

鑄造・凝固シミュレーションの 動向と課題

大 中 逸 雄*

1. ま え が き

鑄型空隙部に溶湯を注入して、複雑な形状の金属製品を製造する型鑄造法は、5000年以上の歴史を有するが、今後とも重要な金属加工法の一つである。鑄造法の近年における革新的な進歩は、鑄造シミュレーションの発達であろう。これにより、芸術とも言われてきた経験的鑄造技術が科学を基本とした先進的技術に変身しつつある。すなわち、鑄造シミュレーションと経験を組み合わせることにより、鑄造品のより合理的な開発・設計、製造、評価等が可能になり、高品質化、軽量化、高機能化、製造コストや納期の低減、省エネルギー、環境負荷の低減等に役立っている。

鑄造には、種々の方法や多くの工程があり、必要なシミュレーションは非常に多い。ここでは、その内、品質や機能に大きく影響する鑄込み時の流動および凝固シミュレーションの最近の世界的動向と今後の課題について述べる。なお、2006年位までの動向は文献(1)などを参照されたい。

2. 湯流れシミュレーション

(1) 重力鑄造法、ダイカスト法などの湯流れシミュレーション

鑄型内空隙部を溶湯が充満する過程のシミュレーション(湯流れシミュレーション)は、鑄造欠陥の発生や凝固組織、すなわち、鑄造品の品質や性能に大きく影響するため、非常に重要である。

このシミュレーションには、流れを層流と近似したものと κ - ϵ モデルなど乱流モデルを使用したもの⁽²⁾があるが、層流モデルによるシミュレーションの研究・実用化はほぼ終了している。しかし、溶湯の乱流現象は、溶湯が高温で不透明なため、本質的進展はこの数十年ほとんどない。従って、そのシミュレーション精度は明確ではなく、乱流モデルの必要性も含めて、今後の課題となっている。また、熔融金属は表面張力が大きいので、表面張力の取り扱いが重要であり、表面張力を考慮した市販ソフトもあるが、詳細や精度が必ずしも明確ではない。

湯流れシミュレーション精度は、湯流れの直接観察結果と比較しないと分からない。直接観察法としては、X線および透明鑄型を利用した観察がある⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。この両者による観察結果を比較した数少ない例では、両者はほぼ同じであった⁽⁶⁾。しかし、流動現象は鑄型空隙部の形状や流速、溶湯とガラスの濡れの程度等で異なるので一般的に同等と言えるかどうかは疑問である。

シミュレーション結果とX線による直接観察結果の厳密な比較例も多くはないが、鑄型空隙部の大体の充満挙動はほぼ一致している⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。しかし、湯先の乱れはシミュレーション結果とかなり異なっている⁽⁷⁾。市販ソフトでも、湯のスプラッシュや充満時間などはプログラムで異なっている⁽⁸⁾。湯先挙動は鑄造欠陥に直結するガスや酸化物(のろ)の巻き込みの推定精度にも関係する重要なものであり、この精度向上が今後の重要課題である。

なお、湯流れ時の温度変化には、溶湯と鑄型間の熱抵抗が大きく関係する。熱抵抗は溶湯流速分布、鑄型からのガス発生、鑄型物性値等で変化するが、合理的推定法に関する最近の進歩はほとんどない。

(2) 種々の鑄造法の湯流れシミュレーション

鑄造法によってはプロセス特有の現象を考慮する必要がある。

例えば、遠心鑄造の場合、遠心力やゲート位置の移動⁽⁹⁾を考慮する必要がある。水平遠心鑄造に対して、水平軸の僅かな傾斜や鑄型粗さ⁽¹⁰⁾、軸方向の熱による歪や鑄型の振動等⁽¹¹⁾を考慮した報告がある。特に薄肉パイプの製造で均一な肉厚や組織を得るにはこのような種々の鑄造パラメータの微妙な最適化が必要である。これをシミュレーションで決定するには計算時間の短縮を含め、さらなる改善が必要である。

消失模型鑄造法では、発砲樹脂模型のガス化による背圧の上昇により、普通鑄造法とは非常に異なる湯流れとなる(図1⁽¹²⁾)。そして、溶湯と模型間の伝熱係数で模型のガス化が律速されるというモデルでの開発、実用化が進みつつある⁽¹²⁾、このようなシミュレーションではガス化残渣物の巻き込み欠陥などに影響する湯面での消失模型特有の乱れ⁽¹³⁾を

* 大阪大学名誉教授

The State of the Art of Casting and Solidification Simulation; Itsuo Ohnaka (Professor Emeritus of Osaka University, Toyonaka)

Keywords: *shape casting simulation, solidification, fluid flow, casting defects, shrinkage, porosity, segregation, hot tear*

2014年5月7日受理[doi:10.2320/materia.53.462]

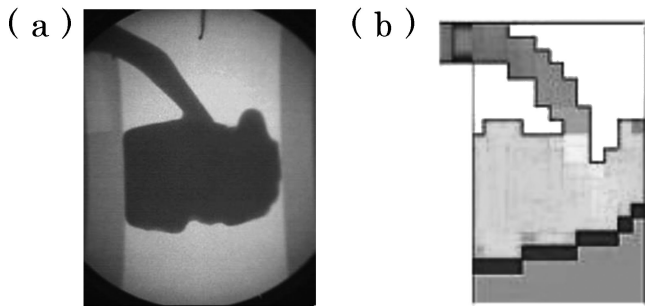


図1 湯流れの X 線観察結果 (a) とシミュレーション結果 (b) の比較例(消失模型鑄造)⁽¹²⁾.

予測できない。予測のためには、模型ガス化域の実態把握が重要であるが、X 線では模型、ガス、模型の液化相などの区別が困難である。また、耐熱ガラスなどの透明鑄型を使用しても、通気性や濡れ性が影響するので問題である。

3. 凝固シミュレーション

固相の移動がない場合の温度・固相率分布を推定する凝固シミュレーションはほぼ完成しており、実用化されている。しかし、推定精度に大きく関係する溶湯と鑄型間の熱抵抗推定法の進歩はあまりない。金型の場合、鑄型および鑄物の変形をシミュレーションすることで熱抵抗を推定することは不可能ではない⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。しかし、砂型では添加物や粘結剤から発生するガスの影響が大きく、より困難である。現状ではこのような計算を鑄物毎に実施するには、大変なコスト、時間がかかる。さらに、関連する物性値等の誤差も明確でない場合が多いので、結果の精度は疑問である。

また、固相率と温度の関係は、2 元合金等ではある程度分かっているが、実用合金についての精度の高いデータは少ない。このデータ蓄積が課題である。組成から計算で求める市販ソフトも存在するが、その精度に疑問がある場合も少なくないし、微量元素の違いで大きく変化する場合もあるので、注意が必要である。また、固相率にはマイクロ偏析が関係するので、厳密には固相率は温度だけでなく冷却速度にも依存する。

一方、Al 合金等のマイクロ凝固組織形成のシミュレーションは研究としては非常に進み、一部実用化されている。これらについては、本誌でも他の解説(本号458頁)があるのでここでは割愛する。マクロ組織形成シミュレーションについては「4.(4)偏析」を参照されたい。

4. 鑄造欠陥のシミュレーション

最近の関心は単なる湯流れ、凝固シミュレーションから、鑄造欠陥の直接シミュレーションに移ってきている。

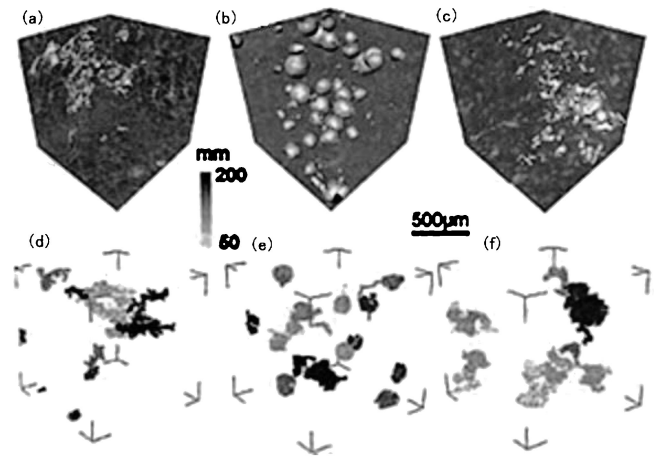


図2 ミクロ組織予測と連成させたマイクロポロシティ欠陥予測例⁽²⁰⁾.

(a)~(c) はそれぞれ Al-4%Cu, Al-7%Si, W319 alloys 合金欠陥部の CT 像, (d)~(f) はそれぞれ (a)~(c) に対応したシミュレーション結果。

(1) 引巢, ポロシティ欠陥

鑄造欠陥の代表的なものであり、古くから多くの研究がある。

(a) Al 合金, 鑄鋼等

これらの合金鑄物に発生する引巢やポロシティ欠陥の形成機構はかなり明らかになっている⁽¹⁶⁾。また、凝固遅れ部近傍に生じる引巢の定性的推定法(温度勾配や Niyama 指数などの欠陥判定指数を使用する)はほぼ確立している。最近では、より定量的な推定方法の開発に関心が移っており、吸収ガス量や凝固収縮流を考慮してシミュレートする研究^{(17)~(19)}が進み、一部実用化されている。また、マイクロ組織予測と組み合わせ、ポロシティの形態・寸法まで推定する方法も提案⁽²⁰⁾され(図2参照)、一部実用化されている。ただし、一般的実用化にはその計算負荷、精度等でまだ問題がある。さらに研究ではフェイズ・フィールド(PF)法による気孔の成長シミュレーションも試みられている⁽²¹⁾⁽²²⁾。

しかし、實際上重要な気孔生成の核の取り扱いについては極めて不十分である。気孔の核となる酸化物を多く含む汚れた溶湯ではポロシティが多く発生することは良く知られた事実である。また、Campbell を中心とした研究者達⁽²³⁾は、湯流れ時に生成あるいは巻き込まれる酸化被膜の考慮は引巢やポロシティ欠陥の正確な推定に極めて重要であることを指摘している。しかし、このような気泡核を考慮したソフトはほとんどない。また、2.(1)の湯流れで述べたように湯面での酸化物の巻き込みに関する湯先挙動の予測精度は未だ十分ではなく、引巢やポロシティ推定精度の向上にはさらなる努力が必要である。

また、固液共存域での凝固収縮によるダルシー流れを解く場合、固液共存域での透過率が重要であり、マイクロ組織予測を基に透過率を計算する試みは多数あるが、工場毎に組成が

微妙に変化する実用合金に対する透過率を計算することは容易ではない。

(b) 球状黒鉛鋳鉄

本合金は凝固時に膨張する点で、他の合金とは異なっており、その引巣生成機構がまだ十分理解されていない。このため、推定精度はAl合金等に比較して良くない。筆者ら⁽²⁴⁾は早く凝固する部分(鋳物周囲)における黒鉛晶出による膨張が内部の未凝固部の圧力を低下させるため、気泡が生成するとしている。しかし、これを考慮したソフトは少なく、多くの市販ソフトでは、引巣推定指標に黒鉛膨張を考慮した実験式を使用している。この場合、実験に近い条件からはずれると推定精度が低下する。一方、鋳物内部の圧力場を計算する方法の場合、現在の市販ソフトでは、鋳型の影響が十分には考慮されていない。しかし、欠陥生成に大きく影響する鋳物内部の圧力は鋳型の強度、変形にも関係するので、鋳型を含む応力解析が望まれる。さらに、これらの変形により、鋳型・鋳物間の熱抵抗が変化し、凝固の進行も変化する。従って、最終的には熱移動、凝固、変形解析を鋳型を含め全て連成させることが必要であろう。

この他、球状黒鉛鋳鉄の場合も、Al合金等と同様に含まれるガス量や酸化物などの引け巣の核の推定が重要であるが、これも今後の課題である。

(2) 外引け

外引けは、鋳物表面近傍の強度が鋳物内部圧力の低下に耐えられないと発生する。従って、その直接シミュレーションには、凝固と粘弾塑性解析を連成させる必要があるため、あまり進展はない。このような連成問題に粒子法^{(25)–(28)}の適用も興味深い。粒子法は要素分割が不要でもあり、このような連成問題への対応が期待されるが、使用する粒子属性と実際の物性値や界面現象との関係を明確にすることと計算時間の短縮が課題である。

(3) 巻込み、ドロスの生成

ドロスの生成、巻込みは機械的性質や耐食性を損じるのみならず、引け巣生成の原因にもなり極めて重要であるが、従来あまりシミュレーションされていない。これらについての本質的シミュレーションや予測は少ないが、ドロスが酸素の拡散境界膜厚さで律速されて球状に成長するなどの仮定でのシミュレーション⁽²⁹⁾がある。

(4) 偏析

(a) ミクロ偏析

セルオートマトン(CA)法やPF法による dendrite 成長とミクロ偏析生成のシミュレーションが進んでいる。例えば、2D解析ではあるが、CA法を鋼に適用し、dendrite 樹間の二重点より三重点の方がはるかにSiが濃化することを示した報告⁽³⁰⁾がある。また、PF法による対流を考慮した dendrite 成長とミクロ偏析生成のシミュレーション⁽³¹⁾や放射光測定結果との比較⁽³²⁾などが報告されている。

これらの結果はミクロ組織や偏析にも対流の影響が少なくなことを示しており、平衡状態での固相率と温度の関係を使用する場合には注意が必要である。

(b) マクロ偏析

マクロ偏析は特に大型鋳鋼品で問題となる。多くの研究があるが、ミクロ偏析と流動、固相移動などに関係する非常に複雑な現象であり、未だに発展の途中である。側面から一方方向冷却される単純な矩形モデルでも、偏析線の数(チャンネル数)やチャンネル内の濃度はソフト毎に異なり、メッシュサイズを小さくしても結果が収束しないという問題がある⁽³³⁾。また、より複雑なモデル化が進んでいる。例えば、柱状晶、等軸晶、dendrite 固相、周囲の液相などを考える5相モデル⁽³⁴⁾や微細化剤の粒度、分布、流動などをモデル化してミクロ組織とマクロ偏析に及ぼす影響を調べた結果⁽³⁵⁾などが報告されている。

また、マクロ偏析生成機構の解明が有機材料における凝固現象のより詳細な観察と共に進んでおり、これまでのシミュレーションでは予想できていない対流構造が見出されている(図3参照⁽³⁶⁾)。さらに、放射光により固液共存域でのせん断状況を観察し、そのモデル化が試みられている⁽³⁷⁾。この現象は、鋼塊のV偏析や半凝固ダイカストにおけるバンド状偏析などのマクロ偏析の生成に関する重要なものであるが、そのシミュレーションは遅れている。

型鋳造におけるマクロ偏析は、形状や冷却制御等で制御できるが、大型インゴット鋳造の場合、対応が限られるのでシミュレーションできても利用が限られる。合金の最適設計まで可能になれば役立つであろうが、現状では容易でない。

(5) 高温亀裂(鋳造割れ)

高温亀裂の生成機構やシミュレーションが特に欧州が進んだ。これは、高温亀裂が型鋳造だけでなく、Al合金の連続鋳造などでも問題になるためであろう。均質体としての応力解析では推定精度に限界があり、ミクロ組織シミュレーションと連成させる取組みが始まっている。

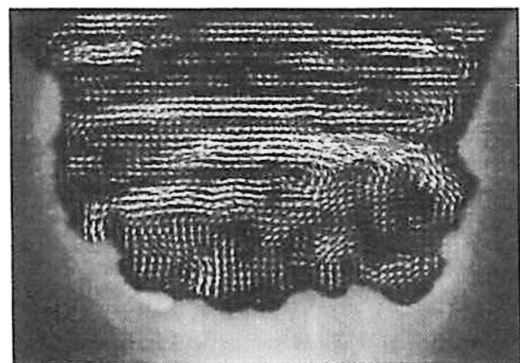


図3 粒子画像流速計(PIV)による29.5% $\text{NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ の凝固過程における対流観察例⁽³⁶⁾。

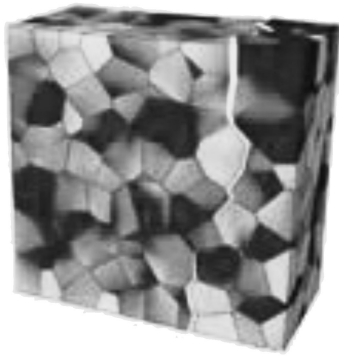


図4 多面体粒子モデルによる高温亀裂発生シミュレーション例⁽³⁸⁾.

例えば、多面体要素を利用した有限要素法を使用し、液相中では溶質は完全混合、固相では拡散、液相移動はダルシー流れ、液相は完全塑性・低降伏応力、固相は弾塑性体として凝固および応力場を解いた例がある(図4)⁽³⁸⁾。そして、結晶粒、ポロシティ量、透過率、パーコレーション(系内を連続する液相流路が存在すること)、流動応力、冷却速度などと亀裂発生との関係を調べ、高温亀裂が結晶粒の微細化で生じにくくなる理由を明らかにしている。実用化には膨大な要素数の計算が必要になるので、時間がかかるであろうが、興味深い結果である。

(6) その他の欠陥

鋳造法により、湯回り不良、鋳型変形、型落ち、砂かみ、侵食、焼付き、差込み、破断チル層、ハードスポット、湯じわ、バンド状欠陥などの種々の欠陥が問題となるが、湯回り不良や焼付き、差し込み欠陥以外のシミュレーションの報告はほとんどない。湯流れ不良予測も10年位前までは報告があったが、最近は少ない。

さらに、寸法不良や変形も欠陥であるが、これらの欠陥は、プロセス特有のもの以外に、鋳物、鋳型の温度変化に起因するものがある。後者は、凝固シミュレーション結果を利用して、予測可能になりつつあるが、弾塑性あるいは粘弾塑性解析は高温域での機械的性質データが少ないこと、計算負荷が大きいことなどから一般的利用は限定的である。

5. 物性・強度・性能予測および統合化計算材料エンジニアリングあるいはプロセス一貫シミュレーション

鋳造品の設計や応力解析には、機械的性質や残留応力が分布しているという事実があまり考慮されていない。これらを考慮しないと、鋳造品の性能変化、真のリスク、さらなる軽量化などに役立てることができない。しかし、機械的性質は、鋳造工程だけでなく、その後の熱処理や機械加工(残留応力が発生する)などで変化する。従って、最終的には溶解から仕上げ工程までの全工程のシミュレーションが必要であ

る。そこで、湯流れ・凝固シミュレーション、組織シミュレーション、熱処理シミュレーション、残留応力シミュレーションなどを全て実施し、機械的性質を推定することが一部の自動車メーカーで試みられている⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾。

これらのポロシティを含むマイクロ凝固組織および熱処理時のマイクロ組織変化予測などから機械的性質や性能を予測するシミュレーションは統合化計算材料エンジニアリング(Integrated computational material engineering)あるいはプロセス一貫シミュレーション(Through process simulation)と呼ばれている。

強度や性能予測問題は、マイクロな凝固組織から製品寸法まで数オーダー異なる多重スケール問題でもある。現状では、サブメッシュの利用でマイクロな解析をしているが、マクロ偏析などではマイクロ領域とマクロ領域の連成の程度が大きいのでこのような単純な方法には限度があるであろう。何らかのブレイクスルーが必要である。

なお、機械的性質予測には実験データが不可欠である。従来、膨大なデータが企業や大学等で取られているが、多くのデータは利用するのが困難である。それは利用するのに必要なデータが欠けているためである。そこで、Al合金の場合の実験ガイドラインの提案がある⁽⁴¹⁾。折角の実験データが無駄にならぬよう、少なくともこのガイドラインを考慮した実験が望まれる。

6. おわりに

鋳造シミュレーションの最終目的は鋳造品の受注、設計から最後の品質保証までの工程を最適化することである。このためには、設計から出荷までを最適化するための種々のソフトウェアの開発と効率的統合化が必要である。また、個々のプロセスシミュレーションはまだ十分ではなく、改良の余地が大きい。研究・開発すべき課題は極めて多い。

本特集のテーマである「高強度化・高機能化」には、最高値と保証する値という視点がある。実際に鋳造品を使用する場合には、最高値ではなく、保証値(通常最低値)とコストで評価される。鋳造品の場合、均質にすることは非常に困難であり、ばらつきは避けられない。従って、ばらつきを減らし、保証値を上げることが、高強度化、高機能化ともなる(高機能化にはより複雑形状のものをより低コストで製造することも含まれる)。そこで、ここで概観したような種々のシミュレーションの開発と効果的な利用が必要である。このためには、学術的レベルでの研究、商業的レベルでのソフト開発等に対する研究開発者、鋳造工場、鋳造資材企業、鋳造品のユーザ・消費者が協力することが不可欠である。

また、この研究・開発には、狭い「金属学」だけでは不可能であり、熱および物質移動、化学反応、粉体工学、欠陥材料の粘弾塑性学等、多くの学際的知識が必要である。シミュレーション利用者にも同様に学際的知識と鋳造経験が要求される。これに対する最近の日本での対応は、大学における研究・教育も含めて極めて心もとない。このままでは、産業技

