

京都大学工学部	学生員	○山羽 佑樹
京都大学大学院工学研究科	フェロー	谷口 栄一
京都大学大学院工学研究科	正会員	山田 忠史
京都大学大学院工学研究科	正会員	安東 直紀
京都大学大学院工学研究科	正会員	Ali Gul Qureshi

## 1. はじめに

近年の経済発展による消費者のライフスタイルの変化、ニーズの多様化にともない、貨物の輸送需要が高度化してきている。そのため、物流業者には多頻度・小口輸送、just-in-time 輸送といった高度なサービスが要求されている。一方で、貨物集配送は、交通渋滞、騒音などの社会問題の一因となっている。これらの課題や問題に対処するために、効率的な配車配送計画の立案が重要な課題となっている。

そこで本研究では、より効率的な配車配送計画の立案を目指し、ソフトタイムウィンドウを有する配車配送計画(Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows, 以下 VRPSTW)の効率的な求解法を検討する。具体的には、列生成法に遺伝的アルゴリズムと局所探索法を組み込んだ近似解法(Hybrid Local Search Genetic Algorithms and the Column Generation Heuristic, 以下 HLSGACGH)を提案する。

## 2. 配車配送計画

本研究において、物流業者における最適な配車配送計画とは、配送に要する総コスト(車両コスト、運行コスト、早着・遅刻ペナルティの和)を最小化するものである。以下に VRPSTW の定式化を行う。

<メインプロブレム>

minimize

$$z = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c'_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

$$c'_{ij} = \begin{cases} \infty & s'_{jk} < a'_j \\ c_{ij} + c_e (s'_{jk} - a_j) & a'_j \leq s'_{jk} < a_j \\ c_{ij} & \text{if } a_j \leq s'_{jk} \leq b_j \\ c_{ij} + c_l (s'_{jk} - b_j) & b_j < s'_{jk} \leq b'_j \\ \infty & b'_j < s'_{jk} \end{cases} \quad (2)$$

subject to

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in C \quad (3)$$

$$\sum_{i \in C} d_i \sum_{j \in V} x_{ijk} \leq q \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ihk} - \sum_{j \in V} x_{hjk} = 0 \quad \forall h \in C \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i0k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in C \setminus V} x_{ij} \geq 1 \quad \forall V \subset C (V \neq \phi, V \neq C) \quad (8)$$

$$a'_i \leq s'_{ik} \leq b'_i \quad \forall i \in V \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$a_i \leq s_{ik} \leq b_i \quad \forall i \in V \quad \forall k \in K \quad (10)$$

$$s_{ik} + t_{ij} - s_{jk} \leq (1 - x_{ijk}) M_{ijk} \quad \forall i, j \in C \quad (11)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in C \quad \forall k \in K \quad (12)$$

ただし、

$z$	: 総費用	$K$	: 車両集合
$k$	: 車両番号	$i, j, h$	: 顧客番号
$C$	: 顧客の集合	$V$	: デポと顧客の集合
$d_i$	: 顧客 <i>i</i> における需要量	$q$	: 車両容量
$A$	: 制約条件を満たす顧客の集合		
$c'_{ij}$	: 時間制約を考慮した顧客 <i>i-j</i> 間のコスト		
$c_{ij}$	: 顧客 <i>i-j</i> 間の距離(コスト)		
$x_{ijk}$	: 車両 <i>k</i> が顧客 <i>i-j</i> をサービスするときには1 それ以外のときは0をとる整数変数		
$c_l$	: 遅刻に関する時間依存係数		
$c_e$	: 早着に関する時間依存係数		
$s'_{ik}$	: 車両 <i>k</i> が顧客 <i>i</i> に到着する時刻		
$s_{ik}$	: 車両 <i>k</i> の顧客 <i>i</i> におけるサービス開始時刻		
$a_i$	: 顧客 <i>i</i> における最早作業開始時刻		
$b_i$	: 顧客 <i>i</i> における最遅作業開始時刻		
$a'_i$	: 顧客 <i>i</i> における許容最早作業開始時刻		
$a'_i = \max \left[ 0, a_i - \frac{(c_{0i} + c_{i0})}{c_e} \right]$	(13)		
$b'_i$	: 顧客 <i>i</i> における許容最遅作業開始時刻		

$$b'_i = \max \left[ b_0 - t_{i0}, b_i + \frac{(c_{0i} + c_{i0})}{c_i} \right] \quad (14)$$

$M_{ijk}$  : 大きな値を持つ定数

$x_{ijk}, a_j, b_j, a'_j, b'_j, d_i, q$  は整数値をとるものとする。

これらの制約条件のうち式(3)を目的関数に組み込んで緩和し、Dantzig-Wolfe の分解法を用いて、マスタープロブレムとサブプロブレムに分割を行う。

<マスタープロブレム>

$$\begin{aligned} &\text{minimize } \sum_{p \in P} c_p y_p & (15) \\ &\text{subject to} \end{aligned}$$

$$\sum_{p \in P} a_{ip} y_p = 1 \quad \forall p \in P \quad (16)$$

$$y_p \in \{0,1\} \quad \forall p \in P \quad (17)$$

ただし、

$P$  : 実行可能経路集合

$p$  : 経路  $c_p$  : 経路  $p$  のコスト

$y_p$  : 経路  $p$  が選択された場合は 1,

そうでない場合 0 をとる整数変数

$a_{ip}$  : 経路  $p$  が顧客  $i$  を訪れる回数

<サブプロブレム>

$$\text{minimize } \sum_{(i,j) \in A} \bar{c}'_{ij} x_{ij} \quad (18)$$

$$\bar{c}'_{ij} = c'_{ij} - \pi_i \quad (19)$$

制約条件は式(4)–(12)と同一である。 $\bar{c}'_{ij}$  を reduced cost と呼ぶ。

### 3. 解法

マスタープロブレムは線形計画問題であるため、容易に解くことができる。サブプロブレムの役割は、実行可能経路の探索であり、本研究では列生成法に局所探索付き遺伝的アルゴリズムを組み込んだ近似的手法 HLSGACGH を用いる。

局所探索付き遺伝的アルゴリズムでは、第一世代の母集団(500 個体)を局所探索法より生成する。初期解では貪欲法を用いる。ただし、この貪欲法では一つ目の染色体(顧客)のみランダムに選択する。そして 2-opt 近傍を用いて解を改善し、第一世代とする。

次世代以降は以下の操作を行う。すなわち、母集団のうち、98%の個体について 2 点交叉を行う。次に、母集団のうち、訪問する顧客数が一つの経路である個体を、適応度(総コストの低さ)の大きい順に 20 個(母集団の 4%)選択し突然変異操作(Single Customer Route

Elimination Mutation)<sup>1)</sup>を行う。

各世代の各個体の reduced cost を算出する。このうち、負の値をとる reduced cost について、値が小さい順に 50 個を選択し、それぞれに対応する個体(columns)を用いて、マスタープロブレムで線形計画問題を解き、 $\pi_i$  を計算する。この繰り返し計算は、回数が 75 回に達すれば終了することとする。この時点で、解は整数解でない可能性がある。最終的に整数解を得るために、problem reduction<sup>1)</sup>を実装する。

### 4. ケーススタディ

本研究では、ソロモンのベンチマーク問題(R1 型)を採用し、5 回の試行を行った。紙面の都合上、R101 の顧客数 50 の結果のみを記す。

提案した手法の性能評価を行うために、遺伝的アルゴリズムを用いた列生成法(Hybrid Genetic Algorithms and the Column Generation Heuristic, 以下 HGACGH)<sup>1)</sup> と解の比較を行う。HGACGH の各パラメータは HLSGACGH と同じである。計算結果を表 1 に示す。HLSGACGH は HGACGH に比べ、計算時間はかかるものの総コストの小さい解を得ることができた。

### 5. おわりに

本研究では VRPSTW の解法として、HLSGACGH を提案し、ベンチマーク問題により、その有用性を確認した。

今後の課題は、大規模な問題への適用、パラメータを変化させた場合のコストの変化について検証する。また、計算時間をさらに短縮する必要がある。

参考文献

- 1) A.G.Qureshi : A Hybrid Genetic Algorithm for VRPSTW using Column Generation, City Logistics V, pp.151-165, 2007

表 1 性能検証のための計算結果

	試行回数	車両台数	計算時間	遅刻ペナルティ	早着ペナルティ	総コスト
HGACGH	1	9	1579	4003	1000	114115
	2	9	740	6323	1413	116212
	3	9	1341	6260	868	115672
平均						115333
HLSGACGH	1	8	3183	11819	665	109599
	2	8	2951	11188	670	109186
	3	9	4518	6169	920	116146
	4	8	1953	19761	460	118188
	5	8	3519	11756	665	109524
平均						112529