

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 18 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560136

研究課題名(和文)パルスレーザー誘起振動を用いた塑性加工法の開発

研究課題名(英文)Development of plastic forming method using pulse laser induced vibration

研究代表者

高橋 学 (TAKAHASHI, MANABU)

愛媛大学・理工学研究科・教授

研究者番号：20274334

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：レーザーパルスによる水中キャビテーションを利用した塑性加工の条件は詳細に調査された。しかしながら、降伏応力および加工硬化の低減現象は発現しなかった。

超音波印加による塑性加工において、明らかな低減現象が確認された。超音波振動を材料内で効率的に伝搬させるために、圧縮治具形状を変化させることにより低減率が上昇した。その最も高い効果は材料内のすべり方向の45度であった。結晶粒レベルで観察するため、X線回折を行った。塑性域印加では圧縮する前の試験片に近くなる傾向を示した。一方、弾性域印加では通常圧縮に近い粒度を示すことがわかった。

研究成果の概要(英文)：Plastic forming induced by bubble cavitation which was generated by laser pulse was tested in detailed conditions. However, the reduction behaviors of yield stress and work-hardening weren't expressed. Stress reduction behaviors clearly expressed in plastic forming induced ultrasonic vibration. In order to transmit efficiently ultrasonic vibration into the material, the shape of the compression jig was changed. As the results the stress reduction rate rose. Its highest reduction rate was 45 degree of slip direction. To observe crystal orientation in several compression conditions including ultrasonic vibration, X-ray diffraction was performed. When giving the supersonic from plastic region, the grain-size was approaching that of virgin material. On the other hand, when giving the supersonic from elastic region, the grain-size approached normal compression without the supersonics.

研究分野：材料強度

キーワード：超音波 塑性加工 Blaha効果 レーザー

1. 研究開始当初の背景

省エネルギー・省資源対策として様々な産業において小型化、軽量化、高効率化が進められている。塑性加工分野においても、高強度材料の塑性加工に関する優れた研究・技術が生み出されており、ものづくり大国日本の真骨頂が発揮されている。しかしながら、従来の塑性加工法は、高応(圧)力・高エネルギーを付与することが一般的である。そのため、加工時間の短縮という長所に対して、加工装置の大型化や高い稼働電力が必要となる。また、材料固有の加工限界によって塑性加工は制限されており、この壁を越えるような斬新な加工技術は少ない。学術的には、逐次成形や超音波利用などの加工法は、従来の力業の塑性加工法とは異なるため、興味深い研究分野である。

本研究の前段階として、メカニカル・ラチェット現象を利用した軸肥大加工に関する新しい塑性加工法の研究に携わってきた。しかしながら、高肥大率において肥大部端部に割れが生じる。この肥大率をさらに増大させるためには、加工硬化(転位密度の増大)を抑えることが必須となるとして、本テーマの着想に至った。すでにその基礎研究として、超音波圧電振動子から発せられる高周波振動を利用した塑性加工法について取り組んでいる。超音波を印加した材料の応力-ひずみ線図では、Blaha(応力低減)効果の発現が認められる。超音波印加により応力は本条件において20%以上の低下が確認できる。ただし、超音波振動子からの振動付与は機械的であることから、ホーン先端部の変形、振動子の発熱、共振周波数の変動(インピーダンス変化)などの問題があるため、本研究を進展させるためには非接触条件下での振動付与を考える必要がある。

そこで、レーザーピーニングに注目した。これは水中または水膜のある状態でパルス時間幅が数 ns ~ 数十 ns のレーザーを材料の表面に照射することによって高圧のプラズマを発生させ、それに伴う衝撃力を利用してピーニング処理を行う技術である。ピーニング処理は材料表面に加工硬化をもたらす。本研究では、そこまで高いエネルギーを必要とせず、材料内に振動を付与する程度でよいいため、高出力レーザーは不要である。設備的にも安価な加工システムとなる。

2. 研究の目的

降伏点以下の一定外力を受ける金属素材に対して、遠隔からパルスレーザーを照射し、部材内に励起された微小振動を用いることによって、降伏応力以下で塑性加工を行う。さらに、この振動効果によって加工硬化に伴う転位密度を緩和させ、通常の塑性加工限界を超える新しい加工法について基礎的研究を行う。

本期間内における研究到達目標は、
・パルスレーザー発振システムおよび負荷装

置の開発

・パルスレーザー照射による Blaha 効果発現条件の探索
・塑性加工限界超越の確認とその挙動メカニズムの検討

3. 研究の方法



図1 パルスレーザー発振器および手動油圧圧縮試験機

パルスレーザー発振器および手動油圧圧縮試験機との複合化により試験装置を設計し、試験機を製作した。試験条件パラメータはレーザー出力、焦点と振動板との距離である。試験材はA1070 アルミニウム合金とし、試験片は直径10×高さ15mmの円柱である。

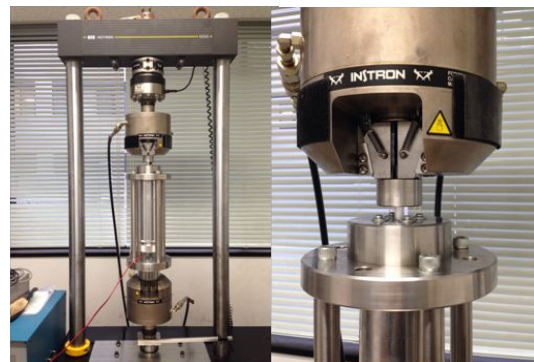
レーザーは試験機側面方向から入射後、反射鏡にて垂直上方に光路を変え、50mmの焦点距離を有する凸レンズを通して水中内で集光させた。パルスレーザー装置を利用して種々のパラメータを変化させた水中キャビテーションを発生させ、塑性加工の促進条件を詳細に調査した。

一方、超音波試験は容量100kNの電気油圧サーボ式引張圧縮試験機(インストロン社製)を用い、定荷重速度にて実験を行った。本実験で使用した超音波印加装置を備えた圧縮治具装置を図2(a)に、その試験部拡大図を(b)に示す。試験材料および試験片寸法はレーザー試験機と同じものとした。

4. 研究成果

4.1 パルスレーザー印加塑性加工の結果

パルスレーザー装置を利用して種々のパラメータを変化させた水中キャビテーションを発生させ、塑性加工の促進条件を詳細



(a)全体写真 (b)試験部詳細

図2 油圧サーボ式試験機に設置された超音波印加治具

に調査したが、降伏応力および加工硬化の明確な低減現象を発現することができなかった。

4.2 定変位速度下および定応力速度下での超音波弾・塑性域印加圧縮試験結果

定変位速度下の超音波弾・塑性域印加圧縮試験の実験結果を図3に示す。図中に見られる不連続データ部は試験中にインピーダンスが変化するために手動調整をするため、これらの挙動は無視する。印は塑性域から超音波印加開始した地点を示す。超音波印加とともに応力は瞬時に減少し、弾性域から印加した応力-ひずみ挙動と一致する。一方、印は弾性域から超音波印加開始し、停止した地点を示す。超音波印加停止とともに、応力は瞬時に増大し、超音波印加のない応力-ひずみ挙動と一致する。しかしながら、超音波印加圧縮と通常圧縮ではひずみの増加に伴い応力差が増大する傾向にある。

定荷重速度下の超音波弾・塑性域印加圧縮試験の実験結果を図4に示す。印は塑性域から超音波印加開始した地点を示す。定変位速度下の場合と同様に、超音波印加開始とともに変位(ひずみ)が瞬時に増大し、弾性域から印加した応力-ひずみ挙動と一致する。同じ応力で真ひずみ増分が4~5%程度増大していることが確認できる。

4.3 定ひずみの超音波印加圧縮試験結果

変位制御圧縮下において設定ひずみで固

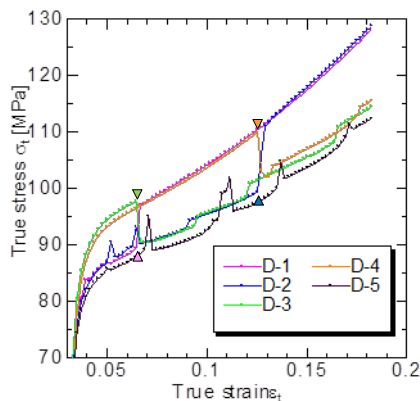


図3 定変位速度下における超音波印加時の真応力-真ひずみ曲線

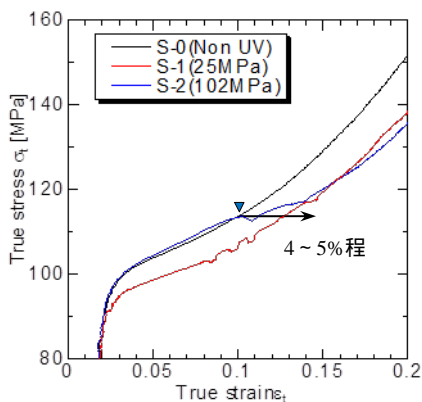


図4 定荷重速度下における超音波印加時の真応力-真ひずみ曲線

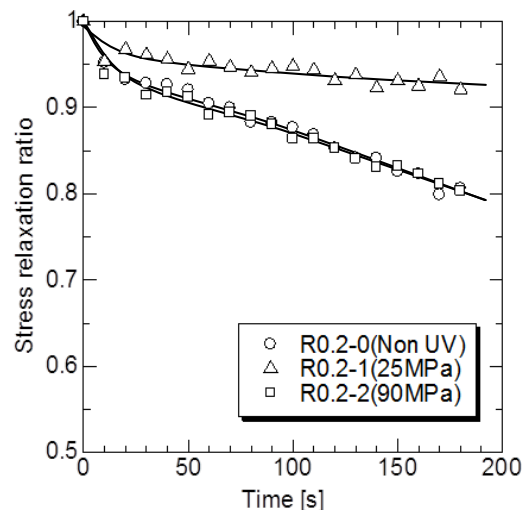
定し、超音波を印加する応力緩和(リラクゼーション)試験, および荷重制御圧縮下において設定応力で固定し、超音波を印加するクリープ試験を実施し、応力およびひずみ挙動を調査した。

定ひずみ超音波印加圧縮(応力緩和)試験の実験結果を図5に示す。超音波印加なしの場合、設定真ひずみが大きくなると応力緩和率も大きくなる。弾性範囲内(25MPa, 90MPa)から超音波印加した条件では設定真ひずみに依らず応力緩和率はほぼ同値であるが、塑性範囲内(102MPa)から超音波印加した条件では大きい。したがって、弾性域より超音波印加すると超音波印加なしに比べて応力緩和が大きく、塑性域より印加した場合は更に応力緩和が促進される傾向を示した。

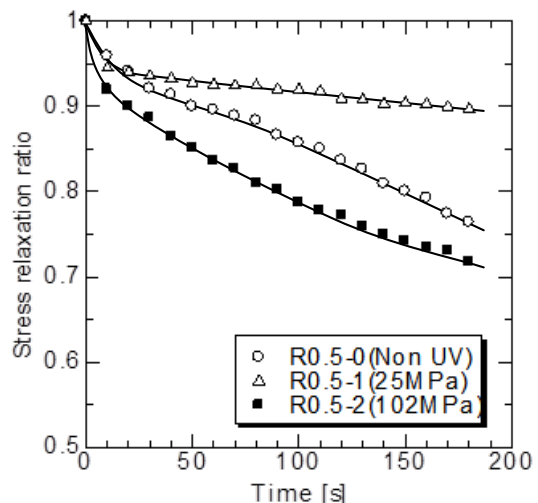
4.4 X線回折結果

圧縮過程の塑性域および弾性域において超音波振動を印加すると微細組織に対してBlaha効果がどのような影響を示すかを確認するためにX線回折を実施した。

各条件下で作成された試験体に対するX線回折結果を図6に示す。各結晶面において、超音波振動印加の有無、印加するタイミングによって積分幅やピーク強度にそれぞれ変



(a) 0.2% 真ひずみ固定



(b) 0.5% 真ひずみ固定

図5 応力緩和挙動

化が顕著にみられ、結晶組織の違いがうかがえる。特徴的な(111)面に注目して考察を行う。

処女材 X-0 の各結晶面を基準に比較する。X-0 のピーク強度(積分面積)は(111)面において高い。これに対し圧縮負荷した X-1,2,3 のピーク強度は著しく低下しているが、これは圧縮による原子配列の変化によるものである。また、超音波の弾性域印加では圧縮負荷したピーク強度とほぼ同値であるが、塑性域印加ではピーク値は高くなる傾向を示している。

4.5 Williamson-Hall 法による結晶粒径と不均一ひずみの解析結果

X 線回折によって得られたデータをもとに、Williamson-Hall 法による結晶粒径と不均一ひずみのプロファイル解析を行った。

超音波弾性印加では結晶粒径や不均一ひずみは通常圧縮の状態に近く、超音波塑性印加では未圧縮の状態に近い。また、どちらの場合も通常圧縮と比較すると結晶粒径 D は大きく不均一ひずみは小さい。弾性域印加は降伏点が降下することで圧縮が進み、ひずみが増加することで結晶粒径は圧縮され小さくなる。一方、塑性域印加では圧縮状態が緩和され結晶が広がり大きくなる。つまり、圧縮によって降伏後の転位密度の増大や介在物等によるピン止め効果(ひずみ硬化)に対して超音波印加によって転位密度の減少、すなわち変形抵抗の減少が生じているものと推察される。

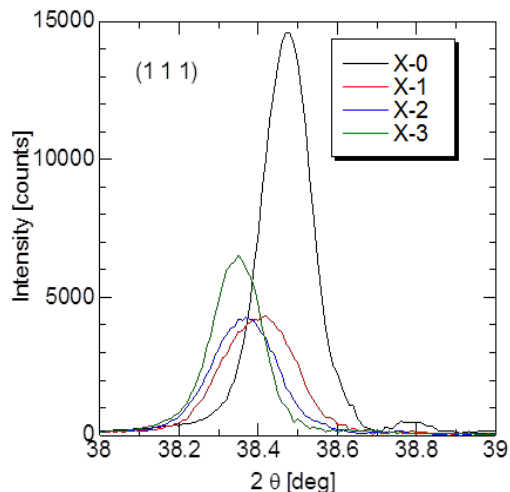


図 6 各条件下で作成された試験体に対する X 線回折結果

4.6 まとめ

(1) 定変位速度下および定応力速度下での超音波弾・塑性域印加圧縮試験

定変位速度下において塑性域から超音波印加開始すると応力は瞬時に減少し、弾性域から印加した応力 - ひずみ挙動と一致する。逆に、弾性域から超音波印加開始し、塑性域で停止すると応力は瞬時に増大し、超音波印加のない応力 - ひずみ挙動と一致する。しかしながら、超音波印加圧縮と通常圧縮ではひずみの増加に伴い応力差が増大する傾向にある。一方、定応力速度下において塑性域か

ら超音波印加開始すると、変位(ひずみ)が瞬時に増大し、弾性域から印加した応力 - ひずみ挙動と一致する。

(2) 定ひずみ超音波印加圧縮(応力緩和)試験

定ひずみ超音波印加圧縮(応力緩和)試験では、弾性域より超音波印加すると超音波印加なしに比べて応力緩和が大きく、塑性域より印加した場合は更に応力緩和が促進される傾向を示した。

(3) 定応力超音波印加圧縮(クリープ)試験

定応力超音波印加圧縮(クリープ)試験では、塑性域印加時のクリープひずみ速度は速く、ひずみ量も多くなる。一方、弾性域印加時のクリープひずみ速度は遅くなる。

活性化過程を考慮したクリープひずみ速度の関係式の活性化エネルギーに超音波(弾性印加および塑性印加)エネルギーの効果を仮定しそれぞれについて算出すると、超音波弾性印加エネルギーはクリープ挙動に抵抗する働きをもち、超音波塑性印加エネルギーはクリープ挙動を促進させる働きを持つことが示唆された。

(4) 結晶構造の相違(X線回折)

処女材に比べて圧縮負荷するとピーク強度は著しく低下するが、超音波塑性印加によりピーク強度が復元傾向にある。回折角 2θ は圧縮負荷によりシフトし、超音波弾性印加、塑性印加の順にさらにシフトする傾向を示した。塑性域印加のピーク強度が再上昇するのは、ひずみ硬化等の転位密度軽減に寄与しているものと思われるが、回折角 2θ はさらにシフトする結果に対する考察は不明であり、詳細な分析が必要であると考えられる。半値幅について通常圧縮では半値幅が広がる(結晶子の縮小)が、超音波印加により通常圧縮に比べて狭くなる傾向(結晶子の拡大)であり、塑性印加ではその傾向が明確である。

(5) Williamson-Hall 法による結晶粒径と不均一ひずみ

超音波弾性印加では結晶粒径や不均一ひずみは通常圧縮の状態に近く、超音波塑性印加では未圧縮の状態に近い。また、どちらの場合も通常圧縮と比較すると結晶粒径 D は大きく不均一ひずみは小さい。

圧縮によって降伏後の転位密度の増大や介在物等によるピン止め効果(ひずみ硬化)に対して超音波印加によって転位密度の減少、すなわち変形抵抗の減少が生じているものと推察される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計0件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕
ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

愛媛大学・理工学研究科・教授
高橋 学 (TAKAHASHI, Manabu)
研究者番号：20274334

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

愛媛大学・理工学研究科・助教
朱 霞 (ZHU, Xha)
研究者番号： 90325358

連携研究者

愛媛大学・理工学研究科・助教
松下正史 (MATSUSHITA, Masafumi)
研究者番号： 90432799