不確実性下の配送ネットワークに対する 協力的２段階モデル*

西崎 一郎[†]・林田 智弘[†]・関崎 真也[†]・大久保和樹[†]

Cooperative Two-stage Model for Distribution Network under Uncertainty*

Ichiro NISHIZAKI[†], Tomohiro HAYASHIDA[†], Shinya SEKIZAKI[†] and Kazuki OKUBO[†]

In this paper, dealing with supply chain planning including distributors, manufacturers, and retailers, we consider distribution planning of distributors that order manufacturers to produce products and deliver the products to multiple retailers via warehouses. Although Calvete et al. (2014) dealt with a similar problem, we extend the problem into a two-stage model by taking into account uncertainty about demands of the retailers. To reduce losses due to the uncertainty, in the second stage the leftover inventories in some retailers are transshipped to retailers with residual demands after the demands are realized. We develop a computational method for obtaining an optimal solution of the extended two-stage model. Furthermore, assuming coordination of multiple distributors, we formulate a cooperative two-stage model in which the multiple distributors jointly place orders with the manufacturer and distribute the products to the retailers in a coordinated manner, and we allocate the total profit to each distributor using a solution concept of cooperative game theory. We demonstrate the validity of the proposed model through an illustrative numerical example.

1. はじめに

サプライチェーン管理の研究分野では、複数の企業や事業所が関わる配送や製造過程に焦点が当てられている。原材料の購入や輸送、倉庫（デポ）や製造工場の設置、中間製品から最終製品への生産（変換）計画、製品の顧客への配送などの決定に関して、サプライチェーンの有効性や効率性を分析するために、さまざまな視点からの試みがなされている。サプライチェーンには製造業者、配送業者、小売業者などの複数の経済主体が含まれ、それぞれが異なる目的やリスク態度を有するため、サプライチェーン全体としての効率性は、一人の意思決定者がサプライチェーン全体の決定権をもたない限り、つまり集中化ではなく、分散化された意思決定モデルでは、必ずしもサプライチェーン全体の最適なパフォーマンスは望めない。さらに、個別の企業間の競争からサプライチェーン間の競争が注目されてきている [5]。このような

観点から、サプライチェーンにおける効果的な統合や協調的な運営の重要性が指摘できる。

サプライチェーンは複数の企業間の生産や輸送などの活動を対象としているので、企業間の協力あるいは競合の側面が問題を特徴付けるとともに、協力の度合いにもさまざまな水準があると考えられ、そのような観点からのサプライチェーンの評価が要請されている。さらにサプライチェーンの業務には、需要量などの不確実性を考慮した適切な意思決定が求められる。

サプライチェーンにおけるビジネスは、一般に複数の独立した企業から構成されているので、それぞれの企業の決定が他社あるいはサプライチェーン全体の利益や費用に影響を及ぼしている。このように複数の意思決定者が自己の目的を最適化したり、複数の意思決定者が結託するような状況を記述あるいは分析するために、ゲーム理論の枠組みが採用されることは自然である。非協力ゲームの枠組みが利用される場合、その目的は Stackelberg 均衡や Nash 均衡を用いてそれぞれの意思決定者の決定を分析あるいは予測することにある。一方、協力ゲームでは、複数の意思決定者が協力したときの、達成可能な結果をいかに各意思決定者に割り当てるか、またその割当ての安定性に焦点が当てられる。その

* 原稿受付 2019 年 11 月 1 日

[†] 広島大学 大学院 工学研究科 Graduate School of Engineering, Hiroshima University; 1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8527, JAPAN

Key Words: distribution network, two-stage model, uncertainty, cooperative game.

ような研究のサーベイには, Cachon and Netessine[1], Nagarajan and Sošić[12] などがあり, サプライチェーンの分析に関するゲーム論的な枠組みは Slikker and van den Nouweland[17] など与えられている. さらに, 需要や価格などの不確実性を考慮するために, 最適化モデルにしばしば確率計画法が取り入れられている.

本論文では, サプライチェーンの階層性と企業間の協力に焦点を当てる. サプライチェーンには階層化された意思決定過程が存在し, 各階層の企業は異なる決定変数や目的関数を持ち, それぞれの目的はしばしば相競合すると考えられる. とくに, 上位レベルの企業は下位レベルの企業の反応を考慮したうえで自己の戦略を選択することになる. このような 2 レベル最適化モデルはサプライチェーンのモデル化においてもしばしば採用されている. Cao and Chen[4] は, 上位レベルの企業が工場の開設に関する決定を行い, 下位レベルの企業は与えられた工場に対して複数の製品をどの工場で生産するかを決めるモデルを定式化している. このとき, 上位レベルの企業は下位レベルの企業が製造費用を最小化することを仮定して, 工場開設費用と工場の余剰容量に関する機会損失の和を最小化する 2 レベル計画問題を定式化し, 単一レベル混合 0-1 計画問題に変換することで, 商用ソルバで解く手法を提案している. Calvete et al.[2] の研究では, 上位レベルの企業は配送業者で, 複数の倉庫を持ち, 顧客である小売業者へ製品を配送する. 下位レベルの企業は製造業者で, 倉庫への製品の納品量が与えられたとき, それを満足するように複数の工場で製品を生産する. 製造業者が生産費用を最小化すると仮定して, 配送業者は, 工場から倉庫と倉庫から小売業者への製品の輸送費用を最小化する. 彼らはこの 2 レベル計画問題を解くために, メタヒューリスティックによる最適化手法を採用している. さらに, Calvete et al.[3] は, 配送業者が倉庫の開設に関する意思決定を含めたモデルに拡張している. Zheng et al.[18] は Calvete et al.[3] と同様のモデルに対して, 複数の製造業者を考慮し, 製造業者の最適反応が複数ある場合, 配送業者にとって最悪の場合を想定した目的関数を定式化し, 問題を分解し, ベナルティ項を導入した解法を提案している.

サプライチェーンにおける関連企業の協調的オペレーションは協力ゲームの枠組みでモデル化されることが多く, 在庫の共有化は代表的な協調的オペレーションと考えられ, 協力による利益の増分を企業間で割り当てることに関する研究が注目されてきている. Gerchak and Gupta[7] の論文は在庫の共有化に関する研究の嚆矢としてしばしば引用されている. 彼らは在庫を集中化し, 不確実な需要を統合することによって費用削減が可能であり, この在庫管理費用をいかに割り当てるかを考察している. Robinson[15] は Gerchak and Gupta の問題を協力ゲームを用いてモデル化し, 公理的な背景をもつ解概念である Shapley 値の適用に関する妥当性を検討してい

る. Hartman and Dror[8] は同様の問題に対して, 三つの基準を導入し, Shapley 値や仁を含む割当て方式を調査している. Reinhardt and Dada[14] は資源を複数企業で共同維持して費用を削減し, その総費用を割り当てるために, Shapley 値を採用している. 一般に, Shapley 値はプレイヤーである企業の数が増大すると, 計算量が増加するので, ある種の条件のもとで計算量の少ない手法を提案している. Hartman et al.[9] や Müller et al.[11] は不確実な需要をもつ在庫の集中化による協力ゲームを定式化し, 協力ゲームの解概念であるコアが非空であることを示している. とくに, コアは各プレイヤーが全体提携から逸脱する動機をもたないという意味で, 安定な解の集合としてよく知られている. Slikker et al.[16] は仕入れ値や売り値がそれぞれの会社で異なり, 需要確定後の商品の輸送を考慮して拡張されたモデルを考察し, 対応する協力ゲームが非空のコアをもつことを示している. Slikker et al. の設定では, 単一の倉庫をもつモデルであったが, Özen et al.[13] は複数の倉庫をもつ配送システムを取り扱い, 対応する協力ゲームのコアの非空性を議論している. Kemahhoğlu-Ziya and Bartholdi[10] は, 単一のサプライヤーが複数の小売業者に対して, 商品を供給するモデルにおいて, 小売業者が在庫を共有化する場合, その利益を Shapley 値で割り当てるならば, このサプライチェーンにおいて小売業者は協力可能であることを示している.

本論文では, Calvete et al.[3] のモデルを基礎に, サプライチェーンにおける不確実性と協力を考慮したモデルを考察する. Calvete et al.[3] のモデルでは, 需要は既知であったが, 本論文では確率変数とし, それゆえに需要確定後生じる製品の過剰在庫と残存需要を小売業者間で再輸送することによって, できるだけ需給のギャップを相殺するモデルを考える. とくに, 需要が離散確率変数で表現されると仮定することにより, 計算の観点から取り扱いやすい問題を定式化する. さらに, 複数の配送業者が共同配送するモデルへと拡張し, 協力ゲームを用いた利益の割当てを考察する.

第 2 節では, Calvete et al.[3] のモデルを紹介したあと, 需要の不確実性を導入し, 需要確定後の製品の再輸送を考慮したモデルに拡張する. さらに, 複数の配送業者による協力モデルに展開する. 第 3 節では, 数値例を用いて, 第 2 節で導入した拡張モデルの妥当性を確認する. 第 4 節で結論を述べる.

2. 配送ネットワーク問題

本節では, Calvete et al.[3] の定式化を示したあと, サプライチェーンにおける不確実性と協力を考慮した拡張モデルを定式化する.

Calvete et al.[3] は, Fig. 1 に示すように, 倉庫をもつ配送業者が製造業者から製品の供給を受け, 需要をもつ小売業者へ製品を輸送する問題を考えた. 彼らは, この

Fig. 1 配送ネットワーク

サプライチェーン問題を配送業者が上位レベルの意思決定者で、製造業者は下位レベルの意思決定者である2レベル計画問題として定式化している。複数の工場をもつ製造業者は自身の決定に基づいて選択した工場で生産し、製品を配送業者の倉庫へ納入する。このとき、製品納入にかかる輸送費用は配送業者の負担となる。配送業者は複数の倉庫設置候補からいくつかの倉庫を開設し、そこから与えられた需要をもつ小売業者へ製品を配送する。

2.1 配送ネットワークにおける2レベル問題

Calvete et al.[3]の定式化では、工場 k での製品の製造費用が送り先の倉庫 l に依存して異なっていたが、解釈が困難なので、本論文では製造費用は同一工場では同じとする。

配送業者の倉庫 l の開設費用を c_l^W , $l=1, \dots, L$, 倉庫 l の容量を W_l , $l=1, \dots, L$ とする。倉庫 l から小売業者 j への製品1単位当たりの輸送費用を c_{lj}^{WR} , $l=1, \dots, L$, $j=1, \dots, J$ とし、小売業者 j の需要を d_j , $j=1, \dots, J$ とする。

製造業者の工場 k の生産能力を F_k , $k=1, \dots, K$ とし、製品の工場 k での製造費用を c_k^F , $k=1, \dots, K$ とする。工場 k から倉庫 l への製品1単位当たりの輸送費用を c_{kl}^{FW} , $k=1, \dots, K$, $l=1, \dots, L$ とする。

配送業者の決定変数は以下の通りである。倉庫 l の開設に関する決定変数を $x_l^W \in \{0, 1\}$ とし、開設ならば、 $x_l^W = 1$, そうでなければ、 $x_l^W = 0$ である。倉庫 l から小売業者 j への製品の輸送量を $x_{lj}^{WR} \geq 0$, $l=1, \dots, L$, $j=1, \dots, J$ とする。製造業者の決定変数は工場 k で生産され、倉庫 l へ輸送される製品量 $y_{kl}^{FW} \geq 0$, $k=1, \dots, K$, $l=1, \dots, L$ である。

配送業者の目的は倉庫の開設費用、倉庫から小売業者への輸送費用、工場から倉庫への輸送費用の和の最小化、すなわち、

$$\text{minimize } \sum_{l=1}^L c_l^W x_l^W + \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J c_{lj}^{WR} x_{lj}^{WR} + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L c_{kl}^{FW} y_{kl}^{FW} \quad (1)$$

である。制約は小売業者の需要を満たすこと、すなわち

$$\sum_{l=1}^L x_{lj}^{WR} \geq d_j, \quad j=1, \dots, J \quad (2)$$

である。また、配送業者に関する制約には製造業者の最適反応が含まれる。つまり、配送業者の倉庫開設と小売業者への輸送量が与えられたとき、製造業者は自身の製造費用を最小化するように生産すると仮定する。

製造業者の目的はすべての工場での製造費用の和の最小化、すなわち、

$$\text{minimize } \sum_{k=1}^K c_k^F \sum_{l=1}^L y_{kl}^{FW} \quad (3)$$

である。制約はつぎに示されるように、工場の生産能力、与えられた倉庫開設状況 x_l^W のもとでの倉庫容量制約、与えられた小売業者への輸送量 x_{lj}^{WR} のもとでの倉庫への供給制約である。

$$\sum_{l=1}^L y_{kl}^{FW} \leq F_k, \quad k=1, \dots, K \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{kl}^{FW} \leq W_l x_l^W, \quad l=1, \dots, L \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{kl}^{FW} \geq \sum_{j=1}^J x_{lj}^{WR}, \quad l=1, \dots, L \quad (6)$$

したがって、配送業者の問題は次のように定式化される。

$$\min \sum_{l=1}^L c_l^W x_l^W + \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J c_{lj}^{WR} x_{lj}^{WR} + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L c_{kl}^{FW} y_{kl}^{FW} \quad (7a)$$

$$\text{s. t. } \sum_{l=1}^L x_{lj}^{WR} \geq d_j, \quad j=1, \dots, J \quad (7b)$$

$$x_l^W \in \{0, 1\}, \quad l=1, \dots, L \quad (7c)$$

$$x_{lj}^{WR} \geq 0, \quad l=1, \dots, L, \quad j=1, \dots, J \quad (7d)$$

$$\min \sum_{k=1}^K c_k^F \sum_{l=1}^L y_{kl}^{FW} \quad (7e)$$

$$\text{s. t. } \sum_{l=1}^L y_{kl}^{FW} \leq F_k, \quad k=1, \dots, K \quad (7f)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{kl}^{FW} \leq W_l x_l^W, \quad l=1, \dots, L \quad (7g)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{kl}^{FW} \geq \sum_{j=1}^J x_{lj}^{WR}, \quad l=1, \dots, L \quad (7h)$$

$$y_{kl}^{FW} \geq 0, \quad k=1, \dots, K, \quad l=1, \dots, L \quad (7i)$$

制約内の製造業者の最小化問題 (7e)–(7i) は線形計画問題であるので、対応する KKT 条件を用いれば、問題 (7) は次のように書き換えられる。

$$\min \sum_{l=1}^L c_l^W x_l^W + \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J c_{lj}^{WR} x_{lj}^{WR} + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L c_{kl}^{FW} y_{kl}^{FW} \quad (8a)$$

$$\text{s. t. } (7b)–(7d), (7f)–(7i)$$

$$\mu_k \left(\sum_{l=1}^L y_{kl}^{FW} - F_k \right) = 0, \quad k = 1, \dots, K \quad (8b)$$

$$\nu_l \left(\sum_{k=1}^K y_{kl}^{FW} - W_l x_l^W \right) = 0, \quad l = 1, \dots, L \quad (8c)$$

$$\omega_l \left(\sum_{j=1}^J x_{lj}^{WR} - \sum_{k=1}^K y_{kl}^{FW} \right) = 0, \quad l = 1, \dots, L \quad (8d)$$

$$(c_k^F + \mu_k + \nu_l - \omega_l) y_{kl}^{FW} = 0, \quad k = 1, \dots, K, \quad l = 1, \dots, L \quad (8e)$$

$$\mu_k \geq 0, \quad \nu_l \geq 0, \quad \omega_l \geq 0, \quad k = 1, \dots, K, \quad l = 1, \dots, L \quad (8f)$$

$$c_k^F + \mu_k + \nu_l - \omega_l \geq 0, \quad k = 1, \dots, K, \quad l = 1, \dots, L \quad (8g)$$

制約式における (8b)–(8e) の相補条件を一般に, $\lambda g(x) = 0$ と表したとき, Fortuny-Amat and McCarl[6] の手法を用いれば, 0-1 変数 z と十分大きな正数 M を導入して, $\lambda g(x) = 0$ は $\lambda \leq M(1-z)$ と $g(x) \leq Mz$ に置き換えられるので, 問題 (8) は混合 0-1 線形計画問題へ変換できる. よって, 変換された問題は Gurobi のような商用ソルバで解くことができる.

2.2 不確実性下の 2 レベル問題

問題 (8) では, 小売業者 j の需要は既知で, d_j と表されるが, 本論文では, 需要は不確実な事象に依存するとし, 確率変数 $\tilde{d}_j$ で表現する. 本論文では, $\sim$ 付きの変数は確率変数を表す. 需要が実現したあと, d_j^s がその実現値であるとする, $\sum_{l=1}^L x_{lj}^{WR} \geq d_j^s$ であれば過剰在庫が存在し, $\sum_{l=1}^L x_{lj}^{WR} \leq d_j^s$ ならば残存需要が存在する.

どちらかが 0 となる非負の変数 $\tilde{\delta}_{j+}$, $\tilde{\delta}_{j-}$ を導入すれば, 小売業者 j に供給された製品と小売業者 j の需要の関係は

$$\sum_{l=1}^L x_{lj}^{WR} + \tilde{\delta}_{j+} - \tilde{\delta}_{j-} = \tilde{d}_j, \quad j = 1, \dots, J \quad (9)$$

と書ける. このとき, 小売業者 j に対する販売数 $\tilde{s}_j$, 過剰在庫 $\tilde{h}_j$, 残存需要 $\tilde{e}_j$ は

$$\tilde{s}_j = \min \left\{ \sum_{l=1}^L x_{lj}^{WR}, \tilde{d}_j \right\} = \sum_{l=1}^L x_{lj}^{WR} - \tilde{\delta}_{j-} \quad (10)$$

$$\tilde{h}_j = \max \left\{ \sum_{l=1}^L x_{lj}^{WR} - \tilde{d}_j, 0 \right\} = \tilde{\delta}_{j-} \quad (11)$$

$$\tilde{e}_j = \max \left\{ \tilde{d}_j - \sum_{l=1}^L x_{lj}^{WR}, 0 \right\} = \tilde{\delta}_{j+} \quad (12)$$

となる.

配送業者の目的関数 (1) は倉庫の開設費用, 倉庫から小売業者への輸送費用, 工場から倉庫への輸送費用の和であり, これが最小化される. 制約式 (2) あるいは (7b) により, 需要はすべて満足される. しかし, 需要に不確実性があるならば, 過剰在庫あるいは残存需要が生じる. そのため, 配送業者の目的関数を利益に変更すると同時に, 需要が実現した後, 過剰在庫によって残存需要を満

たすように小売業者間で製品を再輸送することを考える.

1 製品当たりの小売業者 j での収入を r_j , 売れ残った在庫の残存価値を v_j , 小売業者 m から小売業者 j への製品の輸送費用を c_{mj}^{RR} とする. 配送業者の目的は, 小売業者からの売上げ, 過剰在庫の残存価値, 再輸送による追加的利益の和から倉庫の開設費用, 倉庫から小売業者への輸送費用, 工場から倉庫への輸送費用を差し引いた正味の利益の最大化であり, 次のように表現できる.

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \quad \sum_{j=1}^J r_j \tilde{s}_j + \sum_{j=1}^J v_j \tilde{h}_j + \Phi(\mathbf{x}^{WR}) \\ & - \sum_{l=1}^L c_l^W x_l^W - \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J c_{lj}^{WR} x_{lj}^{WR} - \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L c_{kl}^{FW} y_{kl}^{FW} \end{aligned} \quad (13)$$

以下に問題 (14) として定式化されるように, $\Phi(\mathbf{x}^{WR})$ は倉庫から小売業者への配送量 $\mathbf{x}^{WR} = (x_{11}^{WR}, \dots, x_{LJ}^{WR})$ が与えられたときの最大化された再輸送による追加的利益である. また, 製造業者からの製品の卸売価格での購入費用は工場から倉庫への輸送費用に含まれるものとする.

z_{mj} を小売業者 m から小売業者 j への製品の輸送量とすると, 需要実現後の再輸送に関する最適化問題は次のように定式化できる.

$$\max \quad \Phi(\mathbf{x}^{WR}) = \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^J (r_j - v_m - c_{mj}^{RR}) z_{mj} \quad (14a)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^J z_{mj} \leq \tilde{h}_m = \tilde{\delta}_{m-}, \quad m = 1, \dots, J \quad (14b)$$

$$\sum_{j=1}^J z_{jm} \leq \tilde{e}_m = \tilde{\delta}_{m+}, \quad m = 1, \dots, J \quad (14c)$$

$$z_{jm} \geq 0, \quad j = 1, \dots, J, \quad m = 1, \dots, J \quad (14d)$$

どちらかが 0 となる非負の変数 $\tilde{\alpha}_{m+}$, $\tilde{\alpha}_{m-}$ を制約式 (14b) に, $\tilde{\beta}_{m+}$, $\tilde{\beta}_{m-}$ を制約式 (14c) に導入し, さらに制約違反に対する単純リコースを導入すれば, 輸送問題 (14) は次のように再定式化できる.

$$\begin{aligned} \max \quad \Phi(\mathbf{x}^{WR}) = & \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^J (r_j - v_m - c_{mj}^{RR}) z_{mj} \\ & + E \left[\sum_{m=1}^J p_m \tilde{\alpha}_{m-} + \sum_{m=1}^J q_m \tilde{\beta}_{m-} \right] \end{aligned} \quad (15a)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^J z_{mj} + \tilde{\alpha}_{m+} - \tilde{\alpha}_{m-} = \tilde{\delta}_{m-}, \quad m = 1, \dots, J \quad (15b)$$

$$\sum_{j=1}^J z_{jm} + \tilde{\beta}_{m+} - \tilde{\beta}_{m-} = \tilde{\delta}_{m+}, \quad m = 1, \dots, J \quad (15c)$$

$$z_{jm} \geq 0, \quad j = 1, \dots, J, \quad m = 1, \dots, J \quad (15d)$$

$$\tilde{\alpha}_{m+} \geq 0, \quad \tilde{\alpha}_{m-} \geq 0, \quad \tilde{\beta}_{m+} \geq 0, \quad \tilde{\beta}_{m-} \geq 0, \quad m = 1, \dots, J \quad (15e)$$

ここで, E は期待値を表し, p_m , q_m は制約違反に対する

るペナルティを意味する。すなわち、 $\tilde{\alpha}_{m-}$ は再輸送後に小売業者 m での過剰在庫を超えて、別の小売業者へ送り出した製品量であり、この制約違反の1単位に対して、 p_m のペナルティがかかる。同様に、 $\tilde{\beta}_{m-}$ は再輸送後に小売業者 m での残存需要を超えて、別の小売業者から受け入れた製品量であり、この制約違反の1単位に対して、 q_m のペナルティがかかる。

小売業者 j の需要 $\tilde{d}_j$, $j=1, \dots, J$ が離散確率変数で表現されると仮定し、次のように表現する。

$$\tilde{d}_j = \{(d_j^1, \pi_j^1), \dots, (d_j^{S^j}, \pi_j^{S^j})\}, j=1, \dots, J \quad (16)$$

ここで、 s 番目のシナリオにおける d_j^s は確率変数 $\tilde{d}_j$ の実現値であり、 π_j^s は対応する生起確率である。

各シナリオに対応した変数を導入すれば、輸送問題(15)は確率変数を含まない次の問題に書き換えられる。

$$\begin{aligned} \max \quad & \Phi(\mathbf{x}^{WR}) = \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^J (r_j - v_m - c_{mj}^{RR}) z_{mj} \\ & + \sum_{m=1}^J \sum_{s=1}^{S^m} (\pi_m^s p_m \alpha_{m-}^s + \pi_m^s q_m \beta_{m-}^s) \quad (17a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{s. t.} \quad & \sum_{j=1}^J z_{mj} + \alpha_{m+}^s - \alpha_{m-}^s = \delta_{m-}^s, \\ & m=1, \dots, J, s=1, \dots, S^m \quad (17b) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^J z_{jm} + \beta_{m+}^s - \beta_{m-}^s = \delta_{m+}^s, \\ & m=1, \dots, J, s=1, \dots, S^m \quad (17c) \end{aligned}$$

$$z_{jm} \geq 0, j=1, \dots, J, m=1, \dots, J \quad (17d)$$

$$\begin{aligned} & \alpha_{m+}^s \geq 0, \alpha_{m-}^s \geq 0, \beta_{m+}^s \geq 0, \beta_{m-}^s \geq 0, \\ & m=1, \dots, J, s=1, \dots, S^m \quad (17e) \end{aligned}$$

このとき、目的関数(13)の期待値を考慮し、制約式(9)に対しても各シナリオに対応した変数を導入すれば、需要の不確実性とそれに伴う製品の再輸送を考慮した配送業者の問題は次のように定式化できる。

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{j=1}^J r_j \sum_{s=1}^{S^j} \pi_j^s \left(\sum_{l=1}^L x_{lj}^{WR} - \delta_{j-}^s \right) + \sum_{j=1}^J v_j \sum_{s=1}^{S^j} \pi_j^s \delta_{j-}^s \\ & + \Phi(\mathbf{x}^{WR}) - \sum_{l=1}^L c_l^W x_l^W - \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J c_{lj}^{WR} x_{lj}^{WR} \\ & - \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L c_{kl}^{FW} y_{kl}^{FW} \quad (18a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{s. t.} \quad & \sum_{l=1}^L x_{lj}^{WR} + \delta_{j+}^s - \delta_{j-}^s = d_j^s, \\ & j=1, \dots, J, s=1, \dots, S^j \quad (18b) \end{aligned}$$

$$\delta_{j+}^s \delta_{j-}^s = 0, j=1, \dots, J, s=1, \dots, S^j \quad (18c)$$

$$\begin{aligned} & \delta_{j+}^s \geq 0, \delta_{j-}^s \geq 0, \\ & j=1, \dots, J, s=1, \dots, S^j \quad (18d) \end{aligned}$$

$$(7e)-(7i)$$

$$(17a)-(17e)$$

問題(18)における(7e)-(7i)は製造業者の費用最小化問題であり、(17a)-(17e)は再輸送問題である。これらの問題はともに線形計画問題であり、問題(8)の定式化で指摘したように、KKT条件を考慮すれば、混合0-1線形計画問題へ変換できる。

2.3 協力モデル

前節では、単一の配送業者の問題を考察したが、本節では複数の配送業者の問題を考え、彼らが協力するモデルを考察する。配送業者の集合を $\mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$ とし、製造業者は複数でもよいが、簡単化のために1社とする。また、小売業者も前節と同様に、 $j=1, \dots, J$ とする。ただし、配送業者 n , $n=1, \dots, N$ はそれぞれ L^n の倉庫を所有するとする。

需要に関しては前節と同様に、離散確率変数であるとし、それぞれの小売業者 j ごとにシナリオがあり、与えられた生起確率のもとで各配送業者 $1, \dots, N$ に対する需要の実現値があるとする。すなわち、小売業者 j の各配送業者 $n=1, \dots, N$ に対する需要は、次のように表現される。

$$\begin{aligned} \tilde{d}_j^N = \{ & (d_j^{11}, \dots, d_j^{N1}; \pi_j^1), \dots, (d_j^{1S^j}, \dots, d_j^{NS^j}; \pi_j^{S^j}) \}, \\ & j=1, \dots, J \quad (19) \end{aligned}$$

配送業者 n の倉庫 l の開設費用を $c_l^{W^n}$, $l=1, \dots, L^n$, 倉庫 l の容量を W_l^n , $l=1, \dots, L^n$ とする。配送業者 n の倉庫 l から小売業者 j への1製品当たりの輸送費用を $c_{lj}^{W^n}$, $l=1, \dots, L^n$, $j=1, \dots, J$ とし、工場 k から配送業者 n の倉庫 l への1製品当たりの輸送費用を $c_{kl}^{FW^n}$, $k=1, \dots, K$, $l=1, \dots, L^n$ とする。配送業者 n に割り振られた工場 k の生産能力を F_k^n , $k=1, \dots, K$, $n=1, \dots, N$ とする。

配送業者 n , $n=1, \dots, N$ の決定変数は以下の通りである。倉庫 l の開設に関する決定変数を $x_l^{W^n} \in \{0, 1\}$ とし、開設ならば、 $x_l^{W^n} = 1$ 、そうでなければ、 $x_l^{W^n} = 0$ である。配送業者 n の倉庫 l から小売業者 j への製品の輸送量を $x_{lj}^{W^n} \geq 0$, $l=1, \dots, L^n$, $j=1, \dots, J$ とする。製造業者の決定変数は工場 k で生産され、その後配送業者 n の倉庫 l へ輸送される製品量 $y_{kl}^{FW^n} \geq 0$, $k=1, \dots, K$, $l=1, \dots, L^n$ である。

協力ゲームを用いて定式化するために、配送業者の集合 $\mathcal{N}$ の部分集合である提携 $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{N}$ について考える。

最初に、配送業者の提携 $\mathcal{S}$ に対する製造業者の最適反応である費用最小化問題は次のように表現できる。

$$\min \sum_{k=1}^K c_k^F \sum_{n \in \mathcal{S}} \sum_{l=1}^{L^n} y_{kl}^{FW^n} \quad (20a)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{n \in \mathcal{S}} \sum_{l=1}^{L^n} y_{kl}^{FW^n} \leq \sum_{n \in \mathcal{S}} F_k^n, k=1, \dots, K \quad (20b)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{kl}^{FW^n} \leq W_l^n x_l^{W^n}, n \in \mathcal{S}, l = 1, \dots, L^n \quad (20c)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{kl}^{FW^n} \geq \sum_{j=1}^J x_{lj}^{W^n R}, n \in \mathcal{S}, l = 1, \dots, L^n \quad (20d)$$

$$y_{kl}^{FW^n} \geq 0, n \in \mathcal{S}, k = 1, \dots, K, l = 1, \dots, L^n \quad (20e)$$

協力モデルでは、配送業者の提携 $\mathcal{S}$ のメンバーが協力して、小売業者 j における配送業者の提携 $\mathcal{S}$ の総需要を満足させるように配送するので、配送業者の提携 $\mathcal{S}$ から小売業者 j に供給された製品と小売業者 j における配送業者の提携 $\mathcal{S}$ の総需要の関係は

$$\sum_{n \in \mathcal{S}} \sum_{l=1}^{L^n} x_{lj}^{W^n R} + \delta_{j+}^s - \delta_{j-}^s = \sum_{n \in \mathcal{S}} d_j^{ns}, j = 1, \dots, J, s = 1, \dots, S^j \quad (21)$$

と書ける。この関係から、小売業者 j における過剰在庫 $\tilde{h}_j$ と残存需要 $\tilde{e}_j$ は各配送業者の個別問題における (11) 式と (12) 式と同じように表現でき、結果として需要確定後の輸送問題も (17) 式と同様の定式化となる。

これらの事実から、配送業者の提携 $\mathcal{S}$ が自身のメンバーの利益の総和を最大化するとすれば、提携 $\mathcal{S}$ の問題は次のように定式化できる。

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{j=1}^J r_j \sum_{s=1}^{S^j} \pi_j^s \left(\sum_{n \in \mathcal{S}} \sum_{l=1}^{L^n} x_{lj}^{W^n R} - \delta_{j-}^s \right) + \sum_{j=1}^J v_j \sum_{s=1}^{S^j} \pi_j^s \delta_{j-}^s \\ & + \Phi(x_S^{WR}) - \sum_{n \in \mathcal{S}} \left(\sum_{l=1}^{L^n} c_l^{W^n} x_l^{W^n} + \sum_{l=1}^{L^n} \sum_{j=1}^J c_{lj}^{W^n R} x_{lj}^{W^n R} \right) \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L^n} c_{kl}^{FW^n} y_{kl}^{FW^n} \end{aligned} \quad (22a)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{n \in \mathcal{S}} \sum_{l=1}^{L^n} x_{lj}^{W^n R} + \delta_{j+}^s - \delta_{j-}^s = \sum_{n \in \mathcal{S}} d_j^{ns}, \quad j = 1, \dots, J, s = 1, \dots, S^j \quad (22b)$$

$$\delta_{j+}^s \delta_{j-}^s = 0, j = 1, \dots, J, s = 1, \dots, S^j \quad (22c)$$

$$\delta_{j+}^s \geq 0, \delta_{j-}^s \geq 0, \quad j = 1, \dots, J, s = 1, \dots, S^j \quad (22d)$$

$$(20a)-(20e)$$

$$(17a)-(17e)$$

ここで、 $\Phi(x_S^{WR})$ は提携 $\mathcal{S}$ に対する再輸送による追加的利益である。問題 (8) や (18) と同様に、問題 (22) は Fortuny-Amat and McCarl[6] の手法を用いれば、混合 0-1 線形計画問題へ変換できる。

協力モデルでは、配送などの決定は（すべての配送業者があたかも一人の意思決定者のように）集中的に行われるのに対して、2.2 節で示した各配送業者の個別問題では、（各配送業者の個別の決定によって）分散的に行われる。そのため一般に、協力モデルで最大化された総利益は各配送業者の問題で個別に最大化された利益の和よりも大きくなる。すなわち、各配送業者の計画問題における最適解は、協力モデルの計画問題の実行可能解の

一部となるが、必ずしも最適解と対応しないため、協力モデルでの最適解がすべての配送業者の総利益を最大化する。

配送業者の集合 $\mathcal{N}$ の部分集合である提携 $\mathcal{S}$ に対して、特性関数 $v(\mathcal{S})$ を問題 (22) の最適値として定義することによって、配送業者の協力モデルは協力ゲーム $(\mathcal{N}, v)$ によって定式化できる。本論文では、複数の配送業者による協力の結果、得られる総利益を各配送業者に割り当てる手法として、第 1 節で紹介したようにサプライチェーンにおける関連企業の協力による利益や費用の割当てにしばしば用いられる Shapley 値を採用する。

Shapley 値は、協力ゲームにおいて、(i) 提携に貢献しないプレイヤーの利得はない、(ii) プレイヤーの順序を変えても利得は同じ、(iii) ゲームの加法性という三つの公理を満たすよく知られた解概念である。協力ゲーム $(\mathcal{N}, v)$ に対して、Shapley 値 $\phi = (\phi_1, \dots, \phi_n)$ は次のように定義される。

$$\phi_i = \sum_{\substack{T \subset \mathcal{N} \\ i \in T}} \frac{(t-1)!(n-t)!}{n!} \{v(T) - v(T - \{i\})\} \quad (23)$$

ここで、 n と t はそれぞれ提携 $\mathcal{N}$ と T のメンバーの数である。Shapley 値の解釈は次のように考えられる。すべてのプレイヤーがランダムに到着するとし、プレイヤー i が到着するまでに $T - \{i\}$ のメンバーがいて、 i が $v(T) - v(T - \{i\})$ の利得を受け取るとする。このとき、 ϕ_i はランダムに到着したときのプレイヤー i に対する利得の期待値に相当する。

3. 数値例

本節では、数値例を用いて、サプライチェーンにおける不確実性と協力を考慮したモデルの妥当性を検証すると同時に、各配送業者の個別問題の最適解と協力モデルの最適解の違いについて考察する。

配送業者の集合を $\mathcal{N} = \{1, 2, 3\}$ として、各配送業者の個別問題と協力モデルとして配送業者 3 社で協力して配送する問題を取り扱う。各配送業者の倉庫の数はそれぞれ 3、製造業者の工場数は 3、小売業者の数は 10 とする。また、倉庫の容量および開設費用、倉庫から小売業者への輸送費用、需要、販売価格、工場の生産能力、製造費用、工場から倉庫への輸送費用、小売業者間の輸送費用の詳細は付録の表に示す。とくに、小売業者の需要はすべて三つのシナリオをもつ離散確率変数である。再輸送問題におけるリソースのペナルティの設定に関しては、残存需要をもつ小売業者へ製品を 1 単位輸送して得られる利益の平均値を考慮して、次のように設定している。

$$p_m = -110, q_m = -100, m = 1, \dots, 10$$

なお、 p_m は（過剰）在庫を超えて送り出す場合のペナルティで、おおむね利益の平均値に設定している。 q_m

は(残存)需要を超えて受け入れる場合のペナルティで, p_m よりも緩めに設定している。

最初に,各配送業者の個別問題の結果をTable 1とTable 2に示す。各配送業者の問題(18)を混合0-1線形計画問題へ変換し,Gurobiを用いて解いて得られた結果を示している。なお,表中の記号D, R, F, Wはそれぞれ配送業者,小売業者,工場,倉庫を表している。

Table 1 配送業者個別:倉庫開設,工場から倉庫への輸送

D1: warehouses	W1	W2	W3
open/close	1	1	1
transportation: F1 to warehouses	0	120	0
transportation: F2 to warehouses	0	0	210
transportation: F3 to warehouses	172	0	0
D2: warehouses	W1	W2	W3
open/close	1	1	1
transportation: F1 to warehouses	0	0	150
transportation: F2 to warehouses	200	19	46
transportation: F3 to warehouses	0	231	0
D3: warehouses	W1	W2	W3
open/close	1	1	1
transportation: F1 to warehouses	0	6	0
transportation: F2 to warehouses	0	194	31
transportation: F3 to warehouses	100	0	190

Table 2 配送業者個別:輸送:倉庫から小売業者,小売業者間

D1:	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
W1	0	0	0	75	35	0	0	62	0	0
W2	0	53	0	0	0	24	0	0	43	0
W3	0	0	0	0	0	13	172	0	0	25
sum	0	53	0	75	35	37	172	62	43	25
transshipment:	R7 → R1: 33 units, R8 → R10: 3 units, R9 → R10: 2 units					R7 → R3: 97 units R9 → R3: 2 unit				
final	33	53	99	75	35	37	42	59	39	30
D2:	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
W1	56	0	47	0	64	0	0	0	26	7
W2	0	160	0	0	0	0	90	0	0	0
W3	0	0	0	14	0	73	0	109	0	0
sum	56	160	47	14	64	73	90	109	26	7
transshipment:	R2 → R4: 77 units, R8 → R10: 85 units					R6 → R4: 3 units				
final	56	83	47	94	64	70	90	24	26	92
D3:	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
W1	0	0	0	0	0	15	0	0	0	85
W2	21	0	66	34	0	9	53	17	0	0
W3	0	62	0	0	37	0	0	0	122	0
sum	21	62	66	34	37	24	53	17	122	85
transshipment:	R5 → R2: 9 units, R9 → R4: 29 units					R9 → R3: 5 units				
final	21	71	71	63	28	24	53	17	88	85

Table 1 および付録のTable A2から,製造業者の工場2での製造費用は他の工場と比べて最も低いので,各配送業者に対して最大限に生産している。残りは,配送業者1と2に対しては,工場1で限度まで生産し,配送業者3に関しては工場3で限度まで生産し,輸送費用の低い倉庫へ配送している。各配送業者とも,倉庫はすべて開設されている。

Table 2には,倉庫から小売業者への輸送量と小売業者間の再輸送の結果が示されている。再輸送を含めた最終的な配送結果はfinalの行に示されている。倉庫から小売業者への輸送に関しては,付録のTable A3から,輸送費用の小さい経路がおおむね選択されていることがわかる。再輸送に関しては,各配送業者において,合計で137, 165, 43単位の製品が小売業者間で輸送されており,平均単位輸送量は31単位である。

最終的な配送結果は,3配送業者で平均すると,10の小売業者に対して,需要が小さいときのシナリオ($s=1$)に0.67回,中央のシナリオ($s=2$)に7.67回,大きいときのシナリオ($s=3$)に1.67回となり,中央のシナリオに偏った配送結果になっている。過剰在庫を残存需要のある小売業者へ搬出するための制約式(17b)と残存需要を満たすために過剰在庫を受け入れるための制約式(17c)に関して,すべてのシナリオで制約を違反することはなかった。また,ペナルティの設定 $p_m = -110$, $q_m = -100$ に対応して,平均すれば,過剰在庫を超えて送り出す量の方が,残存需要を超えて受け入れる量よりも小さい結果となっている。上述の結果から,需要の不確実性を考慮し,小売業者間での製品の再配送を導入した2段階モデルが適切に機能していると考えられる。

配送業者3社の協力モデルの結果をTable 3とTable 4に示す。3社協力の問題(22)も,各配送業者の個別問題と同様に混合0-1線形計画問題へ変換し,Gurobiを用いて解いている。

Table 3 3社協力:倉庫開設,工場から倉庫への輸送

D1: warehouses	W1	W2	W3
open/close	1	1	1
transportation: F1 to warehouses	0	153	0
transportation: F2 to warehouses	0	0	400
transportation: F3 to warehouses	188	0	0
D2: warehouses	W1	W2	W3
open/close	1	1	1
transportation: F1 to warehouses	0	0	247
transportation: F2 to warehouses	100	0	0
transportation: F3 to warehouses	100	245	0
D3: warehouses	W1	W2	W3
open/close	1	1	0
transportation: F1 to warehouses	0	0	0
transportation: F2 to warehouses	0	200	0
transportation: F3 to warehouses	100	0	0

Table 4 3 社協力：輸送：倉庫から小売業者、小売業者間

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
D1W1	0	0	0	188	0	0	0	0	0	0
D1W2	0	0	0	0	0	0	0	0	153	0
D1W3	0	0	0	0	0	24	376	0	0	0
D2W1	0	0	71	0	129	0	0	0	0	0
D2W2	0	245	0	0	0	0	0	0	0	0
D2W3	0	0	0	31	0	116	0	100	0	0
D3W1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
D3W2	96	0	0	0	0	0	0	0	3	101
D3W3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sum	96	245	71	219	129	140	376	100	156	201
transshipment: R2 → R4: 21 units, R2 → R5: 17 units R7 → R1: 26 units, R7 → R3: 152 units R7 → R8: 13 units										
final	122	207	223	240	146	140	185	113	156	201

各配送業者の個別問題と配送業者 3 社の協力モデルを比較しながら、協力モデルの結果を記述する。Table 3 を見ると、各配送業者の個別問題の結果に対して、協力モデルにおける配送業者 1 と 2 の取扱い量は増加し、配送業者 3 の取扱い量は減少している。とくに、配送業者 3 の取扱い量の減少は倉庫 3 を開設していないことによるものである。後述するように、協力モデルの取扱い量は個別問題の取扱い量の総和に比べて、増加しているにもかかわらず、倉庫の開設数が少ない。すなわち、倉庫の稼働率が協力モデルでは 0.89 であるのに対して個別問題では 0.71 であり、協力モデルでの倉庫が効率的に使用されていることがわかる。協力モデルの配送結果は、小売業者の需要が小さいときのシナリオ ($s=1$) で 0 回、中央のシナリオ ($s=2$) で 4 回、大きいときのシナリオ ($s=3$) で 6 回となり、各配送業者の個別問題に比べて、需要の大きいシナリオにシフトしている。その結果、各配送業者の個別問題の総取扱い量は 1669 であるのに対して、協力モデルの取扱い量はこれより多く、1733 となっている。Table 4 を見ると、各配送業者の個別問題に比して、倉庫から小売業者への輸送の単位は大きくなり、輸送費用の低い経路が選択されている。再輸送に関しては、協力モデルの輸送量 229 単位は各配送業者の個別問題の 3 社合計輸送量 345 単位に比べて、116 単位減少しているが、平均単位輸送量は 45.8 単位で大きくなっており、効率的な再輸送となっていると解釈できる。さらに協力モデルでの、総利益 (18a)、再輸送によるペナルティを含む利益 (17a)、製造業者の製造費用 (3) を Table 5 に、各配送業者の個別問題の結果とともに示す。Table 5 では、上述の効率的な輸送や倉庫の開設が利益の増加として表れている。すなわち、各配送業者の個別問題の 3 社合計の総利益は 135165.1 であり、それに対して協力モデルの総利益は 151798.0 で、協力による利益の増分 16632.9 が確認できる。また、1 製品当たりの平均利益を

Table 5 配送業者の利益、再輸送の利益、製造費用、Shapley 値

	利益	再輸送利益	製造費用	Shapley 値
配送業者 1	38,517.3	11,882	17,980	42,760.35
配送業者 2	55,829.1	16,254	23,190	61,230.35
配送業者 3	40,818.7	3,248	18,590	47,807.60
全体提携	151,798.0	15,392	62,320	—

比較すると、各配送業者の個別問題での 81.0 に対して、協力モデルでは 87.6 となり、協力による効果が確認できる。なお、単位当たりの製造費用に関しては、協力モデルと各配送業者の個別問題ともに同程度の費用である。

本数値例における配送業者の集合 $\mathcal{N}$ の部分集合 $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{N}$ に対して、特性関数値 v を問題 (22) の最適値に関連付けることによって、協力ゲーム $(\mathcal{N}, v)$ を定義し、Shapley 値を計算した結果も Table 5 に示している。

Shapley 値は、配送業者 3 社が協力し、総利益を最大化した利益 151798.0 を各配送業者の貢献度に応じて分配した利益の割当てである。配送業者 2 の割当てが最大で、次に配送業者 3、配送業者 1 の順になっている。この順序は各配送業者の個別問題の利益の大きさの順序と同じであり、それぞれの割当ては、各配送業者の問題での利益よりも大きく、協力して配送することの動機づけとなっている。

4. おわりに

本論文では、配送ネットワークに関する問題に対して、需要の不確実性と複数の配送業者間の協力を考慮したモデルを考察した。とくに、小売業者の需要を離散確率変数として表現し、需要確定後に生じる過剰在庫と残存需要を小売業者間の再輸送で、できるだけ相殺するように定式化した。この問題を複数の配送業者が共同配送する協力モデルに拡張し、協力ゲームを用いて、共同で得られた総利得を分配することを提案した。最後に数値例を通して、需要の不確実性や配送業者間の協力の効果を数値的に示した。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP18K18923 の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- [1] G. Cachon and S. Netessine: Game theory in supply chain analysis; D. Simchi-Levi, D. Wu and M. Shen (Eds.), *Handbook of Quantitative Supply Chain Analysis: Modeling in the e-Business Era*, Kluwer, pp. 13–59 (2004)
- [2] H. I. Calvete, C. Galé and M. J. Oliveros: Bilevel model for production-distribution planning solved by

- using ant colony optimization; *Computers and Operations Research*, Vol. 38, pp. 320–327 (2011)
- [3] H. I. Calvete, C. Galé and J. A. Iranzo: Planning of a decentralized distribution network using bilevel optimization; *Omega*, Vol. 49, pp. 30–41 (2014)
- [4] D. Cao and M. Chen: Capacitated plant selection in a decentralized manufacturing environment: a bilevel optimization approach; *European Journal of Operational Research*, Vol. 169, pp. 97–110 (2006)
- [5] R. Z. Farahani, S. Rezapour, T. Drezner and S. Fallah: Competitive supply chain network design: an overview of classifications, solution techniques and applications; *Omega*, Vol. 45, pp. 92–118 (2014)
- [6] J. Fortuny-Amat and B. McCarl: A representation and economic interpretation of a two-level programming problem; *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 32, pp. 783–792 (1981)
- [7] Y. Gerchak and D. Gupta: On apportioning costs to customers in centralized continuous review systems; *Journal of Operations Management*, Vol. 10, pp. 546–551 (1991)
- [8] B. Hartman and M. Dror: Cost allocation in continuous-review inventory models; *Naval Research Logistics*, Vol. 43, pp. 549–561 (1996)
- [9] B. C. Hartman, M. Dror and M. Shaked: Cores of inventory centralization games; *Games and Economic Behavior*, Vol. 31, pp. 26–49 (2000)
- [10] E. Kemahligözü-Ziya and J. J. Bartholdi, III: Centralizing inventory in supply chains by using Shapley value to allocate the profits; *Manufacturing & Service Operations Management*, Vol. 13, pp. 146–162 (2011)
- [11] A. Müller, M. Scarsini and M. Shaked: The newsvendor game has a nonempty core; *Games and Economic Behavior*, Vol. 38, pp. 118–126 (2002)
- [12] M. Nagarajan and G. Sošić: Game-theoretic analysis of cooperation among supply chain agents: Review and extensions; *European Journal of Operational Research*, Vol. 187, pp. 719–745 (2008)
- [13] U. Özen, J. Fransoo, H. Norde and M. Slikker: Cooperation between multiple newsvendors with warehouses; *Manufacturing & Service Operations Management*, Vol. 10, pp. 311–324 (2008)
- [14] G. Reinhardt and M. Dada: Allocating the gains from resource pooling with the Shapley value; *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 56, pp. 997–1000 (2005)
- [15] L. W. Robinson: A comment on Gerchak and Gupta’s “On apportioning costs to customers in centralized continuous review systems”; *Journal of Operations Management*, Vol. 11, pp. 99–102 (1993)
- [16] M. Slikker, J. Fransoo and M. Wouters: Cooperation between multiple news-vendors with transshipments; *European Journal of Operational Research*, Vol. 167, pp. 370–380 (2005)
- [17] M. Slikker and A. van den Nouweland: *Social and Economic Networks in Cooperative Game Theory*, Kluwer Academic Publishers (2001)
- [18] Y. Zheng, G. Zhang, J. Han and J. Lu: Pessimistic bilevel optimization model for risk-averse production-distribution planning; *Information Sciences*, Vol. 372, pp. 677–689 (2016)

付 録

Table A1 倉庫の容量と開設費用

	warehouse	W1	W2	W3
D1	capacity	200	300	400
	opening cost	50	100	150
D2	capacity	200	250	300
	opening cost	100	150	200
D3	capacity	100	200	400
	opening cost	100	150	250

Table A2 工場の生産能力, 製造費用, 輸送費用 (工場から倉庫)

	factory	F1	F2	F3
capacity	for D1	120	210	270
	for D2	150	265	340
	for D3	130	225	290
	sum	400	700	900
manufacturing cost		40	30	40
transportation cost to D1W1		45	80	50
transportation cost to D1W2		35	60	55
transportation cost to D1W3		37	20	50
transportation cost to D2W1		60	45	40
transportation cost to D2W2		37	50	35
transportation cost to D2W3		20	55	80
transportation cost to D3W1		80	55	35
transportation cost to D3W2		45	20	40
transportation cost to D3W2		60	50	37

Table A3 輸送費用 (倉庫から小売業者), 需要, 価格, 残存価値

transportation cost		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
D1	w1	30	20	30	20	10	25	30	5	20	60
	w2	40	15	60	30	25	10	40	20	5	90
	w3	60	50	50	50	30	20	10	40	40	40
D2	w1	20	20	20	60	5	10	15	30	10	30
	w2	30	5	30	90	20	10	10	40	25	45
	w3	50	40	50	40	40	10	20	10	30	50
D3	w1	20	60	20	30	30	10	20	5	10	5
	w2	15	90	30	45	40	25	15	10	10	20
	w3	50	40	50	50	10	30	40	20	10	40
D1	demand $s=1$ ($p=0.3$)	25	49	93	73	31	34	39	58	33	25
	demand $s=2$ ($p=0.4$)	28	53	96	75	35	37	42	59	39	28
	demand $s=3$ ($p=0.3$)	33	55	99	77	39	41	45	63	43	30
D2	demand $s=1$ ($p=0.3$)	53	80	42	86	61	65	86	22	24	84
	demand $s=2$ ($p=0.4$)	56	83	47	89	64	70	90	24	26	88
	demand $s=3$ ($p=0.3$)	62	88	49	94	70	73	96	28	32	92
D3	demand $s=1$ ($p=0.3$)	18	67	66	60	28	20	51	15	88	83
	demand $s=2$ ($p=0.4$)	21	71	71	63	30	24	53	17	91	85
	demand $s=3$ ($p=0.3$)	27	73	75	69	37	26	57	22	96	91
price r_j		141	141	133	148	146	143	133	147	134	148
salvage value v_j		10	11	5	10	13	11	10	9	7	15

Table A4 輸送費用 (小売業者間)

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
R1	0	31	35	38	33	45	33	33	43	31
R2	31	0	32	31	32	40	48	49	46	49
R3	35	32	0	47	34	32	31	50	30	43
R4	38	31	47	0	42	31	41	37	36	33
R5	33	32	34	42	0	39	48	37	45	48
R6	45	40	32	31	39	0	41	50	39	40
R7	33	48	31	41	48	41	0	34	35	46
R8	33	49	50	37	37	50	34	0	35	33
R9	43	46	30	36	45	39	35	35	0	34
R10	31	49	43	33	48	40	46	33	34	0

著者略歴

にし ざき いち ろう (正会員)

1959年生。1984年神戸大学大学院工学研究科修士課程修了。同年新日本製鐵株式会社入社。1990年京都大学経済研究所助手。1993年摂南大学経営情報学部助教授。1997年広島大学工学部助教授。2002年同大学大学院工学研究科教授を経て、2020年同大学大学院先進理工系科学研究科教授となり、現在に至る。意思決定およびゲーム理論に関する研究に従事。博士(工学)。

はやし だ とも ひろ (正会員)

1980年生。2006年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年広島大学大学院工学研究科助手。2007年助教。2015年准教授を経て、2020年同大学大学院先進理工系科学研究科准教授となり、現在に至る。意思決定および機械学習に関する研究に従事。博士(工学)。

せき ざき しん や (正会員)

1986年生。2013年9月名古屋工業大学大学院工学研究科創成シミュレーション工学専攻博士後期課程修了。同年10月広島大学大学院工学研究科電気電子システム数理部門特任助教。2016年同大学助教を経て、2020年同大学大学院先進理工系科学研究科助教となり、現在に至る。主として電力市場における経済主体の意思決定、送配電系統における電力品質管理に関する研究に従事。博士(工学)。

おお ぐ ほ かず き

1997年生。2019年広島大学工学部卒業。同年広島大学大学院工学研究科博士課程前期に入学し、現在に至る。ゲーム理論を用いたサプライチェーンに関する研究に従事。