

プレス成形 CAE 解析の動向と 精度向上への取組み

JFE スチール(株)
石渡亮伸*

初めて有限要素解析ソフトウェアに触れたのは約 30 年前の大学時代で、授業で三角形要素による梁の弾性たわみの計算を、先生自作の BASIC プログラムに数要素分の節点の座標、要素設定、境界条件などの数値入力し実施したことを覚えている。大学院を卒業後、会社に入ってから、NIKE 3D や MARK を使って 2 次元の圧延解析を大型計算機で行っていたが、その後エンジニアリングワークステーション (EWS) で行うことになった。この頃の計算は現状の PC より何十倍、何百倍も速度が遅いものであった。2000 年代に

入り、社内の異動によりプレス成形解析にかかわるようになったが、このころも EWS を使用していた。その後 PC の高速化とソフトウェアの進歩により複数台の PC を用いた並列計算化や CPU のマルチコア化により有限要素解析が格段に早くなってきたことは、多くの人のよく知るところである。

このような計算機の高速化・大容量 (メモリ) 化により、計算時間とのトレードオフであったメッシュサイズを細かくすることができるようになり、割れしわ評価につながる板減予測の精度が向上してきた。このような計算の高速化、高精度化により金型設計にプレス成形 CAE 解析がなくてはならないものとなってきている。

もちろん、高精度化は計算機の高速化だけによるものではなく、解析ソフトウェアそれ自体の高精度化によるものでもある。特に顕著と感じられるものは、スプリングバックの予測精度の向上であろう。J-STAMP や DYNA-FORM などプリポストソフトウェアのソルバーである LS-DYNA ではプレス下死点での応力の開放方法が大幅に改善され、実プレス結果に近い計算結果が得られるようになった。

一方、弾塑性力学の観点からは、鋼板、アルミ板などの被加工材の材料変形に関するモデル化においても各段の進歩があった。1 つは塑性異方性の考慮方法の高精度化であり、もう 1 つは変形経路が変化した場合に発生するバウシinger 効果の考慮の高精度化である。

これらの材料モデルによる高精度化について次

* (いしわたり あきのぶ) : スチール研究所薄板加工技術研究部 主任研究員
〒260-0835 千葉市中央区川崎町 1
TEL : 043-262-2966 FAX : 043-262-2031

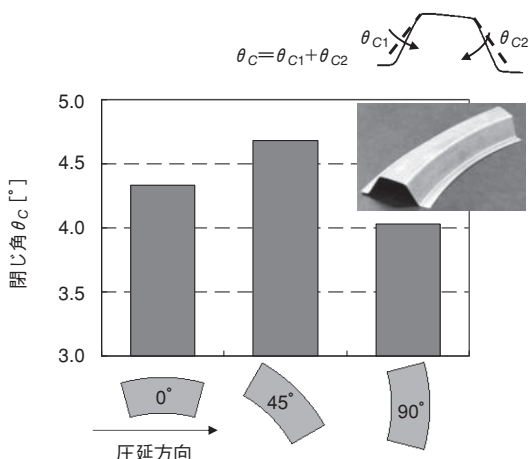


図1 板の切り出し方向と板端部の閉じ角

項で詳細に解説する。さらに、「プレス成形 CAE 解析の精度向上への取り組み」の項ではプレス成形解析関連で近年研究・開発がなされているものの、まだ一般のプレス成形解析には取り込まれていない、または取り込まれつつある話題について解説する。また、「プレス成形 CAE 解析の新たな活用方法」では成形 CAE の高精度化ではなく、新たな活用方法について述べる。

材料モデルの高精度化動向

1. 塑性異方性の考慮方法による高精度化

塑性異方性とはなにか？プレス業務に従事される方なら、割れ、しわ、スプリングバックが異なる現象であることをご存じと思う。鋼板からの切り出し方向により端部の口開き角のスプリングバックが異なる例を図 1 に示す。ここでは塑性異方性が解析のなかでどのように扱われているかと、近年市販のソフトウェアに取り込まれてきたことを解説する。

材料の変形特性の定式化はすべて試験結果を再現するために定式化されたものであり、各種の実験によって妥当性が認められた仮定に基づき作成した実験式である。プレス成形解析を実施したことがある方はご存じとは思いますが、有限要素解析において材料の塑性異方性は降伏関数により表現されている。降伏関数は有限要素解析の前処理ソフトウェアでは図 2 のように σ_x - σ_y 軸上で楕円形状として表示されているが、本来降伏関数は x 方向応力、y 方向応力の他、z 方向応力、せん断応力 xy 、 yz 、 zx の 6 の応力成分と塑性異方性を示す材料パラメータにより表現される関数であり、多くの関数が提案されている。ここで x 軸は圧延方向、y 軸は圧延直角方向、z 軸は板厚方向とするのが一般的である。しかしながら、薄板のプレス成形解析では板厚方向の応力が作用しないと仮定でき、シェル要素という板厚方向の応力を考慮しない解析が多く行われ、降伏関数も板厚方向の応力は考慮していない。

降伏関数の役割の 1 つとして、初期降伏、弾性から塑性に入った時点を与えることである。つまり降伏関数が与える境界（降伏曲面と呼ぶ）の中にあれば、弾性変形であり、初期降伏曲面に到達

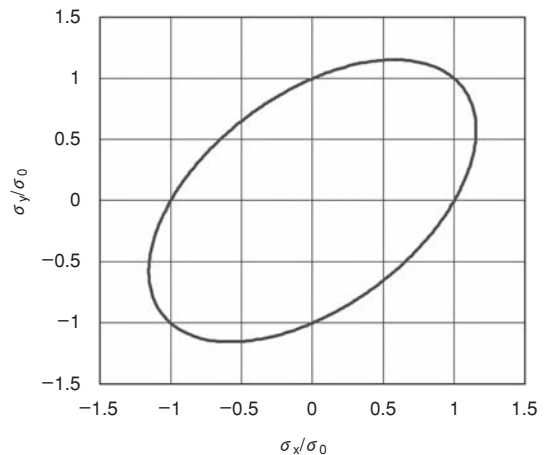


図 2 降伏曲面の例（等方性：Mises 降伏関数）

した時点で塑性変形が始まるということである。従来、商用の有限要素解析においては、Hill らによる 1948 年の異方性降伏関数¹⁾が一般であり、圧延方向、圧延直角方向、45 度方向の 3 方向の r 値を入力することで塑性異方性を考慮することができ、非常によく使用されてきた。ところで応力によって定義される降伏関数を、なぜ応力ではなく、3 方向の r 値を与えることで降伏関数の材料パラメータを求めることができるのか？実は関連流れ則、すなわち「塑性ひずみの増加方向は降伏曲面に垂直方向と一致する」という仮定と、板厚方向と引張垂直方向の塑性ひずみ比（r 値）は板厚方向と引張垂直方向の塑性ひずみ増分比と等しいという仮定とさらに体積一定則により、3 方向の r 値から Hill の降伏関数の材料パラメータが決定されている。

ところで、降伏関数のパラメータを決めるための材料試験として、従来は単軸引張試験から前述した r 値や単軸応力下の応力や液圧バルジ試験により等二軸応力を調べる試験が行われてきた。桑原らは 1999 年にスリットの付いた十字形状の試験片による二軸引張試験方法を提案²⁾し、二軸応力下の鋼板やアルミ材の等塑性仕事点を求めている。硬化則については次節で述べるが、等方硬化則すなわち「降伏曲面は加工硬化（塑性仕事の増加）により原点を中心に相似的に大きくなる」という仮定をすると、等塑性仕事面（点を繋いだ面）は各塑性仕事時点の降伏曲面を表していることになり、等塑性仕事面と降伏曲面は一致する。