

ダイカストシミュレーション技術の開発と 二輪車部品での検証

Development of High-Pressure Die-Casting Simulation and Verification in Motorcycle Parts

中 川 昌 彦*
Masahiko NAKAGAWA

千 葉 幸 一*
Koichi CHIBA

小 屋 栄太郎*
Eitaro KOYA

要 旨

ダイカスト鋳物において、空気巻き込み量の定量化と凝固完了時の実体強度を材料試験およびシミュレーションにて検討した。その結果、新たに背圧を考慮することで空気巻き込み解析の予測精度は向上した。また、流動完了時の空気巻き込みを凝固過程に連成させることにより、実体強度の解析が可能となった。

ABSTRACT

The quantitative evaluation of trapped air and strength of cast products at the completion of solidification in high pressure die-cast has been studied using material test and simulation. As a result, the prediction accuracy of trapped air analysis was enhanced by considering back pressure. In addition, by coupling the trapped air defect at the completion of flow with the solidification process, the analysis of mechanical characteristics of cast products has become possible.

1. まえがき

二輪車のフレーム部品は、軽量化を目的としてアルミニウム化が進められている。従来、展伸材と接合されるフレーム部品は、溶接性の観点から重力金型鋳造法により製造されていた。更なるフレーム部品の軽量化のためには、薄肉、高精度、高生産性の観点より、ダイカスト製法が適している。しかし、従来のダイカスト製法は、溶接に適さないものとされてきた。

この課題を解決するために、遷移域充てん法ダイカストによるフレーム部品のダイカスト化が図られている⁽¹⁾。さらに近年、軽量化要求の高まりに伴い、溶接可能かつ高強度、高剛性が得られる中空構造鋳物が遷移域充てん法ダイカストで作られ、製品化されている⁽²⁾。また他の手法とし

て、金型キャビティ内の真空度を高めて、ダイカスト製品内への空気の巻き込みを抑えることにより、フレーム部品へのダイカスト製法の適用を実現化する例が見られるようになってきた⁽³⁾。

これらの鋳物を短期間で開発するためには成型性、溶接性、強度、品質などを開発の早期段階で予測する技術が必要であるが、従来の鋳造シミュレーションでは、空気巻き込み量を定量的に解析することが困難であった。一方、ダイカスト鋳物は製品部位により内部品質が均一でないため強度が異なり、更なる軽量化をおこなうためには、実体強度予測手法の開発が望まれていた。

本稿では、新たに開発したダイカスト製法における空気巻き込み、実体強度の解析手法の概要および、実鋳造品とシミュレーション結果の相関について報告する。

*朝霞研究所

2. 従来技術との比較

近年、鋳物の品質向上を目的として鋳造シミュレーションをおこなうことが多い。従来の鋳造シミュレーションは、流動過程における溶湯の挙動、物性の変化および凝固過程での凝固巣の発生を個別に解析し、それぞれ必要に応じて使い分けてきた。これらの手法でも一般の鋳造における欠陥予測や鋳造方案を定性的に検討することは可能であった。しかしながら、従来の鋳造シミュレーションの多くは、金型キャビティ内の背圧の影響が考慮されていないため、金型キャビティ内の圧力は一定として解いていた。したがって、空気巻き込み量の予測精度は充分ではなく、定性的な評価に留まっていた。そこで今回、従来の解析手法に加えて背圧を考慮し、気相と液相の二相流を扱うことにより、金型キャビティ内の空気圧の圧力勾配までも解析を可能とした。これにより、空気巻き込み量の定量的予測精度の向上を図った。

また、より正確に流動シミュレーションをおこなうために、境界条件の設定によりビスケットから溶湯を注入して解くのではなく、スリーブ内の溶湯の挙動も解いている。

一方、溶湯流動時に発生した空気巻き込みが、凝固のひけ巣を伴って最終的な鋳物中のポロシティとなるが、従来の凝固解析では凝固の初期段階で充てん完了時の空気巻き込みを考慮することができず、正確なポロシティのサイズ、量を解析することができなかった。特に充てん過程で空気を巻き込むダイカスト製品においては、これらを考慮する必要がある。今回、新たに流動完了時の空気巻き込みを凝固過程に連成させることにより、凝固完了時のポロシティのサイズ、量を定量的に解析できるようになった。さらに Dendrite Arm Spacing(DAS)、偏析を考慮することにより強度、伸びの予測を可能とした。

3. 鋳造シミュレーション

3.1. 流動シミュレーション

流動シミュレーションでは、Fig. 1 に模式的に示すように空気巻き込みをモデル化することにより、解析を可能にした。まず、自由表面をVOF(Volume of Fluid)法⁽⁴⁾で解くことにより、ボイドの発生を予測する。この場合、ボイドとは数個以上のメッシュ要素の集合として表されるマクロ的な空洞である。流動解析の途中でボイドが発生するとボイドの保存方程式を解く。さらに溶湯が充てんされることにより、ボイドが1要素以下のサイズになって消滅する。このマクロ的な空洞が消滅した時点で1要素以下のサイズの空気巻き込みが発生したとして、空気巻き込みのサイズ、ガス圧、個数を計算する。その後、溶湯の流動に伴い空気巻き込みはサイズ、ガス圧を変化させて移動する⁽⁵⁾。

3.2. 凝固シミュレーション

一方、従来の凝固シミュレーションの欠陥予測手法としては、等温度法、凝固時間法、温度勾配法、修正温度勾配法($G/\sqrt{R}$ 法)などがある⁽⁶⁾。しかしながら、これらの方法ではポロシティ発生メカニズムを充分考慮していないため、どの位置にどの程度のポロシティが発生するのかを定量的に予測することは困難であった。そこで、Fig. 2に模式的に示すように凝固ポロシティ発生原理をモデル化して、シミュレーションをおこなうこととした。まず、ガス気泡としてデンドライトの根元で核生成し、凝固の進行とともにガス気泡が大きくなりデンドライトの根元から分離する。さらに凝固が進行し、デンドライト同士がぶつかった場合は、デンドライト間に移動したガス気泡は凝固収縮を補うために成長し、ポロシティ欠陥となる。これらのシミュレーションの基礎式は式(1)-(4)に示すとおりである⁽⁷⁾。また、Fig. 3に欠陥予測のフローチャートを示す。

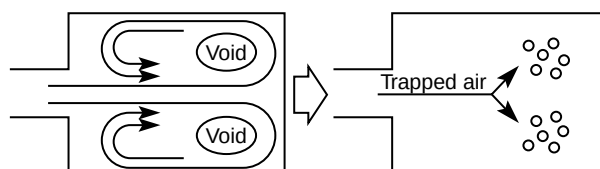


Fig. 1 Mechanism of trapped air evolution

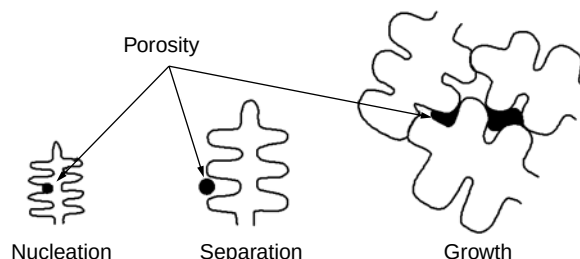


Fig. 2 Principle of porosity creation

(1) 熱移動方程式

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \rho L \frac{\partial f_L}{\partial t} \quad (1)$$

C :比熱 ρ :密度 T :温度 t :時間

λ :熱伝導率 L :潜熱 f_L :液相率

(2) 連続の式

$$\left(\frac{\rho_s}{\rho_L} - 1 \right) \frac{\partial f_L}{\partial t} - \frac{\partial f_L u}{\partial x} - \frac{\partial f_L v}{\partial y} - \frac{\partial f_L w}{\partial z} + \frac{\partial f_v}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

ρ_s, ρ_L :固相と液相の密度

u, v, w :デンドライト間流動の流速

f_v :ポロシティの体積率

(3) 運動方程式

$$u = -\frac{k}{\mu f_L} \frac{\partial P}{\partial x} \quad v = -\frac{k}{\mu f_L} \frac{\partial P}{\partial y} \quad w = -\frac{k}{\mu f_L} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (3)$$

$$k: \text{透過率} = \frac{f_L^3 d^2}{180(1-f_L)^2} \quad \mu: \text{粘性係数}$$

d : デンドライトセルサイズ

(4) ガス量保存

$$[H_0] = (1-f_L)[H_S] + f_L[H_L] + \alpha_H \frac{P_g f_v}{T} \quad (4)$$

$[H_0]$: 全ガス量 $[H_S]$: 固相内ガス量 $[H_L]$: 液相内ガス量

α_H : 係数 P_g : ポロシティ内ガス圧

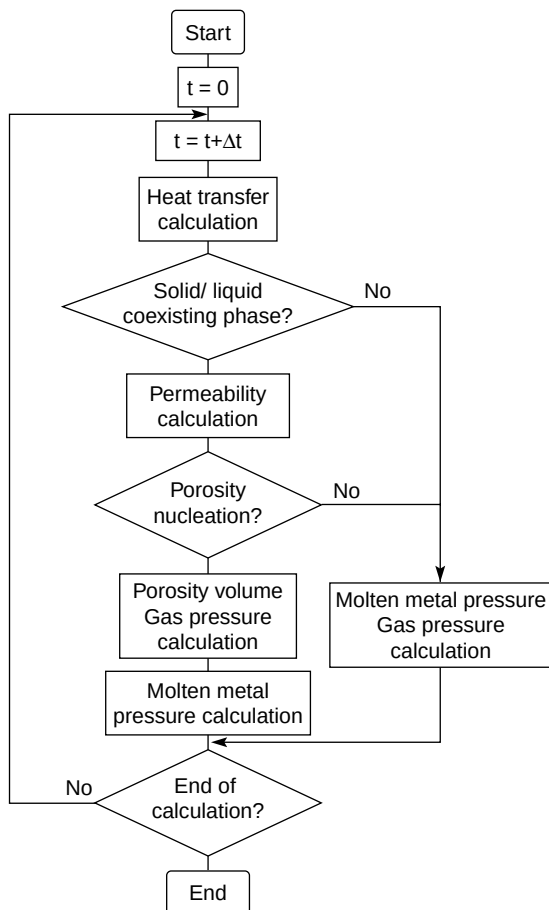


Fig. 3 Flow chart for predicting of defects

4. シミュレーションと実測の比較

4.1. 遷移域充てん法ダイカスト

まず初めに、一般ダイカストより溶湯の流入速度が遅く、溶接性の判断も必要となる遷移域充てん法ダイカストについて比較をおこなった。流動および凝固シミュレーション結果の比較には、Fig. 4に示す二輪車フレーム部品のピボットプレートを用いた。プランジャ速度は 1.8 m/s である。オーバフローは 5ヶ所に設定してあり、そのうち 3ヶ所は減圧されている。各特性の測定には、一般面より試験片を採取し、実験に供した。また、シミュレーションには要素数 137 285 のメッシュを使用し、溶湯の物性値は Al-5%Mg-0.7%Mn-0.8%Ni 材を用いた。

4.1.1. 空気巻き込み量

空気巻き込み量の解析結果を Fig. 5 に示す。(a),(b) では方案が異なり、空気巻き込み量の実測値はそれぞれ 3.6, 2.0 cm³/100g Al である。背圧を考慮しない従来の解析では、それぞれ 1.7, 2.4 cm³/100g Al であり、空気巻き込み量の傾向および絶対値の精度が劣っていた。それに対し、今回背圧を考慮した解析とすることで、それぞれ 3.1, 1.9 cm³/100g Al が得られ、傾向および絶対値とも精度が向上している。これは、背圧を考慮したことにより溶湯の充てんパターンが実際に近くなったためであると考えられる。また、この部位は溶湯の最終充てん部であるにも関わらず、溶接可能レベルにあることがわかる。

4.1.2. ポロシティ量、ポロシティサイズ

Fig. 6 (a), (b) にポロシティ量とポロシティサイズの解析結果を示す。また、Fig. 7, 8 にポロシティ量、ポロシティサイズの解析値と実測値の比較を示す。横軸は解析値、縦軸は実測値を示す。ポロシティ量、ポロシティサイズとも実測値の方が若干大きい値を示すものの全体的な傾向は一致している。製品内のポロシティ量は 0 - 0.02%，ポロシティサイズは 10 - 80 μm であり、部位により差がある。空気巻き込みが多い部位や凝固速度の遅い部位ではポロシティ量、ポロシティサイズとも大きくなる傾向にある。



Fig. 4 Pivot Plate

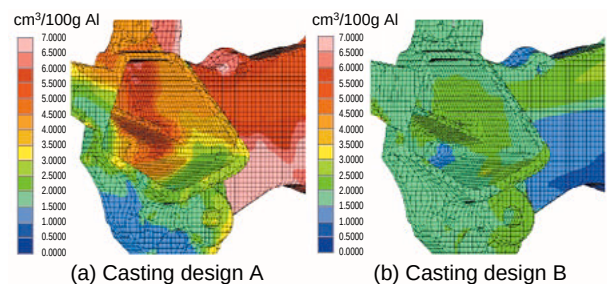


Fig. 5 Example of trapped air simulation with consideration to back pressure

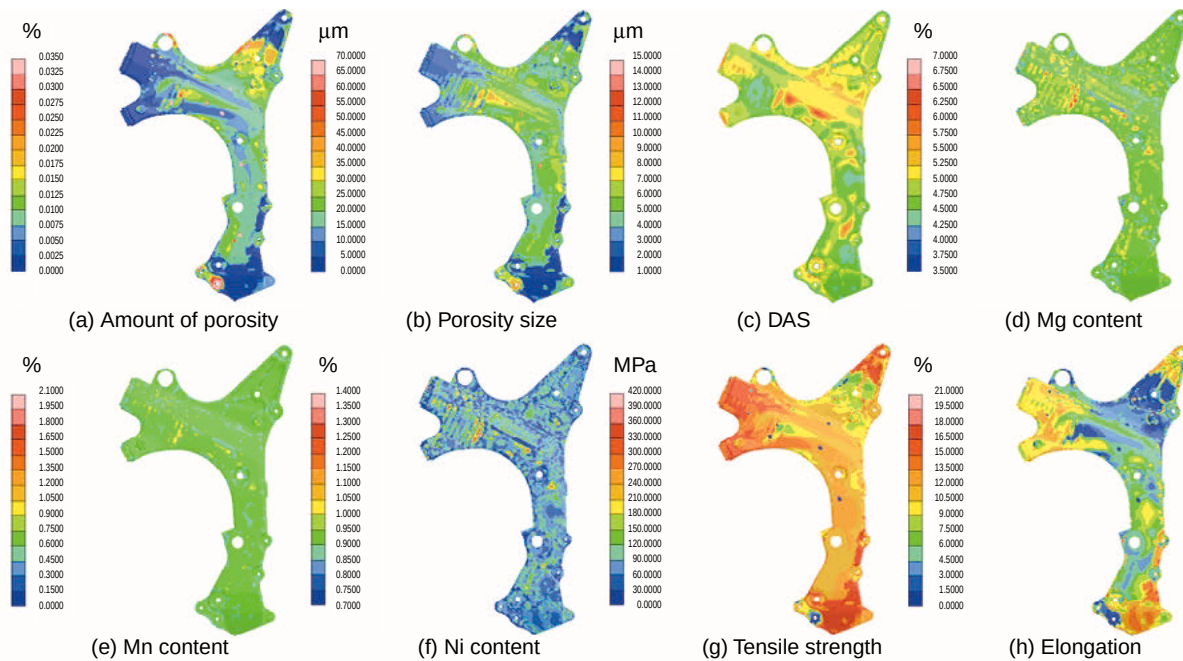


Fig. 6 Simulation results of pivot plate

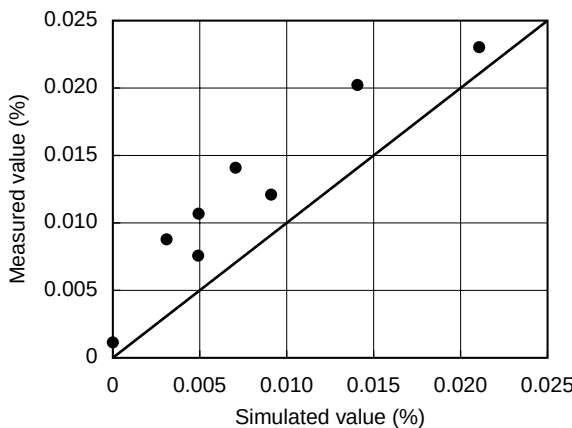


Fig. 7 Comparison of amount of porosity

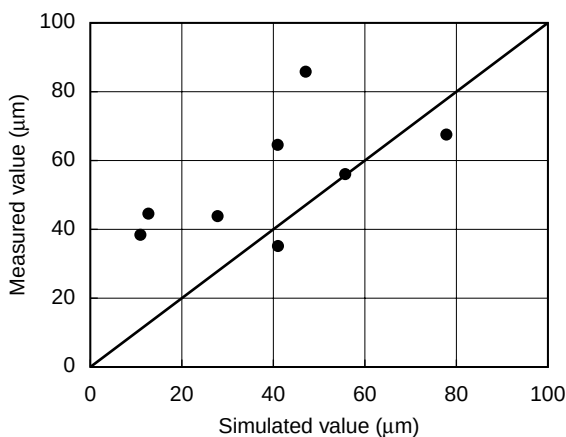


Fig. 8 Comparison of porosity size

4.1.3. DAS

DAS の解析結果を Fig.6 (c) に、解析値と実測値の比較を Fig. 9 に示す。実測値と解析値は良い一致を示している。各部位の DAS は 6.5-9 μm であり、部位による DAS の差は少なく、一般ダイカストと比較してほぼ同等である。遷移域充てん法ダイカストにおいても一般ダイカストと同等の冷却速度が得られていることがわかる。

4.1.4. 成分

Fig. 6 (d), (e), (f) に成分の解析値を示す。また、Fig. 10 に成分の解析値と実測値の比較を示す。各元素とも実測値と解析値は比較的良好一致を示す。これらの Mg, Ni, Mn の濃度分布より鋳物全体にマクロ偏析が存在していることがわかる。このようなマクロ偏析は、ダイカスト鋳物の機械的、化学的、物理的特性の不均一性をもたらす、ミクロポロシティと同じ場所に発生すること多い⁽⁸⁾。

4.1.5. 抗張力、伸び

抗張力と伸びの解析結果を Fig. 6 (g), (h) に、解析値と実測値の比較を Fig. 11, 12 に示す。抗張力、伸びとも比較的良好一致を示している。抗張力、伸びはそれぞれ 195-285 MPa, 2-10.6% である。局部的にポロシティの多い部位は、抗張力と伸びの低下がみられる。これは、Al-Mg 系の合金を用いていることに起因している。すなわち、Al-Si 系合金が表皮生成型の凝固形態をとるのに対し、Al-Mg 系合金は粥状型の凝固形態をとる。そのため、凝固初期に鋳物全体に初晶 $\alpha\text{-Al}$ デンドライトが晶出してその間隙が圧力伝達経路となり、溶湯圧力が早期に損失される。したがって、ゲートから離れた部位では圧力が十分に伝達されず、ポロシティのサイズが他の部位より大きく抗張力、伸びが低い値となっており、これは Al-Si 系合金よりも顕著である。

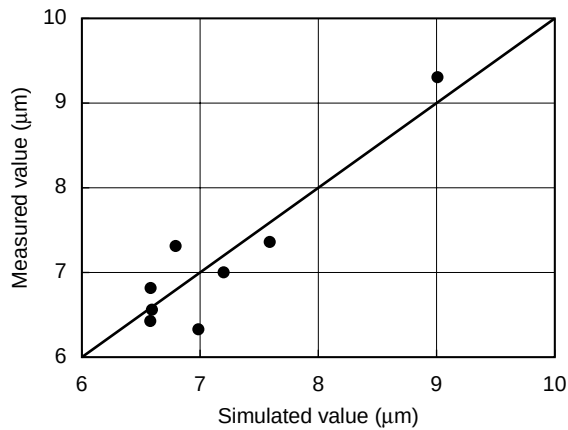


Fig. 9 Comparison of DAS

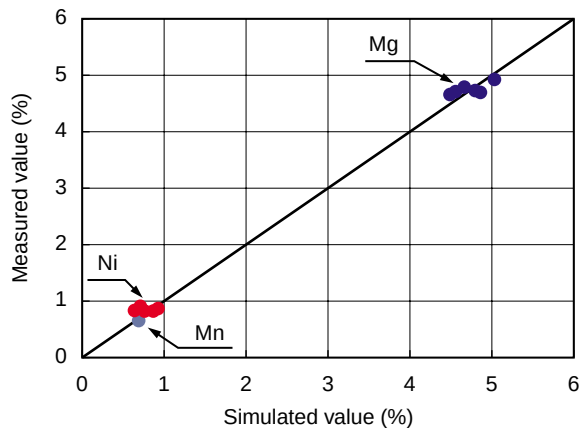


Fig. 10 Comparison of chemical composition

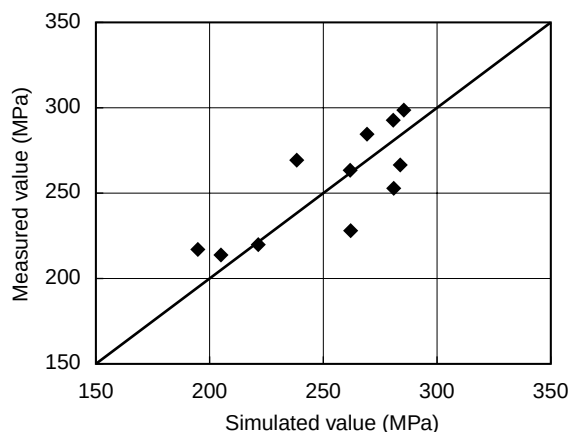


Fig. 11 Comparison of tensile strength

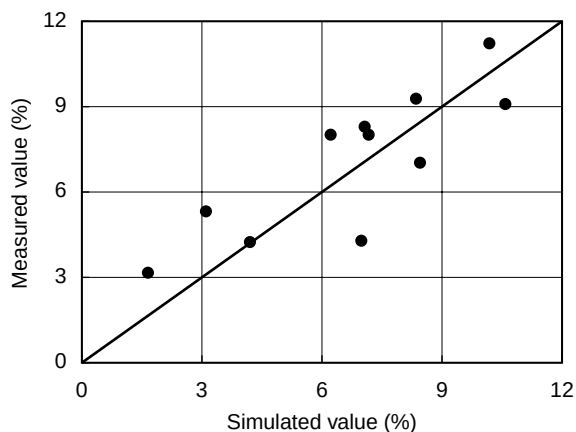


Fig. 12 Comparison of elongation

4.2. 一般ダイカスト

遷移域充てん法ダイカストでの検証において相関性が得られていることが確認できたため、次に一般ダイカストにおいて検証した。一般ダイカストの流動シミュレーション結果の比較には、Fig. 13 に示すクラッチアウトを用いた。プランジャ速度は 2 m/s である。オーバーフローは 7ヶ所に設定しており、そのうち 5ヶ所はベントに繋がっている。各特性の測定にはフィン部より試験片を採取し、実験に供した。また、シミュレーションには要素数 51 723 のメッシュを使用し、溶湯の物性値は JIS ADC12 相当材を用いた。

4.2.1. 空気巻き込み量

空気巻き込み量の解析結果を Fig.14 (a) に、解析値と実測値の比較を Fig. 15 に示す。横軸は解析値、縦軸は実測値を示す。背圧を考慮しない解析では、キャビティ内の空気の圧力が上がった場合、その部位で巻き込まれる空気は実際より低くなる。また、充てんパターンや最終充てん部位も異なってくるため、空気巻き込み量も異なる。しかしながら、今回背圧を考慮したことにより、各部位とも良い一致を示している。製品内の空気巻き込み量は 2 - 10 cm³/100 g Al 程度である。この空気巻き込み量の差は主に流動長に起因しており、流動長が長いほど空気の巻き込みが多くなっている。

4.2.2. ポロシティ量、ポロシティサイズ

Fig. 14 (b), (c) にポロシティ量とポロシティサイズの解析結果を示す。また、Fig. 16, 17 に解析値と実測値の比較を示す。今回のシミュレーションでは流動完了時の空気巻き込みのサイズ、量などを凝固解析に連成させていることにより、両者とも比較的良好一致を示している。製品内のポロシティ量は 0 - 0.047%，ポロシティサイズは 20 - 330 μm であり、部位で異なる。空気巻き込み量が多い部位や凝固速度の遅い部位ではポロシティ量、ポロシティサイズとも大きくなる傾向にある。

4.2.3. DAS

DAS の解析結果を Fig. 14 (d) に、解析値と実測値の比較を Fig. 18 に示す。Al-Mg 系合金を用いた遷移域充てん法ダイカストの結果とは異なり、実測値の方が大きな結果となっている。これは、鑄造方法によるものではなく、合金系の違いによるものである。一般的に Al-Mg 系のように金

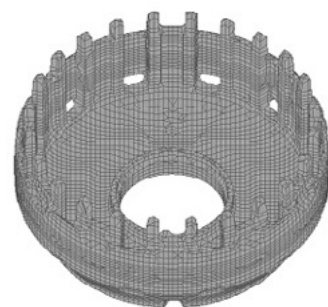


Fig. 13 Clutch outer

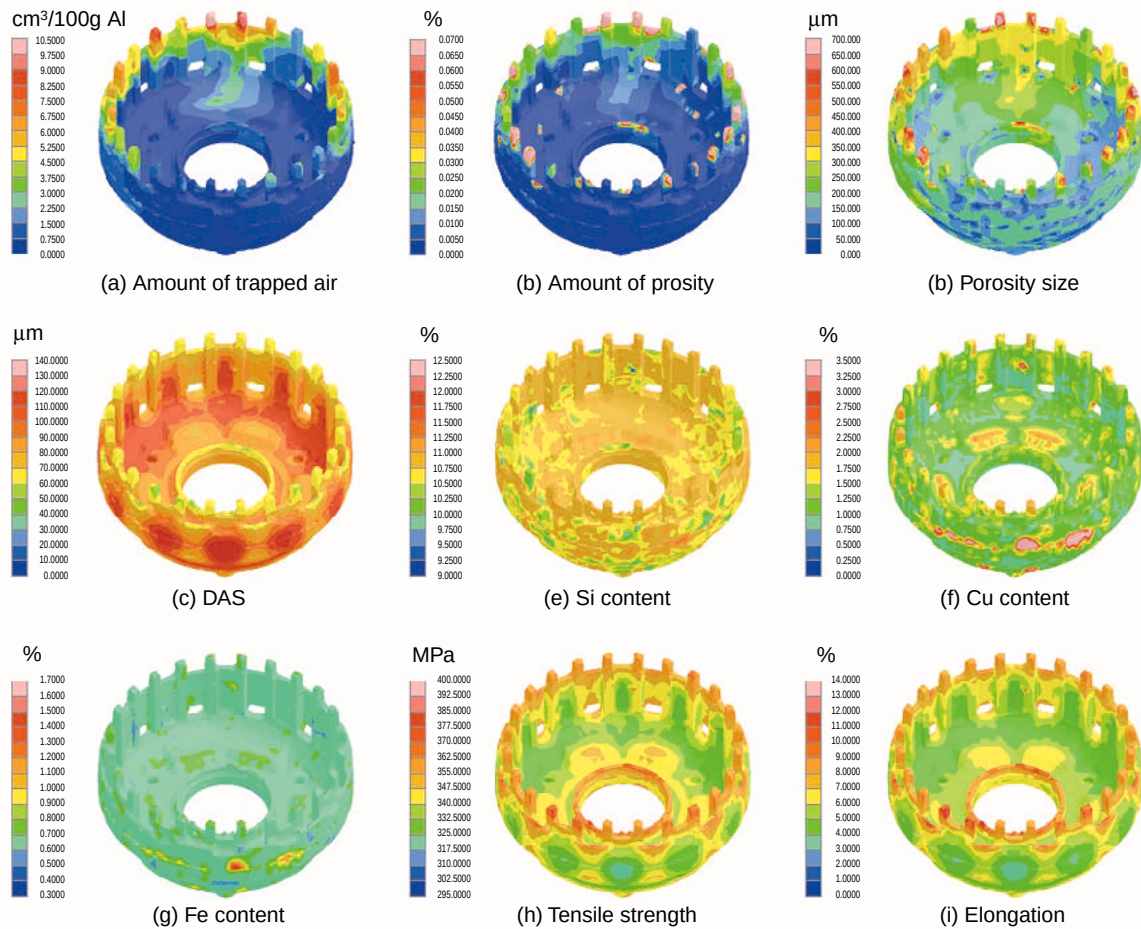


Fig. 14 Simulation results of Clutch outer

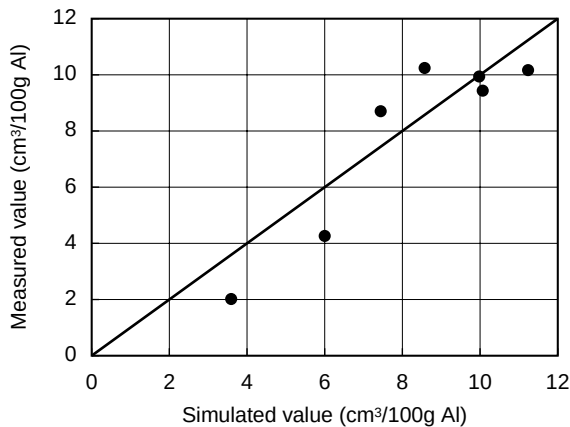


Fig. 15 Comparison of trapped air

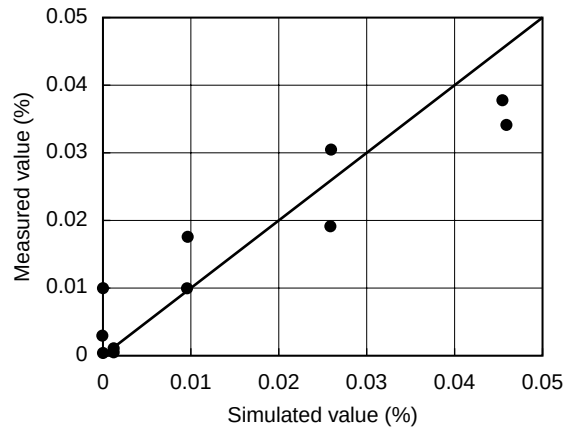


Fig. 16 Comparison of amount of porosity

属元素同士の合金では、固液界面で平衡が成り立っているとして問題がない。しかし、Al-Si 系のように金属-半金属元素の合金は、ファセット-ノンファセット共晶凝固をおこなうために固液界面で比較的大きな過冷が生じる。この過冷が凝固パターンやミクロ組織に大きな影響を与える。今回用いたプログラムでは平衡凝固解析をおこなっているが、非平衡凝固解析をおこなうことにより予測精度が向上するものと考えられる。

4.2.4. 成分

Fig. 14 (e), (f), (g) に成分の解析値を示す。また、Fig. 19 に解析値と実測値の比較を示す。これらの Si, Cu, Fe の濃度分布より鋳物全体にマクロ偏析が存在していることがわかり、実測値と解析値は良い一致を示す。これは、マクロ偏析のしやすさが、凝固速度よりも透過率に起因しているためであると考えられる。

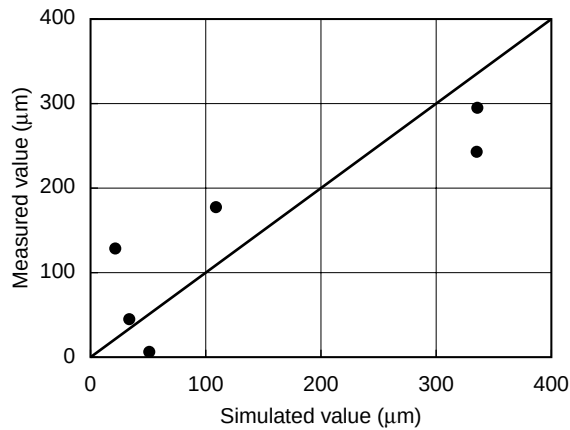


Fig. 17 Comparison of porosity size

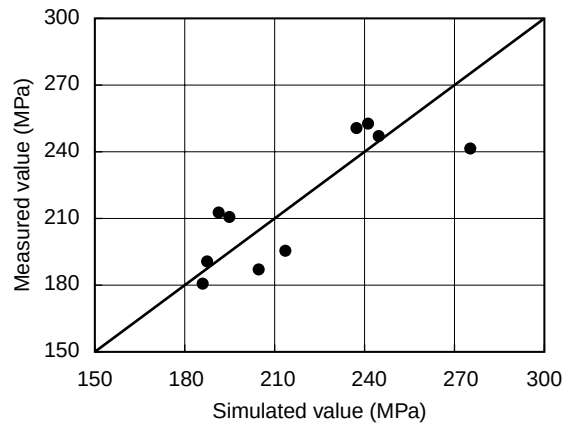


Fig. 20 Comparison of tensile strength

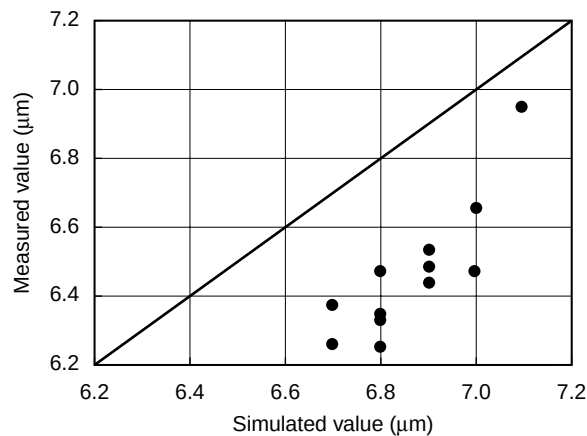


Fig. 18 Comparison of DAS

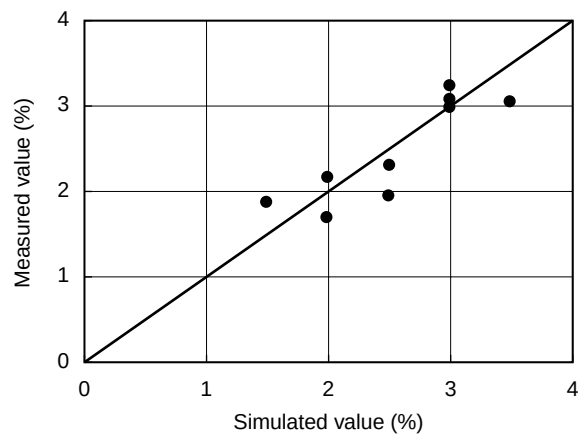


Fig. 21 Comparison of elongation

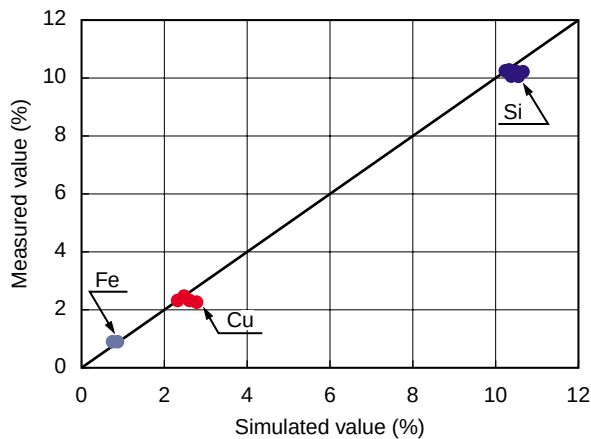


Fig. 19 Comparison of chemical composition

4.2.5. 抗張力, 伸び

抗張力と伸びの解析結果を Fig. 14 (h), (i) に、解析値と実測値の比較を Fig. 20, 21 に示す。4.2.3. 項で述べたように DAS の相関性が低いにも関わらず、抗張力、伸びとも良い一致を示している。これは、ダイカストのように急冷された 10 μm 以下の組織では、DAS により機械的性質がほとんど変化しないためであると考えられる。

5. まとめ

鋳造シミュレーションにおいて、溶湯流動時の空気巻き込みを凝固過程に連成させるシステムを開発し、以下の結果を得た。

- (1) 流動解析から凝固解析までを連成させた解析が可能となった。
- (2) 流動解析において背圧を考慮することにより、製品内空気巻き込み量の定量予測の精度が向上した。
- (3) 凝固解析においてポロシティの量、サイズの定量的な解析が可能となった。
- (4) DAS、偏析の解析結果にポロシティ量、サイズを考慮することで抗張力、伸びの解析も可能となった。

鋳造シミュレーションにおいては、現在さまざまな方法が検討されているが、本研究にて開発されたシステムは、鋳造シミュレーションの新たな方向性を示していると思われる。今後、更なる精度向上および、適用拡大が期待される。

6. 謝辞

本システムを開発するにあたり、多大な協力をいただいた(株)イーケーケー日本の関係者の方々に對し、深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Nakagawa, M., et al.: Development of Die-Cast Parts for Welded Structure Manufactured by the Transition Flow Filling, SAE, 1999-01-3297(1999)
- (2) 小屋栄太郎ほか：二輪車アルミフレーム用中空ダイカスト部品の開発，自動車技術会学術講演前刷集 20035030(2003)
- (3) 山縣裕：アルミニウム軽量車体における高品質ダイカスト部品の利用，軽金属，第53巻，第7号，p.309-313 (2003)
- (4) Hirt, C. W., Nichols, B. D.: Journal of Computational Physics 39, p.201-225(1981)
- (5) 久保公雄：鑄造シミュレーションの最新動向，鑄造工学，第76巻，第12号，p.1022-1030(2004)
- (6) 高橋勇：汎用鑄造 CAE システム入門，鑄造工学，第73巻，第7号，p.482-488(2001)
- (7) 久保公雄：最近の凝固シミュレーション技術，鑄造工学，第73巻，第9号，p.634-642(2001)
- (8) 久保公雄：「鑄造 CAE システム CAPCAST」のベンダー報告，素形材，第44巻，第3号，p.39-42(2003)

■著 者■



中川昌彦



千葉幸一



小屋栄太郎