

13. 生産加工・工作機械部門

13.1 製造技術を取り巻くこの 10 年の環境

13.1.1 経済的、社会的環境に対する製造技術の関心

図 1 は、この 10 年間の製造技術を取り巻く社会環境の変化とこれに関わる技術の概要である。2008 年のリーマンショック後、製造業における景気の悪化とともに生産にかかわる投資も減り、一時期は生産加工・工作機械技術を取りまく環境も低迷した。その後、景気の回復とともに、国内における製造業も復活し、現在に至っている。しかし、一方では 2011 年の東日本大震災等の天災があり、工場および設備の立て直し等も多かった。そのため、工場の立地や天災に対する工場および製造設備への配慮とともに、国内生産における工場の配置や製造分担のあり方を考える契機となった。また、海外での現地生産においては、例えば、タイの洪水による生産停止などがあり、天災に対応する部品の調達などの重要性をあらためて認識することになった。このように、この 10 年間では製造技術を取り巻く環境の予期せぬ事態に対し、事前の準備、発生時の柔軟な対応と迅速な回復に関する課題が挙げられてきた。

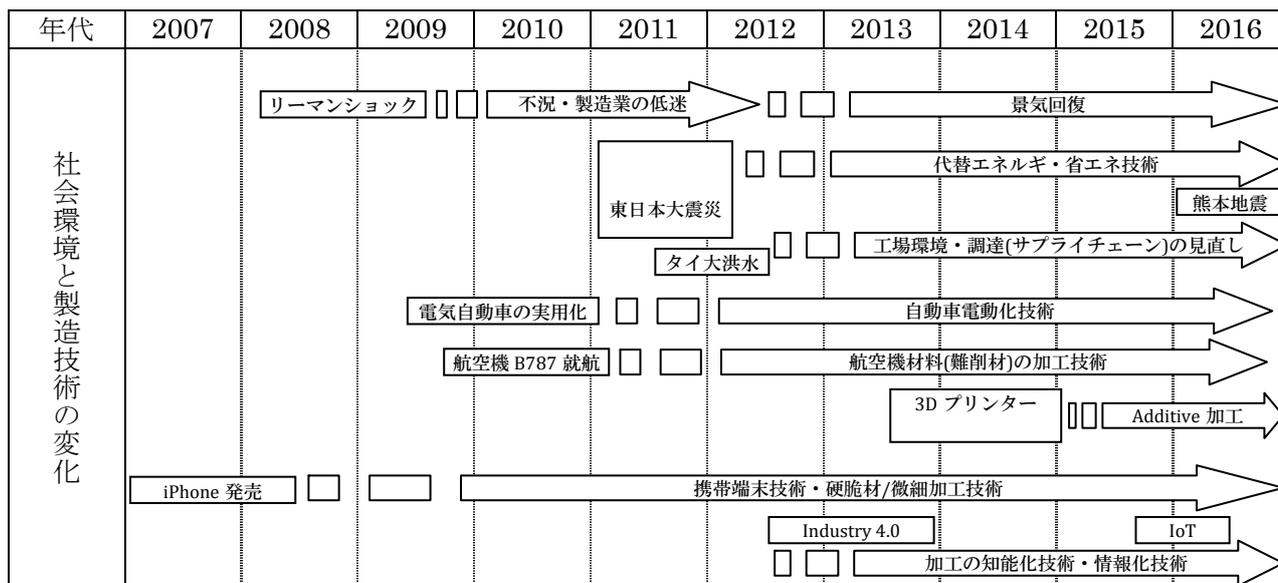


図 1 2007 年から 2016 年までの製造環境と技術の動向

一方、最近では Industry4.0 や IoT (Internet Of Things) に対する研究開発が注目されており、製造技術に対する情報技術の活用について、多くの取り組みが進みつつある。人工知能やエキスパートシステムは 1970 年頃に話題となったが、当時のコンピュータの性能が充分でなかったため、顕著な効果が見いだせなかった。しかし、現在の高度化されたコンピュータ技術、通信技術、センサー技術によって、再度、人工知能の活用が期待され、製造現場においてもその応用が試みられている。今後もこの技術に対する取り組みは精力的に進められ、製造技術に対する新たな展開が予想される。

13.1.2 各産業における製造技術の開発課題の変化

製造技術の適用分野としては、自動車、航空機、医療、エネルギー、情報産業等があり、それぞれの産業におけるニーズとともに、これに対応できる生産および工作機械技術の開発が進められている。

(1)自動車・自動車部品産業に対する製造技術の課題

自動車および自動車部品の生産において、効率の向上とコスト低減に対する要求は厳しく、従来の加工法にこだわらず新加工法に対する技術開発も進められている。また、電気自動車の商品化に伴い、この10年の自動車の生産現場では電動化への対応が迫られてきた。しかし、現在においてもガソリンエンジン車やハイブリッド車の数は多く、効率を向上させるための課題として、

- ・車体の軽量化
- ・低摩擦技術
- ・動力伝達技術

が挙げられており、これに対する生産技術開発が精力的に進められている。車体の軽量化に対しては、高張力鋼板の強度向上に伴う車体材料の薄肉化への取り組みと、炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) を用いた車体の樹脂化に関する研究開発が進められている。10年前に比べると車体材料における樹脂率が高くなっており、CFRPの加工とこれに対応できる工作機械技術の開発が増えている。

低摩擦技術としては、摩擦係数の小さい DLC 等の薄膜技術の開発と、表面に微細構造を加工して潤滑性を改善する微細加工技術が注目されている。特に近年の微細加工技術の発達により、表面加工に対する関心が高まっている。

動力伝達にかんしては、歯車設計の学術的な研究の歴史は長いものの、実際の自動車生産における歯車の加工では、工具摩耗による形状精度の劣化、加工時の振動等に起因する仕上げ面の悪化などが問題となり、これに対する技術開発のニーズが高い。また、従来の歯車加工では専用機が使用されてきたが、最近では設備投資や生産効率の観点から汎用工作機械での歯車加工に対して関心が高まっている。

(2)航空機産業に対する製造技術の課題

CFRPの適用比率を上げた旅客機 B787 型機の機体の製造を、ボーイング社が日本の重工メーカーに発注したことを契機に、国内においても航空機製造技術に対する関心が増えてきた。軽量化による燃費向上と機体の保全性の観点から CFRP を積極的に使用した機体の製造においては、CFRPの成形・加工技術に対するニーズが高くなっている。航空機部品の場合、現在のところ、そのほとんどは切削によって加工されているが、CFRP やアルミ合金とともにチタン合金の切削に対する技術開発が進められている。一方、航空機のエンジン部品としては、高温下で機械的強度を維持できる材料として、インコネルに代表されるニッケル基耐熱超合金が用いられている。最近では、セラミック基複合材料 (Ceramic Matrix Composites, CMC) も適用されており、今後も高温強度の高い材料開発とその加工が増加する傾向にある。

これらの CFRP、チタン合金、インコネルの切削では、工具寿命や仕上げ面に対する管理が難しく、難削材として位置づけられている。難削材の切削に対しては、次節のように工具技術と工作機械技術の両側面からさまざまな技術が開発されている。また、航空機の構造部材の穿孔は、組立工程においてハンドドリルで実施されるため、マシニングセンタで加工する場合よりも作業の制限が多くなる。そのため、安定した加工技術が求められている。

(3)医療産業に対する製造技術の課題

我が国の医療機器の市場規模 (国内売上額) は 2004 年以降増加し、2014 年は約 2.8 兆円になった。これに伴い医療産業に対する製造技術への期待も高まり、例えば以下のような展開がある。

- ・インプラント部品の加工
- ・手術用器具の製造
- ・人体あるいは相当材料の加工

がある。インプラント部品材料としては、耐摩耗性と生体適合性を踏まえ、チタン合金、ステンレス、コバルトクロムモリブデン合金 (Cobalt Chromium Molybdenum alloy, CCM) 等がある。一般にデンタルインプラントでは、軽量かつ生体適合性の高いチタン合金が使用され、体内埋め込み用のインプラントでは、耐食性、耐摩耗性、機械的強度の高いコバルトクロムモリブデン合金の使用が期待されている。これらの材料の切削では工具寿命が短いため、難削材として位置づけられている。

手術用器具においては、低侵襲治療に対する要求に対してデバイスの小型化が進められ、これに対する加工技術の開発が進められている。また、微細加工とともに表面処理に対するニーズも高い。

人体およびその相当材料は非金属が多く、低熱伝導で脆性的である。そのため、工具寿命や仕上げ面に対する課題が多い。また、医療産業への参入では、厚生労働省等の認可などの法規に対する状況も踏まえる必要がある。

(4) エネルギー産業に対する製造技術の課題

エネルギー産業においては、これまで原子力によるエネルギーに対する依存度が高かったが、2011年の東日本大震災後、代替のエネルギー変換システムが注目されている。タービンプレードなどの部品には高温強度や軽量化が求められ、また、長期に利用する設備部品には耐腐食性の高い材料が用いられる。このような観点から、ステンレスや他の難加工材料が用いられている。近年では、例えば、風力発電のブレードの大型化に伴いCFRPの利用も増えている。エネルギー産業における部品加工のもう一つの特徴は比較的大型なものが多く、かつ、回転部品に対しては高い精度が求められる。

(5) 情報産業に対する製造技術の課題

携帯端末機器の普及とともに、情報産業における高品位、高能率加工に対する要望が高まっている。この10年間では、スマートフォンに代表されるように、タッチパネルの普及と高機能デバイスの集積化が飛躍的に進んでいる。タッチパネルの材料として化学強化ガラスが使用され、このような高強度のガラス加工に対する需要が増えている。近年では、より軽量の複合材料やサファイアへの転換も検討されている。サファイアの加工においては、現在、レーザ等が適用されているが溶着等の課題がある。デバイスの集積化に関しては微細加工の技術が不可欠であり、MEMS等の加工技術の応用と展開が期待されている。

13.2 生産加工・工作機械技術の現状と将来

13.2.1 切削加工

前節のように加工対象となる材料は、難削化、複合化、硬脆化の傾向にあり、切削技術に対する要求として、年々高いレベルの課題が挙げられている。難削材に関しては、以前よりインコネルやチタン合金に対する切削技術の研究開発が進められているが、これらの加工では工具摩耗やチッピングおよび欠損に対する課題がある。そのため、これに適用できる工具材料の開発が求められている。工具材料では、近年、硬質薄膜を工具表面に被覆したコーティング工具の使用が増えているが、この薄膜材料の特性とともに、母材と薄膜の密着度が重要となっている。

複合材料に関しては、この10年間にCFRPの切削に関する研究が増えている。CFRPは炭素繊維に樹脂を含ませた薄層を重ねたものであり、この切削では表層部に生じる剥離や残留繊維が問題となる。また、脆性材料である炭素繊維に起因する切れ刃の摩耗とともに、仕上げ面が悪化する。そのため、工具摩耗とこれに伴う仕上げ面の悪化をいかに抑制するかが課題となっていた。近年では、ダイヤモンドコート工具が実用化され、CFRPの切削における摩耗については、ある程度改善されている。しかし、CFRPの剥離に関しては工具形状の設計に依存するところが大きく、多くの工具形状が提案されている。例えば、穴あけに対してはダブルアングルドリルなどが市販され、エンドミルについてはヘリングボーンカッターやルータ等が市販されるようになった。材料の複合化は、CFRPだけではなく、異種材料を接着または重積した複層材もあり、航空機で使用されるCFRPとチタン合金の重積材やパイマテリアルとしての多機能材料も増えている。このような複層材はそれを構成するそれぞれの材料で切削特性が異なるため、適切な工具材質を選定することは容易ではなく、工具の形状も含めて設計または選定することが必要となる。

硬脆材料としては、情報端末、情報機器の増加とともに、ガラスやサファイアの加工に対して研究開発が進められている。また、人体および相当材料に対する切削についても、未だ効率や仕上げ面の観点からは、実用的に十分な成果が得られておらず、次項の研削・研磨加工、レーザなどのエネルギービーム加工が適用されている。

13.2.2 研削・研磨加工

研削および研磨加工は加工領域が小さいため、砥粒と材料との界面における物理および化学的な現象が、プロセスの効率や仕上げ面および表層部の特性に影響する。特にこれらに対する近年の要求は、サブミクロンからナノオーダーに対するものであるため、その現象の解明に対する研究が多い。また、砥粒および砥石の

製造技術も発達し、材質や形状等の制御も可能になっている。研削加工においても、前節の産業界におけるニーズのもとでCFRPの研削に関する研究が増えている。また、硬質材料として、例えば、ナノ結晶ダイヤモンドやサファイアの研削に対する試みもある。一方、研削の工程管理の観点からインプロセス計測技術の開発も進められ、AEセンサーを使用した監視等が報告されている。これらの監視技術は後述のIoT技術への要素技術として、これからの展開が期待できる。

研磨加工では、従来からChemical Mechanical Polishing (CMP)に対する関心が高く、このプロセスの解明などに関する研究も多い。研磨加工では環境負荷の軽減や作業環境の改善のために、近年では、固定砥粒化、研磨剤の低減化、レアアース研磨剤の代替、研磨剤のリサイクルなどが課題となっている。また、研磨パッドと研磨剤の挙動が研磨特性に及ぼす影響は大きく、これらに関する技術も多く提案されている。最近では、紫外線、プラズマ、光触媒を利用した研磨技術も進んでおり、複合研磨技術に対する関心も高い。

砥粒加工の一つとして位置づけられるワイヤソーやブレードによる切断では、高能率化に対する取り組みが多く、サファイア等の硬質材料に対する適用例が増えている。また、セラミックやガラスに対する噴射加工も年々高度になっている。噴射加工には、高圧の空気または液体を媒体として砥粒を表面に供給して材料を除去するものであるが、空気や液体の流れを制御することによって、除去効率や加工面を制御できる。これに関する研究では、従来は加工パラメータに対して特性を調べる程度にとどまっていたが、最近ではComputational Fluid Dynamics (CFD)を使用してその流れを解析できるようになっている。

13.2.3 電気・化学加工

1940年代に開発された放電加工は、現在、型彫り放電加工による金型加工と、ワイヤー放電による切断等に適用され、前項の切削や研削で成形が困難な材料や形状の加工において、その優位性を示してきた。しかし、加工能率や仕上げ面の観点で課題があり、現在においても、放電現象に関する基礎的な研究がなされ、それらの課題に対する改善が進められている。最近では可視化技術の進歩に伴い、放電現象を観察できるようになっており、例えば極間隙における気泡の挙動に関する議論が具体化され、材料除去体積と関連づけられている。

一方、これまで放電加工が困難とされていた新材料に対する取り組みがなされ、例えば、絶縁性窒化アルミニウム、絶縁セラミックス、炭素繊維強化プラスチック等の高機能材料の加工技術が開発されてきた。また、放電加工の対象も複雑な三次元形状、深穴、微細穴などのマイクロ形状に対する技術が増えている。

電解加工では、静電誘導給電法による短パルスの微細加工法が考案され、微細化と高精度化が進んでいる。また、パルス電圧の制御による電解加工の高度化技術の開発が目立っている。

13.2.4 エネルギービーム加工

エネルギービーム加工の中で、近年のレーザー加工に対する関心は年々強まり、この10年の間に多くの試みがなされてきた。レーザー加工は、材料照射部にエネルギーを供給して熱的に除去する光熱加工と、光子の衝突により材料の原子、分子の結合を断ち切って除去するアブレーション加工があり、対象とする加工によってそれらが使い分けられている。

光熱加工では、高出力化により厚板材料の加工を対象とした技術開発が進められ、切断性能の向上を図っている。一方、アブレーション加工では、短波長、短パルス・超短パルス化により微細加工への応用が進められている。例えば、高アスペクト比の微細穴加工では、非熱加工で高品位な加工が可能となっている。このようなビームの照射による微細穴の加工では、切削等の機械的な除去に比べて穴の径の制御が難しく、ビームの照射制御に対して高度な技術が開発されている。

2010年頃になると高出力のファイバーレーザーが開発され、ファイバーの柔軟性が高いことから多くの加工現場で使用されるようになった。これに伴い、高出力固体レーザーに対する関心が高まり、板金加工においても炭酸ガスレーザーからファイバーレーザーに移行している。さらに、半導体レーザーも高出力化が進み、励起源から直接加工が可能な直接加工用半導体レーザー(Direct Diode Laser, DDL)が開発され、レーザー加工における新たな展開が期待されている。

レーザにおける熱的加工としては、焼結や表面改質への応用も増え、除去加工から熔融加工や表面処理技術への展開も注目されている。特にレーザ焼結は、次項の Additive 加工にも適用されている。また、ガラス等の低熱伝導材料に対しては、熱応力を利用した切断に適用されている。

13.2.5 Additive 加工

この 10 年間において、特筆すべき代表的な技術として Additive Manufacturing (AM) が挙げられる。AM は 3D プリンターとして市場に投入され、国内外においてその販売台数も急速に拡大している。AM は、もともと 1980 年の光造形法による Rapid Prototyping の技術として開発されていた。国内では当時、積層造形法と呼ばれていたが、1995 年に Z Corporation 社が MIT が開発した製品を 3D printing (3DP) の商標で販売し、その後、3D プリンターと呼ばれるようになった。現在、工作機械に搭載される AM の主な技術としては、

- ・粉末焼結積層造形法
- ・熱溶解積層法

がある。それぞれに特長があり、加工対象に応じて設備導入が検討されている。AM の特徴は製品や部品の閉じた空間にも複雑な形状を制御できることであり、除去加工では不可能な加工ができる。最近では金型への応用も期待されているが、AM の加工では十分な仕上げ面粗さが得られないため、工程内に切削による仕上げを併用している。すなわち AM の実用化においては切削工程が不可欠であり、上記の積層法で得られた材料の切削特性に関する研究も進められている。

13.2.6 工作機械技術

工作機械の高速化における取り組みでは、以前より高速スピンドルの開発やリニアモータによるテーブルの高速駆動に関する技術開発が進められているが、この 10 年の間では、CFRP のテーブルやスピンドルの開発が注目されている。すなわち、要素部品の軽量化により加減速に対する性能を向上させ、さらなる高速化とともに省エネ化を図っている。

多軸制御加工では高精度な運動制御技術が発達し、5 軸マシニングセンタの利用が飛躍的に増えている。5 軸マシニングセンタは設備投資も大きいため、それを使いこなすための CAM が不可欠であり、近年では多くのソフトが販売されている。多軸制御加工では複雑な三次元形状を加工するため、工具の干渉や、工具姿勢に対する工具や被削材の動的挙動にも配慮する必要があり、これに関する研究も進められている。

高精度化への取り組みでは、運動制御技術と機械構造の両側面からの技術開発が進められている。工作機械における精度不良は力学的変形と熱変形に起因するものがあり、特に熱変形対策では多くの研究がなされている。運動制御技術に対しては精度評価技術が不可欠であり、さまざまな測定法が提案されてきた。

複合化技術に関しては、機械構造の多様化と、複合加工に対応する工具において、多くの技術が開発された。特に最近注目されている技術としては、歯車加工のギアスカイピングと旋削加工のハードスカイピングがある。これらは二つの回転運動の同期、回転と直動の同期を組み合わせた加工であり、制御技術の進歩によって成し得たものである。特にギアスカイピングは、自動車等の輸送機産業において注目されており、今後の展開と発展が期待されている。また、制御技術の進歩により、切れ刃の振れに応じて工具の回転や送りを制御する技術も注目され、これにより工具損傷を抑えることが可能となった。

知能化に関しては、工作機械のユーザの視点から多くの機能が開発されているが、近年の取り組みとしては、びびり振動抑制に対する機能が開発されている。また、工具と材料または他の周辺機器との衝突を回避する機能などもあり、シミュレーションと制御を同期させた技術もある。知能化に関連して IoT への展開を視野に入れ、センサー技術と加工プロセスの監視技術への期待が高まっている。2015 年頃から話題となっている IoT 技術については、現在、産学界において研究開発が精力的に進められているが、今後、実用化技術が現れてくるものと予想される。

13.3 生産加工・工作機械部門の展開

生産加工・工作機械部門は、第 69 期(1991 年)より部門として活動を開始しているが、部門の前身は「生産加工・工作機械委員会」であり、この委員会を含めると今年で 40 年を迎える。部門となってからは今年

で26年目になり、輸送機、家電、エネルギー、医療、情報等の産業における生産技術と設備技術を対象とし、我が国のものづくりを支える一つの分野として本会会員に対し、学術および実践的な情報と交流の場を提供してきた。2016年11月時点で、当部門の登録者数は第1から第3順位までで2796名、第5順位までを含めると3353名であり、日本機械学会の中では中規模の部門である。企業の登録である特別員は第1から第3順位までで82社、第5順位までで126社となっており、当部門の活動分野は企業側からも高い関心が寄せられている。

生産加工・工作機械分野の交流の場としては、部門講演会と国際会議「The International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century: LEM21」を隔年で交互に開催してきた。表1は部門講演会の実績であるが、1999年に第1回を京都大学で開催して以来、2016年度までで第11回を迎えた。また、国際会議は表2に示すように、第1回はInternational Conference on Manufacturing Milestones toward the 21st Centuryとして国際フォーラムで開催され、その後21世紀に入り、会議名を上記のLEM21とし、第2回は新潟朱鷺メッセで開催され、2015年で第8回を迎えている。

表1 生産加工・工作機械部門講演会の開催実績

	No.	開催日	会場	場所	講演数	参加者
第1回	No.99-2	1999年3月31日、4月1日	京都大学	京都府京都市	119	255
第2回	No.00-5	2000年11月21、22日	東レ総合研修センター	静岡県三島市	120	277
第3回	No.01-20	2001年11月21、22日	生産性国際交流センター	神奈川県葉山市	143	236
第4回	No.02-25	2002年11月21、22日	犬山国際観光センター	愛知県犬山市	122	245
第5回	No.04-3	2004年11月20、21日	大阪大学コンベンションセンター	大阪府吹田市	165	300
第6回	No.06-34	2006年11月24、25日	生産性国際交流センター	神奈川県葉山市	156	246
第7回	No.08-19	2008年11月21、22日	長良川国際会議場	岐阜県長良市	152	263
第8回	No.10-11	2010年11月19、20日	岡山大学工学部	岡山県岡山市	153	268
第9回	No.12-10	2012年10月27、28日	秋田県野津大学	秋田県由利本荘市	149	244
第10回	No.14-15	2014年11月15、16日	徳島大学	徳島県徳島市	136	246
第11回	No.16-34	2016年10月22、23日	名古屋大学	愛知県名古屋市	120	233

表2 国際会議LEM21の開催実績

	No.	開催日	会場	場所	講演数	参加者
第1回	No.97-208	1997年7月22日～25日	国際フォーラム	東京都		(注)
第2回	No.03-203	2003年11月3～5日	朱鷺メッセ	新潟県新潟市	177	381
第3回	No.05-204	2005年10月19～22日	ポートメッセなごや	愛知県名古屋市	218	353
第4回	No.07-205	2007年11月6～9日	福岡国際会議場	福岡県福岡市	187	347
第5回	No.09-207	2009年12月2～4日	大阪コンベンションセンター	大阪府吹田市	168	255
第6回	No.11-207	2011年11月8～10日	ソニックシティ大宮	埼玉県さいたま市	147	213
第7回	No.13-203	2013年11月7～8日	ホテル松島大観荘	宮城県松島町	135	179
第8回	No.15-206	2015年10月18～22日	京都リサーチパーク	京都府京都市	193	311

(注) 第1回は「21世紀への生産技術のマイルストーン国際会議」として開催。講演数、参加者に関するデータは不明

また、当部門が関係する本会英文雑誌 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing (JAMDSM)は、2007年に第1巻を発刊して以来、今年で11年目になり、2016年の時点でインパクトファクターは0.48になっている。本会の雑誌でインパクトファクターがついているものが少ない中で、JAMDSMの取りあげている分野は、国際的に注目されていることがうかがえる。

当部門における特色としては産学の連携が極めて強く、企業側と大学等研究機関との交流が盛んに行われてきた。部門登録では前述のように企業側の特別員の登録数が多く、部門運営委員会の構成でも、企業側委員の割合が大きい。このように生産加工・工作機械分野の研究開発においては、企業と大学の産学連携が不可欠である。すなわち、「産」のニーズに対して「学」が研究に取り組み、「学」のシーズを「産」が実用化することが強く望まれている。この部門と関連の深いRC研究分科会では、2年間ごとに生産加工・工作機械に関わるテーマで活動を継続しており、当分野で活躍している研究者と産業界の交流も進められている。さらに、当分野における若手技術者育成のために、RC研究分科会では研究協力委員制度を持ち、大学関係の助手や大学院生の積極的な参加も呼び掛けている。

また、外部組織との連携として、日本工作機械工業会が主催する日本国際工作機械見本市(Japan International Machine Tool Fair, JIMTOF)における各種イベントにも協賛している。2015年度には国際交流イニシアティブとして、大学および企業の若手研究者で調査団を組織し、イタリア・ミラノで開催された欧州の工作機械見本市 EMO ショーと関連企業や研究機関を訪問する派遣事業が実施され、当部門も協賛した。

このように生産加工・工作機械の分野ではグローバル化は不可欠であり、当部門における今後の展望としては国際化を目指し、海外の学会における連携を強化することが課題となる。2017年6月には米国機械学会(ASME)の Manufacturing Engineering Division (MED)が主催する Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC)において、当部門運営委員会が主催するシンポジウムを開催し、今後のMEDに対する連携のきっかけ作りに取り組んでいる。部門活動とともに、LEM21の更なる国際化に向けて、今後、諸外国における同分野の組織との連携を積極的に進めることで、日本のものづくり技術のプレゼンスを示すことも視野に入りたい。

[松村 隆 (第94期部門長) 東京電機大学]