

分散強化型フェライト鋼の強度特性評価(4)

(動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書)

1996年3月

九州大学大学院総合理工学研究科

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。については複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。
〒311-13 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

分散強化型フェライト鋼の強度特性評価(4)

中島英治*、吉澤明展**、吉田冬樹*

要旨

Y_2O_3 によって分散強化されたODSフェライト鋼再結晶材の高温変形挙動と分散強化機構を明らかにするために、温度範囲600～700°C、ひずみ速度範囲 $2 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ で圧縮試験、応力瞬間負荷試験した。さらに、ODSフェライト鋼の集合組織を解析し、粒界構造分布を明らかにして、粒界すべりの素因子を明らかにした。得られた結論を以下に示す。

- (1)ODSフェライト鋼再結晶材のひずみ速度の応力指数は27～28であった。また、変形の活性化エネルギーは479～527kJ/molであった。これら2つの値は通常の金属材料の値とは極めて異なっている。
- (2)ODSフェライト鋼再結晶材のしきい応力は変形の進行とともに169MPaから140MPaに遷移した。この応力の遷移はオローワン応力からボイド強化応力の変化に対応しており、このことから高温における分散強化機構は転位と粒子の引力型相互作用にもとづく、スロロビッツ機構であると結論される。
- (3)ODSフェライト鋼一方向圧延材と被覆管の集合組織にはΣ9やΣ5対応粒界が存在することが知られた。これらの粒界は高い粒界エネルギーを有しており、この粒界で高温変形中の粒界すべりは生じたものと考えられる。

本報告書は九州大学が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：070D0213

事業団担当課および担当：大洗工学センター 燃料材料開発部 照射材料試験室(MMS) 吉武庸光

* 九州大学 大学院総合理工学研究科 材料開発工学専攻

** 九州大学 大学院生

COMMERCIAL PROPRIETARY

PNC ZJ9606 96-002

M a r c h , 1 9 9 6

Character Evaluation of Strength in Dispersion Strengthened Ferritic Steel (4)

Hideharu Nakashima*, Akinori Yoshizawa**, Fuyuki Yoshida*

Abstract

In order to clarify the high-temperature deformation behaviour and the origin of threshold stress of recrystallized ODS ferritic steel with Y_2O_3 particles, the stress-strain curves and threshold stress measured by compression test and stress abruptly loading test (SAL test) were at temperature from 600 to 700 °C and at strain rates from $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ to $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Furthermore, it was clarified the root of the grain boundary sliding to find the structure distribution of grain boundary in ODS ferritic steel. The results are summarized as follows.

(1) The stress exponents of recrystallized ODS ferritic steel were 27~28. And the activation energy of high-temperature deformation were 479~527 kJ/mol. These characteristic values were very different with those of normally metallic materials.

(2) The Orowan stress and the void-hardening stress calculated from dispersion parameters approximately agreed with the threshold stress obtained by SAL test. In addition, as the time under load elapsed, the transition of the threshold stress obtained by SAL test was observed, it is concluded that the originating mechanism of the threshold stress in ODS ferritic steel is the Srolovitz's one.

(3) There were $\Sigma 9$ and $\Sigma 5$ grain boundaries in ODS ferritic steel of cold rolled material and tube. These boundaries has high grain boundary energy, and then it is considered that the these boundaries slide during high-temperature deformation.

This work was performed at Kyushu University by contract with Power reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison : MMS, Fuels and Materials Division, Oarai Engineering Center,
Tsunemitsu Yoshitake

*:Department of Materials Science and Technology, Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University.

**:Graduate Student, Kyushu University

目次

I 緒言	1
II 実験方法	1
II.1 試験片	1
II.2 分散パラメータとしきい応力の理論値	2
II.3 高温圧縮引張試験	4
III 実験結果	5
III.1 高温変形挙動	5
III.2 しきい応力	6
IV 集合組織と粒界すべるの関係	7
IV.1 粒界構造の解析法(O格子理論)	7
IV.2 ODSフェライト鋼の粒界構造分布	10
V 結論	11

図目次

1 本研究で用いた試料の作製工程の流れ図	16
2 T面の結晶粒形態を示した光学顕微鏡写真	17
3 L面の結晶粒形態を示した光学顕微鏡写真	18
4 T面の結晶粒径の大きさ分布とアスペクト比分布	19
5 L面の結晶粒径分布とアスペクト比分布	20
6 $\vec{g} = \langle 110 \rangle_2$ 波励起状態で観察した分散粒子	21
7 電子顕微鏡試料膜厚と見かけの粒子の面密度の関係	22
8 透過電子顕微鏡観察して得られた粒子の大きさ分布	23
9 ODSフェライト鋼の高温強度試験の流れ図	24
10 高温圧縮試験で得られた応力－ひずみ曲線	25
11 高温圧縮試験で得られた変形応力を剛性率Gで規格化した σ/G とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の両対数プロット	26
12 変形応力 σ からしきい応力 σ_{th} を引いた $\sigma - \sigma_{th}$ を剛性率G で規格化した $(\sigma - \sigma_{th})/G$ とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の両対数プロット	26
13 ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ のアレニウスプロット	27
14 ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ のアレニウスプロット	28
15 応力瞬間負荷試験で得られた応力とひずみの関係	29
16 2つの結晶を8°回転して得られるモアレパターン	30
17 O格子点の決定法の説明図	31
18 一方向圧延材の結晶粒方位測定結果	32
19 α -FeとMo<110>対称傾角粒界の粒界エネルギーと傾角の関係	33
20 アルミニウム<001>対称傾角粒界の(a)粒界すべり量と(b) 粒界エネルギーの傾角依存性	34

表目次

1 一方向圧延材、1DK被覆管および再結晶材の各面における結晶粒の長軸と単軸の大きさ及び結晶粒のアスペクト比	13
2 分散パラメーター	13
3 透過電子顕微鏡観察より得た N_v より算出した f を用いて求めた ODS2-B しきい応力の理論値	14
4 一方向圧延材の結晶粒の方位関係	14
5 被覆管の結晶粒の方位関係	15

I 緒言

ODS フェライト鋼は高温強度が高いため、次世代の高温構造材料として注目されている。このため、高速増殖炉用の燃料被覆管としての使用が考えられてきたが、管作製工程の強加工にともなう、集合組織の形成と長く伸張した微細結晶粒の形態にともない、高温変形時に粒界すべりの変形への寄与が大きく、著しい高温強度の低下が起こることが明らかとなった⁽¹⁾⁽²⁾。この粒界すべりは結晶粒の形態を等軸化することによって低下させることができ。本研究では分散粒子である Y_2O_3 の量を最適化することによって再結晶によって結晶粒を等軸化した試料を用いて ODS フェライト鋼の高温強度に及ぼす粒界すべりと分散強化機構について検討した。さらに、ODS フェライト鋼の集合組織を解析するとともに粒界構造分布を解析し、粒界すべりの素因子を明らかにした。

II 実験方法

II.1 試験片

試料は(株)神戸製鋼所より供与されたもので、その作製工程の流れ図を図1に示した。得られた試料は直径 7mm の丸棒であり、この状態での丸棒断面と長手方向での結晶粒の形態を示す光学顕微鏡写真をそれぞれ図2と図3に示した。図2より T 面の結晶粒径の大きさ分布を測定し、大きさ分布をヒ

ストグラムで示したものが図4である。T面でわずかに結晶粒は伸張しており、結晶粒の長軸と短軸の大きさはそれぞれ $16.9 \mu m$ と $7.3 \mu m$ であり、アスペクト比は2.3である。一方、L面での結晶粒はさらに伸張しており、長軸と短軸ではそれぞれ $24.9 \mu m$ と $6.8 \mu m$ でアスペクト比は3.7である。この結果は図5に示した。

以上のことより、本研究で用いたODSフェライト鋼の結晶粒は完全に等軸化できているわけではないが、前年度以前に用いた一方向圧延材や被覆管のような著しく伸張した結晶粒とはなっていない。これらの比較を表1にまとめて示した。一方向圧延材や被覆管での結晶粒径と比較すると再結晶材では約50倍に著しく粗大化している。

一般に粒界すべりが高温強度に大きな影響を与える場合、ひずみ速度は結晶粒径の2乗の逆数に比例することが知られており、これが正しければ再結晶材のひずみ速度は同じ応力では1/2500程度に低下することになる。

II.2 分散パラメータとしきい応力の理論値

Y_2O_3 粒子の分散パラメータ（平均粒子中心間距離 \bar{l}_s 、平均粒子半径 \bar{r}_s ）は電子顕微鏡を用いて測定した。粒子の体積分率 f は回折条件が図6に示した $\vec{g}=(110)$ の二波励起状態で出現する等厚干渉縞間の粒子数 N'_s を測定し、図7に示したように N'_s を電子顕微鏡観察用薄膜試料の膜厚に対してプロットし、その勾配が単位体積当たりの粒子数 N_v に等しくなることより求めた。また、

粒子の大きさ分布は図6の粒子像より求めた。本研究で用いたODSフェライト鋼中の粒子径のヒストグラムは図8でもあり、平均粒子径は3.04nmである。また、体積分率fは

$$f = \frac{4}{3} \pi \bar{r}^3 N_v \quad (1)$$

であるので、図7より得られる N_v と図8より得られる \bar{r} よりfを求める0.26%となる。

また、平均粒子中心間距離 $\bar{\ell}_s$ は

$$\bar{\ell}_s = \frac{1}{\sqrt{2\bar{r}N_v}} \quad (2)$$

より求め、 \bar{r}_s は

$$\bar{r}_s = \frac{\pi}{4} \frac{\bar{r}^2}{\bar{r}} \quad (3)$$

より求めた。さらに、平均粒子表面間距離 $\bar{\lambda}$ は

$$\bar{\lambda} = 1.25\bar{\ell}_s - 2\bar{r}_s \quad (4)$$

より求めた。

以上、得られた諸パラメータを表2にまとめて示した。表中には体積分率fとしてYの化学分析値より求めた Y_2O_3 のfを示したが、その値は0.35であり、電子顕微鏡法で求めた0.26よりも大きい。電子顕微鏡法では結晶粒内の Y_2O_3 の情報を得ているので、結晶粒界に Y_2O_3 が偏在している可能性がある。しかし、変形の担い手である転位は結晶粒内を運動するのでしきい応力の理論的評価には $f=0.26\%$ を用いた。

しきい応力の理論値はボイド強化応力 σ_v がオローワン応力 σ_{ov} とした。これららの算出法は参考文献(3)を参照されたい。

得られた理論値を表3にまとめて示した。ここで理論値に範囲があるのは、その理論で用いた転位芯の大きさに不確実性があるためであり、本研究では転位芯の大きさ r_0 には b と $3b$ を用いた。

II.3 高温圧縮引張試験

高温圧縮試験には図9に示したように丸棒試料から $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 3\text{mm}$ の角柱状試料を切断と研磨によって作製し、試験に供した。また、引張試験とは同図のような平行部直径 $2\text{mm} \phi$ と長さ 20mm の試験片を作製し、試験に供した。

一般に、結晶材料の高温における状態方程式は

$$\dot{\varepsilon} = A \left(\frac{\sigma}{G} \right)^n \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right)$$

となる。ここで、 $\dot{\varepsilon}$ はひずみ速度、 σ は応力、 G は剛性率、 RT は通常の意味で、 n 値と Q 値は材料の変形で固有の値である。本研究では状態方程式中の n 値と Q 値を圧縮試験で求めた。

圧縮試験はAr雰囲気中で行い、加熱は高周波誘導加熱法によって行った。これらの方法は昨年度と同様である。また、試験温度は $600 \sim 700^\circ\text{C}$ であり、

ひずみ速度は $2 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ である。引張試験はしきい応力の実測のために行った。しきい応力の測定には応力瞬間負荷法を用い、真空中で加熱は電気炉によって行った。

III 実験結果

III.1 高温変形挙動

図10は各温度で圧縮試験を行って得られた応力ーひずみ曲線である。各温度では同一の試験片を用いて、①②③④の順番でひずみ速度を変化させて試験した。ここで、①と④のひずみ速度はほぼ等しく、両者の変形応力がほぼ等しいことから、変形応力に及ぼすバレーリング等の不均一な変形の影響は少ないものと考えられる。

図11は図10のひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ と剛性率 G の温度依存性を除くために変形応力 σ を G で規格化した σ/G の両対数プロットである。各温度で測定点はほぼ直線関係にあり、各温度での直線の勾配からひずみ速度の応力指数 n を求めると、27～28程度の大きな値である。

一般に分散粒子を含む材料では大きな n 値になることが多いが、変形応力 σ からしきい応力 σ_{th} を引いた $\sigma - \sigma_{th}$ を変形応力の代りに用いると、母相の変形挙動に帰着することが知られている。図12はこれを確認した図であるが、横軸には G で規格化した $(\sigma - \sigma_{th})/G$ が用いられている。ここで、 σ_{th}

には後述する応力瞬間負荷法による実測値を用いた。図より明らかに、応力指数nは18～20と非常に大きな値である。一般に、単相の純金属や固溶強化合金の応力指数は3～6程度の値であり、本研究の値はこれらよりも非常に大きい。

図13と図14はひずみ速度のアレニウスプロットである。図13は $\sigma/G = 9 \times 10^{-3}$ におけるひずみ速度であり、図14では $(\sigma - \sigma_{th})/G = 7 \times 10^{-3}$ におけるひずみ速度である。両図から得られる変形の活性化エネルギーは479～527 kJ/molであり、 α -Fe中のWの固有拡散の活性化エネルギー(304 kJ/mol)⁽⁴⁾や α -Feの自己格子拡散の活性化エネルギー(273 kJ/mol)⁽⁴⁾よりも大きい。

以上のようにODSフェライト鋼再結晶材の高温変形挙動はこれまでに知られている金属材料のそれと極めて異なっており、今後詳細な検討が必要であろう。

III.2 しきい応力

図15は応力瞬間負荷試験で得られた応力とひずみの関係を示したものである。ここで、応力負荷にともなう瞬間ひずみを■印で示し、□●○▲印は応力負荷後、1秒、2秒、3秒および4秒経過後のひずみである。また、図中の破線は応力とひずみの弾性的比例関係を示したものであり、測定点が同線上に位置する場合、変形は弾性変形のみであり、転位の運動による塑性変形

がなかったことを意味している。したがって、測定値が弾性的比例関係よりも上に位置し始める応力がしきい応力に対応することになる。応力負荷にもなうひずみは169MPa以上で破線よりも大きくなつており、この応力がしきい応力である。この値は図中に斜線領域で示したオローワン応力 σ_{o_r} の理論値の範囲内にある。さらに、1秒以降のひずみは140MPa以上の応力で弾性的比例関係よりも上に位置しており、しきい応力は140MPaである。また、この応力はボイド強化応力 σ_v の理論値の範囲内にある。

このようなしきい応力の変化は転位と粒子の相互作用が斥力型から引力型に変化することによるものであることがすでに知られている⁽⁵⁾。したがつて、転位の粒子表面上での応力場が十分に緩和できる高温変形におけるしきい応力の発現機構は転位と粒子の引力型相互作用に基づくスロロビッツ機構のであると結論される。

IV 集合組織と粒界すべりの関係

IV.1 粒界構造の解析法(O格子理論)

同一の結晶構造の異なる方位を有する結晶同士の境界が結晶粒界であるが、ここでは結晶の周期性が失われる。そこで何らかの構造緩和が生じる。例えば、方位差の小さな結晶粒界、すなわち小傾角粒界では刃状転位列で構造緩和が起こる。しかし、この転位モデルの限界は約30°である。また、対

応格子理論⁽⁶⁾はある特定の方位差やそれより僅かにずれた粒界を記述するこ
とはできても、それ以外の一般の粒界は記述できない。そこで、Bollmann
はO格子理論⁽⁷⁾を提案した。

彼は、両結晶の格子を互いの結晶に延長して重ね合わせたときに両結晶で
の内部座標が一致する位置に注目した。この位置は最小ひずみと考えられる
点であり、彼はこれをO格子点と名付けた。O格子点は周期的に存在する
が、その間には必ず一致度の悪い位置が存在する。これはOセルと呼ばれ、
O格子点を囲むWigner-Seitzセルを形成する。例えば、図16は2次元の単
純格子を8°回転させて重ね合わせたものであるが、図のような周期的な
Moire-patternが形成される。このpatternの中心がO格子点であり、その周り
がOセルである。

次に、実際にO格子を求めてみる。簡略化するために2次元の単純格子
を用いると、原点Oを基準とするX₁-Y₁直交座標系で表した結晶1(これを
基準となる座標系とする)に、図17に示したように回転操作のようなアフィ
ン変換Aで作られる結晶2を重ねる。いま、結晶1の原点と任意の点pを
結ぶベクトルを $\vec{X}^{(1)}$ で表し、変換後のベクトルをX₁-Y₁座標系で $\vec{X}^{(2)}$ と表す
と

$$\vec{X}^{(2)} = A \vec{X}^{(1)} \quad (5)$$

である。ここで、もし、差ベクトル $\vec{X}^{(2)} - \vec{X}^{(1)}$ が結晶1の並進対称ベクトル、

すなわち

$$\bar{X}^{(2)} - \bar{X}^{(1)} = \vec{b}^{(L)} \quad (6)$$

ならば、 q の内部座標は結晶 1 の座標系でも結晶 2 の座標系でも同じになる。この q が O 格子点である。ここで、O 格子点である $\bar{X}^{(2)}$ を $\bar{X}^{(0)}$ とすると、式(1)と(2)より、

$$(I - A^{-1})\bar{X}^{(0)} = \vec{b}^{(L)} \quad (7)$$

となり、これが O 格子理論の基本式となる。ちなみに $\bar{X}^{(0)}$ が実際の結晶の格子点であるとき、その点は対応格子点となるが、O 格子点は必ずしも結晶の格子点には対応しない。これが O-格子理論が対応格子理論を拡張した理論である所以である。

式(7)で $\det(I - A^{-1}) \neq 0$ のとき、

$$\bar{X}^{(0)} = (I - A^{-1})^{-1} \vec{b}^{(L)} \quad (8)$$

とすることができる。O 格子は基準となる結晶の並進対称ベクトル $\vec{b}^{(L)}$ で求めることができる。また、この $\vec{b}^{(L)}$ が対応する O セルに入る転位のバーガースベクトルになる。ここで注意しなければならないことは、O 格子の単位胞は変換マトリックス A や $\vec{b}^{(L)}$ で変化してしまうことである。 $\vec{b}^{(L)}$ は基準となる結晶の最も小さな並進対称ベクトルを選ぶ必要がある。また、変換マトリックス A は変換前後で体積変化が生じないので、結晶同士を重ね合わせてできる Moire'-pattern と O 格子が一致するようなものを選ばなければいけない。

ある一つの結晶方位を軸とした回転関係であるから回転軸方位への結晶の乱れはなく、O格子は回転軸方位に平行な線、O線となるため、2次元問題として取り扱ってよいことになる。さらに、式(7)で $\det(I - A^{-1}) = 0$ ならば、O線は面に拡張されることになる。

IV.2 ODS フェライト鋼の粒界構造分布

図18は岡田氏の報告書に示されている一方向圧延材のT面の電子顕微鏡より得られた各結晶粒内の粒界の種類を示したものである。このような図から一方向圧延材と被覆管の結晶粒界の種類を分類分けしたのが表4と5である。表の横と縦の欄は結晶粒のT面での方位を表し、横の欄と縦の欄が交差した部分が粒界を表している。例えば表4で縦欄が $\{100\}\langle 110 \rangle$ で横欄が $\{112\}\langle 110 \rangle$ の時、両結晶の回転軸は $\langle 110 \rangle$ と等しいので、 $(110)\Sigma 9$ 対称傾角粒界となる。表4に示した一方向圧延材では、小傾角粒界の他に、(100)ねじり粒界等があるが、特徴的なことは $(100)\Sigma 9$ 対称傾角粒界が存在することである。また、表5の被覆管では、 $(110)\Sigma 11$ 対称傾角粒界が存在している。

図19はWolf⁽⁸⁾によるbccの α -FeとMoの $\langle 110 \rangle$ 軸対称傾角粒界の粒界エネルギーを(001)面どうしの傾角 θ に対してプロットした結果である。一方圧延材や被覆管で存在した $\Sigma 9$ 粒界や $\Sigma 11$ 粒界のエネルギーは $(114)\Sigma 9$ と $(332)\Sigma 11$ 粒界では小さな極少点を示すが、粒界エネルギーは高い。

図20はBiscondiとGoux⁽⁹⁾による(001)対称傾角粒界を1つだけ有するアル

ミニウム双結晶の粒界すべり量Sと傾角 ϕ の関係を示したものである。粒界すべり量はある特定の(210) Σ 5粒界や(310) Σ 5粒界で最少を示す。また、この粒界エネルギーは低い。したがって、すべりが起こり難い粒界は低エネルギーな粒界であり、高い粒界エネルギーの粒界はすべり易い。したがって、一方向圧延材と被覆管に存在した Σ 9や Σ 11粒界は高い粒界エネルギーを有しているので高温で容易に粒界すべりを起こすであろう。

V 結論

Y_2O_3 によって分散強化されたODSフェライト鋼再結晶材の高温変形挙動と分散強化機構を明らかにするために、温度範囲600～700°C、ひずみ速度範囲 $2 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ で圧縮試験、応力瞬間負荷試験した。さらに、ODSフェライト鋼の集合組織を解析し、粒界構造分布を明らかにして、粒界すべりの素因子を明らかにした。得られた結論を以下に示す。

(1)ODSフェライト鋼再結晶材のひずみ速度の応力指数は27～28であった。

また、変形の活性化エネルギーは479～527kJ/molであった。これら2つの値は通常の金属材料の値とは極めて異なっている。

(2)ODSフェライト鋼再結晶材のしきい応力は変形の進行とともに169MPaから140MPaに遷移した。この応力の遷移はオローワン応力からボイド強化応力の変化に対応しており、このことから高温における分散強化機構は転位

と粒子の引力型相互作用にもとづく、スロロビッツ機構であると結論される。

(3)ODS フェライト鋼一方向圧延材と被覆管の集合組織とは $\Sigma 9$ や $\Sigma 5$ 対応粒界が存在することが知られた。これらの粒界は高い粒界エネルギーを有しており、この粒界で高温変形中の粒界すべりは生じたものと考えられる。

参考文献

- (1)中島英治、吉澤明展、藤田剛志、吉田冬樹、吉永日出男
「分散強化型フェライト鋼の強度特性評価(2)」、PNC ZJ9606 94-001、
1994.
- (2)吉田冬樹、藤田剛志、吉澤明展、中島英治、吉永日出男
「分散強化型フェライト鋼の強度特性評価(3)」、PNC ZJ9606 95-002、
1995.
- (3)中島英治、吉永日出男
「分散強化型フェライト鋼の強度特性評価」、PNC ZJ9606 93-001、1993.
- (4)H. Oikawa, Technology Report, Tohoku University, 47(1982), 265.
- (5)F. Yoshida, J. Sugamoto, H.Nakashima and H.Yoshinaga, Mater. Trans., JIM. 35
(1994), 576.
- (6)D. G. Brandon: Acta Met. 12(1964), 813.
- (7)W. Bollman: Crystall Defect and Crystalline Interfaces, Springer-Verlay 1970.
- (8)D. Wolf: Phil. Mag., A62(1990), 447.
- (9)M. Biscondi and C. Goux: Mem. Sbi. Rev. Metallurg., 65(1968), 167.

表1 一方向圧延材、1DK被覆管および再結晶材の各面における
結晶粒の長軸と短軸の大きさ及び結晶粒のアスペクト比

		長軸(μm)	短軸(μm)	アスペクト比
一方向圧延材	C面	8.57	1.00	9
	T面	1.07	0.12	9
	L面	—	0.12	71
被覆管	C面	3.93	0.34	11
	T面	0.34	0.34	1
再結晶材	T面	16.9	7.30	2
	L面	24.9	6.80	4

表2 分散パラメーター

$\bar{r} / 10^{-9} \text{m}$	$\bar{r}^2 / 10^{-17} \text{m}^2$	$\bar{r}^3 / 10^{-26} \text{m}^3$	$\bar{l}_s / 10^{-7} \text{m}$	$\bar{r}_s / 10^{-9} \text{m}$	$\bar{\lambda} / 10^{-7} \text{m}$	$f / \%$
3.0	1.1	4.7	1.1	2.8	1.3	0.26* 0.35**

*透過電子顕微鏡観察より得たNvより算出

**Chemical compositionより算出

表3 透過電子顕微鏡観察より得た N_v より算出した
 f を用いて求めたODS2-B しきい応力の理論値

	σ_v / MPa		σ_{Or} / MPa	
$T / ^\circ\text{C}$	$r_0=3b$	$r_0=b$	$r_0=3b$	$r_0=b$
600	91.8	130	107	152
650	87.9	124	102	146
700	82.9	117	97.3	138

表4 一方向圧延材の結晶粒の方位関係

	$\{100\} <110>$	$\{100\} <100>$	$\{100\} <230>$	$\{112\} <110>$
$\{100\} <110>$		$(100) \phi = 45^\circ$ Twist - 小傾角粒界	$(100) \phi = 11^\circ$ Twist - 小傾角粒界	$<110> \Sigma 9$ - Tilt ($\Delta \phi = 4^\circ$)
$\{100\} <100>$	$(100) \phi = 45^\circ$ Twist - 小傾角粒界		$(100) \Sigma 5$ - Twist ($\Delta \phi = 4^\circ$)	
$\{100\} <230>$	$(100) \phi = 11^\circ$ Twist - 小傾角粒界	$(100) \Sigma 5$ - Twist ($\Delta \phi = 4^\circ$)		
$\{112\} <110>$	$<110> \Sigma 9$ - Tilt ($\Delta \phi = 4^\circ$)			

表5 被覆管の結晶粒の方位関係

	{111} <110>	{100} <100>	{100} <230>	{100} <100>
{111} <110>				<110> $\Sigma 11$ - Tilt ($\Delta \phi = 4^\circ$)
{100} <100>			(100) $\Sigma 5$ - Twist ($\Delta \phi = 4^\circ$)	(100) $\phi = 45^\circ$ Twist - 小傾角粒界
{100} <230>				(100) $\phi = 11^\circ$ Twist - 小傾角粒界
{100} <110>	<110> $\Sigma 11$ - Tilt ($\Delta \phi = 4^\circ$)	(100) $\phi = 45^\circ$ Twist - 小傾角粒界	(100) $\phi = 11^\circ$ Twist - 小傾角粒界	

ODSフェライト鋼再結晶材(2B材)

(株)神戸製鋼所

製造工程

真空溶解

Arガスアトマイズ($\leq 150 \mu\text{m}$)

メカニカルアロイング(ボール:粉末=15:1、処理粉末量=10kg, 220rpm, 48h)

分級($\leq 100 \mu\text{m}$)、脱気(400°C, 10^{-2} torr)、カプセル封入押出(850°C, $67 \phi \Rightarrow 30 \phi$; 押出比=5)熱間スエージ(30 $\phi \Rightarrow 25 \phi$)冷間圧延($25 \phi \Rightarrow 15t$)

焼鈍(1150°C/1h)

機械加工($7 \phi \times 300\text{L}$)

図1 本研究で用いた試料の作製工程の流れ図

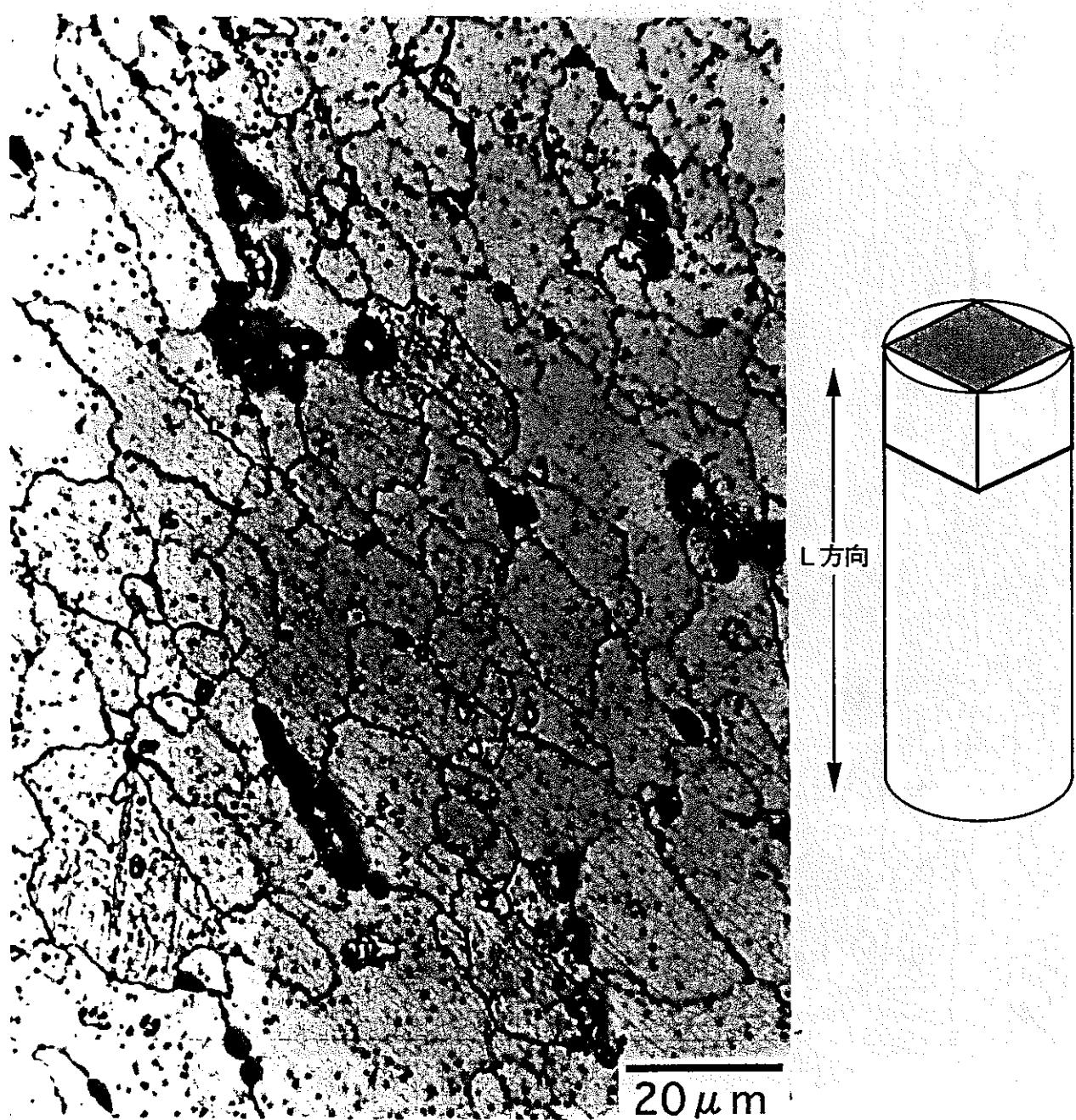


図2 T面の結晶粒形態を示した光学顕微鏡写真

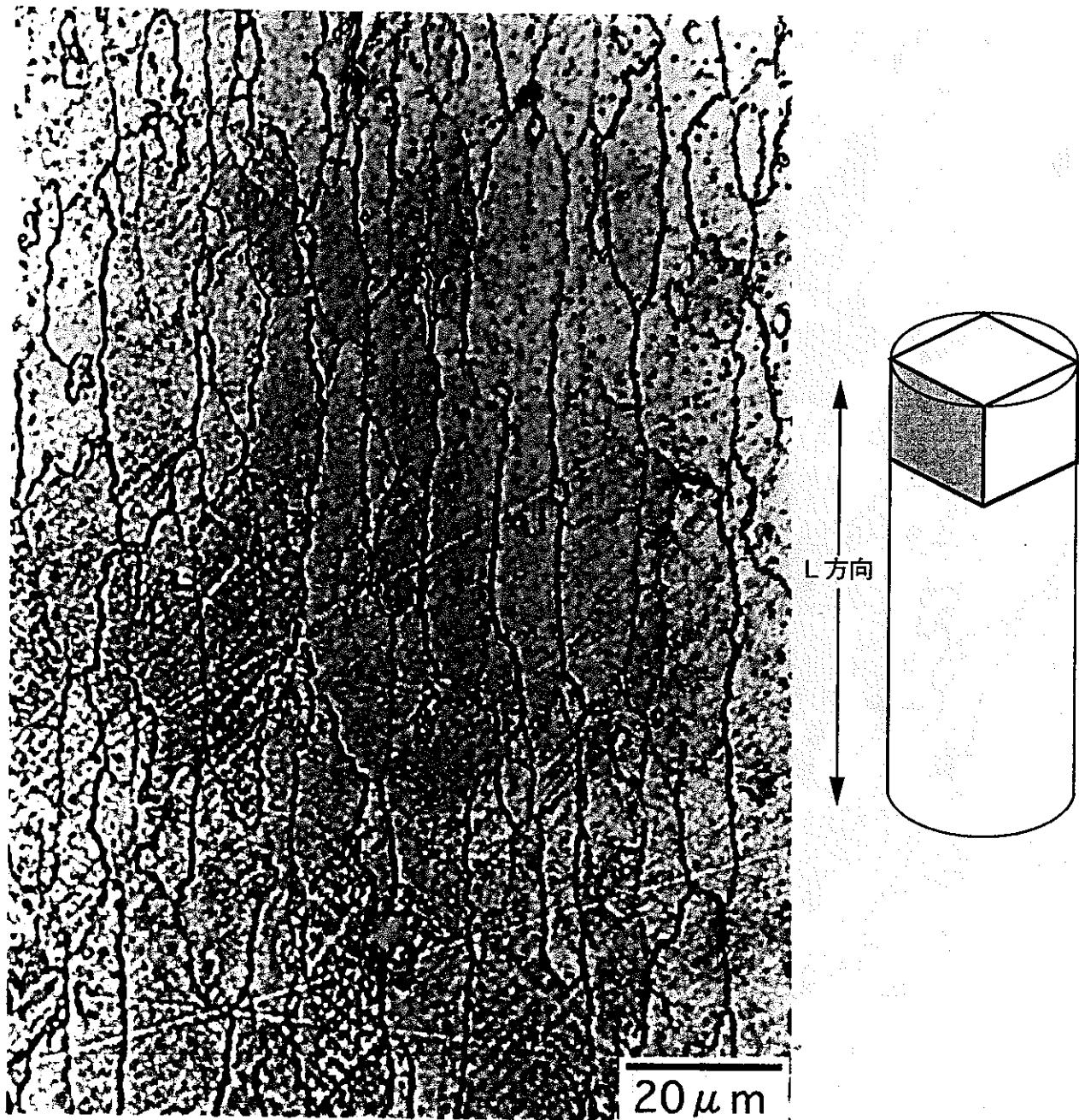


図3 L面の結晶粒形態を示した光学顕微鏡写真

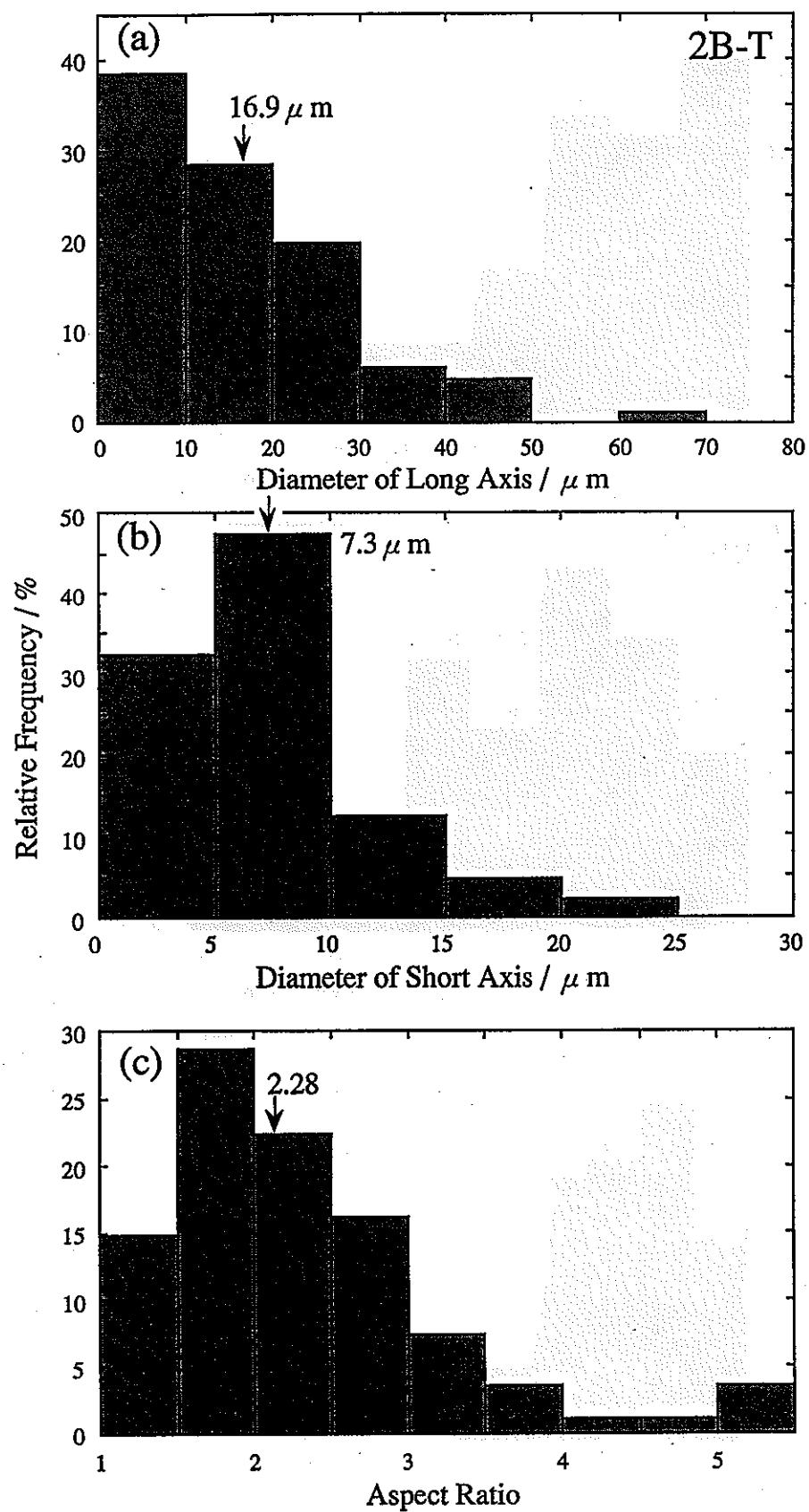


図4 T面の結晶粒径の大きさ分布とアスペクト比分布

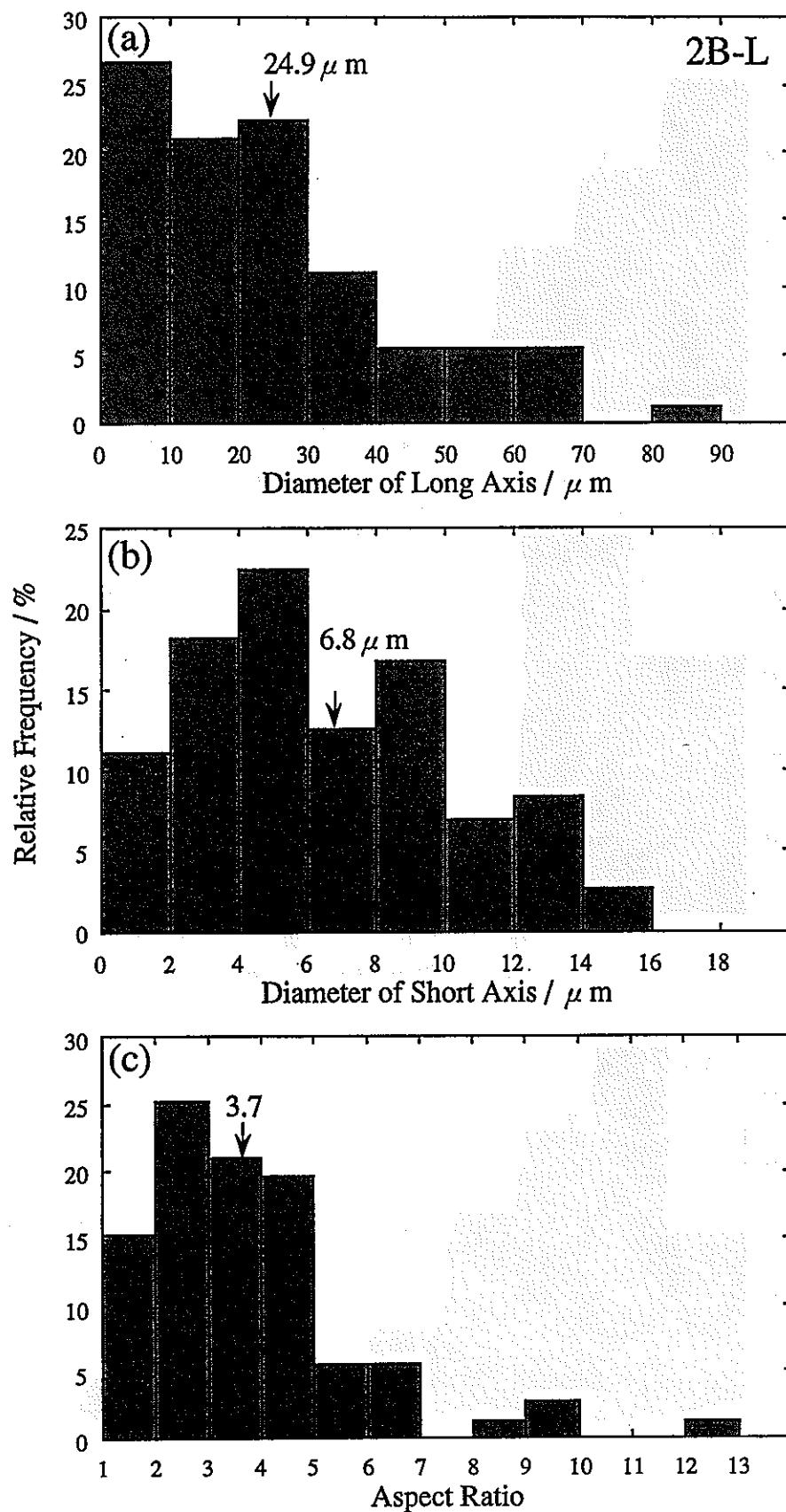


図5 L面の結晶粒径分布とアスペクト比分布



図6 $\vec{g}=\langle\bar{1}10\rangle$ 2波励起状態で観察した分散粒子

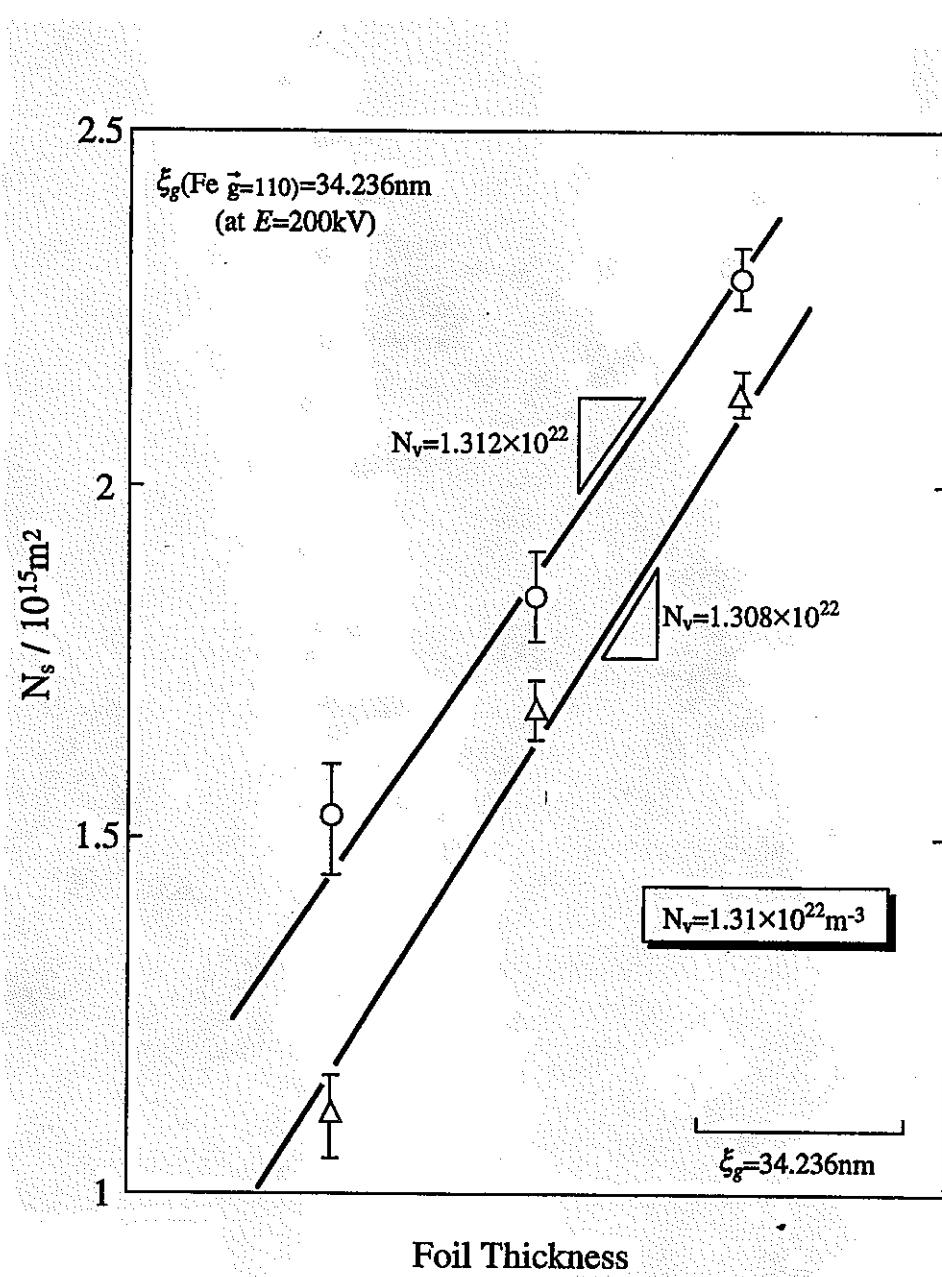


図7 電子顕微鏡試料膜厚と見かけの粒子の面密度の関係

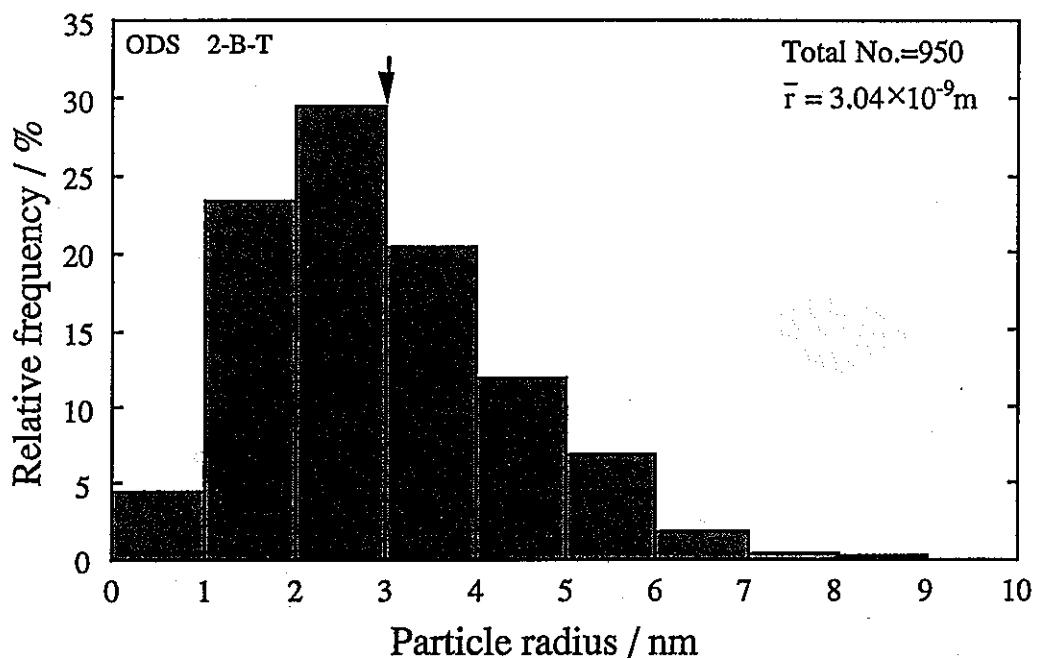


図 8 透過電子顕微鏡観察して得られた粒子の大きさ分布

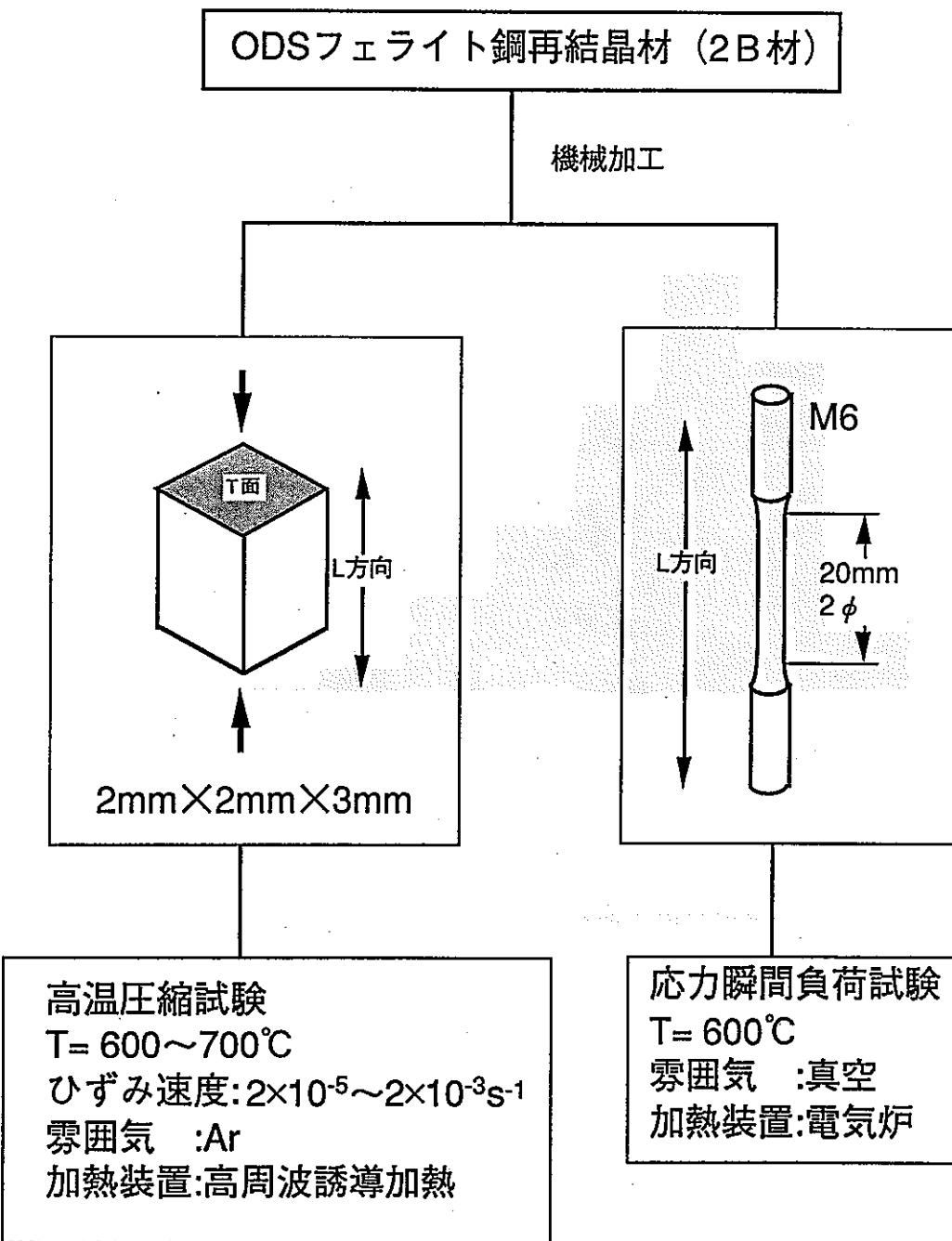


図9 ODS フェライト鋼の高温強度試験の流れ図

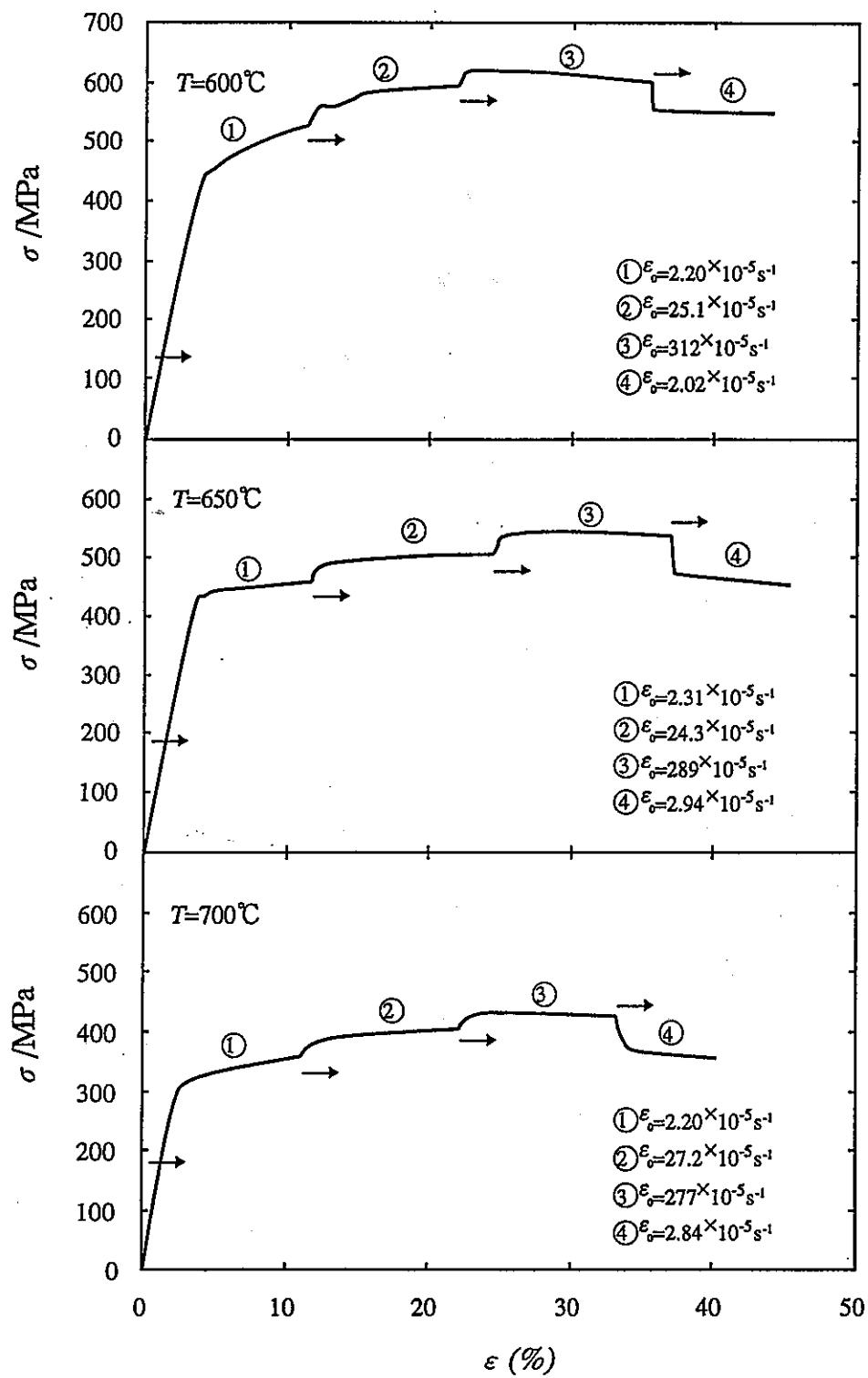


図 10 高温圧縮試験で得られた応力－ひずみ曲線

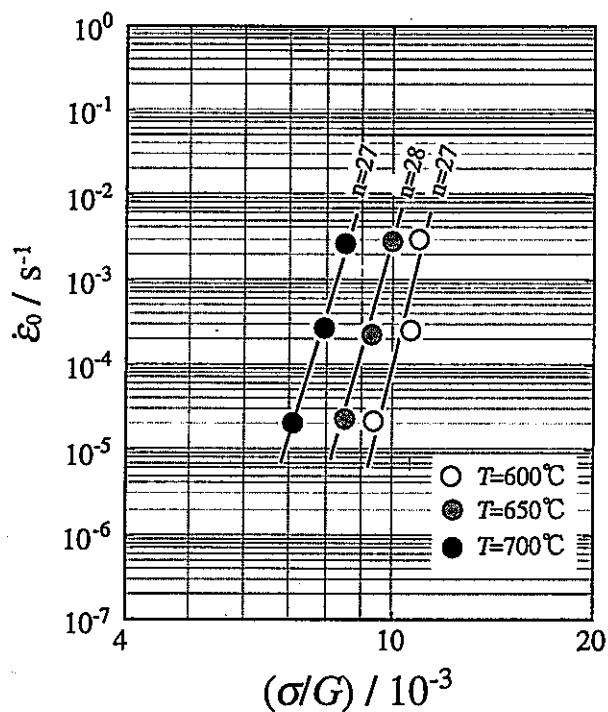


図 11 高温圧縮試験で得られた変形応力を剛性率 G で規格化した
 σ/G とひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ の両対数プロット

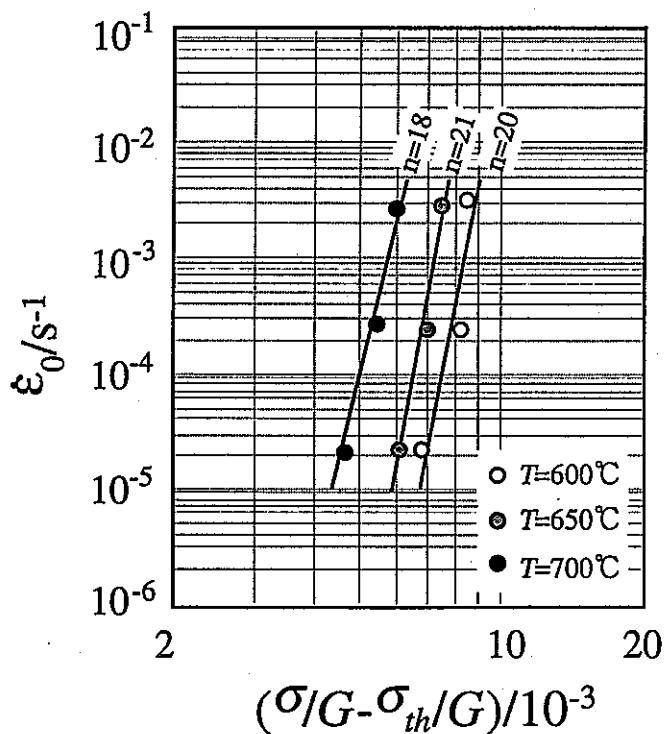


図 12 変形応力 σ からしきい応力 σ_{th} を引いた $\sigma - \sigma_{th}$ を剛性率 G で
規格化した $(\sigma - \sigma_{th})/G$ とひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ の両対数プロット

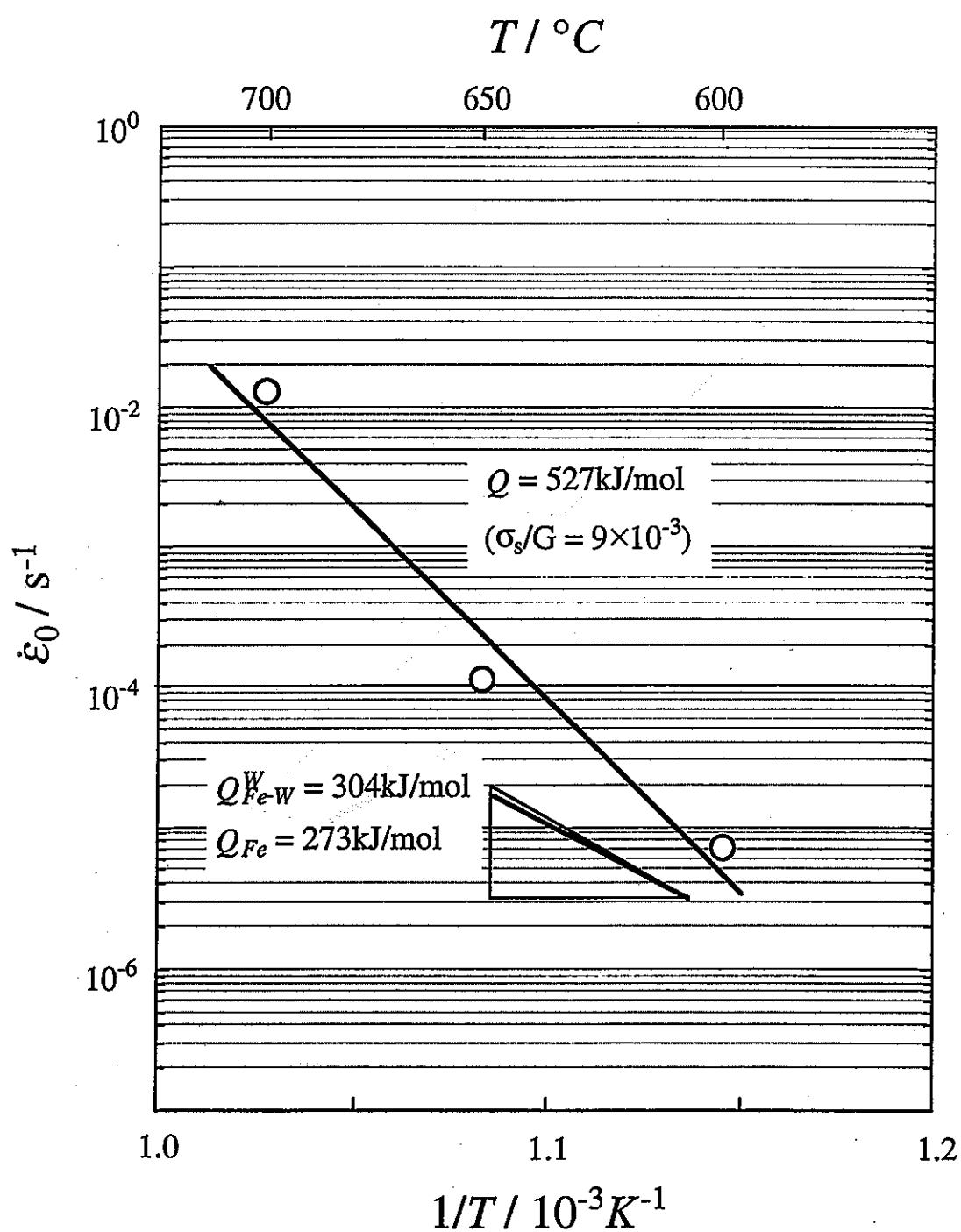
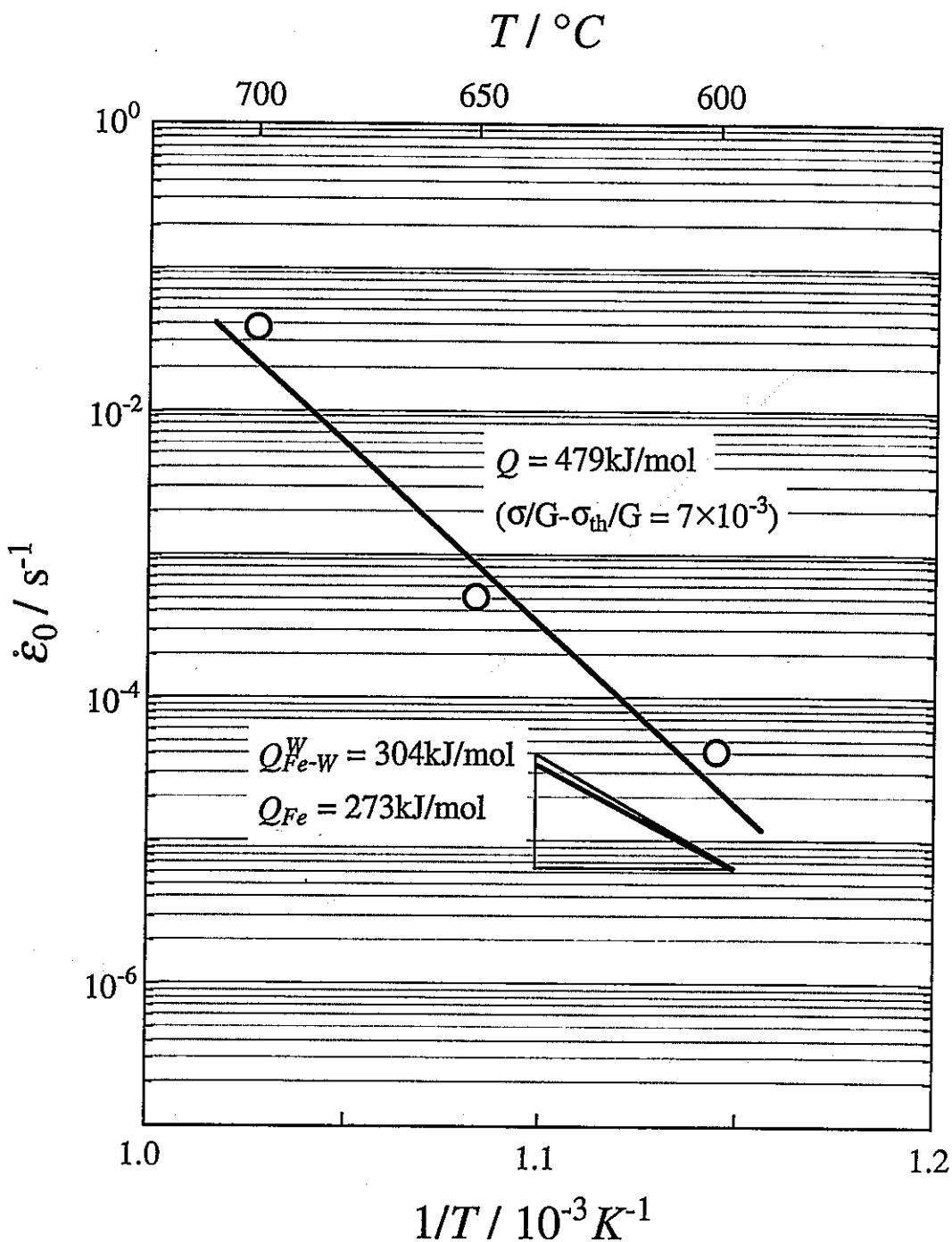


図13 ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ のアレニウスプロット。
ただし、 $\sigma/G = 9 \times 10^{-3}$ である。

図 14 ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ のアレニウスプロット。ただし、 $(\sigma - \sigma_{th})/G = 7 \times 10^{-3}$ である。

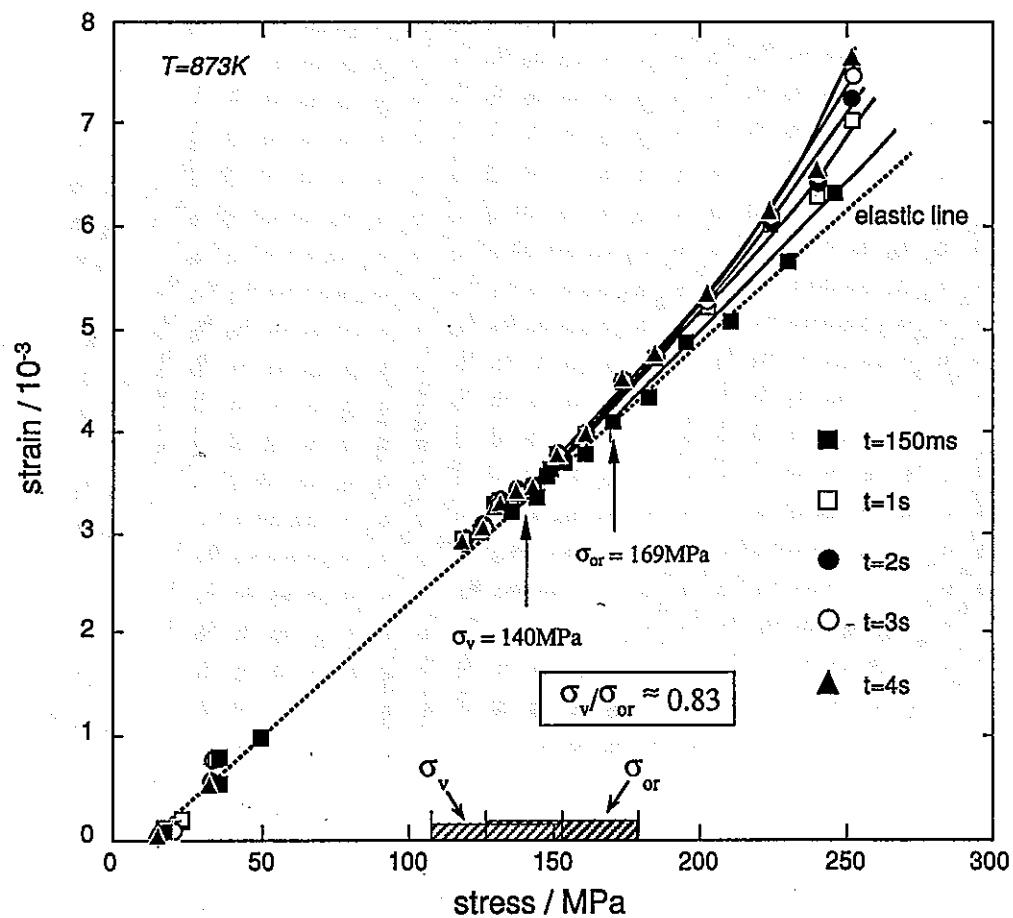


図 15 応力瞬間負荷試験で得られた応力とひずみの関係

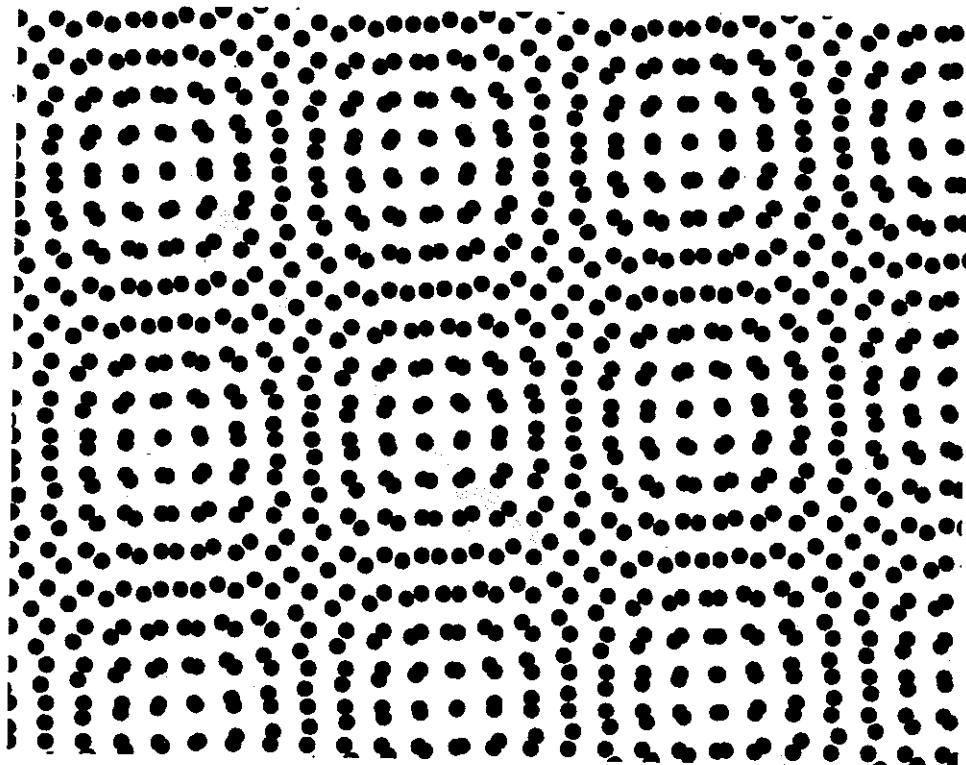


図16 2つの結晶を8°回転して得られるモアレパターン

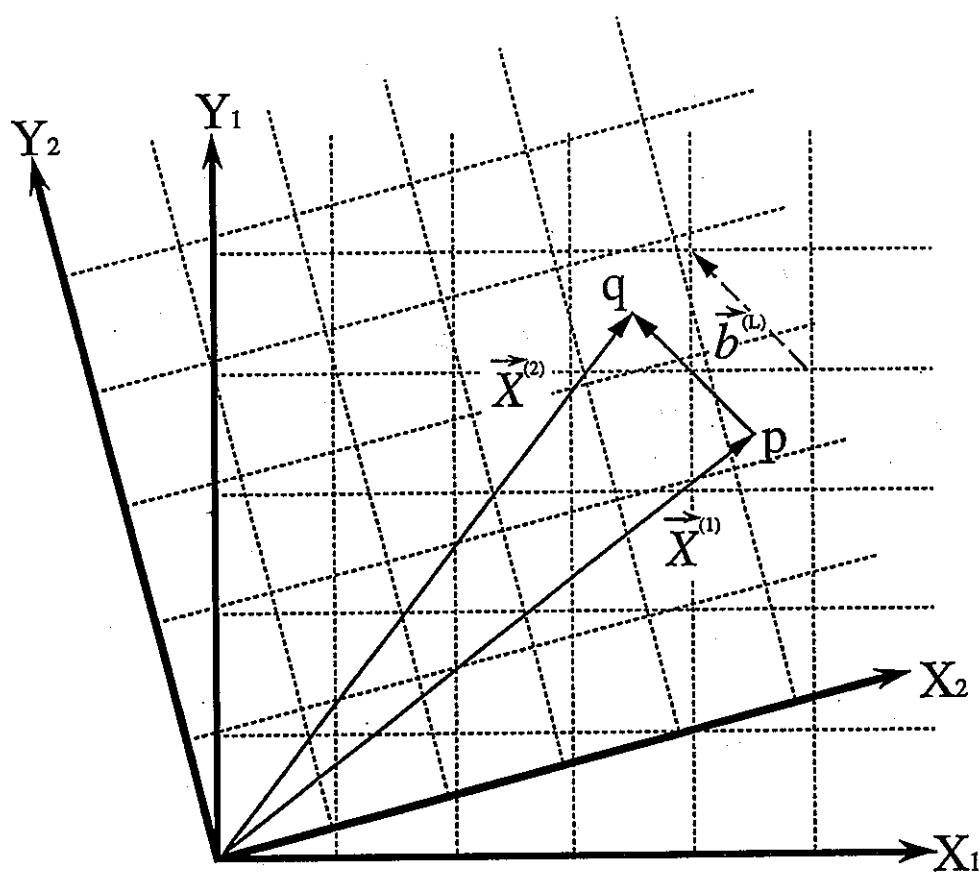


図17 O格子点の決定法の説明図

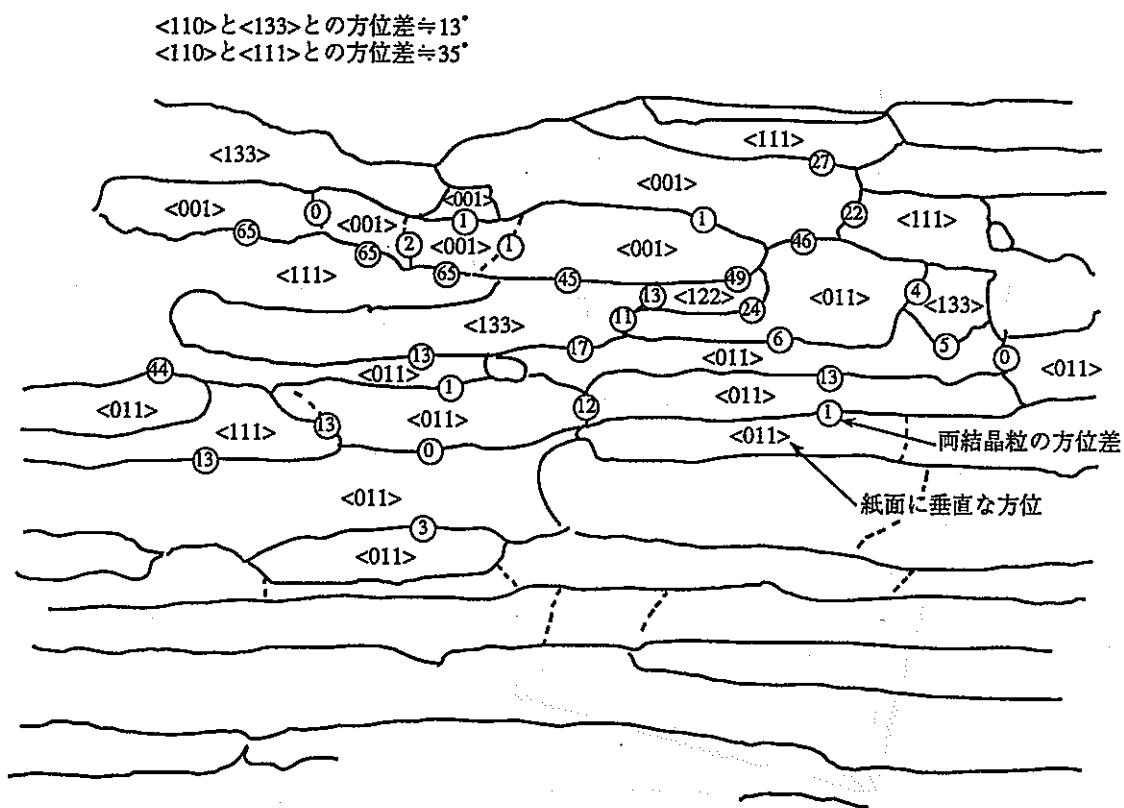


図 18 一方向圧延材の結晶粒方位測定結果

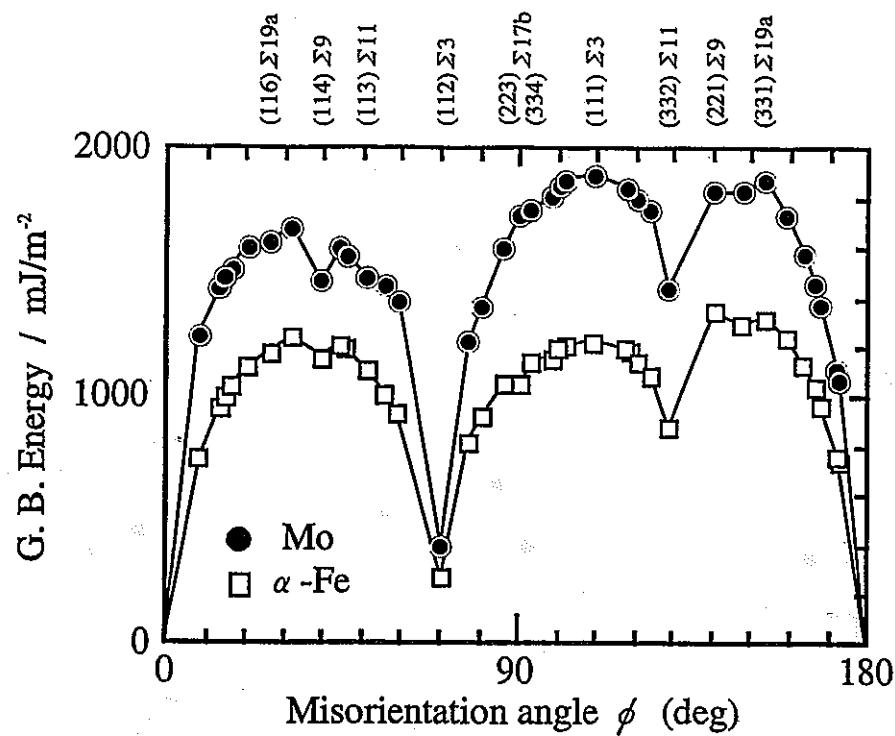


図19 α -FeとMo(110)対称傾角粒界の粒界エネルギーと傾角の関係

出典 D.Wolf : Phil. Mag., A62(1990), 447.

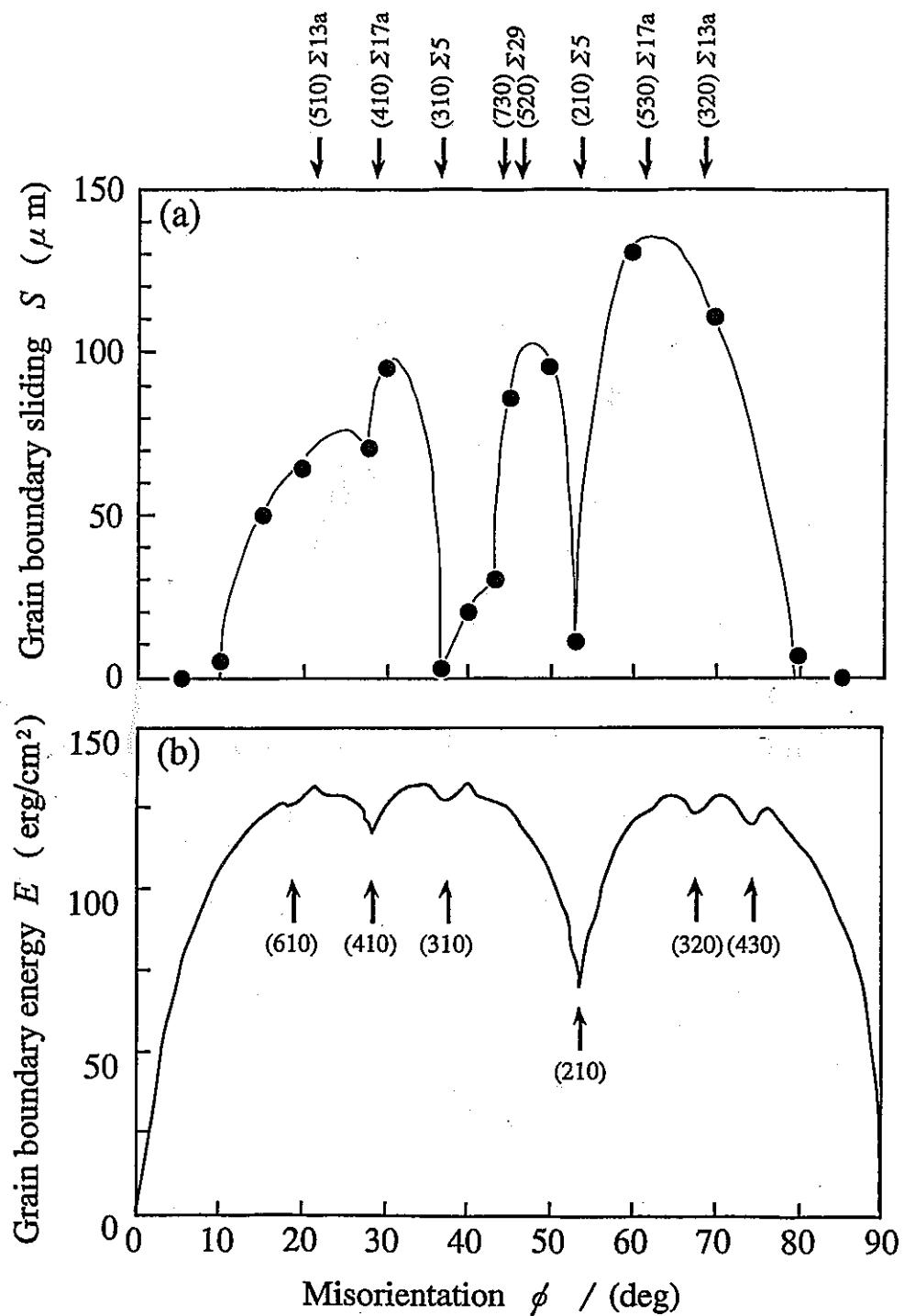


図20 アルミニウム(001)対称傾角粒界の(a)粒界すべり量と
(b)粒界エネルギーの傾角依存性

出典 M.Biscondi and C.Goux : Mem. Sbi. Rev. Metallurg., 65(1968), 167.