

精密鑄造におけるシミュレーション技術の現状

Current Status of Simulation Technology in Investment Casting Process

佐藤 茂 征 株式会社 IHI キャスティングス 技術部 部長
齋藤 侑里子 技術開発本部基盤技術研究所材料研究部
荒井 幹 也 株式会社 IHI キャスティングス 取締役

精密鑄造は溶融した金属をセラミック鑄型に注湯し、凝固させることでタービンプレードを代表とする中空複雑形状品を製造する技術である。凝固を制御することで一方向凝固 (Directional Solidification) や単結晶 (Single Crystal) に結晶組織を制御することができるが、鑄造条件や鑄造方案の影響を受けてさまざまな鑄造欠陥が発生する。この鑄造欠陥を速やかに、かつ効率良く低減することを目的としてシミュレーションの適用を図っており、単純な鑄造欠陥の予測精度は大きく向上している。一方、複雑な発生メカニズムをもつ鑄造欠陥についても、妥当性の高い予測が可能となっており、従来よりも技術は進歩している。本稿では、株式会社 IHI キャスティングスにおけるシミュレーションの適用手法や事例について紹介する。

Investment casting is a technique for manufacturing hollow, complex shaped products, such as turbine blades, by pouring molten metal into a ceramic mold and solidifying it. Moreover, crystal structures can be controlled for directional solidification or single crystal by controlling solidification, but various casting defects occur due to the influence of casting conditions and gating design. Simulation is applied for the purpose of promptly and efficiently reducing these defects and prediction accuracy of simple casting defects is greatly improved. Meanwhile, it is becoming possible to reasonably predict casting defects having complex generation mechanisms. This paper introduces a case study of how simulation is applied in our company.

1. 緒 言

株式会社 IHI キャスティングス (ICC) ではロストワックス精密鑄造法 (インベストメント鑄造法) を適用して、ジェットエンジン部品やターボチャージャー用タービンホイールを製造している。ジェットエンジン用のタービンプレードは複雑な中空形状を有し、加えて一方向凝固や単結晶として組織制御が求められる場合もある。高い寸法精度と品質要求があり、規格値を超えた寸法外れ、鑄造欠陥は許容されない。主要な鑄造欠陥としては、①湯回り不良 ②シュリンケージ (収縮巣) ③介在物 ④方向性凝固品の等軸晶 ⑤結晶方位のずれ ⑥再結晶 ⑦クラック ⑧湯境、などがあり、製品歩留りを低下させている。鑄造欠陥を低減させるためには、適正な鑄造方案 (同時に鑄造する数、配置)、鑄造条件 (鑄込み温度、鑄型温度、引抜き速度など)、耐火物 (鑄型、セラミックコア) を選定する必要がある。従来の新製品開発では、これらの最適化に多大な時間を要してきた。

一方、迅速かつ低コストで素材を開発するために、最適化へのシミュレーションの適用が検討されてきた⁽¹⁾。ICCでも、1980年後半からIHIと共同でシミュレーション

技術の開発を開始したが、当初はシミュレーションに使用する物性値や境界条件が妥当ではなく、実験結果と一致するシミュレーション結果とはならなかった。また、コンピュータの能力が乏しく、解析には多大な時間を要し、開発のスピードアップにはつながらないことも問題であった。現在、これらの問題は改善され、特定の鑄造欠陥については、実験結果とほぼ一致するようになっており、素材開発に活用されている。また、さらなる精度向上と予測できる事象を拡張するためシミュレーション技術の開発を続けている。

2. 現状のシミュレーションの実力

2.1 解析精度

精密鑄造は加熱した鑄型に溶湯を注湯し、それを冷却・凝固させるプロセスである。溶湯は流入中から抜熱され、流動限界温度まで湯温が低下すると溶湯の進行は止まり、湯回り不良となる。一方、湯が完全に充填されたとしても、凝固中に製品から押し湯部へ温度の指向性がないと押し湯からの給湯が途絶え、局所的な最終凝固となる。そして凝固時に体積収縮が起きシュリンケージとなる。これに加えて、凝固中の温度勾配は結晶の核発生やその成長性に

関与し、結晶の形状や粒径に影響を及ぼす。すなわち、精度良くシミュレーションを実施するには、凝固過程で刻々と変化する製品部位の温度を正確に把握することが最も重要である。

一方向凝固 casting における引抜き中の各部位の温度解析値と実測値の比較を第 1 図に示す。凝固時の各測定箇所における解析値と実測値の差は $\pm 20^{\circ}\text{C}$ であり、従来よりも精度は大きく向上している。さらに解析精度を高めるには、鋳型厚さのばらつき設定など、各種耐火材の細かい設定が必要になる。

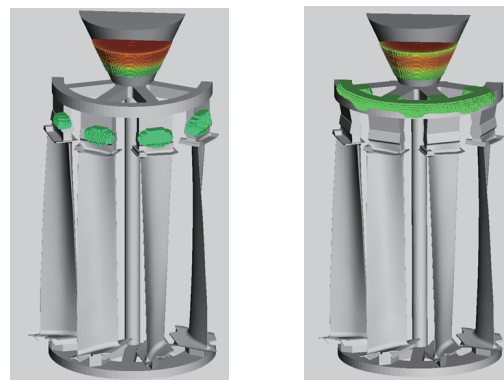
2.2 コンカレントエンジニアリングへの適用

製品開発にはコンカレントエンジニアリングが取り入れられるケースが増加している。ICC では、正式図面が出図される前の三次元モデルを用いて、鋳造方案と鋳造条件を変えた湯流れ凝固シミュレーションを行い、湯回り不良とシュリンケージを抑制できる鋳造方案、鋳造条件を絞り込んでいる。また、ゲート位置が製品形状と干渉する場合や余肉を付けることが望ましい場合、早い段階で設計変更を依頼することがある。解析数が多いときは、タグチメソッドを併用し、評価する⁽²⁾⁽³⁾。このような取組みによって正式図面出図後の試作回数は低減しており、開発期間の短縮に役立っている。

第 2 図にシミュレーションを用いて設計前段階でシュリンケージを改善した例を示す。鋳造条件を変更することで、製品部に発生するシュリンケージをランナ側に移動させることができた。大物構造物の解析では詳細部分で解析

(a) 製品部発生

(b) 製品部未発生



第 2 図 シミュレーションを用いて設計前段階でシュリンケージを改善した例

Fig. 2 Example of improved shrinkage using simulation at the preliminary design stage

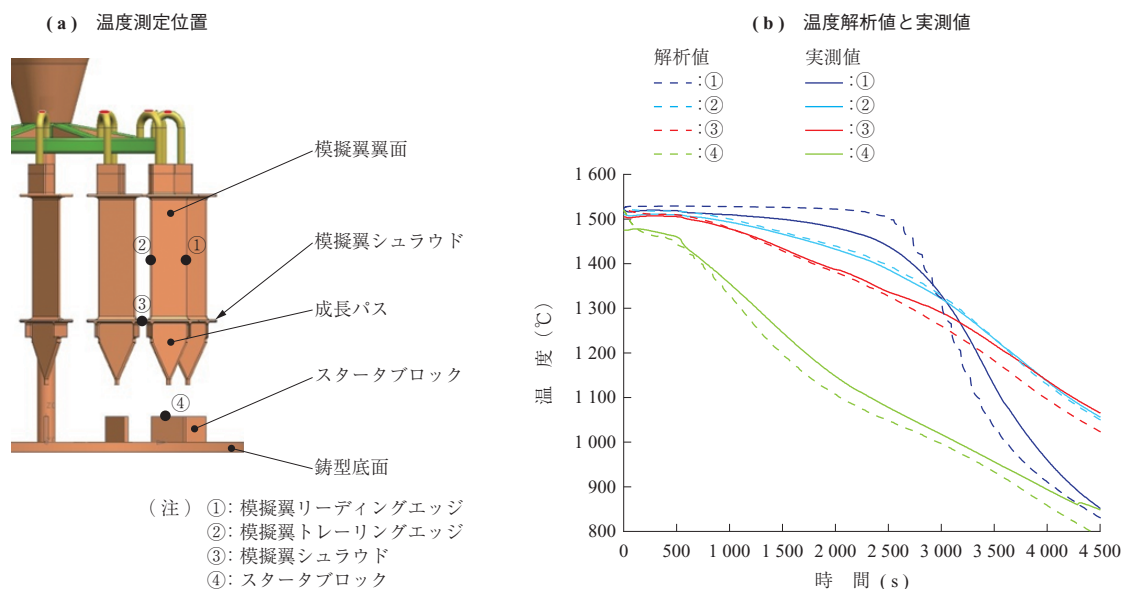
結果と実験結果に差異はあるが、タービンブレードなどの解析において湯回り不良やシュリンケージの予測精度は高い。

3. シミュレーションの適用事例

ICC では、湯流れと凝固の現象以外にも鋳造プロセスの諸現象を可視化するために技術開発を進めている。解析に必要な物性値が十分に整備されていないなどの理由から、まだ解析精度は低い状況ではあるが、相対的な評価ツールとして鋳造試験と併用すれば、活用が可能である。

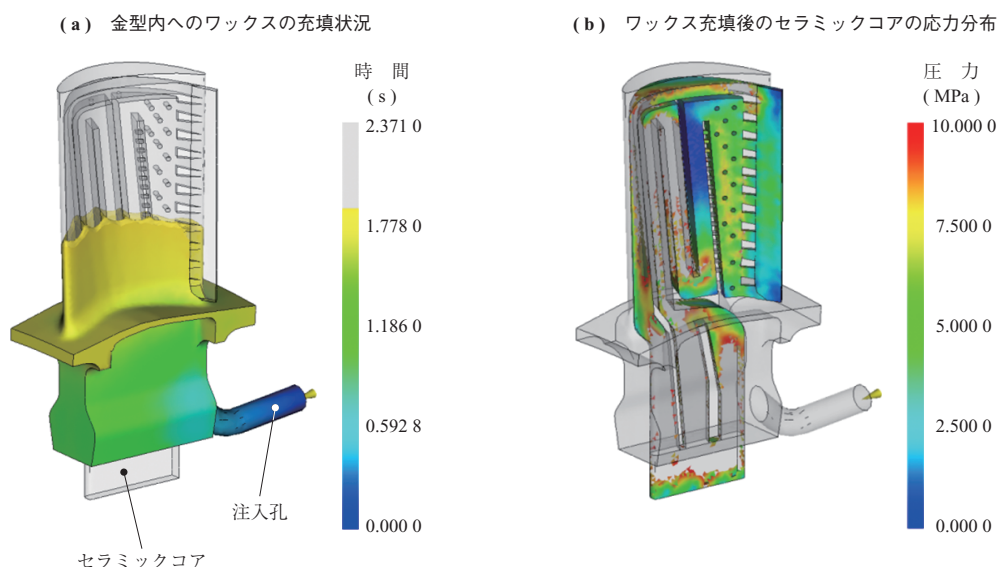
3.1 射出成形

セラミックコアを含む金型へのワックスの射出成形シミュレーションを第 3 図に示す。シミュレーションによってセラミックコアやワックスの金型への充填状況を解



第 1 図 一方向凝固 casting における引抜き中の各部位の温度解析値と実測値の比較

Fig. 1 Comparison of simulation temperature and measured temperature during withdrawal of directional solidification casting



第 3 図 セラミックコアを含む金型へのワックスの射出成形シミュレーション
Fig. 3 Injection molding simulation of wax to die including ceramics core

析しており、均一かつ速やかな充填を行うことができるスプルー位置や形状およびベント位置を見いだすことに役立っている。

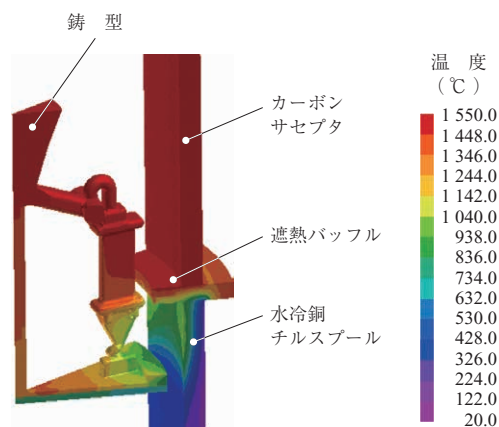
また、ワックス充填中および充填後の保圧中にセラミックコアに発生する応力の解析も行っており、セラミックコアのクラックの抑制にも役立っている。さらに冷却固化したワックスやセラミックコア成形品について変形シミュレーションの取組みも行っている。

3.2 溶解鑄造

一方向凝固炉は、上部の加熱ゾーンと下部の冷却ゾーンで垂直方向に負の温度勾配を作り、その中で注湯した鑄型を下に引き抜くことで垂直方向に結晶を成長させる。良好な結晶制御を行うためには、垂直方向に高い温度勾配をもち、水平方向の温度勾配は低いことが望ましい。一方向凝固炉体の温度分布状態のシミュレーションを第 4 図に示す。炉体は、① カーボンサセプタ ② 水冷銅チルスプール ③ 水冷銅チルスプール ④ 遮熱バップル ⑤ 断熱材、で構成されている。これらの材質や形状をシミュレーションで最適化することで、より高い温度勾配型の構造を見いだしている。

3.3 結晶予測

単結晶合金には結晶粒界強化元素が添加されていない。そのため、単結晶鑄造品中に等軸晶が発生するとその結晶粒界の強度は極度に低下する。したがって、単結晶における等軸晶の存在は許容されない。単結晶鑄造における等軸晶の発生予測例を第 5 図に示す。実験において等軸晶が発生する位置をほぼ予測できるようになってきたが、結晶



第 4 図 一方向凝固炉体の温度分布状態
Fig. 4 Simulation of thermal gradient of directional solidification furnace



第 5 図 単結晶鑄造における等軸晶の発生予測例
Fig. 5 Prediction example of equiaxed grain in single crystal casting

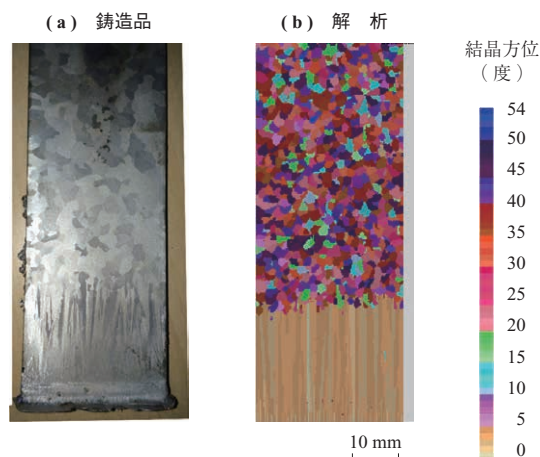
の形状、方位には大きな違いがあり、まだ実用レベルではない。合金ごとの過冷却中の核発生温度、核発生数分布のモデル精度が不足していることが予測精度を低下させる一因と考えているが、これらのデータの入手が難しいことも問題である。特別な引抜き制御をすることで得られた铸造品の組織予測を第6図に示す。加熱温度と引抜き速度を精密に制御することで、下側を柱状晶、上側を等軸晶にしているが⁽⁴⁾、柱状晶の結晶粒径、等軸晶の結晶粒径、結晶粒のトランジションゾーン位置は実験値と解析値で変わらない結果となっている。

近年、単結晶铸造では一次方位の制御に加えて、二次方位の制御も要求される場合がある。二次方位の制御は、通常、種結晶法（シード法）が用いられているが、シミュレーションを用いてセクター法による二次方位制御技術の開発も進めている。

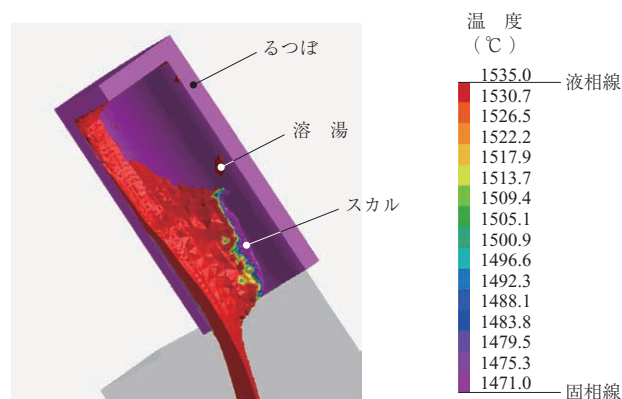
3.4 TiAl 铸造への適用

TiAl 金属間化合物のニアネットシェイプ翼の铸造技術開発にもシミュレーションを適用している。TiAl は融点が高く、密度が小さい材料であり、また、銅るつぽを使用した溶解では溶湯が過熱されにくいいため、湯回り不良が発生しやすいという課題がある。インダクションスカル溶解における銅るつぽ傾動時の TiAl 溶湯の挙動シミュレーションを第7図に示す。TiAl 溶湯が銅るつぽと接触するとき、溶湯温度が低下しているのが分かる。また、TiAl 遠心铸造時の湯流れ状況のシミュレーションを第8図に示す。遠心力が加わる環境でも湯流れ状況を把握できるようになっている。

一方、TiAl 铸造品はもろく、割れやすい特性をもつ。

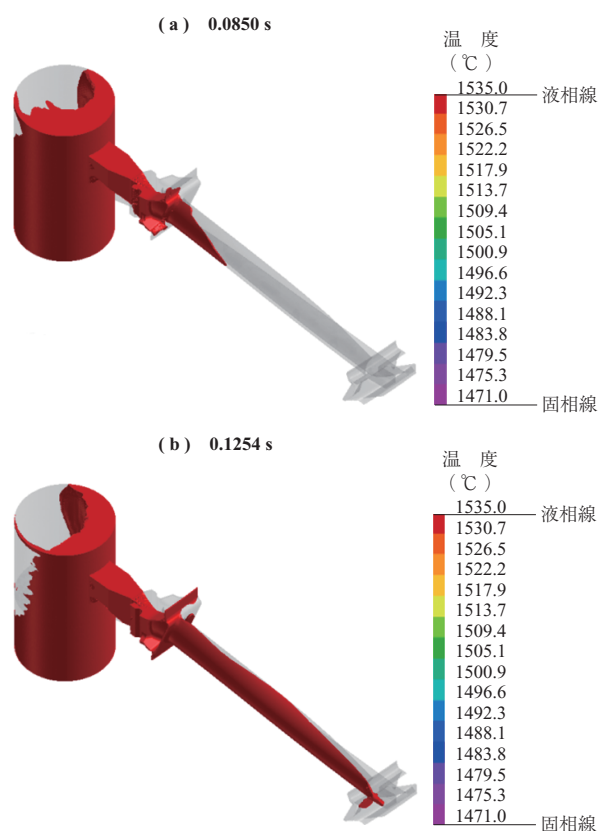


第6図 特別な引抜き制御をすることで得られた铸造品の組織予測
Fig. 6 Macro grain prediction of castings obtained by special withdrawal control



第7図 インダクションスカル溶解における銅るつぽ傾動時の TiAl 溶湯の挙動シミュレーション

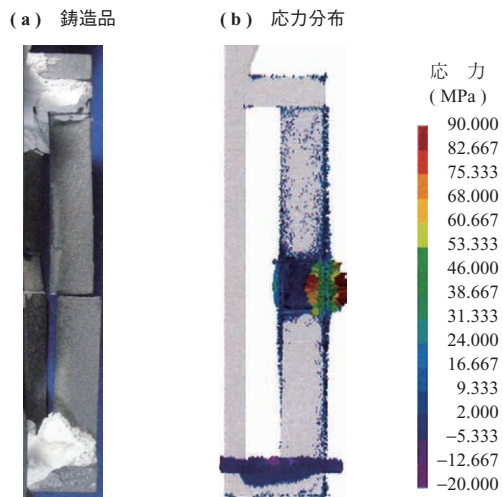
Fig. 7 Simulation of the situation of molten TiAl at the tilting of the copper crucible in induction skull melting



第8図 TiAl 遠心铸造時の湯流れ状況のシミュレーション

Fig. 8 Simulation of flow condition of molten TiAl during centrifugal casting

そのため铸型の強度が高く、铸造方案が適切ではないと凝固時、铸造品の収縮を铸型が拘束することとなり、クラックへと発展する。铸造品に発生する応力分布の予測を第9図に示す。クラックを予測するには至っていないが、応力の発生状況を予測できるようにはなってきた。



第 9 図 鋳造品に発生する応力分布の予測
Fig. 9 Prediction of stress distribution occurring in castings

4. 結 言

シミュレーションは開発期間の短縮および目に見えない現象の可視化に役立つツールである。特に、湯回り不良やシュリンケージの予測精度は高く、開発の前段階から実際に試作することなく、これらの欠陥を削減する鋳造方案、鋳造条件を選定できるに至っている。鋳造するのに有利な形状を設計が固まる前に提案できるようになったというメリットもある。

一方、湯回り不良やシュリンケージ以外のさまざまな鋳

造欠陥や事象についても予測技術の開発を進めており、解析精度の信頼性は向上しつつある。しかし、実用化レベルには至っていないのが現状であり、その原因の一つはシミュレーションに必要な特殊な物性値が不足しているためである。これらのデータが充実してくれば、予測精度は高められると考えている。今後も高精度の解析技術を用いて、高品質の鋳造品を早期に開発することで国際的な競争力の向上を図っていく。

参 考 文 献

- (1) 長坂悦敬, 木口昭二, 那智雅博: 3 次元凝固解析による引け巣の定量的予測 鋳物 第 61 巻 第 2 号 1989 年 2 月 pp. 98 - 103
- (2) 安藤裕二, 本多 弘, 野島 直, 横田尋己, 清水友和: LE-7A エンジン用構造鋳物への鋳造シミュレーション 石川島播磨技報 第 45 巻 第 3 号 2005 年 9 月 pp. 135 - 143
- (3) 齋藤侑里子, 木間塚明彦, 黒木康德: 鋳造シミュレーションを使ったロバスト最適条件の選定 IHI 技報 第 51 巻 第 1 号 2011 年 3 月 pp. 37 - 42
- (4) 佐藤茂征, 関口達也, 加藤佳樹: Ni 合金鋳造品の製造方法及び Ni 合金鋳造品 公開特許公報 特開 2016-140894 2016 年 8 月