

## 人工生命的アプローチによる集配送計画問題の解法

# An Artificial Life Approach to Multi-Vehicle Routing Problem

伊藤 雅†

Masaru ITOH

**Abstract:** This paper proposes a new method for multi-vehicle routing problems (MVRP). MVRP is to determine the optimal routes for all vehicles through the minimal total tour length subject to vehicle capacity constraints and other restrictions. All nodes have some packages to deliver to other nodes before vehicles start. Each time a vehicle arrives at a node, it drops off packages and picks up others. Vehicles go on moving until all packages in the area are completely delivered. The aim of this paper is to indicate that MVRP can be solved by artificial life, which is a methodology of the modern heuristics such as genetic algorithms, tabu search or simulated annealing. The proposed approach is basis on a point of view that a vehicle can be regarded as an artificial life. For instance, picking up goods is corresponded to the act of predatory, and dropping off ones to the act of excretory. The method makes use of three indicators to characterize the artificial life. First is a moving length, second is a loading tendency, and last is a standing by at the same node. Each indicator takes one integer value among zero to 99. If the value of moving length indicator is relatively small, then it means that the vehicle tends to prefer a short-distance movement to a long-distance. Other two indicators can be made similarly interpretation.

### 1. はじめに

本論文では、国内輸送の中では特に重要視されるトラックの貨物輸送の問題を集配送計画として捉え、人工生命<sup>1)</sup>を用いた近似解法での効率化を試みる。人工生命とは生命特有の現象をコンピュータシミュレーションや人工的なシステムを作ることによって再現する試みである。人工生命における生命体は比較的単純な機能を持たせるだけで非常に興味深い挙動をする。このような生命体を複数生成すると、それらの局所的な相互作用や自律的な行動によって生態系全体で大域的な挙動や秩序を形成することが知られている。集配送計画に適用された人工の生命体が、それぞれ自律的に、より効率的に行動することによって、全体として集配送計画の効率化を導くのではないかというのが本論文の視点である。

配送計画 (Vehicle Routing Problem:VRP)<sup>2,3)</sup> は、ロジスティクス拠点間の中で、配送センターから末端の店舗などへの物の流れを計画することである。配送計画には多くの計画問題が含まれており、例として、配送経路の決定、貨物引当や乗務員スケジューリングなどが挙げられる。ここでは、配送計画の中でも、配送費用に大きな影響を与える配送経路を決定する問題を中心に考察する。

配送経路の決定には、積載容量を考えながら、どの配送車がどの店舗をどの順番で回るかといった組合せ的な要素が多く含まれ、組合せ方で配送距離や配送費用が大幅に変わる。このことから配送計画は配送経路問題とも呼ばれる。

配送計画は次の2つの問題を含んでいる。一つは各配送車

が積載容量の範囲内でどの店舗を担当するかという問題であり、もう一つは割り当てられた店舗をどのような経路で配送するかという問題である。後者の問題は、巡回セールスマン問題として独立に研究が進められている。

本研究で取り扱う集配送計画の目的は、各配送車の配送距離や配送費用の合計を最小化することである。この問題で考慮しなければならない制約は大別すれば3つである。まずは、各配送車は積載容量以上の荷物を一度に配送できないという容量制約である。次は、各需要地へはいずれかの配送車によって配送されるという割当制約である。最後は、配送車は配送センターを出発し、いくつかの店舗を巡回配送して配送センターに戻るという配送車の巡回路制約である。これらの制約全てを同時に満たさなければならないため、実用規模の問題を最適に解くことが困難となる。そのため、一般的には厳密解法よりも、セービング法 (Saving Method) に代表されるような近似解法が利用されている。セービング法は貪欲法を基本とし、1964年にClarkeとWright<sup>4)</sup>によって提案された。その単純さと実用性から実務家の間では配送計画の代名詞にもなっている。

近年、モダンヒューリスティクス<sup>5)</sup>あるいはメタヒューリスティクス<sup>6)</sup>といわれる手法の研究が盛んに行われている。遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms)、タブー探索 (Tabu Search)、ニューラルネットワーク (Neural Network)、シミュレーテッドアニーリング (Simulated Annealing) などがある。人工生命もこの分野の範疇にある。ただ、人工生命を最適化手法として捉えた研究は少ない。アリのフェロモンによる効果で最適経路を探索する方法がColormiら<sup>7)</sup>によって提案されている。

† 愛知工業大学 経営情報科学部 経営情報学科 (豊田市)

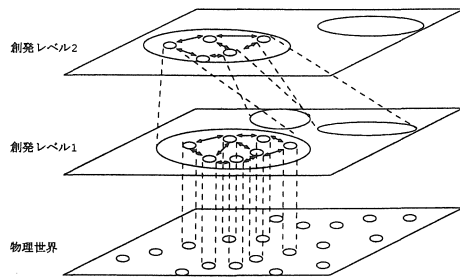


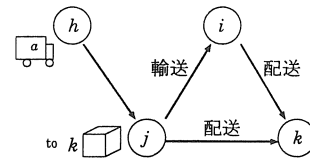
図 1 構造の創発

## 2. 人工生命

人工生命 (Artificial Life, 以下 A-Life と略記)<sup>1, 8)</sup> とは, 人工生命ワークショップの提唱者である Langton C.G. によれば, 「A-Life とは自然の生命システムに特徴的な振る舞いを示す人工システム」である。つまり, 自己増殖, 進化, 発達, 適応といった生命現象を高分子化合物, マイクロマシン, コンピュータシミュレーションなどの人工物による合成を通して実現する。分析的な方法に代わって, 合成的な方法を用いて行動を創造するメカニズムを探求する。生命のような行動を創造するメカニズムの発見は, 大別すると次の 2 つの目的に結びつく。ひとつは, 既存の生命のより深い理解, 特に生命にとって基本的な属性の理解, つまりは科学目的である。これは生物を分析, 模倣することによって生命の本質を理解する, あるいは生物システムの挙動や進化のメカニズムを解明することである。もうひとつは, 一般的な適応能力を持った人工物の創造, つまりは工学目的である。これは生物システムをモデル化し, そのモデルに基づいた工学的な実際のシステムを構築することである。

人工生命の研究で対象となる生命現象には, 自己増殖, 代謝, 発達と成長, 環境適応など多くの側面がある。多くの研究者が共通に持つ興味の対象は, 「創発」である。例えば生物などは, 細胞が集まって組織を作り, 組織が集まって器官を作り, 器官が集まって個体を作るというように, あるレベルのシステムはそれを構成する下位のサブシステムの有機的な結合によって出来上がっている。しかも, 個々の細胞は組織として上位のシステムが機能しなければ生存できず, 必然的に下位システムは上位システムから制約を受けることになる。このような, 上位レベルと下位レベルの相互作用が, 生物に特徴的な複雑なシステムを作り上げる基本的な仕掛けである。システムをどのレベルで括るかによって, 創発の見え方も様々である (図 1 参照)。

人工生命の基本思想はコレクショニズム (Collectionism) とも呼ばれる。コレクショニズムでは, 構成要素間の局所的な相互作用を通して大局的な秩序や挙動が生成されるというボトムアップ的な創発と, 創発された大局的な秩序や挙動が構成要素の振る舞いや相互作用に影響し変化をもたらすというトップダウンとの双方向の機構を有する。そのために, システムを構成する要素の集団と, 要素同士がお互いに影響しあう相互作用の仕組みを考える。影響から与えられる刺激や情報にいくつかの要素が反応し, それらの相互作用が働き出



空の配送車 a がノード h からノード j に到着し, 配送先が k の荷物を積載したと仮定する。配送車 a が直接 k に移動し荷物を降ろした場合, 配送車 a はノード j からノード k へ荷物を「配送」したという。配送車 a がノード i を経由する場合, ノード j からノード k へ荷物を「輸送」したという。その後, 配送車 a がノード k に移動し, 荷物を降ろすと配送車 a はノード i からノード k へ荷物を「配送」したことになる。

図 2 配送と輸送の概念

す。そして, それらの相互作用の結果, ある種の形態 (組織, 構造, 秩序, ネットワーク, 全体的な状態など) が出現する。その形態がさらに他の要素の反応を呼び起こして形態が変化する。そのような仕掛けで機能を実現したり情報を処理する。コレクショニズムの考えに方に沿って集配送計画を捉え直すと以下のようにまとめることができる。

**集中制御から並列分散制御へ** エリア内の集配送は集中的な制御によって実現されるのではなく, 配送車集団を構成する各配送車同士の局所的な相互作用から創発する。

**最適設計から集団的冗長設計へ** 配送車には事前に最適設計されたパラメータを与えて巡回路を生成させるのではなく, 多少の冗長性をもつパラメータで集団的かつ組織的な挙動から全体の集配送を実現する。

**固定から流動へ** パラメータは一旦固定して, エリア内の荷物を全車で集配する。このパラメータは世代交代と共に自発的にかつ相互依存的に変化する。但し, 配送車台数については自立的な変化の対象とはしない。

## 3. 集配送計画問題

まず, 集配送計画問題で使用する用語を整理しておく。

**配送車** すべての配送車は, あらかじめ積載容量と出発点が決められている。配送作業と収集作業の両方を担い, 必ず出発点に戻る。配送車の台数は不変とする。

**輸送** 単に荷物を運ぶことを指す。配送とは区別される概念である (図 2 参照)。

**配送** 荷物を直接, 配送先に届けること。輸送とは区別してこのように呼ぶ。

**ノード** 荷物の需要点。荷物をすべて配送して配送活動は終了する。荷物の供給点でもある。

**パス** 2 つのノード間の経路である。

**ルート** ある配送車が集配送のために使用したパスを繋いだもの。配送車の出発点を基点とする閉路のことである。

**分割積載** 荷物の最小単位を 1 とし, 荷物を分割して積載すること。分割積載は積載する荷物の大きさが配送車の積載可能量を超えた場合にのみ適用され, その配送車は可能な限り積載することとする。

本論文の集配送計画では、配送車の総移動距離を最小にすることを目的とする。よって目的関数は各配送車が使用したパスの長さの総和となる。各ノードはそれぞれ全てのノードへのパスをもつと仮定している。問題を定式化してみる。

$$\min. f = \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \{ (x_{ij}^k + y_{ij}^k + z_{ij}^k) \times D_{ij} \} \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{i \in N} (x_{ih}^k + y_{ih}^k + z_{ih}^k) = \sum_{j \in N} (x_{hj}^k + y_{hj}^k + z_{hj}^k), \quad \forall k \in K, \forall h \in N \quad (2)$$

$$\sum_{t^k \in T^k} w_{ij}^{t^k} = x_{ij}^k, \quad \forall k \in K, \forall i, j \in N \quad (3)$$

$$\sum_{t^k \in T^k} \left( q_j^{t^k} \sum_{i \in N} w_{ij}^{t^k} \right) = g_j^k, \quad \forall k \in K, \forall j \in N \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N} q_j^{t^k} \leq Q^k, \quad \forall t^k \in T^k, \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} g_j^k = \sum_{i \in N} L_{ij}, \quad \forall j \in N \quad (6)$$

$$x_{ij}^k, y_{ij}^k, z_{ij}^k \in Z, \quad \forall t^k \in T^k, \forall k \in K, \forall i, j \in N \quad (7)$$

$$w_{ij}^{t^k} \in \{0, 1\}, \quad \forall t^k \in T^k, \forall k \in K, \forall i, j \in N \quad (8)$$

以下は記号の説明である。

$T^k = \{t_0^k, t_1^k, \dots, t_{LAST}^k\}$  配送車  $k$  がノードに到着する時刻の集合。  $t_s^k$  は配送車  $k$  が  $s$  番目のノードに到着した時刻

$K = \{1, 2, \dots, m\}$  配送車の集合

$N = \{1, 2, \dots, n\}$  ノードの集合

$Z = \{0, 1, 2, \dots\}$  非負整数の集合

$x_{ij}^k$  配送車  $k$  が  $i$  から  $j$  へのパスを使用して配送した回数

$w_{ij}^{t^k}$  配送車  $k$  がノード  $j$  への荷物を積載した状態で、時間  $(t_{s+1}^k - t_s^k)$  に  $i$  から  $j$  へのパス使用の有無

$y_{ij}^k$  配送車  $k$  が  $i$  から  $j$  へのパスを使用して輸送した回数

$z_{ij}^k$  配送車  $k$  が荷物を持たずに  $i$  から  $j$  へのパスを使用した回数

$g_j^k$  配送車  $k$  がノード  $j$  へ配送した荷物の量

$q_j^{t^k}$  配送車  $k$  が時間  $(t_{s+1}^k - t_s^k)$  において積載していたノード  $j$  への荷物の量

$D_{ij}$  ノード  $ij$  間の距離 (但し  $D_{ij} \neq 0, i \neq j$  とする)

$L_{ij}$  ノード  $i$  に配置したノード  $j$  への荷物の量

$Q^k$  配送車  $k$  の最大積載容量

式 (1) が目的関数である。最も重要な定数はノード  $ij$  間のパス長  $D_{ij}$  である。主変数  $x_{ij}^k, y_{ij}^k, z_{ij}^k$  は配送車  $k$  がノード  $ij$  間のパスを使用した回数である。式 (2) は各配送車の巡回路制約である。式 (3), (4) が従属変数の関係式、式 (5) が各配送車の積載容量制約、式 (6) が配送完了制約となる。式 (7) は主変数を、式 (8) は従属変数を表している。

定式化した集配送計画問題は汎用性にとても優れている。複数の配送拠点を考慮した宅配便のような問題を取り扱うこともできる。また、荷物の供給点を一カ所に限定すれば配送計画問題となり、荷物の需要点を一カ所にすれば収集計画問題となる。配送計画問題に加え、「積載容量  $\geq$  総荷物量」である配送車 1 台を配送拠点に配置すれば、需要点を対象とする巡回セールスマン問題が構成できる。

しかし、この問題は通常の配送計画と比較すると求解が大変困難なものとなっている。通常の配送計画では、配送車の積載容量を考慮した配送点の割当問題と、割り当てられた配送点の中での巡回セールスマン問題の 2 つの問題を解けばよい。しかし集配送計画では、配送先が決まっている荷物の配置が刻々と変化するため、それに応じて配送車が行動しなければならず、単純に割当問題と巡回セールスマン問題を解くだけでは求解不可能である。そのため、集配送計画に特化した優れたヒューリスティックが必要となる。

#### 4. 人工生命的アプローチによる解法

##### 4.1 集配送計画と人工生命と対応づけ

集配送計画における配送車を人工生命の生命体とみなし、個々の配送車の自律的な行動から組合せ最適化の発現を導く。人工生命と集配送計画の対応づけについて説明する。

まず、人工の生命体が生息する仮想空間を構築する。集配送計画における配送車は、複数あるノード上と、それらを結ぶパス上のみ存在可能とする。これが生息空間である。

本研究で扱う人工生命は、遺伝的アルゴリズムのように一個体で評価関数をもたないため、個体の優劣をつける基準が新たに必要となる。人工生命の場合、生命力の強いものが環境に適応した優れた個体である。一定量の荷物をより少ない移動距離で配送することは、配送効率を高めることと同義である。そこで人工生命における生命力を各配送車の配送効率に対応させ、配送車の優劣とすることを提案する。配送効率が高い優れた配送車の性質はそのままに、低い劣った配送車の性質に若干の変化を与え、次の世代の配送車を生成する。さらに、配送車の生成過程において、局所解からの脱出が可能となるよう突然変異の概念を取り入れる。配送車  $k$  の配送効率を次式で定義する。

$$\begin{aligned} \text{配送効率} &= \frac{\text{配送荷物量} \times \text{配送ルート長}}{\text{積載容量} \times \text{総移動距離}} \\ &= \frac{\sum_{t^k \in T^k} \sum_{j \in N} \left\{ q_j^{t^k} \sum_{i \in N} (D_{ij} w_{ij}^{t^k}) \right\}}{Q^k \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \{ (x_{ij}^k + y_{ij}^k + z_{ij}^k) \times D_{ij} \}} \quad (9) \end{aligned}$$

配送車は、「荷物を積む」「荷物を降ろす」「移動」「待機」の 4 つの行動をする。このうち、荷物を積むことと降ろすことは一対の行動とみなす。この 2 つの行動の間に「移動」を加えることによって荷物の輸送が成立し、配送車の評価尺度である配送効率に大きく影響する。よって、配送車の「荷物の積み降ろし」は、人工生命における「摂取」と「排泄」にそれぞれ対応づけることができる。「移動」に関しても、生命体や配送車が無駄に移動すると、それぞれ生命力や配送効率

表 1 集配送計画と人工生命の対応関係

集配送計画	人工生命
配送車	仮想生命体
ノード及びパス	生息空間
配送効率	生命力
荷物の積み降ろし	摂取及び排泄

を減少させるので、互いに対応づけが可能である。人工生命の「待機」は時間の経過とともに生命力が減退するのに対し、配送車の場合は直接配送効率を下げる原因とはならない。

人工生命では各個体間で競争や共存といった相互関係を持つ。集配送計画の場合でも、リソースとなる荷物を巡って配送車間で同様な相互関係を持つと考えられる。

生命体の行動と環境についてまとめると、表 1 のようになる。このような対応づけを行うことによって、仮想空間内で集配送という創発レベルが発現する。

#### 4・2 配送車の性質形成

配送車の行動について説明する。配送車はノードに到着した時点で、まずそのノードへの荷物を降ろし、次に以下の 3 つの行動の中から少なくとも 1 つ以上を選択し、実行する。各行動はすべて配送車自身もつ性質に依存して行われる。

- 次の移動先を選択して移動する
- ノードに配置してある荷物を積載する
- 移動せずにノードに待機する

配送車の行動はしきい値と適当な乱数の大小関係で決定される。しきい値で規定される配送車の性質のことを、ここでは度合と呼ぶことにする。以下の 3 つの度合で配送車の性質を形成する。しきい値は 0 から 99 までの整数値で表現するものとする。

**移動距離の度合** 配送車があるノードに到着したとき、次の移動先としてどの程度離れたノードを選択するかという度合である。このしきい値が大きいほど、配送車は次の移動先としてより遠くのノードを選択する。

**積載度合** ノードにある荷物をどの程度積載するかという度合である。このしきい値が大きいほど、配送車は積載量制限一杯に荷物を載せる傾向が強くなる。配送車が荷物を積載する際は、移動距離の度合を用いてどのノードへの荷物を積載するかを事前に決定しておく必要がある。

**待機度合** すぐに移動先を決定せず、そのノードに待機する程度の強さを表す。このしきい値が大きいほど、配送車は移動せずにノードに留まる傾向が強くなる。

#### 4・3 一世代の集配送

一世代あたりの集配送の実行は、ノードに到着した配送車について 1 台ずつ逐次実行する。ノードに到着した配送車はまず荷物を降ろし、ノードに待機するか否かを決定する。続いて荷物を収集するか否かを決定した後、次の移動先を決定する。配送車がどのような行動を採択するかは、すべて各配送車もつ性質に依存することになる。

荷物を積み込むのが好きな性質を示しているのが積載度合である。積載度合を例として配送車の行動を規定する方法について論じる。配送車があるノードに到着してそのノードにある荷物を積載するか否かを決定しなければならないとする。このとき、まず行動規準値を乱数で割り付ける。次にその行動を採択するか否かを規準値と積載度合の大小関係で決定する。大小比較の結果、積載行動が却下された場合には荷物を積載せずに次のノードに移動する。待機度合との関係で、そのノードに留まるかもしれない。移動する場合には、次の行き先ノードの候補を再び乱数で決める。但し、そのノードに行くか否かの行動決定には今度は移動距離の度合が決定因子になる。このように度合という性質を用いて配送車の次の行動を規定できる。

ノードに事前に配置されている荷物は次第に配送され、すべての荷物を収集・配送し、すべての配送車が出発点に帰還した時点で集配送が完了する。配送車の性質は同一世代の間は変動しないが、乱数で自律的に移動するため、同一世代でこの集配送を数回繰り返す。その世代の目的関数値(配送車の移動距離の総和  $f$ ) は、その実行回数の中の最小値で代表させる。代表値を算出した配送車の経路からその世代の解  $x_{ij}^k, y_{ij}^k, z_{ij}^k$  が得られる。制約式 (2)~(6) は、配送車の自律的行動によりすべて自動的に満たされる。

#### 4・4 暫定値の更新と進化

集配送の結果、過去最良の暫定値よりも優れた総移動距離を算出した場合、暫定値と解を更新する。その解を算出した配送車群の経路情報も一緒に更新する。そして配送車を進化させる。ここで、進化とは性質を形成している 3 つの度合のしきい値を更新することである。これは解空間の探索を集中化させたり多様化させたりするのに必要不可欠である。

配送車の性質の引継ぎ方、つまりは、しきい値の更新による進化の方法について述べる。配送車の性質の引継ぎにおいては「性質度合に関するしきい値を、優秀な配送車に近づけ、劣悪な配送車から遠ざける」ことを基本とする。例えば、過去最良の(最も優れた経路を算出した)世代のある配送車のある性質度合のしきい値が 60 であり(図 3 上)、現在の同じ(子孫の)配送車で同じ性質度合のしきい値が 30 であったとする(図 3 下)。現在と過去最良の世代で比較して、暫定値の方が現世代の目的関数値よりも優れていた場合、現在の配送車のしきい値を少し増加させ(60 に近づけて)、次世代配送車の性質を進化させる(図 4 上)。逆に現世代の目的関数値が暫定値よりも優れている場合、現在の配送車のしきい値を少し減少させ(60 から遠ざけて)、次世代の配送車の性質を進化させる(図 4 下)。これを一定数の配送車に適用する。それ以外の配送車は、現在のしきい値をそのまま引継がせる。

しきい値の増加/減少幅は一定範囲(5 前後)の乱数を発生させて、これらの幅を決定する。

#### 4・5 アルゴリズムの概略

以上のアプローチ概念に基づいて人工生命を用いた集配送計画の求解手順を示す。

**Step 1** 配送車の初期性質を適当に形成し、集配送を 1 回実行させ、暫定値と暫定解を求める。解とは配送車の経路

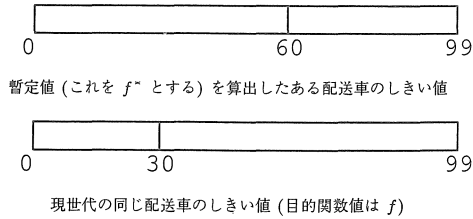


図3 過去最良のしきい値と現在のしきい値の関係

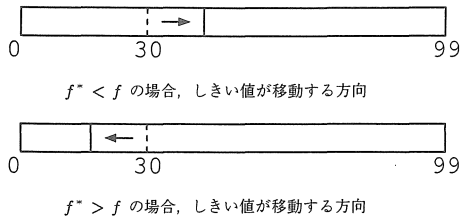


図4 しきい値の更新方法

のことである。世代数を1で初期化する。

- Step 2 初期性質とは異なる配送車群を適当に生成する。
- Step 3 同一配送車群で集配送を数回実行し、その世代の代表値から目的関数値を算出する。数回の実行中、しきい値に外乱を与え突然変異をさせる。
- Step 4 暫定値と目的関数値を比較し、暫定値と暫定解を更新する。
- Step 5 配送車の性質を形成している3つの度合のしきい値を進化させる。過去最良のしきい値も更新する。
- Step 6 事前に設定した世代数に到達したら、暫定値と暫定解を本集配送計画問題の準最適値および準最適解として採用し、アルゴリズムを終了する。さもなければStep 7を実行する。
- Step 7 世代数を更新し、新たな性質をもつ次世代の配送車群を生成し、Step 3へ戻る。

5. 数値実験結果と考察

小規模な集配送計画モデルに対する人工生命の適用について述べる。人工生命的アプローチによる本提案法と別手法であるシミュレーテッドアニーリング法(以下SA法)の求解結果との比較も行った。これについても報告する。

5.1 実験環境条件

まず、世代を追って配送車の性質形成の様子を観察できるように総世代数は敢えて多めに設定する。一世代間に実行する集配送の回数は、5回、10回、20回と3通りを用意する。解の収束過程を調査できるようにするためである。荷物の配置点数は8ノード、配送車2台を対角線上に配備して集配送を実行する。配送車の性質は性質形成の節4.2で論じたように3種類とする。突然変異率は適当であるが、ここでは10%とする。そして突然変異率の収束係数を、総世代数の約1/3に設定する。総世代数が4000であるならば、ほぼ1300世代から突然変異は徐々に消失していく。数値実験で使用した所与の定数をまとめると以下ようになる。

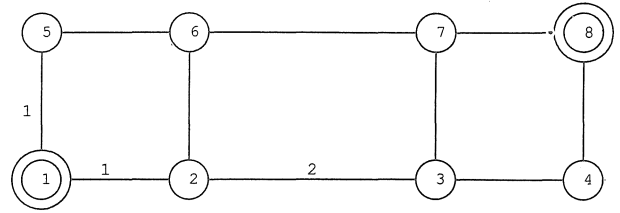


図5 小規模モデルのノード位置

表2 8ノードモデルの荷物の配置

配置点	配送先							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	8	0	0	2	0	0	0
2	3	0	0	0	0	4	0	0
3	0	0	0	0	0	0	2	0
4	0	0	0	0	0	0	4	3
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	2	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	3	2	0	0	0	0

例えば、ノード1からノード5に大きさ2の荷物が、ノード4からノード7に大きさ4の荷物が配置されている。

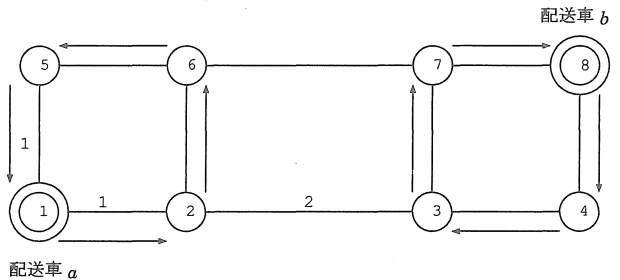


図6 小規模モデルの最適ルート

集配送を行う総世代数 4000 世代

一世代間に実行する集配送の回数 5,10,20 回の3通り

配送車の台数と最大積載容量 2台ともに10単位

ノード数 8ノード

配送車の性質 移動距離度合, 待機度合, 積載度合の3つ

同一世代中の突然変異率 10%

突然変異の収束係数 1/3

本モデルのノードの位置関係を図5に示す。8ノードが一辺の距離が1である2次元ユークリッド平面上に展開してある。図には示していないが、各ノードは他のすべてのノードへのパスを持っており、例えばノード1-8間の距離は $\sqrt{17}$ である。配送車は2台使用する。1台目の配送車aの出発点はノード1、最大積載容量は10である。2台目の配送車bは配送車aと対角線上に配備し、出発ノードは8、最大積載容量は配送車aと同じ10である。

荷物は表2のように配置してある。

ノードの位置関係と荷物の配送先から、この小規模モデルの最適経路は配送車aが1→2→6→5→1、配送車bが

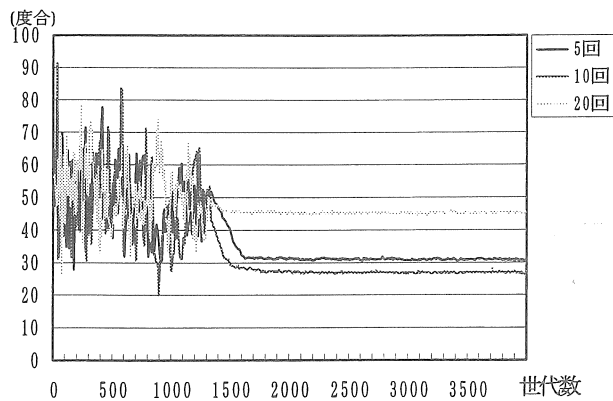


図 7 待機割合の推移 (配送車 b)

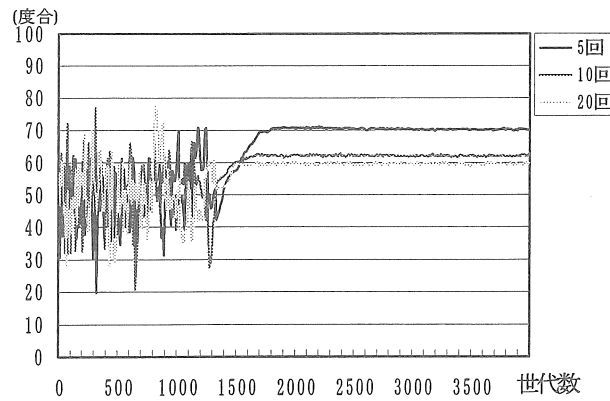


図 9 積載割合の推移 (配送車 b)

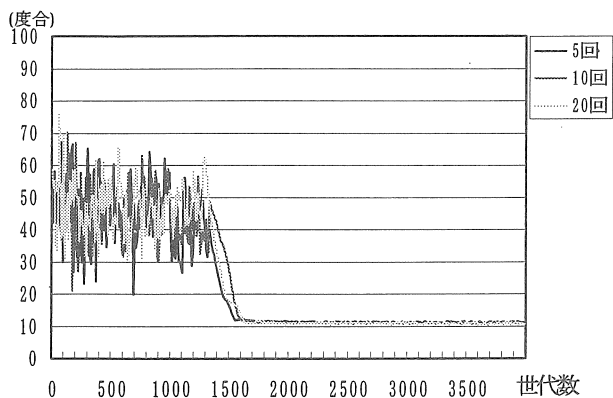


図 8 移動距離の割合の推移 (配送車 b)

8 → 4 → 3 → 7 → 8 であることは明らかである。最適値は 8.00 となる。2 台の配送車の総移動距離が目的関数だからである。最適ルートは図 6 のようになる。

数値実験で使用した計算機の環境を示しておく。

Machine Sun SPARC Workstation S-7/300U Model 2300  
 CPU UltraSPARC-II(300MHz)×2, RAM:256MB  
 OS 日本語 Solaris 2.6  
 Compiler gcc 2.7.2.2.f.2

### 5・2 性質形成や配送効率の推移

実験は一世代の間に実行する集配送の回数ごとに示す。すべて複数回の実験から得られた平均値を使用している。集配送の回数を 5 回から 10 回, 20 回と増やすと計算量は当然 2 倍, 4 倍と増加する。

配送車の性質割合に関して, その推移を世代を横軸にして追跡してみた。図 6 右上から出発する配送車 b だけ示す。

まず待機割合は図 7 のようになった。このしきい値が大きくなると, 配送車は移動せずにノードに留まる傾向が強くなる。初期の頃はランダムに変動しているのが, 突然変異率が収束するあたりから安定し始める。しきい値 30 から 50 に収束しており, ノードに留まって待機をすることをあまり好まない性質が形成されていることが判る。

次に移動距離の割合について考察する。図 8 より非常に低い値で推移しており, より近くのノードへ移動しようとする傾向がはっきりと見て取れる。

3 つ目の割合として, 積載割合の推移について図 9 に示す。

この割合は先程の待機割合の推移と似ており, 値は 55 から 70 を少し超える程度に収束している。移動距離の割合ほど極端ではないものの, なるべくノードにある荷物を収集する傾向にある。配送車 a の割合もほぼ同様の結果であった。

3 つの割合を規定するしきい値の推移から次のような性質が配送車に形成されていることが判明した。つまり, 対症的な位置関係にある 2 台の配送車は, 互いに少しの休憩をしながら, できるだけ近くのノードを巡回して, 配置されている荷物をなるべく収集するようになる。このような性質が配送車に形成されていることがこれらの図から確認できる。

次に, 式 (9) で定義した配送効率について考察する。配送車 b の配送効率の推移を図 10 に示す。推移の傾向は配送車 a もほぼ同じであった。性質割合を規定する 3 つのしきい値変動にほぼ追従している。世代交代が進み, 性質形成されるにしたがって配送効率も徐々に高くなる。一世代間に実行する集配送回数が 20 回の場合が一番高効率な集配送を実現している。2 台の配送車が最短ルートで集配送を行った際の配送効率は, 配送車 a が 0.475, 配送車 b が 0.350 であった。

暫定解がどのくらい更新され, 暫定値が世代進行に伴ってどれくらい改善されているかを示しているのが図 11 である。この図は一世代間に実行する集配送回数を 20 回とした場合のグラフとなっている。さらに, 右縦軸は 10 世代分をまとめた暫定値更新回数でプロットされている。更新回数には暫定値と等しい値を算出した世代数も含まれている。突然変異の影響が弱くなり, しきい値が安定しだす 1300 世代以降から急に暫定値更新回数も安定する傾向にある。暫定値それ自体は比較的早い世代で最適値である 8.00 を算出していることがこの図から確認できる。

### 5・3 性質割合・配送効率と総移動距離の相関関係

配送車の性質割合と配送効率, あるいは性質割合と総移動距離の関係について論じる。配送車 b のみ詳細を紹介する。配送車 a もほぼ同様の結果を得ている。まず得られた実験データから配送車 b の性質割合と配送効率の相関係数を計算すると表 3 のようになった。

提案法では遺伝的アルゴリズムのように個体単体で評価関数をもたない。そこで個体の優劣を決定するために配送効率なるものを節 4・1 で導入した。配送車の性質形成では配送効率を高めるように割合が設計されている。特に配送効率は

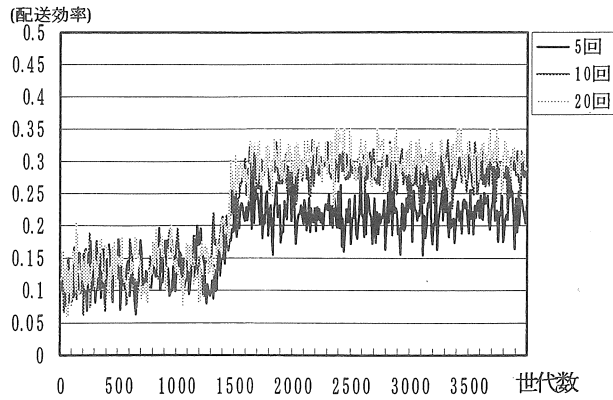


図 10 配送効率の推移 (配送車 b)

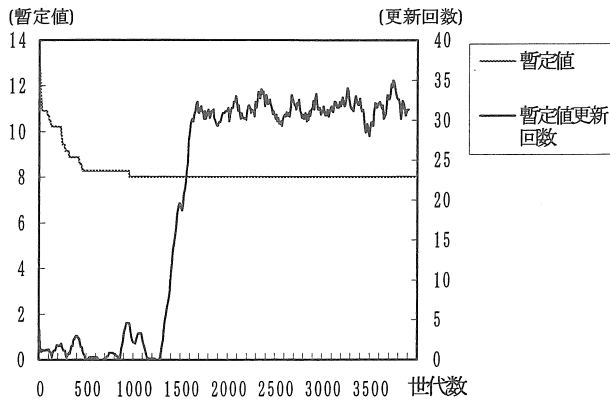


図 11 暫定値とその更新回数の推移

移動距離の度合と強い負の相関がある。これは、遠くの荷物を取りに行く(移動距離度合が大きい)と配送効率が悪く(小さく)なることを意味している。逆に配送効率と積載度合には正の相関がある。つまり、荷物をたくさん積む(積載度合が大きい)配送車は配送効率が良く(大きく)なるのである。

配送車 b の性質度合や配送効率と総移動距離(目的関数)の関係について考察する。相関係数を一世代あたりの集配送実行回数別にまとめると表 4 のようになった。

相関係数から配送効率と総移動距離の間には明らかに負の

表 3 配送車 b の性質度合と配送効率の相関係数

一世代の実行回数	待機度合	移動距離度合	積載度合
5 回	-0.7225	-0.8377	0.7845
10 回	-0.7906	-0.9292	0.6892
20 回	-0.4403	-0.9368	0.6719
全体	-0.4450	-0.8424	0.5096

表 4 配送車 b の性質度合・配送効率と総移動距離の相関係数

一世代回数	待機度合	移動距離度合	積載度合	配送効率
5 回	0.5256	0.5699	-0.5604	-0.5183
10 回	0.4885	0.4715	-0.2625	-0.4894
20 回	0.3803	0.5044	-0.3207	-0.5113
全体	0.3770	0.4975	-0.3741	-0.4725

表 5 提案法による計算時間

一世代あたりの実行回数	計算時間	最適解出現
5 回	2.65 秒	225 世代
10 回	4.13 秒	189 世代
20 回	5.45 秒	117 世代
全体	4.08 秒	177 世代

表 6 SA 法による計算時間

初期温度	冷却率	
	0.95	0.99
1 度	38.84 秒	39.59 秒
5 度	40.38 秒	33.07 秒
10 度	42.78 秒	45.81 秒
平均	40.67 秒	39.49 秒

相関があることが判る。配送効率が悪く(小さく)なると総移動距離は長く(大きく)なるのである。興味深いのは待機度合と総移動距離の関係である。ノードに長く待機しても総移動距離には直接影響はないはずであるが、実際には正の相関が認められた。つまり、ノードに留まる傾向の強い(待機度合が大きい)配送車が存在すると総移動距離は長く(大きく)なってしまう。総移動距離に一番影響を与えるのはここでもやはり移動距離の度合であった。

#### 5・4 提案法と SA 法の比較

最後に、SA 法との比較を行う。小規模なモデルでは提案法も SA 法も共に最適解を算出できる。そこで最適解が出現するまでに費す計算時間で比較することにする。

提案法による計算時間を表 5 に示す。提案法では、一世代あたりの実行回数を増加させると最適解が出現するまでの世代数は当然減少するが、計算時間そのものは増大している。このことから、効率良く求解するためには問題の複雑さに応じて総世代数や一世代あたりの実行回数など所与の定数を設定しなければならない。

一方の SA 法による計算時間を表 6 に示す。この表にあるように SA 法では 2 通りの冷却率と 3 通りの初期温度で複数回の実験を行い、平均値で計算時間を算出している。冷却率と初期温度について簡単に説明する。ここで採用している値は他の一般的な問題にも適用できる、いわば汎用的な冷却率と初期温度である。よって提案法との性能比較に何ら支障はないと判断した。冷却率は人工生命の一世代あたりの実行回数に相当する。この値を増加させると収束速度は鈍化するが近傍解の探索をより深く重点的に行うことができる。初期温度とは人工生命の総世代数に相当し、解の探索回数を制御する。初期温度の上昇も冷却率の増加も共に計算時間を増大させる要因になる。

両手法を比較すれば、計算時間に関しては提案法の方が明らかに SA 法より優れている。SA 法はもともと組合せ最適化問題に対して解の質と計算時間を天秤に掛ける手法の一つ

であり, 計算時間をかなり要求するヒューリスティックであることが知られている。提案法は SA 法と比較すれば非常に短時間で最適解の導出に成功している。平均で約 1/10 の計算時間であった。

## 6. おわりに

本論文では, 複数台の配送車で構成される集配送計画を組合せ最適化問題として定式化した。目的関数は全配送車の総移動距離とした。そして人工生命的アプローチをこの問題に適用することで新しい求解法を提案した。

数値実験より, 小規模モデルに対しては限られた世代数で最適経路を導出することに成功した。配送車の性質度合が形成され, しきい値が安定するに伴い, 目的関数である総移動距離は次第に最適値へと収束していった。これは性質形成のための各種度合が適切に設定されている証拠である。

数値実験を繰り返し, 相関係数を算出した結果, 移動距離度合と配送効率の間には強い負の相関が認められ, 移動距離度合と目的関数の間には正の相関が認められた。移動距離度合は配送車の性質を形成している 3 つの度合のひとつである。この相関は「遠くの荷物を取って取りに行けば, 配送効率は低下し, その結果, 総移動距離も長くなる」と解釈できる。計算時間に関しては少なくとも SA 法よりは高速であることが明らかとなった。

さまざまな評価結果から以下のようなことが分った。すなわち, 組合せ最適化問題に人工生命的アプローチを適用する場合, 目的関数と強い相関のあるパラメータを人工生命の性質づけに利用することが肝要である。この性質づけが各世代で生成される解の質に大きな影響を与え, 求解法全体の成否を握る重要な要因となる。

今後の課題としては, より大規模な問題に対して人工生命が有効に機能することを示すことである。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり, 平成 11 年本学大学院生産システム工学専攻修了の近藤瑞木氏 (現在 三菱電機メカトロニクスソフトウェア株式会社勤務) には多大な協力を得た。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 星野 力, “遺伝的アルゴリズムと人工生命”, オペレーションズ・リサーチ, Vol.38, No.7, pp.330-333, 1993.
- 2) 増井 忠幸, 百合本 茂, 片山 直登, ロジスティクスの OR, 槇書店, 1998.
- 3) 久保 幹雄, 毛利 裕昭, “配送計画支援システム METRO とその適用事例”, オペレーションズ・リサーチ, Vol.41, No.8, pp.429-435, 1996.
- 4) G. Clarke and J.W. Wright, “Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points”, Operations Research, Vol.12, No.4, pp.568-581, 1964.
- 5) Colin R.Reeves 編, 横山 隆一 他訳, モダンヒューリスティックス, 日刊工業, 1997.
- 6) 安田 恵一郎, “進化論的計算手法とメタヒューリスティックス”, 電気学会論文誌 C, Vol.122-C, No.3, pp.320-323, 2002.
- 7) A. Colorni, M. Dorigo and V. Maniezzo, “Distributed Optimization by Ant Colonies” in Toward A Practice of Autonomous Systems, pp.134-142, MIT Press, 1992.
- 8) 畝見 達夫, “人工生命研究のポリエージェント的側面”, オペレーションズ・リサーチ, Vol.42, No.9, pp.604-609, 1997.

(受理 平成 14 年 3 月 19 日)