

高出力ファイバレーザにおける誘導ラマン散乱と耐反射性

株式会社フジクラ 先端技術総合研究所

日高 輝 柏木 正浩 北林 和大 島 研介

1.はじめに

近年レーザ加工の分野では高出力ファイバレーザが注目されており、様々な加工事例が報告され加工装置としての導入が急速に進んでいる。高出力ファイバレーザの特徴は従来レーザと比較して効率よく集光性の良い（＝高ビーム品質）レーザ光を出力できることである。これは媒体として用いているファイバの損失が小さく、またレーザ光が通るコアが数 μm ～数 10 μm 径と非常に小さいためである。このような高ビーム品質、高効率をあわせもつ高出力ファイバレーザは材料加工において低消費電力（＝エコ）、加工速度向上（高スループット）、リモート加工など従来の CO_2 レーザや YAG レーザなどに対して様々な利点をもつ。そのため従来レーザからの置き換えというだけでなく、高出力ファイバレーザにより新しいレーザ加工の応用分野も創出されている。このように高出力ファイバレーザを用いた材料加工が普及する一方で、加工中に不意の故障や停止、加工途中での加工不安定という問題が新たに生じている。その主たる原因は、高出力ファイバレーザから出射された光が加工対象で反射し、再び高出力ファイバレーザに戻ることである。反射光が高出力ファイバレーザに不具合を生じさせる理由は大きく分けて二つある。ひとつは反射光が装置に熱的な損傷を与えることである。もうひとつは反射光により高出力ファイバレーザのレーザ発振が不安定になることである。本稿では反射光によりレーザ発振が不安定になること、およびそれに対するフジクラの対策について解説する。

2. 高出力ファイバレーザの構成と性能

まず高出力ファイバレーザの構成を示す。図1のように高出力ファイバレーザは複数の光エンジンモジュール（橙色）とビームコンバイナ（青色）からなる。フジクラでは各光エンジンモジュールからは 1 kW 超のシングルモードのレーザ光を出力し、ビームコンバイナによりインコヒーレントに結合することで最大 6 kW のマルチモードのレーザ光が出力可能である。またフィードファイバのコア径が 100 μm である場合には出力されるマルチモードのレーザ光のビーム品質は BPP（Beam Parameter Product）で 3.0 mm・mrad 程度である。

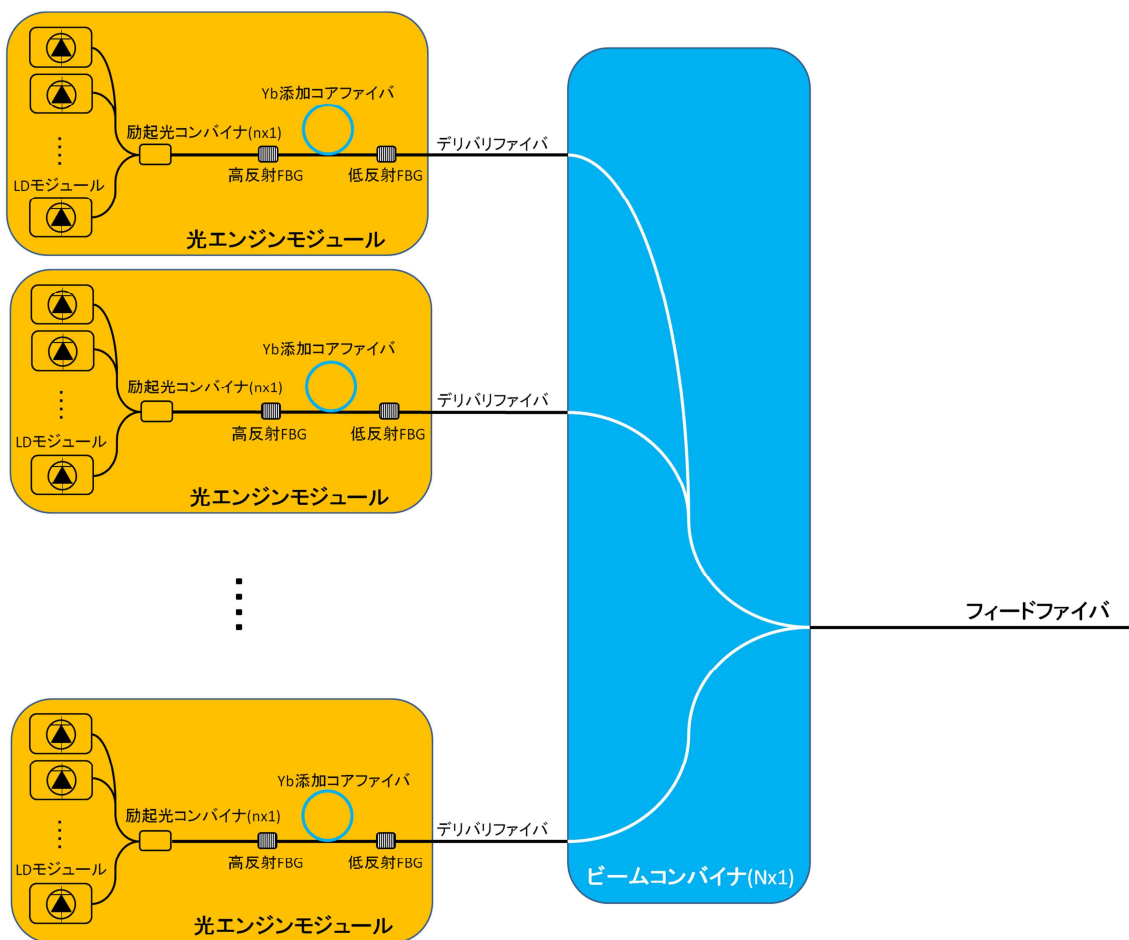


図1 高出力ファイバレーザの構成

3. 誘導ラマン散乱によるファイバレーザ出力の不安定性

高出力ファイバレーザで材料加工を行う際に最も大きな問題になるのが加工対象からの反射光による出力パワーの不安定性である。出力パワーが不安定になることで加工品質が大きく劣化する。これに対して多くのファイバレーザメーカーではレーザ光を加工対象に対して斜めに入射することで高出力ファイバレーザに戻る反射光を減らすという、ユーザの加工作業性及び加工品質を低下させる対処療法的な使用を推奨している。そのため何故反射光により出力パワーが不安定になるかについては理論的にも実験的にも解明されていない。そこでフジクラではユーザの立場に立ち垂直照射での加工が可能となるように、この問題の解決に取り組んだ。材料加工時に反射光により高出力ファイバレーザの出力パワーが不安定になる現象について観察を行い、ファイバの非線形現象のひとつである誘導ラマン散乱 (SRS: Stimulated Raman scattering) が出力パワーが不安定になる原因であることを突き止めた。

SRS とはレーザ光がファイバを構成する分子 (SiO₂) の格子振動 (光フォノン) と相互

作用をすることにより、格子振動のエネルギーだけ波長が長波長にシフトした光（ストークス光）として散乱される現象である。SRS の発生はレーザ光とストークス光の強度の積に応じて非線形的に大きくなる。高出力ファイバレーザではレーザ光とストークス光の強度が非常に高いことから、SRS の発生によるレーザ光の損失が大きくなり出力パワーが低下する現象が起こりやすい。材料加工中に SRS により出力パワーが不安定になる様子を観察した結果を図 2 に示す。加工セットアップとしては従来の反射耐性の低い高出力ファイバレーザを用い、加工対象のアルミにレーザ光を垂直に照射した。出力パワーは 2 kW である。この時にレーザ光とストークス光のパワーの時間変化を比較すると、SRS によるストークス光のパワーが増加することでレーザ光のパワーが減少していることがわかる。つまり高出力ファイバレーザによる材料加工で出力パワーが不安定になるのは SRS が顕著に発生しているためであることが実験的に確認できた。

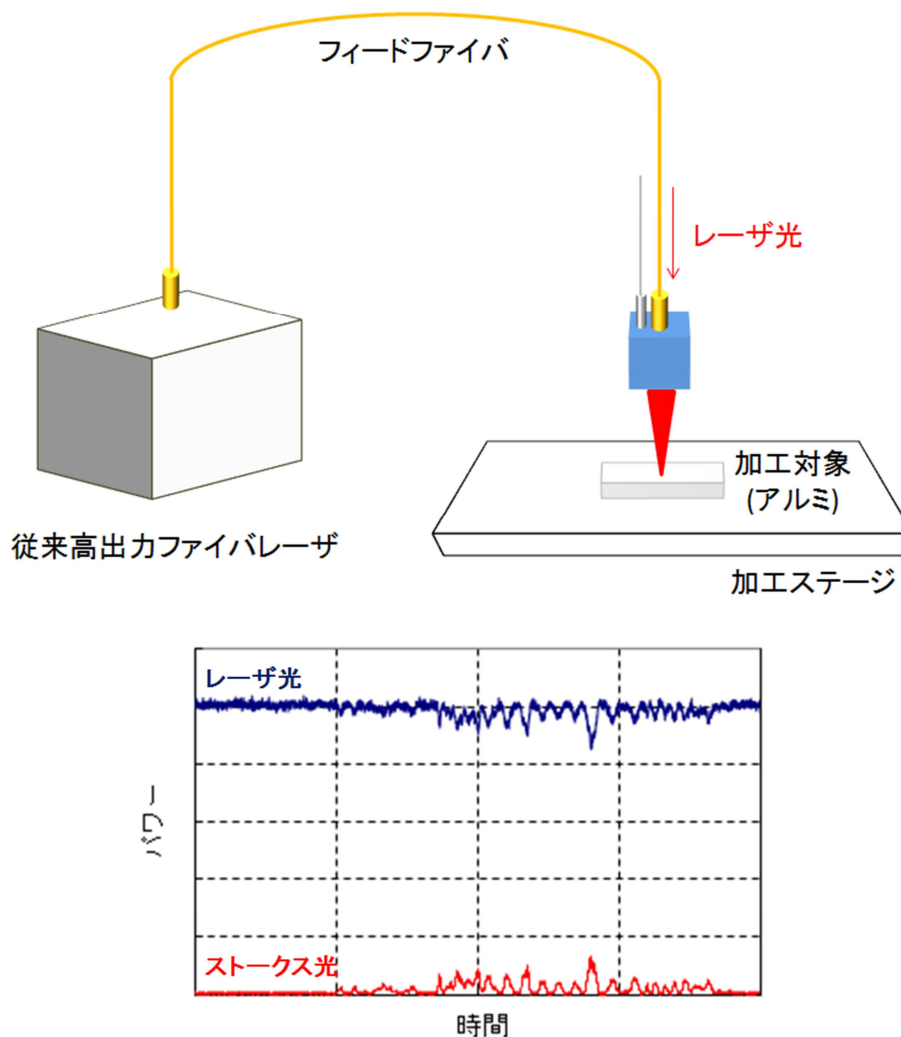


図 2 従来の耐反射性が低い高出力ファイバレーザを用いて垂直照射で加工した際に出力パワーが SRS 発生により不安定になる様子

4. SRS 抑圧手法によるファイバレーザの耐反射性向上

垂直照射による材料加工が可能な高出力ファイバレーザを実現するには、SRS を十分に抑圧することが重要である。そこで高出力ファイバレーザでの SRS の発生について理論的に解析を行い、SRS 抑圧手法の検討を行った。図 3 は解析に用いた光エンジンモジュールのモデルを示したものである。このモデルよりファイバ中におけるレーザ光とストークス光の強度を計算した結果が図 4 である。強度を対数軸にした結果も示している。なお、ここでは現象を模式的に示す目的で各軸の数値は省略した。SRS の発生によりデリバリファイバのファイバ長に依り急激にストークス光が増加し、またそれに相当するレーザ光が減少している。ただし図 4(b)からわかるようにストークス光は SRS の発生によりデリバリファイバ内のみならず共振器部も含めたファイバの全長にわたって増加する。前述したように SRS で発生するストークス光はファイバ中を導波するレーザ光とストークス光の強度の積に応じて非線形に増加する。したがってレーザ光の高出力を維持したままストークス光の増加を抑圧するためには、ファイバ中でのビーム径を拡大してレーザ光とストークス光の強度を下げること及びファイバ長を短くすることが有効である。

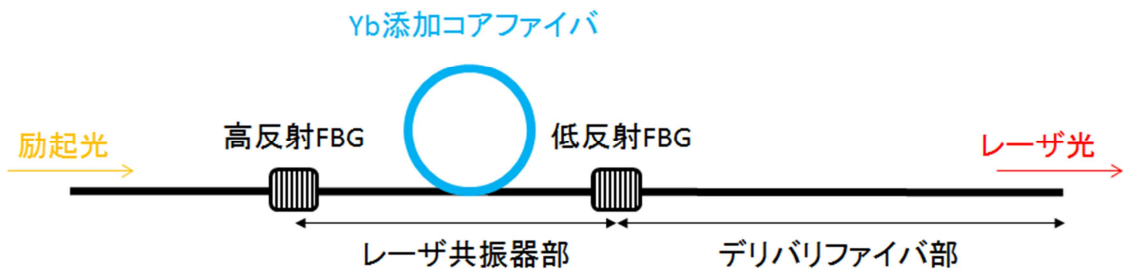


図 3 SRS 発生解析に用いた光エンジンモジュールのモデル

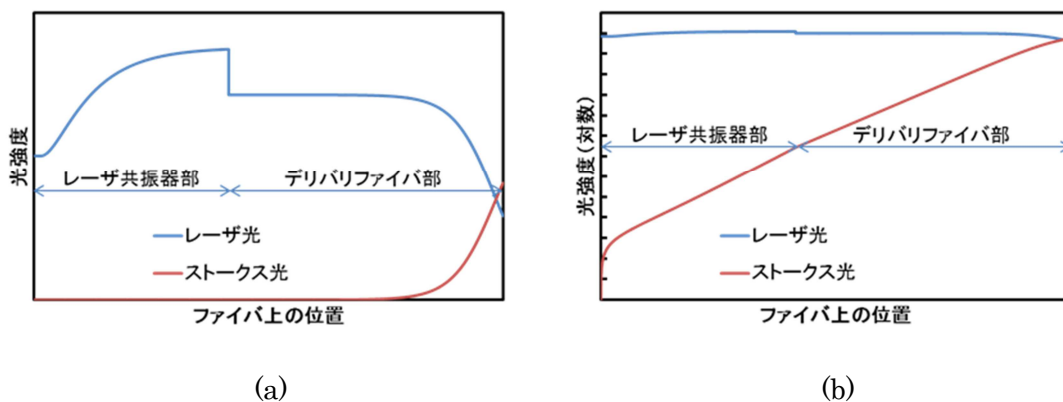


図 4 光エンジンモジュール中でのレーザ光とストークス光の強度が変化様子
(a)縦軸は線形。(b)縦軸は対数 (1 桁/目盛)

まずビーム径を拡大してレーザー光とストークス光の強度を下げることで SRS を抑圧する手法を検討した。図 5 はファイバ中のビーム径を 2 倍にした場合の計算結果である。この場合、ストークス光の強度はファイバ長が長い場合でもレーザー光の強度に対して十分無視できるほど小さく抑圧できている。

次にファイバ長を短くすることで SRS を抑圧する手法を検討した。高出力ファイバレーザの構成から一般的にデリバリファイバを短くすることには限界がある。そこで Yb 添加コアファイバを短くすることでレーザー共振器部のファイバ長を半分にする方法について検討を行った。計算結果を図 6 に示す。ストークス光の強度はレーザー光の強度の 1%程度まで増大しており、その分だけレーザー光の強度は低下している。

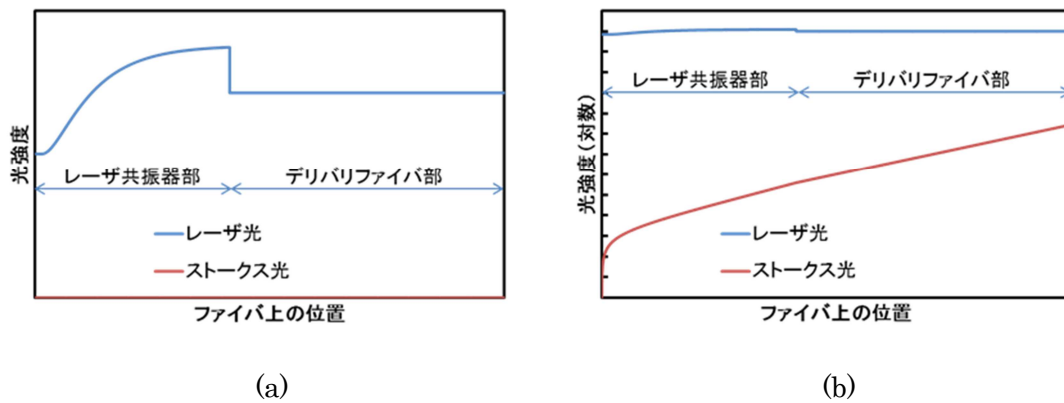


図 5 ビーム径を 2 倍にした場合における光エンジンモジュール中でのレーザー光とストークス光の強度が変化する様子

(a)縦軸は線形。(b)縦軸は対数 (1 桁/目盛)

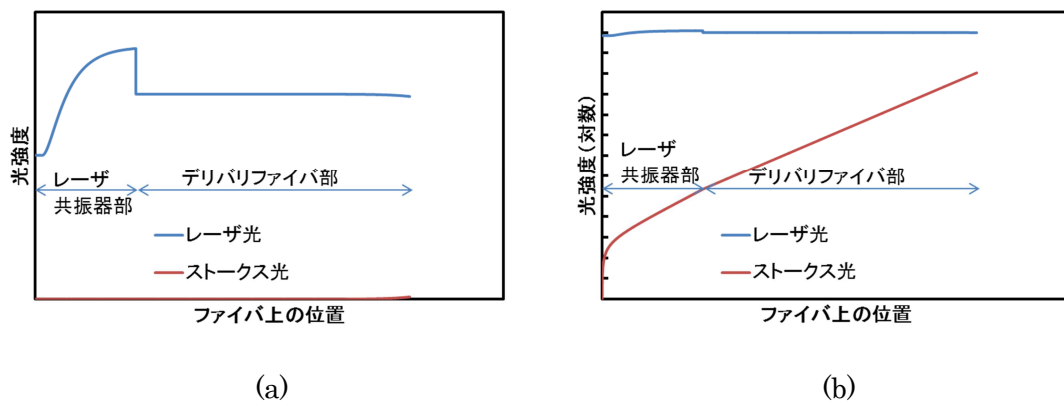


図 6 レーザ共振器部のファイバ長を半分にした場合における光エンジンモジュール中でのレーザー光とストークス光の強度が変化する様子

(a)縦軸は線形。(b)縦軸は対数 (1 桁/目盛)

これまでは出射方向のストークス光の強度についてだけ検討を行った。しかしながら高出力ファイバレーザでの材料加工時は加工対象からの反射により逆方向に導波するストークス光も存在する。この逆方向に導波するストークス光もまた **SRS** で非線形に増加する。そのため材料加工時はより出力パワーが不安定になりやすい。

そこで上記のレーザ共振器部のファイバ長を半分にした場合において、加工対象で反射され逆方向に導波したストークス光も計算した結果を図7に示す。この計算では逆方向に導波するストークス光が非常に小さいと仮定してレーザ光に与える影響を無視した。逆方向に導波したストークス光は約2億倍に増幅されており、反射により50万分の1という微小なストークス光がファイバのコアに戻るとした場合でもレーザ光のパワーの10%程度にまでなる。これは計算の仮定に反して **SRS** により増加するストークス光は無視できない比率であることを意味し、逆方向に導波するストークス光の増加によりレーザ光が減少し出力パワーが不安定になるということである。したがって材料加工時の反射を考えるとファイバのビーム径とファイバ長の両方を最適化し、**SRS** を十分に抑圧する必要がある。

高出力ファイバレーザは図1に示したように複数の光エンジンモジュールからのレーザ光をビームコンバイナにより1本のフィードファイバに結合する構成である。これまでは **SRS** の発生が大きい光エンジンモジュール内について検討したが、**SRS** はフィードファイバ内でも発生するため、フィードファイバのコア径やファイバ長も適切に設計するのが望ましい。しかしフィードファイバの設計を変えるとビーム品質や加工セットアップの自由度に対して影響が大きく、ユーザの加工品質や加工作業性を低下させてしまう恐れがある。そこでフジクラでは光エンジンモジュール内のファイバのみを改善することで **SRS** を十分に抑圧し、垂直照射による材料加工が可能となる高い耐反射性をもつ高出力ファイバレーザを実現した。フジクラ製高出力ファイバレーザで、高反射材料に垂直照射した場合においても **SRS** が抑圧され安定した出力パワーで加工ができている様子を図8に示す。出力パワーは4kWと従来高出力ファイバレーザで加工した際の2倍で、加工対象は高反射材料である銅、そしてアシストガスには窒素を用いている。レーザ光のパワーは全く変化せず、**SRS** の発生も抑圧されストークス光が十分に小さいことがわかる。

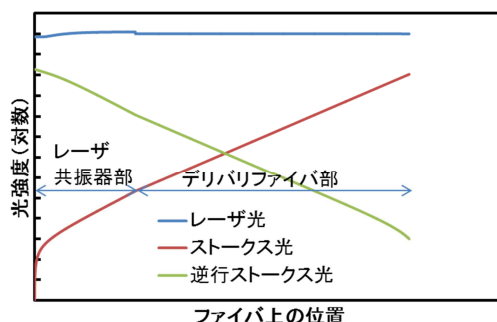


図7 光エンジンモジュール中でのレーザ光と順方向ストークス光及び逆方向ストークス光の強度が変化の様子（縦軸は対数で1桁/目盛である。）

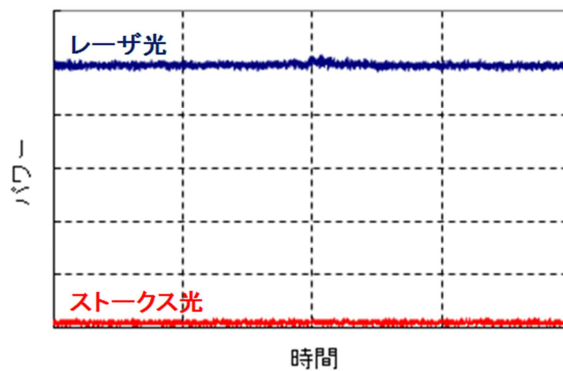
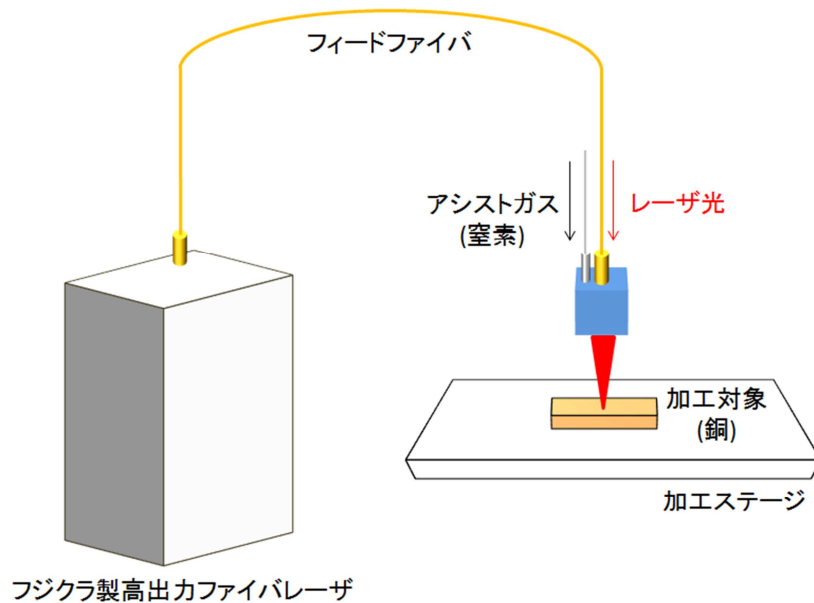


図7 高い耐反射性を有するフジクラ製高出力ファイバレーザで高反射材料である銅を垂直照射により加工した際に出カパワーが安定している様子

フジクラ製高出力ファイバレーザではパワーが安定しているレーザ光を垂直照射して加工することができるため、高反射材料に対しても高品質な材料加工が実現できる。

5. まとめ

これまで高出力ファイバレーザを用いた材料加工では、加工対象からの反射光で出力パワーが不安定になり、加工品質が大きく劣化するという問題がある。フジクラではファイバの非線形現象である **SRS** が原因であることをつきとめ、**SRS** 抑圧手法により高い耐反射性を有する高出力ファイバレーザを実現した。フジクラ製高出力ファイバレーザでは高反射材料である銅でも垂直照射による加工が可能で、高い加工精度と加工作業性をユーザーに提供する。