

要 旨

計算時間の短縮のために低メモリ有限要素法の開発を行った。さらに,流れ解析の高精度化のためにみかけの粘性 係数の測定を行った。試作プログラムによる流れ解析の計算時間は市販プログラムに比べて短くなった。みかけの粘 性係数は晶出固相の形態と量に依存することを認めた。そして固相形態は流速の増加に伴って小さくなる。AI-Si系 合金の流れ解析に用いる固相率と流速により算出できる。また,流れの可視化により,溶湯充てんはキャビティ内の 背圧分布と凝固状態に大きく影響されることを認めた。粘性変化と背圧を考慮したT字鋳物の流れ解析は実測結果と 良い一致を示した。

キーワード アルミニウム合金,鋳物,粘性,凝固,流れ,シミュレーション

## Abstract

In order to shorten the computation time, the finite element method with a lower memory requirement is developed. Also, in order to improve the accuracy of the flow simulation, the apparent viscosity was measured.

The computation time of the flow simulation by the experimental program was shortened where compared with the commercial program simulation.

The apparent viscosity of castings was found to depend on the value and the geometric factor of the solid phase in the molten metal. Also, this solid phase became smaller with an increase in the molten metal velocity. Therefore, the apparent viscosity for the flow simulation of an Al-Si alloy was derived from the solid fractions and the molten metal velocity.

The molten metal flow was determined by observing the flow that depended on the distribution of the backing pressure in the cavity and the solidification state. The flow simulation of T-shaped castings based on the change in the apparent viscosity and the backing pressure was similar to the measurement.

Keywords Aluminum alloy, Castings, Viscosity, Solidification, Flow, Simulation

# 1.はじめに

鋳造CAE技術が開発され,鋳造方案の検証や鋳造欠 陥発生原因の推定に利用されている。しかし,鋳物に よっては解析結果が実鋳造の結果と合わない場合があ る。また,最近の自動車軽量化の強いニーズに伴い, 部品の薄肉化や形状の複雑化が進み<sup>1-3)</sup>,より高い精 度での解析が求められるようになってきている。

鋳造における溶湯充てん・凝固解析については種々 のソフトが販売されているが<sup>4-6)</sup>, その主流は矩形要 素の差分法(FDM)による解析である。しかし差分法 は,鋳物境界部分が階段状となるために,薄肉部品や 曲面形状を有する部品への形状適合性が劣り,解析精 度が悪いと言われている。形状適合性の面では有限要 素法(FEM)による解析が良いとされているが,そこ では膨大なメモリを必要とする等の問題点がある。ま た,解析精度を高めるためには,形状適合性に加えて 実鋳造における溶湯物性の変化を正確に計算に反映さ せる必要がある。現状の鋳造解析では,特に凝固過程 での溶湯物性変化が正確に求められていないために,

19

特

隼

溶湯充てん時の粘性変化やキャビティ背圧などの影響 は考慮されていない。

本報告では形状適合性の良いFEM解析を採用し,そ の問題点である低メモリ化に一点求積法を適用すると ともに,溶湯流動時の温度低下に伴うみかけの粘性係 数の変化を実験によって求め,計算に織り込むことに より,高速・高精度な鋳造解析法を開発した。

2. 実験方法

#### 2.1 FEM解析方法と低メモリ化法

溶湯充てん解析の基礎式は三次元Navier-Stokes式お よび連続の式である。これらの式から有限要素式を導 出後,部分積分を行い,時刻ごとの各節点の流速を求 める。低メモリ化は,各式に現れるナブラ演算子を一 点求積法による近似計算で求める<sup>7)</sup>ことにより行っ た。

背圧は,ガス抜き孔からのキャビティ内空気の抜け 量をHagen-Poiseuille式で算出し,キャビティ内に残留 する空気の圧力を状態方程式から求め,その空気圧を 流れの圧力境界条件とすることにより考慮した。また, 粘性係数は完全液体状態では0.0024Pa・sとした。凝固 に伴う粘性変化は,別途実験により求めた温度,流速 と粘性係数との関係式より時刻ごとに各要素の粘性係 数を求めることによって与えた。

凝固解析は,三次元エネルギ方程式を解き,時刻ご とに各節点の温度を求めることにより行った。時間増 分幅は,鋳物と鋳型の熱拡散数で制約を受けることか ら,鋳物と鋳型の時間増分幅を別々に取り,鋳型側の 時間増分幅を大きくすることにより解析数を低減し, 高速化を図った。

2.2 アルミニウム合金溶湯の粘性測定法

粘性は運動流体が速度勾配を持つときに現れる接線 応力で表される。液体中を一定速度で運動する回転子 に生じるトルクを測定すれば,その液体の粘性を求め ることができる。

凝固過程でのトルク変化は,一定速度で回転する回 転子( $\phi$ 77mm×80mm)をアルミニウム合金溶湯中(坩 堝内径 $\phi$ 80mm×深さ80mm)に50mm浸漬し,30K/hの速 度で冷却し,測定した。回転数は流速1m/sに相当する 10rpmから流速10m/sに相当する90rpmの範囲で変化さ せた。粘性係数への変換は,種々の標準粘度液を測定 して作成したトルク-粘性曲線を用いて行った。

2.3 溶湯充てん状態の観察方法

Fig. 1に溶湯充てん観察の方法を示す。T字状キャビ ティを持つ鋳型を差圧鋳造装置に水平に取り付け,保 持炉内およびキャビティ内を同時に10torrまで減圧し た。その後,保持炉内のみを空気加圧して,溶湯をキ ャビティ内に充てんさせた。T字状キャビティの左右 先端部の2カ所には,ガス抜き孔を設け,それを開閉 することにより背圧を変化させた。溶湯はAC4C合金 で,溶湯温度は953Kとした。溶湯充てんの観察は, キャビティの上面をパイレックスガラスで構成し,そ こを通してビデオ撮影することにより行った。

3.実験結果および考察

3.1 湯流れ・凝固解析の高速化

ー点求積法による近似解析を行うことにより低メモ リ化し,計算の高速化を図った。Fig.2に流れ解析の 計算時間について市販FEM解析ソフトと比較した結 果を示す。解析モデルの形状は図中に示す。要素数が 1000以下と少ない場合,本解析法の計算時間は市販ソ フトの約60%と短い。計算時間短縮の効果は要素数の 増加とともに大きくなり,要素数が3000を越えると市 販ソフトの約40%までに短縮され,約3倍の高速化が 達成されている。

ついで,凝固解析の高速化について矩形キャビティ 金型(厚さ10mm×幅10mm×長さ80mm)内での AC4C合金(913K注湯)の凝固解析を行い,検討した。



Fig. 1 Experimental apparatus and T shaped cavity.



Fig. 2 Effect of total nodal point's number on computation time.

集

21

Fig. 3にキャビティ中心部で実測した冷却曲線と凝固 解析した同一位置の冷却曲線を示す。解析は鋳物と金 型のそれぞれの熱拡散数から時間増分幅を算出し,時 間増分幅を変えて解析した場合と,通常行われている 両者の最小時間増分幅(鋳物側の時間刻み幅)で解析 した場合について示してある。金型側の解析数を大幅 に減少させていくと計算精度が悪くなると予想される が,鋳物と金型の解析を別にし,金型の解析数を1/10 に減少させても実測との温度差はほとんどなく,許容 できる解析精度の中にあった。この時の計算時間を Fig. 4に示す。通常の解析(鋳物と金型とを同じ時間 増分幅にした場合)に比べて計算時間は1/6と大幅に 短縮されている。

3.2 亜共晶AI-Si系合金のみかけの粘性係数

AC4C合金の凝固に伴うみかけの粘性係数の変化を Fig. 5に示す。みかけの粘性係数は測定時の回転数に よって変化している。回転数が10rpmと小さい場合は 凝固が始まる(初晶AI晶出)とともに粘性係数は急激 に増大する。しかし回転数が増加すると,粘性係数が 急激に増大する温度は低温側に移行し,より低い温度



Fig. 3 Colling curve of AC4C alloy obtained by each method simulation.

まで粘性は小さいままに保たれる。例えば,回転数が 90rpmになると,粘性係数は850Kの共晶凝固温度付近 まで微増しつづけ,共晶凝固が始まると急激に増大し ている。回転数は溶湯流速を支配しており,回転数が 大きくなれば溶湯流速も大きくなる。AC4C合金では 回転数が多いほど,すなわち流速が大きいほど同一温 度でのみかけの粘性係数が小さくなる。

このような回転数の違いによるみかけの粘性係数変 化を粘性測定中の固相の晶出状態に注目して調べた。 Fig. 6には初晶凝固過程の865K付近の温度から各試料 を水中急冷したときの凝固組織を示す。回転数が 10rpmから90rpmへと大きくなると初晶AIは花弁状か ら粒状へと変化し,通常の凝固組織で観察される発達 したAIデンドライトは全く認められない。これは,初 晶AIデンドライトは全く認められない。これは,初 晶AIデンドライトが回転子によって破壊されて液相中 に分散し,さらに回転子によって溶湯ともに攪拌され ることにより固相AIが等方的に成長し,粒状化が進ん だものと考えられる。

このような初晶AIの結晶粒径および粘性と溶湯流速の関係をFig.7に示す。溶湯流速が大きくなると初晶



Fig. 5 Relation between apparent viscosity and molten metal temperature for AC4C alloy.



Fig. 4 Computatin time by each analysis method.



Fig. 6 Microstructure during measurement for AC4C alloy.

特 集

AI粒径は小さくなり,それとともに粘性も小さくなる。 すなわち,みかけの粘性係数は晶出した固相形態に支 配されており,固相形態は流速に依存していることが わかる。

Fig. 8にAC4C合金とAI-4~9%Si合金の固相率と粘 性係数との関係を示す。溶湯流速が一定であれば、い ずれの組成の合金も固相率に対するみかけの粘性係数 は同一の変化を示す。すなわち、溶湯流速によって初 晶AIの粒形状が決まり、それらの固相粒子がある量を 越えるとチクソトロピ性が急速に失われて粘性が急激 に増大するものと考えられる。したがって、アルミニ ウム鋳物の溶湯充てん解析には溶湯流速と固相率とに よって決定できるみかけの粘性係数を用いれば良いこ とがわかった。

- 3.3 溶湯充てんシミュレーション
- 3.3.1 T字キャビティ内へのAI合金溶湯の 充てん

T字キャビティの左右先端部に取り付けたガス抜き 孔をすべて開放したときの溶湯充てん状態をFig.9に 示す。湯口側(図の下部)よりT字形状のキャビティ に流入した溶湯は交差部壁面(図の上面側)に衝突



Fig. 7 Effect of molten metal velosity on grain size and viscosity for AC4C alloy.

後,左右に分かれ,ほぼ均等にT字部先端まで流れて, 同時に充てん完了する。すなわち,左右キャビティの ガス抜き効果が同じで背圧が等しければ,溶湯は左右 均等に分流し,それぞれを均等に充てんする。

Fig. 10は, T字キャビティの右側部のガス抜きを閉 じ, 左側部のガス抜きを開けたときの溶湯充てん状態 を示す。溶湯はT字キャビティの交差部に衝突後, ガ ス抜きのある左側部を先に充てんし,その後ガス抜き のない右側部を充てんする。これはガス抜きの有無に よる背圧の大小が溶湯充てんに影響を与えたもので, 溶湯はガス抜きにより背圧が小さくなる領域を優先的 に充てんしたことがわかる。なお,ガス抜きがなく背 圧が高くなる右側部を充てんする溶湯は,上側に沿っ て先端へ流れた後, 交差部付近から未充てん領域を図 中の矢印で示す方向に向って充てんしている。

3.3.2 T字キャビティ内の溶湯充てんシミュ レーション

3.1で考案したFEM湯流れ解析法とその高精度化 に必要なキャビティ内背圧および溶湯の粘性変化の影響を明確にするために, Fig.9およびFig.10の観察結



Fig. 8 Relation between solid fraction and apparent viscosity for Al-Si alloy.



Fig. 9 Molten metal flow in T shaped cavity by experimental method.

果を例題として解析した。

Fig. 11には,背圧を考慮せず粘性係数も一定という 条件で計算した結果を示す。溶湯はT字キャビティ交 差部に衝突後,左右に分流し上面に沿って先端まで流 れ,上面側から下面側へと充てんする左右対象の流れ を示している。この解析条件は,背圧の点ではT字キャビティの左右の背圧が同じとなるFig.9の実験に近いものである。しかし,左右のキャビティを対称に充てんするものの,キャビティ内の充てん順序は実際とは異なっている。Fig.12は,粘性係数は一定にし,背

23



Fig. 10 Molten metal flow in T shaped cavity unopened right air vent.



Fig. 11 Molten metal flow simulation unconsidered backing pressure in T shaped cavity.



Fig. 12 Molten metal flow simulation considered backing pressure in T shaped cavity.

圧を考慮して計算した結果を示す。溶湯はT字キャビ ティの交差部に衝突後,背圧の小さい左側部を先に充 てんし、その後、背圧の大きい右側部を充てんする。 この充てん順序はFig. 10の結果をほぼシミュレートして いるように見えるが,右側部の溶湯充てんは実測結果 と違いがある。すなわち,計算では溶湯は右側部を上 面に沿って先端まで流れた後,図中の矢印で示すよう に上面側より下面側に向って充てんしている。Fig. 13 は,背圧に加えてさらに溶湯充てん時の温度低下に伴 う粘性係数を変化させて計算した結果を示す。溶湯は T字キャビティの交差部に衝突後, 左側部を先に充て んし,ついで右側部を充てんする。この傾向は粘性係 数を考慮しない場合と大きな差はない。しかし,右側 部では溶湯は上面に沿って先端まで流れた後,矢印で 示すようにT字交差部付近から右下方向に向って充て んしており, Fig. 10の実測結果と同じ挙動を示す解析 結果が得られた。これは,図中に示した溶湯温度分布 から明らかなように,T字右側上面を流れる溶湯の温 度が先端部で873Kに低下したために,粘性係数が急 激に増大し,溶湯が流動能力を失ったことによると考 えられる。このため,溶湯温度が883Kで粘性係数が 小さいT字交差部付近から溶湯が流出するものと考え られる。

# 4.まとめ

形状適合性の良いFEM解析法を採用して,低メモリ 化した高速FEM湯流れ,凝固解析法を考案するとと もに,溶湯流動時の温度低下に伴う粘性係数変化とキ ャビティ内背圧の影響を組み込み,解析の高精度化を 実現した。

1) 溶湯充てん解析における計算時間は,ナブラ演算 子を一点求積法による近似計算とすることにより低メ モリ化でき,市販ソフトの約3倍(総節点数3000の場 合)の高速化を達成した。 2) 凝固解析における計算時間は鋳型と鋳物の時間増 分幅を変え,鋳型側の解析数を1/10にすることにより, 同じ解析精度を維持し,計算時間を1/6に短縮した。

3) AI-Si系合金の凝固に伴うみかけの粘性係数は初 晶AIの形態によって変化し,その粒状化が進むほど低 温度まで粘性係数は小さい。

4) 溶湯流動下での粘性係数の変化は溶湯流速,固相 率(温度)との関係で整理される。この関係式を溶湯 充てん解析に組み込むことにより精度の高い解析が可 能になる。

5) キャビティ内の背圧は溶湯充てんに大きな影響を 与える。これを考慮することにより精度の高い解析が 可能になる。

### 参考文献

- 1) Franke, A. J. : Trans. North Am. Die Cast. Assoc., (1997), NAD97-074
- 2) Sternau, H. : Trans. North Am. Die Cast. Assoc., (1995), NAD95-073
- 3) 柴田新次:鉄と鋼, 78-10, (1992), 8
- 4) Schneider, M., Andersen, S. : Mod. Cast., 90-5 (2000), 39
- 5) 三中西信治,安斎浩一,久保紘:日本鋳造工学会第134回講演 概要集,(1999),7
- Kallien, L. H. : Trans. North Am. Die Cast. Assoc., (1995), NAD95-022
- 7) 棚橋孝彦:計算流体力学,(1994),495,IPC出版 (2000年9月25日原稿受付)

## 著者紹介



岩田 靖 Yasushi Iwata
生年:1959年。
所属:車両軽量化材料研究室。
分野:鋳造分野。
学会等:日本鋳造工学会会員。
1989年日本鋳物協会小林賞受賞。
1999年日本鋳造工学会東海支部堤賞
受賞。
工学博士。



Fig. 13 Molten metal flow simulation in T shaped cavity considered both backing pressure and changing of apparent viscosity.