

# Mod.9Cr-1Mo鋼のクリープ寿命評価に関する研究

(その2) クリープ中斷材の損傷組織の定量化  
—先行基礎工学分野に関する平成9年度報告書—

1998年2月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken 311-1393, Japan.

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

## Mod.9Cr-1Mo鋼のクリープ寿命評価に関する研究

### (その2) クリープ中断材の損傷組織の定量化

-先行基礎工学分野に関する平成9年度報告書-

澤田 浩太\*・丸山 公一\*\*・小峰 龍司\*\*\*・永江 勇二\*\*\*

#### 要旨

高速炉の蒸気発生器材料として開発された Mod.9Cr-1Mo 鋼は、細長い板状マルテンサイトが束となった組織を有している。これをマルテンサイトラス組織という。クリープ中にはラスの大きさの増加や転位密度の減少といった組織の回復が起きる。この組織回復は加速クリープを引き起こし、材料は最終的には破断する。本報では、マルテンサイトラス組織のラス幅（個々の細長い板状のマルテンサイトの幅）に注目し、クリープ寿命評価因子としての可能性を種々のクリープ中断試験により検討した。

本鋼の焼き戻し温度(1053K)は試験温度(848~923K)に比べて高く、ラス組織は熱的に安定である。しかし、クリープ中には応力の影響を受けてラス組織が回復する。ラス幅はクリープひずみの増加に伴い増加し、応力によって決まる平衡値に飽和する。ラス幅の増加は、高温・高応力ほど早い。そこで試験条件の影響を受けない指標として、以下に示すラス幅の変化率を導入した。

$$\Delta d / \Delta d_s : \text{ラス幅の変化率} \quad \Delta d = d - d_0, \quad \Delta d_s = d_s - d_0$$

ここで、 $d$  は時間  $t$  でのラス幅、 $d_0$  は初期のラス幅、 $d_s$  はラス幅の飽和値(応力で決まる)である。 $\Delta d / \Delta d_s$  とクリープひずみの関係は、試験条件に依存しない。したがって、加速試験により得られた $\Delta d / \Delta d_s$  とひずみの関係は、実機条件にも適用できる。

以上から、ラス幅を測定すれば、クリープひずみが推定でき、このひずみ量から推定クリープ曲線を使ってクリープ寿命比を求めることができる。

---

\*研究生（東北大学 材料物性学専攻）

\*\*客員研究員（東北大学大学院 工学研究科）

\*\*\* 大洗工学センター 安全工学部 機器・構造安全工学室

## Creep Life Assessment of Mod.9Cr-1Mo steel

### (Part II) Quantitative evaluation of microstructural damage in creep-interrupted specimens.

Kota Sawada\* Kouichi Maruyama\*\* Ryuji Komine\*\*\* Yuji Nagae\*\*\*

#### ABSTRACT

Mod.9Cr-1Mo steel has a martensitic lath structure. Recovery of the lath structure takes place in the course of creep. Microstructural degradation due to the recovery results in the acceleration of creep rate and the subsequent failure of a specimen. Change of lath width during creep of the steel was quantitatively investigated to propose a residual life assessment methodology based on the recovery process.

Since the steel was tempered at 1053K, the lath structure is thermally stable at the testing temperatures(848K~923K). However, recovery of lath structure readily takes place during creep, indicating that the recovery is induced by creep deformation. Lath width  $d$  increases with creep strain and saturates to a value  $d_s$  determined by creep stress. The increase of  $d$  is faster at a higher stress and temperature. A normalized change in lath width,  $\Delta d/\Delta d_s$ , was introduced to explain the variation of lath growth rate with creep stress and temperature.  $\Delta d$  is the change in lath width from the initial value  $d_o$ , and  $\Delta d_s$  is the difference between  $d_s$  and  $d_o$ .  $\Delta d/\Delta d_s$  is uniquely related to creep strain  $\varepsilon$  and the relationship is independent of creep stress as well as creep temperature. This  $\Delta d/\Delta d_s-\varepsilon$  relationship obtained by an accelerated creep test at a higher temperature or stress is applicable to any creep condition including service conditions of engineering plants.

Creep strain can be evaluated from the measurement of  $\Delta d/\Delta d_s$  based on the  $\Delta d/\Delta d_s-\varepsilon$  relationship. A creep curve under any creep condition can readily be calculated by creep data of the steel. Combining these information one can assess residual life of a structural component made of the steel.

---

\* Graduate Student, Tohoku University

\*\* Graduate School of Engineering, Tohoku University

\*\*\* Structural Safety Section, Safety Engineering Division, Oarai Engineering Center

## 目 次

1. 緒言 .....	1
2. 実験方法 .....	2
3. 実験結果および考察 .....	3
3. 1 ラス幅の時間に伴う変化 .....	3
3. 2 ラス幅の変化とひずみの関係 .....	4
3. 3 ラス幅の変化率とひずみの関係 .....	5
3. 4 ラス幅の変化にもとづく寿命消費率の推定 .....	6
3. 5 二つの寿命評価法の優劣 .....	7
3. 6 硬さ測定によるラス幅変化の推定 .....	8
3. 7 ラス内の転位密度の変化とクリープ寿命評価 .....	9
4. 結言 .....	10
5. 参考文献 .....	11

## Caption list

Table 1. Chemical composition(mass%) and heat treatment procedure of the steel studied.

Table 2. Conditions of interrupted creep tests.

Fig.1(a). Effect of stress on the relation between lath width and creep time.

Fig.1(b). Effect of temperature on the relation between lath width and creep time.

Fig.2. Change of lath structure as a function of time. (a) Before creep,  
(b),(c)873K 137MPa, (d),(e) 873K 177MPa.

Fig.3(a). Effect of temperature on the relationship between lath width and strain.

Fig.3(b). Effect of stress on the relationship between lath width and strain.

Fig.4. Effect of stress on the normalized change of lath width with creep strain.

Fig.5. Relation between normalized change of lath width and creep strain obtained under various creep conditions.

Fig.6. Procedure of creep life assessment based on the relation between the normalized change of lath width and creep strain.

Fig.7. Correlation between real creep life fraction and creep life fraction assessed by change of lath width.

Fig.8. Relationship between normalized change of lath width and creep life fraction under various creep conditions.

Fig.9. Creep curve under various creep conditions.

Fig.10. Relationship between lath width and hardness.

Fig.11. Relationship between lath width and dislocation density.

Fig.12. Change of dislocation density as a function of creep strain.

## 1. 緒言

我が国における火力発電プラントの多くは、設計寿命を迎えている。しかし、設計寿命には、十分な安全裕度を見込んでいるため、これらのプラントは、今後も安全に使用できる。ただし、これら経年プラントの使用期間を延長するには、プラントの余寿命を評価し、どの程度安全かを示す必要がある。発電プラントでは、構成部材は高温高圧下にさらされる。このような環境下では、材料はクリープ変形し、それに伴って破壊が進行する。クリープ変形中に粒界キャビティが発生し、それが連結して破断するオーステナイト鋼やニッケル基合金では、粒界キャビティの成長・連結がクリープ寿命を直接支配する。そのため、粒界キャビティの成長、連結過程を計測すれば、破断に至るどの段階にあるかを推定できる。<sup>1-3)</sup> しかし、十分なクリープ延性を有するフェライト鋼やマルテンサイト鋼では、キャビティが観察されるのは破断のごく近傍である。したがって他の指標が必要である。高温クリープでは、破壊に先立って塑性変形が起き、それがクリープ曲線として観察される。このクリープひずみと寿命との間には密接な関係がある。<sup>4)</sup> そこで延性材料では、ひずみの計測によりクリープ損傷の評価が行われている。<sup>5)</sup>

一方、高温使用中の組織変化を計測し、寿命評価する方法がある。<sup>6)</sup> 組織変化と破壊(寿命)の関係は必ずしも確立されていないが、組織因子の変化とクリープ寿命比の間に一定の関係があれば、組織変化に基づく寿命評価が可能である。

本研究では、高速増殖炉の蒸気発生器材料として開発された、改良 9Cr-1Mo 鋼に注目する。この材料は、火力発電用ボイラ材としても現在広く使用されている。高 Cr フェライト系耐熱鋼は、マルテンサイト組織、析出強化、固溶強化

により高温強度が確保されている。本鋼は高いクリープ延性を有し、マルテンサイト組織の回復や析出物の成長などによりクリープ変形が促進され、その後キャビティの発生により破壊に至る。したがって、破壊に先立つクリープ変形を引き起こす微細組織の変化が、クリープ寿命の大半を占めると考えられる。著者らは以前、強化因子の一つであるマルテンサイトラス組織のラス幅が、クリープ損傷評価に利用できることを提案した。<sup>7)</sup> ラス幅はクリープ変形速度と密接な関係があり、<sup>8,9)</sup> ラス幅の変化は、組織変化とクリープ寿命を関連づける上で有用な指標と考えられる。

本研究では、ラス幅の変化と、クリープひずみおよびクリープ寿命比の関係を、種々の温度、応力において検討し、クリープ寿命評価手法を確立することを目的とする。寿命評価には、ラス幅と寿命比を関係づける検量線が必要である。この検量線は加速試験で作るため、検量線は温度や応力によって変化しない方が望ましい。そこで、試験温度や応力に影響されずにラス幅と寿命比を関係づける手法を検討した。

## 2. 実験方法

本研究で用いた改良 9Cr-1Mo 鋼は、熱間圧延板材である。その化学成分と熱処理条件を Table 1 に示す。クリープ試験片は、その応力軸方向が圧延方向と平行となるように切り出した。ゲージ平行部直径 10mm、標点間距離 50mm の丸棒試験片である。単レバー型クリープ試験機により、大気中で定荷重クリープ破断および中断試験を行った。

ラス幅と寿命比を結びつける検量線を、温度あるいは応力加速試験に基づいて作ることを想定して、同一温度で応力を変えた、あるいは同一応力で温度を変えた試験条件で、クリープ中断試験を行った。選択した中断試験条件を Table 2 に示す。ラス組織変化を透過型電子顕微鏡を用いて観察した。試料は、ゲージ平行部から応力軸方向と平行に切り出し、観察に供した。また、各試料のゲージ平行部のビッカース硬さを測定した。(荷重 10kg)

### 3. 実験結果および考察

#### 3. 1 ラス幅の時間に伴う変化

Fig.1(a)および Fig.1(b)に、873K・137MPa, 177MPa および 177MPa・848K, 873K におけるマルテンサイトラス幅の変化過程を比較して示す。Fig.2 には Fig.1(a)に対応する組織変化を示す。初期の平均ラス幅は  $0.53 \mu\text{m}$  である。ラス幅はクリープの進行とともに増大し、ラス組織の回復が起きる。Fig.1 で、最も長時間側の実験点は破断材の測定結果である。ラス幅はこの時点で応力によって決まる平衡値に飽和する。<sup>7)</sup> ラス幅の飽和値は高応力ほど小さい。一定応力なら、飽和値は温度に依らない。

本実験の試験温度は、焼き戻し温度に比べて十分低い。そのため、無応力下(ネジ部)ではラス組織は回復しない。<sup>7)</sup> これに対して Fig.1 に示す応力下では、ラス幅は変形初期から増加する。このことは、ラス組織の回復が応力あるいは変形に誘起された現象であることを示唆する。Fig.1(a)は同一温度で応力が、(b)は同一応力で温度がラス幅の成長に及ぼす影響を調べたものである。これらの結

果から明らかなように、高応力あるいは高温ほどラス幅の増加は早い。ラス幅の変化からクリープ寿命消費を評価するには、ラス幅の変化を支配する要因を明らかにする必要がある。そのためには、ラス幅の変化に応力や温度が影響する原因、言いかえれば、ラス幅の変化を温度や応力に影響されない形で表現する方法を見出す必要がある。

### 3. 2 ラス幅の変化とひずみの関係

ラス幅の変化はラス境界の消失や新たなセル壁の形成によって起きる。例えばラス境界の消失は、ラス境界全体が移動して隣接ラス境界と合体するか、あるいはラス境界を構成する転位が解けることによって起きる。これらのプロセスにはラス境界を形成する多数の転位の運動が必要である。転位の易動度は、応力や温度に影響され、高応力や高温ほど高い。<sup>10)</sup> 3. 1 で述べたラス幅の変化に対する温度や応力の影響は、高応力あるいは高温ほど、一定時間に生じるひずみが大きいことに対応し、ひずみが応力下でのラス組織回復の重要な因子であることを示唆する。

Fig.3(a)に、ラス幅とひずみの関係に及ぼす温度の影響を示す。ラス幅は、ひずみの増加に伴い増加し、応力によって決まる値に飽和する。図から明らかなように、ラス幅とひずみの関係は温度に依らない。このことは、ラスの成長がひずみに支配されていることを示す。<sup>11)</sup> またラス幅とひずみの関係が温度に依らないことは、低温・長時間条件でのラス幅とひずみの関係を温度加速試験で作ることが可能なことを示す。

Fig.3(b)に、ラス幅とひずみの関係に及ぼす応力の影響を示す。Fig.1(a)と比較すると、ラス幅の変化過程の試験応力による違いが少なくなる。このことも、ラス幅の変化がひずみとより密接な関係にあることを示唆する。しかし、ラス幅とひずみという単純な指標では応力の影響を完全に取り除くことはできない。

### 3. 3 ラス幅の変化率とひずみの関係

クリープ変形中には、ラス境界の消失と新たなセル壁の形成が同時進行する。これらの転位の運動を経てラス幅は応力で決まる平衡値に飽和する。したがって、応力が異なる場合すなわちラス幅の飽和値が異なる時、これらの転位運動のプロセスは、ひずみだけでなくラス幅の初期値と飽和値の差(ラス幅変化の駆動力)にも影響されると考えられる。低応力ではラス幅の飽和値すなわち駆動力が大きい。その結果、応力が低いと、Fig.3(b)のように単位ひずみ当たりのラス幅の増加が大きい。以下では、ラス幅変化の駆動力を考慮し、ラス幅の変化率 $\Delta d / \Delta d_s$ を導入して、ひずみとラス幅の関係に対する応力の影響を検討する。

ラス幅の変化量 $\Delta d$ を以下のように定義する。

$$\Delta d = d - d_0 \quad (1)$$

ここで、 $d$ は時間 $t$ でのラス幅、 $d_0$ は初期値( $0.53 \mu m$ )である。 $\Delta d_s$ は変化量の飽和値であり、次式で定義される。

$$\Delta d_s = d_s - d_0 \quad (2)$$

ここで、 $d_s$ はラス幅の飽和値ある。また、次の式に示すように、 $d_s$ は応力と一定の関係がある。<sup>7)</sup>

$$d_s = 11 \frac{Gb}{\sigma} \quad (3)$$

ここで、 $G$  は剛性率、 $b$  はバーガースベクトルの大きさ、 $\sigma$  はクリープ応力である。実機部材のラス幅の飽和値は、長時間の試験を要するため、実験から求めることは困難な場合が多い。しかし、応力が既知なら、式(2)および(3)より、 $\Delta d_s$  を推定することができる。

Fig.4 に、ラス幅の変化率とひずみの関係に及ぼす応力の影響を示す。ラス幅の変化率とひずみの関係は、応力に依らない。Fig.5 に種々の温度・応力におけるラス幅の変化率とひずみの関係をまとめて示す。この図から、両者の関係は試験条件(温度、応力)に依らず、一義的に決まることが分かる。

### 3. 4 ラス幅の変化にもとづく寿命消費率の推定

Fig.5 の関係を使えば、Fig.6 のようにラス幅の変化の測定から、ひずみを推定できる。ひずみとクリープ寿命は、クリープ曲線によって密接に関係づけられる。<sup>4)</sup> したがってこれらの情報をすれば、ラス幅の変化を計測することから、クリープ寿命比  $t/t_r$  が評価できる。ここで  $t_r$  は破断時間である。ラス幅の変化率とひずみを関係づける検量線は温度や応力に影響されない。したがって温度あるいは応力加速試験で検量線を決定できる。応力が既知であれば、ラス幅の飽和値( $\Delta d_s$ )も容易に推定できる。これらのこととは、長時間の実機条件での余寿命を短時間の試験で評価できることを示唆する。

Fig.6 に示す上記の手法で求めた寿命比( $t / t_r$ )<sub>1</sub> を Fig.7 に示す。横軸は実際の寿命比である。組織変化を利用してクリープ寿命を評価するには、注目する組織

因子とクリープ寿命比を関係づける検量線を作る必要がある。その際に、組織変化を直接寿命比に対してプロットすることがよくある。Fig.8はそのような一例で、種々の条件におけるラス幅の変化率とクリープ寿命比の関係をまとめたものである。 $\Delta d / \Delta d_s$ を測定すれば、Fig.8の関係から寿命比 $(t / t_r)_2$ を推定できる。Fig.7にはこのようにして求めた寿命比 $(t / t_r)_2$ も示す。 $(t / t_r)_1$ 、 $(t / t_r)_2$ とともに、誤差を含むが実寿命比とほぼ一致する。このように、ラス幅の変化率から寿命比を推定することが可能である。

### 3. 5 二つの寿命評価法の優劣

前項で、 $\Delta d / \Delta d_s$ と $t / t_r$ の関係から直接寿命消費を評価する方法(Fig.8)と、ひずみを介してクリープ曲線から評価する方法(Fig.6)の2つを検討した。Fig.7に示した本研究の実験範囲では両者の間に、明白な優劣はない。

$\Delta d / \Delta d_s$ と $t / t_r$ の関係を使って実機条件での余寿命を評価するには、短時間試験で得たこの関係が長時間(低温あるいは低応力)へ外挿できなければならぬ。そのためには、 $\Delta d / \Delta d_s$ と $t / t_r$ がいかに関係づけられているかを考える必要がある。 $\Delta d / \Delta d_s$ は、次の理由で $t / t_r$ と密接な関係があるものと考えられる。

3. 2と3で述べたように、ラス幅の成長は変形とラス成長の駆動力に支配され、 $\Delta d / \Delta d_s$ とひずみの間には一義的な関係がある。Fig.9に、 $t / t_r$ を横軸にとって種々の条件におけるクリープ曲線を示す。177MPaでの848Kと873Kのクリープ曲線、あるいは873Kでの137MPaと177MPaのクリープ曲線を比較すると明らかのように、本研究の実験範囲内では、ひずみと $t / t_r$ の関係は、実験誤差を考慮すれば、温度および応力に依らずほぼ一致する。これが $\Delta d / \Delta d_s$ と $t / t_r$

$t_r$  の間にも Fig.8 に示す直接的関係を得た理由である。

Fig.9 を詳細に見ると、低温・低応力ほど、ある  $t/t_r$  でのひずみ量が減少する。

Fig.9 には、実機条件の応力に近い 73.5 MPa(923K)のクリープ曲線も比較して示す。実機条件に近い低応力では、他の条件に比べてある寿命比でのクリープひずみが小さくなる。このことは、ラス幅の変化率がひずみに支配されるなら、実機条件ではラス幅の変化率と寿命比の関係が、Fig.8 の検量線より下にずれる可能性を指摘する。これが事実であるなら、加速試験から求めた Fig.8 の検量線を実機部材に適用すると過度に危険側の予測(実際より長い余寿命)をする恐れがある。これに対して Fig.6 のラス幅の変化率とひずみの関係に基づく方法では、クリープ曲線の試験条件による変化を別に考慮するので、危険側の予測をする恐れはない。この点において、Fig.8 に基づく方法より Fig.6 に基づく方法の方がクリープ寿命評価に適切である。しかし、Fig.6 の  $\Delta d/\Delta d_s$  とひずみの関係には誤差がある。それは、ラス幅自体の測定誤差と  $\Delta d_s$  の評価誤差に起因する。今後はこの誤差を小さくし、ラス幅の変化によるひずみの推定精度を向上する必要がある。

### 3. 6 硬さ測定によるラス幅変化の推定

前報<sup>12)</sup>において、クリープ破断材のラス幅は硬さと一定の関係があることから、硬さ測定による非破壊的な寿命評価の可能性を指摘した。硬さを寿命評価に利用するためには、クリープ変形中のラス幅の変化を、破断材と同様に硬さにより推定できなければならない。

Fig.10 に、種々の条件でクリープ破断および中断した材料の硬さとラス幅の関係を示す。破断材のラス幅は、試験温度に依らず硬さと一定の関係がある。一方中断材においては、ラス幅の増加に伴い硬さは減少するが、両者の関係は試験温度に依存して異なる。このことは、クリープ中の硬さの変化をラス幅の変化のみでは説明できないことを示している。硬さは種々の組織因子を総合したものを作成している。Fig.10 の結果は、ラス幅以外の組織因子がクリープ変形に伴い複雑に変化することによるものと考えられる。

以上から、クリープ中のラス幅の変化過程と硬さの変化過程の関係は、試験条件に依存するため、硬さとクリープ寿命比を結びつける検量線を作成するためには、さらに多くの条件で試験を行う必要がある。

### 3. 7 ラス内の転位密度の変化とクリープ寿命評価

本鋼においては、クリープ変形に伴いラス幅だけでなく、ラス内の転位密度も変化する。ラス幅とラス内の転位密度の間には、Fig.11 に示す一定の関係がある。単相材におけるサブグレイン径とサブグレイン内の転位密度の間にも同様な関係がある。<sup>13)</sup> したがってラス内の転位密度の場合も、ひずみとの間に Fig.5 に示すような関係が得られるはずである。しかし、転位密度には測定箇所に依存したばらつきがあり、Fig.5 に示すラス幅の変化率のように規格化を行うと、かなりの誤差を含むことになる。Fig.12 に、ラス内の転位密度とひずみの関係を示す。図から明らかなように、すべての試験条件でラス内の転位密度はクリープひずみの増加に伴い減少する。しかしほらつきが大きいため、その変化過程に及ぼす試験条件の影響は確認できない。したがって、検量線を作成するためには、さらに転位密度の測定精度を向上する必要がある。

#### 4. 結言

改良 9Cr-1Mo 鋼の、種々の条件におけるクリープ中断試験材の組織観察から、本材料の転位組織変化とクリープ変形量および寿命比の関係について、以下の結果が得られた。

- (1) ラス幅は、高温・無応力下では変化しない。しかし応力下ではラス幅は時間とともに増加し、高温・高応力ほど増加速度は早い。すなわち応力下での変形が、ラス幅の増加を誘起する。
- (2) ラス幅およびラス幅の変化率は、ひずみの増加に伴い増加する。ラス幅とひずみの関係は、温度に依存しない。ラス幅の変化率とひずみの関係は、温度のみならず応力にも依存しない。
- (3) ラス幅の変化率とひずみの関係は、温度あるいは応力加速試験から実機条件での検量線を作ることができる。この関係を使えば、ラス幅の測定からひずみを推定し、推定クリープ曲線から寿命比を評価できる。

## 参考文献

- 1) 金属材料技術研究所研究報告集, **11** (1990), 29.
- 2) 角屋好邦, 後藤徹: 材料, **41** (1992), 1736.
- 3) 新谷紀雄: 鉄と鋼, **73** (1987), 1089.
- 4) 浅川幸一, 大友暁, 雜賀喜規: 鉄と鋼, **65** (1979), 869.
- 5) 吉澤廣喜, 中代雅士, 木原重光, 馬木秀雄: 鉄と鋼, **82** (1996), 1011.
- 6) 増山不二光: 日本金属学会会報, **35** (1996), 753.
- 7) 澤田浩太, 丸山公一, 小峰龍司, 永江勇二: 鉄と鋼, **83** (1997), 466.
- 8) F.Masuyama and N.Nishimura : Proc. 10th Int. Conf. on the Strength of Materials (ICSMA 10), ed. by H.Oikawa et al., JIM, (1994), 657.
- 9) G.Eggeler, J.Hald, M.Cans and J.Phillips : Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures, ed by B.Wilshire and R.W.Evans, The Inst. Materials, London, (1993), 527.
- 10) 丸山公一編著, 中島英治著: 高温強度の材料科学, 内田老鶴圃 (1997)
- 11) W.Blum and S.Straub : steel res., **62** (1991), 72.
- 12) 澤田浩太他3名, PNC TN9410 97-035, 動力炉・核燃料開発事業団, 1997
- 13) J.Cadek : Creep in Metallic Materials, Elsevier, Amsterdam, (1988).

Table 1 Chemical composition(mass%) and heat treatment procedure of the steel studied.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Nb-Ta	Al	N
0.10	0.40	0.43	0.014	0.001	0.07	8.73	0.96	0.22	0.090	0.013	0.051
<hr/>						<hr/>					
normalizing	tempering										
1323K	2988s	1053K	3600s								

Table 2 Conditions of interrupted creep tests.

Temperature / K	Stress / MPa
873	137
873	177
848	177
898	118
923	118

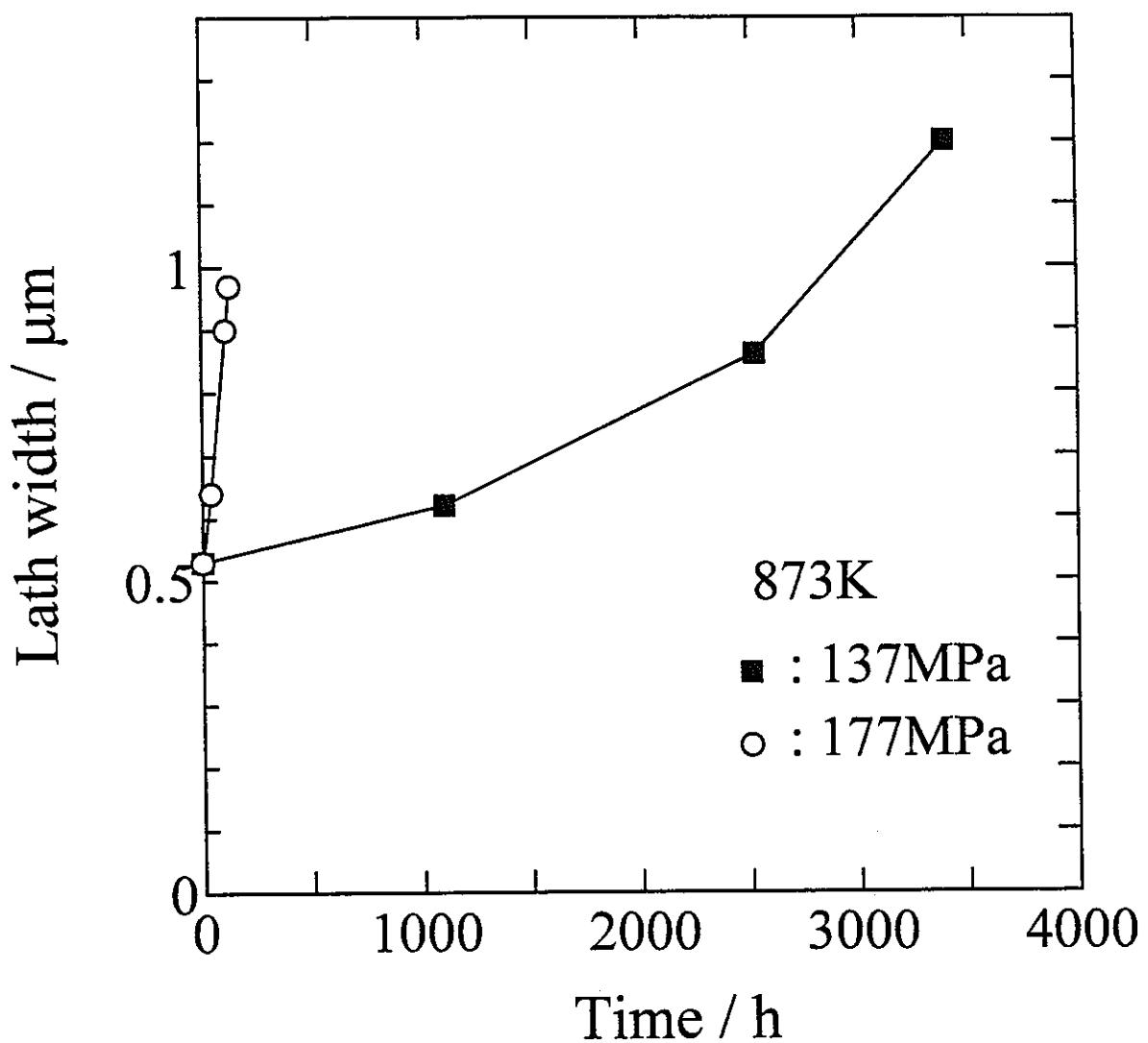


Fig.1(a) Effect of stress on the relation between lath width and creep time.

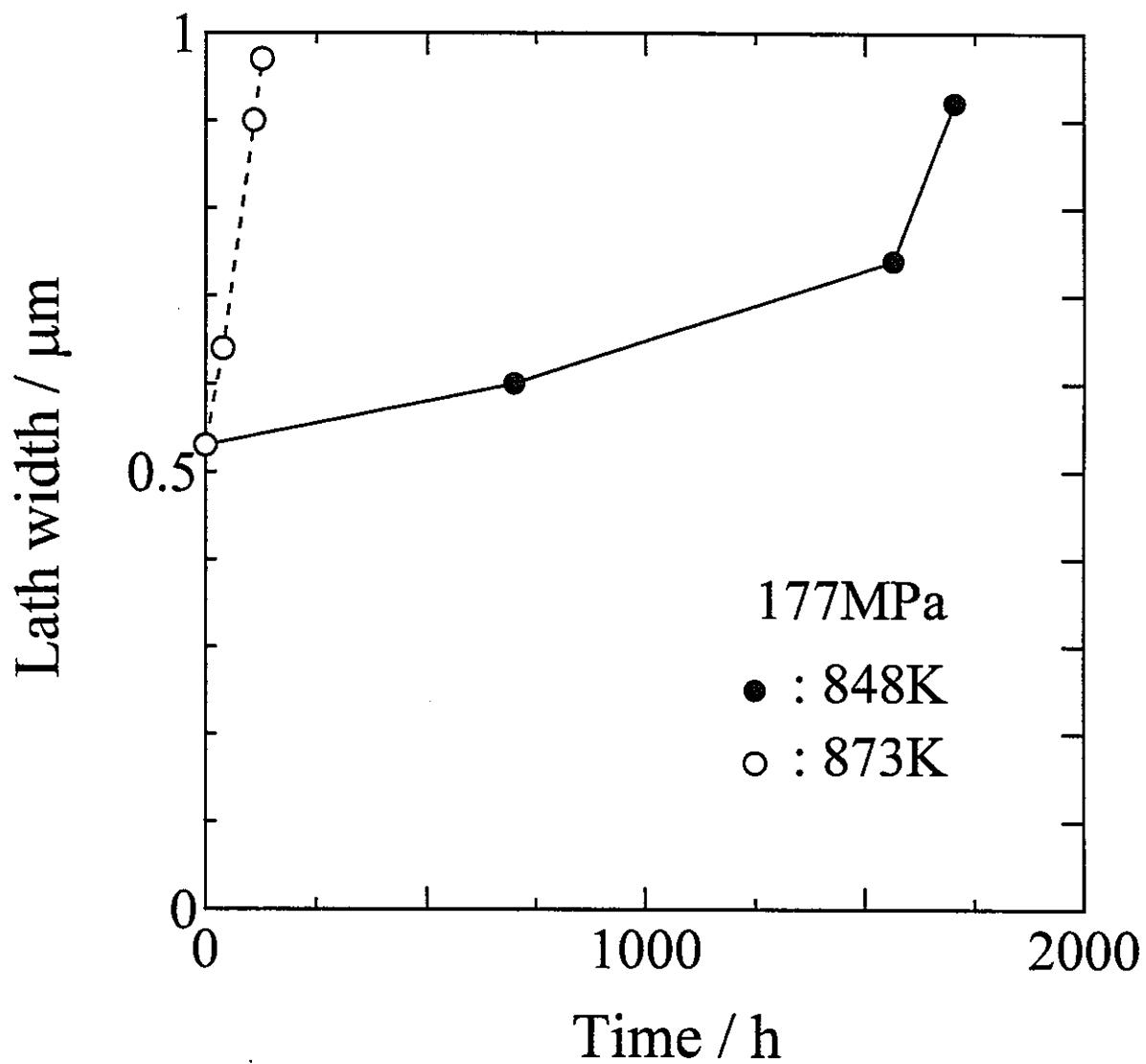


Fig.1(b) Effect of temperature on the relation between lath width and creep time.

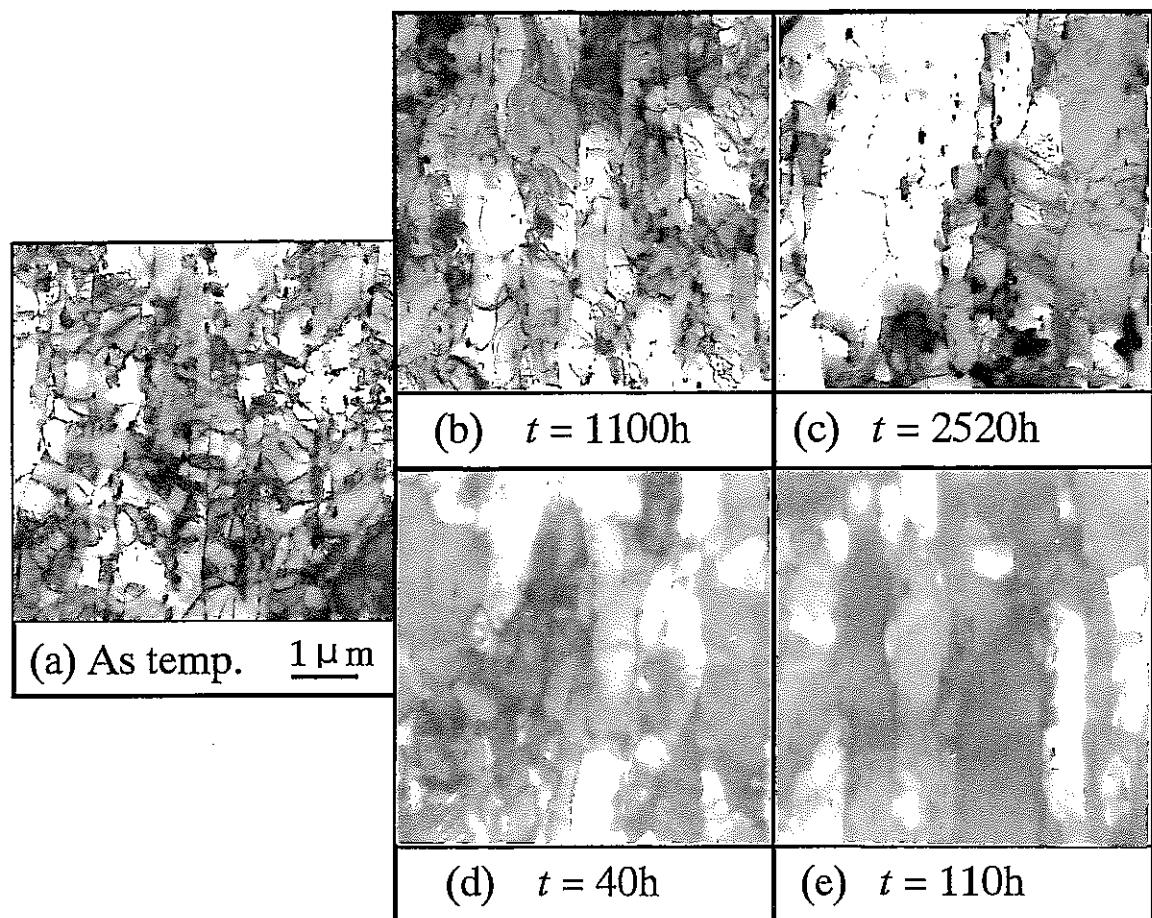


Fig.2 Change of lath structure as a function of time.  
(a)Before creep, (b),(c)873K 137MPa, (d),(e)873K 177MPa.

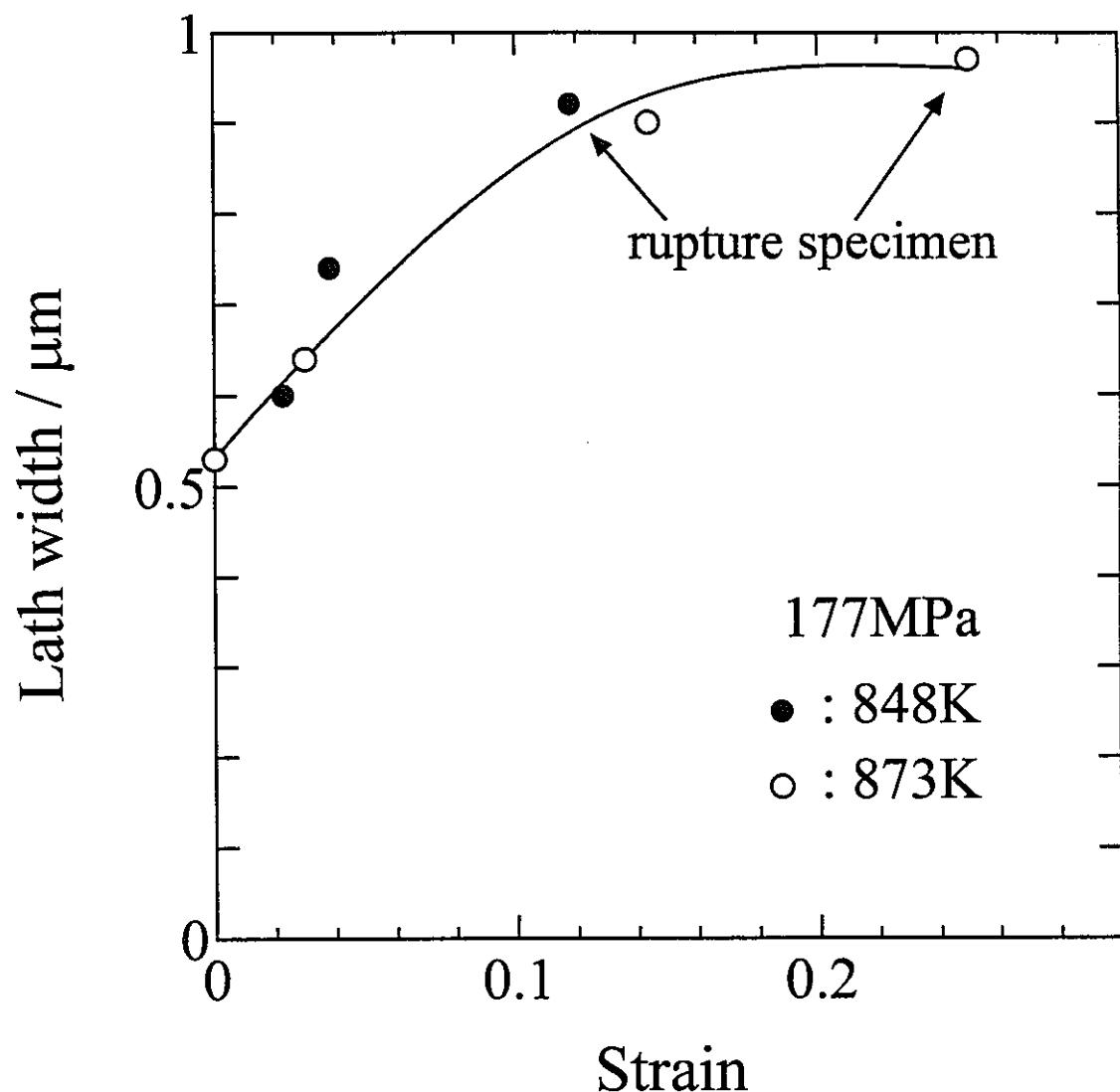


Fig.3(a) Effect of temperature on the relationship between lath width and strain.

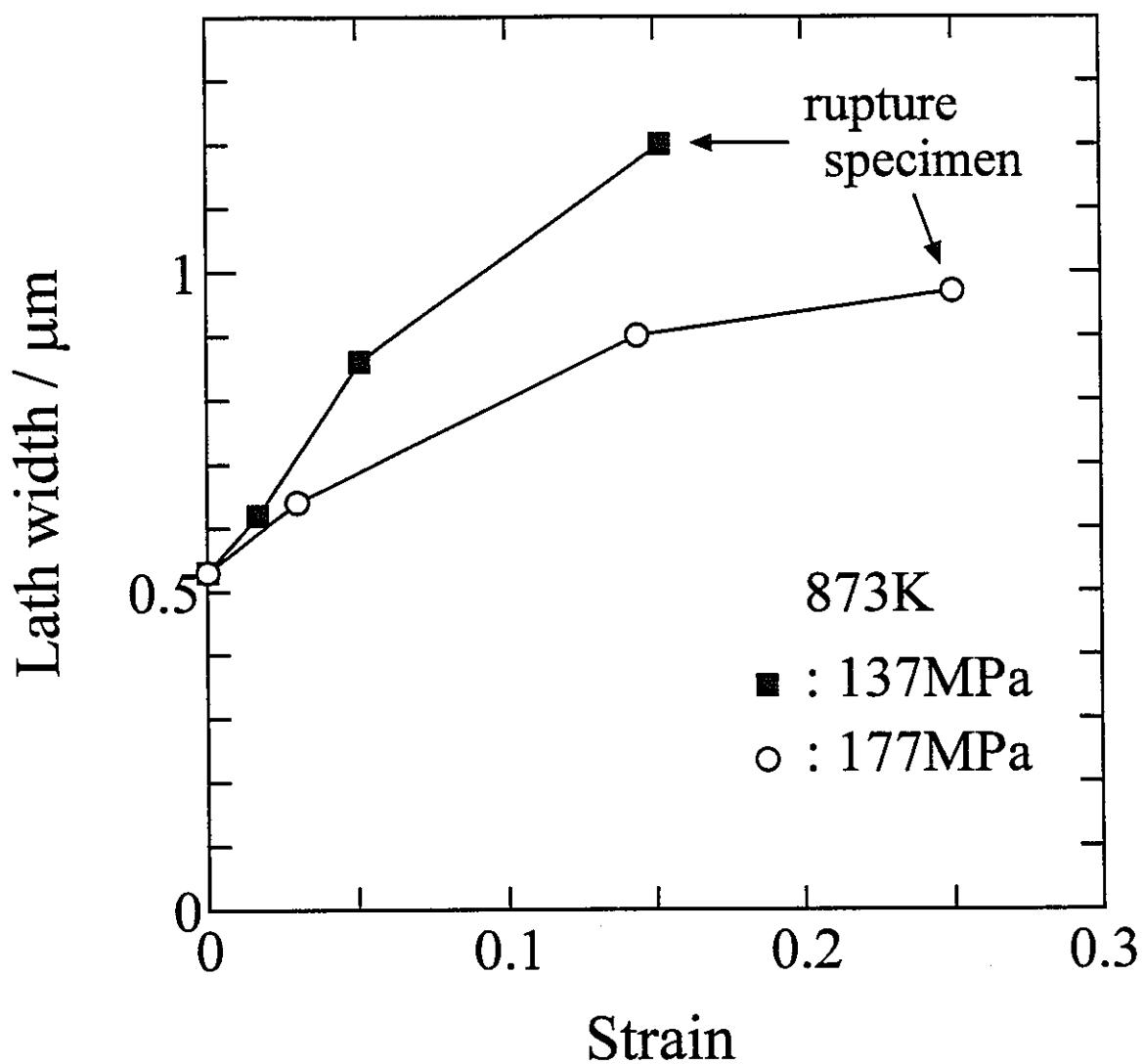


Fig.3(b) Effect of stress on the relationship between lath width and strain.

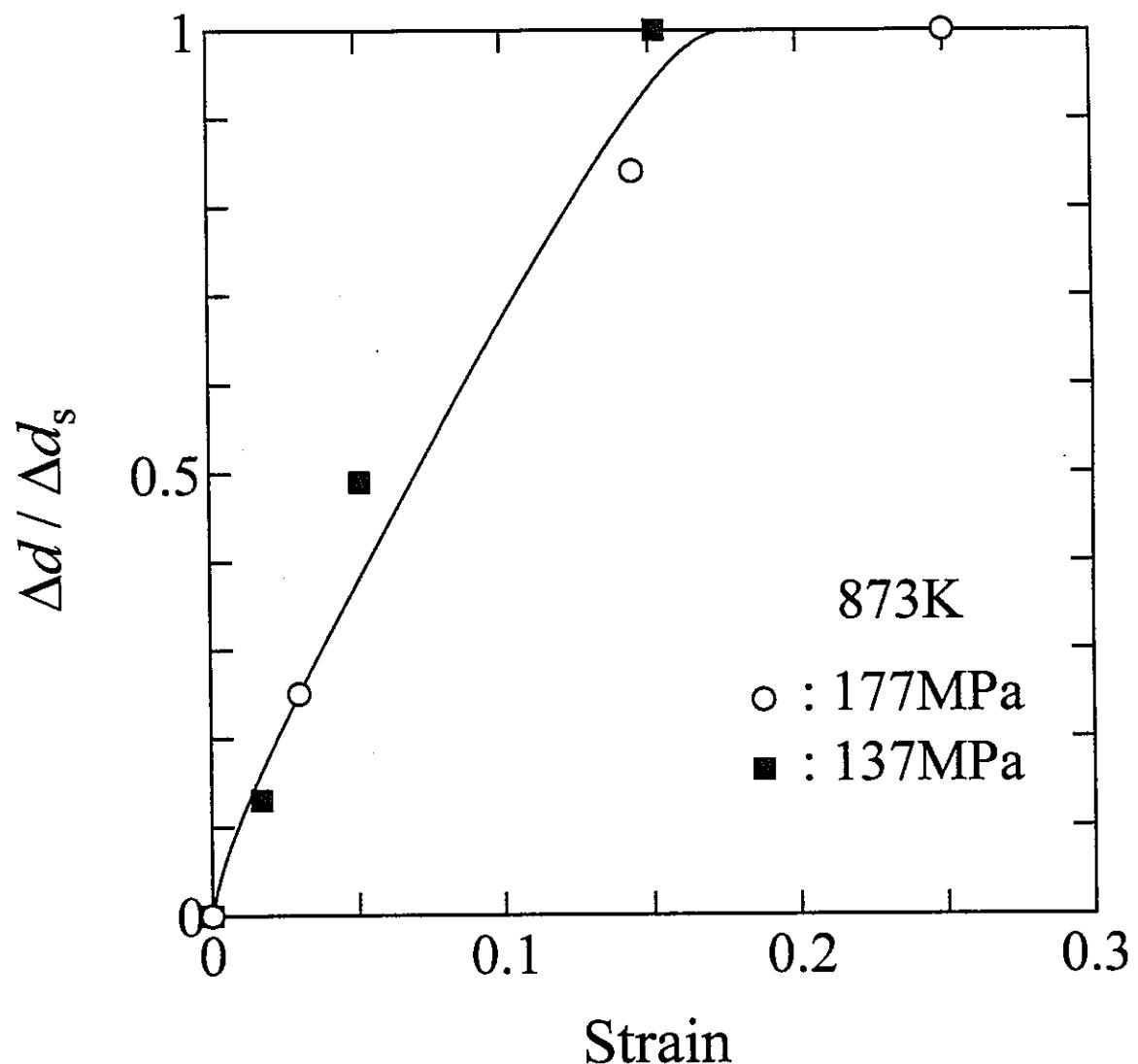


Fig.4 Effect of stress on the normalized change of lath width with creep strain.

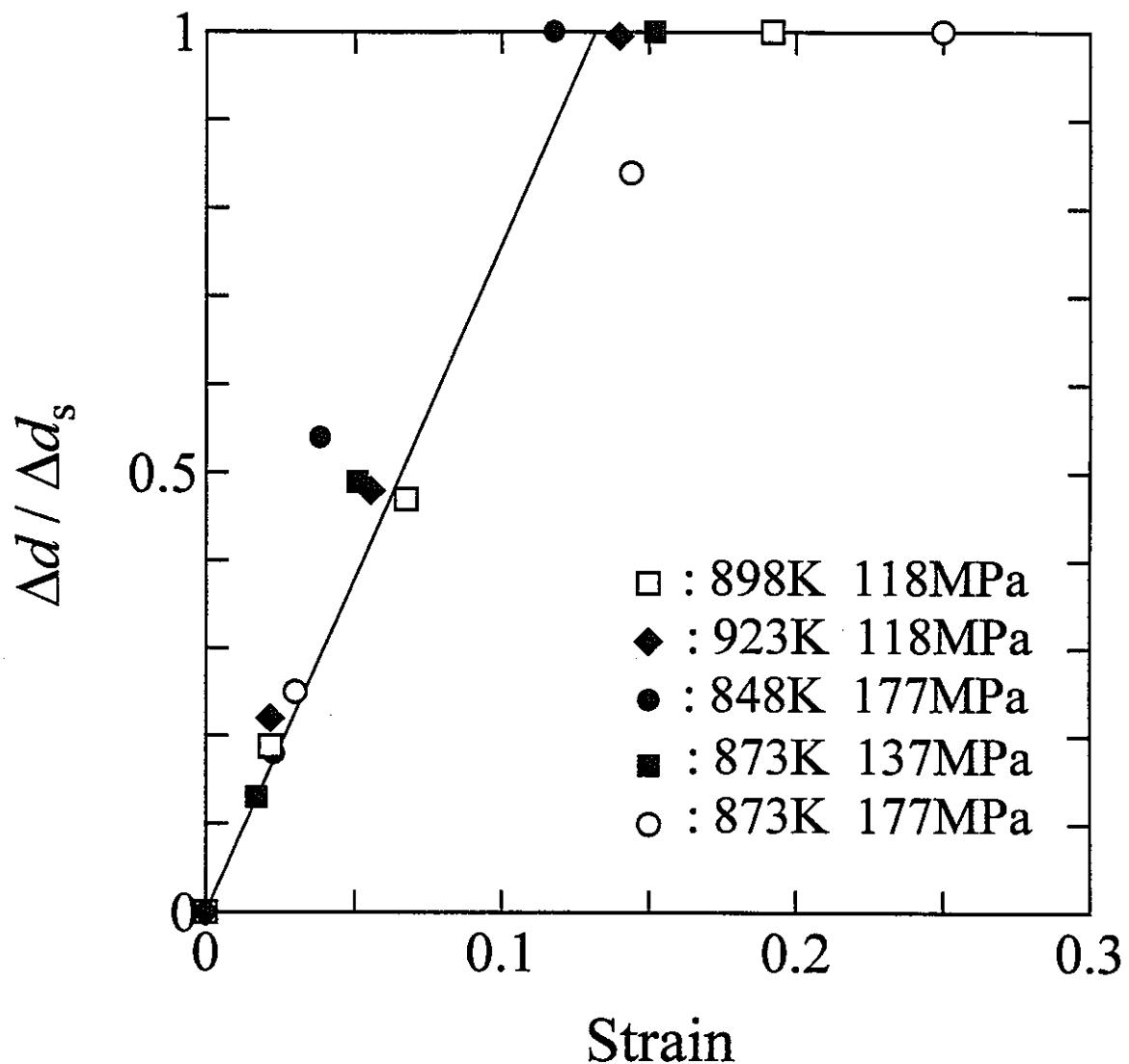


Fig.5 Relation between normalized change of lath width and creep strain obtained under various creep conditions.

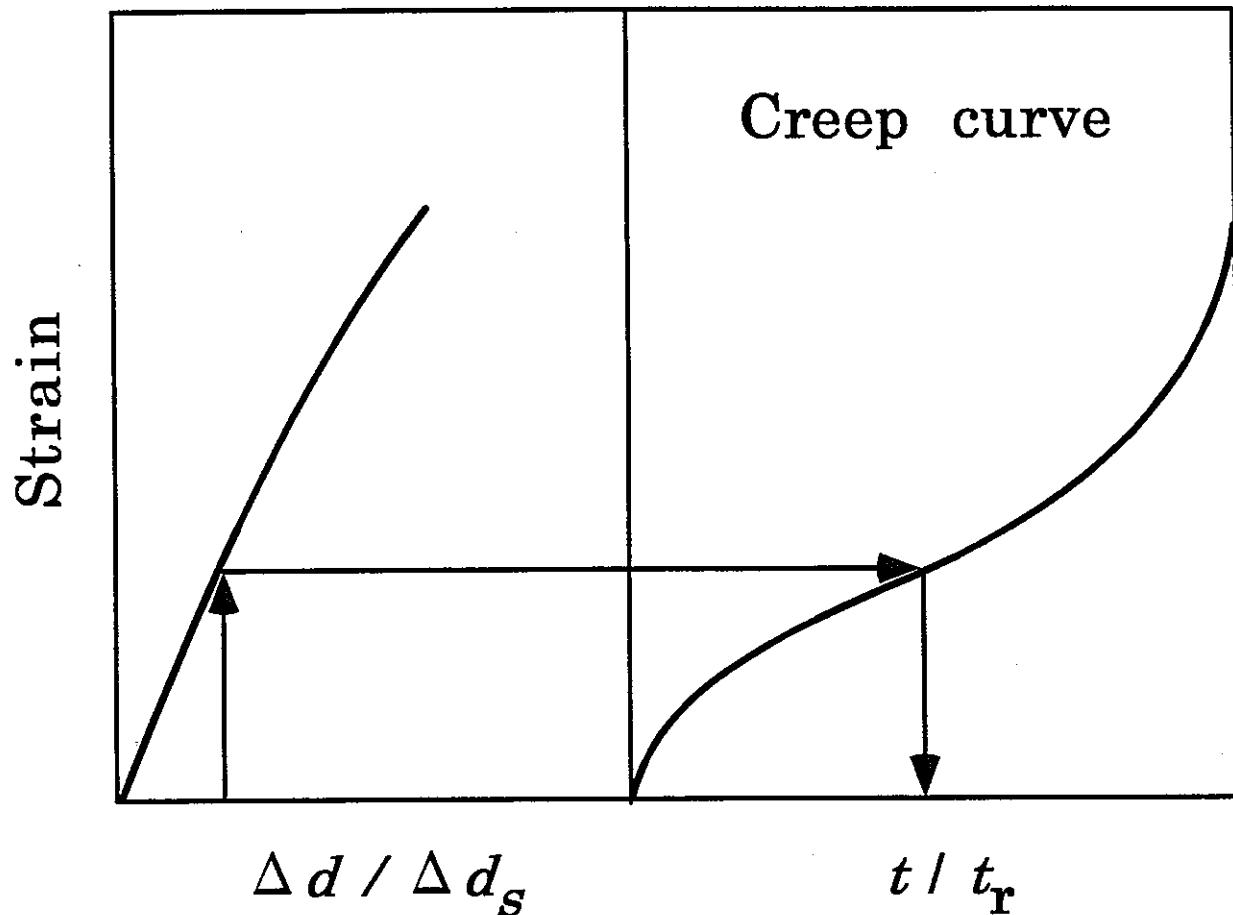


Fig.6 Procedure of creep life assessment based on the relation between the normalized change of lath width and creep strain.

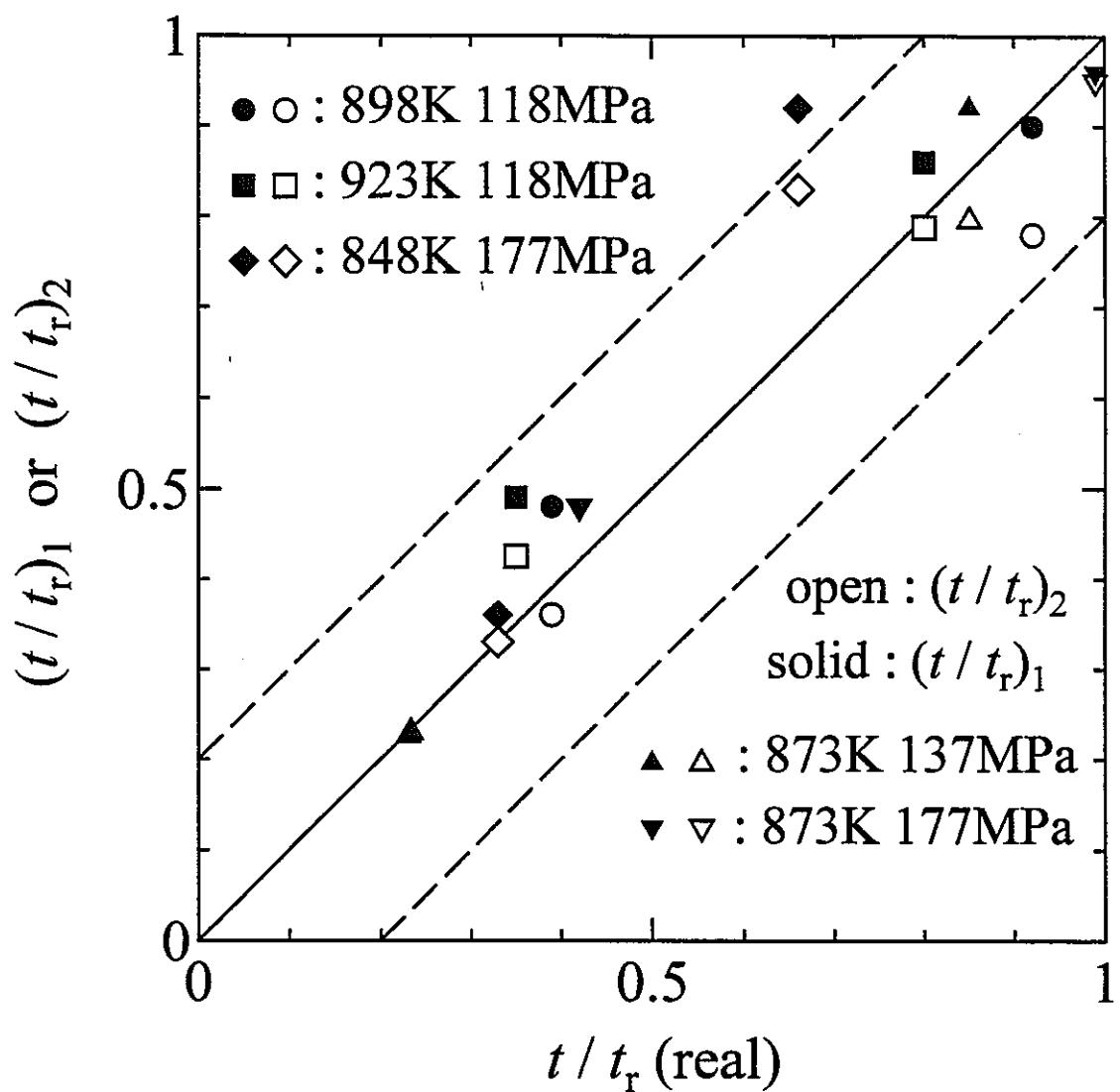


Fig.7 Correlation between real creep life fraction and creep life fraction assessed by change of lath width.

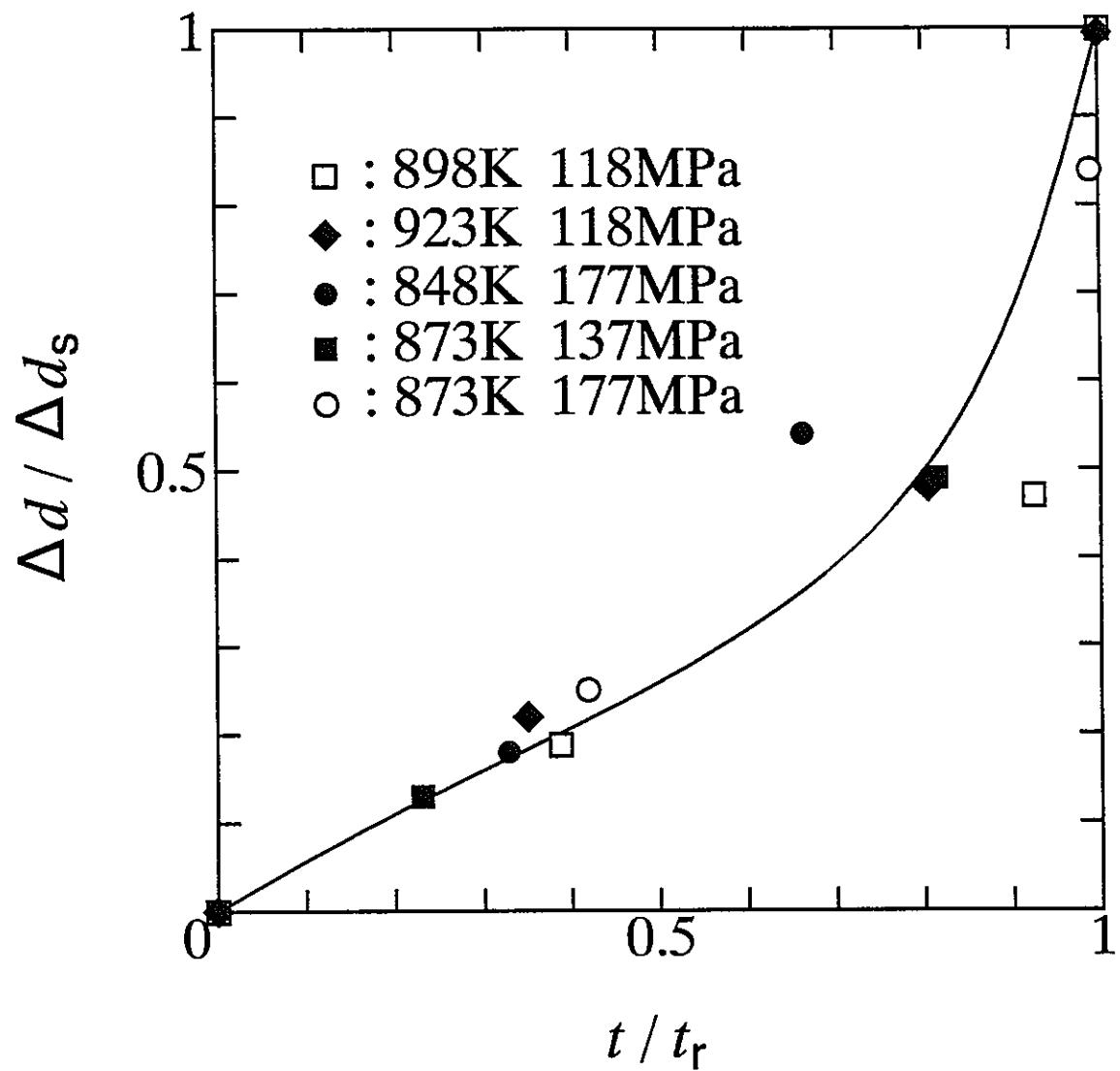


Fig.8 Relationship between normalized change of lath width and creep life fraction under various creep conditions.

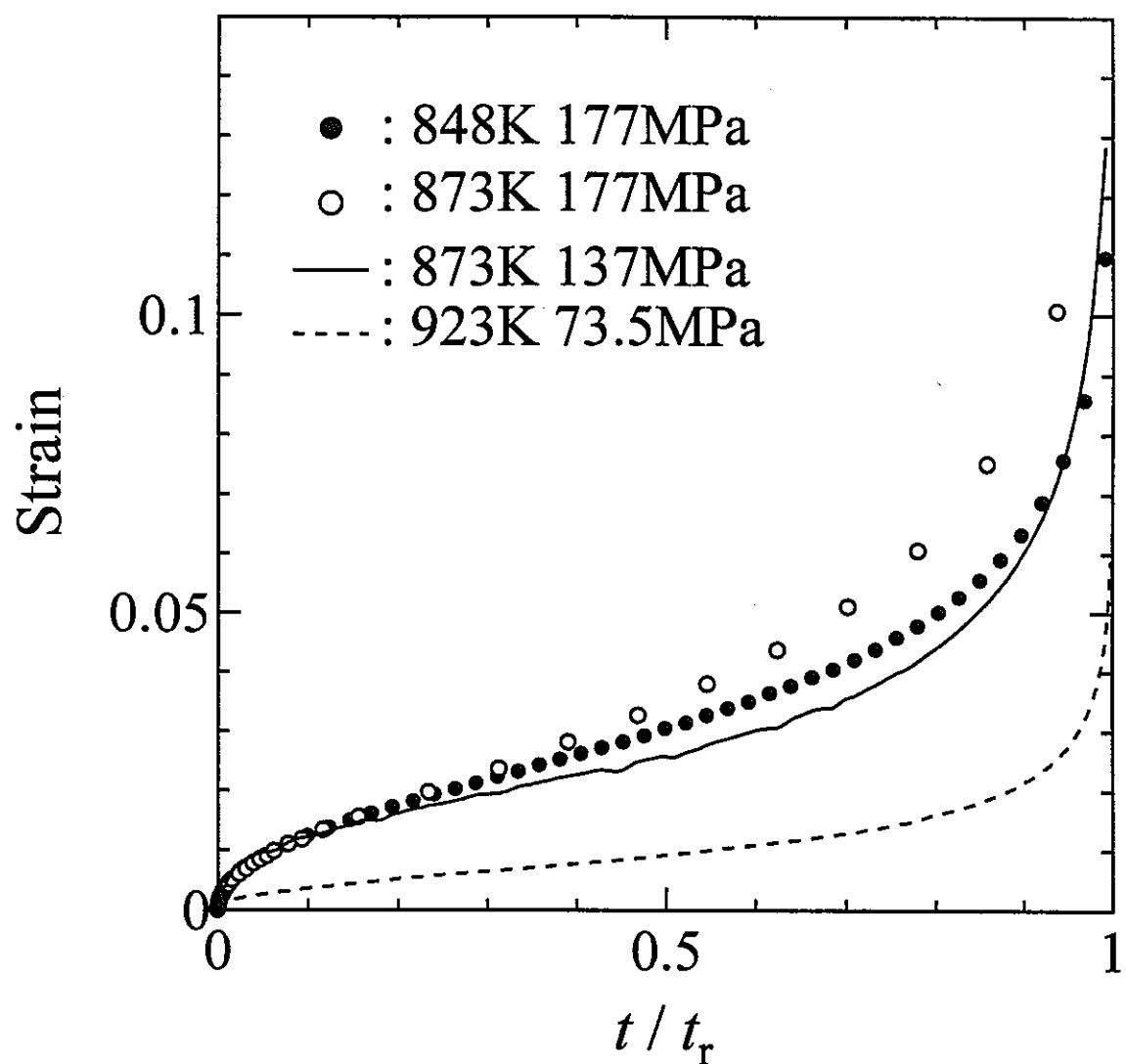


Fig.9 Creep curve at various conditions.

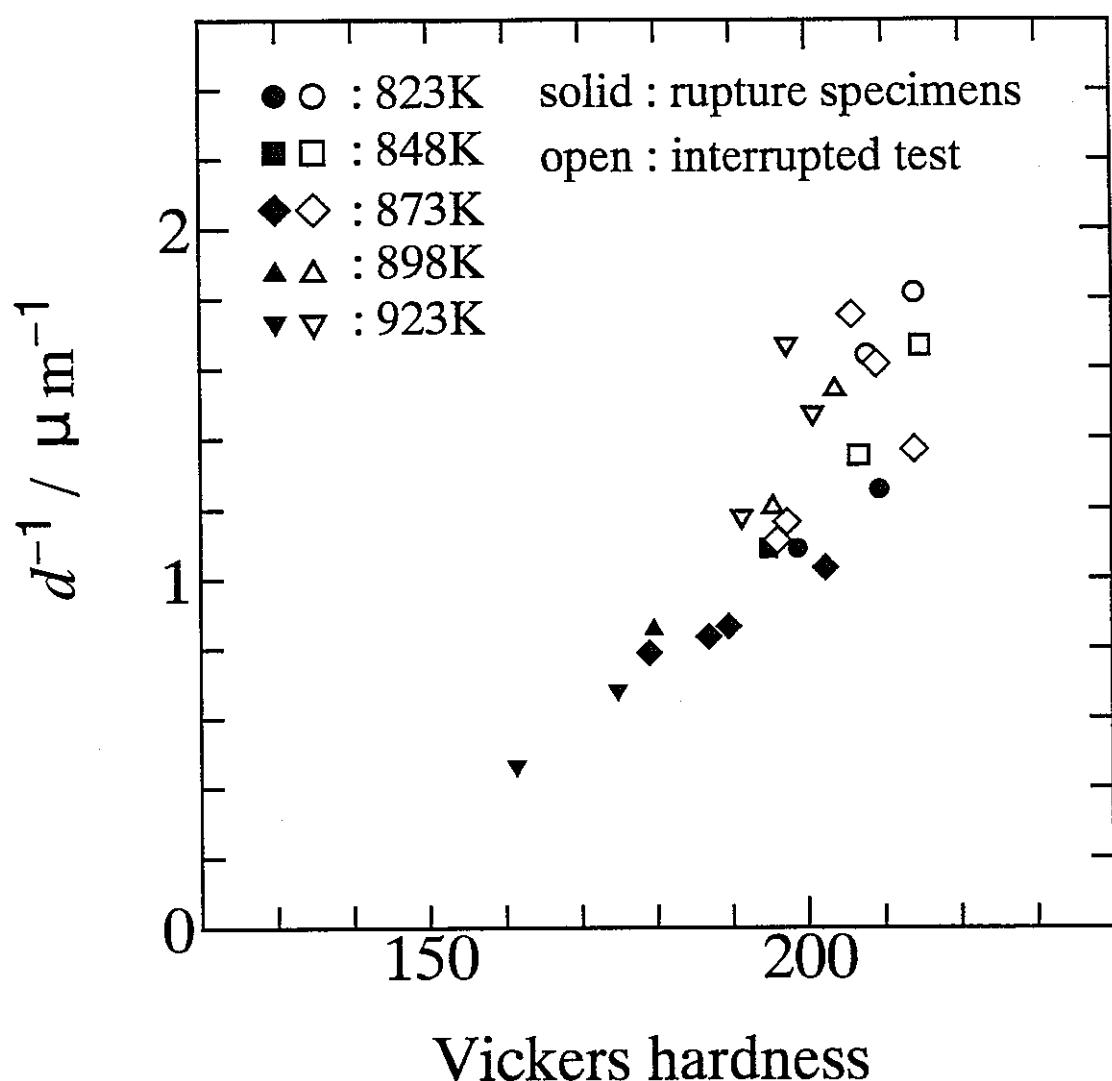


Fig.10 Relationship between lath width and hardness.

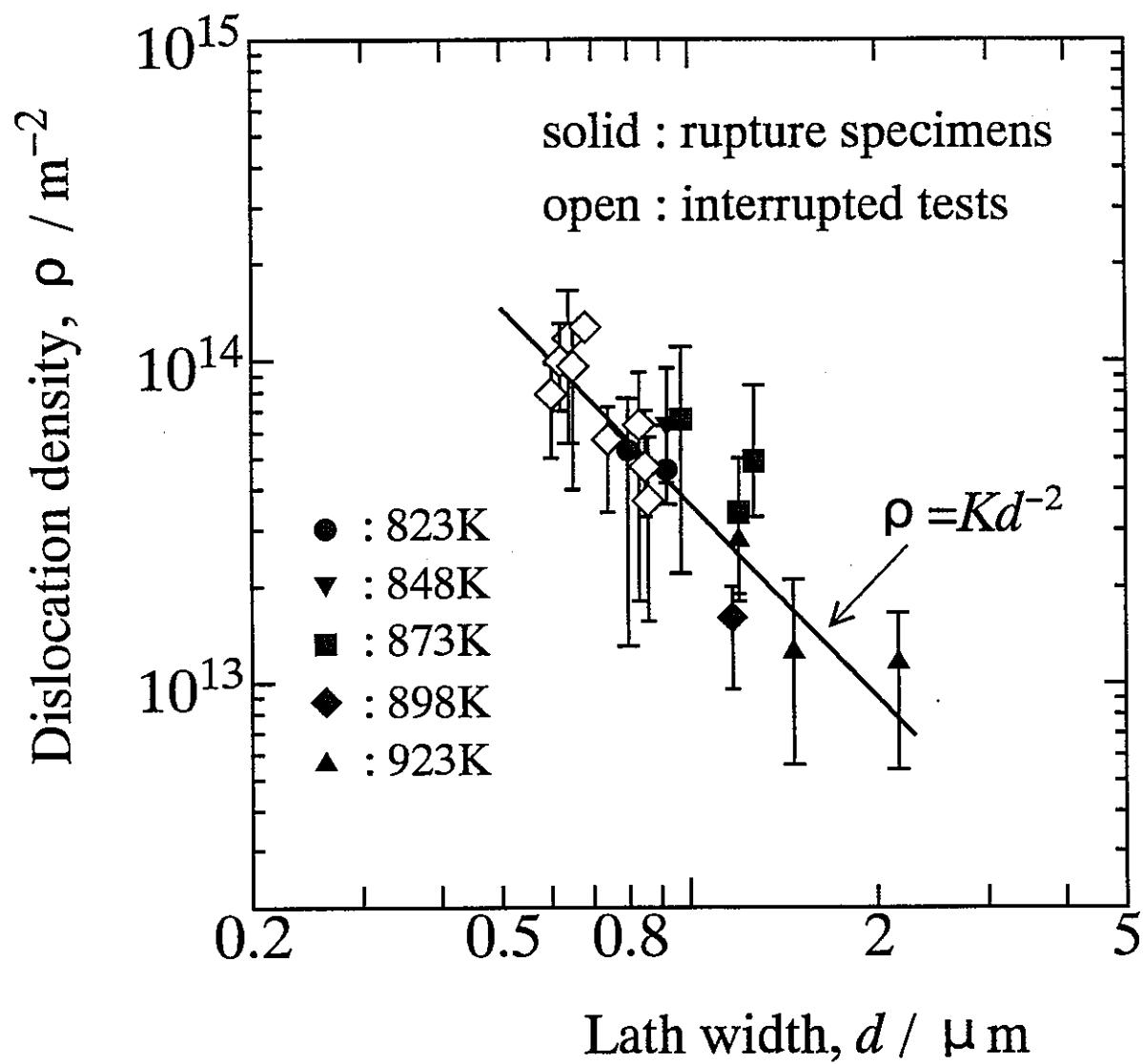


Fig.11 Relationship between lath width and dislocation density.

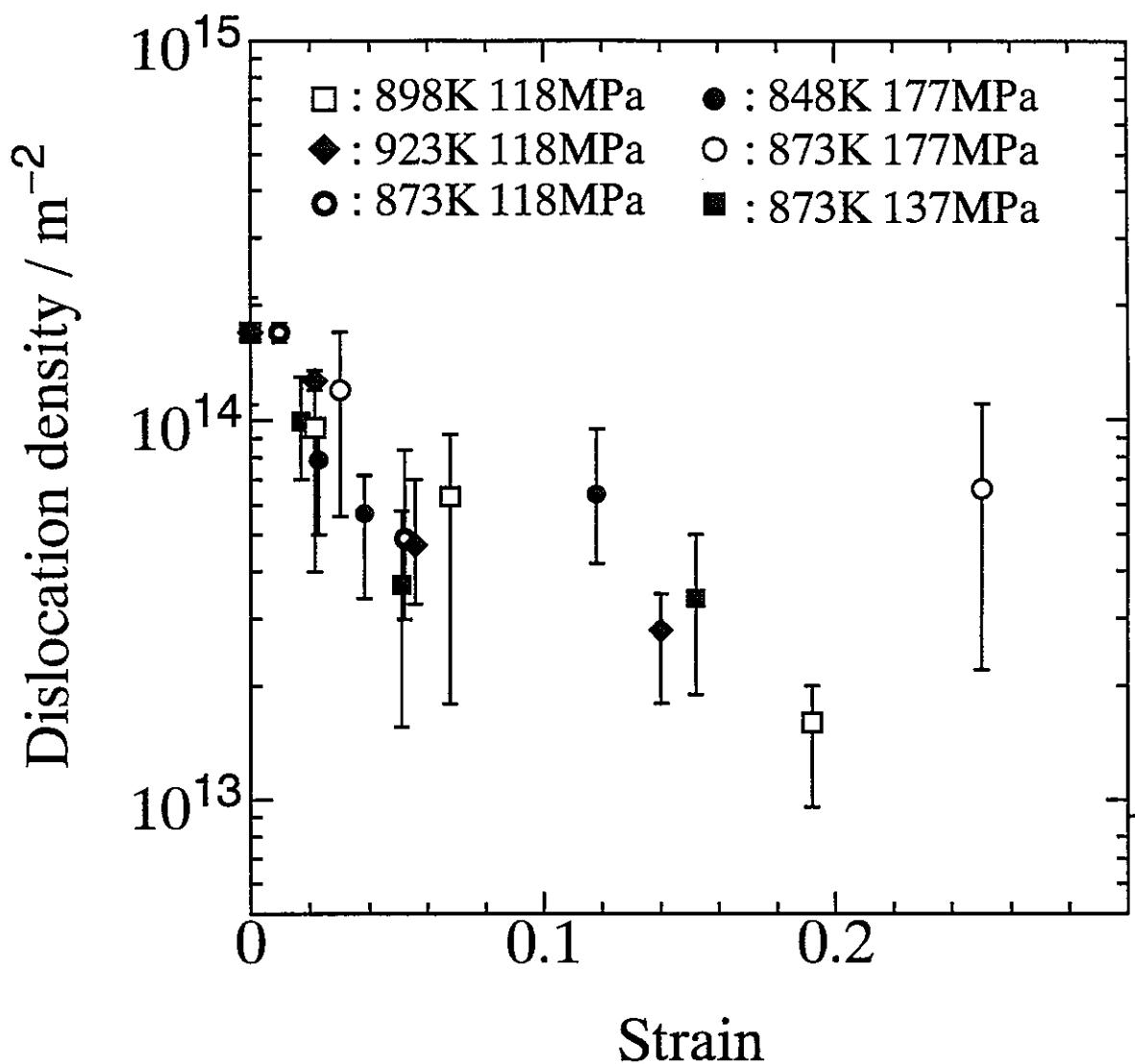


Fig.12 Change of dislocation density as a function of creep strain.