

# 金属のクリープ挙動の光弾性的研究

三木 教\*・石田 武\*

## Photoelastic Studies on Creep-Behaviors of Metals

Satoshi MIKI and Takeshi ISHIDA

### Abstract

Creep-behaviors of aluminum and mild steel under the constant tensile load were investigated with the photoelastic coating method. By using this method, creep-behaviors of stress and strain distributions in tensile strips with a circular hole under the constant load were analysed.

Influences of the direction angle of the working to tensile axis in specimen for creep-behaviors were analysed.

### 1. 緒 言

本文はアルミニウムおよび軟鋼のクリープ挙動を光弾的に調べたものである。著者三木<sup>1)~6)</sup>は既に高分子および金属のクリープ挙動について光弾的研究をしばしば報告しているが、今回はアルミニウムおよび軟鋼帯板の平行または有円孔試験片の引張クリープ挙動を光弾性皮膜法を用いて調べ、すべりの発生およびその進展状態、円孔近傍の弾塑性応力およびひずみ分布のクリープ変化ならびに材料の加工方向による影響をも併せて調べた結果について述べたものである。

### 2. 試片の材料および形状・寸法

本実験に用いた金属材料は、厚さ 1mm のアルミニウムおよび厚さ 0.5mm の軟鋼薄板であり、総て市販のものである。これらの材料を圧延方向、圧延方向と 45° 方向および圧延方向と直角方向に板取りし（以後、それぞれ 0° 方向材、45° 方向材および 90° 方向材という）、Fig. 1 に示したような形状・寸法に加工して試片とした。また、圧延方向に板取りして所定の形状・寸法に加工したものうち、一部はその後、残留応力除去のために塩浴中にて、アルミニウムが 280°C で 1hr、軟鋼が 370°C で 1hr 焼鈍し、徐冷して試片として用いた。

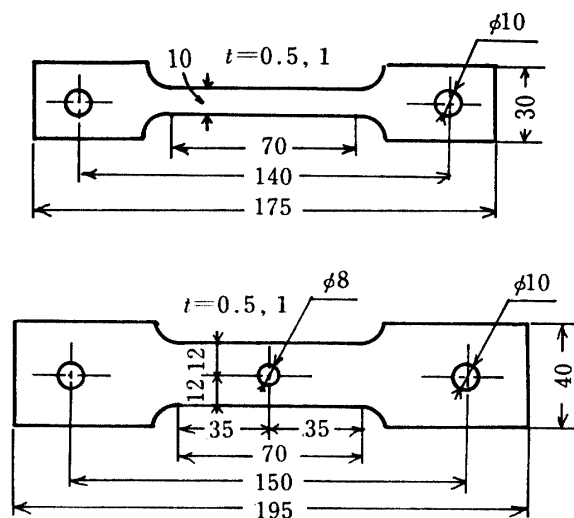


Fig. 1 Dimensions of specimens

光弾性皮膜としては、厚さ 1mm のエポキシ・ポリサルファイド・アミンを用いたが、その主ひずみ感度 ( $\beta$ ) はアルミニウム試片に用いたもので  $69.3\text{mm}^{-1}$ 、軟鋼用のが  $83.4\text{mm}^{-1}$  であった。

なお、実験は総て常温において行った。

### 3. 実験結果とその考察

#### 3.1 材料の静機械的特性

クリープ実験に先立ち、各材料とも光弾性皮膜を接

\* 生産機械工学科

Table 1 Mechanical properties of aluminum and mild steel

Materials	Tensile axis angle to the working direction ( $\theta$ ) deg	Photoelastic coating film	Yield Point ( $\sigma_s$ ) kg/mm <sup>2</sup>		Tensile strength ( $\sigma_B$ ) kg/mm <sup>2</sup>	Elongation ( $\delta$ ) %	
Mild steel	Annealed	without	35.1	33.0	36.8	29.9 (22.6)	
		with	37.9	36.8	42.7		
	0°	without	28.2	26.2	36.0	34.0 (24.0)	
		with	30.2	28.4	38.6		
	45°	without	28.5	26.8	37.2	30.0 (23.0)	
		with	31.0	29.2	39.5		
	90°	without	26.9	26.2	33.6	36.5 (24.8)	
		with	29.2	28.0	37.4		
	Aluminum	Annealed	without	4.0		9.8	30.8 (28.1)
			with	4.4		12.6	
0°		without	12.6		13.3	9.2	
		with	13.0		14.6		
45°		without	12.4		12.5	8.2	
		with	12.9		14.4		
90°		without	13.2		13.4	8.2	
		with	13.3		14.7		

着する前と接着後の両方について静引張実験を行い、静機械的特性を調べたが、その結果を Fig. 2 および Tab. 1 に示した。Tab. 1 の降伏点の欄で、軟鋼の場合は上降伏点、下降伏点の順で示し、アルミニウムについては、0.2%の残留ひずみを生じる応力を用いた。また伸び率の欄の( )内には光弾性皮膜破断時の値を示した。

ヤング率は光弾性皮膜の有無および加工方向にかかわらず、その大きさに変化は認められず、軟鋼で21300 kg/mm<sup>2</sup>、アルミニウムで7000kg/mm<sup>2</sup>であった。また、伸び率は軟鋼においては、焼鈍材、45°方向材、0°方向材、90°方向材の順に大きくなり、30%から37%まで変化したが、アルミニウムでは焼鈍材では約30%、それ以外は大差なく、約9%となった。降伏点は皮膜接着により増大し、アルミニウムで約0.4kg/mm<sup>2</sup>、軟鋼で約3kg/mm<sup>2</sup>の差があり、引張強さも同様に、それぞれ約2kg/mm<sup>2</sup>、5kg/mm<sup>2</sup>の差があった。さらに、加工方向性の影響を調べると、アルミニウムでは降伏点、引張強さともに、焼鈍材、45°方向材、0°方向材、90°方向材の順で大きくなり、また軟鋼では、その逆に、90°方向材、0°方向材、45°方向材、焼鈍材の順で大きくなった。また、軟鋼においては、上下両降伏点

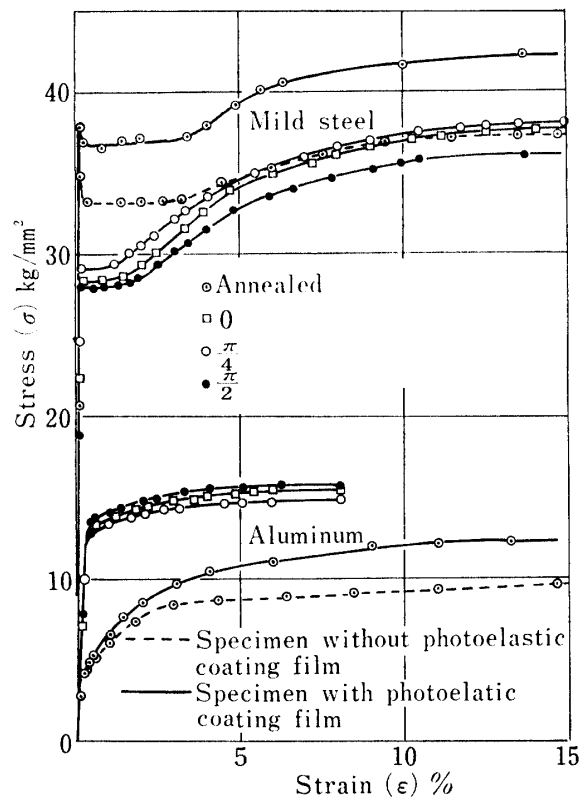


Fig. 2 Stress ~ Strain diagram of aluminum and mild steel

の差は焼鈍により大きくなったが、いずれの加工方向材においても光弾性皮膜を接着すると、やや小さくなった。

3.2 平行帯板試片のクリープすべりの発生および進展の光弾性的解析

本実験で得たアルミニウム焼鈍材平行帯板試片のクリープ光弾性写真の一例を Fig. 3 に、また、その際の自由周辺におけるすべりひずみの時間的变化状態を Fig. 4 に示したが、これらより明らかなように、すべりひずみは負荷と同時に試片全長にわたってほぼ一様に発生し、時間の経過とともに、それがほぼそのままの分布状態で増大、進展した。また、Fig. 5 には試片全長にわたっての平均的なすべりひずみの時間的变化状態を応力をパラメータとして、複屈折 (しま次数  $N$ ) で示したが、焼鈍アルミニウムでは、クリープに

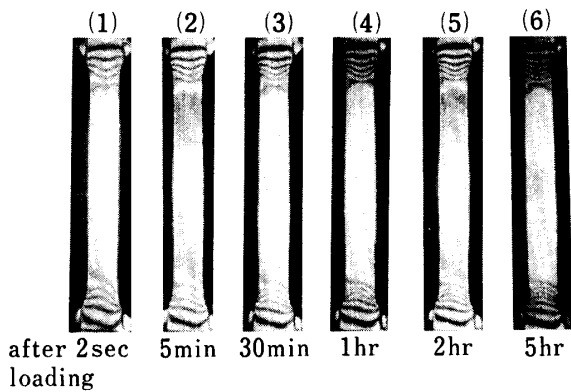


Fig. 3 Birefringent patterns in the flat specimen of annealed aluminum during the creep under the constant stress ( $\sigma = 9.0 \text{ kg/mm}^2$ )

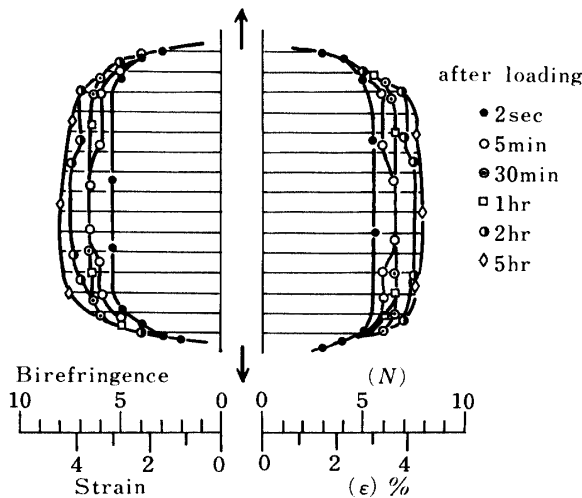


Fig. 4 Strain distributions in the flat specimen of annealed aluminum during the creep under the constant stress ( $\sigma = 9.0 \text{ kg/mm}^2$ )

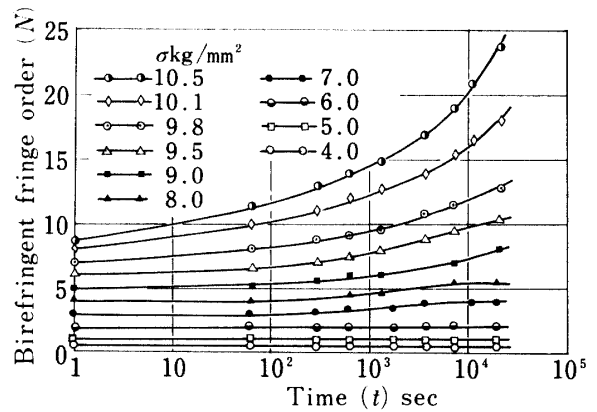


Fig. 5 Birefringent fringe order of photoelastic coating films on flat specimens of annealed aluminum during the creep

よるすべり量は時間の経過につれ増大するが、その変化量は応力の大きいものほど大きかった。

また、軟鋼焼鈍材帯板試片のクリープ実験での光弾性写真と試片の自由周辺上のすべりひずみの時間的变化状態を Fig. 6 および Fig. 7 に示したが、この場合は上、下両降伏点よりも低い応力でも明らかにクリープ現象を呈し、しかも、すべりは試片平行部の一端ま

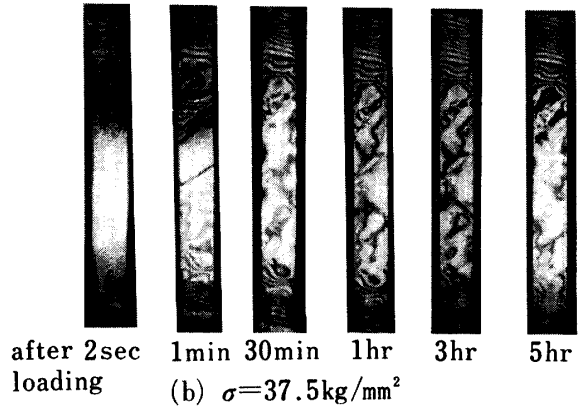
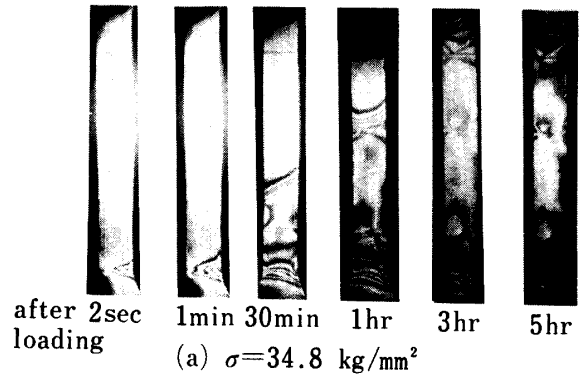


Fig. 6 Birefringent patterns in flat specimens of annealed mild steel during the creep under constant stress ( $\sigma$ )

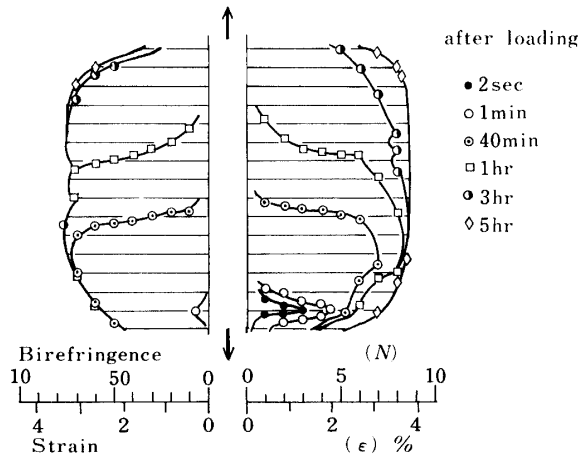


Fig. 7 Strain distributions in the flat specimen of annealed mild steel during the creep under the constant stress ( $\sigma = 34.8 \text{ kg/mm}^2$ )

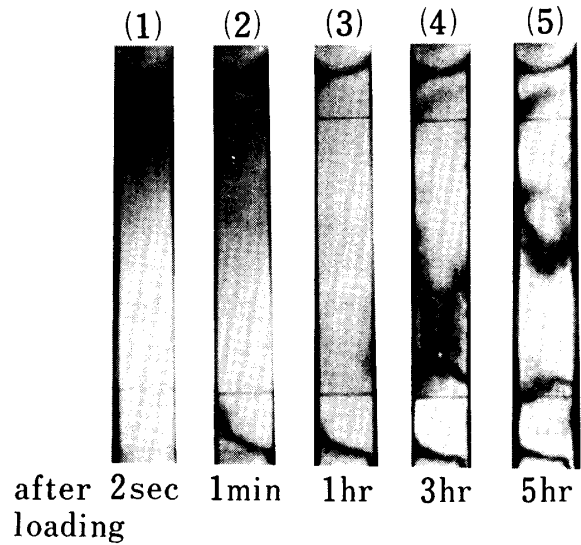


Fig. 9 Birefringent patterns and strain distributions in an aluminum flat specimen during the creep under the constant stress ( $\sigma = 12.96 \text{ kg/mm}^2$ ) (tensile axis angle to the working direction is 0 deg)

たは両端より発生し、時間が経過するにつれてすべり量が增大しながら試片平行部全体に進展していき、ほぼ一様なすべり量となって、その後は、ほぼそのまま増大、進展した。また、軟鋼焼鈍材では、すべりは斜めに発生したが、そのすべり方向と試片の軸方向とのなす角はほぼ $60^\circ$ であった。さらに、試片全長にわたるすべり量(複屈折しま次数  $N$  で表わす)の平均値の時間的変化の状態を Fig. 8 に示したが、軟鋼では、

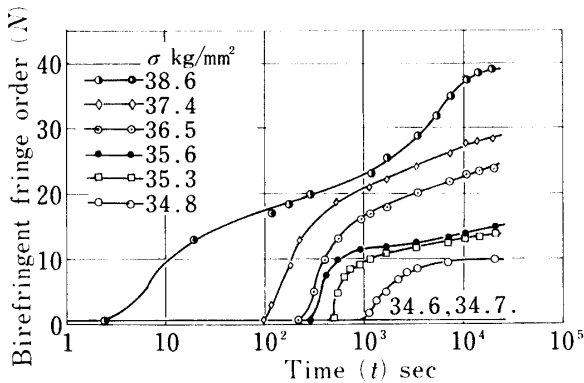


Fig. 8 Birefringent fringe order of photoelastic coating films on flat specimens of annealed mild steel during the creep

負荷後ある時間を経てから急激にすべりが生じ、その時間は応力の大きいものほど短くなった。また、負荷後のある瞬間におけるすべり量は、応力の大きいものほど大きかった。

次に、アルミニウムの板取り方向のクリープ挙動への影響について調べるために、Figs. 9~11 にそれぞれ $0^\circ$ 方向材、 $45^\circ$ 方向材、 $90^\circ$ 方向材に一定単軸引張荷重を作用させた場合のクリープ光弾性写真および自由

周辺のすべりひずみ分布を示したが、いずれの方向材においてもすべりが局部的に発生したが、 $45^\circ$ 方向材では先ず一方向すべりが、また、 $90^\circ$ 方向材では交叉すべりが生じ、それが増大・進展してその個所から破断した。なお、クリープに対する変形抵抗は $45^\circ$ 方向材が最も小さく、 $90^\circ$ 方向材が最大であった。

軟鋼平行帯板の各方向材のクリープ光弾性写真と自由周辺上でのすべりひずみ分布の時間的変化状態を Figs. 12~14 に示したが、いずれの方向材も負荷後ある時間経って急激に発生した局部的すべりは、交叉す

べりを生じながら一定量すべり，試片全長に進展していった。また，すべり方向と試片軸とのなす角は0°方向材が最大で60°，45°方向材が56°，そして90°方向材が52°と最小であった。なお，クリープに対する変形抵抗は45°方向材が最大で，90°方向材が最小となった。

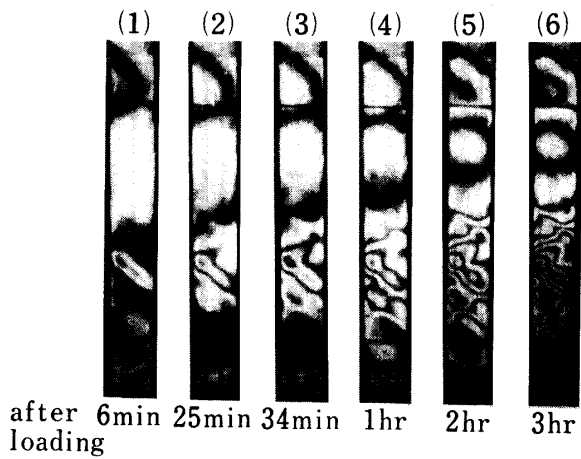


Fig. 10 Birefringent patterns and strain distributions in an aluminum flat specimen during the creep under the constant stress ( $\sigma = 12.88 \text{ kg/mm}^2$ ) (tensile axis angle to the working directions is 45 deg)

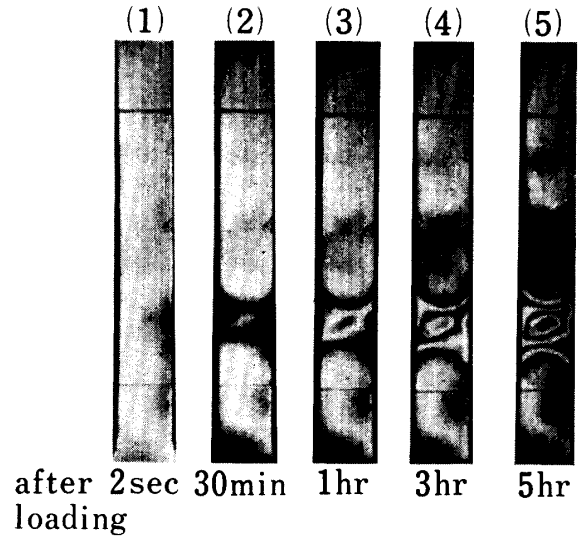


Fig. 11 Birefringent patterns and strain distributions in an aluminum flat specimen during the creep under the constant stress ( $\sigma = 13.42 \text{ kg/mm}^2$ ) (tensile axis angle to the working direction is 90 deg)

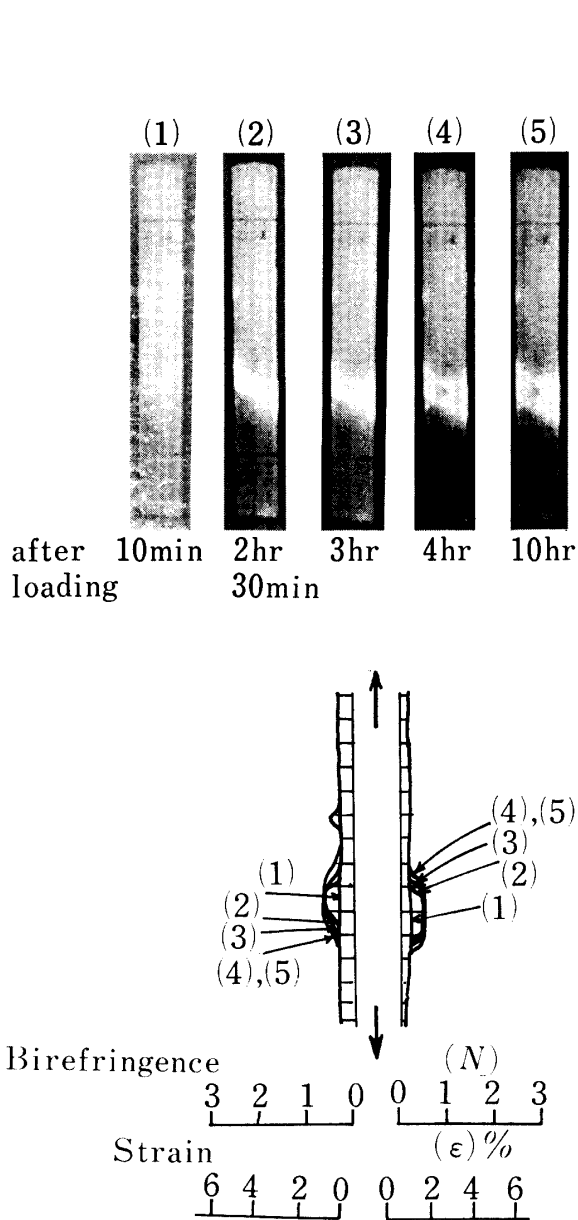


Fig. 12 Birefringent patterns and strain distributions in a mild steel flat specimen during the creep under the constant stress ( $\sigma=25.9 \text{ kg/mm}^2$ ) (tensile axis angle to the working direction is 0 deg)

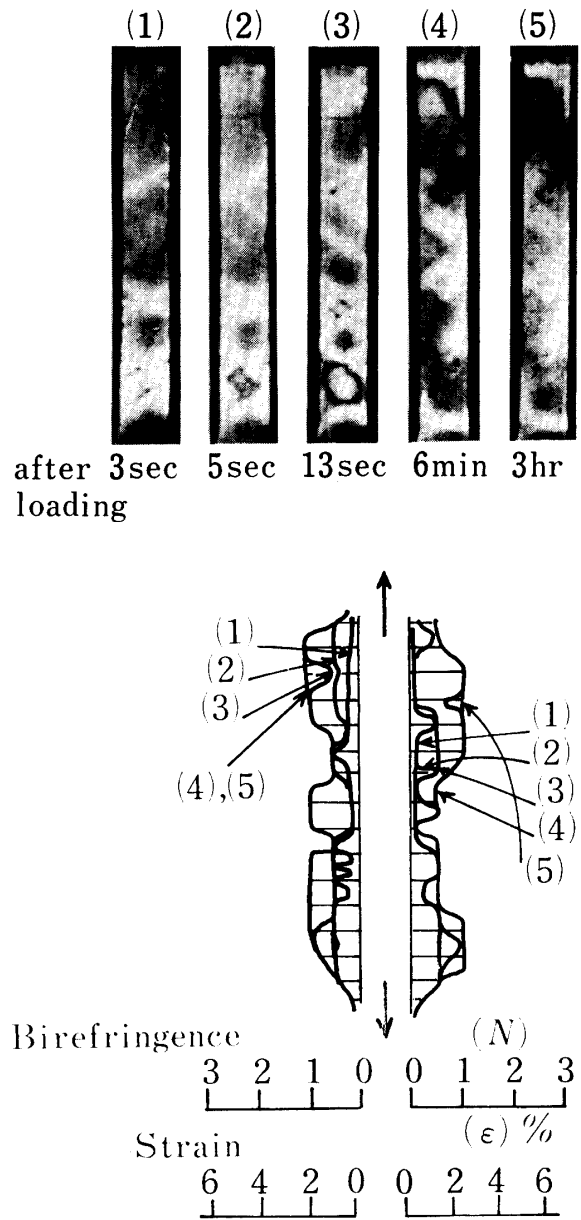


Fig. 13 Birefringent patterns and strain distributions in a mild steel flat specimen during the creep under the constant stress ( $\sigma=27.5 \text{ kg/mm}^2$ ) (tensile axis angle to the working direction is 45 deg)

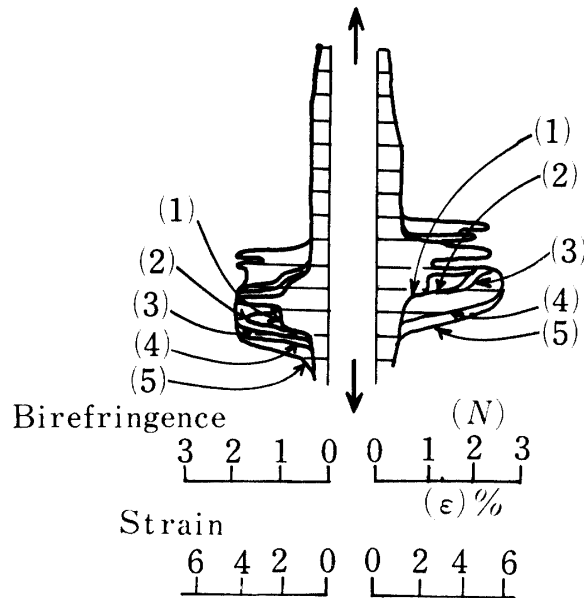
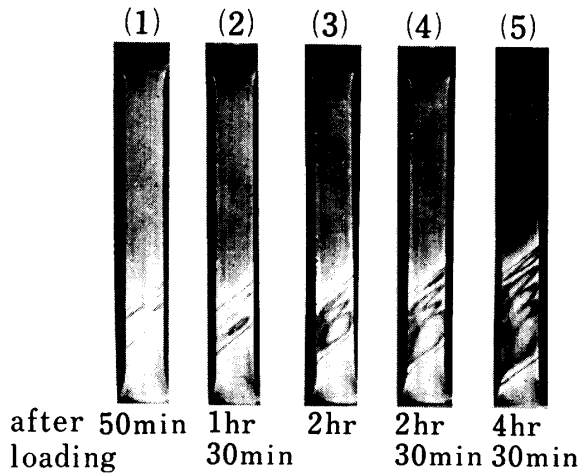


Fig. 14 Birefringent patterns and strain distributions in a mild steel flat specimen during the creep under the constant stress ( $\sigma = 26.0 \text{ kg/mm}^2$ ) (tensile axis angle to the working direction is 90 deg)

### 3.3 有円孔帯板試片のクリープ応力およびひずみの光弾性的解析

アルミニウムおよび軟鋼について、有円孔帯板試片での引張りクリープ過程における弾・塑性応力およびひずみの時間的変化を測定・解析するために、時間をパラメータとした応力～復屈折（しま次数：N）線図を用いたが、その一例として、アルミニウム焼鈍材の場合を Fig. 15 に、また軟鋼焼鈍材の場合を Fig. 16 に示した。これらより、アルミニウム焼鈍材では約  $5 \text{ kg/mm}^2$ 、軟鋼焼鈍材では約  $35 \text{ kg/mm}^2$  以下の応力ではクリープを示さないことがわかった。

まず、アルミニウム焼鈍材の有円孔帯板試片の引張

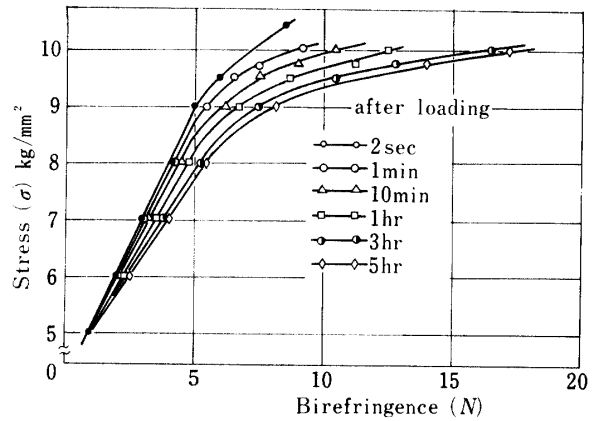


Fig. 15 Relation between stress and birefringence during the creep on annealed aluminum specimen

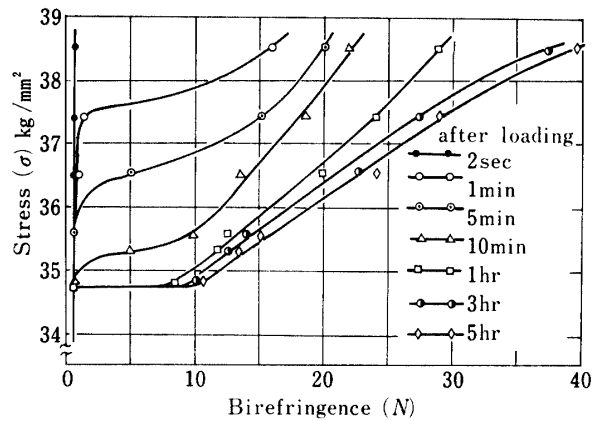


Fig. 16 Relation between stress and birefringence during the creep on annealed mild steel specimen

りクリープ過程における皮膜光弾性写真の一例を Fig. 17 に、また、平均引張応力  $\sigma_0 = 5.0 \text{ kg/mm}^2$  の場合の弾・塑性応力およびひずみの時間的変化状態を Fig. 18 に示した。これらによると、円孔周辺では、負荷後の経過時間にかかわらず円孔側壁において最大ひずみとなり、従って、応力も最大となり、そこより生じた塑性域が5時間後に平行外縁上の最大応力、最大ひずみの点に達した。また、Fig. 18 から明らかなように、円孔周辺においても平行外縁においても、負荷瞬間よりひずみは時間の経過とともに増大しているが、応力は極大値は減少し、また極小値は逆に増大して、均一な分布に近づいた。

次に、軟鋼焼鈍材の有円孔帯板でのクリープ光弾性写真の一例とその際の弾・塑性応力およびひずみ分布の時間的変化の状態を Fig. 19, Fig. 20 に示したが、この場合はアルミニウムと異り、クリープによる塑性域は先ず円孔側壁より生じ、それがほぼ試片軸に直角

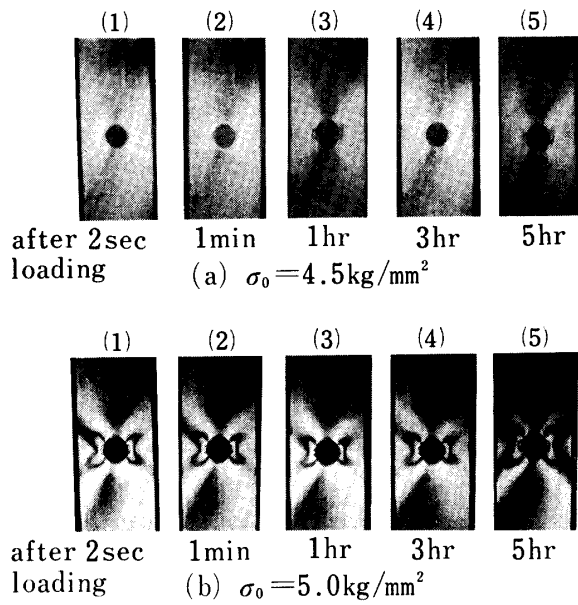


Fig. 17 Birefringent patterns in an annealed aluminum specimen with a circular hole during the tensile creep

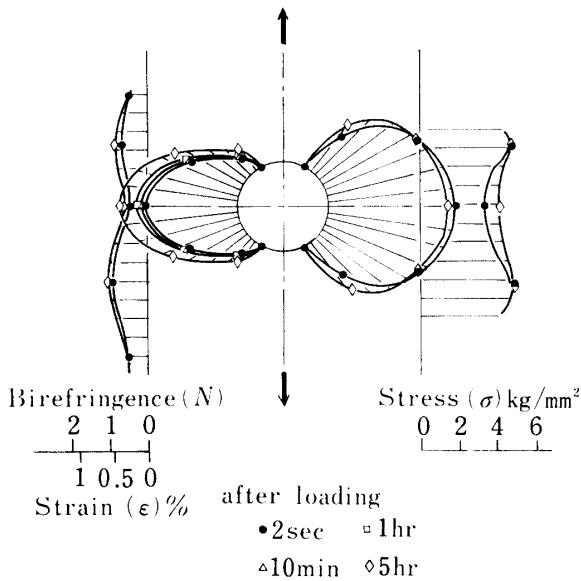


Fig. 18 Stress and strain distributions in an annealed aluminum specimen with a circular hole during the tensile creep ( $\sigma_0 = 5.0 \text{ kg/mm}^2$ )

な方向に進んで平行外縁に到達して、そこから平行外縁上を上下どちらか一方に進み、それが終わった後に他方の側に進展して上下ほぼ対象な分布になる。また、応力はアルミニウムと同様に、極大値は減少し、極小値は増大しながら均一な分布に近づくことがわかった。

引張りクリープ過程におけるこれらの有円孔帯板試片において、各平均引張応力を降伏点で除した値 ( $\sigma_0/\sigma_s$ ) をパラメータとして円孔側壁の塑性応力集中

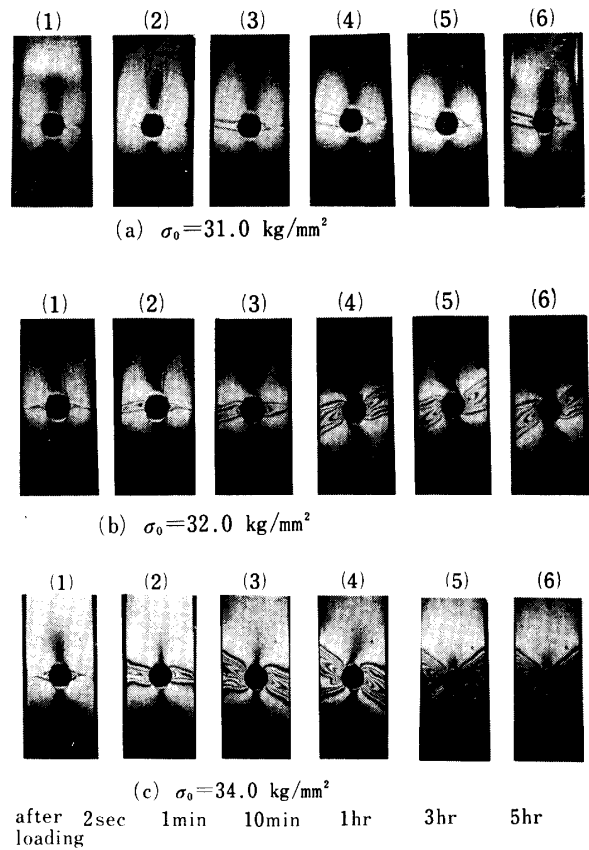


Fig. 19 Birefringent patterns in annealed mild steel specimens with a circular hole during the tensile creep

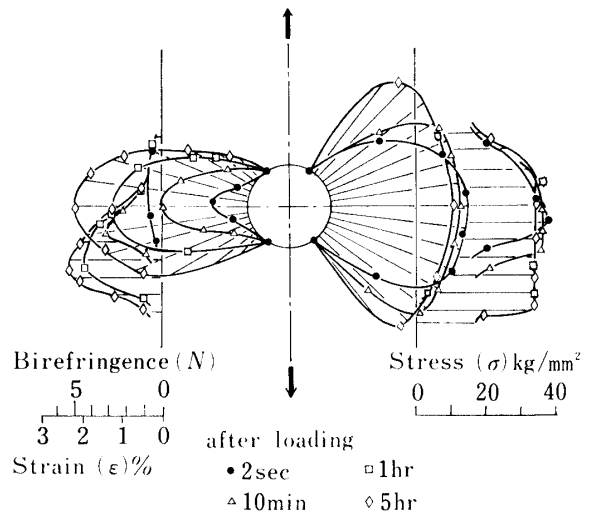


Fig. 20 Stress and strain distributions in an annealed mild steel specimen with a circular hole during the tensile creep ( $\sigma_0 = 32.0 \text{ kg/mm}^2$ )

係数の時間的変化を Fig. 21 に示したが、アルミニウム、軟鋼どちらの材料も平均応力が大きくなるほど負



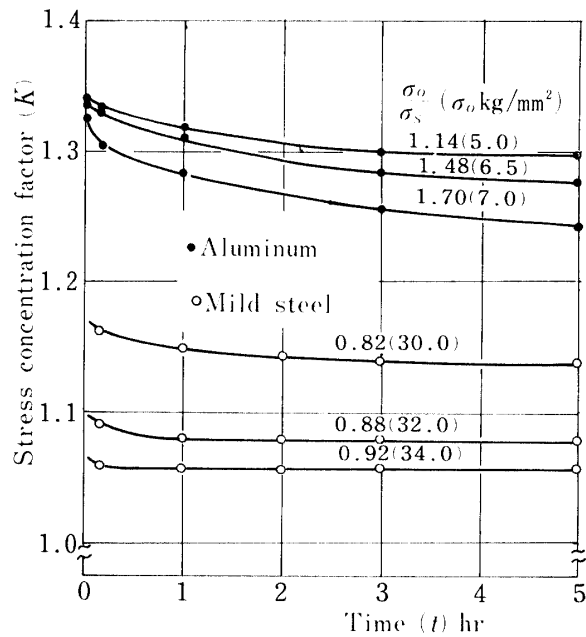


Fig. 21 Stress concentration factor at the hole on the horizontal section of specimen with a circular hole during the tensile creep

荷後の塑性応力集中係数は小さくなるが、いずれは1に近づくものと思われる。また、 $(\sigma_0/\sigma_s)$ を同一にして比較した場合は、軟鋼の方がアルミニウムよりも塑性応力集中係数は小さくなった。

次に、有円孔帯板試片のクリープ過程での加工方向性による相異を調べてみたが、アルミニウム試片では、Fig. 22 に示したクリープ光弾性写真から明らかなよ

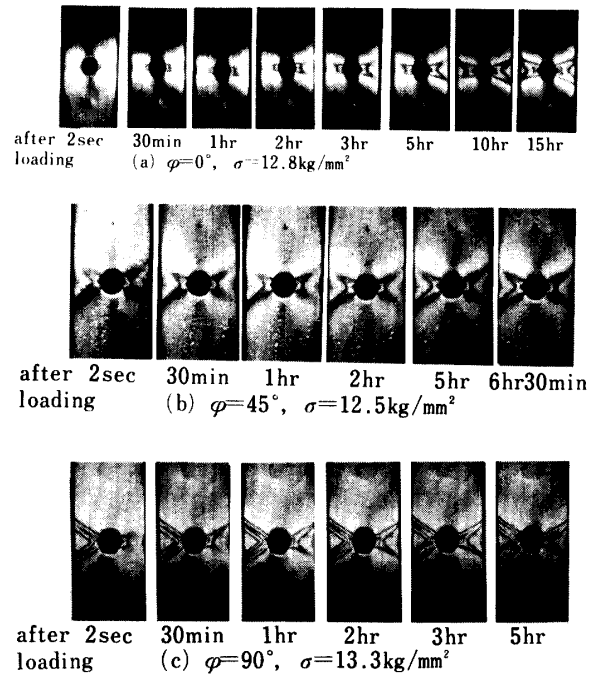


Fig. 22 Birefringent patterns in aluminum specimens with a circular hole during the tensile creep (tensile axis angle to the working directions  $\varphi$  are  $0^\circ, 45^\circ$  and  $90^\circ$ )

うに、加工方向性による影響は顕著に現われた。先ず、 $0^\circ$ 方向材では円孔側壁に生じた塑性域は垂直中央断面に近い範囲内で進展して平行外縁に達し、 $90^\circ$ 方向材では円孔側壁の塑性域は試片垂直断面と約 $36^\circ$ の角度で斜上下方向の、しかも狭い範囲内で進んで平行外縁

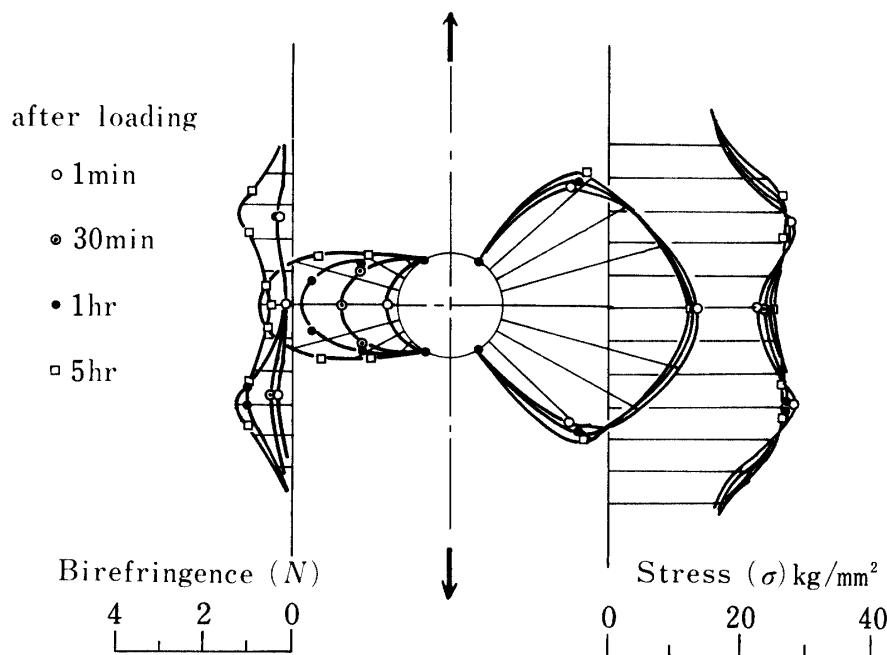


Fig. 23 Stress and strain distributions corresponding to Fig. 22 (b)

に到達した。これら両者は、垂直中央断面の上下で、ほぼ応力およびひずみ分布は対称であるが、45°方向材では Fig. 22 (b) および Fig. 23 からわかるように、円孔周辺の応力およびひずみ分布が垂直中央断面の上下で対称ではなく、円孔自由周辺上で圧延方向に一致する方向においてひずみは大きくなった。また、その影響が平行外縁にまでおよび、円孔周辺で圧延方向に近い方向から進んだ塑性域が平行外縁に早く達し、そこがひずみも応力も大きくなった。

軟鋼の有円孔帯板試片のクリープ過程における皮膜光弾性写真の一例を示したのが Fig. 24 であるが、0°

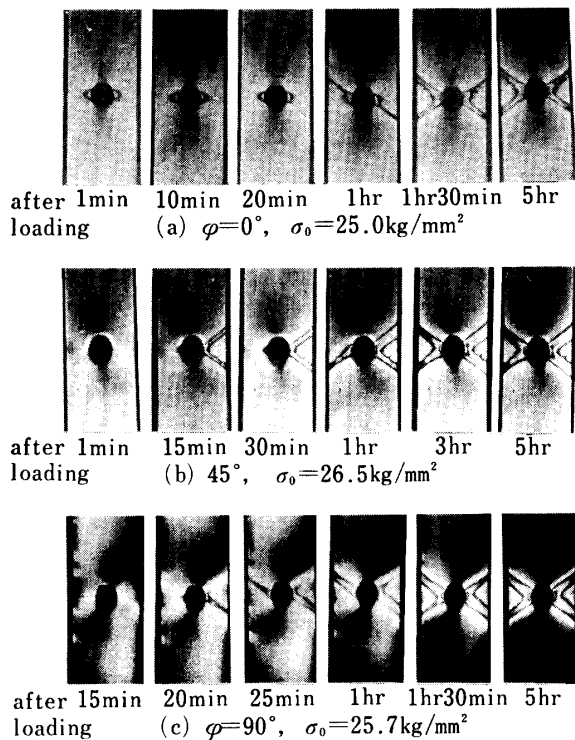


Fig. 24 Birefringent patterns in mild steel specimens with a circular hole during the tensile creep (tensile axis angle to the working direction  $\varphi$  are 0°, 45° and 90°)

方向材および90°方向材においては、円孔側壁に生じた塑性域は、まず、右上りまたは右下りのどちらか一方の方向に進んで平行外縁に達し、しかる後に他の斜め方向にも進んでほぼ上下対称となった。また、45°方向材では円孔周辺の塑性域は中央断面より上下ほぼ対称に同時に進んで平行外縁に達した。このように、塑性域が円孔周辺から平行外縁に到る方向を示したのが Fig. 25 であって、 $M_1, M_2$  点は平行外縁上の最初に塑性域が達した点を表わす。これより、アルミニウムでは0°方向材が $\theta \approx 27^\circ$ と最も中央垂直断面に近く塑性域が進み、90°方向材が $\theta \approx 36^\circ$ と最も離れて進

んだことがわかる。また、軟鋼においては、0°方向材と90°方向材はほぼ同じで $\theta \approx 38^\circ$ となり、45°方向材が約42°と最大であった。なお、アルミニウムよりも

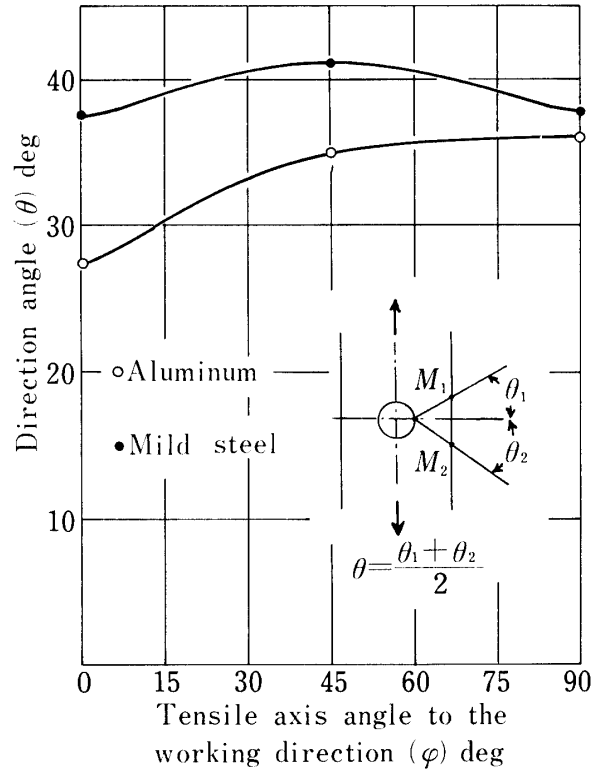


Fig. 25 Direction-angle of birefringent slip band at a circular hole in the specimen

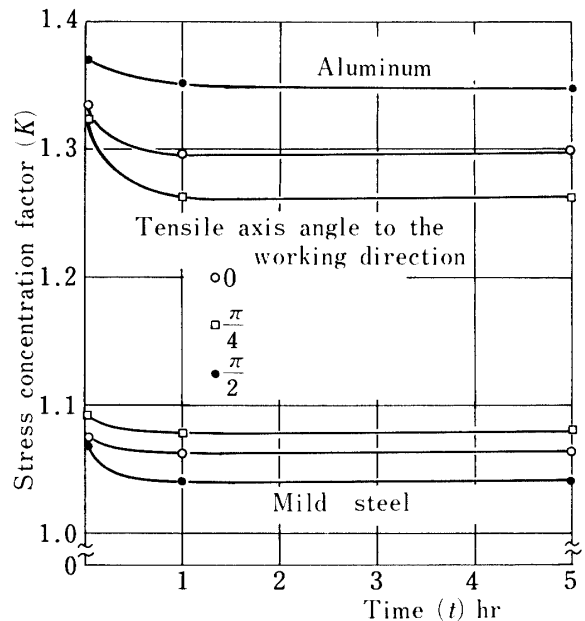


Fig. 26 Stress concentration factor at the hole on the horizontal section of specimen with a circular hole during the tensile creep

軟鋼の方が各加工方向とも大きな値となった。

アルミニウムおよび軟鋼の各加工方向材の有円孔帯板試片において、クリープにより時間の経過とともにひずみが増大するにもかかわらず、応力の極大値は減少し、極小値は逆に増大して均一な分布に近づくことは焼鈍材の場合と同じであったが、円孔側壁の塑性応力集中係数を調べてみると、Fig. 26 に示すようになった。すなわち、アルミニウムでは  $\sigma_0/\sigma_s \approx 0.98$  の値をとったが、90°方向材が最も大きい値を示し、45°方向材が最も小さくなった。また、軟鋼では  $\sigma_0/\sigma_s \approx 0.91$  の値で比較したが、アルミニウムとは逆に、45°方向材において最大となり、90°方向材で最小となった。また、 $\sigma_0/\sigma_s$  が大きいほど塑性応力集中係数は小さくなることが Fig. 21 より明らかであるので、加工方向性を考えた場合でも軟鋼よりアルミニウムの方が塑性応力集中係数は大きくなる。

#### 4. 結 論

アルミニウムおよび軟鋼の平行および有円孔帯板試片の引張クリープ過程における挙動を光弾性皮膜法を用いて解析し、あわせて加工方向性による影響をも調べて、次のようなことがらが明らかとなった。

(1) 降伏点および引張強さは、アルミニウムでは引張軸方向が加工方向に対して45°方向材、0°方向材、90°方向材の順で大きくなり、軟鋼では逆に、90°方向材、0°方向材、45°方向材の順に大きくなる。

(2) アルミニウム焼鈍材の平行帯板では、試片の全長にわたって、ほぼ一様にすべりが発生し、時間の経過によって、そのまま増大・進展する。

(3) 軟鋼焼鈍材の平行帯板試片では、負荷後、一定時間を経て急激に平行部の一端または両端よりすべりが発生し、それが進展・増大するが、そのすべりの方向は試片軸と約60°の角度をなす。

(4) アルミニウムの各方向材においては、クリープに対する変形抵抗は45°方向材、0°方向材、90°方向材の順で大きくなるが、いずれも局部的すべりが発生し、特に45°方向材では、先ず一方向すべり、90°方向材で

は交叉すべりが発生、進展して、その個所から破断する。

(5) 軟鋼の加工方向材においては、クリープに対する変形抵抗は90°方向材、0°方向材、45°方向材の順で大きくなり、いずれも交叉すべりを生じながら一定量すべり、試片全長にわたって進展した後、破断する。

(6) アルミニウム焼鈍材の有円孔帯板試片では、クリープすべりは円孔側壁より発生し、そこから約40°の角度をなして斜上、下方向へ進展し試片外縁に達して塑性が貫通するが、軟鋼焼鈍材では円孔側壁より生じたすべりは試片軸に直角に進み試片外縁に達し、その後、試片外縁上を上下に進行する。

(7) 有円孔帯板試片のクリープ過程では、応力分布は時間の経過につれて均一化する。

(8) アルミニウム加工方向材の有円孔帯板試片では、クリープによる塑性域の拡がりは、0°方向材、45°方向材、90°方向材の順で平行外縁上をより遠くまで達するが、軟鋼においては、45°方向材が最も拡がりが大で、0°方向材、90°方向材は大差ない。

(9) 有円孔帯板試片の円孔側壁の塑性応力集中係数は平均応力が大きいほど小さく、 $\sigma_0/\sigma_s$  を一定にした場合、アルミニウムの方が軟鋼より大きい。この係数はクリープによって減少して1に近づく。

(10) 有円孔帯板試片の円孔側壁の塑性応力集中係数はアルミニウムでは、45°方向材、0°方向材、90°方向材の順で大きくなり、軟鋼ではこれと逆になる。

#### 参 考 文 献

- 1) S. Miki; Proc. 8th Japan Nat. Congr. Appl. Mech. 1958" pp. 231~234 (1959)
- 2) 三木 教; 機械学会創立60周年記念東京講演論文集 pp. 22~26 (1957)
- 3) S. Miki; International Symposium on Photoelasticity, (1961) (Chicago USA)
- 4) 三木 教; 応用物理, **31**, 262~268 (1962)
- 5) 三木 教; 応力と歪, **1**, 9~17 (1971)  
応力と歪, **1**, No. 2, 10~17 (1971)
- 6) 三木 教; 光弾性学要論, 理工新社 (1974)