

SUS304鋼のクリープ疲労試験における 時間損傷則と延性消耗則の比較研究

日高敏朗*¹・石山英樹*¹・山浦寿幸*²・小畑清和*²

Comparison between the Time Fraction Rule and the Ductility Exhaustion Method for the Creep-Fatigue Tests of SUS304 Steel

Toshirou Hidaka*¹, Hideki Ishiyama*¹, Hisayuki Yamaura*²,
and Kiyokazu Kobatake*²

For the designing and the life prediction of the elevated temperature components, it needs not only the materials data and the stress analysis techniques, but also the evaluation criteria of the structural integrity. Creep-fatigue tests are carried out at the constant temperature of 600°C using SUS304 stainless steel specimens. The time fraction rule and the ductility exhaustion method are applied to the obtained data and compared with each other for the life prediction.

1 緒言

高温領域で使用される機器等において、その高温部分の構造設計や寿命予測の切りつめは、経済的な機器設計上求められるところであるが、材料強度、構造解析などの知識のみならず、設計評価基準が必要である^{2)~7)}。また、それぞれの設計基準では、どのような差異や特徴があるか知ることが必要である。クリープと疲労の双方が生ずる状態の600°C高温試験を、SUS304鋼について行い、時間損傷則と延性消耗則²⁾を適用して比較を試みた。

2 試験

2.1 試験体

試験体の形状を図1に示す。

試験体は、丸棒を旋盤、NC旋盤、及び、万能研削盤を用いて加工して作製した。

2.2 試験体材料

試験体材料には、高温構造部材として一般に使われるSUS304鋼を使用した。化学成分を、表1に示す。

水産大学校研究業績 第1573号, 1997年6月20日受付。

Contribution from National Fisheries University, No.1573. Received Jun. 20, 1997.

*1 水産大学校研究科 (Graduate School, National Fisheries University).

*2 水産大学校海洋機械工学科海洋機器工学講座 (Laboratory of Ocean Engineering Machineries, Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University).

2.3 試験装置

試験に使用したサーボバルサ試験機の主な仕様は、次の通りである。

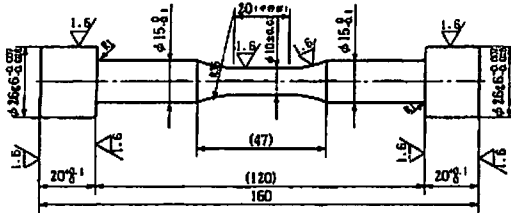


Fig. 1. Test specimen configuration

Table 1. Chemical compositions of SUS304 (JIS G 4308-1991)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
<0.08	<1.00	<2.00	<0.045	<0.030	8.00~10.50	18.00~20.00

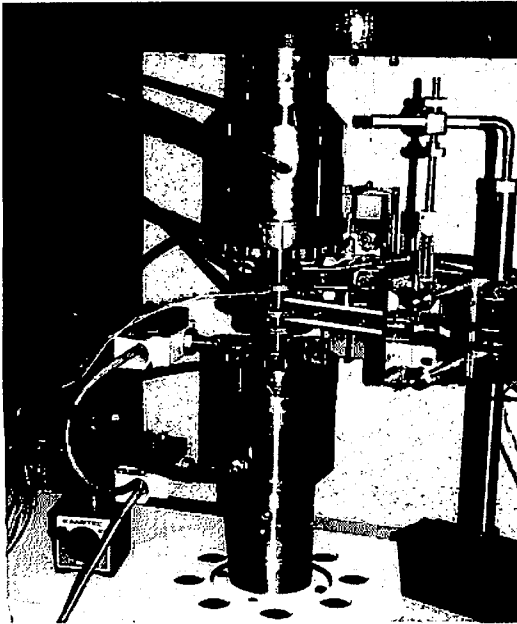


Fig. 2. Appearance of test section

- 1) 最大荷重 動的±10tf 静的±15tf
- 2) 最大ピストンストローク ±25mm
- 3) 繰返し速度 0.00001~30Hz
- 4) 振幅特性 ±2.8mm/5Hz
- 5) 制御量 荷重, ストローク, 標点間変位
- 6) 試験波形 正弦波, ランプ波, 三角波, 台形波
- 7) 最高使用温度 1,000°C

2.4 試験方法

試験体に温度600°C、一定ひずみで、ひずみ保持時間をパラメーターとして台形波ならびに三角波を负荷して試験を行った。試験環境は大気中で行った。試験体取付部の写真を、図2に示す。

3 試験結果

3.1 ひずみ、ひずみ保持時間と破断回数の関係

試験より得られたひずみ範囲、保持時間 t_H に対する破断回数 N_f を表2に示す。この表には、後述する寿命評価の検討に必要な $\sigma_{N_f/2}$ (破断回数の1/2のときの応力)、 ϵ_c (クリープひずみ)も併記した。また、表2の下欄には、文献1)のデータを引用させていただき、後述の寿命評価法で、著者らの試験データと共に寿命評価してみた。

表2より、ひずみと破断回数の関係をプロットすると、図3のようになる。この図より、三角波(保持時間なし)よりも、台形波(保持時間あり)のほうが寿命回数が低下しており、保持時間が大となると、クリープ効果が表われ、破断回数が減少することがわかる。

3.2 応力とサイクル数の関係

試験は、ひずみ速度一定で行った。その時の試験片にかかる応力とサイクル数を、試験時の記録紙から求めると、図4の(a)、(b)、(c)のようになった。この図から、ひずみ範囲0.29%で試験を行った場合には、加工軟化を生じている事が分かる。

また、ひずみ範囲0.5%及び0.7%で試験を行った場合には、加工硬化していることが分かる。ひずみ範囲0.29%の場合、応力振幅で見ると加工軟化と見られるが、繰返し数の増加と共に、圧縮側応力増大の方向に移行している。

また、応力-ひずみヒステリシスを、ひずみ範囲0.29%及び0.7%について、クリープ疲労試験の初期、中期、末期それぞれについて、図5に示す。

Table 2. Creep-fatigue test data and the reference data

No	Strain(%)	Temp(°C)	N_f (cycle)	$\sigma_{NI/2}$ (MPa)	ϵ_c	t_H (sec)
1	0.7	600	2035	157.2	0.0089	600
2	0.7	600	2056	176.65	0.0153	600
3	0.5	600	927	264.93	0.0103	600
4	0.5	600	523	246.46	0.019	600
5	0.29	600	1357	133.98	0.0067	600
6	0.29	600	7318	82.59	0.0176	600
7	0.7	600	460	—	—	0
8	0.5	600	1036	—	—	0
9	0.5	600	1129	—	—	0
10	0.25	600	5036	—	—	0
11	0.25	600	10000	—	—	0
Ref.data ¹⁾	1.02	600	348	260	0.003	360
"	0.73	600	679	255	0.0017	360
"	0.5	600	1900	232	0.0011	360
"	0.4	600	2080	219	0.0008	360
"	0.3	600	4070	180	0.0004	360
"	0.26	600	10100	177	0.0003	360
"	1.01	600	190	249	0.0031	3600
"	0.75	600	584	227	0.0018	3600
"	0.5	600	803	222	0.001	3600
"	0.38	600	1650	191	0.0004	3600
"	0.98	600	500	—	—	0
"	0.72	600	579	—	—	0
"	0.47	600	2420	—	—	0
"	0.31	600	6690	—	—	0
"	0.24	600	26500	—	—	0

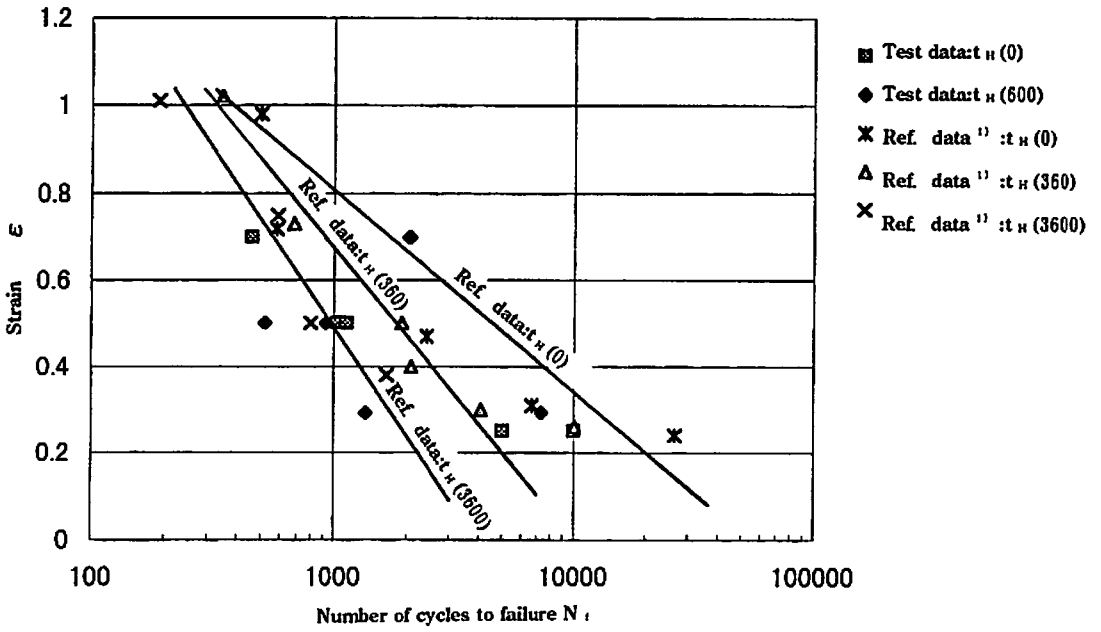
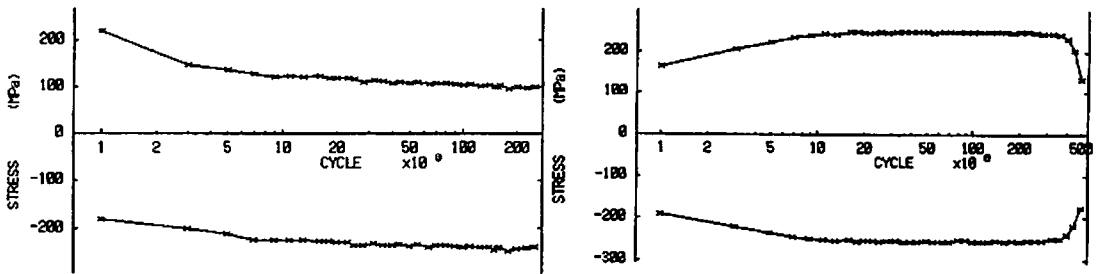
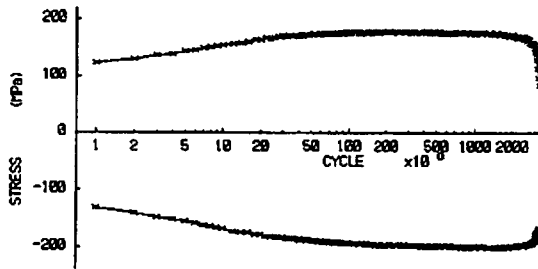


Fig. 3. Strain vs rupture plots for SUS304 at 600°C



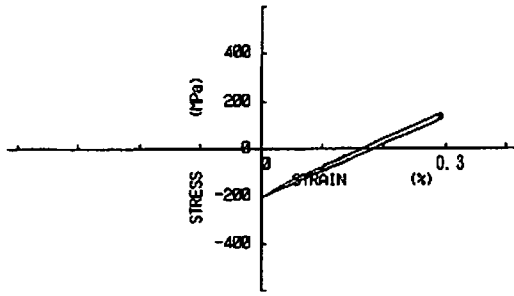
(a) At 0.29% strain

(b) At 0.50% strain

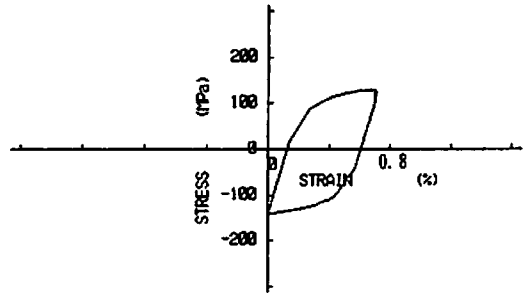


(c) At 0.70% strain

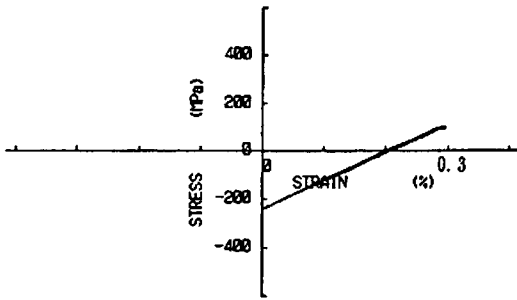
Fig. 4. Relationship between stress and number of cycles



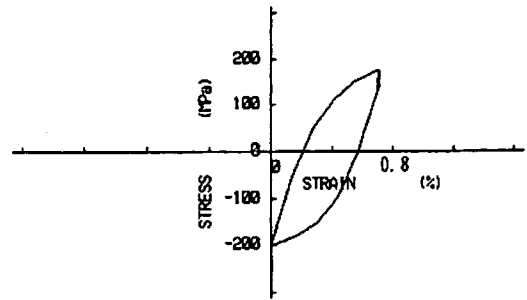
(a) At 0.29% strain
(Early stage of test)



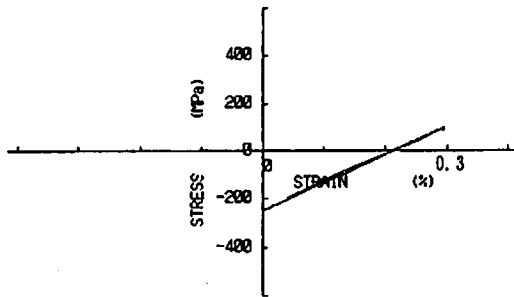
(a) At 0.70% strain
(Early stage of test)



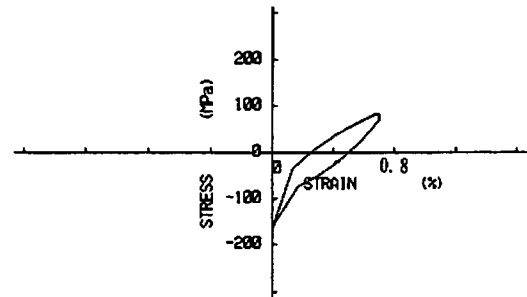
(b) At 0.29% strain
(Middle stage of test)



(b) At 0.29% strain
(Middle stage of test)



(c) At 0.29% strain
(Last stage of test)



(c) At 0.70% strain
(Last stage of test)

Fig. 5. Hysteresis of stress vs strain

4 検 討

4.1 評価手順

クリーブ疲労試験結果を時間損傷則及び延性消耗則の二つの評価法で評価する。これらの評価手順概要は図6に示す。²⁾

(1) 時間損傷則の評価法は、まず、試験条件から分かっているひずみ ϵ (%)、試験温度 t (°C)、保持時間 t_H (sec)の試験結果から得た破断回数 N_f (回)から、 $N_f/2$ (回)での応力 $\sigma_{N_f/2}$ を求める。次に、応力 $\sigma_{N_f/2}$ を応力-クリーブ寿命線図の縦軸にとり、これと線図との交点からクリーブ破断時間 t_r (hr)を求める。同様に、ひずみ ϵ をひずみ-疲労寿命線図の縦軸にとり、これと線図との交点から破断回数 N (回)を求める。ここで求めたクリーブ破断時間 t_r と破断回数 N から、時間損傷則におけるクリーブ損傷を D_{ct} として、疲労損傷を D_{ft} とすると、式(1)(2)のようになる。

$$D_{ft} = \frac{N_f}{N} \dots\dots\dots(1)$$

$$D_{ct} = N_f \int_0^{t_H} \frac{dt}{t_r} = N_f \frac{t_H}{t_r} \dots\dots\dots(2)$$

それぞれの式に、試験から得られた保持時間 t_H 、破断回数 N_f と、線図から得られたクリーブ破断時間 t_r 、破断回数 N を代入することによりクリーブ損傷 D_{ct} 及び疲労損傷 D_{ft} を得ることができる。

このようにして求めた D_{ct} と D_{ft} の和が線形被害則

$$D_{ct} + D_{ft} = 1.0 \dots\dots\dots(3)$$

を満足するかどうかを調べる。

今回、クリーブ破断時間 t_r を求めるのに図7を、また、破断回数 N を求めるのに図8をそれぞれ用いた。

(2) 延性消耗則の評価法は、時間損傷則と同様に、まず、試験条件から分かっている試験温度 t (°C)、ひずみ ϵ (%)、保持時間 t_H (sec)の試験結果によって得られる破断回数 N_f (回)から、 $N_f/2$ (回)での応力 $\sigma_{N_f/2}$ を求める。

次に、 $N_f/2$ のときのクリーブひずみ-時間線図の横軸の時間(保持時間)からクリーブひずみ ϵ_c を求め、損傷延性-ひずみ速度線図もしくは試験前断面積を A_0 、試験後断面積を A とすると式(4)から損傷延性 ϵ_f を求める。

$$\begin{aligned} \epsilon_f &= \ln \frac{A}{A_0} \\ &= \ln \frac{1}{1 - \frac{A_0 - A}{A_0}} \\ &= \ln \frac{1}{1 - \phi} \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

$\phi = (A_0 - A) / A_0$: 面積収縮率

このとき、 ϕ は、図9の面積収縮率-破断時間の線図から求めることができる。そして、時間損傷則と同様に、ひずみ ϵ をひずみ-疲労寿命線図の縦軸にとり、これと線図との交点から破断回数 N (回)を求める。ここで求めたクリーブひずみ ϵ_c 、損傷延性 ϵ_f と破断回数 N から、延性消耗則での疲労損傷を D_{fc} 、クリーブ損傷を D_{ce} とすると、

$$\begin{aligned} D_{ce} &= N_f \int_0^{t_H} \frac{d\epsilon_c}{\epsilon_f} \\ &= N_f \frac{\epsilon_c}{\epsilon_f} \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

$$D_{fe} = \frac{N_f}{N} \dots\dots\dots(6)$$

式(5)、(6)のようになる。それぞれの式において、試験から得られた結果と、その結果を用いて求めたクリーブひずみ ϵ_c 、損傷延性 ϵ_f 、破断回数 N_f 、そして求めた破断回数 N を代入することにより、クリーブ損傷 D_{ce} 及び疲労損傷 D_{fe} を得ることができる。このようにして求めた D_{ce} と D_{fe} の和が、線形被害則を満足するかどうかを調べる。

今回は、損傷延性 ϵ_f を求めるために、図9から面積収縮率 ϕ を求めた。また、 ϵ_f は、式(4)から求めた。 ϵ_c は、試験結果を用いた。

$$D_{ce} + D_{fe} = 1.0 \dots\dots\dots(7)$$

式(1)及び式(6)は、同一の式であるので、この二つの評価法の差異は、クリーブ損傷の評価の違いにある事が分かる。

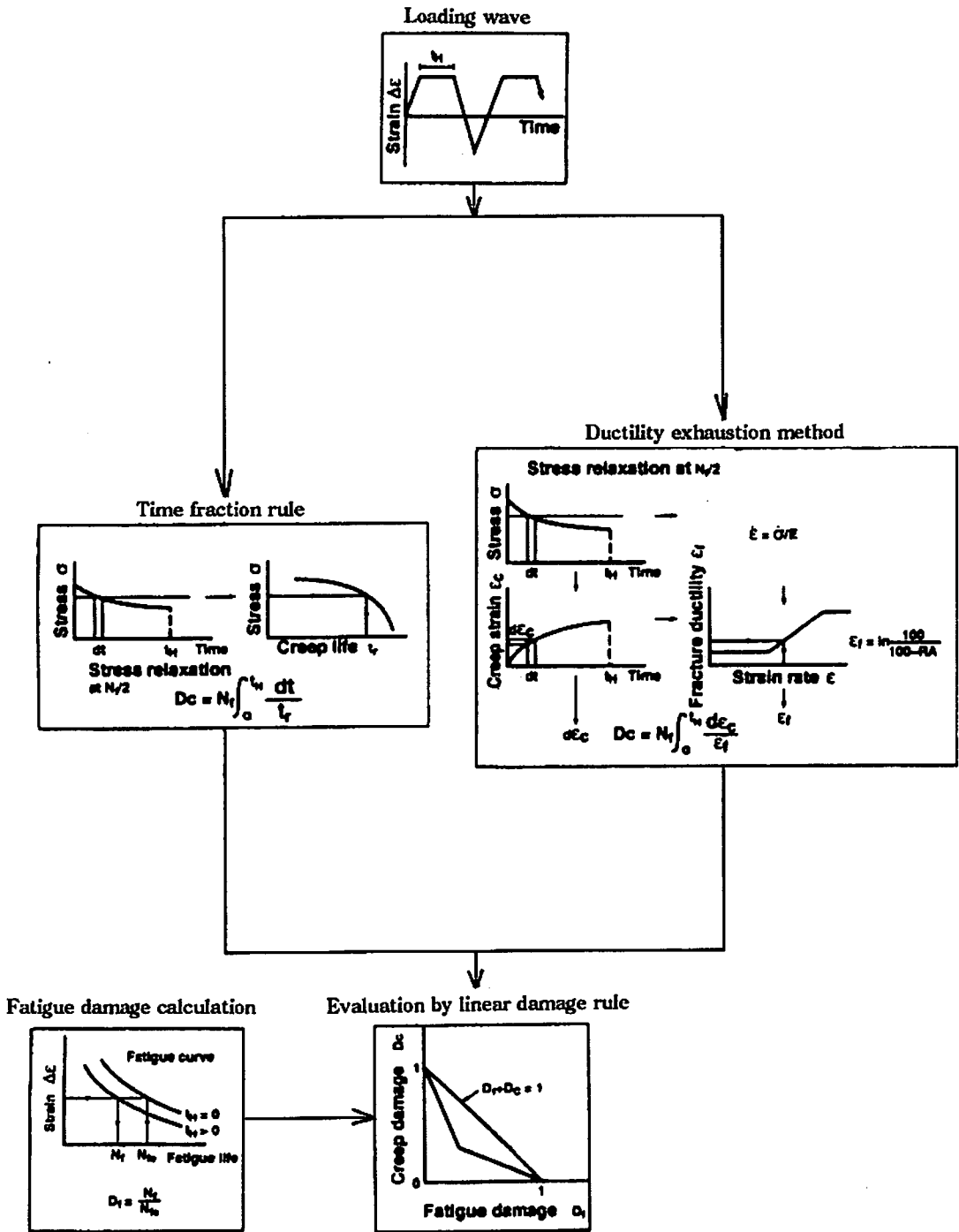


Fig. 6. Creep-fatigue damage evaluation procedures

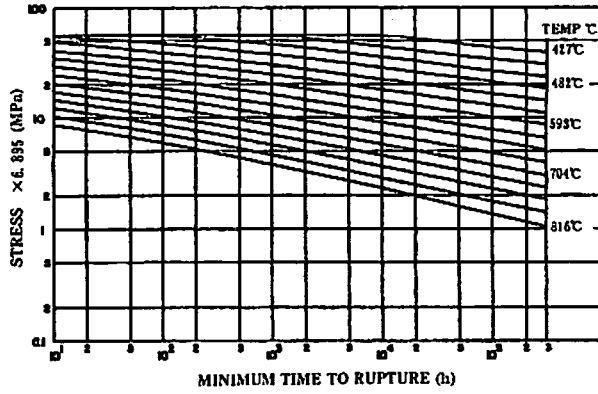


Fig. 7. Minimum creep rupture stress of SUS304⁴⁾

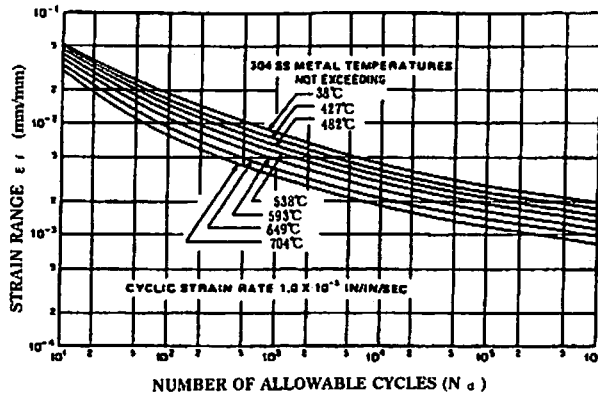


Fig. 8. Design curves of fatigue of SUS304⁴⁾

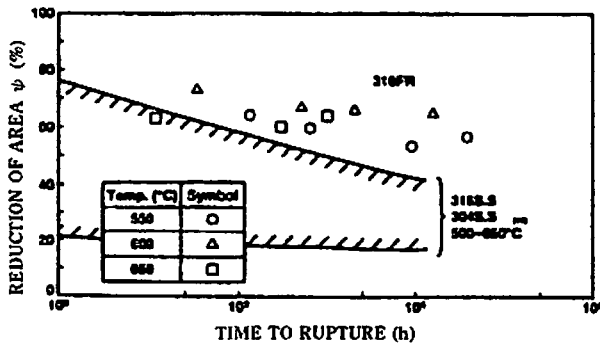


Fig. 9. Creep rupture ductility²⁾

Table 3. Evaluation by the time fraction rule

No	Strain(%)	Temp(°C)	t_H (sec)	D_f	D_{ct}	$D_f + D_{ct}$
1	0.29	600	600	20.54	0.219	20.759
2	0.29	600	600	111.23	0.0308	111.261
3	0.5	600	600	46.35	21.64	67.99
4	0.5	600	600	26.15	3.58	29.73
5	0.7	600	600	117.16	0.678	117.838
6	0.7	600	600	118.36	1.011	119.371
Ref.data ¹⁾	1.02	600	360	10.3	5.12	15.42
"	0.73	600	360	7.46	7.26	14.72
"	0.5	600	360	11.6	6.65	18.25
"	0.4	600	360	6.64	6.97	13.61
"	0.3	600	360	7.4	2.85	10.25
"	0.26	600	360	12.2	6.17	18.37
"	1.01	600	3600	4.9	19.59	24.49
"	0.75	600	3600	8.98	2	10.98
"	0.5	600	3600	4.9	2.71	7.61
"	0.38	600	3600	2.68	1.65	4.33

Table 4. Evaluation by the ductility exhaustion method

No	Strain(%)	Temp(°C)	t_H (sec)	D_f	D_e	$D_f + D_e$
1	0.29	600	600	20.54	7.626	28.166
2	0.29	600	600	111.23	155.18	266.41
3	0.5	600	600	46.35	7.626	53.976
4	0.5	600	600	26.15	8.053	34.203
5	0.7	600	600	117.16	16.6	133.76
6	0.7	600	600	118.36	29.32	147.68
Ref.data ¹⁾	1.02	600	360	10.3	4.37	14.67
"	0.73	600	360	7.46	5.76	13.22
"	0.5	600	360	11.6	11.45	23.05
"	0.4	600	360	6.64	9.4	16.04
"	0.3	600	360	7.4	14.2	21.6
"	0.26	600	360	12.2	43.33	55.53
"	1.01	600	3600	4.9	2.42	7.32
"	0.75	600	3600	8.98	5.33	14.31
"	0.5	600	3600	4.9	4.44	9.34
"	0.38	600	3600	2.68	7.21	9.89

4.2 評価結果

時間損傷則で評価した結果を、表3に示す。また、延性消耗則で評価した結果を表4に示す。

また、図10には縦軸にクリープ損傷 D_c 、横軸に疲労損傷 D_f をとり、これらの評価結果のプロットを示す。この図より、同一の D_f の値に対し、時間損傷則の D_{ct} と延性消耗則の D_{cd} の値が比較できる。試験点が少なく、限られた試験範囲についての評価であるが、時間損傷則でのクリープ損傷和 ($D_f + D_c$) は、延性消耗則のそれに比べて小さくなっている。図3より、保持時間が大となると破断回数の低下が顕著に現れていることから、温度600℃、SU S304の構造物にクリープ疲労が負荷される場合、時間損傷則の方がクリープ疲労損傷和を小さく算出することを示している。よって、解析設計を時間損傷則で行い、クリープ疲労損傷和を

$$D_c + D_f = 1.0$$

で評価した方が、より精度の高い設計評価になると考える。今後、さらにデータを積み重ね、妥当な現実設計に役立つ寿命評価を追求したい。

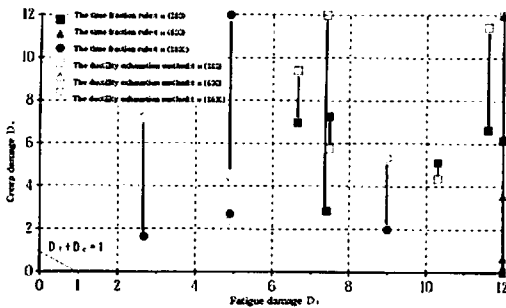


Fig. 10. Comparison of the time fraction rule and the ductility exhaustion method

5 結 言

- (1) 試験データの数は少なかったが、今回の試験結果から考えると、時間損傷則及び延性損傷則は、それぞれ十分な設計余裕を持っていることがわかる。
- (2) 今回の限られた数のデータの評価では、時間損傷則の方が延性消耗則よりも寿命損傷和が、式(3)に示す値1.0にやや近いことがわかった。

文 献

- 1) 金属材料技術研究所, 熱間圧延ステンレス鋼板SUS304-HP(18Cr-8Ni)の高温時間依存低サイクル疲れ特性データシート, No.49, 1985
- 2) M.Ueta, T.Nishida, H.Koto, M.Sukekawa and K.Taguchi: Creep-Fatigue Properties of Advanced 316-Steel for FBR, PVP-Vol.313-2, 423-428 International Pressure Vessels and Piping Codes and Standards: Volume 2-Current Perspectives ASME (1995)
- 3) 小畑清和・山浦寿幸: 水産大研報, 44, 25 - 45(1995).
- 4) The American Society of Mechanical Engineers: "Case N-47-29, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Code Cases", 1979/1990
- 5) The American Society of Mechanical Engineers: "Criteria of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code for Design by Analysis", (1969).
- 6) The American Society of Mechanical Engineers: "Criteria for Design Elevated Temperature class 1 Components in Section III, Division 1, of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code", (1976).
- 7) 鶴戸口英善・朝田泰英・岡林邦夫・牧野豊・木村和成: ASME Code Sec. III Div.1によるクラス1コンポーネントの高温設計基準, ISES7707(翻訳), 高温構造安全技術研究組合, (1977).