IOT, インダストリ 4.0 時代に 精密工学は何をすべきか*

What Should the Precision Engineering Do in the Times of IOT and Industrie 4.0?

清水伸二**
Shinji SHIMIZU

Key words

IOT, IIOT, Industrie 4.0, precision engineering, monozukuri, mass customization, visualization, connect, machine tool, smart factory

1. はじめに

身の回りのあらゆるものがインターネットにつながる IOT (Internet of Things) は、さまざまな分野で活用されるようになってきている。特に、自動車分野、交通機関分野、医療分野での発展は、身近に感じるところである。これにより、自動運転技術が促進されたり、自分の乗車したい交通機関の運行状況がリアルタイムで把握できたり、健康状態の記録・管理、医師との共有なども容易になってきている。この流れは、“ものづくり”現場にも及び、その大変革を起こすべく、産業分野を対象とした IOT、つまり IIOT (Industrial Internet of Things) が世界レベルで推進されている。特にドイツでは、これを中核としてのものづくりの大変革を目指す、インダストリ 4.0 (第4次産業革命) という国家レベルでのプロジェクトが進められている。しかしながら、その現状は、“もの”と“もの”をつなぐためのネットワークの標準化やセキュリティ、信頼性の高い通信インフラなどに偏る傾向があり、“つながるもの”や生産システムそのものの在り方についての取り組みが不十分な状況となっているように感じる。

そこで、本稿では、IIOT、特にインダストリ 4.0 の本来の趣旨などを整理し、どのような課題があり、それらの解決のために精密工学がどのような貢献を果たすべきかについて考えてみたい。

2. インダストリ 4.0 が目指すもの

インダストリ 4.0 でドイツが目指しているのは、高品位製品の量産を得意とする日米に対抗するため、個の量産 (マスカスタマイゼーション：一個流し生産) を、これまでの大量生産と同等のコストと能率で実現し、自国の人件費の高さをカバーすることである。そして、単なる高能率化や低コスト化だけではなく、これを通して新たな価値 (新たなビジネスモデルや市場を一変させるような製品・

サービスの創出) を産み出すことも狙っている。この目標を達成するためには、IIOT を駆使した、つながる機械、つながる工場、考える工場 (スマート工場)、つながる製品などがキーワードになっており、すべてのものづくりプロセスの見える化・最適化・自律化が必要となっている。

これらを実現するためにドイツが描いているスマートファクトリーのイメージをまとめてみると、図 1 のようになる。企業経営プロセスを包括的に管理し、最適化する ERP (Enterprise Resources Planning：統合基幹業務システム) により、製品の企画構想・開発からアフターサービス、廃棄までの製品開発プロセスを包括的に管理する PLM (Product Lifecycle Management：プロダクトライフサイクルマネジメント) と製造現場の各プロセスを包括的に管理し、最適化する MES (Manufacturing Execution System：製造実行システム) を有機的にリンクさせ、経営資源の最適化を図ることを目指している。このためには、企業活動プロセス、製品開発プロセス、製造プロセスの各プロセスをデジタル化することにより、「見える化」する必要がある。製造現場 (工場) の見える化のためには、同図に示すような各種の基本構成要素が必要となる。例えば、最も下層では、工作機械の制御やその稼働状態の見える化のための多くのセンサや FA (Factory Automation) 機器が存在している。それらを PLC (Programmable Logic Controller) や工作機械の CNC (Computerized Numerically Controlled) 装置などの制御装置が、そして、その上層では、SCADA (Supervisory Control And DATA Acquisition：生産制御監視システム) などが製造プロセスの監視・制御を行っている。これらの監視情報を基にして MES が製造プロセスのアウトプットを最適化することになる。このような仕組みづくりの要素として、各種レベルのネットワークと業務パッケージが開発されている。

このように、開発、製造、企業経営の各プロセスに見える化し、有機的につなぐことにより、いかに第4次産業革命を実現するかが課題となっている。

しかしながら、前述のように、現状はネットワークを中

*原稿受付 平成 28 年 10 月 30 日
**MAMTEC 代表/上智大学名誉教授

図1 ドイツが進めるスマートファクトリのイメージ

心とした標準化、工場全体の稼働状態の見える化などの議論が先行し、センサなどを有効に活用して、加工プロセスや加工を行う工作機械の稼働状態、そのほか周辺機器の稼働状態の見える化による生産システムの知的管理などの議論が遅れているように思われる。そこで、以下では本来のより実践的なものづくりシステムの最適化に向けて、精密工学の果たすべき役割について考えてみたい。

3. これからの“ものづくり”

3.1 これからの“ものづくり”を駆動する影響因子

図2は、これからのものづくりを駆動すると思われる影響因子をまとめたものである。駆動因子としては、前述のような“ものづくり”の大変革への要求に加えて、社会問題と社会環境の変化が挙げられる。ものづくりの変革の在り方は、つくる物、つくり方、受発注仕様、販売法によ

り、大きく影響を受けるものと思われる。特に、つくる物が消費財、耐久消費財、生産財なのかにより、そのつくり方も変わってくる。すべての物が、インダストリ 4.0 が目指す、個の量産にふさわしい対象であるとは限らないことも念頭に置いて議論する必要がある。つくられる物により、個の量産よりは多種中少量生産、あるいは量産が適しているものも存在する。また、受発注の仕方にも、標準仕様、専用仕様、特殊仕様などの各種のもの、販売方法にも各種形態のものが存在している。しかしながら、インダストリ 4.0 の目指す目標達成から得られる成果は、他の方式のものづくりにも大いに役立つものと考えられる。

次に、社会問題への対応としては、持続可能な社会の実現のために、世界は、特に革新的な環境・省エネ化を目指して、交通システムやエネルギーシステムのインフラの見直しを進めている。

もの・製造・販売		【ものづくりの変革（インダストリ 4.0, IOT）】
つくる物		消費財、耐久消費財、生産財 → 個の量産化、スマート化、超省エネ化
つくり方		大量生産、多種少量生産、個の量産（モジュール化、インダストリ 4.0, IOT, IOE）、ファブレス（EMS）、超省エネ
受発注仕様		標準仕様（標準、キット、組合せ）、専用仕様（一括受発注方式（ターンキー）、分離（個別）発注（オーダーメイド）、特殊仕様
販売法	消費財	店舗販売（量販、専門）、訪問販売、通信販売（インターネット、TEL）
	耐久消費財	店舗（店頭）販売、訪問販売
	生産財	代理店、メーカー直販
【社会問題】		・現状社会の持続可能性 [環境・省エネ化（モーダルミックス、スマートグリッド）、再生エネルギー創出] ・人口爆発、・少子高齢化
【社会環境の変化】		・グローバル化 ・ICT化 ・IOT, IOE ・高度自動化、・高度柔軟・多様化

図2 これからの“ものづくり”への影響因子

表1 工作機械の貢献が期待される主な産業

社会問題への対応		期待される産業	備 考
持続可能な社会の実現 (環境省エネ, 再生エネルギー創出)	交通システム	自動車産業	ハイブリッド, 燃料電池, 電気
		鉄道産業	高速列車とその鉄道網
		航空機産業	リージョナルジェット, 燃費
		造船産業	燃費, 高速化
		建設・土木機械産業	GPS の活用
	エネルギーシステム	荷さばき・荷役設備 & 機器産業	フォークリフト, クレーンなど
		エネルギー産業	風力, 太陽光, 燃料電池, バイオマス
		原子力産業	放射性廃棄物, 安全性
	グローバル化	情報・通信機器産業	ICT, IOT
人口爆発と少子・高齢化	医療関連産業		医療機器, インプラント部品
	農業・食品機械産業		農業の企業化, 食品機械の高度自動化
	介護・福祉機器産業		ロボットの活用
	エネルギー産業		風力, 太陽光, 燃料電池, バイオマス

交通手段としては、自動車、バス、列車、航空機、船舶などが使われているが、環境・省エネの観点からは、各システムについて、人1人を1キロメートル運ぶのに排出するCO₂量が注目されている。その排出量は、鉄道が最も少なく、バスは鉄道の約3倍、飛行機は約6倍、自家用車は約10倍であることから、鉄道が注目を浴びており、世界で高速鉄道網の整備が進められていることは周知のとおりである。しかしながら、各交通手段には、陸は走っても海は走れないなど、それぞれの特性があり、すべての人と物の移動を鉄道のみで実現することはできない。そこで、これら交通手段をうまく組み合わせて、総体的にCO₂排出量を少なくするような交通インフラを構築する必要がある。これを実現するために、各交通手段のCO₂排出量を削減するとともに、それらの特性を生かして各交通手段を効率的に組み合わせ、運行状況を見える化するとともに、人と物の流れをスムーズに連結するための革新的なターミナル（駅、港、空港、駐車場）の構築が進められている。このように、それぞれの特性を生かして組み合わせることにより各種交通手段を最適配分することを“モーダルミックス”と呼んでいる。

エネルギーシステムとしては、これまで使われてきた火力、水力、原子力発電のような集中形の大規模発電システムに加えて、太陽光発電、風力発電、燃料電池発電、バイオマス発電のような分散形の比較的小規模な発電システムが注目されている。火力発電については、将来枯渇する燃料を使用していることとCO₂排出の問題があり、また、原子力発電については、安全性と放射性廃棄物の問題があり、これらに代わる持続可能な、クリーンでかつ安全なエネルギーの創出が望まれている。これらに応えられるエネルギー源として、太陽光、風力、燃料電池、バイオマスなどが

期待されているというわけだ。

以上のような分散形の小規模発電システムと集中形の大規模発電システムを組み合わせ、必要なエネルギーを必要とときに必要なだけ、必要な場所に供給することにより、効率的にエネルギーを使い、総体的にCO₂の排出量を削減しようとする仕組みづくりが必要となっている。この実現のために、これまで一方向の電力供給であったものを、双方向として、一般家庭などの需要側も給電側に参加できるようにするとともに、双方の電力利用状況を見える化するシステムの構築が進められている。これにより、発電できるときに発電し、余剰のエネルギーは蓄電しておき、必要とときに必要な場所に給電できる送電網が実現できることになる。このような送電網システムを“スマートグリッド”と呼んでおり、これまで不安定とされてきた分散形発電システムもより安定した効率的な電力供給システムにすることが可能になる。

以上のような持続可能な社会実現のためにも、共通的にIOTが必要になることが理解できるであろう。

もう一つの問題としては、地球規模での人口爆発と少子高齢化が挙げられている。現在約70億人の地球人口が、2050年には100億人を超えるといわれている。これによる、食料、水、エネルギー、住宅、雇用の不足などが懸念されている。また逆に、日本をはじめとして、多くの国々で、少子・高齢化が課題となっている。これにともない、多くの国で、医療、福祉費用の増大、労働力不足などへの対応が迫られている。

一方、社会環境もめまぐるしく変化し、特にグローバル化とともに、ICT (Information Communication Technology) 化、IOT化が進み、前述のように、日常生活においてもあらゆるものがインターネットを通じてつながるようになってきており、それらを活用した各種製品の高度自動化、高度柔軟化・多様化が望まれている。

以上のような社会問題や社会環境の変化に対応するために貢献が期待される産業をまとめてみると、表1のようになる。これからのものづくりは、これら産業における各種ニーズの影響を大きく受けながら、それらの要求に効率的に応えるために、インダストリ 4.0 が目指しているようなものづくりの変革を進めていくことになる。

3.2 これからのものづくりシステム

図2で述べたように、これからのものづくりは、各種の要求により大変革がなされようとしているが、それに対応するための共通の対応策をまとめてみると図3のようになる。主な対応策としては、見える化、知能化、柔軟化、省エネ化の4つが挙げられる。いろいろなものがつながり、最適化されるためには、つながるもの自体が見える化されていることが重要となる。この見える化は、つながるものの状態が単に見えるだけではなく、その状態が正常なのかどうかを判断し、異常であればその状態をどのようにすべきなのかを考え、自律的に修正できる必要がある。つまり、つながるものの状態を検知し、そのデータを収集

図3 これからのものづくりを革新するための4つのポイント

表2 精密工学会が探求している学問領域と研究対象

対象領域	具体的な研究対象
設計・生産システム	ライフサイクルエンジニアリング, 製品・製造・形状モデリング, 設計論・設計支援, CAD/CAM/CAE, ラピッドプロトタイプング・機能形状創成, スマートエンジニアリング, 生産計画・管理, デジタルエンジニアリング
精密加工	切削加工・砥粒加工, プラナリゼーション・CMP, 放電・エネルギービーム加工, 射出成形加工, 表面処理・機能薄膜創製, マイクロ・ナノ加工
メカトロニクス	マイクロ/ナノシステム, ロボティクス, 精密・超精密位置決め, 工作機械の高速・高精度化, アクチュエータ, 機構・要素・機能材料
精密計測	画像応用計測, 光応用計測, 三次元測定, 粗さ・表面形状計測, 知的精密計測, 走査型/プローブ顕微鏡, インプロセス計測, マイクロ・ナノ計測
人・環境	人間工学, 福祉工学, 医用工学, 生体計測, エコマシニング技術, サービス工学, 技術・技能

し、整理・分析して、その状態を正しく判定できる必要がある。そのためには、高度な知能化を図り、自律的な判断を行えるシステムを構築することがポイントとなる。例えば、ものづくりの中核にある工作機械をはじめとする設備機械、生産システム、工場の高度な知能化が必要となる。また、特に個の量産を実現するためには、工作機械をはじめとした設備機械と生産システムを高度に柔軟なものにし、一個流しに対応できる必要がある。そして、高効率・高効率な生産を実現するためには、徹底的な省エネ化も重要な課題と言える。以上の4つの対応策は、個の量産だけでなく、多種中少量生産などにおいても有効に作用するものと思われる。

4. 精密工学は何をすべきか

4.1 精密工学の学問分野と社会における位置付け

まず、精密工学とはどのような学問分野であるのか、あらためて考えてみたい。ウィキペディア¹⁾では、「高精度な機械を実現するための知識や諸原則についての研究を行う工学の一分野である」と定義されている。精密工学会のホームページ²⁾には、「ものづくり」に関わるテーマを広範囲に探究する学会であるとし、設計・生産システム分野、精密加工分野、メカトロニクス分野、精密計測分野、

図4 精密工学の位置付け

図5 ものづくりに必要となるプロセスと主な学問

人・環境分野を対象学問分野としている」と述べられている。各分野では、表2に示すように、多様なカテゴリがその研究対象として挙げられている。図4は、このような精密工学の全学問分野における位置付けを示している。学問分野として、大きくは、自然を対象とする自然科学、人間を対象とする人文科学、社会を対象とする社会科学、そして、人工物を対象とする人工科学に分けられている。工学は、当然のことながら人工科学に属し、周知のとおり機械工学、精密工学、電気工学、電子工学、化学工学、物理工学をはじめとして、数えきれないほどの工学が存在している。これらの中でも「精密工学」は、ものづくりに最も近い位置にあり、他の工学をはじめとして、工学以外の人工科学の学問分野にも深く関連しており、ものづくり科学の中核として大きな貢献をしている。そして、人工物は、自然にも、人間にも、社会にも大きな影響を及ぼすとともに、それらからも大きな影響を受けることから、人工科学以外の科学分野との関係もかなり深いといえる。

4.2 ものづくりのプロセスと精密工学の役割

図5は、ある製品が、企画構想から市場に届けられるまでの「ものづくり」のプロセス (前述のPLMの各プロセス) とその流れを示している。さらに、左側には、表2で示したものに必要となる精密工学分野の対象領域をカバーする主な学問分野も含めて、新しく必要となっ

きた学問分野（下線を付したもの）を示している。図中の各プロセスを結ぶ矢印は、お互いが常に情報交換しながら見える化状態につながっていることを示している。つまりは、製品の企画・構想段階からすべてのプロセスの状態がお互いに見える化され、常に最適化されながら、ものづくりの各プロセスが同時並行で進められる必要がある。これは、すでに「コンカレントエンジニアリング」と呼ばれているものに相当しているが、そのコンセプトを改めて明確に図示したものである。日本的に言えば、すべてのプロセス間で常に擦り合わせが行われながら、ものづくりを同時並行で進めることがキーポイントであることを示している。これが、まさしく理想的な IIOT の実現ということになる。

これらの各プロセスを見れば、表 2 で示した精密工学分野における研究対象の成果は、各プロセスでのものづくりの高度化のために大いに貢献するものであることは、容易に想像できる。これら精密工学における研究を推進することにより、各プロセスの見える化、知能化、柔軟化、省エネ化を実現していく必要があるといえる。

企画・構想や研究開発プロセスでは、創造工学をさらに駆使する必要がある。例えば、QFD（Quality Function Deployment：品質機能展開）手法、田口メソッド、TRIZ（Theory of Inventive Solution：発明問題解決の理論）、DSM（Design Structure Matrix：設計構造マトリックス）、FMEA（Failure Mode and Effect Analysis：故障モードと影響解析）、FTA（Fault Tree Analysis：フォルトツリー解析）など、さまざまな設計技法や設計支援ツールが開発されている³⁾が、実際の現場に深く浸透しているとは言い難い。この要因を明らかにして、これらの成果が、特に中小企業での開発設計においても、活用されるような仕組みづくりも重要といえる。

個別の顧客の要求に応えるためには、「個の製品設計」手法の確立が必要である。これに加えて、個別に設計された製品を製作する機械には、「個の量産」に応えるための、より柔軟な加工機能が要求されている。これに応えるべく、工作機械の柔軟化も進んでおり、5 軸のターニングセンタ（TC）とマシニングセンタ（MC）機能を有し、同一機械上で両加工機能を切り替えたり、また、それらによる同時加工も行ったりなど、個の量産にも応えようとする機械も登場し始めている⁴⁾。このような工作機械の設計には、モジュラ設計技術のさらなる高度化が必要とされている。また、設計段階からサービスを製品に組み込む手法なども必要となっている。これが、「つながる製品」の実現にも貢献するものと思われる。

生産計画段階では、製造ラインの構築に当たり、生産システムのシミュレーション技術の高度化が必要となっている。3D で表現されたリアルな工場レイアウトで、ダミーの作業者の動きも確認できるなど、これまでよりさらに実践的で、正確なシミュレーションを行うための技術開発が必要である。

製造現場にあっては、生産設備の稼働状態、加工プロセスの見える化が強く求められている。工作機械構造の熱変位の状態監視とその補正、幾何偏差の測定と補正などについては既に行われている。これらに加えて工作機械の主軸受、案内などの振動、温度、潤滑状態、寿命などの監視と自律的な対応が求められており、その取り組みも始まっている⁴⁾。加工プロセスにあっては、加工点の温度上昇にともなう工具・工作物の熱膨張予測と補正、びびり振動の検知と回避、アンバランス振動の検知と自動補正、工具摩耗の検出と寿命の判定など、多くの見える化、知能化が要求されているが、まだ十分な対応ができていない。

さらには、ロボットの導入により、生産システムの柔軟性がより高まり、個の量産、多種少量化に対して縦横に対応できるようになってきた。ロボットは、単なる工作物の着脱作業だけではなく、取付具やユニットの組み立て、クーラントノズルや工具の交換、各種測定などの作業を行うとともに、本格的なエンドミル加工や研磨加工にも適用されるようになってきた。さらには、安全性も高まり、人間との協働作業も可能となっている⁴⁾。

生産設備の省エネ化については、既にかんがりの進展を見せている。これまでは、電力消費量の削減が重点的に行われ、かなりの成果を挙げている。最近の工作機械においては、切りくずやクーラントのリサイクル技術の開発も進められているが、まだ十分とはいえない。今後は、構造の軽量・コンパクト化による工作機械稼働時の革新的な省エネが望まれており、CFRP の工作機械構造への適用技術の開発も進められている。

評価プロセスでは、製品のオンマシン測定、評価技術とその加工プロセスへのフィードバックが行えるようになってきている。インプロセス測定とポストプロセス測定技術の高度化により、個の量産に適した品質管理のさらなる高度化が望まれている。

販売・サービスでは、つながる製品を実現すべく、ユーザに届けられた製品の稼働状態の監視とメンテナンスサービスなどを通して、顧客側の稼働状態のデータを収集・分析し、次期開発機に反映させる仕組みの確立などが急務となっている。

以上のように精密工学が、これからのものづくりに果たすべき役割は極めて大きいといえる。

5. ま と め

以上、インダストリ 4.0 を中心に、これからの“ものづくり”について概観し、あらためて精密工学分野の位置付けとともに、これからの“ものづくり”において精密工学が果たすべき役割について考えてみた。現状は、ネットワークの標準化など、つなぐことに重点が置かれているが、今後はハードウェアである工作機械などの“つながれるもの”の見える化、知能化など、その高度化を進め、つながれるものから見た、より良いネットワークや生産システムの在り方などについても考えていく必要がある。そのため

には、情報・産業用ネットワークの高度化を進める関係者と、ものづくりの現場に近い精密工学分野の関係者との密な情報交換により、最適で、バランスのとれた生産システムを構築して、真の第4次産業革命を実現していく必要がある。

本稿が、これからのものづくりシステムを考える上で、多少なりともご参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) ウィキペディア：<https://ja.wikipedia.org/wiki/精密工学>
- 2) 精密工学会：ホームページ，http://www.jspe.or.jp/about_us/outline/jspe/

- 3) 精密工学会：第376回講習会テキスト「基礎講座 設計技法入門—今日から使える設計技法—」，(2015)。

- 4) 清水伸二：EMO2015における工作機械の最新技術動向，工作機械，**221** (2016) 16.

清水伸二

1978年(株)大隈鐵工所(現オークマ(株))退職，1981年 上智大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了，工学博士，2014年上智大学名誉教授，専門分野：工作機械工学(結合部，性能評価)，精密加工学，ソーリング。