



ProCASTの紹介並びに鋳鋼品への適用事例

日本イーエスアイ(株)
技術本部 VMソリューション部

米澤 剛

1. はじめに

鋳造は高温の溶融金属を注湯して冷却凝固させて目的とする製品形状を得るプロセスですが、健全な製品を得るためには温度変化に伴う様々な物理現象を把握、制御することが必要となります。

従来技術者の経験による物理現象の把握、制御が行われ、より複雑な現象に関しましては製造プロセスパラメーターの統計的な分析などによりプロセス設計が行われてきましたが、コンピューターの処理速度の向上やより詳細な物理現象のモデル化の進歩により、鋳造シミュレーションによる物理現象の視覚的な把握により、個別のパラメーターの影響を事前に検討して鋳造方案を決定することが可能となってまいりました。

表1に弊社鋳造シミュレーションソフトウェアProCASTのモジュール一覧を示します。従来鋳造シミュレーションとしましては注湯時のフローパターン、引け巣の有無等の予測を主目的としていましたが、それらの予測精度の向上に加えて、変形・応力予測や割れ、結晶成長やマイクロ組織など、鋳造プロセスに生じる様々な予測が可能となるように目的に応じたパッケージが提供されるようになっております。

本稿ではProCASTにつきまして、その基本となります有限要素法による鋳造シミュレーションのメリットおよびProCAST特有のモデル化や機能につきまして概説し、鋳鋼品へのProCASTへの活用方法につきまして、事例紹介を含めてご紹介させていただきます。

表1 ProCASTのモジュール一覧

Pre/Post	プリ・ポスト	マルチウィンドウ、任意の結果指標作成可能自由な境界条件設定可能
Material database	材料物性値作成モジュール	化学成分を入力することにより物性値作成Fe, Al, Mg, Ni, Ti, Cu合金に対応
Geometry & Mesh	メッシュ作成モジュール	四面体要素作成、シェル鋳型生成 サーフェスメッシュのアセンブリ対応
Thermal Solver	熱解析モジュール	引け巣欠陥、輻射熱対応、サイクル計算
Flow Solver	流動解析モジュール	チクソ、ロストフォーム、遠心鋳造、砂充填対応
Stress Solver	応力解析モジュール	ギャップ生成による抜熱状態の変化を考慮 熱間亀裂予測
Gas & Micro-porosity	ガスポロシティーモジュール	デンドライト成長と含有ガスの偏析を考慮
Micro-structure	凝固偏析モジュール	鋳鉄の黒鉛膨張を考慮した欠陥予測に対応
Continuous Casting	連続鋳造モジュール	CC&DC castingの非定常、定常解析が可能
Grain Structure	結晶成長モジュール	セルラーオートマトン法を採用

2. 有限要素法と差分法

鋳造解析は解析する鋳物、鋳型、スリーブ、冷し金等の三次元形状をCADで作成し、そのCAD形状を基にして計算に必要なメッシュを作成する必要があります。そのメッシュに対して、材料物性値、鋳造条件を設定して湯流れ、凝固などの計算を行います。

鋳造解析の手法としては大きく分けて直交差分法と有限要素法の2つの手法があります。両者の大きな違いは解析に必要なメッシュモデルの取り扱いになります。直交差分法では、サイコロ状の直方体のメッシュで形状を表現し、有限要素法では、任意に形状を変形できるピラミッド状のメッシュで表現します。

直交差分法のメッシュ作成は、X、Y、Zの三次元方向に対して、要素の分割数(大きさ)を決定するだけで作成できる為、メッシュ作成は容易ですが、モデルの表現精度は悪くなります。一方、有限要素のメッシュ作成は、部分ごとに設計者が要素の大きさを決定する必要がある為、メッシュ作成は困難となりますが、形状の表現精度は高くなります。

解析の精度は、形状の表現精度の影響が大きいと一般的に考えられています。直交差分法では要素を細かくしていけば、表現の精度は高くなりますが、それに比例して要素数が増える為、解析時間も長くなります。それに対して、有限要素法では、部分ごとに要素サイズを指定できる為、形状の表現精度も高く、更に要素数を少なくできる為、解析時間を短縮することができます。

最近の鋳造解析においては、鋳物の割れや変形、型の寿命解析などが注目されております。現象としては、鋳型内で鋳物が凝固収縮で変形し、型は温度上昇で膨張変形が発生します。このように鋳物と鋳型はつねに接触と拘束が行われてい

る為、この現象を精度良く解析するには、形状の表現精度が高い有限要素法のメッシュモデルが適しております。また、有限要素メッシュの作成につきましては、自動化の作成機能が進歩してきておりますので、短時間でメッシュ作成が可能となってきております。

ProCASTは計算性の高い有限要素法を採用しており、湯流れ、凝固、変形の解析を連続的に行うことができます。

3. 事例紹介

鋳造解析において、精度良く計算結果を得る為には、形状の表現精度と正確な材料物性値が不可欠になります。鋳造において最も代表的な問題は引け巣になりますが、この現象を精度良く解析するには、凝固過程中的鋳物の状態を忠実に再現する必要があります。溶湯は、型に熱を奪われることによって冷却されます。型の壁面近傍と鋳物中心では温度差が発生します。温度差があるということは熱の移動が発生することになりますが、その現象は熱伝導率で表現できます。温度によって熱の移動量も変化します。冷却が進んだ部分は、体積変化が起こります。この現象は密度で表現します。液相から固相へ相が変わっていく変化状態は、固相率分布、エネルギー状態はエンタルピーで表現します。流動については、温度差により対流が発生します。流れを表現するのは粘度になります。

引け巣は、凝固収縮した部分に周りの溶湯の供給ができない部分に発生します。従って、密度のデータと供給のしやすさを表す粘度、そして固液共存状態を表す固相率分布が正確である必要があります。

ProCASTでは合金に含まれる化学成分を入力することによって解析に必要な上記の材料物性値を設定することが可能です。この機能で得ら

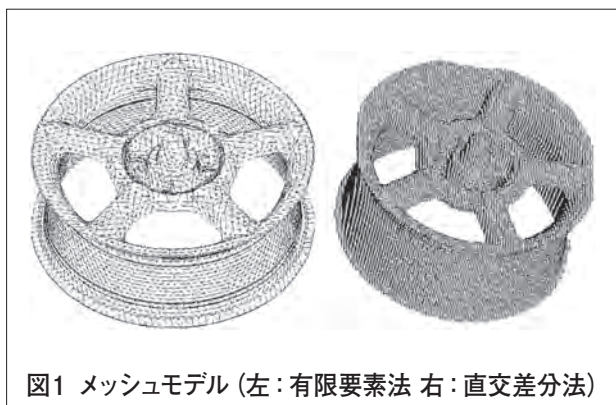


図1 メッシュモデル(左:有限要素法 右:直交差分法)

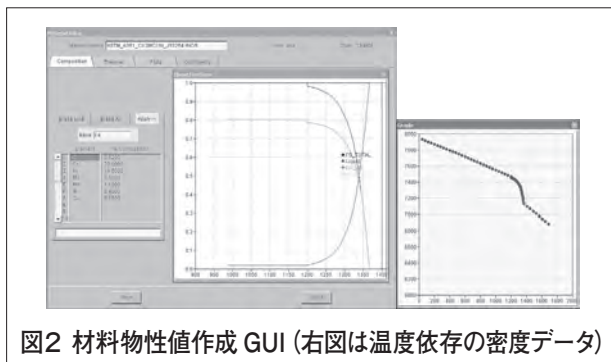


図2 材料物性値作成 GUI(右図は温度依存の密度データ)

れる材料物性値は米国Compu Therm LLC社が開発しております多元系状態図計算ソフトウェアPandatの機能を取り込み作成しております。Pandatは数多くの様々な実験データから熱力学平衡や状態図を計算するCALPHAD (Calculation of Phase Diagram) 法を用いており、信頼性の高い熱力学データを得ることが可能です。

3-1 湯流れ、凝固解析の適用事例

下図は鋳鋼GS-20Mn5の砂型重力铸造になります。型のサイズは900×700×700mmです。

押湯部分にスリーブを取り付けた時の引けの様子を比較したものになります。スリーブを使用することにより、製品部まで到達していた引けの発生が解決されました。



図3 铸造方案



図4 形状のモデル化

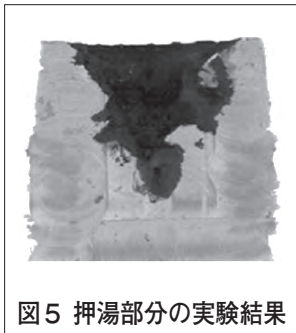


図5 押湯部分の実験結果

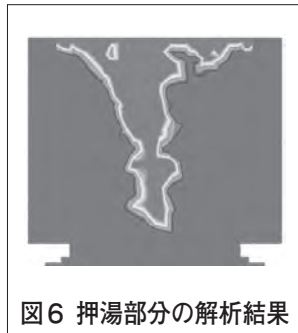


図6 押湯部分の解析結果

次の事例は、Sheffield Forgemasters International社の大型インゴットの解析事例になります。材料物性値は図7のように合金の成分を設定することにより作成可能です。図8は条件設定のGUIになります。解析は対称条件を設定することによって1/4のモデルで実行可能です。これにより解析時間の短縮が可能です。

図9は鋳型の温度分布、図10は鋳塊の温度分布を示しています。鋳型の上部に温度が高い部分があることを確認できます。鋳塊はほぼ中心部が高温領域になっていることが確認できます。

図11は注湯部分に粒子を発生させその軌跡を

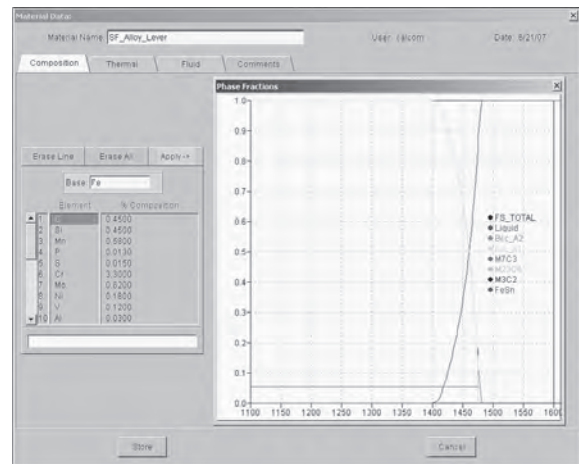


図7 材料物性作成

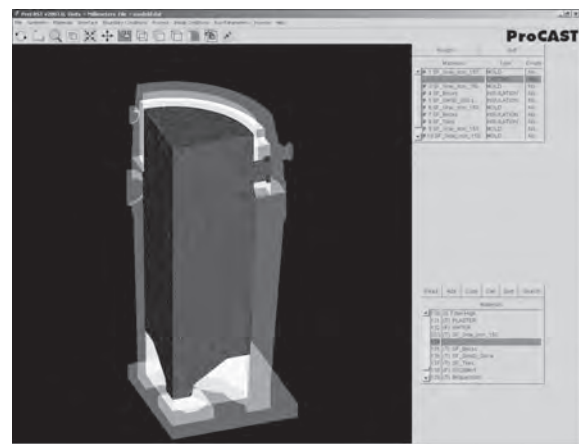


図8 解析条件設定GUI(赤い部分は鋳塊)



図9 温度分布(鋳型)



図10 温度分布(鋳塊)

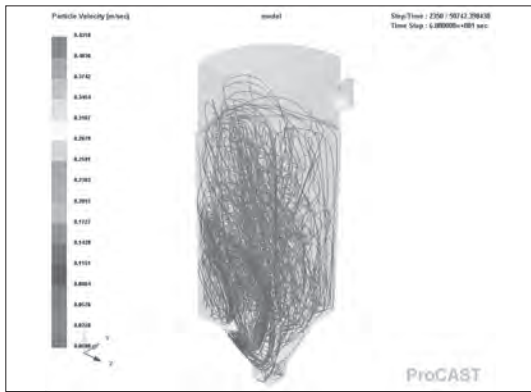


図11 粒子発生による不純物の到達点予測



図13 ProCASTの注湯時の温度分布

確認しています。これで不純物の到達点の予測が可能です。

次の事例は、EVRAZ VITKOVICE STEEL社の解析事例になります。ProCASTで湯流れ凝固解析と熱変形解析を実行し、その後の熱処理工程を弊社製品であります熱処理解析ソフトSYSWELDに受け渡します。鋳造時の温度分布、残留応力を考慮するので精度の高い、相変態を考慮した熱処理結果を得ることができます。

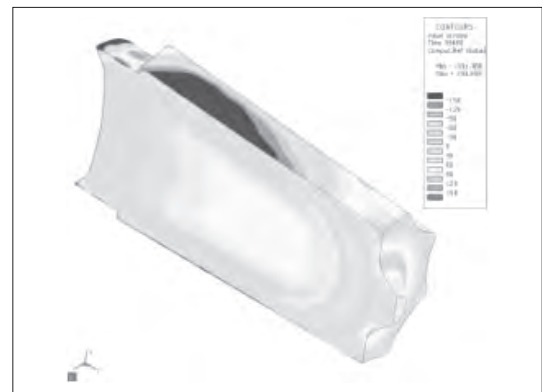


図14 SYSWELDの解析結果



図12 解析モデル

3-2 熱応力解析の適用事例

鋳型内の鋳物は、凝固収縮によって鋳物と型との間に隙間が発生します。隙間が発生すると鋳物の熱は鋳型から奪われることはないでその部分の冷却は遅くなります。また逆に鋳物が鋳型に抱きつく場合は、冷却の効果が増します。ProCASTではこの効果を実現する為に図15に示すアルゴリズムを採用しております。初期設定の熱伝達率 h_0 に隙間が発生した場合は、隙間の距離と空気の熱伝導率を使用して、熱伝達率 h を低くします。逆に抱きつく場合は、接触圧力を考慮して熱伝達率 h を大きくしていく操作をしております。この機能により精度の高い、熱応力解析が可能です。

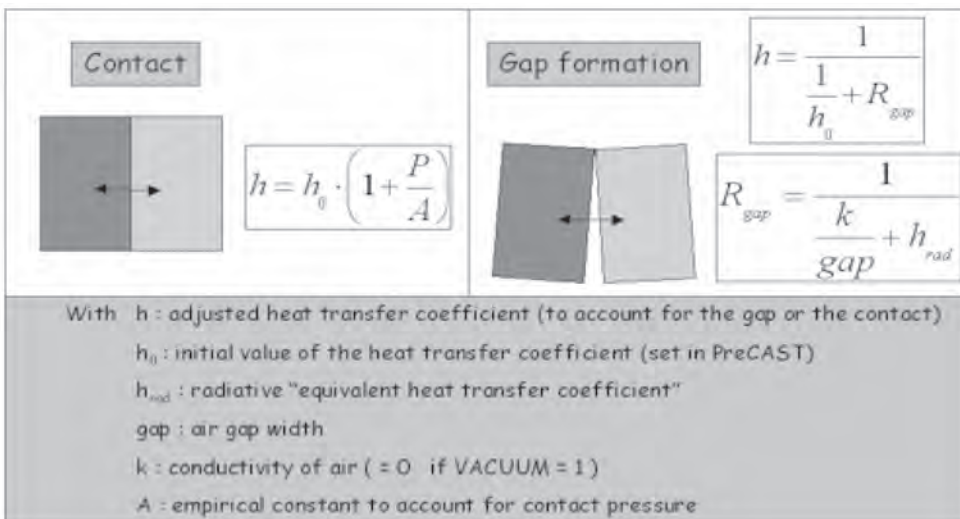


図15 ギャップ生成による熱伝達率の変更アルゴリズム

またProCASTでは熱間亀裂の予測が可能です。熱間亀裂は主に凝固の遅い箇所

で収縮応力の働く部分に細かい樹枝状晶を伴って発生します。この予測は、凝固解析と熱応力解析を連動させることによって可能です。

図16、17に解析結果と実機の結果を示します。

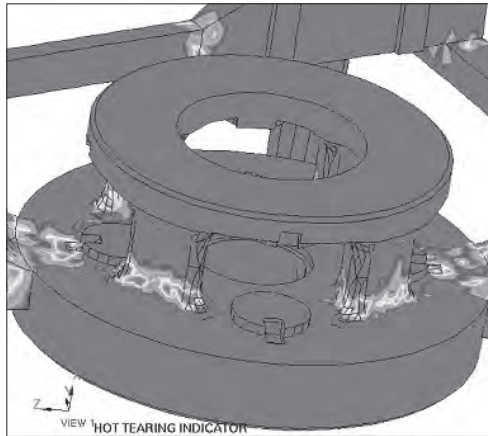


図16 熱間亀裂解析結果

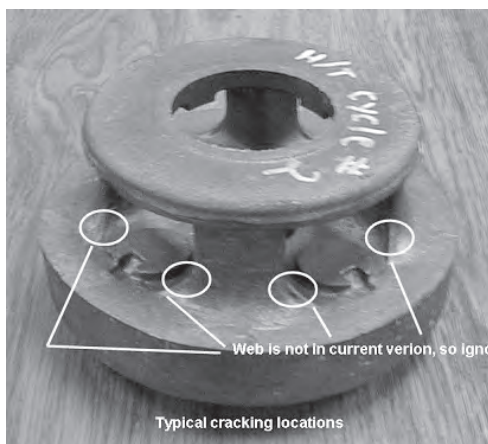


図17 熱間亀裂発生部位

3-3 凝固偏析解析の適用事例

球状黒鉛鋳鉄鋳物の凝固では黒鉛膨張が起こることによって、引け巣の発生が抑えられます。これは黒鉛膨張が押湯効果として働く為ですが、鋳型の剛性が弱いと膨張の効果を有効に使用することができません。

ProCASTでは凝固偏析モジュールを使用することによって、溶湯中に含まれる溶質の分布変化を考慮した凝固解析が可能です。球状黒鉛鋳鉄鋳においては、黒鉛膨張を考慮した引け巣欠陥予測が可能です。図18、19は引け巣の発生結果を比較しております。図18では黒鉛膨張を考慮していないので、断面図の赤い部分に引け巣が発生しておりますが、図19は黒鉛の膨張を考慮しているため、引け巣の発生は予測されておられません。



図18 引け巣結果(黒鉛膨張：無し)



図19 引け巣結果(黒鉛膨張：有り)

4. おわりに

現在、有限要素法による鋳造シミュレーションソフトウェアであるProCASTにより、湯流れ凝固のみではなく、変形、応力、割れ、組織といった様々な鋳造製品品質の予測が可能となっています。

さらには最適化ソルバーとの組み合わせにより鋳造条件を最適化したり、鋳造・冷却後の製品品質を予測し、冷却後の熱処理プロセスによる材料強度予測、さらには製品として組み込まれた環境における挙動の予測など、ハードウェア・ソフトウェアの性能を最大限組み合わせ引き出すことで、製造現場だけではなく、製品設計まで広範囲な予測技術として鋳造シミュレーションおよびシミュレーション技術がご活用されるようになってきました。

今後は鋳造シミュレーションソフトウェアとしての性能向上だけではなく、様々な技術・ソフトウェアとリンクすることによって、製品設計段階からプロセスを考慮するend-to-endというコンセプトをベースに、設計から製造までのトータルの工程短縮、コスト削減や品質向上の予測が可能となっていくものと考えられ、ProCASTの高精度の鋳造プロセス予測技術がそれらのトータルエンジニアリングをリードするソフトウェアとしてユーザー様にご利用頂けるものと考えております。