

ファイバーレーザー溶接を用いた二相ステンレス鋼溶接継手の機械的特性と耐食性を考慮した溶接継手部の健全性評価に関する研究

北海道科学大学 寒地先端材料研究所
教授 齋藤 繁

(2019 年度 一般研究開発助成 AF-2019218-B3)

キーワード：ファイバーレーザー溶接，二相ステンレス鋼，溶接金属

1. 研究の目的と背景

近年、自動車車体の軽量化を目的に、抵抗スポット溶接による点溶接からファイバーレーザー溶接による連続溶接に転換するといったニーズが高まっている。ファイバーレーザー溶接は抵抗スポット溶接と比較して溶接時間を大幅に短縮することができ、溶接速度が速く、高精度の溶接が可能である。さらに、ひずみや焼けが少なく、高品質な仕上がりとするため、他の溶接工法に比べて溶接継手強度が優れている。

フェライト相とオーステナイト相の二相組織からなる二相ステンレス鋼は高強度かつ耐食性に優れており、オーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)と比較して約 2 倍の高強度を有する¹⁾。そのため、構造材の板厚を薄くすることで軽量化や使用量を削減することが可能となる。本研究で用いた二相ステンレス鋼(SUS821L1)の耐食性は SUS304 と同等であるため、主に河川内設備や化学プラントなどの構造材として使用されている。一方、北海道のような積雪寒冷地で使用される大型機械部品の構造材には高強度と軽量化、さらには耐食性も求められる。そのため、二相ステンレス鋼板同士の突合せ溶接にファイバーレーザー溶接を適用し、ファイバーレーザー溶接の溶接適正条件の確立を目指している。

そこで本研究では、ファイバーレーザー溶接を用いて二相ステンレス鋼板同士の突合せ溶接を行い、溶接継手における断面組織と機械的特性との関係について検討した。また、実機使用環境における溶接継手の健全性評価について検討するため、耐食性を考慮して過酷な複合腐食試験を施した突合せ溶接試験片の引張強度特性について検討した。

2. 実験方法

本研究で用いた二相ステンレス鋼は化学成分 (mass%) Fe-21Cr-2Ni-3Mn-1Cu-0.17N からなる SUS821L1 であり、幅 32mm、長さ 280mm、厚さ 1mm の板状にレーザー切断されたものである。

図 1 は、本研究で用いたファイバーレーザー溶接システムと溶接の様子を示し、多関節ロボットに取り付けられた溶接ヘッドによって溶接施工が自動化される。ファイバーレーザー溶接の条件はレーザー出力 1kW、溶接速度 2000mm/min で行い、アシストガスに窒素を用いた。なお、レーザー出力 1kW では溶込み不足による未貫通溶接が確認されたため、

レーザー出力を 2kW に変更した。開先突合せ部は I 型開先とし、作製した突合せ溶接試験片からは 12mm 角にそれぞれレーザー切断して溶接継手小片を 15 個採取した。レーザー切断およびファイバーレーザー溶接は(株)トリパス石狩工場で行った。図 2 は、溶接継手小片の外観を示す。図中の上部と下部はそれぞれ二相ステンレス鋼板であり、中央部に溶接ビードが形成されている。レーザー切断後の溶接継手小片は樹脂埋めした後、溶接継手小片に対して、垂直方向に切断した。溶接継手小片の切断面は、ダイヤモンド研磨材により鏡面研磨した後、10% しょう酸電解エッチングを行い、光学顕微鏡を用いて溶接継手小片の断面組織観察を行った。



図 1 本研究で用いたファイバーレーザー溶接システムと溶接の様子

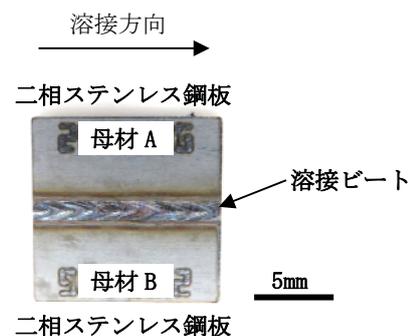


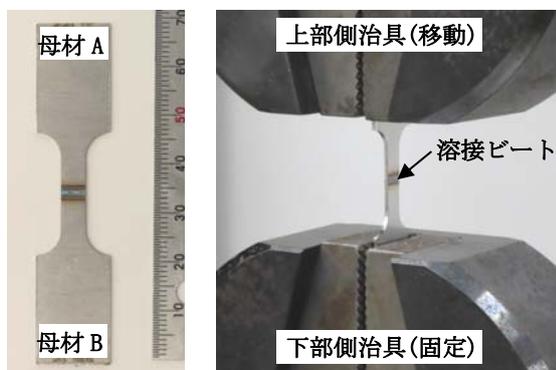
図 2 溶接継手小片の外観

溶接継手小片の溶接部断面近傍における硬さ測定には、マイクロビッカース硬さ試験機を使用した。硬さ測定位置は、二相ステンレス鋼板の表面側および裏波側から 0.2mm の深さと板厚の中央部(3列)の計5列を測定間隔 0.15mm で行い、試験力は 1.961N とした。

ファイバーレーザー溶接を施した溶接継手の引張強度特性を検討するため、二相ステンレス鋼板同士の突合せ溶接を行った後、レーザー切断で引張試験用突合せ溶接試験片を作製した。引張試験用突合せ溶接試験片は JIS Z 2241 に準拠し、全体の長さ 70mm、幅 15mm とし、平行部の長さ 15mm、幅 5mm の形状になるようにレーザー切断を行った。比較のため、板状の二相ステンレス鋼(SUS821L1)およびオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)から、引張試験用突合せ溶接試験片と同一の形状にレーザー切断し、それぞれ未溶接試験片として引張試験に供した。

図3は、引張試験用突合せ溶接試験片の外観とチャッキング時の様子を示す。引張試験用溶接試験片は図に示すように上部の二相ステンレス鋼板 A と下部の二相ステンレス鋼板 B が突合せ溶接されており、中央部には溶接ビードが確認できる。引張試験にはテンシロン万能材料試験機を使用し、標線間距離 15mm、チャック間距離 30mm とした。引張試験用突合せ溶接試験片の向きは図に示すように溶接ビードがいずれも同じ方向になるように固定した。引張試験用溶接試験片は下部(母材 B)側治具を固定し、上部(母材 A)側治具は引張方向に移動する。引張試験のクロスヘッド変位速度は 3mm/min とし、引張試験中はデータ処理システムを用いてデータを収集した。引張試験には溶接開始直後(No. 4)、中間箇所(No. 9)、終了直前(No. 15)の引張試験用突合せ溶接試験片をそれぞれ使用した。引張試験前および引張試験後における突合せ溶接試験片は樹脂埋めした後、二分割に切断した。各溶接試験片の切断面は、ダイヤモンド研磨材により鏡面研磨した後、10%しゅう酸電解エッチングを行い、光学電子顕微鏡を用いて断面組織観察を行った。

二相ステンレス鋼板



二相ステンレス鋼板

図3 引張試験用溶接試験片の外観とチャッキング時の様子

ファイバーレーザー溶接を施した溶接継手の耐食性を検討するため、二相ステンレス鋼板同士の突合せ溶接試験片に対して複合腐食試験を行った。試験方法は JIS H 8502 に準拠し、塩水噴射(5%NaCl、35℃)を 2h、乾燥(60℃)を 4h、湿潤(95%RH、35℃)を 2h の計 8h を 1 サイクルとして 96 サイクルを実施した。複合腐食試験後の引張試験用突合せ溶接試験片は、前述のようにテンシロン万能材料試験機を使用し、標線間距離 15mm、チャック間距離 30mm、クロスヘッド変位速度 3mm/min として引張試験を行った。

3. 実験結果および考察

3・1 レーザ出力 1kW における二相ステンレス鋼溶接継手小片の断面組織とビッカース硬さ

図4は、レーザー出力 1kW でファイバーレーザー溶接を施した二相ステンレス鋼溶接継手小片における溶接部近傍の断面組織一例を示す。断面組織より、二相ステンレス鋼板(母材 A と母材 B)間には溶接金属が形成され、溶込み形状は図4に示すように溶接金属の上部の幅が広く、裏波側は溶込み幅が狭くなるワインカップ形状であり、貫通溶接されていることがわかる。

図5は、レーザー出力 1kW でファイバーレーザー溶接を施した二相ステンレス鋼溶接継手小片における溶接部近傍の断面組織とマイクロビッカース硬さ試験結果一例を示す。断面組織より、二相ステンレス鋼板(母材 A と母材 B)間にはいずれの溶接継手小片(計 15 個)においても、溶接金属が形成されている。一方、溶接継手小片の一部には図に示すように鋼板の裏波側に溶込み不足からなる未貫通溶接部が確認され、レーザー光の出力不足により十分な溶込み深さが得られなかったと考えられる。断面組織における表面側のマイクロビッカース硬さ試験結果より、二相ステンレス鋼板(母材 A および母材 B)のビッカース硬さは 249~264HV の範囲であるのに対し、溶接金属におけるビッカース硬さは 280~305HV の範囲であった。すなわち、溶接金属は二相ステンレス鋼板(母材 A および母材 B)と比較して 40~50HV 程度硬化する傾向を示した。

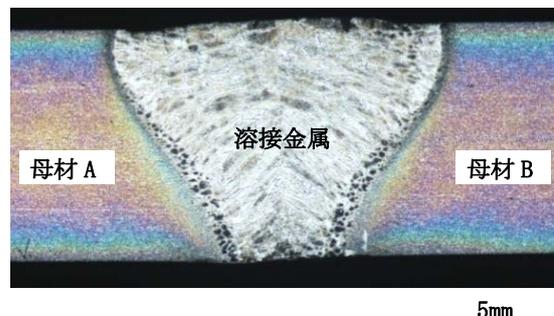


図4 二相ステンレス鋼溶接継手小片における溶接部近傍の断面組織(レーザー出力: 1kW)

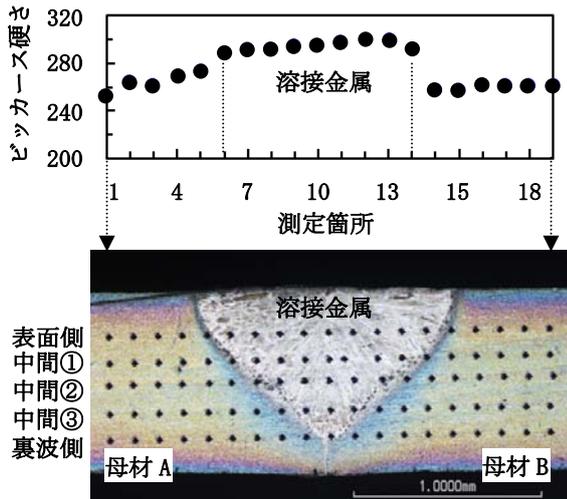


図5 二相ステンレス鋼溶接継手小片における溶接部近傍の断面組織とマイクロビッカース硬さ試験試験結果(レーザー出力：1kW)

3・2 レーザ出力 2kW における二相ステンレス鋼溶接継手小片の断面組織

図6は、レーザー出力 2kW でファイバーレーザー溶接を施した二相ステンレス鋼溶接継手小片における溶接部近傍の断面組織一例を示す。レーザー出力 2kW における断面組織より、断面組織は溶接開始直後(a) #1 と(b) #3、溶接中間位置(c) #7 と(d) #10 および溶接終了付近(e) #13 と(f) #15 において、いずれも貫通溶接されており、溶接金属はワインカップ状を有している。本研究では、ファイバーレーザー溶接を施した二相ステンレス鋼溶接継手小片(計 15 個)に対して溶込み不足による未貫通溶接部が生じていないことを確認した。そのため、引張試験用突合せ溶接試験片の作製

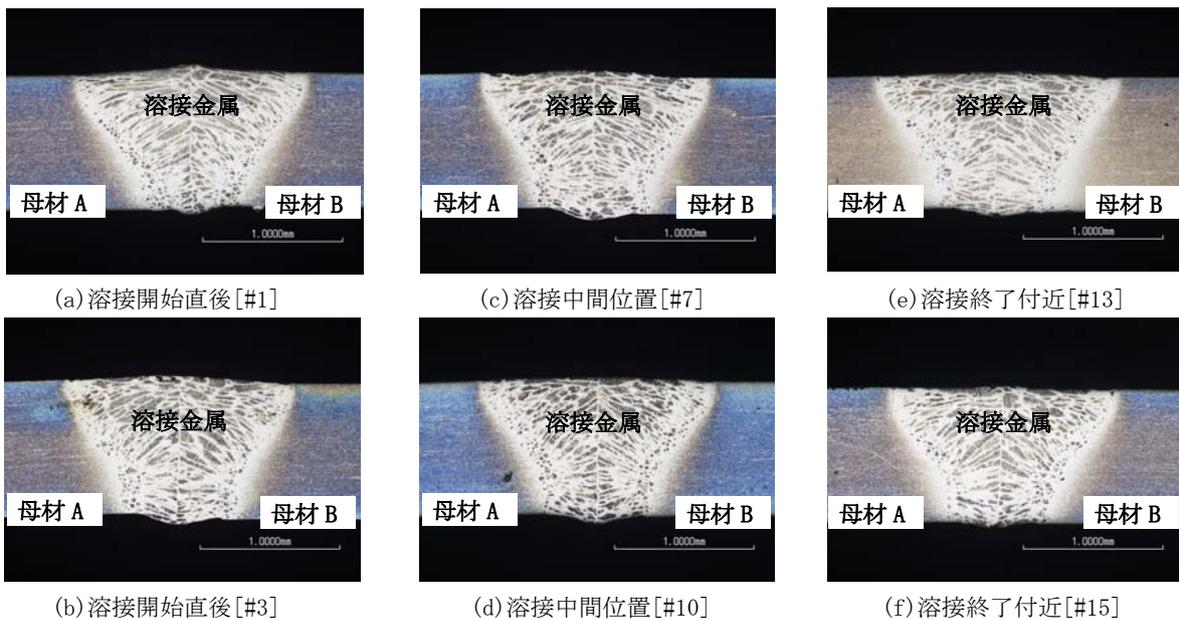


図6 二相ステンレス鋼溶接継手小片における溶接部近傍の断面組織(レーザー出力：2kW)

におけるファイバーレーザー溶接の条件はレーザー出力 2kW、溶接速度 2000mm/min で行った。

3・3 引張試験用突合せ溶接試験片の引張強度特性

図7は、破断後における引張試験用突合せ溶接試験片の外観と破断部近傍の断面組織を示す。破断後の引張試験用突合せ溶接試験片は、図7(a)に示すように二相ステンレス鋼板(母材 A)側に溶接ビードが残存していることがわかる。なお、断面組織は図7(a)中の母材 A 側における黒色枠で囲んだ部分を観察した。破断部近傍の断面組織は母材 A と溶接金属が共存しているのに対し、母材 B の裏波側には一部母材 B と見られる部分が確認できる。

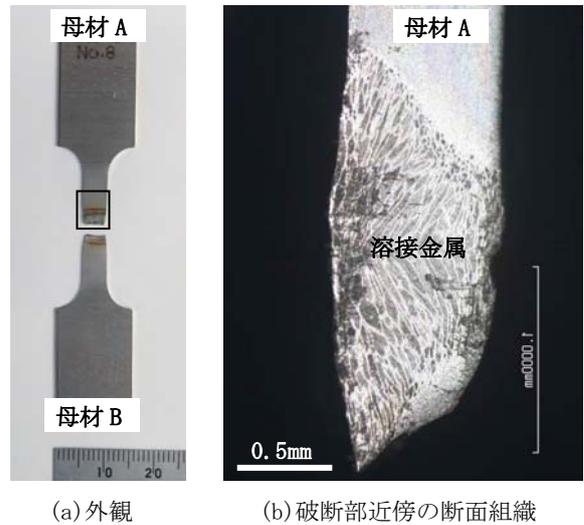


図7 破断後における引張試験用突合せ溶接試験片の外観と破断部近傍の断面組織

図8は、引張試験用突合せ溶接試験片の荷重-伸び線図を示す。本研究では、引張試験用突合せ溶接試験片の上部(母材 A)側を固定する治具を移動させるクロスヘッドの移動量を測定した。また、図中には未溶接試験片の二相ステンレス鋼(SUS821L1)とオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)の結果を示している。これらの結果より、突合せ溶接試験片は図中の青色線で示すように明瞭な降伏現象が見られず、一般的なステンレス鋼と同様の傾向を示した。また、突合せ溶接試験片の最大荷重は約3.9kNであり、図中の赤色線で示す未溶接試験片(SUS821L1)とほぼ同程度であるのに対し、伸びは減少することが明らかになった。破断後の断面組織観察では、溶接金属中のオーステナイト相とフェライト相の量比が大幅に変化しており、母材と大きく異なることが知られている²⁾。特に、破面の組織がデインブルと呼ばれる延性破壊によって生じる破面状態を示しており、この差異については破断部とその近傍の組織観察および元素分析を行い、詳細に検討する必要がある。

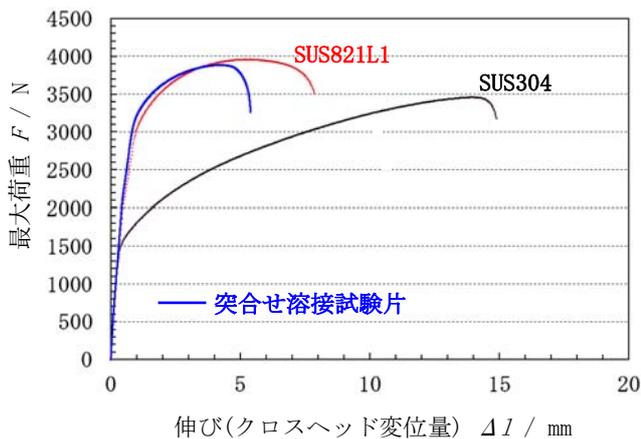


図8 引張試験用突合せ溶接試験片の荷重-伸び線図

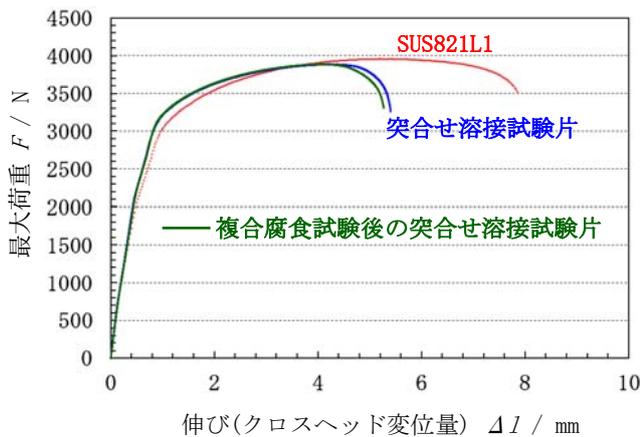


図9 複合腐食試験後における引張試験用突合せ溶接試験片の荷重-伸び線図

図9は、複合腐食試験後における引張試験用突合せ溶接試験片の荷重-伸び線図を示す。複合腐食試験後の突合せ溶接試験片は、図中の緑色線で示すように引張試験用突合せ溶接試験片(赤色線)とほぼ同程度の傾向を示しており、複合腐食試験による引張強度特性の低下は見られなかった。

本研究の一連の結果から、ファイバーレーザー溶接を施した二相ステンレス鋼板の突合せ溶接継手においては引張強度特性に関する新たな知見を得ることができた。したがって、溶接継手部の組織形態と機械的特性との関係を把握することにより、突合せ溶接継手の機械的特性に起因する支配因子の解明を明らかにすることができる。

4. 結論

本研究では、ファイバーレーザー溶接を用いて二相ステンレス鋼板同士の突合せ溶接を行い、溶接継手部における断面組織と機械的特性との関係について検討した。また、実機使用環境における溶接継手の健全性評価について検討するため、耐食性を考慮して過酷な複合腐食試験を施した突合せ溶接試験片の引張強度特性について検討した。得られた結果は、以下のように要約される。

- (1) レーザ出力2kWにおいて、未貫通溶接部が生じない溶接継手小片を得ることができた。
- (2) 二相ステンレス鋼板(母材Aと母材B)間には溶接金属が形成され、ワインカップ形状で貫通溶接される。また、溶接金属は二相ステンレス鋼板と比較して硬化する傾向を示した。
- (3) 引張試験用突合せ溶接試験片の最大荷重は約3.9kNであり、未溶接試験片(SUS821L1)とほぼ同程度であるのに対し、伸びは減少した。
- (4) 複合腐食試験後の突合せ溶接試験片は、引張試験用突合せ溶接試験片とほぼ同程度の傾向を示し、複合腐食試験による引張強度特性の低下は見られなかった。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、複合腐食試験の実施にご協力頂いた地方独立行政法人北海道立総合研究機構の櫻庭洋平氏に厚く御礼申し上げます。また、本研究は公益社団法人天田財団の2019年度一般研究開発助成(AF-2019218-B3)を受けて実施されたものであり、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 加賀祐司:JSSC, AUTUMN No.19 (2014), 3.
- 2) 大村朋彦, 榎田隆弘, 小溝裕一:溶接学会誌, Vol.68 No.6(1999), 37.