

Close Up

鉄鋼材料のレーザハイブリッド 摩擦攪拌接合

藤井 英俊・中田 一博・野城 清

大阪大学接合科学研究所

1 はじめに

摩擦攪拌接合 (FSW) の適用は、アルミニウム合金をはじめとする低融点材料に留まらず、最近では、鉄鋼材料^{1)~12)} やチタン¹³⁾、白金¹⁴⁾、モリブデン¹⁵⁾ など比較的高融点材料の接合に成功が報告されている。

1991年に英国TWIで開発されたFSW¹⁶⁾ は、従来の溶接法にない種々の優れた特徴を有し、わが国ではこの15年余りの間に鉄道車両、土木構造物、船舶、自動車を中心としてさまざまな分野で実用化されてきた^{17)~22)}。

しかしながら、実用化はほとんどAl合金に限られており、構造物の多くを占める鉄鋼材料をはじめとした比較的融点の高い材料に関しては、ツールおよび装置に対する負荷の低減など解決しなければならない課題が残されており、依然実現していない^{21), 22)}。

そこで本研究では、接合部における欠陥発生抑制やツールへの負荷低減などにより高融点材料のFSWをより容易にすることを目的として、レーザ熱源を用いてツール前方部を局部的に加熱した後FSWするという新しい接合プロセスを紹介し、鉄鋼材料の摩擦攪拌接合に対する有効性を述べる。

2 実験方法

図1にレーザハイブリッドFSWの概念図を示す。本研究では、荷重制御方式によるFSW装置を用いて接合を行った。先行加熱源としてはYAGレーザを用い、出力2.0kW、ビームヘッド角度45°の条件でツール前方部を局部加熱した。一般的にFSWでは、前進側に欠陥を生じやすいため、照射位置を接合界面から前進側に3mmずらした位置に照射した。

供試材としては、表1に化学組成を示す、50mm^W×300mm^L×3.2mm^Tの一般構造用圧延鋼 (SS400) を用いた。あらかじめ試料の接合部界面を機械加工し、表面をグラインダで研磨した試料を脱脂したのちに裏板上で突合せ、クランプで裏板に固定した。

次に、ツールを時計まわりに回転させながら突合せ面に挿入しFSWを行った。なお、接合中は装置全体の温度上昇を防止するためにツールホルダ内部に冷却水を循環させ、さらに試料表面の酸化を防止するためにArガス雰囲気中で行った。ツールには一般の(市販の)超硬合金を用い、ショルダ径15mm、プローブ径6mmとした。FSW条件は、Ar雰囲気中で回転速度400rpm、接合速度100~800mm/minとしてI型突合せ接合を行った。また比較のため、先行加熱のない通常のFSWも接合速度50~700mm/minで行った。

接合後、それぞれの継手に対して断面組織観察、硬さ試験、引張試験により継手特性を検討した。接合部断面組織は、接合方向に垂直な横断面についてマクロおよびミクロ組織観察を行った。その後、腐食液として3%ナ

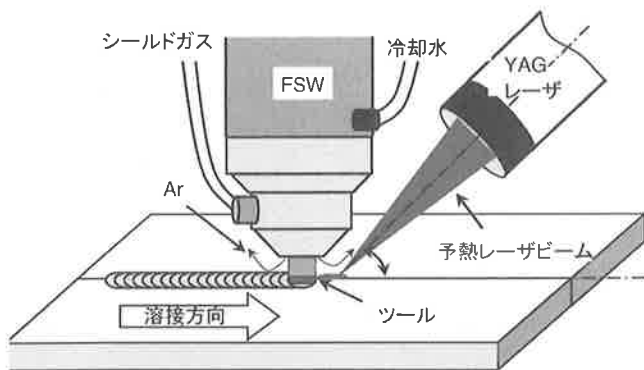


図1 ハイブリッドFSWの概念図

表1 用いた鋼材の化学組成

	化学組成 (mass%)					
	C	Si	Mn	P	S	Fe
SS400	0.16	0.01	0.49	0.015	0.006	Bal.

イタール溶液を用いて試料表面を腐食し、光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡にて組織観察を行った。硬さ試験は、接合部断面の水平方向へ0.5mm間隔で測定した。測定条件は、測定圧子の荷重を0.98N、荷重保持時間を15sとした。

引張試験は、継手強度を測定するためにJIS13B号定型試験片を用い、攪拌部の強度を測定するために、平行部がすべて攪拌部からなる小型引張試験片を放電加工機で作製し、それを用いた。試験は室温にてインストロン万能試験機を用いてクロスヘッド速度1.0mm/minで行った。

3 実験結果

図2に接合速度400mm/minで行った通常のFSWおよび接合速度400および800mm/minで行ったレーザーハイブリッドFSWの代表的な継手断面マクロ組織を示す。通常のFSWでは、接合速度50~300mm/minにおいて欠陥のない継手を得られたが、(a)に示すように接合速度400mm/minでは攪拌部の前進側(AS)に微細な欠陥が

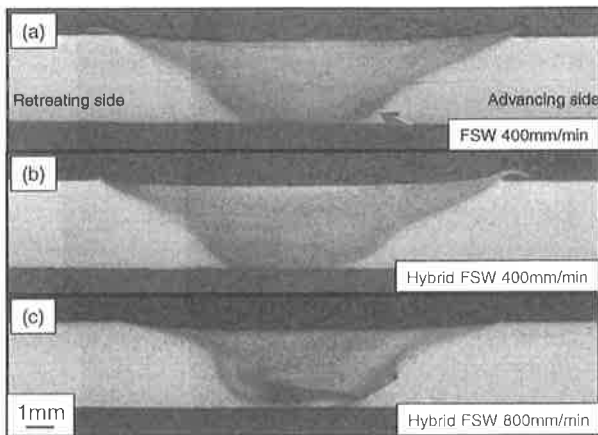


図2 継手のマクロ断面 (a) 通常のFSW, (b) (c) ハイブリッドFSW継手

発生した。また、これ以上の接合速度ではツールが破断し、接合が不可能であった。一方、レーザーハイブリッドFSWでは、(b)に示す接合速度400mm/minをはじめとして接合速度800mm/minまでは欠陥のない継手を得ることができた。すなわち、レーザーハイブリッドFSWを適用することで欠陥の発生を抑制し、適正な接合速度範囲を拡大することができた。

前述のように、レーザーハイブリッドFSWでは、まずYAGレーザーによってツール前方部の局所加熱を行い、その直後にツールが通過することで継手を形成する。図3(a)(b)に接合速度400mm/minレーザーハイブリッドFSWの攪拌部マイクロ組織を示す。この条件では、レーザーによる溶込み深さが板厚の半分程度にまで達し、試料は十分に予熱されたと判断できる。また、レーザーの通過する部分は、図3(a)に示すように熔融凝固組織を形成する。図3(b)はツールが通過後の攪拌部組織であり、レーザー通過の際に形成した凝固組織は消滅し、通常のFSWの場合と極めて類似した微細な攪拌部組織が得られることがわかる。

これらの結果から、レーザーハイブリッドFSWでは、先行するレーザーはあくまでも予熱に過ぎず、最終組織には大きな影響を及ぼさないとと言える。

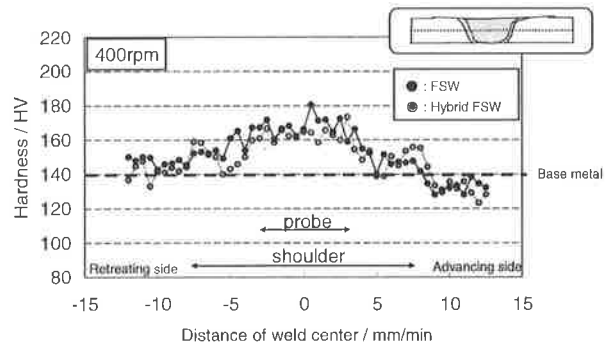


図4 ハイブリッドFSW継手と通常FSW継手の硬度分布 (400mm/min)

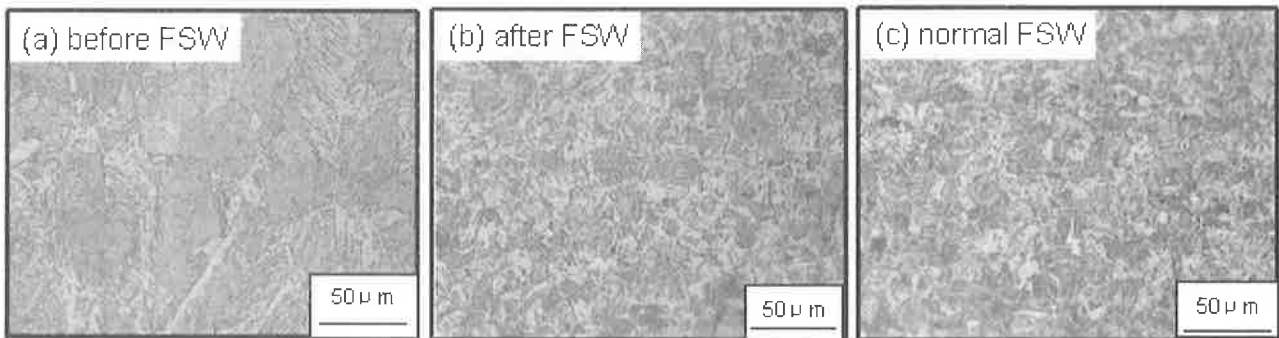


図3 接合部の微細組織 (a) ハイブリッドFSW, FSW前 (レーザーのみ), (b) ハイブリッドFSW, FSW後, (c) 通常FSW (いずれも400mm/min)

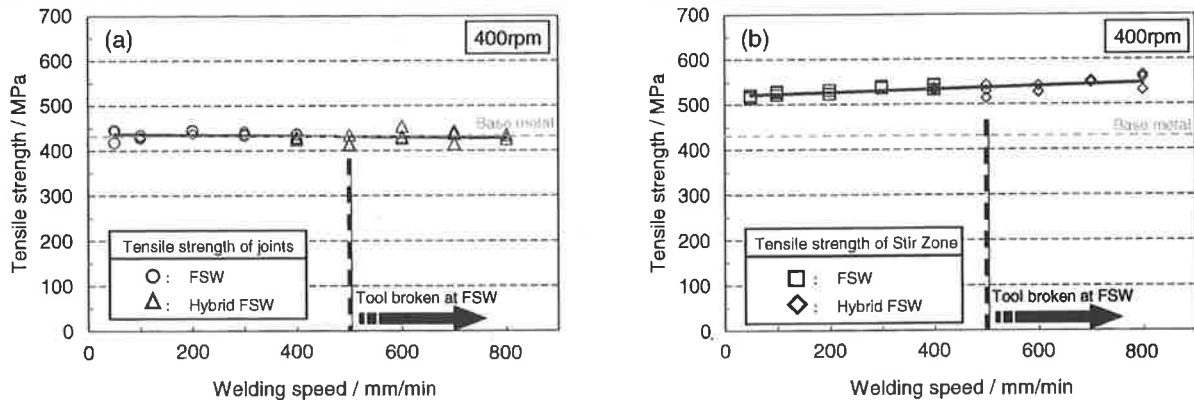


図5 (a) 継手および (b) 攪拌部の引張強さに及ぼす接合速度の影響

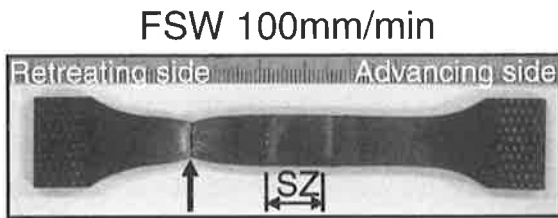


図6 破断した引張強度試験片

図4は溶接方向に垂直な断面の硬さ分布に及ぼすレーザー照射の影響を示している。この時、接合速度は400mm/minである。当初、予熱の際に形成する凝固組織が攪拌部に残存し硬さ分布にバラツキを呈することも考えられたが、実際には、通常のFSWの場合とまったく同等の硬さ分布を得られた。レーザーハイブリッドFSWでもツールの通過の際にツールの攪拌作用によって動的再結晶が生じることで凝固組織は完全に消滅し、図3(c)に示したように通常のFSWと極めて類似した組織が形成したためである。

図5(a)に通常のFSWおよびレーザーハイブリッドFSWの継手の引張強さを示す。FSWの接合速度50~400mm/minの継手は、図6に示すように、すべて母材破断した。しかしながら、接合速度600および700mm/minでは接合が不可能であった。一方、レーザーハイブリッドFSWにおいては、400~800mm/minのすべての接合速度で図6(b)に示すように母材破断を示した。

SS400の母材強度は438MPaであり、すべての継手で母材同等の強度が得られている。このように、JIS Z 2201形状のすべての引張試験片は母材で破断し、接合部の強度を調べるのに不適切であったため、接合部がすべて平行部によってカバーされた小さな引張試験片を用いて、攪拌部の機械的特性を調べた。

このようにして測定したFSWおよびレーザーハイブリッドFSWの攪拌部のみの引張強さを図5(b)に示す。攪拌

部の引張強さは母材強度よりも高い値を示した。一方、FSWおよびレーザーハイブリッドFSWの接合プロセスの違いは引張強さに対して顕著な影響は及ぼさず、ともに接合速度が増加するに従って攪拌部強度が徐々に上昇するという傾向が見られた。

図7は、攪拌部の微細組織に及ぼす接合速度の影響を示している。図7(a)および(b)は通常のFSWによって得られた組織であり、図7(c)はレーザーハイブリッドFSWによって得られた組織である。図7(c)は、接合速度800mm/minでレーザーハイブリッドFSWを実施した接合部の断面中央部の組織を示している。

微細組織はレーザーの有無には依存せず、溶接速度に著しく依存する。両プロセスで得られた微細組織は同じ接合速度では同様であるが、前述したように、レーザーハイブリッドFSWによって溶接速度を増加させることが可能である。その結果、レーザーハイブリッドFSWでは、より組織を微細化することが可能で、接合部の強さは通常のFSW継手より高くなる。

4 おわりに

レーザーによる局部加熱源を利用して接合部欠陥発生の抑制やツール負荷を低減することにより、鉄鋼材料のFSWを容易にすることを目的としてSS400に対して『レーザーハイブリッド摩擦攪拌接合』を適用し、接合を行い、組織および機械的特性を評価した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) レーザーハイブリッドFSWを適用することで微細な欠陥を抑制することができ、接合速度を大幅に向上させることが可能である。今後の実用化に向けて有望な手法の一つとなり得る。
- (2) 先行加熱の際に溶融凝固組織が形成する場合であっても、その後通過するツールによって凝固組織は消

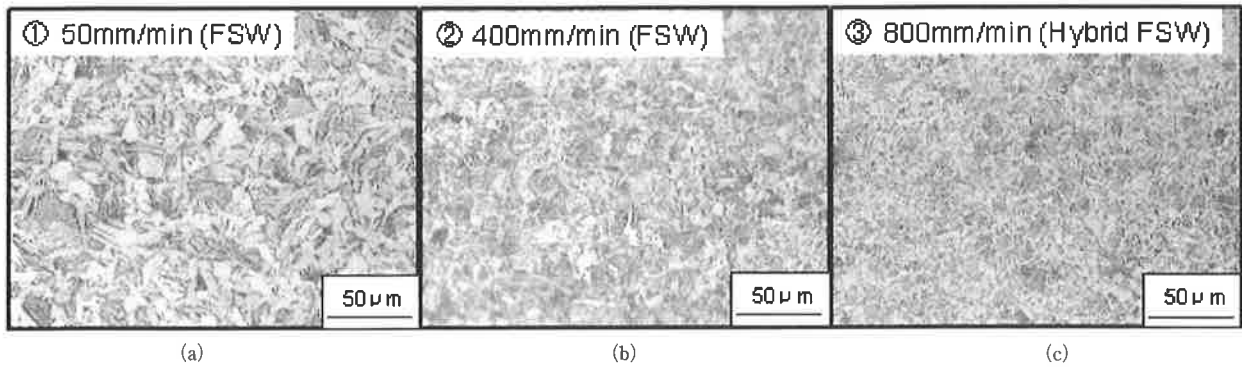


図7 攪拌部の微細構造に及ぼす接合速度の影響
 (a) 通常FSW
 (b) 通常FSW
 (c) ハイブリッドFSW

減し、通常のFSWと同様な微細な攪拌部組織を得ることができる。

- (3) 接合速度が上昇するに従って単位長さ当りの入熱が減少し、結晶粒が微細化する。
- (4) レーザハイブリッドFSWの接合部継手引張試験では、すべての条件で母材破断を示し、母材と同等の強度を得ることができた。攪拌部引張試験では、レーザハイブリッドFSWと通常のFSWを比較すると、接合プロセスによる顕著な差異は見受けられず、ともに接合速度が増加するに従って攪拌部強度は上昇する傾向を示した。しかしながら、レーザハイブリッドFSWの方が高速度まで接合ができるため、結果としてレーザハイブリッドFSW継手の方が高強度となる。これらの結果は、組織観察と対応がとることができ、接合速度が上昇するに従って、攪拌部組織が微細化になることが原因である。

謝 辞

本研究は、全国共同利用附置研究所連携事業（金属ガラス・無機材料接合技術開発拠点）、グローバルCOE、日本学術振興会の科学研究費、東レ科学技術振興助成、日本鉄鋼協会鉄鋼研究振興助成、岩谷科学技術財団研究助成の成果である。

参 考 文 献

- 1) W.M. Thomas, P.L. Threadgill and E.D. Nicholas: Sci. Technol. Weld. Joi., Vol. 4 (1999), p365.
- 2) T.J. Lienert, W.L. Stellwag, B.B. Grimmer and R.W. Warke: Weld. J., Vol. 82 (2003), p1s.
- 3) A.P. Reynolds, W. Tang, M. Posada and J.DeLoach: Sci. Technol. Weld. Joi., Vol. 8 (2003), p455.
- 4) P.J.Konkol, C.J.A.Mathers, R. Johnson and J.R.Pickens: J. Ship Prod., 19 (2003), p159.
- 5) S. H. C. Park, Y. S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano and M. Inagaki: Scripta Mater., Vol.51 (2004), p101.
- 6) A.Ozekcin, H.W.Jin, J.Y.Koo, N.V.Bangaru and R.Ayer: Intern. J. Offshore Polar Eng., 14 (2004), p284.
- 7) H. Fujii, R. Ueji, Y. Takada, H. Kitahara, N. Tsuji, K. Nakata and K.Nogi: Mater. Trans., Vol. 47 (2006), p239.
- 8) H. Fujii, L. Cui, N. Tsuji, M. Maeda, K. Nakata and K. Nogi: Mater. Sci. Eng. A, Vol. 429 (2006), p50.
- 9) R. Ueji, H. Fujii, L. Cui, A. Nishioka, K. Kunishige and K.Nogi: Mater. Sci. Eng. A, Vol. 423 (2006), p324.
- 10) L. Cui, H. Fujii, N. Tsuji, K. Nakata and K. Nogi, R.Ikeda and M.Matsushita: ISIJ International, Vol. 47 (2007), p299.
- 11) L.Cui, H. Fujii, N. Tsuji and K. Nogi: Scripta Mater., Vol. 56 (2007), p637.
- 12) Y.S.Sato, H.Yamanoi, H.Kokawa and T.Furuhara: Scripta Mater., 57 (2007) p557.
- 13) H.Fujii, H.Kato, K.Nakata and K.Nogi, Ceram. Trans., 198 (2007) p51.
- 14) 日刊工業新聞, 2005年8月22日
- 15) H.Fujii, H.Kato, H.Fujii, H.Kato, K.Nakata and K.Nogi, Proc. 6th Int. FSW Symp., Montreal, Canada, 10-13 October,
- 16) W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needhan, M. G. Murch, P. Temple-Smith, and C. J. Dawes: International Patent Application PCT/GB92/02203 and GB Patent Application 9125978.8, UK Patent Office, London, December 6, 1991.
- 17) H. Okamura, K. Aota, and M. Ezumi: J. Jpn. Inst. Light Met., 50 (2000),166.
- 18) G. Campbell and T. Stotler: Welding J., 78 (1999), 45.
- 19) M. R. Johnsen: Weld. J., 78 (1999), 35.
- 20) K. E. Knipstron and B. Pekkari: Weld. J., 76 (1997), 55.
- 21) C. J. Dawes and W. M. Thomas: Weld. J., 75 (1996), 41.
- 22) H.J.Liu, H.Fujii, M.Maeda and K.Nogi: J. Mater. Proc. Tech., 142 (2003), 692.
- 23) 摩擦攪拌接合—FSWのすべて—, 溶接学会編, 産報出版 (2006).
- 24) 藤井英俊: 軽金属学会, 57 (2007) p499.