

高空間分解能デジタル画像相関法を用いた金属材料の極限変形能評価

研究代表者 岐阜大学 教育学部 技術教育講座 准教授 中田 隼矢

1. 緒言

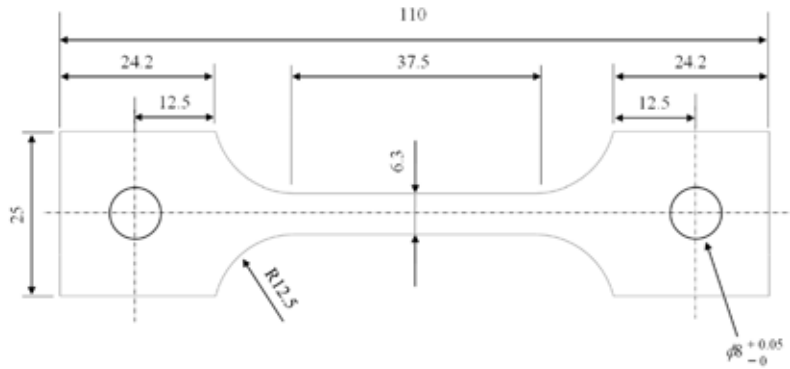
材料の強度特性を評価する最も基礎的な指標は応力とひずみである。応力は断面積あたりに作用する荷重、ひずみは単位長さ当りの変形割合であり、これらの指標によって寸法や形状が異なる評価対象であっても、強度特性を相互に評価することが出来る。一方で、引張試験を代表とする強度試験の結果は、試験片形状に大きく依存する。これは、平面応力と平面ひずみなどの変形モードや応力多軸度の変化が一因と考えられるが、強度試験で評価できているのは試験片の変形であり、材料自体の変形を正しく評価できていない可能性がある。吉田ら¹⁾は、平行部が極端に短い薄板引張試験片を用いることによって、鉄鋼の破断時のひずみを評価している。その結果、このひずみは平行部を有する引張試験片によって評価された公称・真ひずみを大きく上回ることを報告している。この吉田らの知見は、前述の試験片の変形と材料の変形に乖離があることを示唆している。そこで本研究では、画像解析法の一つであるデジタル画像相関法 (DIC)^{2,3)}を用いて、引張変形によって試験片に生じる局所的なひずみを評価し、試験片の形状変化によって評価される公称ひずみや真ひずみと材料の変形の差異について基礎的な評価を実施した。

2. 実験方法

2.1 供試材及び引張試験

供試材には代表的な金属材料である鉄鋼及びアルミニウムとその合金の中から、延性の異なる材料を選択して用いた。鉄鋼については、純鉄に近い特性を示す薄板 SPCE、高張力鋼板から引張り強さ 440 MPa 級、590 MPa 級、780 MPa 級（以下、HTSS 440, 590, 780）の三種類を用いた。アルミニウムについては、純アルミである A1050、代表的なアルミニウム合金であるジュラルミン A2017 を用いた。板厚は全て 1 mm であり、表面に研削加工を施さずに試験に供した。これらの材料に追加の熱処理を施さずに、受け取りままの状態ですべて引張試験片を採取した。引張試験には、平行部を有する平板型引張り試験片（以下、GS 試験片）に加えて、平行部を有しない局所変形型引張り試験片（以下、OGS 試験片）の二種類を用いた。試験片の形状を Fig. 1 に示す。引張試験は移動速度を 0.3 mm/min のクロスヘッド制御とし、試験片の変形はクロスヘッド変位によって評価した。

a)



b)

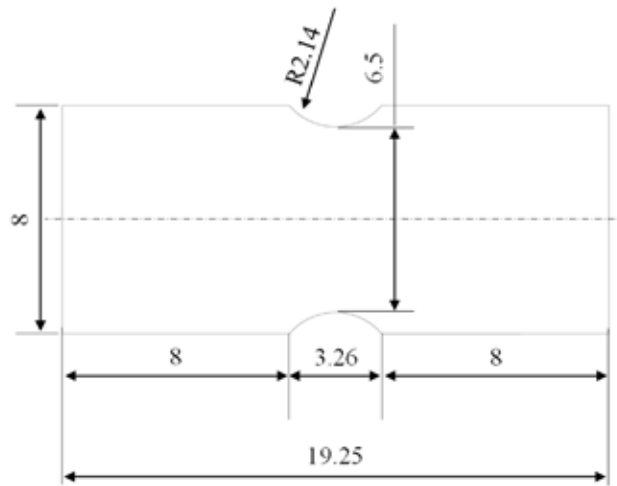


Fig.1 Geometries of tensile specimen. a: with gauge section, b: without gauge section.

2.2 デジタル画像相関法

引張変形に伴って生じる局所ひずみを評価するためデジタル画像相関法（DIC）を用いた。DICとは、観察対象表面の幾何学的な模様をマーカーとして、変形過程の画像を連続的に撮影し、マーカーの移動や変形を追尾することによって変形を評価する手法である。緻密なマーカーを形成しそれを明瞭に観察さえ出来れば、スケールに依存することなく変形を評価することが可能である^{4,5)}。本研究では、Correlated Solutions社製のVic-2D 6を用いて、試験片表面のひずみを二次元で評価した。試験片表面にはエアブラシでミクロンオーダーのランダムパターンを塗布し、それを一眼レフカメラ（Nikon製D7500、有効画素数2088万）で観察した。当初はマクロレンズによって観察していたが、観察倍率と焦点深度がやや低く、十分な精度でひずみ解析が出来なかった。そのため、実体顕微鏡（Olympus製SZX7）に一眼レフカメラを接続し、実体顕微鏡側の観察倍率を1.6倍で試験片を観察した。撮影は毎秒1コマず

つ JPEG 形式 (解像度 5568×3712, 圧縮度最低, ファイルサイズ約 10MB) で撮影した。

3. 実験結果

3.1 引張試験結果

GS 試験片を用いた引張試験によって評価した公称応力-公称ひずみ線図を Fig. 2 に示す。強度と延性が大きく異なる供試材が混在しているため、低強度と高強度の供試材に分けて示している。鉄鋼においては、SPCE の引張強さが 160MPa 程度と低いものの、破断ひずみは 0.42 に達した。一方で、高張力鋼板の引張強さは最大で約 800MPa を示し、強度が上昇するほど破断ひずみが低下した。また、本研究で評価した鉄鋼材料については、均一変形以降に生じる変形領域が比較的大きく、その後不均一変形が生じる局部延性に優れる素材であることがわかる。一方でアルミニウム系材料については、A1050 は引張強さ・破断ひずみとも本供試材の中では最小となり、鉄鋼と比べて均一変形域も狭かった。A2017 においては、引張強さは 440MPa 程度を示し比較的高強度であるものの、破断ひずみは 0.16 程度だった。さらに、均一変形後に即座に破断しており、局部延性に乏しい素材であることを示している。

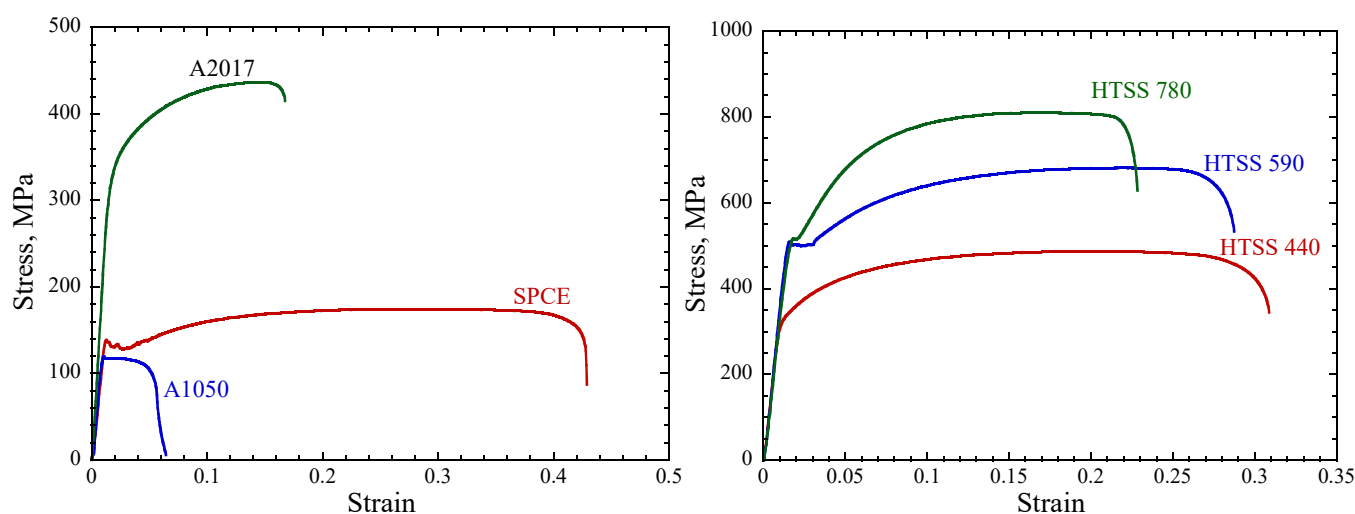


Fig.2 Stress – strain curves measured by tensile specimen with gauge section.

3.2 引張試験に伴うマクロ変形

試験片のマクロ変形評価の一例として、GS 試験片によって評価した A1050 及び A2017 の変形前、均一変形から不均一変形の遷移点となる引張強さ及び破断直前、及び破断後の観察写真を Fig. 3 に示す。A1050 では、均一変形以降に試験片の極一部が大きくくびれ、試験片の完全破断前にはくびれ部の内側で破壊が生じている様子がみてとれる。一方で、A2017 の破断直前では、破壊に至る左側に僅かに不均一変形の様子がみてとれるが、その度合いは小さい。破断後の試験片でも不均一変形によるくびれはほとんど生じておらず、応力-ひずみ線図の分析結果とよく対応している。

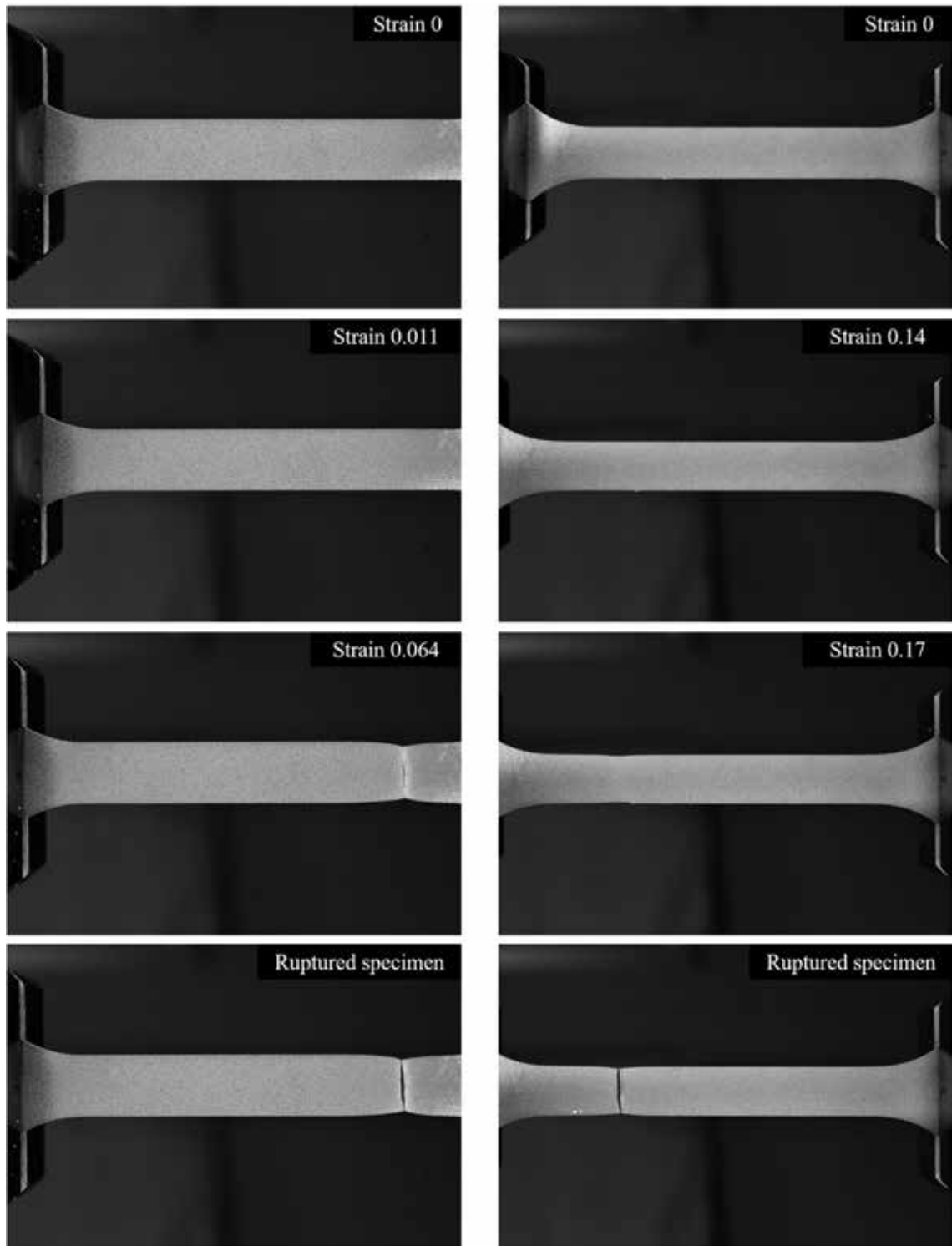


Fig.3 Images of tensile specimen with gauge section. Left side images: A1050, Right side images: A2017.

3.3 DICによるひずみ解析結果

GS試験片の引張強さ時及び、破断直前の Mises の相当ひずみを DIC によって評価したコンター図を Fig. 4 に示す。

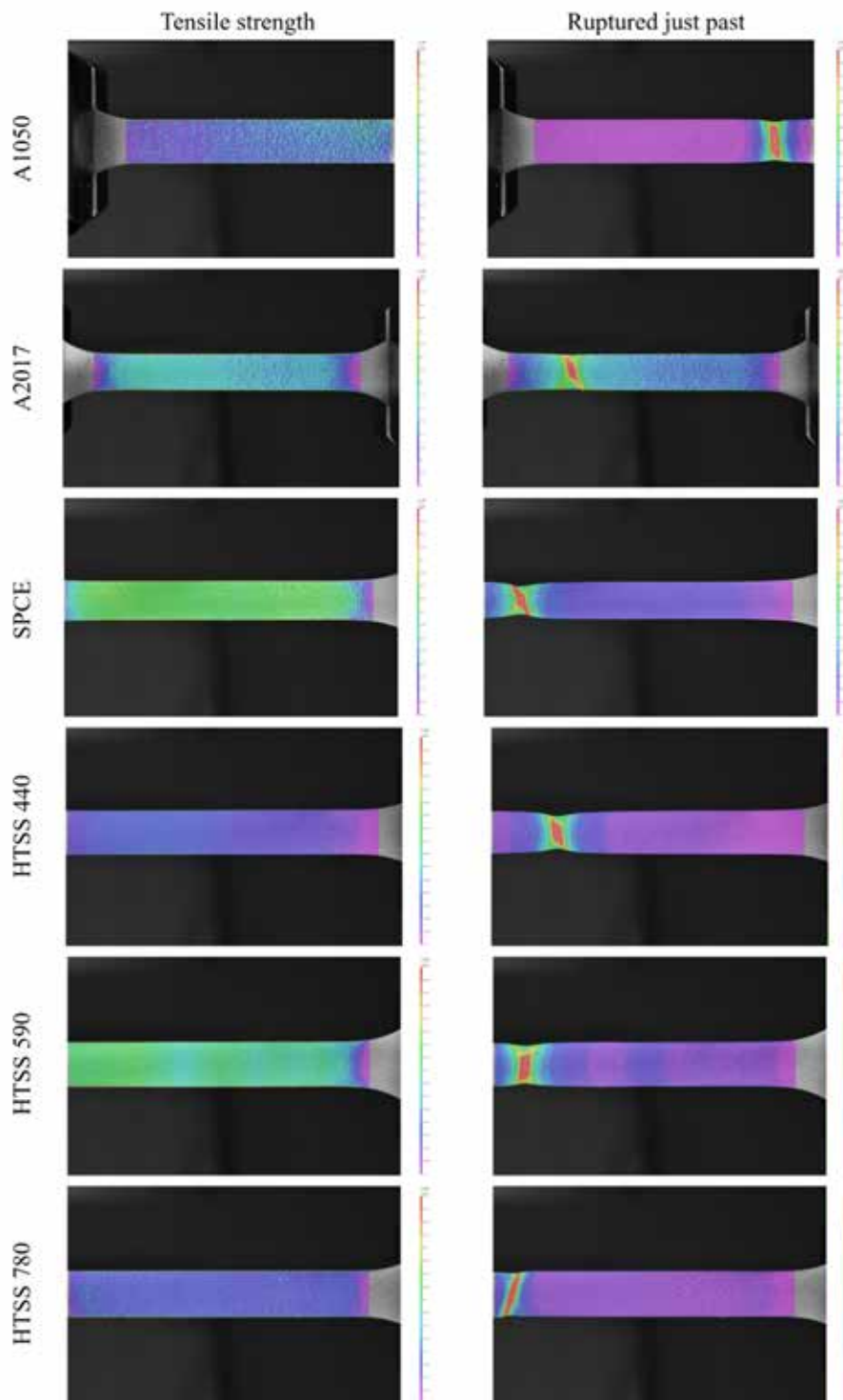


Fig.4 Distributions of equivalent Mises strain. Left side images: at tensile strength, Right side images: at ruptured just past.

どの供試材も均一変形域である引張強さ時の平行部のひずみ分布はほぼ均一であり、DICによって均一変形時のひずみ分布を評価出来ていることがわかる。一方で、破断間近の試験片内のひずみ分布は大きく分けて二種類に分類することができる。局部延性に優れる供試材においては、くびれ部内に広範にひずみが分布しているが、局部延性に乏しいHTSS 780やA2017においては、ひずみは帯状に細く分布している。これらのひずみ分布の差異を詳細に分析するため、各試験片の①破断部の中央、②破断部中央から板幅方向のやや端、③均一変形領域の相当ひずみ挙動を公称ひずみに対してプロットした結果をFig. 5に示す。

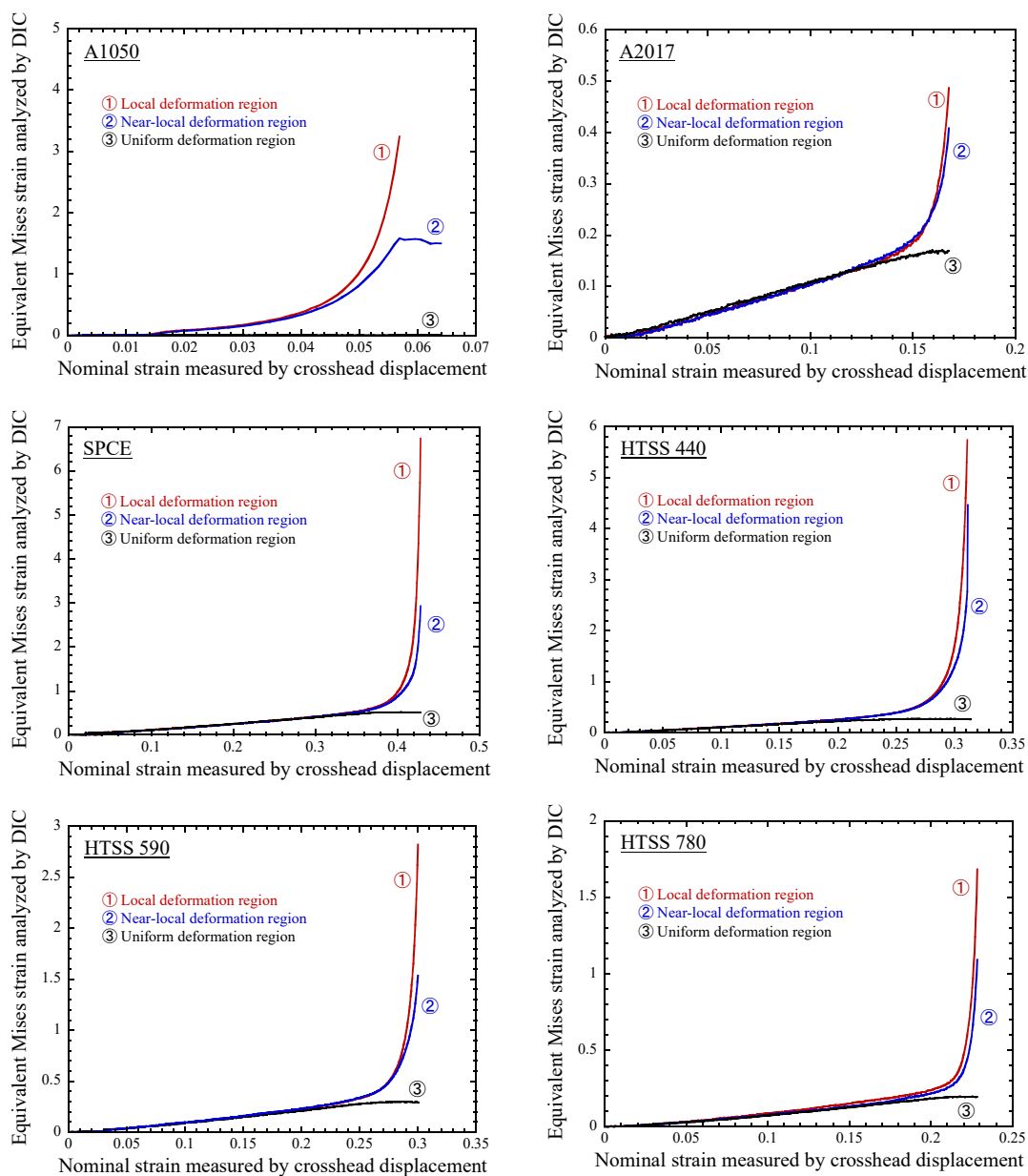


Fig.5 Relationship equivalent Mises strain analyzed by DIC between nominal strain measured by crosshead displacement.

均一変形領域では、各試験片の引張強さまでは試験片の変形に伴って相当ひずみが増加するものの、それ以降では相当ひずみの変動はほぼ生じなかった。一方で、局所変形が生じた領域では、変形の初期では相当ひずみの変化は均一変形域とほぼ同様の傾向を示すが、引張強さ以降ではその値は著しく増大した。この傾向は局部延性に優れる供試材で顕著だった。局部延性に優れる A1050 と局所延性に乏しい A2017 について、板幅の寸法減少から簡易的に評価した破断材の真ひずみはそれぞれ 0.17 と 0.29 だった。この真ひずみは板厚方向の変形を考慮していないため過小評価になるが、試験片形状が薄板のため板幅方向と比べて板厚方向の変形は小さく、真ひずみに与える影響はあまり大きくない。この真ひずみと相当ひずみを比較すると、真ひずみと比べて相当ひずみの値は著しく大きい。したがって、局所的な試験片形状の変化によって評価された真ひずみと試験片中に局所的に発生するひずみとの間には、大きな乖離があることが確認された。試験片の中に局所的に発生するひずみを精度良く解析するために、試験片の変形が一定の領域に集中するよう平行部を除去した試験片 (OGS 試験片) をデザインし、それを引張試験に供した。得られた、荷重-変位曲線を Fig. 6 に示す。

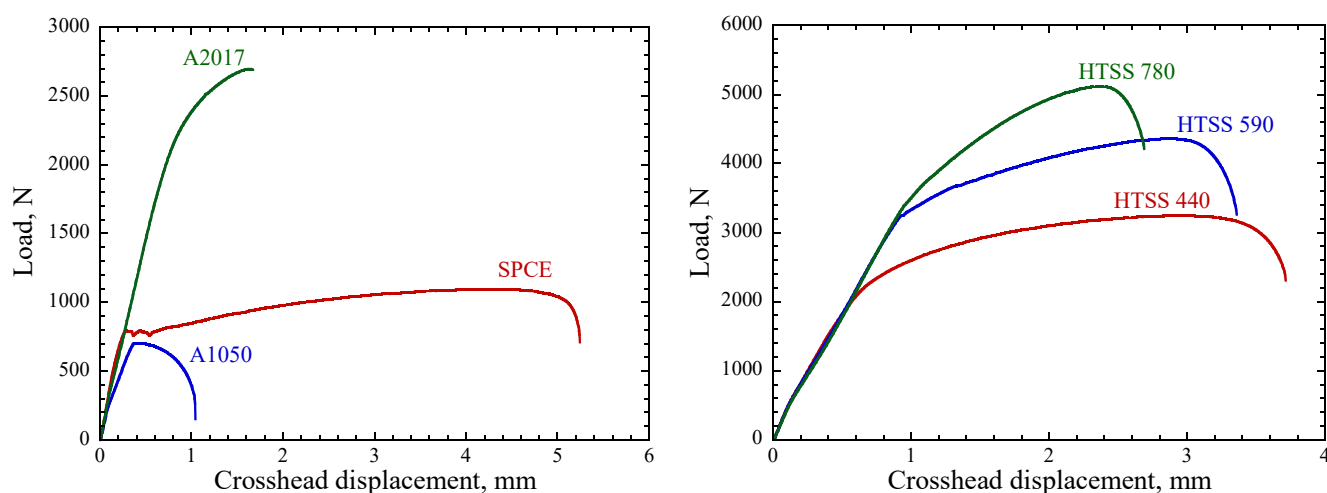


Fig.6 Load-crosshead displacement curves measured by tensile specimen without gauge section.

この試験片によって DIC によるひずみ解析を実施した。各試験片中でも最も高いひずみを示した R 部先端付近の相当ひずみの変化と変位の関係を Fig. 7 に示す。各供試材の相当ひずみの最大値は GS 試験片で評価した相当ひずみの最大値をおおむね 50~200%程度上回っていた。吉田ら¹⁾が報告している実験的に評価したひずみは 2 程度 (公称ひずみは 0.5 程度) だった。本研究では、DIC を用いて実験的に評価することが難しい極局所の変形を評価することによって、大きなひずみを評価出来たと考えられる。一方で、OGS 試験片は R 部を有するため、平行部を有する試験片と比べて応力多軸度

が異なっていると思われる。さらに、平行部を有する通常の引張り試験片であっても、局所変形の発生に伴ってその形状が刻々と変化し、同様に応力多軸度が変化する。金属材料の変形は応力多軸度に依存することが知られており、材料自身が本来有する変形を真に理解するためには、この点も考慮した評価が必要であろう。

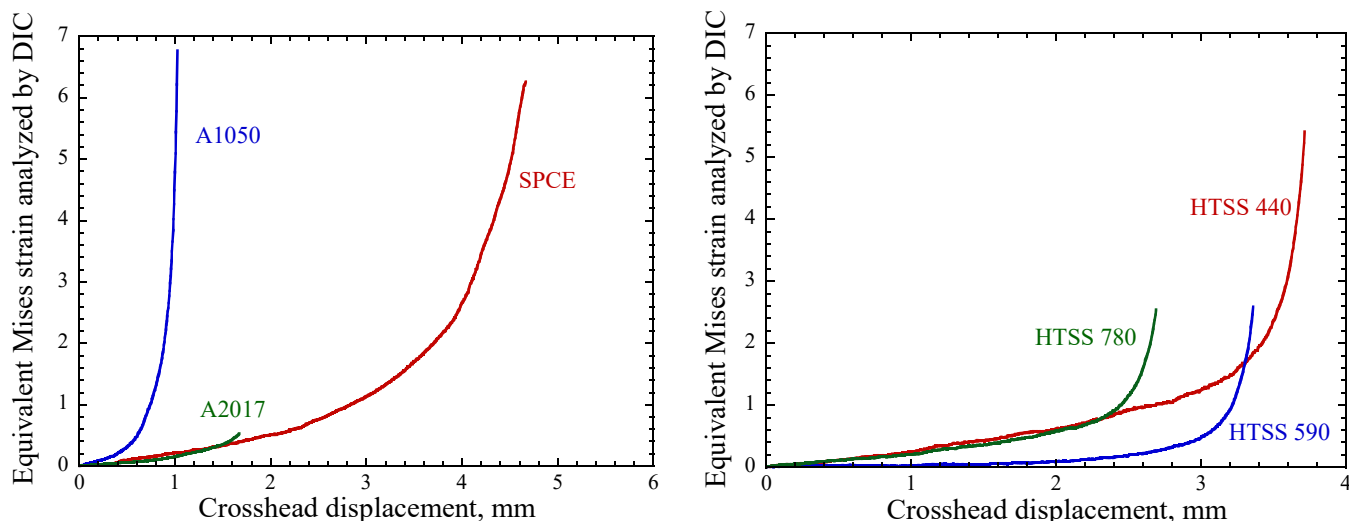


Fig.7 Relationship equivalent Mises strain between crosshead displacement evaluated by tensile specimens without gauge section.

4. 結言

本研究では、鉄鋼及びアルミニウムを供試材として、引張試験に伴って試験片中に生じる局所的な変形をデジタル画像相関法によって評価した。その結果、従来工学的な変形評価の指標として使用される真ひずみを大きく上回る変形が局所的に生じていることを確認した。さらに、平行部を除去した試験片によって変形領域を限定したところ、DICによって評価される相当ひずみは大きく増大した。

謝辞

本研究は「公益財団法人 JFE21 世紀財団」の 2017 年度・技術研究助成によって実施した。ここに謝意を表す。また、引張試験は国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構六ヶ所核融合研究所で実施した。同核融合炉構造材料開発グループの野澤貴史グループリーダー及び、加藤太一郎主任技術員に謝意を表す。

参考文献

- 1) 吉田清太, 阿部邦雄, 細野和典, 竹添明信, 薄鋼板の成形における極限変形能と平均変形能に関する実験, 理化学研究所報告, 第 44 巻, 第 3 号 (1968) pp.128-139.
- 2) Helm, J.D., McNeill, S.R. and Sutton, M.A., Opt. Eng. 35 (1996) pp. 1911-1920.

- 3) W.H. Peters, W.F. Ranson, Digital imaging techniques in experimental stress analysis, *Optical Engineering* 21 (1982) pp. 427-431.
- 4) T. Nakata, H. Tanigawa, Evaluation of local deformation behavior accompanying fatigue damage in F82H welded joint specimens by using digital image correlation, *Fusion Engineering and Design*, Vol. 87 (2012) pp. 589-593.
- 5) 中田隼矢, 伊藤和馬, 上森武, 多田直哉, 高純度鉄の微視的変形挙動評価, 日本機械学会 2016 年度年次大会, J0410301.