

超微細フェライト-セメンタイト鋼の静的引張特性

土田 紀之*・友田 陽*²・長井 寿*³

Tensile Properties Obtained by Static Tensile Tests in Ultrafine-grained Ferrite-Cementite Steels

Noriyuki TSUCHIDA, Yo TOMOTA and Kotobu NAGAI

Synopsis : We conducted static tensile tests below room temperature for ultrafine-grained ferrite-cementite (FC) steels with ferrite grain sizes between 0.47 and 1.5 μm . The change in flow stress (σ) for the FC steels as a function of ferrite grain size (D) follows the Hall-Petch equation: $\sigma = \sigma_0 + kD^{-1/2}$, where σ_0 and k are constants. The effects of temperature and strain rate on flow stress for the FC steels are scarcely influenced by ferrite grain size and the effect of ferrite grain size on flow stress is almost independent of temperature and strain rate. When the results of the FC steels are compared with those of the ferrite-pearlite (FP) steels, little difference is found in the effects of temperature and strain rate on flow stress. However, the effect of ferrite grain size on flow stress and the work-hardening rate are different from each other.

Key words: ultrafine-grained steel; low carbon steel; static tensile test; temperature; strain rate; ferrite grain size.

1. 緒言

鉄鋼材料の変形応力は、結晶粒の微細化により増大する¹⁾。この関係は、以下に示すホール・ペッチの式を用いて記述することができる。

$$\sigma = \sigma_0 + kD^{-1/2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 σ は変形応力、 D はフェライト結晶粒径、 σ_0 、 k はそれぞれ定数を示す。結晶粒微細化による変形応力の変化については、過去に多くの研究が行われている^{2,3)}。最近では、従来作製が困難とされてきたフェライト粒径5 μm 以下の微細粒鋼^{4,5)}だけでなく、2 μm 以下の超微細粒鋼についての研究が行われている⁶⁻¹⁴⁾。

我々は超微細粒鋼の変形特性を明らかにするため応力-ひずみ曲線に注目し、常温以下で種々のひずみ速度において引張試験を行っている。塑性変形機構をひとつの熱活性化過程に基づいて考えると、ひずみ速度を高くすることと温度を低くすることは等価である。例えばJIS-SUS310S鋼の場合¹⁵⁾、296K、 10^3s^{-1} での引張試験と165K、 10^{-4}s^{-1} の試験とはほぼ等価である。現在までに我々は、粒径の影響を調べるために平均フェライト結晶粒径(D)が3.6、9.8、46.2 μm のフェライト-パーライト(FP)鋼を作製し、常温以下において静的ならびに高速引張試験を行った^{4,5)}。得られた結果から加工硬化率、変形応力に及ぼす温度、ひずみ速度、フェライト粒径の影響を検討した。それより、検討したフェライト粒径範囲においてはFP鋼の変形応力に及ぼす温度とひずみ速度の影響はフェライト粒径によらず等

しく、また、変形応力に及ぼすフェライト粒径の影響は温度やひずみ速度に依存しないことがわかった。また、微細FP鋼は高速変形においても優れた強度-延性バランスを示した。

ところで低炭素鋼の場合、フェライト粒径を2 μm 以下に微細化すると、パーライト組織が存在できなくなり、フェライト-セメンタイト鋼(FC)鋼へと変わることが明らかとなっている^{9,10,16)}。フェライト粒径が2 μm 以下の超微細になるだけでなく、第二組織がパーライトからセメンタイトに変わり、その体積率が低下する。これらの変化が変形挙動にどのように影響を及ぼすかは大変興味深いのが、今までにこの点を系統的に調べた例は見当たらない。

本研究では、前述したFP鋼と同じSM490相当鋼より粒径2 μm 以下でフェライト粒径の異なる超微細FC鋼を作製し、常温以下における静的引張試験を行った。これらの結果よりFC鋼の引張特性について整理を行うとともに、塑性変形域における加工硬化率、変形応力に及ぼす温度、ひずみ速度、フェライト粒径の影響について検討した。一方でFP鋼の結果と比較を行い、超微細FC鋼の変形挙動について考察を行った。

2. 実験方法

JIS-SM490相当鋼(0.15C-0.3Si-1.43Mn-0.009P-0.001S (mass%))よりフェライト粒径の異なる4種類のFC鋼を作製した。まず、1173Kにおいて3.6ks保持後、773Kにおいて減面率91%の圧延を行い、その後723Kにおいて減面率

平成15年5月12日受付 平成15年7月22日受理 (Received on May 12, 2003; Accepted on July 22, 2003)

* 日本学術振興会 (Japan Society for the Promotion of Science, 1-2-1 Sengen Tsukuba 305-0047)

*2 茨城大学工学部 (Faculty of Engineering, Ibaraki University)

*3 物質・材料研究機構超鉄鋼研究センター (Steel Research Center, National Institute for Materials Science)

43.8%圧延を施した後水冷し、18 mm角の棒材を得た。これを、743Kおよび773Kにおいてそれぞれ1時間保持後水冷することにより、 $D=0.47$ および $0.7\ \mu\text{m}$ のFC鋼を得た。また、同じく1173Kにおいて3.6ks保持後、1043Kにおいて減面率40%の圧延を行い、その後823Kにおいて減面率91%圧延を行い、さらに723Kにおいて減面率43.8%の圧延を施した後水冷し、別の18 mm角の棒材を得た。これを723Kにおいて1時間保持後水冷した。これより $D=1.1\ \mu\text{m}$ のFC鋼を得た。さらに、1173Kで3.6ks保持後、973Kに

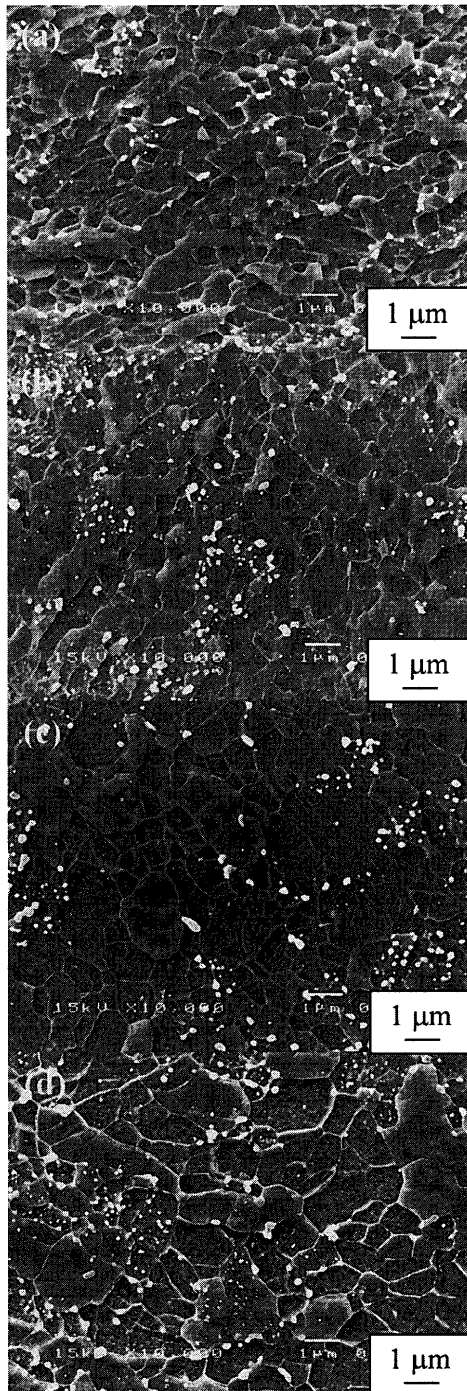


Fig. 1. SEM micrographs of ferrite-cementite steels used in this study; (a) $D=0.47\ \mu\text{m}$, (b) $D=0.7\ \mu\text{m}$, (c) $D=1.1\ \mu\text{m}$, and (d) $D=1.5\ \mu\text{m}$.

において減面率45.8%圧延を加えた後、823Kにおいて減面率89.8%の圧延後水冷することで、 $D=1.5\ \mu\text{m}$ の棒材を得た。本研究で用いた、4種類のFC鋼の縦断面組織のSEM写真をFig. 1に示す。

得られたFC鋼材より、直径3.5 mm、平行部長さ25 mmの丸棒試験片を作製した。ギア駆動式引張試験機を用いて、296K（常温）、210K（低温アルコール）、77K（液体窒素）の3種類の温度にて、ひずみ速度 $10^{-6}\sim 10^{-2}\ \text{s}^{-1}$ における引張試験を行った。引張試験の際には、試験片に20 mmの伸び計を装着し伸びを測定した。

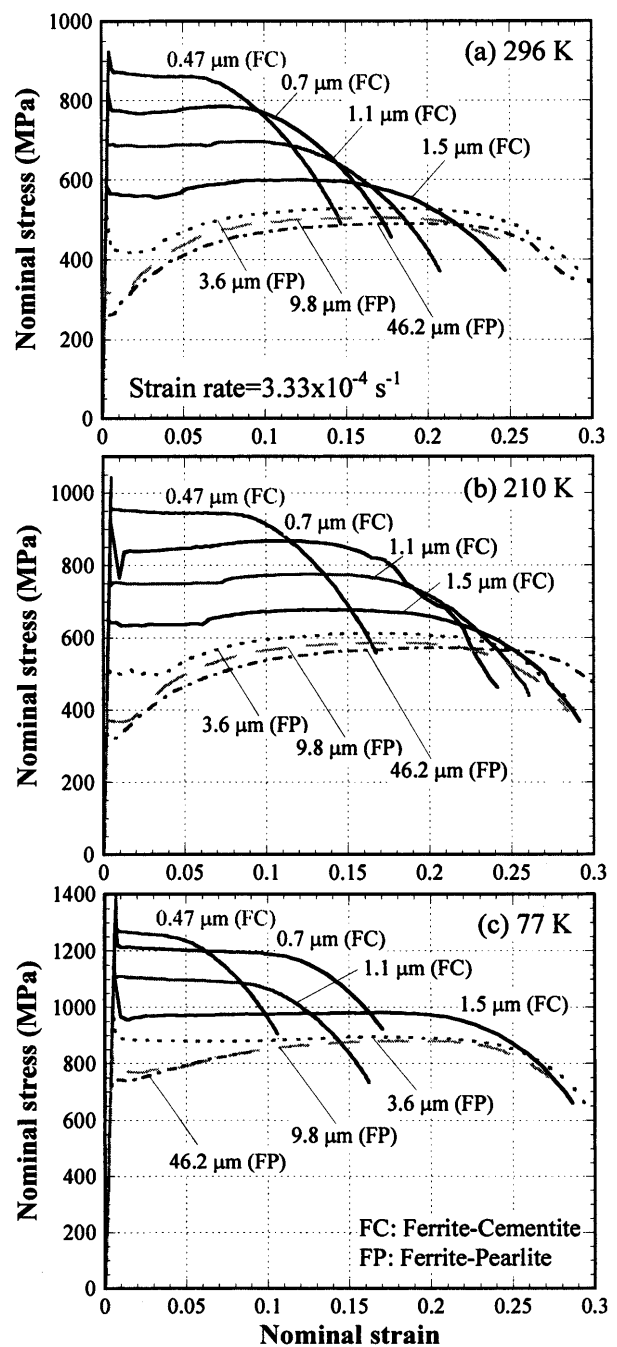


Fig. 2. Nominal stress-nominal strain curves of the ferrite-cementite (FC) steels and the ferrite-pearlite (FP) steels⁴⁾ at 296K (a), 210K (b), and 77K (c).

Table 1. Mechanical properties of the ferrite–cementite steels and the ferrite–pearlite steels⁴⁾ obtained by static tensile tests (Initial strain rate= $3.33 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$).

D (μm)	T (K)	LYS (MPa)	TS (MPa)	U.El (%)	T.El (%)
0.47	296	870	880	—	14.7
	210	952	956	—	16.8
	77	1265	1288	—	9.8
0.7	296	770	784	7.6	17.8
	210	840	867	10.8	24.2
	77	1200	1214	—	17.1
1.1	296	682	699	9.1	17.8
	210	750	756	12.8	26.1
	77	1100	1109	—	16.2
1.5	296	550	600	12.3	25.0
	210	633	678	13.8	27.3
	77	970	982	16.9	27.3
3.6	296	430	541	15.1	27.0
	210	500	613	16.8	28.8
	77	935	952	16.7	25.0
9.8	296	315	504	17.6	28.6
	210	380	591	20.5	32.8
	77	770	881	18.8	24.6
46.2	296	260	489	20.2	29.2
	210	320	567	20.3	31.2
	77	740	843	9.4	10.0

D: Ferrite grain size, T: Temperature
 LYS: Lower yield stress, TS: Tensile strength,
 U.El: Uniform elongation, T.El: Total elongation

3. 実験結果

3.1 応力-ひずみ曲線の特徴

Fig. 2に296, 210, 77Kにおける初期ひずみ速度 $3.33 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ での公称応力-ひずみ曲線をそれぞれ示す。この図には、別途得られた $D=3.6, 9.8, 46.2 \mu\text{m}$ のFP鋼の公称応力-ひずみ曲線⁴⁾もあわせて示した。Table 1には、初期ひずみ速度 $3.33 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ で得られた引張特性を整理した。

各温度において、フェライト粒微細化により変形応力は増大し、均一伸びや全伸びは減少した。各温度での局所伸びは、フェライト粒径によらずほぼ一定の値を示した。フェライト粒径 $0.47 \mu\text{m}$ のFC鋼はすべての温度において降伏点降下後荷重はなだらかに減少し、均一伸びはほとんど得られなかった。 $D=0.7, 1.1 \mu\text{m}$ のFC鋼の場合、77Kで同様の傾向を示した。ひずみ速度の影響を調べたところ、データを示すことは割愛するが296K, $3.33 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ の条件では、局所伸びと全伸びが他の条件と比べて小さかった。これは常温、低ひずみ速度において、動的ひずみ時効が影響している¹⁷⁾ためと考えられる。

すべての公称応力-ひずみ曲線において、上降伏応力と下降伏応力が観察された。Fig. 3には、FC鋼とFP鋼で得られた上降伏応力(σ_{UYS})と下降伏応力(σ_{LYS}) (どちらも公称応力)を、フェライト粒径の $-1/2$ 乗($D^{-1/2}$)に対して整理した。 σ_{UYS} は粒径によるばらつきが σ_{LYS} と比べて大きい、どちらも(1)式で整理することができ、このとき(1)式における傾き k は温度によらず等しいと判断できる。

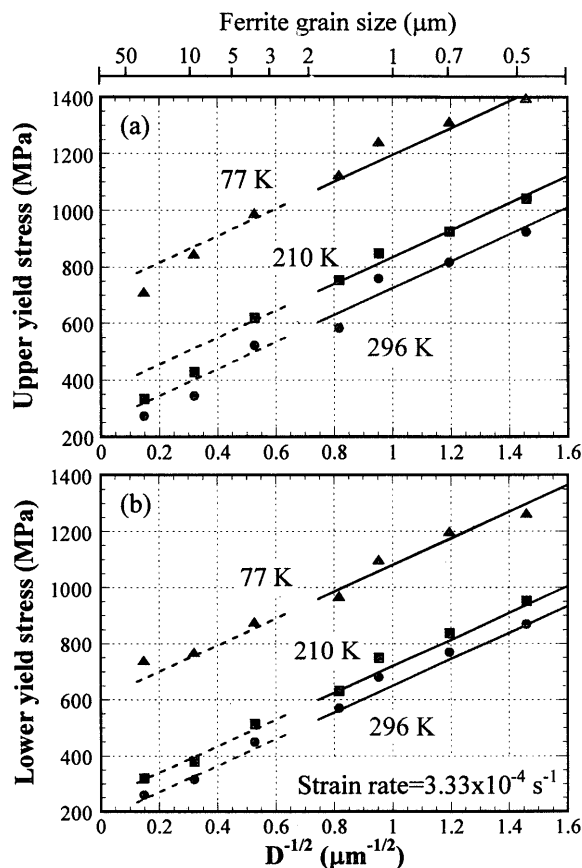


Fig. 3. Upper and lower yield stresses (nominal stress) as a function of inverse square root of ferrite grain size for the ferrite–cementite steels (solid lines) and the ferrite–pearlite steels (dashed lines) at 296, 210, and 77K: (a) upper yield stress and (b) lower yield stress.

σ_{UYS} ならびに σ_{LYS} を、 k を一定値として以下のように整理した。

$$\begin{aligned}
 296\text{K} : \sigma_{\text{UYS}} &= 250 + 475D^{-1/2} \quad (R^2=0.965) \dots\dots\dots (2) \\
 210\text{K} : \sigma_{\text{UYS}} &= 360 + 475D^{-1/2} \quad (R^2=0.956) \dots\dots\dots (3) \\
 77\text{K} : \sigma_{\text{UYS}} &= 720 + 475D^{-1/2} \quad (R^2=0.966) \dots\dots\dots (4) \\
 296\text{K} : \sigma_{\text{LYS}} &= 175 + 475D^{-1/2} \quad (R^2=0.986) \dots\dots\dots (5) \\
 210\text{K} : \sigma_{\text{LYS}} &= 245 + 475D^{-1/2} \quad (R^2=0.987) \dots\dots\dots (6) \\
 77\text{K} : \sigma_{\text{LYS}} &= 605 + 475D^{-1/2} \quad (R^2=0.966) \dots\dots\dots (7)
 \end{aligned}$$

ここで R^2 は決定係数（詳細は文献18を参照）を示し、 D の単位は μm である。いずれの場合も $R^2 \geq 0.95$ が得られており、 k を一定値としても予測精度は問題ないと考えられる。Fig. 4には、現在までに報告されている微細鋼・超微細鋼の降伏応力の粒径依存性を本結果も含めて整理した。降伏応力の粒径依存性については、材料により多少の違いは見られるもののすべて $D^{-1/2}$ に対して同じ傾きで整理することができる。

特徴的な現象として、いくつかのFC鋼においてFP鋼同様変形初期にリュウダース伸びが観察された。粒径微細化もしくは温度低下に伴いリュウダース伸びは増大する傾向を示した。しかし、 $D=0.47, 0.7 \mu\text{m}$ のFC鋼の各温度、もしくはすべてのFC鋼の77Kでは、リュウダース変形中に塑性不安定条件を満足したと思われ、降伏点降下後もしくはリュウダース変形中に荷重はなだらかに低下した。

3.2 変形応力に及ぼす温度、ひずみ速度とフェライト粒径の影響

次にFC鋼の塑性変形域での変形応力に及ぼす温度、ひずみ速度とフェライト粒径の影響について述べる。ここで

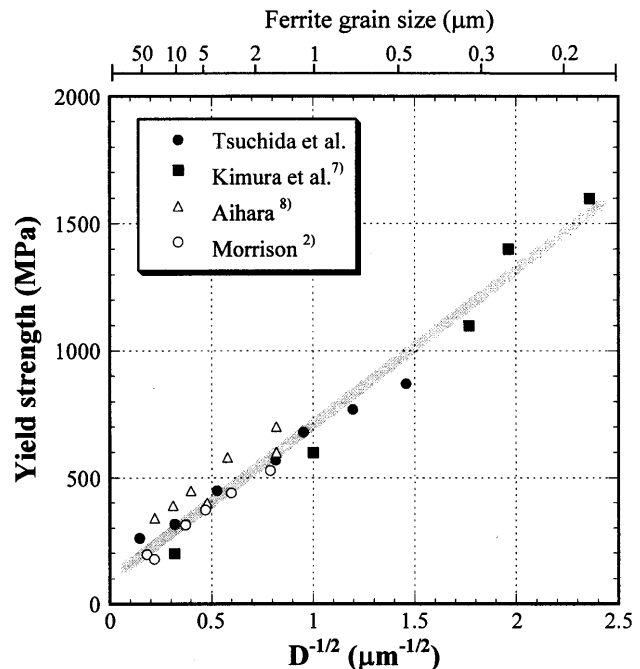


Fig. 4. Yield strength (lower yield stress) as a function of inverse square root of ferrite grain size for various steels^{2,7,8)} at 296K.

は、リュウダース変形領域後の均一変形における変形応力について議論するため、ひずみ7%の変形応力($\sigma_{0.07}$)を取り上げる。また、 $D=0.47 \mu\text{m}$ のFC鋼については、Fig. 2に示したようにほとんど加工硬化しなかったため、ここでの検討においては対象外とした。

3.2.1 温度依存性

Fig. 5(a)に3種類のFC鋼における試験温度に対する $\sigma_{0.07}$ を示す。77Kでは、唯一加工硬化が認められた $D=1.5 \mu\text{m}$ のみ $\sigma_{0.07}$ が得られた。また、FP鋼との比較のために $D=9.8 \mu\text{m}$ のFP鋼の結果も示した。この図からFC鋼、FP鋼によらず温度による変形応力の変化はほぼ等しいと判断できる。Fig. 5(b)は、296Kの変形応力を基準として各温度での変形応力の増分を示したものである。これからもFC鋼とFP鋼の変形応力の温度による変化量はほぼ等しいことがわかる。このように、FC鋼の変形応力の温度依存性はフェライト粒径によらず等しく、また、FC鋼とFP鋼の温度依存性もほぼ等しいと判断することができる。

3.2.2 ひずみ速度依存性

Fig. 6に、210Kでの $\sigma_{0.07}$ をひずみ速度に対して整理した。傾きが等しいことから、ひずみ速度による変形応力の変化は粒径によらずほぼ等しいと判断できる。ところで変形応力は、ひずみ速度($\dot{\epsilon}$)の関数として以下のように記述できる。

$$\sigma = A + B(\log \dot{\epsilon}) \dots\dots\dots (8)$$

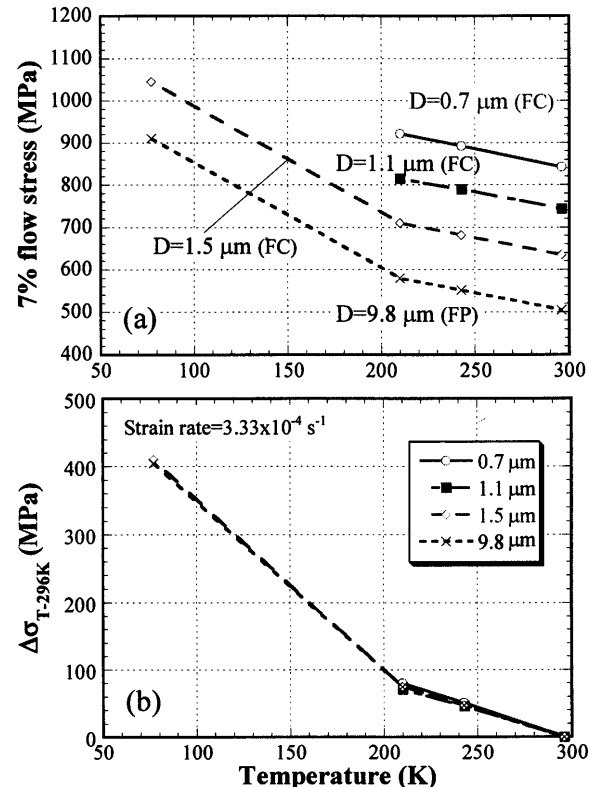


Fig. 5. Changes in 7% flow stress as a function of test temperature for the ferrite-cementite (FC) steels and the ferrite-pearlite (FP) steels.

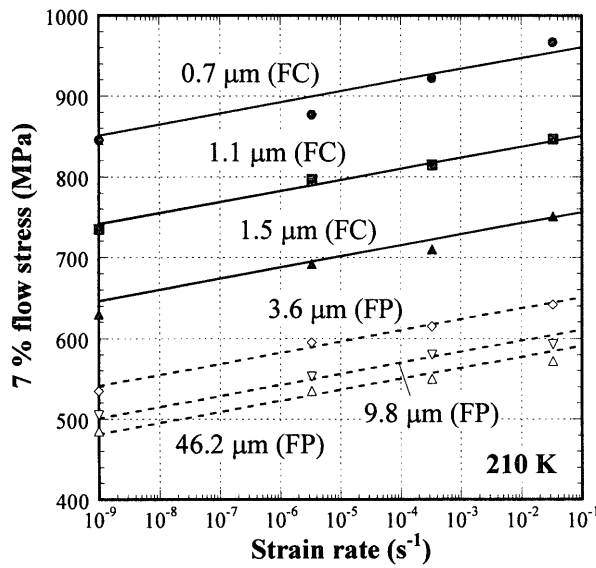


Fig. 6. Changes in 7% flow stress as a function of strain rate for the ferrite-cementite steels (FC) and the ferrite-pearlite (FP) steels at 210K.

A, Bはそれぞれ定数を示す。Fig. 6の結果を、(8)式におけるひずみ速度による変化の傾きBを一定として記述すると以下ようになる。

$$0.7 \mu\text{m (FC鋼)} : \sigma_{0.07} = 970 + 13.75(\log \dot{\epsilon}) \quad (R^2 = 0.931) \dots\dots\dots (9)$$

$$1.1 \mu\text{m (FC鋼)} : \sigma_{0.07} = 865 + 13.75(\log \dot{\epsilon}) \quad (R^2 = 0.985) \dots\dots\dots (10)$$

$$1.5 \mu\text{m (FC鋼)} : \sigma_{0.07} = 765 + 13.75(\log \dot{\epsilon}) \quad (R^2 = 0.971) \dots\dots\dots (11)$$

$$3.6 \mu\text{m (FP鋼)} : \sigma_{0.07} = 665 + 13.75(\log \dot{\epsilon}) \quad (R^2 = 0.998) \dots\dots\dots (12)$$

$$9.8 \mu\text{m (FP鋼)} : \sigma_{0.07} = 625 + 13.75(\log \dot{\epsilon}) \quad (R^2 = 0.963) \dots\dots\dots (13)$$

$$46.2 \mu\text{m (FP鋼)} : \sigma_{0.07} = 600 + 13.75(\log \dot{\epsilon}) \quad (R^2 = 0.940) \dots\dots\dots (14)$$

Fig. 6における実線ならびに点線は、(9)~(14)式による計算結果である。

以上より、FC鋼の変形応力の温度依存性やひずみ速度依存性はフェライト粒径によらないことがわかった。また、FP鋼における温度、ひずみ速度依存性とも定量的にほぼ一致した。したがって、静的引張試験結果を論ずる限り、FC鋼とFP鋼は第二組織の形態に違いがあるにも係わらず、粒径によらずほぼ等しい熱的応力成分を持つと結論づけられる。

3・2・3 粒径依存性

Fig. 7に、FC鋼、FP鋼の296, 210Kでの $\sigma_{0.07}$ を $D^{-1/2}$ に対して示す。変形応力は結晶粒微細化により(1)式に従い増大し、Fig. 3の結果同様(1)式における傾きkの値は温度によらずほぼ等しいと判断できる。しかしながら、FC鋼と

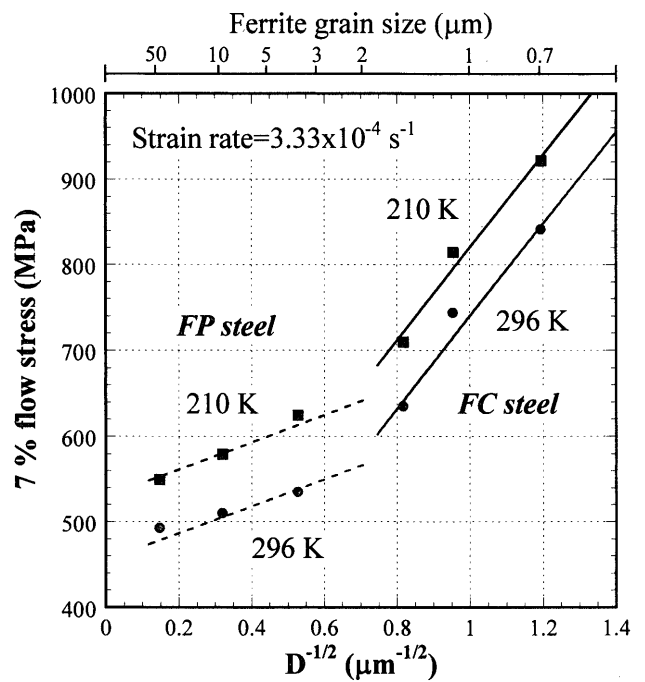


Fig. 7. 7% flow stress as a function of inverse square root of ferrite grain size for the ferrite-cementite (FC) steels and the ferrite-pearlite (FP) steels at 296K and 210K.

FP鋼の傾きkは異なり、FP鋼よりもFC鋼の方が大きい。各結果を(1)式で整理すると、以下ようになった。

$$\text{FC鋼 (296K)} : \sigma_{0.07} = 200 + 540D^{-1/2} \quad (R^2 = 0.961) \dots\dots\dots (15)$$

$$\text{FC鋼 (210K)} : \sigma_{0.07} = 280 + 540D^{-1/2} \quad (R^2 = 0.976) \dots\dots\dots (16)$$

$$\text{FP鋼 (296K)} : \sigma_{0.07} = 455 + 158D^{-1/2} \quad (R^2 = 0.983) \dots\dots\dots (17)$$

$$\text{FP鋼 (210K)} : \sigma_{0.07} = 530 + 158D^{-1/2} \quad (R^2 = 0.994) \dots\dots\dots (18)$$

Fig. 7における実線および点線は、(15)~(18)式による計算結果を示す。Fig. 3で示した上降伏応力、降伏応力においてFC鋼とFP鋼の傾きkは等しかったが、均一変形時の変形応力での傾きkはFC鋼とFP鋼で異なる。上・下降伏応力と変形応力は異なる塑性変形状態の変形抵抗を表しているため、フェライト粒径の影響が異なるものと思われる。現在のところその理由は明確でなく、検討中である。

3・2・4 296K, 210Kにおける変形応力の記述

本章においては、 $\sigma_{0.07}$ のフェライト粒径およびひずみ速度依存性をそれぞれ(1), (8)式を用いて記述した。さらに、両者を結びつけると296, 210Kの $\sigma_{0.07}$ をひずみ速度とフェライト粒径の関数として以下のように整理できる。

$$\text{FC鋼 (296K)} : \sigma_{0.07} = 240 + 540D^{-1/2} + 12.0(\log \dot{\epsilon}) \dots\dots\dots (19)$$

$$\text{FC鋼 (210K)} : \sigma_{0.07} = 325 + 540D^{-1/2} + 13.75(\log \dot{\epsilon}) \dots\dots\dots (20)$$

$$\text{FP鋼 (296K)} : \sigma_{0.07} = 505 + 158D^{-1/2} + 12.0(\log \dot{\epsilon}) \dots\dots\dots (21)$$

$$\text{FP鋼 (210K)} : \sigma_{0.07} = 575 + 158D^{-1/2} + 13.75(\log \dot{\epsilon}) \dots\dots\dots (22)$$

このとき、定数項とひずみ速度依存性に関する傾きは低温の方が大きい。変形の熱活性化過程に基づけば、上記の

式は試験温度の関数にもなっているはずであるが、試験温度が限られているため今回はひずみ速度のみで整理するにとどめた。

3.3 加工硬化率

Fig. 8は、296, 210, 77KにおけるFC鋼の加工硬化率の真ひずみによる変化を示す。77Kについては、この温度で加工硬化が唯一認められた $D=1.5\ \mu\text{m}$ の結果を示した。加工

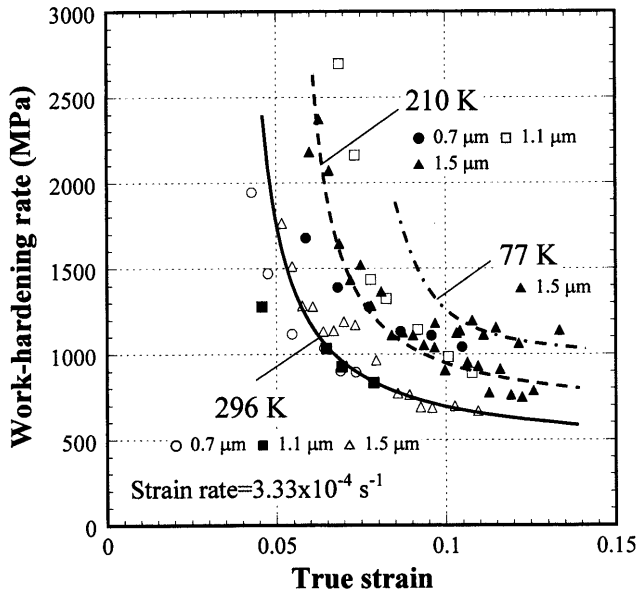


Fig. 8. Work-hardening rate as a function of true strain for the ferrite-cementite steels at 296, 210, and 77K.

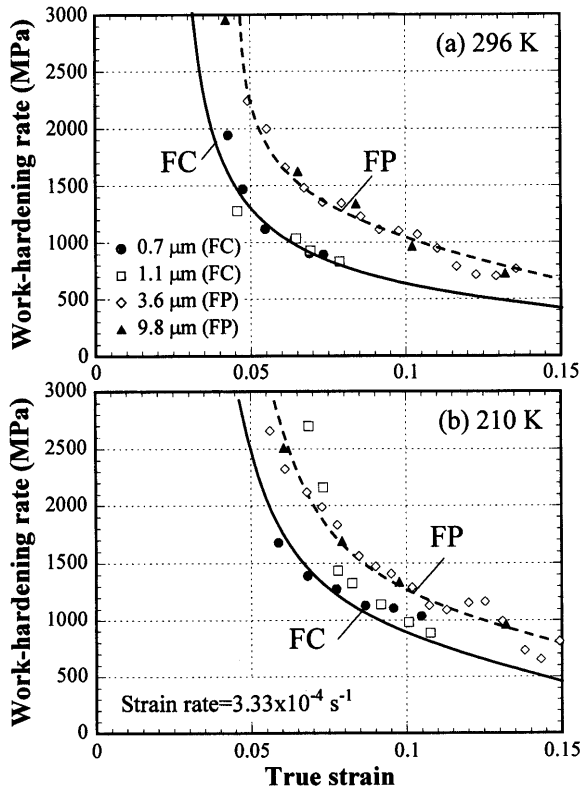


Fig. 9. Comparison of work-hardening rate between the ferrite-cementite (FC) steels and the ferrite-pearlite (FP) steels at 296K (a) and 210K (b).

硬化率は、温度の低下に伴い増大した。296, 210Kでの加工硬化率はフェライト粒径にほとんど依存しなかったが、加工硬化率は実験精度等に非常に敏感であり、FC鋼の場合均一変形領域がFP鋼よりも少ないことなどから考えて、粒径非依存であると結論づけるのは難しい。一方で、296, 210KにおけるFC鋼の加工硬化率は、Fig. 9に示すように、各温度同じひずみにおいてFP鋼より低い。

4. 考察

4.1 FC鋼とFP鋼の加工硬化率

FC鋼とFP鋼の加工硬化率の違いについて考えるとき、第二組織の違いを認識しなくてはならない。しかし、パーライトが加工硬化に及ぼす影響に関する確立した理論は見当たらない。そこで、Fig.10(a)においてフェライト鋼、パーライト鋼のデータベース¹⁹⁾とマイクロメカニクスのsecant法^{20,21)}を用いて、種々のフェライト粒径でのFP鋼の

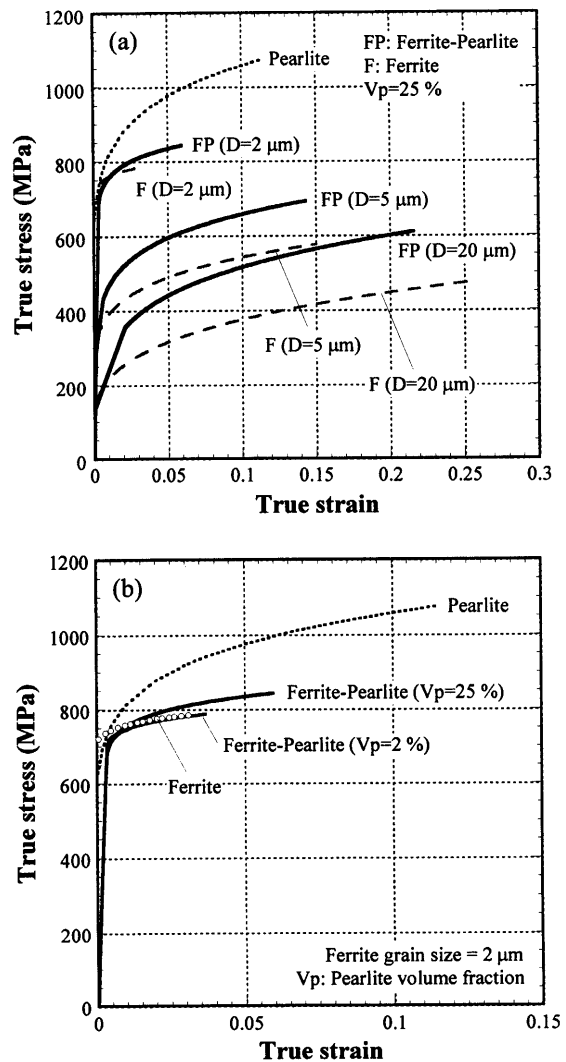


Fig. 10. Predicted true stress-true strain curves for ferrite-pearlite steels with various ferrite grain sizes (a) and the effect of pearlite volume fraction on uniform elongation for the ferrite-pearlite steel with a ferrite grain size of $2\ \mu\text{m}$ (b).

真応力-ひずみ曲線を計算した。secant法は、複合組織鋼の応力-ひずみ曲線の計算において重要となる、応力とひずみの分配や塑性緩和を数学的に計算可能とした手法である。この計算において、材料の化学組成は本検討材と同じSM490相当鋼(0.15C-0.3Si-1.5Mn(mass%))とし、パーライト体積率は25%、パーライトラメラ間隔は0.1 μm とし、フェライト粒径を200~2 μm の間で変化させた。フェライト鋼のデータベースにおける最小フェライト粒径は22 μm であり、それ以下の粒径は2 μm まで外挿により計算が可能である。結晶粒微細化によりフェライト鋼、FP鋼ともに変形応力は増大するが均一伸びは減少し、5 μm ではフェライト鋼とFP鋼の均一伸びはほぼ等しくなり、それ以下になるとFP鋼の方が大きい。すなわち、第二組織としてパーライトを25%持つFP鋼は、単一フェライト鋼よりも加工硬化率が高く、微細化し変形応力が高くなるほどその効果が顕著に現れる。

これらのデータベースにはセメンタイト鋼が含まれておらず、また、粒径が2 μm 以下になるとフェライト鋼の計算が不可能になるため、この方法ではフェライト粒径2 μm 以下のFC鋼の予測は困難である。また、第二組織の大きさを規定できないという制約もある。そこで、Fig.10(b)のように $D=2\mu\text{m}$ のFP鋼について、パーライト体積率を25%からセメンタイト体積率に相当する2%へ変化させた計算結果を示す。2%の場合はフェライト鋼の応力-ひずみ曲線とほとんど変わらない。この検討から第二組織の体積率が加工硬化率に影響し、均一伸びと関係していることがわかる。

4.2 リューダース伸び

本研究で検討したFC鋼、FP鋼の応力-ひずみ曲線の特徴のひとつとして、リューダース伸び²²⁾の存在をあげることができる。リューダース伸びはフェライト粒径が小さくなる程、または温度低下、ひずみ速度上昇に伴い増大した⁴⁾。Fig.11には、FC鋼とFP鋼の296、210Kにおける、 $D^{-1/2}$ に対する降伏応力および各ひずみにおける変形応力をそれぞれ示す。ここでは、変形応力は真応力で示し、降伏応力についてはリューダース伸びに相当する真ひずみにおける真応力で整理した。Butler²³⁾は0.025C鋼の常温における引張試験結果を同様の整理で議論し、降伏応力と各ひずみにおける変形応力が交わる点はその粒径におけるリューダース伸びと対応していることを明らかにした。そして、リューダース伸びは降伏応力において均一変形時の加工硬化率に到達するために必要なひずみであると指摘した。Fig.11においてFC鋼では交点が明瞭でないが、FP鋼の結果は彼の結論とよく一致している。上記のButlerの解釈に加えて、Fig.9に示したようにFC鋼の加工硬化率がFP鋼よりも低いことなどから考えると、FC鋼のいくつかの結果について均一変形(加工硬化)が観察されなかったのは、降伏応力(σ_{LY} :真応力表示)の時点で既にその

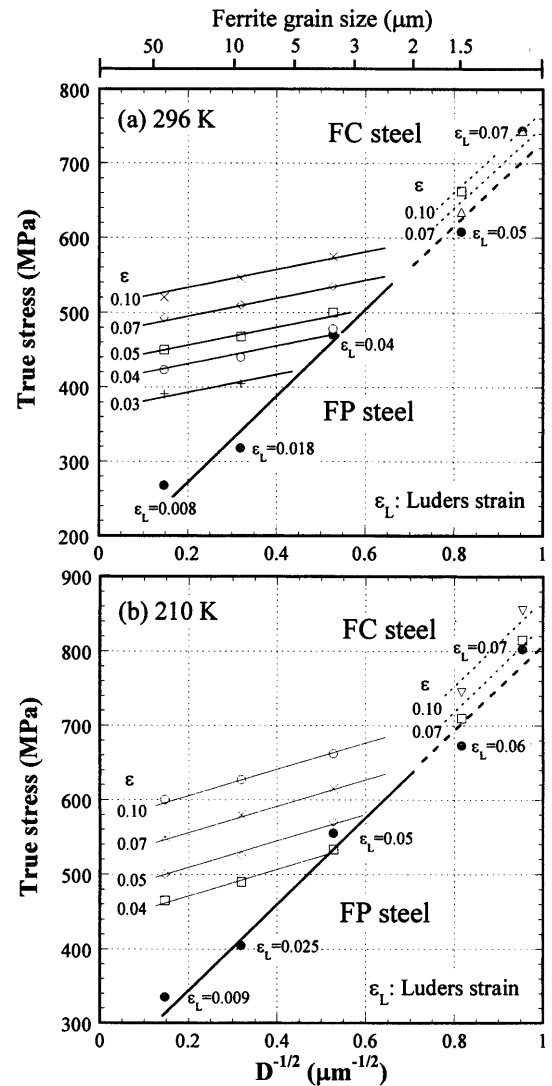


Fig. 11. True stress versus inverse square root of ferrite grain size at the end of yielding and for various true strains for the ferrite-cementite (FC) steels and the ferrite-pearlite (FP) steels at 296K (a) and 210K (b).

変形応力での加工硬化率 ($d\sigma/d\epsilon$: ϵ は真ひずみ表示)に達していたため、もしくはそれ以下であってリューダース変形中に塑性不安定条件($\sigma_{LY} > d\sigma/d\epsilon$)を満たしたためであると考えられる。すなわち、 σ_{LY} はリューダース変形帯を広げる限界応力であるのに対して、 $d\sigma/d\epsilon$ はリューダース変形で形成された変形組織の加工硬化能を表している。 $\sigma_{LY} < d\sigma/d\epsilon$ であれば、試験片全体をリューダース変形が覆った後、加工硬化を伴う均一変形が現れるのに対し、 $\sigma_{LY} = d\sigma/d\epsilon$ の場合は試験片のできぐあいなど他の微妙な条件によってリューダース変形帯の進行とネッキングの開始が競合すると考えられる。超微細粒で $\sigma_{LY} > d\sigma/d\epsilon$ であればリューダース帯が導入されると同時にネッキングが開始し、荷重は低下すると思われる。

5. 結言

SM490鋼より作製した、平均フェライト粒径0.47, 0.7, 1.1, 1.5 μm の超微細フェライト-セメンタイト(FC)鋼を用いて、常温以下における静的引張試験を行った。主な結論は、以下の通りである。

(1) FC鋼の応力-ひずみ曲線には、上降伏点、下降伏点とリューダース伸びが観察された。FC鋼の変形応力は、微細化に伴いホール・ペッチ則に従い増大し、各温度での均一伸びや全伸びは微細化に伴い減少した。

(2) FC鋼のリューダース変形領域以降の均一変形時の変形応力に及ぼす温度とひずみ速度の影響は、フェライト粒径によらず等しいと判断できた。また、変形応力はホール・ペッチの式で記述することができ、ホール・ペッチ式における傾き k は温度とひずみ速度によらず等しいことがわかった。

(3) FC鋼とFP鋼の変形応力の温度、ひずみ速度依存性を比較すると、両者はほぼ等しいと判断することができた。一方で、FC鋼とFP鋼の粒径依存性は異なり、ホール・ペッチ式における傾き k の値は、FP鋼よりもFC鋼の方が大きかった。

(4) FC鋼の加工硬化率はFP鋼の結果同様、温度低下により増大した。FC鋼とFP鋼では、FP鋼の方が加工硬化率が高く、この違いに第二組織であるセメンタイト、パーライトの体積率が影響していると考えられる。

本研究を遂行するにあたり、ご助言、ご協力をいただいた物質・材料研究機構、超鉄鋼研究センターの鳥塚史郎博士、大森章夫氏(現JFEスチール)に心より感謝申し上げます。

ます。

文 献

- 1) N.J.Petch: *J. Iron Steel Inst.*, **174** (1953) 5, 25.
- 2) W.B.Morrison: *Trans. ASM*, **59** (1966) 4, 824.
- 3) N.Hansen: *Metall. Trans. A*, **16A** (1985), 2167.
- 4) N.Tsuchida, T.Ono, Y.Tomota and K.Nagai: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. A*, **68** (2002), 1547.
- 5) N.Tsuchida, Y.Tomota and K.Nagai: *ISIJ Int.*, **42** (2002), 1594.
- 6) N.Tsuji: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 359.
- 7) Y.Kimura and S.Takaki: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **41** (2000), 13.
- 8) S.Aihara: Proc. 4th. Symp. on Super Metal, JRCM, Tokyo, (2001), 17.
- 9) M.Fujioka, T.Yokota, Y.Adachi and N.Matsuoka: The 2nd Symp. on Super Metal, JRCM, Tokyo, (1999), 193.
- 10) S.Torizuka, K.Nagai and A.Sato: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **42** (2001), 287.
- 11) K.Nagai: *J. Mater. Process. Technol.*, **117** (2001), 329.
- 12) N.Tsuji, R.Ueji, Y.Minamino and Y.Saito: *Scr. Mater.*, **46** (2002), 305.
- 13) T.Hayashi and K.Nagai: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. A*, **68** (2002), 1553.
- 14) A.Ohmori, S.Torizuka and K.Nagai: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 1128.
- 15) N.Tsuchida, Y.Tomota, H.Moriya, O.Umezawa and K.Nagai: *Acta Mater.*, **49** (2001) 15, 3029.
- 16) Y.Adachi, T.Tomida and S.Hinotani: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 620.
- 17) M.Abe, Y.Kokabu, N.Arai and S.Hayami: *J. Jpn. Inst. Met.*, **45** (1981), 942.
- 18) 奥野忠一: 応用統計ハンドブック, 養賢堂, 東京, (1986), 96.
- 19) 変形特性の予測と制御, 特基研究会変形特性の予測と制御部会編, 日本鉄鋼協会, 東京, (1994), 239.
- 20) G.J.Weng: *J. Mech. Phys. Solids*, **38** (1990), 419.
- 21) N.Tsuchida, Y.Tomota, S.Torizuka, K.Tsuzaki and K.Nagai: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 1462.
- 22) 周藤悦郎: ストレッチャ・ストレイン, 日本金属学会, 仙台, (1970), 1.
- 23) J.F.Butler: *J. Mech. Phys. Solids*, **10** (1962), 313.