

(財) 電力中央研究所 正

○ 松原雅昭

同上 正

新田明人

同上

緒方隆志

同上

正

桑原和夫

1. 緒言

現在、新素材に関する研究開発が盛んであり、その一環として高強度化を図る耐熱超合金の実用化研究が進められている。この場合、鉄基からコバルト基あるいはニッケル基に到る新しい組成による超合金の開発は昨今では限界に達し、新正に結晶制御による高強度化が進められている。すなわち、普通鍛造では結晶が等軸晶状態にある合金を、最近の技術進歩によって一方向凝固鍛造法で一方向に結晶を成長、配列させた柱状晶超合金、さらには単結晶超合金とする技術開発が注目されている。単結晶超合金は一方向凝固超合金中に含まれている部分溶融温度を下げる働きをする粒界強化作用元素をなくして溶体化処理温度を高めたとによる微細化(Ni₃Al)量の増加、および結晶粒界の消失によるデンドライト偏析の低減や耐酸化性の向上等によってクリープ強度のさらなる向上を目差したものである。したがって、単結晶超合金の実用化に対する期待には極めて大きいものがある。

そこで、本報告ではガスタービンの高効率化に資するために単結晶超合金に着目し、英国および国内のメーカーにおいて試作した材料を用いて、その高温クリープ・疲労強度特性に実験的検討を加え、一方向凝固超合金との強度比較に基づき単結晶化による有効性を評価した。

2. 実験方法

2.1. 供試材および試験片

供試単結晶超合金は米国Cannon-Muskegon社がニッケル基超合金Mar-M247を基本に開発した単結晶超合金CMSX-2である。一方、強度比較を行う一方向凝固超合金はMar-M247である(以後、Mar-M247DSと呼ぶ)。したがって、両供試材は同系列下におり、その化学成分を対比させてTable 1に示し、等温疲労試験を行う900℃での引張特性をTable 2に示す。なお、CMSX-2の熱処理条件は次の通りである。

溶体化処理 1316℃X 3h, 空冷

安定化処理 980℃X 5h, 空冷

時効処理 870℃X 20h, 空冷

Fig. 1にクリープ・疲労試験片を、また、

Fig. 2には中実翼から採取されたクリープ・疲労試験片を示す。Fig. 3には高温疲労試験片を示す。

なお、単結晶鍛造素材は全てX線検査により、強度上問題となる欠陥が存在しないことを事前に確認している。また、単結晶の(001)方位の素材軸方向からの偏差は全て12°以内としており、この範囲内であれば強度面において有意差はないことを確認している。

強度比較を行うMar-M247DSはCannon-Muskegon社製のマスターメタルを用いた。高温疲労試験結果については既報¹⁾のデータを用い、クリープ・疲労試験については、Fig. 2の試験片によって試験を行った。Mar-M247の熱処理条件は次の通りである。

溶体化処理 1232℃X 2h, 空冷

時効処理 870℃X 20h, 空冷

Table 1 Chemical compositions of CMSX-2 and Mar-M247.

	CMSX-2	Mar-M247
Cr	7.9	8.3
Co	4.7	10.0
W	7.9	10.0
Mo	0.6	0.7
Ta	6.0	3.0
Al	5.75	5.5
Ti	1.02	1.0
C	0.0016	0.15
Hf	≤0.001	1.5
B	≤0.001	0.015
Zr	≤0.005	0.05
Ni	Bal.	Bal.

Table 2 Tensile properties at 900℃

	Tensile strength (kgf/mm ²)	Proof stress (kgf/mm ²)	Elongation (%)
CMSX-2	95.3	59.9	9.8
Mar-M247DS	82.9	57.3	16.2

Table 3 Creep rupture properties at 900℃

	Stress (kgf/mm ²)	Failure time (hr.)	Elongation (%)	Reduction area (%)
CMSX-2	40	122.6	20.7	27.7
Mar-M247DS		69.6	27.3	39.7

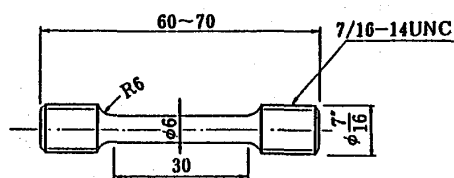
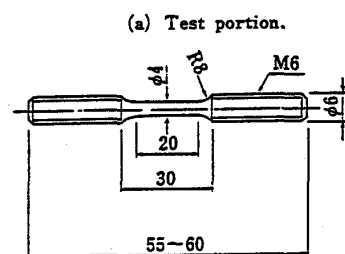
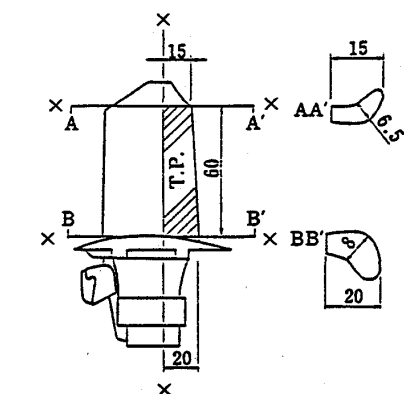


Fig. 1 Tensile and creep rupture specimens machined from solid bar.



(b) Specimen for tensile and creep-rupture tests.

Fig. 2 Test specimen machined from solid blade.

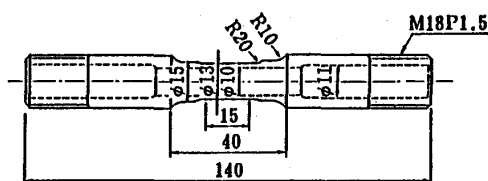


Fig. 3 High temperature fatigue specimen.

2. 2. 実験方法

クリープ試験は単一レバー式クリープ試験機を用いて行った。試験温度は760, 900, 982および1050°Cとした。

高温疲労試験には直流サーボモータ駆動負荷の電気機械式引張圧縮疲労試験機を用い、試験片の加熱には高周波誘導加熱方式を採用した。試験温度900°C一定とし、ひずみ波形はFig. 4に示す4種類とした。このうちPP波形はひずみ速度0.1%/sの三角波であり、クリープひずみが生じない条件に対応する。その他のPC, CPおよびCC波形では、それぞれ引張、圧縮およびその両過程におけるひずみ速度が0.00

167%/sであり、その過程中にクリープひずみが生じると考えられる。

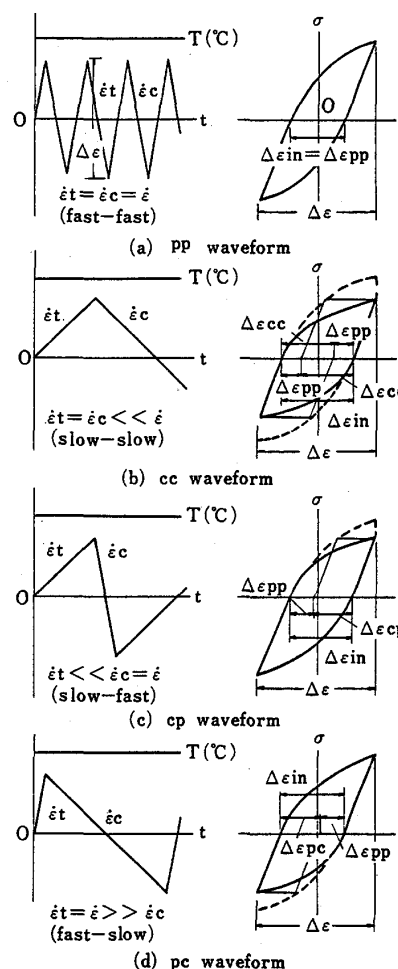


Fig. 4 Strain wave forms in isothermal fatigue test.

3. 実験結果および考察

3. 1. クリープラフチャ特性

Fig. 5にクリープラフチャ試験結果を示す。図において縦軸は負荷応力 σ 、横軸はLarson-MillerパラメータLM

$$LM = (T + 273)(\log t_h + 20) \times 10^{-3} \quad (1)$$

をそれぞれ表す。ここで、 T は温度(°C)、 t_h はクリープラフチャ寿命(h)である。図中、実線で示されているのがCMSX-2の実験結果であり、破線はMat-M247DSのそれである。

図からわかるように、CMSX-2の方がMat-M247より優れたクリープラフチャ強度を有している。このことから、緒言で述べた単結晶化本来の目的が達成されていることが確認できた。

なお、参考のため疲労試験を行う900°Cにおいて負荷応力40 kgf/mm²の場合の両者のクリープラフチャ特性をTable 3に示す。これより、破断寿命

は当然のことながらCMSX-2の方が長寿命となっているが、クリープ・ラフチャ一延性、すなわち伸びや絞りMar-M247DSの方が優れている。CMSX-2にはFig. 6に示すマイクロポロシティと呼ばれる微細な欠陥が生じ易い傾向が認められ、これが延性面でMar-M247DSより劣る一因ではないかと考えられる。

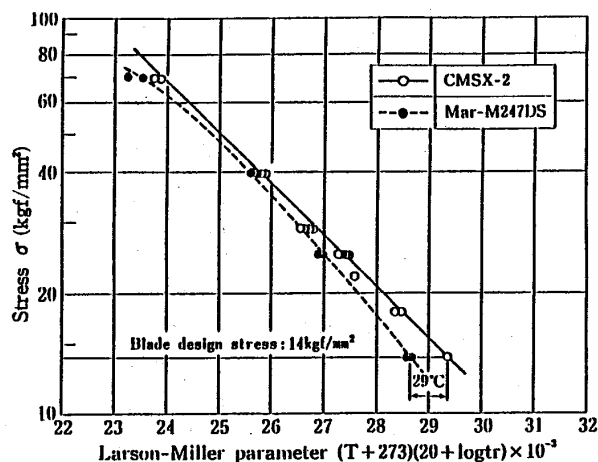


Fig. 5 The creep rupture strength characteristics of CMSX-2 and Mar-M247 DS.

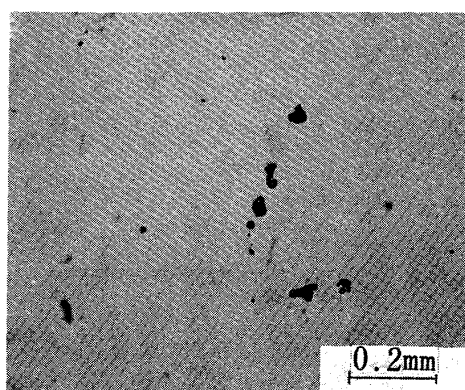


Fig. 6 Microporosities observed after casting ((%): volume fraction of microporosity).

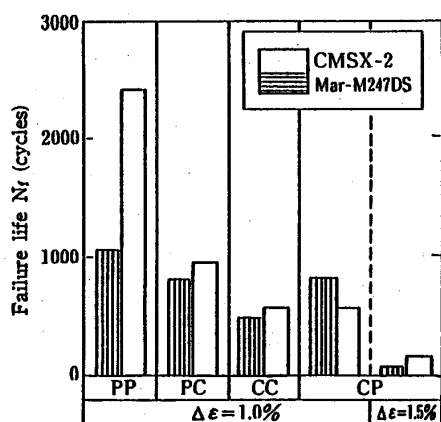


Fig. 7 Comparison of high-temperature fatigue life between CMSX-2 and Mar-M247 DS.

3. 2. 高温疲労強度特性

Fig. 7には4ひずみ波形下におけるCMSX-2とMar-M247DSの高温疲労寿命特性の比較結果を示す。図中、縦軸は破損寿命 N_f である。CP波形以外は $\Delta\epsilon_t = 1.0\%$ について比較し、CP波形では 1.5% の場合も加えた。PP波形下では、CMSX-2はMar-M247DSよりも2倍以上の長寿命である。これに対して疲労サイクル中にクリープひずみが生じるPC、CCおよびCP波形下では、PP波形の場合ほどその優位性は顕著ではないが、CP波形 $\Delta\epsilon_t = 1.0\%$ の場合を除いてはCMSX-2の方がMar-M247DSよりも長寿命となっている。

高強度材である超合金では、非弾性ひずみ依存型から弾性ひずみ依存型に移行する寿命が10オーダーであるため、低サイクル寿命域(ほぼ 10^4 サイクル以下)においても、寿命が強度に依存する弾性疲労の傾向が強い。²⁾このため、疲労型PP波形下でのCMSX-2の寿命がMar-M247DSに比して著しく長寿命となったことが可能性として考えられる。また、その他の波形でのCMSX-2の疲労強度優位性が顕著でないのは、これらの波形下での寿命にクリープ・ラフチャ一延性依存性があり、³⁾これがTable 3でわかるように、Mar-M247DSの方が優れていることがその一因として考えられる。

4. 結言

本報告では、緒言で述べたような状況に鑑み、単結晶超合金CMSX-2について、その高温クリープ・疲労強度特性の優位性の評価検討を一方凝固超合金Mar-M247のそれとの比較により行った。

その結果、クリープ・ラフチャ一強度については、CMSX-2の方がMar-M247DSよりも優れており、単結晶化による本来の目的が達成されていることを確認した。

一方、高温疲労強度については疲労サイクル中にクリープひずみが生じないPP波形下ではCMSX-2はMar-M247よりも約2倍以上の長寿命特性を有することが認められた。また、疲労サイクル中にクリープひずみが生じる負荷波形下においてもPP波形ほど顕著ではないが、CMSX-2の方が長寿命となる傾向を示した。

参考文献

- 1) 新田明人 ほか2名, 第22回高温強度シンポジウム前刷集, P.122 (1984).
- 2) Nitta, A., ほか2名, International Gas Turbine Congress, P.765 (1983).
- 3) 文獻2) と同じ。