

# 計測データと連携した CAE の製造工程への活用に関する研究

機械情報システム課 中村陽文、吉江真太郎

## 1. 緒言

アルミニウム合金は、軽量・高強度であることに加えて、極めて優れたリサイクル特性を有する点等から、輸送用機器への使用が増えているが、ヤング率が鋼材に比べて小さいことからプレス成形の際のスプリングバックが大きく、CAE を用いた成形予測が必要とされている。一方、近年では、計測値を用いて実現象を計算機上で再現するデジタルツインに注目が集まっている。デジタルツインで将来予測を行う際、物理現象を基にした計算を行う CAE と組み合わせることで精度を高められる可能性がある。そこで、プレス成形の CAE で用いる材料物性値や境界条件等のパラメータを計測値を用いて修正するデジタルツインモデルの構築が考えられる。本研究では、アルミニウム合金のプレス成形を対象として、CAE で用いるパラメータを計測データから同定することによって実際の現象を再現可能なシミュレーションモデル作成手法の開発を目指す。一方、パラメータの同定の際に、有限要素法によるプレス成形シミュレーションの繰り返し計算を行うと、計算時間が長いことが問題となる。そこで、有限要素法によるシミュレーションを再現できる計算時間の短い代理モデルを事前に作成しておく方法が考えられる。今年度は、有限要素法によるシミュレーションを代理モデルで近似し計算高速化を実施した内容について報告する。

## 2. 実験方法

Fig. 1 に、本研究で対象とする曲げ加工の外観、およびそれを再現する有限要素法によるシミュレーションモデルを示す。試験片は幅 30 mm 長さ 120 mm 厚さ 2 mm の A5052-H34 アルミニウム合金板であり、支点間距離 30 mm の支持台(半径 5 mm 円柱)に置かれ、中央の圧子(半径 5 mm 円柱)により 15 mm/min の速度で 15 mm 押し込まれ

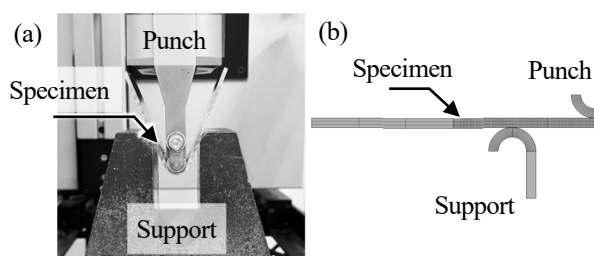


Fig. 1 (a)Experimental appearance and (b)FEM model of the bending

る。有限要素モデルは対称性を考慮した 2 次元の 1/2 モデルとし、要素は 4 角形 2 次要素とした。有限要素法において、硬化則は式 (1) で示される Voce の式を用いた。

$$\sigma = Y + A(1 - \exp(-b\varepsilon_p)) \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon_p$  は塑性ひずみであり、 $Y$ 、 $A$ 、 $b$  は材料定数である。式(1)に含まれる材料定数、ヤング率  $E$  および接触部の摩擦係数  $\mu$  を、計測データからの予測を行うパラメータとした。代理モデルは、クリギング法<sup>(1)</sup>を用いて作成した。クリギング法は応答曲面法のひとつであり、統計的手法で関数を近似する。Table 1 に、代理モデル構築に使用する 5 個のパラメータの設定範囲を示す。変位を 57 分割し、各変位の荷重を出力変数とし、変位増分毎の近似関数を求めることで全体の荷重-変位曲線を再現することとした。ラテン超方格法でサンプリングしたサンプル点のうち、代理モデル構築に用いるサンプル点数は 75% とし、残りは代理モデルが有限要素法によるシミュレーションを再現できているか判断するためのテスト用サンプル点とした。サンプル数 20、60 および 100 個の 3 パターンで代理モデルを構築し、テスト用サンプル点で自由度調整済み決定係数の比較を行った。有限要素法によるシミュレーションおよび代理モデル作成は、それぞれ COMSOL Multiphysics 5.6(COMSOL) および MATLAB 2021(The MathWorks)を用いて行った。

## 3. 実験結果および考察

Fig. 2 に、実験、ならびに各パラメータを Table 1 に示される範囲の中央値として入力した場合における有限要素法で得られた荷重-変位曲線を示す。なお、同図には変位が 15 mm 時および荷重値が 0 N となった時の有限要素モデルの変形図および曲げ角度も示した。Fig. 2 に示されるように、変位が最大に達した後、荷重が 0 N に減少する際に曲げ角度は減少しており、スプリングバックを再現

Table 1 Ranges of parameters

Parameter	Min.	Max.
$E$ [GPa]	56	84
$Y$ [MPa]	172	258
$A$ [MPa]	156	234
$b$	13.6	20.4
$\mu$	0.12	0.18

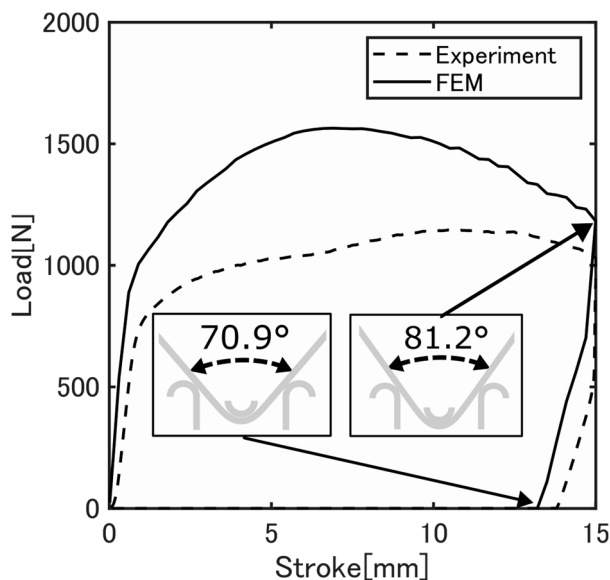


Fig. 2 Load and stroke curve of the experiment and FEM simulation

できていることがわかる。なお、荷重が 0 N となった時の実験における曲げ角度は 85.7°であった。現状、有限要素法の結果と実験値は異なる値となっており、材料定数および摩擦係数を修正する必要があることがわかる。

クリギング法で作成した代理モデルについて、有限要素法の再現性を評価する目的で、テスト用サンプル点を用いて自由度調整済み決定係数を計算した。その結果、自由度調整済み決定係数は、サンプル数が 20、60 および 100 個の場合において、それぞれ 0.994、0.997 および 0.999 となり、サンプル数の増大に伴い決定係数は向上する傾向が認められた。Fig. 3 は、サンプル数 100 個の場合において、テスト用サンプル点からランダムに選択した 5 点での有限要素法および代理モデルの荷重-変位曲線を示したものである。Fig. 3 に示されるように、代理モデルは有限要素モデルをよく近似できていることがわかる。Intel Zeon Platinum 8260 (2.4GHz) の CPU を搭載した PC で任意の荷重-変位曲線の計算に必要な時間を計測したところ、有限要素法では約 129 秒であったのに対し、代理モデル

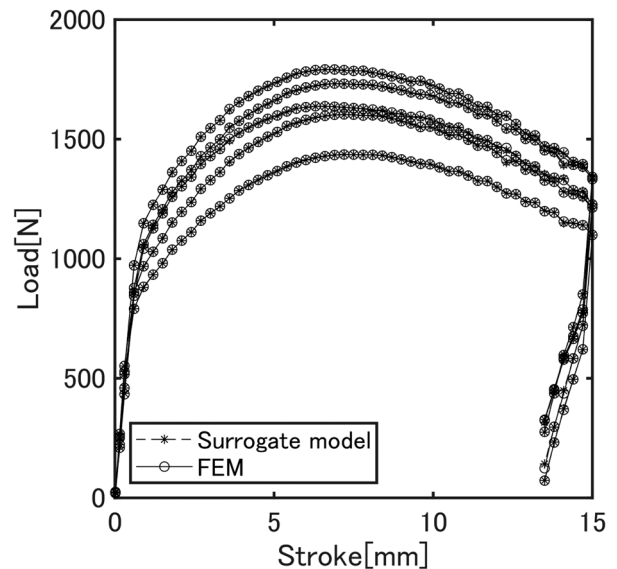


Fig. 3 Load and stroke curve of the FEM simulation and surrogate model in N=100

では約 0.01 秒となり、約 1 万分の 1 の計算時間となった。今後、作成した代理モデルを用いて材料定数および摩擦係数の修正を行う手法の開発を行う予定である。

#### 4. 結言

有限要素法を用いてアルミニウム合金の曲げ加工におけるスプリングバックを再現可能なシミュレーションを作成した。クリギング法を用いて作成した代理モデルは決定係数 0.999 以上の精度で有限要素法によるシミュレーションを近似できたことを確認し、計算時間は本研究で用いた計算環境において約 1 万分の 1 となった。今後、作成した代理モデルを用いて材料定数および摩擦係数の修正を行う手法の開発を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) D.R. Jones *et al.* : *Journal of Global Optimization*, **13**(1998)

キーワード : CAE、応答曲面法、塑性加工

## Application of CAE to Manufacturing Process using Data Assimilation

Mechanics and Digital Engineering Section; Takafumi NAKAMURA and Shintaro YOSHIE

In recent years, digital twin, which reproduces real phenomena on a computer using measured values, has been attracting attention. In this study, we aim to reproduce actual bending phenomena by identifying material properties used in CAE from forming data for the aluminum alloy press forming. In this year's report, we describe our efforts to approximate the finite element method simulation with a surrogate model to speed up the calculation.