

京都大学工学部 学生員 ○横山 大河
 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 フェロー 谷口 栄一

1. 研究の背景と目的

サプライチェーン上の商品の流動や活動主体の行動を記述することは、行政側が物資流動発生メカニズムや物流施策の効果を適切に把握することに寄与するだけでなく、企業側の施策理解にもつながる。それゆえ、複数主体の分権的な意思決定や主体間の行動の相互作用を考慮したうえで、多段階の SCN 全体で生じる現象を記述する方法(SCNE モデル)¹⁾が提案されている。

しかし、既存の SCNE モデルでは、各主体の意思決定において、その上下流の主体の行動が確定的な情報として捉えられている。そこで、本研究では、各主体にとって、他の主体の行動が不確実である（確率的に変動する）ことを想定し、他の主体の行動を予測して、自らの意思決定を行う確率論的モデルの構築を試みる。

2. モデルの定式化

サプライチェーン上には、製造業者、小売業者、物流業者が各 1 社、消費市場が 1 つ存在すると仮定する

(図-1)。製造業者の行動は、利潤最大化のもと以下のように定式化できる。式中の*は最適解を表す。

$$\text{Max}_{q_1^M} \rho_1^{M*} q_1^M - f(q_1^M) - g_1(q_1^M) - c_{12}(q_1^M) - \rho_3^{M*} q_1^M \quad (1)$$

$$\text{subject to } q_1^M \geq 0 \quad (2)$$

ここに、

- ρ_1^M : 製造業者の小売業者への販売価格
- q_1^M : 製造業者の生産量
- $f(q_1^M)$: 製造業者の生産費用関数
- $g_1(q_1^M)$: 製造業者の施設費用関数
- $c_{12}(q_1^M)$: 製造業者と小売業者間の取引費用関数
- ρ_3^M : 製造業者と小売業者間の運賃

である。販売価格、生産量、運賃は、下記のように、製造業者が小売業者と物流業者の行動を不確実性下で予測して決めるものであり、必ずしも実現しない。

製造業者が予測する小売業者の商品需要 $d_2^M(\rho_1^M, \omega^1)$ 、および、物流業者の輸送供給量 $s_4^M(\rho_3^M, \omega^2)$ は、それぞれ以下の均衡条件で記述される。なお、 ω^1 (以下、

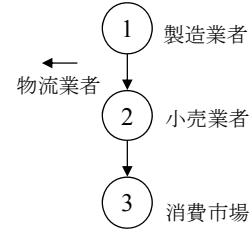


図-1 モデル化の対象とするサプライチェーン

$\omega^2 \sim \omega^7$ についても同様) は確率変数を表す。

$$d_2^M(\rho_1^{M*}, \omega^1) \begin{cases} = q_1^{M*} & \text{if } \rho_1^{M*} > 0 \\ \leq q_1^{M*} & \text{if } \rho_1^{M*} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$s_4^M(\rho_3^{M*}, \omega^2) \begin{cases} = q_1^{M*} & \text{if } \rho_3^{M*} > 0 \\ \geq q_1^{M*} & \text{if } \rho_3^{M*} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

製造業者の販売価格、生産量、運賃（いずれも、予測量）は、下記の変分不等式の解として表される。

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\partial f(q_1^{M*})}{\partial q_1^M} + \frac{\partial g_1(q_1^{M*})}{\partial q_1^M} + \frac{\partial c_{12}(q_1^{M*})}{\partial q_1^M} + \rho_3^{M*} - \rho_1^{M*} \right] \times [q_1^M - q_1^{M*}] \\ & + [q_1^{M*} - d_2^M(\rho_1^{M*}, \omega^1)] \times [\rho_1^M - \rho_1^{M*}] \\ & + [s_4^M(\rho_3^{M*}, \omega^2) - q_1^{M*}] \times [\rho_3^M - \rho_3^{M*}] \geq 0 \quad \forall (q_1^M, \rho_1^M, \rho_3^M) \end{aligned} \quad (5)$$

つぎに、小売業者の行動は、利潤最大化のもと、以下のように定式化できる。

$$\text{Max}_{q_1^R, q_2^R} \rho_2^{R*} q_2^R - c_2(q_1^R) - g_2(q_1^R) - c_{23}(q_2^R) - \rho_4^{R*} q_2^R - \rho_1^{R*} q_1^R \quad (6)$$

$$\text{subject to } q_2^R \leq q_1^R \quad (7)$$

$$q_1^R \geq 0, q_2^R \geq 0 \quad (8)$$

ここに、

- ρ_1^R : 小売業者の製造業者からの購入価格
- ρ_2^R : 小売業者の消費市場への販売価格
- q_1^R : 小売業者の製造業者からの購入量
- q_2^R : 小売業者の消費市場への販売量
- $c_2(q_1^R)$: 小売業者の保管費用関数
- $g_2(q_1^R)$: 小売業者の施設費用関数
- $c_{23}(q_2^R)$: 小売業者と消費市場間の取引費用関数
- ρ_4^R : 小売業者と消費市場間の運賃

である。購入価格、販売価格、購入量、販売量、運賃は、下記のように、小売業者が製造業者、物流業者、消費市場の行動を不確実性下で予測して決めるものであり、必ずしも実現しない。小売業者が予測する製造業者の商品供給量 $s_1^R(\rho_1^R, \omega^3)$ 、消費市場の商品需要

$d_3^R(\rho_2^R, \omega^4)$, および, 輸送量供給 $s_4^R(\rho_4^R, \omega^5)$ は, それぞれ, 以下のような均衡条件で記述される.

$$s_1^R(\rho_1^{R*}, \omega^3) \begin{cases} = q_1^{R*} & \text{if } \rho_1^{R*} > 0 \\ \geq q_1^{R*} & \text{if } \rho_1^{R*} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$d_3^R(\rho_2^{R*}, \omega^4) \begin{cases} = q_2^{R*} & \text{if } \rho_2^{R*} > 0 \\ \leq q_2^{R*} & \text{if } \rho_2^{R*} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$s_4^R(\rho_4^{R*}, \omega^5) \begin{cases} = q_2^{R*} & \text{if } \rho_4^{R*} > 0 \\ \geq q_2^{R*} & \text{if } \rho_4^{R*} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

小売業者の購入価格, 販売価格, 購入量, 販売量, 運賃 (いずれも, 予測量) は, 下記の変分不等式の解として表される.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\partial c_2(q_1^{R*})}{\partial q_1^R} + \frac{\partial g_2(q_1^{R*})}{\partial q_1^R} + \rho_1^{R*} - \gamma^* \right] \times [q_1^R - q_1^{R*}] \\ & + \left[-\rho_2^{R*} + \frac{\partial c_{23}(q_2^{R*})}{\partial q_2^R} + \rho_4^{R*} + \gamma^* \right] \times [q_2^R - q_2^{R*}] \\ & + [q_1^{R*} - q_2^{R*}] \times [\gamma^* - \gamma] + [s_1^R(\rho_1^{R*}, \omega^3) - q_1^{R*}] \times [\rho_1^R - \rho_1^{R*}] \\ & + [q_2^{R*} - d_3^R(\rho_2^{R*}, \omega^4)] \times [\rho_2^R - \rho_2^{R*}] \\ & + [s_4^R(\rho_4^{R*}, \omega^5) - q_2^{R*}] \times [\rho_4^R - \rho_4^{R*}] \geq 0 \\ & \forall (q_1^R, q_2^R, \gamma, \rho_1^R, \rho_2^R, \rho_4^R) \in R_+^6 \end{aligned} \quad (12)$$

γ は式(7)の制約条件に関するラグランジェ定数である.

消費市場の商品需要は, 以下の式で記述される.

$$q_2^{C*} = \max\{d_3(\rho_2^R, \omega^4), 0\} \quad (13)$$

物流業者の行動は, 利潤最大化のもと, 以下のよう
に定式化できる.

$$\text{Max}_{q_1^F, q_2^F} \rho_3^{F*} q_1^F + \rho_4^{F*} q_2^F - g_4(q_1^F, q_2^F) - w(q_1^F, q_2^F) \quad (14)$$

$$\text{subject to } q_2^F \leq q_1^F \quad (15)$$

$$q_1^F \geq 0, q_2^F \geq 0 \quad (16)$$

ここに,

q_1^F : 製造業者と小売業者間の輸送量

q_2^F : 小売業者と消費市場間の輸送量

$g_4(q_1^F, q_2^F)$: 物流業者の施設費用関数

$w(q_1^F, q_2^F)$: 物流業者の運行費用関数

ρ_3^F : 製造業者と小売業者間の運賃

ρ_4^F : 小売業者と消費市場間の運賃

である. 製造業者や小売業者と同様の理由で, 輸送量と運賃は物流業者の予測量である. 物流業者が予測する製造業者の輸送量需要 $d_1^F(\rho_3^F, \omega^6)$, および, 小売業者の輸送量需要 $d_2^F(\rho_4^F, \omega^7)$ は, それぞれ以下のような均衡条件で記述できる.

$$d_1^F(\rho_3^{F*}, \omega^6) \begin{cases} = q_1^{F*} & \text{if } \rho_3^{F*} > 0 \\ \leq q_1^{F*} & \text{if } \rho_3^{F*} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$d_2^F(\rho_4^{F*}, \omega^7) \begin{cases} = q_2^{F*} & \text{if } \rho_4^{F*} > 0 \\ \leq q_2^{F*} & \text{if } \rho_4^{F*} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

物流業者の意思決定は, 下記の変分不等式の解として表される.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\partial g_4(q_1^{F*}, q_2^{F*})}{\partial q_1^F} + \frac{\partial w(q_1^{F*}, q_2^{F*})}{\partial q_1^F} - \rho_3^{F*} - \delta^* \right] \times [q_1^F - q_1^{F*}] \\ & + \left[\frac{\partial g_4(q_1^{F*}, q_2^{F*})}{\partial q_2^F} + \frac{\partial w(q_1^{F*}, q_2^{F*})}{\partial q_2^F} - \rho_4^{F*} + \delta^* \right] \times [q_2^F - q_2^{F*}] \\ & + [q_1^{F*} - q_2^{F*}] \times [\delta - \delta^*] + [q_1^{F*} - d_1^F(\rho_3^{F*}, \omega^6)] \times [\rho_3^F - \rho_3^{F*}] \\ & + [q_2^{F*} - d_2^F(\rho_4^{F*}, \omega^7)] \times [\rho_4^F - \rho_4^{F*}] \geq 0 \\ & \forall (q_1^F, q_2^F, \delta, \rho_3^F, \rho_4^F) \in R_+^5 \end{aligned} \quad (19)$$

δ は式(15)の制約条件に関するラグランジェ定数である.

製造業者と小売業者間の商品取引量 q^D や商品価格 ρ^D の実現値, および, 小売業者と消費市場間の商品取引量 q^D の実現値については, 以下のように決まるものとする. なお, 各運賃については, 物流業者の提示運賃になる場合, もしくは, 製造業者や小売業者が要望する運賃になる場合の, いずれかを想定する.

$$q_1^D = \min\{q_1^{M*}, q_1^{R*}\} \quad (20)$$

$$\rho_1^D = \min\{\rho_1^{M*}, \rho_1^{R*}\} \quad (21)$$

$$q_2^D = \min\{q_2^D, q_2^{C*}\} \quad (22)$$

確率変分不等式(5),(12),(19)については, $\min$ 関数を利用して, 期待残差最小化法(ERM 法: Expected Residual Minimization Method)²⁾により求解する.

3. ケーススタディの概要

各主体の他主体の行動予測に含まれる不確実性 (各 ω) が, 生産量, 商品取引量 (物資流動量), 価格, および, 余剰などへ及ぼす影響について考察した. その結果, 不確実性が大きくなると, 商品取引量 (物資流動量) や総余剰が減少することが確認できた. なお, 紙面の都合上, ケーススタディの詳細は講演時に示す.

4. まとめ

本研究では, 各主体が他主体の行動を予測して, 不確実性下で意思決定を行う確率論的サプライチェーンネットワークモデルの定式化を行った. 講演時には, ケーススタディの問題設定や計算結果についても詳述する予定である.

参考文献

- 1) 例えば, 山田忠史, 今井康治, 谷口栄一: 物流業者の行動を考慮したサプライチェーンネットワーク均衡分析, 土木学会論文集 D, Vol.65, No.2, pp.163-174, 2009.
- 2) X.Chen and M.Fukushima: Expected Residual Minimization Method, for Stochastic Linear Complementarity Problems, *Mathematics of Operations Research*, vol.30, No.4, pp. 1022-1038, 2005.