

# レーザー加熱を利用した嵌合に関する研究

兵庫県立工業技術センター 生産技術部  
主席研究員 岸本 正  
(平成 26 年度一般研究開発助成 AF-2014210)

キーワード：レーザー曲げ，嵌合，異種金属材料

## 1. 研究の目的と背景

レーザー加熱による熱歪みを利用して材料を曲げる加工技術が，レーザー・フォーミングとして提案された<sup>1)</sup>。その後，レーザー・フォーミングについて研究報告<sup>2)~4)</sup>が行われ，IT 産業では，間隔調整のための曲げ<sup>5)6)</sup>等が実用化されている。

筆者らは，レーザー・フォーミングの研究において，厚さ 2.9mm のステンレス鋼板の曲げ加工技術を開発し，外径 216mm，厚さ 2.9mm のステンレス鋼管の縮管に成功した<sup>7)</sup>。これらは，レーザー加熱によって部材内部に温度勾配が発生することともなう熱膨張と自己冷却ともなう収縮差に起因するものであると考えられる。

前報では，この薄肉ステンレス鋼管のレーザー加熱による収縮変形現象を，実用的な寸法のステンレス鋼管とステンレス鋼棒の嵌合に適用し，ステンレス鋼棒が挿入されたときのステンレス鋼管の変形挙動について検討し，母材強度とほぼ同等の接合強度が得られる条件を明らかにした<sup>8)</sup>。

機械部品としての軸の高機能化とコスト低減という観点から，耐熱性や耐食性の必要な部分だけ高価な材料を用いて他の部分は安価な材料とすることがよく行われており，本技術の発展には異種材料の接合の可否についても検討する必要がある。従来技術としては，圧入，溶接ならびに摩擦圧接による接合があるが，これらの引張強度は，母材強度まで達していない。

そこで，本報では熱特性が大いに異なり，軸の材料としてよく用いられるステンレス鋼管と炭素棒鋼の組み合わせにおいて，レーザー加熱を利用した嵌合を試み，レーザー加熱回数<sup>9)</sup>による嵌合部の形状変化，残留応力および接合強度を計測することにより，異種材におけるレーザー加熱の機構について検討し，その接合特性について明らかにする。

## 2. 実験方法

### 2.1 試験片

供試材は，固溶化熱処理を施した外径  $\phi 17.2\text{mm}$ ，長さ 150mm のオーステナイト系継目無ステンレス鋼管 (SUS304) ならびに焼入れ焼もどし熱処理および研磨加工を施した外径  $\phi 12.0\text{f}7^{+0.018}_0\text{mm}$ ，算術平均粗さ  $Ra0.3\mu\text{m}$ ，長さ 150mm の機械構造用炭素鋼 (S45C<sup>①</sup>) を用いた。そして，ステンレス鋼管の嵌合部を切削加工によりはめあいの寸法の  $\phi 12.0\text{H}7^{-0.016}_{-0.034}\text{mm}$ ，算術平均粗さ  $Ra0.8\mu\text{m}$  に仕上げた。実用的な嵌合技術を目指して，ステンレス鋼管と炭素棒鋼

の嵌合部は，一般的なすきまばめとして寸法差を 0.030mm とした。また，レーザー加熱による軸方向の塑性変形率を調べるため，ステンレス鋼管の表面には嵌合部端面から 5mm 間隔で 60mm の間，紫外レーザー加工装置の波長 355nm，出力 1W のレーザービームを用いて円周方向に長さ 10mm のケガキを行った。

### 2.2 レーザー加熱方法

図 1 に試験片のレーザー加熱方法を示す。試験片は，ステンレス鋼管に，炭素鋼棒を照射範囲と同じ 50mm 挿入し，ステンレス鋼管表面にはレーザービームの吸収率改善のため，カーボンブラックを均一に塗布した。なお，照射範囲外の部分は，レーザー光遮蔽のため，ステンレス鋼管を用いて覆った。

レーザー加熱は，CO<sub>2</sub> レーザー加工装置を用いて，鋼管の内径の塑性変形量が大きく，試験片表面が溶融しない条件<sup>7)</sup>として，出力 1400W，ビーム径 20mm の TEM01 モードの CO<sub>2</sub> レーザービームを，焦点距離 190.5mm のレンズを用いた焦点

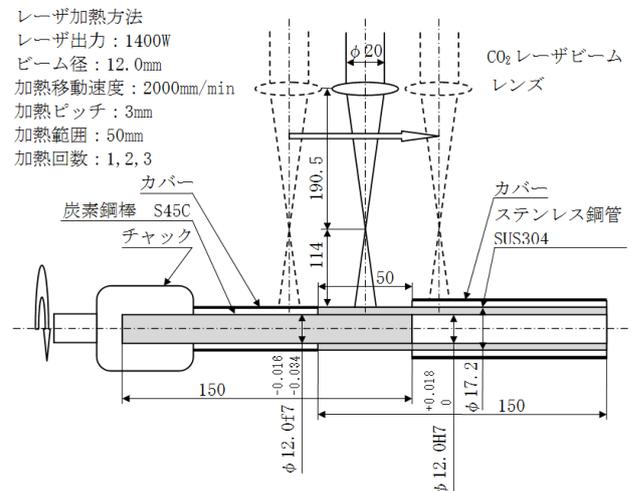


図 1 レーザー加熱方法

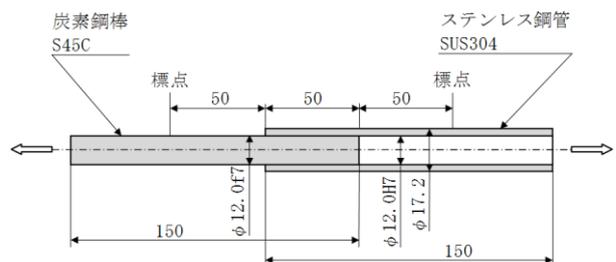


図 2 引張試験

はずしにより、ビーム径を 12mm に変換したものをを用いた。

レーザービームの移動速度を 2000mm/min、加熱するピッチを 3mm とするため、試験片の回転速度を 36.7rpm、レーザービームの軸方向の移動速度を 110mm/min とした。レーザービームを試験片の軸方向に試験片手前の照射範囲外から試験片の照射範囲の距離 50mm を超え試験片の照射範囲外まで移動させて、レーザー加熱を 1 回、2 回、3 回行った。

### 2.3 金属組織の観察

レーザー加熱を行ったステンレス鋼管および炭素鋼棒の金属組織の変化について、軸方向に切断し、断面を研磨し、ステンレス鋼管については 50% に希釈した王水（塩酸：硝酸=3：1）を用いて腐食を行い、炭素鋼については 5% 硝酸アルコール（硝酸：エチルアルコール=1：19）を用いて腐食を行い、金属顕微鏡を用いて観察を行った。

### 2.4 塑性変形量の計測

レーザー加熱を行ったステンレス鋼管の表面に付けたケガキ線の位置における外径を計測し、計測した値とレーザー加熱前の値との差を塑性変形量とした。また、ステンレス鋼管のケガキ線の間隔を計測し、計測した値とレーザー加熱前の値との差をレーザー加熱前の値で除して管軸方向の塑性変形率とした。なお、外径の塑性変形量および軸方向の塑性変形率は、同じ試験片 5 本について加熱回数ごとに計測を行った平均値であり、ケガキ線の位置ごとに外径は 8 回、軸方向は 180° 回転させ 2 回測定を行った。

### 2.5 残留応力の計測

レーザー加熱によるステンレス鋼管の汚れを取り、表面粗さの影響を低減するために、外周に電解研磨を行い、ブルカー・エイエックス社製 X 線残留応力測定機 D8 DISCOVER を用いて、2 次元検出器による X 線残留応力測定を 10mm 間隔で行った。

### 2.6 引張試験

図 2 に嵌合した接合強度を調べるための引張試験を示す。図に示すように、ステンレス鋼管の照射範囲から 50mm の距離の点を一方の標点として、炭素鋼棒の重なっているところから 50mm の距離の点をもう一方の標点として、インストロン社製万能材料試験機 5982 および非接触伸び計を用いて、引張速度 1mm/min で引張試験を行った。さらに、レーザー加熱前のステンレス鋼管 (SUS304) ならびに機械構造用炭素鋼 (S45C $\text{\textcircled{H}}$ ) について、標点間距離 50mm として引張速度 1mm/min で引張試験を行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 金属組織

レーザー加熱前およびレーザー加熱 1 回、2 回、3 回のレーザー加熱後のステンレス鋼管および炭素鋼棒を図 3(a)～(d)に示す。図より、レーザー加熱後のステンレス鋼管は、加熱した部分が黒く変色しており、ピッチ 3mm の送り模様が認められる。加熱回数にしたがって、加熱した部分がより黒く変色している。

レーザー加熱前およびレーザー加熱 3 回後のステンレス鋼

管および炭素鋼棒の断面の金属組織を図 4(a)～(d)に示す。図より、レーザー加熱前後において金属組織に変化が認められない。また、レーザー加熱後のステンレス鋼管の表面近傍においても熔融の痕跡は認められない。なお、レーザー加熱 1 回、2 回後のものにおいても金属組織に変化がなかったため、3 回後のもののみを掲載する。レーザー加熱前後のいずれにおいても、ステンレス鋼管はオーステナイト組織、炭素鋼は微細パーライト組織のままであり、全くマルテンサイト組織への変化は認められない。

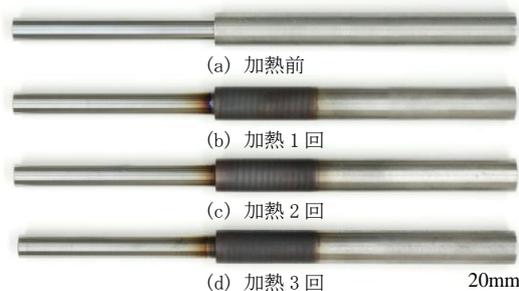


図 3 レーザ加熱後の試験片

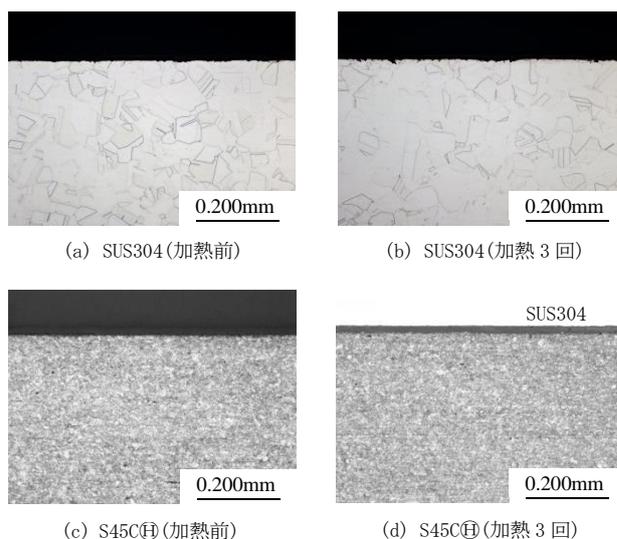


図 4 レーザ加熱後の試験片断面の金属組織

### 3.2 塑性変形量

図 5 に、レーザー加熱前のステンレス鋼管の端面からの距離を示すケガキ線の位置におけるレーザー加熱を行い嵌合したステンレス鋼管の外径の塑性変形量を示す。図より、外径の塑性変形量は、レーザー加熱 1 回において、端面では塑性変形量が小さく、端面からの距離 40mm まで徐々に塑性変形量が大きくなり、端面からの距離 40mm から 45mm の範囲ではほぼ一定の約 0.018mm となる。

レーザー加熱 2 回においては、照射範囲の両端を除けば、外径の塑性変形量は、端面からの距離 10mm から 45mm の範囲ではほぼ一定の約 0.018mm である。

レーザー加熱 3 回においては、外径の塑性変形量は、端面からの距離 5mm から 25mm までの範囲ではレーザー加熱 2 回

に比べて約 0.001mm 小さくなり、端面からの距離 30mm から 35mm の範囲ではほぼ一定の約-0.018mm であり、端面からの距離 40mm から 45mm までの範囲ではレーザー加熱 2 回に比べて約 0.002mm 小さくなる。このことは、軸方向の塑性変形率と関係し、炭素鋼棒にステンレス鋼管の内面が拘束され、軸方向に収縮するために、外径の塑性変形量が小さくなると考えられる。

いずれのレーザー加熱回数においても、照射範囲の両端を除けば、外径の塑性変形量の最大値は、ほぼ一定の約 -0.018mm である。このことは、前報で示したようにステンレス鋼管が収縮し、内径がすきまばめの寸法差の -0.030mm に達し、棒と嵌合されると、内径の塑性変形が抑制され一定になると同時に、管外径の塑性変形も抑制されるためと考えられる。

図 6 に、端面からの距離と嵌合したステンレス鋼管の軸方向の塑性変形率との関係を示す。図より、軸方向の塑性変形率は、レーザー加熱 1 回において、端面からの距離 0mm から 20mm までの範囲では端面における約-0.07%から徐々に小さくなり、端面からの距離 15mm から 35mm までの範囲では、ほぼ 0%となり、端面からの距離 35mm から 40mm までの範囲では約-0.03%に大きくなり、端面からの距離 40mm からの範囲では、ほぼ 0%となっている。

レーザー加熱 2 回においては、軸方向の塑性変形率は、端面からの距離 0mm から 15mm までの範囲では端面における約-0.27%から徐々に小さくなり約-0.05%となり、端面からの距離 10mm から 25mm までの範囲では、約-0.05%となり、端面からの距離 25mm から 30mm までの範囲では約-0.01%に小さくなり、端面からの距離 30mm から 40mm までの範囲では、徐々に大きくなり約-0.07%となり、端面からの距離 40mm から 50mm までの範囲では、徐々に小さくなりほぼ 0%となっている。

レーザー加熱 3 回においては、軸方向の塑性変形率は、端面からの距離 0mm から 30mm までの範囲では端面における約-0.30%から徐々に小さくなり約-0.03%となり、端面からの距離 25mm から 35mm までの範囲では、約-0.03%となり、端面からの距離 35mm から 40mm までの範囲では約-0.08%に大きくなり、端面からの距離 40mm から 50mm までの範囲では、徐々に小さくなりほぼ 0%となっている。

いずれのレーザー加熱回数においても、端面からの距離 0mm から 30mm までの範囲では軸方向の塑性変形率は、最大値から徐々に小さくなり、端面からの距離 25mm から 30mm までの範囲で最小値になり、端面からの距離 35mm から 40mm までの範囲では大きくなり、端面からの距離 40mm から 50mm までの範囲では、徐々に小さくなっている。また、レーザー加熱回数の増加とともに、軸方向の塑性変形率も増加している。このことは、端面近傍ではステンレス鋼管が収縮するとき棒からの軸方向の塑性変形の抑制が少ないためと考えられる。また、端面からの距離 35mm から 40mm までの範囲では、レーザー加熱の終点に近く、最高温度となったステンレス鋼管が収縮するとき軸方向の塑性

変形が大きくなると考えられる。

嵌合したステンレス鋼管の外径の塑性変形量と軸方向の塑性変形率から、嵌合したステンレス鋼管の金属組織に変化がなく、残留応力による体積の変化は微小であることから、体積に変化がないと仮定し、炭素鋼棒の影響がないと仮定して計算により内径の塑性変形量を求めた。図 7 に、ステンレス鋼管の端面からの距離と内径の塑性変形量との関係を示す。図より、内径の塑性変形量は、レーザー加

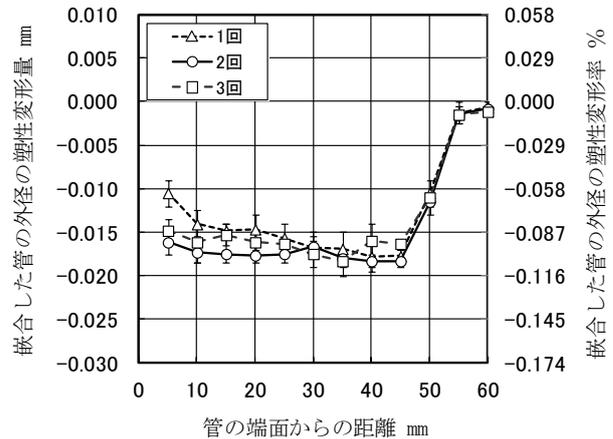


図 5 嵌合したステンレス鋼管の外径の塑性変形量

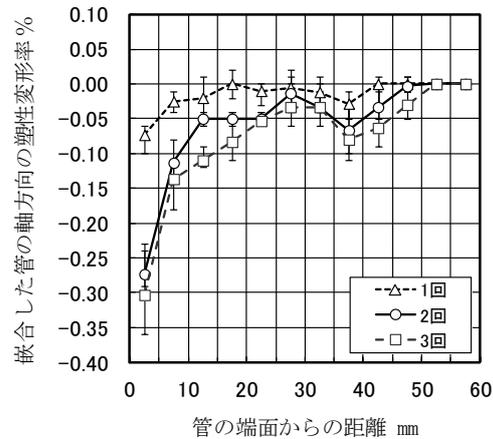


図 6 嵌合したステンレス鋼管の軸方向の塑性変形率

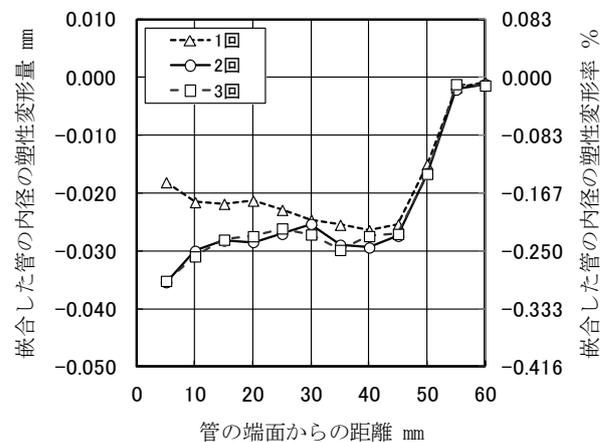


図 7 嵌合したステンレス鋼管の内径の塑性変形量

熱 1 回において、端面からの距離 5mm から 30mm までの範囲では徐々に大きくなり、端面からの距離 30mm から 45mm までの範囲では-0.025mm より大きくなり、ステンレス鋼管が収縮し内径がすきまばめの寸法差の-0.030mm に近づき嵌合されている。レーザ加熱 2 回、3 回において、内径の塑性変形量は、端面からの距離 5mm から 45mm までの範囲では-0.025mm より大きくなり、嵌合されていると考えられる。

### 3.3 残留応力

図 8 に、嵌合したステンレス鋼管について、レーザ加熱前のステンレス鋼管の端面からの距離を示すケガキ線的位置における円周方向の残留応力を示す。図より、円周方向の残留応力は、端面からの距離 5mm から 45mm までの範囲ではほぼ一定の圧縮応力が生じており、レーザ加熱 1 回、2 回、3 回において、それぞれ約-225MPa、約-172MPa、約-84MPa の圧縮応力が生じていることがわかる。また、レーザ加熱回数にともなって残留応力が小さくなっていることがわかる。このことは、ステンレス鋼管に熱伝導率の大きな炭素鋼棒が入ることにより、レーザ加熱 1 回において、ステンレス鋼管の表面が加熱され膨張し、内面に向かって熱伝導され膨張し、塑性変形をとめないながら、内径が収縮していく。そして、内径がすきまばめの寸法差の-0.030mm に達し、熱伝導率がステンレス鋼の約 3 倍ある炭素鋼棒に内面が接触すると急激に冷却される。内面から表面に向かって冷却され、ステンレス鋼管の端面から内径が大きくなり、表面と内面の温度差と表面の塑性変形が大きいことにより、表面に大きな圧縮応力を生じる。

レーザ加熱 2 回において、内径と炭素鋼棒の寸法差は小さく、ある範囲では嵌合しており、ステンレス鋼管の表面が加熱され膨張し、塑性変形をとめないながら、内径が収縮し、炭素鋼棒に接触し冷却される。このときの表面の温度がレーザ加熱 1 回の温度よりも高く、冷却され収縮することと表面の塑性変形が小さいことにより、ステンレス鋼管表面の圧縮応力がレーザ加熱 1 回より減少する。

レーザ加熱 3 回において、ステンレス鋼管内径と炭素鋼棒は嵌合しており、ステンレス鋼管の表面が加熱され膨張し、内面に向かって熱伝導され膨張するが、内面が嵌合され接触している炭素鋼棒で抑制され、つねに冷却される。このときの表面の温度がレーザ加熱 2 回の温度よりも高く、冷却され収縮することと表面の塑性変形がさらに小さいことにより、ステンレス鋼管表面の圧縮応力がレーザ加熱 2 回よりも減少すると考えられる。

図 9 に、嵌合したステンレス鋼管について、端面からの距離と軸方向の残留応力との関係を示す。図より、軸方向の残留応力は、端面からの距離 5mm から 45mm までの範囲ではほぼ一定の圧縮応力が生じており、レーザ加熱 1 回、2 回、3 回において、それぞれ約-250MPa、約-215MPa、約-92MPa の圧縮応力が生じていることがわかる。また、レーザ加熱回数にともなって残留応力が小さくなっていることがわかる。このことは、円周方向の残留応力と同様の

結果であると考えられる。レーザ加熱 2 回、3 回において端面からの距離 45mm のところでは、圧縮応力が大きくなる。この部分は、図 5 および図 6 の収縮部の終わりの部分であり、管の塑性変形量が急激に変化するために圧縮応力が大きくなったと考えられる。ステンレス鋼管の表面には、円周方向、軸方向ともに大きな圧縮の残留応力が生じているが、嵌合していることから、ステンレス鋼管の内面には、円周方向に大きな引張の残留応力が生じ、ステンレス鋼管全体としては円周方向に引張の残留応力が生じていると考えられる。

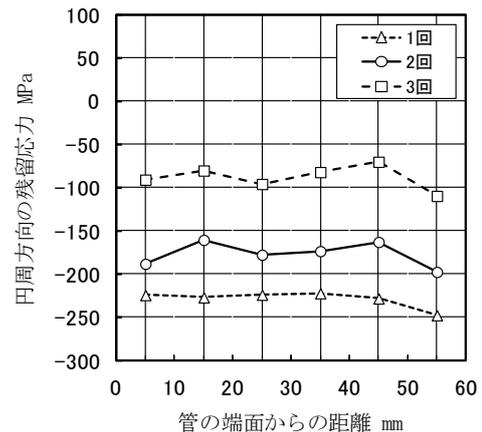


図 8 ステンレス鋼管表面の円周方向の残留応力

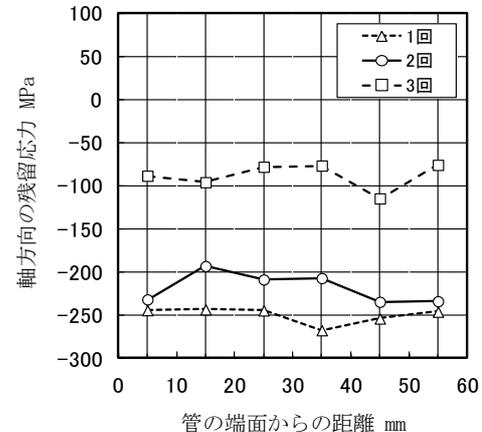


図 9 ステンレス鋼管表面の軸方向の残留応力

### 3.4 引張試験

図 10 に、レーザ加熱回数を変えて嵌合した試験片について、標点間伸びと引張荷重との関係を示す。引張試験後の嵌合した試験片を図 11 に示す。これらの図より、レーザ加熱 1 回の試験片は、標点間が伸びるにしたがって、ステンレス鋼管が伸びて、引張荷重 23.2kN に達した後、嵌合部が滑りながら最大引張荷重 27.4kN に達し、さらに嵌合部が滑りながら引張荷重が小さくなり抜けた。レーザ加熱 2 回ならびに 3 回の試験片は、標点間が伸びるにしたがって、ステンレス鋼管が伸びて、最大引張荷重 81.5kN ならびに 80.0kN に達した後、嵌合部が滑りながら引張荷重

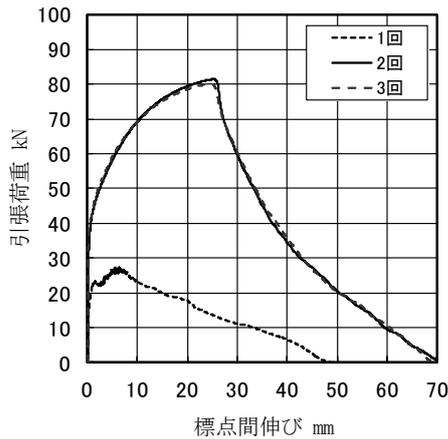


図 10 標点間伸びと引張荷重との関係

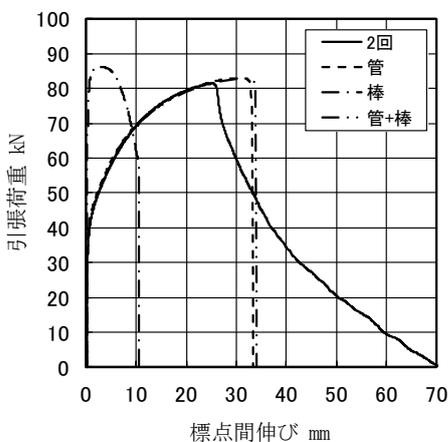


図 12 標点間伸びと引張荷重との関係

が小さくなり抜けた。

図 12 に、外径  $\phi 17.2\text{mm}$ 、内径  $\phi 12.0\text{mm}$  のステンレス鋼管ならびに外径  $\phi 12.0\text{mm}$  の機械構造用炭素鋼棒について、標点間伸びと引張荷重との関係を示す。図中の管+棒は、引張荷重に対するステンレス鋼管の標点間伸びと炭素鋼棒の標点間伸びを合算したものを標点間伸びとして整理したものである。図より、ステンレス鋼管ならびに炭素鋼棒は、標点間が伸びるにしたがって引張荷重が増し、最大引張荷重  $83.0\text{kN}$  ならびに  $86.3\text{kN}$  に達した後、さらに標点間が伸び、破断し、引張荷重が無くなった。レーザー加熱 2 回で嵌合した試験片の最大引張荷重は、ステンレス鋼管の最大引張荷重とほぼ同じである。レーザー加熱 2 回で嵌合した試験片の最大引張荷重時の標点間伸びは、管+棒の最大引張荷重時の標点間伸びより、約  $6\text{mm}$  短いことがわかる。

#### 4. 結言

本研究では、レーザー加熱を利用した実用的な嵌合技術の開発を目指して、ステンレス鋼管と機械構造用炭素鋼棒に  $\text{CO}_2$  レーザを用いて加熱実験を行い、嵌合を試みた結果、以下の結論を得た。

- (1) 嵌合強度は、レーザー加熱 2 回において、ステンレス鋼管の母材強度と同一の最大引張荷重  $81.5\text{kN}$  になる。

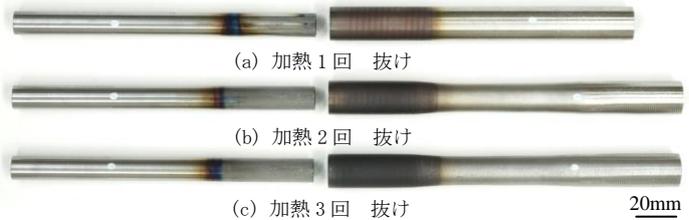


図 11 引張試験後の試験片

- (2) レーザ加熱したステンレス鋼管および炭素鋼棒の嵌合部における金属組織には、変化がない。
- (3) レーザ加熱を 2 回したステンレス鋼管の嵌合部において、外径塑性変形量が約  $-0.018\text{mm}$ 、軸方向の塑性変形率が約  $-0.05\%$  となる。
- (4) レーザ加熱を 2 回したステンレス鋼管の嵌合部の表面における残留応力は、円周方向には約  $172\text{MPa}$  の圧縮応力、軸方向には約  $215\text{MPa}$  の圧縮応力である。レーザー加熱回数にともなって残留応力が小さくなっている。
- (5) レーザ加熱すると、加熱されたステンレス鋼管の嵌合部は、円周方向に大きく、軸方向に小さく収縮し、炭素鋼棒に圧縮応力を発生させることで、嵌合強度を創出する。

#### 謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団平成 26 年度一般研究開発助成により遂行されたものであり、ここに深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) Yoshiharu Namba ; Laser Forming of Metals and Alloys, Proc. LAMP' 87, 601 (May, 1987).
- 2) F. Vollertsen ; Mechanism and Models for Laser Forming, Proc. LANE' 94, 1, 345 (1994).
- 3) 難波義治, 片山卓也 : レーザ・フォーミングの三次元熱弾塑性解析, 精密工学会誌, **65**, 9 (1999) 1330.
- 4) 宮崎俊行, 斎藤昌利, 徳永剛, 三須直志, 吉岡俊朗 : 初期曲げを利用した半導体レーザービームによる金属薄板の曲げ加工, 精密工学会誌, **68**, 5 (2002) 700.
- 5) 松下直久, 十倉央彦 : レーザマイクロベンディングによる磁気ヘッドスライダの浮上面形状修正技術の開発, 第 57 回レーザー加工学会論文集, (2002) 66.
- 6) 北田幸作, 朝日信行 : レーザフォーミングによるリレーの特性調整, 松下電工技報, Aug. 2002 (2002) 40.
- 7) 太田勝久, 岸本正, 三須直志 : ステンレス製フィギュア製造におけるレーザー加工の応用, 第 74 回レーザー加工学会講演論文集, (2010) 203.
- 8) 岸本正 : レーザ加熱を利用した嵌合に関する研究, 精密工学会誌, **81**, 8 (2015) 758.
- 9) 岸本正 : レーザ加熱を利用した金属板の 3 次元曲げ加工, 兵庫県立工業技術センター研究報告書, **15**, (2006) 42.