

なるほど 薄鋼板

Step 1 材料変形を理解するマクロな視点とミクロな視点

不良の原因を探るために、マクロな視点での理解で十分な場合と、ミクロな視点が不可欠な場合がある。

1 マクロな視点

図1に示すように薄鋼板を拡大しても均質な材料であり、加えられる力（応力）と変形（ひずみ）との一定の関係の下で、材料が加工されると取り扱うのがマクロな視点である。また図2に示すように、引張試験で両者の関係が実験的に得られたとき、ある変形（ひずみ）を与えるに必要な力（応力）を見積もる、あるいはある力（応力）を与えたときに発生する変形（ひずみ）を見積もることができる。実際の加工では3次元的に取り扱う必要があり、塑性力学を用いて計算しなければならない。

簡単な形状の場合は解析的な解が得られるが、多くの複雑な形状の場合には、有限要素法(FEM)を用いた計算機シミュレーションが駆使される。この際、材料の特性は、材料の変形抵抗（強度、加工硬化）や変形の異方性などを数学的に表現した材料構成式と呼ばれる数式が導入される。材料構成式には、表1に示すような力学的特性を表すさまざまな特性が含まれる。

マクロな視点は必ずしも数学的な扱いだけでなく、実験的なアプローチもある。たとえば、さまざまな材料を準備（試作）して以下に取り組む。

- ①引張試験をして特性を調べる
- ②モデル成形試験や実物成形実験により成形の可否および優劣を評価する
- ③計算機シミュレーションを行い、故意に材料特性を表すパラメータを変化させて成形性の評価をする

これらの結果を比較検討して相関性を調べるだ

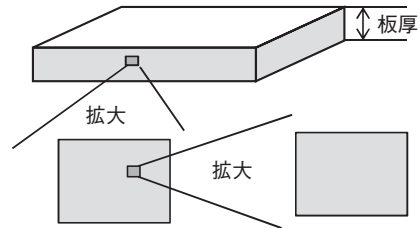


図1 均質な材料（マクロな視点）

どれだけ拡大しても均質な材料と見なし、作用した力と変形の間関係を追求する立場

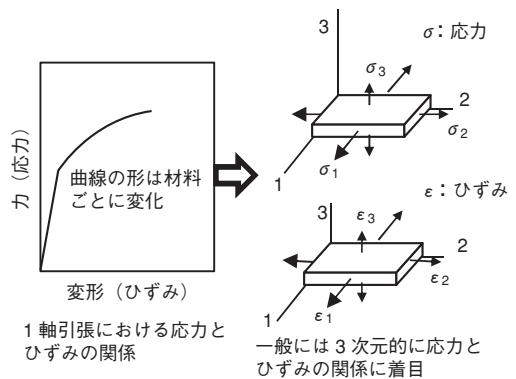


図2 応力とひずみの関係

引張試験などで得られる応力とひずみの関係を塑性力学で3次元変形に拡張して理解する

表1 材料構成式

材料の強度、加工硬化特性、変形の異方性などを数式モデル化して材料変形に及ぼす材料特性の影響を解析する

材料が塑性変形を開始する条件を表す式

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \dots) = Y_0$$

材料が変形に伴い硬化したり、変形の変化するときに軟化したりする特性などを表す式

$$Y = g(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \dots)$$

応力とひずみ(増分)の関係(方向と配分)を表す式

$$(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \dots) = h(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3 \dots)$$

さまざまな関数形 f, g, h が提案されている。金属の種類により、どんな関数形が精度が良いかが変わる。関数の中に含まれるパラメータは材料ごとに引張試験、特殊な材料試験などをして定める

けでなく、詳細にひずみ分布を調べ、成形メカニズムを理解することが大事である。

プレス加工性を代表的な5項目に分類し、主な材料特性と単純な相関性を調べると、表2のようにまとめられる。マクロな視点で見た最も単純化した切り口での結果であるが、前項で述べたように材料特性を詳細に考慮した材料構成式を導入すれば、精度の高い成形性の検討が可能になる。

2 ミクロな視点

実際の材料は冒頭で述べたような均質なものはほど遠く、模式的に図3、4に示すようにその微細構造は複雑で不均一なものである。薄鋼板の断面をよく研磨して軽く腐食させ、光学顕微鏡で拡大して見ると、直径が10~20 μ m程度の結晶粒で構成されていることがわかる。さらに薄い薄膜まで研磨して電子顕微鏡の世界まで拡大すると、1つの結晶粒の中は一定の方向に規則正しく鉄原子が並んだ結晶格子から構成されていることがわかる。鉄は多結晶体である。

さらによく調べると、原子の並び方が乱れた部分(原子空孔や転位：後出)や、炭素と鉄あるいは他の元素との化合物(析出物)、非金属介在物などが内在していることがわかる。また、さまざまな元素が鉄の格子の中に溶け込んだり、鉄原子に置き換わって存在している(固溶元素)。

乱暴な言い方をすれば、プレス加工性と材料との関係の7割は、均質な材料としてのマクロな力学的な性質で理解することができる。したがってこれらの金属学的な要素が、主に引張試験で得られる力学的な性質とどんな関係にあるかを理解することがまず大事である。そして残り3割として、金属学的な要素が直接的にプレス加工における材料変形とどう関わるかを理解する必要がある。

表2 材料特性と成形性の相関

変形モードにより強く影響を受ける材料特性が異なる。本表は最も単純化してまとめた相関関係である

変形モード(不良)	降伏点	引張強さ	伸び	n 値	r 値
深絞り性(割れ)					◎
張り出し性(割れ)			○(一様伸び)	◎	
伸びフランジ性(割れ)			◎(局部伸び)	○(冷延材)	
曲げ性(割れ)			◎(局部伸び)	○	
曲げ性(形状精度)	○	◎			
打ち抜き性(かえり)			◎(局部伸び)		

◎：強い相関あり、○：相関あり

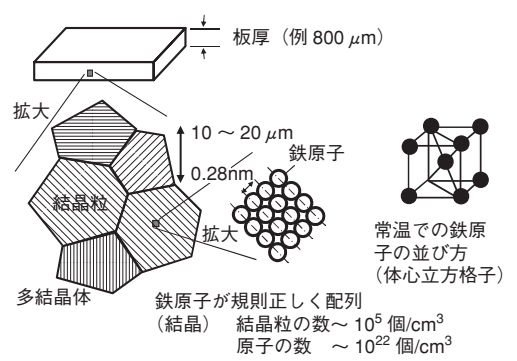


図3 材料のミクロな構成(1)

薄鋼板を拡大して観察すると、鉄原子が規則正しく配列した結晶粒が集めた多結晶体であることがわかる

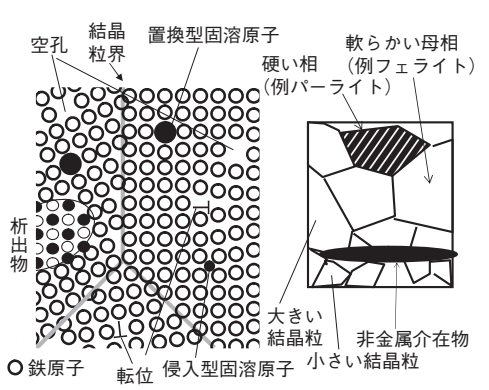


図4 材料のミクロな構成(2)

ミクロに調べるとさまざまな原子の配列の乱れや固溶している他の原子、硬い相、析出物、介在物など多数の異なる相が存在する