

粒子分散強化したフェライト鋼における粒子サイズ分布を考慮した降伏強度の評価

北浦 知之*・飛鷹 秀幸*²・土山 聡宏*³・高木 節雄*³

Evaluation of Yield Strength Taking Account of Particle Size-distribution in Particle Dispersion Strengthened Ferritic Steel
Tomoyuki KITaura, Hideyuki HIDAka, Toshihiro TSUCHIYAMA and Setsuo TAKAKI

Synopsis : Yield strength of particle dispersion strengthened ferritic steel is discussed in consideration of the size-distribution of particles in some imaginary models with different type of size-distribution and real materials of an Fe-C alloy and Fe-oxide alloys. Estimation of the mean particle spacing (λ) using the models has revealed that λ strongly depends on the type of size-distribution: ideal distribution, nominal distribution and log-nominal distribution, and that the influence of size-distribution on λ becomes more significant with increasing size and volume fraction of particles. This means that the size-distribution has to be considered for the correct estimation of the increment in yield strength ($\Delta\sigma$) depending on particle dispersion strengthening, especially in high strengthened materials. The $\Delta\sigma$ measured for the real materials was found to be proportional to λ^{-1} regardless of the kind of particles by making an appropriate correction of the size-distribution of particles. Consequently, the increment of yield strength due to particle dispersion strengthening was described as $\Delta\sigma$ [MPa] = $64/\lambda$ [μm] in the iron-base ferritic alloys.

Key words: particle dispersion strengthening; cementite; oxide particle; mean particle spacing.

1. 緒言

鉄鋼材料において粒子分散強化は、材料の基地中に母相よりも硬質な粒子あるいは軟質な粒子を微細に分散させることで転位の運動を抑制し、それによって降伏強度や変形時の加工硬化を増大させる手法である。本手法で強化された材料の特性は第二相粒子の分散状態と関連付けて議論することが可能であり、定量的に両者の関係を表す理論が構築されている。第二相硬質粒子による粒子分散強化を説明する際、一般的に用いられる理論がOrowanモデルであり、降伏強度の増加量が粒子隙間間隔の逆数に比例することが示されている¹⁾。したがって粒子分散強化量を評価・予測するためには分散粒子の隙間間隔を正確に評価することが最も重要となる。

一般に、粒子の隙間間隔は直接的に測定できないため、分散している第二相粒子の体積率と平均直径を用いて間接的に求められることが多い。ただし、実材料中の分散粒子は真にランダムに分布しているわけではなく、厳密には基地の組織に依存した分散状態になっている。そのため幾何学的な観点から粒子の隙間間隔を近似的に与えるモデルも提案されている²⁻⁴⁾。

第二相粒子の体積率と平均直径は隙間間隔を求めるための最も重要な因子であることは言うまでも無いが、同時に

粒子の大きさのバラツキ（粒子サイズ分布）も隙間間隔の見積りに多大な影響を与える因子である。中島らは、Al-Be合金を用いた実験において、粒子サイズ分布を無視して粒子の隙間間隔を評価するとその値は過小評価され実際の半分程度の値になると報告している⁵⁾。このように隙間間隔は粒子サイズ分布に大きく影響されることが確認されているにもかかわらず、実用鋼を用いた粒子分散強化に関する研究は、隙間間隔の評価に粒子サイズ分布の影響を全く考慮していないものがほとんどである。とくに高強度材においては、隙間間隔の誤差が予想強度を大きく変動させる可能性もあり、粒子分散強化を定量評価する上で、隙間間隔におよぼす粒子サイズ分布の影響を系統的に整理することが非常に重要である。

本研究では平均粒子径と粒子サイズ分布に着目して、まず分散している第二相粒子の粒子サイズ分布の異なるモデル材料を提案し、粒子隙間間隔に及ぼす粒子サイズ分布の影響を理論的なシミュレーションにより明らかにした。その後、第二相粒子を基地中に均一分散させた試料を実際に作製して、引張試験を行い、粒子分散強化量の評価を行った。

平成17年4月20日受付 平成17年6月13日受理 (Received on Apr. 20, 2005; Accepted on June 13, 2005)

* 九州大学大学院生 (Graduate Student, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki Higashi-ku Fukuoka 812-8581)

* 2 九州大学大学院工学研究院材料工学部門 (現: 日本精工 (株)) (Department of Materials Science and Engineering, Kyushu University, now NSK Ltd.)

* 3 九州大学大学院工学研究院材料工学部門 (Department of Materials Science and Engineering, Kyushu University)

2. 試料作製および実験方法

2.1 モデル材料を用いたシミュレーション

本研究では、分散粒子の隙間間隔に及ぼす粒子径のパラツキ（サイズ分布）の影響を詳しく調査するために、経験的によく見られる幾つかの代表的な分布を採用し、粒子サイズ分布のモデルを設定した。Fig. 1は、設定した粒子サイズ分布のモデルの一例を示す。各分布の特徴は次のようになる。

- (a) 理想分布：分散している粒子のサイズがすべて等しい
- (b) 正規分布：平均粒子径と最も度数の高い階級値が等しく、平均値を中心に対称な分布
- (c) 対数正規分布：平均粒子径が最も度数の高い階級値より大きい

このような粒子サイズ分布を有するモデル材料の分散粒子の直径を1000個測定したと仮定し、このときの分散粒子の隙間間隔を評価した。

2.2 試料および熱処理

本研究では基地中に分散させる第二相粒子として炭化物（セメンタイト）および種々の酸化物を採用した。Table 1は分散粒子の種類と体積率を示す。これらの粒子は、基地である鉄と比較して十分に硬いことから、Orowanモデルに基づく粒子分散強化機構が適用できると考えられる。

炭化物分散材ではセメンタイトを基地中に均一に分散させるために、以下のようなマルテンサイト（以下 α' ）の再結晶法を用いた⁶⁾。試料は、市販のSNC415（C: 0.16%, Si: 0.45, Mn: 0.47, Ni: 0.5, Cr: 0.4）をArガス雰囲気中にて1273Kで1.8ksの溶体化処理した後油焼入し、 α' 単一組織とした。得られた α' 試料は、再結晶を促進させるために約40%の冷間圧延を施しこしたのち、塩浴炉を用いて973Kで0.6~36ksの時効処理に供し、フェライト基地中に微細な炭化物が分散した試料を得た。酸化物分散材は、以下に示すように、メカニカルミリング(Mechanical Milling; MM)粉の固化成形によって作製し、変態誘起粒成長(Transformation Assisted Grain Growth; TAGG)^{7,8)}を利用して結晶粒を粗大化させたバルク材を得た。原料粉末としては、電解鉄粉（焼鈍粉、粒度-100 mesh、純度99.9 mass%）、還元鉄粉（粒度-100 mesh、純度99.2 mass%）、高純度 Y_2O_3 微粉末（粒子径0.05 μm ）および高純度 TiO_2 微粉末を用いた。これらの粉末を用いて、目的組成；180gとなるように秤量・混合した後、直径15mmの鋼球（SUSJ2, 3.6 kg）とともにSUS304製のポット（容積1.2L）にArガスとともに充填し、振動型ボールミルを用いて720ksのMM処理を施した。なお、ボール/粉末の重量比は20である。MM処理した粉末は、真空中にて873Kで1.8ksの脱ガス処理後、直径16mm（肉厚1mm）のステンレス製パイプに充填・真空封入し、973~1073Kで厚さ約1.2mmまで熱間圧延するこ

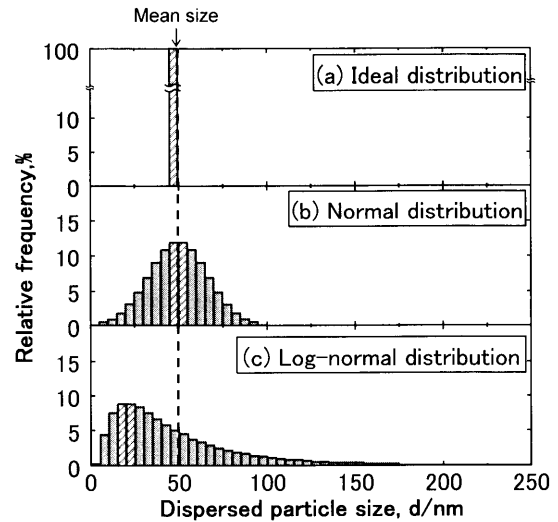


Fig. 1. Histograms showing distribution of particles in ideal models: Ideal distribution (a), Normal distribution (b) and Log-normal distribution (c). Mean particle size is set at 50 nm.

Table 1. The kind of particles and their volume fraction in the steels used in this study.

Kind of Particles	Volume Fraction of Particles
Fe_3C	0.025
Fe_3O_4	0.018
Y_2O_3	0.03
TiO_2	0.03
TiO_2	0.05
TiO_2	0.07
TiO_2	0.1

とにより、固化成形した。得られたバルク材は、1273~1573Kで1.2~3.6ksのオーステナイト（以下 γ ）化処理後空冷して、フェライト基地に微細な酸化物が分散した試料を得た。組織観察は、透過型電子顕微鏡（以下、TEM）、方位像顕微鏡（以下、OIM）を用いて行った。試料は、放電加工により切り出した後、120~1500番のエメリー紙で湿式研磨して $\phi 3 mm \times 0.1 mm$ のディスク状に加工した。ディスクはツイングジェット法による電解研磨により薄膜化し、TEM観察およびOIM観察用試料に仕上げた。引張試験は、インストロン型試験機により室温において初期歪速度； $1.67 \times 10^{-3} s^{-1}$ の条件下で行った。

3. 粒子分散強化学論と粒子隙間間隔の見積り

3.1 一般的な粒子分散強化学論^{3,9)}

Fig. 2のように、運動している転位が隙間間隔(λ)の分散粒子の間を張り出すとき、外力により転位線に働く力

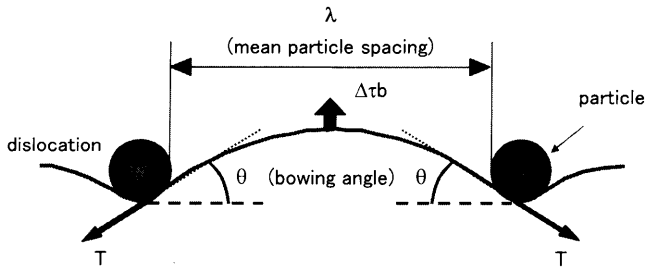


Fig. 2. Schematic illustration showing dislocation bowing-out between particles.

(F) は、進行方向では $\Delta\tau b\lambda$ となり、これが接線方向に働く線張力 ($T(=\alpha Gb^2)$) と釣り合うことから、次式が成立する。

$$\Delta\tau b\lambda = 2T \sin\theta = 2\alpha Gb^2 \sin\theta \quad (1)$$

ここで、 G は基地の剛性率、 b はバーガースベクトルであり、本研究では G 、 b としてそれぞれ、室温における基地フェライトの剛性率 (80 Ga)¹⁰⁾ および鉄原子の大きさ (0.25 nm) を用いた。また $\Delta\tau$ は有効せん断応力であり、外部から転位にかかる外部せん断応力 (τ) から転位を動かすために必要な応力 (τ_0) を差し引いた値である。(1)式より、角度 θ まで転位が張り出すために必要な有効せん断応力は、次式で与えられる。

$$\Delta\tau = \tau - \tau_0 = \frac{2\alpha Gb}{\lambda} \sin\theta \quad (2)$$

(2)式より、有効せん断応力は、張り出し角度が大きくなるとともに大きくなり、 $\theta = \pi/2$ で最大値となる。この最大有効せん断応力が、粒子間を通過するために必要な応力、すなわち Orowan 応力 ($\Delta\tau_{or}$) であり、それは次式で与えられる。

$$\Delta\tau_{or} = \frac{2\alpha Gb}{\lambda} \quad (3)$$

ここで BCC 鉄では、 $\sigma \approx 2\tau$ と近似できるので¹¹⁾、実際の粒子分散強化量 ($\Delta\sigma_{or}$) は次式で表される。

$$\Delta\sigma_{or} = \frac{4\alpha Gb}{\lambda} = \beta \frac{Gb}{\lambda} \quad (\beta = 4\alpha) \quad (4)$$

(4)式より Orowan 機構に基づく粒子分散強化量は粒子隙間間隔の逆数に比例し、分散粒子の種類には依存しないことがわかる。

3.2 分散粒子の隙間間隔 (λ) の見積り^{3,12)}

Fig. 3(a) は、単位体積中 (1 m^3) に直径 d_p の同じ大きさの球状粒子が無秩序に分布 (理想分布) している状態を示す。Fig. 3(b) のように、一枚のすべり面が分散粒子を切断する状況を考えて、粒子一個の体積は $\pi d_p^3/6$ なので、単位体積あたりに存在する全粒子数 (N_v) は分散粒子の体積率 (V_p) を用いて次式で表される。

$$N_v = 6V_p/(\pi d_p^3) \quad (5)$$

ここですべり面に切断される粒子は、粒子の中心がすべり面から $\pm d_p/2$ の範囲にあるものに限られる。このすべり面では Fig. 3(c) に示されるような組織が現れ、結局すべり面上を含む厚さの体積中に存在する粒子だけが、すべり面上を運動する転位に影響を与えることとなる。Fig. 3(b) のように単位高さの物体中に直径 d_p の球が存在するとき、任意のすべり面がその球を切る確率は $d_p/1$ である。粒子が単位体積あたりに N_v 個あり、これを任意の面でせん断するとき、その面と交わる粒子の個数は単位体積あたり $d_p N_v$ となる。切断面上の単位面積あたりの粒子数を N_s とすると、

$$N_s = d_p N_v \quad (6)$$

となり、(5)を用いて、

$$N_s = 6V_p/(\pi d_p^2) \quad (7)$$

と表される。

平均的な λ の値は、Fig. 3(d) のようにすべり面上にランダムに分布した粒子を正方形の形に再配置し、粒子の分布間隔 (\bar{L}_s) と観察される粒子切断面の平均直径 (\bar{d}_s) から以下のように求める。まず、 \bar{L}_s は幾何学的に $\bar{L}_s = 1/\sqrt{N_s}$ となり、(7)式より d_p と V_p の関数として次式で与えられる。

$$\bar{L}_s = \{\pi/(6V_p)\}^{1/2} d_p \quad (8)$$

ここで粒子がランダムに分布している場合、平均粒子間距離 (\bar{L}_s) は \bar{L}_s の約 1.25 倍になることが知られている¹³⁾。 \bar{L}_s は (8)式を用いて、

$$\bar{L}_s = 1.25 \{\pi/(6V_p)\}^{1/2} d_p \approx 0.9V_p^{-1/2} d_p \quad (9)$$

と表される。一方 Fig. 3(d) に示すようにすべり面で転位に影響を及ぼす粒子切断面の大きさは一定でないため、その影響を考える必要がある。直径 (d_p) の粒子をある面で切断した場合、断面上に現れる粒子の平均直径 (\bar{d}_s) は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \bar{d}_s &= \frac{2}{d_p} \int_0^{d_p/2} d_s dx = \frac{2}{d_p} \int_0^{d_p/2} 2 \sqrt{\left(\frac{d_p}{2}\right)^2 - x^2} dx \\ &= d_p \int_0^{\pi/2} \sin^2 \theta d\theta = \frac{\pi}{4} d_p \approx 0.8d_p \quad (10) \end{aligned}$$

ここで、 $\lambda = \bar{L}_s - \bar{d}_s$ の関係から、

$$\lambda = \left[1.25 \{\pi/(6V_p)\}^{1/2} - \frac{\pi}{4} \right] d_p \approx (0.9V_p^{-1/2} - 0.8) d_p \quad (11)$$

と求めることができる。(11)式からわかるように粒子径が一定でバラツキがない場合、分散粒子の隙間間隔は粒子平均直径および体積率を用いて見積もられる。

ところで実在する材料において、Fig. 3(a) のように同じ

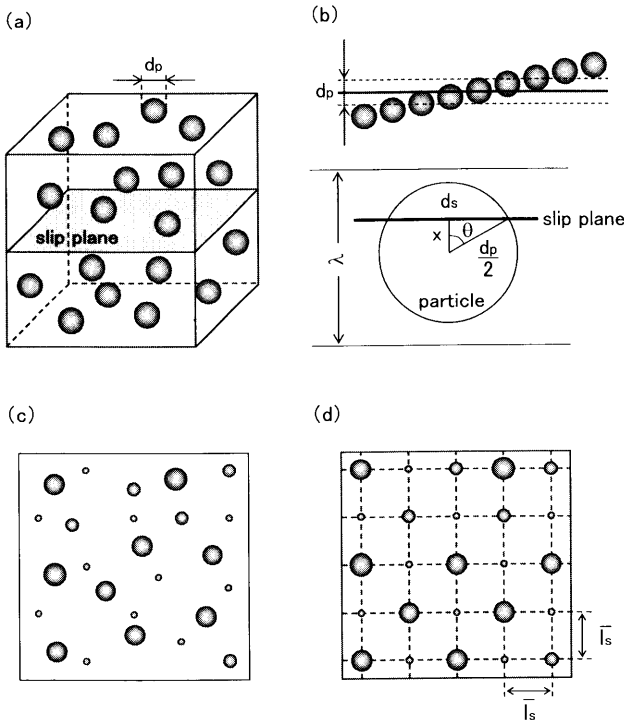


Fig. 3. Schematic illustrations showing the square particle distribution model.

大きさの粒子が分散することは極めて稀であり、ほとんどの場合、大きさにバラツキが存在する。そのため中島らは、正方分布モデルをさらに発展させて分散粒子のサイズ分布を考慮に入れた評価法を提案しており、この場合粒子径のバラツキを考慮に入れた隙間間隔は次式で与えられる^{5,12)}。

$$\lambda = \left(1.25 \sqrt{\frac{\pi}{6V_p} \frac{\overline{d_p^3}}{\overline{d_p}}} \right) - \frac{\pi}{4} \frac{\overline{d_p^2}}{\overline{d_p}} \dots\dots\dots(12)$$

ここで、 d_p は分散粒子の直径であり、 $\overline{d_p}$ 、 $\overline{d_p^2}$ 、 $\overline{d_p^3}$ はそれぞれ d_p 、 d_p^2 、 d_p^3 の平均である。

4. 結果および考察

4.1 粒子隙間間隔の見積もりに及ぼすサイズ分布の影響

第二相粒子が基地中に均一に分散している場合、粒子隙間間隔の評価に影響をおよぼす因子としては、前掲した(11)、(12)式に示されるように分散粒子の平均直径、体積率およびサイズ分布の3つが挙げられる。Fig. 4は、第二相粒子の平均直径および体積率は同一であるがサイズ分布がそれぞれ理想分布、正規分布、対数正規分布と異なる場合の平均隙間間隔を示す。平均粒子径および体積率はそれぞれ50 nm、0.05と設定している。サイズ分布を無視した場合、隙間間隔は分布状態にかかわらず常に一定で、理想分布した場合と同じ値 ($\lambda \approx 160$ nm, 破線) となる。つまり、サイズ分布を無視して隙間間隔を評価すると、自動的

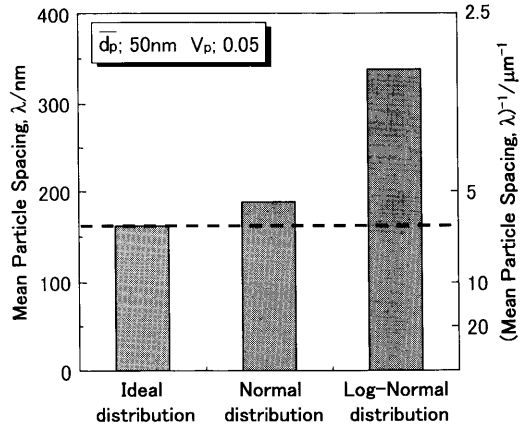


Fig. 4. Mean particle spacing calculated for each distribution model. Mean particle size and volume fraction are set at 50 nm and 0.05, respectively.

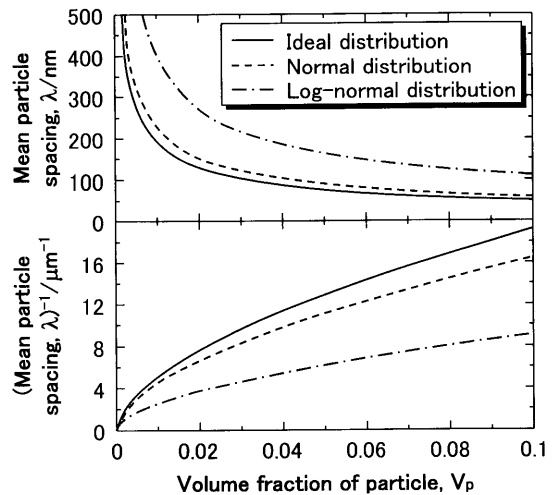


Fig. 5. Mean particle spacing and reciprocal of mean particle spacing as a function of volume fraction of particles in each distribution model. Mean particle size is set at 25 nm.

に粒子径は理想分布していると仮定していることになる。一方、サイズ分布を考慮した場合、隙間間隔は分布状態によって異なり、サイズ分布を無視した場合との間に大きな差異を生ずる。とくに対数正規分布している場合では、隙間間隔はサイズ分布を無視した場合の2倍程度にまで大きくなるのがわかる。Fig. 5は、平均粒子径を25 nmに固定した場合の粒子隙間間隔と隙間間隔の逆数に及ぼす体積率の影響を示す。いずれの分布状態においても隙間間隔は体積率の増加にともない減少し、これに対応して隙間間隔の逆数は増加する。ただし、隙間間隔の逆数はサイズ分布に依存して大きく異なり、対数正規分布している場合では理想分布している際の半分程度の値となる。一方Fig. 6は、体積率を0.05に固定した場合の粒子隙間間隔、隙間間隔の逆数に及ぼす平均粒子径の影響を示す。いずれの分布状態においても、平均粒子径の減少にともない隙間間隔は減少し、隙間間隔の逆数は増加していく。また隙間間隔は体積率が変化する場合と同様に対数正規分布している際に最も

大きくなる。以上のように、サイズ分布の考慮の有無によって、見積られる粒子隙間間隔は大きく変化し、とくに分散粒子の体積率が大きい場合もしくはサイズの小さい場合に粒子隙間間隔の見積りにおよぼすサイズ分布の影響が大きいことがわかる。すなわち高強度の材料ほど粒子隙間間隔の評価を慎重に行う必要があることをこの結果は示唆している。

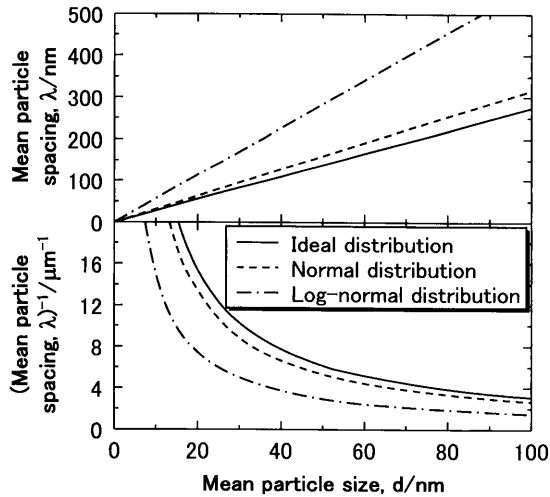


Fig. 6. Mean particle spacing and reciprocal of mean particle spacing as a function of mean particle size in each distribution model. Volume fraction of particles is set at be 0.05.

4.2 供試材の内部組織

Fig. 7は、本研究で作製した炭化物分散材、酸化物分散材の代表的なOIM組織およびTEM組織の一例を示す。なおOIM組織中の黒線は、EBSP法による方位測定結果より得られた方位差 15° 以上の粒界を示している。いずれの試料においても結晶粒は等軸状であり、顕著な集合組織の発達は見られない。なお、本研究で用いた試料の平均結晶粒径は熱処理過程に依存して若干異なり、 $20\sim 60\mu\text{m}$ であった。フェライト鉄におけるHall-Petchの関係¹⁴⁾から結晶粒微細化強化の寄与の差を見積もると、最大でも50MPaと予想された。また、結晶粒微細化強化と粒子分散強化の相互作用については研究者により意見が異なり、未だ不明な点が多いが^{15,16)}、本研究で用いた供試材における結晶粒径の範囲では、結晶粒径の影響は少ないものと仮定して議論する。一方、分散粒子はいずれの試料においても球状で母相基地中に均一に分布しており、別視野の観察により粒界等に優先析出していないことを確認している。Fig. 8は、TEM組織より測定した炭化物分散材における粒子直径のヒストグラムを示す。時効時間が最も短い0.6ks時効材 (Fig. 8(a)) では最多頻度の階級値と平均粒子径に若干の差が見受けられるものの、その差は時効時間の経過にともない小さくなり、36ks時効材 (Fig. 8(c)) において最多頻度の階級値と平均粒子径はほぼ同一の値となる。Fig. 1に示した分散粒子径の分布モデルと比較すると、時効時間が短い場合には、正規分布と対数正規分布の中間の分布状態とな

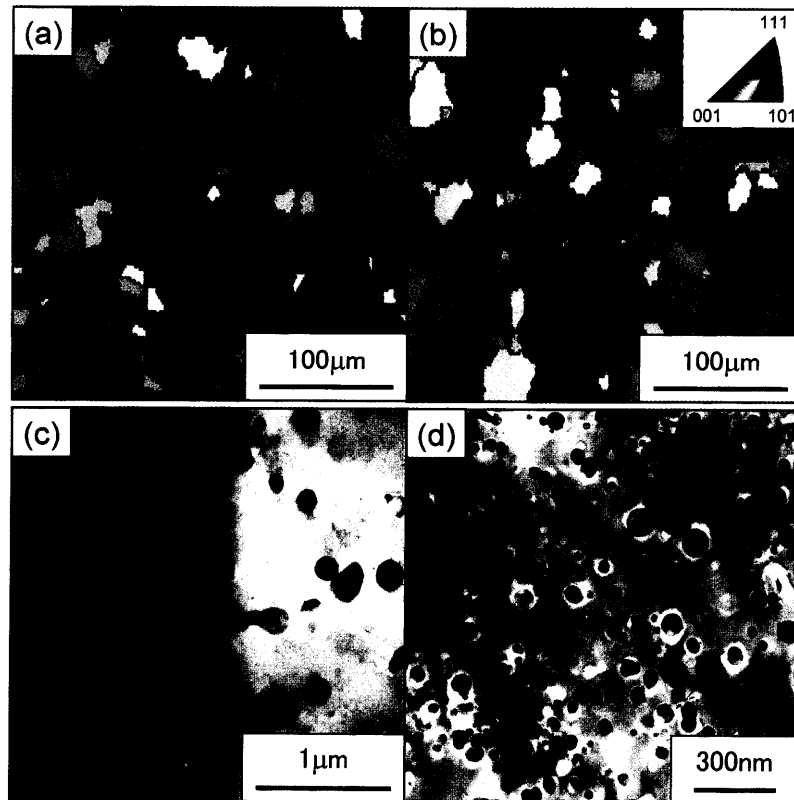


Fig. 7. (a), (c) OIM and TEM images of the carbide dispersion steel annealed at 973K for 36 ks and (b), (d) 5 vol% TiO_2 dispersion steel annealed at 1473K for 3.6 ks.

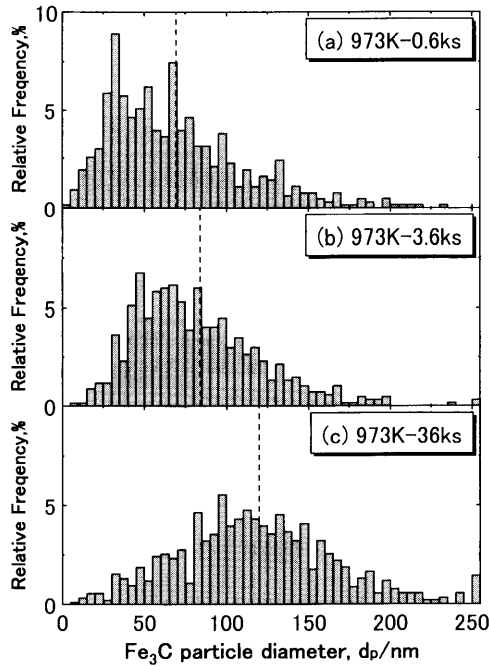


Fig. 8. Histograms showing the distribution of diameter of cementite particles in the carbide dispersion steels annealed at 973K for different times: 0.6 ks (a), 3.6 ks (b) and 36 ks (c).

るが、時効処理の経過とともに炭化物はオストワルド成長し、サイズ分布は正規分布に近づいていくことがわかる。同様に Fig. 9は、酸化物分散材の一例として Fe-10vol% TiO₂ 合金を種々の温度で 3.6ks 焼鈍した試料における分散粒子直径のヒストグラムを示す。いずれの試料においても最多頻度の階級値と平均粒子径に大きなずれが生じている。他の酸化物分散材においても同様の傾向がみられ、酸化物分散材における粒子径の分布状態は Fig. 1 に示した対数正規分布に近い傾向を示した。

4.3 第二相粒子による粒子分散強化量

本研究では、粒子分散強化量を各試料の 0.2% 耐力から十分に焼鈍した純鉄の 0.2% 耐力 (108 MPa) を引いた値とした。Fig.10 は、室温での粒子分散強化量を粒子隙間間隔の逆数で整理した結果である。なお黒色および白色のプロットは、それぞれ粒子サイズ分布を考慮して隙間間隔を評価した場合、およびそれを無視して評価した場合の結果を示している。隙間間隔の逆数はサイズ分布を無視した場合と比較して全体的に小さくなり、図中のプロット位置は左側に遷移している。またその遷移量は鋼種や強度レベルにより異なり、高強度材で最も顕著であることがわかる。これは Fig. 8, Fig. 9 に示したように、粒子径の分布状態は炭化物分散材では正規的な分布をしているのに対し、酸化物分散材では対数正規的に分布していることに起因している。この結果から明らかなように、平均の隙間間隔によって粒子分散強化量を見積る手法では、粒子のサイズ分布によって見積られる Orowan 応力に大きな差異が生ずることになるので、粒子分散強化材の降伏強度を粒子の分散状態と関

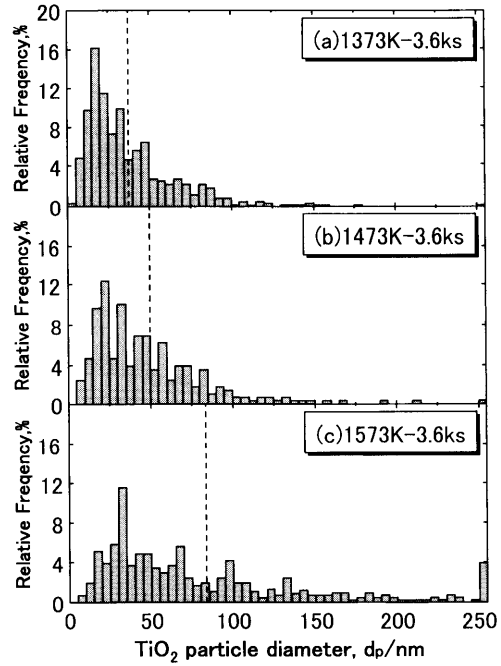


Fig. 9. Histograms showing the distribution of diameter of TiO₂ particles in the oxide dispersion steels (10 vol% TiO₂) annealed at 1373K (a), 1473K (b) or 1573K (c) for 3.6 ks.

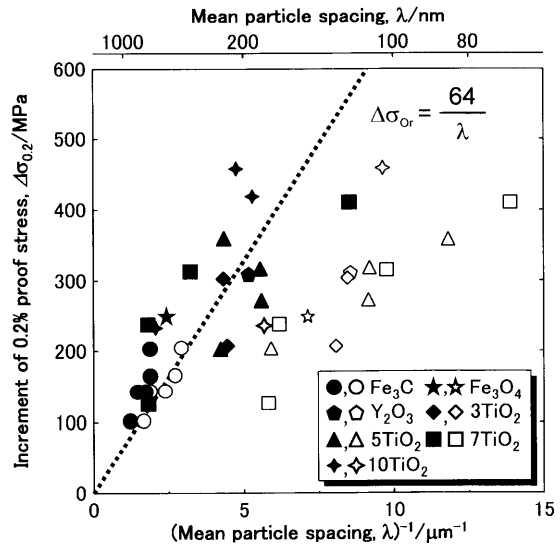


Fig. 10. Relation between 0.2% proof stress and inverse of mean particle spacing in the carbide and oxide dispersion steels. The plots of solid or open are the data with or without correction of particle dispersion, respectively.

連付けて議論する際には、粒子のサイズ分布を考慮に入れた(12)式を用いて Orowan 応力を評価するべきである。なお、Fig.10 に示した直線の傾きより、鉄鋼材料における粒子分散強化量はおおよそ次式で与えられると考えて良いであろう。

$$\Delta\sigma_{Or} [\text{MPa}] = 64/\lambda [\mu\text{m}] \dots \dots \dots (13)$$

(13)式を(4)式と比較することにより粒子分散係数 β を求

めると3.2という値が得られ、線張力の係数 α は0.8となる。一方、転位論から導出される転位の線張力の係数が0.5~1とされていることから^{4,17)}、本研究で得られた実験結果は概ね妥当と考えられる。ただし、図からわかるように、サイズ分布を考慮しても降伏強度の評価に依然として大きなバラツキがある。その理由として分散粒子径の測定誤差やカウント数不足などが挙げられるが、実際には粒子分散の不均一性もあるので、この程度のバラツキはやむを得ないと思われる。

5. 結言

室温における粒子分散強化量におよぼす粒子のサイズ分布の影響について検討した結果、見積もられる分散粒子の隙間間隔は粒子のサイズ分布状態によって大きく異なることが明らかとなった。この影響は対数正規分布のようにサイズ分布の不均一性が増すにつれて大きくなり、とくに、分散粒子の体積率が大きく、平均分散粒子径が小さい高強度材ほど顕著になる。室温での粒子分散強化量は、分散粒子のサイズ分布を補正して得た粒子間の隙間間隔(λ)の関数として、 $\Delta\sigma_o$ [MPa]= $64/\lambda$ [μm]で与えられる。

なお本研究の一部は、日本鉄鋼協会戦略的研究課題（平

成15年度-16年度）として実施されたものであり、研究助成に対して感謝の意を表します。

文 献

- 1) E.Orowan: Discussion in The Symposium on Internal Stresses in Metals and Alloys, Inst. Metals, London, (1948), 451.
- 2) 木村 宏: 材料強度の考え方, アグネ, 東京, (1998), 318.
- 3) S.Takaki: *Materia Jpn.*, **36** (1997), 675.
- 4) 高木節雄: 鉄鋼の析出制御メタラジー最前線, 日本鉄鋼協会, 東京, (2001), 69.
- 5) H.Nakashima and H. Yoshinaga: *Tetsu-to-Hagané*, **77** (1991), 1399.
- 6) S.Takaki, T.Iiduka, H.Tomimura and Y.Tokunaga: *J. Jpn. Inst. Met.*, **55** (1991), 1151.
- 7) Y.Kimura and S.Takaki: Proc. 1998 PM World Congress and Exhibition, Granada, Spain, **1** (1998), 573.
- 8) K.Kawasaki and S.Takaki: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 18.
- 9) K.Nakashima, Y.Futamura, T.Tsuchiyama and S.Takaki: *Tetsu-to-Hagané*, **89** (2003), 524.
- 10) 技術資料金属材料の弾性係数, 日本機械学会, 東京, (1998), 43.
- 11) G.I.Taylor: *J. Inst. Met.*, **62** (1938), 307.
- 12) 中島英治著, 丸山公一編著: 高温強度の材料科学, 内田老鶴圃, 東京, (1997), 80.
- 13) A.J.E.Foreman and M.J.Makin: *Philos. Mag.*, **14** (1966), 911.
- 14) S.Takaki: *J. Jpn. Soc. Heat Treat.*, **40** (2000), 292.
- 15) H.Tsubakino: *J. Jpn. Soc. Heat Treat.*, **39** (1999), 227.
- 16) K.Masaharu: *J. Jpn. Soc. Heat Treat.*, **42** (2002), 169.
- 17) A.J.Ardell: *Metall. Trans. A*, **16A** (1985), 213.