

CAE による砂喰い欠陥低減の取り組み Fewer Sand Inclusion Defects by CAE

小川 兼司
Kenji Ogawa
加納 伸也
Shinya Kanou
柏原 茂
Shigeru Kashihara

これまでの研究において開発した鑄造 CAE 技術（凝固解析技術・湯流れ解析技術）を活用することによって、押し湯方案を改善した引け巣欠陥の低減、湯道方案を改善した湯周り不良、湯境欠陥の低減がある程度実施可能な状況になりつつある。

しかしその一方で、鑄物が完品になるまでを見ると、加工不具合を引き起こす介在物の欠陥により、加工時間の超過や工具破損、手直し補修の工数などが大きな問題となっており、これらの問題に関しては、これまでの CAE 技術では湯流れ解析の機能不足や介在物発生起点の特定の難解さなどから対応が難しく、勘と経験によって対応しているのが実態である。

そこで鑄物加工時の問題を解決すべく、流体内の介在物の挙動が予測可能な解析手法を検討中である。本報告では、介在物による加工不具合が問題となった大型ブルドーザの足回り部品を対象に、CAE による介在物予測手法を用いた介在物欠陥の低減および、加工代、加工工程の削減について実施した内容を報告する。

The use of casting CAE (solidification analysis and fluidity analysis) technologies, developed through previous research activities, has enabled, to some extent, a reduction in both shrinkage cavities, through an improved feeding method, as well as misruns and cold shut defects, thanks to an improved runner.

On the other hand, however, throughout the entire casting process, the work hours required by longer processing time, damage to tools, reworking and other factors caused by inclusions that result in processing defects represent significant problems. CAE technology was previously unable to resolve such problems due to the lack of a function to analyze fluidity and the difficulty in identifying the sources of inclusions. These problems are, in fact, dealt with by intuition and experience.

To solve these problems encountered in casting, an analytical technique is being scrutinized to forecast the behaviors of inclusions in fluids. Parts of the undercarriage of large bulldozers have presented these problems due to machining defects caused by inclusions. This paper reports activities involving reducing the inclusion defects, machining margins and machining processes for these undercarriage parts by using a technique to forecast inclusions by CAE.

Key Words: 湯流れ解析, 鑄造 CAE, 介在物欠陥, 加工改善, コンピュータシミュレーション

1. はじめに

鑄物の介在物欠陥とは、取鍋内で反応生成されたノロ（酸化物等のスラグ）や、鑄型や中子の砂が剥離して溶湯内に巻き込まれて製品内に流れ込み、加工面に非金属介在物として現れる欠陥のことで、加工時のチップの破損などの原因になる。鑄造部品加工時の不具合の多くはこの介在物である。介在物欠陥の主な対処法は、

- ①取鍋内でノロを反応・浮上させ除去する CaSi 処理
- ②整流化による介在物の浮上効果やろ過効果を狙ったストレーナやフィルターの設置
- ③湯道の外に介在物を追いやるスペース（ハケ湯など）の設置

④加工代を増やし、加工代ごとガウジングや荒加工で介在物を除去してしまう捨て加工処理

などがあるが、①～③の処理は効果や有効性の検証が難しい。したがってコストはアップするが、より確実な④の対策が多く用いられ、加工代や加工工程の多い鑄物素材となってしまう。

本論文では、CAE による溶湯内介在物の挙動が予測可能な解析手法を検討し、その適用事例を紹介する。この効果として、より確実に介在物をトラップ可能なスペースを設置することによって介在物の量を減らし、介在物除去のための加工代や捨て加工が低減できた。

2. CAEによる介在物欠陥予測手法について

2.1 CAEによる介在物欠陥の予測手法

介在物欠陥を予測するためには、溶湯内での介在物の挙動を解析しなければならず、従来の溶湯界面の挙動を追跡するだけでは対応しきれない。そこで、計算領域の流体中にマーカー粒子を配置し、マーカー粒子近傍の速度場を用いてマーカー粒子を移動させることによって、流体中の介在物の動きを模擬することとした。

まず、流体速度場の計算に用いたナビエ・ストークス運動方程式を式(1)、(2) [2次元表記] に示す。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \dots (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \dots (2)$$

u : x 方向速度, v : y 方向速度, t : 時間, ρ : 密度,
 x : x 方向距離, y : y 方向距離, p : 圧力, ν : 動粘性係数

次に、マーカー粒子位置における溶湯の速度は、近傍の速度点から線形の内挿によって得られる。 x 方向の速度について図1に示す。

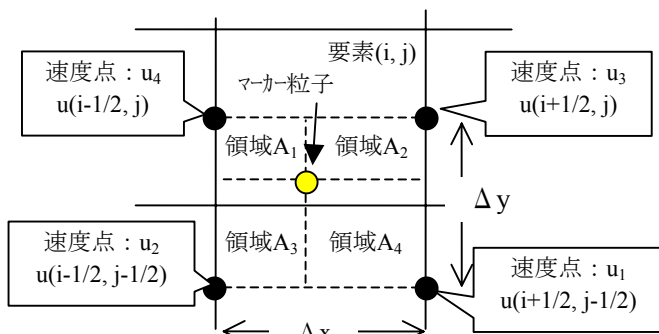


図1 要素 (i, j) におけるマーカー粒子に内挿する x 方向速度の関係

要素 (i, j) 内のマーカー粒子に対して、近傍の速度点4点 (図1 $u_1 \sim u_4$) から速度を求める。そのためのマーカー粒子の速度の重み付けを式(3)に、移動式を式(4)に示す (y 方向も同様)。

$$u = \frac{A_1 u_1 + A_2 u_2 + A_3 u_3 + A_4 u_4}{\Delta x \Delta y} \dots (3)$$

$A_1 \sim A_4$: マーカー粒子に対する速度の重み付け比率,
 Δx : x 方向微小距離, Δy : y 方向微小距離

$$x^{n+1} = x^n + u \Delta t \dots (4)$$

x^n : 現時点の x 座標, x^{n+1} : Δt 秒後の x 座標

上記の式によりマーカー粒子の軌跡を得ることができる。そこで、注入初期の溶湯や、型の表面を流れる溶湯が介在物を運ぶ可能性が高いと考え、以下の法則に従ってマーカー粒子を速度場内へ発生させることとした。

1. あらかじめ任意の要素にマーカー粒子を配置 (図2)
2. 最初に同部位を通過した溶湯にマーカー粒子を追従
3. タイムステップごとにマーカー粒子の周囲の速度点から同粒子の速度を算出、移動させる
4. マーカー粒子の経路と最終地点を記録する

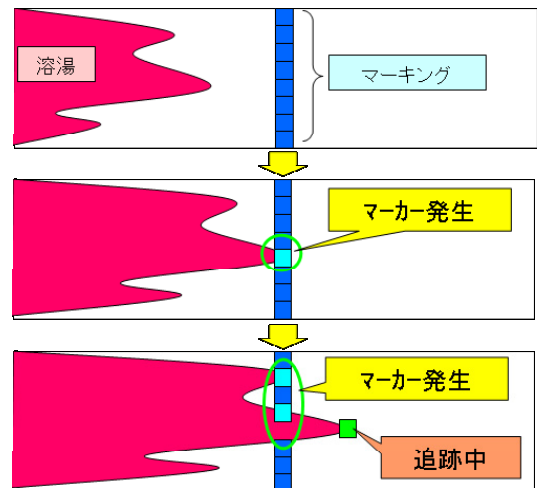


図2 マーカー粒子による介在物追跡機能

このマーカー粒子を用いた解析事例を図3に示す。このように、本手法により流体内に存在する粒子の挙動を可視化することが可能である。

さらに、本解析手法を実製品に適用したマーカー粒子 (介在物) 解析結果を図4に示す。同図により、実製品の介在物欠陥発生比率の傾向 (A部よりB部の方が介在物欠陥の発生頻度が高い) と、解析結果による製品内の粒子分布の傾向 (C部よりD部の方が粒子が集中している) がよく似ていることから、本解析手法を用いることで、実際の介在物の可視化がある程度可能であると考えられる。

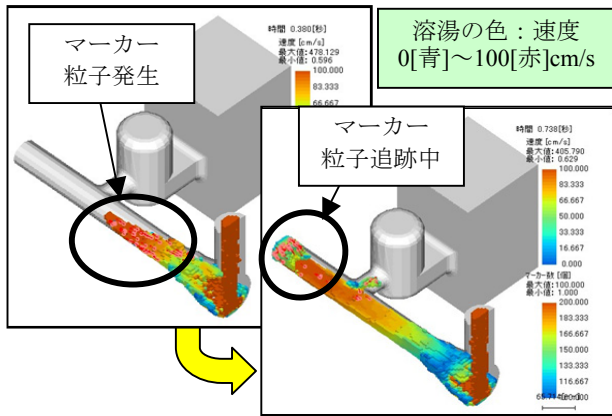


図3 マーカー粒子の解析事例

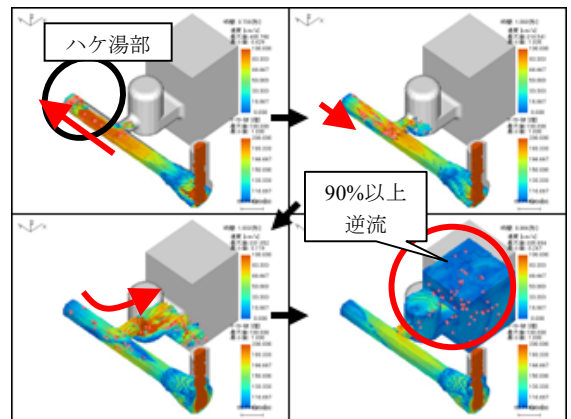


図5 介在物機能によるハケ湯の検証

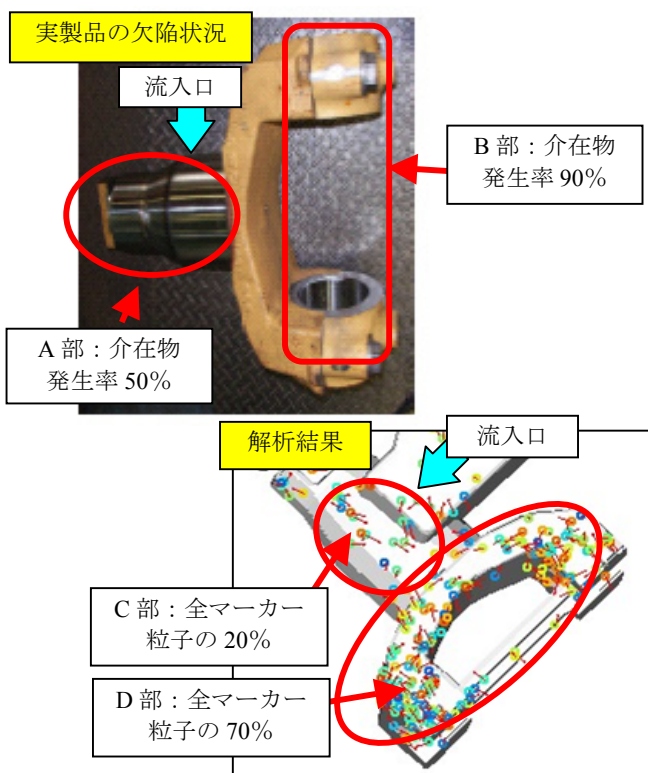


図4 ヨークの介在物解析

2.2 介在物除去方案（砂止め）の検討

本手法により、介在物を低減できる方策について検討した。まず、従来から用いられているハケ湯についてその効果を検討した（図5）。

ハケ湯は注入初期の溶湯を湯道の外へ追い出すための方案であるが、その解析の結果が図5である。ハケ湯部で滞留すると思われていたマーカー粒子が、全て製品部へ逆流しており、期待された機能を有していないことがわかる。その改善として次の2つの機能の追加を検討した。

- 一度入った介在物を逆流させない機構
- 介在物を捕らえられるスペース

まず、吐き出した溶湯の逆流を防止するために、湯道

から滞留させたいスペースへの入口を絞って面積を狭めて流出量を減らし、湯道側からの圧力で押し込むことを狙った。効率的に逆流を防止するために、絞る方向の水準を振った結果、上面と側面を絞ることで最も効率的に逆流を防止できる結果が得られた（図6）。

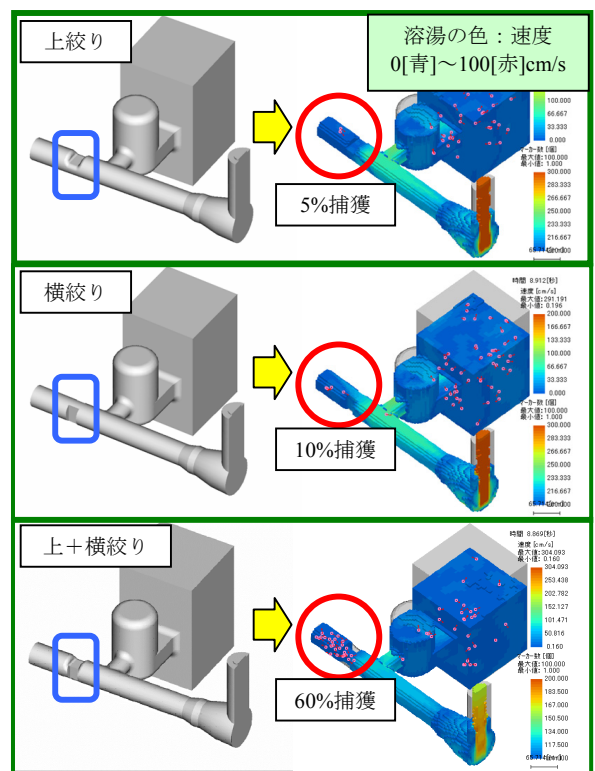


図6 絞り形状による逆流防止効果

上記の逆流防止で最高でも捕獲率が60%なのは、滞留させたいスペースの容量が不足しているためである。そこで、除去したい介在物を十分確保でき、滞留できるスペースを作ることを念頭におき、溶湯が上手く循環し強制的に渦を発生させ介在物を集めてしまうような形状を検討した。そして解析によるトライ&エラーの結果、横長の直方体や球形のスペースにおいて良好な結果を示した（図7）。

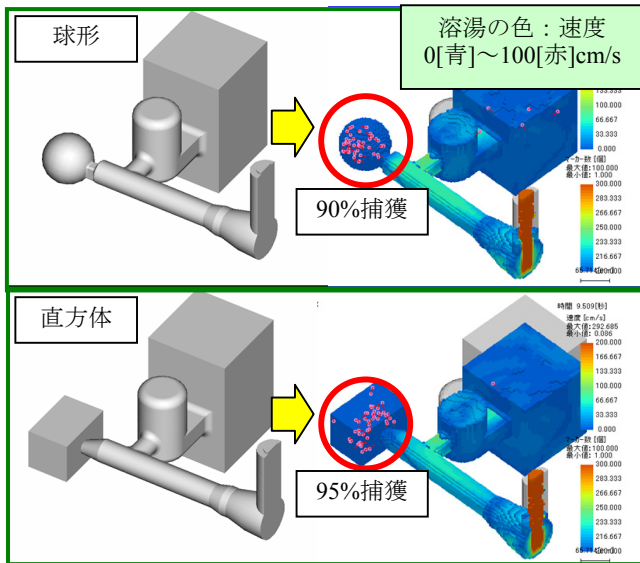


図7 絞り形状による逆流防止効果

このように介在物の逆流を防止し、介在物をトラップするために工夫したスペースを“砂止め”と呼ぶこととした。球形砂止めの注入実験による砂止め内の介在物の状況を図8に示した。同図に示す通り、砂止め内には多数の介在物を確認することができる。このことから、本解析手法を活用した介在物除去方案の検討は有効であると考えられる。

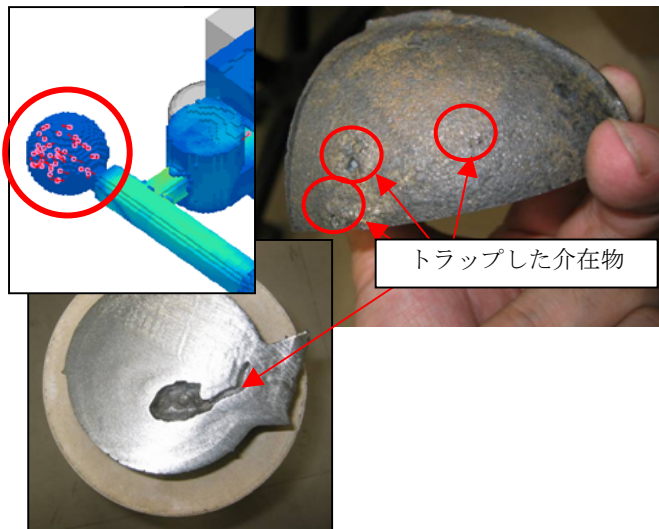


図8 球形砂止め内の介在物

次に、ここまで湯道に設置していた砂止めを製品部に設置した解析例を図9に示す。製品内に流れ込んでしまった介在物や製品空間で発生した介在物についても、製品内の粒子を積極的にトラップするスペース（砂止め）を設置することによって、製品内の介在物量を削減し、介在物欠陥発生リスクを大幅に低減可能であると考えられる。

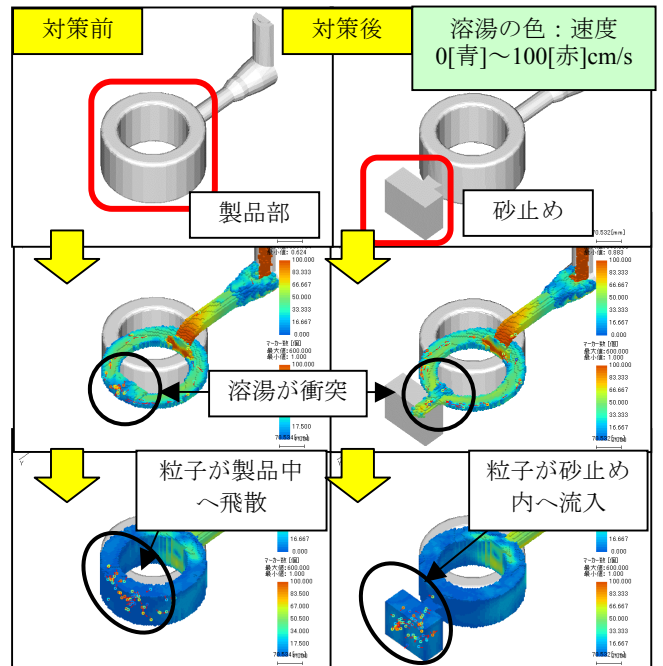


図9 製品部へ取り付けの砂止め方案

このように、砂止めは湯道・製品など設置場所を問わずに使うことができるため、個々の介在物の要因に対応した対策に有効である。

3. 解析事例

大型ブルドーザD155の鋳物部品のコスト分析調査結果から、足回り部品であるボギー（図10）が突出して高く、その素材コストの内訳は加工費が全体の25%を占めてい

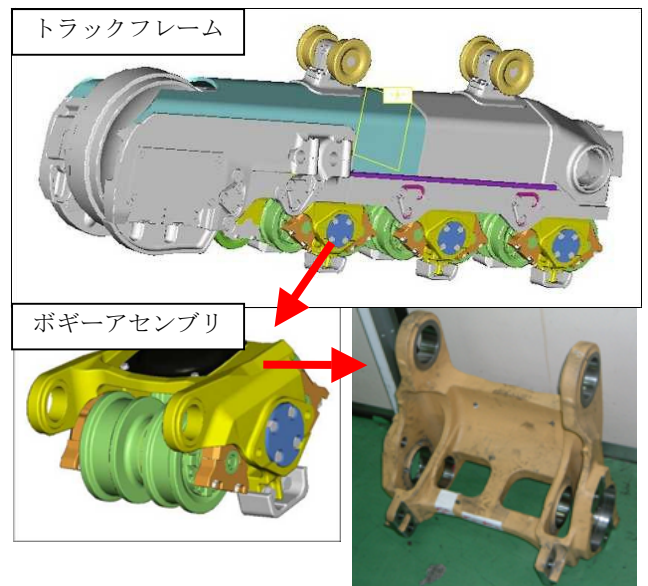


図10 ボギー（足回り部品）

た(図11). この素材コストには最終の加工費は入っておらず、通常素材コストに占める加工費の割合は0~10%前後であることから非常に高い比率といえる。

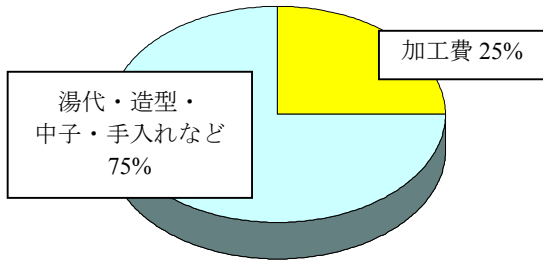


図11 ボギー素材の製造コスト

そこで、同部品の製造工程をみてみると、焼鈍後に一度社外にて荒加工を実施し、熱処理(QT)を施した後で最終の加工が行われていた(図12). このQT前加工の目的を確認したところ、最終加工面への介在物欠陥の発生を抑えるために、加工代を増やし、QT前の荒加工で介在物を除去するという目的のための捨て加工であることが明らかとなった。

従って、介在物の問題をクリアできればQT前に行う荒加工の排除が可能で、加工費のカット、さらには「社外へ運んで切削⇒また社内へ戻してQT」という物流のネックとなっている横持ちも解消できるというメリットがある。

3.1 ボギーにおける介在物欠陥の調査

前述の介在物追跡機能と砂止め方案をボギーの介在物欠陥低減に適用するにあたって、まず現状の介在物欠陥に絞った欠陥発生傾向の調査を図13のような部位別に実施した。その結果として、介在物欠陥全体を100%とした場合の部位別の内訳を図14に示す。このグラフによると、内側のボス穴周りの欠陥が約40%、ガイド部の欠陥が約25%とこの二つで大半を占めており、逆に外側のボスや側面、先端ボスなどは欠陥比率が10%前後と低いことがわかる。

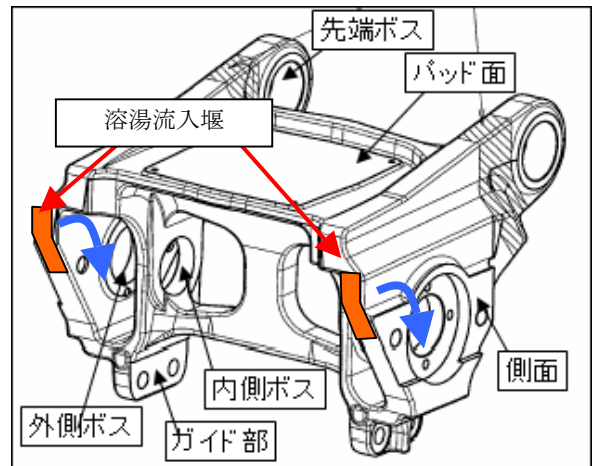


図13 ボギー各部名称

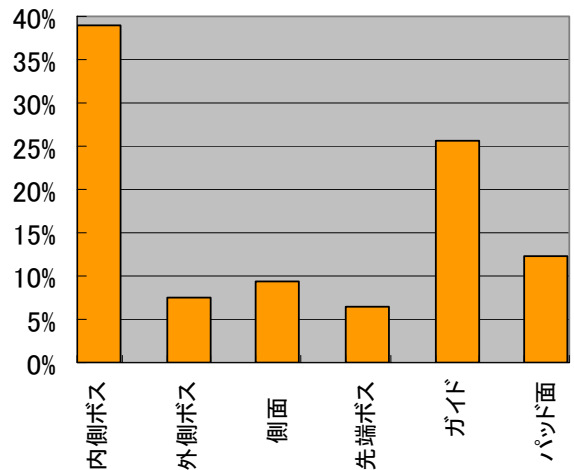


図14 ボギー部位別欠陥分布

この製品での湯道方案は、左右両側面の後方に堰を取り付け、そこから溶湯を流入させている(図13). 従って、側面から落下した溶湯が一番下のガイド部から順次上方へ充填していくというもので、欠陥の発生傾向とボギーの中子の多さという点を照らし合わせると、湯口から底部までの間の型表面に残された砂や中子から介在物が流

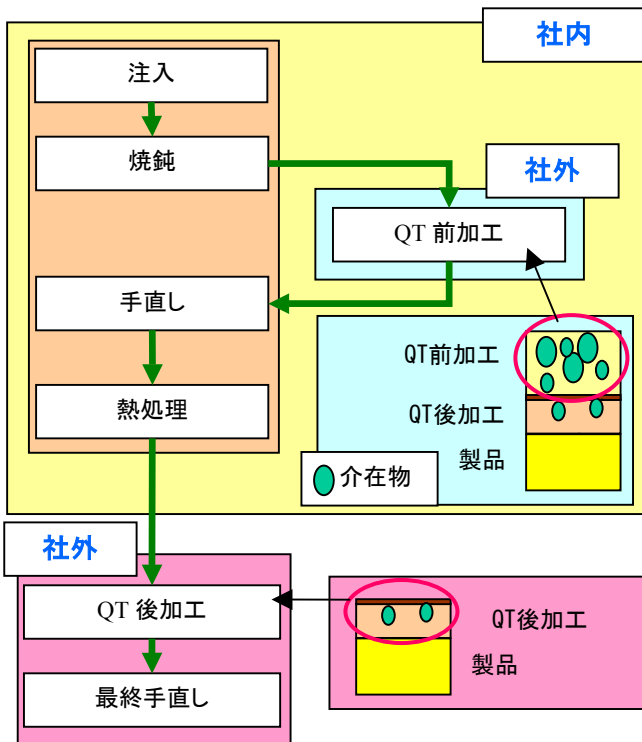


図12 ボギー生産の流れ

され、ガイド部に付着もしくは内側ボス部へ浮上・付着したものと考えることができる。

ここで、現状の方案における解析結果を図 15 に示す。このように、介在物欠陥の発生率が高い内側ボス部に粒子の集中が見られ、解析結果と実際の介在物欠陥の発生傾向はよく似ていると考えられる。

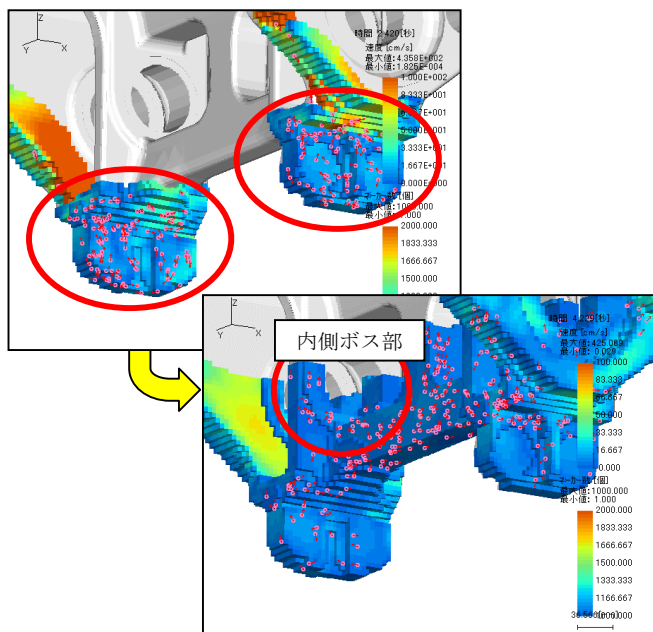


図 15 ボギーの現状解析結果

3.2 砂止め方案の適用

これらの情報を踏まえて、前述した砂止め方案を配置するにあたって最も効果的な場所を検討した。ポイントとしては、型上の介在物を最も含んでおり、放っておくと介在物が型へ付着もしくは浮上してしまう場所となり、双方を満たす部位としてガイド部に取り付けることとした。そこで、湯の流れを活かして強制的に砂止めに入流するように堰と正対した部位に取り付けることとし、図 16 の方案形状を立案し、解析を実施した。

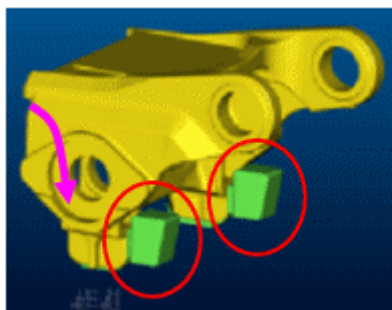


図 16 ボギーの砂止め方案

砂止め方案対策後の解析結果を図 17 に示す。

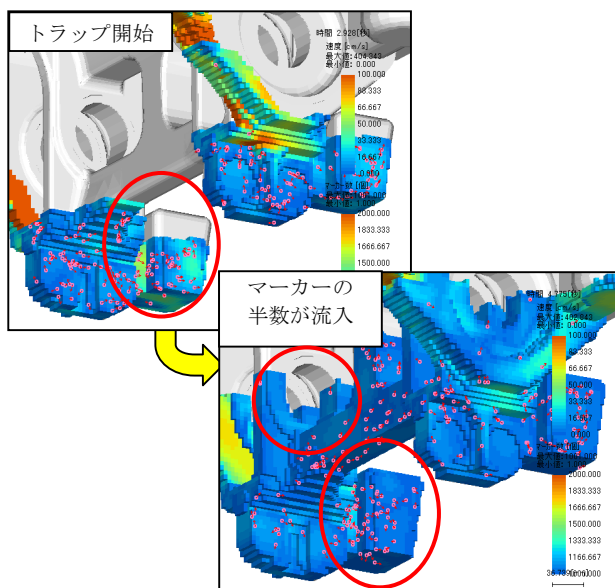


図 17 ボギーの砂止め方案解析結果

同図に示すように砂止めを設置することにより、発生したマーカーク粒子の約半数を砂止め内に捕獲でき、介在物欠陥が問題となる内径ボス部の粒子数は大幅に少なくなった。この結果を踏まえ、ボギーに設置した実際の砂止めを切断調査した結果を図 18 に示す。



図 18 ボギーの砂止め方案による効果

同図より、砂止め内には多数の介在物が確認できた。そこで、砂止め方案適用品にて N 増しテストを実施したところ、従来の欠陥発生率を半減させることに成功

した。この結果により、QT 前加工（捨て加工）を廃止し、QT 後加工のみに工程集約するとともに加工代の低減を実施することができた。

これらから、本解析手法を用いて製品内の介在物の動きを可視化し、砂止め方案の検討を行うことは、介在物欠陥対策に非常に有効であると考えられる。

4. おわりに

これまで、介在物挙動は完全なブラックボックスとなっていて、対策手法も限られていた。そのため避けられない介在物欠陥に対しては補修の工数が増え、取代は増加し、重量も重くなるなど介在物欠陥による弊害は多岐にわたっていた。そこへまだ開発初期段階であるが、CAE による介在物欠陥予測機能を導入し、現象の解析から対策の立案までのプロセスを効率的に進められるようになったことは大きな一歩である。

一方、まだ初期段階と述べたように、課題は山積みである。例を挙げれば、解析面では介在物の挙動をより詳しく表現するために浮力の考慮や壁面への付着を再現可能にしなければならない。また、実現象と解析を合わせこむために、介在物発生起点の分析・絞込みが重要となってくる。これらの問題に対し、今後も研究を進めていき介在物による欠陥を無くすことを目指したい。

筆者紹介



Kenji Ogawa

小川 兼司 1997 年、コマツ入社。
現在、生産本部 生産技術開発センター所属。



Shinya Kanou

加納 伸也 1989 年、コマツ入社。
現在、生産本部 生産技術開発センター所属。



Shigeru Kashihara

柏原 茂 1981 年、コマツ入社。
現在、コマツキャステックス 技術部所属。

【筆者からのひと言】

マーカーを使ったこの解析結果をアニメーションでプレゼンすると、見た目のインパクトもあいまって各地でとても好評です。ただ欠陥低減という結果を出すには個人のセンスによるところが大きい肝心なところは人任せになってしまうのが難点です。それはそれとして、解析機能的にも不足している点が多く、まだまだ先の長い道のりなので着実に前に進めるよう気合を入れていかねばならないと思っています。