タフピッチ銅平板の変動応力下の疲労寿命推定法の検討*

渡辺 広光^{*1}, 山本 晴生^{*2}
三沢 啓志^{*3}, 大塚 満章^{*4}

Fatigue Life Prediction of Tough Pitch Copper Material Under Variable Stresses in Service Loading

Hiromitsu WATANABE^{*5}, Haruo YAMAMOTO,
Hiroshi MISAWA and Michiaki OHTSUKA^{*5} MEIDENSHA CORPORATION, Institute of Laboratory, ohsaki, 2-1-17, Sinagawa-ku, Tokyo, 141-8565 Japan

In spite of the tough pitch copper material is used for the many kinds of conductors of electrical machining devices, the fatigue phenomenon of the tough pitch copper material does not still clarify under variable stresses considering to a service loading. Then, constant stress amplitude fatigue tests were carried out for the tough pitch copper sheet material and then the fatigue life under variable stresses were predicted by Miner's law using constant stress tests results as shown $S-N$ diagram. The program fatigue tests consist of two steps and multifold stress levels were carried out for tough pitch copper sheet specimens compared with the fatigue lives predicted by using Miner's law. As it was clear that the fatigue lives predicted by using Miner's law were shorter than the experimental program fatigue lives under variable stresses in service loading, so new practical diagram modified from original $S-N$ diagram was proposed. The fatigue lives predicted by using new $S-N$ diagram coincide with experimental fatigue lives under variable stress consist of two or three step and multifold stress levels.

Key Words: Fatigue, Life Prediction, Nonferrous Metal, Bending, Miner's Law

1. 緒言

タフピッチ銅は発電機や電動機の電気機器の導体として広く使用されているが、近年、高効率、小型・軽量化されるとともに高い信頼性を実現するため、より精度の高い寿命予測技術が必要となってきた。

この導体に負荷される応力は、定常的な繰返し応力のみではなく、共振点通過時に発生する高レベルの応力や熱応力も重畳しており、時間と共に複雑に変化する変動応力を受けている。また、応力繰返し数は総繰返し数が 10^7 回を越えるような超長寿命域まで使用される。

しかし、銅材やアルミニウムなどの非鉄金属の疲労強度は応力繰返し数が 10^7 回を越えても $S-N$ 曲線が水平とならないため、疲労限度が明確に現れないことが知られている⁽¹⁾。そこで、このような特性を示すタフピッチ銅を強度部材として用いる場合には、一般に構造用鋼で用いられている疲労限度を基準とする評価方法が適用できず、有限寿命設計を行う必要がある。

また、変動応力を受ける場合の疲労寿命推定法には

変動する応力の大きさが全て疲労限度より大きい場合には、マイナー則が適用できることが明らかにされている。また、疲労限度以下の応力を含む場合には修正マイナー則、およびハイパッサの方法⁽²⁾、コルテン・ドラン⁽³⁾の方法を用いた線形累計繰返し数比に関する研究が盛んに行われている。

ところが、超長寿命域での有限寿命推定に関する研究は、高強度低合金鋼の回転曲げに関する研究⁽⁴⁾があるが、平面曲げに関する研究は、実験に多大な時間を要するためほとんど行われていない。さらに、超長寿命域下における変動荷重下の疲労寿命評価に関する研究は例を見ない⁽⁵⁾。

したがって、タフピッチ銅の変動荷重下における疲労寿命を精度よく推定するためには、超長寿命域において極めて多数回負荷される低レベルの応力負荷の影響を明らかにする必要がある。

そこで本研究は製造時の溶接を考慮した、焼きなまし熱処理を施したタフピッチ銅を用いて、回転機械の変動応力パターンを考慮した、低レベルの応力振幅を多数回負荷する変動応力試験を行い、超長寿命域での低応力負荷の影響を明らかにした。さらに、変動応力試験の結果をもとにして、タフピッチ銅の疲労寿命推定法について検討を加えた結果について報告する。

* 原稿受付 1999年11月19日。

^{*1} 正員, (株)明電舎 (☎ 141-8565 東京都品川区大崎2-1-17)。^{*2} 正員, 明星大学理工学部 (☎ 191-8506 東京都日野市程久保2-1-1)。^{*3} 正員, 東京都立大学大学院 (☎ 192-0397 八王子市南大沢1-1)。^{*4} (株)明電舎 (☎ 373-0847 太田市西新町127)。

E-mail: h-watana@ohsaki.meidensha.co.jp

2. 実験方法

2・1 試験片 試験片の材質はJ I S・C1100の加工度が1/2Hのタフピッチ銅で、組立時の溶接の影響を考慮するために、機械加工した後に真空中で1027Kで600 s間保持して炉冷する焼なまし熱処理を施した。

表1は材料の機械的性質を示す。引張強さはJ I S・Z2201の5号試験片で測定し、硬度はマイクロビッカース硬度計(荷重2N、保持時間20 s)で測定した。なお、0.2%耐力はひずみゲージを試験片の中央部の表面と裏面に取り付け、曲げ成分を除去したひずみから求めた。

図1は引張試験における試験片の公称応力とクロスヘッドストローク(初期値100mm)の増分との関係を示す。試験片の変形挙動は0.2%耐力(25MPa)を越えた後もストロークの増加とともに応力が増加する傾向が認められ、焼きなまし熱処理を施しているため大きな加工硬化を生じることがわかった。

疲労試験片の寸法形状は図2に示すように、疲労き裂の発生箇所を最小断面部に限定させるため、試験片の中央部に緩やかな切欠きを設けたが、有限要素法による解析では応力集中係数は1.1で平滑材とみなすことができる。

2・2 試験機 試験機は島津製作所製の曲げ・ねじり疲労試験機T B - 1 0型である。本機はモーメント振幅が一定の試験機で、容量が49 N・m、試験速度が33cycles/sである。

また、本研究での破断繰返し数 N_f の定義は、疲労き裂の進展により試験片の曲げ剛性が低下し、チャック部のたわみ量が約10mmを越えて疲労試験機の自動停止装置が作動した時の繰返し数とする。

Fig.1 Stress-Stroke curve

Table 1 Mechanical properties

0.2% proof strength	Tensile strength	Hardness (2N, 20s)
25MPa	214MPa	35Hv

3. 実験結果

3・1 S-N曲線 図3は応力比 $R = -1$ の両振りで、繰返し応力振幅が一定の平面曲げ疲労試験で得られたS-N曲線である。図の縦軸は応力振幅 σ を、横軸は破断繰返し数 N_f を両対数目盛りで示す。図3は破断繰返し数が 4×10^8 回の超長寿命域においてもS-N曲線に水平部が現れず、疲労限度を特定することができないことを示している。また、 σ と N_f との関係を対数表示して両者の関係を直線近似して求めた実験式を表すと式(1)のようになる。

$$N_f = (650 / \sigma)^{7.42} \quad \text{----- (1)}$$

なお、試験片表面に約1mmの疲労き裂が発生する応力繰返し数は N_f に対して σ が小さい50~60MPaの場合が90%以上で、 σ が大きい120~150MPaの場合が約80%である。したがって、疲労き裂が進展している繰返し数は破断繰返し数 N_f に対して小さな割合であると見なすことができる。

また、 σ が50MPaの疲労試験後の試験片中央部のビッカース硬度(2N、20s)は85Hvであり、表1に示す試験前の35Hvと比べると大幅に硬化している。

Fig.2 Fatigue specimen

Fig.3 S-N curve

3・2 変動応力実験方法 本研究は回転機械の変動応力パターンを模擬して、低応力の応力繰返し数が高応力の繰返し数に対して20倍から100倍となるように変動応力パターンを決めた。表2は本研究で実験した変動応力試験の1ブロックにおける各段の応力振幅とその繰返し数ならびに、式(2)で示される1ブロックの損傷度 d を示す。

$$d = (n_i / N_{fi}) \quad \text{----- (2)}$$

ここで、 N_{fi} は式(1)により求めた i 段目の応力振幅負荷による破断繰返し数であり、 n_i は表2に示す i 段目応力振幅の1ブロックの繰返し数である。

次に、各変動応力の組み合わせについて説明する。パターン1から5までは二段二重疲労試験である。パターン1と2は一段目に高応力振幅である120MPaの応力を、パターン1の場合は 1.60×10^5 回、パターン2の場合は 5.25×10^4 回繰返した後に、低応力振幅である60MPaを破断まで繰返す、応力振幅減少型の二段二重疲労試験でH型と呼ぶ。これによって、初めに繰返される高応力振幅の繰返し数が疲労寿命に及ぼす影響を検討しようというものである。

パターン3と4は一段目に低応力振幅である60MPaの応力を、パターン3の場合は 1.22×10^7 回、パターン4の場合は 4.80×10^6 回繰返した後、高応力振幅である120 MPaを破断するまで繰返す、応力振幅増加型

の二段二重疲労試験でL型と呼ぶ。この試験では初めに繰返される低応力振幅の繰返し数をパターン4とパターン3で2.5倍に変えて、疲労寿命に及ぼすステップ1の低応力振幅の繰返し数の影響を検討するものである。

パターン5は、パターン3と同じL型で、低応力振幅を50MPa、高応力振幅を100MPaとして低応力振

Table 2 Experimental procedure

Pattern No.	Step No.	Applied stresses	Number of cycles	Cumulative
		Stress amplitude σ_i MPa	per one block n_i cycles	cycle ratio d by Eq(1)and(2)
1	1	120	1.60×10^5	0.58
	2	60	-	-
2	1	120	5.25×10^4	0.19
	2	60	-	-
3	1	60	1.22×10^7	0.26
	2	120	-	-
4	1	60	4.80×10^6	0.10
	2	120	-	-
5	1	50	5.01×10^7	0.27
	2	100	-	-
6	1	100	1.20×10^5	0.11
	2	50	2.76×10^6	0.01
7	1	150	1.00×10^4	0.19
	2	50	8.50×10^6	0.05
8	1	150	1.00×10^4	0.19
	2	100	5.00×10^4	0.05
	3	50	8.50×10^6	0.05
9	1	150	1.00×10^4	0.19
	2	100	1.00×10^5	0.10
	3	50	8.50×10^6	0.05

Table 3 Experimental results

Pattern No.	Step No.	sample1			sample2			sample3			mean		
		Total number of cycles to failure cycles	Cumulative cycle ratio D by Eq(1)and(3)	Cumulative cycle ratio D' by Eq(4)and(3)	Total number of cycles to failure cycles	Cumulative cycle ratio D by Eq(1)and(3)	Cumulative cycle ratio D' by Eq(4)and(3)	Total number of cycles to failure cycles	Cumulative cycle ratio D by Eq(1)and(3)	Cumulative cycle ratio D' by Eq(4)and(3)	Total number of cycles to failure cycles	Cumulative cycle ratio D by Eq(1)and(3)	Cumulative cycle ratio D' by Eq(4)and(3)
1	1	1.60×10^5	0.58	0.48	1.60×10^5	0.58	0.48	—	—	—	1.60×10^5	0.58	0.48
	2	1.57×10^7	0.33	0.73	1.06×10^7	0.22	0.49				1.32×10^7	0.28	0.61
		total	0.90	total 1.21	total	0.80	total 0.97				total	0.85	total 1.09
2	1	5.25×10^4	0.19	0.16	5.25×10^4	0.19	0.16	5.25×10^4	0.19	0.16	5.25×10^4	0.19	0.16
	2	1.00×10^7	0.21	0.47	2.22×10^7	0.47	1.04				1.69×10^7	0.35	0.79
		total	0.40	total 0.62	total	0.65	total 1.19				total	0.54	total 0.94
3	1	1.22×10^7	0.26	0.57	1.22×10^7	0.26	0.57	—	—	—	1.22×10^7	0.26	0.57
	2	1.26×10^5	0.45	0.38	8.78×10^4	0.32	0.26				1.07×10^5	0.38	0.32
		total	0.71	total 0.95	total	0.57	total 0.83				total	0.64	total 0.89
4	1	4.80×10^6	0.10	0.22	4.80×10^6	0.10	0.22	4.80×10^6	0.10	0.22	4.80×10^6	0.10	0.22
	2	1.76×10^5	0.63	0.53	2.87×10^5	1.03	0.86				2.41×10^5	0.87	0.72
		total	0.73	total 0.75	total	1.13	total 1.08				total	0.97	total 0.94
5	1	5.01×10^7	0.27	0.78	—	—	—	—	—	—	5.01×10^7	0.27	0.78
	2	4.33×10^5	0.40	0.43							4.33×10^5	0.40	0.43
		total	0.67	total 1.22							total	0.67	total 1.22
6	1	6.00×10^5	0.56	0.60	5.31×10^5	0.49	0.53	—	—	—	5.66×10^5	0.53	0.57
	2	1.24×10^7	0.07	0.19	1.10×10^7	0.06	0.17				1.17×10^7	0.06	0.18
		total	0.62	total 0.79	total	0.55	total 0.70				total	0.59	total 0.75
7	1	2.92×10^4	0.55	0.33	6.00×10^4	1.13	0.68	5.00×10^4	0.94	0.57	4.64×10^4	0.87	0.53
	2	1.70×10^7	0.09	0.27	4.39×10^7	0.24	0.69				3.33×10^7	0.18	0.52
		total	0.64	total 0.60	total	1.37	total 1.37				total	1.05	total 1.05
8	1	4.00×10^4	0.75	0.46	4.00×10^4	0.75	0.46	5.00×10^4	0.94	0.57	4.33×10^4	0.82	0.49
	2	1.94×10^5	0.18	0.19	2.00×10^5	0.19	0.20				2.08×10^5	0.19	0.21
	3	2.75×10^7	0.15	0.43	2.69×10^7	0.15	0.42				2.95×10^7	0.16	0.46
		total	1.08	total 1.08	total	1.08	total 1.08				total	1.17	total 1.16
9	1	2.00×10^4	0.38	0.23	4.00×10^4	0.75	0.46	3.00×10^4	0.56	0.34	3.00×10^4	0.56	0.34
	2	2.00×10^5	0.19	0.20	3.10×10^5	0.29	0.31				2.70×10^5	0.25	0.27
	3	1.67×10^7	0.09	0.26	2.55×10^7	0.14	0.40				1.98×10^7	0.11	0.31
		total	0.65	total 0.69	total	1.18	total 1.16				total	0.92	total 0.92

幅と高応力振幅の比をパターン3と4の場合と同一に選び、一段目の低応力振幅による繰返し数比 d もパターン3と同一になるように決めたものである。

パターン6と7は、二段多重疲労試験条件を示す。パターン6は、一段目の高応力振幅は $\sigma_1=100\text{MPa}$ で1ブロック中の繰返し数 $n_1=1.20 \times 10^5$ 回を選び、二段目の低応力振幅は $\sigma_2=50\text{MPa}$ 、その繰返し数は $n_2=2.76 \times 10^6$ 回としたものである。またパターン7は、一段目の高応力振幅を $\sigma_1=150\text{MPa}$ 、その繰返し数 $n_1=1.00 \times 10^4$ 回を選び、二段目の低応力を $\sigma_2=50\text{MPa}$ 、その繰返し数を $n_2=8.50 \times 10^6$ 回としたものである。パターン6と7では、一段目の応力とそれぞれの n_1 も変えて1ブロック中の高応力による損傷度を変えている。同様に、二段目の低応力振幅の値は同一にして n_2 をそれぞれのパターンで変えて、低応力による1ブロック中の損傷度を変えている。これによって、パターン6と7では、応力振幅の変動幅が異なりパターン6の応力変動幅が50MPaであるのに対して、パターン7の場合は100MPaと2倍である。

パターン8と9は、実機に負荷されている実働荷重のパターンを模擬した三段多重疲労試験条件を示す。両パターンとも各段の応力振幅の大きさ $\sigma_1=150\text{MPa}$ 、 $\sigma_2=100\text{MPa}$ 、 $\sigma_3=50\text{MPa}$ はそれぞれ同一で、1ブ

ロック中の σ_2 の繰返し数 n_2 だけが異なっている。パターン8は $n_2=5.00 \times 10^4$ 回とし、パターン9では2倍の $n_2=1.00 \times 10^5$ 回に選んでいる。

3・3 変動応力試験結果 表3はマイナー則によって求めた累計繰返し数比 D を示す。ここで D は実験で得られた i 段目の破断応力繰返し数 n_i と、 i 段目の応力振幅 σ を式(1)に代入して求めた破断寿命 N_i を用いて式(3)によって求めた。

$$D = \sum (n_i / N_i) \quad \text{-----} \quad (3)$$

表3には、同一試験条件で行った複数回の試験結果を数値データによって示した。なお、同表中の D' は後述の修正S-N曲線に基づく累積繰返し数比である。

図4に破断面の一例としてパターン7の破断面写真を試験片を重ねた状態で示す。疲労き裂は4ブロック目の150MPaの応力繰返し中に試験片のかど部から発生した。また、断面には変動応力に対応するビーチマークが確認された。

図5は変動応力試験のパターン番号と D の値を示す。

Fig.4 Photograph of the section (pattern 7)

Fig.6 S-N curve

Fig.5 Cumulative cycle ratio by Eq(1) and (3)

Fig.7 Cumulative cycle ratio by Eq(4) and (3)

図中の○印は表3に示す試験片1、2および3の累計繰返し数比であり、それらの平均値を■印に示す。これ以後は平均値について考察する。

図5から、二段二重のH L型のパターン1と2の結果を見ると、両パターンともD値は1より小さく、高応力振幅の繰返しによる損傷が大きいパターン1に比べて、小さいパターン2の方が低応力による損傷が大きいことを示している。このことは、線形損傷則が成立するとすれば、パターン1では高応力の繰返し後の残存累計繰返し数比は $0.42(1-d=0.42)$ であるのに実験結果は0.28(表3のD値)であった。また、パターン2では、同様に0.81であるのに実験結果は0.35であることを示している。

一段目に低応力振幅を多数回繰返ししたパターン3の場合では残存累計繰返し数比が0.74と想定できるが、実験結果では0.38である。一方、低応力振幅の繰返し数が少ないパターン4の場合は0.90に比べて、0.87とほぼ等しくなっている。

このことは、低応力振幅が多数回負荷されている場合の、低応力振幅による残存累計繰返し数比の推定すなわち疲労寿命の推定に線形損傷則は成立せず、低応力振幅の疲労寿命に何らかの修正が必要であることを示している。

3・4 寿命推定法の検討 本実験結果を考察すると、マイナー則を用いて変動応力下の疲労寿命推定を行う場合には、低応力振幅の損傷を大きく見積る必要があることがわかった。

変動応力下の疲労寿命推定に関する研究は、S-N曲線の修正方法についてハイバッハ⁽²⁾、菊川⁽⁶⁾およびコルテン・ドラン⁽³⁾の研究がある。

この中で実用性を考慮して、S-N曲線が直線で示されるコルテン・ドランの方法について検討を行ったが、損傷度のD値が1より大きくなる傾向となった。

そこで、コルテン・ドランの方法による修正のスタート点を、繰返し加工硬化後の降伏応力⁽⁷⁾である100 MPaにとり、降伏応力以下の小応力側の損傷を大きく見積もり、降伏応力以上の高応力側の損傷を小さく見積もるようにS-N曲線を修正した。修正したS-N曲線は次式の式(4)であり、修正したS-N曲線を図6の実線で示す。

$$Nr' = (1000/\sigma)^{6.0} \quad \text{----- (4)}$$

次に式(4)を用いて各応力振幅における Nr' を求め、これを式(3)の N_i に代入して、修正後の累計繰返し

数比 D' を求めた結果を図7に示す。本研究で行ったすべての変動応力パターンで、損傷度 D' の値がほぼ1となっていることがわかる。

以上のことから本研究で検討した種々の変動応力パターンについて、S-N曲線を図6あるいは(4)式を用いて修正することにより、変動応力下の寿命推定の精度が改善できることがわかった。

なお、電気銅を用いた超音波疲労試験による研究⁽⁸⁾では 1×10^9 回においても、本研究と同様に疲労限度が明確に現れない結果が得られている。一方、変動応力下においては低応力レベルの損傷を大きく見積る必要があるため、図6のS-N曲線の修正結果は $\sigma = 50 \text{ MPa}$ の一定応力振幅で得られた超長寿命域の測定点からはずれた結果となっている。

4. 結論

タフピッチ銅の平面曲げ応力下で変動応力試験を行い、その応力の総繰返し数が 1×10^7 回を越えるような長寿命範囲における疲労寿命について検討した結果、次の結論が得られた。

- (1) 変動応力試験の結果から、繰返し応力振幅の大きさが小さい50 MPaや60 MPaであっても、疲労寿命の低下に多大な影響を及ぼし、二段二重疲労試験ではマイナー則による累計繰返し数比が0.54と小さくなることがわかった。
- (2) 変動応力下の疲労寿命推定の精度を高めるには、低応力側の損傷を大きく見積る必要がある。変動応力パターンにおいては式(4)に示すようにS-N曲線の傾きを大きくすることにより、疲労寿命は最大25%の誤差で推定できることを明らかにした。

文 献

- (1) 日本材料学会編, 金属の疲労, (1970), 124, 丸善.
- (2) Hibach, E., *The Allowable Stresses under Verifiable Amplitude Loading of Welded Joints*, Proc. on Fatigue of Welded Structures, 6-9, (1970).
- (3) Corten, H. T. ・Dolan, T. J., Proc. Inter. Con. on Fatigue of Metals. Inst. Mech. Engrs (London), and ASME, (1956), 235.
- (4) 金澤・西島, 材料, 46-12, (1997), 1396.
- (5) 城野, 機講論, No. 96-1-II, (1996), 414.
- (6) 菊川・城野・宋, 材料, 21-227, (1972), 753.
- (7) 山田・幡中・与川, 機論, 40-339, (1974), 2967.
- (8) 栗谷・他3名, 機論, 40-337, (1979), 2453.