ガラス繊維架橋効果による
摩擦攪拌線接合(FSW)継手の耐久性能向上

岡山大学　学術研究院環境生命自然科学学域
研究准教授　荒川　仁太
(2023 年度 一般研究開発助成 AF-2023008-B2)

キーワード：FSW 溶接継手，疲労強度，疲労き裂進展

1．研究の目的と背景

各材料の特性を生かしてそれらを併用するマルチマテリアル化が行われている [1,2]．その際，軽金属の利用が積極的に行われており，その筆頭がアルミニウム合金である．こうした背景からアルミニウム合金やその他金属を対象に摩擦攪拌接合継手を作製し，その機械的特性や疲労強度を評価した研究成果が多く報告されている [3-6]．著者らも前報 [7]では，一般的に広く使用されている A5052 アルミ合金を対象として，その FSW 継手を作製し，ミクロ組織を EBSD によって観察するとともに疲労試験を実施し，疲労寿命曲線を取得した．また，簡易的な有限要素解析モデルを使用した数値計算の結果として算出された相当応力拡大係数範囲を用いて，FSW 継手のスリット先端から生じる疲労き裂の進展方向を予測することに成功した．一方で，前報の結果より図 1 に示すような疲労寿命曲線において，低荷重振幅域で顕著に寿命延伸することがわかった．しかしながら，この要因を明らかにするには至っておらず，A5052 の FSW 継手の疲労破壊メカニズムの解明を行うためには低下荷重振幅域でどのような破壊力学的挙動が生じているかを明らかにする必要がある．そこで，本研究では疲労き裂進展部である熱影響部(HAZ)を切出し，平面曲げ疲労試験を実施することで，同箇所の疲労き裂進展特性を取得した．さらに，攪拌部(SZ)，熱影響部(HAZ)，母材部(BM)を切出した試験片によって機械的特性を取得することで，弾塑性有限要素解析に用いる物性値を精度良く見積もった．本解析によって得られた相当応力拡大係数範囲と HAZ 部の疲労き裂進展特性を比較することで，破壊力学的検討を行った．さらに寿命向上のためにガラス繊維配合を模擬した継手の解析モデルを作製し，その有効性を示した．

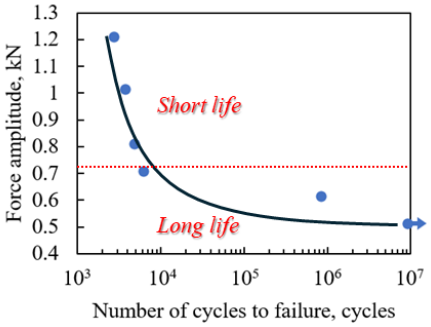
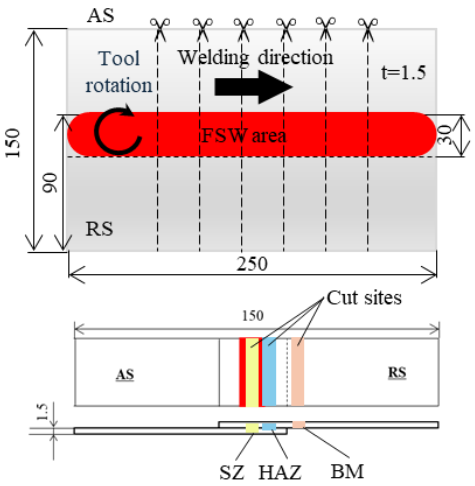
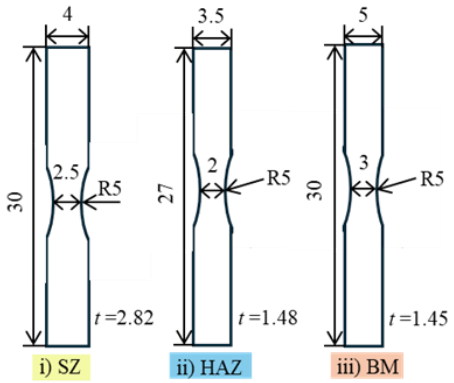


図1 A5052-FSW継手の疲労寿命 [7].



(a) Manufacturing FSW welded plate.



(b) Tensile and fatigue tested FSW specimen cut from welded plate.
図2 各種箇所から切出した試験片.

2．実験方法

2・1　供試材

本研究では，試供材料として A5052 アルミニウム合金を使用した．試験片は図 2(a)に示すように板幅 90 mm，長さ 250 mm，板厚 1.5 mm の板を 30 mm 重ね合わせ，接合した素板から左右 30 mm を除いたところから，隣接して板幅 30 mm になるよう切り出したものを使用した．FSW の接合条件は前報 [7]に示す通りである．また，本研究においてツールの回転方向と進行方向が同じ側を *AS*,

異なる側を *RS* とする．さらに，FEM 解析に必要な機械的特性を取得するため，図 2(b)に示すように FSW 接合継手の攪拌部(SZ)，熱影響部(HAZ)，母材部(BM)を切出した試験片を作製した．これらの試験片を使用して，機械的特性の物性値を取得した．

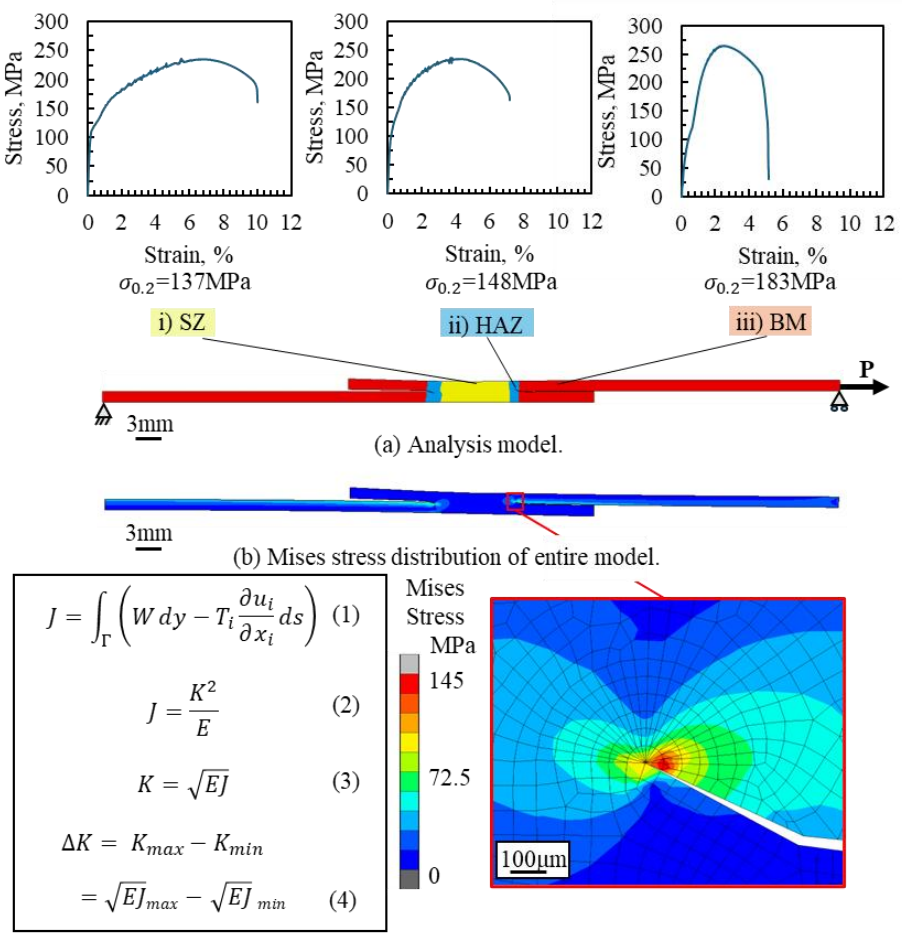
2・2　試験条件

静的引張試験，疲労試験は島津製作所製 50kN 油圧式疲労試験機を用いた．試験条件は，室温大気下で試験力比 $R_p(=P_{min}/P_{max})$=0.1，試験周波数 f=1～20 Hz，試験力振幅は 0.5～1.2 kN，未破断の試験打ち切り回数は N_f =1.0×10^7 cycles とし，試験を行った．弾塑性有限要素解析は，各部部材の物性値を基に FEM 解析モデルを作成し，疲労試験と同様の境界条件にて解析を実施した．同解析により，各荷重振幅における初期応力拡大係数範囲 ΔK_{ini} を J 積分値から算出した．また，先行研究より FSW 接合継手の疲労破壊は HAZ 部が起点となるため，同箇所から切出した試験片の疲労き裂進展挙動を詳細に観察することで，HAZ 部の疲労き裂進展特性を取得した．本結果と FEM 解析によって得られた ΔK_{ini} 値の比較検討を行った．

３．実験結果

3・1　FEM 解析結果

FSW 継手から切出した SZ，HAZ，BM 試験片を用いて，中心部にマイクロひずみゲージを貼付して静的引張試験を実施した．その結果を図 3 に示す．同図より，それぞれの箇所で 0.2%耐力（降伏点）が異なることが明らかになり，延性挙動も大きく変化することがわかった．結果として，SZ では低強度・高延性となり，BM では高強度・低延性となることがわかった．また，HAZ はそれらの中間の特性を示した．これらの引張特性(S-S curves)とヤング率 E=66 GPa，ポアソン比 v=0.33 を FEM 解析モデルに反映させ，二次元弾塑性有限要素解析を実施した．結果の 1 例を図 3 に示す．同結果は P=0.8 kN を負荷した際のミーゼス応力分布である．同結果より，RS 部のフッキング先端付近に著しく応力が集中していることがわかる．これは，本研究で使用した FSW 継手の破壊起点箇所と極めて一致する結果となった．また，解析結果より式(1)より J 積分値を算出し，式(2)～(4)を用いて ΔK 値を算出した．



$$J = \int_\Gamma \left(W\,dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} ds \right) \quad (1)$$

$$J = \frac{K^2}{E} \quad (2)$$

$$K = \sqrt{EJ} \quad (3)$$

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = \sqrt{EJ}_{max} - \sqrt{EJ}_{min} \quad (4)$$

(c) Mises stress distribution near the hook tip.

Fig. 3 FEM解析結果（ミーゼス応力を示す）．

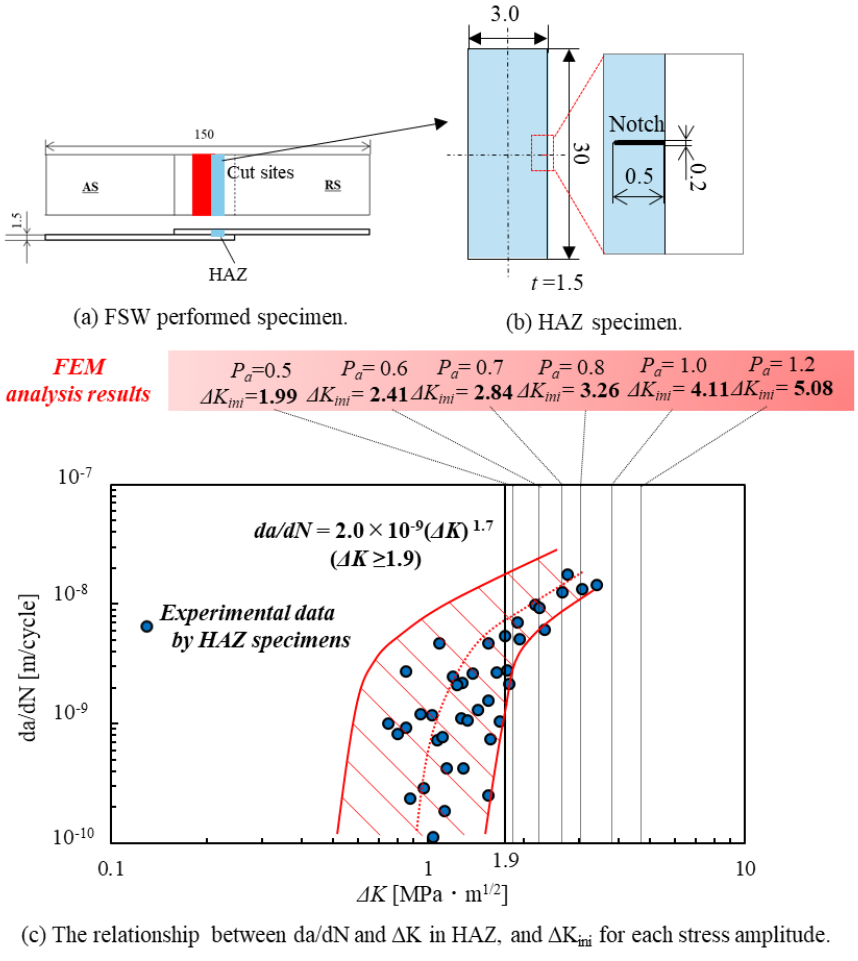
3・2　応力拡大係数による評価

HAZ 部の疲労き裂進展特性を取得するために, 図 4(a)(b)に示すように, HAZ 部から切出した試験片に同図に示すような放電加工スリットを施工した．同試験片を使用して, R=-1, σ_a=57 MPa, 40 MPa の条件で平面曲げ疲労試験を実施した．その際に疲労き裂進展挙動をレプリカ法にて詳細に観察し，き裂進展速度 da/dN を算出した．さらに，破断面より得られた，き裂のアスペクト比 λ=0.50 を用いて Newman-Raju の式 [8]から応力拡大係数範囲 ΔK を算出した．これらの結果をグラフ化したものを図 4(c)に示す.

また，FEM 解析によって得られた各荷重振幅での初期応力拡大係数範囲 ΔK_{ini} も図 4(c)に併記する．図 4(c)より ΔK≧1.9 では著しい線形関係が確認されパリス則に従うと考えられるが，ΔK<1.9 ではき裂進展速度が顕著に低下し，線形関係を示さないことがわかった．ここで，各応力振幅の ΔK_{ini} を見てみると P_a=0.6, 0.5 の条件では線形関係を示さない ΔK=1.9 に著しく近い値のため，顕著な疲労寿命の低下が引起されたと考えられる．一方で，P_a=1.2, 1.0, 0.8, 0.7 の条件ではパリス則の線形関係に極めて準じているため，早期の疲労破壊を呈したと推察できる.

3・3　ガラス繊維による補強効果

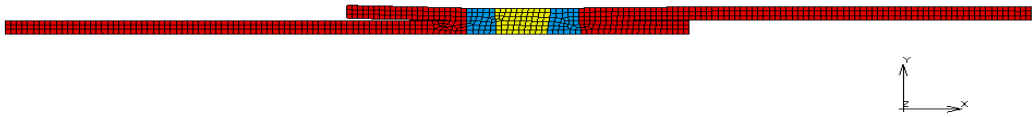
FSW 接合継手の疲労寿命を向上させるための手法として，スリット先端に E ガラス繊維を配合したモデルを作製し応力状態が緩和されるかを試みた．解析には Marc Mentat. 2023 を用いて 2 次元の弾塑性解析を実施した．なお，作製したモデルを図 5 に示す．同図(a)はガラス繊維無しの試験片モデルであり硬度から降伏点を予測し, 各組織における応力-ひずみ関係を弾完全塑性体により再現した．また，同図(b)は E ガラス繊維を配合した試験片でスリット先端に E ガラス繊維を配置した．なお，E ガラス繊維の降伏点は 3 GPa とした．これらのモデルに関して左端固定で右端に P=3 kN 負荷した場合の結果を図 6 に示す. 同図(a)(b)のせん断応力 τ_{xy} の大きさを比較すると, E ガラス繊維を配合することで応力が分散・緩和されていることがわかる．以上より，FSW 接合継手の疲労強度向上のためにスリット先端に E ガラス繊維を導入することは有効な手法の一つであることが示唆された.



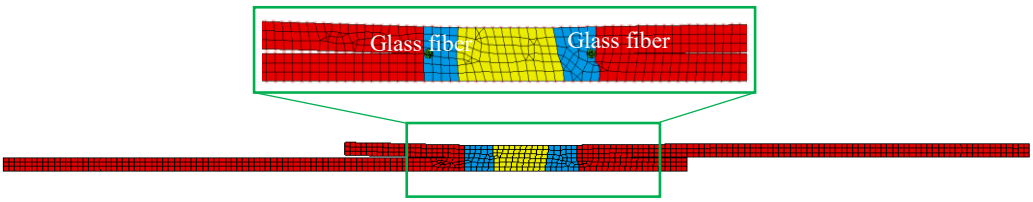
(a) FSW performed specimen.　(b) HAZ specimen.

(c) The relationship between da/dN and ΔK in HAZ, and ΔK_{ini} for each stress amplitude.

図4 HAZ部のき裂進展特性と応力拡大係数.

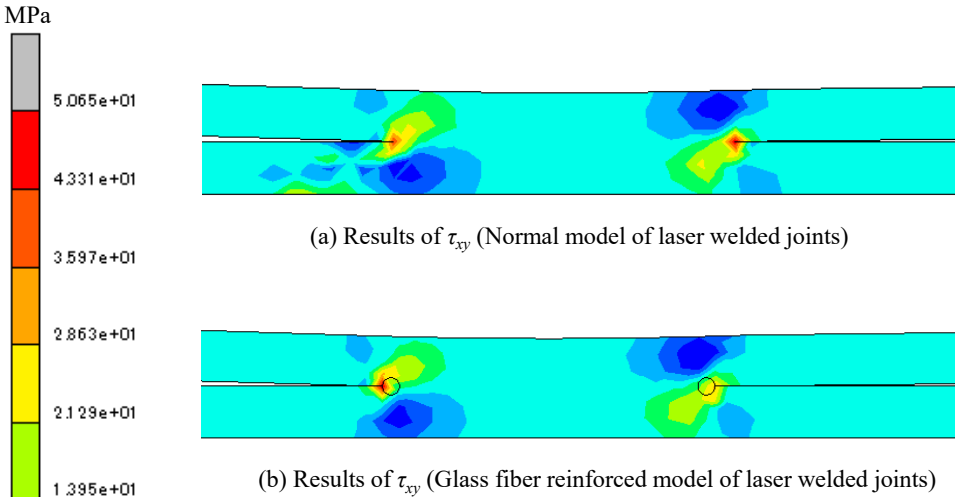


(a) Normal model of laser welded joints



(b) Glass fiber reinforced model of laser welded joints

図5 FEM解析モデル.



(a) Results of τ_{xy} (Normal model of laser welded joints)

(b) Results of τ_{xy} (Glass fiber reinforced model of laser welded joints)

図6 FEM解析結果.

謝　辞

本研究は公益財団法人天田財団の一般研究開発助成(AF-2023008-B2)を基にして実施された．ここに深く謝意を表す.

参考文献

1) Sun Y, Gong W, Feng J, Lu G, Zhu R, Li Y. *Metals*. **12**(2022), 675. https://doi.org/10.3390/met12040675.

2) W. Zhang, J. Xu. *Materials & Design*. **221**(2022), 110994. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110994.

3) Y.F. Sun, H. Fujii, N. Takaki, Y. Okitsu. *Materials & Design*. **47**(2013), 350-357. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.007.

4) T. Selvaraj, S. Ishida, J. Arakawa, H. Akebono, A. Sugeta, Y. Aoki, H. Fujii. *Fatigue. Fract. Eng. Mater. Struct.* **44**(2021), 74-84. https://doi.org/10.1111/ffe.13332.

5) M. Hayashi, I. Fujita, T. Itadani, J. Arakawa, Y. Aoki, H. Fujii, H. Akebono, A. Sugeta. *Fatigue. Fract. Eng. Mater. Struct.* **47**(2024), 2127-2138. https://doi:10.1111/ffe.14295.

6) H. Lombard, D.G. Hattingh, A. Steuwer, M.N. James. *Eng. Fract. Mech.* **75**(2008), 341-354. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2007.01.026.

7) Arakawa, J., Ban, S., Ogawa, Y. and Yukutake, E. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, **48**(2025), 3206-3210. https://doi.org/10.1111/ffe.14644.

8) Newman, J. C., Jr. and Raju, I. S. *Eng. Fract. Mech.*, **15**(1981), 185-192. https://doi.org/10.1016/0013-7944(81)90116-8.