所要時間の不確実性を考慮した
平均－分散輸送戦略モデルの閉路解決法

崔　航[1]・佐々木　晋一[2]・長江　剛志[3]

[1]学生会員　電気通信大学大学院　情報システム学研究科（〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1）
E-mail:cuihang@rmss.is.uec.ac.jp

[2]非会員　マクセル精器株式会社（〒618-8558 京都府乙訓郡大山崎町鏡田45-101）
E-mail:ocean-sunfish@rmss.is.uec.ac.jp

[3]正会員　電気通信大学大学院　情報システム学研究科（〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1）
E-mail:nagae@is.uec.ac.jp

都市内輸送において，輸送サービスの効率化が強く求められている．実際，輸送業者は遅刻や早着といった問題がよく生じる．顧客からのペナルティを受ける一方，交通渋滞や環境負荷など問題も抱えている．最近，経路を選択するモデルにおいて，所要時間の期待値と分散を同時に考慮したモデルが提案された．本研究では，先行研究における閉路を含む非現実的な戦略が得られたことに対して，simplicial decomposition法を平均－分散モデルに適用し，閉路の出ない方法を開発する．

Key Words : *mean-variance model,cyclic-path,simplicial decomposition algorithm, route cost*

1.　はじめに

(1)　研究背景

都市の経済を支えている物流はわれわれの生活と切り離せない．近年，企業間の激しい競争により，物流の効率化，サービスの向上が求められている．特に，ジャストインタイム輸送に代表される輸送時間指定の輸送方式が一般化している．物流業者は様々な条件の下で，最適な配送計画を立案している．しかし，物流業者にとって，輸送コストを削減したいという大きなニーズがある．

都市内において，物流輸送の大多数はトラックが担う．そのため，トラック輸送が極めて重要な役割を果たしている．しかし，トラック輸送は様々な問題を抱えている．例えば，道路の所要時間を予測することが困難であるため，貨物の遅刻や早着といった問題が生じる．遅刻する場合は，貨物価値が低下したり，顧客からのペナルティを受けたりする．一方，早着する場合は，厳しい指定時刻を守るため，早めに出発し，目的地の近くで指定時刻まで待つ必要がある．しかし，周辺の交通渋滞，アイドリングによる二酸化炭素の排出量の増加などを招く恐れがある．到着時間のずれを減らすため，物流業者が事前に最適な経路を選択する必要がある．

(2)　既存研究と本研究の位置づけ

従来の経路選択モデルでは，出発地から目的地までの経路選択において，所要時間の期待値のみを指標にして，経路を決定する．しかし，実際は，ドライバーは経路を選択する際，所要時間の分散も考慮することが少なくなかった．近年，交通工学の分野では，道路ネットワーク上のリンクの所要時間が正規分布に仮定した上で，現代ポートフォリオ理論の平均分散アプローチを応用し，所要時間の平均（期待値）と分散を考慮した研究がいくつか提案されている．Sen[1)]は所要時間の平均－分散モデルを利用し，所要時間の期待値（平均）と分散の和が最小値となる経路の決定方法を構築した．安東[2)]はITSを活用した道路交通ネットワーク調査・評価手法に関する研究において，所要時間の平均と分散を考慮した経路評価指標を構築した．佐々木[3)]は，所要時間の不確実性を考慮した複数の経路に車両を分散させる輸送戦略を提案した．そこで，車両を分散させる戦略が，1つの経路に全車両を集中させる戦略より，車両1台あたりの平均経路所要時間ATT(*average travel time per unit vehicle*)の分散を抑えることができる．輸送業者にとっては所要時間の分散が少ない輸送戦略をとることで，早着や遅刻のリスクを下げられる．しかし，佐々木の研究において，閉路を含む非現実的な戦略が得られた．

本研究の目的としては，佐々木の平均－分散輸送戦略

をもとに閉路を生成しない解決法を開発する．

2. 佐々木の研究におけるモデルの2つ表現方法

(1) 経路変数を用いた平均－分散モデルの定式化

ある起終点の経路集合に全車両を配分した時，車両1台あたりの平均経路所要時間時間ATTが確立変数となり，交通量配分が変わるとATTの期待値と分散も変化する．式(2.1)はATTの期待値と分散を同時に最小化する輸送戦略を表す．

$$\min_{\mathbf{h}}.\ \mathbf{h}^T\boldsymbol{\mu} + \frac{\theta^2}{2}\mathbf{h}^T\mathbf{V}\mathbf{h} \tag{2.1}$$

$$s.t.\ \ \mathbf{h}^T\mathbf{1} = 1 \tag{2.2}$$

$$\mathbf{h} \geq \mathbf{0} \tag{2.3}$$

$$\mathbf{h},\boldsymbol{\mu},\mathbf{1},\mathbf{0} \in \mathbf{R}^{K\times 1}, \mathbf{V} \in \mathbf{R}^{K\times K}$$

ここで，$\mathbf{h}$はサイズが$K \times 1$のベクトルであり，経路交通量を表す．$\boldsymbol{\mu}$は$K \times 1$のベクトルであり，経路所要時間の期待値を表す．$\mathbf{V}$は$K \times K$の行列であり，経路間の分散共分散行列を表す．k行k'列の要素は$V_{k,k'}$で表現される．θは経路所要時間の分散の重みを表す．

経路変数を用いた表現方法は，もし経路集合が与件なら，最適な配分が2次計画問題の解として求められる．しかし，実際のネットワークにおいては，ある起終点間に膨大な経路が存在しており，それらを全て列挙することは極めて困難である．そのため，佐々木はリンク変数のみを扱う2次計画問題として平均－分散輸送問題に再定式化した．

(2) リンク変数を用いた平均－分散モデルの定式化

$$\min_{\mathbf{x}}.\mathbf{x}^T\mathbf{c} + \frac{\theta^2}{2}\mathbf{x}^T\boldsymbol{\sigma}\mathbf{x} \tag{2.4}$$

$$s.t.\ \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{q} \tag{2.5}$$

$$\mathbf{x} \geq \mathbf{0} \tag{2.6}$$

$$\mathbf{x}, \mathbf{c},\mathbf{0} \in \mathbf{R}^{L\times 1}, \boldsymbol{\sigma} \in \mathbf{R}^{L\times L}$$

ここで，$\mathbf{x}$はサイズが$L \times 1$のベクトルであり，リンク交通量を表す．$\mathbf{c}$はサイズ$L \times 1$のベクトルであり，リンク所要時間の期待値を表す．$\boldsymbol{\sigma}$は$L \times L$の行列であり，リンク間の分散共分散行列を表す．l行l'列の要素は$\boldsymbol{\sigma}_{l,l'}$で表現される．$\mathbf{A}$はノードリンク接続行列であり，行列$\mathbf{A}$の$n$行$a$列要素は，ノード$n$がリンク$a$の始点なら1，終点なら-1，そうでなければ0で表す．$\mathbf{q}$は定数であり，ノードnが出発点の場合は1，ノードnが到着点の場合は0で表す．θはリンク所要時間の分散の重みを表す．

リンク変数を用いた表現方法は，経路を列挙する必要がないため，佐々木はリンク変数を用いた平均－分散輸送問題を解いた．しかし，リンク変数表示平均－分散モデルの欠点は閉路を含む経路を除外できないため，非現実的経路戦略を得られた．それを解決するため，本研究は平均－分散輸送戦略に閉路の出ない方法を開発する．

3. 提案手法

(1) Simplicial decomposition法

交通工学分野でsimplicial decomposition法[5]は利用者均衡配分問題の解法として開発された．経路交通量を変数としたsimplicial decomposition法は経路集合を限定して，部分線形化法によって，目的関数の最適化を行い，各最適状態で次の新たな経路を加えて計算を繰り返して，新たな経路が生成されなくなると終了とする方法である．

本研究ではsimplicial decomposition法を経路変数を用いた平均－分散モデルに適用する．式(2.4)に部分線形化すると，以下の式が得られた．

$$\mathbf{t} = \mathbf{c} + \boldsymbol{\sigma}\mathbf{x} \tag{3.1}$$

ここで，$\mathbf{t}$はリンク不効用である．各繰り返しにおいて，リンク不効用$\mathbf{t}$の下で最短経路を探索し，生成された最小不効用経路を経路集合に逐次的に加えていく．得られた経路集合を与件として，最適な配分は2次計画問題の解として求められる．この方法では，経路交通量を未知変数として扱うため，あらかじめ経路を列挙する必要がない．そして，各繰り返しにおいて最短経路探索を行うため，閉路を含んだ冗長な経路が生成されない．それは平均－分散輸送モデルにおいて閉路を含む非現実的な戦略が得られた問題を解決できる．

(2) 平均－分散モデルに適用したsimplicial decomposition法のアルゴリズム

平均－分散モデルに適用したsimplicial decomposition法のアルゴリズムは以下のように述べる．

①適当な初期交通量配分$\mathbf{x}^{(0)}$及び初期経路集合$K^{(0)}$を与える，繰り返し回数$n=0$とする．

②交通量配分$\mathbf{x}^{(n)}$の下で，最小不効用経路$k^{(n)}$を求める．

③もし，求められた経路$k^{(n)}$が経路集合$K^{(n)}$に含まれていたら，終了する．そうでなければ，$K^{(n+1)} := K^{(n)} \cup k^{(n)}$として，ステップ④へ．

④経路集合 $K^{(n+1)}$ を与件とした交通量の最適配分を求める $\mathbf{x}^{(n+1)}$ とする．

⑤繰り返し回数 $n := n+1$ として，ステップ②へ．

4. 数値計算

(1) 計算条件

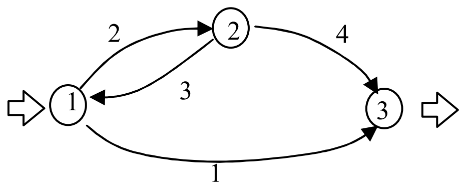

図-1 計算に用いた仮想道路ネットワーク

図-1はノード数3，リンク数が4の仮想道路ネットワークである．リンク上の数字はリンク番号を表す．リンク所要時間の期待値を与件として，リンク間の分散共分散行列が計算できる．

(2) 先行研究の手法を用いた数値計算の結果および考察

表-1 リンク変数を用いた平均ー分散輸送問題を解いた結果

θ	所要時間の期待値	所要時間の標準偏差
1	14	1.4
5	20.4	3
10	21.5	5.4
15	24.3	7.7
20	26.5	9.9
30	28	14.7

以下は分散の重みが各値を取る場合の輸送戦略の配分状況であり，リンク上の数値が配分比率を表す．しかし，**図-5**，**図-6**，**図-7**において所要時間の分散の重みが15,20,30を取った場合，ノード1と2の間に閉路が生じた．

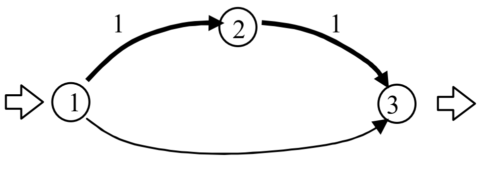

図-2 所要時間の分散の重みθ=１場合

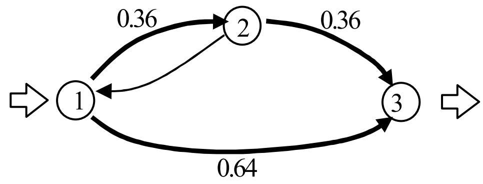

図-3 所要時間の分散の重みθ=5場合

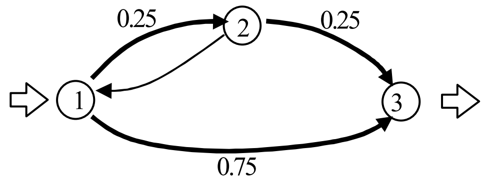

図-4 所要時間の分散の重みθ=10場合

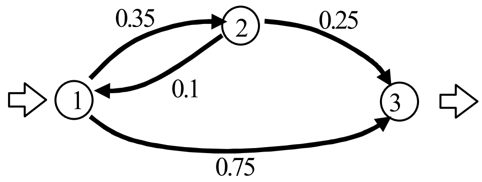

図-5 所要時間の分散の重みθ=15場合

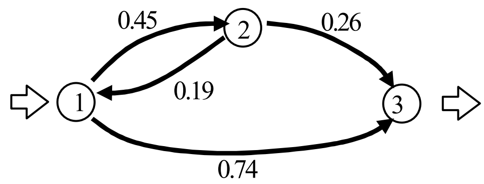

図-6 所要時間の分散の重みθ=20場合

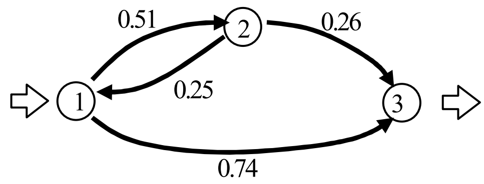

図-7 所要時間の分散の重みθ=30場合

(3) 本研究の手法を用いた数値計算の結果および考察

表-2 経路変数を用いた平均ー分散輸送問題を解いた結果

θ	所要時間の期待値	所要時間の標準偏差
1	14	1.4
5	20.4	3
10	21.5	5.4
15	21.75	8.1
20	21.83	10.8
30	21.88	16.1

本研究手法を用いた経路変数を表示された平均ー分散輸送問題を解いた結果は，所要時間の分散の重みが1,5,10を取る場合，輸送戦略の配分状況が先行研究の手法を用いた数値計算の結果と同じになった．そして，先行研究における所要時間の分散の重みを15,20,30にした場合，本研究手法を用いた最適な配分は以下である．

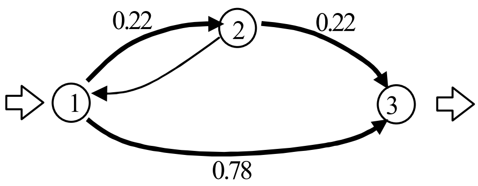

図-8 所要時間の分散の重みθ=15の場合

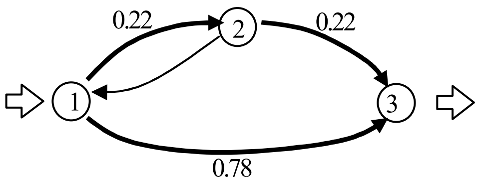

図-9 所要時間の分散の重みθ=20の場合

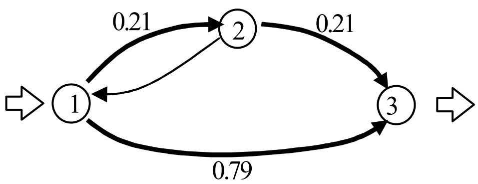

図-10 所要時間の分散の重みθ=30の場合

この結果により，平均ー分散輸送戦略は全車両を2つの経路に分散させた．しかも，先行研究のように，ノード1と2の間に閉路が生じさせないことがわかった．

5. おわりに

本研究は，simplicial decomposition法を経路交通量を未知変数とした平均ー分散輸送モデルに適用し，閉路を含む経路が生じさせない解決法を開発した．また，仮想道路ネットワークを対象として佐々木の研究で扱う手法と本研究で提案する方法を用いた計算例を示した．得られた結果により，本研究で提案手法の有効性を証明した．最後に，本研究の提案する方法を実ネットワークに適用し，パフォーマンスを測定する必要があると考えられる．

参考文献

1) Sen, S., Pillai, R., Joshi, S. and Rathi, A. K.:A Mean-Variance Model for Route Guidance in Advanced Traveler Information Systems. *Transportation Science* 35(1), pp.37-49,2001.
2) 安東直紀,谷口栄一,山田忠史,岡弦太郎:平均ー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論文報告集,173-176,2008.
3) 佐々木晋一:市内物流における起終点所要時間のバラツキを考慮した分散輸送戦略,電気通信大学大学院情報システム学研究科修士論文,2010.3.
4) Nagae, T. and Sasaki, S.: A Mean-Variance Approach to Mixed Strategies for Dispatching Problems under Travel Time Uncertainty,*The 14th Hong Kong Society of Transportation Studies International Conference,* Vol. 1, 189-196, 2009.12.
5) Larsson, T. and Patriksson, M.:Simplicial Decomposition with Disaggregated Representation for the Traffic Assignment Problem.,*Transportation Science* 26,4-17,1992.

RESOLUTION OF CYCLIC-PATH PROBLEMS ON MEAN-VARIANCE MIXED ROUTING PROBLEMS UNDER TRAVEL TIME UNCERTAINTY: A SIMPLICIAL DECOMPOSITION APPROACH

Hang CUI,Shin'ichi SASAKI and Takeshi NAGAE

The efficient of the transport services has become a necessary demand in urban transportation.But delays or arrive early are often occurred. This kind of problems are not only bring penalty to customers, but also lead to traffic congestion problem and environmental pollution. The model which consider both expected value and variance of travel times has been researched in the recent years. The proposal in this paper is based on previous research which proposed mean-variance mixed routing problems. It is a method that apply simplicial decomposition algorithm to a mean-variance model to resolve cyclic-path problems.