

半凝固鑄鍛成型の工程設計のための CAE 活用法

Application of CAE for process design of semi-solid casting and forging

技術開発部 工業材料科 穴澤大樹 工藤弘行 矢内誠人
応募企業 日本オートマチックマシン株式会社

応募企業は半凝固鑄鍛成型技術の開発を行っているが、参考にできる情報が少なく、工程設計が困難であるという課題がある。そこで今回、CAE 解析による工程設計の効率化を目指して、材料試験と CAE 解析結果を照合し、半凝固鑄鍛成型の CAE 解析を行った。その結果、鍛造 CAE 解析により組織や欠陥の予測が可能であることが分かった。

1. 緒言

金属加工一般に、温度や金型や加工条件の工程パラメータについて様々な組み合わせを試し、最適な組み合わせを見つける作業を工程設計と呼ぶ。提案企業が取り組む半凝固鑄鍛成型は、半熔融・半凝固加工の一種で、(1)金型に及ぼす熱影響が小さい、(2)熱間割れが発生しにくい、(3)加工に要するエネルギーが少ない等の利点¹⁾を有している。しかし、実用段階にあるものは稀で、参考にできる情報が少なく、工程設計が困難である。そのため、工程設計には CAE の有効活用が求められるが、鑄造 CAE と鍛造 CAE のどちらを使用すべきなのか、どこまで適用できるのか見がなく、検証を行う必要がある。

そこで本研究では、材料試験を行い半凝固鑄鍛成型の特徴を調べるとともに、その結果を CAE 解析にフィードバックすることで、半凝固鑄鍛成型の CAE 解析の活用法を検討する。また、CAE 解析により得られた情報から試験・観察位置を決めるという CAE 解析から実験へのフィードバックも行い、CAE 解析と実験を統合的に行うこととする。

2. 実験

2. 1. 実験概要

半凝固鑄鍛成型の工程設計が難しいのは、凝固や熱間の塑性変形など、複雑な変化を生じるためである。図 1 に本研究で対象とする A6061 合金 (Al-Mg-Si) の Al-Mg₂Si 擬 2 元系状態図を示す²⁾。A6061 合金の一般的な組成は、Al-Mg₂Si の擬 2 元系状態図上に存在するため、2 元系合金として取り扱うことができる。このとき、図 1 中の液相線より上 (A) で成型する工程が鑄造、液相線と固相線の間 (B) で加工する工程が半凝固鑄鍛成型、固相線より下 (C) で加工する工程が熱間鍛造となる。半凝固加工は、固液共存状態から固相へと移り変わる途中で加工を行うため、加工を行わない鑄造や固相域での加工となる鍛造に比べ、複雑に変化することは状態図からも明らかである。

この複雑な変化を調べるにあたり、本研究では、X線CT観察、金属組織観察、硬さ試験を行う。

X線CT観察では、ボイド等の内部欠陥の確認と欠肉等の成型不良の確認を行う。この試験は非破壊で三次元的に観察できるため、他の試験を行う際の参考情報にもなる。例えば、内部欠陥を発見した際には、組織観察で、その断面を選択的に観察することができる。

金属組織観察は結晶粒径や介在物の有無、微小なボイドを観察する目的で行う。上述の通り、半凝固鑄鍛成型では金属組織がダイナミックに変化するため、組織観察を行いその特徴を確認する。

硬さ試験はサンプル各部位の機械的特性を調べるために行う。一般に温度履歴や加工度が違う場所は機械的特性にも差が生じる。半凝固加工では、表面と内部の温度勾配が大きく、一つのサンプル中でも場所によって温度履歴や加工度が異なっている。各部位の硬さを調べることで温度と加工条件に関する情報が得られると期待できる。

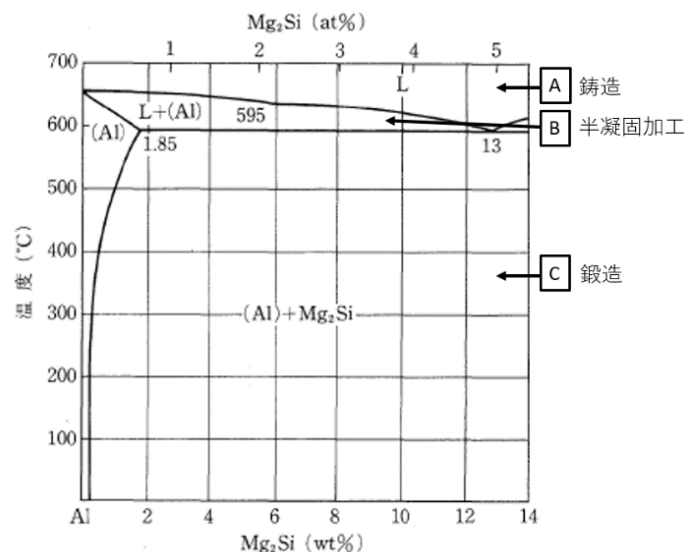


図 1 Al-Mg₂Si の擬 2 元系状態図²⁾

CAE 解析では鍛造解析用のソフトを用いて、製品形状、フローライン、加工履歴、温度履歴など基本

情報を算出する他、想定される加工欠陥である「ポイド」「欠肉」「自己接触」等の評価手法を検討した。

さらに、半凝固鑄鍛成型後の組織・硬さと、その後の熱処理後の組織・硬さを比較し、半凝固鑄鍛成型の熱処理に与える影響についても確認を行う。

2. 2. 試験項目

本研究では、素材を半凝固鑄鍛成型し、熱処理をするという一連の流れの各工程において、図2に示す試験を行う。素材と半凝固鑄鍛成型後のサンプルではCT観察、硬さ試験、組織観察を行い、熱処理後のサンプルには硬さ試験と組織観察を行った。

また、加工速度や加工温度の異なる2種類のサンプル(10-4, 11-4)を作製する(サンプル番号は提案企業指定)。サンプル名は表1に示したようにサンプル番号+工程とした。

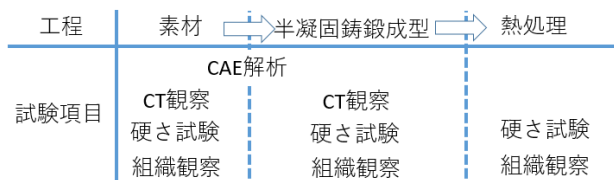


図2 各工程における試験内容

表1 サンプル名

工程 サンプル番号	素材	半凝固鑄鍛成型	熱処理
10-4	素材	10-4鑄鍛後	10-4熱処理後
11-4		11-4鑄鍛後	11-4熱処理後

2. 3. サンプル作製

2. 3. 1. 半凝固鑄鍛成型

素材として A6061 材を使用。切削加工によりある程度、最終形状に近づけた状態で半凝固鑄鍛成型を行った。

2. 3. 2. 熱処理

熱処理は T6 処理とした。T6 処理は溶体化処理により合金元素を母材中に固溶させた後、時効処理によって微細析出させ、機械的特性を向上させる熱処理である。条件は、一般的な T6 処理の条件³⁾として、溶体化処理を 530[°C]で 2 時間加熱後急冷(衝風冷却)、時効処理を 160[°C]で 18 時間行った(図3参照)。

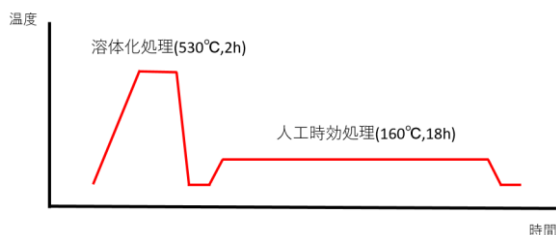


図3 T6 処理概要

2. 4. 試験

2. 4. 1. CAE 解析

本研究では、鍛造・熱処理解析が可能な simufact.forming を用いて解析を行った。このソフトは、有限要素解析と有限体積解析という2つの解析手法を併せ持つことや、解析上の専門用語ではなく加工現場の言葉を用いて解析の設定や評価ができることが特徴である。

図4はその基本画面である。基本画面は、ツリーウインド、部品庫ウインド、結果選択ウインド、メインウインド、グラフウインド等からなる。部品庫ウインドは工程設計の候補条件を一時的に保管する場所であり、条件をツリーウインドにドラッグ&ドロップするだけで容易に条件を変更できるなど、CAEソフトに不慣れな操作者でも、扱いやすい仕様となっている。

モデルは素材、ストリップ、パンチ、ダイの4部品で構成される。ダイを固定し、ストリップとパンチにそれぞれ異なるプレスモーションを与えた。プレスモーションは、時間とストロークを表形式で設定する「テーブルプレス」を用いた。これは、提案企業が使用するプレス機が出力する時間-ストロークグラフのデータをそのまま利用し、解析のリアリティを高めるためである。図5に「テーブルプレス」設定画面を示す。

本研究では、実験データとの連携のため、フローライン機能、ポストパーティクル機能を活用した。これらは、鍛造・熱処理解析に特化した Simufact.forming ならではの機能である。

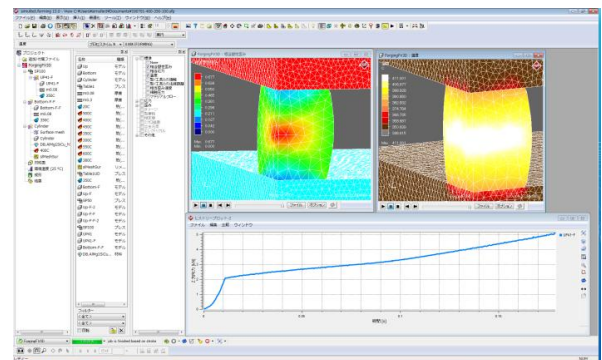


図4 基本画面

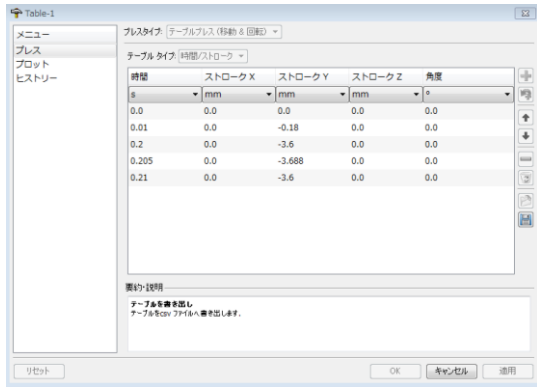


図5 プレスモーション設定画面

2. 4. 2. X線CTによる観察

非破壊構造解析装置 (TOSCANER-FTC32251phd) にて観察を行った。観察時の条件は管電圧 200[kV]、管電流 60[μA]、画素ピッチ約 70[μm]であり、今回の観察ではおおよそ 200[μm]以上の欠陥が観察対象となる。

2. 4. 3. 組織観察

各サンプルを樹脂包埋、研磨後エッチングを行った。エッチング液は 0.5[%]ふっ酸水溶液を用い 450 秒間液中に浸漬した。通常より長時間浸漬した理由は、半凝固プレス加工後のサンプルの粒界が現出しなかったため、結晶方位の違いによるコントラストを際立たせて結晶粒の観察を行うためである。その後、高倍率金属顕微鏡 (GX-71) にて観察を行った。観察はすべて明視野で行った。

2. 4. 4. 硬さ試験

マイクロビッカース硬度計 (HMV-2ADW) にて硬度測定を行った。荷重は 100[gf]で測定を行った。マイクロビッカース硬さ試験は微小な領域の硬さを測定することが可能であり、製品中の加工度や温度履歴の異なる様々な場所の測定ができる。

3. 結果及び考察

3. 1. CAE 解析結果

図6にフローライン解析の例を示す。図6左は塑性歪みのカラーマップ、図6右は温度のカラーマップとなっており、図中の黄色い線がフローラインである。フローライン解析は加工前の形状を基準に製品中の縦方向、横方向に等間隔の升目を配置し、加工後、加工中に、升目がどのように移動、変形するかを頼りに、加工の特徴を分かりやすく表示するものである。この方法は、鍛造加工におけるモデル材料 (例えば粘土が用いられる) を使った模擬試験や、板成型加工におけるスクライブドサークル試験と類似性のある評価といえる。なお、フローライン解析

という名称は、組織観察において素材自体が持つ方向性のある線状の模様を活用した観察に由来する。

図7にポストパーティクル解析の例を示す。この機能は、加工後の素材の形状を基準に任意の点や、升目で設定した点の加工履歴データを算出するものである。仕組みとしては、過去の計算結果を徐々にさかのぼりながら、その点がどこに居たかを、時間を遡るように追跡し (パーティクルトラッキングと呼ぶ)、その点の計算結果を収録する仕組みである。なお、この計算結果は積分点結果からの補間推定値である。

図7左は算出点の候補を設定する画面であり、データ算出後、表示する点を選び、グラフを生成する仕組みである。図7右は横軸を時間、縦軸を温度として、数点の温度履歴をプロットしたものであるが、全体としてどのような履歴を取り得るのか、例外的な履歴を持つ点はないかを調べる応用が考えられる。その他、加工後の位置を基準とする特徴から、組織観察や硬さ測定と紐づけた評価に有効と思われる。

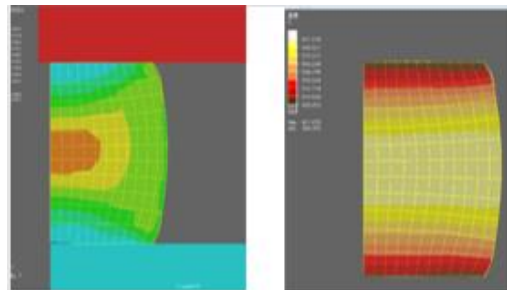
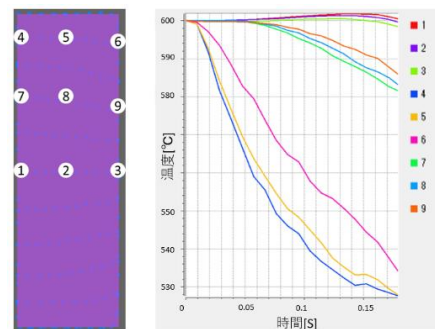
図6 フローライン解析例
(左: 塑性歪み 右: 温度)

図7 ポストパーティクル解析例

3. 2. X線CTによる観察結果

いずれのサンプルにおいても欠陥は見当たらず、良好な結果であった。また、CT 観察結果から作成した STL データをシミュレーション結果と重ねることで欠肉部の評価ができると期待できる。

3. 3. 組織観察および CAE との照合結果

3. 3. 1. 組織観察結果

図8～11に組織観察の一部の結果を示す。基本的には鍛造組織と類似した組織となっている。鍛造後のサンプルでは結晶粒界がほとんど現出されなかったが、熱処理を行うことで、結晶粒界が確認できるようになった。これは、素材時点で結晶粒界に集まっていた合金元素が、半凝固鍛造成型によって全体に拡散し、その後の熱処理によって再度、結晶粒界に合金元素が集まったためだと考えられる。結晶粒は、結晶粒径 100～200[μm]程度の結晶粒が引き延ばされている。Si や Mg-Si 化合物が万遍なく分布していたが、その他問題となる介在物や欠陥は見当たらなかった。



図8 10-4 鍛造後組織観察結果



図9 10-4 熱処理後組織観察結果



図10 11-4 鍛造後組織観察結果

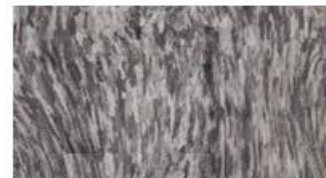


図11 11-4 熱処理後組織観察結果

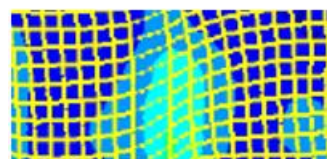
3. 3. 2. 鍛流線

鍛流線はファイバーフローとも呼ばれ、金属材料の鍛造時に見られる繊維状の組織の流れである。製品の機械的特性に影響を与える要素の一つであり、主に靱性に関与する。流れに沿った力に対して強い組織となるため、鍛流線の向きを制御することは製品開発において重要なポイントとなる。

図8、図10のような半凝固鍛造成型後サンプルでは、鍛流線がはっきりと見える結果となった。図12に示したように CAE 解析結果と比較すると高い精度で合致している。この時、CAE 解析では、フローライン解析を用いた。フローライン解析を用いることで高い精度での鍛流線予測が可能であることが分かった。



組織観察結果



CAE解析結果

図12 鍛流線とフローライン解析結果の比較

3. 3. 3. 欠肉部

図13に示す通り、CAEで予測されていた欠肉は組織観察でも観察でき、発生箇所もほぼ一致していた。今回の半凝固鑄鍛成型の条件であれば、液相の噴出、漏れ等は起こらず、CAEで予測された欠肉は実際の試験においても発生可能性が高いとみられる。

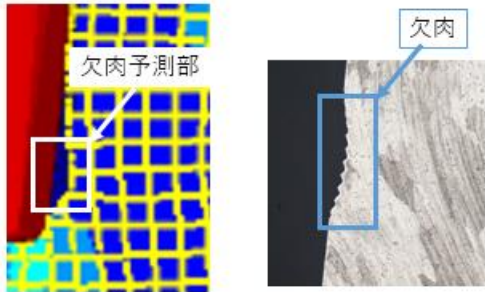


図13 CAEによる欠肉予測と組織観察結果

3. 3. 4. 自己接触部

図14に示すように、CAEで予測されていた自己接触は組織観察では見られなかった。CAE解析結果によると、自己接触時の温度は550~600[°C]とみられ、A6061の固相線温度が595[°C]であることを考えると接触後、溶け込む温度帯であった可能性がある。これは半凝固鑄鍛成型の大きなメリットである。この結果から、鍛造シミュレーションで自己接触が予測される場所において、同時に温度分布シミュレーションを行うことで不良発生の判断が可能になると期待できる。

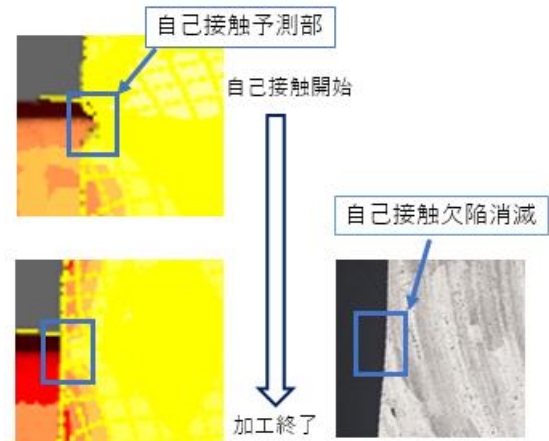


図14 CAEによる自己接触予測と組織観察結果

3. 4. 硬さ試験結果

10-4 鑄鍛後サンプルに対して等間隔で74点の測定を行ったところ、全体的に55HV0.1程度と、ほぼすべての測定箇所において誤差の範囲内となった。これは今回の加工温度域では加工硬化が起こらないことが原因だと考えられる。図15にA6061合金のフローカーブを示した。縦軸が流動応力(Pa)、横軸

が塑性ひずみであり、いわゆる応力-ひずみ曲線に相当する。図15には複数の温度条件(350~600[°C])、ひずみ速度条件(0.001~100[/sec])のフローカーブが描かれている。グラフの形を見ると350[°C]の場合と400[°C]の歪み速度が大きい場合を除きほとんどが平坦もしくは右肩下がりとなっており、加工硬化しないことを表している。したがって、半凝固鑄鍛成型では硬さがほぼ均一になると思われる。

この結果を受けて、10-4 熱処理後、11-4 鑄鍛後、11-4 熱処理後については、特徴点となる場所のみ測定することとした。測定位置はCAE結果から、①塑性歪みの大きい部分と小さい部分の境となる箇所、②塑性歪みが小さい箇所、③塑性歪み大きく特徴的な箇所、④塑性歪みの大きい箇所、⑤冷却速度が速い箇所を選んだ。結果を表2に示す。硬さの差は鑄鍛後サンプルの結晶粒の大きさや加工度の違いによる差と考えられる。通常、硬さ試験だけではここまで調べることはできないが、CAEを活用することで、加工温度やひずみ量を考慮した試験位置決定、検討を行うことが可能となる。

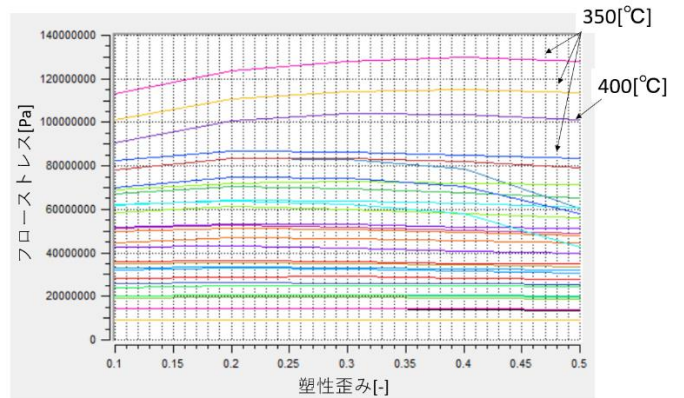


図15 A6061合金フローカーブ

表2 硬さ試験結果

	①	②	③	④	⑤
素材	121.6	123.9	120.7	122.9	122.0
10-4鑄鍛後	56.2	56.6	54.2	53.6	54.8
10-4熱処理後	126.3	125.6	128.4	131.2	119.7
11-4鑄鍛後	57.4	56.8	53.6	52.8	52.6
11-4熱処理後	121.6	119.8	132.3	121.1	124.4

(HV0.1)

4. 結言

本研究では、半凝固鑄鍛成型に対して CAE 解析や CT 観察、組織観察、硬さ試験等を行い、下記の知見を得ることができた。

- ① 鍛造 CAE でポイントトラッキングやフローカーブ機能、温度分布シミュレーションを活用することで組織予測・不良予測が高い精度で可能である。これらは工程設計において有用な情報であり、今回使用した CAE ソフトが工程設計に活用できる。
- ② 半凝固鑄鍛成型は加工の影響が硬さにあまり影響せず、全体的に均一な硬さになると考えられる。
- ③ 半凝固鑄鍛成型後は強度が A6061-O 材程度となるが、熱処理によって通常の A6061-T6 材とほぼ同等の機械的特性になると見込まれる。
- ④ 半凝固鑄鍛成型は接合性に優れ、自己接触による欠陥を抑制することができる。

参考文献

- 1) 杉山澄雄. 半溶融・半凝固加工研究の流れ. 生産研究. 2013, 65 巻 6 号, P. 803-809
- 2) 大堀紘一. Al-Mg-Si 系合金. 軽金属. 1988, Vol. 38, No. 11, P. 748-763
- 3) 軽金属学会. アルミニウムの組織と性質. 1991, 572p.