到着時間・供給不足を考慮した救援物資配車配送計画に関する研究

小川　慶輔[1]・谷口　栄一[2]・山田　忠史[3]・中村　有克[4]

[1]学生会員　京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）
E-mail:k.ogawa@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

[2]フェロー会員　京都大学大学院教授（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）
E-mail: taniguchi@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp
[3]正会員　京都大学大学院准教授（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）
E-mail: t.yamada@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp
[4]正会員　京都大学大学院助教（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）
E-mail: nakamura@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

大規模震災の発生時における救援物資配送に対して，具体的な計画策定の必要性が高まっている．このような背景の下，配送量の偏りや到着時間の遅れといった，被災者の不満をもたらしうる問題を緩和するための方法として，「欠乏費用」という概念を取り入れた配車配送計画モデルの構築を行う．
構築したモデルを実際の規模を想定したネットワークに適用し，需要に対する供給の割合に応じてどのような配送量割当・配送経路となるのが望ましいか，検討を進める．

Key Words :*humanitarian logistics ,relief supply,vehicle routing problem, deprivation cost, human suffering, optimization*

1.　研究の背景

近年，大規模災害における救援物資配送に対して，具体的な計画策定の必要性が高まっている．東日本大震災など過去の大規模災害において，物資の不足が生じ被災者の避難所生活は困難を極めた．その中で，末端輸送において配送量の偏りや到着時間の遅れが生じた [1)]．これにより，避難所への物資の到着の遅れ，供給不足などの問題が起こり，被災者にとって十分でない配送になったと言える．これは，各自治体の地域防災計画に救援物資の配送に関して曖昧な記載しかなされていないことが原因の１つであると考えられる．以上のような背景から，配送量割当や経路設計など定量的な事前計画策定が必要であると考え，本研究では配送量割当・配送経路決定のための配車配送計画モデルの策定を行うこととする．

従来の配車配送計画モデルは，総走行距離が最小となるように，顧客に対する配送経路を決定する組み合わせ最適化のためのモデルである．しかし，このモデルは各顧客の需要を満足させることを前提としているため，大規模災害時の適用は難しい．そこで，本研究では供給不足を考慮した災害時の配車配送計画モデルに着目した．このモデルは，需要量に対して供給量が不足する条件下で配送経路に加え配送量割当を決定するためのモデルである．以下，このモデルに分類される既往の研究を取り上げる．

Özdamar *et al.*[2)] は，避難所の供給不足最小化を単目的としたモデルを構築した． Yi and Özdamar[3)] は Özdamar *et al.*[2)] のモデルを発展させ，救援物資配送と災害による犠牲者の運搬の両者を考慮した被災地の供給不足最小化を目的としたものを構築した．ただし，以上のモデルは配送拠点への配送を計画するためのものであり，配送拠点から避難所毎への配送計画策定を目的としている本研究とはこの点で異なる．配送拠点から避難所毎への配送計画策定を目的としている研究として，岡林ら [4)]は，自治体が救援物資配送を担う物流事業者に対して，「優先度を考慮した各避難所への配送量」及び「配送トラックの訪問順序」を指示するための意思決定支援モデルを提案した．岡林らは，「避難所における供給不足に対するペナルティ」及び「配送トラックの総走行距離」の最小化を目的とする多目的最適化問題として配送のモデル化を行っている．ただ，目的関数において「救援物資の到着時間」を考慮に入れていない．

以上を踏まえて本研究では，Holguin-Veras *et al.*[5]の研究に着目した．Holguin-Veras *et al.*[5]は，巨大災害において社会的な混乱が高く，被災者支援のためのシステムが著しく影響を受けた場合には，従来の物流費用のみを目的関数としたモデルでは被災者の厚生が評価されないとした．その考えのもと，被災者の不満を測る指標として「欠乏費用」を定義した．この欠乏費用は，財やサービスを受けられない場合の被災者の経験則から算出できるものとしている．その一つとして，水に対する支払い意思額をもとにして，欠乏費用を

$$p_i(s_i) = e^{(1.5031+0.1172\cdot s_i)} - e^{(1.5031)} \quad (1)$$

とした．ここで，s_iは欠乏時間（Deprivation Time）であり，配送トラックが拠点を出発してから被災者のもとに物資が届けられるまでに要する時間を指す．以下，欠乏費用の概念を取り入れ，「供給不足」と「到着時間」の両方を考慮したモデルの構築を進めることとする．

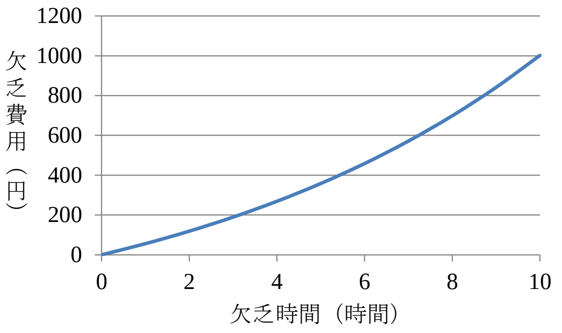

図-1　欠乏費用と欠乏時間の関係

2.　モデルと定式化

本研究では，「供給不足」（本研究ではこれを「欠乏量」と呼ぶことにする．）を考慮に加えたモデルを構築した．震災時の救援物資配送計画問題を，被災者の不満足度を表す避難所ごとの欠乏費用と物流費用（燃料費）の総和の最小化問題として，以下のように定式化を行った．

Minimize

$$\alpha\sum_{k\in K}\sum_{i\in N}\left\{p^f(d_i-q_i)+p_i(s_{ik})q_i\right\}+\beta\sum_{k\in K}\sum_{(i,j)\in A}c_{ij}x_{ijk}E_k \quad (2)$$

Subject to

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

$$\sum_{j\in V}x_{0jk}=1 \qquad \forall k\in K, \quad (4)$$

$$\sum_{i\in V}x_{ihk}-\sum_{j\in V}x_{hjk}=0 \qquad \forall h\in N, \forall k\in K, \quad (5)$$

$$\sum_{i\in V}x_{i,n+1,k}=1 \qquad \forall k\in K, \quad (6)$$

$$\sum_{i\in S}\sum_{j\in V\setminus S}x_{ij}\geq 1 \qquad \forall S\subset V, (S\neq\phi, S\neq V), \quad (7)$$

$$\sum_{i\in N}q_i\sum_{j\in V}x_{ijk}\leq Q \qquad \forall k\in K, \quad (8)$$

$$\sum_{i\in N}q_i\leq T \quad (9)$$

$$q_i^{\min}\leq q_i\leq d_i \qquad \forall i\in N, \quad (10)$$

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

$$s_{ik}+t_{ij}-L_{ij}(1-x_{ijk})\leq s_{jk} \qquad \forall i,j\in N, \forall k\in K, \quad (12)$$

$$a_i\leq s_{ik}\leq b_i \qquad \forall i\in N, \forall k\in K, \quad (13)$$

$$L_{ij}=b_i-a_j \qquad \forall i,j\in N, \quad (14)$$

ただし，

α,β　：欠乏費用，燃料費の重み

p^f　：配送が終了した時点での欠乏費用（円/個）

s_{ik}, s_{jk}　：配送トラックkの避難所i,jにおける救援物資の到着時間（時間）

$p_i(s_{ik})$　：救援物資到着時間s_{ik}における避難所iの欠乏費用（円/個）

d_i　：避難所iにおける需要量（個）

q_i　：避難所iにおける配送量（個）

c_{ij}　：避難所i-j間の距離(m)

E_k　：配送トラックkの単位距離あたり燃料費(円/m)

i, j, h, n　：避難所番号，0及びn+1は配送拠点を表す

N　：避難所の集合

K　：配送トラックの集合

x_{ijk}　：配送トラックkが避難所i-j間を移動するときは1，それ以外のときは0をとる変数

V　：避難所及び配送拠点の集合

S　：Vの部分集合

Q　：配送トラックの積載容量（個）

T　：配送拠点に存在する総供給量（個）

$q_i^{\min}$　：避難所iに対する最低限の配送量（個）

a_i　：避難所iの望む到着指定時間帯の開始時間（時間）

b_i　：避難所iの望む到着指定時間帯の終了時間（時間）

t_{ij}　：避難所i-j間の所要時間（時間）

式(2)は欠乏費用と物流費用（燃料費）の総和最小化の目的関数である．それぞれ重み付けをした形で定式化する．式(3)～式(7)は避難所における配送トラックの訪問に関する制約条件，式(8)は配送トラックの積載容量に関する制約条件である．式(9)は被災地における総供給量に関する制約条件，式(10)は配送量に関する制約条件を示しており，配送トラックが避難所に到着すれば，

必ず最低限の物資を降ろすという条件である．式(11)は変数x_{ijk}の整数条件を示している．式(12)-式(14)は被災者の望む到着指定時間帯の制約条件である．

本モデルは，被災地における各避難所への配送量及び配送順序を決定する組み合わせ最適化問題である．本研究では遺伝的アルゴリズム（GA）を用いて，解を求めることとする．図-2はそのフローチャートである．

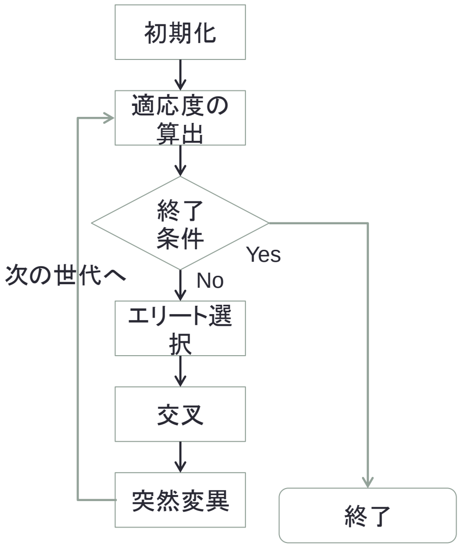

図-2　遺伝的アルゴリズム（GA）のフロー

3.　ケーススタディ

本モデルを，東日本大震災で被害を受けた宮城県石巻市のデータを参考にした仮想ネットワークに適用し，予想される被害に備えた救援物資配送計画を行う．配送拠点に送られた物資がネットワーク全体の総需要量に対して大きく不足している状況を想定し，目的関数値を最小にする配送経路・配送量割当を決定する．物資の種類は水・おにぎりといった食料とする．

需要に対する供給の割合に応じて式(2)の α,β の値を変えていき，その時々での最適な配送量割当・配送経路の決定を行う．

以上のケーススタディの結果は，発表当日に示すこととする．

4.　おわりに

本研究ではまず，大規模災害において具体的な救援物資配送計画の策定の必要性を説いた．その上で，供給不足・到着時間を考慮した救援物資配車配送計画として，「欠乏費用」という概念を取り入れ，欠乏費用と物流費用の総和最小化問題としてのモデルを構築した．そして，構築したモデルを実際の規模を想定したネットワークに適用し，需要に対する供給の割合に応じてどのような配送量割当・配送経路が望ましいか，検討を進めることとする．

参考文献

1) 内閣府：阪神・淡路大震災教訓情報資料集，緊急食糧・物資調達と配給，輸送網・輸送手段 http://www.bousai.go.jp/1info/kyoukun/hanshin_awaji/data/detail/1-7-2.pdf
2) Özdamar, L., Ekinci, E. and Küçükyazici, B.:Emergency Logistics Planning in Natural Disasters, Annals of Operation Research, Vol.129, pp217-245, 2004.
3) Yi, W. and Özdamar, L.: A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities, European Journal of Operational Research, Vol.179, pp1177-1193, 2007.
4) 岡林楠博，中村有克，安東直紀，山田忠史，谷口栄一：災害時における配送量の優先度を考慮した救援物資配送モデルの構築，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.67，No.5，pp.I_887-I_898，2011.
5) Holguín-Veras J., Jaller, M., Van Wassenhove, L.N., Pérez, N. and Wachtendorf, T. :On the appropriate objective function for post-disaster humanitarian logistics model, Journal of Operations Management, pp.262-280, 2013.