

圧力と通電加熱を用いた合金鋼同士の接合

菊竹 孝文*¹

Joining of Alloy Steel by Pressure and Energization Heating

Takafumi Kikutake

金属材料の接合は高度な熟練技術と冶金学的知識を要する。県内中小企業の技術伝承や人材不足等の課題解決のため、デジタル制御による圧力と通電加熱を用いた接合方法が求められている。本研究は、放電プラズマ焼結装置を用いた、圧力と通電加熱に関する基礎的な接合条件を調査することを目的とした。アルゴン雰囲気および低真空下で合金鋼同士を接合した結果、すべての条件において接合率は約 98%であり、十分な引張強度、延性が得られた。一方、高温下の加圧接合によって、接合面近傍における幅が膨張した。

1 はじめに

金属材料の接合は、高度な熟練技術と冶金学的知識が必要である。しかしながら、県内中小企業では熟練技術の伝承や人材不足等の問題が深刻であり、個人の技能や知識によらないデジタル制御による接合手法が望まれている。

近年、圧力と通電加熱を用いた接合技術が注目されている。その中の一つである放電プラズマ焼結は、抵抗発熱によって接合界面の極近傍のみを溶融(拡散)接合する技術である。本手法は、加圧力と電流量を制御することで接合することが可能である。また、材料を溶融せずに接合できる摩擦圧接と比べ、接合面形状の制約や中心部と外周部の温度差が少ない等の利点がある¹⁾。

これまで放電プラズマ焼結を用いた接合に関する研究がいくつか報告されている^{2, 3)}。しかしながら、鉄鋼材料に放電プラズマ焼結を用いた実用化例は少なく、基礎的なデータが十分とはいえない。そこで本研究では、放電プラズマ焼結を用いた、圧力と通電加熱による接合技術の基礎的な接合条件を調査することを目的とした。

2 実験方法

2-1 供試材および接合条件

供試材料は、一般的な合金鋼である Cr, Mo 含有鋼 (SCM440)を用いた。接合材として $\phi 28\text{mm}$, 長さ 60mm の円柱形状を用い接合した。図 1 に装置の外観, 図 2



図 1 放電プラズマ焼結装置外観

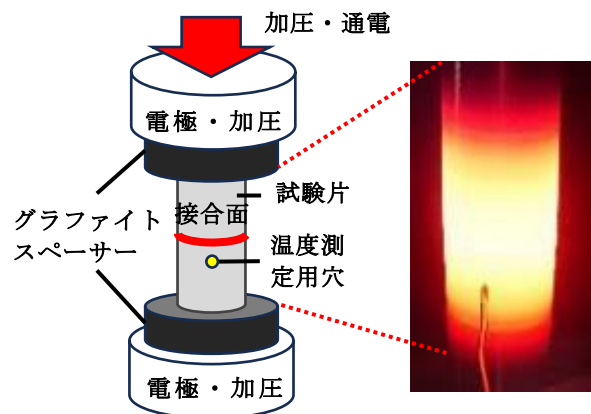


図 2 放電プラズマ焼結を用いた接合法の模式図および接合時の様子

に接合方法の模式図および接合時の様子を示す。表 1 に示した 4 種類(①～④)の条件により接合を行った。加圧力は 4700kgf (応力に換算すると 75MPa) とした。均熱温度は、 850°C および 1000°C とした。雰囲気は、低真空およびアルゴンとした。低真空雰囲気は、 10Pa 程度までロータリーポンプを用いて減圧し、接合中も減圧を継続した。アルゴン雰囲気は、低真空雰

*1 機械電子研究所

囲気に減圧後、ガス置換を3回繰り返し、接合中もアルゴンガス流入を継続した。接合面は十分な脱脂を行い、接合界面から10mmの位置にφ2mm×4mmの穴を開け、シース熱電対により内部温度を測定した。

表1 接合条件

試験片	①	②	③	④
加圧力 (MPa)	75	75	75	無し
均熱温度 (°C)	850	850	1000	850
雰囲気	低真空	アルゴン		

2-2 特性評価

引張試験は、板厚3mm、平行部の幅10mm、評点間距離30mm、平行部の長さ40mmの試験片により行った。接合した円柱中央からそれぞれ引張試験片を1本ずつ採取し、降伏強度(YS)、引張強度(TS)および歪(EL)を評価した。比較のため、非接合材も同様に評価した。寸法変化は、予め試験片の側面に5mm間隔の印を付け、接合前後の幅と長さの変化率から評価した。接合面積の割合は、破面観察により算出する方法が提案されている⁴⁾。しかしながら、本研究では簡易的にレーザ光学顕微鏡(OLS5100-EAT)により、断面組織における接合界面中央10mm幅(引張試験片と同じ)から算出した。算出方法は、10mm幅から未接合領域の長さの合計を差し引き(接合長さ)、10mm幅に対する接合長さの割合を接合率とした。金属組織は、接合断面を3%ナイトールによるエッチング後、光学顕微鏡(オリンパス製、BX-60)により観察した。

3 結果

3-1 接合後の外観

図3に接合後の試験片外観を示す。すべての試験片において、接合界面近傍の側面は、雰囲気制御によっ

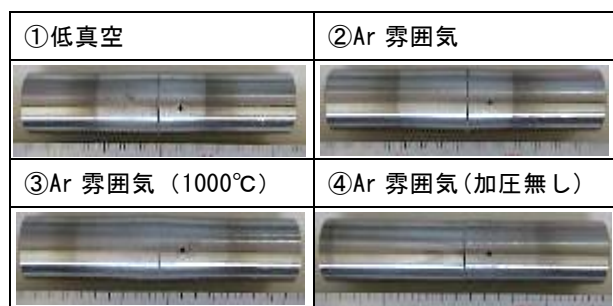


図3 接合後の外観

て金属光沢が維持されていた。

3-2 形状変化

図4に接合前後の幅と長さの最大寸法変化の割合を示す。①、②、④は線形関係にあるが、③は膨張率側に遷移した。④の加圧無しの場合は、寸法の変化はほとんど見られなかった。一方、①の「低真空」、②の「Ar雰囲気」③の「Ar雰囲気(1000°C)」の順に膨張率と圧縮率が大きかった。

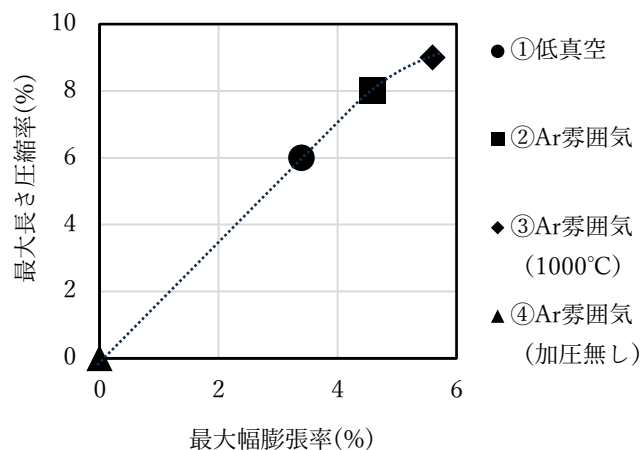


図4 接合前後の幅と長さの最大寸法変化

3-3 引張試験結果

図5に引張試験結果を示す。白抜きは降伏強度、塗りつぶしは引張強度を示す。接合材の降伏強度はすべて400MPa程度、引張強度はすべて700MPa程度といずれの接合においても同等であった。一方、歪は20~30%の範囲にあり、①と②がわずかに高かった。非接合材の降伏強度と引張強度は接合材に比べて1.5倍以上高く、歪は①および②の半分以下であった。破断位置はすべての試験片で接合面であった。

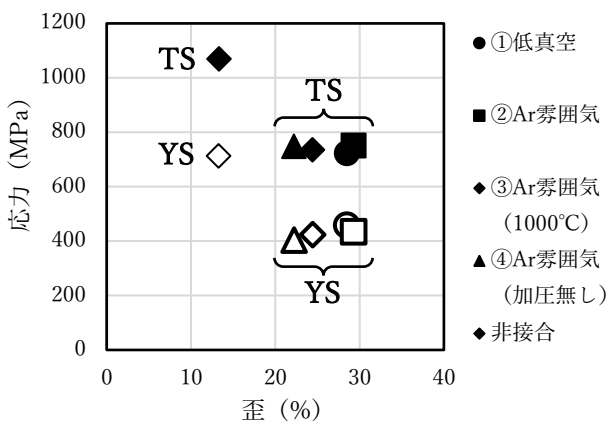


図5 引張試験結果

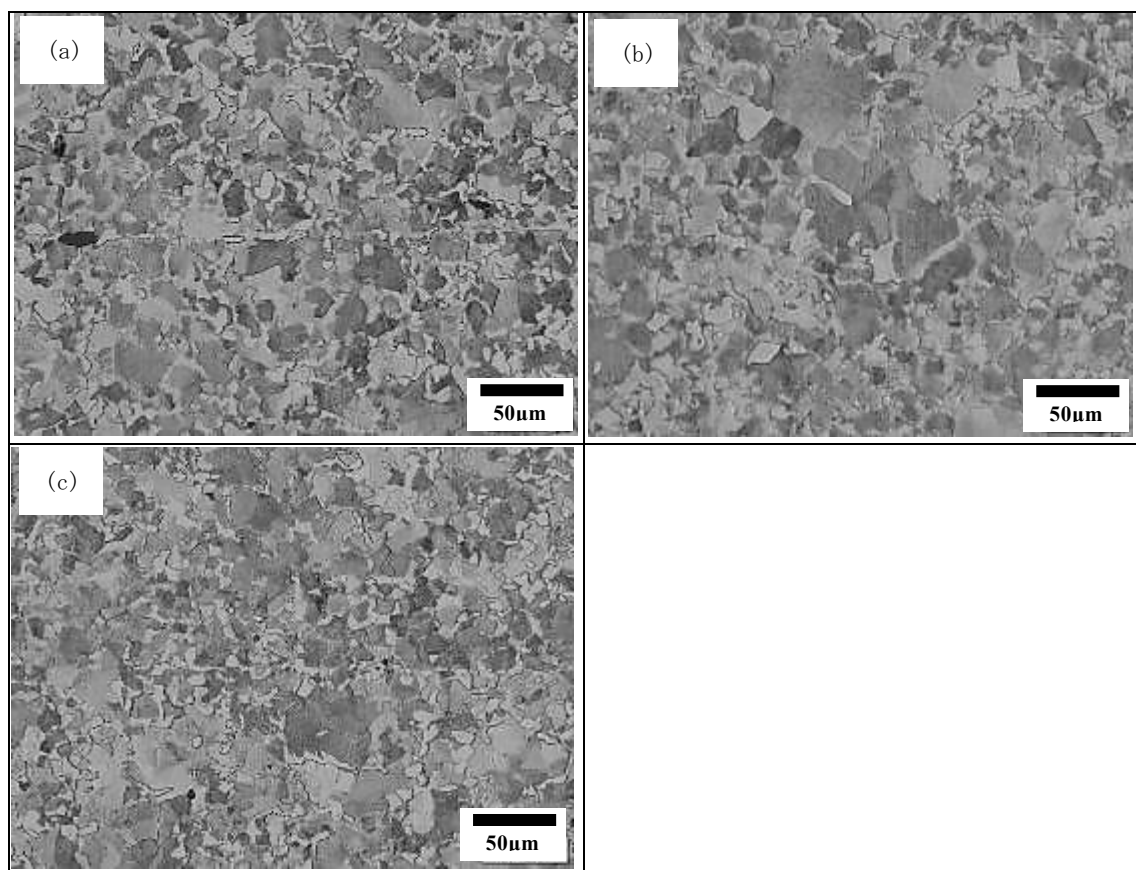


図6 接合面近傍の光学顕微鏡観察結果(表1の①)。(a)エッジ部, (b)幅 1/4 部, (c)幅 1/2 部.

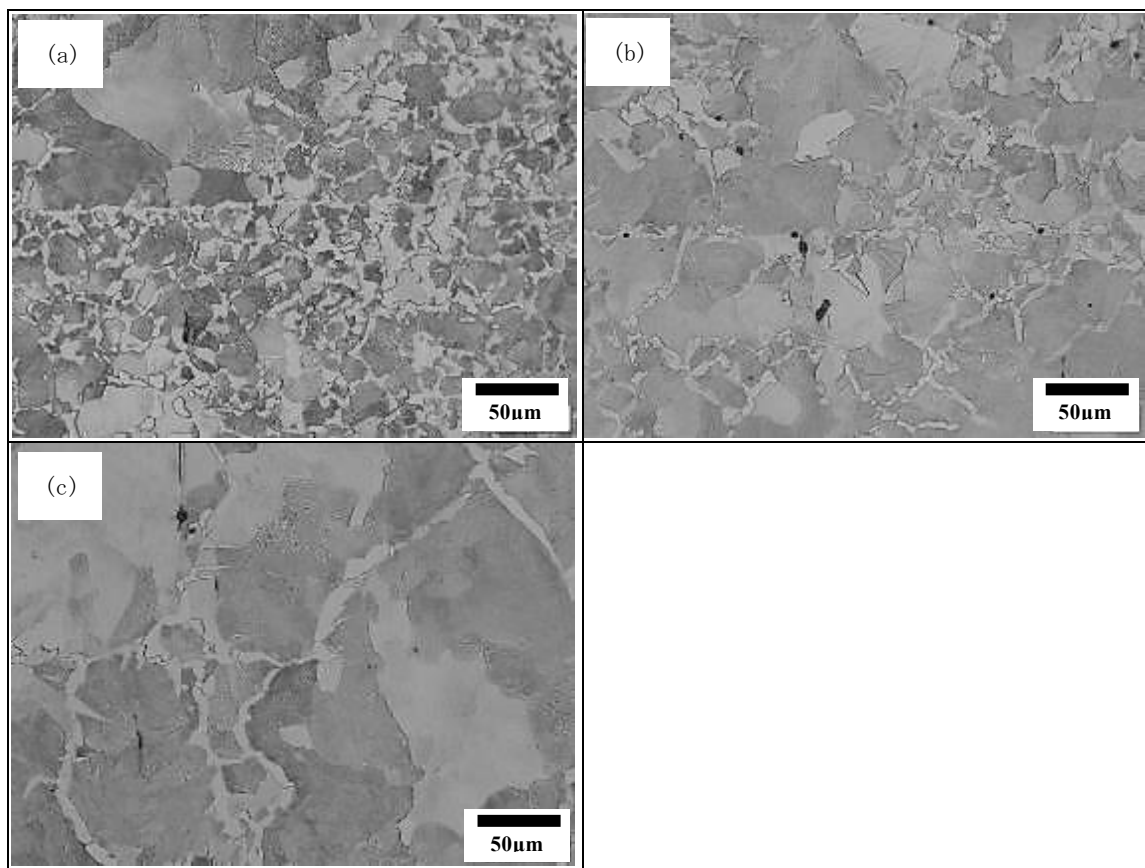


図7 接合面近傍の光学顕微鏡観察結果(Ar 雰囲気, 1/4 幅部)。(a)850℃(表1の②), (b)1000℃(表1の③), (c)加圧無し(表1の④)。

3-4 接合率

接合率を測定した結果、中央部(10mm)においてはすべての試料で約98%と同等かつ高い値を示した。

3-5 組織観察

図6および図7に光学顕微鏡による組織観察結果を示す。図6は低真空(表1の①)における、エッジ部、1/4幅部、1/2幅部の組織を示す。すべての部位でフェライト相およびパーライト組織が観察された。エッジ部に比べて、1/4幅部と1/2幅部の組織は結晶粒の粗大化が認められた。

図7はAr雰囲気における接合界面近傍の組織を示す。(a)850℃(表1の②)，(b)1000℃(表1の③)，(c)加圧無し(表1の④)，(各1/4幅部，①の低真空は図6(b)を参照)の組織を示す。低真空と同様、すべての部位でフェライト相およびパーライト組織が観察された。また、図7(a)は一部，(b)，(c)は接合界面全体で結晶粒の粗大化が観察された。1000℃および加圧無しにおいては、850℃よりも結晶粒の粗大化が顕著であった。

4 考察

低真空およびAr雰囲気下における接合の場合、本実験条件においては降伏強度および引張強度はすべて同等であった(図5)。延性は850℃で接合した低真空およびAr雰囲気が同程度であり、最も高かった。Ar置換には時間を要するため、低真空の方が実用的な条件であると考えられる。しかしながら、破断面はすべての試験片において接合界面であった。一方、接合率はすべての試験片で高かったため、接合が十分にできており、高い強度および延性が得られたと考えられる。

油圧による機械的な加圧が無くても接合が可能であった(表1の④)のは、グラファイトスペーサーおよび電極・加圧軸に自重があり、接合界面が部分的に密着したことも要因として考えられる。一方、結晶粒の粗大化は最も顕著であった。これは、接触面積が小さく、通電加熱のため局所的に加熱が急激に進んだためと推察される。しかしながら、寸法変化は加圧無しの条件が最も小さく、寸法に精度が求められる場合は、加圧力を下げることが有効であることが示唆された。

本実験において最も高温である1000℃で接合した場合は、寸法変化が最も大きく、結晶粒もやや粗大にな

った。合金鋼の変態点であるA₃点およびA₁点は実験式が提案されており、SCM440の場合、A₃点は約1060℃、A₁点は約1020℃(成分によって前後する)と概算される⁵⁾。本接合方法は抵抗発熱によって加熱を行うため、接合界面近傍の温度が急激に上昇する。よって、昇温時にオーバーシュートによってA₃点以上に加熱され、結晶粒の粗大化が起こった可能性が考えられる。本手法を用いてより高温で接合したい場合、特に昇温時の温度管理に注意が必要である。

5 まとめ

合金鋼(SCM440)を対象に低真空、アルゴン雰囲気下で850℃における接合を行い、雰囲気、接合温度、加圧の影響を調査した。強度、延性および実用性の観点から、10Pa程度の低真空雰囲気下における接合が本実験条件において最適な条件であることがわかった。また、接合界面近傍が膨張するため、寸法精度が重要な場合は、加圧を低減する事が有効である。しかしながら、結晶粒が粗大化することが示された。1000℃で接合した場合は、強度と延性への影響は小さいものの、接合部の膨張が大きくなり、結晶粒もやや粗大になることが示された。

6 参考文献

- 1) 劉 恢弘，宮垣 徹也，釜井 正善，藤井 英俊：溶接学会秋季全国大会講演概要，12巻，3号，pp. 178-179 (2019)
- 2) 才田 一幸：溶接学会誌，71巻，3号，pp. 30-34 (2002)
- 3) 鴫田 正雄：塑性加工学会 接合・複合分科会 講演配布資料，pp. 1-10 (2017)。
- 4) 古畑 肇，大橋 修：日本金属学会誌，67巻，9号，pp. 448-451 (2003)
- 5) 中崎 一之，井上 達雄：材料システム，20巻，pp. 105-114 (2002)