【土木計画学研究・論文集 Vol.21 no.1 2004年9月】

確率的利用者均衡配分を用いた整備効果の計測に関する実証研究*

A Study on Evaluation of Road Investment by Stochastic User Equilibrium Assignment Model*

吉田禎雄**，原田昇***

By Yoshio YOSHIDA** ・ Noboru HARATA***

1．はじめに

利用者均衡配分（UE）の利用が実務で本格化してきた．しかし，UE は道路利用者が情報を完全に把握しているとの強い仮定を持つものであるが，実際の道路利用者はマスメディアからの部分的な情報や経験的な情報を持っているのみであり情報を完全に把握しているとの仮定は非現実的である．そこで，利用者が持っている不完全な情報による経路選択行動のばらつきを考慮した確率的利用者均衡配分が注目される．

確率的利用者均衡配分（SUE）は，利用者が認知している経路選択要因にばらつきを導入し，ランダム効用理論によって記述したモデルとして定式化される．中でも，ロジット型の確率的利用者均衡配分モデルは，定式化や計算アルゴリズムが簡明であることから多く用いられている．また，確率的利用者均衡配分モデルは，定式化において経路交通量を明示的に導入しているため，リンク交通量のみならず経路交通量に関しても解が一意に定まるという特徴がある．そのため，配分結果から多くの経路関係の情報を得ようとする実務においては，確率的利用者均衡配分が適している．

また，実務では配分結果を得ると同時に道路関連プロジェクトの投資効果を計測する要請が高い．道路投資の効果は多岐にわたるが，我が国では，効果計測の容易性から時間短縮効果，走行費用減少効果，交通事故減少効果及び地域社会が受ける環境改善効果といった直接便益を計測することが多い[1]．中でも配分結果より得られる総走行台時の変化に時間便益原単位を乗じて得られる時間短縮効果は総便益額に占める割合が高く重要な評価指標となっている．確率的利用者均衡配分を用いた道路整備効果の計測事例では配分モデルとの整合性の面から期待最小コスト[2]による利用者便益の算定を実施している．

*キーワーズ：整備効果計測法，配分交通，経路選択

**正員， 株式会社インテルテック研究所
（〒169-0075 東京都新宿区高田馬場2-14-6
TEL：03-3203-9241，FAX：03-3203-9246
E-mail：yoshida@intel-tech.co.jp）
***正員，工博 東京大学大学院新領域創成科学研究科
環境学専攻

しかし，整備効果を期待最小コストによって評価しようとした場合，予想されるような整備効果が得られないといった便益計測上の問題が実務で多く発生している．

そこで，本研究では道路の整備効果のうち時間短縮便益を対象に，確率的利用者均衡配分を用いた利用者便益の算定における期待最小コストの挙動を実際のネットワークにより示し，便益計測上の問題点を明らかにする．つづいて，実務で用いられることの多い確率配分にDial法[3]を用いた部分線形化法[4]（以後「Dial法」と記す）とSimplicial Decompositon法[5]（以後「SD法」と記す）の2種類の確率的利用者均衡配分を用いて，期待最小コストによる計測上の問題は，主に経路集合に起因することを実証的に示す．

最後に，期待最小コストを用いた整備効果の計測上の問題は，経路集合に含まれる経路数の増加や整備前後の経路集合の変化を抑えることによって解決できる可能性のあることから，経路を明示的に扱うSD法における簡便な方法として① Dijkstra法を用いた最短経路探索方法の改良と，② 整備前後の経路集合を固定化する方法を提案し，実用的に十分な精度と安定性のある期待最小コストが得られることを示した．

2．確率的利用者均衡配分と解法のレビュー

（1）ロジット型確率的利用者均衡配分（SUE）

ロジット型の確率配分では，OD ペアー rs 間の経路 k を利用する場合の効用を次の効用関数で定義する．

$$U_k^{rs} = V_k^{rs} + \varepsilon_k^{rs} \qquad (1)$$

ここで，V_k^{rs} は経路 k 経路上の効用の確定項，ε_k^{rs} は利用者の認知誤差を表す確率項である．

また，確率項を相互に独立で同一のガンベル分布に従うものとし，ガンベル分布の分散 σ に関するスケールパラメータを θ（$\sigma^2 = \pi^2/6\theta^2$）と仮定するロジットモデルの場合，利用者が経路 k を選択する確率は，ランダム効用理論により次式で表される．

$$P_k^{rs} = \frac{\exp\left(\theta V_k^{rs}\right)}{\sum_{k'} \exp\left(\theta V_{k'}^{rs}\right)} \qquad (2)$$

また，ランダム効用理論によれば，経路の選択では最大効用の選択肢が選択されていると仮定されているため，利用者が経路選択行動によって得ると認知する期待最大効用は，次式となる．

$$S^*(V)=\frac{1}{\theta}\ln\sum_{k}\exp(\theta V_k) \tag{3}$$

ここで，経路選択における効用は，経路k上のリンクコストの和について符号を逆にした$V_k^{rs}=-c_k^{rs}$と考えられるため，式(3)は次式で示す期待最小コストとして表現できる．

$$S(c)=-\frac{1}{\theta}\ln\sum_{k}\exp(-\theta c_k) \tag{4}$$

ロジット型確率配分では，式(4)で与えられる期待最小コストを最小化するような経路選択を行っていることに等しく，この意味で期待最小コストは配分モデルと整合の取れた評価指標となり得る．

ロジット型の確率的利用者均衡配分は，式(1)，(2)およびOD交通量のフロー保存則，リンク交通量と経路交通量の関係式等によって定式化され，これを等価な最適化問題とした場合，その目的関数は次式で表される．

$$\min Z(\mathbf{x},\mathbf{f})=\sum_{a}\int_0^{x_a}t_a(\omega)d\omega+\frac{1}{\theta}\sum_{rs}\sum_{k}f_k^{rs}\ln\left(\frac{f_k^{rs}}{q_{rs}}\right) \tag{5}$$

subject to

$$x_a=\sum_{rs}\sum_{k}f_k^{rs}\delta_{a,k}^{rs}$$

$$q_{rs}=\sum_{k}f_k^{rs}$$

$$f_k^{rs}\geq 0 \quad \forall a\in A,\ \forall k\in K_{rs},\ \forall r\in R,\ \forall s\in S,$$

ここで，x_aはリンク交通量，f_k^{rs}はゾーンrs間の第k経路の経路交通量，q_{rs}はゾーンrs間のOD交通量，$t_a(x_a)$はリンクコスト，$\delta_{a,k}^{rs}$はゾーンrs間の第k経路がリンクaを含むとき1，含まないとき0の値をとるダミー変数である．

（２）SUEの解法

確率的利用者均衡配分（SUE）の解法は，逐次平均法（MSA）[6]，部分線形化法（PLA）[4]，あるいはSimplicial Decompositon法（SD法）[5]といった代表的な解法アルゴリズムを用いて解くことができる．

本研究では，実務で多く用いられているDial法とSD法の2種類の解法を用いて検討を行う．

(a) Dial法

部分線形化法は式(5)の右辺第2項のエントロピー項を線形化した補助解を確率配分で求めFran-Wolfe法と同様に一次元探索を実施することを繰り返して目的関数が最小となる経路交通量パターンを求めるものである．また，確率配分では経路を列挙せずにロジット型確率配分を行うDial法がよく用いられている．

Dial法のアルゴリズムは経路選択にいくつかの規範を設けることにより経路の列挙を避けているため，全ての経路を列挙した場合のロジット型配分モデルによるリンク交通量パターンとは必ずしも一致しない．また，Dial法は，一度に1つの起点から複数の終点への配分をリンク及びノードに着目した演算のみで実施するものであり，大規模ネットワークにも簡単に対応できるものであるが，後述するように経路選択上の問題があることが知られている．

(b) SD法

SD法は経路交通量を明示的な未知変数として扱い，経路を生成する列生成フェイズと，それまでに生成された経路集合のもとで経路交通量を直接求める限定親問題を繰り返し，列生成フェイズで新たな経路が生成できなくなるまで繰り返すものである．また，現実の交通量パターンでは最短経路に近い限られた本数の経路に流れていると考えられることから，列生成フェイズでは，限定親問題の解のもとで最短経路を探索し，これを新たな経路として追加するという単純な方法[2]が一般的に採用されている．なお，新たな経路として経路集合に加えるか否かの判定は，ロジットモデルのIIA特性による問題[2]を緩和するため，得られた最短経路と既に生成されている経路集合との重複リンクについて適当な基準をもとに決定している．この場合の基準としては，重なり合ったリンク数の割合が予め決めた定数未満ならば経路集合に加え，そうでなければ棄却する方法が採用される．このように重複率の高い経路を削除することで、重複リンクに過大な交通量が配分されるというIIA問題を緩和することができる。

限定親問題は，得られた経路集合の全てについて経路コストの算定を行い，式(2)に示すロジット式を適用して経路交通量を求め，一次元探索と解の更新を繰り返すことで目的関数が最小となる経路交通量パターンを求めている．

このようにSD法では経路交通量を明示的に扱っているため，実務で要求されるリンクのOD内訳，方向別交通量など多くの指標が得やすいという特徴がある．

３．利用者便益

（１）利用者便益の考え方

整備効果として計測される便益は，道路の利用者が負担する時間的，金銭的な全ての費用（一般化費用）が軽減されることから生じるものと定義できる[1]．そのため，便益は道路利用者が整備前に負担している一般化費用か

ら整備後に負担する額の差分の総和（消費者余剰）として推計される（図-1 の $P_{without}$－P_{with}－A－B の面積）．

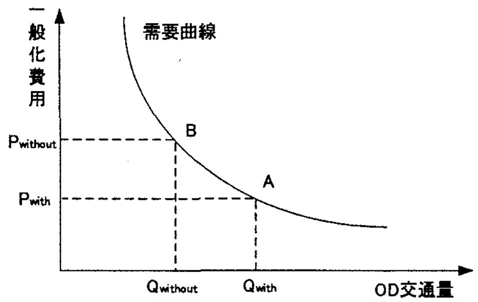


図-1　消費者余剰の概念図

道路整備等のない場合の OD ペアー rs 間の一般化費用を $P_{rs}^{without}$，OD 交通量を $Q_{rs}^{without}$ とし，道路整備等を実施した場合の一般化費用 P_{rs}^{with} を，OD 交通量を Q_{rs}^{with} とすると，便益 B は，いわゆる台形公式として知られた次式で示される．

$$B=\sum_{r}\sum_{s}\frac{\left(P_{rs}^{without}-P_{rs}^{with}\right)\left(Q_{rs}^{without}+Q_{rs}^{with}\right)}{2} \tag{6}$$

ここで，OD ペアー rs 間の OD 交通量が固定の場合には，$Q_{rs}^{without}=Q_{rs}^{with}$ であるため，

$$B=\sum_{r}\sum_{s}\left(P_{rs}^{without}-P_{rs}^{with}\right)Q \tag{7}$$

となる．ここで，OD ペアー rs 間の k 番目の経路交通量 f_k^{rs} とし，リンク a を利用することによる一般化費用を p_a，リンク交通量を x_a とする．また，OD ペアー rs 間の k 番目の経路がリンク a を利用するとき 1，利用しないとき 0 となるダミー変数を $\delta_{a,k}^{rs}$ とすると，以下の関係が求められる．

$$\begin{aligned}\sum_{r}\sum_{s}PQ&=\sum_{r}\sum_{s}\left(\sum_{k}\sum_{a}p_a\delta_{a,k}^{rs}f_k^{rs}\right)\\&=\sum_{a}p_a\left(\sum_{r}\sum_{s}\sum_{k}\delta_{a,k}^{rs}f_k^{rs}\right)=\sum_{a}p_a x_a\end{aligned} \tag{8}$$

そのため，需要が固定の場合には，リンク毎に一般化費用を求めこれにリンク交通量を乗じて全リンクで総和を求めればよいことになる．ただし，確率的利用者均衡配分では，リンク別の期待最小コストは求められないため，適用が困難である．

(2) 一般化費用

ロジット型の確率的利用者均衡配分で算定できる OD ペアー毎の一般化費用は，最小コスト，期待最小コスト及び平均コストの 3 種類が考えられる．

(a) 最小コスト

最小コストは，配分終了時における OD ペアー間の最短経路上のコストとして求められるものである．Wardrop の第一原則に従って定式化されている確定的な利用者均衡配分（UE）の場合，最小コストを用いることで配分モデルと整合の取れた評価指標として利用者便益の算定が利用可能である．しかし，確率的利用者均衡配分（SUE）の場合では最小コストは単に選択された経路の中で一般化費用が最小であるというだけであり，様々な経路を選択する利用者を統一的に示す指標とは成り得ない．

(b) 平均コスト

平均コストは，利用された経路に沿った一般化費用を経路交通量で加重平均したものとして次式で定義する．

$$P_{rs}=\frac{\sum_{k}f_k^{rs}\cdot c_k^{rs}}{Q_{rs}} \tag{9}$$

この平均コストは，経路を明示的に扱う SD 法においては選択された全経路について式(9)をそのまま適用することで簡単に求められる．

経路が明示されていないロジット型確率配分の Dial 法では部分線形化法で用いる発ノード別交通量を用いて算定する必要がある．すなわち，線形近似に際し，目的関数式(5)の経路交通量で表現されたエントロピー項を次式で示すリンク交通量による表現に改めることができる．

$$\begin{aligned}&\sum_{rs}\sum_{k}f_k^{rs(n)}\ln\left(\frac{f_k^{rs(n)}}{g^{rs(n)}}\right)\\&=\sum_{r}\sum_{(I,J)\in L}x_{IJ}^{r(n)}\ln x_{IJ}^{r(n)}-\sum_{r}\sum_{J\in N}\left(\sum_{I\in I_J}x_{IJ}^{r(n)}\right)\ln\left(\sum_{I\in I_J}x_{IJ}^{r(n)}\right)\end{aligned} \tag{15}$$

ここで，$x_{IJ}^{r(n)}$ はリンク $(I\rightarrow J)$ における発ノード r 別のリンク交通量，L はノードペアー (I,J) で表されたリンク集合，N はノード集合，I_J はノード J に流入するリンクの始点ノード I の集合である．計算過程で発ノード別リンク交通量を発ノード別・着ノード別リンク交通量 x_{IJ}^{rs} を算定しておけば，次式で平均コストを算定できる．

$$P_{rs}=\frac{\sum_{k}f_k^{rs}\cdot c_k^{rs}}{Q_{rs}}=\frac{\sum_{IJ}x_{IJ}^{rs}\cdot t_{IJ}\left(x_{IJ}\right)}{Q_{rs}} \tag{10}$$

また，経路交通量とリンク交通量は次式の関係が成立している．

$$x_a=\sum_{rs}\sum_{k}f_k^{rs}\delta_{a,k}^{rs} \tag{11}$$

そのため，OD ペアー毎に求める式(9)に OD 交通量を乗じた走行台時を全てのリンクで総和した総走行台時は，

$$PQ=\sum_{rs}\sum_{k}f_k^{rs}\cdot c_k^{rs}=\sum_{a}x_a\cdot c_a \tag{12}$$

となりリンク毎に一般化費用を求めこれにリンク交通量を乗じて全リンクの総和を求めた場合と同一となる.

(c) **期待最小コスト**

SD 法による配分では，列生成フェイズにおいて経路を明示的に追加することを繰り返して収束計算を実行しているため，得られた経路集合に含まれる全ての経路に対し，コストが求められる．そのため，式(4)を用いて直接的に期待最小コストを算定できる.

一方，Dial 法による部分線形化法における期待最小コストの算定方法は，繰り返し計算による配分が終了した時点での確率配分の結果を用いて次式で算定できる.

$$S_{rs} = -\frac{1}{\theta}\ln\left\{\sum_{m\in M_s} W[m \to s]\right\} + c_{rs} \tag{13}$$

ここで，θ は分散係数，M_s は集中点 s に流入するリンクの始点集合，c_{rs} はゾーン rs 間の最小費用，$W[\ ]$ は Dial 法によるノードウェイトである．ただし，収束の最終回で期待最小コストが求められるのは経路集合が収束過程で変化しないとの仮定の上に成り立つものであることに注意する必要がある.

(３) 一般化費用の比較

上記 3 種類の一般化費用の関係を見る．平均コストは，全ての経路について経路交通量で加重平均したものであるため，最小コストよりも大きなコストとして算定される．また，期待最小コストは，式(4)と表現されるため，経路が 1 本の場合に最小コストと等しく，複数経路の場合は最小コストより小さくなる．そのため，理論的には，

期待最小コスト≦最小コスト≦平均コスト

の関係となる．なお，期待最小コストは，分散係数が相対的に小さい場合にはマイナス値となることもある.

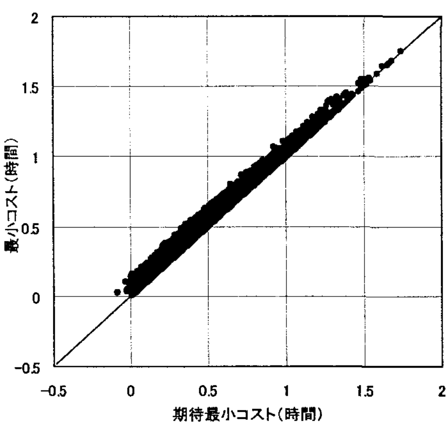


図-2 OD ペアー別期待最小コストと最小コストの散布例

表-1 一般化費用の平均値例

期待最小コスト	最小コスト	平均コスト
0.4212	0.4611	0.4663

これらの関係を後述する SD 法の改良 2 で算定された OD ペアー別の期待最小コストと最小コストの散布図として示すと，図-2 に示すとおりであり，全ての OD ペアーで期待最小コストよりも最小コストが大きくなっている．また，3 種類の一般化費用の単純平均を求めると表-1 のとおりであり，上記大小関係が明確に示されている.

４．整備効果の算定事例

（１） 整備効果算定上の問題点

実ネットワークを用いて行った整備効果の算定事例を示す．検討対象ネットは，沖縄本島中南部の幹線道路網で約 850 リンク，114 ゾーンであり、効果算定方法の問題点を明確にするため，一方通行を除去して対称ネットとし，OD 表は方向別交通量に差のない対象 OD 交通量を用いた．また，OD 表は上下方向別交通量に差のない対象 OD 交通量を用いた．配分は，利用者均衡配分(UE), Dial 法による確率的利用者均衡配分（Dial）および SD 法による確率的利用者均衡配分（SD）の 3 種類である．なお，SD 法における列生成フェイズでの新経路採択は，高速道路のように卓越した経路となり得る道路は概してリンク延長が長いことなどを考慮し，重複リンクの延長が経路の総延長に占める割合が 80%以下の場合に採択とした．評価指標である総走行台時は，OD ペアー毎に最小コスト，期待最小コスト，平均コストを用いた場合とリンク毎の総和によるものの 4 種類の算定方法で求めた．また，道路の整備として幹線道路の国道 58 号を那覇市から北に延長 0.8km～10.3km の各整備を行った 4 ケースを設定し，総走行台時の減少量を整備効果と考えた．結果は，表-2 及び図-3～5 に示すとおりである.

表-2 整備延長別・指標別整備効果

配分方法	コストの算定方法	整備延長別整備効果（台時）			
		0.8km	2.8km	6.0 km	10.3km
UE	最小コスト	10.1	44.6	153.3	251.5
	リンク別の和	12.0	46.0	154.0	260.0
Dial 法	最小コスト	9.9	50.7	167.3	255.0
	平均コスト	-3.5	14.3	123.9	305.4
	期待最小コスト	338.1	27.3	-172.0	-113.3
	リンク別の和	11.0	112.0	158.0	390.0
SD 法	最小コスト	11.1	37.8	145.5	200.4
	平均コスト	12.3	39.6	160.0	216.1
	期待最小コスト	6.2	-9.4	28.5	16.4
	リンク別の和	12.0	39.0	146.0	207.0

UE の場合，集計誤差による相違はあるが，リンク別

の総和と最小コストを用いた場合とで理論どおりに同じ値となっている.

Dial 法の場合，期待最小コストは他の指標に比べ大きく異なっている．特に整備延長 6km 以上のケースでは全てマイナス値となっている．また他の指標は，多少の相違はあるものの概ね整備延長の増加に伴って整備効果が増加する傾向を示している.

SD 法では期待最小コストを除く他の指標がほぼ同じ値であるのに対し，期待最小コストについては整備延長 2.8km 以上では整備延長に関係なく小さな値となっている.

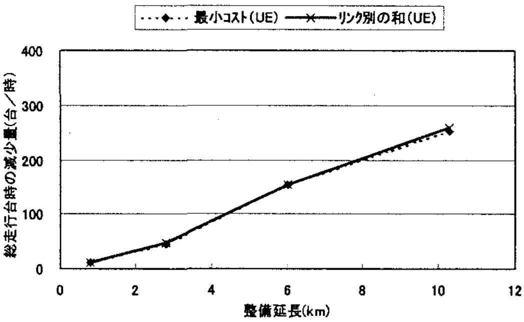


図-3　整備延長別整備効果（UE）

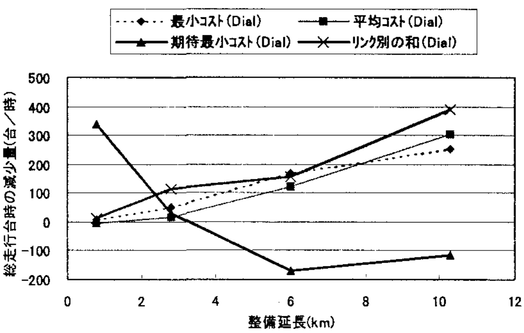


図-4　整備延長別整備効果（Dial）

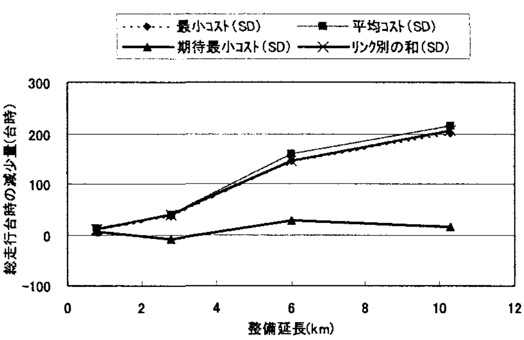


図-5　整備延長別整備効果（SD）

このように，確率的利用者均衡配分では期待最小コストを用いた便益計算では，Dial 法も SD 法も安定した便益が得られていないという問題があることが分かる.

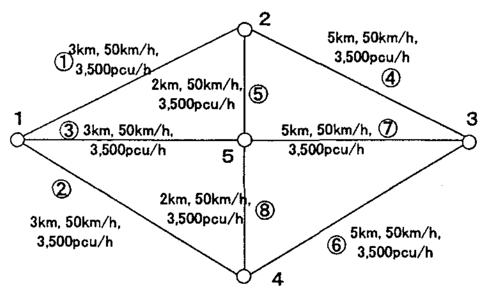
なお，均衡配分における各種パラドクス [7) 8) 9)] などの影響については検討していないが，ここで示した便益計測上の問題は配分アルゴリズムに負うところが多いのではないかと思われる.

以下，Dial 法を用いた場合と SD 法を用いた場合についてより詳細に検討を加える.

（2）Dial 法による検討

(a)　事例(1)

期待最小コストの問題点を明らかにするために，簡単なネットワークに確率的利用者均衡配分を行った場合で検討する．検討するネットワークは，図-6 に示すネットワークである．なお，図-6 に示すネットワークは，発生集中点 1 及び 3 から見て対称なネットであり，ここでは「対象ネット」と呼ぶ．また，リンク④の距離 5km を 10km に変更したネットを「非対称ネット」と呼ぶことにする．さらに，発生集中点 1 及び 3 のゾーン間配分交通量を 5,000pcu とする．分散係数 θ は，1,10,100（／時間）の 3 種類とする.



注）数字はノード番号，○数字はリンク番号，その他はリンク条件を表す

図-6　検討対象ネットワーク

Dial 法による配分から得られるゾーン 1，3 に対する期待最小コストの配分回ごとの変化を図示したものが図-7，8 である．なお，以下の図-7～9 ではゾーン 3→1 の方向を 1，ゾーン 1→3 の方向を 2 と表記する.

対称ネットの期待最小コストの変化を見ると，初期実行可能解（収束回=0）をはじめとする全計算回で，両方向の期待最小コストが等しく変化している．これに対し，非対象ネットのケースでは，初期段階から両方向の期待最小コストに相違がみられる．さらに非対象ネットで分散係数の小さな場合には最終的に収束した状態でも両方向の期待最小コストに大きな差がみられる.

分散係数の大きな場合には確定的均衡配分に近づき，経路集合は最短経路に近いものによって構成され，その変化も最初のうちのみであり 4 回目位からはほぼ一定値を示すようになると同時に，両方向の期待最小費用がほぼ等しくなっている．分散係数が小さい場合にはランダ

ムに経路が選択される状況に近づき，収束計算回毎に選択される経路集合が異なり，結果として期待最小コストに変動が発生する．

ここで，非対象ネットで，分散係数$\theta=1$ の場合について，期待最小コストの式(13)の右辺をログサム値と最小コストに分けて示すと図-9 のとおりとなっている．これらによると，最小コスト項については，OD の方向による相違は少ないと共に大きな変動は見られないが，ログサム値については方向による相違が大きく，かつ大きく変動している．この変動は Dial 法により選択された経路集合が配分回毎に異なることによるものであると考えられる．

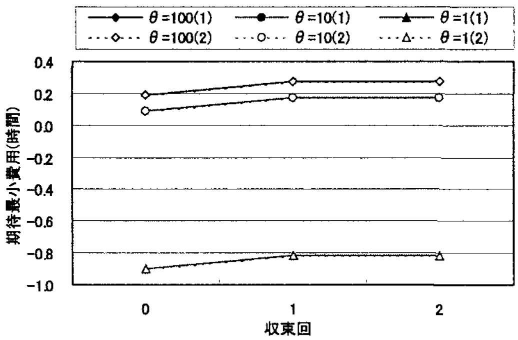


図-7　期待最小コストの変化（対称ネット）

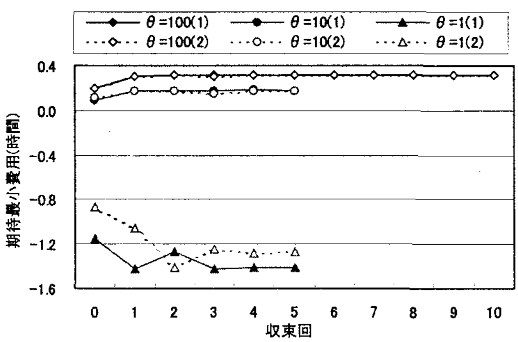


図-8　期待最小コストの変化（非対称ネット）

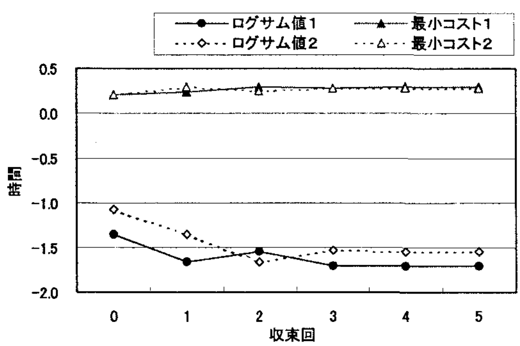


図-9　非対象ネットの期待最小コストの内訳

(b) 事例(2)

前述の沖縄本島のネットワークを用いた事例示す．ゾーン間距離が大中小のゾーンペアーA，B，Cについて収束回毎の期待最小コストの変化を示したものが図-10である．この配分では，ＯＤ交通量を対称行列としたものを用いているため，理論的にはＯＤの方向に関わらず期待最小コストは同じ値となるべきものである．しかし，期待最小コストの変化は，分散係数が小さくなる（認知誤差が大きくなる）に従って，ＯＤの方向による差が大きくなっていることが分かる．

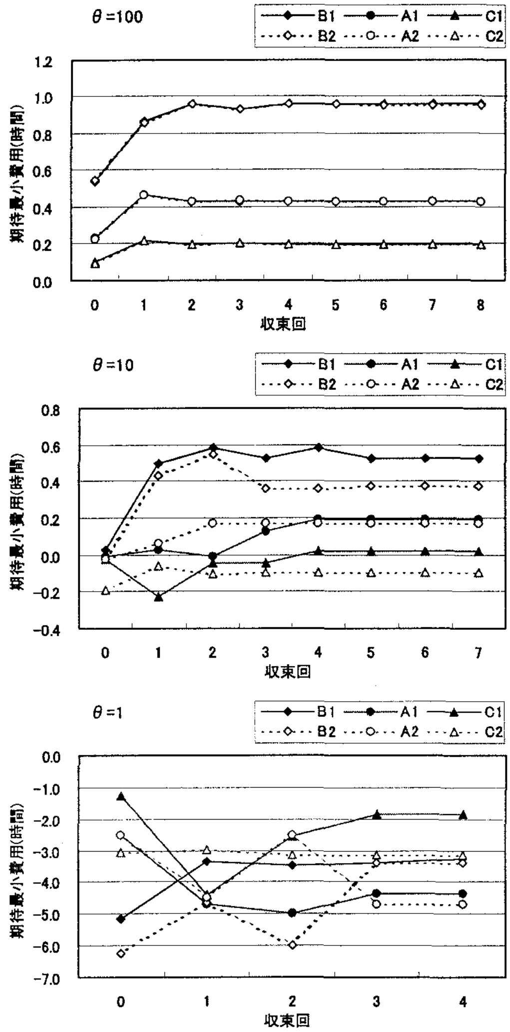


図-10　期待最小コストの変化（沖縄ネット）

ここで，全てのＯＤペアーについて，ＯＤ方向別に算定された期待最小コストの差を求め，OD 間の最短距離を横軸にとって表示したものが，図-11 である．これによると，距離帯が 20 ｋｍ程度を中心に全距離帯にわた

って OD の方向間で差が発生している．より分かりやすくするために距離帯別に誤差率（期待最小コストの差の平均÷平均期待最小コスト）でまとめると図-12 に示すとおりである．これによると，期待最小コストのみならず理論的に対称であるべき最小コストにも方向による誤差が発生している．最小コストに差がでるのは，確率配分による配分交通量が OD の方向によって異なり，方向別のリンクコストが異なるために最短経路も異なってくるためと考えられる．また，図-12 において最小コストの誤差率は全距離帯でほぼ同様の値を示すが，期待最小コストの誤差率は OD 間距離の短い 10km 前後で大きくなっている．最小コストの差は距離に比例して増加していると言えるが，期待最小コストの差は，往復の経路の重複が少ないほど大きくなるものであることから，OD 間距離が長くなるほど往復で同一リンクが経路として選択される割合が高くなり距離に比例して誤差が増加しないためと考えられる．

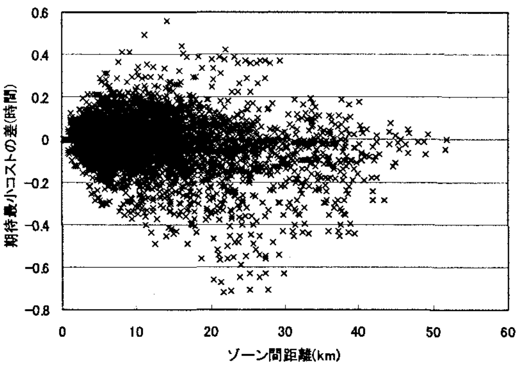


図-11　距離別・期待最小コストの方向別相違（Dial 法）

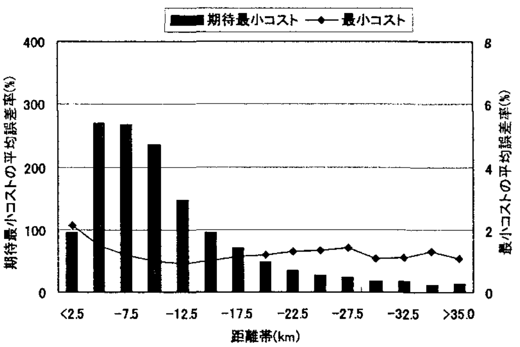


図-12 距離帯別期待最小コスト及び最小コストの誤差

(c) Dial 法の改良可能性

２つの事例で見たように，Dial 法を用いた確率的利用者均衡配分では，期待最小コストがネットワークのわずかな非対称性により大きく変化することが分かった．この原因として，Dial 法のアルゴリズムが原因と考えら得る．Dial 法ではノード i から j に進むとき，起点からの最短経路を後戻りするようなリンク尤度は０となる．そのため，前述の図-13 に示すようなループ状のネットワークにおいては，最短経路とならない経路が無視される（経路として処理されない）という問題が発生する．図-13 においてノードｂがゾーンｒｓ間の中点になく経路ｒ→ａ→ｓのコストが経路ｒ→ｂのコストより小さい場合，すなわち $c^{rb} \geq c^{ras}$ 場合には，経路ｒ→ｂ→ｓ選択されない．ところが，繰り返し計算の過程では，経路ｒ→ａ→ｓに交通量が配分されることによりリンク１のコストが上昇し $c^{rb} < c^{ras}$ となる場合には経路ｒ→ｂ→ｓも経路に採用され，この時，期待最小コストも大きく変化する．Dial 法による確率配分を用いた確率的利用者均衡配分では，事例で示したように収束計算回毎に異なる経路集合と期待最小コストが得られる可能性が非常に高く，経路集合が変化しないケースはまれであると考えられる．また，各回の経路集合の影響が最終回の交通パターンから得られる期待最小コストに反映されていないという問題もある．

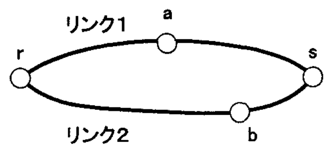


図-13 経路集合に問題が発生するネットワーク例

なお，これらの問題に対処するため，Leurent[10] は経路集合を初期状態で作成し，以後この経路集合に配分するという Dial 法を改良した配分方法を提案している．この方法を用いた場合，経路集合が初期値で決まっているため期待最小コストが計算過程で振動することは避けられるが，初期の準備作業で経路に加えられなかった「明らかに経路となり得る」経路については，最後まで採用されることはなく，その有効性については疑問である．

（３）SD 法による検討

SD 法でも列生成フェイズにおいて経路を追加する際，追加経路として最短経路を対象とする場合には経路が無視されてしまうのは Dial 法と同様である．しかし，SD 法では経路集合は増加するだけで減少しないため，振動は発生しない．また，Dial 法に比べ，SD 法では経路を明示的に選択するため，得られる経路が少なく，かつ最短経路に近いものとなることから期待最小コストの両方向の差は少なくなる(図-14)．

期待最小コストを用いた場合に不安定となる原因を見

るため，整備延長 10km の場合について，整備前後の OD ペアー別経路数を調べた結果が図-15，16 である．図-15 は，整備前後の経路数別 OD ペアー数の割合を示したものである．なお，OD ペアーは交通量のある OD ペアーのみを対象としている．これによると，整備後は経路数が減少している．また，図-16 は，整備前後での経路数の変化を示したものであり，整備前よりも整備後に経路数が多くなっている OD ペアーよりも，整備後に経路数が減少している OD ペアーが多いことを示している．これは，道路整備が行われることにより，一般化費用が小さくなった整備対象道路を通過する経路を利用する OD ペアーでは，整備前に比べ他の経路が選択されにくくなったためである．

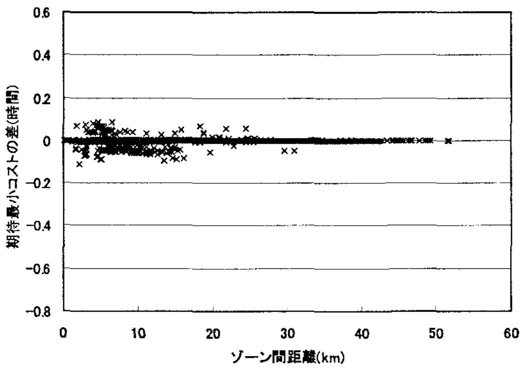


図-14　距離別・期待最小コストの方向別相違（SD 法）

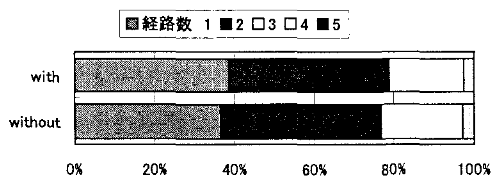


図-15　経路別 OD ペアー数構成比

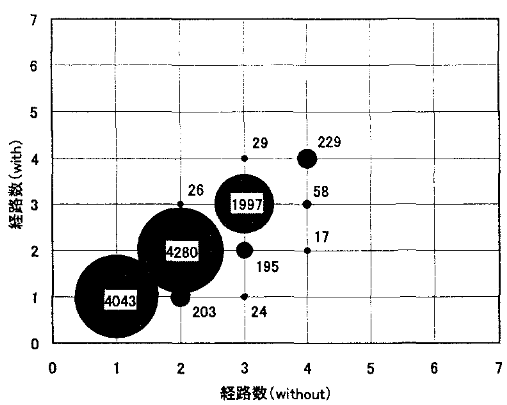


図-16　整備前後別経路数の変化

また，期待最小コストは，幾つかの特徴的性質を持っているが，中でも次式で示すように「経路集合のサイズに関して単調減少関数」であるという性質がある．

$$S(c_1,\cdots,c_k,c_{k+1}) \le S(c_1,\cdots,c_k) \tag{14}$$

そのため，整備後に経路数が少なくなるだけで期待最小コストは整備前より増加し，便益としてマイナスとなる OD ペアーが多くなる．このことから，道路整備が行われ，一般化費用の小さな道路が出現することで，経路集合に含まれる経路数が整備前よりも減少することが，便益計算において不安定になる原因と考えられる．実際に，整備前の経路数と整備後の経路数の差別に便益（走行台時）の平均値を求めると，表-3 に示すとおりであり，整備後に経路数が減少した場合には走行台時がマイナスとなっていることが分かる．

表-3　経路差別平均整備効果

経路差	-2	-1	0	1	全体
便益	-0.106	-0.047	0.002	0.048	0.000

注）経路差＝Without の経路数－With の経路数

以上のことから，SD 法では多くの経路を抽出するか，あるいは整備前後の経路集合の変化を抑えることによって期待最小コストの問題が解決できるものと考えられる．

5．経路選択問題の簡便な改良法

確率的利用者均衡配分で期待最小コストを用いた整備効果の計測上の問題は，経路集合にあることが分かった．そのため，経路集合を明示的に扱う SD 法においては，問題への対応が可能と考えられ，簡便な対応方法について検討した．

（1）Dijkstra 法 [11] のプログラミング上の改良（改良１）

SD 法の経路数が少ないことと，収束計算の回数が UE のように多くならないことから，少しでも多くの経路を抽出することは有意義である．特に，収束回数が少ないため，初期条件の影響がいつまでも残る．そのため，初期の最短経路探索においてできるだけ多くの経路を抽出する方法を試みる．

Dijkstra 法による最短経路の探索では，起点より各ノードまでの複数の経路の中で一般化費用が最小である経路のみを残していく方法が取られている．最小であるか否かを判断する場合，一般化費用が等しい場合にはプログラム上で等しい（=）条件を含むか否かで異なる経路が選択される．これは，従来から行われている分割配分においてプログラムが異なるとまったく異なる結果が得られることで知られている問題である．例として簡単な

ネット上で経路1→2の場合について等しい条件の有無による最短経路探索結果を図-17 に示す．図-17 の太線で示した経路が発生点1から全ノードまでの経路であり，等号の有無によりまったく異なる最短経路が選択されていることが分かる．

このことから，経路探索において等号条件を含むか否か別に最短経路を 2 回探索することで，1 度に 2 本の経路が選定できる可能性が高まる．ただし，複数の最短経路が取られるのは収束計算の初期段階に多く見られる．

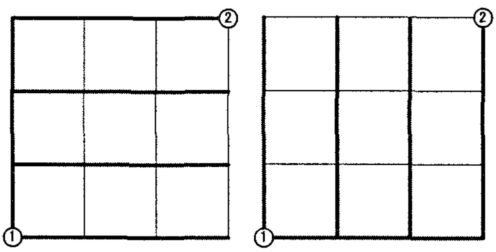


図-17　Dijkstra 法に経路探索例

沖縄ネットで，列生成フェイズにおいて，Dijkstra 法による最短経路探索時にコストが等しい条件の有無により 2 本の最短経路を追加する方法を適用した．整備延長 10km の場合で，1 回の経路探索において複数の経路が選択された OD ペアー数を見ると，1 回目に 14 ペアー，その後 4 回目までに計 8 ペアーで 2 経路が同時に選択された．また，最終的に採用された経路数を OD ペアー別に比較すると，11 ペアーで改良 1 の方法で経路数が多くなっていた．

便益計算の結果を図-18 に示す．これによると，期待最小コストを用いた場合についても，他の指標と類似した効果が計測できている．

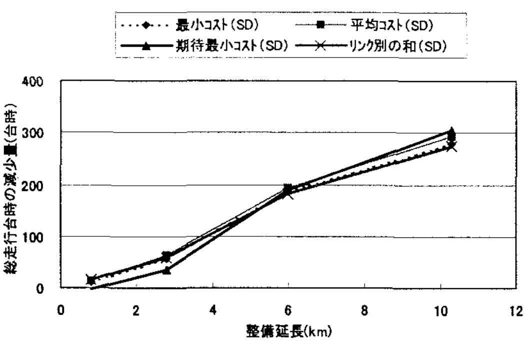


図-18　整備延長別整備効果（改良１）

さらに，整備前後の経路数の変化を示すと図-19，20 となる．前述の単に 1 本の最短経路を採用した場合の図-15，16 と比べると，整備前後で経路数が変化している OD ペアー数が減少していることが分かる．

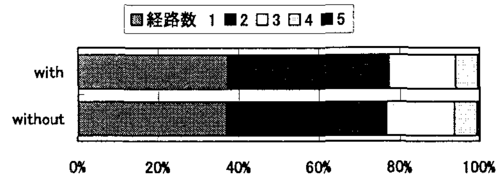


図-19　経路別 OD ペアー数構成比（改良１）

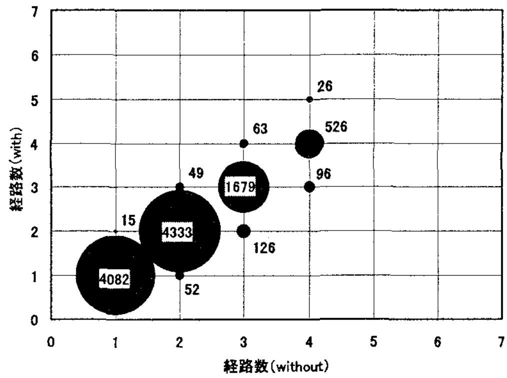


図-20　整備前後の OD ペアー別経路数の変化（改良１）

しかし，経路差別の平均走行台時を求めると，表-4 に示すとおりであり，整備後に経路数が減少している OD ペアーについてはマイナスとなっている．このことから，改良 1 で効果計測ができているように見えてはいるものの，OD ペアー別では依然として計測上の問題が残されている．

なお，この改良法では，最短経路の探索で 1 つのノードに接続している最初の最短リンクと最後に見つかった最短リンクのみ考慮され，途中で見つかった最短リンクについては無視されてしまう．しかし，収束計算の初期段階で少しでも多くの経路を探索する主旨からみれば大きな問題ではない．

表-4　経路差別平均整備効果（改良１）

経路差	-2	-1	0	1	2	全体
便益	-0.043	-0.034	0.002	0.041	0.075	0.002

注）経路差＝Without の経路数－With の経路数

（２）経路集合の固定による改良（改良２）

以上の経路探索方法による改良では，整備前後の経路が完全には一致することはない．そのため，期待最小コストによる評価の問題が改善はされるものの依然として問題が残されたままとなっている．ここでは，整備前後の配分で用いる経路集合を同一のものとする方法を提案する．

経路集合の変化を抑える究極の方法は，整備前後の配

分において同一の経路集合を用いることである．しかし，この同一の経路集合は，整備前あるいは整備後で抽出される経路集合を含んでいる必要がある．そのため，整備前後の配分において列生成フェイズでそれぞれ抽出された経路の和集合を取ることで経路集合を固定する．この配分方法は，以下の手順となる．

① 整備前後の配分に共通して利用できるネットワークを作成する
② 整備前と整備後のネットワーク条件をそれぞれ設定し、SD 法により整備前後の配分を実施し，それぞれの経路集合を作成する
③ 得られた整備前後の経路集合の和集合を取った経路データを作成する
④ 作成した経路データを用いて，再度整備前後のネットワークを用いて限定親問題を解く

なお、新規道路の整備では、固定された経路の一部が新規道路を利用する設定になるが、整備前の新規道路のリンクコストは無限大（閉鎖）に設定されるため、経路コストは無限大となり、結果として整備前の新規道路の配分交通量はゼロとなる。経路集合を固定する方法を適用した場合の結果は，図-21 及び表-5 に示すとおりであり，全ての指標がほぼ一致する結果が得られた．このことから，経路を固定することで配分モデルと整合の取れた期待最小コストによる評価が可能と考えられる．

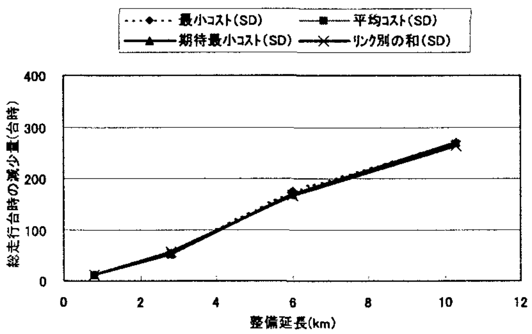


図-21　整備延長別整備効果（改良２）

表-5　改良方法別整備効果

配分方法	コストの算定方法	整備延長別整備効果（台時）			
		0.8km	2.8km	6.0 km	10.3km
SD 法(改良 1)	最小コスト	11.8	57.9	186.3	278.3
	平均コスト	15.3	64.0	195.3	292.4
	期待最小コスト	-1.5	35.1	188.5	305.5
	リンク別の和	16.0	58.0	183.0	274.0
SD 法(改良 2)	最小コスト	12.0	54.9	175.8	271.1
	平均コスト	11.5	53.3	170.5	268.8
	期待最小コスト	11.4	52.9	170.6	270.6
	リンク別の和	11.0	56.0	167.0	263.0

なお，表-5 によると，経路を固定しない改良１の場合と経路を固定した改良２の整備効果に差が見られる．SD 法による解は，限定された経路集合に対しての厳密解を得るものであるが，全ての経路を考慮した元の問題に対しては近似解となっている．このことから，改良１よりも改良２で用いる経路集合の方が大きく，改良２の方法で得られた解が，経路数が多い分だけ元の問題の解に近づいていると考えられる．

なお，加藤ら [12] は，交通量によってリンクコストが変化しない鉄道プロジェクトについて本研究と同様の 3 種類の指標を用いて便益計算を実施し，便益の大小は対象ネットワークの条件及びプロジェクトの特性（新規整備の有無など）によって決まることを示している．本研究では，いずれの一般化費用を用いた場合でも，その差である便益はほぼ同一になっており，混雑を考慮しない鉄道プロジェクトの便益の大小関係とは異なっている．

6．おわりに

確率的利用者均衡配分による整備効果の計測にあたって期待最小コストがモデルと整合が取れた指標として利用されるが，整備量に比べ大きく変動して不安定な状態になることが多いことを実証的に示した．また，その原因の１つとして解法にあることも示した．ここで示した期待最小コストの計測上の問題点については，固定需要のモデルのみならず需要変動型となる時間帯配分モデルや統合モデルにおいてもあてはまるものであり，これを実証的に確認したことの意義は大きい．

本研究では，経路集合を明示的に扱う SD 法おいて，期待最小コストが不安定になる原因が整備前後の経路集合の相違にあることを示した．また，経路集合の抽出方法の改良について検討を加えた，実用的には整備前後の経路集合を固定する方法により期待最小コストを用いた整備効果の計測が可能であることを示した．しかし，マスタープランのように多くの配分ケースが存在する場合，あらゆるケースを事前に網羅できない場合には適用が困難である．また，確率的利用者均衡配分を用いた統合モデルなどでも，経路を固定する方法の適用に課題が残されている．

なお，本論文をまとめるにあたり，多くの貴重なコメントを下さった査読者の方々に，ここに深く感謝の意を表します．

参考文献

1) 道路投資の評価に関する指針検討委員会偏："道路投資の評価に関する指針(案)", 1998.
2) 土木学会：交通ネットワークの均衡分析, 1998.
3) Dial : A Probabilistic Multipath Traffic Assignment Algorithm Which Obviates Path Enumeration, *Transportation Research* 5,

pp.83-111, 1971.
4) 赤松隆, 土屋裕二, 河上善博：確率的均衡配分のいくつかの計算アルゴリズムとその比較, 土木計画学研究・論文集 7, pp.89-96, 1990.
5) Damberg, J.T.Lundgren, M.Patricksson : An Algorithm for the Stochastic User Equilibrium Problem, *Transportation Research* 30, pp.115-131, 1996.
6) Fisk: Some Developments in Equilibrium Traffic Assignment, *Transportation Research* 14B, pp.243-255, 1980.
7) Braess D. : Uber Ein paradoxon der Verkehrsplanung, *Untemehmenforshung* 12, pp.256-268, 1968.
8) Murchland J. D. : Braess's Paradox of Traffic Flow, *Transportation Research* 4, pp.391-394, 1970.
9) 羽藤英二, 村上公一：道路容量のパラドクスに関する再考察, 土木計画学研究講演集 No.26, No.182, 2002.
10) Leurent F. : Curbing the Computational Difficulty of the Logit Equilibrium Assignment Model, *Transportation Research* B, Vol.31, No.4, pp.315-326, 1997
11) Dijkstra, E.W. : A Note on Two Problems in Connection with Graphs. Numer Math, 1, pp.269-271, 1959.
12) 加藤浩徳, 金子雄一郎, 井上真志：交通プロジェクトの利用者便益評価における OD 間代表一般化費用に関する諸問題, 運輸政策研究, vol6, No1, pp.23-38, 2003.

確率的利用者均衡配分を用いた整備効果の計測に関する実証研究*

吉田禎雄**・原田昇****

確率的利用者均衡配分による期待最小コストを用いた整備効果の計測が不安定となるという実務上の問題がある. 本研究では, この原因の１つが経路集合の問題であることを実証的に示した. その上で, 経路集合を明示的に扱う SD 法おいて, 経路集合の抽出方法の改良と, 整備前後の経路集合を固定する方法を提案し, これらの方法を適用することにより整備効果の計測が安定して可能となることを示した.

A Study on Evaluation of Road Investment by Stochastic User Equilibrium Assignment Model*

By Yoshio YOSHIDA** • Noboru HARATA***

There is a practical problem that the measurement of the user benefit using the inclusive cost by stochastic user equilibrium assignment becomes unstable. We show an empirical reason that it has the problem of path set to this cause. We propose the extraction method of path set and the method of fixing path set, and measurement of the user benefit being stabilized by applying these methods on the Simplicial Decompositon method, which treats a path set clearly.