

排気バルブ用ニッケル基高耐熱合金の開発

Development of Heat-resistant Nickel-based Super Alloy for Exhaust Valve

富永 克彦*
Katsuhiko TOMINAGA
倉田 征児**
Seiji KURATA

清水 哲也**
Tetsuya SHIMIZU
都地 昭宏***
Akihiro TOJI

植田 茂紀**
Shigeki UETA

要 旨

高耐熱排気バルブ用に、従来の高ニッケル耐熱合金に対し、ニッケル含有量を低減した高耐熱合金 NCF5015 を開発した。本合金は、高温強度と耐摩耗性および長時間加熱後の組織安定性に優れた材料である。この特性は、低ニッケル化に伴う強度低下を補うために、析出強化に寄与するガンマプライムの生成量と固溶強化に寄与するモリブデン、タングステン量を、いずれも熱間加工性を損なわない範囲にまで増量したことにより得られた。

ABSTRACT

A heat-resistant super alloy, NCF5015, which has lower nickel content than a conventional high nickel heat-resistant alloy, was developed for use in a highly heat-resistant valve. This alloy has reliable high-temperature strength, abrasion resistance, and phase stability after long-term heating.

These characteristics were obtained by increasing the amount of gamma-prime phase that contributes to precipitation-hardening and the amounts of molybdenum and tungsten that contributes to solid-solution within the range that hot formability is not impaired in order to recover strength by reducing nickel.

1. まえがき

四輪車用の排気バルブには、一般的に高Mn系耐熱鋼21-4N(SUH35)が広く使用されてきたが、この材料は、高温での強度と硬さが充分でないため、高性能エンジンにおいては必要に応じ、バルブフェース面に盛金を施し使用している。Hondaの四輪車用排気バルブ材料は、1979年以降一貫してコスト低減、工程簡素化より盛金を施さないニッケル基耐熱合金を採用してきた。

四輪車用排気バルブに、ニッケル基耐熱合金を採用してきた理由を下記に示す。

- (1)バルブフェース面に盛金が不要なこと。
- (2)高温強度に優れ、バルブステムの細軸化が可能なこと。
- (3)耐酸化性に優れていること。

特に、バルブに対してのコスト低減要求より、量販車に

はNCF3015(30Ni-15Cr)、高性能エンジンには高ニッケル耐熱合金 NCF440(70Ni-19Cr)を採用してきた。近年、排気バルブに対して排ガス規制の強化、燃費効率改善から希薄燃焼による排気温度の高温化が進み、量販車においても高温強度ニーズが高まってきている反面、依然としてコスト低減要求は大きい。そのため、現在の高ニッケル耐熱合金 NCF440 に対しニッケル量を低減させ、コスト低減を図ると共に、同等の高温強度と耐摩耗特性を有する新しいニッケル基耐熱合金 NCF5015 を開発した。

2. 開発のねらい

高強度低ニッケルバルブ開発にあたり、各特性は高ニッケル耐熱合金同等とした。また、下記に示す6項目の開発目標については現行量産材同等と設定した。

* 四輪開発センター

** 大同特殊鋼株式会社

*** 日立金属株式会社

- (1) 常温硬さ
- (2) 800℃の高温硬さ
- (3) 800℃の高温疲労強度
- (4) 800℃で 400hr 加熱後の衝撃値
- (5) 耐酸化性
- (6) 鍛造性

3. 合金設計

開発材 NCF5015 材の特徴は、材料の長時間組織安定性を保ちつつ、ガンマプライム相とニッケル量、モリブデン・タングステン量、クロム量を最適化することにより高耐熱性を達成した点である。ニッケル量を低減しつつ高い疲労強度を得るためには、ガンマプライム相(アルミニウム、チタン、ニオブとニッケルの金属間化合物の総和)を高めることが必要である。しかしながらアルミニウム、チタン、ニオブ量を高めた場合、高温強度が上昇する代わりに熱間加工性が低下する。

現行量産設備においては、30at%を越えるガンマプライム量では熱間加工性は著しく低下する。このため開発材 NCF5015 は熱間加工性確保のために27at%に設定した。クロムは耐酸化性向上のため、モリブデン、タングステンは固溶強化による強度向上のために添加するが、いずれの元素も多量に添加した場合にはシグマ相、Laves相といった脆化相が現れ強度、靱性の低下や熱間加工性の低下を招く⁽¹⁾。NCF5015-Dにおいては、モリブデン、タングステン量はFig. 1 より Laves 相生成防止の観点からそれぞれ 1.0%, 1.5% までの添加量とした。Fig. 2 よりニッケル量が50%の場合、70Ni-19Cr 合金と同等レベルのクロム量 19%では 800℃においてシグマ相が生成することが示唆される。このためクロム量を 15%までの添加とした。

また NCF5015-H においては、オーステナイト基地を固

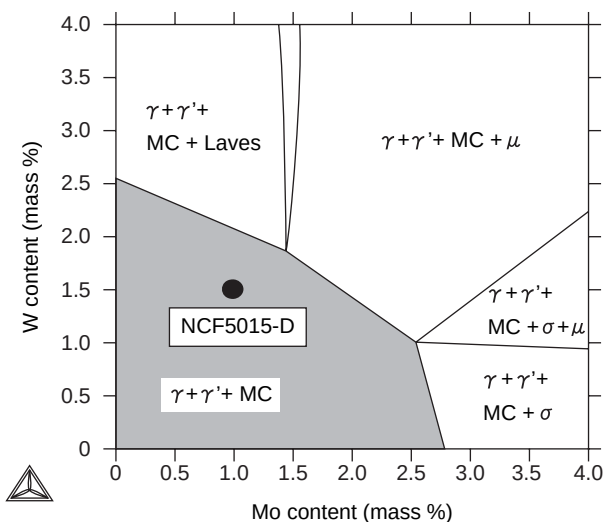


Fig. 1 Phase diagrams of Ni-15Cr-Mo-W after heat treatment at 800 °C

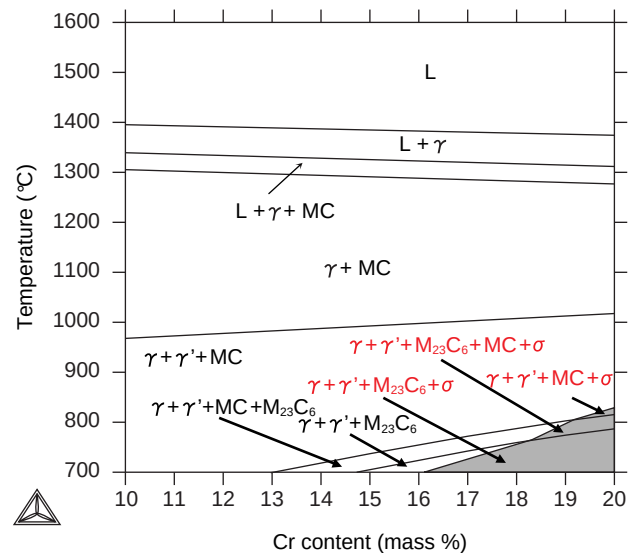


Fig. 2 Phase diagrams of 50Ni-Cr-Mo-W alloy

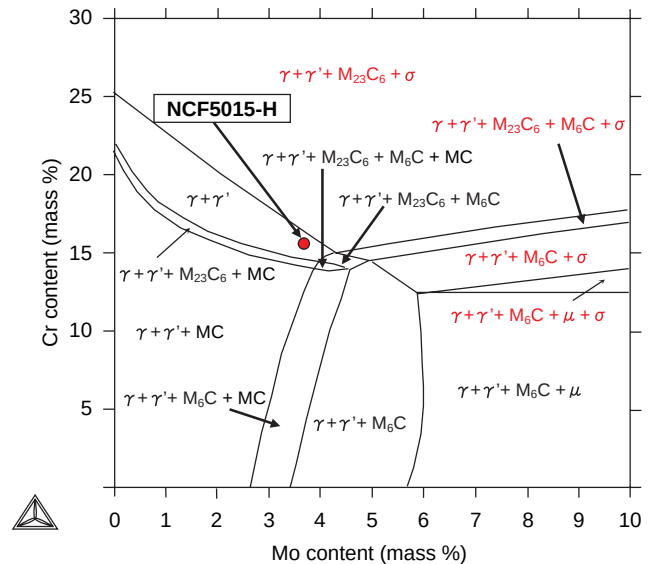


Fig. 3 Phase diagrams of 0.03C-Cr-1.8Al-2.1Ti-1.2Nb-55Ni-Mo-Fe after heat treatment at 800 °C

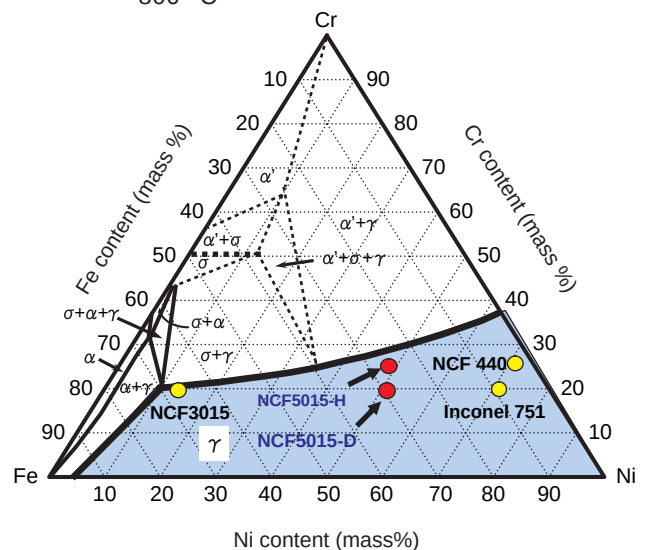


Fig. 4 Phase diagrams of matrix after heat treatment at 800 °C

Table 1 Nominal chemical composition

Material	Composition (mass %)												Theoretical amount (atomic %)
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Fe	Mo	W	Ti	Al	Nb	Others	γ' Ni ₃ (Al, Ti, Nb)
NCF5015-D	0.05	0.1	0.1	50	15	26	1.0	1.5	2.5	1.4	1.3	0.004 B 0.003 Mg	26.7
NCF5015-H	0.03	0.1	0.1	55	16	20	3.7	—	2.1	1.8	1.2	0.004 B 0.004 Mg	27
NCF440	0.05	0.1	0.1	70	19	3	1.0	1.5	2.5	1.4	1.3	0.004 B 0.003 Mg	26.9
Inconel751	0.05	0.1	0.1	72	16	7	—	—	2.3	1.2	1.0		23.4
NCF3015	0.03	0.1	0.1	32	16	47	—	—	2.7	1.2	0.8	0.004 B	23.6

NCF5015-D (Developed material with Daido Steel Co., Ltd.)

NCF5015-H (Developed material with Hitachi Metal, Ltd.)

溶強化し、高温疲労強度を高める効果をもつモリブデンにて検討した。モリブデン量の設定にあたっては、先ずクロムの添加量を耐酸化性を考慮し現行材市場実績から16%に設定した。Fig. 3に示す800℃におけるモリブデン、クロムの状態図からモリブデン添加量は、クロム16%で有害なシグマ相を形成させない最大量として3.7%に設定した。

以上の合金設計から、高温強度と耐酸化に優れ、長時間使用においても強度低下をきたさない、排気バルブ用ニッケル基高耐熱合金の開発をおこなった。ニッケル量を低減した開発材の成分設定値をTable 1に示す。Fig. 4からは、二つの開発材ともに組織的に安定な安定オーステナイト領域に属していることがわかる。

4. 組織の安定性

4.1. 衝撃値

衝撃値はバルブ首部の靱性を示す特性値である。組織の安定性に欠けると、高温で長時間使用後の衝撃特性が低下し、バルブ折損につながる心配がある。Fig. 5に800℃で400時間加熱後の衝撃値を示す。開発材は目標の高ニッケル耐熱合金NCF440、Inconel751より優れた衝撃値が得られた。

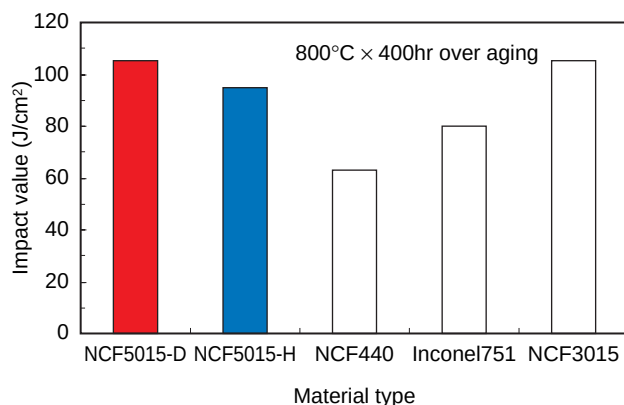
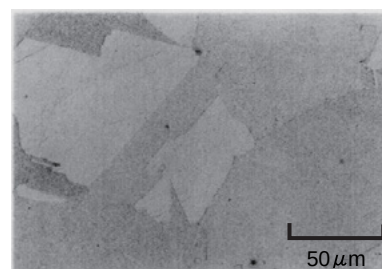


Fig. 5 Impact value of each material type

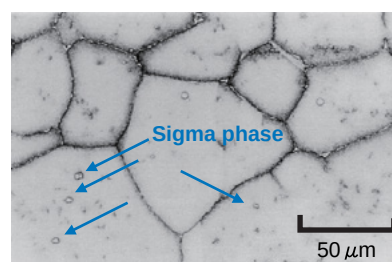
4.2. 組織

開発材の溶体化時効熱処理後、800℃で400hr加熱後の組織写真をFig. 6に示す。組織写真からは、800℃で400hr加熱において強度劣化に有害なFig. 7の例に示されるようなシグマ相の析出物は見られない。



NCF5015-H after solution heat treatment, aging treatment, and over-aging at 800 °C x 400 hr

Fig. 6 Microstructure of developed materials



Trial material after solution heat treatment, aging treatment, and over-aging at 800 °C x 400 hr

Fig. 7 Microstructure of sigma phase

5. 材料特性

5.1. 高温硬さ

高温硬さは、バルブフェースの耐摩耗性を示す重要な特性値である。NCF5015の室温と高温の硬さをFig. 8に示す。

開発材は 800℃の高温において目標の高ニッケル耐熱合金 NCF440 同等の硬さが得られた。特に、バルブフェースの温度域である 600℃以上での高温硬さは、NCF440(70Ni-19Cr)と同等レベル、Inconel751(72Ni-16Cr)に対しては高硬度を有する。従って、開発材は高ニッケル耐熱合金同等の耐摩耗性を有しているといえる。

5.2. 引張り強さ

引張り強さは、バルブ首部の強度を支配する特性値である。バルブ首部温度は 800℃以上に達し、バルブシーティング時には曲げ応力と共に引張り応力が発生する。高出力、高回転エンジンにおいては、オーバーレブ時に過大な応力が発生する⁽²⁾。開発材の室温と高温での引張り特性を Fig. 9 に示す。開発材の引張り強度は、高ニッケル耐熱合金 NCF440(70Ni-19Cr)と同等で、Inconel751(72Ni-16Cr)に対しては、500℃以上の領域で高い引張り特性を有する。

5.3. 疲労強度

高温疲労強度は、バルブ首部の疲労強度を示す重要な特性値である。800℃における回転曲げ疲労試験の結果を Fig. 10 に示す。開発材は 800℃において目標の高ニッケル耐熱合金 NCF440 とほぼ同等な疲労強度が得られた。

5.4. 耐酸化性

排気バルブは、バルブシートとの接触条件で使用され、高温酸化環境、エンジン加速減速の負荷変動に伴う温度サイクル下で使用される。バルブの酸化はアブレッシブスケールを生じ、摩耗を増加させたり、時にはフェース面の吹抜けを発生させる。850℃で 400hr 加熱後の酸化

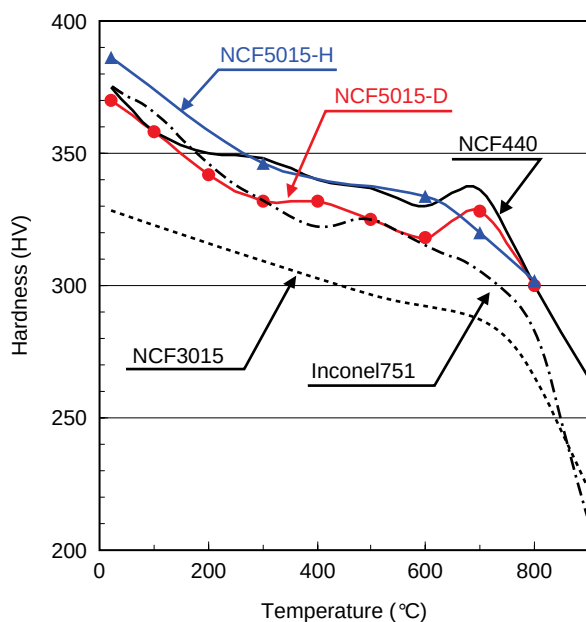


Fig. 8 Hardness at elevated temperature

増量を Fig. 11 に示す。開発材は高ニッケル耐熱合金の NCF440(70Ni-19Cr)と同等であり、Inconel751(72Ni-16Cr)に対しては耐酸化性に優れる。Inconel751 に対しては、アルミ添加増量により Al_2O_3 酸化膜がより機能したものと考えられる。

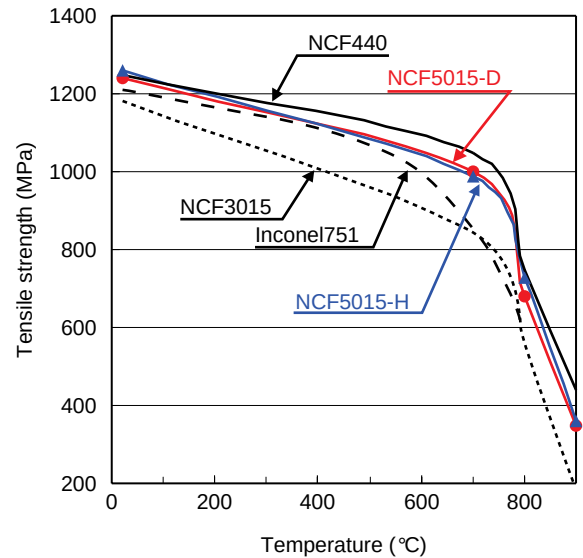


Fig. 9 Tensile properties at elevated temperature

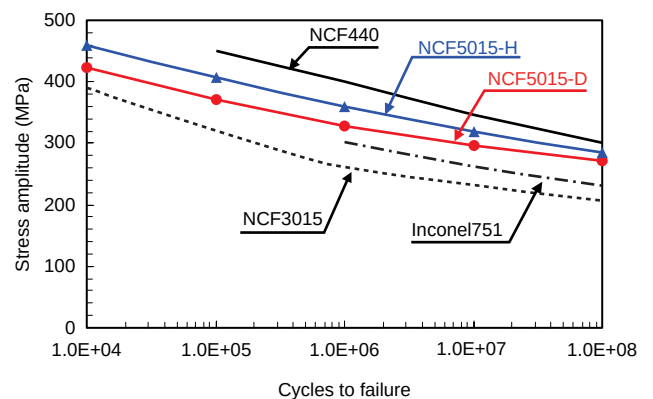


Fig. 10 Fatigue strength at 800 °C

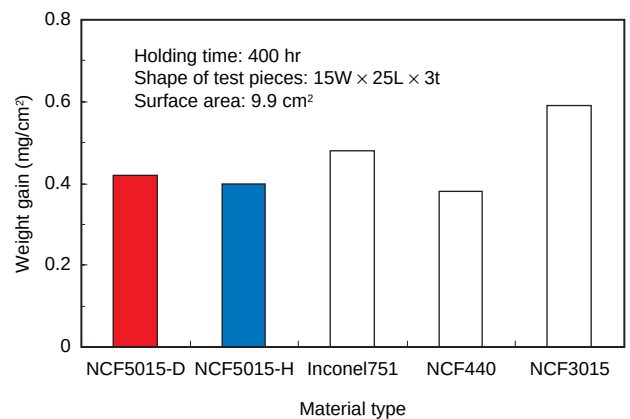


Fig. 11 Oxidation resistance at 850 °C

Table 2 Specific gravity

g/cm ³				
NCF5015-D	NCF5015-H	NCF440	Inconel751	NCF3015
8.09	8.17	8.24	8.25	7.90

5.5. 物理的特性

物理的特性の中では、熱膨張係数はバルブの伸び、すなわちタペットクリアランスに影響を及ぼし、熱伝導率はバルブの熱引き性に、比重はバルブ重量に影響を及ぼす特性である。一般的に熱膨張係数は、熱応力軽減およびタペットクリアランスへの影響を小さくするために小さく、熱伝導率は熱引き性向上から大きく、比重は軽量化から小さい方がよい⁽³⁾。Fig. 12に熱膨張係数、Fig. 13に熱伝導率、Table 2に比重を示す。開発材の熱膨張係数、熱伝導率は高ニッケル耐熱合金と同等特性を有し、比重はニッケル量低減により小さくなっている。

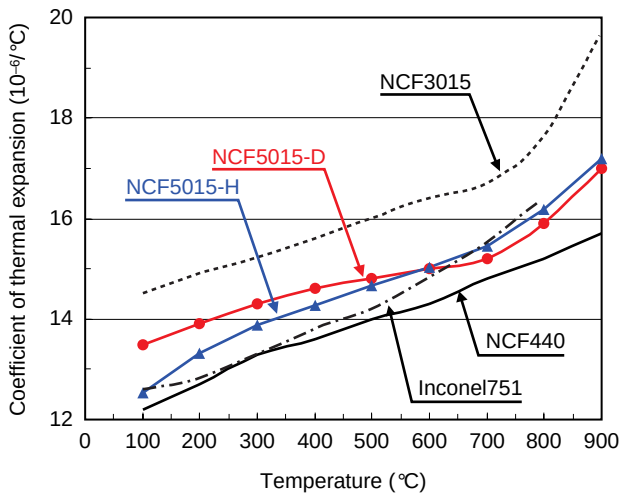


Fig. 12 Coefficient of thermal expansion

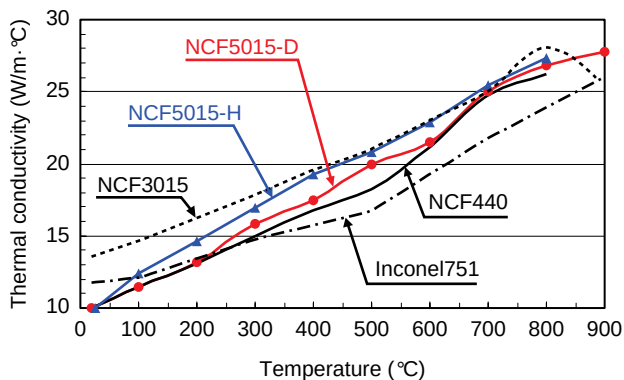


Fig. 13 Thermal conductivity

6. 部品単体特性

6.1. 熱間加工性

熱間加工性は、バルブの成形性を評価するものである。グリーブル試験機による高温高速引張試験結果を Fig. 14 に示す。一般的に、グリーブル試験で絞り値50%以上を得られる温度域が成形可能範囲である。開発材の絞り値50%以上の温度範囲は、250℃以上有しており現行量産材同等の熱間加工性を有する。

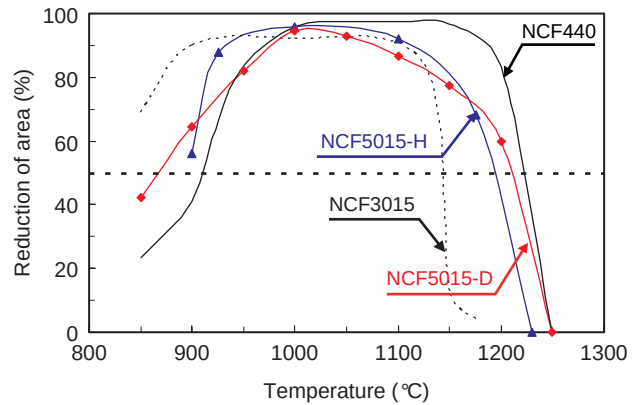


Fig. 14 Hot forgeability

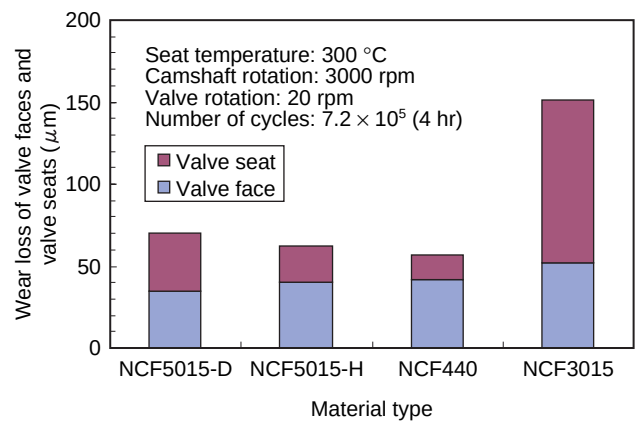


Fig. 15 Valve sliding examination

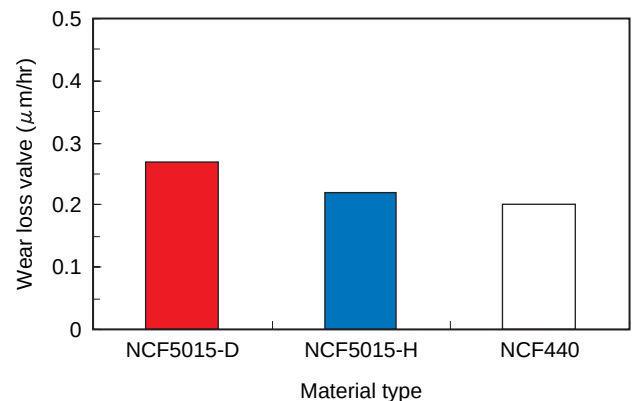


Fig. 16 Wear loss of exhaust valve faces

6.2. 部品単体特性

バルブ単体摺動試験結果をFig. 15に示す。開発材は、高ニッケル耐熱合金 NCF440 同等の耐摺動特性を有する。現行量産材 NCF3015 に対しては、約半分以上に摩耗は減少する。

6.3. 実機耐久性

2.4L 無鉛エンジンにて、7100rpm で 100hr 運転後のバルブフェース摩耗量を Fig. 16 に示す。開発材は、高ニッケル耐熱合金 NCF440 同等の実機耐摩耗性を有する。

7. まとめ

近年の排気バルブ材への要求特性を再検討し、省資源低コスト型の NCF5015 材を開発した。開発材の特性をまとめると下記の通りである。

- (1) 盛金が不要で、長時間加熱後も組織安定性を有するニッケル基高耐熱合金である。
- (2) 高温での耐摩耗性及び疲労強度は、高ニッケル耐熱合金同等である。
- (3) 低ニッケルを実現しつつ、熱間加工性を低下させない範囲でガンマプライム相の生成量を増加させ、合わせて固溶強化元素であるモリブデン、タングステンを最適添加させたことを特徴とする。
- (4) 本合金を適用することにより、従来の高ニッケル耐熱合金に対し約16%のコスト削減が図れた。当開発材は 2008 年モデルの ACCORD より量産を開始した。

参考文献

- (1) 森永正彦, 湯川夏夫, 足立裕彦: d 電子合金設計理論, 鉄と鋼, 第 11 号, p.159(1985)
- (2) 佐藤克明, 坂勉, 大野丈博, 野田俊治: 排気バルブ用低ニッケル耐熱合金の開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.9, p.185-190
- (3) 萩原好敏, 石田正雄, 岡智生: 排気バルブ用ニッケル基耐熱合金の開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.4, p.63-72

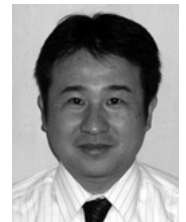
■ 著 者 ■



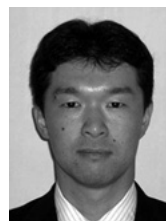
富永 克彦



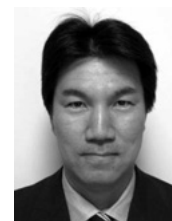
清水 哲也



植田 茂紀



倉田 征児



都地 昭宏