

鑄造CAE技術の精度向上

道岡 裕也
Yuya Michioka

日野 健太郎
Kentaro Hino

概要

本論文では、鑄造CAEにおける不具合予測の精度向上を図るため、温度に着目した複数の取り組みについて紹介する。具体的には、基礎試験によってCAEパラメータを調整した事例、および実際の鑄造ラインにおける注湯工程を数値化しCAE条件へ適用することで精度向上を実現した事例を取り上げる。

1. はじめに

アイシン高丘では、鑄造プロセスにおいて鑄鉄製の自動車部品を主に生産している。従来、鑄造における不具合対策は、経験と勘、および試行錯誤に頼る部分が大きかった。しかし、約30年前に鑄造CAE (Computer Aided Engineering)を導入して以降、不具合対策の強力なツールとして活用してきた。

近年、CAEはDX(デジタルトランスフォーメーション)推進による生産準備リードタイム短縮に向けた重要なツールとして位置付けられている。品質不具合による手戻りをなくすことを目的としてCAEを最大限に活用するためには、さらなる不具合予測の精度向上が必須となっている。

鑄造におけるCAE評価は、溶融金属を砂型へ流入させる「湯流れ」過程と、その後の冷却・固化に至る「凝固」過程を主な対象とする。これら二つの過程のいずれにおいても、温度を要因とした不具合(図1)が発生するため、実際の鑄造における温度変化をCAEで高精度に再現することが重要である。そこで、湯流れおよび凝固過程における温度を調査するために、オフラインでの基礎実験を行い、CAEパラメータの調整に取り組んだ。なお、鑄造CAEソフトはFLOW-3Dを使用した。



ユザカイ欠陥 ガス欠陥
図1 温度を要因とした不具合例

さらに、実際の量産ラインへの適用においては、トリベ(図2)を用いて溶湯(溶融金属)を型に流し入れる「注湯工程」によって鑄型内の温度分布が形成される。このため、注湯状態を数値化しCAE条件に適用することで、量産におけるCAE精度向上に向けた取り組みを実施した。

本論文では、以上の背景に基づき、以下の3つの実施内容について報告する。

- (1)湯流れ基礎実験による流動状態および温度の再現
- (2)凝固基礎実験による冷却温度の再現
- (3)量産注湯条件の数値化とCAE条件への適用

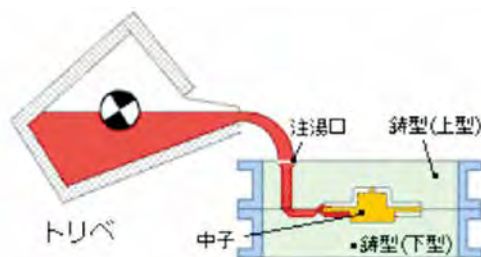


図2 注湯工程

2. 湯流れ基礎実験による流動状態および温度の再現

2.1 実験条件

湯流れCAEにおける温度精度向上のため、渦巻き試験片を用いて鑄造実験を行った。その際、熱電対を設置して溶湯の到達温度を測定するとともに、流動長を調査した。また、注湯時の注ぎ方によるばらつきを低減するため、注湯方法はストッパー方式を採用した。実験形状および条件を図3に示す。



図3 実験形状および条件

2.2 実験結果及びCAE比較

実験結果およびCAE結果(パラメータ調整前後)を図4に示す。実験では、測定点①および②において、溶湯の到達温度が液相線温度以上であった。その後、測定点②から③にかけては、温度が共晶凝固点付近に低下し、それに伴い流動性が低下したため、溶湯の到達時間が遅延していることが確認された。

一方、調整前のCAE結果では、各測定点における温度が実測値と比べて高い傾向が確認され、流動長も実験結果と比較して長くなる結果となった。

これらの結果に基づき、CAEにおける熱伝達係数等のパラメータを調整し、温度が実験結果と合致するように補正を行った。その結果、調整前と比較して実験結果と同様のCAE結果が得られるようになった。

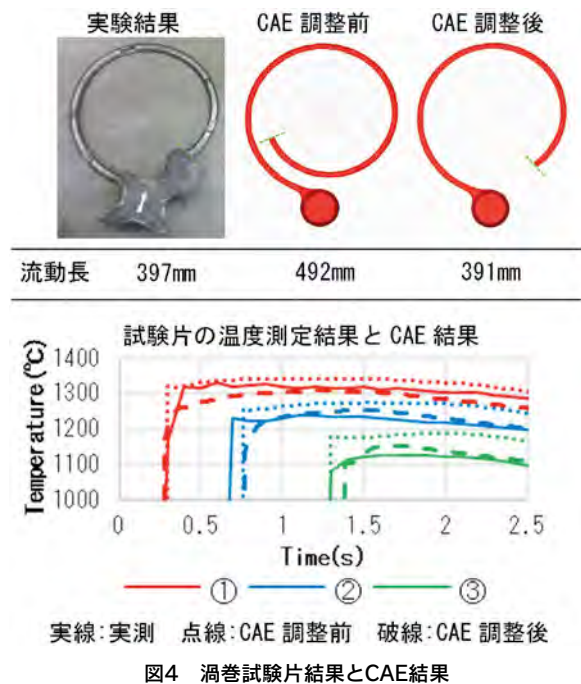


図4 渦巻試験片結果とCAE結果

3. 凝固基礎実験による冷却温度の再現

3.1 実験条件

凝固CAEにおける温度精度向上のため、当社の主力製品であるデフケースを模擬した円盤形状の試験片を用いて鑄造実験を行った。円盤の上下方向の2か所に

熱電対を設置し、溶湯の湯流れ温度および凝固温度の測定を実施した。実験形状および条件を図5に示す。

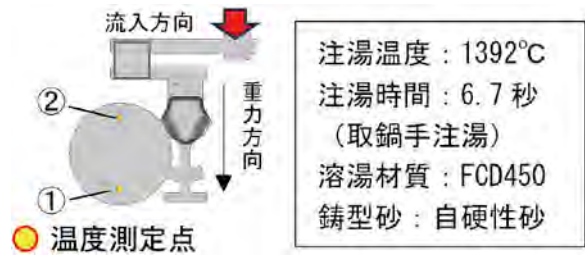


図5 実験形状および条件

3.2 実験結果及びCAE比較

実験結果およびCAE結果を図6に示す。CAE解析には、前項の湯流れ実験で調整されたパラメータを適用した。実験では、湯流れ過程において、測定点①および②の順に溶湯が充填され、その到達温度は測定点①の方が高いことが確認された。その後、凝固過程においては、到達温度の高かった測定点①の方が先に冷却・凝固していることが確認できた。さらに、注湯完了後から共晶凝固に至るまで(溶湯の流動性が低下するまで)の期間において、測定点①と②の温度が逆転していることが確認された。

一方、CAE結果では到達温度の再現性は確認されたものの、その後の凝固過程においては測定点②が先に冷却・凝固するという、実験結果とは異なる結果となった。実験結果では、重力方向において、温度測定位置の上下で温度逆転(高温部と低温部の入れ替わり)が発生しており、対流の影響によるものと推察された。

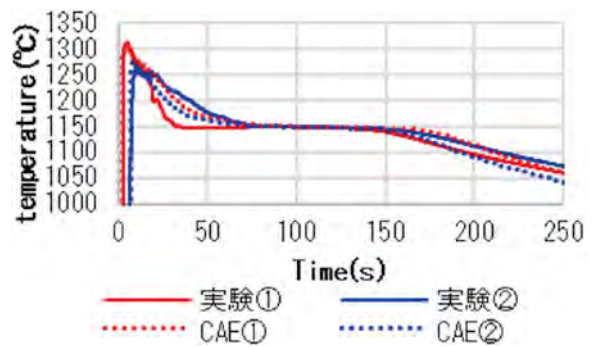


図6 試験結果とCAE結果

3.3 対流考慮によるCAE結果

鑄造CAEにおいては、小物の鑄鉄製品を対象とする場合、凝固までの時間が短いという特性から、計算時間の短縮と比較的良好な精度を両立できるため、流動計算を省略する手法が用いられている。しかし、今回得られた実験結果を再現するためには、凝固過程における流動の考慮が必要であると考えられた。

そこで、CAEモデルにおいて温度低下に伴う密度変化を設定し、対流を考慮した流動解析を凝固過程の計

算に適用した。その結果、実験結果とCAE予測が良好に一致するようになり、凝固過程における温度計算精度の向上が確認された(図7)。一方で、この手法は従来手法と比較して計算時間が約2倍程度長くなるため、計算時間の短縮が今後の課題となる。

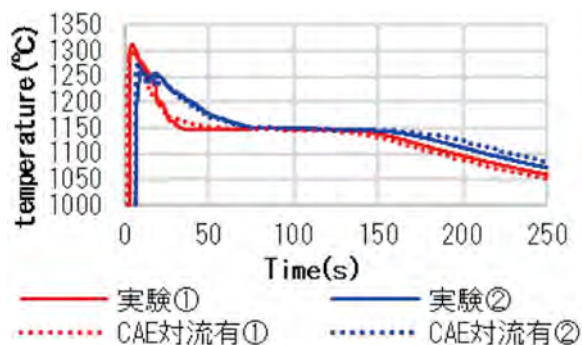


図7 対流考慮CAE結果

4. 量産注湯条件の数値化とCAE条件への適用

4.1 CAEの量産工程への適応

量産工程で発生しているユザカイ不良(主に温度影響による不良であり、溶湯が製品を低温度で充填した際にシワ状に発生する欠陥)を対象に、湯流れ過程のCAE予測精度の検証を実施した。CAE解析結果では、溶湯先端の合流時の温度が1250°C以上(液相領域)と予測され、ユザカイ不良の発生を予測できない結果となった(図8)。



図8 実機-CAE結果

4.2 要因考察

鑄造工程においては、様々な条件が鑄造不良に影響を及ぼす。今回対象としているユザカイ不良は、温度に起因するものであり、量産工程において温度に大きな影響を与える因子として、注湯温度および注湯流量が挙げられる。

注湯温度については、注湯前に実測し、その値をCAEに適用している。しかし、注湯流量に関してはCAEに適切に反映されていない現状がある。これまでのCAEにおける注湯条件は、設備に入力される注湯時間と注湯重量から算出される平均流量を一定として扱っていた。一方、量産工程における実際の注湯状態では、時間経過とともに流量が変化することが知られており、この流量変動が

溶湯の鑄型内への充填挙動や温度分布に影響を及ぼしていると考えられる。その結果、ユザカイ発生部位におけるCAE予測精度の低下につながっているものと推察される。

4.3 注湯状態の数値化

注湯流量の時間変化を詳細に捉えるため、まず設備から取得可能な時間-重量変化データ(図9)の活用を検討した。しかし、このデータを注湯条件として扱った場合、図9のa付近では実際の溶湯は排出されているにもかかわらず、取得データはマイナスの値を示していた。これは溶湯が逆流する現象を示唆しており、物理的に起こり得ない状態であった。また、図9のb付近では、傾動取鍋が湯切り動作を行う際に、注湯データが取得できないことも確認された。これらのことから、設備からの時間-重量変化データでは、注湯流量を正確に表すことは困難であると推定した。

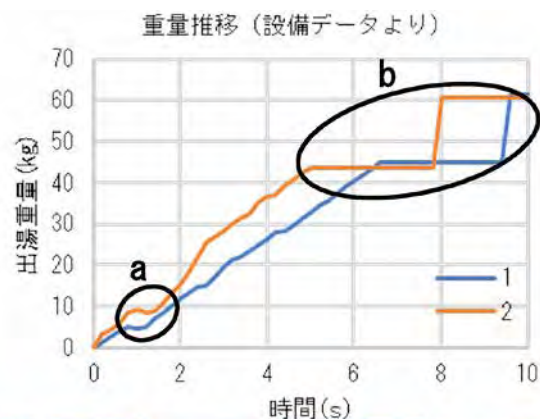


図9 注湯の時間-重量変化

そこで次に、溶湯を直接観察することで注湯流量の変化を捉える手法を検討した。様々なカメラの検証を行った結果、産業用カメラが注湯状態を詳細に捉えるのに適していると判断した(図10)。得られた注湯動画を専用の分析ソフトウェアで解析することにより、流線の太さを自動で数値化することが可能となり、注湯流量を定量的に表現できるようになった。この手法により、注湯流量を直接的かつ精度良く表現できるようになったため、注湯中の流量変化をCAEの境界条件として組み込むことが可能となった。

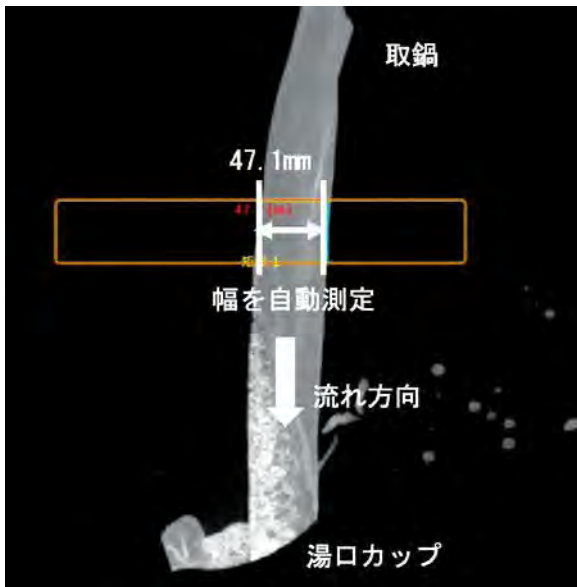


図10 産業用カメラで撮影した注湯の様子

4.4 注湯条件の適合化とCAE比較結果

CAE解析に適用した注湯条件として、従来手法に基づく一定流量条件と、変動流量条件を図11に示す。一定流量条件(従来の条件)は、設定された注湯重量と目標とする注湯時間から平均流量を算出する方式を採用した。一方、変動流量条件は、実際の注湯重量および注湯時間を考慮し、前節で述べた産業用カメラによる画像解析から得られた注湯流量の時間変化データに基づいて設定した。

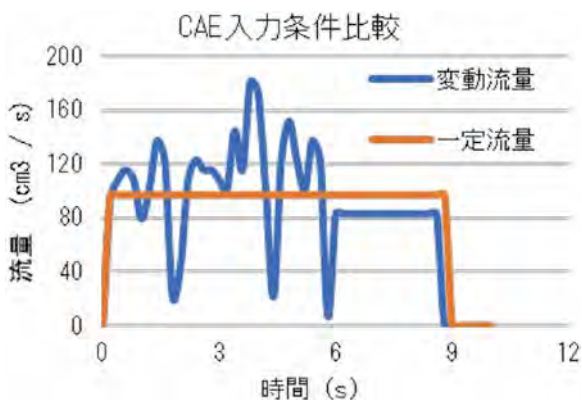


図11 注湯条件の比較

図12に、一定流量条件(従来の解析条件)と変動流量条件を用いて実施したCAE解析の比較結果を示す。まず、量産工程においてユザカイ不良が発生した部位に対して、変動流量条件を適用したCAE解析の結果では、ユザカイ不良発生部位付近での顕著な温度低下が確認された。具体的には、当該部位が約1200℃で充填されていることが示され、従来の一定流量条件でのCAE結果と比較して、充填時の温度が約50℃低い結果となった。この温度は、対象の材質における液相線を下回る温度であるため、変動流量CAEにおいてはユザカイ不良の発生を予測することが可能となった。これにより、

量産工程の実際の注湯条件(流量の時間変化)をCAEに加味することで、CAEの充填挙動がより現実に合致するようになり、CAE上でのユザカイ不良の判定精度を大幅に向上させることができた。

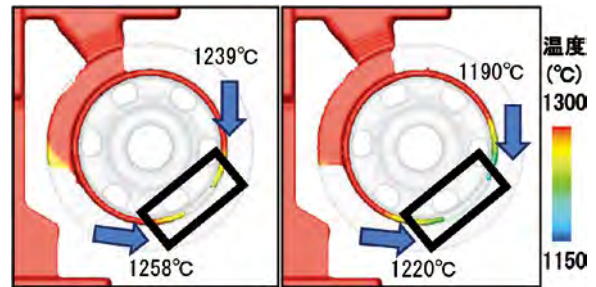


図12 CAE比較結果

5. おわりに

鑄造解析におけるパラメータ調整と、実注湯条件(変動流量)のCAEへの適用により、温度計算精度の向上を実現した。これにより、ユザカイのような温度関連の不良に対する予測精度が向上し、その有効性が実証された。一方で、凝固中の対流現象をCAEで考慮した場合、計算時間が大幅に増加するという課題が明らかになった。この問題に対応するためには、GPUなどを活用した計算時間短縮技術の導入が不可欠であると考えられる。また、温度だけでなく複数の要因が複雑に絡み合っ発生する鑄造不良に対しては、依然として予測精度に課題が残っている。CAEでは十分に考慮できていない物理現象の再現性を高めることが今後の重要な課題である。今後も、ソフトメーカーとの連携を強化しながら、CAE解析のさらなる精度向上に取り組んでいく所存である。

筆者



道岡 裕也

アイシン高丘株式会社
鑄造生技部
鑄造生準G DET
鑄造CAE活用及びCAE精度向上に従事



日野 健太郎

アイシン高丘株式会社
鑄造生技部
鑄造生準G DET
鑄造CAE活用及びCAE精度向上に従事