

# 船体構造における超音波ピーニングを用いた 疲労強度改善に関する研究 第1報

正員 原 純 哉<sup>\*1</sup>      正員 下 田 太 一 郎<sup>\*1</sup>  
 正員 出 口 貴 則<sup>\*2</sup>      正員 毛 利 雅 志<sup>\*3</sup>  
 正員 福 岡 哲 二<sup>\*4</sup>      正員 小 汐 啓 介<sup>\*4</sup>  
    加 野 大 地<sup>\*5</sup>

A study on Fatigue Strength Improvement for Ship Structures by Ultrasonic Peening Part 1

by Junya Hara, *Member*      Taichiro Shimoda, *Member*  
 Takanori Deguchi, *Member*      Masashi Mouri, *Member*  
 Tetsuji Fukuoka, *Member*      Keisuke Koshio, *Member*  
 Daichi Kano

**Key Words:** Ultrasonic Peening, Fatigue Strength

## 1. 緒 言

近年、船体における疲労強度の要求はより厳しいものとなっている。その疲労強度の要求に対し、従来は疲労損傷懸念箇所へショットピーニング、ハンマーピーニングが施され、より疲労強度が重要となる箇所にはグラインダー施工を行うなどの対策が講じられてきた<sup>1)</sup>。しかし近年、新たな疲労強度改善方法として超音波ピーニング(Ultrasonic Peening)が注目を集めている。これは、従来のグラインダー施工等の手法に比べ、より効率的かつ効果的な疲労強度改善対策となるものと期待されている。

Fig.1に超音波ピーニング施工後の溶接止端部の様子を示す。実際に超音波ピーニングは、機械加工品のギア表面や鍛造スプリング等に使用されており、引張残留応力を除去する事により疲労強度の向上を図ることに有効であることが確認されている<sup>2)</sup>。しかし現在までに、超音波ピーニングを船体に施工することに対する検証を行った事例はあまり報告されていない。そこで本論文では、溶接継手に超音波ピーニング施工を行った試験体の疲労強度試験を行い、その結果を通じて超音波ピーニングが船体疲労強度に与える効果を検証した。

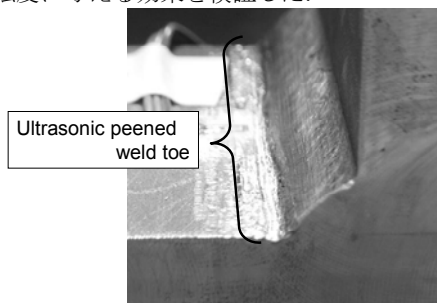


Fig.1 Ultrasonic peened weld toe

## 2. 超音波ピーニングの疲労強度改善プロセス

溶接継手は通常、As Weld では止端部の形状が鋭利な状態となっており、溶接止端部に大きな応力集中が生じる。さらに繰り返し応力が作用する場合、その箇所から疲労亀裂が生じ、疲労破壊にまで進展する危険性がある。そこで従来とられてきた対策は、止端部にグラインダー施工を行い、研磨することで止端部形状を滑らかにし、応力集中を小さくするという方法であった。

一方超音波ピーニングは、ピーニング打撃子を超音波で振動させることにより溶接止端部を打撃するという手法である。これによりFig.2及び以下に示す3点の効果が得られ、それらの相互作用により疲労強度が向上する。

### (1)圧縮残留応力の付加

溶接止端近傍では、一般に引張側の残留応力が発生する。そこで、溶接止端部をピーニング打撃子で打撃することで、止端部に圧縮残留応力が付加され、これにより疲労強度が向上する。

### (2)溶接止端部の応力集中緩和

曲率を持ったピン先によって、溶接止端部を打撃することにより、止端部が塑性変形し止端形状が滑らかとなり応力集中が緩和される。

### (3)表面組織の微細化

超音波ピーニングによって溶接止端部近傍の金属組織が微細化され、疲労強度が向上する。

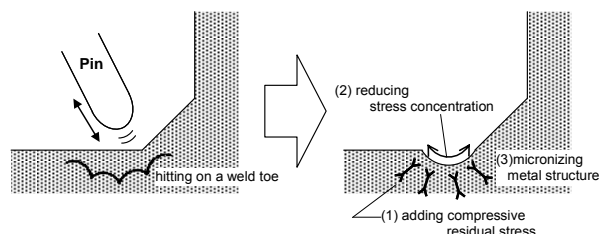


Fig.2 Effects of ultrasonic peening

\*1 株式会社川崎造船  
 \*2 株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド  
 \*3 株式会社 IHI  
 \*4 三井造船株式会社  
 \*5 川崎重工業株式会社

### 3. 超音波ピーニング装置

本研究では ITL 社(Integrity Testing Laboratory Inc.)の UP500 システム(Fig.3)を用いて試験体に超音波ピーニング施工を行った. UP500 システムの各性能をTable1に示す.

Table1 Details of UP500 system

電圧	100-120or 220-240	V
電源周波数	50~60	Hz
最大電力	500	W
超音波振動の周波数	22	kHz
冷却用圧縮空気圧	0.2-0.25	MPa
本体の重量	3.9	kg
発信機の重量	6.2	kg



Fig.3 UP500 system

### 4. 疲労強度試験

#### 4.1 疲労試験体

超音波ピーニングが疲労強度に与える効果を検証する為に, 荷重非伝達型十字継手を有する試験体(Fig.4, Fig.5), 角回し溶接継手を有する試験体(Fig.6), 梁構造モデル試験体(Fig.7)を用いて疲労強度試験を行った. 梁構造モデルは後述するように, 試験体に圧縮荷重を負荷する際に試験体が座屈する事を回避する為に用意した試験体である. 尚, 梁構造モデル試験体は角回し溶接継手を有している. また板厚の違いが超音波ピーニングの効果に及ぼす影響を検証する為に, 荷重非伝達型十字継手に関しては板厚  $t=16\text{mm}$ ,  $t=22\text{mm}$ ,  $t=30\text{mm}$  の3種類を用いて実験を行った.

#### 4.2 溶接止端部処理

溶接止端部の処理による疲労強度の違いを検証する為, As Weld, グラインダー施工, 超音波ピーニング施工の3種類に対して疲労試験を実施した.

#### 4.3 荷重条件

試験体長手方向へ応力範囲  $100\text{N/mm}^2 \sim 300\text{N/mm}^2$  の一定荷重( $R=0$ )を作用させて実験を行った. また, 応力比の違いが結果に及ぼす影響を検証する為に, 荷重非伝達型十字継手には別途  $R=0.25, 0.5$  の応力比に対する疲労試験を実施した.

### 4.4 初期過大荷重の影響

超音波ピーニング施工後に過大荷重が作用した場合, 超音波ピーニングの疲労強度改善効果にどのような影響を及ぼすかを検証する為に実験を行った. この実験では, 超音波ピーニング施工後の試験体に降伏応力程度の圧縮若しくは引張の過大荷重を負荷し, その荷重を除荷した後に繰り返し荷重を与える疲労試験を実施した. 使用した試験体は角回し溶接継手を有する試験体である. ここで圧縮過大荷重を負荷する試験体は, 試験体自体の座屈を防止する為にFig.7に示す梁構造モデルとした.

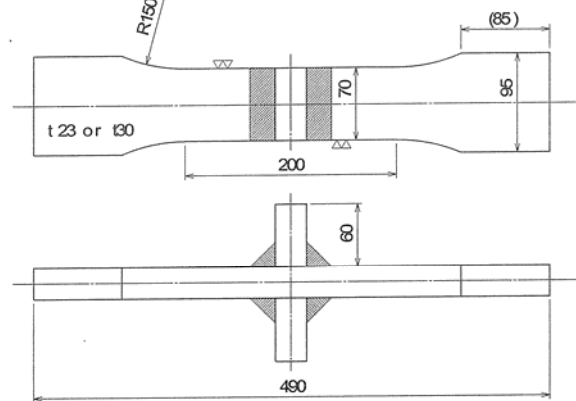


Fig.4: Fatigue test piece

(Non load carrying cruciform welded joint  $t=22, 30\text{mm}$ )

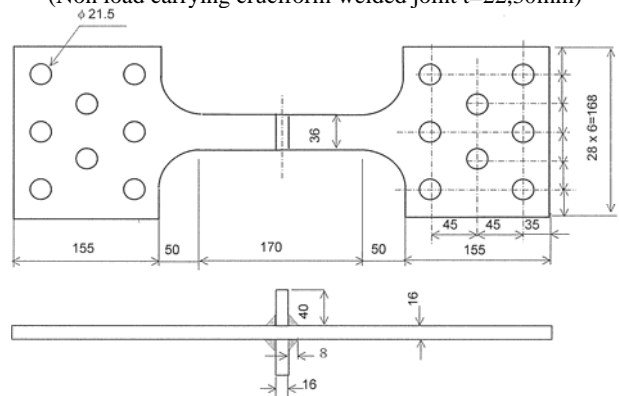


Fig.5: Fatigue test piece

(Non load carrying cruciform welded joint  $t=16\text{mm}$ )

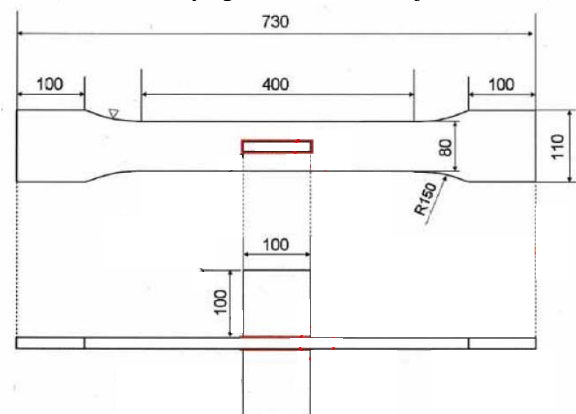


Fig.6: Fatigue test piece (boxing fillet welded joint)

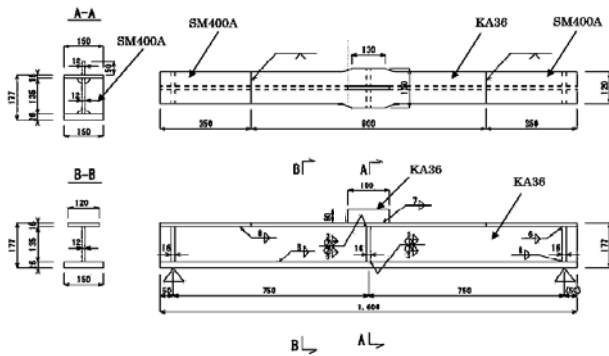


Fig.7: Fatigue test piece (beam model specimen)

## 5. 試験結果及び考察

### 5.1 板厚が超音波ピーニングの効果へ及ぼす影響

Fig.8は試験体破断までの荷重の繰り返し数を横軸に、繰り返し荷重の応力範囲を縦軸にとり実験の結果をプロットしたものである。Fig.8は、 $t=16, 22, 30\text{mm}$ の荷重非伝達型十字継手の疲労試験結果をプロットしたものである。

Fig.8を見ると、超音波ピーニングを施工した試験体の疲労寿命は、As Weld よりも高応力側に分布している。さらにその分布は、グラインダー施工後の試験体の結果と同程度である。従ってこの結果から、超音波ピーニングを施工することで溶接止端部の疲労強度はグラインダー施工後の継手止端部と同等となるまで向上することが分かる。また、Fig.8の結果の分布に着目すると、As Weld よりも超音波ピーニング施工後の結果のほうが分布の傾きが緩やかとなっていることが分かる。従って、継手に生じる応力範囲が小さくなるに依り、超音波ピーニングの疲労強度改善効果がより効果的に得られる事が判明した。

一方、超音波ピーニングを施工した試験体において板厚の違いによる疲労試験結果の差異に着目すると、板厚16mm, 22mm, 30mmの結果は互いに同等の結果を示している。したがって本研究で用いた範囲であれば、厚板であっても超音波ピーニングの疲労強度改善効果は有効に得られることが判明した。

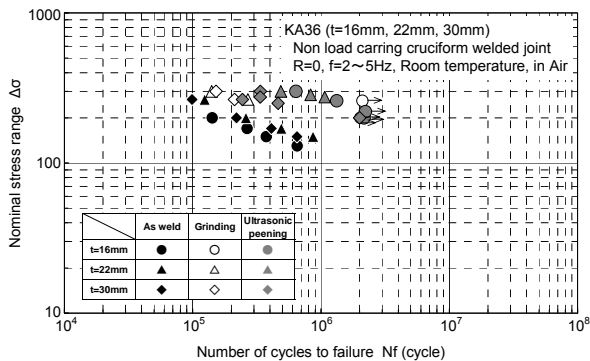


Fig.8 S-N data of non load carrying cruciform welded joint

### 5.2 角回し溶接継手における超音波ピーニング効果

Fig.9は  $t=16\text{mm}$ の角回し溶接継手、及び梁構造モデル試験体のそれぞれの疲労強度試験の結果をFig.8と同様にプロットしたものである。Fig.9を見ると、角回し溶接継手の超音波ピーニング施工後の疲労強度は、作用応力が大きい場合はAs Weld と同等となったが、S-N 線図の傾きはAs Weld より緩やかとなっている。これより、角回し溶接継手においても超音波ピーニングによる疲労強度改善効果は応力範囲が小さい場合に、より効果的に得られる事が判明した。

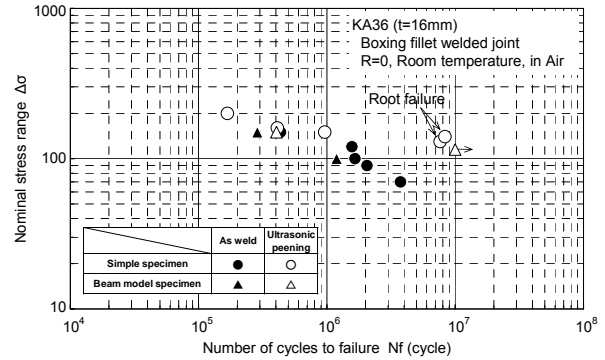


Fig.9 S-N data of boxing fillet welded joint

### 5.3 応力比と超音波ピーニング

Fig.10は、 $t=16\text{mm}$ の荷重非伝達型十字継手に対して、作用させる繰り返し荷重を  $R=0, 0.25, 0.5$  と変化させた疲労試験の結果を、Fig.8と同様にプロットしたものである。

Fig.10を見ると、応力比が大きくなるに従って疲労試験結果は短寿命、低応力範囲側となっている。従って、応力比が大きくなると超音波ピーニングによる疲労強度改善効果は小さくなる事が確認された。一方 S-N 線図の傾きに着目すると、全体の疲労強度は応力比が高くなるに従って低下するが、傾きは超音波ピーニングを施したものの方がAs Weld よりも緩やかになることが確認された。

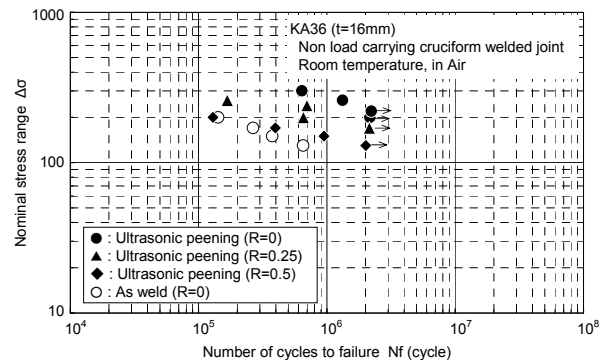


Fig.10 Effects of stress ratio on fatigue strength

#### 5.4 過大荷重がピーニング効果に及ぼす影響

Fig.11は、超音波ピーニング施工後に圧縮過大荷重若しくは引張過大荷重を負荷した疲労試験体の疲労試験結果をプロットしたものである。この結果より、圧縮過大荷重を負荷した試験体は、超音波ピーニングの疲労強度改善効果が小さくなる事が分かる。

超音波ピーニングの疲労強度改善効果が小さくなる要因を考察する為に、溶接継手の溶接から疲労試験までの応力状態の変化を Fig.12 に示す。溶接止端部には、溶接後に引張残留応力が生じ①の状態となる。超音波ピーニング施工後、溶接止端部には圧縮残留応力が付加され、溶接止端部の応力状態は②bの状態となる。超音波ピーニング施工後に繰り返し荷重を与えた場合は、②bから③bの状態が繰り返されることとなる。ここで②bの状態から圧縮過大荷重が負荷されると、止端部は圧縮降伏応力に達し、④の状態となる。この状態から過大荷重を除荷すると、止端部の応力は、通常角回し溶接止端部の応力集中係数が2以上である為、引張降伏応力に達し⑤の状態になる。この状態から繰り返し応力が作用すると、最大応力は②cとなり、最小応力は③cになる。②cから③cの応力変動はAs Weld(②aから③a)と同様であり、このため疲労強度もAs Weldと同程度まで下がったと推察される。

また引張過大荷重の負荷された試験体では、超音波ピーニングの疲労強度改善効果は損なわれず、超音波ピーニングが有効であることが判明した。

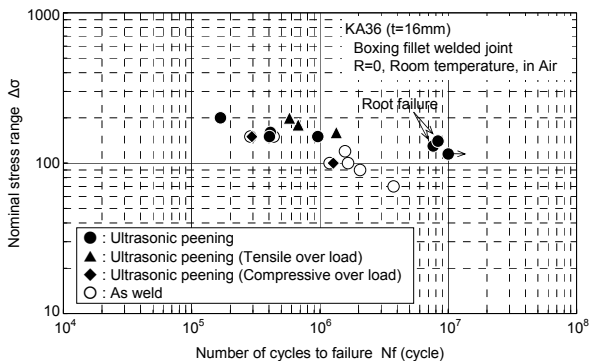
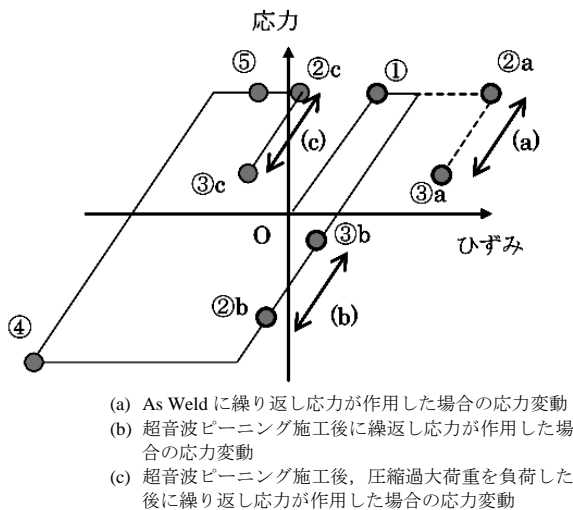


Fig.11 Effects of over load on fatigue strength



- (a) As Weld に繰り返し応力が作用した場合の応力変動
- (b) 超音波ピーニング施工後に繰り返し応力が作用した場合の応力変動
- (c) 超音波ピーニング施工後、圧縮過大荷重を負荷した後に繰り返し応力が作用した場合の応力変動

Fig.12 Process of stress fluctuation

#### 結言

各種溶接継手試験体を用い、超音波ピーニングの継手部疲労強度に及ぼす影響について検証を行った結果、以下の知見が得られた。

- 超音波ピーニングを施工することで、疲労強度はグラインダー施工後とほぼ同等になるまで向上した。
- 厚板に対しても超音波ピーニング施工は疲労強度改善に有効である。
- 超音波ピーニングの施工により S-N 線図の傾きは As Weld と比べて緩やかになる事が判明した。
- 応力比が大きくなると、超音波ピーニングの疲労強度改善効果が小さくなる可能性がある。
- 超音波ピーニング施工後に圧縮過大荷重が負荷される場合、超音波ピーニングの疲労強度改善効果が小さくなる可能性がある。

#### 参考文献

- 1) 日本鋼構造協会:止端加工による疲労強度向上法,日本鋼構造協会,1987.
- 2) 岩村吉就:超音波ピーニング(UP)システムの提案-溶接継手の疲れ強さを向上-,溶接技術,2005年3月号, pp.128-133.