

鑄造時における砂中子内ガス流れの数値シミュレーション

前田 安郭¹

Simulation of Gas Flow through Sand Core

Yasuhiro Maeda

Abstract

This paper provides the numerical simulation model of the gas flow through the sand core. When the sand core is used in the casting, the core is heated to release gas which causes casting defect. It is necessary to exhaust the gas in order to obtain a sound casting product without defects caused by gas entrapped. As a technique to decide the locations of gas vents, knowing the distribution of pressure and velocity in the core by numerical simulation is one of the key methods to give sound castings. In this study, Ergun's equation is used as the fundamental equation considering the variation of characteristics of the sand core. The governing equations for the gas are solved by the SIMPLE method. The experiments are done to verify the model. As the result of tuning up parameters by comparing the result of simulation with the experiment, it becomes possible to estimate pressure distribution, velocity, and flow quantity with enough precision. From these results, the present simulation provides the useful information for deciding the positions of gas vents.

Keywords: Gas flow, Ergun's equation, SIMPLE method, Core sand, Gas vent

1. はじめに

引け巣やガスホールなどのポロシティ欠陥は、よく観察される鑄造欠陥であり、欠陥予測に関していくつかの報告¹⁾²⁾がある。これらの多くは、温度勾配や凝固収縮量の計算をもとに推定する方法である。一方、重力鑄造をはじめ砂中子を用いる鑄造においては、溶湯と中子との接触及び反応によりガス生成がおこり、ガス抜きが不十分である場合には、この生成したガスは溶湯内部に侵入しガス欠陥鑄物となる。欠陥のない鑄物を得るためには、適切なガス抜きベントの仕様及び配置を決定する必要がある。そこで、本研究では、ガス抜きベントの仕様及び配置を決める上で重要な情報となる中子内を流れるガスの速度及び圧力を数値シミュレーションにより推測する方法の開発を試みる。

充てん砂層内の流れ解析³⁾⁴⁾に関しては、Ergun 式⁵⁾を基礎式としたいいくつかの報告がある。しかし、多くの事例は定常解析や、1次元及び2次元解析である。複雑形状な鑄物製品に対して中子も複雑形状化しており、実用的な中子内を流れるガスの解析を行うには、3次元非定常解析が必要と考えられる。そこで本研究では、Ergun 式をベースに、3次元非定常解析のシミュレーション方法を開発するとともに、複雑形状をした自動車鑄物の中子に適用して有効性の検討を行う。

2. 数値解析方法

2.1 基礎方程式

充てん砂層内におけるガスは、Navier-Stokes の方程式で表現できるとものとし、ガスの流動挙動に関

¹ 海上保安大学校、機械工学講座, maeda@jcga.ac.jp

して、マクロ的視点から基礎式が構成できるとすると下記の保存則³⁾⁻⁷⁾となる。

・質量保存則

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} (\varepsilon v_j) = 0 \quad (1)$$

・運動量保存則

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\varepsilon v_i v_j) = -\frac{\varepsilon}{\rho_g} \frac{\partial p_i}{\partial x_i} + f_{pi} \quad (2)$$

ここで、 p , v , ε , ρ_g は、それぞれ流体(ガス)圧力、流体(ガス)速度、砂層空隙率、流体(ガス)密度である。(2)式の右边第2項は、流体と砂粒子との相互作用による圧力損失項であり、次式で表現される。

$$f_{pi} = \frac{\beta}{\rho_g} v_i \quad (3)$$

ここで、 β は Ergun 式から算出される圧力降下であり、

$$\beta = \frac{\mu(1-\varepsilon)}{d_p^2 \varepsilon^2} [f_1(1-\varepsilon) + f_2 R_e] \quad (4)$$

$$R_e = \frac{|v| \cdot \rho_g \cdot \varepsilon \cdot d_p}{\mu} \quad (5)$$

である。 R_e はレイノルズ数、 d_p は砂粒子径、 μ は流体(ガス)の粘性係数である。また(4)式における係数 f_1 と f_2 は Ergun の論文では、それぞれ 150 と 1.75 である。

本研究では砂中子内を流れるガスを考えるため、砂層空隙率に関しては $\varepsilon \leq 0.8$ であり、かつ時間依存しない変数として取り扱うことが出来る。また通常、砂中子に使われる砂粒子は完全球形ではなく凹凸があるため、平均粒子径 d_a と形状係数 ϕ を用いて、

$$d_p = \phi d_a \quad (6)$$

と表現する。Ergun 式を用いた数値解析においては、得られる計算結果は実験値と良く合うとの報告もある一方で、Ergun 係数を修正する必要があるとの報告⁸⁾もある。これは Ergun 式が構築されたときと数値解析シミュレーションでの対象との条件相違によるものであり、本研究の適用範囲においても係数のフィッティングは必要である。そこで、Ergun 係数のフィッティングを簡易化するために、(4)式にチューニングパラメータ C を導入する。

$$\beta = C \frac{\mu(1-\varepsilon)}{(\phi d_a)^2 \varepsilon^2} [f_1(1-\varepsilon) + f_2 R_e] \quad (7)$$

$$R_e = \frac{|v| \cdot \rho_g \cdot \varepsilon \cdot \phi \cdot d_a}{\mu} \quad (8)$$

2.2 計算技法と条件

基礎方程式の解法には、差分法の一つである SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)法⁹⁾を採用した。初期条件及び境界条件の下で解くことにより、直交要素分割された各セルにおける速度及び圧力値が算出できる。

また、初期条件としては、砂層空隙率の分布、砂粒子の平均直径、形状係数などの砂中子の条件を設定する。これらの値は、砂試験を実施することで実験的に容易に得ることのできるパラメータである。また、境界条件としては、壁面すべり条件、ガスの入出力条件を設定する。今回の解析では、入出力条件の設定では速度境界条件と圧力境界条件のいずれも採用できるようにしてある。

ガスの入力条件に関しては、本来はガス生成条件を設定することが好ましい。しかしながら、砂中子における反応ガスの生成に関しては、中子内の温度状況、粘結剤の反応速度などが影響しており、その生成メカニズムは非常に複雑である。またガス生成条件を与えるためには砂中子の温度履歴を得ておく必要も生じる。 casting中における砂中子の温度履歴を連立して計算することも出来るが、本研究の目的であるガス抜きベントの仕様や配置を決定するツールとして使用する際には、計算時間の増大につながり適切ではないと判断した。そこで、この入力設定部分を簡略化するために、予備実験で求めた生成ガス量をユーザが指定する適当な位置に設定できる仕様とした。

Table 1 Calculation conditions for round bar.

Void Fraction of Core, ε [-]	0.40
Shape Coefficient of Particle, ϕ [-]	0.76
Average Diameter of Particle, d_s [m]	0.22×10^{-3}
Gas Density, ρ_g [kg/m ³]	1.204
Gas Viscosity, μ [Pa·s]	1.18×10^{-5}
Total Numbers of Mesh	157216
Mesh Numbers of Core	105596
Tuning Parameter, C [-]	1.0, 0.3
Inlet Quantity of Gas, q_{in} [$\times 10^{-6}$ m ³ /s]	16.7, 33.3, 50.0
Outlet Pressure, [kPa]	0.0

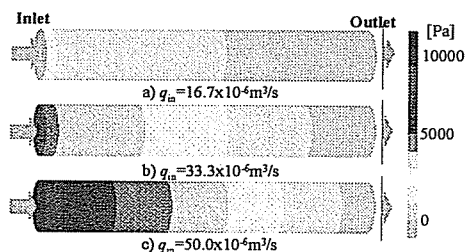


Fig. 2 Gas pressure distribution of round bars obtained by calculation in the case of parameter $C=0.3$.

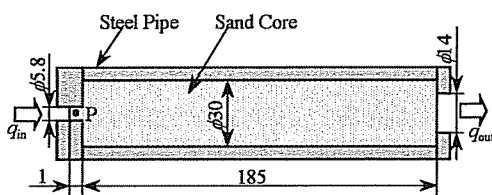


Fig. 1 Schematic illustration of round bar model.

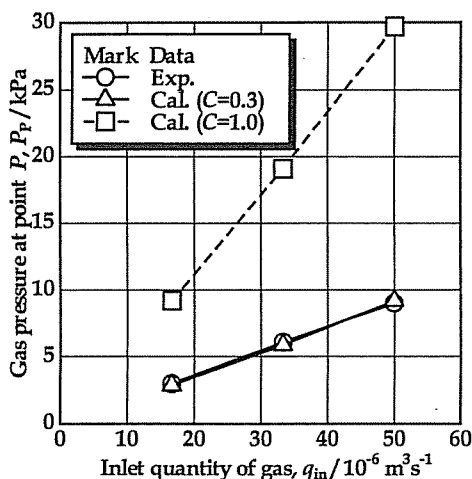


Fig. 3 Comparison of inlet gas pressure values for round bar model between experiment and calculation.

3. 結果と考察

3.1 シミュレーションモデルの検証

まず、本研究で開発したシミュレーションモデルの検証と、導入したチューニングパラメータ C の同定を目的として、簡単形状の丸棒モデルを用いての実験とシミュレーションを実施した。Fig.1 に解析に使

用した丸棒モデルの概略を示す。砂中子サイズ $\phi 30 \times 185 \text{ mm}$ の周りをスチールパイプで囲ってある。この状態において、Table1 に示す条件で実験と計算を行い、圧力値の比較検討を行った。なお、この解析におけるガスには空気を代用し、砂中子内の空隙率分布は一樣として取り扱った。

Fig.2にチューニングパラメータ C を0.3とした場合における定常状態でのガス圧力分布を示す。定常状態は、ガス流入後1秒である。図より、流入位置近傍での圧力値が高く、流出位置に近づくにつれ低下していることがわかる。圧力最大値はFig.1のP点において発生しており、この点での圧力値を比較した図をFig.3に示す。チューニングパラメータ $C=1$ の場合は、オリジナルのErgun係数に相当するが、この場合の計算結果は、実験値と一致していない。しかし、 $C=0.3$ とすることで両者は良く対応することがわかる。

Kuboら⁸⁾は、Ergun式の第1項の係数を180に修正することで実験結果と一致すると報告しているものの、本研究の適用範囲内では一致しなかった。これは、Kuboらも指摘しているように砂粒子の大きさ、粒度分布、ガスの流体性質などが異なるためと考えられる。このように適用する条件が変われば、Ergun式の係数を求め直す必要が生じるが、この係数を正確に求めるには多くの実験結果が必要であり、また砂粒子の特性はロットが変わる毎に変化することが一般的である。このため充てん砂層内を流れる流体の圧力損失を精度良く推定するためには、この係数をいかに正確に、簡易的に、また容易に求めるかが実用上の問題となる。本研究で提案しているチューニングパラメータ C は非常に簡単に設定できる値であり、本研究では $C=0.3$ と設定するだけで良く、非常に有効な方法であると考えられる。なお、以下の適用事例においては、 $C=0.3$ を用いている。

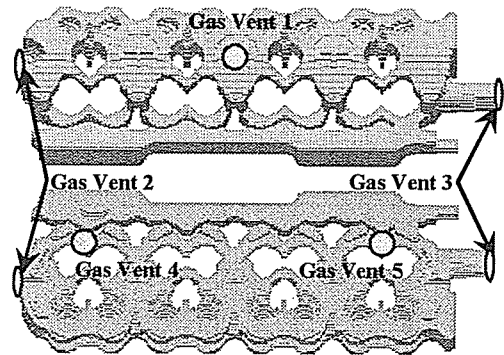


Fig. 4 Arrangement of gas vents.

3.2 自動車鑄物の中子への適用

複雑形状な中子としてシリンダヘッドのウォータージャケット中子を取り上げ、本解析法の有効性を検討した。ガス抜き用のベントは、Fig.4 に示す中子表面の適当な位置5箇所に設定し、その他表面は被覆を施した。実験と計算との比較のために、Fig.5 に示す中子表面4箇所での圧力測定を実施した。

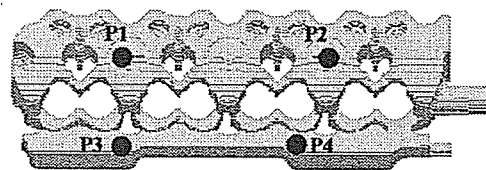


Fig. 5 Measurement points of gas pressure.

予備実験を実施し中子から生成されるガスを測定した結果、 $0.075 \times 10^{-6} [\text{m}^3/\text{g}]$ を得た。対象中子の重量は1.6kgであり、生成ガスは1秒間生成されるとして流入ガスを量 $120 \times 10^{-6} [\text{m}^3/\text{s}]$ と設定した。実現象では溶湯熱で加熱されることでガスは各位置で連続的に生成すると考えられるが、この連続現象を正確に追跡することは困難である。十分な解析

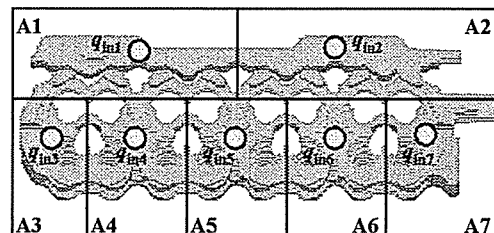


Fig. 6 Separated areas and inlet gas condition.

Table 2 Calculation conditions for core of water-jacket.

Void Fraction of Core, ε [-]	0.46
Shape Coefficient of Particle, ϕ [-]	0.76
Average Diameter of Particle, d_p [m]	0.22×10^{-3}
Gas Density, ρ_g [kg/m ³]	1.204
Gas Viscosity, μ [Pa·s]	1.18×10^{-5}
Total Numbers of Mesh	1307320
Mesh Numbers of Ccor	323548
Tuning Parameter, C [-]	0.3
Total Quantity of Inlet Gas, q_{in} [$\times 10^{-6}$ m ³ /s]	120.0
Numbers of Gas Vent Area	5
Outlet Pressure, [kPa]	0.0

Table 3 Separated areas and inlet quantities of gas.

Area	Volume Ratio [%]	Inlet Quantity [m ³ /s]
A1	10.9	13.0×10^{-6}
A2	11.1	13.3×10^{-6}
A3	12.2	14.8×10^{-6}
A4	16.0	19.2×10^{-6}
A5	16.0	19.2×10^{-6}
A6	16.0	19.2×10^{-6}
A7	17.8	21.3×10^{-6}

Table 4 Opening ratios of gas vents.

Condition Number	Opening Ratio of Gas Vent				
	1	2	3	4	5
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	1.0	1.0	1.0	0	0
3	1.0	1.0	1.0	0.25	0.25
4	1.0	0.25	0.25	1.0	1.0

精度の結果を得るために必要なガス生成データが不足しているためである。そこで本研究では、ガス流入位置を Fig.6 に示す位置に設定することで簡便化した。なお後述するが、この簡便化手法でも実用上問題ない程度の精度を持った結果が得られる。また計算においては、ベントの配置を変えた場合、すなわち生成ガスによるヤニ等でベントの一部が閉塞した場合を想定して計算を行った。計算条件を Table2, Table3 及び Table4 に示す。

Fig.7 に計算で得られたガス圧分布を示す。図から、ベント条件の違いにより中子内でのガス圧分布に影響が現れる様子が伺える。特に、2つのベントを閉塞させている条件2における圧力値がもっとも高くなっている。一方、適切なベン条件が設定されている条件1は、他の条件に比べて圧力値及び圧力勾配も小さくなっていることがわかる。一方、ヤニ等によるベント一部閉塞を想定した条件3, 4においても健全な条件1の状態と比べてガス圧力の上昇が観察できる。この結果から、例えば実際の操業状態において、ガス抜きベントの定期的メンテナンスの時期等を知ることが出来ると考えられる。

条件1と3に関して、実操業想定下でのモデル実験を行い、中子内4箇所での圧力測定を行った。実験と計算との圧力値の比較を Fig.8, Fig.9 に示す。図より、計算で得られる圧力値は、実験値と若干の差はあるものの両者の傾向は良く一致しており、このことから本研究で開発したシミュレーション方法により適切に中子内のガス圧を推定できるものと考えられる。

上記の計算結果及び考察は、中子内の解析に限ったものであるが、本解析結果の有効的活用方法として次の方法が考えられる。現在、鋳造 CAE システムの開発が進み、湯流れ・凝固シミュレーションが活発に行われるようになっている。湯流れ・凝固シミュレーションにおいて得られるパラメータには、速度、温度の他に溶湯圧力がある。溶湯圧力と本解析で得られるガス圧力との関係を考えると、ガス圧力が溶湯圧力より大きい場合は、中子から生成したガスは溶湯内部に侵入していく。その結果、ガス欠陥を誘発する危険がある。逆に、適切なガス抜きが実施された場合は、溶湯圧力よりガス圧力が小さくなるため、中子ガスに依存する鋳造欠陥は出来にくくなると考えられる。この考察から、臨界ガス圧力(例えば、3kPa)を設定することで、中子から生成するガスに依存する鋳造欠陥の有無を判定できると考えられる。

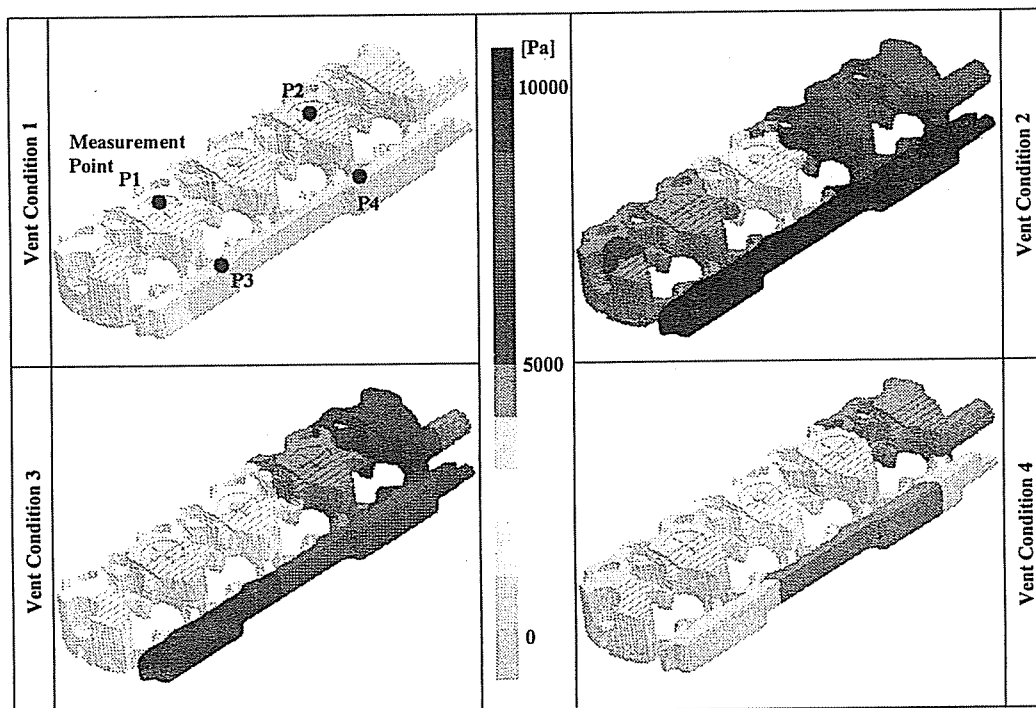


Fig. 7 Gas pressure distributions for core of water-jacket obtained by calculation in the cases of vent conditions shown in Table 4.

Fig.7 及び Fig.9 に示すように、臨界ガス圧力 3kPa を超える条件 3 は不適切な設定(この場合はヤニ等による部分閉塞)であり、至急の対策が必要であることがわかる。

以上のように、本解析方法は、鑄造時に砂中子から生成されるガスに依存する鑄造欠陥を抑制する判断材料として、また適切なガス抜きベントの決定等において有効活用できるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、健全な鑄物を鑄造するためのキーテクノロジーとして、数値シミュレーションにより砂中子内を流れる生成ガスの速度及び圧力を推定する方法を開発した。3次元 非定常解析として開発した本方法を簡易モデル及び自動車鑄物の中子に適用して有効性を検討した結果、チューニングパラメータ C の設定により、十分な精度でガス圧力の推定が可能であることがわかった。この結果から、本方法は、ガス抜きベントの配置や、ベントのメンテナンス時間の決定など、中子ガスに依存する鑄造欠陥を抑制する対策に対して、有効な情報を示すツールであると考えられる。

本研究の実施にあたり、試験片の作製やガス量測定、ウォータージャケット中子の提供など、実験及び検証における多くの局面でトヨタ自動車㈱の大塚幸男氏、富重博美氏の協力を得たことに感謝する。

参考文献

1. E. Niyama, T. Uchida, M. Morikawa and S. Saito, "Predicting Shrinkage in Large Steel Castings From Temperature Gradient Calculations", *AFS Int. Cast Metals Journal*, 1981, 6, pp.12-22

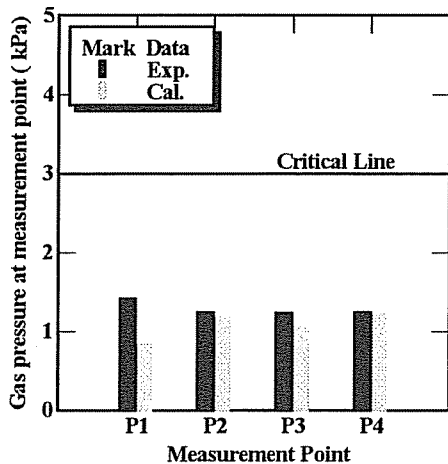


Fig. 8 Comparison of gas pressures at measurement points in the case of vent condition 1.

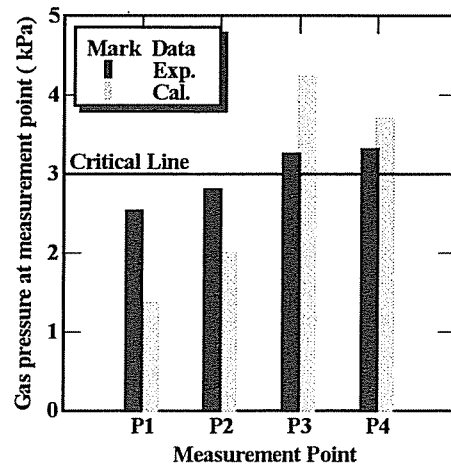


Fig. 9 Comparison of gas pressures at measurement points in the case of vent condition 3.

2. K. Kubo and R. D. Pehlke, "Mathematical Modeling of Porosity Formation in Solidification", *Metallurgical Transactions*, 1985, 16B, 359-366
3. K. Araki and A. Moriyama, "Extension of Ergun Equation to Two Dimensional Flow in Packed Beds", *Tetsu-to-Hagane*, 1977, pp.137-138
4. M. Kuwabara and I. Muchi, "Theoretical Analysis of Gas Flow In Shaft with Layered Burdens", *Tetsu-to-Hagane*, 1976, 62, pp.465-471
5. T. Sugiyama, J. Yagi and Y. Omori, "A Theoretical Analysis on Gas Flow and Heat Transfer in Packed Beds with Fused and Unfused Layers", *Tetsu-to-Hagane*, 1978, 64, pp.1676-1683
6. S. Ergun, "Fluid Flow through Paced Columns", *Chemical Engineering Progress*, 1952, 48, pp.89-94
7. T. Kawaguchi, T. Tanaka and Y. Tsuji, "Numerical Simulation of Two-dimensional Fluidized Beds using the Discrete Element Method (Comparison between the Two- and Three-dimensional models)", *Powder Technology*, 1998, 96, pp.129-138
8. K. Kubo, T. Fukusako and I. Ohnaka, *IMONO*, 1980, 52, pp.411-417
9. S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, 1980, pp.116