

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420078

研究課題名(和文) 金属延性破壊の中性子による内部構造計測に基づく高精度せん断加工解析システムの構築

研究課題名(英文) Shearing simulation with ductile fracture based on neutron diffraction measurement

研究代表者

須長 秀行 (Sunaga, Hideyuki)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究領域・研究員

研究者番号：70442978

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、実際に単軸引張試験にて延性破壊が発生した時点との対比により限界ダメージ値を同定する手法、及び亀裂発生を表現する弾塑性FEMに関するアルゴリズム等の最適化を図り、実際にプレス金型によるせん断加工実験結果との対比等をもとに、亀裂発生箇所及び進展方向等せん断変形過程時の材料挙動が予測できることを確認した。

また、金属材料(SS400)が変形する際の材料内部構造変化を中性子回折により延性破壊に至るまで連続的に観察し、材料の局所くびれ変形過程による板幅減少、板厚減少後の破断に至る過程を(110)結晶粒群の体積分率の変化として中性子線回折により捉えることができることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The simulation of fracture propagation is a highly nonlinear problem that is difficult to solve using elastoplastic FE codes, mainly because of the sudden change in the force equilibrium situation in fracture. Simulations of shearing processes of steel plates were carried out and the results showed good correlation with the experimental results. It was proved to be sufficiently robust and accurate to treat shear cutting.

A neutron diffraction measurement was performed to reveal microstructural aspects of the ductile fracture in ferritic steel. The diffraction patterns were continuously measured until the end of the fracture process. The measurement results showed that the volume fraction of the specified plane in lattices {110} for the axial loading direction increased almost proportionally to the material elongation during necking. The effect of the fracture was observed as a change in the volume fraction of {110} prior to the actual fracture.

研究分野：塑性加工

キーワード：せん断加工 弾塑性FEM 中性子計測 延性破壊

1. 研究開始当初の背景

近年の環境負荷低減の高まりを受け、燃費向上を目的とした自動車の軽量化要求が厳しさを増しており、部品強度を保ったまま軽量化する手段として高張力鋼板の適用が拡大している。しかし、高張力鋼板は一般的にその強度に反比例して延性が低下することからくびれ発生なしに破断する等、くびれ発生や板厚減少をもって成形限界とする従来理論に基づく考察が難しい。また、生産現場では機能部品の複合化等による高付加価値化と生産性向上を同時に実現させるために、せん断変形が伴う板厚増減等材料を加工限界まで変形させることが必要不可欠となっている。そこで、板材のくびれ発生や板厚減少をもって成形限界とする従来からの FLD (Forming Limit Diagram: 成形限界線図) や S-R 限界理論に対して、われやせん断変形過程は材料内部の破壊により発生することから、延性破壊が起こったかどうかを知ることが極めて重要となっている。

申請者らは、不釣り合い力消去アルゴリズムを備えた静的陽解法を採用することにより、せん断過程で生じる大きな塑性流動に伴う大変形や、破壊クライテリアに基づく要素の切り離し時に生じる大きな不釣り合い力の問題に対処できる弾塑性 FEM を実現させた。しかし、実際の単純せん断加工による精度検証では、ダレ量については実験と解析結果で一致が見られたが、せん断面率については実験と解析結果でかい離が発生している。破壊に関する材料物性値 (限界ダメージ値) は直接破壊条件となるために解析精度に大きく影響する。簡単な引張試験 (延性破壊試験) 解析で限界ダメージ値を決める指標となる材料延性破壊の確認方法は、実際の延性破壊材料試験における最大荷重点以降の局部伸び領域での応力値による特定しかなく精度よく計測できていないのが現状であり、新たな計測手法が必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、まだ確立していない実際の材料試験において延性破壊発生を特定する計測手法を構築し、弾塑性 FEM に対して延性破壊条件を導入することによりせん断過程のシミュレーション技術を発展させていくための研究基盤を確立する。特に、破壊予測のための限界ダメージ値の検討では、X 線等と比較して内部構造観察が容易な中性子線による延性破壊現象の特定を試みる。

3. 研究の方法

延性破壊の発生は、応力及びその他の材料パラメータを変形履歴に沿って積分した値が限界ダメージ値を超えた時点を一般的に延性破壊条件式として定義される。本研究では、実際の実験で鋼板材料による単純せん断加工を行い、せん断過程での亀裂発生状況を把握し、実際の加工と同条件のせん断加工解析において限界ダメージ値をもとに予測された延性破壊現象が実験結果と一致していることを検証することにより、適用すべき延性破壊条件を同定する。さらに、クリアランス及び刃先形状が異なる工具条件に対して解析を行い、せん断過程の亀裂発生状況及び加工後の材料形状に対して実験結果と比較することにより精度検証を行う。これにより、亀裂進展に伴い局所的に発生する大きな歪に対応するために機能するリメッシュが、新たな破壊モデル (延性破壊条件) に対しても必要な箇所のみ細かい要素が配されて形状再現性及び計算精度を確保しつつ計算時間が最適化されていること等も検証する。

せん断加工途中の材料内部構造 (亀裂発生) の把握では、パルス中性子による組織構造イメージングをもとにした微視的観察により、実際の加工と同条件のせん断加工解析において限界ダメージ値をもとに予測された延性破壊現象が実験結果と一致していることを検証することにより、適用すべき延性破壊条件を検討する。

4. 研究成果

本研究では、延性破壊条件式により延性破壊とする閾値（限界ダメージ値）として定義する方法として、実際に単軸引張試験より得られた材料特性をもとに同条件にて弾塑性 FEM 解析を行ない、くびれ発生とともに応力集中が生じた部位の要素に対して実試験にて延性破壊が発生した時点との対比により限界ダメージ値を同定する手法を構築した。さらに、任意要素の変形履歴に沿った応力-歪関係の積分値が適用材料固有の限界ダメージ値を超えた時点で延性破壊として、亀裂発生を表現するアルゴリズム及びリメッシュ機能等の最適化を図った弾塑性 FEM を開発して、板材のプレス加工による単純せん断加工解析を行なった。これにより、材料がせん断変形を伴う亀裂進展により材料が分離させるまでの変形過程を計算機上で逐次可視化することができた。また、実際にプレス金型によるせん断加工実験を行ない、板材変形過程を高速度カメラで動画撮影する等せん断加工実験結果対解析結果の比較（図 1 参照）により、亀裂発生箇所及び進展方向等せん断

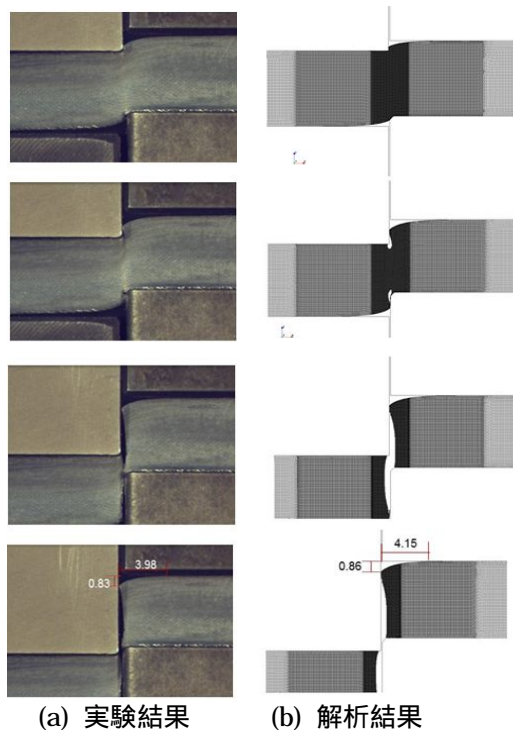


図 1 せん断加工解析対実験結果

変形過程時の材料挙動を弾塑性 FEM 解析により予測できることを確認し、限界ダメージ値の同定手法及び FEM 解析における取り扱いが適していることを明らかにできた。

鉄鋼材料の数ミリ深さの材料組織構造を捉える方法として中性子回折法が有効と考えられる。本研究では、金属材料が変形する際の材料内部構造変化を観察するために、小型加速器を使用した中性子源システム（RANS）による結晶構造の非破壊計測を行なった。RANS では 7 MeV まで加速した陽子を Be ターゲットに当てて、生成した中性子をポリエチレン減速材に通すことで meV から MeV までの広いエネルギースペクトルの中性子が得られる。このことから、金属結晶の格子定数をカバーする波長のエネルギー領域を用いて、材料試験機にて鋼材に引っ張り変形を加える前後に対して回折実験を行ない、金属材料変形による集合組織の変化を捉えることを確認した。

しかし、小型加速器を使用した中性子源システム（RANS）による回折実験では、動的な材料塑性変形過程に対応した結晶構造変化を捉えることが難しいことから、大強度陽子加速器施設（J-PARC）を使用した回折実験の詳細検討を行ない、実際に工学材料回折装置（愛称：匠）を使用して延性破壊に至るまでの結晶構造変化を捉える実験を行なった。匠を使用した回折実験では、材料試験片が短軸引張試験により延性破壊に至るまでの時

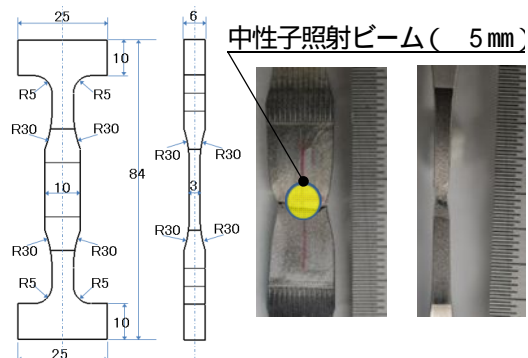


図 2 中性子回折実験（匠）用試験片

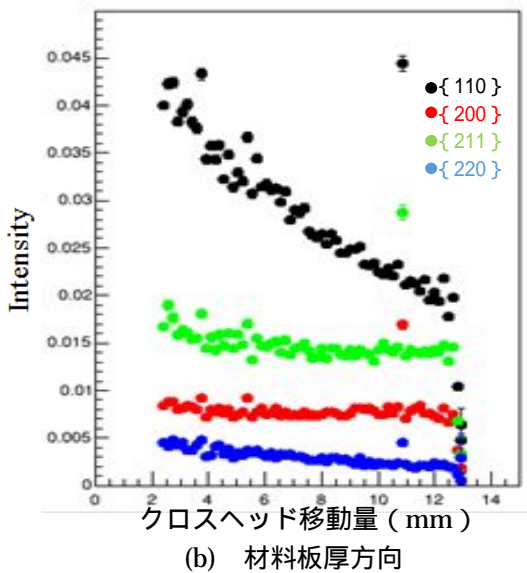
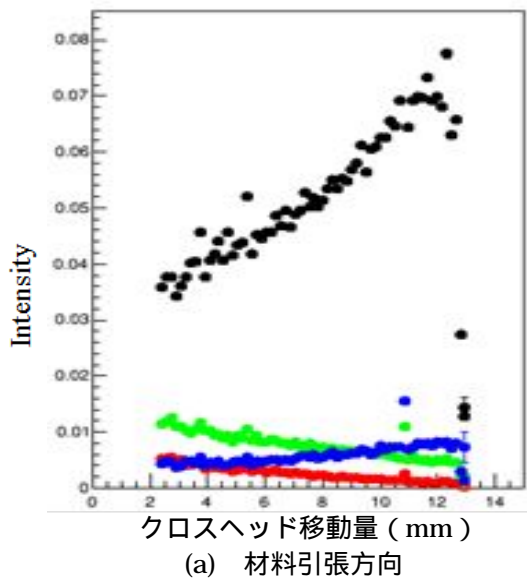


図3 材料変形に対する回折強度の変化

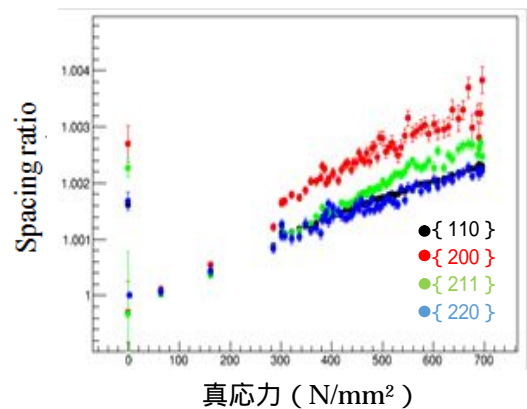


図4 真応力に対する格子間距離の変化

間変化に対して逐次結晶構造変化を捉えるために、くびれ現象が発生して破断に至る直前まで試験片中央部に中性子ビーム照射エリアを確保できる特殊形状を有する材料と

してSS400を使用した試験片(図2参照)を製作し、引張変形の進行に対する引張軸に平行及び垂直方向の回折中性子強度を測定した。

この回折実験により、bcc結晶の回折面である(110)、(200)、(211)、(220)、(310)、(222)に対する中性子強度が塑性変形の進行に伴って変化していくことが追跡でき、すべての結晶ですべりが進行していることが確認できた。特に、(110)結晶粒群の体積分率が他の方位の結晶粒に比べて大きく、塑性変形の進行に対する増加傾向も顕著であり、試験片の幅が減少し始めるくびれ現象発生時、さらに板厚減少が顕著になる各段階では(110)結晶粒群の増加の割合が変化することが明らかとなった。また、加工硬化による真応力の増加に対して、格子間距離は直線的に増加しており、材料変形の進行に伴ない結晶歪の推移に特異的な変化は発生しないと考えられる。したがって、材料の局所くびれ変形過程による板幅減少、板厚減少後の破断に至る過程を(110)結晶粒群の体積分率の変化として中性子線回折により捉えることが可能と考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

M.Takamura etc, Advanced Metal Forming Simulations Coupled with Neutron Beam Technology, 査読有、Physics Procedia, 60 (2014), 238-243. doi:10.1016/j.phpro.2014.11.033

〔学会発表〕(計5件)

H.Sunaga, Texture evaluation in ductile fracture process by neutron diffraction, NUMISHEET2016、2016.09.04-09、Marriot Bristol City、Bristol、UK

須長秀行 他、金属延性破壊に基づくせん断加工シミュレーション、理研シンポジウム、2015.11.13、埼玉県和光市

池田義雄 他、RANS における中性子回折実験の取り組み、理研シンポジウム、2015.01.16、埼玉県和光市

高村正人 他、中性子ビーム計測とFEMによる金属のメソスケール変形解析、理研シンポジウム第2回「光量子工学研究」、2014.11.25、宮城県仙台市

池田義雄 他、理研小型中性子源 RANS、理研シンポジウム第2回「光量子工学研究」、2014.11.25、宮城県仙台市

〔図書〕(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

須長 秀行 (SUNAGA Hideyuki)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究領域・研究員

研究者番号：70442978

(2) 研究分担者

高村 正人 (TAKAMURA Masato)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究領域・研究員

研究者番号：00525595

大竹 淑恵 (OTAKE Yoshie)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究領域・チームリーダー

研究者番号：50216777

(3) 連携研究者

竹谷 篤 (TAKETANI Atsushi)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究領域・副チームリーダー

研究者番号：30222095