マスカスタマイゼーション実現に向けた 顧客ニーズ・製造装置の状況を考慮した 生産スケジューリング手法の提案*

國領 大介[†]・貝原 俊也[†]・藤井 信忠[†]・平井 康大[†]

A Proposal of Production Scheduling Method considering with Users' Demands and Machines' Condition in Realization of Mass-customization*

Daisuke KOKURYO[†], Toshiya KAIHARA[†], Nobutada FUJII[†] and Kodai HIRAI[†]

Recently, the environment of manufacturing industries greatly changes according to diversification of users' demands and production machines' condition, and then the effective scheduling method to deal with changes of various situation is required. In this paper, a scheduling method for realizing the mass-customization is proposed using a combinatorial auction technique which is one of the autonomous distributed optimization method. The users' demands, the number of running machines and the equalization of the running machines' usage ratio each term are considered in the proposed method. Computational experiments are performed for evaluating the effectiveness of the proposed method. The suitable schedules in consideration of the users' demands and machines' conditions are acquired using the proposed method. Thus, the proposed method has the potential to make the effective scheduling in realization of mass-customization.

1. はじめに

近年の製造業において、顧客ニーズの多様化や急速なデジタル化の進展、グローバル競争の激化により、大量生産に近い生産性を保ちつつ個々の顧客のニーズに合う商品やサービスを生み出すマスカスタマイゼーション (Mass-customization) への対応が求められている。マスカスタマイゼーションとは、大量生産に近い生産性を保ちつつ個々の顧客のニーズに合う商品やサービスを生み出すことであり、少品種多量生産により生産コストを下げる「マスプロダクション (大量生産)」と、顧客の要望に応じて仕様変更を行う「カスタマイゼーション (受注生産)」の二つの生産方式を両立させるものである[1]。この概念は1990年代前半に提唱され[2]、PCのカスタマイズ、自動車やバイクなどのカスタマイズ製品の発注・製造で取り組まれている。われわれのグループでは、内閣府・戦略的イノベーション創造プログラム (Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion

Program, SIP) において、ラバー用3Dプリンタの開発、ならびにマスカスタマイゼーションを実現し顧客のニーズ・価値・性能や製品の使用状況を考慮することによりユーザの希望に沿った製品設計・製造を可能とするテラーメイド設計・生産システムに対する研究開発に取り組んできた[3,4]。

一方、マスカスタマイゼーションの実現のためには、製造のために必要な材料・設備とそれらをいつどのような作業で使用するかという日程計画において、「必要なものを、必要なときに、必要な量だけ」製造する高効率生産モデルの構築が重要であり、高い生産効率を維持しつつ、顧客のニーズも十分に考慮した生産スケジューリング手法の確立が重要となる。生産スケジューリング手法に関する研究は、製造ショップの能力差[5]や部品供給量を考慮した研究[6]や同時に製造するロットのサイズを考慮した研究[7,8]をはじめ、数多く検討されてきた。スケジュールを決定する際の基準となる目的関数も総納期遅れ最小化のみならずメイクスパン最小化やコスト最小化、ならびにそれらの重み付け最小化など、対象モデルに合わせた検討が行われており[9–12]、その最適化には遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm) やタブ探索 (Tabu Search) といったメタ解法も多く用いられてきた[5,13,14]。われわれのグループでも製造機械と無人配送車を同時に考慮したスケジューリング手法[15]、分散協

* 原稿受付 2018年9月21日
第61回システム制御情報学会研究発表講演会にて発表 (2017年5月)

[†] 神戸大学 大学院 システム情報学研究科 Graduate School of System Informatics, Kobe University; 1-1 Rokkodai-cho, Nada ward, Kobe city, Hyogo 657-8501, JAPAN
Key Words: mass-customization, production scheduling, optimization method, combinatorial auction.

調型手法であるラグランジュ分解・調整法を用いたフレキシブル・フローショップにおける生産スケジューリング手法[16], 社会的交渉を模擬化した自律分散型最適化手法の一種である組合せオークション (Combinatorial Auction) [17] を使用した実仮想融合型生産システムにおけるスケジュール立案手法[18]や製造機械の使用順序や使用する部品選定を同時に行うためのスケジューリング手法[19]を提案してきた。

本論文では, マスカスタマイゼーションの実現に向け, 製品に対する顧客のニーズやその価値を考慮しつつ, 製造現場における製造装置台数やその稼働率に着目し, その調整を可能にするための手法として, 顧客 (オーダー) と製造装置の代理としてそれぞれふるまう顧客エージェントと製造装置エージェントの交渉を模した組合せオークションを用いた生産スケジューリング手法を提案する。本論文では, 製造開始前に発注のあったオーダーを対象とした計画段階における生産スケジュールを立案する。先行研究[19]では考慮していない顧客ニーズに対応するオーダーの優先順位や製造装置とその台数・稼働率を考慮するため, 目的関数を重み係数を付与した各評価値の線形荷重和の最小化とし, 使用する製造装置や使用時間の調整によりその最適化を行う。提案手法に対し, 計算機実験を実施し, その有効性について検討する。

2. 対象モデル

本論文では, SIP プログラムでの対象製品である, ランニングシューズのソール部分を対象とする。ランニングシューズはソール部分とアッパー部分に分かれており, ソール部分はインナーソール (中敷き), ミドルソール, アウターソールの 3 部品から成り立つ。なお, 本論文においてアッパー部分は十分な種類・在庫が常にあるものとして, その製造はスケジュール立案の対象外とする。

対象の概略図を Fig. 1 に示す。対象製品は部品を製造する工程とそれらの部品を組合せる工程の二つから成り立つ。ソール部分の各部品は, 標準装置もしくは顧客のニーズに合わせテーラードメイド製品を製造する 3D プリンタのいずれかで製造される。そして製造された各部品とアッパー部分を組立装置で組合せることで, 製品として完成する。各製造装置で行う作業を指すジョブならばに顧客からのオーダーの特徴は以下の通りである。

● 装置の特徴

- － 部品製造の工程数は 1 とし, 各部品は標準装置, 3D プリンタのいずれかで製造される。
- － 標準装置はそれぞれ製造できる部品, 品種が限定されている。
- － 3D プリンタは製造できる部品, 品種に限定はない (標準部品も製造可能)。
- － 3D プリンタには高性能, 標準性能の二つのタイプがあり, 性能が高ければ製造時間が短くなる。
- － 各装置が同時刻に処理できるジョブは一つである。

Fig. 1 Model

- － 各装置では処理するジョブの品種が変わるたびに段取替えが発生する。ただし, 3D プリンタは同じオーダー内のジョブならば品種が異なっても段取替え無しで連続して製造可能である。
- － 組立装置はオーダー内のすべての部品が完成した後に組立作業を開始する。
- ジョブの特徴
 - － ジョブは標準部品製造ジョブ, テーラードメイド部品製造ジョブ, 組立ジョブに分かれる。
 - － ジョブの処理時間は部品, 品種, 装置の種類により決定される。
- オーダーの特徴
 - － 顧客が発注するオーダーには各部品の品種, 納期, 追加料金の情報が含まれる。
 - － 追加料金とは製品の価格に加えて追加で支払うオプション料金のことを言い, 顧客は追加料金を支払うことで自身のオーダーを優先的に製造してもらうことができる。

3. 顧客ニーズ, 装置稼働台数・稼働率を考慮したスケジューリング手法の提案

本論文では, 計画段階におけるオーダーを対象に, 顧客ニーズ, 装置稼働台数やその稼働率の考慮を可能にするため, 複数の財を効率的に配分することが可能な組合せオークション[17]を用いた生産スケジューリング手法を提案する。オークションの主催者を製造拠点, 入札者を顧客が発注したオーダーの各作業, 財を装置の使用権 (製造装置番号, 製造開始時間) とする。本論文では, オーダーの組合せによりその価値が変わる代替性や補完性はないものとする。また 1 入札者あたりの入札数を制限することにより高速に準最適解を求めるとともに, 複数回繰り返すことにより解の改善を図る。

本論文での生産スケジュール立案基準を以下に述べる。

- 総納期遅れ最小化を最優先とする。
- 顧客ニーズへの対応として追加料金による顧客のオーダーの優先手法を導入する。
- 生産コストや特急ジョブへの対応を考慮するために, 稼働装置台数を調整し, 必要でなければ機械を遊休状態にする。

- 将来的なオーダー追加への対応に向け、複数の期に分け各期の装置稼働率を平準化する。

3.1 記号の定義

提案手法で用いる記号に関して、求解する決定変数、決定変数から求まる従属変数ならびにオーダー数や装置性能から事前に与えられる所与変数を以下で定義する。

決定変数

$x_{i,j,k}$: オーダー i の作業 j の入札 k が勝者ならば 1, 敗者ならば 0 となる 0-1 変数

$U_{i,j,k,t}$: オーダー i の作業 j の入札 k がタイムスロット t に標準装置を使用していれば 1, 使用していなければ 0 となる 0-1 変数

$UA_{i,j,k,t}$: オーダー i の作業 j の入札 k がタイムスロット t に 3D プリントを使用していれば 1, 使用していなければ 0 となる 0-1 変数

従属変数

$PS_{i,j,k}$: オーダー i の作業 j の入札 k の製造開始時間

$MT_{i,j,m}$: オーダー i の作業 j の装置 m での製造時間

$MN_{i,j,k}$: オーダー i の作業 j の入札 k の製造装置番号

$Bi_{j,k}$: オーダー i の作業 j の入札 k の入札値

IT_m : 装置 m の遊休時間

Δd_{te} : 期 te の製造時間の差分

所与変数

i : オーダー番号 ($i=1, \dots, I$)

j : 作業番号 ($j=1, \dots, J$; $standard, tailor, assembly \in j$)

$standard$: 標準部品製造作業

$tailor$: テーラ部品製造作業

$assembly$: 組立作業

k : 入札番号 ($k=1, \dots, K$)

m : 装置番号 ($m=1, \dots, M$; $m_s, m_p \in m$)

m_s : 標準装置装置番号 ($m_s=1, \dots, M_s$)

m_p : 3D プリント番号 ($m_p=1, \dots, M_p$)

t : タイムスロット番号 ($t=1, \dots, T$)

te : 期番号 ($te=1, \dots, TE$)

TS_{term} : 1 期あたりのタイムスロット数 [TS]

RT_i : オーダー i の到着時間

DP_i : オーダー i の納期

AT_i : オーダー i の組立時間

AP_i : オーダー i の追加料金

α_i : オーダー i の納期遅れへの重み係数

β : 遊休時間 IT_m への重み係数

γ : 製造時間の差分 Δd_{te} への重み係数

δ : 稼働装置台数調整における重み係数

Co : 標準装置の段取替え時間

CoT : 3D プリントの段取替え時間

3.2 提案手法の流れと定式化

提案手法では、まず入札者である各オーダーが財である使用する製造装置と使用開始時間を組合せ複数の入札を作成し入札値を求める入札決定問題を実行し、つぎに作

Fig. 2 Flowchart of proposed method

成された入札に対しオークション主催者が設定した目的関数が最小（最大）となる入札の組合せを決定する勝者決定問題を実行する。この操作を繰り返し実行することにより良い解を得ることができる財の組合せを求め、良好なスケジュールを取得する。提案手法の流れを Fig. 2 に示し、以下にその手順を述べる。詳細については、3.3 節以下で述べる。

STEP1 オークション主催者は組合せオークションを開催する。オークションにかけられたすべての財情報を入札者に提示する。

STEP2 入札決定問題

各入札者は繰り返し回数 $ite=1$ ならば **STEP2-a**, それ以外は **STEP2-b** で財の組合せに対して入札を行う。

STEP2-a 初期入札

STEP3 で述べる勝者決定問題において、必ず実行可能解を得ることができるように入札を作成する。

STEP2-b 近傍操作による入札作成

2 回目以降のオークションでは、実行可能解を必ず得るとともに目的関数値の改悪を防ぐための入札を作成する。

STEP3 勝者決定問題

オークション主催者は入札値の合計が最小（最大）となる入札を決定する。

STEP4 $ite=ITE$ であれば終了し結果を出力、それ以外は **STEP2** へ。

3.3 入札決定問題

勝者決定問題で用いる入札値、明らかな実行不可能となる組合せを除外するための入札制約を述べた後、初期

入札ならびに近傍操作による入札作成について述べる。

3.3.1 入札値

入札値はオーダ i , 作業 j , 入札 k の納期遅れの値 $B_{i,j,k}$ であり, (1) 式で表す。

$$B_{i,j,k} = \begin{cases} \max\{0, (PS_{i,j,k} + AT_i - DP_i)\} & (\text{if } j \in \text{assembly}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

3.3.2 入札制約

効率よくオークションを行うために明らかに実行不可能となるオーダの組合せへの入札を防ぐ必要がある。そこで入札制約として (2) 式および (3) 式を定める。

- 製造装置の製造開始に関する制約

オーダ i の部品の製造開始時間 $PS_{i,j,k}$ はオーダ i の到着時間 RT_i より後であることを表す。

$$PS_{i,j,k} \geq RT_i \quad (\forall i, \forall j, \forall k) \quad (2)$$

- 組立装置の組立開始に関する制約

組立作業はオーダ内のすべての部品の完成後に開始できることを表す。

$$PS_{i,j',k} \geq \max(PS_{i,j,k} + MT_{i,j,MN_{i,j,k}}) \quad (\forall i, \forall k, j \in \text{standard}, \text{tailor}, j' \in \text{assembly}) \quad (3)$$

3.3.3 初期入札作成

3.4 節で述べる勝者決定問題では各入札者の入札のうち必ず一つの入札が勝者になる必要があるが, 各入札者が他入札者の入札を考慮せず入札を行うと実行可能解を得ることができない場合がある。そこで, オークションの初回では必ず実行可能解を得ることができるよう, 以下の手順に従いすべての入札者が同じオーダの組合せに入札を行うものとする。またテーラ部品製造ジョブを高性能プリンタに割り付けることで, オークション初期において高性能プリンタのみを用いた製造を検討する。

STEP1 オーダの処理順序をオーダ i の到着時間 RT_i が早い順とする。

STEP2 **STEP1** で得られたオーダの処理順序をさらにオーダ i の納期 DP_i が早い順とする。標準部品製造ジョブは **STEP3-a**, テーラ部品製造ジョブは **STEP3-b** に従いジョブを装置に割り付ける。

STEP3-a **STEP2** で得られた順番で標準部品製造ジョブを各標準装置に割り付ける。

STEP3-b **STEP2** で得られた順番でテーラ部品製造ジョブを高性能プリンタに割り付ける。

STEP4 **STEP3** で得られたスケジュールに従い各入札者が入札を行う。初期入札では先の入札がなく必ず実行可能解を取得する必要があることから, **STEP3** までで決まったスケジュールそのものをすべての入札者の入札とする。

3.3.4 近傍操作による入札作成

オークションの2回目以降において, 実行可能解を必ず得るとともに目的関数値の改悪を防ぐため, 前回のオークションで勝者となった入札とその近傍に入札を行う。以下の手順に従い入札を作成する。

STEP1 前回のオークションで勝者となった入札と同じ財の組合せの入札を一つ作成する。

STEP2 その他の入札の製造装置番号 $MN_{i,j,k}$ をランダムに決定し変更する。その際, すべての3D プリント装置番号がテーラ部品を含む入札に割り当てる。

STEP3 その他の入札の製造開始時間 $PS_{i,j,k}$ を以下の手順で決定し変更する。 $rand, rand'$ は区間 $[0,1]$ の一様乱数に従う確率変数, 閾値 $direct, loop$ は予備実験で求めた定数とする。

- 前回勝者の入札の製造開始時間 $PS_{i,j,k}$ をずらす量 ε [TS] を決定する。以下の (4) 式の判定を行い条件を満たせば ε を 1 [TS] 増加させる。この操作を条件を満たさなくなるまで繰り返す。

$$\varepsilon := \begin{cases} \varepsilon + 1 & (\text{if } rand < loop) \\ \varepsilon & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4)$$

- 前回勝者の入札の製造開始時間 $PS_{i,j,k}$ をずらす方向を決定する。以下の (5) 式の判定を行い条件を満たせば製造開始時間を ε [TS] 遅らせ, 満たさなければ ε [TS] 早める。

$$PS_{i,j,k} := \begin{cases} PS_{i,j,k} + \varepsilon & (\text{if } rand' < direct) \\ PS_{i,j,k} - \varepsilon & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (5)$$

STEP4 **STEP3** で作成した入札が他の入札の製造開始時間 $PS_{i,j,k}$ と重複している場合は **STEP3** へ戻る。これは後の勝者決定問題における解候補を一定数確保するためである。重複する入札がなければ入札作成を終了し, 勝者決定問題へ進む。

3.4 勝者決定問題

作成された入札に対し, 最適な組合せを決定する勝者決定問題の定式化を以下に示す。

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (B_{i,j,k} \times x_{i,j,k} \times \alpha_i) \\ & + \sum_{m_p=1}^{M_p} (IT_{m_p} \times \beta) \\ & + \sum_{te=1}^{TE} (\Delta d_{te} \times \gamma) \quad (j \in \text{assembly}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^K x_{i,j,k} = 1 \quad (\forall i, \forall j) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J U_{i,j,k,t} \times x_{i,j,k} \leq 1 \\ & (\forall k, \forall t, j \in \text{standard}, \text{tailor}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$U_{i,j,k,t} = \begin{cases} 1 & (\text{if } PS_{i,j,k} \leq t \\ & \wedge t \leq PS_{i,j,k} + MT_{i,j,MN_{i,j,k}}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

$$\sum_{i=1}^I UA_{i,j,k,t} \times x_{i,j,k} \leq 1 \quad (\forall k, \forall t, j \in \text{assembly}) \quad (9)$$

$$UA_{i,j,k,t} = \begin{cases} 1 & (\text{if } PS_{i,j,k} \leq t \\ & \wedge t \leq PS_{i,j,k} + AT_i) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

$$x_{i,j,k} + x_{i',j',k'} \leq 1 \quad (10)$$

$$(\forall i, \forall i', \forall j, \forall j', \forall k, \forall k' | i \neq i' \wedge j \notin \text{assembly}$$

$$\wedge PS_{i,j,k} + MT_{i,j,MN_{i,j,k}} \leq PS_{i',j',k'}$$

$$\wedge PS_{i',j',k'} < PS_{i,j,k} + MT_{i,j,MN_{i,j,k}} + C_j)$$

$$C_j = \begin{cases} Co & (j \in \text{standard}) \\ CoT & (j \in \text{tailor}) \end{cases}$$

$$PS_{i,j,k} \times x_{i,j,k} + MT_{i,j,MN_{i,j,k}} \leq PS_{i,j',k'} \times x_{i,j',k'} \quad (11)$$

$$(\forall i, \forall j, \forall k, \forall k' | j \in \text{standard, tailor, } j' \in \text{assembly})$$

$$x_{i,j,k} \in \{0,1\} \quad (\forall i, \forall j, \forall k) \quad (12)$$

目的関数である (6) 式は入札値の合計である総納期遅れ、遊休時間の合計と製造時間の差分の線形加重和の最小化を目的とし、総納期遅れ最小化を目指すとともに運用段階での生産効率向上に向け稼働装置台数最小化、期ごとの装置稼働率平準化を目指す。ここで顧客ニーズの反映に用いる α_i 、装置稼働率に関する IT_{m_p} 、および装置稼働率に関する Δd_{te} については後述する。(12) 式で示した $x_{i,j,k}$ はオーダー i 、作業 j 、入札 k が勝者となれば 1、敗者となれば 0 となる決定変数である。(7) 式は勝者となる入札に関する制約であり、各入札者が作成した入札のうち勝者となるのは一つであることを表している。(8) 式は標準装置、3D プリンタの専有制約、(9) 式は組立機械の専有制約であり、同じ時間に一つの装置を使用できる入札は一つであることを表し、タイムスロット t においてオーダー i 、作業 j 、入札 k が装置を使用していれば $U_{i,j,k,t}$ または $UA_{i,j,k,t}$ の値が 1 となり、使用していなければ 0 となる。(10) 式は段取替えを考慮した制約であり、同一機械で異なる種類の部品を製造する際に作業 j の装置の段取替え時間 C_j を考慮し、つぎに製造する入札の製造開始時間を決定することを表す。(11) 式は製造・組立の先行関係制約であり、組立が開始するのは必ずオーダー内のすべての部品の製造が終了した後であることを表す。本論文では、勝者決定問題の求解に IBM ILOG CPLEX[20] を用いる。

3.4.1 追加料金による製造の優先

(6) 式で示す目的関数中の納期遅れへの重み係数 α_i はオーダー i の追加料金 AP_i に従って値が変化し、Fig. 3 に示すように高い追加料金を支払った顧客の α_i を大きく

Fig. 3 Relationship between weight factor and price

する。そうすることにより、高い追加料金を支払った顧客のオーダーに納期遅れが発生すれば目的関数値が大きく増加するようになり、総納期遅れを最小化することで追加料金による製造の優先が可能となる。

3.4.2 稼働装置台数調整に関する定式化

(6) 式で示す目的関数中の IT_{m_p} は以下の (13) 式によって求める。 IT_{m_p} は 3D プリンタ m_p の遊休時間であり、メイクスパンから 3D プリンタ m_p で製造するジョブの製造時間の合計を引いたものである。 UM_{i,j,k,m_p} はオーダー i 、作業 j 、入札 k が 3D プリンタ m_p で製造されるならば 1、製造されなければ 0 となる変数である。本論文では製造時間が長く納期遅れ発生のおもな要因である 3D プリンタを稼働台数調整の対象とする。

$$IT_{m_p} = \max_{\forall i, \forall k} \{ (PS_{i,j,k} + MT_{i,j,MN_{i,j,k}}) \times x_{i,j,k} \} - \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (MT_{i,j,m_p} \times x_{i,j,k} \times UM_{i,j,k,m_p}) \quad (j \in \text{tailor}) \quad (13)$$

$$UM_{i,j,k,m_p} = \begin{cases} 1 & (\text{if } m_p = MN_{i,j,k}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

またオーダー数（需要）に合わせて稼働装置台数を最小限に抑えた生産スケジュールを立案するため、以下の (14) 式も用いる。 $x_{i,j,k} \times UM_{i,j,k,m_p}$ は 3D プリンタ m_p で製造を行うオーダーの個数を表し、 δ を IT_{m_p} に比べても大きな定数とする。3D プリンタ m_p で製造が行われない場合は $IT_{m_p} = 0$ となり、3D プリンタ m_p の遊休時間が無視できるようになる。そうすることで、稼働装置台数が減少すれば目的関数値も減少するため稼働装置台数を最小限に抑えたスケジュールの立案が可能となる。

$$IT_{m_p} = \min \{ IT_{m_p}, \delta \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (x_{i,j,k} \times UM_{i,j,k,m_p}) \} \quad (j \in \text{tailor}) \quad (14)$$

3.4.3 期稼働率平準化に関する定式化

(6) 式で示す目的関数中の Δd_{te} は以下の (15) 式に従って求める。 Δd_{te} は期 te の製造時間の差分であり、期 te に製造開始するオーダーの製造時間の合計から平均製造時間を引いたものである。期とは生産スケジュールを複数

のタイムスロットごとに区切ったものとする。 $T_{i,j,k,te}$ はオーダー i , 作業 j , 入札 k が期 te に製造開始するならば 1, 開始しなければ 0 となる変数であり, OR_{ave} は平均稼働率で (16) 式によって求める。各期の製造時間の差分 Δd_{te} を最小化することで期ごとの装置稼働率を平準化し, 運用段階において追加オーダーがいつ到着したとしても対応できるよう各期に一定の遊休時間を確保する。

$$\begin{aligned} \Delta d_{te} = \max\{0, \\ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (MT_{i,j,MN_{i,j,k}} \times x_{i,j,k} \times T_{i,j,k,te}) \\ - (TS_{term} \times TE) \times OR_{ave}\} \quad (15) \\ T_{i,j,k,te} = \begin{cases} 1 & \text{(if } TS_{term} \times (te-1) \leq PS_{i,j,k} \\ & \wedge PS_{i,j,k} < TS_{term} \times te) \\ 0 & \text{(otherwise)} \end{cases} \\ OR_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (MT_{i,j,MN_{i,j,k}} \times x_{i,j,k})}{TS_{term} \times TE \times M} \quad (16) \end{aligned}$$

4. 計算機実験および考察

提案手法の有効性を検討するため, 計算機実験を実施し, 結果についての考察を述べる。

4.1 評価基準

計算機実験の結果を評価する基準は以下の通りである。

- DD : 総納期遅れ [TS]
- IT : 遊休時間の合計 [TS]
- Δd : 製造時間の差分 [TS]
- DN : 納期遅れが発生しているオーダー数 [item]
- DN_{AP} : 納期遅れが発生している追加料金ありのオーダー数 [item]
- MN : 稼働装置台数 [machine]
- CT : 計算時間 [sec]
- OR : 全体の装置稼働率 [%]
- OR_{te} : 期 te の装置稼働率 [%]

4.2 条件

本対象では, 標準部品ならびにテーラ部品があり, 標準部品は, インナー, ミッド, アウターそれぞれ 3 種類, テーラ部品の製造は, インナー, ミッド, アウター, インナー・ミッド一体型, ミッド・アウター一体型, インナー・アウター一体型ならびにインナー・ミッド・アウター一体型の計 7 種類から選択する。

共通の実験条件は, 以下の通りとする。

- ソール部分の種類: 3 (インナー, ミッド, アウター)
- 標準装置台数: 3[台] (インナー, ミッド, アウター用が各 1 台)
- 3D プリント台数: 5[台] (高性能プリンタ: 2[台], 標準性能プリンタ: 3[台])
- 高性能プリンタ装置番号 m_p : 1, 2
- 標準性能プリンタ装置番号 m_p : 3, 4, 5
- 組立装置台数: 1[台]

- オーダーの到着時間 RT_i : 0[TS]
- オーダーの納期 DP_i : 25, 50, 75, 100, 125, 150[TS]
- 標準部品製造時間 $MT_{i,standard,m_s}$: 1[TS]
- テーラ部品製造時間 (標準性能) $MT_{i,tailor,m_p}$: 10, 15, 20[TS]
- テーラ部品製造時間 (高性能) $MT_{i,tailor,m_p}$: 8, 12, 16[TS]
- 組立時間 AT_i : 1[TS]
- 標準装置段取替え時間 Co : 3[TS]
- 3D プリント段取替え時間 CoT : 4[TS]
- 期数 TE : 3[期]
- 1 期あたりのタイムスロット数 TS_{term} : 50[TS]
- 近傍操作における閾値 (量) $loop$: 0.9
- 近傍操作における閾値 (方向) $direct$: 0.5
- 稼働装置台数調整における重み係数 δ : 1000000
- 1 入札者あたりの入札数 K : 10
- オークション繰り返し回数: 200
- 試行回数: 50

オーダーにはインナー, ミッド, アウターそれぞれの部品の品種, 納期, 追加料金の情報を含む。オーダーはすべて 0[TS] に到着し, 各オーダーの納期は 25, 50, 75, 100, 125, 150[TS] からランダムに設定した。本実験では 1~50[TS] を 1 期, 51~100[TS] を 2 期, 101~150[TS] を 3 期とする 150[TS] までの生産スケジュールを立案した。

4.3 価格を考慮した顧客ニーズへの対応評価

追加料金を支払った顧客に対する製造の優先度を評価するために, 追加料金額と優先度の関係について評価する。オーダー数を 70 としたオーダーセットに対し, α_i による重みづけを行う提案手法 (Pro.) と α_i による重みづけを行わない比較手法 (Com.) を用いて計算機実験を行った。顧客が支払う追加料金 AP_i は 0, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 円のいずれかの金額とした。各追加料金のオーダー数は, 0 円の場合 15 オーダー, 1000~5000 円の場合それぞれ 11 オーダーとした。提案手法において, (6) 式で示す目的関数中の納期遅れへの重み係数 α_i は, 以下の (17) 式に従って決定する。

$$\alpha_i = \begin{cases} 10^{AP_i/1000} & \text{(if } AP_i > 0) \\ 1 & \text{(otherwise)} \end{cases} \quad (17)$$

提案手法ならびに比較手法における総納期遅れ DD , 納期遅れが発生したオーダー数 DN ならびに追加料金を支払ったオーダー数 DN_{AP} , 計算時間 CT を Table 1 に, 追加料金ごとの納期遅れ発生数を Table 2 に示す。Table 1 より, 今回のオーダーセットでは追加料金を支払った場合でも納期遅れが発生したが, 提案手法の DN_{AP} の値は 44.4% 減少したことから, 追加料金を支払ったオーダーを優先できることが示された。また Table 2 より, 追加料金が安い $AP_i = 0, 1000, 2000$ のときに納期遅れが発生したのに対し, $AP_i = 3000$ では納期遅れが発生しなかつ

Table 1 Results acquired using proposed method with additional fees

	Pro.		Com.	
	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
$DD[TS]$	302.6	61.1	149.4	19.9
$DN[item]$	13.4	1.3	11.2	1.4
$DN_{AP}[item]$	4.0	1.3	7.2	1.1
$CT[sec]$	112.65	6.48	88.20	1.48

Table 2 Number of delayed orders by each additional price

	Pro.		Com.	
	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
0[yen]	9.5	0.9	4.0	1.0
1000[yen]	3.3	1.3	1.1	0.7
2000[yen]	0.7	0.7	1.7	1.0
3000[yen]	0.0	0.0	1.2	0.8
4000[yen]	0.0	0.0	1.2	0.7
5000[yen]	0.0	0.0	2.1	0.8
total (DN)	13.4	1.3	11.2	1.4

Table 3 Weighting factor of each method

	α	β	γ
Pro.(a)	1000000	1000	1
Pro.(b)	1000000	1	1000
Com	1	0	0

た。これらの結果より、提案手法の α_i の値を金額に比例して設定することで金額によるオーダーの優先が可能なのが確認できた。一方、Table 1 に示した DD ならびに DN の値は追加料金による優先を行っているため提案手法の方が比較手法よりも増加した。これは追加料金を多く支払ったオーダーを優先するために追加料金の少ないオーダーへの影響が大きくなったためと考えられる。計算時間に関しては提案手法の方が 27.7% 増加したが、これは追加料金に対して重みづけを行う処理が増えたためであると考えられる。

4.4 稼働装置台数・期稼働率調整に関する評価

稼働装置台数調整と期稼働率標準化を同時に考慮した提案手法の有効性を評価するために、重み係数の設定が異なる提案手法と目的関数を総納期遅れ最小化とした比較手法を用いた計算機実験を行った。オーダー数は 30 とし、設定した重み係数の値を Table 3 に示し、各手法の概要を以下に示す。なお本実験では目的関数 ((6) 式) 中の重み係数 α_i を α と固定値とし、追加料金による優先度の関係性はない。

- 提案手法 (a) : 優先順位を総納期遅れ最小化、稼働

Table 4 Results acquired using proposed method with different weighting factors

	Pro.(a)		Pro.(b)		Com.	
	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
$DD[TS]$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$IT[TS]$	65.2	6.0	223.4	6.2	414.1	20.5
$\Delta d[TS]$	102.1	3.2	3.0	0.0	43.8	9.6
$MN[ma.]$	3.9	0.3	4.0	0.0	5.0	0.0
$CT[sec]$	465.01	73.59	543.98	151.20	44.92	1.73
$OR[\%]$	39.61	1.11	39.26	0.51	39.53	0.47
$OR_1[\%]$	67.10	4.39	39.62	0.61	52.10	3.76
$OR_2[\%]$	51.72	5.27	39.30	0.63	43.22	4.67
$OR_3[\%]$	0.00	0.00	38.86	0.51	23.26	4.06

装置台数調整、期稼働率平準化とし、生産コストの削減やまとまった遊休状態の確保を目指し稼働装置台数を最小限に抑えた生産スケジュールを立案する。

- 提案手法 (b) : 優先順位を総納期遅れ最小化、期稼働率平準化、稼働装置台数調整とし、計画後のオーダーの追加などに対応することを目指し各期に一定の遊休時間を確保した生産スケジュールを立案する。
- 比較手法 : 総納期遅れ最小化のみを最優先した生産スケジュールを立案する。目的関数 ((6) 式) において稼働装置台数ならびに期稼働率に関する第 2 項、第 3 項の重み係数 β , γ を 0 とすることで総納期遅れのみを考慮した手法とした。

Table 4 に各手法における各評価基準の値を示す。また提案手法 (a) ならびに (b) を用いたある一試行のガントチャートを Fig. 4 ならびに Fig. 5 に示す。

本節で使用したオーダー数においては、総納期遅れはどの手法も 0 であり差はなかった。それぞれの手法間の遊休時間の合計 IT と製造時間の差 Δd を比較すると、 IT の値は稼働装置台数調整を優先している提案手法 (a) が最も小さく、 Δd の値は期稼働率平準化を優先している提案手法 (b) が最も小さくなった。総納期遅れのみを優先した比較手法では、稼働装置台数も稼働率も考慮しないため、装置稼働台数 MN は条件として与えた 5 台を常に使用し、納期遅れはなかったものの提案手法 (a) で考慮している IT が大きくなったと考えられる。また期ごとの稼働率を考慮しておらず可能な限り早く製造しようとするため、提案手法 (b) で考慮している Δd も大きくなったと考えられる。これらの結果より、総納期遅れ最小化のみを考慮した比較手法に対し、各提案手法は考慮した装置稼働台数ならびに期稼働率を考慮したスケジュールの立案に有用であると考えられる。

Fig. 4 ならびに Fig. 5 において、提案手法 (a) のガントチャートでは、遊休状態となっている 3D プリンタ 5 を除き、前詰めスケジュールになっていることがわかる。これは少ない装置台数でできる限り多くのジョブを処理するためのスケジュールを立案したことによると考

Fig. 4 Gantt chart of Pro.(a)

Fig. 5 Gantt chart of Pro.(b)

えられる。これ以上オーダが増えた場合、遊休状態の装置を稼働させることで、各装置の遊休時間を抑えるためのスケジュールが立案できると考えられる。一方、提案手法 (b) のガントチャートを見ると 3D プリンタ 3 が遊休状態となっているとともに、期稼働率平準化を行ったためジョブがばらけたスケジュールとなっており、各期に一定の遊休時間が確保できたことが確認できる。この場合、早い納期で追加されるような特急ジョブにも対応可能なスケジュールとなっていると考えられる。これらの結果から、提案手法 (a) が最も稼働装置台数を抑えた生産スケジュールを、提案手法 (b) が最も期稼働率を平準化した生産スケジュールを立案できたと考えられる。

以上より、各提案手法における重み係数の設定によって、 IT 、 Δd の値を最小化できており、重み係数が目的関数 ((6) 式) の各項の最小化優先に対して有効であることが確認できた。提案手法は、重み係数の調整により、目的を優先した生産スケジュールの立案が可能となり、複数の目的を考慮したスケジュールを立案できることが確認できた。

5. おわりに

本論文では、ランニングシューズのソール部分を対象としたマスカスタマイゼーションの実現に向け、組合せオークションを用い顧客ニーズならびに製造装置台数・稼働率を考慮可能な生産スケジューリング手法を提案し、計算機実験によりその有効性について検討した。提案手法で用いる目的関数に含まれる重み係数を調整することにより、追加料金を支払った顧客を優先すること、稼働製造装置台数を最小限に抑えること、装置稼働率を平準化すること、をそれぞれ実現するスケジュールの立案が可能であることがわかった。このことから提案手法は顧客ニーズ、製造装置の状態を考慮したスケジューリング手法であるといえる。

今後、より大規模なオーダが投入されたときの影響を

検討するとともに、提案手法で得られた稼働製造装置台数や稼働率を考慮して立案されたスケジュールに対し、特急オーダを含むオーダの追加を考慮した運用段階におけるスケジュール更新手法を提案しその効果を検討することにより、計画・運用段階の統合的生産スケジュール手法の立案を目指す。

謝 辞

本研究は、内閣府・戦略的イノベーション創造プログラムの支援を受け実施された。また多くのチーム関係者の方々のご協力にこの場を借りて深く感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] M. M. Tseng, S. J. Hu and Y. Wang: Mass customization; *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, pp. 836–843 (2014)
- [2] B. J. Pime II: Mass Customization: *The New Frontier in Business Competition*, Harvard Business School Press (1992)
- [3] リアクティブ3Dプリンタによるテーラーメイドラバー製品の設計生産と社会経済的な価値共創に関する研究開発; <http://www.innov.kobe-u.ac.jp/sip/index.html>
- [4] D. Kokuryo, T. Kaihara, S. S. Kuik, S. Suginochi and K. Hirai: Value co-creative manufacturing with IoT based smart factory for mass customization; *International Journal of Automation Technology*, Vol. 11, No. 3, pp. 509–518 (2017)
- [5] 興田, 江口, 村山: 能力調整を考慮したジョブショップスケジューリング (GA と優先規則の融合による効率的探索法); 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 79, No. 807, pp. 423–433 (2013)
- [6] J. Tang, C. Zeng and Z. Pan: Auction-based cooperation mechanism to parts scheduling for flexible job shop with inter-cells; *Applied Soft Computing*, Vol. 49, pp. 590–602 (2016)
- [7] C. Wolosewicz, S. Dauzere-Peres and R. Aggoune: A

Lagrangian heuristic for an integrated lot-sizing and fixed scheduling problem; *European Journal of Operational Research*, Vol. 244, No. 1, pp. 3–12 (2015)

- [8] M. Rohaninejad, A. Kheirkhah and P. Fattahi: Simultaneous lot-sizing and scheduling in flexible job shop problems; *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 78, No. 1-4, pp. 1–18 (2015)
- [9] M. K. Marichelvam, T. Prabakaran and X. S. Yang: Improved cuckoo search algorithm for hybrid flow shop scheduling problems to minimize makespan; *Applied Soft Computing*, Vol. 19, pp. 93–101 (2014)
- [10] S. Dong and D. J. Medeiros: Minimising schedule cost via simulation optimisation: an application in pipe manufacturing; *International Journal of Production Research*, Vol. 50, No. 3, pp. 831–841 (2012)
- [11] 指尾, 貝原, 藤井, 梅田: 生産コストに基づいた意思決定支援システムの一提案—適性ロットサイズの決定問題への適用—; 精密工学会誌, Vol. 73, No. 7, pp. 840–845 (2007)
- [12] K. T. Fang and B. M. T. Lin: Parallel-machine scheduling to minimize tardiness penalty and power cost; *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 64, No. 1, pp. 224–234 (2013)
- [13] Y. Demir and S. K. Isleyen: An effective genetic algorithm for flexible job-shop scheduling with overlapping in operations; *International Journal of Production Research*, Vol. 52, No. 13, pp. 3905–3921 (2014)
- [14] X. Lin and L. Gao: An effective hybrid genetic algorithm and tabu search for flexible job shop scheduling problem; *International Journal of Production Economics*, Vol. 174, pp. 93–110 (2016)
- [15] 田ノ畑, 貝原, 藤井: 搬送を考慮した分散協調型生産スケジューリング手法に関する研究; 計測自動制御学会論文誌, Vol. 49, No. 8, pp. 802–807 (2013)
- [16] 貝原, 藤井, 西林, 藤井, 梅田: ロット編成問題を有するフレキシブル・フローショップを対象とした分散協調型スケジューリング手法の一提案; 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 768, pp. 2127–2134 (2010)
- [17] S. de Vries and R. V. Vohra: Combinatorial auctions: A survey.; *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 15, No. 3, pp. 284–309 (2003)
- [18] 銭, 藤井, 貝原, 藤井, 梅田: 社会的交渉手法を用いた実仮想融合型生産スケジューリング—計画段階における組合せオークション手法の適用—; 計測自動制御学会論文誌, Vol. 47, No. 11, pp. 549–556 (2011)
- [19] 杉之内, 貝原, 藤井, 國領: 組合せオークションとフェロモンを用いた顧客と企業の交渉・協調による日程計画および部品選定の同時最適化手法に関する研究; システム制御情報学会論文誌, Vol. 31, No. 2, pp. 49–57 (2018)
- [20] IBM ILOG CPLEX. IBM Web page.
<http://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer>

著者略歴

こく しょう だい すけ
國 領 大 介 (正会員)

2007年9月神戸大学大学院自然科学研究科博士課程後期課程修了。2006年4月日本学術振興会特別研究員(DC2), 2007年10月同特別研究員(PD)。2008年4月放射線医学総合研究所博士研究員, 2011年4月同研究所研究員, 2015年1月神戸大学大学院システム情報学研究科特命助教を経て, 2018年4月より同助教となり現在に至る。医用システム・生産システムに関する研究に従事。博士(工学)。ISMRR, 日本磁気共鳴医学会, 日本コンピュータ外科学会などの会員。

かい ほう とし や
貝 原 俊 也 (正会員)

1985年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。三菱電機(株), 神戸大学大学院自然科学研究科助教授, 神戸大学大学院工学研究科教授などを経て2010年4月より神戸大学大学院システム情報学研究科教授となり現在に至る。社会指向型マルチエージェントによるシステム最適化理論と, その生産・サービス・社会システムなどへの応用に関する研究に従事。Ph.D.(Imperial College London)。日本機械学会, 日本OR学会, 計測自動制御学会, 電気学会, スケジューリング学会, CIRP, IFIP, IEEEなどの会員。

ふじ い のぶ たい
藤 井 信 恵 (正会員)

1973年生。1998年3月神戸大学大学院自然科学研究科機械工学専攻博士前期課程修了。1998年4月日本学術振興会特別研究員(DC1, 神戸大学大学院自然科学研究科生産科学専攻), 2000年10月神戸大学工学部助手, 2002年5月東京大学人工物工学研究センター助手, 2005年12月同客員助教授を経て, 2007年10月神戸大学大学院工学研究科情報知能学専攻准教授(2010年4月より同システム情報学研究科システム科学専攻准教授)となり現在に至る。自律分散型生産システム, 複雑ネットワーク, サービス工学など, 人工システムにおける価値創成に関する研究に従事。博士(工学)。精密工学会, 日本機械学会, 人工知能学会などの会員。

ひら い こう だい
平 井 康 大

2016年3月神戸大学工学部情報知能工学科卒業, 2018年3月神戸大学大学院システム情報学研究科修了。同年, 株式会社野村総合研究所入社, 現在に至る。在学中はマスカスタマイゼーションを考慮した生産スケジューリングの最適化に関する研究に従事。