

# 海底パイプライン／鋼管端部真円化整形機の開発

## ～現地溶接部 高品質化に向けて～

Pipe End Round Forming Equipment and Control System  
(PERFECTS)

～The Fundamental Solution for Reducing Welding Defects  
in Offshore Pipeline Constructions～

岸口 哲也\* Tetsuya KISHIGUCHI  
技術開発第一研究所  
機械商品開発室

細田 寛之 Hiroyuki HOSODA  
技術開発第一研究所  
機械商品開発室

生野 康之 Yasuyuki IKUNO  
技術開発第一研究所  
機械商品開発室

池崎 徹 Toru IKEZAKI  
技術開発第一研究所  
機械商品開発室長

赤坂 政芳 Masayoshi AKASAKA  
技術開発第一研究所  
溶接・材料評価技術室

鳥井 正志 Tadashi TORII  
海洋事業部  
海洋設計技術部 設備企画技術室長

### 抄 録

海底パイプラインの周方向溶接時の初層溶接欠陥の発生率低減を目的として、鋼管端部整形機“PERFECTS”を開発した。本整形機によって鋼管端部を真円化かつ同径化することで、初層溶接欠陥の発生に影響を及ぼさず鋼管のフィッティング精度を抜本的に改善することができる。本稿では“PERFECTS”の特長と本機による管端整形実験の結果ならびに整形加工が鋼管の機械的性質に与える影響について述べる。

### Abstract

Nippon Steel & Sumikin Engineering Co.,Ltd. has developed the pipe end round forming equipment “PERFECTS” to aim at reducing welding defects for girth welding in offshore pipeline constructions. Applying “PERFECTS”, pipe ends are equalized in both diameter and roundness, and are fitted easily with each other for the root pass welding. This paper describes features of “PERFECTS” and results of the pipe ends forming test and their mechanical properties.

## 1 緒言

石油・天然ガスの経済的で安全な輸送のため、陸上および海底に多くのパイプラインが敷設されている。このうち、海底パイプラインの敷設には、一般にレイバージ工法が用いられる。レイバージ工法とは、①定尺(約12m)の鋼管をパイプレイバージ(パイプライン敷設用の台船)上にて溶接接合、②パイプラインを海底に沈ませつつ定尺分のパイプレイバージの移動を繰り返し、毎日数kmの距離のパイプラインを敷設する工法である。この工法は多くの

作業員や機器・船団を必要とし、一日当たりの敷設コストも多大となるため、いかに敷設能率を向上させて工期を短縮できるかが、海底パイプライン敷設事業の競争力強化において求められている<sup>1)</sup>。一般に敷設時間は、「定常の溶接工程のサイクルタイム」と「定常の作業を停止するダウンタイム」からなるが、ダウンタイムの内、特に大きな割合を占める溶接欠陥の補修時間をいかに短縮するかが重要となる。

ところで、近年、海底パイプラインの現地溶接継手部に対する品質要求が厳しくなり、特に鋼管内面

\*〒293-0011 千葉県富津市新富20-1 Tel: 0439-80-4427

で輸送流体と接触する初層溶接部に、無欠陥を求められるケースが増加している。この結果、従来と比較して、初層溶接の補修に要するダウンタイムが増加しており、初層溶接の欠陥を減少させることが技術課題となっている。初層溶接の欠陥には、図1に示す既設管と新設管のフィッティング精度(隙間精度と目違い精度)のうち、特に目違い精度が大きく関わっており、初層溶接の欠陥低減には、この目違い精度の向上が重要な鍵となる。そこで、目違い精度の抜本的な向上策として、鋼管の端面形状を真円かつ同径に整形する鋼管端部整形機(Pipe End Round Forming Equipment and Control System以降、“PERFECTS”と略す)を開発した。

本稿では、鋼管端部整形機“PERFECTS”の開発に至った経緯をまず紹介し、つぎに“PERFECTS”の設備、整形原理、整形能力について述べる。最後に、本整形が鋼管の機械的性質に与える影響について述べる。

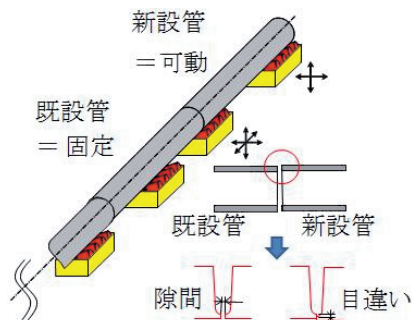


図1 鋼管のフィッティング  
Fig. 1 Pipe fitting

## 2 初層溶接に求められる目違い精度と目違い精度向上への取組み

### 2.1 要求目違い精度

パイプライン敷設におけるフィッティング作業とは、既設管位置に合わせて新設管位置を調整する作業と、両者の位置調整後にインターナルクランプで既設管と新設管の内面を把持する作業からなる。

先に述べたようにフィッティング精度と溶接品質には高い相関関係があり、フィッティング精度が悪いと、特に初層溶接欠陥が多発し、補修溶接時間が増大する。

また、特に目違いは溶接部の疲労強度などを低下させることから、フィッティング精度はパイプライ

ンの敷設能率だけでなく品質においても大きな影響を及ぼす。これまでのパイプライン敷設工事の実績から、鋼管フィッティング部の隙間を0.5mm以下、目違いを1.0mm以下に管理できれば、初層溶接欠陥の発生を防止できることが分かっているが、目違いについては、必ずしも1.0mm以下に管理できていない。これは、鋼管の規格では、その製造理由により、真円度や外径の公差が初層溶接で求められるフィッティング精度に比べて、その許容範囲が非常に大きいためである。例えば、API 5Lの鋼管規格では18インチ(外径:457.2mm)の場合、真円度(一つの鋼管端部で計測した鋼管内半径の平均値からのバラツキ量と定義する)は $\pm 2.3\text{mm}$ 、各鋼管の端部の鋼管周長計測結果から算出した平均外径の精度(個体差)は3.2mmまでを許容している。製造後の鋼管形状を調べたところ、真円度で $\pm 1.0\text{mm} \sim \pm 2.0\text{mm}$ 程度、平均外径の精度は2.6mmであった。

### 2.2 目違い精度向上への取組み

これまで当社では、目違い精度を向上させるために高拘束インターナルクランプを開発・実用化した<sup>2)</sup>。

この装置によれば、相互に溶接接合する鋼管の内面を同一のクランプシューによって同時に弾性変形範囲で拡張することで目違いを低減し、例えば、鋼管内面の開口欠陥は長さ25mmまで許容といった従来の溶接品質に十分対応して来た。しかし、真円度で $\pm 2.0\text{mm}$ を越えるような鋼管に対しては、目違い量1.0mm以下を必ずしも達成できていない。近年、初層溶接部に無欠陥が求められるようになると、溶接欠陥の発生を防止するために厳格に目違い量1.0mm以下を求められ、インターナルクランプだけでは対処できないため、新たな高精度目違い矯正技術が必要となった。

目違い精度を抜本的に改善するためには、溶接接合する前に鋼管端部に整形加工を加え、真円化かつ同径化を図ることが最も効果的である。従来、鋼管の内外面にダイスを挿入し、鋼管外周部からプレス加工を加えることで鋼管端面を整形する技術もあったが<sup>3)</sup>、1回のプレス加工での整形範囲が限定されるため、鋼管全周のプレス加工に数十回の繰り返し

作業が必要であった。この結果、プレス加工による整形技術を適用すると、サイクルタイムが従来の数倍の30～60分に延びることが懸念され、海底パイプライン敷設ラインであるパイプレイバージ上へこの技術を導入することはできなかった。鋼管とダイスの接触面積を広げることでプレス加工の回数を減らす案もあるが、整形荷重が10000kNレベルと大きくなり、設備の大型化が避けられないため、導入することは困難であった。

そこで、当社の主な施工対象である外径16インチ～48インチ、板厚6mm～25.4mmの鋼管を対象とし、①整形時間はサイクルタイムに影響を与えない5分以内、②従来のプレス加工荷重の1/10レベルの低整形荷重で、鋼管端部の真円度を±0.5mm以下に、平均外径の精度を0.5mm以下に整形する“PERFECTS”の開発に着手した。

### 3 鋼管端部真円化整形機“PERFECTS”の開発

#### 3.1 鋼管端部真円化整形機“PERFECTS”の概要

“PERFECTS”の主要構成要素は図2に示す通りで、整形ロール、ケーシング、受けロール、鋼管回転モーターおよびジャッキからなる。鋼管は、整形ロールとケーシングの間に挿入され、ジャッキにより整形ロールを介して鋼管に整形荷重を負荷する構造となっている。ここで、ケーシングは内外面を真円に加工したリングで、受けロールを鋼管回転モーターで回転駆動させることで、ケーシング、鋼管、整形ロールを相互間の摩擦により回転させ、連続的に鋼管をケーシングの内周面に押付け、ケーシング内面に沿って整形することができる。なお、本整形ロールの管軸方向の幅は120mmであり、この整形ロール幅分へ整形荷重を付与することになる。

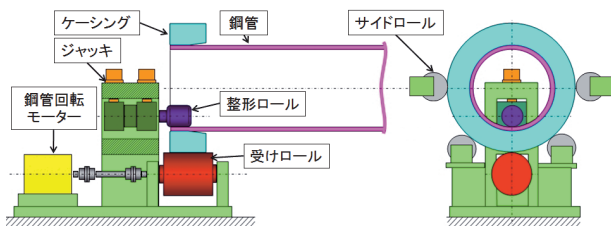


図2 管端整形装置「PERFECTS」の主要構成  
Fig. 2 Components of “PERFECTS”

#### 3.2 鋼管端部真円化整形機“PERFECTS”の特長

“PERFECTS”の開発目標は、真円度±0.5mm以下と平均外径の精度0.5mm以下を、整形時間5分以内、②低整形荷重で実現することであった。真円化達成のキー技術は「内周面を真円に加工したリング状のケーシング」に鋼管外面を馴染ませる整形加工であり、ロールを利用して、「連続的」・「局部的」に行うことで目標①と②を達成しようとするものである。

まず、管端整形の真円化メカニズムについて、以下に示す仮説をたてた。図3でケーシングと整形ロール間で圧下された鋼管は、厚み方向全域で塑性域に達して変形が促進される。この際、鋼管内面側が凸面、外面側が凹面のロールにより加圧される非対称圧延により鋼管円周方向の伸びは、整形ロール側で最も大きく、ケーシング側で最も小さい不均一伸びとなる。その結果、鋼管はケーシング内周面に倣いながら変形し、真円化が図られるものと想定した。

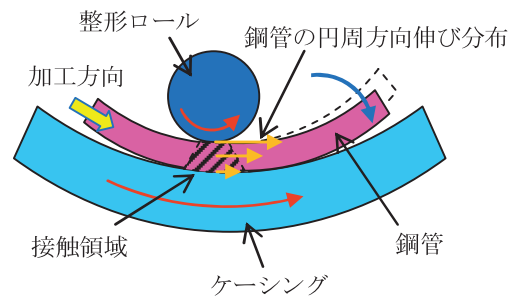


図3 管端整形における真円化メカニズム  
Fig. 3 Mechanism of pipe end round forming

この仮説を検証するため、FEMによる二次元弾塑性解析を行った。モデル化の際は、実機を想定し、整形ロール直径φ225mm、整形幅120mmとし、鋼管は外径18inch、板厚は全周均一に17.5mmとし、形状は真円度±0.9mmの楕円とした。

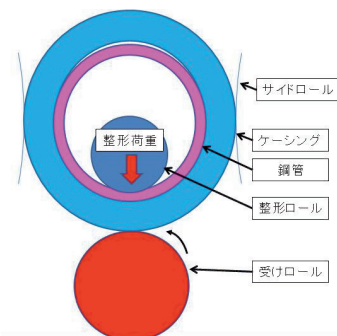


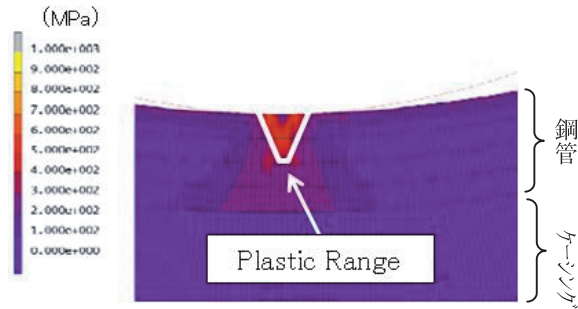
図4 FEMモデル  
Fig. 4 FEM analysis model

なお、鋼管、ケーシングの材質は、表1に示すように、それぞれAPI 5Lの X65グレード相当、JIS G4053の SCM440相当である。

表1 FEM 解析条件  
Table 1 FEM analysis parameters

ソルバー	MSC.Marc2008r1
プリポスト	MSC.Mentat
弾塑性モデル	鋼管…API 5L X65グレード相当 ( $\sigma_y=600\text{MPa}$ , $E=205.8\text{GPa}$ , ポアソン比=0.3) ケーシング…JIS G 4053 SCM440相当 ( $\sigma_y=835\text{MPa}$ , $E=205.8\text{GPa}$ , ポアソン比=0.3)
剛体モデル	整形ロール、受けロール、サイドロール

整形荷重を500kN、1000kNと変化させた時の鋼管にかかる相当応力分布を図5に示す。いずれの場合も、鋼管内面側の応力が大きく、外面側の応力が小さくなっており、この応力に対応した鋼管の円周方向の伸びにより、ケーシング内表面に做う方向への変形がみられる。但し、整形荷重が500kNの場合は、整形ロール直下の塑性域は板厚の40%程度しか達しておらず、ケーシングへ做う変形が十分に起こらず、整形後の真円度も $\pm 0.6\text{mm}$ に留まった。一方、整形荷重を1000kNとした場合、整形ロール直下の鋼管の塑性域は板厚全域に達し、ケーシングへの做いが促進された結果、真円度も $\pm 0.2\text{mm}$ まで改善。先述の真円化の基本メカニズムの仮説を実証することができた。



(a)整形荷重500kN(真円度： $\pm 0.6\text{mm}$ )



(b)整形荷重1000kN(真円度： $\pm 0.2\text{mm}$ )

図5 整形荷重別の鋼管にかかるミーゼス相当応力分布  
Fig. 5 Distribution of Von Mises stress under forming loads

次に鋼管の同径化メカニズムについて説明する。管端整形では上述のように、鋼管の円周方向の伸び変形が生じることから、伸びに伴った拡張変形が発生する。そこで、管端整形によって鋼管をケーシングの内面に密着させるまで拡張変形させることで同径化を図ることとした。図6は、FEM解析における管端整形後の鋼管平均半径の拡張履歴である。ケーシングに密着した時点から拡張変形は抑制され、追加の整形加工を行ったとしても、鋼管径は一定に保つことができる。そのため、ケーシング内径を鋼管の外径公差範囲内に設定することで、ケーシングから鋼管を抜き取った際に整形後の鋼管外径を公差範囲内に抑えることができる。

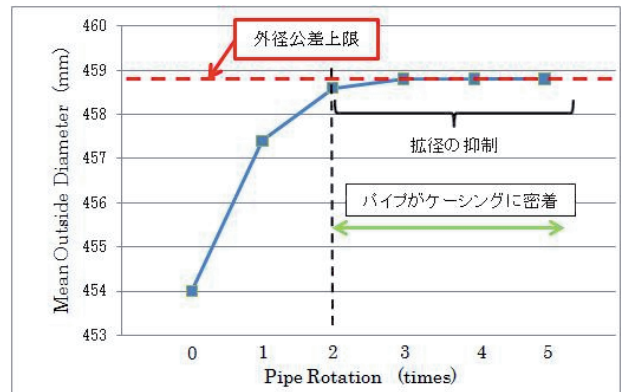


図6 鋼管の平均外半径履歴  
Fig. 6 Relationship between pipe average outside radius and rotation number of pipe end round forming

## 4 管端整形実験とその結果

API 5L X65に準拠した18インチ鋼管(板厚17.5 mm、長さ2 m)で、整形後の真円度 $\pm 0.5\text{mm}$ 、鋼管外径の精度0.5mm以下を目標とした管端整形実験を実施した。整形ロール径 $\phi 225\text{mm}$ 、整形幅120 mmも FEM 解析モデルと同じとした。

### 4.1 真円化に対する評価

今回の実験では、真円度 $\pm 1.1\text{mm}$ の鋼管に整形荷重1400kNをかけて5回転の整形を行った。図7に管端整形前後の鋼管端部の断面形状(鋼管全周の内半径の計測結果)を示す。整形時間は5分以内で真円度を $\pm 0.49\text{mm}$ ( $\leq \pm 0.5\text{mm}$ )へ改善し、目標真円度を達成できた。また外径は3.1mm(0.7%)分拡張した。

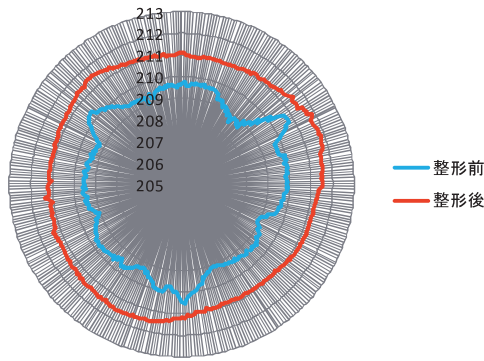


図7 管端整形による鋼管断面形状の改善  
Fig. 7 Improvement of pipe profile by pipe end round forming

## 4.2 同径化に対する評価

本整形機では整形後の鋼管を同径化するため、ケーシングへ鋼管を密着させる手法を採用している。本手法の有効性を検証するため、鋼管をケーシングへ密着させた場合と密着させない場合のそれぞれで整形実験を実施した。整形後の鋼管の平均外径の精度と真円度の実測比較は表2に示す通りで、いずれの場合も、目標値とした $\pm 0.5\text{mm}$ の真円度を達成することができた。しかし、平均外径の精度については、鋼管をケーシングへ密着させた場合は、目標である $0.5\text{mm}$ を達成したが、密着させない場合には $1.7\text{mm}$ で未達となった。これにより、鋼管を同径化するためには、ケーシング内径へ密着させるまで拡張することが有効であることを確認した。

表2 ケーシングへの密着の有無による同径化への影響  
Table 2 Comparison between fitting the pipe on the anvil tightly and loosely with not contacting

	ケーシングへの密着	
	有	無
外径の精度	1.7mm	0.5mm
真円度	$\pm 0.39 \sim \pm 0.50\text{mm}$	$\pm 0.42 \sim \pm 0.44\text{mm}$

## 4.3 整形後の目違い精度の向上

本開発では整形した鋼管を、フィッティング時にインターナルクランプで把持することで目違い精度 $1.0\text{mm}$ 以下を狙っている。そこで、管端整形前後でのフィッティング時の鋼管の目違い量を鋼管断面の時計位置毎に計測した。図8はその計測結果で、横軸は鋼管断面の時計位置(鋼管頂点:12H)を、縦軸は各時計位置での目違いを示している。管端整形前は最大 $2.4\text{mm}$ (4H位置)の目違いがあった鋼管

端面を真円化・同径化することにより、目違いを最大 $0.5\text{mm}$ (11H位置)まで改善することができ、今回の真円化・同径化によれば目違い $1.0\text{mm}$ 以下を十分に満足できることを実証できた。

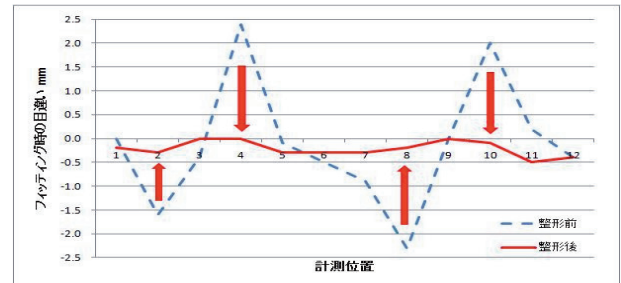


図8 管端整形による目違いの改善  
Fig. 8 Improvement of alignment by pipe end round forming

## 5 整形加工が機械的性質に与える影響

本管端整形では鋼管に対して塑性加工を加えるため、塑性変形による鋼管の機械的性質に劣化がないことの検証が必要となる。そこで、通常の鋼管に求められる代表的な機械試験として、シャルピー衝撃試験、引張試験を実施した。また、UOE鋼管の場合、製造工程で拡張され、円周方向に引張を受けるため、バウシinger効果により圧縮降伏強度が低下することが知られている。管端整形による拡張で、鋼管の圧縮降伏強度の低下が懸念されたため、圧縮強度評価も行った。更に、当社では、腐食成分が含まれる流体を輸送する耐サワーパイプラインも敷設対象とするため、耐サワーパイプラインで要求されるピッカース硬さ試験も実施した。

### 5.1 シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験をAPI 5Lに基づいた試験方法で、ASTM A370で定められた試験片形状で、試験温度 $0^\circ\text{C}$ で実施した。その結果、衝撃吸収エネルギーは整形加工により個々の最小値は $396\text{J}$ から $358\text{J}$ へ、平均値は $404\text{J}$ から $375\text{J}$ へと微減した。一般的にパイプラインで使用される鋼管の衝撃吸収エネルギーは試験温度 $0^\circ\text{C}$ で $200\text{J}$ 以上であり、API 5L規格の個々の最小値 $38\text{J}$ 、平均値 $45\text{J}$ を大きく上回っている。よって、整形加工が衝撃吸収エネルギーに与える影響は問題とならない。

### 5.2 引張試験(円周方向、管軸方向、溶接継手管軸方向)

鋼管単体の円周方向・管軸方向の引張試験と、溶接継手に対する引張試験を実施した。引張試験では、試験片形状はASTM A370に準拠しており、API 5L 規格に基づいた試験片の採取位置や試験方法を採用した。また、引張試験で使用する溶接継手は表3に示す溶接条件で製作した。

表3 溶接継手製作時の溶接条件  
Table 3 Welding parameter for girth welding

	Root-Hot	Filler-Cap
溶接材料規格	AWS A5. 28 E90S-G	
溶接電流 (A)	290-300	240-270
溶接電圧 (V)	24.5-25.5	24.5-26.0
走行速度 (cm/min)	120	76

鋼管単体の円周方向・管軸方向の引張試験では表4に示すように、0.5%耐力と引張強度ともにそれぞれ向上することが判明、本管端整形の塑性変形により、鋼管の機械的性質に劣化がないことを検証できた。

表4 引張試験結果  
Table 4 Tensile test results

試験片方向	整形の有無	0.5%耐力 (MPa)	引張強度 (MPa)
円周方向	整形前	490	593
	整形後	521	610
軸方向	整形前	510	568
	整形後	531	586

つぎに、通常の溶接継手に加えて、「管端整形部と非整形部」が含まれる溶接継手を製作し、引張試験を実施した。破断は図9に示すように、前者の継手では管端整形部で、後者の継手では非整形部で完全に発生した。この結果、管端整形部は非整形部よりも強度が向上し、また溶接継手に求められる溶接金属部の強度が母材部の強度を上回ることも満足することが判明した。

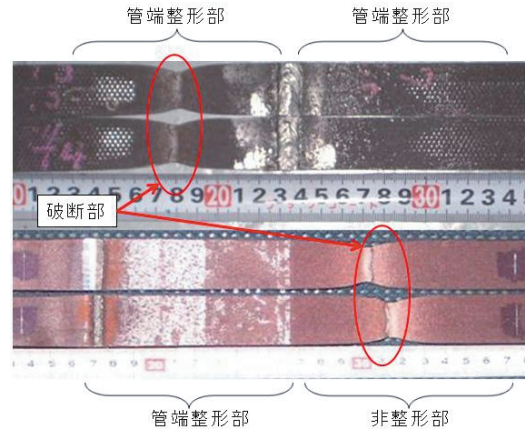


図9 溶接継手部の引張試験結果  
Fig. 9 Tensile test results of girth welded joint

### 5.3 バウシinger効果の影響評価

一般的に UOE 鋼管は最終製造工程で1%程度拡張され、円周方向に引張を受けるため、バウシinger効果により円周方向の圧縮降伏強度が15%程度低下することが知られている。管端整形では、整形過程で鋼管に拡張を付与することから、バウシinger効果による圧縮降伏強度の低下が危惧された。一方、従来の知見として、鋼管製造時からさらに拡張すると加工硬化により円周方向の圧縮降伏強度が向上することが報告されている<sup>4)</sup>。そこで、管端整形による拡張が圧縮降伏強度に与える影響を検証するため、整形加工により0.3%拡張した UOE 鋼管を用いて圧縮試験を実施した。

この結果、表5に示す通り、UOE 鋼管に対して管端整形を適用することで、円周方向の圧縮降伏強度が10%程度上昇した。軸方向については、管端整形前後で圧縮降伏強度にほとんど変化せず、拡張の影響を受けないことも確認した。

表5 圧縮試験結果  
Table 5 Compression test results

試験片方向	整形の有無	0.5%耐力 (MPa)
円周方向	整形前	433
	整形後	488
軸方向	整形前	559
	整形後	567

### 5.4 ビッカース硬さ試験

ビッカース硬さ試験を ISO6507に基づき、試験荷重を98Nと定め、溶接金属部・熱影響部・母材部の各部に対して実施した。その結果、整形加工前後で

各部のばらつきは  $Hv(10) = \pm 10$  の範囲に納まっており、整形加工による影響は無視し得るといえる。

## 6 結言

本稿では、整形ロールと内径を真円加工したケーシングによって鋼管を内外面から加圧しながら回転させることにより、鋼管端部の  $\pm 0.5\text{mm}$  以下の真円化と  $0.5\text{mm}$  以下の同径化を、従来のプレス加工と比較して  $1/10$  レベルの低荷重で、且つ短時間（5分以内）で達成する“PERFECTS”について紹介した。本開発設備を適用すれば、鋼管フィッティング時の目違いを  $1.0\text{mm}$  以内に抑えられることから、初層溶接欠陥の抜本的な対策になるものと確信している。また、本技術は溶接継手部の施工性が向上することから、今後、海底パイプラインをはじめとする鋼管突合せ溶接を用いる現場への適用のみならず、鋼管の製造プロセスへの適用の可能性についても検討していきたい。

### 参考文献

- 1) 箱田利秀, 谷中幸司, 池崎徹, 細田寛之, 曾我部徳久, 鳥井正志 海底パイプライン自動溶接技術開発の変遷と現在 新日鉄エンジニアリング技報 vol. 01 2010
- 2) Hiroyuki Hosoda, Ikuno Yasuyuki, Toshihide Hakoda and Fumiaki Kimura, “Automatic Welding System Characterized by High Speed Torch Oscillation and Hydraulic Clamp for Offshore Pipelines”, Proceedings of “Pipeline Technology Now and Then” at 8<sup>th</sup> International Welding Symposium, Kyoto, 2008/11/16-18, Japan Welding Society, 2008
- 3) 山本記之 UOE 金属管の管端形状矯正方法 特開2010-167440 2010/08/05
- 4) 木内学, 向四海 極限解析の圧延加工への応用(第4報) - 非対称圧延の一般的解析モデルの構成 - 生産研究 36巻2号 1984
- 5) 津留英司, 朝日均 圧潰強度に優れた UOE 鋼管の製造方法 特開2003-340518 2003/12/02