

特集 レーザ溶接における円筒部品の変形挙動解析*

Analysis of Deformation Behavior of Pipe under Laser Welding

白井秀彰
Hideaki SHIRAI

沢本節夫
Setsuo SAWAMOTO

佐藤隆文
Takafumi SATO

Recently, laser welding technologies have been increasingly applied in order to join two parts at a small area with small distortion. In the automobile parts industry, seam welding has been widely required for pipe. In this application, deformation of dozens of micron after welding sometimes causes trouble. Therefore, the process of deformation in laser welding of pipe has been expected to be explained. However, there are few reports about the analysis of deformation in laser welding of pipe.

The present study deals with deformation mechanism with the help of phenomenal and theoretical analyses in order to clarify the process of deformation in laser welding of pipe.

Key words : Laser welding, Automobile parts, Seam welding, Deformation mechanism

1. 緒言

近年の自動車を取り巻く環境は、厳しさを増している、製品特性からは、高精度・小型化・高性能等のニーズが求められている。そうしたニーズに対応するための加工法の一つとして、レーザー溶接が注目されている。

レーザー溶接技術の動向としては、大物構造物や大型アクチュエータ等を1000 μm から100 μm レベルの精度でアークを熱源として溶接していた70年代から80年代後半に対して、90年代に入り、微小領域を低歪みで接合するための有効な手法としてレーザー溶接の適用が急増している。EFI（電子式燃料噴射装置）の普及に伴い、90年代後半からは製品の小型化及び低コスト化対応のためにレーザー溶接を多用化するようになり、加工技術として大きな変化を遂げた。

しかし、自動車部品では溶接後の数十 μm レベルの変形が問題になる場合がある。そのため、レーザー溶接における変形挙動の明確化及び高精度接合技術開発が望まれており、これら要求にこたえるため高精度接合研究に着手した。

2. レーザ溶接現象の概要

レーザー溶接における変形メカニズム概要をFig.1に示す。レーザー溶接は、入熱・溶融・凝固・冷却というプロセスを数十msという非常に早い時間で行われる現象である。このうち、変形に影響するのは、凝固過程から冷却過程で発生する収縮応力である。収縮応力は、最終過程で歪み=変形(曲がり)となり溶接欠陥

として現れる。

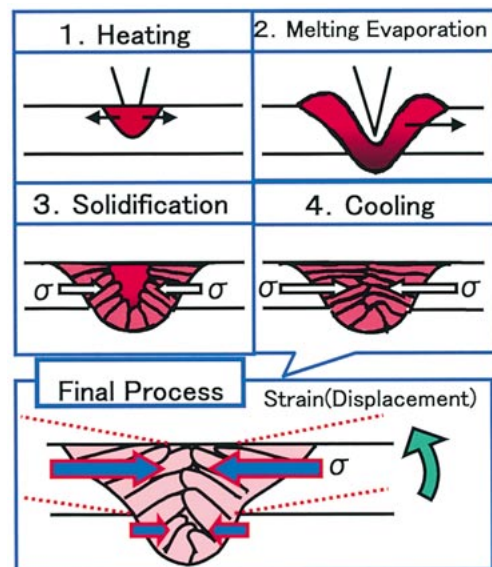


Fig.1 Deformation mechanism in the welding process

実際の溶け込み形状をFig.2に示し、変形(曲がり)に影響する溶接ビード表面に発生する変形量を単純に1450 から20 の温度変化を与え、圧入による拘束力がないと仮定し、線膨張係数 11.7×10^{-6} を与え、手計算により予測を行った(Fig.3参照)。単純計算により算出した推定変化量 δ は、11.8 μm となり、溶接後の数 μm の変形が問題となる製品に対して、微小領域を低熱歪みで接合するための有効な手法として用いられているレーザー溶接でさえも、要求を満足するには通常の方法では限界があることを予想できる。以上のことより、溶接による数 μm という歪み量は、高精度

* 2001年8月23日 原稿受理

化を進めていく上で無視できないレベルであることがわかる。

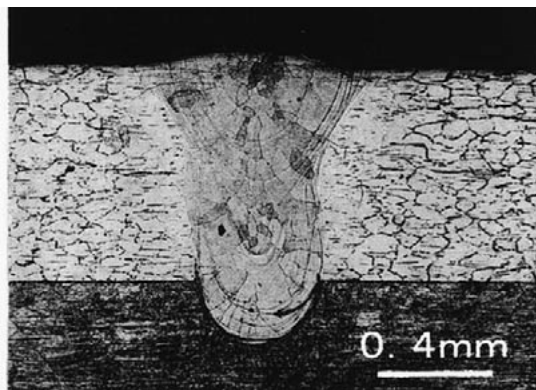
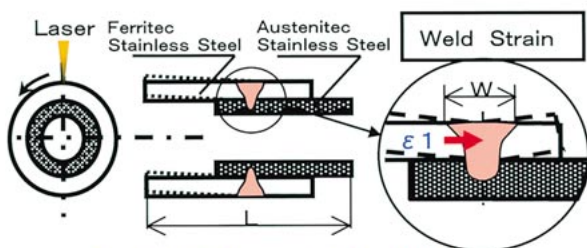


Fig.2 Cross section



Analysis Displacement $\epsilon 1 = 11.8 \mu m$

Fig.3 Displacement prediction simple calculation

3. 自動車部品におけるレーザ溶接の特徴

自動車部品においてレーザ溶接は部品の精密組付け技術として多く用いられている。又、その形状及び継手は、Fig.3に示す円筒部品の重ね及び突き合せ継手が大半である。溶接後の要求品質としては、Fig.4に示す変形（曲がり）が少ないことが求められている。

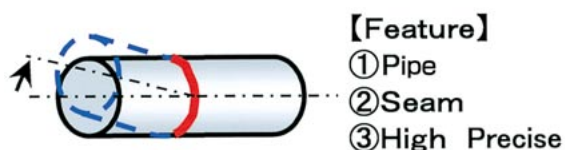


Fig.4 Feature in automobile parts

4. レーザ溶接における変形実挙動の把握

レーザ溶接における変形実挙動の把握を行った。理想的には、溶接加工中の動歪み特性を把握することが変形実挙動を把握する上で精度の高いデータとなる。しかし、現実的に溶接加工中の動歪み特性を精度良く計測する技術がないため、歪みゲージを用いて、温度変化に対するゲージの変化を代用特性として使用し変形挙動を把握した。解析要領は、Fig.5, Fig.6に示すようにテストサンプルに溶接開始点と180°対角の位置に歪みゲージを貼り付け、全周溶接における動歪み

を測定した。測定に際しては、既存の歪みゲージの中で最小（ゲージ長0.2mm 温度補償範囲250℃）のゲージを使用し、溶接部から熱影響が温度補償限界近傍の2.0mmを計測位置として測定を行った。

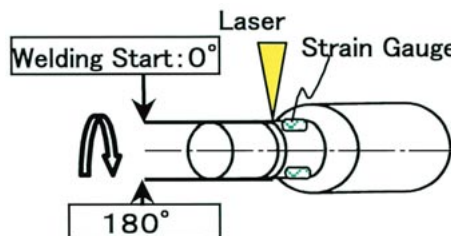


Fig.5 Experiment

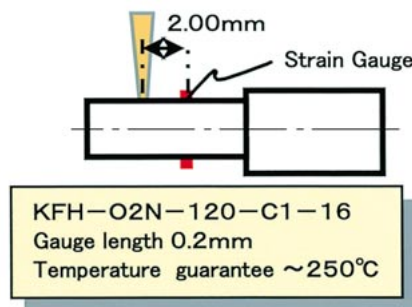


Fig.6 Measurement point

測定した歪み履歴をFig.7に示す。溶接開始から溶接終了までの全周溶接における挙動は、溶接開始直後には加熱膨張により軸方向の歪みは圧縮方向に移行する。溶接の進行に伴い引張方向に移行する。一方、180°対角の位置では溶接熱源の通過により、圧縮方向に歪みが発生し、溶接進行により、引張方向に移行している。

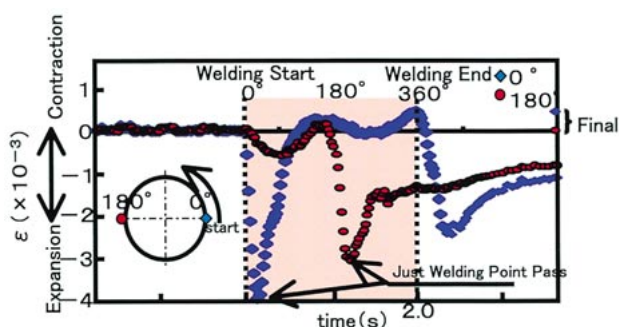


Fig.7 Strain behavior

以上より、溶接加工中の動歪み特性は溶接の進行に伴い複雑に変化していることがわかる。しかし、歪みゲージによる代用特性を観察しており、レーザ溶接における真の変形挙動をリアルタイムで把握できておらず、過渡的な変形挙動の詳細把握が必要である。

5. シミュレーションによる検討

レーザー溶接における過渡的な変形挙動を把握するため、シミュレーションによる検討を行った。解析対象は、Fig.8に示すような実際の製品形状を模して作製したテストサンプルを使用し、図中の丸印で示した部分をモデル化した。FEMモデル概要をFig.9に示す。3次元モデルを用いて、実際の加工を再現するため移動熱源を与え、応力解析時には、端部を完全拘束状態とした。

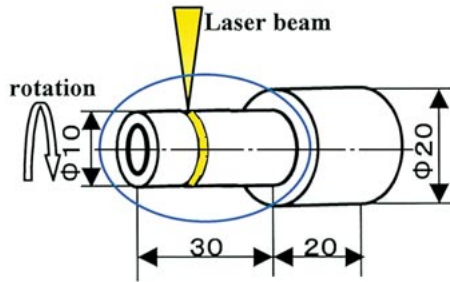


Fig.8 Object

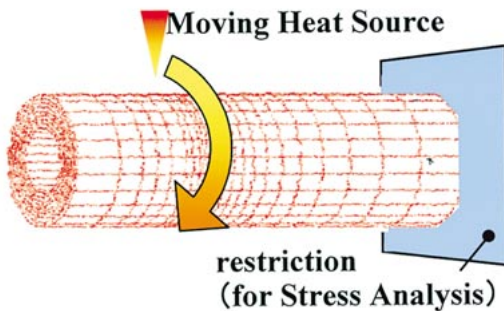


Fig.9 Model

解析方法をFig.10に示す。熱源は、実際の溶融形状が再現可能な温度境界を付与し、非定常の熱伝導解析を行った。解析結果より得られた温度分布をもとに弾塑性熱応力解析を行い溶接変形を把握した。解析は、汎用の有限要素法解析ソフトを使用しFig.11に示すように熱的特性（比熱 C 、熱伝導 λ 、密度 ρ ）及び機械的特性（降伏応力 σ_y 、弾性率 E 、熱膨張率 α ）は、温度依存性を考慮している。

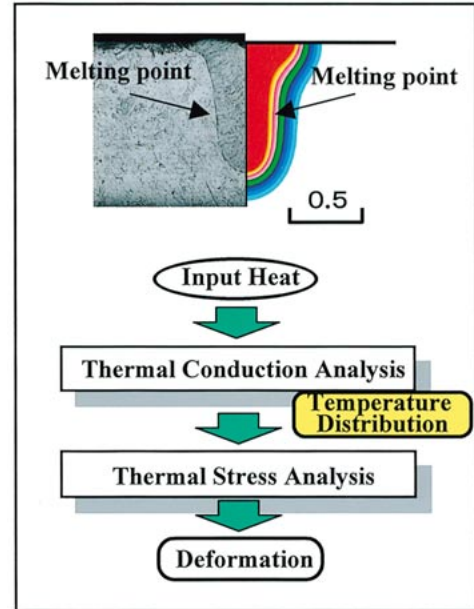


Fig.10 Method

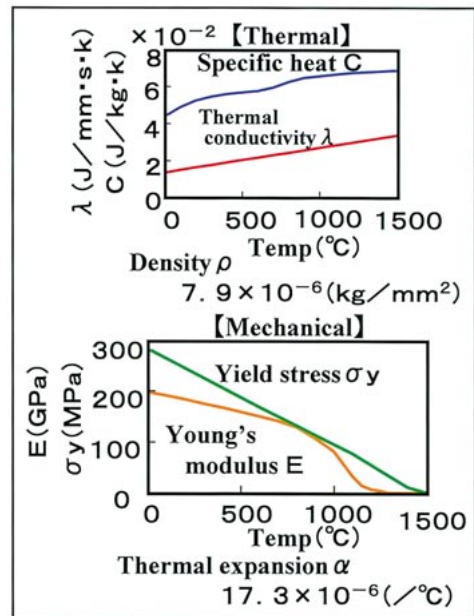


Fig.11 Physical properties

5.1 非定常熱伝導解析結果

レーザー溶接における温度履歴を計測し、解析結果との比較を行った。Fig.12に示すように溶融部から軸方向に1、2及び4mmの位置に熱電対を接合し、溶接開始から溶接終了までの温度履歴を計測した。実測データを点線で示すがレーザー照射を開始してすぐに温度は上昇し始める。溶接の進行に伴い熱源が離れていくため、温度は徐々に減少し全周溶接終了時点で再び熱源が接近するため、最高到達点温度がこの時点で把握で

きる。溶接位置から離れていくに従い最高到達点温度は下がっており、5 s以降で200 程度に安定している。溶接部に一番近い1mmの位置では、最高到達点温度が約1000 となっており、溶融部からの距離に比例して、温度が下がっていることを実測データから把握した。

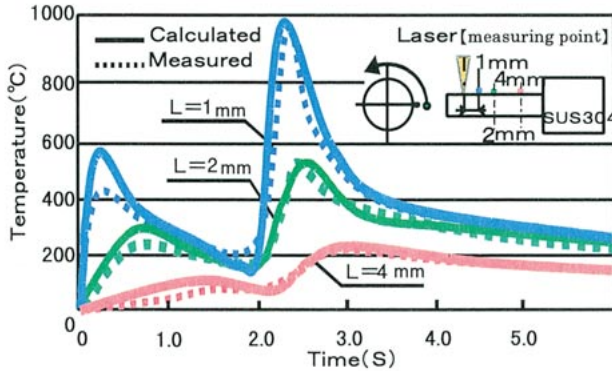


Fig.12 Comparison between calculated and measured temperature

一方、熱伝導解析結果を照らし合わせると溶接開始から溶接の進行に伴う温度履歴が実測の表面分布データとほぼ一致しており、熱伝導解析結果の妥当性を確認できた。

5.2 弾塑性熱応力解析結果

熱伝導解析結果より得られた温度分布をもとに弾塑性熱応力解析を行い、溶接変形を把握した。溶接加工中に生じる変形は、Fig.13に示すようにパイプ端面の軸ズレを溶接進行角度ごとに解析を実施し、表現した。

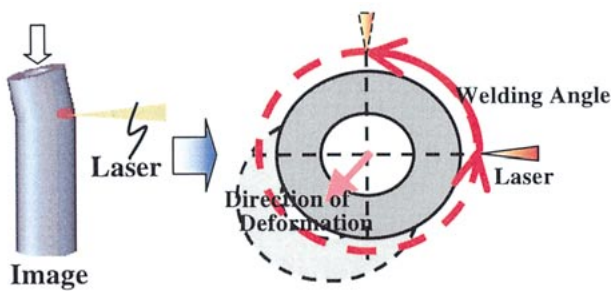


Fig.13 State of deformation

溶接加工中から溶接終了後までの変形挙動は、解析結果よりFig.14のようになる。変形は、溶接開始から熱源の移動とともに熱源と反対方向に発生する。90°、180°、270°、360°と溶接の進行に伴い変形が移動し、溶接終了後に変形が落ち着くことがわかる。

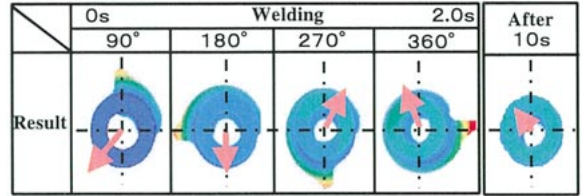


Fig.14 Deformation behavior

解析結果より得られた変形挙動をFig.15に示す。径方向に変形量を取り、全周溶接過程における溶接範囲（角度）に対する加工中の変形特性を示している。



Fig.15 Analysis result

溶接開始から変形は増加していき、溶接熱源の進行に伴って増加 減少 増加 減少という複雑な挙動を示している。全周溶接終了後の変形量を解析結果と実測データと比較すると熱伝導解析結果に対し一致レベルは低いが変形方向は、ほぼ一致することを確認している。

6. 変形挙動メカニズムの考察

解析結果より得られた全周溶接過程の変形挙動は、その特性から、Fig.16に示すように4つの領域に分類することができる。

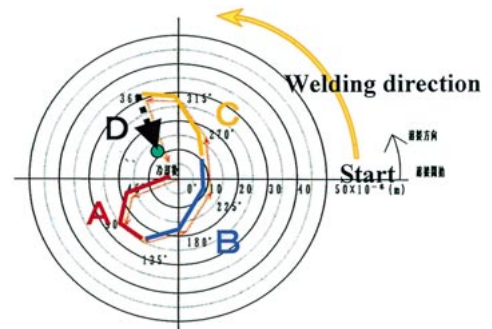


Fig.16 Direction of deformation

変形挙動特性を変形量と溶接範囲（角度）に展開するとFig.17のようになる。溶接の進行に伴い変形量が増加する領域A，領域Aから溶接が進行していく過程で変形が減少する領域B，さらに溶接が進行し再び変形が増加する領域C，溶接後の冷却過程では減少する領域Dと整理できる。

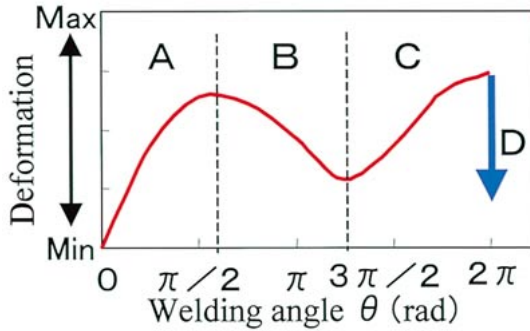


Fig.17 Relationship between welding angle and deformation

解析結果により考察した変形挙動をFig.18に模式的に表す。変形は、領域Aでは溶融による膨張で熱源と反対側に变形が生じ、溶接の進行に伴い増加する。一方、領域Bでは溶接の進行に伴う膨張と溶接前半部分の凝固が始まるため生じる収縮により変形が減少する。さらに溶接が進み領域Cでは、溶接の進行に伴う膨張と溶接前半部分の凝固による収縮が重畳するため増大し、領域Dでは溶接後の冷却により、全体が収縮し変形が減少する。以上のことから、レーザー溶接後における円筒部品の全周溶接で生じる変形は、溶接範囲（角度）による膨張と収縮に依存していることを明らかにした。

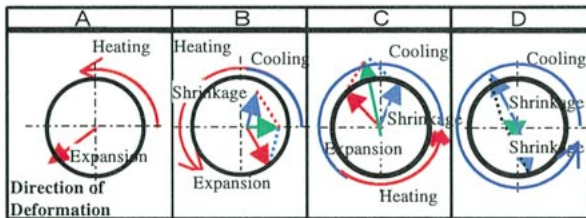


Fig.18 Deformation behavior under laser welding

7. 結言

レーザー溶接の高精度化を目的に変形挙動解析を行い、以下の結果を得た。

レーザー溶接における温度履歴を計測し、理論解析結果との比較を行い、溶接の進行に伴う温度履歴が

実測の表面分布データとほぼ一致し、熱伝導解析結果の妥当性を確認できた。

全周溶接過程における加工中の変形挙動を弾塑性熱応力解析から導き、変形は溶接熱源の進行に伴って増加 減少 増加 減少という複雑な挙動を示していることを明確にした。

レーザー溶接における円筒部品の全周溶接で生じる変形は、熱源の移動に伴う膨張と収縮に依存していることを把握できた。

今後は、変形を抑制できる溶接技術として、変形挙動解析を進め、安定的に利用できる技術を確立していく。また、変形シミュレーションの精度向上を進め、変形予測はもとより溶接プロセスを予測できる解析手法の確立を目指したい。

< 著 者 >



白井 秀彰
(しらい ひであき)

生産技術開発部
溶接技術開発に従事



沢本 節夫
(さわもと せつお)

生産技術開発部
溶接技術開発に従事



佐藤 隆文
(さとう たかふみ)

試作部
試作部接合除去技術開発に従事