

ADSTEFAN の紹介並びに鋳鋼への適用事例

茨城日立情報サービス(株)
ADSTEFAN センタ・チーフアドバイザー
内田敏夫

1. 緒言

湯流れと凝固の鋳造シミュレーションシステムが鋳造品の品質改善、コスト低減などに有効なことは広く知られるところです^{1), 2)}。ADSTEFAN は東北大学の鋳造シミュレーションについての産学共同の研究会・stefan 研究会で基本形が開発され(1992~1999年)、この終了後に(株)日立製作所日立研究所で製品化された(1999年)ものです。そして現在は日立グループの弊社製品となつて(2007~)、引き続き新機能の開発とバージョンアップを行っています。

以下、ADSTEFAN の内容と鋳鋼品への二、三の適用例を紹介します。事例のうち鋳造方案などノウハウ事項を多く含むものについては実製品でなく擬似形状品で示しています。

2. ADSTEFAN の概要

解析手法には等分割直交メッシュを用いた FDM(有限差分法)を採用しています。表 1 に対応可能な解析の種類を示します。

表 1. ADSTEFAN に対応可能な解析

解析の種類	出力可能な評価用パラメータ
湯流れ解析	19種類(充填進行状況など)
凝固解析	16種類(凝固進行状況など)
金型温度解析	10種類(溶湯と鋳型温度の経時変化など)
組織予測解析	4種類(凝固組織など)
熱処理解析	2種類(鋳物と雰囲気温度の経時変化など)
連続鋳造解析	4種類(定常状態での凝固状況など)
ESR解析	8種類(非定常状態での凝固状況など)
変形・応力解析	7種類(主応力、変位量など)

図 1 は ADSTEFAN ソフトを起動したときに表示されるメイン画面です。左側にある項目をクリックするとその作業用ウィンドウが開きます。標準的には[プリプロセッサ]→[計算の実行]→[ポストプロセッサ]の順に作業を進めます。[プリプロセッサ]はシミュレーションで用いる要素化モデルの作成と計算条件の設定を行う部分、[ポストプロセッサ]は計算結果を図にして可視化表示する部分です。

図 1. ADSTEFAN のメイン画面



鋳物とか冷し金の形状データは市販の 3 次元の CAD ソフトを使用して作成したもの(stl 形式)を用います。要素化は全て等寸法の立方体要素で行うことを特徴としています。このことによってメッシュ線の間引きとか追加の作業を全く必要としないので解析モデルを容易かつ高速に作成できます。合わせて、湯流れ解析を精度よく高速に行うことができます。物性値の入力は内蔵の材料データベースに登録しておいたものから選択することで行います。他の計算条件は画面に表示されている項目にチェックマークを入れることと必要数値を入力することで設定します。

計算の実行では多数の計算を自動的に連続して行うことや、コンピュータが複数の CPU を搭載していれば並列計算とか複数の計算の同時実行が可能で計算を短時間で完了させることができます。

計算結果は 3 次元表示、断面表示、クリッピング表示(閾値表示)、グラフ化表示などが可能です。溶湯の充填過程とか凝固の進行過程などは動画として出力できます(avi 形式)。

3. 鋳鋼品への適用例

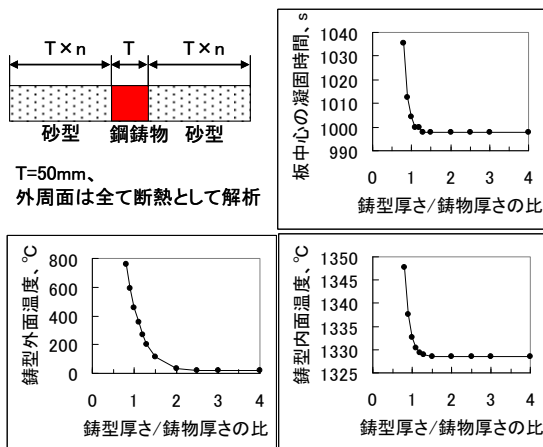
3.1 解析時に最低限必要な鋳型厚さ

シミュレーションの実施に当たって、コンピュータの使用メモリ量および計算時間を考慮して総メッシュ量低減を目的に鋳型サイズを実際の寸法よりも小さく想定することが多いかと思ひます。

図 2 はこのときどこまで小さくできるかを検討してみた結果を示します。左右の端部が鋳型外表面に相当する 1 次元モデルで、この部分も含めて周囲は完全に断熱にしています。得られた凝固時間

および鑄型温度の変化から厚さTの平板の砂型鑄鋼品については片側に1.5から2T程度の砂型層を設ければよいことが分かります。実際の複雑な鑄物についてもこれを参考に決めればよいでしょう。

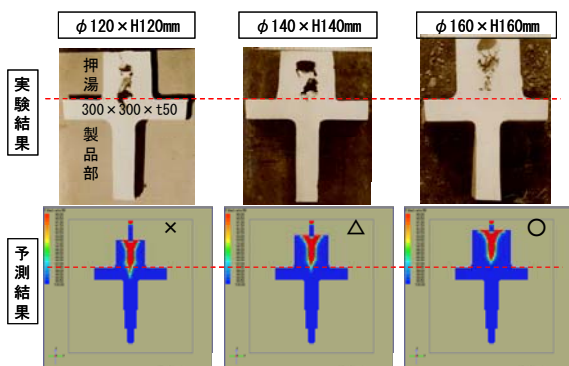
図2. 鑄型の厚さが凝固時間に及ぼす影響



3.2 押湯サイズの最適化

図3はT形鑄鋼品(普通鑄鋼材)の押湯サイズの最適化を行った例を示します。全体の形状は図4に示す例のものと同じです。押湯の頂部に付いた円柱部は空気抜きの穴です。引け巣の形状は凝固完了までの温度変化の計算をする過程で要素間の溶湯補給を計算することで求められる各要素の健全度の分布を表示したものです。収縮穴が全くない要素は健全度100%、全て収縮孔になってしまった要素は健全度0%となります。この結果から直径140mmの押湯が限界サイズで、安全上は直径160mmが良いことが分かります。図中に示す写真は試験鑄造品での実際の引け巣発生状況を示したものです。

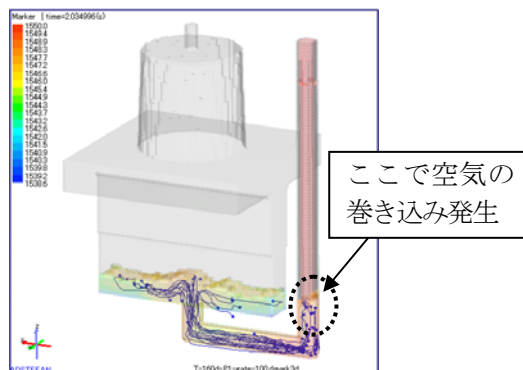
図3. 押湯サイズが引け深さに及ぼす影響



3.3 湯道での空気巻き込み

図4は湯口につながる縦湯道での空気巻き込み状況をシミュレーションした例です。鑄物は図3のものと同じのもので、鑄込みはストッパー方式のとりべを使用してそのノズル直径は湯道直径よりも細いものを使用しています。また、湯道系は全て同じ太さで絞り部はありません。この結果湯口から流入した溶湯は縦湯道部を満杯にすることなく充填が進んで、落下流は湯道内湯面(概ね製品部の湯面と同じ高さ)と衝突することになって、そこで空気の巻き込みを起こしています。これが製品部まで持ち込まれると酸化物とか気泡の巻き込み欠陥を発生させる可能性があります。そこまでは調査しておらず、シミュレーションのみの事例です。

図4. 湯道での空気巻き込みとその行方追跡



3.4 偏析予測への適用

ADSTEFANではADSTEFANの各種出力データを加工するツールを用意してあって、これを用いることでユーザ独自の変数を創生することができます。例えば、凝固区間の平均冷却速度Rを使って式1によってDAS(デンドライト・アーム・スペーシング)の予測ができます。

$$DAS = K/R^\alpha \quad \text{----- (1)}$$

ここで、K、 α は材料によって決まる定数で、実用炭素鋼の値として $K=209$ 、 $\alpha=0.386$ が知られています³⁾。

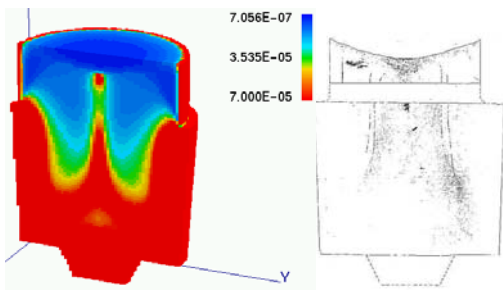
図5は流動限界固相率相当温度を通過時に求めた温度勾配Gと冷却速度Rを使って大型鋼塊の逆V偏析を予測した例を示します。この予測には鈴木らの提唱の式2を用いています(Bは定数)⁴⁾。

$$P = B \cdot R^{2.1} G^{-1.1} \quad \text{----- (2)}$$

大型鑄鋼品の押湯直下などに現れることのある偏析問題がこれと同種のものであればこれを用いる

ことでその防止策を考えることができます。

図5. 大型鋼塊の逆V偏析の予測

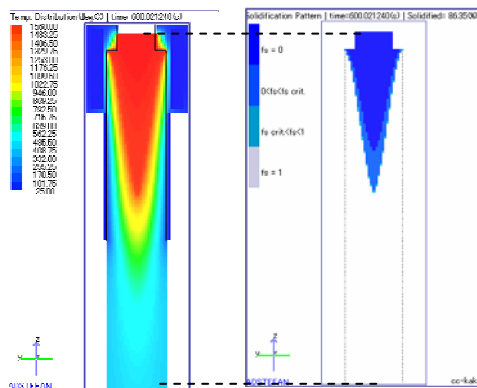


(1) 予測結果結果 (青色側ほど発生し易い) (2) 実物のサルファープリント試験結果

3.5 連続鋳造、ESR

図6は連続鋳造のシミュレーション例を示します。このシミュレーションでは定常状態でのメタルプールの形状および鋳物と鋳型の温度分布が求まり、冷却条件と鋳造速度の最適化の検討に使用できます。また、事例図は省略しますが ESR のシミュレーションも可能です。ESR のシミュレーションでは非定常状態つまり時々刻々変化する鋼塊と鋳型の温度分布、鋼塊各部の凝固時の冷却速度、温度勾配が求まります。鋳型の内側に心材を置けば ESR 肉盛りのシミュレーションも可能です。

図6. 連続鋳造時のメタルプール深さの予測



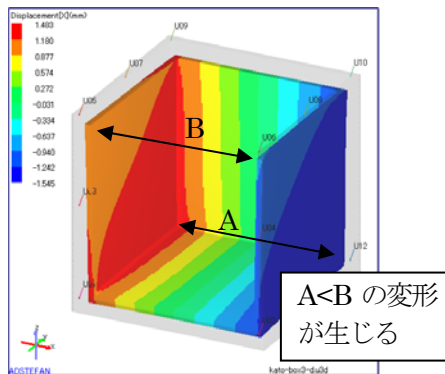
(1) 鋳型と鋳物の温度分布 (2) メタルプールの形状と深さ

3.6 変形・応力解析

鋳造時の鋳物の変形が予測できれば逆変形を与えた形で鋳造することで鋳物のさらなるニア・ネット・シェープ化が達成できます。ADSTEFANにはダイカスト向けに(1)金型から取り出すまで

は鋳物は金型に拘束されているため寸法変化は起こらない、(2)金型から取り出した後は金型による拘束がなくなってそのときの温度と室温との温度差に応じた熱収縮が起こる、と仮定して熱変形と熱応力を求めるプログラムがあります。砂型鋳造品でもある時間まで冷却が進むと鋳物強度が鋳型強度を上回ることになって鋳型の拘束なしとみなしてもよいでしょうから、これを使って砂型鋳物の変形予測を行う検討を行っています。図7は鋳鉄鋳物(250×250×250×10mm)での変形解析例で、変形は凝固直後から起こるとしています。この結果は実物で認められたのと同じ変形傾向を示しています。

図7. 変形解析例



4. 結言

鋳造シミュレーションシステムは鋳造方案作成支援ツールですので結果をスピーディに出すことが求められます。ADSTEFANはこれに適した解析手法を採用することで、またプログラムに工夫を重ねることで、十分これに答えられるものとなっています。このADSTEFANを鋳物の高品質化、コスト低減、新技術の創生などにお役立ていただければ幸いです。

以下にホームページのアドレスを記します。

<http://www.adstefan.com/>

5. 参考文献

- 1) 吉本：鋳鋼と鍛鋼、No.527
- 2) 李、高杉、糸藤：鋳鋼と鍛鋼、No.530
- 3) 素形材センター：鋳鋼の生産技術、(1996)
- 4) 鈴木、宮本：鉄と鋼、Vol.63(1977)