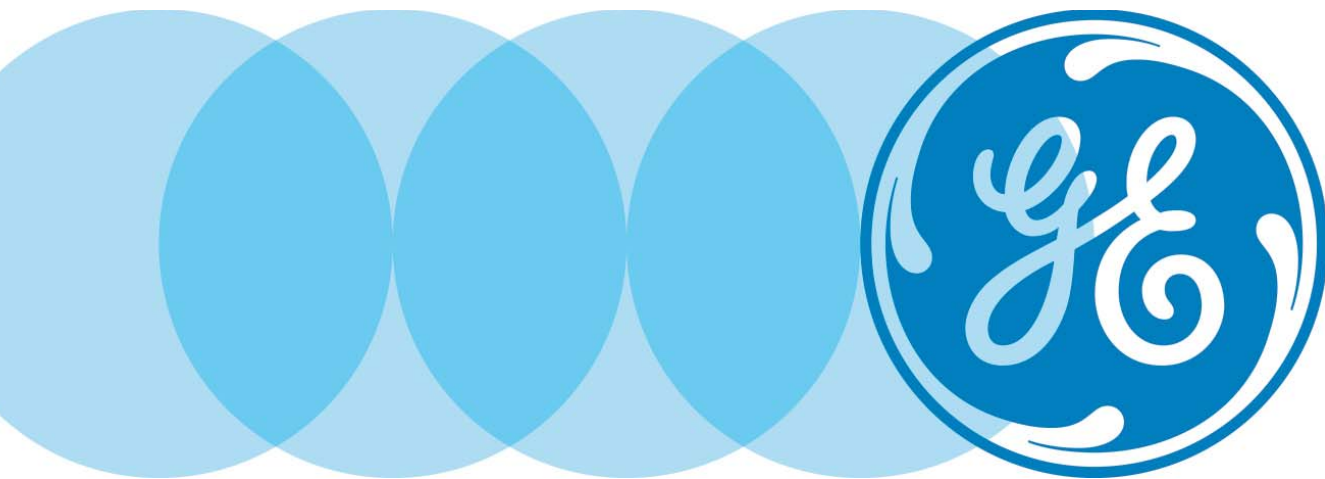


# The Future of Work

GE チーフ・エコノミスト **Marco Annunziata**

GE チーフ・マニュファクチャリング・サイエンティスト **Stephan Biller**



## はじめに

現在、産業界で深く広い範囲に及び力強い変革が起きています。製品の設計方法や製造方法、さらには製品が果たす機能が根本から変わるとともに、複雑な供給・流通網が形成され、世界経済をこれまでよりも速く、柔軟かつ弾力性豊かに結び付けています。さらに、人々は広範囲に広がる創造性と起業家精神を引き出すことができるようになり、また、多くのセクターでは競合環境が見直され、それに伴って国際貿易パターンと世界的な成長分布への将来的な影響が予想されています。医療、エネルギー、輸送、そして人々の働き方における大きな進歩を通じて、ひとりひとりの日常生活にも変化が起きている。

この変革が「Future of Work」です。一体となってそれを形作っている 3 つの大きな力を紹介します。

1

物理世界とデジタル世界の連動ー  
インダストリアル・インターネット

2

新しい生産プロセスおよび材料の発展ー  
アドバンスト・マニュファクチャリング

3

アドバンスト・マニュファクチャリング  
とインダストリアル・インターネットにより  
可能となる、工場、従業員、サプライ  
チェーン、流通チャネルを結びつける  
ネットワークの再編成

第 1 の原動力は、インダストリアル・インターネットです。物理世界とデジタル世界との境界は、どんどん曖昧になっています。クラウドベースのアナリティクス（「ビッグデータ」）と産業機械類（「大型コンピューター」）の融合により、生産性を向上

させる大きなチャンスが生まれています。以前のレポート<sup>1</sup>で示したように、電子センサーとデータの保管および処理コストはどちらも急速に低下しているため、現在では産業機械類から膨大な量のデータを得ることができるようになりました。高度なアナリティクスを使うことで、そこから効率の向上に役立つ知見を導き出すことができます。

ガスタービン、ジェットエンジン、機関車などの機械や医療機器は、予測機能と応答機能を持ったソーシャルマシンへと変わりつつあります。そのおかげで、機器同士や人間との間でさらにシームレスな通信が実現しています。こうした機械がもたらす情報は、インテリジェントなものになり、必要なとき自動ですぐさま届くため、故障発生前の問題解決を可能にしてくれます。これによって、ダウンタイムがなくなり、個々の機械の生産性向上、つまり、ジェットエンジンの燃料消費削減や、風力タービンの発電コスト低下などにつながり、システム全体の効率が上がります。その結果、病院の待ち時間や航空交通における遅延を減らすことができます。

第 2 の原動力は、アドバンスト・マニュファクチャリングです。アドバンスト・マニュファクチャリングという概念の中核を成すのは、設計、製品エンジニアリング、製造、サプライチェーン、流通、そして再製造（または保守）をデジタルに結んで 1 つのまとまったインテリジェントなシステム、すなわち、プリリアント・ファクトリーを作り上げる能力です。現在、積層製造技術積層造形技術（3D プリンティング）といった新しい生産技術によって、全く新しい部品や新しい特性を持った製品を作り出すことが可能になっています。

こうした技術は柔軟性の向上にも貢献し、プロトタイプ作成の迅速化と低コスト化を

<sup>1</sup> Marco Annunziata・Peter C. Evans 「The Industrial Internet: Pushing the Boundaries of Minds and Machines」 (GE ホワイトペーパー、2012 年 11 月) および 「The Industrial Internet @ Work」 (GE ホワイトペーパー、2013 年 10 月)

実現しています。積層製造技術装置を使えば、エンジニアは、部品 1 個を「印刷」し、テストし、そのフィードバックに基づいてすぐにデジタルデザインを修正し、改良版を再び「印刷」という工程すべてを同じ装置で行うことができ、設計からプロトタイピング、生産までのサイクルが加速します。また、アドバンスト・マニュファクチャリングでは、生産プロセスやサプライチェーン、流通ロジスティクスに対する修正をリアルタイムに計算して実行することもできます。

こうしたことが、従来型の工場をブリリアント・ファクトリーへと変えていきます。リスク緩和およびレジリエンス強化戦略は、これまでよりも進展し、ブリリアント・ファクトリーの自動応答／修正システムに欠かせない要素になると考えられます。さらに、このレポートの中盤で詳しく考察していますが、アドバンスト・マニュファクチャリングは、分散生産やマイクロ・ファクトリー、マス・カスタマイゼーションへのシフトを加速させる役割も果たします。

**第 3 の原動力は、グローバルブレインです。**技術進歩と経済成長は、人間が生産プロセスにおいて果たす役割を一変させています。特にハイパフォーマンスコンピューティング (HPC)<sup>2</sup> やロボット工学、人工知能の分野における技術進歩により、機械の方が人間よりもうまくこなせる業務の範囲が拡大しています。それによって、一部の職が奪われたり、一部のスキルが役に立たなくなったりといった短期的な痛みはありますが、人間が得意とする、創造性や起業家精神、対人能力といった分野の持つ力や経済的価値を飛躍的に高めることにもつながっています。

---

<sup>2</sup> ハイパフォーマンスコンピューティングは、「ノード」と呼ばれる相互接続されたコンピュータの集合体である「クラスタ」の力を活用しています。複数のノードの演算能力を連携させて性能を飛躍的に高めることにより、ビジネスや科学、エンジニアリングの分野において大規模で複雑性の高い問題を解決へと導いています。

一方で経済成長は、インターネットにアクセスできる人の数を何千万人という単位で増やしています。それだけではなく、経済成長によって食糧やきれいな水、医療が手に入りやすくなることで、そこに費やされていた時間が自由になり、それがインターネットを利用するための時間へと変わります。これからさらに何百万という人々が世界規模の知の蓄積を利用できるようになり、それに貢献する輪の中に参加することになります。グローバルブレインとは、デジタル通信網を通じて 1 つになった世界中の人々の集団的知性のことです<sup>3</sup>。それは今後、さらに巨大で、強力なものになっていくでしょう。グローバルブレインは、事実上、人間版の HPC といえます。

オープンソース・プラットフォームとクラウドソーシングは、グローバルブレインの創造性と起業家精神を引き出す最も効果的な 2 つの方法です。産業界では、この 2 つの方法への依存度が高まっています。これによって、雇用者と被雇用者の両者により大きな柔軟性とメリットがもたらされ、両者の関係性は見直されると考えられています。雇用する側は、目の前の業務に合わせて、これまでより大きな人材プールにアクセスでき、働く側は、主導権をもって自らのスキルと才能を生かせるようになります。

「Future of Work」により、生産性と経済成長は大幅に加速します。以前に発表したレポートでは、セクターごとの効率向上を細かに評価し、インダストリアル・インターネットが単独でもたらす主要な経済的利益の推定を行いました<sup>4</sup>。中には、現代のイノベーションには、産業革命ほどの変革力も、経済的な影響力もないと主張するエコノミ

---

<sup>3</sup> 「グローバルブレイン」という語は、Peter Russell (1983) がその著書『The Global Brain: speculations on the evolutionary leap to planetary consciousness.』(Los Angeles, JP Tarcher) の中ではじめて用いたものです。

<sup>4</sup> 「The Industrial Internet: Pushing the boundaries of minds and machines」の中で行われた推定によると、インダストリアル・インターネットによって達成できる 1% の効率向上は、石油・ガス部門で 900 億ドル、電力部門で 660 億ドル、医療部門で 630 億ドル、航空部門で 300 億ドル、そして鉄道輸送部門で 270 億ドルの節減を生み出します。

ストもいます<sup>5</sup>。しかし、**私たちは、「Future of Work」が産業革命と同じか、それ以上の変革をもたらすと確信しています<sup>6</sup>。そして、人々の生活の質を大きく改善させると考えています。**

こうした変革は、一夜にして起こるものではありません。まず、変革の種がまかれ、そして時間をかけて芽が出てきたものです。しかし、現在の状況は、描いているような変化がはっきりと加速していく段階に突入しています。Ray Kurzweil の表現を借りると、チェス盤の後半に差し掛かっているのです。そこでは、変化が突然より目に見える形で現れ、サイエンスフィクションがより急速に現実のものとなります<sup>7</sup>。

こうした変革は、単独で起こるものではありません。新たな技術に投資したり、組織や経営手法を適応させたりすることが必要になります。また、強固なサイバーセキュリティを実現するアプローチによって、機密情報と知的財産を守り、サイバー攻撃から重要インフラを保護することも求められます。さらに、教育システムについても、この急速に変化する経済に対応できるだけのスキルを学生たちに身に付けさせるようなものに発展させなければなりません。労働市場における従来手法の崩壊による衝撃を和らげるため、継続した教育および再訓練も必要になります。時間とお金はかかりますが、この技術イノベーションの波は私

たちの生活を根本から変える重要なものです。

進行中のリサーチプロジェクトの第 1 章であるこのレポートでは、「Future of Work」の枠組みを明らかにすることを目的とし、一体となってそれを形作っている 3 つの力について考察しています。次回以降のレポートでは、プリリアント・ファクトリーが機能する仕組みについてさらに深く掘り下げ、技術とグローバルブレインの間で進展する相互作用について考察し、ロボット工学や人工知能といった技術開発の可能性を探り、そして競合環境とマクロ経済環境への影響について評価を行っていく予定です。このレポートでは、現在起こっている変化をより大きな視点から説明します。また、こうした変化をリアルに感じてもらうため、具体的な例を挙げています。

---

<sup>5</sup> Robert Gordon 「The Demise of US Economic Growth: Restatement, Rebuttal and Reflections」 (NBER Working Paper 19895、2014 年 2 月) および 「Is US Economic Growth Over? Faltering Innovation Confronts The Six Headwinds」 (NBER Working Paper 18315、2012 年 8 月)。

<sup>6</sup> 18 世紀半ばから約 150 年間にわたって起こった産業革命は、2 つの時代区分に分けることができます。蒸気機関の発明によって起きた第一次産業革命と、1850 年頃にはじまり、内燃機関と電気の発展に伴ってさらに広範囲な技術の加速が見られた第二次産業革命です。この 2 つの革命は連続的に進展しているため、ここでは一般的な慣習にならい、2 つをまとめて「産業革命」と呼んでいます。

<sup>7</sup> Ray Kurzweil (2000) 『The age of spiritual machines: When computers exceed human intelligence』 (Penguin)。

## 1. インダストリアル・インターネット

物理世界とデジタル世界との境界は、どんどん曖昧になっています。クラウドベースのアナリティクス（「ビッグデータ」）と産業機械類（「大型コンピューター」）の融合—インダストリアル・インターネット—により、生産性を向上させる大きなチャンスが生まれています。産業機械に取り付けられる電子センサーの数は増え続け、それによって産業機械がかつてないほど多くのものを見、聞き、感じ、それと同時に膨大な量のデータを生成するようになりました。その後、高度なアナリティクスがこのデータを解析することにより、重要な知見がもたらされ、これまでよりも効率的な全く新しい方法で機械を運転したり、さらには航空機および機関車や、電力網および病院などのシステム全体の運用を行うことができます。

今や、私たちが扱う機械は単にインテリジェントではなく、ブリリアントではなく、ブリリアントになってきています。

### ブリリアントな機械類

電子センサーが登場してしばらく経ちますが、そのコストがここへきて急速に低下しています。同様に、クラウドコンピューティングの進歩のおかげで、データの保管や処理にかかるコストも急速に下がっています。そして、このことがインダストリアル・インターネットの規模の拡大をさらに加速させています。

今や、私たちが扱う機械は単にインテリジェントではなく、ブリリアントになってきています。ブリリアントな機械とは、予測機能と応答機能を持ったソーシャルマシンです。例えば、機械同士や人間との間でシームレスな通信が可能な航空機エンジン、機関車、ガスタービン、医療機器がそれに当たります。情報はインテリジェントになり、欲しいときにすぐさま自動で届くため、わざわざ探す必要がなくなります。

多くの産業機器にセンサーとソフトウェアが組み込まれて久しいですが、これまではソフトウェアが物理的にハードウェアに組み込まれてきたため、ソフトウェアをアッ

プグレードする際には毎回ハードウェアの変更が必要でした。現在、組み込み型仮想化、マルチコアプロセッサ技術、クラウドベースの高度通信といった技術の展開が産業界全体ではじまっています。この新しいソフトウェア定義型の機械インフラでは、機械の機能をソフトウェア内で仮想化することができるため、機械のソフトウェアがハードウェアから切り離され、産業機器の監視、管理、アップグレードを自動的に、そして遠隔から行うことが可能になります。言い換えると、次世代型産業機器のソフトウェアは、ハードウェアを一切変更せずに遠隔からアップグレードを行うことができます。つまり、スマートフォンのソフトウェアと同じように、すぐに新しい機能が使えるようになるのです。

### 予想外のダウンタイムのゼロ化

予防的な状態管理保全へシフトすることができるため、今後は、決まったスケジュールに基づく保守によらない形で、故障発生前に機械を修復することができるようになります。それにより「予想外のダウンタイムのゼロ化」が実現し、停電やフライトの遅延、工場の操業停止をなくすことにつながります。

フライトの遅延・欠航のうち 10%が、予定外の保守を原因として発生しています。これにより世界の航空産業が負うコストは 80 億ドルにのぼると推定されます。もちろん、不便さやストレス、それから、空港ターミナルでどうすることもできずに座っている間に参加できないまま終わってしまった会議など、利用者にも与える影響は言うまでもありません。この問題に対処するために GE が開発したのが、どんな航空機にも導入でき、オペレーターが見逃してしまうかもしれない問題を予測する自己学習型の予知保守システムです。フライト中に地上の技術者に情報を伝えるため、着陸時には保守が必要な箇所をすでに技術者が把握している状態になります。このシステムにより、米国内の航空路線だけでも年間 6 万件以上の遅延・欠航が回避でき、700 万人以上の乗



**10%**  
flight DELAYS  
and CANCELLATIONS  
caused by  
**UNSCHEDULED  
MAINTENANCE** = **\$8billion**  
+ COSTS  
**AIRLINE  
INDUSTRY** 

**TECHNOLOGY**  
could PREVENT > **60,000/YR**  
DELAYS and CANCELLATIONS

 > **\$7million** PASSENGERS  
DESTINATIONS 

客が時間通りに目的地へと到着できるようになります。

インダストリアル・インターネットは、医療産業にも大きな恩恵をもたらします。現在の非効率性をたった 1%減らすだけで、600 億ドル以上の節約になります。現在、看護師の各勤務時間のうち、機器を探すことに費やされる時間は平均 21 分間です。これは、患者のケアに費やす時間の減少につながっています。インダストリアル・インターネット技術を使えば、患者やスタッフ、医療機器を病院が電子的に監視および接続することができます。これにより、ベッドの準備時間を 1 時間近く減らすことができます。手術を必要としている場合、1 時間というのは貴重です。また、これは、治療を受けることのできる患者数を増やし、より多くの命を救うことにもつながっていきます。

同じような効率向上は、エネルギー分野でも見られます。その中には、風力などの再生可能エネルギーも含まれています。遠隔監視・診断により、複数の風力タービンが相互に通信を行い、風の変化に合わせてブレードのピッチを調整できるようになり、ウインドファームにおける kWh あたりの発電コストが 5 セント未満に低下しました。10 年前には 30 セント超と、現在の 6 倍コストがかかっていました。

## プラットフォームとコラボレーションツール

インダストリアル・インターネットのツールとアプリケーションを利用することで、これまでよりも素早くスマートな方法でのコラボレーションが可能になり、業務が効率化するだけでなく、より有意義なものとなっています。医師と介護者のチームは、安全で信頼性の高いクラウドベースのプラットフォームを使うことにより、患者の症例についてすぐに協議を行い、画像や報告書へ同時にアクセスして、診断や治療計画に協調して取り組むことができるようになりました。医療の専門家たちは、お互いの報告書や専門知識をより有効に活用することで、より良い治療を達成しています。

このようなシステムを実現しているのが、情報の収集と保管、アナリティクス機能、そして新しい形のコラボレーションを一体的に支える統合型デジタルソフトウェアプラットフォームです。こうしたプラットフォームは、産業規模のアナリティクスを実行するための、そして機械やデータ、人々をつなぐための標準的な方法を提供してくれます。オンプレミス方式またはクラウド方式で機械に展開され、分散コンピューティングやビッグデータアナリティクス、アセットデータ管理、機械間通信、モビリティといった技術を支える役割を果たすことができます。これらはすべて安全な環境で行われるため、産業データは守られ、機械、ネットワーク、システムへのアクセスは保護されます。

## 2. アドバンスト・マニュファクチャリング

「ものづくりの方法」が変化しています。

広範囲に及ぶ産業イノベーションの波は、生産プロセスのあらゆる面に変化をもたらしています。新しい技術と材料は、新しいものを新しい方法で作ることを可能にします。また、データから得られる知識は、個々の工場を顧客や流通業者、サプライヤーと結ぶ供給・流通網の再編成に活用することができ、スピードと柔軟性の向上に役立てることができます。そして、設計とプロトタイプングからはじまり、生産、顧客による利用、そして保守へと続く一連のサイクルは、どんどん短縮され、加速し続けています。

工場自体もインテリジェントへ、そして、さらにその上のプリリアントへと進化し、かつてない迅速さと効率で、予測や適応、応答が可能になっています。アドバンスト・マニュファクチャリングを活用すると、工場の管理者やエンジニアは、製品デザインの変更が現場に与える影響をシミュレーションしたり、予想外の事象に対応してサプライチェーンや生産プロセスをリアルタイムに再編成したりすることができます。アドバンスト・マニュファクチャリングは、規模の概念を定義し直し、これから考察するように、分散生産やマイクロ・ファクトリー、マス・カスタマイゼーションへのシフトを実現します。

### 新しい生産プロセスと新しい材料

新しいものではないにも関わらず、積層製造技術または「3D プリンティング」と呼ばれる手法がメディアを賑わせています。その理由は簡単で、話題性のある名前に加え、一般の人でも熱意があれば自宅やガレージで試してみることができる段階にあるからです。

この技術は、1980 年代に Charles Hull によってはじめて開発され、光造形法という名前が付けられました（「3D プリンティング」

と比べると地味な名前に感じられます！）。こうして、特定の材料の連続した層を重ねていくことにより、デジタル設計図から 3次元物体を作り出す手法が生まれました。それから 30 年にわたり改良が加えられ、より精度の高い技術となり、使用できる材料の幅も広がりました。当初は紫外線硬化樹脂が用いられていましたが、その後の世代の 3D プリンターでは樹脂粉末や金属粉末が用いられています。

3D プリンターの中には複数の材料を扱えるものもあり、作成する物体に異なる物理的性質の組み合わせを持たせることが可能です。これにより、現在では、積層製造技術を使用して、医療用インプラントや航空機やガスタービンの部品といった産業部品を作ることができます。もしかすると、人体組織まで作ることができるかもしれません<sup>8</sup>。

### 3D プリンティングが強いインパクトを持つ主な 5 つの理由

1. 積層製造技術により、従来の製造技術では得られなかった新しい部品や製品の生産が可能になるため。積層製造技術によって航空機エンジンの高効率な燃焼器の部品を製造すると、以前であれば 20 個を超える別々の部品だったものを 1 つにすることができます。エンジンブラケットなどの幾何学的に複雑な構造を持つ部品に積層製造技術を利用すれば、部品を大幅に軽量化することができます。
2. 積層製造技術は、鋳造や切削、穿孔、フライス加工、接合を用いる従来型の「減法」技術とは根本的に異なるため。減法製造では、原材料の最大 90%が「無駄」になってしまいます。積層製造技術なら、印刷に使われた材料がほぼすべて、最終製品になります。

アドバンスト・マニュファクチャリングは、規模の概念を定義し直し、分散生産やマイクロ・ファクトリー、マス・カスタマイゼーションへのシフトを実現します。

<sup>8</sup> 執筆者不明「Printing a bit of me」(The Economist, 2014年3月8日)。

積層製造技術は、より進んだ現地生産や分散生産、再構成可能型生産を可能にするため、サプライチェーンの様相は一変すると予想されます。

3. 積層製造技術により、設計のクラウドソーシングを通じて、全く新しいイノベーションエコシステムの構築が可能になるため。GrabCAD などのクラウドソーシングプラットフォームでは、メーカーが設計課題を投稿し、世界中の何百人というエンジニアがそれに取り組むといった形が実現できます。先日、GE が航空機エンジンブラケットに関してこうした募集を行ったところ、700 件近い応募がありました。そして、受賞したデザイン（インドネシアからの応募）は、重量を 80% 以上削減できるというものでした。
4. 積層製造技術は、非常に高い柔軟性を持つため。多種多様な部品を 1 台の装置で印刷することができます（大きさや材料の点で制約はありますが）。
5. 積層製造技術は、その高い柔軟性によって、現地生産や分散生産、生産方法の組み直しを可能にするため。これにより、サプライチェーンの様相は一変すると予想されます。

人々の心をとらえているにも関わらず、米国における全商品のうち 3D プリンティングを使って生産されているものはわずか 0.02%にとどまっています<sup>9</sup>。積層製造技術のメリットを大規模な「従来型の」製造業にまで拡大させることはできるのでしょうか？答えはイエスです。GE アピエーションでは、2020 年までに 10 万点を超える部品を積層製造技術で生産すると推定されています。これによって航空機 1 機あたりの重量を 1,000 ポンドも減らすことができ、燃料消費の削減につながります。

こうした進展を促している 2 つの大きな力があります。それは、(1) ハイパフォーマンスコンピューティング (HPC) と、(2) 工場とサプライチェーンにおける「ビッグデータ」の登場です。この 2 つが一体となることにより、製造プロセスおよびシステムの

大規模な改善が実現し、製造業における新たなパラダイムが生まれます。

私たちは、この新しいパラダイムをブリリアント・ファクトリーと呼んでいます<sup>10 11</sup>。ブリリアント・ファクトリーの要素の多くは新しいものではありませんが<sup>12</sup>、以降のページで説明するようなシステムインテグレーションとフィードバックループは新しい考え方です。HPC とインターネット並のデータスピードとが工場に備わることにより、工場とサプライチェーンにおけるモデリング精度の向上とリアルタイムな最適化が実現されようとしています。

<sup>9</sup> Wohlers Associates 「Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry」 (Wohlers Report 2013, 2013 年 5 月) <wohlersassociates.com>。

<sup>10</sup> Stephan Biller 「GE's Brilliant Factory」 (EmTech Conference 2013, MIT, Cambridge, MA) 。

<sup>11</sup> Christine Furstoss 「Digital Thread: Creating a Self-Improving, Brilliant Factory」 (CIO Review, 2013 年 12 月) 。

<sup>12</sup> www.smartmanufacturingleadershipcoalition.org の例を参照のこと。



設計から製品エンジニアリング、製造エンジニアリング、製造、サプライチェーンの運用、保守へとつながり、エンジニアリングへと戻ってくるフィードバックループの構築により、設計と製造との間のラーニングサイクルを省くことができるため、製品開発の迅速化と万全の体制での工場運用開始が実現します。

## ブリリアント・ファクトリー

インダストリアル・インターネットの事例で見たように、物理世界とデジタル世界は連動をはじめています。バリューチェーンの各構成要素がますます多くのデータを生成し、スマートアナリティクスがそれをすぐさま知見へと変え、その知見が通信によって即座にシステム内の関連する構成要素へと広がります。ブリリアント・ファクトリーの基本概念はシンプルです。それは、バリューチェーンの3大領域をまたいだデジタル接続（「スレッド」）を構築することです。その3大領域とは(1) 製造システムの設計、(2) 製造システムの運用、(3) 保守業務です（図1参照）。設計から製品エンジニアリング、製造エンジニアリング、製造、サプライチェーンの運用、保守へとつながり、エンジニアリングへと戻ってくるフィードバックループを構築することにより、設計と製造との間のラーニングサイクルを省くことができるため、製品開発の迅速化と万全の体制での工場運用開始が実現します。

製造プロセスは、設計からはじまります。設計の結果、デジタル設計図が作成されます。GEのChristine Furstossは、次のように説明しています。

デザインが決まったら、デジタル方式で製造エンジニアリングへと送られます。そこで製造プロセスのモデリングとシミュレーションが行われます。製造エンジニアリングでは、機能が生産可能なものであるか、製造された部品が使用時のストレスに耐えうるだけの構造を持つか、許容範囲を広げて部品歩留まりを改善するためにこういったトレードオフが可能か、その他にも数多くの問いに関するテストとシミュレーションを行うことができます。さらに、実際の生産に先立ち、工場のフローおよびレイアウト、ロボット、製造管理のシミュレーションと最適化も行われます<sup>13</sup>。

---

<sup>13</sup> Christine Furstoss、同記事。

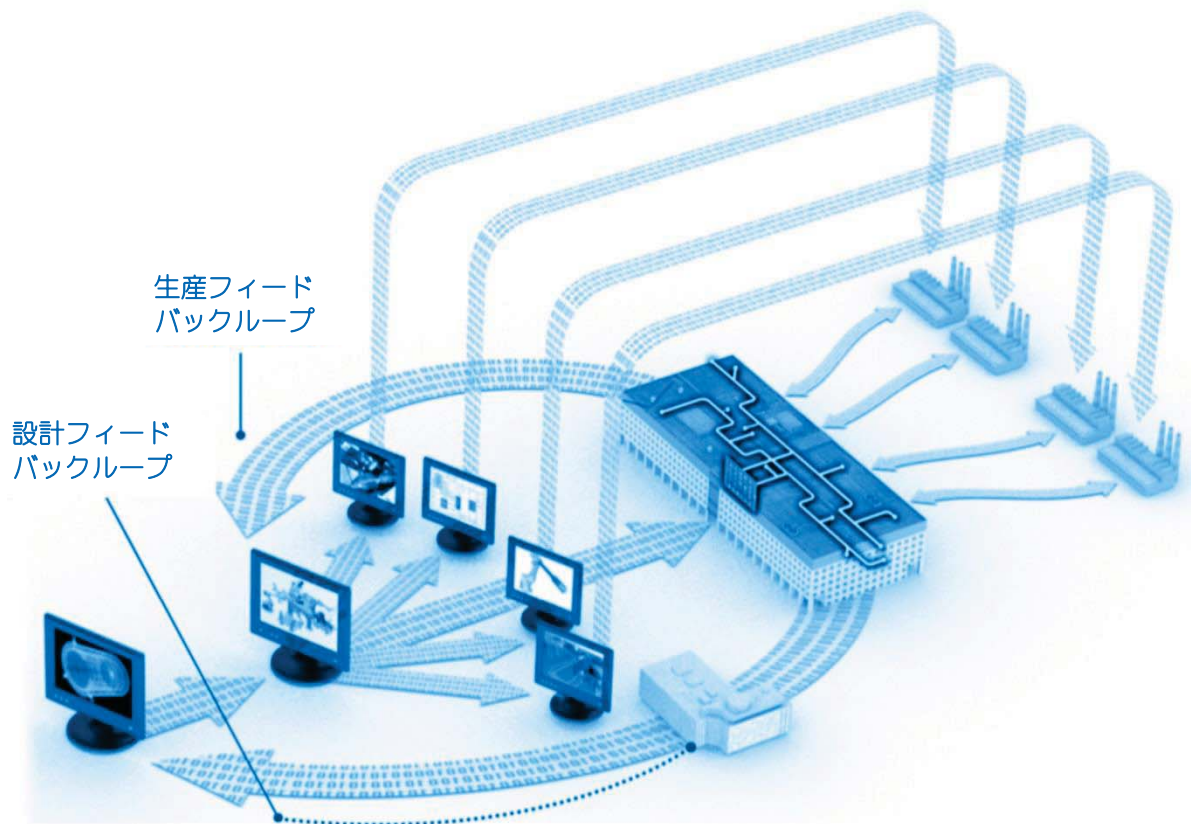


図 1: プリリアント・ファクトリー

製品デザインと製造システムのデザインが事実上承認されたら、製造パラメータとその他のプログラムおよび制御情報が工場の現場に送信されます。その後、インテリジェントな機械類がそのデータを受け取って変換し、該当の部品または製品の物理的な製造を行います。

プリリアント・ファクトリーでは、機械間、機械と現場の製造システム間、工場とサプライヤーおよび販売者間がデジタル通信で結ばれ、内部を完全に見通すことのできるサプライチェーンが形成されます。このスレッドには、サプライヤーを含むことが重要です。それにより、このエコシステム内でサプライヤーの変革能力が発揮されるようになります。

HPC を利用したアナリティクスやシミュレーション、アルゴリズムにより、生産やロジスティクス、在庫、製品提供の最適化を行い、工場やサプライチェーン、商業運転に対してリアルタイムに役立てることが可

能です。これは、突発的な問題が起きた場合には特に重要です。例えば、ロボットが動作不良を起こすかもしれない場合（ロボットが 15 分以内に動作不良を起こすとアルゴリズムが高い信頼性で予測した場合）や部品の供給が遅れるとの信号がサプライヤーから入った場合、従業員が欠勤した場合などです。Furstoss は、次のように説明しています。

プリリアント・ファクトリーは、生産量、品質、そして製造工程に関する問題への対処を支援することで、企業の製造全体をリアルタイムに最適化します。もっと言えば、予測機能を使い、まだ起こってすらいらない問題を予測し、先手を打って対処することも可能です。これにより、まさに止まることのない工場が実現するのです。製造プロセスで得られた知識は、すぐに仮想製造段階へとフィードバックされ、修正と改良に役立てられます。テスト後、改良された新しいプロセスが再びプリリアント・ファクトリーに送られ、実行へと移されます（生産フィードバックループ）。製品が販売さ

れ、顧客に利用されてしばらく経つと、今度は保守が必要になります。この保守段階こそが、製品の用法や欠点に関する新しい知見を数多く見つけ出せる段階なのです。実際のところ、部品の保守のすべては、故障パターンやそれによる影響を解析する機会と考えることができ、設計および製造プロセスを改善へと導いてくれます（設計フィードバックループ）。生産および設計の両フィードバックループが情報をとらえ、新しい部品や既存部品のエンジニアリングと製造に関する新しい知識を生み出す、これが GE の自己改善型ブリリアント・ファクトリーの本質です。私たちが築き上げているこの真にオープンなコラボレーション型のイノベーションモデルは、新しい情報をとらえ、それに基づいて行動するため、製品の設計・製造に関するプロセスとシステムの絶え間ない改善が実現します。最も驚くべきは、リアルタイムのアナリティクスと制御のおかげで、機械自らがそうした最適化を実行できるところまで急速に到達していることです<sup>14</sup>。

さらに、アドバンスト・マニュファクチャリングは、製造された各ユニットに関する材料・生産・使用・保守履歴の遺伝子マッピングとも言うべきものを提供してくれます。完全な製品系譜を知ることにより、エンジニアは、潜在的なパフォーマンス不良や品質問題の原因をこれまでよりも迅速かつ正確に特定することが可能になります。このため、同じように素早く、的を絞った対策を用いて、こうした問題に対処することができるようになります。また、ある問題によって影響を受ける可能性のある製品を素早く特定して状況把握ができるので、製品回収の規模が格段に縮小できます。

加えて、アドバンスト・マニュファクチャリングの技術は、再製造の利用見込みを格段に広げます。再製造は、基本設計を変えずに、機械の中で故障や動作不良を起こしている部品に的を絞って交換を行う方法です。再製造を用いれば、新規製造に比べて

最大 90% のエネルギーを節減することができ、その分の環境的利益ももたらされます（比較として、同じ状況でリサイクルによるエネルギー節減を計算すると 5% 未満になります<sup>15</sup>）。

## 影響

アドバンスト・マニュファクチャリングのイノベーションは、まさしく産業界における革命です。新しい技術によって新しい機能や特性を持った新しい製品が生み出され、従来型の製造技術における物理的制約がなくなることで生産可能性の範囲が広がっています。製造されるのが産業機械である場合、こういった進歩は効率向上とコスト節減につながります。例えば、軽量化した航空機エンジンは、以前よりも少ない燃料ですみます。

さらに重要なのは、新しい製造技術と、データを駆使するインダストリアル・インターネットの力が融合することで、設計、製品エンジニアリング、製造エンジニアリング、製造、サプライチェーン、物流を 1 つに結ぶインテリジェントなデジタルスレッド、すなわちブリリアント・ファクトリーが実現することです。

その結果、スピードと効率が格段に向上します。つまり、設計、プロトタイプング、生産、カスタマーエクスペリエンスの間に高速化したフィードバックループが形成されることにより、生産プロセス全体が突発的な事態にリアルタイムかつ自動的に対応できるため、生産システムレベルで「予想外のダウンタイムのゼロ化」が確保されます。ブリリアント・ファクトリーでは、リスク緩和およびレジリエンス強化戦略がこれまでよりも進展し、ブリリアント・ファクトリーの自動応答／修正システムに欠かせない要素になると考えられます。

---

<sup>15</sup> 次の文献を参照のこと。John W. Sutherland • Daniel P. Adler • Karl R. Haapala • Vishesh Kumar 「A Comparison of manufacturing and remanufacturing energy intensities with application to diesel engine production」 (CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2008 年)

---

<sup>14</sup> Christine Furstoss、同記事。

積層製造技術は、さまざまな部品を同じ積層製造技術装置で作成可能なことから、規模の経済の性質をも変えることができます。従来方式では、スケールメリットを得るためには、それぞれの機械で非常に大量の同一ユニットを生産する必要があります。より高い柔軟性を持つ積層製造技術機なら、同水準の設備稼働率で、さまざまな機能を持つ複数の製品を製造することができます。経済効率が同一ユニットの大量生産ということに依存しなくなれば、採算性の観点からして、特定製品のバリエーションを大幅に増やし、同じ生産設備で次々と量産することが可能になります。特注品は、大量生産品と同じくらい簡単でコスト効率良く生産できるようになります。このように、アドバンスト・マニファクチャリングによって、マス・カスタマイゼーションは現実のものになると見られます。

また、アドバンスト・マニファクチャリングは、工場と製造システム全体にも優れた柔軟性をもたらします。規模というものが極めて重要なことに変わりはありませんが、より分散化していくと予想され、小規模な製造工場（マイクロ・ファクトリー）への依存度が高まると考えられます。これによって、次のような新しいメリットが生まれます。

1 つは、研究、設計、そして製造を同じ場所に配置できるようになり、イノベーションプロセスが加速することです。

もう 1 つは、生産を市場に近づけることができ、輸送コストや現地調達の状態といったファクターに関して生産チェーンを最適化できることです（ただし、生産設備の最適立地は、人材確保の可能性、インフラの質、そして規制や税制などの全体的なビジネス環境といった数々の主要ファクターによって最終的には決定されます）。

さらに、柔軟性が生まれることによって、必要な人材はそろっているものの地理的な流動性に制約がある地域に雇用を創出することも挙げられます。例えば、2008 年不況からの回復が遅れる中で、米国における

雇用増加を阻む一因となったのが労働力の流動性低下でした。人々は住宅市場の含み損に縛られ、より良い就業機会を求めて州を移動するといったことができませんでした。マイクロ・ファクトリーなら、こうした人々の元にも仕事をもたらすことができます。



### 3. グローバルブレイン



新しいデジタル通信と分析ツールは、機械類の柔軟性と相互接続性を向上させる源となっています。同様の変化は、人間の側にも変革を起こしています。技術進歩により、創造性および起業家精神といった、人間が機械よりも明らかな優位性を持つ分野へと労働人口が向かう傾向が高まると予想されています。グローバルブレイン（デジタル通信網を通じて1つになった世界中の人々の集団的知性）は、さらに巨大で強力なものになっていくと考えられます。それは、これからさらに何千万人という人々が教育とインターネットへのアクセスを手に入れ、この世界規模の知の蓄積を利用し、かつ、それに貢献できるようになるためです。オープンソース・プラットフォームとクラウドソーシングは、グローバルブレインの創造性と起業家精神を最大限に引き出す最も効果的な2つの方法です。企業はこの2つの方法への依存度を高めており、それによって、雇用者と被雇用者の両者に、より大きな柔軟性とメリットがもたらされ、両者の関係性が新しく定義されています。

#### 技術が育む創造性と起業家精神

農業の機械化から産業界における初期のオートメーションに至るまで、業務は人間から機械へとシフトしていき、それによって人々は肉体的にきつい作業や退屈な反復作業から徐々に解放されてきました。この流れは今も続いています。人々は、機械の優れたパワーと一貫性、そして正確さをもって行うべき仕事を機械に任せ、人間の方がより高い優位性を持つ仕事へと専念しています。

機械類や工場がブリリアントなものになるにつれ、教育やスキルの重要度が上がります。ここ数十年間、「大卒プレミアム」の上昇、つまり、大卒者と高卒者の平均賃金格差の拡大が見られています<sup>16</sup>。これは、大卒者の数が増える中で起こりました。高いスキルを持つ労働力の供給が増加したにもかかわらず、それを上回るスピードでこうした労働力の需要が高まったのです。技術変化のおかげで高いスキルを持つ労働力の生産性は向上し、それに伴ってこうした労働力の価値がさらに上昇し、ますます求められるようになっていきます。これがエコノミストの間で「スキル偏向的」技術進歩と呼ばれているものです<sup>17</sup>。

<sup>16</sup> 例として、Daron Acemoglu 「Technology and Inequality」 (NBER Reporter 2003) を参照のこと。Acemoglu は、新しい技術が高いスキルを持つ労働者を補充し、彼らの生産性と賃金を高めているこの新しい変革は、オートメーションによってスキルを持つ労働者の職が減る傾向にあった19世紀の技術変化とは対照的であると指摘しています。

<sup>17</sup> Jan Tinbergen 「Substitution of Graduate by Other Labor」 (Kykkos 27, 1974年) では、教育と技術の間の競争についてはじめて言及がなされました。それによると、技術イノベーションは、スキルを持つ労働者の生産性を高め、それに伴って教育の価値も上昇させるが、教育によってスキルを持つ労働者の数が需要以上に増加すれば、彼らの賃金は低下するとされています。もっとも最近の主張で、米国に対する影響が詳細に検討されているのが次の文献です。Claudia Goldin・Lawrence F. Katz 「The Race Between Education and Technology」 (Harvard University Press, 2008年) およびそのレビューである Daron Acemoglu・David Autor 「What does Human Capital Do? A review of Goldin and Katz's The Race Between Education and Technology」 (Journal of Economic Literature, 2012年) 。

しかし、実態はさらに複雑で表面化しづらいものです。1990年代以降、米国でもヨーロッパでも、職業と賃金の二極化が起っています。高学歴・高賃金の仕事と低学歴・低賃金の仕事の両方が、その中間の仕事に比べて増加しています。また、高低どちらの層の賃金水準も中間賃金層に比べて上昇しています。言い換えると、反復的なルーチン型の事務職や労働職が減っている一方、高いスキルを必要とする仕事（管理職や専門職）、そして専門スキルは必要ないものの適応能力と対人能力が必要な仕事の2つに対する需要は増えているのです<sup>18</sup>。

この傾向は、今後も続く見込みです。プリリアントな機械類はより効果的に通信や自己調整を行うことができるようになり、人間による日常的な介入の必要性はさらに減っていくことが予想されます。ロボット工学や人工知能、ハイパフォーマンスコンピューティングによって機械の能力が次第に高まっているため、機械の方が人間よりも効率よく（低コストで）こなせる業務の範囲が拡大しています。スマートグリッドは現実のものとなり、住宅のスマート化は進み、自動運転車を道路で普通に見かける日も思った以上に早く訪れるかもしれません。反復的な仕事やデータマイニング技術を通じて取り組むことのできる仕事は、ますますその多くが機械へと効率的に割り当てられていくでしょう。

それに応じて、人間の労働力の大半がより多くの創造性を生かすことのできる業務へとシフトすると考えられます。ここで述べている創造性とは、自立的に考え、新たなソリューションを見いだすことのできる能

---

<sup>18</sup> 次の文献を参照のこと。Daron Acemoglu・David Autor 「Skills, Tasks and Technologies: Implications for Employment and Earnings」 (NBER Working Paper 16082, 2010年6月)、Daron Acemoglu・David Autor 「What does Human Capital Do? A review of Goldin and Katz's The Race Between Education and Technology」 (Journal of Economic Literature, 2012年) および David Autor・Frank Levy・Richard J. Murnane 「The Skill Content of Recent Technological Change: An Empirical Exploration」 (Quarterly Journal of Economics, 2003年)。

力です。それは、より強力な技術の登場によってさらに高められる能力でもあります。

こうした移行には、痛みを伴うことが予想されます。技術進歩によって混乱が引き起こされるほか、人間と機械との間で業務の再配分が行われるため、一部の職が奪われたり、一部のスキルが役に立たなくなったりという事態が考えられます。このことが意味するのは、人間、社会、経済の移行にかかる実質的なコストは、再訓練と社会保障政策の組み合わせによって対処する必要があるということです。

一方で、技術進歩は、二極化したスキル区分のどちらにも、就業機会の創出と収入の向上を引き続きもたらすと見られます。技術進歩が生産性を高め、経済成長を促進することによって、購買力の上昇もたらされ、さらに今度はそれが新しい商品やサービスの需要へと変化します<sup>19</sup>。このプロセスを注意深く監視することによって、教育システムや会社主催の訓練プログラムが、変化する需要にきっちりとは見合ったスキルを提供できているか確かめることが必要です。

実際、重要な傾向として、新しいタイプの仕事が登場しています。物理的な機械とそ

---

<sup>19</sup> 生産性向上と経済成長の推進力として技術イノベーションが果たす重要な役割は、ずっと以前から認識されてきました。それを形にした最も有名で影響力のある文献が Robert Solow 「A Contribution to the Theory of Economic Growth」 (Quarterly Journal of Economics, 1956年) です。このテーマについては、以後数十年にわたって膨大な量の理論的・経験的文献が発表されました。このレポートの内容と最も関連があるところでは、1990年代半ばの米国における生産性急上昇について、その主な要因として直前の10年間に起きた情報通信技術の進歩が考えられることを示した数々の研究が挙げられます。例として、次の文献を参照のこと。Kevin Stiroh 「Information Technology and the US Productivity Revival: What Do the Industry Data Say?」 (Staff Report, Federal Reserve Bank of New York, nr. 116, 2001年1月)、Barry Bosworth・Jack Triplett 「Productivity Measurement Issues in Services Industries: "Baumol's Disease" Has Been Cured」 (Federal Reserve Bank of New York Economic Policy Review, 2003年9月) および Barry Bosworth・Jack Triplett 「Services Productivity in the United States」 (『Hard-to-measure goods and services: Essays in Honor of Zvi Griliches』内、University of Chicago Press, 2007年)。

の関連データの両方を熟知しているメカニカル・デジタルエンジニアは、今後、大きな需要を獲得すると思われます。これは、自身の業界とそこで用いられるアナリティクスの両方を熟知し、新しい技術を最大限活用できる形にビジネスを再編成する能力を持つマネージャーについても同様です。物理世界とデジタル世界がより密接に連動するつれ、より多くの新しい仕事において、ソフトウェアとハードウェアの両方の専門知識が求められるようになるでしょう。

**.02%**  
all goods in the U.S using  
**3D** printing  
more **INNOVATIVE**  
and **EFFICIENT**

**SUBTRACTIVE**  
manufacturing techniques  
WASTES **90%**  
raw materials  
**ADDITIVE**  
manufacturing techniques  
NEARLY **ALL**  
printed materials  
PART OF FINAL PRODUCT

## クラウドソーシングとオープンソース・コラボレーション

「Future of Work」を形作っているイノベーションの際立った特徴は、目の前の問題に依拠して切り替わるさまざまな形のつながりを用いて、より大きな潜在資源の集まりを活用する能力です。機械の場合、機械同士や人間との間で即座に通信を行い、必要なときすぐに他の機械によるサポートや技術者による介入を受けることができます。工場の場合、オンラインプラットフォームを通じて、より幅広いサプライヤーを利用することができます。プロダクトデザイナーは、より大きな顧客基盤からのフィードバックを迅速に設計変更へとつなげることができます。これと同じ原理が人材についても当てはまります。

物理世界とデジタル世界がより密接に連動するつれ、より多くの新しい仕事において、ソフトウェアとハードウェアの両方の専門知識が求められるようになるでしょう。

以前のレポート<sup>20</sup>で説明したように、インダストリアル・インターネットのアプリケーションの中には、一人一人の従業員が同僚全員の知識と専門技術へリアルタイムにアクセスできるようにすることを目的としているものがあります。これは、1つの会社の「グローバルブレイン」を活用しているという見方ができます。しかし、制限のない本物のグローバルブレイン（デジタル通信網を通じて1つになった世界中の人々の集団的知性）からは、さらに大きな価値を得ることができます。これは、人間版のハイパフォーマンスコンピューティングなのです。

オープンソース・プラットフォームとクラウドソーシングは、分散した世界規模の人材プールから創造性と起業家精神を最大限に引き出す最も効果的な2つの方法です。この2つによって、十分な好奇心とインターネットへのアクセスを持つすべての人が、全く異なる領域や分野のものを含む新しい問題にそのスキルと専門技術を生かすチャンスを手に入れます。また、ベンチャー企業にとっては、資金の調達と人材の誘致がやりやすくなります。

企業はこのことを理解しはじめ、クラウドソーシングとオープンソース・コンペティションおよびコラボレーションを今まで以上に頻繁かつ大規模に用いるようになってきています。この分野におけるGE初の試みについては、セクション2で紹介しました。私たちは、こうした活用傾向が今後高まっていくと考えています。より大きな人材プールへのアクセスにより、分野における専門家の能力と経験をより多く活用だけでなく、全く新しい角度から問題に取り組むことができる分野外の優れた人材の斬新な視点を活用することも可能になります。

グローバルブレインへのアクセス支援を目的とした新しいプラットフォームや企業がすでに登場しています。エンジニアおよび

<sup>20</sup> Marco Annunziata • Peter C. Evans 「The Industrial Internet @ Work」 (GE ホワイトペーパー、2013年10月)。

CAD 向けの GrabCAD やデータサイエンティスト向けの Kaggle などがそれに当たります。このようなコミュニティを拡大していくためには、実験的な試みと組織的な適応の両方が求められます。イノベーションを実践する企業は、継続した長期的な独自の取り組みとオープンソース・コラボレーションとの最適な組み合わせを見つけることが必要です。知的財産の問題に関しては十分な対処が不可欠であり、また、新たな報酬体系の構築が求められる可能性もあります。ただ、経済的なインセンティブは非常に高いので、こうしたプロセスは進んでいくと考えられます。

グローバルブレインは、これから数十年で、さらに巨大かつ強力なものになるようとしています。大規模な新興市場における経済成長の加速とコンピューティングパワーコストの大幅な低下、携帯電話網の急速な広がりによって、それが ATM のような「壁の穴」的な導入であっても、スマートフォンからの接続であっても、どんな形にせよ、さらに何百万人もの人々がインターネットへのアクセスを手に入れることとなります。

また、経済発展によって、多くの人々がきれいな水や食糧、より良い医療を手に入れることができるようになっているため、以前であれば生きるための基本的欲求を満たすのに費やしていた貴重な時間を（少なくともその一部を）世界規模の知の蓄積を利用し、かつ、それに貢献するための時間として使うことができます。それによって、グローバルな相互接続ネットワーク上では、これからさらに莫大な数の人々が学び、考え、問題に取り組み、そしてその貢献が世界中のどこからでもアクセス可能になっていきます。

このプロセスは、雇用者と被雇用者の関係性を新しく定義するとともに、両者に柔軟性の向上をもたらします。雇用する側は、目の前の業務に合わせて、これまでより大きな人材プールにアクセスでき、働く側は、主導権をもって自らのスキルと才能を生かせるようになります。フリーランスで（顧問として）働くことを選ぶ人の数が増えたり、職業の変更がより頻繁に行われたりといったことが予想されます。ハイテク産業においては、短期間での職業移動は一般的です。テンポの速い環境の中で、才能ある労働者の学習・成長・発展のスピードは増していきます。産業の高速化とともに、仕事環境も高速化していくのです。





## 結論

大きな変革が「Future of Work」を形成しはじめています。これは、物理世界とデジタル世界の連動、新しい設計技術と生産技術、そして生産プロセスにおける人間の役割の激変によって引き起こされています。こうした変化の大半は以前から進行していたものですが、ここへきてスピードと規模が増しており、産業界の様相を急速に変化させる方向へと進んでいます。

インダストリアル・インターネットは、ビッグデータの力を利用することにより、予測・応答機能を持ち、さらに機械同士や対人間とのシームレスな通信ができる次世代型のプリリアントな機械類を作り出しています。3D プリンティングなどのアドバンスト・マニファクチャリング技術は、新しい製品を生み出すだけでなく、設計、プロトタイプング、生産、そしてカスタマーエクスペリエンスの間をつなぐ高速なフィードバックループの構築を実現しています。そして、顧客、流通業者、サプライヤーから成るエコシステムと個々の工場とを結びつける供給・流通網の再編成を促しています。

こうしたすべてのことによって、生産プロセス全体が突発的な事態にリアルタイムかつ自動的に対応できるようになり、生産システムレベルで「予想外のダウンタイムのゼロ化」が確保されます。こうした変化は、さらに、マイクロ・ファクトリーへの依存度上昇など、分散生産への移行を加速させることにつながっていきます。

技術進歩により、創造性および起業家精神といった、人間が機械よりも明らかな優位性を持つ分野へと労働人口が向かう傾向が高まると予想されています。グローバルブレイク（デジタル通信網を通じて1つになった世界中の人々の集団的知性）は、さらに巨大で強力なものになっていくと考えられます。それは、これからさらに何千万人という人々が教育とインターネットへのアクセスを手に入れ、この世界規模の知の蓄

積を利用し、かつ、それに貢献できるようになるためです。

この変革がその潜在能力を最大限に発揮するには、まだ時間がかかります。その実現のためには、新たな技術に投資したり、組織や経営手法を適応させたりすることが必要になります。また、強固なサイバーセキュリティを実現するアプローチによって、機密情報と知的財産を守り、サイバー攻撃から重要インフラを保護することも求められます。さらに、教育システムについても、この急速に変化する経済に対応できるだけのスキルを学生たちに身に付けさせるようなものに発展させなければなりません。労働市場における従来手法の崩壊による衝撃を和らげるための継続した教育および再訓練も必要になります。

「Future of Work」には、時間とお金がかかります。しかし、その一方で、生産性向上と経済活動を新たにもたらしてくれます。今後のレポートでは、この革命的な変革のダイナミクスと影響について、より詳細に探っていく予定です。「Future of Work」は、企業と国の両方の競合環境を一新し、人々の働き方と暮らし方を良い方向へと根本から変革するものです。