

## 論文の内容の要旨

氏名：常見 祐 介

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：薄鋼板における異方硬化挙動に関する研究

板材成形シミュレーションの多くは巨視的連続体力学の枠組みで構築された現象論的材料モデルが用いられている。現象論的材料モデルは実用性の高いものである反面、その理論に材料の変形挙動をもたらす具体的な物理機構や根拠を持たないため、外挿的な予測能力を基本的に有しない。そのため、未知の変形挙動の予測などに使用するのは必ずしも適切ではない。また、複雑な現象を表現しようとする、構成式が極めて煩雑になってしまう傾向にあり、材料パラメータを決めるための実験コストも増大する。これらの課題に対し、変形挙動の物理機構を明らかにし、それをモデル化することが普遍的なアプローチとなり得る。

板材成形では通常の引張試験と異なり、多軸応力下の変形挙動を正確に表現することが重要となる。そのためには多軸応力下での材料の加工硬化挙動とその機構を明らかにする必要がある。特に  $r$  値を高めた深絞り用鋼板において、異方硬化と呼ばれる単軸と 2 軸で加工硬化の程度が異なることが知られている。異方硬化は集合組織や転位のセル構造などによって引き起こされると考えられているが、詳細は不明である。そこで本研究では、実験、および、結晶塑性解析を用い、その物理機構について検討した。

供試材は、冷間圧延-連続焼鈍により製造された板厚 1.6mm の 270MPa 級深絞り鋼板とした。十字形試験片を用いた 2 軸引張試験を実施した。応力比は  $\sigma_{xx} : \sigma_{yy} = 4:1, 2:1, 4:3, 1:1, 3:4, 1:2, 1:4$  の 7 通りとした。また、JIS5 号試験片を用いた圧延方向および圧延直交方向の単軸引張試験により、真応力比  $\sigma_{xx} : \sigma_{yy} = 1:0, 0:1$  における加工硬化特性を測定した。等塑性仕事面を算出するための基準となる塑性ひずみ  $\epsilon_p$  は 0.005, 0.01, 0.02 および 0.04 とした。応力比が 4:1~3:4 の範囲において、得られた等塑性仕事面は  $0.005 \leq \epsilon_p \leq 0.04$  の範囲で変形の進展とともに外側に膨張する異方硬化挙動を示した。特に、応力比が 1:1 となる等 2 軸引張近傍で顕著な異方硬化挙動を示した。

Advanced lamel モデルおよび結晶塑性有限要素解析により異方硬化挙動の再現を試みた。Advanced lamel モデルによる解析は Virtual Experimentation Framework ソフトウェアによって実施した。結晶方位情報は実験により取得した Orientation Distribution Function マップを再現するように決めた 5000 の結晶粒とした。加工硬化特性は圧延方向の引張試験より材料パラメータを同定した。実施した Advanced lamel モデルによる解析では異方硬化挙動は再現しなかった。結晶塑性有限要素解析では転位の増殖と飽和を評価した Hoc らの開発した結晶塑性モデルを用いた。Electron Backscatter Diffraction Pattern 解析により 200  $\mu\text{m}$  四方の領域を 1  $\mu\text{m}$  ピッチで測定し、得られた結晶粒形状、方位から解析対象となる代表体積要素を得た。応力比が 1:1 に近づくほど等塑性仕事面は膨張する傾向を示しており、実験の結果を定性的に再現していることがわかる。異方硬化量  $X$  は 1.051 となり、実験より得られた 1.057 と同程度であることが分かる。これらの結果より結晶塑性有限要素解析により、異方硬化挙動が再現することが分かった。

鉄鋼材料の異方硬化挙動については先行文献の調査により集合組織の依存性があることが推定された。また、異方硬化挙動は結晶塑性有限要素法により発現した。このことから、その物理機構は数値解析で表現できるものにあると考えた。すなわち、結晶塑性有限要素解析は結晶塑性モデルにより転位の増殖、切り合いによる加工硬化や有限要素法により結晶粒間の相互作用を定量的に評価できる。したがって、異方硬化の機構は、初期の結晶方位分布による結晶粒間の相互作用による粒内不均一性や各結晶の加工硬化に強い影響を与える活動すべり系の相互作用の影響によるものと推察される。一方で、Advanced lamel モデルでは異方硬化は発現しなかった。結晶塑性有限要素解析と Advanced lamel モデルの大きな違いの一つにすべり系間の相互作用、つまり、潜在硬化がある。そのため、異方硬化挙動の要因の一つとして潜在硬化が重要な役割を担っている可能性が推定される。そこで、異方硬化の物理機構として集合組織と潜在硬化の役割について考察する。

仮想組織を用いた結晶塑性有限要素解析により、集合組織の影響を調査した。仮想集合組織はランダ

ム組織，板厚方向に{111}，{001}，{101}，{214} および{324}の集合組織とする6種類とした．異方硬化量Xは{111}集合組織が最も大きく，等塑性仕事面が膨張する一方で，{101}や{214}集合組織は1より小さく，等塑性仕事面は収縮する傾向を示すことがわかる．これより，実験で観察された異方硬化挙動は深絞り用鋼板の特徴である{111}集合組織であるγファイバー，もしくは{001}集合組織が多く存在することが一因となり，異方硬化が発現したと考えられる．

潜在硬化と異方硬化の関係を考察するために，発生した潜在硬化の大きさを示す指標として活動したすべり系の数に着目した．実験結果を再現した結晶塑性有限要素解析の結果より活動したすべり系の数を算出した．変形の初期には単軸引張と等2軸引張で活動したすべり系の数は同じだが，変形とともに等2軸引張変形時に活動したすべり系の数が大きく増加することがわかる．この活動したすべり系の数が大きいほど，潜在硬化が発生しやすいと考えられる．一般に，硬化代は自己硬化よりも潜在硬化の方が大きいことが知られており，より潜在硬化が現れやすい等2軸引張変形の方が単軸引張変形に比べて大きな加工硬化が発生したと考えられる．すなわち，深絞り鋼の塑性ひずみ数%以下での異方硬化挙動は変形様式の違いによって活動したすべり系の数が異なるため，等2軸引張では転位の切り合いによる潜在硬化がより生じやすいことが要因の一つであることが示唆された．つまり，深絞り用鋼板は{111}集合組織が発達しており，その{111}集合組織は単軸と二軸で転位の切り合いによる硬化量に差があるため，異方硬化が起こることを明らかにした．

本研究によりフェライト系の鉄鋼材料の異方硬化挙動は結晶方位，すなわち，集合組織の違いにより発現すると推定される．集合組織によって単軸と2軸で活動するすべり系の数が変わり，それによって引き起こされる潜在硬化量が異なるため，異方硬化が生じると考えられる．特に今回実施した深絞り用鋼板では{111}集合組織であるγファイバー，もしくは{001}集合組織が多く存在するため，等2軸引張近傍が張り出す異方硬化挙動が発現したと考えられる．今回評価できた集合組織は一部であり，体系的に集合組織と異方硬化の関係を理解することで，材料の変形機構の物理的理解に基づく材料モデルの開発を行うことが可能となる．このモデルを用いることで，例えば集合組織情報をインプットすることで，高精度に異方硬化挙動を再現できると考えられる．つまり，多数の2軸引張試験を行う必要がなくなり，試験コストの削減が期待される．また，用途に応じて異方硬化挙動をコントロールした材料開発に大きく貢献することが期待される．