微小引張試験片を用いた局所機械的特性評価法の開発と
塑性加工材への適用*箕島 弘二^{*1}, 米田 敬詞^{*2}, 米津 明生^{*3}
崎原 雅之^{*4}, 黒田 浩一^{*5}Evaluation Method of Local Mechanical Properties Using Micro
Tensile Testing and Its Application to Cold-Worked MaterialsKohji MINOSHIMA^{*6}, Keishi YONEDA, Akio YONEZU,
Masayuki SAKIHARA and Kouichi KURODA^{*6} Department of Mechanical Engineering, Osaka University,
2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

We developed a noble technique of micro mechanical tensile testing to evaluate local mechanical properties in cold-worked materials. The specimen used here was a cold drawn austenitic stainless steel (Type 316L) rod. A cold work generally varies the mechanical properties (especially plastic properties), and thus leads the property to nonhomogeneous distribution in the material. To evaluate local mechanical properties in such cold-worked materials, we developed the technique of micro tensile test to examine a stress-strain curve of a limited area (smaller than 1 mm²) of interest. The specimens with gage length of 5 mm and cross section of 1.2×0.7 mm rectangle were machined from the rod using wire-electrical discharge machining to achieve little formation of work hardened surface layer during the fabrication process. For the as-received material, the stress-strain curve obtained by the present technique exhibited excellent agreement with that from the general tensile test based on JIS Z 2241. When the technique was applied to the cold-worked material, it was found that near the surface of worked rod, yield stress, tensile strength and residual plastic strain were higher, while fracture strain was lower. In parallel with the experiment, finite element analysis was carried out to compute the distribution of residual plastic strain after cold drawn, indicating the good agreement with that obtained from the present technique. It is thus revealed that the developed technique can quantitatively evaluate the local mechanical properties, and thus supply us rich information on nonhomogeneously-distributed properties in plastic worked materials.

Key Words: Local Mechanical Property, Cold-Worked Material, Micro Mechanical Tensile Testing

1. 緒 言

塑性加工を施すと、マクロな引張強度は上昇するが、材料中の塑性ひずみやそれに起因した残留応力の分布は様ではなく複雑に分布する。このため、塑性加工法やその使用用途によっては、材料の平均的な塑性特性を含めた機械的特性を評価するだけでは十分ではなく、微視的な分布を評価することが重要である。特に圧延材や本研究で取り扱う引抜き加工材では、ダイスに接触する表層において大きな塑性ひずみが発生し、それに起因した環境助長割れ⁽¹⁾などを起こす場合があ

る。したがって、表層付近などの限定した「局所領域の機械的特性」を定量的に評価する技術が必要である。また、塑性加工の最適化のためには、所望の位置における機械的特性の評価やその分布特性を把握する必要があるが^{(2)~(5)}、引抜き加工を施した棒材の直径が小さい、あるいはパイプの肉厚が薄くなると、機械的特性の分布を定量的に評価することは容易ではない。

そこで、本研究では塑性加工の一例として、引抜き加工を施した棒材を取り上げ、その局所領域における機械的特性の評価法を開発した。具体的には、引抜き加工材の所望の位置から採取した微小試験片に対する引張試験法を開発し、応力-ひずみ曲線を評価した。試験片加工にあたっては、表面加工層を可能な限り小さくする目的でワイヤ放電加工を用いた。したがって、加工ひずみを受けにくく、引抜き加工によって変化し

* 原稿受付 2009年11月2日。

^{*1} 正員, フェロー, 大阪大学大学院工学研究科(☎ 565-0871 吹田市山田丘 2-1)。^{*2} 学生員, 大阪大学大学院工学研究科。^{*3} 正員, 大阪大学大学院工学研究科。^{*4} 大阪大学大学院工学研究科。^{*5} 正員, 住友金属工業(株)総合技術研究所(☎ 660-0891 尼崎市扶桑町 1-8)。

E-mail: k-minoshima@mech.eng.osaka-u.ac.jp

た機械的特性のみを評価できる可能性がある。そこで、開発した微小引張試験法を用い、塑性加工によって生じた不均質な機械的性質の分布特性を評価するとともに、引抜き加工の有限要素解析 (FEM) を実施し、塑性加工による残留塑性ひずみ (予ひずみ) と微小引張試験から得たそれとを比較して、本試験法の有効性を検証した。

2. 供試材

供試材は、低炭素オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L の直径 30 mm の丸棒溶体化処理材 (1050 °C で 1.5h 保持後水冷, 以下母材と呼ぶ) およびその引抜き加工材である。化学成分は C: 0.015, Mn: 1.13, Si: 0.53, P: 0.027, S: 0.028, Ni: 11.7, Cr: 17.19, Mb: 2.08, Cu: 0.19, N: 0.051, Fe: bal [mass%] である。引抜き加工前の母材に対して JIS Z 2241 にしたがって実施した引張試験 (直径: 7 mm, 試験片平行部長さ: 32.5 mm, ひずみを求めるにあたっての標点距離: 25 mm) から得た機械的特性は、ヤング率: 175 GPa, 引張強さ: 586 MPa, 0.2%耐力: 260 MPa であった。引抜き加工材は、引抜き方向を同一にして、最終直径 27.36 mm, 最終減面率 16.8% になるように合計 3 回の冷間加工を実施して得た。

このような冷間加工によって変化する機械的特性を調べるために、別途引抜き加工の FEM 解析を実施した。解析には汎用非線形構造解析ソフト (MSC. Software Corp.: Marc Mentat 2005r3) を用い、バルク引張試験片を用いて得た弾塑性特性にしたがう軸対称モデル (要素数 7622, 節点数 7866) を作成した。実際の加工に用いた剛体ダイスを忠実に模擬して 3 回の引抜き加工を行い、引抜き加工材と同一の最終減面率まで加工した。ダイス角は α であり、ダイス半径は 1 回目からそれぞれ 14.55 mm, 14.10 mm, 13.68 mm である。なお、解析に用いた摩擦係数 μ は、引抜き加工時の荷重値により

合わせ込みを行い、 $\mu=0.05$ とした。

図 1 に FEM で求めた相当塑性ひずみ分布を示す。図に示すように、棒材中心から表層に向かって塑性ひずみが大きくなり、とくに表層部近傍には 50% もの大きな塑性ひずみが生じていることがわかる。これは、引抜き加工によって材料の塑性特性分布の不均質性が顕著に生じることを示しており、後述の微小引張試験法から得た 0.2%耐力あるいは引張強度の大小関係に対応している。

3. 実験方法

3.1 試験片形状 微小引張試験片を作成するにあたり、試験片加工の際に生じる加工ひずみや加工層をできる限り小さくするため、ワイヤ放電加工機 (三菱電機機: DIAX-PX05) を用いて試験片を作成した。なお, Newton ら⁶⁾ および Yan ら⁷⁾ はインコネル 718 にワイヤ放電加工を施すと、放電によって溶解した一部が加工材料の表面に再堆積し、厚さ 5 から 9 μm 程度の加工層が形成されることを報告している。その加工層は、材料表面に残留応力をもたらすほか、材料表面の硬さなどの機械的特性を変化させる場合があることを指摘している。図 2 に、走査型電子顕微鏡 (日本電子 (株): JSM-5300S) を用いて観察した微小引張試験片の加工面近傍の断面を示す。これより、表面付近に再溶解などの加工影響層が存在し、その厚さは 10 μm 程度で、試験片厚さの 5% 以下であることがわかった。さらに、ワイヤ放電加工による加工ひずみの有無を調べるために、図 2 の表層近傍のナノ硬さと試験片表面からの距離の関係を調べた。ナノ硬さは AFM 機能付き押し込み試験装置 (Hysitron Inc.: Triboscope) にバーコビッチ型ダイヤモンド圧子を装着してナノインデンテーション試験を実施して求めた。試験条件は押し込み力: 2 mN, 押し込み速度: 0.4 mN/s である。なお、試験面は機

Fig.1 Contour map of residual equivalent plastic strain after cold drawn, computed by FEM.

Fig.2 Cross sectional SEM photograph of recast layer formed on SUS316L after WEDM.

械研磨で平坦にした後、電解研磨（溶液：過塩素酸 8vol%, ブトキシエタノール 10vol%, エタノール 70vol%, イオン交換水 12vol%）によって断面を得るための切断とそれに引続く機械研磨による加工層を除去した。図 3(a)に表面付近の圧痕の AFM 微分像を、図 3(b)にナノ硬さを表面からの距離で整理した結果を示す。図 3 のように、ナノ硬さは表面 3 μm からほとんど変化せず、およそ 4 GPa となった。この硬さは材料内部の硬さと同程度であり、また Ohmura ら⁽⁸⁾の SUS316 材のナノ硬さの結果ともおよそ一致している。すなわち、表面から 3 μm 程度の表層付近においてもワイヤ放電加工による硬さの上昇は見られなかった。

微小引張試験用の試験片採取位置およびその試験片形状を図 4 に示す。図 4(a)のように、棒材の長手方向を L、半径方向を R、円周方向を C と定義した。母材および引抜き加工材ともに、採取方向は引張方向を長手方向にした試験片（L 材）および長手方向に対して直角方向に採取した試験片（C 材）の 2 種類とし、各条件で一本ずつの試験を実施した。また、棒材内部の

機械的特性の分布を調べるために、原点对称に 7 本の試験片を 3.6 mm 間隔で採取した。以下では、例えば L 材の原点からの距離が 7.2 mm の試験片は、L(7.2)と呼ぶことにする。

図 4(b)に微小引張試験片の形状を示すが、ゲージ部寸法は、幅 1.2 mm、厚さ 0.7 mm、長さ 5.1 mm であり、評価断面積は 1 mm² 以下である。微小試験片に引張負荷を加えるために、試験片ゲージ部よりも十分に大きな肩部⁽⁹⁾を両端部に設け、それを後述する治具に挿入して引張試験を実施した。公称応力は、断面寸法を光学顕微鏡（分解能 1 μm ）で測定した値を用いて算出した。また、レーザー顕微鏡を用いて加工面の表面粗さを測定したところ、中心線平均粗さ R_a は、1.0 ~ 1.5 μm 程度であり、ゲージ部の断面寸法の 0.2% 未満であるため、表面粗さによる応力算出の誤差は十分小さい。なお、試験片アール部の応力集中係数は 1.25 である。

3.2 試験装置 引張試験には、油圧サーボ式材料強度試験機（株式会社島津製作所：EHF-FG1kN-4LA、ロードセル容量：1 kN、ピストンストローク： ± 25 mm）を用いた。本研究で対象とするような横断面積 1 mm² 以下の微小領域を評価するために図 5 に示す試験治具を開発し、試験片の肩部を治具に挿入することで試験片へ

Fig.3 (a) Differential AFM image of Berkovich impressions on SUS316L after WEDM fabrication. (b) Changes in nanohardness as a function of distance from the surface.

Fig.4 Schematic of micro tensile specimen taken from base and cold drawn rod.

の負荷を可能にした。すなわち、本研究で対象とするように、試験片寸法が小さい場合は、治具の平行度や試験片固定の際に生じるわずかな傾きが試験結果に大きな影響を与える。すなわち、1) 治具と試験機の連結方法と、2) 2個の治具間の接続方法が、引張負荷の軸中心を合わせるうえで重要となる。1) の治具と試験機の連結には、通常のピン連結では一方のみの曲げモーメントしかキャンセルできないため、本研究では球面軸受 (THK(株): PHS 5) を用い、治具と試験機間のあらゆる方向の曲げモーメントに対応できるようにした。また、2) については2個の治具間の平行を保つためにリニアガイド (THK(株): SRS 9M) を用い、微小引張試験片に対して均一な負荷が行えるように工夫した。さらに、球面軸受の取り付け位置と試験片の軸中心を合わせるために、治具は球面軸受取り付け部と試験片挿入部を一体としてワイヤ放電加工による精密加工により製作した。また、上下の試験治具の引張軸中心を合わせるために、治具に設けた2つの位置合わせ用三角溝 (図5図部) を合わせた後にリニアガイドを装着した。

試験片のひずみは、試験治具に取り付けた渦電流式変位センサ (株キーエンス: EX-200, 分解能 $0.4 \mu\text{m}$, 測定範囲 $0 \sim 1 \text{ mm}$) および接触式変位センサ (株キーエンス: AT, 分解能 $1 \mu\text{m}$, 測定範囲 $-2 \sim 2 \text{ mm}$) を用いて、上下試験治具間の変位を測定し、これをもとに FEM 解析より求めた試験片アール部の変位量を補正することにより推定した。ここで、弾性変形領域などの微小変形領域では渦電流式変位センサを、また 1 mm を超える変位の測定には接触式変位センサを用いた。引張試験にあたっては、試験片と試験治具との片あた

りを解消するために、応力-ひずみ曲線の傾きが一定になるまで、弾性域内で負荷・除荷を5回程度繰返した後、破断まで負荷 (変位速度: 0.06 mm/min) した。

4. 実験結果および考察

4.1 試験法の有効性の検証 開発した治具の有効性を検証するために、母材の L(0.0)材の微小引張試験を実施し、ヤング率を測定した。図6に弾性領域における応力-ひずみ曲線を示す。図に示すように、第1回目の応力-ひずみ曲線の傾きは小さかったものの、引き続いて、複数回の負荷除荷試験を実施したところ、試験回数3回目から試験片と試験治具との片あたりが解消され、応力-ひずみ曲線の傾きが一定になった。そこで、図に示した3回目から5回目の負荷除荷曲線に対して最小二乗法を用いてヤング率を算出したところ 171 GPa となり、直径 7 mm のバルク材料に対して JIS 規格 (JIS Z 2241) に沿った試験から得たヤング率 (175 GPa) に極めて近い値が得られた。したがって、本試験法により、弾性領域のような微小な変形領域においても、応力-ひずみ曲線を精度良く測定できることがわかった。

つぎに、母材の L(0.0)材に対して最終破断まで引張試験を行い、バルク試験片の結果と比較した。応力-ひずみ曲線の低ひずみ領域を図7(a)に、また最終破断までの曲線を図7(b)にバルク試験片の結果と併せて示す。図7(a)より、微小引張試験片の結果 (実線) はバルク試験片の結果 (○印) と良く一致していることがわかる。これより、 0.2% 耐力を求めたところ、 $\sigma_{0.2} = 254 \text{ MPa}$ であり、バルク試験片の結果 (260 MPa) とほぼ等しかった。一方、図7(b)の最終破断までの応力-ひずみ曲線においても微小引張試験結果 (実線) はバルク試験片の結果 (○印) とほぼ一致しており、引張

Fig.5 Schematic of testing fixture for micro tensile test.

Fig.6 Nominal stress-strain curves in elastic deformation of base material: the curves of trial 3 – 5 tests provide good evaluations of Young's modulus.

(a) The curve around elastic limitation

(b) The curve up to failure

Fig.7 Nominal stress-strain curve of base material obtained by micro tensile and ordinary sized tensile tests.

強さ $\sigma_B = 575 \text{ MPa}$, 破断伸び $\epsilon_f = 0.74$ と, バルク材の結果とほぼ等しい値が得られた. 一般に破断伸びは試験片寸法に依存し, それは(標点距離)/(平行部断面積)⁰⁵で整理できる⁽¹⁰⁾. ここで微小試験片の(標点距離)/(平行部断面積)⁰⁵は5.56で, JIS規格(JIS Z 2201)で規定された試験片のそれ(5.65)とほぼ一致していることから, 図7(b)のように破断伸びの寸法依存性は見られなかったものと考えられる. なお, 破断後の試験片写真を図7(b)中に示すように, 試験片ゲージ内で破断しており, 試験片アール端部における破断は見られなかった.

以上のように, 微小引張試験の応力-ひずみ曲線はバルク試験片のそれと弾性域から最終破断に至るまでよく一致しており, 本研究で提案した微小試験片を用いた引張試験法の有用性が示された. 微小試験片では試験片そのもののひずみを直接測定することが, 通常の大サイズの試験片に比べて困難になるが, ここで採用した試験片, 引張試験治具を用いて, 試験片アール部の変位量をFEM解析により求め, この量をチャック間変位より補正することにより, 公称ひずみを十分な精度で求めることができ, 微小試験片のひずみ測定法と

Fig.8 Nominal stress-strain curves of base and cold drawn materials.

して有用である. しかも, ワイヤ放電加工による試験片加工層の影響は応力-ひずみ曲線には現れず, 本研究で採用したワイヤ放電加工は微小試験片の加工に適していることが明らかであり, 図3で得た試験片加工による加工層厚さが十分小さいことが応力-ひずみ曲線からも示された.

4.2 機械的特性(塑性特性)の分布評価 図8に母材のL(0.0)と, 加工材のL(0.0)からL(10.8)の公称応力-公称ひずみ曲線を示す. 図に示すように, 引抜き加工材は母材より引張強度が大きく, 破断ひずみが小さくなった. しかも, 表層に近づくにつれて, 0.2%耐力および引張強度が大きく, 破断ひずみが減少した. これらの傾向は, 引抜き加工によって表層のほう加工硬化が顕著になったためであり, 引抜き加工材の機械的特性, とくに塑性特性は不均質であることを意味している.

つぎに, 図8に示した応力-ひずみ曲線から得た0.2%耐力, 引張強度を棒材中心からの距離 r で整理した結果を図9に示す. 図9の(a)には0.2%耐力($\sigma_{0.2}$), および(b)には引張強度(σ_B)をそれぞれ示しており, 各図には三角印(▲, △)で母材の結果を, 丸印(●, ○)で引抜き加工材の結果を試験片採取方向(L: 黒抜き, C: 白抜き)を区別して示している. また, 母材のバルク試験片で得た結果を破線で示す. 図9(a)に示すように, 母材の $\sigma_{0.2}$ は r によらず260 MPaとほぼ一定値を保ち, バルク試験片の結果と一致している. しかし, 引抜き加工材の $\sigma_{0.2}$ は, 550から750 MPaと母材の2倍以上の値を示し, また棒材の中心から表層に近づくにつれて増大することがわかる. つぎに, 試験片採取方向の影響について見ると, 母材, 引抜き材ともにその影響は見られなかった.

つぎに, 図9(b)に示す引張強度について見ると, 母

Fig.9 The mechanical properties ($\sigma_{0.2}$ (a) and σ_B (b)) of base and drawn materials obtained by micro tensile tests.

材のそれは r によらず 529 MPa から 577 MPa の範囲でほぼ一定値を示し、バルク試験片の引張強度 (586 MPa) と比較して 1.5% から 9.7% 小さい傾向を示すものの、両者は比較的良く一致している。一方、引抜き加工材の引張強度は、0.2% 耐力の場合と同様に母材よりも大きくなり、 r が大きく、表層に近づくにつれて増大する。すなわち、棒材の中心付近では母材の σ_B より 120 MPa ほど大きいだけであるが、引抜き加工のダイスとの相互作用で大きな塑性変形を受ける表層付近では加工硬化によって引張強度は大きく上昇する。また、引張強度に及ぼす試験片採取方向の影響を見ると、表層付近ではその差異は見られないが、棒材中心付近では 8% 程度 L 方向の引張強度が高くなる傾向を示す。すなわち、表層付近では引抜き加工による加工硬化を顕著に示すが、採取方向による異方性は示さない。一方、引張強度の上昇があまり見られない、換言すれば、引抜き加工による加工硬化が小さい棒材中心付近では、引抜き方向である L 方向の引張強度が C 方向に比べてわずかながらに上昇して、強度異方性を示した。

Fig.10 Evaluation of pre-strain in cold drawn material.

以上のように、引抜き加工の工具接触面となる表層部に近づくにつれて、0.2% 耐力と引張強度は上昇するが、破断伸び (図 8) は低下する。一方、採取方向の異方性は、0.2% 耐力については見られないが、引張強度についてはわずかながらに見られた。

4.3 塑性ひずみ量の推定 図 10(a) に加工材における L 方向試験片、L(0.0) から L(10.8) の真応力-真ひずみ曲線を母材のそれと併せて示す。なお、破断直前のくびれ発生に伴う断面積の減少は真応力の計算には考慮していない。いずれの位置より採取した加工材の真応力-真ひずみ曲線においても、図に示すように、適当な量だけ横軸方向、すなわちひずみ軸方向にシフトさせると、降伏応力以上の塑性変形領域の応力-ひずみ曲線は母材のそれと一致した。このひずみシフト量は、加工による予ひずみに相当すると考えられる⁽¹¹⁾。このようにして求めた予ひずみ量と棒材中心からの距離の関係を図 10(b) に示す。表層部のほうが中心部に比べて予ひずみ量が大きく、図 9 の 0.2% 耐力および引張強度と同じ傾向が見られる。また、図には図 1 の有限要素解析から得た相当塑性ひずみ量を実線で示すが、微小引張試験結果から得た予ひずみ量は解析結果と良

く一致している。したがって、本研究で開発した微小引張試験法により、断面積が 1 mm^2 程度の小さな領域の機械的特性を定量的に精度よく求めることができ、本手法の有用性が明らかである。

5. 結 言

本研究では微小引張試験法を開発し、オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS316L) の引抜き加工材の局所機械的特性とその分布を評価した。得られた結果をまとめると以下のようである。

- (1) 断面積が 1 mm^2 程度の局所領域が評価可能な微小引張試験片の加工にワイヤ放電加工機を用いることにより、加工による加工影響層を $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下と十分に小さくすることができ、微小試験片の切り出し・加工による影響を排除して素材の局所領域の機械的特性を測定することが可能となった。
- (2) 両端に肩部を有する微小引張試験片、新たに開発した微小試験片用引張治具、およびチャック間変位を測定する変位センサーからなる微小引張試験システムを新たに構築した。
- (3) チャック間変位に対して、FEM解析により試験片アール部の変位量を補正することにより求めた公称ひずみを用いて得た SUS316L 溶体化処理母材の微小試験片の公称応力-公称ひずみ曲線と、JIS Z 2241 にしたがって実施した直径 7 mm の丸棒引張試験片のそれとは、弾性域から最終破断に至るまでほぼ一致し、ヤング率、引張強さ、および破断伸びもほぼ等しくなった。すなわち、測定することが困難である微小試験片のひずみの直接測定を実施することなく、チャック間変位を代わりに測定することにより公称ひずみを十分な精度で求めることが可能となり、本研究で開発した微小試験片に対する引張試験法の有用性が確認できた。
- (4) 引抜き加工材に対して、本研究で開発した微小引張試験法を用いて局所領域の機械的特性を調べた結果、引抜き加工のダイスが接触する表層に近づくにつれて、 0.2% 耐力および引張強度が上昇し、破断伸びは減少した。これはFEM解析で得た塑性ひずみ量の傾向と対応した。
- (5) 公称応力-公称ひずみ曲線から得た真応力-真ひずみ曲線を母材のそれと重なるようにひずみ軸方向にシフトさせることにより得た塑性ひずみ量、すなわち予ひずみ量は、加工材の表層ほど大きくなった。この予ひずみ量は、FEM解析で得た相当塑性ひずみ量と定量的によく一致した。

以上のように、本研究で開発した微小引張試験法により、断面積が 1 mm^2 程度の領域における局所機械的特性を、定量的に精度よく求めることが可能であった。

謝 辞

本研究の一部は (財) 天田金属加工機械技術振興財団奨励研究助成の援助 (AF-2008036) を受けて行った。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) Ishiyama, N., Mayuzumi, M., Mizutani, Y., Tani, J., The effect of cold rolling and aging treatment on the stress corrosion cracking of SUS 316L and SUS 316 stainless steels in high temperature water, *Journal of the Japan Institute of Metals*, Vol. 69, No. 12 (2005), pp. 1049-1052.
- (2) Yukawa, N., Latest numerical analyses of forging, extrusion, and drawing process (in Japanese), *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, Vol. 43, No. 495 (2002-4), pp. 322-326.
- (3) Kim, K. H., Evolution of anisotropy during twisting of cold drawn tubes, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.40, No. 1 (1992), pp. 127-139.
- (4) Yoon, J. W., Barlat, F., Dick, R.E., Karabin, M. E., Prediction of six or eight ears in a drawn cup based on a new anisotropic yield function, *International Journal of Plasticity*, Vol. 22 (2006), pp. 174-193.
- (5) Łuksza, J., Burdek, M., The influence of the deformation mode on the final mechanical properties of products in multi-pass drawing and flat rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vols.125-126 (2002), pp. 725-730.
- (6) Newton, T. R., Melkote, S. N., Watkins, T. R., Trejo, R. M., Reister, L., Investigation of the effect of process parameters on the formation and characteristics of recast layer in wire-EDM of Inconel 718, *Materials Science and Engineering A*, Vols.513-514 (2009), pp. 208-215.
- (7) Yan, M.-T., Lai, Y.-P., Surface quality improvement of wire-EDM using a fine-finish power supply, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47 (2007), pp. 1686-1694.
- (8) Ohmura, T., Sawada, K., Kimura, K., Tsuzaki, K., Alteration in nanohardness of matrix phase associated with precipitation during long-term aging of type 316 stainless steel, *Materials Science and Engineering A*, Vol.489 (2008), pp. 85-92.
- (9) Nakayama, E., Miyahara, M., Okamura, K., Fujimoto, H., Fukui K., Prediction of fatigue strength of spot-welded joints based on local material strength properties measured by small specimen, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.53(10) (2004), pp. 1136-1142.
- (10) Oliver, D. A., Proposed new criteria of ductility from a new law connecting the percentage elongation with size of test-piece, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. II (1928), pp. 827-864.
- (11) Matsuoka, S., Relationship between 0.2% proof stress and vickers hardness of work-hardened low carbon austenitic stainless steel, 316SS, *The Japan Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 70, No. 698, (2004-10), pp. 1535-1541.