

レーザーによるステンレス鋼溶接材の局部溶体化処理

大川正巳, 坂村 勝, 森 健太郎^{*1}, 矢田貝 稔

The localized Solution Treatment of welded Stainless Steels with Laser

OHKAWA Masami, SAKAMURA Masaru, MORI Kentarou^{*1} and YATAGAI Minoru

As for the austenitic stainless steel, the heat affected zone loses corrosion resistance when welding (sensitization). The sensitization causes the intergranular corrosion and the stress corrosion cracking. To modify sensitization, the solution treatment was locally done by the laser in this study. The effectiveness was evaluated by the stress corrosion cracking test. As a result, it has been understood that cracks don't occur in sensitization areas, and the localized solution treatment with the laser is effective.

オーステナイト系ステンレス鋼は溶接を施工すると、熱影響部の耐食性を失う（鋭敏化）。鋭敏化は粒界腐食や応力腐食割れを引き起こす。鋭敏化を改善するために、本研究ではレーザーを用いて局部的に溶体化処理を行い、その有効性を応力腐食割れ試験で評価した。その結果、鋭敏化部から割れが発生しなくなり、レーザーによる局部溶体化処理が有効であることがわかった。

キーワード：ステンレス鋼, 鋭敏化, レーザ, 粒界腐食, 応力腐食割れ

1. 結 言

ステンレス鋼はその優れた耐食性、機械的性質、加工性から化学装置、食品加工機械、船舶、原子力機器など様々な分野で使用されている。その中で最も使用されているステンレス鋼はオーステナイト系のSUS304である。オーステナイト系ステンレス鋼の欠点の1つは、約500～800℃の温度域に長時間保持したり、高温に加熱後この温度域を緩やかに冷却したりすると耐食性が失われることである。この温度域では結晶粒界にCr濃度が約94%にもなるCr炭化物(Cr₂₃C₆)を析出し(図1)、結晶粒界近傍にはCr炭化物にCrを奪われたために耐食性が低下したCr欠乏層が形成される。この現象を鋭敏化と呼ぶ。鋭敏化が粒界腐食を引き起こしたり、そこに引張応力が加わると粒界型応力腐食割れを引き起こしたりすることは広く知られている¹⁾。

鋭敏化を防ぐには幾つか方法がある。C量を低減すればCr炭化物は析出しにくくなるため、低C量のSUS304Lなどの材質に変更する。CrよりもCと結びつきやすいTi、Nbなどを添加し、これらの安定な炭化物を粒内に分散させたSUS321、SUS347などの材質に変更する。さらに約1100℃まで加熱し急冷してCr炭化物を固溶させる。この熱処理を固溶化熱処理(溶体化処理)という。

ステンレス鋼を使用した機器・構造物の製作には溶接が不可欠であるが、熱影響部に鋭敏化を引き起こす。

鋭敏化した材料は溶体化処理を行えばよいが、熱処理炉で溶体化処理を行う場合、大型構造物であれば不可能であり、また高温に加熱した場合に生じる酸化やひずみの問題もある。

そこでレーザーを用いると材料の表面だけを高温に加熱することができ、材料自身の冷却能力によって急冷されるため溶体化処理が可能である。局部的に熱処理が可能のため、酸化やひずみの問題も回避できる。

本研究では代表的なオーステナイト系ステンレス鋼SUS304、SUS304Lとさらに耐食性に優れているSUS316を用いて、溶接したままの材料(非熱処理材)、意図的に鋭敏化させた材料(鋭敏化熱処理材)と溶接材にレーザーで局部溶体化処理を施した材料(レーザー熱処理材)の耐

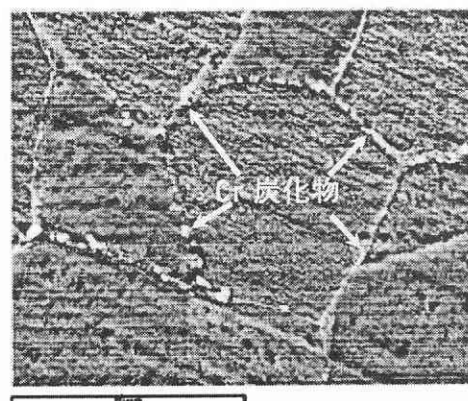


図1 結晶粒界に析出したCr炭化物の一例
(SUS304)

食性をJISに規定されている応力腐食割れ試験で評価し、その破壊形態とレーザ熱処理の有効性を確かめた。

2. 実験方法

2.1 試験片

厚さ3mmのSUS304, 304L, 316にそれぞれD308, 308L, 316の溶接棒でアーク被覆溶接を施工後、図2に示すような形状に切断した。試験片は溶接したままのもの（非熱処理材）、鋭敏化熱処理（650℃×8hr）したもの（鋭敏化熱処理材）、鋭敏化部をレーザで局部溶体化処理したもの（レーザ熱処理材）を用意した。余盛を削除して全面を研磨紙で800番まで研磨後、半径8mmの曲げジグで180度曲げを行った。図3に示すように曲げ箇所は溶接金属部と熱影響部の2種類とした。試験片の曲げ箇所と熱処理を表1に示し、化学組成を表2に示す。

2.2 レーザ熱処理

YAGレーザ（500W三菱電機製C0606SC-K）を用いて出力320W、デフォーカス10mm、送り速度150mm/minの条件で走査した。

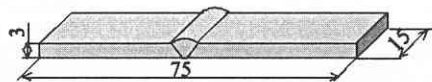


図2 試験片形状

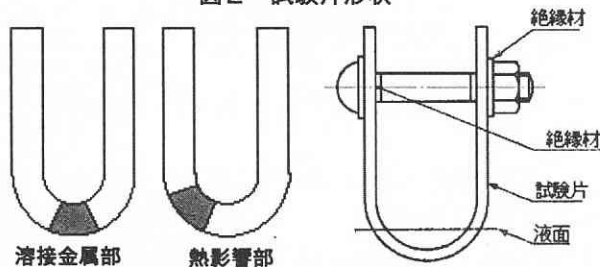


図3 曲げ箇所

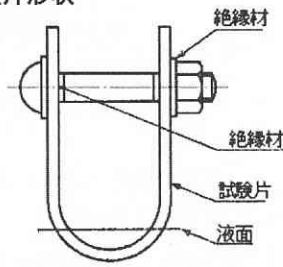


図4 試験概要

表1 試験実施材料一覧

熱処理	材質	曲げ箇所
鋭敏化熱処理	SUS304 SUS304L SUS316	溶接金属
非熱処理 (溶接そのまま)	SUS304 SUS304L SUS316	溶接金属 熱影響部
レーザ熱処理	SUS304	熱影響部

表2 ステンレス鋼の化学組成

Symbol	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
304	0.06	0.44	1.13	0.029	0.008	8.04	18.48	0.21
304L	0.02	0.52	0.98	0.026	0.006	8.98	18.72	0.18
316	0.04	0.68	0.93	0.031	0.004	9.96	15.96	2.25

注：製品分析値

2.3 応力腐食割れ試験

JIS G 0576 ステンレス鋼の42%塩化マグネシウム応力腐食割れ試験方法のU字曲げ試験に準拠して試験を行った。180度曲げ後、図4に示すようにスプリングバックで広がった脚幅を平行となるまでジグで締め付け応力を付与し、沸騰溶液（143℃）に浸漬した。試験を開始してから割れが発生するまでの所要時間を求めた。

3. 結果及び考察

3.1 溶接材料の鋭敏化

鋭敏化の状況は、JIS G 0571 ステンレス鋼のしゅう酸エッチング試験方法で判別した。この方法によると健全な組織は結晶粒界が段状組織となり、鋭敏化した材料は溝状組織になる。SUS304の溶接したままの材料（非熱処理材）の鋭敏化の状況を図5に示す。溶接金属から約1mm離れたところの幅約0.8mmの範囲に鋭敏化が認められた(A)。SUS304Lと316は鋭敏化が認められなかった。C量が低減するとCr炭化物も低減し²⁾、またMoはCr炭化物の成長を抑制^{3),4)}するため、本実験の溶接条件

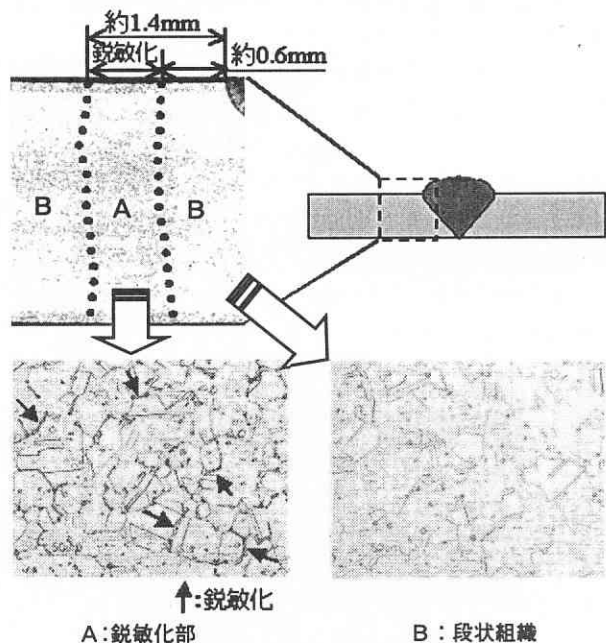


図5 SUS304 非熱処理材の鋭敏化状況



図6 鋭敏化熱処理材の鋭敏化の状況

では鋭敏化しなかったものと考えられる。

3.2 溶接材料の鋭敏化熱処理

鋭敏化熱処理を施した溶接材料の鋭敏化の状況を図6に示す。SUS304と316は溝状組織、304Lは部分的に溝のある混合組織となっていた。熱処理温度650℃に対しての時間8hrは鋭敏化するには各材料とも十分な時間であり⁵⁾、鋭敏化の度合いはC量に依存するものと考えられる。

3.3 レーザ熱処理

鋭敏化熱処理材にレーザを照射して局部溶体化処理の最適条件を検討した。出力を320Wに固定し、デフォーカス量と送り速度を調節した。溶体化の幅が鋭敏化部の幅約0.8mmの2～3倍になる条件をさがした。耐食性は表面性状に依存するため溶体化の深さについては検討しなかった。

デフォーカスを大きく速度を小さくすると溶体化の領域を大きくすることができる。しかし、そうするとレーザ照射の始端部と終端部とで溶体化領域に大きな違いが生じる。始端部と比べて終端部は溶体化領域が大きくなり、表面付近は結晶粒が粗大化したり、激しく溶融したりする場合もあった。これは試験片が小さく熱容量が小さいため、また速度が遅いため入熱の影響が大きく、終端部ほど高温になるためである。

そこで、安定した溶体化を得るためにできるだけ速度を大きくデフォーカスを小さくした。採用した条件は出力320W、デフォーカス10mm、速度150mm/minである(図7)。表層部が溶融再凝固しているが、溶融させても応力腐食割れの防止には効果があるとの報告もある⁹⁾。

この条件で溶接した材料の鋭敏化部に局部溶体化処理を施工した。

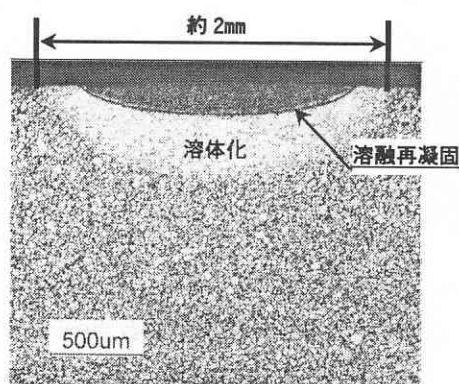


図7 採用した条件での溶体化状況
(出力:320W, デフォーカス:10mm, 速度:150mm/min)

3.4 応力腐食割れ試験

非熱処理材の試験結果を表3に示す。SUS304のうち鋭敏化部で破断したものは2本あった。その他はすべて熱影響部以外の母材部が破断した。オーステナイト系ステンレス鋼は塩化マグネシウム溶液の環境で粒内割れを起

こすため、粒界が耐食性を失う鋭敏化は影響が小さい⁷⁾。本実験でも鋭敏化部からのき裂の発生は少なく、鋭敏化の影響が実験結果にあまり反映されなかったものと考えられる。鋭敏化した材料の応力腐食割れ感受性は、粒界選択腐食性のある溶液で試験したほうがより明確になると考えられ、今後の課題である。塩化マグネシウム溶液中の応力腐食割れ抵抗性はNi量によってほとんど決まっていた。SUS304<304L<316となるといわれているが⁸⁾、本実験ではSUS304L<304<316の傾向となった。

鋭敏化熱処理材の試験結果を表4に示す。SUS304と304Lは溶接金属部が破断して、316は熱影響部以外の母材部が破断した。応力腐食割れ抵抗性はSUS304L<304<316の傾向となった。

レーザ熱処理材の試験結果を表5に示す。鋭敏化部からのき裂発生はなくなり、レーザによる局部溶体化処理の効果があったものと考えられる。

表3 非熱処理材の応力腐食割れ試験結果

材質	曲げ箇所	割れ発生時間(hr)
SUS304	溶接金属	2*, 55
	熱影響部	17*, 21, 48, 74, 100以上(2本)
SUS304L	溶接金属	2, 17, 100以上
	熱影響部	3, 8, 100以上
SUS316	溶接金属	100以上(2本)
	熱影響部	51

*: 鋭敏化部の破断 無印は母材部の破断

表4 鋭敏化熱処理材の応力腐食割れ試験結果

材質	曲げ箇所	割れ発生時間(hr)
SUS304	溶接金属	31 [▲] , 16 [▲]
SUS304L	溶接金属	8 [▲] , 8 [▲]
SUS316	溶接金属	45, 52

▲: 溶接金属部の破断 無印は母材部の破断

表5 レーザ熱処理材の応力腐食割れ試験結果

材質	曲げ箇所	割れ発生時間(hr)
SUS304	熱影響部	4, 5, 9, 18, 21, 70, 87

母材部の破断

3.5 破壊形態

き裂は引張応力のかかる表側に発生した。き裂は板幅の両端を起点として、付加応力方向と垂直に進展した(図8)。き裂の進展速度はかなり速く、発生から破断まではほとんどが1時間以内であった。き裂の発生は、最大引張応力のかかる曲げの頂点になるとは限らなかった。

鋭敏化部で破断したSUS304は、き裂起点近傍は粒界割れであり(図9)、鋭敏化の影響によるものと考えられる。また、き裂は多数の枝分かれを伴って粒界に沿って

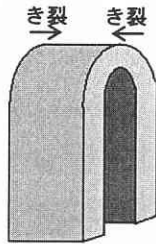


図8 き裂起点と進展方向

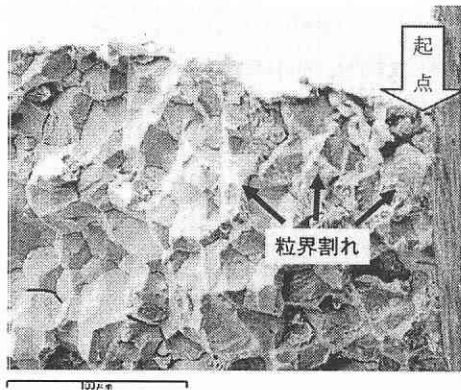


図9 SUS304 鋭敏化部破断のき裂起点近傍破面

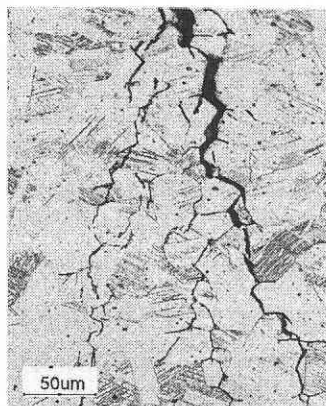


図10 SUS304 鋭敏化部のき裂進展
(多数の枝分かれを伴う粒界割れ)

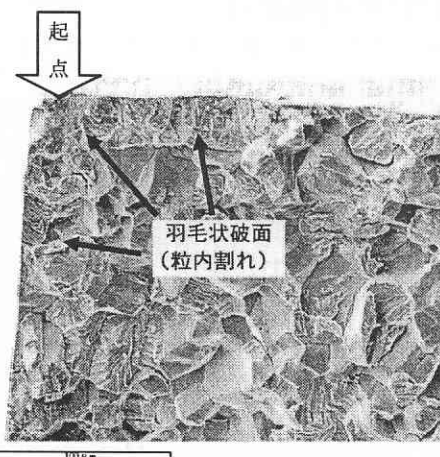


図11 SUS304 母材部破断のき裂起点近傍破面

進展していた(図10)。き裂進展領域もほとんどが粒界割れであった。

非熱処理材のうち母材部分で破断したものは、各材料ともき裂起点近傍は粒内型応力腐食割れの特徴である羽毛状破面がみられた(図11にSUS304の例を示す)。応力腐食割れの特徴である枝分かれしたき裂も観察された。き裂進展領域の破面は、SUS304は粒内と粒界割れが混在、304Lはほとんどが粒内割れ、316はほとんどが粒界割れであった。

4. 結 言

オーステナイト系ステンレス鋼の溶接材(鋭敏化熱処理材、非熱処理材、レーザ熱処理材)をJISに準じて42%塩化マグネシウム応力腐食割れ試験を行い、次のようなことがわかった。

- 1) 本実験の溶接条件ではSUS304だけが鋭敏化した。
- 2) 非熱処理材ではSUS304は鋭敏化部で破断したものと母材部で破断したものがあつた。SUS304LとSUS316はすべて母材部で破断した。応力腐食割れ抵抗性はSUS304L<SUS304<SUS316となった。
- 3) 鋭敏化熱処理材はSUS304とSUS304Lは溶接金属部が破断、SUS316は母材部が破断した。応力腐食割れ抵抗性はSUS304L<SUS304<SUS316となった。
- 4) レーザ熱処理を施工すると鋭敏化部からき裂が発生しなくなり、レーザによる局部溶体化処理の有効性が認められた。
- 5) 鋭敏化部が破断したもののき裂の起点は粒界割れ、母材部が破断したものの起点は粒内割れであった。

文 献

- 1) 日系メカニカル編:事故は語る, 日経BP社, p.159, 1998
- 2) 伊藤伍郎:防食科学と防食技術, p.283, 1975
- 3) V.G.Herbsleb, K.J.Westerfeld: Werku.Korr., 27, 404(1976)
- 4) M.Akashi, T.Kawamoto: 防食技術, 27, 165(1978)
- 5) ステンレス協会編: ステンレス鋼便覧, 日刊工業新聞社, p.1491, 1995
- 6) 日本溶接協会: シンポジウム「レーザ表面改質の現状と今後の展開」, p.37, 2000
- 7) ステンレス協会編: ステンレス鋼便覧, 日刊工業新聞社, p.264, 1995
- 8) 腐食防食協会編: 腐食防食データブック, 丸善, p.160, 1994