

技術論文

パルスYAGレーザによる軽量化排気チャンバーの低歪溶接組立

Development of Lightened Chamber to Decrease the Weld Distortion by the Pulsed YAG Laser Welding

高橋 尚久*

Naohisa Takahashi

田中 泰夫**

Yasuo Tanaka

要 旨

4-4気筒二輪車(FZR系)の排気コントロールシステム(EXUP)のチャンバーは、高温・高振動がかかる為、当初オーステナイトステンレス鋳鋼製であった。量産機種展開に向け、コストダウンおよび動力性能上軽量化が必要な為、これをオーステナイトステンレス薄板の精密プレスと、熱歪を押さえた溶接で組立てた。特に、回転する可変バルブの対向面となる、4本のエキゾースト角パイプの集合端は、バルブを滑らかに回転させ、排気ガス量を制御するため、高い精度を要求される。そこで、精密プレスと溶接で組み立てた角パイプの先端を半円形に精密打抜きし、各端をパルスYAGレーザによりへり溶接して組立てた。これにより、板金チャンバーの精度を機械加工並にし、30%の重量低減と20%のコスト低減を達成した。

Abstract

The high precision exhaust chamber of EXUP (Exhaust Ultimate Power Valve), which works under heavy vibration and high temperature, has been produced with the lost-wax stainless steel casting, but lower cost and much lighter one has been requested to improve the drivability of motorcycles. The edges of four exhaust pipes in chamber which are associated with the variable exhaust valve are required of dimensional accuracy.

Press-formed four square pipes are assembled by edge welding. This edge joints are welded by Pulsed YAG Laser installed with the bead width—, joint penetration— and laser power—controller to obtain an accuracy within 0.1% in radius of semicircular.

Thus we produce the same press-formed chamber without additional machining as the previous cast chamber, we consequently reduce 30% in weight and 20% in cost.

1. ま え が き

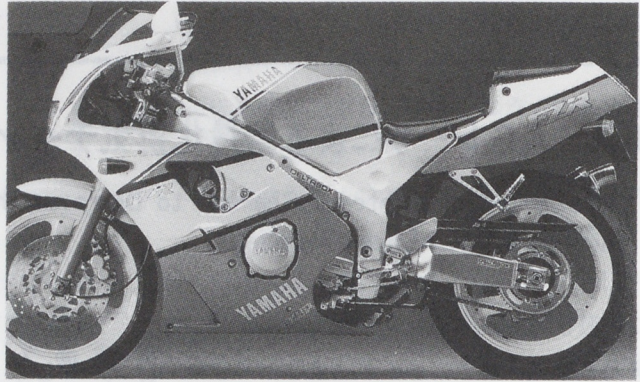
レーザ溶接は、パワー密度が高くスポット径が小さいことから、小物精密部品の加工に多く使わ

れている。自動車業界でも歪みの小さいことなどから、自動車のボディの溶接に実用化されている。二輪車では、フレームやエンジンの多くがアルミ化されていたり、多品種少量生産部品が多いため、レーザ溶接の対象となり得る部品がほとんど無い。その中で、スポーツモデルのマフラー部品に、精密なバルブ開閉機構を持つヤマハ独自のEXUP

* 技術本部 要素研究部

** サクラ工業(株) 生産技術部

4〜4気筒DOHC
 排気量：400cc
 乾燥重量：160kg
 最高出力：59ps
 (約150ps/ℓ換算)
 最大トルク：4.0Kg.m



FZR400

図1 ヤマハスポーツモデル

(EXhaust Ultimate Power valve) システムがあり、その板金溶接部品の組立の一部にNd-YAGレーザー溶接を応用しているのを紹介する。

2. EXUPシステム

モーターサイクルのおもしろさに、優れた加速感がある。これはパワーウェイトレシオが高いことや、空気抵抗の少いことにあり、特にスポーツモデルでは図1に例を示すように、自動車よりもはるかに高い性能を発揮する。

ところが、エンジン回転数が高いとIN.とEX.のバルブ開放のオーバーラップ期間が大きくなり、シリンダへの新気流入時に、排気弁側の圧力が正圧の場合、新気の流入が阻害され、燃焼状態の悪化・性能低下を招く。その為図2の性能曲線が示すようにトルク谷が顕著に現れる。そこで、排気管の集合部に、排気ガス圧を調節する回転式バルブを設け、エンジン回転数に応じてバルブを開閉し、排気ガス圧の正負の脈動を制御することで、トルク谷を消すことができる。

3. 軽量化EXUP開発の狙い

EXUPのバルブ開閉部は、図3に示す様に、従来のエキゾーストパイプの集合部に円弧状の回

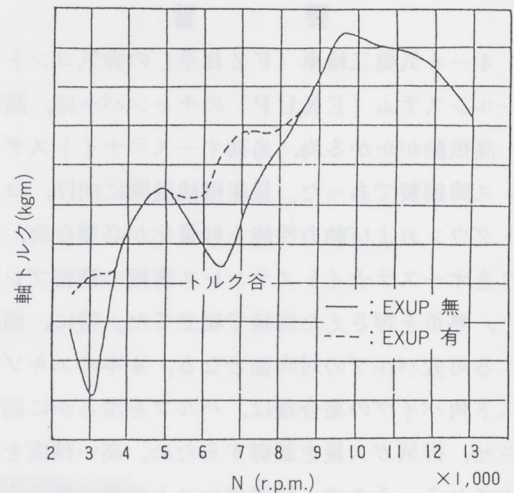


図2 エンジン性能曲線(トルク特性)

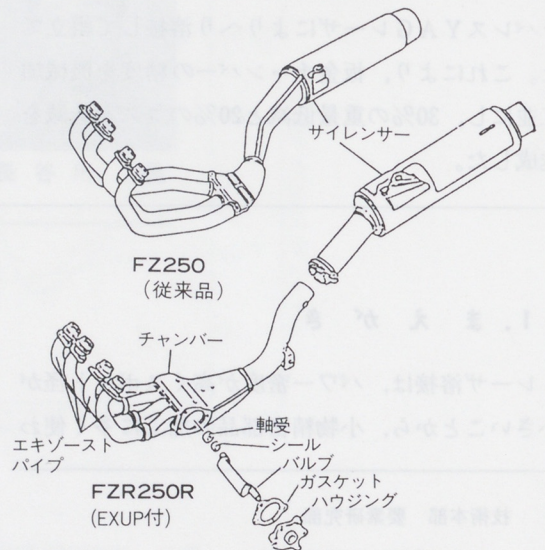


図3 EXUPの構成 (マフラーAssy)

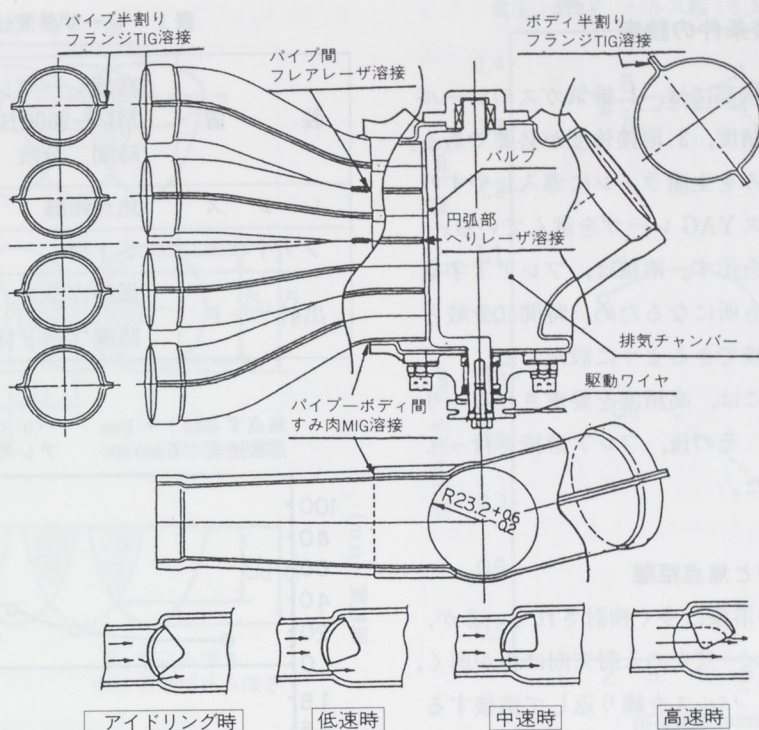


図4 EXUP排気チャンバーとバルブの回転

転バルブを設け、ワイヤを介してモーターで駆動する。バルブの入るチャンバー部分は、排気ガスが集合し高温・高振動になるため、バルブを正常に作動させるためには、高剛性・高精度が要求される。

当初はSUS鋳造品を機械加工で仕上げたが、薄肉のSUS鋳造（平均肉厚 $t2.0$ ）や、バルブ合面の円弧状の機械加工は難しく、重量・コストとも大きくなった。そのため、歪を押さえたSUS304($t1.2$)の板金溶接構造とし、機械加工品並の精度を作り込みながら、軽量化およびコストダウンを狙ったのである。

3.1 EXUPの構造

EXUPの心臓部となる排気チャンバー部分は、図4に示すような4本のパイプとボディのプレス品の溶接組立てで構成されている。

4本の溶接パイプは、断面が円から四角になり、

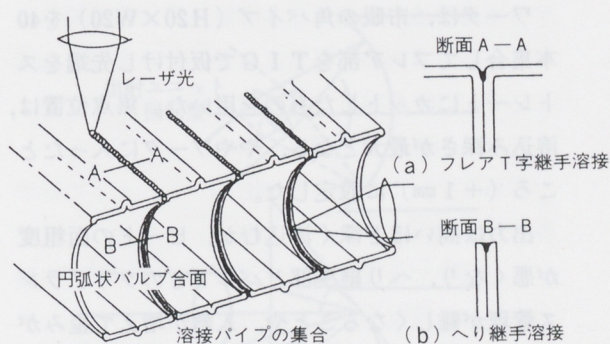


図5 パルスYAGレーザの応用

バルブ合面となるパイプの端を円弧状にカットしてある。図5に示すように、この円弧をそろえてパイプ同士を集合させ、四角部のフレアとへりをパルスYAGレーザにより溶接する。このへり溶接された円弧部に向かい合ってバルブがセットされる。バルブとへりとのクリアランスは、 $0.3\sim1.0$ mmとなるように、全体の溶接歪みを押さえ、精度良く作る必要がある。

4. レーザ溶接条件の設定

パイプ同士の溶接部には、1.排気ガスのシール性、2.円弧形状の精度、3.溶接強度が必要である。そのため深い溶込みを生産ラインに導入しやすいことを考え、パルスYAGレーザを選んでいる。

表1に装置の仕様を示す。溶接は、フレアT字継手とへり継手の二カ所になるため、時間二分岐とし、同じ条件で溶接できるように設定した。

溶接条件の設定には、高精度を要求されるへり溶接を中心に行い、その後、フレア溶接を行って条件の確認を行った。

4.1 レーザ出力と焦点距離

一般にSUS304の溶接は多く検討されているが、へり継手の場合はレーザ光の入射方向に板が厚く、横への伝熱が少い。パルスを繰り返して溶接すると、ワークがかなり加熱され溶込みも変化する。そこで、パルスレーザ出力（入力電圧とパルス幅）が溶込みやビード幅に及ぼす影響を図6に示す。

ワークは、市販の角パイプ（H20×W20）を40本集合してフレア部をTIGで仮付けし先端をストレートにカットしたものを用いた。焦点位置は、溶込み深さが最大となる、ややワークに入ったところ（+1mm）に設定した。

出力は高いほど深く溶込むが、ビードの面粗度が悪くなり、へり継手部とバルブとのクリアランス管理が難しくなることや、入熱が増えて歪みが大きくなること、またフラッシュランプの寿命が縮まりコストアップになることなどから好ましくない。有効な溶込み深さの基準は、0.5mm以上とし、面粗度で最大高さが30μm以下となる条件を選ぶ。またビード幅は、小さいと溶接線からずれたとき、有効な溶込み深さが減少するため、1mm以上は必要である。

4.2 溶接速度の選定

生産ラインにレーザ溶接を導入する場合、コス

表1 レーザ装置仕様

装 置	宮地レーザシステム製 ML-2600 B 時間二分岐
レ ン ズ	焦点距離 f 70mm
ファイバー	S I 型 φ 0.8mm
出射ヘッド	保護ガラス、 防煙フード付

焦点ずれし：+1mm パルス：17PPS
溶接速度：6mm/sec アシストガス：無

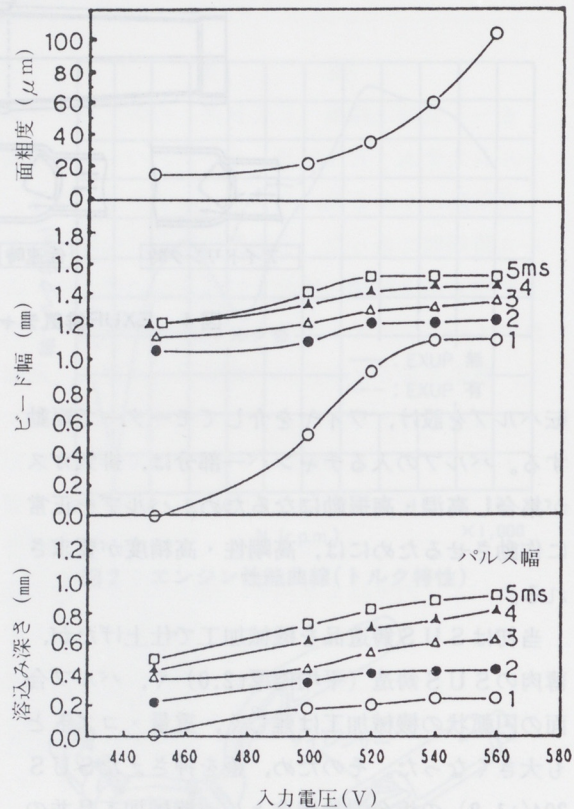


図6 パルスレーザ出力の影響

ト的に装置を数多く置けないため、できるだけ溶接速度を速めて生産能力を上げる必要がある。しかし、パルスYAGレーザでは速度を速めると、図7に示すようなビードのオーバーラップする部分が減り、排気ガスをシールするための有効な溶込みが浅くなる。

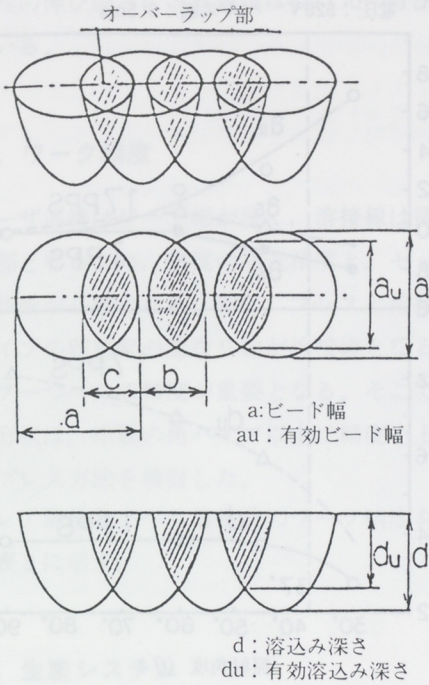


図7 溶接ビードのオーバーラップ

そこでへり溶接部にビードを剥がし、有効溶込み深さを調べたので、その結果を図8に示す。

速度が速まるにつれビードのラップする部分が減るので、有効溶込み深さは減少するが、有効ビード幅は5 mm/secまで変わらない。1パルスごとのビード幅や溶込み深さは、速度が速まっても変わらないはずであるが、実際は、5 mm/secを超えるとどの寸法も減少する。これは速度が遅いと、レーザー光の入熱による予熱効果により、溶込みが増大し、速度が速くなるにつれ、この効果が減少するものと考えられる。そこで、生産ラインではこれより遅い速度で溶接する必要がある。

4.3 照射角度の影響

へり継手溶接の場合、形状が円弧のため、図9に示すように、溶接面に対してレーザー光を垂直に照射しようとする、出射ユニットを回転させる必要がある。ところが、円弧(R23.2)が小さい

電圧：520 V パルス幅：5.5ms パルス：17pps

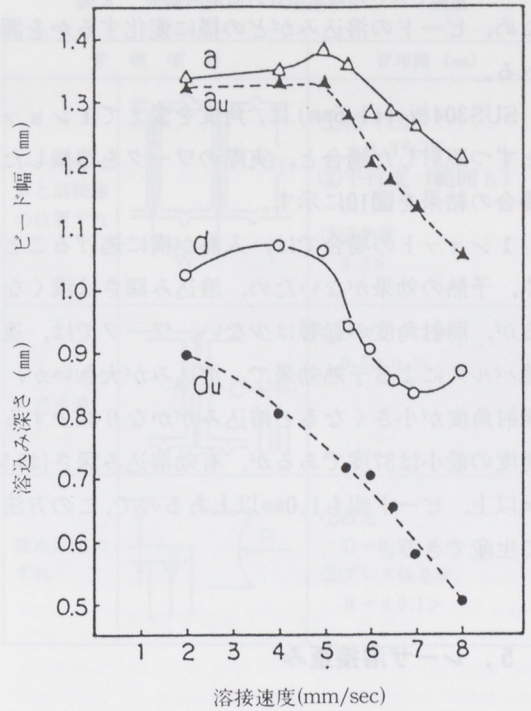


図8 溶接速度の影響

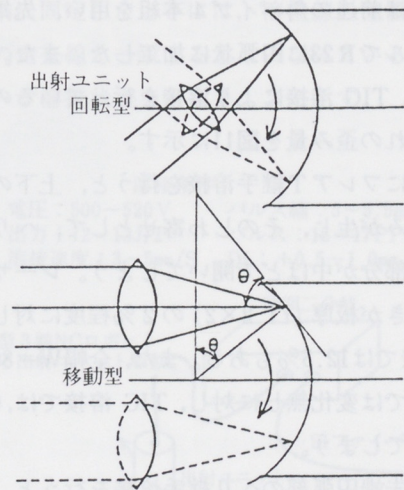


図9 へり継手溶接へのレーザー照射方法

ため、回転させるには、出射ユニットやレンズ（焦点距離）をかなり小型化する必要があり、物理的に困難である。そこで、出射ユニットを円弧に沿って平行移動させて溶接する。ここで、円弧

の上下はレーザ光に対し、照射角度が小さくなるため、ビードの溶込みがどの様に変化するかを調べる。

SUS304板 ($t1.5\text{mm}$) に、角度を変えて1ショットずつ照射した場合と、実際のワークを溶接した場合の結果を図10に示す。

1ショットの場合では、入熱が横に逃げることや、予熱の効果がないため、溶込み深さは浅くなるが、照射角度の影響は少ない。ワークでは、連続パルスによる予熱効果で、溶込みが大きいが、照射角度が小さくなると溶込みがかなり減少する。角度の最小は37度であるが、有効溶込み深さは0.5mm以上、ビード幅も1.0mm以上あるので、この方法で生産できる。

5. レーザ溶接歪み

レーザ溶接は入熱が少ないため、溶接歪みが小さいことは一般的であるが、このワークではどの程度歪むのか、生産での設定条件で溶接を行った。ワークは前述の角パイプ4本組を用い、先端はエンドミルでR23に円弧状に加工した。また。比較として、TIG 溶接により溶接を行っているの、それぞれの歪みを図11に示す。

初めにフレアT継手溶接を行うと、上下の継手部で縮みが生じ、そのしわ寄せとして、へりの重なった部分が中ほどで開いてしまう。レーザ溶接での開きが板厚 ($t1.2 \times 2$) の2%程度に対し、TIG 溶接では12.5%もある。また、全幅 $W=80\text{mm}$ もレーザでは変化無しに対し、TIG 溶接では、0.6%も縮んでしまう。

次に先端円弧部のへり継手溶接を行うと、開いていたへりがやや縮んでくるが、TIG 溶接では板厚に対し、依然8%程度開いたままである。全幅もさらに縮むため、元の80mmより約1%も縮んでしまう。また、円弧の上下先端部のみR23より小さくなってしまう。

これに対し、レーザ溶接では寸法変化が小さく、

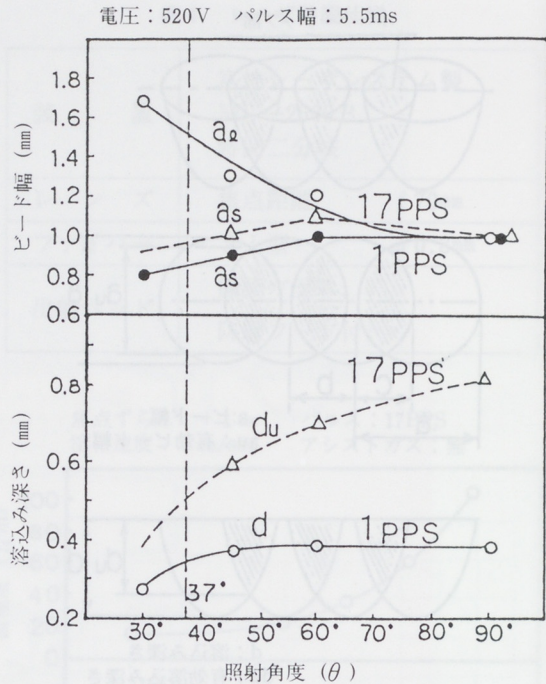


図10 照射角度の影響

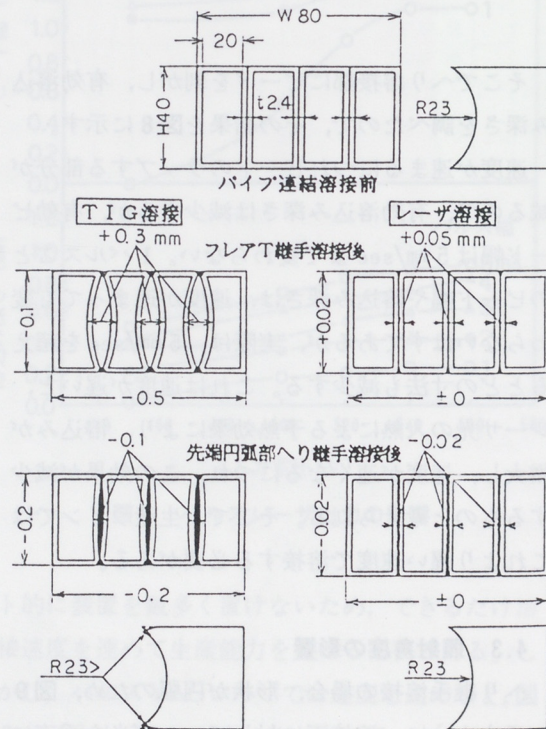


図11 パイプ連結時の溶接歪みの比較

二工程の伸び縮みにより最後はほぼ元の寸法になっている。

6. ワーク精度

レーザー溶接はビード幅が狭く、溶接線は薄板の重ね部となるため、高度の開先精度と、セッティング技術が必要となる。特に、プレスと溶接で作るパイプの四角部の重なり線が溶接線となるため、パイプ一つ一つの精度が重要となる。そこで四角部の形状は、市販の角パイプ以上に精度を上げるようプレス方法を検討した。

フレア溶接及びヘリ溶接時のワーク精度を表2及び表3に示す。

7. 生産システム

これまで検討してきたレーザー溶接条件に基づき、図12に示すような生産システムにより加工を行っている。ワークは治具により固定し、出射ユニット

表3 先端円弧部ヘリ溶接時のワーク精度

管 理 項 目	管理幅 (mm)
レーザービームと溶接線の位置ずれ	①幅寸法 $\pm 0.3\%W$ ②平行度 (範囲 h) $0.1>$ ③直角度 $0.2>$
レーザービームの通過	①クリアランス $0.5a u >$
焦点距離のずれ	①段差 $D = 0.2>$ ②プレス抜き R $R = \pm 0.1>$

表2 パイプ連結フレア溶接時のワーク精度

管 理 項 目	管理幅 (mm)
レーザービームと溶接線の位置ずれ	1.幅寸法 $\pm 0.3\%W$ 2.真直度 (範囲 l) $0.1>$ 3.平行度 $0.1>$
レーザービームの通過	1.クリアランス $0.5a u$
焦点距離のずれ	1.高さ $\pm 0.1\% h$ 2.段差 $D = 0.2>$ 3.プレス曲げ R 板厚 $R \geq$

トを前後または左右に動かし、時間二分岐でレーザー光を照射する。出射ユニットは、NCロボットにより常に一定の位置を動かされるため、ワークを治具に固定したときには、溶接線の位置がレーザー光の走査線と一致している。

レーザー溶接状況を写真1、2に示す。

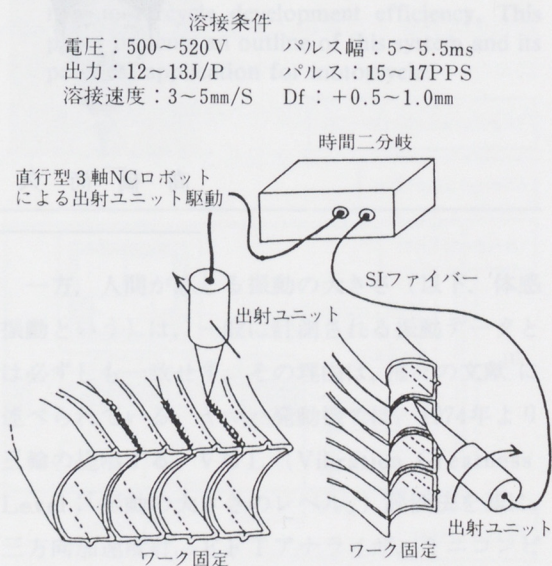


図12 レーザ加工装置の構成

8. おわりに

レーザ溶接は、工業的応用としては新しいため、その名前にとらわれ技術的に高度と見られるが、実際に苦勞するのは溶接線の位置を決める、ワー

クの精度をいかに高めるかである。

最後に、本システムの開発にあたり、レーザ溶接のテストに装置の協力をして頂いたミヤチテクノス(株)に対し改めて深く感謝の意を表します。

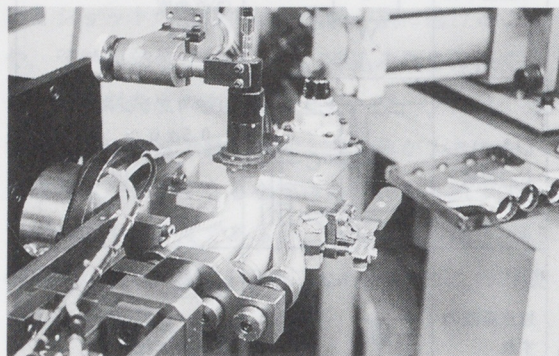


写真1 フレアT字継手溶接

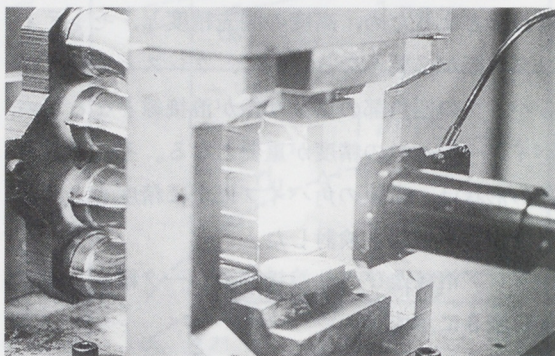
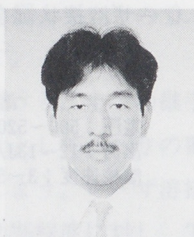


写真2 先端円弧部へリ継手溶接

■ 著 者 ■



高橋 尚 久



田 中 泰 夫