

# 現実配送計画問題への多目的最適化手法の応用

中尾 芳隆

配送計画問題 (Vehicle Routing Problem) の研究の歴史は長く、これまで多くの研究者により様々なアルゴリズムが提案されている。またそれらの応用事例も多く報告されている。現実問題への適用においては、現実世界の多目的性をどのように扱うかがしばしば課題となる。配送計画に限らず、現実世界の最適化問題では多目的のトレードオフ制御が重要であり、目的関数の線形和最小化だけではユーザの要求を満たせないことは多い。本稿では、多目的の現実配送計画問題に対し配送計画アルゴリズムに多目的手法を組合せることにより、実用的な解を得た事例を紹介する。

キーワード： 配送計画, 多目的最適化, メタヒューリスティクス, 現実問題

## 1. はじめに

配送計画問題 (Vehicle Routing Problem, VRP) は、組合せ最適化問題の代表的な問題の1つであり、これまで数多くの研究成果が報告されている[1][3][4][6]。VRPは、デポ(車両の発着地かつ荷物の積地)、複数の顧客(荷物の卸地)、各顧客への配送量および車両容量が与えられたとき、各車両の配送量が車両容量以下で、各顧客にはちょうど1台の車が訪問し、目的関数値が最小となるよう、各車両の顧客への訪問順を決定する問題である。目的関数は、使用された車両台数あるいは総走行距離として定義されることが多い。

上記VRPの拡張として、顧客への到着時間帯指定のある時間枠付配送計画問題 (VRP with Time window, VRPTW) [5][12]、車両が配送を終えデポに戻った後、新たな配送を行える複数回転配送計画問題 (Multi Trip VRP, MTVRP) [13]、1顧客に対し2台以上の車両による分割配送を許容した分割配送計画問題 (Split Delivery VRP, SDVRP) [2][9]等、現実の配送業務要件を考慮した問題に対するアルゴリズムも、種々研究されている。

これまで数多くのVRPの研究成果が、配送計画支援システムという形で産業界に適用され、配送コストの削減および環境負荷軽減に寄与してきた。ただし、ORの基本手法をそのまま適用するだけでは、配送現場で「使える」解になるとは限らない。現場が「使える」解を生成するには、以下の要件を満たすことが必

要だと考えている。

- ・現実問題は多目的かつ多制約であり、それらの要求を満たすこと
- ・それらの目的・制約間にはトレードオフが内在することが多い。作業者がトレードオフを意思通りにコントロールできること

ノーベル経済学賞受賞者のSimon博士は、「人は目的関数値が最小の答えを必ずしも選択するのではなく、出た答えが満足かどうかで選択する」と、人間行動の現実的意思決定として「満足化」を主張した[11]。実世界の目的・制約条件は多様でその定義自体が曖昧なことも多い。多様な最適化要件を含む現実問題に対し、目的関数の線形和最小化問題として定式化し、その最適解を得たとしても、その結果を現場が満足するとは限らない。それは、現場は複数目的間のトレードオフバランスを重視するためである。本稿では、多目的かつ多制約の現実配送計画問題に対し、配送現場の要求を精緻かつ柔軟に反映することにより、トレードオフバランスの満足化を実現した事例を紹介する。そのアプローチのベースはVRPおよびORにおける代表的な手法であり、まさに「学んだ」ORが基本解法として使われている。以降の構成は次の通りである。2節では物流分野の背景について述べる。3節では現実の配送計画問題を紹介する。4, 5節では求解アプローチについて説明する。6, 7節にてまとめを述べる。

## 2. 物流分野の背景

### 2.1 物流効率化の必要性

産業界において物流効率化はコスト削減および環境負荷軽減の点で重点的課題である。まずコスト面に着目すると、2005年度の国内製造業における対売上高

なかお よしたか  
キヤノンシステムソリューションズ(株)  
〒530-0004 大阪市北区堂島浜1-2-6

物流コスト比率は5.8%（全業種では4.8%）である[14]。製造業の発展を担う研究開発費でさえ対売上高比率が4.2%であり、それに比べて物流コスト比率は高い。物流コストの内訳は、輸送費が58.5%、保管費が16.9%、その他24.6%であり、輸送費の比率が突出している。輸送機関別では、自動車輸送の占める割合が最も高く、その比率はトン数ベースで全体の9割を占め、自動車輸送部門におけるコスト削減の必要性は極めて高い。

次に環境面に着目する。2005年に京都議定書が発効され、日本は2008-2012年の間に温室効果ガスの平均排出量を、基準年（1990年）比で6%削減することが義務付けられた。この目標達成の実現に向け、改正省エネ法が2005年3月15日に閣議決定され、2006年4月1日に施行された。改正省エネ法により、特定荷主（年間3,000トンキロ以上の荷主）および特定輸送業者（保有車両台数200台以上）の事業者は、今後5年以内にエネルギー使用原単位を年1%削減することが課せられている。このように環境面においても物流効率化は急務である。

## 2.2 多目的・多制約性

配送業務は、発荷主（荷物の発送者）・運送会社（配送の実行者）・顧客（荷物の受取者）の3者間に及ぶ（図1参照）。

図1に示すように、発荷主・運送会社・顧客それぞれの最適化要件（目的）は異なる。VRPの基本形である台数・距離の最小化は、運送会社における輸送費最小化にほぼ合致する。発荷主にとっては、運送会社に支払う支払物流費の削減が主目的である。支払物流費は、大別して車建て運賃と個建て運賃の2種類がある。前者は台数最小化にほぼ合致するが、後者は荷物のトンキロで運賃が決まるため、台数や距離とは無関係である。

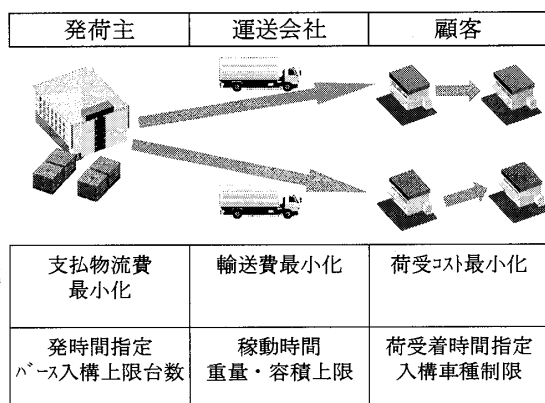


図1 最適化要件と制約条件

係である。また、顧客にとっては荷受作業負荷の軽減が主目的となるが、分割配送計画問題における分割回数最小化等が相当する[8]。配送計画支援システムは、輸送費最小化を目的に運送会社が主体となって構築することが多いが、その場合でも以下の理由により発荷主、顧客の最適化要件をも考慮する必要がある。

- ・運送会社は発荷主の物流子会社であることが多く、発荷主（親会社）の要求は無視できないため
- ・顧客満足度向上のため顧客の要求は無視できないため
- ・改正省エネ法では、荷主、運送会社、顧客間の相互連携が推奨されているため

このように、配送業務は3者間に横断的であり、各々の目的・制約を考慮しなければならない点、現実配送計画問題の多目的かつ多制約性の主要因と考えられる。

## 3. 配送計画問題概要

本節では、ある大手製造業物流子会社A社（図1の「運送会社」に相当）の配送計画問題を紹介する。

### 3.1 A社の現状と将来構想

A社では、首都圏に3箇所の出荷拠点を構えている。各車両はこの3拠点をいずれかを出発地とし、1日内で1~3回転の運行を行う。車両は自社車両と備車車両（外部運送会社から一定期間借り受ける車両）があり、出荷拠点ごとに契約先の外部運送会社が決まっている。現状では、各車両は自拠点（出発地）を発地とするオーダ（荷物）のみ配送している。この理由は2つあり、

- ・オーダ情報が一元化されておらず、出荷拠点ごとに個別に配送計画を立案しているため
- ・出荷拠点ごとに出荷製品の品種が異なり、各車両は出荷製品に適した車両装備が必要なため

である。A社では、車両とオーダの紐付きをなくし、車両が自拠点以外のオーダも配送対象とすることにより、車両台数および走行距離の削減を狙っている（図2参照）。この実現には、一括配送計画立案のためのオーダ一元化の仕組みおよび車両装備の向上が必須であるが、その詳細は省略する。全オーダ一括配送計画による台数・距離の削減量の定量把握およびシステム実現可否検討を目的に、プロトタイプを構築し実データを用いた検証を行った。

### 3.2 問題概要

入力として、配送オーダ（出荷拠点・顧客・重量・

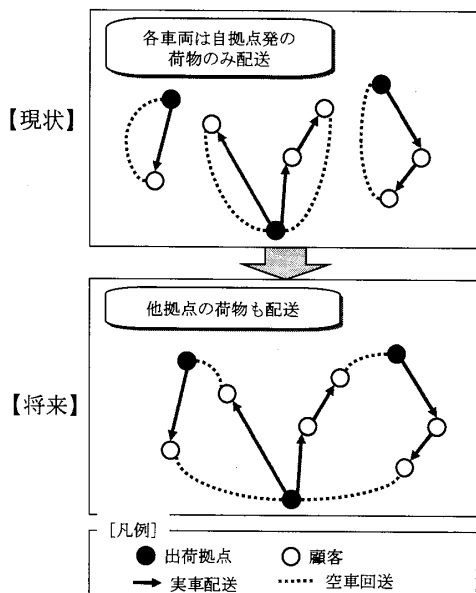


図2 配送形態の現状と将来構想

品種・各種制約条件値等) および車両情報(出帰着地・車両容量等)が与えられる。最適化要件は第1に車両台数を最小化し、同一台数に対しては走行距離を最小化する。制約条件は図1のものを含め約30種類あるが、詳細は省略する。

#### 4. 配送計画問題の解法

##### 4.1 解法

VRPの求解方法として、一般的に次の2種類の解法が知られている。

- (1) 分枝限定法等による厳密解法
- (2) ヒューリスティクスおよびメタヒューリスティクスによる近似解法

(1)は大規模な現実問題に対しては実行時間(数分以内)での求解が困難なことが多く、通常は(2)が採用される。(2)は主に以下2フェーズからなる。

- ① 構築型アルゴリズムによる初期解生成
- ② 局所探索法をベースとするメタヒューリスティクスによる解改善

①は、節約法[1]、一般化割当法[3]、sweep法[4]などが知られている。A社問題に対し、節約法を実装した。節約法は以下のような手法である。デポを0、卸地の集合を $\{1, 2, \dots, n\}$ 、2点 $i, j$ 間の距離を $e_{ij}$ とする。まずデポと各卸地の単純往復ルートを構築する。次に全ての $i, j \in \{1, \dots, n\}$ に対し、

$$s_{ij} = e_{i0} + e_{0j} - e_{ij}$$

を計算し、この値の大きい順に $i$ と $j$ を接続するという操作を、制約条件を満たす範囲で反復する。このア

ルゴリズムは近似アルゴリズムの代表格である「貪欲法」に基づくものである。A社問題のように時間指定、複数回転等の条件がある場合は、実装において工夫が必要となるが、節約法のような貪欲法をベースとする近似アルゴリズムは、短時間で良質な初期解を得られるという点で現実問題に対しても極めて有効である。②の局所探索法とは、現行解を微小に変化させた解(近傍解)を生成し、評価値が改善していればその近傍解を採用するという操作を反復する手法である。本問題に対し、近傍解を生成する操作として2-opt[7]、or-opt[10]、クロス交換近傍[12]等を実装した。局所探索法では、局所最適解に到達するとアルゴリズムは停止する。局所最適解からの脱出法として、焼きなまし法(Simulated Annealing, SA)、タブー探索法(Tabu Search, TA)、反復局所探索法(Iterated Local Search, ILS)等が提案されている。本問題に対しては、VRPに対してその有効性が示されているILSを実装した。各手法の詳細は[16]を参照されたい。

##### 4.2 試行結果と現場の改善要望

A社配送計画担当者に、出力結果(配送ルート内容および台数・距離等の各種集計値)をレビューしたところ、次の改善要望を受けた。

<改善要望> 出荷拠点Xの車両の総配送量が大きく増大した一方、他の出荷拠点Y、Zの車両の総配送量は減少した。各出荷拠点の車両配送量の大幅な格差は、各拠点が契約している外部運送会社間に不公平感を生じ、配送量の少ない運送会社から緊急時の備車調達を断られる等の懸念がある。各出荷拠点の車両配送量は、現状となるべく同量にしたい。

車両とオーダの紐付きを排除することにより、台数および走行距離は削減できるが、その一方で各出荷拠点の車両配送量の格差が現状よりも大きくなった。これはXを出荷拠点としY、Z近郊へ届けるオーダが相対的に多く存在し、Xを出帰着地とする車両の2回転目に、YまたはZ発のオーダが割りやすい構造になっていたためであった。

#### 5. 多目的最適化におけるトレードオフ制御

##### 5.1 目標配送量の設定

前節の改善要望をもとに、出荷拠点ごとの車両配送量を現状となるべく同量にする方法を検討した。多目

的最適化の分野で一般的な方法は、出荷拠点ごとに目標配送量を設定し、計算値と目標値との差異を最小化するという方法である。以下のように定式化できる。

$$\text{minimize } w_1 \cdot |R^+| + w_2 \cdot \sum_r d(\lambda_r) + w_3 \cdot (y_p^+ + y_p^-) + \sum_{i=1}^k w_i \cdot f_i \quad (1)$$

subject to

$$\bigcup_r \lambda_r = V \quad (2)$$

$$\lambda_r \cap \lambda_{r'} = \phi \text{ for all } r, r' \in R, r \neq r' \quad (3)$$

$$\sum_{r \in R_p} q(\lambda_r) - y_p^+ + y_p^- = W_p \quad (4)$$

$$y_p^+, y_p^- > 0 \quad (5)$$

(容量制約、時間指定等の条件式は省略)

各記号の意味は以下の通りである。

$V$ : オーダの集合

$R$ : 車両の集合

$R_p$ : 出荷拠点  $p$  に属する車両の集合

$\lambda_r$ : 車両  $r \in R$  が配送するオーダの順序付き集合

$R^+$ : 少なくとも1つのオーダが割当てられている車両の集合。つまり  $R^+ = \{r | \lambda_r \neq \phi\}$

$W_p$ : 出荷拠点  $p$  の車両の目標配送量

$d(\lambda)$ : オーダ集合  $\lambda$  を並び順に従って配送したときの距離

$q(\lambda)$ : オーダ集合  $\lambda$  の総重量

$f_i$ : 目的関数  $i$

$w_i$ : 目的関数  $i$  の重み係数

$k$ : 目的関数の個数

なお、 $\lambda$ ,  $R^+$ ,  $y_p^+$ ,  $y_p^-$  が決定変数である。(2)は全てのオーダが配送されることを示している。(3)は各オーダがちょうど1台の車両で配送されることを示している。(4),(5)式は非負変数  $y_p^+$ ,  $y_p^-$  を用いて目標配送量との差異を定義している。目的関数式(1)の第1項は車両台数の最小化、第2項は総距離の最小化を表している。第3項は、目標配送量と計算値との差異の最小化を表している。第4項以降はその他の目的関数である。

目的関数が複数存在するとき、それらの線形加重和をとり、その最小化を行うことが多い。線形加重和については、次のような欠点が報告されている。作業者が重みを適切にコントロールするのは困難であるという点、重みをいかに調整しても得られないパレート最適解が存在するという点、目的関数  $f_i$  を改善したい場合に、その項の重み  $w_i$  を大きくすると、逆に  $f_i$  が改悪に遷移する場合があるという点等である[15]。ただし、通約性がある(各項の次元が同じである)場合やトレードオフ分析自体が不要の場合は、線形和で

も現実問題に対して十分実用できる。

A社問題では、目標配送量と計算値との差異と車両台数の間にはトレードオフの関係がある。この2目的のトレードオフを線形和の重み係数で制御するのは容易ではないことが判明した。そこで目標配送量との差異の許容値を逐次変更しつつ、トレードオフを確認しながら解を探索できるアプローチを案出した。

## 5.2 制約条件化 ( $\epsilon$ 制約法)

目標配送量遵守の目的関数を制約条件化し、以下のように考慮した。

$$\text{minimize } w_1 \cdot |R^+| + w_2 \cdot \sum_r d(\lambda_r) + \sum_{i=1}^k w_i \cdot f_i \quad (6)$$

subject to

$$\bigcup_r \lambda_r = V \quad (7)$$

$$\lambda_r \cap \lambda_{r'} = \phi \text{ for all } r, r' \in R, r \neq r' \quad (8)$$

$$\sum_{r \in R_p} q(\lambda_r) - y_p^+ + y_p^- = W_p \quad (9)$$

$$y_p^+, y_p^- \leq \epsilon_p \quad (10)$$

目的関数式(6)は(1)の第3項を取り除いた式になっている。(10)では、出荷拠点  $p$  における目標配送量と計算値との差異の許容値を  $\epsilon_p$  で与えた。この定式化に基づき、車両台数と目標配送量のトレードオフ制御を加味した求解手順は以下の通りである。

求解手順:

STEP1: 全ての  $p$  に対し、 $\epsilon_p$  をほぼゼロに近い値に設定した上、4.1節の手法(節約法, ILS)により最良解を求める

STEP2: ある  $p$  に対し、 $\epsilon_p$  を少し大きくし、そのときの解を求める( $p$ ,  $\epsilon_p$  は作業者が決定する)。任意の  $p$  に対しこれを反復する。

STEP3: 全ての  $p$  に対し、 $\epsilon_p$  が作業者が予め決めた上限値に達した時点で停止する。作業者は、途中経過で得られた全ての解の中で、トレードオフバランスの上で最も満足度の高い解を選ぶ。

STEP2では、反復時の1つ前の  $\epsilon_p$  値での解を初期解として、ILSにより解を求める。図3に、ある  $p$  に対する目標配送量との差異  $\epsilon_p$  と車両台数のグラフを示す。 $\epsilon_p$  を大きくするほど車両台数は小さくなっており、この2目的間にはトレードオフ関係があることがわかる。

上記求解手順は、多目的最適化手法の1つである  $\epsilon$  制約法を応用したのになっている。 $\epsilon$  制約法とは、以下に示すように、ある目的関数  $f_j(x)$  を最小化対象

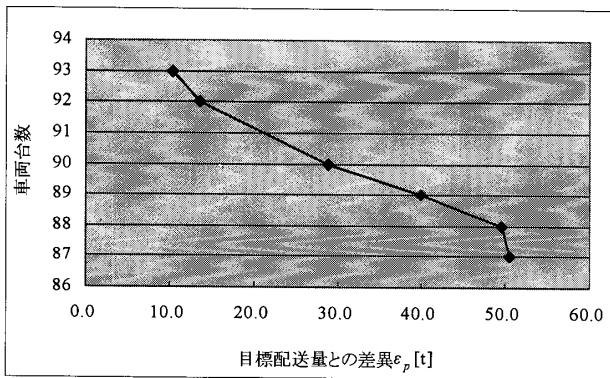


図3 目標配送量と車両台数のトレードオフ

とし、それ以外の目的関数を不等式制約の形で表現する手法である。

minimize  $f_j(x)$

subject to

$$|f_i(x)| \leq \epsilon_i \quad i=1, \dots, k \quad i \neq j$$

$\epsilon$  制約法では、1の目的関数を除いてそれ以外を制約条件化するが、上記求解手順では、トレードオフ制御で特に重要な、目標配送量との差異の最小化のみ制約条件化した。制約が過多の場合、解の探索範囲が狭まり、最適化の精度が低下する可能性があるが、制約化対象を厳選することにより、それを回避することができた。

以上により、A社問題に対し、トレードオフバランスを満たした解を実現することができた。システム導入効果として、車両台数約10%削減という試算値を得ることができ、またその解が実務上運用可能との評価を受け、システム導入への端緒を得ることができた。

## 6. 学んだORと使ったOR

冒頭で述べたように、現場が「使える」解を導くには、現実問題の多様な目的・制約に対応する必要があるが、本稿ではOR手法を効果的に組合せ、現場の制約条件を充足し、かつ多目的のトレードオフバランスを満たした解の実現事例を紹介した。事例では、節約法、ILS、 $\epsilon$ 制約法といった手法が登場したが、これらはまさに学んだORである。

ここまでは、現実問題の多目的性に着目し満足化の重要性について述べたが、ORを実践する際のその他の考慮すべき事項として、以下が肝要と考えている。

### (1) 拡張性の高い手法の適用

学んだORでは、目的関数・制約条件は所与であるが、実務においては、それらがアルゴリズム設計前に

全て洗い出されているとは限らない。特にシステム導入により業務改革を伴う場合は、導入後に新たな要件が現れ出ことは多く、システム改造の依頼があれば早急に対応する必要がある。特定の目的・制約を付加することにより、最適化の精度が大きく低下する、あるいは適用自体できなくなるような手法は、実用に当ってリスクは大きい。目的・制約に対する耐付加という点で拡張性の高い手法の適用が望ましい。

### (2) 簡単なパラメータ設定

解の精度に影響を与えるパラメータは極力少なく、また含めたとしても作業者がコントロールしやすいものが望ましい。本稿の例では、目標配送量遵守の要件を、線形和の重み  $w_i$  ではなく、目標配送量との差異の許容値  $\epsilon_p$  で制御した。後者の方が、そのパラメータの持つ意味が作業者にとって自明であり、使いやすい。

### (3) 作業者が理解しやすい求解アプローチ

現実問題の多様性・曖昧性により、アルゴリズムだけで現場の要求を100%充足する解を生成するというのは現実的ではなく、作業者による解の修正（人間系との協調）は少なからず必要である。アルゴリズムが生成した解の確認・修正という点において、作業者がアルゴリズムの基本フレームを理解できると、修正のしどころが把握しやすい。例えば、貪欲法のような構築型手法の考え方は、人間の直感にも近く、現実世界では受け入れられやすい。

## 7. おわりに

本稿では、多目的かつ多制約の現実配送計画問題に対し、トレードオフ制御を取入れた解法により、現場が「使える」解を実現した事例を紹介した。さらに前節では、ORを実践する際のポイントについて述べた。ORを応用したシステムの構築においては、OR技術だけでなく、周辺開発（入力データ編集、出力インタフェース開発等）も重要である。筆者のこれまでの経験でも、アルゴリズム面だけでなく、ORとは直接関係のない課題に対する対処で苦勞を伴うことも多い。ORの効果を最大限活かすためには、OR技術者といえども周辺技術や業務知識等も十分に周知しておく必要がある。またOR以外の技術者との連携も不可欠である。

キヤノンシステムソリューションズ(株)数理技術部は、1960年代に住友金属工業(株)中央研究所内に発足し、これまで現場での実践に軸足を置き、ORを応用した

数々のシステムを構築してきた。配送計画だけでなく、生産計画、需要予測、医療、データ分析等の分野においても開発実績は多い。

近年、産学連携が重視され、OR の分野でも応用研究や事例の文献を目にすることが多くなった。筆者においても、今後より一層、産業界におけるOR の価値を高め、そしてコスト削減や環境負荷軽減等の効果を通じて社会に貢献できるように、OR の研究と実践に励んでいきたい。

#### 参考文献

- [1] G. Clarke and J. Wright, "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points," *Operations Research*, 12, 568-582, 1964.
- [2] M. Dror and P. Trudeau, "Split delivery routing," *Naval Research Logistics*, 37, 383-402, 1990.
- [3] M. L. Fisher and R. Jaikumar, "A generalized assignment heuristic for vehicle routing," *Networks*, 11, 109-124, 1981.
- [4] B. E. Gillet and L. R. Miller, "A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem," *Operations Research*, 22, 240-349, 1974.
- [5] H. Hashimoto, T. Ibaraki, S. Imahori and M. Yagiura, "The vehicle routing problem with flexible time windows and traveling times," *Discrete Applied Mathematics*, 154, 2271-2290, 2006.
- [6] G. Laporte, M. Gendreau, J. Y. Potvin and F. Semet, "Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem," *International Transactions in Operational Research*, 7, 285-300, 2000.
- [7] S. Lin, "Computer solutions of the traveling salesman problem," *Bell System Technical Journal*, 44, 2245-2269, 1965.
- [8] Y. Nakao and N. Konishi, "The Multi-Trip Vehicle Routing Problem with a Large Quantity of Demand for each Customer," *Fifth Metaheuristics International Conference (MIC 2003)*, Kyoto, Japan, MIC 03\_53, 2003.
- [9] Y. Nakao and H. Nagamochi, "A DP-based heuristic for the discrete split delivery vehicle routing problem," *International Symposium on Scheduling 2006*, Tokyo, Japan, 42-47, 2006.
- [10] I. Or, "Traveling salesman-type combinatorial problems and their relation to the logistics of regional blood banking," *Ph. D. Thesis, Department of Industrial Engineering and Management Science, Northwestern University, Evanston, IL*, 1976.
- [11] H. Simon, "The sciences of the artificial", 稲葉, 吉原 (訳), 『システムの科学』, 1987.
- [12] E. Taillard, P. Badeau, M. Gendreau, F. Guertin and J. Y. Potvin, "A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows," *Transportation Science*, 31, 170-186, 1997.
- [13] E. Taillard, G. Laporte and M. Gendreau, "Vehicle routing with multiple use of vehicles," *Journal of the Operational Research Society*, 49, 8, 799-805, 1998.
- [14] 「2005年度物流コスト調査報告書」, 日本ロジスティクスシステム協会, 2006.
- [15] 中山, 「多目的計画法の応用について」, 『第6回RAMPシンポジウム論文集』, 135-149, 1994.
- [16] 柳浦, 茨木, 『組合せ最適化—メタ戦略を中心として』, 朝倉書店, 2001.