総合生産システム専門委員会

ITがもたらす生産システムの新展開*

白瀬敬一 ** 荒井栄司 *** 杉村延広 **** 藤井 進 **

Evolution in Manufacturing System Produced by Information Technology
/ Keiichi SHIRASE, Eiji ARAI, Nobuhiro SUGIMURA and Susumu FUJII**Key words:** manufacturing system, information technology, supply chain management, holonic manufacturing system, distributed scheduling, intelligent machine tool

1. はじめに

1977年に総合生産システム専門委員会が設立され、まもなく30年が経とうとしている。本専門委員会は、黎明期のCAD/CAMから最近のマネージメント・モデルに至るまで、固有技術とシステム技術の統合を考えながら、新しい生産システムの研究開発に貢献してきたと自負している。

この30年間にコンピュータ技術が劇的に進歩し、生産システムは大きく変貌を遂げた。機械や設備といったハードウェアの高度化・高性能化はもちろんであるが、それ以上にCAD/CAMをはじめとするソフトウェアの普及で、設計情報や生産管理情報の取扱いが生産の自動化や効率化を左右するようになってきている。特に、消費者のニーズが多様化・個性化する中で、製品開発のリードタイムは短くなる一方で、CAD/CAMを利用しない製品開発は考えられず、製品設計から実生産に必要な情報が一貫した情報ネットワークで結ばれ、デジタルエンジニアリングという言葉で総称されるように、種々のコンピュータ支援技術を駆使する時代を迎えている。

* 原稿受付 平成16年6月2日

** 正会員 神戸大学工学部(神戸市灘区六甲台町1-1)

*** 正会員 大阪大学大学院工学研究科(吹田市山田丘2-1)

**** 正会員 大阪府立大学大学院工学研究科(堺市学園町1-1)

白瀬敬一

1984年神戸大学大学院工学研究科修士課程修了、工学博士(神戸大学)、1984年金沢大学助

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。研究分野：知能型工作機械、切削シミュレーション。

荒井栄司

1980年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、工学博士、1980年神戸大学助手、1984年静岡大学助教授、1992年東京都立大学助教授、1995年大阪大学教授、現在に至る。研究分野：インテリジェントCAD/CAM。

杉村延広

1978年神戸大学大学院工学研究科修士課程修了、1980年大阪大学大学院工学研究科博士課程中退、工学博士(大阪大学)、1980年神戸大学助手、1987年神戸大学助教授、1994年大阪府立大学教授、現在に至る。研究分野：自律分散型生産システム、工作機械精度解析。

藤井 進

1970年ウィスコンシン大学大学院理工学研究科博士課程修了、1971年Ph.D.、1970年神戸大学助手、1971年神戸大学助教授、1984年神戸大学教授、現在に至る。研究分野：生産システム、大規模分散型シミュレーション。

IT(Information Technology)は、生産システムはもちろん企業活動そのものを大きく変えつつある。図1に示すように企業内に限らずに、他の企業や顧客とも巨大な情報ネットワークで結ばれるようになったことで、企業単独の最適化ではなく、サプライチェーン全体としての最適化を目指すSCM(Supply Chain Management)の重要性が指摘されている。

このように生産システムを取巻く環境は変化し、ものづくりに必要な情報の伝達には時間的な隔たりがなくなっている。これに対して、ものづくりに必要な物(原料や素材)の輸送に要する時間を短縮することには限界がある。これからの生産システムに求められることは、情報と物の流れの時間的・距離的な乖離を克服することである。すなわち、情報と物が適切な時間と場所に供給される情物一致を実現する技術が不可欠となる。

ここでは、実績データに基づく生産コスト評価、分散型生産システムにおけるスケジューリング問題、生産システムの設備要素としての工作機械の自律化・知能化に関する研究を紹介し、次世代の知的な分散型生産システム実現の可能性を考えてみたい。

2. 生産コストを指向したスケジューリング

企業経営という観点では売上高、投資額、利益といった財務に関わる評価指標が用いられるが、生産という観点で

図1 生産システムを取巻く環境

表1 スケジューリング実験で仮定した仕事の特性

仕事名	処理時間	段取り替え係数	納 期
a	200	1	1233
b	230	1	4000
c	2000	2	6000
d	200	7	4000
e	400	4	1800
f	120	8	230
g	1200	1	5000

表2 スケジューリング実験の結果

評価指標	最良値	最悪値	コスト最小
メイクスパン	5,050	7,450	5,750 (515)
段取り替え時間	700	3,100	1,400 (515)
段取り替え回数	4	6	5 (719)
納期遅れ時間	120	18,707	120 (1)
納期遅れ個数	1	6	1 (1)

は、生産性、稼働率、リードタイム、納期といった時間や生産効率に関わる評価指標が用いられる。しかし、企業内でキャッシュフローの観点で情報を共有するためには、生産コストを意識した生産管理が求められる¹⁾。

2.1 生産コストとスケジューリング

生産計画やスケジューリングの際には、リードタイム最小化、納期遅れ最小化、稼働率最大化等の指標が用いられる。しかし、製品の需要動向や生産現場の状況で有効な指標が変化したり、複数の指標を考慮する必要が生じたりする。IT化とともにAPS(Advanced Planning and Scheduling)システムが注目され、多様なスケジューリングが可能になっているが、そのためにはパラメータのチューニングや高精度の実績データ収集が必要となる。

生産コストは実績データに基づいて算出されるが、実績データはスケジュールを実行した結果である。スケジュールに用いる指標が変われば、実績データも変化するはずで、過去の実績データから生産コストが正しく算出できる保証はない。簡単な数値実験として、1機械7仕事問題を考える²⁾。この事例では全スケジュール(5040通り)を調べることができる。ここでは素材倉庫と製品倉庫の在庫費用、機械の運転費用、段取り替え費用をそれぞれ単位時間当たり100円として計算する。7種類の仕事の特性は表1に示すとおりである。表中の「段取り替え係数」は、仕事の順序によって変化する段取り替え時間を計算する係数で、前後の仕事の係数の差の絶対値に100を乗じた値を段取り替え時間としている。

表2に数値実験の結果を示す。指標ごとに最良解と最悪解を示した。また、活動基準原価計算法(ABC法: Activity Based Costing)³⁻⁵⁾でコストを計算して、コストを最小化するスケジュール結果を求めた。仕事の順序がfdaebgcとfdaegbcとなる2通りでコストを最小となり、その場合の指標ごとの値と順位(括弧内)を示した。コストを最小化するスケジュールリング結果が、必ずしも従来の指標では最良にならないことが分かる。

表3 ABC法におけるコストドライバの例

ABC 間接費	第一段階 コストドライバ	第二段階 コストドライバ
労務費	作業時間	段取り時間 機械稼働時間
エネルギー費	稼働時間 搬送時間	稼働時間 搬送時間
設備費稼働時間	稼働時間 搬送時間	稼働時間 搬送時間
在庫費	在庫時間	在庫時間
修理費	故障時間	機械稼働時間

2.2 特急ジョブのコスト

特急ジョブはスケジュールを乱すジョブとして捉えられる。特急ジョブを最優先に処理する結果、既に手配の済んだジョブが後回しにされたり、他の機械で処理されたりする。このように他のジョブの待ち時間や加工時間に影響を与えるにも拘わらず、特急ジョブそのものの待ち時間やリードタイムは短くなる。このためABC法などで計算される生産コストは安くなる。実際には特急ジョブのために他のジョブの生産コストが高くなっているはずであるが、現状ではこれを求めることは困難である。特急ジョブを含まない元のスケジュールにおける総生産コストと、特急ジョブを含むスケジュールにおける総生産コストを計算できれば、これらの差を特急ジョブのコストとするのが妥当である。このような特急ジョブの生産コストを算出するためには、通常の実績データから生産コストが計算できる環境を整える必要がある。

2.3 生産コスト算出のための環境

特急ジョブのコストでも分かるように、従来のコスト算出法では製品個々に適切な生産コストを算出することができない。ABC法が有効と考えられるのは、間接費を生産に使われた活動ごとにプールして、各製品のコストドライバという指標に関する使用比率で配賦するという点である。間接費として考えられるコストプールとコストドライバの例を表3に示す。コストプールは実績データに基づいて積算されるので、生産コストは実績データを反映したものとなる。

このところのIT化で実績データは実時間での収集が可能となり、生産コストも短時間で知ることができる。しかし、スケジュールの立案時に生産コストを評価するとか、特急ジョブの生産コストを推定するためには、未だ実行していない生産を仮想環境で実行して仮の実績データを収集する必要がある。このためには実生産と同様な精緻な生産システムシミュレーションの実現が必須となる。

3. 分散型生産システムにおけるスケジューリング問題

多様な製品の生産に柔軟に対応することを目的にFMS(Flexible Manufacturing System)やFMC(Flexible Manufacturing Cell)が実用化され、工作機械やロボット、搬送装置を集中管理してトップダウン的に制御が行われてきた。しかし、企業の連携や国際化で生産システムが巨大

で複雑になり、製品の種類や生産量の変動、設備の故障などへの対応が求められると、集中管理では限界があることから自律化、分散化が提案されてきた⁶⁻¹²⁾。

これらは、生物指向型生産システム、自律分散型生産システム、ランダム生産システム、ホロニック生産システムなどの名称で呼ばれているが、生産システムの構成要素に意思決定機能と通信機能を持たせ、個々の構成要素が情報を交換しながら生産プロセスを自律的に実行していくという点で同じである。しかし、生産プロセスに対する意思決定を個々の構成要素に任せてしまう完全分散型と、意思決定の競合や矛盾を調整する集中・分散混在型あるいは分権型に大別され、実用化という観点では集中・分散混在型あるいは分権型が有利である。ここでは、このような分散型生産システムのスケジュール問題を考える¹³⁾。

3.1 分散型生産システムの基本構成

分散型生産システムでは、工作機械、無人搬送車、自動倉庫などの構成要素を自律的な要素であるとする。ホロ

図2 階層分散型生産システム

ニック生産システムでは、こうした自律的な要素をホロンと呼び、以下の性質を持つものと定義している。

- 1) 自律性：外部から与えられた仕事を達成するための行動計画を自ら立て、かつ自ら状態を監視しつつ作業を遂行し、異常事態が生じた場合には自ら必要な措置をとること。
- 2) 協調性：外部から与えられた仕事を達成するための行動計画を複数の構成要素間で立て、かつ複数の構成要素間で状態を監視しつつ作業を遂行し、異常状態が生じた場合には複数の構成要素間で必要な処置をとること。

さらに、ホラーキと呼ばれる階層構造を考えることができる。ホラーキは、システムを構成する要素間の包含関係を表すもので、複数のホロンが集まった1つの集合体をホロンとして取り扱うことができることを意味する。

例えば、図2は製造工場、製造部門、加工ラインで構成される企業のホラーキを示す。また、企業は複数の製造工場ホロンで、製造部門は複数の加工ラインホロンで構成され、企業全体の活動はこれらのホルンの自律的な行動と協調により実現されると考える。同様に、製造部門全体の活動は、加工ラインホロン、組立ラインホロンなどの自律的な行動と協調により実現されると考える。このホラーキは、固定的な階層構造ではなく、意思決定や行動の目的に応じて時間的に変化するとともに、多重に存在するものと考えることが必要である。

3.2 分散型スケジューリングシステムの例

分散型生産システムのスケジューリング手法は、①スケジューリングを専用に行う構成要素が存在する場合、②構成要素が自身のスケジューリングを行う場合、に分けられるが、いずれの場合も複数の構成要素でスケジューリングが行われるために、それぞれの構成要素が独自にスケジュー

図3 対象とした階層分散型生産システム

ールを決定することはできない。矛盾や競合が起こらないようにするためには、構成要素間でスケジュールに関するデータを交換しながらスケジューリングプロセスを実行していくことが要求される。ここでは階層型の生産システムを対象とした階層分散型スケジューリング手法の例を紹介する¹⁴⁻¹⁵⁾。

対象とした生産システムは図3に示すように、企業、工場、ショップなどの階層構造を有している。スケジューリングシステムは階層ごとに存在するものとし、これらのシステムが企業、各工場および各ショップのスケジュールを同時に並列して作成していくものとする。ここで紹介するスケジューリング手法では、各スケジューリングシステム間で、スケジュール結果に関する情報を交換することでそれら整合性を保障している。

3.3 分散型スケジューリングの方法

ここではスケジュールの変更の問題(リスケジューリング問題)を取り扱っている。すなわち、初期状態では階層ごとに最適または適切なスケジュールが用意されているものとする。そこに、予期しなかった変化が発生し、オペレーションの処理時間が増大するなどして、スケジュールを変更する必要が発生する問題である。その手順は以下のようによまとめられる。

(1) スケジュールの遅延の認識

オペレーションの処理時間の増大が、総処理時間に影響を与えるかどうかを認識する。総処理時間が変化しなければ、リスケジューリングを行う必要はない。

(2) 総処理時間の上位階層への伝達

増大した総処理時間を上位階層のスケジューリングシステムに伝達し、あるオペレーションの処理時間の増大として認識する。

上記(1)および(2)の処理を最上位階層まで繰り返し、最上位階層における要求納期に納まらない場合、最初に処理時間が増大した階層、および総処理時間の変化の影響を受けるその上位階層においてリスケジューリングの処理を並列で行う。

(3) 各階層におけるリスケジューリング

増大した総処理時間に基づいて、各階層で同時・並列にリスケジューリングを行う。各階層のリスケジューリングで総処理時間が短縮できれば、その情報を上位階層へと伝達し、上位階層の処理時間を変更する。スケジュールを変更する方法としては、遺伝的アルゴリズム(GA)を適用している。

図3に示す生産システムに対して、同時・並列にリスケジューリングを行った結果を図4に示す。この例では、3つの階層における並列的なリスケジューリング処理を1回行うことにより、納期を満たすことができる新しいスケジュールが作成されている。

本システムの場合、リスケジューリングにGAの手法を用いて近似最適解を求めていることと、各階層のスケジューリングシステムが同時・並列にリスケジューリングを行

図4 階層分散型生産システムのリスケジューリングの結果

っていることから、迅速にスケジュールを変更することが可能である。

4. 工作機械の自律化・知能化

分散型生産システムでは、構成要素である工作機械やロボットが、単なる自動機械ではなくて自律的に機能する知能的な機械であることが前提となっている。まったく新しい次世代生産システムを探るためには、生産設備の自律化・知能化のための機能を具体化したうえで、それらを統合化することで得られる全体機能を考える必要がある。ここでは、生産設備の自律化・知能化の例として、NC プログラムを必要とせずに、加工戦略に従って自ら工具経路を生成し、加工状況をフィードバックしながら自律的な機械加工が実現できる工作機械を紹介する¹⁶⁾。

4.1 仮想加工による適応制御

加工では、スタイラスがマスタモデル上を做うと同時に、その時のスタイラスの変位から工具の移動方向と移動速度が制御されるので、工具経路を予め生成する必要がなかった。この加工の原理に注目して、仮想加工では、製品形状のCADモデルを仮想マスタモデルとし、スタイラスも仮想的に用意することで、計算機内で仮想スタイラスが仮想マスタモデル上を做うと同時に、工具の移動方向と移動速度を計算し、実時間で工具経路を生成して工作機械を制御する。

工作機械に与えるのは、素形材と最終加工形状のCADモデル、使用工具、切削条件であり、そこから図5に示すような工具経路が生成される。また、加工と同時に工具経路が生成されているので、送り速度だけでなく、工具半径方向あるいは軸方向の切込みを加工中に容易に修正することが可能になる¹⁷⁻¹⁸⁾。

この機能を利用すれば、加工状況に応じて切削条件を動

図 5 仮想加工による工具経路変更の例

図 6 加工状況に応じた切削条件の修正

的に修正することが可能になる。図 6 は切削条件を加工状況に応じて修正している加工実験の写真で、加工と同時に工具経路を生成する仮想加工システム(左下)が、工具位置を制御し(右上)、主軸モータの電流値から検出される切削負荷に応じて、送り速度、工具半径方向切込み [RD]、工具軸方向切込み [AD] を動的に修正することができる(右下)¹⁹⁾。

4.2 生産設計の知能化

生産設計(工程設計および作業設計)の知能化は、加工状況に応じて加工順序や使用工具を選択し、自律的な機械加工を実現するうえで重要である。機械加工では、素材形状と最終加工形状との差から加工除去領域が抽出できる。ここから加工形状特徴(加工フィーチャ)を認識する研究は、これまでに幅広く行われており²⁰⁻²¹⁾、加工順序や使用工具、切削条件や工具経路は、認識された加工形状特徴からデシジョンテーブルやデータベースを参照して決定することができる。

また、複数の加工形状特徴の加工順序は、加工形状特徴の相対的な位置関係、体積、開口面の数をもとにして決定することができる。こうして決定される加工順序、各加工形状特徴の加工に必要な加工時間、さらには工具交換回数を考慮すると、総加工時間を概算することができる。

さらに、加工形状特徴は加工除去領域から一意に決定されるものではない。加工除去領域の分割を変えれば認識される加工形状特徴も異なることから、分割の異なる加工形

図 7 加工除去領域と加工形状特徴の分割例

表 4 加工形状特徴ごとの加工能率

加工形状特徴	加工能率	
	加工時間 (min)	工具交換回数
分割案 1	123	3
分割案 2	118	2
分割案 3	128	4

状特徴に対して生産設計を行い、加工時間や工具交換回数を比較しながら優位な結果を採択することが望ましい。図 7 は加工除去領域を 3 種類の分割案で分割し、そこから認識される加工形状特徴の違いを示している。表 4 にはそれぞれの分割案に対して行った生産設計の結果から、加工時間と工具交換回数を比較して示した。この例では 3 種類の分割案の中で、分割案 2 の場合に加工時間が最短となる結果が得られている。

生産設計の最適化のためには、加工順序や工具交換順序、加工能率を考慮した工具選択など、考慮すべきことは多い。しかし、それ以上に重要なことは、機械の能力や機械が保有している工具によって、適切な加工順序や使用工具が変化するという事実である。工具破損などの加工トラブルの後に、残りの工具を使って加工を継続する場合には、当初の生産設計の結果を破棄して、新たな生産設計を行わなければならない。すなわち、既存の CAM システムのように、工作機械と独立したシステムで生産設計を行っていたのでは、こうした対応は不可能である。そうした意味でも、生産設計は工作機械の加工状況を考慮して制御装置内で行われるべきであり、こうした生産設計の知能化は工作機械の自律化に不可欠となる。

5. お わ り に

ここでは、実績データに基づく生産コスト評価、分散型生産システムにおけるスケジューリング問題、生産システ

ムの設備要素としての工作機械の自律化・知能化に関する研究を紹介した。

実績データに基づく生産コスト評価では、実績データの重要性を示したが、精緻なシミュレーションモデルと高品質な入力情報の必要性を強調しておきたい。特に入力情報の品質はシミュレーション結果を左右するだけに、常に最新の情報を高品質で入手する機能は重要であり、これを実現する労力も必要である。また、これまでは直感的に把握しやすい時間や生産効率を評価指標としてきたが、コストを評価指標として意識することが重要であり、特急ジョブの考え方にその一例を示した。

分散型生産システムにおけるスケジューリング問題では、階層型生産システムにおけるリスケジューリングに対して分散処理と協調処理の手法を提案した。本手法は、リスケジューリングに GA の手法を用いて近似最適解を求めていることと、各階層のスケジューリングシステムが同時・並列にリスケジューリングを行っていることから、迅速にスケジュールを変更することが可能である。企業内や工場内だけでなく、サプライチェーン全体の管理を考えようとすると、ここで示した階層分散型生産システムのスケジューリング手法を拡張して適用することになる。

工作機械の自律化・知能化では、NC プログラムを必要とせずに、加工戦略に従って自ら工具経路を生成し、加工状況をフィードバックしながら自律的な機械加工が実現できることを示した。また、生産設計を工作機械の制御装置内で行うことで、加工状況に柔軟に対応しながら加工順序や使用工具を変更することも可能となる。このことは、構成要素の自律化が前提である分散型生産システムの実現可能性を示している。さらにこうした機能を拡張していけば、工程や作業の変更に対しても、加工状況に応じた実績データを発信することが可能となり、生産コスト評価や分散型生産システムにおけるリスケジューリングの成否を握るようになると考えられる。

こうした研究成果を統合して産まれる新しい生産システムでは、情報と物の流れの時間的・距離的な乖離を克服されるであろう。これは、情報と物が適切な時間と場所に供給される情物一致が実現することであり、情報を準備して物を流す既存の“オープンループ方式”から、物の流れに応じて情報を更新する“クローズドループ方式”への転換と見ることもできる。ユビキタスコンピューティングに代表される IT の動向を予想することは難しいが、ここで紹介した研究事例が、生産システム新展開のヒントとなれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 藤井: ものづくりにおける企業競争力, システム/制御/情報, **48**, 6 (2004) 197-201.
- 2) S.Fujii, T.Kaihara, K.Sashio and M.Sugimori: A Basic Study on Cost-based Scheduling in Job Shop for Agile Manufacturing, Proc. 7th World Multi-conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI2003), **XIII**, (2003) 255-260.
- 3) 吉川: ABC の展開と応用, オペレーションズ・リサーチ, **43**, 1, (1998) 7-12.
- 4) 加登: 管理会計入門, 日本経済新聞社, (1999).
- 5) S.Fujii, T.Kaihara and H.Morita: A distributed virtual factory in agile manufacturing environment, Int. J. Production Research, **38**, 17, (2000) 4113-4128.
- 6) N. Okini: A prototyping of bionic manufacturing system, Proc. of the ICOOMS'92, (1992) 292-302.
- 7) K. Ueda: An approach to biological manufacturing systems based on DNA-type information, Proc. of the ICOOMS'92, (1992) 303-308.
- 8) 森脇, 杉村, Martawirya, 蛭川: 自律分散型生産システムの設計と運用に関する研究(第1報), 日本機械学会論文集 C 編, **58**, 549, (1992) 1674-1679.
- 9) H. J. Warnecke: The fractal enterprise, Springer-Verlag, New York, (1993).
- 10) K. Iwata, et. al.: Random manufacturing system - A new concept of manufacturing systems for production to order, Annals of CIRP, **43**, 1, (1994) 379-384.
- 11) J. Wyns, et. al.: Workstation architecture in holonic manufacturing systems, Proc. of the 28th Int. Seminar on Manufacturing Systems, (1996) 220-231.
- 12) 樋野, 森脇: ホロニック生産システムの概念の提案, 日本機械学会論文集 C 編, **67**, 658, (2001) 2063-2069.
- 13) 杉村: 分散型生産システムの動向 - スケジューリングの観点から -, システム/制御/情報, **46**, 5, (2002) 269-275.
- 14) Y. Tanimizu, K. Iwamura and N. Sugimura: A study on rescheduling of hierarchical and decentralized manufacturing systems, Proc. of 2000 Japan-USA Symposium on Flexible Automation, (2000) 1-8.
- 15) 谷水, 岩村, 杉村, 岩田: 生産システムの多目的モデリングに関する研究(第3報), 日本機械学会論文集 C 編, **67**, 654, (2001) 283-288.
- 16) 荒井: 生産設備要素の知能化とシステム統合, システム/制御/情報, **48**, 6, (2004) 202-207.
- 17) 白瀬, 近藤, 岡本, 若松, 荒井: NC プログラムを必要としない機械加工のための仮想加工システムの開発(自律型 NC 工作機械のための実時間工具経路生成), 日本機械学会論文集 C 編, **66**, 644, (2000) 1368-1373.
- 18) 中本, 白瀬, 若松, 妻屋, 荒井: NC プログラムを必要としない機械加工のための仮想加工システムの開発(第2報), 日本機械学会論文集 C 編, **67**, 663, (2001) 3656-3661.
- 19) 中本, 白瀬, 若松, 妻屋, 荒井: NC プログラムを必要としない機械加工のための仮想加工システムの開発(第3報), 日本機械学会論文集 C 編, **69**, 677 (2003) 270-277.
- 20) J.J.Shah: Assessment of features technology, Computer-Aided Design, **23**, 5, (1991) 331-343.
- 21) J.H.Vandenbrande, A.A.G.Requicha: Spatial Reasoning for the Automatic Recognition of Machinable Features in Solid Models, IEEE Transaction of Pattern Analysis and Machine Intelligence, **15**, 12, (1993) 1269-1285.