

薄鋼板の強度におよぼす歪速度の影響

高木 周作*・三浦 和哉*・古君 修*・小原 隆史*・加藤 俊之*²・谷村 眞治*³

Effect of Strain Rates on Strength of Sheet Steels

Shusaku TAKAGI, Kazuya MIURA, Osamu FURUKIMI, Takashi OBARA, Toshiyuki KATO and Shinji TANIMURA

Synopsis : Strain rate sensitivity of deformation behavior in various sheet steels were investigated in order to find out the suitable steel for automotive anti-crash parts. Dual phase steels consisted of ferrite and martensite phases absorbed higher energy at strain rate of $2 \times 10^3/s$ with lower yield strength at strain rate of $2 \times 10^{-2}/s$, compared with other steels. Higher energy absorption of dual phase steels was due to high strain rate sensitivity of yield strength and n-value. Increase of volume fraction or large surface area of martensite phase in dual phase steel led higher strain rate sensitivity in work hardenability as well as yield strength.

Key words : strain rate sensitivity ; high strain rate deformation ; high strength steel ; dual phase steel ; Hopkinson pressure bar.

1. 緒言

乗用車のエンジンルームは、前面衝突時に適度に圧潰されてエネルギーを吸収することで、過大な減速度による脳の損傷等を防止し、人体の安全を確保する役割を持つ。自動車衝突時の鋼板の変形の歪速度は、 $10^3/s$ までの高速変形領域に達する。したがって、エンジンルーム部材に使用される鋼板には、高速変形における衝突吸収エネルギーが大きいことが要求される。

Table 1. Chemical composition and microstructure of sheet steels tested.

Steel	Structure	Chemical composition / mass %						Cr
		C	Si	Mn	P	S		
ULS	Ferrite	0.003	0.04	0.18	0.01	0.008	—	
LS	Ferrite	0.061	0.03	0.28	0.01	0.012	—	
SSH 440	Ferrite	0.003	0.55	1.50	0.10	0.006	—	
SSH 590	Ferrite	0.003	1.44	2.02	0.11	0.004	—	
DP 390	Ferrite+Martensite	0.041	0.05	1.19	0.02	0.006	0.5	
DP 590	Ferrite+Martensite	0.076	0.86	1.75	0.09	0.004	—	
DP 780	Ferrite+Martensite	0.16	0.09	1.75	0.03	0.006	—	
WH340	Ferrite	0.061	0.03	0.28	0.01	0.012	—	
TRIP640	Ferrite+Bainite +Austenite	0.10	0.98	1.48	0.01	0.001	—	
PH490	Ferrite (hardened by TiC)	0.04	0.73	0.30	0.01	0.040	—	

ULS : Ultra low carbon mild steel LS : Low carbon mild steel
 SSH : Solid solution hardening PH : Precipitates hardening
 DP : Dual Phase (Ferrite+Martensite) WH : Work hardening
 TRIP : Transformation-induced plasticity

一般に、鋼の強度は歪速度の上昇とともに増加するが、その歪速度依存性は高張力鋼ほど小さくなる。そのため、歪速度 $10^3/s$ では高張力化による高歪速度での強度上昇効果が減少する²⁻⁴⁾。Yoshitakeら⁵⁾は、鋼板強度の歪速度依存性は鋼の強化法によらず、引張強さが上昇するにつれて単調に低下すると報告している。一方、Miuraら⁶⁾は、フェライト-マルテンサイト2相組織鋼(以下Dual Phase鋼と称する)の鋼板強度の歪速度依存性および高速変形時の吸収エネルギーが、他の高張力鋼板と比較して高いという結果を示し、また、水井ら⁷⁾や上西ら⁸⁾は、TRIP鋼の高速変形時の吸収エネルギーが高いと報告している。しかし現在までのところ、強度の歪速度依存性に対する冶金的支配因子については明らかにされていない。

以上の観点から、歪速度 $10^3/s$ における鋼の強度の支配因子を明らかにすることを目的として本研究を行った。

2. 実験方法

Table 1 に組成および組織を示す種々の鋼板を供試材として、歪速度 $2 \times 10^{-2}/s$ および $2 \times 10^3/s$ で引張試験を行った。歪速度 $2 \times 10^{-2}/s$ の条件についてはインストロン型引張試験機を、歪速度 $2 \times 10^3/s$ の条件についてはホプキンソン棒法を応用した衝撃引張試験機⁹⁾(以下、ホプキンソン棒法衝撃引張試験機と称する)を用いた。引張試験片形状は、平行部幅2.5mm、ゲージ長3.8mmとした。なお、降伏点を示す鋼種は、0.7%の圧延歪を与えて降伏点を消滅させた後、引張試験を行った。また、Table 1 に示す鋼板のうち、軟鋼

平成9年3月11日受付 平成9年6月16日受理 (Received on Mar. 11, 1997; Accepted on June 16, 1997)

* 川崎製鉄(株)技術研究所 (Technical Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chuo-ku Chiba 260)

* 2 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp.)

* 3 大阪府立大学工学部 (College of Engineering, University of Osaka Prefecture)

(ULS), 440MPa級固溶強化鋼(SSH440), 590MPa級固溶強化鋼(SSH590)および590MPa級Dual Phase鋼(DP590)について, 試験温度293K, 223K, 153K, 77Kで, インストロン型引張試験機により歪速度 $2 \times 10^{-2}/s$, $2 \times 10^{-1}/s$ および $1/s$, あるいはホプキンソン棒法衝撃引張試験機により歪速度 $2 \times 10^3/s$ の条件で引張試験を行った。試験温度293Kで歪速度 $2 \times 10^{-2}/s$ および $2 \times 10^3/s$ における軟鋼, 440MPa級固溶強化鋼, 590MPa級Dual Phase鋼の応力-歪曲線を Fig. 1 に示す。歪速度 $2 \times 10^3/s$ では, 変形開始直後にピークが認められた。このピークは, 装置の振動, 装置中を伝

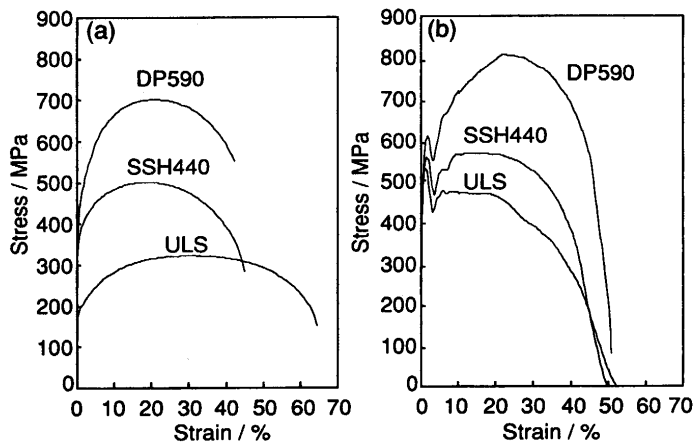


Fig. 1. Stress-strain curves for mild steel (ULS), solid solution hardened steel (SSH440) and Dual Phase steel (DP590) at strain rates of (a) $2 \times 10^{-2}/s$ and (b) $2 \times 10^3/s$.

Table 2. Chemical composition and microstructure of sheet steel tested.

Steel	Structure	Chemical composition / mass %					
		C	Si	Mn	P	S	Cr
DP590	Ferrite+ Martensite	0.05	0.96	1.35	0.01	0.004	0.99

播する応力波の分散もしくは降伏現象の影響に起因すると考えられる。これらの影響の分離は困難であるので, 降伏強さがピークの上端, 下端, 上端と下端の平均値の三つを仮定した場合の引張試験結果を比較した。いずれの場合もほぼ同様の結果を得たので, 以下, ピークの平均値を降伏強さとした結果を示す。歪速度 $2 \times 10^{-2}/s$, $2 \times 10^{-1}/s$ および $1/s$ での降伏強さは, 0.2% オフセット流動応力を用いた。歪量 ϵ での n 値は, $(\epsilon - 2.5)\%$ 歪および $(\epsilon + 2.5)\%$ 歪での応力と歪を用いて計算した。

つぎに, Table 2 に示す組成の熱延鋼板を種々の条件で冷間圧延, 焼鈍し, Table 3 に示すようにフェライトとマルテンサイトの結晶粒径, マルテンサイトの体積率, フェライトとマルテンサイトの界面の面積を変化させ, 高速変形特性におよぼすマルテンサイト体積率とフェライト-マルテンサイト界面面積の影響を調べた。結晶粒径はエチルアルコール中に硝酸を3%加えた液で腐食した後の組織写真を用い, マルテンサイト体積率は, 4%ピクリン酸アルコールと2%ピロ硫酸ナトリウムを1対1に混合した腐食液でマルテンサイトのみを白く現出させた組織写真を用い, 画像処理により定量化した。フェライト-マルテンサイト界面面積は, マルテンサイトの個数と体積率を画像処理により測定し, その形状を同じ大きさの球と仮定して, 計算により求めた。

3. 実験結果

3・1 鋼の歪速度 $2 \times 10^3/s$ における吸収エネルギー

歪速度 $2 \times 10^3/s$ における高速引張試験の応力-歪曲線から求めた歪量30%までの吸収エネルギーを Fig. 2 に示す。Dual Phase鋼の吸収エネルギーは, 歪速度 $2 \times 10^3/s$ においては他の高張力鋼と比較して大きいことが明らかとなった。

Table 3. Properties of various dual phase sheet steels tested.

Number	Strain rate : $2 \times 10^{-2}/s$		Strain rate : $2 \times 10^3/s$		Grain size of ferrite / μm	Grain size of martensite / μm	Volume fraction of martensite / %	Surface area of martensite / $\mu m^2 \cdot (10 \mu m)^{-3}$
	YS / MPa	TS / MPa	YS / MPa	TS / MPa				
1	353	647	595	783	4.8	2.4	5.7	16.2
2	332	620	574	727	5.1	2.9	5.8	16.7
3	346	587	579	708	8.8	8.8	6.5	18.4
4	333	650	593	775	5.4	2.6	7.9	22.3
5	335	589	574	735	5.5	3.0	6.6	18.8
6	326	590	578	720	8.8	11.1	8.1	23.1
7	332	576	566	696	6.2	1.4	4.1	11.8
8	305	560	546	670	6.3	2.1	4.5	12.5
9	312	542	564	679	8.0	5.6	5.4	15.4
10	351	605	566	722	5.3	1.6	4.8	13.6
11	321	555	543	676	5.4	2.0	1.5	7.8
12	317	546	557	675	8.7	2.0	3.3	9.3
13	323	574	550	730	15.0	3.5	5.0	5.7
14	349	630	540	754	5.3	1.5	3.8	10.4
15	349	614	548	741	7.0	2.6	9.8	14.7
16	329	563	525	692	7.9	2.7	7.7	11.9

3・2 鋼の強度におよぼす歪速度の影響

軟鋼, 440MPa級固溶強化鋼, 590MPa級Dual Phase鋼の降伏強さおよび引張強さの歪速度依存性をFig. 3に示すが, 歪速度の上昇にともない降伏強さおよび引張強さはともに増加した。この傾向は, 他の全ての鋼板でも同様であった。Fig. 4に降伏強さの歪速度依存性の一つの指標である静動比(歪速度 2×10^{-2} /sにおける降伏強さに対する歪速度 2×10^3 /sにおける降伏強さの比)と歪速度 2×10^{-2} /sにおける降伏強さの関係を示す。いずれの鋼種においても, 降伏強さの歪速度依存性は降伏強さの上昇とともに低下した。しかし, Dual Phase鋼, 加工強化鋼, TRIP鋼の降伏強さの歪速度依存性は, 同じ降伏強さの固溶強化鋼, 析出強化鋼と比較するとわずかに大きかった。

3・3 歪速度 2×10^3 /sにおける加工硬化指数n値におよぼす組織の影響

歪速度 2×10^{-2} /sおよび 2×10^3 /sで変形したときの歪量10%における瞬間n値(以降n値)をFig. 5に示す。歪速度

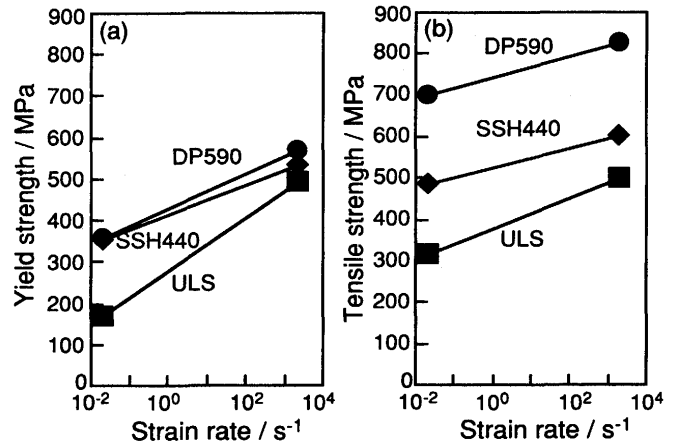


Fig. 3. Effects of strain rate for mild steel (ULS), solid solution hardened steel (SSH440) and Dual Phase steel (DP590) on (a) yield strength and (b) tensile strength.

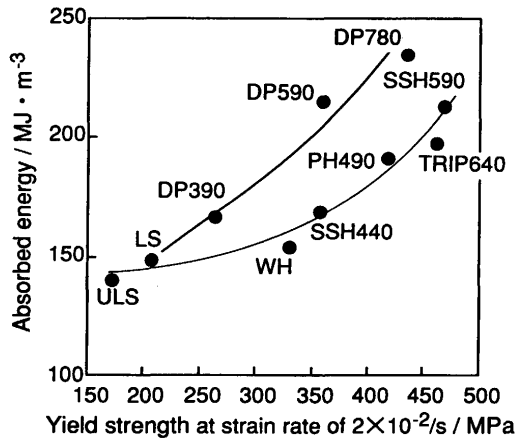


Fig. 2. Relationship between collision absorbed energy at strain rate of 2×10^3 /s and yield strength at strain rate of 2×10^{-2} /s (Thickness: 0.7mm).

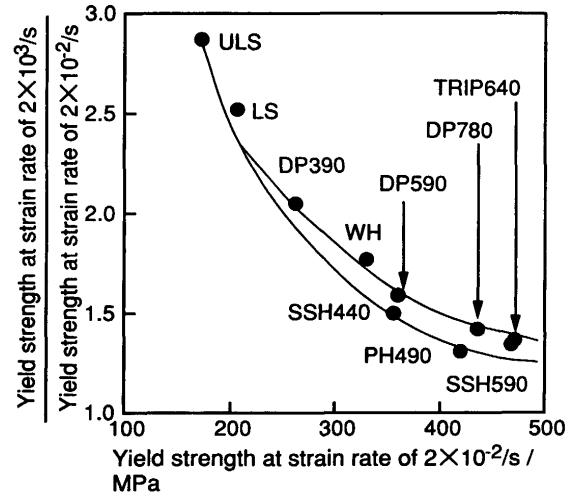


Fig. 4. Relationship between strain rate sensitivity of yield strength and yield strength at strain rate of 2×10^{-2} /s.

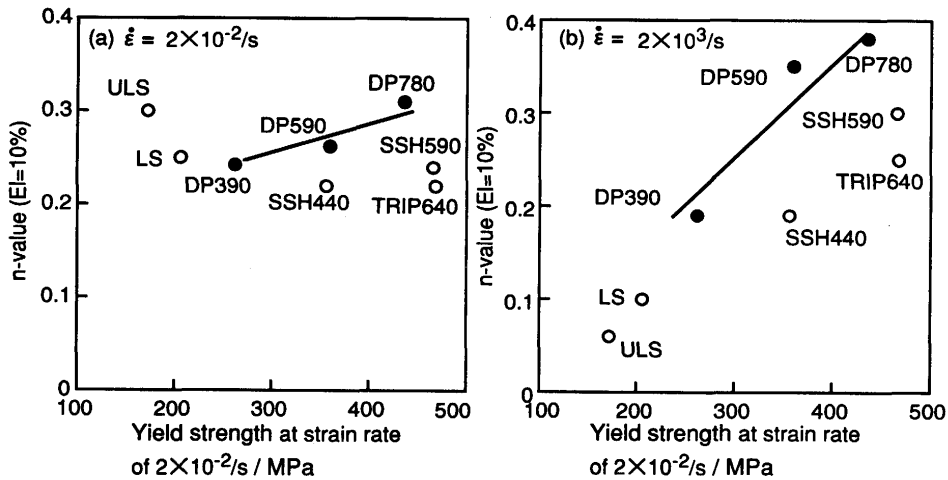


Fig. 5. Effects of yield strength at strain rate of 2×10^{-2} /s on n-value for various steels at 10% strain (a) Strain rate = 2×10^{-2} /s; (b) Strain rate = 2×10^3 /s.

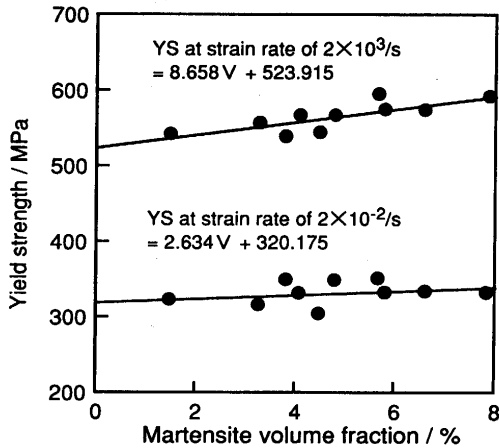


Fig. 6. Relationship between martensite volume fraction and yield strength of 590MPa grade Dual Phase steels (V: Volume fraction of martensite/%).

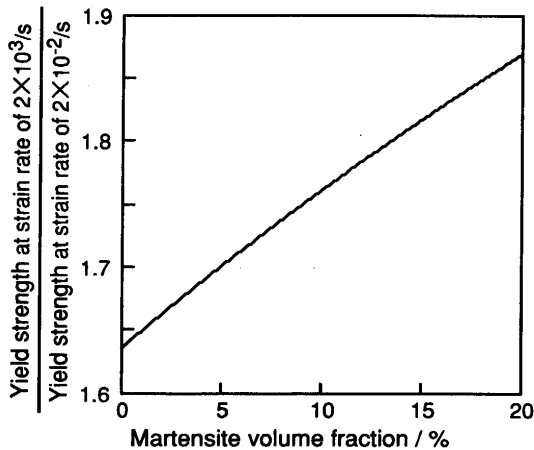


Fig. 7. Relationship between martensite volume fraction and strain rate sensitivity of yield strength of Dual Phase steels.

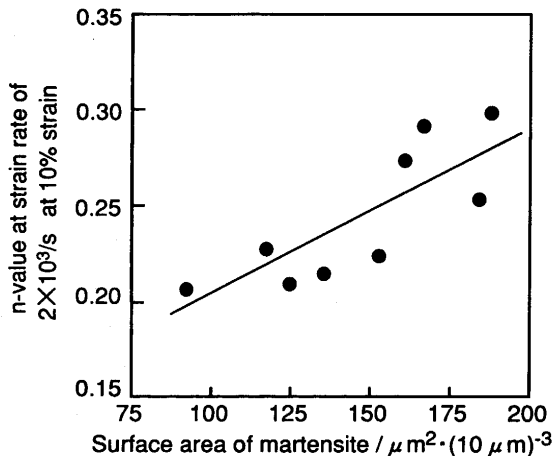


Fig. 8. Effect of surface area of martensite on n-value at strain rate of $2 \times 10^3/s$ of 590MPa grade Dual Phase steels.

$2 \times 10^3/s$ におけるn値は、歪速度 $2 \times 10^{-2}/s$ における降伏強さの上昇ともなって増加する傾向を示した。特に、Dual Phase鋼のn値は他の鋼種よりも著しく大きく、この傾向は歪量によらず同様であった。

3.4 Dual Phase鋼の高速変形特性におよぼすマルテンサイト体積率とフェライト-マルテンサイト界面面積の影響

マルテンサイトの体積率と歪速度 $2 \times 10^{-2}/s$ および歪速度 $2 \times 10^3/s$ における降伏強さとの関係を、Fig. 6に示す。また、両者の関係を1次近似した式を図中に併記する。本実験の範囲では、歪速度 $2 \times 10^{-2}/s$ における降伏強さは、マルテンサイト体積率1%あたり2.6MPaと小さかったが、歪速度 $2 \times 10^3/s$ における降伏強さは、マルテンサイト体積率1%あたり8.7MPaと大きかった。この結果から、マルテンサイト体積率と降伏強さの静動比の関係を計算した結果をFig. 7に示す。降伏強さの歪速度依存性は、マルテンサイトの体積率の増加とともに上昇することが明らかとなった。

つぎに、歪速度 $2 \times 10^3/s$ における歪量10%でのn値とフェライト-マルテンサイト界面面積の関係をFig. 8に示すが、n値は界面面積の増加につれて上昇した。なお、マルテンサイト体積率は4%から6.5%でほぼ一定とし、界面面積は結晶粒径により変化させた。

以上の結果より、マルテンサイトの体積率の増加とフェライト-マルテンサイト界面面積の増加にもなって、Dual Phase鋼の降伏強さの歪速度依存性と高歪速度変形時のn値は上昇し、歪速度 $2 \times 10^3/s$ における吸収エネルギーが増加すると結論される。

4. 考察

上述の実験結果から、Dual Phase鋼の高速変形時の吸収エネルギーは、他の鋼種と比較して大きく、その原因は、Dual Phase鋼のn値および降伏強さの歪速度依存性が他の鋼種よりも大きいためであることが明らかとなった。本節では、鋼の降伏強さの歪速度依存性の支配因子とDual Phase鋼のn値および降伏強さの歪速度依存性が他の鋼よりも大きい理由について考察する。

4.1 鋼の降伏強さの歪速度依存性の支配因子

従来の研究¹⁰⁾より、本実験範囲における77Kから293K、歪速度 $2 \times 10^{-2}/s$ から1/sまでの降伏強さは、熱活性化過程により支配されると考えられる。これらのデータから、野島¹¹⁾が下降伏点について用いた方法で、0.2%オフセット流動応力が転位の移動の熱活性化過程に支配されると仮定した場合の歪速度 $2 \times 10^3/s$ での降伏強さを推定した。下降伏点と0.2%オフセット流動応力は厳密には同等ではないが、ともに転位同士の切りあいが多く、応力は転位の移動に対する抵抗のみで決定できると考えられるので、本論文では同等として解析を行った。その推定曲線と測定値をFig. 9

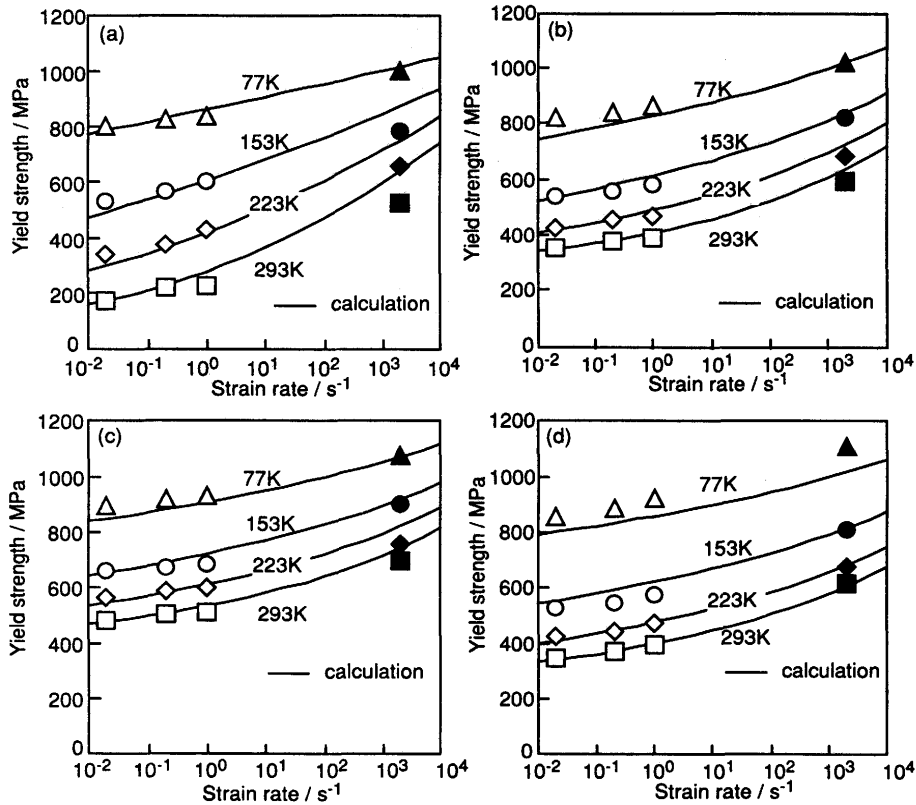


Fig. 9. Effect of strain rates on average yield strength for (a) mild steel (ULS), (b) solid solution hardened steel (SSH440), (c) solid solution hardened steel (SSH590) and (d) Dual Phase steel (DP590).

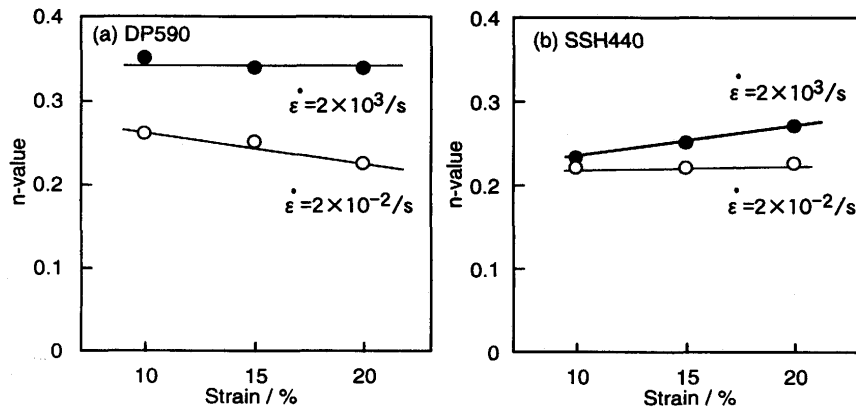


Fig. 10. Effects of strain rates on relationship between n-value and strain for (a) Dual Phase steel (DP590) and (b) solid solution hardened steel (SSH440).

に示す。歪速度 $2 \times 10^3/s$ における降伏強さの測定値(黒印)は、低歪速度域から外挿した推定値を越えなかった。したがって、この歪速度での鋼の変形は、Structure Evolution¹²⁾あるいは転位の移動に対するフォノン粘性抵抗¹³⁾により支配されるのではなく、転位の移動の熱活性化過程により支配されるとした取扱いで、十分に説明づけられる。

4・2 Dual Phase鋼のn値および降伏強さの歪速度依存性の支配因子

本節では、Dual Phase鋼のn値と降伏強さの歪速度依存性が他の鋼よりも大きい理由について考察する。

Dual Phase鋼は、歪速度 $2 \times 10^{-2}/s$ では、変形中の内部応力の蓄積のため変形初期のn値が大きい、変形量の増加につれて内部応力の緩和が起こり加工硬化量は減少する¹⁴⁾と考えられている。Dual Phase鋼と固溶強化鋼のn値と変形量の関係をFig.10に示す。Dual Phase鋼の歪速度 $2 \times 10^{-2}/s$ でのn値は、変形量の増加にともなって減少したが、固溶強化鋼のn値は、変形量によらずほぼ一定であった。一方、Dual Phase鋼の歪速度 $2 \times 10^3/s$ でのn値は、変形量によらずほぼ一定であり、歪速度の上昇にともなうn値の上昇は、固溶強化鋼よりも大きかった。歪速度の上昇は、転位の運動に対

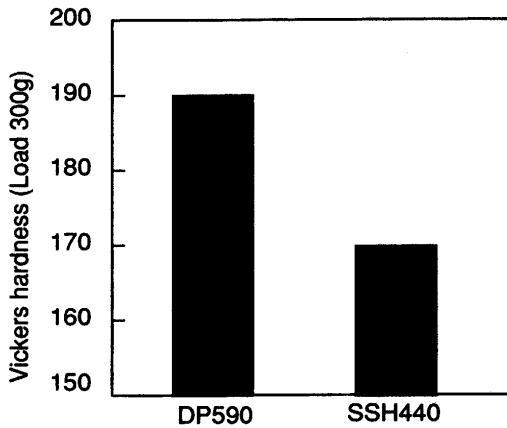


Fig. 11. Vickers hardness of ferrite phase in Dual Phase steel (DP590) and solid solution hardened steel (SSH440).

する熱振動のエネルギーの寄与を減少させるため、Dual Phase鋼中の内部応力の緩和が起こりにくくなると考えられる。そのため、歪速度の上昇にともない、 n 値が大きく増加し、さらに変形量が増加しても n 値が低下しなかったと考えられる。

つぎに、Fig. 4に示したように、Dual Phase鋼の降伏強さの歪速度依存性は他の鋼板よりも大きかった。その理由について考察する。Dual Phase鋼の変形は、マルテンサイト相よりも軟質であるフェライト相から始まる¹⁴⁾。そこで、降伏強さの等しいDual Phase鋼(DP590)と固溶強化鋼(SSH440)のフェライト相の結晶粒内の硬さを測定した。その結果をFig.11に示す。Dual Phase鋼中のフェライトのビッカース硬さは190であり、固溶強化鋼のビッカース硬さ170よりも高かった。一方で、Dual Phase鋼中のフェライトは、多量の運動可能な転位を含む¹⁵⁾ため、フェライトの強度が高いDual Phase鋼の降伏強さは低く、歪速度 $2 \times 10^{-2}/s$ における変形時には固溶強化鋼とほぼ同じ降伏強さを示した。しかし、歪速度 $2 \times 10^3/s$ における変形時には、歪速度 $2 \times 10^{-2}/s$ における変形時よりも転位の運動に対する熱振動のエネルギーの寄与が減少し、同一応力下で運動可能な転位は減少すると考えられる。そのため、歪速度 $2 \times 10^3/s$ における変形は、歪速度 $2 \times 10^{-2}/s$ における変形と比較して、転位の移動速度が速い、もしくは転位の増殖量が多いと考えられる。いずれの場合でも、Dual Phase鋼は固溶強化鋼よりもフェライトの強度が高く、転位の速度上昇もしくは増殖に大きな外部応力を必要とする。したがって、歪速度 $2 \times 10^{-2}/s$ における変形時にDual Phase鋼と固溶強化鋼がほぼ同じ降伏強さを示す場合に、歪速度 $2 \times 10^3/s$ における

変形時にはDual Phase鋼の降伏強さが固溶強化鋼よりも高くなったと考えられる。

以上の考察により、Dual Phase鋼の n 値および降伏強さの歪速度依存性が高く、歪速度 $2 \times 10^3/s$ における吸収エネルギーが大きい理由は、歪速度の上昇にともなうフェライトとマルテンサイト間の内部応力の緩和の減少により n 値が増加し、かつ転位の速度上昇もしくは転位の増殖に大きな外部応力を必要とするためと考えられる。

5. 結言

鋼板強度の歪速度依存性におよぼす強化法と組織の影響について研究を行い、以下のことが明らかとなった。

(1) Dual Phase鋼は、同じ降伏強さの他の鋼板と比較して、歪速度 $2 \times 10^3/s$ における吸収エネルギーが大きい。これは、Dual Phase鋼の歪速度 $2 \times 10^3/s$ における加工硬化指数が高く、かつ、降伏強さの歪速度依存性も大きいことに起因する。

(2) Dual Phase鋼中のマルテンサイトの体積率の増加およびフェライト-マルテンサイト界面面積の増加により、Dual Phase鋼の吸収エネルギーは上昇する。

本研究を遂行するにあたり、ご助言いただきました茨城大学友田陽教授に深く感謝いたします。

文 献

- 1) SAE Information Report, SAE, J885(1980), 6.
- 2) W.C.Leslie, R.J.Sober, S.G.Babcock and S.J.Green: Trans. Am. Soc. Met., **62** (1969), 690.
- 3) 阿部吉朗, 児島盛一郎: スパル技報, **14** (1986), 72.
- 4) E.Nakanish, M.Itabashi and K.Kawata: IUTAM Symp. on Constitutive Relation in High and Very High Strain rates, Noda, (1993), 423.
- 5) A.Yoshitake, K.Sato and T.Okita: SAE Tech. Pap. Ser., #960020, (1996).
- 6) K.Miura, S.Takagi, O.Furukimi, T.Obara and S.Tanimura: SAE Tech. Pap. Ser., #960019, (1996).
- 7) 水井直光, 福井清之, 小嶋啓達, 山本三幸, 川口喜昭, 岡本篤樹: 材料とプロセス, **9** (1996), 1100.
- 8) 上西朗弘, 末広正芳, 栗山幸久, 白田松男: 材料とプロセス, **9** (1996), 1112.
- 9) 栗生直樹, 谷村眞治: 第2回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, 日本機械学会編, 東京, (1994), 17.
- 10) A.R.Rosenfield and G.T.Hahn: Trans.Am.Soc.Met., **59** (1966), 962.
- 11) 野島武敏: 材料, **35** (1986), 1118.
- 12) J.D.Campbell and W.G.Ferguson: Phil.Mag., **21** (1970), 63.
- 13) P.S.Follansbee and U.F.Kocks: Acta Metall., **36** (1988), 81.
- 14) 友田 陽, 田村今男: 鉄と鋼, **68** (1982), 1147.
- 15) T.Tanaka, M.Nishida, K.Hashiguchi and T.Kato: Structure and Properties of Dual-Phase Steels, The Metallurgical Society of AIME (1979), 221.