

表面処理方法がステンレス材料の表面組織に与える影響

Effects of Surface Treatments on Microstructure in Stainless Steel

日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社	馬淵 靖宏	NonMember
日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社	玉古 博朗	NonMember
日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社	金田 潤也	NonMember
東京電力株式会社	山下 理道	NonMember
東京電力株式会社	宮川 雅彦	NonMember

It is revealed that Stress Corrosion Cracking (SCC) on the surface of the L-grade stainless steels in Nuclear Power Plants is caused by heavily cold work of the materials. The microstructure, hardness and residual stress on the surface of the material are factors for SCC initiation. There are surface treatment methods that is effective reduction on SCC such as Flap Wheel (FW) polishing, Clean N Strip (CNS) polishing, Water Jet Peening (WJP) and Shot Peening(SP). In this paper, the characteristics of the surface cold worked layer of the L-grade stainless steels conducted by above-mentioned surface treatments are analyzed, and effects of the surface treatments on the surface layer are discussed.

Keywords: SCC, Polishing, Flapper Wheel, Clean N Strip, Water Jet Peening, Shot Peening

1. 緒言

近年、BWRの炉内構造物に使用される表面処理を受けたステンレス材料の炉水環境における応力腐食割れ (SCC) への感受性についての検討が進められている¹⁾。高温純水下でのオーステナイト系ステンレス鋼において、SCC感受性は塑性変形や冷間加工により増大し、その原因として表面への冷間加工により形成される微細結晶層や塑性変形帯がSCCの発生起点やSCC進展パスとなると考えられている。一方で、残留応力の改善がSCC発生抑制に効果があり、フラップホイール (FW) 研磨、クリーンNストリップ (CNS) 研磨、ウォータージェットピーニング (WJP)、ショットピーニング (SP) 等の様々な表面処理方法が炉内構造物へ適用されている。

SCC発生に及ぼす表面処理の影響の議論が残留応力や表面の硬さなどの観点から行われてきたが、表面処理がSCC発生要因となる可能性のある表面層の特性にどのような影響を与えているのかはよく分かっていない。本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼における、FW研磨、CNS研磨、WJ

P、SPが行われた冷間加工表面の特性の調査結果を示すとともに、表面層に及ぼす表面処理の効果について述べる。

2. 試験方法

2.1 試験片の作成

各々の表面処理方法単独での材料表面への影響を評価するため、ステンレス鋼材 (SUS316L) 製の寸法 200×200×20mm の試験体に対し、固溶化熱処理及び残留応力低減のための焼きなまし処理を実施、その後酸化膜をCNS研磨により除去し、さらに深さ約 400 μ mの電解研磨を施し、材料表面の加工層を完全に除去した。除去後の試験体表面に対し、それぞれFW研磨、CNS研磨、WJP、SPを実施した。

次に、実機製作過程を模擬し、表面に冷間強加工層を形成した状態で各々の表面処理方法を施した場合の材料表面への影響を評価するため、上記と同様に材料表面の加工層を完全に除去した試験体に対し、機械加工を実施した。その後、機械加工後の表面に対し、FW研磨、FW研磨を行いその後CNS研磨、FW研磨を行いその後WJP、WJPを実施した。

表1に各々の試験体に対する表面施工の手順を示す。

連絡先：馬淵 靖宏, 〒319-1221 茨城県日立市大みか町 5-2-2 日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所、電話：0294-55-5478,
e-mail:yasuhiro.mabuchi.ep@hitachi.com

表1 試験体に対する表面施工の手順

評価対象	施工手順
単独施工	電解研磨 ^{※1}
	電解研磨 ^{※1} +フラップホイル(FW)研磨
	電解研磨 ^{※1} +クリーンストリップ(CNS)研磨
	電解研磨 ^{※1} +ウォータージェット研磨(WJP)
	電解研磨 ^{※1} +ショット研磨(SP)
機械加工後施工	機械加工
	機械加工+FW研磨
	機械加工+WJP
	機械加工+FW研磨+CNS研磨
	機械加工+FW研磨+WJP

※1: 固溶化熱処理、焼きなまし処理、CNS研磨後に電解研磨を実施

2.2 表面加工層の評価方法

各々の表面処理を実施した試験体から試験片を採取し、断面硬さ測定、EBSD (Electron Back Scattering Diffraction) 分析、断面TEM観察、残留応力測定を実施した。断面硬さ測定は、マイクロビッカース硬さ測定法により試験力 245.2mN (25gf) で表面から1mmの深さまで実施した。EBSDデータは約300×400μmの断面に対し1μmステップで観察を行ったものである。EBSDでは、塑性変形によりひずみの高い領域が黒く表示されるIQ (Image Quality) マップにより塑性変形帯の深さを評価した。FIB (Focused Ion Beam) 加工により表面からTEM試験片を採取し、表面から深さ約10μmまでの微細組織を透過電子顕微鏡 (TEM) を用いて観察した。残留応力は、X線回折法により表面と平行な2方向について測定を実施した。さらに、表面からの所定の厚みを電解研磨により取り除いた後に残留応力を測定し、深さ方向の残留応力分布を調査した。

3. 試験結果

3.1 表面処理方法単独での材料表面への影響

図1に電解研磨を行った後に、それぞれFW研磨、CNS研磨、WJP及びSPを行った試験体断面のIQマップを示す。電解研磨のみを実施した試験体では、塑性ひずみがないため表層域でのコントラストの変化が観察されない。一方でごく薄い塑性ひずみが、FW研磨、CNS研磨、WJPによる表層部に観察された。SPではIQマップ上に暗い領域が観察され、表層に高い塑性ひずみが存在していることがわかる。

硬さ分布測定結果を図2に示す。電解研磨による試験体は深さ方向に渡り概ね140HVの一定の硬さであった。WJP試験片では、僅かな硬度増加が200μmまでの深さにわたり観察された。SP試

験体では300HV以上の硬さとなっており硬化層は約200μmであった。

表層域における微細結晶層をTEMにより観察した結果を図3に示す。FW研磨、CNS研磨、SPでは、微細結晶層や塑性変形帯が観察されたのに対し、WJPではそれらのいずれも見られずに転位の蓄積が観察された。

図4に残留応力測定結果を示す。いずれの手法においても表層には圧縮残留応力が付与され、その値はSP、WJP、CNS研磨、FW研磨の順で大きかった。

3.2 機械加工後に表面処理を行う場合の影響

図5に機械加工後に、各種表面処理を施した試験体断面のIQマップを示す。機械加工後の試験体表面には高ひずみ部位が見られ、また塑性変形領域は約250μmであった。機械加工+FW研磨による試験体でも塑性変形領域が観察されたが、FW研磨により表面層が約100μm除去されており塑性変形領域の深さは約150μmに減少していた。機械加工+FW研磨+CNSもしくはWJPによる試験体では、機械加工+FW研磨の場合と同様の塑性変形領域が見られた。従って、WJPとCNS研磨の表面除去効果は僅かであるものと考えられる。

硬さ分布測定結果を図6に示す。機械加工後の試験体の硬さは350HV以上あり、硬化層の深さは約400μmであった。機械加工+FW研磨による試験体では、最大硬さが300HV以下に減少し、硬化層の深さも機械加工のみの場合よりも減少していた。機械加工+FW研磨+CNS研磨もしくはWJPによる試験体では、機械加工+FW研磨の場合と同様の硬さ分布を示した。機械加工後にWJPを実施した試験体では、硬さ分布は機械加工を実施した試験体と同様であり、最大硬さは350HVであった。

表層域における微細結晶層をTEMにより観察した結果を図7に示す。機械加工後の試験体には約10μmの深さまで微細結晶層が観察された。機械加工+FW研磨による試験体では、約1μmの微細結晶層やそれより深い領域に塑性変形帯および双晶が見られた。機械加工+FW研磨+CNS研磨もしくはWJPを実施した試験片では、機械加工+FW研磨の場合と同じであった。一方で、機械加工後にWJPを実施した試験体では、微細結晶層は約5μmまで観察され、塑性変形帯も見られた。

図8に残留応力測定結果を示す。機械加工後の試

験体表面には約200MPaの引張残留応力が発生していた。機械加工+FW研磨を実施した場合、表面残留応力は0MPa以下となり残留応力が改善されていた。CNS研磨を追加して実施した場合は、表面残留応力は、-100MPa以下となった。一方で、機械加工+FW研磨後にWJPを実施した場合と機械加工+WJPを実施した場合は、残留応力が-300MPa以下に改善された。

4. 結言

以上の結果をまとめて以下に示す。

- (1) 機械加工、FW研磨、CNS研磨、SPの単独施工では表面層に微細結晶層と塑性変形帯が形成された。また、加工層形成に伴い表面層の硬さが上昇した。一方、WJP単独では微細結晶層および塑性変形帯は形成されず、転位組織が認められるのみであり、表面層の硬さ上昇は小さかった。単独施工による加工影響は、機械加工、SP、FW研磨、CNS研磨、WJPの順で大きくなると考えられる。機械加工後に各

種表面施工を施した場合、機械加工により形成された加工層が残留しており、FW研磨による表面除去効果により加工層厚さが低減された。CNS研磨の表面除去効果はFW研磨より小さく、僅かであった。

- (2) 表面残留応力低減効果は、SP、WJP、CNS研磨、FW研磨の順で大きく、圧縮残留応力化が期待される。

謝辞

本報告は、東京電力、東北電力、中部電力、北陸電力、中国電力、日本原子力発電、電源開発、東芝、日立GEニュークリア・エナジーによる共同研究の一部であり、有益なご議論をいただいたことに感謝いたします。

参考文献

- 1) 橋内裕寿, 児玉光弘: 第52回材料と環境討論会講演集, B-212, (2005)

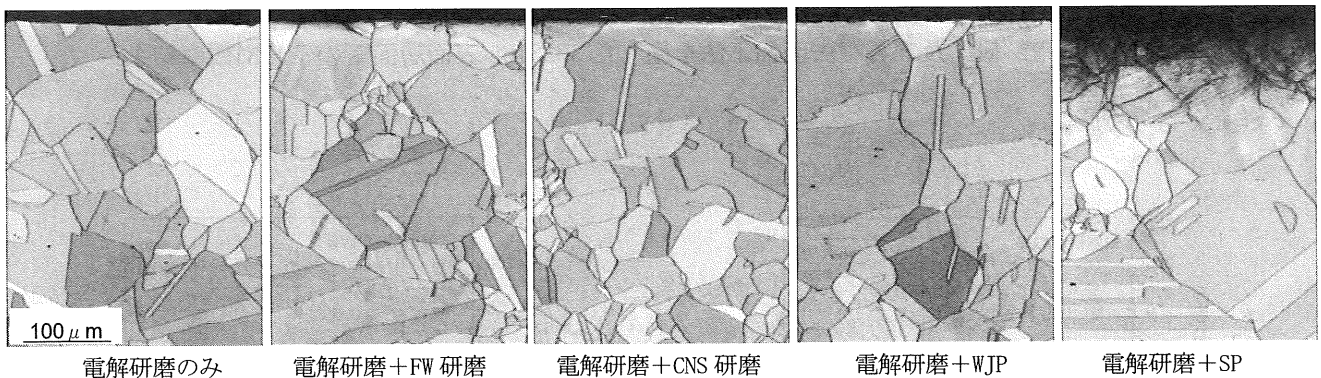


図1 電解研磨及び各種表面加工法を施した SUS316L 表面層断面の EBSD 分析結果 (Image Quality)

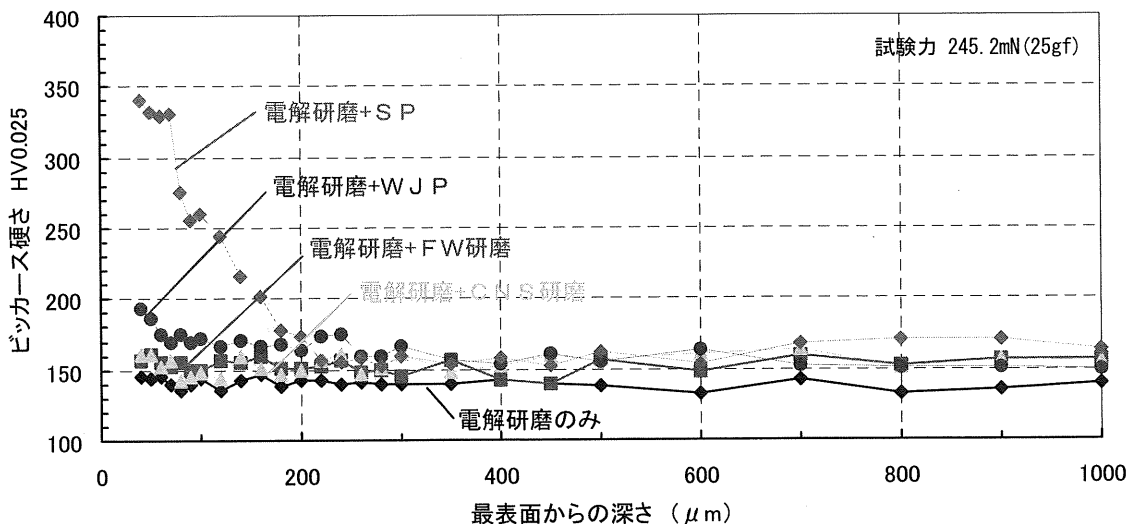


図2 電解研磨及び各種表面加工法を施した SUS316L 表面層断面の硬さ分布測定結果

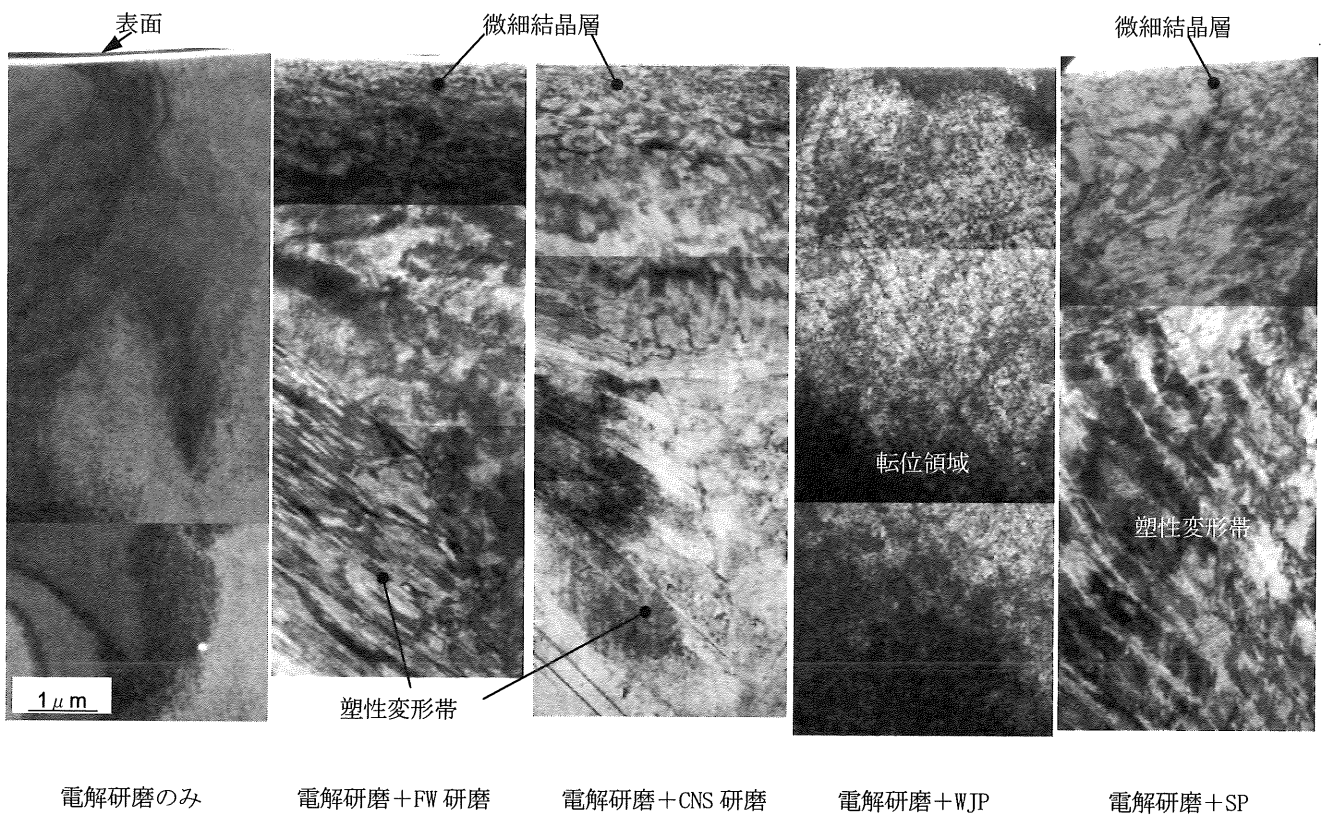


図3 電解研磨及び各種表面加工法を施した SUS316L 表面層断面の TEM 観察結果

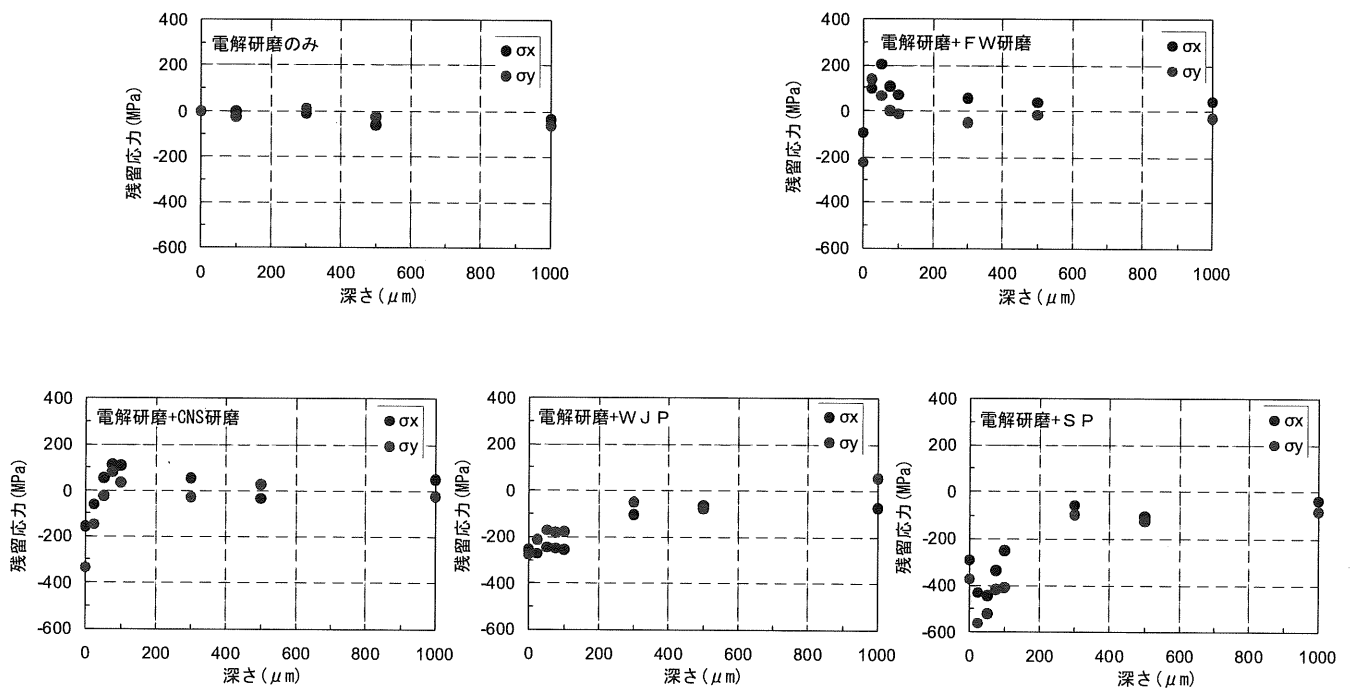


図4 電解研磨及び各種表面加工法を施した SUS316L 表面層断面の残留応力測定結果

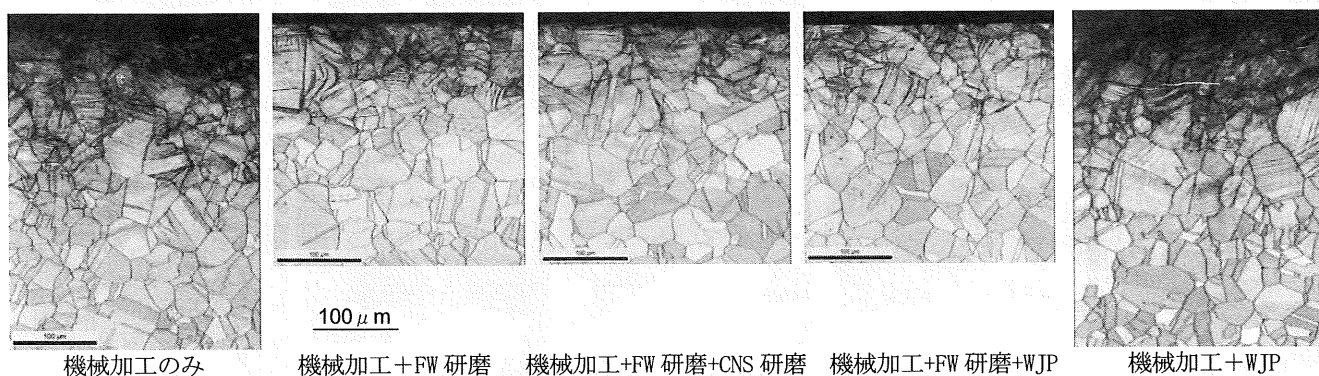


図5 機械加工及び各種表面加工法を施した SUS316L 表面層断面の EBSD 分析結果 (Image Quality)

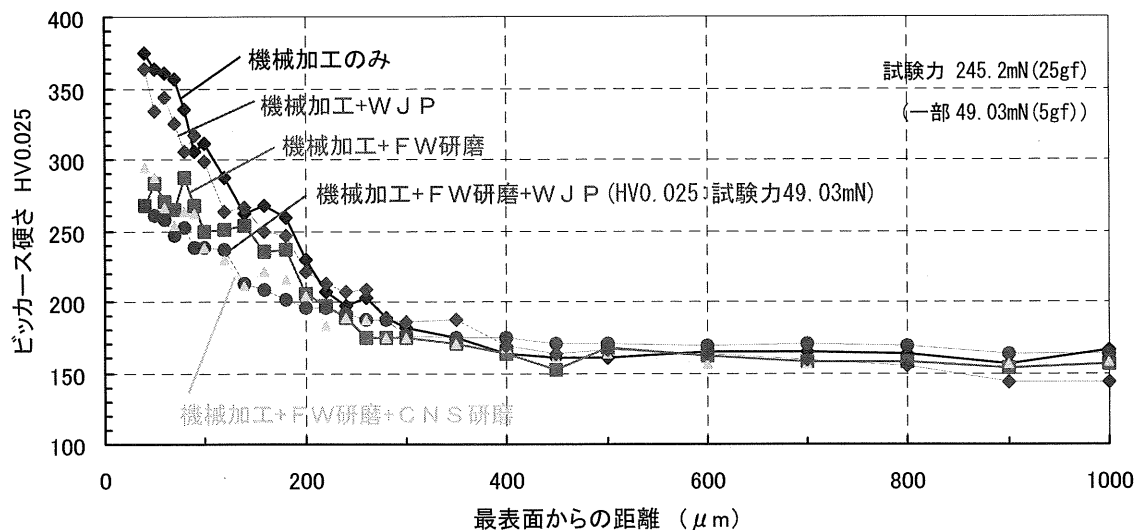


図6 機械加工及び各種表面加工法を施した SUS316L 表面層断面の硬さ分布測定結果

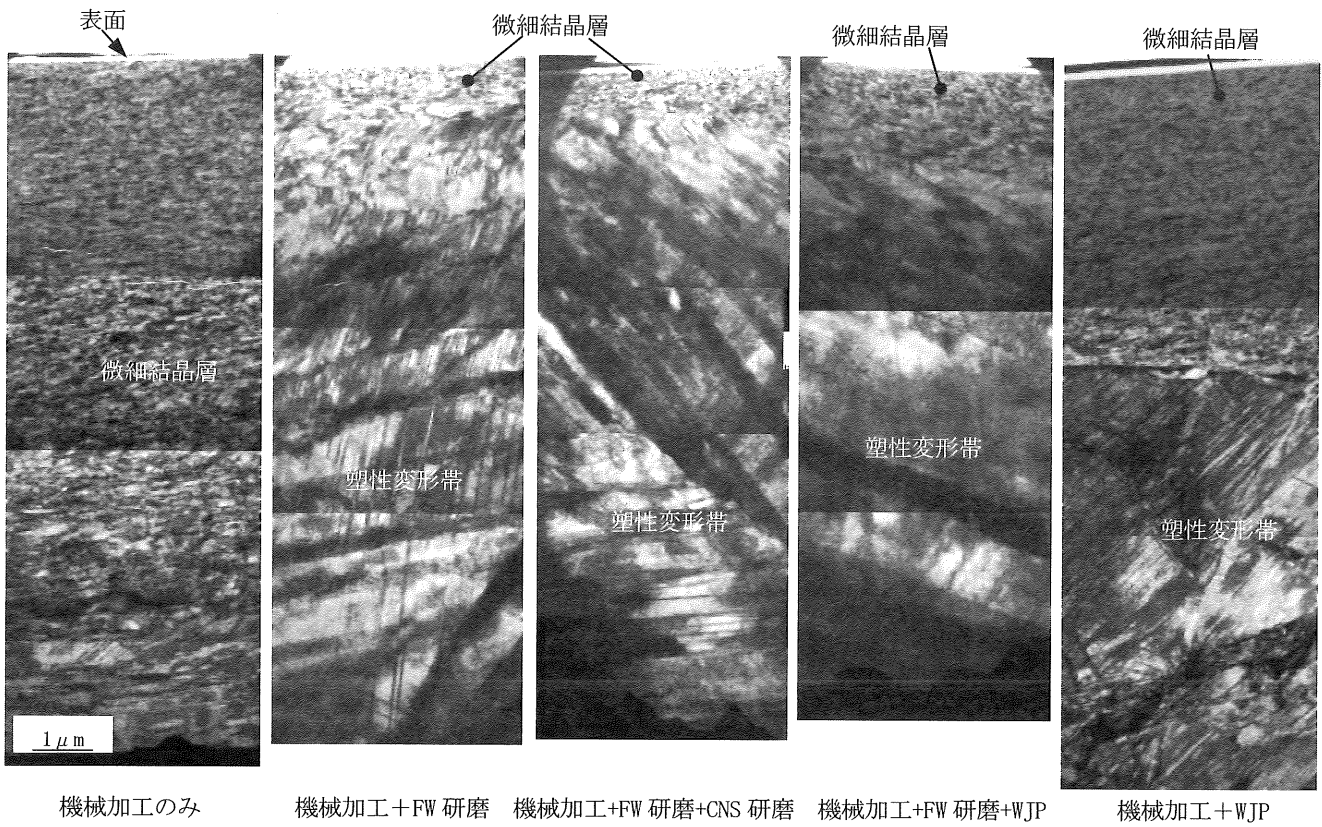


図7 機械加工及び各種表面加工法を施した SUS316L 表面層断面のTEM観察結果

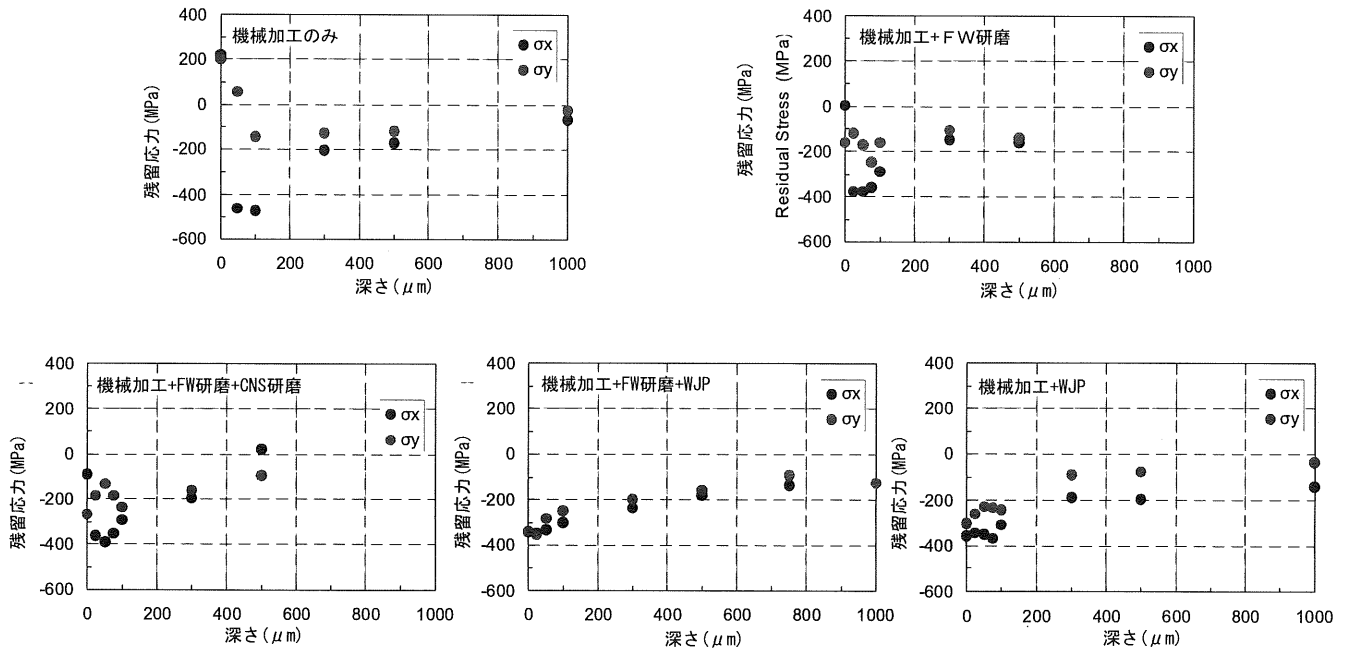


図8 機械加工及び各種表面加工法を施した SUS316L 表面層断面の残留応力測定結果