動的サプライチェーンにおける適応戦略の構築に関する研究*

(多階層のサプライチェーンのモデルと交渉プロセスの提案)

谷 水 義 隆^{*1}, 小 澤 知 里^{*1}
岩 村 幸 治^{*1}, 杉 村 延 広^{*2}

A Study on Development of Adaptive Strategies in Dynamic Supply Chains (Proposal of Models and Negotiation Processes for Multi-Layered Supply Chains)

Yoshitaka TANIMIZU^{*3}, Chisato OZAWA,
Koji IWAMURA and Nobuhiro SUGIMURA

^{*3} Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University,
1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai-shi, Osaka, 599-8531 Japan

This research proposes a new model representing multi-layered dynamic supply chains and a new negotiation process among components. The proposed model consists of three components named clients, manufacturers, and suppliers. The manufacturers generate and send both the orders of the parts to the suppliers and the offers of the products to the clients. The manufacturers continue to modify their production schedules after sending their orders of the parts to the suppliers, in order to improve their schedules to manufacture the ordered products. Therefore, the manufacturers are able to satisfy the requirements on the delivery time of the ordered products, even if the possible delivery time from suppliers does not satisfy the required delivery time from the manufacturers. The effectiveness of the proposed model and negotiation processes is verified through some computational experiments from the viewpoint of profits.

Key Words: Supply Chain, Multi-Layer, Cooperative Negotiation, Concurrent Scheduling, Genetic Algorithm

1. 結 言

材料や資源の取引、在庫の管理など、物と情報の流れを管理するサプライチェーンマネジメント (Supply chain management) が注目されてきた⁽¹⁾。近年、情報伝達の高速化や系列の解体により、物品の調達先を自由に選択し、サプライチェーンを組み替えることができるようになった⁽²⁾⁽³⁾。このような状況に対して、マルチエージェントによる契約手法⁽⁴⁾⁽⁵⁾や入出荷量の決定方法⁽⁶⁾などの研究が行われている。本研究では、物品の調達先を契約ごとに組み替えるサプライチェーンを動的サプライチェーンと呼ぶ⁽⁷⁾⁽⁹⁾。動的サプライチェーンにおいて企業が存続するためには、各企業が自身の外部環境および内部環境の変化に適応した戦略を構築する必要がある。

著者らは、完全受注生産を行う企業群と顧客で構成

される動的サプライチェーンを対象とし、各企業が、生産の進捗状況を考慮して、自身の生産スケジュールを変更しながら、需要側および供給側の企業と交渉を繰り返すことにより、適切な契約をリアルタイムに締結する手法の構築を目指している。既存の研究では、ClientとSupplierの2種類の要素で構成される2階層の動的サプライチェーンモデル (以下、2階層モデル) を提案し、顧客を表すClientと製造企業を表すSupplierが交渉を繰り返すことで、適切な納期と価格を決定する手法を提案した⁽⁷⁾⁽⁹⁾。Supplierは、実行中の生産スケジュールを変更しながら、Clientと交渉を行う。これにより、Supplierは、Clientの要求をリアルタイムに考慮した適切な納期と価格を決定し、自身の利益を向上することができる。

本研究では、既存の2階層モデルを拡張して、多階層の動的サプライチェーンを表現するための新たな要素モデルを提案する。次に、多階層の動的サプライチェーンにおいて、効率的に契約を獲得するために、構成要素間の協調的な交渉プロセスについて提案を行う。さらに、多階層の動的サプライチェーンシミュレーション

* 原稿受付 2010年5月19日。

^{*1} 正員, 大阪府立大学大学院工学研究科(〒599-8531 堺市中央区学園町1-1)。

^{*2} 正員, フェロー, 大阪府立大学大学院工学研究科。
E-mail: tanimizu@me.osakafu-u.ac.jp

ョンシステムのプロトタイプを開発して、計算機実験を行い、利益向上の観点から、提案したモデルと交渉プロセスの有効性を検証する。

2. 既存の2階層モデル

前報⁽⁹⁾で提案した2階層モデルは、図1に示すように、ClientとSupplierの2種類の要素で構成される。Clientは、製品や部品を要求する構成要素であり、一般に、顧客を表す。一方、Supplierは、製品や部品を製造し、供給する構成要素であり、製造企業を表す。Clientは、発注情報となるオーダー(Order)を生成し、全てのSupplierに提示する。Supplierは、Clientからのオーダーに対して、その回答となるオフア(Offer)を生成し、Clientに提示する。Clientは、Supplierと交渉を繰り返し、適切なオーダーを送ったSupplierと契約することで、製品の納期と価格が決定する。

2階層モデルで、新規オーダーの製品の納期と価格を決定する手順を図2に示し、その説明を以下に示す。

Step 1: Client U_{Cp} は、 n 個目の製品 $N_{Cp,n}$ (以下、 N) のオーダーを新規オーダー $Ord_{Cp,N}$ として全てのSupplierへ提示する。オーダーには、要求納期 $DT_{Cp,N}^{Ord}$ 、要求価格 $PC_{Cp,N}^{Ord}$ 、納期遅れペナルティコスト係数 $k_{Cp,N}$ および回答期限 $BT_{Cp,N}$ の情報が含まれる。納期遅れペナルティコスト係数は、納期遅れに対する罰金の大きさを表す。

Fig. 1 Two-layered dynamic supply chain models

Fig. 2 Negotiation process between clients and suppliers

Step 2: Supplier U_{Sq} は、既に、 g_q 個のオーダーを獲得済みとする。 g_q 個目の製品を $G_{Sq,g}$ または $G(S,q,g)$ と表す。Client U_{Cp} からのオーダーに対して、Supplier U_{Sq} は、自身の生産スケジュールを変更して、オフア $Ofr_{Sq,N}$ を生成する。ここでは、回答期限 $BT_{Cp,N}$ 以降の時刻に新規オーダーの製品 N の作業を割り付け、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以下 GA)⁽¹⁰⁾ によるスケジューリング手法を用いて、ローリングスケジューリングを行う⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。スケジューリングの目的関数は、重み付き納期遅れ和とし、その最小化を行う。生成したオフアには、見積納期 $DT_{Sq,N}^{Ofr}$ と見積価格 $PC_{Sq,N}^{Ofr}$ の情報が含まれる。見積納期 $DT_{Sq,N}^{Ofr}$ は、Supplier U_{Sq} において、製品 N の製造を完了する予定時刻であり、式(1)で表される。一方、見積価格 $PC_{Sq,N}^{Ofr}$ は、生産コスト、報酬額、および納期遅れペナルティコストを考慮して、式(2)で算出する。

$$DT_{S,q,N}^{Ofr} = \max\{ft_{S,q,N}\} \quad (1)$$

$$PC_{S,q,N}^{Ofr} = TC_{S,q,N} + RW_{S,q,N} - PN_{S,q,N} + \sum_{i=1}^g \Delta PN_{S,q,G(S,q,i)}^{Rv(N,r)} \quad (2)$$

$\max\{ft_{S,q,N}\}$ 製品 N の最終工程の終了時刻。

$TC_{S,q,N}$ Supplier U_{Sq} における製品 N の総生産コスト。原材料コストや加工コストを含む。

$RW_{S,q,N}$ 製品 N に対する Supplier U_{Sq} の報酬額。

$PN_{S,q,N}$ 製品 N の要求納期 $DT_{Cp,N}^{Ord}$ からの遅延に対する納期遅れペナルティコスト。

$\Delta PN_{S,q,G}^{Rv(N,r)}$ 製品 N を Supplier U_{Sq} の生産スケジュー

ールに追加することで、契約済みの製品 $G_{Sq,i}$ が r 回目のスケジュール変更を施され、納期が変更されることで発生する納期遅れペナルティコストの増分。

Step 3: Client U_{Cp} は、回答期限までに回答されたSupplierのオフアを全て評価し、要求を満たすオフアを提示したSupplierの一つと契約する。一方、要求を満たすオフアが存在しない場合は、新規オーダーの要求を緩和し⁽⁴⁾、それをSupplierへ再提示する。次に、Step2に戻る。

以上の手順を、契約が成立するか、Clientが新規オーダーを取り下げるまで繰り返す。

3. 多階層のサプライチェーンのモデル化

3・1 中間企業のモデル化 多階層の動的サプライチェーンでは、図3に示すように、製品のオーダーを生成する Client と、オフアを生成する Supplier だけでなく、その両方を生成する中間企業が存在する。そこで、本研究では、中間企業を表現するための要素モデルとして、Manufacturer を新たに提案する。Manufacturer とは、上流の企業から素材や部品を購入し、下流の企業が要求する製品を製造して、供給する製造企業である。多階層の動的サプライチェーンは、Client, Manufacturer および Supplier の3種類の構成要素で表現することができる。したがって、本論文では、多階層の動的サプライチェーンの最小構成となる3階層の動的サプライチェーンのモデル（以下、3階層モデル）を対象として議論を進める。3階層モデルの模式図を図4に示す。なお、本論文では、Manufacturer と Supplier の間において、製品の主要な部品一つの授受のみを考慮することとし、製品を構成する、その他多数の部品の授受は考慮しない。

3・2 Manufacturer におけるオーダーとオフアの生成 Manufacturer U_{Mh} は、Client U_{Cp} から提示された製品 N のオーダー $Ord_{Cp,N}$ に対して、自身の生産スケジュールを変更して、製品 N の主要部品のオーダー $Ord_{Mh,N}$ を生成し、Supplier U_{Sq} に提示する。Manufacturer が生成するオーダー $Ord_{Mh,N}$ には、主要部品の要求納期 $DT_{Mh,N}^{Ord}$ 、要求価格 $PC_{Mh,N}^{Ord}$ 、納期遅れペナルティコスト係数 $k_{Mh,N}$ 、回答期限 $BT_{Mh,N}$ の情報が含まれる。なお、Manufacturer は、すでに g_h 個のオーダーを獲得済みとす

る。 g_h 個目の製品を $G_{Mh,g}$ または $G(M,h,g_h)$ と表す。スケジューリングの目的関数は、式(3)で示すように、重み付き納期遅れ和とし、その最小化を行う。

$$\sum_{i=1}^{g_h} (W_{M,h,G(M,h,i)} \times TR_{M,h,G(M,h,i)}) + W_{M,h,N} \times TR_{M,h,N} \rightarrow \min \quad (3)$$

$$TR_{M,h,G} = \max\{\max\{ft_{M,h,G}\} - DT_{M,h,G}^{Cn}, 0\} \quad (4)$$

$$TR_{M,h,N} = \max\{\max\{ft_{M,h,N}\} - DT_{C,p,N}^{Ord}, 0\} \quad (5)$$

$W_{M,h,G}$, $W_{M,h,N}$ 製品 G および N の重み。

$\max\{ft_{M,h,G}\}$ Manufacturer における製品 G の最終工程の終了時刻。

$DT_{M,h,G}^{Cn}$ 契約成立時の製品 G の納期。

$\max\{ft_{M,h,N}\}$ Manufacturer における製品 N の最終工程の終了時刻。

$DT_{C,p,N}^{Ord}$ Client の製品 N に対する要求納期。

Manufacturer U_{Mh} が、Supplier に提示するオーダーの要求納期 $DT_{Mh,N}^{Ord}$ と要求価格 $PC_{Mh,N}^{Ord}$ は、式(6)と式(7)で表される。

$$DT_{M,h,N}^{Ord} = \min\{st_{M,h,N}\} \quad (6)$$

$$PC_{M,h,N}^{Ord} = PC_{C,p,N}^{Ord} - MC_{M,h,N} - RW_{M,h,N} \quad (7)$$

$\min\{st_{M,h,N}\}$ Manufacturer における製品 N の第一工程の開始時刻。

$PC_{C,p,N}^{Ord}$ Client の提示した製品 N の要求価格。

$MC_{M,h,N}$ Manufacturer における製品 N の加工コスト。

$RW_{M,h,N}$ 製品 N に対する Manufacturer の報酬額。

Fig. 3 Multi-layered supply chains

Fig. 4 Three-layered models

Supplier にオーダーを提示したことにより、Manufacturer の生産スケジュールには、式(8)の制約が与えられる。すなわち、Manufacturer において、製品 N の作業は、Supplier に提示した要求納期 $DT_{Mh,N}^{Ord}$ 以降の時刻に割り付けられる。

$$\min\{st_{M,h,N}\} \geq DT_{M,h,N}^{Ord} \quad (8)$$

一方、Supplier U_{Sq} から回答されたオフア $Ofr_{Sq,N}$ に対して、Manufacturer U_{Mh} は、自身の生産スケジュールを変更して、Client U_{Cp} に提示するオフア

$Of_{M,h,N}$ を生成する。オファ $Of_{M,h,N}$ に含まれる見積納期 $DT_{M,h,N}^{Of}$ と見積価格 $PC_{M,h,N}^{Of}$ は、式(9)と式(10)で表される。

$$DT_{M,h,N}^{Of} = \max\{f_{M,h,N}\} \quad (9)$$

$$PC_{M,h,N}^{Of} = PC_{S,q,N}^{Of} + MC_{M,h,N} + RW_{M,h,N} - PN_{M,h,N} + \sum_{i=1}^{g_h} \Delta PN_{M,h,G(M,h,i)}^{Rv(N,r)} \quad (10)$$

$\max\{f_{M,h,N}\}$ Manufacturer における製品 N の最終工程の終了時刻。

$PC_{S,q,N}^{Of}$ Supplier の提示した製品 N の主要部品の見積価格。製品 N の原材料コスト。

$MC_{M,h,N}$ Manufacturer における製品 N の加工コスト。

$RW_{M,h,N}$ 製品 N に対する Manufacturer の報酬額。

$PN_{M,h,N}$ 製品 N の要求納期 $DT_{C,p,N}^{Ord}$ からの遅延に対する納期遅れペナルティコスト。

$\Delta PN_{M,h,G}^{Rv(N,r)}$ Manufacturer が新たに製品 N を生産スケジュールに追加したことで、契約済みの製品 $G_{M,h,i}$ が r 回目のスケジュール変更を施され、納期が変更されることで発生する納期遅れペナルティコストの増分。

Manufacturer が Supplier からオファ $Of_{S,q,N}$ を受けたことにより、Manufacturer の生産スケジュールには、式(11)の制約が与えられる。すなわち、Manufacturer において、製品 N の作業は、Supplier の見積納期 $DT_{S,q,N}^{Of}$ 以降の時刻に割り付けられる。

$$\min\{st_{M,h,N}\} \geq DT_{S,q,N}^{Of} \quad (11)$$

3・3 Manufacturer の利益 Client は、式(12)と式(13)を同時に満たすオファを提示した Manufacturer と契約を行う。同時に、Manufacturer は、契約に至るオファを提示した Supplier と契約を行う。

$$DT_{M,h,N}^{Of} \leq DT_{C,p,N}^{Ord} \quad (12)$$

$$PC_{M,h,N}^{Of} \leq PC_{C,p,N}^{Ord} \quad (13)$$

契約成立時における製品 N の納期 $DT_{M,h,N}^{Cn}$ と価格 $PC_{M,h,N}^{Cn}$ 、および製品 N の主要部品の納期 $DT_{S,q,N}^{Cn}$ と価格 $PC_{S,q,N}^{Cn}$ を以下に示す。

$$DT_{M,h,N}^{Cn} = DT_{M,h,N}^{Of} \quad (14)$$

$$PC_{M,h,N}^{Cn} = PC_{M,h,N}^{Of} \quad (15)$$

$$DT_{S,q,N}^{Cn} = DT_{S,q,N}^{Of} \quad (16)$$

$$PC_{S,q,N}^{Cn} = PC_{S,q,N}^{Of} \quad (17)$$

Supplier と同様に、Manufacturer は、ローリングスケジューリングを行う。そのため、契約後の製品 N の実際の納期 $DT_{M,h,N}^{Act}$ は、契約時の納期 $DT_{M,h,N}^{Cn}$ と異なる場合がある。その場合、製品 N の実際の価格 $PC_{M,h,N}^{Act}$ も、契約時の価格 $PC_{M,h,N}^{Cn}$ とは異なる。Manufacturer における製品 N の実際の価格は、式(18)で表される。同様に、Supplier における製品 N の主要部品の実際の価格は、式(19)で表される。

$$PC_{M,h,N}^{Act} = PC_{M,h,N}^{Cn} - k_{C,p,N} \times \max\{DT_{M,h,N}^{Act} - DT_{M,h,N}^{Cn}, 0\} \quad (18)$$

$$PC_{S,q,N}^{Act} = PC_{S,q,N}^{Cn} - k_{M,h,N} \times \max\{DT_{S,q,N}^{Act} - DT_{S,q,N}^{Cn}, 0\} \quad (19)$$

製品 N の受注および製造によって、Manufacturer が得られる実際の利益 $PF_{M,h,N}$ は、式(18)、(19)、(15)、(17)、(10)に基づき、以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} PF_{M,h,N} &= PC_{M,h,N}^{Act} - PC_{S,q,N}^{Act} - MC_{M,h,N} \\ &= PC_{M,h,N}^{Cn} - k_{C,p,N} \times \max\{DT_{M,h,N}^{Act} - DT_{M,h,N}^{Cn}, 0\} \\ &\quad - PC_{S,q,N}^{Cn} + k_{M,h,N} \times \max\{DT_{S,q,N}^{Act} - DT_{S,q,N}^{Cn}, 0\} \\ &\quad - MC_{M,h,N} \\ &= PC_{M,h,N}^{Of} - k_{C,p,N} \times \max\{DT_{M,h,N}^{Act} - DT_{M,h,N}^{Cn}, 0\} \\ &\quad - PC_{S,q,N}^{Of} + k_{M,h,N} \times \max\{DT_{S,q,N}^{Act} - DT_{S,q,N}^{Cn}, 0\} \\ &\quad - MC_{M,h,N} \\ &= PC_{S,q,N}^{Of} + MC_{M,h,N} + RW_{M,h,N} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} &- PN_{M,h,N} + \sum_{i=1}^{g_h} \Delta PN_{M,h,G(M,h,i)}^{Rv(N,r)} \\ &- k_{C,p,N} \times \max\{DT_{M,h,N}^{Act} - DT_{M,h,N}^{Cn}, 0\} - PC_{S,q,N}^{Of} \\ &+ k_{M,h,N} \times \max\{DT_{S,q,N}^{Act} - DT_{S,q,N}^{Cn}, 0\} - MC_{M,h,N} \\ &= RW_{M,h,N} - PN_{M,h,N} + \sum_{i=1}^{g_h} \Delta PN_{M,h,G(M,h,i)}^{Rv(N,r)} \\ &- k_{C,p,N} \times \max\{DT_{M,h,N}^{Act} - DT_{M,h,N}^{Cn}, 0\} \\ &+ k_{M,h,N} \times \max\{DT_{S,q,N}^{Act} - DT_{S,q,N}^{Cn}, 0\} \end{aligned}$$

以上より、Manufacturer の利益は、式(20)の第1項に示すように、契約の獲得により得られる報酬額だけではなく、第3項に示すように、再スケジューリングによ

り納期からの遅延が短縮された場合、他の Client へ支払う必要がなくなった納期遅れペナルティコスト増分が Manufacturer の利益の増分となる。また、第 5 項に示すように、Supplier からの部品の到着が遅れた場合、その納期遅れペナルティコストも Manufacturer の利益となる。しかし、第 2 項は、契約時に要求納期からの遅延に対して、Manufacturer が支払う納期遅れペナルティコストを、第 4 項は、契約後に契約納期からの遅延に対して、Manufacturer が支払う納期遅れペナルティコストを表しており、Manufacturer が納期遅れを起こす場合、Manufacturer の利益は減少する。よって、Manufacturer の利益を向上させるためには、生産スケジュールを適切に改善することが重要である。

4. 協調的な交渉プロセス

4・1 交渉プロセスにおける課題 3 章で示したように、Supplier と Manufacturer は、交渉プロセスにおいて、自身の生産スケジュールが良くなるほど、高い利益が得られる。本研究では、Supplier と Manufacturer は、GA を用いたローリングスケジューリングを行うため、解の探索時間が長いほど、良い生産スケジュールが得られる。しかし、Supplier と Manufacturer は、オーダーやオフアの情報を授受しなければならない。そのため、サプライチェーンの階層が多くなるほど、各階層における解の探索時間は減少する。

交渉プロセスには、相反する 2 つの要求が存在する。

- (1) 各階層における解の十分な探索時間の確保。
- (2) 各階層間における情報の早期の授受。

これらの要求を満たすために、本研究では、Supplier と Manufacturer によるコンカレントスケジューリング (Concurrent scheduling) 手法を提案する。Manufacturer におけるスケジューリング手順の概要を以下に示す。

- (1) Client からオーダーを受けた Manufacturer は、GA を用いて、ローリングスケジューリングを行う。GA には、探索の初期段階で、ある程度 of 良好な解を探索することができるという特徴がある。そこで、Manufacturer は、一定時間経過後に、探索を一時停止して、式(6)と式(7)を用いて、オーダーを生成し、Supplier へ提示する。
- (2) オーダーを提示した後、Manufacturer は、式(8)の制約を考慮しながら、自身の生産スケジュールを改善し続ける。この時点において、各階層では、並列にスケジューリングが行われている。

- (3) Supplier から回答されたオフアを受けた場合、Manufacturer は、式(11)の制約を考慮しながら、自身の生産スケジュールを改善し、回答期限までにオフアを生成して、Client に回答する。なお、Manufacturer が多階層になる場合でも、同様の手順になる。

Manufacturer が早期にオーダーの情報を提示することで、Supplier は、良い生産スケジュールを作成するための時間を確保することができ、低コストかつ短納期の適切なオフアを生成することができる。その結果、Manufacturer は、Client の要求を満たし易くなり、契約獲得の機会が増えることになる。また、Manufacturer は、Supplier にオーダーを提示した後も、自身の生産スケジュールを改善し続ける。これにより、Manufacturer における製品の滞留時間を短縮することができれば、Manufacturer の要求納期を満たすオフアが Supplier から得られない場合でも、Manufacturer において、それを補うことができる。これにより、Manufacturer は、契約を獲得し易くなるだけでなく、式(20)の第 5 項で示したように、Manufacturer の利益は増大する。また、Manufacturer が契約を獲得したことにより、Supplier も報酬額を得ることができる。このように、コンカレントスケジューリングは、Manufacturer と Supplier が、新規オーダーの契約を獲得し易くするだけでなく、利益の向上においても有効である。

4・2 コンカレントスケジューリングによる交渉プロセス 新規オーダー N の契約における Client U_{Cp} 、Manufacturer U_{Mh} および Supplier U_{Sq} 間の交渉プロセスの一例を図 5 に示す。縦軸は、時間の進行を表し、横向き矢印は、情報の授受を表す。以下に、交渉プロセスの詳細を示す。

Step 1: 2 節の Step 1 と同じ。Client U_{Cp} は、新規オーダー $Ord_{Cp,N}$ を全ての Manufacturer へ提示する。

Fig. 5 Negotiation process among three organizations

- Step 2:** Manufacturer U_{Mh} は, Client U_{Cp} からのオーダーに基づき, Supplier へのオーダー Ord_{MhN} を生成する.
- Step 2-1:** 回答期限 BT_{CpN} 以降の時刻に新規オーダーの製品 N の作業を割り付け, GA によるローリングスケジューリングを行う.
- Step 2-2:** 一定時間経過後に, 式(6)と式(7)を用いて, オーダー Ord_{MhN} を生成し, 全ての Supplier へ提示する.
- Step 2-3:** 式(8)の制約を考慮しながら, 自身の生産スケジュールを改善し続ける.
- Step 3:** 2 節の Step 2 と同じ. Supplier U_{Sq} は, Manufacturer U_{Mh} からのオーダー Ord_{MhN} に基づき, GA を用いて自身の生産スケジュールを変更して, オファ Off_{SqN} を生成し, Manufacturer U_{Mh} に回答する.
- Step 4:** Manufacturer U_{Mh} は, Supplier U_{Sq} からのオファ Off_{SqN} に基づき, 式(11)より, 自身の生産スケジュールを改善し, オファ Off_{MhN} を生成して, Client U_{Cp} に提示する.
- Step 5:** 2 節の Step 3 と同じ. Client U_{Cp} は, 式(12)と式(13)を満たすオファを提示した Manufacturer U_{Mh} と契約する. これにより, Manufacturer U_{Mh} は, Supplier U_{Sq} と契約する. 一方, 全てのオファが, 式(12)または式(13)を満たさない場合, Client U_{Cp} は, 一定の緩和率に基づき, 納期と価格の要求を緩和し⁽⁴⁾, Manufacturer にオーダーを再提示する. 次に, Step2に戻る.

以上の手順を, 契約が成立するか, Client が新規オーダーを取り下げるまで繰り返す. なお, Manufacturer は, 異なる複数の Client から同時に新規オーダーが提示された場合, Supplier と同様, FCFS (First-Come First-Served) ルールに基づき, オーダーを一つずつ処理する. また, 回答期限までは, 他のオーダーの処理は行わない.

5. 計算機実験

オブジェクト指向言語 Smalltalk を用いて, 3 階層モデルのシミュレーションシステムのプロトタイプを開発した. 本システムは, ネットワーク上の複数の計算機を用いてシミュレーションを行うことができる. また, Supplier, Manufacturer および Client は, 自律的に意思決定を行うプログラムモジュールとして実装した. なお, 本論文の実験では, 複数の Supplier および Manufacturer のプログラムモジュールは, 個々に異なる計算機上に実装するが, Client は, 1 つの計算機上の単一のプログラムモジュールで実装した.

本論文では, 2 種類の実験結果について報告する. 一つは, コンカレントスケジューリングの特性を評価

するために, 単一のサプライチェーンによる計算機実験を行った. もう一つは, 異なる戦略との性能を比較するために, 複数のサプライチェーンにおける競争入札の実験を行った. 実験の詳細を以下に示す.

5・1 単一のサプライチェーンによる特性評価

一組の Supplier U_{S1} , Manufacturer U_{M1} および Client U_{C1} で構成される単一のサプライチェーンを実装し, 計算機実験を行った. Supplier U_{S1} は, 工作機械 5 台と獲得済みのオーダーの部品 20 個からなるジョブショップ型の生産スケジュールを持つ. また, Manufacturer U_{M1} は, 工作機械 10 台と獲得済みのオーダーの製品 20 個からなるジョブショップ型の生産スケジュールを持つ. Client U_{C1} は, 連続的に新規オーダーを生成する. Manufacturer U_{M1} と Supplier U_{S1} は逐次, オーダーを受け取り, 交渉が繰り返される. ここでは, 新規オーダーを約 2 時間連続して投入し, その契約の成否の割合を検証した.

6 回の実験結果の平均値を表 1 にまとめる. Manufacturer が契約を成立することができた新規オーダーの割合は, 90%であった. そのうちの 37%の契約は, Supplier のオファが Manufacturer の要求納期を満たしていないが, Manufacturer が自身の生産スケジュールを改善したことで, Client の要求納期を満たすことができ, 契約を獲得することができた割合を表す. このように, コンカレントスケジューリングによって, Manufacturer が Supplier の納期遅れを補うことで, より多くの契約を獲得することができたことがわかる.

5・2 複数のサプライチェーンにおける競争入札

図 6 に示すように, ネットワークに接続した 5 台の計算機に, 2 つの Supplier U_{S1} , U_{S2} , 2 つの Manufacturer U_{M1} , U_{M2} , および Client 群 U_{Cp} を実装し, 競争入札の計算機実験を行った. 2 つの Manufacturer は, 異なる戦略を持つ. Manufacturer U_{M1} は, 提案手法のコンカレントスケジューリングを行う. Manufacturer U_{M2} は, Supplier U_{S2} へオーダーを提示した後, オファの回答があるまで, 生産スケジュールの改善を行わない. これを比較手法とする. なお, 初期状態において, Supplier と Manufacturer は, 5.1 節の実験と同じ生産スケジュー

Table 1 Experimental results

	Ratio of completion of contracts [av.] (%)
Total	90
Without cooperative negotiation	53
With cooperative negotiation	37

ルを持つ。また, Supplier と Manufacturer は全て, 同じ GA のスケジューリングプログラムを持つ。

実験では, Client が 2 つの Manufacturer $U_{M,1}$, $U_{M,2}$ に対して, 7 時間連続して新規オーダーを提示し, 競争入札を繰り返した。Supplier および Manufacturer の報酬額の組合せを変えて, 9 通りの実験を行った。以下に条件を示す。

- Supplier の報酬額: 1600, 2000, 2600
- Manufacturer の報酬額: 2400, 3000, 3900

実験結果を図 7 と図 8 にまとめる。図 7 は, Supplier と Manufacturer が獲得した契約数を表し, 図 8 は, Supplier と Manufacturer の利益の総和を表す。各図のグラフは, 契約数および利益の総和の最大値, 平均値, および最小値を表す。図 7 より, 提案手法の Manufacturer $U_{M,1}$ を含むサプライチェーンの方が, 多くのオーダーを獲得できたことがわかる。また, 図 8 より, 提案手法の Manufacturer $U_{M,1}$ を含むサプライチェーンの方が, 獲得した利益の総和は多いことがわかる。なお, 図 8 のグラフの濃い部分は Manufacturer の利益を, 薄い部分は Supplier の利益を表す。提案手法の Manufacturer $U_{M,1}$ の利益は, 比較手法の Manufacturer $U_{M,2}$ の利益よりも多い。これは, 5.1 節の実験で示したように, Manufacturer が Supplier の納期遅れを補って獲得したオーダーの利益と考えられる。

6. 結 言

本研究では, 多階層の動的サプライチェーンを表現するために, Manufacturer という新たな要素モデルを提案し, Manufacturer におけるオーダーとオフアの納期と価格を算出する計算式を提案した。また, Manufacturer が Supplier へオーダーを提示した後, 生産

スケジュールを改善し続けるコンカレントスケジューリング手法を提案した。このスケジューリング手法は, Manufacture と Supplier がオーダーを獲得し易くするだけでなく, 利益の向上においても有効である。次に, 3 階層モデルのシミュレーションシステムのプロトタイプを開発し, 計算機実験を行った。これにより, Supplier のオフアが Manufacturer のオーダーの要求納期を満たしていない場合でも, Manufacturer が Client の契約を獲得できることを示した。さらに, Manufacturer がコンカレントスケジューリングを行わない場合と比較した結果, 提案手法は, 生産スケジュールを改善し続けることで, より多くの契約を獲得することができ, 利益が向上することを示した。

文 献

- (1) Fujino, N, Essence of Supply Chain and Financial Impact (in Japanese), *Harvard Business, Diamond*, Vol. 23, No. 6 (1998), pp. 10-21.
- (2) Emerson, D. and Piramuthu, S., Agent-based Framework for Dynamic Supply Chain Configuration, *Proc. of the 37th Hawaii International Conference on System Science* (2004), 70168a, CD-ROM.
- (3) Piramuthu, S., Knowledge-based Framework for Automated Dynamic Supply Chain Configuration, *European Journal of Operational Research*, 165

Fig. 7 Number of contracts

Fig. 6 Simulation system

Fig. 8 Profits of manufacturers and suppliers

- (2005), pp. 219-230.
- (4) Kaihara, T. et al., Virtual Enterprise Negotiation Strategy in Agile Manufacturing Environment, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 67, No. 661 (2001), pp. 299-306.
 - (5) Kaihara, T. and Fujii, S., A Study on Partnering Strategy in Virtual Enterprise (Game Theoretic Approach), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 69, No.680 (2003), pp. 317-324.
 - (6) Nishi, T., Distributed Optimization Technique for Supply Chain Management, *Journal of the Japan Society for Artificial Intelligence*, Vol. 19, No.5 (2004), pp. 571-578.
 - (7) Tanimizu, Y. et al., Multi-Agent Based Dynamic Supply Chain Configuration Considering Production Schedules, *Proc. of 2006 International Symposium on Flexible Automation* (2006), pp. 572-578.
 - (8) Tanimizu, Y. et al., Credibility of Supplier in Dynamic Supply Chain, *Proc. of the 40th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems CD-ROM, SC5* (2007), pp. 1-6.
 - (9) Tanimizu, Y. et al., A Study on Development of Adaptive Strategies in Dynamic Supply Chains (Proposal of a Framework and Two-Layered Models), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 75, No. 756 (2009), pp. 2351-2358.
 - (10) Holland, J. H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press (1975).
 - (11) Tanimizu, Y., et al., Genetic Algorithm Based Reactive Scheduling, 1st Report, Modification of Production Schedule for Delays of Manufacturing Processes, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 69, No. 685 (2003), pp. 234-239.
 - (12) Tanimizu, Y., et al., Evolutional Reactive Scheduling for Agile Manufacturing Systems, *International Journal of Production Research*, 44, 18-19 (2006), pp. 3727-3742.
-