

[論文]

7/3 黄銅の二段二重ひずみ制御疲労寿命に関する研究

東海大学 工学部 教授・工博 林 守仁*

Fatigue Life Subjected to Dual Cyclic Strain Stage Loading in Cartridge Brass

Faculty of Engineering, Tokai University Prof, Dr. Eng. Morihito Hayashi

(Received February 21 ; Accepted May 7,2008)

For estimation of safety life in a fatigue strength design particularly in the case of fluctuating load, a way of thinking by Palmgren-Miner rule made the basics and is applied. However, it was reported that this technique did not work partly when the loading sequence was different or the kind of materials changed. Therefore, in this study, the phenomenon of cartridge brass subjected to dual stage fatigue load with two levels of cyclic strain in the form of pulsating triangle with load ratio of -1, said, low (Lo) to high (Hi) total strain range and vice versa, was investigated to correlate fatigue life due to sequence of loading. Based on the fatigue life curve of the previous report, 0.4% was taken here as one of low level of total strain ranges and 1.2% was taken as one of high level. In the initial stage, either of strains was loaded until a fixed life ratio, and then shifted to the next stage, where another strain was loaded to detect a life ratio of the stage. On the other hand, the experimental data were substituted into presumed expression formed by Coffin-Manson or Basquin rules in order to compare with Palmgren-Miner rule. As a result, it was confirmed that fatigue life is dominated by Palmgren-Miner rule in cartridge brass. However, the influence of load conditions of the initial stage on both of cyclic peak stress and plastic strain, in the next stage, was found as follows. In the case of Lo-Hi, in initial stage, the strain hardening was promoted locally, that made the microstructure further homogeneous mechanically. As a result, although the peak stress became slightly higher in the remained stage, the plastic strain was almost unchanged, and Palmgren-Miner rule effected still. As to the case of Hi-Lo, brass was greatly affected by strain hardening of preceding stage, and in the subsequent stage, the deformation resistance increased, with small amount of plastic strain.

Keywords: strain controlled fatigue, cartridge brass, linear damage rule, fatigue life prediction, cumulative fatigue damage, Coffin-Manson rule, Basquin rule, dual stage fatigue, Palmgren-Miner rule

1. 緒 言

近年、機械や構造物は、使い易さ、省エネルギーに配慮、ますます高性能化、高効率化と共に安全性が以前にも増して強く要求されてきた。それに伴い設計・製作技術は年々向上している、にもかかわらず、それらの製品破損による事故は絶えない。その中で主要原因は疲労に関わるものが多い。機械部品または構造物にはさまざまな、応力またはひずみが生じる。その場合、変動負荷を両振り負荷に等価変換し、安全寿命設計の考えに基づき、その耐用期間は線形累積損傷則¹⁾から発展してきた諸種手法により推定予測される。そのなかで、重なる大小繰返し負荷量（応力、ひずみなど）の順序または材料の種類に変化が生じた場合、寿命予測が外れることが報告されている。

そこで、本研究では、安全寿命の推定に関する知見をさらに深めようと、ひずみ制御式疲労試験法³⁾に則り、求めた7/3黄銅の低サイクル疲労寿命曲線⁴⁾をベースに、ひずみを変数とした二段二重の疲労試験を行い、ひずみ量の変動が寿命に与える影響を調べた。

2. 二段二重疲労寿命の表現式

累積損傷則を代表するマイナー則は繰返し作用応力 S_i を規準に、繰返し数比 n_i/N_i と、試験片に吸収されたエネルギー量 w_i の破壊に至るまでの全エネルギー W に対するエネルギー比 w_i/W は比例すると仮定し、次の関係を示した。

$$\frac{w_i}{W} = \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

ここで、 w_i は試験片が任意応力 S_i が n_i 回繰返されたことにより蓄積されたエネルギーである。 N_i は S_i が破壊に至るまで繰返される回数、すなわち、 S_i の疲労寿命を

* 〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117
Tel : 0463-58-1211 Fax : 0463-59-8293
E-mail : hayashi463@yahoo.co.jp

表している。Wはまた試験片が破壊するまでに作用する全エネルギーを指す。式(2)が示すように、試験片にはさまざまな破壊に寄与するエネルギーが作用したとしても、破壊に至るまでに辿る各過程の内訳に拘わらず、疲労破壊に費やす全エネルギーはつねに等しく一定であることが仮定されている、

$$w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n = W \quad (2)$$

(2)式の両辺を W で割ると次式(3)が得られる。

$$\frac{w_1}{W} + \frac{w_2}{W} + \frac{w_3}{W} + \dots + \frac{w_n}{W} = 1 \quad (3)$$

(3)式に(1)式を代入して(4)が得られる。

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = 1 \quad (4)$$

あるいは略して次式で示される。

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (5)$$

これまでの式は応力負荷を対象としているが、繰り返しひずみ負荷に対しても適用できることが考えられる。

二段二重疲労試験の場合は、マイナー則を2項に限定した場合、両負荷寿命割合の合計を満たす関係は式(6)で示される。

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1 \quad (6)$$

N_1, N_2 : 各疲労過程での破断寿命、 n_1, n_2 : 各疲労過程における繰返し数を示す。負荷条件の順序は関係なく、繰返し数比の和が1に達すると試験片は破断する。

ここで、この直線累積損傷則を低サイクルひずみ制御疲労に適用してみる。低サイクル疲労で得られた Coffin-Manson 則は次式(7)で示される。

$$\Delta \epsilon_p \cdot N_f^{k_p} = C_p \quad (7)$$

これはさらに次式(8)、

$$\left(\frac{\Delta \epsilon_p}{C_p} \right)^{1/k_p} = \frac{1}{N_f} \quad (8)$$

および(9)式で表わせる。

$$\left(\frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_o} \right)^\alpha = \frac{1}{N_f} \quad (9)$$

ただし、記号間に次の関係がある。

$$\epsilon_o = C_p \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{1}{k_p} \quad (11)$$

および ϵ_o は材料定数で、

$$\alpha \approx 2 \quad (12)$$

$$\epsilon_o \approx (0.8 \sim 1.0) \cdot \epsilon_f \quad (13)$$

とされている。また、引張試験では

$$N_f = 1/4 \quad (14)$$

$$\Delta \epsilon_p = 2\epsilon_f \quad (15)$$

と見なせるゆえ、(7)式より、次の関係を得る。

$$\epsilon_o = C_p = 2\epsilon_f / 4^{k_p} \quad (16)$$

マイナー則(5)式内の各項に対してひずみ制御疲労曲線上の(9)式を代入すると(17)式となる。

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta \epsilon_{pi}}{\epsilon_o} \right)^\alpha \cdot n_i = 1 \quad (17)$$

これより、サイクルあたりに生じる損傷率は $(\Delta \epsilon_{pi} / \epsilon_o)^\alpha$ であると見なせる。これが線形的に蓄積されて1に到達すると破断する。これを二段二重疲労試験に限定すれば、(6)式に対応した(18)式で表現される。

$$\left(\frac{\Delta \epsilon_{p1}}{\epsilon_o} \right)^\alpha \cdot n_1 + \left(\frac{\Delta \epsilon_{p2}}{\epsilon_o} \right)^\alpha \cdot n_2 = 1 \quad (18)$$

同様に、Basuquin 則によれば表現式は(19)式となる。

$$\left(\frac{\Delta \epsilon_{e1}}{C_e} \right)^\alpha \cdot n_1 + \left(\frac{\Delta \epsilon_{e2}}{C_e} \right)^\alpha \cdot n_2 = 1 \quad (19)$$

3. 供試材と試験片

もちいた供試材は 7/3 黄銅 (C2600-1/2H) である⁵⁾。その化学成分、引張性質、および内部組織は前報と同様である。ただ、試験片の寸法形状はFig.1 のものを用いた。

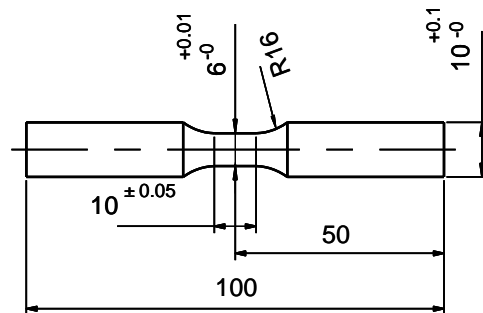


Fig.1 Configuration of fatigue specimen.

4. ひずみ制御疲労試験法および疲労寿命曲線

本研究で、行ったひずみ制御疲労試験の条件は前報⁴⁾と同様である。

$$\begin{aligned} \epsilon_{tr} &= \epsilon_{pr} + \epsilon_{er} \\ &= C_p N_f^{-k_p} + C_e N_f^{-k_e} \\ &= 0.272 N_f^{-0.4} + 0.0183 N_f^{-0.167} \end{aligned} \quad (20)$$

それによって得られた 7/3 黄銅のひずみ制御疲労寿命

曲線は Fig.2 に、実験式は(20)式に示した。式中の右辺2項の前項はCoffin-Manson則、後項はBasquin則を表す。

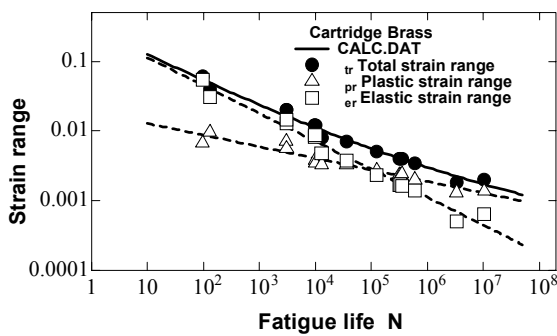


Fig.2 Fatigue curve for cartridge brass.

5. 二段二重疲労実験方法

二段二重疲労試験は Fig.3 が示すように、ひずみ制御疲労試験を前段階ではLoまたはHi のいずれかのひずみがある定められた回数繰り返される。引き続き、後段では逆のHi またはLo のひずみが破断するまで繰り返される。Lo-Hi は、前段に低ひずみを、後段に高ひずみで行い、Hi-Lo での順序は、その逆である。

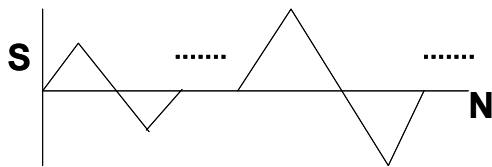


Fig.3 Dual stage fatigue test with double strain level.

具体的に、ここでの低ひずみは0.4%を、高ひずみは1.2%を選定した。それぞれのひずみが占める寿命割合はそのひずみが繰返した数をそのひずみの疲労寿命で割った。ここで、疲労寿命は疲労寿命曲線から、低ひずみ範囲0.4%では285000 サイクル、高ひずみ範囲1.2%では7200 サイクルを基準にして、マイナー則中各項の寿命割合を(21)式をもって算出した。

$$\frac{n_i}{N_i} = \frac{n_{0.4}}{285000}, \quad = \frac{n_{1.2}}{7200} \quad (21)$$

6. 二段二重疲労実験結果と考察

6.1 二段二重疲労寿命

上述の二段二重疲労試験を行った結果より得られた、前段階後段それぞれの繰返し数と寿命割合に関する数値データを Table 1 にまとめた。

7/3 黄銅(C2600-1/2H)試験片の室温大気中での「低ひずみ 高ひずみ」Lo-Hi または「高ひずみ 低ひずみ」Hi-Lo の二段二重疲労試験結果をそれぞれ Fig.4 および Fig.5 に示す。図中の横軸は前段の疲労寿命割合、縦軸は後段の破断するまでに占めた寿命割合、または、Coffin-Manson 則による(18)式、Basquin 則による(19)式をもって表わしている。なお、図中の対角線は二段二重疲

Table 1 Fatigue test results subject to dual stage.

Test Sequence	Strain %	% of 1st stage	Cycles of 1.2%	Cycles of 0.4%	% of 2nd stage.
Hi-Lo	1.2 to 0.4	76.6	5520	57744	20.2
		69.4	5000	111517	39.1
		57.5	4140	119245	41.8
		38.3	2760	178353	62.5
		29.0	2090	228052	89.7
	19.1	1380	255857	80.0	
Life from SN curve			7200	285000	
Lo-Hi	0.4 to 1.2	92.1	1638	262567	22.7
		84.2	1187	240000	16.4
		63.1	2627	180000	36.4
		42.1	4076	120000	56.6
		39.5	5110	112590	70.9
		21.0	4382	60000	60.8

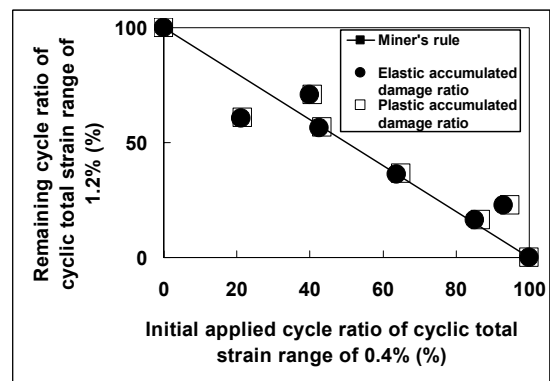


Fig.4 Dual strain stage fatigue test result for cartridge brass, low strain range of 0.4% in 1st stage and high strain range of 1.2% in 2nd stage respectively at the strain ratio of -1.

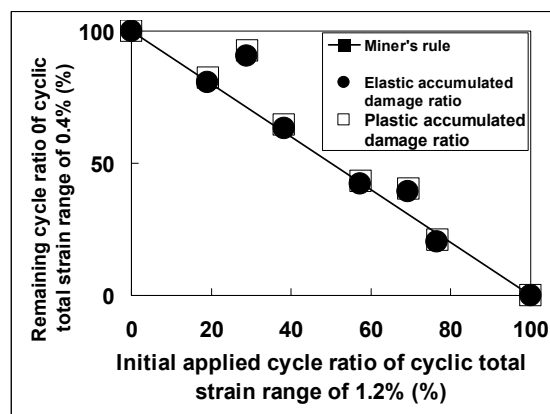


Fig.5 Dual strain stage fatigue test result for cartridge brass, high strain range of 1.2% in 1st stage and low strain range of 0.4% in 2nd stage respectively at the strain ratio of -1.

劣に対応した Miner の予測式、すなわち、(6)式の関係

表したものである。両図中において、左上から右下に向かった対角線より右上の領域では寿命が Miner の予測を上回ることを表し、対角線より左下の領域にある点は予測より寿命が短くして破断したことを表している。

本研究では、応力ではなく、ひずみを繰返し負荷条件として調査したものであるが、その結果、Hi-Lo または Lo-Hi のいずれの場合においても Miner 則による推測に近い傾向を示した。

6.2 二段二重疲労におけるヒステリシスループ

前段と後段での応力とひずみのサイクル関係を Fig.6 および Fig.7 に示す。これより各サイクルに起こる弾性と塑性のひずみ量および応力の最大と最小値の変化が検出される。

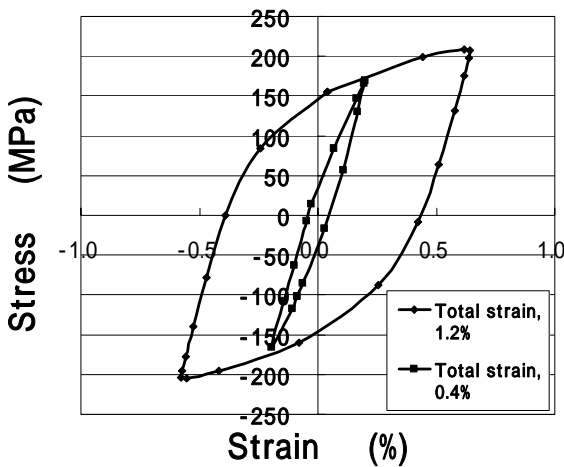


Fig.6 Hysteresis loop of double level fatigue test from Hi-1.2%ε to Lo-0.4%ε on cartridge brass.

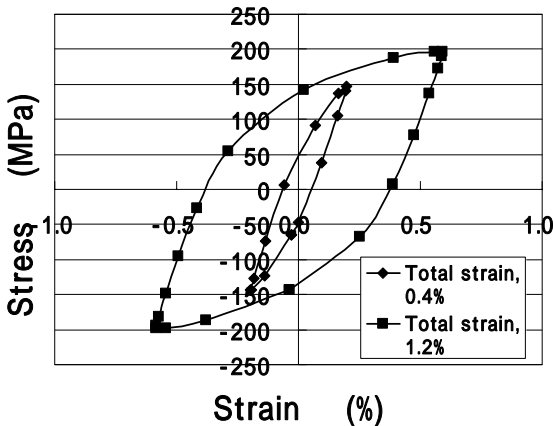


Fig.7 Hysteresis loop of double level fatigue test from Lo-0.4%ε to Hi-1.2%ε on cartridge brass.

実験で得られた応力のピーク値は試験条件に対して試験期間中は一定値にそれほど変動せず安定していた。そのうち、前段の影響を受けた後段の全応力範囲および塑性ひずみ範囲の数値変化を Table 2 に示す。

Table 2 Effect of 1st stage on total stress range and plastic

strain range in 2nd stage.

Test Sequence	Cyclic Strain %	1st stage %	t_r in 2nd stage	p_r in 2nd stage %	
hi-lo	1.2 0.4	0.4	NS data	316	0.181
			76.6	347	0.10
			69.4	340	0.13
			57.5	363	0.113
			38.3	373	0.150
			29.0	328	0.130
			19.1	307	0.120
			Mean	339	0.124
lo-hi	0.4 1.2	1.2	NS data	406	0.779
			92.1	448	0.805
			84.2	456	0.770
			63.1	424	0.800
			42.1	394	0.770
			39.5	390	0.790
			21.0	440	0.790
			Mean	425	0.788

それによると、前段が低ひずみ範囲 (Lo) の場合、高ひずみの後段での応力範囲は Fig.8 が示すように (SN 曲線の場合より) やや高めになる。その場合、前段の占める寿命割合が長い程、応力は増加する傾向が見られる、ただ塑性ひずみについては Fig.9 に見られるように多少のばらつきがあっても、特定の傾向は見られず、(SN 曲線の場合に比べて) 際立った変化は見られない。

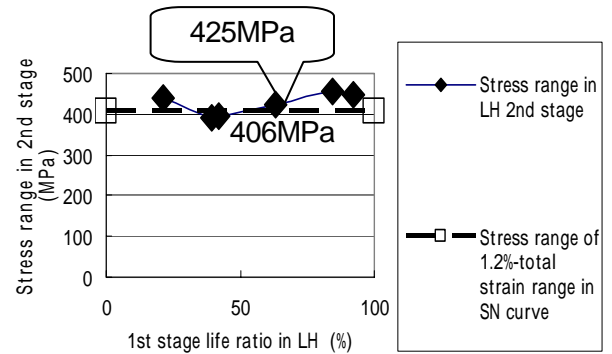


Fig.8 Stress in 2nd stage in Lo-Hi dual stage test.

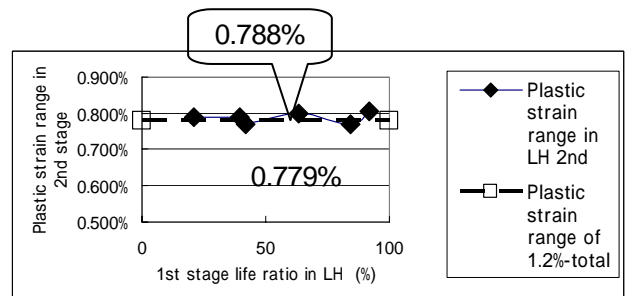


Fig.9 Plastic strain in 2nd stage in Lo-Hi dual stage test.

次に、前段が高ひずみ範囲 (Hi) の場合、低ひずみである後段においても応力範囲は Fig.10 が示すように (SN 曲線の場合より) 高めになっていることが見出された。

ただ、前段における高ひずみの作用回数は低ひずみの後段に生じる応力または塑性ひずみに対する特定の影響は見られなかった。なお、後段の塑性ひずみ範囲は、Fig.11 が示すように著しく低下していた。

二段二重疲労結果によれば、前段が後段に与える材質

の影響はあったとしても、全寿命はマイナー則に則って推移している。このように、前歴による加工硬化または累積損傷の影響が総合的に作用した結果、マイナー則による予測と大きく掛離れることはなかった。その詳細について次のようなことが考えられる。

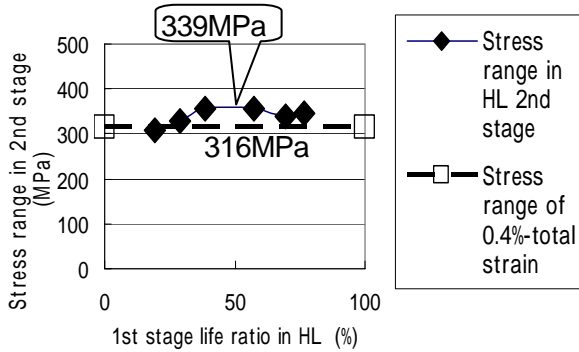


Fig.10 Stress in 2nd stage in Hi-Lo dual stage test.

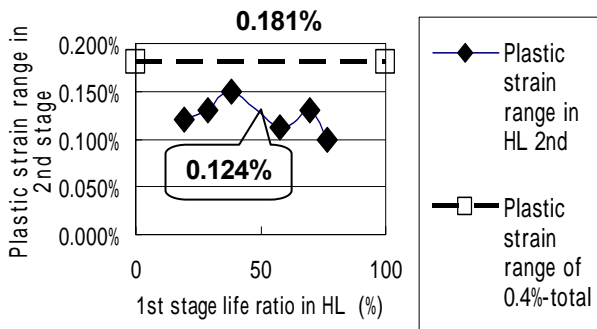


Fig.11 Plastic strain in 2nd stage in Hi-Lo dual stage test.

低ひずみ負荷の前段階では応力集中度の高い局部には選択的塑性変形が顕著に現れ、局部的にひずみ硬化と共にミクロ的破壊核の集中的形成が予想されがちである。しかし実際、後段での全体的硬化は Fig.8 が示すように特に目だって起こらず、繰返し塑性変形量も Fig.9 が示すように全面的影響変化は少ない。前段において局部的集中部では破壊核の形成よりは変形による硬化が先行し、後段での抵抗を多少上昇させるが、疲労破壊に直接寄与する塑性ひずみには大きな変化が見られなかった。また、これもマイナー則への符合を促した一つの原因でもあると考え、7/3 黄銅は単純に 固溶体より形成され、粒界また結晶粒欠陥以外に、析出物などの破壊欠陥形成要素が少なく、組織が均質一様である。

次に、前段が高ひずみの場合、ひずみ硬化が全面的におこりやすい。それに従い、低ひずみの後段での抵抗は Fig.10 が示すように上昇しているが、全体の繰返し塑性ひずみ量は Fig.11 が示すように低く、塑性破壊は特に促進されない。Fig.12 はその 1 例を表している。高負荷である繰返しひずみが前段に与えられたことにより、後段で発生した応力は高くなっている、しかしそれに伴う塑性ひずみ量は減り、全体的に疲労寿命の増減変化は見

られない。

粒内の転位濃度の増殖・蓄積によって生じる疲労損傷・欠陥は、主に繰返し負荷である塑性ひずみ量に直接関わる。この疲労破損に直接つながる繰返しひずみを二段二重疲労試験のパラメータとした寿命割合を Miner 則に適用したことと共に、7/3 黄銅自体の内部組織の一様性が加わり疲労寿命が Miner の提案式に直接符合したものと考える。

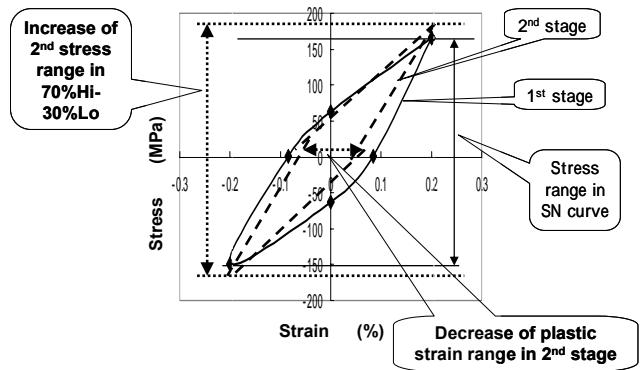


Fig.12 An example of change of hysteresis loop subjected to dual cyclic strain stage of Hi-Lo sequence.

4. 結言

本研究では、7/3 黄銅に対して、異なる 2 種類の繰返しひずみ負荷量をもって二段二重疲労試験を行った。その結果、後段では前段での影響を受けても、最終的に Miner 則による疲労寿命の予測の成り立つことが明らかになった。

謝辞 最後に、本研究の遂行にあたり、三菱伸銅株式会社鈴木竹四氏ならび熊谷淳一氏により試験素材をはじめとする多くの援助を頂いた。この場を借りて深甚なる謝意を表したい。

参考文献

- 1) M. A. Miner: Cumulative Damage in Fatigue, J. Appl. Mech., 12(1945), A159.
- 2) 例えば, A. Kobayashi, N.Ohtani, K. B. Choi: Proceedings, Third Japan-U.S. Conference on Composite Materials, Tokyo, (1986), 133-140.
- 3) 日本機械学会, 金属材料疲労強度の設計資料 低サイクル疲労強度(1983)
- 4) 林守仁, 鈴木竹四: 銅と銅合金, 44(2005), 286-291.
- 5) 日本規格協会, JIS ハンドブック 非鉄, (2001)