

(技術資料)

凝固・流動シミュレーション技術の鋳鍛鋼製品への応用

Solidification and Flow Analysis Applications for Steel Castings



石田 斉*
Hitoshi Ishida



吉本篤人**
Atsuhito Yoshimoto



神崎祐一**
Yuichi Kanzaki

In recent years, 3D solidification and flow analysis have advanced and it is now possible to predict casting defects caused by the casting process. In the present study, a few basic examinations were carried out on the physical properties used in such solidification analysis. The physical properties of the exothermic powder used for casting were experimentally tested. The results were then applied to Kobe Steel's products.

まえがき = 鋳鍛鋼品では鋳造時に引巣や偏析をはじめとした鋳造欠陥が生成する。特に大型鋳鍛鋼品においては、冷却速度が約 1 /min 前後と非常に遅いため、鋳造欠陥がより顕著になる。軽微な鋳造欠陥は、鋳造後の鍛造、熱処理工程においてある程度改善されるが、製品表面や表面付近の内部に残存した場合には製品の強度・疲労特性などの機械的性質に大きく影響を及ぼすため、鋳造段階での欠陥低減が非常に重要となる。

鋳造欠陥のうち引巣については、凝固進行状況や温度勾配法などの凝固パラメータの評価からマクロ的な生成状況を推定することができる。この方法については近年、3次元での流動凝固解析技術¹⁾²⁾が普及し、理論的な計算による鋳造条件の検討が可能になっている。当社でも流動凝固解析技術を用いて組立型クランク軸(写真1)をはじめとした鋳鋼品の鋳造方案の検討に活用している。

しかしながら、流動凝固解析にあたって使用する熱物性値の精度が解析結果に大きく影響するにもかかわらず、十分な検討がなされているとは言い難い。また流動解析結果の評価方法についても、凝固解析のような定量的な評価指標がないため、ダイカストのような湯流れが直接に鋳塊品質に影響する場合を除いて、鋳塊品質との

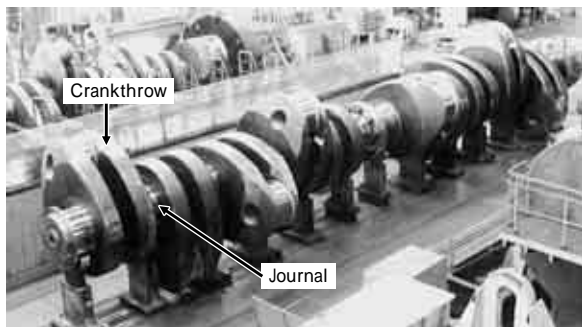


写真1 組立型クランク軸
Photo 1 Built-up type crankshaft

関係に不明な点が多いことから、一般の造塊品には流動解析が十分に活用されていない。

本報では流動凝固解析の活用方法として、解析に使用する熱物性値を評価した事例について紹介する。

1. 凝固解析の熱物性値評価

1.1 鋳造欠陥の評価指標

鋳造欠陥(引巣)は主に、(1)凝固進行状況から推定される凝固遅れ部の閉ループ部分、もしくは(2)温度勾配法、固相率勾配法、修正温度勾配法などの凝固パラメータで評価することができる。例えば修正温度勾配法は、温度勾配 G (/m) と凝固速度 R (m/s) を用いて G/R で表される値をもとに引巣発生位置を評価でき、温度勾配法よりも鋳塊形状による影響が小さいため、引巣発生位置の評価指標として汎用的に使用されている。

これらの評価指標で引巣を予測するにあたっては、ベースとなる鋼塊部分の伝熱凝固挙動を正確に再現することが重要である。特に押湯部分の保温性は凝固進行に大きく影響するため、押湯表面に添加する押湯保温剤の発熱特性を正確に評価することは非常に重要である。

しかしながら押湯保温剤に関しては、保温剤の種類の違いによる鋼塊内部性状について一部の報告³⁾があるものの、その詳細な発熱特性については不明な点が多い。また、実際の使用下での発熱挙動は、保温剤のみの発熱挙動とは異なると考えられることから、実際の使用下における発熱挙動を測定し、その値から計算に必要な物性値を見積もる必要がある。そこで保温剤の発熱挙動を実験的に確認することとし、鋳造時の鋼塊の押湯部分を模擬した鋳塊を作製して、保温剤部分の温度変化を熱電対により測定し、その発熱特性を明らかにした。

1.2 保温剤発熱挙動の測定

実験で使用した鋳型形状と熱電対の測定位置を図1

*技術開発本部 材料研究所 **鉄鋼部門 鋳鍛鋼事業部 製造部

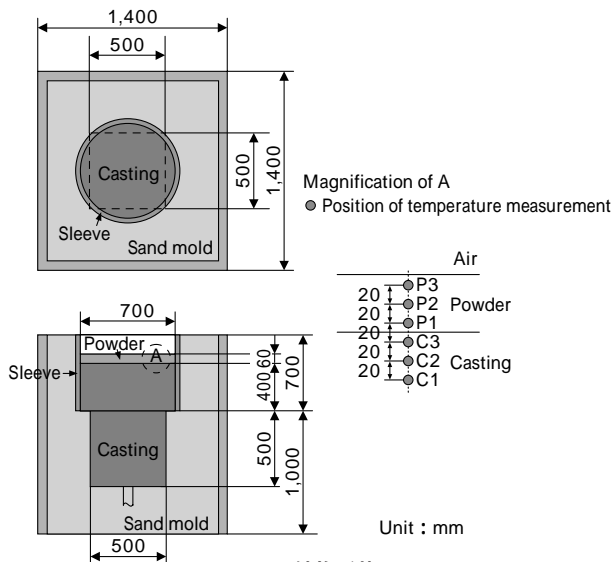


図1 鑄物形状
Fig. 1 Shape of casting

表1 実験条件

Table 1 Experimental conditions

Parameter	
Chemical composition of casting	Fe-0.24C
Casting temperature ()	1,545
Chemical component of exothermic powder	Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -FeO-Al
Thickness of exothermic powder (mm)	60

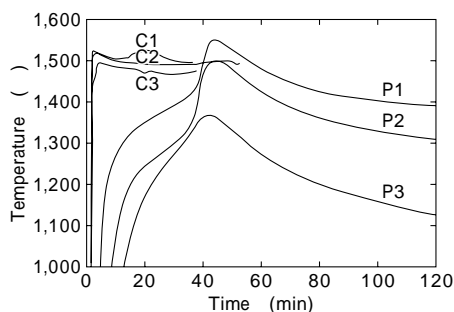


図2 温度測定結果

Fig. 2 Results of measured temperature

に、実験条件を表1に示す。保温剤箇所の温度として、押湯溶鋼表面から保温剤部分と押湯部分にかけて高さ方向に各3点(合計6点)測定し、鑄造開始から一定時間における温度変化を記録した。測温用の熱電対はアルミナ製保護管に挿入して設置したが、溶鋼部分については熱電対が途中で断線したため、測定は鑄造後から一定時間のみの測温となっている。

ここで得られた温度データを図2に示す。図2から分かるとおり、初期は室温であった保温剤が溶鋼からの吸熱により昇温し、40~50分後に発熱反応のピークを迎え、その後長時間にわたり発熱保温特性が保たれている状況が確認できた。また保温剤の厚さ方向の温度変化については、溶鋼内部に近い部分ほど温度が高く、最高温度は1,500以上に達している。一方で、溶鋼表面温度は鑄造直後に若干低下するものの、保温剤の発熱に応じて再度加熱されるためほとんど温度低下をすることなく1,500程度を維持している。従って、保温剤の発熱挙動に応じて溶鋼表面温度も影響を受けていることが実験上でも確認でき、保温剤の発熱挙動の取扱いが重要であ

表2 保温剤の熱物性値

Table 2 Thermal condition of exothermic powder

Thermal properties	Old	New
Thermal conductivity (W/m ² ·K)	0.42	0.42
Specific heat (J/kg·K)	880	880
Density (mg/m ³)	0.5	0.5
Calorific value (cal/g)	0	250
Start of reaction (sec)	0	2,100
End of reaction (sec)	0	2,700

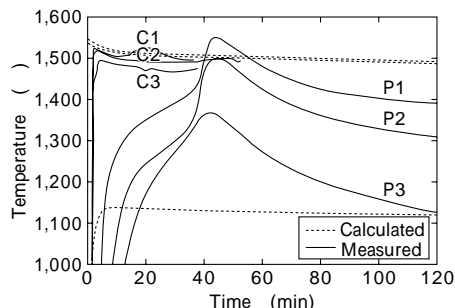


図3 実機と計算値の温度比較(従来物性値)

Fig. 3 Comparison between simulated and measured temperature (Used old thermal condition of exothermic powder for calculation)

ることがあらためて確認できた。

また保温剤の熱物性を簡易的に測定する方法として、保温剤単体を温度1,200一定の炉内で保持した際の発熱挙動についても別途実験を行った。その結果、発熱ピークは20~30分後に現れ、最高到達温度は約1,700であることが分かった。このことから、実際の鑄造で使用される際には、保温剤の発熱量は単体の場合よりも少ないという、発熱ピークの現れる時間も遅い側にずれることが明らかとなった。これは保温剤が押湯溶鋼上で使用される場合、保温剤や溶鋼の体積、保温剤から溶鋼・雰囲気への熱伝達条件などに影響されるためと考えられる。従って、伝熱解析を実施するにあたっては実際の使用下における熱物性値を使用しないと、正確な温度挙動を解析できないことが明らかとなった。

1.3 凝固解析用熱物性値の決定

この実験結果をもとに、伝熱計算に使用する押湯保温剤の熱物性値を検証した。実験と同様の形状、鑄造条件での伝熱計算結果と実験で得られた温度データの比較を行い、パラメータフィッティングにより熱物性値を決定した。

従来のパラメータと今回決定したパラメータを表2に示す。保温剤の熱物性値は、熱伝導率、比熱、密度、単位時間あたりの発熱量、発熱開始時間、発熱終了時間からなり、このパラメータと汎用ソフト²⁾を用いて、差分法による3次元凝固解析を実施した。

図3に従来のパラメータを用いた場合の実験と計算の温度データの比較を示すが、発熱量の時間依存性を考慮していないため、保温剤の昇温現象が現れず、最高到達温度も1,100程度まででその後は単調に低下している。また溶鋼温度も保温剤の発熱量を考慮できていないため、時間経過とともに低下しており実測の温度挙動を正確に再現できていない。次に図4に今回決定したパラメータを用いた場合の実験と計算の温度データの比較を示

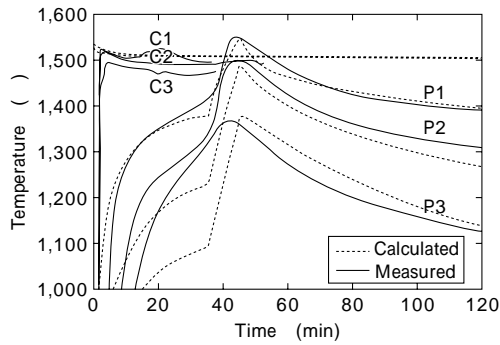


図4 実機と計算値の温度比較(新規物性値)

Fig. 4 Comparison between simulated and measured temperature (Used new thermal condition of exothermic powder for calculation)

す。図4に示したとおり、保温剤の発熱量の時間依存性を考慮することで、鑄造後40分付近での発熱ピークを含めた保温剤の発熱挙動をほぼ再現できていることが分かる。また溶鋼温度についても保温剤の発熱により温度低下することなく、1,500程度を維持しており、実測値と完全には一致していないものの、保温剤の発熱の影響による温度挙動を再現している。

このように、保温剤の熱物性値を発熱量・発熱時間を含めて考慮することにより、保温剤および押湯表面の温度挙動をより正確に推定することが可能となった。

1.4 鋼塊品質との関係

押湯保温剤界面の溶鋼温度挙動と鋼塊品質の関係については、過去に報告³⁾がなされており、上記実験における鋼塊品質について考察を行った。

一般に発熱性保温剤は溶鋼から受ける熱を利用し、保温剤中に含まれるAlと酸化鉄がテルミット反応を起こし、そのときのAlの酸化熱で発熱する。一方、鑄造後の押湯に投入される保温剤は常温であるため、溶鋼表面に凝固殻が生成しやすい。従って、保温剤が発熱する際にこの凝固殻が再溶融した場合、溶鋼内に沈降する可能性があり、このとき凝固核に酸化物を主組成とする保温剤や溶鋼中の介在物が付着することで、沈降性介在物と呼ばれる鋼塊底部の品質不良の原因となる。

従って、上記現象を保温剤界面の溶鋼温度挙動に置換えて考えると、溶鋼温度がいったん液相線温度以下に低下して凝固核が生成した後、保温剤の発熱により復熱し、液相線温度以上となって再溶融した場合、沈降性介在物不良が発生しやすくなると推定できる。

今回の実験で用いた溶鋼の液相線温度は1,510、固相線温度は1,460である。実測した保温剤界面の溶鋼温度は保温剤投入後、若干の温度変動があるものの固液共存温度内で推移し、保温剤の発熱時にも再溶融と考えられる大きな温度上昇は発生していない。従って、この実験における温度挙動から推定すると、沈降性介在物は生成していないものと考えられる。なお、実際の操業下においては、溶鋼温度や保温剤の添加条件などが変動するため、鋼塊品質上の観点から保温剤の使用方法には十分留意する必要がある。

2. 実製品への適用

今回得られた保温剤の熱物性値を実製品の鑄造時の伝

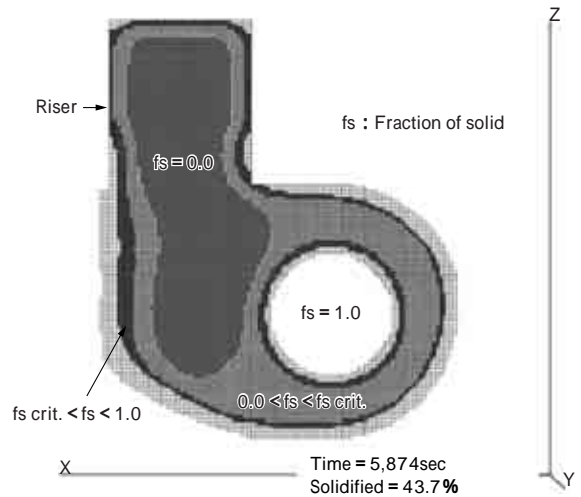


図5 3次元凝固解析結果

Fig. 5 Result of 3D solidification analysis

熱凝固解析に適用した事例を紹介する。

当社鑄鍛鋼品の主力製品である船舶エンジン用組立型クランク軸は、クランクスローと呼ばれる部品に鑄鋼材を用いることが特徴である。そのクランクスローの鑄造工程で最も留意すべきことは、引裂の発生防止や強度を均一に保つための成分偏析低減であり、そのためには鑄造方案上でいかに押湯に向かって指向性凝固させるかが重要となる。そこで今回得られた保温剤の熱物性値を用いて押湯部も含めた鑄造方案の検討を行った。

解析条件の詳細は省略するが、図5に3次元伝熱解析結果の一例として、クランクスローのウェブ断面におけるある時間での凝固進行状況を示す。保温剤を含めた押湯部分は十分に保温されており、押湯に向かって指向性凝固が実現できている。その結果、鑄造欠陥の観点からは凝固進行状況から推定される凝固遅れ部の閉ループ部分の有無とその位置、および修正温度勾配法の凝固パラメータ(G/R)による評価、さらに沈降性介在物の観点からは押湯部の温度挙動の評価をそれぞれ実施した上で、最適な鑄造方案を決定することができた。

このように実機製品の凝固解析においても、押湯保温剤の発熱挙動を含めて精度良く解析することにより、製品の鑄造欠陥低減、品質改善に役立っている。

むすび=鑄造工程においては3次元の流動凝固解析技術の発展により、湯流れ、凝固の状況を予測することで、鑄造欠陥の評価が可能となってきている。しかしながら、解析に使用する物性値、解析結果の評価の仕方などが課題となっており、各工場の操業条件に応じた対応が必要となる。今回紹介したのは一例であるが、それぞれの場合に応じた物性値の検討がますます重要になってくるものと思われる。

参考文献

- 1) 高橋 勇ほか: 素形材, No.6 (2002) p.24.
- 2) 大中逸雄ほか: 素形材, No.5 (1996) p.1.
- 3) 垣生泰弘ほか: 鉄と鋼, Vol.62, No.14 (1976) p.21.