

## 論文の要旨

題目 銅合金板の弾塑性挙動とそのプレス成形品のバネ特性予測  
( Elasto-plasticity Behavior of Copper Alloy Sheets and Prediction of Spring  
Properties of their Press-formed Products )

機械物理工学専攻 D100138 服部 康弘

自動車用ワイヤーハーネス(WH)は、自動車に搭載された電気・電子機器やモータ、アクチュエータ、灯火装置、さらにはスイッチ、ハンドル、ペダル等のインターフェイス装置等を電氣的に接続する重要な自動車部品であり、WHの信頼性は、自動車の正常な動作を保証するうえで非常に重要である。WHは、電線、コネクタ等の接続部品を基本に構成されており、コネクタの電氣的接続の信頼性が WH 全体の信頼性を左右するといっても過言ではない。コネクタは内包された銅合金製の端子によって電氣的に接続されており、メス端子のもつバネ構造で発生する接触荷重により、嵌合されたオス端子とメス端子が互いに押し付けられることにより電氣的接続を形成する。端子の接続信頼性は、接触荷重が大きな要因の一つとなっているため、端子の開発においては有限要素法を用いたバネの荷重-変位特性すなわちバネ特性の予測技術が大変重要となる。

バネ特性の予測において、バネの変位に伴う材料の変形方向が、バネを形成する加工方向と逆の場合、バウシinger効果等により材料の応力-ひずみ特性が複雑な挙動を示すことから、これらの挙動を反映した材料モデルとそれを用いた有限要素解析が必要となる。これまでの銅合金に関する研究ではバウシinger効果の重要性は指摘されてきたが、バネ特性の予測にまで踏み込んだ研究はなされていなかった。一方、バウシinger効果を高精度で表現する材料モデルとして吉田一上森(Y-U)モデルが提唱され、応力-ひずみ特性の高い再現性や高張力鋼板を中心としたスプリングバック予測への応用が数多く報告されてきており、その有用性が実証されてきた。そこでバネ特性予測への応用が期待できる一方で、スプリングバック後の特性への応用はほとんど検討されていないこと、一般に入手できる銅合金板に存在する残留ひずみを、Y-U モデルを含む材料モデルでは想定していないことなどの課題もある。

本研究は、加工方向と逆方向に変位させるバネの荷重-変位特性を予測する手法の確立を目的とする。そのために、Y-U モデル及びそれを用いた有限要素解析について、各種銅合金の応力-ひずみ特性、曲げ変形、U 曲げ加工、さらには実際にプレス加工で作製した模擬端子の形状予測とバネ特性予測への適用を検討した。その結果、Y-U モデルを用いた有限要素解析でプレス加工、バネ特性を連続して解析することで、加工方向と逆方向に変位させるバネの荷重-変位特性を精密に予測できることを実証し、新たな手法として提案した。以下に各取組の要点をまとめる。

銅合金板の弾塑性挙動を把握するために、板材の繰返し引張-圧縮測定ができる装置を開発し、板厚 0.65~1.0mm のタフピッチ銅、黄銅、コルソン系合金について単軸応力-ひずみ特性、直接圧縮応力-ひずみ特性、繰返し応力-ひずみ特性を取得した。その結果、加工硬化型銅合金である C2600R は大きなバウシinger効果を示し、それは調質が高く残留ひずみが大きい C2600R-H で顕著であった。さらに得られた実験結果から Y-U モデルの材料パラメータを決定した。銅合金板は焼鈍材ではないが、焼鈍された状態を初期状態とする Y-U モデルでも、特にひずみ 0.02 以上で精度よく繰返し応力-ひずみ特性を再現できることを明らかにした。これらより冷間圧延された銅合金板でもそのまま繰返し引張-圧縮測定を行い、Y-U モデルのパラメータを取得すれば、加工、スプリングバック、バネ特性の予測に応用できる可能性を示した。

Y-Uモデルを用いた有限要素解析の曲げ変形への応用を検討した。曲げ変形のみを実現する測定装置を開発し、それにより得られた繰返し曲げ荷重-変位特性は、何れの材料でも Y-U モデルでのみ正確に再現できた。曲げ変形で材料は、曲げの外側で引張、内側で圧縮の変形を受ける。そのため C2600R-H のような残留ひずみが多く引張、圧縮の応答が異なる材料では、ひずみが有る状態を初期状態として行う有限要素解析が現実を厳密に再現した解析となる。しかし材料の残留ひずみを見込むこと実質的には不可能であることを鑑みると、この成果は材料に存在する残留ひずみを考慮せずとも曲げ変形時の挙動を一定の精度で見積もることが可能であることを示すものであり、実際の応用上、非常に

意義のある結果である。

さらには実際の端子に使う板厚 0.25mm の銅合金板についても専用の曲げ変形測定装置を開発した。取得した繰返し曲げ荷重-変位特性は、板厚 0.65~1.0mm の材料から得た材料パラメータを用いた解析で非常に精度良く再現した。これは製造過程が異なる材料に対しても、材料パラメータが汎用的に使用できることを示唆しており、この結果も実用上の利便性を考えると重要な結果である。

また繰返し曲げ荷重-変位特性から材料パラメータを求める手法を提案し、繰返し応力-ひずみ特性から求めるパラメータとほぼ同じ結果を得た。先述のように材料パラメータの汎用性を示す結果が得られたものの、材料の製造工程が把握できない現状では、実際に用いる材料から材料パラメータを求める手法がより望ましい。この点で繰返し曲げ荷重-変位特性から材料パラメータを決定する手法は、大きな意味を持つ。

次いで各種材料モデルを用いた有限要素解析により、銅合金板のプレス加工のスプリングバック予測について検討した。摩擦係数の速度依存性や金型、プレス機の剛性等の影響を排除できる U 曲げ加工を行い、加工後の形状を各種材料モデルで解析した結果、Y-U モデルは非常に精度よく再現できることを実証した。これは曲げ変形そのものは Y-U モデルを用いた有限要素解析で再現できることを保証するものであり、プレス加工での形状予測を議論するうえで大切な結論である。

またスプリングバック量は、代表的なひずみとその時の応力、ヤング率から定性的に見積もった結果とよい相関を示した。これは有限要素解析を実施しなくてもスプリングバックを議論できる可能性を示すものであり、今後の応用に向けた発展が期待される。

次いで実際の順送プレス機で模擬バネを作製し、形状予測、バネ特性予測への Y-U モデルの適用について検討した。形状予測は、実際の成形品と解析結果では曲げ角度で 1~4° の誤差で予測できることを実証した。より高精度化に向けては、金型下死点の位置の違い等の、プレス工程のより詳細な解析が必要である。一方、バネ特性予測については、仕上がり形状から IH モデルで解析を行う従来の手法では、バネ定数、弾性変形の範囲共に大きく見積もる結果となった。しかし繰返し応力-ひずみ特性を精度良く再現する Y-U モデルを用いた有限要素解析で、プレス加工工程の解析により形状、残留ひずみを得て、さらにその状態からの変形を計算することでバネ特性を予測する、本研究で新たに提唱した手法では、REVERSE 方向に変形する非線形なバネ特性を精度良く再現できることを示し、本研究の手法の優位性を実証した。

本研究では、バウシinger 効果の影響を受けた材料の弾塑性挙動を再現し、端子のバネ構造についてその形状、バネ特性を正確に予測する手法を確立した。端子の開発においてバネ設計は要となる重要なプロセスであり、本研究で提唱する手法により、トライアンドエラーで作り込むことのない開発に前進できると考える。また材料の弾塑性変形の挙動を理解したうえで、例えば単軸応力-ひずみ特性からスプリングバック量を論ずるような簡便な手法と相関をとれば、設計だけでなく製造の現場でも活用できるツールに発展させていくことも可能であり、今後の進展に期待する。

本研究では残留ひずみのある材料に、それを前提としない Y-U モデルをそのまま適用し、実際の開発に活用できる精度の解析結果を得た。これは Y-U モデルの高いポテンシャルを示すものであり、今後、さらに広い分野での応用展開が期待できるものと考ええる。

以上