

討27

住友金属工業(株) 中研 平川賢爾, 時政勝行

1. 緒言

高温材料, とくに熱疲労き裂が問題となる機器に用いられる材料に対しては, 高温疲労特性として疲労とクリープの重畳効果をも含めた性質を明確にする必要がある。このような材料の疲労とクリープの重畳効果特性を考慮した一般的な高温疲労特性を求める手法としては, Mansonらの提案したひずみ範囲分割法⁽¹⁾が現状では最も有用と考えられる。

こゝでは, 筆者らが行ってきたひずみ範囲分割法による各種高温材料の高温疲労特性評価の実際について報告する。^{(2)~(7)}

2. 試験方法

2-1. ひずみ範囲分割法: Mansonらによれば, 材料に生じる非弾性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{in}$ の基本型は図1に示す4種類であり, これら4種類の非弾性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{pp}$, $\Delta\epsilon_{pc}$, $\Delta\epsilon_{cp}$ および $\Delta\epsilon_{cc}$ ($\Delta\epsilon_{ij}$ と総称) に対して材料固有の疲労寿命 N_{pp} , N_{pc} , N_{cp} および N_{cc} (N_{ij} と総称) が存在する。任意の大きさの $\Delta\epsilon_{in}$ は,

$$\Delta\epsilon_{in} = \Delta\epsilon_{pp} + \Delta\epsilon_{cc} + \Delta\epsilon_{pc} \text{ (あるいは } \Delta\epsilon_{cp}) \quad \dots\dots(1)$$

の形に表示でき, このときの寿命 N_f は,

$$\frac{1}{N_f} = \frac{1}{N_{pp}} + \frac{1}{N_{cc}} + \frac{1}{N_{pc}} \text{ (あるいは } \frac{1}{N_{cp}}) \quad \dots\dots(2)$$

で与えられる。 $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$, $\Delta\epsilon_{pc}-N_{pc}$, $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ および $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 関係 ($\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性と総称) が材料の一般的な高温疲労特性であり, これをいかにして求めるかが材料評価上重要なポイントとなる。

2-2. IJ試験による $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性

の評価: 表1は $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性を評価するために筆者らが実施した, PP, PC, CP およびCC試験 (IJ試験)の試験方法を示す。両振三角波を基本とし, 疲労試験の途中でひずみ範囲分割を行なうのが特徴である。

いま, IJ試験において, $\Delta\epsilon_{in} = \Delta\epsilon_{pp} + \Delta\epsilon_{ij}$ ($ij \neq pp$), 疲労寿命を N_f , $\Delta\epsilon_{pp}$ に対応する寿命を N_{pp} とすると, 式(2)より, $\Delta\epsilon_{ij}$ に対して N_{ij} が次式のごとく求まる。

$$N_{ij} = \frac{N_{pp} \cdot N_f}{N_{pp} - N_f} \quad \dots\dots(3)$$

$\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ 関係はPP試験で求まるので, 異なる $\Delta\epsilon_{in}$ のIJ試験で異なる N_f を求めることにより異なる ($\Delta\epsilon_{ij}$, N_{ij}) の組合せが得られ, $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 関係が定まる。

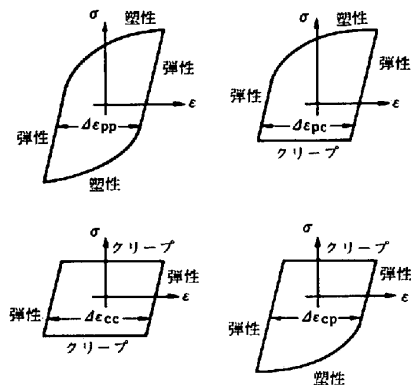
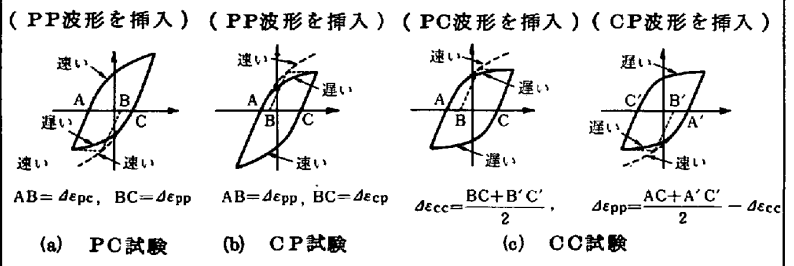


図1. 非弾性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{pp}$, $\Delta\epsilon_{pc}$, $\Delta\epsilon_{cp}$, $\Delta\epsilon_{cc}$ の定義

表1. IJ試験の内容

試験	ひずみ波形	負荷ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1$	除荷ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_2$	ひずみの種類
PP		クリープ変形が生じない程度に速い	$\dot{\epsilon}_2 = \dot{\epsilon}_1$	$\Delta\epsilon_{pp}$
PC		$(\dot{\epsilon}_1 = 10^{-8} \sim 8 \times 10^{-8} \text{ 1/Sec})$	$\dot{\epsilon}_2 \leq 10^{-4} \text{ 1/Sec}$	$\Delta\epsilon_{pp} + \Delta\epsilon_{pc}$
CP		$\dot{\epsilon}_1 \leq 10^{-4} \text{ 1/Sec}$	$\dot{\epsilon}_2 = 10^{-8} \sim 8 \times 10^{-8} \text{ 1/Sec}$	$\Delta\epsilon_{pp} + \Delta\epsilon_{cp}$
CC			$\dot{\epsilon}_2 = \dot{\epsilon}_1$	$\Delta\epsilon_{pp} + \Delta\epsilon_{cc}$

ひずみ範囲の分割方法: 試験中にPP, PCあるいはCP波形を挿入する。(下図)



2-3. 供試材および試験片：表2に供試材の化学成分，素材形状および室温における機械的性質を示す。試験片は直径10mm，平行部30mm (GL=25mm)の中実丸棒試験片を用いた。

2-4. 試験装置：用いた試験機は容量10Tonおよび25Tonの電気油圧式サーボ制御高温疲労試験装置 (MTS製)である。前者ではコンピュータとデジタル関数発生器により，後者ではデジタル関数発生器により，表1に示したI J試験を実施できる。加熱方式は前者では赤外線加熱，後者では高周波誘導加熱であり，また後者は 5×10^{-6} mm Hg以下の真空中で試験可能な真空チャンバを具備している。

表2. 各種高温材料の化学成分 (wt.%)，素材形状および室温における機械的性質

No.	鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Ti	V	W	素材形状	耐力 $\sigma_{0.2}$ (kgf/cm ²)	引張強さ σ_B (kgf/cm ²)	伸び δ (%)	絞り φ (%)
1	SUS304(溶体化処理)	0.07	0.74	1.71	0.025	0.004	0.04	9.22	19.04	0.05	0.04	—	—	—	28φ×400ℓ	22.7	59.0	66.9	79.8
2	SUS321(")	0.08	0.53	1.59	0.018	0.007	0.02	10.55	17.70	0.08	0.02	0.46	—	—	18φ×ℓ	25.7	59.3	56.0	69.0
3	2¼Cr-1Mo(Ann)	0.11	0.47	0.47	0.021	0.009	0.02	0.09	2.17	0.99	0.02	—	—	—	28φ×500ℓ	28.7	53.7	38.3	71.6
4	" (N.T.)	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	28φ×500ℓ	44.5	60.1	29.7	78.2
5	9Cr-2Mo	0.048	0.30	0.30	0.021	0.019	0.05	0.16	8.77	2.12	0.05	—	—	—	28φ×500ℓ	44.0	62.0	29.8	76.6
6	12%Cr(A)	0.19	0.33	0.33	0.023	0.005	0.02	0.61	11.40	0.87	—	—	0.28	—	344φ×38t×ℓ	57.2	77.1	21.0	55.0
7	" (B)	0.20	0.32	0.60	0.019	0.005	0.08	0.68	11.80	0.89	—	—	0.32	0.55	323φ×52.5t×ℓ	56.6	78.0	22.0	55.0
8	Alloy 800	0.069	0.67	0.79	0.012	0.005	0.04	82.37	21.40	0.02	0.36	0.39	—	—	25φ×ℓ	19.9	53.8	48.0	76.7
9	STY-80	0.69	0.25	0.66	0.020	0.024	0.04	0.05	0.14	0.02	—	—	—	—	実体車輪リム部	73.1	114.4	15.0	36.5
10	鋳鋼	0.66	0.35	0.74	0.011	0.023	0.12	0.06	0.06	0.01	—	—	—	—	実体車輪リム部	71.1	106.8	6.0	7.0
11	SM50B	0.21	0.27	1.20	0.024	0.018	0.32	0.28	—	—	0.030	—	—	—	90t鋼板	38.0	57.1	30.0	70.4
12	40キロ鋼(AsQ)	0.05	0.23	1.31	0.016	0.008	—	—	0.05	—	0.046	—	—	—	80t鋼板	31.1	47.7	37.3	78.2

3. 試験結果および考察

3-1. $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性：各供試材について得られた $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性を図1にまとめて示す。

SUS304およびSUS321の $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性(図1(a),(b))からみてオーステナイト系ステンレス鋼に共通する点は， $\Delta\epsilon_{op}-N_{op}$ 特性が最も短寿命側にくることおよび $\Delta\epsilon_{pc}-N_{pc}$ ， $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 両特性が大気中と真空中とで変わらず雰囲気の影響を受けないという事実である。各特性によって雰囲気効果が異なる理由は $\Delta\epsilon_{pp}$ ， $\Delta\epsilon_{pc}$ ， $\Delta\epsilon_{cp}$ および $\Delta\epsilon_{cc}$ に対応してき裂の発生場所，形態が異なることから説明できるようである。表3はSUS304でのI J試験後の試験片表面および内部のき裂の形態および破面の様相を観察した結果をまとめたものである。これから $\Delta\epsilon_{pp}$ ， $\Delta\epsilon_{cc}$ による破壊の形態は破壊の原因となる核が試験片表面で形成されるため雰囲気の影響を受けやすいのに対し， $\Delta\epsilon_{pc}$ ， $\Delta\epsilon_{cp}$ による破壊形態は破壊の原因となる核が試験片内部で形成されるため雰囲気の影響をほとんど受けないと言える。

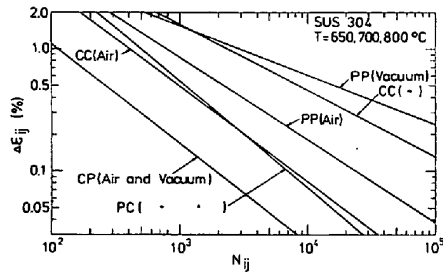
図2に示されたSUS304鋼以外の材料の $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性はすべて大気中で求められており，試験後の試験片表面および内部のき裂の形態をも考慮して，疲労とクリープの重畳効果を論ずる必要がある。表4に試験片の縦断面に観察された主き裂以外のき裂の形態をまとめて示す。Alloy 800H，鋳鋼以外では試験内部にき裂あるいは欠陥の存在は認められず，各材料とも $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性に雰囲気の影響を考慮する必要がある。

2¼Cr-1Mo鋼の場合，同一化学成分でも熱処理条件が異なると $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性も異っている。(図1(c),(d)) Annealed材では， $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性と $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 特性の間に大きな差がなく，き裂の発生も試験の種類によらず試験片表面に限られていることから， $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性間の小さな差はクリープの影響よりも雰囲気の影響によるものと考えられる。一方，N.T.材では $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性が最も低寿命側に位置し， $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性と $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 特性との間に明瞭な差が認められることから， $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性と他の3つの特性との差は雰囲気の影響よりもクリープの影響による方が大きいと言える。

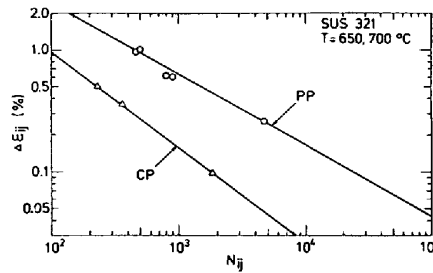
Alloy 800Hの場合， $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性が他の3特性に比べ最も低寿命側に位置する傾向にあるが， $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ ，

表3. SUS304鋼のI J試験での破壊の様相

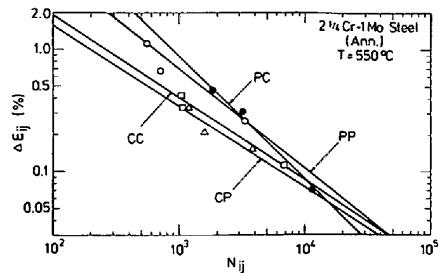
試験	ひずみの種類	破壊の様相		
		表面	内部	破壊の主原因
PP	$\Delta\epsilon_{pp}$	ストライエーションを伴う粒内き裂	ストライエーションを伴う粒内き裂	表面からの粒内き裂進展
PC	$\Delta\epsilon_{pp}+\Delta\epsilon_{pc}$	同上	伸長されたフィンブルあるいはポイド	試験片内部におけるポイドの形成
CP	$\Delta\epsilon_{pp}+\Delta\epsilon_{cp}$	ストライエーションを伴う粒内および粒界き裂	粒界き裂(多数)	試験内部における粒界き裂の形成と合体
CC	$\Delta\epsilon_{pp}+\Delta\epsilon_{cc}$	粒界き裂	粒界き裂(破面のみ)	表面からの粒界き裂進展



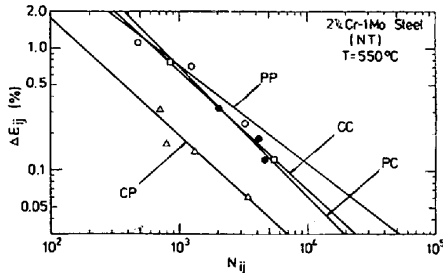
(a) SUS 304 (650, 700, 800°C)



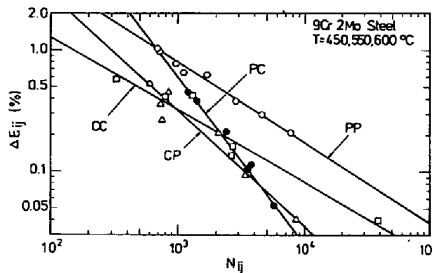
(b) SUS 321 (650, 700°C)



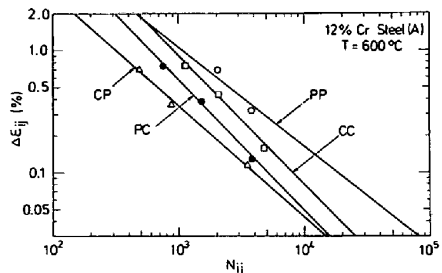
(c) 2 1/4 Cr-1 Mo (Ann.) (550°C)



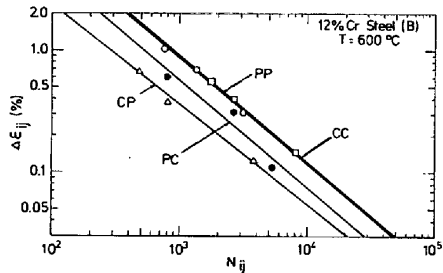
(d) 2 1/4 Cr-1 Mo (N.T.) (550°C)



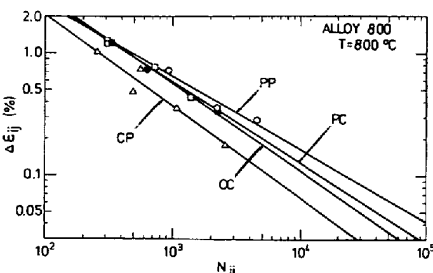
(e) 9Cr-2Mo (450, 550, 600°C)



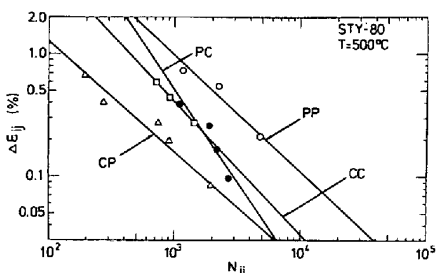
(f) 12% Cr (A) (600°C)



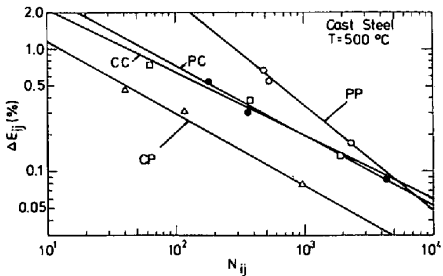
(g) 12% Cr (B) (600°C)



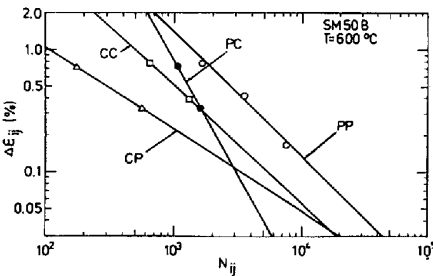
(h) Alloy 800 H (800°C)



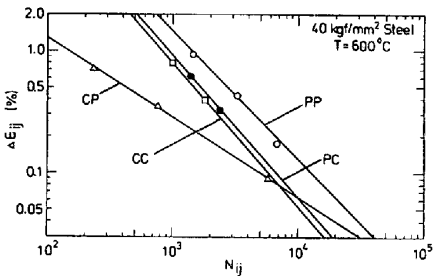
(i) STY 80 (500°C)



(j) 鑄鋼 (500°C)



(k) SM50 B (600°C)



(l) 40キロ鋼 (600°C)

図 2. 供試材料の $\Delta\epsilon_{ij} - N_{ij}$ 特性

表 4. I J 試験後の試験片表面および内部での主き裂以外のき裂の形態

試験の種類	2 1/4 Cr-1 Mo (Ann.)		2 1/4 Cr-1 Mo (N.T.)		9Cr-2Mo		12Cr (A)		12Cr (B)		Alloy 800H		STY80		鑄鋼		SM50B		40キロ鋼	
	表面	内部	表面	内部	表面	内部	表面	内部	表面	内部	表面	内部	表面	内部	表面	内部	表面	内部	表面	内部
PP	T	無	T	無	T*	無	T	無	T	無	T	無	T	無	無	無	T	無	T	無
PC	T	無	T	無	T*	無	T	無	T	無	T	D	T	無	無	無	T	無	T	無
CP	T	無	T	無	T*	無	T*	無	T	無	T	I	T	無	無	I	T	無	T	無
CC	T	無	T	無	T*	無	T*	無	T	無	T	無	T	無	無	無	T	無	T	無

T...粒内型き裂, I...粒界型き裂, D...ディンプル(ポイド)

T*...粒内型き裂で先端が分岐しているもの, 無...き裂認められず

表 5. A, B, n, A', B', n' の値

材料	T(°C)	A	B	n	A'	B'	n'
SUS 304	650	0.61	-0.016	1.20	-0.24	-0.10	2.46
	700	0.59	-0.037	1.20	-0.46	-0.30	2.31
	800	0.68	-0.031	1.20	-0.49	-0.066	1.49
2 1/4 Cr-1 Mo (Ann.)	550	0.42	-0.045	1.40	-0.29	-0.11	2.70
		(N.T.)	0.45	-0.040	1.40	-0.48	-0.16
9Cr-2Mo	550	0.48	-0.050	1.44	-0.37	-0.14	2.79
12Cr (A)	600	0.49	-0.056	1.40	-0.43	-0.22	2.05
	(B)	600	0.43	-0.062	1.50	-0.49	-0.23
STY 80	500	0.26	-0.067	1.54	-0.38	-0.17	2.15
SM50 B	600	0.60	-0.048	1.23	0.65	-0.16	1.48
40キロ鋼	600	0.65	-0.040	1.38	0.25	-0.12	1.57

$\Delta\epsilon_{pc}-N_{pc}$, $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ の3特性間の差は小さい。CP試験後の試験片内部に粒界き裂の発生は認められるものの、304鋼の場合ほど著しい $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性の劣化につながっていない。また、CC試験後に認められる表面き裂の形態は粒内型となっており、この点が $\Delta\epsilon_{pp}-N_{pp}$ 特性と $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ 特性の間に大きな差がない原因の一つと考えられる。

鋳鋼の場合には他の材料に比べ $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性が大巾に低寿命側に位置している。とくに、 $\Delta\epsilon_{pc}-N_{pc}$, $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$, $\Delta\epsilon_{cc}-N_{cc}$ の3特性が劣っている。これは試験前にすでに試験片内部に小さな欠陥が存在していたことによるものと考えられる。

一般的にみてオーステナイト系鋼、フェライト系鋼を問わず各材料とも $\Delta\epsilon_{cp}-N_{cp}$ 特性が疲労とクリープが重畳する条件下での寿命の下限を与えるようである。

3-2. 高温変形特性：各供試材について、クリープが疲労に重畳するPC, CPおよびCCの各試験において発生する $\Delta\epsilon_{pc}$, $\Delta\epsilon_{cp}$ および $\Delta\epsilon_{cc}$ と試験条件の関係についてまとめた。

図3はSUS304鋼について1本の試験片を用いて負荷ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1$ の異なる各種CP波形を繰返した場合の $\Delta\epsilon_{in}$ および $\Delta\epsilon_{cp}$ の値を求め、 $\dot{\epsilon}_1$ との関係を片対数グラフ上にプロットしたものである。 $\Delta\epsilon_{cp}$ の値は $\dot{\epsilon}_1$ の低下に伴ない片対数グラフ上で直線的に増大する。図4は同じくSUS304鋼について、 $\dot{\epsilon}_1$ および $\dot{\epsilon}_2$ を一定として、 $\Delta\epsilon_t$ と $\Delta\epsilon_{ij}$ ($ij \neq pp$)の関係を図示したものである。 $\Delta\epsilon_{in}$ と $\Delta\epsilon_t$, $\Delta\epsilon_{ij}$ と $\Delta\epsilon_t$ の関係は温度一定の場合試験の種類PC, CP, CCにはほぼ無関係に両対数グラフ上で一本の直線で表示される。また、その傾きにおよぼすひずみ速度の影響も小さいようである。

上述の事実より、IJ試験における $\Delta\epsilon_{in}$,

$\Delta\epsilon_{ij}$ は、次式のごとく表示できる。

$$\Delta\epsilon_{in} = (A + B \log \dot{\epsilon}) \Delta\epsilon_t^n \quad \dots (4)$$

$$\Delta\epsilon_{ij} = (A' + B' \log \dot{\epsilon}) \Delta\epsilon_t^{n'} \quad \dots (5)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}$ は $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2$ のうち低速のひずみ速度であり、A, B, n, A', B', n'は材料と温度によって定まる定数で各供試材について求めると表5のごとくとなる。

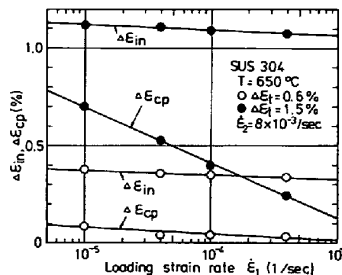


図3. $\Delta\epsilon_{in}$, $\Delta\epsilon_{cp}$ と $\dot{\epsilon}_1$ の関係

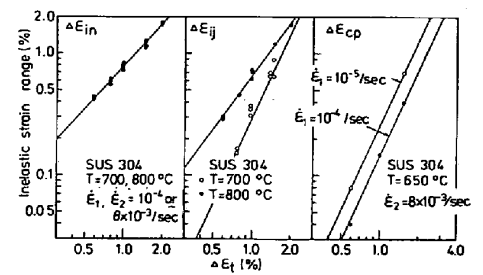


図4. $\Delta\epsilon_{in}$, $\Delta\epsilon_{ij}$ と $\Delta\epsilon_t$ の関係

式(4)および(5)を用いれば、一定温度での($\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2$)の任意の組合せの非対称三角波の場合のひずみ範囲の分割が可能である。すなわち、引張側クリープを ϵ_{c1} , 圧縮側クリープを ϵ_{c2} とすると、式(5)より、 $\epsilon_{c1} = (A' + B' \log \dot{\epsilon}_1) \Delta\epsilon_t^{n'}$, $\epsilon_{c2} = (A' + B' \log \dot{\epsilon}_2) \Delta\epsilon_t^{n'}$ となり、 $\Delta\epsilon_{in}$ は式(4)で求まるから、 $\epsilon_{c1} > \epsilon_{c2}$ ならば、 $\Delta\epsilon_{pp} = \Delta\epsilon_{in} - \epsilon_{c1}$, $\Delta\epsilon_{cp} = \epsilon_{c1} - \epsilon_{c2}$, $\Delta\epsilon_{cc} = \epsilon_{c2}$, $\epsilon_{c1} < \epsilon_{c2}$ ならば、 $\Delta\epsilon_{pp} = \Delta\epsilon_{in} - \epsilon_{c2}$, $\Delta\epsilon_{pc} = \epsilon_{c2} - \epsilon_{c1}$, $\Delta\epsilon_{cc} = \epsilon_{c1}$ となる。さらに荷重保持あるいはひずみ保持を伴う場合は保持時間中のクリープ変形量を ϵ_{c1} あるいは ϵ_{c2} に加算すればよく、実験式(4), (5)を明らかにすることにより、かなり複雑な波形の場合でもひずみ範囲の分割が可能となることがわかる。

4. 結言

ひずみ範囲分割法による高温疲労特性評価試験としてのIJ試験およびIJ試験によって求められた12種類の材料の $\Delta\epsilon_{ij}-N_{ij}$ 特性および高温変形特性を紹介した。比較的短時間でかつ数少ない試験片により、材料の特性を把握できる。しかしながら、いずれの材料についても雰囲気の影響は小さいとは言えず、今後真空中での試験データの蓄積が望まれる。また、動的ひずみ時効などのように負のひずみ速度依存性を示し、クリープ変形を打消すような変形機構の活性化条件下では今のところひずみ範囲分割法の適用は難しい。この点についても今後の研究が望まれるところである。

参考文献：省略