自動車と航空業界における ディスクレーザ

バート・クレムザー、エワ・ジオルコウスキー

調節可能なナノ秒パルス長によって実現される連続生産

モビリティのグローバルな高まりに加えて、新興工業国の経済成長やますます進むグローバル化が、自動車と航空業界の継続的な成長を支える推進力となっている。それに伴うCO_2汚染や気候温暖化といった環境への影響と、使用可能な化石資源の減少を受けて、エレクトロモビリティ（Eモビリティ）や軽量構造の分野の開発が進められている。車体の軽量化においては、この傾向が特に顕著に見られ、この10年間で多くの新素材が開発されて工業生産に実用化されている（アルミニウムとチタンの合金や、炭素繊維強化プラスチックなど）。

このような材料を、従来の製造プロセスを適用して加工すると、通常はかなりの労力とコストがかかる。レーザは非接触で摩耗とは無縁のツールであるため、優れた代替手段である。上述の材料に対する典型的なレーザ加工といえば、インコネル（Inconel）やチタン合金などの耐熱性金属でできたタービンブレードに冷却孔をあける処理や、電池膜に微細孔をあける処理がある。炭素繊維強化プラスチックの切断に加えて、そのような材料の修復もますます重要性を高めている。この補修処理では、修復パッチを当てられるように破損部分をレーザで少しずつ除去することが行われる。

材料の溶融温度と熱伝導率は非常に高い場合が多いため、それらをレーザで加工するには、数10～数100キロワット程度のパルスピーク出力と、0.1mm範囲への集光が必要である。独イエナオプティック社（Jenoptik）が提供する「JenLas disk IR70」や「JenLas disk IR70E」（**図1**）などのダイオード励起ディスクレーザは、ピーク出力が高く、このような用途に最適である（**表1**）。パルス長がナノ秒レベルで柔軟に調節可能で、パルス繰り返し周波数が数百kHzと高いことから、これらのレーザは、プロセスの開発および最適化と、連続生産における工業用途の両方に理想的なツールである。また、統合と制御が容易で、堅牢性に優れ、24時間年中無休稼働に耐える高い信頼性を備えることで、他とは一線を画す製品となっている。

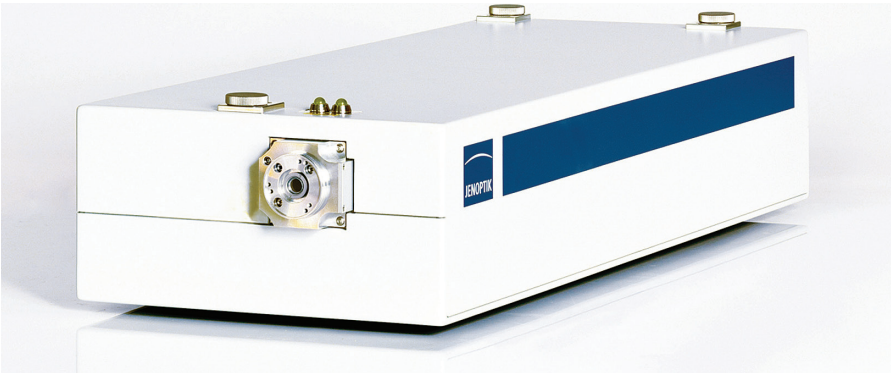

図1　「JenLas IR70/IR70E」ディスクレーザ

表1　「JenLas disk IR70」と「JenLas disk IR70E」のレーザ仕様

	JENLAS DISK IR70	JENLAS DISK IR70E
波長（nm）	1030	1030
出力パワー（W）	65	65
パルス繰り返し周波数（kHz）	8～100	10～300
パルス長（ns、調節可能）	200～1600	30～300
パルスエネルギー（mJ）	＞7	＞6.5
パルスピーク出力（kW）	＞25	＞220
ビーム品質（M2）	＜1.2	＜1.2

加工結果に対する影響

ナノ秒レーザによって得られる加工品質は、材料に加えられる熱に依存する。この点においても前出のレーザは非常に優れており、パルスピーク出力が高いことから、インコネル、アルミニウム、チタン合金といった耐熱性材料への熱の印加が抑えられるため、熱影響部（HAZ：heat-affected zone）は最小限にとどまる。

一般的には、レーザ照射時間が長いほど、熱影響部は大きくなる。このことから、加熱、溶融、蒸発という温度に基づく中間段階で構成されるアブレーション工程における、熱拡散長とアブレーション速度の間の相関関係を導き出すことができる。

表2は、$AlMg_3$アルミニウム合金に対するディスクレーザを用いたシングルパルスアブレーションの例を基に、パルス長がアブレーション速度に与える影響を示したものである。

複数のパルスまたはパスを適用することによってアブレーション処理を行う場合は、より多くのレーザパラメータ（出力、繰り返し周波数、パルスオーバーラップなど）を考慮に入れる必要がある。パルス間隔は通常、印加した熱が完全に放散するほど長くはない。その場合、材料の基本温度が上昇して、溶融温度や蒸発温度に早く達する。しかし、熱影響部も大きくなるため、材料に与える損傷も大きくなる。

図2は、パルス長と溶融温度／蒸発温度に達するまでの時間の関係を示している。パルスエネルギーが同一の場合、パルス長が長いほど、材料温度の上昇と低下は緩やかになる。そのため、表面を傷つけることなく、より多くのエネルギーを材料に加えることができる。この動作は、例えば、厚さが数ミリ程度の金属を溶融切断する場合や、プラスチックを溶接する場合に望ましい。

表2　パルス長がアブレーション結果に与える影響

使用レーザ源	パルス長（ns）	測定アブレーション径（μM）	測定アブレーション深さ（μM）	理論的な熱拡散長（μM）
JenLas disk IR70E	20	131.4	10	2.8
JenLas disk IR70E	100	121.5	11	6.2
JenLas disk IR70	200	160.7	15	8.7
JenLas disk IR70	750	142.8	23	16.9

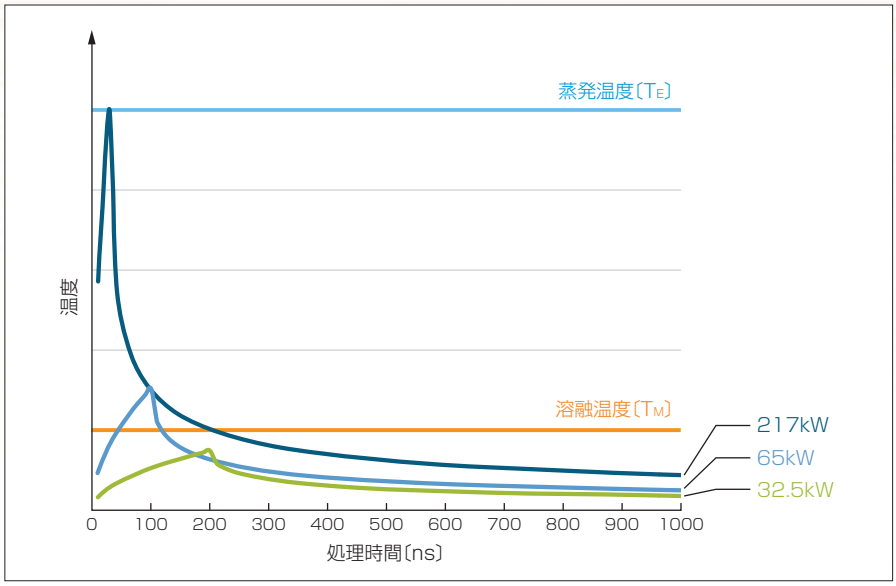

図2　シングルパルス照射における、パルス長と溶融／蒸発温度の関係を簡素化したモデル

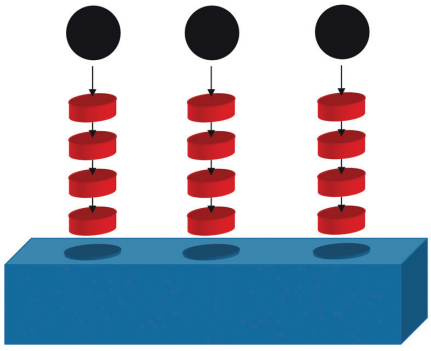

図3　パーカッション穴あけ

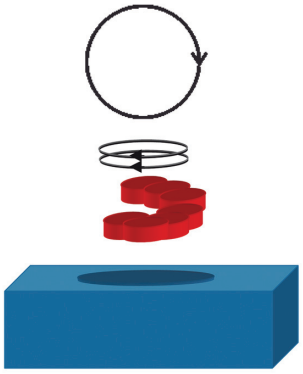

図4　トレパニング穴あけ

レーザ穴あけ

レーザ穴あけでは、材料を取り除くために加工面が蒸発温度に達する必要がある。穴が底面に達するまで上面から材料が除去される。この過程において、溶融粒子が表面や穴の壁面に付着し、極端な場合は穴が再びふさがれるという最悪の事態に陥る可能性がある。この処理が改良され、材料は上面と底面の両方から除去されるようになった。材料の厚さと穴の大きさによって、2種類の穴あけ方法を適用することができる。原則としては、直径が集光範囲以下（一般的には100μm未満）の小さな穴には、パーカッション穴あけ（**図3**）が適用され、中～大の大きさの直径（一般的には100μm以上）には、トレパニング穴あけ（**図4**）が望ましい。

前出の2種類のディスクレーザはパルス幅が調節可能であるため、レーザパラメータが加工結果に与える影響を確認するのに適切である。**表3**と**表4**

表3　チタン（グレード5）に対するパーカッション穴あけ結果

レーザ	パルス長（NS）	繰り返し周波数（kHz）	デューティ比（%）	最小テーパー角（°）	最大穴あけ速度（1秒あたり個数）
JenLas disk IR70	700	8	0.5	0.8	133
JenLas disk IR70E	300	30	1.0	0.2	600
JenLas disk IR70	1800	30	5.0	1.1	1500

表4　アルミニウム合金（$AlMg_3$）に対するパーカッション穴あけ結果

レーザ	パルス長（NS）	繰り返し周波数（kHz）	デューティ比（%）	最小テーパー角（°）	最大穴あけ速度（1秒あたり個数）
JenLas disk IR70E	100	10	0.1	1.1	334
JenLas disk IR70	700	8	0.5	0.7	800
JenLas disk IR70E	300	20	0.6	0.9	833

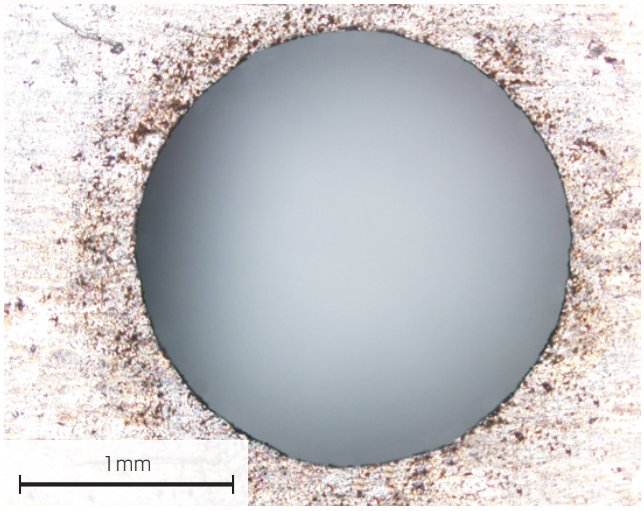

図5　トレパニング穴あけによるニッケル合金（インコネル）のマクロ孔

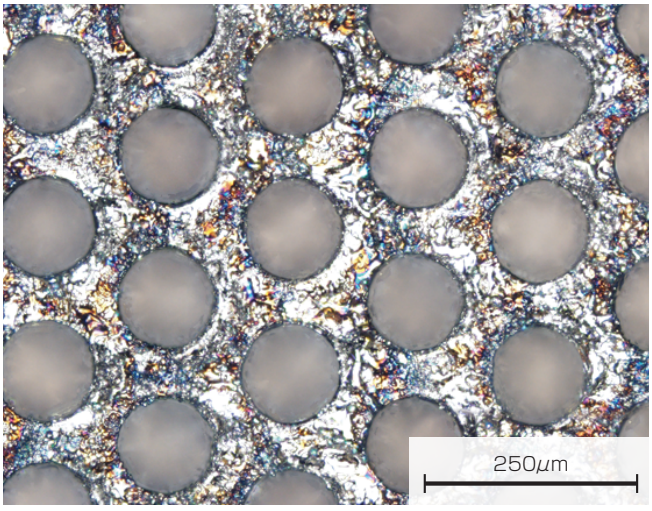

図6　パーカッション穴あけによるチタン（グレード5）の微細孔

は、厚さ1mmのチタン合金（グレード5）と厚さ0.8mmの$AlMg_3$に、これら2種類のレーザでパーカッション穴あけを行った結果を示している。約50μmの集光径によって、穴径約70μmで、テーパー角が1.1°未満という内側のエッジ勾配が非常に急峻な穴を生成することができる。

他のレーザパラメータを一定に保った場合、穴あけ速度とテーパー角は、主にパルス長とパルス繰り返し周波数、つまり、それらから算出されるデューティ比によって決まる。表3と表4に示されているように、デューティ比の増加に伴い処理速度は速くなる。しかしそれと同時に、表面に堆積する粉じんの量が増加し、熱影響部も大きくなることが確認できる。

短いパルスを一定のパルスエネルギーで適用する（ピーク出力を高くする）と、熱影響部は小さくなり、生成される粉じんの量も減る。液相にある材料の量が減り、材料がすぐに蒸発するためである。パルスを短くすれば品質を向上させることができるが、パルスを長くする方が穴あけ速度は速くなる。したがって、パルス長が調節可能であれば、ユーザーが個々の用途ごとに必要に応じて処理を最適化することができる。

2つの穴あけ方法を、ニッケル合金とチタンに適用した例を示す。例えば、トレパニング穴あけによって、厚さ6mmのニッケル合金（インコネル）に直径2mmの穴をあける場合、処理時間は約30秒で、1秒あたり0.03個の穴をあけることができる（**図5**）。パーカッション穴あけによって、厚さ1mmのチタンシート（グレード5）に直径100μmの穴をあける場合は、最大で1秒あたり1400個の穴をあけることが可能である（**図6**）。ピコ秒レーザによる材料加工と比較して、穴あけ速度が速く、生成

表5　アルミニウム合金（$AlMg_3$）に対するエングレービング結果　（単位：mm^3/min）

ALUMINUM（ALMG3）	8kHz	10kHz	20kHz	30kHz
JenLas disk IR70 長パルス（1000–1600ns）	126.8	84.9	32.8	20.6
JenLas disk IR70 短パルス（200ns）	試験せず	21.9	20.0	15.9

表6　ニッケル合金（インコネル）に対するエングレービング結果　（単位：mm^3/min）

NICKEL ALLOY（INCONEL）	8kHz	10kHz	20kHz	30kHz
JenLas disk IR70 長パルス（1000–1600ns）	16.4	14.0	12.9	4.3
JenLas disk IR70 短パルス（200ns）	8.1	7.4	5.9	4.0

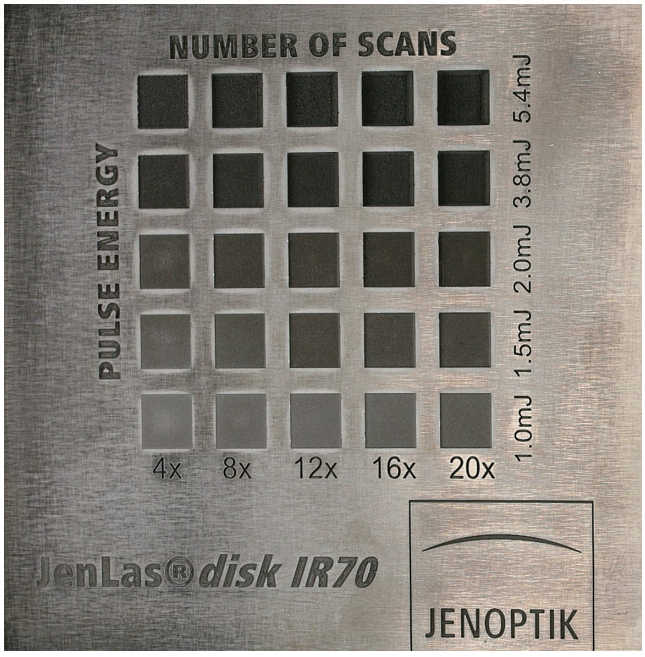

図7　$AlMg_3$のアブレーション結果に対する、パス数とパルスエネルギーの影響

される穴の品質も高い。

エングレービング

エングレービングの場合は、加工結果は、出力、パルスの繰り返し周波数と長さ、ハッチ間隔、オーバーラップによって決まる。オーバーラップが大きい場合は、処理速度が低下するため、粗さも軽減される。個々の品質要件に応じて、各材料に対する最適なレーザと加工パラメータを特定することが必要となる。

実験例として、$AlMg_3$とニッケル合金（インコネル）を、JenLas disk IR70を使用して異なるパルス繰り返し周波数で加工した。短いパルスと長いパルスを適用して、結果を比較した（**表5**、**表6**）。

長パルス（1000～1600ns）の方が処理速度が速いが、短パルス（200ns）の方が熱影響部が小さいために品質が高くなることも明らかである。パルスエネルギーが高いことが、生産性の向上につながる決定的な要素である。パルスが長く、パルスエネルギーが高い場合に、最も速く溶融温度と蒸発温度に達する。

図7はアルミニウムに対するエングレービング例で、パルスエネルギーとレーザパス数の関係を示すものである。処理の最後に、最終的なクリーニングと研磨の工程を加えることによって、表面の粗さを改善することができる。低いパルスエネルギーと高いパルス繰り返し周波数を用いた処理工程によって、これを行う。

まとめ

各種金属に対する適用テストから、ミリジュールレベルの高いパルスエネルギーと、数百ナノ秒レベルのパルス幅によって、アブレーションと穴あけの両方の処理の生産性が向上することが明らかになった。ただし、パルスエネルギーが一定の場合に、加工結果として最適な品質が得られるのは、パルス長が短く、パルスピーク出力が高い場合である。JenLas disk IR70とJenLas disk IR70Eは柔軟な設定オプションを備え、個々の用途の要件に応じてレーザパラメータを適切に調節することができるため、生産性と品質の両方の面で結果の最適化を図ることができる。工業用途に適したその柔軟性とデザインにより、プロセス開発にも、連続生産における工業用途にも合致するレーザとなっている。個々の加工処理に続いて要件が激しく変更される自動車または航空業界の金属微細加工に、これらのレーザは最適である。

著者紹介
バート・クレムザーはイエナオプティックレーザ社のプロダクションマネージャー。
エワ・ジオルコウスキーはレーザアプリケーションエンジニア。
e-mail:bert.kremser@jenoptik.com
ewa.ziolkowski@jenoptik.com

ILSJ