



Title	疲れ強さにおよぼす加工硬化および残留応力の影響 : 低温焼鈍の場合
Author(s)	秦, 謹一; Hata, Kin-ichi; 長沢, 徹 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 97, 1-9
Issue Date	1980-02-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41602
Type	departmental bulletin paper
File Information	97_1-10.pdf



疲れ強さにおよぼす加工硬化および残留応力の影響

— 低温焼鈍の場合 —

秦 謹一* 長 沢 徹**

(昭和54年9月29日受理)

The Effect of Work-Hardening and Residual Stress upon the Fatigue Strength

— A Case of Low Temperature Annealing —

Kin-ichi HATA Tōru NAGASAWA

(Received September 29, 1979)

The purpose of this paper is to examine the effect of work-hardening and residual stress upon the fatigue strength of cold-rolled plate specimens. Material used in this experiment is commercial deoxidized copper. The tension test and bending fatigue test of the cold-rolled specimens are carried out after low temperature annealing in vacuum for 90 min. at 280°C, and then the residual stress in these plate specimens is measured by strain gauge method.

In spite of the tensile residual stress in the vicinity of the surface of the plate specimens, the fatigue strength of the cold-rolled specimens increases by 14 to 24% as compared with that of the annealed specimens with an increase of reduction in thickness.

The S-N curves predicted by the equation which has been proposed with consideration of the effect of work-hardening and residual stress are in good agreement with the experimental results. It can be verified from the results that the effect of work-hardening upon the fatigue strength is about 3 times that of residual stress.

1. 諸 言

繰返し荷重を受けている機械や構造物は、応力振幅が弾性限度以下であっても破壊が生じる。このような疲れ破壊は、金属材料の実用面においてきわめて重要であるが、材料の大きさ、形状、応力負荷条件などの力学的因子や、材料の組織などの金属学的因子によって影響を受けやすいので、疲れ破壊の現象は複雑なものとなる。

現在までに、疲れ強さを上昇させるため、材料に表面圧延¹⁾やショットピーニング^{2),3)}などの冷間加工を施すことは有益な手段であることが確められている。これらの手段による疲れ強さの上昇は、加工硬化による材質の変化と残留応力との相互作用の結果として起こることが知られている。

金属材料の疲れ強さにおよぼす加工硬化、残留応力の重要性を評価するために、多くの研

* 機械工学第二学科 塑性加工学講座

** 北海道教育大学 釧路分校

究^{4),5)}がなされており、光永ら⁶⁾は炭素鋼の回転曲げ疲れ試験を行い、加工硬化と圧縮残留応力の影響を考察しており、中村⁷⁾、早山⁸⁾、宇田川ら⁹⁾によってもピアノ線、炭素鋼の回転曲げ疲れ試験において、加工硬化と残留応力の影響が定量的に解析されている。

残留応力に着目すると、疲れ強さは外層部に生じている圧縮残留応力によって上昇し、引張残留応力は、逆に、疲れ強さを低下させるということが知られているが¹⁰⁾、引張残留応力が生じている場合でも疲れ強さが上昇するという研究例^{11),12),13)}もある。また、板を冷間圧延する場合は、ロール直径、圧下率、板厚などの圧延条件によって、板の表面に生じる残留応力が、圧縮となったり、引張となったりすることが言われており^{14),15)}、冷間圧延により表面に引張残留応力が生じている場合の疲れ強さにおよぼす加工硬化、残留応力の影響の程度を研究した例は少ない。

本研究では、市販の脱酸銅 (Cu: 99.9%, P: 0.024%) を用い、冷間圧延を施した材料について、両振り平面曲げ疲れ試験の実験的研究を行い、疲れ強さにおよぼす加工硬化および残留応力の影響を調べることを目的とし、さらに、加工硬化と残留応力が生じている場合の材料の疲れ強さの推定方法について検討している。

2. 供試材料および試験片

本実験で使用した供試材料は、市販の脱酸銅板 (板厚: 2.6 mm) であり、表 1 に供試材料の分析結果を示す。

供試材料の圧延方向と試験片の長手方向とが一致するように試験片を切り出し、最初に、圧延加工を施さない試験片と、圧延加工を施す試験片の基地をそろえるため、280°C、90 分保持の真空低温焼鈍を行った。その後、圧延加工を施さない試験片、すなわち焼なまし材は、フライス加工および穴あけ加工後、残留応力除去のため、280°C、60 分保持の真空低温焼鈍を行い、又、圧延加工を受けた試験片としては、実験用 2 段圧延機 (ロール直径: 150 mm, ロール長さ: 180 mm) により、各種の圧下率に冷間圧延を行った後に焼なまし材と同様の機械加工を施し、試験片を製作した。試験片形状および寸法と、今後の説明で必要となる座標軸 (x 軸, y 軸) を、図 1 に示す。

疲れ強さは、表面仕上げの影響を受けやすいので各試験片の最小断面部に、2000 番の紙やすりで表面を研磨し、さらに、酸化アルミニウム粉を溶かした水溶液を用いてバフ研磨を行い、各試験片の表面を鏡面状態に仕上げた。

3. 実験方法および実験結果

3.1 引張試験結果

引張試験には、万能試験機 (RH-50: 島津製作所) を用い、焼なまし材、およびその焼なま

表 1 供試材料の組成

供試材料	組 成 (重量 %)		
	Cu	P	O
脱 酸 銅	99.9	0.024	—

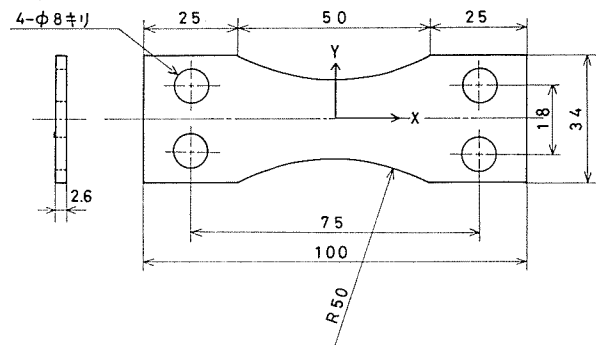


図 1 試験片形状および寸法

し材に各種の圧下率により冷間圧延を行った各引張試験片(板幅: 25 mm, 平行部長さ: 180 mm)の中央部両面に電気抵抗線ひずみゲージ(KFC-2-D16-16: 共和電業)を貼り, ひずみ変化を動ひずみ計(DPM-110B: 共和電業)で測定し, 多ペンレコーダー(B-38H: 理化電機)に記録させた。得られた銅の応力-ひずみ曲線より, 縦弾性係数, ポアソン比, 引張強さ, 降伏点を求めた。

本実験では, 圧延の加工度をあらわす量として次式で示される圧下率を用いることにする。

$$\text{圧下率} = \frac{h_0 - h}{h_0} \times 100 (\%) \quad (1)$$

ここで, h_0 : 圧延前の板厚, mm

h : 圧延後の板厚, mm

以後, 焼なまし材の語は, 圧下率0%の意味も含んでおり, 焼なまし材に, 5%, 10%, 15% および20%の圧下率の圧延を施した試験片を, それぞれ, 圧下率5%, 圧下率10%, …… , 圧下率20%の試片と呼ぶことにする。

焼なまし材, 圧下率5%, 圧下率10%, …… , 圧下率20%の試片の引張試験結果を図2に示す。図中で示されている細線は, 0.02%永久ひずみに対応するものであり, 本実験では, 0.02%永久ひずみを生ずる応力を降伏点とした。図より明らかなように, 圧下率の上昇に伴い引張強さ, 降伏点が増加しているのがわかる。焼なまし材, 圧下率5%, 圧下率10%, 圧下率15%, 圧下率20%の試片の引張強さは, それぞれ, 23.6 kg/mm², 26.3 kg/mm², 28.3 kg/mm², 29.5 kg/mm² および30.9 kg/mm²であり, 降伏点は, それぞれ, 20.0 kg/mm², 21.2 kg/mm², 24.5 kg/mm², 25.7 kg/mm² および26.6 kg/mm²である。

図より, 縦弾性係数 $E=1.22 \times 10^4$ kg/mm², ポアソン比 $\nu=0.33$ と決定し, これらの値を用いて, 曲げ応力の算定, 残留応力の計算を行った。

圧下率5%, …… , 圧下率20%の各試片の引張強さから焼なまし材の引張強さを引いた引張強さの増加量 $\Delta\sigma_B$ は, それぞれ, 2.7 kg/mm², 4.7 kg/mm², 5.9 kg/mm² および7.3 kg/mm² である。図3に各圧下率と引張強さの増加量 $\Delta\sigma_B$ の関係を示す。図から, 引張強さの増加量 $\Delta\sigma_B$ は, 圧下率の上昇に伴い増加しているのがわかる。

3.2 両振り平面曲げ疲れ試験結果

本実験では, シェンク式疲れ試験機を使用し, それに治具を取り付け, 両振り平面曲げ疲れ試験を行った。毎分の応力繰返し数は1000

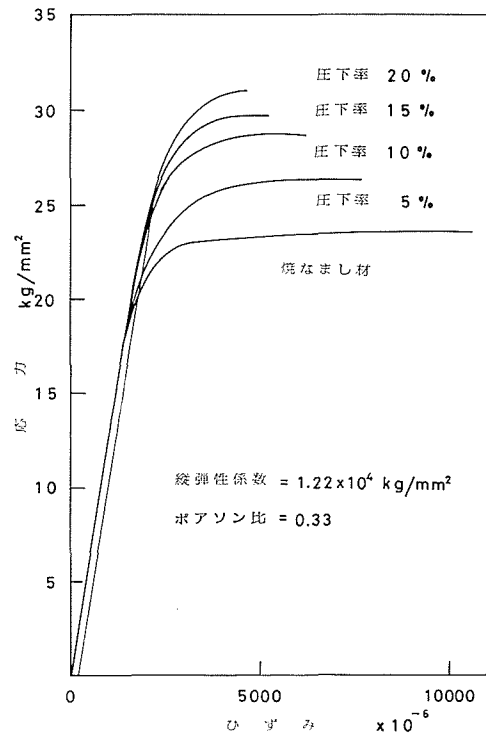


図2 各圧下率における銅の応力-ひずみ曲線

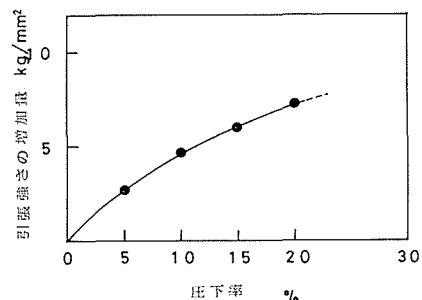


図3 圧下率と引張強さの増加量 $\Delta\sigma_B$ との関係

r.p.m.である。曲げ応力の算定は、各圧下率の試験片の表面にひずみゲージを貼り、疲れ試験機に取り付け、負荷を増してゆく時のひずみ変化を測定し、図2の銅の応力-ひずみ曲線より行った。

前記の焼なまし材、圧下率10%、圧下率20%の三種類の疲れ試験を行い、得られたS-N線図を図4に示す。図内の○、●印などは実験結果を示し、実線はこれらの実験点を結ぶことにより得られたものである。図4における多数の実験点をあらわすものを3つの直線で近似すると、各直線間の接続点が、S-N線図上に繰返し数 2.0×10^5 回付近と、 6.0×10^6 回付近に2カ所見られる。前者は、応力約 20 kg/mm^2 と降伏応力に相当し、後者は疲れ限度に相当する。本実験では、4章の所で述べてあるが、繰返し数 1.5×10^7 回に達する応力を疲れ限度とした。図より、圧下率の上昇に伴い、時間強さ、疲れ限度が上昇しているのがわかる。

焼なまし材、圧下率10%、圧下率20%の試片の疲れ限度は、それぞれ、 8.6 kg/mm^2 、 9.8 kg/mm^2 および 10.7 kg/mm^2 である。冷間圧延により、焼なまし材にくらべ、圧下率10%で 1.2 kg/mm^2 、圧下率20%で 2.1 kg/mm^2 の疲れ限度の上昇が見られた。図5に各圧下率と疲れ限度との関係を示す。この図からもわかるように、疲れ限度は圧下率の上昇につれ、ほぼ直線的に上昇している。

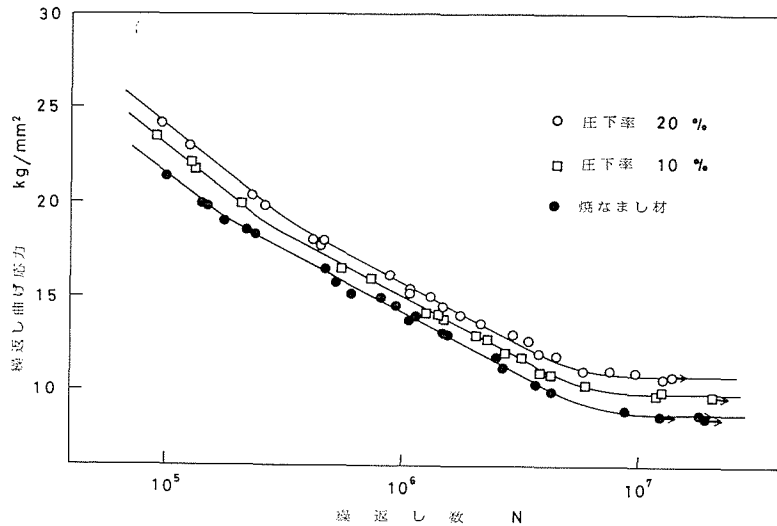


図4 各圧下率における両振り平面曲げ疲れ試験結果

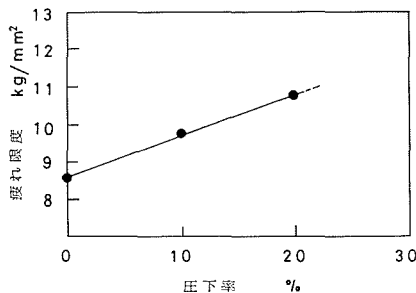


図5 圧下率と疲れ限度との関係

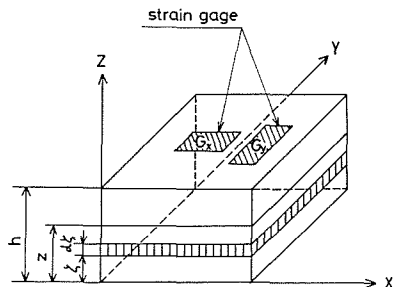


図6 残留応力の計算に使用した座標系

3.3 残留応力測定結果

試験片表面の残留応力の測定は、ひずみゲージ法¹⁶⁾を用い、腐食液としては30%硝酸溶液

を使用した。本実験の残留応力の計算で用いた座標系¹⁶⁾を図6に示す。表面から任意の距離 z に薄層 $d\zeta$ を考えればその層の残留応力 σ_x, σ_y は z の関数となり、 $\zeta=0\sim z$ まで取り去った時のひずみ変化を測定すれば残留応力が求まる。まず、試験片の片面にひずみゲージ(KFC-2-D16-16: 共和電業)を貼り、その上にラッカーを吹きつけひずみゲージ側の表面を被覆した後に、試験片を腐食液の中につけ逐次腐食除去を行い、腐食除去層厚さと、ひずみゲージにあらわれるひずみ変化を静ひずみ計にて測定した。得られた結果により、腐食除去層厚さとひずみ変化との関係曲線を求め、下記の(2)式¹⁶⁾を用いて試験片の残留応力を求めた。図1, 6に示されている座標軸で、長手方向(x 方向)の残留応力を σ_x 、幅方向(y 方向)の残留応力を σ_y とする。

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ 2(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) - \frac{(h-z)}{2} \cdot \frac{d}{dz}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) - 3(h-z) \int_0^z \frac{1}{(h-\zeta)^2} \cdot (\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) d\zeta \right\} \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ 2(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) - \frac{(h-z)}{2} \cdot \frac{d}{dz}(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) - 3(h-z) \int_0^z \frac{1}{(h-\zeta)^2} \cdot (\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) d\zeta \right\}\end{aligned}\quad (2)$$

ここで、
 E : 縦弾性係数, kg/mm^2
 h : 腐食前の試験片の板厚, mm
 z : 腐食除去層厚さ, mm
 ν : ポアソン比
 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$: 長手方向(x 方向)、幅方向(y 方向)のひずみの大きさ

残留応力 σ_x, σ_y の計算を行うにあたり、(2)式内の第2項目の微分項は数値微分を行い、第3項目の積分項はシンプソンの1/3法則を用いて、残留応力を求めた。

圧下率10%の試片の残留応力 σ_x, σ_y の分布を図7に示す。横軸は表面からの距離を示し、縦軸は各方向の残留応力 σ_x, σ_y を示す。

冷間圧延を施した板の残留応力分布は、ロール直径、圧下率、板厚などの圧延条件によって変化し、板厚 h と、ロールと板との接触弧長さ l_{arc} との比(h/l_{arc})が小さい場合には、材料内部まで塑性変形が進み、表面は引張残留応力、中心部は圧縮残留応力となることが言われている¹⁴⁾。本実験の場合も上記の圧延条件に相当し、図7で見られるように、表面より少し内部で引張残留応力の最大値をとり、中心部に行くにしたがい引張残留応力は減少し圧縮残留応力となっている。試験片表面の残留応力は、計算の結果ばらつきが大きくなり求めることができなかったため、本実験では、表面より少し内部に入った所の最大引張残留応力を採用することにした。

圧下率10%の長手方向最大引張残留応力 $\sigma_x=10.3 \text{ kg/mm}^2$ 、幅方向最大引張残留応力 $\sigma_y=4.3 \text{ kg/mm}^2$ であ

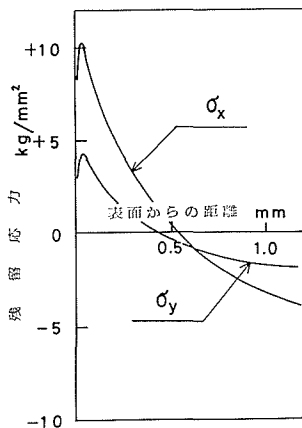


図7 残留応力 σ_x, σ_y の分布 (圧下率10%)

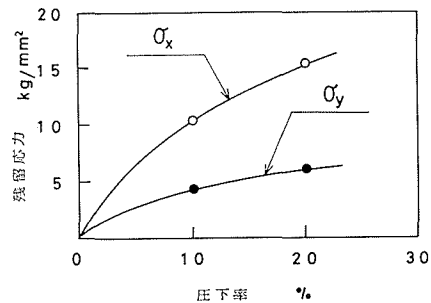


図8 圧下率と最大引張残留応力 σ_x, σ_y との関係

り、圧下率 20% では、各方向の最大引張残留応力は、それぞれ、 $\sigma_x=15.5 \text{ kg/mm}^2$ 、 $\sigma_y=5.8 \text{ kg/mm}^2$ である。図 8 に圧下率と各方向の最大引張残留応力 σ_x 、 σ_y との関係を示す。図内の○印は長手方向残留応力 σ_x であり、●印は幅方向残留応力 σ_y をあらわす。図からもわかるように、圧下率の上昇に伴い引張残留応力 σ_x 、 σ_y も上昇している。今までの研究例において、残留応力が疲れ強さに影響をおよぼすのは、一般に長手方向残留応力であると言われているので¹⁶⁾、本実験においても、各圧下率の試片とも長手方向最大引張残留応力 σ_x を用いて、疲れ強さにおよぼす影響を考察した。

3.4 硬さ測定結果

硬さ変化は、加工硬化、残留応力との関連性が深いので硬さ測定を行った。硬さ測定には、マイクロビッカース硬度計（型式-MVK：明石製作所）を用い、試験片の最小断面上に試験片の中心を通る直角な 2 方向（図 1 の x 方向、 y 方向）について、疲れ試験前と疲れ試験後の硬さ測定を行った。硬度計の試験荷重は 100 g、荷重保持時間は 30 秒とした。

焼なまし材、圧下率 10%、圧下率 20% の試片の疲れ試験前後のマイクロビッカース硬さ測定結果を図 9 に示す。疲れ試験前の測定結果は○印で示してあり、圧下率の上昇に伴いマイクロビッカース硬さが上昇している。焼なまし材、圧下率 10%、圧下率 20% のマイクロビッカース硬さは、それぞれ、 $H_v=91$ 、 $H_v=115$ および $H_v=129$ である。疲れ試験後のマイクロビッカース硬さは●印で示してある。すべての試験片において硬さの減少が見られ、圧下率の上昇に伴い硬さの減少の割合が大きくなっており、疲れ試験後の硬さは一定の値に近く傾向が見られる。疲れ試験後の焼なまし材のマイクロビッカース硬さは $H_v=85$ 、圧下率 10% では $H_v=107$ 、圧下率 20% では $H_v=107$ である。

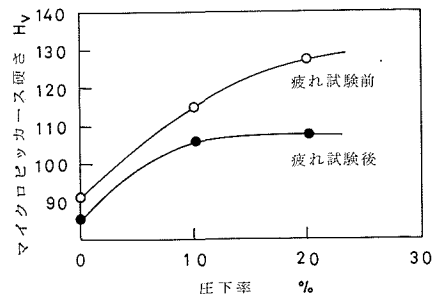


図 9 圧下率と疲れ試験前後のマイクロビッカース硬さとの関係

4. 数式による実験結果の検討

銅や、その他多くの非鉄金属材料は、疲れ試験において、繰返し数 $10^6 \sim 10^7$ 回程度で S-N 線図上に水平部分があらわれないということから、疲れ限度が存在しないと言われている。言い換えると低い繰返し応力でも疲れ破壊が生じるということであるが、一般に、非鉄金属材料の疲れ限度をあらわすには、繰返し数 $10^8 \sim 10^9$ 回に達する時間強さが採用されている。しかし、栗谷ら¹⁷⁾の銅の疲れ試験において、繰返し数 10^{10} 回程度で疲れ限度の存在が示されており、必ずしも非鉄金属材料の疲れ限度の存在が否定されているわけではない。本実験においても、図 4 の S-N 線図で見られるように、繰返し数 1.0×10^7 回付近から S-N 線図上に水平部分があらわれていることから、銅にも疲れ限度があるものと考えられる。本実験では、繰返し数 1.5×10^7 回に達する応力を疲れ限度とした。

図 5 から、圧下率の上昇とともに疲れ限度の上昇が見られ、この傾向は、圧下率と引張強さの増加量 $\Delta\sigma_B$ およびマイクロビッカース硬さの変化を示した図 3、図 9 に良く似ており、さらに、引張残留応力の変化を示した図 8 にもその傾向が似ていることから、冷間圧延加工による疲れ限度の上昇は、加工硬化および残留応力との関連性が大きいものと思われる。一般に、冷間加工による疲れ強さの上昇は、加工硬化と残留応力によるものであると言われており、疲れ限度に

影響をおよぼす残留応力は、初期の残留応力が応力の繰返しを受けて疲れ試験中変化しないものとすれば平均応力として作用するものと考えられている¹⁸⁾。言い換えると、試験片の表面に圧縮残留応力が生じている場合は疲れ限度は上昇し、逆に、引張残留応力が生じていれば疲れ限度は低下すると言うことになる。

本実験では、試験片表面付近に生じている残留応力は、図7のごとく引張残留応力となっており、残留応力の見地から考えると疲れ限度が低下するものと推定されるが、引張残留応力が生じているにもかかわらず、圧下率の上昇に伴い疲れ限度が上昇している。この理由としては、引張残留応力による疲れ限度を低下させる作用よりも、加工硬化による疲れ限度上昇作用が大きくあらわれることと、圧延によって板厚が減少することによる寸法効果によるものと考えられる。他の研究例においても、小林¹²⁾は炭素鋼の引抜き線材について回転曲げ疲れ試験を行い、引張残留応力が生じている場合にも疲れ限度が上昇するという結果を得ており、Henpel¹⁹⁾は疲れ強さの上昇を加工硬化の立場からとらえ、クロム-モリブデン鋼の試験片の表面にショットピーニング加工を与えた後に、圧縮残留応力を除去するために500°C、2時間の熱処理を施し回転曲げ疲れ試験を行ったところ、焼なまし材よりも疲れ限度が上昇するという結果を報告している。

今、両振り平面曲げ疲れ試験において、疲れ強さにおよぼす加工硬化と残留応力の影響を定量的に求める近似法として、炭素鋼の回転曲げ疲れ試験で、加工硬化、残留応力を考慮して提案された式¹²⁾に修正を加えた次式を用いることにする。

すなわち、加工硬化、残留応力を考慮したS-N線図は次の形であらわすことができるものとする。

$$N = \frac{1}{C - A \exp(-B\sigma - m\Delta\sigma_B + n\sigma_{res})} \quad (3)$$

- ここで、
 N : 疲れ破壊を生じるまでの応力の繰返し数
 σ : 応力振幅, kg/mm²
 $\Delta\sigma_B$: 焼なまし材の引張強さを基準とし、冷間加工を受けた試験片の引張強さの増加量, kg/mm²
 σ_{res} : 冷間加工を受け表面に生じた残留応力, kg/mm²
 A, B, C, m, n : 材料や加工条件による材料定数

疲れ限度 σ_w は N が無限大になった時の応力であるから (3) 式で $\sigma = \sigma_w$ とし、 $N = \infty$ とすると次式が得られる。

$$\sigma_w = -\frac{1}{B} \left\{ \log \frac{C}{A} + m\Delta\sigma_B - n\sigma_{res} \right\} \quad (4)$$

加工硬化、残留応力が生じていない時、すなわち、焼なまし材のS-N線図は (3) 式で、 $m=0$ 、 $n=0$ とすることにより次式が得られる。

$$N = \frac{1}{C - A \exp(-B\sigma)} \quad (5)$$

(3) 式、(5) 式は、任意の応力振幅に対するS-N線図をあらわす。まず(5)式を用いて、図4の焼なまし材のS-N線図より、定数 A 、 B および C を求めると次の値を得る。

$$\begin{aligned} A &= -0.1648 \times 10^{-7} \\ B &= -0.2987 \text{ mm/kg}^2 \\ C &= -1.418 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

(3) 式を用いて、圧下率が0%以外の場合に対しても A , B および C の値が変わらないものと考え、図4から、圧下率10%、圧下率20%のS-N線図より m , n の値を求め、もし各圧下率とも m , n の値が一定値になるとすれば、 m , n の値から、疲れ強さにおよぼす加工硬化と残留応力の影響の比率が求まることになる。

本実験で、 m , n の値を求めるために(3)式の中の $\Delta\sigma_B$, σ_{res} の値を、 $\Delta\sigma_{B-10}=4.7 \text{ kg/mm}^2$, $\Delta\sigma_{B-20}=7.3 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_{res-10}=10.3 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_{res-20}=15.5 \text{ kg/mm}^2$ として計算を行った。ここでの σ_{res} は3章3節の長手方向引張残留応力 σ_x に相当し、添字の10, 20は、圧下率10%、圧下率20%の試験片を意味する。図4のS-N線図から m , n の値を計算した結果、ほぼ一定で $m=4.20 \times 10^{-2} \text{ mm}^2/\text{kg}$, $n=-1.64 \times 10^{-2} \text{ mm}^2/\text{kg}$ となった。これらの値より、疲れ強さにおよぼす両者の比率は、 $|m|:|n|=1:0.39$ となる。小林¹²⁾の実験において直径8mmの工具炭素鋼にローラーで表面加工を施した時の m , n の値は、 $m=5.8 \times 10^{-2}$, $n=2.0 \times 10^{-2}$ となり、両者の比率は、 $m:n=1:0.345$ となっている。さらに、小林¹²⁾, 三木²⁰⁾により引抜加工、圧延加工ともに疲れ強さにおよぼす加工硬化の影響は約75%、残留応力の影響は約25%であるという結果が得られている。本実験では、上述の m , n の値から、疲れ強さに対して加工硬化が72%、残留応力が28%という割合で影響をおよぼすものと(3)式により一応考えることができる。

一般に、初期の残留応力は繰返し数とともに変化していくことが確かめられている。焼入材のような高硬度材料の場合は残留応力はほとんど変化しないが、比較的軟らかい材料においては残留応力は急速に減衰する²¹⁾。光永ら⁶⁾の実験でも過大応力振幅では初期の繰返しで急速に残留応力はほとんど消滅し、疲れ限度付近の応力振幅では初期段階である程度減衰し、その後破壊まで一定値を維持すると報告されている。以上のように、残留応力の変化は複雑であり、供試材料、応力負荷条件、残留応力の種類によって異なる。

しかしながら、本実験では初期の残留応力が疲れ破壊するまで変化しないと仮定して、前述の m , n の値を用いて(3)式より疲れ強さを計算している。得られた計算結果と実験結果との比較を図10に示す。図10内の○印や●印などは実験結果を示し、計算結果は実線で示されている。図から明らかなように、時間強さ、疲れ限度は繰返し数 6.0×10^6 回付近の接続点を除いて、計算結果と実験結果とが良く一致している。

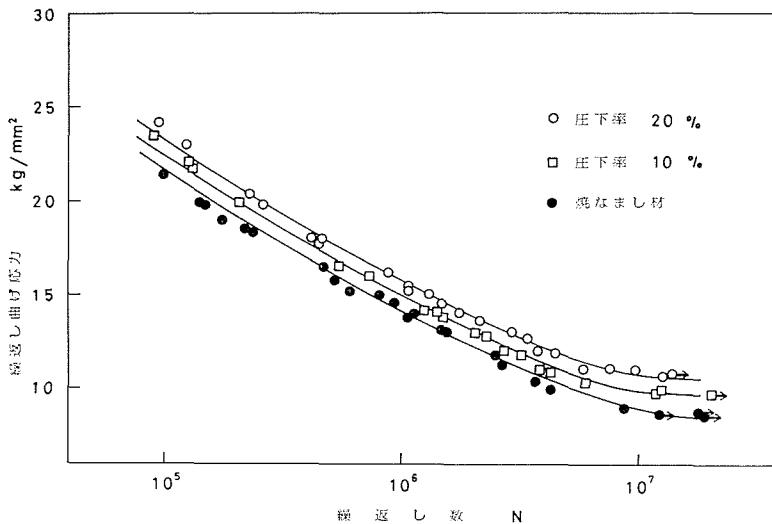


図10 疲れ強さの計算結果と実験結果

本実験だけでは、加工硬化、残留応力の影響を十分明確には握することはできないが、本実験のような圧延条件のもとでの疲れ強さに対しては、(3)式から求めた m , n の値から考え、加工硬化による材質の変化の影響の方が、残留応力の影響よりも大きいものと考えられる。

5. 結 論

市販の脱酸銅 (Cu: 99.9%, P: 0.024%) を 280°C, 90 分保持の真空低温焼鈍を行った後毎分 1000 回の両振り平面曲げ疲れ試験を行い、冷間圧延加工を与えた試験片の疲れ強さにおよぼす加工硬化および残留応力の影響を知ることが目的として行った実験より、次の結論が得られた。

(1) 非鉄金属材料には一般に、疲れ限度が存在しないものと言われているが、本実験で用いた脱酸銅では、繰返し数 1.0×10^7 回付近から S-N 線図上に水平部分があらわれていることから、疲れ限度を推定した。

(2) 疲れ試験を行った結果、試験片の表面付近に引張残留応力が生じているにもかかわらず圧下率の上昇に伴い疲れ強さの上昇が見られた。

(3) 加工硬化、残留応力を考慮して提案された実験式を用い、疲れ強さを計算によって求めたところ、実験結果と良く一致することが確かめられた。この実験式により、加工硬化、残留応力の影響をあらわすことができるならば、冷間加工を受けた試験片の引張強さおよび表面に生じている残留応力を知り、焼なまし材の S-N 線図を基準として、種々の冷間表面加工を受けた材料の疲れ強さの推定が可能である。

(4) 加工硬化の程度をあらわすものとして各圧下率の引張強さの増加量 $d\sigma_B$ を用い、さらに初期の残留応力 σ_{res} が疲れ破壊するまで変化しないものと仮定し、提案された実験式より疲れ強さに対して、加工硬化の影響が約 72%、残留応力の影響が約 28% である。

参 考 文 献

- 1) 吉田 彰, ほか 2 名: 材料, 18-191 (昭 44-8), 695.
- 2) 宮川信勇, ほか 2 名: 材料, 23-248 (昭 49-5), 392.
- 3) 宮川信勇, ほか 2 名: 材料, 23-248 (昭 49-5), 398.
- 4) 真武友一: 材料, 16-168 (昭 42-9), 732.
- 5) 林 建吉, ほか 1 名: 材料, 19-207 (昭 45-12), 1075.
- 6) 光永公一, ほか 1 名: 日本機学会論文集, 39-317 (昭 48-1), 42.
- 7) 中村 寛, ほか 1 名: 日本機学会論文集, 31-224 (昭 40-4), 494.
- 8) 早山 徹: 日本機学会論文集, 41-343 (昭 50-3), 721.
- 9) 宇田川義紘, ほか 3 名: 日本機学会論文集, 35-272 (昭 44-4), 693.
- 10) 矢畑 昇, ほか 2 名: 材料, 21-220 (昭 47-1), 11.
- 11) 横堀武夫: 金属材料の強度と破壊, 丸善 (昭 43), 359.
- 12) 小林真造: 材料, 22-241 (昭 48-10), 962.
- 13) 児玉昭太郎, ほか 1 名: 材料, 26-280 (昭 52-1), 56.
- 14) 黒田正夫: 残留応力, 共立出版 (昭 45), 108.
- 15) 神崎文晧, ほか 2 名: 材料, 13-135 (昭 39-12), 978.
- 16) 土肥 修: 北海道大学工学部研究報告, 27 (昭 36), 1.
- 17) 栗谷文夫, ほか 3 名: 日本機学会論文集, 40-337 (昭 49-9), 2453.
- 18) 横堀武夫: 金属材料の強度と破壊, 丸善 (昭 43), 352, 357.
- 19) M. R. Henspel: "Internal Stresses and Fatigue in Metals", Elsevier Publishing Company (1959), 311.
- 20) 三木英雄, ほか 1 名: 第 20 回塑性加工連合講演会前刷 (昭 44-11), 57.
- 21) 横堀武夫: 金属材料の強度と破壊, 丸善 (昭 43), 353.