

鑄造の CAE の現状と問題点

Status and Accuracy Issues of Today's CAE Systems for Casting Simulation

平 林 繁

要 約 鑄造の CAE である金属流動解析と凝固解析に関し、その現状と問題点について述べる。流動解析については樹脂流動解析との対比により金属流動の特徴、金属流動解析の難しさについて言及する。次に鑄造の CAE で従来から多用されている直交分割（ボクセル分割）という要素分割手法が鑄造解析には不適當である点について例を交えて詳述する。ボクセル分割自体は鑄造解析以外、他の解析分野でも一部で使用されているが、その精度に関しては十分な検証が必要である。次に鑄造 CAE の最近の技術的チャレンジについて紹介する。多点ゲート使用時に各ゲートから流入した溶融物の充填領域を識別する機能、巻き込み欠陥の定量化の試みなどプラスチック射出成形分野でも興味深い機能と考える。最後に、現在開発中のプラスチック射出成形、軽合金ダイカスト鑄造向け金型冷却解析の概要について述べる。このシステムは従来の金型冷却解析システムに較べ大幅な使い勝手向上、計算効率向上を狙ったものである。

Abstract This paper presents status and accuracy issues of casting analysis concerning metal filling simulation and solidification simulation. Characteristics and some difficulties of metal filling simulation are discussed in comparison with mold filling simulation. Then, inadequacy of VOXEL division in casting analysis is pointed out with examples. VOXEL division is used in other analyses but its accuracy must be sufficiently verified.

Then, some technical challenges in casting analysis are introduced. These are a function in multi-gating system to identify areas which are filled by molten metal passing through a particular gate, and quantitative analysis of air-entrapment defects. Finally, new mold cooling system for plastic injection and light-metal die-casting under development is briefly described. The system aims at drastic improvement of ease of use and reduction of computation time compared with conventional cooling simulation systems.

1. は じ め に

近年、鑄造業界でも 3 次元 CAD/CAM システムの導入が活発化する中で、コンピュータによる解析システム（CAE: Computer Aided Engineering）への関心が高まり、中小の鑄造メーカー、金型メーカーへの導入も盛んになりつつある。鑄造の CAE を構成する解析システムは溶融金属の型への充填過程を解析する流動解析と、充填完了後、鑄物が型により冷却、凝固していく過程を解析する凝固解析が代表的である。後者の凝固解析が 20 年以上の歴史を持つのに対し、流動解析は商用ソフトが開発されてからまだ 10 年余りしか経過していない^[1]。金型内流動解析についてはプラスチック射出成形の分野の方がはるかに歴史がある。本稿の第 2 章では型内流動解析について、樹脂と金属の相違点、金属流動解析の開発が遅れた理由などについて概説する。

鑄造業界で CAE が導入され、現場での適用が盛んになるにつれて、解析に対する問題点も浮上している。鑄造品は他の素形材製品と比較しても、非常に複雑な 3 次元形状を有している

が、このことがCAEの適用を難しくしている。解析を行うにはコンピュータ内に3次元形状を作成した後、その形状を小領域に分割するという重要な作業が必要になる。3次元複雑形状の要素分割を容易にするため、従来から直交分割（ボクセル分割）という簡略的な手法が多用されてきたが、この要素分割手法が解析に大きな影響を及ぼすことが明らかになってきた。ボクセル分割は他の解析分野で使用される場合もあり、この分割手法の問題点について第3章で鑄造解析を例に詳述する。

第4章は鑄造のCAEの最近の技術的挑戦について紹介する。鑄造の流動解析では充填過程における残留空気、発生ガスの巻き込み欠陥を見つけることが重要である。この問題に対する新しい取り組みを紹介する。また多点ゲートのランナーシステムで各ゲートから製品部へ流入する溶湯を識別する手法は鑄造以外、樹脂の射出成形でも適用可能な解析手法であると考えられる。

最後に、現在弊社で開発中の新しい金型冷却解析システムの概要について紹介する。このシステムはプラスチックの射出成形、軽合金のダイカスト鑄造の金型冷却解析用に開発しているもので、冷却回路を使用した金型が冷却過程でどのような温度履歴を持つのかを解析する。従来からある金型冷却解析と大きく異なるのは、型の解析ではあるが型のソリッド要素分割を必要としない点である。直交の型要素と非直交（FEM）の製品部要素の併用で型の伝熱解析を行うという全くユニークなシステムである。

なお、本文中鑄造のCAEシステムとして紹介されている流動解析システム「METAL FILL」、凝固解析システム「METAL TEMP」は筆者が日本ユニシス(株)在籍中に開発し、現在は弊社において開発、サポート業務を引き継いでいるものである。

2. 金型内流動解析

金型内流動解析は溶融した樹脂や金属が型内をどのように流動、充填していくかを解析するものであるが、汎用流体解析にはない特徴をもつ。数値解析的には自由表面の移動境界問題に分類されるもので、型内を自由表面（メルトフロント、湯先）がどのように移動していくかを解析する。一般の汎用流体解析では解析領域に流体は充満した状態で、定常、非定常の流れを解析するが、型内流動解析では解析の始めに解析領域に流体は存在しない。解析開始と同時に解析領域へ流体が流れ込んでいく過程を追跡することになる。解析対象である鑄造品、射出成形品の形状を想い浮かべれば、この先端移動の処理がいかに技術的難度が高いか想像できよう。このような理由から汎用流体解析のソフトでは一般的に型内流動解析は扱えないのである。先端移動の問題については後章で触れる。

次に型内流動解析における樹脂と金属の相違点について述べる^[2]。樹脂流動解析のソフトを使用して、材質データをアルミ等の金属に替えれば金属流動を解析できるのではないかという疑問も湧こう。実際10数年前にはこのような解析が一部で行われていた。ただし、解析結果は金属の流れというより樹脂の流れに近いものであった。樹脂と金属の型内流動は共に非圧縮性粘性流体として近似される。支配方程式はNavier-Stokes方程式（N-S方程式）と連続方程式、エネルギー方程式である。樹脂流動解析ではこのN-S方程式をさらに簡略化する。溶融樹脂と金属の流れに関係する物性データで大きく異なるのは粘度である。一般的に樹脂と金属の粘度は10の5乗から6乗の差がある。樹脂の場合、高粘性を仮定してN-S方程式を圧力勾配と粘性項のつりあい式に簡略化できる（Hell-Shaw近似）^[3]。この定常式から各時点の圧力がわかり、その勾配として先端要素の流速が決まる。このヘルショー近似は流れを特徴づけ

るパラメータの一つであるレイノルズ数で1以下の流体に適用される。一方金属流動の型内におけるレイノルズ数は1万前後で乱流域に属する。従って金属の場合 N-S 方程式の簡略化は不適切で、そのままの形で解析される。以上の理由から樹脂流動解析で金属の流れを解析することはできないが、逆に金属流動解析で樹脂の流れを解くことは理論的には可能である。しかし、数値解析的には非常に大きな粘性項の扱いが難しいのが障害になっている。次に実際の型内流動における両者の流れはどのように異なるのか。まず樹脂の型内流動は粘性力主体の流れで拡散流である。ゲートから流入した樹脂の先端は円弧状に広がりながら流れる。一方金属の型内流動は慣性力主体の流れで、直線的な流れになる。金属の粘性はほぼ水の粘性に近く、型内を水が流れると想定すれば現実の金属溶湯の流れに近いと考えられている。この両者の流れの差が型内流動解析の難しさにも関連している。樹脂の場合、粘度の高い拡散的な流れとなるため、複雑形状でも隅々まで充填し易いのに対し、金属では慣性による直進的な流れのため、流路の分岐部分でもコーナー R の大きさにより分岐する流量が異なってくる。金属の流れは樹脂より流路形状の影響を大きく受けることになる。従って金属流動解析ではより多くの要素を使用した詳細な解析モデルが必要になる。この流路形状に敏感な流れに対し、従来からの直交格子分割（ボクセル分割）の手法がいかに不適切であるかは容易に想像がつこう。この問題を次章で詳述する。

3. 鋳造解析の問題点

現状の鋳造解析は他の解析分野と比較して、大きな問題点を抱え特異な状況にある。その主たる要因は鋳造解析の分野で従来から多用されている直交分割（ボクセル分割）が鋳造の解析には適合しないことが明らかになってきたためである。ボクセル分割の問題点を鋳造解析を例に詳述する。

まず凝固解析からみていく。凝固解析は鋳造品の冷却、凝固過程を解析するものであるが、数値解析的に見れば非定常の熱伝導、熱伝達問題であり、さらに相変化（液相から固相）を伴う点に特徴がある。一般的には高温の鋳物から低温の金型へ鋳物と型の接触面を通過して熱移動が起こる。伝熱解析をする上で重要なパラメータは離散化された小領域の熱容量、隣接する小領域との伝熱面積と伝熱距離である。直交分割を使用しても分割サイズを小さくしていけば、熱容量と伝熱距離は現実の値に近づいていく。問題は伝熱面積である。鋳物と金型の伝熱面積（接触面積）は分割サイズを小さくしても全く不変である。例として斜め金型境界を直交分割した場合を考える。図1から明らかなように、粗い分割（A）と分割サイズを1/3にした細かい分割（B）の接触部分の境界線長さは等しい。従って直交分割では分割サイズを小さくしても伝熱面積は全く変わらないことになる。金型冷却は鋳物から接触部を通過して型へ熱移動が起こるわけで、一番重要な伝熱面積の精度が向上しない以上、伝熱解析の精度が上がることはない。例として円筒鋳物（材質アルミニウム）の凝固解析を検討する。図2の有限要素分割されたモデルでは軸対称の温度分布が得られるが、直交分割のモデル（図3）では分割方向に対し、45度方向で接触面積の誤差が最大になり、伝熱面積を過大に評価するため冷却が一番速い。その結果として軸対称のモデルに対し、軸対称の温度分布が得られないことになる。この例は鋳造解析に限らず、樹脂の金型冷却でも全く同様である。

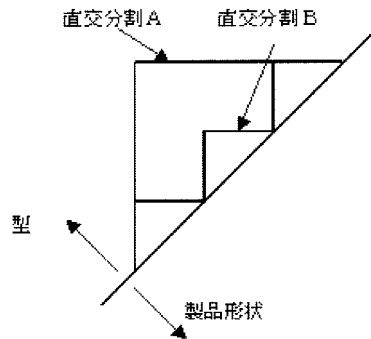


図1 斜め金型境界の直交分割

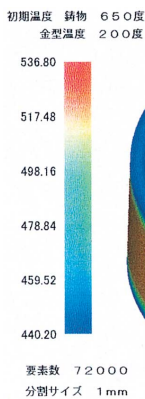


図2 円筒鑄物の凝固解析（非直交分割）

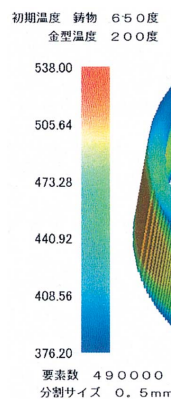


図3 円筒鑄物の凝固解析（直交分割）

次に流動解析に直交分割を使用した場合の問題点を検討する。流動解析における直交分割の影響は凝固解析よりはるかに大きい。それは流動解析の特徴である移動境界問題に起因する。流動解析は型内へ金属溶湯が充填していく過程を解析するが、充填途中の誤差がその場所に局所化されず、伝播していくからである。ある場所での誤差が、その後の充填を全く無意味なものにしてしまう可能性がある。凝固解析のように誤差が局所化されない分だけ難しい。流動解析における直交分割の誤差は実際の鑄物形状をガタガタの階段状に分割することにより、溶湯がガタガタ形状に衝突して、湯の拡散、エネルギー損失（流速の低下）をもたらす結果である。流動解析におけるこの問題点は筆者が従来から指摘しており^{[4],[5],[6]}、最近ではベンチマークモデルとして、R30テストを提唱している。このモデルは鑄造品に多いR形状や曲面形状を解析ソフトがどの程度正確に解析できるかを調べるものである。R30は大きなRなので、流れはR部を問題なく通過すると予想される。図4はモデルを六面体要素で有限要素分割し、肉厚方向は3層に分割した場合の解析結果である。R部で最外層の流れに若干の拡散が見られるが、主流はほぼ手前の流路幅を保ちつつ、反対側の平板へ流出する。一方、このモデルを直交分割した解析では（図5）、R部の階段形状に湯が衝突して、左右へ分岐してしまう。直交分割による差分法解析では完全に左右へ分岐して、反対側の平板へ全く流出しない解析も見られる。さらに深刻なのは分割サイズを小さくして、肉厚方向の分割を5層、10層にしても結果はほとんど変わらず、左右へ分岐してしまうことである。通常の鑄造解析では基本板厚部分を2、3層程度に分割するのが一般的であるため、直交分割によるR30テストの結果は解析に対

する信頼性を揺るがすことになった。

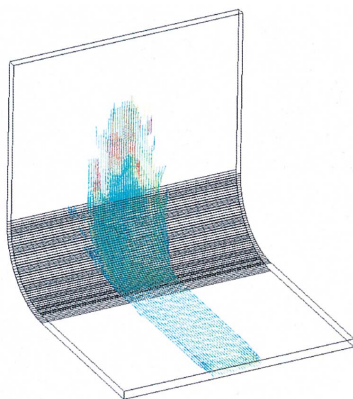


図 4 R 30 テスト (非直交分割)

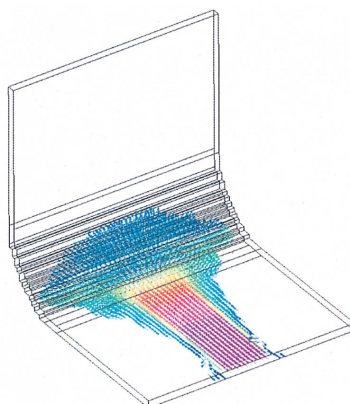


図 5 R 30 テスト (直交分割)

さらに重大な問題は直交分割では斜め平板の解析すらできない点である。鑄造の解析モデルとして最も簡単なモデルが平板流れである。当然、平板を例えば XY 平面に置き、直交分割しても分割誤差が生じないようにすれば差分法でも正しい解析ができることは言うまでもない。問題はこの平板が座標平面に対し斜めに配置された場合である。斜め平板を直交分割すると、平板の表裏面がガタガタの階段状になる。このガタガタに溶湯が衝突して、直進できず左右へ拡散してしまう。この流れは高粘性の樹脂流動に近い流れである (図 6)。斜め平板を有限要素分割すれば、XY 平面の平板流れと全く同じ流れが実現する。粘性の低い慣性流れの特徴である直進流となり、入り口の反対側まで直進して壁に衝突して、流れは手前に戻るのが熔融金属の平板流れの特徴である (図 7)。鑄造の流動解析で直交分割をすると斜め平板の解析にも問題があることが明らかになったが、実用鑄物の形状で斜め平板に近い形状が一部存在すれば、上に述べたような現実とは異なる人為的な拡散現象が起こることになる。他にも直交分割をすると明らかに流れ方がおかしい形状として円筒形状や円錐形状などがあるが参考文献を参照されたい^[7]。

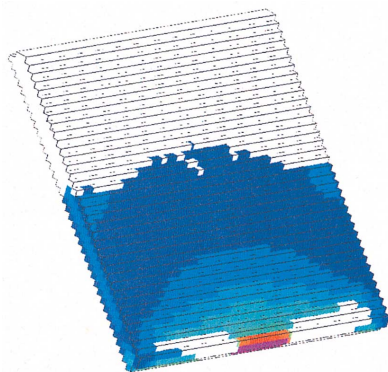


図 6 斜め平板テスト (直交分割)

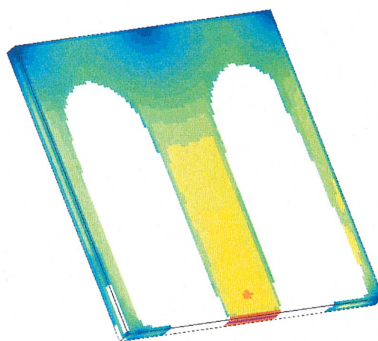


図 7 斜め平板テスト (非直交分割)

次に流動解析で問題にしたいのが、移動境界問題で一番重要な自由表面（湯先）の移動アルゴリズムである。「METAL FILL」がマーカー法を採用しているのに対し、他の内外のソフトはVOF法を湯先移動のアルゴリズムにしている。両手法とも長所、短所があるが、鑄造の流動解析で使用するにはマーカー法がより適切と考える。その理由は解析対象である鑄造品の形状に関係する。鑄物形状は部分的な肉厚部は存在するが、基本薄肉の板状部分が大半を占める。解析的にみると肉厚方向に要素が数個配置される部分が圧倒的で十分な数の内部要素が存在する厚肉部はごく一部に限られる。軽量化が叫ばれる自動車部品などはできるだけ「肉を盗む」鑄物形状が多くなっているのが実情である。このような薄肉形状の流路の中で溶湯を移動させるとき、斜めの金型境界では両手法の差は大きい。VOF法では流量保存の計算のため、面で接する隣接要素のみに流体を移動でき、節点や辺でのみつながる斜め要素には移動できない。従って斜め境界では実際の流れ方向とは関係なく境界の壁に溶湯を衝突させる結果となる（図8）。一方マーカー法では任意方向に湯を進めることが可能で狭い斜めの流路でも境界と衝突せずに、境界に沿った流れが容易に実現する（図9）。VOF法は十分に広い内部領域をもつ解析モデルに対して有効なアルゴリズムであるが、鑄造品のような薄肉形状の移動アルゴリズムとしては不適切である。この端的な例が上に述べた斜め平板テストである。マーカー法を採用している「METAL FILL」では、直交分割の3層は無理としても肉厚方向を5層に分割すれば、ほぼ正しい解析が可能である。一方、VOF法を採用している差分法ソフトでは5層に分割しても直進できず、左右へ拡散してしまうのが現実である。

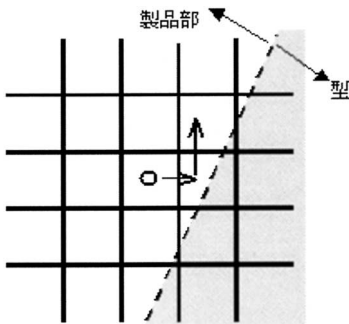


図 8 斜め境界の流れ（VOF法）

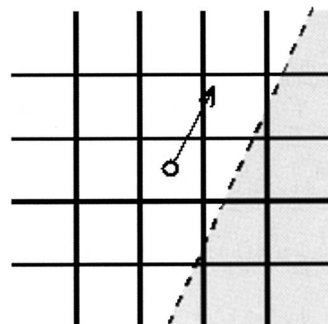


図 9 斜め境界の流れ（マーカー法）

4. 鑄造のCAEの新機能

本章では鑄造のCAEの新しい機能について紹介する。「METAL FILL」最新版に導入されている機能である。

4.1 ゲート識別

製品部への入り口となるゲートを複数設ける多点ゲートのランナー設計は樹脂や金属の成形で日常的に行われている。多点ゲートから溶融樹脂、金属が製品部へ流入するとき、各々のゲートから流入した溶融物が製品部のどの部分を充填するかを知ることはランナー設計にとって重要である。この情報から各ゲートの充填に対する寄与が明確になり、ゲート点数の増減、各ゲートの寸法変更が容易になる。「METAL FILL」で初めてこの機能が導入されたが、基本的には溶湯移動で使用しているマーカーを活用する。マーカーが各ゲートを通過する際、マーカー

一属性にゲート番号を追加する．一方マーカが製品部を充填していくとき，ゲート番号を通過する各要素に付与することで充填領域を識別している．ある要素に複数のゲートからマーカが到達したときは，最後に到達したマーカのゲート番号になる．図 10 は携帯電話のボタン側でマグネシウム成形品である．4 点のゲートから流入した溶湯が色別で表示されている．

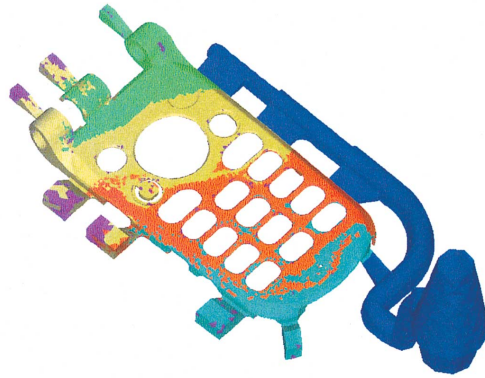


図 10 ゲート識別図（携帯電話）

4.2 巻き込み欠陥の定量化

流動解析により型内流動の状況を解析できても，鑄造欠陥の位置や程度を解析結果から読み取ることは難しい．流動過程における代表的な欠陥が巻き込み欠陥である．充填時において型内の残留空気や発生ガスを溶湯内に巻き込んでしまう欠陥を予測することは流動解析の課題であった．これに対し，「METAL FILL」は従来から「空気マーカ法」という独自の欠陥予測を提供してきた．さらに最新版では欠陥発生位置に加え，欠陥の程度に関する情報まで提供できるようになった．基本的なアルゴリズムは以下の通りである．流動過程の各計算ステップで溶湯に周囲を囲まれた未充填閉領域を見つける．この初期の未充填閉領域の体積を記憶し，以後発見した閉領域の動きを追う．未充填閉領域は一般的には体積を縮小しながら流動し，最後には全ての要素が充填される．途中で他の閉領域と合併または分裂する場合もある．注目した閉領域で最後に充填した要素に空気を巻き込んだ目印の空気マーカを発生させるが，このマーカの属性に記憶している初期の未充填体積を付与する．巻き込まれた空気(空気マーカ)はその場に留まることは稀で，周囲の溶湯によって押し流されていき，充填完了時に到達した要素に欠陥が発生すると予測する．当然初期の未充填体積の大きい方が巻き込み欠陥の度合いも大きい．この予測方法により巻き込み欠陥が発生しても巻き込み量が小さく無視できるもの，大きな巻き込み量で巣の発生が予測されるものに判別できる．また製品部全体の巻き込み量や製品にとって重要な特定部位の巻き込み量を解析から求めることができるので方案の優劣や，さらに方案の最適化の指標になりうると考えている．

巻き込み欠陥の表示は基本的にマーカ表示を採用している．マーカのアニメーションにより巻き込み発生位置（原因）とそこから流動して，実際に欠陥の発生位置（結果）を明確に認識できるようにした．図 11 は巻き込みの発生位置でボタンの周囲で巻き込みが多く発生している様子がみえる．図 12 は鑄造後，巻き込み巣の欠陥が予想される位置で，一部はオーバーフロー内に移動している．なお，表示色は初期未充填体積量である．

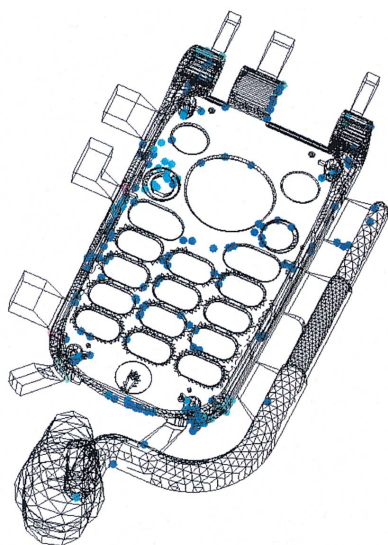


図 11 巻き込み発生位置

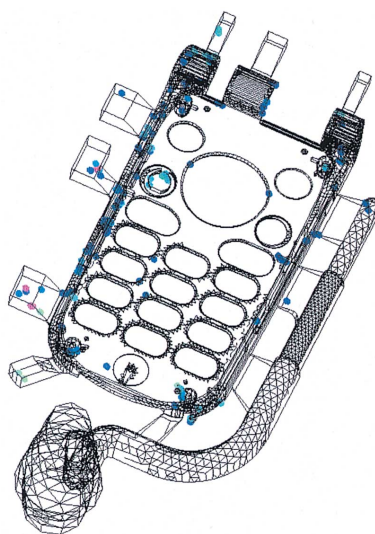


図 12 巻き込み欠陥位置

4.3 新しい金型冷却解析システム

現在弊社で開発中のプラスチック射出成形，軽合金ダイカスト鑄造向け金型冷却解析システムの概要について紹介する．射出成形の分野では昔から境界要素法（BEM）による金型冷却解析が一般的であった．この解析手法は金型内部の要素分割を必要としない点で使い勝手は良いが，最終的に解く連立一次方程式の行列が非対称密行列となり，解析に多くの時間を要する弱点があった．最近この反省から有限要素法（FEM）を使用した金型冷却システムも開発されているが，FEM の場合金型内部の要素分割が必要になる^[8]．型内部のソリッド分割は箱状の外側形状に対し，内側は製品部に接触しており，製品の複雑な形状が現れて要素分割は簡単ではない．さらに金型は製品と比べ圧倒的に体積が大きいので，要素数が膨大になる欠点も無視できない．一方鑄造の分野では，製品を含めて型全体を直交分割する手法が従来から行われているが，第3章でも詳述したように解析精度の面で問題が多い．新システムは直交分割と非直交分割（FEM 分割）を併用するユニークな解析手法である．まず，ユーザ側で準備するデータは固定，可動型表面の STL データと流動解析用に作成した FEM モデル，冷却管は中心線の位置を線要素の形で入力する．口径は別途数値入力する．型の要素分割を必要としない点で BEM の使い勝手の良さを取り入れている．以上のデータからシステム側で製品部を含む型全体を粗く直交分割する．さらに製品部（キャビティ）近辺は形状の複雑さの度合いにより 8 分木法のアルゴリズムで最初の粗い型要素を適当なサイズまで細分化する．解析自体は製品部分の FEM 要素と金型部分の直交要素を混合した形で処理している．製品部近辺では直交の型要素に FEM 要素が喰い込むような状況になるわけで，そのような要素分割でも伝熱解析ができるようなシステムを開発した．型の分割は製品部付近のみ細かく，離れると粗くなるため型の要素数は 4, 5 万以下でよい．FEM で型を分割する場合と比較して，1/10 以下である．数値解析には FEM のような行列を構成せず，集中定数化による差分式を使用するので計算時間も短い．さらに今後の展開としては型の STL データのみで，製品部の FEM データを必要としない解析や冷却回路の最適配置を考えている．冷却管の最適自動配置については今回のシス

テムが内部で型の分割を行っているため、冷却管の一部移動についても、型の分割の部分修正により柔軟に対応できること、型の要素数が少なく計算時間も短いので最適化に必要な繰り返し計算の時間も短いなど、最適化計算に適している。このシステムによる解析例が図 13 である。モデルはカメラ（材質 ABS）で可動型パーティング面の温度分布を表示している。解析は充分な数の成形後、型温が安定した状態の温度分布を計算する定常解析である。

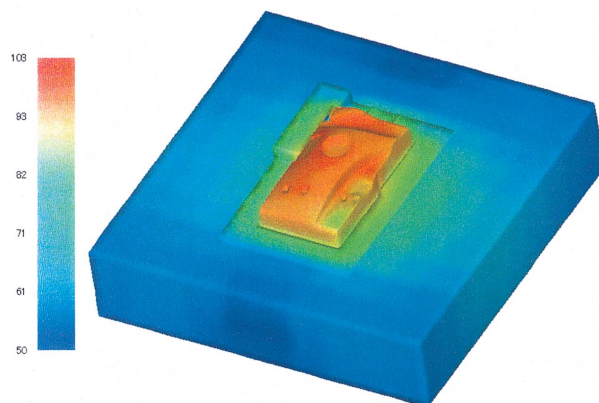


図 13 カメラ可動型温度分布

5. お わ り に

鋳造の CAE に関して現状と問題点について述べた。鋳造解析の分野では 20 年以上も前から簡便な要素分割手法として直交分割（ボクセル分割）が多用されてきたが、この分割手法が解析に及ぼす影響については詳細な検討を避けてきた。本文中でも指摘したように、凝固解析の基本である伝熱解析については要素分割サイズを小さくしても、温度は厳密解に近づく点において解析とは言い難い。また流動解析では平板、円筒、円錐形状など基本形状での解析が現実の流れと全く合わない点において解析とは言い難い状況にある。直交分割の問題は解析に対する信頼性を低下させるものであるが、鋳造業界に CAE が根づくためにも現状からの脱却が望まれる。

最後に最近の鋳造解析の話題に触れたが、金型内の現象は未だ未解明の部分が多い。現状の解析は鋳造工程の一部をモデル化したにすぎない。今後はさらにモデルの精緻化に努め、コンピュータによる仮想生産を現実のものにしていきたい。

-
- 参考文献**
- [1] 平林 繁, ダイカスト鋳造の湯流れ解析, 日本ダイカスト会議論文集, pp.83~88, 1992.
 - [2] 平林 繁, 金型内流動解析(溶融樹脂と溶融金属), 計算工学講演論文集, Vol.7, 2002.
 - [3] 平林 繁, 射出成形における溶融樹脂の金型内流動シミュレーション, ユニシス技報, Vol.8, No.3, pp.108~121, 1988.
 - [4] 平林 繁, 湯流れシミュレーションの実験(その1), 湯流れ可視化計測技術とコンピュータシミュレーション, 素形材センター, pp.75~81, 1994.
 - [5] 平林 繁, ダイカストの流動, 凝固解析の現状と問題点, AI ある, No.12, pp.17~24, 1999.
 - [6] 平林 繁, 湯流れ解析における直交格子と非直交格子, アルトピア, Vol.29, No.8, pp.29~36, 1999.
 - [7] 平林 繁, 「鋳造 CAE METAL FILL」, 素形材, Vol.44, No.7, pp.42~45, 2003.
 - [8] 大井秀人「三次元金型冷却解析システムの開発」, 成形加工, Vol 14, No.9 pp 566~569, 2002.

執筆者紹介 平 林 繁 (Shigeru Hirabayashi)

1948 年生，1973 年東京大学理学部物理学科卒業．同年日本ユニシス(株)入社，以来，技術計算，CAE ソフトの開発，サポート業務に従事，2002 年 3 月，日本ユニシス(株)を退社，(株)ザ・ワークスを設立，代表取締役．プラスチック成形加工学会，日本鑄造工学会，型技術協会会員．