

鑄造 CAE による鑄型過熱起因のひけ巣予測方法の検討

Examination of Method for Shrinkage Prediction by Overheating of the Mold with Casting Simulation

新井 信裕*
Nobuhiro Arai

中道 義弘*
Yoshihiro Nakamichi

林 啓次郎*
Keiji Hayashi

ハーキュナイト®-S (耐熱鑄鋼) を材料とする自動車用排気系部品の鑄造工程において、注湯時の鑄型 (砂型) 過熱が原因でひけ巣が生じていると推測される場合がある。この推測を検証するため、試験片を用いた鑄造実験によってひけ巣の発生状態を調査した。また、鑄型の熱物性値を実測し、解析条件を見直した。この改良した解析条件を用いることで、鑄型過熱が原因のひけ巣の発生が鑄造 CAE で予測できるようになった。さらに、この解析条件を実際の排気系部品のひけ巣予測に採用した結果、ひけ巣予測精度を向上させることができた。

It may be surmised that shrinkage, including that of exhaust system parts (Hercunite®-S), occurred due to overheating of the sand mold during melt pouring. The developmental state of the shrinkage was investigated by the casting experiments using the test pieces to verify this inference. Also, the casting simulation parameters were modified by the measured thermal property of various molds. The casting simulation using these parameters permitted shrinkage prediction by overheating of the mold. In addition, the accuracy of shrinkage prediction by casting simulation for exhaust system parts was improved by applying this improved parameter.

● Key Word : 鑄造 CAE, ひけ巣, 鑄型過熱

● Production Code : ハーキュナイト®-S

● R&D Stage : Development

1. 緒言

日立金属では、耐熱鑄鋼ハーキュナイト®-Sを材料とした砂型鑄造により、自動車用排気系部品の製造している。ハーキュナイト-Sは鑄鉄と比較して、液相線温度が高いなど難鑄造材であるため、注ぎ口から製品部までの溶湯の通り道となる湯道を太くし、凝固収縮分の溶湯を補給するための押湯も多く、かつ十分な熱量を持たせるために体積を大きくせざるを得ない。そのため、注入歩留りや鑄造合格率を向上させるために鑄造 CAE を活用している。

砂型鑄造品の素材不良は、製品部を溶湯が満たす前に凝固することで生じる湯廻り不良と、溶湯の凝固収縮により空隙が生じるひけ不良に大別される。湯廻り不良は鑄造方案や鑄造条件の影響が大きいので、これらに着目した対策がとられる。ひけ不良は押湯の追加や凝固パターンを考慮した肉厚の適正化などにより対策が講じられ、これら対策の検討には鑄造 CAE が活用される。

鑄造 CAE は一般的に、量産開始後の不良対策で用いられてきた。このような取り組みでは、対策の立案と確認鑄造を繰り返して目標とする品質への到達を目指す、限られた期間内に達成できない場合がある。日立金属ではこの

課題を解決するため、製品設計段階で鑄造 CAE を活用するシステムを構築し、現在運用している。

このシステムを有効に機能させるためには、鑄造 CAE のひけ巣予測精度が重要である。ひけ巣予測に必要な主なパラメータとして、鑄物の物性値、鑄型の物性値、鑄物と鑄型界面の熱伝達が挙げられる。これらに適切な値を用いて計算することで、高い精度の結果が得られる。鑄物の物性値は過去の研究における実測値や成分系が合致していれば、文献値などからある程度正確な値を引用できる。

一方、鑄型の物性値については、工場ごとに使用している砂の種類や管理値が異なるため、骨材は同一でも物性値が異なる可能性があり、文献値から引用するのは好ましくない。また、湯流れ時に鑄型が過熱されることで、ひけ巣の発生の原因になるとの報告があり^{1), 2)}、実際の生産に用いられる鑄型の物性値を実験で把握することが、ひけ巣予測精度の向上には不可欠である。

本報では、鑄型過熱のひけ巣をテストピースで再現するとともに、実体の鑄型物性値を明らかにして鑄造 CAE のパラメータに使用することで、ひけ巣予測の精度を向上させた内容について報告する。

* 日立金属株式会社 高級機能部品カンパニー

* High-Grade Functional Components Company, Hitachi Metals, Ltd.

2. 実験方法

2.1 テストピース

鑄型過熱によるひけ巣を再現するためのテストピース形状を図1に示す。形状起因のひけ巣の発生を回避するため、湯口(Sprue)から離れるほど薄くなるようにした。そして、通過湯量によって鑄型の過熱度合いを変え、ひけ巣の差を生じさせるために、湯口から最も離れた鑄物の終端には2種類の大きさのはかせ(Run-off)と呼ばれる湯溜りを配置できるようにした。また、鑄物からの熱で鑄型が過熱されるように板形状の途中を湾曲させ、この部分を評価部として、はかせ大小によるひけ巣を比較した。

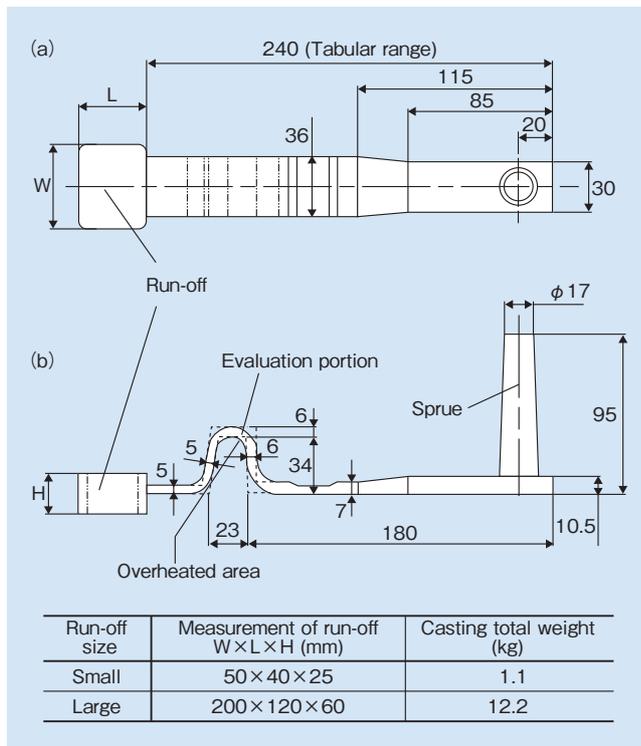


図1 テストピースの形状 (a)平面図 (b)側面図
Fig. 1 Shape of a test piece (a) top view (b) side view

2.2 鑄造条件およびひけ巣の観察方法

代表的な鑄造条件を表1に示す。鑄造 CAE の結果と比較するため、熱電対で鑄造時の鑄物と鑄型の温度曲線を測定した。測定位置を図2に示す。テストピース幅方向の中心断面上の2点とした。

鑄造後は図1で示した評価部のひけ巣の状態を観察するために、評価部を幅方向の中心線上で切断し、エメリー研磨紙で#80から#1000まで研磨後、光学顕微鏡で観察した。

表1 鑄造条件
Table 1 Casting conditions

Mold	Alkaline phenolic mold	
Kind of material	18 Cr ferritic cast steel	
Pouring temperature	1,580–1,640°C	
Filling time	Run-off (small)	2.0 s
	Run-off (large)	13.0 s

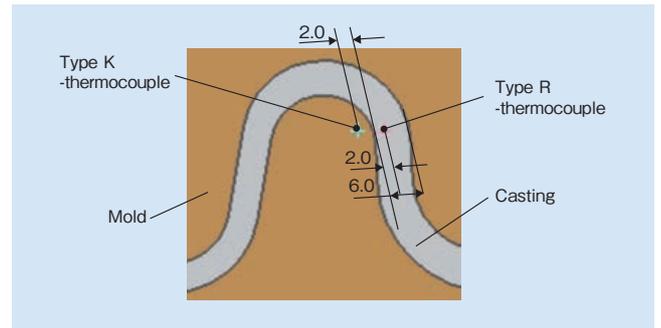


図2 試験片および鑄型の温度測定位置(評価部の拡大図)
Fig. 2 The temperature measurement points of the test piece and the mold (enlarged view of the evaluation portion)

2.3 鑄造 CAE ソフトとひけ巣の評価方法

鑄造 CAE ソフトは CAPCAST* を使用した。解析方法は、湯流れ計算で充填完了時の鑄物と鑄型の温度を求め、凝固計算の初期値としてひけ巣評価を行う湯流れ連成凝固解析を用いた。ひけ巣の予測方法は①限界固相率法による閉ループ(ホットスポット)の有無、②CAPCAST特有のポロシティ量による2つの方法とした。

限界固相率法は凝固計算において溶湯の流動限界固相率の時間変化を求め、閉ループ(ホットスポット)が生じると周囲からの溶湯の補給が行われなくなるため、閉ループ内にひけ巣が生じる、とするものである³⁾。一般的によく知られ、実用性の高い評価方法の一つである。

ポロシティ量はCAPCAST独自のひけ巣評価方法で、溶湯圧やガス圧、デンドライト間流動を考慮して、ひけ巣発生メカニズムに基づいた計算を行う。ポロシティ量(単位: %)として結果が出力されるので、定量的な評価ができる⁴⁾。このポロシティ量が大きいほど実際のひけ巣も大きくなると評価できる。

* CAPCAST は、株式会社 CAPCAST の登録商標です。

3. 実験結果および考察

3.1 鑄造結果および鑄造 CAE 結果の比較

3.1.1 鑄造結果

鑄造したテストピースの評価部断面を図3に示す。評価部に生じたひけ巣は、はかせ大の方が広範囲に生じ、かつ大きいことが分かる。

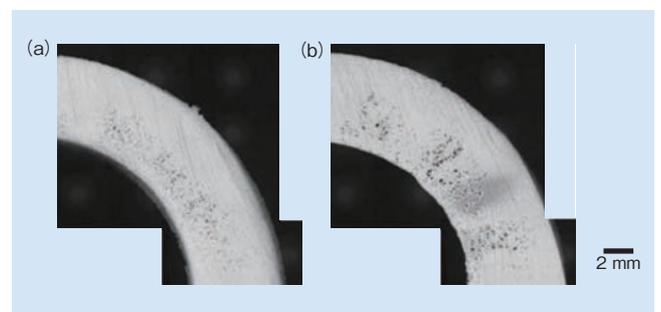


図3 テストピース評価部の断面 (a)はかせ小 (b)はかせ大
Fig. 3 Sections of the evaluation portion of a test piece
(a) run-off: small (b) run-off: large

はかせ大小それぞれの casting 時の温度曲線を図4に示す。はかせ小に比べて、はかせ大の casting 部の冷却は遅く、近傍の casting 温度は高温になっていることが分かる。これらの結果から、通過湯量の増加によって casting が高温になり、そのため、この部位の casting の凝固が遅れて、ひげ巣の形態が変わったものと考えられる。

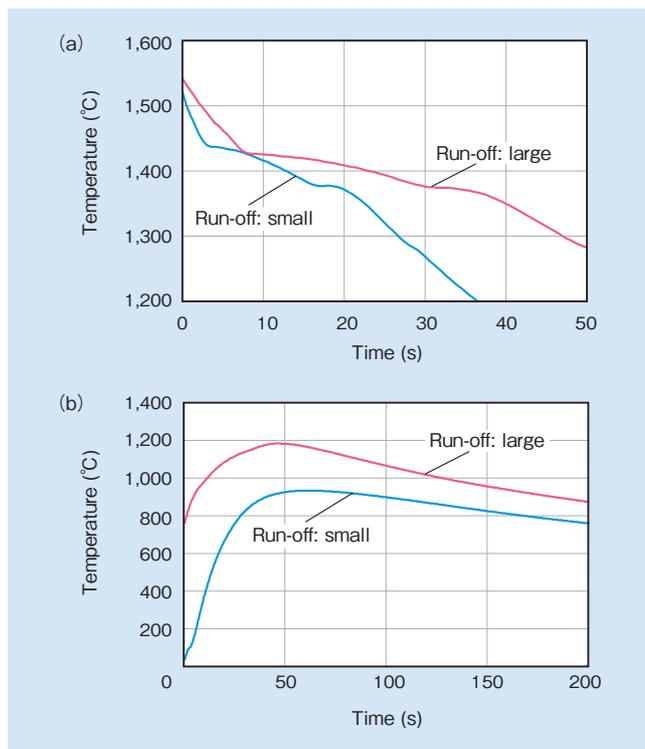


図4 テストピースと casting 温度曲線
 (a) casting 温度 (b) mold 温度
 Fig. 4 Temperature curve of the test pieces and the molds
 (a) casting temperature (b) mold temperature

3.1.2 casting CAE 結果との比較

casting CAE によるひげ巣解析結果を表2に示す。解析では、はかせ大小ともにホットスポットが生じておらず、ひげ巣ポテンシャルそのものが予測できていないうえ、ポロシティ量も実際の結果とは逆になっている。

表2 テストピースのひげ巣解析結果
 Table 2 Results of shrinkage analysis of a test piece

	Run-off: small	Run-off: large
Hotspot	Nothing	Nothing
Porosity	5%	4%

次に温度曲線について述べる。実測と解析結果の比較を表3に示す。 casting の温度では、はかせ大小いずれの条件でも解析結果の方が実測よりも冷却が速く、短時間で凝固が完了している。また、 casting 温度は解析結果の方が実測よりも低い。

これらの結果から、 casting と casting 温度変化が正確に再現できていないことがひげ巣を予測できていない原因の一つであると推測される。これには解析条件を調整し、それぞれの温度曲線の予測精度を上げることが必要であると考えられる。

表3 実測と解析結果でのテストピースと casting 温度曲線の比較
 Table 3 Comparison of temperature curves of the test pieces and the molds between measured value and analysis

	Run-off: small	Run-off: large
Casting		
Mold		

3.2 鑄型砂の物性値の測定

3.2.1 測定方法

解析条件の見直しが必要な物性値の検討を行った。鑄物の物性値は、実測に基づいた値を解析設定値として用いている。材料成分が変わらなければ、この値に大きな違いは生じない。一方、鑄型の物性値については、工場ごとに用いる砂の種類や添加物、管理値などが異なるため、従来の解析設定値と実際の値は異なる可能性がある。以上のことから、鑄型の物性値に注目し、見直す必要のある物性値の選定と測定方法の検討を進めた。

鑄物の凝固は鑄物の物性値以外に、鑄型の冷却能力にも大きな影響を受ける。鑄型の冷却能力は式(1)で表され、熱拡散度あるいは熱吸収度と呼ばれる⁵⁾。この式から、鑄型の冷却能力は鑄型の密度、比熱、熱伝導率で決まるといえる。

$$\text{熱拡散度} [J/m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K] = \sqrt{(\rho \cdot C \cdot \lambda)} \quad (1)$$

(ただし、 ρ : 密度, C : 比熱, λ : 熱伝導率)

鑄型過熱が原因のひけ巣を鑄造 CAE で予測するには、鑄型の冷却能力を正確に再現することが必要であり、そのためには実体に合った物性値が求められる。鑄型の密度は比較的簡単に実測が可能であるため、従来の解析設定値でも実測値を用いていた。一方、比熱や熱伝導率は文献値や砂メーカーのカタログ値などに基づいた値を従来条件として用いてきたが、前述のように実際の値と異なる可能性がある。そこで、鑄型の比熱と熱伝導率を実測して解析設定値の妥当性を確認した。測定試料は工場の量産ラインで実際に用いている、生砂、シェル砂、コールドボックス砂とした。

比熱は示差走査熱量測定 (DSC: Differential Scanning Calorimetry) により、測定範囲 50℃ ~ 800℃, 昇温速度 20℃ /min, 大気中の条件で測定した。また、標準試料には Al₂O₃ を用いた。

熱伝導率は図 5 に概略を示す測定装置を製作して測定した。装置の構造を簡単に説明する。測定試料(砂型)を熱伝導率既知材 (S45C: JIS G 4051, 機械構造用炭素鋼) で挟

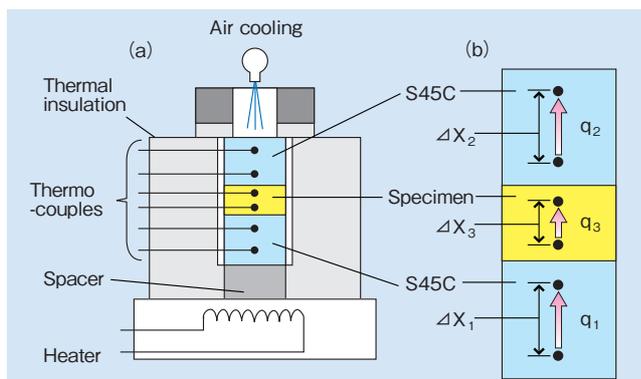


図 5 熱伝導率測定装置の概略 (a) 全体図 (b) 温度測定部の詳細
Fig. 5 Schematic drawing of apparatus for measurement of thermal conductivity (a) overall view (b) detail view of temperature measuring part

み込み、周囲を断熱材で囲む。熱伝導率既知材の一方を加熱し、反対側を冷却する。測定試料および熱伝導率既知材の各 2 点ずつに熱電対をセットし、温度差を測定するものである。

次に熱伝導率の求め方について述べる。底部の熱伝導率既知材の加熱と、測定試料を挟んだ上部の熱伝導率既知材の冷却を一定時間維持し、定常状態とする。この時の熱伝導率既知材の 2 点間における温度勾配 ($\Delta T / \Delta X$) から、式(2)を用いて熱流束を求める⁶⁾。ここで、熱伝導率既知材と試料の界面や表面から放熱などの熱損失が無いと仮定した場合、2つの熱伝導率既知材の熱流束は等しくなり、測定試料の熱流束も同一の値になる。すなわち、図 5 において、 q_1, q_2, q_3 は同一値となる。式(2)から熱伝導率 λ について解いた式(3)を用い、各温度における測定試料の熱伝導率を求めた。

$$\text{熱流束 } q [J/m^2 \cdot s] = -\lambda (\Delta T / \Delta X) \quad (2)$$

$$\text{熱伝導率 } \lambda = -q (\Delta X / \Delta T) \quad (3)$$

(ただし、 ΔT : 温度差, ΔX : 距離, λ : 熱伝導率)

3.2.2 比熱の測定結果

DSC 測定結果と従来の解析パラメータ設定値の比較を図 6 に示す。シェル砂、コールドボックス砂(図中は CB と記載)の比熱は、200℃ から徐々に低下し 500℃ から 600℃ で最小となったあと、700℃ にかけて増加し横ばいとなる。500℃ ~ 600℃ で比熱が低下しているのは、砂の周りにコーティングされたレジンの燃焼反応によるものである。また、シェルとコールドボックスでピーク位置が異なるのは、レジンの違いによるものと推定する。

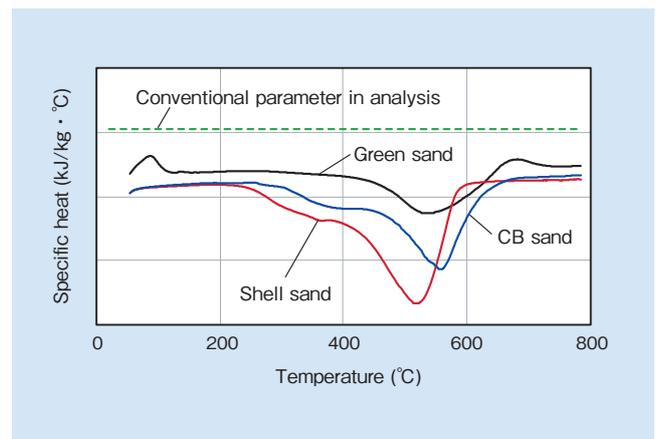


図 6 比熱の測定結果と従来の解析設定値の比較
Fig. 6 Comparison of measurement result of specific heat and analysis setting value

生砂では 100℃ 付近で比熱の微増が生じた後、横ばいになる。シェルやコールドボックス同様に 500℃ 付近で一時的な低下が生じた後、もとの値まで上昇し、再び横ばいとなる。100℃ 付近での比熱の微増は、生砂に含まれる水分の蒸発の影響である。また、量産ラインの循環生砂にはシェルやコールドボックス砂が混入している。このため、生砂においてもレジンの燃焼反応により、500℃ 付近の比熱の

低下が生じているものと推測する。

これらの結果から、これまでの解析において比熱は実測よりも大きい値を用いていたことが分かった。

3.2.3 熱伝導率の測定結果

熱伝導率の測定結果を図7に示す。装置の性能上の制約により、500℃までの結果である。各種砂の熱伝導率は温度によって変化が認められるが、伝熱計算に影響するほど大きな変化ではなかった。この結果から、砂の熱伝導率は従来の解析設定値とほぼ同じ値であると言える。

ここまでの結果から、従来の解析設定値は実際よりも比熱は大きく、熱伝導率は同等であることが分かった。これにより、解析では鋳型の冷却効果が実際よりも高くなることで、実測よりも鋳型温度は低く、鋳物の冷却は速くなる。この推測は表3の比較結果の傾向と一致している。

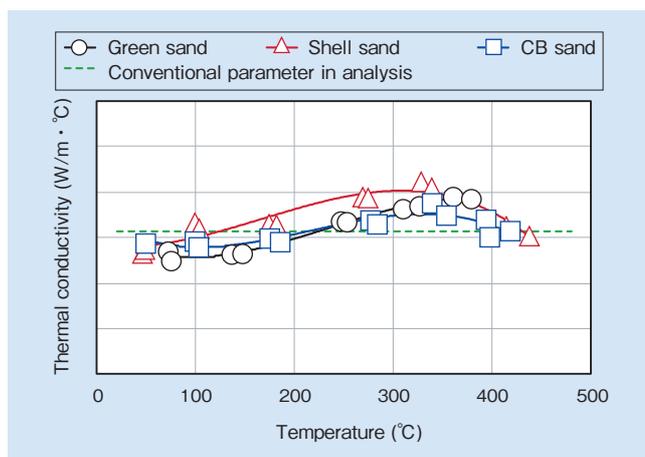


図7 熱伝導率の測定結果と従来の解析設定値の比較
Fig. 7 Comparison of measurement result of thermal conductivity and analysis setting value

3.3 鋳造 CAE 改良条件での比較

鋳型の実測比熱に基づき、解析条件を見直して再計算を行った。条件見直し後(改良条件)の温度曲線と実測の比較を表4に示す。従来条件(表3)で解析した鋳物の温度は実測よりも短時間で凝固が完了していたが、改良条件では実測と解析結果が一致している。また、従来条件で解析した鋳型の温度は実測よりも低い結果であったが、改良条件では鋳物の温度と同様に、実測と解析結果が良く一致している。

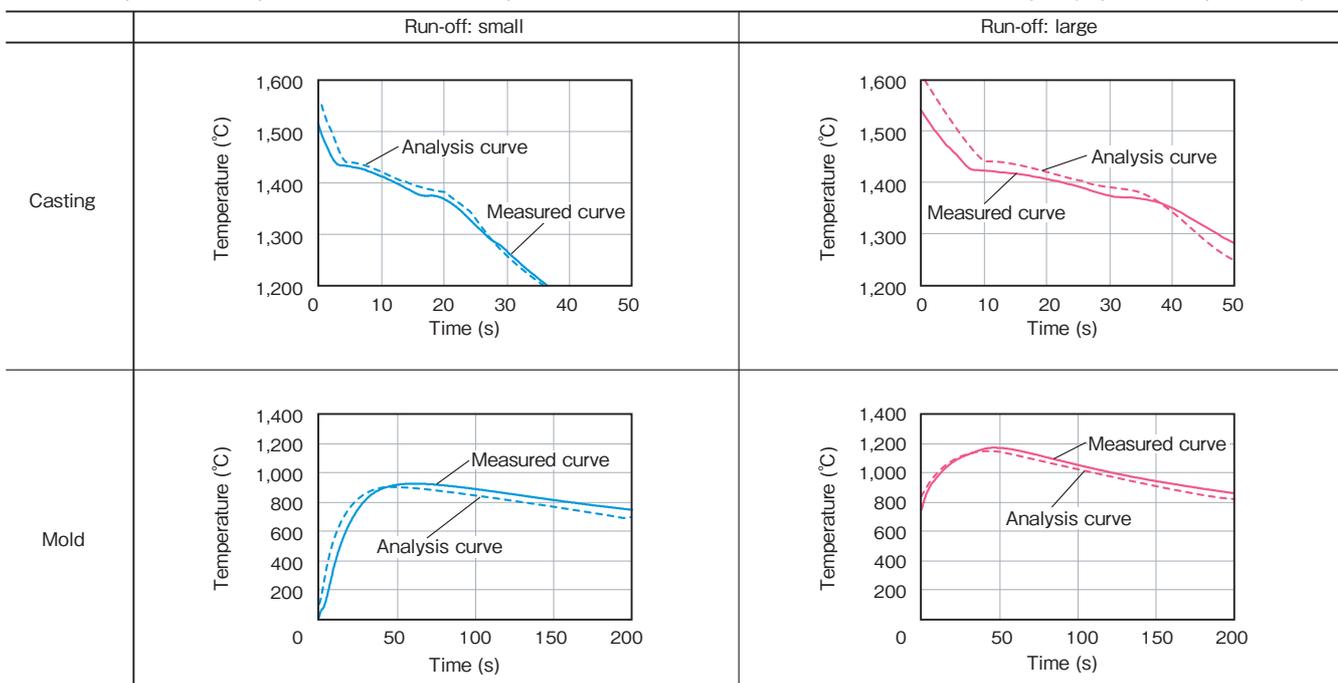
次に改良条件でのひけ巣解析結果を表5に示す。従来条件では、はかせ大小いずれの条件でも評価部にホットスポットは生じておらず、ひけ巣を予測できていなかった。しかし、表5に示す改良条件のホットスポットの結果では、はかせ小での微細なひけ巣は予測できていないが、はかせ大では実際のひけ巣発生部にホットスポットが生じており、ひけ巣の悪化傾向が一致した。また、従来条件での

表5 改良条件でのひけ巣解析結果
Table 5 Results of shrinkage analysis with improvement parameter

	Run-off: small	Run-off: large
Hotspot	Nothing	Occurrence
Porosity	5%	12%

表4 実測と解析結果(改良条件)でのテストピースと鋳型の温度曲線の比較

Table 4 Comparison of temperature curves of the test pieces and the molds between measured value and analysis (improvement parameter)



ポロシティ量は実際と逆の傾向を示していたが、改良条件におけるポロシティ量は、はかせ大の値が大きくなり、ひけ巣の悪化傾向と一致した。

これらの結果から、鑄型の物性値を実測に合わせた改良条件によって鑄物と鑄型の温度曲線の予測精度が上がり、鑄型過熱によるひけ巣が予測できるようになったと考える。

4. 実製品へ採用した際の効果

テストピースによる基礎実験でひけ巣予測精度の向上が確認できた解析条件を、日立金属の九州工場で量産している自動車用排気系部品（図8）に使用し、解析を実施した。改良条件を用いることで、従来条件では予測できていなかったひけ巣不良のうち、40～50%を予測できるようになった。より高い精度でひけ巣予測が可能になったことで、設計段階でのさらなる活用が期待できる。



図8 日立金属で生産している自動車用排気系部品の一例
Fig. 8 Photograph of the exhaust system parts for cars produced at Hitachi Metals, Ltd.

5. 結 言

テストピースによる基礎実験および鑄型の物性値の実測を行い、解析条件の見直しを行った結果、以下の結論を得た。

- (1) テストピースを用いた鑄造実験で、鑄型が過熱される現象を再現し、これが原因となるひけ巣形態の変化も明らかにした。
- (2) 鑄型の熱伝導率測定装置を製作し、解析に用いるパラメータの妥当性を検証した。
- (3) 鑄型の比熱の解析パラメータを実測値に合わせることで、解析と実測の鑄型温度の整合性が向上し、鑄物の冷却曲線の予測精度も向上した。さらに、鑄型過熱が原因のひけ巣の変化が鑄造CAEでも予測できるようになった。
- (4) 実製品においても、改良条件を用いることで従来条件では予測できていなかったひけ巣のうち、40～50%が予測できるようになった。

引用文献

- 1) 大中逸雄, 長坂悦敬, 福迫達一, 大山昌一: 鑄物, 55, (1983), P758.
- 2) 長坂悦敬, 大中逸雄, 福迫達一: 鑄物, 56, (1984), P22.
- 3) 大中逸雄: コンピュータ伝熱・凝固解析入門 鑄造プロセスへの応用, 丸善, (1985), P213.
- 4) 久保公雄: 鑄造工学, 83, (2011), P399.
- 5) 大中逸雄: コンピュータ伝熱・凝固解析入門 鑄造プロセスへの応用, 丸善, (1985), P192.
- 6) 新山英輔: 鑄造伝熱工学, アグネ, (2001), P2.



新井 信裕
Nobuhiro Arai
日立金属株式会社
高級機能部品カンパニー
素材研究所



中道 義弘
Yoshihiro Nakamichi
日立金属株式会社
高級機能部品カンパニー
素材研究所



林 啓次郎
Keijiro Hayashi
日立金属株式会社
高級機能部品カンパニー
九州工場