

先端レーザ加工機を支えるシミュレーション技術

西前順一*
山本達也*
藤川周一*

Simulation Technology for Advanced Laser Processing System

Junichi Nishimae, Tatsuya Yamamoto, Shuichi Fujikawa

要旨

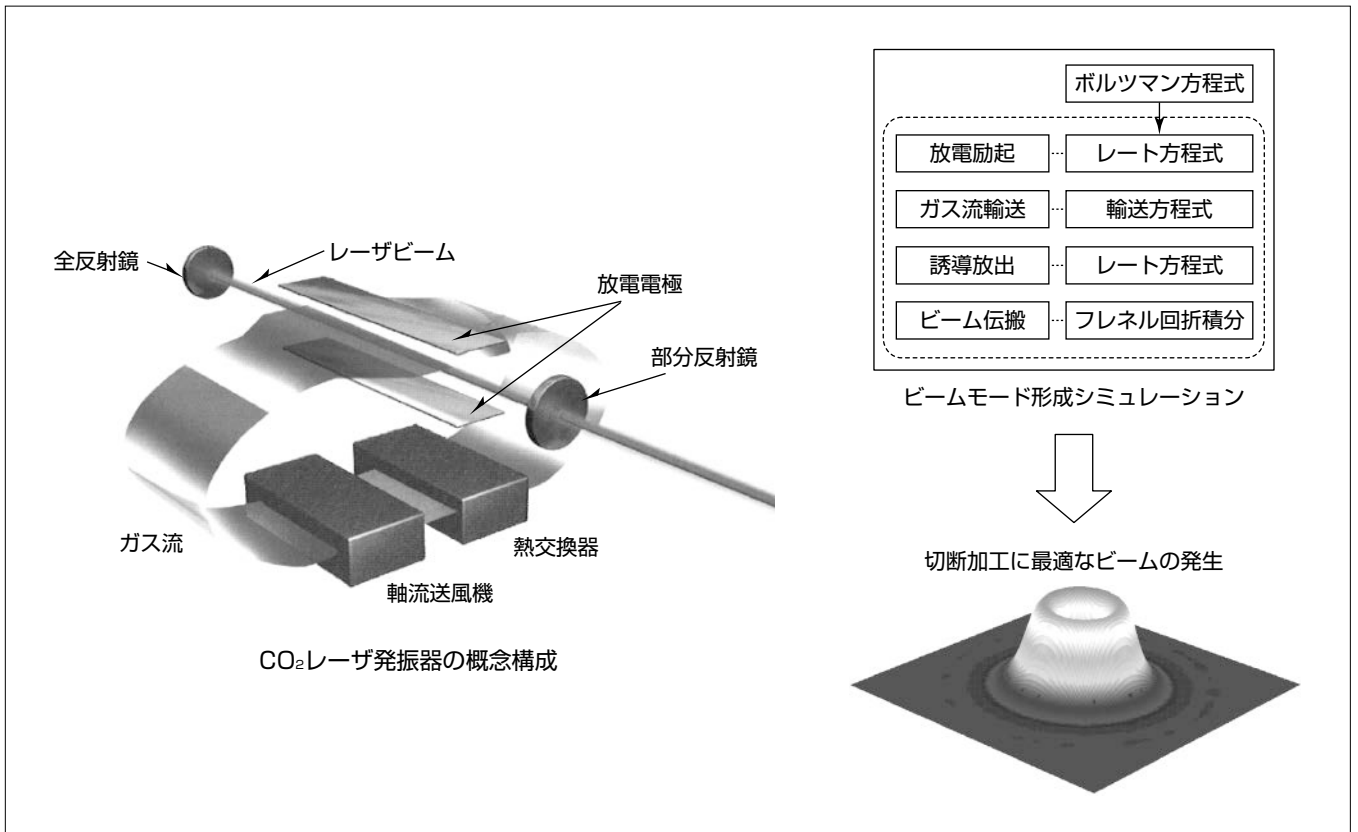
三菱電機では板金切断用途とプリント基板の微細穴あけ用途を中心に幅広い産業分野に向けたレーザ加工機を製品化しており、生産性(加工速度)をはじめとする性能ならびに品質向上を目指して、弛(たゆ)まぬ研究開発を進めている。レーザ加工機の開発では、目的とする加工に適したレーザビームを発生させることが、重要な開発ポイントとなる。本稿では、板金切断用レーザ加工機の開発に焦点を当て、切断加工に最適なレーザビームを発生させるために活用されているシミュレーション技術について述べる。

板金切断用のレーザ光源として使用されるCO₂レーザ発振器では、放電励起やレーザビームの空間伝搬など複数の物理過程が混在する中でビームモードが形成されるため、出力として発生するビームの性質を精度良く予測すること

は容易なことではない。レーザ発振器中に存在する各種物理過程を連立させて解析するシミュレーションを活用して、薄板から厚板まで高速かつ高品位に切断可能なレーザビームを発生させる発振器を効率的に開発することによって、業界トップレベルの切断速度と切断面品質を実現している。

また、近年、レーザビームの偏光状態をビーム半径方向の偏光(ラジアル偏光)とすることで切断速度の向上を図る試みが注目されている。電磁界解析シミュレーションの一種であるRCWA(Rigorous Coupled Wave Analysis)法を用いて設計した偏光制御ミラーによってラジアル偏光ビームとしては世界最高出力^(注1)となる出力4kWの発生に成功している。

(注1) 2011年4月1日現在、当社調べ



ビームモードシミュレーションの活用による加工に最適なビームの発生

板金切断加工に使用されるCO₂レーザ発振器では、放電励起、ガス流輸送、誘導放出、ビーム伝搬等複数の物理過程が混在するため、加工に最適なビームを発生させるための装置パラメータの決定は容易ではない。レーザ発振器中に存在する各種の物理過程を連立させて解析するビームモード形成シミュレーションを活用することによって、加工に最適なビームモードを発生する発振器の開発効率化を図ることができる。

1. ま え が き

レーザー加工プロセスは様々な分野に適用され、多くの産業で欠かすことのできない存在となっている。当社では板金切断用途とプリント基板の微細穴あけ用途を中心に幅広い産業分野に向けたレーザー加工機を製品化しており、生産性(加工速度)をはじめとする性能向上ならびに品質向上を目指して弛まぬ研究開発を進めている。

レーザー加工機の製品開発では、目的とする加工に適したレーザービームを発生させることが重要な開発ポイントとなる。

本稿では、板金切断用レーザー加工機の開発に焦点を当て、切断加工に最適なレーザービームを発生させるために活用されているシミュレーション技術について述べる。

2. 板金切断用レーザー加工機の概要

板金切断用レーザー加工機は、金属板に高出力のレーザービームを集光照射し、照射軌跡に沿って生じる金属溶融物をアシストガスの圧力などによって除去することで金属板を高速で任意形状に切断する装置である。機械加工にない高速性とプレス加工にないフレキシビリティを兼ね備えた工作機械として、自動車や電気機器をはじめとする多様な板金加工分野の開発試作や製造の現場で広く使用されている。

板金切断用レーザー加工機の例として図1に二次元レーザー加工機“ML3015LVP-45CF-R”の外観を示す⁽¹⁾。板金切断用レーザー加工機は、レーザービームを所定の軌跡に沿って走査して、加工対象である金属板に集光照射することで切断加工を実現する加工機本体と、加工機本体にレーザービーム

を供給するレーザー発振器から構成される。板金切断用のレーザー発振器としては、主に出力2～6kWの高出力炭酸ガス(CO₂)レーザーが用いられている(図1の例におけるレーザー出力は4.5kW)。

図2に板金切断用レーザー加工機を用いた加工例として、板厚4.5mmから19mmまでの軟鋼の切断結果を示す⁽²⁾。プレス加工では困難な幅広い板厚で良好な切断面品質の自由形状切断が、機械加工を遥(はる)かに上回る速度で実現されている。

図2に示すようなレーザー切断の特長を活用した加工を実現するためには、高速高精度のビーム走査を可能にする加工機の開発や、アシストガスを吹きつけるノズルの最適化などによって加工能力の向上を図る加工技術の開発と並んで、目的とする加工に適したレーザービームを発生させることが重要なポイントとなる。

図3にレーザービームを発生させるCO₂レーザー発振器の概念構成を示す⁽³⁾。一對の放電電極間にレーザー光を発生させる分子であるCO₂分子を含んだレーザーガスを流し、電極間の放電によってCO₂分子を励起することによって光の増幅作用を持つゲインを生成する。全反射鏡と部分反射鏡で構成されるレーザー共振器中を往復させる光をゲインによって増幅して部分反射鏡から出力レーザービームとして取り出す構成である。CO₂レーザーではレーザーガスの温度上昇によって動作特性が低下するため、レーザーガスは軸流送風機と熱交換器を用いて循環冷却される。レーザービームの光軸方向、ガス流方向、放電電流の方向が互いに直交していることから、三軸直交型と呼ばれる構成である。



図1. 二次元レーザー加工機“ML3015LVP-45CF-R”

レーザー発振器で発生するビーム品質の最適化は、加工性能の向上に対して極めて重要な要素である。最適なモード次数(ビーム集光性)の適用のみならず、ビームプロファイルのわずかな差異が加工に及ぼす影響も無視できない。板金切断加工に供されるレーザー出力の増大に伴う切断板厚の増大や切断の高速化によって、発振器の出力ビームにはますます厳しい品質が要求されるようになってきている。一方、図3に示す



SS400 : t4.5~t19mm
図2. 軟鋼切断例

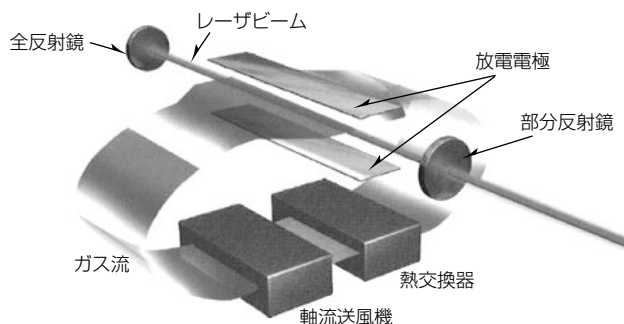


図3. 三軸直交型CO₂レーザー発振器の概念構成

ようにCO₂レーザ発振器では、放電励起やレーザビームの空間伝搬など複数の物理過程が混在する中でビームモードが形成されるため、出力として発生するビームの性質を精度良く予測することは難しく、試行錯誤的な手法で加工に最適なビームを発生させるレーザ発振器の装置パラメータを決定するには多大の時間と労力を費やしていた。そこで、加工に最適なビームモードを発生させる発振器の開発効率化を目的として、発振器中のビームモード形成をシミュレートする技術を開発した。

3. ビームモード形成シミュレーション

2章で述べたように、CO₂レーザ発振器では、次に挙げる複数の物理現象が混在して相互に影響を及ぼし合いながらビームモードが形成される。

- ・放電プラズマによるCO₂分子の励起
- ・ガスの流れによる励起分子の輸送
- ・励起分子とレーザビームの相互作用(誘導放出)
- ・共振器ミラー間のビーム空間伝搬

CO₂レーザ発振器から発生するビームモードを精度良く計算予測するためには、このような物理現象を数値モデル化し、三軸直交型CO₂レーザの構造を考慮して各現象が相互に影響しあう効果を付け加えることですべてを連立させて解析する計算コードが必要であり、図4のブロック図に示されるビームモード形成シミュレータが作成されている。

レーザ発振器の励起源となる放電の解析にはボルツマン方程式を基にした放電シミュレーションが用いられる。ボルツマン方程式による放電シミュレーションは、電子が電界から受け取るエネルギーが放電中で生じる電離現象や励起現象などに分配されていく過程を解析するのに有用であり、当社ではオゾナイザをはじめとする高性能の放電応用製品の開発に広く活用している。

レーザ発振器の開発では、ボルツマン方程式を基にした放電シミュレーションによってレーザ励起放電における励起効率や最適なガス組成などが求められており、試験デー

タと付き合わせて検証された値がレーザ励起放電のデータベースとしてビームモード形成シミュレーションで使用される。

レーザ発振は光の増幅作用を持つゲインによって、レーザビームが増幅されて発生する。CO₂レーザのゲインは、放電によって励起されたCO₂分子の密度に比例する物理量で、励起状態にあるCO₂分子の密度は、レーザ発振に関係する複数のエネルギー準位の励起や脱励起などを表すレート方程式と呼ばれる一群の方程式に基づいて解析される。一般的なレート方程式では時間変化のみが扱われるが、当社では三軸直交型CO₂レーザの構造を考慮して、ガス流によるCO₂分子の輸送効果を加えることによってゲインの時間・空間分布を求めるコードを開発している。

レーザ発振器のビームモードは、全反射鏡と部分反射鏡で構成されるレーザ共振器中を往復して空間伝搬するレーザビームが、ゲインによって増幅されて形成される。共振器中のミラー間のビーム空間伝搬は、波動光学における数値計算で多用されている高速フーリエ変換(FFT)によるフレネル回折積分を用いている。

レーザ発振器のビームモードはゲインの時間・空間分布の影響を受けて形成される。また、逆にゲインの時間・空間分布はビームモード形状の影響を受けて変化する。各物理現象に対応する数値解析をすべて連立させて矛盾のないビームとゲインの状態を求めることによって、CO₂レーザ発振器で発生するビームモードを数値的に予測することが可能となる。開発したビームモード形成シミュレーションを使って求めた出力ビームモードの例を図5に示す。

切断加工に最適なビームのモード次数は加工対象に依存する。例えば切断板厚がある程度厚くなると、熔融物を除去する切断溝幅を確保する必要性から、最適なビームモードは高次のモードへシフトしていく。またモード次数などの単純な指標では表すことができないわずかなモード形状の崩れや、ビーム周辺光の存在によって切断加工能力が大きく変化する。ビームモード形成シミュレーション技術を活用することによって、ゲイン分布やレーザガス温度分布、モードを規定する開口の配置等詳細な構成までを考慮した発振器装置パラメータの最適化が可能となる。これによって加工対象やユーザーニーズに合わせて最適化された発振器開発の効率化が図られ、業界トップレベルの切断速度と切断面品質の製品を実現している。

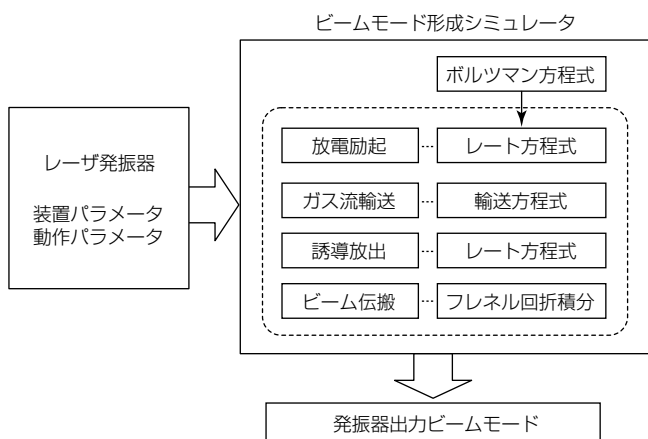


図4. ビームモード形成シミュレーションのブロック図

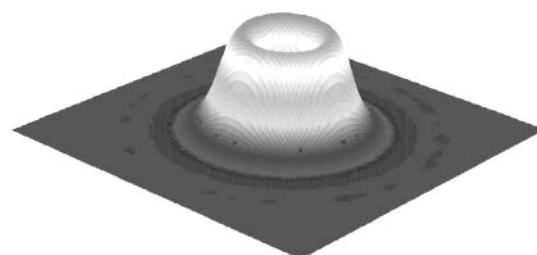


図5. 三軸直交型CO₂レーザ出力ビームモードの計算例

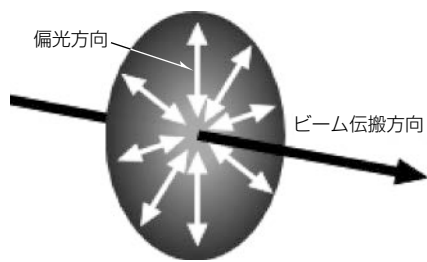


図6. ラジアル偏光ビームの概念図

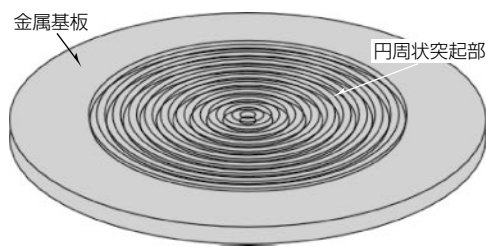


図7. 完全反射型ラジアル偏光選択ミラーの概念構造

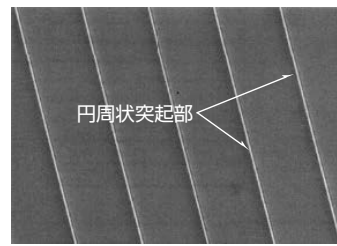


図8. ラジアル偏光選択ミラー写真(一部分の拡大)

4. 偏光制御におけるシミュレーション技術

最近のレーザ板金切断加工に関するトピックスとして、レーザビームの偏光状態をビーム半径方向の偏光(ラジアル偏光)とすることで切断速度の向上を図る試みが注目されている。

図6にラジアル偏光ビームの概念を示す。レーザビームが金属表面に斜めに入射する場合、入射面内で振動する電界を持つ光(P偏光)が最も高い吸収率を持つことが知られている。ビーム径方向のみに偏光したラジアル偏光ビームを金属切断へ適用した場合、任意の切断進行方向で照射されるレーザビームが常に吸収率が高いP偏光の状態に入射するため、一般的な切断加工に使用されている円偏光に比べてビーム吸収率が増加し、切断速度の向上が可能になると考えられている。

これまでもラジアル偏光ビームを選択的に発生させる提案はあったが、偏光を選択する素子が透過型の素子であるためにレーザビームの吸収が大きくなり、高出力レーザへの適用は困難と考えられていた⁽⁴⁾。これに対して当社では、ビーム吸収に伴う熱負荷の影響を回避するため、完全反射型の金属製ラジアル偏光選択ミラーを考案した。

完全反射型ラジアル偏光選択ミラーの概念構造を図7に示す。ミラー表面にはレーザビームの波長以下の幅を持つ円周状の突起部分が形成されている。金属の突起部分は、レーザビームを電磁波と考えた場合に一種のアンテナとして作用するものである。ラジアル偏光に直交する偏光成分(アジマス偏光)に関して、突起部分の高さを調整することによって、突起上面で誘起されるアンテナ反射波と、基板面で反射する基本反射波が打ち消し合うよう干渉させることで、ラジアル偏光のみを選択的に強く反射させる動作原理である。

3章でレーザビームの伝搬計算に用いたフレネル回折積分はスカラー近似の理論であるため、電界ベクトルに相当する偏光の振る舞いを扱うことはできない。ラジアル偏光選択ミラーの理論的動作検証ならびに試作のための設計検討には電磁界解析シミュレーション手法の一種であるRCWA法を選択した。

RCWA法を用いて円周状突起部のピッチならびに突起の高さ・幅をパラメータとしたシミュレーションで検討を実施し、ラジアル偏光成分に対する反射率は損失が生じないように十分に高い反射率であるとともに、ラジアル偏光に直交する偏光成分に対する反射率は、打ち消し合う干渉の効果によってレーザ発振器の出力ビームには現れなくなる低い反射率となるように円周状突起部の形状を設計した。このような設計にしたがって試作したラジアル偏光選択ミラーの写真を図8に示す。試作したラジアル偏光選択ミラーを共振器ミラーとして用いることによって、ラジアル偏光ビームとしては世界最高出力となる出力4kWの発生に成功している⁽⁵⁾。

5. むすび

板金切断用CO₂レーザ発振器のビームモード形成シミュレーション技術は、加工に最適な発振器開発の効率化によって業界トップレベルの切断速度と切断面品質の実現に寄与している。また、電磁界解析シミュレーション手法の一種であるRCWA法を用いて設計したラジアル偏光選択ミラーによって、ラジアル偏光ビームとしては世界最高出力となる出力4kWの発生に成功した。今後にわたり、レーザ加工機の開発で物理シミュレーション技術は有効な手段となると考えられ、その開発と活用を推進していく。

参考文献

- (1) 城所仁志, ほか: 新型炭酸ガス二次元レーザ加工機“ML3015LVP-45CF-R”三菱電機技報, **84**, No.2, 151~154 (2010)
- (2) 井上 孝, ほか: 炭酸ガスレーザ加工機の普及とその技術変遷, レーザ加工学会誌, **13**, No.1, 1~5 (2006)
- (3) 藤川周一, ほか: CO₂レーザ加工機の現状と新展開, レーザー研究, **38**, No.3, 160~166 (2010)
- (4) Moser, T., et al.: Intracavity generation of radially polarized CO₂ laser beams based on a simple binary dielectric diffraction grating, **45**, 8517~8522 (2006)
- (5) 山本達也, ほか: 4kWラジアル偏光ビームの発生, レーザー学会第393回研究会報告, 1~6 (2009)