

レーザー溶接を応用した予防保全・補修技術の確立に向けて

- ステンレス鋼レーザー溶接部の凝固割れ発生予測 -



研究ノート

森 裕 章*

For Establishment of Preventive Maintenance and Repair Technique
Based on Laser Beam Welding

- Prediction of Solidification Cracking in Laser Welds of Stainless Steels -

Key Words : Laser beam welding, Preventive maintenance, Repair technique,
Stainless steel, Solidification cracking

1. はじめに

3R (Reduce (削減), Reuse (再使用), Recycle (再生)) が政策としても掲げられており、現在稼働中の各種プラントについても寿命延長・再利用が求められている。様々なプラントや構造物の構造材料として、ステンレス鋼 - なかでもオーステナイト () 系ステンレス鋼 - は、耐食性、耐熱性だけでなく加工性や溶接性にも優れることから広く用いられている。しかしながら、同鋼種においても過酷な環境下での長期供用による材質劣化は避けられない。したがって、プラントの寿命を延長するためには、材質が劣化する前の予防保全、もしくは損傷部の補修といった処置を施すことが必要不可欠といえる。ところが、溶接性が良いはずの系ステンレス鋼であっても、溶接時に初晶で凝固する場合、高温割れ (とくに凝固割れ) が発生しやすいことが問題となる。従来より高温割れ抑制には溶接時の入熱量の低減が有効であることが知られている。この観点にたてば、高エネルギー密度熱源であるレーザーを用いた溶接においては、割れの発生が抑制されることになる。ところが、最近の研究では、レーザー走行速度が速く、初晶凝固する場合、すなわち実行投入熱量が低い条件において、逆に凝固割れ感受性が上昇することが明らかになっている¹⁾。そこで、レーザー溶接を用いて健全な予防保全あるいは補修を施す技術を確

立することを目的とし、溶接部に発生する凝固割れの発生機構の解明とその予測手法の確立を目指した研究を進めている。以下では研究の概略を紹介する。

2. レーザ溶接部における凝固割れ

系ステンレス鋼 (ここでは SUS316L 鋼を使用) をレーザー溶接した際、比較的多くの不純物元素 (P や S 等) を含む鋼種において溶接金属中に図 1 に示すような割れの発生が認められた。割れはその発生位置からビード中央柱状晶会合部における縦割れとデンドライトの成長方向に沿った割れの 2 種類に大別でき、これらの破面を観察した結果、いずれも凝固割れと呼ばれる凝固完了前に開口した割れであることが確認された。

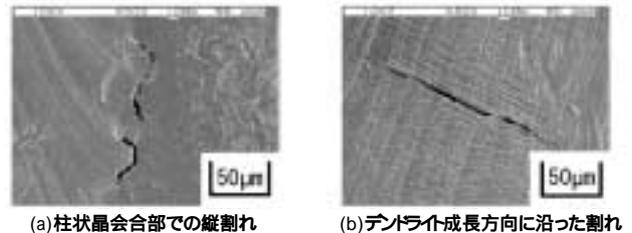


図 1 レーザ溶接部における凝固割れの例

3. 凝固割れの概念と理論的解析手法

従来より凝固割れについては、図 2 に示すように“割れる側の要因 (材料要因)”である凝固脆性温度域 (BTR) の臨界曲線と“割る側の要因 (力学要因)”である凝固過程で溶融凝固部に付加される引張りひずみのひずみ曲線が交差するか否かにより、割れが発生するかが決まると理解されてきた。しかしながら、あくまでも概念的な理解であって、それらを定量的に取り扱い、割れ発生の可否を評価した報告例²⁾はほとんど無いのが現状である。



*Hiroaki MORI

1968年4月生

大阪大学大学院・工学研究科・生産加工
工学専攻 (1997年)現在、大阪大学大学院工学研究科 ビジ
ネスエンジニアリング専攻 准教授 博
士 (工学) 溶接・接合工学

TEL : 06-6879-4728

FAX : 06-6879-4728

E-mail : mori@mit.eng.osaka-u.ac.jp

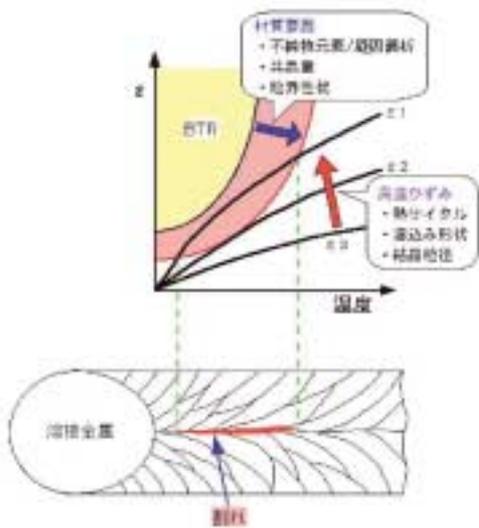


図2 溶接金属中の凝固割れ発生機構の模式図

また、凝固割れに関するこれまでの研究では、単に“割れる側(材料学的観点)”からと“割る側(力学的観点)”からそれぞれ個別に取り扱われているものが多い³⁾が、本来これらが重畳することによって生じる現象であることから、両面からアプローチしないかぎりは解き得ない問題であるといえる。この点に着目し、冶金学と力学の両方を同時に取り扱い、この凝固割れの定量的取り扱いを試みている。BTRは凝固速度や不純物元素の含有量によって変化し、溶融凝固部に発生するひずみのひずみ速度に関しても凝固速度によって大きく変化することが予想され、前述の考え方の延長線上に立てば、これらを計算した結果求められる両曲線が重なるか否かによって、凝固割れの発生の可否が判定し得ると考えられる。このことから、具体的には、以下のような手順でレーザー溶接部の凝固割れ感受性の評価を試みている。

- (1) トランス・バレストレイン試験時に溶融池後縁部に発生した凝固割れの長さを凝固割れ発生温度域に換算し、付加ひずみ量と同温度域の関係より通常のアーク溶接時のBTRを求める。
- (2) 急冷凝固過程に対応した dendrite の成長に関する理論モデルである Kurz-Giovanola-Trivedi (K-G-T) モデルを Fe-Cr-Ni の三元系に拡張したモデル⁴⁾を用いて、Dendrite 先端温度(凝固開始温度に相当)を求める。
- (3) 有限差分法を用いた凝固偏析に関する理論モデ

ルを急冷凝固過程に応用して dendrite 境界における不純物元素の凝固偏析量を計算により求める。その数値を基に、熱力学計算により固相線温度(凝固完了温度に相当)を求める。

(4) 実験的に求めた BTR の温度の上限値と下限値を計算により求めた凝固の開始および完了温度にシフトすることによってレーザー溶接部の BTR として推定する(図3参照)。

(5) 有限要素法を用いた熱弾塑性解析により、レーザー溶接における溶融凝固部に付加されるひずみを計算する。

(6) 推定したレーザー溶接部の BTR の臨界曲線と凝固過程でのひずみ曲線を比較し、両曲線が交差するか否かをもって割れが発生するか否かを判定する(図4参照)。

なお、理論モデルや実験・解析結果の詳細に関しては参考文献5),6)を参照されたい。

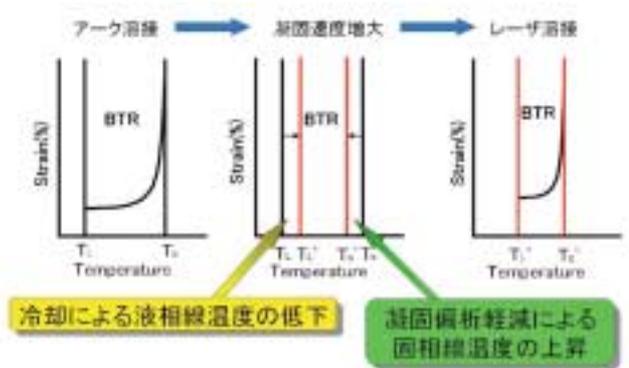


図3 レーザ溶接部の凝固脆性温度域の推定方法

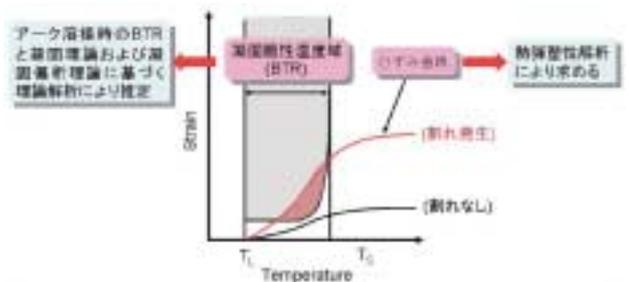


図4 レーザ溶接部における凝固割れ感受性の評価方法

現在のところ、前述のように完全に理論解析だけでは系ステンレス鋼のレーザー溶接部における凝固割れ発生の予測は難しく、実験と理論解析を組み合

わせた方法で予測した割れ発生条件と実験結果との対応がつつつあるという状況であるが、将来的には理論解析のみで同部位における割れ発生条件を予測し得る手法を確立し、それを用いて、逆に割れが発生しないレーザー溶接条件を提示し得るシステムの開発を目指す予定である。このような取組みは、レーザー溶接を用いて健全な予防保全あるいは補修を施す技術の確立に貢献し、様々なプラントの寿命延長・再利用に役立てるものと考えている。

4. おわりに

本研究は、従来個別に取り扱われてきた割れに対する冶金学的側面からと力学的側面からのアプローチを同時に取り扱うことによって、割れ感受性（あるいは割れ発生の有無）をより定量的に評価する手法を確立し得ることを、系ステンレス鋼のレーザー溶接部における凝固割れを一つの対象として提案するものである。現在研究は進行中であり、今後他の材料のレーザー溶接部における凝固割れ発生挙動の予測に対して応用し得る可能性を秘めているとは考えられるものの、一方で(1)完全に理論解析のみで凝固脆性温度域の算定ができていないこと、(2)凝固脆性温度域とひずみ挙動の解析を個別に見積もらなければならない、冶金学的解析と力学的解析の融合が未完であること、(3)単一の割れ感受性評価パラメータが構築されていないため、同割れが抑制されるレーザー溶接条件を提示するのは現段階では困難であ

ること、などの問題点がある。以上のことから、今後は前述の課題を克服すべく、新たな解析モデルや割れ感受性評価パラメータの構築も視野に入れて、積極的に研究を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 西本, 森, 林: 「凝固脆性温度域に及ぼす凝固速度の影響-ステンレス鋼レーザー溶接部の高温割れに関する研究(第1報)-」溶接学会全国大会講演概要, 71(2002), 30-31.
- 2) 篠崎, 山本, 温, 田村: 「溶接凝固割れ発生の予測」溶接学会誌, 77-4(2008), 284-289.
- 3) 柴原, 曾根, 芹澤, 村川, 西本, 才田, 亀山: 「多層溶接時に発生する延性低下割れのFEM解析」関西造船協会論文集, 241(2004) 177-186.
- 4) S.Fukumoto and W.Kurz: 「Prediction of the to Transition in Austenitic Stainless Steels during Laser Treatment」ISIJ International, 38-1(1998), 71-77.
- 5) 西本, 森, 林: 「ステンレス鋼レーザー表面溶融処理部の高温割れに関する理論的検討」WM-1860-03, 第171回溶接冶金研究委員会, 東京(2003年2月4, 5日).
- 6) 西本, 森, 中村: 「系ステンレス鋼レーザー表面溶融処理部における高温割れ発生挙動に関する理論解析」第58回レーザー加工学会論文集, 58(2003), 96-108.

