

IoT・インダストリー4.0環境下における 生産システムのシミュレーション

高桑 宗右エ門

IoT (Internet of Things; モノのインターネット) の普及により、製造企業では、インダストリー 4.0 の到来が取りざたされるようになり、工場、プラント、ロジスティクス、製品などのインテリジェント化が進むことにより、生産活動を取り巻く環境が大きく変わろうとしている。IoT・インダストリー 4.0 環境下において、現実の生産活動に対して、コンピュータ上でモデルを構築し、システムシミュレーションを実施することに焦点を当てて、これまでの取り組みや現状を踏まえうえて、今後の課題について検討する。そして、生産マネジメントの観点から、リアルタイムスケジューリングを含めた特徴について言及する。

キーワード：リアルタイムシミュレーション、スマート工場、サイバーフィジカルシステム、ショップフロア、スケジューリング

1. 緒言

生産ならびにサービスの分野にインターネットが急速に浸透することにより、IoT の導入が普及してきた。ある調査報告によれば、2020 年までに、車、携帯電話、ドローンなど産業社会の各場面において、およそ 2.1 兆ものデバイスが IoT に繋がる、との予測がある [1]。IoT の普及により、特に製造企業では、インダストリー 4.0 (Industry 4.0; 第四次産業革命) の到来により、工場、プラント、ロジスティクス、製品などのデジタル化およびインテリジェント化が進むことで、生産活動を取り巻く環境が大きく変わろうとしている。

また、IoT と共通した概念としてサイバーフィジカルシステム (Cyber-Physical System; CPS) があり、そこでは現実世界にある物理システムにセンサーなどを取り付け、それらを経由して、IoT 機器でデータを収集することにより、コンピュータやクラウドにおける処理・活用をしたりする。そして、その過程において、ビッグデータの統計解析が行われる。

本稿では、IoT・インダストリー 4.0 環境下において、システムシミュレーション (以下、シミュレーション) の現状と将来のあり方について検討する。シミュレーションは、通常、適切なソフトウェアを用いて、コンピュータ上で、実際のシステムの挙動をまねるための手法や応用といった広範囲にわたる包括的な内容を

さす。

そのため、シミュレーションがコンピュータに内在する、その時点における技術水準を保つツールであることから、シミュレーションソフトウェアはスプレッドシートやデータベースなどのほかのパッケージとの統合をも可能としてきた。そして、いまやシミュレーションとは別個に、一方でシステムデータを収集・保存・解析したりするソフトウェアパッケージの出現や、あるいは、システムのコントロールを支援するソフトウェアとの統合化などが視野に入ってきた。そこで、生産システムのシミュレーションを念頭に置いて、これまでの経過を振り返り、現状ならびに将来を展望する。

2. スマート工場におけるショップフロアマネジメント

2.1 スマート工場

インダストリー 4.0 環境下のスマート工場 (smart factory) では、各構成要素は自身を特定し役割を認識したうえて、自律的なネットワークキングを形成する。このようなシステムに関して、次の設計原理を挙げることができる [2]。

- (1) 各構成要素ならびにデータは相互運用性 (interoperability) を有する。機械、デバイス、センサー、作業員はインターネットを介して繋がっていて、互いに通信し合っている。
- (2) リアルタイムのセンサーデータは、バーチャルファクトリー (virtual factory; 仮想工場) に繋がっている。これにより、工場の状態に関して、より高い価値の情報と併せて、システム全体の

見える化をもたらす。

- (3) 突発的な問題を解決するための意思決定支援システムを技術的にサポートする。これには、生産プロセスにおける不断の改善を支援するためのデータの蓄積や見える化も含まれる。たとえば、機械の故障後の再スケジュールリングなどが挙げられる。
- (4) 分散型意思決定により、システムの構成要素は、できるだけ多くのタスクを実行し、かつできるだけ自立的に実行することができる。たとえば、機械がオペレーションの限界を検知して修理を要求する、といった自己診断機能をもつことなどが挙げられる。

2.2 デジタルツイン

1990年代、バーチャルファクトリーが脚光を浴びた。これにより、自動化された実際の生産工場を遠隔操作によって管理することができる。今日、デジタルツイン (digital twin) とよばれるものは、生産工場や製品など現実世界のモノをデジタル世界で表現し、双子のように現実世界をシミュレートする手法を指して用いられる。その意味で、インダストリー 4.0 環境下における生産活動にとって、重要な考え方である。本稿においても、デジタルツインを念頭に置いて、現実世界にある生産工場に対して、リアルタイムシミュレーション (real-time simulation) ならびにリアルタイムスケジュールリング (real-time scheduling) について検討する。

2.3 ERP・MESによるショップフロアコントロール

近年、企業活動のグローバル化や、顧客満足を満たすためのマスカスタマイゼーション (mass customization) ないし変種変量生産の生産方式など、企業活動を取り巻く環境が大きく変化してきた。1990年代に、企業の経営・マネジメントにおいて、購買・生産・在庫・販売の一連のロジスティクスと、財務会計・管理会計・人事管理が総合的に設計され構築された統合基幹業務システムとして、ERP (Enterprise Resource Planning) が製造業における全社最適化を目指す情報システムとして登場した。

ERPでは、サプライヤ (仕入先)、顧客 (得意先) とのサプライチェーンにおける水平統合と、経営から生産現場に至る企業内部、すなわち、全社レベル・工場レベル・工程レベル、の垂直統合がある。後者においては、ERPと連結するMES (Manufacturing Execution System; 製造実行システム) がショップフロアコントロール (shop floor control) と密接に関連する。概要

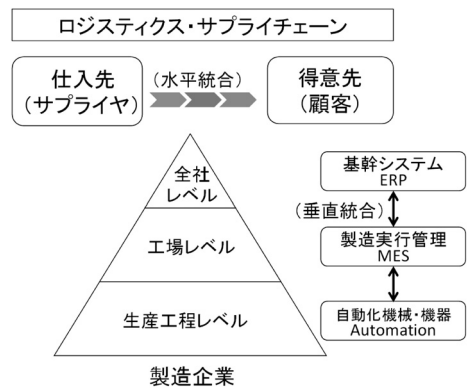


図1 水平統合の垂直統合

		システム統合性			
		低 ←	パターン①	パターン②	高 →
実績収集 (数量実績主体)	業務計画	SAP ERP	SAP ERP (需給計画はSAP SCMを利用するケースもあり)	SAP ERP (需給計画および生産計画はSAP SCMを利用するケースもあり)	SAP ERP (需給計画および生産計画はSAP SCMを利用するケースもあり)
	日程計画	MESシステム	MESシステム	MESシステム	MESシステム
	指示(モノの指令)	MESシステム	MESシステム	MESシステム	MESシステム
詳細指示/実績					
システム利用形態		工場入口受発 指図は現場との結びつけのための整理的・定期的使用	おおよそ需給計画に基づいて工場への指示(要)まで実施	需給計画と工場内の生産計画との分岐 業務用、現場に近いシステム 少量生産で、作業の計画管理や 指図は行わない	需給計画と工場内の業務用 業務用業務用計画、作業の計画 管理など、現場に近いシステム 少量生産で、作業の計画管理や 指図は行わない
期待される効果	経営情報提供の質的向上	△	△	○	○
	業務の効率化	△	△	○	○
	生産計画の統合	×	△	○	○
	トレーサビリティの強化	×	△	○	○
	在庫削減への貢献	△	△	○	○
情報の共有・統括	△	△	○	○	

適用事例が多いパターン

図2 ERPとMESの役割分担 (出典: SAP社資料, ©SAP)

を図1に示す。

ERPの生産の計画機能として、需要計画 (予測)、基準生産計画 (Master Production Schedule; MPS)、資材所要量計画 (Materials Requirement Planning; MRP) を経て、サプライヤに対する発注や生産指示が行われる。他方、生産指示や進捗管理は、MESを介して行われる。すなわち、MESはショップフロアにおける作業員、生産設備、品目 (アイテム) の最適な活用を目的とする。ERPからMESへ作業指示があり、ショップフロアの生産機器からMESへは操業情報が送られ、他方、MESからERPへは作業実績が送られる [3]。ERPとMESに関して、生産の計画・実施、システムの利用形態、および期待される効果について図2に示す。

3. インダストリー 4.0 環境下におけるシミュレーション

3.1 オブジェクト指向シミュレーション

シミュレーションは、21世紀に向けて決定的に重要な技術であると認識されている。そして、生産システ

ムを含む複雑なシステムの設計や改善において、最も応用されている経営科学の技法である。

コンピュータを用いたシミュレーションの歴史は、20世紀後半から始まった。当初はFORTRANのような汎用言語でコンピュータプログラムを書いて実行した。これらは、離散イベントシミュレーションであり、基本的に、毎回、モデルを最初から構築するものである。

その後、GPSS、SLAM、SIMANといった専用シミュレーション言語が登場し、プロセス指向シミュレーションが主流となった。なかでも、Arenaシミュレーション言語は階層構造をもつもので、生産システムだけでなく、ロジスティクス、病院・ヘルスケア、種々のサービスシステムなど幅広く活用されてきた [4-6]。

今世紀に入り、Simioなどのオブジェクト指向シミュレーション言語が登場した [7]。オブジェクト指向シミュレーション言語では、インテリジェントなオブジェクト、すなわち識別力あるいは判断力をもつオブジェクトに基づくシミュレーションモデリングを可能にする。その意味で、オブジェクト指向シミュレーションは、モデリングにおいて大きな変革をもたらすものであり、これまでのプロセス指向シミュレーションからのパラダイムシフトと位置づけられる。

プロセス指向シミュレーション言語では、ビジネスモデリングツールとしてのフローチャートにおけるフローのように、エンティティがシステム内を逐次移動することにより、シミュレーションが実行される。それに対して、オブジェクト指向シミュレーション言語では、知的オブジェクトを中心に据えて、オブジェクトの構築および利用方法を提供する。そして、オブジェクトは、システム内のイベントに応答して独自の挙動をする。たとえば、生産システムでは、機械、コンベヤ、フォークリフト、無人搬送車、通路などを表すオブジェクトを設置することにより、シミュレーションモデルを構築する。

IoT・インダストリー 4.0 環境下では、シミュレーションモデリングの対象とするショップフロアでは、作業員、機械・機器類、ロボット、マテハン機器などが互いに関わり合いながら、それぞれが自律的に生産活動を行っている。そのため、それぞれがインテリジェントをもつオブジェクトとしてモデリングすることができれば、生産システムの挙動をいっそう的確に表現することができることから、オブジェクト指向シミュレーション言語がより適合する。

3.2 入力データとリアルタイムシミュレーション

本来、入力データとシミュレーションモデルの関係

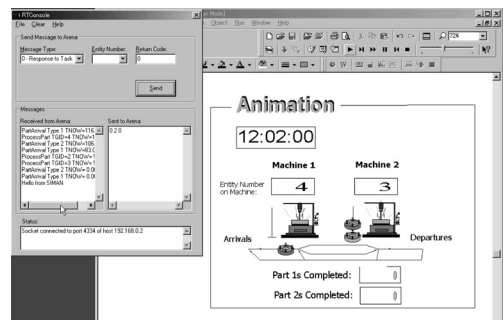


図3 リアルタイムシミュレーション

について、シミュレーションでは、シミュレーションモデルの入力におけるランダム性 (randomness) を採用する。そして、そのことがシミュレーション実験の結果得られる出力に及ぼす影響について解析を行う。すなわち、ランダム入力・ランダム出力を特徴としていて、到着時間間隔や作業 (処理) 時間などの観測値に基づいて、確率分布およびパラメータを指定することにより、確率変数を生成してシミュレーションを実行する。その結果、得られた出力結果に対して統計解析を行い意思決定に資する、という手順が進めることが一般的である。

1990年代になると、上述のランダム性のほかに、Excelなどの表計算ソフトウェアにあるデータを読み込んで、シミュレーションを実行することが可能になった。シミュレーションモデルの外部データファイルからデータを直接読み書きできるようになったことで、シミュレーションモデルにおいて利用できるデータの規模が格段に大きくなり、またシミュレーションの応用範囲が広まった。たとえば、大学病院における外来患者の電子カルテデータや、小売店舗のPOSデータなどの大量のデータを直接利用したシミュレーション解析が可能となった [8, 9]。リアルタイムシミュレーションは、2.2節で述べたように、現実世界の実際の生産システムに対して、コンピュータ上で、実際の時間進行スピードでシミュレーションを実行することである。システムシミュレーション以外の「シミュレーション」においても、特に各種の訓練やゲームなどにこのアプローチが採用されている。

システムシミュレーションにおいて、リアルタイムシミュレーションへの取り組みは1990年頃から、大学の実験室や小規模の生産システムにおいて行われ、研究成果が報告されている。リアルタイムシミュレーションのPC実行画面の例を図3に示す。ここでは、2台の工作機械があり、ジョブタイプにより2台のい

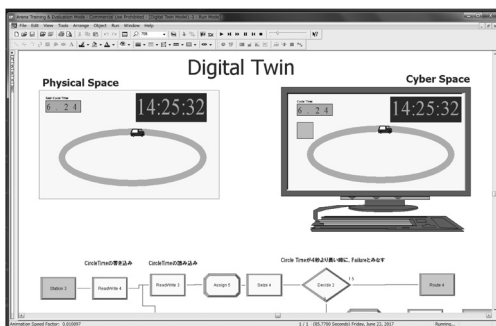


図 4 シミュレーション実行画面 [11]

ずれかで加工が行われ、さらにそれぞれの工作機械の前には仕掛品置場がある。図 3 において、画面の左欄にはリアルタイムコンソール (RT console) が表示されている。いくつかの条件の下に、評価尺度を考慮してジョブの加工順序に関する意思決定を行うことが問題として設定されている。ここで、2 台の工作機械からシミュレーションモデルへ、ショッップフロアの状況がオンラインで送信され、シミュレーションモデルが実行される。そして、現状を基にシミュレーションが実行され、評価尺度に基づいてパフォーマンスが評価される [10]。

現実のシステムにセンサーを設置し、検知したデータを収集することにより、デジタルツインにおいて、物理モデル (模型) と PC 上でのシミュレーションモデルを構築する。そして、収集したデータに基づいて、シミュレーションモデルを実行することにより、任意の時点でシステムシミュレーションを実行することで、意思決定に資する統合的なシステムを構築できることを実証実験により確認した [11]。実行の様子を図 4 に示す。

さらに、統合基幹業務システムである SAP ERP データからシミュレーションを実行する手順が提案されている [12]。また、NC 工作機械などで構成された生産システム (物理モデル) から、サイバーモデルとしてシミュレーションをリアルタイムで実行するサイバーフィジカルシステムなども開発されている [13]。

今後、IoT・インダストリー 4.0 環境下においては、デジタルツインとして、コンピュータ上でのリアルタイムシミュレーションが重視されることが予想される。現実の生産システムから取り出されるデータは、センサーなどを介して収集する場合と、当該システムから直接収集する場合がある。上述のように、シミュレーションのモデリングや分析では、ランダム性がもたら考慮される。それに対して、リアルタイムシミュレーション

では、ショッップフロアから、センサーなどを介したデータ取得や、フィジカルシステムからの直接のデータ取得により、外部データを取り込むことによって、シミュレーションが実行される。したがって、デジタルツインにおけるビッグデータの取得により、その中からシミュレーションモデリングおよび実行に必要なデータを抽出するための手順を整えることが必要である。

4. リアルタイムスケジューリング

4.1 工程管理・進捗管理のツールとしてのスケジューリング

ERP を含めた経営管理および生産管理の枠組みにおいて、迅速かつ適切に管理活動を遂行するために、IoT という共通のプラットフォーム上で、実際の生産活動と管理を実施するための新しい方策を検討する必要がある。生産管理において、工程管理は計画機能と管理機能からなる。計画機能では、生産に係る必要作業、工程順序、作業順序、作業条件を決めて、仕事量を各工程へ割り振り、そして生産の日程計画を立てる。管理機能では、その日程計画に対する進捗管理を行う。ここに、商取引において合意した完成品・品目の納期の遵守が工程管理の最大の目的である [14]。

生産計画・スケジューリングに基づいて、実際の生産活動が実施される。しかし、運用の段階で計画どおり作業が進行しない場合が生ずる。その理由としては、次の事項が挙げられる。

- (1) 需要に基づいて生産の予測を行う完璧な方法がない。
- (2) 生産計画は不確実な需要の推定値に基づいて立てられる。
- (3) 工程・日程の計画は標準の値に基づいて設定されるため誤差が生じる。
- (4) 運用段階で、生産設備の故障・作業員の欠勤など不測の事態が発生する。
- (5) 素材・部品などの納入遅れが起こる。
- (6) 誤差・不良品などが生じ歩留りが低下する。

そこで、生産実施において、フォローアップを逐次行い、適宜修正や改善をしながら初期の生産目的を達成するための活動が生産統制 (production control)、工程管理 (process control)、あるいはショッップフロアコントロールである。

次節では、進捗管理のために、特にシミュレーションを援用した生産スケジューリングの活用について検討する。

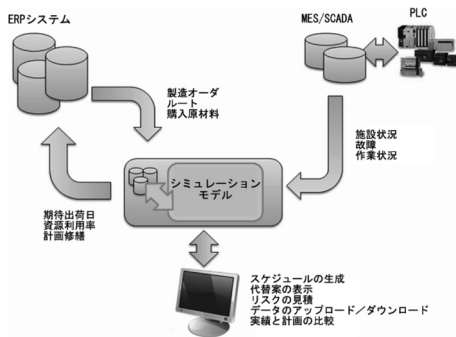


図 5 典型的なシミュレーションによるスケジューリングシステムの構造 [7]

4.2 シミュレーションとスケジューリング

有限能力スケジューリングに汎用の離散イベントシミュレーション (DES: Discrete Event Simulation) を用いることができる。図 5 は、計画とスケジューリングシステムのコアとして DES エンジンを用いるための典型的な構造を示している。図中、ERP システムならびに MES がシミュレーションおよびスケジューリングへの入力データとしてモデルに活用されることに留意する。

このアプローチの利点は以下のとおりである。

- (1) 柔軟性に富む。
- (2) 測定することができる。
- (3) 先行事例を活用できる。
- (4) 確率的に運用できる。
- (5) 確定的に運用できる。
- (6) リスクを評価できる。
- (7) 必要なパフォーマンス指標をすべて利用できる。

すなわち、IoT・インダストリー 4.0 環境下では、サプライヤならびに顧客と連結したサプライチェーンを考慮した ERP システム・MES、工場のショップフロア、そしてシミュレーションモデルの三者の統合的な活用が鍵となる。

4.3 リスクに基づく計画・スケジューリング

本節では、納期に対してジョブの完了時刻が遅延するリスクを考慮したスケジューリングアプローチについて検討する [7]。リスクに基づく計画・スケジューリング (RPS: Risk-Based Planning and Scheduling) は、前節で述べたシミュレーションアプローチの重要な利点をすべて活用し設計されている。

ERP・MES あるいは IoT に連結するデジタルツインでは、スマート工場において、バーチャルな工場モデルを構築し解析を行うことにより、以下に列挙するような重要な機能を備えることができる。

表 1 データテーブル (抜粋)

Table Name	Resource	Materials	Bill of Materials	Material Lots
Items	ResourceName	MaterialName	RoutingKey	MaterialName
	XLocation	MaterialClass	ComponentMaterial	Lot ID
	ZLocation	MaterialCost	RequireQuantity	Quantity
	ObjectType	MaterialColor	MaterialUse	
	CostRate	CostColor		
Table Name	ManufacturingOrders	Routings	Work in Process	ManufacturingOrdersOutput
Items	OrderId	RoutingKey	OrderIn Process	OrderId
	MaterialName	Sequence	CurrentRouteNumber	RoutingKey
	ReleaseResource	MaterialName	CurrentResource	ScheduledResource
	DueDate	RouteNumber	FractionOfSetupCompleted	ScheduledStartTime
	OrderStatus	SetupTime	CompletedQuantity	ScheduledEndTime
	Priority	ProcessingTime	AccruedCost	ScheduledQuantity
	Quantity			

- (1) 知見を得るためのシステムの見える化。
- (2) KPI (Key Performance Indicator) に合致した経営リソースの将来の利用に関する最適化
- (3) 計画を検討するための what-if 分析の支援
- (4) スケジュールのリスクの評価と軽減
- (5) 将来のデータのパターンや傾向の設定
- (6) 将来のボトルネックの発見

スケジューリングモデルを用いることによって、将来に対して詳細な計画を立てることができ、さらに実際のシステムで発生する前に、問題の特定および意思決定を支援することができる [15]。

RPS は、業務計画やスケジューリングへの適用に対して、確定的および確率的シミュレーションを組み合わせ、伝統的な DES のすべての能力を引き出すツールである。RPS は、ほぼすべての生産システムに存在する変動性を考慮するために、伝統的な手法を拡張し、スケジューリング担当者がリスクと不確実性を前もって緩和するために必要な情報を提供する。そして、RPS では、シミュレーションモデルは、あらゆる水準の詳細さで構築することができ、現実のシステムに存在するランダム変動のすべてを組み込むことができる。

ここでは、例として、簡単な部品生産の生産システムを取り上げる。この生産システムは、Cut, Weld, Shape, Finish の 4 工程で構成されており、それぞれ 1 台ないし 2 台の機械がある。ここで、もし 2 台の機械がある場合、スケジューリングルールによりいずれかの機械が選択される。この生産システムでは 2 種類の完成品があり、それぞれは独自の工程順序があり、段取時間および処理時間を有する。一連の CSV ファイルを通して、モデルの主要部分が自動的に生成され、Simio data Add-ins を用いて、データ駆動型スケジューリングモデル (data-driven scheduling model) が自動生成される。データテーブルの主なオブジェクト名を表 1 に示す。そして、シミュレーション実行後に得られたオーダのワークフローを図 6 に示す。オーダごとに納期の遵守に対するリスクの度合いが図中に示されており、進捗管理の観点から、リスクを含めた分析が可能となる。

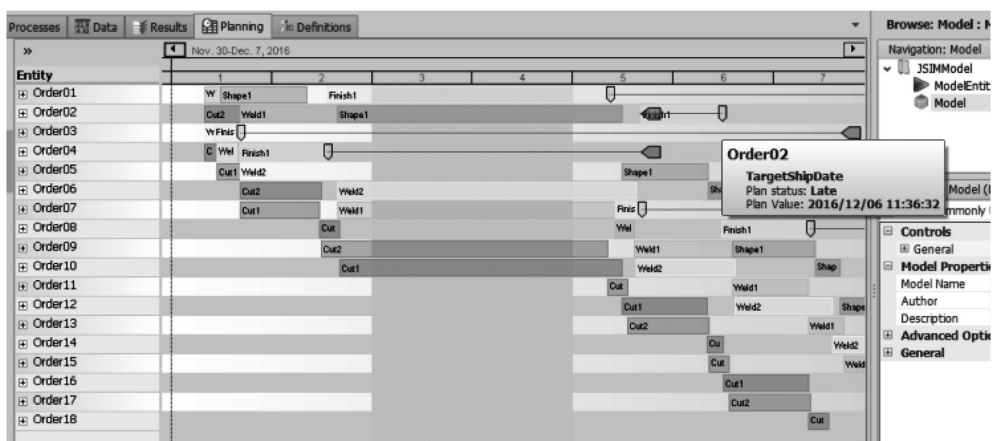


図6 オーダのワークフロー

シミュレーションの実行後、オーダごとのジョブを縦軸、そして時間軸を横軸に表示した図6に示すようなスケジューリング結果のガントチャート表示により、各ジョブに関する納期に対して、オペレーションの終了時期を予測することができる。このことは、シミュレーションの進行が現実の生産システムの実施状況を忠実に表現できる状況下において、新規の特急オーダの指示や生産設備の故障など、当初の計画時点には考慮されなかった状況の変化に対して、迅速に対応することにより、納期に関する予測を更新できることを意味する。このように、IoT・インダストリー 4.0 環境下において、リアルタイムスケジューリングを加味したシミュレーションを実行することは、進捗管理において有用である。

5. 結言

本稿では、IoT がもたらすスマート工場を念頭に置いて、生産システムに関するシステムシミュレーションに関して、系譜を踏まえて、現状と将来の展望について検討した。

1. IoT・インダストリー 4.0 環境下では、サプライチェーンを考慮した ERP システム・MES と ショップフロア、そしてシミュレーションモデルの三者の統合的な活用が鍵となる。
2. スマート工場では、自律性を備えたインテリジェントな機械・機器間で相互のトランザクションが行われる。そのようなシステムのシミュレーションモデリングには、インテリジェントなオブジェクトを含むモデリングが可能なオブジェクト指向シミュレーション言語が有効である。
3. シミュレーションの主要な利用目的として、これ

までの生産システムの設計ならびに改善に加えて、スケジューリングを援用することにより、リアルタイムないし迅速に納期に関するリスクを含めた知見の獲得が可能となる。生産マネジメントの観点から、工程管理・進捗管理に資する活用が見込まれる。

4. 通常のシミュレーションでは、ランダム性が考慮される。他方、IoT が進展したスマート工場においては、リアルタイムシミュレーションが重要な役割を果たすことも期待される。特に、ショップフロアから、センサーなどを介したデータ取得や、フィジカルシステムからの直接のデータ取得により、外部データを取り込むことにより、シミュレーションを効率的に実施するための環境作りが加速する。デジタルツインにおけるビッグデータ取得により、その中からシミュレーションモデリングに必要なデータを揃えるための手順を整えることも必要である。

謝辞 本研究は、中央大学共同研究プロジェクト「インダストリー 4.0 環境下の生産とマネジメントに関する国際研究拠点形成」における研究成果に基づいて、本誌の特集テーマの視点から執筆した。シミュレーションに関しては、Simio LLC. の CEO・C. D. Pegden 博士、上級副社長・D. T. Sturrock 氏の支援を受けた。また、ERP に関しては、SAP 社・Asia Pacific Japan の Crispian Tan 氏の支援を得た。本稿で紹介したリアルタイムシミュレーション／リアルタイムスケジューリングの実証実験には、中央大学理工学部経営システム工学科・楊文賀助教、吉田孝太郎君、中央学院大学商学部・譚奕飛准教授の助力を得た。深甚なる謝意を

表する。

参考文献

- [1] Information Week, “Gartner: 21 Billion IoT Devices To Invade By 2020,” <https://www.informationweek.com/mobile/mobile-devices/gartner-21-billion-iot-devices-to-invade-by-2020/d/d-id/1323081> (2017年12月30日閲覧)
- [2] C. D. Pegden, *Deliver on Your Promise: How Simulation-Based Scheduling Will Change Your Business*, Createspace Independent Publishing, 2017.
- [3] SAP 公式ブログ, 「ERP と MES の役割の違い」(2014年4月22日), <https://www.sap.jp.com/blog/archives/6480> (2017年12月27日閲覧)
- [4] C. D. Pegden, R. E. Shannon and R. P. Sadowski, *Introduction Using SIMAN*, McGraw-Hill, 1990. (高桑宗右エ門訳, 『生産システム・シミュレーション—アプローチと SIMAN—』, コロナ社, 1993.)
- [5] W. D. Kelton, R. P. Sadowski and D. T. Sturrock, *Simulation with Arena*, 4th edition, McGraw-Hill, 2007. (高桑宗右エ門監訳, 『シミュレーション—Arena を活用した総合的アプローチ—』, 第4版, コロナ社, 2007.)
- [6] 高桑宗右エ門, “総合的システム分析技術としてのシミュレーション,” 技術士, 2010年7月号, pp. 16–19, 2010.
- [7] W. D. Kelton, J. S. Smith and D. T. Sturrock, *Simio and Simulation: Modeling, Analysis, Applications*, 4th edition, Simio LLC, 2017. (高桑宗右エ門監修, 野村淳一, 三輪冠奈, 譚奕飛, 岳理恵訳, 『Simio とシミュレーション: モデリング・解析・応用』, 第4版, Simio LLC, 2017.)
- [8] S. Takakuwa, and D. Katagiri, “Modeling of patient flows in a large-scale outpatient hospital ward by making use of electronic medical records,” In *Proceedings of 2007 Winter Simulation Conference*, pp. 1523–1531, 2007.
- [9] K. Miwa and S. Takakuwa, “Simulation modeling and analysis for in-store merchandizing of retail store with enhanced information technology,” In *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, pp. 1702–1710, 2008.
- [10] G. R. Drake and J. S. Smith, “Simulation system for real-time planning, scheduling, and control,” In *Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference*, pp. 1083–1090, 1996.
- [11] W. Yang, Y. Tan, K. Yoshida and S. Takakuwa, “Digital twin-driven simulation for a cyber-physical system in Industry 4.0 Era,” *DAAAM Scientific Book*, pp. 227–234, 2017.
- [12] P. Kirchhof, “Automatically generating flow shop simulation models from SAP data,” In *Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference*, pp. 3588–3589, 2016.
- [13] S. Scheifele, O. Riedel and G. Pritschow, “Engineering of machine tools and manufacturing systems using cyber-physical systems,” In *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference*, pp. 3908–3916, 1503–1514, 2017.
- [14] 高桑宗右エ門, 『オペレーションズ・マネジメント』, 中央経済社, 2015.
- [15] W. Yang and S. Takakuwa, “Simulation-based dynamic shop floor scheduling for a flexible manufacturing system in the Industry 4.0 environment,” In *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference*, pp. 3908–3916, 2017.