



マスクスタマイゼーション実現のための主体間の交渉・協調による生産スケジューリング手法に関する研究

杉之内, 将大

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2018-03-25

(Date of Publication)

2019-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7201号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007201>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

マスカスタマイゼーション実現のための
主体間の交渉・協調による
生産スケジューリング手法に関する研究

平成30年1月

神戸大学大学院システム情報学研究科

杉之内 将大

目次

1	緒論	1
1.1	研究背景	1
1.1.1	マスカスタマイゼーション	1
1.1.2	顧客を取り込んだ製造	2
1.1.3	自律分散型生産システム	3
1.1.4	製造に関わる要素間での情報共有に着目した生産システム	5
1.1.5	スマートファクトリ	7
1.2	研究目的	7
1.3	対象とするサプライチェーン	7
1.4	本論文の構成	8
2	対象モデル及び提案手法	11
2.1	緒言	11
2.2	組合せオークション	11
2.3	組合せオークションを用いた近似解法	13
2.3.1	組合せオークションによる近似解法	13
2.3.2	主体間の交渉を模した計画立案手法	14
2.3.3	入札作成	15
2.4	フェロモンを導入した組合せオークションによる主体間の交渉・協調を模した近似解法	15
2.4.1	Ant Colony Optimization	15
2.4.2	組合せオークションを用いた近似解法へのフェロモンの導入	17
2.5	結言	18
3	企業間交渉による受発注計画の立案手法及び交渉過程での情報共有の有効性	19
3.1	緒言	19
3.2	対象のサプライチェーン	20
3.2.1	オーダー	23
3.2.2	製品	25
3.2.3	企業	26
3.2.4	企業が保持する情報	26
3.2.5	情報共有の有効性	27

3.3	企業間交渉による受発注計画の立案手法	27
3.3.1	入札	28
3.3.2	勝者決定問題	35
3.4	計算機実験	35
3.4.1	評価基準	36
3.4.2	実験条件	36
3.4.3	ナップサック問題としての定式化	37
3.4.4	実験1 提案手法の性能評価	38
3.4.5	実験2 情報共有の有効性の評価	45
3.5	結言	49
4	顧客間の交渉・協調による日程計画及び部品選定のスケジューリング手法	51
4.1	緒言	51
4.2	対象モデル	51
4.2.1	記号の定義	51
4.2.2	製造工程	54
4.2.3	顧客の満足度	54
4.3	顧客間の交渉を模した部品選定と日程計画の立案手法	54
4.3.1	入札	55
4.3.2	勝者決定問題	62
4.4	計算機実験	63
4.4.1	共通の実験条件	64
4.4.2	比較手法	64
4.4.3	実験1 提案手法の有効性	66
4.4.4	実験2 敗者となった入札を記憶することの有効性	76
4.5	結言	77
5	顧客の意見を取り入れた部品の仕様決定手法	79
5.1	緒言	79
5.2	計画対象	79
5.3	量産部品の仕様決定	81
5.4	計算機実験	82
5.4.1	評価指標	82
5.4.2	比較手法	82
5.4.3	実験条件	84
5.4.4	実験結果	87

5.5 結言	93
6 結論と今後の展望	95
6.1 結論	95
6.2 今後の展望	97
参考文献	99
研究業績	104
謝辞	107

目次

1.1	A schema of Modularization	2
1.2	An overview of target model	8
1.3	A relationship among chapters	10
2.1	Flowchart of the scheduling method with netotiation by Combinatorial Auction and cooperation by pheromone	17
3.1	An overview of targeted supply chain	21
3.2	An Example of BOM	25
3.3	Process of making a first bid	32
3.4	A transition of the value of the objective function when K is 10	42
3.5	A transition of the value of the objective function when K is 100	42
3.6	The effects of sharing information on a transition of OF	49
4.1	A schema of production flow	53
4.2	An overview of negotiation and cooperation among customers	55
4.3	Flowchart of making a bid with pheromone	58
4.4	Distribution of Spec pheromone with Pheromone diffusion ($\rho=0.5$)	70
4.5	Distribution of Spec pheromone without Pheromone diffusion ($\rho=0.5$)	71
4.6	Distribution of Spec pheromone with Pheromone diffusion ($\rho=1.0$)	71
4.7	Distribution of Spec pheromone without Pheromone diffusion ($\rho=1.0$)	72
4.8	Probability Distribution with Pheromone diffusion ($\rho=0.5$)	72
4.9	Probability Distribution without Pheromone diffusion ($\rho=0.5$)	73
4.10	Probability Distribution with Pheromone diffusion ($\rho=1.0$)	73
4.11	Probability Distribution without Pheromone diffusion ($\rho=1.0$)	74
5.1	Relationship between chapter 4 and 5	80
5.2	Flowchart of planning horizon	81
5.3	A Distribution of Spec Pheromone when σ^2 is 1	89
5.4	A Distribution of Spec Pheromone when σ^2 is 3	89

表 目 次

3.1	An Example of orders	24
3.2	An Example of Inventory List	25
3.3	Correlation coefficients of Datasets	36
3.4	Experimental Conditions	39
3.5	Results with Exact Solution	40
3.6	p -value between K and K'	40
3.7	Results of Experiments stopped at a predetermined time	43
3.8	Experimental Conditions (Common)	44
3.9	Experimental Conditions (Differs with Condition)	44
3.10	Effectiveness of Information Sharing (Dataset 2)	46
3.11	Effectiveness of Information Sharing (Dataset 3)	47
3.12	p -values between two groups	48
3.13	Exact solutions	48
4.1	Processing time and specification	67
4.2	Datasets (Experiment 1-1)	67
4.3	Results of Experiment without pheromone diffusion	68
4.4	Results of Experiment with pheromone diffusion	69
4.5	Experimental Conditions (Experiment 1-2)	74
4.6	Experimental Results with Competitive method	75
4.7	Experimental Conditions	76
4.8	Distribution of customer's needs	76
4.9	Experimental Results for difference of Unit Loser-pheromone $\Delta\tau_{loser}$	77
5.1	Distribution of customer's needs	85
5.2	Relationship between weight $MP_{p,t,3}$ and processing time $pt_{i,j,k}$	85
5.3	Experimental Conditions (Common)	86
5.4	Experimental Conditions	86
5.5	Experimental Results with Competitive method	88
5.6	Calculation time[s]	90
5.7	Objective Function value OF_{term} with changing $\Delta\tau_{loser}$	91
5.8	Satisfaction value OF_{term} with changing $\Delta\tau_{loser}$	92

第 1 章 緒論

1.1 研究背景

1.1.1 マスカスタマイゼーション

消費者のニーズは多様化しており、近年は大量生産された画一的な製品・サービスを提供するのではなく、顧客一人一人のニーズに適した製品・サービスを提供することが求められている。製造業の企業が多様な顧客のニーズに素早く対応するための方法として、マスカスタマイゼーション (Mass-Customization) [1, 2] に注目が集まっている。マスカスタマイゼーションでは、低コスト・高効率の製造と顧客一人一人のニーズに適した製品・サービスの提供の両立を目指す [3]。

マスカスタマイゼーションの実現方法の1つに製品を構成する部品のモジュール化による方法がある。Fig. 1.1に概念図を示す。製品は標準化されたモジュールの組合せで構成され、各モジュールは特徴が異なる複数のバリエーションを持つ。モジュールの組合せによる多様なバリエーションの実現と、量産部品である各モジュールの大量生産による生産の低コスト化・高効率化がモジュール化の利点である。各モジュールが量産部品であることから、規模の経済性が働き低コストでの製造が可能となるだけでなく、モジュールごとに標準化することで1モジュール内での複数の量産部品において加工に必要な設備の共有が可能となり、範囲の経済性が働くことで1モジュールあたりの量産部品のバリエーションの増加に対する製造コストの増加を抑えることが出来る [4]。

1つの製品を構成する複数のモジュールを同じ時間に並行して加工し完成後に組み立てることが可能であるためモジュール化はリードタイムの短縮に繋がる [5]。また、モジュール化された部品の機能がそのモジュール内で完結しているならば、あるモジュールについて仕様を変更する際に残りの部品は既存の部品を使用したままそのモジュールのみ新部品と交換することが出来るため、製品のライフサイクル及び新たな製品の開発にかかる時間は従来よりも短縮する。同様に製品の故障などに対しても、機能がモジュール内で完結しているためモジュールごとに検査を行うことが可能となる。短い製品ライフサイクルと短い製品開発期間はマスカスタマイゼーションの特徴の1つであるとされている [3, 6]。

マスカスタマイゼーションの適用例としては、Harley-Davidson社によるバイク [7]、Dell社によるパソコン [8]、トヨタ自動車社によるi-ROADと呼ばれる小型EV車両 [9]、自動車部品 [10]、インクジェットプリンタ [11] などがある。また、トヨタ自動車社による例ではフロント部のパーツやドリンクホルダなど一部のパーツは、量産部品ではなく3Dプリンタで造形された一点ものの部品とすることが可能であり、顧客が部品カラーや

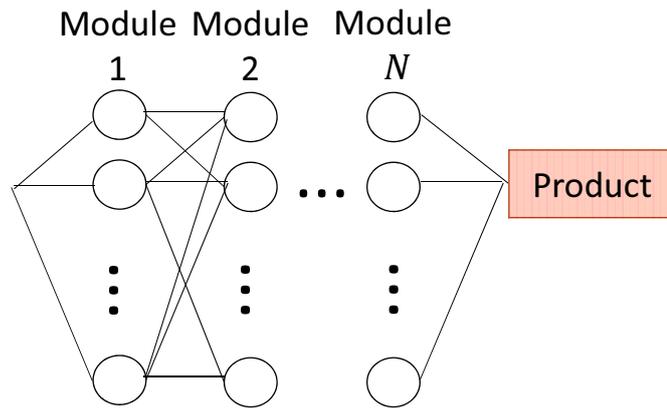


Fig. 1.1: A schema of Modularization

テクスチャを選択するコンセプトが提案されている [9].

1.1.2 顧客を取り込んだ製造

価値の生産者と消費者は不可分であることから [12], マスカスタマイゼーションの実現のためには顧客を製造に取り込むことが必要不可欠であるとされている [6]. これまで製品やサービスなどの価値の消費者であった顧客が, 価値の消費者かつ生産者となることが求められる. マスカスタマイゼーションにおける顧客による価値の生産の例として, 顧客が自身のニーズに基づき量産部品として準備された複数のバリエーションの中から各モジュールを選択し製品の構成を決定し, 量産部品の仕様を設計することが挙げられる. それにより企業が製品構成の決定や部品設計を行う場合よりも, 製品や量産部品より顧客一人一人のニーズに適した顧客を価値の生産者とするために, 製造に取り込み顧客に自身のニーズを表現させるための枠組みの提案が求められている. 例えば Dell 社のパソコンの注文 [8] はモジュール化及び顧客が自身のニーズを表現するための枠組みの典型例であり, 顧客自身がハードディスクの容量やメモリなどの各モジュールを企業が準備したバリエーションの中からそれぞれ選択し, ニーズに適した製品を顧客自身が構成する.

実際に製品を使用する顧客を考慮した製品開発の重要性は, マスカスタマイゼーションに限らず全ての製造業を対象とし指摘されている [13]. Menguc らはハイテク産業の企業を対象にアンケート調査に基づいて製品開発に顧客を巻き込むことを検討し, 製品に対する知識を持つリードユーザを巻き込むことの有効性を示唆した [14].

顧客がどのような製品・サービスを求めているか, あるいはトレードオフ関係にある製品・サービスの持つ複数の属性について顧客の求める組合せの特徴を得るための方法としてコンジョイント分析 (Conjoint Analysis) [15] がある. コンジョイント分析は, アンケートにより得た顧客の製品・サービスの要素の選好順序を用いて製品・サービ

スを構成する属性の効用値を測定する手法である [16]. モジュール化された製品に対してコンジョイント分析を用いて量産部品の仕様を決定することを提案した論文として Tseng らによるものがある [6]. Tseng らは, 顧客の回答から動的に顧客に提示する組合せを決定する Adaptive Conjoint Analysis を用いることで顧客を量産製品の仕様決定に巻き込む方法を提案し, その有効性を評価した [6]. 先行研究では製造拠点での生産能力は実験条件として与えられるものとし実際に製造を行うことについては十分に考慮していなかった.

先行研究 [6, 13, 14] から製品の仕様決定については顧客を製造に取り込むことの有効性が示されており, 日程計画など実際の製造についても同様に顧客を製造に取り込み顧客と共に製造に関わる計画を立案することで, 顧客と企業の両者にとってより良い製造及び製品を提供することが出来ると考えられる. そこで本研究では顧客を製造に取り込んだ製造に関わる計画の立案手法を提案する.

1.1.3 自律分散型生産システム

生産に関わる計画を製造拠点が製造拠点の基準のみに従い立案する場合は, 生産システム全体を製造拠点が管理・処理する集中型システムとして捉えることが可能である. しかし顧客を製造に取り込むことを考えた場合は, 製造拠点と複数存在する顧客それぞれの立場を考慮することが求められる. そこで, 製造拠点やそれぞれの顧客をサブシステムと捉えることで生産システムに自律分散システムの概念を適用することが考えられる. 集中型システムと自律分散システムについて述べ, 自律分散型生産システムの一形態であるホロニック生産システムと生物指向型システムについて述べる.

集中型システム

従来は, システム全体を1台のコンピュータで処理する集中型システムが主流であった. 集中型システムでは, 1台のコンピュータがシステム全体を処理するためシステム全体の管理が容易であり, システムの部分間での相互作用・協調にかかるコストを考慮する必要がないという利点がある. システムが大規模化・複雑化するとシステムの部分的な故障の頻度が増えるが, 集中型システムではシステム全体を1台のコンピュータで処理するため, 部分的なシステムの故障への対応や, システムの拡張・縮小を行なう際にシステム全体を停止する必要があるという欠点がある. システム全体を停止することなくシステムの部分的な故障・拡張・縮小へ対応することが求められる一方で, 集中型システムでそれを実現することは困難であるとされている [17].

自律分散システム

システム全体を1台のコンピュータで処理する集中型システムに対し、それぞれが目的と機能を持った複数のサブシステムからなる自律分散システムが提案された[17]. 自律分散システムは、他のサブシステムの状態に依らず各サブシステムは自身の目的を達成することが出来（自律可制御性）、全体の中に稼働しないサブシステムが存在しても残りのサブシステム間で協調するが出来る（自律可協調性）システムであると定義されている[17]. そのため自律分散システムはシステムの拡張や故障に全体の機能を停止することなく対応することが出来るという特徴を持っており、環境の変化への適応に着目した概念であると言える。

自律分散システムはそれぞれが独立した複数のサブシステムから構成されるため、各サブシステムの挙動からシステム全体の挙動を把握することは困難である。システムの挙動を全て把握することは困難とされる一方でシステム全体に形成される大域的秩序について考慮することの重要性が示唆されており、個々のサブシステムの挙動に着目した高次元のシステムではなくシステム全体としての挙動に着目した低次元のシステムとして捉えることが有効であるとされている[18]. 自律分散型の生産システムにおいて、形成される大域的な秩序に着目した概念としてホロニック生産システム[19]や生物指向型生産システム[20]が提案されている。

ホロニック生産システム

ホロニック生産システム[19, 21]は、我々が観測出来る全ての事象はあるシステムの1要素であるという特質とそれ自体がシステムであるという性質の両方を備えているというホロン[22]の考え方に基づく。自律分散システムと比較すると、ホロニック生産システムはシステム間のヒエラルキー構造により着目した概念である。集中型の生産システムの場合、特急ジョブの追加や機械故障が発生に対応するために再スケジューリングを行う際に負荷が1台のコンピュータに集中する。自律分散システム及びホロニック生産システムにより、負荷を分散し短時間での再スケジューリングやリアルタイムでの計画立案を行うための手法に関する研究が行われている[23, 24, 25].

生物指向型生産システム

生物指向型生産システム[20]は、生産に関わる工作物、工具、人間など全ての要素を自律した生物に模す。工作物は遺伝子型の自己情報を発現して、素材から部品、製品へと成長する。人工物製品は、動的な環境の変化への適応しながら他の人工物と協調しながら自らの機能を発揮する。生産のみでなく製品の計画から廃棄までの全ライフサイクルを対象としているという特徴がある[20].

生物指向型生産システムは、生産システムを創発システムとして捉え、進化・学習、

自己組織化などの創発的手法を用いることで、適応的生産の実現を目指す[26]。創発とは、部分の発現の結果として複雑な全体構造が現れ、現れた全体構造が部分の環境となるという特徴を指す[20]。創発システムは、個が全体の秩序を形成するというボトムアップ作用と、形成された秩序が個に作用するというトップダウン作用の双方向関係がある点と、時間と共に新規の構造や機能が生成される点が自律分散システムと異なる[27]。

主体間の交渉・協調によるスケジューリング手法

本研究では、生産に関わる企業、顧客などの主体を生産スケジュール立案のための自律分散型生産システムの構成要素として捉え、主体間の交渉・協調によるスケジューリング手法を提案する。

1.1.4 製造に関わる要素間での情報共有に着目した生産システム

企業・顧客などの生産に関わる主体からなる自律分散型生産システムにおいては、システムの構成要素である企業・顧客の効率的な情報共有・協調が必要不可欠である。顧客の代理として振る舞う顧客エージェントと、製造に関わる企業の代理として振る舞う企業エージェントの連携・協調により生産に関わる計画を立案することで、顧客と企業の両者によってより良い製造・製品の提供が実現すると考えられる。

製造に関わる要素間での情報共有に着目した生産システムとして、いくつかの先行研究がある。その例と特徴は以下の通りである。

社会指向型生産システム

自律分散システムは環境の変化への適応に着目した概念であり、集中型システムと比較すると最適性は十分に考慮されていなかった。そこで、自律分散システムの概念に基づいた適応性だけでなく、最適性にも着目した生産システムとして社会指向型生産システムが提案された[28, 29]。社会指向型生産システムではシステム全体の最適化を目指し、それぞれ異なる目的を持つ複数のエージェントが交渉を行うことで、各サブシステムの個別最適化と、システムの全体最適化の両立を目指す。

Cyber-Physical Production Systems

Cyber-Physical Systems (CPS) は、実世界のプロセスの進行と同時にコンピュータ上でデータを収集・計算することでそれらの連携を行うことを目指した概念である[30]。これを生産システムに適応したものがCyber-Physical Production Systems (CPPS)であり、計算機科学、情報通信技術、生産科学、生産技術に基づきIndustrie 4.0[31]で提唱されているシステムの実現を目指す。計算機科学及び情報通信技術と生産システムの融合を

目指す CPPS の概念の根源に生物指向型生産システム及びホロニック生産システムがあるとされている [30].

Internet of Things (IoT)[32] は、ありとあらゆるモノをインターネットに接続し、モノ同士が協調による相互的な作用により共通の目的を達成することを目指す [33]. 近年の無線通信技術の発展が IoT のコンセプトの根源であり [33], IoT ではあらゆるモノをインターネットに接続するというコンセプト自体に着眼点を置いている. CPPS は現実世界とサイバー空間の連携に着目した概念であり, 実仮想融合型生産システムは需要変動・機械故障などへの対応するための方法としてサイバー空間上でのエージェント間の協調に着目している.

生産システムへの IoT の適用例の一つが, 製造拠点における生産のモニタリングである. ジョブの加工を行う生産設備の状態をセンサを用いて取得し生産設備そのものをインターネットに接続することで, 生産の状況をモニタリングすることが可能となる. IoT のコンセプトは, あらゆるモノがインターネットに接続され情報のやり取りを行うことでモノのデータ化やそれに基づく自動化が進展し, 新たな付加価値を生み出すこととされている [34]. 状況をモニタリングするのみでなく, 取得した情報を用いることで生産の自動化の推進を図る.

実仮想融合型生産システム

実仮想融合型生産システム (Real-Virtual Fusion Manufacturing System) は, 需要変動や機械故障のような不確定要素に対し効率的かつ素早く対応することを目指した生産システムである [35]. 実仮想融合型生産システムは, 現実の生産現場とコンピュータ上にモデル化された仮想の生産現場の融合により, 需要変動や特急ジョブなどの生産システム外部の環境変動と, 機械故障や部材納品の遅延などの生産システム内部の不確定要素の両者に対する効率性と頑健性を有する. マルチエージェントシステム概念を取り入れて現実の生産設備をエージェント化し, 環境の変動を検知しながら必要な時期に, 必要な範囲で結合し構造化することで現実の生産現場のモデルを動的に生成しエージェント間での協調により意思決定を行うことで需要変動や機械故障など生産システム内外の問題への対応を行う [25, 36].

Cloud-Based Manufacturing System

製品の製造を行う企業及びその企業が保持する製造リソースを互いに接続し, 製品を製造したい企業が必要に応じて分散する製造リソースにアクセスし製造を行うことを目指した概念である Cloud-Based Manufacturing (CBM) が提案され [37], CBM を実現するための仕組みとして Cloud-Based Manufacturing System (CBMS) [38] が提案された. 需要変動に対し他社が保持するリソースを用いて対応し, 生産能力に余剰が発生した

際は他社にリソースを提供することで稼働率低下を防ぐ。多品種少量生産の製品の生産設備の稼働率の向上により生産コストの大幅な削減が期待出来るとされている一方で、製造を他社に委託するためにかかるコストや製品の輸送にかかるコストが発生するため、CBMSの効果が期待できない業種もあるとされている[39]。勝村らは、受注生産型製品に対してCBMSを適用することの有効性を評価し生産性が向上することを確認し、その効果は参加企業数が増加するほど大きくなる傾向にあると主張した[39]。

1.1.5 スマートファクトリ

スマートファクトリは、製造拠点内のあらゆる要素を互いに接続し、全ての情報を取得することで製造拠点の活動を可視化することを目指した概念である[40]。スマートファクトリの構築を目指した概念としてドイツ政府が取り組むIndustrie 4.0[31]や、アメリカの企業が主導するIIC (Industrial Internet Consortium) [41]がある。Industrie 4.0ではCPPSの概念に基づき、IoTにより様々な要素をネットワークに接続し自律分散的にセンシング及び制御することでスマートファクトリの実現を目指した。一方で、IICではクラウドコンピューティング環境下に世界中に点在する製造に関わる全ての要素を取り込むことでスマートファクトリの実現を目指した[42]。

1.2 研究目的

本研究ではマスカスタマイゼーションの実現を目指し、製造に関わる計画の主体間での交渉・協調による生産スケジューリング手法を提案する。生産に関する計画の評価指標は、生産に関わる主体・立場により異なる。異なる目的を持つ主体間で交渉を行うことで、全ての主体の合意点となる計画を立案する。生産に関わる主体とは、サプライチェーンの構成企業や製品を発注した顧客を指す。マスカスタマイゼーションの実現のためには、顧客を製造に巻き込み、顧客の意見を取り入れることが必要不可欠であるとされている[6]。生産に関わる全ての主体にとって好ましい製品を製造・提供するための、スケジューリング手法を提案する。提案手法では、受発注計画や日程計画などの生産に関わる様々な計画を対象とし、実際に製品を製造する製造拠点のみでなくサプライチェーンを構成する他の企業や製品を発注した顧客との交渉によりスケジューリングを行う。

1.3 対象とするサプライチェーン

本論文で対象とするサプライチェーンを、Fig. 1.2に示す。

本論文では複数の販社と、販社を統括する営業本部、製造拠点、本社がそれぞれ1拠点ずつ存在するサプライチェーンを対象とする。販社は日本、北米、ヨーロッパなど

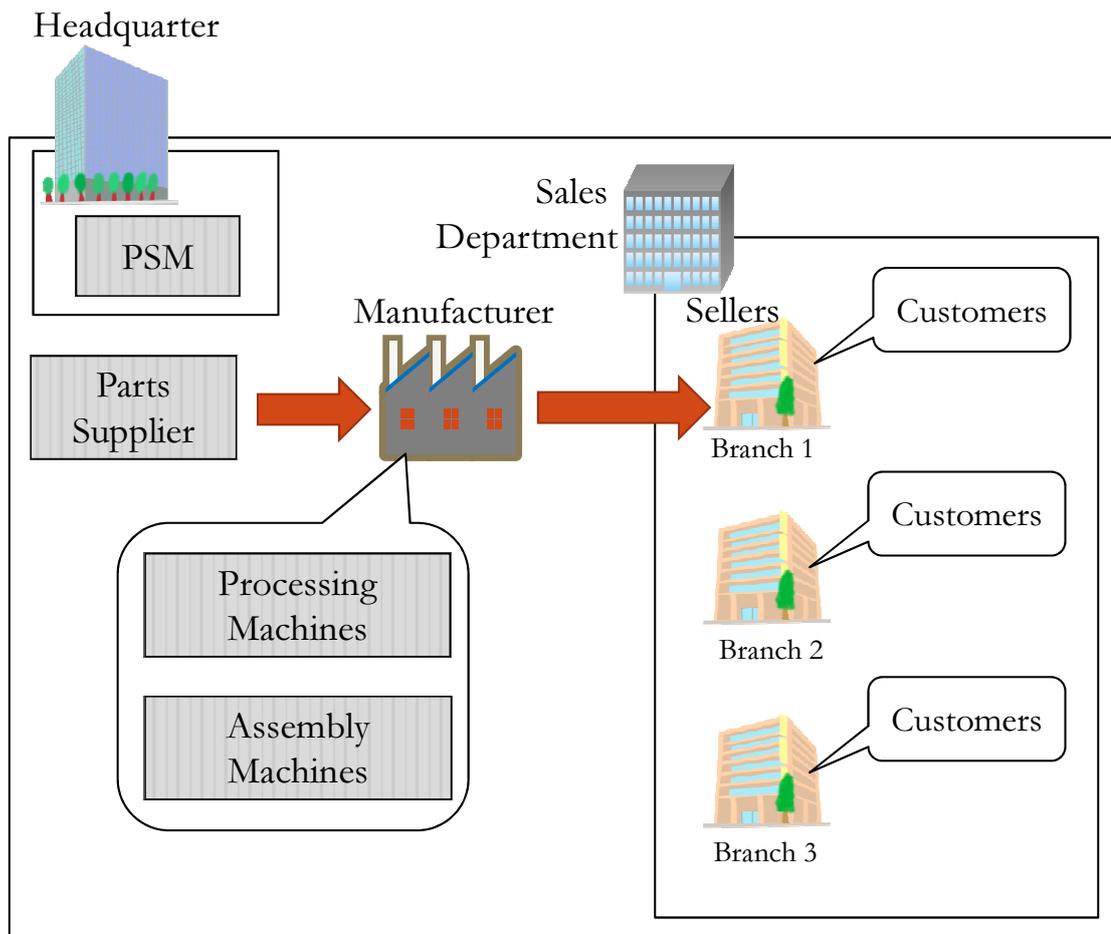


Fig. 1.2: An overview of target model

物理的に離れて存在しているものとする。製造拠点は、部品加工を行うための機械及び組み立てを行う機械を保有する。また、部品を他の企業である部品サプライヤに発注する場合もある。PSM (Procurement and Sales Management) は本社の中に存在する1部門であり、利益の最大化を目指し部材の調達及び生産の効率化を図る。

1.4 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第2章では、本論文で対象とする製造業の企業のモデル及び、提案する主体間の交渉を模した計画立案手法と、交渉の過程での主体間の協調手法について説明する。

第3章では、需要予測を越える発注があった場合における複数の企業の交渉による受発注計画問題を対象とし、主体間で情報共有を行うことの有効性について検討する。サプライチェーンを構成する企業の立場によって受発注計画の評価指標や保持する情報が異なる場合や、構成企業が保持する情報をサプライチェーンの他の企業に公開・

企業間で共有することが困難な場合がある。情報を公開することなく企業間で交渉を行い計画を立案するための手法を提案するとともに、評価指標及び保持する情報を企業間で公開・共有することの有効性について計算機実験により検討する。

第4章では、顧客間での交渉・協調に着目し、組合せオークションを用いた製造拠点での日程計画と部品選定を同時に立案する手法を提案する。Ant Colony Optimizationで用いられるフェロモンの考え方を導入し、組合せオークションを用いた交渉の過程で、各顧客がオークションにかけられた財にフェロモンを添加することで入札履歴を記憶しフェロモン分布を共有することで顧客間で協調を行う。フェロモンの特徴である蒸発・拡散に着目し計算機実験を行うことで提案手法の有効性を検討する。

第5章では、顧客のニーズを企業が読み取る手法を提案する。交渉過程でのフェロモン分布を用いて、顧客ニーズと生産効率の両方を考慮した量産部品の仕様を決定する。計算機実験により、フェロモン分布から顧客ニーズを推定することの有効性を評価する。

最後に第6章で本論文の結論及び今後の課題を述べる。

各章の関係を Fig. 1.3 に示す。

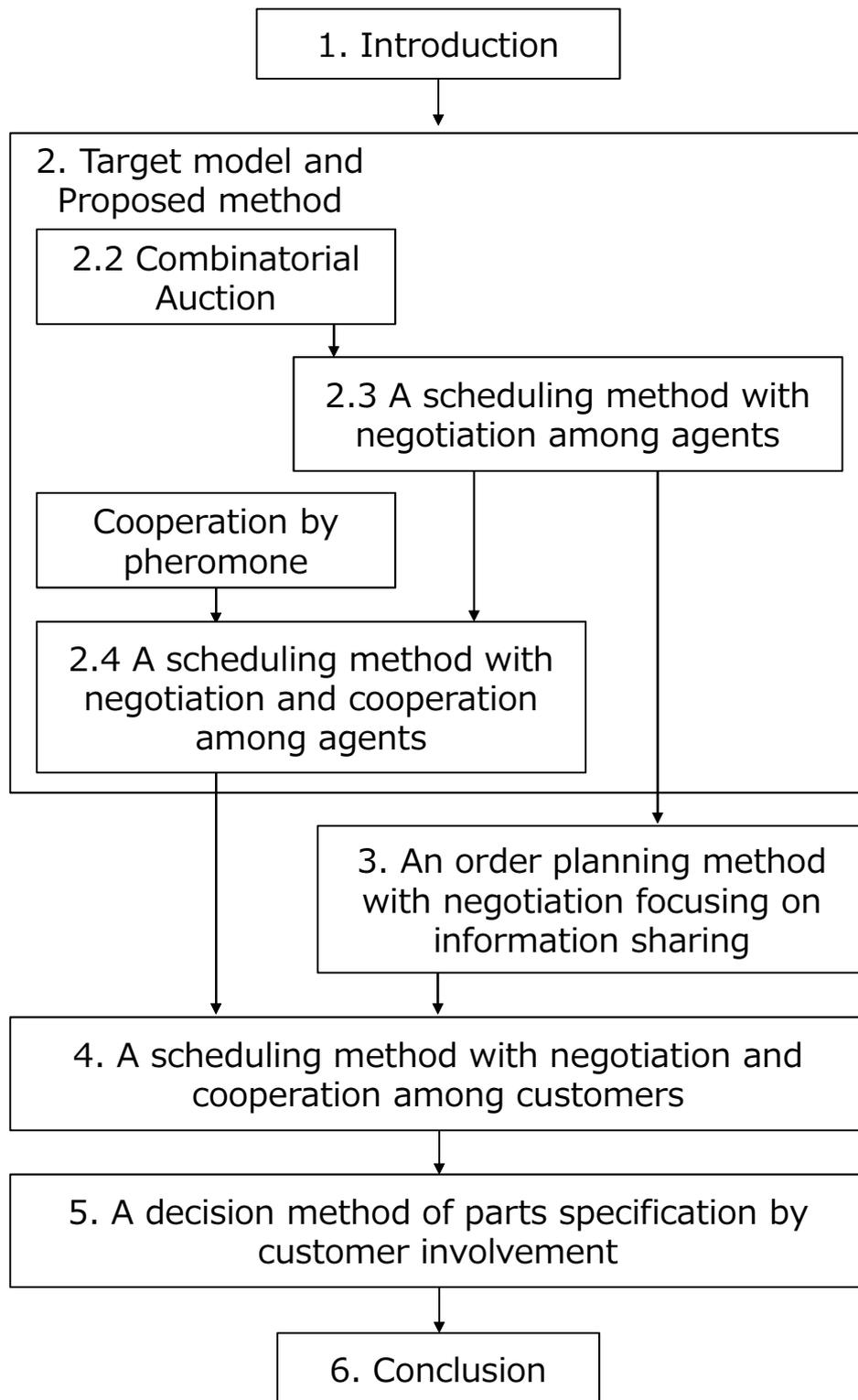


Fig. 1.3: A relationship among chapters

第 2 章 対象モデル及び提案手法

2.1 緒言

本章では、サプライチェーンが抱える製造に関する最適化問題に対する複数主体間での交渉を模した近似解法を提案する。2.2節では、本章で着目した組合せオークション (Combinatorial Auction) について述べる。2.3節では、組合せオークションを用いた近似解法を提案し、その概要を述べる。2.4節では、交渉を模した探索の過程で主体間で協調を行うための手法を提案し、その概要を述べる。最後に2.5節で、本章をまとめる。

2.2 組合せオークション

製造に関わる全ての主体の合意点となる計画を得るためには、ある1主体が計画を立案するのではなく全ての主体による自律分散型の手法を用いた計画立案が有効であると考えられる。そこで、各主体による意見の主張と複数主体間の意見の調整の繰り返しによる計画立案手法を提案する。生産に関する計画を複数主体間への最適な財の配分を決定する問題として定式化し、提案手法を適用することで準最適解を得る。各主体による意見の主張は探索する解空間を限定することに相当し、意見の調整が限定された解空間内の探索に相当する。主体間の交渉を表現するために、組合せオークション [43] に着目する。組合せオークションでは同時に複数の財が競りにかけられ、オークションにかけられた財の組合せに対する入札を認めることで複数の財の配分を一度に決定するところに特徴がある。財の組合せによる価値の変化への対応が容易であるという利点があり、複数の財の間で価値に依存関係がある場合であっても効率的に最適な配分を決定することが出来る。

また、複数の入札者間での複数の財の配分を決定する問題として定式化することが可能な組合せ最適化問題であれば、組合せオークションを用いてその最適解を得ることが出来る。主な組合せオークションの適用例として、2007年の連邦通信委員会 (Federal Communications Commission) による700MHz帯電波利用権の割り当て [44]、空港における滑走路の使用権の飛行機への割り当て [45] などがあり、航空機や自動車による輸送の最適化に対して多くの適用例がある [46]。

組合せオークションは、入札作成と勝者決定問題の2つから構成される。入札作成は、各入札者が財の組合せに対する入札値を決定し入札を行う。勝者決定問題は、オークションの主催者が各入札者の行った入札を取りまとめ、評価値が最大 (最小) となるように勝者とする入札を選択する問題である。オークション主催者及び全ての入札者にとって最適な財の配分を行うためには、各入札者は考えられる全ての財の組合せに

入札を行う必要がある．財の数を N とすると，それぞれの財を入札に含める場合と含めない場合の2つの状況が考えられるので，一度のオークションで最適な財の配分を決定するために必要な1入札者あたりの入札数は 2^N となる．

勝者決定問題は，以下に示すような0-1整数計画問題として定式化することが可能である [43]．定式化に用いた記号の定義は以下の通りである．

n : オークションにかけられた財 ($n = 1, \dots, N$)

i : 入札者 ($i = 1, \dots, I$)

k : 入札 ($k = 1, \dots, 2^N$)

$BV_{i,k}$: 入札者 i の入札 k の入札値

$a_{n,i,k}$: 入札 (i, k) に財 n が含まれていれば1, 含まれていなければ0となる変数

$x_{i,k}$: 入札 (i, k) の決定変数

$$\max(\min) \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^{2^N} BV_{i,k} \times x_{i,k} \quad (2.1)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^{2^N} a_{n,i,k} \times x_{i,k} \leq 1 \quad (\forall n) \quad (2.2)$$

$$\sum_{k=1}^{2^N} x_{i,k} = 1 \quad (\forall i) \quad (2.3)$$

$$x_{i,k} \in \{0, 1\} \quad (\forall i, \forall k) \quad (2.4)$$

決定変数は $x_{i,k}$ であり，この値が1の時に入札者 i の入札 k が勝者となり入札に含まれる財が落札され，この値が0の時に入札者 i の入札 k は敗者となる．目的関数は (2.1) 式であり，入札値の合計の最大化（最小化）が目的である．(2.2) 式は，財を落札出来るのは高々1入札者であることを表す制約式である．(2.3) 式は，1入札者につき必ず1つの入札を勝者とする制約である． $x_{i,k}$ は勝者決定問題の決定変数であり，この値が1の時入札者 i の k 番目の入札が勝者となり入札 (i, k) に含まれる財が落札される．この値が0の時入札 (i, k) が敗者となる．

複数の財の組合せの価値が個々の財の価値の総和よりも大きくなるという補完性や個々の価値の総和よりも小さくなるという代替性のように，複数の財の間で価値に依存関係がある場合がある．補完性・代替性を考慮した上でオークション主催者と入札者の双方にとって最適な財の配分を行うために (2.3) 式の制約式を定める．ある入札者にとって，複数の財からなる価値が独立した集合1,2がある場合を考える．例として，財

の集合 $\mathbf{n}_1 = \{1, 3\}$, $\mathbf{n}_2 = \{2, 4\}$ があり, \mathbf{n}_1 , \mathbf{n}_2 に対する, ある入札者の入札値が 10, 20 であるとする. それらの財の価値が独立しているならば, 財の集合 $\mathbf{n}_3 = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ の価値は 30 となる. 入札者が財の集合 1, 2, 3 に対して入札値 10, 20, 30 で入札したならば, 集合 1, 2 への入札を勝者とする事と, 集合 3 を勝者とする事は同じ意味を持つ. 次に, ある入札者にとっては財 1, 2 の間に代替性がある場合を考える. 集合 1 の価値が 10, 集合 2 の価値が 20, 集合 3 の価値が 25 であり, 入札者が集合 1, 2, 3 に入札値 10, 20, 25 で入札した時勝者決定問題の目的関数が入札値の最大化であれば, 集合 3 への入札が勝者とならずに集合 1, 2 への入札がそれぞれ勝者となり, その入札者にとっての財の価値以上の価格で財が落札される. そのような状況を防ぐため, 財の空集合への入札を認めると共に (2.3) 式の制約式を定める.

(2.3) 式の制約式は, 勝者決定問題の解の数にも影響を与える. 勝者決定問題の計算量は入札者の数を I , 1 入札者あたりの入札数を K とすると, 各入札について勝者とするか敗者とするかを決定する必要があるため $O(2^{I \times K})$ ($O(2^{I \times 2^N})$) と表される. 1 回のオークションで, 1 人の入札者から 2 つ以上の入札を勝者とする事はなく, ある入札者が行った K 個の入札の中から必ず 1 つが勝者に選ばれるため, オークション主催者が実際に考慮する必要がある解の数は $K^I = 2^{NI}$ と表すことができる.

2.3 組合せオークションを用いた近似解法

2.3.1 組合せオークションによる近似解法

組合せオークションの勝者決定問題の最適解を得るためにかかる計算時間は入札者数及び 1 入札者あたりの入札数に対し指数的に増加する. そのため, 入札者及び 1 入札者あたりの入札数が増えると実時間内に勝者決定問題の最適解を得ることが出来なくなる. 本節では, 全ての入札者が有り得る全ての財の組合せに入札を行った時の勝者決定問題を原問題と呼ぶ. 原問題の最適解が組合せオークションにおけるオークション主催者と入札者の双方にとっての最適な財の配分となる.

原問題の最適解は問題の規模が大きくなると実時間内に得ることが出来なくなるうえ実用的には準最適解が求まれば十分なことも多いため, 原問題の最適解を得ることで最適な配分を行うことを目指すのではなく原問題の準最適解を高速に得ることを目指した研究が行われてきた. 櫻井ら [47] は, ノードを 1 つの入札とし根ノードから葉ノードまでの経路が 1 つの実行可能解となるように作成された探索木を探索する過程で Limited Discrepancy Search [48] を用いて探索範囲を限定することで高速に原問題の準最適解を得るための方法を提案した.

Fujishima ら [49] は, 入札者に着目し同時多回数オークションを行うことで高速に準最適な配分を得るための手法として Virtual Simultaneous Auction (VSA) を提案した. VSA では 1 入札者あたりの入札数が制限されている. 入札値を変更しながらオークション

を複数回繰り返すことで準最適な配分を高速に決定する。オークションの各回ごとに勝者を決定し、入札者がオークションの結果を用いて次のオークションでの各入札の入札値を決定する。勝者を決める際は、入札値が大きな入札から順に入札に含まれる財に重複がないように勝者を決める。財を落札することが出来なかった入札者の中で、同じ財の組合せに対してより大きな入札値を提示することが出来る入札者が存在するならば、その入札者は入札値を変更し再入札するという操作を複数回繰り返すことで、高速に準最適解を得ることを目指した。

2.3.2 主体間の交渉を模した計画立案手法

本研究では、組合せオークションを複数回行うことで原問題の準最適解を得る計画立案手法を提案する。入札者数 I 及びオークションにかけられた財の数 N が大きな問題に対し、実時間内に勝者決定問題の最適解を得るために1入札者あたりの入札数 K を制限する。得られる解はある入札の組合せの下での最適解であるものの原問題の大域的最適解である保証はないため、オークションを複数回行うことで目的関数値の改善を図る。

VSAと本節で提案する近似解法はいずれも組合せオークションを複数回行うことで準最適解を得ることを目指すが、VSAではオークションの繰り返しの過程で入札に含める財の組合せは変更せずに入札値を変更するのに対し、提案手法では財の組合せに対するある入札者の入札値は一意に決まるものとする。入札者が入札する財の組合せを変更しながらオークションの繰り返すことで準最適解を得る。以下に提案する主体間の交渉を模した計画立案手法の流れを示す。

STEP1 オークション主催者はオークションにかけられた財の情報を入札者に提示し、オークションの繰り返し回数 Ite を決定する。現在のオークションの繰り返し回数 ite を1とする。

STEP2 各入札者は、財の組合せに対して入札を行う（入札作成）。

STEP3 オークション主催者は、入札値の合計が最大（最小）となるように勝者となる入札を決定する（勝者決定問題）。

STEP4 繰り返し回数が $ite = Ite$ ならば終了。そうでなければ $ite := ite + 1$ とし **STEP2** へ。

2回目以降のオークションで各入札者が行う K 個の入札のうち、1つは前回のオークションで勝者となった自身の入札と同じ財の組合せに入札を行い、残りの $K - 1$ 個の入札を作成し直す。これにより、勝者決定問題で必ず実行可能解が得られることを保証すると共に目的関数値の改悪を防ぐ。

同様に必ず実行可能解を得ることを保証するため、初回のオークションでは各入札者はあるルールに従い得た初期解に従い入札を作成する。

2.3.3 入札作成

1入札者あたりの入札数が制限された中で良い目的関数値を持つ解を得るためには、各入札者が行う入札作成が重要となる。本研究では特に入札作成に着目し、良い目的関数値を持つ解を得るために主体間の交渉を模した組合せオークションを用いた計画立案手法及び、立案過程での入札者間の情報共有・協調手法を提案する。

入札者が作成する入札に着目した研究としてはKutanogluら [50] や佐々木ら [51] によるものが挙げられる。いずれも原問題にラグランジュ緩和法 (Lagrangian relaxation method) を適用することで得られた解を参考に入札を作成した。ラグランジュ緩和法を適用するためには、原問題が入札者ごとの子問題に分解できなければならないという条件がある。

組合せオークションを用いたスケジューリング手法では近接最適性の原理 (Proximate Optimality Principle) に基づき、オークションの繰返しの際に各入札者が前回のオークションで勝者となった自身の入札とその近傍に入札を行うことで良い目的関数値を持つ解の周辺を詳しく探索し、目的関数値の改善を図った。近傍に入札する際は、入札に含める財の組合せを前回勝者からランダムにいくつか交換するという方法を用いた。

2.4 フェロモンを導入した組合せオークションによる主体間の交渉・協調を模した近似解法

本節では、フェロモンの考え方を導入した組合せオークションを用いた近似解法を提案する。良い目的関数値を持つ解を得るためには各入札者の作成する入札が重要である。ランダムに入札作成するのではなく何らかの基準に従い入札を作成することでより良い目的関数値を持つ解を得ることが出来ると考えられる。そこで、各入札者が自身の入札履歴を記録し入札者間で履歴を共有することで他の入札者の嗜好を読み取り、入札者間で協調することにより効率的に財の配分を行う。入札履歴の記録には、Ant Colony Optimization (ACO)[52] で用いられるフェロモンの考え方をを用いる。

2.4.1 Ant Colony Optimization

ACOは蟻の採餌行動を模した群知能アルゴリズムによるメタヒューリスティクスの一種である [53, 54]。特に巡回セールスマン問題を対象としたメタヒューリスティクスである Ant System (AS) [54] が最初に提案されたACOである。ASでは各都市に配置された蟻エージェントが都市間を移動し巡回路を生成することで探索を行う。 n 都市の問題に対し n 個の蟻エージェントが n 個の順回路を生成するという操作を1反復の探索とし、探索を複数回反復することで目的関数値の改善を図る。都市間を移動する際、各蟻エージェントは自身が通った経路を記憶するために通った経路にフェロモンを添加す

る。添加されたフェロモンは次回以降の繰り返しで蟻エージェントが巡回路を生成する際に用いられる。また、各経路に添加されたフェロモンは探索の繰り返しと共に蒸発するという性質を持つ。各蟻エージェントが次に訪れる都市を選択する際は、都市間の距離が短く、経路に添加されたフェロモンの量が多い都市ほど高い確率で選択する。多くのフェロモンが添加された経路は多くの蟻エージェントに選択されるために、十分な回数探索を繰り返すとある1つの経路にフェロモンが集中し、全ての蟻が同じ順回路を生成するようになることが考えられる。

ASは蟻の採餌行動を模したアルゴリズムであるが焼きなまし法やタブーサーチよりも探索性能は低く、20都市程度の巡回セールスマン問題を最適化する性能しかなかった[54]。そこで、現実の蟻の採餌行動にはないものの探索性能の向上を目的とし工夫を施した手法が提案された。代表例として、Any Colony System (ACS) [55]とMax-Min Ant System (MMAS) [56]がある。

ACSでは、次に訪れる都市の選択式に集中化の働きを加え、フェロモンの更新式に多様化の働きを加えている。ASではルーレット選択を用いて蟻エージェントが次に訪れる都市を決定したのに対し、ACSでは、ある確率ではルーレット選択を用いずに最もフェロモンの添加量が多い経路を選択する。そのためACSの集中化の性質はASよりも強くなる。フェロモンの更新を行う際は、ある経路に添加されたフェロモンの量が基準値よりも大幅に小さい時は大量のフェロモンを添加し、基準値に近い時は少量のフェロモンを添加する。全ての経路に添加されたフェロモン量を、ある基準値に近づけるような更新式を用いることである1つの経路にフェロモンが極端に集中することを防ぎ、多様性の維持を狙っている。

MMASでは各経路のフェロモンの添加量に上下限を設ける。これによりフェロモンがある1つの経路に集中することを防ぎ、探索を反復する過程で生成される巡回路の多様性を維持することを狙っている。一方で、これまでの探索で得られた最良解の経路、もしくは1回の探索の n 個の蟻エージェントの中での最良解の経路のみにフェロモンを添加することで探索の集中化を図る。局所解に陥った後はある1経路にフェロモンが添加され続ける。その後も十分な回数探索を繰り返すと、1回の反復でのフェロモンの添加量と蒸発量が均衡するようになる。この均衡点をフェロモンの上限とし各蟻エージェントの経路選択に用いるルーレット選択の式と、局所解に陥った状態で蟻エージェントが厳密解と同じ経路を選択する確率からフェロモンの下限を設定する。

ACOでは、フェロモンの分布により全体の秩序が形成される。蟻エージェントのフェロモンの添加によるボトムアップ作用と、蟻エージェントの巡回路の生成にフェロモンが影響を与えるトップダウン作用の双方向関係が存在する。また、フェロモンの添加と蒸発により、探索の繰り返しと共にフェロモン分布が変化するという特徴を持つ。

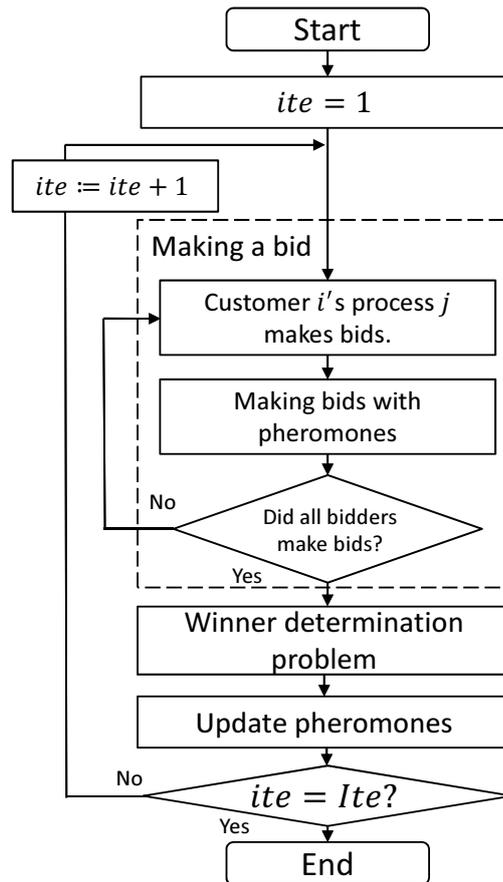


Fig. 2.1: Flowchart of the scheduling method with netotiation by Combinatorial Auction and cooperation by pheromone

2.4.2 組合せオークションを用いた近似解法へのフェロモンの導入

オークションにかけられた財にフェロモンを添加することで入札履歴を記憶し，各財に添加されたフェロモン量の分布を入札者間で共有する．入札者は，自身及び他の入札者のフェロモン分布を参考に入札する財の組合せを決定する．自身のフェロモンが多く添加されている財ほど高い確率で入札に含め，他者のフェロモンが多く添加された財ほど入札する確率を低くすることで，他の入札者との協調を図る．フェロモン分布を用いた入札作成方法は定式化に依らず適用可能であり，前回勝者の近傍にランダムに入札する入札作成方法よりも高い性能を持つ．

オークション1回毎にフェロモンの蒸発と添加が行われ，入札者はフェロモン分布を参考に入札を作成する．フェロモンを導入した組合せオークションを用いた主体間の交渉・協調による計画立案手法の流れをFig. 2.1及び以下に示す．

STEP1 オークション主催者はオークションの繰り返し回数 Ite を決定する．現在のオークションの繰り返し回数 ite を1とする．全ての財に添加されているフェロモンの量

を初期化する.

STEP2 各入札者は, 財に添加されたフェロモンの量を参考に財の組合せに対して入札を行う (入札作成).

STEP3 入札値の合計が最小 (最大) となるようにオークション主催者は勝者となる入札を決定する (勝者決定問題).

STEP4 フェロモンの蒸発と添加を行う (フェロモン分布の更新).

STEP5 繰返し回数が $ite = Ite$ ならば終了. そうでなければ $ite := ite + 1$ とし **STEP2** へ.

2.5 結言

本章では, 製造に関わる組合せ最適化問題の近似解法を提案した. 提案する近似解法では, それぞれ異なる目的を持つ製造に関わる複数の主体の交渉を模した手続きを行い, 合意点となる計画を得ることを目指した. 複数主体間の交渉には, オークションの一種である組合せオークションを用いた. 組合せオークションについて述べた後, 組合せ最適化問題をオークションにかけられた複数の財を複数の入札者に配分する問題として定式化し, 組合せオークションを用いた近似解法について説明した.

次に, 組合せオークションを用いた主体間の交渉の過程で主体間で協調を行うための手法を提案した. 交渉が繰り返される過程で各入札者が自身の入札履歴をオークションにかけられた財に添加されたフェロモンとして記憶し, 共有した他の入札者のフェロモン分布から他の入札者の求める財を推測し入札を作成することで効率的により良い財の配分を決定することを目指した.

第3章 企業間交渉による受発注計画の立案手法及び交渉過程での情報共有の有効性

3.1 緒言

本章では、サプライチェーンの構成企業間の交渉による受発注計画の立案手法を提案する。企業間で交渉を行うことで、他の企業に公開不可能な機密情報を公開することなく全ての企業の交渉の合意点となるような受発注計画を得るためのスケジューリング手法を提案する。その上で、交渉を模したスケジューリング手法における企業間での情報共有を行うことの有効性を検討する。

サプライチェーンのグローバル化による拠点間の物理的な距離の延長や、製品の複雑化により製品の供給リードタイムは長期化傾向にある。同業他社との競争に勝つためには、多様化する顧客ニーズへの素早い対応が求められる。輸送リードタイムや製造リードタイムの短縮は困難であるため、予め需要予測に基づいて部品や材料の調達を行い、販社からの製品発注があればすぐに製造出来る状態で待機することでリードタイムの短縮を図る。発注を行う部品や材料の中に長納期のものが含まれている場合、部品・材料サプライヤは長い場合で数ヶ月以上先の需要を予測し発注を行う必要があるため、需要予測と実際の発注の間に誤差が生じる場合がある。そのため需要予測の精度を高めることは最適な生産の実現のために有効かつ重要な戦略となるが、同様に需要予測を見誤った場合の対応も重要な戦略となる。実際の発注が需要予測を下回った場合は、製造拠点が不要な在庫を抱え無駄な管理費用が発生することや流行の移り変わりによりそれらが不良在庫となることが考えられるが、対象の期における顧客の発注に対応することは可能であり受発注計画への影響はない。一方で、需要予測を超える発注があり材料不足が起きた場合は受注したオーダの一部しか製造することが出来ないという状況が発生する。その際、今期に製造するオーダと次期以降に製造するオーダの取捨選択を行う必要がある。

今期に製造するオーダの取捨選択を行う際は、サプライチェーン全体としての利益の最大化を目指すだけでは不十分である。サプライチェーンの構成企業の中に採算が独立した企業が含まれている場合は、サプライチェーン全体としての利益の最大化が各企業の利益の最大化に繋がるとは限らない。また、取捨選択の基準となる指標は利益最大化以外にも、それぞれの企業によって異なる指標をもつ場合がある。企業が保持する情報の中には他の企業には公開出来ない情報が含まれる。公開不可能な情報の例として顧客情報、在庫情報、利益率などがある。また、顧客の優先度と利益率のように単位が異なる場合がある。これらの理由から、製造に関わる全ての情報を本社に集

約し、本社がそれら全ての情報を集中制御し、サプライチェーンを構成するどの企業にとっても納得の出来る最適な受発注計画を立案することは困難である。そこで各企業が自身の基準に従い、顧客からの発注（オーダー）を0から1の無次元化・正規化された満足度という値を用いて評価し、目的関数を満足度の最大化とし受発注計画を最適化する。全ての情報をヘッドクォータに集約しヘッドクォータが全ての企業にとって最適な受発注計画を立案することは困難であるため、受発注計画を最適化するために、企業間の交渉を模したスケジューリング手法を提案する。特に、企業間の情報共有に着目し、共有する情報の種類が最適化の結果得られる受発注計画に与える影響について検討する。

3.2節では、本章で対象とするサプライチェーンと、提案手法を適用する想定した状況について述べる。3.3節では、提案手法について述べる。対象のモデルに提案手法を適用した時の計画立案の流れ、定式化、計画立案時の各エージェントのアルゴリズムについて述べる。3.4節では計算機実験を行い得られた結果について考察する。最後に3.5節で本章をまとめる。

3.2 対象のサプライチェーン

本章では、サプライチェーンの構成企業に着目する。日本・北米・欧州など物理的に離れて存在する複数の販社と、販社を統括する営業本部と製造拠点及び本社が1拠点ずつ存在するグローバルサプライチェーンを対象とする。Fig. 3.1に、対象とするサプライチェーンの概要図を示す。販売計画から適切な在庫量を見積もり生産計画を立てる調達販売管理部門が需要予測を見誤った結果、製造拠点の部品在庫量及び生産能力を越える発注がある1期にあったという状況を対象とする。部品在庫及び生産能力の不足に対応するために今期に製造するオーダーと次期以降に製造するオーダーの取捨選択を行うことで受発注計画を立てる。サプライチェーンの構成企業間で交渉を行うことで、交渉の合意点となる受発注計画の立案を目指す。

販社によって顧客の嗜好や利益率が異なるものとする。市場規模の小さい新興国に拠点を構えることで新興国と共に発展し、市場の拡大と将来の需要の確保を狙う場合があり[57]、ある販社が受注した全てのオーダーが、どの企業にとっても好ましいオーダーでないという状況も想定される。そのような場合であっても、将来的な市場の拡大や現時点でのその販社の売上を確保するためにその販社が受注した全てのオーダーの製造を次期以降に先送りすることは出来ないものとし、販社間での売上バランスを考慮した受発注計画の立案が必要であるものとする。

記号の定義

対象モデルと提案手法の説明及び、定式化に先立ち以下の記号を定義する。

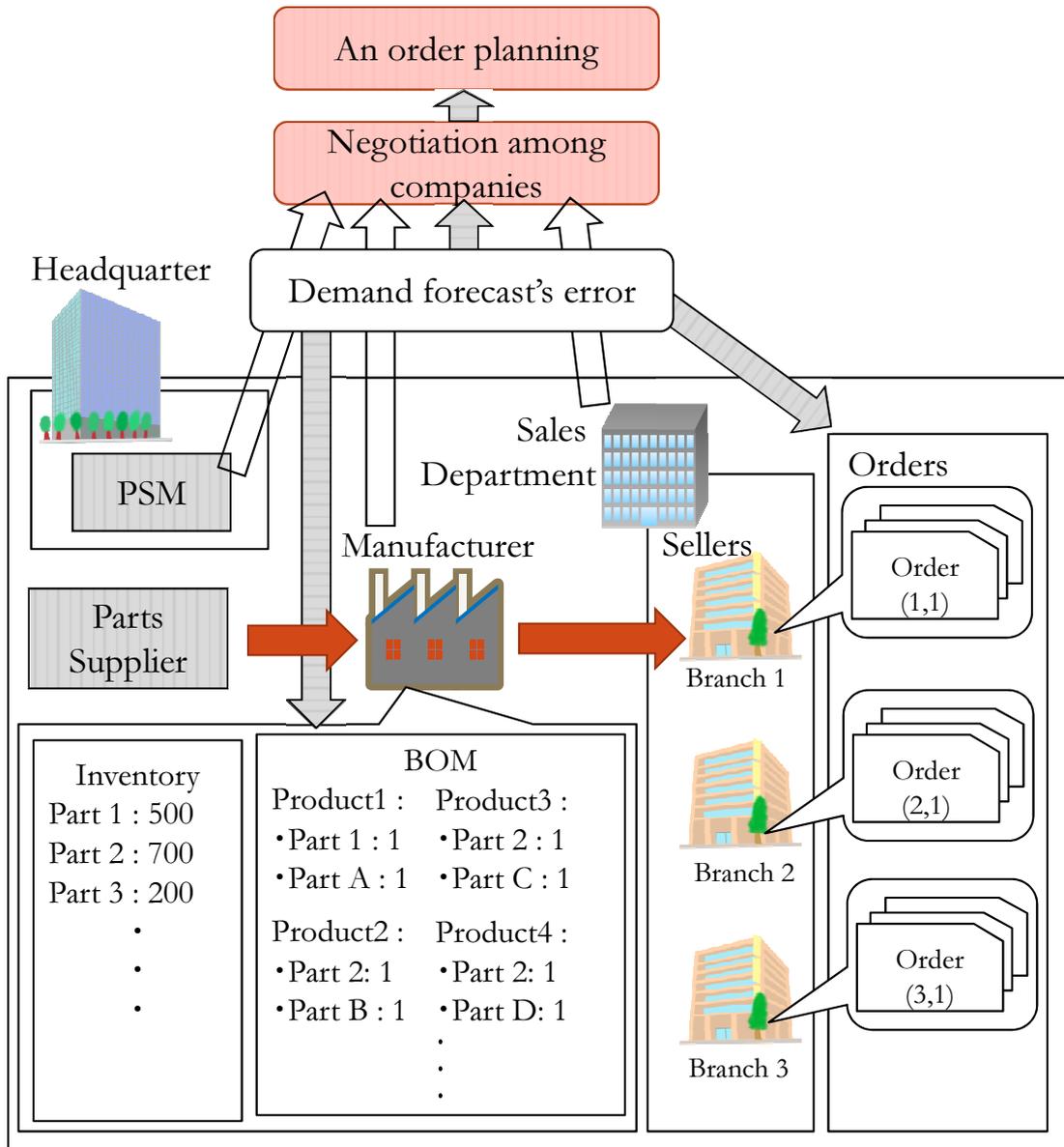


Fig. 3.1: An overview of targeted supply chain

オーダーに関する記号

s : 販社番号 ($s = 1, \dots, S$)

j : 販社 s が受注したオーダー ($j = 1, \dots, J_s$)

$L_{s,j}$: オーダー (s, j) における製品の発注数量

$CP_{s,j}$: オーダー (s, j) を発注した顧客に対する販社 s の顧客優先度

$SP_{s,j}$: オーダー (s, j) で発注された製品を1個製造することにより得られる売上

$GM_{s,j}$: オーダ (s, j) が1個製造されることでサプライチェーン全体として得られる利益

$cus_{s,j}$: オーダ (s, j) を発注した顧客の販社 s 内での通し番号

$prd_{s,j}$: オーダ (s, j) で発注された製品の通し番号

$UPC_{s,j,c}$: オーダ (s, j) で発注された製品 $prd_{s,j}$ の製造に部品 c が必要ならば1, 不必要なら0となる変数

$UPV_{s,j,v}$: オーダ (s, j) で発注された製品 $prd_{s,j}$ の品種が v ならば1, そうでなければ0となる変数

満足度に関する記号

$SV_{s,j}$: 販社 s のオーダ j が1個された時の営業本部の満足度

$PV_{s,j}$: 販社 s のオーダ j が1個製造された時の調達・販売管理部門の満足度

$MV_{s,j}$: 販社 s のオーダ j が1個製造された時の製造拠点の満足度

製品に関する記号

v : 品種 ($v = 1, \dots, V$)

p : 製品 ($p = 1, \dots, P$)

c : 部品 ($c = 1, \dots, C$)

$c_p \in \mathbb{N}$: 製品 p の製造に必要な部品 c の集合

$y_{s,j,c}$: 販社 s のオーダ j を1個製造する為に必要な部品 c の個数

$m_{s,j,v}$: 販社 s のオーダ j を1個製造するために必要な製造拠点の品種 v の生産能力

PP_c : 部品 c の調達コスト

Y_c : 製造拠点の保持する部品 c の個数

入札に関する記号

i : 入札者 ($i = 1, \dots, I$)

k : 入札 ($k = 1, \dots, K$)

$q_{s,j,i,k}$: 入札者 i の入札 k に含まれる販社 s のオーダ j で発注された製品の数量 (入札の決定変数)

$RC_{i,k,c}$: 入札者 i の入札 k に含まれるオーダーの製造に必要な部品 c の数量

$RV_{i,k,v}$: 入札者 i の入札 k に含まれるオーダーの製造に必要な品種 v の製品を製造するための製造拠点の生産能力

$RS_{i,k}$: 入札者 i の入札 k に含まれるオーダーを製造することにより得られる売上

$BV_{i,k}$: 入札者 i の入札 k の入札値

$SS_{i,k}$: 入札者 i の入札 k における営業本部の満足度

$PS_{i,k}$: 入札者 i の入札 k における調達・販売管理部門の満足度

$MS_{i,k}$: 入札者 i の入札 k における製造拠点の満足度

$x_{i,k}$: 入札者 i の入札 k を勝者とするなら 1, 敗者とするなら 0 となる 0-1 変数

勝者決定問題に関する記号

PC_v : 品種 v の製品を製造するための製造拠点の生産能力の上限

LL_s : 全ての販社の合計売上に対する販社 s が得る売上の割合の下限

UL_s : 全ての販社の合計売上に対する販社 s が得る売上の割合の上限

3.2.1 オーダ

販社 $s (s = 1, \dots, S)$ に, それぞれ J_s 個の発注があったものとする. 各販社はそれらを販社 s が受注したオーダーとしてサプライチェーン全体に公開する. 1つのオーダーにつき, 1種類の製品のみが発注される. 1つのオーダー中で発注された製品は, 同じ期に $L_{s,j}$ 個全てを製造する必要はなく, 発注数量 $L_{s,j}$ の一部を今期に製造し, 残りを次期以降に製造することが認められている. 各オーダーには, 発注した顧客 $cus_{s,j}$, 発注された製品 $prd_{s,j}$, 発注数量 $L_{s,j}$ についての情報が含まれる. また, 各企業はそれぞれのオーダーについて他企業には非公開の情報を持つ. 営業本部は, そのオーダーを発注した顧客の社内での優先度 $CP_{s,j}$ 及びそのオーダーで発注された製品の1個あたりの売上 $SP_{s,j}$ についての情報を持つ. 調達・販売管理部門は, そのオーダーで発注された製品1個あたりのサプライチェーン全体としての利益 $GM_{s,j}$ についての情報を持つ. 製造拠点は, 部品 c の調達コスト PP_c , 部品 c の在庫量 Y_c , 品種 vc の製品を製造するために必要な生産能力の上限 PC_v についての情報を持つ. オーダの例を Table 3.1 に示す.

Table 3.1: An Example of orders

Seller	Order	Customer	Product	Quantity	Priority	Sales	Benefit
s	j	$cus_{s,j}$	$prd_{s,j}$	$L_{s,j}$	$CP_{s,j}$	$SP_{s,j}$	$GM_{s,j}$
1	1	1	1	100	5	10,000	5,000
1	2	1	2	200	2	24,000	7,000
1	3	2	2	150	3	10,000	4,000
2	1	1	3	75	2	12,000	3,000

オーダーの満足度

営業本部，調達・販売管理部門，製造拠点は販社 s のオーダー j で発注された製品が1個製造されることに対する満足度 $SV_{s,j}$ ， $PV_{s,j}$ ， $MV_{s,j}$ を見積もる．満足度は，各拠点が自身にとって最も満足度が高いオーダーで発注された製品が1個製造された時を1として正規化し，0から1の範囲の値で与えられる．

営業本部の満足度

販社 s のオーダー j が1個製造されることに対する営業本部の満足度 $SV_{s,j}$ は，それにより販社が得られる売上 $SP_{s,j}$ と，そのオーダーを発注した顧客 $cus_{s,j}$ の顧客優先度 $CP_{s,j}$ により決定される．営業本部にとって最も満足度が大きいオーダーの満足度を1として正規化したものを営業本部の満足度とし，(3.1) 式で表す．

$$SV_{s,j} = \frac{SP_{s,j} \times CP_{s,j}}{\max_{\forall s', \forall j'} SP_{s',j'} \times CP_{s',j'}} \quad (3.1)$$

調達・販売管理部門の満足度

販社 s のオーダー j が1個製造されることに対する調達・販売管理部門の満足度 $PV_{s,j}$ は，それにより得られるサプライチェーン全体としての利益 $GM_{s,j}$ により決定される．調達・販売管理部門にとって最も満足度が大きいオーダーの満足度を1として正規化したものを調達・販売管理部門の満足度とし (3.2) 式で表す．

$$PV_{s,j} = \frac{GM_{s,j}}{\max_{\forall s', \forall j'} GM_{s',j'}} \quad (3.2)$$

製造拠点の満足度

販社 s のオーダー j が1個製造されることに対する製造拠点の満足度 $MV_{s,j}$ は，そのオーダーで発注された製品を1個製造するために必要な部品の調達コスト PP_c の合計に

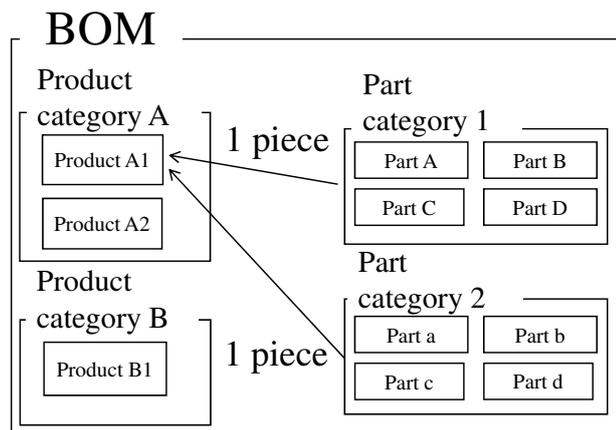


Fig. 3.2: An Example of BOM

Table 3.2: An Example of Inventory List

Part c	Quantity of Inventory Y_c	Cost PP_c
1	400	3000
2	200	2000
3	500	1800

より決定される．これは，部品在庫が製品の製造に使用されることで製造拠点の棚卸資産が減少し，在庫を抱えることに対するリスクが減少することが製造拠点の満足度に繋がることを表す．製造拠点にとって最も満足度が大きいオーダの満足度を1として正規化したものを製造拠点の満足度とし，(3.3) 式で表す．

$$MV_{s,j} = \frac{\sum_{c=1}^C PP_c \times y_{s,j,c}}{\max_{\forall s', \forall j'} \sum_{c'=1}^C PP_{c'} \times y_{s',j',c'}} \quad (3.3)$$

3.2.2 製品

製造拠点は， P 種類の製品の製造を行う．製品 p を1個製造するためには，部品カテゴリ1及び部品カテゴリ2に属する部品を1個ずつと，製造拠点の設備の生産能力が1必要である．製造に必要な設備は品種 v ごとに異なり，生産能力には上限 PC_v がある．製品 p と属する品種 v 及び製造に必要な部品 c の組合せ及び，部品 c と属する部品カテゴリの組合せは予め決まっており，実験条件として与えられる．製品，部品，品種の関係を表したBOM (Bill Of Materials) の例を Fig. 3.2に示す．

製造拠点はTable 3.2に示す在庫リストを持つ。在庫リストには、部品 $c(c = 1, \dots, C)$ の保持数量 Y_c と単価 PP_c に関する情報が含まれる。

3.2.3 企業

交渉に参加する拠点とその目的は以下の通りである。

ヘッドクォータ

オークションを主催し、各拠点の意見の調整を行う。

営業本部

ヘッドクォータの中に存在する1部門であり世界中に点在する全ての販社を取りまとめ、全ての販社を代表しオークションの入札者として交渉に参加する。全ての販社からの売上額の合計の最大化と重要な顧客からのオーダーの優先的採用を目指す。

調達・販売管理部門

ヘッドクォータの中に存在する1部門であり、サプライチェーン全体の利益の最大化を目指し、オークションの入札者として交渉に参加する。Fig. 1.2中のPSM (Procurement and Sales Management) はこれにあたる。

製造拠点

対象とするサプライチェーンにおいて製造拠点は1拠点のみ存在する。交渉の結果、今期に製造することが決まった発注の製造を行う。棚卸資産の最小化を目指し、オークションの入札者として交渉に参加する。

3.2.4 企業が保持する情報

各拠点が保持する情報を計画の評価指標に直接関わる情報と計画の評価指標に直接は関わらない情報の2種類に分類する。

評価指標に関わる情報

受発注計画の評価指標として、各オーダーに対する営業本部、調達・販売管理部門、製造拠点の満足度 $SV_{s,j}$, $PV_{s,j}$, $MV_{s,j}$ に着目する。満足度は、経営戦略に関わる情報の一部を無次元化・正規化したものである。

評価指標に関わらない情報

受発注計画の評価指標には直接関わらない指標として、製造拠点の部品在庫量 Y_c 及び生産能力 PC_v に着目する。

3.2.5 情報共有の有効性

本章では、サプライチェーンの構成企業間での情報共有の有効性について検討する。評価指標に関わる情報と、評価指標に関わらない情報のそれぞれの場合について情報共有することの狙いと意味は次の通りである。

評価指標に関わる情報

評価指標に関わる情報として、先に述べた満足度の共有を行う。満足度を共有することは、利益額や顧客の優先度の数値そのものは公開していないものの、サプライチェーンの構成企業が自身の経営戦略に関わる情報の一部を他の企業に公開することを意味する。満足度を共有することで2.3節で述べた組合せオークションの入札作成の際に他拠点の意見を取り入れることが可能となる。

入札作成の際に他拠点の意見を取り入れることで、入札者はより大きな評価値を持つ入札を効率的に作成することが可能となる。受発注計画の目的関数は各拠点の満足度の平均の最大化である。作成した入札に含まれるオーダーがある拠点にとっては満足度が高いオーダーの組合せであっても、他の拠点にとっては満足度が低く、入札値が小さな値となることが考えられる。他の拠点にとって満足度が低いオーダーを入札から取り除き、他の拠点にとって満足度が高いオーダーを入札に追加することで、その入札の入札者のみにとって満足度が高く他拠点にとっては満足度が極端に低い入札が作成されることを防ぐ。

評価指標に関わらない情報

評価指標に関わらない情報である部品在庫量及び生産能力を共有することの有効性を検討する。部品在庫量及び生産能力を共有することで、明らかに実行不可能となるような入札の作成を防ぐことが可能となる。例として、1つの入札に含まれるオーダーの製造に必要な部品の数量が製造拠点の部品在庫量を超える場合は、2.3節で述べた組合せオークションの勝者決定問題においてその入札が勝者となることはない。1入札者あたりの入札数 K が制限されているため、明らかに勝者となり得ない入札が作成されると探索性能は低下する。

製造拠点の部品在庫量及び生産能力に関する情報を共有することは、勝者決定問題の目的関数値ではなく制約式に関する情報を共有することを意味する。

3.3 企業間交渉による受発注計画の立案手法

本節では、2.3節で述べた組合せオークションを用いた主体間の交渉による計画立案手法を本章の対象モデルに適用した。組合せオークションを用いたサプライチェーンの構成拠点間の交渉を模した受発注計画の立案手法について述べる。

3.3.1 入札

入札の定義

入札者はサプライチェーンを構成する拠点*i*であり、営業本部、調達・販売管理部門、製造拠点の三者である。入札者*i*は、1回のオークションにつき*K*個の入札を行う。オークションにかけられた財は、製造拠点の保持する部品*p*の使用権及び品種*v*に属する製品の製造に必要な製造拠点の生産能力*PC_v*の使用権である。

入札者は今期に製造したいオーダ(*s, j*)の組合せに入札する。入札(*i, k*)の決定変数はオーダ(*s, j*)の数量*q_{s,j,i,k}*である。

入札値

入札(*i, k*)の入札値は、入札に含まれるオーダとその数量の組合せに対する3拠点の満足度*SV_{i,k}*, *PV_{i,k}*, *MV_{i,k}*の平均であり(3.4)式で表す。営業本部、調達・販売管理部門、製造拠点の満足度は、入札に含まれるオーダとその数量*q_{s,j,i,k}*の組合せにより決定され、販社*s*のオーダ*j*が1個製造されることに対する各拠点の満足度*SS_{s,j}*, *PS_{s,j}*, *MS_{s,j}*を用いて(3.5)式、(3.6)式、(3.7)式で表す。

$$BV_{i,k} = \frac{SS_{i,k} + PS_{i,k} + MS_{i,k}}{3} \quad (3.4)$$

$$SS_{i,k} = \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{J_s} SV_{s,j} \times q_{s,j,i,k} \quad (3.5)$$

$$PS_{i,k} = \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{J_s} PV_{s,j} \times q_{s,j,i,k} \quad (3.6)$$

$$MS_{i,k} = \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{J_s} MV_{s,j} \times q_{s,j,i,k} \quad (3.7)$$

3.2.5項で述べたように、各拠点の満足度が非共有ならば各拠点が入札を作成する際にオーダ及び入札に対する自身以外の拠点の満足度を知ることが出来ない。

従属変数

入札(*i, k*)に含まれるオーダの製造に必要な部品*c*の数量*RC_{i,k,c}*、品種*v*の製品を製造するための生産能力*RV_{i,k,v}*、それにより得られる売上*RS_{i,k}*は、入札(*i, k*)に含まれるオーダとその数量の組合せ*q_{s,j,i,k}*の従属変数であり(3.8)式、(3.9)式、(3.10)式で表される。

$$RC_{i,k,c} = \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{J_s} UPC_{s,j,c} \times q_{s,j,i,k} \times x_{i,k} \quad (3.8)$$

$$RV_{i,k,v} = \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{J_s} UPV_{s,j,v} \times q_{s,j,i,k} \times x_{i,k} \quad (3.9)$$

$$RS_{i,k} = \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{J_s} SP_{s,j} \times q_{s,j,i,k} \times x_{i,k} \quad (3.10)$$

入札制約

勝者決定問題の制約を満たすことが出来ず、明らかに勝者とならない入札が作成されることを防ぐために部品在庫量，生産能力，オーダーの発注数量に関する入札制約 (3.11) 式，(3.12) 式，(3.13) 式を定める．

$$\sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{J_s} y_{s,j,p} \times q_{s,j,i,k} \leq Y_c \quad (\forall p) \quad (3.11)$$

$$\sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{J_s} m_{s,j,v} \times q_{s,j,i,k} \leq PC_v \quad (\forall v) \quad (3.12)$$

$$q_{s,j,i,k} \leq L_{i,j} \quad (\forall s, \forall j) \quad (3.13)$$

(3.11) 式は，製造拠点の保持する部品 p の数量には上限があり，在庫量よりも多くの数量を必要とするような入札は作成しないことを表す．(3.12) 式は，製造拠点の生産能力 PC_v には上限があり，製造拠点の生産能力よりも多くの生産能力を必要とするような入札は作成しないことを表す．(3.13) 式は，販社 s が受注したオーダー j の製造数量は発注数量 $L_{s,j}$ 以下でなければならないことを表す．

3.2.5項で述べた通り，製造拠点の保持する部品在庫量及び生産能力に関する情報が非共有の時は，営業本部及び調達・販売管理部門は部品在庫量 Y_c 及び製造拠点の生産能力の上限 PC_v を知ることが出来ないため，(3.11) 式，(3.12) 式の入札制約を考慮せずに入札を作成する．部品在庫量及び生産能力は製造拠点自身に関する情報であるため，製造拠点は部品在庫量および生産能力に関する情報の共有・非共有に関わらず (3.11) 式，(3.12) 式の入札制約を考慮し入札を作成することが出来る．営業本部及び調達・販売管理部門は，部品在庫量及び生産能力に関する情報を共有する場合のみ (3.11) 式，(3.12) 式の入札制約を考慮し入札を作成する．

初期入札

3.3.2項で述べる勝者決定問題では，販社間の売上の配分に関する上下限制約，オーダーの発注数量の上限に関する制約などがあるため，各入札者が他の入札者の入札の存在を考慮せずに入札を行うと，実行可能解を得ることが出来ない場合がある．そこで

本章で提案するスケジューリング手法においては、各入札者がオークションの初回はあるルールに従って作成した初期入札に従い入札を行うことで勝者決定問題の実行可能解が得られることを保証する。

また、勝者決定問題の制約式 (3.29) 式により、1入札者につき必ず1つの入札が勝者となるように定められている。あるルールに従い実行可能解を得た後に、実行可能解における各オーダの発注数量を入札者数 I で割りそれを初期入札とする。

以下に各入札者がオークションの1回目で行う初期入札を得るためのルールを示す。定式化の都合上、初期解を入札者 i の入札 k として扱う。

STEP1 全ての販社 s について、販社 s が受注したオーダの集合を集合 $Jus_s \in \{1, \dots, J_s\}$ と定める。

STEP2 $s := 1$ と設定する。

STEP3 製造拠点は、販社 s が受注したオーダのうち、まだ選択されていないオーダの集合 Jus_s に含まれるオーダの中からランダムに1つを選択し、オーダ $j \in Jus_s$ とする。集合 Jus_s にオーダが存在しないならば**STEP6**へ。

STEP4 入札 (i, k) に含めるオーダ j の数量を決定する。(3.11) 式, (3.12) 式に示す部品在庫量及び生産能力に関する制約を満たすことが出来ず、オーダ j を1個も製造することが出来ないならば、販社 s が受注したオーダの集合 Jus_s からオーダ j を取り除き**STEP2**へ。オーダ j を1個以上製造可能であれば、製造拠点は部品在庫量、生産能力、発注数量に関する入札制約 (3.11) 式, (3.12) 式, (3.13) 式を満たす範囲内で生産する数量 $q_{s,j,i,k}$ をランダムに決定し、入札 (i, k) に販社 s のオーダ j を $q_{s,j,i,k}$ 個追加する。

STEP5 $s = S$ ならば $s := 1$ とし、それ以外の場合は $s := s + 1$ として**STEP3**へ。

STEP6 営業本部は、入札 (i, k) が (3.14) 式, (3.15) 式に示す販社の売上の割合の上下限制約を満たすかを判断する。(3.14) 式, (3.15) 式を満たしていないならば、制約を満たすまで入札 (i, k) に含まれた (3.16) 式を満たす販社 s が受注したオーダの中から1つをランダムに選択し入札から取り除く。(3.16) 式は、販社 s が入札 (i, k) に含まれるオーダの組合せが採用されることで最も大きな売上を得る販社であることを表す。入札 (i, k) から取り除く数量は、1から $q_{s,j,i,k}$ の範囲でランダムに決定する。ただし、 $\text{floor}(x)$ は x 以下の最大の整数である。

STEP7 の操作を行うことで3.3.2項で示す勝者決定問題の制約式 (3.25) 式, (3.26) 式を満たすことが出来なくなることを防ぐために (3.14) 式, (3.15) 式では上下限

制約の判定に $\text{floor}(\frac{q_{s,j,i,k}}{I})$ を用いた.

$$\left(\sum_{s=1}^S \sum_{s=1}^{J_s} SP_{s,j} \times \text{floor}\left(\frac{q_{s,j,i,k}}{I}\right)\right) \times UL_{s'} \leq \sum_{j'=1}^{J_{s'}} SP_{s',j'} \times \text{floor}\left(\frac{q_{s',j',i,k}}{I}\right) \quad (\forall s') \quad (3.14)$$

$$\sum_{j'=1}^{J_{s'}} SP_{s',j'} \times \text{floor}\left(\frac{q_{s',j',i,k}}{I}\right) \leq \sum_{s=1}^S \sum_{s=1}^{J_s} SP_{s,j} \times \text{floor}\left(\frac{q_{s,j,i,k}}{I}\right) \times UL_{s'} \quad (\forall s') \quad (3.15)$$

$$\sum_{j=1}^{J_s} SP_{s,j} \times q_{s,j,i,k} \geq \sum_{j'=1}^{J_{s'}} SP_{s',j'} \times x_{s',j',i,k} \quad (\forall s') \quad (3.16)$$

STEP7 全てのオーダ (s, j) について, (3.17) 式に従い一部を入札 (i, k) から取り除く.

$$q_{s,j,i,k} := \text{floor}\left(\frac{q_{s,j,i,k}}{I}\right) \quad (\forall i, \forall j) \quad (3.17)$$

STEP3 から **STEP5** の操作を繰り返すことで, 各販社から順番に1つずつオーダを選択し入札に追加する. 製造拠点の部品在庫量か生産能力の上限までオーダが追加されるか, ある販社が受注した全てのオーダが追加されるまで **STEP3** から **STEP5** の操作が繰り返される. **STEP6** の操作を行うことで原問題の実行可能解が得られ, **STEP6** の操作により勝者決定問題で実行可能解が得られることが保証された初期入札を得る.

Fig. 3.3に **STEP 7** に到達するまでの初期解作成の例を示す.

オークション2回目以降の入札作成

2.3節でも述べた通り, 本論文で提案する組合せオークションを用いたスケジューリング手法では1人あたりの入札数を制限した上でオークションを複数回行うことで原問題の準最適解を得ることを目指す.

オークションの2回目以降では, 各入札者は前回のオークションで勝者となった自身の入札と同じ財の組合せと, その近傍に入札を行う. 以下の3つの戦略の中から1つをランダムに選択しそれに従い近傍を作成する.

追加 : 勝者となった入札に新たなオーダを追加する.

削除 : 勝者となった入札に含まれていたオーダを取り除く.

交換 : オーダの追加とオーダの削除を同時に行う.

追加/削除するオーダを選択する際にはルーレット選択を用いる. 追加/削除するオーダを選択する拠点を選択者と呼び, 選択者にとって満足度が高いオーダほど高い確率で入札に追加され, 満足度が低いオーダほど高い確率で入札から取り除かれる. 満足度非共有の場合は常に選択者は入札者自身であり, 満足度を共有する場合は全ての拠点の中から1拠点をランダムに選択し, その拠点を選択者とする.

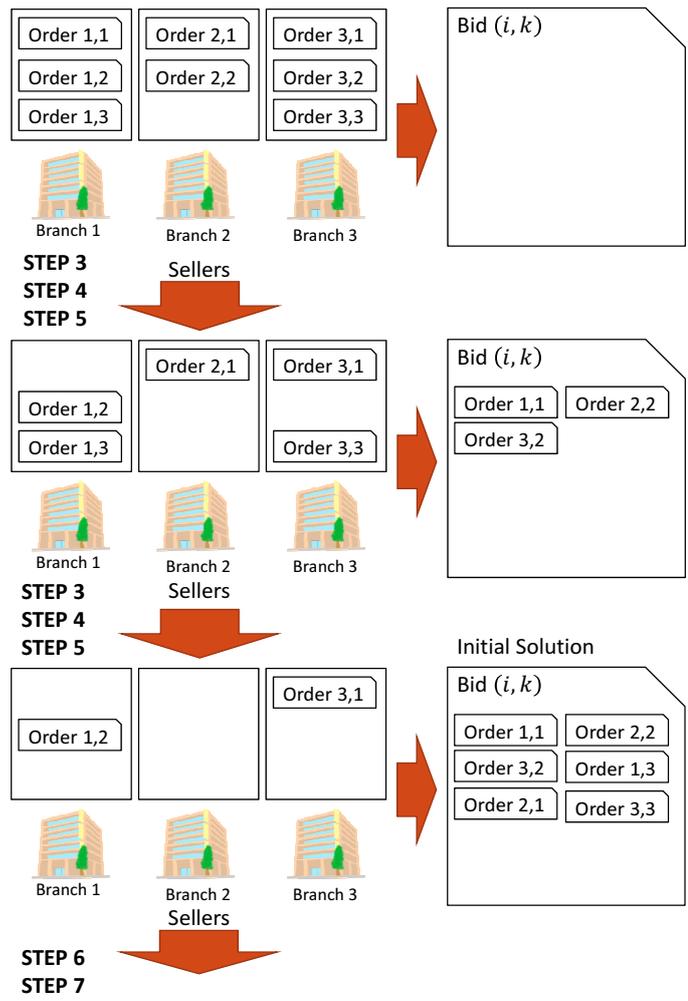


Fig. 3.3: Process of making a first bid

各オーダーに対する満足度を拠点間で共有する場合と共有しない場合とでこれらの戦略の意図が異なる。満足度が非共有の場合、各入札者は自身の満足度を基準に追加/削除するオーダーを決定することで、他の拠点に対してより強気な姿勢をとることを表している。一方、満足度を共有する場合は、自身もしくは他の入札者の満足度を用いて追加/削除するオーダーを決定する。これは、入札作成の際に他入札者の意見も取り入れることでサプライチェーン全体として最適な計画を目指すことを表している。

オーダーの追加

以下にアルゴリズムを示す。

STEP1 入札者 i の入札 k を作成する。満足度を拠点間で共有するならば **STEP2-1** へ。共有しないならば **STEP2-2** へ。

STEP2-1 この入札の入札者も含め全ての入札者の中から1つをランダムに選択し、追加するオーダーを決める選択者 ci とする。 **STEP3** へ。

STEP2-2 この入札の入札者を追加するオーダーを決める選択者 ci とする。 **STEP3** へ。

STEP3 選択者 ci は追加するオーダーを決定する。販社 s のオーダー j が選択される確率 $Pa_{s,j}$ はそのオーダーに対する選択者 ci の満足度 $Si_{s,j,ci}$ を用いて (3.18) 式で表される。

$$Pa_{s,j} = \frac{Si_{s,j,ci}}{\sum_{s'=1}^S \sum_{j'=1}^{J_{s'}} Si_{s',j',ci}} \quad (3.18)$$

ただし、前回のオークションで採用された選択されたオーダーの数量 $Wo_{s,j}$ と発注数量 $L_{s,j}$ が等しければ追加するオーダーを選択し直す。

STEP4 入札に追加する選択されたオーダーの数量を決定する。選択者が製造拠点の場合か、3.2.5項で述べた製造拠点の部品在庫を共有する場合ならば **STEP5-1** へ。部品在庫量に関する情報を非共有かつ選択者 ci が営業本部か調達・販売管理部門ならば **STEP5-2** へ。

STEP5-1 選択者 ci は製造拠点の保持する部品在庫量に関する情報を参考に、(3.19) 式に従い追加する数量 $AL_{s,j,i,k}$ を決定する。ただし、そのオーダー (s,j) で発注された製品 p を製造するために必要な部品 c の集合 \mathbf{c}_p を $\mathbf{c}_p = \{c_1, c_2\}$ 、前回のオークションでオーダーに引当てられず余った部品 c の数を RP_c 、製品 p が属する品種を v_p 、前回のオークションの結果余剰となった品種 v_p の製品を製造するための生産能力を RM_{v_p} 、 $rand$ を0以上1未満の一様分布に従う確率変数とする。

$$AL_{s,j,i,k} = 1 + \text{floor}(\min\{(L_{s,j} - Wo_{s,j}), RP_{c_1}, RP_{c_2}, RM_{v_p}\} \times \text{rand}) \quad (3.19)$$

STEP5-2 (3.20) 式に従い追加するロット数 $AL_{i,j,b,k}$ を決定する.

$$AL_{s,j,i,k} = 1 + \text{floor}\{(L_{i,j} - Wo_{i,j}) \times \text{rand}\} \quad (3.20)$$

(3.19) 式と (3.20) 式の違いは、前回のオークションで部品に引当てられず余った部品 c_1 及び c_2 の数量 RP_{c_1} , RP_{c_2} 及び、品種 v_c を製造するための生産能力の余剰 RM_{v_c} についての情報を用いるかどうかである。(3.20) 式に従う場合は、選択者 ci が製造拠点の部品在庫量及び生産能力の上限に関する情報を持たないため、それらの情報を用いずに追加するロット数 $AL_{i,j,b,k}$ を決定する.

オーダーの削除

以下にアルゴリズムを示す.

STEP1 入札者 i の入札 k を作成する. 満足度を拠点間で共有するならば **STEP2-1** へ. 共有しないならば **STEP2-2** へ.

STEP2-1 この入札の入札者も含め全ての入札者の中から1つをランダムに選択し、取り除くオーダーを決める選択者 ci とする. **STEP3** へ.

STEP2-2 この入札の入札者を取り除くオーダーを決める選択者 ci とする. **STEP3** へ.

STEP3 選択者 ci は入札から取り除くオーダーを決定する. 既に入札に含まれているオーダーの中から販社 s のオーダー j が選択される確率 $Pr_{s,j}$ は (3.21) 式で表される. ただし、販社 s のオーダー j に対する選択者 ci の満足度を $Si_{s,j,ci}$, 前回のオークションで勝者となった入札者 i の入札に販社 s のオーダー j が1個以上含まれているならば1, 含まれていないならば0となる変数を $BP_{i,s,j}$ とする.

$$Pr_{s,j} = \frac{(1 - Si_{s,j,ci}) \times BP_{i,s,j}}{\sum_{s'=1}^S \sum_{j'=1}^{J_{s'}} (1 - Si_{s',j',ci}) \times BP_{i,s',j'}} \quad (3.21)$$

STEP4 (3.22) 式に従い、選択されたオーダー (s,j) を入札から何個取り除くかを決定する. 取り除く数量を $RL_{s,j,i,k}$, 前回のオークションで勝者となった入札者 i の入札に含まれる販社 s のオーダー j の数量を $LP_{s,j,i}$ とする.

$$RL_{s,j,i,k} = 1 + \text{floor}(LP_{s,j,i} \times \text{rand}) \quad (3.22)$$

3.3.2 勝者決定問題

以下に勝者決定問題の定式化を示す.

$$\max \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K BV_{i,k} \times x_{i,k} \quad (3.23)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K RC_{i,k,c} \times x_{i,k} \leq Y_c \quad (\forall c) \quad (3.24)$$

$$\left(\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K RS_{i,k} \times x_{i,k} \right) \times LL_s \leq \sum_{i'=1}^I \sum_{k'=1}^K \sum_{j=1}^{J_s} SP_{s,j} \times q_{s,j,i',k'} \times x_{i',k'} \quad (\forall s) \quad (3.25)$$

$$\sum_{i'=1}^I \sum_{k'=1}^K \sum_{j=1}^{J_s} SP_{s,j} \times q_{s,j,i',k'} \times x_{i',k'} \leq \left(\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K RS_{i,k} \times x_{i,k} \right) \times UL_s \quad (\forall s) \quad (3.26)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K RV_{i,k,v} \times x_{i,k} \leq PC_v \quad (\forall v) \quad (3.27)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K q_{s,j,i,k} \times x_{i,k} \leq L_{s,j} \quad (\forall s, \forall j) \quad (3.28)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{i,k} = 1 \quad (\forall i) \quad (3.29)$$

$x_{i,k}$ は入札者 i の入札 k の決定変数であり, この値が1の時に入札 (i, k) は勝者となり入札に含まれるオーダの組合せが今期に製造され, 0の時にこの入札は敗者となる.

目的関数は (3.23) 式で表され, 入札値 $BV_{i,k}$ の合計の最大化であり, 全ての拠点の満足度の平均の最大化を意味する. (3.24) 式から (3.29) 式は制約式であり, 以下にその詳細を述べる. (3.24) 式は製造拠点の保持する部品在庫の上限に関する制約であり, 勝者となる入札に含まれるオーダを全て製造するために必要な部品 c の数は製造拠点の在庫量 Y_c 以下でなければならないことを表す. (3.25) 式は販社の売上の配分比率の下限に関する制約であり, ある任意の販社 s の売上は全ての販社の売上の合計に対し LL_s 以上の割合でなければならないことを表す. (3.26) 式は販社の売上の配分比率の上限に関する制約であり, ある任意の販社 s の売上は全ての販社の売上の合計に対し UL_s 以下の割合でなければならないことを表す. (3.27) 式は製造拠点の生産能力に関する制約であり, 品種 v の製品を製造するための製造拠点の生産能力には上限 P_v があることを表す. (3.28) 式は販社 s のオーダ j には発注数量 $L_{s,j}$ があることを表す. (3.29) 式は各入札者の行った入札のうち必ず1つの入札が勝者となることを表す.

3.4 計算機実験

本節では, 提案する拠点間の交渉を模した近似解法の有効性及び, 提案手法を適用する上で企業間で情報共有を行うことの有効性を評価するために計算機実験を行う.

Table 3.3: Correlation coefficients of Datasets

Dataset		1	2	3
Company 1	Company 2			
Seller	PSM	0.17	-0.48	-0.06
PSM	Manufacturer	-0.03	-0.31	0.03
Seller	Manufacturer	-0.14	0.62	-0.09

需要予測を見誤った結果，ある1期に需要予測を超える発注があり部品及び生産能力が不足しているものとする．生産能力は作業者の残業や一時的な作業員数の増員により一部を補うことが可能であるが，部品はそのような対応が出来ないために，生産能力の不足よりも部品在庫量の不足の方が深刻であるという状況を想定している．

3.4.1 評価基準

計算機実験で得られた結果の評価基準は以下の通りである．

- *OF* : 目的関数の値 (営業本部，調達・販売管理部門，製造拠点の満足度の平均)
- *PART* : オーダに引き当てる事が出来ず余った部品の調達コストの合計 [円]
- *CT* : 計算時間 [秒]

3.4.2 実験条件

対象とするサプライチェーンにおいて取扱社は世界中に7拠点あるとし，その中の1拠点は新興国に拠点を構えており新興国に拠点を構える取扱社が受注したオーダはいずれの拠点にとっても満足度が低いオーダであるものとした．

計算機実験では，3種類のデータセットを用いた．データセット1は架空のデータセットであり各オーダに対する営業本部，調達・販売管理部門，製造拠点の満足度の間に相関はなく，オーダ数は100であり実データよりも小規模なデータセットである．データセット2は問題の規模及び拠点間の満足度について実データを参考に設定しており，営業本部にとって満足度が高いオーダは製造拠点にとっても満足度が高い傾向がある一方で，調達・販売管理部門にとって満足度が高いオーダは営業本部及び製造拠点にとっては満足度が低い傾向にある．データセット3は問題の規模は実データと同程度であるが，拠点間の満足度に相関はない．実データと同じように拠点間で満足度に相関があるデータセット2と，拠点間の満足度に相関がないデータセット1，3を用いて計算機実験を行う．3種類のデータセットにおける3拠点の満足度の相関係数を Table 3.3 に示す．

実験環境

実験にはIntel Xeon CPU E5-1650 16GB memoryのコンピュータを用い、勝者決定問題及び厳密解の求解にはIBM ILOG CPLEX 12.6[58]を用いた。

3.4.3 ナップサック問題としての定式化

現実のサプライチェーンでは全ての情報をヘッドクォータに集約することは困難であるが、サプライチェーンに関わる全ての情報をヘッドクォータに集約することが可能である場合は対象の問題をナップサック問題として定式化し、厳密解を得ることが可能となる。そこで提案手法を評価するための比較手法としてナップサック問題として定式化し、計算機ソルバを用いてその厳密解を得る。新たに以下の記号を定義し、ナップサック問題としての定式化を(3.30)式から(3.36)式に示す。

$x_{s,j}$: 販社 s のオーダー j で発注された製品の製造数量を表す決定変数

$$\max \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{J_s} \frac{SS_{s,j} + PS_{s,j} + MS_{s,j}}{3} \times x_{s,j} \quad (3.30)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{J_s} y_{s,j,c} \times x_{s,j} \leq Y_c \quad (\forall l) \quad (3.31)$$

$$\left(\sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{J_s} SP_{s,j} \times x_{s,j} \right) \times LL_{s'} \leq \sum_{j'=1}^{J_{s'}} SP_{s',j'} \times x_{s',j'} \quad (\forall s') \quad (3.32)$$

$$\sum_{j'=1}^{J_{s'}} SP_{s',j'} \times x_{s',j'} \leq \left(\sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{J_s} SP_{s,j} \times x_{s,j} \right) \times UL_{s'} \quad (\forall s') \quad (3.33)$$

$$\sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{J_s} m_{s,j,v} \times x_{s,j} \leq PC_v \quad (\forall v) \quad (3.34)$$

$$x_{s,j} \leq L_{s,j} \quad (\forall s, \forall j) \quad (3.35)$$

$$x_{s,j} \geq 0 \quad (\forall s, \forall j) \quad (3.36)$$

目的関数は(3.30)式であり、サプライチェーンを構成する各拠点の満足度の平均を最大化することを目的とする。 $x_{s,j}$ は決定変数であり、この値が販社 s のオーダー j で発注された製品の製造数量となる。(3.31)式から(3.36)式は制約式である。(3.31)式は製造拠点の部品 c の在庫数量には上限 Y_c があることを表す。(3.32)式は販社の売上の配分比率の下限に関する制約であり、ある任意の販社 s' の売上は全ての販社の売上の合計に対し $LL_{s'}$ 以上の割合でなければならないことを表す。(3.33)式は販社の売上の配分比率の上限に関する制約であり、ある任意の販社 s' の売上は全ての販社の売上の合計に対し $UL_{s'}$ 以下の割合でなければならないことを表す。(3.34)式は、製造拠点の品種

v の製品を製造するための生産能力には上限 PC_v があることを表す。(3.35)式は、販社 s のオーダー j の製造数量 $x_{s,j}$ は発注数量 $L_{s,j}$ 以下でなければならないことを表す。(3.36)式は、発注数量は非負であることを表す。

3.4.4 実験1 提案手法の性能評価

実験1では、Table 3.4に示した2種類の実験条件に対して提案手法を適用した。表中のPossetion rateは、全ての発注を製造するために必要な部品 c の個数に対する製造拠点 i が保持する部品 c の個数の割合を表す。実験1では、ナップサック問題として定式化することで得た最適解と比較することで提案する企業間の交渉を模したスケジューリング手法の有効性を評価する。提案手法では3.2.5項で述べた満足度と部品在庫量の両者が非共有であるとする。実験条件1及び実験条件2に対して1入札者あたりの入札数 K を変更し提案手法を適用した結果をTable 3.5に示す。表中のAvg.は100試行の平均を表し、S.D.は標準偏差を表す。

目的関数値 OF

実験条件1に対して提案手法を適用した時の目的関数値 OF は、1入札者あたりの入札数 K が10, 20, 30, 50, 100, 150, 200の時にそれぞれ1664.2, 1675.4, 1685.4, 1696.1, 1713.9, 1717.8, 1717.8となった。提案手法で得た解の目的関数値を厳密解の目的関数値1774.0と比較すると、 $1664.2/1774.0 \simeq 93.8[\%]$, $1675.2/1774.0 \simeq 94.4[\%]$, $1685.4/1774.0 \simeq 95.0[\%]$, $1696.1/1774.0 \simeq 95.6[\%]$, $1713.9/1774.0 \simeq 96.6[\%]$, $1717.8/1774.0 \simeq 96.8[\%]$, $1717.8/1774.0 \simeq 96.8[\%]$ の値が得られた。

実験条件2に対して提案手法を適用した時の目的関数値は、1入札者あたりの入札数 K が10, 20, 30の時に9424.9, 9585.7, 9635.3となった。提案手法で得た解の目的関数値を、厳密解の目的関数値10001.2と比較すると、 $9424.9/10001.2 \simeq 94.2[\%]$, $9585.7/10001.2 \simeq 95.8[\%]$, $9635.3/10001.2 \simeq 96.3[\%]$ の値が得られた。

入札数 K

実験条件1, 2の両方で、1入札者あたりの入札数 K が多い時ほど目的関数値が良い値となる傾向にあった。

1入札者あたりの入札数 K を増やすことの影響について検討するために、1入札者あたりの入札数が K の時に得られる目的関数値 OF と $K'(K \neq K')$ の時に得られる目的関数値 OF の間に有意差がないという帰無仮説を設定し、この仮説を棄却することが出来るか t 検定を行った結果をTable 3.6に示す。この時の帰無仮説の棄却域は有意水準0.05未満とした。表中の*は仮説が棄却され有意差があったことを表す。

実験条件1において、1入札者あたりの入札数 K が100の時と150の時及び、150の時

Table 3.4: Experimental Conditions

Experimental Condition	1	2
Dataset	1	2
Sellers S	7	7
Orders $\sum_{s=1}^S J_s$	100	400
Ordering quantity (Min.) $\min L_{s,j}$	1	5
Ordering quantity (Max.) $\max L_{s,j}$	100	4000
Products P	88	179
Parts C	40	211
Parts (Category 1)	25	72
Parts (Category 2)	15	139
Min. Possession rate[%]	20	20
Max. Possession rate[%]	100	50
Sales (Smallest) $\min SP_{s,j}$	40,000	400,000
Sales (Highest) $\max SP_{s,j}$	90,000	1,028,000
Customer Priority $CP_{s,j}$	Highest(5), High(4), Normal(3) Low(2), Lowest(1)	
Min. Profit $\min GM_{s,j}$	0	0
Max. Profit $\max GM_{s,j}$	26460	328,000
Min. Parts Cost $\min PP_c$	500	650
Max. Parts Cost $\max PP_c$	3000	4250
Invenroty asset	24,441,000	42,972,400
Production capacity (Cat. 1) PC_1	3506	25000
Production capacity (Cat. 2) PC_2	1276	5000
Required capacity (Cat. 1)	3506	40028
Required capacity (Cat. 2)	1276	7905
Min. ratio of Sales LL_s	1	1
Max. ratio of Sales UL_s	50	50
Bids per bidder K	10,20,30,50	
	100,150,200	10,20,30
Iteration of auction Ite	500	500
Trials	100	100

と200の時の目的関数値 OF に有意差がないという帰無仮説が採択された。なお、他の入札数の組合せ K, K' の場合は全て帰無仮説が棄却され、得られた目的関数値 OF に有意差があることがわかった。このことから、探索性能の高めるために1入札者あたりの入札数が増やしたとしてもその効果は徐々に小さくなると考えられる。

Table 3.5: Results with Exact Solution

	K	OF		$PART$		$CT[s]$	
		Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
Experimental Condition 1	10	1664.2	26.4	3,554,150	47,475	5.0	1.1
	20	1675.4	25.3	3,563,658	45,597	7.9	1.6
	30	1685.4	24.4	3,567,903	43,929	9.7	1.4
	50	1696.1	21.1	3,567,308	40,950	17.7	2.4
	100	1713.9	15.6	3,583,989	34,049	28.5	2.2
	150	1717.8	13.9	3,586,620	30,525	41.6	3.0
	200	1718.8	15.4	3,581,761	35,634	57.0	5.4
(Optimal Solution)		1774.0		3,629,640		0.4	
Experimental Condition 2	10	9424.9	173.9	5,323,173	858,969	9.9	1.3
	20	9585.7	92.9	5,381,827	419,911	18.6	1.7
	30	9635.3	91.2	5,294,574	421,978	35.0	1.4
(Optimal Solution)		10001.2		5,535,151		0.4	

Table 3.6: p -value between K and K'

Experimental Condition 1			Experimental Condition 2		
K	K'	p -value	K	K'	p -value
10	20	$*2.5 \times 10^{-3}$	10	20	$*1.6 \times 10^{-13}$
20	30	$*5.4 \times 10^{-3}$	20	30	$*4.0 \times 10^{-239}$
30	50	$*1.1 \times 10^{-3}$			
50	100	$*3.3 \times 10^{-3}$			
100	150	5.2×10^{-2}			
150	200	6.5×10^{-1}			

計算時間 CT

1入札者あたりの入札数 K を増やすことによる目的関数値への影響は徐々に小さくなる一方で、計算時間 CT は1入札者あたりの入札数 K が増えると長くなる。データセット1に対して提案手法を適用した時、1入札者あたりの入札数 K が10の時の計算時間は平均5.0[s]、入札数 K が100の時の計算時間 CT は平均28.5[s]、入札数 K が200の時の計算時間 CT は平均57.0[s]であった。提案手法では、オークションが1回行われるごとに入札作成と勝者決定問題の最適化が行われる。入札数 K が10の時、入札作成にかかった時間の平均はオークション1回あたり5.9[ms]であり、勝者決定問題の最適化にかかった時間の平均は7.2[ms]であった。入札数 K が100の時は、入札作成にかかった時間の平均はオークション1回あたり15.2[ms]であり、勝者決定問題の最適化にかかった時間の平均

均32.6[ms]であった。入札数 K が200の時は、入札作成にかかった時間の平均はオークション1回あたり38.2[ms]であり、勝者決定問題の最適化にかかった時間の平均64.3[ms]であった。入札数 K が100の時の入札作成にかかった時間は入札数 K が10の時の2.6倍となり、入札数 K が200の時は入札数 K が10の時の6.8倍となった。また、入札数 K が100の時の勝者決定問題の最適化にかかった時間は入札数 K が10の時の4.5倍となり、入札数 K は入札数 K が10の時の8.9倍となった。入札数 K の増加に対しては、入札作成よりも勝者決定問題の最適化の方が大きな影響を受けることがわかった。

勝者決定問題の計算量は $O(2^{I \times K})$ であり、計算時間 CT は入札数 K に対して指数関数的に増加することが考えられるが、入札者数 I 及び1入札者あたりの入札数 K がソルバを用いて厳密解を得るには十分に規模が小さかったために計算時間 CT への影響も小さかった。

次に、ナップサック問題として定式化し最適化した時の計算時間と、提案手法の計算時間 CT を比較する。ナップサック問題として定式化し計算機ソルバを用いて最適化した時の計算時間は、実験条件1, 2の両方で0.2[s]であり提案手法を用いて準最適解を得るよりも短い時間で厳密解を得ることが出来た。これは、提案手法ではオークションを Ite 回繰り返し、1回ごとに各入札者の入札作成と勝者決定問題の最適化を行っていることと、用いたデータセットが計算機ソルバを用いて最適化するには規模が十分に小さいことが理由である。採算が独立した複数の企業で構成されるサプライチェーンのように全ての情報を公開・拠点間で共有しヘッドクォータに集約することは困難である場合は、ナップサック問題として定式化することが出来ないために本章で提案した手法を用いる必要がある。

勝者決定問題の計算時間に影響を与える実験条件の内、指数関数的な影響を与えるのは、入札者数 I と1入札者あたりの入札数 K の2つである。入札者数 I はサプライチェーンを構成する企業の内交渉に参加する企業の数であり敵案手法を用いる際に自由に変更することが出来ない。提案手法を用いる際に変更可能であるのは、1入札者あたりの入札数 K のみである。

オークションの繰り返し回数 Ite

次に、オークションの繰り返し回数 Ite に着目し計算機実験を行う。1入札者あたりの入札数 K が大きい時ほど提案手法で得られる解の目的関数値 OF は良い値となったが、問題の規模が大きい時は1入札者あたりの入札数 K の増加に対して指数関数的に計算時間が増加すると考えられる。そのため、実時間内に勝者決定問題の最適解を得るためには設定可能な入札数 K に上限がある。一方、オークションの繰り返し回数 Ite を大きくした時は、組合せオークション1回あたりの計算時間には影響がないため、提案手法の計算時間 CT は一次関数的な増加で抑えられる。オークションを十分な回数繰

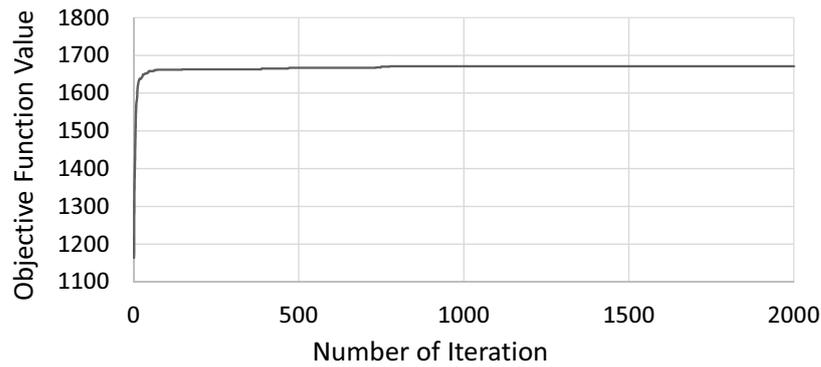


Fig. 3.4: A transition of the value of the objective function when K is 10

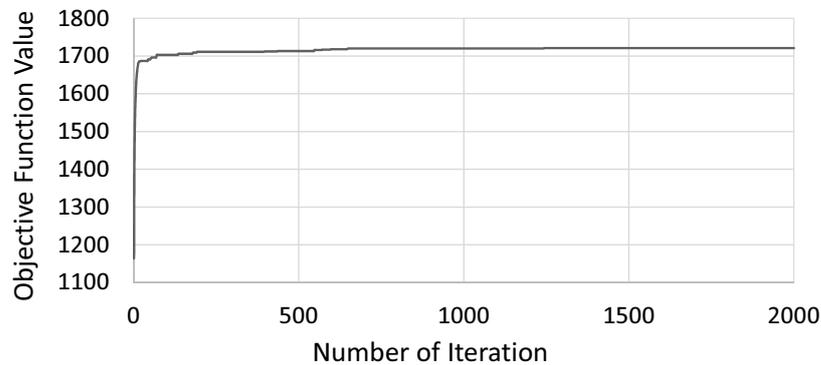


Fig. 3.5: A transition of the value of the objective function when K is 100

り返すことで、入札数 K を増やした時と同程度の目的関数値 OF を持つ解を得ることが出来るかについて検討する。

オークションの繰り返し回数 Ite を 2000 とし、1 入札者あたりの入札数 K を 10, 100 とした時のオークションの繰り返しの過程での目的関数値 OF の推移を Fig. 3.4, Fig. 3.5 に示す。入札数 K が 10 の時オークションを 2000 回繰り返す ($Ite = 2000$) ためにかかった計算時間は 20.5[s] であり、入札数 K が 100 の時の計算時間は 76.3[s] であった。

Fig. 3.4 から、1 入札者あたりの入札数 K が 10 の時はオークションが 100 回程度繰り返された時点で局所に陥り、それ以降目的関数値はほぼ改善しなかったことがわかる。その後、局所解から脱出し目的関数値 OF が改善することが数回はあったものの、得られた解の目的関数値はオークションが 500 回繰り返された時点のものとはほぼ差がなかった。同様に Fig. 3.5 から、1 入札者あたりの入札数 K が 100 の時はオークションが 200 回程度繰り返された時点で局所に陥り、それ以降目的関数値はほぼ改善しなかった。

次に、1 入札者あたりの入札数 K を 10 とし、オークションの繰り返し回数 Ite を設定せずに、提案手法を用いて最適化を開始してから指定の時間が経過した時点で得られている解を出力した。1 入札者あたりの入札数 K が 200 の時の計算時間を参考に、計算

Table 3.7: Results of Experiments stopped at a predetermined time

K	OF		$PART$		$CT[s]$	
	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
10	1673.9	25.9	3,546,784	50,321	57.0	0.0
(Competitive) 200	1718.8	15.4	3,581,761	35,634	57.0	5.4

を打ち切る時間を57.0[s]後とした。得られた結果をTable 3.7に示す。表中の値は全て100試行の平均である。計算時間が57.0[s]経過した時点でオークションを終了した時、1入札者あたりの入札数 K が10の目的関数値は、入札数 K が200の場合よりも悪い値となった。Fig. 3.4にも示したように、オークションの100回目以降は目的関数値 OF がほぼ改善しておらず、一度局所に陥った後はそれ以上オークションを繰り返しても急激に目的関数値が改善することはないと考えられる。

これらから、局所に陥るまで十分にオークションを繰り返した後、同じ計算時間でオークションを終了するならば、提案手法はオークションの繰り返し回数 Ite を増やすよりも1入札者あたりの入札数 K を増やす方がより良い目的関数値を持つ解を得ることが出来ることがわかった。しかし、1入札者あたりの入札数 K もある程度大きくなると目的関数値に与える影響は徐々に小さくなるため、計算時間の短縮と良い目的関数値を両立させるには適切なパラメータ設定が重要となる。

引き当てられず余った部品の調達コストの合計 $PART$

オーダに引き当てられず余った部品の調達コストの合計 $PART$ は、データセット1,2の両方の場合で厳密解よりも小さな値となった。提案手法で得られた解では、厳密解よりも多くのオーダに部品在庫を引き当てたために余った部品の調達コストの合計 $PART$ は小さな値となったものの、部品が引き当てられたオーダに対する各拠点の満足度が低かったために目的関数値 OF は厳密解よりも悪い値となったと考えられる。

提案手法では、入札作成の際に各入札者が行う K 個の入札の内、1つを前回のオークションで勝者となった自身の入札と同じ財の組合せとすることで、目的関数値の改悪を防ぐ。引き当てられた部品在庫の一度手放した上で次回のオークションで別のオーダに引き当てることが出来ないために、引き当てられた部品在庫を手放す入札と、手放された部品在庫と同じ種類の部品を求める入札の両方が一度のオークション中に同時に存在する必要がある。そのため、提案手法では探索の過程で局所解から効率的に脱出することが出来ず、余った部品の調達コスト $PART$ は厳密解よりも小さいものの、目的関数値 OF は厳密解よりも悪い値となったと考えられる。

Table 3.8: Experimental Conditions (Common)

Dataset	2,3
Sellers S	7
Orders $\sum_{s=1}^S J_s$	400
Ordering quantity (Min.) $\min L_{s,j}$	5
Ordering quantity (Max.) $\max L_{s,j}$	4000
Products P	179
Parts C	211
Parts (Category 1)	72
Parts (Category 2)	139
Sales (Smallest) $\min SP_{s,j}$	400,000
Sales (Highest) $\max SP_{s,j}$	1,028,000
Customer Priority $CP_{s,j}$	Highest(5), High(4), Normal(3), Low(2), Lowest(1)
Min. Profit $\min GM_{s,j}$	0
Max. Profit $\max GM_{s,j}$	328,000
Min. Parts Cost $\min PP_c$	650
Max. Parts Cost $\max PP_c$	4250
Production capacity (Cat. 1) PC_1	25000
Production capacity (Cat. 2) PC_2	5000
Required capacity (Cat. 1)	40028
Required capacity (Cat. 2)	7905
Min. ratio of Sales LL_s	1
Max. ratio of Sales UL_s	50
Bids per bidder K	30
Iteration of auction Ite	500
Trials	100

Table 3.9: Experimental Conditions (Differs with Condition)

Experimental Condition	1	2	3	4
Min. Possession rate[%]	20	30	30	50
Max. Possession rate[%]	50	70	100	100
Invenroty asset	42,972,400	59,294,250	86,167,620	91,122,480

3.4.5 実験2 情報共有の有効性の評価

実験2では交渉の過程での企業間の情報共有の有効性を評価するために計算機実験を行う。提案手法において情報共有することが、得られる解に与える影響について検討する。共有する情報は各拠点の各オーダーに対する満足度と、製造拠点の保持する部品在庫及び生産能力の2種類とし、両方を共有しない場合、いずれか1つを共有する場合、両方を共有する場合の4パターンについて計算機実験を行った。

2種類のデータセットを用いて、4種類の実験条件の下で計算機実験を行った。実験に用いたデータセットは3.4.2項で述べたデータセット2,3とした。製造拠点の部品在庫量に着目し、現実のサプライチェーンで起こりうるいくつかの典型的な状況を想定し、4種類の実験条件の下で計算機実験を行った。4種類の実験条件で共通の設定をTable 3.8, それぞれ異なる設定をTable 3.9に示す。用いた4種類の実験条件で想定した状況は、以下の通りである。

実験条件1：部品在庫が大変不足している状況（在庫が必要量の20から50[%]）

実験条件2：不足している状況（必要量の30から70[%]）

実験条件3：不足しているものと足りているもの間に大きな差がある状況（必要量の30から100[%]）

実験条件4：一部の部品は必要数量ある状況（必要量の50から100[%]）

部品在庫量に関する4つの実験条件の下でデータセット2, データセット3に対して提案手法を適用し得られた結果をTable 3.10, Table 3.11に示す。表中のPartsは部品在庫量及び生産能力の情報共有・非共有, Satisfactionは満足度の情報共有・非共有を表し, Unshareは非共有, Shareは共有することを表す。Avg.は100試行の平均, S.D.は標準偏差を表す。

情報共有が得られる目的関数値 OF に与える影響について検討するために、部品在庫量と生産能力及び満足度を共有する場合と共有しない場合の間で得られた目的関数値 OF に有意差がないという帰無仮説を設定し、この仮説を棄却することが出来るか t 検定を行う。Table 3.10, Table 3.11に示した実験結果の目的関数値 OF について、部品在庫量と生産能力及び満足度の共有の有無の条件が異なる2グループの間で t 検定を行った結果をTable 3.12に示す。表中のParts, Satisfactionは部品在庫量及び満足度の情報の共有・非共有を表し, Uは非共有, Sは共有することを表す。帰無仮説の棄却域は有意水準0.05未満とする。表中の*印は仮説が棄却され、有意差があったことを表す。

満足度の共有・非共有による目的関数値 OF への影響

Table 3.10に示した通りデータセット2に対し満足度のみを共有し交渉を行った時の目的関数値 OF は、満足度と部品在庫量及び生産能力の両方を共有しない場合と比較

Table 3.10: Effectiveness of Information Sharing (Dataset 2)

	Parts	Satisfaction	BS		PART		CT	
			Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
Ex. 1	Unshare	Unshare	7019.5	61.9	4,279,658	204,993	35.0	1.4
	Unshare	Share	7010.0	62.2	4,261,003	207,463	35.3	1.4
	Share	Unshare	7056.0	60.8	4,173,519	231,638	41.2	1.5
	Share	Snshare	7058.1	53.4	4,180,437	211,511	41.3	1.5
Ex. 2	Unshare	Unshare	9635.3	91.2	5,294,574	421,978	35.0	1.4
	Unshare	Share	9630.0	91.5	5,301,226	395,961	35.3	1.4
	Share	Unshare	9715.5	81.7	5,028,958	390,384	41.2	1.5
	Share	Share	9702.4	76.5	5,115,284	387,265	41.3	1.5
Ex. 3	Unshare	Unshare	12963.4	47.3	16,085,942	102,908	38.4	1.2
	Unshare	Share	12964.9	40.7	16,092,586	97,328	39.6	1.4
	Share	Unshare	12997.7	35.5	16,097,892	103,351	44.2	1.5
	Share	Share	12989.1	46.1	16,111,800	89,962	44.8	1.3
Ex. 4	Unshare	Unshare	13969.5	43.1	14,551,377	152,383	44.7	1.9
	Unshare	Share	13975.7	46.6	14,572,372	155,675	45.7	2.6
	Share	Unshare	14016.2	30.1	14,675,654	98,912	49.7	2.1
	Share	Share	14021.5	33.2	14,675,285	117,598	50.3	4.5

し実験条件1, 2に対しては僅かに悪化し, 実験条件3, 4に対しては僅かに改善した. 同様に Table 3.11 に示したようにデータセット3に対しては, 満足度のみを共有した時の目的関数値 OF は両方を非共有の場合と比較し実験条件1, 2, 3に対しては僅かに悪化し, 実験条件4に対しては僅かに改善した. Table 3.12 に示した通り, 満足度のみを共有する場合と, 両方を共有しない場合の目的関数値 OF に有意差がないという帰無仮説を設定し t 検定を行ったところ, 2種類のデータセットと4つの実験条件の全ての場合で帰無仮説が採択され目的関数値 OF に有意差がないことがわかった.

入札作成の際に他の入札者の意見を取り入れることにより, たとえ自身の満足度が低下したとしても他者の満足度がより高くなるような入札を作成することが満足度を共有することの狙いである. 一方, 3.3.1 項で述べた入札作成方法では選択者 c にとって満足度が低い/高いオーダであっても低い確率で追加/削除される. 満足度非共有の場合は, 低確率で自身にとっては満足度が低くなるような入札を作成し, 他の企業の満足度がより大きくなるような計画を得ることを目指す. ただし, ある入札者にとって満足度が低い/高いオーダが常に別の入札者にとっては満足度が高い/低いオーダであるとは限らない. オークションを繰り返す過程で偶然そのような入札が作成され, 目的関数値が改善したと考えられる. 他の入札者の意見を取り入れることと, 低い確率で自身にとって満足度が低下するような入札を作成することが同じ働きであったため

Table 3.11: Effectiveness of Information Sharing (Dataset 3)

	Parts	Satisfaction	<i>OF</i>		<i>PART</i>		<i>CT</i> [s]	
			Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
Ex. 1	Unshare	Unshare	6666.7	105.0	4,395,478	438,702	44.2	7.3
	Unshare	Share	6647.4	97.9	4,424,817	336,854	45.4	8.3
	Share	Unshare	6778.1	79.2	4,335,498	293,499	52.6	8.2
	Share	Share	6777.1	77.6	4,360,686	271,163	53.3	8.7
Ex. 2	Unshare	Unshare	9071.4	118.7	5,436,026	428,276	43.6	5.9
	Unshare	Share	9054.6	107.5	5,400,638	389,155	45.2	6.1
	Share	Unshare	9201.1	98.5	5,289,897	388,781	51.2	6.9
	Share	Share	9196.7	107.1	5,275,394	393,186	51.6	6.6
Ex. 3	Unshare	Unshare	12396.1	71.0	15,971,757	65,451	48.9	5.0
	Unshare	Share	12387.2	83.2	15,972,148	55,595	50.1	5.1
	Share	Unshare	12474.1	68.2	15,961,314	58,793	55.5	5.4
	Share	Share	12471.9	70.7	15,963,443	46,553	56.4	5.3
Ex. 4	Unshare	Unshare	13545.3	85.3	14,248,770	163,254	60.0	5.2
	Unshare	Share	13546.8	74.1	14,253,058	171,351	61.0	5.0
	Share	Unshare	13624.2	53.1	14,338,050	174,231	66.8	5.4
	Share	Share	13645.0	58.6	14,356,248	166,318	68.0	4.6

に、満足度の共有・非共有で得られた目的関数値に有意差がなかったと考えられる。

データセット2に対し実験条件1の条件下で提案手法を適用した時の、オークションが100回繰り返されるまでの目的関数値の推移をFig. 3.6に示す。満足度を共有・非共有のそれぞれの場合について実験を行い、部品在庫量及び生産能力は情報非共有とした。目的関数値*OF*は満足度の共有・非共有に依らずほぼ同じ値で収束した。目的関数値*OF*の収束までにかかったオークションの繰り返し回数は、満足度を共有した場合の方が少なかった。満足度非共有の場合は入札者は低い確率で自身にとって満足度が低いオーダを追加し満足度が高いオーダを削除することで他者にとって満足度が高いオーダを追加し満足度が低いオーダを削除することを狙うが、そのオーダが他の入札者にとって満足度が高い/低いかどうかは考慮されない。オーダを追加/削除する際に入札者にとっては満足度が低い/高いオーダを選択した時に、そのオーダが偶然他者にとって満足度が高い/低いオーダである場合がある。他者にとって満足度が高い入札が偶然作成されることで、目的関数値が改善される場合がある。しかし、そのためにはオークションを十分に繰り返す必要がある。

一方、満足度を共有した場合は他者にとっても満足度が高い入札を効率的に作成することが可能となるために、より少ないオークションの繰り返し回数で目的関数値が収束したと考えられる。問題の規模が極端に大きくオークション1回あたりにかかる

Table 3.12: p -values between two groups

Group 1		Group 2		Dataset 2			
Parts	Sat.	Parts	Sat.	Ex.1	Ex. 2	Ex.3	Ex. 4
U	U	U	S	0.28	0.68	0.81	0.34
U	U	S	U	$*4.3 \times 10^{-5}$	$*5.9 \times 10^{-10}$	$*3.1 \times 10^{-8}$	$*5.9 \times 10^{-16}$
U	U	S	S	$*4.8 \times 10^{-6}$	$*6.8 \times 10^{-8}$	$*1.5 \times 10^{-4}$	$*7.3 \times 10^{-18}$
U	S	S	S	$*2.1 \times 10^{-8}$	$*7.4 \times 10^{-9}$	$*1.3 \times 10^{-5}$	$*1.3 \times 10^{-13}$
S	U	S	S	0.80	0.25	0.14	0.24
Group 1		Group 2		Dataset 3			
Parts	Sat.	Parts	Sat.	Ex.1	Ex. 2	Ex.3	Ex. 4
U	U	U	S	0.18	0.18	0.42	0.89
U	U	S	U	$*7.1 \times 10^{-15}$	$*3.2 \times 10^{-23}$	$*2.0 \times 10^{-13}$	$*5.5 \times 10^{-13}$
U	U	S	S	$*7.7 \times 10^{-15}$	$*8.3 \times 10^{-21}$	$*1.8 \times 10^{-12}$	$*6.7 \times 10^{-18}$
U	S	S	S	$*2.7 \times 10^{-20}$	$*1.2 \times 10^{-27}$	5.6×10^{-13}	$*4.6 \times 10^{-20}$
S	U	S	S	0.93	0.70	0.82	*0.010

Table 3.13: Exact solutions

		OF	$PART$	CT
Dataset 2	Ex. 1	7286.6	3,600,550	0.5
	Ex. 2	10001.2	5,535,151	0.4
	Ex. 3	13139.1	15,958,640	0.4
	Ex. 4	14143.2	14,774,550	0.5
Dataset 3	Ex. 1	7353.8	3,611,950	0.5
	Ex. 2	9867.8	3,995,940	0.4
	Ex. 3	12940.7	15,904,280	0.4
	Ex. 4	13959.3	14,009,790	0.4

計算時間が膨大である時は、満足度を共有することでより効率的に準最適解を得ることが出来る。

部品在庫量及び生産能力の共有・非共有による目的関数値 OF への影響

次に、部品在庫量及び生産能力の共有・非共有が、得られた目的関数値 OF に与える影響について検討する。

Table 3.10 に示したようにデータセット2に対し部品在庫量のみを共有し交渉を行った時の目的関数値は、情報共有しない場合と比較し4種類の実験条件に対して目的関数値 OF は平均0.49%改善した。同様に Table 3.11 に示したようにデータセット3に対しては、部品在庫量のみを共有した時の目的関数値 OF は、非共有の場合と比較し4種類の実験条件に対しては平均1.08%改善した。Table 3.12 に示した通り、満足度のみを共有

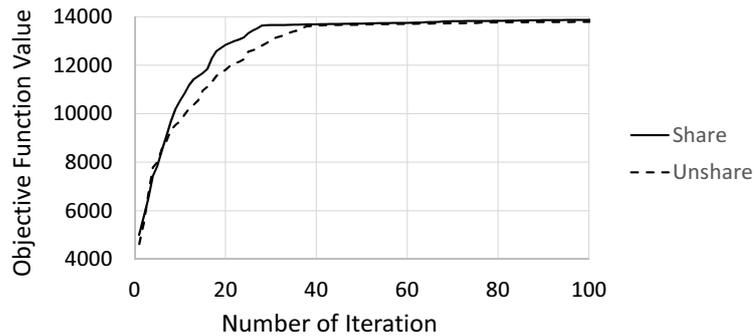


Fig. 3.6: The effects of sharing information on a transition of OF

する場合と情報共有しない場合の目的関数値 OF に有意差がないという帰無仮説を設定し有意差検定を行ったところ，2種類のデータセットと4つの実験条件の全ての場合で帰無仮説が棄却され目的関数値 OF に有意差があることがわかった。

Table 3.12 に示したように満足度と部品在庫量の両方を有する時と両方を共有しない場合の間の目的関数値 OF 及び，満足度のみを共有した場合と満足度と部品在庫量の両方を共有した場合の目的関数値 OF に有意差があったが，部品在庫量のみを共有した場合と満足度と部品在庫量の両方を共有した場合の目的関数値 OF には有意差がなかった。

製造拠点が保持する部品在庫量についての情報を営業本部及び調達・販売管理部門に公開することで，営業本部及び調達・販売管理部門は入札作成の際に (3.11) 式，(3.12) 式の入札制約を違反する入札を作成することを防ぐことが出来，実行可能領域をより広く探索することが出来たために目的関数値 OF が改善した。部品在庫量が非共有の場合は営業本部及び調達・販売管理部門はそもそも勝者となり得ない入札を作成する場合があります，十分に探索を行うことが出来なかったと考えられる。

これらの計算機実験により，企業間での情報共有が有効であることがわかった。また共有する情報の種類によりその影響は異なり，本章で提案した企業間の交渉を模した近似解法においては，計画の評価指標に直接関わる指標に関する情報を共有することでより少ない交渉の繰り返し回数で合意点となる計画が得られ，計画の評価指標に直接関わらない指標に関する情報を共有することでより良い目的関数値を持つ計画が得られた。

3.5 結言

本章では，採算が独立した企業が含まれるサプライチェーンを対象とし，需要予測を超える発注があり部品在庫が不足したために一部のオーダーしか今期に製造することが出来ないという状況における企業間での交渉による受発注計画の立案手法を提案

した。各企業が自身の評価基準に従い満足度という無次元化・正規化された値を用いてオーダを評価し、各企業の満足度の平均の最大化を目的とし受発注計画の最適化を行った。

はじめに、提案手法の性能を評価するために、サプライチェーンに関わる全ての情報をヘッドクォータに集約することが出来るという仮定の下でナップサック問題として定式化し、計算機ソルバを用いて最適化することで得た厳密解と比較し考察した。

次に、企業が保持する情報を受発注計画の評価基準に関わるものと関わらないものに分類し、それらの情報を企業間で共有することの有効性を評価した。受発注計画の評価基準に関わる指標として満足度に着目し、関わらない指標として製造拠点の部品在庫量及び生産能力に着目した。満足度を共有することで、目的関数値の収束までにかかるオークションの繰り返し回数が減り、より効率的に交渉が進むことがわかった。また、部品在庫量および生産能力を共有することで、営業本部及び調達・販売管理部門が実行不可能であり勝者となり得ない無駄な入札を作成することを防ぐことが可能となり、一度のオークションでより広い実行可能領域を探索することが可能となるためにより良い目的関数値を持つ解を得ることが出来ることが分かった。

第4章 顧客間の交渉・協調による日程計画及び部品選定のスケジューリング手法

4.1 緒言

3章では、企業間の交渉を模した組合せオークションによる受発注計画の近似解法を提案し、計算機実験を行うことで企業間での情報共有の有効性を示した。本章では、各主体の入札作成の際に主体間で協調を行う方法を提案する。作成する入札に他主体の意見を取り入れることで、主体間の交渉を模した近似解法において良い目的関数値を持つ交渉の合意点をより効率的に得ることを目指す。情報共有は良い入札値を持つ入札を作成するため、もしくは勝者となり得ない入札が作成されることを防ぐために行われた。ある1つの入札のみに着目しその入札をより良いものにするために行われる情報共有に対し、協調は相互的な関係にある複数の入札間に着目し、同じ財を求める複数入札間で財を効率的に譲り合うために行われる。

オーダーを発注する顧客間での交渉・協調による日程計画及び部品選定の立案手法を提案する。特に顧客間での情報共有・協調に着目し、交渉の過程で顧客間で情報共有し協調することで全体としてより良い計画を得ることを目指す。

4.2節では、本章の対象モデルについて述べる。4.3節では対象モデルを定式化し、提案するフェロモンの考え方を導入した組合せオークションについて述べる。4.4節では計算機実験を行い、提案手法の有効性を評価する。最後に4.5節で本章をまとめる。

4.2 対象モデル

本章では、製造拠点が1拠点のみ存在する企業を対象とする。ランニングシューズを製造する企業を対象とし、ラバー製のソール[59]の製造工程における日程計画と部品選定の同時最適化を行う。ある1期に複数の顧客からの発注があり、今期中に全ての発注に対応する必要があるものとする。

日程計画とは複数個の仕事の処理順序を決める問題であり、部品選定とは、製造拠点が製造する量産部品リストの中から自身が発注した製品を構成する部品を顧客が選択する問題であるとする。

4.2.1 記号の定義

対象モデルと提案手法の説明及びその定式化に新たに用いる記号とその定義は以下の通りである。

顧客に関する記号

i : 顧客 ($i = 1, \dots, I$)

j : 作業 ($j = 1, \dots, P, P+1$)

k : 入札 ($k = 1, \dots, K$)

p : 部品 ($p = 1, \dots, P$)

t : タイプ ($t = 1, \dots, T$)

$\mathbf{t} \in \mathbb{N}^P$: 製品を構成する P 個の部品について、それぞれあるタイプ t を選択したことを表すベクトル

S : 指標のスケール

SDP_i : 最大納期 (顧客 i の満足度が最大の時の納期)

$DP_{i,t}$: 製品を構成する P 個の部品に対し顧客 i がタイプ t を選択した時の納期

入札に関する記号

$BV_{i,j,k}$: 入札者 (i, j) の入札 k の入札値

$st_{i,j,k}$: 入札者 (i, j) の入札 k の作業開始時刻 (入札の決定変数)

$MN_{i,j,k}$: 入札者 (i, j) の入札 k の作業を行う機械番号 ($MN_{i,j,k} = 1, \dots, M$, 入札の決定変数)

$PN_{i,j,k}$: 入札者 (i, j) の入札 k の作業で加工する部品のタイプ ($PN_{i,j,k} = 1, \dots, T$, 入札の決定変数)

$pt_{i,j,k}$: 入札者 (i, j) の入札 k の作業にかかる時間 (加工する部品タイプ $PN_{i,j,k}$ の従属変数)

$PS_{i,p,t}$: 部品 p のタイプ t に対する顧客 i の満足度 ($0 \leq PS_{i,p,t} \leq S$)

$Sat_{i,t}$: 製品を構成する P 個の部品に対しタイプ t が選択された時の顧客 i の満足度

フェロモンに関する記号

$Phe_{s_{p,c},sp}$: 部品 p の指標 c の値 sp に残る Spec フェロモンの量

$Phe_{o_{i,m,ts}}$: 財 ts [TS] の機械 m の使用権に残るオーダ i の Order フェロモンの量

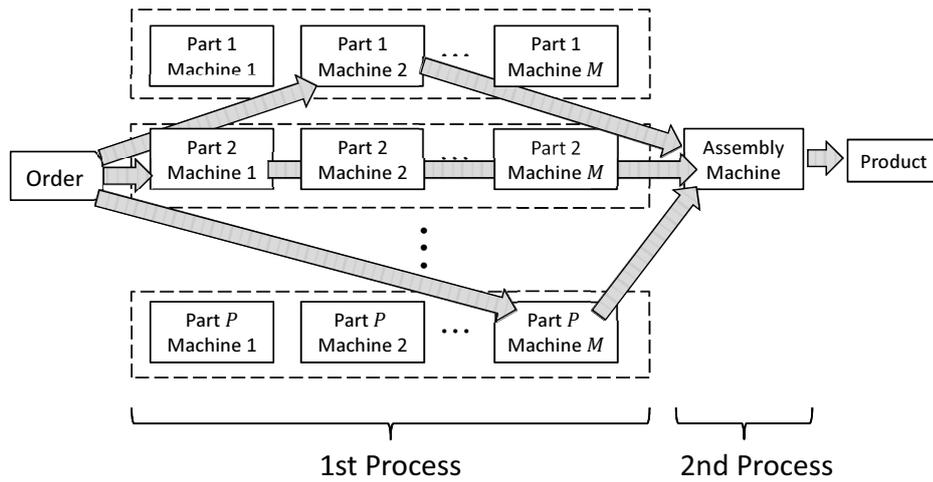


Fig. 4.1: A schema of production flow

$Phet_{p,t,m,ts}$: 財 ts [TS] の機械 m の使用权に残る部品 p のタイプ t を発注した顧客の Type フェロモンの量

PI : フェロモンの初期量

ρ : フェロモンの蒸発率

γ : フェロモンの散布率

製造に関する記号

M : 部品 p を加工するための機械の台数

CO : 段取り替え時間

$C_{i,i',j,k,k'}$: 部品加工作業 j ($j \neq P+1$) について、2つの入札 (i, j, k) と (i', j, k') が同じタイプの部品を加工する ($PN_{i,j,k} = PN_{i',j,k'}$) なら 0, 異なるタイプならば段取り替え時間 CO が発生することを表す変数

組合せオークションに関する記号

Ite : オークション繰り返し回数

$x_{i,j,k}$: 入札者 (i, j) の入札 k を勝者とするなら 1, 敗者とするなら 0 となる変数 (勝者決定問題の決定変数)

4.2.2 製造工程

製品製造の流れを Fig. 4.1 に示す。ランニングシューズのソールは P 個の部品から構成される。製造工程は二工程から成り立つ。第一工程で P 個の部品を加工し、第二工程でそれらを組み立てることで製品が完成するものとする。第一工程では複数の部品を同じ時刻に並行して加工することが可能であり、全ての部品の完成後に組立工程へと移行することが出来る。部品 p は仕様の異なる T 種類のバリエーションを持ち、タイプ $t (t = 1, \dots, T)$ と呼ぶ。

製造拠点は、部品 p を加工するための機械を M 台ずつと組立を行うための機械を 1 台持つ。 M 台の機械の性能は全て同じであるとする。部品加工機械は、加工する部品のタイプ t が変わる度に段取り替え時間が発生する。顧客からの発注は全て 0 [Time Slot (TS)] に到着する。

4.2.3 顧客の満足度

顧客は自身の足を測定し、測定データからその顧客にとって最適な部品仕様が決まる。顧客 i は各部品 p の各タイプ t に対して部品満足度 $PS_{i,p,t}$ という数値を持ち、顧客 i にとって最適な部品の仕様と部品 p のタイプ t の仕様の差からその量産部品 (p, t) に対する満足度 $PS_{i,p,t}$ が決まる。

部品 p のタイプ t は重さ、硬さ、部品カラーなど部品の仕様を決定する C 種類の指標を持ち、それぞれ $1, \dots, S$ の範囲の値 $MP_{p,t,c}$ を持つ。顧客 i にとって最適な部品 p の指標 c の値 $PB_{i,p,c}$ は実験条件として与えられる。部品 p のタイプ t に対する顧客 i の満足度 $PS_{i,p,t}$ は、最適な指標の値 $PB_{i,p,c}$ と、部品 p のタイプ t の指標 c の値 $MP_{p,t,c}$ を用いて (4.1) 式に従い決まり、0 から 100 の範囲を取る。

$$PS_{i,p,t} = 100 \times \frac{\sum_{c=1}^C (S - |MP_{p,t,c} - PB_{i,p,c}|)}{S \times C} \quad (4.1)$$

全ての顧客に最適な製品を提供するためには 1 部品につき S^C 種類のタイプを準備する必要があるが、製造拠点が準備する量産部品のタイプ数の増加は生産効率の低下や棚卸資産の増加などのリスクに繋がるため上限 T を設ける。

4.3 顧客間の交渉を模した部品選定と日程計画の立案手法

本節では、顧客間の交渉を模した組合せオークション及びフェロモンを用いた入札者間の協調による日程計画及び部品選定の立案手法を提案する。Fig. 4.2 に企業及び顧客間での交渉による日程計画及び部品選定の立案と、交渉の過程でのフェロモンを用いた交渉履歴の記憶・共有による顧客間での協調の概要図を示す。

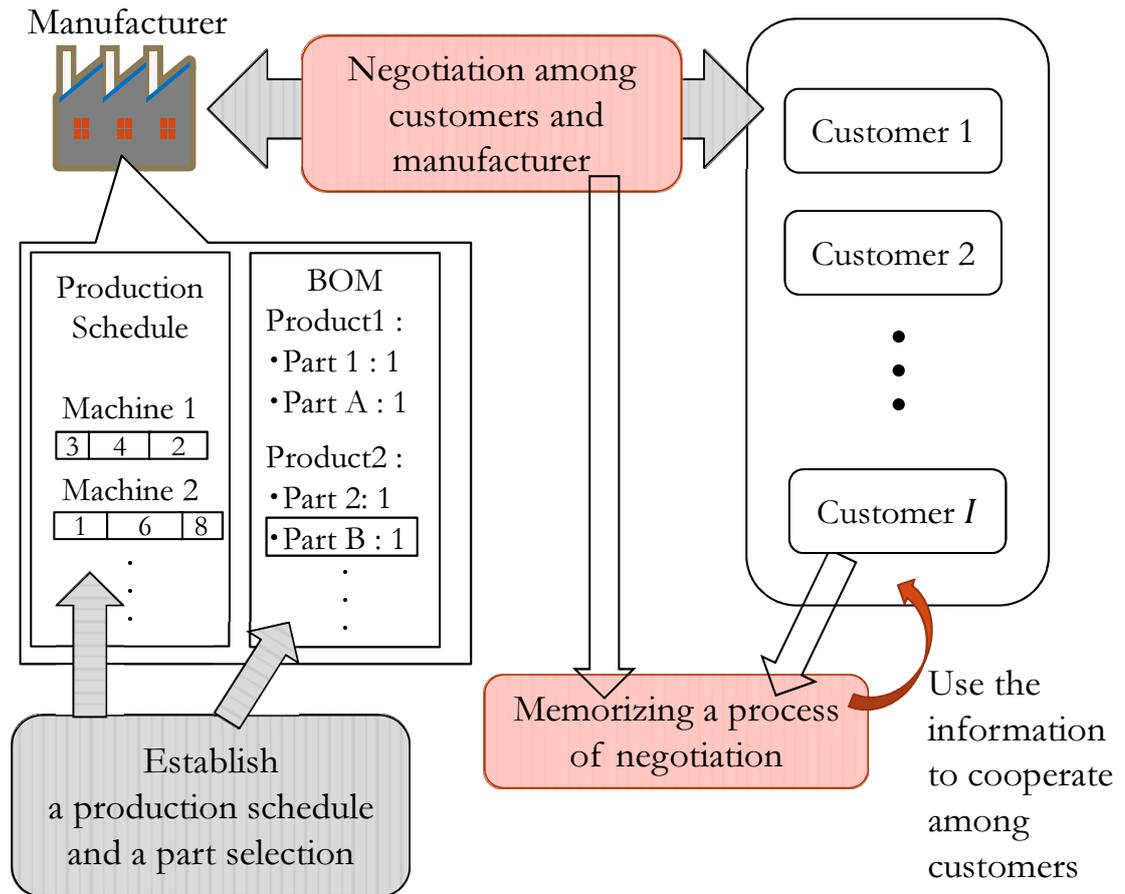


Fig. 4.2: An overview of negotiation and cooperation among customers

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製品の製造に必要な部品加工及び組立の各作業とする．オークションにかけられる財は各機械のあるタイムスロットの使用権であり，入札者は，自身の作業を行うために必要な機械の使用権の組合せに入札を行う．

1顧客につき P 個の部品加工と，それらの組立作業を行う必要があるため顧客数を I とすると組合せオークションの入札者数は $(P+1) \times I$ となる．ある入札の組合せの下での勝者決定問題の最適解を実時間内に得るために，1入札者あたりの入札数を制限する．そのため勝者決定問題を解くことで得られる解は原問題の最適解である保障はない．そこで組合せオークションを繰返し行なうことで目的関数値の改善を図る．

4.3.1 入札

入札の定義

入札者は，顧客 $i(i = 1, \dots, I)$ の発注した製品の製造に必要な作業 $j(j = 1, \dots, P, P+1)$ である．作業 $j = 1, \dots, P$ は第一工程における部品 $p(p = 1, \dots, P)$ の加工作業であり，作

業 $j = P + 1$ は第二工程における製品の組立作業である。

入札者 (i, j) は1回のオークションにつき K 個の入札を行う。オークションにかけられた財は、ある時刻における各機械の使用権である。入札者 (i, j) は、自身の作業を行うために必要な機械の使用権の組合せに入札する。入札 (i, j, k) に含まれる財の組合せは、作業の開始時刻 $st_{i,j,k}$ と加工する部品タイプ $PN_{i,j,k}$ 、作業を行う機械番号 $MN_{i,j,k}$ の3種類の決定変数により決定され、作業にかかる時間 $pt_{i,j,k}$ は加工する部品タイプ $PN_{i,j,k}$ の従属変数である。定式化する便宜上、入札者が組立作業である時 ($j \neq P + 1$) は加工する部品タイプ $PN_{i,j,k}$ 及び作業を行う機械番号 $MN_{i,j,k}$ を1と定義する。

入札値

入札者 (i, j) の入札 k の入札値 $BV_{i,j,k}$ は、自身の納期遅れの値とし納期 $DP_{i,t}$ を用いて (4.2) 式で表す。納期 $DP_{i,t}$ は、顧客 i が選択した製品を構成する P 個の部品について、それぞれタイプ $PN_{i,j,k}$ を選択した時の満足度により決まる。

$$BV_{i,j,k} = \max\{0, (st_{i,j,k} + pt_{i,j,k} - DP_{i,t})\} \quad (4.2)$$

1[TS] の納期遅れが発生する場合でも 100[TS] の納期遅れが発生する場合でも、納期遅れ 1[TS] あたりの価値は同じである。入札者が大きな納期遅れを嫌う働きは入札作成の手順に含まれる。

入札制約

入札制約は以下の通りである。

$$0 \leq st_{i,j,k} \quad (4.3)$$

$$PN_{i,j,k} \in \{1, \dots, T\} \quad (4.4)$$

$$MN_{i,j,k} \in \begin{cases} \{1\} & (\text{if } j = P + 1) \\ \{1, \dots, M\} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4.5)$$

(4.3) 式は、作業開始時刻 $st_{i,j,k}$ は非負であることを表す制約である。(4.4) 式は、顧客は製造拠点が準備した量産部品リストの中から選択しなければならないことを表す制約である。(4.5) 式は、部品加工機械と組立機械の台数に関する制約である。

初期入札

オークションの初回で必ず実行可能解が得られるよう、最大納期 SDP_i が短い顧客から順に機械に割り付けることで得たスケジュールに従い各入札者が入札を行う。機械番号 $MN_{i,j,k}$ は1とし、加工する部品タイプ $PN_{i,j,k}$ は最も満足度が高い部品タイプを選択する。

入札作成に用いるフェロモン

入札作成には3種類のフェロモンを用いる。フェロモンの種類とその狙いは以下の通りである。

Spec フェロモン $Phes_{p,c,sp}$

Spec フェロモン $Phes_{p,c,sp}$ は部品 p に対する顧客が求めた部品仕様を記憶するためのものであり、全ての入札者間で共有される。Spec フェロモンは入札作成における部品タイプ $PN_{i,j,k}$ の決定に用いる。

全ての入札者間で Spec フェロモンの分布を共有することで、ある顧客にとっては満足度が低いタイプであっても多くのフェロモンの残るタイプを選択することで段取り替え回数の削減を目指す。段取り替え回数が減ることで生産効率が向上し、結果として自身の納期遅れが小さくなることを狙う。

Order フェロモン $Pheo_{i,m,ts}$

Order フェロモン $Pheo_{i,m,ts}$ は作業開始時刻 $st_{i,j,k}$ 及び作業を行う機械番号 $MN_{i,j,k}$ を決めるためのフェロモンであり、1人の顧客 i の各作業間（入札者 $(i, 1), \dots, (i, P), (i, P+1)$ ）で共有される。Order フェロモンの狙いは、各作業の作業開始時刻を近づけ滞留時間を短縮することである。Order フェロモンにより、1つの部品加工が遅れたために組立作業に移ることが出来ないという状況を防ぐ。あるいは、他の部品が計画期間の終盤で加工されるならば1つの作業 j のみ計画期間の序盤で加工される必要はないため、計画期間の序盤での機械の使用権を他の顧客に譲ることを図る。

Type フェロモン $Phet_{j,t,m,ts}$

Type フェロモン $Phet_{j,t,m,ts}$ は作業開始時刻 $st_{i,j,k}$ 及び作業を行う機械番号 $MN_{i,j,k}$ を決めるためのフェロモンであり、部品 p のタイプ t を発注する全ての顧客間（入札者 $(1, j), \dots, (I, j)$ 、ただし作業 j は部品加工作業 $j \neq P+1$ ）で共有される。Type フェロモンを参考に、同じタイプ t を選択した入札者が近い作業開始時刻 $st_{i,j,k}$ に入札する。ある顧客にとっては納期遅れが発生するような作業開始時刻であっても、同じタイプを連続して加工することで段取り替え回数を減らし、全体として良い計画を得ることを目指す。

Order フェロモンは入札の集中化の狙いがあるのに対し、Type フェロモンは入札の多様化の狙いがある。

フェロモンを用いた入札作成方法

オークションの2回目以降において、前回のオークションで敗者となった入札を作成し直す際は以下の手順に従う。Fig. 4.3に入札作成部分のフローチャートを示す。

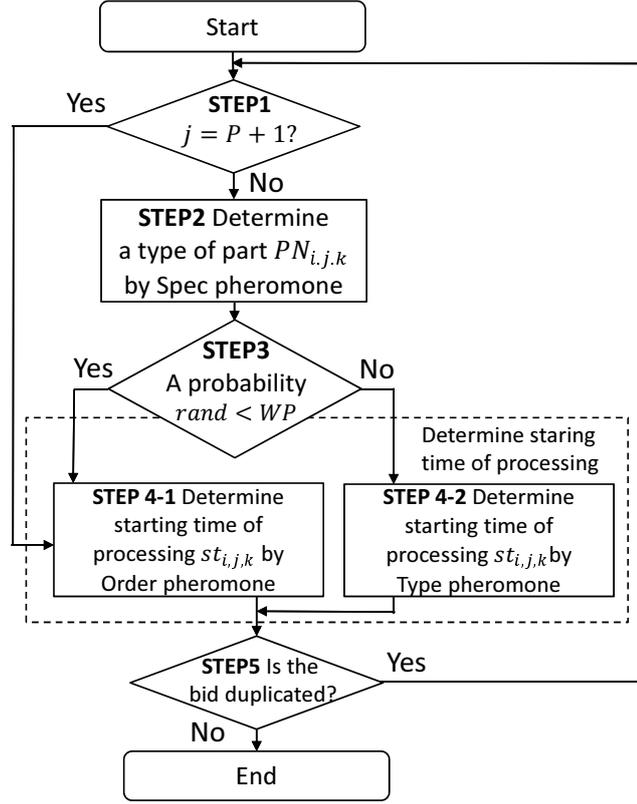


Fig. 4.3: Flowchart of making a bid with pheromone

STEP1 入札者 (i, j) の入札 k を作成する．入札者が部品加工作業 $(j \neq P + 1)$ ならば加工する部品タイプを決定する．**STEP2** へ．組立作業 $(j = P + 1)$ ならば**STEP4-1** へ．

STEP2 加工する部品 $p(p = j)$ のタイプ $PN_{i,j,k}$ を決定する．入札者は，求める部品の仕様 $s_{i,j,k} = [s_{1,i,j,k}, \dots, s_{C,i,j,k}]$ を決定する．顧客 i が求める部品 p の指標 c の仕様を sp $(1 \leq sp \leq S)$ とする確率 $pros_{p,c,sp}$ は，顧客 i にとって最適な部品 p の仕様 $PB_{i,p,c}$ と部品 p の指標 c の値 sp に添加されたフェロモン量 $Phes_{p,c,sp}$ を用いて (4.6) 式で表す．

$$pros_{p,c,sp} = \frac{(S - |sp - PB_{i,p,c}|) \times Phes_{p,c,sp}}{\sum_{sp'=1}^S \{(S - |sp' - PB_{i,p,c}|) \times Phes_{p,c,sp'}\}} \quad (4.6)$$

自身にとって満足度が高い仕様の値 sp ほど高い確率で選択し顧客の納期 $DP_{i,t}$ を大きな値とすることで納期遅れ最小化を目指す．また，Spec フェロモンが多く添加された仕様の値 sp ほど選択される確率を高め多くの顧客が同じ部品タイプ $PN_{i,j,k}$ を選択することで高い生産効率を実現し納期遅れ最小化を目指す．

オークションの序盤では，各仕様の値 $sp = 1, \dots, S$ に添加されたフェロモンの量に大きな差がなく添加されたフェロモンの絶対量自体も少ないため，確率 $pros_{p,c,sp}$ は満足度により大きな影響を受ける．オークションとフェロモンの添加が繰り返

されると各仕様の値 $sp = 1, \dots, S$ ごとのフェロモン量に差が現れ, 確率 $pros_{p,c,sp}$ はフェロモンの影響を大きく受ける.

(4.7) 式を満たすタイプ t を加工する部品タイプ $PN_{i,j,k}$ とする. (4.7) 式はタイプ t が顧客が選択した部品の仕様 $s_{i,j,k}$ と最も近いタイプであることを意味し, $MP_{p,t',c}$ は部品 p のタイプ t' の指標 c の値を表す.

$$t = \arg \min_{\forall t'} \left(\sum_{c=1}^C |s_{c,i,j,k} - MP_{p,t',c}| \right) \quad (4.7)$$

STEP3 Order フェロモン $Pheo_{i,m,ts}$ と Type フェロモン $Phet_{j,t,m,ts}$ のどちらを参考に入札を作成するかを, Order フェロモンを参考にする確率 WP を用いて決定する. $rand < WP$ ならば **STEP4-1** へ. そうでなければ **STEP4-2** へ. ただし, $rand$ は 0 以上 1 未満の一様分布に従う確率変数とする. Order フェロモンを参考にする確率 WP は実験条件として与えられる.

STEP4-1 Order フェロモン $Pheo_{i,m,ts}$ を用いて作業開始時刻 $st_{i,j,k}$ 及び作業を行う機械 $MN_{i,j,k}$ を決定する. 作業を行う機械を m とし, 作業開始時刻を ts [TS] とする確率 $proo_{i,j,m,ts}$ はオーダ i の最大納期 SDP_i と機械 n のタイムスロット ts に残るフェロモンの量 $Pheo_{i,m,ts}$ を用いて (4.8) 式, (4.9) 式, (4.10) 式で表す. ただし, ms は前回のオークションで得られた計画のメイクスパンの値である. 各顧客が自身の納期遅れを嫌う働きは $\delta \times \max\{0, (ts - SDP_i)\}$ の項で与えられ, 大きな納期遅れが発生するタイムスロットほど入札する確率が低くなる. δ は実験条件として与えられる値であり, この値が大きい時ほど顧客 i に納期遅れが発生するタイムスロットに入札する確率は小さくなる. 納期遅れの値が小さく多くのフェロモンが残るタイムスロットほど高い確率で選択される.

$$proo_{i,j,m,ts} = \begin{cases} \frac{poats_{ts}}{ms} & (\text{if } j = P + 1) \\ \frac{\sum_{ts'=1}^{ts} poats_{ts'}}{ms} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4.8)$$

$$poats_{ts} = \frac{\sum_{m=1}^M Pheo_{i,m,ts}}{(1 + \delta \times \max\{0, (ts - SDP_i)\})} \quad (4.9)$$

$$pomts_{m,ts} = \frac{Pheo_{i,m,ts}}{(1 + \delta \times \max\{0, (ts - SDP_i)\})} \quad (4.10)$$

作業 j が組立作業 ($j = P + 1$) ならば作業を行う機械の番号 $MN_{i,j,k}$ は 1 と定義されており機械番号 $MN_{i,j,k}$ を決定する必要がないため, 機械番号 1 から機械番号 M

のタイムスロット ts [TS] に添加されたフェロモンの合計 $\sum_{m'=1}^M Pheo_{i,m',ts}$ を用いて作業開始時刻 $st_{i,j,k}$ を決定する。

STEP4-2 Type フェロモン $Phet_{j,t,m,ts}$ を用いて作業開始時刻 $st_{i,j,k}$ 及び作業を行う機械の番号 $MN_{i,j,k}$ を決定する。機械番号を m , 作業開始時刻を ts [TS] とする確率 $prot_{i,j,t,m,ts}$ はオーダ i の最大納期 SDP_i とそのタイムスロットに残るフェロモンの量 $Phet_{j,t,m,ts}$ を用いて (4.11) 式, (4.12) 式, (4.13) 式で表す。

$$prot_{i,j,t,m,ts} = \begin{cases} \frac{ptats_{ts}}{ms} & (\text{if } j = P + 1) \\ \sum_{ts'=1} ptats_{ts'} & \\ \frac{ptmts_{m,ts}}{\sum_{m'=1}^M \sum_{ts'=1}^{ms} ptmts_{m',ts'}} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4.11)$$

$$ptats_{ts} = \frac{\sum_{m'=1}^M Phet_{j,t,m',ts}}{(1 + \delta \times \max\{0, (ts - SDP_i)\})} \quad (4.12)$$

$$ptmts_{m,ts} = \frac{Phet_{j,t,m,ts}}{(1 + \delta \times \max\{0, (ts - SDP_i)\})} \quad (4.13)$$

STEP5 入札者 (i, j) の入札 k に含まれる財の組合せが入札 $1, \dots, (k-1)$ と同じならば入札を作り直す。 **STEP1** へ。

フェロモンの更新

フェロモンは、オークションにかけられた財に添加される。オークションが繰り返される過程で、オークションの結果に従い財にフェロモンが添加される。オークションの開始時に各財に添加されているフェロモンの量が初期フェロモン量 PI に初期化される。オークションが1回行われるごとに入札に含まれた財へのフェロモンの添加と、財に残るフェロモンの蒸発を行う。

フェロモンの蒸発

フェロモンは時間と共に蒸発するものとする。これにより古い記憶は忘却され、直近のオークションの結果ほど入札作成により大きな影響を与える。蒸発率 ρ を用いて (4.14) 式, (4.15) 式, (4.16) 式に従い3種類のフェロモンを蒸発させる。

$$Phes_{p,c,sp} := \max\{0.01, Phes_{p,c,sp} \times \rho\} \quad (4.14)$$

$$Pheo_{i,m,ts} := \max\{0.01, Pheo_{i,m,ts} \times \rho\} \quad (4.15)$$

$$Phet_{j,t,m,ts} := \max\{0.01, Phet_{j,t,m,ts} \times \rho\} \quad (4.16)$$

$\rho = 1$ の時、フェロモンの蒸発は行われず、オークションの結果が記憶され続ける。 $\rho = 0$ の時、財に添加された全てのフェロモンが蒸発する。フェロモンの蒸発を行った後に添加が行われるため、 $\rho = 0$ の時は直前のオークションの結果のみを記憶することと同じ意味を持つ。

フェロモンの添加

前回のオークションの結果勝者となった入札に含まれる財にフェロモンを単位添加量 $\Delta\tau_{winner}$ 添加し、敗者となった入札に含まれる財にフェロモンを単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$ 添加する。勝者となった入札に含まれる財にフェロモンを添加することで、意見が採用され交渉の合意点となった入札を記憶する。敗者となった入札に含まれる財にフェロモンを添加することで、採用はされなかったものの入札者が求めた財を記憶する。

Spec フェロモン $Phes_{p,c,sp}$ と Type フェロモン $Phet_{j,t,m,ts}$ は製造するタイプ $PN_{i,j,k}$ に関するものであるため、部品加工作業 ($j \neq P+1$) である入札者のみフェロモンの添加を行う。Order フェロモン $Pheo_{i,m,ts}$ は全ての入札者がフェロモンの添加を行う。Spec フェロモンは入札した部品 p の指標 c の値 $s_{c,i,j,k}$ とその前後 ds の値 ($s_{c,i,j,k} - ds, \dots, s_{c,i,j,k} + ds$) に拡散する。 ds が 0 の時、フェロモンは拡散せず値 $s_{c,i,j,k}$ のみに添加される。フェロモンを拡散させることで、入札した指標 c の値 $s_{c,i,j,k}$ と近い値に入札する確率を高める。

勝者となった入札及び敗者となった入札のフェロモンの添加による値 sp ($\max\{0, s_{c,i,j,k} - ds\} \leq sp \leq \min\{S, s_{c,i,j,k} + ds\}$) への Spec フェロモンの更新式を (4.17) 式, (4.18) 式で表す。単位添加量 $\Delta\tau_{winner}$, $\Delta\tau_{loser}$, 周辺の入札へのフェロモンの拡散量を示す散布率 γ 及び ds は実験条件として与えられる。

$$Phes_{p,c,sp} := \begin{cases} Phes_{p,c,sp} + \Delta\tau_{winner} & (\text{if } ds = 0) \\ Phes_{p,c,sp} + \Delta\tau_{winner} \times \{\gamma + (1 - \gamma) \times |s_{c,i,j,k} - sp|/ds\} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4.17)$$

$$Phes_{p,c,sp} := \begin{cases} Phes_{p,c,sp} + \Delta\tau_{loser} & (\text{if } ds = 0) \\ Phes_{p,c,sp} + \Delta\tau_{loser} \times \{\gamma + (1 - \gamma) \times |s_{c,i,j,k} - sp|/ds\} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4.18)$$

Order フェロモン及び Type フェロモンは入札した作業開始時刻 $st_{i,j,k}$ [TS] の前後 dt [TS] に拡散する。フェロモンを拡散しない時は $dt = 0$ とし、拡散する時は入札 (i, j, k) の作業にかかる時間 $pt_{i,j,k}$ を用いて $dt = pt_{i,j,k}$ とする。フェロモンを拡散する場合、作業開始時刻 $st_{i,j,k}$ に近いタイムスロットほど多くのフェロモンが添加される。勝者及び敗者となった

入札の ts [TS] へのフェロモンの添加による Order フェロモンの更新式を (4.19) 式, (4.20) 式, Type フェロモンの更新式を (4.21) 式, (4.22) 式で表す.

$$Pheo_{i,ts} := \begin{cases} Pheo_{i,ts} + \Delta\tau_{winner} & (\text{if } dt = 0) \\ Pheo_{i,ts} + \Delta\tau_{winner} \times \{\gamma + (1 - \gamma) \times |st_{i,j,k} - ts|/pt_{i,j,k}\} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4.19)$$

$$Pheo_{i,ts} := \begin{cases} Pheo_{i,ts} + \Delta\tau_{loser} & (\text{if } dt = 0) \\ Pheo_{i,ts} + \Delta\tau_{loser} \times \{\gamma + (1 - \gamma) \times |st_{i,j,k} - ts|/pt_{i,j,k}\} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4.20)$$

$$Phet_{p,t,ts} := \begin{cases} Phet_{p,t,ts} + \Delta\tau_{winner} & (\text{if } dt = 0) \\ Phet_{p,t,ts} + \Delta\tau_{winner} \times \{\gamma + (1 - \gamma) \times |st_{i,j,k} - ts|/pt_{i,j,k}\} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4.21)$$

$$Phet_{p,t,ts} := \begin{cases} Phet_{p,t,ts} + \Delta\tau_{loser} & (\text{if } dt = 0) \\ Phet_{p,t,ts} + \Delta\tau_{loser} \times \{\gamma + (1 - \gamma) \times |st_{i,j,k} - ts|/pt_{i,j,k}\} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4.22)$$

フェロモンは時間と共に徐々に拡散するのではなく、一度に拡散するものとする.

4.3.2 勝者決定問題

以下に勝者決定問題の定式化を示す.

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K BV_{i,(P+1),k} \times x_{i,(P+1),k} \quad (4.23)$$

$$BV_{i,(P+1),k} = \max\{0, (st_{i,(P+1),k} + pt_{i,(P+1),k} - DP_{i,t})\} \quad (4.24)$$

$$DP_{i,t} = SDP_i \times Sat_{i,t} \quad (4.25)$$

$$Sat_{i,t} = \frac{\sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^K PS_{i,j,PN_{i,j,k}} \times x_{i,j,k}}{P} \quad (\forall i) \quad (4.26)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^K x_{i,j,k} = 1 \quad (\forall i, \forall j) \quad (4.27)$$

$$\sum_{k=1}^K (st_{i,j,k} + pt_{i,j,k}) \times x_{i,j,k} \leq \sum_{k'=1}^K st_{i,(P+1),k'} \times x_{i,(P+1),k'} \quad (\{i, \forall j | j \neq (P+1)\}) \quad (4.28)$$

$$x_{i,j,k} + x_{i',j,k'} \leq 1$$

$$(\{\forall i, \forall i', \forall j, \forall k, \forall k' | i \neq i' \wedge st_{i,j,k} \leq st_{i',j,k'} \wedge MN_{i,j,k} = MN_{i',j,k'} \wedge$$

$$st_{i',j,k'} \leq st_{i,j,k} + pt_{i,j,k} + C_{i,i',j,k,k'}\}) \quad (4.29)$$

$$x_{i,j,k} \in \{0, 1\} \quad (4.30)$$

$x_{i,j,k}$ は入札者 (i, j) の入札 k の決定変数であり, この値が 1 の時入札 (i, j, k) は勝者となり入札に含まれる財が落札され, 顧客 i の作業 j は機械 $MN_{i,j,k}$ で $st_{i,j,k}$ [TS] から作業を開始する. 作業 j が部品加工作業 ($j \neq P+1$) であればタイプ $PN_{i,j,k}$ の部品 j ($j = p$)

を加工し、作業 j が組立作業 ($j = P + 1$) であれば組立作業を行う。 $x_{i,j,k}$ が 0 の時、入札 (i, j, k) は敗者となる。

目的関数は (4.23) 式で表され、入札値 $BV_{i,(P+1),k}$ の合計の最小化であり、総納期遅れ最小化を意味する。顧客 i の納期 $DP_{i,t}$ は製品に対する満足度 $Sat_{i,t}$ によって変化するものとする。製品に対する満足度 $Sat_{i,t}$ は、製品に対する満足度が高ければたとえ時間がかかっても購入を希望するという関係を表すため、満足度が高い時ほど納期 $DP_{i,t}$ は大きな値となる。4.3.1 項でも述べた通り (4.24) 式は、入札者 $(i, (P + 1))$ の入札 k の入札値であり納期遅れを表す。(4.25) 式は、顧客の納期は顧客 i が発注した製品に対する満足度 $Sat_{i,t}$ により決まることを表す。製品に対する顧客 i の満足度 $Sat_{i,t}$ は製品を構成する P 個の部品に対する満足度 $PS_{i,j,PN_{i,j,k}}$ の平均とし、(4.26) 式で表す。入札者 (i, j) の入札 k で選択されたタイプ $PN_{i,j,k}$ に対する顧客 i の満足度 $PS_{i,j,PN_{i,j,k}}$ は 0 から 100 の範囲を取るため、製品に対する満足度 $Sat_{i,t}$ も同様に 0 から 100 の範囲を取る。

(4.27) 式から (4.29) 式は制約式であり、以下にその詳細を述べる。(4.27) 式は 1 入札者につき必ず 1 入札が勝者となることを表し、顧客が発注した製品は全て製造されることを表す。(4.28) 式は部品加工作業と組立作業の先行関係制約である。組立工程の作業開始時刻 $st_{i,(P+1),k'}$ は、全ての部品の加工完了後でなければならないことを表す。(4.29) 式は段取り替えを考慮した機械の専有制約である。2 つの入札 (i, j, k) と (i', j, k') が同じ機械の同じ時刻の使用権に入札している時、勝者となり得るのは高々 1 つであることを表す。 $C_{i,i',j,k,k'}$ は、2 つの入札 (i, j, k) と (i', j, k') を連続して加工する際の段取り替えの有無を表す記号であり、(4.31) 式に従う。

$$C_{i,i',j,k,k'} = \begin{cases} 0 & (\text{if } PN_{i,j,k} = PN_{i',j,k'}) \\ CO & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4.31)$$

2 つの入札 (i, j, k) と (i', j, k') について、加工する部品タイプ $PN_{i,j,k}$, $PN_{i',j,k'}$ が異なれば段取り替え時間 CO が発生し、同じであれば 0 となる。作業 j が組立作業 $j = P + 1$ であれば、加工する部品タイプ $PN_{i,(P+1),k}$ は 1 と定義されているため、常に $C_{i,i',(P+1),k,k'}$ は 0 となる。

4.4 計算機実験

提案手法の有効性を評価するため計算機実験を行う。実験 1 では提案手法の有効性を検討するために、フェロモンの特徴である蒸発と拡散に着目し蒸発率 ρ 及び拡散の有無が計画に与える影響について考察した後に、提案手法を適用することで得た計画と顧客間での協調を行わない比較手法で得られた計画を比較し考察する。実験 2 では、敗者となった入札によるフェロモンの添加に着目し、敗者となった入札の履歴を記憶することの有効性を検討する。

4.4.1 共通の実験条件

実験1, 実験2で共通の実験条件は以下の通りである.

フェロモンを導入した組合せオークション

入札作成に関する各パラメータは予備実験に基づき, 以下のように設定する.

- Order フェロモン $Pheo_{i,m,ts}$ を用いる確率 $WP : 0.7$
- 納期遅れの重み $\delta : 0.05$
- フェロモンの初期量 $PI : 10$
- フェロモンの散布率 $\gamma : 0.3$
- Spec フェロモンの拡散 $ds : 2$ (拡散を行う場合), 0 (拡散を行わない場合)
- Order フェロモン, Type フェロモンの拡散 $ds : pt_{i,j,k}$ (拡散を行う場合), 0 (拡散を行わない場合)
- オークションの繰り返し回数 $Ite : 500$
- 試行回数: 20

製品及び製造

製品は3種類の部品で構成される ($P = 3$). 1つの部品 p につき10種類のタイプが量産部品として準備されている ($T = 10$). 部品 p のタイプ t は, つま先部の硬さ ($c = 1$), 踵部の硬さ ($c = 2$), 重さ ($c = 3$), 部品カラー ($c = 4$) の4種類の指標を持つ. 各指標のスケール S は10とし, 部品 p の指標 c の値 $MP_{p,t,c}$ 及び顧客 i にとって最適な部品 p の指標 c の値 $BP_{i,p,c}$ は1から10の範囲で表される. 部品の加工作業にかかる時間 $pt_{i,j,k}$ は各部品の各タイプにより異なるものとし, 組立作業にかかる時間 $pt_{i,(P+1),k}$ は1とする.

実験環境

実験にはIntel Xeon CPU E5-1650 16GB memory のコンピュータを用い, 勝者決定問題及び厳密解の求解にはIBM ILOG CPLEX 12.6[58]を用いた.

4.4.2 比較手法

提案手法の有効性を評価するために, 各入札者が前回のオークションで勝者となった自身の入札の近傍に入札する比較手法[60]を用いる. 比較手法では顧客間の交渉により日程計画及び部品選定を立案するが顧客間での協調は行わない. 比較手法のアルゴリズムの説明に先立ち, 以下の記号を新たに定義する.

LR : 作業開始時刻 $st_{i,j,k}$ を前回のオークションで勝者となった自身の入札よりも早いタイムスロットとする確率

$Loop$: 作業開始時刻 $st_{i,j,k}$ を更に1[TS]変更する確率

COT : 加工する部品タイプ $PN_{i,j,k}$ を前回のオークションで勝者となった自身の入札から変更する確率

COM : 機械番号 $MN_{i,j,k}$ を前回のオークションで勝者となった自身の入札から変更する確率

以下に比較手法のアルゴリズムを述べる.

STEP1 入札者 (i, j) の入札 k を作成する. 作業開始時刻 $st_{i,j,k}$, 加工する部品タイプ $PN_{i,j,k}$, 機械番号 $MN_{i,j,k}$ を前回のオークションで勝者となった自身の入札と同じ値に設定する. 入札者 (i, j) が部品加工作業 ($j \neq P+1$) ならば**STEP2**へ. 組立作業 ($j = P+1$) であれば**STEP6**へ.

STEP2 入札者 (i, j) は加工する部品タイプ $PN_{i,j,k}$ を変更するかどうかを決定する, $rand < COT$ ならば部品タイプ $PN_{i,j,k}$ を変更する. **STEP3**へ. そうでなければ**STEP4**へ. ただし $rand$ を0以上1未満の一様分布に従う確率変数とする.

STEP3 入札者 (i, j) にとって現在選択されている部品タイプ $PN_{i,j,k}$ の次に満足度が高い部品タイプ t か, 現在選択されている部品タイプ $PN_{i,j,k}$ の次に満足度が低い部品タイプ t' のうち, いずれか1つを選択し加工する部品タイプ $PN_{i,j,k}$ とする. ただし, 現在選択されている部品タイプ $PN_{i,j,k}$ が最も満足度が高いもしくは低い部品タイプである時は, その次に満足度が高い部品タイプ t もしくは低い部品タイプ t' が存在しないため, 必ずもう一方を選択するものとする.

STEP4 入札者 (i, j) は, 自身の作業を行う機械の番号 $MN_{i,j,k}$ を変更するかどうかを決定する. $rand < COM$ かつ機械が複数台存在する ($2 \leq M$) ならば**STEP5**へ進み機械番号を変更する. そうでなければ**STEP6**へ.

STEP5 現在選択されている機械番号 $MN_{i,j,k}$ 以外の番号の中から1つをランダムに選択し, 作業を行う機械の番号 $MN_{i,j,k}$ とする.

STEP6 作業開始時刻 $st_{i,j,k}$ を変更する. $rand \leq LR$ ならば作業開始時刻 $st_{i,j,k}$ を現在よりも早いタイムスロットとするために**STEP7-1**へ. そうでなければ作業開始時刻 $st_{i,j,k}$ を現在よりも遅いタイムスロットとするために**STEP7-2**へ.

STEP7-1 作業開始時刻 $st_{i,j,k}$ を現在よりも1[TS]早める ($st_{i,j,k} := st_{i,j,k} - 1$). ただし, それ以上早めることが出来ない ($st_{i,j,k} = 0$) ならば, 作業開始時刻 $st_{i,j,k}$ を変更

せずに **STEP8** へ. $rand \leq LOOP$ ならば更に作業開始時刻を変更するために再度 **STEP7-1** へ.

STEP7-2 作業開始時刻 $st_{i,j,k}$ を現在よりも 1[TS] 遅らせる ($st_{i,j,k} := st_{i,j,k} + 1$). $rand \leq LOOP$ ならば更に作業開始時刻を変更するために再度 **STEP7-2** へ.

STEP8 入札者 (i, j) の入札 1 から入札 $(k - 1)$ で既に入札 k と同じ財の組合せに入札しているならば入札の重複がなくなるまで入札 k の作業開始時刻 $st_{i,j,k}$ を 1[TS] ずつ遅らせる. 重複が無いならば, 入札作成を終了する,

比較手法のパラメータは, 予備実験に基づき以下のように設定した.

勝者の単位添加量 $\Delta\tau_{winner} : 100$

作業開始時刻を前倒しする確率 $LR : 0.6$

作業開始時刻を更に 1[TS] 前倒し/後ろ倒しする確率 $Loop : 0.75$

部品タイプを変更する確率 $COT : 0.2$

機械番号を変更する確率 $COM : 0.2$

4.4.3 実験1 提案手法の有効性

実験1では, 提案手法の有効性を評価するために計算機実験を行う. 実験1-1ではフェロモンの特徴である拡散・蒸発に関わるパラメータを変更し計算機実験を行い, パラメータの設定が得られた結果に与える影響について考察する. 実験1-2では, 提案手法を適用することで得られた結果を比較手法を適用することで得られた結果と比較することで提案手法の有効性を評価する.

評価基準

実験1で行った計算機実験の評価基準は以下の通りである.

- OF : 目的関数値 (製品に対する満足度により決まる納期からの遅れの合計)
- SAT : 顧客の満足度 $Sat_{i,t}$ の平均
- CT : 計算時間 [秒]

Table 4.1: Processing time and specification

t	$pt_{i,j,k}$			$MP_{p,t,c}$			
	$p = 1$	$p = 2$	$p = 3$	$c = 1$	$c = 2$	$c = 3$	$c = 4$
1	5	5	5	1	1	1	1
2	4	4	5	2	2	2	2
3	3	3	4	3	3	3	3
4	4	4	3	4	4	4	4
5	5	3	3	5	5	5	5
6	3	3	4	6	6	6	6
7	3	4	4	7	7	7	7
8	3	5	4	8	8	8	8
9	5	5	5	9	9	9	9
10	5	4	5	10	10	10	10

Table 4.2: Datasets (Experiment 1-1)

Dataset	1	2	3
Customers I	20	20	30
Max due date SPD_i	U[10,80]	U[10,40]	U[30,100]
Type T	10	10	10
Processing Machine M	1	2	1
Set-up time CO	3	3	3
Distribution of Optimal Specification $BP_{i,p,c}$	U[1,10]	U[1,10]	U[1,10]

実験1で共通の実験条件

顧客 i にとって最適な部品 p の指標 c の値 $BP_{i,p,c}$ は1から10の一様分布に従う。製造拠点が準備する量産部品 p のタイプ t の指標 c の仕様 $MP_{p,t,c}$ 及び加工にかかる時間 $pt_{i,j,k}$ は Table 4.1 に従う。各タイプの仕様は、全ての部品 p で共通で $\{1, 1, 1, 1\}, \dots, \{10, 10, 10, 10\}$ であり、タイプ t と部品 p の指標 c の仕様 $MP_{p,t,c}$ は (4.32) 式の関係にあるとする。

$$MP_{p,t,c} = t \quad (\forall p, \forall c) \quad (4.32)$$

実験1-1 蒸発及び拡散の有効性

フェロモンを用いた入札作成の有効性を検討するために、拡散の有無及び異なる蒸発率 ρ の下で計算機実験を行う。実験1-1では3種類のデータセットに対して提案手法を適用する。用いたデータセットの詳細を Table 4.2 に示す。3種類のデータセットの異なる点は顧客数 I 、最大納期 SDP_i の分布及び加工機械の台数 M である。データセット1

Table 4.3: Results of Experiment without pheromone diffusion

Evaporation rate ρ			0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
D. S. 1	<i>OF</i>	Avg.	*551.6	*513.8	*516.3	*539.4	*570.4	*545.5	*563.8	*504.2	*493.3	421.6	
		S.D.	65.3	64.2	63.4	60.7	63.6	71.9	55.7	58.8	56.8	60.8	
	<i>SAT</i>	Avg.	83.8	83.7	83.8	83.8	83.8	83.7	83.7	83.7	83.7	83.6	83.5
		S.D.	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2
	<i>CT</i> [s]	Avg.	80.6	79.9	82.2	82.9	82.1	84.7	85.2	75.5	82.8	85.8	
		S.D.	5.4	5.0	7.3	4.1	6.9	8.1	10.8	5.2	6.1	5.4	
D. S. 2	<i>OF</i>	Avg.	107.3	119.4	110.2	108.4	122.9	116.6	*134.8	*144.4	*134.1	*134.2	
		S.D.	22.3	21.2	21.2	18.4	26.5	22.0	26.2	27.1	33.0	25.5	
	<i>SAT</i>	Avg.	82.6	82.6	82.7	82.5	82.7	82.6	82.7	82.7	82.6	83.0	
		S.D.	0.4	0.3	0.5	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	
	<i>CT</i> [s]	Avg.	64.8	65.9	66.2	68.6	68.8	69.9	74.4	66.3	74.1	74.9	
		S.D.	4.7	4.7	6.1	5.7	4.6	4.8	12.0	3.7	6.1	3.8	
D. S. 3	<i>OF</i>	Avg.	*204.6	*213.2	*220.6	*205.2	*193.6	*245.1	*218.2	*210.6	*198.7	167.6	
		S.D.	34.0	38.4	40.5	39.0	46.0	43.5	32.2	34.0	44.3	29.2	
	<i>SAT</i>	Avg.	83.3	83.3	83.4	83.2	83.3	83.4	83.2	83.4	83.3	83.2	
		S.D.	0.2	0.3	0.3	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	
	<i>CT</i> [s]	Avg.	46.0	47.9	44.8	45.7	45.8	45.4	50.9	45.1	48.0	51.1	
		S.D.	5.6	5.8	5.1	4.1	5.9	6.3	14.8	4.6	7.3	4.6	

では顧客数 I を 20 とし，加工機械の台数 M を 1 とする．データセット 2 では顧客数 I を 20 とし，加工機械の台数 M を 2 とする．データセット 3 では顧客数 I を 30 とし，加工機械の台数 M を 1 とする．規模の異なる 3 種類のデータセットを用いて計算機実験を行うことで，フェロモンの拡散と蒸発の設定が結果に与える影響について検討する．

実験 1-1 では，フェロモンを導入した組合せオークションに関する各パラメータを以下の通り設定する．

- 1 入札者あたりの入札数 K : 5
- 敗者の単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$: 0

フェロモンを拡散しない場合，拡散する場合の計算機実験の結果を Table 4.3, Table 4.4 に示す．表中の Avg. は 20 試行の平均を表し，S.D. は標準偏差を表す．蒸発率 ρ は 0.1 から 1.0 まで 0.1 刻みで変更した．蒸発率 ρ が 0 の時はフェロモンが全て蒸発するため，計算機実験は行わなかった．Table 4.3 及び Table 4.4 において目的関数値 OF の 20 試行の平均が最良となったものを太字で示す．20 試行の平均が最良となった蒸発率の下で得た目的関数値 OF と，ある蒸発率 ρ の下で得た目的関数 OF の間に有意差がないという帰無仮説を設定し，帰無仮説の棄却域を有意水準 0.05 未満とし，この仮説を棄却することが出来るか t 検定を行った．表中の*は，帰無仮説が棄却され最良の結果が得られた場合とその蒸発率 ρ の下で得られた結果の間に有意差があったことを表す．

Table 4.4: Results of Experiment with pheromone diffusion

Evaporation rate ρ			0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
D. S. 1	<i>OF</i>	Avg.	*312.8	279.5	275.1	275.1	274.6	277.0	274.8	273.9	281.7	*331.1
		S.D.	37.8	29.2	22.6	23.8	29.8	23.4	26.0	25.6	31.0	28.3
	<i>SAT</i>	Avg.	83.5	83.5	83.4	83.4	83.6	83.5	83.5	83.4	83.6	83.6
		S.D.	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2
	<i>CT</i> [s]	Avg.	91.5	85.0	83.2	82.7	83.6	83.4	89.8	82.4	84.8	94.4
		S.D.	4.9	2.6	3.1	3.2	3.5	3.1	12.5	3.4	2.9	4.7
D. S. 2	<i>OF</i>	Avg.	*65.0	56.2	56.0	57.9	57.8	59.5	58.5	*62.9	*66.6	*75.2
		S.D.	13.0	7.6	11.1	7.6	10.3	7.5	8.7	7.8	8.4	9.1
	<i>SAT</i>	Avg.	82.8	82.7	82.5	82.7	82.7	82.6	82.5	82.7	82.9	82.8
		S.D.	0.2	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.5
	<i>CT</i> [s]	Avg.	74.4	66.2	62.8	61.3	59.9	57.4	56.7	58.9	61.0	71.9
		S.D.	2.5	3.0	3.7	3.1	2.9	1.9	1.6	2.4	3.2	2.1
D. S. 3	<i>OF</i>	Avg.	*98.1	73.3	75.7	69.5	68.4	71.7	79.6	74.3	72.5	*107.9
		S.D.	16.2	11.4	14.0	15.9	11.2	14.8	18.2	15.3	12.4	10.9
	<i>SAT</i>	Avg.	83.0	82.7	82.9	82.7	82.7	82.9	82.9	82.9	82.9	83.1
		S.D.	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	0.2	0.3	0.3
	<i>CT</i> [s]	Avg.	58.1	54.1	52.6	52.1	52.3	51.5	53.5	50.5	52.0	58.2
		S.D.	4.7	3.0	3.7	2.5	2.5	2.3	4.8	2.4	3.1	2.9

フェロモンの拡散を行わない場合は、3種類のデータセットに対し蒸発率 ρ が1.0, 0.1, 1.0の時に目的関数値*OF*はそれぞれ最良となり421.6, 107.3, 163.6となった。ただし、データセット2に対しては蒸発率 $0.1 \leq \rho \leq 0.6$ の範囲で得られた結果に有意差が認められなかった。フェロモンの拡散を行う場合は、3種類のデータセットに対し蒸発率 ρ が0.8, 0.3, 0.5の時に目的関数値*OF*はそれぞれ最良となり273.9, 56.0, 68.4となった。ただし、データセット1に対しては蒸発率 $0.2 \leq \rho \leq 0.9$ の範囲で、データセット2に対しては蒸発率 $0.2 \leq \rho \leq 0.7$ の範囲で、データセット3に対しては蒸発率 $0.2 \leq \rho \leq 0.9$ の範囲で得られた結果に有意差は認められなかった。

フェロモンの拡散の有無による得られた目的関数値*OF*を比較すると、フェロモンの拡散を行う場合の方が良い目的関数値を得ることが出来た。それぞれ最良の結果が得られた蒸発率 ρ の下で、拡散を行わない場合と比較しフェロモンの拡散を行うことで目的関数値はデータセット1では35.0%, データセット2に対しては47.8%, データセット3に対しては58.2%良い値となった。また、フェロモンの拡散を行う場合の標準偏差は拡散を行わない場合よりも小さな値となり、それぞれ最良の結果が得られた蒸発率 ρ の下でデータセット1では42.1%, データセット2では49.8%, データセット3では38.4%となった。フェロモンの拡散を行うことで目的関数値*OF*の平均と分散はより小さな値となることがわかった。

フェロモンの拡散を行わない時、加工機械の台数 M が1であるデータセット1とデータセット3に対しては蒸発率 ρ が1.0の時に目的関数値は最良となった。フェロモンを拡

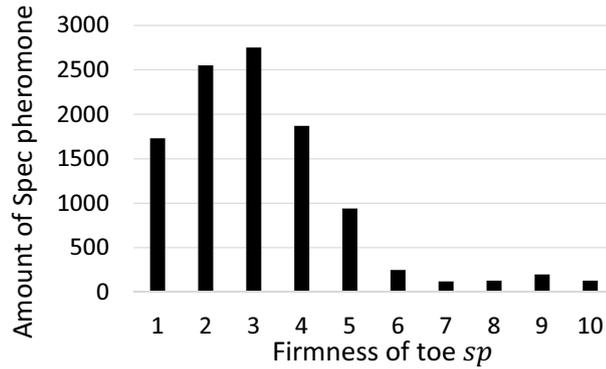


Fig. 4.4: Distribution of Spec pheromone with Pheromone diffusion ($\rho=0.5$)

散させることには、これまでのオークションで勝者となった自身の入札に含まれる財へフェロモンを添加することによる入札の集中化の働きだけでなく、勝者となった入札に含まれる財の周囲にもフェロモンを添加することで入札の多様化を保つ働きがあった。一方、フェロモンの拡散を行わない場合は勝者となった自身の入札に含まれる財へのフェロモンの添加による入札の集中化の働きはあったものの、入札の多様化を維持する働きはなかった。このため蒸発率 ρ を大きな値とすることにより過去のオークションの結果を記憶し続けることで入札の多様性を維持し、良い目的関数値 OF が得られたと考えられる。

一方で加工機械の台数 M が2であるデータセット2に対しては蒸発率 ρ が0.1の時に目的関数値は最良となった。これは、4.3.1項で述べた初期解及び初期入札作成のルールの影響が現れたと考えられる。初期解を作成する際は加工機械の台数 M の台数に依らず全て機械番号1の機械に割り付けられる。そのため加工機械の台数 M が2以上の時は納期遅れが発生している顧客 i の部品加工作業 $j(j \neq P+1)$ が作業を行う機械の番号 $MN_{i,j,k}$ を1以外とした入札を作成することで、初期解以外の勝者決定問題の実行可能解を得ることが出来る。ある財に同じ量のフェロモンが添加されている時、蒸発率 ρ が小さな値である場合の方がオークション1回あたりの蒸発量は多い。また(4.14)式、(4.15)式、(4.16)式に示した通りフェロモンには下限が設定されており、蒸発率 ρ が小さな値であるほどオークションにかけられた財の間での添加されたフェロモン量の差は小さくなり、蒸発率 ρ が大きな値であるほど財の間での添加されたフェロモン量の差が大きくなる。蒸発率 ρ が大きな値であるほど入札作成の際にフェロモンの影響を大きく受け機械番号 $MN_{i,j,k}$ を2とする入札が行われにくくなるため、目的関数値 OF は悪い値となったと考えられる。

蒸発率 ρ を0.5とし提案手法をデータセット3に適用した時の、ある1試行におけるオークションが500回繰り返された時点でのフェロモンを拡散する場合と拡散しない場合での部品1の指標1の各値 $sp(1 \leq sp \leq 10)$ に添加されたSpecフェロモン $Phes_{1,1,sp}$ の分



Fig. 4.5: Distribution of Spec pheromone without Pheromone diffusion ($\rho=0.5$)

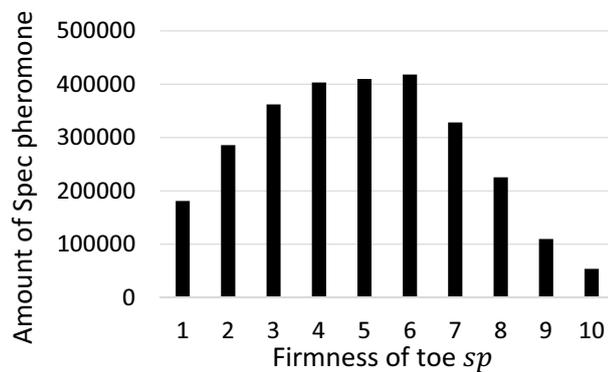


Fig. 4.6: Distribution of Spec pheromone with Pheromone diffusion ($\rho=1.0$)

布を Fig. 4.4, Fig. 4.5 に示す. 同様に, 蒸発率 ρ を 1.0 とした時の分布を Fig. 4.6, Fig. 4.7 に示す. それぞれ 20 試行の平均が最良となった蒸発率 ρ の下での結果を示す. 蒸発率 ρ が小さな値であるほど 1 回あたりの蒸発量は多くなるため, フェロモンの総量は蒸発率 ρ が 1.0 の場合の方が多い. 拡散の有無による Spec フェロモンの分布の違いを比較すると, 拡散を行わない場合はある一部の値 sp にフェロモンが集中し拡散を行なう場合よりも値 sp 間でのフェロモン量の差が大きいことがわかる.

勝者決定問題の目的関数値は (4.23) 式に示した通り組立作業である入札者の入札値 $BV_{i,(P+1),k}$ の合計の最小化であるが, (4.24) 式及び (4.25) 式に示した通り入札者 $(i, (P+1))$ の入札 k の入札値 $BV_{i,(P+1),k}$ は顧客 i が発注した製品を構成する各部品 ($j = 1, \dots, P$) のタイプ $PN_{i,j,k}$ の組合せにより決定される. そのため, 1 入札者の K 個の入札の中で選択された部品タイプ $PN_{i,j,k}$ のバリエーション数が増加すると勝者決定問題の最適解を得るためにかかる計算時間は指数的に増加する. 部品 1 の各指標 $c(1 \leq c \leq 4)$ の各値 $sp(1 \leq sp \leq 10)$ に添加された Spec フェロモンの量 $Phes_{p,c,sp}$ 及び, Spec フェロモン $Phes_{p,c,sp}$ と選択する部品タイプ $PN_{i,j,k}$ の関係を示した (4.7) 式から得られる蒸発率 ρ が 0.5 の時の部品 1 のタイプ t が選択される確率を Fig. 4.8 (拡散を行なう場合), Fig. 4.9 (拡散を行わない場合) に示し, 蒸発率 ρ が 1.0 の時の部品 1 のタイプ t が選択される

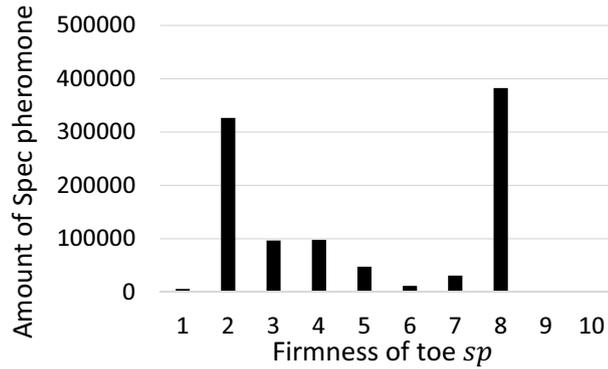


Fig. 4.7: Distribution of Spec pheromone without Pheromone diffusion ($\rho=1.0$)

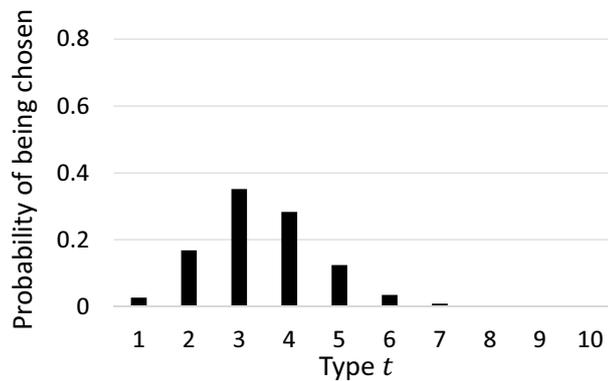


Fig. 4.8: Probability Distribution with Pheromone diffusion ($\rho=0.5$)

確率を Fig. 4.10 (拡散を行なう場合), Fig. 4.11 (拡散を行わない場合) に示す. ただし, 図中の確率分布はフェロモン量のみに影響を受け, 部品 p のタイプ t に対する顧客 i の満足度 $PS_{i,p,PN_{i,p,k}}$ は無視したものである. Fig. 4.8, Fig. 4.9, Fig. 4.10, Fig. 4.11 を比較すると, フェロモンの拡散を行わない時はある値に極端にフェロモンが集中していることがわかる. フェロモンの拡散を行なう場合の方が値 sp が選択される確率の分布はなだらかであり, 1入札者が行なう K 個の入札の中で選択されるタイプ数 $PN_{i,j,k}$ のバリエーションが多くなることがわかる. そのため, フェロモンの拡散を行なう場合の方が勝者決定問題の最適解を得るためにかかる時間は長くなった. 組合せオークションが繰り返されることでフェロモン分布が形成され部品 p の指標 c の値 sp 間で添加されたフェロモン量の差が大きくなると 1入札者の K 個の入札の中での部品タイプ $PN_{i,j,k}$ のバリエーション数は減少するため勝者決定問題の最適解を得るためにかかる計算時間はオークションの序盤よりも短くなる. また, Fig. 4.9 と Fig. 4.11 を比較すると, フェロモンの蒸発率 ρ が大きな値である時の方が値 sp 間での選択される確率の差は小さく, より多様な入札が行われた.

計算時間 CT は, フェロモンを拡散する場合の方が長くなった. これは, 1入札者が行なう K 個の入札の中で選択された部品タイプ $PN_{i,j,k}$ のバリエーション数がフェロモ

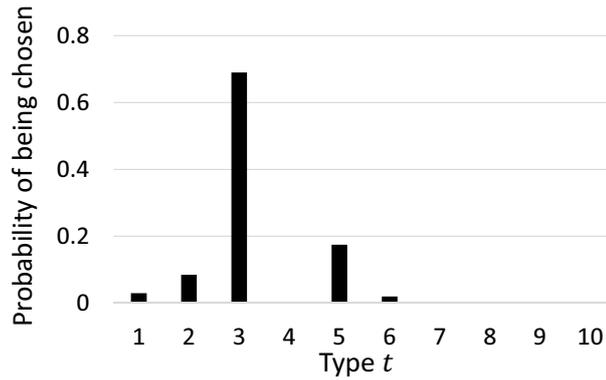


Fig. 4.9: Probability Distribution without Pheromone diffusion ($\rho=0.5$)

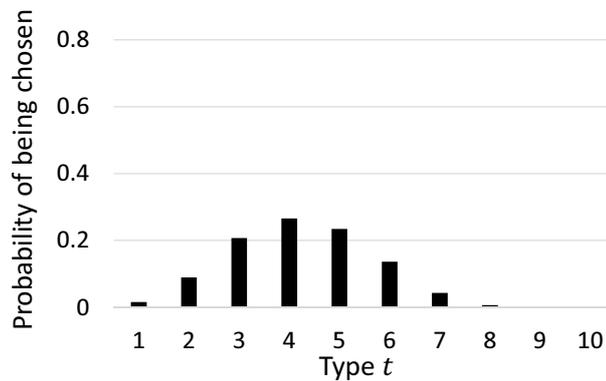


Fig. 4.10: Probability Distribution with Pheromone diffusion ($\rho=1.0$)

ンの拡散を行なう場合の方が多かったためであると考えられる。

実験1-1より、フェロモンを用いて入札履歴を記憶すること及び、フェロモンの蒸発により古い記憶を忘却することが有効であることが分かった。同様に、勝者となった入札に含まれる財の周辺にフェロモンが拡散することが有効であることが分かった。

実験 1-2 提案手法の性能評価

提案手法で得られた計画の評価のために、比較手法を適用することで得た計画と比較する。顧客数 I , 1 部品あたりのバリエーション数 T , 加工機械の台数 M , 段取り替え時間 CO が異なる 7 種類のデータセットに対して提案手法及び比較手法を適用する。7 種類のデータセットの詳細を Table 4.5 に示す。実験 1-2 では、フェロモンに関する各パラメータを以下の通り設定する。

- 1 入札者あたりの入札数 K : 5
- 敗者の単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$: 0

7 種類のデータセットに対し提案手法及び比較手法を適用した結果を Table 4.6 に示す。提案手法を適用することで得られた結果と比較手法を適用することで得た結果を

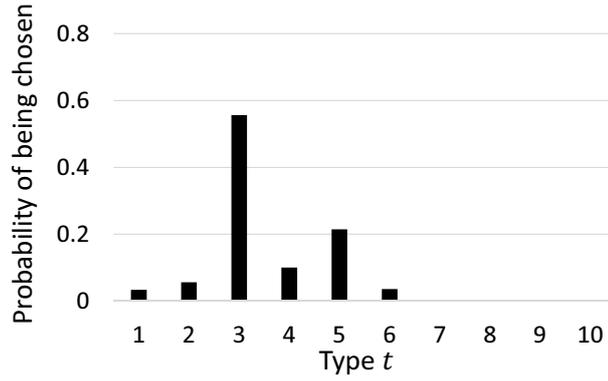


Fig. 4.11: Probability Distribution without Pheromone diffusion ($\rho=1.0$)

Table 4.5: Experimental Conditions (Experiment 1-2)

Experimental Condition	1	2	3	4
Customers I	20	20	20	20
Max due date SPD_i	U[5,30]	U[10,80]	U[10,80]	U[10,40]
Type T	2	10	10	10
Processing Machine M	1	1	1	2
Set-up time CO	1	1	3	1
Distribution of Optimal Specification $BP_{i,p,c}$	U[1,10]	U[1,10]	U[1,10]	U[1,10]
Experimental Condition	5	6	7	
Customers I	20	30	30	
Max due date SPD_i	U[10,40]	U[30,100]	U[30,100]	
Type T	10	10	10	
Processing Machine M	2	1	1	
Set-up time CO	3	1	3	
Distribution of Optimal Specification $BP_{i,p,c}$	U[1,10]	U[1,10]	U[1,10]	

比較すると，実験条件3, 4, 5, 7で提案手法の方が良い目的関数値 OF を持つ計画を得ることが出来た．実験条件3, 5, 7は段取り替え時間 CO が3[TS]であり他の実験条件よりも長く，実験条件4, 5は部品加工機械台数 M が2の実験条件である．段取り替え時間 CO が長いデータセットに対しては，同じ部品タイプ $PN_{i,j,k}$ を連続して加工することで段取り替え回数を減らし生産効率を高めることで総納期遅れを小さく出来たことが考えられる．提案手法では，同じ部品タイプ $PN_{i,j,k}$ を選択した顧客間で1つのTypeフェロモン $Phet_{j,t,m,ts}$ の分布を共有し分布を参考に入札を作成することで段取り替え回数を減らすことを目指した．しかし，比較手法では段取り替え回数を減らすことを狙い入札を行なうことが出来ない．フェロモンを用いて複数の入札者間で協調を行なう

Table 4.6: Experimental Results with Competitive method

		Proposed method			Competitive method		
		<i>OF</i>	<i>SAT</i>	<i>CT</i> [s]	<i>OF</i>	<i>SAT</i>	<i>CT</i> [s]
D. S. 1	Avg.	849.7	61.7	36.4	839.6	61.5	25.2
	S.D.	8.6	0.7	2.7	1.9	0.5	1.9
D. S. 2	Avg.	107.6	83.2	56.4	91.4	83.0	23.8
	S.D.	11.2	0.3	2.4	18.4	0.3	2.5
D. S. 3	Avg.	150.6	82.8	61.5	231.7	82.8	29.8
	S.D.	40.9	0.3	2.4	63.8	0.5	2.8
D. S. 4	Avg.	59.2	82.6	69.9	331.0	82.5	26.5
	S.D.	9.3	0.4	14.7	11.4	0.5	2.5
D. S. 5	Avg.	77.6	82.1	125.3	408.8	82.5	25.1
	S.D.	18.6	0.6	5.0	34.9	0.6	1.7
D. S. 6	Avg.	267.2	83.5	164.4	244.0	83.1	33.6
	S.D.	30.0	0.2	5.3	22.1	0.4	2.4
D. S. 7	Avg.	294.3	82.5	190.2	429.0	83.2	43.6
	S.D.	34.9	0.6	3.9	89.2	0.4	1.5

ことで、全顧客及び企業の交渉の合意点となるようなより良い目的関数値 OF を持つ計画を得ることが出来たと考えられる。加工機械台数 M が2の場合も同様であり、比較手法では入札者が作業を行なう機械の番号 $MN_{i,j,k}$ を変更し作業開始時刻 $st_{i,j,k}$ を決定するための指標となる情報を持たないために無作為に入札を作成することしか出来ないのに対し、提案手法では部品タイプ $PN_{i,j,k}$ 、部品機械番号 $MN_{i,j,k}$ 、作業開始時刻 $st_{i,j,k}$ の決定に3種類のフェロモンを用いて入札者間での協調を図り目的関数値の改善に寄与する入札を効率的に作成することが出来た。

計算時間 CT は総じて提案手法の方が長かった。これは実験1-1と同様に、1入札者の K 個の入札の中で選択された部品タイプ $PN_{i,j,k}$ のバリエーション数の違いによるものである。提案手法では1入札者の K 個の入札の中で選択された部品タイプ $PN_{i,j,k}$ の数の平均は2.9種類であり、比較手法では平均1.9種類であった。1入札者の K 個の入札の中で選択された部品タイプ $PN_{i,j,k}$ のバリエーション数が増加すると、勝者決定問題の決定変数の数が指数的に増加するために計算時間は長くなった。

オークションの繰り返し回数 ite と1入札者の K 個の入札の中で選択された部品タイプ $PN_{i,j,k}$ のバリエーション数の相関係数は-0.25であり、勝者決定問題の最適解を得るためにかかる計算時間と1入札者の K 個の入札の中で選択された部品タイプ $PN_{i,j,k}$ のバリエーション数の相関係数は0.26であった。これらから、オークションの序盤ほど勝者決定問題を解くためにかかる計算時間は長くなり、1入札者に選択された部品タイプ $PN_{i,j,k}$ のバリエーション数が増えるほど計算時間は長くなる傾向にあったことがわ

Table 4.7: Experimental Conditions

Dataset	1	2	3
Max due date SPD_i	U[10,80]	U[10,80]	U[10,80]
Variance shown in Table 4.8 σ^2	1	3	-
Set-up time CO	1	1	1

Table 4.8: Distribution of customer's needs

	Firmness of toe ($c = 1$)	Firmness of heel ($c = 2$)
$p = 1$	$N(4, \sigma^2)$	$N(6, \sigma^2)$
$p = 2$	$N(6, \sigma^2)$	$N(7, \sigma^2)$
$p = 3$	$N(7, \sigma^2)$	$N(4, \sigma^2)$
	Weight ($c = 3$)	Color ($c = 4$)
$p = 1$	$N(7, \sigma^2)$	$N(4, \sigma^2)$
$p = 2$	$N(4, \sigma^2)$	$N(4, \sigma^2)$
$p = 3$	$N(6, \sigma^2)$	$N(4, \sigma^2)$

かる。

4.4.4 実験2 敗者となった入札を記憶することの有効性

組合せオークションの勝者決定問題で敗者となった入札が添加するフェロモンの単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$ を変更して計算機実験を行い，勝者決定問題の敗者となったために交渉及びその時点で得られた計画には反映されなかった入札者の意見を記憶することの有効性について評価する．実験2の評価指標は以下の通りである．

- OF : 目的関数値 (製品に対する満足度により決まる納期からの遅れの合計)

実験2では3種類のデータセットに対し計算機実験を行った．計算機実験に用いたデータセットの詳細を Table 4.7 に示す．また，データセット1, 2では顧客にとって最適な部品 p の指標 c の値 $BP_{i,p,t}$ は Table 4.8 に示した通り正規分布に従うものとする．データセット1と2では，顧客の求める仕様の分散 σ^2 が異なるものとする．データセット3では顧客が求める仕様は一様分布に従うものとする．

実験2では，1入札者あたりの入札数 K 及び勝者の単位添加量 $\Delta\tau_{winner}$ を以下の通り設定する．

- 1入札者あたりの入札数 K : 7
- 勝者の単位添加量 $\Delta\tau_{winner}$: 100

Table 4.9: Experimental Results for difference of Unit Loser-pheromone $\Delta\tau_{loser}$

		Unit amount of Loser pheromone $\Delta\tau_{loser}$				
		0	1	5	10	100
Dataset 1	Avg.	*198.9	176.1	169.2	*186.4	*318.1
	S.D.	22.0	24.9	25.5	26.9	86.8
Dataset 2	Avg.	294.0	281.0	296.0	292.6	*344.8
	S.D.	16.6	24.9	23.8	29.5	47.7
Dataset 3	Avg.	*289.4	266.7	270.5	272.6	*339.0
	S.D.	20.0	25.2	20.2	28.3	40.3

3種類のデータセットに対し、敗者の単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$ を0, 1, 5, 10, 100と変更し計算機実験を行った結果をTable 4.9に示す。目的関数値 OF の20試行の平均が最良となったものを太字で示す。20試行の平均が最良となった敗者の単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$ の下で得た目的関数値 OF と、ある敗者の単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$ の下で得た目的関数 OF の間に有意差がないという帰無仮説を設定し、帰無仮説の棄却域を有意水準0.05未満とし、この仮説を棄却することが出来るか t 検定を行った。表中の*は、帰無仮説が棄却され最良の結果が得られた場合とその敗者の単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$ の下で得られた結果の間に有意差があったことを表す。データセット1に対しては敗者の単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$ が5の時に目的関数値 OF は最良となり、データセット2, 3に対しては敗者の単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$ が1の時に目的関数値 OF は最良となった。今回用いた実験条件に対しては、敗者の単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$ が5よりも大きな値になるにつれて目的関数値 OF は悪化した。敗者となった入札もフェロモンを添加することで入札履歴を記憶することは良い目的関数値となる計画を得るために有効であることが示唆された。ただし、勝者の単位添加量 $\Delta\tau_{winner}$ に対して敗者の単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$ が大きくなると良い目的関数値 OF を得ることが出来なかった。1入札者が行なう K 個の入札のうち、勝者となる入札は1つのみである。敗者となった入札は $K-1$ 個存在するため、勝者と敗者の単位添加量 $\Delta\tau_{winner}$ が $\Delta\tau_{loser} \times (K-1)$ よりも大きな値となると、勝者となった入札が添加するフェロモン $\Delta\tau_{winner}$ によるフェロモン分布への影響は相対的に小さくなる。勝者となった入札の影響が相対的に小さくなった結果、次回以降のオークションでも敗者となった入札と似た入札が行われ更にフェロモンが添加されるということが繰り返されるために目的関数値 OF は良い値とならなかったと考えられる。

4.5 結言

本章では、ある1期を対象とし製造拠点と複数の顧客間での交渉を模した組合せオークションによる日程計画及び部品選定の立案手法を提案した。特に顧客間での協

調に着目し、オークションの入札者である各顧客が自身の入札履歴をACOで用いられるフェロモンの考え方を用いて記憶し入札者間でフェロモン分布を共有することで協調を行なう手法を提案した。

はじめに、フェロモンの特徴である蒸発・拡散に着目し蒸発率 ρ 及び拡散の有無を変更して計算機実験を行うことでフェロモンを用いることの有効性について考察した。その結果、フェロモンを用いて入札履歴を記憶すること、古い記憶を忘却すること、フェロモンを拡散することが有効であることがわかった。

次に、提案手法を適用することで得た計画と、前回勝者の近傍にランダムに入札を行なう比較手法を適用することで得た計画を比較し、提案手法の性能及び有効性を考察した。フェロモンを用いることで、勝者となり得るような前回勝者と大きく構造が異なる入札を効率的に作成することが出来ることがわかった。

最後に入札者が主張したものの採用されなかった意見を記憶することの有効性を評価するために、敗者となった入札に含まれる財に対するフェロモンの単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$ を変更し計算機実験を行った。良い目的関数値 OF を持つ計画を立案するためには勝者となった入札に含まれる財へフェロモンを添加するのみでなく、敗者となった入札に含まれる財に対しても少量のフェロモンを添加することが有効であることがわかった。ただし、勝者となった入札に含まれる財へのフェロモンの単位添加量 $\Delta\tau_{winner}$ に対し、敗者となった入札に含まれる財に対するフェロモンの単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$ が大きくなるほど得られた目的関数値 OF は悪化することがわかった。

第 5 章 顧客の意見を取り入れた部品の仕様決定手法

5.1 緒言

4章では、ある1期を対象とし顧客と企業の交渉を模した組合せオークションを用いた日程計画及び部品選定の立案手法及び、ACOで用いられるフェロモンの考え方をを用いた顧客間で協調・情報共有を行うための手法を提案した。顧客は自身の意見をフェロモンを用いて記録し、顧客間でフェロモン分布を共有することで他の顧客の嗜好を読み取り協調を図った。

本章では、多様化する顧客のニーズに製造拠点が素早く対応するために製造に顧客の意見を取り入れるための方法を提案する。計画対象を複数期間とし、 $term$ 期の日程計画及び部品選定の立案のための交渉の過程で顧客の主張した入札履歴が反映されたフェロモン分布を用いて $term+1$ 期に製造拠点が製造する量産部品の仕様を決定する。日程計画及び部品選定を同時に立案する過程で顧客間での情報共有・協調のために用いたフェロモン分布を製造拠点が利用し顧客の嗜好を読み取ることで、顧客のニーズに素早くかつ正確に対応することを目指す。4.4.4項において顧客が主張したものの採用されず計画には反映されなかった意見を計画立案の際に参考にすることが有効であると示唆された。そこで、複数主体の合意点である交渉の結果得られた計画を用いるのではなく、交渉の合意点に至るまでの交渉過程を記憶したフェロモンを用いることで、他主体の意見との兼ね合いで最終的な計画には反映されなかった顧客の意見を読み取り、部品仕様の決定に取り入れることを目指す。複数期間からなる計画対象期間において各期の部品選定及び日程計画の立案と、その過程で得たフェロモン分布を用いた量産部品の仕様決定方法を提案し、計算機実験によりその有効性を評価する。

4章と本章の関係性をFig. 5.1に示す。

5.2節では、本章の計画対象について述べる。5.3節では、提案手法について述べる。5.4節では、計算機実験を行い得られた結果について考察する。最後に5.5節で本章をまとめる。

5.2 計画対象

4章と同じランニングシューズの生産を行う製造拠点を対象とし、ラバー製のソール部の量産部品の仕様を決定する。

Fig. 5.2に計画対象の流れを示す。ある1期中の部品選定及び日程計画を4章で提案した顧客間の交渉・協調による立案手法を用いて同時に立案した後に、製造拠点が次期に製造する量産部品の仕様を決定する。計画の対象期間を $Term$ 期とし、日程計画

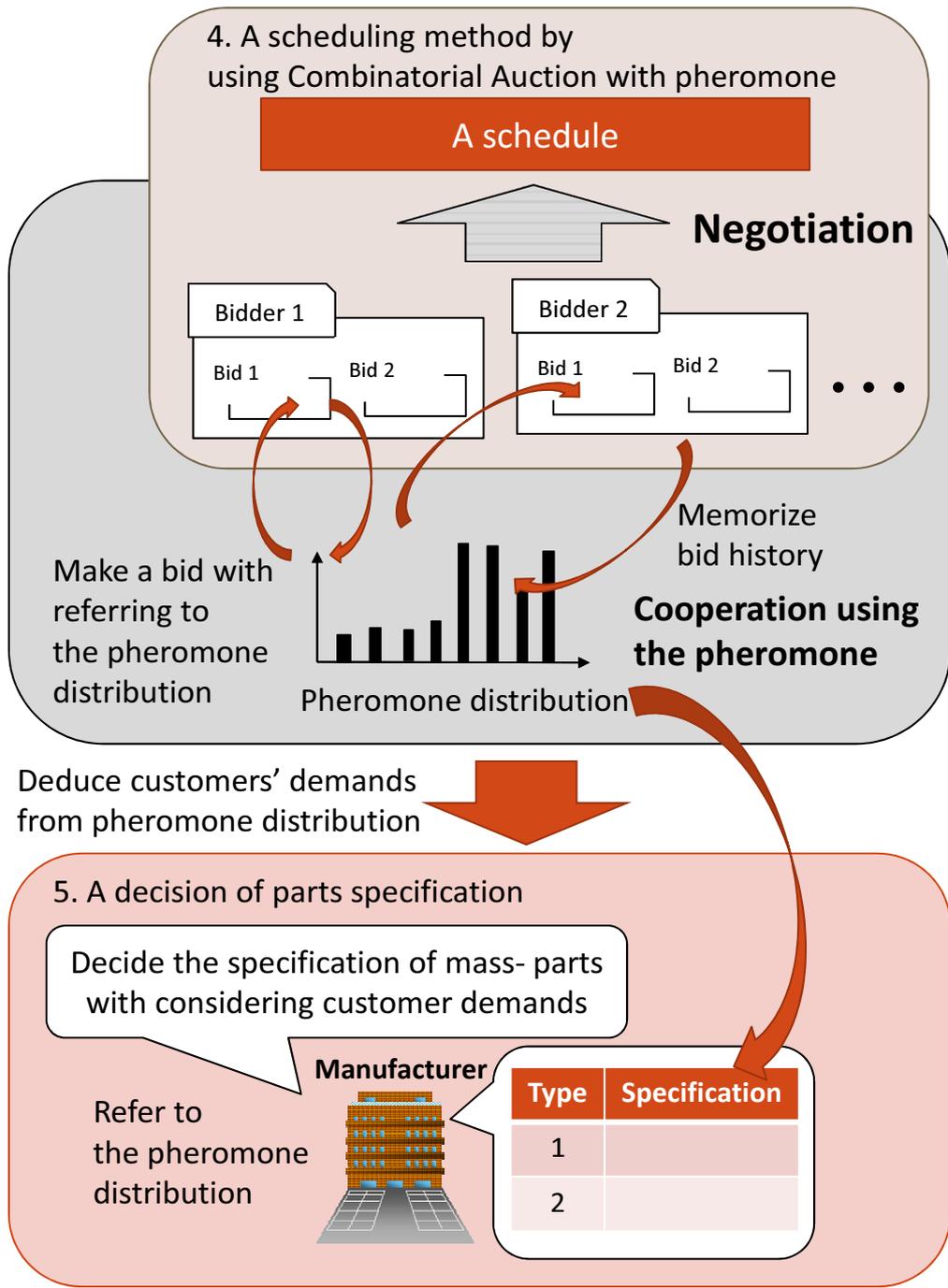


Fig. 5.1: Relationship between chapter 4 and 5

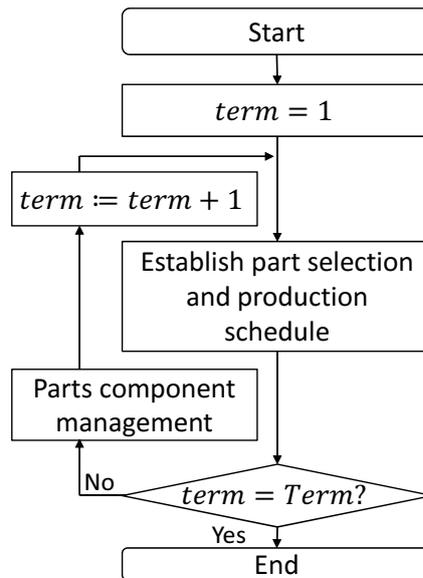


Fig. 5.2: Flowchart of planning horizon

及び部品選定の立案と部品仕様の決定を期ごとに行う。日程計画及び部品選定の立案には、4章で提案した手法を用いる。 $term$ 期の計画の立案過程で得られたフェロモン分布を用いて $term + 1$ 期に製造拠点が準備する量産部品の仕様を決定する。

5.3 量産部品の仕様決定

顧客の意見を取り込んだ量産部品バリエーションの実現を目指し、各期の部品選定及び日程計画の最適化の過程で得たSpecフェロモン $Phes_{p,c,sp}$ の分布を用いて次期に顧客へ提供する量産部品の仕様を決定する。多くのSpecフェロモン $Phes_{p,c,sp}$ が添加された値 sp には多くの顧客のニーズがあると考え、次期の量産部品の仕様決定の際にSpecフェロモン $Phes_{p,c,sp}$ の添加量が多い値 sp ほど高い確率で選択する。交渉の結果得られた計画では反映されていない顧客の潜在的なニーズをフェロモン分布から読み取ることによって顧客のニーズへの対応を図る。また、日程計画及び部品選定の立案のための交渉の過程でのフェロモン分布を用いることで、顧客のニーズへの対応のみでなく高い生産効率と顧客ニーズへの対応の両立を目指す。

ここでは仕様を決定するのみであり、各顧客が量産部品バリエーションの中からの部品タイプを選択するかは4章で述べた日程計画及び部品選定の立案を行なう過程で4.3.2項の勝者決定問題を解くことで決まる。量産部品は期ごとに全ての部品 p の全てのタイプ t の仕様を変更するものとする。以下に仕様決定の手順を示す。

STEP1 部品 p のタイプ t の部品仕様を決定する。指標 $c := 1$ とする。

STEP2 Specフェロモンの分布を用いてルーレット選択により指標 c の値を決定する。

指標 c の値を sp とする確率 $prov_{p,c,sp}$ は、部品 p の指標 c の値 sp に添加された Spec フェロモンの値 $Phes_{p,c,sp}$ を用いて (5.1) 式で表す.

$$prov_{p,c,sp} = \frac{Phes_{p,c,sp}}{\sum_{sp'=1}^S Phes_{p,c,sp'}} \quad (5.1)$$

STEP3 全ての指標の値を決定した ($c = C$) ならば**STEP4**, そうでなければ $c := c + 1$ とし **STEP2** へ.

STEP4 部品 p のタイプ $1, \dots, t-1$ の中に同じ仕様を持つ部品があれば**STEP1** へ. そうでなければ**STEP5** へ.

STEP5 得られた部品仕様から加工時間を決定する. 仕様と加工時間の関係は実験条件として与えられる.

5.4 計算機実験

量産部品の仕様決定に顧客の意見を取り入れることの有効性を評価するために、部品選定及び日程計画の最適化の過程で得たフェロモン分布を量産部品の仕様決定に用いた計算機実験を行う.

5.4.1 評価指標

計算機実験で得られた各期の計画の評価指標は以下の通りである.

- OF_{term} : $term$ 期の部品選定及び日程計画の目的関数値 (総納期遅れ)
- SAT_{term} : $term$ 期の顧客の平均満足度
- $CTV[s]$: 部品の仕様決定にかかった計算時間

5.4.2 比較手法

提案手法の有効性を評価するために2種類の比較手法を用いる. 以下に各手法の狙いとアルゴリズムを述べる.

比較手法1 得られた計画を用いた部品バリエーション

比較手法1では量産部品の仕様決定の際に Spec フェロモンの代わりに、交渉の結果得られた計画を用いる. アルゴリズムの説明に先立ち、新たに次の記号を定義する.

$NOQ_{p,t}$: $term$ 期の計画における部品 p のタイプ t が選択された件数

5.3節の(5.1)式に代わり,(5.2)式を用いて次期に製造する量産部品 p のタイプ t の指標 c の値 $MP_{p,t,c}$ を決定する. $term + 1$ 期に製造する量産部品 p のタイプ t の指標 c の値 $MP_{p,t,c}$ を, $term$ 期に製造した量産部品 p のタイプ t' と同じ値とする確率 $proq_{p,t',c}$ は,(5.2)式で表される.

$$proq_{p,t',c} = \frac{NOQ_{p,t'}}{\sum_{t''=1}^T NOQ_{p,t''}} \quad (5.2)$$

提案手法は顧客の入札とその顧客にとって最適な部品の仕様の間には乖離があるという考えの下,顧客が求める部品仕様を記憶したSpecフェロモンの分布を用いて顧客の嗜好を推定し部品仕様を決定する.それに対し,比較手法1では入札及び最適化の結果得られた計画は顧客の嗜好が正確に反映されており,発注数量の多い部品は多くの顧客を満足させることが出来るという考えの下,交渉の結果得られた計画を用いて部品仕様を決定する.

比較手法2 顧客満足度を最大化する部品バリエーション

比較手法2では顧客の満足度を最大化する部品バリエーションを得るために整数計画問題として定式化し計算機ソルバを用いることで最適な部品バリエーションを得る.ただし, $term$ 期の顧客からの発注が確定した後すぐに製造に移るためには $term$ 期の量産部品の仕様は顧客からの発注を受ける前に予め決定しておく必要があり,発注した顧客についての情報が確定してからその期に製造する量産部品の仕様を決定する比較手法2は現実的な手法とは言えない.

$term$ 期にあった顧客からの発注に関する情報を用いて $term$ 期の量産部品の仕様を決定する.顧客の平均満足度を最大化を目的とし量産部品の仕様を決定する整数計画問題として定式化し,計算機ソルバを用いてその厳密解を得ることで量産部品の仕様を決定する.定式化にあたり,以下の記号を新たに定義する.

$PS_{i,p,s1,s2,s3,s4}$: 仕様 \mathbf{s} が $\mathbf{s} = \{s1, s2, s3, s4\}$ である部品 p に対する顧客 i の満足度

$x_{i,p,s1,s2,s3,s4}$: 顧客 i が部品 p について仕様 $\mathbf{s} = \{s1, s2, s3, s4\}$ である部品を選択するならば1,選択しないならば0となる決定変数

$APP_{p,s1,s2,s3,s4}$: 仕様 \mathbf{s} が $\mathbf{s} = \{s1, s2, s3, s4\}$ である部品 p を1人以上の顧客が選択したならば1,どの顧客からも選択されなければ0となる決定変数 $x_{i,p,s1,s2,s3,s4}$ の従属変数

$$\max \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P \sum_{s_1=1}^S \sum_{s_2=1}^S \sum_{s_3=1}^S \sum_{s_4=1}^S PS_{i,p,s_1,s_2,s_3,s_4} \times x_{i,p,s_1,s_2,s_3,s_4} \quad (5.3)$$

$$PS_{i,p,s_1,s_2,s_3,s_4} = \sum_{c=1}^4 100 \times \frac{S - |s_c - PB_{i,p,c}|}{S \times 4} \quad (\forall i, \forall p) \quad (5.4)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{s_1=1}^S \sum_{s_2=1}^S \sum_{s_3=1}^S \sum_{s_4=1}^S x_{i,p,s_1,s_2,s_3,s_4} = 1 \quad (\forall i, \forall p) \quad (5.5)$$

$$APP_{p,s_1,s_2,s_3,s_4} = \min\left\{1, \sum_{i=1}^I x_{i,p,s_1,s_2,s_3,s_4}\right\} \quad (5.6)$$

$$\sum_{s_1=1}^S \sum_{s_2=1}^S \sum_{s_3=1}^S \sum_{s_4=1}^S APP_{p,s_1,s_2,s_3,s_4} = 10 \quad (5.7)$$

$$x_{i,p,s_1,s_2,s_3,s_4} \in \{0, 1\} \quad (5.8)$$

(5.3) 式は目的関数であり，顧客の満足度の合計の最大化を意味する．(5.4) 式は，仕様 $\mathbf{s} = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ を持つ部品 p に対する顧客 i の満足度 $Sat_{i,p,s_1,s_2,s_3,s_4}$ はその顧客にとって最適な部品 p の仕様 $PB_{i,p,c}$ と，部品 p の仕様 $\mathbf{s} = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ により決まることを表す関係式である．

(5.5) 式から (5.8) 式は制約式である．(5.5) 式は，顧客 i は部品 p について必ず1つの仕様 $\mathbf{s} = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ を選択することを表す．(5.6) 式，(5.7) 式は，量産部品のバリエーションの上限に関する制約である．(5.6) 式は，部品 p について仕様 $\mathbf{s} = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ を持つタイプが1人以上の顧客に選択されたかを表す式である．(5.7) 式は，部品 p のバリエーション T は10種類であることを表す． x_{i,p,s_1,s_2,s_3,s_4} は決定変数であり，この値が1の時顧客 i は部品 p について仕様 $\mathbf{s} = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ を持つタイプを選択したことを表す．

(5.3) 式から (5.8) 式に示した整数計画問題を解くことで，1部品につき10種類と量産部品のタイプ数 T が制限された中で顧客の満足度を最大化する，全ての部品 p のタイプ1からタイプ T の仕様と各顧客が選択する部品 p のタイプの組合せが決まる．

5.4.3 実験条件

部品

部品 p のタイプ t はつま先部硬さ ($c = 1$)，踵部硬さ ($c = 2$)，重さ ($c = 3$)，部品カラー ($c = 4$) の4種類の指標を持つ．部品 p のタイプ t の加工時間 $pt_{i,j,k}$ は部品の重さ ($c = 3$) の値 $MP_{p,t,3}$ により決まり，重さ ($c = 3$) の値 $MP_{p,t,3}$ が大きな部品ほど加工にかかる時間は長くなるものとし Table 5.2 に従うものとする．

Table 5.1: Distribution of customer's needs

	Firmness of toe ($c = 1$)	Firmness of heel ($c = 2$)
$p = 1$	$N(4, \sigma^2)$	$N(6, \sigma^2)$
$p = 2$	$N(6, \sigma^2)$	$N(7, \sigma^2)$
$p = 3$	$N(7, \sigma^2)$	$N(4, \sigma^2)$
	Weight ($c = 3$)	Color ($c = 4$)
$p = 1$	$N(7, \sigma^2)$	$N(4, \sigma^2)$
$p = 2$	$N(4, \sigma^2)$	$N(4, \sigma^2)$
$p = 3$	$N(6, \sigma^2)$	$N(4, \sigma^2)$

Table 5.2: Relationship between weight $MP_{p,t,3}$ and processing time $pt_{i,j,k}$

$MP_{p,t,3}$	1	2,3,4	5,6,7	8,9,10
$pt_{i,j,k}$	3	4	5	6

データセット

6種類の実験条件に対し計算機実験を行った。6種類の実験条件で共通の条件を Table 5.3 に示し、実験条件ごとに異なる条件を Table 5.4 に示す。

実験条件1から実験条件5では各顧客にとって最適な各部品の各指標の分布は Table 5.1 に示す正規分布従い、実験条件6では一様乱数に従うものとする。

実験条件1, 2は1期と2期で同じデータセットに対し部品選定と日程計画の立案を行う。実験条件1と2では、顧客にとって最適な仕様の分散 σ^2 が異なる。1部品あたりのバリエーション数の上限 T が設定されているため、実験条件1よりも顧客が求める仕様の分散 σ^2 が大きい実験条件2の方が顧客を満足させる部品バリエーションの実現は難しい。

実験条件3, 4, 5, 6は、1期と2期で異なるデータセットに対して部品選定と日程計画の立案を行なう。1期と2期でデータセットが異なる場合であっても、1期の計画立案の過程で得たフェロモン分布を用いて2期の部品バリエーションを決定することが有効であるかについて検討する。実験条件3, 4, 5は顧客の求める仕様は正規分布に従うものとし、実験条件6は顧客が求める仕様は一様乱数に従うものとする。実験条件6では、1期と2期で部品選定及び日程計画を立案する対象のデータセットに関係性がないため、実験条件6に対しては1期の計画立案の過程で得た情報を用いて部品バリエーションを決定することは有効な方法でないと考えられる。

Table 5.3: Experimental Conditions (Common)

Planning Horizon $Term$	2
Customers I	20
Parts P	3
Type T	10
Criteria C	4
Processing Machine M	1
Assembly time $pt_{i,(P+1,k)}$	1
Set-up time CO	1
Trial	20

Table 5.4: Experimental Conditions

$term$	Experimental Conditions	1	2	3	4	5	6
1	Max due date SPD_i	U[10,80]	U[10,80]	U[10,80]	U[10,80]	U[10,60]	U[10,80]
	Variance σ^2	1	3	1	1	1	-
2	Max due date SPD_i	U[10,80]	U[10,80]	U[10,60]	U[10,80]	U[10,80]	U[10,80]
	Variance σ^2	1	3	1	1	1	-
	Are datasets same between Term 1 and Term 2?	Yes	Yes	No	No	No	No

部品バリエーション

対象の計画期間は2期であり、1期の日程計画及び部品選定の立案の過程で得たフェロモン分布を用いて2期の部品バリエーションを決定する。提案手法及び比較手法1では、1期に製造拠点が量産部品として製造する各部品の各タイプの仕様はランダムに決定されるものとし、全ての試行で同じとする。比較手法2では、1期では1期にあったオーダの情報を用いて部品仕様を決定し、2期では2期にあったオーダの情報を用いて部品仕様を決定する。

組合せオークションを用いた計画立案手法

日程計画及び部品選定のためのフェロモンを導入した組合せオークションによる顧客間の交渉・協調を模した計画立案手法に関するパラメータを以下の通り設定する。

- 1入札者あたりの入札数 K : 7
- Order フェロモン $Pheo_{i,m,ts}$ を用いる確率 WP : 0.7
- フェロモンの蒸発率 ρ : 0.7

- 納期遅れの重み δ : 0.05
- フェロモンの散布率 γ : 0.3
- フェロモンの初期量 PI : 10
- 勝者の単位添加量 $\Delta\tau_{winner}$: 100
- 敗者の単添加量 $\Delta\tau_{loser}$: 1 (実験1), 0, 1, 5, 10, 100 (実験2)
- フェロモンの拡散 : 行う
- Spec フェロモンの拡散 ds : 2
- Order フェロモン, Type フェロモンの拡散 ds : $pt_{i,j,k}$
- オークションの繰り返し回数 Ite : 500

実験環境

実験には Intel Xeon CPU E5-1650 16GB memory のコンピュータを用い, 勝者決定問題の最適化には IBM ILOG CPLEX 12.6[58] を用いた.

5.4.4 実験結果

実験1 提案手法の有効性

はじめに提案手法の有効性を評価するために, 提案手法, 比較手法1, 比較手法2を適用することで得られた結果を比較する. 敗者の単添加量 $\Delta\tau_{loser}$ を1とし, 実験条件1から実験条件6に対して提案手法, 比較手法1, 比較手法2適用した結果を Table 5.5 に示す. 表中の Pro. は提案手法により得られた結果を表し, Co. 1, Co. 2 は比較手法1, 比較手法2を適用することで得られた結果である. 表中の値は全て20試行の平均であり, 太字は提案手法と2種類の比較手法の中で最良の値であることを表す.

全ての実験条件に対し提案手法と比較手法1で得られた1期の目的関数値 OF_1 及び顧客の平均満足度 SAT_1 の間に差はなかった. これは, 提案手法及び, 比較手法1の1期の部品バリエーションは同じであり, 日程計画及び部品選定の立案手法とそのパラメータの設定も同じであるためである. 比較手法2は, 1期の日程計画及び部品選定の立案を行う前に, 顧客のデータセットを参考に (5.3) 式から (5.8) 式に示した整数計画問題を解くことで顧客の満足度を最大化する部品バリエーションを得る. そのため比較手法2では, 計算機実験を行った全ての実験条件に対し1期の目的関数値 OF_1 及び顧客の平均満足度 SAT_1 の値が提案手法及び比較手法1よりも良い値となった.

1期と2期で同じデータセットを用いて日程計画及び部品選定の立案を行う実験条件1, 2に対して提案手法を適用して2期の部品バリエーションを決定したところ, 2期の総

Table 5.5: Experimental Results with Competitive method

Experimental Condition	Term $term$	OF_{term}			SAT_{term}		
		Pro.	Co. 1	Co.2	Pro.	Co. 1	Co.2
1	1	176.1	170.9	113.2	82.0	85.8	95.2
	2	85.7	140.4	107.3	89.4	82.4	95.0
2	1	281.0	269.8	91.4	80.2	81.2	89.9
	2	138.2	221.1	92.0	84.1	80.6	90.1
3	1	205.7	172.6	107.6	82.4	86.4	95.6
	2	252.2	316.1	277.7	89.9	82.4	95.2
4	1	200.1	170.5	116.2	82.4	86.5	92.6
	2	110.8	174.8	107.6	89.8	82.3	95.3
5	1	379.9	361.4	280.2	83.0	86.4	95.0
	2	71.2	149.1	106.2	89.7	82.9	95.5
6	1	266.7	253.3	92.2	78.4	78.9	85.8
	2	160.4	203.2	87.8	81.0	78.4	86.2

納期遅れの値は減少した。1期の目的関数値 OF_1 が176.1, 281.0であったのに対し2期の目的関数値は85.7, 138.2となりそれぞれ $85.7/176.1 \simeq 48.7[\%]$, $138.2/281.0 \simeq 49.2[\%]$ の値となった。同様に比較手法1を適用したところ, 1期の目的関数値 OF_1 が170.9, 269.8であったのに対し2期の目的関数値は140.4, 221.1となり, それぞれ $140.4/170.9 \simeq 82.2[\%]$, $221.1/269.8 \simeq 82.0[\%]$ の値となった。交渉の結果得られた計画を用いて部品仕様を決定する比較手法1よりも交渉の過程を記憶した情報を用いる提案手法の方が, より良い目的関数値を持つ日程計画及び部品選定を得ることが出来る部品バリエーションを実現することが出来た。同様に顧客の平均満足度は, 1期の顧客の平均満足度 SAT_1 が82.0, 80.2であったのに対し, 2期の顧客の平均満足度 SAT_2 は89.4, 84.1とそれぞれ $89.4/82.0 \simeq 109.0[\%]$, $84.1/80.2 \simeq 104.9[\%]$ の値となり, 顧客の平均満足度は向上した。

実験条件1と実験条件2の違いは顧客が求める部品仕様の分布の分散 σ^2 であり, 実験条件2の方が分散 σ^2 が大きく顧客が求める部品仕様のばらつきが大きい。そのため, 実験条件2の方が最適な部品バリエーションを得ることはより難しいと考えられる。実験条件1及び実験条件2に対して提案手法を適用した時の, 部品1の指標1の各値 sp に添加されたSpecフェロモン $Phes_{1,1,sp}$ の分布をFig. 5.3, Fig. 5.4に示す。Fig. 5.3, Fig. 5.4から, 分散 σ^2 が1の時よりも3の時の方が, 値 sp の間でのフェロモン量の差が小さいことがわかる。また部品1の指標1(つま先部の硬さ)は, 平均が4, 分散 σ^2 が1もしくは3の正規分布に従っている。分散 σ^2 が1の時は分布の平均に近い $sp=3$ に最も多くのフェロモンが添加されているが, 分散 σ^2 が3の時は $sp=7$ に最も多くのフェロモンが添加され, $sp=2$ に2番目に多くフェロモン量が添加されていた。

日程計画を立案する際は加工する部品タイプ $PN_{i,j,k}$ が変わる度に段取り替えが発



Fig. 5.3: A Distribution of Spec Pheromone when σ^2 is 1

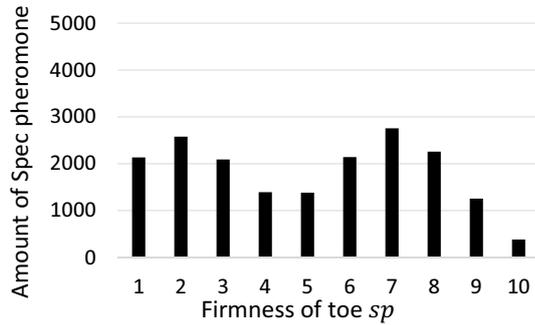


Fig. 5.4: A Distribution of Spec Pheromone when σ^2 is 3

生する．各顧客が協調し同じ部品タイプ $PN_{i,j,k}$ を選択することで段取り替え回数を減らし，生産効率を高めることで総納期遅れの最小化を目指した．分布の山の数が少ない時ほど，多くの顧客が同じ部品タイプ $PN_{i,j,k}$ を選択していると考えられる．満足度が低下すると納期の値が短くなるために，提案手法では日程計画と部品選定を同時に立案することで少ない段取り替え回数と高い満足度の両者を考慮した計画の立案を目指した．顧客が求める指標の値 sp の分散 σ^2 が小さければ多くの顧客が同じ部品タイプ $PN_{i,j,k}$ を選択することでフェロモン分布の山が1つとなる．一方で，分散 σ^2 が大きい時は納期が極端に短い顧客が現れるのを防ぐため複数の部品タイプ $PN_{i,j,k}$ が選択されたために Spec フェロモンの分布の山が増えたと考えられる．これらの結果から，Spec フェロモンの分布を用いて部品仕様を決定することで，顧客のニーズの分散 σ^2 が小さい時はフェロモン分布の山が1つとなるため良く似た仕様の部品を充実させる確率が高くなると考えられる．また，顧客のニーズの分散 σ^2 が大きい時はフェロモン分布に複数の山が現れるため幅広い仕様を持つ部品バリエーションが得られる確率が高くなると考えられる．しかし，部品バリエーション数の上限 T が設定されているために分散 σ^2 が大きい実験条件2の目的関数値 OF_2 及び平均満足度 SAT_2 は，分散 σ^2 が小さい実験条件1よりも悪い値となったと考えられる．実験条件1に対しては提案手法を適用することで比較手法2よりも良い目的関数値 OF_2 を持つ日程計画及び部品選定が得られた

Table 5.6: Calculation time[s]

Experimental Condition	Pro.	Co. 1	Co. 2
1	0.001	0.001	39.0
2	0.001	0.001	44.1
3	0.001	0.001	39.0
4	0.001	0.001	38.9
5	0.001	0.001	39.1
6	0.001	0.001	88.1

が、実験条件2に対しては比較手法2の方が良い目的関数値 OF_2 となった。2期の顧客の平均満足度 SAT_2 は、比較手法1よりも良い値となり比較手法2より悪い値となった。

1期と2期で異なるデータセットに対して、日程計画及び部品選定を立案する実験条件3, 4, 5に対し提案手法を適用した時、実験条件3,5に対しては比較手法よりも良い目的関数値 OF_2 が得られ、実験条件4に対してはほぼ同じ値の目的関数値 OF_2 が得られた。このことから、顧客のニーズが期ごとで同じ分布に従うのであれば1期と2期でデータセットが異なる場合であっても、提案手法を適用することで生産効率と顧客ニーズの両方を考慮した部品バリエーションをフェロモン分布から得ることが出来ると考えられる。

顧客の求める部品仕様が一樣乱数に従うデータセット6に対しては、提案手法を適用することで得られた目的関数値 OF_2 及び平均満足度 SAT_2 は比較手法2を適用した場合よりも悪い値となった。これは、実験条件6では1期と2期の顧客が求める仕様の間に関係性がなく、1期の交渉の過程で得たフェロモン分布が2期の顧客のニーズを反映していないためである。提案手法では顧客の嗜好を顧客の入札履歴から推定することで次期に製造する部品の仕様を決定するため、各期の顧客の嗜好には何らかの関係性がある必要がある。

部品仕様の決定にかかった計算時間 CTV [s]をTable 5.6に示す。提案手法及び比較手法1では、部品の仕様決定にかかる時間は6種類の実験条件に対し平均1[ms]ミリ秒以下であった。提案手法では、Specフェロモンの分布を用い比較手法1では発注数量を用いてルーレット選択により部品の仕様を決定するため、短時間で仕様を決定することが可能である。一方、比較手法2では(5.3)式から(5.8)式に示した整数計画問題を最適化する必要があるため数十秒の計算時間がかかった。また比較手法2では、計算時間 CTV は顧客の求める部品仕様が一樣乱数に従う実験条件6に対して最長となった。比較手法2では、顧客数 I 、バリエーション数 T 、部品の指標の数 C 、指標のスケール S が増加すると実時間内に最適解を得ることが出来なくなる。一方提案手法及び比較手法

Table 5.7: Objective Function value OF_{term} with changing $\Delta\tau_{loser}$

Experimental Condition	Term $term$	Loser-pheromone $\Delta\tau_{loser}$				
		0	1	5	10	100
1	1	198.9	176.1	169.2	186.4	318.1
	2	81.6	85.7	54.6	64.3	123.1
2	1	294.0	281.0	296.0	292.2	344.8
	2	132.6	138.2	118.6	105.3	165.0
3	1	203.8	205.7	221.6	233.5	328.2
	2	239.8	252.2	268.9	257.8	124.6
4	1	194.5	200.1	193.3	239.0	304.2
	2	96.4	110.8	117.9	129.8	127.0
5	1	367.5	379.9	373.3	407.3	417.0
	2	75.3	71.2	102.5	90.7	135.7
6	1	289.4	266.7	270.5	272.6	339.0
	2	143.3	160.4	138.2	128.5	118.7

1は、問題の規模が大きな場合でも仕様決定にかかる計算時間はほぼ変わらず実時間内に部品仕様を決定することが出来る。

実験2 敗者となった入札によるフェロモン添加の影響

実験2では、敗者となった入札に含まれる財へのフェロモンの単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$ を変更し計算機実験を行った。実験条件1から実験条件6に対して、提案手法を適用することで得た1期、2期の目的関数値 OF_{term} 及び顧客の平均満足度 SAT_{term} を Table 5.7, Table 5.8に示す。表の値は全て20試行の平均である。表中の太字は、5種類のパラメータ設定の中で最良の結果が得られたことを表す。

顧客が求める仕様の分散 σ^2 が大きいデータセット2, 納期が短いデータセット3, 顧客の求める仕様が一樣乱数に従うデータセット6に対しては、敗者となった入札に含まれる財へのフェロモンの単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$ が大きな値の時に2期の目的関数値 OF_2 は最良となった。顧客が求める仕様の分散 σ^2 が小さいデータセット1, 4, 5に対しては、敗者となった入札に含まれる財へのフェロモンの単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$ が小さな値の時に2期の目的関数値 OF_2 は最良となった。また、顧客の平均満足度 SAT_2 は全ての実験条件に対し、敗者となった入札に含まれる財へのフェロモンの単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$ が100の時に最良となった。

オークションの初回では、全ての財に同じ量のフェロモンが添加されている。そのため、オークションの序盤では入札作成の際に入札者が受けるフェロモンの影響は小さく、各入札者は自身の満足度を最大化する部品仕様 $s_{i,j,k}$ 及び部品タイプ $PN_{i,j,k}$ を高い確率で選択する。敗者となった入札に含まれる財へのフェロモンの単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$ が

Table 5.8: Satisfaction value OF_{term} with changing $\Delta\tau_{loser}$

Experimental Condition	Term $term$	Loser-pheromone $\Delta\tau_{loser}$				
		0	1	5	10	100
1	1	82.4	82.0	82.1	82.3	83.6
	2	89.4	89.4	89.8	89.8	93.2
2	1	80.3	80.2	80.8	80.5	82.1
	2	83.5	84.1	81.3	83.9	93.4
3	1	82.4	82.4	82.6	82.8	83.7
	2	89.7	89.9	87.7	90.9	92.9
4	1	82.1	82.4	82.4	82.8	83.5
	2	89.3	89.8	88.0	90.4	93.0
5	1	82.6	83.0	82.9	83.3	83.8
	2	89.5	89.7	87.2	90.5	93.0
6	1	78.5	78.4	78.6	78.5	81.0
	2	80.5	81.0	78.5	80.6	93.0

勝者の単位添加量 $\Delta\tau_{winner}$ よりも十分に小さいならば、勝者となった入札は敗者となった入札よりも入札作成に大きな影響を与える。オークションが繰り返されフェロモン分布が形成されると、自身の満足度は低下するものの全体として良い目的関数値 OF_2 を持つ計画を得ることが出来た仕様 $s_{i,j,k}$ 及び部品タイプ $PN_{i,j,k}$ に入札する確率が高くなる。しかし、敗者の単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$ が大きくなると敗者となった入札が添加するフェロモンの影響が相対的に大きくなり、これまでに敗者となった入札と似た財の組合せへ入札する確率が高くなる。ある敗者となった入札で選択した部品仕様 $s_{i,j,k}$ に大量のフェロモンが添加されると、次のオークションで同じ部品仕様 $s_{i,j,k}$ 及び部品タイプ $PN_{i,j,k}$ が選択される確率は更に高くなる。

敗者の単位添加量 $\Delta\tau_{loser}$ が大きな値の時は、各入札者は自身が行った入札が敗者となったとしてもその入札を記憶し次回以降のオークションで同じ仕様 $s_{i,j,k}$ に対して入札を行い続ける。そのため、オークションの結果に依らず顧客が求めた部品仕様に大量のフェロモンを添加し続けたフェロモン分布が形成される。そのようなフェロモン分布を用いて決定した部品バリエーションは平均満足度 SAT_2 は大きな値となるものの、効率的な日程計画については十分に考慮されていないために目的関数値 OF_2 は良い値とならなかったと考えられる。

ただし、顧客の求める部品仕様の分散 σ^2 が大きい時のように、段取り替え回数削減を目指し多くの顧客が同じ部品タイプ $PN_{i,j,k}$ を選択すると各顧客の満足度が低下し納期が極端に短くなる場合は、段取り替え回数が増加したとしても各顧客に満足度が高い製品を提供した場合の方が結果として良い目的関数値 OF_2 となることも考えられる。

5.5 結言

本章では，製造拠点が製造する量産部品の仕様を決定する手法を提案した．そこで，第4章で提案した顧客間の交渉・協調による日程計画及び部品選定の立案手法で用いたフェロモンに着目した．顧客間の協調に用いたフェロモン分布を製造拠点が用いることで，顧客のニーズを推定し最適な部品バリエーションの実現を試みた．さらに，日程計画及び部品選定の立案の過程を記憶したフェロモン分布を用いることで，高い生産効率と顧客のニーズへの対応の両立を目指した．

交渉の過程ではなく交渉の結果得られた計画そのものを参考に部品仕様を決定する比較手法1と，顧客の注文が確定してから顧客のニーズへの対応のみを考慮して部品の仕様を決定する比較手法2を計算機実験にて比較することで，提案手法が有効であることを示した．

また，顧客が主張したものの採用されなかった意見を記憶することの影響について，敗者の添加量 $\Delta\tau_{loser}$ を変更し計算機実験を行うことで評価した．顧客のニーズが多様である場合は，各顧客が主張したものの採用されなかった意見を記憶することが有効であることがわかった．

第 6 章 結論と今後の展望

6.1 結論

本論文では、マスカスタマイゼーション実現を目指し、製造に関わる主体間での交渉・協調に着目し研究を行った。

まず第1章では本研究の背景と目的を明らかにした。マスカスタマイゼーションの実現方法の1つである製品のモジュール化の特徴と利点について述べた。製品のモジュール化により、製品を構成する各モジュールについて特徴の異なる複数のバリエーションを持つ各モジュールの組合せによる多様なバリエーションの実現と、各モジュールのバリエーション数を制限し大量生産することで高い生産効率を両立を目指す。また、マスカスタマイゼーションの実現のためには、顧客を生産に取り込むことが必要不可欠であるとされている。そこで、顧客の代理として振る舞う顧客エージェントと企業エージェントが交渉・協調することの有効性について検討するために、自律分散型の生産システム及び、生産システムにおける要素間の情報共有に着目した先行研究についてその特徴を述べた。

第2章では、製造に関わる主体間で交渉を模した手続きにより計画を立案するための方法として、組合せオークションに着目した。組合せオークションについて説明した後、組合せオークションを用いた主体間の交渉を模した近似解法を提案した。更に、主体間で協調を行なうことにより交渉の合意点を効率的に求めることに着目し、ACOで用いられるフェロモンを導入した組合せオークションを用いた主体間の交渉・協調による計画立案手法を提案した。

第3章では、サプライチェーンの構成企業間の交渉による受発注計画の立案手法を提案した。企業が保持する情報を受発注計画の評価指標に関わる情報と、評価指標に直接関わらない情報の2種類に分類し、共有する情報の種類が得られる受発注計画に与える影響について計算機実験により得られた結果から考察した。その結果、提案手法では評価指標に関わる情報を共有することでより少ないオークションの繰り返し回数で交渉の合意点を得ることが可能となり、評価指標に直接関わらない指標を共有することでより良い目的関数値を持つ計画を得ることが可能となることがわかり、交渉の過程での主体間の情報共有が主体間の交渉を模した計画立案手法に対して有効であることを示した。

第4章では、顧客間での協調に着目し、ACOで用いられるフェロモンを導入した組合せオークションを用いた顧客間の交渉・協調による日程計画及び部品選定の立案手法を提案した。オークションの繰り返しの過程で、各入札者による自身が求めた財へ

のフェロモンの添加と入札者間でのフェロモン分布の共有を行うことで、フェロモン分布から他の入札者が求める財を推測し入札作成の際に他の入札者との協調を図る方法を提案した。フェロモンの特徴である拡散・蒸発に着目し計算機実験を行うことで、入札履歴の記憶及び入札者間での協調にフェロモンを用いることの有効性を示した。また、顧客が主張したものの採用はされなかった意見を記憶することの有効性について検討を行った。その結果、採用されなかった意見を記憶することは有効であるものの、その影響が大きくなると得られる計画の目的関数値は悪化することがわかった。

最後に第5章では、顧客ニーズの推定による量産部品の仕様決定手法を提案した。日程計画及び部品選定の立案の過程で顧客間で協調を行うために用いたフェロモンに着目し、フェロモン分布を製造拠点が用いることで顧客のニーズを読み取り、顧客の求める部品の仕様を決定することを目指した。交渉過程での顧客の主張した意見の推移を記憶したフェロモン分布に対し、交渉の結果である立案された計画から顧客ニーズを読み取ることを目指した比較手法1及び、製造を考慮せず顧客ニーズへの対応のみを目指し部品仕様を決定する比較手法2と比較し、交渉の過程での顧客の意見の推移を記憶したフェロモン分布を用いて部品仕様を決定する提案手法の有効性を示した。

以上より、本論文の成果は以下のようにまとめられる。

- マスカスタマイゼーションの実現を目指し、製造に関わる主体間での交渉・情報共有・協調による生産スケジューリング手法を提案した。
- サプライチェーンを構成する企業間の交渉により受発注計画を立案する際に企業間で情報共有を行うことが有効であることを示した。また、共有する情報の種類によって受発注計画の立案に異なる影響を与えることを示した。
- 製品を発注した顧客間の交渉により部品選定及び日程計画の立案を行う際に、フェロモンを用いた入札履歴の記憶と入札者間でのフェロモン分布の共有により、顧客間で協調を行う手法を提案した。フェロモンの特徴である蒸発・拡散に着目した計算機実験を行いその有効性を示した。
- 量産部品の仕様を決定する際に、顧客間で協調を行うために用いたフェロモンを用いることで顧客の意見を量産部品の仕様決定に取り入れることを提案した。部品選定と日程計画の立案のために用いたフェロモンを用いることで、顧客ニーズへの対応と効率的な日程計画の立案の両立することを目指した。計算機実験によりその有効性を示した。
- 今後、顧客ニーズの多様化が更に進み、テーラメイドでの製造が一般化し顧客一人一人に一点ものの製品を提供することが求められる場合に対しても顧客を製造に取り込むことが有効となることが期待出来る。

6.2 今後の展望

今後の研究の展望は以下の通りである。

人間とエージェントの交渉・協調

本論文では、サプライチェーンの構成企業及び顧客を模したエージェント同士の交渉・協調による計画立案手法について検討を行った。そこで今後の展望としては、エージェントのみでなく製品を発注した人間が実際に交渉に参加するためのシステムの提案が挙げられる。組合せオークションを用いた計画の立案に人間が参加し、現実存在する人間とコンピュータ上で他の顧客や企業の代理として振る舞う顧客エージェント、企業エージェントの協調を目指す。エージェントの入札をフェロモン分布から推測し、人間に対して入札すべき財の組合せを提示する。入札例の提示は入札補助機能を通して行われ、人間は必ずしも提示された入札例の通りに入札を行う必要はないものとする。また、人間の行動をエージェントがフェロモンを用いて推測することを目指す。本論文で提案したフェロモンを導入した組合せオークションを用いた顧客間の交渉・協調による日程計画及び部品選定の立案手法では、各エージェントは他のエージェントと常に協調を行い、最適であると考えられる入札を作成していた。しかし、人間は他者の裏をかくなど敢えて非合理的な戦略を取ることが考えられる。そのような人間の行動をエージェントがフェロモンから察知し顧客の入札を推測することを目指す。

さらに、同時に複数の人間が計画立案に参加するためのシステムを提案する。現実の人間同士による直接的な協調と、入札補助機能を介しての協調を行う場合について比較する。直接協調する時、その情報はフェロモンに残らないため顧客エージェントは人間同士の協調を読み取ることが出来ない。そのような状況における入札補助機能が取るべき戦略について検討することで、複数の人間及び顧客の代理として振る舞うエージェントが交渉・協調を行うためのシステムの構築を目指す。

知識を持つ顧客との交渉結果を用いた大量生産品の在庫管理

5章では、モジュール化された製品を対象に製品を発注した顧客のニーズをフェロモン分布から読み取ることによって部品の仕様を決定する方法を提案した。これは、カスタマイズされた製品を発注する顧客は自身が発注した製品に対する知識が十分にあるという前提に基づくものである。そこで十分な知識を持つ顧客との交渉の結果を、製品に対する知識を持たない顧客に提供する製品に反映することを目指す。十分な知識を持つ顧客との交渉の過程で得たフェロモン分布を用いて大量生産品の需要予測を行い最適な在庫管理を行う。

立場の異なる主体間の交渉・協調

本論文では、サプライチェーンの構成企業間での交渉・情報共有による受発注計画立案手法、製品を発注した顧客間の交渉・協調による日程計画及び部品選定立案手法、顧客間での交渉・協調の過程で得たフェロモン分布を用いた製造拠点による顧客ニーズの推測による部品仕様の決定手法を提案した。しかし、立場の異なる主体同士の交渉・協調については十分考慮されていない。製造拠点が保有する工作機械と、製品を発注した顧客が交渉・協調することで日程計画を立案することも考えられる。

立場が異なる主体間であっても交渉・協調を行うことが可能な手法が提案されれば、多目的最適化問題への適用や、さらにより大規模・複雑な問題への適用が可能となると考えられる。

参考文献

- [1] B. J. Pine II. *Mass Customization*. Harvard Business School Press, 1992.
- [2] B. J. Pine II. Mass customizing products and services. *Planning Review*, Vol. 21, pp. 6–55, 1993.
- [3] S. Kotha. Mass customization: Implementing the emerging paradigm for competitive advantage. *Strategic Management Journal*, Vol. 16, pp. 21–42, 1995.
- [4] C. Y. Baldwin and K. B. Clark. Modularity-in-design: An analysis based on the theory of real options. *Harvard Business School Working Paper*, 1994.
- [5] R. Duray, P. T. Ward, G. W. Milligan, and W. L. Berry. Approaches to mass customization: configurations and empirical validation. *Journal of Operation Management*, Vol. 18, pp. 605–625, 2000.
- [6] M. M. Tseng and X. Du. Design by customers for mass customization products. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 47, No. 1, pp. 103–106, 1998.
- [7] Harley-Davidson Inc. <https://www.harley-davidson.com/us/en/bike-builder/index.html> [Accessed 2/12/2017].
- [8] Dell Inc. <http://www.dell.com/> [Accessed 2/12/2017].
- [9] トヨタ自動車. Open road project. <http://openroad-project.com/prototyping/road-kitchen> [Accessed 2/12/2017].
- [10] 近能善範. 自動車部品サプライヤーのマスカスタマイゼーション戦略. 日本経営学会誌, Vol. 7, pp. 84–95, 2001.
- [11] E. Feitzinger and H. L. Lee. Mass customization at hewlett-packard: The power of postponement. *Harvard Business Review*, Vol. 75, No. 1, pp. 116–121, 1997.
- [12] K. Ueda, T. Takenaka, and K. Fujita. Toward value co-creation in manufacturing and servicing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 1, No. 1, pp. 53–58, 2008.
- [13] R. W. Veryzer and B. B. de Mozota. The impact of user-oriented design on new product development: An examination of fundamental relationship. *The Journal of Product Innovation Management*, Vol. 22, No. 2, pp. 128–143, 2005.

- [14] B. Menguc, S. Auh, and Peter Yannopoulos. Customer and supplier involvement in design: The moderating role of incremental and radical innovation capability. *Journal of Product Innovation Management*, Vol. 31, No. 2, pp. 313–328, 2014.
- [15] P. E. Green and V.Srinivasan. Conjoint analysis in consumer research: Issues and outlook. *Journal of consumer research*, Vol. 5, No. 2, pp. 103–123, 1978.
- [16] 岡太彬訓, 守口剛, 木島正明. マーケティングの数理モデル. 朝倉書店, 2001.
- [17] 森欣司, 宮本捷二, 井原廣一. 自律分散概念の提案. 電気学会論文誌C (電子・情報・システム部門誌), Vol. 104, No. 12, pp. 15–22, 1984.
- [18] 湯浅秀男, 伊藤正美. 自律分散システムの協調と大域的秩序形成. 計測と制御, Vol. 29, No. 10, pp. 929–934, 1990.
- [19] 樋野励, 森脇俊道. ホロニック生産システム概念の提案. 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 67, No. 658, pp. 367–373, 2001.
- [20] 上田完次. 生物指向型生産システム自然・生命からの発想. 工業調査会, 1994.
- [21] H. V. Brussel, J. Wyns, P. Valckenaers, L. Bongaerts, and P. Peeters. Reference architecture for holonic manufacturing systems: Prosa. *Computers in Industry*, Vol. 37, pp. 255–274, 1998.
- [22] A. Koestler. *The Ghost in the Machine*. Lightning Source, 1982.
- [23] 岩村幸治, 谷水義隆, 杉村延広. ホロニック生産システムにおけるリアルタイムスケジューリングに関する研究 (第1報, 効用値に基づく意思決定プロセス). 日本機械学会論文誌 (C編), Vol. 69, No. 682, pp. 1733–1737, 2003.
- [24] 岩村幸治, 眞弓宗久, 谷水義隆, 杉村延広. 自律分散型リアルタイムスケジューリングへのマルチエージェント強化学習の適用. システム制御情報学会論文誌, Vol. 26, No. 4, pp. 129–137, 2013.
- [25] 錢毅, 藤井信忠, 貝原俊也, 藤井進, 梅田豊裕. 運用段階における社会的交渉ベースの実仮想融合型生産スケジューリング. 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 78, No. 792, pp. 3033–3042, 2012.
- [26] 上田完次, 藤井信忠. 環境適応型生産システム-生物指向型生産システム研究の展開. システム制御情報学会論文誌, Vol. 49, No. 12, pp. 462–467, 2005.
- [27] 北村新三. 自律分散システムと創発システム. システム制御情報学会, Vol. 51, No. 1, pp. 45–47, 2007.

- [28] 貝原俊也. 社会指向型の新生産システム. 日本機械学会誌, Vol. 111, No. 1078, 2008.
- [29] 貝原俊也. 社会指向型フレキシブル・オートメーション. システム制御情報学会論文誌, Vol. 55, No. 2, pp. 48–53, 2011.
- [30] L. Monostori. Cyber-physical production systems; roots, expectations and r&d challenges. *Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Vol. 17, pp. 9–13, 2014.
- [31] H. Kagermann, W. Wahlster, and J. Helbig. Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0. 2013.
- [32] K. Ashton. That 'internet of things' thing. *RFID Journal*, 2009.
- [33] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito. The internet of things: A survey. *Computer Networks*, Vol. 54, pp. 2787–2805, 2010.
- [34] 総務省. 平成27年度版情報通信白書. 2015.
- [35] 錢毅, 藤井信忠, 貝原俊也, 藤井進, 梅田豊裕. 実仮想融合型生産システムにおける仮想システムの動的生成. システム制御情報学会論文誌, Vol. 24, No. 2, pp. 31–38, 2011.
- [36] 錢毅, 藤井信忠, 貝原俊也, 藤井進, 梅田豊裕. 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.
- [37] D. Wu, M. J. Greer, D. W. Rosen, and D. Schaefer. Cloud manufacturing: Drivers, current status, and future trends. *Proceedings of the ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC2013*, 2013.
- [38] D. Wu, D. W. Rosen, L. Wang, and D. Schaefer. Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation. *Computer-Aided Design*, Vol. 59, pp. 1–14, 2015.
- [39] 勝村義輝, 杉西優一, 貝原俊也. クラウドマニュファクチャリングの生産効率性に関する研究. 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 835, 2016.
- [40] 清威人. スマート・ファクトリー 戦略的「工場マネジメント」の処方箋. 英治出版.
- [41] Industrial Internet Consortium. <http://www.iiconsortium.org/> [accessed 8/12/2017].
- [42] 貝原俊也. Iot環境下の「考える工場」実現を目指す実仮想融合型生産システム. 計測と制御, Vol. 55, No. 1, pp. 53–58, 2016.

- [43] S. de Vries and R. V. Vohra. Combinatorial auctions: A survey. *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 15, No. 3, pp. 284–309, 2003.
- [44] Federal Communications Commission. Second report and order. *FCC*, No. 07-132, 2007.
- [45] S. J. Rassenti, V. L. Smith, and R. L. Bulfin. A combinatorial auction mechanism for airport time slot allocation. *The Bell Journal of Economics*, Vol. 13, No. 2, pp. 402–417, 1982.
- [46] P. Cramton, Y. Shoham, and R. Steinberg. *Combinatorial Auctions*. MIT Press, 2006.
- [47] 櫻井祐子, 横尾真, 亀井剛次. 組合せオークションの高速な準最適勝者決定アルゴリズム. *人工知能学会論文誌*, Vol. 16, No. 5, pp. 445–453, 2001.
- [48] W. D. Harvey and M. L. Ginsberg. Limited discrepancy search. *IJCAI'95 Proceedings of the 14th international joint conference on Artificial intelligence*, Vol. 1, pp. 607–613, 1995.
- [49] Y. Fujishima, K. Leyton-Brown, and Y. Shoham. Taming the computational complexity of combinatorial auctions: Optimal and approximate approaches. *Proceedings of the Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 548–553, 1999.
- [50] E. Kutanoglu and S. David Wu. On combinatorial auction and lagrangean relaxation for distributed resource scheduling. *IIE Transactions*, Vol. 31, No. 9, pp. 813–826, 1999.
- [51] D. Sasaki and T. Nishi. Combinatorial auction algorithm with price-adjustment mechanism for airline crew scheduling problems. *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, pp. 1183–1188, 2015.
- [52] M. Dorigo, M. Birattari, and T. Stutzle. Ant colony optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, Vol. 1, pp. 28–39, 2006.
- [53] 相吉英太郎, 安田恵一郎. メタヒューリスティクスと応用. *電気学会*, 2007.
- [54] A. Coloni M. Dorigo, V. Maniezzo. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics-Part B*, Vol. 26, No. 1, pp. 1–13, 1996.
- [55] M. Dorigo and L. M. Gambardella. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 1, No. 1, pp. 53–66, 1997.
- [56] T. Stutzle and H. H. Hoos. Max-min ant system. *Future Generation Computer Systems*, Vol. 16, No. 8, pp. 889–914, 2000.

- [57] 株式会社東芝. グローバルトップへ挑戦する東芝の攻めの経営. アニュアルレポート, 2012.
- [58] IBM ILOG CPLEX. <http://www-03.ibm.com/software/products/ja/ibmilogcple> [accessed 7/12/2017].
- [59] D. Kokuryo, T. Kaihara, S. Suginochi, and S. Kuik. A study on value co-creative design and manufacturing system for tailor-made rubber shoes production construction of value co-creative smart factory. *2016 International Symposium on Flexible Automation*, pp. 171–174, 2016.
- [60] S. Suginochi, T. Kaihara, D. Kokuryo, and S. Kuik. A research on optimization method for integrating component selection and production scheduling under mass customization. *Proceedings of 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems (USB)*, 2016.

本論文の構成

本論文の第3章は以下の論文からなる。

- 杉之内将大, 貝原俊也, 藤井信忠, 國領大介, 吉田聡, 古賀康隆. 情報共有に着目したサプライチェーンの構成企業間交渉による受発注計画手法の一提案. システム制御情報学会論文誌, Vol. 61, No. 2, pp.33-43, 2016
- Toshiya Kaihara, Nobutada Fujii, Tomomi Nonaka, Shota Suginochi, Satoshi Yoshida, Yasutaka Koga. A Study on Accepting and Ordering Plans for Global Supply Chain. *Procedia of SICE Annual Conference 2014 (CD-ROM)*, pp.1395-1399. 2014
- Shota Suginochi, Toshiya Kaihara, Nobutada Fujii, Satoshi Yoshida, Yasutaka Koga. Towards an optimal order planning in global supply chain. *Proceedings of 48th CIRP Conference on Manufacturing Systems (USB)*, pp. 526-531. 2015
- 貝原俊也, 藤井信忠, 野中朋美, 杉之内将大, 吉田聡, 古賀康隆. グローバルサプライチェーンにおける受発注計画に関する研究. 第58回システム制御情報学会研究発表講演会. 211-2. 2014
- 貝原俊也, 藤井信忠, 杉之内将大, 吉田聡, 古賀康隆. グローバルサプライチェーンにおける受発注計画に関する研究. 第57回自動制御連合講演会. 3A07-4. 2014
- 杉之内将大, 貝原俊也, 藤井信忠, 吉田聡, 古賀康隆. グローバルサプライチェーンにおける受発注計画に関する研究. 第59回システム制御情報学会研究発表講演会. 122-1. 2015

本論文の第4章は以下の論文からなる。

- Daisuke Kokuryo, Toshiya Kaihara, Swee S. Kuik, Shota Suginochi, Kodai 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
- 杉之内将大, 貝原俊也, 藤井信忠, 國領大介. 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及び部品選定の同時最適化に関する研究. システム制御情報学会論文誌, 2018(採択済み)
- Shota Suginochi, Toshiya Kaihara, Daisuke Kokuryo, Swee Kuik. A research on optimization method for integrating component selection and production scheduling under

mass customization. Proceedings of 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems (USB), pp.527-532. 2016

- Daisuke Kokuryo, Toshiya Kaihara, Shota Suginochi, Swee Kuik. A study on value co-creative design and manufacturing system for tailor-made rubber shoes production - Construction of value co-creative smart factory. Proceedings of International Symposium on Flexible Automation 2016, pp. 171-174. 2016
- Shota Suginochi, Toshiya Kaihara, Daisuke Kokuryo. Value co-creative manufacturing system for mass customization: Concept of smart factory and operations method using autonomous negotiation mechanism. Proceedings of 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems (USB), pp. 727-732. 2017
- Shota Suginochi, Toshiya Kaihara, Nobutada Fujii, Daisuke Kokuryo. Optimization method of part selection and production scheduling with negotiation process between manufacturer and customers using pheromone statistic data. Proceedings of International Symposium on Scheduling 2017, pp. 190-195. 2017
- Toshiya Kaihara, Daisuke Kokuryo, Shota Suginochi, Swee Kuik. Value Co-Creative Manufacturing methodology with IoT-Based Smart Factory for Mass Customization. Reconstructions of the Public Sphere in the Social Mediated Age (K. Endo, S. Kurihara, T. Kamihigashi, F. Toriumi Eds.). Springer Nature Singapore. Chapter 9. 2017
- 杉之内将大, 貝原俊也, 藤井信忠, 國領大介. サプライチェーンを構成する要素間の交渉・協調による日程計画及び在庫引当て計画の同時最適化に関する研究. 2015年度精密工学会秋季大会学術講演会. K63. 2015
- 杉之内将大, 貝原俊也, 藤井信忠, 國領大介. サプライチェーンを構成する要素間の交渉・協調による日程計画及び在庫引当て計画の同時最適化に関する研究(第2報). 第58回自動制御連合講演会. 1E1-3. 2015
- 杉之内将大, 貝原俊也, 藤井信忠, 國領大介. 製造拠点と顧客の交渉による顧客ニーズを考慮した日程計画及び在庫引当て計画の同時最適化に関する研究. 日本機械学会生産システム部門発表講演会2016. 201. 2016
- 國領大介, 貝原俊也, Swee S. Kuik, 杉之内将大, 朱佳利. テーラーメイド設計・生産システムを対象とした価値共創型スマートファクトリの構築. 日本機械学会生産システム部門発表講演会2016. 208. 2016

- 國領大介, 貝原俊也, Swee Kuik, 杉之内将大, 朱佳利. エージェントシステムを用いた価値創造型スマートファクトリの運用法に関する研究. 第60回システム制御情報学会研究発表講演会. 223-2. 2016
- 杉之内将大, 貝原俊也, 藤井信忠, 國領大介. 顧客間の交渉・協調による部品選定及び日程計画の同時最適化に関する研究. 平成28年電気学会電子・情報・システム部門大会. MC2-9. 2016
- 杉之内将大, 貝原俊也, 藤井信忠, 國領大介. 組合せオークションによる部品選定及び日程計画の同時最適化に関する研究-フェロモン統計量を利用した顧客間の協調モデル-. スケジューリング・シンポジウム2016. G5-1. 2016
- 杉之内将大, 貝原俊也, 藤井信忠, 國領大介. 組合せオークションによる日程計画と部品選定の同時最適化に関する研究-フェロモン統計量の共有範囲による影響評価-. 第60回システム制御情報学会研究発表講演会, 111-2. 2017
- 國領大介, 貝原俊也, 杉之内将大, 平井康大. 価値共創型テーラーメイド設計・生産システムを対象としたスマートファクトリの構築-設備の拡張とユーザの希望を考慮した運用法. 第60回システム制御情報学会研究発表講演会, 131-5. 2017

本論文の第5章は以下の論文からなる.

- 杉之内将大, 貝原俊也, 藤井信忠, 國領大介. 顧客の意見を取り入れた量産部品の仕様決定手法に関する研究. システム制御情報学会論文誌, 2018(採択済み)
- 杉之内将大, 貝原俊也, 藤井信忠, 國領大介. 複数期間を対象としたフェロモン統計量を用いた部品選定及び日程計画立案手法の一提案. 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会 2017, 101. 2017.3.
- 杉之内将大, 貝原俊也, 藤井信忠, 國領大介. 複数期間を対象とした部品選定及び日程計画の同時最適化に関する研究-フェロモンを用いた部品構成管理法-. 平成29年電気学会電子・情報・システム部門大会. TC23-5. 2017
- Shota Suginochi, Toshiya Kaihara, Nobutada Fujii, Daisuke Kokuryo. A methodology on parts specification management with involving customer demands for Mass Customization. Proceedings of 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems. 2018 (投稿中)

謝 辞

本論文の執筆にあたり、多くの方々にご指導ご鞭撻を賜りました。

著者の指導教員である貝原俊也教授に心より厚く御礼を申し上げます。学部4年次に貝原研究室に配属されて以来、5年に渡りご指導・ご鞭撻を賜りました。国内外での講演など数多くの機会を与えて頂き、私の猪突猛進を許して頂く一方で、猪突猛進が過ぎた時には、時には厳しく時には諭すように軌道修正をして頂きました。

研究のみならず、日常生活におきましても多くのご指導・ご鞭撻を賜りました藤井信准教授に心より厚く御礼を申し上げます。研究を進める上で直面した種々の困難を乗り越えるにあたり、何よりの励みとなりました。

常に丁寧かつ厳しくご指導・ご鞭撻を賜りました國領大介特命助教に心より厚く御礼を申し上げます。研究内容のみでなく、研究を行う姿勢を学びました。

2014年3月まで特命助教として多くのご指導を賜りました青山学院大学理工学部経営システム工学科水山研究室野中朋美助教に深く感謝の意を表し、厚く御礼を申し上げます。

お忙しい中副査を引き受けて下さり、論文全体に渡って貴重なご助言、ご指導を多々頂きました。多田幸生教授、羅志偉教授に厚く御礼を申し上げます。

研究室に配属されてからの5年間に出会い、私を支えて頂き、暖かいご支援・励ましのお言葉を頂きました皆様に感謝致します。特に、貝原研究室の卒業・修了生及び在学生の皆様との充実した研究室生活はかけがえのない思い出です。

生産システムに関する興味を抱くようになったきっかけ及び、後期課程への進学を決心するきっかけを頂きました皆様に感謝の意を表します。特に、鈴鹿工業高等専門学校機械工学科白井達也准教授及び鈴鹿工業港専門学校電子情報工学科浦尾彰准教授との出会いが研究者を志したきっかけです。心より深く感謝致します。

最後に、私が後期課程へ進学することを許して頂き、これまで私を育てて頂いた両親と家族に心より感謝致します。

平成30年1月杉之内将大

神戸大学博士論文「マスカスタマイゼーション実現のための主体間の
交渉・協調による生産スケジューリング手法に関する研究」全 107 頁

提出日 2018 年 1 月 26 日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリKernelにて掲載される場合、
掲載登録日（公開日）はリポジトリの該当ページ上に掲載されます。

©杉之内将大

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。