

鑄鋼品のガス欠陥防止解析技術の開発

Numerical Analysis Technology for Prevention of Gas Defects in Cast Steel Products

技術本部 下 島 幸 郎*¹ 古 河 洋 文*²
 神戸造船所 田 中 俊 彰*³ 馬 躰 重 満*³
 渡 辺 潔*⁴

大型複雑形状の鑄鋼品には鑄物表面に広範囲にガス欠陥が発生しやすく、補修に多大な工数を必要とする。ガス欠陥の主要原因は有機樹脂バインダの熱分解によるCO、H₂を主成分としたガスによるもので、注湯・凝固時の鑄型内のガス圧力が高いほどガス欠陥は発生しやすい。一般に、ガス欠陥防止のため鑄型にはガス抜き孔等が設置される。しかし従来熟練者の経験に頼っており、対策が効果的ではなかった。本研究では鑄型内のガス流れをダルシー流れとして解析により把握する手法を開発し、ガス抜き位置を理論的に特定可能とした。また解析に基づいて鑄型内のガスを強制的に排気する減圧注湯工法を開発し、ガス欠陥防止に有効であることを把握した。

Gas defects in large cast steel products tend to be produced over a wide range of surfaces, and the repair of castings by welding takes a lot of time. Reaction gases which mainly consist of CO₂, H₂ are generated by the thermal decomposition of the organic binder, and high gas pressures in the mold while the casting is solidifying produce gas defects. The configuration of vents in the mold is the general method used to prevent gas defects in casting but this method is not so effective because at present it depends on the experience of experts. In this study we developed a method of estimating gas pressures in the mold. Now we can logically decide countermeasures to prevent gas defects. By using numerical analysis we developed a reduced pressure pouring method. This method is one method of discharging reaction gases from a mold.

1. ま え が き

当社の大型鑄鋼品の製造には砂型が用いられ、造型には粘結材(バインダ)として有機質の樹脂が採用されている。これらの有機バインダは、自硬性(硬化剤添加による反応硬化)で高強度かつ鑄造後の崩壊性が良好な性質を有しており、造形及び“型ばらし”が容易でまた鑄物砂の再生率が良好な特徴を持っている。しかし注湯により鑄型が加熱されるとバインダの熱分解により多量のガスが発生し、鑄物にガス欠陥が発生しやすいという欠点も併せ持っている。

そこで当社はこれまで(1)ガス欠陥の原因を特定し、防止条件を把握すること、(2)ガス欠陥の発生を予測し、鑄型設計に反映すること、(3)ガス欠陥を防止する鑄造方法を開発すること、を目標に総合的なガス欠陥防止技術の開発を実施してきた。

2. 鑄型内のバインダの熱分解に起因するガス欠陥発生メカニズム及び特徴

鑄鋼に発生するガス欠陥を大別すると、(1)溶鋼精錬過程での脱酸不良による酸素あるいは吸湿による水素等の溶鋼中のガスに起因する欠陥、(2)注湯後に鑄型から発生するガスに起因する欠陥、となる。特に有機バインダを使用した鑄型では、鑄型からの発生ガスに起因したガス欠陥が多く、対策も容易ではない。

表1に注湯時に鑄型から有機バインダの熱分解により発生したガスを採取し、分析したガス成分を示す。なお当社で使用している有機バインダはフラン樹脂(フラン)あるいはアルカリレゾール樹脂(アルカリフェノール)である。発生ガス成分は両者ともCO、H₂が主体であり、フランとアルカリフェノールでその組成に大きな違いはないが、フランの方がややCH₄等の有機ガス成

表1 鑄型からの発生ガス組成
Composition of reaction gases in mold (Vol.%)

バインダ	CO	H ₂	N ₂	O ₂	CO ₂	有機	H ₂ O
フラン	43	34	8.0	3.5	4.6	3.5	3.4
アルカリフェノール	44	41	3.0	1.4	4.1	1.1	5.4

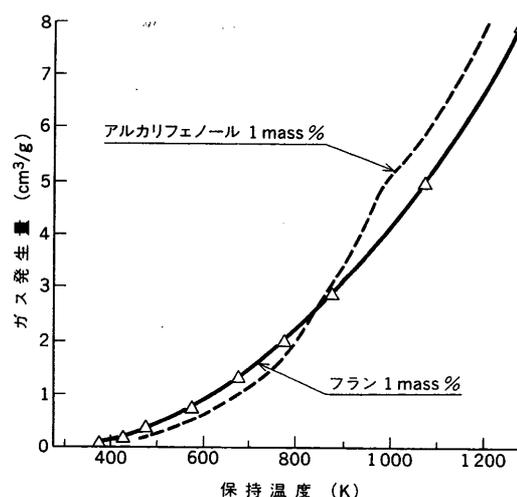
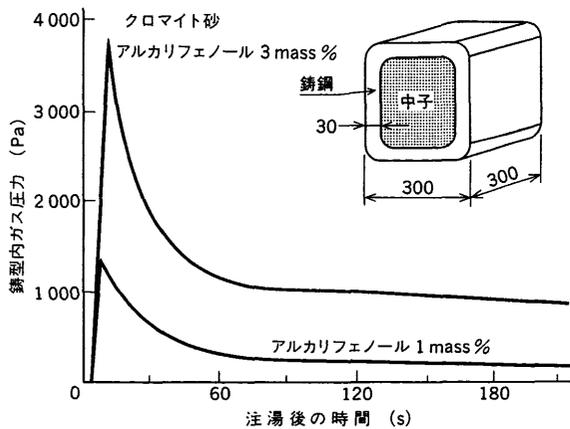


図1 鑄型からのガス発生量測定結果 フランとアルカリフェノールでガス発生量はあまり変わらず、高温であるほどガス発生量が多い。
Temperature dependence of reaction gases amount in mold

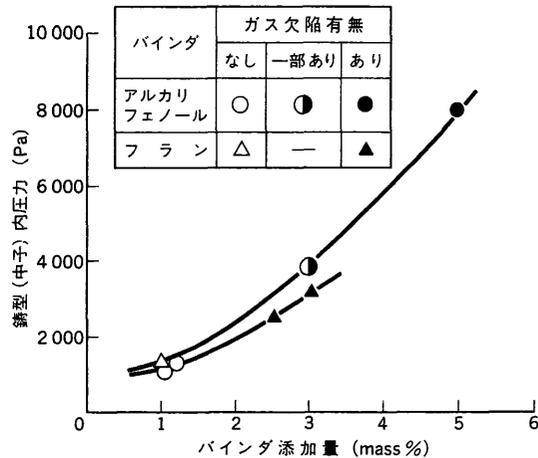
分が多いことが特徴である。

また鑄型材(砂+バインダ)を特定の温度で一定時間保持しながら次第に昇温し、発生したガスの総量を測定した結果を図1に

*1 高砂研究所製造技術開発センター *3 プラント工作部
*2 高砂研究所製造技術開発センター主務 *4 プラント工作部主務



(a) 注湯後の鑄型内ガス圧力の時間変化



(b) 鑄型内ガス圧力とバインダ量及びガス欠陥の関係

図2 角筒試験片での鑄造時鑄型内ガス圧力測定結果 注湯後数10sで鑄型内のガス圧力はピークに達し、またバインダ量が增加するに従い鑄型内圧力は増加し、ガス欠陥も発生している。
Result of gas pressure measurement in mold during casting at square cylinder test model

示す。なおガス発生量は発生したガスを加熱炉外に導出することにより室温に冷却し、一定時間保持した温度ごとに測定した。鑄型重量比1%の同一バインダ量ではフランとアルカリフェノールで発生量に大きな違いはなく、温度上昇とともにガス発生量は増加している。

さらに鑄造時の鑄型内ガス圧力の測定試験を実施した。鑄型内ガス圧力の時間変化の測定例を図2(a)に示す。試験片形状は外径300×300mm、長さ300mm、板厚30mmの角筒型であり、鑄型砂には平均粒径約0.2mmのクロマイト砂(主成分Cr₂O₃)を用いた。鑄込材料はSC450、鑄込温度は1873Kである。中子中央部の溶鋼接触面付近に内径2mmのSUS304製パイプを挿入して圧力測定を実施した。なお温風送風機にて48h以上453Kの高温乾燥空気を鑄型内に送風することにより鑄型を十分乾燥しているため、粘土を用いて造型する生型では問題となる鑄型中に含まれる水分の影響は無視できる。鑄型砂に対し重量比でアルカリフェノールが1%及び3%の場合とも、注湯後数10sで鑄型内のガス圧力がピークに達し、その後なだらかに低下することを示している。これは試験片形状、サイズが異なる場合及び圧力ピークの大きさが異なる場合でも同様である。

図2(b)にバインダ量を変化させた場合の鑄型内ガス圧力とガス欠陥の発生関係を示す。バインダ量の増加に伴い、鑄型内のガス圧力のピーク値も上昇している。このときのガス欠陥は鑄物の表面近傍に発生した1mm以下のピンホール欠陥が主体である。ガス欠陥の発生はフランとアルカリフェノールで臨界ガス圧力は異なっているが、鑄型内のガス圧力が高いほど、ガス欠陥が発生しやすいことを示している。

鑄型に起因するガス欠陥発生原因、機構を大別すると、

- (1) 鑄型内のガス圧が高く気体状態で溶鋼中に移行し、補そくされる⁽¹⁾⁻⁽³⁾、
- (2) 鑄型内で発生したガスが一たん溶鋼中に溶解し、凝固過程での溶解度の低下により過飽和分が気泡となる⁽⁴⁾、

の二つに整理される。前者の場合は数mmのブローホールのガス欠陥が発生するのに対し、後者は鑄物表面近傍に1mm以下のピンホール欠陥が発生しやすいという特徴がある。どちらの場合も鑄型内ガス圧力が高いほどガス欠陥が発生しやすいということが分かっている。しかしガス欠陥発生臨界ガス圧力は溶鋼静圧及び材料の違い等により異なっており、まだ系統的な研究は行わ

れていない。

3. 鑄型内ガス圧力数値解析方法

前述したように、鑄型内ガス圧力とガス欠陥の発生には密接な関係があり、鑄型内のガス圧力を把握することは、ガス欠陥防止に有効である。ガス欠陥を防止する方法としては、一般的に鑄型にガス抜き孔等を設けて、鑄型内で発生したガスを鑄型外へ排出する措置がとられる。しかしこの設け方は熟練者の経験に頼っており、理論的な防止方法はこれまで実施されていない。大量生産品については、試作段階に鑄型内のガス圧力を実際に測定することにより、ガス圧力を低減する対策を行い、ガス欠陥の低減に効果を挙げている例がある⁽²⁾。しかし当社は大型鑄鋼の少量生産が主体であるため、この手法を採用するのが困難である。そこで解析により鑄型内のガス圧力を把握する手法を検討した。

先に述べたとおり鑄型内のガス圧力は注湯直後にピークに達し、その後なだらかに低下する。このため圧力ピーク時の値が分かればガス欠陥防止に有用である。注湯による鑄型中の伝熱により、ガス発生量及び発生位置は厳密には時々刻々変化し非定常である。図1の各温度でのガス発生量の測定結果と一次元の伝熱計算の組合せにより、鑄型の溶湯接触面近傍から発生するガス発生量の時間変化を算出した。図3にその結果を示す。図2(a)で示した圧力ピークが観察される初期の段階では、ガスの発生する範囲は溶湯接触面から10mm以内であり、鑄型の溶湯接触面でのみガスが一定に発生する定常流とすることが可能である。このときの溶湯接触面単位面積当たりのガス発生量は鑄込温度1873K、鑄型温度353Kで、鑄型砂に対し重量比でアルカリフェノールを1%、硬化剤を0.3%添加した場合、ガス温度を373Kとすると0.429cm³・cm⁻²・s⁻¹となる。

鑄型は通気性物質であり、鑄型内を流れるガスは流量が計算仮定に差支えない程度の大きさであることから、鑄型内のガス流れの挙動は流量と圧力損失が比例するダルシー流れ(D'Arcy Flow)として取扱うことが可能である⁽⁵⁾。定常流のダルシー流れの基本式は三次元直交座標系の場合次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x} &= -\frac{\mu \epsilon}{K} u, \quad \frac{\partial P}{\partial y} = -\frac{\mu \epsilon}{K} v, \quad \frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{\mu \epsilon}{K} w - \rho g \\ \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} &= 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

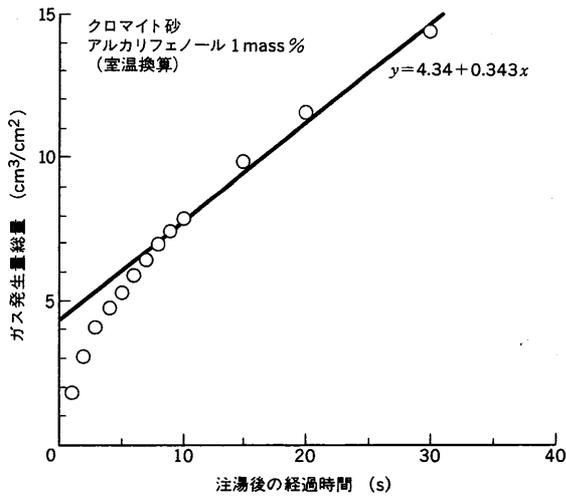


図3 鑄型の溶湯接触面から発生するガス発生累積量の時間変化 約10sから30sにかけて鑄型の溶鋼接触面でガスが直線的に増加するように発生している。
Time change of total amount of reaction gases in mold

ここで

P : ガス圧力

u, v, w : それぞれ x, y, z 方向のガス流速

μ : ガス粘度

ε : 鑄型の空げき率

K : 鑄型の透過率

ρ : ガスの密度

g : 重力加速度

この式をもとに鑄型をモデル化して要素分割し、境界条件を考慮して差分法にて解析計算式を導出する。その後シミュレーション解析を実施することで、鑄型内のガス圧力及びガス流量を把握することが可能となる。

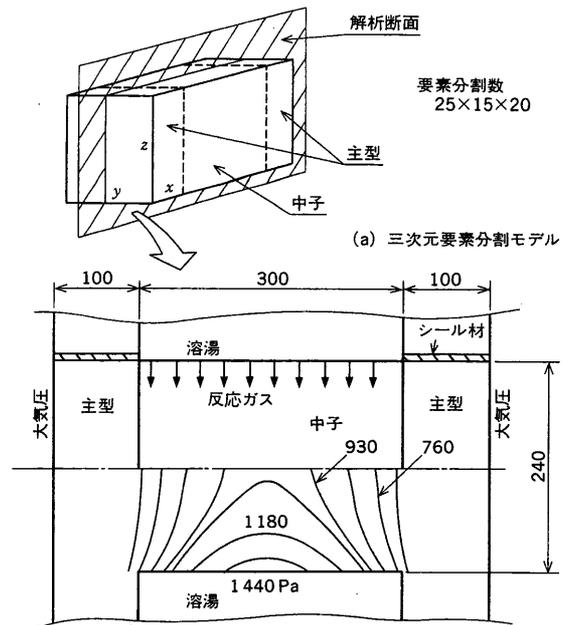
4. 鑄型内ガス圧力分布解析例

図2の鑄型内のガス圧力測定例に対応する解析モデルと解析結果を図4に示す。なお入力データは表2に示す。なお発生ガスの密度、粘度は表1に示す成分系で加成性が成立つものとして、373 Kでそれぞれ $0.70 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $0.025 \text{ MPa}\cdot\text{s}$ とした。解析の結果、鑄型外部から中子中央部の溶鋼接触面に向かうほど鑄型内のガス圧力が高くなっており、実測結果とほぼ同様の分布を示している。またピーク値の最大値を示す部分でのガス圧力は、実測データが大気圧を基準として 1300 Pa であるのに対し、解析結果が 1440 Pa とよく対応しており、十分予測が可能であることを把握した。

5. 解析によるガス圧力低減方法の検討

注湯・凝固時に鑄型内のガス圧力を低減するために、通常は鑄型にガス抜き孔を設けている。このため鑄型構造は複雑となり、造型に熟練技術と工数が必要となっている。ガス抜き孔の設置が不要なガス圧力低減方法としては、鑄型砂の大粒径化による鑄型の通気性の向上及び鑄型を減圧下に置くことによる強制的なガスの鑄型外への排出が考えられる。これらの有効性について解析により検討した。

まず鑄型砂の粒径を変化させた場合を検討した。一般に、解析に用いる定数である透過率はほぼ粒径の2乗に比例することが知



(b) 境界条件(上半分)とガス圧力分布(下半分)
図4 角筒試験片の鑄型の解析モデルと鑄型内ガス圧力分布解析結果 鑄型外部から鑄型内部の溶鋼接触面に向かうほど、ガス圧力は増大している。
Simulation model of mold for square cylinder test model and numerical analysis result of gas pressure contour in mold

表2 角筒試験片の鑄型内ガス圧力解析入力データ
Input data for numerical analysis of gas pressure in mold

ガス発生量	$0.429 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
ガス粘度	$0.025 \text{ MPa}\cdot\text{s}$
ガス密度	$0.70 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
鑄型の空げき率	0.344
鑄型の通気度	118 (JIS)
鑄型の透過率	$3.39 \times 10^{-7} \text{ cm}^2$

られている⁽⁵⁾。このことから鑄物砂の平均粒径が 0.2 mm から 0.8 mm へ変化した場合、透過率は $3.39 \times 10^{-7} \text{ cm}^2$ から $5.42 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ となると推定される。この条件で図4と同じ解析を実施したところ、圧力分布状況は図4と同じであるが、鑄型内の最大ガス圧力は 1440 Pa から 91 Pa に大幅に減少し、ガス欠陥防止に有効であることを示している。

次に鑄型外部を減圧下においた場合について検討した。図4の例において鑄型外部の圧力を大気圧から -0.01 MPa と減圧状態にして解析を実施した結果、鑄型内の最大ガス圧力は 1440 Pa から -8560 Pa と負圧状態になり、ガス欠陥防止に有効であると推定される。

6. 減圧注湯工法の検討

減圧注湯工法は鑄型をチャンバ内に置き、チャンバ内を負圧に保つことにより鑄型内のガスの発生によるガス圧力の上昇を抑さえ、ガス欠陥を防止する工法である。本工法は、(1) 鑄型を完全に大気と遮断する方法、(2) 一方から空気を流入させながら減圧する方法が考えられるが、本研究では設備及び鑄造時の操作性の観点から、後者の方法を採用した。原理を図5に示す。すなわち図5において、鋼板製のチャンバ内に造型した鑄枠を設置し、

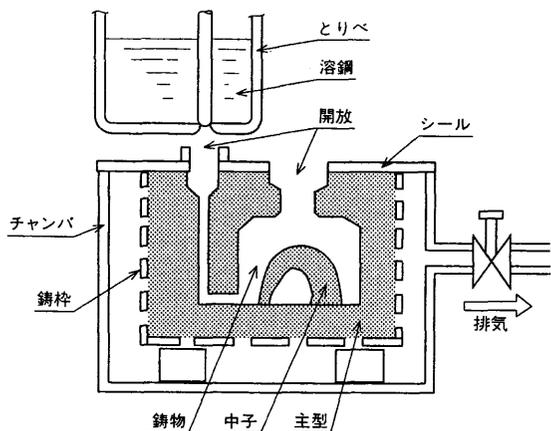


図5 減圧注湯工法試験の概要 減圧注湯工法の試験装置及び試験方法の概要を示す。
Concept of test for reduced pressure pouring method

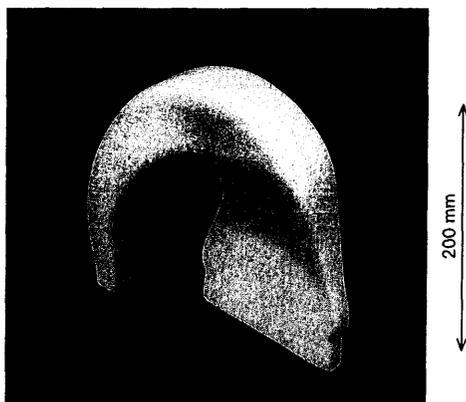


図6 ポンプケーシング用中子モデル ポンプケーシングに用いられる中子の形状を説明するモデル。
Model of core for pump casing

湯口及び押湯部を除いて鋼板あるいは木板等でシールする。チャンバ内を排気すると湯口及び押湯部からの空気流入により鑄型内の負圧状態は大きくないが、注湯時あるいは注湯後は流入空気量が減少するため、鑄型内は $-0.01 \sim -0.09$ MPa程度の負圧状態になる。鑄型内の圧力は空気の流入量及び排気量によって当然異なるが、注湯時及び凝固時に鑄型内のガス圧力を低く保持することが可能である。

本工法の減圧条件を解析により検討した。試験は $W 250 \times D 180 \times H 250$ mm のブロック形状の中央部に、図6に示す形状のポンプケーシング用の中子を配置した試験片形状にて実施した。なお鑄込材料は SC 450、鑄込温度は 1873 K、鑄型砂にはクロマイト砂を用い、バインダとしてはフランを故意に鑄物砂に対して重量比 3% (通常 1%) 添加した。解析の結果、中子において注湯後圧力が最大になる部分での圧力を大気圧以下にするためには、

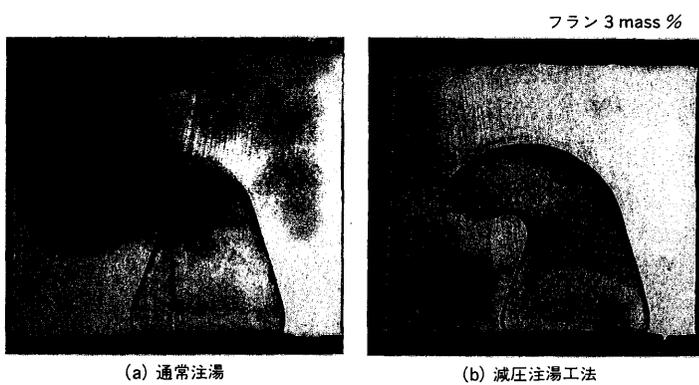


図7 ポンプケーシング用中子での通常注湯、減圧注湯工法試験片断面のガス欠陥状況 普通注湯ではガス欠陥が発生しているが、減圧注湯工法ではガス欠陥が発生していない。
Difference of gas defect appearance at casting between normal pouring method and a reduced pressure pouring method

チャンバ内を -0.04 MPa以下の負圧状態にする必要があることが分かった。本試験での排気装置の能力からすると解析結果からチャンバ内を大きな負圧状態にすることが可能であり、十分ガス欠陥を防止できるものと期待される。

図7に試験片を切断して調べたガス欠陥発生状況を示す。通常鑄込の場合はバインダ添加量を過大とし、かつガス抜き孔がないことから数 mm のブローホールからなるガス欠陥が発生している。なおこの場合バブリング現象が観察され、この影響で注湯・凝固時の鑄型内ガス圧力の最大測定値は 0.018 MPaと解析結果の半分程度であった。一方、減圧鑄造工法ではこのような悪条件の中でも鑄型内ガス圧力は常に負圧状態を維持し、ガス欠陥が発生していない。このことから減圧鑄造工法はガス欠陥防止に有効であることを把握した。現在実用化に向けチャンバ及び排気装置の大型化を検討中である。

7. む す び

バインダの熱分解によって発生するガスによる鑄型内のガス圧力はガス欠陥の発生と密接に関係することを把握した。そこで鑄型内のガス圧力を数値解析により把握する技術を開発し、ガス欠陥防止方法の条件決定の指針として利用できることを把握した。また、減圧鑄造工法を開発し、ガス欠陥防止に有効であることを把握した。今後、鑄型内ガス圧力とガス欠陥の発生条件の把握、解析プログラムの汎用化による解析適用製品の拡大、並びに減圧鑄造工法の実用化を実施し、着実に鑄鋼品のガス欠陥低減に努めていく予定である。

参 考 文 献

- (1) 三木ほか, 鑄物 第39巻 (1967) p.21
- (2) 中村ほか, 鑄物 第55巻 (1983) p.511
- (3) 山岡ほか, 鑄物 第34巻 (1962) p.22
- (4) 鈴木, 鑄物 第42巻 (1970) p.849
- (5) 大中逸雄, コンピュータ伝熱・凝固解析入門, 丸善 (1985)