

## 論文審査の結果の要旨

氏名：上 浦 友 洋

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：薄鋼板材における破壊のひずみ速度依存性に関する研究

審査委員：(主 査) 教授 高 橋 進

(副 査) 教授 久保田 正 広 教授 綱 島 均

自動車用のシートは、製品の性能評価や実際の車両衝突等により、様々なひずみ速度で変形が生じる。現在の産業界では CAE を用いた性能評価を行い、実験にかかる費用、納期を短縮することが求められている。シートの性能評価においては、延性破壊の予測が重要となるが、従来は破壊におよぼすひずみ速度の影響が明確になっておらず、有限要素法を用いて延性破壊の予測を行う場合には、実験によりひずみ速度ごとの破壊限界を測定する必要があった。金属材料の延性は温度による影響が大きいことが知られているが、その評価対象は体積の大きなバルク材料に対する研究となっており、薄鋼板を対象とした評価は十分に行われていない。そこで、本研究では塑性変形により発生する温度上昇が材料延性に与える影響に着目し、薄鋼板における材料破壊のひずみ速度依存性を明らかにすると共に、有限要素法を用いた破壊予測の精度を向上させることを目的としている。本論文は全 6 章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章「緒言」では、本研究の背景を整理し、研究の必要性を解説すると共に本論文の構成を説明している。

第 2 章「塑性変形による温度上昇が延性へ及ぼす影響」では Dual Phase 鋼板 SPFC980Y を対象とし、ひずみ速度による加工硬化特性および局所延性の変化を明らかにすることを目的として実験を行った。高速引張試験に適した、小型の試験片を新たに設計した。従来試験片との比較を行い一様伸びおよび全伸びを従来よりも広範囲で計測可能であることを確認した。DIC を用いたひずみの測定においては、単眼カメラによる計測を用いる方法により、引張試験において十分な測定精度を得られることを確認した。これにより 2 種類のゲージ長を用い、一様伸びから局所伸びへの変遷を計測することが可能となった。その結果、局所伸びの発生が最大応力の発生と同時に生じていることを実験で確認することができた。引張試験中の温度計測は、応答速度の高速な放射温度計を用いることで、破断までの温度変化を計測することが可能であることを示した。赤外線の放射率を一定にするために面粗度を揃えることで安定した温度測定が可能であることを確認した。これにより一様変形が生じている間は温度上昇がほとんど発生していないことが明らかとなった。その後、温度上昇は最大応力の発生以降に生じ、破断直前の引張応力の急速な減少と共に上昇し、破断時に最大温度が生じることを実験により確認することができた。引張試験中に生じる温度変化に対応した恒温環境下で引張試験を実施した。これにより Dual Phase 鋼板において青熱脆性の影響で局所延性が低下することを明らかにした。ひずみ速度  $9.5\text{s}^{-1}$  時の材料温度は、塑性発熱により青熱脆性温度まで上昇しており、ひずみ速度の変化による延性の変化は、局所伸び部の温度変化により生じることを明らかにした。

第 3 章「FEM による延性挙動の検証」では加工硬化特性のひずみ速度依存性および温度依存性を導入した有限要素法を用いた解析により、引張試験における応力低下機構を再現することを目的とした。メッシュサイズの違いによる応力低下の再現性の確認を行い、計算精度に及ぼすメッシュサイズの影響を確認した。サイズの微細化による精度向上には限界があり、ポイドの発生を考慮した計算の必要性が示唆された。ひずみ速度が増加した際の塑性発熱の影響による軟化の予測精度を確認するために、恒温環境下での引張試験の再現性を確認した。室温から 523K までは各温度での実験による応力変化を精度よく再現することが出来た。一方 573K および 623K では実験よりも早期に拡散くびれが発生し、応力

の低下を生じる結果となった。実験では加工硬化による応力上昇と動的再結晶による材料軟化が釣り合うことで、くびれの発生が抑制されているものと考えられる。Swift 則に代表される、べき乗効果則を用いた加工硬化則を使用した場合は高温時の再現性に課題を残す結果となった。計算に用いる要素はシェル要素とソリッド要素による比較を実施した。シェル要素を使用した場合は、局所くびれ発生部の板厚減少が少なく見積もられるため発熱量が実際より低く見積もられる。そのため最大応力発生以降の材料軟化も小さくなるため、応力低下の再現性がソリッド要素に劣ることが確認された。これらの結果より、最大応力の発生以降から破断に至るまでの応力低下機構が、ひずみ速度により異なることを明らかにすることができた。ひずみ速度  $0.001\text{s}^{-1}$  では温度の影響は少なく、最大応力発生以降の応力低下はボイドの成長および合体機構が支配している。ひずみ速度  $0.1\text{s}^{-1}$  では温度上昇による材料軟化の影響が支配的である。ひずみ速度  $9.5\text{s}^{-1}$  ではひずみ速度上昇による加工硬化の増加と、加工発熱による軟化が同程度に作用している。ひずみ速度  $60\text{s}^{-1}$  では加工硬化の増加よりも、温度上昇による材料軟化が優位となっている。ひずみ速度  $1260\text{s}^{-1}$  の大幅な延性向上は有限要素法では再現できなかったが、動的再結晶による応力均衡が生じ延性が大幅に向上する。

第4章「破壊限界の同定」においては有限要素法を用いて材料延性の速度依存性の検証を行ない、ひずみ速度毎に異なる局所延性の変化を再現することが出来た。その結果、実機の引張試験の結果を精度よく計算することが可能となった。従来の応力のひずみ速度依存性のみを考慮した計算では、破壊までの予測精度の向上は困難なことが確認できた。速度による加工硬化の増加、温度による材料軟化、温度による局所延性の変化による影響個別の影響を確認した。温度による材料軟化が最も寄与していることが明らかとなった。これにより静的な破壊試験により求めた破壊限界を用いて、ひずみ速度ごとに異なる破壊限界の予測を行うことが可能となった。

第5章「自動車用シート部品解析への適応」では第4章で導出した Mohr-Coulomb の破壊限界を用いて自動車シート部品の破断予測解析を実施した。シェル要素を使用した場合、要素除去法による破壊部の応力集中が過少評価された。節点分離による破壊表現の必要性が示唆された。ソリッド要素を使用したプレス成形解析の結果 Mohr-Coulomb 則では破壊限界曲面の追従性が不足していることが明らかとなった。車両開発で使用するためには多様な応力状態で破壊限界ひずみを測定した上で、最適な曲面を表現可能な数式を用いた同定が必要になると考えられる。

第6章「結言と今後の展望」では、第2章から第5章から得られた知見を総括すると共に、今後に解明が望まれる課題について示した。

以上の結果より、薄鋼板の破壊はひずみ速度の影響により変化を生じることを明らかにすることができた。加工硬化の速度依存性、加工硬化の温度依存性、局部延性の温度依存性を考慮することで静的試験から求めた破壊限界を用いてひずみ速度に応じた延性破壊を高精度で予測する解析手法が示された。

その結果、本論文は、薄板材のひずみ速度に依存した延性破壊の予測において有用な知見を示すものであり、この分野に大きく貢献するものである。

この成果は、生産工学、特に塑性加工学に寄与するものと評価できる。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成 31 年 3 月 7 日