

令和 6 年 9 月 6 日現在

機関番号：82110

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20488

研究課題名（和文）応力・ひずみの多軸性に着目した構造材料の水素脆化特性の解明

研究課題名（英文）Hydrogen Embrittlement Susceptibility Based on Stress/Strain triaxiality

研究代表者

柴山 由樹（Shibayama, Yuki）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 物質科学研究センター・博士研究員

研究者番号：20964323

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：成形部品中の残留応力は、その耐水素脆化特性を理解するための重要な因子である。しかし、部品形状による耐水素脆化特性の優劣を比較する方法は未だない。そこで我々はそれら成形によって生じる残留応力の応力状態を表す応力三軸度に着目した。本研究では幅広い応力三軸度を評価する引張試験を有限要素法を用いた弾塑性解析より設計した。そして中性子応力測定装置を用いた引張変形中の応力状態の測定と比較してその妥当性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

構造部材は高強度材料の適用・複雑形状化による軽量化・信頼性向上が進められている一方、耐水素安全性の把握が喫緊の課題として浮上している。構造部材の水素が力学特性に及ぼす影響を考慮した新たな耐水素性に優れた加工方法・部材形状設計に向けた基盤の構築が急がれている。本研究ではその一環として成形部品が有する応力・塑性ひずみ状態の多軸性に着目した新たな力学試験手法を開発し、新たな知見を得た。

研究成果の概要（英文）：The stress states during various plastic deformations were classified based on stress triaxiality. The deformation modes were designed respectively, and the triaxial stress evolution behaviors of high-strength martensitic steels under different deformation modes were evaluated experimentally by neutron diffraction measurement and numerically using finite element analysis to investigate the effects of stress triaxiality on the stress-strain responses and hydrogen embrittlement behaviors. The comparison between experimental measurement and numerical simulation results suggests that the above method is applicable for evaluating hydrogen embrittlement susceptibility.

研究分野：材料科学

キーワード：水素脆化 応力三軸度 中性子応力測定 有限要素法 構造材料 中性子回折 応力測定技術

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

負荷低減を同時に達成することが可能であることから、取り組みが続いている。軽量化を進める手法としては高い比強度を有する金属材料の利用が一般的である。しかしながら、さらなる比強度の向上や適用範囲の拡大を阻む要因として水素脆化の懸念が挙げられる。

水素脆化は金属材料中に侵入した水素がその材料強度を低下させる劣化現象であり、高強度材料ほどわずかな水素 (0.1massppm 程度) でも生じることが知られている¹⁾。したがって、高強度材料を利用する場合は常にその耐水素性を考慮する必要がある。

耐水素脆化特性の評価は、実用部材にかかる塑性加工条件・組付け条件を模擬した試験片 (例えば曲げ加工、張出し加工、深絞り加工した試験片) に水素を添加して水素脆性破壊の有無を判断する手法が一般的である²⁾。我々はこれまで曲げ加工試験片および張出し加工試験片について内部応力を定量し、水素脆性破壊が最大主応力の作用する面に生じることが示した^{3,4)}。しかしながら、これら加工様式の耐水素性能を比較するには至っていない。

水素は静水圧によって材料内部を拡散するため、加工様式による耐水素性能を比較するためには内部応力 "状態" も考慮する必要がある⁵⁾。応力 "状態" は応力三軸度により表現される。Wang らは平滑丸棒引張試験片と環状切欠丸棒引張試験片の破壊発生領域近傍の水素濃度と破断応力の関係が応力三軸度によって異なることを示した⁶⁾。藤田らは成形限界線を用いて応力状態を分類し、成形モードによって水素脆化発生に必要な水素濃度が異なることを示した⁷⁾。応力状態によって耐水素脆化特性が変化することが示されている一方、いずれの先行研究においても一部の応力状態の議論にとどまっている。

2. 研究の目的

本研究では、耐水素性能の評価を想定した幅広い応力三軸度における引張試験手法を検討した。代表的な構造用高強度材料である低合金マルテンサイト鋼を用い、Bao らの引張試験片形状を参考にした 3 種類の引張試験片を作製した⁸⁾。作製した試験片の応力形成過程を中性子応力測定から評価した。並行して有限要素解析によって変形中の平均応力三軸度を算出し、検討した引張試験手法の適用可能性を検証した。

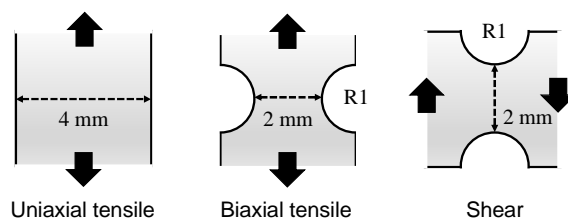


Figure 1 Schematic illustrations of tensile test specimens. Block arrows and dashed lines indicate tensile directions and stress triaxiality evaluation range, respectively.

3. 研究の方法

(1) 試験片の作製

供試材には焼戻しマルテンサイト組織を有する低炭素鋼を使用した。Table1 に化学組成を示す。長手方向を圧延方向として長さ 310mm、幅 300mm、厚さ 12mm の鋼板の板厚中央から放電加工によって圧延方向を引張方向とした板厚 1mm の 3 種類の板状引張試験片を作製した。Fig.1 に試験片の変形部の詳細を示す。平滑引張試験片と 2 種類の切欠付き引張試験片を作製した。切欠付き引張試験片では半径 1mm の半円を引張方向に対してそれぞれ水平、垂直に配置した。

Table 1 Chemical composition of the steel used (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0.13	0.21	1.45	0.005	0.002	0.03	0.56	0.05

(2) 中性子測定

日本原子力研究開発機構が所有する研究用

原子炉 JRR-3 に設置されている中性子応力測定装置 RESA を用いて中性子測定を行った。引張試験中、変位を途中で保持した時に回折プロファイルを測定した。変形速度はクロスヘッド速度 0.1mm/min とし、一定変位ごとの弾性ひずみを破断するまで測定した。入射中性子の波長は 1.59Å を使用した。平滑試験片では入射側に 10×5mm の Cd スリットを設置し (211) 面の回折角度を測定した。切欠付き試験片では 2×2mm の Cd スリットを設置し、(110) 面を測定した。1 回あたりの測定時間は最低 1800s とした。得られた回折プロファイルから引張方向の弾性ひずみを評価した。

(3) 有限要素解析商用の有限要素解析コード

Abaqus/Standard を用いて引張試験をシミュレーションした。Fig.1 に示した 3 種類の引張試験片を低減積分 6 面体 1 次要素によりモデル化した。加工硬化特性は Fig.1 に示した Uniaxial 引張試験片の応力ひずみ応答を Swift の加工硬化則に落とし込んだ結果を使用した。引張方向に強制変位を与えた時の引張方向弾性ひずみおよび応力三軸度を評価した。強制変位の変位量は引張試験から得た各試験片の破断伸びまでとした。弾性ひずみの評価領域は中性子測定と同じ領域の平均値とした。応力三軸度は Fig.1 に示す点線領域の平均値を評価した。

4. 研究成果

中性子測定と有限要素解析から得た引張試験中の引張方向の弾性ひずみ挙動を Fig.2 に示す。中性子測定 (Fig.2a) において、Biaxial tensile 試験片が最初に最大弾性ひずみを示し、破断に至った。次に Shear 試験片の弾性ひずみが単調増加したまま破断した。最後に Uniaxial tensile 試験片が破断した。また、引張試験中の弾性ひずみの最大値は Uniaxial、Biaxial、Shear の順に低下した。以上の傾向を有限要素解析の結果 (Fig.2b) と比較する。有限要素解析から得た弾性ひずみ挙動は中性子測定結果と同様の傾向を示すことが確認された。

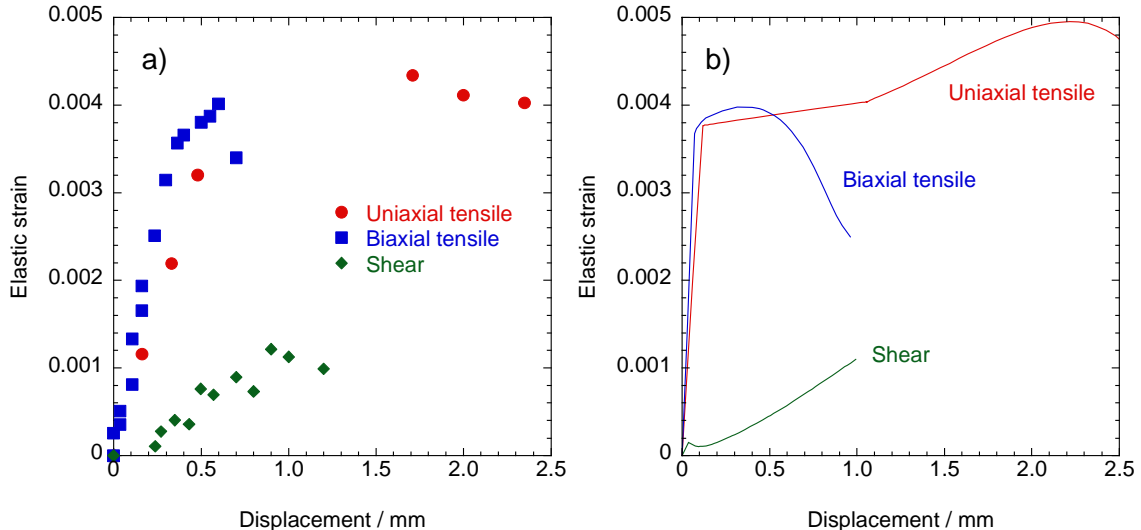


Figure 2 a) Neutron measurements and b) finite element analysis of the elastic strain in the tensile direction- displacement response).

有限要素解析から得た引張試験中の平均応力三軸度の形成挙動を Fig.3 に示す。3 種類の試験片の平均応力三軸度は Shear、Uniaxial、Biaxial の順に増加した。先行研究より、平均応力三軸度 $0 \leq \eta \leq 0.33$: せん断応力状態、 $\eta = 0.33$: 一軸応力状態、 $\eta > 0.33$: 多軸応力状態であることが報告されている 8)。したがって、設計した 3 種類の引張試験片を用いることで幅広い応力三軸度における力学特性の評価が可能であることを検証した。

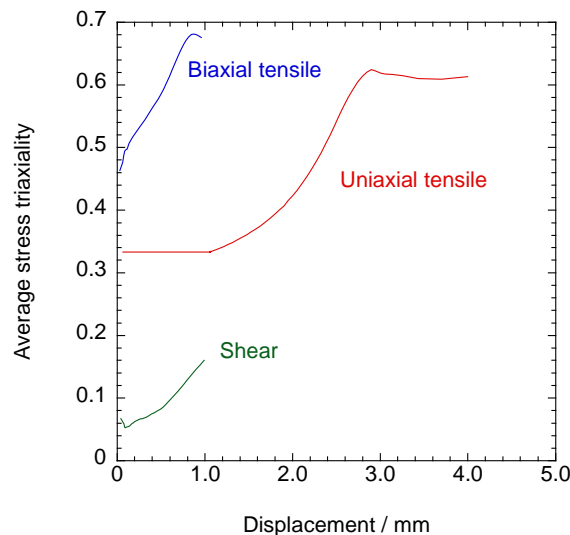


Figure 3 The Evolution of stress triaxiality for tensile tests).

参考文献

- 1) T. Fujita, et al., "Physical metallurgy and SCC in high strength steels", International Corrosion Conf. series NACE-5, Houston, TX pp.736-746 (1977).
- 2) Y. Toji, et al., "Evaluation of Hydrogen Embrittlement for High Strength Steel Sheets", Tetsu-to-Hagane, Vol.95, No.12, pp.887-894 (2009).
- 3) Y. Shibayama, et al., "Effects of Stress and Plastic Strain on Hydrogen Embrittlement Fracture of a U-bent Martensitic Steel Sheet", ISIJ Int., Vol.61, No.4, pp.1322-1329 (2021).
- 4) H. Nishimura, et al., "Effects of Residual Stress on Hydrogen Embrittlement of a Stretch-Formed Tempered Martensitic Steel Sheet", ISIJ Int., Vol.61, No.4, pp.1170-1178 (2021).
- 5) J. Lufrano, et al., "Enhanced hydrogen concentrations ahead of rounded notches and cracks- competition between plastic strain and hydrostatic stress", Acta Mater., Vol.46, No.5, pp.1519-1526 (1998).
- 6) M.Wang,etal., "Effectofhydrogen and stress concentration on the notch tensile strength of AISI 4135 steel", Mater. Sci. Eng. A, Vol.398, No.1, pp.37-46 (2005).
- 7) Y. Fujita, et al., "Investigation of Delayed Fracture Evaluation Method Simulating Processing Forming Part", Zairyo-to-Kankyo, Vol.68, No.5, pp116-119 (2019).
- 8) Y.Bao,etal., "Onfracturelocusin the equivalent strain and stress triaxiality space", Int. J. Mech. Sci., Vo.46, No.1, pp.81-98 (2004).
- 9) 柴山由樹,etal., "幅広い応力三軸度を評価する引張試験方法の検討", 第 57 回 X 線材料強度に関するシンポジウム, 日本材料学会, 山梨県, pp 11-11 (2023), 山梨県.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 柴山由樹, 諸岡聡, 徐平光, 菫蒲敬久
2. 発表標題 幅広い応力三軸度を評価する引張試験方法の検討
3. 学会等名 第57回X線材料強度に関するシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 柴山由樹, 諸岡聡, 徐平光, 菫蒲敬久
2. 発表標題 応力三軸度を指標とした引張試験手法の開発
3. 学会等名 日本中性子科学会第23回年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Shibayama, Satoshi Morooka, Pingguang Xu, Takahisa Shobu
2. 発表標題 Triaxial stress evaluation of high strength steels under various deformation modes using neutron diffraction and finite element analysis
3. 学会等名 The 3rd Materials Research Meeting (MRM 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------