

災害時における配送量の優先度を考慮した配車配送計画に関する研究

Vehicle routing and scheduling planning incorporating the priority of delivering relief goods after disasters*

岡林楠博**・中村有克***・谷口栄一****・山田忠史***・安東直紀***

By Kusuhiro OKABAYASHI**・Yuki NAKAMURA***・Eiichi TANIGUCHI****・Tadashi YAMADA***・Naoki ANDO***

1. はじめに

近年、大規模災害の多発とともに防災・減災技術の重要性が高まっている。救援物資の迅速かつ的確な配送は被災地における二次被害を抑え、減災に役立つが、現状では具体的な救援物資配車配送計画の不備が指摘されている。被災地において、配送拠点や緊急経路を選定し、機材・人員を確保し、方策を作成・実行することは非常に困難となる。実際に、阪神・淡路大震災や新潟県中越地震の被災地では、救援物資供給量の偏りや配送経路の混乱といった問題が発生している。災害時において、被災状況に応じた救援物資の管理および迅速かつ的確な配給のための救援物資配車配送計画が求められていると言える。

主な救援物資の配送先である避難所は、校舎や体育館等の公共建築物を使用した一般避難所と、保育園や老人ホーム等を使用した福祉避難所に分けることができる。福祉避難所は障害者や高齢者、妊産婦など災害時に特別な配慮を必要とする人を受け入れるための避難所である。福祉避難所に優先して救援物資を配送することが求められており、配送量の優先度を考慮した救援物資配車配送計画を作成する必要がある。救援物資配送を行う主体は様々な主体が考えられ、本研究では、災害時に在庫を活用して物資を供給する企業に着目する。実際に自治体と協定を結び、災害時に救援物資支援を行う企業は近年増加している。

本研究では、救援物資を配送する企業の「配送先」「配送量」「配送経路」を決めるための意思決定支援モデルを提案する。提案したモデルの性能検証を行い、そ

の後、仮想的な問題にモデルを適用し、提案したモデルの有用性を確認する。

2. モデルの定式化

災害時の配車配送計画問題を扱った研究は、現状では少ない。奥村ら¹⁾は、大規模地震における重傷者の搬送計画を、搬送時の死亡リスクを最小化の問題としてモデル化している。首藤ら²⁾は、阪神・淡路大震災での救援物資配送の問題点を抽出し、救援物資配車配送計画の効果をモデル分析により考察した。緊急路における走行速度が重要な影響を与え、その走行速度に応じて、採るべき方策が異なってくることを明らかにしている。

本研究においては、災害後、物資が不足し需要過多となり、供給が追い付かないという状況を想定し、多目的最適化の枠組みで、配車配送計画問題の定式化を行う。目的関数の一つは供給不足に対するペナルティであり、供給不足量に各顧客への優先度に応じて設定された単位ペナルティを乗じて、全顧客での総和が最小となるように配送量を決定する。もう一つの目的関数は配送トラックの総走行距離であり、与えられた配送量の下で総走行距離が最小となるように配送経路を決定する。多目的最適化を行うことにより、各避難所への配送量および配送経路に関して、複数の解が提示される。図-1に本モデルの概要を示す。

本研究では、配送経路に関する目的関数を配送トラックの総走行距離最小化としている。これは、総走行距離

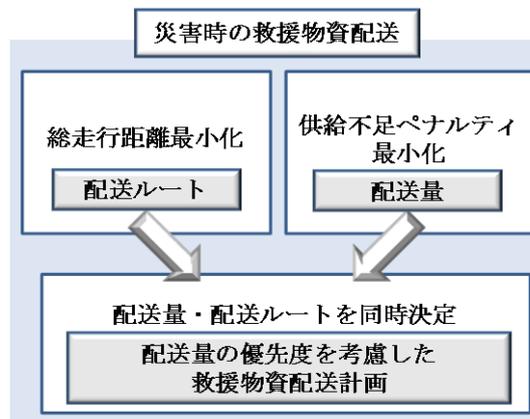


図-1 モデルの概要

*キーワード：配車配送計画，防災計画，多目的最適化

**学生員，京都大学大学院工学研究科

(京都市西京区京都大学桂C1，
TEL075-383-3231、FAX075-950-3800)

***正会員，博士（工学），京都大学大学院工学研究科

(京都市西京区京都大学桂C1，
TEL075-383-3231、FAX075-950-3800)

****フェロー，博士（工学），京都大学大学院工学研究科

(京都市西京区京都大学桂C1，
TEL075-383-3229、FAX075-950-3800)

を最小化することにより、迅速な救援物資配送を目的とするためである。一方、配送経路に関する目的関数として、総所要時間の最小化も挙げられるが、災害時には、道路の損傷や渋滞等により道路の所要時間が不確定であり、総所要時間による評価は困難であると考えた。

定式化は以下の通りである。

$$\text{Minimize} \left\{ \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ijk}, \sum_{i \in N} p_i (d_i - q_i) \right\} \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K, \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ihk} - \sum_{j \in V} x_{hjk} = 0 \quad \forall h \in N, \forall k \in K, \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i,n+1,k} = 1 \quad \forall k \in K, \quad (5)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in V \setminus S} x_{ij} \geq 1 \quad \forall S \subset V, (S \neq \phi, S \neq V), \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N} q_i \sum_{j \in V} x_{ijk} \leq Q \quad \forall k \in K, \quad (7)$$

$$q_{\min} \leq q_i \leq d_i \quad \forall i \in N, \quad (8)$$

$$s_{ik} + t_{ij} - s_{jk} \leq (1 - x_{ijk}) M_{ijk} \quad \forall i, j \in N, \forall k \in K, \quad (9)$$

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

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N, \forall k \in K, \quad (11)$$

ただし、

- K : 配送トラックの集合
- k : 配送トラック番号
- i, j, h : 顧客番号, 0 および n+1 はデポ
- A : リンクの集合
- c_{ij} : 顧客 i - j 間の距離
- x_{ijk} : 配送トラック k が顧客 i - j に物資を供給するときは1, それ以外のときは0をとる変数
- N : 顧客の集合
- p_i : 顧客 i における供給不足により生じる単位配送量あたりのペナルティ
- d_i : 顧客 i における需要量
- q_i : 顧客 i における実際の配送量
- V : 顧客およびデポの集合
- S : V の部分集合
- Q : 配送トラックの車両容量
- q_{\min} : 顧客に最低限配送しなければならない配送量
- t_{ij} : 顧客 i - j 間の所要時間
- M_{ijk} : 十分に大きな定数
- s_{ik} : 配送トラック k が顧客 i に物資供給を開始する時刻
- a_i : 顧客 i における最早作業時刻
- b_i : 顧客 i における最遅作業時刻

式(1)は配送トラックの総走行距離および供給不足ペナルティ最小化の目的関数である。式(2)~式(6)は顧客における配送トラックフローの制約条件、式(7)は配送トラッ

ク容量制約条件、式(8)は配送量に関する制約条件、式(9)と式(10)は時間枠制約条件、式(11)は変数 x_{ijk} の整数条件を示している。

3. 多目的最適化問題の解法

多目的最適化問題の解法として、非優越ソート遺伝的アルゴリズム(NSGA-II)³⁾を用いる。NSGA-IIはGoldberg⁴⁾によって提案された個体のランク付け方法の1つである非優越ソート(non-dominated sorting)の概念に基づく、多目的最適化問題の求解アルゴリズムである。混合距離の導入による個体の多様性の維持や、探索過程において見つかった非優越解の保存などの特徴を持つ。本アルゴリズム手法におけるランクとは、2つの目的関数値の優越関係に基づいて定められる適応度のことである。混雑距離とは、ある個体の周りにある個体の密度を評価するための手法であり、これを考慮することにより解の多様性が維持される。

本研究において、NSGA-IIで用いる個体の表現方法の具体例を図-2に示す。個体を特徴付ける染色体は、複数の遺伝子により構成されており、各顧客への配送量と、その配送量における供給不足ペナルティ、総走行距離、混雑距離、ランクを1つの個体で表現する。

初期値としてランダムに配送量を与えて、遺伝的操作(混雑度トーナメント選択, 交叉, 突然変異)により次世代を生成し、探索を進める。与えられた配送量の下、時間枠制約付き配車配送計画問題に列生成法⁵⁾を適用することにより、配送経路の厳密解を得る。算出された総走行距離および供給不足ペナルティを適応度とする。解法のフローチャートを図-3に示す。

4. NSGA-IIの性能検証

本問題にNSGA-IIを適用するにあたり、解法の性能検証を行った。Solomonのベンチマーク問題R101の10顧客に対して、44の物資を配送する問題を想定し、列挙法に

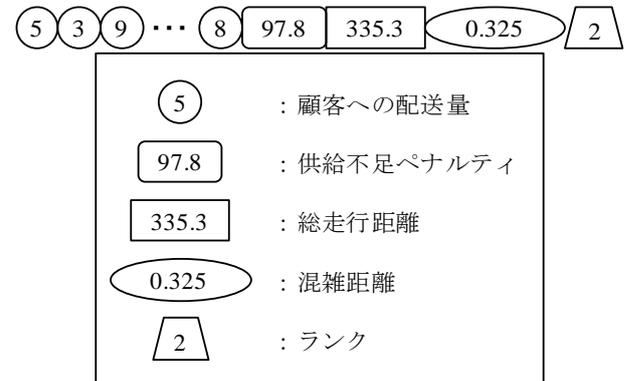


図-2 個体の表現方法

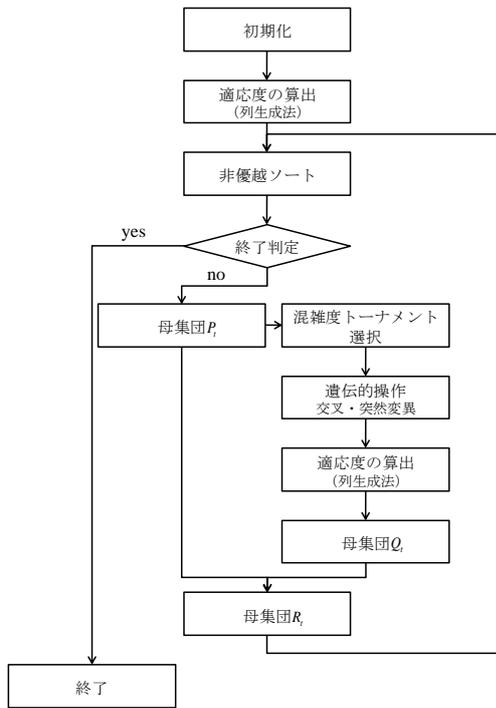


図-3 解法のフローチャート

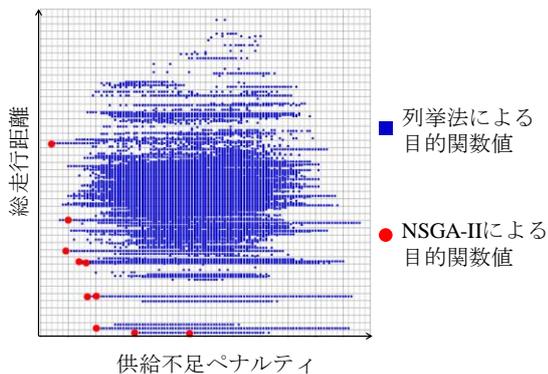


図-4 列挙法とNSGA-IIによる目的関数値の比較

による目的関数値とNSGA-IIによる目的関数値を比較した。NSGA-IIにより100世代まで解の探索を行った結果、20世代で列挙法による解とほぼ同じ非劣解が算出されることが確認できた。適応度の算出の際、列生成法により配送経路の厳密解を得ているため、解法が十分な性能を有していると考えられる。列挙法およびNSGA-IIによる目的関数値を図-4に示す。

5. ケーススタディ

本モデルを長岡京市を対象とした仮想的な問題に適用する。図-5のように、長岡京市内の実際の32か所の避難所を顧客と想定し、顧客間の距離は顧客間の直線距離に基づき算定した。番号0がデポ、顧客番号1~20が一般避難所、顧客番号21~32が福祉避難所である。デポは配送主体である企業とした。

本ケーススタディにおいては、福祉避難所の優先度を



図-5 対象地域 (長岡京市)

表-1 ペナルティセット

顧客番号	ペナルティセットa	ペナルティセットb	ペナルティセットc
1	1.00	1.20	1.00
2	1.20	1.00	1.00
...
19	1.10	1.00	1.00
20	1.05	1.00	1.00
21	1.50	1.40	2.00
22	1.60	4.50	2.00
...
31	1.60	1.50	2.00
32	1.50	1.60	2.00

表-2 データセット

ケース	供給量	ペナルティセット
0	1500	ペナルティセットa
1	1000	ペナルティセットa~c
2	1500	ペナルティセットa~c
3	1750	ペナルティセットa~c
4	2000	ペナルティセットa~c

高く設定することとした。優先度は、各顧客における供給不足に対する単位配送量あたりのペナルティ p_i により表される。各顧客の p_i の組み合わせをペナルティセットと呼び、本研究では3種類設定した。

表-1のように、ペナルティセットa,bにおいて一般避難所は p_i を0.85~1.20、福祉避難所は1.30~1.70の範囲とし、ペナルティセットcにおいては一般避難所を1.00、福祉避難所を2.00と設定した。ケーススタディで使用するデータセットを表-2に示す。

ケース0によりNSGA-IIのパラメータのキャリブレーションを行う。ケース1~4において、供給量を変化させた場合の最終世代における目的関数値の分析を行う。さらに、目的関数を単目的化するための、供給不足ペナルティの総走行距離に対する重みの分析を行う。ペナルティセットを変化させた時の配送量および配送経路の変化を分析する。以上の分析により本モデルが救援物資配車配送計画策定にどのように寄与できるか検証する。

ケース1~4において、供給量を変化させた場合の最終世代における目的関数値を図-6~9に示す。供給量によって最終世代の目的関数値のばらつきに変化が見られた。供給量が多くなれば配送パターンは多くなり、このことは意思決定者にとって選択の範囲が広がり選択肢が増え

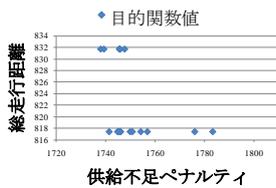


図-6 最終世代の目的関数値 (ケース1-a)

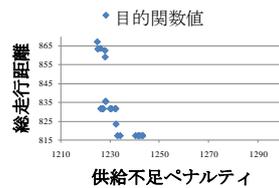


図-7 最終世代の目的関数値 (ケース2-a)

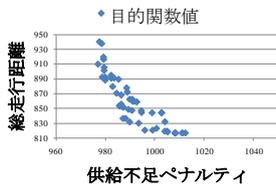


図-8 最終世代の目的関数値 (ケース3-a)

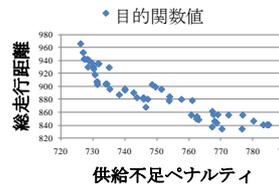


図-9 最終世代の目的関数値 (ケース4-a)

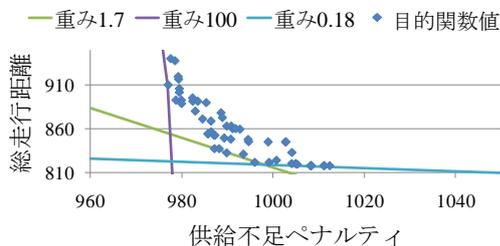


図-10 目的関数値と重みを表す直線 (ケース3-a)

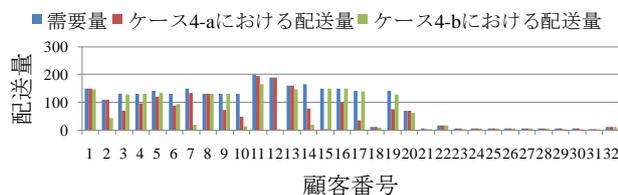


図-11 各顧客への配送量 (ケース4)

ることを意味する。しかし、多数の選択肢が存在すると解の探索および実際的意思決定が困難になる。

ケーススタディの結果に関しては、紙面の都合上、以下にその一例を示す。ケース3-aにおける最終世代の目的関数値と単目的化のための重みを表す直線を図-10、ケース4の各顧客への配送量を図-11に示す。

図-10のように、配送量と総走行距離に関する解が複数算出された。単目的化に必要な重みを決定することにより、被災状況や救援物資の種類に応じた意思決定に寄与することができる。0.18~100の間で重みを設定した場合、供給不足ペナルティ、総走行距離の両方を考慮した救援物資配車配送計画となる。

図-11のように、供給不足によって生じる単位配送量あたりのペナルティの設定により、各顧客への配送量に変化が見られた。これは単位配送量あたりのペナルティの設定の相違が、各顧客で発生する供給不足に対するペナルティに影響し、各顧客への配送量パターンに変化が

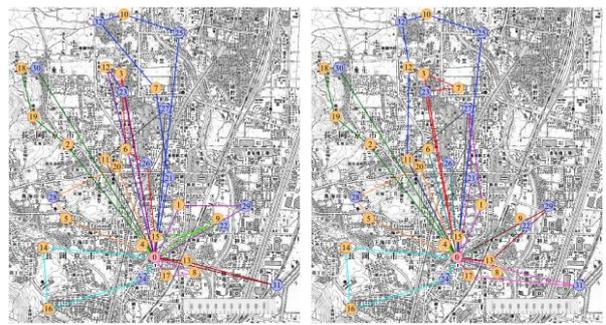


図-12 配送経路(ケース4-a) 図-13 配送経路(ケース4-b)

生じるためであると考えられる。各顧客への配送量パターンの変化は、配送トラックの配送経路を変化させる。経路に含まれる配送量が配送トラックの車両容量を超えた場合には、1台の配送トラックで配送することができなくなる。その結果、配送トラックが選択する顧客および配送経路が変化する。図-12、図-13に、ケース4で計算により得られた配送経路を示す。これらと比較すると、単位配送量あたりのペナルティの設定により配送経路が変化していることが確認できる。

6. おわりに

本研究では、災害時における需要過多の状況の下、配送量および配送経路を決定するモデルを提案した。供給不足によって生じる単位配送量あたりのペナルティの設定により、物資を適切に分配することができる。また、供給不足ペナルティと、総走行距離を単目的化する際に必要な重みを分析することにより、被災状況に応じた配車配送計画の策定に寄与できると考えられる。

今後は、本モデルの現実との整合性を考慮すること、および、災害時において配送企業に指示を出す行政の役割をモデルに反映する必要がある。

参考文献

- 1) 奥村誠, 塚井誠人, 安村勇亮, 大規模地震による重傷者の搬送計画モデル, 第26回交通工学研究発表会論文報告書, 2006.
- 2) 首藤敦, 徳永幸之, 被災状況と対応策に応じた救援物資配送計画の検討, 土木学会論文集 No.695/IV-54, pp. 67-75, 2002.
- 3) K. Deb, S. Agrawal, A. Pratab, and T. Meyarivan: A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II, *KanGAL report 200001*, Indian Institute of Technology, Kanpur, India, 2000.
- 4) D. E. Goldberg. *Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley, 1989.
- 5) A. Qureshi, E. Taniguchi, and T. Yamada: Elementary Shortest Path Problem with Resource Constraints and Time Dependent Late Arrival Penalties, *Doboku Gakkai Ronbunshuu D*, Vol.63, No.4, pp. 579-590, 2007.