

差分法による凝固解析とその応用

Development and Application of FDM Solidification Simulation for Castings

恩 田 祐* 伊 東 勲* 箱 崎 健 一*
Hiroshi Onda Isao Ito Kenichi Hakozaki
増 田 栄 二*
Eiji Masuda

要 旨

鋳造・鍛造・新素材開発などの素形技術は、自動車用材料技術の根幹をなすものであり、近年の部品形状の複雑化、高度化に伴い、これらの素形プロセスへの数値解析技術の適用が盛んに行われ、コンピュータ技術の急速な進歩とあいまって、素形技術の各領域でコンピュータ数値シミュレーションの研究・開発が活発に行われている。

筆者らは、素形技術シミュレーションの研究として、鋳造・鍛造などいくつかの素形技術領域に対して数値シミュレーションの適用を試みている。

これらの試みのうち、鋳造プロセスについては、差分法による伝熱・凝固解析を独自に行うためにSOLTONと名付けたシステムを開発し、シミュレーション研究を進めている。

本報においては、差分法による凝固解析、およびSOLTONの概要と、アルミ鋳造に関するいくつかの適用事例について述べる。

ABSTRACT

Among the modern automotive material technologies, casting, forging and new material techniques are essential and have become the focus of computer applications for numerical analysis.

The authors have studied and applied such material simulation to investigation of materials processes such as casting and forging. Among them the original simulation system (SOLTON) was established as an effective means of analyzing heat transfer and solidification in casting, based on finite differential method (FDM).

This paper outlines that original solidification analysis by FDM and the original simulation system of SOLTON. It also introduces their applications as an example to aluminum castings.

1. ま え が き

金型鋳造においては、ゲート・ランナ・ライザ等のいわゆる方案部と、製品部キャビティの三次元的な位置関係や、型材質・冷却構造等の型構造、加熱冷却条件、型のコーティング条件などが品質に大きく影響する。しかしながらこれらの要因の効果を的確に把握することは極めて困難である上、試験鋳造による品質の確認に多大のコスト・時間を必要とするので、理論的根拠に基づいた凝固プロセスの定量的把握が望まれている。

一方、近年のコンピュータ技術の急速な発展に伴い、内外で、差分法、有限要素法、境界要素法を中心とする数値解析を、凝固過程のシミュレーションに適用する研究が活発に行われており⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾、いくつかの市販パッケージも販売されている。

* ホンダエンジニアリング

コンピュータ数値解析を凝固プロセスのシミュレーションに適用することによって、凝固プロセスの定量的把握が実現でき、また開発に関わるノウハウ・データの系統的な蓄積も可能となる。

しかしながら、大部分の汎用パッケージでは凝固解析などの解析部分(ソルバ)がブラックボックスとなっているため、解析対象に応じたきめの細かい対応や、最新の解析アルゴリズムの適用化研究を行うのが困難である。

そこで、筆者らは

- ① 解析結果と実態を一致させる種々の試みを自由に行えること
- ② 加熱・冷却条件などの固有条件を解析にとりこめること
- ③ モデルデータ・解析データの処理を自由に行えること

を目標に、二次元および三次元の伝熱凝固解析システムを独自に開発している。

ここでは、差分法による伝熱凝固解析の概略と適用化研究として、二次元伝熱凝固解析によるアルミ鑄造プロセスのシミュレーション、および、三次元伝熱凝固解析の概要について報告する。

2. 差分法による凝固解析

差分法(Finite Differential Method 以下FDMと記す)によって凝固解析を行う場合、伝熱解析により、溶湯内の温度分布を求め、次に凝固潜熱補正を行って対応する領域の固相の比率(固相率)を求めるという手順を計算ステップ毎に繰り返すのが一般的である。

2.1. 伝熱解析

(1) 差分化

FDMでは通常、次の二つの方法で差分化して、数値解析を行う。

① 偏微分方程式の差分化による方法⁽⁴⁾

差分の定義式に従って、微分項を差分化する。

例として物性値一定の場合の一次元伝熱方程式(1)式を中央差分によって差分化すると(2)式が得られる。

$$\rho C_p (\partial T / \partial t) = \lambda (\partial^2 T / \partial x^2) \quad (1)$$

$$\rho C_p (\Delta T / \Delta t) = \lambda (T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}) / \Delta x^2 \quad (2)$$

T	: 温度
t	: 時間
x	: 距離
λ	: 熱伝導率
ρ	: 密度
C_p	: 比熱

② 直接差分法による方法⁽¹⁾

フーリエの法則(3)式を基礎式として差分化した(4)式によって着目要素の隣接要素(j = 1, n)について移動熱量を計算し、直接に要素ごとの熱収支をとる方法で、(5)式により温度変化に換算する。

$$q = -\lambda \partial T / \partial x \quad (3)$$

$$\Delta Q = \Delta t \cdot \lambda \Sigma \{S_j (T - T_j) / L_j\} \quad (4)$$

$$\Delta T = \Delta Q / (\rho C_p \cdot V) \quad (5)$$

q	: 熱流束
S_j	: j要素との伝熱面積
T_j	: j要素の温度
L_j	: 代表点間距離
V	: 要素体積

一般にFDMと云った場合、①を指すが、伝熱解析の場合、計算ステップあたりの計算負荷が軽く、熱量を直接扱うので解析の物理的意味付けが明確で、輻射伝熱、凝固潜熱補正などが取り込みやすいなどの理由から②の方法がよく用いられる。

(2) 数値解法⁽¹⁾⁽⁴⁾

差分化された式の数値解法には、時間差分の取扱により、

- ① 前進差分による陽解法
- ② 後退差分による陰解法

があり、陰解法では計算の時間きざみ Δt を任意に設定でき、計算が比較的安定であるという利点があるが、多元連立一次方程式を解く必要があり、計算ステップあたりの計算負荷が膨大で、計算誤差を生じ易く、プログラムも複雑になる。

陽解法では、 Δt が収束条件から規定され、空間きざみが小さいほど、また熱拡散率が大いほど Δt を小さくしなければならないが、計算ステップあたりの計算負荷が小さく、プログラミングの負荷も軽い利点がある。

SOLTON では型構造まで含めた大規模な三次元解析に対応するために直接差分による陽解法を採用している。

2.2. 凝固解析

凝固解析では、溶湯要素内の固相の比率を表す固相率を算出し、温度分布・固相率分布から凝固欠陥を予測する。

(1) 固相率変化の算出⁽¹⁾

伝熱解析結果に凝固潜熱補正を行って、固相率変化を算出するが、簡便な方法としては、温度と固相率に直線関係を仮定して固相率変化を推定し、凝固潜熱補正を行う温度回復法がよく用いられる。

温度回復法では、伝熱解析により溶湯要素の温度が液相温度から δT だけ温度降下すると計算されたとき、(6)、(7)式から温度降下分を除去熱量と固相率変化に換算して、固相率変化に相当する分の温度を回復させることによって凝固挙動のシミュレートを行い、固相率変化の積算が 1 に達したときをもって凝固完了とする。

$$\Delta Q_{sol} = \rho C_p V \cdot \delta T \quad (6)$$

$$\Delta g = C_p \cdot \delta T / H \quad (7)$$

ΔQ_{sol} : 凝固に伴いステップあたりに除去されるべき熱量

H : 凝固潜熱

Δg : ステップあたりの固相率変化

δT : 液相温度からの温度降下

図 1 に概略を示したように、亜共晶系の合金では、温度が共晶温度に達すると、共晶凝固が終了するまで、溶湯温度は共晶温度に保たれる。(実際は、この温度は冷却条件によって変化する見かけの共晶温度であるが便宜上共晶温度として扱う)

図 2 にテスト型による実測データを、図 3a, b に対応するモデルを SOLTON によって解析した結果を伝熱解析のみの場合と、凝固潜熱補正した場合について示した。

当然ながら、伝熱解析のみでは凝固挙動は再現されておらず、凝固潜熱補正により、凝固パターンが再現されていることがわかる。

最近、溶湯の過冷現象のシミュレーションを行う方法も提案されており⁽⁵⁾、今後さらに解析アルゴリズムが精密になっていくと思われる。

(2) 凝固欠陥の推定

SOLTON では、引け巢推定方法として、

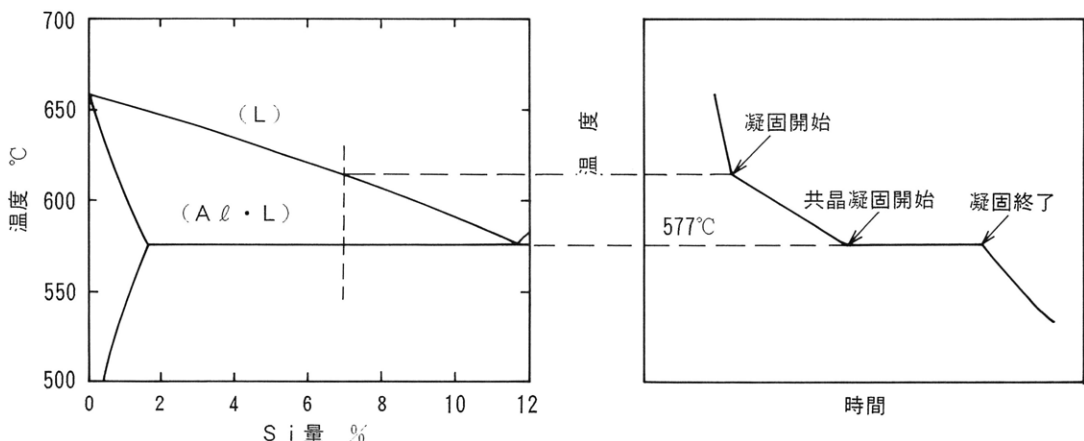


図 1 Al-Si 二元系状態図と Al-7%Si 合金の冷却曲線

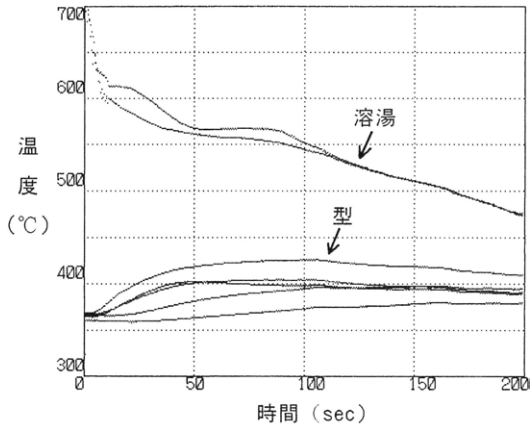


図2 実測データ

計算された固相率分布から等固相率線(面)を求め、溶湯が移動しなくなる限界の固相率(流動限界固相率 通常 $f_s = 0.7$)以上の線で囲まれた領域内部には溶湯補給が行われなと考え、流動限界固相率に達した領域に囲まれた未凝固部を引け巣と推定する方法を用いている。⁽⁷⁾

この方法で、定性的には大部分の引け巣が容易に予測できるが、形状などによって推定できない場合もあり⁽³⁾、他の方法も種々提案されていて^{(6), (8), (9)}、SOLTONへのとりこみを現在検討中である。

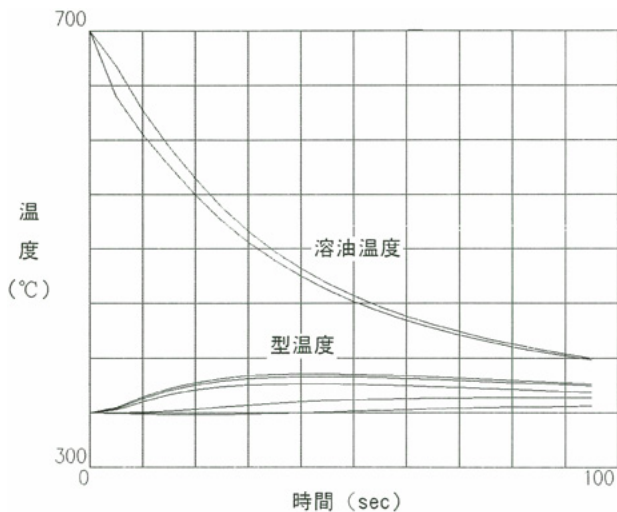


図3a 伝熱解析のみ

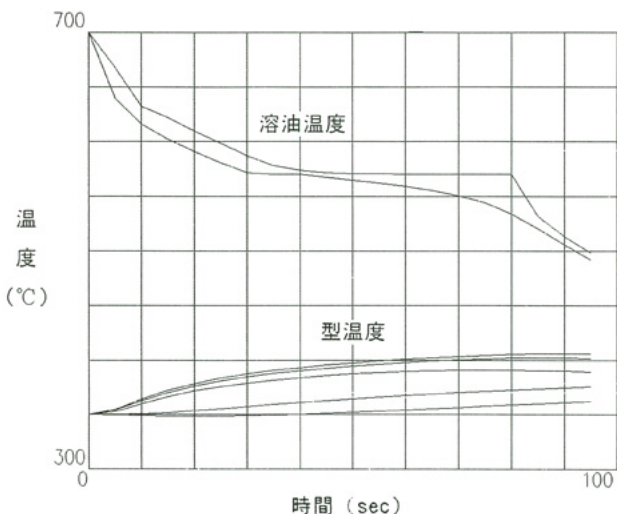
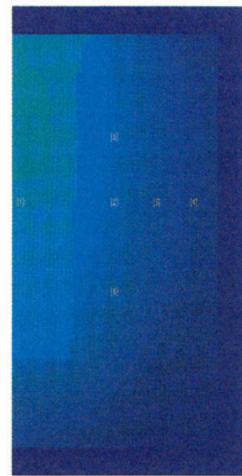
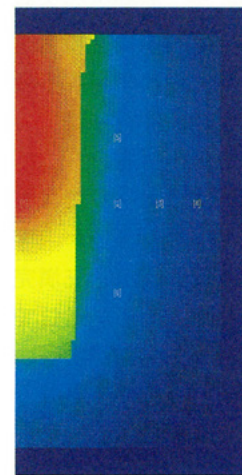


図3b 凝固熱補正

図3 凝固熱補正の有無による解析結果の違い



3. 適用化研究

自動車用鋳造部品は、シリンダヘッド、インターカムニホールドなど、三次元形状の見本のようなものが多く、ホイールのような比較的簡単な形状にしても、二次元的な取扱いでは不十分であり、三次元解析が実際上不可欠である。

しかしながら、解析対象の対称性が高い場合、あるいは、三次元配置の影響を受けにくいように解析領域が限定できる場合は、二次元解析に若干の改良を加えれば、容易に求める結果が得られる場合も多い。

以下、2次元解析事例としてアルミ鋳造部品の解析例と、3次元解析の開発状況について紹介する。

3.1. 二次元解析事例

SOLTON をアルミ鋳造プロセスに適用する際に、市販パッケージではきめ細かい対応が困難である以下の項目について、以下の工夫を行って精度の向上を計った。

① 擬似三次元モデル

解析モデルに現物を考慮した重み付けを行って、擬似三次元的取扱いができるようにした。例えば、後述のアルミホイールの解析では、モデルを軸対称として解析しているが、実際のホイールは、リブ部や窓部があり、これらの領域では円周方向に対して均一ではないため、単一断面での表現は不可能であった。

そこで、断面上の各領域に対して対称軸を中心とする円周上の当該領域の存在率を概算し、熱容量に相当する項にこの存在率を掛ける形で補正を行った。

② 初期温度分布

市販パッケージでは、初期溶湯温度は均一とするものが多いが、実際は充填過程における熱移動により、充填完了時の溶湯温度は分布を持っている。そこで、SOLTON では実測値から、溶湯と型の初期温度分布を決めて解析精度の向上を計った。

③ 熱伝達条件

熱伝達係数は熱移動を量的に規定する重要なデータであるが、通常は文献値や、パッケー

ジメーカの推奨値を使用する。しかしながら、溶湯と型の間の熱移動は、溶湯／型の接触条件など様々な要因により複雑に変化し、簡単な数値表現は困難である。一部のパッケージでは、温度に対するデータをいくつか与えて、温度依存性を持たせるものもあるが、この場合も、入力するデータを用意する必要があり、すべての条件に対するデータを用意するのは実際上困難である。

この項目は伝熱解析実用化のキーポイントでもあるため、現在基礎実験として、種々の条件に対して実験的に熱伝達係数の挙動を調べていて、より合理的に、使用する鋳造法固有の条件に即した熱伝達の定式化を行うべく研究中である。今回の SOLTON 適用に当っては溶湯／型間の熱移動を輻射伝熱と伝導伝熱を加えたものとして、輻射伝熱（温度の4乗の関数）により熱伝達の温度依存性をもたせ、輻射率と熱伝達係数はパラメータと割り切って、温度変化の計算結果が実測温度データと大略一致するように試行錯誤により設定した。

また、固有条件として、型コーティング条件や、水冷、空冷などがあるが、これらの的確な表現は市販パッケージではやはり不十分である。

SOLTON においては、局所的に熱伝達係数を変化させることにより対応することにした。

④ 強制加熱・冷却条件

加熱冷却条件もプロセスの固有条件であり、SOLTON においては、解析要素のうち、特定の要素の温度を時間により任意温度に設定できるようにして、強制加熱冷却条件の再現ができるようにした。

また、解析モデルの任意位置に温度制御センサに相当する要素を設定し、特定の要素の温度を制御する機能も付加して温度制御機構の再現も可能にした。

⑤ 直交分割の差分法解析においては、要素分割を無限に細かくすると理論値に一致する。

そこで実用的な解析ができる範囲内で極力分割を細かくして解析精度を向上した。

これにより、温度分布や固相率分布の計算結果が実態に近づき、把握しやすくなった。

(1) アルミホイール casting プロセスのシミュレーション

アルミホイール casting プロセスのシミュレーションを行った結果を温度分布と固相率分布について図4 に時間の進行に沿ってまとめて示した。解析モデルは図の左端を中心軸とする軸対称モデルで、冷却構造を含めた型構造もモデル化している。

温度分布からわかるように、140sec から強制冷却が再現されている。

固相率分布図中の青色は凝固が進行した部分で、緑色で示される領域がほぼ流動限界固相率に対応する領域で、青色に囲まれた緑色の部分 (矢印で示される部位) に凝固欠陥が予想され、現在、方案を改良し、新方案による検討を行っている。

(2) アルミ casting 金型の構造改良への適用

アルミ casting 部品の一部に欠陥発生が予想され、試験 casting に先だって、対策案の絞り込みに適用した。引け巣対策として、次の3通りの方案 (型構造、冷却方法、図5a~c) について、それぞれ解析を行った。

モデル A: 鋳抜きピンを間接的に冷却する

モデル B: 鋳抜きピンを直接冷却する

モデル C: 鋳抜きピンなしで直接冷却する

シミュレーション結果を図6~図8 に示す。

図からわかるように、鋳抜きピンに冷却効果は期待できないが、鋳抜きピンのない場合と比較して溶湯容積が減少し凝固挙動が変化することと、間接冷却では冷却効果が低いことがわかる。

3.2. 三次元解析

直交分割による三次元解析では、三次元形状のR部など細部の表現が困難で、これを回避するには、分割を極端に細かくする必要がある、計算規模が膨大となる。例えば、R5を表現する場合1mm程度のきざみでメッシュを形成しなければなら

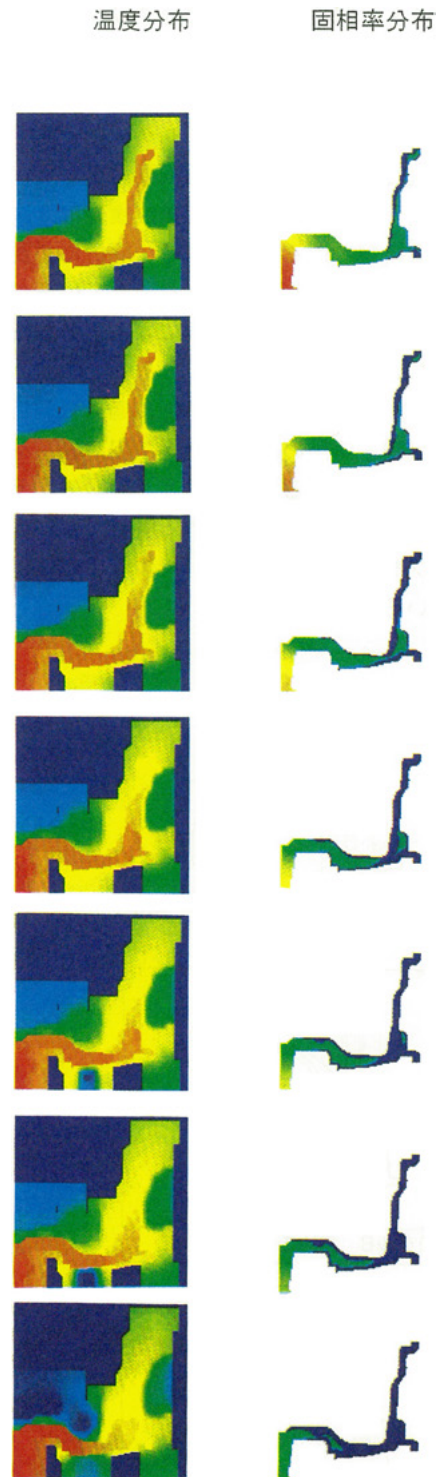
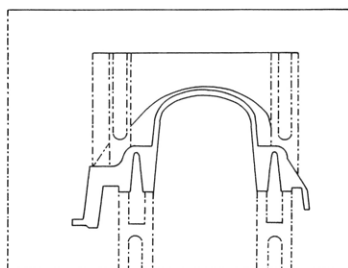


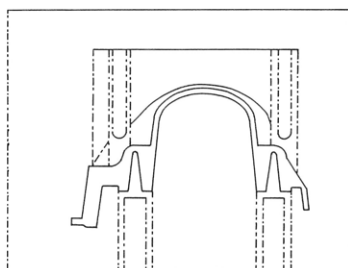
図4 温度分布変化と固相変化解析結果
(矢印⇒部分に引巣が予想される)

いが、 $400 \times 400 \times 170\text{mm}$ のモデルを 1mm 等間で直交分割すると $400 \times 400 \times 170$ のメッシュなり、要素数は 2720 万個となってワークステーション程度のマシンでは処理が極めて困難となる。一方、最近の市販の有限要素法用モデリング・パッケージでは、非直交分割メッシュを解析要素をしているので、三次元形状がよく表現でき、複雑な三次元モデルの取扱ができるものが多く、解析に必要なメッシュ分割もかなり自動化されてきているが、メッシュ形状の違いから直交分割による差分解析に適用できない。

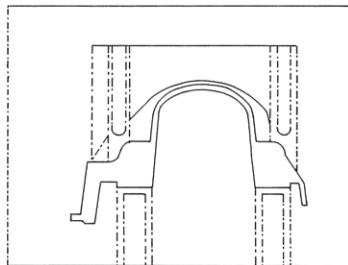
そこで、自動車部品の三次元解析に適した解析システムを実現するため、有限要素法用のメッシュを直接差分に適用することを考え、市販三次元モデラを用いて三次元解析のできる解析ソルバのプロトタイプを開発し、現在、解析精度の確認などを行っている。



モデルA 鋳抜きピン間接冷却



モデルB 鋳抜きピン直接冷却



モデルC 鋳抜きピン無し

図5 解析モデル

図6～8 固相率分布 a 120sec
b 150sec
c 180sec
d 210sec

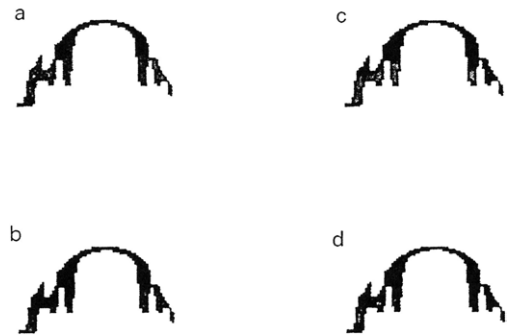


図6 モデルA 解析結果

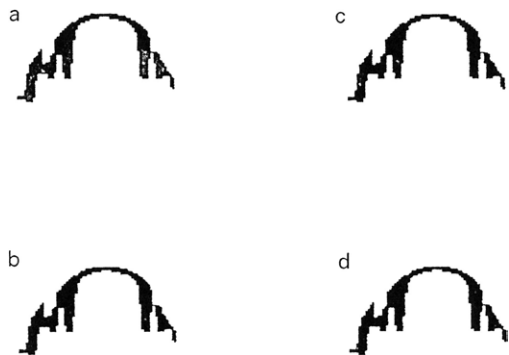


図7 モデルB 解析結果

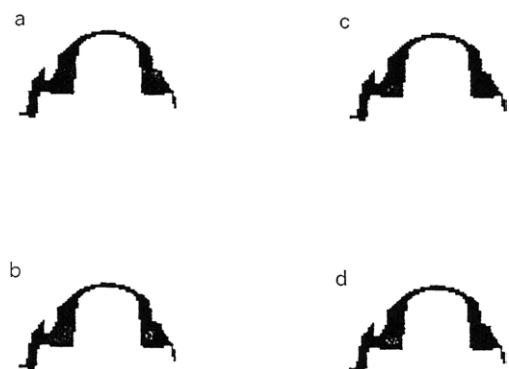


図8 モデルC 解析結果

解析の手順は以下のようにしている。

- ① 市販 FEM パッケージを利用して、モデル作成、メッシュ作成を行う。
- ② 生成したメッシュデータの全要素について、熱収支を取るべき隣接要素を決め、体積、面積、代表点間距離などを算出し、材料条件から熱抵抗係数を算出して解析用データを作る。
- ③ 初期条件を設定し、二次元解析と同様にして伝熱凝固解析を実行する。
- ④ 解析結果を FEM パッケージが処理できる形式で出力する。

図9～図10に三次元解析ソルバによる解析例を示す。

この手法により、複雑な三次元形状に対する独自の解析を行うことも可能になった。

4. 結 論

- (1) 差分法に基づく二次元の伝熱凝固解析システム、及び三次元の伝熱凝固解析ソルバを独自に開発した。
- (2) 開発した二次元のシステムに以下の改良を加えてアルミ鋳造プロセスへ適用した。
その結果、有用性を確認した。
- ① 解析モデルに現物を考慮した重み付けを行って、擬似三次元的取扱いができるようにした。
- ② 充填過程における熱移動の影響を考慮するために、充填完了時の型及び溶湯の温度の実測値から、初期温度分布を決めて解析精度の向上を計った。

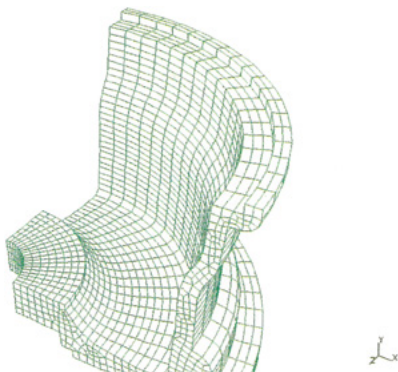


図9 メッシュ

- ③ 溶湯／型の熱移動に輻射伝熱を加味し温度依存性をもたせ、温度変化の計算結果が実測温度データと大略一致するように輻射率と熱伝達係数を決めた。
- ④ 冷却条件や、型のコーティング条件をモデルに取り込めるよう改良し、実条件にあわせた。

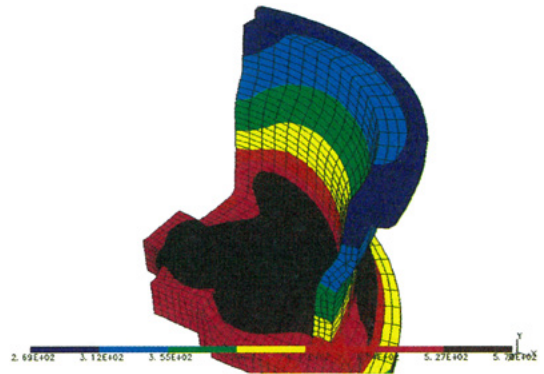


図10a 温度分布 (50sec)

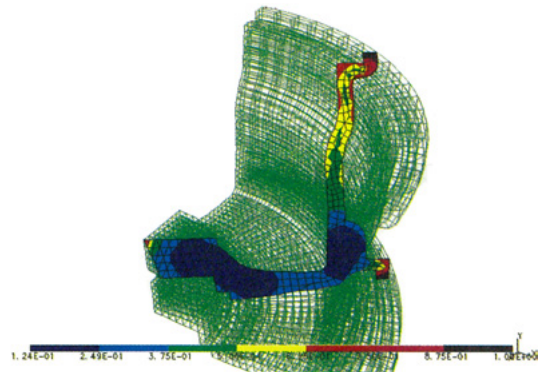


図10b 固相率分布 (20sec)



図10c 固相率分布 (50sec)

5. 今後の展開

以上述べてきたように、凝固シミュレーションの有用性は確認されつつあり、固有条件を考慮した独自の適用技術も確立しつつあるが、この手法を有効に適用していくためには、コーティング条件、冷却構造などの固有技術の定量的表現を行うことが必要である。

筆者らは、3. で述べたように、解析手法の研究開発と並行して、伝熱・凝固挙動に関する基礎実験を展開している。

また、現状の解析では不十分な点も多々あり、その一つに充填時の解析があげられる。

周知のように、薄肉品や金型鑄造などでは、溶湯充填時の熱移動を無視することができず、厳密には、流動をとまなう凝固解析が必要であるが、現在、実用化されている充填解析ソルバはポテンシャル流れを仮定したシェル要素に対するものがほとんどであり、溶融金属の実用的な三次元粘性流動解析手法はいまだに確立されていない。

また、現在の凝固解析は比較的簡単な凝固潜熱補正によっているが、この方法では凝固にとまなう結晶成長などの組織学的情報はわずしか得ら

れないし、予測できる凝固欠陥の種類も限られている。

これらの問題点を考慮しつつ、新しい解析アルゴリズムの適用検討、固有条件の定量化を行って、三次元シミュレーションの実プロセスへの適用を推進する必要があると考えている。

5. 参考文献

- (1) 大中“コンピュータ伝熱凝固解析入門”
- (2) Louvo A et al. “state art comput simul cast solidif process” (1986), 83
- (3) Rezayat M et al. “numer method therm problems” 5 (1987), 84
- (4) 斉藤“数値伝熱学”
- (5) 高森、新山、井川“鑄物” 61 (1989), 906
- (6) 大中、鑄物 61 (1989), 876
- (7) 大中、長坂、福迫“鑄物” 54 (1982), 384
- (8) 新山、内田、森川、斉藤“鑄物” 52 (1980), 635
- (9) 荒瀬、大浜、瀬崎、氏家“石川島播磨技報” 26 (1986), 13

■著 者■



恩 田 祐



伊 東 勲



箱 崎 健 一



増 田 栄 二