

アルミニウム合金鍛造工程設計における 数値シミュレーションの活用

金丸信夫*・長田 卓*・北村 章(工博)*・竹内浩二**・柴田暁典**・武林慶樹**

*技術開発本部・生産技術研究所 **アルミ・銅事業本部・大安工場

Application of Numerical Simulation to Forging Process Design of Aluminum Alloy

Nobuo Kanamaru・Takashi Choda・Dr. Akira Kitamura・Koji Takeuchi・Akinori Shibata・Yoshiki Takebayashi

In order to reduce the weight of the various important parts for automobile, electronics and aircraft, a thin and complicated highly strengthened aluminum forgings are going to be applied. To produce the precise forgings for these alloys with a much higher quality as well as accuracy, numerical simulation was used to role in efficient planning and optimum designing of forging processes. It was shown that for the prevention for lap type defects, a technique for load reduction and the reduction in the number of production trials was successful for the production advanced aluminum alloy forgings.

まえがき = アルミニウム合金製鍛造品は比強度や耐食性などに優れた特性を持ち、構造部材として航空機分野を中心に広くもちいられてきたが、最近、自動車用部材や電子機器部品への利用の動きも急速に高まっている。

従来、熱間鍛造品は機械加工を経て最終製品とされてきたが、精密鍛造品化は、この機械加工を削減し、低コストの製品を供給できることにあった。アルミニウム合金精密鍛造品の特徴は、まず形状の複雑さにあるとともに、この技術が航空機部品に適用されたのをきっかけに、多くに鍛造品がウェブ型形状を持つようになったことである。さらに、複雑な形状品を鍛造後の黒皮のまま使用するために、高い寸法精度と良好な品質を供給することが必要であり、金型設計や荒地形状設計のみならず潤滑技術、熱処理技術や設備面においても、高度な技術が要求される。こうした精密鍛造技術は従来の鍛造技術の蓄積の上で成り立つものであるが、製品形状の大型化や薄肉化にともない、精密鍛造品の寸法精度への要求は厳しくなっている。

こうした傾向の中で、鍛造加工中の素材の変形シミュレーション技術の開発と応用が進められている。同技術は、材料の充満状態、成形荷重、金型面圧、欠陥発生や鍛造材の歪み分布などの把握に利用され、鍛造工程や金型設計に活かされている¹⁾²⁾。

数値シミュレーションをおこなう上では、実際に生じている複雑な現象をいかにモデル化するかということが

重要であり、問題解決のニーズに合わせてモデルの単純化や高精度化を考える必要がある。とりわけ、アルミニウム鍛造品で製品のネットシェイプ化が要求される場合、鍛造中のメタルフローを予測し、欠陥発生の危険箇所を事前に把握することは重要な課題である。

ここではとくにアルミニウム合金熱間鍛造分野で、数値シミュレーション技術の適用により、寸法精度向上、鍛造欠陥防止を実現した事例をもとに、鍛造工程設計技術の高度化の概要を紹介する。

1. 工程設計における数値シミュレーションの役割

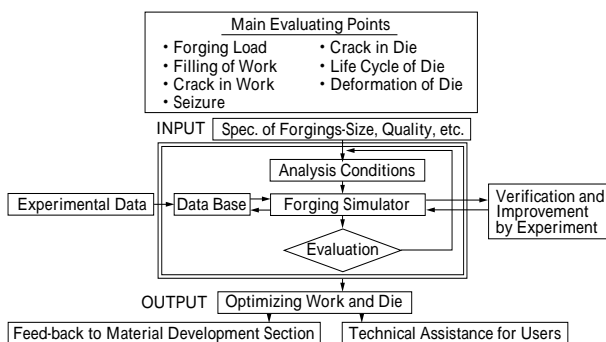
まず鍛造加工の工程設計の中で、数値シミュレーションの占める役割を考える。第1図は数値シミュレーションの評価項目と解析システムの処理フローである。多くの鍛造品は、素材形状から2回以上の鍛造加工を経て製品となる。鍛造加工の前後および間には、機械加工や熱処理などの工程が加わることがある。

鍛造加工の数値シミュレーションでは、材料の変形解析は二次元(平面歪みまたは軸対称)剛塑性FEMを、金型の応力解析は三次元弾塑性FEMをもちいるのが一般的である。また鍛造加工に固有の特定の現象をモデル化するには、鍛造加工または鍛造技術に関する経験が必要である。

数値シミュレーションの評価項目は、第1図に示しているが、技術者はこれらに対する解析結果を総合評価して、鍛造工程の全体の流れや部分的な設定条件を改善する。多くの場合、試作実験により改善効果を確認し、同時に現状の数値シミュレーションで推察が困難な問題点を抽出する。

鍛造品の実生産にいたるまでのこのような事前検討によって、鍛造工程の詳細な設計案が決定される。設計案段階で明らかにすべき最低限の情報は、素材・荒地・鍛造品の設計図、金型設計図、鍛造方案、鍛造荷重・材料歩留りなどの基本データおよび製造コストと工期に関するものである。

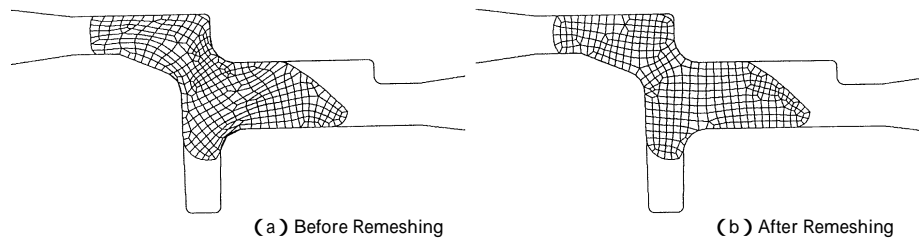
製品に対する寸法精度の保証・成形面圧の推定・材料歩留りの予測は、鍛造工程を設計するために不可欠であ



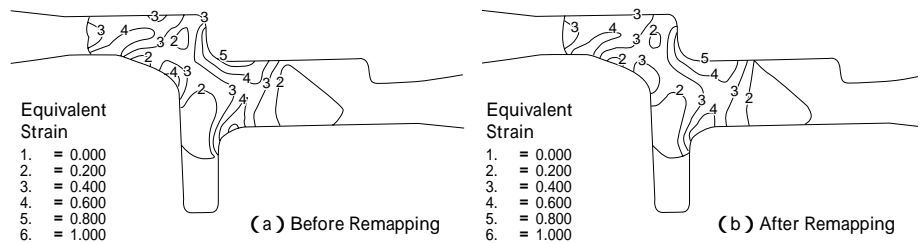
第1図 鍛造シミュレーションの評価項目と解析システム

Fig. 1 Main evaluating points and analysis system of forging simulation

第2図 リメッシュ前後の要素の状態
Fig. 2 FEM meshes before and after remeshing



第3図 リメッシュ前後の相当塑性歪み
Fig. 3 Equivalent strain distribution before and after remeshing



る。この中で、鍛造品の品質や寸法精度がユーザの要求水準を満足するかどうかはもっとも重要な項目である。材料の変形解析の結果にもとづいて、変形中の欠肉・表面欠陥・割れなどの発生の可能性を検討し、この結果を、金型図や鍛造条件などが記載される工程指示書に反映する。鍛造荷重を推定することは、製造にもちいるプレス設備を選定し、プレス速度や素材加熱温度などの加工条件と鍛造回数を決定するために必要である。鍛造荷重算定の根拠となる成形面圧分布は解析で求められるが、材料の充填状況、金型の弾性変形量、金型材の割れや損傷による金型寿命の評価などに不可欠の基礎データでもある。

以下に、アルミニウム合金部品の熱間鍛造において、数値シミュレーションをもちいた金型設計や、荷重低減法に関する工程設計例について紹介する。

2. 熱間鍛造シミュレーションの解析事例

2.1 ウェブリブ部材の精密鍛造における変形解析

アルミニウム合金製航空機部品は、複雑なウェブリブ構造を持ちネットシェイプ形状に成形されることが特徴である。とくに航空機部品の設計精度が高くなり、損傷許容設計の概念が導入されるようになって、メタルフローをより精密に制御することが要求される³⁾。

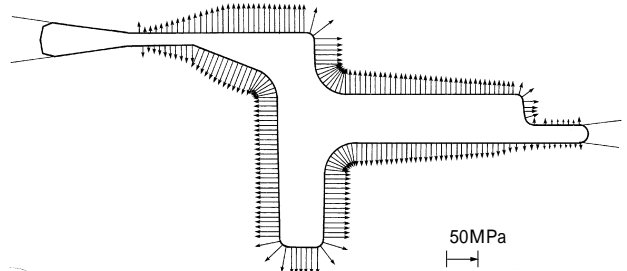
このようなウェブリブ構造部品の精密な変形解析に二次元FEM解析をもちいる場合、変形の進行にともなって要素自身が崩壊し、計算精度が悪化したり、解析の継続が困難になったりする。このため要素の再分割(リメッシュ)が必要となり、解析効率の低下と解析技術者の負担増になっていた。近年、自動リメッシュ機能が開発され、再分割法の最適化も検討されている⁴⁾。筆者らは精密鍛造の解析で常に課題となっていたリメッシュ操作を自動化し、写真1に示すような航空機窓枠部品の変形解析に適用した⁵⁾。

第2図および第3図に被加工材のリメッシュ前後の要素の状態と相当塑性歪み分布の状態を示す。第3図(a),(b)より変形状態の連続性がほぼ維持されていることがわかる。

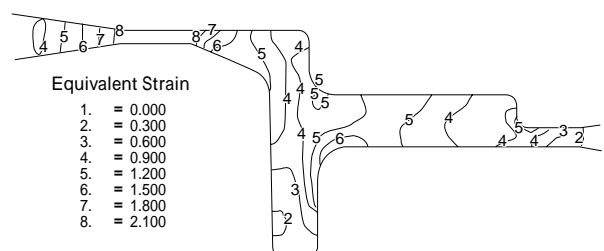
次に、充填時の金型面圧分布と被加工材の相当塑性歪み分布を第4図と第5図に示す。金型面圧分布は金型



写真1 窓枠部品
Photo.1 Window frame for passenger aircraft



第4図 充填時の面圧分布
Fig. 4 Forging pressure distribution in perfect filling



第5図 充填時の相当塑性歪み分布
Fig. 5 Equivalent strain distribution in perfect filling

寿命の予測のために必要であり、また、相当塑性歪み分布は鍛造加工における被加工材の材質の分布状況を予測する上で必要な情報である。

さらに、筆者らはウェブリブ部材の精密鍛造で、荒地ウェブ肉厚とフロー欠陥との関係を、シミュレーション技術を活用して検討した⁶⁾。また、ひげやしわなどのメタルフローの不具合による表面欠陥の発生条件を解明してきた。

第6図 ウェブ座屈変形に及ぼす荒地ウェブ厚さの影響
 Fig. 6 Effect of preform web thickness on web buckling deformation

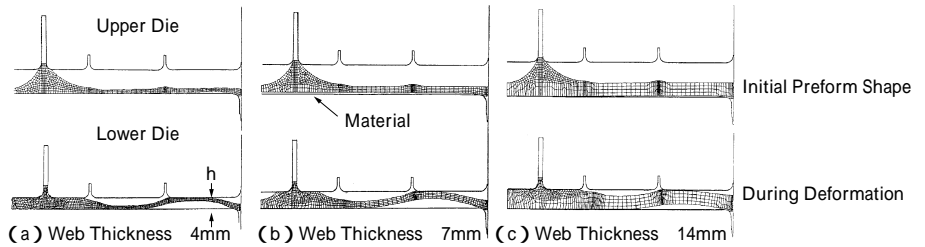


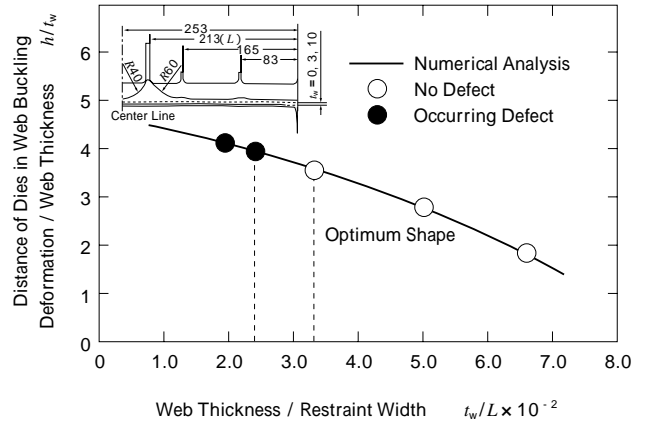
写真2 航空機部品の精密鍛造におけるしわきず事例
 Photo.2 Lap type defect in precision forging of aerospace part

写真2は航空機部品の精密鍛造におけるしわきず事例である。一般にしわきずはウェブ厚さが厚くなれば発生しにくいと、限界のウェブ厚さを把握することが重要である。そこで第6図に示すようにウェブ厚さを变化させた変形解析をおこなった。これより、素材はリブの高い部分で凸形状になっているため、その部分がまず変形し、とくに、素材ウェブ厚さが薄いと、薄肉部の素材は横方向に押しつけられて、波状に変形し、しわきずの原因となる。さらに、ウェブ座屈変形によるしわきず発生限界に及ぼす荒地ウェブ厚さの影響を定量化した結果を第7図に示す。同図において、縦軸に座屈の最大間隙量/ウェブ厚さ (h/t_w) を、横軸にウェブ厚さ/拘束される代表ウェブ長さ (t_w/L) をとり、両者の関係と同時に実験によるしわきずの有無を示す。これより、しわきずを回避できる限界の荒地ウェブ厚さは t_w/L 2.4 ~ 3.3 × 10⁻² であることが実験と解析の対比で明らかになった。以上の結果をもとにウェブ厚さを決定し、表面欠陥の発生を減少させることができ、荒地設計の指針をえた。

2.2 スクロール部品の充満荷重低減法⁷⁾

エアコン向けスクロール部品は、これまで形状の複雑さから鋳造により、製品化されてきたが、より軽量・高強度かつ寸法精度の向上を目的として、アルミニウム合金製鍛造スクロールが開発されている⁸⁾。スクロール部品の鍛造では、低コスト化のために、荒地成形を省いて少ない工程数で、かつ、金型の高寿命化のために低荷重で成形することが必要であるが、スクロール部品を円柱形状の素材から1段で成形すると、中央部羽根の成長が遅れ同先端部に欠肉が生じやすい。また、これを完全充満させるには高い荷重が必要となるため、大容量プレスでなければ成形できないことや、金型寿命がいちじるしく低下することが問題となる。

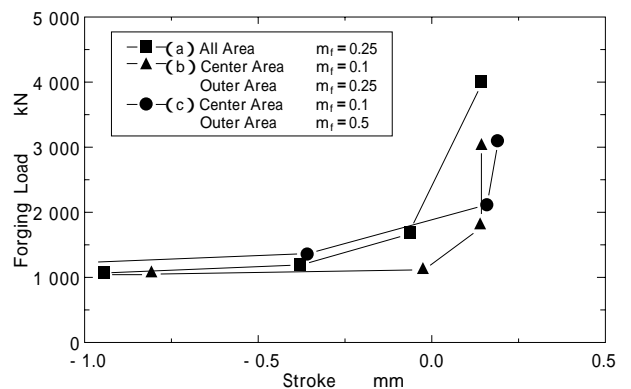
ここでは、スクロール鍛造時の羽根部の不均一の状態



第7図 ウェブリブ鍛造部品のしわきず発生限界
 Fig. 7 Lap type defect criterion of rib/web forging parts

を防止する方法として、金型の摩擦係数を面粗度によって制御する方法について数値シミュレーションをもちいて検討した例について述べる。

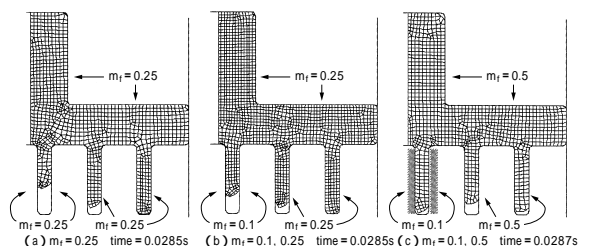
第8図(a)は、通常に鍛造した場合の充満状況であるが、この場合は、スクロールの羽根部の成長が不揃いになる。これは、中心部側の羽根成長にくらべ、外側は流動しやすいことによる。とくに、羽根の反対側にボスを持つものでは、中心部の材料流れをボス部に取られ羽根成長が大きく遅れることになる。これに対し、同図(b)および(c)は、羽根成長を均一に成形する方法として、リブ側面にあたる金型の面粗度を変化させること

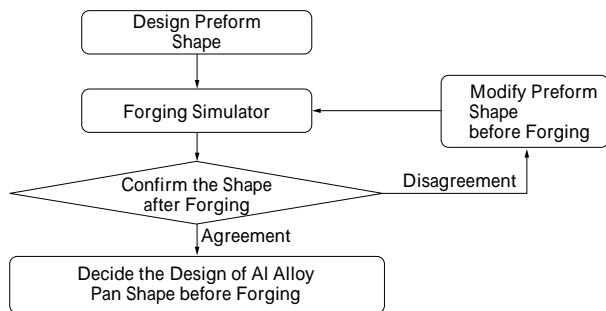


第9図 荷重とストローク線図
 Fig. 9 Relation between forging load and stroke

第8図 アルミ合金製鍛造スクロールと羽根成形に及ぼす摩擦状態の影響
 m_f : 摩擦係数

Fig. 8 Aluminum scroll by hot forging and effect of friction condition on rid deformation
 m_f : friction coefficient





第10図 鍋形状の設計フローチャート
Fig. 10 Flow chart for designing the preform shape for a grill pan

を想定し、それに見合う摩擦係数で計算した結果で、中心部の羽根成長が促進され、外側の羽根部とほぼ同時に充満する結果がえられた。その時の荷重ストローク線図を第9図に示す。第9図中の(a)は羽根全体が完全充満する際に、荷重が急激に上昇することがわかる。第9図の(b)および(c)の充満荷重は、(a)にくらべて低くなっていることがわかる。

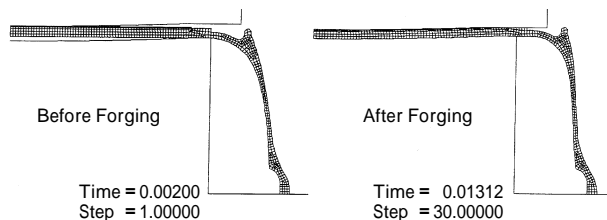
このように、金型面の摩擦状態を変化させる方法を考案し、その条件を数値シミュレーションをもちいて決定した後、スクロール鍛造をおこない荷重低減に有効なことを確認した。

2.3 クラッド鍋の圧接変形シミュレーション⁹⁾

ここでは、アルミニウム鍋の底部に熱間鍛造にて、ステンレス-アルミニウムクラッド材を圧接したIH(Induction heating)アルミニウム鍋の開発に数値シミュレーションを適用した例について述べる。アルミニウム鍋本体とクラッド板を圧接鍛造する際に、鍋底に大きな塑性変形がともなうため鍋の形状が変化する。第10図に鍋形状決定までの設計フローチャートを示す。あらかじめ圧接によって生じる鍋の変形を数値シミュレーションで予測し、その結果にもとづいて加工前の形状を設計した(第11図参照)。鍋底は圧縮変形によりその直径が大きくなり、鍋上端部の拘束により鍋底が相対的に沈みかつ隅部のRが小さくなることからわかる。第12図に鍋底径変化量とクラッド板径変化量について解析値と実験値を合わせて示す。これより解析値は実験値に良く一致しており、圧接加工前の鍋形状を設計するのに有効であることがわかる。こうしてえられたIHアルミ鍋の外観を写真3に示す。上述した圧接工程において、数値シミュレーションによる工程設計は、試作による試行錯誤の回数を減らし、試作回数の低減に寄与している。

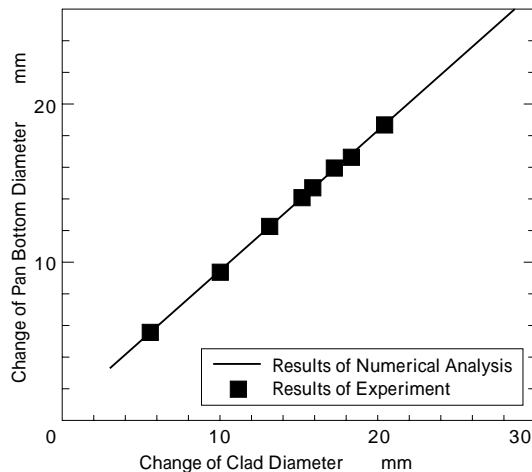
むすび=アルミニウム鍛造加工への数値シミュレーションの適用に関し、その技術と適用事例について報告した。

今後、鍛造CAEシステムは、FEM, CAD, DB(データベース), AI(人工知能)技術などの統合化したシステムに発展すると思われる^{10)~12)}。鍛造加工の工程・工具の設計における知能化手法の活用の一例として、筆者らは前述した航空機用ウェブリブ部品の工程設計CADシステムを構築し、それとFEM解析システムとの結合を図り、より効率的なシステム化の試みをおこなっている^{13),14)}。



第11図 鍋形状の圧接変形シミュレーション

Fig. 11 Deforming simulation for a grill pan



第12図 クラッド板径変化量と鍋底径変化量の関係

Fig. 12 Relation between change of clad diameter and change of grill pan bottom diameter



写真3 IH調理器用圧接鍛造アルミ鍋の外観

Photo.3 Aluminum IH grill pan by pressure welding method

いっぽう、DBについては、これまでの二次元の数値解析をベースに試作実験で有効な設計データを蓄積し、DB化することで鍛造設計業務の効率化がなしとげられる。

このような現状から、利用可能な手法や手段を駆使して、鍛造技術の基礎データを体系的に蓄積し、上記の統合化システムを開発することが課題と考える。

参考文献

- 1) 小坂田宏造: 塑性加工シンポジウム(1990), p.14.
- 2) 松下富春: 塑性と加工, Vol. 33(1992), p.1262.
- 3) 尾崎幸一ほか: 塑性と加工, Vol. 30(1989), p.1114.
- 4) 湯川伸樹ほか: 第42回塑性加工講演会, (1991), p.331.
- 5) 金丸信夫ほか: 第44回塑性加工講演会, (1993), p.693.
- 6) 金丸信夫ほか: 第42回塑性加工講演会, (1991), p.515.
- 7) 金丸信夫ほか: 第92回軽金属春季講演会, (1997), p.237.
- 8) 神尾一ほか: 軽金属, Vol. 47(1997), p.114.
- 9) 高田与男: 軽金属学会鍛造委員会資料.
- 10) 小坂田宏造ほか: 塑性と加工, Vol. 33(1992), p.1268.
- 11) 矢野裕司: 塑性と加工, Vol. 37(1996), p.1252.
- 12) 中西広吉: 第77回塑性加工講習会, (1997), p.41.
- 13) 金丸信夫ほか: 第47回塑性加工講演会, (1996), p.303.
- 14) 金丸信夫ほか: 平成9年塑性加工春季講演会, (1997), p.275.