

地域間の公平性を考慮した有限の 輸送機材による災害後の燃料輸送計画

岡村 祥汰¹・長江 剛志²

¹学生非会員 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-816)
E-mail:shota.okamura.t8@dc.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-816)
E-mail:nagae@tohoku.ac.jp

本研究では、まず、災害直後における石油製品の供給不足の状況を想定し、配送量、配送ルート、輸送力のスケジューリングを決定する輸送計画を構築する。輸送費用及び供給不足による超過需要の不効用コストを目的関数とし、時空間ネットワークを用いて最小費用問題を考える。その上で、エントロピーモデルを導入することで地域間の超過需要の偏りを軽減した、より現実に即した輸送計画モデルを構築する。次に、このモデルに対する計算アルゴリズムを開発し、その効率性および得られる妥当性を検証する。

Key Words : *the Great East Japan Earthquake, gasoline shortage, demand-supply gap, gasoline logistics, spatio-temporal network*

1. はじめに

(1) 背景と目的

東日本大震災の発生によって、関東・東北地域の広い範囲でガソリン不足の問題が震災発生から1ヶ月前後続いた。このガソリン不足によって、救援・復旧作業が妨げられただけでなく、社会・経済活動が大きく低下した。赤松らの研究¹によると、ガソリン不足によって2900~3600億円の経済損失が出ていたと推計されている。また、赤松らの研究²において、このガソリン不足の主たる原因が輸送戦略の失敗にあったとされている。特に、被害の少なかった日本海側港湾への西日本などの他地域からの受け入れが十分でなかったとされており、燃料輸送計画の構築が十分ではなかったと考えられる。今後、東海・東南海・南海地震といった災害発生時に、同様の失敗を繰り返さないためにも災害時の燃料輸送における対策が必要である。

(2) 関連研究

赤松らの研究²では、東日本大震災における供給量不足による石油製品の需給ギャップを実際のデータに基づいた分析を行うと共に、限られたデータから推計を行うモデルを用いて分析を行っている。ガソリンの輸送費用と在庫費用の最小化を行ったモデルを提案しており、震

災時の実際の輸送データに基づき、地域間の需給ギャップの過度な偏りが生じない輸送計画の構築を行い、現実に近い推計を行っている。しかし、ガソリンを運ぶ輸送力のフローを考慮せず、ガソリンそれ自体が機動力を持って移動するようなモデルとなっている。そのため、災害時にタンクローリといった輸送力が十分確保できない状況に対応しておらず、災害時のオペレーションを想定した輸送計画としては十分ではない。

瀧川の研究³では、災害後の燃料輸送のオペレーションのための輸送計画のフレームワークの提案を行っている。輸送費用と未解消需要の不効用のコストを最小化する問題として定式化している。さらに時空間ネットワークを用いることで、輸送力フローとガソリンフローの二つのフローに分けて燃料の輸送を表現し、輸送力のやりくり考慮したモデルとなっている。しかし、単純にコスト最小化を目指した輸送計画であり、地域間の超過需要の偏りが生じる恐れがある。そのため災害時の輸送計画としては十分でない。

本研究では、災害後の供給量の地域間の偏りに加えて、限られた輸送機材のやりくりを考慮した輸送計画の構築を目的とする。

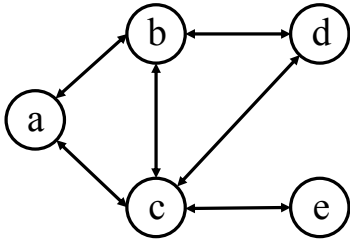


図-1 ネットワーク図

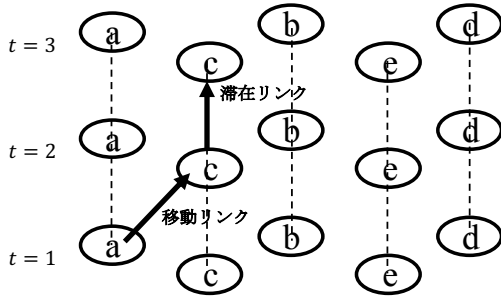


図-2 時空間ネットワーク図

2. モデルの定式化

(1) 状況設定

a) 想定するネットワーク

本研究では、図-1に示す地点数5、リンク本数6の簡単なネットワークを用いる。ノードaはガソリンの生産地であり、1時点あたり5単位だけガソリンが生産される。ノードb, cは経由地。ノードd, eは消費地であり、ノードdは1時点あたり2単位のガソリン、ノードeは1時点あたり3単位のガソリンが消費される。ガソリンを輸送する輸送力は5台、1台あたり3単位分のガソリンを積載可能とする。

b) 時空間ネットワーク

本研究では、輸送力のやりくりを表現するために、ガソリンフローだけでなく、輸送力フローを同時に扱うことのできる時空間ネットワークを用いる。図-1のネットワークに時間軸を加えて図-2のように三次元に拡張する。時空間ネットワーク上には、ある地点から別の地点に移動する移動リンクとある地点に留まる滞在リンクの二つのリンクがある。また、本研究では時点数30で計算を行う。

(2) 定式化

定式化は以下の通りである。

$$\min_{x,d} \sum_{t \in T} \sum_{i \in O} \sum_{j \in D} c_{i,j} x_{i,j}(t) + \sum_{t \in T} \sum_{j \in D} \pi d_j(t) + \theta \sum_{t \in T} \sum_{j \in D} \frac{S_j(t)}{D_j(t)} \ln \frac{S_j(t)}{D_j(t)} \quad (1)$$

Subject to

$$x_{i,i} + \sum_{j \in D} x_{i,j}(t) = X_{i,j}(t) + x_{i,i}(t-1) + \sum_{i \in O} x_{i,j}(t - \tau_{i,j}) \quad (2)$$

$$y_{i,i}(t) + \sum_{j \in D} y_{i,j}(t) = Y_{i,j}(t) + y_{i,i}(t-1) + \sum_{i \in O} y_{i,j}(t - \tau_{i,j}) \quad (3)$$

$$d_j(t) = d_j(t-1) + r_j(t) - \sum_{i \in O} y_{i,j}(t - \tau_{i,j}) \quad (4)$$

$$x_{i,j}(t) \leq \mu_{i,j} \quad (5)$$

$$y_{i,j}(t) \leq \rho x_{i,j}(t) \quad (6)$$

$$x_{i,j}(t) \in N \quad (7)$$

$$x_{i,j}(t), y_{i,j}(t) \geq 0 \quad (8)$$

ただし、

$x_{i,j}(t)$: 時点 t にリンク i, j を移動する輸送力の台数

$y_{i,j}(t)$: 時点 t にリンク i, j を移動するガソリンの量

$d_j(t)$: 時点 t にノード j における超過需要

$c_{i,j}$: 時点 t にリンク i, j を移動するのに要する費用

π : ノード j における超過需要の不効用

θ : エントロピー項の重みを表す定数

$S_j(t)$: 時点 t にノード j における累積供給量

$D_j(t)$: 時点 t にノード j における累積潜在需要量

$X_{i,j}(t)$: 時点 t にノード j に加わる輸送力の台数

$Y_{i,j}(t)$: 時点 t にノード j に加わるガソリンの量

$r_{i,j}(t)$: 時点 t にノード j に発生する需要量

$\mu_{i,j}$: リンク i, j の容量

ρ : 輸送力の積載容量

$\tau_{i,j}$: リンク i, j を移動するのに要する時間

(3) エントロピーモデルの導入

エントロピーモデルを導入することによって、時点 t

における累積潜在需要量に対する累積供給量の割合 $\frac{S_j(t)}{D_j(t)}$

が偏らないような供給を実現することができる。エントロピー H は、

$$H = - \sum_{t \in T} \sum_{j \in D} \frac{S_j(t)}{D_j(t)} \ln \frac{S_j(t)}{D_j(t)} \quad (9)$$

で表す。エントロピー $-H$ は、 $\frac{S_j(t)}{D_j(t)}$ が0以上1以下である

限り非負であり、地域間の $\frac{S_j(t)}{D_j(t)}$ が偏るほど小さな値をとる。このエントロピー $-H$ を符号を反転させた状態で輸送費用と超過需要の不効用に加えることで式(1)の目的関数を得ることができる。この目的関数を最小化することで超過需要の地域間の偏りが小さい輸送が実現できる。

3. 問題の解法

(1) 部分線形化

目的関数が非線形であり、計算が困難であるため、部分的に線形化を行い、線形化された式について計算を行い、最適化を行う。

(2) 解法のステップ

a) 初期解の設定

元の目的関数からエントロピー項を除いた線形な式について最適化を行い、得られた解を初期解とし、

$$(x_{i,j}^n(t), y_{i,j}^n(t)) = (x_{i,j}^0(t), y_{i,j}^0(t)) \text{ とする。}$$

b) 部分線形化 (降下方向の決定)

$(x_{i,j}^n(t), y_{i,j}^n(t))$ 点で、元の目的関数である式(1)の勾配を求め、線形近似した式(8)を求める。式(8)を解いて得られた点 $(x'_{i,j}(t), y'_{i,j}(t))$ から降下方向ベクトル $(\bar{X}, \bar{Y}) = (x'_{i,j}(t), y'_{i,j}(t)) - (x_{i,j}^n(t), y_{i,j}^n(t))$ を求める。

$$\begin{aligned} \min_{x,y} & \sum_{t \in T} \sum_{i \in O} \sum_{j \in D} c_{i,j}(t) \{x_{i,j}(t) - x_{i,j}^n(t)\} \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{j \in D} \left\{ -\pi_j \right. \\ & \left. + \frac{\theta}{D_j(t)} \left(1 + \ln \frac{\sum_{\tau=0}^t \sum_{i \in O} y_{i,j}(t)}{D_j(t)} \right) \right\} \\ & \cdot \{y_{i,j}(t) - y_{i,j}^n(t)\} \end{aligned} \quad (10)$$

c) ステップサイズの決定

$\{x_{i,j}^{n+1}(t), y_{i,j}^{n+1}(t)\} = \{x_{i,j}^n(t), y_{i,j}^n(t)\} + \alpha(\bar{X}, \bar{Y})$ を元の目的関数に代入すると式(9)となる。新たに得られた目的関数は、一つの変数を持つだけの一次元最適化問題であり、式(9)を最小化するステップサイズ α を黄金分割法を用いて求める。

$$\begin{aligned} f(\alpha) = & \sum_{t \in T} \sum_{i \in O} \sum_{j \in D} c_{i,j}(t) \{x_{i,j}^n(t) + \alpha \bar{X}\} + \\ & \sum_{t \in T} \sum_{j \in D} \left\{ -\pi_j + \frac{\theta}{D_j(t)} \left(1 + \right. \right. \\ & \left. \left. \ln \frac{\sum_{\tau=0}^t \sum_{i \in O} y_{i,j}(t)}{D_j(t)} \right) \right\} \{y_{i,j}^n(t) + \alpha \bar{Y}\} \end{aligned} \quad (11)$$

d) 収束判定

収束判定を行い、収束していれば計算を終え、収束していなければ、新たに得られた解をとし、b)部分線形化へ戻り、収束するまで計算を繰り返す。

4. 計算結果

計算結果を図-3、図-4に示す。図-3は、目的関数からエントロピー項を除いた場合の結果である。ノードdの需要に対する供給は行われている一方で、ノードeに対する供給はほとんど行われていない。ノードdとノードeの間で超過需要の偏りが大きい輸送計画となっている。図-4は、 $\theta = 100$ としてエントロピー項を導入した場合の結果である。エントロピー項を導入していない場合と比較して、ノードeに対する供給が増えており、ノード間の偏りが考慮された輸送計画となっている。

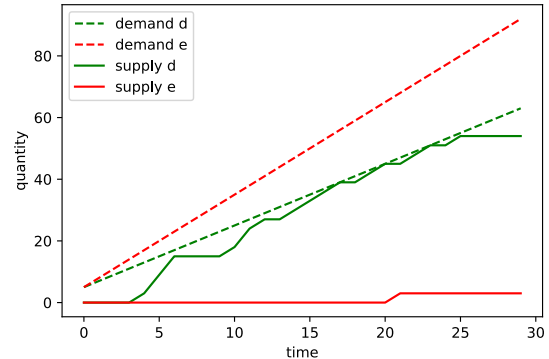


図-3 エントロピー項なし

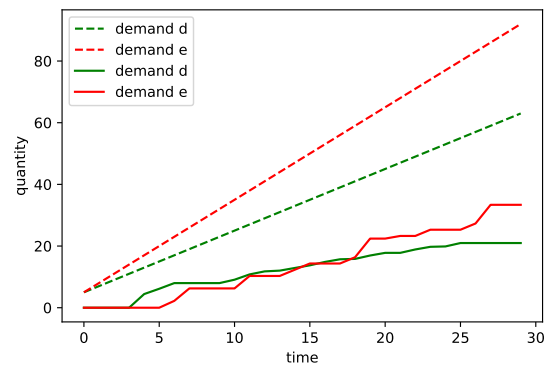


図-4 エントロピー項あり

4. おわりに

本研究では、災害時の燃料輸送計画において、地域間の超過需要の偏りと、ガソリンを運ぶためのタンクローリーといった輸送力のやりくりを考慮し、実際のオペレーションに対して有用な輸送計画を提案した。

まず、時空間ネットワークを用いて燃料フローだけでなく、輸送力フローを同時に扱うことで輸送力のやりくりを可能にした。また、エントロピーモデルを導入することで地域間の超過需要の偏りを考慮した輸送を実現した。

今後の課題として、本研究で用いたネットワークは、地点数5、リンク本数6の簡単なネットワークであった。今後は、東日本大震災におけるデータを用いて数値計算を行う必要がある。

参考文献

- 1) 赤松隆, 大澤実, 長江剛志, 山口裕通: 巨大災害時のガソリン不足に対する戦略とその社会経済評価, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol. 72, No. 5, I_1-I_19, 2016.
- 2) 赤松隆, 大澤実, 長江剛志, 山口裕通: 3. 11 震災後の東北地域で生じたガソリン需給ギャップの時空間分析, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol. 69, No. 2, 187-205, 2013.
- 3) 瀧川悠: 災害直後に発生するガソリン需給ギャップの空間的分布と時間的進展を考慮した輸送計画, 電気通信大学修士論文, 2013.

(2019. 10. 4 受付)