

令和 4 年 5 月 16 日現在

機関番号：15401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22395

研究課題名（和文）エタノール射出型ジェットピーニングによる高耐久性を発現する接着接合技術の開発

研究課題名（英文）High fatigue resistance of adhesive bonded material by using ethanol jet peening process

研究代表者

荒川 仁太（Arakawa, Jinta）

広島大学・デジタルものづくり教育研究センター・特任助教

研究者番号：80882018

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究においてターゲットとしていたのは、エタノール射出型ジェットピーニングの表面処理に伴う接着接合強度改善を狙っていたが、そもそも接着接合継手の耐久性強度や破壊メカニズムに関して不明な点が多く、本課題に関連して接着接合継手の破壊機構に関して検討を行った。結果として、SPCC材を母材とする接着接合継手は水浸漬を施すことで、大幅に疲労強度が低下することがわかった。一方で、SUS材を母材とする接着接合継手は水浸漬によって大きく疲労強度は低下する傾向は見られなかった。そのため、SPCC接着接合継手においては水浸漬に伴う界面強度の低下を起因として、疲労強度が低下したことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

接着接合継手はマルチマテリアル化が期待される工業界において、今後の応用が多分に期待される。その中で、本研究にて明らかとした「接着接合継手の水劣化に伴う疲労強度低下」とその要因が「界面強度に低下によるものであること」を示唆した結果は、接着接合継手をあらゆる工業製品にて適用する上で、信頼性確保の観点から極めて貴重である。

また、DCB試験によって疲労き裂進展速度を定量的に求めた結果、水浸漬ををこなうことで、劇的に同指標が低下すること示した。これは、接着接合継手をあらゆる環境下において使用する中で、き裂が少しでも入った場合、非常に危険側の結果を招くことを示唆するもので設計上重要な指針となる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed to improve the adhesive bonding strength associated with the surface treatment of ethanol injection type jet peening, but there were many unknown points regarding the durability strength and fracture mechanism of adhesive joint in the first place, and the fracture mechanism of adhesive joint was examined in relation to this problem.

As a result, it was found that the fatigue strength of adhesive joints using SPCC material as the base material greatly decreased by applying water immersion. On the other hand, adhesive joints made of SUS material as the base material did not tend to decrease the fatigue strength greatly by water immersion. Therefore, it became clear that the fatigue strength decreased in SPCC adhesive joints due to the decrease in the interface strength associated with water immersion.

研究分野：金属疲労

キーワード：接着接合 金属疲労 表面処理

### 1. 研究開始当初の背景

自動車、航空機、鉄道メーカーなど各種産業界においては、CO<sub>2</sub>削減の観点から構造体の軽量化が求められている。自動車にスポットを当てると、従来であれば自動車用鋼板もしくはアルミニウム合金を材料としてこれらを接合することで自動車の構造体を生産してきた。なお、上述した金属材料を用いると車体の重量が増すため、軽量化した金属材料(添加元素を変化させた高強度なアルミニウム合金など)が各種開発されてきた。しかしながら、近年注目されているカーボン添加のプラスチック材料(CFRP)に代表されるようなカーボン材料は金属材料と比較して遥かに軽量で、静的強度レベルも著しく高い。しかしながら、コスト面では非常に高価であるため、一部の適切な箇所への適用は有効である。その要因の一つが大量生産されないため価格帯が下がらないことだと考えられる。そのため、このようなカーボン添加のプラスチック材料 CFRP を産業界に多く普及させる必要があるが、その足かせになっていることが、異種材料との接合技術が未発達な点であり、この技術を開発できないかということに焦点を当てて研究を実施することとした。同種材料であれば抵抗スポット溶接やレーザ溶接によって接合強度を保証されるが、CFRP と金属材料では融点、延性、剛性などの物性値が極端に異なるため、上述の施工は適用できない。そこで、注目されているのが接着接合技術である。しかしながら、接着接合技術はあらゆる異種材料を接合できる点で圧倒的に優位性があるが、強度レベルに関しては他の接合体と比較して著しく低い。そこで、申請者は被着材表面の処理手法としてエタノール射出型ジェットピーニングを提案する。この表面処理によって接着剤の水素結合力、被着材の表面凹凸に起因するアンカー効果および材料表面の濡れ性の増大によって接着強度が向上することが期待される。そのため、接着接合体に関する信頼性確保のための耐久性能試験を実験的に行うこととした。

### 2. 研究の目的

本研究では比較材として、未処理の金属(自動車用鋼板 SPCC590Y)およびプラスチック(CFRP)を接着した試験体も用意し、同様の材料で、表面処理を施したものも準備する。これより、両試験体の静的および耐久性能試験を実施し、処理効果による耐久力向上の有無について確認する。また、破壊メカニズムの解明を行い、破壊に寄与する因子の特定に尽力する。この結果から、今回提案する表面処理手法が接着接合体において有効なのかを検証する。

### 3. 研究の方法

本研究では、そもそも接着接合体自身の疲労強度の研究結果が僅少であり、尚且つ製作方法において未確立な点が多いことが判明したため、当初の研究計画とは少々ずれるが基本的な接着接合継手の疲労特性を把握するため同試験片に対して実験的検討を行った。被着材として板厚 1.2mm の 300MPa 級自動車用鋼板 SPCC を使用した。同材の化学組成、および機械的性質を表 1、表 2 に示す。同材を図 1 に示す短冊状 (70mm×25mm) に加工後、10mm×25mm の範囲に接着を施工し、継手を作成した。なお本研究で使用した接着剤は、サンスター技研製自動車用一液熱硬化型エポキシ接着剤 SW-601 であり、デンケン・ハイデンタル製卓上マッフル炉 1500Plus で硬化させた。直径 0.15mm のガラスビーズを接着剤に混合することで接着厚さが同厚となるように接合した。本研究では加熱保持時間の変化に対する接着強度への影響を検討するために、使用する接着剤の特性から加熱硬化温度を 200℃と固定し、加熱保持時間を 30 分、60 分、90 分の 3 条件で比較検討した。静試験、および疲労試験は、島津製作所製電気油圧式サーボパルサを用いた。また試験条件として、静試験では、負荷速度 0.02kN/s、疲労試験は荷重比  $R (=P_{min}/P_{max})=0.1$ 、周波数  $f=1\sim 20\text{Hz}$  にて行い、未破断時の試験打切り回数は  $N=1\times 10^7$  cycles とした。

Table 1 Chemical composition [mass%]

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.04	0.01	0.17	0.0013	0.004	Bal.

Table 2 Mechanical properties

Yield strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]
205	336	47

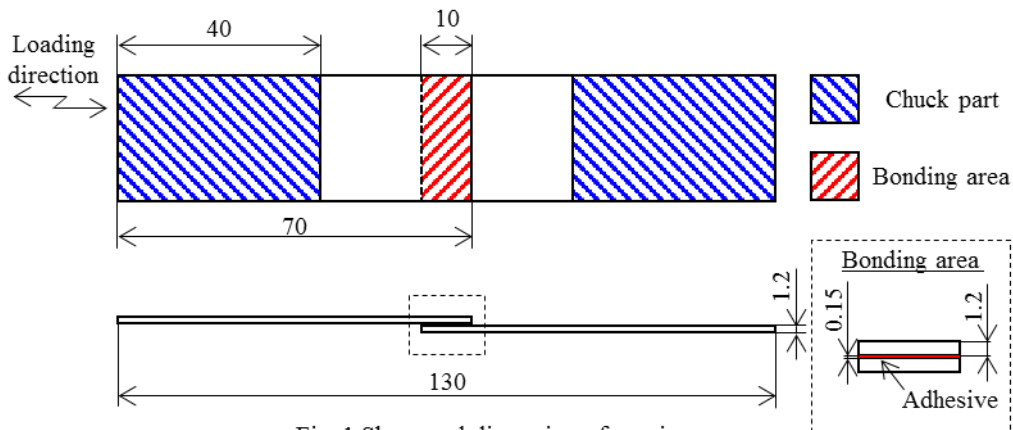


Fig. 1 Shape and dimension of specimen.

#### 4. 研究成果

##### 4.1 静的引張試験結果

各加熱保持時間下にて5本の接着結合継手に対して静的引張試験を実施した。その代表例を図2に示す。なお同図における縦軸は継手に作用する試験力、横軸はピストン変位をそれぞれ表している。同図より、加熱保持時間が増加するにつれ、継手の静的強度が増加することが分かった。以上の結果に対して要因を検討するために、静的引張試験後の破壊形態から考察を行った。各加熱保持時間の試験後の破面の一例を図3に示す。また、同図にて、各加熱保持時間30分、60分、90分の各々における、接合部全体に占める接着剤層内の破壊が生じた凝集破壊率の平均値は、それぞれ97.1%、73.3%、66.8%であり、加熱保持時間の増加に応じて、凝集破壊の割合が減少していることが分かる。そこで、加熱硬化した接着剤自体の硬度をビッカース硬さ試験により測定した。その結果、加熱保持時間30分、60分、90分に対して、それぞれ12.4、20.5、26.0であり、加熱保持時間の増加に応じて、接着剤自体の硬度が上昇していることが分かる。そのため、加熱保持時間30分では、接着剤自体の加熱硬化が十分に行われていないために接着剤層自体の強度が被着材-接着剤間の界面強度より低いと推察される。したがって、図4(a)のき裂進展の模式図で表すように特異応力場を示す接着端部から発生したき裂が早期に接着剤層内で進展、急激に破壊が進み最終破断に至ったと考えられる。それにより、接着剤層内の破壊の割合を示す凝集破壊率は高い値を示すが、接着剤自体の強度が低いために継手の静的強度も他と比較し低い値を示したと考えられる。一方、加熱保持時間が60分、90分の場合では、加熱保持時間の増加により接着剤層の硬化が十分に進んだために、接着剤自体の強度が被着材-接着剤間の界面強度より増加したと考えられる。そのため、図4(b)のき裂進展模式図のように、き裂が接着界面を進展した後、接着剤層内に進路を変更し、接着剤内部で破壊が進み、最終破断に至ったと考えられる。したがって、凝集破壊率は低下したが、継手の静的強度は加熱保持時間30分と比較すると向上したと考えられる。

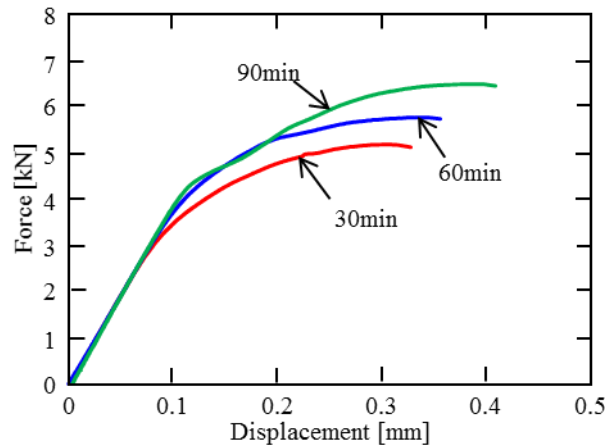


Fig. 2 Results of static tensile test.

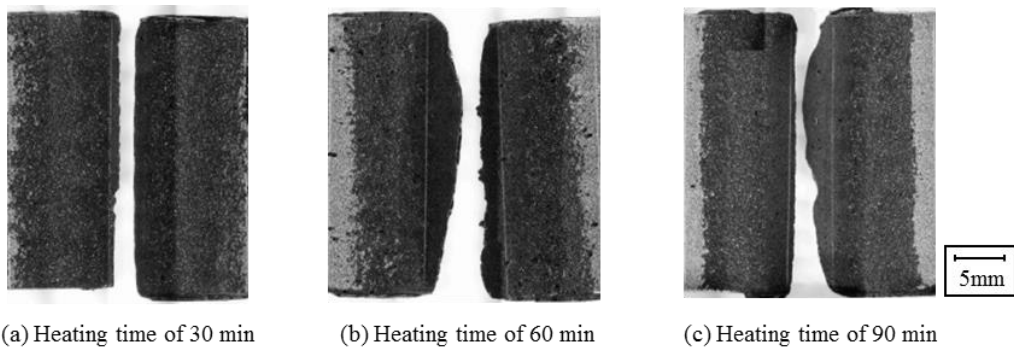


Fig. 3 Fracture surface of each joint after static tensile test.

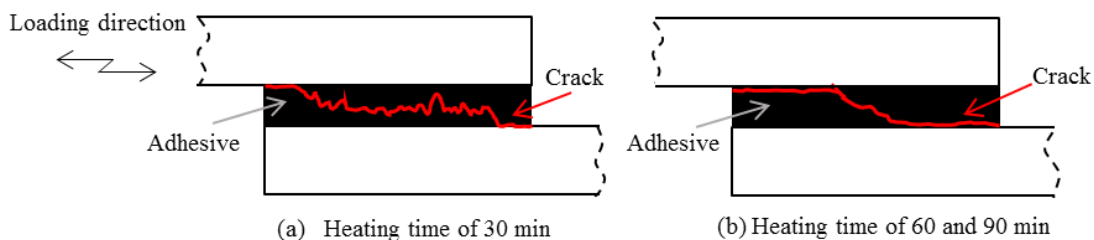


Fig. 4 Schematic illustration of fracture mechanism.

#### 4. 2 疲労試験結果および凝集破壊率

各加熱保持時間による疲労試験結果を図 5 に示す。なお、同図縦軸は負荷試験力振幅  $P_a$  を、横軸は破断までの繰返し数をそれぞれ表している。同図より、静的引張試験の結果と同様に、加熱保持時間の増加に伴い向上した。また、図 6 に試験力振幅  $P_a=1.5\text{kN}$  の場合の各加熱保持時間下で取得した疲労破面の観察結果を示す。同図から、加熱保持時間の差異によらず、接着端部では鋼板表面が露出し両材界面を疲労き裂進展する界面破壊を呈している。また、接着部中央では鋼板表面に接着剤が凝着する凝集破壊が生じている。そのうち、各加熱保持時間の凝集破壊率に対しては差が生じており、同試験力振幅において加熱保持時間が増加するにつれて、凝集破壊率も増加することが分かった。特に加熱保持時間 90 分の場合、他と試験片と比べ高い凝集破壊率を示している。この結果から、加熱保持時間の増加は接着剤の硬化と被着材-接着剤間の界面強度増加につながり、特異応力場を示す接着端部から発生する疲労き裂が接着剤層内へ経路変更しやすくなり、疲労き裂の進展が遅延するため疲労強度自体も向上したと推察される。また、加熱保持時間 30 分および 60 分の場合、界面破壊に至る割合が多くなり、接着接合自体に影響を及ぼす因子が数多く存在する界面特性によって支配されるため、疲労強度のばらつきも顕著に発現された。したがって、接着接合継手の疲労強度向上に対しては、被着材-接着剤間の界面精度向上および凝集破壊に遷移するための界面強度向上が重要であると考えられる。今後の検討課題としては、被着材の表面処理を施工するなど、接着界面の不純物の除去や界面強度自体の向上等の詳細な検討が必要とされる。

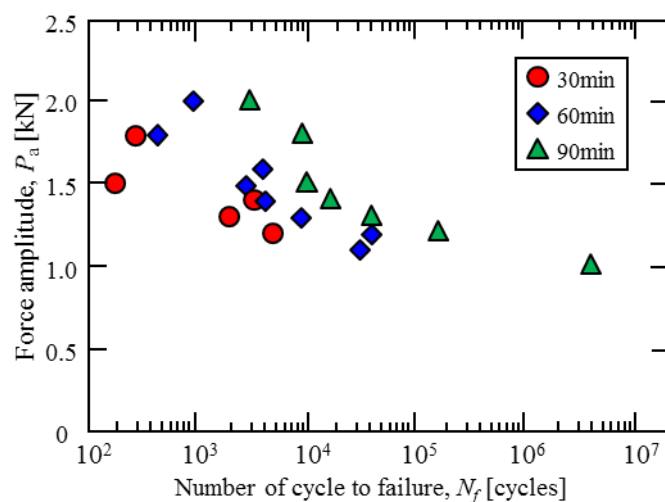


Fig. 5  $P-N$  curves.

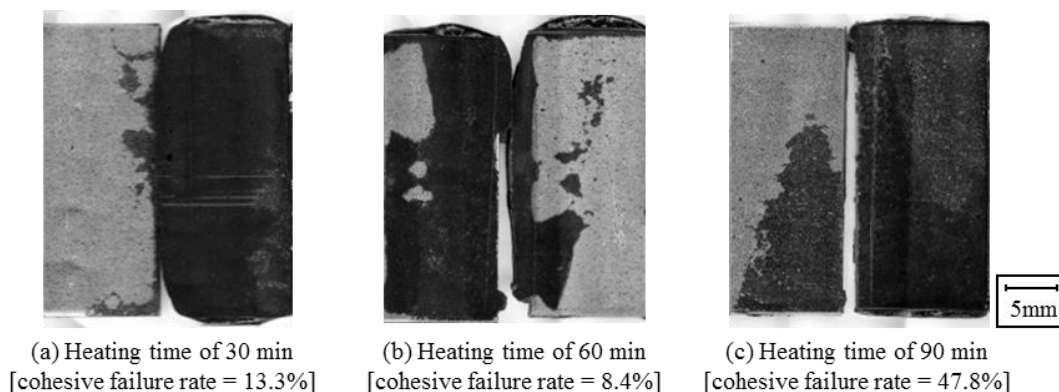


Fig. 6 Fatigue fracture surface of each joint ( $P_a=1.5\text{kN}$ ).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------