

組合せオークション理論を用いた グローバル需給計画の適正化

Rationalization of Global Supply and Demand Planning Utilizing Combinatorial Auction Method

村尾 了 古賀 康隆 櫻井 勇樹

■ MURAO Ryo ■ KOGA Yasutaka ■ SAKURAI Yuki

製造販売（以下、製販と略記）のグローバル化に伴いサプライチェーンの大規模化と複雑化が加速するなか、真に全体最適な需給計画を立案することは困難になりつつある。かりにできたとしても、それが社内外の組織を含む膨大なステークホルダー間でWin-Winの関係とならない場合、その実行は難しい。今後のサプライチェーン管理には、全体最適性に加えて各組織の実行性も考慮した調整が重要であると考えられる。

そこで東芝は、社会学からのアナロジーによるマルチエージェント技術に基づいた組合せオークション理論に着目し、国立大学法人神戸大学（以下、神戸大学と略記）との共同研究を行い、サプライチェーン上の需給調整業務を対象に、事業損益と組織間の対立関係を可視化し、意思決定の参考情報を提示する手法を開発した。

With expanding scale and complexity of supply chains in recent years together with the globalization of manufacturing and sales sites, totally optimized planning of supply and demand has been becoming increasingly difficult. Even if planning can be optimized, it is also difficult to realize it on a practical level without building win-win relationships among a number of internal and external partners. Accordingly, not only methods for optimization and but also those for the coordination of opposing interests are essential for future supply-chain management.

Focusing on a combinatorial auction (CA) method inspired by sociology, which is one of the optimization methods based on the multi-agent system, Toshiba, in cooperation with Kobe University, has developed a supply and demand adjustment method that can visualize adversarial relationships among manufacturing and sales sites and provide information to improve the quality of decision-making.

1 まえがき

現在、東芝グループでは海外でモノづくりをして海外市場へ供給する、製販のグローバル化が進められている。グローバルサプライチェーン管理の課題として最適な需給計画の実現がある。一般的にサプライチェーン上のあらゆる組織とプロセスの情報を収集し、中央集権的に管理する方法が知られている⁽¹⁾。しかし製造委託や物流委託など水平分業が加速するなか、製販の情報共有は垂直統合時よりも難しくなっている。欠落した情報を元に計画を立案することは困難であり、強引に立案しても一部組織にとって納得できない計画であれば、実行性も乏しく人間系での調整が必須となる。

しかし変化の激しい需要に追従するため、サプライチェーン管理は月次から週次・日次サイクルが主流となりつつあり⁽²⁾、拠点間時差などから十分にコミュニケーションを図ることも物理的に難しい。図1に示すような制約下では、各組織が自己利益を追求しかねず、結果として需給バランスが崩壊し機会損失や過剰な棚卸資産の増加につながりうる。今後のサプライチェーン管理には、全体最適性に加えて各組織の実行性も考慮する必要がある。

そこで東芝は、図2に示すマルチエージェント技術による自律分散型の最適化手法⁽³⁾に注目した。大規模で複雑な問題を

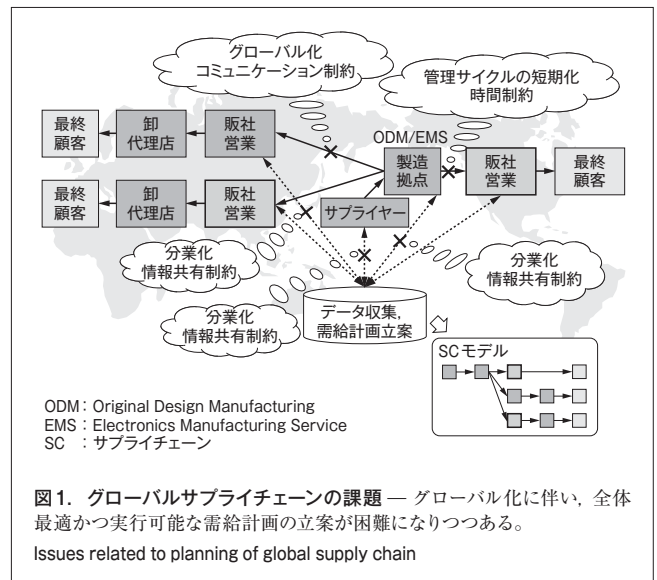
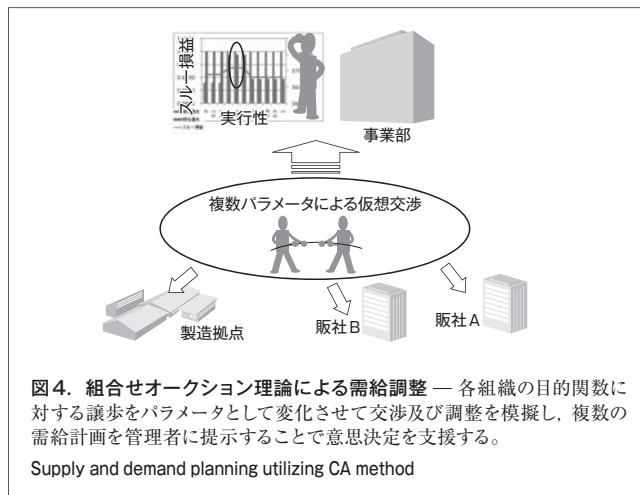
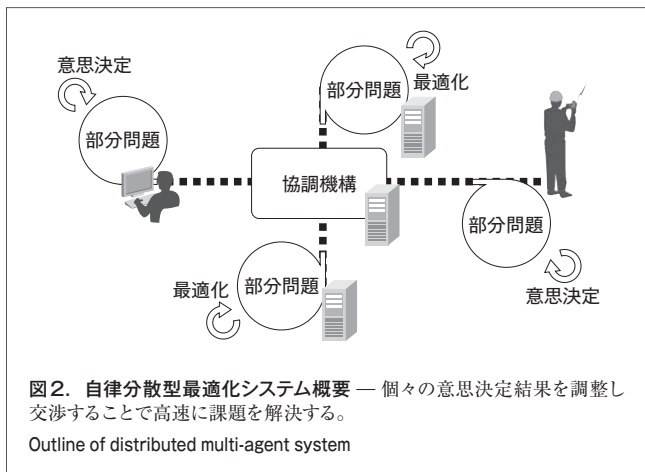


図1. グローバルサプライチェーンの課題 — グローバル化に伴い、全体最適かつ実行可能な需給計画の立案が困難になりつつある。
Issues related to planning of global supply chain

部分問題に分割し、個々に意思決定又は最適化を行う。協調機構ではそれぞれの意思決定及び最適化結果を集約し、効率よく調整することで、高速に解を求められる。ここでは、神戸大学との共同研究で開発した資源配分問題の解法として知られる組合せオークション理論を用いた、サプライチェーン上の需給計画立案方法とその数値実験の結果について述べる。

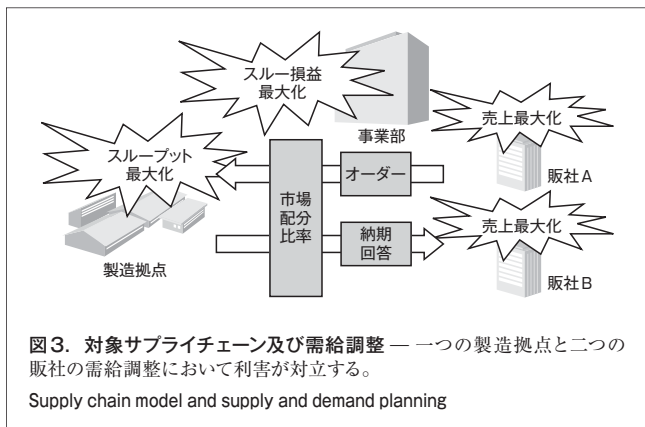


2 需給調整モデルと組合せオークション

対象とするサプライチェーン及び需給調整の概略を図3に示す。複数販社は単一製造拠点へ必要な機種や台数、納期などをオーダーとして提示し、製造拠点は生産計画を立案し納期回答を行う。販社はオーダーごとに売上最大化などの、製造拠点もまたスループット最大化などの指標（以下、目的関数と呼ぶ）を持つ。一方で事業部についても事業全体をスルーした損益最大化などの目的関数が存在する。またここでは、市場配分比率という販社間の利益配分目安を設ける。これにより、一部販社に製品が供給されない事態の防止や一部市場でのシェア拡大戦略などを反映することが可能である。

各組織は自身の目的関数が最大となる需給計画を望むが、それぞれの要求は必ずしも一致せず対立が生じる。スルー損益の最大化と組織間対立の最小化は多目的となり、最適性を論理的に定義することは困難である。かりにできたとしても製造拠点の立上げや市場開拓など、事業背景や環境、戦略に依存するところが多い。そこで最適需給計画を定義せず、管理者に複数案を提示することで、柔軟な意思決定を支援する。

ここではその実現手法として、組合せオークション理論による仮想交渉・調整を提案する。具体的には製造拠点に“販売



優先”や“製造優先”などの製販の力関係を定義する。販売優先ならば販社の、製造優先ならば製造拠点の目的関数が最大となるよう計画立案する。図4に示すように、この関係性を製販の譲歩具合を示すパラメータとして変化させ、複数の需給計画を高速に求める。求めた各計画を製販の対立関係やスルー損益も併せて提示することで、管理者の意思決定を支援する。

3 組合せオークション理論による数理モデル記述

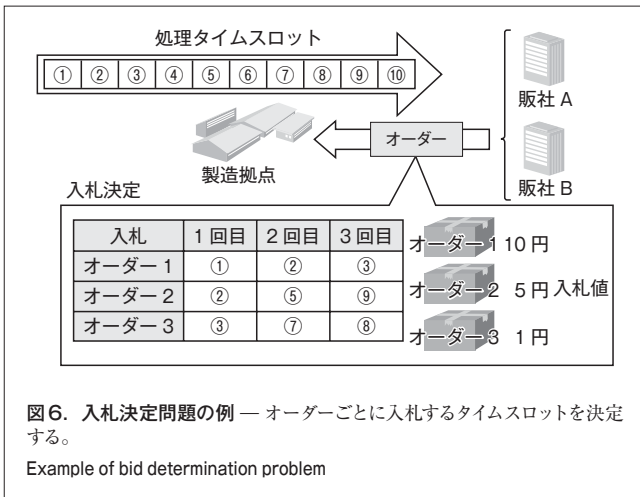
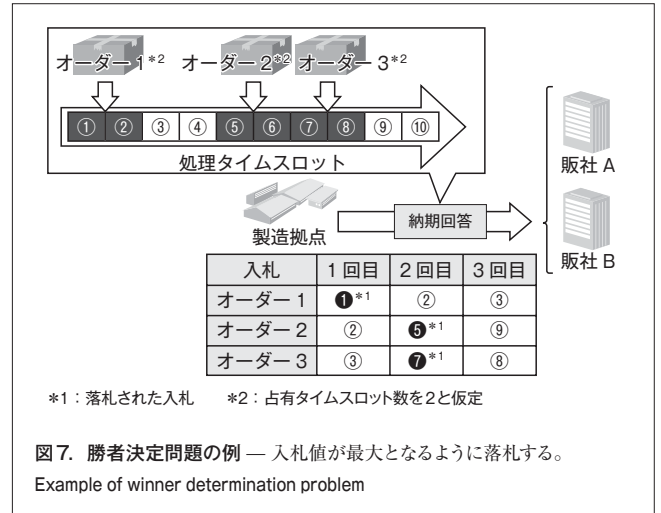
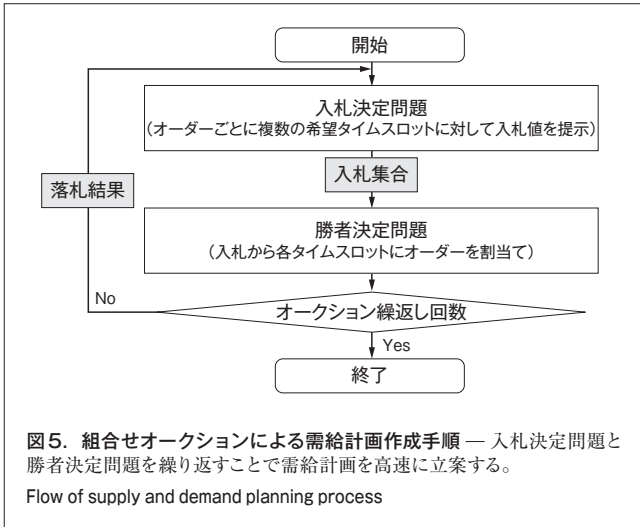
需給計画は組合せオークション理論を用いて定式化し立案する。具体的には、各オーダーごとに販社や製造拠点の目的関数に基づいて製造拠点のタイムスロットに対し入札を行い（入札決定問題）、入札値が最大となるように生産計画を立案する（勝者決定問題）。各オーダーが全タイムスロットに対して入札する（全入札）場合、最適解が得られることが知られている⁽⁴⁾。

しかし膨大な計算時間を要する可能性があるため、ここでは入札できるタイムスロット数を限定する。ただしこの場合、得られる計画の精度が保証⁽³⁾されない。そこで図5に示すように前回の落札結果と比較しながら入札決定と勝者決定を繰り返すことで改善を図る準最適化手法を用いる。繰返しの終了条件については、回数上限を付与する。以降では、入札決定問題及び勝者決定問題の数理モデルについて述べる。

3.1 入札決定問題

入札決定問題では、図6に示すように、販社が各オーダーごとに希望のタイムスロットに対して入札値を提示する入札集合を求める。

はじめに変数についてまとめる。 I を入札数、 J をオーダー数とする。入力パラメータとして T を最大タイムスロット、 n_j をオーダー j の台数、 cv_j をオーダー j の販社利益額、 cp_j をオーダー j の優先度（顧客優先度など）、 v_j をオーダー j の引渡価格、 pt_j をオーダー j が占有するタイムスロット数、 ω を製販の交渉パラメータ（ $0 \leq \omega \leq 1$ ）とする。また決定変数として、 p_j をオー



オーダー j の入札値, bt_j^i を入札 i におけるオーダー j の処理開始タイムスロット, $\tau_{t,j}^i$ を入札 i においてオーダー j がタイムスロット t を占有するのであれば 1, それ以外は 0 の 2 値変数と定義する。

入札決定問題は以下のように記述される。

$$B_j^i = \{\tau_{t,j}^i, bt_j^i, p_j\} \quad (1)$$

$$p_j = \omega \frac{tp_j}{\max[tp_j]} + (1-\omega) \frac{cv_j n_j cp_j}{\max[cv_j n_j cp_j]} \quad (2)$$

$$tp_j = \frac{n_j v_j}{p_j} \quad (3)$$

制約条件

$$\sum_{i=1}^T \tau_{t,j}^i = p_j \quad (\forall i, \forall j) \quad (4)$$

$$p_j + bt_j^j - 1 \leq T \quad (\forall i, \forall j) \quad (5)$$

ここで式(1)は入札集合の定義を表す。式(2)は入札値が販社及び製造拠点の目的関数の加重和で定義されることを意味する。 ω により販売優先, 製造優先を表現する。式(3)は製造

優先度決定式, 式(4)は入札タイムスロットの和が処理時間と等しいことを示している。式(5)は処理開始タイムスロットと処理時間の和が計画期間内に収まることを示している。

3.2 勝者決定問題

勝者決定問題は図7に示すように, 入札決定問題で作成した複数の入札から落札するオーダーとタイムスロットを決定する。目的関数は落札する入札値の最大化とする。目的関数が落札されるオーダー数に影響するため段取時間は最小化される。ただし市場配分比率の制約を厳密に設けた場合, 実行可能解を得られる保証がない。ここでは, 配分比率緩和率として, $\pm 10\%$ といった上下限制約条件を課すことで実行可能解を得る。

次に変数について述べる。入力パラメータとして a_c を販社 c の市場配分比率の下限値, β_c を販社 c の市場配分比率の上限値, st_{j_1, j_2} をオーダー j_1 の後にオーダー j_2 を生産する際の段取時間とする。また, ct_j^i を入札 i におけるオーダー j の処理終了タイムスロットとし, 決定変数として, x_j^i を入札 i においてオーダー j を落札するのであれば 1, それ以外は 0 の 2 値変数とする。

勝者決定問題は以下のように定式化される。

$$\text{Max} \sum_{j=0}^J \sum_{i=1}^I p_j x_j^i \quad (6)$$

制約条件

$$\sum_{i=1}^I x_j^i \leq 1 \quad (\forall j) \quad (7)$$

$$\sum_{j=0}^J \sum_{i=1}^I \tau_{t,j}^i x_j^i \leq 1 \quad (\forall t) \quad (8)$$

$$x_{j_1}^i + \sum_{\substack{j_2 \\ ct_{j_1}^i < bt_{j_2}^i \leq ct_{j_1}^i + st_{j_1, j_2}}} x_{j_2}^i \leq 1 \quad (\forall j_1, \forall j_2, j_1 \neq j_2, \forall i) \quad (9)$$

$$a_c \sum_{j=0}^J \sum_{i=1}^I x_j^i n_j cv_j \leq \sum_{j=0}^J \sum_{i=1}^I x_j^i n_j cv_j \leq \beta_c \sum_{j=0}^J \sum_{i=1}^I x_j^i n_j cv_j \quad (10)$$

$$x_j^i \in \{0,1\} \quad (\forall i, \forall j) \quad (11)$$

ここで、式(6)は勝者決定問題の目的関数を表し、入札値総和の最大化が目的であることを意味する。式(7)は入札制約で、入札が複数回落札されないことを示している。式(8)はタイムスロットに関する制約で、任意のタイムスロットに複数落札されないことを定義している。式(9)は段取時間に関する制約で、式(10)は市場配分比率の上限と下限に関する制約を表す。式(11)は決定変数が2値数であることを定義している。これらの数理モデルは市販の最適化ツールを用いて解を求める。

4 数値実験による効果検証

ここでは数値実験による組合せオークションの需給調整業務への適用効果について一例を述べる。

4.1 数値実験データ及び条件

実験データのパラメータ設定及び組合せオークションの実施条件を表1にまとめる。入札するタイムスロットを決定するために一様乱数を用いる。この場合、常に同一の結果が得られる保証がないため試行回数を10回とし、乱数の影響を低減した。 ω は0から1まで0.1刻みで実験し、各値での製販の目的関数値とスルー損益算出結果を提示する。配分比率は $\pm 10\%$ として、販社間の利益が8:2から6:4の範囲で配分されるよう計画を立案する。

4.2 数値実験結果

数値実験の結果を図8に示す。棒グラフは製販の優先順位の尊重度合いを示すが、製販対立の関係性を明確化するために全ての ω における最大値で除算することで正規化した。製造優先の棒グラフと販売優先の棒グラフの高さに差がなければ両方の対立が小さいと考えることができる。一方折れ線グラフは、その値の大きさがスルー損益(10回試行の平均値)の高さを示す。したがってスルー損益最大化かつ組織間対立

表1. 数値実験データのパラメータ設定及び実験条件
Experimental parameters and conditions

項目	設定値及び条件値
最大タイムスロット	60
オーダー数	30
オーダー台数	[25, 100]*
販社利益額	[40, 400]*
売渡価格	[80, 2,000]*
処理時間	[2, 5]*
段取時間	[0, 4]*
市場配分比率	7:3
入札数	15
オークション繰返し回数	40
入札するタイムスロット	一様乱数
試行回数	10
ω	0, 0.1, ..., 1
配分比率緩和率	$\pm 10\%$

* []は、左側数値以上で右側数値以下の整数を表す

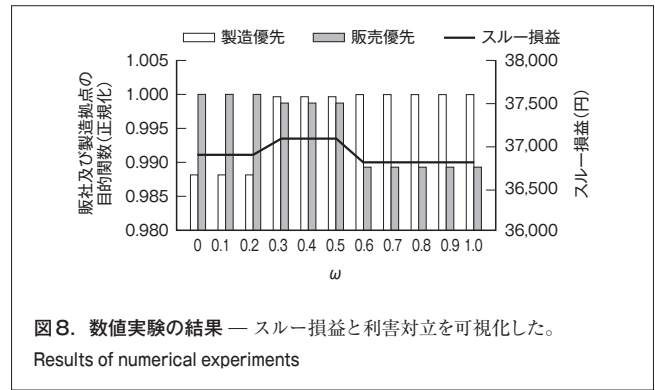


図8. 数値実験の結果 — スルー損益と利害対立を可視化した。
Results of numerical experiments

の最小化を目的とする場合、折れ線グラフが高く、棒グラフの差が小さい計画を求める必要がある。

図8は $\omega = 0 \sim 0.2$, $\omega = 0.3 \sim 0.5$, $\omega = 0.6 \sim 1$ の三つの需給計画が立案されていることを示している。まず製造優先棒グラフに着目すると、 ω に応じて上昇している。式(2)で ω の値が製造優先度に乗算されていることからこの結果は妥当であるといえる。また販売優先度についても同様の理由から ω に応じて減少している。

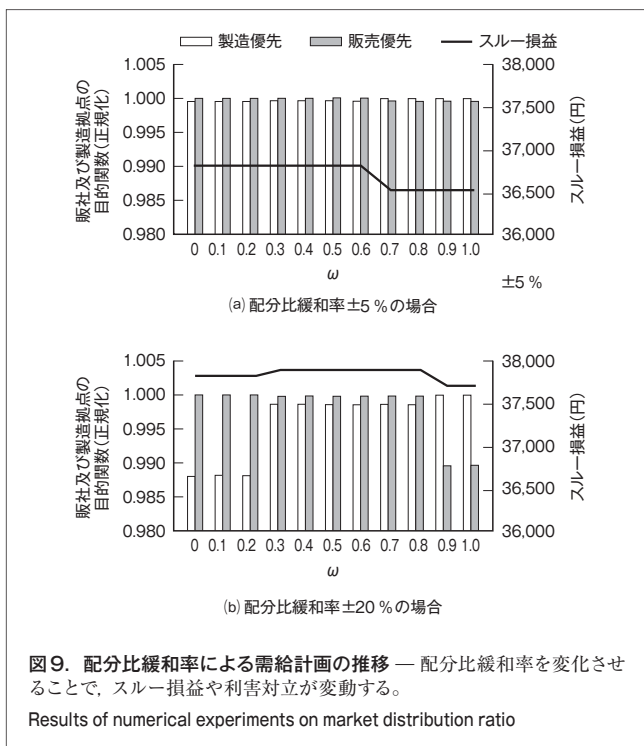
次にスルー損益は、 $\omega = 0.3 \sim 0.5$ で最大化される。このことから製販が互いに交渉及び譲歩をすることによってスルー損益が改善されることがわかる。また組織間対立についても、 $\omega = 0.3 \sim 0.5$ で製造優先と販売優先の差が最小であることから、製販の交渉及び譲歩によって対立が緩和されていることが見て取れる。

全体最適性と実行性の観点からは、 $\omega = 0.3 \sim 0.5$ の需給計画が最良であると思われるが、2章でも述べたように、事業背景や事業戦略を考慮すると真に最適な需給計画の定義は困難である。具体的には新規製造拠点の立上げに伴い製造損益を重視するのであれば、 $\omega = 0 \sim 0.2$ の需給計画が最適と考えることができる。また一方で、新製品の投入などで、グローバルなシェアの拡大が目的であれば、 $\omega = 0.6 \sim 1$ の需給計画を最適と考えることができる。全体のスルー損益と組織間対立を正しく認識しながら、戦略に応じて最良計画を選択することで柔軟な意思決定が可能である。この数値実験では、販社間での利益配分結果は63:37であり、計算時間は最大で約250秒、最小では約50秒、平均で130秒程度であった。

5 開発手法の活用

ここでは4章で述べた結果から、管理者や担当者にどのような情報が提供でき、どのように活用できるかを述べる。パラメータとして制御するのは、 ω 及び市場配分比率である。

ω については、図8のように管理者に ω ごとの製販対立とスルー損益の情報が提供される。管理者はこの情報を基に事業背景や戦略を考慮し最適と思われる計画を選択することが



できる。

一方市場配分比率は、2章でも述べたように事業戦略と、販社間の対立調整を目的に設定したものである。また3章では実行可能性を保証するために、配分比緩和率を提案した。この配分比緩和率の効果について以下に述べる。4章のデータにおいて配分比緩和率を±5%、±20%と変化させた場合の結果を図9に示す。

配分比緩和率が±5%の場合、スルー損益が大幅に減少し、 ω を変化させても交渉の余地はなく、販社の要求どおりに生産することでスルー損益が最大化されることがわかる。また製販の対立についても全体的に小さい。一方、配分比緩和率が±20%の場合、スルー損益が全体的に改善され、製造拠点が僅かに譲歩することにより対立構造が解消するとともに、スルー損益も改善する。ただし対立の観点からは、±5%の場合に比較して棒グラフの差が拡大していることから悪化していることがわかる。配分比緩和率の変化による販社間での配分比率は±5%、±20%でそれぞれ、66:34、58:42であった。

事業としての全体最適性を追求するためスルー損益を最大化すると拠点間対立の小さい需給計画が得られる一方で、少しそのバランスが崩れると、スルー損益が大幅に悪化することや、製販間の対立が激化することなどがわかる。

6 あとがき

ここでは需給調整問題に対して、スルー損益と組織間対立

の観点から、効果的な需給計画を導出する手段として、組合せオークション理論を用いて神戸大学と共同で開発した需給計画立案手法について述べた。

今後の課題としては、まず計算時間の短縮がある。ここで述べたデータはオーダー数30、計画期間60タイムスロットと小規模な問題である。実ビジネスへの適用に際しては、入札数やオークション繰返し回数、入札タイムスロット決定アルゴリズムなどを更に進化させる必要がある。

また、今回の需給計画はサプライチェーン上のごく限られた業務範囲しかカバーできていないことも課題である。真に最適なサプライチェーン管理を目指すためには、製販や事業部だけでなく、調達や設計などの業務プロセスにも範囲を拡大するべきと考えられる。このことから現在、需給調整における部品アロケーション問題への適用検討を進めている。実際に調達リードタイムの長い電子部品などを扱う事業では、需給計画作成時に製造能力と同様に、部品制約が重要になる。損益や組織間対立に加えて、新規に製造梱卸適正化の観点を考慮した数理モデルの構築を進めている。

文献

- (1) 経済産業省. ものづくり白書2006年版. <<http://www.meti.go.jp/report/data/g60731aj.html>>. (参照2013-07-12).
- (2) IT経営実践事例集. 経済産業省. 2011-02. <http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2011fy/0022947.pdf>. (参照2013-07-12).
- (3) 貝原俊也 他. 生産スケジューリング問題に対する組合せオークションを用いた最適化手法に関する一提案. 日本機械学会論文集C編. **75**, 752, 2009, p.1143-1150.
- (4) 松井知己 他. オークションの設計理論と数理計画. オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学. **48**, 7, 2003, p.516-521.



村尾 了 MURAO Ryo

生産技術センター グローバル生産エンジニアリングセンター。
モノづくりの仕組み構築に従事。
Global Manufacturing Engineering Center



古賀 康隆 KOGA Yasutaka

生産技術センター グローバル生産エンジニアリングセンター
研究主幹。モノづくりの仕組み構築に従事。
Global Manufacturing Engineering Center



櫻井 勇樹 SAKURAI Yuki

生産技術センター グローバル生産エンジニアリングセンター
研究主務。モノづくりの仕組み構築に従事。
Global Manufacturing Engineering Center