

X線回折測定を用いた超高張力鋼の引張時破断直前の内部損傷度評価 Damage Evaluation of Ultra-high Strength Steels by X ray Diffraction Analysis in Tensile Test

松野 崇^a, 左納 伊織^a, 中川 雄介^a, 近藤 大樹^a, 高橋 智也^a,
浜 孝之^b, 内藤 正志^c, 興津 貴隆^c, 林 誠次^c, 高田 賢治^c
Takashi Matsuno^a, Iori Sanou^a, Yusuke Nakagawa^a, Daiki Kondo^a, Tomoya Takahashi^a,
Takayuki Hama^b, Tadashi Naito^c, Yoshitaka Okitsu^c, Seiji Hayashi^c, Kenji Takada^c

^a 鳥取大学, ^b 京都大学, ^c 本田技研工業(株)
^a Tottori University, ^b Kyoto University, ^c Honda Motor Co., Ltd.

本研究は自動車用超高張力鋼における高ひずみ域の損傷挙動を明らかにすることを目的としている。今回の測定では直径 0.5 mm の平滑丸棒と切り欠き丸棒を対象に X 線回折により引張中の引張直交方向の格子ひずみを測定し、引張方向の真応力を荷重計測値および X 線透過像を用いた試験片の幾何形状変化より算出した。格子ひずみ測定結果は損傷によるものと思しき負荷応力に対する飽和現象を示した。

キーワード： 超高張力鋼、回折、損傷解析、その場引張

背景と研究目的：

近年、CO₂ 排出規制を主な背景として自動車の軽量化が進んでいる。その一環として、自動車用の耐衝突部材では素材の高張力化が図られてきた。強度を増した分だけ素材は薄肉化され、軽量化と衝突安全性能の向上を達成する事ができる。CO₂ 排出規制はますます強化されており、限界まで素材を高張力化したうえで、さらにその強度を限界まで使い切らなければならない。これまでの軟鋼と異なり、超高張鋼を使った耐衝突部材では頻繁に内部に亀裂や亀裂が開口した空包（内部損傷）が生じるため、その影響をいかに考慮して部材の設計に取り込むかが課題となる。

そこで、本測定においては超高張力鋼が破断に至るまでの内部損傷を、X 線回折による格子ひずみの挙動として捉えることを試みた。格子ひずみの挙動から内部損傷による鋼材の軟化挙動を数式モデル化することを狙ったものである。数式モデル化のためには引張中の塑性ひずみと関連づける必要があるため、X 線透過イメージングを活用することで試験片の幾何形状の変化から塑性ひずみ（真ひずみ）を読み取ることを試みた。

実験：

測定のレイアウトを図 1 に示す。本試験は引張試験機を測定ステージに設置し、引張中の格子ひずみの測定と透過像の撮影を実施した。

(引張試験) 変形部直径 0.5 mm の小型丸棒引張試験片を BL46XU 用の小型引張試験機を用いて引張試験した。平滑丸棒と切り欠き丸棒 2 種に対して実験を行った(切り欠き R1.5 および R0.3)。供試鋼には 1.5 GPa 級の焼き入れ済みボロン鋼（ホットスタンプ材）を用いた。

引張中においては荷重履歴を測定し、回折測定の際には一旦引張を停止した。引張を停止した際には停止直後の荷重を保持することができないため、どうしても一定値だけ荷重が下がってしまう。下がった荷重を補正する解析を後々実施することを考え、荷重が低下する履歴も測定をした。

(回折) エネルギーを 37 keV とし、50 μm × 50 μm に成形したビームをサンプルに照射、サンプルを透過させた後にダブルスリット(開口幅 100 μm)を通した回折光を検出した。低合金鋼の {321} 面を狙った検出角度 (25 度程度) を設定した。

(透過像) サンプルより 2.5 m 離れた位置にカメラを設置し、サンプルの透過像を撮影した。透過像より試験片の直径の変化を評価する。負荷応力を直径より算出した断面積で除することで、

真応力を求める。また、直径の変化量より塑性ひずみ（真ひずみ）へ変換することもできる。

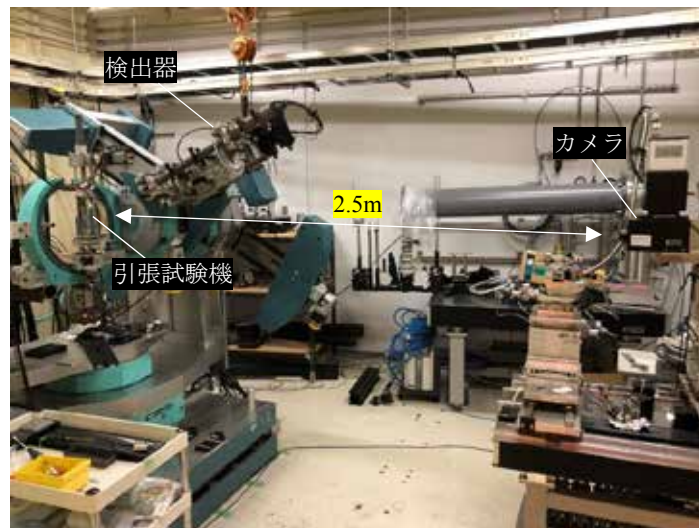


図1 実験レイアウト

結果および考察：

ここまで得られた解析結果を述べる。図2はそれぞれの引張ステップにおける引張直交方向の格子ひずみと引張方向の負荷応力（引張停止後の荷重を断面積で除したもの）である。平滑丸棒においては負荷応力が低い領域において負荷応力に応じてポアソン比だけ圧縮の格子ひずみが生じ、くびれによる多軸応力状態となった後はその関係が崩れる傾向が読み取れる。切り欠き丸棒2種においては最初から多軸状態であるため、負荷応力が増すごとに格子ひずみは引張側へ遷移している。

着目すべきは切り欠き丸棒において、ある一定応力以上では格子ひずみの増加が飽和することである。内部損傷によるものと考えられ、何らかの破断の前駆現象をとらえたものと思われる。

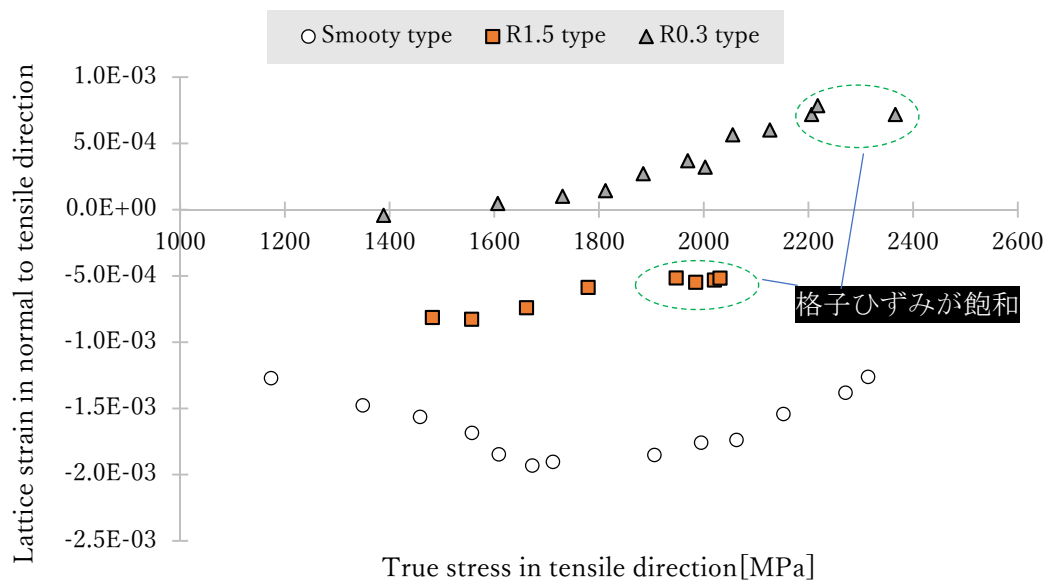
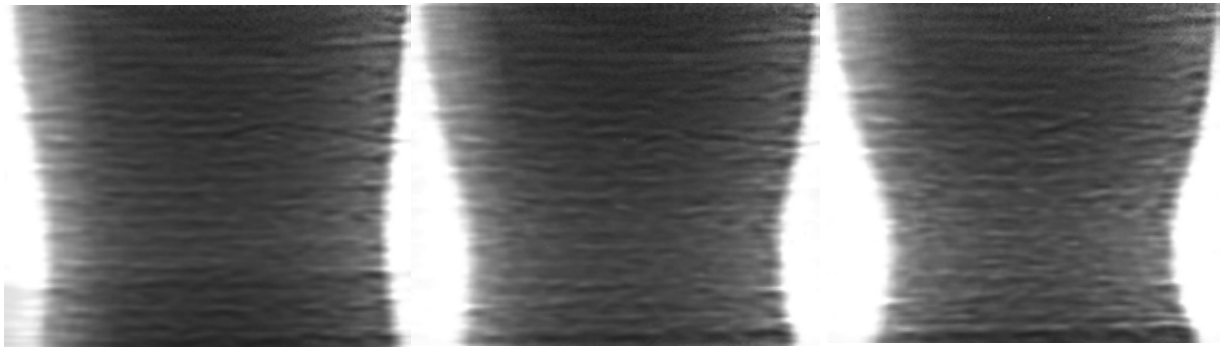


図2 引張直交方向の格子ひずみと引張方向の負荷応力

続いて平滑丸棒における引張破断直前の透過像を示す。この透過像により得られた直径の変化は、既に図2中の真応力算出に用いている。表面凹凸がハイライトされたような像となっており、直径変化に加えてくびれ部の伸びひずみまで求めることができるものと期待される。



(a)負荷荷重 277 N

(b)負荷荷重 251 N

(c)負荷荷重 226 N

図3 透過像 (平滑丸棒)

今後は図3の透過像を用いた画像処理によりくびれ中央部の伸びひずみを求め、体積ひずみを算出することを試みる。また、格子ひずみの測定結果と有限要素法と組み合わせることで、除荷を含まない状態の静水応力を導出する予定である。これら2つの状態量より、超高張力鋼の損傷による軟化挙動の数式モデルを構築していく。