

アルミニウム合金の超音波照射による残留応力低減とその疲労寿命向上

[研究代表者] 武田亘平 (工学部機械学科)

[共同研究者] 本多祐二 (本多電子(株))

研究成果の概要

近年、持続可能な開発目標が掲げられ、地球規模の環境問題への対策が活発に行われている。地球環境を守る観点において省エネルギー、省資源が重要であり世界中で注目されている。産業分野において、低燃費や軽量化は環境保全に直結するため、様々な研究が行われている。その中でも、比強度が高く加工性が良いアルミニウム合金が注目されており、様々な工業製品において採用されている。また、その製品としての製造方法も様々であり多くの分野において使用されている。アルミニウム合金が構造体または製品として使用される場合、製造過程において生じるバリなどの除去および表面仕上げにおける加工処理として切削または研削加工が施され、これらの加工処理は材料表面に対して引張残留応力を付与する。引張残留応力を材料表面近傍において有している場合、その材料は疲労き裂を生じやすい状態であり、疲労寿命が低下する。この引張残留応力を簡単に除去できれば、疲労き裂が生じにくい材料表面となり、さらなるアルミニウム合金の利用拡大が見込まれる。そこで、残留応力を除去する方法として、本研究では超音波洗浄利用した超音波洗浄ピーニング（以下、UCP）を提案する。これは、水中で実施する方法であり、複雑形状にも対応する簡単かつ効率的な残留応力除去方法となる可能性があり、その効果が実証できれば、多くの分野においてさらなる省資源、省エネルギー化が期待できる。

本研究では、アルミニウム合金 A7075 に対して種々の加工を施し、引張残留応力を与え、その後 UCP による残留応力の変化を確認した。また、使用した液体の溶存酸素濃度および試験片表面のマークの状態と UCP の効果について調査した。得られた主な結果を次に示す。(1) 種々の加工により生じた引張残留応力は、UCP により圧縮残留応力に変化する。(2) UCP と洗浄効果には関係性があり、洗浄効果が高いほど圧縮残留応力が大きくなる傾向がある。

研究分野：高機能材料、材料力学、表面工学

キーワード：超音波、キャビテーション、残留応力、アルミニウム合金

1. 研究開始当初の背景

地球環境保全の観点から省エネルギー、省資源が必要とされる中、低燃費や軽量化のために主に産業分野においてアルミニウム合金が採用されている。また、その製品としての製造方法も様々であり多くの分野において使用されている。特に航空宇宙分野、自動車分野において主たる構造体の材料として使用されている。アルミニウム合金が構造体または製品として使用される場合、製造過程において生じるバリなどの除去および表面仕上げにおける加工処理として切削または研削加工が施される。これらの加工処理は材料表面に対して引張残留応力を付与することが知られており疲労寿命低下につな

がる。引張残留応力を材料表面近傍において有している場合、その材料は疲労き裂を生じやすい状態である。そこで、この引張残留応力を除去できれば、疲労き裂が生じにくい材料表面となり、さらなる軽量化が見込まれる。

本研究では、残留応力を除去する方法として、水中において超音波を照射する種々の形状に対応した方法を提案する。これは、複雑形状にも対応する簡単かつ効率的な残留応力除去方法となる可能性があり、その効果が実証できれば、多くの分野において軽量化が進み、さらに省資源、省エネルギーへ貢献できる。機械構造物にショットピーニングなどの表面改質処理を施す疲労寿命を向上させる方法があるが、処理に時間やコストを要し

狭窄部への処理が困難である。このため近年では、これらの課題を解決するためキャビテーションピーニングが研究されている。

2. 研究の目的

本研究では、キャビテーションを利用して部品等を洗浄する超音波洗浄に着目し、洗浄機内にて生じるキャビテーションを用いることで、キャビテーションピーニングと同様の効果を得られるのではないかと考え、超音波洗浄による残留応力の変化と疲労特性の関係を解明することを目的とした。これまでの研究において、アルミニウム合金 A7075 に種々の加工（研削加工：Grinding 材、研磨加工：Milling 材）を施して引張残留応力を付与し、超音波洗浄機を用いて超音波洗浄ピーニング（Ultrasonic cleaning peening：UCP）を施し、残留応力の変化を X 線回折により求め、超音波照射による残留応力低減を検証してきた。さらに、UCP の効果と超音波洗浄機の洗浄効果の関係性を調べた。

3. 研究の方法

本実験では、試験片として Electronics Inc. 社製の Almen Strips を使用した。納入材を As-received 材とし、試験片に引張残留応力を付与することを目的に、As-received 材に汎用フライス盤および平面研削盤を用い加工した。試験片名として、汎用フライス盤または平面研削盤を用いて加工した材料をそれぞれ Milling 材、Grinding 材とした。それぞれの試験片の加工条件は、Milling 材では、フライス盤の主軸回転数 915 rpm、送り速度 250 mm/min とし、Grinding 材では、回転数 1,800 rpm、送り速度 560 mm/min とした。また、試験片の寸法と残留応力測定的位置（青丸 5 か所）を図 1 に示す。左から順に点 1、2、3、4、5 とし、これら測定点にマークをつけ実験を行った。試験片は As-received 材、Milling 材、Grinding 材それぞれ 2 本準備した。

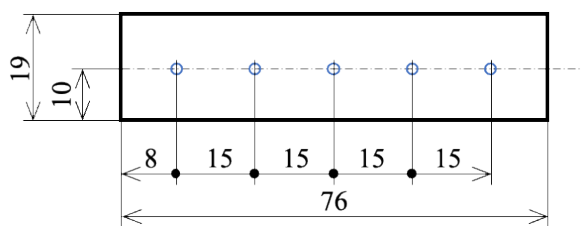


図 1 試験片寸法と残留応力測定位置（青丸 5 箇所）

4. 実験装置

(1) 超音波洗浄装置

UCP に使用する超音波洗浄装置は、本多電子株式会社製の ULTRASONIC CLEANER WS-600-28 であり、周波数 28 kHz、出力 600 W の装置であった。UCP の時間は 20 分とした。本実験では、試験片を中央の浴槽底面から 27 mm の高さで図 2 に示すように配置した。図中の①が As-received 材、②が Milling 材、③が Grinding 材である。

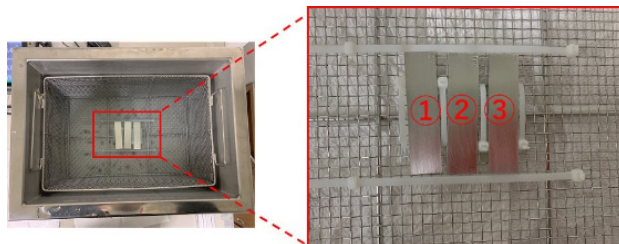


図 2 超音波洗浄装置を用いた UCP の様子と試験片の設置場所

(2) 残留応力測定装置

残留応力を測定するための X 線回折装置は、株式会社リガク製の AutoMATE を用いた。測定箇所は図 1 青丸 5 箇所であり、すべての試験片において測定した。

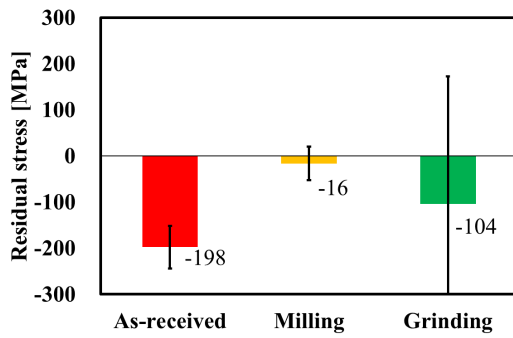
(3) 溶存酸素濃度測定装置

溶存酸素濃度の測定には東亜ディーケーケー株式会社製の OE-473BA を用いた。測定方法は、浴槽内水面中心において、水面から深さ 1 cm の場所を 3 回計測し、平均値を求めた。

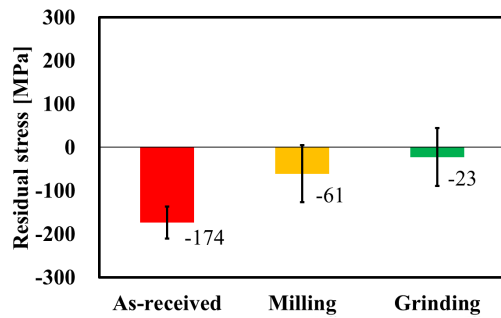
5. 研究成果

(1) 溶存酸素濃度と UCP の関係調査

水道水または脱気水を用いて UCP の効果を比較した。水道水、脱気水はどちらも 12 L 使用し UCP を施した。脱気水は水道水を 95 °C まで加熱後、30 °C に冷却したものとした。水道水、脱気水の溶存酸素濃度はそれぞれ、7.0 mg/L、1.9 mg/L であった。UCP はそれぞれ 20 分間行った。水道水または脱気水を用いて施した UCP 前後の残留応力測定値を図 3 および図 4 にそれぞれ示す。それぞれの結果から、脱気水では UCP の効果が少ないように見える。原因として、溶存酸素濃度が低かったことや試験片の表面性状が影響したと考えられる。

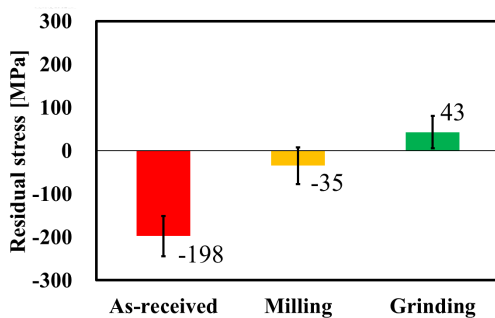


(a) Before

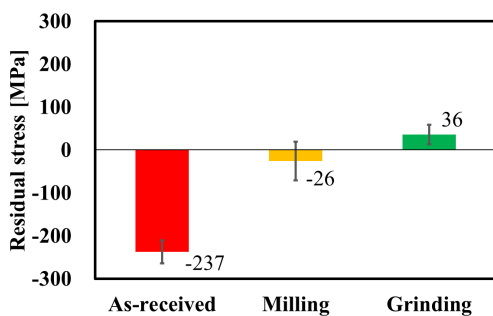


(b) After

図3 水道水（溶存酸素濃度 7.0 mg/L）を用いた UCP 前後の平均残留応力値とその標準偏差



(a) Before



(b) After

図4 脱気水（溶存酸素濃度 1.9 mg/L）を用いた UCP 前後の平均残留応力値とその標準偏差

(2) 洗浄効果と UCP

UCP 後に残留応力測定点に塗布したマークが消えて

いる箇所が存在することがわかった。マークが消える洗浄効果と残留応力の変化には関係性があると考えられる。そのため、本実験で測定した 30 点から、洗浄効果と残留応力の変化の関係を調査する。その結果、30 点中 8 点マークが消えていた。マークが消えた測定箇所と消えていない測定箇所における、UCP 後の残留応力の平均と標準偏差を図 5 に示す。図 5 から、マークが消えている箇所は消えていない箇所に比べて残留応力がより圧縮に変化したことがわかる。これは、超音波洗浄機の原理であるキャビテーションによって、圧縮残留応力が付与されているためだと考える。

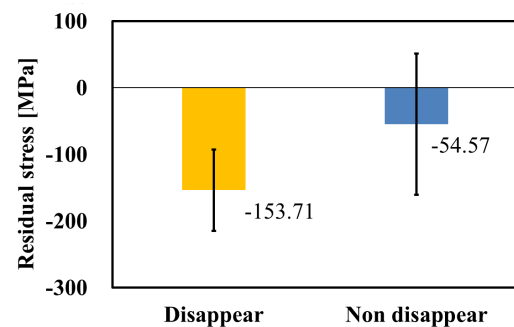


図5 測定点のマークの消失の有無と残留応力値の関係

6. 結言

アルミニウム合金 A7075 に対して種々の加工を施し、引張残留応力を与え、その後 UCP による残留応力の変化を確認した。また、使用した液体の溶存酸素濃度および試験片表面のマークの状態と UCP の効果について調査した。得られた結果を次に示す。

- (1) 種々の加工により生じた引張残留応力は、UCP により圧縮残留応力に変化する。
- (2) UCP と洗浄効果には関係性があり、洗浄効果が高いほど圧縮残留応力が大きくなる傾向がある。

7. 本研究に関する発表

- (1) 山口洋平, 武田亘平, 本多祐二, “超音波照射によるアルミニウム合金の残留応力低減”, 日本ばね学会春季ばね及び復元力応用講演会, 2023 年 6 月