

結晶構造を考慮した高強度銅合金の成形解析

機械情報システム課 吉江真太郎、中村陽文

1. 緒言

自動車産業の EV 化や燃費向上ニーズ等により、車載部品向け金属材料の軽量化が求められており、主に電装系で用いられる銅合金においても各種の高強度材の利用が進んでいる。一方で、CAE を用いた成形解析においては、材料の多様化は材料物性取得の負荷を大きくするため、様々な材料に対応した解析手法が求められている。

また、コネクタや端子節点として用いられる銅合金には、接触抵抗を低く保つため、高い応力緩和特性が求められる場合があるほか、応力緩和特性は、プレス成型でのモーション制御成形時の材料挙動にも深く関わる。

本研究では、高強度銅合金の応力緩和挙動に着目し、結晶塑性解析を用いた成形解析の実施を試みた。結晶塑性解析は、結晶方位を考慮することによって、結晶構造が材料のマクロ挙動に与える影響そのものを解析に取り込む方法であり、世界的に高い注目を集めている。一例として、チタン成形材の常温におけるスプリングバック量の時間依存変化を高精度に予測した先行研究²⁾がある。

本稿では、無酸素銅板の曲げ変形時の応力緩和挙動を対象として、まず実験と一般的な有限要素解析を行い、次に結晶塑性解析の実装までを行った結果を報告する。

2. 応力緩和試験方法

本研究では曲げ試験でのクロスヘッド保持により応力緩和試験を行った。試験片の材質は市販の無酸素銅板 (C1020P) で、試験機はインストロン型万能試験機 5567A を用いた。クロスヘッドを降下させて試験片に所定のたわみ変位 δ_0 を与えたのち、クロスヘッドを保持し、試験機荷重の室温での時間変化を測定した。試験方法は日本伸銅協会技術標準 JCBA T309 「薄情板の曲げによる応力緩和試験方法」による片持梁方式と JIS K 7171 「三点曲げ試験」による三点曲げ方式の 2 方式で行った (Fig. 1)。

Method	Cantilever beam	3-point bending
Standard	JCBA T309	JIS K 7171
Figure		
L	50	100
δ_0	1.36	1.7
t	3.02	3.02
b	30	10

Fig. 1 Method of stress relaxation test (unit: mm)

3. 実験結果および考察

試験結果を Fig. 2 に示す。縦軸は試験機で測定された荷重値で、横軸は経過時間の対数軸である。クロスヘッド停止直後の荷重を 100% とすると、片持梁での実験では、10000 秒後には 92% まで低下した。グラフ上の解析結果 (FEM) については後述する。

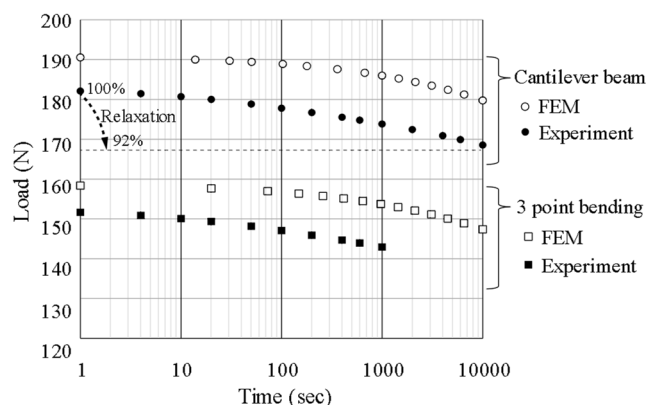


Fig. 2 Load-Time Curve (Experiment and FEM)

4. 応力緩和挙動の CAE 解析

つづいて、試験から得られたデータを用いて、材料の応力緩和特性を表現する構成則の導出を試みた。まず実験の時間-荷重データから応力-荷重データへの変換を行うため、JCBA T309 に準じ、以下の式で応力 σ を算出した。

$$\sigma = \frac{6FL}{bt^2} = \frac{3Et\delta_0}{2L^2}$$

ここで、 F は荷重 (N)、 L は標点長さ、 δ_0 はたわみ変位、 b は板幅、 t は板厚、 E は曲げたわみ係数 (N/mm²) であり、クロスヘッド降下時の荷重-変位曲線の勾配から $E=85600$ N/mm² とした。三点曲げ試験においては、上式の L を $L/2$ 、 F を $F/2$ と置き換えて応力を算出した。

つづいて汎用 FEM ソフト Marc (2022.1) のカーブフィット機能を用いて、陽解法型のクリープ則 (Fig. 3) を得た。Fig. 2 には、この構成則を用いて実験時の応力緩和挙動を Marc を用いて再現した FEM 解析結果もプロットした。

Material law of creep	$\dot{\epsilon}^c = \frac{\partial \epsilon^c}{\partial t} = A \sigma^m (\epsilon^c)^n$ <p>ϵ^c : equivalent creep strain σ : equivalent stress A, m, n : constants</p>
Constants calculated from experiment	$A = 3.508E-29, m = 5.970, n = -1.884$

Fig. 3 Material Law of Creep calculated by Curve Fitting

5. 結晶塑性解析の導入

5.1 結晶塑性解析の概要

前項の実験から構成則を得る手法では、別の材料には都度実験が必要となる。これに対し、結晶構造の違いそのものを解析に組み込む結晶塑性解析の導入を試みた。

結晶塑性解析は、多結晶塑性モデルを用いた有限要素シミュレーションであり、集合組織の情報を材料の状態を表す変数として直接考慮することが可能である。また、ひずみ速度依存型の構成則(Fig. 4)を用いることで、金属材料のひずみ速度依存性を自然に表現できるという数値計算上のメリットがある。ひずみ速度依存性とは、応力やひずみなどの材料挙動が、ひずみ速度(変形速度)によって変化する性質のことであり、応力緩和やクリープも、こうした現象のひとつとして考えられている。

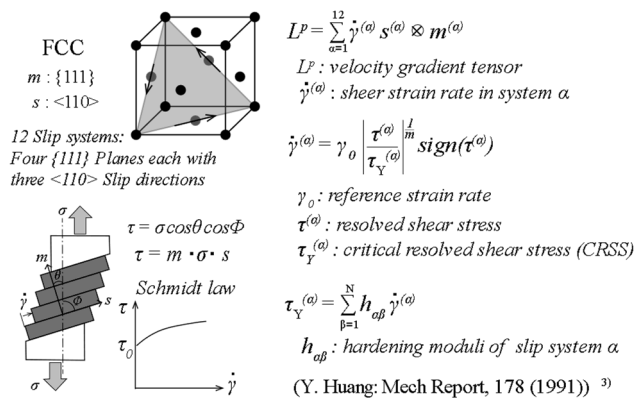


Fig. 4 Strain rate dependent model used in CPFEM

5.2 結晶塑性解析の実装

以上に要約した結晶塑性解析を市販の FEM 解析ソフトウェア Abaqus にユーザーサブルーチンを使って導入する手法³⁾が開発されており、今回は Abaqus と似た入力書式をもつオープンソース FEM 解析ソフトである Calculix のユーザーサブルーチン UMAT を用いて、結晶塑性解析を実装した。サブルーチンのソースコードや実装方法は、米国ミシシッピ州立大学車両先端技術研究所(CAVS)のウェブサイト⁴⁾を参考にした。

5.3 結晶塑性解析の解析例

結晶塑性解析の簡単な解析例として、異なる変形速度における応力ひずみ曲線の計算を実施した。一辺が 1mm の立方体の仮想的な多結晶モデルに対して、高さ方向に 0.3mm の変位を異なる時間(0.1s, 1s, 10s)で与えたときの応力ひずみ曲線を、前述の Calculix で計算した(Fig. 5)。材料定数は無酸素銅と同じく FCC (面心立方格子)型の結晶構造である純アルミニウムの文献値を用いた。

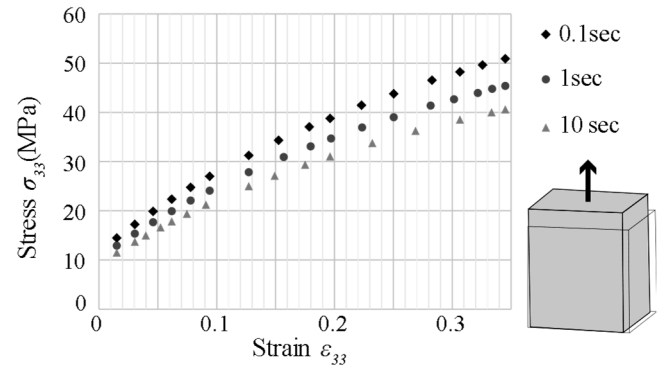


Fig. 5 Stress-Strain Curve calculated by CPFEM

6. 結言

銅合金の応力緩和特性に着目し、まず一般的な FEM 解析で、実験から推定した構成則を用い、応力緩和挙動を再現した。次に結晶塑性解析を導入し、ひずみ速度依存性のある材料挙動を予測できる可能性を確認した。

今後は、結晶方位の差による応力緩和挙動の検証や、コルソン系合金など高強度銅合金での実験および解析の実施、また当センターが保有する汎用 FEM ソフト Marc への結晶塑性解析の実装に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 高橋寛:多結晶塑性論, (1999)
- 2) T. Hama et al.: *International Journal of Plasticity*, **91** (2017) pp 77-108
- 3) Y. Huang: *Mech Report*, **178** (1991)
- 4) <https://www.cavs.msstate.edu/icme/Mesoscale/>

キーワード：銅合金、プレス成型、CAE、結晶塑性解析、応力緩和

Forming Simulation of High-Strength Copper Alloy Considering Crystal Structure

Mechanics and Digital Engineering Section; Shintaro YOSHIE and Takafumi NAKAMURA

Numerical simulation of stress relaxation in copper alloy considering crystal orientation was attempted. First, an experiment of stress relaxation by bending test was performed and then the stress relaxation was simulated by FEM using the material law of creep calculated from the experiment. Finally, a Crystal Plasticity Finite Element Method (CPFEM) was implemented to FEM software using Calculix user-subroutine UMAT. Stress-Strain curve at different strain rates was shown as a simple example of analysis using CPFEM.