

称号及び氏名	博士（工学） 小嶋 啓達
学位授与の日付	平成22年3月31日
論文名	「薄鋼板材料の高速変形特性の 実験的評価と定式化に関する研究」
論文審査委員	主査 三村 耕司 副査 大多尾 義弘 副査 伊藤 智博

## 論文要旨

地球温暖化現象の対策として温室効果ガス排出量の削減が急務であり、世界的な取り組みが行われている。運輸部門からのCO<sub>2</sub>排出削減のため、交通流の円滑化、モーダルシフト・物流の効率化、公共交通機関の利用促進などの施策が取られているが、自動車の燃費向上は最も有効性が高い手段である。燃費向上の手段として、車両軽量化が推進されている。一方、自動車の衝突安全向上に対しても強い社会的要請があり、衝突安全基準やアセスメントは厳しくなりつつある。自動車ボディの強化のため、使用する鋼板の板厚を増やし、補強部品を追加するため、ボディ重量は増加傾向にある。そのため、高張力薄鋼板（ハイテン）の使用と構造最適化の組み合わせで、衝突安全性と軽量化の両立を達成することが求められている。

ハイテンの性能は、準静的な強度とプレス成形性で専ら評価され、衝突特性という視点では従来あまり研究がされていなかった。衝突時に鋼板は10<sup>2</sup>/s以上の高いひずみ速度で変形しており、通常の引張試験でのひずみ速度より4~5桁大きい。一般に、鋼の流動応力は正のひずみ速度依存性を持っているので、準静的な流動応力から衝突特性を直接的に推定することはできない。従来は、準静的な特性と衝突特性の経験的な相関を利用するに留まっていたが、ハイテン化が進むと従来材料での経験則が適用できなくなるという問題が生じてきている。一方、近年のコンピュータの進歩と開発期間短縮のニーズによって、自動車開発のCAE化が進められている。衝突試験は、試作車の製造および試験自体に多大なコストと時間が費やされており、CAEを活用して試

験回数を削減する経済効果が大きい。しかし、ハイテンの高ひずみ速度での機械特性が明らかでないため、CAEの精度が十分でなく、ハイテンを活用したボディー設計が十分行われているとはいえない。特に、コンピュータの進歩により、解析自体の精度が向上し、解析結果が材料データの精度に大きく依存するようになってきている。こうした背景より、衝突CAEに必要な高精度な材料データの整備が強く求められている。

高速変形挙動や材料構成式を議論する上で、広範囲のひずみ速度における応力-ひずみ曲線の取得は不可欠であり、様々な試験法が開発されてきた。Split Hopkinson Bar法などの試験法は、荷重の計測時間が応力棒の長さに制限され、低ひずみ速度の試験は原理的に実施できない。そのため、ひずみ速度依存性を調査するためには、油圧サーボ試験機などが併用されている。しかし、複数の試験機を用いると、同一の試験片形状での直接的な比較が行えない、あるいは、試験機間での較正が必要になる等の問題を生じる。谷村らが開発した検力ブロック式高速材料試験機は、広範囲のひずみ速度に一台の試験機で対応できるとともに、衝撃の専門家でない一般利用者でも容易に扱うことができる等の長所があり、系統的な信頼性が高い試験データを迅速に取得するのに有用であると期待されている。

ひずみ速度感受性を考慮した材料構成式は多く提案されているが、薄鋼板材料を取り扱う上で、いくつかの問題がある。一点目は、ひずみ速度依存性はひずみによらず一定とする構成式が多く、ひずみが大きくなるとひずみ速度依存性が小さくなるという鉄系材料に特有な性質を記述できる構成式が少ないこと、二点目は、構成式のパラメータを材料毎に実験結果から決めなければならないことである。谷村-三村モデルは、これら二点を解決した構成式であり、準静的応力-ひずみ関係が既知であれば、鉄系材料について共通のパラメータを用いて、動的な応力-ひずみ関係を記述できるものである。このような特徴は、工業的なCAE解析において極めて利便性が高いが、このモデルが汎用FEMソフトウェアに採用されたのは最近であり、解析結果の精度にどれほど寄与するかを検証が必要である。一方、自動車用薄鋼板の高速変形については、日本では1990年代に高速引張試験や薄鋼板部材の動的圧壊試験が精力的に行われたが、構成式の観点から、種々の材料を統一的に整理する試みは十分になされてはいない。

以上のように、薄鋼板の高速変形挙動の理解に対するニーズが高まっているにもかかわらず、これまでの研究成果は、CAEなど工業的に活用する上では利便性が高いとはいえない。本研究の目的は、自動車用ハイテンを含む各種薄鋼板材料の高ひずみ速度での機械特性を実験的に評価し、材料構成式の定式化を行うことによって、自動車衝突解析に供する材料データを、利用者に利便性が高い形で提供することである。

本論文は7章より構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、自動車の衝突解析の高精度化ニーズに対する背景を述べ、高精度化には流動応力のひずみ速度依存性の理解が重要なことを指摘した。高速変形試験法、流動応力のひずみ速度依存性および材料構成式に関する従来の研究について述べ、本研究で取り組む課題とアプローチを説明した。

第2章では、各種の高速変形試験法をレビューし、本研究で用いた検力ブロック式材料試験機の特徴と工業的な有用性を述べた。本試験方法で得られる応力-ひずみ曲線の信頼性を検討した。応力に重畳しているノイズの振幅、および、同一条件で繰り返し試験した時の応力の試験間バラツキは、ひずみ速度変化に伴う応力の変化量より十分小さいことを示し、応力測定がひずみ速度依存性の解析に十分な精度を有していることを確認した。試験片の平行部以外を含めて測定された変位から求めた応力-ひずみ曲線の弾性領域の勾配は、鋼のヤング率よりも大幅に小さいが、この勾配を鋼のヤング率に合わせる補正を行うと、平行部に貼付したひずみゲージから求めた応

カーひずみ曲線と一致した。したがって、適切な補正を行えば、平行部のひずみを直接測定しなくとも、信頼できるひずみ測定ができることを示した。

第3章では、極低炭素軟鋼の圧縮試験および引張試験を行い、両者を比較した。圧縮試験の流動応力は、ひずみ速度の増加に伴い増加し、加工硬化率は低下した。引張試験の一樣伸びは、ひずみ速度の増加に伴い低下した。これらは、加工硬化率が低いために、引張試験の塑性不安定条件が低ひずみで発生するようになったと考えられる。この現象を定量的に理解するために、圧縮試験で得られた応力-ひずみ曲線を用いて引張試験のFEM解析を行い、高ひずみ速度では平行部中央にひずみが局在化することが確認された。また、高ひずみ速度における加工硬化率の減少、すなわち、大ひずみ域の流動応力が相対的に低くなる現象について、試験中の温度上昇および可動転位密度の増加が一因であることが示唆された。

第4章では、自動車用鋼板をはじめとする種々の薄鋼板の高速引張特性を実験的に評価し、谷村-三村モデルを用いて定式化した。転位運動の熱活性化過程に支配される応力成分について得られた材料パラメータは、既報のパラメータとほぼ同じであり、鉄系材料について共通のパラメータを適用できるという同モデルの特徴が検証された。粘性摩擦抵抗に支配される応力成分は、準静的流動応力が高いほど小さくなる傾向があるが、すべての供試材について統一的には整理できない。また、衝突解析における破断クライテリアの設定に役立てるため、破断応力および破断ひずみを調査した。それらにひずみ速度依存性は認められなかったが、準静的引張強さの上昇にともない破断ひずみが小さくなる傾向があった。なお、破断部における3軸応力の影響を検討すると、単軸引張における破断引張応力は、見かけの破断応力より5~20%小さいと考えられた。

第5章では、固溶炭素を含む極低炭素軟鋼板と含まない鋼板について、ひずみ時効前後の高速引張特性を調査し、時効処理を行った鋼板の応力-ひずみ関係のひずみ速度依存性を記述し得る構成則を検討した。試験後の転位組織の観察結果から、動的変形では静的変形のような転位のセル組織は形成されないが、固溶炭素を含む鋼板では、ひずみ時効によって不動化した転位組織を動的変形させると弱いセル組織が認められることが分かった。このようなセルの存在が、力学的にはひずみ時効による流動応力の増加を引き起こしているものと考えられる。この観察結果に基づき、ひずみ速度履歴効果を考慮した拡張谷村-三村モデルを基本的枠組みとして、その基準ひずみ速度(=準静的ひずみ速度)における応力-ひずみ関係に、ひずみ時効による強度上昇分を取りこむ手法を提案した。提案した構成式に基づく応力-ひずみ関係のシミュレーション結果は実験結果とよく一致し、提案した構成則の妥当性が検証できた。

第6章では、極低炭素軟鋼板をスポット溶接して作製した中空部材の動的3点曲げ試験を行い、荷重-変位曲線および座屈形態について、複数の材料モデルを用いた数値解析結果と実験結果を比較検討した。荷重-変位関係は、谷村-三村モデルは全変位において実験と良く一致した。一方、Cowper-Symondsモデルは小変位のみで一致し、ひずみ速度依存性を考慮しないモデルは全変位において荷重が実験より低かった。座屈領域の幅は、谷村-三村モデルが最も狭く、次いでひずみ速度依存性を考慮しないモデルが狭くなっており、実験結果は谷村-三村モデルと良く一致した。谷村-三村モデルは高ひずみ速度域での加工硬化率が著しく減少する仕様のため、ひずみの局在化が顕著になる現象を再現できたと考えられる。供試材そのものの高速引張試験から求めた谷村-三村モデルパラメータと、鉄系材料共通の推奨パラメータのいずれを用いても、解析結果に大きな差はなかった。したがって、供試材のひずみ速度依存性を調べることなく、共通パラメータを使用した解析を行えば、精度良い結果が簡便に得ることができると考えられる。

第7章では、本研究で得られた成果を総括し、今後の課題を述べた。

## 審査結果の要旨

本論文は、工業的に非常に重要な薄板鋼板材料の変形特性の鋼特有のひずみ速度依存性の把握と、その簡便かつ的確な定式化、さらに、その数値解析への応用に関する研究をまとめたものであり、次のような成果を得ている。

- (1) 幅広いひずみ速度域での薄板試験片の動的引張試験に必要な検力ブロック法について示し、この試験法で得られる応力-ひずみ関係の信頼性について検討した。試験片の平行部以外の剛性に起因するひずみの誤差を補正する関係式を提示し、この補正式の適用下で、対象ひずみ速度域において信頼できるひずみの測定が可能となることを示した。
- (2) 極低炭素軟鋼を例に、検力ブロック法に基づく動的引張および圧縮試験を実施し、得られた結果より、ひずみ速度の上昇に伴い流動応力は増加するものの、応力-ひずみ関係における加工硬化率は減少する「鋼に特有のひずみ速度依存性」を確認した。また、この加工硬化率の低下が、局所断熱変形に伴う温度上昇と、高ひずみ速度域での可動転位密度の増加に起因することを示唆した。
- (3) 種々の薄鋼板材の高速引張特性を実験的に評価した結果、過応力のひずみ速度に対する勾配である無次元化ひずみ速度感受性と、各鋼板材の準静的流動応力との間に反比例の関係が成立することを示し、対象とした薄鋼板材全体に適用可能なひずみ速度依存性構成関係式を定式化した。
- (4) 薄板製品の塗装焼付け工程等で生じるひずみ時効に対するひずみ速度依存性の発現機構を、転位組織の観察を通して解明し、前項の構成関係式の一部を拡張することによって、この効果の記述が可能であることを示した。
- (5) 提案した構成関係式の実問題への応用性を検証するため、中空部材の動的三点曲げ試験を実施し、得られた実験結果と、提案した構成モデル、および、従来モデルに基づく動的 FEM の解析結果を比較したところ、提案モデルに基づく解析結果が、従来モデルに基づく解析結果より、荷重-変位関係、変形の局所化形態とも良く一致し、応用性に優れていることを示した。

以上の研究成果は、材料力学・衝撃工学分野に於いて、薄板鋼板材料の変形特性のひずみ速度依存性の把握と定式化に重要な知見を与えると共に、その応用としての数値解析/設計の確立に大きな貢献を為すものであり、当該分野の発展への寄与が大である。また、申請者が自立して研究活動を行うに必要な能力と学識を有することを証したものである。

学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。