

# 道路ネットワークにおける所要時間の平均と分散を考慮した最適経路決定手法に関する研究\*

## A Route Choice Model Considering Mean Travel Time and Its Variance on Road Networks \*

有馬和輝\*\*・安東直紀\*\*\*・谷口栄一\*\*\*\*・山田忠史\*\*\*

By Kazuki ARIMA\*\*・Naoki ANDO\*\*\*・Eiichi TANIGUCHI\*\*\*\*・Tadashi YAMADA\*\*\*

### 1. はじめに

急速なIT技術の普及などにより、ビジネスは高度化、高速化の一途を辿っている。それに伴い、現代社会は非常に時間制約の強い社会となっており、公共交通機関や、貨物の配送業などにおいては、Just-in-Timeが原則であるといえる。したがって、道路利用時における所要時間の大幅な変動は重大な問題であり、いかにして遅刻も早着もすることなく、予定通りの時刻に目的地に到着するかということは、道路利用者にとって重要な関心事項の一つである。そこで、道路利用者にとって、所要時間変動を考慮した経路評価は経路を選択する際に有効であり、定量的に評価可能である評価手法の構築が必要であるといえる。

### 2. 本研究の位置付け

道路ネットワークを対象とした信頼性評価手法は多くの研究者により提案されているが、そのなかでも代表的なものとして、所要時間信頼性、容量信頼性、連結信頼性などが挙げられる。また、経路の所要時間に関する信頼性手法としては、変動係数を用いた解析や、累積頻度分布を用いた解析などがある。変動係数を用いた解析では、平均値と標準偏差が比例関係にある2つの経路を等価に評価してしまうという点が、累積頻度分布を用いた解析では経路を定量的に評価しにくいという点が問題点としてあげられている。これらの研究は、いずれも好ましくない事象が発生する確率を考えたものであり、いわゆる工学的リスクの視点に基づく研究であるといえる。

これに対し経済学では、ある事象の変動の大きさをリスク

\*キーワード: 交通情報、経路選択、交通ネットワーク分析

\*\*学生員、学士(工)、京都大学都市社会学専攻

(京都市西京区京都大学桂C1、

TEL075-383-3231、FAX075-950-3800)

\*\*\*正会員、博士(工学)、京都大学都市社会学専攻

(京都市西京区京都大学桂C1、

TEL075-383-3231、FAX075-950-3800)

\*\*\*\*フェロー、工博、京都大学都市社会学専攻

(京都市西京区京都大学桂C1、

TEL075-383-3231、FAX075-950-3800)

として扱う。Jackson and Jucker<sup>1)</sup>は道路利用者が複数の交通手段を用いた経路を決定する際に経路の平均所要時間と重み付き分散の和が最小となる経路を選択すると仮定し、分散の重みパラメータをSP調査により求めている。Polak<sup>2)</sup>は道路利用者の効用関数について、経済学<sup>3) 4)</sup>の場合と同様に二次多項式を用いることで期待効用を経路の所要時間の平均と分散の線形和で表されるとしている。また、現代ポートフォリオ理論<sup>5)</sup>の平均分散アプローチ<sup>6)</sup>を道路ネットワークに適用した研究としてはSen<sup>7)</sup>らの研究があげられる。この中で道路利用者の効用を所要時間の二次関数で表せると仮定し、経路の接続条件を線形緩和した二次計画問題を解くことで最適経路となる候補を削減し、多目的最適化モデルによりVORとVOTの比により最適な経路が変化する可能性があることを示している。また、Senna<sup>8)</sup>は到着時刻制約の有無や通勤交通であるか否かなど多様な条件下でのVO T/VORをSP調査により求める手法について検討している。

川本ら<sup>9)</sup>による先行研究において、所要時間の不確実性を考慮した配車配送計画により配送を行う場合、所要時間の平均値を用いて得られた最短経路に比べ、経路学習により得られた経路を用いた方が配送コストを削減できる可能性があることが示された。つまり、所要時間の平均値に基づく最短経路に比べ、所要時間の平均値は大きくなるが、標準偏差の小さい経路を用いた方が、総配送コストの面で有利になる可能性を示している。

そこで、安東ら<sup>10)</sup>は都市内道路ネットワークにおける経路を評価する際に、平均所要時間に加えて、所要時間の標準偏差に着目し、これら二つのパラメータを同時に用いて経路を評価する指標を提案している。

本研究では、安東らによって提案された平均所要時間と所要時間の標準偏差を考慮する指標を最適化する経路決定手法を構築する。また、ケーススタディとして実際の道路ネットワークに適用し、本手法の有効性について検討する。

### 3. 平均分散アプローチ

所要時間の平均値と分散という二つのパラメータを用いて経路評価を行うにあたり、本研究では主に証券市場などで用いられている現代ポートフォリオ理論<sup>5)</sup>における平均分散アプローチ<sup>6)</sup>を援用する。

平均分散アプローチは、ある投資対象が投資家に与える効用を期待収益率と収益率の分散の関数として表現することで、その投資対象の評価を行うものである。ここで、投資対象の市場における価格が確率変数として表せるものとする。個々の投資対象を道路ネットワークにおけるリンクに、投資対象の組み合わせであるポートフォリオをリンクの組み合わせである経路に対応させることで平均分散アプローチを道路ネットワークへ援用する。

投資においては、複数の投資対象を比較するときに、期待収益率が等しい場合、収益率の分散が小さい方が選択される、すなわち投資家が危険回避型の行動をとると考えるのが合理的である。一方、交通行動を考えた場合、道路ネットワークの各リンクにおける所要時間が確率変数であるとする、道路利用者の経路選択では多様な評価基準が想定される。しかし、対象を都市内物流に限定すると、道路利用者が目的地までの所要時間に関して、同じ平均所要時間であれば、利用者の行動は危険回避型、すなわち、その分散は小さい方が好ましいと考えらる。

また証券市場ではポートフォリオに含まれる証券の保有比率は自由に決定可能であるが、道路ネットワークにおける経路を一つのポートフォリオとして扱う場合、ポートフォリオは複数のリンクの組み合わせで表されるが、ポートフォリオに含まれる各リンクは接続している必要があることが制約条件として加わる。このように道路ネットワークを対象とした分析に平均分散アプローチを適用する場合、証券市場を対象とした解析に加え、いくつかの付加的な条件を考慮する必要がある。

評価対象経路の平均所要時間、所要時間の分散を、経路に含まれるリンクの所要時間から計算する。それらは以下の式で計算される。

$$\tilde{t}_p = \sum_{i=1}^n \tilde{t}_i \quad (1)$$

$$\mu_p(\tilde{t}_p) = \sum_{i=1}^n \mu_p(\tilde{t}_i) \quad (2)$$

$$\sigma_p^2 = \sum_i \sum_j \sigma_{ij} \quad (3)$$

ここに、

$\tilde{t}_i$  : リンク  $i$  の所要時間

$\tilde{t}_p$  : 経路  $p$  の所要時間

$\mu_p(\tilde{t})$  : 所要時間  $\tilde{t}$  の平均所要時間

$\sigma_p^2$  : 経路  $p$  の分散

$\sigma_{ij}$  : リンク  $i$  とリンク  $j$  の所要時間の共分散

なお、上部にチルダのついている変数は確率変数である。

本研究では、上記の式(1)、(2)、(3)により、所要時間の平

均値と所要時間の標準偏差を求め、それら二つの値をパラメータに持つ関数を仮定し、この関数の値により経路の評価を行うこととする。

#### 4. 経路の評価関数

経路の平均所要時間  $\mu$  と所要時間の標準偏差  $\sigma$  をパラメータに持つ評価関数を定めるため、次のような仮定を設ける。道路利用者は、平均所要時間  $\mu$  および所要時間の標準偏差  $\sigma$  の小さい経路を選考する。また、平均所要時間  $\mu$  が等しい場合、所要時間変動によるリスクを小さくするために、より所要時間の標準偏差  $\sigma$  が小さい経路を選好すると考えられる。さらに、 $\mu$  と  $\sigma$  の限界代替率は、現状での充足度合いによって変化すると考えられるので、無差別曲線は原点に対して凹性を示す。これらの仮定を反映した式(4)を経路の評価関数とする。

$$U = (\mu_p^2 + (\alpha \sigma_p)^2)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ここに、

$U$  : 経路の評価関数値

$\mu_p$  : 経路の平均所要時間

$\sigma_p$  : 経路の所要時間の標準偏差

$\alpha$  :  $\sigma_p$  が評価関数に与える影響の大きさを表す正のパラメータ

式(4)の評価関数を三次元座標にプロットしたものを、図1に示す。

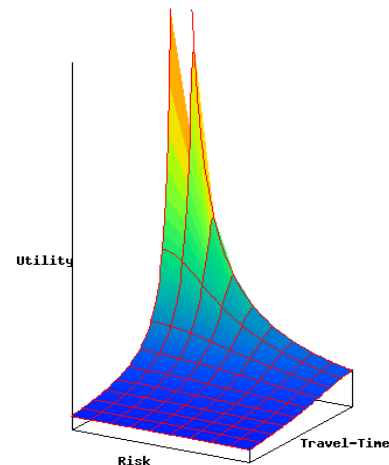


図1 評価関数の3次元プロット

#### 5. 最適経路決定手法

道路ネットワークにおいて、ある出発地と目的地を結ぶ経路の中から、所要時間の平均と標準偏差を考慮した最適な経路を決定するため、式(4)の評価関数値が最大となる経路を求める。その手順は以下の通りである。

- まず、Eppstein<sup>11)</sup>によるk-最短路問題を解くアルゴリズムを用いて、出発地と目的地を結ぶ経路について所要時間の平均値の小さいものから順に探索を行う。
- 得られた各経路について、所要時間の標準偏差を求め、 $\mu - \sigma$  平面上にプロットする。
- 各経路の  $\mu$ 、 $\sigma$  をプロットした散布図に、評価関数値が等しい  $\mu$ 、 $\sigma$  の組み合わせの集合である無差別曲線を描く。
- 複数ある無差別曲線のうち、最も大きな評価関数値を示す無差別曲線に含まれる経路が評価関数値最大経路となる。

得られた評価関数値最大経路を最適経路とする。上述の最適経路を決定する手法に関して、経路の散布図と無差別曲線の概念図を図2に示す。

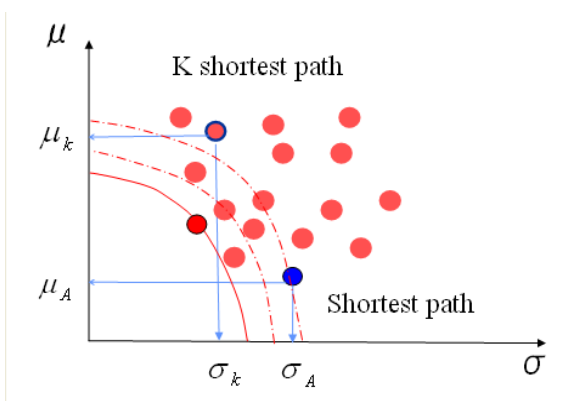


図2 経路の散布図と無差別曲線

$\alpha$  は所要時間の標準偏差が評価関数に与える影響の大きさを表すパラメータであるが、無差別曲線はこの  $\alpha$  の値によって変化する。したがって、 $\alpha$  の値が0のときには、所要時間の標準偏差を考慮しない、すなわち平均所要時間に関する最短経路が最適経路となる。また、 $\alpha$  の値が大きいほど、所要時間の標準偏差の小さい経路が最適経路として決定される。したがって、所要時間の標準偏差の重要度は  $\alpha$  の値により調整することが可能であり、所要時間変動の小さい経路を探索することが可能となる。

## 6. ケーススタディ

### (1) 対象道路ネットワーク

上述の手法の有効性を検討するために、実際の道路ネットワークに本手法を適用する。

大阪中心部の道路ネットワークの一部を対象ネットワークとする。ノード数は225、リンク数は789である。対象ネットワークを図3に示す。リンクの所要時間は平成16年10月1日から11月16日までの平日30日間における各日15時のVICSデータを用いた。

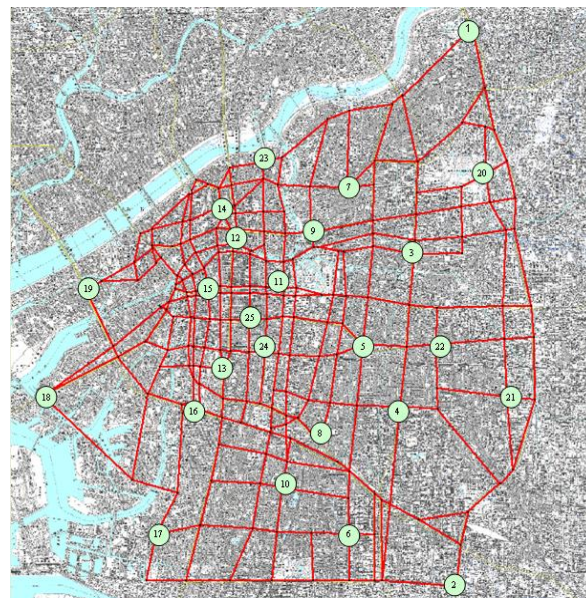


図3 大阪中心部ネットワーク

### (2) 最適経路の決定

図3のネットワークにおいて、出発ノードを16番ノード、目的ノードを1番ノードとする経路について考察する。このODを持つ各経路について、各リンクの所要時間情報から、所要時間の平均  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$  を算出し、図4にこの散布図を示す。

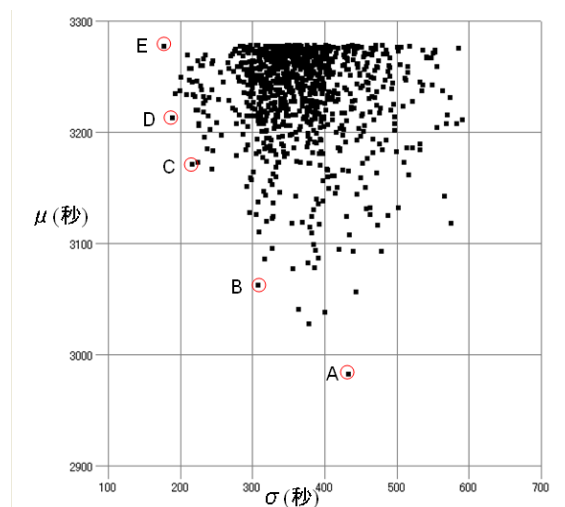


図4 出発ノード16 目的ノード1の経路の散布図

上述の手法に従って評価関数値が最大となる経路を探索した。図4の各経路の散布図のうちA~Eの経路が  $\alpha$  の値により評価関数値最大経路となりえる。それぞれの経路が評価関数値最大経路となる  $\alpha$  の値を表1に示す。また、例として経路A,B,Eを図5に示す。

### (3) 結果・考察

表2にA~Eの各経路についての平均所要時間と所要時間の標準偏差を示す。平均所要時間に関する最短経路、

つまり経路 A の所要時間の平均は 49.7 分、標準偏差は約 6.4 分であるのに対し、経路 E の経路の場合、平均が 54.6 分、標準偏差が約 3.0 分であることから、平均値はおよそ 5 分ほど所要時間が大きい、経路 E は所要時間信頼性の高い経路であるといえる。このように、所要時間の標準偏差を考慮する度合いに応じて  $\alpha$  の値を調整することにより、道路利用者のニーズに応じた最適な経路を決定することが可能であるということが本手法の特徴である。

表 1 評価関数値最大経路

評価関数値最大経路	$\alpha$
A	$0 \leq \alpha \leq 2.29$
B	$2.29 < \alpha \leq 3.75$
C	$3.75 < \alpha \leq 4.87$
D	$4.87 < \alpha \leq 10.13$
E	$10.13 < \alpha$

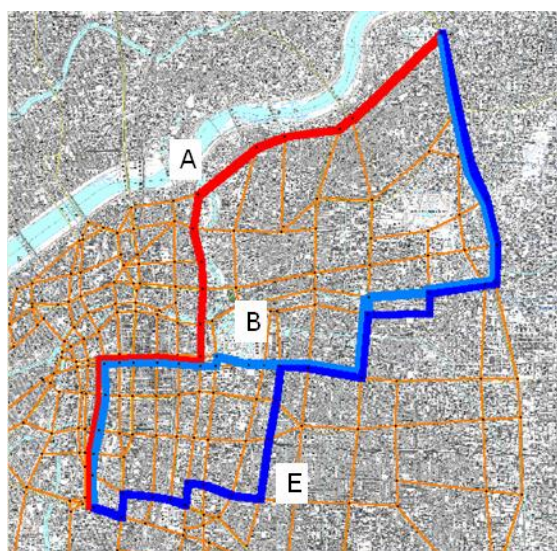


図 5 評価関数値最大経路

表 2 評価関数値最大経路の所要時間データ

	平均所要時間 (分)	標準偏差 (分)
A	49.71	6.43
B	51.04	5.13
C	52.85	3.60
D	53.56	3.13
E	54.62	2.95

## 7. 結論

本研究では、平均所要時間と所要時間の標準偏差をパラメータに持つ経路の評価関数を用いて、評価関数値が最大となる経路の決定手法の構築を行った。さらに実際の道路ネットワークに適用し、 $\alpha$  の値を調整することによって所要時間変動の小さい経路を決定することが可能

であることを示した。本手法の特徴として、比較的容易に経路を定量的に評価することができ、さらに所要時間変動に関して道路利用者のニーズに応じて最適経路を決定できるという点である。しかし、出発地と目的地の異なる経路について評価関数値を比較することはできないというデメリットもある。

最適経路決定手法において、評価関数における所要時間の標準偏差の影響の大きさを決める  $\alpha$  の値が最適経路を決定する上で重要であることから、道路利用者は、実際には経路を選択する際に所要時間のばらつきをどの程度考慮しているのかをアンケート調査等により調べることが、今後の課題として挙げられる。

また、本研究では、ネットワーク全体の所要時間情報を、特定の時刻におけるスナップショットにより表したが、今後はタイムスライスを考慮した経路の所要時間により比較・検討を行う必要があると考えられる。

## 参考文献

- 1) Jackson, W.B. and Jucker, J.V.: An empirical study of travel time variability and travel choice behavior, Transportation science, Vol.6, No4, pp.460-475, 1981.
- 2) Polak, J.: A more general model of individual departure time choice, PTRC summer annual meeting, Proceedings of seminar C, 1987.
- 3) Tobin, J.: Liquidity preference as behavior towards risk, The economic studies, XXV, pp.65-86, 1957.
- 4) Simm, H.W.: Economic decisions under uncertainty, North-Holland, 1983.
- 5) たとえば日本証券アナリスト協会編, 榊原茂樹, 青山讓, 浅野幸弘: 証券投資論, 第3章, pp110-160, 1991.
- 6) H. M. Markowitz: Portfolio Selection, Wiley, 1959.
- 7) Sen, S., Pillai, R., Joshi, S. and Rathi, A. K.: A mean-variance model for route guidance in advanced traveler information systems, Transportation Science, Vol.35, No.1, pp.37-49, 2001.
- 8) Senna, L.A.D.S.: The influence of travel time variability on value of time, Transportation, 21, pp.203-228, 1994.
- 9) 川本宗由, 谷口栄一, 山田忠史: アンツルーティンクを活用した配車配送計画手法の効果分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.32, CD-ROM, 2005.
- 10) 安東直紀, 谷口栄一, 山田忠史, 岡弦太郎: 平均分散アプローチを用いた経路の所要時間評価に関する研究, 第28回交通工学研究発表会論文報告集, pp.173-176, 2008.
- 11) Eppstein D: Finding the k Shortest Paths, SIAM Journal on Computing, Vol.28, No.2, pp652-673, 1998.