

# マスカスタマイゼーションに対応した次世代生産・受注システムの開発

## -工作機械を例に-

赤坂 信悟\*      翁 嘉華\*\*

### Production and management methodologies for mass customization

#### -A Case Study on Machine Tools-

Shingo AKASAKA\*      Jiahua WENG\*\*

#### 1. はじめに

グローバル競争時代を生き抜くために、企業は、国内外の顧客を対象に、新しい付加価値を創造すると共に、個々の顧客のニーズに合わせた製品・サービスを提供する必要がある。

一方、少子高齢化や雇用形態の変化により、企業は自動設備の導入や、様々な形での技術者の受け入れが余儀なくされ、異なる能力を持つリソースを運用し生産活動をしなければならない。さらに、「一人一人のニーズに合わせる形で社会的課題を解決する新たな社会を作る為に」[1]、企業は ICT, IoT などあらゆる技術を活用し、サプライチェーン上の協力他社だけでなく、同業他社とも連携し、顧客・地域・社会に貢献しなければならない。このため、熟練者技能のデジタル化や WIN-WIN の関係を築ける取引交渉仕組みの開発など、「スマートモノづくり」も大切になる。

したがって、筆者らの研究グループは、マスカスタマイゼーションでも高いサービス及び生産性を維持できる新しい生産方式の開発や、グローバル生産・販売・流通マネジメントシステムの構築とその効率的な運営方法などの研究を行っている。今回は、個別仕様受注生産を対象に行ってきた研究成果の一部を報告する。

#### 2. 個別仕様受注(ETO)生産のための新生産方式

工作機械等の受注設計 (Engineer-to-Order, 以下 ETO)生産における受注方式を対象とする。工作機械等の生産設備は顧客の使用環境に合わせて製品の機能や性能値を選択する必要があり、機能・性能値の組合せが莫大な数になる。このため、予め設定された製品品種ではなく、顧客の用途に合わせて機能ごとの性能値を設定して受注仕様とする。

また、需要(注文)は顧客企業の設備導入計画を受けた形で、景気の動向が把握できる直前になって発生するために、短期間の生

産・納品が求められる。一方、生産期間が顧客から要求される期間より長い場合、予め部品を用意しておき、準備した部品を使って受注し生産を行っている。

上記の ETO 企業が、生産能力に対して十分な需要(注文の引合)があるにも関わらず、十分な量の注文がとれていないことに着目し、受注率の向上を目指した新生産方式(営業支援方式)を提供することを目的とする。

#### 2.1 新生産方式の概要

ETO 企業を対象に調査した結果、目標とする注文がとれない理由は、大きく 2 つ挙げられる。

第一に、ETO 企業が引き合いを受けてから受注仕様と納期を提案するまでに時間がかかりすぎる。通常、営業部門が顧客から希望を聞き、その情報を設計部門に伝達し、更に設計部門から提供される部品などの情報を基に、生産部門が生産負荷や部品在庫を確認するといったように、多部門に渡って見積を行う必要があるため、場合によっては 10 週間も要する場合がある。その他、設計段階になって必要な情報に不備があった場合や、顧客の要求が技術上に矛盾があることが判明した場合など、再度営業スタッフが顧客に確認をするような手戻りも多発している。したがって、結果的に顧客の要求納期に製品を提供できなく、失注になってしまう。

第二に、営業スタッフが顧客との商談中に、その場に製品仕様・納期の代案を提示することが出来ていないことが挙げられる。実は、受注仕様を提案する際には、顧客の要求を満たす仕様は複数存在するが、現状では設計者が経験または直近の設計案から最小手間で設計できるように、単一の受注仕様のみを設計している。このため、部品が存在し生産可能な受注仕様があったとしてもこれに気付かず要望を満たす仕様案の提示が出来ない。さらに、注文(引合)毎、到着順に、個別に部品在庫の引当を行い受注案件とするため、部品在庫の利用効率の向上を考えた注文の選択ができていない[2][3]。

以上の問題点を解決するために、本研究では、顧客ニーズの把握から受注仕様・納期の見積までを、営業スタッフが顧客と対面しながら

\*助教 経営工学科

Assistant Professor, Dept. of Industrial Engineering and Management

\*\*准教授 経営工学科

Associate Professor, Dept. of Industrial Engineering and Management

ら、その場で、迅速に見積を行えるように、受注プロセスを改善し、営業支援方式を開発した。その基本コンセプトを図1に示す。

まず、受注プロセスのリードタイムを長大化させている最大の原因である、多部署の分業で行っている見積作業を、営業スタッフのみで1週間以内に完了できるようにする。これを実現するために、従来、不正確な顧客ニーズの把握により手戻りを無くす必要がある。さらに、手作業で時間をかけて行っていた受注仕様設計作業を、営業が顧客との対話の現場で、要求内容に応じて迅速に受注仕様を決定できるようにする必要がある。

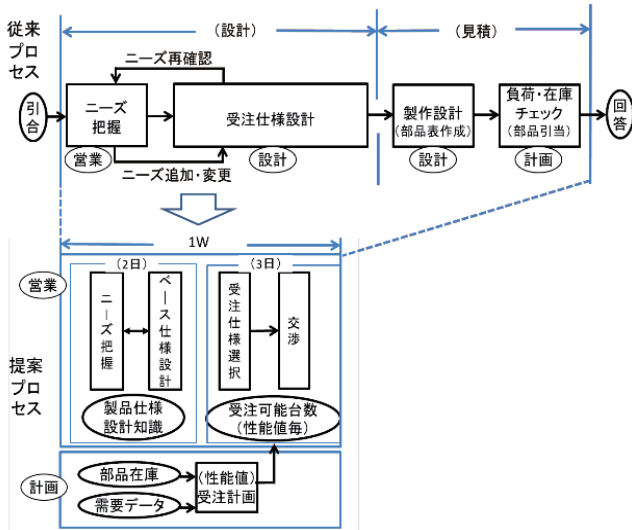


図1 受注プロセスの改善

したがって、本研究はまず、顧客の要求仕様を受注製品仕様が決出出来る詳細度で、かつ漏れなく顧客ニーズ(用途)仕様を体系化し仕様項目として設計する。次に、用途仕様を製品仕様に変換する設計知識を仕様間の関係規則(制約ネットワーク)として抽出し体系化する。さらに、用途仕様値を入力として、適合する機能仕様値を設定する受注仕様の設計作業の自動化(ロジック開発)を行なう。その詳細を次節に示す。

次に、受注仕様案を複数案提示できるように、受注可能枠(部品在庫の効率的利用を考えた)を事前に計画し、前記の自動システムによって設計された製品仕様ベース案を基に、受注可能枠を参照しながら受注見積(代案を含む)を提示する。

これを実現するためには、本研究はまず、受注座席を用いた見積作業方法の全体設計を行なう。次に、需要(注文)の仮データ設定方法を設計する。さらに、受注座席数を自動的に計画するロジック開発する。それらの詳細を2.3節に示す。

前記のコンテンツで構成される新方式によって顧客への見積が迅速・正確にでき、且つその場で複数の代案を提示でき、受注率の向上に寄与できると考えられる。したがって、その効果検証も2.3節に記す。

## 2.2 製品仕様ベース提案の自動生成

前節に示した方式について、図2に示すような穴明加工機を事例として開発を行った[4][5][6][7]。穴明加工機とは加工対象のワークをテーブル上に設置しておきNCデータにより穴明位置を指定す

ることにより、テーブルをX軸・Y軸方向に移動し、ドリルが装着された主轴をZ軸方向に下降し、ワークに穴明加工を行う機械である。穴明加工機は、加工範囲、加工速度といった機能によって製品が表される機能型製品である。

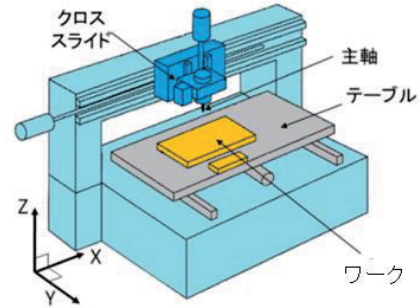


図2 穴明加工機(イメージ図)

### 2.2.1 顧客用途仕様の提案

顧客ニーズ(用途仕様)の設計では、まず、対象製品領域(切削加工機械)に関するニーズ情報を抽象化しておき、5W1Hの観点からのカテゴリ化を行った。そして、カテゴリ毎のニーズ情報と機能仕様項目とを突合せ、必要十分性を確認しながら用途仕様を定義する手順で体系化を行った。その結果、穴明加工機の場合、8カテゴリ24項目の用途仕様を定義することができた。製品機能仕様との対応性が確認でき、機能・性能値の設計に必要な情報を漏れがなく表現できることを確認した。また、後述する用途仕様と製品機能仕様との対応関係等を考慮して、各用途仕様に対して実現可能な範囲(最小値と最大値)を設定し、実現不可能な用途仕様値を最初に検出できるようにした。表1に用途仕様項目の設計結果を示す。

表1 用途仕様項目の設計

用途仕様項目の分類	用途仕様項目	単位	項目値の範囲		
what	入力	ワークの寸法(X)	mm	30~550	
		ワークの寸法(Y)	mm	30~550	
		ワークの寸法(Z)	mm	0.4~3.6	
	出力	穴径	mm	0.3~5.0	
		穴の数	個	50~10,000	
where	稼働環境	穴の位置	-	-	
		内壁粗さ	μm	5~25	
		加工精度	μm	0.15~0.4	
		電源電圧	V	100~480	
	設置環境	電源周波数	Hz	50~60	
		気温	°C	15~25	
		湿度	%	40~60	
		設置場所寸法(X)	mm	2,000~2,500	
	搬入環境	設置場所寸法(Y)	mm	1,200~4,200	
		設置場所寸法(Z)	mm	1,500~2,000	
		床耐圧	kg/m <sup>2</sup>	500~2,000	
		搬入可能な横幅	mm	1,200~2,500	
	how	生産性	搬入可能な高さ	mm	1,500~2,000
			月間の生産枚数	枚	10,000~25,000
コスト		基板重ね加工枚数	枚	1~5	
		稼働シフト	直	1~3	
when	納期	購入価格	円	-	
		ランニングコスト	円	54,000~82,000	

### 2.2.2 顧客用途仕様と製品仕様との関係整理

機能仕様の設計知識は、用途仕様と製品機能仕様の対応関係を仕様項目間の関係規則(制約)を用いて表現する制約ネットワーク形式により体系化した。具体的な制約は、切削理論などの技術情報

を参照に制約式の形を決定した. 工作機械のような機能型製品においては機能・性能の上位互換が成り立つ為, 制約式の表現形式は全て「不等式」とした. 図3に用途仕様と製品仕様との関係例を示す. 穴明加工機では, 3タイプ22種類の制約式を抽出することができた. 22種類のうち5種類の制約式は, 複数の用途仕様値によって複数の製品機能仕様値が決まるタイプである. さらに, 複数の制約式によって値が決まる製品機能仕様項目が存在しており, 仕様値の決定を複雑にしている.

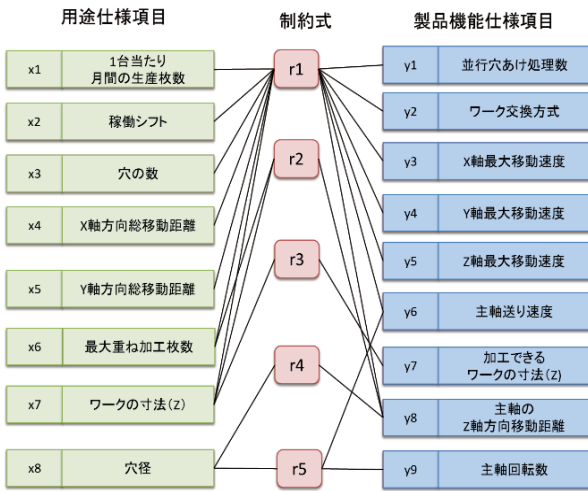


図3 用途仕様と製品仕様との関係例 (制約ネットワーク表現)

例えば図3のr1制約式は, 加工サイクル時間は機能仕様から求められるサイクル時間より短い必要があることを示す(式(1)).

$$\frac{9600 x_2 x_6 y_1}{x_1} - y_2 \geq x_3 \times \left( \frac{2y_8 - x_6 x_7}{y_5} + \frac{x_6 x_7}{y_6} \right) + \frac{x_4}{y_3} + \frac{x_5}{y_4} \quad (1)$$

2.2.3 バックトラック法を用いたベース製品仕様の自動生成  
製品ベース仕様自動設計の概要を図4に示す.

設計処理システムは入力された用途仕様項目の値に対して, 制約関係規則の矛盾の有無をチェックする. その際に, 用意できる機能仕様の最良(大)値を用いて判定を行なう. 最良(大)値でも対応できない場合に, 顧客へ用途仕様項目の値を変更するアドバイスを行なう[8].

受注仕様の仕様値決定の自動化アルゴリズムは, 前述の「機能・性能の上位互換性」を前提に, 顧客の要求を満足する最も廉価な仕様(低い性能値の仕様)をベース仕様として出力可能な方式とした. 入力された用途仕様値に対して, 機能仕様項目を順次に, 性能が低い仕様値から制約式を満たせるか深さ優先探索にて解を求める. なお, 目的関数は, 最下位性能値との乖離距離の最小化とした. 得られた初期解に対して, バックトラック方式による解の改善探索を行うことにより, 最廉価仕様をベース仕様として探索できる. さらに, 処理時間を短縮する為に, 制約式との関連度の高い仕様項目順に値の探索を行なうようにし, 仕様項目のチェック回数を少なくする工夫をした.  $1.2 \times 10^7$ 通りの解候補がある工作機械の事例では, 解が数秒で算出可能なことを確認した. 図5に仕様決定アルゴリズムの

概要を示す.

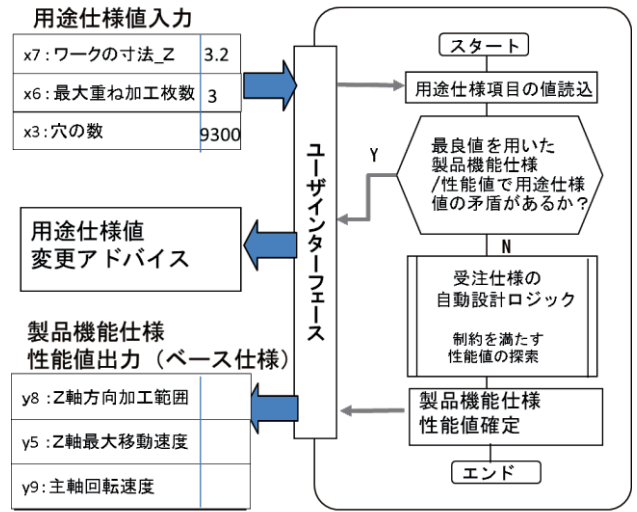


図4 受注仕様の設計処理の概要

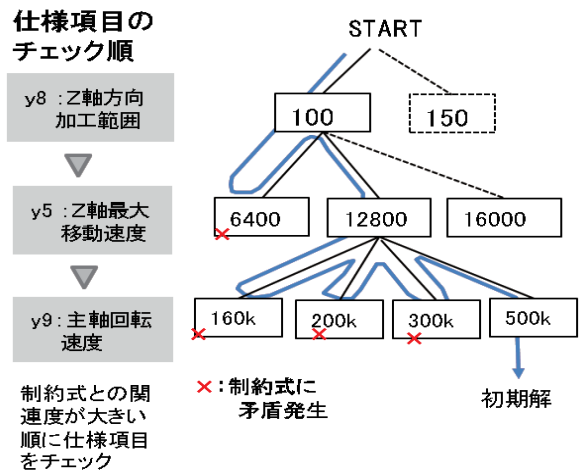


図5 仕様値決定アルゴリズムの概要

2.3 ベース仕様を用いた見積提案

2.3.1 座席方式を用いた受注見積システムの概要

受注見積に関して, 見積業務の全体設計を行った. その際に, 列車・飛行機の切符予約システムと同じ考え方で, 提供可能な製品について受注座席を作成した. ただし, 対象製品の仕様が何は数百万通りにもあり得るため, 製品単位の代わりに, 長期・短期の需要予測から得られる需要台数と製品機能仕様・性能値毎の比率に基づき, 機能仕様・性能値毎の目標生産台数を受注座席として設定する. 次に, 直近の疑似注文を想定し受注座席の補正を行なう. さらに, 受注座席に対して在庫部品の配分(保証)を事前に行なっておく. 以上により計画された受注座席を参照し, 前述の受注仕様設計システムにより得られる受注仕様をベースに, 複数の仕様・納期案が提示できる受注見積の枠組みを設計した[9][10][11]. 図6に受注見積の概要を示す.

ベース受注仕様およびニーズ把握段階で明らかになる顧客の要求納期情報に基づき, 受注予約枠への引き当てにより, 複数仕様・

納期の検討を行い受注仕様を選択する。選択された複数の仕様に関して顧客と交渉し、受注仕様・納期を迅速に決めることができるようになる。

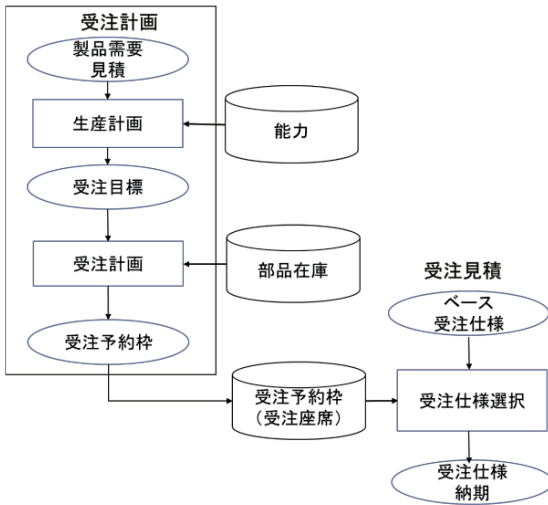


図 6 見積提案の枠組み

図 7 に受注予約枠を用いた受注仕様交渉の例を示す。受注予約枠により、納期-仕様の一覧が分かるので、例えば、ベース受注仕様 X 軸移動範囲 600、X 軸移動速度 6400 が希望納期 t 期になかった場合、代案として納期をずらした案 2、X 軸移動速度 6400 の代わりに上位機能である 12800 を使う案 3 などの複数案を取り入れた交渉を行うことができる。

機能仕様項目	性能値	受注可能台数(台)		
		t期	t+1期	...
X軸移動速度	18000	10	5	...
	12800	3	10	...
	6400	0	8	...
X軸移動範囲	700	8	5	...
	600	7	10	...
	500	5	10	...

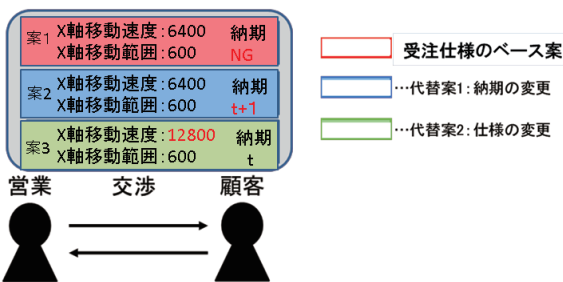


図 7 受注予約枠を用いた受注仕様交渉の例

2.3.2 受注目標と受注可能枠の設定

受注座席（目標）に対して部品在庫を保証する受注座席の設定アルゴリズムを開発した。機能仕様・性能値区分毎に設定された目標台数に対して利用可能な部品在庫を配分し、目標受注台数に最も近い受注可能台数を設定する。対象である受注可能台数は整数の決定変数である為、整数計画法を用いることにした[12][13]。

図 8 に整数計画法を用いた機能仕様値毎の受注可能台数の最大化の概要を示す。需要予測値として与えられる機能仕様項目・性能値の比率を用いて、機能仕様-部品の対応関係から得られる部品所要量

と部品在庫数との関係を示す制約式を用いて受注可能台数を最大化する。

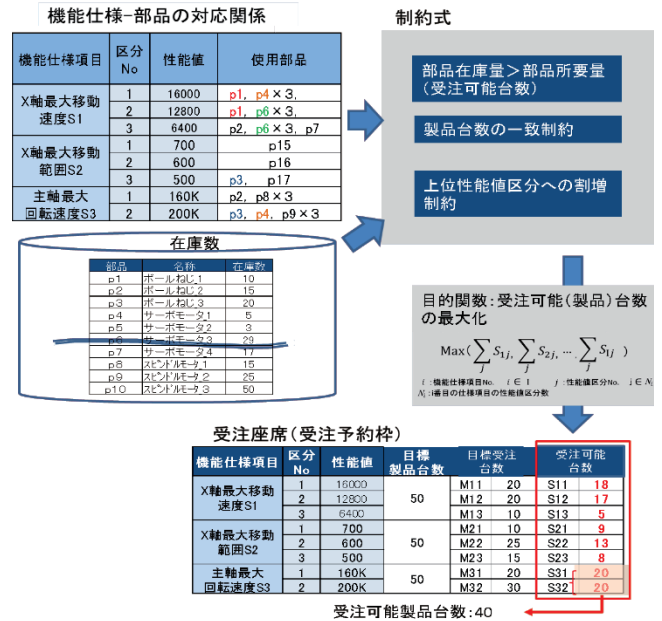


図 8 整数計画法を用いた受注可能台数の最大化

提案の計画アルゴリズムの結果と、不足部品を利用する機能仕様値を特定し受注座席数を減らす方法とを比較し、受注座席数を 10%程度増やせることを確認した。さらに、実製品の需要データを参考に、誤差を伴う注文データを発生させた受失注シミュレーションを行った。受注座席を用いて受注仕様・納期を見積る提案方式と、従来方式（受注座席を用いずに注文の到着順に逐次部品引当を行う）との比較を行い、受注率が 30%程度向上可能なことを確認した（図 9）。なお、受注座席を用いた受失注判定には、1) ベース仕様に固定し性能値区分単位で予約枠に引当てるケース（予約枠に受注可能台数があれば受注となる）2) ベース仕様に加え上位性能値区分も引き当ての対象とする 2 ケースを評価した。

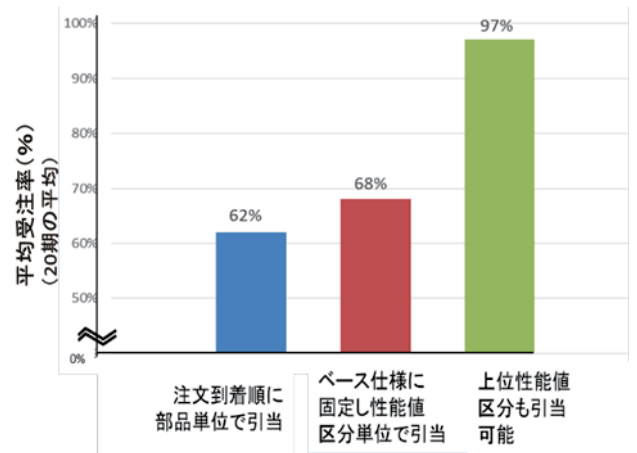


図 9 受注予約枠を用いた受注率向上効果

注文到着順に部品単位で引当（現状に相当）とベース仕様に固定し性能値区分単位で予約枠を引当とでは、約 6%の受注率差異が

ある。これは受注予約枠を計画する際に、予め想定される注文を予測して必要な部品を確保した効果（注文の選択による効果）と考えられる。また、上位性能値区分も引当可能にした場合とベース仕様に固定した引当の差は 29%あるが、これは複数仕様の選択が出来ることによる受注率向上効果である。

#### 2.4 新生産方式の纏めと今後の課題

提案した新生産方式を活用することにより、営業が顧客との商談中に用途仕様を確認しながら受注仕様案を作成することができ、提案時間が大幅に短縮可能である。従来対応できなかった短納期引合に対応できるようになり、さらに、在庫部品の活用効率を上げることで 3 割程度の受注率向上が見込まれる。受注プロセスリードタイムの短縮と部品の活用効率向上の効果合計すると受注率の倍増が期待できる。

本研究では、受注製品仕様提案における「仕様」「納期」を対象に検討を進めたが、今後は、さらに「コスト/価格」を評価の要因に取り上げ、製品コストと製品機能仕様の関係モデルに基づいた、利益最大化が図れる受注方式への拡張を図る。

#### 3. おわりに

今回は、個別仕様受注生産を対象に行った研究の一例を簡単に紹介した。今後も 2.4 節で述べた課題の解決と共に、開発した諸仕組みが工作機械以外の業界で適用できるかの検証を行う予定である。

それと同時に、企業が様々な地域・国に事業を展開していることを考え、消費者動向や雇用環境等の変化、為替や関税など政策の変化、さらにはコロナショックで顕著に表れるように、サプライチェーン寸断リスクなどを分析した上で、生産・販売体制の見直しや収益計画の立案をサポートできる仕組みの開発も行っている [14][15]。また、サプライチェーン全体の価値を高めるために、社内外の組織間の情報共有や取引価格決定の仕方 [16][17]なども研究としている。それらについて、また別の機会で紹介ができればと思う。

#### 参考文献

- [1] 「Society 5.0 とは」、内閣府ホームページ、<https://www8.cao.go.jp/cstp/panhu/csti2017/p7-8.pdf> (2020.12.20 アクセス)
- [2] Hicks, C. and Braiden, P.M. : “Computer-aided production management issues in the engineer-to-order production of complex capital goods explored using a simulation approach”, *International Journal of Production Research*, Vol.38, No.18, pp.4783-4810 (2000)
- [3] Weng, J. Akasaka, S. Hoshino, A. Onari, H.:” A Study on Value Setting of Product Functional Specifications with Consideration of Parts and Inventory Costs for Engineer-to-Order Production”, *Asian Journal of Management Science and Applications*, Vol.2, No.1, pp.33-47 (2015)
- [4] 赤坂信悟, 翁嘉華, 大成尚 : “ETO 生産における製品機能モデルに関する研究”, *日本経営工学会論文誌*, Vol.66, No.1, pp.59-66 (2015)
- [5] Weng, J. Akasaka, S. Onari, H.:” Acquiring Orders using Requirement Specifications for Engineer-to-Order Production”, *Journal of Japan Industrial Management Association*, Vol.64, No.4E, pp.620-627(2014)
- [6] Akasaka, S. Weng, J. Onari, H.:” Product Functional Structure Model for Engineer-to-Order Production : A Case study on Drilling Machines”, *Journal of Japan Industrial Management Association*, Vol.66, No.4E, pp.443-447 (2016)
- [7] 福村莉慶, 翁嘉華, 赤坂信悟, 大成尚 : “ドリル式穴明け加工機の個別受注仕様の決定に用いる製品機能構造モデルの設計”, *日本経営工学会春季大会予稿集*, Vol.2014, pp.32-33 (2014)
- [8] 翁嘉華, 大久保寛基, 赤坂信悟, : “生産座席方式に用いる製品グループ設定に関する研究”, *生産管理*, Vol.20, No.2, pp.19-28 (2014)
- [9] 翁嘉華, 赤坂信悟 : “部品仕込製品受注生産における生産座席を用いた受注方法の提案”, *日本生産管理学会第 45 回全国大会* (2017)
- [10] Weng, J. Akasaka, S. Onari, H.:”A Study on Production Seat Planning for Make-to-Order Production with Make-to-Stock Parts”, *Proceedings of the 12th International Conference of Decision Sciences Institute and the 18th Annual Conference of Asia-Pacific Decision Sciences Institute*, pp. 668-674 (2013)
- [11] 下田篤, 小杉秀則, 狩野隆文, 薦田憲久 : “製品の仕様代替性と部品消費バランスを考慮した受注生産製品の推奨方式”, *電気学会論文誌 C*, Vol.130, No.5, pp.895-902, (2010)
- [12] 今野 浩 : 「線形計画法」, 日科技連出版社 (1987)
- [13] 山下洋史, 諸上茂登, 村田潔, *グローバル SCM サプライチェーン・マネジメントの新しい潮流*, 有斐閣 (2003)
- [14] 翁嘉華, 黄茜, “海運による物流を考慮したグローバル生産計画に関する研究”, *日本生産管理学会第 45 回全国大会*, *日本生産管理学会第 45 回全国大会論文集*, Vol.2017, pp.297-300, (2017)
- [15] Q. Huang, J. Weng, W. Li and H. Onari: *Global Production Planning Considering Marine Transportation Factors*, *日本経営工学会論文誌*, Vol. 69, No. 2E (2018)
- [16] S. Wu, J. Weng and S. Ryu, “A Study on Coordinated Trading System for Product Sales of Consumer Electronics Manufacturers”, *Proceedings of the 20th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference* (2019)
- [17] S. Wu, S. Ryu and J. Weng, “Proposal of Coordinated Trading System for Eliminating Double Marginalization”, *Proceedings of the 2019 INFORMS Annual Meeting* (2019)