

# 論文の要旨

題目 高張力鋼板の円形および楕円形穴広げ挙動に及ぼす異方性発展の影響  
(Effect of anisotropy evolution on circular and oval hole expansion behavior of  
high-strength steel sheets)

氏名 鈴木 利哉

本研究は、自動車の衝突性能向上や燃費向上のための車体軽量化を進めるために車体構造部品への適用が年々拡大している高張力鋼板のプレス成形性、特に伸びフランジ成形性に関する課題改善の一助とするため、伸びフランジ成形の代表的な評価試験手法である穴広げ成形における薄鋼板の変形挙動に及ぼす材料特性の影響について、穴広げ試験による実験的検討および有限要素シミュレーションによる解析的検討の両面から考察を実施した。供試材には材料特性の面内異方性を比較的強く示す高張力熱延鋼板 JSH440W と JSH590R を用い、特に、これまでの先行研究での知見が少ない加工硬化特性の異方性、すなわち異方硬化の影響について検討を行った。材料特性の異方性を把握するための評価試験としては、面内引張方向を細かく変化させた単軸引張試験、二軸引張試験、および大ひずみ域での加工硬化特性を評価するための液圧バルジ試験と近年提案された新たな評価手法である面内引張-曲げ試験を実施し、両供試材の材料特性の異方性を詳細に調査した。得られた材料特性の異方性を穴広げ成形シミュレーションにおいて表現するため、3種類の異方性降伏関数 (Hill48- $r$ , Yld2000-2d, 6次多項式型) と近年提案された異方硬化モデルによる再現性について評価を実施し、各種異方性降伏関数によるその予測精度を検証した。また供試材 JSH440W, JSH590R を用いて、円形穴および楕円形穴を対象とした円筒穴広げ成形試験を実施し、穴縁周辺の局所変形挙動に及ぼす材料異方性の影響について考察した。次に先に述べた異方性降伏関数と異方硬化モデルを適用して材料異方性を考慮した穴広げ成形シミュレーションによる検討を実施し、円形および楕円形穴広げ成形の局所変形挙動に及ぼす材料異方性およびその発展の影響について考察した。さらに、これらの検討結果を踏まえて追加の単軸引張試験および穴広げ成形試験による詳細検討を実施し、材料異方性を強く示す本供試材の穴広げ成形における局所変形メカニズムについて推定を行った。

以下に本論文の要旨を示す。

第1章では、自動車および自動車用薄鋼板を取り巻く環境と課題と共に高張力鋼板の穴広げ成形に関するこれまでの検討事例について記し、本研究の目的と論文の構成について述べた。

第2章では、材料特性の面内異方性を比較的強く示す高張力熱延鋼板 JSH440W と JSH590R を対象に、その異方性を把握するための評価試験として面内引張方向を最大7方向まで変化させた単軸引張試験、二軸引張試験、液圧バルジ試験、および面内引張-曲げ試験を実施し、両材料の材料特性の異方性を詳細に調査した。その結果、両材料共に  $r$  値の異方性が強く、特に JSH590R で顕著であること、流動応力の異方性は JSH590R で強く示すが JSH440W では弱いことが明らかとなった。また応力-ひずみ曲線の方向依存性、すなわち異方硬化特性については JSH590R の大ひずみ域で顕著であり、圧延 60° 方向で非常に低い加工硬化率を示すことが判明した。

第3章では、第2章において取得した材料特性の異方性を3種類の異方性降伏関数 (Hill48- $r$ , Yld2000-2d, 6次多項式型) と異方硬化モデルにより再現するため、各モデルのパラメータ同定を行うとともに、その予測精度を検証した。その結果、3種類の異方性降伏関数による  $r$  値の予測精度は両供試材共に良好であること、流動応力についてはパラメータ同定に応力値が考慮されない Hill48- $r$  モデルを除き Yld2000-2d モデルおよび6次多項式型モデルでは精度良く予測できることが確認された。また各種異方性降伏関数により計算された降伏曲面については、Hill48- $r$  モデルでは両材料共に圧延 90° 方向の誤差が大きく、また JSH590R では等二軸引張変形域での誤差も大きい、Yld2000-2d モデルおよび6次多項式型モデルでは試験結果と良好に一致することが確認された。さらに6次多項

式型降伏関数と異方硬化モデルの組み合わせにより、JSH590R の大ひずみ域での異方硬化挙動を精度良く計算できることを確認した。特に JSH590R で特徴的である圧延 60° 方向の加工硬化率の極端な低下も良好に再現することができた。

第4章では、本供試材を用いて円形穴および楕円形穴を対象とした円筒穴広げ試験を実施し、穴縁周辺の局所変形挙動に及ぼす材料異方性の影響について考察した。その結果、まず円形穴広げ成形では両材料共に圧延方向に破断が発生し、さらに圧延 90° 方向にも板厚減少が見られた。これには  $n$  値および  $r$  値の面内異方性が強く影響しており、特に圧延方向での破断発生には圧延 90° 方向で  $n$  値が最も低いことが影響した可能性が高いと推察される。この理由は本試験での破断が内割れ傾向となっており、平面ひずみ変形下における変形挙動に対して  $n$  値が支配的であることに起因していると考えられるためである。楕円形穴広げ成形では、材料特性の面内異方性を強く示す JSH590R の楕円形穴の方向が圧延 45° 方向に位置する条件において、破断の方向が圧延 45° 方向から圧延方向側へ傾斜する傾向を示した。この破断挙動も内割れ傾向であり、平面ひずみ変形下での  $n$  値の異方性の影響が大きいと推察される。一方、相対的に材料異方性が小さい JSH440W では、楕円形穴方向が圧延 45° 方向の条件でも破断方向は楕円形穴の方向と一致し、これは材料異方性よりも楕円形穴の先端形状による応力集中効果の影響が上回ったものと考えられる。両供試材共に、楕円形穴の方向が圧延方向に一致した条件において成形限界が最も低い結果となった。これは圧延 90° 方向の  $n$  値が最小値であり、また  $r$  値も圧延方向に次いで極小値を示すことが原因と考えられる。

第5章では、第3章においてパラメータ同定した3種類の異方性降伏関数と異方硬化モデルを用いて材料異方性を考慮した穴広げ成形シミュレーションによる検討を実施した。その結果、円形穴広げ成形における穴縁周辺の局所変形挙動には、初期穴径が大きな条件では3種類の異方性降伏関数と等方硬化モデルの組み合わせにより穴縁周りの板厚ひずみ分布を良好に予測することができたことから、3種類の降伏関数で共通して予測精度の良好な  $r$  値の面内異方性が主に支配的であることが判明した。初期穴径が小さな条件では流動応力の異方性および異方硬化特性が大きく影響することが判明し、特に JSH590R では鋼板端部から内側でのネッキングの起点も含めた局所変形挙動を異方硬化モデルでのみ精度良く予測できたことから、異方硬化特性の影響が支配的であることが判明した。また楕円形穴広げ成形においても JSH590R の楕円形穴の長径方向が圧延 45° 方向に位置した条件で、破断に繋がるネッキングの方向が圧延 45° 方向から圧延方向側に傾斜して発生するという特有の現象を異方硬化モデルでのみ再現できたことから、本条件でも異方硬化特性の影響が大きいことが判明した。また本章での検討結果から、穴広げ成形における局所変形挙動の正確な予測のためには異方硬化モデルの適用が極めて重要であることが示された。

第6章では、第5章までの検討結果を踏まえて、面内 19 方向単軸引張試験および成形前期から後期までの穴広げ成形試験を追加して詳細検討を実施し、材料異方性を強く示す本供試材の穴広げ成形における局所変形メカニズムについて推定を行った。その結果を以下に示す。円形穴広げ成形では、①本供試材は顕著な  $r$  値の面内異方性を示し、この影響で成形前期にて圧延方向と 90° 方向にひずみ集中が生じ、その後のひずみ発達の方向が限定される。②JSH590R は強い異方硬化特性を示すため、その影響により成形後期において圧延方向のネッキングが発生し破断に至る。初期穴径が大きい場合は、成形前期でのひずみ発達方向の影響が緩和され、異方硬化特性に応じて圧延方向と 90° 方向以外にも局所的なひずみ集中が現れる。③JSH440W では、 $n$  値と流動応力の異方性がひずみの局所化に影響しているものと考えられる。ただし本研究の取り組みでは異方硬化特性の有無とその影響については明確ではない。また楕円形穴広げ成形では、④楕円形穴の傾斜方向が 45° の条件において、 $r$  値の異方性が相対的に大きい JSH590R では、この影響で成形前期において楕円形穴の方向から 90° 方向側に傾斜した方向にひずみの局所化が生じる。成形後期になると大ひずみ域での異方硬化特性の影響で板厚ひずみは圧延方向側に傾斜してネッキングが発生し、その後破断に至る。⑤JSH440W の  $r$  値の異方性は JSH590R に対して相対的に小さいため、成形前期から板厚ひずみは楕円形穴の方向に集中し、そのままネッキング・破断に至る。

第7章では、本研究により得られた結果を総括した。