

溶接したSUS304の耐食性に及ぼす ショットブラストのピーニング効果の影響

谷内大世* 藤井要* 鷹合滋樹* 宮本勘史*

ステンレス鋼の溶接部は、溶接焼けやスパッタなどが付着し、外観上の問題と付着物によるもらい錆を引き起こすことから、その対策としてショットブラストが行われる。本報告では、オーステナイト系ステンレス鋼SUS304に対するショットブラストのピーニング効果に加え、溶接したSUS304へのショットブラストによって、不動態皮膜の損傷と圧縮残留応力の付与による耐孔食および応力腐食割れ性への影響について調査した。その結果、ショットブラストにおいてもピーニング効果が確認され、条件によって圧縮残留応力が変化した。溶接したSUS304は、ショットブラストによって不動態皮膜が損傷することなく、耐孔食性への影響は見られなかった。また、耐応力腐食割れ性は、約-700MPaの圧縮を付与することで、未処理と比べて割れ発生までの時間が2倍、割れ横断までの時間が3倍に向上した。ショットブラストにより、外観だけでなく耐応力腐食割れ性が向上するため、製造現場における仕上げ加工としての有効性を示すことができた。

キーワード：SUS304, ショットブラスト, ピーニング, 溶接, 孔食, 応力腐食割れ, 残留応力

Influence of Peening Effect of Shot Blast on Corrosion Resistance of Welded Austenitic Stainless Steel SUS304

Taisei YACHI, Kaname FUJII, Shigeki TAKAGO and Kanji MIYAMOTO

Welding on stainless steel surfaces causes defects in appearance such as slag, oxide scale and spatter and accelerates rusting. As a countermove, shot blasting is generally carried out to remove them. It also has other effects such as hardening and improving fatigue strength by applying compressive residual stress on stainless steel. This is known as the peening effect. On the other hand, we are concerned with the damage of passive films that possess effective corrosion resistance on the surface of stainless steel. Therefore, we focused on the damage of corrosion resistance and the peening effect due to shot blasting. In this report, the compressive residual stress due to various shot blasting conditions on welded austenitic stainless steel SUS304 was measured using the X-ray method. Moreover, each sample was investigated by pitting and stress corrosion test. As a result, we found that the influence of shot blasting on pitting corrosion resistance was minimal, and the passive films' damage was less. By applying compressive residual stress of about -700MPa to the samples, stress corrosion cracking resistance improved; crack generation time was doubled and crack traverse time increased to three times longer than in the untreated sample. Shot blasting is an effective finishing process in welding due not only to the improvement of appearance but also the improvement of resistance against residual stress corrosion cracking.

Keywords : austenitic stainless steel SUS304, shot blast, peening, weld, pitting corrosion, stress corrosion cracking, residual stress

1. 緒 言

耐食性に優れたステンレス鋼は、食品製造機械や搬送用チェーン、プラント用配管などの素材として広く利用されている。これらの部品においては、溶接を施して使用される場合が多い。ステンレス鋼の溶接では、溶接部が変色する溶接焼けやスパッタ等の付着は、製

品見栄えの悪化やもらい錆の原因となることから、これらを除去するためショットブラストが行われている。これは、鋼球やセラミックスビーズ等の投射材を加工物に高速で打ち付けて表面を機械的に洗浄する方法である。ショットブラストは、ステンレス鋼表面に形成されている不動態皮膜を損傷させるため、後処理として不動態化処理を施すことが望ましいとされる¹⁾。また、溶接時の熱影響によって組織が鋭敏化して耐食性

*機械金属部

が低下することも知られており、その対策として、固溶化熱処理が提案されている^{2),3)}。ただし、後処理としての不動態化処理や固溶化熱処理は、製造現場において納期の長期化やコスト増につながることから、必ずしも施されていないのが現状である。

一方、ショットブラストには、対象物表面の加工硬化による硬さの向上や圧縮残留応力付与に伴う疲労強度の向上、応力腐食割れの低減といったピーニング効果があることが知られている^{4),5)}。しかしながら、ショットブラスト処理によるピーニング効果を定量的に示したデータは少ない^{6),7)}。

そこで本報告では、ショットブラストによるピーニング効果の把握に加えて、溶接したステンレス鋼の腐食性に及ぼす影響について定量的に調査した。

2. 実験方法

2. 1 ショットブラスト実験

実験には、空気式のショットブラスト装置((株)不二製作所・SGK-4ST)を用い、投射材として表1に示す鋼球およびアルミナを使用した。試験片は、50mm×40mm×5mmのSUS304とした。ショットブラストの条件としては、投射時間を3, 5, 10秒、投射距離を200, 400, 600mmに変化させて実験を行った。

また、遠心式のショットブラスト装置((株)ニッチュー・TF-77)を用いた実験も行った。この場合の投射材は、SUS304カットワイヤー(0.5mm, 500HV相当)であり、処理時間を1, 3, 5, 10分と変えて実験した。

表1 投射材の特性

	鋼球	アルミナ
形状	球	多角形
ビッカース硬さ	700HV相当	1600HV相当
粒番号	#80	#24
真比重(g/cm ³)	7.6	3.9

2. 2 溶接ステンレス鋼の耐食性試験方法

試験片は、125mm×40mm×5mmのSUS304板材2枚を手動TIG溶接で突合せ裏波溶接して作製した。溶接棒は、TIG308Lを用いた。試験片の外観を図1に示す。各腐食試験に合わせて試験片を機械加工により所定の寸法に切り出した後、前述の条件にてショットブラスト

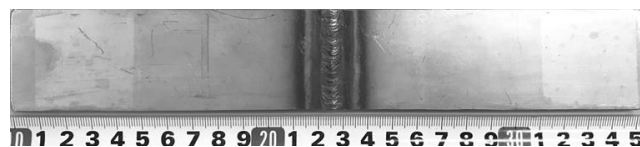


図1 SUS304溶接後試験片の外観

を施して腐食試験を実施した。各腐食試験の詳細を以下に示す。

2. 2. 1 孔食試験

ショットブラストによる耐孔食性向上効果を評価するため、孔食試験(JIS G 0578 ステンレス鋼の塩化第二鉄腐食試験方法A法)を行った。溶接部を含む30mm×20mm×5mmの大きさに試験片を切り出し、鋼球を投射距離200mmで10秒間投射するショットブラストを行った。また、比較対象として素材および溶接後のショットブラスト無しの2種類の試験片を作製した。これら試験片を50℃に保持した腐食液中に24時間浸漬し、腐食前後での重量変化から腐食度(g/m²・h)を算出した。

2. 2. 2 応力腐食割れ試験

ショットブラストによって付与される圧縮応力の違いが耐応力腐食割れにどの程度影響するかを調べるため、JIS G 0576 ステンレス鋼の応力腐食割れ試験方法A法に従って評価を行った。試験片として、図1の溶接後試験片を145mm×20mm×3mmに機械加工後、溶接部に引張応力を与えるために、図2に示すように押しジグ直径12mm、ローラ間隔22mmでU字に曲げて端部をボルト止めして作製した。これに、引張側表面に対して鋼球を投射距離400mmで5秒間(条件A)、投射距離200mmで10秒間(条件B)の2水準の条件でショットブラストを施した。また、比較材として、ショットブラスト

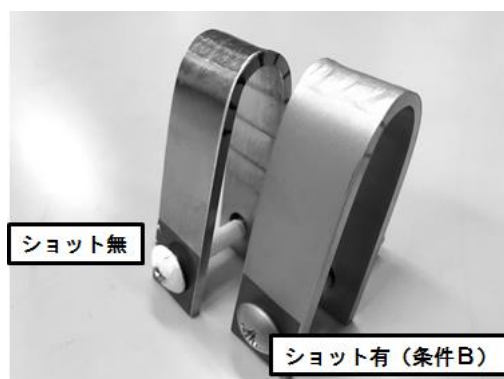


図2 応力腐食割れ試験片の外観

ト無しの試験片も準備した。

その後、腐食液に浸漬させ、割れが発生するまでの浸漬時間や割れが試験片幅を横断するまでの浸漬時間を計測した。

3. 実験結果および考察

3. 1 ショットブラストによる応力付与

図3から図5にSUS304に対して各条件により空気式ショットブラストを施した場合の圧縮残留応力値を示す。なお、残留応力の測定には、微小部X線応力測定装置(株式会社・Auto MATE II)を用いた。

図3に示すとおり投射材によって付与される残留応力値に差が見られ、鋼球の方がアルミナよりも高い圧縮応力を付与できる。これは、投射材の質量による影響と考えられる。

投射時間の影響は、図4のとおり空気式ショットブラストでは投射3秒で約-1200MPaの圧縮応力を付与できる。投射時間を延ばしても約-1000MPaから圧縮応力値は変化しない。これは、SUS304の降伏応力が関連し

ており⁸⁾、この条件において、SUS304に対する最大の圧縮応力が与えられていると考えられる。

また、投射距離を変化させた場合の結果を図5に示す。投射距離が長くなるに従って、付与される応力値が減少している。空気式の場合、投射距離によって応力値は大きく影響を受けることから、加工物に対して十分な圧縮残留応力が付与されない場合や、不均一な応力分布になる場合があり、適切な投射距離を設定する必要がある。

次に、遠心式ショットブラスト装置で処理した試験片の残留応力測定結果を図6に示す。処理を施すことで表面には圧縮応力が付与され、その大きさは処理時間の経過に伴い、増加していく。投射時間が6分で応力値はほぼ一定となり、付与できる最大の圧縮応力に達する。

さらに、空気式と遠心式による圧縮応力分布の測定結果を図7に示す。空気式は、試験片中心から離れるに従い圧縮応力が減少している。しかし、遠心式は約900MPaの圧縮応力が均一に分布している。このように、

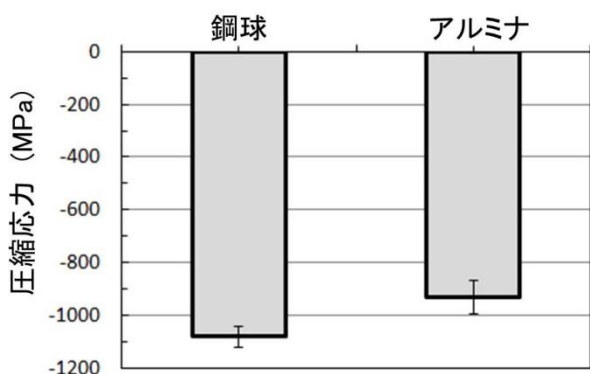


図3 投射材の違いによる残留応力の差

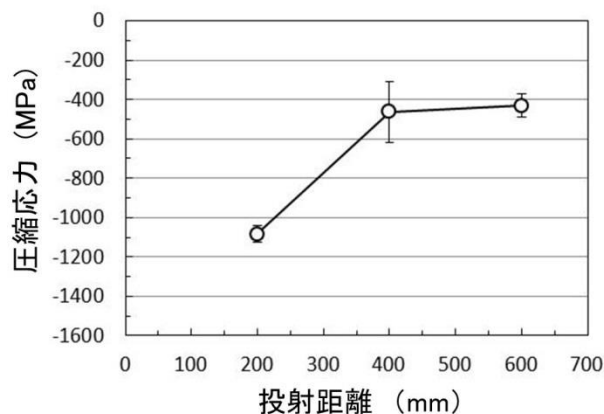


図5 投射距離の違いによる残留応力の差

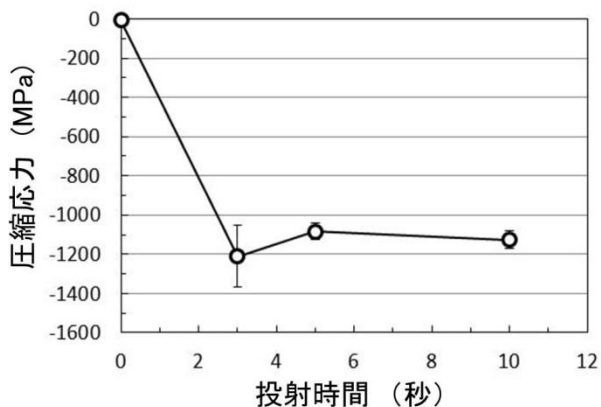


図4 投射時間の違いによる残留応力の差

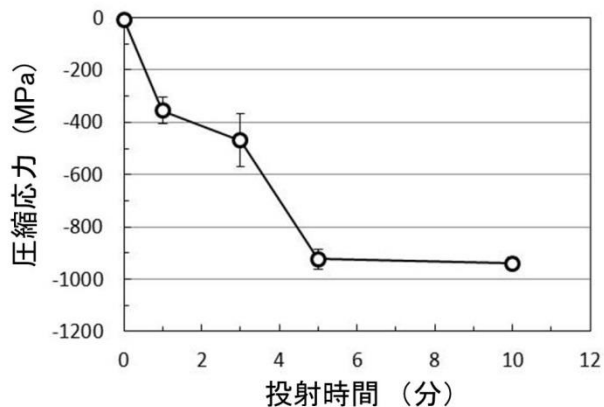


図6 遠心式ショットブラスト装置による残留応力の変化

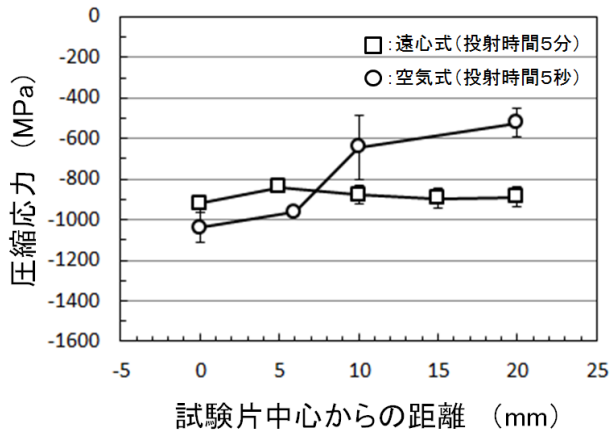


図7 空気式と遠心式による圧縮応力分布

空気式は局所的に最大の圧縮応力が付与されるが、遠心式は広範囲に均一な応力を与える特徴がある。ただし、図4および図6に示すとおり、両方式において投射時間が大きく異なる点を考慮する必要がある。

3. 2 溶接ステンレス鋼の耐食性

3. 2. 1 孔食試験

図8(a),(b)に孔食試験前後の試験片の外観を示す。ショットブラストによって、ビード両側に生じている溶接焼けが除去され、梨地状態に仕上げられていることが確認できる。この試験片を腐食液中に浸漬させると同図(c)に示すように、表面および断面には孔食が発生し、特に同図(d)の断面のビード両側内部の熱影響部(HAZ)において、表面に比べて大きな孔食が見られた。孔食における腐食度の測定結果を図9に示す。素材に対して、溶接を施すことで、腐食度が増加することから、溶接によって腐食しやすくなることがわかる。一方、ショットブラストを施すことで溶接焼けが除去され、耐孔食性の向上が期待される。同時に不動態皮膜の損傷による耐孔食性の低下も予測されたが、実験結果では腐食度に差が見られなかった。図10に熱影響部(HAZ)と素材の組織写真を示す。ビード両端側にある熱影響部では、激しい孔食の発生が見られた。組織観察においても熱影響部は素材と比べて、粒界に多くの穴が観察され、組織の状態が異なることがわかる。これらの穴は、粒界に析出したクロム炭化物が、組織観察のために施した電解エッチングによって脱落した跡である。溶接熱によるクロム炭化物の析出によって、素材中のクロム濃度が低下し、熱影響部付近の耐食性が低下したと考えられる。

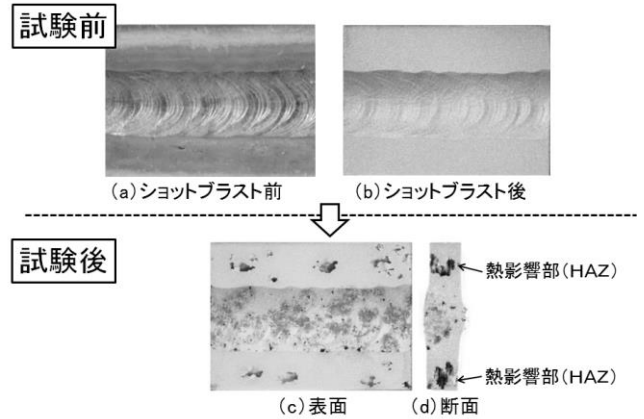


図8 孔食試験における試験片外観比較

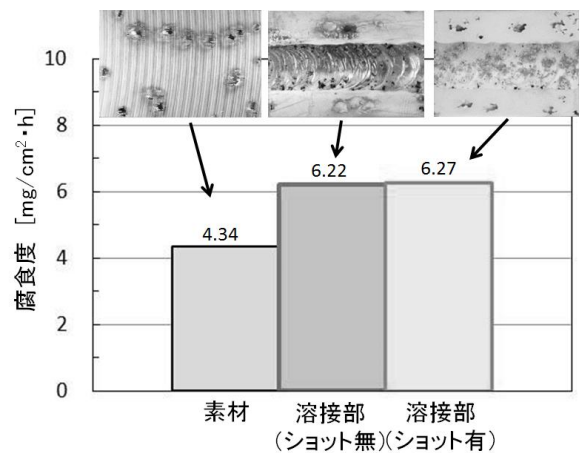


図9 孔食試験における腐食度測定結果

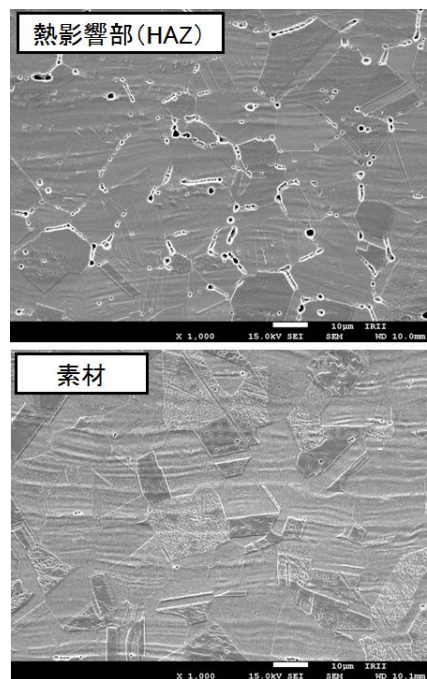


図10 熱影響部と素材の組織比較

溶接された素材に対する耐食性低下防止策は、ショットブラストのような機械的な方法や、酸洗浄の化学的な方法などの表面処理が知られている⁹⁾が、材料の状態や処理方法によっては必ずしも効果的な処理ではない^{9),10)}。この場合、耐食性低下の原因は溶接熱による鋭敏化が主であるため、固溶化熱処理が有効な対策と考えられる。

3. 2. 2 応力腐食割れ試験

まずショットブラスト無しの状態では、ビード近傍に+606MPaの引張応力が生じていることを確認した。このように引張応力が残留した状態の試験片に対して、ショットブラストを施すことで、条件Aでは約-698MPa、条件Bでは-1071MPaの圧縮応力状態に変化させることができている。これらの試験片を腐食液に浸漬して、割れ発生時間および割れ横断時間を調べた結果を図11に示す。ショットブラスト無しでは1時間で割れが発生し、3時間で試験片全幅が割れてしまうのに対し、-698MPaの圧縮応力を付与した試料では割れ発生までの時間が約2倍、割れ横断時間が約3倍に伸びて耐応力腐食割れ性が向上している。さらに、-1071MPaの圧縮応力を与えた試料では、10時間浸漬しても割れは発生しなかった。残留圧縮応力値によって効果が異なることから、応力腐食割れ防止のためにはSUS304の場合最大-1000MPa程度付与することが必要と考えられる。

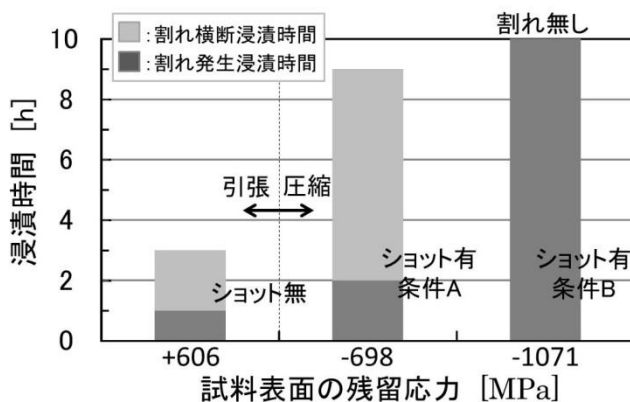


図11 各試料の応力腐食割れ試験結果

4. 結 言

SUS304に対してショットブラストを施すことで生じるピーニング効果について調べた。また、溶接されたSUS304へのショットブラストによるピーニング効果

が、耐食性に及ぼす影響について定量的に調査した。

- (1) 表面の清浄化に利用されるショットブラストは、圧縮残留応力を与えられることから、ピーニング効果が確認でき、その圧縮残留応力は、投射の時間、材質、距離によって変化した。
- (2) 孔食試験において、ショットブラストによる溶接焼けの除去と同時に不動態皮膜の損傷による耐孔食性の低下も予想されたが、ショットブラストの有無による腐食度の差は見られなかった。
- (3) 応力腐食割れ試験において、ショットブラスト無しでは1時間で割れが発生し、3時間で試験片全幅が割れたが、-698MPaの圧縮応力を付与することで割れ発生までの時間が約2倍、割れ横断までの時間が約3倍となり、耐応力腐食割れ性が向上した。また、圧縮応力が-1071MPaでは10時間浸漬しても割れの発生は確認されなかった。

参考文献

- 1) “接合・溶接技術Q&A1000”. 一般社団法人日本溶接協会 溶接情報センター.
http://www-it.jwes.or.jp/qa/details.jsp?pg_no=0050020720, (参照 2019-8-1).
- 2) ステンレス協会. ステンレス鋼便覧—第3版—. 日刊工業新聞社, 2003, p. 427, p. 1037.
- 3) 日本鉄鋼協会. 鋼の熱処理—改訂5版—. 丸善株式会社, 1969, p. 558-560.
- 4) 当舎勝次. ショットピーニングの温故知新. まてりあ. 2008, 第47巻, 第3号, p.134-139.
- 5) 原田泰典. ショットピーニング. 表面技術. 2016, Vol.67, No.1, p.2-7.
- 6) 橋本哲之祐. 溶接の腐食に及ぼす影響. 防食技術. 1988, Vol.37, No.9, p.559-565.
- 7) 松島巖. ステンレス鋼溶接部の耐食性(II). 溶接学会誌. 1999, 第68巻, 第4号, p. 276-281.
- 8) 岡田秀樹, 丹下彰, 安藤柱. ショットピーニング方法の違いによる材料硬さと残留応力分布と降伏応力の関係. 圧力技術. 2003, Vol. 41, No. 5, p. 233-242.
- 9) 幸英昭. ステンレス鋼溶接部の耐食性劣化とその防止法. 材料と環境. 1991, 第40巻, 8号, p. 567-568.
- 10) 砂田聡, 真島一彦, 石田修一, 菅野光輝, 武田義信. 焼結SUS304鋼, SUS316鋼の耐食性に及ぼすショットピーニングの影響. 粉体および粉末冶金. 2005, 第52巻, 第7号, p. 544-550.