

## 技術資料

## Technical Data

## 排気バルブ用 Ni 基耐熱合金 NCF5015D の高温特性

大崎元嗣\*<sup>1</sup>, 倉田征児\*<sup>2</sup>, 植田茂紀\*<sup>1</sup>, 露無崇志\*<sup>3</sup>

## High Temperature Properties of Heat-Resistant Nickel-Based Superalloy, NCF5015D, for Exhaust Valves

Mototsugu Osaki, Seiji Kurata, Shigeki Ueta, and Takashi Tsuyumu

## Synopsis

Ni-based superalloy, JIS NCF751 has been conventionally used for exhaust valves in high performance automotive engines owing to better high temperature strength than heat resistance steels. On the other hand, Daido's originally developed NCF440(70Ni-19Cr-1.4Al-2.5Ti-1.3Nb-3Fe-1.5Mo-1W:mass%) which was enhanced in high temperature strength has been also used for more advanced engines. However, the material cost of NCF440 is expensive due to high Nickel content so that demand to reduce the cost has been high. Therefore, we developed NCF5015D(Fe-50Ni-15Cr-1.4Al-2.5Ti-1.3Nb-1.5Mo-1W) of which Nickel content is lower than that of NCF440, but it has excellent high temperature strength as well as NCF440. NCF5015D is the cost effective superalloy and has already been applied to new released cars since 2008.

## 1. 緒 言

エンジン用排気バルブには、一般的に $\gamma$ 系耐熱鋼 21-4N (JIS SUH35) が広く使用されているが、この材料はバルブフェース部の耐摩耗性が不十分であるため、Co 基合金であるステライトの硬化肉盛りが施される場合がある<sup>1)</sup>。また、一部の高性能エンジンには JIS NCF751 のように、より高温強度の高い $\gamma'$ 相を析出させた、析出強化型 Ni 基超合金が適用されている<sup>2)</sup>。さらに、当社では NCF751 に対し $\gamma'$ 生成元素である Ti, Al, Nb および Mo, W の固溶強化元素の最適化により、高温強度特性を高めた NCF440 (70Ni-19Cr-1.4Al-2.5Ti-1.3Nb-3Fe-1.5Mo-1W) を開発し、実用化している<sup>3)</sup>。Ni 基超合金は耐熱鋼に比較し、高温における耐摩耗性、および機械的特性に優れており、特に耐摩耗性についてはバルブフェース部の肉盛レスが可能であるメリットを有しているものの、反面 Ni を多量に使用するため耐熱鋼

に比較し材料コストが高いという問題がある。

そこで、NCF440 において高コスト化の原因である Ni 量を低減させつつ、NCF440 同等の高温特性を有する排気バルブ合金 NCF5015D (Fe-50Ni-15Cr-1.4Al-2.5Ti-1.3Nb-1.5Mo-1W) を開発した。本報では NCF5015D の化学成分、特性について報告する。

## 2. 合金組成

NCF5015D の化学成分を Table 1 に示す。高い疲労強度を得るためには、 $\gamma'$ 相の生成元素である Al, Ti, Nb 量を高めることが必要である。しかし、Al, Ti, Nb 量の増加は $\gamma'$ 相の析出量増加により高温強度は上昇するものの、 $\gamma'$ 相の固溶温度上昇およびマトリックスの融点低下により、熱間加工可能な温度域が縮小し鍛造材として成立させるのは困難となる。そのため、NCF5015D では熱間加工性確保のため量産実績のある NCF440 の Al, Ti, Nb 量と同等とした。

2010 年 11 月 17 日受付

\*1 大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research &amp; Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

\*2 大同特殊鋼(株)特殊鋼事業部 (Special Steel Div., Daido Steel Co., Ltd.)

\*3 (株)本田技術研究所 四輪開発センター (Automobile R&amp;D Center, Honda R&amp;D Co., Ltd.)

Table 1. Nominal chemical composition.(mass%)

Material	C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	Ti	Nb	Fe	Mo	W
NCF5015D	0.05	0.1	0.1	15	50	1.4	2.5	1.3	Bal	1.5	1
NCF440	0.05	0.1	0.1	19	Bal	1.4	2.5	1.3	3	1.5	1
NCF751	0.05	0.1	0.1	16	Bal	1.2	2.4	1.0	7	-	-

また、Fig.1 に NCF440 の成分をベースにし、1073 K における析出相の相率に及ぼす Ni 量の影響について、

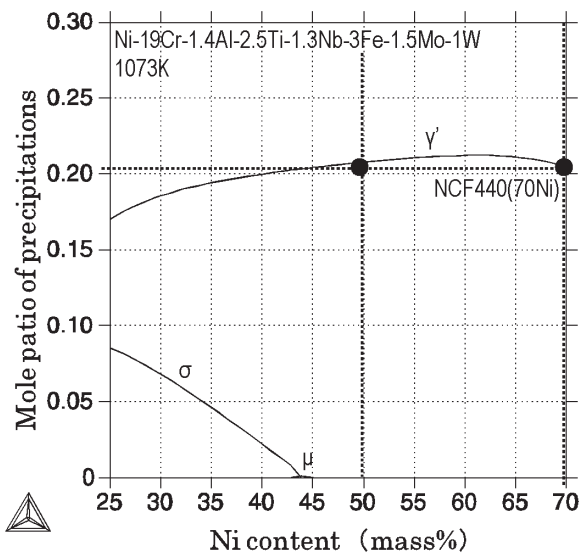


Fig.1. Calculated phase diagram on relation of  $\gamma'$  precipitation and Ni content at 1073 K.

平衡状態図計算ソフト Thermo-Calc (ver.Q, database : Ni (Thermotech database ver.7)) で計算した結果を示す。Ni 量の増加とともに  $\gamma'$  量も増加するものの、50% 以上では増加量が鈍化し飽和状態となる。すなわち、Ni 量を 50% まで低減しても NCF440 と同等レベルの  $\gamma'$  量を確保できる可能性があることが判明した。そこで、NCF5015D では目標とする NCF440 同等の高温強度を確保するために、Ni 量を 50% とした。

Fig.2 に 50Ni-Cr-Mo-W-1.4Al-2.5Ti-1.3Nb-Fe 合金をベースに、横軸を Cr とした計算平衡状態図を示す。Cr は耐酸化性向上のため高温材料には不可欠な添加元素であるが、多量の添加は  $\sigma$  相の析出を促進する。 $\sigma$  相は脆化相であり、強度特性の低下原因となるため、NCF5015D では Cr 量を  $\sigma$  相析出の可能性がない 15% とした。Fig.3 には横軸を Mo 量、縦軸を W 量とした、1073 K における計算平衡状態図を示す。固溶強化元素である Mo、W はともに添加によって強度特性の向上に寄与するものの、Cr と同様に多量の添加により  $\mu$ 、Laves、 $\sigma$  相などの脆化相の析出を促進するため、NCF5015D で

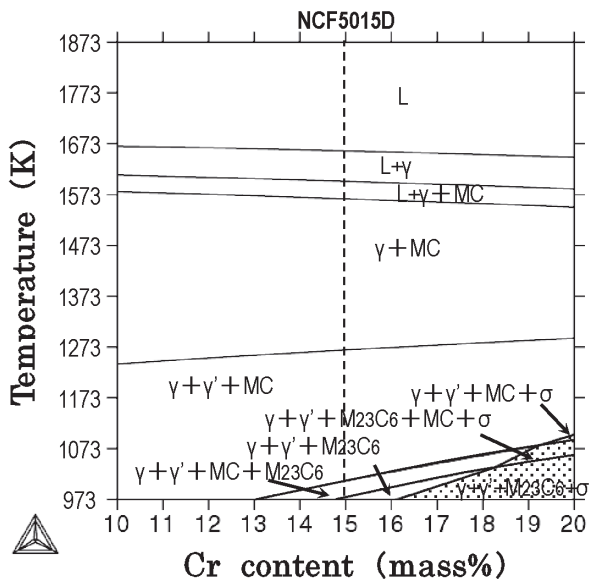


Fig.2. Calculated phase diagram of 50Ni-Cr-Mo-W alloy.

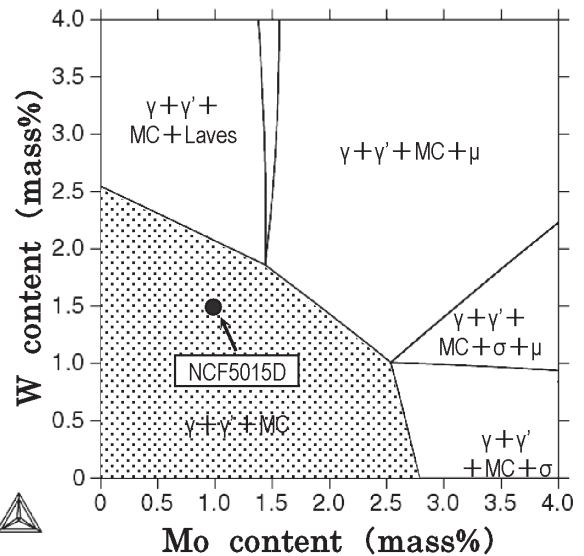


Fig.3. Calculated phase diagram of Ni-15Cr-Mo-W at 1073 K.

は強度特性・相安定性の観点から Mo 量を 1%，W 量を 1.5% とした。

上記の観点から合金組成を設計した NCF5015D は、高い高温強度と相安定性との両立を狙った組成となっている。

### 3. 実験方法

Table 1 に記載の合金成分を真空溶解炉にて、50 kg のインゴットに溶製し、熱間鍛造によって鍛伸材を作製した後、各種の熱処理を施した。熱処理は 1273 K で 1.8 ks、油冷の固溶化処理（以下 ST）を行った後、1023 K で 14.4 ks、空冷の時効処理（以下 AG）を実施し、引張特性および高温疲労特性、高温硬さ、シャルピー衝撃試験、耐酸化性、各物理特性の調査を行った。また、長時間の使用環境を模擬し 1073 K で 1440 ks の長時間熱処理（以下、過時効処理）を行い、組織安定性を光学顕微

鏡および SEM（走査型電子顕微鏡）によるマイクロ組織観察で確認した。

## 4. NCF5015D の特性

### 4. 1 ミクロ組織

NCF5015D の ST、AG 後および過時効処理後の光学顕微鏡マイクロ組織を Fig.4 に示す。NCF5015D は、時効処理後の組織は母相  $\gamma$  と炭化物の組織を呈しており、また光顕レベルでは確認できないものの、粒内には微細な  $\gamma'$  相が析出していることを X 線回折で確認している。さらに過時効処理後の組織では  $\gamma$  相の結晶粒内に、非常に微細な析出物が認められるようになる。NCF5015D および NCF440 の過時効処理後の SEM 観察組織を Fig.5 に示す。Fig.4 で粒内に認められた微細析出物はナノレベルの粒状  $\gamma'$  相であり、過時効により成長したものと

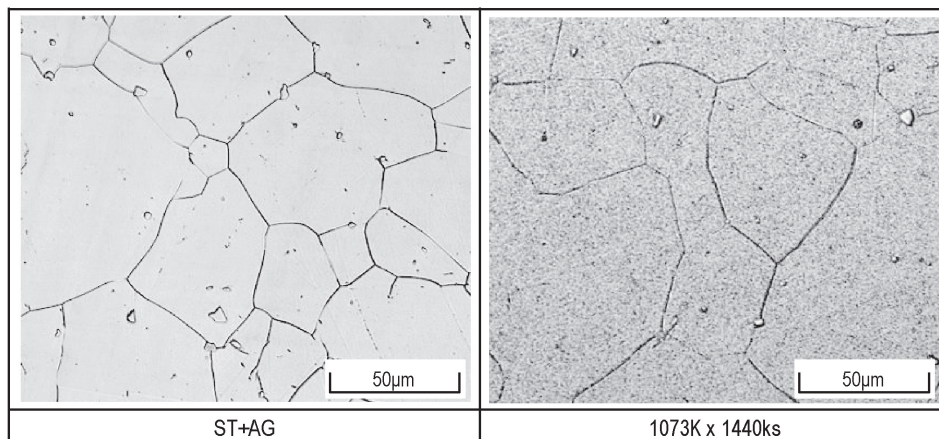


Fig.4. Microstructure of NCF5015D after ST(1273 K,1.8 ks) and AG(1023 K,14.4 ks) treatment.

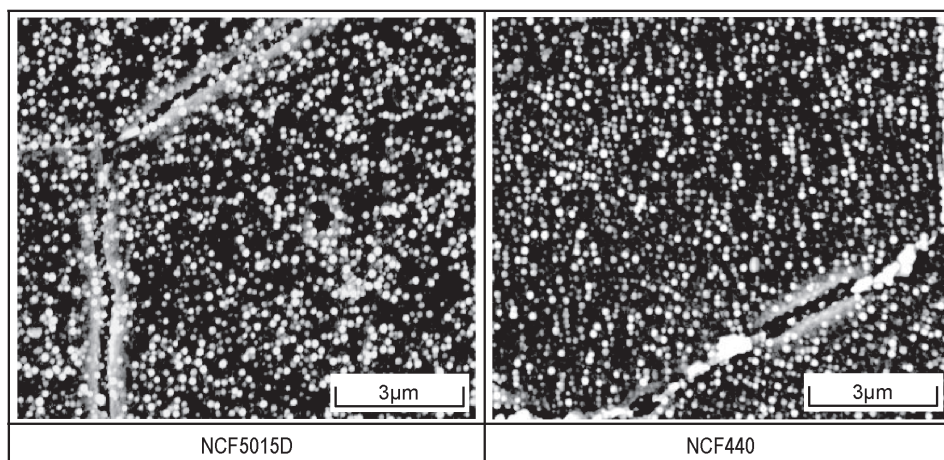


Fig.5. SEM image of NCF5015D and NCF440 for 1440 ks at 1073 K in addition to ST+AG condition.

考えられる。また、NCF5015Dの $\gamma'$ 相は、NCF440と比較し、形状・サイズとも同レベルであり、合金設計の狙いどおりとなっている。いずれの合金も過時効後に脆化相である $\sigma$ 相やその他の $\gamma'$ 以外の析出物は認められず、組織安定性は良好である。

#### 4. 2 高温強度特性

バルブの首部温度は実用において1073 K以上に達し、バルブが閉じる時には曲げ応力と引張応力が同時にバルブに付加される<sup>4)</sup>。これらの応力は繰り返し付加されるため、引張強度のみならず疲労強度も重要となる。そのため、バルブ材料では高温の引張強度特性および曲げ疲労特性は高温特性を評価するために不可欠な特性で

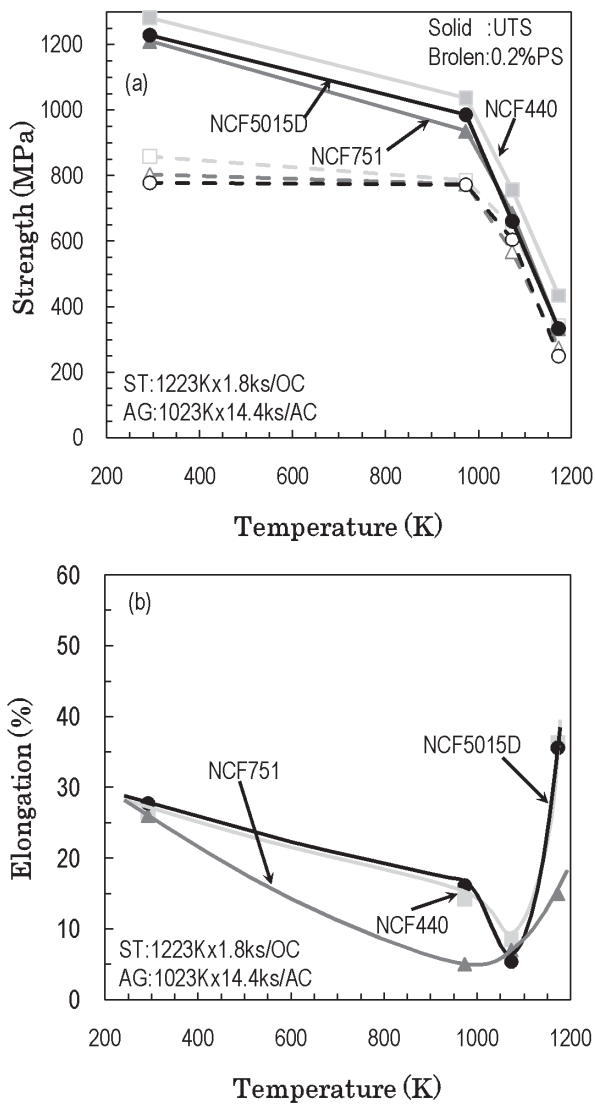


Fig.6. Tensile properties at elevated temperature, (a) strength and (b) elongation.

ある。Fig.6に開発材の室温と高温での引張特性を示す。NCF5015Dの引張強度は、高Ni合金であるNCF751に比較し特に773 K以上で高い強度を有し、NCF440と同等レベルの特性である。Fig.7には小野式回転曲げ疲労試験による1073 Kの疲労特性を示す。NCF5015Dの1073 K - 10<sup>8</sup>回疲労強度は、NCF440より若干劣るものの高い値を有し、NCF751同等以上の疲労特性を有する。NCF5015Dは成分設計段階で目標としたNCF440に近いレベルの高温強度特性を有することが確認できる。

#### 4. 3 高温硬さ

高温硬さはバルブシートとの接触面であるバルブフェース部の耐摩耗性を示す重要な指標である。Fig.8にNCF5015D, およびNCF440, NCF751の室温から1173 Kまでの硬さの変化を示す。NCF5015DはNCF440とほぼ同等レベルの高温硬さを有する。

#### 4. 4 シャルピー衝撃特性

衝撃値はバルブ首部の靱性を示す特性値であり、組織の安定性に欠けると使用中に早期のバルブ折損につながる恐れがある。Fig.9にNCF5015Dの室温および1023 Kにおける衝撃値を示す。NCF5015DはNCF440, NCF751よりも高い衝撃値を有する。

#### 4. 5 耐酸化性

バルブの酸化は摩耗や減肉による強度低下を促進さ

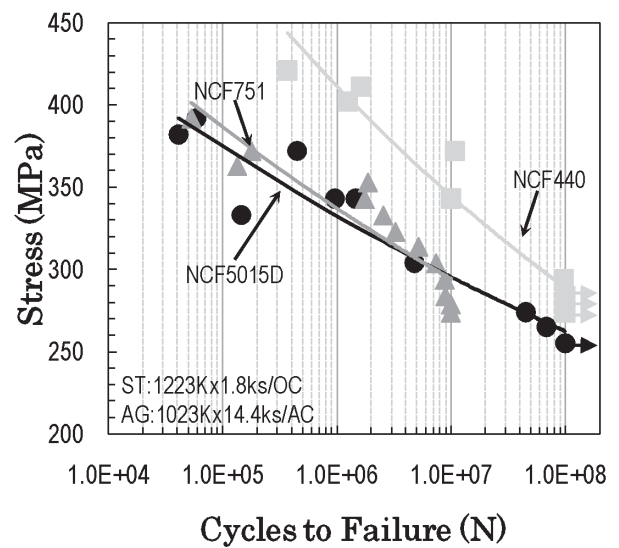


Fig.7. Fatigue strength properties at 1073 K.

せ、時にはフェース面の吹抜けを発生させる。そのため、排気バルブは高温酸化環境、およびエンジン加減速の負荷変動に伴う温度サイクル下で優れた耐酸化性が要求される。Fig.10 に 1123 K で 1440 ks 加熱後の酸化増量を測定した結果を示す。NCF5015D の高温耐酸化性は NCF440 と同等レベルであり、優れた耐酸化性を有する。

#### 4. 6 耐鉛腐食性

先進国においては、無鉛ガソリンが主に使用されているものの、世界各地では有鉛地区も未だ存在し、排気バルブ材でも、地区によって、高温の耐鉛腐食性が要求さ

れることがある。Fig.11 に 1153 K における耐鉛腐食性の試験結果を示す。NCF5015D は Ni 量を低減させたため、高 Ni 材の NCF440 に比較し耐鉛腐食性は低下している。そのため、有鉛地区においては NCF5015D の使用が制限される。

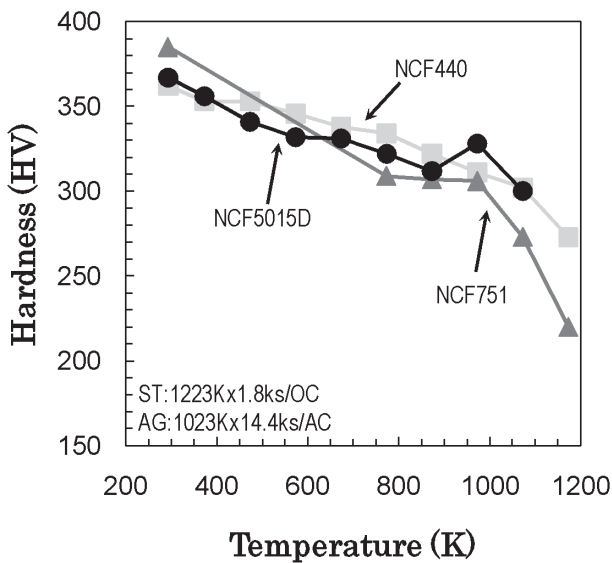


Fig.8. Vickers hardness at elevated temperature.

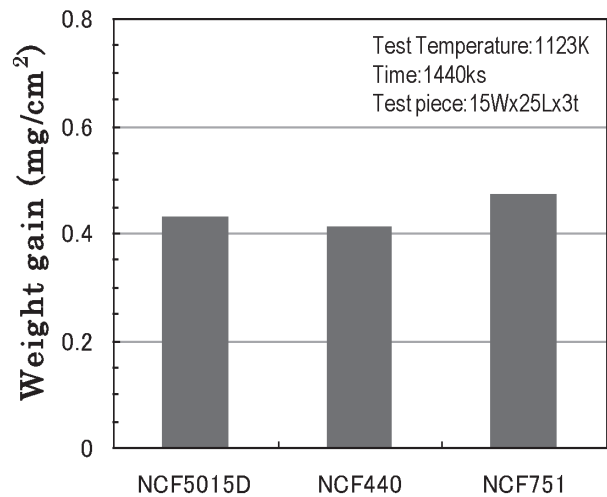


Fig.10. Oxidation resistance at 1123 K.

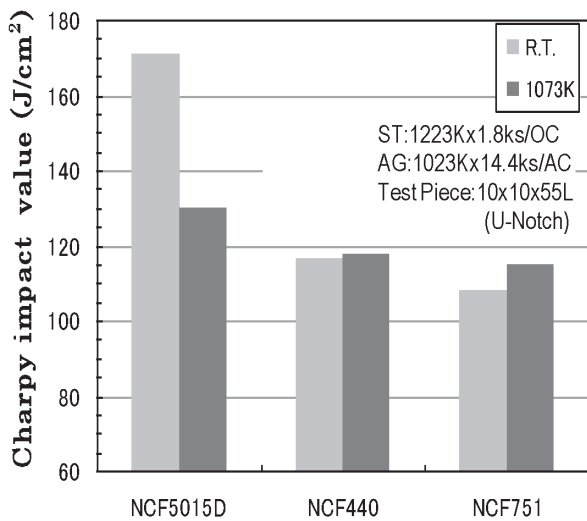


Fig.9. Impact values.

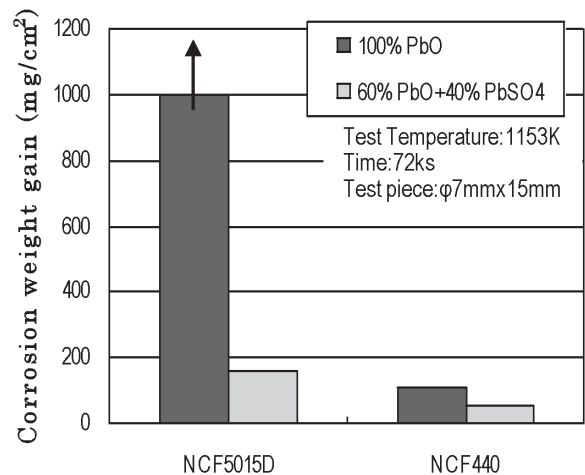


Fig.11. Pb attack resistance at 1153 K.

### 4. 7 各物理特性

Fig.12, Fig.13 に NCF5015D の室温からの平均熱膨張係数および熱伝導率をそれぞれ示す。熱膨張係数は使用時のバルブの伸び、すなわちロッカーアームとのクリアランスに影響を及ぼす物理特性であり、熱膨張係数が小さいほど熱応力軽減および部品設計への裕度に影響する。また、熱伝導率はバルブの熱引き性に影響する特性であり、バルブの高温化を抑制するためには熱引き性向上の観点から熱伝導率は大きい方が良い。NCF5015D の熱膨張係数は NCF440 より若干高くなるが、問題となる

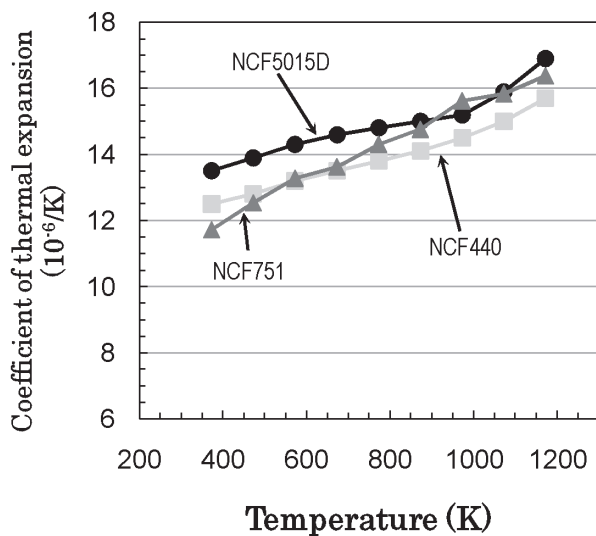


Fig.12. Mean coefficient of thermal expansion from room temperature.

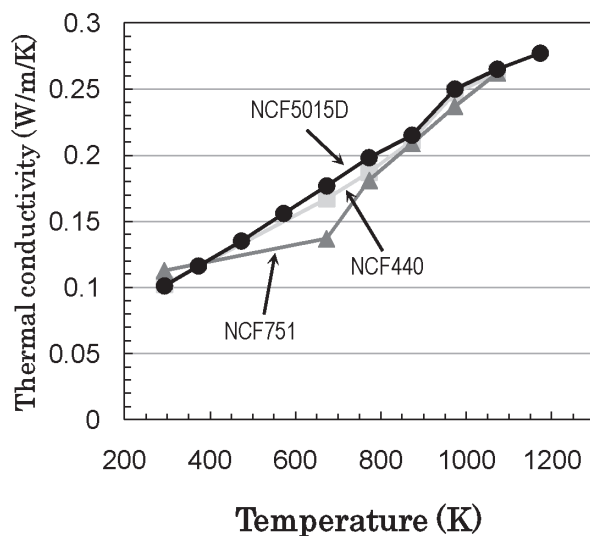


Fig.13. Thermal conductivity.

レベルではない。一方の熱伝導率は NCF440 と同等レベルである。

## 5. 実機への適用

NCF5015D は 2008 年より本田技研工業(株)にて実機搭載されている。

## 6. 結 言

今回開発した NCF5015D は、NCF440 (70Ni) の Ni 量を 50 % まで低減させても  $\gamma'$  相析出量がほぼ変わらないという平衡状態図計算結果をもとに設計している。実際に NCF440 とほぼ同等レベルの優れた高温特性を有することが確認され、省資源型のコストパフォーマンスに優れた合金が開発できた。

(文 献)

- 1) John F. Kocis and Wallace M. Matelock: METAL PROGRESS, 8(1975), 58.
- 2) M.Kiriyama and T.Sasakura: Valvetrain System Design and Materials, 14-15(1997), 19.
- 3) Y.Takagi, M.Okabe, T.Likudo and S.Isobe: Stahl und eisen, 14(1990), 138.
- 4) H.Heisler: Advanced engine technology, Book of SAE International, 1995, 11.