

## 総合生産システム専門委員会

## 生産システム情報化/高度化の現状と課題\*

Present and Future on Manufacturing System Informatisation and Sophistication

貝原俊也\*\* 白瀬敬一\*\* 藤井信忠\*\*

Toshiya KAIHARA, Keiichi SHIRASE and Nobutada FUJII

## Key words

integrated manufacturing system, production management system, factory automation, machining process

## 1. 緒 言

精密工学会総合生産システム（IMS）専門委員会は、発足以来 32 年余が経過した。この間、日本の生産技術は進歩し続け、日本の工業製品が有する高品質・短納期・高機能低価格、などの一翼を担っているのは優れた生産技術力であることは世界で認められている。しかし、昨年来の経済危機に伴う世界同時不況の影響で、すでに底は脱したとの報告もあるが、日本企業も依然苦しい状況が続いており、企業買収や統合、さらには派遣切りや雇い止めといった当面の利益確保に奔走するケースが増えている。その結果、生産技術に限らず企業内における組織能力の持続的な蓄積が困難となりつつあり、今後の発展が危ぶまれている。

これからの日本企業は、持続的成長をめざし、グローバル競争力を強化するために大きな構造改革や経営革新を実行しなければならず、このようなときこそ、生産システム技術による企業経営効率の革新が求められている。また、自社内にとどまらず、取引している他企業と連携を築きながら製品ライフサイクル全体を見渡して、無駄のないモノづくりをどのように実践するか、ということも今後の検討課題となる。



\*原稿受付 平成 21 年 7 月 20 日

\*\*正 会 員 神戸大学大学院工学研究科（兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1）

貝原俊也

1985 年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。三菱電機や神戸大学助教授などを経て 2004 年神戸大学教授。現在に至る。社会的マルチエージェントシステムの理論とその生産・流通・社会システムなどへの応用に関する研究に従事。Ph. D.

白瀬敬一

1984 年神戸大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月金沢大学助手。1995 年金沢大学助教授。1996 年大阪大学助教授。2003 年神戸大学教授。現在に至る。「自律性と柔軟性を備えた次世代 NC 工作機械の研究」に従事。

藤井信忠

1998 年神戸大学大学院自然科学研究科博士前期課程修了。神戸大学工学部助手。東京大学人工物工学研究センター助手。客員准教授を経て、2007 年より神戸大学大学院工学研究科准教授となり現在に至る。博士（工学）。

このような状況をかんがみ、本専門委員会では、おもに生産システムの情報化と高度化について調査・研究を進めている。まず、生産システムの情報化については、効率的な生産管理の計画・運用のために、システム化技術や最適化技術、シミュレーション技術などを用いた取組みを進めている。また、生産システムの高度化については、加工技術や計測技術、工作機械、ロボットセル、マン・マシンインタフェース技術などに関する研究を進めており、その内容は毎年発行している活動報告書に詳しく記載している。

このように生産システムを総合的に鳥瞰し、生産システムに関する S/W と H/W にかかわる両分野の研究者・実務家が、それぞれの垣根を越えて相互交流を実践できることは、本専門委員会の大きな特徴といえよう。本稿では、本専門委員会における主な取組みについて、最近の研究テーマを挙げその概略を説明する。

## 2. 生産システムの情報化

情報通信技術の発達を礎として、製造フロアにおける情報通信機器の導入と相互ネットワーク化、製品発注やリソース調達システムのネットワーク化による生産システム環境のユビキタス化が実現してきており、生産システムは高度に情報化してきている。総合生産システム専門委員会においても、このような生産システム環境の情報化を前提としてさまざまな研究活動を行ってきている。これらの生産システムの情報化に関する活動は、以下の 3 つに分類が可能であると考えられる。1) システム計画手法の情報化、2) システム運用手法の情報化、3) 異分野との融合を目指す横断的研究、である。以下では、総合生産システム専門委員会の年次活動報告書に掲載された各委員の報告内容をもとに活動内容の一端を報告する。

## 2.1 システム計画手法の情報化

計算機技術の発達によってメタヒューリスティクスに代表される近似解法が発達し、大規模な問題でも実用的な時間で求解可能となってきている。これらの知見を発展させ、単一目的問題だけでなく、目的関数が多目的となる多目的問題に関する研究が進められてきている。生産システ

ムにおいても、トレードオフ関係にある多目的最適化問題としてモデル化可能な問題が多くあり、発展が期待されている。また、評価指標を生産効率だけでなくコストにも着目することにより、効率的な生産を行う試みもある。以下でそれらの研究例を紹介する。

(1) 動的ジョブショップ環境における納期遵守と段取り時間最小化の二目的スケジューリング<sup>1)</sup>

顧客からの注文の納期を遵守しつつ、できるだけ段取り時間を小さくすることを目指し、納期遵守と段取り時間最小化の二目的問題最適化問題を取りあげている。納期遵守に有効な ATCS ルールと段取り時間最小化に有効な SIMSET ルールの重みを遺伝的アルゴリズムによって調整・切替することで、二目的最適化問題を解く手法が提案されている。提案手法は静的問題だけでなく動的問題にも適用され、近未来の段取り時間増大と引き替えに、納期余裕を確保したスケジューリングを行うことが納期の遵守に有効であることが報告されている。

(2) 単一工程における異なる組立時間および部品価格に基づく製品の投入順序決定法<sup>2)</sup>

JIT 生産方式における多品種組立スケジューリング問題では、部品在庫量を減らすため組立に用いられる部品の消費速度を一定に保つ手法が多かったが、提案手法ではさらに部品の購入費用にも着目し、部品価格および組立時間を考慮した目的追跡法と呼ばれる新しいヒューリスティックを提案している。単一組立工程を対象とした検証例では、組立時間のばらつきが大きいほど提案手法が部品購入費用のばらつきを減らすこと、また同時に在庫費用の軽減にも有効であることが報告されている。

## 2.2 システム運用手法の情報化

システム運用段階において、需要変動やシステム構成要素の故障やメンテナンスなど、システム内外の動的な変動に適応可能なシステム構成法として、生産システムを自律分散システムとして構成するホロニック生産システム、生物指向型生産システム等が提案され、その有効性が確認されてきた。自律分散システムにおいては、構成要素間の相互作用において交換される情報量と達成される性能に関連があることはよく知られているが、通信時間・計算量を考えるとできるだけ通信を抑えながら必要な性能を実現することが望ましい。以下ではホロニック生産システムと生物指向型生産における取組みを紹介する。また、自律分散型生産システムは、各要素が部分的な情報しかもち得ないため最適性を追求するのは困難であったが、社会的交渉の仕組みを導入することにより可能となりつつある。以下ではその取組みについても紹介する。

(1) 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<sup>3)</sup>

ホロニック生産システムは、ホロンと呼ばれる自律要素から構成される自律分散型の生産システムである。本研究では、すべてのホロンが他のホロンおよびコーディネーションホロンの意思決定基準を用いずに生産システムの将来

の状態を予測して、個々のホロンの目的関数の観点から適切なスケジュールを生成することができる新しいリアルタイムスケジューリングを提案している。各ホロンがシミュレーションによって実行可能な組合せについての将来予測を行い、予測結果を用いて各候補解の効用値を決定するというものである。提案手法を用いることで、従来の将来予測を行わない場合と比較して、各ホロンの目的関数値と総処理時間を改善することが示されている。

(2) 限定合理的なエージェントを導入した生物指向型生産システム<sup>4)</sup>

生物指向型生産システムの一つとして自己組織型生産システムが提案され、リアルタイムスケジューリングなどに適用されてその有効性が確認されてきている。しかしシステムを構成する各エージェントはシステム全体の情報を用いないため、局所的な競合が生じてしまい最適性の観点からは好ましくない。本研究では、各エージェントに知覚能力の限界や情報処理能力に限界があるとする限定合理性や、そのためにしばしば観察される非合理的な行動をエージェントに導入することを提案している。並列機械問題を対象に、各エージェントの目的関数を最大化(最小化)する合理的なエージェントのみで構成されるシステムよりもメイクスパンが小さいシステムを構成し得ることが示されている。

(3) 社会的交渉を用いたマルチエージェント型最適化生産スケジューリング手法に関する基本特性解析<sup>5)</sup>

社会的交渉メカニズムの一つであるオークションは、効率的な資源配分を実現する仕組みとして注目され、種々の研究がなされてきている。本研究では、入札者が複数の財の組合せに対して入札を行い(入札決定問題)、入札値の合計が最大となるように勝者を決定する(勝者決定問題)組合せオークションを生産スケジューリングに適用することで、運用段階における変動への適応性と最適性を兼ね備えたスケジューリング手法の提案と検証を行ってきている。入札者を機械設備、財をジョブとしたフレキシブルフローショップ問題へと提案手法を適用し、入札者がすべての実行可能な組合せに入札を行う全入札と、一部のみに入札を行う繰返しオークションとの比較などの基本特性解析を行い、提案手法の有効性を確認している。

## 2.3 異分野との融合を目指す横断的研究

生産環境だけではなく、医療現場や小売業、金融業などにおいても、情報通信技術の発展による情報化が推進されてきている。製造業で培われた技術が医療システムや小売りシステムなどへ適用され効果を上げてきていたり、逆に金融工学における知見が製造業へと生かされたりしてきている。製造業だけを対象とするのではなく、領域横断的に研究を推進することにより、新しい価値を創出する試みが行われてきている。以下ではそれらの取組みについて紹介する。

(1) CAD/CAM とラピッドプロトタイプングの歯科医療への応用<sup>6)</sup>

製造業の生産効率の向上に対する CAD/CAM, ラピッドプロトタイプング技術の寄与は改めて触れるまでもないが、それらの技術の医療への展開が図られてきている。CT や MRI などを使って計測した 3 次元データを元に、CAD による設計や CAM による加工データの作成を用いることで、医療器具の製造が行われてきている。ロスワークス法や粉末焼結法を用いた歯冠修復物のラピッドプロトタイプング手法や、人工ボディ・エピテーゼの 3 次元スキャナによる計測と、計測結果を用いた 3D モデルの構築などが行われてきている。さらに手術前の検証で用いられる実体モデルの製造などにもこれらの技術が用いられていることが紹介され、医療と工学の連携によるこれまでの取組みが紹介されている。

## (2) 開かれたものづくり立国の姿<sup>7)</sup>

「ものづくり」の本質に対して経営科学的アプローチからの分析・検証を行ってきている。最先端の固有技術に代表されるように「もの」そのものに着目していたのではものづくりの本質は見え、設計情報に宿る付加価値の流れを最大化しながら、エネルギーや物理的な物の流れを最小化するものが次世代のものづくりの本質であるとしている。製品設計情報を創造する活動が「開発」であり、設計情報を転写する活動が「生産」であり、その媒体を購入するのが「購買」であるとすると、媒体が物理的なモノかエネルギー的なコトであるかの違いは本質ではなくなり、製造業、サービス業を問わずものづくりがコンテンツ産業であると捉えられるとされている。このように広い視野から「開かれたものづくり」を実現していくことが次世代のものづくりには重要であると報告されている。

## 3. 生産システムの高度化

昨年 9 月以降、アメリカ発の金融危機の影響で工業製品の消費需要が世界規模で激減した。“在庫をもたずに消費の需要変動に柔軟に対応できる”といわれるトヨタ生産方式の JIT やセル生産方式など、日本が世界に誇る生産システムでさえ、想定外の需要変動に対応することはできず、作業員の解雇や生産調整を余儀なくされた。

グローバル化する企業間競争に勝ち残るためには、製品開発や改良を頻繁に繰り返さなければならず、製品の多様化と消費の需要変動に柔軟に対応可能な生産システムが求められている。途上国への生産移転（国内生産の空洞化）を防ぎ、高い生産性を確保するためには生産システムの自動化は避けて通れないが、自動化のための設備投資や設備の改造コスト、運用コストは低く抑える必要がある。わが国の“モノづくり”にとって、生産システムの高度化はもちろんのこと、低コストでフレキシブルな生産システムの実現が求められている。

### 3.1 工作機械の複合化・多軸化

工作機械の技術開発トレンドは、複合旋盤や 5 軸制御マシニングセンタなどの複合化・多軸化、主軸や送り機構の高速化、ミクロンオーダーの高精度加工に対応する熱変形

補正技術である。特に複合化・多軸化はユーザにも注目されている。2008 年に開催された日本工作機械見本市 (JIMTOF2008) では、航空機部品加工用の大型 5 軸加工機、光学系や医療分野の超微小・超微細な部品や金型加工用の精密 5 軸加工機など、ユーザの注目に応える 5 軸加工機の展示、応用事例の紹介が目まぐるしく行われていた。

工作機械の複合化・多軸化は、多工程を必要とする複雑形状部品を 1 回の段取りで加工できるというメリットをユーザにもたらす。しかし工作機械の取り扱い是一段と複雑になり、こうした機械を自由自在に使いこなすために必要となるソフトウェア支援が現状では不十分である。ハードウェアのパフォーマンスを十分引き出すためには、ハードウェアに見合うソフトウェアが不可欠となっている。もちろん工作機械の複合化・多軸化に併せて種々の CAM ソフトウェアが市販されているが、工具の干渉回避や工具姿勢の決定、加工順序や使用工具の決定（工程設計）など、作業員にとって判断が難しい項目を、合理的あるいは客観的に評価するソフトウェア支援技術の開発が求められている。工具の干渉回避や工具姿勢の決定<sup>8)9)</sup>、加工順序や使用工具の決定（工程設計）<sup>10)</sup>に関する種々の研究成果が報告されており、こうした研究成果が CAM ソフトウェアに実装されることが強く望まれる。

### 3.2 ロボットによる自動化セル生産システム

ロボットによる生産システムの自動化は、設備のコストと自動化の効果のトレードオフで決まる。製造現場でセル生産方式に注目が集まるのは、作業員の技能を最大限に活用して設備にコストを掛けずに製品の多様化と生産量の変動に柔軟に対応できるためである。設備にコストが掛からなければ、ロボットによる自動化セル生産システムが求められるのは当然である。

ロボットによるライン生産の自動化では、デンソーがロボットの稼働率向上を目的に、作業員の行動を参考にして移動ロボットの自律協調作業を実現した事例がある<sup>11)</sup>。この事例では、走行台車に搭載した多関節型ロボットが、多工程の作業用ハンドを使い分けて作業を行う。設備のモジュール化やプログラムのライブラリ化で設備の共用と再利用を実現している。その後さらに、『ロット周回式工程集約度可変システム』<sup>12)</sup>と呼ばれる新しい概念のフレキシブル生産システムが開発されている。この生産システムは、少量生産時の工程集約したセル生産方式から、大量生産時の工程分割したライン生産方式へと、工程集約度に応じて設備を変化させる。このため、製品の変化や設備の進化に対してムダのない改造を可能とする『機能分割型モジュール設備』、素早い改造を可能とする『モジュール間プラグ・アンド・プレイ技術』を考案して実現している。

また、最近になって三菱電機と京都大学が、ロボットによる自動化セル生産システムを試作している<sup>13)</sup>。図 1 に示す試作システムは、多関節型ロボット 2 台、可動式の部品供給台、完成品の払い出し台で構成され、3 次元ビジョンセンサによる部品の位置認識技術、ロボット自身が作業動

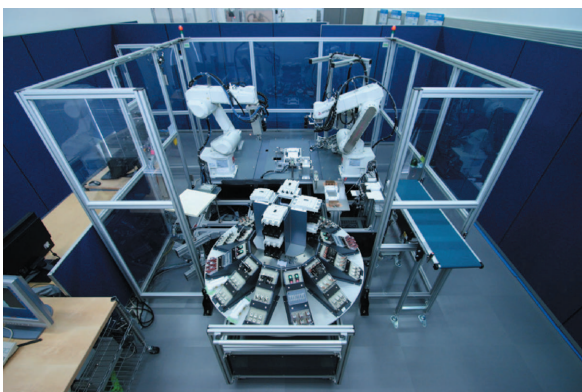


図1 試作されたロボットによる自動化セル生産システム

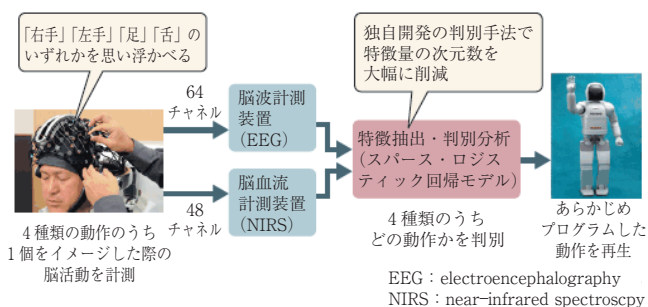


図2 ブレイン-マシン・インタフェースによるロボットの遠隔操作

作に習熟する技術，エラー発生時に正常状態に復帰する技術が盛り込まれている。種々の作業工程での利用が進むとともに，作業者の技能に迫る自動化セル生産システムの登場が期待される。

### 3.3 ブレイン-マシン・インタフェース (BMI)

脳波計 (EEG)，機能的磁気共鳴画像 (fMRI)，近赤外光血流計 (NIRS) による脳活動の計測技術も，最近ではテレビ番組で紹介されるほど一般的になっている。ブレイン-マシン・インタフェース (BMI: Brain Machine Interface) は，脳の信号を読み取り，それを利用してコンピュータや機械を操作するためのインタフェース技術であり，新たなヒューマンインタフェースとしての工学応用が注目されている<sup>14)</sup>。一般的には，脳が機械を一方的に操作することをイメージするが，脳は機械を効率よく操作するために脳自身を変えていく。これは機械が脳を操作して変えていくとみることができ，こうした相互作用のシステムこそがブレイン-マシン・インタフェースとして捉えられている<sup>15)</sup>。

ブレイン-マシン・インタフェースの応用例として，ホンダ・インスティテュート・ジャパン (HRI)，国際電気通信基礎技術研究所 (ATR) 脳情報研究所，鳥津製作所が，人間型ロボット「ASIMO」を念じることで遠隔操作することに成功している。上の図2に示すようにあらかじめ決められた4種類の動作から1つを思い浮かべるといふ4者択一であるが，空間分解能は低い時間分解能が高い脳波計 (EEG) と，空間分解能は高い時間分解能

の低い近赤外光血流計 (NIRS) の2つの脳計測手法を組み合わせて90.6%という高い正答率を実現している<sup>16)</sup>。

まだまだ基礎研究段階であり実用化までには時間を要するが，作業者の技能や経験に依存することが多い“モノづくり”において，作業者の“思い”を生産システムへ伝えることができるようになれば，複雑な生産システムも作業者のイメージどおりに運用できるようになる。

## 4. 結言と今後の展開

本稿では，総合生産システム専門委員会における研究活動について，その概要を紹介した。生産システム技術における情報化と高度化技術はいわば車の両輪の関係にあり，それぞれが相互依存する形で生産システムの進展が可能となる。また，研究のフィールドが製造業を中心とするモノづくりにある以上，基礎研究とその産業応用もまた密接な関係にあり，産学連携が重要な意味をなす研究分野である。このような状況で，本専門委員会が果たすべき役割は大きく，これからも対象を広げながら活動を進めていく予定である。

本調査専門委員会における今後の方向性の一つに，製品ライフサイクル全体をとらえたモノづくりへの対応が検討されている。その一つに，原材料の調達から製造，流通，販売までの一連の流れを管理し，経営判断の迅速化を図るサプライチェーンマネジメント (SCM) への取組みが挙げられる。その主たる目的は，製造業や流通業，物流業といった企業や組織の壁を超え，一つのビジネス・プロセスとして経営資源や情報を共有し，全体の最適化を目指すことにある。そのSCMには，プロセスの無駄を削減することにより，サステナブルなモノづくりへの貢献も期待されている。次に，GDPベースで日本経済の約7割を占める重要産業としてサービス産業があり，近年のサービス需要の拡大に伴い製造業と並んで日本の経済成長の牽引役となることが期待されている。しかし，その重要性にもかかわらず，サービス産業の生産性の伸び率の低さが指摘されている。持続的な経済成長のためにはサービス産業の生産性向上は重要な課題であり，サービスプロセスに対する科学的・工学的な手法を開発・普及させることが重要であり，近年，サービス工学が提唱されている<sup>17)</sup>。そこでは，「観測」「分析」「設計」「適用」の4つの観点を中心としたサービス産業に関する研究開発の方法論が提案されている。

これらの状況をかながみ，本専門委員会においても従来から対象としている“モノづくり”をより広範にとらえ，上述したサステナブル生産のためのグローバルサプライチェーン全体を対象とする研究や，製造業のみならずサービス産業をも含めたモノづくりに関するシステム全体の設計や運用などの方法論について，最適手法やシステムシミュレーション手法などを適用したサービス工学への取り組みを少しずつ進めていく予定である。

本委員会では，委員会メンバーの相互交流を活性化するために，宿泊研修を始めいろいろな活動を行っています。

上述したように、今後も新しい研究分野を模索しながら委員会の活性化を図っていく予定です。本稿にて紹介させていただいた研究分野に興味をおもちの皆様の積極的なご参加をお待ちいたしております。

※専門委員会事務局：

神戸大学 大学院工学研究科 貝原研究室

連絡先：

電話：078-803-6086, FAX:078-803-6391

E-mail: kaihara@cs.kobe-u.ac.jp

### 参 考 文 献

- 1) 江口透, 河合宏明, 大場史憲: 遺伝的アルゴリズムと優先規則の融合による納期遵守と段取り時間最小化の二目的スケジューリング—優先規則の性質の変化を利用した効率的探索法—, 精密工学会誌, **72**, 3 (2006) 342.
- 2) 張家俊, 柳川佳也, 宮崎茂次: 単一組立工程における異なる部品価格を考慮した製品の投入順序決定法, 日本経営工学会論文誌, **55**, 5 (2004).
- 3) 岩村幸治, 大久保敬広, 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, 日本機械学会論文誌 (C編), **72**, 713 (2006) 261.
- 4) K. Ueda, T. Kito and N. Fujii: Modeling Biological Manufacturing Systems with Bounded-rational Agents, Annals of the CIRP, **55**, 1 (2006) 469.
- 5) 貝原俊也, 藤井進, 三浦克仁: 生産スケジューリング問題に対する組合せオーケストレーションを用いた最適化手法に関する一提案, 日本機械学会論文誌 (C編), **75**, 752 (2009) 1143.
- 6) 村山長, 江口透, 他: CAD/CAMとラピッドプロトタイピングの歯科医療への応用, 精密工学会総合生産システム専門委員会2007年度活動報告書, (2008) 22.
- 7) 善本哲夫, 藤本隆宏: ITと生産現場育成, 2008年度精密工学会総合生産システム専門委員会活動報告書, (2008) 84.
- 8) 藤野裕典, 森重功一: 機械の可動範囲と工具姿勢変化の連続性を考慮した5軸制御加工用工具経路生成法, 精密工学会誌, **74**, 12 (2008) 1330.
- 9) 金子順一: 同時5軸制御加工における工具姿勢の工作機械旋回軸作業空間を用いた計画法, 精密工学会誌, **75**, 4 (2009) 530.
- 10) 中本圭一, 稲岡孝彬, 白瀬敬一, 森脇俊道: 5軸制御工作機械のための工程設計支援システムの開発 (第1報), 精密工学会誌, **73**, 9 (2007) 1019.
- 11) 花井嶺郎, 土屋総二郎, 日比均, 中斎龍美, 寺田宏幸: 市場の不確実性に順応する生産システム (APS) の開発, 精密工学会誌, **65**, 8 (1999) 1085.
- 12) 杉戸克彦, 井上保, 上島益美, 竹田修二, 横井俊之: 変化に対応し長期間使える循環型生産方式, 精密工学会誌, **70**, 6 (2004) 737.
- 13) Tech-On!—ものづくりとIT, 三菱電機と京都大学, ロボットによる自動化生産システムを試作 (2009/7/15).  
<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20090715/173054/>
- 14) 白瀬敬一 他: 小特集: 新たなヒューマンインタフェース—脳科学の工学応用—, 日本機械学会誌, **111**, 1080 (2008) 895.
- 15) 櫻井芳雄, 八木透, 小池康晴, 鈴木隆文: プレイン-マシン・インタフェース最前線, 工業調査会, (2007).
- 16) Tech-On!—電子部品, 【詳報】ホンダとATRが開発したBMI技術, 念じることでロボットを操作 (2009/5/13).  
<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20090501/169666/>
- 17) 内藤耕: サービス工学入門, 東京大学出版, (2009).