

異種接合材の機械強度および耐食性向上を目的とした レーザ熱処理技術の開発

釧路工業高等専門学校 創造工学科 機械工学分野
教授 高橋 剛
(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016227)

キーワード：レーザ加工，固相接合，時効硬化，耐食性，ガルバニ電池腐食，鋭敏化

1. 緒言

摩擦圧接に代表される固相接合法は、母材強度を凌ぐ継手強度が得られる場合が多く、その高い生産性と生産効率から多くの工業製品に適用されている。最大の長所は、融接と異なり液相状態で接合しないため不必要な金属間化合物を生成せずに接合できることにあり、結果的に異種材料の組み合わせ自由度が広いことにある。

但し、問題点もある。一つ目は、図 1 に示すように摩擦熱によって接合界面付近が焼鈍され、その温度が時効硬化のそれを超えると硬度が著しく低下することにある¹⁾。そこで、やむを得ず再熱処理するにしても、両材料の熱処理条件に違いがあるため電気炉などで再熱処理する場合は、両材料にとって適切な再熱処理条件を改めて検討しなければならない。更に、軟化領域は接合界面付近に限定されているにも拘わらず、構造全体を再熱処理するため、それを不要とする領域にとっては逆に悪影響を及ぼすことになる。二つ目は、異種接合材を腐食環境に晒した場合、金属間電位差によって生じるガルバニ電池腐食(以後、電食)により、卑な金属は一層激しく腐食することである。

そこで、本研究では、異種接合材を適用する具体的な工業製品としてアルミ合金製のエンジンピストンを対象に検討を進めることにする。ところで、エンジン市場は、低燃費と高出力化を求められる一方で、環境負荷に配慮し、軽量化を追求しなければならない。そのためエンジンの主要部品であるピストンは以前にも増して薄肉化していく方向にあるため、ピストンの強度・耐久性確保がより一層困難になってきている。但し、多くの市場不具合はピストン頂面の熱亀裂であるため、これに特化した対策を講じれば大きな効果を生む。

この対策案として、本研究で取り組むのはピストン頂部を高強度材料に部分置換することによる耐久性向上である。そして、その異種材料への接合法に摩擦圧接を用いる。

更に、オーステナイト系ステンレス鋼が腐食環境下に置かれた場合、溶接熱影響部に応力腐食割れが発生することがある。この対策として、熱影響部のみレーザ光を照射し溶体化処理する。これはこの材料を接合材として用いた場合でも有効な方法となり得る可能性があるため検証する。

2. 研究背景と目的

上述したように本研究は、摩擦圧接時の摩擦熱によって

生じる材料軟化対策を局所的に行うことにあるが、まずこれを可能とする熱処理装置を開発するところから始める。

材料は Al-Si 系アルミ合金鋳物 AC8A と Al-Mg-Si 系アルミ合金展伸材 A6061 であり、共に T6 処理が施されている。両材料を摩擦圧接で接合し、円柱接合試験片を作成する。これを対象にレーザ再時効処理条件を確定した後、この試験片から具体的な機械部品としてピストンを対象に検証を進める。

ピストンはラジコン用エンジンであるが、上述したように AC8A は鋳物であるために伸びに乏しく、触火面となるピストン頂部に熱亀裂を発生することが多い²⁾。そこで、この頂部のみに機械強度に優れた A6061 を材料置換する。これも AC8A 同様、時効析出硬化材料であり T6 処理によって高い強度を発揮する。

A6061-T6 材を AC8A-T6 に接合する方法に摩擦圧接を用い、以下のことを行う。

- 1) 中実円柱試験片 AC8A-T6 と A6061-T6 の摩擦圧接
- 2) 接合界面付近のレーザ光による再時効熱処理の硬度回復条件の検討
- 3) 再時効熱処理した異種接合ピストンの熱サイクル耐久性評価
- 4) 再時効熱処理した異種接合ピストン耐食性評価

SUS304 溶接鋼板に関する耐食性向上対策として、次のことを行う。

SUS304 オンビード溶接鋼板の熱影響部(HAZ)に対するレーザ光による溶体化処理と評価

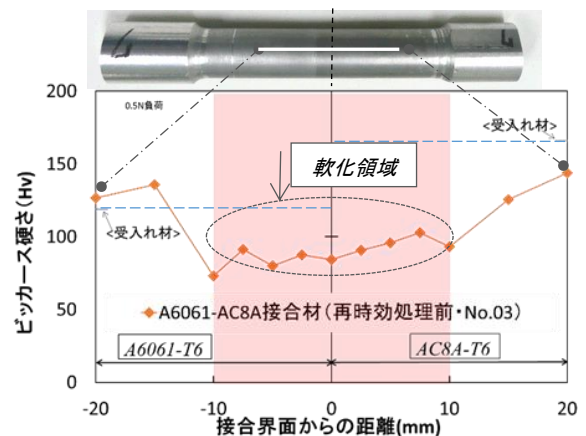


図 1 A6061-T6 と AC8A-T6 接合試験片の軸方向硬さ

3. 実験条件及び実験方法

3.1 供試材料と試験片形状

摩擦圧接材料はアルミ合金鋳物 AC8A と疲労強度に優れたアルミ合金展伸材 A6061 である。接合材の試験片形状は全長 100mm, 評点間距離 60mm, 直径 12mm の中実円柱試験形状である。一方, SUS304 溶接鋼板は板厚 4mm, 75mm 正方形である。供試材料の化学組成並びに機械特性を表 1 に示す。

表 1 化学組成 (mass %)

(a)AC8A								
Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb
0.8	11.0	0.7	0.15	0.8	0.15	0.8	0.2	0.05
Sn	Cr	Al	Mechanical properties		T.S(MPa)	Density(kg/m ³)		
0.05	0.1	bal			270	2.70		

T.S.:引張強度

(b) A6061								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others
0.40	0.7	0.15	0.15	0.8	0.04	0.25	0.15	0.15
Mechanical properties								
Tensile strength (MPa)				Density (Mg/m ³)				
320				2.70				

(c) SUS304							
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.07	0.58	1.56	0.03	0.008	8.26	18.3	Bal.
Mechanical properties							
Tensile strength (MPa)				Elongation [%]			
897				33			

3.2 アルミ合金の熱処理条件

アルミ合金ピストンとして一般的に用いられる母材の AC8A, 部分強化材料の A6061 は共に時効析出硬化材料であり, それぞれ共にピーク時効として知られる T6 処理が施され使われている。その熱処理条件を以下に示す。

< T6 処理条件 >

- ・ AC8A : 530°C × 4.5hr → 水冷 → 180°C × 6hr → 空冷
- ・ A6061 : 550°C × 1.0hr → 水冷 → 200°C × 1hr → 空冷

3.3 摩擦圧接条件

摩擦圧接接合条件は, 摩擦速度 27.5s⁻¹(1650rpm), 摩擦圧力 25MPa, 摩擦時間 5.0s, アプセット圧力 75MPa, アプセット時間 6.0s 以上とする。

3.4 レーザ光による再時効硬化処理

再時効硬化処理には図 2 に示すレーザー加工システムを用いる。このシステムは試料回転部, レーザ照射部, 放射温度測定部で主に構成されており, 試験片を軸まわりに回転させながらレーザー光を軸方向に揺動させることで照射領域を全周に渡り万遍なく加熱する。照射範囲は図 1 の結果から軟化傾向が顕著な ±10mm の範囲とする。原点は

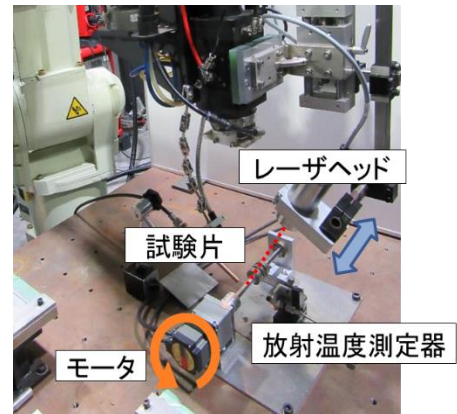


図 2 再時効処理用レーザー装置外観写真

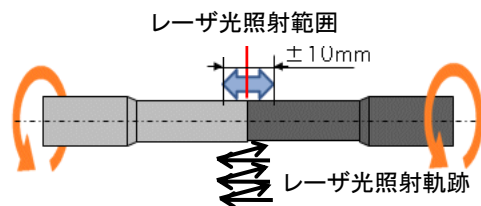


図 3 レーザ光照射範囲及び照射軌跡

接合界面である。試料回転数は 300rpm, 往復運動の周期は 1.05s, 入熱制御センサの放射率は 28% である。

レーザー照射条件, すなわち再時効硬化処理条件は A6061 本来の T6 条件である 200°C × 1hr, 更にそれよりも時効温度を 10% 高くした 220°C × 1hr, 2hr, 3hr の計 4 条件を試した。時効温度を 10% 高くした理由は, 雰囲気温度を一定にして材料全体を加熱する本来法に比べ, レーザ光を移動させながらの熱処理となり, しかも熱伝導率の高い材料であるため冷却も早いことから, それを補完する目的で温度を少し高く設定した。

手順は, まず A6061-T6 単材に対し, 摩擦熱によって界面が軟化した状況を再現するため試験片全体を溶体化処

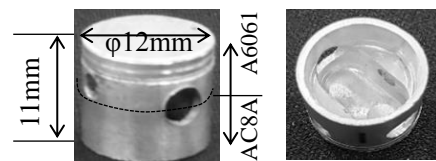


図 4 A6061-AC8A 接合ピストンの外観

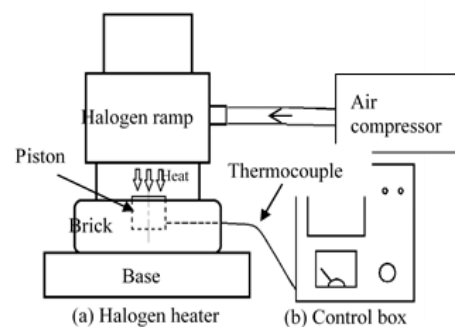


図 5 熱サイクル試験装置の模式図

理し、前記4条件の硬度回復効果を比較する。その中から最も効果的な照射条件をレーザー再時効条件として、A6061-AC8A 接合材への適用を試みる。

3.5 エンジンの擬似的熱負荷サイクル試験

図3に示した評点間直径12mmの試験片をマシニングセンターにより図4に示すピストンに切削加工する。この形状はボア直径18mmのラジコンエンジンの本物を実測し、12mm用にサイズダウンしたものである。ピストンピンホールよりも直径の大きな軽量化ホールが設けられている。材料置換したA6061領域は、この軽量化ホールの中心点付近からヘッド頂面までであり、その境界線を図中に黒点線で示す。

熱負荷サイクル試験方法を図5に示す。これは寒冷地においてエンジンの急発進と急停止を繰り返し運転した際の冷熱耐久試験を模擬したものである。熱源は、ハロゲン熱処理機(ULVAC製MR-39H)を用い、70sで220℃まで急加熱させる。その後、ピストンヘッド全面を氷で冷やし30sで40℃まで急冷する。これを一サイクルとして50回繰り返す。尚、加熱面は、実際ではヘッド面のみ燃焼熱に晒されるため、それと同じ条件となるようにピストンを耐熱煉瓦に埋め込み、ヘッド面のみを露出させ加熱する。試験後、接合界面を中心に上下±2mmまでを数点のビッカース硬さを測定した。熱電対は、スカート端面につないだ。

3.6 腐食試験方法

腐食試験は、二種類の試験片とも図6に示すプロピレン容器の中に20℃一定、6%濃度の塩化第二鉄水溶液160mm³の中に入れた。アルミ合金円柱試験片の場合はテグスで吊し、ステンレス鋼板の場合は直接底面に置いて二週間浸漬し、腐食液は一週間で交換する。

4. 試験結果と考察

4.1 再時効硬化処理による硬度回復効果

最初に、A6061-T6単体試験片に対し溶体化処理に施し、その後上述した4条件(200℃×1hr, 220℃×1hr, 2hr, 3hr)を課して硬度回復を比較し、硬度回復させるための条件を検討した。その結果、図7に示すように220℃×1hrでレーザー再時効するとほぼ受け入れ状態の硬度まで回復することが確認できた。なお、圧下荷重は0.5Nであり、硬さは4~5回の測定値の平均値とした。

その結果を受けて、A6061-T6とAC8A-T6の接合材に

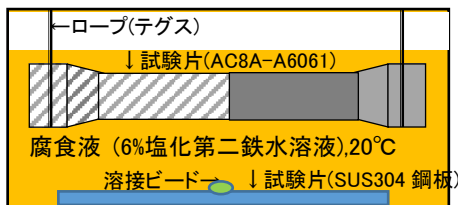


図6 腐食試験方法の模式図

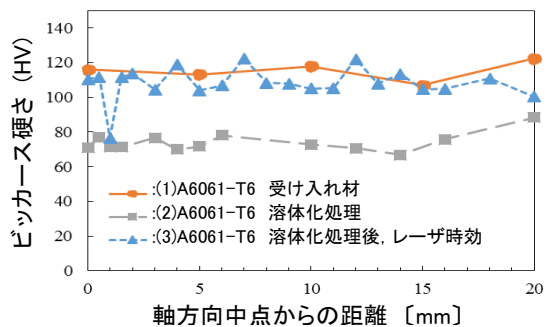


図7 A6061-T6にレーザー再時効による硬さの変化

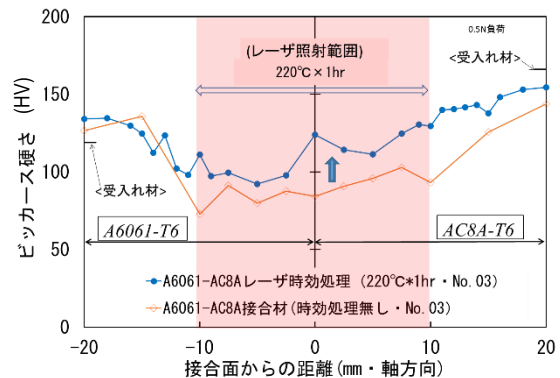


図8 レーザー再時効による硬さ回復の効果

対して220℃×1hrのレーザー再時効を適用した。その結果を図8に示す。この結果を見ると図7に示すほどの硬度回復効果は現れていないことが分かる。要因としては、異種接合に関連して、例えば熱伝導率や熱膨張率の違いなどの物性値の影響、摩擦圧接による残留応力の影響などが考えられるが確認が得られていない。因みにこれ以外の3条件はいずれも硬度改善効果が見られず結果図を割愛した。尚、採択された220℃×1hrという条件は、A6061の硬度回復を目的としたものであるが、この図を見る限り、AC8Aにも効果があることが分かった。

4.2 接合型ピストンに対する熱負荷サイクル試験結果

熱負荷サイクル試験のビッカース硬さの結果を図9に示す。比較の意味で、接合のままのピストンに対する結果も併せて示す。但し、図8に示したようにレーザー再時効による十分な硬度回復が得られなかったことから、オイルバスを用いA6061のT6時効条件200℃×1hrにて接合試験片全体を再時効処理し、その後でピストン形状に加工した。

ビッカース硬さは、スカート外側表面の接合界面を中心に高さ方向に±2mmを0.5mm間隔で測定した。この図の右側がAC8A-T6、左側がA6061-T6である。再時効処理でも最大20HV程度の硬度回復しか得られなかったが、50回の熱負荷サイクル後の硬さは再時効の有無によって両者に大きな違いが生じている。すなわち、再時効しない場合は硬さが全体に渡って約40HVも低下しているのに対して、再時効した場合硬さの低下はほとんど見られない。このことから再時効硬化処理には、実稼動による硬度低下を抑制する効果があることが確認できた。

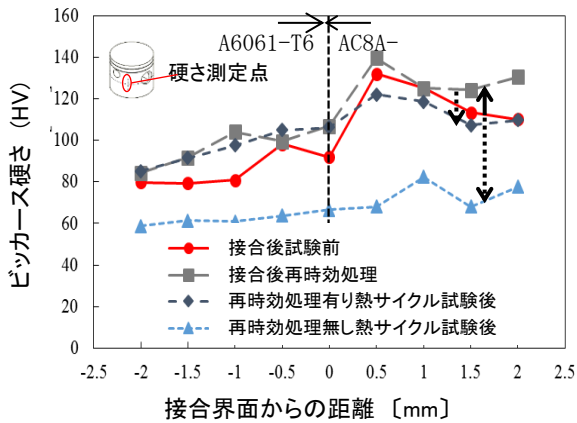


図9 再時効処理の有無によるビッカース硬さの変化

4.3 局所的再時効処理による耐食性への影響

摩擦圧接材の接合界面付近に対するレーザー光による再時効処理の硬度回復効果が明らかとなったので、併せて耐食性に及ぼす影響を調べるため腐食試験を行った。

図10は20℃の6%濃度塩化第二鉄水溶液に2週間浸漬した後の試験片の全体写真である。レーザー溶射範囲は(b)図の白抜き矢印範囲である。両試験片共に図1に示した腐食前の写真に比べ激しく腐食している。接合界面付近を比較すると両条件ともA6061のほうがAC8Aよりも直径が細くなっているように見える。

図11は、図10に示す点線で囲った領域を拡大して示した写真である。両条件ともガルバニ電位腐食によって接合界面のA6061側に腐食溝が形成されている。レーザー再時効の有無による違いは、(a)再時効無しには界面からA6061側に約2mm離れた矢印の位置に凹があるが、(b)再時効有りにはそれが無いことである。

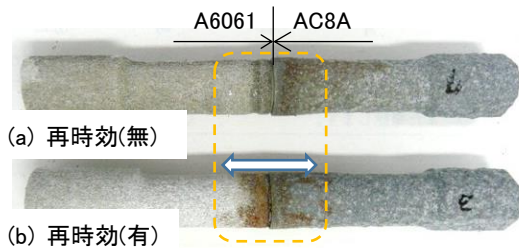


図10 レーザ再時効処理の有無による腐食様相の違い

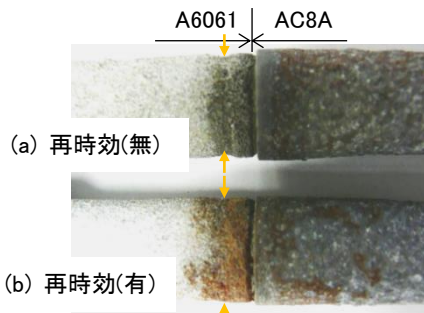
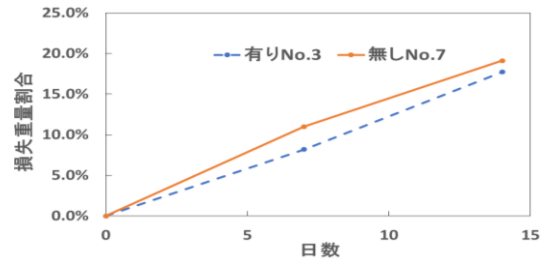
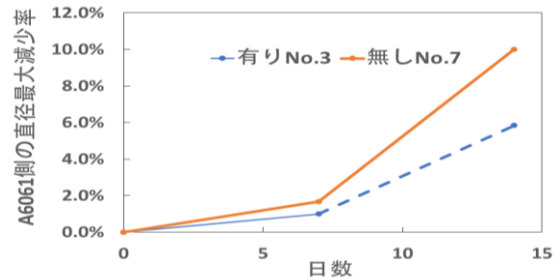


図11 レーザ再時効処理の有無による接合界面付近の違い



<a>腐食による全体損失重量比率



腐食によるA6061側の直径最大減少率

図12 レーザ再時効処理の有無による腐食への影響

図8を見る限り、この位置と硬さ分布の関連性は低いと言わざるを得ないが、接合によって生じる軸方向の残留応力分布との因果関係は考えられる。すなわち、摩擦圧接時に軸方向に高温状態で圧縮荷重を加えることにより接合後熱膨張率の大きいA6061側の界面付近に残留引張応力が生じる。この引張応力は腐食を促進する方向に作用すると考えられる。

図12に腐食による<a>全体損失重量比率とA6061側の直径最大減少率を示している。この結果から全体重量に対する減少比率及びA6061側の凹部の直径最大減少率共にレーザー再時効処理の方が少なく、効果が認められる。特に図12(a)に矢印で示した凹部直径減少率については有意な違いが生じた。

4.4 局所的溶体化処理による耐食性への影響

オーステナイト系ステンレス SUS304 は強固な不動態皮膜によって表面が保護されるため優れた耐食性を示す。しかし、溶接によってビード周辺の熱影響部が加熱されると鋭敏化により大規模孔食を生成し、著しい強度低下を招く。この対策として熱影響部にレーザー光によって溶体化熱処理を施し、その効果を明らかにする。

図13はビードオン溶接を施した75mm 正方、板厚4mmのSUS304鋼板を6%濃度の塩化第二鉄水溶液に2週間浸漬した後のものである。溶接ビードを中心に左右の熱影響部の腐食様相が異なっているのが分かる。右側の熱影響部に大きな2つの孔食³⁾が確認できるのに対して、左側には孔食がない。但し、左側にはビードに沿って変色筋が見える。この変色筋はレーザー光照射の跡である。レーザー光の照射条件は出力550W、移動速度300mm/min、焦点系φ80である。赤外線サーモグラフィを用いて照射部の温度を測

定したところ 600°C以上であることが確認できた。これに対して右側は溶接のままである。

この違いを組織的に明らかにするため図 14 に表面から 0.1~0.2mm の SEM 映像断面写真を示す。位置は図 13 中の矢印で示すようにビード終端側の辺から約 10mm である。(b) 図のレーザー再熱処理無しの点線で囲った領域を見ると結晶粒界が明瞭であることから、この領域は鋭敏化組織と言える。一方、(a) 図のレーザー再熱処理有りの点線で囲った領域を見ると結晶粒界が不明瞭であることから、溶体化処理が奏功し、Cr 欠乏域が無くなり不動態皮膜が再生されたと見なすことができる。この処理は異種接合材を用いた場合でも有効であると思われる。

5. 結言

(1) A6061-AC8A 円柱試験片におけるレーザー光を用いた再時効硬化処理により、摩擦熱による接合界面付近の局所的軟化現象を改善し、硬度回復が可能であることを確認した。
 (2) 上記(1)で作られた接合試験片から接合型ピストンを切削加工し、それを用いて実働運転に作用する擬似的な熱サイクル負荷を課し、硬さの変化に着目した。その結果、再時効硬化処理無しのピストンは熱負荷後 40HV 程度も軟化した。再時効処理したピストンはほとんど軟化しなかつた。

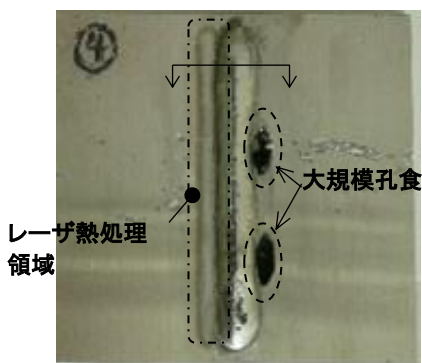


図 13 腐食試験後の外観様相
 (左側:HAZ にレーザー熱処理/右側:レーザー熱無し)

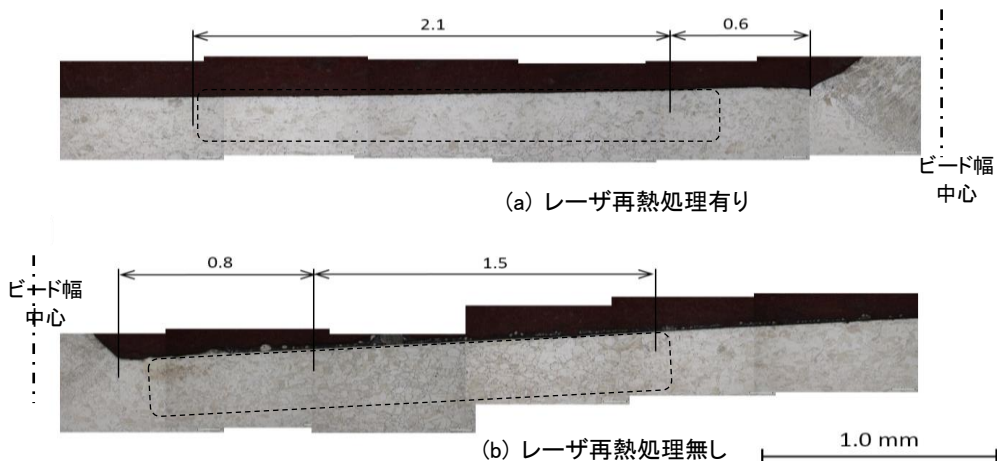


図 14 レーザ再熱処理による熱影響部の組織断面写真

今後、更なる硬度回復条件の適正化検討が必要になるもののレーザー光による局所再時効処理は有効な手段となり得る対策法として期待できる。

(3) 上記(1)で作られた接合試験片を 6%濃度塩化第二鉄水溶液に 2 週間浸漬し耐食性を評価した。再時効処理の有る無しをそれぞれを同一腐食環境下に置き、結果を比較したところ、再時効処理が腐食に対しても有利であることが分かった。特に接合界面付近の A6061 側の腐食による直径減少率に有意な差が認められた。但し、科学的根拠を明確にするためには更に調査研究を進める必要がある。

(4) 腐食環境化にオーステナイト系ステンレス SUS304 溶接鋼板を設置すると熱影響部(HAZ)に大規模孔食が生じるが、レーザー光による局所的溶体化処理を施すと生じない。SEM による表層付近の断面組織を観察したところ、鋭敏化組織が改善されていることが確認でき、異種接合材の腐食対策としても有効な手段になり得る可能性が高い。

謝辞

本研究の一部は、平成 28 年度天田財団一般研究開発助成 (AF-2016227) の直接的な御支援によるものであり、ここに謝意を申し上げます。

また、地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 産業技術研究本部 工業試験場 製品技術部生産システム・製造技術グループ研究主任 櫻庭 洋平氏並びに兵庫県立大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 准教授 木村 真晃氏には、研究に関する有益な助言や参考データの提供など多くのご支援を頂戴したことに對して感謝致します。

参考文献

- 1) M. Kimura, H. Sakaguchi, M. Kusaka, K. Kaizu & T. Takahashi: International Journal of Mechanics and Materials in Design, ISSN 1569-1713(2018), Vol 14, No 4, Int J Mech Mater Des 14:577-589, DOI 10.1007/s10999-017-9391-4
- 1) 株式会社テクノス, エンジン部品損傷実例, シリンダーヘッド爆発面亀裂, <http://e-technos.jp/example/>
- 2) T. Takahashi, K. Ishitsuka, J. Shibano: Corrosion 2012, NACE, (2012, Mar.)