

# 金属加工におけるデジタルツインの構築に関する基礎的研究

機械情報システム課 中村陽文、吉江真太郎

## 1. 緒言

近年、輸送機器における軽量化のためのマルチマテリアル化が進んでおり、重ねた異種金属同士を加圧で大変形を付与することで接合する手法が注目されている<sup>1)</sup>。接合時の大変形挙動をコンピュータ支援工学(CAE)によるデジタルツインの構築により予測することで、加工条件の効率的な最適化が期待される。異種金属を接合する工程をCAEで解析する場合、金型と加工材および加工材間の摩擦係数の設定が必要となる。リング状の試験片を圧縮した際の内径変化から摩擦係数を推定する手法<sup>2)</sup>が提案されているものの、金型を剛体と仮定し金型と加工材間の摩擦係数の推定に用いられることが多く、加工材間の摩擦係数の推定に用いた例は少ない。

以上の背景より、本研究では、加工材間の摩擦係数を測定する手法の開発を目的として、アルミおよび銅合金を対象としてリング圧縮試験および有限要素解析を用いる手法の検討を行った。また、リング圧縮試験を用いて摩擦係数および材料物性を簡便に推定することが可能なシミュレーションアプリの作成を行った。

## 2. 実験方法

リング圧縮試験は、リング型の試験片を圧縮した際に、摩擦係数が高いほど内径が小さくなることを利用して摩擦係数を推定する手法である(図1)。またリング圧縮試験においては、圧縮荷重を同時に測定することで材料の変形抵抗を推定する手法も提案されている<sup>3)</sup>。本研究では、加工材間の摩擦係数を推定するために、以下の3つの工程を行った。①各加工材単体のリング圧縮試験を行い、圧盤と試験片間の摩擦係数および加工材の変形抵抗を推定する。このとき、有限要素法により計算された摩擦係数と内径変化の関係および圧縮荷重を用いる。②加工材のうち片方を平板、もう片方をリングとし、平板間にリングを挟んだ状態でリング圧縮試験を行う。③工程①で得られた加工材の変形抵抗と摩擦係数を用いて、平板間にリングを挟んだ圧縮工程を有限要素解析し、内径変化を実験値と比較することで加工材間の摩擦係数の推定を行う。

供試材はA1070およびC1020とした。リングは、外径15 mm、内径7.5 mm、高さ5 mm、平板は、縦横30 mm、高さ3 mmとし、いずれの試験片も圧縮面の粗さはRa0.6  $\mu\text{m}$  以下である。万能試験機(東京衡機)を用いて5 mm/minの速度で圧縮した。

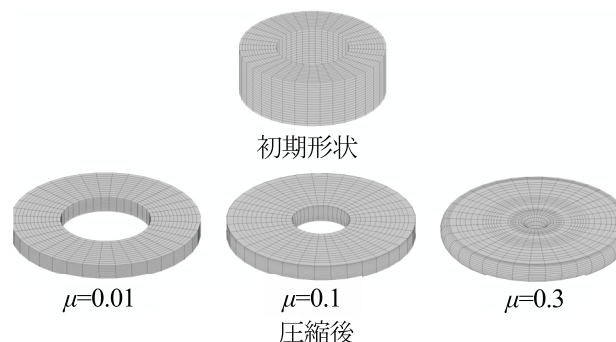


Fig. 1 Schematic diagram of ring compression test

有限要素法による解析はMARC 2023.4(Hexagon)を用い、4辺形1次要素の軸対称モデルとして行った。また、摩擦モデルはクーロン摩擦とした。シミュレーションアプリの作成は、COMSOL Multiphysics 5.6(COMSOL)を用いて行った。

## 3. 実験結果および考察

各材料単体でリング圧縮試験を実施した結果、A1070およびC1020と試験機の圧盤間の摩擦係数は、それぞれ0.20および0.18程度と推定され、加えて各加工材の変形抵抗を得た。加工材間の摩擦係数を推定するリング圧縮試験において、平板およびリングに使用する材料の組み合わせが内径変化に及ぼす影響を調査するために、有限要素法を用いた解析を実施した。リングをA1070およびC1020として単体圧縮の場合、リングをA1070、平板をC1020およびリングをC1020、平板をA1070とした組み合わせの場合の、有限要素法で計算された内径変化率と圧縮率の関係を図2に示す。図2に示されるように、リ

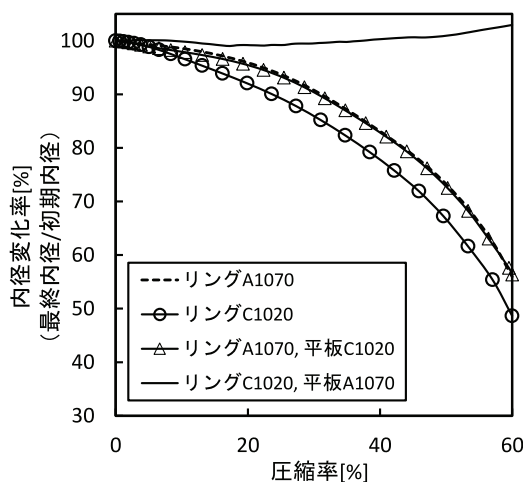


Fig. 2 Comparison of relationships between reduction in height and change in inner diameter calculated by FEM

ングを C1020、平板を A1070 とした場合、内径の変化はほとんど認められなかった。これは、平板側が大きく変形し、リングの変形が少なかったことに起因するものと考えられる。一方、リングを A1070、平板を C1020 として圧縮した場合の内径変化率はリングを A1070 として単体圧縮した場合とほぼ同様となった。以上の結果より、リングを A1070、平板を C1020 とすることで、通常のリング圧縮試験と同様に摩擦係数の推定が可能になるものと考えられる。図 3 に、リングを A1070、平板を C1020 とした場合のリング圧縮試験による有限要素解析結果と実験値を示す。圧縮率が 50%程度までは、摩擦係数は 0.2 程度、圧縮率が 55%程度の条件では摩擦係数は 0.3 程度と推定された。圧縮率の増加に伴う摩擦係数の増加は、銅板側の変形による接触状態の変化が影響した可能性が考えられる。他の手法で推定された摩擦係数との比較、加工材の種類を変更した場合における比較などを行うことで、手法の有効性をさらに検証することが可能と考えられる。

図 4 に、リング圧縮試験を用いて摩擦係数および材料

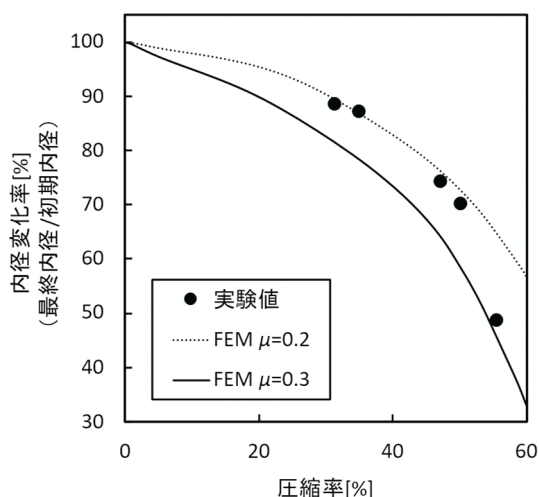


Fig. 3 Relationships between reduction in height and change in inner diameter obtained by ring compression tests and FEM

キーワード：塑性加工、鍛造、CAE、摩擦

## Fundamental Study of Digital Twin for Metal Processing

Mechanics and Digital Engineering Section; Takafumi NAKAMURA and Shintaro YOSHIE

In this study, ring compression tests and finite element analysis on aluminum and copper alloys were conducted to develop a method to measure the coefficient of friction between processed materials. Based on the results obtained by the finite element analysis, we performed ring compression tests using A1070 as the ring and C1020 as the flat plate. We also developed a simulation app that can easily estimate the coefficient of friction and deformation resistance using ring compression tests.

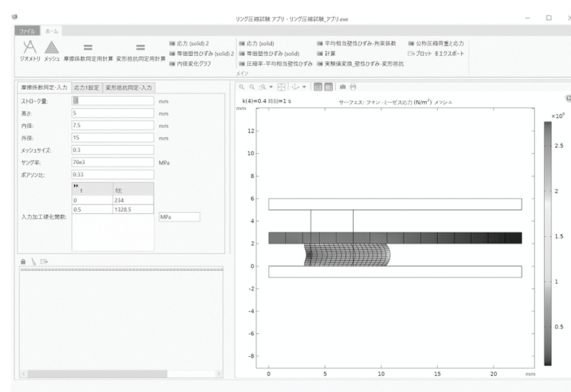


Fig. 4 GUI of the custom simulation application

物性を推定するためのシミュレーションアプリの表示画面を示す。リングを対象の加工材として単体圧縮した試験で得られる内径、圧縮率および荷重を入力し、加工材の変形抵抗と摩擦係数を計算する機能を有するようにした。一方、現状では、設定可能な摩擦モデルが限定される点、計算の収束性が悪いといった点で実用上の課題がある。

## 4. 結言

アルミおよび銅合金を対象として加工材間の摩擦係数を測定する手法の開発を行った。加工材のうち片方を平板、もう片方をリングとし、平板間にリングを挟んだ状態で圧縮し、リングの内径変化を有限要素解析と比較することで、加工材間の摩擦係数を推定できる可能性が示された。現時点では適用範囲は限定されているが、リング圧縮試験を用いて簡便に摩擦係数と変形抵抗の推定を行えるシミュレーションアプリを作成した。

## 参考文献

- 1) H. Yamagishi: *Metall. Mater. Trans. A*, **54** (2023) 3519-3536
- 2) 日本塑性加工学会: 鍛造, コロナ社 (2018) 53-55
- 3) 小坂田他: 日本機械学会論文集(C 編), **55** (1989) 2213-2220