

圧力と通電加熱を用いた炭素鋼と合金鋼の接合

菊竹 孝文*¹

Joining of Carbon Steel and Alloy Steel by Pressure and Energization Heating

Takafumi Kikutake

異鋼種の接合は、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、デジタル制御が可能な圧力と通電加熱(ジュール熱)を用いて炭素鋼と合金鋼の異鋼種を接合した。大気、アルゴン雰囲気、低真空下で接合した結果、低真空下が最も強度と延性が高かった。低真空下では、接合時の温度が上昇するにつれて接合界面の未接合部が減少したことに加え、界面近傍に延性の高いフェライト相が生成した。また、ニッケル系ろう材を使用することで接合界面にニッケル相が生成し、破断伸びが向上した。しかしながら、接合時の温度が上昇するにつれて、接合面近傍の幅が膨張した。

1 はじめに

熱交換器等の配管用鋼管には、Cr-Mo 含有合金鋼が用いられることが多く、実際の設備施工の際は合金鋼と炭素鋼(異鋼種)の溶接を要することがある。実際の施工時には溶接環境が様々であるため、溶接の難易度が高く、溶接不良による品質低下につながる可能性がある。そこで、すでに異鋼種の継ぎ手を作製しておけば、同種鋼材の溶接になるため、溶接の難易度が低減される。

近年、圧力と通電加熱(ジュール熱)を用いた異材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)接合するため、異材接合に適している。基本的な接合条件は、加圧力と電流量であり、これらを制御することで接合が可能であるため、熟練の技術や冶金学的知識を必要としない。また、材料を溶かさず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メリットがある¹⁾。

これまで放電プラズマ焼結を用いた鉄鋼材料の異材接合に関する研究はいくつか報告されている²⁾。しかしながら、炭素鋼と合金鋼を対象とする放電プラズマ焼結を用いた異鋼種接合の実用化例は少なく、基礎的なデータが十分とはいえない。そこで本研究では、放電プラズマ焼結による炭素鋼と合金鋼の接合における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

供試材料は S45C(炭素鋼)と SCM440(合金鋼)を用い、表 1 に示す 6 種類(A~F)の条件により接合した。図 1 に装置の外観、図 2 に接合方法の模式図および接合時の様子を示す。雰囲気は、大気、アルゴン雰囲気、低真空雰囲気とした。アルゴン雰囲気においては、低真空雰囲気に減圧後アルゴンガス置換を 3 回行い、接合中もアルゴンガス流入を継続した。低真空雰囲気は、10Pa 程度まで減圧した環境下で接合した。ろう材は、市販の Ni-Si-B 系アモルファスろう材(MBF-30、厚さ 40 μ m)を用いた³⁾。接合材はそれぞれ 19mm 角 $\times$ 42mm とし、接合面を#2000 の湿式研磨後、十分な脱脂を行った。熱電対は SCM440 側の接合界面から 10 mm の位置に ϕ 2mm $\times$ 3mm の穴開け、シース熱電対により内部温度を測定した。引張試験は、接合した試料か



図 1 放電プラズマ焼結装置外観

*1 機械電子研究所

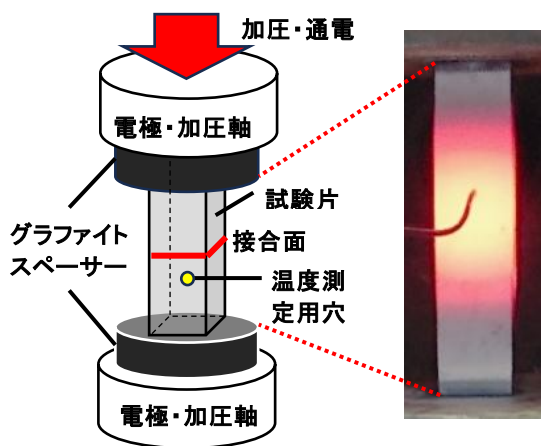


図2 放電プラズマ焼結の模式図および
接合時の様子

ら、板厚 2mm の試験片をそれぞれ 2 本採し、平均の引張強度、破断伸びを評価した。膨張率の測定は接合界面の縦×横の幅を測定し、元の面積 (19mm 角) と比較した。組織観察は、断面を鏡面研磨し、3% ナイタ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。試料 F については、接合界面近傍の EPMA (電子線マイクロアナライザー) 観察を行った。観察条件は、加速電圧 15kV、照射電流 5.0×10^{-8} A、ビーム径最小、ピクセル当たりの時間 15ms、点数 200×200 、間隔 $0.5 \times 0.5 \mu\text{m}$ とした。

3 結果

3-1 外観および形状変化

図 3 に接合後の試験片外観を示す。試験片 A の大気雰囲気では側面に酸化が見られた。試験片 B のアルゴン雰囲気では、接合界面近傍の酸化は少なかった。試験片 C～F の低真空雰囲気では、700℃ には若干酸化が見られたが、酸化は概ね抑制された。試験片 F のろう材を用いたものは側面にろう材がはみ出しており、ろうは十分に熔融したと考えられる。

図 4 に接合界面の断面膨張率を示す。700, 900℃

表 1 接合条件

試験片	A	B	C	D	E	F
加圧力 (MPa)	80					
温度 (℃)	900			700	1100	
時間 (分)	15					
ろう材	無					有
雰囲気	大気	Ar	低真空			

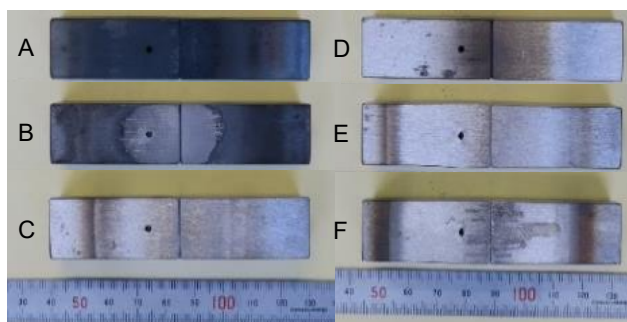


図3 接合後の外観 (表 1 の条件 A～F に対応)

で接合した場合の膨張率において、雰囲気の影響はほとんど無く、2%程度であった。一方、1100℃で接合した場合、ろう材の有無に関わらず膨張率が 10%程度と大きくなった。

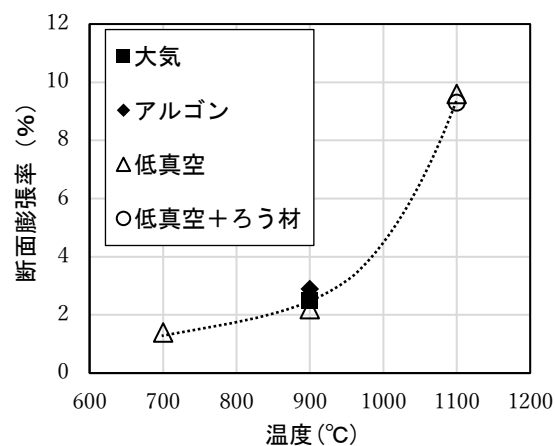


図4 接合界面の断面膨張率

3-2 機械的性質

図 5 に接合温度が 900℃ の場合について、それぞれの雰囲気において接合した試験片の引張試験結果を示す (条件は表 1 中の A～C)。大気中で接合した場合、引張強度、破断伸びがほとんど無かった。アルゴン雰囲気と低真空下では引張強度は同等であったが、破断伸びは低真空下の方が大きかった。また、すべての試験片において破断位置は接合部であった。

図 6 に低真空下での引張試験結果および接合温度が 1100℃ においてろう材を使用した結果を示す (条件は、表 1 中の C～F)。ろう材が無い場合は、接合時の温度が高くなるにつれて引張強さ、破断伸びが上昇した。同じ接合温度でろう材有無の影響を比較すると、破断伸びが倍以上に増加した。破断位置はろう材無しの場合は、すべての試料で接合部であった。一方、ろう材有りの場合は、破断位置はすべての試料において母材部であった。

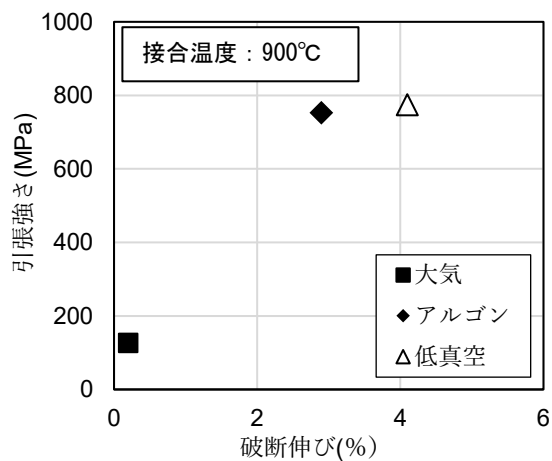


図5 引張強度および破断伸びに及ぼす接合雰囲気の影響

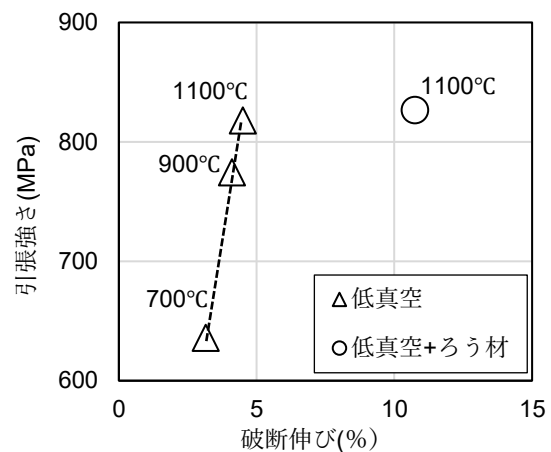


図6 引張強度および破断伸びに及ぼす接合温度およびろう材の影響

3-3 組織

図7に低真空下で接合した試験片(条件は、表1中のC~F)における接合界面近傍の組織観察結果を示す。700°Cで接合した場合は、接合界面上に連続する未接合部が観察された。900°Cで接合した場合は、部分的に未接合部が観察された。1100°Cで接合した場合は、

ろう材無しでは接合界面にフェライト相が、ろう材有りでは接合界面にNi相が一様に観察され、いずれも未接合部はほとんど観察されなかった。

図8に試験片FのEPMA観察結果を示す。接合界面近傍において、Niろうが溶融、拡散していた。また、接合界面の著しい酸化は見られなかった。

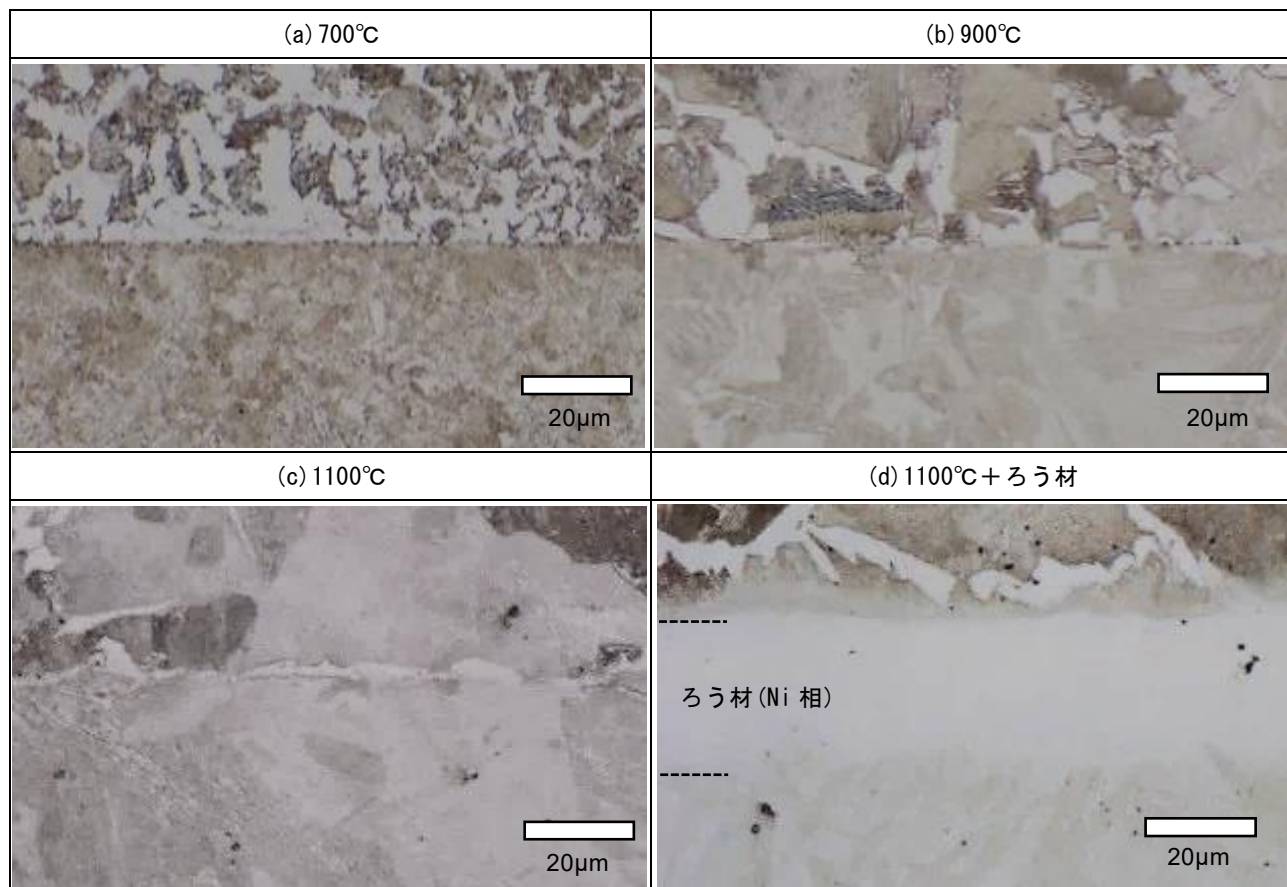


図7 接合界面近傍の断面組織(接合面より上：S45C，下：SCM440)

4 考察

900℃の条件で炭素鋼(S45C)および合金鋼(SCM440)を大気、アルゴン、低真空の雰囲気下で接合を行い、雰囲気の影響を調査した。大気雰囲気では、引張強度および破断伸びがほとんど無く、表面の酸化により接合ができなかったと考えられる。アルゴン、低真空雰囲気(10Pa程度)では、同程度の引張強度および破断伸びが得られたため、接合雰囲気の酸素濃度を低減することが重要であることがわかった。しかしながら、すべての試料において破断位置が接合部であった。図7(b)で示した様に、接合温度が900℃では未接合部が存在するため、接合強度が低下したと考えられる。

低真空下において接合温度の影響を調査した結果、接合温度を高くすることで接合強度と破断伸びが上昇した。この要因は、温度を高くすることで接合界面の溶融部が増え、未接合部が減少したためと考えられる。さらに、1100℃における接合界面には延性の高いフェライト相が一様に存在しており、延性が向上したと考えられる。しかしながら、700、900℃と同様に1100℃における破断位置も接合部であった。今回は10Pa程度の低真空下で接合を行ったが、油拡散ポンプ等を用いた高真空雰囲気下で接合を行うことで、さらなる接合品質の向上が期待できる。

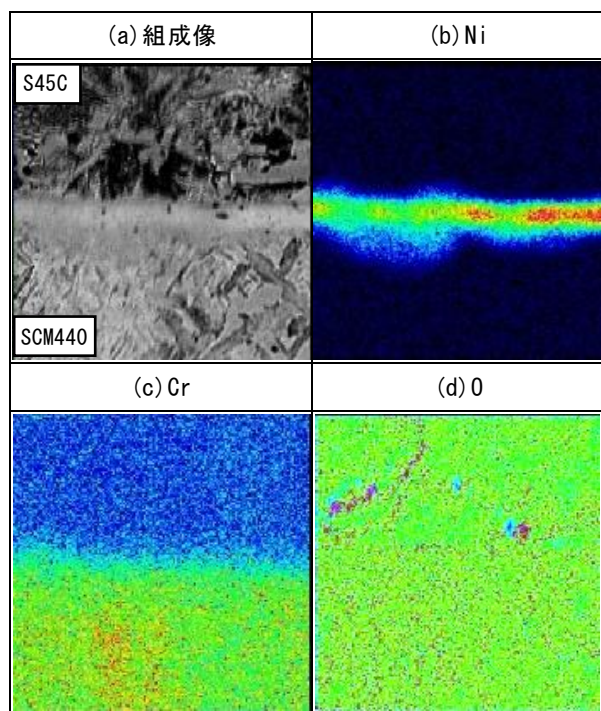


図8 試験片FのEPMA分析結果。(a)組成像、(b)Ni、(c)Cr、(d)O

また、1100℃の低真空下においてろう材を用いることで、ろう材無しの場合に比べて延性が倍以上に向上した。また、破断位置は母材側であった。本試験条件では、低真空、1100℃の温度でろう材を用いた接合が最も接合品質に優れていた。これは、接合界面でろう材が溶融、拡散し延性の高いNi相が形成したためと考えられる。

一方、形状の変化については、雰囲気やろう材の有無に関わらず、接合温度の上昇に伴って接合界面の断面膨張率が増加した。温度が1100℃の場合、断面膨張率は10%程度あり、実際に本手法を用いて接合をする場合は、形状を修正する後工程が生じる可能性がある。今回使用したNi-Si-B系ろう材(MBF-30)の液相線温度は約1040℃⁴⁾であり、少なくとも約1070℃以上の接合温度が必要と考えられるため、変形を抑制するためにはより低温で溶融するろう材を検討する必要がある。また、接合時の形状変化を抑制できるような治具を用いることで、変形を改善できる可能性が考えられる。今後は変形を考慮した接合温度、強度および延性のバランスを考慮した最適接合条件を確立する必要がある。

5 まとめ

炭素鋼(S45C)および合金鋼(SCM440)を大気、アルゴン、低真空の雰囲気下で接合し、雰囲気が接合に与える影響を調査した。アルゴン雰囲気と低真空雰囲気は引張強さが同等であり、延性は低真空雰囲気が高かった。低真空雰囲気において、700～1100℃の温度で接合を行った場合は、1100℃が最も強度および延性が高く、接合面にろう材を挟むことで延性は倍以上に向上した。

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) 西尾 一政, 中村 憲和, 加藤 光昭: 溶接学会論文集, 20巻(4号), pp. 523-530 (2002).
- 4) 中尾 嘉邦, 西本 和俊, 篠崎 賢二, 姜 晶允, 堀裕仁: 溶接学会論文集, 7巻, 3号, pp. 83-89 (1989)