

特集記事・2

鉄鋼業におけるAI・IoT技術の最前線

サイバーフィジカル生産システムと 超並列多変量シミュレーションによる 動的最適化生産

Production Management with Dynamical Optimization and
Cyber Physical System

中村昌弘

(株)レクサー・リサーチ
代表取締役

Masahiro Nakamura

1 緒言～製造業の市場変化と課題

今日、多くの製造業界ではマーケット変化に伴い、従来の大量生産から小ロットの多品種生産の形態へと大きく変貌している。それに対応して生産方式も単純な流し生産方式からセル生産を組み合わせた複数工程によるショップ生産方式やフローショップライン、また、段取り替えを組み込んだ多品種生産ラインへと変更せざるを得なくなった。図1に示すように、生産システムとはそれらを取り巻く社会環境、国際環境、労働環境、ものづくり技術等の影響を受けて、必要に応じて変貌していくものである。

その結果、生産の流れが複雑になり、また、多くの段取り

替え作業が必要になった。それにより、各工程の作業計画を工場全体として全体最適に組み立てることが困難になり、生産工場の生産性は低下している。生産現場の管理者はこれらの状況に対応するために、これまでの経験値と勤勉なる努力を積み重ねて日々、対応しているのが現状である。

一方、近年、このような市場変化に対する対応として、製造業の生産工場におけるIoTの利活用が期待されている。ところが、このためにはIoTを組み込んだサイバーフィジカルシステム (Cyber Physical System、以下、CPS) をどのように活用できるのか、つまり、戦略的なコンセプトが重要であるが、現状はまだ、模索段階にある。

本稿ではCPSを構築するための新しい生産システムのコ

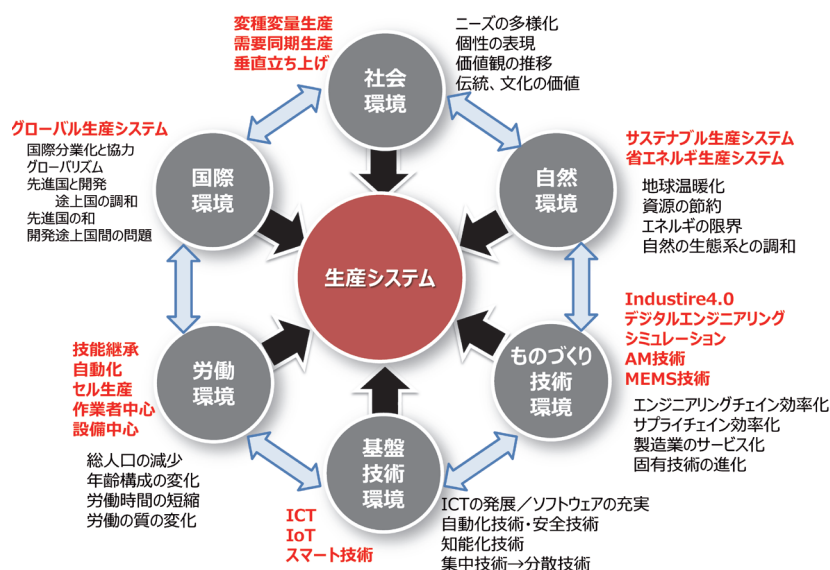


図1 生産システムの位置づけ (中村、日比野、則竹)

ンセプトとして、生産の全体最適を動的に実現する「シミュレーション統合生産」の考え方を説明し、当該コンセプトを運用している事例を紹介する。製造業では自動化が進んでいるとは言え、先に説明したような複雑な生産の流れを的確に管理できている企業は大手を含めて多くはない。本事例ではCPSの考え方を取り入れた新しい生産マネジメント方式が効果を奏することを示す。

2 IoTがもたらすCPSの意義

ドイツのIndustrie4.0や米国のIndustrial Internet Consortiumに代表されるように、世界中で製造領域のIoT化による新たな期待が高まっている。一方、IoTの考え方はモノと情報の結合を主体としたものであり、そのことだけでは新たな価値を生むことはできない。IoTを生産領域に活用する場合には、いわゆる「CPS」として価値生成を行う機構を構築して行かなければならない。ここではまず、サイバーフィジカルの基本的な考え方を確認する。

図2に、IoTを活用したCPSの構成を示す。IoTは生産現場のフィジカルな要素をサイバーな要素へと仮想化する役割を担う。生産現場で管理されている要素とは、品番、部品仕様、部品数量などの製品情報、接合、加工、組み立て、塗装、検査等の工程情報、生産計画、製造番号、ルーティング指示などの製造情報に留まらず、それに関わる個別作業、搬送台車、金型番号、電力やエア、ガスなど供給を含んだ生産リソースや、また、設備レイアウト、歩行通路などの環境情報などの、そもそも、異種、異質な要素が混在する、いわゆるヘテロジニアスの集合である。それらの要素間結合のためには、個別に関係性を得る機構を構築しなければならず、従来、CIM (Computer Integrated Manufacturing) と称される個別結合方式では全体を結合し、それらを統合運用することは事実上、困難であった。

ここでこれらのヘテロジニアスな集合をIoTにより、予め

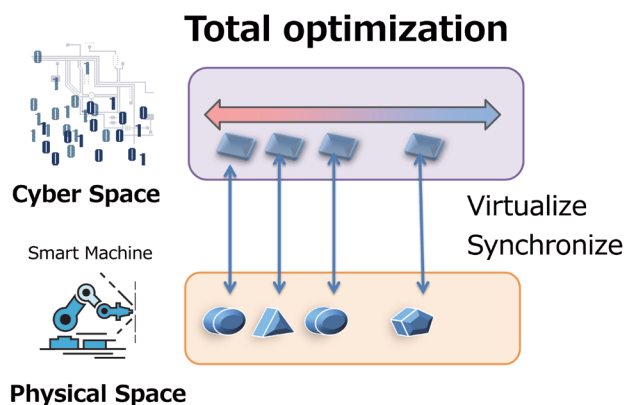


図2 CPSの概念

準備された共通なフレームワークへ射影することができればホモジニアスな集合へと変換することができ、これらの要素間の結合は一般化できる。すなわち、ヘテロジニアスからホモジニアスへ変換することにより、要素間のインターオペラビリティ（相互運用性）を確保することができる。そして要素間の関係性演算を可能にすることができれば、従来、個別に対応しなければならなかった要素間の部分最適化の範囲を拡大して全体最適化することが容易になる。また、サイバー空間で最適化された要素群を実時間で同時にフィジカル化するようにすれば、生産現場を統合的に最適化するリアルタイムな制御を行うことができるようになる。

このようにサイバー空間とフィジカル空間を一体として統合管理し、「ありたい姿」としての理想的な全体最適を実現することにより、新しい様々なマネジメントやサービスを実現することができる。例えば、最適化対象の業務範囲、サービス範囲を拡大することでそれらの要素間の同期最適化を実現する。多様性を拡張することで従来にない、革新的なサービスをもたらすこともできる。従来は非同期で実施されていた活動が結合されて同期することで、そこに新たな付加価値サービスを実現できる。これにより、ビジネスモデルのパラダイムチェンジを誘導し、新たな価値づくりに貢献することが期待される（図3）。

3 「シミュレーション統合生産」の概念

従来、ものづくりの流れにおいては、製品企画、製品設計、生産準備の活動、また、量産に入った後の生産計画、作業者編成立案、調達、作業指図、製造作業、搬送、出荷までの業務は必ずしも的確に連携していないため、これらを密連携させることがモノづくり力を強化するひとつのポイントとなる。

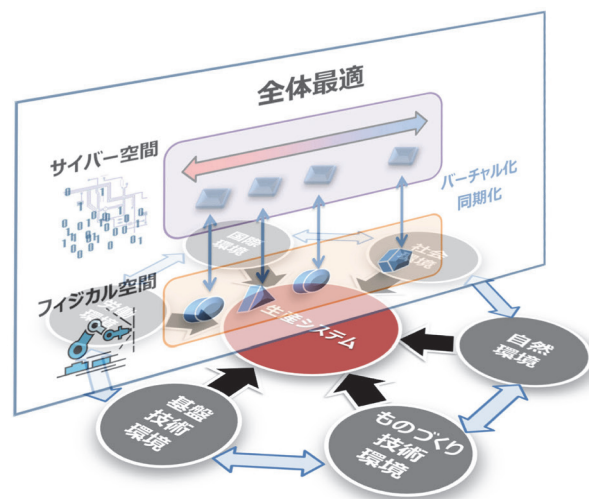


図3 サイバーフィジカルによる生産システムの多様性対応

そのため、これらをサイバー化して各要素間を密結合できれば、有効なアプローチとなる。そのためには、サイバー空間での共通なフレームワークとして、図4に示すような「生産モデル」の概念をベースに置くと、それぞれの業務が生産モデルを通じて有機的に連携させることができる。

ここで生産モデルの概念を導入する狙いのひとつは、それぞれの業務での計画が結果としてどのような影響を及ぼすのかを把握することにある。つまり、このまま進めばどのような問題が発生するのか、どこまで実現できるのか、つまり、実現される未来を予測 (Predict) することである。そのためには、生産シミュレーション技術を活用することが有効である。図5に示すように、製品企画段階から生産戦略、製品設計、工程設計、ライン設計、物流設計、物流計画、さらには量産開始後の生産活動までの計画立案活動においてIoTにより得られた現場データを活用しながら一貫して最適化シミュレーションを適用し、共通の生産モデルをバックボーンとし

た検証を行なう。各業務プロセスにおいて成立性や効率性の検証を行い、立案作業を進めていく。生産モデルが軸になることによって各業務を全体最適へ導き、ものづくり力を最大化する。

ここでのポイントは、生産モデルに実際の工場で実施されている生産現場の要素や現状の状態を組み込むことである。フロアプランや物流、設備、金型などのツール、さらには作業員編成の情報を活用することで、生産現場に対する生産モデルの具体性と記述詳細度が高まる。これにより生産現場の実体に対する忠実度を高めることで生産シミュレーションへの信頼性をもたらす。

このように生産シミュレーションを駆使してエンジニアリング業務を統合する考え方を「シミュレーション統合型生産 (Simulation Integrated Manufacturing、以下、SIM (エスアイエム))」と呼ぶ¹⁻⁶⁾。これにより、業務プロセスに垂直統合の軸を通すことになり、後工程での手戻りを削減し、ものづくり力の追求を推進する。

次に、SIMの特徴のひとつは、多数の生産シミュレータを超並列に実行する機構を活用して最適化を行うことである。SIMで利用する生産シミュレータは生産モデルに制約条件を柔軟に付加したり、変更することができる機構であるため、様々な条件に対応する場合、生産モデルを変更することなく試行することができる。これを超並列シミュレータによる処理系で評価したのち、最適な条件を選択する。Fig.12に示すようにクラウド上に多数のシミュレータを分散配置し、それぞれに対して個別の条件を付加した生産モデルを渡して超並列にシミュレーションを行う。演算後に目的関数の演算結果を収

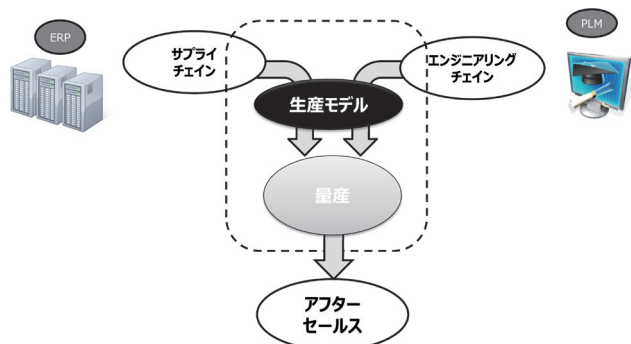


図4 サプライチェーンとエンジニアリングチェーンの連携設計

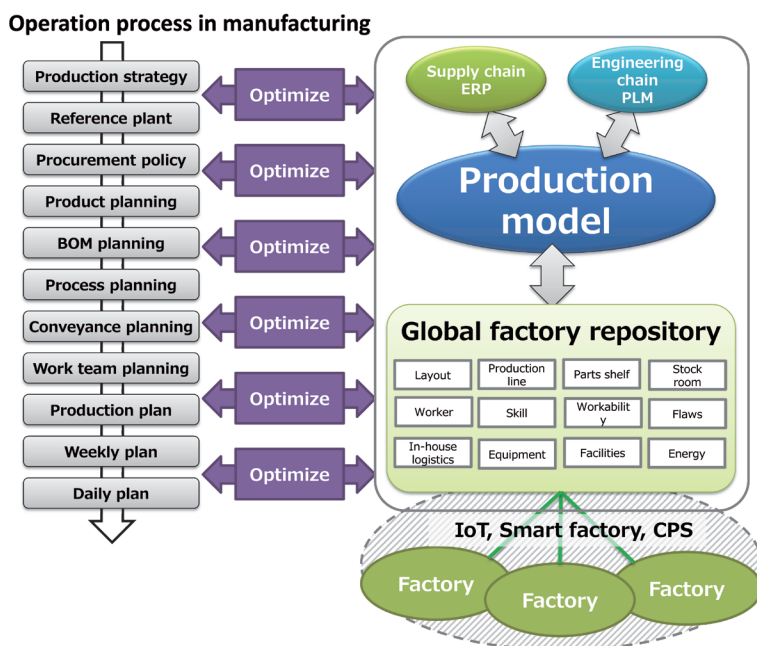


図5 シミュレーション統合生産の概念

集してそれを評価することにより、最適な条件を算出する。

ここでは、個別に設定される条件の数が問題となる。条件の組み合わせがそれほど多くなければ総当たりして最適解を求めればよいが、条件の組み合わせが多ければ天文学的な数字となるため、対象とする解空間候補を計算可能な処理まで削減する機構を組み込む。

このような超並列シミュレータによる最適化は、量産に至るまでの生産準備の段階とともに、量産における生産マネジメントにおいて、特に有効である。IoTを活用して得られる生産現場の稼働状態、仕掛状態、また、生産要求の変化、部品供給計画などを条件として最適化を行い、2節で説明したCPSとして、個別作業指示の生成等の支援情報を提供する。

SIMは生産モデルをキーとして、IoTにより得られる生産現場を仮想化したうえで、エンジニアリングチェーンとしての生産プロセス（工程設計情報）、さらにはサプライチェーンとしての生産要求を生産シミュレーションにより結合しようとするものである。SIMによりものづくりを垂直統合することにより、ものづくり力を醸成することを支援する。

SIMの具体的な活用としては、図5に示すように、生産に至る各段階で共通の生産モデルを活用しながらそれぞれの設計の評価を行い、問題ポイントの早期の予測と対策を実施する。このとき、生産現場をIoT等の技術を活用してその状態をリアルタイムに獲得してレジストリ化しておくことにより、生産シミュレーションを実施する場合に必要な生産モデルに対する条件を与えることができる。

4 新しいAI技術「Deep Thinking」 としてのSIM

SIMのAI領域における位置づけを説明する（図6）。SIMは生産現場を反映したモデルを元に、生産シミュレーションによる最適化を図るものであり、実現されうる未来を予測するものであることを説明した。

一方、Machine LearningやDeep LearningなどのAI技術は、過去の事象から帰納することが基本であり、それをベースに演繹する。換言すれば過去の事象を関係化することから予測を行う技術であるため、過去の知識の範囲での予測に留まることがこれらの限界であるとも言える。特に生産領域においては、過去からの帰納によるAI技術の有効な範囲は、品質管理や生産設備の予知的異常検知などの物理的挙動の予測などに限られる。CPSが求める「理想的として、ありたい姿としての全体最適」を得ることに對しては、本質的に目的が異なると言える。

一方、SIMは生産モデルという「在りたい姿」をベースとして、現状から展開すればどのような状態になるかを仮説と

して置いたあらゆる可能性から予測するものであり、生産モデルの多変量パラメータを組み合わせることで変化させながら潜在的な解を探索していく。深層思考を行う方式としてこれを「Deep Thinking」と呼ぶ。従来のAI技術とは一線を画した新しい予測技術となるとともに、従来のAI技術を補完する、新しいAI技術と位置付けられる。

尚、SIMでは基本的にモデル化が必要である。このため、ベイジアンネット等の分析的技術を活用しながら自動的にモデル化を行うことや、業務計画ツールから実務的計画をデータベースに蓄積して、業務計画者の計画行動からモデル化を自動的に進め、モデル作りを意識しない、実践的なAI技術として実現する。

5 超並列多変量シミュレーションの 量産への適用

前節で紹介したシミュレーション統合生産の考え方は広く、上流設計から量産まで適用されるものであるが、本稿では特に量産段階での適用について紹介する。

従来、製造現場における日々の作業計画は、生産管理や製造部の職長などの人間系で管理されていることが多く、様々な難問や混乱が起きている。実際、多品種生産を行う生産現場では作業の流れが乱れて、本来の生産能力を発揮できない場合が多い。特に、ジョブショップ系の生産ラインで要素作業の工数差が大きい場合、また、段取り替えが必要な製品種を生産する場合などの指図計画は難しい。製造現場では作業が順調に進むことは多くはなく、また、特急品が割り込んだ場合など、一旦、生産が遅れはじめると、それを挽回することは困難なものである。

これまでは人間系、つまり、生産管理や製造ラインの管理者の経験によりこれらの問題に対応していた。しかし、今日

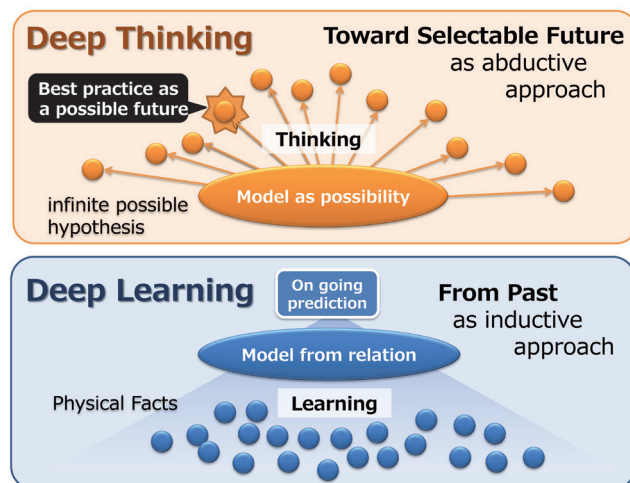


図6 SIMのAI領域における位置づけ

では多品種少量生産の度合いが進み、発注ロットが小さくなるとともに発注数が多くなってきている。また、納期の要求も厳しくなるとともに、これらの運用を支える生産に関する管理者が限られることから、生産現場では十分な対応ができない状況となっている。

これに対応するために、SIMの考え方にに基づき、図7に示すように、日々の生産活動において常に生産シミュレーションによる作業計画の最適化を実施する。IoTにより生産現場から実績を収集しながら、リアルタイム超並列多変量生シミュレーションによる最適化を実行する。ここでの最適化の対象は残された作業計画の実施順番であってもよいし、実施する生産ラインの変更、担当者の変更などであってもよい。

ここでは、クラウド上に設置された数百程度の生産シミュレータを並列動作させるとともに、それぞれのシミュレータに対してはそれぞれ異なったパラメータのセットを与えてそれぞれのシミュレーション結果を設定された評価値で得ることで、どのパラメータセットが最も目的に適しているかを判断することができる。すなわち、多変量シミュレーションを超並列で行うことによる生産計画の最適化を実現する。

この方式により、生産現場の進捗や設備故障の影響、また、特急品の割り込み生産などの現実的な生産現場の課題に対応する。

6 SIMの精密プレス工場への適応

本節では、ここまで紹介したSIMのコンセプトを軽量なCPSとして実装し、インターネット・クラウドを介して中小

企業へ実際に適用した例を紹介する。一般的に中小企業ではエンジニアリング力は決して高くないためにサイバーフィジカル化は難易度が高いと思われるが、中小企業でもカジュアルにCPSを活用できることを示す。

ここで紹介する企業は地方に立地する精密プレス専門の部品サプライヤで、多くの電機・電子系大手セットメーカーに対して高精度のプレス板金部品を供給している。そして当該社も例に漏れず、従来の順送プレス（多工程連続プレス）による大量生産から、今日では単発プレスによる多品種少量生産を余儀なくされており、その結果、生産性が低下していることが大きな経営課題であった。このため、SIMを精密プレス生産ラインへ適用し、生産管理から製造までの量産管理業務をCPS化して生産現場の生産性を高め、大きな効果を上げている。

ここでのSIM適用の特徴は、人中心のプレス作業に対してスマートフォンを活用し、軽量・カジュアルなCPSを導入したことである。この狙いは、無侵襲（手術を行わない、体を傷つけない）なCPSを構築することで、新しい生産設備の導入や既存の設備の改修を行うことなく、作業者にスマートフォンを与えるだけでCPSを実現することである。

具体的には、図8に示すように、作業者が個別に持つスマートフォンに各工程作業の指示をタイムリーに送ると共に、各個別作業の終了時にはリアルタイムに実績を入力するようにした。従来はライン長がホワイトボードや直接の声掛けで作業指示を出し、一日の業務終了後に実績を回収して翌日の生産計画を立てなければならなかったが、本方式を導入することでリアルタイムな作業指示と実績、進捗の把握がで

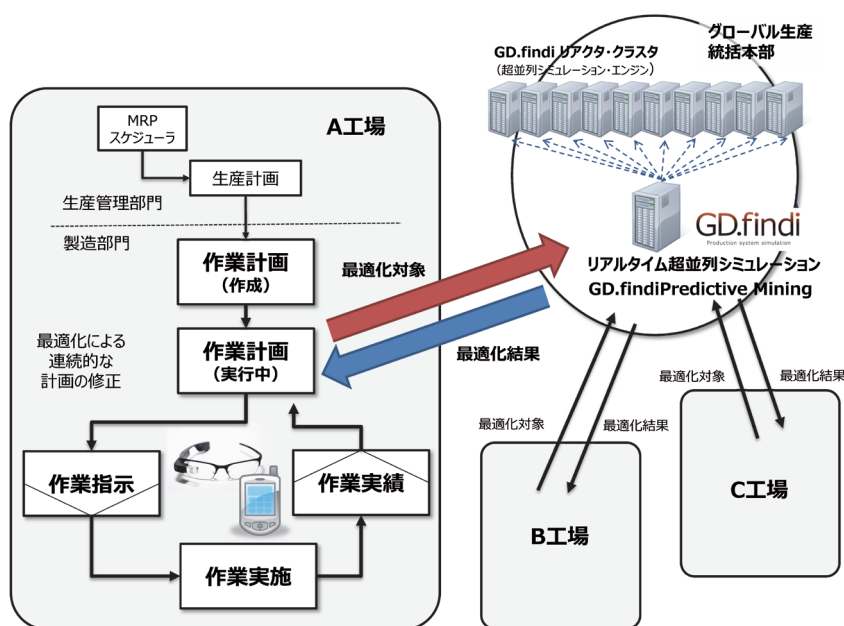


図7 SIMによる動的最適化生産

きるようになった。ここではSIMのコンセプトをクラウドサービスとして利用できるGD.findi（レクサー・リサーチ社）を活用し、超並列シミュレーションによる生産計画の最適化システムをはじめ、リアルタイムな作業指示、実績収集システムを導入した。ここでは極めて短時間に生産計画の立案や変更ができるようになったため、毎日の生産管理者の業務が劇的に短縮されたとともに、顧客オーダーの急な割り込みにも柔軟に対応できるようになった。

7 適用効果と現場導入課題の解決

図9に実施例を示す。生産管理部から製造部へ送られた生産依頼を元に、最適化システムが最適な指図を生成するとともに、生産現場に設置した大型ディスプレイや、作業者個々が持つスマートデバイスへ指示を送る。また、生産実績はスマートデバイスへ入力するだけで、全ての作業実績が進捗としてリアルタイムに管理される。

ここでの特徴は、生産計画の自動的な最適化システムを導入しただけでなく、それを活用しながらも、生産現場を管理するライン長が日々の製造指図を自らの判断で変更を加えることができるシステムを活用したことである。図8に示すように、ショップ毎の作業計画は生産計画最適化システムで自動生成されるが、自動的に一意に確定されるのではなく、複数の候補からライン長が選択できるとともに、選択された作業計画についてもマウスのドラッグ＆ドロップでライン長がその指図を自ら修正できるようにしている。生産現場にはそ

の生産現場特有の経験値や、作業スタッフの育成に関わるきめ細やかなスキルセットの管理等が肝要であるため、システムによる自動立案技術を最大限に活用しながらも人間系が最終意思決定し、管理できる運用システムとした。

また、作業指図だけでなく、品質管理のためのデータベースも共有できるようにした。朝礼では、日々、変わりゆく受注オーダーに対してライン長が本機能を使って作業者へ確認指示を行うとともに、各作業者もそれぞれに品質管理帳票を閲覧することができる。

多品種混流生産での最大の問題は、各指図の全体最適が難しいために生産ラインの稼働率が低下することである。この新しい生産マネジメントシステムを導入することにより得られた効果を図10に示す。ここでわかるように、本システムの導入前後で生産性が約15%ほど、向上していることがわかる。また、毎日、かなりの時間を翌日の生産計画のために費やしていた生産管理担当者の残業時間を大きく削減することができた。

さらに同等の生産出来高の月次で本システムの導入前後で比較すると、従来は5人のチームで200時間の残業が発生していたものがほぼ、ゼロとなり、純利益ベースでも大きく貢献していることがわかった。

一方、このようなシステムを導入する場合、生産現場から見るとITシステムで一体、何ができるのかという不信感と、すべての活動が明らかになることでの拒否感を示す場合が多い。このことは事前に理解していたため、本システムの導入はステップを経て進めた。

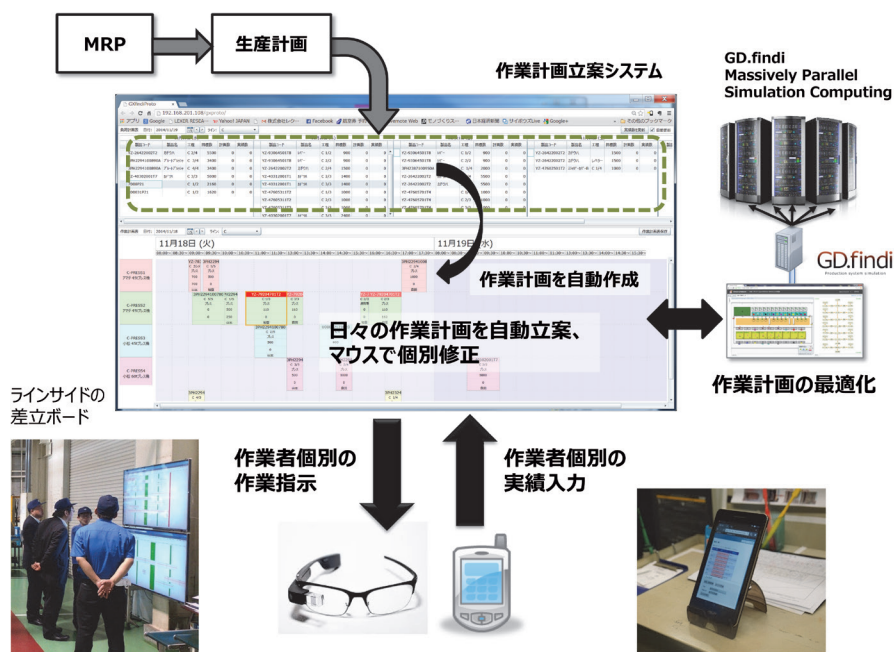


図8 導入されたCPSの構成



図9 CPSが導入された生産現場

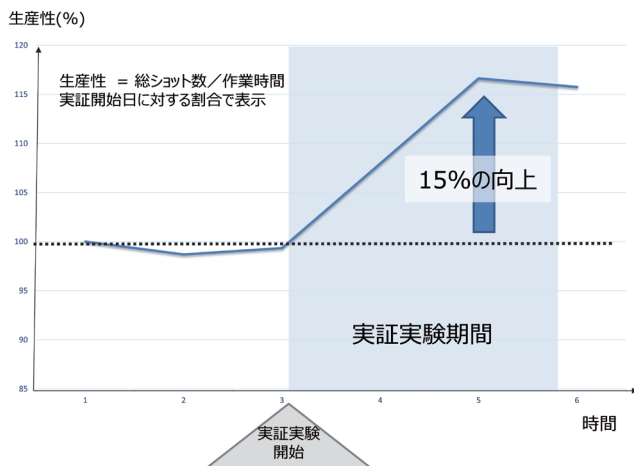


図10 CPS導入前後の生産性の変化

まず、本システムの目指すものは何なのか、それにより如何に生産現場にメリットをもたらすかを、生産管理部門、製造リーダーの上流側から体験しながら理解していただいた。次に、生産現場の作業者に展開を進める段階では、実績収集をリアルタイムに行うことが如何に会社にとって、社員それぞれにとって有効であるかを説いた。

一旦、そのような体制になればデジタル化の効果は大きい。従来、生産性や柔軟性に課題を抱えていた組織であったものが今や全体が密連携する強い現場組織に変貌する姿は、これからの中小企業の新しい姿を示唆するものであろう。

大手、中小企業での実例を紹介した。

また、このコンセプトはAI領域における新しい取り組みとして位置付けることができることも紹介した。

これらが今後の日本のものづくり現場の高度化に対する何らかの参考になれば幸いである。今後の中小企業でのサイバーフィジカル化を推進するための一助となればよい。

参考文献

- 1) M. Nakamura, S. Makihara, J. Sugiura and Y. Kamioka : International Journal of Automation Technology, 11 (2017) 1, 56.
- 2) 中村昌弘：シミュレーション統合生産の衝撃, 日経BP, (2015)
- 3) 中村昌弘：精密工学会誌, 81 (2015) 3, 220.
- 4) 中村昌弘：生産システム設計の新手法を開発, 日経ものづくり, 1月号, (2015)
- 5) 中村昌弘：グローバルなものづくりで勝つカギは理想的な生産モデルの追及にあり, 日経ものづくり, 10月号, (2014)
- 6) 中村昌弘：日本製造業を立て直す「超ものづくり経営」, 日経BP, (2012)
- 7) 中村昌弘：グローバル生産の究極形, 日経BP, (2011)

(2018年8月31日受付)

8 おわりに

本稿では、サイバーフィジカル生産を実現するためのコンセプト「シミュレーション統合生産」を説明するとともに、