

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（本多電子株式会社）

研究成果の概要

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。アルミニウム合金は、軽量でありながら高比強度、耐腐食性、加工性に優れており、特にその密度は鉄鋼材料に比べ3分の1であり、比強度が高いため、軽量かつ強度が求められる航空宇宙産業において頻繁に使用されている。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。鋳造後のバリ取りや切削加工後には引張残留応力が生じており、これが疲労寿命低下につながっている。一方で、機械構造物にショットピーニングを施し疲労寿命を向上させる方法がある。しかし、処理に時間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。そこで本研究では、キャビテーションを利用して洗浄する超音波洗浄に着目し、洗浄槽内にて生じるキャビテーションを用いることで、材料の表面を改質できるのではないかと考えた。本研究では、アルミニウム合金 A7075 に種々の加工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 線回折により求めた。また、UCP の効果と超音波洗浄機の洗浄効果の関係性を調べ、さらに、UCP による材料表面の硬さの変化も調査した。得られた成果を次に述べる。(1) 切削加工または研削加工によって生じた残留応力は UCP 処理によりマイナス方向に変化する。(2) 加工硬化により試験片表面は硬くなるが、UCP によるこの硬さへの影響は非常に少ない。

研究分野：機能材料、材料力学、設計工学

キーワード：アルミニウム合金、超音波、キャビテーション、疲労寿命

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た。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した。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可能だと考えた。

2. 研究の目的

本研究では、キャビテーションにて表面改質を行っていることに着目し、産業分野においてよく使用されている超音波洗浄において可能と考える超音波洗浄ピーニング

(Ultrasonic cleaning peening 以下 UCP) が材料特性に及ぼす影響の解明を目的とした。具体的には、試験片としては航空機などに多用されている A7075 であるアルミニウム合金 (アルメンストリップ) を用い、予め試験片表面を加工し、その後 UCP を施し、その前後の試験片表面の残留応力および表面硬さを調査した。

3. 研究の方法

(1) 試験片および UCP 処理方法

本研究では試験片として Milling 材と Grinding 材をそれぞれ 3 本作製し、Milling 材を M1、M2、M3、Grinding 材を G1、G2、G3 とした。Milling 材は汎用フライス盤のフェイスマルにより加工した試験片であり、Grinding 材は平面研削盤の GC 砥石にて加工した試験片である。実験に使用した Milling 材、Grinding 材を図 1(a)および(b)にそれぞれ示す。図からわかるように、それぞれの試験片において切削加工によるカッターマークや焼けが確認できる。

UCP 処理は洗浄槽中央の底面から 27 mm の高さに試験片を 3 本配置し、洗浄液には常温の水道水 12 L を用いた。UCP 処理時間は 20 分とした。

(2) 残留応力測定

表面近傍の残留応力測定には東洋精鋼株式会社様ご協力のもと、株式会社リガク製の X 線回折装置 Auto MATE を用いた。測定方法は $\sin^2\psi$ 法であった。試験片長手方向に対して並傾法にて測定し、X 線の照射径は $\phi 2.0$ mm であった。また、残留応力測定箇所はそれぞれの試験片において図 1 に示している点 A、B、C、D、E の 5 点にて行った。

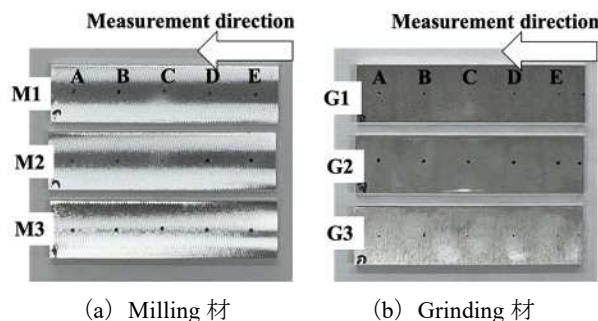


図 1 加工された試験片

(3) 表面硬さ

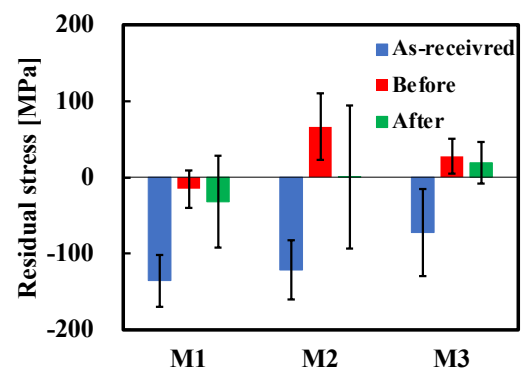
試験片の表面硬さ測定にはマイクロビッカース硬さ装

置である島津製作所製の HMV-G30S を用いた。As-received 材、Milling 材、Grinding 材、UCP 後の Milling 材、UCP 後の Grinding 材はそれぞれ別個体の試験片の表面硬さである。測定条件は押し込み荷重 0.2 kgf、0.3 kgf、0.5 kgf、1.0 kgf の 4 種類で行い保持時間は 15 秒とした。測定点は残留応力測定点の B、C、D 点である 3 点と、これらの点からそれぞれ上下 5 mm の点とし、合計 9 点の表面硬さを比較した。

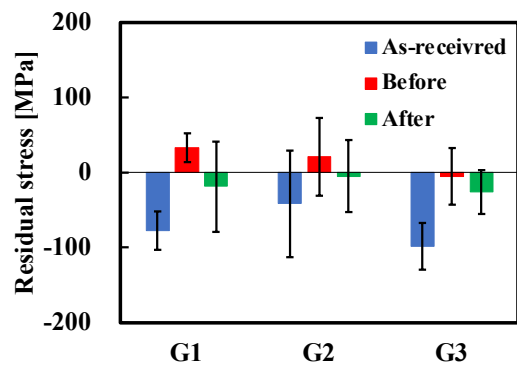
4. 研究成果

(1) USP 処理前後の残留応力

納入時 (As-received) と、加工後および UCP 前 (Before) と、UCP 後 (After) における Milling 材と Grinding 材の残留応力の変化を図 2(a)および(b)にそれぞれ示す。図はそれぞれの試験片の残留応力測定点 5 点の平均値と標準偏差を示している。納入時である As-received 材は圧縮残留応力が付与されていることがわかる。その後のフライス加工および、研削加工によって残留応力がプラス方向に変化し、加工した試験片に UCP を行うと残留応力がマイナス方向に変化していることがわかる。今回の結果では残留応力測定点 60 点のうち、53 点がマイナスの変化を示した。残留



(a) Milling 材



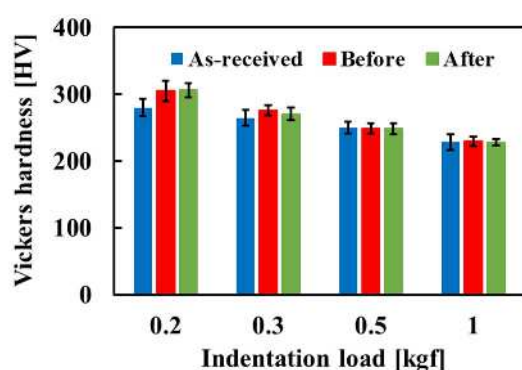
(b) Grinding 材

図 2 納入時に対する USP 処理前後の残留応力

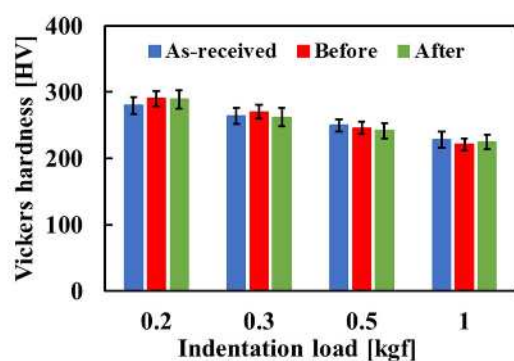
応力がマイナスに変化する要因としてはキャビテーションによる衝撃力が関係していると考えるが、詳細については今後の研究課題である。

(2) USP の表面硬さへの影響

UCP によって残留応力がマイナス方向に変化していることがわかった。ショットピーニングでは、一般的に投射材が衝突した衝撃により、表面層に塑性変形が起こり、圧縮残留応力が付与され、また表面硬さが向上することが知られている。UCP もキャビテーションの衝撃力によって



(a) Milling 材



(b) Grinding 材

図3 納入時に対する USP 処理前後の表面硬さ

試験片表面で塑性変形が起こり、残留応力がマイナスに変化したと考えている。このため、ショットピーニングと同様な変化が生じている場合、硬さも向上していると推測し、マイクロビッカース試験装置により表面硬さを調査した。

表面硬さの平均と標準偏差を図3(a)、(b)にそれぞれ示す。Milling 材、Grinding 材は切削加工による加工硬化のよって、試験片表面層が硬くなっていることがわかる。しかし、Milling 材、Grinding 材それぞれの試験片に UCP を行っても表面硬さが変化しないことがわかる。これより、UCP は表面近傍の残留応力には影響を与えるが、表面硬さへ影響は非常に少ないと言える。

5. まとめ

本研究では、切削加工と研削加工を施したアルミニウム合金に対して、超音波洗浄である UCP 処理を施し、その前後において表面近傍の残留応力および硬さに与える UCP の影響を調査した。得られた結果を次に示す。

- (1) 切削加工または研削加工によって生じた残留応力は UCP 処理によりマイナス方向に変化する。
- (2) 加工硬化により試験片の表面は硬くなるが、UCP によるこの硬さへの影響は非常に少ない。

6. 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
- (2) 山口洋平、武田亘平、本多祐二、“超音波洗浄ピーニングを用いたアルミニウム合金の残留応力低減”、日本機械学会 M&M2023 材料力学カンファレンス、2023 年 9 月