

フェムト秒レーザーを用いたポリマー材料の高品質切断

ポリマーはさまざまな技術分野で極めて重要な役割を果たしています。ポリマーは機械的強度や柔軟性、絶縁性、耐熱性および耐薬品性に優れた素材です。特に注目すべき2つのポリマーは、ポリイミド（PI）とポリエチレンテレフタレート（PET）です。ポリイミドは機械的強度、耐熱性、耐薬品性が高いことで知られており、電流の流れを管理するための堅牢な誘電材料として、フレキシブルプリント回路基板市場で欠かせない存在となっています。また、樹脂状態では、熱硬化性カーボンファイバー構造の他、耐熱性ファイバーのコーティングや集積回路の保護層にも用いられています。一方、PETは汎用ポリマーとして、医療機器から食品包装まで多岐に渡る用途に用いられています。その優れた重量比強度と総合的な耐破断性により、PETは優れたバルク素材となります。ファイバー状では、丈夫で耐水性があり、しわのよらない織物になります。この2つの材料、PIとPETには、重要な共通の応用領域があります。それはOLEDフラットパネルディスプレイです。他の低価格ポリマーと比較して耐熱性に優れているPETは、歴史的にサブストレートの材料としてよく用いられていますが、他の用途にも使用されています。より要求の厳しい用途では、PIのより優れた強度や温度、電気特性が有効です。いずれの材料も、フラットパネルまたはOLEDディスプレイ全体の厚さとしては、数ミクロンの薄膜から数十ミクロン以上のより厚いシートまでさまざまです。装置やディスプレイの軽量化が進み、フレキシブル/折りたたみ式になるにつれ、全体の厚みは薄くなっていきます。

レーザーは長年にわたって多くの産業でポリマーの加工に用いられてきました。溶融や他の熱影響部（HAZ）の形成を避けがたい場合もありますが、超短パルス（USP）レーザーはこの課題に対処できることがわかっています。PIやPETのUSP加工についての理解を深めるために、弊社のアプリケーションラボ研究員は高出力フェムト秒レーザーであるSpirit®100 Wレーザーを赤外線（IR）基本波長 1030 nmと緑色（Green）の第二高調波長 515 nmで照射し、アブレーション現象の総合的な調査を実施しました（平均出力50W）。この研究では、シングルパルスやマルチパルス照射時の加工閾値の決定（加工プロセスの「発生係数」も含む）、またシングルパスおよびマルチパスによる切断プロセスの開発や最適化に関する情報についても扱っています。

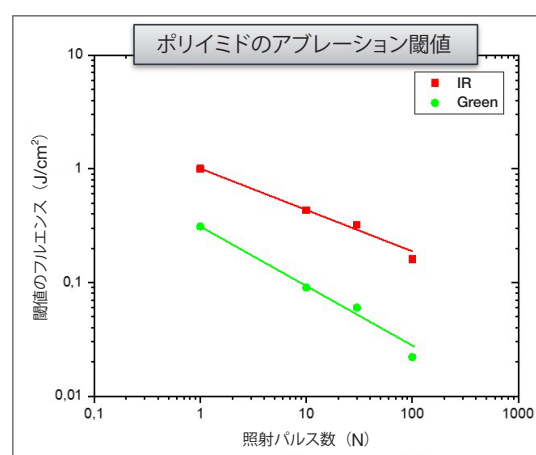


図1: ポリイミドにおけるシングル/マルチパルスのアブレーション閾値

いずれの波長も焦点サイズを $17\text{ }\mu\text{m}$ 以下（直径 $1/e^2$ にて）とし、1–100パルスの範囲で固定ビーム照射時の閾値を決定しました。シングル／マルチパスにおける閾値の決定と分析にはそれぞれ、文末記載の参考文献から引用しています。加工閾値決定において蓄熱現象を区別するため、テストは1 kHz から2 MHzの幅広いソパルス繰返し周波数(PRF)で実施しました。実験ではサンプルとしてCreative Global Services Inc. (Newmarket, ON, Canada) から調達したさまざまな厚みのPIシートとPETシートを使用しました。

Spiritレーザーの典型PRFである1 MHzでは、1–100パルス時のIRとGreen波長のPIのアブレーション閾値は、図1のように表示されます。

いずれの波長でも、照射パルス数の増加に伴ってアブレーション閾値が急激に低下することがわかります。これはレーザー加工ではよく知られている現象であり、不十分なエネルギーによって形成される材料欠陥より生じます。そのような欠陥は、シングルパルスでの材料アブレーションにおける、一般的な「損傷」として識別できるものではありませんが、わずかに材料特性を変えつつ、後続の同じ（低）エネルギーパルスで損傷を引き起こすようなもので、アブレーションの特徴として知られています。照射パルス数に伴う閾値の減少量は「発生係数」で特徴づけられ、値が低いほど閾値の減少量は大きくなります。以下の表1に、PI およびPET に対して Spiritレーザーの両方の波長を照射した場合の閾値と発生係数をまとめます。

アブレーション閾値フルエンス - $F_a(N)$ (J/cm ²)	N=1	N=10	N=30	N=100	発生係数 (S)
ポリイミドーIR	1.00	0.43	0.32	0.16	0.63 ± 0.02
ポリイミドーGreen	0.31	0.09	0.06	0.022	0.47 ± 0.02
PETーIR	1.09	0.40	0.32	0.16	0.60 ± 0.02
PETーGreen	0.73	0.04	0.02	0.008	0.32 ± 0.06

表1: 波長および照射パルス数によるPIおよびPETにおける閾値

Greenの波長はIRと比較してより高いパルス数で閾値の減少値が大きくなることがわかります。特にPETの場合には、パルスが1から100まで変化する間に閾値は9倍減少します。また、IRの閾値は、全てのパルス照射でいずれの材料でも極めて類似しています。

ポリマーに断熱性があることを考えると、PRFが高いほど、パルス間の蓄熱によってマルチパルスアブレーションの閾値が効率的に下げられると考えられます（あるいは期待されます）。

これを試験するため、1 kHzから2MHzのPRFでパルスを30回照射する場合について閾値を決定しました。ポリイミドの結果を図2に示します。

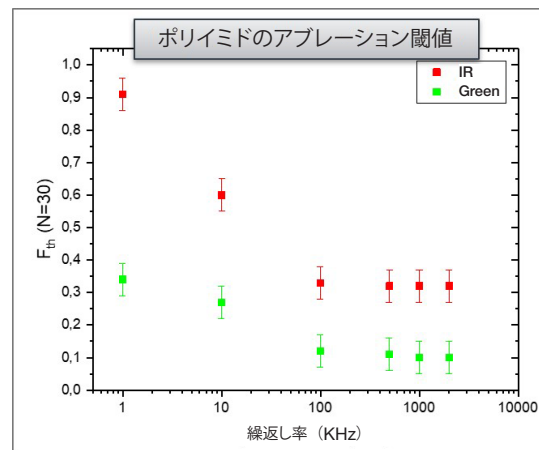


図2: パルスを30回照射した場合のPRFによるポリイミドの閾値の減少

データより、レーザー PRFを1 kHzから100 kHz に上げると閾値が著しく減少し、また100 kHzを超える閾値には比較的变化がないことがわかります。パルス照射で発生するプラズマや、デブリによる後続パルスの遮蔽効果に起因した閾値増加がみられない点は、注目に値します。ある材料ではそのような現象が発生し、高いPRFによるスループットの向上を妨げることがわかっています。したがって、この観点から考えると、Spiritが最高の出力電力レベルを発揮する非常に高いPRFで加工を行うこ

とに不利益はないと言えます。さまざまなパルス照射や周波数に対するアブレーション閾値の挙動を決定し、厚さ75- μm および125- μm のPETおよびPIフィルムの全切断加工を2つの波長で展開しました。2 MHz PRFの場合のシングルパス、マルチパス加工の切断速度を表2に示します。

切断速度 (mm/s) (2 MHz PRF)	75 μm (3 mil)		125 μm (5 mil)	
	シングルパス 切断	マルチパス 切断	シングルパス 切断	マルチパス 切断
ポリイミド – IR、70W	540	400	390	363
ポリイミド – Green、42W	540	363	420	307
PET – IR、70 W	900	800	470	400
PET – Green、42 W	880	666	510	363

表2: 2 MHzでPRFを使用した場合のSpiritによるさまざまな切断速度

データからは様々な傾向が見て取れます。例えば、シングルパス切断は全ての材料、波長および厚さで、マルチパスよりも早いことがわかります。波長の効果については、マルチパス切断の全てのケースでIRはGreenよりも速く、シングルパス切断ではGreenの加工スピードは同じか速くなります。ただしIRの平均出力がGreenよりも大幅に大きいことを考えると、全てのケースで、単位出力（すなわち、mm/s/W）あたりのスルーputに關しては、波長は短い方が効果的であると言えます。

シングルパス切断の方が高速ですが、最高品質のUSPレーザー切断加工は、マルチパスを用いた、低いパルスオーバーラップにより実現されます。この優れた品質はIRとGreenの両方で図3に示す厚さ125 μm のPIの切断部の顕微鏡写真で明らかです。

いずれの波長も、HAZは小さいか存在しないことが明らかです。IRレーザー切断ではエッジに沿って微粒子状の破片が見られますが、これは後工程のクリーニングで簡単に取り除くことができます。Greenレーザーについては、HAZと破片がないことは特に注目に値します。Greenレーザー照射時にカーフがより狭いという点も利点となります。これが重要である用途もあるかもしれ

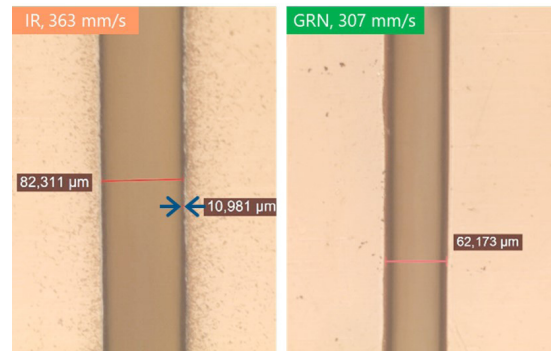


図3: IRとGreen波長による厚さ125 μm のPIのマルチパス切断で、優れた品質、最小限のHAZを実現

ません。PETのマルチパス切断については、似ているものの同じではない結果が得られました（図4）。

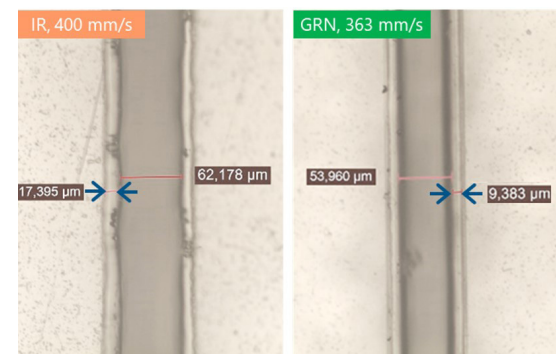


図4: IRとGreenによる厚さ125 μm のPETのマルチパス切断の比較写真

重要な所見は、切断カーフのエッジに小さな膨張が存在する点です。これはGreenとIRの両方に見られますが、これはPETの軟化点／融点がPIと比較してかなり低いことに起因する可能性が高いと言えます。この溶融効果によって、PIでの結果と比べてPETでは、IRとGreenでの品質の差が比較的小さいことも確認できます。それでもなお、Greenの加工の場合の方が、残存デブリがより少ないという利点があります。

PETおよびPIポリマーは、医療装置からOLEDディスプレイまで、ますます重要な役割を果たすようになっていきます。ここで示したアブレーション閾値のデータは、IRまたはGreenの波長、高出力または低出力のパルス照射、そして低PRFから高PRFで加工した場合に期待される加工上の利点やトレードオフを明らかにしています。全切断加工を導き出すためにこのデータを使用すると、Spiritフェムト秒レーザーで実現できる優れた品質と高いスループットが示されます。

工した場合に期待される加工上の利点やトレードオフを明らかにしています。全切断加工を導き出すためにこのデータを使用すると、Spiritフェムト秒レーザーで実現できる優れた品質と高いスループットが示されます。

参考文献:

1. J. Liu, 1982. "Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes," *Opt. Lett.* 7, 196-198.
2. Y. Jee., M. Becker., and R. Walser., 1988. "Laser-induced damage on single-crystal metal surfaces," *J. Opt. Soc. Am. B* 5, 648-659 (1988).

製品情報

Spirit® 1030-100 および515-50

Spirit 1030-100 および515-50レーザーは、高精度な工業製造におけるフェムト秒レーザーに新たな標準を打ち立てるものです。これらのレーザーは高い平均出力、高いパルスエネルギー、高い繰返し率を実現し、スループットの向上を図ります。工業的に利用可能な最短のパルス幅と優れたビーム品質によって、最高レベルの精度と品質で、文字通り熱影響部（HAZ）を生じ

させることなく、最高のスループットにて複雑で難しい部分の機械加工を行うことが可能となり、お客様に恩恵をもたらします。Spirit 1030-100 および515-50は産業用に設計されており、最低レベルの所有コストで信頼性が高く堅牢な運転を24時間365日実現します。

	Spirit 1030-100	Spirit 515-50
波長	1030 nm ±5 nm	515 nm ±3 nm
出力	>100 W	>50 W
パルスエネルギー	>100 μJ	>50 μJ
繰返し周波数	1–30 MHz	
パルスセレクション	内蔵パルスピッカー(AOM)にてシングルショット - 2MHzまで選択可能	
パルス幅	<400 fs	
出力安定性	100時間以上、<1% rms	
パルス - パルス安定性	<2% rms	
空間モード	TEM ₀₀ (M ² <1.2)	
ビーム径	2.5 mm ±0.5 mm	
ビーム拡がり角(全角)	<1 mrad	<0.5 mrad
バーストモード	>100 μJ / burst	N/A
プリパルス消光比	>250:1	
偏光	水平	
コールドスタート時間	30分以下	
ウォームスタート時間	15分以下	