつ、利用者均衡配分モデルを理論的に拡張したモデルであり、単に一般化所要時間（旅行時間+道路料金/時間評価値）が最小の経路のみを選択すると仮定している料金負荷モデルよりも高速道路の利用特性を細かく表現することが可能になるため、現況再現性の向上が期待できるモデルといえる。転換率内生化学モデルの特徴として、以下のことが挙げられる。

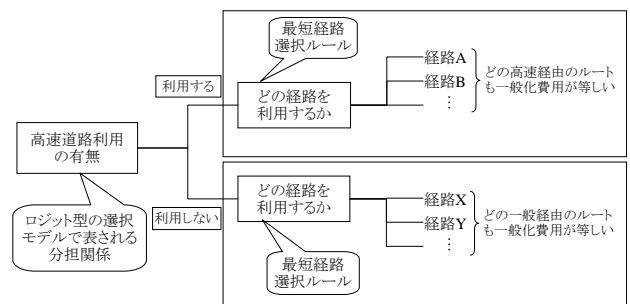


図- 5 転換率内生化学モデルの考え方

- i) 高速道路と一般道路の選択に旅行時間と道路料金以外の要因を考慮することができる。
- ii) 時間評価値に確率分布を持たせたモデルであると解釈することも可能であり、ドライバーの均質性の仮定を緩和したより一般性の高いモデルと考えられる。
- iii) 転換率式のパラメータを論理性・説明性を持たせつつ、OD ペア別の交通特性に合わせ適切に設定することにより、モデルの現況再現性や施策感度が改善する可能性がある。

## 2) 高速転換率式

転換率内生モデルで用いる転換率式を式(4)に示す。

転換率式のパラメータについては、これまでの研究成果から、式(5)、式(6)に示すようにパラメータ  $\theta$ 、 $\psi$  がそれぞれ OD 間距離の関数として表されると仮定している。転換率式パラメータについて、その意味解釈を表-2 に示す。これより、高速転換率式は式(7)のように表される。なお、パラメータ  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  は、平成 11 年度道路交通センサス自動車起終点調査オーナーインタビュー調査及び阪神高速起終点調査から OD 間距離別の高速利用と高速を利用しない OD ペアをランダム抽出し、最尤推定法により表-3 のように求められる。

$$P_{rs} = \frac{1}{\exp\{-\theta_{rs} \cdot (C_{rs}^1 - C_{rs}^2) + \psi_{rs}\} + 1} \quad (4)$$

ここに、

$P_{rs}$  : OD ペア  $rs$  間の高速転換率

$C_{rs}^m$  : OD ペア  $rs$  間のモード  $m$  の最小コスト

モード 1 : 一般街路ルート

モード 2 : 高速利用ルート

$\theta_{rs}$ ,  $\psi_{rs}$  : パラメータ

$$\theta(L_i) = a \times L_{rs}^b \quad (5)$$

$$\psi(L_i) = c \times \ln L_{rs} + d \quad (6)$$

ここに、

$L_{rs}$  : OD ペア  $rs$  間の距離

$a, b, c, d$  : パラメータ

$$P_{rs} = \frac{q_{rs}^2}{Q_{rs}} = \frac{1}{\exp\{-a \cdot L_{rs}^b \cdot (C_{rs}^1 - C_{rs}^2) + c \cdot \ln L_{rs} + d\} + 1} \quad (7)$$

表-2 転換率式パラメータ意味解釈

パラメータ	パラメータの値の意味・解釈
$\theta$	高速道路を利用した場合の一般化所要時間と利用しなかった場合の一般化所要時間の差を近距離では利用者がより正確に認識しており、距離が長くなるにつれて不確実性が増してくることを表している。また、時間表価値が分布を持っていると考え、長距離の方が一般化所要時間の差の分布が大きく、ランダム性が高くなっていると解釈できる。
$\psi$	高速道路の利用が一般化所要時間の差だけでは経路選択されないことを示すパラメータと言える。つまり、高速道路を嫌う利用者層や長距離では道のわかりやすさ、走りやすさなどが経路選択の要因になっていることを表している。また、短距離ほど $\psi$ が大きい傾向があり、これは短距離帯では、長距離帯に比べ高速道路が選ばれにくいと解釈できる。

表-3 京阪神地区の転換率パラメータ

$a$	$b$	$c$	$d$
+0161	-0.331	-1.04	+5.117

## 3. 利用者均衡配分による現況再現性

平成 11 年を現況とする利用者均衡配分による現況配分を行い、実績値（平成 11 年度阪神高速道路起終点調査）との比較により現況再現性の検証を行った。配分条件を表-4 に示す。利用者均衡配分では、料金負荷モデルと転換率内生モデルでの配分を行い、モデルの違いによる比較を行った。

### 3-1 利用台数及び平均利用距離

将来交通量推計の重要な用途の一つとして、償還計画の検討に関わる料金収入の将来予測が挙げられる。したがって、現況再現において、阪神高速道路の利用台数や平均利用距離が適切に再現されることが重要と考えられる。

実績値との比較という観点から、図-6 を見ると、以下のように整理される。

表- 4 現況再現配分の前提条件

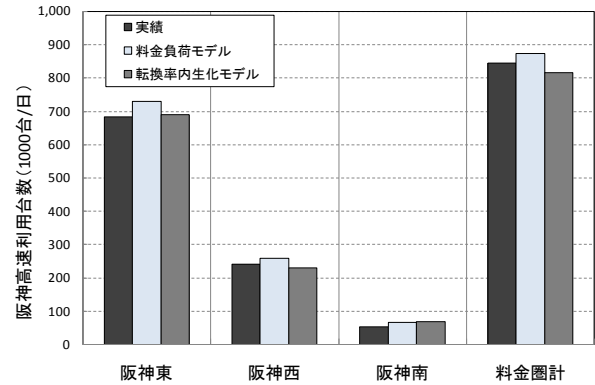
項目	現況再現で設定した条件
対象エリア	京阪神都市圏 (大阪府, 神戸市, 阪神間, 京都市, 京都周辺南部)
OD 交通量	平成 11 年度道路交通センサス OD 表
ゾーン数	793
ネットワーク	リンク数 : 12,845, ノード数 : 4,322
リンクコスト関数のパラメータ	土木学会標準パラメータ $\alpha = 0.48, \beta = 2.82$
交通容量	QV 式の $Q_3$ を適用 ( $Q_3$ (pcu/日) は可能交通容量の日換算値)
阪神高速の通行料金	時間評価値は 78.36 円/分・台 料金は現行料金 (均一料金)
実績データ	第 21 回阪神高速道路起終点調査 交通量月報 (平成 11 年 10 月) 平成 11 年度道路交通センサス一般交通量調査
配分ケース	・料金負荷モデル ・転換率内生化学モデル

- ・利用台数については、料金負荷モデルでは全体的に推計値の方が大きめ、転換率内生化学モデルは阪神南圏で推計値の方が大きめ、阪神西圏と料金圏計で推計値の方がやや小さめである。
- ・平均利用距離については、料金負荷モデルと転換率内生化学モデルで精度に差は認められない。両モデルにおいて、阪神東圏と料金圏計で推計値の方が大きめ、阪神西圏と阪神南圏では推計値の方が小さめである。

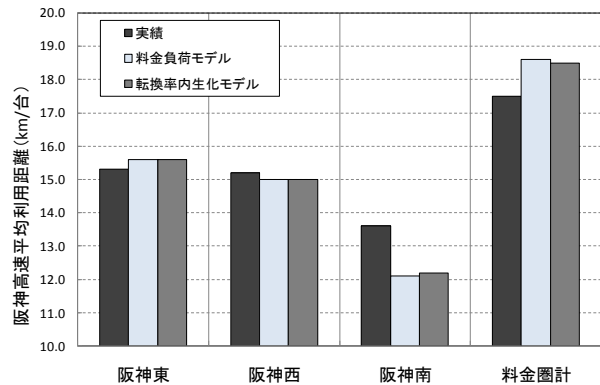
### 3-2 利用距離分布

利用台数及び平均利用距離の他に配分結果の精度を検証するため、利用距離分布の比較を行った。図-7 に、利用距離帯分布を整理した結果を示す。分布形状を見ると、料金負荷モデル、転換率内生化学モデルとも、実績値と同様の傾向にあることがわかる。

また、RMS 誤差率は、転換率内生化学モデルの方が小さく、転換率の導入による精度向上が定量的に現れている。



i. 利用台数



ii. 平均利用距離

図- 6 阪神高速の利用台数及び平均利用距離の現況再現の状況 (現況 : 平成 11 年)

### 3-3 主要区間における再現性

阪神高速道路の主要区間における交通量の実績値と配分結果の比較を図-8 に示す。現況値との相関係数が、転換率内生化学モデルでは 0.952 と料金負荷モデルの 0.902 に対して高く、転換率内生化学モデルの方が現況再現性が高い。

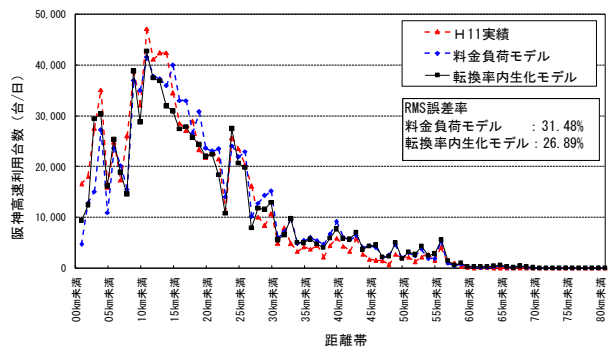


図- 7 阪神高速の利用距離分布の現況再現 (現況 : 平成 11 年)

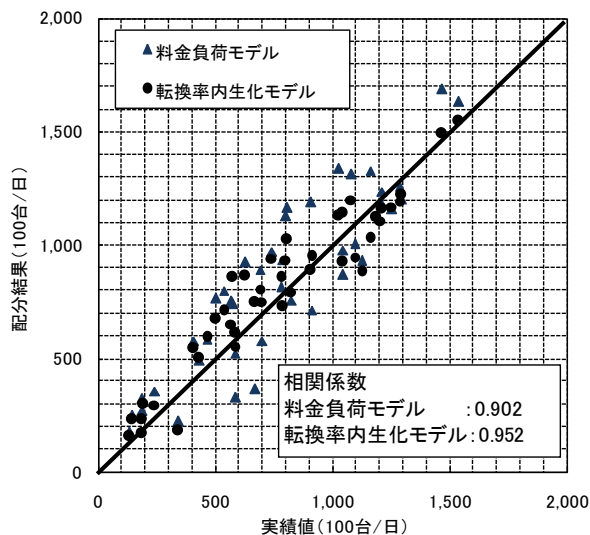


図- 8 阪神高速の主要区間の現況再現  
(現況：平成 11 年)

#### 4. まとめ

1. 高速道路の利用行動を考慮した利用者均衡配分モデルの開発を行った。
2. 利用者均衡配分モデルとして、「料金負荷モデル」と「転換率内生化モデル」を開発し、その適用性を検討した。
3. 「料金負荷モデル」と「転換率内生化モデル」について現況再現の配分によって比較検証し、後者の方が主要区間交通量の再現性など優位であることを確認した。

謝辞：利用者均衡配分の実用化に向けた検討については、平成 16 年度から検討会にて検討を進め、平成 19 年度「阪神高速道路交通量推計手法検討委員会」にて、検討結果のとりまとめを報告することができた。長年にわたり座長を務めていただいた神戸大学朝倉教授をはじめ、検討会、委員会でご指導いただいた先生方、関係の皆様には謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会土木計画学研究委員会交通需要予測技術編集小委員会：道路交通需要予測の理論と適用 第 I 編 利用者均衡配分の適用に向けて，社団法人土木学会，平成 15 年 8 月。
- 2) 土木学会土木計画学研究委員会交通需要予測技術編集小委員会：道路交通需要予測の理論と適用 第 II 編 利用者均衡配分モデルの展開，社団法人土木学会，平成 18 年 7 月。
- 3) 松井寛・藤田素弘：高速道路を含む都市圏高速道路網における利用者均衡配分モデルの実用化に関する研究，土木学会論文集，No.653/IV-48，pp.85-94，平成 12 年。
- 4) 中村毅一郎，森田緯之，井上紳一，中野敦，遠藤弘太郎：首都高速道路における転換率内生化利用者均衡配分モデルの適用，土木計画学研究・講演集，Vol. 29，2004.6.

## INTRODUCTION OF USER EQUILIBRIUM ASSIGNMENT IN TRAFFIC FLOW ESTIMATION OF HANSHIN EXPRESSWAY

Teruhisa ISHIBASHI, Toshihiko KITAZAWA and Akito HIGATANI

Since traffic assignment results are used as the basis for important decision making, they should be logical enough to support accountability. The incremental assignment method which is conventionally used has some factors which prevent objective decision making on the number of iteration and split ratio for the origin-destination flow, showing its logical weakness. Unlike the incremental assignment, the user equilibrium assignment technique uses convergent calculation so that travel times for an arbitrary origin-destination pair are equalized between different routes. This produces more logical results through the clear and simple rule of time equality.

Preliminary examinations have been made since fiscal year 2004 toward the introduction of the user equilibrium assignment. For the expression of relationship between traffic

volume and travel time required, the link cost function is examined to replace the current Q-V (traffic volume-speed) formula. Modal split between toll roads and ordinary highways is reviewed to change from the shifting ratio to a toll share model or a shifting ratio endogenous generation model. The convergent calculation conditions are also reviewed.

This paper describes introduction of the equilibrium assignment technique to the Hanshin Expressway and reports its reproducibility on the current network.

石橋 照久



阪神高速道路株式会社  
計画部 調査グループ  
Teruhisa Ishibashi

北澤 俊彦



阪神高速道路株式会社  
情報システム部 情報企画グループ  
Toshihiko Kitazawa

飛ヶ谷 明人



阪神高速道路株式会社  
計画部 調査グループ  
Akito Higatani