

技術資料



Technical Data

高温排気ガス対応タービンハウジング用 オーステナイト系耐熱鋳鋼 Starcast® DCNX1

高林宏之*, 植田茂紀*

Starcast® DCNX1 : Austenitic Cast Steel for High Temperature Automobile Engine Gas Systems

Hiroyuki Takabayashi and Shigeki Ueta

Synopsis

In order to reduce the emission of exhaust gas and fuel consumption, using turbocharger systems and theoretical air-fuel ratio combustion systems should be one of the most effective ways. However, these systems lead to rise of the maximum gas temperature from 1173 K to 1323 K in gasoline engine. For the turbocharger systems, cast materials have been used mainly. So far Daido has developed some ferritic and austenitic cast steels for the turbine housing which is a casing for the turbine in the turbo charger. Although the previous developed austenitic cast steels, for instance DCN4(26 %Ni-2 %W) or DCN5(26 %Ni-4 %W), has excellent thermal fatigue resistance to be serviceable up to 1323 K, they are expensive due to including high Ni and W contents. Newly developed austenitic cast steel DCNX1(21 %Ni-3 %W) is reduced Ni and W from DCN5 to reduce in the cost, but DCNX1 has good thermal fatigue resistance comparable to DCN5 by increasing of $M_{23}C_6$ to reduce coefficient of the thermal expansion and to enhance the high temperature strength instead of reducing Ni and W contents.

1. 緒 言

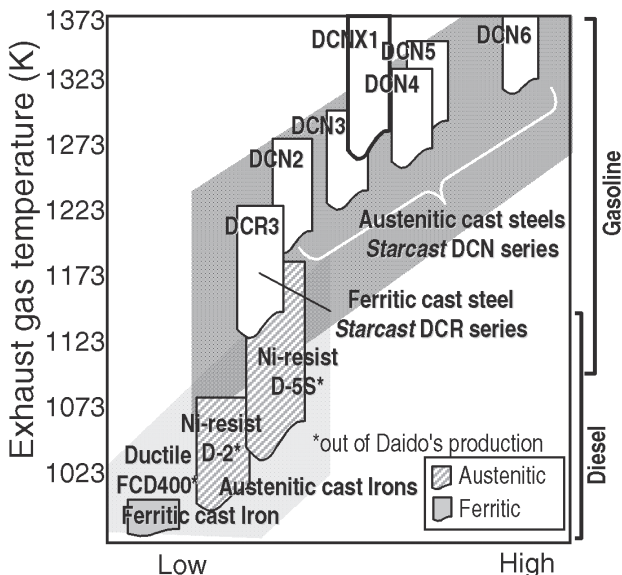
近年、地球温暖化現象は悪化の一途を辿っており、温暖化ガスである CO₂ の削減は世界的な主要課題となっている。特に、日常生活に最も密着した CO₂ 排出源である自動車は、燃焼効率改善や小型軽量化による低燃費化などにより、飛躍的に改善がなされている。具体的な手段として、ハイブリッド化、電動化の導入が挙げられる。一方で、従来のガソリン車では、ターボチャージャーを利用したエンジン排気量のダウンサイジングが挙げられる。ターボチャージャーは出力を落とさずエンジンの小型軽量化が可能であり、身近な改善ツールとして需要が伸びている。一方で、エンジン温度が上昇する

うえ、燃焼効率改善のためにストイキ燃焼化の傾向にあり、排気ガス温度はさらに高温化すると予想される。このためターボチャージャーの排気側部品は、温度的により過酷な環境となる。排気ガス温度として 1273 ~ 1323 K にもなる高温域で利用可能な材質は少ない。これまでに当社では、Table 1 および Fig.1 に示すように、タービンホイールが入る部品であるタービンハウジング用に、排気ガス温度ごとに対応したフェライト系およびオーステナイト系耐熱鋳鋼 Starcast シリーズを開発、実用化してきた。しかしながら、1273 ~ 1323 K の高温域を担う DCN4 (26 %Ni-2 %W)、DCN5 (26 %Ni-4 %W)、DCN6 (40 %Ni-6 %W) といった鋼種は、比較的高価で価格変動の大きい Ni, W 含有比率が高く、コスト安

2010 年 11 月 15 日受付

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

定性に問題を有していた。そこで、Ni, W 減量によりコスト安定性に優れ、1323 K の高温域において DCN4, DCN5 より優れた耐熱特性を有するオーステナイト系耐熱鋳鋼 DCNX1 を開発したのでその特性について紹介する。



Total production cost INDEX

Fig.1. Estimated service temperature of Daido's heat resistant steel Starcast series.

2. 実験方法

2. 1 供試材

Table 2 に供試材の化学成分を示す。新材料の開発に当たり、基本組成はオーステナイト系耐熱鋳鋼である Starcast DCN4, DCN5 をベースに、Ni を 26 % から DCN3 相当の 21 % に低減し、W は主要な耐熱性改善元素であるため DCN4, DCN5 の中間の 3 % として、高温強度、熱疲労特性で DCN4, DCN5 と同等以上の特性を得ることを目的とした。

従来知見より排気系部品の材料開発には熱疲労特性の向上が重要であり、そのためには高温強度を高めて熱膨張係数を低くすることが有効であることが知られている¹⁾。また、植田らは高温強度と熱膨張係数に及ぼすマトリックス成分、NbC および Cr, W からなる M₂₃C₆ 量の影響を調査し、それぞれの特性について重回帰式を導出して、Ni 添加は熱膨張に、W 添加は熱膨張と高温強度の改善に有効であることが報告されている²⁾。一方、炭化物は高温強度および熱膨張係数共に Ni および W と同様の影響を及ぼす。そこで、Ni, W 低減の代替手段として炭化物の増量を検討した。重回帰式によると、その影響度は M₂₃C₆ よりも NbC の方が大きく、NbC の増量が有効な手段と考えられる。しかし、木原らは 25Ni-25Cr 鋳鋼において共晶 NbC を晶出させると 1311 K における

Table 1. Chemical composition of Daido's heat resistant steel Starcast series.

Type	Alloy	Chemical composition (mass%)						
		C	Si	Ni	Cr	W	Nb	Fe
Ferrite	DCR3	0.35	1.8	-	19.0	0.7	1.5	Bal.
Austenite	DCN3	0.27	1.0	21.0	25.0	1.0	1.0	Bal.
	DCN4	0.30	1.0	26.0	25.0	2.0	1.0	Bal.
	DCN5	0.30	1.0	26.0	25.0	4.0	1.0	Bal.
	DCN6	0.30	1.0	40.0	25.0	6.0	1.5	Bal.

Table 2. Chemical composition of test steels.

Alloy	Chemical composition (mass%)						
	C	Si	Ni	Cr	W	Nb	Fe
DCNX1	0.40	1.5	21.0	25.0	3.0	1.0	Bal.
DCN4	0.30	1.0	26.0	25.0	2.0	1.0	Bal.
DCN5	0.30	1.0	26.0	25.0	4.0	1.0	Bal.

クリープ破断寿命が延びるものの、過剰に Nb を添加して $M_{23}C_6$ がほとんど形成されなくなると逆に低寿命になると報告しており³⁾、そのため Nb 量は増量せず、C 量を増やして $M_{23}C_6$ 型の Cr 炭化物量を増加させることとした。Thermo-Calc 状態図計算ソフトを用いて導出した各合金の応力除去熱処理温度 1323 K における平衡状態でのオーステナイト相固溶成分および析出物の種類と量を Table 3 に示す。開発合金 DCNX1 は、DCN4、DCN5 対比で $M_{23}C_6$ を増量しているため、オーステナイト相中の固溶 Cr は若干減少するものの 20% 以上を確保しているが、さらに耐酸化性向上を狙い Si を増量した。

2. 2 試験方法

供試材は大気中にて高周波誘導溶解し、供試部が直径 22 mm、長さ 160 mm 棒状の JIS G 0307 の B 号舟型比例形状、および外径 65 mm、底面径 31mm、エッジ角 30°、

厚さ 15 mm の円盤形状のコールドボックス製砂型に減圧吸引铸造した。続いて 1323 K で応力除去熱処理を施した後に、各試験に供した。棒状素材からヤング率、熱膨張係数、引張、酸化、クリープラプチャー測定用の試験片を、円盤状素材から熱疲労試験片を採取した。

各試験における試験サイズおよび試験方法は以下のとおりである。いずれの試験片も実機を想定して試験部の外表面と柱状晶が垂直の関係になるよう切り出している。

・ヤング率

JIS Z 2280 準拠、横共振法、厚さ 2 mm、幅 16 mm、長さ 60 mm、昇温速度 0.17 K/s

・熱膨張係数

示差膨張分析法、直径 ϕ 5 mm、長さ 19 mm、昇温速度 0.08 K/s、標準試料アルミナ

室温からの平均熱膨張係数を算出

Table 3. Chemical composition of test steels and amount of carbide which were calculated with Thermo-Calc.

Alloy	Chemical composition in matrix (mass%)							Amount of carbide(mol%)	
	C	Si	Ni	Cr	W	Nb	Fe	$M_{23}C_6$	NbC
DCNX1	0.03	1.6	22.7	22.5	2.0	0.03	Bal.	6.6	1.2
DCN4	0.04	1.3	27.3	23.6	1.5	0.03	Bal.	3.8	1.1
DCN5	0.04	1.3	27.5	23.5	3.2	0.02	Bal.	4.4	1.1

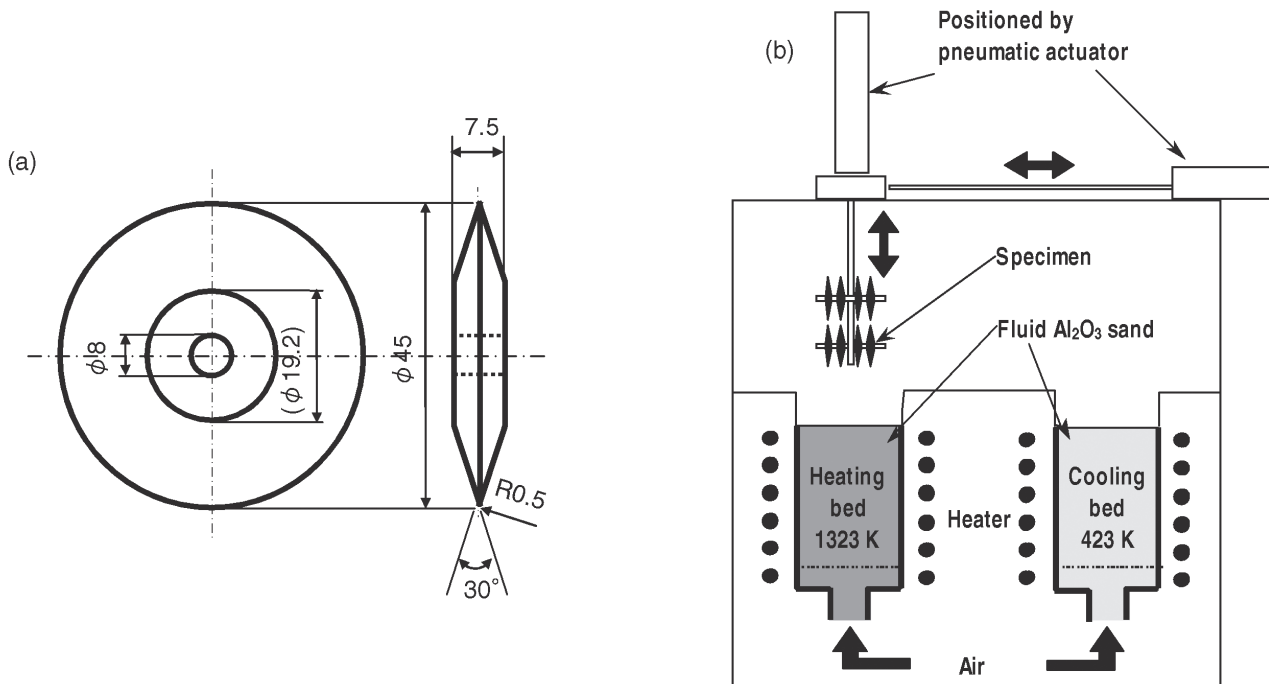


Fig.2. Experimental apparatus and conditions for thermal fatigue test.(a) specimen dimension, (b) fluidized bed.

・引張試験

JIS G 0567 準拠, 平行部直径 ϕ 8 mm, 標点間距離 40 mm, II 形試験片

・繰返し酸化試験

JIS Z 2282 準拠, 厚さ 3 mm, 幅 15 mm, 長さ 25 mm
1273 K, 1.8 ks 保持および室温 1.8 ks 保持を 1 回とし,
200 回実施

・クリープラプチャー試験

JIS Z 2272 準拠, 平行部直径 ϕ 6 mm, 標点間距離 30 mm

・熱疲労試験(Fig.2)

JIS Z 2278 準拠, 外径 ϕ 45 mm, 中央肉厚 7.5 mm の円盤形試験片

低温と高温の二つの流動床炉を用いた内部拘束型の熱疲労試験^{4), 5)}

高温炉 1323 K, 180 s 保持および低温炉 423 K, 240 s 保持を 1 回とし,

1000 回まで実施

3. 開発合金

3. 1 ミクロ組織

Fig.3 に棒状インゴット中央の横断面ミクロ組織を示す。いずれの合金もほぼ同様にデンドライト樹間部に比較的粗大な共晶状炭化物とその周囲に微細な析出炭化物が存在する。また、これら合金から電解抽出により炭化物を抽出した際の抽出率と抽出物の XRD 結果を Fig.4 に示す。Fig.4 (a)より開発合金 DCNX1 は DCN4, DCN5 に比べて 1.5 ~ 2 倍程度の炭化物を有しており、C 量が多いほど炭化物量が多く、 $M_{23}C_6$ と NbC の第一ピークの回折強度比から NbC 対比で $M_{23}C_6$ が増加していることが確認された。

3. 2 物理特性および機械的特性

タービンハウジングへの適用を考慮し、現在実用環境上最高レベルの 1373 K を高温側上限温度と設定し、熱膨張係数、ヤング率、引張特性、耐酸化性、クリープラプチャー特性、内部拘束型熱疲労特性を調査した。

3. 2. 1 熱膨張係数

Fig.5 に 373 K から 1373 K までの室温から各温度間の平均熱膨張係数を示す。DCNX1 は DCN4, DCN5 同等の熱膨張係数が得られており、設計どおり Ni, W 低減の代わりに炭化物の増加が有効であることが確認され

た。これは W がマトリックスのオーステナイト相に固溶することによって熱膨張を低下させるといわれている⁶⁾ 減量分を熱膨張係数が低い炭化物の増量によって補ったためと考えられる。

3. 2. 2 ヤング率

Fig.6 に室温から 1323 K までのヤング率を示す。

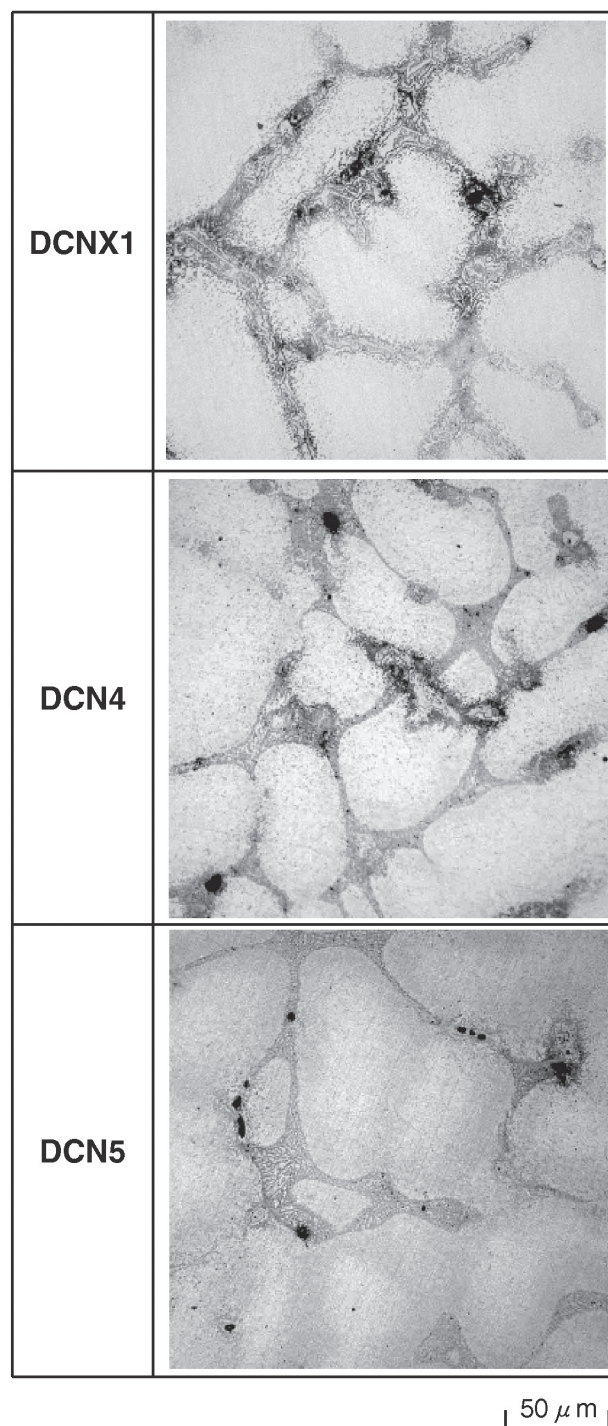


Fig.3. Typical microstructure of the experimental alloys.

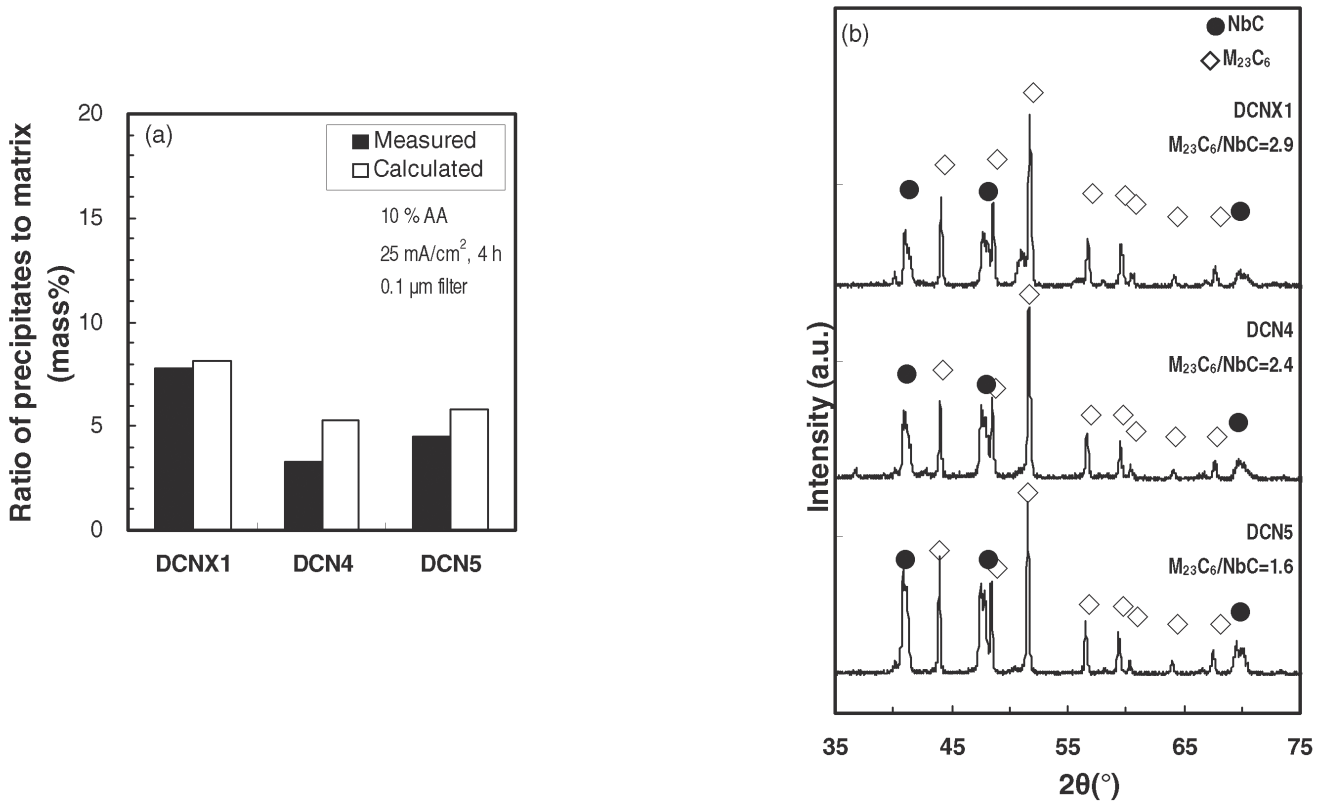


Fig.4. (a)Ratio of electrolytic extraction residues and (b)the X-ray diffraction pattern of the experimental alloys after annealing at 1323 K for 3.6 k sec, air cooled.

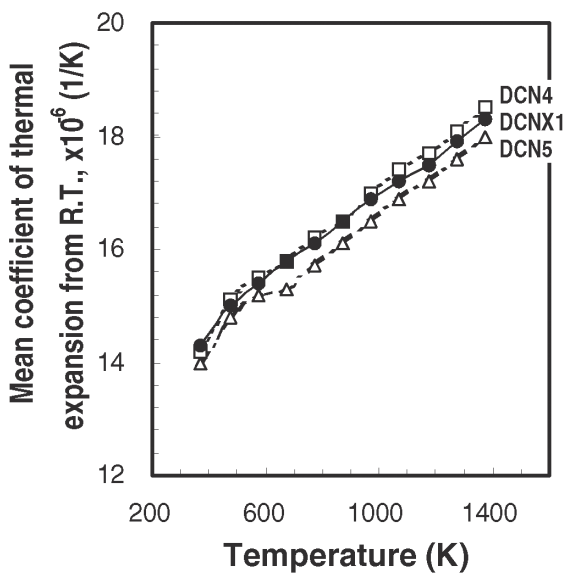


Fig.5. Mean coefficient of thermal expansion of the experimental alloys at elevated temperatures.

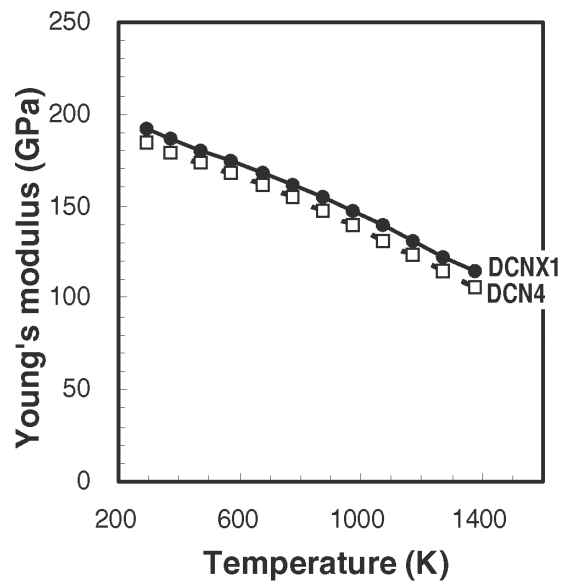


Fig.6. Young's modulus of the experimental alloys at elevated temperature.

DCNX1はDCN4よりも高い値となっている。これは開発合金の組織においてヤング率の高い炭化物が増加したためと考えられる。

3. 2. 3 引張特性

Fig.7に1173～1373 Kの0.2%耐力および引張強度を示す。DCNX1はDCN4対比で高い0.2%耐力および引張強度を有している。

3. 2. 4 耐酸化性

Fig.8に室温、1.8 ks 保持および1273 K、1.8 ks 保持の繰り返し試験を行った結果を示す。いずれの合金も繰り返し数とともに重量増加が認められるが、DCNX1はDCN4対比で酸化増量が少なく、優れた耐酸化性を有していることが分かる。これは耐酸化性に寄与するSiを増加したためと考えられる。

3. 2. 5 熱疲労特性

Fig.9に1323 Kで180 s 保持後、423 Kで240 s 保持す

る加熱冷却の繰り返し熱疲労試験における寸法変化および円盤最外周部に発生する割れの長さの合計（総割れ長さ）の変化を示す。また、Fig.10に試験後の各試験片の外観写真を示す。Fig.9(a)(b)よりDCNX1の寸法変化量は、DCN4、DCN5とほぼ同等であることが分かる。また、Fig.9(c)より総割れ長さでは従来合金対比で開発合金は割れの発生が抑制されており、優れた熱疲労特性を有していることが分かる。

3. 2. 6 クリープラプチャー特性

Fig.11に1273 Kにおけるクリープラプチャー試験結果を示す。DCNX1はDCN4、DCN5対比で優れたクリープラプチャー強度を有していることが分かる。

4. まとめ

(1)開発合金 DCNX1は Ni, W低減による高温強度低下、熱膨張係数上昇を、 $M_{23}C_6$ 量の増加により補い、さらにSi増加で耐酸化性を向上し、従来合金 DCN4、DCN5対比で同等以上の高温強度、耐酸化性、熱疲労特性を得

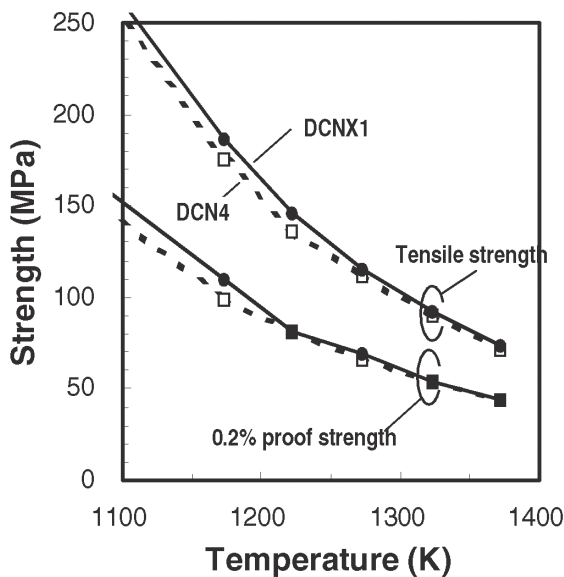


Fig.7. 0.2% proof strength, and tensile strength of the experimental alloys at elevated temperature.

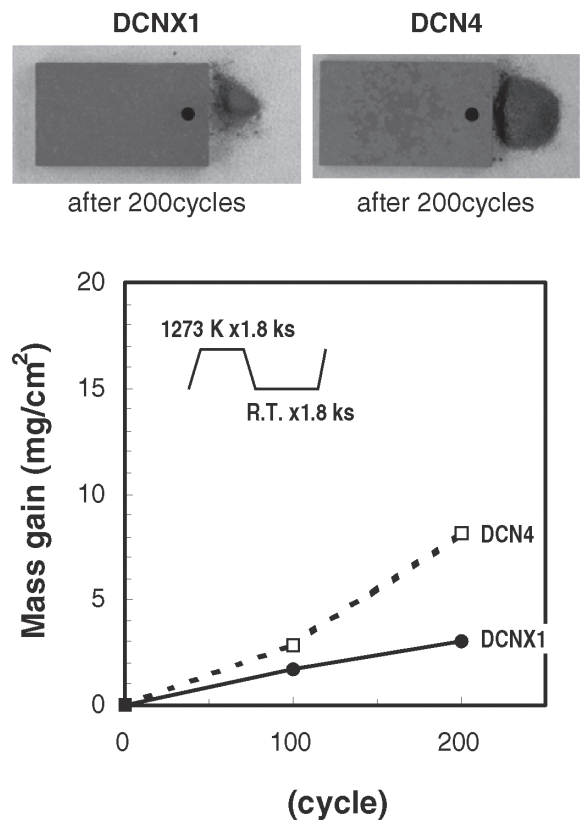


Fig.8. Cyclic oxidation resistance of the experimental alloys at elevated temperature.

た。

(2)開発合金は車載タービンハウジング用材料として良好な耐熱特性を有し、コストパフォーマンスに優れた有望な材料であり、実機への適用を進めていく。

(文 献)

- 1) 平修二：熱応力と熱疲労，(1974)，日刊工業新聞社。
- 2) 植田茂紀，濱野修次，阿部直弘，野田俊治：電気製鋼，

73(2002)，93。

- 3) 木原重光，大友暁，雑賀喜規，田島耕，齊藤弥太郎：学振耐熱金属材料 123委研究報告，14(1973)，231。
- 4) 岡部道生，堀部清，附田賢治，飯久保知人，磯部晋：学振耐熱金属材料 123委研究報告，31(1990)，103。
- 5) 野田俊治，飯久保知人，磯部晋：学振耐熱金属材料 123委研究報告，31(1990)，279。
- 6) 山本隆一，角屋好邦，河合久孝，馬越龍太郎，野田俊治，磯部晋：材料とプロセス，14(2001)，1322。

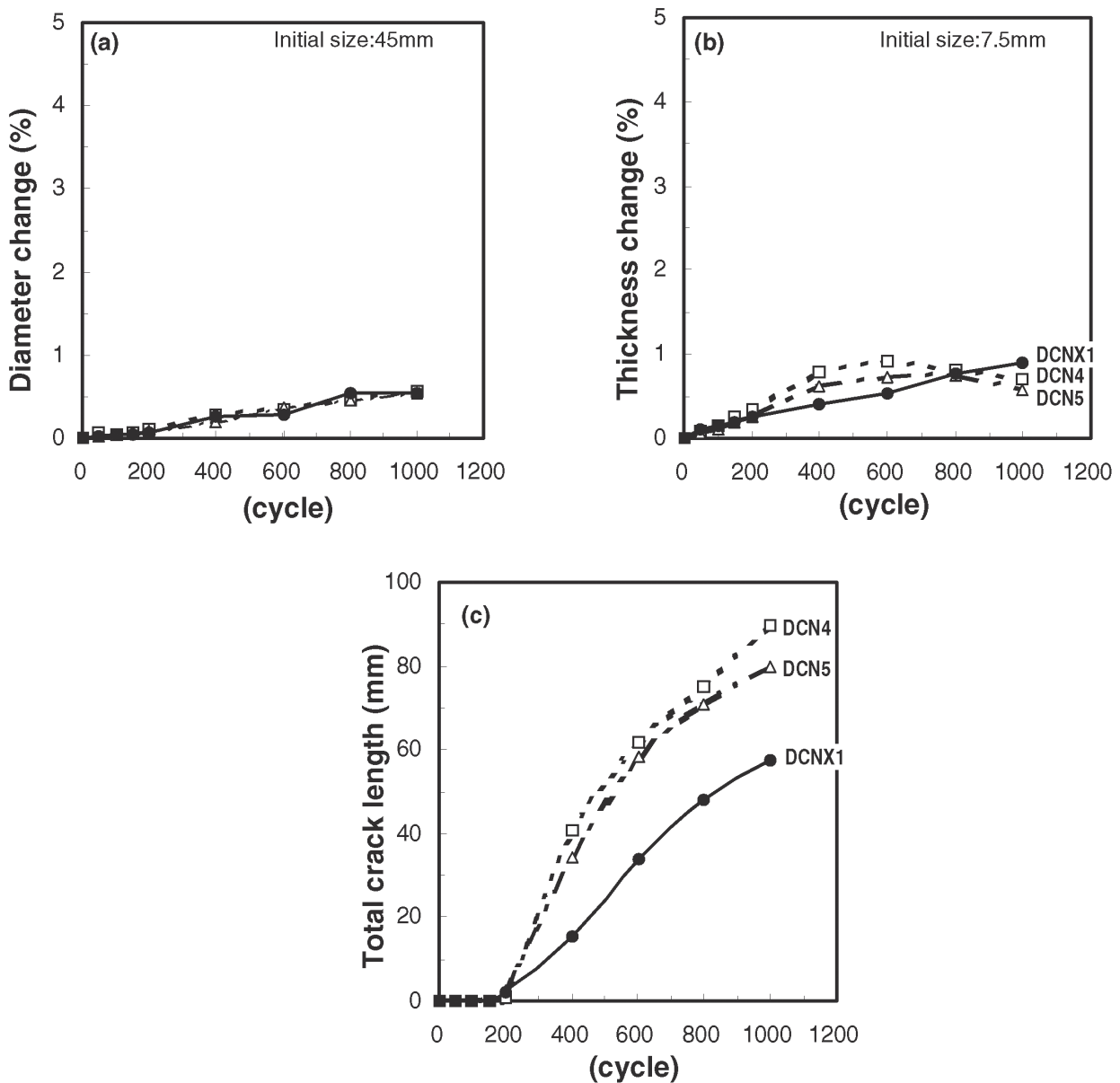


Fig.9. Result of thermal fatigue test for 1000 cycles of the experimental alloys from 423 K to 1323 K. (a) diameter change, (b) thickness change, and (c) total crack length.

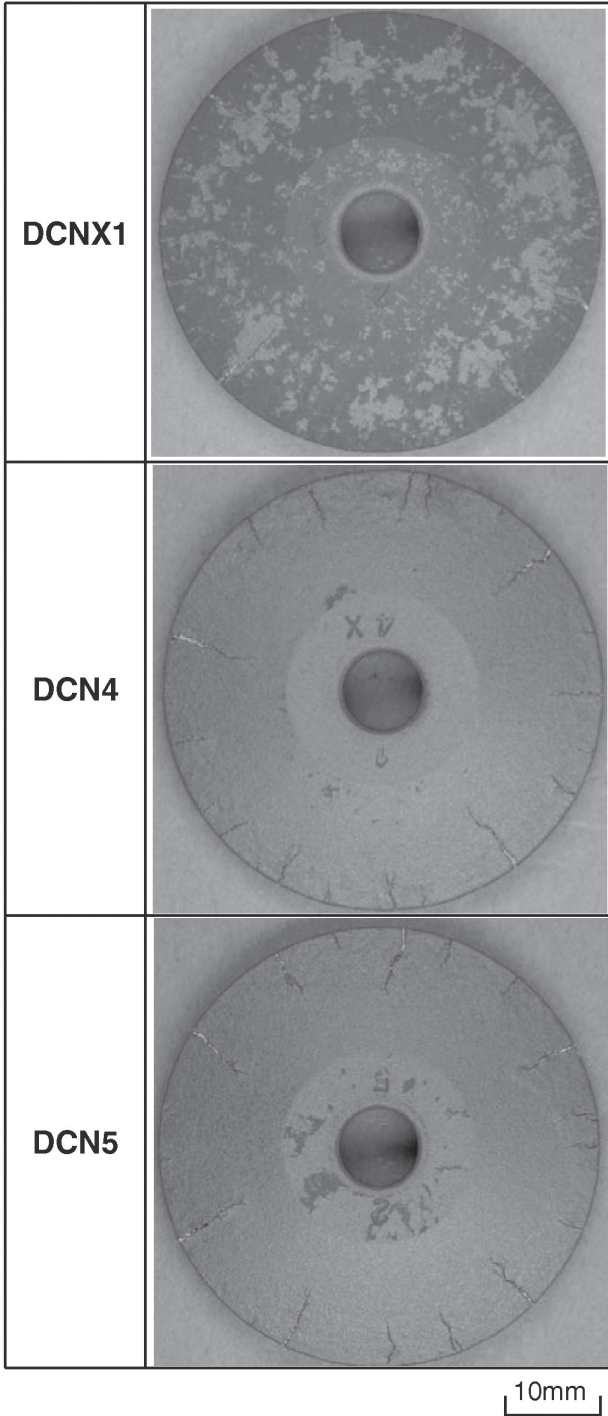


Fig.10. Appearance of specimens after thermal fatigue test for 1000 cycles from 423 K to 1323 K.

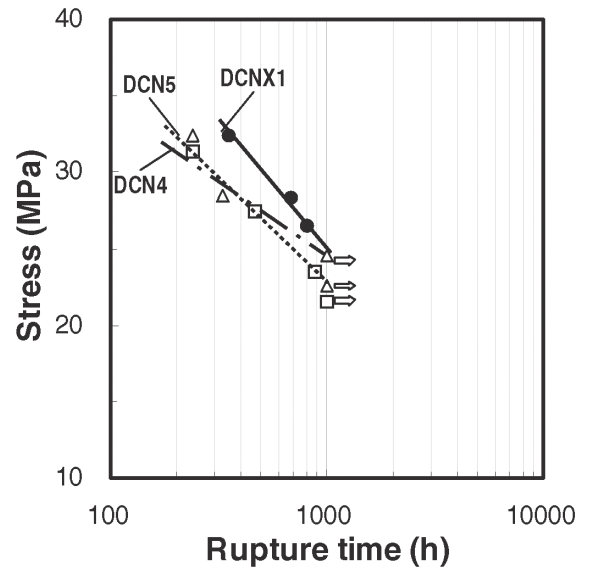


Fig.11. Creep rupture life at 1323 K.