

## 論 文

無酸素銅および 7-3 黄銅の定荷重クリープ挙動に  
及ぼす結晶粒径の影響

武 藤 侃,\* 伊 藤 芳 輝\*

Effect of Grain Size on Dead Load Creep Test of OFHC-Cu and  
7-3 Brass at Elevated Temperatures.

by

Akira Muto† and Yositeru Ito†

For a further understanding on the effect of grain sizes on the mechanical properties of OFHC-Cu and  $\alpha$  brass, a dead load creep test of OFHC-Cu (grain size 0.040mm and 0.076mm) and 7-3 brass (grain size 0.022mm and 0.118mm) was conducted at elevated temperatures (from 523K up to 723K) using different loads. Rupture time and creep curves of OFHC-Cu and 7-3 brass were obtained. The creep strength of OFHC-Cu remained independent of grain size. Creep strength of 7-3 brass, however, showed, a very different value. Equi-cohesive temperature appeared in 7-3 brass, but did not in OFHC-Cu. OFHC-Cu showed an irregular creep curve due to the dynamic recrystallization at a large value of the Zener-Hollomon parameter.

**Key Words** : Copper,  $\alpha$  Brass, Stacking Fault Energy, Dead Load Creep Test, Dynamic Recrystallization, Equi-cohesive Temperature, High Temperature Deformation.

## I 緒言

一般に、金属や合金の成型加工においては、生産工程そのものためあるいは製品の表面の品質維持のためなどで、加工材そのものの結晶粒の調整には心配りがされている。この方法としては前加工と熱処理過程

が重要な要素を占めている。この中で前加工としては大きくわけて熱間加工と冷間加工がある。さらに、熱間加工の目的としては鑄込み組織を加工容易な組織に変化させるための過程と、冷間加工の素材を作成する過程とに分けることもできる。この後者の過程で問題となる要素の一つとして結晶粒の問題が発生する。ところで、金属や合金は高温になるほど加工しやすくなるのが一般的であるが、ここに高温脆性<sup>(1)~(8)</sup>という厄介な存在も存在していて、これも大きな問題の一つである。銅合金はこの中間温度脆性を内在する合金として古くより知られていた<sup>(3)~(5)(7)(8)</sup>。しかし、この中

平成10年6月5日受付

\* 秋田大学工学資源学部材料工学科  
〒010-8502 秋田市手形学園町1-1† Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University,  
1-1 Tegata Gakuenncho, Akita 010-8502, Japan

間温度脆性は銅合金に固有の性質ではないことを著者は明らかにしてきた<sup>(9)(10)</sup>。また、一般的に、高温変形を考えるときには相変態や析出の問題をも考えることが必要になってくる。これらが変形に特有な現象をもたらすからである。そこで、結晶粒界そのものの高温における強度への影響を調べるのには、相変態等の問題等の複雑な関連性を考慮に入れる必要のない単相の合金を用いて試験をすることが第一歩である。ところで、純銅や $\alpha$ 単相の黄銅はFCC構造の合金系でありながら、積層欠陥エネルギーも相当異なることも知られており、高温における挙動を考えるうえで興味のもたれる合金系である。ここでは、無酸素銅と7-3黄銅合金について工業的な試験方法の一つとして一般的に用いられている定荷重クリープ試験によって初期応力、試験温度を大幅に変化させて、クリープ破断強度に及ぼす結晶粒径の影響を調べることを目的とした。その結果、積層欠陥エネルギーの違いがクリープ強度の違いに影響し、それが結晶粒径に反映すること、また無酸素銅にはZener-Hollomon因子<sup>(11)</sup>が大きい場合には動的再結晶に起因する不整クリープが観察されたのでここに報告する。

## II 実験方法

### 1. 供試材

実験に供した試料は市販の1.5mm厚の無酸素銅と1.6mm厚の7-3黄銅である。無酸素銅を化学分析した結果、その組成はCu:99.99, Pb:0.0004, Fe:0.0003, O:0.0006, S:0.0001mass%以下であり、7-3黄銅はCu:70.67, Fe:0.001, Pb $\leq$ 0.001, Ag $\leq$ 0.001, Sn $\leq$ 0.001, S:0.001, O:0.001mass%, As, Bi, In, Se, Sb, Te, Tl各1ppm以下、その他Znを含む単一相合金であった。これらの素材を厚さ1.0mmまで冷間圧延し、圧延方向と平行にゲージ部25.0mm $\times$ 5.0mm $\times$ 1.0mm(肩部の曲率半径3.0mm)、全長59mmの引張り試験片を打ち抜き加工によって作成した。試験片の結晶粒径の調整は、無酸素銅については723と973Kの各温度で、7-3黄銅については773Kと903Kの各温度でいずれも各試験片を3.6ks間アルゴンガス雰囲気中で焼きなましすることにより行った。その結果、無酸素銅については0.040mmと0.076mm、7-3黄銅については0.022mmと0.118mmの粒径を有する試験片を得た。なお、結晶粒径の測定は、いわゆ

る切片法によったものであり、この際双晶境界を考慮していないものである。

### 2. クリープ試験

クリープ試験は試作した定荷重クリープ試験機を用いて行った。その模式図をFig. 1に示す。この試験機は一定温度で一定荷重を負荷したときの破断時間を計測するだけではなく、クリープ伸びの変化過程をも測定できるようにした。試験片は図のように上部ロッドと下部ロッドに取り付けた引掛け型の治具に装着し炉中の所定の位置にセットする。炉の上端には金属製のふたをし、下端はアルミナ綿でふさぎ極力炉内の空気が外部と対流を起こしにくくして、炉内をできるだけ均一に一定試験温度になるように温度調節計で調節する。この後、所定の荷重を下部ロッドに錘をのせて負荷をかけ炉外部に取り付けた変位計(作動変圧器)の出力と炉中の試験片近くにセットした熱電対の出力をレコーダーに記録して、変位と温度を連続的に測定した。なお、このとき別に試験片の破断時には止まるようにしつらえたタイマーをセットして破断時間を測定した。外部に設置した変位計の端子の位置の関係上、

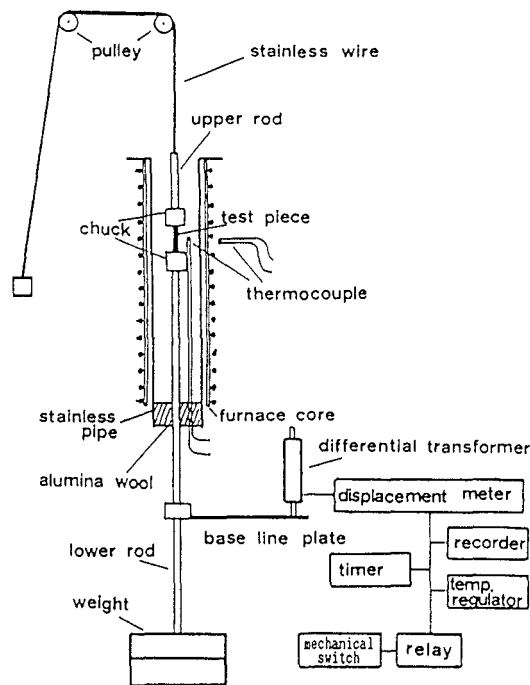


Fig. 1 A schematic of dead load creep test machine.

試験片の真の標点距離の変位を実測しているわけではないが、この場合試験片を装着している部、さらにロード等の治具系統の変位はほとんど小さく、試験片の標点間距離は標点外伸びを無視できるほど大きいため、レコーダーに記録された変位を標点間の伸びとみなした。なおまた、破断時にはタイマーのほかに炉を加熱するための電源も同時に切れるようにしてある。また、試験雰囲気は大気中であり、試験中の炉内の温度は±2Kの範囲に押さえられていた。

### III 実験結果

#### 1. 無酸素銅のクリープ曲線

Fig. 2 に一例として結晶粒径0.040mmと0.070mmの523Kと723Kにおけるクリープ曲線を示す。いずれの場合も試験条件のうちで高応力の場合の曲線で、523Kのときには結晶粒径0.040mmでは98MPa、結晶粒径0.070mmでは100MPaの初期応力で、723Kのときには結晶粒径0.040mmでは41MPa、結晶粒径0.070mmでは39MPaの初期応力を負荷したときのものである。ほぼ同じ負荷応力のもとでも低温側の523Kでは細粒材の方が破断時間が長く、高温側の723Kでは結晶粒径によらず破断時間は同じであった。高温側の細粒材のクリープ曲線をのぞくと通常知られているような1次（遷移）、2次（定常）、3次（加速）といった典型的なクリープ曲線を示している<sup>(12)</sup>。そこで、他の曲線といくぶん異なる形状をしている高温側の細粒材についてその形状を確認するために、細粒材の粒径0.040mmの場合につき実験範囲内の高応力側のクリープ曲線を温度をパラメーターとしてFig. 3に示した。

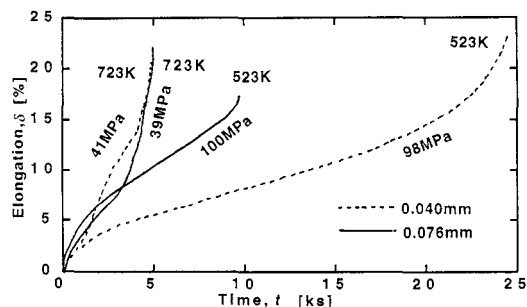


Fig. 2 Creep curves of OFHC-Cu (grain size, 0.040mm and 0.076mm) tested at high load and at temperatures, 523K and 723K.

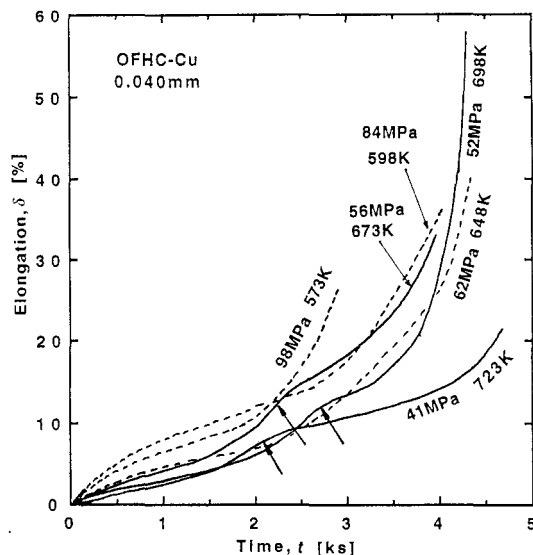


Fig. 3 Creep curves of OFHC-Cu (grain size, 0.040mm) tested at high load and at various temperatures.

これによると、点線で示した573Kから648Kまでの温度では通常知られているような1次、2次、3次といった典型的なクリープ曲線を示しているが、実線で示した673Kから723Kまでの温度においては矢印で示したところで屈曲点が観察される。なお、ここに示した条件より低応力側では、通常知られているような典型的なクリープ曲線を示した。

#### 2. 無酸素銅のクリープ破断曲線

前節では一例として無酸素銅の高応力側のクリープ曲線を示したが、同様にして523Kから723Kまでの温度範囲で、初期応力を変化させて定荷重クリープ試験をおこない、各応力における破断時間を求めた。そのようにして得られた結晶粒径0.040、0.070mmの2種類について、試験温度をパラメーターとしたクリープの破断時間に対する試験応力の関係図をFig. 4に示した。結晶粒径の差も少ないせいもあるが、各試験温度とも粒径によらずほとんど同様な傾向を示していることがわかる。ただし、各温度において同一応力では比較細粒の0.040mmの結晶粒の方が破断時間が長い。また、実験範囲内において同じ温度では結晶粒径0.040mmと0.070mmの2種類の破断曲線はほぼ平行である。これらのことから、523Kから723Kまでの温

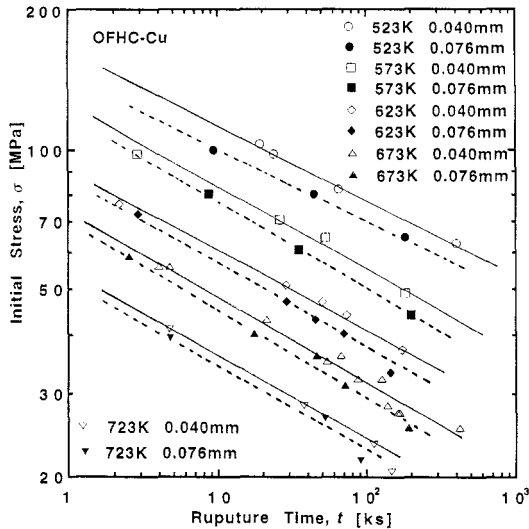


Fig. 4 Creep rupture curves of OFHC-Cu (grain size, 0.040mm and 0.076mm) tested at various loads and at various temperature.

度範囲では初期結晶粒径0.040, 0.070mmの2種類の試料では破断時間700ksまでの間では強度にほとんど差がないことがわかった。さらに、このグラフからある応力、温度における破断寿命を推定することができる。

### 3. 無酸素銅のクリープ試験における Zener-Hollomon 因子と応力の関係

一般に高温における試験においては、しばしば Zener-Hollomon 因子<sup>(2)</sup>で整理する方法がとられることがある。この Zener-Hollomon 因子  $Z$  は温度補償をしたひずみ速度因子であり、 $Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$  で表される。ここで  $\dot{\epsilon}$  はひずみ速度、 $T$  は試験温度、 $R$  は気体定数、 $Q$  は変形の見かけの活性化エネルギーでほとんどの場合自己拡散の活性化エネルギーに近い値を示すことが多い。そこで、 $\log Z$  と応力の関係を Fig. 5 に表してみた。これで見ると、ばらつきは大きいものの各粒径について分けることができなく、粒径にかかわらずほぼ一本の直線関係と見なすことができる。なお、ここで活性化エネルギーの値は197kJ/mol<sup>(3)</sup>を用いた。また  $\dot{\epsilon}$  としてはクリープ曲線の定常部と思われる部分におけるある一定時間のひずみの変化から求めた。

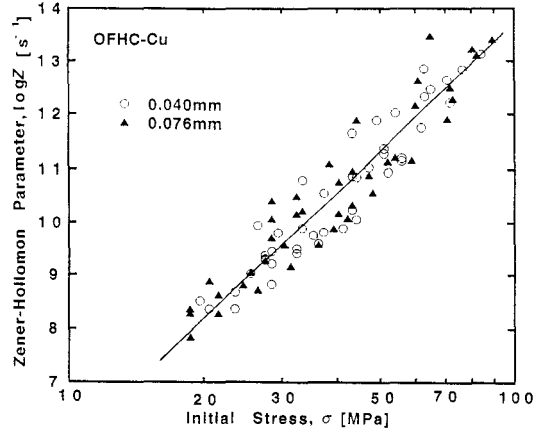


Fig. 5 Relation between initial stress and Zener-Hollomon parameter  $\log Z$  of OFHC-Cu (grain size, 0.040mm and 0.076mm)

### 4. 7-3黄銅のクリープ曲線

次に、7-3黄銅の548Kと648Kの温度における結晶粒径0.022, 0.118mmのクリープ曲線の一例を Fig. 6, Fig. 7 に示す。Fig. 6に見られるように548Kの温度では応力の大小によらず、粗粒材の方が細粒材に比べて破断伸びも破断時間も小さい。それが温度が648Kと高くなると Fig. 7のように破断伸びは粗粒材の方が小さいが、破断時間の方は粗粒材の方が長くなって示している。しかし、いずれの曲線も1次、2次、3次といった典型的なクリープ曲線を示している。

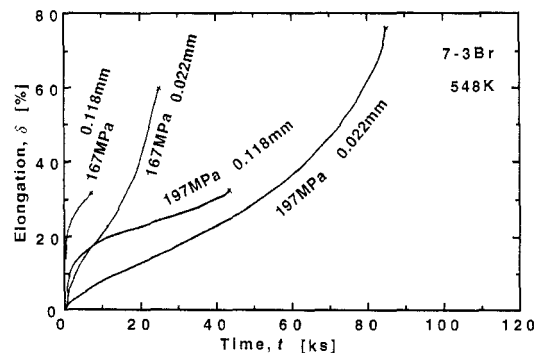


Fig. 6 Creep curves of 7-3 brass (grain size, 0.022mm and 0.118mm) tested at high load side and at 548K.

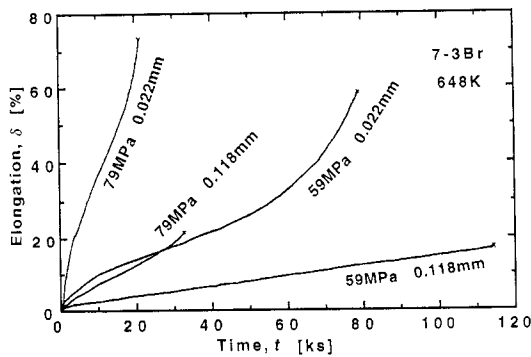


Fig. 7 Creep curves of 7-3 brass (grain size, 0.022mm and 0.118mm) tested at low load side and at 648K.

### 5. 7-3 黄銅のクリープ破断曲線

前節では一例として7-3黄銅の高応力側のクリープ曲線を示したが、無酸素銅の時と同様にして548Kから648Kまでの温度範囲で、初期応力を変化させて定荷重クリープ試験をおこない、各応力における破断時間を求めた。そのようにして得られた結晶粒径0.022, 0.118mmの2種類について、試験温度をパラメータとしたクリープの破断時間-試験応力線図を Fig. 8

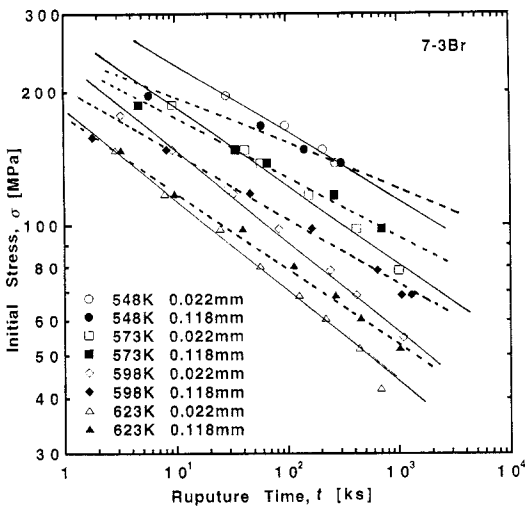


Fig. 8 Creep rupture curves of 7-3 brass (grain size, 0.022mm and 0.118mm) tested at various loads and at various temperatures.

に示した。これで見ると、無酸素銅のときと同様応力と時間には直線関係が存在している。しかしながら、無酸素銅のときと異なり低温側では顕著に細粒材と粗粒材の直線は交差していることがわかる。そして、この交差する時間は温度の上昇とともに短時間側に移動していく傾向を示している。すなわち、いずれの試験温度においても同一破断時間で比較するとある点を境として破断強度に及ばず結晶粒径依存性は逆転している。もっともこのことは前節のクリープ曲線の様子からして考えられたことである。

### 6. 7-3 黄銅のクリープ試験における

#### Zener-Hollomon 因子と応力の関係

無酸素銅のときと同様にして  $\log Z$  と応力の関係を Fig. 9 に表してみた。これによると無酸素銅のときとは異なって、結晶粒径の差が大きいこともあるかもしれないが、応力が200MPa 付近までは結晶粒径ごとにそれぞれ直線関係を示していることがわかる。なおここでもひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  は無酸素銅のときと同様に7-3黄銅のクリープ曲線から求めた。さらに活性化エネルギー  $Q$  は170kJ/mol<sup>(34)</sup>を用いた。また、 $\log Z$  の方から見ると11付近で細粒材と粗粒材で交差していることがわかる。

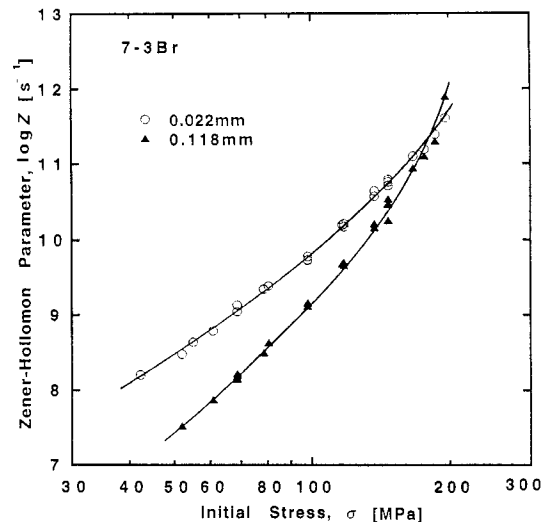


Fig. 9 Relation between initial stress and Zener-Hollomon parameter  $\log Z$  of 7-3 brass (grain size, 0.022mm and 0.118mm).

## IV 考察

1. 積層欠陥エネルギーのクリープ  
破断寿命への影響

FCC合金の無酸素銅と7-3黄銅の結晶粒径の違いが、定荷重クリープ試験の結果にどのように反映するのかを見ることを目的とした。ところが固溶体合金の7-3黄銅は結晶粒径の違いを比較的簡単に調整することができたが、純金属の無酸素銅はひずみ焼鈍法では結晶粒を小さくすることも、また大きくすることも難しかった。そのため、当初の大きな目的の一つであった無酸素銅の結晶粒径の効果を的確に判断することは困難となったことは否めない。それでも、クリープ曲線には結晶粒径による違いが明らかに認められたので、ここでは7-3黄銅と同様に粒径の違いとして比較検討した。ところで、変形に大きく関与する値の一つとして積層欠陥エネルギーがある。この値として大きなものの例としてはニッケル、アルミニウムなどがあり、それぞれ  $3 \times 10^{-7}$ 、 $2.38 \times 10^{-7}$  J/mm<sup>2</sup> である<sup>(15)</sup>。銅も比較的大きな値を持つ金属として知られており、その値は  $1.6 \times 10^{-7}$  J/mm<sup>2</sup> である<sup>(15)</sup>。金などは小さな値を持つ例で、その値は  $0.1 \times 10^{-7}$  J/mm<sup>2</sup> である<sup>(15)</sup>。これと匹敵するようにCu-Zn合金の積層欠陥エネルギーの値はCuにZnを $\alpha$ 相内で固溶していくと小さくなっていき30% massZnでは  $0.3 \times 10^{-7}$  J/mm<sup>2</sup> となる<sup>(15)</sup>。そこで、同一系の合金で、同構造、同相でありながら積層欠陥エネルギーの値に比較的大きな差を持つものとして知られており、積層欠陥エネルギーの違いによる挙動を調べる合金としてよく用いられている。ところで、力学的状態方程式として、BarrettとSherby<sup>(16)</sup>はクリープ速度 $\dot{\epsilon}$ と応力 $\sigma$ の間に積層欠陥エネルギー $\gamma_F$ を取り入れてある式を提案したが、Mukherjeeら<sup>(17)</sup>は彼らの式ではディメンションの点で問題があるとして、次のような式を提唱した。

$$\frac{\dot{\epsilon} kT}{DGb} = A \phi \left( \frac{\gamma_F}{Gb} \right) \left( \frac{\sigma}{G} \right)^n \quad (1)$$

ただし、 $\dot{\epsilon}$ は定常ひずみ速度、 $k$ はボルツマン定数、 $D$ は拡散係数、 $G$ は剛性率、 $T$ は温度、 $A$ は定数、 $b$ はバーガースペクトル、 $\sigma$ は応力、 $n$ は応力指数を表す。ここで、 $\phi(\gamma_F/Gb)$ は種々の金属で行ったクリープ試験の結果を、一定の $\sigma/G$ の値ごとに $\dot{\epsilon} kT/$

$DGb$ と $\gamma_F/Gb$ の関係で表すことにより経験的に求めることができる。また、 $\sigma/G$ によってクリープ速度は $\dot{\epsilon}$ は $\gamma_F$ の違いによって決まってくることを示している。すなわち、 $\gamma_F$ が小さくなるに従い同じ応力のもとではひずみ速度が小さくなると見て取れる。ひずみ速度が小さいということは変形の時間が長くなることに相当する。このような観点でFig. 4とFig. 8を見て同じ温度で比べると、例えば573Kの温度で応力が100MPa近傍の破断時間は積層欠陥エネルギー $\gamma_F$ の小さい7-3黄銅の方が無酸素銅に比べて100倍以上の長い時間で破断が起きていることと一致する。すなわち、無酸素銅と7-3黄銅のクリープ破断試験の結果から積層欠陥エネルギーが小さくなると破断寿命は長くなることが確かめられた。

## 2. 結晶粒径のクリープ強度に対する影響

多結晶粒材の変形を考えるとときには結晶粒内の変形と結晶粒界の変形とを考える必要がある。このことには変形の温度が大きく関与していることが知られている。一般に、温度の基準としては融点 $T_m$ がいちばん問題となる。普通、高温変形を考えるときには $0.5T_m$ 、または $0.4T_m$ がいわゆる高温変形かそうでなく低温変形かの境界温度とされている。変形様式が温度によって低温側では粒内変形が寄与し、高温では粒界での変形が律速すると言われている。すなわち、低温側では粒界強度が大きい結晶粒が応力軸方向に変形し、はじめ等軸粒であったものでもそれぞれの結晶粒が応力軸方向に長くなり、当然応力軸に直角方向には細くなり全体として応力方向に伸びることになる。これに対し、高温では粒界の強度が小さくなり粒界のすべりや移動で変形が律速されることになる。このように考えると粒界の強度と粒内の強度が等しくなる温度がどこかにあることになる。すなわち、等強度温度が存在することになる。ところで、結晶粒が小さいほど粒界の面積は大きくなることから低温側では全体としてその材料は強度が大きくなることになる。なお、このことに関してはHall-Petchの関係<sup>(18)(19)</sup>として知られている。そこで、7-3黄銅についての温度と破断時間の関係を示しているFig. 8を見ると、細粒と粗粒と交差している時間は温度によって異なっていて、ほぼ同じ応力上に交点が並んでいる様子を示している。ところが、無酸素銅についての同様に示したFig. 4で見るとそのような傾向は見られないようである。すな

わち、どの温度においても細粒材と粗粒材の線はほぼ平行に近く、どこかで交差する様子は見られない。523Kの温度でいくぶん交差するかのようにも見られるが、プロット点が少なくまた他の温度の傾向から考えると、実際にはこれも平行と考えたほうがよさそうである。そうすると、7-3黄銅では表れた交差する点は無酸素銅には見られなかったことになり、その理由を考える必要がある。その第一の原因は粒径の違いが7-3黄銅ほど大きくなかったことが考えられる。この場合平均結晶粒径の差がほぼ2倍であるということは単純化のため結晶粒を球形と見なすと、表面積は4倍異なることになる。この差を大きいと見るか小さいと見るかは問題となるところであるが、同じ条件の試験で粒径の違いによってクリーブ曲線に違いが見られたということは、やはり粒径の効果はあると見たほうが順当である。このことをさらに確認するため、結晶粒径の差の大きい0.034mmと0.126mmの場合についてZener-Hollomon 因子  $\log Z$  と初期応力の関係を Fig. 10に示した。点の数は少ないものの細粒材と粗粒材とに別々に線を引くことは難しいことがわかる。このことからすると粒径の効果はないものと思われる。そうすると、先に、粒径の効果があると述べ、今粒径の効

果が無いと述べたことになり、矛盾することになる。このことについては後述することにした。第2に試験条件、特に温度の一定条件がくずれたとすると、全体にもっとばらついてよさそうに思えるのでこれもそれほどの問題でないと思われる。先程、523Kの温度でいくぶん交差するかのようにも見られるがとも記したが、もしこの延長に交差する点を探してみると応力が30MPa程度のところである。この応力線を探してもどの温度においても交差するようには見えず、やはりこれも無理である。その他のこともいくつか考えなければならぬかもしれないが、とくに無酸素銅の積層欠陥エネルギーは7-3黄銅に比べて相当大きいことである。積層欠陥エネルギーが特に大きいアルミニウム等では動的再結晶が起きにくく、動的回復が起きやすいことが知られている。銅の積層欠陥エネルギーはアルミニウムほどに大きくはなかったが、それでも大きいほうである。このような場合変形条件によって動的復旧過程は複雑になるものと思われる。すなわち、Zener-Hollomon 因子  $Z$  の違いで変形中に復旧過程は回復や再結晶等のどちらかに別れるものと思われる。回復が支配的であれば、変形とともにセル構造を作りやすくなる。ここでの変形は  $Z$  の大きなところ (523Kの温度または高応力の条件) をのぞけば、回復が律速していると考えて、その結果このセルの大きさが結晶粒径と同様の挙動を示すと考えれば、初期粒径の違いがそれほど大きく表れなくてもいいのではないとも考えられる。先に、一方では粒径の効果があると述べ、すぐに粒径の効果は無いと述べたことも説明できる。すなわち、先にふれていた粒径とは初期粒径のことで、変形を律速している結晶粒径は、ある程度変形した結果生じたセルの大きさによるものである。しかしこのことを確かめるのにはいまのところTEM観察をしていないので何とも言えない。それでも、その可能性は大きいものと考えている。

今このことを考えるとなおさら、高温での変形では拡散が関与してくることから変形速度によっても、変形が律速されることも考えなければならない。拡散は温度が高くなるほど、また速度が小さくなるほど同様な効果として表れてくる。このことを考えるうえで前章でZener-Hollomon 因子  $Z$  についてふれ、これと負荷応力についての関係を Fig. 5と Fig. 9について示した。これらを見ると無酸素銅の場合は結晶粒径によ

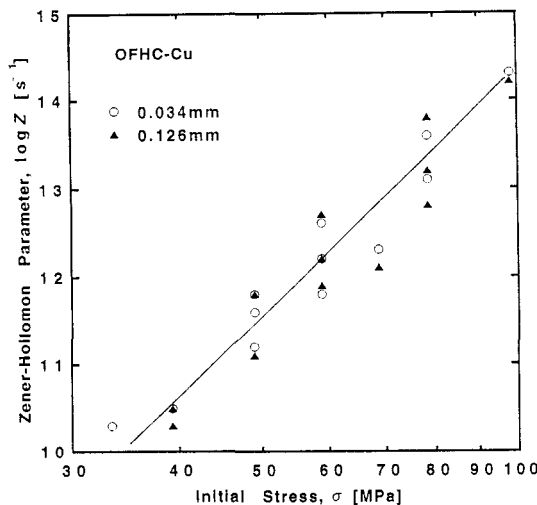


Fig. 10 Relation between initial stress and Zener-Hollomon parameter  $\log Z$  of OFHC-Cu (grain size, 0.034mm and 0.126mm).

らず比較的ばらばらであるが、ほぼ帯のようにであるが一本の直線で表されている。これに対し、7-3黄銅の場合には0.022mmと0.118mmの各粒径についてそれぞれ別の直線で引けていることがわかる。これらの整理のしかたからしても、無酸素銅は粒径の大きさにあまりよらず、7-3黄銅は粒径に大きく依存していることがわかる。

### 3. Zener-Hollomon 因子 $Z$ の大きい場合の クリープ曲線の形状

Fig. 3およびFig. 6にZener-Hollomon 因子  $Z$  の大きい場合のクリープ曲線を示してある。無酸素銅の場合には通常知られている遷移、定常、加速と言った三段階の過程をしたクリープ曲線を示していなく、定常変形に相当する過程の途中で屈曲点が見られる。これに対し、7-3黄銅ではそのような様子は見られない。7-3黄銅の場合、装置の関係上これより高応力の試験はできなかったため、無酸素銅の様なより短い破断時間の試験はできなかったが、そのような試験ができたとしても無酸素銅の様な屈曲点が観察されるクリープ曲線は出ないと思われる。無酸素銅の場合、通常の低速度引張試験において、今回の定荷重クリープ試験と非常に近い変形条件ではFig. 11のような多重ピーク型の動的再結晶挙動が観察され、7-3黄銅ではそのような傾向は見られなかったためである。すなわち、定速度または定荷重速度試験で見られる動的再結晶挙動が、今回の定荷重クリープ試験においても観察されたことになる。なお、クリープ試験ではこのほかに幾種の不整クリープが存在することも知られてお

り<sup>(20)(21)</sup>、著者の一人も7-3黄銅についての不整クリープ挙動については報告<sup>(22)</sup>もしている。今回の無酸素銅の定荷重クリープ試験で得られた曲線も動的再結晶を伴った不整クリープ曲線の一形態である。

## V 結論

無酸素銅と7-3黄銅について、前者の結晶粒径を0.040, 0.076mm, 後者の結晶粒径を0.022, 0.118mmとそれぞれ変えて、大気中で温度を523Kから723Kまでの範囲で定荷重クリープ試験を行い、以下の結果が得られた。

1. 無酸素銅は結晶粒径の違いにかかわらずクリープ強度に大きな差は見られなかった。これは、動的復旧過程が変形中に生じ、変形を律速する結晶粒径は変形中に生成したセルの大きさが関与するためと考える。
2. 7-3黄銅は結晶粒径の違いによりクリープ強度に大きな違いが見られた。
3. 7-3黄銅には等強度温度の現象が観察されたが、無酸素銅には見られなかった。
4. Zener-Hollomon 因子  $Z$  が大きい場合に無酸素銅には動的再結晶による不整クリープ曲線が観察された。
5. 積層欠陥エネルギーの大小がクリープ破断寿命と関係がある。すなわち、積層欠陥エネルギーが小さくなるとクリープ破断寿命は長くなる。

## 文 献

- 1) 鈴木洋夫, 西村 哲, 今村 淳, 中村 泰: 鉄と鋼, **67**, 1180 (1981)
- 2) 大森正信, 吉永芳豊, 間庭秀世: 日本金属学会誌, **34**, 791 (1970)
- 3) 大森正信, 若狭邦男, 吉永芳豊: 日本金属学会誌, **37**, 1188 (1973)
- 4) 堀内 良, 大塚正久: 日本金属学会会報, **22**, 293 (1983)
- 5) 和泉 修: 日本金属学会会報, **18**, 15 (1979)
- 6) J.N. Greenwood, D.R. Miller and J.W. Suiter: Acta Met., **3**, 109 (1955)
- 7) C.C. Koch, A.R. Troiano: Trans. ASM, **57**, 519 (1964)
- 8) V. Sklenička, I. Saxl, P. Popule and J. Cadek: Mat. Sci. and Engr., **18**, 271 (1975)

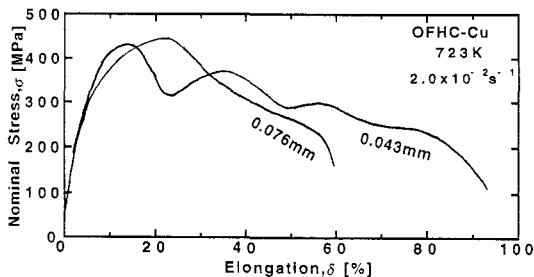


Fig. 11 Nominal stress-conventional strain curves of OFHC-Cu (grain size, 0.043mm and 0.076mm) tested at a tensile strain rate of  $2.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  and at 723K.



- 9) 武藤 侃, 後藤正治, 田上道弘, 麻生節夫 : 日本金属学会誌, **58**, 146 (1994)
- 10) 武藤 侃, 後藤正治, 田上道弘, 麻生節夫 : 日本金属学会誌, **59**, 23 (1995)
- 11) C. Zener, J.H. Hollomon : J. Appl. Phys., **15**, 22 (1944)
- 12) 丸山公一編著 : 高温強度の材料科学 クリープ理論と実用材料への適用, **3** (1997)
- 13) 幸田成康 : 改訂金属物理学序論, **112** (1973)
- 14) L. Chongmon, M. Hillert: Acta Met., **30**, 1132 (1982)
- 15) 日本伸銅協会編集委員会編 : 銅および銅合金の基礎と工業技術 (改訂版), **93** (1994)
- 16) J.E. Barrett, O.D. Sherby : Trans, AIME, **233**, 1116 (1965)
- 17) A.K. Mukherjee, J.E. Bird and J.E. Dorn : Trans. ASM, **62**, 155 (1969)
- 18) E.O. Hall : Proc. Roy. Soc. London, **B64**, 747 (1951)
- 19) N.J. Petch : J.Iron Steel Inst. : **174**, 25 (1953)
- 20) H. Conrad and W.D. Robertson : Trans. AIME, **212**, 536 (1958)
- 21) E.M. Howard, W.C. Barmore, J.D. Mote and J. E. Dorn : Trans. AIME, **227**, 1061 (1963)
- 22) 武藤 侃, 後藤正治, 田上道弘, 麻生節夫 : 日本金属学会誌, **62**, 343 (1998)