

1. 緒言

構造用材料では、通常研究される準静的材料試験よりも非常に大きな変形速度において、強度と延性を求められる場合がしばしばある。鉄鋼材料の場合、強度と延性を両立させる組織制御法の一つとして、パーライトやマルテンサイトなどの硬質組織とフェライト組織の複相組織化がある。複相組織を有する鋼の高速変形特性を解明するためには、複相組織を構成する個々の組織の高速変形挙動に関する知見が必要である。しかし、これまでに、パーライトやマルテンサイトの高速変形挙動は調べられていない。そこで、本研究では鉄鋼材料における硬質組織の高速変形挙動を広範囲($10^{-3}/s$ から $10^3/s$)のひずみ速度で明らかにし、高速変形時に優れた機械的性質を発現させるための理想的な硬質相を検討した。

2. 実験方法

供試材には、炭素量が 0.005~0.190mass%と異なる 5 種類の鋼と、ほぼ共析組成を有する炭素量 0.550mass%の鋼の熱延板を受け入れた。炭素量 0.005~0.190mass%の鋼を 1100°Cに再加熱後、氷水焼入れの熱処理を施すことにより、全面マルテンサイト組織を有する試料(マルテンサイト鋼)を作成した。炭素量 0.550mass%の鋼に対して、二段熱処理(1100°Cと 600°C)を用いて試料(パーライト鋼)を作成した。

実用上、パーライト中のセメンタイトを球状化させた組織も硬質組織の一つとして用いられる場合がある。そこで本研究では、パーライトとマルテンサイトに加えて、球状化セメンタイト+フェライト組織の高速変形特性も検討した。球状化セメンタイトを得るために、パーライト組織を有する 0.550% C 鋼に対し、冷間圧延と熱処理を組み合わせた球状化熱処理を行った。また、炭素量 0.024mass%のフェライト単相組織を有する鋼(平均フェライト粒径 10.3 μ m)の熱延板も比較のため用いた。

板厚 1.2mm、平行部長さ 6.0mm、平行部幅 2.0mmの微小引張試験片を用い、初期ひずみ速度 $10^{-3}/s$ ~ $10^3/s$ (変位速度: 0.006mm/s~6000 mm/s) で室温引張試験を行った。また、各種顕微鏡を用い組織観察を行った。観察は圧延方向と板厚方向に垂直な方向 (TD) から行った。

3. 実験結果及び考察

Fig. 1 にマルテンサイト鋼(0.190C)の光顕組織(a)、及びパーライト鋼(b)と球状化セメンタイト鋼(SP20h)(c)の SEM 組織を示す。マルテンサイト鋼は、低炭素鋼における典型的なラスマルテンサイト組織を示した。パーライト鋼は、組織のほぼ全面がパーライト組織となっていた。球状化セメンタイト鋼では、直径数 μ mの球状セメンタイトがフェライト中に分散していた。

各種組織を有する鋼の公称応力-公称ひずみ曲線を Fig. 2 に示す。それぞれ、初期ひずみ速度 $10^{-3}/s$ と $10^3/s$ において得られた結果を示している。各鋼ともにひずみ

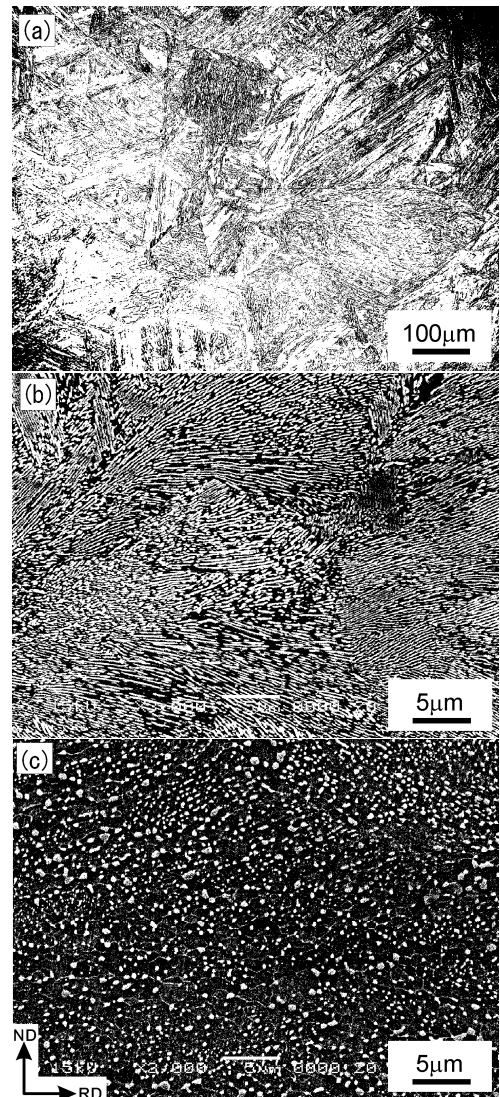


Fig.1. Optical micrograph of the martensitic (0.190C) steel (a) and Scanning electron micrograph (SEM) of the pearlitic (b) and spherical cementite (SP20h) steel (c).

速度の増加に伴い、降伏応力、引張強さは増加した。マルテンサイト鋼(a)は炭素量によらず、小さな加工硬化、均一伸びを示し、局部伸びが大きい。一方、パーライト鋼(b)は、マルテンサイト鋼とは逆の延性を示した。すなわち、加工硬化、均一伸びが大きく、局部伸びが小さい。球状化セメンタイト鋼(c)は、パーライト鋼と比較して均一伸びは同程度であり、局部伸びが大きくなる。

各種ひずみ速度の試験で得られたマルテンサイト鋼、パーライト鋼、フェライト鋼の0.2%耐力を Fig. 3 に示す。パーライト鋼とフェライト鋼のひずみ速度依存性(傾き)は、ひずみ速度 $10^0/s$ を境に大きくなる。このような、2段のひずみ速度依存性を示す傾向は、Campbell ら⁽¹⁾の、フェライト+パーライト組織を有する低炭素鋼の研究において報告されている。フェライト鋼とパーライト鋼で、類似したひずみ速度依存性を示した事実は、パーライトの塑性変形初期では、セメンタイトは弾性変形を示し、フェライト部のみの転位のすべり運動が塑性変形の主体

を担っていることを示唆している。一方、マルテンサイト鋼のひずみ速度依存性は2段階の推移を示さず、むしろ、一本の直線で十分に近似することができる。マルテンサイト鋼のひずみ速度依存性は、パーライト鋼やフェライト鋼よりも小さく、静動差も小さい。また、その傾きは含有炭素量により変化する。

一般に、変形応力は、ひずみ速度に依存する熱的応力と依存しない非熱的応力の加算で示される。降伏応力のひずみ速度依存性は、転位が短距離障害物を越える際に必要な熱的応力の大きさと対応する。Fig. 3 に示したようにマルテンサイト鋼の場合、含有炭素量によりひずみ速度依存性が変化した。マルテンサイト中では、炭素原子の多くは侵入型固溶元素として強化に寄与する。固溶元素は、短距離障害物であり、その濃度が異なればひずみ速度依存性が変化する。すなわち、本研究の結果は、マルテンサイトの場合、 $10^3/s$ の低速の場合でも、熱活性化過程が転位のすべり運動を律速している可能性を示唆している。いずれにせよ、鉄鋼材料の代表的な硬質相であるマルテンサイトとフェライトでは、ひずみ速度依存性が大きく異なることが、本研究より明らかとなった。

Fig. 4 に各焼鈍時間の球状化セメンタイト鋼とパーライト鋼の0.2%耐力に及ぼすひずみ速度の影響を示す。球状化セメンタイト鋼はいずれも、パーライト鋼と同様に、

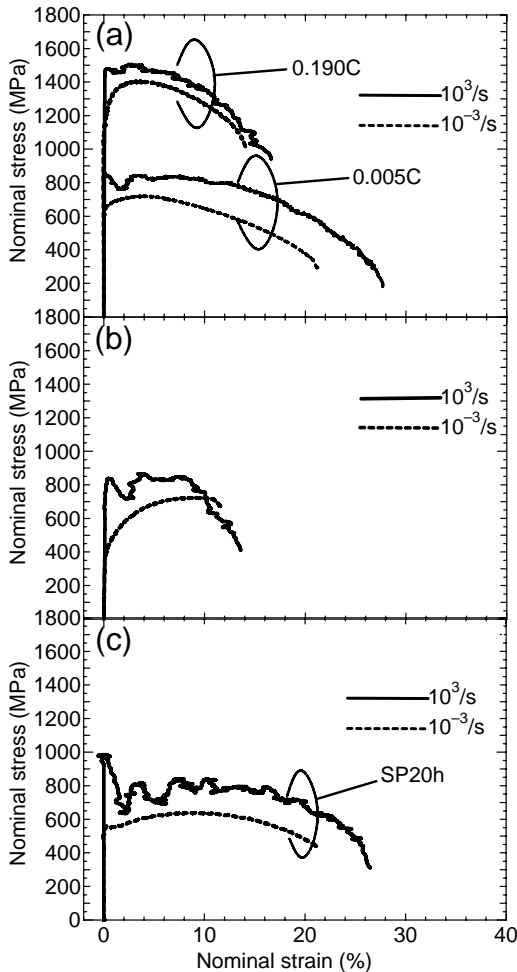


Fig.2. Nominal stress – nominal strain curves of the martensitic (a), pearlitic (b) and spherical cementite (c) steels tensile tested in various strain rates.

二段のひずみ速度依存性を示す。ひずみ速度によらず、いずれの球状化セメンタイト鋼においても、0.2%耐力はパーライト鋼よりも大きな値を示し、最も微細な炭化物が分散しているSP1h材が最大の0.2%耐力を示す。

Fig. 2 で示したように、球状化セメンタイト鋼はパーライト鋼やマルテンサイト鋼と比べて、延性に優れている。また、パーライト鋼と同様の0.2%耐力のひずみ速度依存性を示すことから、マルテンサイト鋼よりもひずみ速度依存性が大きく、良好な降伏応力の静動差が得られる。すなわち、大きなひずみ速度依存性を有し、優れた強度-延性バランスを示す複相組織鋼を得るためには、球状化セメンタイトを複相組織中の硬質組織として分散させることが望ましいと考えられる。

4. まとめ

- (1) パーライト鋼、マルテンサイト鋼、球状化セメンタイト鋼の中では、ひずみ速度によらず、球状化セメンタイト鋼が最も大きな延性を示す。
- (2) パーライト鋼と球状化セメンタイト鋼はフェライト鋼と同様、二段のひずみ速度依存性を示す。一方で、マルテンサイト鋼の場合、ひずみ速度により、ひずみ速度依存性は変化することは無く、また静動差が小さい。
- (3) 良好な高速変形特性を有する鋼を得る組織設計指針の一つとして、球状化セメンタイト+フェライト組織を硬質相として分散させることが望ましい。

(参考文献)

- 1) Campbell JD, Ferguson WG, Phil Mag, vol. 21, (1970), pp. 63-82.

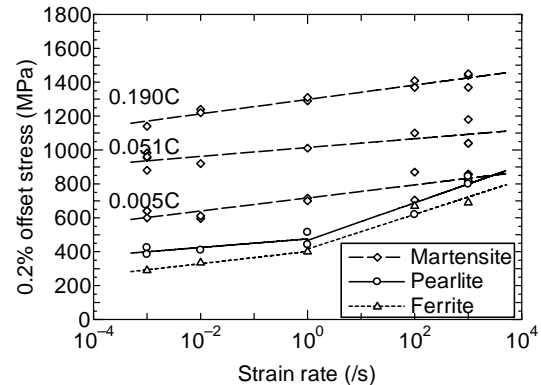


Fig.3. 0.2% offset stress of martensitic (0.005C, 0.051C, 0.190C), pearlitic and ferritic steels in various strain rates.

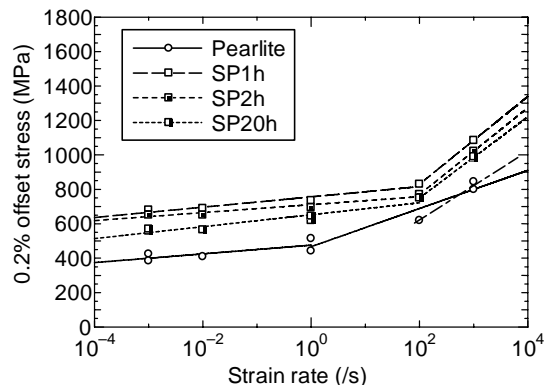


Fig.4. 0.2% offset stress of pearlitic and spherical cementite (SP1h, SP2h, SP20h) steels in various strain rates.