

# ものづくりの技術

August 2015

## 不易流行

No. 48

### 不易流行

この度、93期の生産加工・工作機械部門長を務めさせて頂くことになりました。生産革新への取り組みが世界中で加速する今日、生産加工・工作機械部門の果たす役割は極めて重要なものとなっております。

今回、工作機械に携わるもの一人としてこの任務にあたることとなりましたこと、あらためて責務の重大さを感じております。これまでの諸先輩の取り組みや熱き思いを継承していくとともに、私なりに貢献できることを模索して参りたいと思います。

ドイツ政府が製造業のイノベーション政策として『Industrie 4.0』を掲げ、米国ではIoT (Internet of Things) の活用、『Industrial Internet』の推進が叫ばれています。次世代工場、さらには工場を軸としたあらゆるモノやサービスの連携によって、新たな価値やビジネスを創出する動きです。一方で、そうしたモノやサービスの創造は今に始まったことでしょうか。私は今から1年ほど前に、84期部門長を務められた青山藤詞郎先生とある座談会で情報技術に関する意見交換をさせていただきました。今から僅か1年前、『Industrie 4.0』も『Industrial Internet』もまだマスコミにおいてキーワードになるに至っていませんでしたが、日本の製造業は従来からこ

### トピックス

#### 「不易流行」(93期部門長就任にあたり)

#### 技術レポート

- 新世代省エネルギーシステム「ECO suite」の開発

#### 部門講習会報告

- 「最新生産加工技術の動向と将来展望～将来のキャリア設計に役立てるために」
- 「生産加工基礎講座」 実習で学ぼう 「切削加工、びびり振動の基礎知識」
- 「今後自動車を変革させていくであろう多様な技術」

#### 部門優秀講演論文表彰

#### 部門からのお知らせ

- LEM21 第8回 JSME 先端生産加工に関する国際会議



オークマ株式会社  
家城 淳

うした次世代工場への構想に思いをめぐらせていた筈です。

僅か1年足らずで世界の産業界のトレンドとビジョンは明確になり、ビジネスとしてシステム化され、製造業への注目度が大きく変わりました。

日本の工作機械は、生産額や技術力において、ドイツをはじめとした欧州勢と激しい競争を続け、また、アジア勢の猛追を受けています。こうした現況において重要となってくることは、工作機械産業のお客様である世界の製造業のニーズとウォンツにフィットした商品・サービスを提供すること、そこでの差別化をはかるための高い技術力を磨くことです。短期的な流れに惑わされず、ものごとの本質を見極めながら革新に挑むことです。

これからも、世界で高い競争力を発揮していくため、高度な研究開発を持続、発展させていくため、その礎となる取り組みが必要です。本部門はそれ自身が産学連携組織であり、本部門関係者の役割は大きなものがあります。

部門として「情報発信、情報交流機能」を強化していくため、(1) 運営委員会を生産加工・工作機械の産学情報交流サロンの場として、自由闊達な議論をしていく。(2) 産学連携の推進をサポートするネットワークを形成する場としていく、ことが重要と考えます。

一般社団法人日本工作機械工業会(日工会)が本年7月1日付で「加工システム研究開発機構」を発足させました。産官学連携を強化し、生産加工・工作機械の基盤研究を強化、推進していく一つの基盤が準備されました。

また、人的ネットワークの構築に関しては、これまで部門検討を進めてきた国際交流イニシアチブを本年度より日工会主催、本部門協賛にて推進致します。研究開発の現場で活躍する大学・企業の若手・中堅研究者、技術者が欧州EMOショーを機に大学・企業研究所等を訪問し、調査・体験活動や技術交流を行うものです。研究現場の最前線で活躍中の大学、企業の研究者各々が知的好奇心を交流させながらの本活

部門企画行事の最新情報は

(<http://www.jsme.or.jp/mmt/kouen/index.html>) をご覧下さい。

動には、調査報告はもとよりその経験が今後の産学交流の礎となることを期待しております。

本年度は、運営委員会や幹事会を企業の工場や大学で出来る限り実施し、また懇親会を通じて産学情報交流サロンの機能を高めて参ります。第1回運営委員会はオークマ(株)可児工場、第2回委員長・幹事会は東京電機大学、第2回運営委員会は日本精工(株)桐原事業所 直動技術センターで実施し技術・研究紹介の上で活発な意見、情報交換がなされました。

また、本年10月には、国際会議 LEM21 (The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century) を当部門主催にて京都で開催致します。多数の海外からの参加者を迎え、優れた論文投稿と発表を期待しております。重要な学術研究情報の交流と情報発信の場ですので、多数のご参加をお待ちしております。

結びとなりますが、当部門の皆様方と共に生産加工・工作機械分野の魅力を高め、この分野の研究者および技術者層の

拡大に努めたいと考えています。また、こうした取組みを通じた多種多様な意見の交流、衝突の中で、次代を拓く新たなテーマ創出のきっかけの場となることを期待し取り組んで参りたいと存じます。

皆様方のご支援、ご指導の程、宜しくお願い申し上げます。



技術レポート

新世代省エネルギーシステム「ECO suite」の開発

オークマ株式会社 山本 誠栄

1. はじめに

マシニングセンタをはじめとする工作機械は、工具と工作物に運動を与えるため、モータを駆動することでエネルギーを消費する。しかし工作機械の消費エネルギーには加工に直結するモータだけでなく、冷却装置や、油圧ユニットなど多数の周辺装置によるものがある。省エネルギーの観点では、実生産に関係のない非加工時は周辺装置を含む工作機械の電力を遮断し、加工時のみ電力を使用することが望まれる。しかし実際には、非加工時であっても電力を使用せざるを得ないケースが多い。その原因の一つが、熱変位に代表される加工精度の問題である。そこで、非加工時に電力を遮断しても加工再開直後から常に高い寸法安定性を発揮できる工作機械のアイドルストップ機能「ECO アイドルストップ」を開発した。また、その他にも電力消費をマネジメントとする機能を含め、新世代省エネルギーシステム「ECO suite」を開発した。本レポートでは、「ECO suite」について概説する。

2. ECO アイドルストップ

省エネルギーを目的とする周辺装置の電力遮断は、プログラム終了信号をトリガとし、タイマを用いて遮断する手法が一般的である。しかし、工作機械の発熱状態は、主軸回転速度などの加工条件や運転継続時間によって変化するため、予め時間を設定することは困難である。そこで「ECO アイドルストップ」では、機械各所における温度センサ情報、運転情報から演算した熱変位情報をもとに、機械の正確な冷却状態を把握し、高精度を保ちながら電力を遮断することを可能とした(図1)。主軸など構造体の温度制御を行う冷却装置においても、熱変位補償技術「サーモフレンドリーコンセプト」との組み合わせによって、精度を維持した省エネルギー運転に対応した。

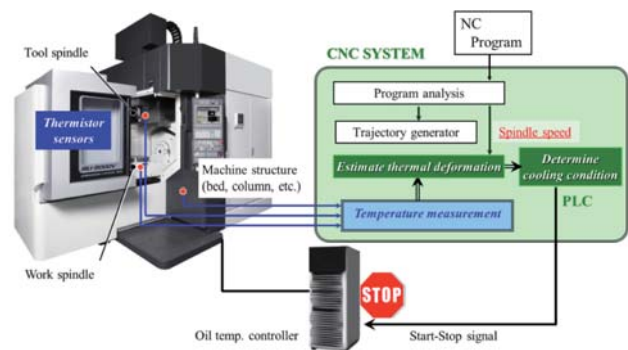


図1 ECO アイドルストップの構成

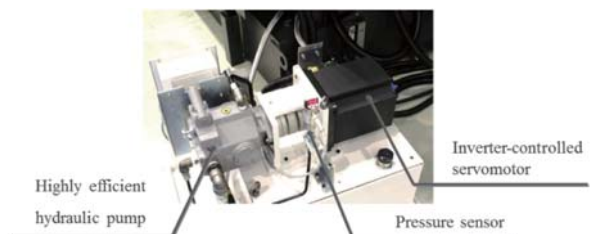


図2 ECO ユアツ概観

3. ECO ユアツ

量産加工など常に機械を動作し続けることが要求される場合、非加工時の電力遮断に加え、加工中における省エネ化が同時に求められる。そこで、電力消費量の大きい油圧ユニットに着目し、省エネ油圧ユニット「ECO ユアツ」(図2)を開発した。油圧ポンプの駆動に、工作機械用サーボ技術による極低速からの精密制御を適用し、高効率化に加えて低騒音、



低振動、低発熱化を実現した。

#### 4. 最後に

「ECO suite」では紹介した「ECO アイドルストップ」、「ECO ユアツ」以外にも、省エネ“意識”を高める見える化「ECO 電力モニタ」(図3)、チップコンベアなど周辺機器の省エネルギー運転が可能となる「ECO オペレーション」を揃え(suite)ている。今後も、お客様の意識に変革をもたらし、使いやすく付加価値が高いと感じていただける技術を開発し提供していきたい。

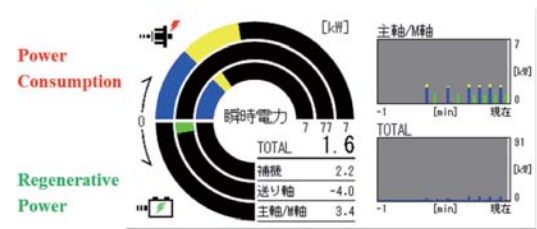


図3 ECO 電力モニタ

### 部門講習会報告

## 『最新生産加工技術の動向と将来展望～将来のキャリア設計に役立てるために』

東京大学 杉田 直彦

2015年3月4日(水)に生産加工・工作機械部門企画の啓蒙セミナー「最新生産加工技術の動向と将来展望～将来のキャリア設計に役立てるために」を東京大学本郷キャンパスにて開催しました。このセミナーは、科研費・成果公开发表(B)の支援を受けて実施されたものであり、就職活動を始めたばかりの大学院生に加え、企業の技術者・研究者を交えた約60名の聴講者にご参加いただきました(図1)。

経済活動のグローバル化の進展に伴い、各国産業の活動地域は益々広範になり、その結果、多くの工業製品の市場獲得競争が激化しています。例えば、我が国の製造業を代表するエレクトロニクス産業において一例を見ることができるよう、かつては世界で大きなシェアを占めていた製品あるいは産業でさえも、グローバルマーケットにおける競争力を失いつつあります。一方、製造業は我が国の経済活動を支える極めて重要な基幹産業であり、今後も先端的な「ものづくり」技術に立脚した魅力ある製品づくりの継続的实施が必要不可欠となっています。

しかしながら、製造業における「ものづくり」を支える生産加工技術が高度化、細分化した結果、大学生や大学院生といった若手人材候補にとって、生産加工技術の現状と将来展望を知る機会が減っています。さらには、生産加工技術に従事することの意義や魅力についても、他の職業に比してわかりにくい状況にあります。

そこで当部門では、部門ポリシーステートメントに「若手人材の育成」を活動の柱の一つに掲げ、本セミナーを企画しました。将来のものづくり技術を担う機械系学生、さらには企業の若手技術者を対象として最新の生産加工技術の動向と将来展望を平易に紹介し、聴講者からの質問に答えながら当該分野に係る仕事の魅力を伝えます。

本シンポジウムは全体を3部構成とし、各分野の専門家に依頼しました。具体的には、第1部の概論、加工技術、生産加工技術などについては、主に大学教員を講師とし、第2部の各論については、企業の第一線で活躍する研究者や技術者に依頼しました。

第1部では製造業の現状から最新の生産加工技術に関する講演としました。「生産加工技術の現況と展望」と題し、日本工作機械工業会の大槻文芳氏、および、名古屋大学・鈴木教和准教授により、生産加工・工作機械分野の現状と中長期的なロードマップについて説明していただきました(図2)。第1部を聴講することによって製造業や生産加工技術が理解できるようになっています。

次に、第2部では、自動車産業などの代表的な産業における、最新のものづくり技術に関する講演としました。ここでは、下記の方々にご講演いただきました。

(1) 自動車産業における最新ものづくり技術

日産自動車(株)総合研究所 南部 俊和 氏



図1 セミナー風景



図2 日工会・大槻氏講演

- (株) デンソー 生産技術部 山本 崇 氏
- (2) 航空機産業における最新ものづくり技術  
(株) IHI 航空宇宙事業本部 櫻井 幹男 氏
- (3) 電機情報産業における最新ものづくり技術  
(株) 日立製作所 横浜研究所 西川 顕二 氏
- (4) 工作機械産業における最新ものづくり技術  
中村留精密工業 (株) 販売促進部 蔵谷 宏行 氏  
オークマ (株) 商品開発部 栗山 和俊 氏

第1部の講演で生産加工技術に興味を抱いた後、製造業において生産加工技術が具体的にどのように利用されているのか、また、次世代に求められている生産加工技術などを理解してもらいました。

第3部は、企業との交流会としました。参加者にアンケート用紙に必要事項を記入してもらい、希望企業のブースに提出することで、簡単なQ & A や工場見学の希望などを伝え

られるようにしました。どのブースも盛況でお互いに満足なディスカッションができたようです。

今回は、機械工学を学んでいる大学生、大学院生を主たる対象者としてしました。彼らの中には、生産加工技術の魅力を学ぶ機会がなかったために、生産加工技術関連の仕事をキャリア設計の候補から除外していた者が少なからずいます。このような啓蒙的かつ魅力的な講演を行うことで、これらの分野に従事するものが現れ、彼らが将来のものづくりの発展に寄与するようになれば、本シンポジウムは成功と言えます。本セミナーは、聴講者が熱心に耳を傾け、あるいは真剣にメモを取るなど、熱気あふれる講習会となりました。また、各講演の後には多くの質疑応答がなされ、実り多い講習会となりました。

ご多忙の中、ご講義をいただきました講師の皆様へ改めて御礼申し上げます。

## 部門講習会報告

### — 生産加工基礎講座 — 実習で学ぼう 「切削加工、びびり振動の基礎知識」

名古屋大学 鈴木 教和

2015年3月5日と3月6日の二日間で、生産加工基礎講座(実習で学ぼう「切削加工、びびり振動の基礎知識」)を、名古屋大学にて開催しました。企業、大学から13名の技術者・研究者・学生にご参加いただき、盛況に開催することができました。

切削加工は生産技術の中で特に重要な位置を占めるにもかかわらず、その基礎的な切削機構、特に実用的な3次元切削の機構については誤解が多く、これを学ぶ適切な機会が中々ないのが実状です。また、生産現場においてしばしば問題となるびびり振動についても、切削加工と機械振動という異なる分野の知識が必要であることから、正しい理解を持つ技術者は少ないようです。本講習会では、こうした切削加工と工作機械の振動が関与する問題について、座学と同時に実習を通して参加者に十分な理解と基礎力を身に付けていただくことをねらいとしています。

最終目標であるびびり振動の基礎理論を理解し、びびり振動の解析を実行してその結果を適切に理解するには、解析に用いるパラメータの測定法や、数学的な知識、計算手法などを知る必要があります。これらを座学のみで深く理解するのは、容易ではありません。そこで、本講座は以下の3項目か

ら構成され、それぞれの基礎理論を座学で学んだ後に、実機による実習・実演を通じて理論の確認を行うことを最大の特徴としています。

1. 切削機構を理解しよう
2. 機械の動剛性を測定しよう
3. 再生びびり振動を理解しよう

「切削機構を理解しよう」では、まず、2次元切削におけるすくい角、摩擦角、刃先丸みの影響などについて、さらに傾斜切削における傾斜角の影響などについて概説します。その後、実用的な旋削加工とエンドミル加工について解説します。実習においては、講義で理解した上述の影響や加工プロセスを旋盤やマシニングセンタを用いて実際に実演し、理論通りの現象が生じることを目で見て、理解を深めます。

続いて、「機械の動剛性を測定しよう」では、振動問題を扱うための運動方程式と数学的な基礎知識を確認した後に、機械構造の動特性の基礎知識を概説します。さらに、動剛性の代表的測定方法として、インパルス応答法の基礎理論と実際の知識について座学を通じて解説します。実習では、主軸に取り付けたエンドミル工具とテーブル上に固定したワークに対してインパルス加振を行い、加振力と振動を計測し

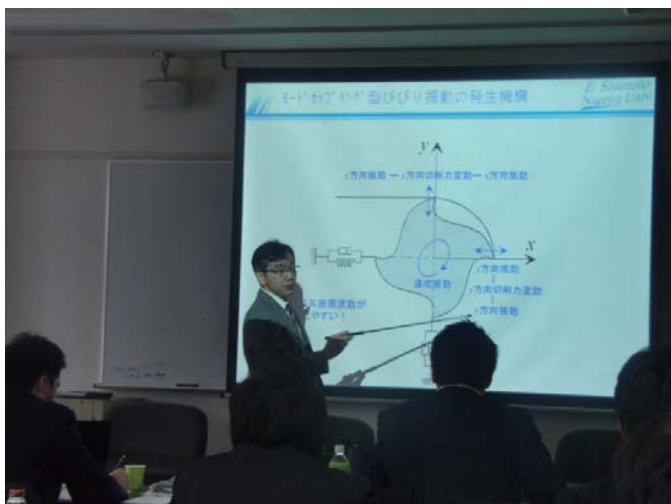


図1 座学によるびびり振動理論の講義の様子

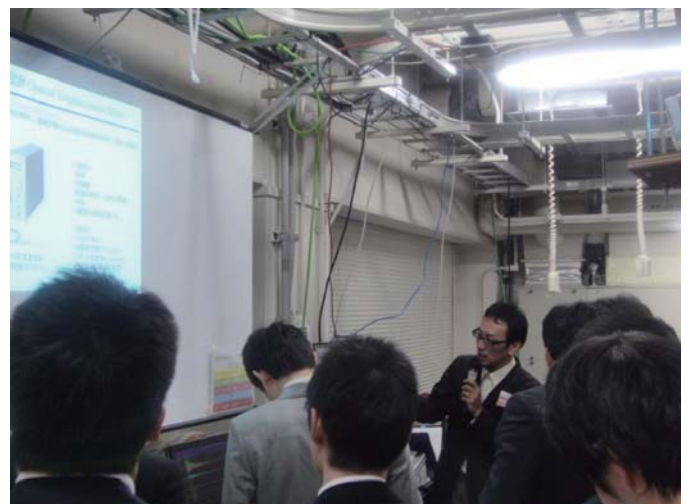


図2 実験室で実習内容を解説する様子



てフーリエ変換し、周波数伝達関数を算出してモーダルパラメータを求めるまでの手順を実演します。

「再生びり振動を理解しよう」では、まず各種びり振動の分類について簡単に説明し、その中で問題となることの多い再生びり振動について理解を深めます。ここでは、旋削加工とエンドミル加工の際に生じる再生びり振動の基礎を、理論とシミュレーション、実体験に基づいて習得します。また、最新のびり理論と研究事例なども紹介します。

## 部門講習会報告

### 『今後自動車を変革させていくであろう多様な技術』

日産自動車(株) 南部 俊和

2015年2月12日(木)に生産加工・工作機械部門企画の講習会「今後自動車を変革させていくであろう多様な技術」を日産自動車(株)横浜工場ゲストホールにて開催しました。企業、大学の技術者・研究者22名の聴講者にご参加いただき、盛況に開催できました。

自動車の保有台数は、今後、新興国を中心に飛躍的に増加すると考えられており、2050年には現状の7億台から20億台に増加するとも言われています。エネルギー問題やCO<sub>2</sub>にかかわる環境問題、交通事故や渋滞などといった課題を解く鍵は、クルマの知能化と電動化と考えられます。一方、製造技術について見てみると、地産地消やサステナブルなモノづくりなど、自動車を取り巻く環境は大きく変化しようとしています。本講習会では、今後の自動車および製造技術に関する最新の動向に関して、各分野でご活躍の講師の方よりご講演をいただきました。

最初に、本講習会の基調講演として、九州工業大学 鈴木裕 名誉教授により、「自動車の生産と金型技術」と題して、自動車産業や素材産業の現状を俯瞰いただき今後の方向性に関して解説いただきました。さらに、具体事例として、溶融中子を用いた中空成形品の成形技術について紹介いただきました。最後に金型を用いない究極の車造りに関しても紹介いただき、インダストリー4.0やインダストリアルインターネットなどのIoT技術との組み合わせにより今後の車造りが大きく変わる可能性について想起させる非常に興味深い内容でした(図1)。

次に、日産自動車(株)上原義貴氏より、「今後の自動車を支えるモノづくり技術」と題して、3つの“環境”をキーワードに講演をいただきました。すなわち、“CO<sub>2</sub>削減” によ

講演会後に実施したアンケートからは、総じて座学で学んだことを実習で確認する方式が分かり易いとの評価をいただきました。本講座は、実験スペースの制約から少人数に制限していますが、一方で、受講者の質問に対しては丁寧に対応することができます。びり振動は極めて難解な現象ですが、今後も、この現象を手っ取り早く理解するための場として本講座が活用され、産業界における生産性向上に少しでも貢献することができれば幸いです。

る環境保護、EVの普及により参入障壁が下がることで生じる新規参入による競争激化という環境変化、さらには、エンジンから電動化への移行によるクリーンな環境でのモノづくりという内容について紹介いただきました。具体事例としては、エンジンフリクション低減のために開発されたマイクロテクスチャ加工技術や将来SiCインバータの高温実装技術に関して研究開発紹介を頂きました。

続いて、前田工業(株)三瓶和久氏より、「レーザ加工の最新動向と自動車応用」という内容で最新のレーザ加工技術に関して講演いただきました。ファイバーレーザの出現により近年、レーザ技術が非常に進歩しており、ユニット部品から車体部品まで幅広い応用事例に関してご紹介いただきました。さらに、超軽量車体に向けたCFRPを使用したマルチマテリアル車体のための新材料、異種材料に関する接合技術に関しても概説いただきました。

午前中最後の講演は、カルソニックカンセイ(株)三原輝儀氏から「電動化部品とモノづくり」と題して、モータ、インバータに関する今後の動向について講演いただきました。特にインバータに関してはその原理や課題に関して機械技術者にも平易にわかりやすく解説いただき、エンジン技術との違いを理解するのに大いに役立ちました。

昼食後、午後の講演は、オーエスジー(株)野尻政敏氏より「ダイヤモンド工具の現状と今後」と題して最新のダイヤモンド工具およびその性能について、ご紹介いただきました。また、ダイヤモンド工具を使ったCFRPなどの先端材料加工および環境保護に向けたドライ加工に関する最新技術を紹介いただきました。最後の講演は、愛知産業(株)木寺正晃氏より、「金属3Dプリンタの自動車応用」という内容でご講演



図1 九州工業大学 鈴木名誉教授による基調講演の様子



図2 エンジン博物館前での参加者の皆様との記念撮影

いただきました。3Dプリンタで作製した実際の部品を持参頂き、また多彩な応用技術を紹介いただき、3Dプリンタ技術の現状について深い理解を得ることができました。

講演の後に、日産自動車(株)横浜工場にあるエンジン博物館および自動車エンジンの生産工場を見学いただきました。先進の技術により進化を遂げてきた歴代のエンジンを見ながら、開発に打ち込んだ技術者の探究心や情熱を感じて頂くとともに、自動車エンジン技術に関してもより理解を深めていただきました(図2)。さらに、同社のエンジン工場に

て、ロボットにより自動化された組み立てラインを見学いただき、自動車エンジン製造の現状を理解いただくことができました。

全体を通じて、講演中も見学中も聴講者が熱心に耳を傾け、あるいは真剣にメモを取るなど、熱気あふれる講習会となりました。各ご講演の後には、多くの質疑応答や活発な議論がなされ、実り多い講習会となりました。ご多忙中、ご講義をいただきました講師の皆様には改めて御礼申し上げます。

優秀講演論文賞

ドライ切削加工における表面テクスチャ付与工具の加工力低減効果とそのメカニズム

名古屋工業大学 清田 大樹, 糸魚川文広, 中村 隆

切削加工における工具・切りくず界面の摩擦状態は加工特性を大きく左右することから、潤滑油剤の成分やその供給方法、工具表面のコーティングやテクスチャに関して数多くの研究がなされてきました。これら既往研究では、往々にして接触界面の広範囲に渡って低摩擦を実現することに焦点が置かれています。一方で、本研究では表面テクスチャ付与工具がドライ切削加工においても加工力低減効果を示すことに着目し、テクスチャの効果的な形状パターンおよび付与域についての調査を通して、切りくずとの摩擦状態に対する工具表面性状の影響について考察しました。

Table 1の条件のもと、超硬工具(すくい角 $10^\circ$ 、逃げ角 $5^\circ$ )を用いて溝入り丸棒の突っ切り切削加工(Fig. 1)を行いました。ここではFig. 2(a)に示すように、すくい面性状の異なる工具として、研削仕上げのTool-N、同仕上げに微細孔アレイを付与したTool-D、切りくず流動方向に平行および垂直な微細溝を施したTool-G1およびTool-G2を準備しました。また、同図(b)に示すように、刃先からテクスチャ付与領域までの距離をフラットランド幅 $W_f$ とし、Tool-Dにおいてこれをパラメータとした試験も行いました。テクスチャリングはレーザ加工によって行い、孔径および溝幅は $20\ \mu\text{m}$ 、深さは $10\ \mu\text{m}$ とし、テクスチャ付与域に占める凹部の面積率はいずれも40%としました。

テクスチャの形状パターンと加工力の関係をFig. 3に示します。Tool-DおよびTool-G2では加工力が低減しますが、Tool-G1はTool-Nとほぼ同値でありその効果が見られません。この結果は、単に見かけ接触面積を制限するのではなく、切りくず流動方向に対して凹部が断続的に存在することが効果発現の必要条件であることを示唆します。

また、Tool-Dにおいて、フラットランド幅をパラメータとして、加工力低減効果を有するテクスチャ付与域を調査した結果をFig. 4に示します。加工力は $W_f=230\text{--}400\ \mu\text{m}$ 間でのみ変化し、それ以外の範囲ではほぼ一定値を示しています。 $W_f=230\ \mu\text{m}$ 以下における一定値はFig. 3のTool-Dの値と一致しており、 $W_f=400\ \mu\text{m}$ 以上ではTool-Nに一致しています。すなわち、刃先から $230\ \mu\text{m}$ 以下および $400\ \mu\text{m}$ 以上の範囲におけるテクスチャは加工力低減には無関係であり、その間の範囲のみでもたらされることがわかります。一般に、工具・切りくず界面の垂直応力分布は一樣ではなく、Fig. 5に模式的に示すように刃先において最大値を持ち、切りくず離脱点に向かって単調に減少します。これに伴い、摩擦状態は刃先からの距離に応じて変化し、高压下の刃先近

Table 1 Cutting conditions

Work material	S45C
Tool material	Cemented carbide
Cutting speed	250 m/min
Feed rate	0.1 mm/rev
Width of cut	1 mm
Lubrication	Dry

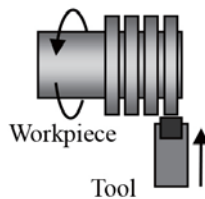
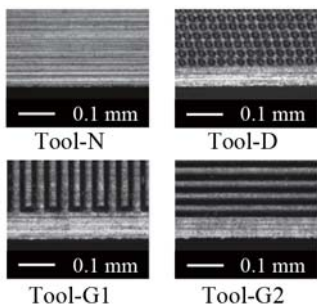
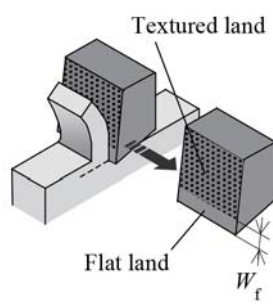


Fig1 Cutting test



(a) Various texture patterns



(b) Width of flat land  $W_f$

Fig2 Employed tools

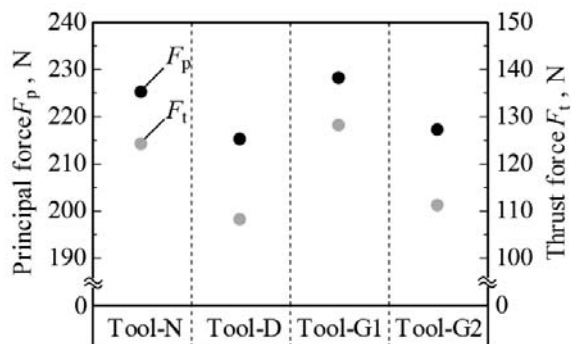


Fig3 Effects of texture patterns on reduction in cutting force at 250 m/min

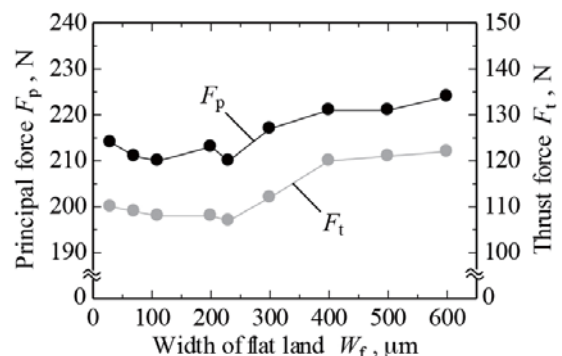


Fig4 Effects of textured region on reduction in cutting force at 250 m/min



傍では付着摩擦を示し、垂直応力が減少するとすべり摩擦へ移行します。Fig. 4の結果は、工具・切りくず接触長さが約  $500 \mu\text{m}$ であったことを考慮すると、Fig. 5に付記するようにこの摩擦状態の移行域に位置するテクスチャが効果的であることを示唆しています。

切りくずのように垂直荷重の減少過程を経る摩擦では、真実接触面積の減少に際し、界面に作用する付着力がその進行を阻害します。上記の実験結果は、付着摩擦からすべり摩擦への移行域で、真実接触部を強制的に分断させ、付着力を解放することが摩擦低減（加工力低減）に効果的であることを示しています。

最後に、優秀講演論文賞を受賞させていただきました。大変光栄に思うとともに、関係各位に心より感謝いたします。

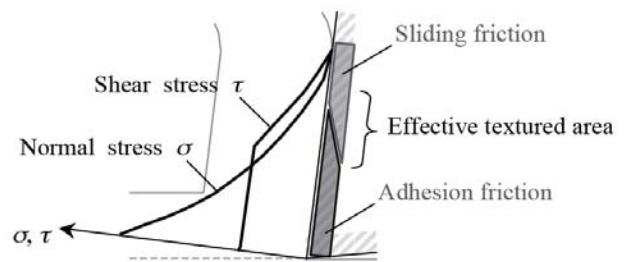


Fig5 Effective textured area

## 優秀講演論文賞

### レーザー照射による多結晶シリコンウエハの加工欠陥修復に関する研究

慶應義塾大学理工学研究科総合デザイン工学専攻 新津敬一郎, 閻 紀旺

太陽光パネルに使われている多結晶シリコンウエハは、シリコンインゴットをワイヤーソーによってスライスすることで製造されている。このワイヤーソーによるスライス工程はソーマークや、内部クラック、相変態、残留応力といった様々な加工欠陥を引き起こすことがわかっている。通常、これらの加工欠陥は研削・研磨によって除去されており、生産コストの問題が指摘されている。また、スライスされた多結晶シリコンウエハを研削・研磨といった次工程に移送する際、ソーマークなどに応力が集中した結果、ウエハ割れが生じてしまうことも問題となっている。

本研究では、ワイヤーソーによる多結晶シリコンウエハの加工欠陥に対してNd:YAGパルスレーザー（波長：532 nm）の照射を行い、加工欠陥を修復することを目的とした。これによりウエハ割れの際に破壊起点となるソーマークや内部クラックを修復することで輸送時のウエハ割れ低減が期待できる。さらに加工欠陥を修復すると同時にウエハ表面粗さを低減させることで、将来的には研削・研磨などの工程が必要なくなり多結晶シリコンウエハの製造過程において大幅な時間短縮とコストカットが期待される。

図1に、レーザー修復の原理を示す。ワイヤーソー加工を行った多結晶シリコンウエハには表面から数百nmの深さまでアモルファス層が存在している。さらに大きさが数 $\mu\text{m}$ の内部クラックがアモルファス層の下に存在している（図1-a）。まず、ウエハ表面にレーザーを照射する（図1-b）。最表面のアモルファスシリコン層は結晶シリコンよりも吸収率が高いため、先に溶融し始め（図1-c）、やがて溶融層は内部クラックまで広がっていく（図1-d）。レーザー照射を止めることで、溶融していない無欠陥の結晶シリコンが種結晶の役割を果たし、溶融層の下部から再結晶化が進む（図1-e）。このようにして、結晶欠陥のない表面を得ることができる（図1-f）。

次に実際にレーザー照射した結果を示す。レーザー照射した多結晶シリコンウエハの一部を集束イオンビーム（Focused Ion Beam: FIB）で切断し、走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscope: SEM）によって断面観察を行った。その結果を図2に示す。レーザー未照射領域では表面クラックのほかに深さ約  $1 \mu\text{m}$  の材料内部にラテラルクラックの存在を確認することができる（図2-a）。一方、レーザー照射領域ではクラックの存在が確認されず、表面が滑らかになっているのがわかる（図2-b）。以上よりレーザー照射によって深さ  $1 \mu\text{m}$  程度のクラックが修復されたことが考えられる。

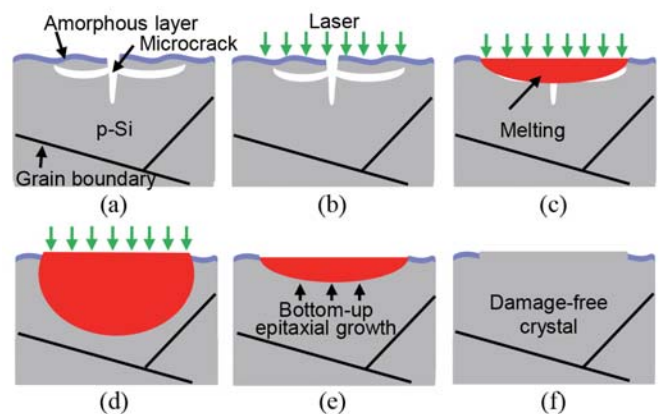
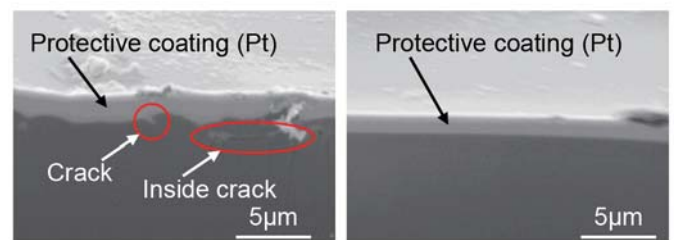


図1 多結晶シリコンウエハのレーザー修復モデル



(a) レーザ未照射域

(b) レーザ照射域

図2 多結晶シリコンウエハのFIB/SEM断面観察

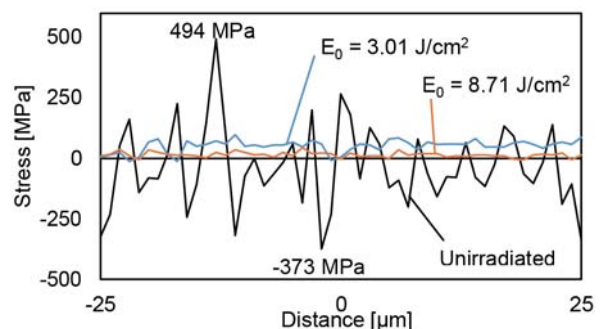


図3 ピークエネルギー密度の違いによる多結晶シリコンウエハの残留応力の比較

さらに、顕微レーザー分光光度計を用いて多結晶シリコンウエハの残留応力を測定した。図3はピークエネルギー密度の違いによる多結晶シリコンウエハの残留応力の変化を示している。ピークエネルギー密度  $E_0 = 8.71 \text{ J/cm}^2$  でレーザーを照射することで最大 494 MPa あった引張残留応力が約 15 MPa まで減少していることがわかる。また、レーザーを強く照射した方が残留応力の除去に有利であることが確認できた。

この結果により、レーザー修復はウエハ破壊抑制にも寄与できることが確認された。

以上からレーザー照射によって多結晶シリコンウエハの加工面性状と機械的強度向上の可能性が示された。

最後になりましたが、本研究の優秀講演論文賞受賞に関し、生産加工・工作機械部門の関係者各位に深く感謝致します。

優秀講演論文賞

楕円振動切削における振幅変調法を利用した焼入れ鋼のナノ精度微細加工

名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻 鈴木 教和, 張 建国, 社本 英二

私たちは、楕円振動切削と呼ぶ振動援用加工法を用いた高硬度材の加工技術開発に取り組んできました。工具-被削材間に相対的な楕円軌跡の振動を与えながら切削加工することで、飛躍的に加工性能が向上し、従来技術では不可能であった焼入れ鋼のダイヤモンド切削が可能となる等、様々な効果が得られることを明らかにしてきました。楕円振動切削では、切込み方向を含む平面内で振動を与えるため、研究の初期には切込みが変化しないように振動振幅を一定に制御することに注目してきましたが、ある時、反対に振動振幅を能動的に制御することで切込みを高速制御する方法（振幅変調法）を思いつきました。この方法では、切込み方向の振動振幅を高速で変更することで切込みを制御しながら加工を行うことにより、高速工具サーボを使わずに高能率な微細加工が可能となります。焼入れ鋼の表面に直接マイクロ・ナノオーダーの微細加工を施し得る唯一の高精度高能率加工と言えます。

本研究では、考案した振幅変調法の問題点を明らかにし、どのような形状が加工可能で、どこまでの加工精度を実現できるのかを明らかにすることを目標としました。まず、図1

に示すように、振幅変調法を用いた場合の加工可能な形状を分類し、幾何学的な制約条件を定式化しました。これにより、加工目標の形状からその加工の可否を判断することが可能となりました。次に、幾何学的な観点から振幅変調法が加工精度に与える影響を考察しました。図1に示す相対運動の包絡形状、すなわち加工形状（緑）と切込み方向振動振幅の制御指令値（赤）を比較すると、緩やかな斜面ではそれぞれがよく一致するのに対し、急斜面や角隅部ではオーバーカットが生じて誤差が大きくなることがわかりました。そこで、振動の包絡形状が加工目標の形状と一致するように振動振幅指令を補正する方法を考案しました。

焼入れ鋼の切削実験により、考案した振幅指令値の補正手法の加工精度への影響について検証を行いました。振幅が  $1 \mu\text{m}_{pp}$  で波長が  $31.62 \sim 6.75 \mu\text{m}$  に減少する正弦波のスweep形状加工を行い、振幅指令補正の有無による加工精度を比較したところ、補正を行わない場合には  $238.1 \text{ nm}$  の誤差が生じるのに対し、補正を与えることで  $17.8 \text{ nm}$  まで誤差が減少することがわかりました。このように、振幅変調法では理

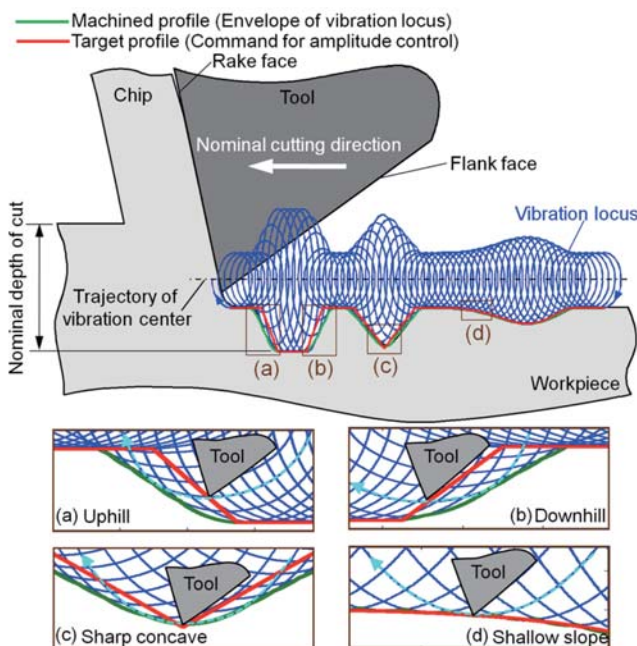


図1 楕円振動切削における振幅変調を利用した微細加工法の模式図

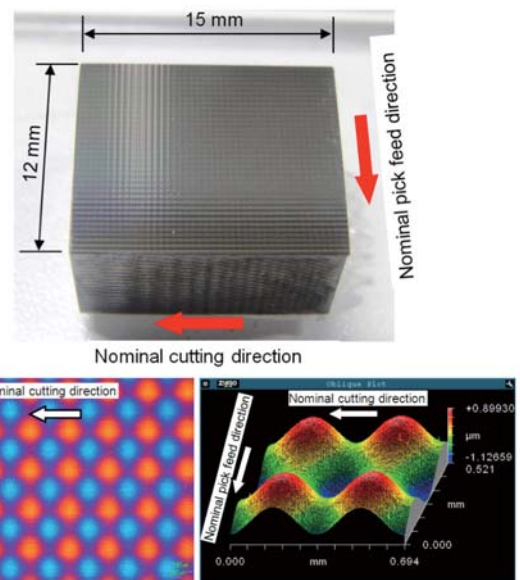


図2 振幅変調法を用いて焼入れ鋼表面に加工した正弦波グリッド面の外観写真（上段）と顕微鏡写真（左下）および形状測定結果（右下）



論的な計算に基づく補正を行うことで、20 nm 程度の優れた加工精度を達成し得ることが確認できました。

次に、開発した振幅変調法を用いて、焼入れ鋼に対して最大高低差  $2 \mu\text{m}$  の正弦波グリッド面を加工した事例を図2に示します。この加工では、工作機械に対して単に平面加工を行うための単純動作(切削速度は1050 mm/min, ピックフィー

ドは  $10 \mu\text{m}$ ) を与え、切込みは振幅変調のみにより制御して加工を行いました。図から、良好な鏡面性状と優れた加工精度の両立に成功していることが分かります。今後、本手法が産業界に貢献することを期待しています。

最後に、本研究の優秀講演論文賞受賞に関し、生産加工・工作機械部門の関係各位に深く感謝いたします。

## 優秀講演論文賞

### 液体金属脆化作用を援用した切削工具の機上再生技術に関する研究

大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻 杉原 達哉, 榎本 俊之

アルミニウム合金などの展・延性に富む金属材料の切削加工においては、特にドライ加工環境下において加工中に工具への著しい切りくず凝着が発生します。そして、この切りくず凝着は突然の工具折損や加工不良の原因となるために、現場では大きな問題となっています。この問題に対しては、従来から工具材料や工具形状、工具へのコーティングなど、切削工具の様々な要素について盛んに研究が行われておりますが、いずれも“工具をいかに長持ちさせるか”に主眼が置かれた研究開発であると言えます。本研究は、そういった従来の切削工具の研究開発の潮流とは全く逆に、“工具の切れ味をいかにして回復させるか”というコンセプトのもと、工具表面の切りくず凝着を工作機械上で除去することで切削工具の“切れ味”を再生する、つまり“切削工具の機上再生技術”の提案・構築を目的としています。

本研究では、物理的・化学的な手法では取り除くことが困難な工具表面上の凝着物の除去を容易にする方法として、液体金属脆化 (Liquid metal embrittlement, LME) 作用に着目した再生プロセスの提案を行いました。LME とは延性金属に液体金属が接触したとき、延性金属の延性が著しく低下するという現象であり、Al 合金は液体のガリウム (Ga, 融点  $29.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ) との接触によって著しく脆化することが知られています。また、この現象は特定の延性金属、液体金属間でのみ発現し、さらに Ga は人体に対して無害な材料です。図1に LME を援用した再生プロセスの概要を示します。Al 合金のドライ加工において切りくず凝着により加工特性が低下した工具は、①アセトン槽での洗浄を経た後、②液体 Ga 槽に浸漬することで工具表面上の凝着物のみが脆化されます。そして、③ケミカルウッドなどの軟質な樹脂材料を切削することによって、脆化された凝着物、工具に付着した液体 Ga が切りくずとともに除去され、④切削位置に戻り加工が再開されます。そして、これらを工作機械主軸の可動範囲内で行うことで、加工⇒工具再生⇒加工⇒…といったサイクルを工具の着脱なく工作機械上で行うことが可能となります。

提案手法の工具再生能力は、小径ドリルを用いた Al 合金のドライ穴あけ加工によって評価を行いました。図2に示すように、50穴加工後の工具には、すくい面からフルート部にかけて著しい切りくず凝着が発生しています。しかしながら、提案したプロセスを適用することで、工具を損傷することなく凝着物の大部分を除去できていることが確認できます。さ

らに、図3は加工中のスラスト力の推移を示しています。同図に示すように、1穴目から50穴目にかけては工具への凝着の発生によってスラスト力が大きく上昇していますが、再生プロセス直後のスラスト力 (51穴目) は、1穴目加工時とほぼ同程度まで低減しています。以上の結果から、本提案プロセスの適用によって、著しく低下した工具のパフォーマンスを新品と同程度まで回復することができたとと言えます。

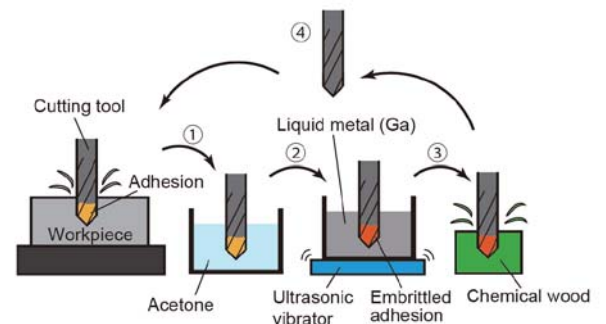


図1 液体金属脆化作用を援用した工具機上再生プロセス

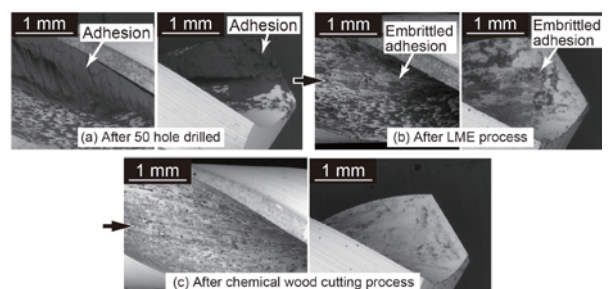


図2 小径ドリルのSEM像

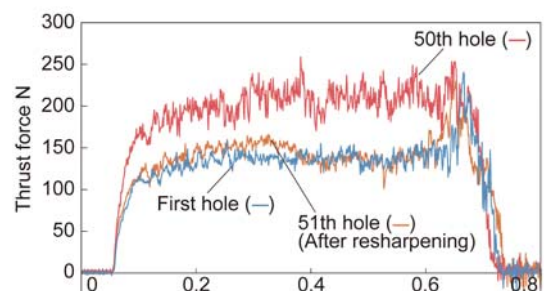


図3 スラスト抵抗の推移

さらに、LME が特定の液体金属 - 延性金属間でのみ発現することを利用すれば、適切な液体金属の選択により、Al 合金以外の金属材料切削における凝着物の除去も可能となると考えられます。そこで、本研究では SS400 を被削材として、鉄鋼材料切削における凝着除去についても検討を行いました。鉄系材料は液体 Ga による脆化は発生しませんが、インジウム、鉛などの液体金属により脆化されることが知られています。そこで、Ga-In 合金 (Ga: 75.5 %, In: 24.5%) を LME プロセスにて使用して凝着物の除去を試みた結果、Ga-In 合金を使用することによって鉄系材料の凝着物の除去も可能であることが示されました (図 4)。以上のように、本研究の結果から、提案プロセスは極めて優れた工具再生能力を有するとともに、汎用性の高い技術として確立できる可能性があることが示されたと言えます。

最後に、本研究の優秀講演論文賞受賞に関し、生産加工・工作機械部門の関係各位に深謝申し上げます。

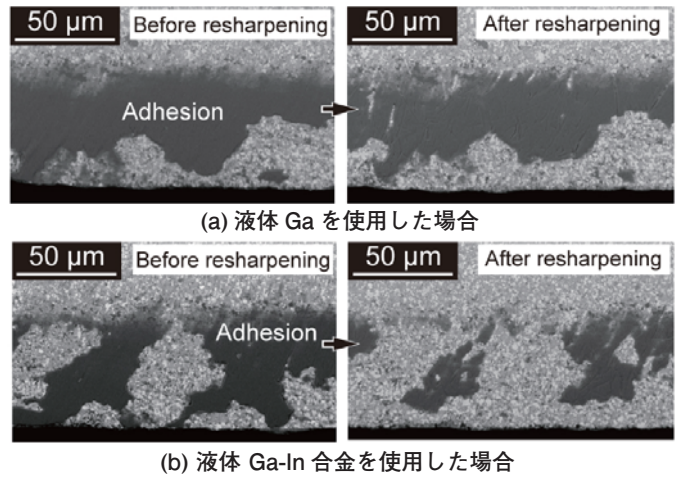


図 4 鉄系材料切削における凝着物の除去

部門からのお知らせ

No.15-206

The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21)  
第 8 回 JSME 先端生産加工に関する国際会議

開催日 2015 年 10 月 18 日 (日) ~ 22 日 (木)

会場 京都リサーチパーク (京都市下京区)

目的 生産加工・工作機械部門は、ものづくりの科学と技術、特に生産加工・工作機械に関する最新情報を国内外に発信し、学術分野の進化、発展に貢献するというポリシーのもとに、先端生産技術に関する国際会議を開催してきました。LEM21 は、ものづくり立国として製造技術で世界をリードしている日本において、ものづくり研究の発信と体系化についての国際会議が必要との要望から 1997 年にスタートしています。2015 年の第 8 回 LEM21 は、従来の伝統を受け継ぎながら、新たな展開を活性化するために、京都にて開催いたします。

LEM21 KYOTO のハイライト

▶ 21 のオーガナイズドセッション(OS)に 200 件の講演を予定。

海外からは 15 カ国からの参加予定。

▶ 5 件のプレナリーセッション (PS) を予定。

▶ 企業から複数参加登録される場合の特典あり。

最新情報は <http://me.kyoto-u.ac.jp/lem21/> を参照下さい。

●プログラム (予定)

10 月 18 日 (第 1 日目) ウェルカムレセプション

10 月 19 日 (第 2 日目) 午前: 開会挨拶, 基調講演 2 件;

PS1・複合加工機による生産性向上 (トルコ Sabanci 大学, Budak 教授)

PS2・航空機産業の将来と製造技術者へのインパクト (米国 Boeing Research & Technology, Itoro A. Ukpe 氏)

午後: 一般講演・オーガナイズドセッション

10 月 20 日 (第 3 日目) 午前: 一般講演・オーガナイズドセッション。午後: 以下の基調講演を予定;



Prof. Erhan Budak

Mr. Itoro A. Ukpe

Prof. Konrad Wegener

Mr. Hans Beckhoff

Prof. Kumiko Nishio



PS3・工作機械の最新制御・補正技術（スイス連邦工科大学、Wegener 教授）

PS4・制御・情報・インターネット技術の統合 Industrie 4.0（ドイツ Beckhoff Automation GmbH, Beckhoff 社長）

PS5・異業種に学ぶネットワーク戦略，京都祇園花街の人材育成・経営学（京都女子大，西尾教授）。

夕刻：懇親会（京都リーガロイヤルホテル）

10月21日（第4日目） 午前～午後：一般講演・オーガナイズドセッション

10月22日（第5日目） 工場見学（島津製作所，カシフジを予定）

懇親会では京都らしい行事，会期中には時代祭・鞍馬の火祭りなどの京都を代表する伝統行事も開催されます。10月21日～24日に名古屋で開催されるメカトロテックジャパン2015

の（<http://mect-japan.com/2015/>）招待券を配付します。多くの方々の参加をお待ちしています。

公用語英語

参加登録・登録料

60 000 円（正員），65 000 円（会員外）

この中には，プロシーディング代が含まれます。また，2件以上発表される場合には，2件目以降，別途各10 000円が必要となります。学生の場合，25 000円（学生員），35 000円（一般学生）で，プロシーディング代は含まれません。なお，追加のプロシーディングについては10 000円申し受けます。

※参加登録者は懇親会に無料で参加できます。

問合せ先 LEM21 実行委員会 [lem21@me.kyoto-u.ac.jp](mailto:lem21@me.kyoto-u.ac.jp)

実行委員長 松原 厚

### 関連イベントカレンダー

期日	主催	名称	場所
10月18日～22日	日本機械学会	生産加工・工作機械部門主催・第8回先端生産加工に関する国際会議 LEM21	京都市サーチパーク
10月19日	精密工学会	第376回講習会 「基礎講座 設計技法入門 - 今日から使える設計技法 -」	東京理科大学 森戸記念館
11月4日～6日	日本機械学会	2015年設計工学とデジタルエンジニアリングに関するアジア会議	北九州国際会議場
11月13日～15日	日本機械学会	第23回機械材料・材料加工技術講演会（M&P2015）	広島大学 東広島キャンパス
11月13日	砥粒加工学会	砥粒の日特別企画（法人化20周年記念） オープンセミナー「砥粒加工を支えるダイヤモンド」	金沢工業大学東京 虎ノ門キャンパス（東京）
11月16日	精密工学会	第23回最先端の研究室（工場）めぐり「大型船舶から精密機械までマルチスケールなものづくり - 住友重機械工業株式会社」	住友重機械工業株式会社 横須賀製造所
11月27日	精密工学会	第378回講習会「オンマシン計測・モニタリング技術の最新動向と高能率・超精密加工へ展開」	東京理科大学 森戸記念館
2016年3月15～17日	精密工学会	2016年度精密工学会春季大会学術講演会	東京理科大学 野田キャンパス

### 編集後記

生産加工・工作機械ニュースレター No.48 をお届けします。今回の技術レポートではオークマ株式会社 山本様にご執筆頂きました。日本機械学会では新しく学術誌 Mechanical Engineering Letter を創刊しました。査読を速やかに行うとのことですので，投稿をご検討頂ければと思います。

10月には第8回 LEM21 が開催されます。多くの方々に参加いただければ幸いに存じます。

委員長：松原 厚（京都大学），幹事：比田井洋史（千葉大学），浅川 直紀（金沢大学），千田 治光（オークマ（株）），  
溝渕 啓（徳島大学）

### Manufacturing&Machine Tool

No.48 秋季号 2015年8月31日発行  
編集 生産加工・工作機械部門・広報委員会

発行者 一般社団法人日本機械学会 生産加工・工作機械部門  
印刷製本 (株) 春恒社

# motion for emotion



www.nsk.com

## ココロを、うごかせ。

“たのしい”をつくれるか。“うれしい”をつくれるか。モノを動かす、それだけじゃない。その先にある“ひとのココロ”を動かす。今よりもっと速く、静かに、美しく、滑らかに。「動き」はもっと進化できる。そしてあなたの明日を、ワクワクするものに変えることができる。1916年に日本で最初のベアリングの生産をはじめてから、100年。私たちNSKは、あたらしい「動き」に、常に挑みつけてきました。身近にある家電製品や自動車から遥か彼方の宇宙ステーションまで、この世界のあらゆる“動くモノ”の質を上げるために。これからも、誰も想像できなかった「動き」をたくさんカタチにして、あなたのココロを、もっともっと動かしたい。100年分の感謝を込めて。私たちNSKの挑戦は、さらにつづきます。



MOTION & CONTROL™  
**NSK**  
日本精工株式会社