

サプライ・チェーンの リスク管理における数理モデル

有江 禎晶, 久保 幹雄, 橋本 英樹

キーワード: サプライ・チェーン, リスク管理, 在庫管理

本稿は、有江 禎晶による 2015 年度東京海洋大学海洋工学部に提出した卒業論文をもとに加筆修正したものです。

1. 問題の簡単な説明と得られた結果

近年、サプライ・チェーンのグローバル化やスリム化が進み、リスクに対して脆弱なものとなってきている。サプライ・チェーンのリスクとして代表的なものの一つに供給途絶があり、長期の供給途絶が起こった際、最終製品が製造不可能な状態に陥る場合がある。たとえば、2011 年に発生した東日本大震災やタイの洪水が原因で、管理の行き届いていないサプライ・チェーン上流部に存在する工場や倉庫からの供給が途絶し、多くの企業が被害を負った。

Ford Motors Company と MIT の Simchi-Levi らが、サプライ・チェーンにおける部品供給リスクを定量的に評価するため、線形最適化を用いた数理モデルを提案した [1]。この研究は、2014 年 INFORMS において『Wagner Prize』を受賞し、2015 年には Ford Motor Company から『Ford 2015 Engineering Excellence Award』を受賞した。

本研究では、そのモデルに確率的な供給途絶シナリオを設定し、それらのシナリオを考慮した総被害額期待値最小化を行う確率最適化モデルを提案する。

2. 問題の設定と考え方

本研究におけるサプライ・チェーンのグラフを表現する際に必要となる情報が、工場グラフ ($G = (V, E)$) と部品展開表 (Bill of Materials) と工場の製品保有情

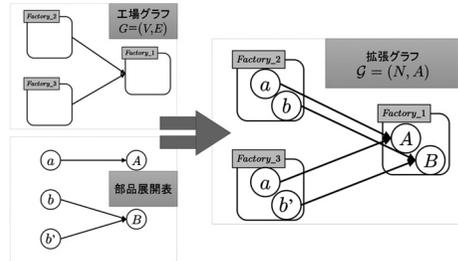


図 1 サプライ・チェーン (拡張グラフ) の構成

報である。これらを用いて拡張グラフ $G = (N, A)$ を構成する (図 1 参照)。図 1 では $Factory_1$ で製品 A を製造するには $Factory_2$ の a もしくは $Factory_3$ の a が必要で、製品 B を製造するには $Factory_2$ の b と $Factory_3$ の b' が必要であることを表している。

作成した拡張グラフを用いて、欠品の原因である供給途絶を確率的に発生するシナリオと表現し、販売機会損失額の期待値と在庫費用との合計を最小化する確率最適化モデルを作成する。

3. 定式化

定式化するための記号の定義を以下で行う。

- 添字
 - i : 参照する工場
 - j : 工場 i に連結していて参照する工場
 - p : 参照する製品 (部品)
 - q : 製品 (部品) p に連結していて参照する製品 (部品)
 - s : 参照するシナリオ
- 集合とグラフ
 - G : 工場グラフ ; $G = (V, E)$
 - V : 工場集合
 - E : 工場グラフの枝集合
 - P : 製品 (部品) 集合
 - F : 最終製品の集合 ; $F \subseteq P$
 - V_p : 製品 p を製造する工場の集合 ; $V_p \subseteq V$
 - $Child_p$: 製品 p を製造するために必要な部品 q の集合 ; $Child_p \subseteq P$

ありえ よしあき, くぼ みきお, はしもと ひでき
 東京海洋大学 海洋工学部
 〒 135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6
 m165001@edu.kaiyodai.ac.jp
 kubo@kaiyodai.ac.jp
 hhashi0@kaiyodai.ac.jp

G : 拡張グラフ ; $G = (N, A)$

N : 拡張グラフの点集合

$$N = \{(i, p) \mid i \in V_p, p \in P\}$$

A : 拡張グラフの枝集合

$$A = \{((j, q), (i, p)) \mid q \in Child_p, (j, i) \in E, p \in P\}$$

S : シナリオ集合

D_s : シナリオ s において途絶を仮定する拡張グラフの点集合 ; $D_s \subseteq N$

● パラメータ

c_{ip} : 工場 i における製品 p の利益 (販売機会損失時の費用)

d_{ip} : 工場 i における製品 p の需要量

M_i : 工場 i の単位期間当たりの容量

ρ_{qp} : 部品 $p \in P$ を 1 ユニット製造するのに必要な $q \in Child_p$ の部品数

t_s : シナリオ s における途絶期間

φ_s : シナリオ s が発生する確率

h_{ip} : 工場 i における製品 (部品) p の在庫費用

● 変数

y_{ip} : シナリオに依存しない工場 i の製品 (部品) p の在庫量

ℓ_{ip}^s : シナリオ s における工場 i の製品 p の販売機会損失量

x_{ip}^s : シナリオ s における工場 i の製品 (部品) p の生産量

r_{jqip}^s : シナリオ s における $((j, q), (i, p))$ の輸送量
以上の記号を用いて定式化を行うと以下ようになる。

$$\begin{aligned} \min. & \sum_{s \in S} \varphi_s \sum_{i \in V_p, p \in F} c_{ip} \ell_{ip}^s + \sum_{(i, p) \in N} h_{ip} y_{ip} \\ \text{s.t.} & x_{ip}^s \leq \sum_{((j, q), (i, p)) \in A} \frac{r_{jqip}^s}{\rho_{qp}} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sum_{((i, p), (j, q)) \in A} r_{ipjq}^s \leq y_{ip} + x_{ip}^s \quad (2)$$

$$\forall (i, p) \in N, \forall s \in S$$

$$x_{ip}^s = 0 \quad \forall (i, p) \in D_s, \forall s \in S \quad (3)$$

$$\ell_{ip}^s \geq d_{ip} t_s - (x_{ip}^s + y_{ip}) \quad (4)$$

$$\forall i \in V_p, \forall p \in F, \forall s \in S$$

$$\sum_{p: i \in V_p} x_{ip}^s \leq M_i t_s \quad \forall i \in V, \forall s \in S \quad (5)$$

$$y_{ip}, \ell_{ip}^s, x_{ip}^s, r_{jqip}^s \geq 0 \quad (6)$$

式 (1) は部品展開表を考慮した入フロー整合条件, 式 (2) は出フロー整合条件, 式 (3) はシナリオ条件, 式 (4) は需要満足条件, 式 (5) は容量制約, 式 (6) は変数の制約を表す。

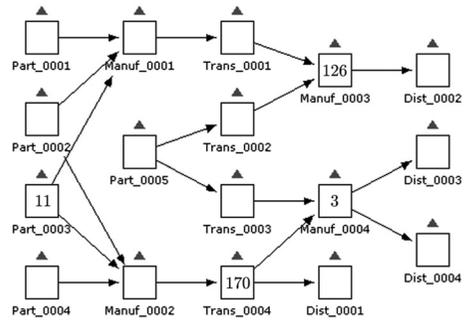


図 2 実験結果

4. 実験と実験結果

実験データとして, [2] のデータを使用した. このデータには, サプライ・チェーンにおける安全在庫モデルのベンチマークが多数含まれており, そこから抜粋しシナリオをつけ実験を行った.

最上流の 1 工場が 1 日途絶する確率を \mathcal{P} とし, サプライ・チェーンの下流から数えて L 層目で, t 日の途絶が発生する確率 γ を, $\gamma = \frac{\alpha^L}{\beta^{(t-1)}} \times \mathcal{P}$ の式で与える (今回の実験では, $\alpha = 10, \beta = e, \mathcal{P} = 10$ で与えた).

途絶日数は 1 日から 31 日すべての日数を用意し, それより長い日数の途絶は起きないものとする. 工場の容量として, 需要を十分に満たせるものを用意する.

以上のデータ設定を用いて実験を行った結果を図 2 に示す. Part と Manuf と Trans と Dist はそれぞれ, 部品工場と組立工場と輸送拠点と物流センターを意味し, ノードの中に記された数字はモデルで算出したその地点でもつべき在庫量を表す. そのほかに, 各シナリオにおける販売機会損失量などの情報が得られる.

実験に使用した各パラメータと精度については引き続き検証を続けたい. また, 実際のデータを用いた解析が今後の課題である.

参考文献

[1] D. Simchi-Levi, W. Schmidt, Y. Wei, P. Y. Zhang, K. Combs, Y. Ge, O. Gusikhin, M. Sanders and D. Zhang, "Identifying risks and mitigating disruption the automotive supply chain," https://client.blueskybroadcast.com/Informs/2014/pdf/Wagner_FORD.pdf, 2014

[2] S. P. Willems, "Real-world multi-echelon supply chains used for inventory optimization." *Manufacturing Service Operations Management*, **10**, pp. 19–23, 2008.