研究論文

超音波キャビテーションを利用した軽合金材料表面への圧縮残留応力付与技術の開発

中川　昌幸*　白川　正登*　本田　崇*

Application of the Cavitation Peening generated by Ultrasonic Vibration with the Bar-type Horn to Light Metal Surface

NAKAGAWA Masayuki*, SHIRAKAWA Masato*and HONDA Takashi*

抄　録

ステップ型ホーンにより増幅された超音波振動により，水中でキャビテーションを発生させ，その周期的な崩壊圧で金属表面をピーニングする効果により表面に圧縮残留応力を付与できる。本研究では，従来の円筒ステップ型ホーンよりも大型のバー型超音波ホーンを開発し，適切な速度で走査させることにより広い面積に対してピーニングを適用する技術を開発した。A5052 圧延板表面 200×180mm に対し，超音波加工ヘッドを 180mm/min で走査することにより，表面粗さをほとんど変化させることなく均一に-100MPa 程度の圧縮残留応力を付与することができた。

1. 緒　言

金属材料表面にショットピーニングに代表される表面塑性加工プロセスを施すことにより，圧縮残留応力が付与されることは良く知られている。材料表面に付与される圧縮残留応力は，疲労強度の向上や SUS304 などにおける応力腐食割れ対策，溶接引張残留応力の低減など，さまざまな効果が期待されるため，工業的にも自動車部品などさまざまな対象にピーニングが適用されている。これらの方法では，ショットと表面という固体同士の衝突によるディンプル形成は避けられず，深部まで圧縮残留応力を付与できる反面，表面粗さの増大，最表面のダメージ層形成を引き起こすため，その効果を半減させてしまうという問題点がある。この対策として，ひとつには WPC（微粒子ピーニング）のようにショットを微粒子化することが考えられるが，本研究では超音波振動により発生させるキャビテーションを利用する方法を提案する。

* 研究開発センター

過去の研究において，キャビテーションの気泡はその崩壊時には，マイクロジェットにより非常に激しい衝撃圧が発生し，最大で数 GPa 程度という大きな値を示すことは，数値解析だけでなく，測定値としてもいくつもの研究結果が示されており [1)]，妥当な主張であると考えられる。そのような大きな衝撃圧は金属材料を塑性変形させるには十分に強力であり，キャビテーションを適切にコントロールすることによってピーニングプロセスとして利用できると考えられる。

東北大の祖山教授はキャビテーションによるピーニングを検討し，キャビテーション・ショットレス・ピーニング（以下 CSP）と名づけ，多くの研究成果を示している。特に，アルミ合金鋳物に対して，CSP ではショットピーニングよりも圧縮残留応力深さが小さいものの，表面へのダメージが少ないために，結果として疲労強度が向上するという結果 [2)] は，前述のとおり，付与できる残留応力深さが小さくても，表面ダメージが少ないことにより，ショット

ピーニングとの置き換えも可能なケースがあることを示唆している。

本研究においては，超音波振動を利用してキャビテーションを発生させる。水中における超音波でキャビテーションが発生することは工業洗浄の分野で良く知られている。

本研究では，より効率的な処理のためキャビテーション発生領域となる振動ホーン先端面を大きく設計することを検討し，さらに実用性を高めるため，走査させることによって効率的な広い面積へのピーニングを検討した。

2. 超音波キャビテーションピーニング技術の概要

2.1 超音波によるキャビテーション発生

ホーンを介した超音波キャビテーションピーニングの最も基礎的な超音波振動発生部の構成を図 1 に示す。19.5kHz の超音波振動子の振動をステップ型ホーンにより増幅する。水中においてホーン先端を被処理面に対し近接させた状態で振動させることにより，ホーン先端面と試料面間において急速な圧力変化が生じ，キャビテーション現象が発生する。水中翼周りなどの流速変化によるキャビテーションと異なり，超音波振動の周期によってキャビテーション気泡の発生，崩壊のサイクルが誘起されるため，超音波振動と同じ周期の表面ピーニングが実現できる。

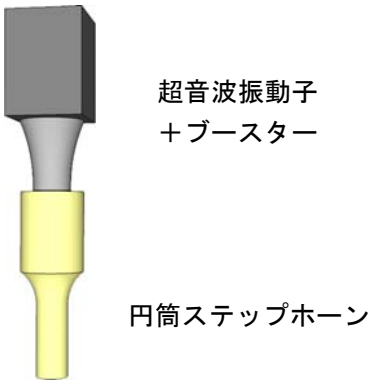


図 1 超音波振動部の構成

2.2 キャビテーション壊食

一般的にキャビテーション現象は壊食を伴う現象として理解されている。壊食とは，キャビテーションにより，設計寿命よりも遥かに短い寿命で破壊が起こる現象である。古くは船舶のスクリューの初期破壊などで知られ，ポンプの破損など流体機械において避けるべき現象である。このメカニズムは水中翼周りなど流速変化の激しい領域で気泡が発生，崩壊を繰り返し，キャビテーション気泡の激しい崩壊圧が繰り返し作用することにより，表面の局部的な破損が蓄積し破壊に到るものである。本研究においても，キャビテーション現象を利用することから，壊食現象との関連性は考慮する必要があると考えられる。

3. 超音波キャビテーションピーニングの適用

3.1 アルミニウム合金表面への適用

板厚 3mm の A5052 圧延板に対して，超音波キャビテーションピーニングを適用した。図 2 に表面粗さの変化を示す。照射時間 5sec まで表面粗さの変化は非常に小さく，圧延板の入手時の Ra 値 0.23μm からの変化はほとんどない。照射時間 5sec 程度を超えると表面粗さが大きくなっている。この表面粗さの悪化は，キャビテーション衝撃圧による表面ひずみ導入から，壊食による表面脱落状態へ遷移しているためである。しかし，それでも通常のブラストやショットピーニング処理面と比較すると，表面粗さ

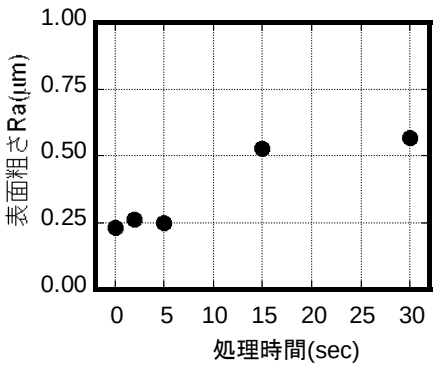
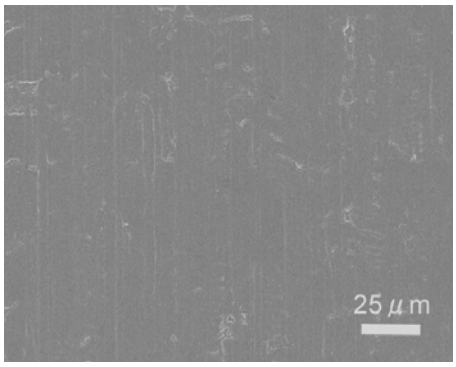
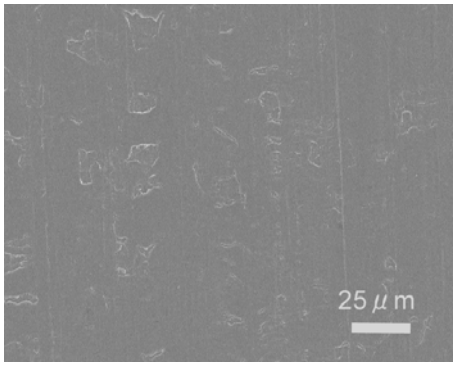


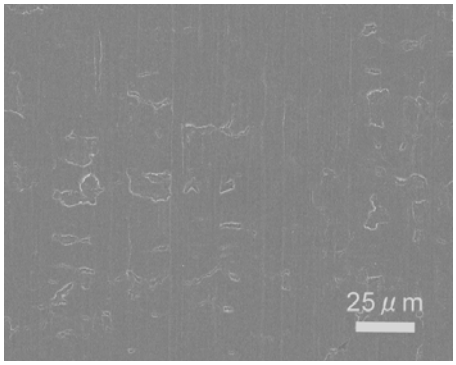
図 2 表面粗さの変化



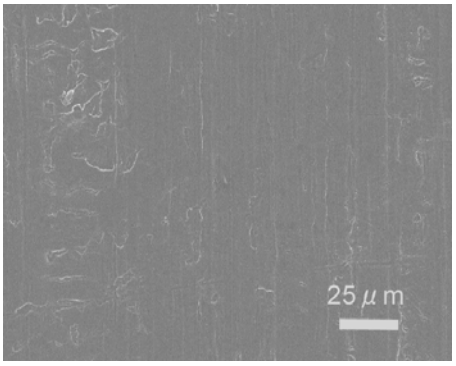
(a)未照射



(b)　5sec



(c)　15sec



(d)　30sec

図 3　表面 SEM 観察

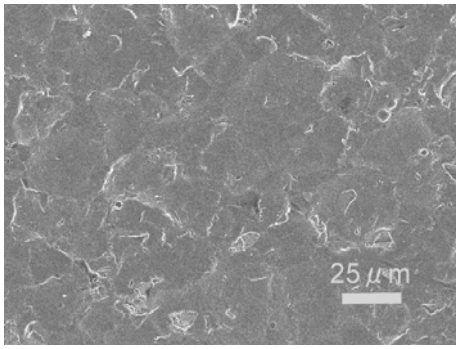


図 4　ウェットブラスト処理面の一例
（ノズル走査速度 600mm/min）

の変化は非常に小さい。図 3(a)～(d)に超音波照射時間 0，5，15，30sec の表面 SEM 観察写真を示す。未照射状態の表面から，大きな変化は見られない。比較のため，図 4 にウェットブラスト処理面の SEM 観察写真を示す。固体ショットによるピーニングでは，ショットの衝突痕が表面を覆い表面ダメージ層を形成するが，超音波キャビテーションでは表面ダメージがほとんどないことが分かる。また壊食による大きな表面脱落も見られない。

3.2　アルミニウム合金表面に付与される圧縮残留応力

先端面φ15mm の円筒ステップホーンを用いてキャビテーションピーニング処理した A5052 圧延板の表面残留応力を測定した。X 線回折により Al の（222）ピークを測定し，$\sin^2\psi$ 法を用いて応力を算出した。回折ピーク位置の決定には半価幅中点法を用いた。図 5 に超音波キャビテーションピーニング処理部中央における表面圧縮残留応力の処理時間による変化を示す。RD，TD はそれぞれ圧延方向とその垂直方向の応力である。処理時間とともに圧縮残留応力が増加し，5sec ほどの処理でほぼ-100MPa 程度に達している。付与される圧縮残留応力の最大値は，処理材の降伏する応力程度であり，加工硬化度の大きい材料は，加工により降伏応力が向上することにより，静的な降伏応力以上の圧縮残留応力が付与されることが分かっている [3)]。

本研究で使用した A5052 の 0.2%耐力はおよそ 110MPa 程度であり，超音波キャビテーションピーニングによる付与応力も同程度である。図 6 に残留応力測定で用いた回折ピークの半価幅の変化を示す。回折ピークの半価幅は焼き鈍しの無ひずみ状態では小さくなり，内部に生じた転位などの結晶格子面の乱れに比例して広がることが知られている [4]。半価幅は，処理時間につれて増大している。図 3 において超音波キャビテーションピーニングによる表面形態の大きな変化は見られないが，表面内部に微視的には転位などのひずみが導入されていることが分かる。キャビテーションピーニングではこのようなひずみにより圧縮残留応力が引き起こされていると考えられる。図 7 に処理部中心を位置 0mm として 2.5mm おきに測定した圧縮応力の処理時間による変化を示す。照射部における位置による違いはほとんど無く，処理領域にほぼ均一に-90～-115MPa 程度の圧縮残留応力を付与することができた。

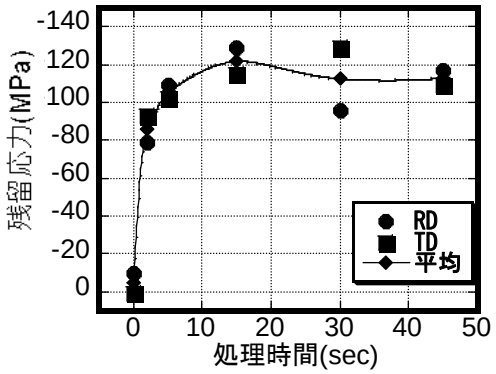


図 5　処理時間による残留応力の変化

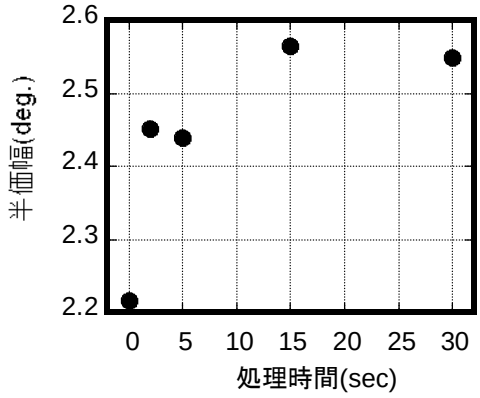


図 6　処理時間による X 線回折ピーク半価幅変化

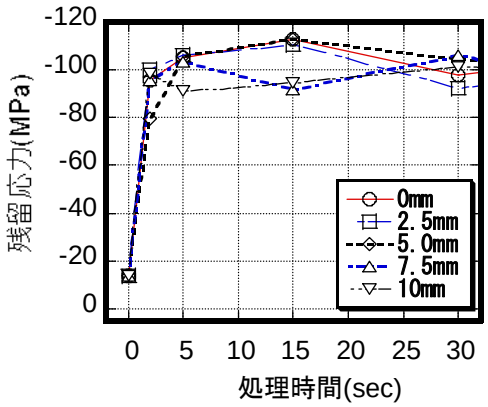


図 7　処理部半径方向の残留応力分布

4.　広面積処理対応超音波キャビテーション加工ヘッドの開発

4.1　バー型ホーンの適用

本研究では，超音波振動子とホーンからなる加工ヘッドを処理面に対して走査させることにより，広い面積へのピーニングを行うことを検討した。そのためのホーン形状としては，スキャン方向に対し，垂直方向に長い長方形断面を持つ形状が適していると考えた。一方このような形状は，超音波の伝播方向に対し垂直な方向への寸法が大きくなるため，曲げなどの横方向の振動モードに対する検討が必要となる。このような形状のホーンは，超音波溶着装置で多く用いられ，バー型ホーンと呼ばれる。本研究においてホーンに不可欠な機能として，振動面が均一かつより大きな振幅を得るということであり，超音波溶着の用途とほぼ一致することから，このバー型ホーンを設計し，超音波キャビテーションピーニングへの適用を試みた。

4.2　バー型ホーンの形状

図 8 にバー型ホーン形状の概略図を示す。走査する方向から見た正面図では，幅広の形状であり，側面から見ると R でつないだ段付形状

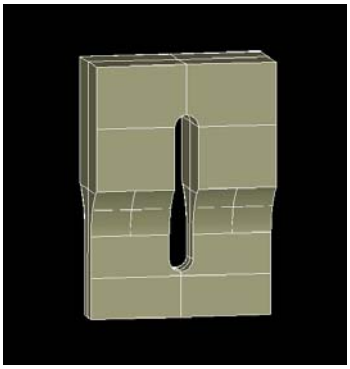


図 8　バー型ホーン概略図

となっている。中央部にはスリットを設けてあり，横方向の振動伝播を抑制している。詳細な高さ，幅寸法は FEM の固有値解析により，最適値を求めた。

4.3　超音波キャビテーションピーニングの適用

超音波振動子にバー型ホーンを取り付けた加工ヘッドをロボットアームで把持し，200mm×180mm の面積に対し，ピーニング処理を施した。図 5 より，5sec 程度のピーニングで圧縮残留応力は-100MPa 程度まで付与されていることから，これと同等の条件となる，180mm/min 程度で走査させた。200mm × 180mm の照射面において，図 9 に示す 3×3 の計 9 ポイントについて，表面残留応力測定と表面粗さ測定を行った。残留応力の結果を図 10

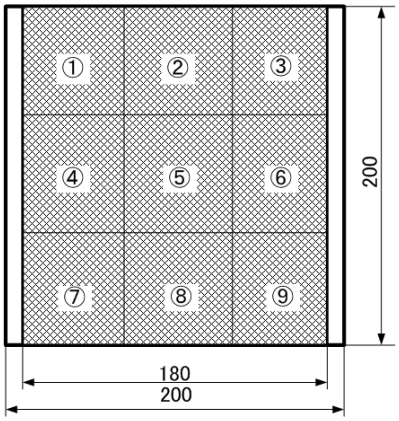


図 9　測定位置（斜線部が処理領域）

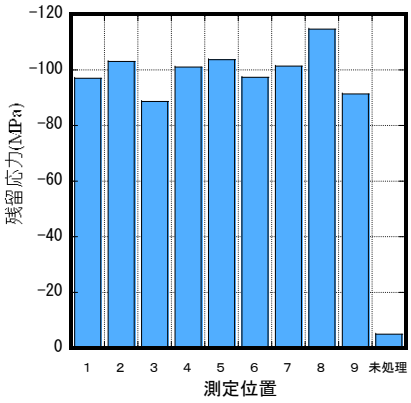


図 10　走査ピーニング残留応力

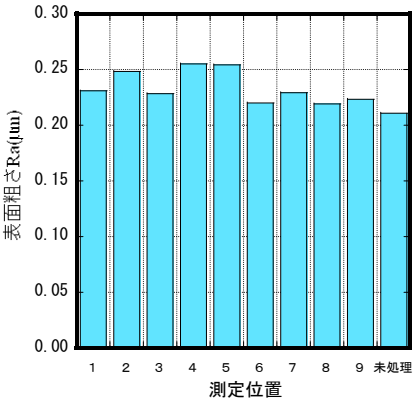


図 11　走査ピーニング表面粗さ

に表面粗さの結果を図 11 にそれぞれ示す。

5.　結　　言

（1）超音波キャビテーションピーニングの実用化を目指し，キャビテーション照射面積を拡大させたバー型ホーンを開発した。

（2）開発したバー型ホーンを処理面に対し走査させることにより，200mm×180mm の面積に超音波キャビテーションピーニングを施した。A5052 圧延板表面に表面粗さを劣化させることなくほぼ均一に圧縮残留応力を付与することができた。

なお，本研究は，(独)科学技術振興機構の平成 20 年度重点地域研究開発推進プログラム（地域ニーズ即応型）「超音波キャビテーションを利用した軽合金材料表面への圧縮残留応力

付与技術の開発」の一環で実施したものである。

参考文献

1）加藤洋治編著，“新版キャビテーション”，槇書店，1999，p204.
2）祖山均ほか，“キャビテーション・ショットレス・ピーニングによる金属材料の疲労強度向上”，自動車技術会論文集，34，1，2003，p101-106.
3）中川昌幸，渡辺健彦，“水中超音波照射による金属材料表面への圧縮残留応力の付与”，溶接学会論文集，22，4，2004，p587-594.
4）カリティ，“X 線回折要論”，アグネ，1691，p265-271.