特集

ヨーロッパ自動車産業におけるレーザ加工の実用化

自動車のボディ製造における高出力固体レーザ

— はじめての応用から未来の生産技術まで —^{*}

カート・マン^{**}

High Power Solid-State Lasers in the Car Body Production

— From the First Applications to the Production Technology of the Future —^{*}

by Kurt MANN^{**}

キーワード YAG レーザ, 自動車ボディ, アルミニウム溶接, ディスクレーザ, リモートレーザ

1. はじめに

トルプの固体レーザ（YAG レーザ：以下 YAG レーザと呼ぶ）が自動車ボディの生産に採用されてから10年以上になる。世界で、700 台以上の YAG レーザが、溶接・ろう付けおよび切断システムに採用されている。今日、欧州の近代的な自動車生産ラインの50%以上の溶接が、レーザを採用することにより実現されている。しかし、潜在的なニーズははかりしれない。特に、ディスクレーザのような新しい技術によって、例えばロボットと組み合わせたリモート溶接のようなより効率的でより経済的な生産コンセプトの実現が保証されている。

2. 開発初期

YAG レーザを自動車生産の溶接や切断にはじめて採用したのは、1980 年代である。光ファイバーの技術は、YAG レーザのビームを生産ラインのワークステーションにフレキシブルに導く可能性を開いたが、レーザ発振器からの出力は、その当時は十分ではなかった。生産可能なロッド長さの制限と熱ひずみへの耐久性から、1 本の YAG ロッドからの出力は、500 W が限界であった。しかし、ボディの溶接には 2 kW の出力が必要であると考えられていた。そこで、このロッドを直列に 4 本配列することによって、2 kW の出力を得るマルチロッドシステムの研究開発が計画された。この開発は、ドイツ政府の教育・研究の強力な支援によって実行に移された。

一方、1987 年に NEC が 1 kW 以上の高出力 YAG レーザを市場に発表した。これらの最初の高出力 YAG レーザは、レーザ出力の上昇に比例して、ロッドの熱レンズ効

果が増大しビーム品質が低下することが避けられず、出力が異なるとビーム焦点径や焦点位置が異なってしまうという現象が認められた。また、同じ出力でも、レーザ発振の開始時としばらく経過した時では、ロッドの温度が異なるため、焦点径や焦点位置が異なってしまう。生産用のレーザではこの現象は受け入れられない条件であった。

1990 年にハースレーザ（現在のトルプ）が、共振器自体や共振器とファイバーとの組み合わせに関連する技術で、高出力レーザの全出力領域にわたって加工点上の焦点径を一定に保つことを達成し、特許を取得した（図 1）。これは、高出力 YAG レーザを生産現場で使用するための必須条件であった。

このような安定なビーム品質の得られる出力 2 kW YAG レーザのプロトタイプが、1991 年にミュンヘンのレーザショーに出展された。しかしながら、その直後に、採用した光ファイバーが、生産ラインで高出力レーザ用として使うには信頼性がないことが判明した。光ファイバー

図 1 Arrangement of a 2 KW Nd:YAG Laser in the laboratories of TRUMPF Laser, 1990

*原稿受付 平成16年10月8日

** TRUMPF Laser, Schramberg

のトラブルが、特に光ファイバーの出口側で続出した。そのため、信頼性のある光ファイバーを開発し、プロセス開発のために高出力レーザーシステムと一体化し、自動車産業のためのテスト加工ができるようになるまでに、さらに2年を要した。

3. 最初の実用

ドイツの自動車産業にYAGレーザーを導入することに貢献したパイオニアとしては、ベルリンにあるINPROを挙げなければならない。INPROとは、ドイツの自動車メーカとサプライヤが生産技術の基礎研究を実施するための開発機構である。1980年代終わりのINPROの主要な課題は、自動車部品の溶接のための高出力YAGレーザーの評価であった。最初はパルスYAGレーザーによるテストであったが、まもなく要求される溶接速度を達成するためには、連続出力のレーザーでなければならないということが明白になった。1991年にINPROに設置されたトルンプの2kW YAGレーザーで、自動車ボディと関連部品がテスト加工された。このテスト結果によって、INPROは、自動車メーカに対して、YAGレーザーが自動車の生産ツールとしての可能性があることを明らかにした。2年後の1993年に、フォルクスワーゲンは、Golf IIIの生産にレーザー溶接を採用することを目的とし、レーザー溶接の経験をつむために、Wolfsburg工場に生産ラインと平行して、YAGレーザー溶接ステーションを導入することを決定し、トルンプの2kW YAGレーザー2台を使って、ルーフとサイドパネルへの2m長さのシーム溶接をおこなった。このテストから有意義な成果が得られたため、フォルクスワーゲンのエンジニアは、次の新しいモデルの自動車へレーザー溶接を採用するよう提言した。1996年に生産がスタートしたPassat V（図2）に対して、トルンプの2kW YAGレーザーであるHL2006 Dが12台設置された。その後の数年間に、フォルクスワーゲンのほとんどすべてのモデルにYAGレーザーが導入された。1997年からは3kWが、1999年からはすべて4kWのYAGレーザーが採用されている。フォルクスワーゲンは、ルーフ溶接以外にも、トランクリッド、BおよびCピラーそしてドアシルへレーザー溶接やろう付けを徐々に採用していった。

目立たないが、アンテナ用の穴をボディにあけるレーザー切断も実用された。これらのレーザー加工を実施するため、2001年までの5年間に、トルンプから100台以上のYAGレーザーを導入した。

1990年代なかばに、アウディでも、自動車ボディへの最初のYAGレーザー溶接が開始された。アウディも、フォルクスワーゲンと同時期にルーフへのレーザー溶接を実施した。アウディが、レーザーを多数採用する際の厳然たる基準は、少なくとも稼働率95%以上であった。そのためまずは3ヶ月のテストが実施され、アウディA4の生産のためにトルンプのYAGレーザーが採用された。このテスト結果は、単に有効性を証明しただけでなく、期待をはるかに超えるものであった。そのときから、アウディでは、A3、A4、およびA6のルーフやCピラーにレーザー溶接が適用されてきた。

1994年に、オペルでは、Ruesselsheim工場に最初のYAGレーザーが導入された。しかしながら、このレーザー加工は、フォルクスワーゲンやアウディのようなルーフ溶接ではなく、Cadillac Cateraというモデルのトランクリッドにおける溶接と切断であった。Cadillac CateraとOpel Omegaはほとんど同じ設計で、同じラインで製造されることになったが、第三のブレーキライトのサイズのみが異なっていたため、2つのサイズを同じラインで同じ方法で加工しなければならなかった。これを解決するために、トルンプの2kW YAGレーザーを採用したレーザーステーションが開発された。1台の発振器からの2本のファイバーに、それぞれ切断用と溶接用の二つの加工ヘッドを取り付け、それらを一台のロボットに保持させた。工程としては、はじめに、トランクリッドのブレーキライト取り付け部の強度を高めるために、その個所に補強材をレーザー溶接した。その後、同じレーザー発振器とロボットで、ライト取り付け部の細長い穴をそれぞれのモデルにあわせてレーザー切断した（図3）。この方法により、YAGレーザーが多様なプロセスに対応できる可能性が示された。

1990年代後半には、ドイツ、ヨーロッパ、北米、そしてアジアの他の自動車メーカでも、レーザー加工の採用を検討する動きが始まった。今日トルンプのYAGレーザーは自動車メーカでのさまざまなレーザー溶接や切断に採用さ

図2 Roof welding at the Passat V, 1996 (Volkswagen)

図3 Welding and cutting at the trunk lid of the Cadillac Catera, 1994

れている。同時に、YAG レーザは、自動車メーカのみならず自動車産業で活躍するシステムインテグレータにとっても、複雑な機能が必要なシステム構築のために、必要なツールとなっている。

4. 支配的な接合技術へ

自動車産業におけるレーザ接合の開発は、今日まで着実に進展しており、とくにアウディではアルミニウムの溶接にも適用している。ほとんどがアルミニウムで構成されているアウディ A2 のスペースフレームへレーザ溶接を採用するというコンセプトは、アウディの Neckarsulm 工場のアルミニウムセンターで開発された。現在、トルンプの 4kW YAG レーザが稼動しており、スペースフレーム構造の多くの溶接個所で、アルミシートと押し出し型材やダイキャストのレーザ溶接が、車体あたり全長 30m 実施されている（図 4）。アウディのコスト計算では、レーザ溶接は他の方法よりも最も低コストで、抵抗スポット溶接よりもコストダウンがなされている。

最近のレーザ溶接の採用率が最も高いモデルは、フォルクスワーゲンの Touran と Golf V である^{1,2)}。これらモデルでは、レーザ溶接の全長は車体あたり 70m であり、自動車ボディ製造へのレーザ溶接に関して世界のフロントランナーの役目を果たしている。300 台以上のトルンプの 4kW YAG レーザが、約 20 台ごとにレーザプールと呼ばれているエリアごとに集積され、それらはトルンプの Trumpf Lasernetwork で相互に連結され集中管理されている。

Trumpf Lاسernetwor では、すべてのレーザ発振器が、レーザビーム分配コンポーネントに組み込まれている。各発振器からは、4 ないし 6 本の光ファイバーが出ており、レーザビームはファイバーにより、いくつかのプロセッシングステーションや、プロセッシングステーションの中の異なる溶接システムに伝送される（図 5）。この場合、ひとつのファイバーから他のファイバーへ 50 ms 以内にレーザビームをスイッチすることができる。この分配コンポーネントにより、ボディパーツがクランピングや搬送されている間に、別の場所での溶接が可能にな

り、レーザの経済効率が向上する。それに加えて、レーザビームパスがコード化されており、どのレーザ発振器から、あるいは発振器の 6 本のどのファイバーから、所定の溶接部分にレーザが伝送されているかが、プロセッシングステーションから管理できる。この過剰ともいえるコンセプトで、ファイバーの交換や位置の変更が、すばやく簡単に実行されている。これらの近代的な生産コンセプトは、生産ラインで 99% 以上の稼働率が達成できる可能性を示しただけでなく、生産床面積のスペースを革新的に減少させた。Touran のサイドパネルの生産ラインでは 50%、プラットフォームでは 33%、スペースを減少できた。さらに、レーザの採用によって抵抗スポット溶接と比べて溶接時間を短縮できるため、生産ラインの生産性も高まった。

レーザは、ボディの生産性に利点をもたらしただけでなく、自動車自体の性能をも向上させた。レーザ溶接やろう付けでは、フランジの幅を狭くでき、ボディの重量を低減させた。他の利点としては、レーザ溶接シームであるためにボディの剛性を高めることができたことである。

5. 未来のレーザコンセプト

今日までに、トルンプの 700 台以上のランプ励起 YAG レーザ、主に出力 4kW のレーザが、自動車ボディの生産に採用されてきた。よりエネルギー効率の高いレーザを提供すること、また、作業中のレーザ照射比率すなわち経済効率が向上する技術を開発することは、レーザ製造メーカにとって、継続的な目的である。トルンプ社は、ディスクレーザを開発することによってこの目的にアプローチした。

このディスクレーザは、トルンプのランプ励起 YAG レーザよりも 5 倍のエネルギー効率と、はるかに優れたビーム品質を有している。ビーム品質は、より高いレーザ使用効率の生産コンセプトを提供するために、もっとも重要な条件である。最近トルンプが商品化したディスクレーザは、発振器出力 6 kW である。ビーム品質は 7mm・mrad で、それゆえ、0.2mm 径のファイバーにカップリングすることができる（図 6）。このレーザは、イ

図 4 Aluminium welding at the A 4 (Audi)

図 5 Beam management of high power solid state lasers

図6 4 KW Disk Laser resonator

ッテルビウム (Yb) をドーピングした4個のYAGのディスクからなっている。各々のディスクは裏面全体が冷却されており、ディスク内部の温度勾配は、レーザビームの伝播方向に並行であるため、熱レンズ効果が発生しない。これは、高出力で高ビーム品質を得るための必要な条件でもある。

ディスクレーザの1030 nm という波長は、Nd: YAG レーザとほとんど同じである。そのため、おなじビーム伝送光学系が適用できる。レーザエネルギーの時間分岐・エネルギー分岐の光学ユニットは、Trumpf Lasernetwork コントロールと同様、ディスクレーザにも採用できる。ディスクレーザの持っている本質的な要素としての利点は、ロッドシステムのようなファイバーの長さの制限がないことで、100 m 以上の長さのファイバーを採用することができる。

現在可能な6 kW という出力さえも制限はまったくない。4個以上のディスクを直列でカップリングする方法や、2組のレーザ発振器を偏光を利用してカップリングする方法は、ビーム品質を低下させることなく、10 kW 以上の出力を発生させる可能性を持っている。特に後者は、高いビーム品質を維持するために優れている。これは、ディスクレーザとファイバーレーザの最も異なる点である。ファイバーレーザの場合、高出力化しようとする、いくつかのシングルファイバーレーザからのファイバーを束ねて高出力化しななければならない。しかし、このファイバーを束ねることにより、ビーム品質の低下を招く。ビーム品質が優れておれば、製造ラインにおいてより高速の溶接や切断が実現でき、また、長焦点でも十分優れた溶け込みを得ることができるため、リモート溶接にも適用可能である。

ディスクレーザの高ビーム品質は、従来炭酸ガスレーザのみが適用できると言われてきた、リモート溶接へのYAGレーザの適用を可能にした。従来のYAGレーザでは、焦点距離を長くすると、焦点スポット径が溶接可能

図7 Remote Welding with Disk Laser and Robot) TRUMPF Laser, Schramberg

な径よりも大きくなるため、焦点距離を長くできず、そのためスキャニング領域も実用的な広さが得られなかった。ディスクレーザの優れたビーム品質では、自動車製造分野で満足のゆく、広いスキャニング領域を得ることができる。特に、このスキャナー光学系をロボットと組み合わせることにより、レーザの効果的な使用が可能となった。スキャナー光学系は、ロボットでワーク全体にわたって連続的に移動するが、スポット位置を正確にすばやく移動させることができるため、高効率の溶接を可能にする(図7)。スポットの移動時間がほとんど無視できるため、レーザ発振効率は100%に近い。ダイムラークライスラーは、ここ数年間、このロボットによるスキャナー溶接法の開発に取り組み、実用化に達した³⁾。他の自動車メーカーも、この技術の優れた点を実証しており、後に続くものと考えられる。

6. おわりに

ディスクレーザやリモート溶接技術は、数年前にトルンプが開発した、一定のビーム品質をもつ高出力YAGレーザ、高出力にも耐えうる光ファイバー、テレプレゼンス、そしてネットワークコンセプトなどと同様、ボディ生産のためのレーザ開発のマイルストーンとなろう。

引用文献

- 1) K. Loeffler: Laseranwendungen im Karosseriebau bei Volkswagen, Proceedings of "Stuttgarter Lasertage '03", ISBN 3-00-012208-7, 2003, 35-37
- 2) K. Loeffler: Laserapplications Golf V: Concept and Implementation in production, Proceedings of EALA '04, 2004, 181-2002
- 3) K. Debschütz, W. Becker, R. Bernhardt, K. Mann: New Laser Application Potential through Robot-Guided Remote Laser Welding, Proceedings of EALA 02, 2002, 147-164