

積載量制約のある複数車両による辺巡回配送計画問題の模擬焼きなまし法を用いた近似解法

A Heuristic Approach to Capacitated Arc Routing Problem Using Simulated Annealing

松本 修一¹・平島 浩一郎²・國府方 久史³・川嶋 弘尚⁴

¹Ph.D. (工学) 慶應義塾大学講師 先導研究センター (E-mail: shuichi@ae.keio.ac.jp)

²M.S. (工学) 元慶應義塾大学大学院理工学研究科

³M.S. (工学) 慶應義塾女子高等学校教諭 (E-mail: kokubu@mita.cc.keio.ac.jp)

⁴Ph.D. (工学) 慶應義塾大学教授 理工学部 (E-mail:kawashima@ae.keio.ac.jp)

積載量制約のある複数車両による辺巡回配送計画問題は、容量制約つき枝巡回問題とも呼ばれ、節と辺によるネットワーク上で、辺にデマンドがある場合において、配送拠点から容量制約つきの車両がデマンドのあるすべての辺を巡回し配送拠点へ戻るときの巡回総コストが最小となるルートを求める問題である。配車配送計画の効率化には、ネットワークの節にデマンド指定がある車両巡回問題が用いられる例が多い。しかし、郵便配達のようなデマンドが密集した場合や、道路清掃など道路区間そのものにサービスを行う場合には、辺にデマンド指定があるCARPのアプローチの方が適している。本研究では模擬焼きなまし法を用いたCARPの近似解法を提案した。

キーワード：ロジスティクス、配送計画問題、CARP、模擬焼きなまし法、ストリングモデル

1. まえがき

都市におけるロジスティクスの合理化は、配送コストの削減による経済活性化に寄与するだけでなく、走行距離の減少による二酸化炭素削減効果等環境の改善にも効果をもつものと考えられる。本研究は、道路に沿って密集した配達箇所がある郵便配達やごみ収集および道路清掃など、道路区間に配送・収集などのデマンドがあると考えられる配送計画問題における解法を提案するものである。このような問題は、積載量制約のある複数車両による辺巡回配送計画問題(Capacitated Arc Routing Problem:以下「CARP」と記す)として形式化されており、容量制約つき枝巡回問題とも呼ばれ、複数ある巡回先を最適に巡回する時の経路を決定する巡回問題の一種である。一般に、巡回問題は、節の集合 V と辺の集合 E によるグラフ $G=(V,E)$ において、大まかに以下のように分類される¹⁾²⁾。

- 節巡回問題 (Node Routing Problem:以下「NRP」と記す)
- 辺巡回問題 (Arc Routing Problem:以下「ARP」と記す)

NRPがネットワークの節上に配送や集荷のデマンドの指定を想定するタイプの問題であるのに対して、ARPはネットワークの辺にデマンドの指定を想定するタイプの問題である。

NRPの中で代表的な問題が、配送計画問題 (Vehicle

Routing Problem:以下「VRP」と記す)である。この問題は、指定された節上にあるデポから容量制約のある複数の車両が出発し、分担して節にあるデマンドをすべて巡回しデポへ戻ってくる時のコストが最小となるルートを探す問題であり、現実で使われている多くの配送計画システムに応用されている。また現実的な配送問題に対応するべく配送時間指定に対応したVRP with Time Window (以下「VRPTW」と記す)、配送と集荷を同じ車両の経路で行うVRP-Backhaulなど様々なバリエーションが考案されている³⁾。

一方、ARPの中でVRPに対応する問題が、CARPであり、CARPは容量制約のある複数の車両で分担して辺にあるデマンドを巡回する問題である。

つまり、CARPとVRPは、巡回するデマンドが辺にあるか節にあるかの違いだけでそれ以外は同じ条件の問題である。VRPはデマンドが節に指定され、現実の道路ネットワークをグラフネットワークで表現したとき交差点や配達先なども節で表現される。そのためVRPは適用範囲が広く、小売店への商品輸送をはじめ宅配便配達、自動販売機の補充など数多くの適用例がある。

これに対し辺にデマンドの指定があるCARPは、郵便配達のように交差点から交差点までの間に多数の巡回先が存在するようなデマンド密度の高い場合や、道路清掃のように道路区間そのものに対してサービスを行う場合ではVRPより有用である。

本研究は、CARPを用いて配車配送計画を支援するソフトウェアの核となる解法の部分を開発する。特に、CARPを解くアプローチとして、既にVRPにおいて著者らの研究によって高い性能を示している模擬焼きなまし法 (Simulated Annealing:以下「SA」と記す) を用いた解法をCARPに適用し、既存の研究で提案されてきた解法と得られる解の精度や探索実行時間といった解法の性能を比較することを目的とする。

本論文では、2章でCARPについてその定義とこれまでの研究事例についてレビューを行う。また3章では解の表現方法であるストリングモデルとそのCARPへの応用を述べ、CARPを解くための具体的なアルゴリズムを提案する。次に4章では計算機実験として、既存研究と解法の性能を比較する計算機実験について詳細を述べる。最後に5章では本研究のまとめを行う。

2. CARPの定義と既存の研究

CARPは1981年にGolden and Wong¹⁾によって提案された問題である。彼らはこの問題を以下のように定義している。

節の集合 $V = \{v_0, v_1, \dots, v_m\}$ と無向辺の集合 $E = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V, i < j\}$ によるグラフ $G = (V, E)$ を考える。このうちの頂点 v_0 をデポとし、均一な許容量制約 Q を持った車両 m 台はすべてデポから出発し最終的にデポへ戻るものとする。 E の部分集合 R を本稿ではデマンド辺と呼ぶ。これらデマンド辺はいずれかの車両によってサービスを受けなければならない。

すべての辺 E には通過時にかかるコスト c_{ij} (例えば、距離、通過時間) が与えられており、すべてのデマンド辺 R にはデマンドを表す非負の値 q_{ij} が与えられている。また、各々のデマンドは1台の車両によってのみデマンドを満たされるものとする。

CARPは以上の条件をすべて満たしながら、すべてのデマンド辺 R をサービスする車両 m 台分の走行ルートの中で総走行コストが最小となるルートを探す問題である。

ARPはネットワークの辺に方向があるかどうかで次の3つに分類される。

- (1) Undirected ARP: すべての辺が無向辺
- (2) Directed ARP: すべての辺が有向辺
- (3) Mixed ARP: 無向辺と有向辺が混在

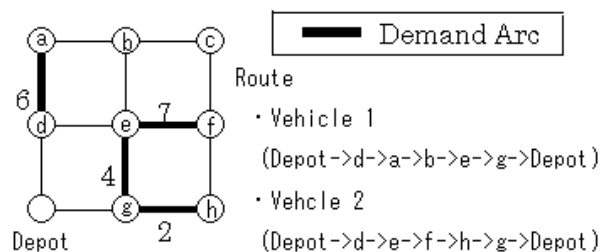


Fig. 1 CARPのイメージ図

Golden and Wong の定義では、CARP はすべての辺に向きが無い無向ネットワークを仮定しており、彼ら以降のCARPに関する研究もほとんどが無向グラフでの研究である。

また、CARPに良く似た問題のクラスにCapacitated Chinese Postman Problem (以下「CCPP」と記す) がある。CCPPは1973年にChristofides⁴⁾によって提案されたもので、容量制約のある複数車両でグラフ上の全ての辺を巡回する問題である。CARPはグラフ上に指定された辺のみをすべて巡回する問題であるため、CCPPはCARPの特別なケースであるといえる。

CARPもVRPと同様にNP困難な問題であり、小規模の問題でないと厳密解法を適用することが困難である。CARPは、VRPに変換されることが知られている。たとえば、Peam⁵⁾の方法によると、デマンドのある辺の数の約3倍の節をもつVRPに変換可能である。しかし、CARPの多くの近似解法は、直接的にCARPの問題の構造を利用して解いている^{6,7)}。近似解法の研究は、ChristofidesによるConstruct-Strike法⁴⁾から始まり、Path-Scanning法、Augment-Merge法、二段階解法など様々な研究がされている⁷⁾。

近年では、メタヒューリスティックと呼ばれる汎用的に近似解を求める手法が様々な組合せ最適化問題で利用されている⁸⁾。Hertz⁹⁾はタブーサーチ (以下「TS」と記す) を、Lacomme¹⁰⁾は遺伝的アルゴリズム (以下「GA」と記す) を用いてCARPを解く手法をそれぞれ提案している。Hertzらの方法は、車両ごとのルートの間でデマンド辺の削除と挿入をタブーサーチによって行うフェーズと車両の区切りをなくした全体のネットワークにおけるルートの最適化のフェーズをある条件の下に相互に繰り返す方法である。また、Lacommeらの方法も、車両ごとのルートの間で局所最適化を行うフェーズと車両の区切りをなくした全体のネットワークにおけるGAによる最適化のフェーズを相互に繰り返す方法である。しかし、SA法を用いて、しかも単一のフェーズでCARPを解く研究は筆者らの知る限り見当たらない。

CARPを解くアルゴリズムを研究する研究者のために、

スペインのValencia 大学においてCARPのベンチマーク問題がインターネットで公開されている。CARPLIB¹¹⁾と呼ばれるこのサイトには、4シリーズのベンチマーク問題が掲載されている。本研究でも、提案解法の性能比較のためにこれらの問題を用いた。

3. CARPのモデリングと評価関数

(1) CARPへのSA法の適用

a) SA法

SA法は、熱した固体を徐々に冷却すると完全格子をもつ構造に再結晶できるという金属工学における原理を取り入れた確率的探索手法である。SA法では、繰返し計算における現在の解の近傍解のうちの1つをランダムに選んで次の時点の解の候補とするが、評価関数の値を改善する場合だけでなく、評価関数が改悪する場合にも温度に対応する変数 T の値に従う確率 $\exp(-\Delta E/T)$ で、その解を次の時点の解として許容する。解探索の初期では、温度変数 T の値を大きく設定し解の改悪を実行する確率を高くして局所最適解に陥らないようにし、徐々に T の値を低くしていった探索の後期には改悪の確率を減らし大域的な最適解への収束を促す。

本提案手法に適用したSA法のアルゴリズムは、以下のように表示できる。他の手法のように、いくつかの部分アルゴリズムを統合して大域的最適化を図ることがないため本手法はきわめて単純な構成になっている点が特徴である。

- 1 初期解 x を生成
- 2 評価関数の値 $E(x)$ を最良値 E^* として記録
- 3 同一温度での平均探索近傍数 N を指定
- 4 温度変数 T を $INITTEMP$ に設定
- 5 試行回数 $trials := 0$,
解変形実施回数 $changes := 0$ に設定
- 6 x の近傍解 x' をランダムに生成し,
 $trials := trials + 1; \Delta E := E(x') - E(x)$
- 7 $\Delta E < 0$ のときは必ず、そうでないときも T の値に従う確率 $\exp(-\Delta E/T)$ で解変形を実施し,
 $changes := changes + 1, x := x',$
 $E(x) < E^*$ ならば, $E^* := E(x), x^* := x$
- 8 $trials < SIZEFACTOR \cdot N$ かつ
 $changes < CUTOFF \cdot N$ なら step 6 へ
- 9 $T := T \cdot TEMPFACTOR$
- 10 $T > INITTEMP / FINDIVISOR$ なら step 5 へ
- 11 最良解 x^* の出力

ここで、アルゴリズム中のJohnson et al¹²⁾によるパラメ

タ(大文字斜体標記)は以下の意味をもつ。

N : 問題の大きさ

$SIZEFACTOR, CUTOFF$: 1つの T の値での繰返しの回数を定めるパラメタで、試行回数が $trials \geq SIZEFACTOR \cdot N$ または解の受理回数が $changes \geq CUTOFF \cdot N$ となるまで繰り返す

$INITPROB$: 初期の受理確率であり、初期温度 $INITTEMP$ は、 $changes / trials = INITPROB$ となるように定める

$TEMPFACTOR$: 温度を下げる係数

$FIN_DIVISOR$: 最終温度を決めるパラメタで、 $T \leq INITTEMP / FIN_DIVISOR$ となるとき、すべての繰返しを終了する

b) データ構造

ストリングモデルは、SA法を用いてVRPを解くために糸山ら¹³⁾によって考案されたモデリング手法である。VRPの解は各車両のルートがデポを中心に結びついた形をしている。これを紐状に展開し、Fig. 2のように横1列の1次元配列で表現したのがストリングモデルである。

ストリングモデルは、デマンドのある節を表現する記号とルートの区切りを表す記号の2種類から構成される。デマンド節を表現する記号は、それぞれのデマンド節とそのデマンドに1対1で対応するものであり、ルートの区切りを表す記号とはデポを示す記号等でモデル中に複数存在する。Fig. 2の例では、アルファベットがデマンド節を意味する記号として用いられ、0は各車両のルートの区切れ目を示すと同時にデポを示している。従って、0と0に挟まれた部分が1台の車両の配送ルートとなる。この区切れ目となる0の数は、使用可能な車両を m とするとストリングモデルの両端の0も含めて $m+1$ 個必要となる。

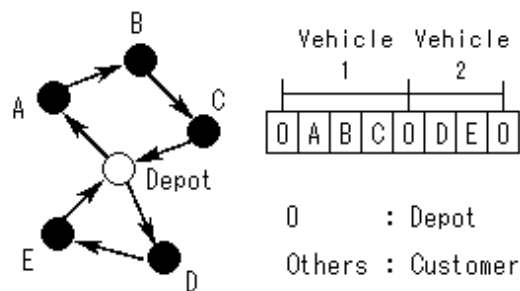


Fig. 2 VRPにおけるストリングモデル

このモデルは、各車両へのデマンド節の割り当てと割り当てられたデマンドへの巡回順序、すなわち配送ルートを同時に表現する。これはCARPにおける解の変形の

説明の際に後述するように、配車とルーティングの両方を同時に考慮することを可能にする。

糸山ら¹³⁾はVRPに対し、stringモデルとSA法を組み合わせた解法を用いて大規模な現実問題に対しても解法としての高い性能を示した。またstringモデルは基本的なVRPだけでなく、車両の回転利用が可能なケースや時間帯制約付きの問題VRPTW などに対しても応用可能であることが示されており¹⁴⁾、拡張性・発展性の高い解の表現方法と考えられる。

本研究ではstringモデルとSA法を組み合わせた解法を辺にdemand指定があるCARPへの適用させることを提案する。この前提として、あらかじめすべての辺間の最短経路をフロイド法にて計算を行い、辺間の使用経路を一意に決定しておく。なお、標準的なCARPでは同一車両の回転利用を考慮しないので、本研究でも同様の前提を置いている。

c) stringモデルのCARPへの適用

CARPにおいても、demand辺を表す記号と車両の区切りを表す記号による1次元配列を通じて解の状態を表現するstringモデルによって、解の状態を表現することができる(Fig.3参照)。グラフ上のすべての辺に向きがある有向グラフの場合、demand辺の進入方向がすべて指定されるため、stringモデルで表現された解から巡回ルートを一意に指定できる。一方、demand辺の中に無向辺が含まれる場合は、Fig.4に示すように、無向demand辺に関しては+、-の符号を用い、無向demand辺の進入方向をstringモデルの中で指定することで巡回ルートを表現する。

これまでのCARPの研究では、Golden and WongによるCARPの定義が無向グラフを仮定していたことから、これまでに提案されてきた解法の中には無向グラフにのみ対応した手法が多い。しかし提案手法は上記の通り、無向グラフに限らず、有向グラフ、混合グラフであっても解を表現できる。よって、一方通行などの進入方向の制限が存在するような現実の配送問題への適用を考える場合、この辺の向きに関する対応は非常に重要である。

(2) 評価関数

CARPの目的は、積載量制約などの制約条件を満たす巡回路(実行可能解)の中で、巡回総コストが最も小さくなる解を求めることである。stringモデル表現された解 s から巡回総コスト E を求めるには、次の式で計算できる。

$$E = \sum_{i=1}^n c_{s_i} + \sum_{i=1}^{n-1} p_{s_i, s_{i+1}} \quad (1)$$

$s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$: stringモデル

c_k : 辺 k でdemandをサービスするのに必要なコスト(ただし、 $k=0$ のとき、 $c_k=0$)

p_{kl} : 辺 k の終点と辺 l の始点を結ぶ最小コスト(すべての p_{kl} は、あらかじめフロイド法で計算しておく)

(1)式の第1項はdemand辺内を通過するときにかかるコストである。第2項はstringモデル内の次のdemand辺へ移動するときにかかるコストである。

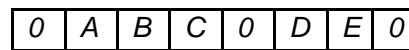
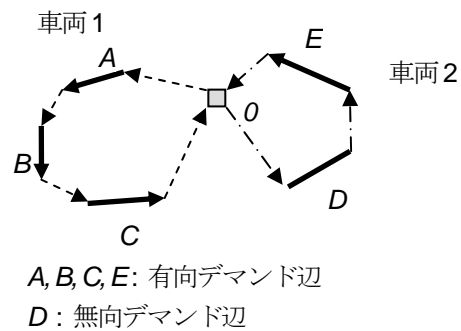


Fig.3 CARPのstringモデル

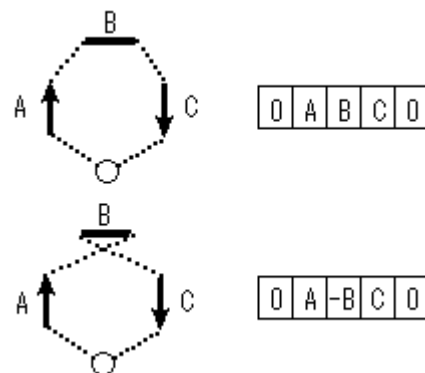


Fig.4 無向demand辺を含むルートの表現

(3) 計算手法

本節では、本研究で提案する計算手法を概説する。SA法は乱数を用いて探索を行う確率的探索法であるため、解がいつも同じ値になる保証はなく、実行するたびに異なる結果となる可能性がある。そこで探索を k 回繰り返し実行し、その解の平均および最良解で評価することとした。その計算過程を以下のフローで行う。

1. ネットワークデータを読み込み、demand辺間の最短距離計算をフロイド法を用いて行い、demand辺間のコストとする

2. 乱数系列を指定する
3. 初期解を生成する
4. SA法による探索を行う
5. 最良解を出力する

以上の2～5をk回繰り返して、解の平均および最良解を出力する。

(4) 試行変形

SA法で最適解の探索を行うのに、現在の解からデマンド辺についての操作を行うことにより近傍解を発生させる変形方法として、「1対1交換」「削除・挿入」および±で表現する無向辺の進入方向を変更させるための「辺の進行方向反転」を加えた3種類の試行変形を適用した (Fig. 5参照)。これらの試行変形は、デマンド辺を表す文字と車両区切りを表す0と区別せずに実行することで、大幅な変形を行うことができる。以下に各々の試行変形を説明する。

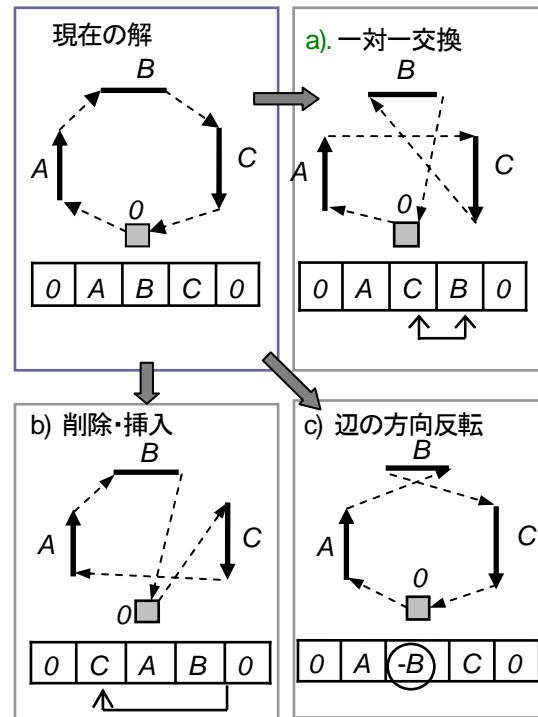


Fig.5 試行変形の概要

a) 1対1交換

この試行変形はストリングモデルの中の2つの要素(デマンド辺2つあるいはデマンド辺とデポ)をランダムに選択し、両者の位置を入れ替える操作である。ただし、0同士の交換は結果的に解の変形にはならないため行わない。0以外の2つの記号の1対1交換により同一車両での配送順序の入れ替え (Fig. 6参照) あるいは異なる車両間での担当デマンド辺の入れ替え (Fig. 7参照) がなされる。片方の要素が0である場合は、ルート統合と分割を伴う大幅な変形を行うことになる (Fig. 8参照)。

b) 削除・挿入

この試行変形はストリングモデルの中から抜き取る要素とそれを挿入する場所をランダムに選び、抜き取られた場所から挿入する場所までの間の要素をシフトさせてから、抜き取った要素を挿入する変形である。この変形により、車両間のデマンド辺割当の移動、あるいは同一車両内での1デマンド辺の巡回順の変更が成される。また0が移動の対象となる場合には、1対1交換の場合と同様に、部分的なルート統合と分割を同時に行う大幅な変形操作となる。

c) 辺の方向反転

この試行変形はストリングモデルの中の1要素をランダムに選択し、その±符号を逆にする操作である。すなわち、無向デマンド辺の進入方向を逆向きにする操作となる。ただし、ランダムに選んだ要素が有向辺であった場合やデポを表す0であった場合には、試行変形を行わない。

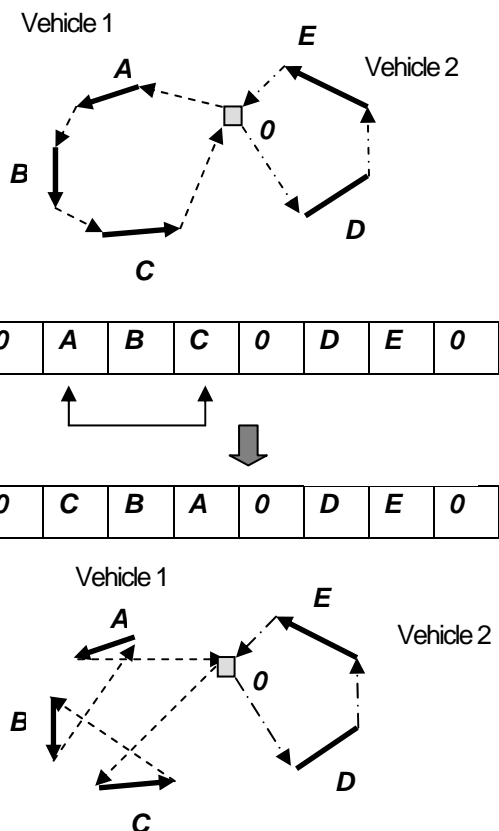


Fig. 6 '0'と'0'の間にある2つの記号の1対1交換

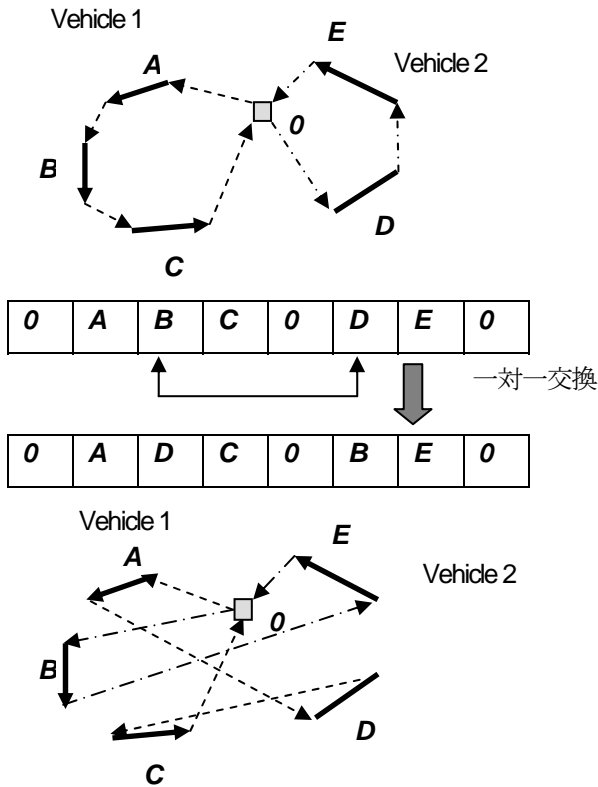


Fig.7 '0'をまたいだ2つの記号の一対一交換

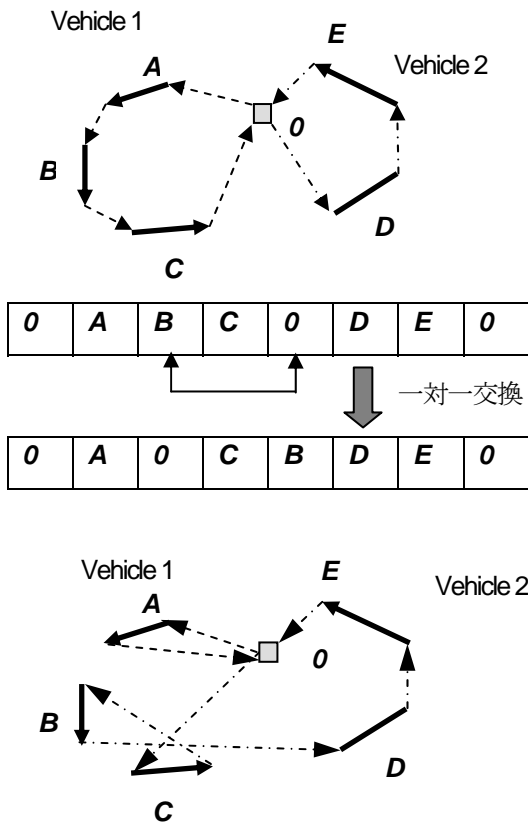


Fig.8 '0'と他の記号との一対一交換

4. 計算機実験

(1) ベンチマーク問題

解法の比較を行うCARPのベンチマーク問題として、インターネットのCARPLIB¹¹⁾で公開されているベンチマーク問題集を用いた。具体的には、比較的小規模な問題が多いGDB シリーズ全21問、中規模の問題の多いBCCM シリーズ全34問、そして、大規模な問題を含むEGLESE シリーズ全24問、合計79問である。

Table 1 CARPのベンチマーク問題(CARPLIB)

シリーズ	問題数	ネットワークの構成
GDB	21	デマンドのある 19~55 個の無向辺のみ
BCCM	34	デマンドのある 39~97 個の無向辺のみ
EGLESE	24	デマンドのある 51~190 個の無向辺と、0 から 115 個のデマンドのない無向辺

このベンチマーク問題の下限値に関しては、2003年にBelenguer and Benavent¹⁵⁾による、切除平面法を用いた研究の結果がこれまでに最も良い結果を報告している。また、メタヒューリスティクスを用いた解法としては、2000年のHertz, Laporte and MittazによるTSによる研究⁹⁾と、2001年のLacomme, Prins and RamdaneによるGAを用いた研究¹⁰⁾の両方が、これまでに良い結果を報告している。

(2) 実験結果および考察

提案手法を用いてベンチマーク問題の解を求め前出の既存研究結果と比較を行った。解の試行変形としては、3章4節で述べた一対一交換、削除・挿入、辺の方向変換の3つを等確率で適用した。3章1節に示したSAのパラメタの値は、Johnsonら¹²⁾の推奨している値および筆者らの予備実験の結果から、次のように定めた。

$$N = 2L^2 \quad (L: \text{は文字列の長さ})$$

$$SIZEFACTOR = 4, \quad CUTOFF = 0.1$$

$$INITPROB = 0.4$$

$$TEMPFACTOR = 0.99 \quad (\text{つまり } T_{n+1} = 0.99T_n)$$

$$FIN_DIVISOR = 10$$

また、計算における初期解は、デマンドが各車両の容量制約を超えないように、ランダムに配分した実行可能解を用いた。

Table 2 GDBシリーズとBCCMシリーズの問題例の計算結果の比較(抜粋)

問題番号	デマンドのある無向辺の数	車両台数	Hertzら (TS)	Lacomeら (GA)	提案手法による10回の計算結果	
					平均	最良
GDB1	22	5	316	316	316	316
GDB3	22	5	275	275	275	275
GDB9	51	10	317	303	312	309
GDB23	55	10	235	235	235	233
BCCM1A	39	2	173	173	176	173
BCCM3B	35	3	87	87	88	87
BCCM6C	50	10	329	317	320	317
BCCM9B	92	4	329	326	330	326

Table 3 GDBシリーズとBCCMシリーズのすべての問題例の計算結果のまとめ

		Hertzら (TS)	Lacomeら (GA)	提案手法による10回の計算結果	
				平均	最良
GDBシリーズ	平均誤差率	0.3%	0.1%	0.8%	0.1%
BCCMシリーズ	平均誤差率	1.4%	0.2%	2.4%	0.9%

Table 2 およびTable 3 はGDBシリーズとBCCMシリーズの問題例における, Hertz らによるTSの解, およびLacomeらによるGAの解と提案手法によるSAの解との比較を示す. 2つの先行研究では, 計算実験の回数に記載されていないが, 提案手法は確率的な探索に基づくものであり, 計算実験ごとに結果が異なるので, 10回の計算実験を行い, 最良解だけでなく平均の解の性能を記載した. Table 2 はそれぞれのシリーズの問題4つずつについて結果の比較を示している. GDB23のように, 提案手法で得られた解がTSやGAによる解よりも良い問題例もあり, 全問題例の結果としては, DBシリーズ全21問のうち19問で既存解法の解と一致する解を得て, BCCMシリーズ全34問中19問で既存解法の解と一致する解を得た. Table 3は, それぞれのシリーズのすべての問題例における平均誤差率の結果を示している. Table 3にある平均誤差率とは, それぞれの解の値をTS法またはGA法で得られた解のうちのよい方の値で割った数値から1を引いた数値である. 同一のSAパラメータを用いて提案手法を10回計算したうちの最良値の質は, GDBシリーズではTS法よりよくGA法と同等であり, より問題の規模が大きいBCCMシリーズでは, TS法とGA法の間であることが分かる. 計算時間は, Pentium IV 1.8GHzのPCを用いて, GDBシリーズで平均11秒, BCCMシリーズで平均34秒である.

Table 4 EGLESEシリーズの問題例の計算結果(抜粋)

問題番号	デマンドのある無向辺の数	車両台数	提案手法10回計算結果		
			平均	最良	計算時間(s)
e1-A	51	5	3769	3602	9.7
e2-B	72	7	6429	6393	20.8
e3-C	87	17	10559	10421	42.7
e4-A	98	9	6738	6566	43.3
s1-B	75	10	6668	6553	23.4
s2-C	147	27	17036	16847	376.6
s3-A	159	15	10749	10591	144.3
s4-B	190	27	16993	16776	478.2

また, EGLESEシリーズについては, 既存研究も少なく, Hertzら⁹⁾やLacomeら¹⁰⁾による結果も与えられていないが, 提案手法により具体的な計算時間で解を求めることができた.

このように提案手法は1つのフェーズで最適化を行う方式であり, 全体最適化と局所最適化の2つのフェーズをもつ既存手法に比べてアルゴリズムが単純であるにもかかわらず, ほぼ同程度の性能をもつことが示された.

5. まとめ

本論文では, 配車配送計画を効率化するアプローチとして, 積載量制約のある複数車両による巡回配送計画問題であるCARPに着目し, 様々な組合せ最適化問題へ応用できるメタヒューリスティックのうち, これまで研究例の少ないSA法を用いてCARPを解く解法を考案した. また, 解のモデリングとしては, スtringモデルを用いた表現方法を提案し, CARPの解の状態および変形をシンプルにかつ効果的に表現することに成功した.

また, 提案手法をこれまでに研究されたCARPの解法と同じベンチマーク問題へ適用して解法の性能を比較したところ, 単純なアルゴリズムをもつ提案手法が2つのフェーズをもつ既存手法とほぼ同等な性能をもつことが確認された.

アルゴリズムが単純であることは, ソフトウェアの開発および実装の際に有利である. また, 調整すべきパラメータの種類も少ないことから, 現実の配送・集荷の最適化システムの構築の際に, より適合すると考えられる.

3節のモデリングの説明の際に述べたように, 本論文で提案した解法は, 先行研究との性能比較を行うため, 標準的なCARPの問題に合わせて条件を設定しているので, 同一車両の回転利用を考慮していない. しかし, 現実の配送問題において, 車両群の積載容量の合計よりも配送需要の方が多き場合には, 一つの車両が配達を終え

てデポに返ってから再び配送に赴く回転利用を考慮しなければ配送計画を作成することができない。本論文で提案したストリングモデルそのままでは、回転利用を要する配送問題に対応していない。著者らは、これまでVRPで車両の回転利用を行う場合に対応するストリングモデルのアイデアを提案しており¹⁰⁾、それをCARPに適用することが可能であると考えている。しかし、回転利用を要するCARPのベンチマーク問題は筆者らの知る限り公表されているものがなく、また、現実の配送データも入手できていないので、回転利用に対応するストリングモデルを用いた解法の検証ができていない。また、このことは、配送・集荷の時間帯制約があるCARPについても同様である。今後は、このような問題についての現実の配送・集荷のデータを入手して、本研究の解法の有効性についての検証を行いたいと考えている。

参考文献

- 1) B.L. Golden, R.T. Wong. (1981) Capacitated arc routing problems, *Networks*, 11, 305-315.
- 2) J.K. Lenstra, A.H.G. Rinnooy Kan. (1981) Complexity of vehicle routing and scheduling problems, *Networks*, 11, 221-227.
- 3) B.L. Golden, A.A. Assad, ed. (1988) *Vehicle Routing: Methods and Studies*.
- 4) N. Christofides. (1973) The optimum traversal of a graph, *OMEGA*, 1(6), 719-732.
- 5) W. L. Peam, A. A. Assad and B. L. Golden. Transforming Arc Routing into Node Routing Problems. *Comput. & Opns. Res.* 14, pp. 1987.285-288.
- 6) M. Dror (ed.): *Arc routing: theory, solutions and applications.*, Kluwer Academic Publishers, 2000
- 7) H.A. Eiselt, M. Gendreau, G. Laporte. (1995) Arc routing problems, part II: the rural postman problem, *Oper. Res.*, 43(3), 399-414.
- 8) 久保幹雄, 「メタヒューリスティクス」室田一雄編 『離散構造とアルゴリズム IV』 (pp.171-230) 近代科学社.
- 9) A. Hertz, G. Laporte, M. Mittaz. (2000) A tabu search heuristic for the capacitated arc routing problem, *Oper. Res.*, 48(1), 129-135
- 10) P. Lacomme, C. Prins, W. Ramdane-Cherif. (2001) A genetic algorithm for the capacitated arc routing problem and its extensions, *Lecture Notes in Computer Science 2037*, 473-483.
- 11) CARPLIB HP : <http://www.uv.es/belengue/carp/> [2009, August 15].
- 12) D.S. Johnson, C.R. Aragon, L.A. MacGeoch, C. Schevon. (1989), *Optimization by Simulated Annealing : An Experimental Evaluation, Part I, Graph Partitioning*, *Operations Research*, 37, 865-892.
- 13) 糸山日出男, 國府方久史, 川嶋弘尚(1995) 「配送計画問題 (Vehicle Routing Problem) のモデリングとシミュレーテッドアニーリング法による解法」 『統計数理研究所共同研究レポート 77 最適化：モデリングとアルゴリズム 7』 277-283.
- 14) H. Kokubugata, H. Kawashima (2008) Application of simulated annealing to routing problems in city logistics, in '*Simulated Annealing*', Cher Ming Tan (Ed.), I-Tech Education and Publishing, Vienna, pp.131-154.
- 15) J.M. Belenguer, E. Benavent. (2003) A cutting plane algorithm for capacitated arc routing problem, *Computers & Operations Research*, 30, 705-728.
- 16) T. Hasama, H. Kokubugata and H. Kawashima (1999) A heuristic approach based on the string model to solve vehicle routing problem with various conditions, Preprint for World Congress on Intelligent Transport Systems, No.3027, Toronto, Canada, Nov. 1999

A Heuristic Approach to Capacitated Arc Routing Problem Using Simulated Annealing

Shuichichi MATSUMOTO¹, Koichiro HIRASHIMA², Hisafumi KOKUBUGATA³,
and Hironao KAWASHIMA⁴

¹Ph.D. (Engineering) Senior Assistant Professor, Keio University, Advanced Research Center
(E-mail: shuichi@ae.keio.ac.jp)

²M.S. (Engineering) Graduate School of Keio University, Faculty of Science and Technology.

³M.S. (Engineering) Teacher, Keio Girls Senior High School. (E-mail: kokubu@mita.cc.keio.ac.jp)

⁴Ph.D. (Engineering), Professor, Keio University, Faculty of Science and Technology.
(E-mail: kawashima@ae.keio.ac.jp)

Capacitated Arc Routing Problem (CARP) is the problem in which routes are made in order to minimize the total cost of vehicles' trip back to depot through each demand arc in network. For the cases like mail delivery where demand is concentrated, and road sweeping where road section itself is the target of service, it is suitable to adopt the approach based on CARP in which demands are set on arcs. In this paper, a solution of CARP, utilizing simulated annealing is proposed. Adoption of "string model", a one-dimensional alignment model makes efficient search for better solution possible. The proposed method is simple and implemented in one phase procedure, while preceding methods are constructed in two phases. Computational experiments are conducted on benchmark instances.

Key Words: Logistics, Routing Problem, CARP, Simulated Annealing