技術論文

UDC 539 . 43 : 66 . 084

UITによる溶接構造物の疲労亀裂発生抑制技術の活用

Application of Fatigue Crack Initiation Suppression Technology of Welded Structures by UIT

島 貫 広 志*　　田 中 睦 人
Hiroshi SHIMANUKI　　*Mutsuto TANAKA*

抄　録

UITによる溶接構造物の疲労発生抑制技術の利用が進んでいる。UITは疲労亀裂の発生部となる溶接止端部の形状改善を行いながら圧縮残留応力を発生させる技術であり，疲労寿命の改善に非常に効果的であるが，使用条件によってはその効果が小さい場合もある。UIT技術のさらなる有効活用のための方針を示した。

Abstract

Suppressing technology is utilized fatigue cracks that occur in welded structures using UIT. This is a technique for generating compressive residual stress while the shape modification of the weld toe where the fatigue cracks initiate, UIT is very effective in improving fatigue life, but the effect is small depending on conditions of use in some cases. The policy for further effective use of UIT technology is shown in this paper.

1. 緒　　言

超音波衝撃処理（Ultrasonic impact treatment：UIT*1）[1,2]はピーニング処理の一種であり，超音波振動させたツールと処理対象部との間に金属ピンを配置し，発生した超音波による衝撃により対象物を打撃することで対象物表面に塑性流動を起こさせると同時に，打撃した表面近くに圧縮の残留応力を発生させる処理である。UITはその簡単な施工方法と溶接部に適用した場合の劇的な疲労強度改善効果のため，新設既設を問わず各種溶接構造物の疲労対策に活用が進んでいる。国内では特に鋼橋を中心として造船や建設機械などで活用され，また，設備の溶接部や溶接補修部の疲労対策などにも定常的に活用されている。2014年には“超音波ピーニング処理（UIT）工法”[3]として国土交通省のNew Technology Information System（NETIS）推奨技術に選定され（NETIS登録案件約4800件，内推奨技術は21件），今後の活用の拡大が期待されている。

溶接部の疲労強度は一般に鋼材強度によって変化しないが，近年の研究でUITによる疲労対策効果は適用する材料や使用条件，処理・施工品質によって効果が異なることが明らかになってきた[4,5]。また使用条件に関しては過大荷重や応力比によって効果のレベルが変わり，溶接ままの疲労特性しか確保できない条件もあること，また，十分な処理が行われない場合や施工の順番で効果のレベルが変化することがある。そこで，本論文では上記のUIT継手の疲労特性に及ぼす影響を解説するとともに，UITの有効な使い方について述べる。

また，UIT効果の定量予測についてはこれまで，種々の方法が検討されているが，現在，規格や基準に取り入れられているとは言い難いものの，その考え方の方向性が徐々に明確になってきている。そこで，UIT効果の定量予測法や現状の規格化動向についても解説する。

2. 溶接構造物の疲労

鋼材の疲労強度は鋼材そのものの強度の上昇とともに上昇していくことがよく知られている[6,7]。一方，溶接部の疲労特性は鋼材強度によらず一定である。このため疲労強度の要求される構造物では，溶接部の疲労設計応力を上げられないため高張力鋼の使用による軽量化を進めにくいことがある。

鋼材の疲労亀裂の発生が繰り返し負荷によるミクロな塑性化によっておこるため，強度上昇そのものは疲労強度上昇させる。しかし，溶接部は溶接止端が応力集中部となるため，平滑な母材部より疲労亀裂が発生しやすくなるが，

*1 UIT技術は米国UIT.L.L.C社の技術です。

* 鉄鋼研究所　材料信頼性研究部　主幹研究員　博士（工学）　兵庫県尼崎市扶桑町1-8　〒660-0891

さらに引張の溶接残留応力が生じている。この引張残留応力は鋼材強度に比例するため，鋼材強度上昇による疲労強度向上効果を相殺してしまう。こうしたことから溶接部では強度上昇による疲労強度向上が得られにくくなる。

溶接部の疲労対策方法としては主に，二つの考え方[8]がある。一つは疲労亀裂発生懸念箇所の応力集中の低減による疲労強度向上方法，もう一つは溶接止端部の引張残留応力を緩和や圧縮応力に反転させるなど，残留応力のコントロールによる疲労強度向上方法である。

前者の代表的な方法としては溶接止端部のグラインダー処理や TIG 処理（Tungsten Inert Gas 溶接による止端の溶融処理）により始端形状を滑らかにする方法がある。また後者の方法としては，焼鈍や各種ピーニング処理，低変態温度（Low-Temperature Transformation：LTT）溶接材料の利用などがある。UIT はピーニング処理の一つであり，溶接止端への残留応力の導入が主な効果であるが，打撃により溶接止端部の形状の改善も行うため，前者の効果も少し加わっていると考えられる。

3. 超音波衝撃処理（UIT）[1, 2, 9-12]

3.1 処理装置と処理方法

UIT は超音波振動を用いたピーニング処理の一種であり，打撃した表面近くに圧縮の残留応力を発生させる処理である。

UIT 装置は図1のようにジェネレーター，ハンドツール，冷却装置からなっている。ハンドツールはジェネレーターで発生させた電気信号をもとに内部の磁歪材料を用いたトランスデューサーで超音波振動を発生させ，これをウェーブガイドに伝達，増幅し，ツール先端部で軸方向に数十 μm の振幅を持つ超音波振動とし，さらにその先のピンへ振動を伝える構造となっている。ピンは打撃時にずれたり外れたりしないよう振動を伝えながら保持できるフォルダーに装着される。なお，超音波振動の発生に伴い発熱が起こるためハンドツール内は水冷されている。

UIT によるピーニング処理は，ツール先端部と処理対象物の間に配置されたピンが超音波振動によって励起され，対象物を連続的に打撃することで対象物表面に塑性流動を起こさせ，硬質のピンの先端の形状を溶接部に転写すると同時に，打撃した表面近くに圧縮の残留応力を発生させる。

なお，溶接部の処理の場合，図2のように疲労亀裂の発生する溶接止端部が母材と溶接金属の間で谷状になっていることから，振動するピンを溶接止端線に沿うようにあてがうと，この部位を選択的に効率よく打撃することができる。溶接部処理では径が 3 mm のピンが標準的に用いられる。処理の目安は，ピンの先端の形状がほぼ完全に転写されるレベルまで繰り返し打撃を行い，元の溶接止端の線が見えなくなる程度まで行うこととしており，これにより溶接止端の形状による応力集中を緩和することができると考えられる。また，形状の転写が完了すると打撃面全体から反力を受けるため，それ以上の変形が進みにくくなり，処理深さはおのずと限定され，通常は 0.2 ～ 0.3 mm 程度である。

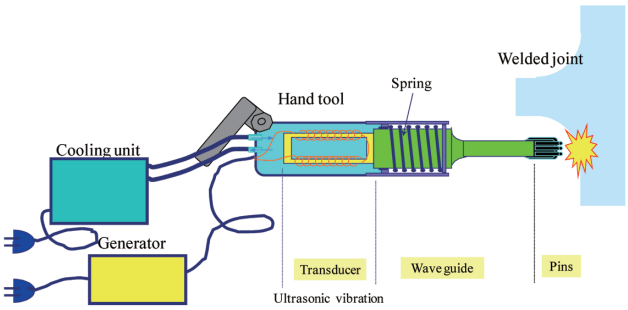


図1　UIT 装置（ESONIX® 27 UIS）の概要
Constitution of the UIT system

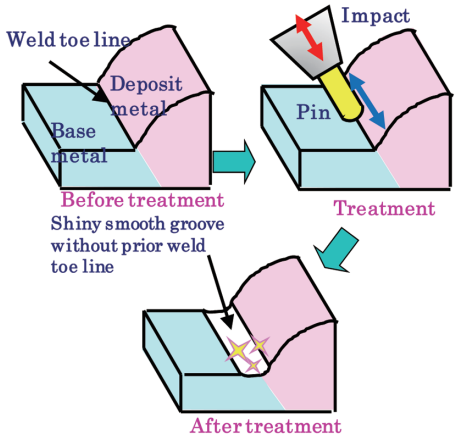


図2　UIT による止端処理要領
Weld toe treatment method by UIT

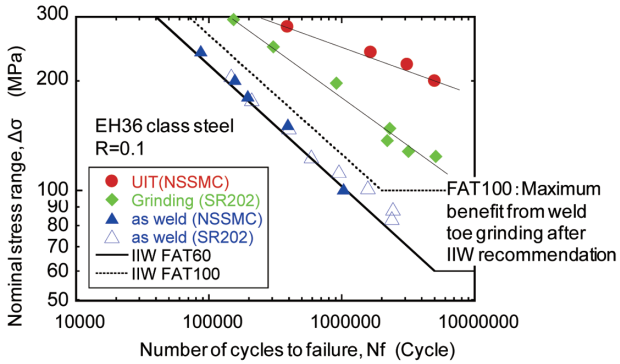


図3　十字継手疲労試験による UIT 効果の例
Example of UIT effect on the cruciform welded joint fatigue test

UIT 処理（ピン径 3 mm，周波数 27 kHz，出力 1000 W）を溶接止端部に施した日本海事協会（NK）規格 KE36 鋼の十字溶接継手の疲労寿命の例を未処理の溶接ままと比較して図3に示す[2,3]。この例では，寿命は数倍から 10 倍程度長く，著しい疲労特性改善が認められた。

3.2 溶接部の疲労亀裂防止メカニズム

処理による溶接止端部の疲労亀裂発生防止効果の発現

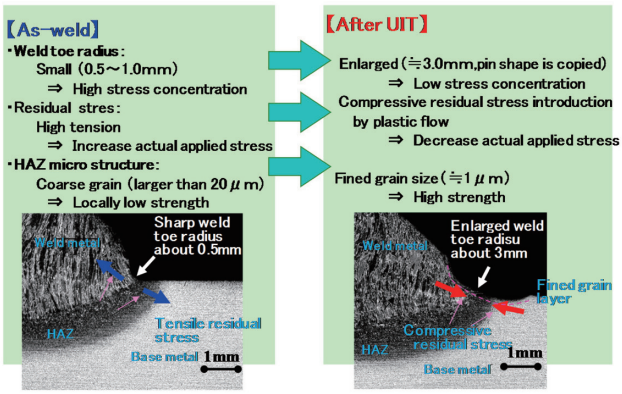


図4　UIT による疲労強度向上要因
Fatigue strength improvement factor in UIT Technique

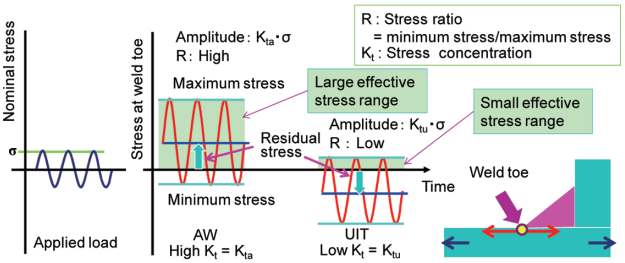


図5　UIT による疲労強度向上のメカニズム
Mechanism of the fatigue strength improvement by UIT

メカニズムは図4[2] に示すように，①打撃によって発生する止端部の圧縮残留応力と②止端部形状の緩和による応力集中の低減と③ホワイトレイヤーと呼ばれる結晶粒が微細化した表層硬化組織の生成との組み合わせによると考えられており，特に圧縮残留応力による効果が大きい。

つまり，疲労亀裂の発生は繰り返し負荷によるミクロな塑性変形の繰り返しにより発生すると考えられるが，図5に示すように，UIT が施された止端部は相対的に応力集中が小さくなり，止端部の応力振幅が相対的に小さくなるとともに，圧縮残留応力により局所的な平均応力が下げられるために，塑性変形が起こりにくくなり疲労亀裂の発生が遅延すると考えられる。また，鋼材の疲労強度は高強度鋼の方が高いことから，疲労亀裂の発生する表層部の硬化組織は疲労強度が向上していると考えられ，これらの組み合わせにより疲労亀裂の発生が効果的に防止されているものと考えられる。

4.　UIT継手の疲労特性

溶接継手の疲労強度は一般に材料強度の影響を受けず，継手タイプごとに S-N カーブが国際溶接協会 IIW や日本鋼構造協会 JSSC の疲労設計指針で決められている。新日鐵住金(株)では UIT 継手については継手タイプによらず疲労強度が劇的に向上することを示してきた[2, 13-21] が，一方で条件によっては効果が期待できないことがあることや効果が期待できる条件の範囲を示し，使用上の留意点として注意を喚起してきた。本章では疲労強度向上効果に影響を与える因子と有効条件について述べる。

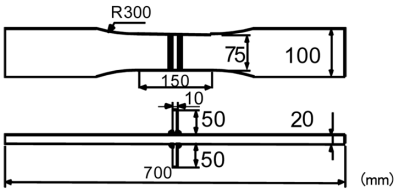


図6　UIT 用の十字継手試験片
Cruciform joint test specimen for UIT

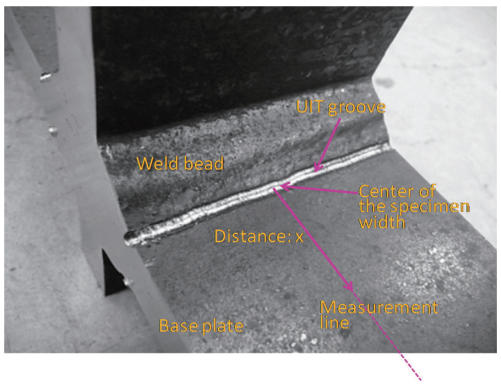


図7　UIT 十字継手と残留応力測定位置
UIT cruciform joint and residual stress measurement point

4.1　予荷重の影響

UIT は溶接止端に導入した圧縮残留応力が疲労亀裂発生抑制効果の源であるため，圧縮残留応力が緩和されることにより，効果が損なわれる可能性がある。そこで，疲労特性改善効果に及ぼす予荷重の影響を調べた。

4.1.1 試験体と試験条件

供試鋼として板厚 20mm の JIS G3106 SM490B を用いて図6に示す荷重非伝達型十字疲労試験片（UIT 用）を作製し，疲労試験の前に所定の予荷重を付与し，その後，予荷重より低い荷重が最大荷重となるようにして疲労試験を行った。なお, UIT 試験体では図6[13] のように試験機チャック部からの疲労破壊を防止するため試験片中央部にくびれを設けているが, UIT を施さない試験片についてはストレートタイプとした。

予荷重試験前後に溶接止端部の残留応力を測定し，UIT により導入した圧縮残留応力の変化を確認した。図7に UIT 継手の処理状況と残留応力測定位置を示した。

4.1.2 試験結果

予荷重による止端部近傍の残留応力変化を図8[13] に示した。図より明らかに，降伏応力（Yield point：YP）の9割（0.9YP）での引張，または6割（0.6YP）での圧縮どちらの結果も UIT ままの圧縮残留応力より小さくなっているものの，この程度の負荷では圧縮残留応力が抜けるほどではないことが確認できた。

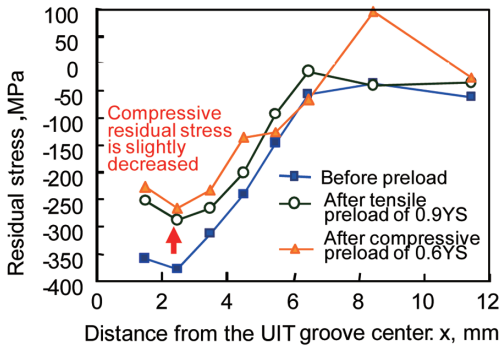


図８　予荷重による止端部付近の残留応力変化
Residual stress change near the weld toe by the pre-load

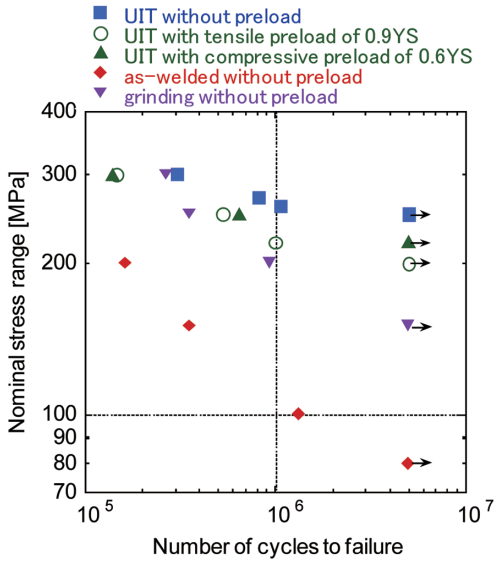


図９　予荷重の UIT による疲労強度改善効果への影響
Influence of the pre-load on the effect of fatigue strength improvement by UIT

継手疲労試験結果を図９[13] に示す。実験の結果，圧縮引張の予荷重継手について UIT ままの継手より疲労強度が多少低下しているが，溶接ままに比べ格段に向上していることが確認できた。また，図中にはグラインダー処理した継手の結果も示しており，0.9YP での引張または 0.6YP での圧縮による予荷重を与えてもグラインダー処理レベルの疲労強度が確保できることが示された。

なお，圧縮の予荷重については UIT による圧縮残留応力に加えて圧縮負荷がかかるため，より大きな圧縮負荷時には処理部が圧縮降伏し圧縮残留応力が解放されてしまうことが懸念されるものの，UIT 処理部の形状による応力集中の低減と処理により生じる継手内部（UIT による圧縮残留応力域より内部）には引張残留応力が生じているため部材に圧縮負荷がかかった場合でもこれが圧縮降伏の抵抗になり，部材の塑性化に抵抗するとも考えられる。より大きな圧縮予荷重の影響の確認については，軸力による負荷は難しくなるため大型試験による曲げ負荷等，他の負荷様式によって行う必要があり，今後の課題である。

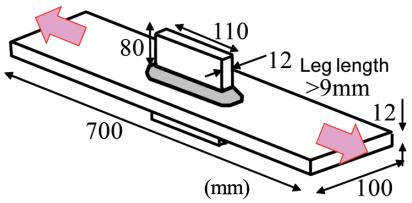
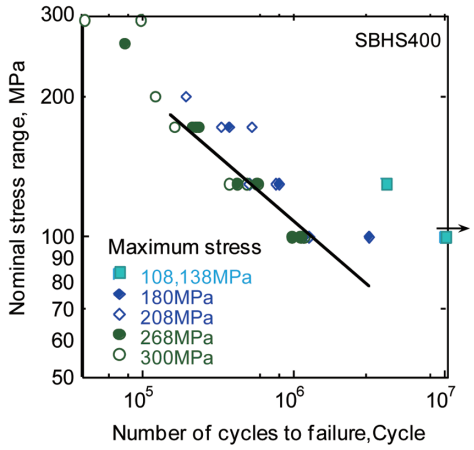
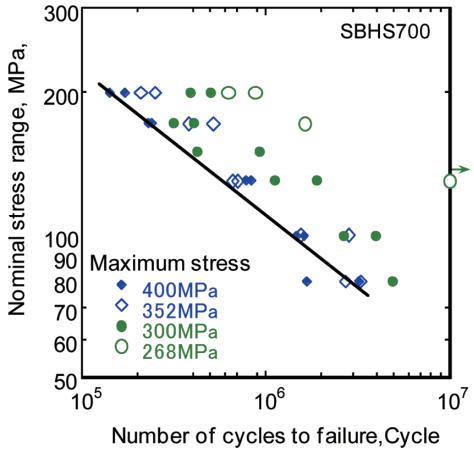


図 10　面外ガセット継手疲労試験片
Out-of-plane gusset joint fatigue specimen



(a) SBHS400



(b) SBHS700

図 11　UIT 効果に及ぼす鋼材強度の影響
Influence of the steel strength on the effect of UIT

4.2　鋼材強度の影響 [3, 5, 13-18]

UIT 継手の溶接止端に導入される圧縮残留の大きさは鋼材強度の影響を受け，高強度鋼の方が大きな圧縮残留応力が生じるため，UIT により，より大きな疲労強度改善効果の向上が期待できる。

4.2.1 疲労強度に及ぼす鋼材強度と最大荷重の関係

強度の異なる３鋼種，JIS G3140 SBHS400，SBHS500，SBHS700 を供試鋼として図 10 に示す面外ガセット継手を作製し，疲労試験を行った。この結果得られた S-N 関係を最大荷重により整理した結果を図 11 に示す。最大荷重が大きくなるといずれの鋼材でも寿命延長効果が小さくな

り，これは，4.1節で述べたように予荷重が大きくなると溶接ままの継手に対しての効果の大きさが小さくなることとも関連していると考えられる。しかし，SBHS700のような高強度鋼では最大荷重が大きくなってもUITの効果が残留し，例えば，SBHS400では効果が見えなくなる最大応力の268MPa以上でもSBHS700では明確に疲労強度の上昇，寿命の延長が見られる。一般に溶接ままの継手では高強度鋼を利用しても疲労強度が上昇しないことはよく知られているが，これに対しUIT継手では高強度鋼に用いるほど疲労強度上昇効果が大きく，高張力鋼が疲労設計のために使えなかった部分に適用できる可能性があり注目すべき特徴であると言える。この，鋼材強度の影響の予測については5章にて述べる。

4.2.2 応力比の影響 [4, 5, 13-18]

前節で図11に示した実験結果を応力比に基づいて整理し再表示したのが図12である。たとえば鋼製橋梁などではその自重に大型車両等の通行で荷重が重畳することがあるが，この場合，疲労亀裂を考慮すべき溶接部では応力比が比較的高い条件となってしまうことがある。UIT継手は図12の結果から明らかに高応力比下では疲労強度向上効果が小さく，最大応力も高い場合には，疲労寿命が溶接ままの継手と同等となってしまうことがある。これは，溶接ままの継手では部材に作用する見かけ上の応力比が変わっても，引張残留応力が作用している溶接止端部の応力比は局所的に高いままであり，これに対し，UIT継手の止端では圧縮残留応力により局所的に圧縮となっている。ここに外力による繰り返し負荷が作用することで局所的な応力比が負側から正側に大きく変化し，これに伴って疲労に影響を及ぼす有効応力が大きく変化するため継手の疲労強度も大きく変化することになる。図13にこの溶接止端部の局所的応力の挙動を示す。こうした応力比の影響については十字溶接試験体についても検討されており，両振りの試験での疲労強度改善効果も確認されている[13]。なお，この応力比の影響の予測については5章にて考察する。

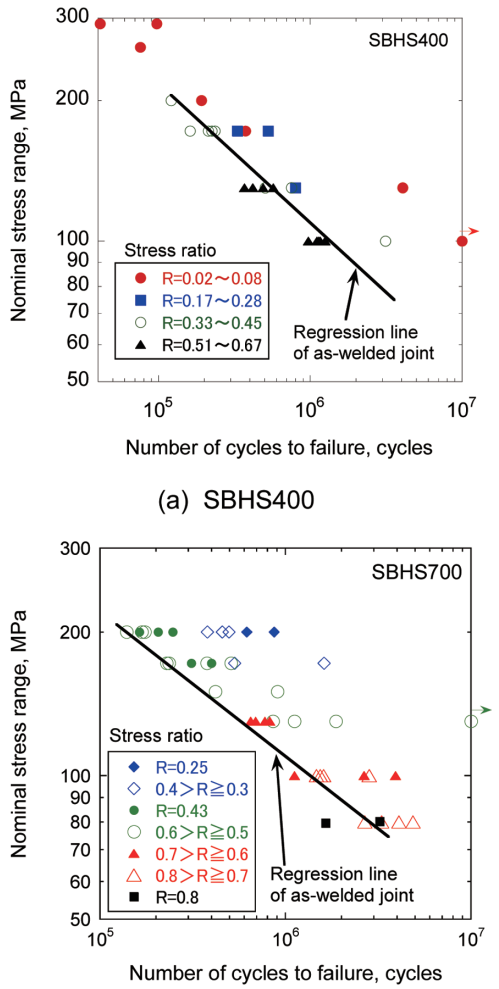


図12　UIT効果に及ぼす応力比の影響
Influence of the stress ratio on the effect of UIT

4.2.3 処理品質，施工誤差の影響

溶接止端部へのUITの品質については元の溶接止端が見えなくなるまで処理することを推奨しているが，元の止端が残っている場合には形状による応力集中のために効果が小さくなる可能性がある。また，溶接材料や溶接条件などにより止端の形状が悪い場合やフランク角が大きい場合，上述したレベルまで処理をするのに時間がかかる上に，処理により折れ込み傷を作ってしまうことがある。この傷が深い場合UIT効果を低下させるため注意が必要である。

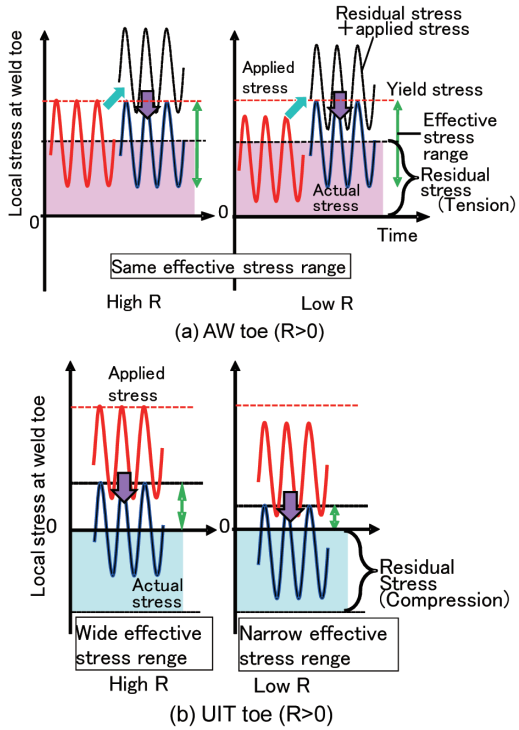


図13　UIT継手の疲労特性に及ぼす応力比の影響の模式図
Diagram of effect of stress ratio on the fatigue property of UIT joint

また，溶接変形による角変形により溶接止端の実質的な応力比が大きくなることがあり，前節で述べたように UIT 継手の疲労強度は応力比の影響を大きく受けるため，比較的応力比に鈍感な溶接ままの継手よりも注意が必要である。

5. UIT効果の予測[17, 18)]

以上のように UIT 継手の場合，溶接まま継手では実質的な影響が小さいため考慮していなかった因子の疲労特性に及ぼす影響が顕著に現れることがある。UIT 継手の疲労特性予測はこうした点について留意して行う必要がある。UIT 継手の疲労特性の予測方法として次の方法が考えられる。一つは亀裂伝播を考慮した，荷重履歴や UIT を施した溝部分の残留応力，応力集中を考慮した疲労亀裂進展解析を基に部材の疲労亀裂による破断条件を計算する方法，もう一つは特に複雑な荷重履歴を考慮しない構造を対象とする進展特性を直接使わずに S-N カーブを推定する方法がある。

5.1 疲労亀裂伝播解析[19-22)]

新日鐵住金では構造物の応力集中，残留応力，ランダム負荷をも考慮しながら，実用的な精度を持った溶接構造物の疲労寿命予測システム[19)]の構築を行ってきた。ここでは溶接継手の亀裂貫通評価までを考慮した場合の疲労寿命予測方法を例にして概要を図 14 に示す。

本システムでは，溶接止端部に微小な初期亀裂をあらかじめ想定し，重み関数法を用いた表面亀裂応力拡大係数解析と，亀裂結合力モデルを応用した亀裂開閉口シミュレーション[20, 21)]を組み合わせ，疲労亀裂進展挙動を逐次解析することで溶接構造物の疲労寿命を推定することが可能である。これにより溶接部形状による応力集中と，溶接や UIT による複雑な残留応力分布の影響を考慮して応力拡大係数を算出し，さらに亀裂先端部の塑性変形挙動と亀裂面接触の解析から亀裂開閉口荷重を推定することで，溶接構造物の疲労寿命を荷重順序や応力比の影響も含め正確に予測することができる。

UIT 継手への適用では UIT 溝の内部に欠陥を想定し，溝による応力集中や進展中の亀裂の形状を考慮して応力拡大係数を算出し，亀裂進展を計算している。図 15 にこの方法を用いて亀裂進展計算から疲労寿命を推定した例を示す。なお，ここでは繰り返し応力条件が一定の場合，JSSC の疲労設計指針で提案されている疲労亀裂進展条件を用いている。

また繰り返し応力が変動する場合については，大きな荷重後の低荷重負荷による亀裂先端の開閉口挙動によって亀裂進展の遅延が起こるため，疲労亀裂進展計算の部分に FLARP[23)]等の亀裂開閉口モデルを用いた方が精度が向上すると考えられる。

なお，残留応力下での高精度な寿命推定には精度の良い

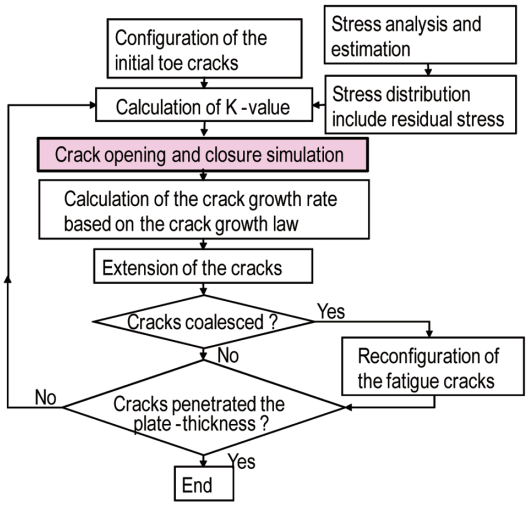


図 14　溶接継手の疲労寿命予測フロー
Fatigue life prediction flow of the welding joint

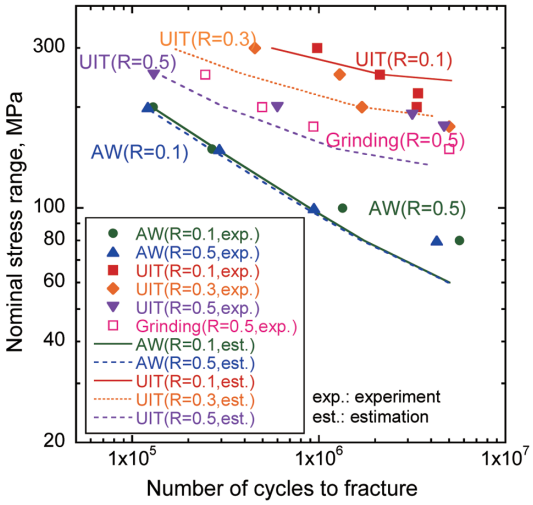


図 15　亀裂伝播解析による UIT 継手の疲労寿命予測
Fatigue life prediction of the UIT joint by the crack extension analysis

残留応力分布のデータが必要となるが，新日鐵住金では弾塑性熱応力解析と併せて中性子回折による三次元的な残留応力分布の非破壊計測技術も活用し，溶接部材中の複雑な残留応力分布の評価を可能としている[24, 25)]。

5.2 S-N カーブの推定

UIT 等の超音波衝撃によるピーニングやエアツールによるピーニング処理に関して，国際溶接協会 IIW の第 13 委員会ではこれらの技術を HFMI（Hi-Frequency Mechanical Impact）と称し，Dr. Marquis らを中心としてその S-N カーブを規定しようとする動きがある[26)]。この S-N 曲線の考え方は IIW の FAT を用いた溶接部の疲労等級の考え方とリンクしており，4 章で述べた鋼材強度や，応力比の影響を考慮した線図が提案されている。図 16 にこの線図の例を示す。

従来 IIW の溶接部疲労対策の推奨案[8)]では HFMI 処理

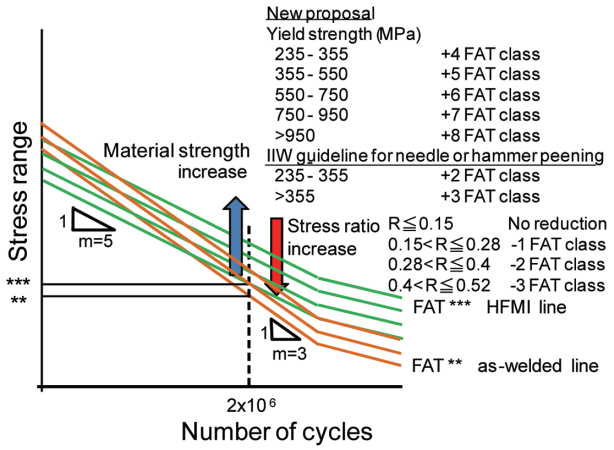


図 16　HFMI 用の S-N 線図の予測図
S-N curve prediction for HFMI joint

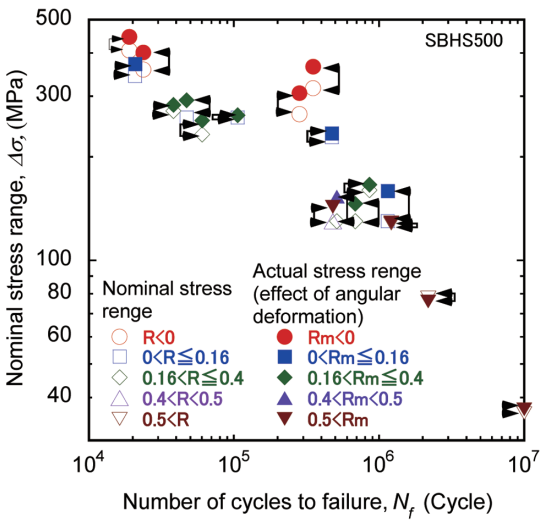


図 17　UIT 継手の疲労試験結果に及ぼす角変形の影響
Effect of angular deformation on the fatigue test results of UIT joint

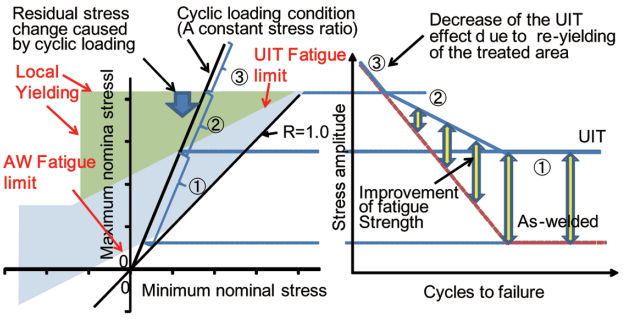


図 18　提唱する UIT 用 S-N カーブの推定方法の考え方
Proposed prediction method of S-N curve for UIT joint

と類似の効果を示すハンマーピーニングやニードルピーニングによる効果を示す線図を提案していたが，この新しい線図では考え方を大きく変えており，軟鋼クラスから強度 950 N/mm² クラスの高張力鋼までの鋼材強度クラスを 4 段階に分け，1 強度クラス上昇で FAT クラスもひとクラス上昇するとしており，また，応力比 R については正側において応力比の増大に伴い改善効果が減少していき，R>0.52 では効果が得られないとしている。

しかし，この S-N 線図の考え方には過大荷重や熱等によって残留応力が変化してしまった場合の評価は含まれないため，十分な精度が得られないこともあるため注意が必要である。

また，4.2.3 節で述べたように UIT の処理品質によって継手の疲労強度は大きく変わりうる。このことは HFMI でも同様であり，IIW の同委員会にて施工品質についても議論が行われており，Quality control に関して推奨案 [27] が紹介されている。

施工品質に関して，従来の溶接ままの継手は溶接止端においては高い引張残留応力が生じていることから，止端部の応力比がもともと高くなっており，容易に降伏し，応力が頭打ちとなることから角変形による構造的な応力比の差は小さいと考えられるが，UIT 継手の止端では応力比が負側から正側に大きく変化するため，角変形による疲労強度の変化が相対的に大きくなると考えられる。図 17 に面外ガセット継手試験により得られた疲労試験結果で，試験片の角変形により低下したと考えられる疲労強度と角変形による低下代を補正した結果を示す。この例では角変形によって実質上，公称応力範囲が 80 MPa 以上も高い条件や応力比が 0.1 以上高い条件で負荷されたものもあり，疲労等級が大きく変わってしまうケースがあり，JSSC の鋼構造物の疲労設計における等級で 2 等級以上も変わる場合もあった。このように，UIT 継手の疲労特性は使用条件によって大きく変化し，使い方によっては期待される疲労強度向上効果が得られない場合がある。このため，有効な使用条件や性能向上代の見極めが重要である。

新日鐵住金では UIT 継手の S-N 線図の予想に関して，処理部の残留応力が繰り返し負荷の条件により変化することが処理継手寿命に大きく影響を与えることに着目した独自の考え方を提案 [17, 18] しており，寿命推定方法の確立を目指している。この方法は，継手の止端の残留応力，鋼材強度，局所応力集中に注目しており，UIT 継手への負荷応力が大きい場合の止端部応力集中を考慮して導入した圧縮残留応力が低下してしまう限界応力や圧縮残留応力によって見かけ上疲労亀裂の生じない限界応力（疲労限）の予測結果と溶接ままの継手の疲労特性に基づいて S-N 曲線を予想するものであり今後精度向上を図っていく予定である。

この方法は，局所残留応力を考慮した，局所領域に拡張された修正グッドマン線図（LEMGD：locally-expanded modified goodman diagram）により疲労強度を算定する方法と過大な繰り返し負荷により UIT により導入した残留応力分布が壊れ圧縮残留応力の効果が減少してしまう条件の予測手法を組み合わせたものである。図 18 に UIT 用 S-N カーブの推定方法の考え方を示す。

止端部の圧縮残留応力レベルに関し，図 19 に SBHS700

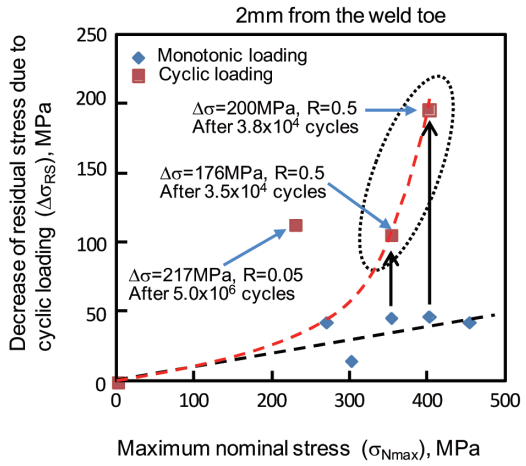


図 19　溶接止端部の残留応力変化に及ぼす繰り返し負荷における最大公称応力の影響
Effect of the maximum nominal stress on residual stress change at the weld toe due to cyclic loading

の面外ガセット継手を例にとり，繰り返し負荷条件を変えた場合の UIT 継手の溶接止端近傍の残留応力の変化を示した。この図から高応力比での繰り返し負荷は導入した残留応力を大きく低減させるため寿命延長効果を減少させると推察される。一方，低応力比では応力振幅が大きくても残留応力低減効果が小さい。このため寿命延長効果がある程度持続すると推察される。このような残留応力の変化については現在正しく予測する手段はない。しかし，溶接継手の寿命予測は必ずしも新規に製作したものばかりではなく，長期間の使用後に予寿命を検討する場合，溶接補修部の予寿命予測であったり，UIT による寿命延長効果を効果的・幅広くに活用するにはこのような残留応力の変化を適切に予測することが必要であり，また，有効範囲の明確化においても有用であると考えられる。

6.　結　　言

UIT は溶接継手部の疲労強度向上や疲労寿命の延長に極めて有効である。しかし，従来から行われているグラインダー等による形状改善とは異なり残留応力の改善による効果を用いているため，その有効な応力条件が異なっている。この点に留意して UIT による疲労強度向上効果を適切に活用することで，構造物の疲労に対する信頼性向上や高強度鋼の活用による軽量化をさらに進めることができるものと期待できる。

参照文献

1) Statnikov, E.S.: Comparison of Efficiency and Processibility of Post-Weld Deformation Methods for Increase in Fatigue Strength of Welded Joints. IIW Doc.XIII-1668-97, 1997
2) 野瀬哲郎：疲労強度向上向け超音波ピーニング法．溶接学会誌．77 (3)，210-213 (2008)
3) 国土交通省：新技術活用システム NETIS（New Technology Information System）．超音波ピーニング処理（UIT）工法．KTK-070004-V，2014
4) 森猛，島貫広志，田中睦人，宇佐美龍一：UIT を施した面外ガセット溶接継手の疲労強度に対する施工時応力レベルと応力比の影響．土木学会論文集 A1．67 (2)，421-429 (2011)
5) 森猛，島貫広志，田中睦人：面外ガセット溶接継手の UIT 疲労強度改善効果に対する鋼材静的強度の影響．土木学会論文集 A1（構造・地震工学）．No.2，210-220 (2014)
6) 日本鋼構造協会編：鋼構造物の疲労設計指針・同解説 2012 年度改定版．2012
7) 森猛：改訂版 JSSC 疲労設計指針について．JSSC 会誌．No.2，38-43 (2010)
8) Hobbacher, A. F.: The New IIW Recommendations. International Journal of Fatigue. 31, 50-58 (2009)
9) Statnikov, E. S., Vityazev, V., Korolkov, O.: Ultrasonic Impact Treatment ESONIX Versus Ultrasonic Peening. IIW Document No. XIII-2050-05, 2005
10) Statnikov, E. S., Korostel, V., Vekshin, N., Marquis, G.: Development of Esonix Ultrasonic Impact Treatment Techniques. IIW Document No. XIII-2098-06, 2006
11) Roy, S., Fisher, J. W., Yen, B. T.: Fatigue Resistance of Welded Details Enhanced by Ultrasonic Impact Treatment (UIT). International Journal of Fatigue. 25 (9), 1239-1247 (2003)
12) Martinez, L. L., Haagensen, P. J.: Life Extension of Class F and Class F2 Detail Using Ultrasonic Peening. IIW Document No. XIII-2143-06, 2006
13) Okawa, T., Shimanuki, H., Funatsu, Y., Nose, T., Sumi, Y.: Effect of Preload and Stress Ratio on Fatigue Strength of Welded Joints Improved by Ultrasonic Impact Treatment. IIW Document No. XIII-2377-2011, 2011
14) 島貫広志，森猛，大川鉄平，田中睦人：UIT による疲労強度改善効果に及ぼす鋼材強度の影響．溶接構造シンポジウム 2011 講演論文集．2011
15) 島貫広志，大川鉄平，田中睦人：超音波衝撃処理（UIT）継手の疲労強度に及ぼす応力比の影響．土木学会第 65 回年次学術講演会．I-100，2010，p. 199-200
16) 島貫広志，森猛，田中睦人：UIT による高張力鋼溶接継手の疲労強度改善効果と止端部残留応力の検討．土木学会第 67 回年次学術講演会．I-260，2012，p. 519-520
17) 島貫広志，木下昌彦，森猛，田中睦人：UIT による溶接継手の疲労強度改善効果の推定方法の検討．土木学会第 68 回年次学術講演会．I-543，2013
18) Shimanuki, H., Mori, T., Tanaka, M. et al.: Study of a Method for Estimating the Fatigue Strength of Welded Joints Improved by UIT. IIW Document No. XIII-2495-13, 2013
19) Shimanuki, H., Okawa, T.: Effect of Stress Ratio on the Enhancement of Fatigue Strength in High Performance Steel Welded Joints by Ultrasonic Impact Treatment. International

Journal of Steel Structures. 2013

20) Okawa, T., Shimanuki, H., Nose, T.: 2nd Int. Conf. On Material and Component Performance under Variable Amp. Loading. Proc. Vol. I, 2009, p. 433-442

21) Okawa, T., Shimanuki, H., Nose, T., Suzuki, T.: Fatigue Life Prediction of Welded Joints. Analysis of Fatigue Strength Improvement by Ultrasonic Impact Treatment, Proceedings of welded structure Symposium 2009. 2009, p. 483-486 (in Japanese)

22) Okawa, T., Sumi, Y.: A Computational Approach for Fatigue Crack Propagation in Ship Structures under Random Sequence of Clustered Loading. J Mar Sci Technol. 13, 416-427 (2008)

23) 豊貞雅宏，丹羽敏男：鋼構造物の疲労寿命予測．共立出版，2001

24) 鈴木環輝 ほか：新日鉄技報．(390)，49 (2010)

25) 鈴木環輝，今福宗行，大川鉄平，島貫広志，野瀬哲郎，鈴木裕士，盛合敦：中性子回折法による超音波打撃処理した鋼材の残留応力測定 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集．2010，p. 56

26) Gary B. Marquis, Eeva Mikkola, Halid Can Yildirim, Zuheir Barsoum: Fatigue Strength Improvement of Steel Structures by High-frequency Mechanical Impact: Proposed Fatigue Assessment Guidelines. Weld World. DOI 10.1007/s40194-013-0075-x, 2013

27) Gary Marquis, Zuheir Barsoum: Fatigue Strength Improvement of Steel Structures by High-frequency Mechanical Impact: Proposed Procedures and Quality Assurance Guidelines. Weld World. DOI 10.1007/s40194-013-0077-8, 2013

島貫広志　Hiroshi SHIMANUKI
鉄鋼研究所　材料信頼性研究部　主幹研究員
博士（工学）
兵庫県尼崎市扶桑町1-8　〒660-0891

田中睦人　Mutsuto TANAKA
厚板事業部　厚板技術部　厚板商品技術室長