

複数コストの最適化のための配送経路計画問題の解法

M2007MM012 加藤圭喬

指導教員：河野浩之

1 はじめに

人々や車両移動するときの最適な経路を求める分析研究が行われている。Kimら [1] のような多くの研究では、時間や距離といったコストを用いて時空間の制約を判断し、最適（近似）経路を見つける研究がされている。このような研究問題を配送経路問題（Vehicle Routing Problem：VRP）という。

VRPでは、複数の車両で複数の配送経路を巡回することが考慮され、総移動距離をより削減することが求められる。さらに、行動できる時間枠（TW:Time Window）の制約を考慮する時間枠付き配送経路問題（Vehicle Routing Problem with Time Window:VRPTW）や配送先への到着時点などの制約を考慮する配送経路計画問題（Vehicle Routing Scheduling Problem:VRSP）が取り扱われるようになった。

VRPに関する研究が様々に行われているが、適用する事例により様々な制約や最小化するコストがある。例えば、ゴミ収集経路研究では積載制約 [1]、バスの運行計画では生徒数制約 [2]、現金輸送車の運用計画では作業時間制約 [3] というように、制約はばらばらである。このように事例ごとに制約に違いがあるため、各研究の理論をそのまま別の研究に適用することは難しい。そこで、本研究では、巡回先での滞在時間、複数人による巡回、TWを制約として考慮し、経路数、総移動時間、経路間の時間差をコストとした「複数コストの最適化のためのVRSP」の提案をする。ここでは研究事例として、複数人による大学教職員の高校訪問モデルを扱う。

本稿の流れについて説明する。2章では、VRPに関する先行研究について概説する。3章では、研究で用いるツールについて説明する。4章では、複数コストの最適化VRSP解法モデルの構成とその実装法について述べる。5章では、モデルの運用事例を取りあげて運用実験と経路の評価を行う。最後に6章でまとめを述べる。

2 巡回経路分析研究事例

本章では、VRPを解く研究の様々な事例について紹介する。Kimら [1] は、VRPTWにより、複数のごみ収集車の最適巡回経路を求める研究を行っている。彼らは、時間制約の中で、ドライバーの昼休みの時間をTWとして考慮に入れた経路モデルを提案している。車両の数と総移動時間の最小化を目指している。解決に当たり、クラスタリングベースの能力を持った挿入法を拡張したVRPTWアルゴリズムを用いている。車両が満タンになったとき、処理施設に戻らなければならない。また、各々の車両は1日に複数回移動できるとして、解決策を提案している。

他にも多くの事例研究が行われている。他の事例の制約の一部、最小化コスト、利用アルゴリズムを表1に2つ紹介する。

表1 VRPの研究事例

事例	スクールバス	現金輸送車
最小化コスト	運用資金	車両数
事例制約	生徒数など	作業時間など
アルゴリズム	セーピング法など	最近傍法

3 経路探索アルゴリズムとツール

経路の時間コスト最小化の計算を行うため、データの前処理を行い、ESRI社のArcGISのNetwork Analystツールを用いて問題を解く方法を示す。

3.1 データ前処理で用いるツール

巡回経路の目的地となる巡回地点データを作成するため、東京大学空間情報センター（CSIS）のCSVアドレスマッチングサービス (<http://newspat.csis.utokyo.ac.jp/geocode/>) を用いる。巡回地点の住所からX, Y座標が得られ、Shapeフォーマットとして出力させることができる。

経路分析に必要な情報を付加するためのツールとしてArcGISのArcMapを用いる。Shapeファイルに、経路分析に必要なデータフィールドを付加することができる。ここで、データフィールドとその型、レコードを付加させることができる。表2に付加例を一部示す。

表2 経路分析に必要なフィールドの一部

フィールド名	RouteName	TimeWindowStart
型	テキスト	日付/時刻
レコード例	2	10:00

ここで、複数経路（RouteName）ごとの解析を行うため、レコードごとのRouteNameをあらかじめ決定しておく必要がある。そこで、より短い時間での巡回を行うため、巡回地点を経路ごとにクラスタリングしてRouteNameに経路番号を与えていく。巡回地点クラスタリングのためのアルゴリズムとして用いられることの多いk-means法を取り上げる [4]。k-means法は初期のランダムに与えたクラスタにより結果の良し悪しが左右される。そのため、最良となる結果となるように試行を繰り返す必要がある。信頼できる結果が得られたか判断するため、式(1)のような誤差関数が用いられる。

$$Err(k) = \sum_{j=1}^k \sum_{r \in R} \|r - \bar{c}_j\|^2 \quad (1)$$

ここで、 k は経路数（クラスタ数）、 R は地点 r の集合、 \bar{c}_j はクラスタ j のクラスタセントロイドを示す。信頼の判断基準として、誤差関数の平均値を記録していき、平

均値が収束するまで繰り返し k-means 法を実行する．収束の条件として，巡回地点数 N の $p\%$ 以上の回数で誤差関数の値が $z\%$ 以内で収まったとき，収束したとする．

さらに，巡回の舞台となる道路データを用意する．道路データには道路の長さなどの情報を持ったデジタルロードマップが必要とされる．そのようなデータとして，ここでは北海道地図社の GISMAP for Road を用いる．これを ArcGIS で加工し，ネットワークデータセットとすることで，Network Analyst による解析が可能となる．ネットワークデータセットの実装法については，4章で示す．

3.2 Network Analyst による経路分析

Network Analyst は，ESRI 社の提供する地理情報システム ArcGIS の拡張ツールである．Network Analyst を使用するにあたって，道路ネットワークを解析するには先に述べたネットワークデータセットと巡回地点を用意する必要がある．Network Analyst では，次の手順で，解析がされる．

1. 道路ネットワークデータセットの読み込み
2. 巡回地点の読み込み
3. 距離，時間のコストいずれかを選択し，どちらかを最小とするのが設定
4. 巡回経路生成

この結果時間コスト最小化が行われ，地図上に最適経路の表示がされ，所要時間，移動距離が得られる．

4 複数コストの最適化 VRSP の解法モデル

これまでに紹介してきた先行研究やアルゴリズムを利用し，複数コスト最小化 VRSP を解決する手法の提案を行う．モデルの前提となる制約条件とモデルの設計を示し，モデルに必要なデータの作成法について述べる．

4.1 制約条件とモデルの設計

先行研究では，より短時間な経路，移動距離の最小化を目指す VRP が研究されてきた．本研究では，時間枠（タイムウィンドウ：TW）を考慮した複数巡回経路を求めるにあたって，経路間の所要時間差，総所要時間，巡回経路数といった 3つのコストの最適化を行う．時間コストに重点を置き経路数の計画を考慮するため，VRSP の概念を用いる．これを調査活動のための事例に用いられるように制約を設定する．本研究での制約を以下に示す．

- 巡回先での滞在時間
- 任意の TW
- 経路内巡回地点数
- 総所要時間
- 経路間の所要時間差

以上の制約の下で，モデルを作成する．ここで実際の道路情報を持った道路データベース，巡回先の情報を持ったデータベースを用意する．これらを ArcGIS の Network Analyst 機能により分析することで 3つのコストの最適化を図り，巡回経路を作成する．k-means 法による分類と Network Analyst による経路分析を繰り返し行い，分

析した情報をまとめ，レコードとして記録していく．レコードには，レコード番号，総所要時間，最小所要時間となった経路の所要時間 (A)，最大所要時間となった経路の所要時間 (B)，最も地点数の多かった経路の経路内巡回地点数，経路間の所要時間差 (B-A)，総所要時間差 ($k=1$ の時の総所要時間 - このレコードの総所要時間) を記録する．最適となる経路を求めるにあたり，制約を満たすレコードを抽出する．制約の強さはシステム利用者側により次の 3項目がパラメータで指定される．

- 総所要時間差パラメータ： ($100 < \quad$)
 - 総所要時間差を $k=1$ の総所要時間の $\quad\%$ 以内に収める．経路数増加に伴う総所要時間の肥大化による，時間にかかるコストの制限
- 経路間時間差パラメータ： ($0 < \quad < 100$)
 - 経路間の所要時間差を最大所要時間となった経路の所要時間の $\quad\%$ 以内に収める．経路間での所要時間の差による不公平性を防止
- 経路内巡回地点数パラメータ： ($0 < \quad < 100$)
 - 全巡回地点のうち，1つの経路で巡回できる最大地点数を全地点のうち $\quad\%$ に収める．特定の経路への巡回地点の集中を抑制

制約を満たし，抽出されたレコードの中から，コスト最適化となるよう巡回経路の評価をする．ここで，最適化の対象となるコストの組のトレードオフを考慮して，複数コストの組み合わせ最適化を評価関数 $f(t)$ で計算する (t :レコード番号)．このとき $f(t)$ が最大となった経路を複数コスト最適化経路とする．評価関数計算のために必要となる変数を定義する． $Max(c)$:全抽出レコード中の最大経路数 (k)， $Max(d)$:全抽出レコード中の最大経路間時間差， $Max(s)$:全抽出レコード中の最大総時間差， c_t : t の経路数， d_t : t の経路間時間差， s_t : t の総時間差とする．このとき，評価関数 $f(t)$ は式 (2) のように定義される．ここで， a, b, c はそれぞれ重みを示している． a は経路数， b は経路間所要時間差， c は総所要時間差の重みとしている．重みは，各要素の優先度を決定するためのパラメータとして用いる．各重みは 0 以上 1.0 以下の値をとり，各重みの合計は 1.0 とする．

$$f(i) = \frac{a \cdot Max(c)}{c_t} + \frac{b \cdot Max(d)}{d_t} + \frac{c \cdot Max(s)}{s_t} \quad (2)$$

4.2 モデルで用いるデータの作成

モデルで必要となる道路データベース作成，巡回地点データベース作成法をそれぞれ示す．

4.2.1 道路データベース作成

道路データベースを作成するために，ArcGIS に付属の ArcCatalog と ArcMap，そしてデータベースの元になる道路のネットワークデータとして北海道地図社の GISMAP for Road を用いる．データはそのままでは利用できないため，データを前処理で加工してネットワークデータセットとして扱う．前処理では，GISMAP for Road

に付属の Shape ファイルデータのうち、道路形状を持つ「全道路リンク」と道路属性を持つ「基本道路リンク」をキーフィールドを作成し、結合し、Shape ファイルの出力する。出力された Shape ファイルを正しく扱うために、投影法の変換を行う。GISMAP for Road の測地系は日本測地系、座標系は経緯度座標系となっていたため、ArcCatalog の「投影変換」ツールで、投影座標系の平面直角座標系の東京第 X 系を選択し、Shape ファイルの投影変換をする（X には地方によって異なる数値が入る）。以上の処理が済んだら、パーソナルジオデータベースファイルとそのクラスを ArcCatalog で作成し、全道路リンクの Shape ファイルをジオデータベースに変換しクラスに保存する。このとき、道路の長さの情報を持つ Shape_Length という属性フィールドが追加される。追加したら、Shape ファイルに登録されているフィールドのうち、道路の種類コード [AL3]、規制速度コードを [BL29] を参照し、コードに従った制限速度の数値を規制速度フィールド Speed_km.h を追加して記録する。例えば、[BL29]=7 のとき、Speed_km.h に 70 と登録する（他のコードは ESRI 社提供のマニュアルを参照）。また、道路の移動にかかる時間を計算するためのフィールドとして、Minutes フィールドを作成し、Shape_Length/Speed_km.h をフィールドの値とする。以上の操作をすることで、前処理が完了する。

前処理が済んだら、ネットワークデータセット本体の作成をする。前処理で作成したデータの属するクラスを ArcCatalog で選択し、新規作成項目によりネットワークデータセット作成を選択し作成を開始する。ネットワークデータセットの項目として、最適経路を求めるときに用いるコストとなる距離 Length、時間 Minutes、優先して利用する道路の順位を決める Hierarchy、一方通行規制の判定をする Oneway の項目を作成する。次に、各項目のエバリュエータを作成する。Length に前処理データの Shape_Length を値に、Minutes には前処理データの Minutes を値に指定する。また、右折時の時間ロスを指定するため、右折時に 0.25 分ロスと指定する。Hierarchy のエバリュエータは、高速道路、一般道、それ以外の道路で階層に分割し、指定する。Oneway では、前処理データの [AL8] フィールドを参照し、[AL8]=4 のときは終点-始点方向、[AL8]=5 のときは始点-終点方向を規制する。以上で、ネットワークデータセットが作成される。

4.2.2 巡回地点データベース作成

巡回地点データベース作成にあたり、CSV アドレスマッチングサービスで巡回地点の住所から Shape ファイルを作成する。作成された Shape ファイルに対し、Network Analyst で分析できるようにするためのフィールドとその属性を加える。ここまでの操作を終えたら、ArcCatalog でパーソナルジオデータベースにフィーチャクラスとして出力する。以上で巡回地点データベースの枠組みが完成する。Network Analyst による分析にあたり、複数経路の計算を行うためには、巡回地点データベースに、あらかじめ巡回地点を経路（巡回地点データベースの RouteName フィールド）ごとに分類しておく必要がある。そこで、3 章で示したように、本研究では k-means 法による分類を行う。

TW も考慮するため、k-means 法に TW の概念を付加し、クラス内で TW の条件を満たすか判断しつつ分類を行う。TW の制約を満たすための条件として、クラスに属するすべての巡回地点間で TW 内にたどりつけることと定義する。そこで、次のようにアルゴリズムを設計、実装する。ここで、経路（クラス）数を k 、経路（クラス）を j ($j = 1, 2, 3, \dots, k$)、レコードを r_i ($i = 1, 2, 3, \dots$, レコード数)、 j のセントロイドを v_j とする。このとき、TW を考慮した k-means 法を次のように作成した。

```
巡回地点データベースからレコード読み込み
巡回時の  $k$  を指定
for( $j = 1; j \leq k; j++$ ){
     $r_i$  をランダムに抽出;  $r_i.RouteName = j$ ;
     $v_j = r_i.xy$ ; }
for( $i = 0; i \leq \text{レコード数} - 1; i++$ )
    if( $r_i.RouteName = NULL$ ){
         $r_i$  から最も近い  $v_j$  を探す;
         $r_i.RouteName = j$ ; 各  $v_j$  を計算; }
while( $RouteName$  の変更がある){
    for( $i = 0; i \leq \text{レコード数} - 1; i++$ )
        for( $j = 1; j \leq k; j++$ ){
            if( $(v_{r_i.RouteName} - r_i.xy) > (v_j - r_i.xy)$ ){
                クラス  $j$  内で TW 制約を確認;
                if(制約を満たす){
                     $r_i.RouteName = j$ ;
                    クラスセントロイド再計算; } }
            else if(制約を満たさない個所  $h$  が 1 つ)
                if( $(v_j - r_i.xy < v_j - r_h.xy) \&\& (r_h$  が
                    TW 制約を満たすクラス  $l$  が
                    他にある)){
                     $r_i.RouteName = j$ ;
                     $r_h.RouteName = l$ ;
                    クラスセントロイド再計算; }
        }
    }
```

5 複数コスト最適化 VRSP の研究事例

5.1 研究事例の利用データ

本研究事例では、大学教職員の高校訪問問題を取り扱う。最初に、本事例で用いる舞台となる地理データを用意する。ここでは、GISMAP for Road の Shape ファイルのうち愛知県名古屋市周辺の道路データを用いる。データの座標系を投影座標系の平面直角座標系の東京第 7 系に設定する。このファイルを 4 章で示した手法でネットワークデータセットとする。次に、事例として用いる巡回地点データベースを用意する。巡回地点は、道路データの範囲内に含まれる高校を選択し、 $N = 63$ 地点とした。高校名および住所を登録し CSV ファイルに保存する。CSV アドレスマッチングサービスにより X, Y 座標を取得し Shape ファイルに変換する。ここで、道路データと同様の座標系にするため「愛知県 街区レベル（公共測量座標系・旧測地系）」を選択する。このデータの各レコード対し、経路番号（クラス）を TW を考慮した k-means 法により誤差関数が収束するまで与えていく。ここでは収束条件

のパラメータをそれぞれ $p = 10$, $z = 0.1$ とする. $k = 9$ のときの収束までの回数と誤差関数の変動を図 1 に示す. このとき, 収束までに 65 回の試行が繰り返された.

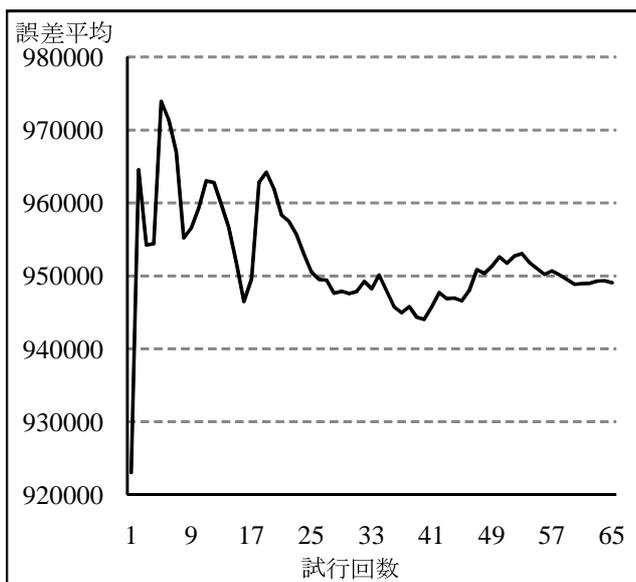


図 1 $k = 9$ の誤差関数の収束

5.2 複数コスト最小化事例の実験

本事例で $k = 1$ の時の総所要時間は 1236 分となった. よって, 総所要時間差は各レコードの総所要時間 - 1236 となる. 事例データで k-means 法と Network Analyst で繰り返し実験をし, 4.1 節で示した形式でレコードを記録していった. 本事例では, 制約パラメータを $a = 200$, $b = 25$, $c = 20$ と設定し, 制約を満たしたレコードのみを抽出した. このとき, $Max(c) = 11$, $Max(d) = 61$, $Max(s) = 1203$ となった. 抽出されたレコード群に対し, 評価関数を計算する. 本事例では経路数, 経路間の時間差に重点を置くと考え, $a = 0.6$, $b = 0.3$, $c = 0.1$ としてコスト最適化を行うこととした. この場合の評価関数を図 2 に示す.

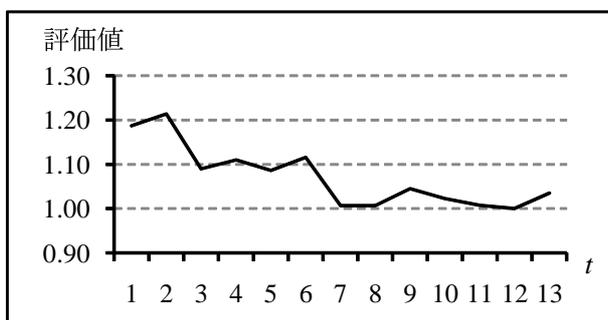


図 2 研究事例の評価関数

このとき, レコード 2 のとき評価関数が式 (3) のようになり, 評価関数が最大となり最適経路となった.

$$f(2) = \frac{0.6 \cdot 11}{9} + \frac{0.3 \cdot 61}{56} + \frac{0.1 \cdot 1203}{781} \quad (3)$$

また, このときの経路は図 3 のようになった. ここで, は巡回地点を指し, 中の数値は巡回の順番, はクラスタセントロイドを差し, 中の数値は経路番号を示す.

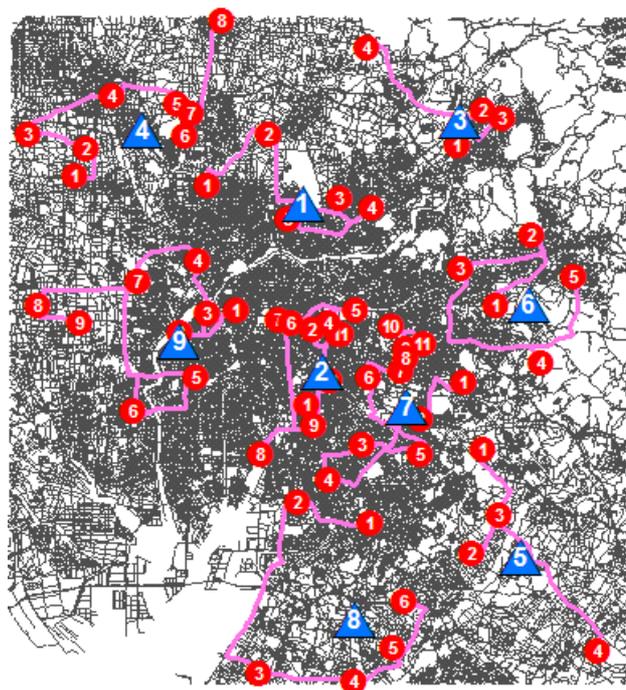


図 3 コスト最適化となったときの巡回経路

以上の操作により, 研究事例における 3 つのコスト最適化がされ, 巡回経路の生成が完了した.

6 まとめ

本研究では, 複数コスト最適化 VRSP の解法を 3 つのコストのトレードオフを各コストに重みつけて評価関数を作成することで求めてきた. その運用事例として, 大学教職員の高校訪問問題に適用することで, コスト最適化となる経路の判別と視覚化を行うことができた.

参考文献

- [1] B. I. Kim, S. Kim, S. Sahoo, "Waste Collection Vehicle Routing Problem with Time Windows," *Computers & Operations Research*, Vol.33, pp.3624-3642, 2006.
- [2] L. Spasovic, S. Chien, C. Kelnhofner-Feeley, Y. Wang, Q. Hu, "A Methodology for Evaluating of School Bus Routing - A Case Study of Riverdale, New Jersey," *Transportation Research Board*, Vol.80, No.1-2088, pp.1-17, 2001.
- [3] 岡野裕之, "時間枠付き配送経路問題における局所探索の誘導方式," 1999 年度日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会, pp.164-165, 1999.
- [4] 渡邊浩和, 小野勉, 松永昭浩, 金川明弘, 高橋浩光, "ファジィ c-means 法を用いた複数巡回セールスマン問題の一解法," *日本知能情報ファジィ学会*, Vol.13, No.1, pp.119-126, 2001.