

A 金属材料の半凝固状態および凝固後冷却中の機械的特性評価技術

ダイカストや鋳物など溶解・鋳造で製作される製品の設計・開発、品質・歩留まり向上のためには、鋳造時の材料の温度・ひずみ・欠陥分布などが鋳造条件によってどのように変化するかを実測することが重要である。しかしながら、鋳造時には鋳型、材料とも高温かつ3次元形状であるため、計測できる情報は非常に限定され、その情報を鋳造条件へ反映させることもまた困難である。そのため、計算機シミュレーションにより鋳造製品のひずみ分布などを精度よく予測することができれば、設計・開発の効率化、品質向上に対して、インパクトは大きい。

鋳造プロセスにおける凝固過程は熱移動、物質移動、変形全てが相互に関連し、また液相から固相への相変態もある。そのため、現実の現象を忠実に再現するシミュレーションを行うには、関連する特性値、物性値を全て実測、インプットして、たとえば濃度、ひずみ、固相率などの空間分布の温度変化を計算することが必要となるが、現実的には非常に困難である。そのため、着目する現象に絞ってシミュレーションすることが多い。とくに熱応力解析においては、インプットデータとして実測する応力-ひずみ関係が重要となる。よく知られているように、鉄鋼材料はもちろんアルミニウム合金などの非鉄材料においても、熱履歴によって内部組織が変わり、それにもとない機械的特性(応力-ひずみ関係)が大きく変化する。したがって、鋳造時の熱応力解析のためには、熱履歴、すなわち溶解→凝固→冷却という順番にしたがった熱履歴の各段階での応力-ひずみ関係取得が必要となるが、これは一般的な引張試験機では不可能である。

本稿では熱応力解析に重要となる鋳造時の熱履歴を模擬して機械的特性を評価できる試験装置を製作し、実際に評価した事例を、アルミニウム鋳物合金を例にとって紹介する。



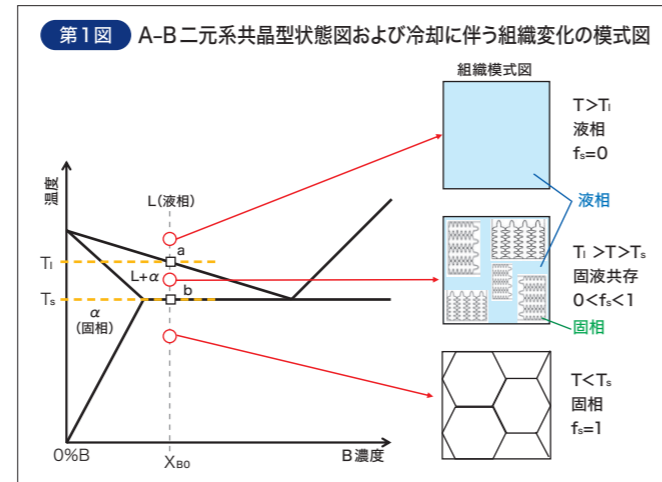
A-1 半凝固引張試験および凝固後引張試験

1.1 概要

一般的に鋳造工程では、一旦完全に溶融し、その後液相線温度から凝固を開始、固相線温度で凝固を完了、その後室温まで冷却される、という熱履歴を経る。成分A、Bの二元系共晶型状態図を模式的に第1図に示す。本図において、縦軸が温度、横軸が成分Bの濃度であり、線で囲まれた領域にその温度、濃度で安定な相を示している。横軸左側がA:100%であり、ここでは主成分AにBが添加されたA-B二元合金を想定し、A側の拡大図を示している。例えばAl-Si二元系状態図はAlをA、SiをBとしてこの型に属する。ここで、濃度 X_{B0} の場合を考えると、濃度 X_{B0} の縦線が最初に状態図上の線と交わる温度(図中の点a)が液相線温度(凝固開始温度)、 T_l 、次に状態図上の線と交わる温度(図中の点b)が固相線温度(凝固終了温度、この場合は共晶温度)、 T_s である。この液相線温度と固相線温度の間では、液相と固相が共存する温度域(固液共存域、図ではL+ α)が現れる。これは純金属には無い合金の特徴である。図には二成分系の場合を示したが、三成分系以上でも図が複雑にはなるが同様である。

鋳造時の熱応力解析には固相線温度以下の完全に固相になった後のみならず液相線温度と固相線温度の間の固液共存

域(固相率、 f_s が $0 < f_s < 1$)での特性も必要となる。それは、第2図に模式的に示すように、固液共存域でも変形抵抗がゼロにならないためである。変形抵抗が発生するのは、第1図中の組織模式図に示したように、液相線温度から固相線温度に近づきある固相率以上になると、固相同士が接触し液相が分断されるためである。

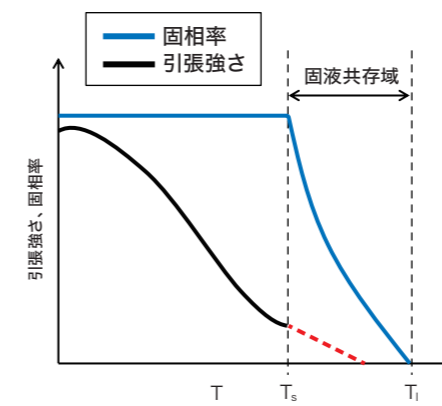


また、上述のようにアルミニウム合金でも鋼と同様に熱履歴によって組織は変わり、またその結果、特性も変わる。したがって、鋳造の場合は完全に溶けた状態から($f_s=0$)、固相($f_s=1$)に変化する過程での固液共存域での特性評価(応力-ひずみ関係取得)が必須となる。熱履歴の異なる固液共存域での引張試験方法の説明図を第3図に示す。室温から昇温して一部を融かして($f_s=1$ から $f_s < 1$ に変化させて)引張試験をする場合(半溶融引張試験)と一度溶解し、鋳造して一部を凝固させて($f_s=0$ から $f_s < 1$ に変化させて)引張試験をする場合(半凝固引張試験)では、同じ温度でも特性に大きな差がでることが報告されている¹⁾。熱履歴、組織を合わせた状態での特性評価のためには、半凝固引張試験の必要性が理解される。

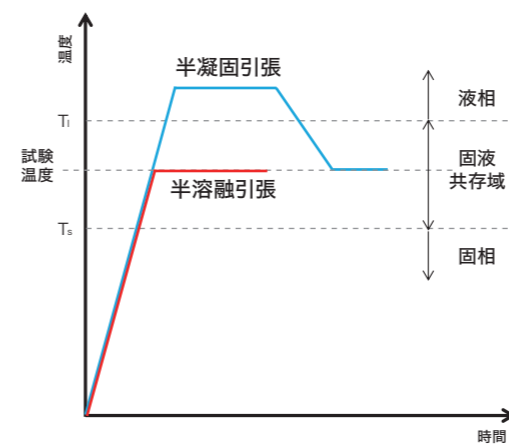
また熱履歴を合わせるという意味においては、完全に凝固した固相線温度以下の温度でも同様である。つまり、完全凝固後の冷却中の特性評価においても鋳造材を加熱して評価するのではなく、鋳造後にそのまま特性評価する必要がある。凝固後模擬の一つの方法として、通常の万能試験機で一旦鋳造材を固相線温度直下まで昇温し、そこから試験温度まで降温して応力-ひずみ関係を取得することも考えられるが、あくまで模擬であり凝固後の組織を正しく反映した評価とはならない。

当社では参考文献¹⁾の早稲田大学のグループが開発した試験機を参考に、半凝固引張試験および凝固後引張試験が可能な装置を製作した。次項以降で、試験機および試験結果を紹介する²⁾。

第2図 固相率と引張強さの関係



第3図 熱履歴が異なる固液共存域引張試験方法



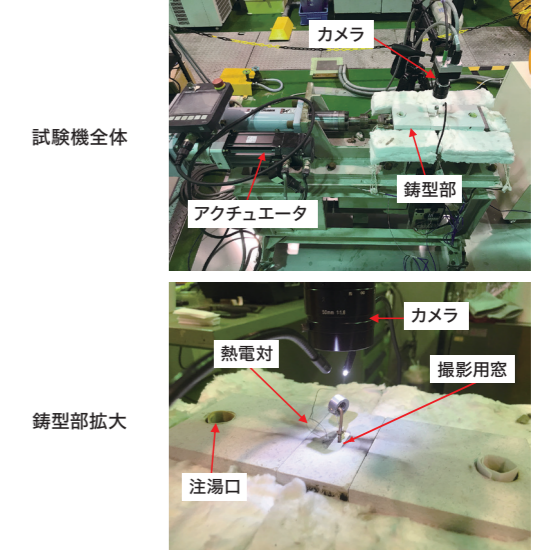
1.2 装置および試験方法

製作した装置外観を写真1に示す。装置概要を簡単に述べると、試験片を鋳込む鋳型が付属した水平型の引張試験機である。主な構成はロードセルを内蔵したアクチュエータ、ヒーター内蔵の鋳型およびひずみ計測用のカメラである。アクチュエータの最大推進力およびロードセルの最大容量は30kNである。試験片を鋳込む鋳型の模式図を第4図に示す。長手方向中心 ± 50 mmに断熱材を設置し、さらに中心 ± 25 mmは厚くしている。中心部の断熱材を厚くし冷却を意図的に遅らせることで、鋳型端の試験片固定部の温度を中心部よりも相対的に低くし強度を高くすることで、中心部が評価部(変形部)となるように設計している。なお、固定部にはボルトを配置し、ボルトに溶湯を鋳ぐるませることで試験片を固定し荷重を負荷できるようにしている。試験中の試験片温度は長手中心から10mm位置でK熱電対により測定している。

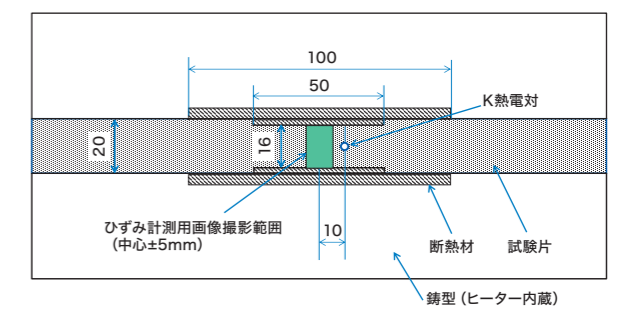
試験手順は以下のとおりである。

- ① 供試材を溶解し、注湯口より鋳型へ鋳造する
- ② 試験開始温度まで温度低下を待つ
- ③ 試験開始温度より引張を開始し、そのときの試験片の評価部表面(長手中心 ± 5 mm)をカメラで撮影する

写真1 試験機外観



第4図 鋳型模式図



試験中の試験片のひずみはカメラ撮影画像から代表2点間の変位を画像解析により求め、そこから算出した。試験片表面のカメラ撮影画像の例を写真2に示す。光を当てることにより白く見える輝点を得られ、この輝点間の変位を計測することでひずみを算出した。温度、荷重、ひずみ(カメラ撮影画像)を全て同期して取得することにより応力-ひずみ関係を取得することができる。なお、試験方法からわかるとおり、本試験では試験中に温度低下が起きるが、本稿では便宜的に最大荷重時の温度を使って結果を整理している。また凝固収縮により評価部断面積は鋳型寸法とは一致しないが、ここでは鋳型寸法(16×20mm)を公称値としてもちいて、荷重を公称応力へ換算した。ロードセルの最大容量の8割である荷重24kN、試験片の公称断面積(16×20mm=320mm²)で計算すると、試験可能な最大応力は75MPaとなり、一般的なアルミニウム合金の高温強度を考えると、固相域での評価も可能であることがわかる。

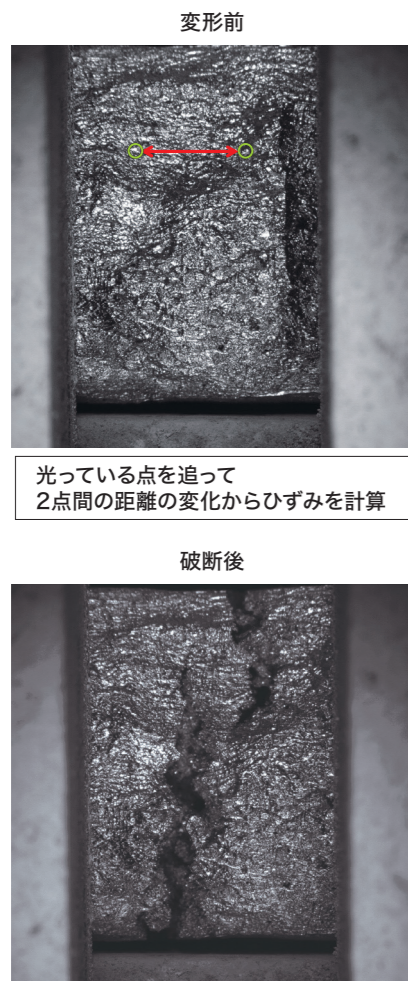
のため、凝固開始温度(約610°C)で一度温度停滞があり、Al-Si二元共晶温度(約570°C)で再び温度停滞が認められた。その後冷却していくが約510°Cで変曲点があり、ここが凝固終了温度と考えられる。また、熱力学計算ソフトFactSageのScheil moduleによる相平衡計算結果を第6図に示す。液相線温度(凝固開始温度)は613°C、固相線温度(凝固終了温度)は510°Cとなり、実測された冷却曲線とほぼ一致していることがわかる。また、液相(Liquid)は約570°Cの共晶温度で一旦急激に減少し、550°Cにかけてゼロに近づき、550°Cでは約2%程度である。

これらの結果から、固液共存域での評価を目的とした半凝固引張試験の試験温度は固相線温度以上、Al-Si二元共晶温度(571°C)以下の範囲とし、試験開始温度を550°Cとした。また凝固後引張試験では、試験開始温度を530°C~380°Cとした。試験速度は0.4mm/sとした。

1.3 供試材および試験条件

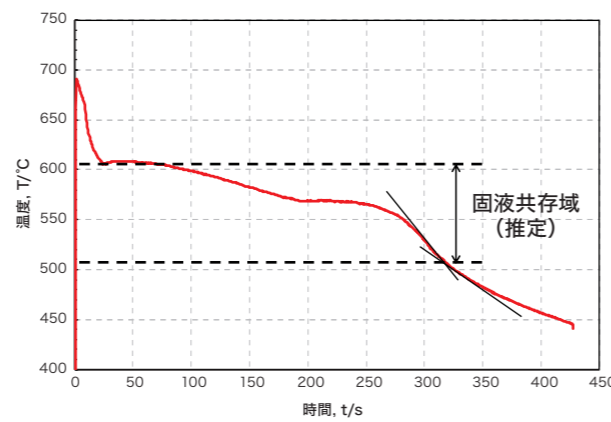
Al-Si-Mg系のAC4Cアルミニウム合金をもちいて半凝固引張試験および凝固後引張試験を行った。主要合金成分の分析値はSi:7.03wt%、Mg:0.357wt%である。また試験機の鋳型に鋳造したときの冷却曲線を第5図に示す。AC4C合金は亜共晶組成

写真2 ひずみ測定用の試験中の溶湯表面カメラ撮影画像



光っている点を追って
2点間の距離の変化からひずみを計算

第5図 AC4C合金の冷却曲線



第6図 AC4C合金の相平衡計算結果 (FactSageのScheil moduleによる計算結果)

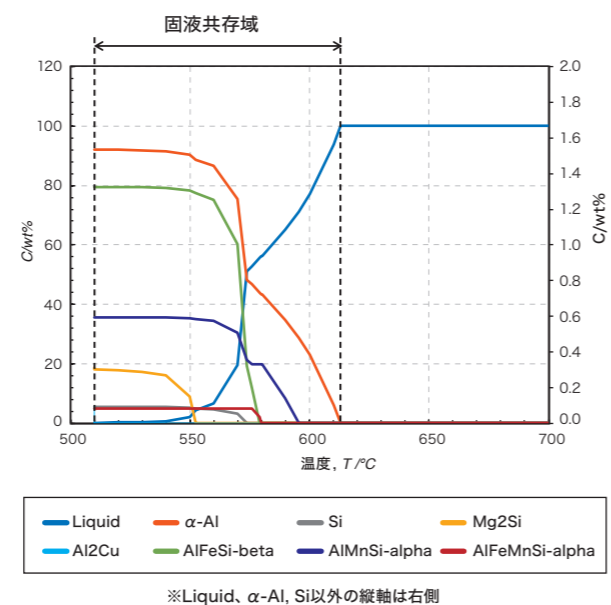
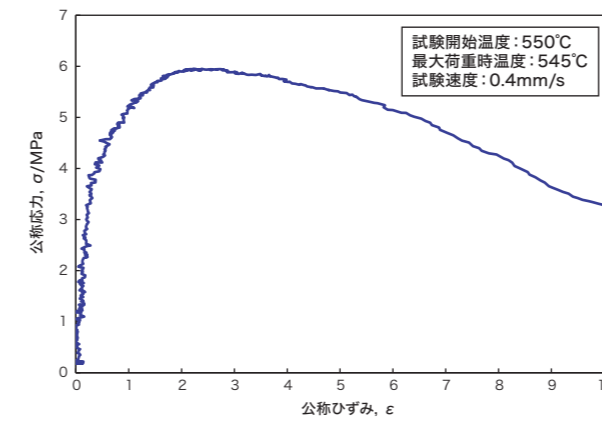


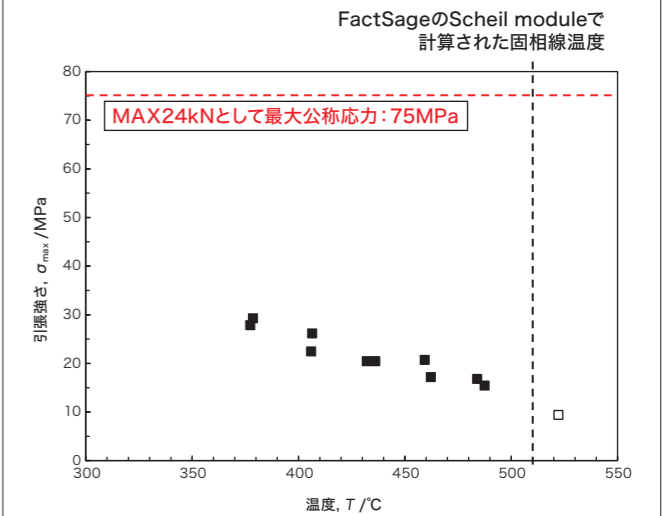
写真3 試験後の試験片外観写真



第7図 AC4C合金の固液共存域での応力-ひずみ関係



第8図 AC4C合金の凝固後引張試験による引張強さと温度の関係



1.4 試験結果

試験開始温度550°Cの半凝固引張試験により得られた応力-ひずみ関係を第7図に、試験後試験片外観を写真3に示す。荷重の急激な立ち上がりから最大荷重を迎え、荷重低下が起きるまで、応力に僅かな振動的な変動があるが、通常の引張試験と遜色のない結果が得られた。なお、上述のとおり、試験中に試験温度は

低下するため、試験片温度約550°Cで試験を開始し、最大荷重時で545°Cとなった。凝固後引張試験の結果を第8図に示す。横軸の温度は最大荷重時の温度とした。温度低下とともに引張強さが増加するという一般的な温度依存性が得られた。また固液共存域と固相域の最大応力に不連続は無く、連続的な変化となることが示唆された。最大荷重にはまだ余裕があるため、より高強度材、低温での評価も可能であることがわかる。

AC4Cアルミニウム鋳物合金について、半凝固引張試験および凝固後引張試験の事例について紹介した。主にアルミニウム合金を対象として装置は設計されているが、改良により温度範囲を拡大することで例えば銅合金などでも実施できるようにしていくことが一つの課題である。また、本稿では鋳造を例にとったが、熱処理、熱間加工、溶接などでも同様に熱履歴を考慮した評価を行わないと、実際の特性和大きく異なることが予想されるため、これらの現象の計算機シミュレーションにおいても熱履歴をあわせた評価が必須となるであろう。機械的特性に限らず試験機の開発・改造などにより液相域、固液共存域をも含む、熱履歴模擬評価の適用範囲拡大に向けてこれからも取り組んでいきたい。

参考文献 *1) 座間ら: 軽金属, 61 (2011), 446-451.
*2) 佐藤ら: 軽金属学会第137回秋期大会講演概要, (2019), 247-248.