

ホーンを介した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*

- 液中超音波照射による材料の表面改質 (第1報) -

中川 昌幸**, 渡辺 健彦***

Introducing Compressive Residual Stress on Metal Surfaces by Irradiating Ultrasonic Wave with a Horn in Water *

—Surface Modification by Irradiating Ultrasonic Wave in Liquid (Report 1)—

by NAKAGAWA Masayuki** and WATANABE Takehiko***

Ultrasonic wave of 19.5 kHz frequency oscillated with an ultrasonic transducer and amplified with a step type horn was irradiated on metal surfaces in water to introduce compressive residual stress. Slight plastic deformation occurred at the surface region of pure metal such as Cu and compressive residual stress was introduced. It seemed that the plastically deformed depth from the surface corresponded approximately to the region where the compressive residual stress is extended from the surface. The higher compressive residual stress could be introduced into the surface of Cu-Zn brass and SUS304 stainless steel because work-hardening was simultaneously induced to those alloys. Furthermore, since martensitic transformation was induced by the plastic deformation in the case of SUS304, the larger compressive residual stress could be introduced more deeply into the surface region. The residual stress of SUS304 surface reached to the maximum value of 574 MPa by irradiating for 5 min and the stress extended to the depth of about 170 μ m from the surface.

Key Words: Ultrasonic wave, Cavitation in water, Compressive residual stress, Plastic deformation, Yield stress

1. 緒 言

液中での超音波あるいは音響波の発生や伝播に付随して生じる諸現象は、医療分野をはじめ、洗浄、攪拌や化学反応の促進等の工業分野において広範囲で応用されている¹⁾。そのほとんどは、超音波あるいは音響波の液中における非線形現象を利用したものであり、その一つにキャビテーション現象がある。

液中におけるキャビテーション現象は、液体の圧力が急激に低下することにより気泡が発生する現象である。この現象は、ポンプやプロペラ等の破損等を招く現象としてその特性解析や対策等の研究が数多く行われてきた。この現象は、気泡の崩壊時に生じる非常に大きな衝撃力が材料表面の脱落、すなわち壊食を引き起こし、破損に至らしめるという回避すべき現象として捉えられてきた。

しかし、近年、その局部的に生じる大きな衝撃力^{3), 4)}を

金属材料の表面処理方法として有効に利用する研究も行われてきている⁵⁾。例えば祖山らは、ウォータージェット装置によって、水中において高速噴流を発生させ、その衝突時に発生するキャビテーションが材料表面に与える効果についていくつかの検討を行った⁶⁾⁻⁸⁾。それによれば、キャビテーションによる気泡の崩壊時に局部的な衝撃力が発生することにより、材料表面に圧縮応力が付与され、結果として疲労強さが向上することが確認された。

また、著者らは、水中で超音波を照射することによって、応力腐食割れなどが問題になるオーステナイト系ステンレス鋼の材料表面に圧縮残留応力を付与できることを確認し、報告している⁹⁾。

このキャビテーション衝撃力によって材料表面に圧縮残留応力が付与される現象は、ショットピーニング¹⁰⁾と類似していると考えられる。ショットピーニングとは、材料表面に硬い微小な金属あるいはセラミックを高速で衝突させ、その際に引き起こされる塑性変形によって圧縮残留応力を付与して、疲労強さなどの材料特性を改善する表面処理技術であり、疲労強度が要求される多くの自動車部品をはじめ、様々な分野に適用されている。しかし、材料の表面粗さの低下を招くことや、被加工物の形状に制約を受けるなどの問題点がある。

液中における超音波照射によってキャビテーションを發

*原稿受付 平成16年5月24日

**学 生 員 新潟大学大学院 Student Member, Graduate School, Niigata University

***正 員 新潟大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Niigata University

生させ、気泡の崩壊時に発生するとされる衝撃力を利用することはショットピーニングと同様な材料の疲労強さの改善や溶接部に発生する引張残留応力の緩和と圧縮残留応力の付与、オーステナイト系ステンレス鋼における応力腐食割れの改善、さらにはショットピーニングで処理できないような小型部品や薄板や箔などに適用できるなどの利点が考えられる。しかし、超音波照射時に発生するキャビテーションによる材料表面への圧縮残留応力の付与機構や影響因子およびキャビテーション発生による表面損傷の関係について検討した研究例はない。

本研究では、最初に、水中超音波照射時に発生するキャビテーション気泡による衝撃荷重の特性を調べた後、超音波照射によって生じる材料表面の残留応力の変化特性を明らかにし、さらに、材料特性との関連性を調べた。また、キャビテーション発生時に問題となる材料表面の壊食について調べた。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材

供試材には、材料の機械的性質と残留応力との関係の評価するために、純金属として無酸素 Cu、工業用純 Fe、工業用純 Al を用い(以後、Cu, Fe, Al)、また、炭素鋼 S45C (以後、S45C)、Al-Mg-Mn 系アルミニウム合金 (以後、A5083)、加工硬化度の高い Cu-30%Zn 黄銅 (以後、Cu-Zn)、さらに塑性変形によってマルテンサイト変態を起こすオーステナイトステンレス鋼 SUS304 (以後、SUS304) を使用した。これら金属・合金の引張試験より求めた引張強さ(UTS)、降伏応力(YS)、および加工硬化指数 n 値を Table 1 に示す。なお、降伏点が明確に現れない材料では、0.2% 耐力と表現するのが正しいが、本研究ではこれを材料の一般的な降伏強さを表すパラメータとして捕らえ、降伏応力と表記する。 n 値は、引張試験より求めた真応力と対数塑性ひずみを対数目盛り上にプロットし、その傾きから算出した。

Table 1 Mechanical properties of materials used.

	UTS(MPa)	YS(MPa)	n
Cu	220	38	0.43
Fe	350	213	0.25
Al	82	28	0.28
S45C	568	343	0.25
Cu-Zn	361	144	0.37
SUS304	715	278	0.53
A5083	320	154	0.25

実験に用いた試験片の寸法・形状は、板厚 10mm、32mm × 32mm の正方形である。本研究では、電解研磨による表面の材料除去と X 線応力測定を繰り返し行うことにより、圧縮残留応力の付与に作用する表面層の深さを検討した。材

料除去による応力開放の影響を考慮して試験片の板厚は 10mm とした。供試材の前処理は、超音波照射面をエメリー紙で研磨後バフ研磨を行い、表面粗さ Ra を 0.01 μm 程度にした。その後、真空焼なましを行い初期残留応力を取り除いた。各供試材の焼なまし条件¹¹⁾を Table 2 に示す。

Table 2 Conditions for vacuum annealing

	Temperature()	Time(h)
Cu	450	1
Fe	650	3.5
Al	345	1
S45C	600	1
Cu-Zn	400	2
SUS304	900	1
A5083	345	1

2.2 実験方法

超音波トランスデューサ(振動周波数: 19.5 kHz)により発振させた超音波振動は、ステップ型ホーンを介して増幅され、水中に置かれた供試材に照射された。ホーン先端の振幅は両振幅で約 45 μm である。ホーンの材質は SUS304 ステンレス鋼で、その先端の直径は 15mm である。ホーン各部の寸法を Fig.1 に、実験装置の概略図を Fig.2 に示す。超音波加振による縦振動が鉛直方向になるように超音波トランスデューサとホーンを固定した。供試材は十分な重量のある治具に固定し、ホーン先端と供試材表面との距離を 1mm としてホーン直下の水中に配置した。振動媒体として水温 15 の水道水を使用した。なお、ホーン先端と供試材表面との距離を 1mm とした理由は後述する。

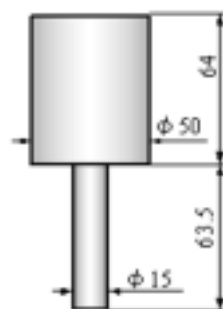


Fig. 1 Shape and size of a horn.

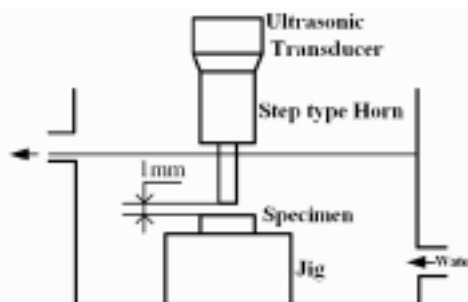


Fig. 2 Schematic of an apparatus for ultrasonic wave irradiation.

Table 3 Conditions for X-ray stress measurement.

Material	X-ray	Diffraction plane	Stress constant, K(MPa/deg.)	Irradiation Area	Detector
Fe	Cr-K α	(211)	-318		PSPC, V filter
Cu	Co-K α	(400)	-116		PSPC, Fe filter
Al	Co-K α	(420)	-69.5		PSPC, Fe filter
S45C	Cr-K α	(211) of α Fe	-318	2.3mmsq	PSPC, V filter
Cu-Zn	Co-K α	(400)	-167		PSPC, Fe filter
SUS304	V-K α	(311) of γ Fe	-267		PSPC, Ti filter
A5083	Co-K α	(420)	-69.5		PSPC, Fe filter

2.3 評価方法

2.3.1 残留応力測定

試験片表面の残留応力の測定は、X線応力測定法 (sin²法)¹²⁾ により行い、回折強度曲線のピーク位置の決定には半価幅法を用いた。圧縮残留応力の付与に作用する表面層の深さは、X線応力測定と電解研磨による材料除去を交互に繰り返し行う方法で検討した。本研究で使用した X線応力測定条件を Table 3 に示す。

2.3.2 塑性変形による加工硬化の評価

Cu を用いて、超音波照射部及びその周辺の硬さの分布を測定し、塑性変形による加工硬化を調べた。硬さの変化を詳細に調べるために微小荷重で圧子を押し込み、その押し込み深さを測定することによって評価した。付与した荷重パターンを Fig.3 に示す。基準荷重 F₀ の押し込み荷重を付与した後に試験荷重 F₁ を与え、基準荷重 F₀ 負荷時における押し込み深さと最大押し込み深さとの差 h を測定するロックウェル硬さ測定と同じ測定手順である。この方法では、圧子と材料表面との接触点における表面粗さなどの微小なばらつきを低減できる。圧子はダイヤモンド製のパーコピッチ (三角錐) 圧子を使用した。各測定位置における硬さは、式(1)によって算定¹³⁾し、焼きなまし後の母材の硬さ値により割り算をした商を用い、正規化した値 (以下単に硬さと表記する) として、硬さの変化を評価した。各測定条件を Table 4 に示す。ここで、Surface は超音波照射面を表し、Cross-section は断面深さ方向の測定を行うために供試材を切断した面を表す。供試材の切断は、超音波照射部の中央を通るように行い、切断面を鏡面研磨した。

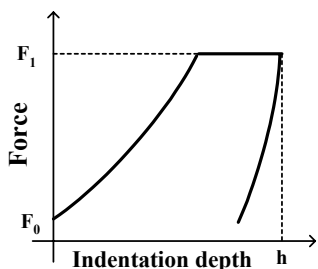


Fig. 3 Loading pattern to measure micro-hardness.

$$Hardness = K \frac{(\sqrt{F_1} - \sqrt{F_0})^2}{h^2} \dots (1)$$

Table 4 Measuring conditions for micro-hardness.

	Surface	Cross-section
Test load (mN) : F1	98.1	29.4
Normal load (mN): F0	19.6	5.88
Indentation depth(μm)	1 ~ 2	~ 0.7
Indentation speed (μm/s)	0.5	0.09
Holding time of F1 (s)	10	10
Unloading time (s)	10	10

3. 実験結果および考察

3.1 水中超音波によるキャピテーション気泡の挙動

3.1.1 水中超音波照射時に発生するキャピテーション気泡による衝撃荷重の特性

超音波は音響波であり、媒質中を伝播する疎密波である。つまり伝播経路のある一点においては圧力の変動として作用する。液体中における超音波照射では、その高速な圧力変動により非線形現象であるキャピテーションが発生することが知られている。水中における超音波照射による圧力変動によって作用する力の特性を調べるため、Fig. 4 に示すように、供試材の代わりに荷重センサを設置し、ホーン先端からセンサ受感面までの距離 (d) を変化させ、作用する荷重を測定した。荷重センサの受感面は直径 13mm であり、単一気泡による衝撃力を測定することはできないが、超音波照射によってその領域に発生する周期的な気泡の挙動を捕らえるには十分である。例として d=1.0mm における荷重(N)の時系列データを Fig. 5(a)に示す。

ホーン先端の超音波振動を入力、荷重センサによる荷重測定値を応答とした系として考えると、入力である超音波振動が周波数 19.5kHz の正弦波であるのに対し、荷重センサにより得られた応答波形には波形の崩れがみられ、その周期も発振した超音波と異なっている。この時系列データをフーリエ変換した結果を Fig. 5(b)に示す。入力である超音波の周波数 19.5kHz のピーク以外にそのおよそ 2 倍の周波数で

ある 39kHz 付近に、より強度の大きい第二高調波が現れており非線形性を示している。

また、比較のため超音波トランスデューサへの加電圧をわずかに下げ、気泡がほとんど発生しなかった時の荷重センサから得られた時系列データを Fig. 6(a)に、フーリエ変換した結果を Fig. 6(b)に示す。Fig. 6(a)において荷重のレベルが Fig. 5(a)の場合に比べて非常に低くなっている。また、わずかな気泡の発生状態であっても正弦波から波形の崩れが少しみられるが、Fig. 6(b)のスペクトルにおいて非線形性を示す第二高調波のピークは低く、入力波である超音波発振周波数の周波数成分の強度が相対的に大きくなった。

水中超音波照射によって激しくキャビテーション気泡を発生させた時には強い非線形性を示すとともに、より強力な圧縮衝撃荷重を作用させることができると考えられる。

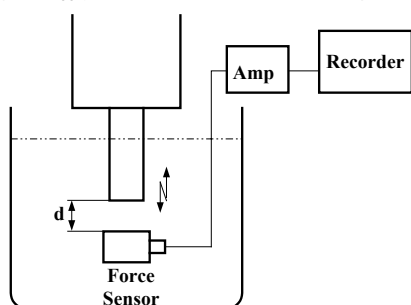


Fig. 4 Schematic to measure force caused by ultrasonic vibration.

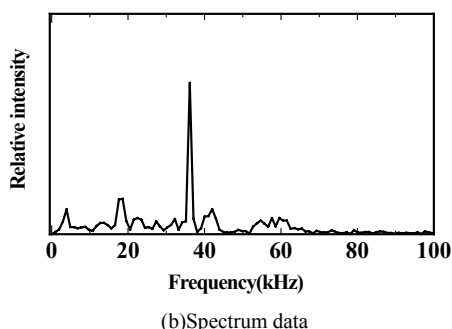
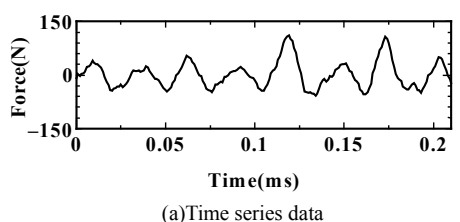


Fig. 5 The data obtained from the force sensor when cavitation bubbles were intensively generated.

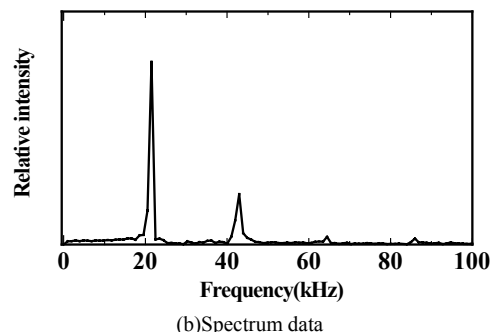
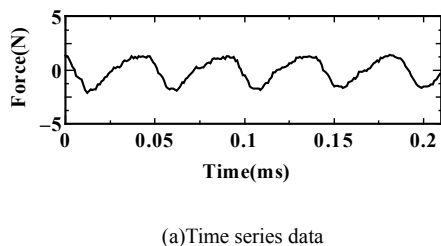


Fig. 6 The data obtained from the force sensor when few cavitation bubbles were generated.

3.1.2 ホーン先端と試験片との距離の設定

Fig.4 に示す測定装置で d の値を変化させ、荷重センサから得られる圧縮荷重のピークを抜き出して荷重レベルにより頻度解析を行った。 d の値を変えて、4 秒間荷重波形データを取得後、波形データから圧縮荷重のピークを抜き出して横軸に圧縮荷重ピーク値をとり、縦軸にその発生度数をプロットした図を Fig. 7(a)に示し、縦軸を対数スケールとした図を Fig. 7(b)に示す。Fig. 7(a)より、各条件において荷重ピークの最大値は 200~300N となっているが、発生度数をみると、ほとんどは最大値の 1/2~1/3 程度の 100N 以下の荷重であった。また、Fig. 7(b)にみられるように、 d の値が大きくなるに従い、高い荷重レベルのピーク頻度が減少する傾向がみられる。ただし、 $d=3\text{mm}$ 以上では明白な度数の減少がみられるが、 $d=0.6\text{mm}, 1\text{mm}$ ではほとんど違いがみられなかった。そこで、本研究では、条件を統一するため、以後のすべての実験において、 $d=1.0\text{mm}$ とした。

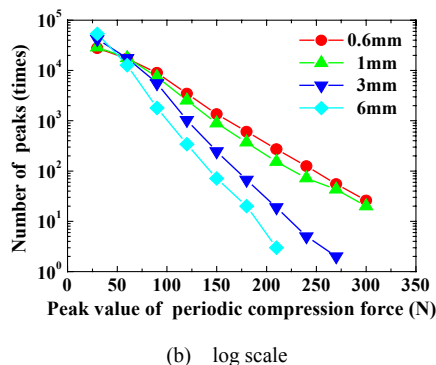
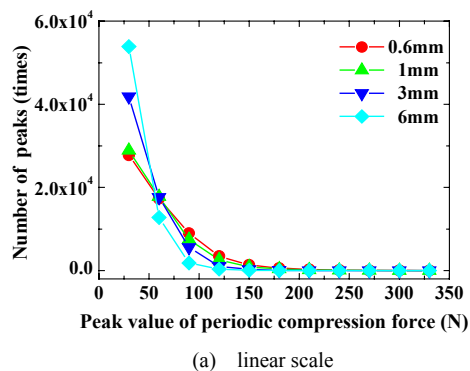


Fig. 7 Frequency distribution of compression force.

3.2 水中超音波照射による圧縮残留応力の変化

超音波を 1min, 2min および 5min 間照射した Cu 表面の顕微鏡写真を Fig. 8(a)~(c)に示す. 照射時間とともに, ホーン直下の領域にホーン先端とほぼ同じ形状の表面状態の変化が明瞭に現れている. また, Cu 表面における超音波照射時間と圧縮残留応力の関係を Fig. 9 に示す. この時の応力測定位置は, 超音波照射部中央のおよそ 2.3 × 2.3mm の範囲である. 横軸における超音波照射時間, 0min, 0.5min はそれぞれ, 未照射, 30sec の照射を意味する. 超音波照射によって圧縮応力が付与されていることがわかる. 圧縮応力値は超音波照射時間とともに増大し, 1min で約 180MPa の最大値を示した後, 若干の減少傾向を示した.

圧縮残留応力が最大値をとった後に測定値のばらつきが大きくなり, 減少傾向を示す理由については 3.4 項で触れるが, 超音波照射をある時間以上長くすると, 照射部の表面粗さ値が急激に大きくなる傾向にあり, 応力の測定値がばらつくこと, また, その際に起こる材料表面の損傷, 脱落による応力開放がその一因であると考えられる.

Fig. 10 に照射部中心を位置 0mm とした時の Cu 表面における硬さと圧縮残留応力の分布を示す. 超音波照射時間は 1min である. 硬さは, 各位置において式(1)により算出した硬さ H_i を求め, 超音波照射前の硬さ H_0 との比 $H=H_i/H_0$ で表した. ホーン先端の半径が 7.5mm であるのに対し, 0mm から 6mm の領域で明らかに硬化がみられる. キャビテーション気泡がほとんど発生しないホーン先端の外側の領域となる 8mm の位置では硬さが若干低下し, さらに外側の 10mm, 12mm の位置では硬化はほとんどみられなかった. これは, ホーン先端面と材料表面の間で発生しているキャビテーション気泡の挙動によって加工硬化が生じたことを示している. そして, 圧縮残留応力も同様に, このホーン先端面直下の内側で付与されており, 加工硬化した領域と圧縮残留応力が付与された領域がほぼ一致していることがわかる.

また, Fig. 11 に表面から深さ方向に測定した硬さと表面を 10 μ m 除去する毎に測定した残留応力値を示す. Fig.10 同様, 超音波照射時間は 1min である. 表面と同様, 硬化深さと圧縮残留応力付与に作用する表面層の深さがほぼ一致している. 以上より, 加工硬化が起こった領域と圧縮残留応力付与に作用する領域はほぼ一致していることが分かった. ここで, 圧縮残留応力付与に作用する領域という表現は, その領域が除去されることによって, 応力開放され, その周辺が初期の応力状態にもどるという意味で用いた.

つまり, Cu においては, 超音波照射によってキャビテーション気泡が激しく発生したホーン直下の領域において, 気泡による衝撃荷重の作用によって塑性変形が引き起こされた結果, 圧縮残留応力が付与されたと考えられる.

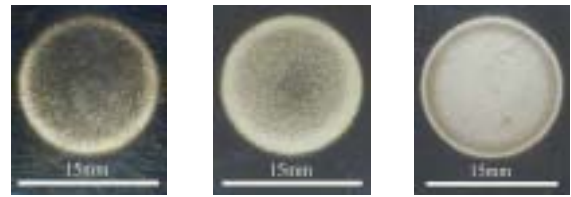


Fig. 8 Optical microscopic observation of Cu surfaces irradiated.

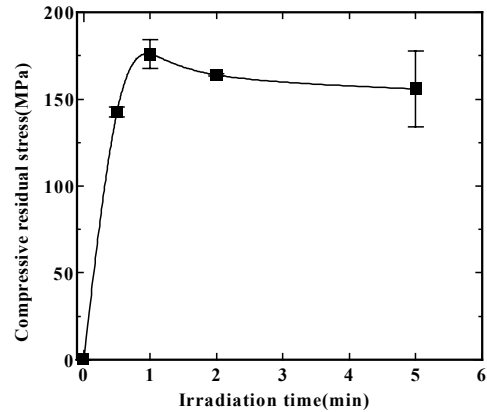


Fig. 9 Irradiation time vs. surface compressive residual stress on the Cu surface.

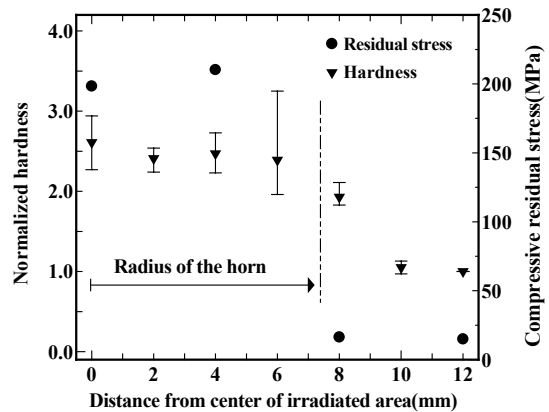


Fig. 10 Hardness and compressive residual stress distribution in the irradiated area.

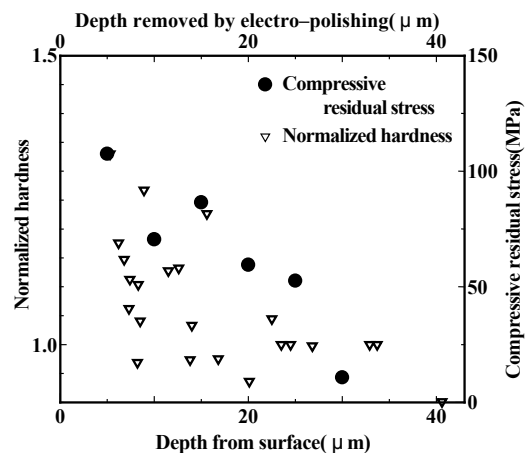


Fig. 11 Relation between hardened depth and removed depth to relieve residual stress.

3.3 圧縮残留応力に及ぼす材料の特性

3.3.1 材料の降伏応力との関連性

超音波を照射する事によって材料表面に圧縮残留応力を付与できたが、圧縮残留応力に及ぼす材料の降伏応力との関連性について調べた。供試材として、Al, Fe および S45C, A5083 を用い、さらに、加工硬化度の大きい Cu-Zn 合金と塑性変形によってマルテンサイト変態を起こす SUS304 を用いた。

Cu の場合と同様の実験を行った結果、上記のすべての材料において超音波照射によって付与される圧縮残留応力と超音波照射時間との関係は、材料により付与される応力の最大値とその照射時間は異なるが、Fig. 9 に示した Cu の場合と同様の傾向を示した。各材料の降伏応力と付与された圧縮残留応力の最大値の関係を Fig. 12 に示す。応力測定位置は、超音波照射部中央におけるおよそ 2.3 × 2.3mm の範囲である。降伏応力の大きい材料ほど大きな圧縮残留応力が付与される傾向が見られる。しかし、Cu, Cu-Zn, SUS304 は n 値がほぼ同様となった他の材料に比べ表面に付与される最大の圧縮残留応力値が非常に大きくなった。

これらの材料は、加工硬化度の高い材料であり、その指標である加工硬化指数 n 値が大きい。例えば、降伏応力が同程度の A5083 と Cu-Zn では、n 値が大きい Cu-Zn の方がより大きな圧縮残留応力付与された。つまり、圧縮残留応力の最大値は、加工硬化が同程度の材料では降伏応力とともに大きくなるが、加工硬化が顕著な材料、すなわち n 値の大きい材料ではさらに大きな圧縮残留応力が付与されることが明らかとなった。

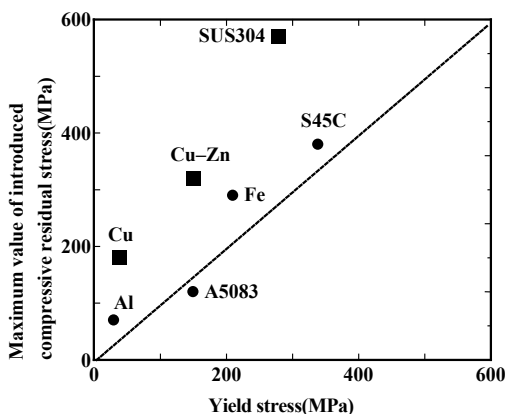


Fig. 12 Yield stress vs. maximum compressive residual stress.

このことを、Fig. 13 に模式的に示した材料の応力 - ひずみ線図で考える。水中超音波照射によるキャビテーション気泡崩壊時に起こるとされる衝撃圧が、材料の初期（本研究では焼きなまし後）の降伏応力 y を超えて作用した場合に塑性変形が生じる。前述したように、衝撃圧は非常に短

い時間作用して除荷される。超音波振動によるその繰り返しのに伴い、加工硬化によって降伏応力 y_i は徐々に上昇してある最大値 y_s に達する。Fig. 13 中の A 曲線のように加工硬化指数 n 値が大きい材料は、塑性変形による降伏応力の上昇率が大きいことになり、Fig. 12 に示したように降伏応力に伴い大きくなる結果となった圧縮残留応力の最大値がより大きくなると解釈される。

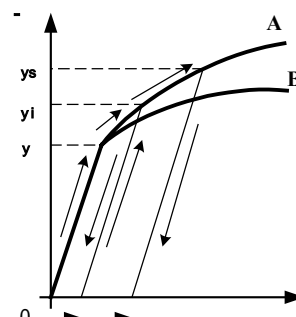


Fig. 13 Schematic of stress-strain curve to explain the stress being introduced.

3.3.2 加工誘起マルテンサイト変態による影響

オーステナイトステンレス鋼 SUS304 は、塑性変形を受けると常温でマルテンサイト変態を起こし硬化することはよく知られている。焼きなましのままの SUS304 と 1min 間超音波照射後の表面での X 線回折の結果を Fig. 14 に示す。1min 間の超音波照射で、矢印で示すマルテンサイト相が生成していることが確認できる。SUS304 では、Fig. 12 に示したように、約 574MPa の非常に大きな表面圧縮残留応力が付与され、さらに、圧縮残留応力の付与に作用する表面層の深さは、Fig. 15 に示すように、30min 間の超音波照射で表面から約 170 μm に達していた。このように SUS304 において、大きな圧縮応力が発生して深部まで作用する理由は、前述の様に加工硬化指数が大きいために、塑性変形による降伏応力の上昇率が大きく、それに伴い圧縮残留応力の最大値が上昇することと、さらに、マルテンサイト相の生成による体積膨張が周囲に拘束されることによって圧縮応力が重畳されるためと考えられる。

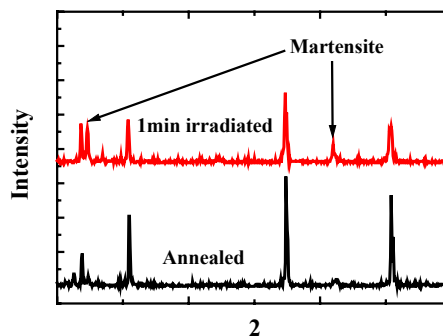


Fig. 14 XRD diffraction patterns obtained from SUS304 surfaces annealed and irradiated ultrasonic wave for 1 min.

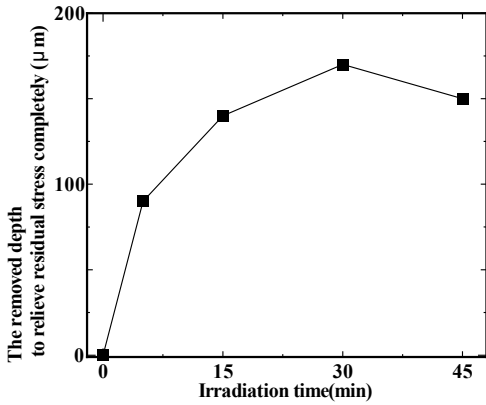


Fig. 15 Variation of removed depth by electro-polishing to relieve residual stress completely.

3.4 超音波照射の表面粗さへの影響について

キャビテーションの発生によって材料表面に生じやすい壊食は、材料表面の損傷であり避けなければならない。そこで、材料表面の損傷度を評価するため、Cu 表面における超音波照射時間による表面粗さの変化を調べた。表面粗さの測定には触針式の粗さ測定器を使用し、評価パラメータとして算術平均粗さ Ra を用いた。その結果を Fig. 16 に示す。測定位置は照射部の中心を 0mm とし、3mm おきに 9mm の位置まで測定した。照射部中心から 6mm の位置までは粗さの変化がみられるが、ホーンの径より外側の 9mm の位置ではほとんど変化がなかった。表面粗さの変化は、気泡が激しく発生しているホーン直下の部分で主に起こっていることが分かる。超音波照射時間 2min までは表面粗さの変化は小さいが、5min では急激な粗さ値の上昇がみられる。

Fig. 17(a) ~ (d) に、照射前および 1min, 2min, 5min 間超音波を照射した後の超音波照射部における Cu 表面の SEM 写真を示す。照射時間につれて、表面の形状に大きな変化が見られる。この表面形状の変化は、前述のとおり、超音波照射部で加工硬化が見られることから、時間とともに塑性変形が重畳しているためであると考えられる。また、照射時間 5min では Fig. 17(d) に示すように多数のピットが発生した。Fig. 17(d) 中の四角形部にみられるピットの拡大写真を Fig. 17(e) に示す。ピットがみられはじめた 5min の超音波照射では、算術平均粗さ Ra が急激に増大しており、塑性変形とともに、壊食による表面の損傷が著しくなったことを示唆している。

以上のように、超音波照射によって材料表面に塑性変形が生じて圧縮残留応力が付与され、圧縮残留応力が最大値を示した後、壊食による材料表面の損傷が急激に進行すると考えられる。この結果、Fig. 9 に見られるように、圧縮残留応力値は最大値を示した後にばらつきが大きくなり、材料の脱落などの損傷が一因となって、若干の減少傾向を示すものと考えられる。

このようなことから、圧縮残留応力が付与された後、さらに長時間超音波照射し続けることは、ショットピーニン

グにおけるオーバーピーニング¹⁰⁾と同様な悪影響を及ぼすと考えられる。

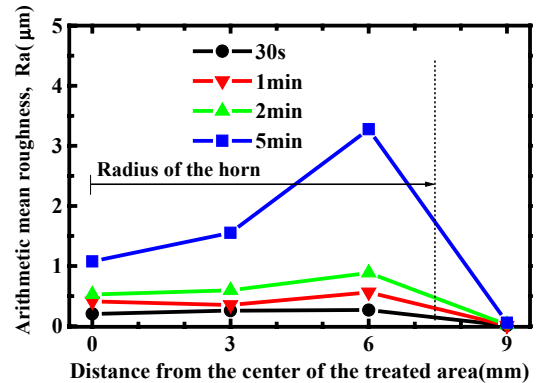


Fig. 16 Variation of surface roughness after ultrasonic irradiation.

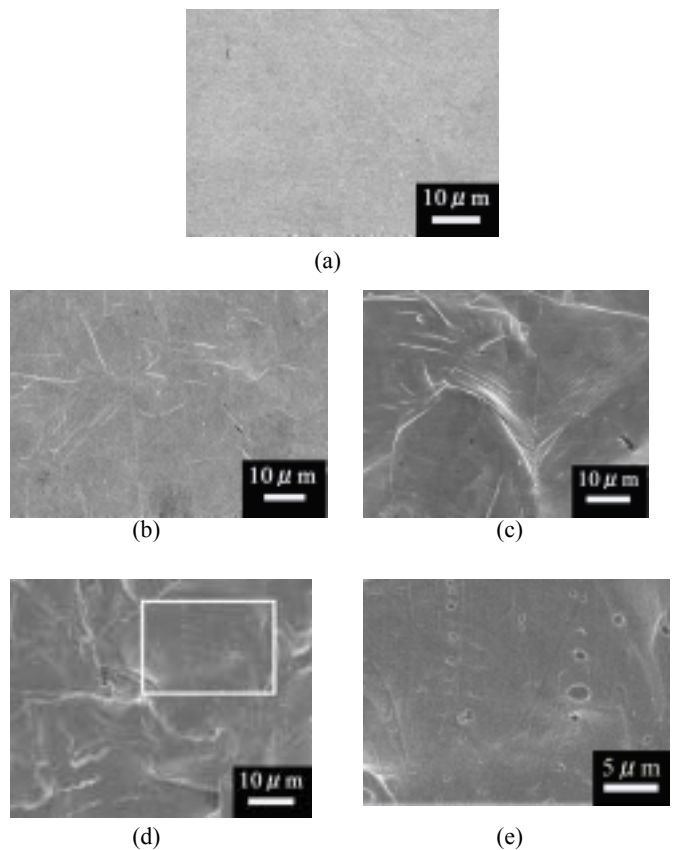


Fig.17 Cu surface observed by SEM.
 (a) Annealed
 (b) Irradiated for 1min.
 (c) Irradiated for 2min.
 (d) Irradiated for 5min.
 (e) Pits appeared on the surface irradiated for 5min.
 (Enlarged the rectangular area in (d))

4. 結 言

本研究では、水中においてステップ型ホーンを介して金属表面に超音波照射をすることによって、表面の残留応力に及ぼす影響について検討を行い、以下の結果を得た。

- 1) 水中において金属表面に超音波照射することによって圧縮残留応力を付与することができる。純 Cu 照射部表面では加工硬化が起こっており、その領域は圧縮残留応力付与に作用する領域とほぼ一致する。これは、超音波照射によって表面に塑性変形が誘起されて圧縮残留応力が付与されていることを示唆している。
- 2) 材料表面に付与される圧縮残留応力の最大値は材料によって異なり、同程度の加工硬化指数を持つ材料では、降伏応力が大きくなるにつれて増大する傾向がある。特に、加工硬化指数の大きい材料では、塑性変形時の加工硬化により降伏応力が上昇するため、より大きい圧縮残留応力が付与される。
- 3) オーステナイトステンレス鋼 SUS304 では、加工誘起マルテンサイト変態による体積膨張が生じて、より大きな圧縮残留応力が付与される。その最大圧縮残留応力は 5min 間の超音波照射で約 574MPa となり、圧縮残留応力の付与に作用する表面層の深さは 30min 間の照射で約 170 μm に達する。
- 4) キャビテーションによる壊食の影響を Cu の表面粗さの変化により評価した結果、表面の損傷によって生じる表面粗さの急激な増加は、表面に付与される圧縮残留応力が最大値を示した後に生じる。すなわち、過度の超音波照射は表面の損傷を引き起こすことから、最適な超音波照射時間が存在する。

参 考 文 献

- 1) M. Shimakawa :Ultrasonic engineering, Kogyo Chosakai Publishing (1975), 19-21. (in Japanese)
- 2) H. Kato et al.: Cavitation, Makishoten Publishing (2003), 189-243. (in Japanese)
- 3) T. Okada Y. Iwai, H. Ishimaru and N. Maekawa : Measurement and Evaluation of Cavitation Bubble Collapse Pressures (2ndReport), Journal of Japan Society of Mechanical Engineering (Ser.A), Vol.58, No.552 (1992), 1489 -1494. (in Japanese)
- 4) N. Terasaki, H. Wada, N. Takasugi, S. Fujikawa and Y. Sugino: Studies on Cavitation Impulse Force in Submerged Water Jet, Journal of Japan Society of Mechanical Engineering (Ser.B), Vol.64, No.623 (1998), 2004 -2010. (in Japanese)
- 5) M. R. Sriraman and R. Vasudevan: Influence of Ultrasonic Cavitation on Surface Residual Stress in AISI304 Stainless Steel, Journal of Materials Science, Vol.33 (1998), 2899-2904.
- 6) Y. Yamauchi, H. Soyama, Y. Adachi, K. Sato, T. Shindo, R. Oba, R. Oshima and M. Yamabe: The Suitable Region of High-Speed Submerged Water-Jets for Cutting and Peening, Journal of Japan Society of Mechanical Engineering (Ser.B), Vol.59, No.557 (1993), 16-22. (in Japanese)
- 7) D. Odhiambo and H. Soyama: Cavitation Shotless Peening for Improvement of Fatigue Strength of Carbonized Steel, International Journal of Fatigue (2003). (in press)
- 8) H. Soyama : Surface modification by cavitation caused by WaterJet, Science of Machine, Vol.52, No.1 (2000), 7-13. (in Japanese)
- 9) T. Watanabe and T. Murakami: Introduction of Compressive Residual Stress by Ultrasonic vibration, Preprints of the national meeting of JWS, No.71 (2002), 400-401.
- 10) Shotpeening Technical Society: Metal Fatigue and Shotpeening, Gendai Kougakusha Publishing (2004), 1-70,441. (in Japanese)
- 11) Japan Society for Heat Treatment: Heat treatment for special steel, Nikkan Kogyo Shinbun (1970), 236-249. (in Japanese)
- 12) Society of Materials Science, Japan: X-ray stress measurement method, Yokendo (1966), 84-105. (in Japanese)
- 13) S.Iwasaki : Some Problems in Microhardness Testing, The Material Testing Research, Vol.34, No.2 (1989) 130-135 (in Japanese)