

ウォータージェットピーニングによる 超小口径管内面の残留応力改善方法の開発

Residual Stress Improved by Water Jet Peening
for Small-Diameter Pipe Inner Surfaces

神戸造船所 大屋 寿三*¹ 沖村 浩司*¹
技術本部 太田 高裕*² 市岡 丈彦*³

構造物の高温水中における劣化事象の一つに、環境、材料、応力の重畳効果に起因する応力腐食割れ (SCC) がある。溶接部に発生した引張残留応力が原因となる場合、表面の引張残留応力を圧縮応力場に改善することが SCC 対策に効果がある。本研究では、水中での高速ウォータージェットに発生するキャビテーションが消滅する際に生じる衝撃圧を利用して対象金属表面に塑性変形を付与し、圧縮応力場とする残留応力改善方法に着目し、狭あい部位 (小口径管内面) への適用性を検討した。ウォータージェット噴射条件の検討、噴射装置の開発を行い、Ni-Cr-Fe 合金 (NCF 600 相当材) の小口径管内面 (内径約 10~15 mm) に適用して、表面応力が約 -350 MPa で、深さ 0.5 mm まで圧縮応力場にできることを確認し、実機適用可能な施工方法を確立した。

As one of degradation conditions on components used in water, overlapping environment, material and stress might cause stress corrosion cracking (SCC). Especially, for the tensile residual stress produced by welding, it is particularly effective to reduce the tensile residual stress on the material surface to prevent SCC. In this paper, the residual stress improvement method using cavitation impact generated by a water jet, called Water Jet Peening, has been developed for the maintenance technology for the inner surfaces of small-diameter Alloy 600 pipes. As the results, for the inner surfaces of Alloy 600 pipe (ID: 10~15 mm), we confirmed to be able to reduce to compressive stress on surface by about -350 MPa and in depth by about 0.5 mm.

1. ま え が き

構造物の高温水中にけおる劣化事象の一つとして応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking: SCC) がある。溶接部に発生した引張残留応力が原因となる場合、劣化防止策として残留応力の低減が有効である。接液して SCC の起点となる表面の残留応力低減 (改善) 方法には気中にて施工するショットピーニング等があるが、対象部位によっては気中にすることが困難で水中で施工できる技術が必要となる。水中で施工可能な残留応力改善方法として、キャビテーション気泡が消滅する際に生じる衝撃圧を利用したウォータージェットピーニング (Water Jet Peening: WJP) 技術が最近注目されている⁽¹⁾。

ウォータージェット噴射ノズルは比較的小さくできることに注目し、空間的制約の厳しい狭あいな小口径配管内面を適用対象として WJP 技術による残留応力改善方法について検討した。

2. WJP による残留応力改善方法の概要

図 1 に示すように、水中でノズルから高速のウォータージェットを噴射すると、ノズル周囲の静止している水と高速ジェットの境界面では大きな速度差による強いせん断力が作用し、強い渦流とそれによるじょう乱が発生する。この領域の圧力は、この水温における水の蒸気圧まで低下し、水が局所的に蒸発してキャビテーション気泡群が発生する。キャビテーション気泡群はジェットの下流側へ成長しながら移動するが、下流へ行くに従って渦流が拡散して圧力が回復し、キャビテーション気泡は急激に収縮する。これをキャビテーション気泡の崩壊と呼ぶ。崩壊時には非常に大きな衝撃圧 (数百 MPa) が発生する。キャビテーション気泡の崩壊時に大きな衝撃圧が起ること⁽²⁾、またそれにより金属表面の残留

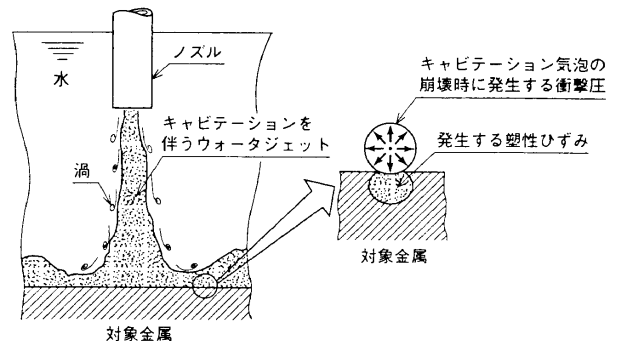


図 1 WJP 施工の模式図 ウォータージェットピーニングによる表面残留応力低減の原理を示す。
Principle of Water Jet Peening

応力が減少することは従来から知られている⁽³⁾⁽⁴⁾。キャビテーション気泡崩壊時の衝撃圧を利用して、対象とする金属表面に塑性変形を起させ、金属表面近傍の残留応力を低減することが可能である。

3. 試験設備

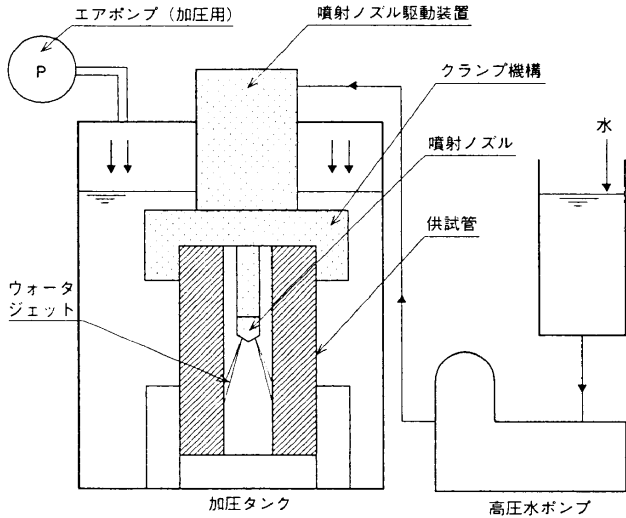
図 2 に試験装置の概要を示す。高圧水ポンプにより高圧水を噴射ノズルから施工対象 (供試管内面) にウォータージェットを噴射する。噴射ノズルは供試管内面を一定速度で回転しながら、管軸方向の上下に往復移動を行う。使用した高圧水ポンプは横型三連プランジャポンプ (流速 $Q=20$ l/min, 最高圧 $P=120$ MPa) である。供試管の水深は約 0.4 m であるが、加圧タンク内を 0.15 MPa (水深: 15 m 相当) に加圧した環境で試験を実施した。

噴射ノズルと対象金属までの距離 (スタンドオフ距離) が短い

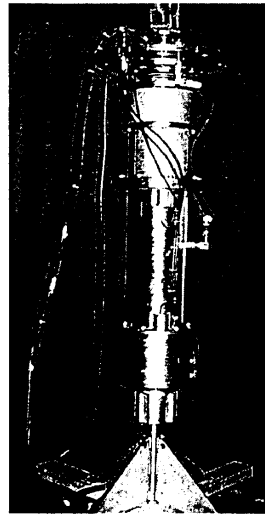
*¹ 原子力建設部プラントサービス技術課

*² 高砂研究所製造技術開発センター

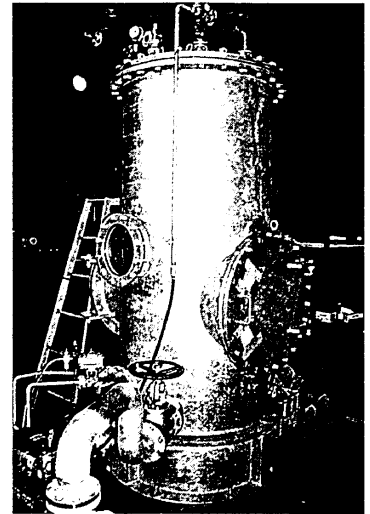
*³ 高砂研究所流体研究室



(a) 全体概要図



(b) 噴射ノズル駆動装置



(c) 加圧タンク

図2 WJP試験装置 実機水深を模擬したウォータージェットピーニング試験装置の主要構成を示す。
WJP apparatus

表1 WJP施工条件
Test condition of WJP

項目	条件範囲
高圧ポンプ	噴射圧力 100~120 MPa
	流量 最大 20 l/min
噴射ノズル	ピーニング時間 33~267 min/m
	噴射ノズルの回転速度 20 rpm
周囲圧力	加圧タンク内圧力 (水深模擬) 0.15 MPa (水深 15 m 相当)

領域、例えばノズル内径の10倍から20倍ではウォータージェットによる壊食が大きく、このためピーニングに適したスタンドオフ距離はノズル径の80倍から120倍の領域であるとされている⁽⁵⁾。

本試験で用いた供試管は内径15mmと小口径であるため、管壁に対して直角ではなく、角度を持ってウォータージェットを噴射することにより、適正なスタンドオフ距離を確保することとする。なお、これはキャビテーション気泡崩壊時に発生する衝撃圧の影響範囲が等方的であり、角度の影響が小さいWJPの特徴を利用したものである。

表1に本試験での代表的な施工条件を示す。

4. 残留応力改善効果の検証

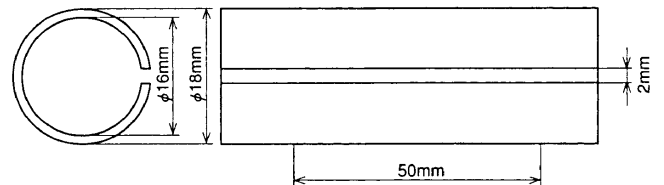
WJPの主要な施工因子として、下記が挙げられる。

- ① 噴射圧力 (ポンプ圧力)
- ② スタンドオフ距離
- ③ 噴射時間
- ④ 噴射角度
- ⑤ 施工部回りの雰囲気圧 (水深)

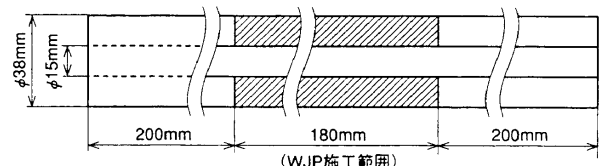
これらの因子を考慮して、以下の施工条件試験を行った。

4.1 ピーニング強度の指標

ショットピーニングの場合は表面近傍に塑性ひずみを加えるため、薄板に施工するとショットの当たった面が伸び、凸状に膨れ上がって変形する。この現象を利用してショットピーニング後の薄板の変化量(アークハイトと称す)をもってピーニング強度の指標としている⁽⁶⁾。このときに用いられる標準の薄板をアルメンストリップと称している。ショット径が等しい場合、同じアークハイ



(a) スリット入り薄肉管形状



(b) 厚肉供試管形状

図3 供試管形状 ウォータージェットピーニングによる残留応力低減効果を確認するため、実機形状を模擬した試験体形状とした。Test piece

トを得られたピーニング条件では残留応力も同等であるといえる。したがって、WJPも、ショットピーニングと同様に金属表面近傍に塑性ひずみを与え、圧縮残留応力を付加する加工であり、アルメンストリップのアークハイトをもって、施工条件の管理が可能であると考えられる。

小口径管内面への施工では空間的な制約からアルメンストリップを用いることができないため、図3(a)に示すスリット入り薄肉管(材質:SUS316)を用いる。薄肉管内面全面にWJPにより塑性ひずみを加えると、管の曲率半径が大きくなる方向に変化する。この曲率の変化を、あらかじめ設けたスリットの幅の変化量で計測する。スリット幅の変化量はアルメンストリップのアークハイトと同様の意味を持っており、発生した塑性ひずみ量の指標とできる。そこで、本研究ではスリット幅の変化量 δ をピーニング強度の指標とする。

4.2 残留応力計測

WJP施工による表面残留応力の改善効果を確認するため、供試管として図3(b)に示す外径38×内径15mmの耐食耐熱超合金のNi-Cr-Fe合金(JIS G 4901 NCF 600相当材)を用いた。供試

管は、機械加工による残留応力を除くため、約 900°C の焼なましにより、内表面の残留応力を除去している (±10 MPa 以内)。WJP による残留応力は表面近傍に発生するため、X 線回折法により残留応力を計測する。

5. 試験結果及び考察

5.1 薄肉管のスリット幅変化量に及ぼす施工条件の影響

加圧タンク内の雰囲気圧力を 0.15 MPa に加圧し、ポンプ圧力を 100 MPa, 110 MPa, 120 MPa の 3 条件で、施工時間を変えて WJP を行った結果を図 4 に示す。横軸は単位管軸長さ (1 m) 当りの WJP 施工時間 (ピーニング時間) を示している。

スリット幅の変化量 δ はピーニング時間と共に増加するが、増加割合は時間と共に減少する。また、スリット幅の変化量 δ はポンプ圧力と共に増加する傾向にある。時間と共に変化量が増加し、その増加割合が減少していく傾向はショットピーニングにおけるアークハイトの変化と同じ傾向を示す。

スリット幅の変化量が急激に増加する領域では、カバレッジ (WJP による塑性へこみが金属表面に占める割合) が 100 % 未満であり、塑性へこみが全面 (均等) に達していない。ほぼ 100 % に達すると、スリット幅の変化量が小さくなると思われる。

5.2 残留応力に及ぼす施工条件の影響

加圧タンク内の雰囲気圧力を 0.15 MPa に加圧し、ポンプ圧力を 120 MPa とし、施工時間を変えて WJP を行った供試管の深さ方向の残留応力分布を図 5 (a) に示す。横軸は供試管内表面からの深さを示している。供試管内表面の残留応力は施工時間にかかわらずほぼ一定である。一方、施工時間が増加すると、圧縮残留応力となる深さが増加し、133 min/m では約 0.7 mm まで圧縮応力となっていることが分かる。

スリットの変化量 δ と残留応力の関係を図 5 (b) に示す。図中のプロットは内表面の残留応力と内表面から深さ 0.3 mm での残留応力である。表面の残留応力は図 5 (a) に示したように、WJP 施工条件による影響はほとんど受けていない。一方、深さ 0.3 mm での残留応力はスリット幅の変化量 δ と相関関係が見られる。

雰囲気圧力とポンプ圧力 (キャビテーション係数 σ) をほぼ一定とすれば、 δ から残留応力を低減できる深さを推定できることが分かる。

なお、キャビテーション係数 σ は式 (1) で示される。

$$\sigma = (P_2 - P_1) / (P_1 - P_2) \tag{1}$$

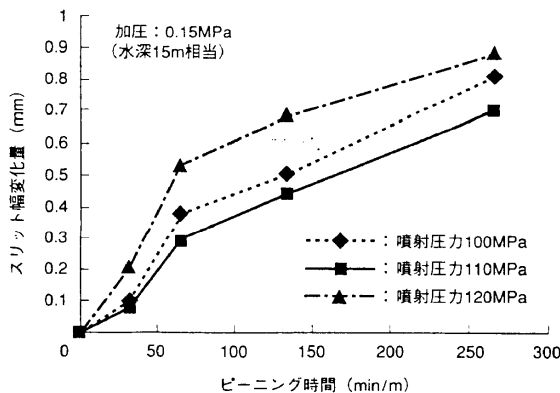
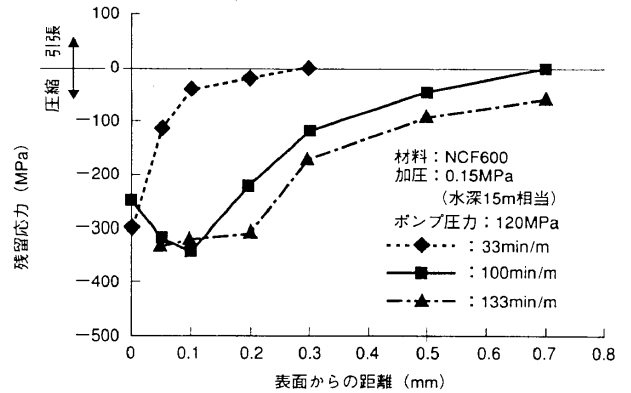
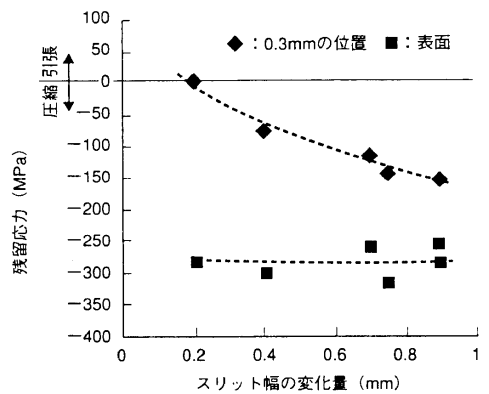


図 4 WJP による薄肉管のスリット幅の変化 実機を模擬した環境での薄肉供試管スリット幅の変化量に及ぼすピーニング時間とポンプ圧力の影響を示す。
Change of slit-width after WJP for thin pipe



(a) WJP 施工後の残留応力分布の施工時間による変化



(b) スリット幅の変化量と残留応力の関係

図 5 WJP による残留応力低減効果 (NCF 600 相当材の例) 実機を模擬した環境での厚肉供試管の残留応力低減効果及び薄肉供試管スリット幅変化量と残留応力低減効果の関係を示す。
Residual stress improvement by WJP for thick pipe

ここで、

P_1 : 噴流吐出圧

P_2 : 雰囲気圧

R : 飽和蒸気圧

5.3 施工後の表面観察

加圧タンク内の雰囲気圧力を 0.15 MPa に加圧し、ポンプ圧力を 120 MPa とし、施工時間を 133 min/m で WJP 施工した供試管内面の外観写真及び浸透探傷試験結果を図 6 (a) に示す。

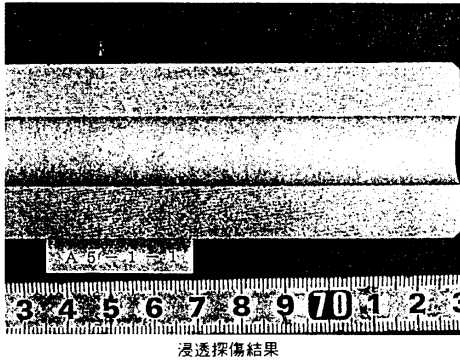
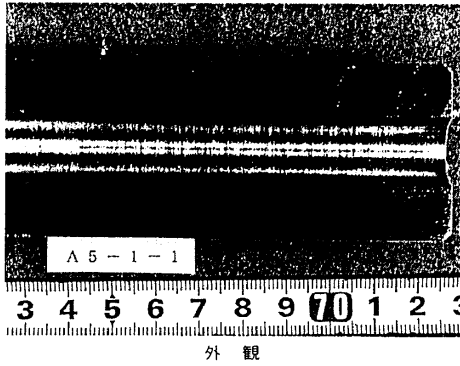
表面に微細なへこみが生じているが欠陥 (塑性変形に伴うクラック等) は検出されておらず、施工部は健全である。

また、WJP 施工後の表面粗度を計測した結果、供試管内面には幅 0.2~0.5 mm 程度で、深さ約 0.01 mm 以下の滑らかなへこみが全面に観察される。WJP により発生する塑性へこみは滑らかであり、キャビテーション気泡の崩壊時の衝撃圧が広範囲で、高いことを示唆している。図 6 (b) には施工部表面近傍の硬さを測定した結果を示す。硬化は表面から約 0.4 mm までである。このことから、へこみの深さ 0.01 mm に対して、塑性ひずみの深さが約 40 倍と非常に大きいことが分かる。Al-Hassani によると単一硬球が静的に金属表面に押込まれたとき、発生する塑性領域の深さ h_p と硬球半径 R 、へこみの深さ Z には式 (2) の関係がある⁽⁷⁾。

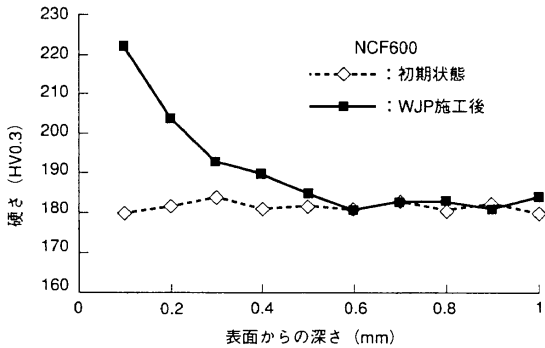
$$h_p / R = k (Z / R)^{1/2} \tag{2}$$

ここで、

k : 定数 (通常ショットピーニングに使われる硬球では



(a) WJP施工後の外観及びPT結果



(b) WJP施工面近傍断面の硬度測定結果

図6 WJP施工部の表面状況 (NCF600相当材の例) 実機を模擬した環境でのWJP施工後の表面状況調査結果により損傷等がない健全施工面であることを示す, Surface condition after WJP

$k=3$ 程度とされている)

WJPについても $k=3$ と仮定すると、 R は約2mmとなる。この結果は表面粗度の計測結果とも一致し、塑性へこみを起したキ

ャビテーション気泡崩壊時の衝撃圧は非常に深い範囲に影響を与え、滑らかな変形を金属に与えていると考えられる。なお、 R は2mmと仮定すると幾何学的には、へこみの幅0.5mmの場合では深さが0.015mm、へこみの幅が0.2mmの場合では深さが0.02mmとなり、へこみの幅が0.5mmではほぼ一致する。

6. む す び

構造物の高温水中におけるSCC防止対策として、小口径管のウォータージェットピーニングによる残留応力改善方法を検討し、以下の知見を得た。

- (1) ウォータージェットピーニングにより、内径 ϕ 15mmの小口径管内面の表面残留応力を圧縮残留応力に改善できるめどを得た。
- (2) ウォータージェットピーニングの施工時間により、供試管内表面の圧縮残留応力に大きな差異はないが、圧縮残留応力が付与される深さが異なることを確認した。
- (3) スリットを入れた薄肉管の内面にウォータージェットピーニングを施工し、スリット幅の変化量を測定することにより供試管の表面近傍の残留応力を低減(改善)できる深さを推定できることを確認した。また、スリット幅の変化量をピーニング強度の指標として施工条件の確認に使用できることが分かった。
- (4) ウォータージェットピーニング施工部を調査した結果、管内面に滑らかな塑性へこみ(幅0.2~0.5mm、深さ0.01mm)が付加されるだけで、顕著な組織変化や損傷を与えないことを確認した。

参 考 文 献

- (1) 祖山 均ほか, キャビテーション噴流によるステンレス鋼の残留応力改善, 材料 Vol.47 No.8 (1998-8) p.808~812
- (2) ウォータージェット技術事典, 丸善 (1993) p.43
- (3) 遠藤吉郎ほか, キャビテーション・エロージョンに関する基礎的研究 (キャビテーション・インテンシティが小さい場合), 日本機械学会論文集 (第1部) Vol.38 No.309 (1972-5) p.924~931
- (4) Krause, H. et al., Investigation of cavitation erosion using X-ray residual stress analysis, Wear Vol.119 No.3 (1987) p.343-352
- (5) 山内由章ほか, 高速水中水噴流のカッティング領域とピーニング領域, 日本機械学会論文集 (B編) Vol.59 No.557 (1993-1) p.16~p.22
- (6) 金属表面加工便覧, 日刊工業社 (1976) p.1206
- (7) Al-Hassani, The Shot Peening of metals -Mechanics and structures, S. T. S., SAE 821452 (1982)