

鋳物のガス欠陥予測シミュレーション

Mold Filling Simulation for Predicting Gas Porosity

木間塚 明 彦 技術開発本部生産技術センター生産技術開発部 主査
黒 木 康 徳 技術開発本部基盤技術研究所材料研究部 主査 博士（工学）

鋳造の充てん過程において、溶湯によって圧縮されたキャビティ内ガスの圧力が高くなり、充てん過程に影響を及ぼす。さらに、溶湯によってキャビティ内のガスが巻き込まれ、ガス欠陥となり問題となる。この欠陥を予測するため、本研究では背圧を考慮し、ガスの鋳型への排出を考慮したシミュレーション手法を提案する。溶湯の運動量保存則、質量保存則は直接差分法によって離散化を行った。シミュレーション結果と X 線湯流れ直接観察装置による観察結果と湯流れ充てんパターンは良い一致を示した。

The process of mold filling requires consideration of the gas escape through the mold, gas vents and gas generation on the mold surface during mold filling. The pressure in the cavity increases due to compression of the gas by the melt, affecting the mold filling behavior. Further, the melt entraps gas or air in the die cavity. This paper presents a method to simulate mold filling with consideration of the backpressure and gas escape. The governing discrete equations for the momentum and mass conservation laws were derived by the DFDM (Direct-Finite-Difference-Method). Simulated mold filling patterns agreed rather well with the results directly observed by X-ray visualization.

1. 緒 言

鋳造プロセスにおいて、溶湯の充てん過程で湯回り不良、湯境、ガスや酸化膜の巻き込み、引け巣などの鋳造欠陥が生じることがたびたび問題となる。注湯時に鋳型内のガスは溶湯によって圧縮され、砂型鋳造では砂型を透過して、ダイカストなどの金型鋳造ではベントなどから外部へ排出される。鋳造方案が適切でない場合にはガスの背圧の影響による湯回り不良や、ガスが溶湯に巻き込まれてガス欠陥が発生する。また、砂型鋳造では粘結材、水分などからのガス発生もガス欠陥の原因となる。これらの欠陥を改善するため、経験や実験によって鋳造方案を検討するには開発コスト、開発期間を多く必要とすることから、近年ではシミュレーションに負う所が大きくなっている。このため、鋳造プロセスの湯流れ、凝固解析に関する研究が数多く行われており^{(1)~(9)}、いくつかの汎用ソフトが市販され、多くの鋳造企業で欠陥予測、鋳造方案の検討のためのツールとして利用されるようになってきた。しかし、従来の湯流れシミュレーションの多くはキャビティ内背圧の影響を考慮しておらず、いくつか背圧を考慮しダイカスト^{(10),(11)}、砂中子⁽¹²⁾へ適用した例はあるが、砂型鋳造へ適用した例はない。

そこで、本研究では背圧の影響および砂型、ベントへの

ガスの排出を考慮したガス巻き込み欠陥を予測するシミュレーションコードの開発を行った。また、開発したコードをいくつかの湯流れ問題に適用した例を示し、X 線湯流れ直接観察との比較および実製品への適用によって本解析手法の妥当性を検討した結果を報告する。

2. 解析方法

2.1 流れ場の解析方法

溶湯の流れは非圧縮性流体の基礎方程式を直接差分法^{(6),(7),(13)}によって離散化する。運動量保存領域にはスタッガード要素を用いた。溶湯の運動量保存則の直接差分式は次のようになる。

$$(\rho V)_{IS} \frac{(u_{IS}^{t+\Delta t} - u_{IS}^t)}{\Delta t} = M_C + M_V + M_g + M_P + M_d \dots\dots\dots (1)$$

- ρ : 密度
- V : 節点領域体積
- u_{IS} : 流速
- t : 時間
- Δt : タイムステップ
- 添字 IS : 節点領域境界面番号
- M_C : 対流項
- M_V : 粘性項
- M_g : 重力項

M_p : 圧力項
 M_d : ダルシー項

また、溶湯の質量保領域は節点領域内の要素とし、質量保存則は次式で示される。

$$\sum_j \bar{\beta}_s S_{ij} u_{IS}^{t+\Delta t} n_{ij} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$\bar{\beta}_s$: 要素充満面積率
 添字 i, j : 面 IS の両側の要素番号
 S_{ij} : 構成面の面積
 n_{ij} : 境界面の法線ベクトル

自由表面の取扱いは、本解析では要素体積充満率 β_v 、要素構成面の面積充満率 β_s 、充満面から自由表面までの無次元距離 β_d の三つのパラメタを使用することによって精度良く自由表面を計算する⁽⁸⁾。

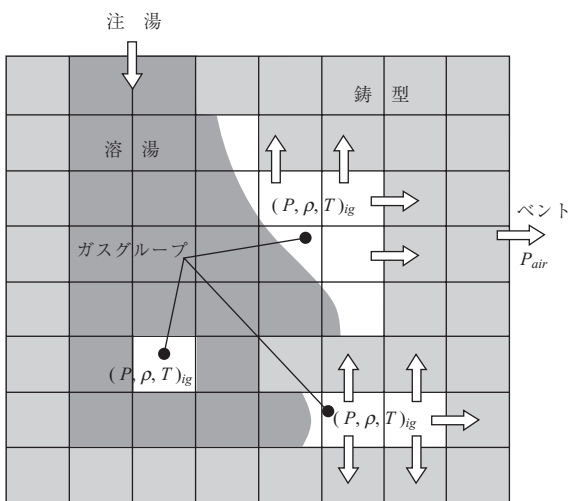
2.2 ガスの解析方法

第1図は砂型への溶湯充てん過程におけるキャビティ内からのガス排出の様子を示している。

キャビティ内および砂型内のガスに関しては次の仮定が成り立つとする。

- (1) キャビティ内でのガスの流動を無視する。
- (2) キャビティ内のガスは理想気体である。
- (3) キャビティ内の圧力、密度、温度はガスグループごとに一定である。
- (4) 砂型内のガスの流れはダルシー流れである。

したがって、キャビティ内ガス質量保存は次式のようなになる。



(注) P : ガス圧力
 ρ : ガス密度
 T : ガス温度

第1図 鋳型内でのガスグループの取扱い
 Fig. 1 Gas group in mold cavity

$$\frac{\rho_{ig}^{t+\Delta t} V_{ig}^{t+\Delta t} - \rho_{ig}^t V_{ig}^t}{\Delta t} = - \sum_j (n_{ij} S_{ij} u_{c/m}^{t+\Delta t} \bar{\rho}_{ig}^t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ρ_{ig} : ガス密度
 V_{ig} : ガス体積
 $\bar{\rho}_{ig}$: 風上ガス密度
 $u_{c/m}$: 鋳型 - キャビティ境界面のガス流速
 添字 ig : ガスグループ番号

また、ガス密度は次式で表される。

$$\rho_{ig}^{t+\Delta t} = \frac{M}{RT_{ig}} P_{ig}^{t+\Delta t} \quad \dots\dots\dots (4)$$

M : ガス分子数
 R : ガス定数
 T_{ig} : ガス温度
 P_{ig} : ガス圧力

次に、砂型内の質量保存は次式で表される。

$$\frac{\rho_i^{t+\Delta t} - \rho_i^t}{\Delta t} V_i \varepsilon = - \sum_j (n_{ij} S_{ij} u_{ISm}^{t+\Delta t} \bar{\rho}_{ij}^t) + V_i Q_m(T_m) \quad \dots\dots (5)$$

ρ : ガス密度
 ε : 砂型空げき率
 $\bar{\rho}$: 風上密度
 Q_m : ガス発生率
 T_m : 鋳型温度

砂型内のガス流れはダルシー流れであるとする、

$$u_{ISm}^{t+\Delta t} = \frac{P_i^{t+\Delta t} - P_j^{t+\Delta t}}{\mu R_T} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$R_T = \frac{\Delta x}{K_m} + \frac{d_c}{K_c} \quad \dots\dots\dots (7)$$

u_{ISm} : 鋳型面 ISm におけるガス流速
 P : ガス圧
 μ : ガスの粘度
 Δx : 面 ISm から両側の要素中心までの距離
 添字 ISm : 鋳型面番号
 K_m : 砂型透過率
 d_c : 塗型厚さ
 K_c : 塗型透過率

(6)式のなかで、面 ISm が砂型の外周面にあるときに、 P_i または P_j は外部圧力 (通常は大気圧) に置き換える。

また面 ISm が鋳壁面にあり、なおかつ未充満要素と隣接するときには P_i または P_j は背圧 P_g に置き換える。砂型空げき率 $\varepsilon = 0$ とし、 $u_{c/m}$ をベントから排出される速度

とすることによって金型鑄造へも適用可能である。

2.3 解析フロチャート

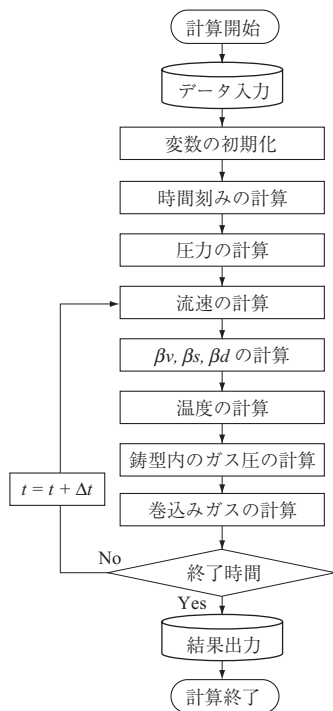
計算の手順を第2図に示す。時刻 $t + \Delta t$ の溶湯圧力の Poisson 方程式を解く際に時刻 t でのキャビティ内ガスを境界条件とすることによって背圧を考慮する。

2.4 ガス巻き込み欠陥の予測方法

ガスグループのうち、ガスの逃げ道が無いグループをガス欠陥要素と定義した(大きなガス巻き込み欠陥)。また、要素サイズ以下となったガスグループをマークに置き換えて追跡することによって微小なガス欠陥を予測する。ガス欠陥予測手順のアルゴリズムを下記に示す。

- (1) 溶湯によって取り囲まれたガスグループをガス欠陥グループと定義する。
 - ① 砂型鑄造 鑄型に面していないグループ
 - ② 金型鑄造 ベントなどに面していないグループ
- (2) ガス欠陥グループのうち要素サイズ以下になった場合に要素中心にマークを一つ発生させる。
- (3) 巻き込まれた微小ガスは溶湯によって運ばれる。
- (4) マークがガスグループに再度含まれた場合はマークを消滅させる。

また、マーク同士の衝突は無視し、壁面に接触した場合の吸着は考えない。マーク追跡によって従来不可能であった微小なガス巻き込み欠陥を予測することが可能である。



第2図 計算の流れ
Fig. 2 Flow chart of calculation

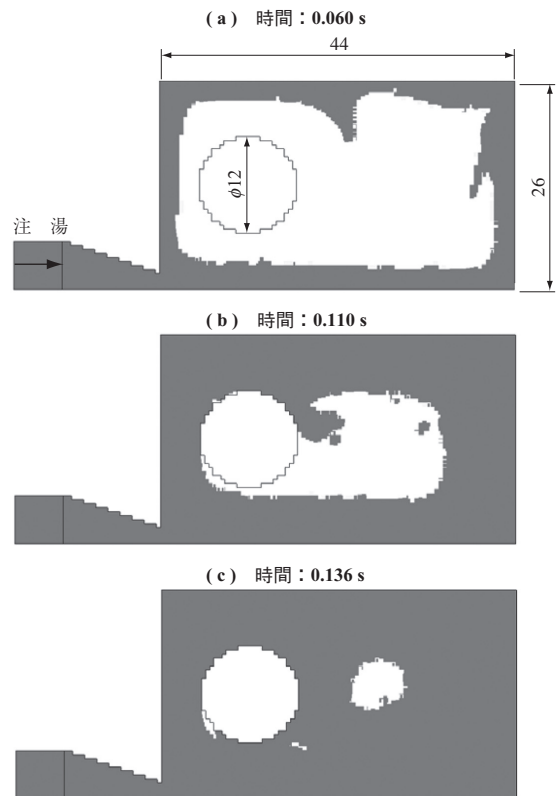
3. 従来報告との比較

3.1 Backerらの計算との比較

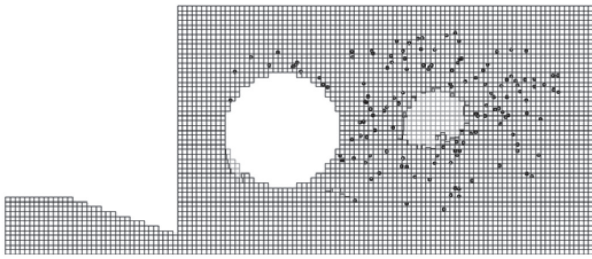
計算例として G. Backer ら⁽¹⁰⁾が行ったダイカストのシミュレーションモデルを用いて計算を実施した。このモデルは矩形のキャビティ内に円形の障害物を持ち、左下のゲートから 1 m/s で溶湯が注湯される。溶湯の物性値は AC4C 合金相当とした。また、キャビティからの気体の逃げはないとしている。第3図に溶湯の充てん過程のシミュレーション結果を示す。キャビティ外周から順に充滿され、最終充てん位置のキャビティ中央付近に溶湯に巻き込まれた大きなガス欠陥が発生している。この結果は G. Backer らの結果と良い一致を示している。第4図にガス巻き込み欠陥のシミュレーション結果を示す。図のマーク(黒丸)は時間: 0.136 s での微小ガス欠陥の分布を示す。このモデルでは、大きな巻き込み欠陥とは別に多数の微小ガス欠陥が発生すると予測される。従来の手法によってこれらの欠陥は予測できないため、本手法は微小ガス欠陥の予測に有効であると考えられる。

3.2 金谷らの実験との比較

背圧計算の検証をするため、スクイーズ鑄造の計算を実施した。矩形キャビティへ下部ゲートから水を速度



第3図 充てん過程のシミュレーション結果(単位: mm)
Fig. 3 Mold filling sequences (unit: mm)



第4図 ガス巻き込み欠陥のシミュレーション結果
Fig. 4 Gas defect distribution

1.0 m/s 一定として流入させた場合の鋳型充てん過程のシミュレーション結果を第5図に示す。計算には 53×100 の格子を使用し、壁面はノースリップ条件とした。

厚み方向(厚さ 10 mm)は1分割とし、壁面をスリップ条件とすることによって二次元の解析としている。また、キャビティ上部にベントを2か所配置した。鋳型へのガスの排出はなく、ベントからのみ排出されるとした。第5図の(a)は背圧を考慮しない場合、(b)は背圧を考慮した場合の結果をそれぞれ示しており、キャビティ下部の傾斜部で空気が巻き込まれている。背圧を考慮しない場合には巻き込まれた気泡はすぐにつぶれているが、背圧を考慮した場合には、巻き込まれた気泡が排出されず、最後まで残っていることが分かる。背圧を考慮した場合の計算結果は第6図に示した金谷ら⁽⁹⁾の実験結果と良い一致を示しており、ガスの抜け道が無い場合に背圧の影響が大きいことが分かる。

4. X線透過装置による湯流れ観察との比較による検証

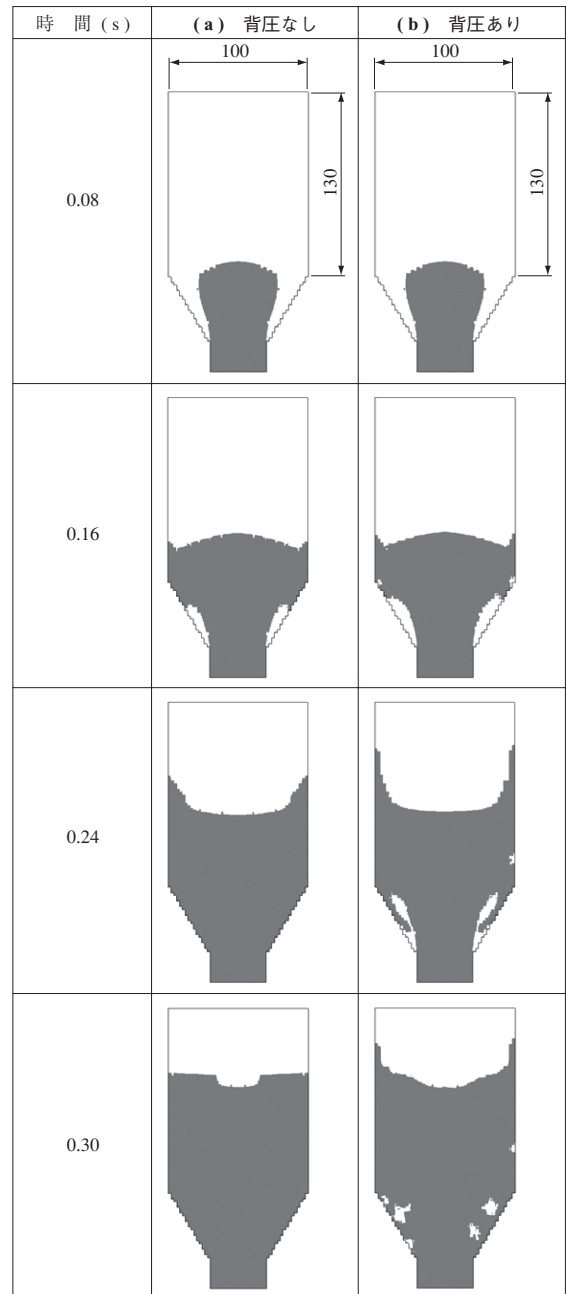
4.1 実験

第7図に示す鋳型形状で鋳造実験を実施し、X線透過装置⁽¹⁴⁾によって充てん挙動を直接観察した。実験にはフラン鋳型、材料はFC250を用いた。実験装置の仕様は下記に示す。

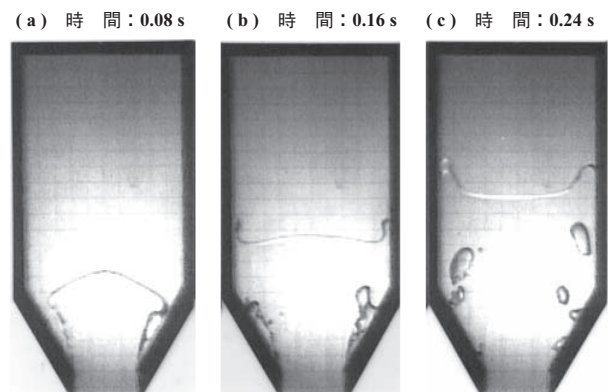
X線管電圧	0 ~ 225 kV
X線管電流	0 ~ 13 mA
最大出力	3 kW
高速ビデオカメラ	最高撮影速度 2000 コマ/s

実験では鋳型をX線源とイメージインテンシファイア間に設置し、鋳型充てん過程を観察した。また、同時に鋳型空げき部の圧力変化を小型半導体圧力センサで測定した。

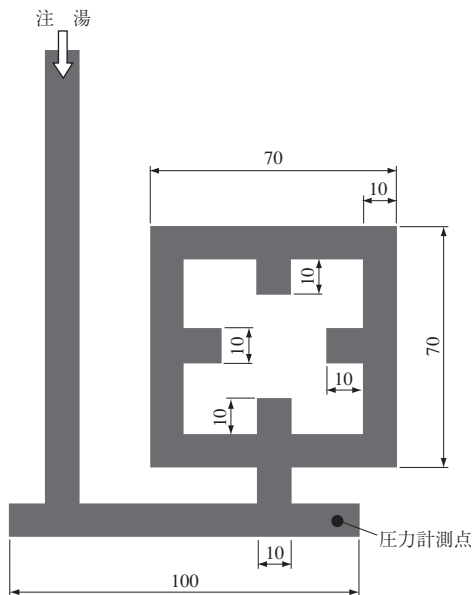
第8図にシミュレーションと実験の比較を示す。第8図-(a)に直接観察の結果を示す。注湯された湯が鉛直部か



第5図 充てん過程における背圧の影響
Fig. 5 Effect of backpressure on mold filling sequence



第6図 実験での充てん過程の様子
Fig. 6 Experimental mold filling sequence



第7図 重力铸造用フラン铸型 (単位: mm)
Fig. 7 Fran mold for gravity casting (unit: mm)

$1.56 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, 塗型の透過率 $K_c = 1.5 \times 10^{-13} \text{ m}^2$, 塗型厚さ 0.1 mm として計算を行った. 第8図-(b)は铸型充てん過程のシミュレーション結果を示し, 砂型内のガス圧力コンターを同時に示している. 第8図から実験において観察されたガスの巻き込みおよび最終充てん位置は良く一致していることが分かる. また, ランナのコーナ部においては砂型のガス圧力が高くなっているため, キャビティ内のガスが铸型に排出されずに残っている. 第9図に铸型内の圧力変化を示す. キャビティ内の圧力計測結果と計算結果は良く一致し, 本計算手法が妥当であることが確認できた. また, 第9図には砂型透過率を $1/10$ ($K_m = 1.56 \times 10^{-10} \text{ m}^2$), 塗型透過率を $1/5$ ($K_c = 7.5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$) とした場合の結果を示し, この結果から, 透過率がキャビティ内圧力に大きな影響を及ぼすといえる. 特に塗型によりキャビティ内圧力が大きく変わるため, 巻き込み欠陥を抑制するには適切な塗型を使用することが重要であることが分かる.

時間 (s)	(a) 実験	(b) シミュレーション
0.4		
0.6		
0.7		

第8図 シミュレーションと実験との比較
Fig. 8 Comparison of observed and simulated results

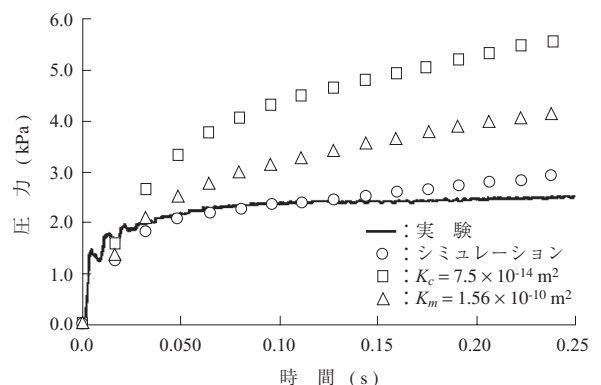
ら水平部となるコーナ部分でガスの巻き込みが発生していることが観察された. また, 最終充てん部は頂上部となっている. また, キャビティ内の背圧は 0.07 s 後にはほぼ一定となり最大圧力は約 2.5 kPa であった.

4.2 シミュレーション

計算では砂型の空げき率を 0.375 , 砂型透過率⁽¹⁵⁾ $K_m =$

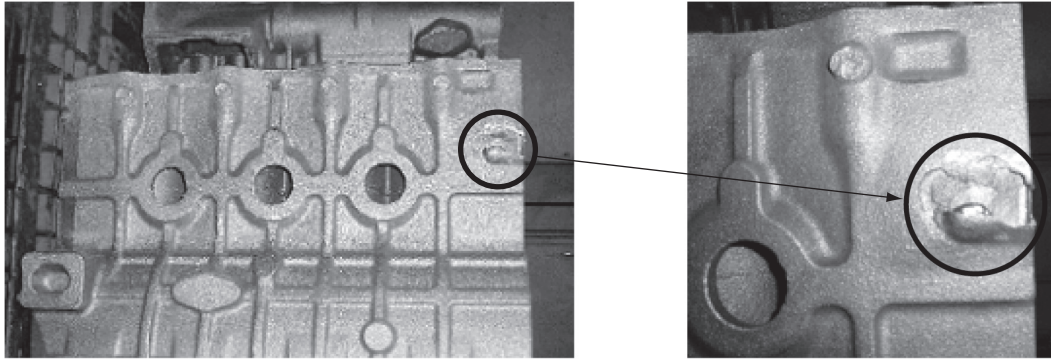
5. 実製品への適用

第10図に砂型铸造で製造される4気筒エンジンのシリンダブロックへのシミュレーション適用例を示す. この铸造方案では铸型内の空気を排出しやすくするため, オーバフローとガス抜き穴が設置されている. しかし, 大きなガス巻き込み欠陥が第10図-(a)のAの部分で発生している. これは铸型内ガスがオーバフロー, ガス抜き穴および铸型を通して十分排出されなかったためであると考えられる. 第10図-(c)はシミュレーションによるガス巻き込み予測結果を示しており, 製品に発生したガス欠陥と良く一致しており, 本手法が実際の製品へ適応可能であるといえる.

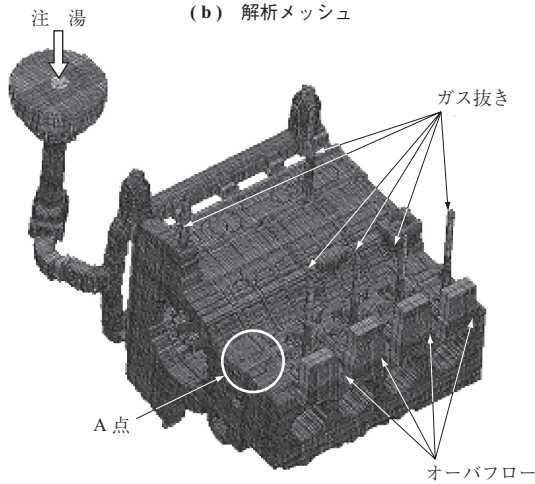


第9図 铸型内の圧力変化
Fig. 9 Pressure change in mold cavity

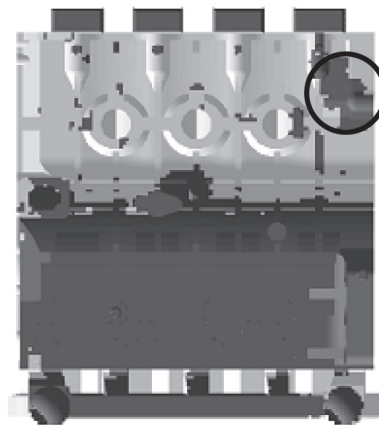
(a) 製品に発生したガス欠陥



(b) 解析メッシュ



(c) シミュレーション



第 10 図 4 気筒エンジンのシリンダブロックで発生したガス欠陥
Fig. 10 Gas defect in 4-cylinder engine block

6. 結 言

— 謝 辞 —

本研究では直接差分法によって背圧を考慮し、砂型およびベントへのガスの排出を考慮できるシミュレーションコードの開発を行い、以下の結論を得た。

本研究の一部は大学連携プロジェクトである経済産業省新規産業創出型産業科学技術研究開発制度における「革新的 casting シミュレーション技術の研究開発」として実施したものであり (NEDO の研究委託)、関係各位から多くのご助言とご協力を頂きました。ここに記し、深く感謝いたします。

- (1) 溶湯の鑄型充てん過程で巻き込まれるガス欠陥を予測する手法を提案した。本手法は大きなガス巻き込み欠陥に加え、微小なガス巻き込みを予測できる可能性がある。
- (2) 金型鑄造の場合において、背圧が鑄型の充てんパターンおよび最終重点位置に影響を及ぼす。
- (3) X線直接観察実験、ガス圧力測定で得られた検証実験結果と比較検討を行った結果、充てんパターンは良く一致し、圧力計測結果も一致したことからコードの妥当性を確認できた。
- (4) 本手法は砂型鑄造においてガス巻き込み欠陥を予測できることから、欠陥が出ない適切な鑄造方案を検討するための有効なツールとなる。

参 考 文 献

- (1) I. Takahashi, K. Anzai and E. Niyama : Simulation tools for practical die casting process Int. J of Cast Metals Res. Vol.15 No.3 (2002) pp. 405 - 410
- (2) 桜木卓也：補間擬似粒子法による自由表面問題の数値解析 鑄造工学 第 73 卷 第 8 号 2001 年 pp. 550 - 555
- (3) M. R. Barkhudarov and C. W. Hirt : Modeling of

- Casting, Welding and Advanced Solidification Process
VII (1995) pp. 935 - 946
- (4) F. Mampaey and Zhi. A. X. : Simulation and Experimental Validation of Mould Filling Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Process VII TMS (1995) pp. 3 - 14
- (5) 蓮野昭人, 安斎浩一, 新山英輔: 非直交格子を用いた有限体積法による凝固解析 日本機械学会論文集 (B編) 61 巻 584 号 1995 年 pp. 254 - 260
- (6) I. Ohnaka and J. D. Zhu : Computer Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer of Bench Mark Test by DFDM/3DFLOW Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Process VII (1995) pp. 23 - 30
- (7) J. D. Zhu and I. Ohnaka : A New Simulation Method of Mold Filling by Using Regular and Irregular-Mixed Elements Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes IX (2000) pp. 428 - 435
- (8) 朱 金東, 大中逸雄: 直接差分法による湯流れの 3 次元コンピュータシミュレーション 鑄造工学 第 68 巻第 8 号 1996 年 8 月 pp. 668 - 673
- (9) 金谷亮吾, 大中逸雄, 朱 金東: 非直交要素を用いた 3 次元湯流れ解析法 鑄造工学 第 69 巻 第 8 号 1997 年 pp. 664 - 669
- (10) G. Backer and M. Ranganathan : Simulation of Flow-Induced Gas Entrapment and its Effect on Porosity in Aluminum Die Castings North American Die Casting Association (2001) pp. 1 - 5
- (11) 高橋 勇, 内田敏夫: 背圧の影響を考慮した湯流れ解析プログラムの開発 鑄造工学会第 133 回全国講演大会講演概要集 1998 年 p. 121
- (12) Y. Maeda, H. Nomura, Y. Otsuka and Y. Mori : Numerical Simulation of Gas flow through sand core Int. J of Cast Metals Vol.15 No.3 (2002) pp. 441 - 444
- (13) 大中逸雄: コンピュータ伝熱・凝固解析入門 丸善 1985 年 p. 43
- (14) 大中逸雄, 大道徹太郎, 朱 金東, 荻野義道, 山本勉次, 品部耕二郎: X線透過法による湯流れの直接観察 鑄造工学会第 137 回全国講演大会講演概要集 2000 年 p. 52
- (15) 久保公雄, 福迫達一, 大中逸雄: 減圧法による鑄型の通気度測定について 鑄物 第 52 巻 第 7 号 1983 年 pp. 25 - 31