

最先端フォトリソ・レーザー（産業応用の高度化）
に係る議論（H29. 1. 26、第 8 回）の骨子案

H29. 2. 13

研究動向

- 光技術は、これまで、テレビ、カメラ、印刷、発光ダイオードなどのエレクトロニクスといった我々が日常的に触れる画像技術や、IoT 利活用の基盤である光情報通信技術や計測技術、レーザーを使用した医療技術やレーザー加工を活用したものづくりなど、私たちの生活や産業を支える極めて重要な技術として発展してきた。資源に乏しく、人口の減少が不可避な我が国において、高付加価値のモノやサービスを生み出すことは、将来にわたって国際的な産業競争力を確保する観点から必須であり、我が国が歴史的に強みを有する光技術のポテンシャルをこれまで以上に発揮し、その応用によって産業を高度化していく重要性はますます高まっているといえる。
- 光技術はこれまで、科学技術の観点からは、いかに波長範囲を拡大し、高出力、短パルス、高安定度を実現するか、ということを目指して高度化が行われてきた。我が国の製造業、高度経済成長を支えてきたものづくりや産業応用の観点からは、主にレーザーの高出力化を目指した活動が行われてきた。近年、それらを融合した産業利用の高度化という観点から、EUV リソグラフィや CPS（サイバー・フィジカル・システム）を活用した最適化生産の実現、加工の学理的な原理の解明などを目指した産学官の取り組み等がなされている。

（EUV リソグラフィ）

- パソコンの頭脳である CPU といった集積回路の回路パターンを、半導体にプリントするためにはレーザーが使用されているが、近年、プリントされるパターンが 14nm という極小の線幅にまで達している。現在は、線幅より長い 193nm の波長の光源を用い、様々な工夫により、このような極小のプリントを実現しているが、線幅が小さくなるほどプロセスが複雑化して製造コストの増大を招いている。全てのモノが繋がる将来の AI・IoT 環境として、年間 1 兆個のセンサが消費されるビジネスモデルも米国において提唱されている中、波長の短い光源による極小な半導体加工による製造コスト低減に向け、EUV 光源の開発が国内外において 20 年以上進められてきた。本格導入にはまだ至っていないが、オランダ ASML 社は研究開発用 EUV リソグラフィ装置を出荷し、インテル社（米国）、TSMC 社（台湾）では、プロセス開発が行われている。数年の間には、EUV リソグラフィ装置が製造現場で稼働する

ようになるのは間違いない状況にある。

- 我が国においても 2016 年に、EUV リソグラフィ光源として本格導入に際して必要とされる出力 250W が短時間実現され、100W では 5 時間の安定運転が実現するなど進展があり、光源の実用化に大きく近づいているといえる。一方で、EUV リソグラフィシステムとしての実用化に向けては、1 か月程度で交換が必要となる集光ミラーのクリーニング、再検査、再コーティング等の工程を含むミラーリサイクルシステムの構築も不可欠である。現在は、集光ミラーの検査には、放射光施設 (SPring-8 等) が利用されているが、運用が制限される。そのため、高次高調波技術を用いたコヒーレント EUV レーザーによる、比較的小型で、製造現場において使用できる集光ミラー検査装置に向けた開発も進められている。このように、光技術の産業応用高度化には、最先端フォトニクス・レーザーの活用が不可欠である。その他の周辺技術についても、我が国はレジスト、マスク、ペリクルといった主要要素に関する高い技術が蓄積されており、これらを有効活用した、国際競争力の確保に向けた開発が急務であるといえる。

(CPS 型レーザー加工システム)

- レーザーは、ものづくりにおける材料の切断、接合などに汎用され、利用が拡大しており、近年では世界的に、IoT 技術を取り入れた知的生産技術の確立を目指した動きがある。これは、経験と勘からこれまで導き出していた加工用レーザーのパラメータ (波長、パルス幅、パワー、繰り返し等) を、加工データベース (加工部の材料形状・温度・スペクトル等) やディープラーニングといったサイバーシステムを駆使して高速に導出し、レーザーに最適パラメータとしてフィードバックすることで、ニーズに合わせた高品位・少量・多品種生産を可能とするシステムであり、CPS 型レーザー加工システムと呼ばれる。
- CPS 型レーザー加工システムは、多様化するユーザーニーズに柔軟に対応可能な新たな加工技術であるとともに、人口減少社会を克服するための生産性の抜本的向上に資するもので、超スマート社会に向けた、我が国の競争力強化に繋がるものである。
- しかしながら、CPS 型レーザー加工システムにおいても、加工用レーザーのパラメータが膨大過ぎるという課題がある。これを解決するためには、「なぜものが切れるのか」といった加工学理の解明を通じた、CPS 型レーザー加工システムへのフィードフォワードにより、パラメータを絞り込むことが必要である。

(加工学理の解明)

- 産業におけるものづくりの現場では、高効率化、高速化、省エネ化、低環境負荷化、すなわちコスト削減の目的で、製造プロセスへのレーザーの導入が急速に進展している。しかし、例えば「なぜレーザーでものが切れるのか」といった根本的な科学的な課題が解決していないため、その適用は、経験的にうまくいった事例に限られている。レーザーによる加工は、光源、システムから材料まで、検討すべきパラメータが天文学的に多いため、経験や網羅的な探索によって最適条件を見いだすには多大なコストが掛かってしまう。この膨大なパラメータを絞り込むためには、レーザー加工の学理を解明することが有効である。この「解明」こそが、レーザー加工の伸びしろとされている部分であり、先駆的に取り組むことが重要である。学理的な見地から見ると、レーザー加工とは、空間スケールでは原子分子レベルからマクロレベルまで、時間スケールではアト秒からミリ秒、秒にまでわたる、非線形・非平衡・開放系の難解な現象である。そのため、この解明には、物理、化学、材料科学、計算機科学など、多岐にわたる分野を融合的に連携させるとともに、地道で息の長い継続的な研究として進めることが重要である。
- 学理の解明により期待される例として、非熱的なレーザー切断技術の開拓も挙げられる。炭素繊維強化複合材料（CFRP）は、我が国が強みを持ち、その軽量高強度性から、燃費向上や環境負荷低減への寄与が期待される高付加価値の材料である。これは難加工材料の一つであり、切断する際に一般的な熱的レーザー加工を行うと、樹脂部が破損してしまう。しかしながら、ある特定の短波長のレーザーによる加工では、非熱的な切断により樹脂部の損傷を低減できることが分かってきており、これを学理から解明することは、より安心・信頼できる材料開発が実現するのみならず、加工する材料に適したパラメータをもった短波長・短パルスレーザー光源の開発や、他の難加工材料の高品位加工への展開が期待される。
- レーザーピーニングも新規加工プロセスとして期待されている。レーザーを材料表面に当てることで材料を改質し、高強度化することで軽量材料として使用できるが、超高圧下での物質の理解が必要であるとともに、加工用レーザーとして繰り返し数の高いパワーレーザー開発が求められる。また、産業界における接合加工の需要も高いところであるが、接合過程の学理解明は、切断のそれよりも更なるチャレンジである。
- このように、最先端の基礎研究は産業利用に密接に結び付いており、学理研究の重要性が高まっているといえる。

日本の強み・課題

- 加工用レーザーとして広く用いられている CO₂ レーザーやリソグラフィ用のエキシマレーザーについて、我が国はこれまでの技術開発に立脚した一定の競争力を持っている一方、今後の加工用レーザーとしての成長が予測されているファイバーレーザーについては米国と独国の後塵を拝している。高品位加工には、短波長又は短パルスのレーザーが適していると言われていた中、独国は、レーザー加工用の短パルス高出力レーザーの開発を行っている。我が国は短波長、短パルス両者に強みを持っているため、短波長・短パルス化を共に進めるとともに、材料それぞれに適した加工パラメータの探索をすることが差別化に繋がる。
- 光技術は多種多様であるが、個々の市場規模が小さいため、一般的に投資の対象になりにくい。さらに、我が国は、技術の応用可能性が十分に理解されないことによるビジネス側のリスク懸念などにより、海外に比べ最先端フォトニクス・レーザーを産業応用したベンチャービジネスを起業する閾値（いきち）が高いのではないかと。また、商品や技術ごとに事業化する傾向も、分割損が大きくなることから、閾値を高めていると思われる。

推進方策の検討にあたって考慮すべき点

- 最先端フォトニクス・レーザー技術の産業応用には、分野横断的な産学の連携が必要である。特に、技術シーズ側とニーズ側両方の言葉を理解して通訳できる、最先端光源をニーズ側が使いやすいように工夫できるといった両者のコーディネーションができる人材の育成が必要である。そのためには、大学や研究機関と産業界両方を経験できる人材流動性や、両者と対等にコーディネーションできる立場を確保する枠組みをいかに構築するかを検討すべきである。そのような枠組みを通じて、継続性のある議論の場を設け、信頼関係を構築し、組織を超えた連携をする必要がある。産業界の高度人材のリトレーニングによる異分野展開促進も有効な手段といえる。
- テーマの設定においては、バックキャスト（課題の解決）とフォアキャスト（未来の創出）の融合する、産業インパクトのある高度な課題を見つけ出すことが必要である。課題解決であっても、学術としての新しいテーマが潜んでいることが必要であり、また、単に課題が解決できれば良いと言うのではなく、掘り下げることによって新しい研究テーマが創出されるようなものが望ましい。
- 産学協同による、俯瞰力のある博士人材の育成や、若手研究者への多様な機会の提供することも必要である。事業化活動を通じた若手研究者のキャリアパス開発、

具体的には、ポスドクの兼業によるキャリア支援・提供などにより、研究とビジネスが融合した場を提供することによって、人の動線の流動性を高め、分野を越えた相互作用を促進する、新しいアイデアと活動の源泉としての役割を活性化していくことが必要である。

- 技術がどのようなレベルにあるのか、その進展によってどのようなポテンシャルや可能性があるのか、どのように社会に役立ち世界が拓けるのかを国民と企業に分かりやすく発信することが重要である。また、ベンチャービジネス起業に当たっては、商品や技術を束ねた事業化によって企画・戦略・営業の一元化ができれば、資金や人材の有効活用、経費削減、連携強化や新規開発投資拡大が期待できるため、起業の閾値が下がるのではないか。

注記

用語解説

EUV

Extreme UltraViolet radiation（極端紫外放射）の略で、波長 1～100nm の範囲の紫外線のこと。半導体分野のリソグラフィ技術として波長 13.5nm の光源が開発されており、現在、EUV=13.5nm の光ということが定着している。

リソグラフィ

半導体や液晶パネルの基板の作成などに用いられ、回路パターンなどをレーザー光で基盤などに現像する技術

レジスト

光によって化学物質を溶媒に溶かしたもので、光を当てる部分を制御することで、必要な形状を描くことができる。光が当たった部分が溶解する「ポジ型」と、光が当たった部分が残る「ネガ型」がある。

マスク

半導体に転写する回路パターンが描かれたもの。

ペリクル

マスクに貼り付ける防塵（ぼうじん）用の保護膜。

炭素繊維強化複合材料（CFRP）

炭素繊維（強化材）とエポキシ等の樹脂（マトリックス）により構成される複合材料。従来材と比較して、比強度（強度/密度）、比弾性率（弾性率/密度）に優れる、疲労特性に優れる、熱膨張係数が小さく、寸法安定性に優れる、導電性を有するといった特徴がある。軽量化による燃費向上や、CO₂ 削減による環境負荷低減が可能となるため、次世代の自動車の車体や航空機の機体の材料として期待されている。

非線形・非平衡・開放系

自然科学では、何かを 2 倍にしたらその結果も 2 倍になるような比例関係が成り立ち（線形）、全体が静かで時間変化しない（平衡状態）、また、その系を構成する物質の出入りがない系（閉鎖系）を扱う場合が一番易しい。そして、その条件が一つでも外れると取扱いが急に難しくなることが知られている。レーザー加工のような過程では、例えば、投入したエネルギーと加工される物質量は比例しない（非線形）、状態は時々刻々

変化する（非平衡）、さらに、加工された物質は外部に逃げていく（開放系）など、すべての状況が取扱いを困難にしている。