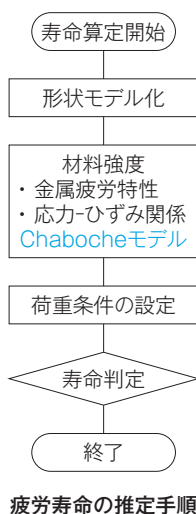


導体の熱ひずみを予測するための解析技術の基礎検討

嶋田祐也 Yuya Shimada

キーワード 金属疲労, 非鉄金属, 材料構成方程式, 応力ひずみ曲線, 弾塑性解析

概要



インフラを支える産業機器や電動車両には、銅材料が多く使われている。銅材料は、電気抵抗が低く電氣的な損失が小さい利点があるが、軟らかくて強度が低いため、寿命計算を行う上では正確さが要求される。

しかし、銅材料に関する材料強度は不明なことが多いため、長期間にわたる疲労寿命データの取得や種々の利用条件を考慮した応力とひずみの関係式に関する研究を進めてきた。

その結果、様々な応力を繰り返し受けたときの材料の変形やひずみ状態を精度よく推定する方法として、材料構成方程式にChabocheモデルを用いればよいことが分かり、熱変形の予測ができるようになった。

1 まえがき

製品の機械的破壊の要因として、金属の疲労破壊が多くを占めており、適正な製品寿命を予測できる技術の向上が求められている。例えば、電子機器の導体には銅材料が用いられ、通電時に発熱する。この発熱が熱ひずみとなり、ヒートサイクルとして荷重が繰り返されることで、導体の変形が進行し、いずれは破断に至る可能性がある。

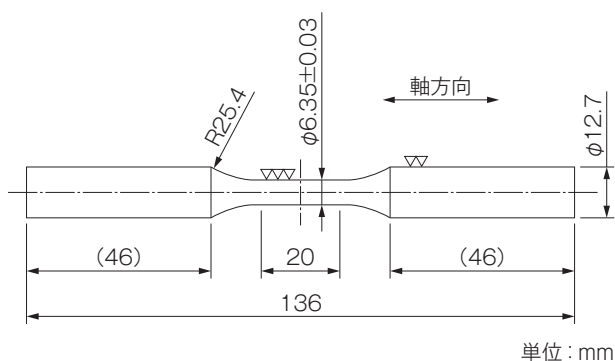
繰り返し荷重を受ける場合の変形予測には、有限要素法による数値解析が用いられることがある。その材料の特性を表す材料構成方程式は、軟鋼⁽¹⁾やステンレス鋼⁽²⁾など鉄鋼材料の研究は盛んに行われている。ところが、純銅に関する研究は極めて少ない。

このような課題に対し、製品の使用範囲と考えられる種々の条件で、銅材の繰り返し応力ひずみ線図を実験的に取得し、数値解析に適用可能な材料構成

方程式を選定した。本稿では、数値解析で実験結果を再現し、熱変形を予測できる技術を紹介する。

2 材料構成方程式に関する基礎検討

一般的に、材料に荷重を加え、除荷した後に材料が永久変形せずに元に戻ることを弾性と言い、元に戻らず永久ひずみが残ることを塑性と言う。また、一度塑性変形した材料に対して、再度同じ向きの力を加えると、前歴で塑性変形が生じていた荷重を超えないと塑性変形が起こらない現象が生じる。このような材料が硬化する現象を加工硬化と言い、繰り返し荷重の履歴によって特性が異なる要因となる。このため、材料の繰り返し荷重を加えた場合の特性の変化は、実験的に種々の状態で行う必要がある。このような背景から、以下に本試験で用いた純銅の特徴と要件を満たす試験を説明する。



第 1 図 試験片形状・寸法

両端に応力を与えて中央部のひずみを測定するために用いる一般的な丸棒の試験片で、全体を純銅で製作している。

2.1 試験片

試験片の材料は、JIS H3140の無酸素銅（C1020 H材）を用いた。第 1 図に試験片形状・寸法を示す。試験片の形状は、圧縮ひずみにおける座屈防止と加熱を考慮して試験部直径が6mmの丸棒を用いた。

2.2 試験機

試験機はMTS社製油圧サーボ疲労試験機で、ひずみ測定は高温軸伸び計を用いた。また、加熱装置は高周波加熱を用いた。

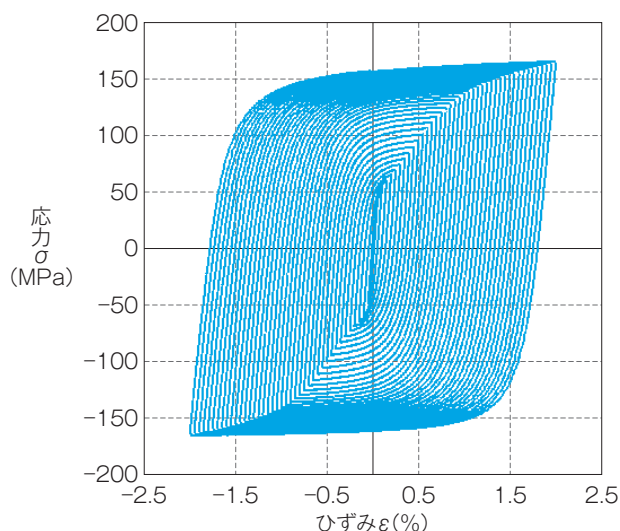
2.3 実験条件

繰り返しひずみ曲線の取得は、熱ひずみを想定してひずみ制御の試験を行った。繰り返しひずみの振幅 ε_a は、0.25・0.5・0.75%とした。温度条件は、実機で電気的な絶縁を持たせるために使われる樹脂が安全に使える範囲として、20℃（室温）・100℃・200℃で実施した。

3 実験結果

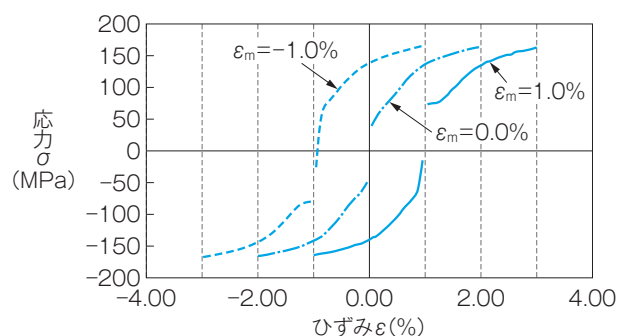
3.1 材料構成方程式における基礎検討

まず、純銅における繰り返し応力ひずみの挙動を調べた。本検討は、焼き鈍しの熱処理を施した状態とした。実験は、平均ひずみ ε_m が1.0%の圧縮、0.0%・1.0%の引っ張りの場合で、ひずみ範囲をサ



第 2 図 繰り返し応力ひずみ曲線

製品は繰り返し利用されるため、材料試験でも繰り返し応力を負荷させたときの、応力とひずみの履歴（ひずみの大きさを0.1%/サイクルずつ増加）を取得した。

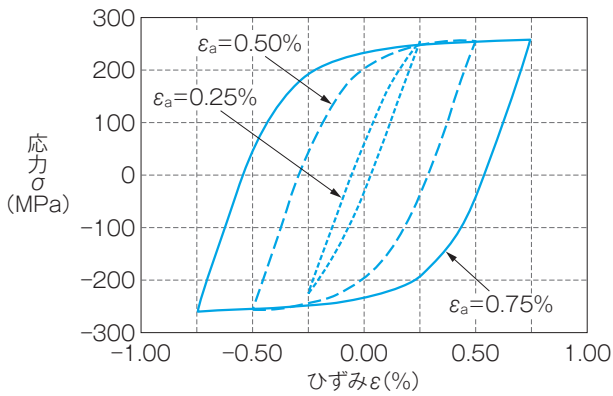


第 3 図 繰り返し応力ひずみ曲線（平均ひずみ比較）

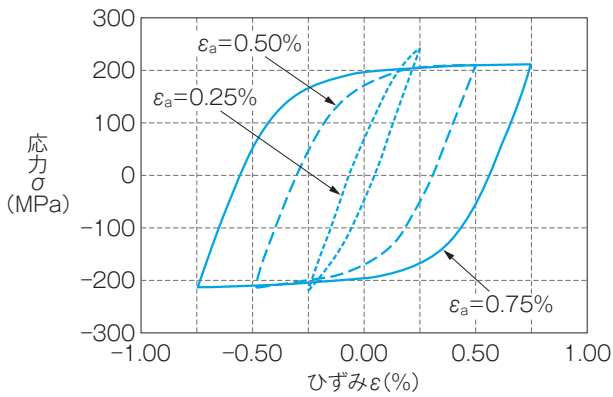
第 2 図の応力とひずみの履歴から、時々最大の応力とそのときのひずみのみを結んだ稜線を示す。三本の線は、ひずみの状態が引っ張りに偏っている場合 ($\varepsilon_m = 1.0\%$) と圧縮に偏っている場合 ($\varepsilon_m = -1\%$) 及び偏っていない場合 ($\varepsilon_m = 0.0\%$) を示しており、主要な稼働状態を模した実験となっている。

サイクルごとに0.1%ずつ増して2.0%に至るまでの応力ひずみ曲線を取得した。第 2 図に平均ひずみ0.0%の場合の繰り返し応力ひずみ曲線を示す。また、第 3 図にこのようにして得られた応力ひずみ曲線の最大応力を結んだ稜線、最小応力を結んだ稜線について、各平均ひずみの試験結果を示す。

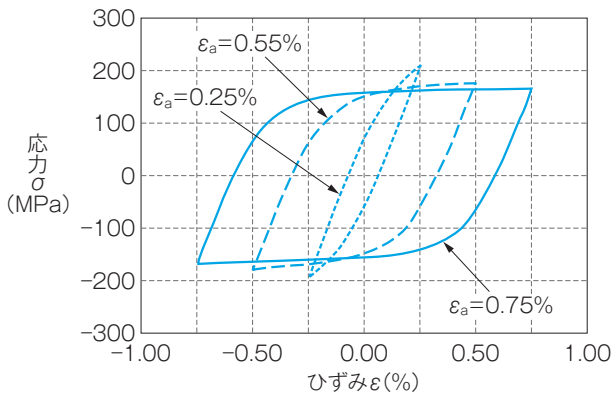
その結果、いずれの平均ひずみの場合でも応力ひずみ曲線に応力の飽和が認められた。一方、平均ひずみが引っ張り側に大きくなると巨視的な降伏点が増加する傾向となった。これらのことから、応力ひ



(a) 20°C(室温)



(b) 100°C



(c) 200°C

第4図 繰り返し応力ひずみ曲線 (ひずみ範囲及び温度の影響)

コイルなどの導体での利用を想定し、樹脂を用いた絶縁材料の耐熱温度を考慮して、200°Cまでの環境で試験を行っている。また、ひずみの大きさも汎用性を持たせるため、ひずみが小さい場合から大きい場合の3条件としている。温度が高くなると、応力ひずみ曲線が左右に扁平となり、ひずみ量が大きくなることから、この応力とひずみの関係から、Chabocheモデルを使って材料構成方程式を定式化した。

ひずみ曲線の応力の上限值が有限であるため、応力が無限に上昇する等方硬化則では不適である。一方、加工硬化があることから、移動硬化を考慮する必要

があるため、移動硬化と制約を与えた等方硬化の複合則が必要になることが分かった。

3.2 温度及びひずみ範囲の影響

第4図にひずみの繰り返しを50回与えたときの応力ひずみ曲線を示す⁽³⁾。(a)は温度が20°C(室温)の場合で、ひずみ振幅 ϵ_a が0.25%の場合を点線で、 ϵ_a が0.5%の場合を破線、更に振幅が大きくなった ϵ_a が0.75%の場合を実線で示す。 ϵ_a が0.25%と0.5%を比較すると最大応力の絶対値 σ_{max} が増加しているが、 ϵ_a が0.5%と0.75%を比較すると σ_{max} はほぼ等しく応力が飽和していることが分かる。(b)は温度が上昇した100°Cで、(c)は200°Cの場合である。温度が上昇すると σ_{max} が低下する。また、温度が100°C及び200°Cの場合には、 σ_{max} は ϵ_a が小さい0.25%が最大となり、 ϵ_a が大きくなると減少する傾向となった。

4 材料構成方程式

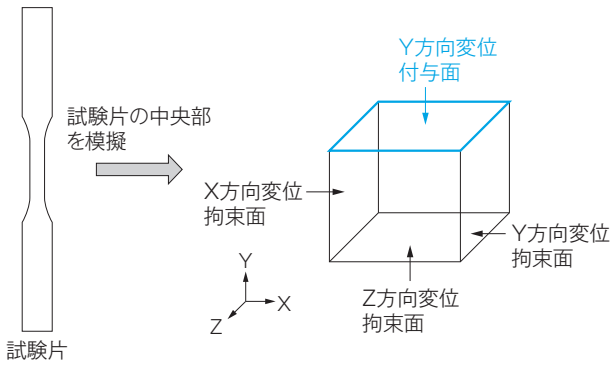
金属材料の材料構成方程式には、多直線等方硬化・多直線移動硬化などが数値解析に用いられる場合が多い。しかし、先の実験結果から、応力に上限があり、かつ加工硬化や移動硬化を考慮する必要があることから、鋼での適用研究⁽⁴⁾が進んでいるChaboche [式(1)]モデルの適用を試みた。

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad \dot{\alpha}_i = \frac{2}{3} C_i \dot{\epsilon}^{pl} - \gamma_i \dot{\epsilon}^{pl} \alpha_i \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 α は背応力、 ϵ^{pl} は塑性ひずみを示し、 C_i 、 α_i は定数である。また、これらの上にあるドットは、その量の時間に関する微分を表している。各試験から得られた応力ひずみ曲線を、式(1)を用いてカーブフィットを行ったところ、5次までを考慮すると第4図に示した実験結果をほぼ再現できることが分かった。

5 数値解析結果

先に得られた材料構成方程式について、汎用有限要素法解析プログラム Ansys 2021 R1を用いて、



第5図 解析モデル及び境界条件

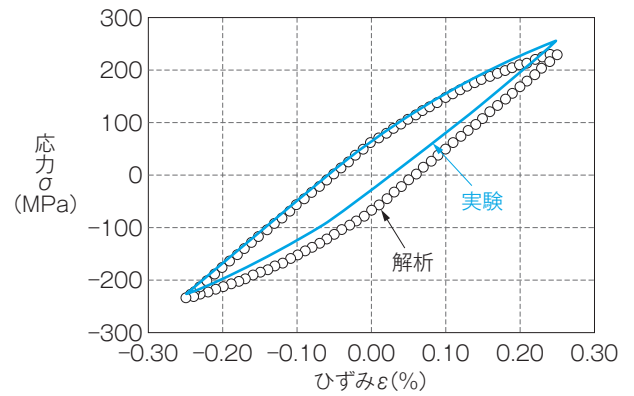
先に示した実験結果を有限要素法を用いた数値解析で再現するために、形状モデルは試験片の中央部に相当するシンプルな立方体にした。

応力・ひずみ曲線を算定した。解析の降伏条件はミーゼス、解法はフルニュートンラプソン法、収束判定はデフォルト値を用いた。第5図に解析モデル及び境界条件を示す。解析モデルは、8節点・1要素、寸法は1mm角とした。境界条件は、XYZ方向の各拘束面に対して、Y方向に変位を付与する条件とした。第6図に実験と数値解析結果の比較を示す⁽³⁾。縦軸は引っ張り軸方向の単軸応力 σ 、横軸は全ひずみ ε である。丸印が解析結果、実線は実験結果である。なお、ひずみ振幅 ε_a が0.5%・100℃のデータをベースとして、対極にある $\varepsilon_a = 0.25\% \cdot 室温$ と $\varepsilon_a = 0.75\% \cdot 200℃$ のデータを抜粋して説明する。

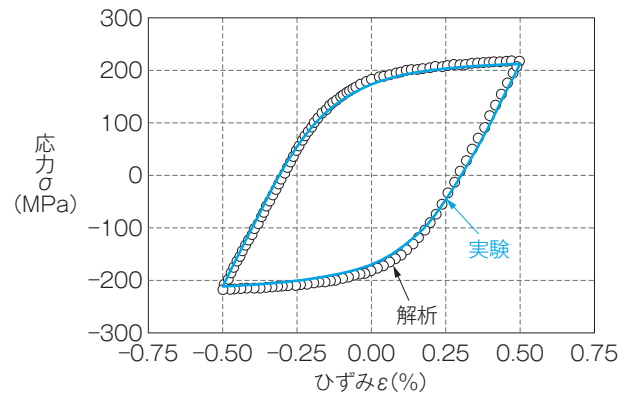
まず室温の場合には、応力が引っ張り側では解析で得られた σ_{max} が若干小さくなっているが、圧縮側ではほぼ一致している。また200℃の場合には、実験結果と一致する結果が得られた。なお、100℃の場合も200℃と同様に良い再現性を確認できた。200℃ではクリープひずみの重畳が考えられるが、別途ヒートサイクル試験で本試験条件ではクリープ量が小さいことを確認している。また、実用上から最終ひずみ範囲が予測できない場合もあるため、 $\varepsilon_a = 0.5\% \cdot 100℃$ で得られた構成方程式を用いて $\varepsilon_a = 0.75\% \cdot 100℃$ の場合を計算し解析と比較した。

第7図に応力ひずみ線図の補完検討を示す。この場合も解析で得られた応力ひずみ曲線と実験結果がほぼ一致する結果が得られた。

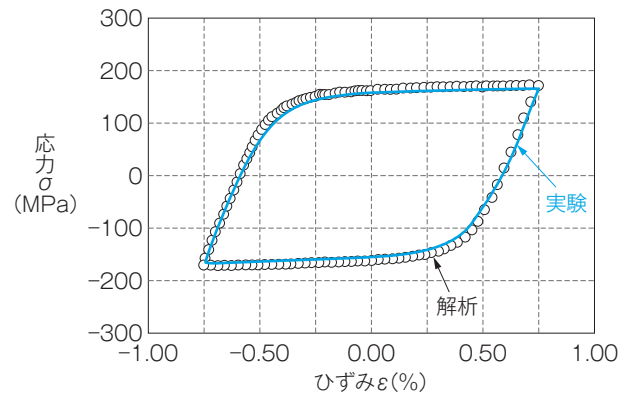
これらの結果から、非線形性が大きいと考えられ



(a) 室温, $\varepsilon_a = 0.25\%$



(b) 100℃, $\varepsilon_a = 0.5\%$

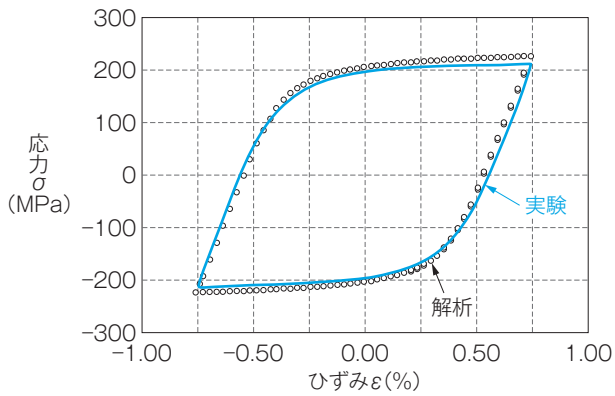


(c) 200℃, $\varepsilon_a = 0.75\%$

第6図 実験と数値解析結果の比較

第4図に示した9条件について、材料構成方程式にChabocheモデルを用いて数値解析を行った。その中で、紙面の都合で代表的な3パターンのみ実験結果と数値解析を比較した結果を示す。ひずみが小さい場合には、数値解析のひずみは過大な値となり安全側の評価となる。ひずみがある程度大きくなると一致する結果が得られた。割愛した残りの6パターンも同様な傾向であった。

ている純銅でも、弾塑性解析を用いて熱変形量の予測や低サイクル疲労の検討を実施できることが示唆された。



第7図 応力ひずみ線図の補完検討

第4図の実験条件以外での適用性を検討するため、 $\epsilon_a = 0.5\%$ 、 100°C で得られた構成方程式を用いて $\epsilon_a = 0.75\%$ 、 100°C の場合で数値解析を試行した。僅かに数値解析の方がひずみが小さくなる傾向であるが、ある程度の推定はできることが分かった。

6 むすび

今回、純銅について数値解析に対応できる材料構成方程式を選定し、熱変形の予測ができるようになった。

今後も、低環境負荷・製品競争力の向上に貢献するため、より高精度な寿命予測技術の構築を推進していく。

- ・ Ansysは、米国ANSYS, Inc.の登録商標である。
- ・ 本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) 吉田総仁・伊藤操・岡田達夫・中口将享：「日本機械学会論文集」, 66, 643, 2000
- (2) 石川博将・佐々木克彦：「日本機械学会論文集」, 54, 501, 1988
- (3) 嶋田祐也・渡辺広光：「日本実験力学会講演論文集」, No21, pp.45-46, 2021
- (4) Chaboche, J.L : 「International Journal of Plasticity」, Vol.5, 1989

《執筆者紹介》



嶋田祐也
Yuya Shimada

基盤技術研究所
解析シミュレーション技術及び材料強度評価技術の開発に従事