

特集号
招待論文

積層造形と切削加工を融合したハイブリッド複合加工機

山崎 拓^{†1}

^{†1} ヤマザキマザック (株)

工作機械は、高速化・高精度・複合化・高機能化とさまざまな進化を遂げてきたが、さらに一段上の生産性の向上を求められる場合、物を削って形にしていく加工方法が主流のモノづくりでは限界が見えてきた。工作機械の新たな可能性を開拓すべく、円筒形状、平面、穴、および自由曲面などさまざまな加工が可能な切削型複合加工機に積層造形機能を融合させたハイブリッド複合加工機を開発した。本稿では、ハイブリッド複合加工機の特徴を加工アプリケーション事例とともに紹介し、次世代のモノづくりについての可能性と課題を示す。

1. はじめに

機械加工方法は、大きく3種類に分類することができる。切削、研削、研磨、レーザ切断などに代表される「除去加工」、鋳造、鍛造、金属プレス、射出成形に代表される「成形加工」、そして第3の加工法として近年、注目を集めているのが、3Dプリンタ、積層造形、溶接、接合などに代表される「付加工」(Additive Manufacturing: 以下、AM)である。AMの長所として、除去加工や成形加工では不可能であった複雑な形状の製品が作成可能であり、効率的な小ロット生産、素材準備を含めたリードタイムの短縮を図ることができる点が挙げられる。しかしながら、機械装置が高価であるにもかかわらず、造形物の精度や生産性、使い勝手やサポート材除去などの運用面において課題が多く、試作や治工具の製作などでの活用が主流である。近年、米国をはじめドイツ、中国、そして日本において政府主導で高水準なAM技術の開発を目指した研究開発が行われている。

一方、切削などの従来の加工法とAMを組み合わせ、お互いの長所を活かすハイブリッド加工に関する研究も盛んに行われて[1],[2]。図1に示すとおり、高精度が要

求される工業製品には、AMによる造形精度は不十分であるため、後工程として切削加工で精度を確保する必要がある。ハイブリッド加工とは、1台の機械で、最終製品に近い形状(ニアネットシェイプ)をAM技術により作り上げ、切削加工で高精度な仕上げを行い、生産リードタイムの短縮を図る概念である。それにより、効率的な小ロット生産、加工時間の短縮、素材準備のリードタイム短縮、仕掛かり在庫の削減が期待できる。しかしながら、成熟した切削加工技術に比べ、金属用AM技術は実用化に向けての課題が多く、ハイブリッド加工の概念を持った加工機の用途は限定的である。また、それらの多くは、平面への積層造形に必要な軸駆動のみを有するプラットフォームによりハイブリッド加工を実現させているため、各層の仕上げ切削が主な目的である。一方、母材の成形や造形物への追加工、曲面や円筒形状への造形やコーティング、空中に張り出した形状のサポート材なしの造形などに旋削や5軸制御切削加工を応用することで、さらに複雑な形状の造形・加工を効率よく行える可能性がある。そこで、次世代のモノづくりを提案すべく、当社が従来から提唱してきた「Done-in-One」(ダーン・イン・ワン: 工程集約) コンセプトをさらに深化させたハイブリッド複合加工機「INTEGREX i-400 AM」を開発した。

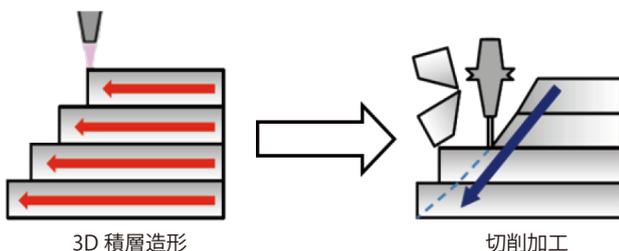


図1 ハイブリッド加工の概念

2. 金属積層造形方式の分類

2.1 金属3D積層造形の方式

3Dプリンタとして注目される積層造形は、技術方式(熱源、造形エリア雰囲気)の種類や金属材料の形状(粉

末、ワイヤ、シートなど)などの組合せにより分類でき、その数は10種類以上あるといわれている。しかし、現時点で切削加工機と融合可能な金属積層造形技術は、以下の2つの大分類に集約できるといえる。

(1) 粉末床溶融結合 (Powder Bed Fusion)

粉末床溶融結合とは、窒素やアルゴンに代表される不活性ガスを充填させた造形エリア (チャンバ) 内に造形対象となる粉末を送り、リコータローラを往復させて平らに敷きならし、その上面に対してレーザーまたは電子ビームなどの熱エネルギーによって選択的に照射し、焼結あるいは溶融結合させる方法である。同様の工程を繰り返すことにより断面形状を積層して、目的の立体構造物を造形する。図2のように、特に熱源がレーザー、材料が金属粉末の場合には、選択的レーザー溶融法 (Selective Laser Melting: 以下, SLM) と呼ばれている [3]。

(2) 指向性エネルギー堆積 (Directed Energy Deposition)

指向性エネルギー堆積とは、レーザーなどの熱エネルギーを母材に照射し、溶融池を生成させると同時に、キャリアガスにより金属粉末を噴射させ、材料 (母材と粉末) を選択的に溶融・結合させることにより、

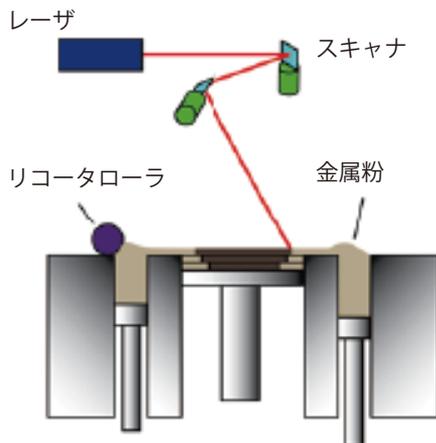


図2 選択的レーザー溶融法 (Selective Laser Melting)

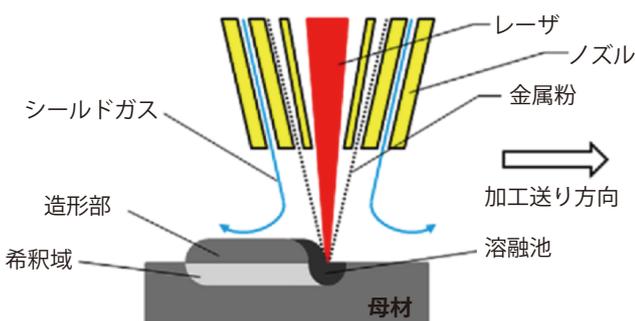


図3 金属レーザー溶融接合 (Laser Metal Deposition)

目的の形状を積層造形する方法である [4]。図3のように、特に熱源がレーザー、材料が金属粉末で、レーザーを照射するヘッドのノズルより粉末とシールドガスを同時に噴射する方式は、金属レーザー溶融接合 (Laser Metal Deposition: 以下, LMD) と呼ばれている。基本的に金属皮膜や表面改質を行うために使用されているレーザー肉盛り (クラディング) と同じ原理であるが、肉盛り方向を一方向にしか制御できなかったレーザークラディングに対し、より立体的かつ複雑な形状を造形させるために発展したのが、LMDといえる。

当社が切削型複合加工機に AM 技術を融合させるにあたり採用した技術は、LMD である。次節で LMD を採用した理由を説明する。

2.2 各造形方法の特徴

積層造形法は3次元の形状データを積層方向にスライスして分割し、上記に代表されるような方式で各層の積層を繰り返して造形を行う。よって、スライス分割が細かいほど、積層方向の形状の分解能が高いことを意味し、造形精度が向上する。一方で、分割が細かいと1層分の高さが低いため積層回数が増加し、造形速度は遅くなる。図4に、各技術における積層高さと造形速度の関係を示す。横軸は1層ごとの積層高さ (mm) を表しており、積層高さが低ければ低いほど造形物の精度は高くなることを意味している。縦軸は造形速度を表している。LMDは、SLMと比較すると造形精度は大きく劣るものの、金属粉末や母材の材質次第で10倍以上の造形速度が得られるという利点があることが分かる。

造形可能な形状にも大きな違いがある。図5はSLMによる造形物の一例である。このように、SLMを用いると、従来の鋳造法や切削加工法では困難であった複雑形状の構造物や多孔質体などが造形可能である。一方、LMDは、図6に示すよう母材の上におおまかな形状を

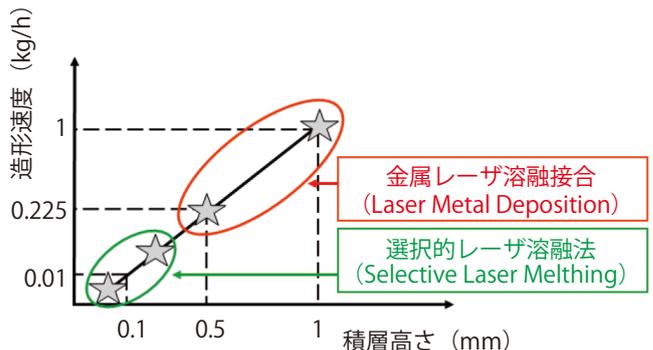


図4 積層高さと造形速度の比較



図5 SLMによる造形物の例 Bathsheba Sculpture LLC. [5]



図6 LMDによる造形物の例

肉盛り溶接することが基本原理であり、一般的には複雑形状の造形には不向きである。

しかしながら、SLMの造形領域はチャンバのサイズにより決まり、□250mm程度のものが一般的であるが、LMDはヘッドを広い範囲で稼働させることが可能であり、大型部品の製造や部分的な修復などに活用できる [6]。

SLMとLMDは、造形精度と造形速度、そして造形可能サイズや形状が大きく異なるため、造形対象物のアプリケーションに応じて適切な技術方式の選択が必要である。

2.3 LMDの特徴

高機能な材料は金属組織や成分が調整されており、一定の熱を加えてしまうとこの機能が失われる場合がある。また、異種金属の溶融接合では接合部に金属間化合物というもろい層ができるため、好ましくない。LMDでは粉末状の材料を溶融する熱源としてレーザーを用いており、一般的な溶接に用いられるアーク放電などの熱源と比較して入熱の制御が容易である。そのため、熱影響や金属間化合物の生成をコントロールし、健全な肉盛りが可能である。つまり、造形物と母材間に材料の変質が少なく、素材特性を最大限活かした接合が可能となる。また、異種金属の接合が可能であるというのが大きな特徴である。図7はLMDによる積層造形物断面のマイクロ組

成である。母材の材質は、海底油田でケーブルやホースの結束・固定などにも使われるステンレス合金 SUS316 である。積層造形部は、耐熱性、耐腐食性、耐酸化性、耐クリープ性などの高温特性に優れているニッケル基合金インコネル718材である。レーザー出力、材料供給量、送り速度などさまざまなプロセスパラメータを最適な条件で組合せを行えば、このように組織欠陥なく、高密度かつ強固に接合することが可能となる。それゆえ、従来の部品設計や製造工程を根本的に見直すことを可能にする技術として注目されている。

3. INTEGREX i-400 AM の紹介

図8は今回開発したハイブリッド複合加工機「INTEGREX i-400 AM」である。切削加工機のプラットフォームは、

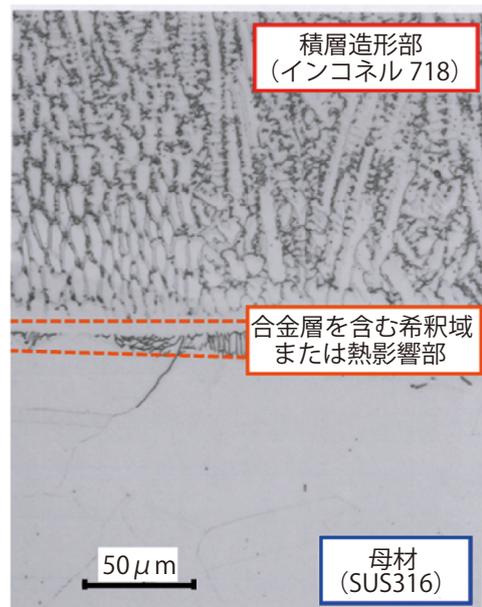


図7 LMDによる積層造形物断面のマイクロ組成



図8 INTEGREX i-400 AM

切削工具を取り付けるミーリング主軸に X, Y, Z の直線 3 軸、そして Y 軸周りの B 軸旋回と、旋削主軸周りの C 軸の 5 軸構造の複合加工機である。また、高い生産性を実現するために、第 2 旋削主軸も装備している。

AM 機能を複合加工機に融合させるにあたり、**図 9** に示す造形用 (AM) ヘッドを 2 種類開発した。1 つはレーザー光軸と同軸上に金属粉末を供給する一般的な同軸レーザークラディングタイプで、金属粉末の供給量とレーザー出力を制限し、造形寸法誤差の小さい高精度な造形を目的とした高精度造形用ヘッドである。もう 1 つは、ヘッド内の特殊なレンズにより、大きいレーザースポット径を作り出し、高精度造形用ヘッドよりも高出力・高効率な造形を可能とした高速造形用ヘッドである。複数のヘッドを搭載することにより、造形形状や加工条件、金属粉末の使い分けなどを可能としている。また、これらのヘッドは主軸とのインターフェースに従来の切削工具と共通のものを採用しており、切削工具同様、通常の工具マガジン内に収納可能である。

LMD による造形を行う際は、ヘッドは自動工具交換 (ATC) 機能にて、切削工具同様にミーリング主軸に装着され、レーザーや金属粉末、不活性ガスの供給口を集合させたユニットであるマニホールドとヘッドが自動的に結合される。その状態を **図 10** に示す。なお、ヘッドとマニホールド内へのコンタミネーション対策として装着されているカバー類は、自動的に取り外される。そして、マニホールドからヘッドにレーザー、金属粉末、不活性ガ



図 9 自動交換可能な造形用 (AM) ヘッド

スが供給され、これらを母材に対して同時に噴射することで、LMD を行う仕組みである。金属粉末が静止している SLM と異なり LMD はヘッドから常に粉末材料を供給する必要があるため、その流れを安定化させる必要がある。粉末材料の配管経路を工夫することで、短時間で安定した流れを得られるように工夫した。

ファイバレーザを熱源として用いて金属粉末と母材を溶融するため、本機の開発には安全な設計を心がけている。たとえば、レーザー光の漏れがない外装カバー設計、ドアインタロックの強化、オペレータドアの窓に遮光ガラスを採用している。また、加工エリア内に浮遊する金属粉末が人体へ悪影響を及ぼさぬよう、機内には集塵機も設置している。さらに、人間工学に基づき、加工エリア内の視認性向上のために機内照明を追加している。

4. 応用事例

切削型複合加工機と LMD 技術を融合させたハイブリッド複合加工機の用途として、部品点数の多いワークを一体化したニアネットシェイプの造形・切削や、高付加価値ワークへのコーティングやリペアなどが期待される。これらの用途を考慮し、オイル・エネルギー産業向けを想定したアプリケーション事例の 1 つを以下に示す。円筒シャフトワーク母材の材質は SUS316 材、積層造形部に使用する金属粉末はインコネル 718 材であり、粒径は 50 ~ 100 μm 程度のものを使用している。高機能な異種金属を接合することにより、製品の高付加価値化と生産性向上、生産コスト削減を狙いとしたアプリケーションである。

図 11 は、アプリケーションの各工程イメージである。まず、母材を旋削加工する。そして、高速造形用ヘッド

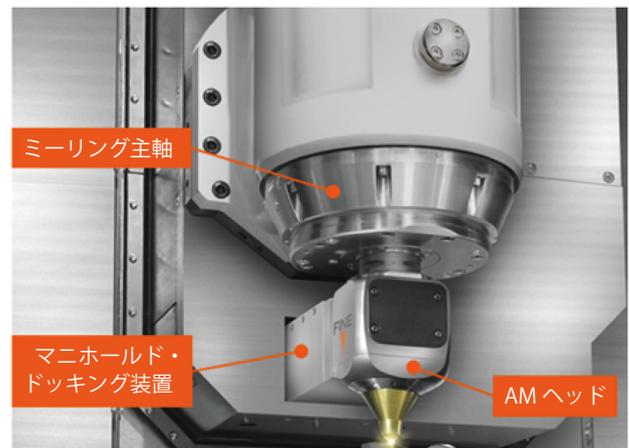


図 10 造形用 (AM) ヘッドとマニホールド

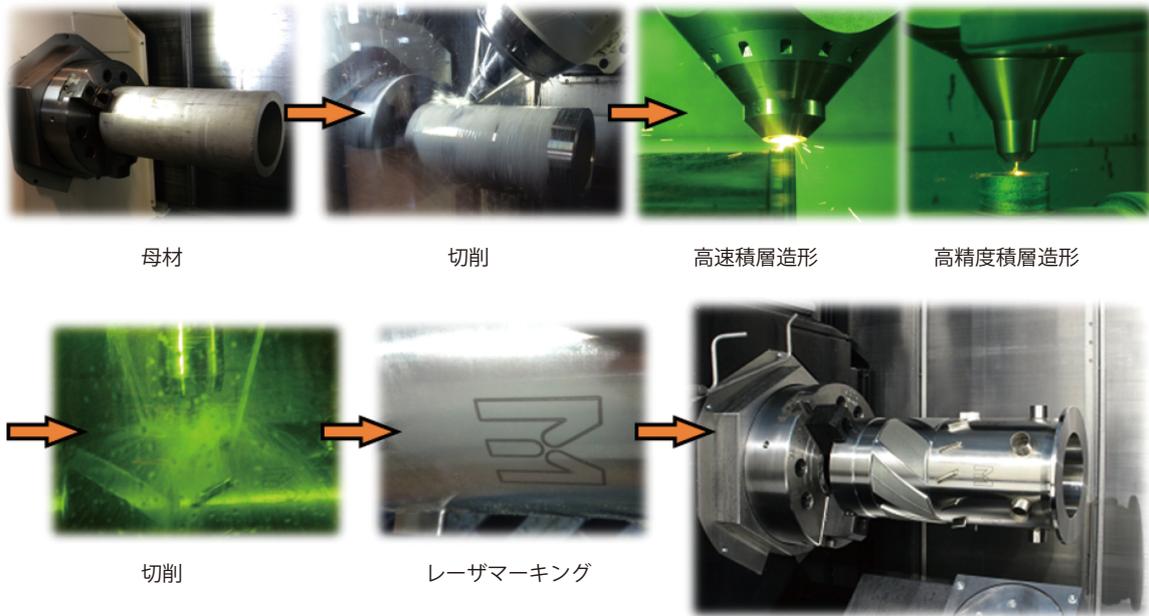


図 11 ハイブリッド加工アプリケーション工程の例

や高精度造形用ヘッドにより積層造形やマーキングを行う。最後に、積層造形部を切削により仕上げて完成である。図 12 に各造形部の特徴を示す。コーティング部は、油田掘削用スタビライザへのコーティングをイメージしたデモンストレーションである。フィンやフランジはニアネットシェイプをイメージしている。いずれも高速造形用ヘッドを用い、1層あたり幅が約3mm、高さが約1.5mmの肉盛りビードで高速積層造形をしている。たとえば、幅7mm、高さ12mmのフィン1枚の造形サイクルタイムは4分程度である。薄肉ボスのニアネットシェイプの高精度造形と当社のロゴのレーザーマーキングには、高精度造形用ヘッドを用いている。1層あたりの肉盛りビードの幅は約1mm、高さは約0.5mmである。レーザーマーキングにおいては、金属粉末を吐出せず、レーザーのみを母材に照射することにより刻印している。バーコードシリアルナンバーを印字するなど、有効活用することにより、トレーサビリティを確保できる。

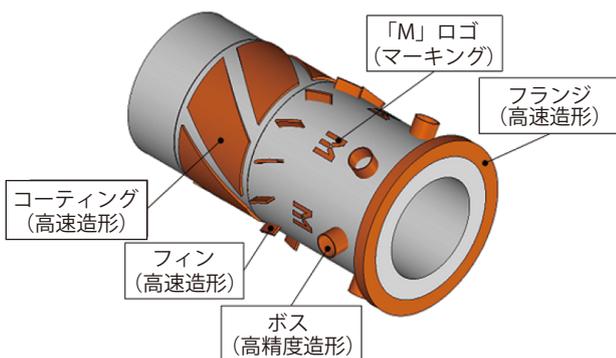


図 12 各造形部の特徴

それぞれの造形部に最適なヘッドを選択する必要があるが、積層条件やパスの最適化も重要なポイントである。フィンやボスなどの薄肉かつ背高の造形部は、積層するにつれて上部の形状が崩れることがある。各層で積層パスの工夫や、中仕上切削を取り入れることによって形状が崩れることなく積層することが可能になった。積層パスの決定は切削と異なり、幾何学形状以外に入熱・放熱の影響も考慮する必要がある。今後 AM 技術用の CAM (Computer Aided Manufacturing) の発展も重要な課題である。

また、本アプリケーションと同様のプロセスパラメータを用いて JIS 規格に準じた試験片を作成し、インコネル 718 粉末による積層造形した部分のみと、インコネル 718 積層造形部と SUS316 母材との接合体に対して硬度や引張りなどの強度試験を行った。インコネル 718 による積層造形した試験片での強度試験では、インコネル 718 熱間圧延材と同等レベルの引張り強度が得られ、硬度は同等以上の結果を得ることができた。インコネル 718 と SUS316 による接合体による引張り強度試験では、インコネルよりも引張り強度が低いステンレス合金 SUS316 側で母材破断する結果を得ている。

接合境界面での断面マイクロ写真は図 7 に示したとおりであるが、積層造形部のみ断面マイクロ写真を図 13 に示す。図 13 (左) は積層送り方向に垂直な断面、図 13 (右) 2 は積層送り方向に平行な断面の写真であるが、ともに組織欠陥につながる巣や亀裂もなく、高密度な造形を行えていることが観察できる。

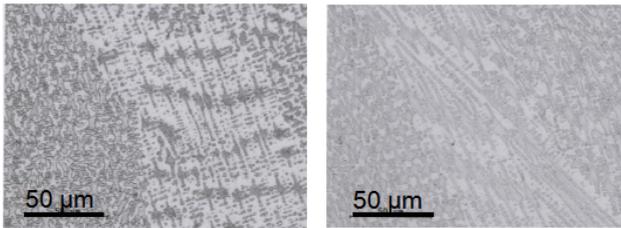


図 13 積層送り方向に垂直な断面 (左)
積層送り方向に平行な断面 (右)

5. おわりに

AM 技術の持つ問題を解決するため、切削型複合加工機に AM 技術の 1 つである LMD 技術の機能を融合させたハイブリッド複合加工機を開発した。この機械を使用することにより、大きな利点を見出せるアプリケーションがあることが分かった。今後、さまざまな基幹産業において、金型を使用しない試作部品の製造、素材単価もしくは付加価値の高い部品の製造、または再利用 (リペア) を中心に普及が進むと考える。しかしながら、確立された切削加工と異なり、LMD の実用例は少なく、工作機械の環境下での使いやすさや信頼性、また運用性などの点において、課題が多い発展途上の技術であるのが現状である。ハイブリッド複合加工機「INTEGREX i-400 AM」を国際工作機械見本市 JIMTOF 2014 に出展して以降、多くの顧客が強い関心を示されており、注目度の高さを実感している。今回開発した機械を市場に投入するため、まずは航空・エネルギー、医療などの特定の産業の顧客と二人三脚で本技術について学びながら、強度や品質要求を満たす造形を行うためのプロセスパラメータ

の研究や、さまざまな条件に対応した機械構造・アプリケーションの開発を進めている。今後、上記の研究開発により得られるノウハウをもとに、AM と切削加工両方に対応した CAD/CAM の開発も本技術の普及に必要なと考えられる。ハイブリッド複合加工機で工作機械の新たな可能性を開拓し、世界のモノづくりの発展に貢献できれば幸甚である。

参考文献

- 1) Karunakaran, K. et al.: Techno-economic Analysis of Hybrid Layered Manufacturing, International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications, Vol.4, pp.161-176 (2008).
- 2) Jacquelyn, K. S. et al.: Hybrid Manufacturing System Design and Development, Manufacturing System, pp.223-246, InTech (2012).
- 3) 新野俊樹: Additive Manufacturing 現状と可能性, 日本機械学会誌, Vol.118, No.1154, pp.12-17 (2015).
- 4) 京極秀樹: 金属粉末レーザー積層造形技術の進展, 溶接学会誌, Vol.83, p.250 (2014).
- 5) <https://www.bathsheba.com/> (2015 年 11 月 2 日現在)
- 6) 谷川大地 他: レーザクラディングにおけるビームプロファイルが皮膜特性に及ぼす影響, 溶接学会全国大会講演概要第 110 集 (2014).

山崎 拓 (非会員) Taku_Yamazaki@mazak.co.jp

ヤマザキマザック (株) 技術本部技術・商品企画室プロジェクトリーダー。2005 年名古屋工業大学工学部システムマネジメント工学科卒業。2006 年 University of Warwick 大学院 Warwick Manufacturing Group 修士課程修了。同年ヤマザキマザック (株) 入社。2011 年京都大学大学院工学研究科マイクロエンジニアリング専攻博士課程修了。博士 (工学)。ヤマザキマザック (株) 機械設計エンジニアを経て、2014 年より現職。

採録決定: 2015 年 11 月 2 日

編集担当: 浦本直彦 (日本アイ・ピー・エム (株))