

京都大学工学部	学生員	○岡林	楠博
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	学生員	中村	有克

1. 研究の背景と目的

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効率的な配送は被災地での二次被害を抑え、減災に役立つが、現状では具体的な救援物資配送計画の不備が指摘されている。実際に、被災地では、救援物資供給量の偏りや配送ルート混乱といった問題が発生している。本研究では、救援物資を配送する企業が「どこに」「どれだけ」「どのルートで」物資を配送するのかを決める際の意味決定支援モデルを構築する。構築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、有用性を確認する。

2. モデルの定式化

本研究において、災害後、物資が不足し需要過多となり、供給が追いつかないという状況に焦点を当て、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優先度に応じて設定された単位ペナルティを乗じて、その総和が最小化されるように配送量を決定する。もう一つの目的関数は配送コストであり、与えられた配送量の下で最小化されるように配送ルートを決める。定式化は以下の通りである。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ただし、

- K : トラックの集合 k : トラック番号
- i, j, h : 顧客番号 A : リンクの集合
- $0, n+1$: デポ N : 顧客の集合
- c_{ij} : 顧客 i - j 間の運行コスト
- x_{ijk} : トラック k が顧客 i - j に物資を供給するときは1、それ以外ときは0をとる変数
- 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 : トラックの車両容量
- q_{\min} : 顧客における最小配送量
- t_{ij} : 顧客 i - j 間の所要時間
- M_{ijk} : 十分に大きな定数
- s_{ik} : トラック k が顧客 i に物資供給する開始時刻
- 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)はトラックの運行コスト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)は顧客におけるトラックフローの制約条件、式(7)は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. モデルの解法

本モデルの解法として、非優越ソート遺伝的アルゴリズム(NSGA-II)¹⁾を用いる。NSGA-IIは多目的最適化問題のためのアルゴリズムで、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。

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．なお，適応度の算出には列生成法²⁾を適用することにより，配送ルートの厳密解を得る．

4. ケーススタディ

構築したモデルの性能検証を行った後，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1のように，長岡京市内の32か所の避難所を顧客とし，顧客間の運行コストは顧客間の直線距離を基にして算定する．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．この問題においては，福祉避難所の優先度を高く設定している．優先度は，各顧客における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 p_i で与える．その組み合わせをペナルティセットと呼び，本研究では3種類とする．ペナルティセット a,b において一般避難所には 0.85~1.2，福祉避難所には 1.3~1.7 で与え，ペナルティセット c においては一般避難所に 1，福祉避難所に 2 を与えている．

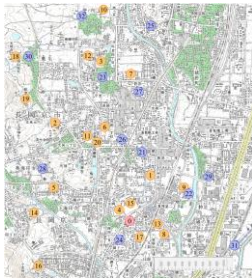


図1 対象地域（長岡京市）

表1 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

ケーススタディで使用するデータセットを表1に示す．ケース0において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非劣解集合の分析を行う．ケース3においては，供給不足ペナルティと配送コストを単目的化する際の重みの分析を行う．ケース4においては，ペナルティセットを変化させた時の配送量および配送ルートの変化を分析する．以上の分析により本モデルが救援物資配送計画策定にどのように寄与できるか検証する．

ケース3-aの目的関数値および重みを図2，ケース4の配送量を図3に示す．その他の結果については，紙面の都合上割愛する．

図2のように，配送量と配送コストに関する非劣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．図3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，顧客への配送量に変化が見られ，その結果，配送ルートも変化した．

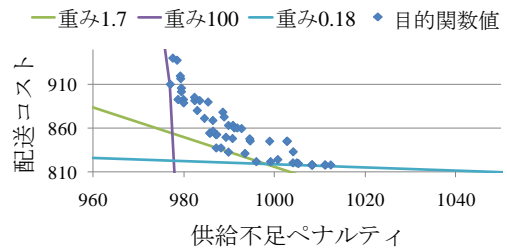


図2 ケース3-aの目的関数値と重み

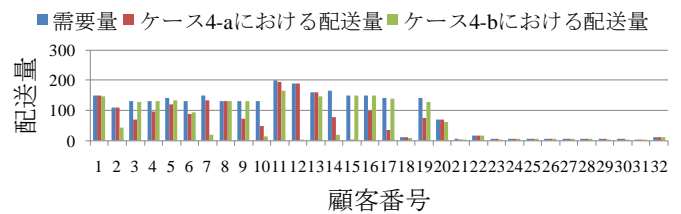


図3 ケース4における配送量

5. 結論

本研究では，災害時における物資供給不足の状況の下，配送量および配送ルートを決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，配送コストを単目的化する際に必要な重みを決定することにより，被災状況に応じた配車配送計画の策定に寄与することが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) 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.*
- 2) Q. Ali, 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.*