

遺伝的アルゴリズムに基づく最適化ソフトウェア開発環境と 配送スケジューリング問題への適用

奥田 篤, 堀 武司, 波 通隆

Development of the Object-Oriented Framework for the Optimization Software Development Environment using the Genetic Algorithm and Application to Delivery Scheduling Problem.

Atsushi OKUDA, Takeshi HORI, Michitaka NAMI

抄 録

人員や施設などの資源を最大限に活用するために、煩雑で困難なスケジュールの最適化作業の効率化が求められている。組合せ最適化問題は、複雑な制約条件を伴うことが多く、有効な解法を求めることが出来なかったり、解法が判明しても莫大な計算時間を要することが多いため、これらを解決するソフトウェアの開発は困難な状況である。

そこで、遺伝的アルゴリズムに基づく最適化ソフトウェアの開発に利用できるオブジェクト指向フレームワークを開発した。さらに、このフレームワークを用いて配送スケジューリング最適化ソフトウェアを開発し、食品・日用品宅配事業における宅配員の顧客訪問スケジュールの最適化に適用した。

キーワード：遺伝的アルゴリズム, オブジェクト指向フレームワーク, 組合せ最適化問題, 配送スケジューリング

Abstract

In order to optimize the use of resources, such as staff and facilities, the increase in efficiency of complicated and difficult optimization work of the schedule is desired. Since a combination optimization problem is accompanied by complicated constraints, it cannot find an effective solution in many cases. Even when a solution is found, calculation cost is usually enormously required for the solution. Thus, development of the software which solves a combination optimization problem is difficult.

Then, an object-oriented framework which can be used for the development of optimization software based on genetic algorithm was developed. A delivery scheduling software was developed using the framework, and the delivery schedule of the delivery person engaged in a parcel delivery service was optimized.

KEY-WORDS : Genetic Algorithm, Object-Oriented Framework, Combination Optimization Problem, Delivery Scheduling

1. はじめに

最近の社会的・経済的な状況を踏まえて、北海道内においても、官民を問わず多くの組織で、人員や施設などの資源を最大限に活用することが望まれている。人員配置プランニングや施設利用スケジューリングのような、莫大な組合せの中から最適なものを求める組合せ最適化作業は、極めて煩雑で困難な作業であることが多く、経験を積んだ作業者の試行錯誤により行われているため、その効率化が求められている。

しかし、組合せ最適化問題は、複雑な制約条件を伴うことが多く、従来からの一般的な計算方法では有効な解法を求めることが出来なかったり、解法が判明しても莫大な計算時間を要することが多いため、これらを解決するソフトウェアの開発は非常に難しい¹⁾。そのため、最適化作業の効率化を進めることが困難な状況にある。

ところが、遺伝的アルゴリズム²⁾ (Genetic Algorithm : GA)は、生物の進化現象を模倣した計算を行うことで、厳密解法を用いることなく、一定水準以上の解を少ない計算コストで求めることができ、組合せ最適化問題のような、難解かつ莫大な計算時間を必要とする問題に有効であることが知られている³⁾。しかし、対象とする問題について、遺伝子を模倣したデータ構造でモデル化し、所望の解が得られるように交配・突然変異・自然淘汰などの進化現象を適切に模倣することが難しく、実際には道内企業においては製品開発や最適化作業改善への応用例は少ない。

このような状況を踏まえて、当場では現実世界の最適化問題へのGAの適用に関する技術開発を進めている。その一環として、GAに基づく最適化ソフトウェアを開発する際に開発環境として利用でき、開発の迅速化に有効なオブジェクト指向フレームワークを開発した。さらに、食品・日用品宅配事業を対象に、このフレームワークを利用して、配送スケジュール最適化ソフトウェアを開発し、宅配員の顧客訪問スケジュールの最適化を試みた。本報告では、開発したGAフレームワークと配送スケジュール最適化事例を紹介する。

2. GAフレームワークの開発

2.1 組合せ最適化問題と遺伝的アルゴリズム

2.1.1 組合せ最適化問題

組合せ最適化問題は、ある制約条件の下で目的関数の最小値、あるいは最大値を与える設計変数を決定する数理的問題、即ち最適化問題であって、かつ求める解が順序や割当のように組合せ的な構造を持つ場合である⁴⁾。

組合せ最適化問題は社会・企業活動の中に幅広く存在しており、具体的な例としては、離散生産・輸送計画、スケジューリング、配送計画などが挙げられる。

数学的には、有限集合と、有限集合上で定義される目的関

数が与えられたとき、目的関数を最適（最小あるいは最大）にする有限集合の要素の組合せを求める問題として、以下の様に定式化される。

目的関数： $f(x)$

制約条件： $x \in S$ 、ただし、 $S \subset X$

S, X : 有限個、または、可算無限個の要素を持つ
離散集合

x : X の要素

組合せ最適化問題は、最適解を求めることが本質的に難しい問題であるが、その困難さの主たる原因は、微分可能ではないため微分的な情報を利用できないことにある。従って、各 x に対して、順にその目的関数の値を調べる全探索を行わざるを得ない。

S が有限個の集合であれば、理論的には、すべての組合せを調べることによって解を求めることが可能であるが、 S の要素数や x の次元が大きくなるにつれて、その組合せの数は指数関数的に増加するため、規模の小さい問題を除いては、現実には求解することが不可能である。

そのため、組合せ最適化問題には、数理計画法に代表される従来の最適化手法よりも、近似解を求める発見的手法（ヒューリスティックス）やランダム探索が有効な手段とされている⁵⁾。

発見的手法は、問題固有の構造や性質を活用して作成する近似解法である。得られた解が最適解であることは保証されないが、対象とする問題の構造を上手く利用することができれば、比較的良い解が得られることが経験的に確かめられている。ただし、近似解法の作成には問題の構造に関する深い知識が必要である。ランダム探索は、問題の性質は全く利用せず、無作為に選び出した解候補の実行可能性を調べ、実行可能な解候補中で目的関数値を最小ないし最大にするものを準最適解として採用する手法である。高品質な準最適解を得るためには、十分に時間をかけて非常に多数の解候補を調べる必要がある。

そのため、近年は、発見的手法とランダム探索を組合せた最適化手法として、特定の問題に限定されずに、どのような問題に対しても汎用的に適用できるように設計されたヒューリスティックスである、進化的計算法が注目されている。特に、現実世界の最適化問題では、最適解を厳密に追求することよりも、実用上満足できる水準の近似解を少ない計算コストで求めることが期待されるため、進化的計算法の利用がよく検討される⁶⁾。

進化的計算法は、生物の進化現象を工学的に模倣した計算手法の総称であり、遺伝的アルゴリズム、遺伝的プログラミング、進化的プログラミング、進化戦略などが含まれる。本研究では、この中でも最も広く研究されている遺伝的アルゴリズムに着目している。

2.1.2 最適化手法としての遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム (GA) は、自然界における生物の適応進化の現象を数理モデルに置き換えて模倣した、確率的な最適化・探索・学習の手法である。

自然界では、環境に適応できない個体は死滅し、環境に適応した個体が生き残り子孫を増やしていく。この現象をモデル化し、問題に対して最もよく適応する個体、すなわち最適解を、計算機上で生成させようとするのが、GAの概念である。

GAによる解探索は次のよう行われる (図1)。与えられた課題に対して、多数の解候補からなる母集団を生成し、これらの解候補に対して、評価・選択・交叉・突然変異と呼ばれる遺伝的操作を適用する。この操作の繰り返しで、課題に対する解候補の評価値を逐次向上させて行き、最終的に課題に対する1つの解に収束させて、最適解もしくはそれに近似した解を得る。

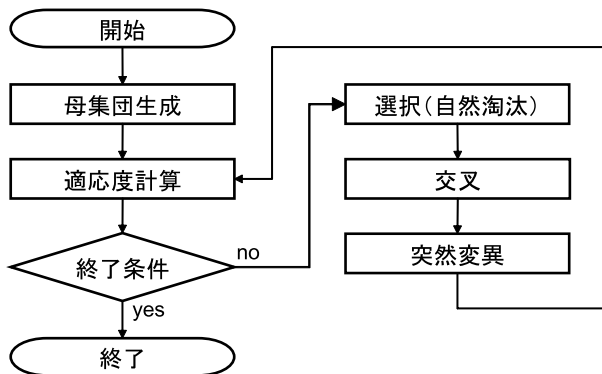


図1 GAにおける解探索の処理手順

GAは、解空間のさまざまな地点から開始され、並列的にそれぞれの解候補が適応度の高い地点をめざして進んで行く探索性質を持つため、数理計画法などの古典的な探索法に比べて、複数の制約条件を含んだ、多峰性の非線形最適化問題や組合せ最適化問題に適用しても局所解に陥ることが少なく、最適化を行うことが可能であり、非常にロバストである。このような特徴により、GAは応用範囲が非常に広く、解空間構造が不明であるため決定的あるいは優れた解法が発見されていない問題や、全探索が不可能と考えられるほど広大な解空間を持つ問題に対しても有効である。

GAでは、個体数・交叉率・突然変異率などの、遺伝操作に関わるパラメータが多数存在しており、これらパラメータの調整によって解の探索能力が大きく異なる。しかし遺伝操作の設計・実装は問題に依存しており、効果的にパラメータを設定するには、多くの経験と知見が必要となるため、実問題へのGAの適用は困難である。特に、数理計画に関する知見やソフトウェア開発技術の蓄積が乏しい道内企業では、最適化作業の改善にGAを応用することが難しいのが現状であ

る。そこで、GAに基づく最適化ソフトウェアを開発する際に、開発環境として利用できるGAフレームワークを開発した。その詳細について、以下に述べる。

2.2 GA用フレームワークの概要

2.2.1 ソフトウェア開発におけるフレームワーク

オブジェクト指向ソフトウェア開発において、フレームワークの構築は、アプリケーション開発の効率を向上させるための有力な手段である。

フレームワークは、ある程度限定した分野 (ドメイン) におけるアプリケーションを仮定したクラスライブラリの集合体として構築し、それだけでも基本的な動作を行わせることができるように実装された半完成のソフトウェアである。その実装の際に、継承や動的束縛を用いて、変更や拡張に伴う影響が、フレームワーク自体には及ばず、フレームワークの外側に限定できるように設計する。このようにして開発されたフレームワークは、拡張性の高いソフトウェア構造を持っており、アプリケーションを開発する際に雛形として利用できる。

特定のドメインを仮定して、アプリケーションの基本となる共通な部分を取り出して予めフレームワーク化しておくことで、それぞれのアプリケーションに固有な部分だけの拡張によってアプリケーションが構築できるようになる。そのため、アプリケーション開発の効率を大きく向上させることができる。

2.2.2 GAフレームワーク

開発したフレームワークは、組合せ最適化問題を適用分野と仮定したクラスライブラリの集合体であり、オブジェクト指向フレームワークとして構築されている。GAに基づく最適化ソフトウェアを開発する際に雛形として利用でき、開発の迅速化に有効である。

フレームワークを構築するために、GA処理の基本的な仕組みから、適用問題とは独立で共通的な手順を取り出すために、オブジェクト指向的に分析を行った (図2)。

GAでは、進化の対象となる個体の集団を遺伝子プールに存在させる。それぞれの個体は染色体1本と適合性値などの情報を含んでいる。染色体は遺伝子を複数並べた構造になっ

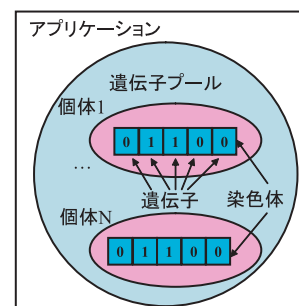


図2 GAを用いるアプリケーションの模式図

ている。遺伝子プールはアプリケーションの中に1個存在させる。遺伝的操作は、2個体間の関係である交叉は遺伝子プールに、個体ごとの事象である突然変異は個体に、それぞれ属している。染色体に含まれる遺伝子は固有の形式で表現される。この分析結果をオブジェクトダイアグラムで表現すると図3のように示される。

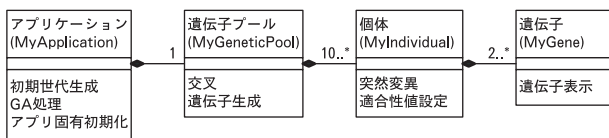


図3 GA処理のオブジェクトダイアグラム

フレームワークはこのオブジェクトダイアグラムに従って構築されており、アプリケーション・遺伝子プール・個体・遺伝子の各クラスから構成される。ただし、アプリケーション拡張に伴う遺伝子クラスの変化から他のクラスを隔離するために、クラステンプレートを利用している。

最適化ソフトウェアを開発する際は、フレームワークを拡張して、クラステンプレートから定義された各クラスを継承して、固有問題領域のクラスを定義することで、アプリケーション拡張を行う(図4)。

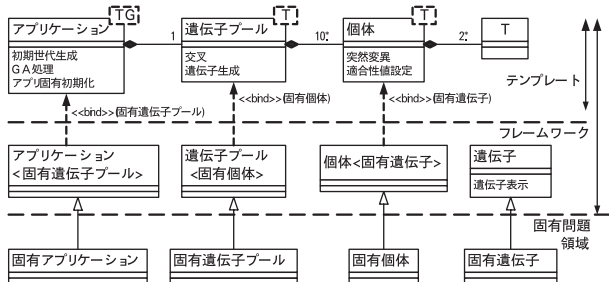


図4 GAフレームワークの構成

3. 最適化問題への適用によるフレームワークの検証

3.1 ジョブショップスケジューリング問題

ジョブショップスケジューリング問題(Job-shop Scheduling Problem: JSP)を対象とする最適化ソフトウェアを開発して、フレームワークの有効性を検討した。

JSPは、n個の仕事をもm台の機械で処理したときの、総所要時間を最小にするような作業の順序を決定する問題である。ただし、各仕事を処理する機械の順序(技術的順序)、および各機械上での各仕事(作業)の処理時間は与えられている。また、各機械の種類はすべて異なり、同時に複数の作業を処理することができないものとする。

JSPは、多項式オーダーの計算量で解ける厳密解法が存在しないと予想されている問題クラスである、NP困難クラス

に属する問題であり、実用規模では最適解を得ることができない問題である。

JSPは生産計画理論の重要な分野であるため、解法評価のための標準問題が多数提案されている。中でも、Muth & Thompsonの問題は、極めて難解な問題として、特に良く知られている。

フレームワークの評価には、Muth & Thompsonの問題(MT06およびMT10)を用いた。各問題における仕事数、機械数および最小の総所要時間を表1に示す。それぞれ問題の最小総所要時間は表1に示した通り55および930であるが、最小総所要時間を持つスケジュール、即ち最適解は複数存在する。

表1 各問題の仕事数・機械数・最小総所要時間

問題	仕事数	機械数	最小総所要時間
MT06	6	6	55
MT10	10	10	930

3.2 JSP最適化ソフトウェア

MT06およびMT10を対象に、フレームワークをアプリケーション拡張して、最適化ソフトウェアを開発した。

遺伝子コーディングには、順序表現を用い、全作業数分、仕事番号を並べたものを遺伝子型とした。従って、同一の仕事番号が、その仕事を処理するのに必要な作業数分出現する。

遺伝子デコーディング(解釈)は、染色体の左端から順に、出現する仕事番号から機械番号を取得し、既知の作業時間を考慮してガントチャートへ配置する方法を用いた。ガントチャートへの作業の配置は、機械スケジュールに挿入可能で、仕事スケジュールで配置済み作業の最も遅い時間以後で最も早い時間を求めて、機械スケジュールと仕事スケジュールへ割り当てることで行う。

遺伝操作は2点交叉と任意の2座位を入れ替える突然変異を実装した。

開発したソフトウェアを、対応するそれぞれの問題に適用して、計算機実験を行った。計算機実験に用いたパラメータは、表2の通りである。計算機は、IBM PC-AT互換のパーソナルコンピュータ(CPU: Intel Pentium 4)を用いた。この計算機を用いて、MT10について探索終了世代である2000世代まで計算するのに要した計算時間は5分程度である。

MT06では、容易に最適解が得られた。最短の最良解到達

表2 計算機実験に用いたパラメータ

パラメータ	MT06	MT10
母集団サイズ	100	400
交叉率	0.8	0.8
突然変異率	0.1	0.1
探索終了世代	100	2,000

世代は25世代であった。得られた解のガントチャートと機械スケジュールを図5、図6に示す。

MT10では、300試行中6回、最適解が得られた。得られた計算結果を図7に示す。平均最良解到達世代は605世代であった。

JSPに適用する最適化プログラムを、フレームワークを用いて開発し、これらプログラムが対応する問題について良好に求解できたことから、フレームワークの有効性が確認できた。

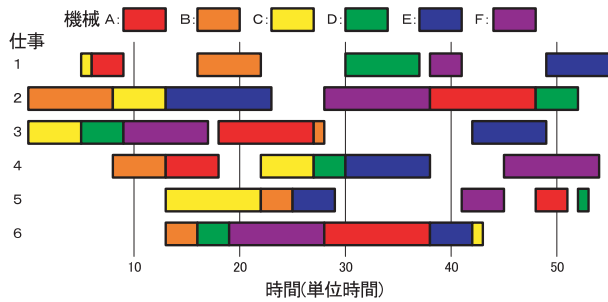


図5 MT06の計算結果（ガントチャート）

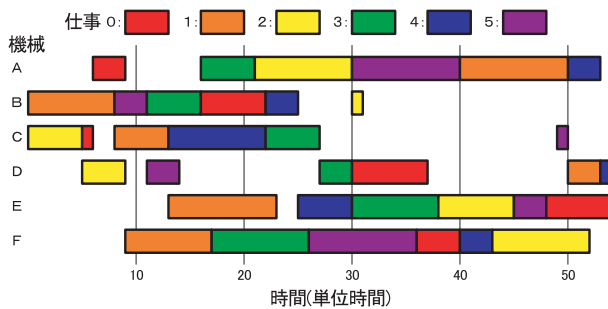


図6 MT06の計算結果（機械スケジュール）

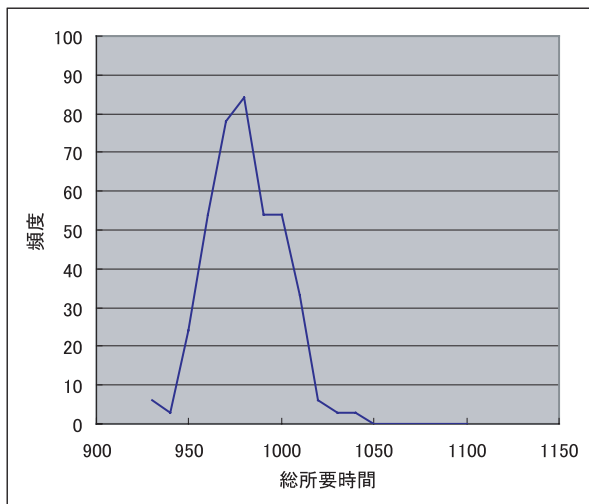


図7 MT10の計算結果

4. 配送スケジュール最適化問題への適用

4.1 配送スケジューリング問題

食品・日用品宅配事業を対象に、GAフレームワークを利

用して、配送スケジュール最適化ソフトウェアを開発し、宅配員の顧客訪問スケジュールの最適化を試みた。

対象にした事業者では、高齢者を対象に食品・日用品の宅配事業を展開しており、宅配員が自動車で顧客宅を訪問して、受注と商品受け渡しを行っている。また配送センターにおける、商品の仕分け、積載も宅配員が行っている。

宅配事業では、その日に訪問すべき顧客を、より多く、かつ経済的な経路で、訪問することが求められる。そのため、各顧客宅の地理的位置や、当日の顧客の在宅予定などを勘案して、顧客を訪問するスケジュールを決める必要がある。

この事業者では、顧客訪問スケジュールの作成は宅配員に任されているため、宅配員が個別にスケジュールを作成しているが、煩雑な作業であり、しかも毎日実施しなければならないため、多くの宅配員にとって負荷の大きい作業になっている。そのため、簡便かつ自動的に適切なスケジュールを生成するソフトウェアが望まれている。

この作業は、予め、顧客宅間の所要移動時間、各顧客宅での平均滞在時間、各顧客の不在予定が与えられている場合に、当日に訪問すべき顧客リストから、訪問スケジュールを生成する時間割生成問題に帰着できる(図8)。時間割作成問題は、NP困難クラスに属する問題であり、多項式オーダーの計算量で解ける厳密解法が存在しない。そこで、GAに基づく配送スケジュール最適化ソフトウェアの開発を試みた。

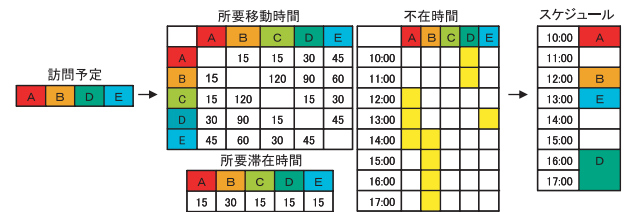


図8 顧客訪問スケジュール最適化問題の模式図

4.2 配送スケジュール最適化ソフトウェア

時間割作成問題に帰着した配送スケジューリング問題を対象に、フレームワークをアプリケーション拡張して、最適化ソフトウェアを開発した。

不在顧客の訪問を禁止する制約条件の下で、訪問予定の全顧客を訪問できるように必要な移動時間および滞在時間を1日の時間割に配置する時に、宅配員の移動時間ないし距離が最小になる時間割を求めることが最適化の目的である。

遺伝子コーディングには、連続番号でノーマライズした順序表現を用いた。さらに、Grefenstetteにより提案された方法を用いてコーディング変換を行って、致死遺伝子の発生を抑制している。

遺伝操作は2点交叉と任意の2座位を入れ替える突然変異を実装した。

開発したソフトウェアの外観を図9に示す。各顧客の不在

情報が入力された状態で、当日の訪問すべき顧客リストを入力すると、配送順序と時刻からなるスケジュールを生成して提示するインターフェースが与えられている。



図9 配送スケジュール最適化ソフトウェア

開発したソフトウェアに、実際の宅配作業において収集した条件を与えて、配送スケジュールを生成し、得られたスケジュールと、対応する宅配作業時の配送スケジュールを比較して、ソフトウェアの有効性を検討した。

宅配作業における条件の収集は、作業に使用した自動車の走行軌跡をGPSを用いて記録することと、宅配員から配送記録などの提供を受けることで行った。作業風景を図10に示す。顧客宅間の移動時間および各顧客宅での平均滞在時間は



図10 試験風景

走行軌跡を解析して抽出した。宅配員が当該日に認識していた顧客不在予定は、宅配員から情報の提供を受けた。当該日の実際の配送スケジュールは、宅配員から提供された配送記録および顧客情報を参照しながら、走行軌跡から抽出した。

ソフトウェアによる配送スケジュールの生成には、IBM PC-AT 互換のパーソナルコンピュータ（CPU：Intel Pentium 4）を用いた。探索終了世代を2,500世代として計算を行い、ほぼ5～10分程度の計算で、ソフトウェアは常に実行可能なスケジュールを生成した。得られたスケジュールはいずれも対応する作業時のスケジュールより経路の経済性

で優れており、生成されたスケジュールの移動距離は宅配作業時のそれに比べて平均して20%程度短縮されていた。

配送スケジュールの比較検討の1例を示す。図11、表3に実際の宅配作業で記録した走行軌跡と配送スケジュールをそれぞれ示す。同日の顧客不在予定を考慮して、ソフトウェアで生成した配送スケジュールを表4に示す。それぞれの配送スケジュールのグラフを図12に示す。生成したスケジュールのグラフが、作業時のスケジュールのグラフに比べて、回数で84%に、距離で70%に低減されており、ソフトウェアで生成したスケジュールが経路の経済性を改善していることが明らかであった。

これらの比較検討の結果から、開発したソフトウェアにより、実行可能かつ経路の経済性改善に有効な解が容易に得られることを確認した。

表3 配送作業時のスケジュール

11:31	松川町 20	13:00	元町 13	15:22	元町 5
11:47	亀田町 6	13:49	万代町 9	15:33	元町 20
11:54	亀田町 6	14:41	末広町 9	15:54	元町 9
11:57	亀田町 7	14:45	末広町 10	16:54	白鳥町 6
12:06	万代町 12	15:09	大町 4	17:08	大縄町 21
12:21	万代町 7	15:16	元町 19		
12:45	大町 5	15:19	元町 5		



図11 配送作業時の走行軌跡（丸点は顧客宅）

表4 最適化したスケジュール

11:00	松川町 20	13:00	大町 5	15:00	元町 5
	亀田町 6		末広町 9		元町 20
	亀田町 6		末広町 10		元町 9
12:00	亀田町 7	14:00	大町 4	16:00	万代町 9
	万代町 13		元町 13		白鳥町 6
	万代町 1		元町 19		大縄町 21
			元町 5		

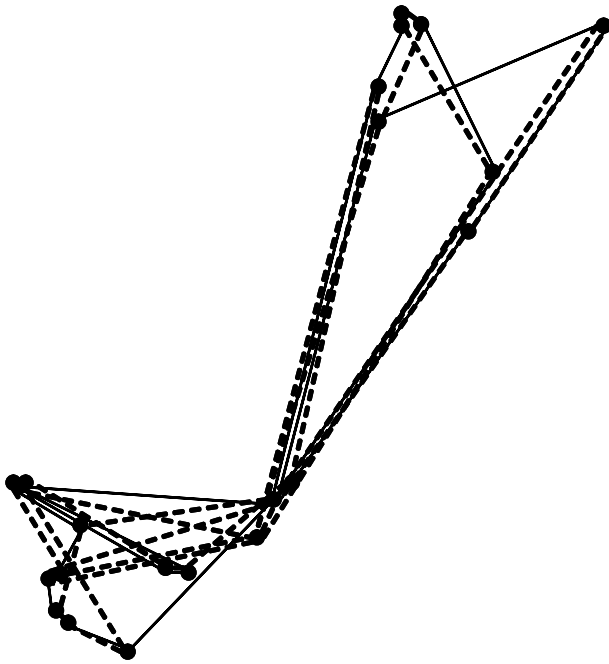


図12 配送スケジュールのグラフ（実線：最適化したスケジュール，波線：作業時のスケジュール）

5. おわりに

遺伝的アルゴリズムに基づく最適化ソフトウェアを開発する際に、開発環境として利用できるフレームワークを開発した。

さらに、このフレームワークを用いて、配送スケジュール最適化ソフトウェアを開発して、食品・日用品宅配事業に従事する宅配員の顧客訪問スケジュールの最適化に適用した。その結果、開発したソフトウェアが、経路の経済性改善に有効な顧客訪問スケジュールを生成できることを確認した。

今後は、開発したフレームワークを応用して、道内企業が抱える実際の最適化作業の効率化に関する技術展開を図って行く予定である。

引用文献

- 1) 川面恵司・横山正明・長谷川浩志：最適化理論の基礎と応用，コロナ社，226PP.，(2000)
- 2) 久保幹雄：組合せ最適化とアルゴリズム，共立出版，164PP.，(2000)
- 3) 三宮伸夫・喜多一・玉置久・岩本貴司：遺伝的アルゴリズムと最適化，朝倉書店，185PP.，(1998)
- 4) 北野宏明：遺伝的アルゴリズム，産業図書，328PP.，(1993)
- 5) 坂和正敏・田中雅博：遺伝的アルゴリズム，朝倉書店，203PP.，(1995)
- 6) 白石洋一：組合せ最適化アルゴリズムの最新手法，丸善，347PP.，(2002)

- 7) 平野廣美：遺伝的アルゴリズムと遺伝的プログラミング，パーソナルメディア，PP382.，(2000)
- 8) 本位田真一・吉田和樹：オブジェクト指向における再利用のためのデザインパターン，ソフトバンククリエイティブ，414PP.，(1999)
- 9) 佐藤啓太・金沢典子：デザインパターンプログラミング，トッパン，305PP.，(1996)
- 10) 依田光江・依田智夫・今野睦：実践UML - パターンによるオブジェクト指向開発ガイド，プレントニスホール，539PP.，(1998)
- 11) 鍋島一郎：スケジューリング理論，森北出版，289PP.，(1974)
- 12) J. F. Muth, G. L. Thompson : Industrial Scheduling, Prentice-Hall, (1963)
- 13) J. Grefenstette, R. Gopal, B. J. Rosmaita and D. Van Gucht: Genetic Algorithms for the Traveling-Sales-man Problem, Proc. of ICGA, pp.160-168, (1985)