

© 1986 ISIJ

チタンの高温変形挙動



及 川 洪*

High-Temperature Deformation Characteristics of Titanium

Hiroshi OIKAWA

1. はじめに

純チタン (以下 Ti と略記) 及びその合金については、すでに数多くの開発研究が行われている。しかし、これらの材料の高温における変形強度を基礎的立場から研究したものは多くはない。

Ti は 1156 K 以下では最密六方晶 hcp である。他の hcp 金属、たとえば亜鉛、カドミウム、マグネシウムなどの高温変形についてはある程度の報告の蓄積はあるが、 α -Ti に関する報告はごく少なく、1973 年に発表された DONER と CONRAD¹⁾ の研究がその主体をなしている。そのほかには GRIEST ら²⁾、BÜHLER と WAGENER³⁾、及び最近の MALAKONDAIAH と RAMA RAO⁴⁾ の研究がある。

高温変形を理解するための第一の手がかりは、その定常変形挙動に注目し、定常クリープ速度 $\dot{\epsilon}_s$ の応力依存性 (通常は応力指数 n (式 2 参照) で表示) およびその温度依存性 (通常は活性化エネルギー Q_c で表示) を知ることである。金属の高温変形挙動をこれら n 、 Q_c の値に注目して分類する立場からは、hcp 金属の高温変形挙動は積層欠陥エネルギー Γ の低い面心立方晶 fcc 金属の高温変形挙動に類似しているとされる⁵⁾。しかし、 α -Ti に関する上記の報告はこの推測とはかならずしも一致していない。たとえば、DONER と CONRAD の報告によれば、 α -Ti における応力指数 n は 4.55 であるが、この値は体心立方晶 bcc あるいは高 Γ fcc の金属について報告されている値⁵⁾ に近い。また、通常は高温定常変形の活性化エネルギー Q_c は拡散の活性化エネルギー Q_D にほぼ等しいとされている。しかし、 α -Ti の場合には、 Q_c として報告されている値¹⁾ は Q_D ⁶⁾ よりも約 40% 大きい。

Ti は高温では bcc 相となる。 β -Ti の高温変形については BÜHLER と WAGENER³⁾ が研究しているが、 n や Q_c の値は報告されていない。

この解説では、Ti の高温変形機構解明の基礎資料を得る目的で最近筆者の研究室で行った実験結果に基づいて、純 Ti 多結晶体の高温強度について述べる。

2. α -Ti の高温強度⁷⁾⁸⁾

市販純度の純 Ti (主な不純物 (mass%) Fe: 0.049, O: 0.107, N: 0.004, C: 0.005, H: 0.005) の高温アルゴン中引張試験を行い、最高 (定常) 応力と (定常) ひずみ速度の関係性を求めた。定常状態に達すれば、定常ひずみ速度試験結果と定応力試験結果は同じものとなる⁹⁾。ただし、引張試験結果から定常 (最高) 応力 σ_s とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ との関係を得るためには、公称応力 σ' -公称ひずみ ϵ' 線図に 2 種の補正をほどこす必要がある。すなわち、1) 試片伸長に伴う断面積縮小と基準長さの増加に対する補正 (ΔA 補正) と、2) 試料伸長による真ひずみ速度減少に伴う変形応力低下に対する補正 ($\Delta \dot{\epsilon}$ 補正) である。両者を考慮すると、真ひずみ ϵ と真ひずみ速度一定時の真応力 σ は

$$\epsilon = \ln(1 + \epsilon'), \quad \sigma = \sigma'(1 + \epsilon')^{1+1/n} \dots \dots \dots (1)$$

で求められる。

応力-ひずみ線図の補正例を図 1 に示す。 ΔA 補正を行うと引張曲線は著しく高応力側に移動し、かなり大きなひずみ量で最高応力に達することがわかる。 $\Delta \dot{\epsilon}$ 補正を追加すれば、曲線はさらに上昇し、しかも応力最高値付近における応力変化はかなり緩やかとなり、ほぼ定常変形と見なし得る状態となつていくことがわかる。

ごく普通の高温焼鈍で得られる結晶粒径約 0.1 mm の試料を用いて、温度範囲 843—1100 K、(公称) ひずみ速度範囲 3.3×10^{-6} — $3.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ の下で引張試験を行い、真ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ 一定条件における定常 (真) 応力 σ_s と (真) ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ との関係性を DORN の式、

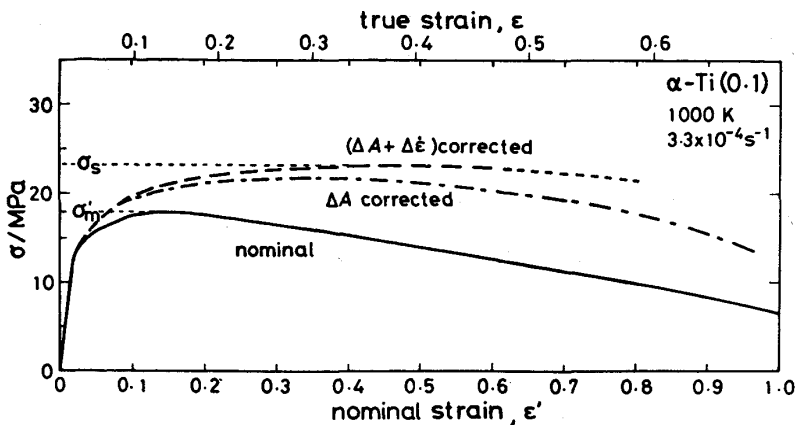
$$\dot{\epsilon}_s = AD(Gb/kT)(\sigma_s/G)^n \dots \dots \dots (2)$$

を用いて整理した。ただし、 D は自己拡散係数、 G は剛性率、 b はバーガースベクトルの大きさ、 k はボルツマン定数、 T は温度である。この式は多くのデータを整理するために提案された半実験式であるが、拡散が関与する条件の下での高温変形において、定常変形速度と応力との関係に及ぼす温度や剛性率の効果をよく表現できるものとされている。

図 2 に示すように、細粒 α -Ti の実験結果は式 (2) で

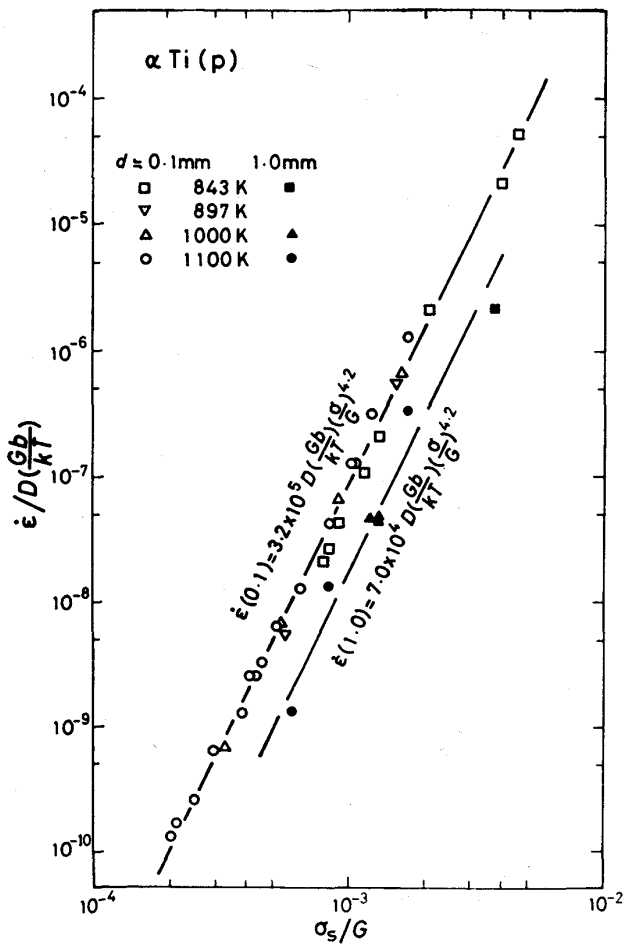
昭和 60 年 7 月 22 日受付 (Received July 22, 1985) (依頼解説)

* 東北大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Tohoku University, Aza-Aoba Aramaki Sendai 980)



Chain line : Corrected for the reduction of area.
Broken line : Corrected for the reduction of area and also the decrease in true-strain rate.

Fig. 1. An example of stress-strain curves (solid line) and the corrected ones.



Open marks : Fine-grained samples.
Solid marks : Coarse-grained samples.

Fig. 2. Relation between the normalized steady-state stress σ_s/G and the normalized strain-rate $\dot{\epsilon}/D(Gb/kT)$ of α -titanium in high-temperature deformation.

良く示すことができる。ただし D としては α -Ti の自己拡散係数として DYMENT⁶⁾ が報告している

$$D^\alpha/m^2s^{-1} = 6.6 \times 10^{-9} \exp(-169 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}/RT) \quad (3)$$

を、また G としては FISHER と RENKEN¹⁰⁾ が α -Ti

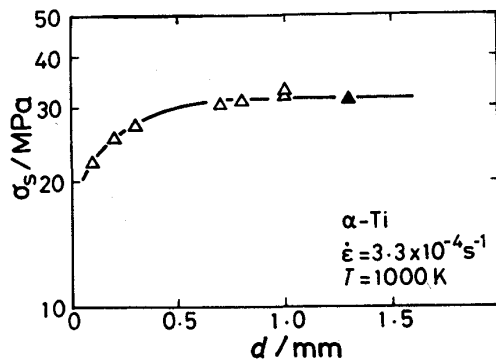


Fig. 3. Effect of the grain diameter, d , on the steady-state stress in high temperature tensile tests of α -titanium.

単結晶について報告している値から計算によつて求めた

$$G^\alpha/\text{GPa} = 49.2 - 2.58 \times 10^{-2} T/\text{K} \quad (4)$$

を用いている。図からわかるように、細粒 α -Ti の高温定常変形挙動は、 D 及び G の報告値を用いると

$$n^\alpha(0.1) = 4.20, A^\alpha(0.1) = 3.2 \times 10^5,$$

$$Q_g^\alpha = 169 \text{ kJ/mol}$$

の定数によつて表示される。

α -Ti の高温強度に及ぼす結晶粒径 d の効果を調べた結果を図3に示す。高温強度は細粒の場合には d 増加に伴つてかなり増加するが、 $d \geq 0.7 \text{ mm}$ では d の影響はごく小さい。図2には、 $d = 0.8 \sim 1.3 \text{ mm}$ のデータを粗粒材の挙動として一括処理したものも示してある。無次元係数 A は d によつて変わるが、 n 、 Q_c は d に依存しないと見なし得る。すなわち、粗粒試料 ($d \sim 1 \text{ mm}$) に対しては

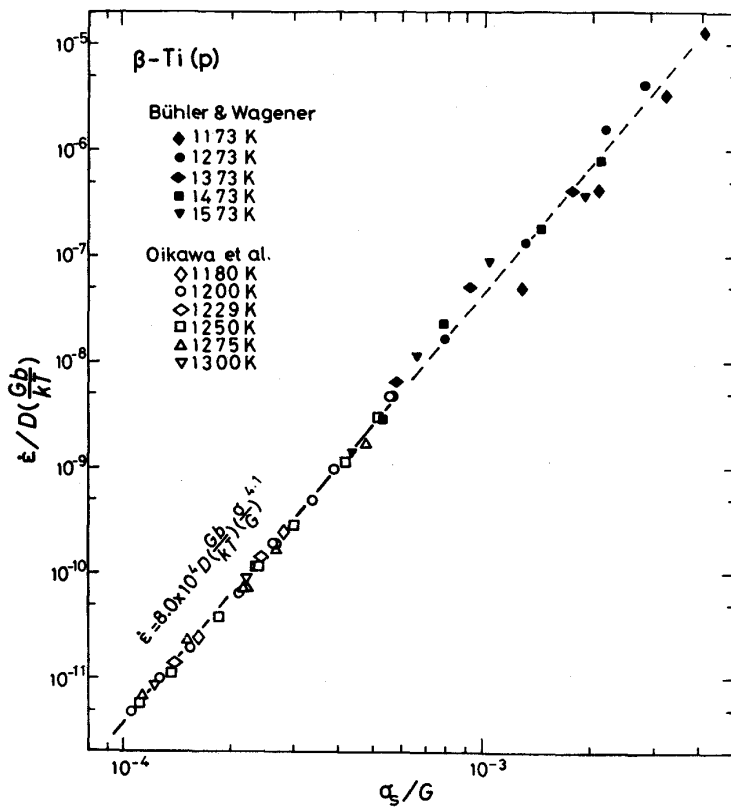
$$n^\alpha(1.0) = 4.2, A^\alpha(1.0) = 7.0 \times 10^4$$

が得られる。

クリープの活性化エネルギー Q_c は、しばしば式(2)よりも簡単な

$$\dot{\epsilon} \propto \sigma^{n'} \exp(-Q'_c/RT) \quad (5)$$

によつて求められ、この Q'_c が Q_D にほぼ一致するとされる場合がある。しかし、 α -Ti では G の温度依



Open marks : Tensile-test results¹¹⁾.
 Solid marks : Compression-test results³⁾.
 Fig. 4. Relation between the normalized steady-state stress σ_s/G and the normalized strain-rate $\dot{\epsilon}/D(Gb/kT)$ of β -titanium.

存性が極めて大きいので、 σ/G 及び Gb/kT の項を考慮に入れるか否かで、結果に著しい差異を生じる。図2のデータを式(5)で処理すると、 $n'=4.36$, $Q'c=222$ kJ/mol が得られる。これらの値は DONER と CONRAD が報告している $n=4.55$, $Q=242 \pm 24$ kJ/mol に近い値である。

以上示したように、 G の温度依存性を考慮に入れれば、 α -Ti の高温定常変形挙動は DORN の式で良く表現でき、 α -Ti はこれまで言われていたように特異な挙動を示すわけではない。

3. β -Ti の高温強度¹¹⁾

前節と同じ素材を用い、bcc 温度域における Ti の変形挙動を調べてみた。実験方法は α -Ti の場合とまったく同じである。ただし、 d は約 2mm であり、 d 依存性の少ない粗粒試料と見なしてよい。

図4に実験データを式(2)によつて整理した結果を示す。なお D としては de REGA と LIBANATI¹²⁾ の実験値、

$$D\beta/m^2 s^{-1} = 1.9 \times 10^{-7} \exp(-153 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}/RT) \quad \dots\dots\dots (6)$$

を使用した。 β -Ti の剛性率はまだ良く知られていないので、FISHER と DEVER¹³⁾ の実測値 (1 温度) に基づく SARGENT と ASHBY¹⁴⁾ の推定値、すなわち

$$G\beta/GPa = 22.1 - 5.3 \times 10^{-3} T/K \quad \dots\dots\dots (7)$$

を使用した。図からわかるように、データは式(2)によ

つて良く整理でき、実験値は

$$n\beta = 4.1, A\beta = 8.0 \times 10^4$$

によつて表示できる。

図4には、BÜHLER と WAGENER³⁾ の高温高速圧縮試験の結果から、定常状態 (真ひずみ約 0.5 以上) における真ひずみ速度と真応力との関係を求めたものも示してある。図からわかるように、2 グループの研究結果は同じ DORN の式で表現される。したがつて、 β -Ti の定常変形はかなり広い変形条件範囲にわたつて上で示した $n\beta$, $A\beta$ を用いて記述できることになる。

4. 高温強度に及ぼす結晶系の影響¹⁵⁾

Ti の引張強度の温度依存性を調べた1例を図5に示す。 α -Ti と β -Ti の強度は変態温度において応力比にして 4.4、ひずみ速度比にして 470 も異なる。変態に伴う各種因子の変化がひずみ速度に及ぼす影響を DORN の式によつて見積もると、 D , G , b の効果はつぎのように評価される。すなわち、

$$\begin{aligned} (D\beta/D\alpha) (G\alpha/G\beta)^{n-1} (b\beta/b\alpha) \\ = 146 \times 1.176^{3.15} \times 0.980 = 238 \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

この数値と $(\dot{\epsilon}\beta/\dot{\epsilon}\alpha)_{\text{obs}}$ とを組み合わせると、

$$\begin{aligned} (\dot{\epsilon}\beta/\dot{\epsilon}\alpha)_{\text{obs}} = 1.97 (D\beta/D\alpha) (G\alpha/G\beta)^{n-1} (b\beta/b\alpha) \\ \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

が得られる。すなわち $A\beta/A\alpha \approx 2$ であつて、 D , G , b に関係ない結晶系による速度因子に約 2 倍の違いがある。

図6に Ti の高温変形強度をまとめて示す。図中には

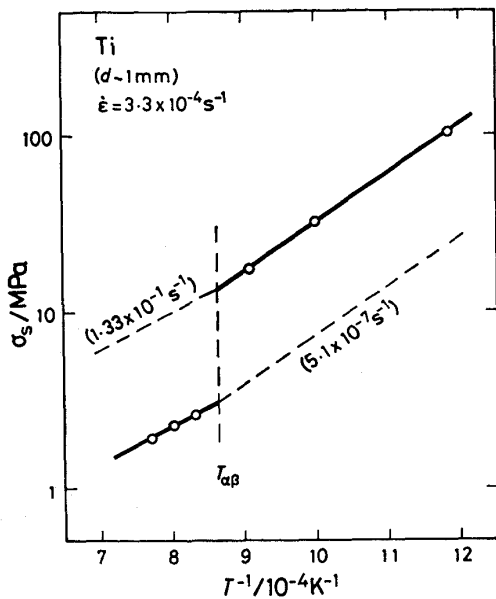


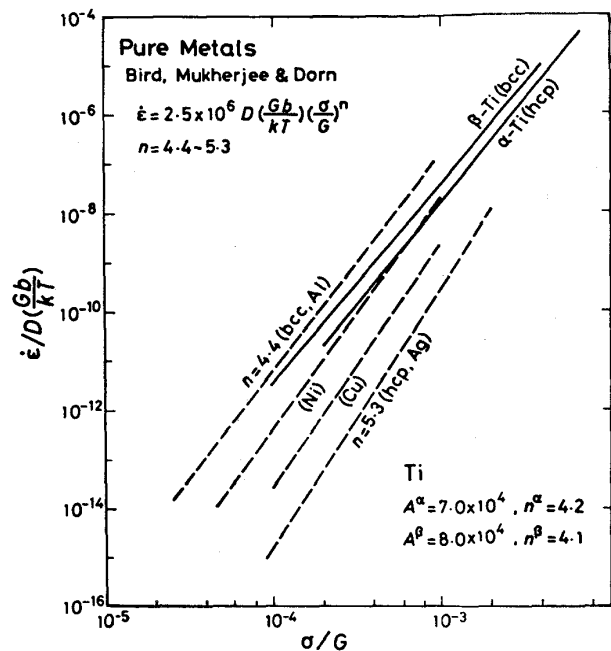
Fig. 5. Temperature dependence of the steady-state stress σ_s in tensile tests with $3.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ of coarse-grained titanium.

BIRD ら⁵⁾ が各種金属のデータをまとめた結果も同時に示してある。図からわかるように、 β -Ti の高温強度はこれまで一般に言われてきた bcc 金属の高温強度に近いもので、特異な点はない。しかし、 α -Ti の規格化強度はこれまで hcp の典型とされていたものとは著しく異なる。すなわち、亜鉛、マグネシウム、カドミウムなどと比較すると、 α -Ti は同じ hcp であつても著しく弱く、その規格化強度は高 Γ fcc あるいは bcc 金属に類似している。これは、 α -Ti では c/a が 1.587 であり、理想比よりもかなり小さく、非底面非 a ベクトルのすべり系が活動する¹⁶⁾¹⁷⁾ので、活動可能なすべり系の数が多いためであろうと考えられる。

タリウムは Ti と同様に同素変態を示し、505.5 K 以下で hcp ($c/a=1.598$)、高温側で bcc であるが、この金属の場合も $A^\beta/A^\alpha \approx 2.5$ であることがわかつている¹⁵⁾。したがって、 c/a が理想比よりも著しく小さい hcp 相の高温強度は、 D, G, b で規格化すると、bcc 相とあまり変わらないのが普通かもしれない。無次元係数 A の結晶系による違いを Γ の違いによるものと仮定し、高 Γ 金属に適用できると考えられる $A=A'\Gamma^{3/18}$ を用いて処理すると、 Γ^β は Γ^α よりも約 25% 大きいことに相当する。しかし、 α -Ti、 β -Ti の Γ に関する報告は見当たらないので、この推論の当否は現在のところ判断できない。

5. ま と め

市販純度の Ti 多結晶の高温引張試験を行い、実験結果に適当な補正を加えて、定常変形特性を調べた。 α -Ti、 β -Ti いずれの場合も、その高温定常変形は DORN



Solid lines: Ti⁷⁾¹¹⁾.

Broken lines: Summarized by BIRD et al.⁵⁾

Fig. 6. Relation between the normalized steady-state stress and the normalized steady-state strain-rate in pure metals.

の式によつて整理できる。すなわち、粗粒 Ti の高温定常変形は

$$\dot{\epsilon}^\alpha = 7 \times 10^4 D^\alpha (G^\alpha b^\alpha / kT) (\sigma / G^\alpha)^{4.2}$$

$$\dot{\epsilon}^\beta = 8 \times 10^4 D^\beta (G^\beta b^\beta / kT) (\sigma / G^\beta)^{4.1}$$

で示される。 α -Ti についてこれまで言われていた温度依存性の特異性は見当たらない。 α -Ti、 β -Ti とともに普通の挙動を示す。

なお、 α -Ti は hcp であつても、その規格化強度は亜鉛などより著しく低い。これは、 α -Ti では c/a が小さく、非底面非 a ベクトルすべり系が活動していることに関連するものと考えられる。

文 献

- 1) M. DONER and H. CONRAD: Metall. Trans., 4 (1973), p. 2809
- 2) A. J. GRIEST, A. M. SABROFF and P. D. FROST: Trans. ASM, 51 (1959), p. 935
- 3) H. BÜHLER und H. W. WAGENER: Bänder Bleche Rohre, 6 (1965), p. 625, 667, 668, 677
- 4) G. MALAKONDAIAH and P. RAMA RAO: Acta Metall., 29 (1982), p. 1263
- 5) J. E. BIRD, A. K. MUKHERJEE and J. E. DORN: Quantitative Relation between Properties and Microstructure, ed. by D. G. BRANDON and A. ROSEN (1969), p. 255 [Israel Univ. Press]
- 6) F. DYMENT: Titanium-80, ed. by H. KIMURA and O. IZUMI (1980), p. 519 [TMS-AIME]
- 7) 崔 明 勲, 及 川 洪: 日本金属学会誌, 49 (1985), p. 195
- 8) H. OIKAWA and M. X. CUI: Strength of

- Metals and Alloys, ed. by *H. J. MCQUEEN* et al. (1985), p. 601 [Pergamon Press]
- 9) *H. OIKAWA, N. KURIYAMA, D. MIZUKOSHI* and *S. KARASHIMA*: *Mater. Sci. Eng.*, 29 (1977), p. 131
- 10) *E. S. FISHER* and *G. J. RENKEN*: *Phys. Rev.*, 135 (1964), A 482
- 11) *H. OIKAWA, K. NISHIMURA* and *M. X. CUI*: *Scr. Metall.*, 19 (1985), p. 825
- 12) *N. E. W. de RECA* and *C. M. LIBANATI*: *Acta Metall.*, 16 (1968), p. 1297
- 13) *E. S. FISHER* and *D. DEVER*: *The Science, Technology and Application of Titanium*, ed. by *R. I. JAFFEE* and *N. E. PROMISEL* (1970), p. 373 [Pergamon]
- 14) *P. M. SARGENT* and *M. F. ASHBY*: *Scr. Metall.*, 16 (1982), p. 1415
- 15) *H. OIKAWA*: *Scr. Metall.*, 19 (1985), p. 1351
- 16) *N. E. PATON* and *W. A. BACKOFEN*: *Metall. Trans.*, 1 (1970), p. 2839
- 17) 崔 明勲, 及川 洪: 日本金属学会講演概要 (1984.4 月), p. 263
- 18) *F. A. MOHAMED* and *T. G. LANGDON*: *Acta Metall.*, 22 (1974), p. 779