

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14043

研究課題名（和文）散逸エネルギー・ひずみ場ハイブリッド計測による異材摩擦攪拌接合の損傷メカニズム解明

研究課題名（英文）Clarification of damage behavior for dissimilar friction stir welding by hybrid measurement of dissipated energy and strain

研究代表者

小川 裕樹（Ogawa, Yuki）

神戸大学・工学研究科・助教

研究者番号：50880788

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：高強度かつ長寿命化を実現する異材摩擦攪拌接合継手の創製に必要となる、継手のマクロからミクロまでの損傷メカニズムを解明するため、ミクロな損傷挙動を捉える散逸エネルギーと継手外部のひずみ場を融合したハイブリッド計測法を構築し、異材接合継手特有の複雑な接合構造から生じる損傷挙動の時間的変化を捉える評価手法を本研究で構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で構築した評価手法により捉えた継手の損傷挙動における時間的変化を接合条件にフィードバックすることで、高強度・長寿命を実現する接合条件の最適化を実現し、マルチマテリアル構造を担う接合技術の革新を目指す。

研究成果の概要（英文）：A hybrid measurement that combines the dissipated energy capturing the micro damage behavior and the strain outside the friction stir welded joint with high strength and long life. was developed to clarify the damage behavior of the joint in macro and micro levels. This study developed an evaluation method that captures the temporal variation of damage behavior caused by the complex welded structures unique to dissimilar welded joints.

研究分野：疲労

キーワード：疲労 接合 非破壊評価 赤外線

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

従来の輸送機器の構造は鋼材を中心とした設計であり、環境負荷低減のため重量削減が求められる。そこで強度や剛性と軽量化を同時に達成するマルチ材料化が、近年の産業界のキーワードである。マルチ材料化の実現には、図1に示す異材接合技術が必要となる。異材接合技術の実用化には、様々な荷様式に対する継手の動的耐久性の把握が重要である。現状の動的耐久性を評価する手法は、様々な接合条件により実際に継手を作製し、動的強度試験を行うと同時に、それぞれの場合における破壊メカニズムを観察する実験的なアプローチにて行われる。しかしながら、数多くのコストと長期の日数が必要となるため、マルチ材料構造の早期実現のためには、迅速な継手の強度評価技術の確立が望まれる。

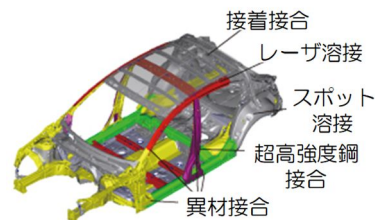


図1 マルチ材料構造の一例

2. 研究の目的

本研究では、高強度かつ長寿命化を実現する異材接合継手の創製のため必要となる、継手の損傷メカニズムの詳細な解明を目的としている。そのため、ミクロな損傷挙動を捉える散逸エネルギーを利用し、異材接合継手特有の複雑な接合構造を考慮した損傷挙動の時間的変化を捉えることができる評価手法を構築する。これらの成果を接合条件にフィードバックすることで、高強度・長寿命を実現する接合条件の最適化を実現し、マルチ材料構造を担う接合技術の革新を目指す。

3. 研究の方法

図2(a)に散逸エネルギーの計測原理を示す。図2(a)の黒線に示す正弦波状の負荷を試験片に加えたとき、熱弾性効果に起因する温度変動は、負荷周波数と同じ周波数となる。一方で、応力変化が弾性変形の範囲内であっても、不可逆的な発熱が起こり、温度が徐々に上昇することがある。このような不可逆的な発熱を散逸エネルギーに基づく温度変化という。散逸エネルギーに基づく温度変化は、正弦波荷重を1サイクルとして最大引張応力と最大圧縮応力を加えたときに発生し、赤外線サーモグラフィでは正弦波荷重の周波数の2倍の温度成分として観測される。このため、実際に赤外線カメラによって計測される温度変動は、熱弾性効果による温度変動に散逸エネルギーによる温度変動を重ねたものとなる。このため、赤外線サーモグラフィで計測される温度変動を周波数解析し、変動応力の2倍周波数における温度成分を抽出することで、散逸エネルギーに起因する温度変動成分を得ることができる。

疲労試験および散逸エネルギー計測は、電気油圧式疲労試験機にて実施した。いずれの実験も応力比 $R=-1$ 、負荷周波数 $f=13\text{Hz}$ 、応力波形は正弦波とした。試験体が2つに完全に分離した時点を目撃破断と定義し、未破断時の試験打ち切り繰返し数は 1×10^7 サイクルとした。放射率向上のために、試験片全体につや消し黒色塗料を塗布した。試験条件として、応力振幅を 10MPa ごとに増加し、各応力振幅で 3600 サイクルの間散逸エネルギーによる温度変化を測定した。散逸エネルギーによる温度変化は、測定波長範囲 $7.7 \sim 9.3\mu\text{m}$ の MCT センサを用いた赤外線サーモグラフィ (SC7500 FLIR Inc.) で計測した。フレームレートは 431Hz 、計測時間は 10 秒とした。散逸エネルギー計測時に、図2(b)に示すようにひずみ場計測用の可視カメラを並べて計測し、接合部およびその周辺のひずみ分布を DIC 法にて計測した。試験片表面には、散逸エネルギー計測用の黒色塗料を塗布した後、温度計測に影響のない白色絵具でランダムパターンを塗布した。デジタル画像は可視カメラ1台を用いて撮影し、赤外線カメラと同期して計測を行う。そのため、デジタル画像は赤外線画像と同じく 4310 枚の画像を取得し、DIC 解析を行った。DIC 解析は、Dipp strain を使用し、サブセットサイズが 21×21 pixels、ゲージ長が 30 pixel の条件で実施した。

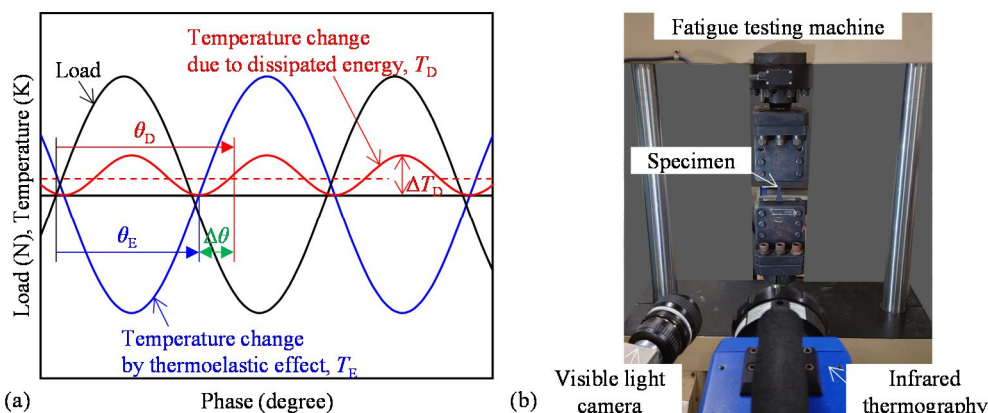


図2 (a)散逸エネルギー計測の原理, (b)散逸エネルギーおよびひずみ場ハイブリッド計測外観

4. 研究成果

本研究は基礎検討として、アルミニウム合金の突合せ接合継手を対象に検討を行った。なお、接合部には表面凹凸が生じるため、試験片の両面を研磨し平滑な状態に仕上げた研磨継手を準備し、接合まま継手と比較した。加えてアルミニウム合金の母材試験片についても併せて評価を行った。図3に2種類の接合継手と母材試験片の疲労試験結果を示す。なお同図縦軸と横軸はそれぞれ、負荷試験力振幅を破断箇所の断面で除した応力振幅と、破断までの繰り返し数を示している。いずれの接合継手の疲労強度は、母材試験片のそれと比べ低下している。接合継手の疲労強度で比較した場合、研磨継手の方が、接合まま継手と比べ高い。また、母材試験片および接合継手の疲労限度は、未破断時の応力振幅と破断時の最小応力振幅との平均値とした。接合まま継手、研磨継手、母材試験片の疲労限度は、それぞれ約 40~50MPa, 70~80MPa, 120~130MPaであった。

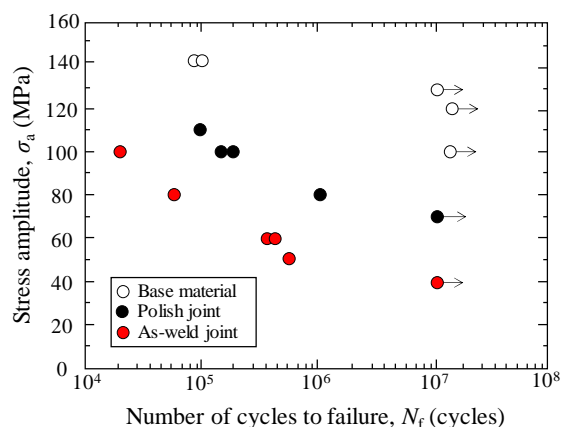


図3 疲労試験結果

接合まま継手、研磨継手の散逸エネルギー分布とDIC計測によるひずみ分布を図4、図5にそれぞれ示す。まず、接合まま継手は、溶接金属と熱影響部(HAZ)の境界から疲労き裂が発生・進展する。接合まま継手の散逸エネルギー分布において、接合部内で高い散逸エネルギーが現れておりき裂発生位置とほぼ一致し、ひずみ分布も疲労き裂発生位置にて高いひずみが確認できる。また、研磨継手は、母材とHAZの境界から疲労き裂が発生・進展する。研磨継手の散逸エネルギー分布およびひずみ分布においても、疲労き裂の発生位置に高い散逸エネルギーとひずみが現れる。したがって、散逸エネルギーを計測することで、溶接継手の疲労破壊起点を可視化することができることが分かる。

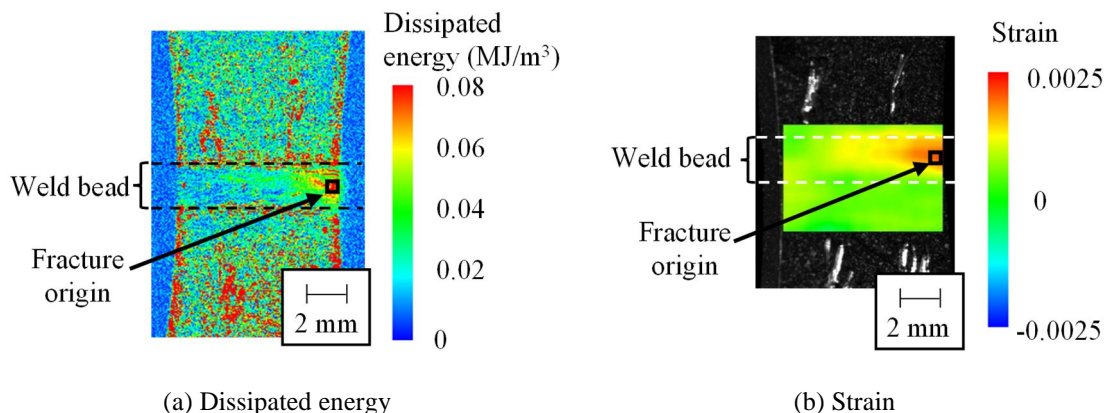


図4 接合まま継手 (As-weld joint) の散逸エネルギーおよびひずみ分布 (応力振幅:85MPa)

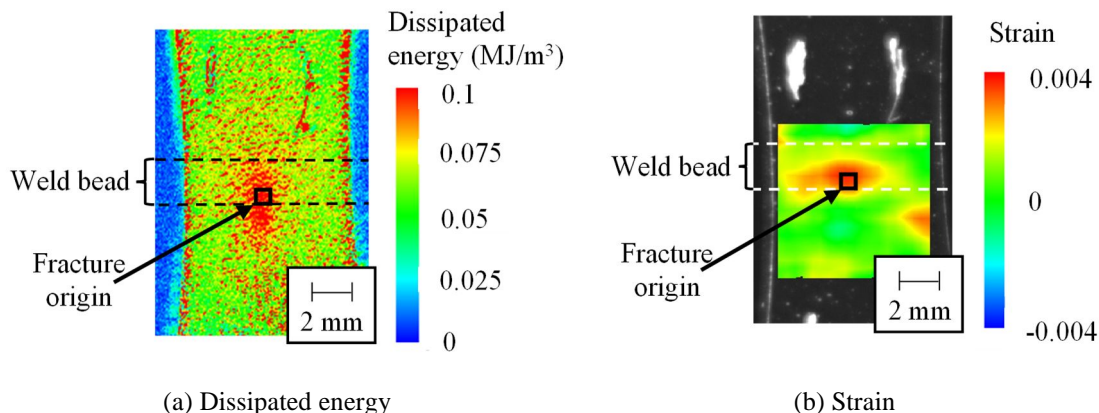


図5 研磨継手 (Polish joint) の散逸エネルギーおよびひずみ分布 (応力振幅:120MPa)

次に、母材試験片および接合継手にて、各応力振幅で計測した散逸エネルギーを整理した結果を図6に示す。いずれの試験片において、散逸エネルギーの評価領域は破壊起点を中心とする10×10pixelsとした。なお、散逸エネルギーによる温度上昇は、他の接合継手と比べて応力振幅に

対して徐々に増加する。そのため、低温グループと高温グループをそれぞれ一次関数近似と二次関数近似によってグルーピングした。母材試験片、接合まま継手、研磨継手の推定疲労限度はそれぞれ、110~120MPa, 60~70MPa, 70~80MPa となる。いずれの推定疲労限度は実際の疲労限度に近い。したがって、アルミニウム合金板の接合継手において、散逸エネルギーに基づく疲労限度推定法の適用が可能であることがわかった。また、研磨継手の散逸エネルギーに起因する温度変化は、接合まま継手と比較して、疲労限度以降の応力振幅において小さい。これは、接合部の凹凸による応力集中が研磨により除去されたため、散逸エネルギーの値が低下したと考えられる。

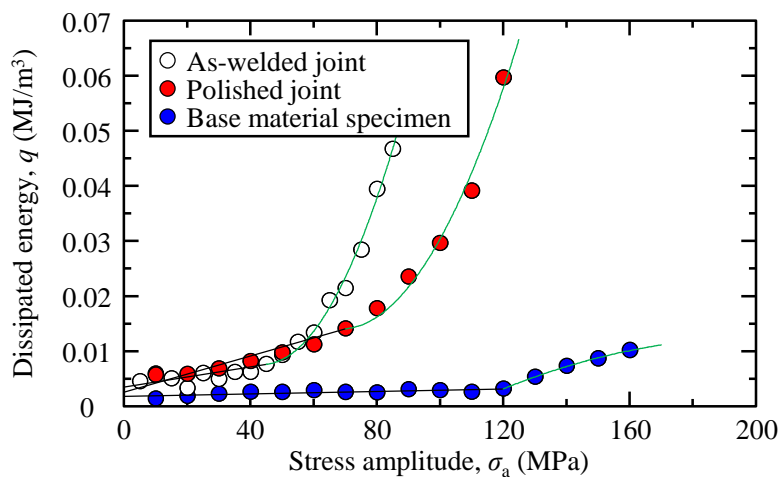


図6 各応力振幅における散逸エネルギーの変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ogawa Yuki, Horita Taiju, Iwatani Naoki, Kadoi Kota, Shiozawa Daiki, Sakagami Takahide	4. 巻 125
2. 論文標題 Evaluation of fatigue strength based on dissipated energy for laser welds	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Infrared Physics & Technology	6. 最初と最後の頁 104288 ~ 104288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.infrared.2022.104288	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamamoto Takumi, Ogawa Yuki, Hayashi Miu, Kadoi Kota, Shiozawa Daiki, Sakagami Takahide	4. 巻 51
2. 論文標題 Fatigue Limit Estimation Based on Dissipated Energy of Butt Laser-Welded Joints	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Engineering Proceedings	6. 最初と最後の頁 47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/engproc2023051047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 肥田木天悠, 岩谷直樹, 林美佑, 小川裕樹, 塩澤大輝, 阪上隆英
2. 発表標題 Al合金/鋼板異材FSW継手の散逸エネルギーに基づく疲労強度評価
3. 学会等名 日本材料学会 第72期通常総会・学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tenyu Hidaki, Naoki Iwatani, Yuki Ogawa, Miu Hayashi, Daiki Shiozawa, Takahide Sakagami
2. 発表標題 Evaluation of fatigue strength by dissipated energy of dissimilar FSW joints of aluminum alloy and steel sheets
3. 学会等名 13th International Fatigue Congress (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 樋口花摘 , 山本拓実 , 小川裕樹 , 林美佑 , 門井浩太 , 塩澤大輝 , 阪上隆英
2. 発表標題 高強度鋼を母材とするレーザー溶接継手の散逸エネルギー計測に基づく疲労強度評価
3. 学会等名 日本材料学会 第21回破壊力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 樋口花摘 , 山本拓実 , 小川裕樹 , 林美佑 , 門井浩太 , 塩澤大輝 , 阪上隆英 , 久保司郎
2. 発表標題 ハイテン鋼を母材とするレーザー溶接継手の 散逸エネルギー計測に基づく疲労強度評価
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部 2023年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 立林寛也, 岩谷直樹, 塩澤大輝, 小川裕樹, 阪上隆英
2. 発表標題 Al合金を母材とするFSW継手の散逸エネルギーに基づく疲労強度評価
3. 学会等名 日本材料学会 第71期通常総会・学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 立林寛也, 岩谷直樹, 塩澤大輝, 小川裕樹, 阪上隆英, 行武栄太郎
2. 発表標題 散逸エネルギー計測に基づいたAl合金FSW継手の疲労強度評価
3. 学会等名 日本材料学会 第35回疲労シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 肥田木天悠, 岩谷直樹, 小川裕樹, 阪上隆英, 塩澤大輝
2. 発表標題 散逸エネルギーに基づくAl合金/鋼板異材FSW継手の疲労強度評価
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部 2022年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 立林寛也, 岩谷直樹, 塩澤大輝, 小川裕樹, 阪上隆英
2. 発表標題 散逸エネルギー計測に基づいた摩擦攪拌接合材の疲労強度評価
3. 学会等名 日本機械学会関西支部 関西学生会2021年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関