

平成23年度第3次補正予算戦略的基盤技術高度化支援事業

「独自1ヘッド同軸多重ノズルによる
高品質製品製作のためのレーザ溶接技術開発」

研究開発成果等報告書

平成25年4月

委託者 近畿経済産業局

委託先 公益財団法人滋賀県産業支援プラザ

目 次

第1章 研究開発の概要	
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	2
1-3 成果概要	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口	6
第2章 本 論	
2-1 切断・溶接共用1ヘッド同軸多重ノズル式加工ヘッドの開発	7
2-1-1 高精度無酸化切断	7
2-1-1-1 ファイバーレーザシステムとレーザヘッド	7
2-1-1-2 レーザ出力及びアシストガス圧力の影響	10
2-1-1-3 切断速度の影響	10
2-1-1-4 技術目標値との対比	11
2-1-1-5 ステンレス鋼以外の材質における切断条件について	12
2-1-1-6 ノズル形状の影響(流体解析)	12
2-1-2 低歪み無酸化溶接	14
2-1-2-1 SPCC 重ね溶接における溶接条件とビード形状の関係	14
2-1-2-2 SPCCとSUS316Lにおける溶接条件とビード幅の関係	14
2-1-2-3 SUS316Lにおけるレーザ出力・溶接速度とビード組織・強度の関係	14
2-1-2-4 SUS316Lにおけるフォーカス位置とビード組織・強度の関係	15
2-1-2-5 ステンレス鋼における高温酸化による変色色見本の作製	15
2-1-2-6 ステンレス鋼以外の材質における溶接条件について	18
2-1-2-7 溶接ノズル形状及び距離がシールドに及ぼす影響(流体解析)	19
2-1-2-8 長尺板における歪みについて	21
2-2 一貫切断・溶接システム技術の開発	22
2-2-1 プレス絞り品(触媒ケース)切断・溶接一貫加工用高精度治具の設計製作	22
2-2-2 切断溶接共用2重ノズルヘッドの開発	23
2-2-3 治具の把持部の検討	23
2-2-4 ステンレス鋼絞り容器の一貫切断・溶接検証(研究対象品)	23
第3章 全 体 総 括	25

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1) 背景・研究目的

排気ガス（ NO_x ）規制に対応する触媒方式での浄化システムの需要が増大しているなかで、触媒を保持する触媒ケースの需要も非常に増大してきている。触媒ケースはディーゼル発電機、ガスエンジン、ガスタービン等にも使われており、節電に対応する自家発電設備として工業分野及び一般の生活分野でも必要不可欠なものとなってきている。

この触媒ケースは、耐食性に優れたSUS316の薄板をプレス絞り加工成形したケース（2部品）を突合せ溶接して製作されている。しかし、プレス絞り品はケース端面に凹凸があるためケース同士を突合せるとギャップが1mm～1.5mm発生する。そのため、現在は、ギャップを埋めるために溶接ワイヤを使用するミグ溶接及びティグ溶接で行なっている。

ステンレス鋼は溶接時において熱伝導性が悪く熱がこもり易いため、大きな変形（歪み）や溶融部の溶落ちが発生する課題がある。そのため、現状のアーク溶接法（ミグ溶接）では4分割溶接工法など、連続溶接は避ける、除冷時間を設ける等、溶接時の熱影響を少なくして対応している。しかしながら、それでもアーク溶接法では歪みや機密性の問題が発生しており、溶接後の歪み修正作業及び気密性評価を全数行い、手修正で対応しているのが実状である。そのため、生産性が低く、品質保証面での課題を抱えている。

一方、レーザ溶接は入熱量が少なく、低歪みで熱影響部が少なく高品位な溶接が可能であるが、溶接面のギャップ（隙間）が0.2mm以下でないとレーザビームが透過するため溶接できないという課題がある。そのため、対象製品であるプレス絞り品の溶接ではギャップが大きいため実用化が困難である。プレス絞り加工した後に切削加工など行い溶接面の精度を向上させギャップを無くすことが考えられるが、切削加工追加となりコスト高とリードタイムの長期化につながるためメリットが少なくなる。しかし、低入熱のファイバーレーザ光活用による精密レーザ切断とレーザ溶接工法で一貫して加工が行えればこのような問題を解決することができる。

本研究開発では、これらの課題を解決するため無酸化精密切断と無酸化溶接を1台のレーザ加工機ヘッドで出来るレーザ加工ヘッドと独自システムの開発を行なうことにより高品質、高精度、高生産性の加工プロセスを確立することを目的とする。また、この工法開発技術は他の金属材料での溶接製品にも活用展開を図ることができ、波及効果が大きい。

2) 実施内容

①切断・溶接共用1ヘッド同軸多重ノズル式加工ヘッドの開発

①-1 高精度無酸化切断

レーザ溶接に用いる溶接面を得るためには、無酸化で高精度なレーザ切断が必要であり、そのため、無酸化で高精度（表面粗さは $R_z 10\mu\text{m}$ 以下、切断面の平面度は 0.01mm 、直角度 $90^\circ \pm 0.5^\circ$ ）な加工面が得られる最適切断条件を検証した。

傾向を見るためガスの種類（酸素、アルゴン、窒素）、ガス圧力、ガス流量、ノズル径、レーザ出力、加工速度の各々の影響や傾向を求めた。また、同軸多重ノズルの形状や配置についても流体解析を用い検討した。

材質は、薄板ステンレス鋼をベースとし他の材料である軟鋼材やアルミ材、チタン材等で検証を行った。

①-2 低歪み無酸化溶接

低歪み（平行度 0.3mm 以下／300mm）で無酸化となる最適加工条件の検証を実施した。

傾向を見るためのレーザ出力、加工速度、シールドガスの種類（アルゴン、窒素）、ガス圧力、ガス流量、ノズル形状、レーザ出力、加工速度、レーザ径の各々の影響や傾向を求めた。また、同軸多重ノズルの形状や配置についても流体解析を用い検討した。

材質は、薄板ステンレス鋼をベースにして、軟鋼材やアルミ材、チタン材等も用いた。

②一貫切断・溶接システム技術の開発

①-1 と①-2 の結果をプレス絞り品に適用して実証検証を行った。また、これをもとに切断・溶接共用同軸多重ノズルを開発すると共に、三次元形状のプレス絞り品を治具から外さずに切断と溶接を行う治具の開発を行い、一貫システムを開発した。

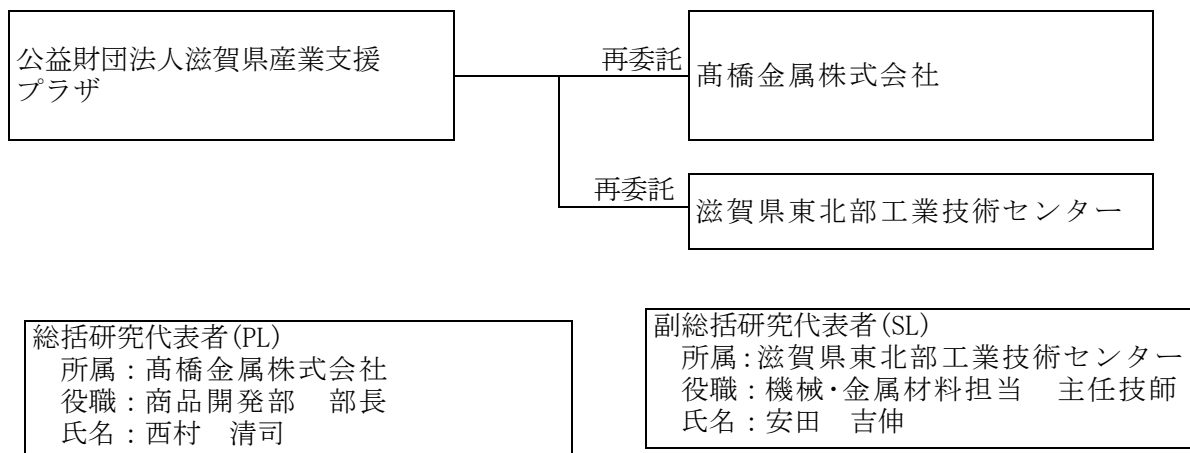
③プロジェクトの管理・運営（公益財団法人滋賀県産業支援プラザ）

本プロジェクト事業が適切かつ効果的に運営され、所期の目的が達成されると共に大きな成果が得られるよう、また、適切な経費の執行がなされるようプロジェクトの運営・管理を実施する。

1-2 研究体制

（1）研究組織及び管理体制

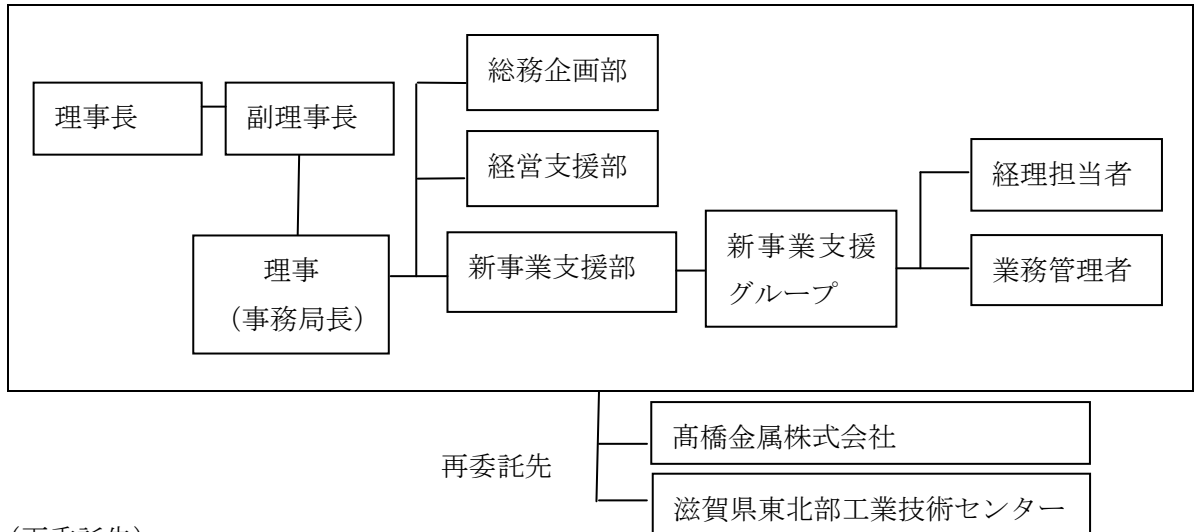
1）研究組織（全体）



2) 管理体制

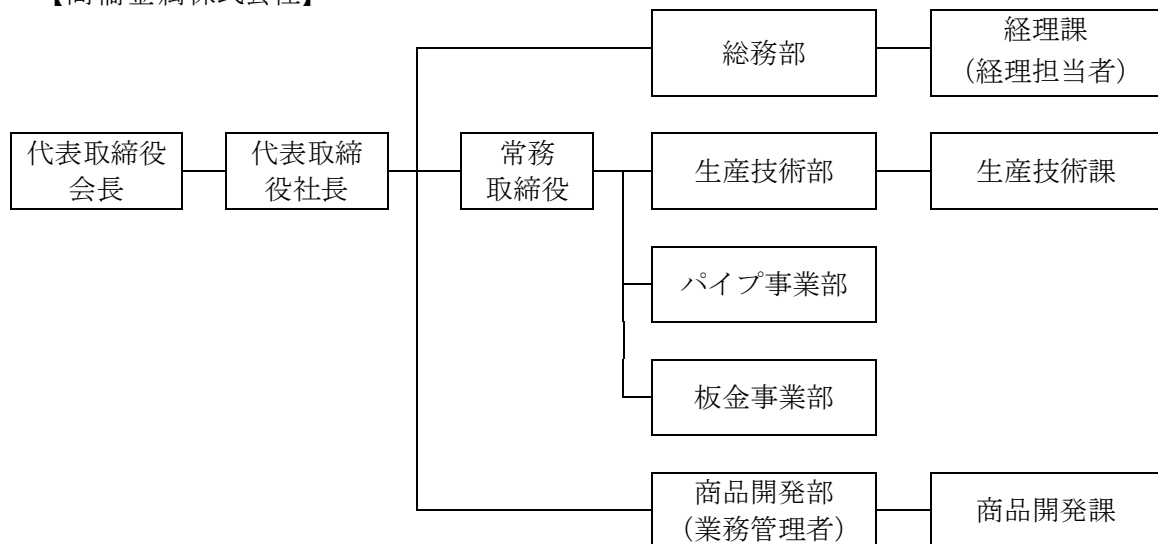
①事業管理機関

【公益財団法人滋賀県産業支援プラザ】

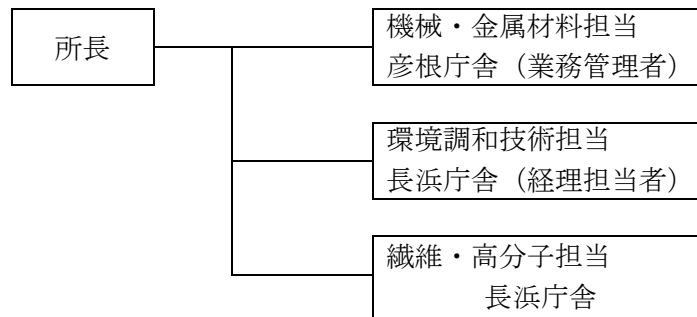


②（再委託先）

【高橋金属株式会社】



【滋賀県東北部工業技術センター】



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 公益財団法人 滋賀県産業支援プラザ

①管理員（プロジェクト管理員）

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
篠原 弘美	新事業支援部新事業支援グループ グループリーダー 主幹	③
山中 義文	新事業支援部新事業支援グループ 参与	③

【再委託先】

高橋金属株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
西村 清司	商品開発部 部長	①、②
村田 猛	商品開発部 商品開発課 技師	①、②
河村 安太郎	商品開発部 参事	①、②
中村 喜昭	商品開発部 商品開発課 主任	①、②
武友 新吾	パイプ事業部 部長	①、②
吉川 浩平	パイプ事業部	①、②
中村 昌史	板金事業部 部長	②
林 一仁	板金事業部 課長	②
藤谷 憲治	生産技術部 部長	①、②
石内 寿典	生産技術部 係長	①、②
上林 守	生産技術部 主任	①、②
辻 吉明	環境商品事業部 課長	②

滋賀県東北部工業技術センター

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
宮川 栄一	機械・金属材料担当 グループリーダー 参事	①、②
安田 吉伸	機械・金属材料担当 主任技師	①、②
深尾 典久	機械・金属材料担当 主任主査	①、②

他からの指導・協力者名及び指導協力事項

①指導・協力者

氏 名	所属・役職	備考
片山聖二	国立大学法人大阪大学 接合科学研究所 教授	アドバイザー
田川哲哉	国立大学法人名古屋大学 大学院工学研究科 准教授	アドバイザー
塩見洋一	龍谷大学理工学部機械システム工学科 教授	アドバイザー

江頭 崇紀	ヤンマー株式会社 小型エンジン事業本部 FIE 技術部 技術グループ グループリーダー	アドバイザー
西本浩司	阿南工業高等専門学校 機械工学科 助教	アドバイザー
西野精一	阿南工業高等専門学校 機械工学科 教授	アドバイザー
辻 正和	IPG フォトニクスジャパン株式会社 代表取締役	アドバイザー
岸田源一	シガスプリング株式会社 常務取締役	アドバイザー

②指導・協力事項

氏名	指導・協力事項
片山聖二	レーザ溶接技術全般について理論的、学術的なアドバイスを受ける。
田川哲哉	溶接の評価技術についてのアドバイスを受ける。
塩見洋一	シールドガスの流体解析技術についてのアドバイスを受ける。
江頭 崇紀	船舶・農業機械・空調機器関係等のニーズ情報提示と実用化アドバイスを受ける。
西本浩司	レーザ加工の要素技術の指導を受ける。
西野精一	溶接時の熱解析技術についてアドバイスを受ける。
辻 正和	レーザ機器の技術情報提示と機器の技術動向についてアドバイスを受ける。
岸田源一	レーザ加工技術の実用化相談とアドバイス指導を受ける。

1-3 成果概要

各研究開発実施内容において以下の成果を得た。

① 切断・溶接共用 1 ヘッド同軸多重ノズル式加工ヘッドの開発

①-1 高精度無酸化切断

レーザ出力が増すにしたがって、表面粗さは小さくなる傾向が見られたが、ドロス高さには影響が少ない。アシストガス圧力が増加すると、ドロスは少なくなる傾向にあるが、表面粗さには影響が少ない。切断速度が遅くなると、ドロスが大きくなるが、表面粗さにほとんど影響しないことがわかった。これらより最適条件を求めドロスの無い状態で技術目標の表面粗さ Rz10 μ m 以下を達成した。

①-2 低歪み無酸化溶接

極力入熱を下げることで溶接部の強度低下を防ぐことができたことがわかった。

広範囲に評価ができる酸化色見本を、SUS316L において作成できた。そしてこの変色は 600℃を境に色の変化の仕方が変わることがわかった。

各材質・板厚毎に良好で溶接欠陥の無い溶接が出来る加工条件を特定することができた。

レーザ切断した材料を突合せ溶接した結果強度上の問題が無かったことは、本研究開発で目指す切断・溶接一貫工法の効果が高いことを示した。

本研究開発で目指す切断溶接一貫工法が、ステンレス鋼以外の材料、鉄はもちろんアルミ、チタン、銅にも適用できることを示した。

流体解析より、ノズル距離が広がると、ガスシールド範囲が広くなることがわかった。そしてガス流量が増えるとシールド範囲が狭くなることがわかった。

②一貫切断・溶接システム技術の開発

切断・溶接一貫加工用高精度治具と開発した切断・溶接共用2重ノズルヘッドにより、プレス絞り品の溶接が表面のビード幅はどこも1.1mmと同一で、裏ビードもすべての場所に出ている良質な溶接ができた。さらに、切断・溶接した溶接部は十分な強度があることがわかった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

公益財団法人滋賀県産業支援プラザ 新事業支援部新事業支援グループ

〒520-0806

大津市打出浜 2-1 コラボしが 21

TEL : 077-511-1414、FAX : 077-511-1418

第2章 本 論

2-1 切断・溶接共用1ヘッド同軸多重ノズル式加工ヘッドの開発

2-1-1 高精度無酸化切断

2-1-1-1 ファイバーレーザシステムとレーザヘッド

今回の研究で用いたファイバーレーザシステムの外観と仕様を図2-1-1-1に示す。

レーザ出力は0.3kWから4.0kWまで自由に設定することができる。ロボットはレーザ照射用
に開発された高精度軌跡ロボットである。

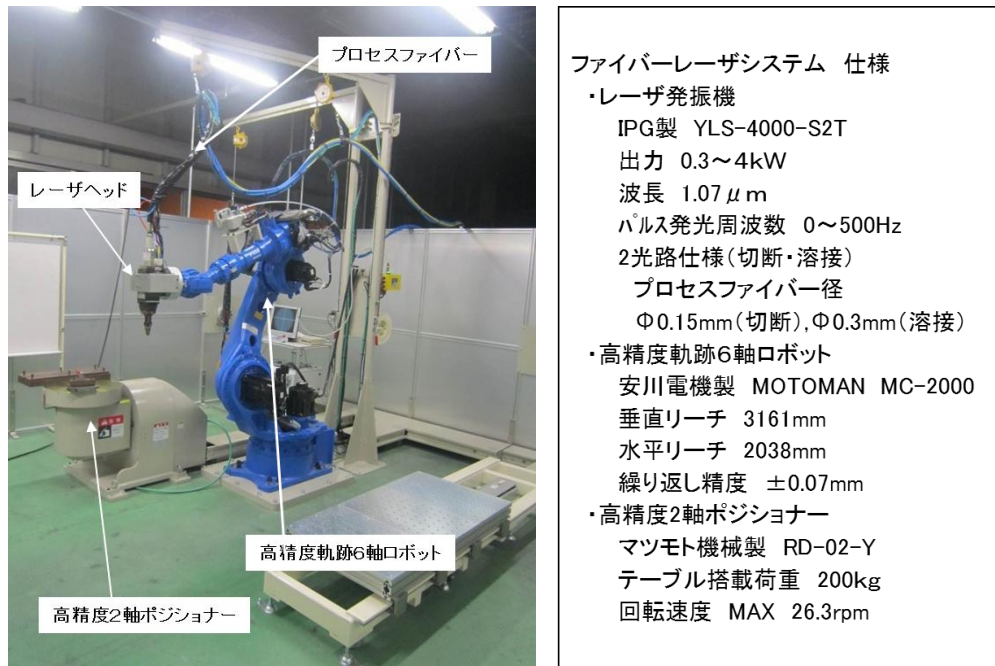


図 2-1-1-1 ファイバーレーザシステムの外観と仕様

図2-1-1-2は本研究で用いた切断ヘッドの外観と主要仕様図である。ジャストフォーカス位置のスポット径0.15mm、ノズル径1.5mm、ノズル高さ1mmである。

図2-1-1-3は切断ヘッドをプロセスファイバーコア径0.15mmに接続したときのレーザプロファイルである。図中の左は各位置で測定したレーザビーム断面のエネルギー分布の等高線図を3次元表示したものである。図中の中央はレーザビーム断面の全エネルギー量の86%を占めるスポット範囲を直径で示したものである。図中の右には各位置におけるレーザビーム断面のエネルギー分布を3次元グラフで示したものである。図よりジャストフォーカス位置のスポット径は仕様通り約0.15mmで均一なエネルギー分布となっている。

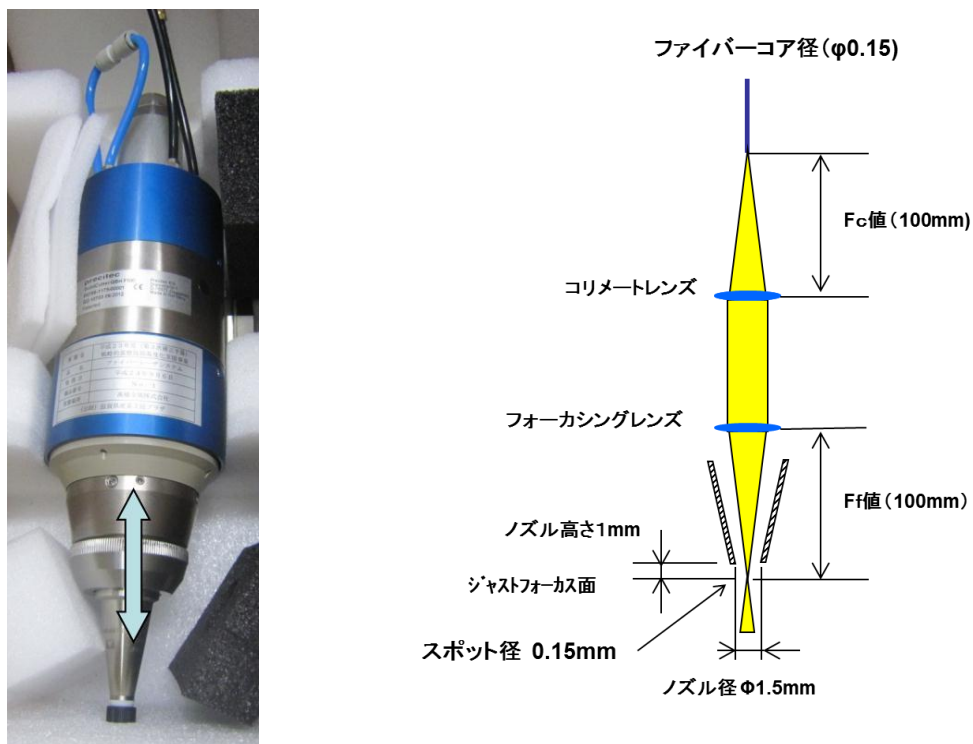


図 2-1-1-2 切断ヘッドの外観と主要仕様図

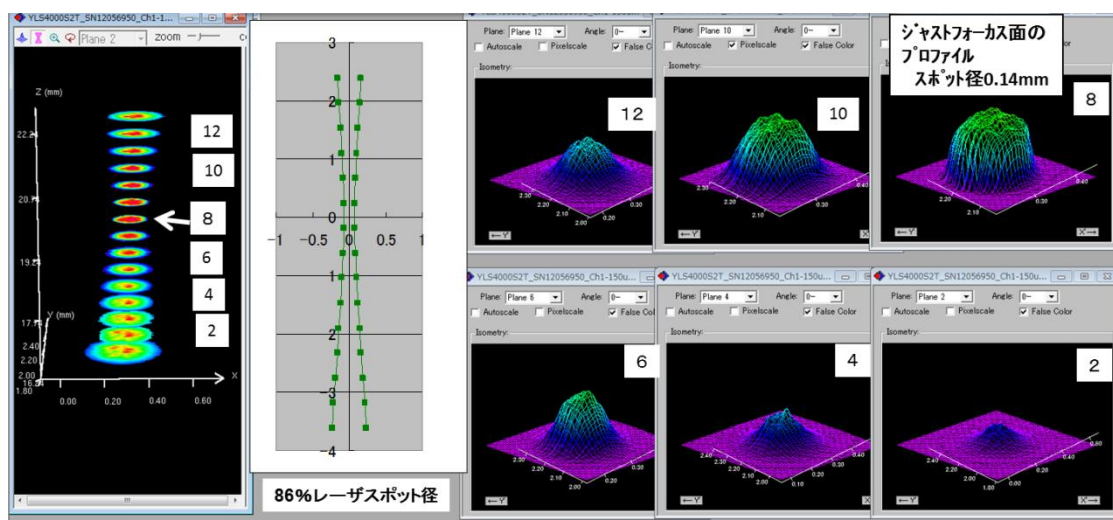


図 2-1-1-3 切断ヘッドのレーザープロファイル

図 2-1-1-4 は本研究で用いた溶接ヘッド YW50（プレシテックジャパン(株)製）の外観と主要仕様図である。ジャストフォーカス位置のスポット径 0.6mm、ノズル径 12mm、ノズル高さ 30mm である。

図 2-1-1-5 は溶接ヘッド YW50 をプロセスファイバーコア径 0.30mm に接続したときのレーザープロファイルである。図よりジャストフォーカス位置のスポット径は仕様通り約 0.6mm でこれも均一なエネルギー分布となっている。

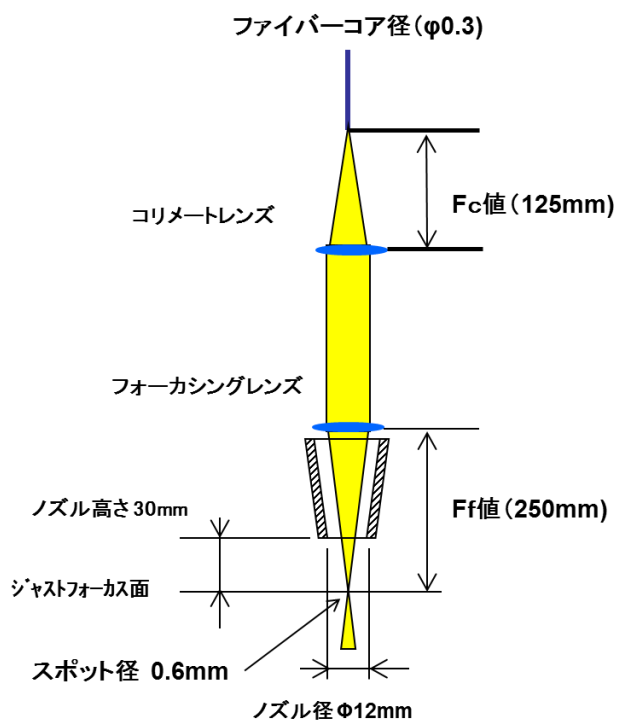


図 2-1-1-4 溶接ヘッドの外観と主要仕様図

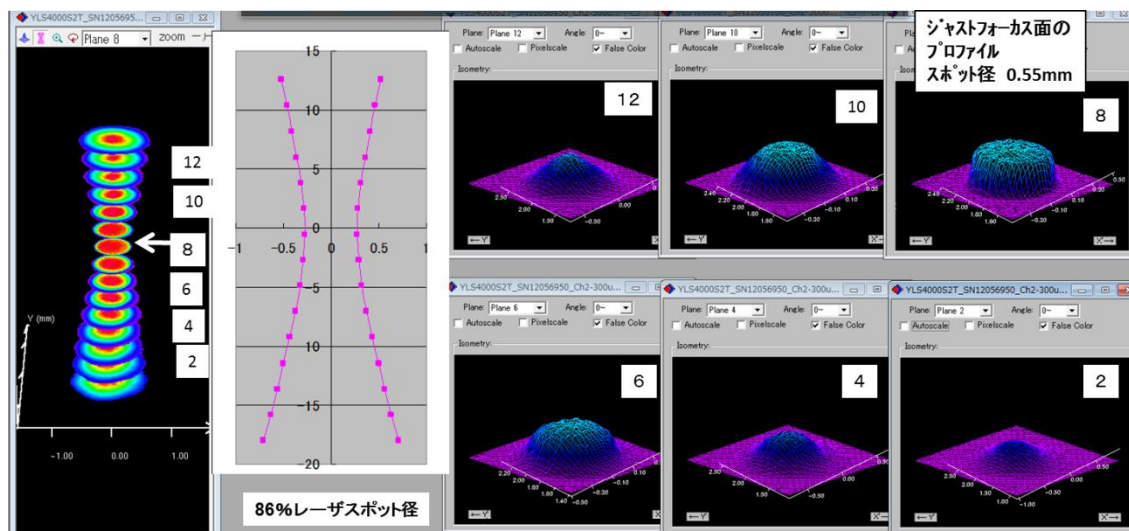


図 2-1-1-5 溶接ヘッドのレーザプロファイル

本研究の中で開発した切断・溶接共用同軸2重ノズルヘッドは、ジャストフォーカス位置のスポット径 0.2mm、切断用ノズル径は 2.0mm ノズル高さ 1mm、溶接用ノズル径 15mm ノズル高さは可変となっている。

2-1-1-2 レーザ出力及びアシストガス圧力の影響

レーザ出力及びアシストガス圧の影響を詳しく調べるため種々条件を変えて加工実験を行った。

加工材は、板厚 2mm のステンレス鋼 SUS304 で、加工材サイズは 100mm×80mm（外周シェーリング加工）である。アシストガスは窒素とした。

実験方法は、レーザ焦点位置を加工材表面とするジャストフォーカスでロボットで一直線に動かし切断した。連続発振を用いた。

レーザ出力の影響については、レーザ出力を 0.3kW から 1.5kW まで変化させ、切断速度 3m/min、ガス圧力 1.7MPa で切断、レーザ出力 0.5kW から 1.5kW まで、切断速度 5m/min ガス圧力 1MPa で切断の 2 つの実験を行った。

アシストガス圧力の影響については、アシストガス圧力を 1MPa から 1.7MPa まで変化させ、レーザ出力 0.3kW、切断速度 3m/min で切断、アシストガス圧力を 1MPa から 1.7MPa まで変化させ、レーザ出力 0.5kW、切断速度 5m/min で切断の 2 つの実験を行った。

(i) レーザ出力の影響

切断面の表面粗さは、レーザ出力が増すにしたがってよくなる傾向が見られた。

ドロス高さは、レーザ出力の影響が少ない。

これは金属の溶融が不十分状態から、レーザ出力を増やすことで単位体積当たりの熱エネルギーが増え十分な溶融状態になったため表面粗さが良くなったと考えられる。また、溶融した金属が切断面から離れるかどうかは吹き飛ばす圧力に関係し、レーザ出力には関係しないと考えられる。

(ii) シストガス圧力の影響

ドロス高さは、アシストガス圧力が増加すると良くなる傾向にある。

表面粗さは、アシストガス圧力の影響は少ない。

これは切断時のアシストガスの役割は、先に述べたように溶融金属を吹き飛ばすことに用いられていることから、圧力が高くなると溶融金属が吹き飛ばされドロスが無くなると考えられる。なお、溶融には関係しないため、表面粗さには影響を与えないと考えられる。

2-1-1-3 切断速度の影響

加工材は、ステンレス鋼とする。切断条件を表 2-1-1-1 に示す。

表 2-1-1-1 実験条件

加工材	SUS304 2mm (t2)
レーザ	出力 4kW 連続照射 ジャストフォーカス（加工材上面にフォーカス）
アシストガス	窒素 2MPa 、ノズル距離 1mm
切断速度	1, 2.5, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70m/min

各条件において 3 回の切断を行い面の表面粗さを評価した。

切断後の表面粗さを図 2-1-1-6 に示す。図中のエラーバーは、各速度において 3 回切断を行い切断面の計測を行った結果である。

上部、中央部及び下部の表面粗さ (RzU, RzM 及び RzL) は速度 20m/min 以上の高速切断においてほぼ一定値であった。

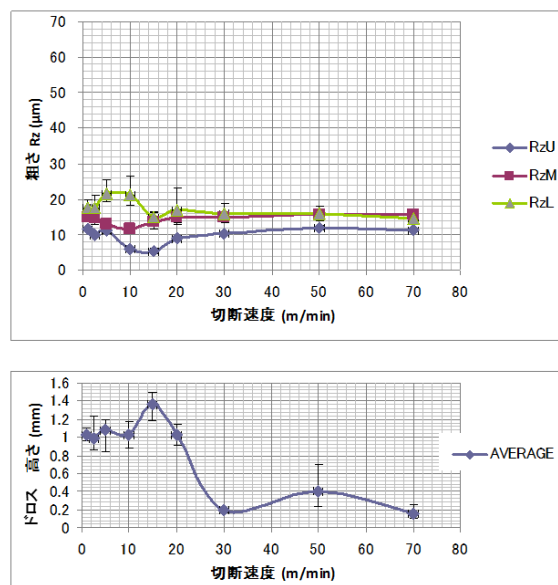


図 2-1-1-6 切断面の表面粗さとドロス高さ

切断速度を大きく変化させても表面粗さはほとんど変わらず、切断速度は表面粗さにほとんど影響しないといえる。

また、ドロスは、20m/min 以下では多く出たが 30m/min 以上では少なくなった。速度が遅いとドロスが発生すると考えられる。

2-1-1-4 技術目標値との対比

良好な切断結果が得られた二つの条件「条件 A」「条件 B」の結果を表 2-1-1-2 に示す。

結果として平面度、直角度については目標値に達しなかったが、最も重要な評価指標である表面粗さについては目標値を達成した。

また、直角度については、予めヘッド角度を調節することで対処が可能であると考えられる。

表 2-1-1-2 切断結果

	結果A	結果B	技術目標
表面粗さ Rz (μm)	8.80 (RzU 7.18, RzM 9.17, RzL 10.05)	7.92 (RzU 6.81, RzM 7.78, RzL 9.18)	10以下
平面度(mm)	0.02	0.03	0.01以下
直角度(°)	89.1	91.0	90±0.5以下
ドロス(mm)	0.02mm	0.03mm	発生しない こと(0.2mm以下)

2-1-1-5 ステンレス鋼以外の材質における切断条件について

研究対象品のステンレス板の切断加工について条件を求めてきたが、他の金属材料である軟鋼板、アルミニウム板、銅板、チタン板等についても切断の傾向を調べた。

加工材料は、軟鋼板 (SPCC t1.2、SPCC t2.3、SPHC t4.5、SPHC t6.0)、ステンレス板 (SUS304 t1.0、SUS304 t2.0、SUS304 t4.0)、アルミニウム板 (A5052 t1.0、A5052 t3.0) 銅板 (C1020 t1.0)、チタン板 (TP340C t0.5、t1.0) を用いた。材料サイズは、100mm×80mm で外周をシャーリング加工した。

アシストガスは、軟鋼板では酸素ガスを用い、ステンレス板、アルミ板、銅板、チタン板では窒素ガスを用いた。

実験方法は、材質、板厚ごとに、レーザ出力、加工速度、ガス圧力、フォーカス量などを変えてゆき、クリーンカットとなる最適加工条件を求めた。

その結果、ファイバーレーザを用いた切断では、従来の CO₂ レーザ切断機では困難であった高反射材のアルミ板、銅板が容易に切断できることがわかった。

2-1-1-6 ノズル形状の影響（流体解析）

切断ノズルの最適形状を求めるため、流体解析による検討を行った。

検討に用いたノズルは図2-1-1-7に示す。(a) テーパー形状、(b) テーパーの先端がストレート形状、(c) 今回開発した2重ノズルヘッドの切断ノズル形状の3種類である。

解析条件はノズル上面のガス圧力1MPa、加工板とノズル先端の距離は1mm、2mmとする。

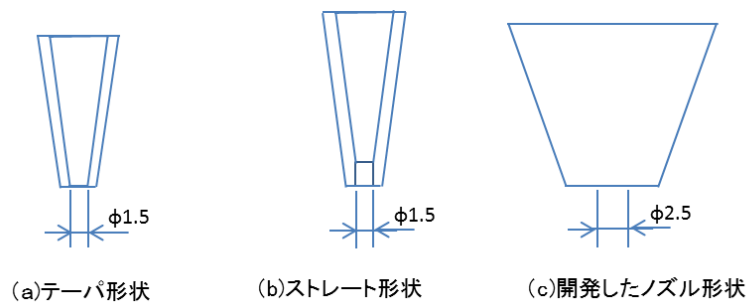


図 2-1-1-7 流体解析に用いた 3 種類のノズル形状

図2-1-1-8は上記 (a) と (b) において加工板とノズルとの距離を 1 mmにした時のノズルから出る噴出ガスの速度をベクトル表示したものである。図2-1-1-9は加工板とノズルとの距離を 2 mmにした速度をベクトル表示である。ノズル周囲からの流れ込みが見られるが、

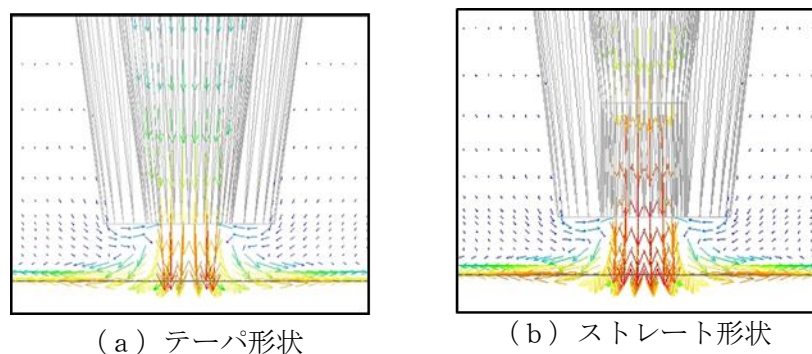
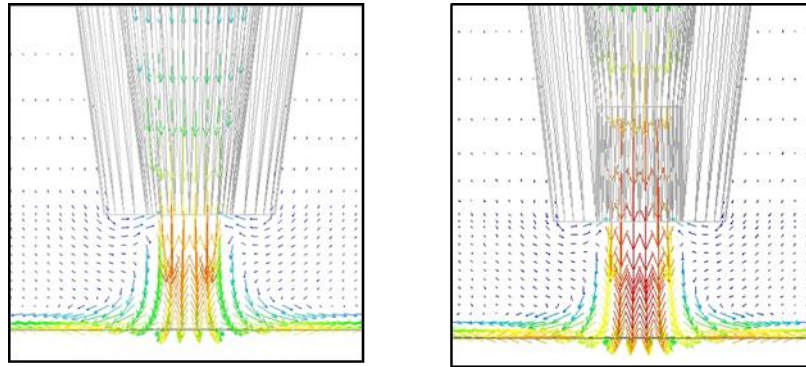


図 2-1-1-8 ノズル距離 1 mm 時の噴出ガスの速度ベクトル表示



(a) テーパー形状

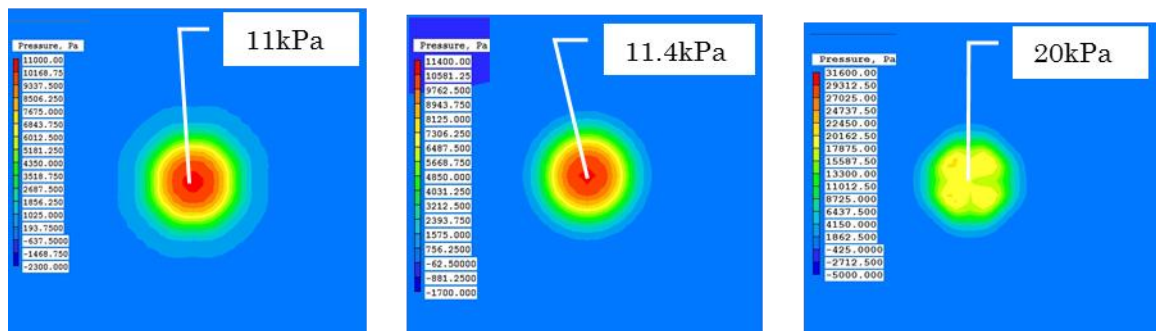
(b) ストレート形状

図 2-1-1-9 ノズル距離 2 mm 時の噴出ガスの速度ベクトル表示

ノズル直下と加工板の周辺上面に強い流れが見られる。ノズル距離を2mmにしても傾向は変わらない。

一方、図2-1-1-10は、ノズル距離 1 mm 時の加工板面上のガス圧力をコンター表示したものである。図2-1-1-11は、ノズル距離2mm時のガス圧力コンター表示である。

レーザで溶融された金属を高速で吹き飛ばす、ノズル直下の加工材面上のガス圧力が切断において重要となる。図より (a) テーパー形状より (b) ストレート形状が中心のガス圧力が高くなっており、(b) の方が良いことがわかる。(c) 開発したノズル形状はガス圧が非常に高くなっており性能が良いことがわかる。なおコンター色は黄色となっているがスケールが異なるため図上に圧力を表示した。

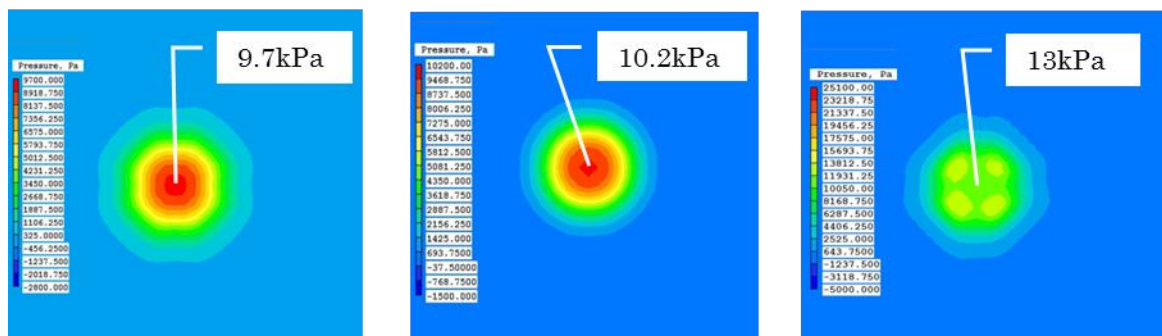


(a) テーパー形状

(b) ストレート形状

(c) 開発したノズル形状

図 2-1-1-10 ノズル距離 1 mm 時の加工板面上のガス圧力コンター表示



(a) テーパー形状

(b) ストレート形状

(c) 開発したノズル形状

図 2-1-1-11 ノズル距離 2mm 時の加工板面上のガス圧力コンター表示

またノズル距離を 2mm に空けると (a) (b) は約 20% 圧力が下がる。しかし (c) は 35% 減と大きくさがる。これはノズル形状に依存するものと思われる。

この流体解析で得た知見をもとに、今後最適な切断ノズルを開発していく。

なお、本解析は龍谷大学理工学部機械システム工学科塩見洋一教授にご支援いただきました。

2-1-2 低歪み無酸化溶接

レーザ溶接の傾向を調べるため、溶接条件とビード形状及び引張強度の関係を調査を行った。

溶接方法は、平板上にレーザ光を照射しビードを形成するビードオン、及び重ね溶接、突き合わせ溶接にて行った。

溶接条件は、レーザ出力、加工速度、フォーカス位置を変化させた。材料には SPCC (厚さ 1.2mm, 2.3mm) 及び SUS316 L (厚さ 1mm, 2mm, 4mm) を使用した。

評価はビード部の組織観察及び硬さ分布試験、引張試験を実施した。

組織観察には、全自動研磨琢磨装置 (テグラミン 30 システム：丸本ストルアス製) による研磨を行った後にエッチングを行い、実体顕微鏡 (BS-D8000II 他、ソニック (株)) にて組織観察及びビード幅や溶込み深さの測定を行った。

硬さ分布は、超微小硬さ試験機 (HM-137 (株)：アカシ及び FM-AR S 9008 C タイプ：(株)フューチャテック) を使用した。

引張試験には、万能試験機 250kN (AG-250kNX、(株)島津製作所) を使用し、母材破断に対する引張強度の比から溶接による強度低下を求めた。

2-1-2-1 SPCC 重ね溶接における溶接条件とビード形状の関係

入熱の小さい溶接条件では未貫通、入熱の大きい溶接条件では大きなアンダフィルと溶落ちが発生した。中間の溶接条件では若干のアンダカットが見られるものの溶落ちは改善された。

2-1-2-2 SPCC と SUS316L における溶接条件とビード幅の関係

高出力や低溶接速度等、入熱の大きな条件においては、ビード幅、熱影響部幅が大きくなった。SPCC、SUS316L いずれも入熱を増やすことでビード幅は増加した。ビード幅を広げる効果は、レーザ出力を上げるより溶接速度を低下させる方が大きかった。

2-1-2-3 SUS316L におけるレーザ出力・溶接速度とビード組織・強度の関係

溶接条件と強度の関係を明らかにすることを目的に SUS316L 厚さ 2mm を用いて実験を行った。図 2-1-2-1 に溶込み形状に及ぼすレーザ出力の影響を示す。入熱が少ない 1.0kW ではキーホール型の部分溶込み形状を示し、未貫通であった。1.5kW では良好なビード組織が得られた。入熱が過大と推定される 2.0kW 以上では、アンダカットやアンダフィルが発生した。なお、いずれも割れの発生は見られなかった。

図 2-1-2-2 に溶接速度の変化によるビード形状の変化を示す。5m/min では未貫通であり、4m/min で良好なビード形状が得られ、1~3m/min ではアンダカットやアンダフィルが発生した。

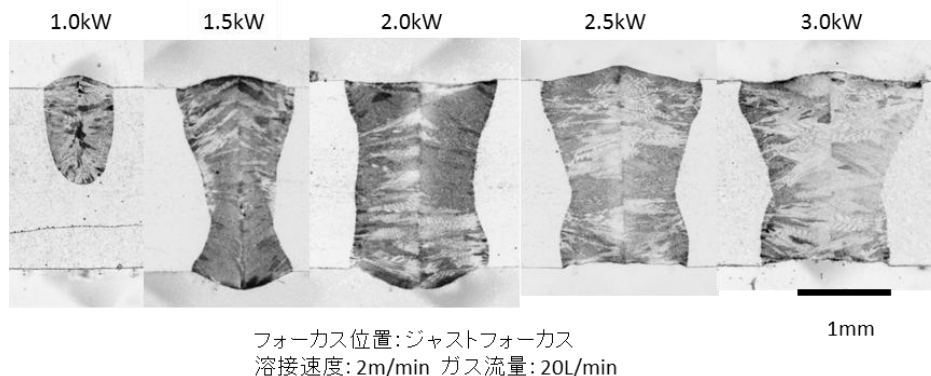


図 2-1-2-1 レーザ出力の変化によるビード形状の変化

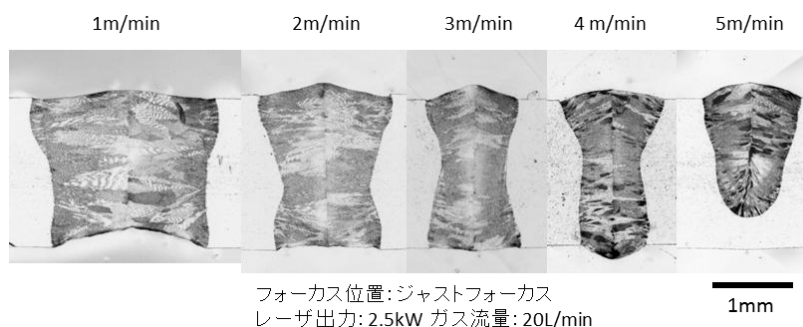


図 2-1-2-2 溶接速度の変化によるビード形状の変化

2-1-2-4 SUS316L におけるフォーカス位置とビード組織・強度の関係

フォーカス位置と溶融部形状の関係を明らかにするため、フォーカス位置を変化させながら溶接を行った。

ジャストフォーカス及びデフォーカスでは表面のビード幅が裏面に比べ広いのに対し、インフォーカスで裏面の方が広いあるいは同等という結果になった。

2-1-2-5 ステンレス鋼における高温酸化による変色色見本の作製

無酸化切断、無酸化溶接を技術目標の一つとしている。

その評価方法として、加工部において SEM-EDX による酸化が見られないことを目標と定めている。しかし、SEM-EDX により一度に評価できる範囲は数 mm 以下と微小な領域であり、広範囲の評価には向かない。

そこで、テンパーカラーから酸化度を評価すること検討した。

具体的には熱処理炉を用い人工的にステンレス鋼を酸化変色させ、その時の加熱温度と色と SEM-EDX による酸素分析の結果を関連づけ、色見本を作製し、これを用いて酸化度を評価することを行った。

(i) 実験方法

試験片には SUS316L (30mm×30mm×1mm) を使用した。前処理として表面をサンドペーパー #400 番にて研磨を行い、エタノールによる洗浄を行った。熱処理には真空熱処理炉 (TFS-0800603GV 石川産業(株)) を用いた。真空度は 4×10^{-3} Pa 以下とした。昇温速度約 20°C/min

で目的の温度まで加熱し、所定の温度にて 30 分間保持した。表 2-1-2-1 に保持温度及び冷却行程の一覧を示す。

表 2-1-2-1 熱処理温度と真空から大気圧開放を行った際の条件一覧

	熱処理温度 (°C)											大気圧開放時	
真空開放条件	200	300	400	450	500	550	600	650	700	800	900	温度°C	雰囲気
真空炉冷法											○	室温	真空
大気開放法	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	熱処理温度	大気

真空から大気圧に開放する方法として、真空熱処理法、大気開放法の 2 通りで行った。真空炉冷法では酸化が起こらない条件下での熱処理の影響を調べるため、真空を保ったまま室温まで冷却した。大気開放法では高温酸化を促進させるため、所定熱処理時間経過後、大気開放を行いその後 1 分間炉中に保持した後、取り出しステンレス鋼ブロックの上にて急冷を行った。

酸化度の測定には SEM-EDX (SEM: JSM-6380LV 日本電子(株)、EDX: Genasis2000 エダックスジャパン(株)製) を使用した。加速電圧 15kV で酸素 0.53eV、鉄 6.40eV のピーク値を測定し、評価を行った。色測定には自記分光光度計 (UV-3150 (株)島津製作所)、及び精密色差計 (CR-5, CM-3500D ミノルタ(株)) を用いた。色差測定は SCE 方式 (正反射光除去) で行った。

(ii) 真空熱処理

900°Cにて真空熱処理後、真空炉冷法で得られた試料表面はステンレス鋼特有の青白い光沢を示しており、変色は見られなかった。表面は研磨による条痕があるが、高温酸化による亀裂等は見られなかった。また EDX 分析の結果でも酸素の明確なピークは見られず酸化していないことが確認できた。以上より、今後の酸化度を評価する基準として本試料を用いることとした。

(iii) 色見本の作製

図 2-1-2-3 に作製した色見本を示す。

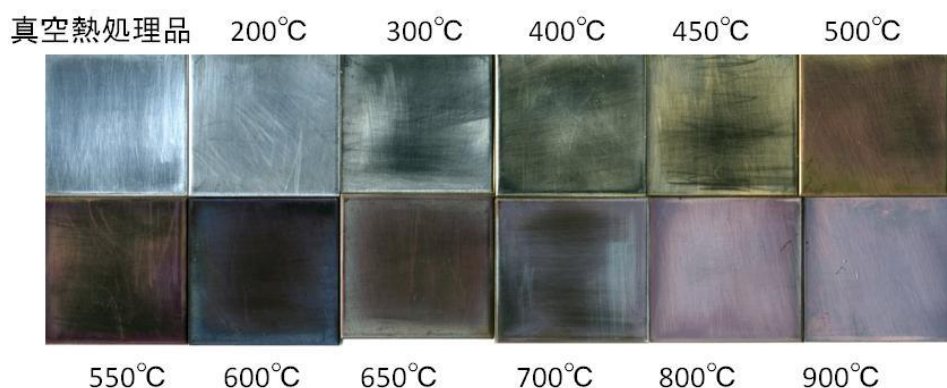


図 2-1-2-3 SUS316L における高温酸化色見本

300°C付近から黄色く変色が発生し、500°Cからは赤色、600°Cでは青く変色した。650°C以上では色の濃さが減少した。図 2-1-2-4 に高温酸化における Lab 表色系色度図を示す。

外観での変化と同様に数値的にも黄色から赤色、青色への変化が起こっていることが確認できた。また 650°C以上では変化の仕方が異なっており、色が薄くなっていた。図 2-1-2-5 に高温酸化における真空熱処理品に対する色差 ΔE^*ab の変化を示す。600°Cまでは加熱温度が上昇

するに従って色差が増すのに対し、650℃以下ではいったん色差は低下していた。以上のことから、600℃付近で着色のメカニズムが異なることが考えられた。

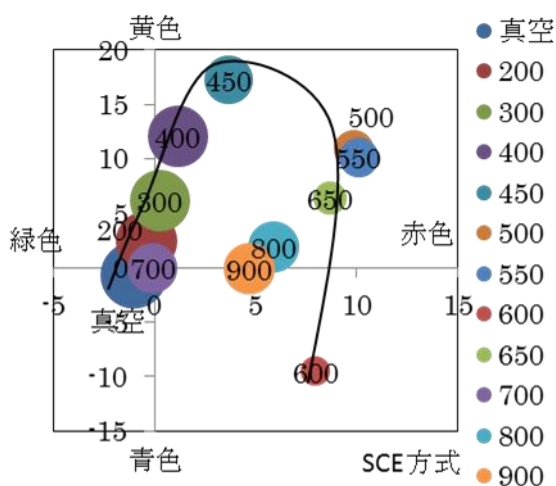


図 2-1-2-4 高温酸化における
Lab 表色系色度図

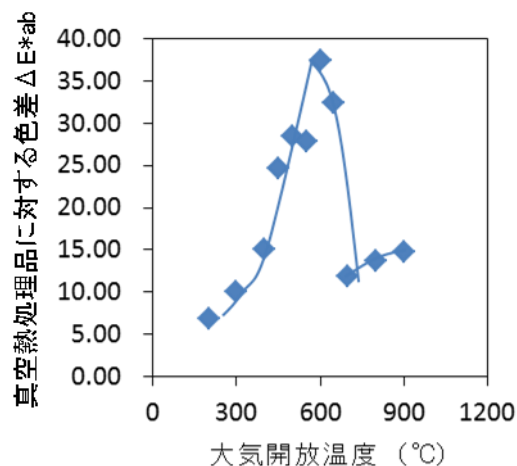


図 2-1-2-5 高温酸化における真空熱処理
品に対する色差 ΔE^*ab の変化

(iv) SEM-EDX による酸素分析

高温酸化における SEM-EDX 酸素ピークの変化を評価するため酸素 $K\alpha$ 線 (0.53keV) と鉄 $K\alpha$ 線 (6.40keV) の強度比の計算をおこなった。図 2-1-2-6 にその結果を示す。

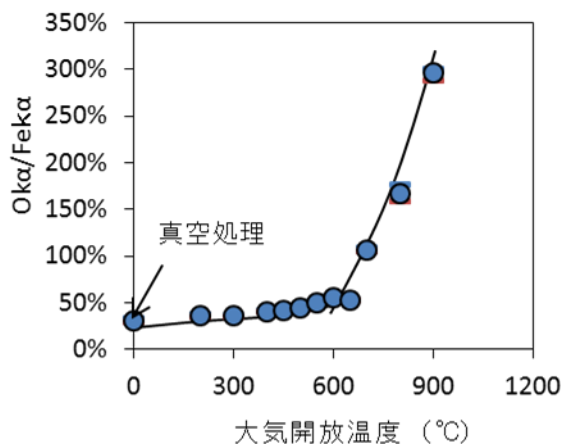


図 2-1-2-6 SEM-EDX による高温酸化
における酸素ピークの変化

400℃以下の高温酸化は EDX で分析を行うよりも変色を観察した方が、酸化度を評価できると考えられる。

(v) グロー放電発光分析装置による酸化膜厚さの測定

実際に酸化被膜がどの程度形成されているか調べるため、グロー放電発光分析を行った。用いた装置はマークス型高周波グロー放電発光表面分析装置 GD-Profiler 2 ((株)堀場製作所製)

である。本装置はアルゴンイオンによる試料表面をスパッタで掘り、その時に発生する光から物質を定性する装置あり、測定時間と発光から物質の深さ方向のプロファイルを得ることができる。

図 2-1-2-7 に発光強度 1V に低下した時の深さを酸化皮膜の膜厚と仮定し、酸化温度でプロットを行った。

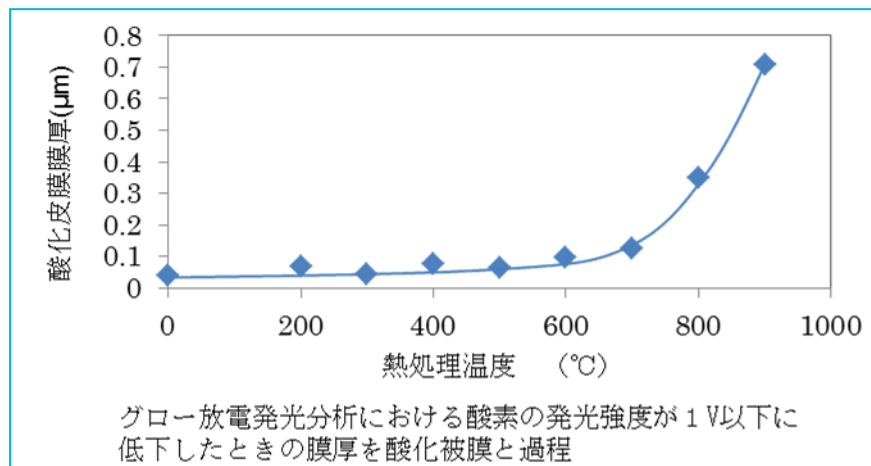


図 2-1-2-7 酸化温度にともなう酸化皮膜の変化

このときの膜厚は 500°C 以下では 0.06 μm 程度で大きな変化は見られないが、600°C 以上では酸化膜は 600°C で約 0.09 μm 、900°C では 0.7 μm と急増加した。

(vi) 酸化物色見本の適応事例

今回作製した色見本を用い、実際に多重ノズル加工ヘッドを用いた溶接品の酸化度の評価応用を行った。デフォーカス 5mm は溶接部の変色は青から黒であることから 600°C 以上でシールドガス効果が無くなったと考えられる。デフォーカス 6mm においては溶接部の変色は赤から青色であることから 450~600°C でシールドガスの効果が無くなったと考えられる。デフォーカス 7mm では溶接部の変色は黄色から赤色であることから 400°C~500 でシールドガスの効果が無くなったと考えられる。今回はデフォーカスを増加した方がシールドガスの効果が高くなるという結果となった。

2-1-2-6 ステンレス鋼以外の材質における溶接条件について

研究対象品のステンレス鋼板の切断加工について条件を求めてきたが、他の金属材料である軟鋼板、アルミニウム板、銅板、チタン板等についても溶接の傾向を調べた。

(i) 実験方法

溶接加工材料は、軟鋼板 (SPCC t1.2、SPCC t2.3、SPHC t4.5、SPHC t6.0)、ステンレス鋼板 (SUS304 t1.0、SUS304 t2.0、SUS304 t4.0)、アルミニウム板 (A5052 t1.0、A5052 t3.0)、銅板 (C1020 t1.0)、チタン板 (TP340C t0.5、t1.0) を用いた。加工材サイズは、50mm × 80mm で、突合せ溶接面はレーザ切断とした。

(ii) 実験結果

各材質・板厚毎に、条件を変えて突合せ溶接を行い、その中から表ビードと裏ビードが良好なものを選出し、良好な溶接が出来る加工条件を特定した。その後この良好な溶接品について、引張り試験を行った。

材料メーカから提出されている引張強さとほぼ同等の引張強さを示しており、強度に影響を及ぼすような内部欠陥が無いことがわかった。

また、レーザ切断した材料の切断部分を突合せて溶接したものが強度上の問題が無かったことは、切断と溶接を1ヘッドで行う本研究開発の一貫工法が可能であることを示している。

さらに各材質でも問題なかったことは、本研究開発で目指す切断溶接一貫工法がステンレス鋼以外の材料、鉄はもちろんアルミ、チタン、銅にも適用できることを示したものだといえる。

2-1-2-7 溶接ノズル形状及び距離がシールドに及ぼす影響（流体解析）

溶接ノズルの最適形状を求めるため、流体解析による検討を行った。

検討に用いたノズルは図2-1-2-8に示す①パイプ3連ノズル、②1連ノズル、③開発したノズルの3種類である。解析条件はガス流量15L/min、30L/min、60L/min、加工板とノズルの距離1mm、5mm、10mmとした。

図2-1-2-9にパイプ3連ノズルで距離を変えた場合の解析結果を示す。図中の等高線表示（コンター表示）はガス濃度を示し、濃度100%すなわちシールドされている所が赤色で示されている。図2-1-2-10は1連ノズルで距離を変えた場合、図2-1-2-11は開発したノズルで距離を変えた場合、図2-1-2-12は一連ノズルで流量を変えた場合である。

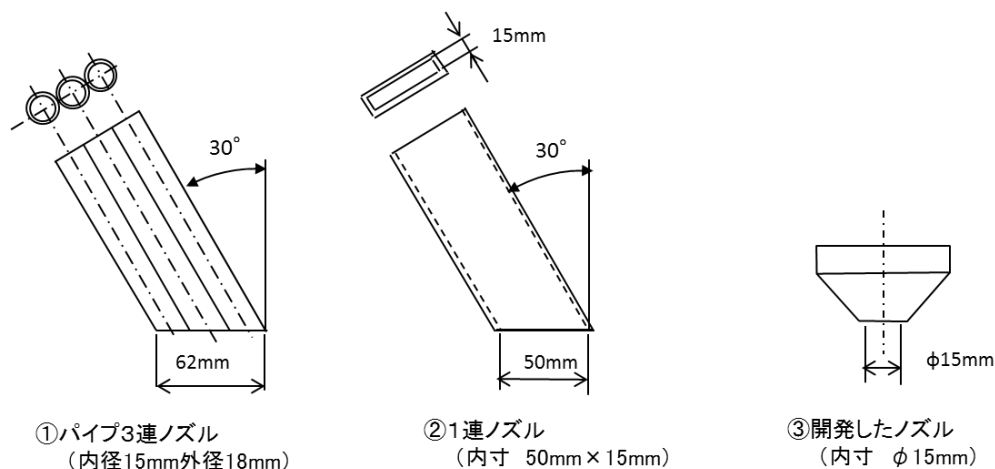


図 2-1-2-8 ノズル形状

ノズル距離が1mmの場合は、パイプ3連ノズルも1連ノズルもシールドされている範囲（赤色部）はノズルの直下だけである。

3種類のノズル共、ノズル距離が5mm以上となるとシールドの範囲は広がる。ただしガス流量が増えてくるとシールド範囲が狭くなる傾向にある。

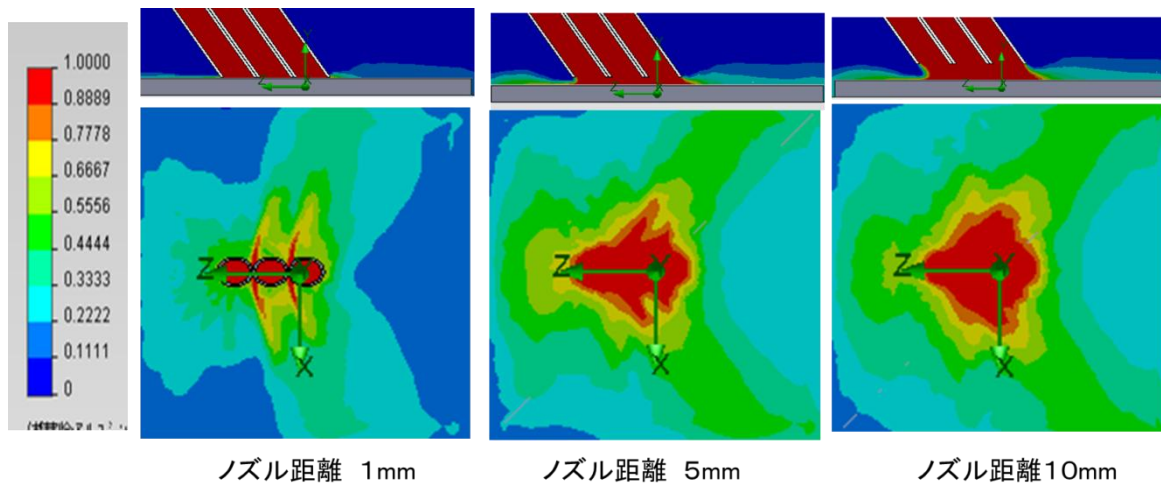


図 2-1-2-9 パイプ 3 連ノズルで距離を変えた場合 (ガス流量 30L/min)

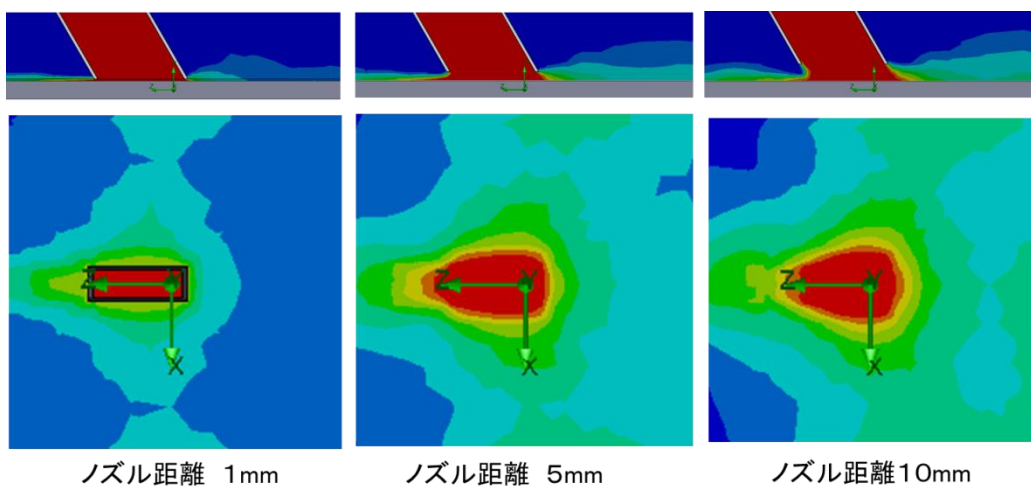


図 2-1-2-10 1 連ノズルで距離を変えた場合 (ガス流量 30L/min)

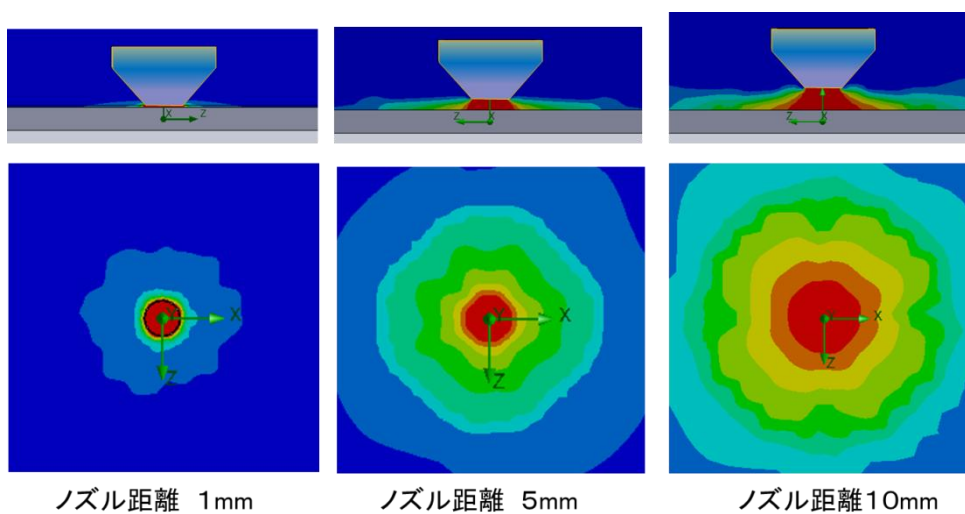


図 2-1-2-11 開発したノズルで距離を変えた場合 (ガス流量 60L/min)

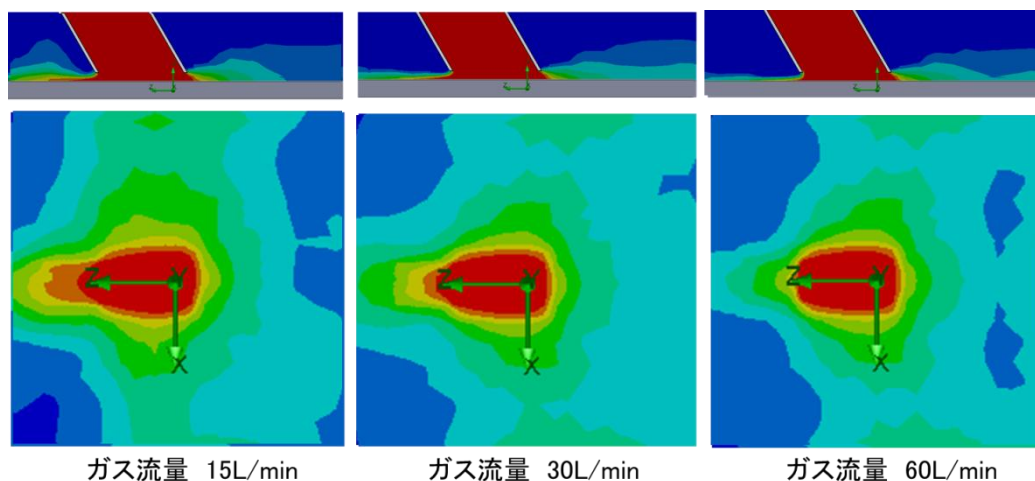


図 2-1-2-12 1 連ノズルで流量を変えた場合(ノズル距離 5mm)

これは、噴出するガスの速度が速くなると、その周囲の圧力が低下し、周囲空気を吸込みガス濃度が低下するためと思われる。

今後、この流体解析結果を用いて実機ノズルによる実験検証を行い、その結果を基にノズル形状の開発を行っていく。

なお、本解析は阿南工業高等専門学校機械工学科西野精一教授にご支援いただきました。

2-1-2-8 長尺板における歪みについて

ファイバーレーザ溶接の溶接変形（歪み）が少ないことを、アーク溶接の溶接変形（歪み）と比較して検証した。

(ii) 実験結果

図 2-1-2-13 に各溶接品を示す。

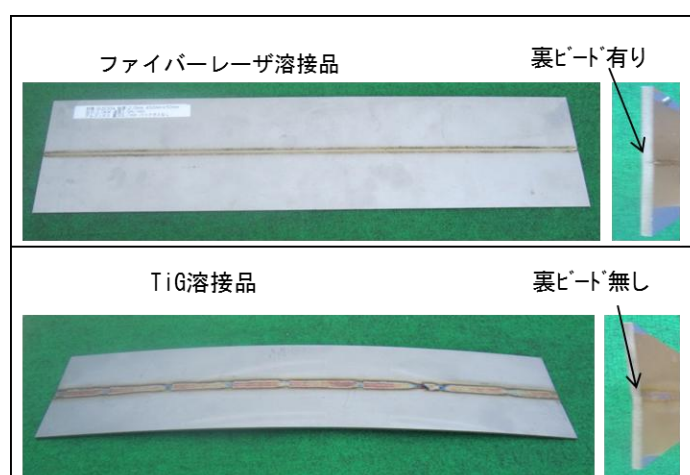


図 2-1-2-13 各溶接品の外観

溶接品の歪みを測定する測定ポイントを図 2-1-2-14 に示す。A、B、F の 3 点を測定面の基準点として、各位置の高さを測定した。その結果を図 2-1-2-15 に示す。

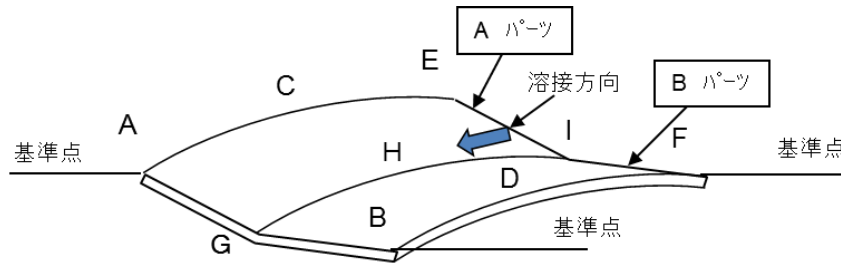


図 2-1-2-14 測定ポイント

	測定ポイント(上図参照)								
	A点	B点	C点	D点	E点	F点	G点	H点	I点
ファイバーレーザ溶接品	0	0	-1.12	-1.2	0.09	0	0.02	-1.2	0.32
TIG溶接品	0	0	13.67	13.11	1.04	0	-1.0	12.13	-0.4

図 2-1-2-15 測定結果

結果より、幅方向の変形（V字の変形）は、幅 50mm に対し、G の高さ、C、D に対する H の高さ、E、F に対する I の高さである。これは TIG 溶接が -1.0mm、-1.3mm、-0.9mm であるのに対し、ファイバーレーザ溶接は 0mm、0mm、0.2mm と TIG 溶接の 1/10 以下でほとんど変形がないといえる。

長手方向の変形（山形の変形）は D の高さ、A、E に対する C の高さで、TIG 溶接が 13mm、13.1mm に対し、ファイバーレーザ溶接は -1.2mm、-1.17mm と 1/10 以下でほとんど変形がないといえる。

これは、ファイバーレーザ溶接は、細いビードで貫通溶接が出来ており、冷却時の収縮が表裏で均一に起こり、変形が少ないためと考えられる。これに対し、TIG 溶接は、母材の上面のみが加熱され、冷却時の収縮で引張り応力が内部に蓄積する。そのため治具から外した時、内部応力が解放され幅方向は V 字に変形したと考えられる。長手方向の変形は、幅方向の変形とは逆方向の変形となっているがこれも内部応力に関係すると思われる。

2-2 一貫切断・溶接システム技術の開発

2-2-1 プレス絞り品（触媒ケース）切断・溶接一貫加工用高精度治具の設計製作

図 2-2-1 に開発したプレス絞り品（触媒ケース）切断・溶接一貫加工用高精度治具の写真を示す。

向かい合ったスクロールチャックにプレス絞り品を固定させ、右側のテーブルが左右に摺動してプレス絞り品をもう一方に押しつける構造となっている。また、開発した 2 重ノズルヘッドと干渉しない形状となっている。



図 2-2-1 上記治具の写真

2-2-2 切断・溶接共用 2 重ノズルヘッドの開発

切断実験及び溶接実験のデータを基に、切断・溶接共用 1 ヘッド同軸多重ノズル式加工ヘッドの一つとして、切断・溶接共用 2 重ノズルヘッドを開発した。

2-2-3 治具の把持部の検討

ファイバーレーザによる突合せ溶接では、2 つの溶接部材の突合せ精度が必要である。

しかし、現状では溶接部材はプレス絞り品であるため、真円度が悪く 2mm～3mm 程度の歪みが発生し、突合せ状態で半径方向の隙間が発生するため両者が同時に熔融することができず、溶接できない状態であった。特にプレス絞り品に側面穴をバーリング加工した品（側面バーリング品）は、端面が楕円形に変形している。これと溶接する奥の平面に穴をあけた品（天穴品）は、端面は変形せず真円に近い。

そのため、治具によるプレス絞り品の把持により真円度を向上させ突合せ精度を向上させる必要がある。

全円周を把持できることから、真円度 0.2mm 以下が達成でき、図 2-2-2 にバーリング部付近の溶接部を示すが、半径方向の歪みを解消しており、真円度が確保できる把持治具が開発できた。



図 2-2-2 バーリング部付近の溶接部

2-2-4 ステンレス鋼絞り容器の一貫切断・溶接検証（研究対象品）

開発した治具を用い、ステンレス鋼絞り加工品を把持し、開発した 2 重ノズルヘッドを用いて、取り外す事無く切断・溶接加工を行う検証実験を行った。

図 2-2-3 はそのプレス絞り加工品の端面状況である。端面の一部が 0.5mm 浮いているのがわかる。 図 2-2-4 は切断・溶接一貫加工品の部品と外観寸法である。



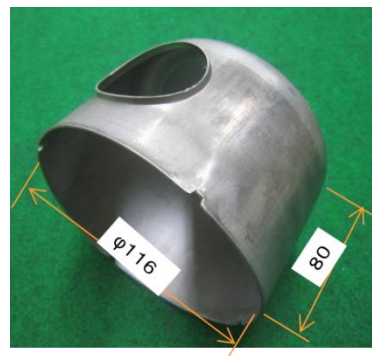
図 2-2-3 プレス絞り加工品 端面状況



側面バーリング品



天穴品



外観寸法

図 2-2-4 切断溶接一貫加工品の部品と外観寸法

(i) 切断検証

切断後の突合せ部の表面粗さ R_z が $20\mu\text{m}$ 以下で、突合せ隙間が 0.1mm 以下、半径方向の段差が 0.25mm 以下となっており良好な溶接用部材となっている。

(ii) 溶接検証

溶接したプレス絞り加工品（触媒ケース）の外観図を図 2-2-5 に示す。ビード幅が細く均一で酸化変色もほとんどなく、良好に溶接されていると推測できる。



表側



裏側

図 2-2-5 溶接したプレス絞り加工品（触媒ケース）の外観図

各溶接部を拡大した外観状態は以下のように、スタートとエンドが重なった部分も他の部分と大きな差異はない。

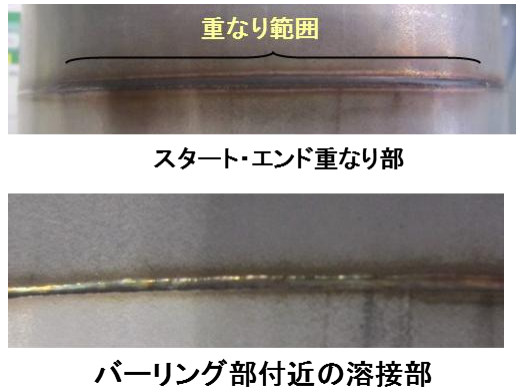


図 2-2-6 触媒ケース溶接部の各部を拡大した外観図

図 2-2-7 は、各溶接部を切断研磨して溶込み状況を調べたものである。スタート・エンド部は下部の方まで幅広く溶融しているが、表面のビード幅はどれも 1.1mm と同一で、裏ビードもすべての場所に出ている、良質な溶接ができた。

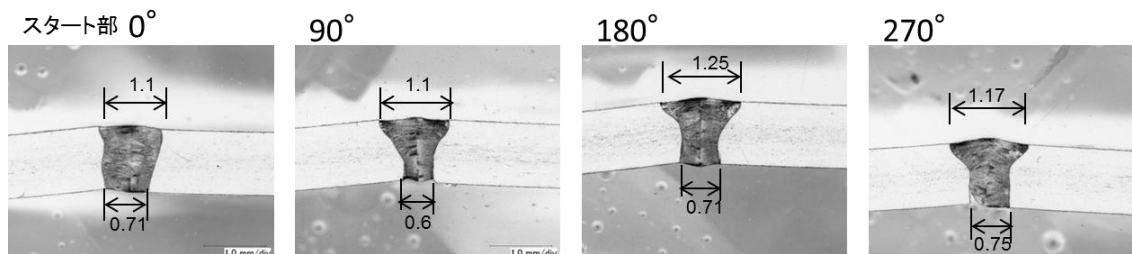


図 2-2-7 各部の溶接部の溶込み状況

なお、溶接部の強度品質を調べるため引張強さを測定した。母材部で破断しており十分な強度があることが確かめられた。

第3章 総括

環境問題の観点から、自家発電・大型自動車・建設機械、船舶などに多く使われるディーゼルエンジン等は、近年、排気ガス（NO_x）規制対策に触媒ケースのニーズが高くなってきており、耐食性材料の薄板溶接工法が求められている。触媒ケースはディーゼル発電機にも使われており、節電に対応する自家発電設備として被災地復興復旧に貢献できる。しかし現在の TIG 溶接では歪みやガス洩れ等の不良が多く、その対策もあり生産性が非常に悪いものとなっている。そこで、ファイバレーザを用い同一軌跡で切断と溶接を行う切断・溶接共用 2 重ノズルヘッドを開発し、これを用いる一貫切断・溶接システム技術を開発した。この技術は高精度、高品質、高生産性を達成し、部材加工産業に貢献できるものである。

本年度の研究開発により得られた成果は以下のとおりである。

1. レーザ出力、切断速度、アシストガス圧力は、切断面の表面粗さやドロスの有無に影響を与えることがわかり、これらの条件を、適切に選定したことにより、ドロスの無い状態で表面粗さ Rz10 μm 以下を達成することができた。
2. 従来の CO₂ レーザでは切断が困難であった高反射材のアルミ板や銅板が、ファイバレー

ザでは容易に切断できることがわかった。

3. 流体解析により、切断ノズル形状は、テーパ形状より、ストレート形状が良く、さらに今回開発したノズル形状が良いことがわかった。
4. 極力入熱を下げることで溶接部の強度低下を防ぐことができることがわかった。
5. ステンレス鋼以外にアルミ、チタン、銅、鉄などの材質や各板厚において良好で溶接欠陥の無い溶接ができる加工条件を特定することができた。
6. レーザ切断した材料を突合せ溶接した試験片は強度上の問題が無かった。これにより、本研究開発で目指す切断・溶接一貫工法の効果が高いことを示した。
7. 本研究開発で目指す切断溶接一貫工法が、ステンレス鋼以外の材料、鉄はもちろんアルミ、チタン、銅にも適用できることがわかった。
8. 流体解析により、溶接ノズル距離が広がると、ガスシールド範囲が広くなり、ガス流量が増えるとシールド範囲が狭くなることがわかった。
9. プレス絞り品（触媒ケース）切断・溶接一貫加工用高精度治具を開発した。
10. 触媒ケースの半径方向の変形を、3点把持から全円周把持にすることにより解決し真円度 0.2mm を達成した。
11. 切断・溶接共用 2 重ノズルヘッドを開発した。
12. 2 重ノズルヘッドと治具開発による一貫切断・溶接システムにより、プレス絞り品の突合せ溶接が表ビード幅 1.1mm 均一で、裏ビードもすべての場所に出て、良質で十分な強度のある溶接ができた。

研究開発最終年度に当たり事業化につながる活動として、展示会出展や川下産業からの引合いテーマについては、3 テーマにおいて具体的に実用化検討段階まで進めている。

研究開発推進面では、本研究を担当する研究者が研究内容の共有化と討議を行うため月例会を開催し、研究推進に努めた。

なお、大学とは定期的に技術交流会を持ち、特に大阪大学接合科学研究所片山聖二教授には計画・実験・評価など全研究について毎月直接指導を受け、研究開発を飛躍的に進捗させることができ、多くの要素技術を構築することができた。