

# 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 —

本資料は“溶接技術”の2005年3月号に紹介したものです。2004年の国際溶接学会(IIW)に発表された論文(IIW Doc. XIII-2010-04)の抄訳を主とし、それに応用例を加えたものです。

### UP システム開発経緯

- ① 1960年代ウクライナのパトン溶接研究所(PWI)で基礎技術が開発された。
- ② 1997年にカナダのIntegrity Testing Laboratory Inc.(ITL社)はPWIとUltrametによる実用化研究に参加(当時はUltrasonic Impact Treatment(UIT)と称していた)。
- ③ 2000年に国際溶接学会でその効果が確認。
- ④ 2004年の大阪でのIIWと国際ウェルディングショーで日本に初めて紹介。
- ⑤ 2005年アメリカの橋梁の補修溶接部に実際施工。

### — ITL 社 —

カナダの会社で、ウクライナのパトン研究所のUIT技術を継承し、さらに発展させて現在のUP装置とソフトを開発。超音波ピーニング(UP)システムの全世界への製造・販売・実施権を有している。

President: Jacob Kleiman, Ph.D.

Chief: Yuri Kudryavtsev, Ph.D.(元パトン研究所研究員)

### — (株)Be よんど —

岩村 吉就: 溶接技術者(元川崎重工業)

**製造元** Integrity Testing Laboratory Inc. Canada

**輸入販売総代理店** (株)Be よんど Phase Tech.部

〒658-0072 神戸市東灘区岡本5丁目2-6 TEL&FAX 078-452-5330

URL : [go-beyond.jp](http://go-beyond.jp) E-mail : [office@go-beyond.jp](mailto:office@go-beyond.jp)

## 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—

岩村 吉就

(有)Beよんど PhaseTech.部

### 1 はじめに

溶接継手部の疲れ強さの向上方法として従来からショットピーニングやハンマーピーニング法が用いられているが、より重要な箇所についてはグラインダ処理が施されているのが一般的である。さらに最近ではティグ溶接によるドレッシング法やレーザーパルス照射法等が提案されている。

しかし、溶接部の疲れ強さをもっとも効率良く向上させるには継手表面に圧縮残留応力を生じさせると同時に、溶接止端部に浅い溝を形成させ応力集中を無くすることが要求される。さらに実際施工において定量的制御が可能であり、どこにも適用できる安全かつハンディタイプな装置が望まれる。超音波ピーニング (UP) 装置はこれらを実現したものである。UPシステムの開発経緯の概要を紹介する。

1960年代から、ウクライナのパトン溶接研究所 (PWI) と金属物理研究所 (IMP/Ultramet) は高出力超音波衝撃処理法に関する研究を開始し、1974年に最初の論文を発表した。1993年にアメリカ溶接学会 (AWS)、イギリス溶接研究所 (BWI) および国際溶接学会 (IIW) 等で紹介された。

1997年にカナダのIntegrity Testing Laboratory Inc. (ITL) は、PWIとUltrametによる「UP技術と装置の進歩と改善に関する開発研究」に参加。2002年にUP技術のソフトとセラミック圧電素子が開発され、溶接継手部の疲れ強さをもっとも効率的にかつ信頼性高く向上させるシステムが完成された。このピーニング本体は小型軽量なためロボットにも搭載でき、フレキシブルな生産ラインの構築も可能にしている。

日本への紹介は、2004年の大阪におけるIIWでの論文発表と国際ウエルディングショーへの出展が初めてである。UPシステムは機械加工品のギア表面や鍛造スプリン

グ等の引張残留応力を除去することにより疲れ強さの向上を図ることや、溶接歪の除去にも有効であることが確認されている。さらに、ハイサイクルな高周波衝撃により材料表面の結晶粒がナノ化するため応力腐食対策にも効果的である。

なお、ITLはPWIとUltrametの総代理で北米、西欧およびアジアにおけるUP技術と装置に関する代理権を持っており、数々の特許を有している。

### 2 UPシステム技術の概要

超音波ピーニング (UP) は特殊な打撃子によるハイサイクルな直接的衝撃とそれによって材料中に誘起する超音波振動との相乗効果を利用し、溶接継手や材料表面に塑性変形を起こす技術である。UP技術でもっとも重要なのは、打撃子を振動子に直結しないで振動子と材料表面との間に独立させることで振幅を大きくし、より大きい衝撃荷重を発生させることにある。自由可動できる打撃子をUP本体に組込んだ構造を図1に示す。図中、部材12が打撃子である。

振動子の周波数と打撃子の振動周波数および振幅は図2に示すように大きく異なっている。

パトン溶接研究所 (PWI) は、UP技術の最初の応用開発において溶接止端部のみへの適用を推奨した。打撃子として球を選定し、溶接止端部に球の半径と同じ半径

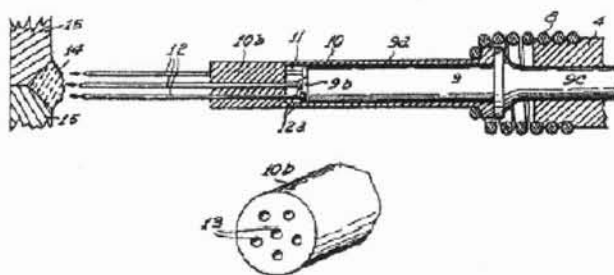


図1 自由可動な打撃子を有する装置の断面



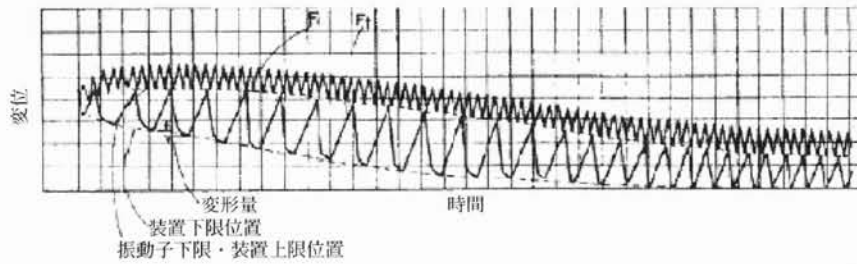


図2 UPにおける振動変換子と打撃子の振動様式

の溝を塑性変形により形成させた。その後、UP処理による残留応力の変化、応力集中係数の変化および材料表面層の機械的特性の変化を解析し、UP処理の成果を評価し得る予測モデルを開発した。このことにより多大な労力、時間および費用がかかる大型試験片でのテストが省略でき、かつ溶接継手の疲れ強さを向上させる上でのUP処理上の諸因子の最適化が図れるようになった。

UP技術の工業界への応用開発はウクライナ、ロシア、カナダ、米国と中国で活発に行われている。さらにUP処理を実施する上でのソフトウェアも開発されている。

### 3 UP技術、装置およびソフトウェア

#### 3.1 UP技術

UP技術は特殊な打撃子によるハイサイクルな衝撃荷重と、それによって材料内に誘起される超音波振動との相乗効果により塑性変形と残留応力の緩和作用を引き起こすものである。超音波振動子の周波数は20~30kHzで、振動変換子としてはセラミック圧電素子か磁歪変換子が用いられる(図4)。どちらも変換子先端の振幅は20~40 $\mu$ mである。ただし振動変換子は打撃子に自身の周波数とは異なった周波数で衝撃を加える(図2)。図3に単一打撃子の構成を示す。

施工対象によって種々の打撃子が工夫されている。そ

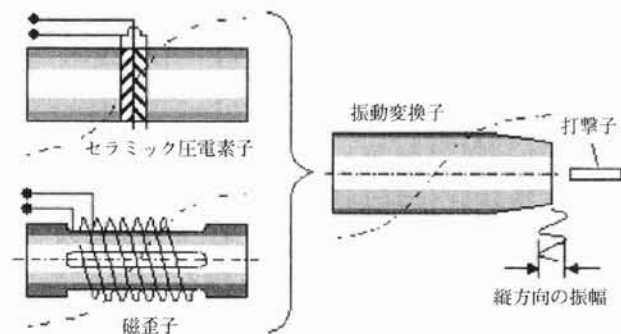


図3 UPの振動子、変換子および打撃子の構成図

の代表例としては

- 1) 3~5本の打撃子を有するヘッドは溶接止端部の処理に
- 2) 1本の打撃子からなるヘッドは十字継手等作業性の悪い箇所の処理に
- 3) 7本以上の打撃子を有するヘッドは平らな表面や大きな曲率をもった箇所の処理に

等がある。残留応力の再分布は主に次の2点によって生じる。

- 1) ハイサイクルな衝撃荷重下によって材料内部に超音波振動が誘起され溶接残留応力を低下させる。この動スペクトラムは超音波振動子、ヘッドの質量、打撃子の形状(球状、棒状等)や材料の形状によって異なる。
- 2) 疲れ強さの向上にもっと大切なのは材料表面に有益な圧縮残留応力を発生させる塑性変形である。衝撃荷重の周波数が高いほど塑性変形は大きくなる。サイクルが材料の所用回復インターバル(ヒステリループに必要な)より短いと、機械的組織は平衡状態を保てず塑性変形が促進されることによる。

さらに、UP施工時には打撃子は振動変換子および材料表面とのそれぞれ小さな隙間の中で振動する。このギャップ間での打撃子の強い準共振振動の発生はUP法の一大特徴である。疲れ強さの向上に最も効果があるのは、

- 1) 材料表面層内に圧縮残留応力を発生させる
- 2) 溶接止端部の応力集中を緩和させる
- 3) 材料表面層の機械的特性を高める

ことである。UP処理によって改善された材料の横断面の残留応力分布を模式的に図4(以下、次ページ)に示す。表にUP処理による利点の要約を示す。

UP処理後の溶接止端部形状の模式図を図5示す。写真1に突合せ溶接部のUP処理後の外観を示す。継手部の両側に鮮明な溝が形成されている。

国際溶接学会(IIW)でも超音波衝撃処理(UIT:UPと同じであるが磁歪変換子を使用)が注目を受け、1994

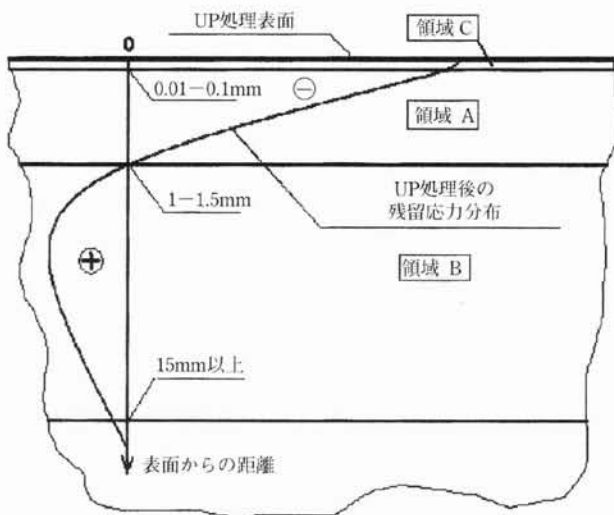


図4 UP処理後の材料横断面での残留応力分布の模式図

表 UP処理後の各領域の利点

領域	特徴	深さ	改善される特性
A	塑性変形発生領域でかつ圧縮残留応力域	1~1.5mm	疲れ強さ、腐食、摩耗重
B	溶接残留応力緩和域	15mm以上	歪、き裂伝搬の抑制
C	ナノ結晶化領域 (特定条件下で可能)	0.01~0.1mm	高温での腐食、摩耗、疲れ強さ

年に疲れ強さ改善法の共同試験が計画され、パトン溶接研究所 (PWI) で試験が行われた。溶接のままと溶接止端部を各種方法 (UIT, ハンマーピーニング, ショットピーニング, ティグ処理, およびティグ処理とUITの組合せ) で処理した試験片 (荷重非伝達型T字すみ肉溶接継手) が用いられた。適切なUIT処理条件を選ぶことにより, もっとも良い疲れ強さを得られることが確認されている (図6)。

### 3.2 UP装置

UPに用いられる振動変換子として磁歪変換子とセラミック圧電素子の2通りあり, 共に電気的変換を機械的振動エネルギーに変えるのがある (図4)。磁歪式では, 超音波発信器からの電気的エネルギーを磁場変換し, その後磁性材料の振動子を通して機械振動に変える。そのためセラミック圧電素子より効率は劣り, 水冷しないといけないので装置は重くかつ高価につく。

セラミック圧電素子は電気的変換を直接的に機械的エネルギーに変えることができるので, 消費電力を60%削減できる。最近の圧電素子は頑強で効率も良く信頼性も高いので安心して使用できる。図7 (次ページ) に示すように1kwの磁歪変換子と同じ効果を得るにはセラミック圧電素子を使用すれば0.25kwで済む。

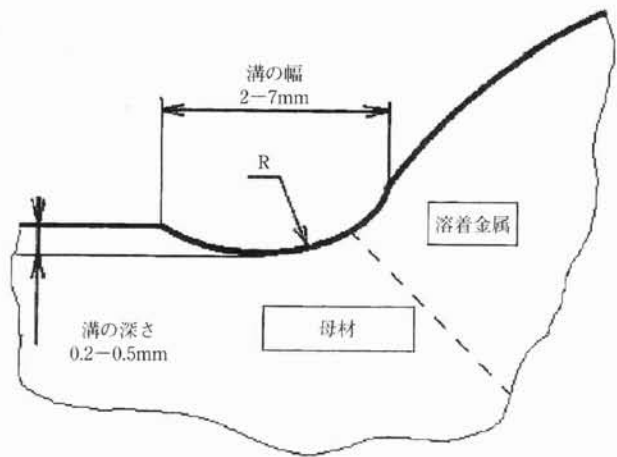


図5 UP処理後の溶接止端部の形状

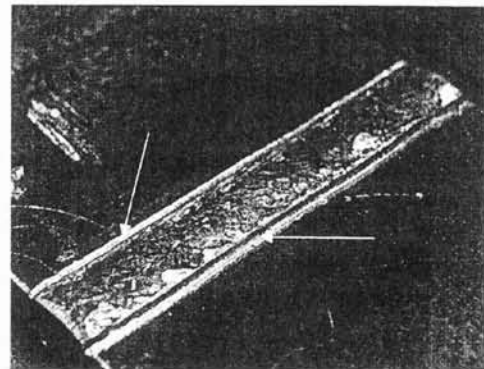
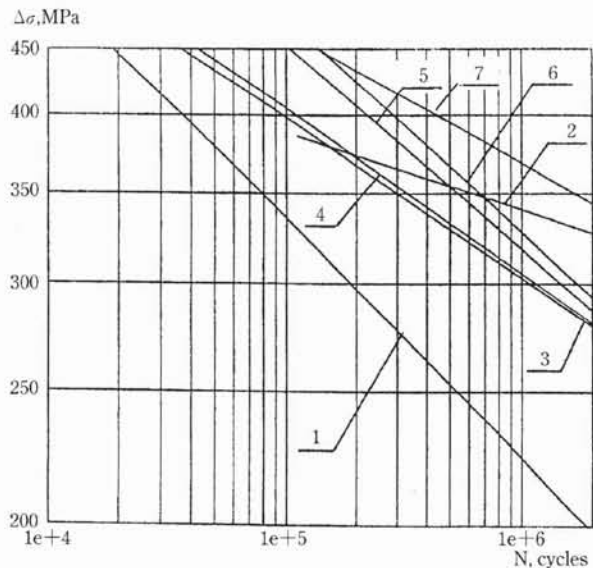


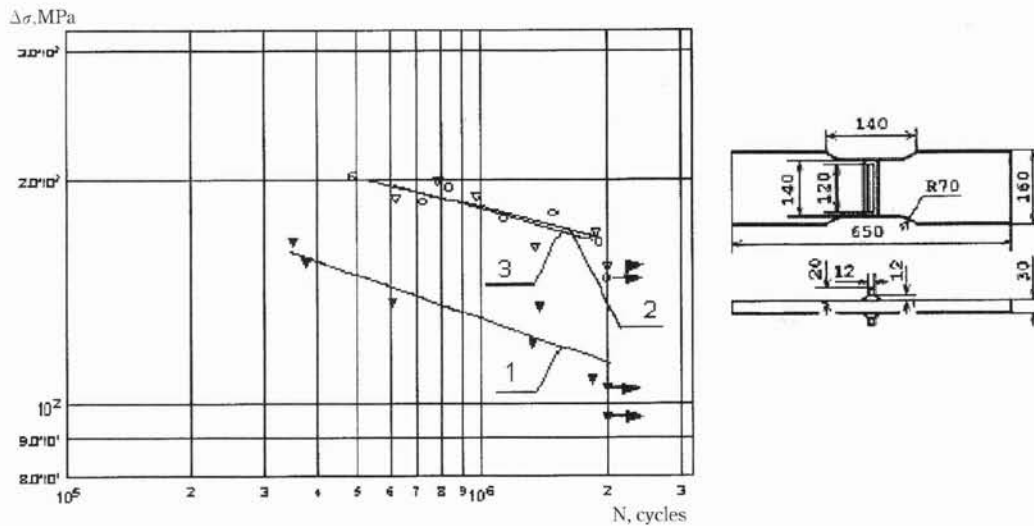
写真1 UP処理後の突合せ溶接部外観



1-溶接のまま, 2-UIT処理 (直径5mmと3mm), 3-ハンマーピーニング, 4-ショットピーニング, 5-ティグ処理, 6-ティグ処理後UIT処理, 7-UIT処理 (直径3mm)

図6 種々の溶接後処理法による疲れ強さの比較

アルミニウムの突合せ継手の疲れ強さの試験結果では, セラミック圧電素子の方が良い結果が得られている



1-溶接のまま, 2-UP処理(磁歪:1kW),  
3-UP処理(圧電素子:0.25kW)

図7 十字型すみ肉溶接継手の疲れ強さ曲線

(図8)。

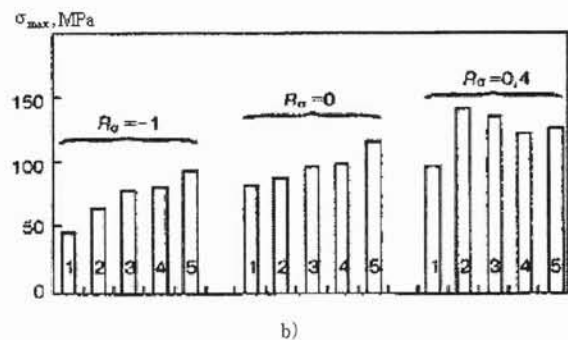
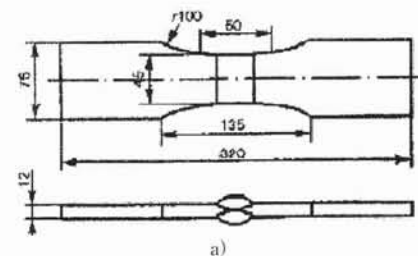
これらの結果を網羅したエキスパートシステムとしてのソフトが開発され、写真2(次ページ)に示すUPシステムが確立された。この新しく最適化されたUPシステム(全重量6kg)は、

- 1) ピーニング本体にはセラミック圧電素子が使用され重量3kgと小型軽量化され使いやすくロボットへの搭載も容易である。
- 2) 超音波発信器の重量は2kgで、消費電力は250Watts、周波数は22kHzまで可能。
- 3) 最適なUP処理条件が選定できるソフトを搭載したノート型PC。ソフトは独自の予測モデルに基づいて開発されている。

### 3.3 UP施工条件設定のためのソフト

溶接継手の疲れ強さ向上に対するUP処理の効果は、残留応力の程度、使用材料の機械的特性、溶接継手形状、繰返し荷重等に依存する。そこでこれらの要素を考慮した独自の予測モデルが新たに設定され、最適なUP施工条件が設定できるソフトが開発された。最小の労働力でUP処理を施工し、もっとも効果的に溶接継手部の疲れ強さを向上させるためのソフトである。その要点は、

- 1) UP処理によって溶接継手の疲れ強さをもっとも向上させる条件設定において、使材料の機械的特性、溶接継手形状および繰返し荷重等を考慮する。
- 2) 最小の労力で最大の効果を上げるためにすべての溶接継手について考慮する。
- 3) UP施工のモニタの実施



1-溶接のまま, 4,5-セラミック圧電素子によるUP処理(0.25kW),  
3-磁歪変換子によるUP処理(1kW), 2-グライマー処理

図8 a) アルミニウム溶接継手の疲れ強さ試験片,  
b) 10サイクルでの最大応力の比較( $R = -1, 0, 0.4$ )

4) UP処理後の溶接構造物の疲れ強さに対する最終評価はUP施工部の詳細な検査と再計算により行う。このソフトによりUP処理後の残留応力の再分布が寿命にどのように影響するのか評価できるようになった。従って大型試験をほとんど必要としなくなった。

種々の鋼材の溶接継手にUP処理をした場合の疲れ強さについて計算した結果を図9に示す。No.1のS-N曲線は各材料の溶接のままでの疲れ強さ試験の結果であり、材料の強度にかかわらずその強さは同じである。しかし





写真2 超音波発振器、ピーニング本体、ソフトウェアからなるUPシステム

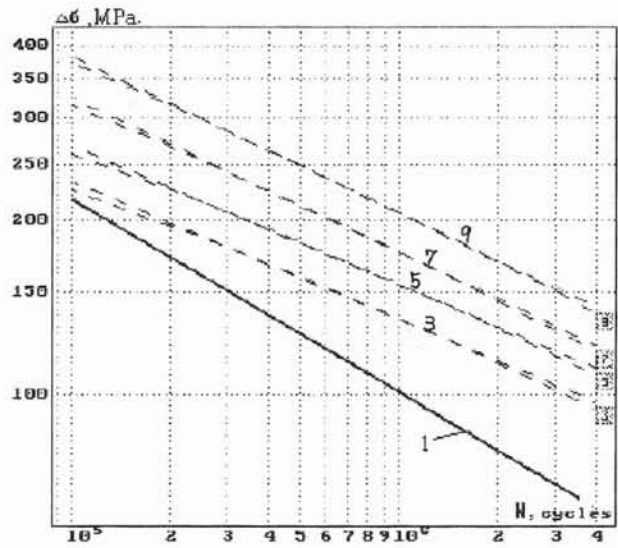
UP処理を施せば鋼材の強度に応じて疲れ強さも向上する。UP処理後の溶接継手の疲れ強度 ( $N=2 \times 10^6$ ) の増加量は鋼材1では42%、2では64%、3では83%、4では112%であった。これは、強度の高い材料程UP処理の効果が高くなることを示しており、高張力鋼の場合には疲れ強度で2倍に、寿命で10倍になっている。

### 3.3 まとめ

- 1) UP技術は特殊な打撃子のハイサイクルな衝撃荷重とそれによって誘起される材料内部の超音波振動を活用したものであり、従来からの溶接後の諸処理法（グラインダ処理、ティグドレッシング、ショットピーニングやハンマーピーニング等）に比べ、溶接部の疲れ強さをもっとも良く向上させる。
- 2) UPシステムは小型軽量化されたピーニング本体と超音波発信器および上記ソフトを搭載したノート型PCで構成されており、最少の作業時間、労力がかつ小さい消費電力でもって溶接部の疲れ強さをもっとも良く向上させ得るものである。
- 3) UPシステムは有害な引張残留応力を減少させると同時に、材料表面から1.0~1.5mmの深さまで有益な圧縮残留応力を発生させる。
- 4) 開発されたソフトに残留応力の程度、使用材料の機械的特性、溶接継手の種類および繰返し荷重等のデータを入力することにより溶接部の疲れ強さの向上度合いを十分な精度でもって解析することが可能である。
- 5) UPシステムは溶接や他の製造工程で生じる歪みを除去できると共に残留応力の緩和、材料表面の硬化と結晶粒のナノ化により耐応力腐食割れ性を高めることにも利用できる。

## 4 UPシステムの応用例

- 1) 自動車用ホイール



1-溶接のまま(全鋼種), 3-鋼材1 ( $\sigma_u=270\text{MPa}$ ), 5-鋼材2 ( $\sigma_u=370\text{MPa}$ ), 7-鋼材3 ( $\sigma_u=615\text{MPa}$ ), 9-鋼材4 ( $\sigma_u=864\text{MPa}$ ), (3, 5, 7, 9はUP処理後)

図9 各鋼種の非荷重すみ肉溶接継手のS-N曲線

鉄鋼製ホイールの断続溶接部の開始部と終端部にそれぞれUP処理を施すと(写真3, 以下, 次ページ), 亀裂発生・伝播ともかなり遅くなり寿命は3倍延びた。UP処理時の一般的作業速度は0.5m/minであるが, この場合は両端の形状が複雑なので作業速度を遅くしている。

#### 2) 溶接パイプの歪取り

UP処理により溶接部の引張残留応力を除去すると撓みはほとんど無くなった。写真4に2種類のパイプを示す。長さ8"パイプのUP処理前後の撓みを図10に示す。

#### 3) 材料表面層の結晶粒のナノ化

種々の材料のUP処理後の結晶構造を写真5に示す。

#### 4) 橋梁の疲れ亀裂補修溶接後のUP処理

橋梁に発生した疲れ亀裂を補修溶接した後でUP処理をしている作業状況を写真6に示す。UP処理において, 材料表面層の引張残留応力を圧縮残留応力に変換するのに要する所用時間の一例を図11に示す。

#### 5) そのほか

そのほか色々な実績がある。重要部材の疲れ亀裂補修溶接後にグラインダ仕上げとUP処理を施し, 再び破損しなかったこと。自動車用鍛造製スプリングへの応用により材料の軽量化と6年間の保証を可能にしたこと。機械加工品の歯車の底部側面への適用による残留応力の除去。さらに自動車用タイヤコードのワイヤ成型時, 引抜き直後に超音波をかけると残留応力が発生せず強度が著しく向上することも研究レベルで明らかにされてきた。ITL社では超音波技術のさらなる応用開発に当たってスポンサーを求めている。

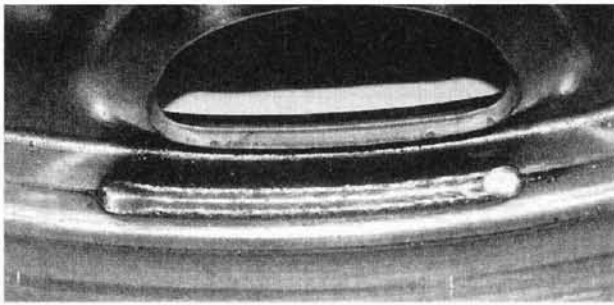


写真3 自動車用ホイールの断続溶接部

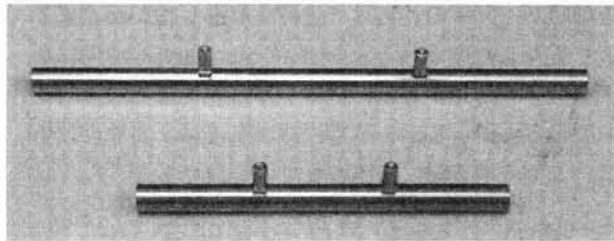


写真4 溶接パイプの外観 (8"と5")



図10 長さ8"の溶接パイプの撓み  
波線-溶接のまま, 実戦-UP処理

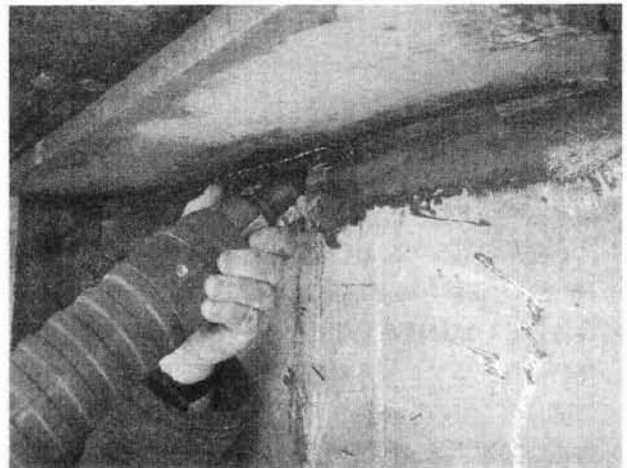


写真6 疲れき裂の補修溶接後のUP施工状況

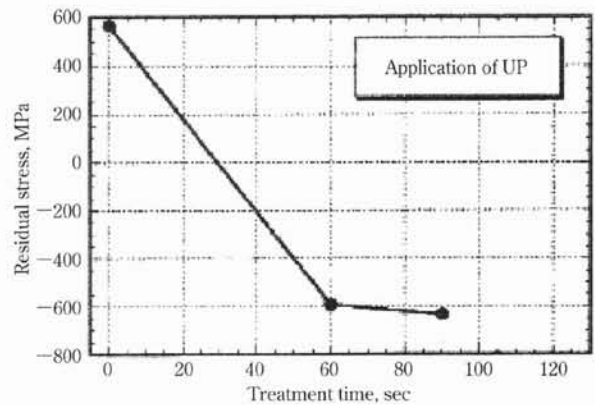


図11 溶接継手表面に圧縮残留応力を発生させるに必要なUP所用時間

## 5 おわりに

本技術について「何故、今まで日本で採用されなかったのか?」という質問をよく受ける。そこで開発経緯・実用化について紹介し、本技術そのものに関しては2004年大阪での国際溶接学会 (IIW) にて発表された論文の抄訳の形を取った。

自動車等の乗り物や橋梁等の溶接構造物に対する信頼性をより高めることと同時にロボットに搭載しフレキシ

ブルな生産ラインを構築し生産性の向上に図る上でもUPシステムは有用であると考えられる。さらに部材寸法の見直しによる軽量化を図り省エネにも役立つ研究開発の推進も必要だと思われる。原子力発電や化学プラント等ではより高い信頼性が要求されており、溶接継手の後処理について色々工夫されているようである。また、鍛造品や機械加工品のギャ表面の残留応力を除去することにより疲れ強さを向上させたり、溶接歪み等を除去することにも有益である。

これらの要求・需要に、本UP技術が役立てば非常に喜ばしい。なお、ITL社では超音波技術を利用した非破壊残留応力測定器も製品化しているが、紙面の都合上割愛した。またの機会に紹介させて頂きたい。

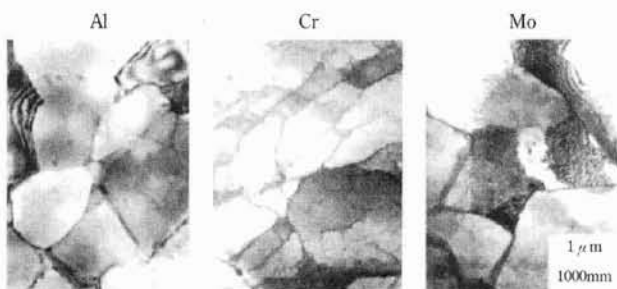


写真5 種々の材料のUP処置後の結晶構造 (材料表面から50 μmの深さ)