

高性能ガソリンエンジン用 HERCUNITE®-S NSHR®-A5Nの開発

Development of HERCUNITE®-S NSHR®-A5N for High Performance Gasoline Engines

伊藤賢児*

Kenji Itoh

林啓次郎*

Keijiro Hayashi

早田智臣**

Tomomi Souda

世界的に厳しくなる環境規制や燃費規制に適応するため、新型ガソリンエンジンの排出ガス温度は1,050℃に到達するものもある。そのため、排気系部品には今まで以上に耐熱性に優れた材料が必要になっている。そこで当社は、高性能ガソリンエンジン用排気系材料として1,000℃以上の高温でも使用可能なオーステナイト系耐熱鋳鋼（HERCUNITE®-S NSHR®-A5N）を開発し、実用化した。さらには、超薄肉鋳造技術の確立により、一般肉厚2.5mmのエキゾーストマニホールド一体型タービンハウジングの試作に成功した。

Since there is a need to adapt to the environmental and fuel consumption regulations being standardized globally, exhaust gas temperatures from some new gasoline engines can now reach 1,050℃. Therefore, an excellent heat resistant material is needed. We have developed an austenitic heat resistant cast steel (HERCUNITE®-S NSHR®-A5N), which can be used for the exhaust component material of petrol engines that can reach high gas temperatures exceeding 1,000℃. In addition, we have established a super thin wall casting technology, and succeeded in prototype casting of the turbo-integrated manifold, of which the nominal wall thickness is 2.5 mm.

① 緒言

世界的に高まる環境問題に対応するために、日米欧主要国では自動車の排出ガス規制や燃費規制が強化され、これら一連の規制に対応すべく新環境エンジンの開発、特に排出ガス浄化技術から、燃費低減新技術の開発まで多岐にわたる開発が進められている。

欧州においては、低燃費化と高出力化を両立させるためにエンジンの小排気量化（小型化）と過給機（ターボチャージャーやスーパーチャージャー等）の搭載が推進されており、さらには、エキゾーストマニホールド（以下エキマニと略称）とターボチャージャーの一体化品（以下マニターボ®と略称）の開発も進行している。

当社は、ここ数年にわたり、タービンハウジングやマニターボ®の市場性に注目してきたが、小型・軽量化が進んでいく乗用車において、形状自由度が大きく、耐熱性がある鋳造品の需要は今後十分に大きくなると予測し、排気系耐熱材料ハーキュナイト®（HERCUNITE®）をラインアップしている。

また、図1に示すように環境規制の強化に伴う技術開発により燃焼技術が進歩した結果、排出ガス温度が上昇し、最近の欧州市場における新型ガソリンエンジンの中には排出ガス温度が1,000℃を超えるものが出てきている。排出ガス温度が1,000℃以下の領域は当社オーステナイト系耐熱鋳鋼であるNSHR®-A3N（以下A3Nと略称）

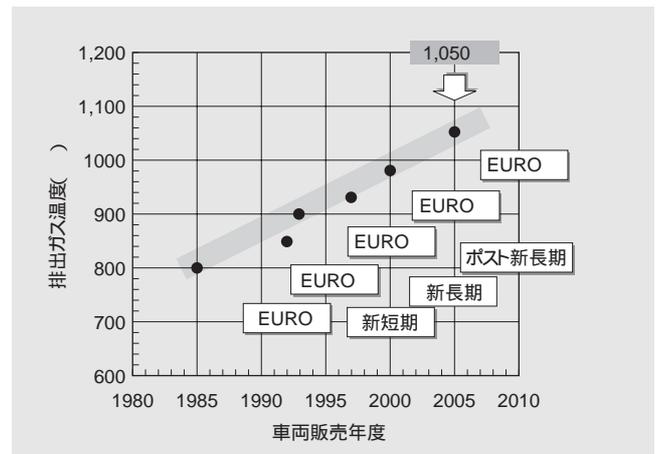


図1 ガソリン車の排出ガス温度上昇経緯
Fig. 1 Circumstances of exhaust gas temperatures.

が適用できるが、1,000℃を超える環境下では耐熱性の不足が予測された。

一方、鋳物に比べて、軽く、熱容量が小さいという特長により広く採用されているパイプエキマニも、素材の耐熱性は非常に優れてはいるが、溶接部に熱き裂が生じる懸念があり、排出ガス温度が1,000℃を超える高温での耐久性は十分ではない場合がある。

そこで、高性能ガソリンエンジン用排気系材料として、A3N（20Cr-10Ni系）の耐熱性を上回り、排出ガス温度

* 日立金属株式会社 素材研究所

* Casting Technology Research Laboratory, Hitachi Metals, Ltd.

** 日立金属株式会社 九州工場

** Kyushu Works, Hitachi Metals, Ltd.

が1,000 を超える温度域でも使用可能なオーステナイト系耐熱鋳鋼材が必要になると考え、新たに25Cr-20Ni系の耐熱鋳鋼材を開発した。

② 材料開発

2.1 排気系部材に要求される機能

図2に示すように、高温環境で使用される排気系部材には、酸化、熱変形および熱き裂の大きな3つの問題がある。そこで、材料開発を効率よく進めるため、まずこれら3つの要素に影響する材料特性を明らかにし、次にその特性に絞った材料開発を試験片を用いて行い、最後に製品実体で耐久性を評価するという手法をとることにした。

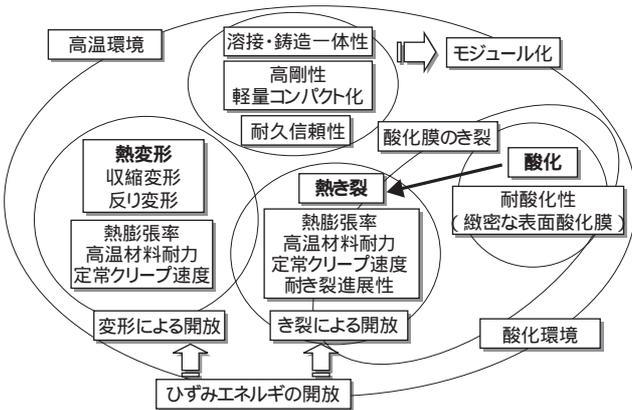


図2 排気系部材に要求される機能
Fig. 2 Functions required for exhaust system components.

2.2 開発目標

表1に開発目標を示す。

25Cr-20Ni系の新耐熱鋳鋼材を開発するにあたり、開発目標としては、1,000 のメタル温度において、優れた耐酸化性と高温耐力を有し、安定した耐熱特性を示すことにより、既存の耐熱鋳鋼材 (A3N) を凌駕する新材質を開発することとした。そして、従来材と比較して、耐酸化性の向上により、耐熱き裂性を飛躍的に改善、全温度域での高温耐力の向上により、耐熱変形・熱き裂性を向上、 鋳造性の改善により、超薄肉鋳鋼品の生産が可能であることを目標とした。

そして、数値目標としては、 既存のA3Nの950 における酸化減量値である0.15kg/m²以下を1000 において達成すること、 高温耐力値は同温度におけるA3Nの耐力値を上回っていること、 熱疲労寿命もA3Nの値を上回ること、そして 鋳造性はA3Nと同等以上であることとした。

表1 開発目標

Table 1 Development targets.

項目	開発目標	A3N
酸化減量	<0.15kg/m ² at 1,000	<0.15kg/m ² at 950
高温耐力	60MPa at 1,000	58MPa at 1,000
熱疲労寿命 (拘束率 = 0.25)	750 cycles at 1,000	708 cycles at 1,000
実体熱疲労寿命	1,000 cycles at 1,000	-
鋳造性	・湯流れ性 ・引け性	A3Nと同等以上

2.3 合金設計

合金成分の決定には、当社が保有する材料データベースを基にして、多変量解析手法等を用い、Cr25%、Ni20%の合金系を基本にメタル温度1,000 における各成分元素と特性との関係を予備検討したのち、個々の元素が鋳造性を含め耐熱特性におよぼす影響を考慮した。以下、材料開発経緯について述べる。

2.3.1 多変量解析による予備検討

各成分元素と特性との関係を重回帰分析により求めた。

例えば、拘束率 = 0.25における熱疲労寿命 (Nf) に影響をおよぼす元素は、重回帰分析では (1) 式で示される。

$$Nf (\text{cycles}) = 50.62 \cdot Ni\% - 45.23 \cdot Cr\% - 246.36 \cdot Nb\% - 248.37 \cdot Mo\% + 1739.68 \cdot N\% + 764.73 \cdot \dots (1)$$

(1) 式より、熱疲労寿命に影響をおよぼす元素として、NiとNの添加は効果があり、Cr、NbおよびMoは添加量が少ないほうが良いと判定される。

実際には、上記解析結果以外に鋳造性や加工性におよぼす影響を考慮して、最適な合金組成を選定した。

2.3.2 C含有量の影響

Cは、Cr、W、Nb等の合金元素と炭化物を形成し、基地の強化に影響をおよぼす。従って、C含有量の増加は、耐熱変形性の向上に寄与すると考えた。

そこで、C含有量と、高温耐力および定常クリープ速度 (これらは耐熱変形性に影響をおよぼす材料特性である) との関係について詳細に検討した。

図3に、C含有量と高温耐力との関係を、図4に定常クリープ速度との関係を示す。

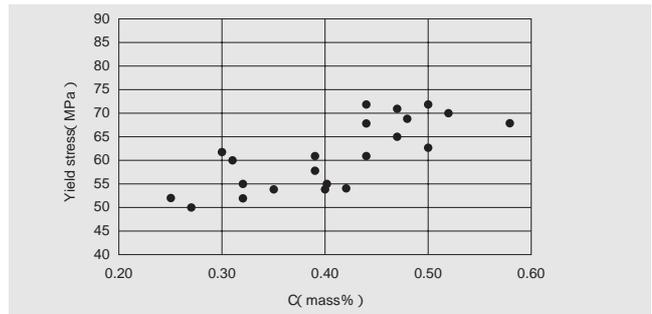


図3 C含有量と高温耐力の関係 (1,000)
Fig. 3 Relation between C content and yield stress(1,000).

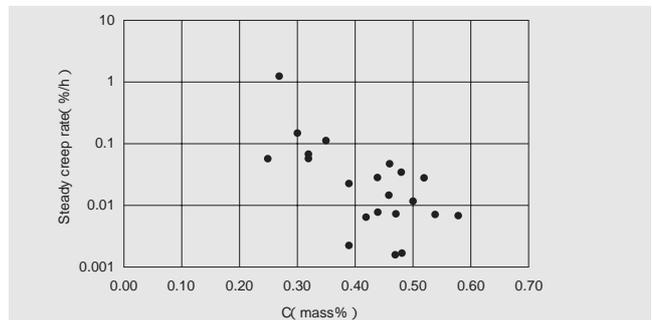


図4 C含有量と定常クリープ速度の関係 (温度: 1,000 , 応力: 29MPa)
Fig. 4 Relation between C content and steady creep rate (Temperature: 1,000 , Stress: 29MPa).

図よりC含有量が大きくなるほど、高温耐力は大きくなり、定常クリープ速度は遅くなることから、C含有量を増加させると熱変形しにくい材料となることがわかる。これらの結果並びに過去の経験を踏まえて、本開発材のC含有量としては、0.50%を採用した。

2.3.3 Si含有量の影響

本開発材は、A3Nよりも耐酸化性を大幅に向上させる必要上、耐酸化性向上元素であるSi添加量を増加させることを検討した。

耐酸化性試験は、直径10mm、長さ20mmの円柱状試験片を試験炉内に挿入し、大気雰囲気下、1,000 の温度で200時間連続加熱して実施した。試験終了後、表面の酸化膜を全て除去し、試験前後の重量差を試験前の試験片表面積で割った値を酸化減量と定義している。

図5にSi含有量と酸化減量の関係を示す。図より、Si含有量が増加すると酸化減量も低下することがわかる。しかしながら、Siを過剰に添加すると基地の脆化ならびに加工性に悪影響を与える懸念があるために、後述するスクリーニング試験においてSi添加量を、A3NのSi含有量である0.5%から1.5%まで添加して検討した。

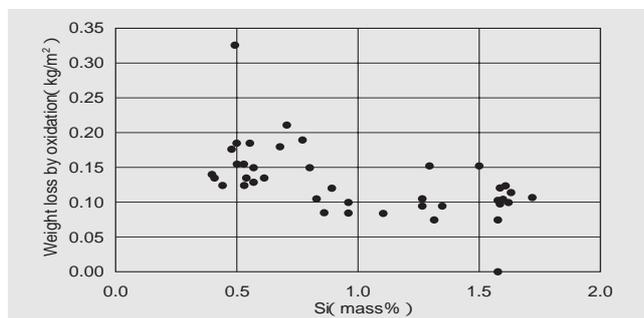


図5 Si含有量と酸化減量の関係 (1,000 × 200時間)
Fig. 5 Relation between Si content and weight loss by oxidation (1,000 × 200h).

2.3.4 N含有量の影響

図6にN含有量と熱疲労寿命の関係を示す。

耐熱き裂性を評価する熱疲労試験は、日本材料学会高温強度部門委員会規格である熱疲労試験片を用い、Coffin型熱疲労試験装置を使用して実施した。

図より、N含有量が0.1%以上あると熱疲労寿命が向上することがわかる。しかしながら、Nは多量に添加す

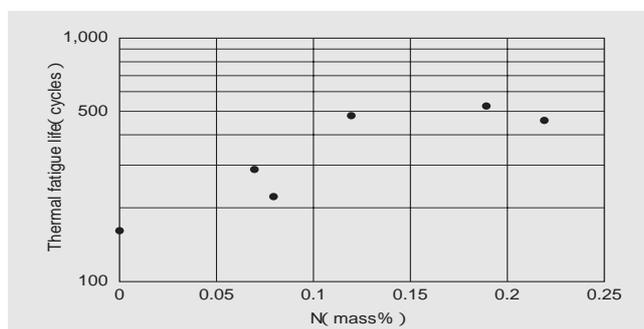


図6 N含有量と熱疲労寿命の関係 (加熱冷却温度範囲: 150 1,000, 拘束率: 0.5)
Fig. 6 Relation between N content and thermal fatigue life (Temperature range: 150 1,000, Restraint ratio: 0.5).

るとガス欠陥を誘発する懸念があるため、注意が必要である。

2.3.5 最終候補材の成分

表2に、本材料開発における最終候補材の成分を示す。実際には、最終候補材を絞り込むまでに多数の成分系による評価試験を実施した。

候補材としては、25Cr-20Ni系耐熱材をベースにCを0.5%とし、耐酸化性を向上させる目的でSiを1.50%まで、熱疲労寿命の向上を目的にNを、さらに基地の強化を目的にW、Mo等を添加した。

表2 最終候補材の成分

Table 2 Chemical compositions of finally selected materials. (mass%)

材質No.	C	Si	Cr	Ni	W	Mo
A3N (比較材)	0.45	0.50	20.0	10.0	3.00	-
A504	0.50	0.50	25.0	20.0	-	-
A505	-	1.00	-	-	-	-
A506	-	1.50	-	-	-	-
A507	-	0.50	-	-	3.00	-
A508	-	1.00	-	-	3.00	-
A509	-	1.50	-	-	3.00	-
A510	-	1.00	-	-	-	3.00
A511	-	1.50	-	-	-	3.00
A512	-	1.00	-	-	-	6.00
A513	-	1.50	-	-	-	6.00

③ スクリーニング試験

3.1 耐酸化性

図7に耐酸化性評価試験結果を示す。本試験では、A505、A506、A509、A511、A513の5種類の材質の酸化減量値が目標の0.15kg/m²以下であった。

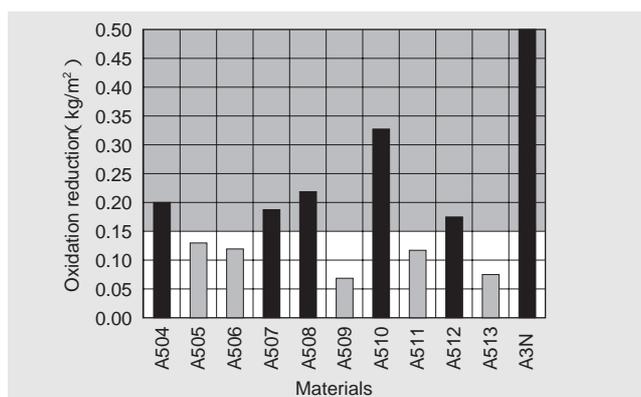


図7 耐酸化性評価結果 (1,000 × 200時間)
Fig. 7 Results of the oxidation test (1,000 × 200h).

3.2 高温特性 (高温耐力)

図8に、耐熱変形性に影響をおよぼす材料特性である高温耐力と温度の関係を示す。この結果から、比較材であるA3Nの高温耐力値を上回るA506、A509、A511、A513の4種類の組成が選択された。

3.3 熱疲労寿命

図9に熱疲労寿命試験結果を示す。この結果から、比較材であるA3Nの熱疲労寿命を凌ぐA509、A513の2材質が選択された。

以上のスクリーニング試験結果から、A509を最終候補材として選定し、次に実用性評価試験を実施した。

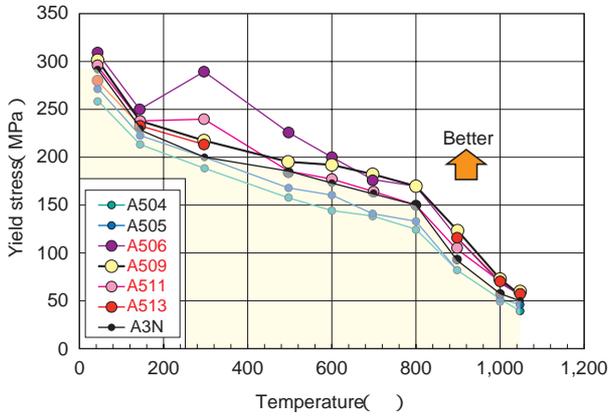


図 8 高温耐力評価結果
Fig. 8 Results of proof stress at high temperatures.

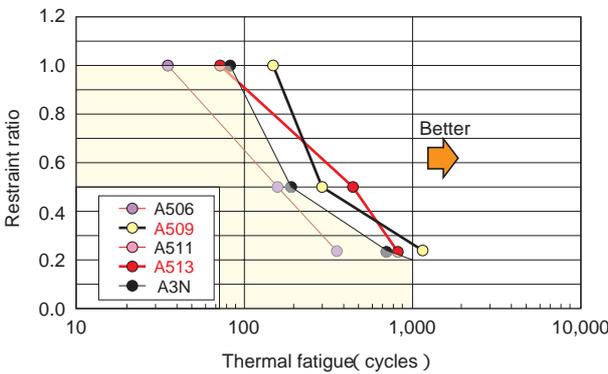


図 9 熱疲労寿命試験結果 (150 1,000)
Fig. 9 Results of thermal fatigue test (150 1,000).

④ 実用性評価試験

4.1 実体熱疲労試験

開発材の実用性評価試験の一つとして、タービンハウジングによる熱疲労試験を実施した。供試材としては、比較材であるA3N，開発材であるA509およびA509と同じ25Cr-20Ni系のJIS標準材であるSCH22の3材質を準備した。当社の排気系部品の単体熱疲労評価試験機である排気シミュレータを用い，排出ガス温度1,100，ウェイトゲート（W/G）部の座面のメタル温度が1,000という試験条件で，1,000サイクルの熱疲労評価試験を実施した。

図 10 にタービンハウジングによる実体熱疲労試験状況とその結果を示す。図より，A3Nは酸化で形状が失われ，SCH22は矢印部分（）（図 10 参照）にき裂を生じているのに対し，開発材A509は，酸化は軽微であり，き裂もなく，実用上全く問題ないことが明らかである。

4.2 引け性，湯流れ評価

図 11 に，球状試験片による引け評価試験の結果を示す。溶湯をこの球状試験片に注ぎ，凝固収縮した容積を計測するものである。

図より，注湯温度1,550 では，A509の引け容積は，A3Nの約0.87倍であり，約13%の引け性の改善が確認された。

図 12 に，湯流れ試験の結果を示す。本試験は，図中の渦巻き試験片を用いて，中央部から注いだ溶湯がどこまで流れるかを測定することにより，湯流れ性の評価ができる。本試験では，A509は全温度域においてA3Nよ

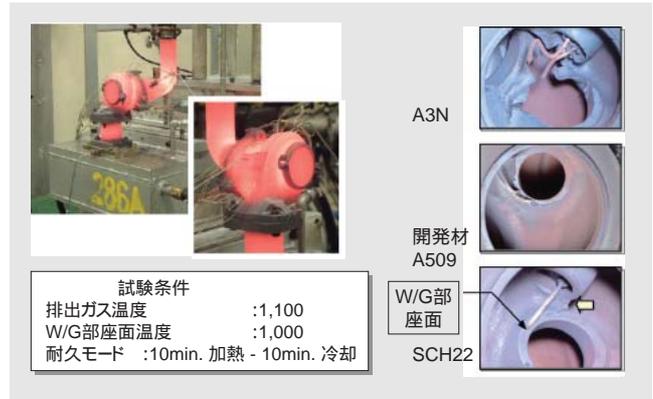


図 10 タービンハウジングによる熱疲労試験とその結果
Fig. 10 Thermal durability test of turbine housing and respective results.

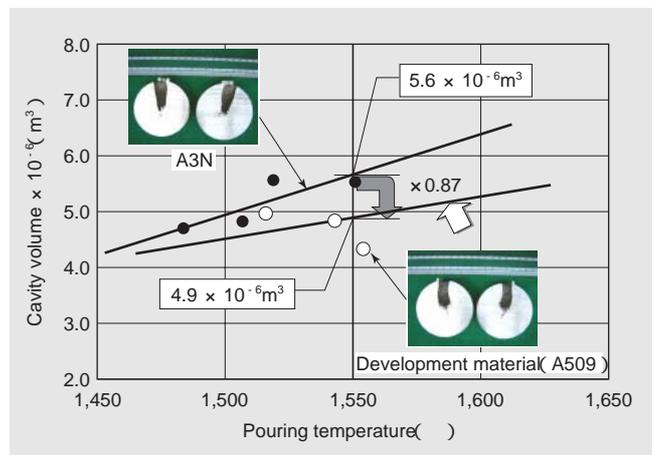


図 11 球状試験片による引け容積測定結果
Fig. 11 Results of cavity volume measurement by spherical test piece.

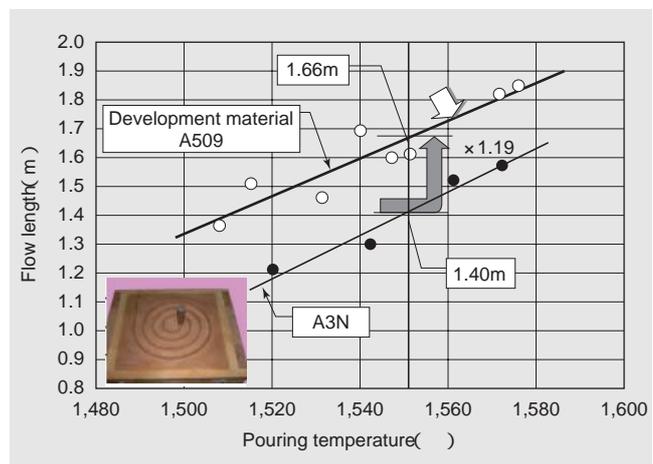


図 12 渦巻き試験片による流動長測定結果
Fig. 12 Results of flow length measurement by swirl test piece.

りも優れた湯流れ性を示し、注湯温度1,550 では、開発材はA3Nと比較して約19%湯流れ性が優れている。

4.3 開発結果

以上の評価結果から、A509 材は優れた特性を持つことが確認され、NSHR®-A5N（以下A5Nと略称）と命名した。

A5Nの主要成分を表3に、主要特性を表4に示す。開発目標に対して、A5Nは、非常に優れた特性を有し、特に耐酸化性は極めて優れた性能を示している。

表3 NSHR®-A5Nの主要成分

Table 3 Chemical composition of NSHR®-A5N. (mass%)

材質No.	C	Si	Cr	Ni	W
開発材 (A509)	0.50	1.50	25.0	20.0	3.00

表4 開発目標とNSHR®-A5Nの主要特性

Table 4 Development targets and characteristics of NSHR®-A5N.

項目	開発目標	NSHR®-A5N
酸化減量	< 0.15kg/m ² at 1,000	0.07kg/m ² at 1,000
高温耐力	60MPa at 1,000	67MPa at 1,000
熱疲労寿命 (拘束率 = 0.25)	750 cycles at 1,000	820 cycles at 1,000
実熱疲労寿命	1,000 cycles at 1,000	1,000 cycles at 1,000
鑄造性	・湯流れ性	A3Nと同等以上 湯流れ: 1.19倍 at 1,550
	・引け性	引け性: 0.87倍 at 1,550

湯流れ、引け性評価における1,550 は注湯温度

5 超薄肉鑄物鑄造技術

耐熱性に優れた排気系用材料を開発しても、鑄造品として成立しなければ価値はない。そこで、湯流れ性に優れたA5Nの特長を生かして、超薄肉耐熱鑄鋼品を安定して製造するための技術開発も進めているが、その開発項目は多岐にわたっている。

例えば、「注湯技術の安定化」のための個別方案ごとのコンピュータ管理技術の開発および高精度注湯技術確立や「湯流れ性の改善」として、減圧吸引鑄造技術や減圧底注ぎ技術の実用化などが挙げられる。

以下、開発技術の内容の一部を紹介する。

5.1 注湯の安定化に関する技術開発

各アイテムごとに異なる模型配列にあった最適な湯口位置とガス抜き位置を設定し、その情報を方案指示コンピュータに登録することにより、注湯時にガス抜き穴と湯口穴あけ用カッターの位置を指示するとともに、湯口位置まで注湯取鍋を誘導し、注湯するシステムを構築した。

この結果、常に安定した注湯が可能になり、鑄造品質の向上にも寄与している。

5.2 湯流れ性の改善に関する技術開発

湯流れ性を改善するには、空気の抵抗が少ない鑄型キャビティ内に勢いよく注湯する必要がある。この課題を解決するために、新たに鑄型減圧底注ぎ重力注湯法を開発した。

図13に鑄型減圧と取鍋の底注ぎを適用した重力注湯法を示す。

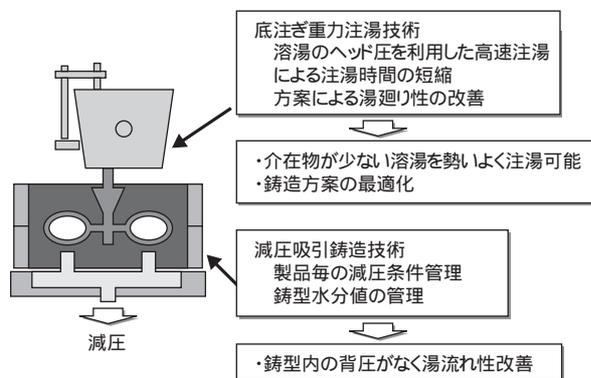


図13 鑄型減圧底注ぎ重力注湯法

Fig.13 Molding decompression and bottom side gravity pouring method.

溶湯が鑄型内を流れる際に、鑄型のキャビティに存在する空気と型内に発生するガスの圧力によって、その流れが抑制される。そこで、鑄型を減圧して鑄型内の空気と発生ガスを強制的に吸引することにより、背圧が低減して、溶湯の流れが大幅に改善するとともに、ガス欠陥を大幅に低減させることができた。

さらに、注湯技術としては、底注ぎ重力注湯法を採用した。

一般的な鑄鉄鑄物ラインでは、管理が容易な上注ぎ注湯法が採用されている。しかしながら、取鍋を傾転させて注湯する上注ぎ注湯法では、溶湯上に浮上したスラグが注湯流とともに鑄型キャビティ内に侵入するために、介在物欠陥を生じやすいこと、かつ注湯速度が傾転角度に依存するために高速での注湯が困難であることから、超薄肉鑄造品を安定して製造するには問題があった。一方、底注ぎ注湯法では、きめ細かな管理が必要であるが、浮上したスラグが注湯流とともに鑄型内に流入することがないため、安定した品質が得られ、かつ取鍋内の溶湯のヘッド圧を利用した高速注湯が可能であることから、超薄肉鑄物の製造に適している。

表5に底注ぎ注湯法と上注ぎ注湯法の比較結果を示す。

表5 底注ぎ注湯法と上注ぎ注湯法の比較

Table 5 Comparison of bottom and top pouring.

注湯方法	底注ぎ注湯法 ストッパー式	上注ぎ注湯法 傾転式
異物混入状況	 ・スラグが浮上	 ・スラグが流入
難度	きめ細かな管理が必要	比較的容易
コスト		
製品品質	(スラグの流入がない)	

この鑄型内減圧吸引鑄造技術と底注ぎ注湯技術を組み合わせることにより、介在物が少ない溶湯を背圧抵抗の

少ない鑄型キャビティ内に勢いよく注湯することができるようになり、A5Nでガス欠陥や介在物欠陥がない高品質でかつ一般肉厚が2.5mmの超薄肉鑄鋼の製造が可能になった。

⑥ 適用事例

今回開発したA5Nを用いて、ターボチャージャーとスーパーチャージャーを搭載した排気量1.4L直噴ガソリンエンジン用マニターボ®の生産を開始した。

さらに、上記超薄肉製造技術を適用した結果、一般肉厚2.5mmのマニターボ®や、部分的に1.5mmの肉厚をもつ超薄肉タービンハウジングの試作にも成功し、2006年以降の生産を予定している。

⑦ 結 論

- 1) 排気系部材用の耐熱鑄鋼材に必要な機能と材料特性の関係を明確にして、それらの特性と成分元素の関係を検討した結果、排出ガス温度超1,000 対応の25Cr-20Ni系耐熱鑄鋼材 (HERCUNITE®-S NSHR®-A5N) を開発し、実用化した。
- 2) 当社従来材のA3Nと比較して、A5Nは、優れた耐酸化性と、耐熱き裂性および同等以上の鑄造性 (引け性と流動性) を示す。
- 3) 減圧鑄造技術の熟成と注湯技術のコンピュータによる一元管理により、A5Nで一般肉厚2.5mmのマニターボ®や、部分的に1.5mmの肉厚をもつ超薄肉タービンハウジングの試作に成功した。



伊藤賢児

Kenji Itoh

日立金属株式会社 素材研究所



林啓次郎

Keijiro Hayashi

日立金属株式会社 素材研究所



早田智臣

Tomomi Souda

日立金属株式会社 九州工場