

(討13) 低合金マルテンサイト鋼のひずみ時効について

大同製鋼中研の福井彰一・渡辺敏幸・浅田千秋

1. まえがき

低炭素マルテンサイトは強度の割合に靱延性がよいが、ソルバイト鋼にくらべて降伏強度が低いさいがある。鋼にひずみ時効処理を施すと降伏強度は上昇するが一般に靱延性を減ずる。筆者らは先に低合金鋼の低炭素マルテンサイトでは少量の予ひずみを加えて時効処理を施すことにより靱延性を損ねることなく降伏強度を著しく上昇できることを報告した^{1),2)}。マルテンサイトのひずみ時効処理による降伏強度の上昇はフェライトあるいはソルバイトの場合より著しく大きい、この場合には予ひずみが関与する本来のひずみ時効効果のほかに焼もどし効果による降伏強度の上昇が含まれるので、これらの効果をひとりに分離して検討してみた。

表1 供試材の化学成分

(%)

steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Ti
A	0.19	0.74	1.32	0.020	0.019	0.14	0.10	1.61	0.12
B	0.20	0.86	1.41	0.014	0.012	0.13	0.10	1.60	0.07

steel A: for the experiments on the effect of tempering before strain aging.
steel B: for the experiments on the effect of pre-strain percent.

2. 供試材および実験方法

供試材は200 kg高周波誘導炉で大気中溶解した鋼を熱間圧延により直径22 mmの丸棒としたもので、その化学成分を表1に示す。試験片の熱処理はいずれも22 mm直径の丸棒で行なった。

焼入は885°C×30 min油冷とし、焼入のままあるいは各種の温度で1 hr加熱後油冷の焼もどしを施したものを準備した。焼もどし試料の標準処理は300°C×1 hr油冷とした。熱処理を施した素材から機械加工によってJIS 4号引張試験片および平行部10 mm角の引張試験片を削り出し、引張試験機によって引張永久ひずみを与えたのち時効加熱を行なった。予ひずみ量は0.2%，時効加熱は200°C×1.5 hrを標準とした。JIS 4号引張試験片はそのままで、また角型引張試験片からはJIS 3号衝撃試験片を切り出してそれぞれの試験に供した。

3. 実験結果および考察

図1にひずみ時効処理後の機械的性質におよぼす素材の焼もどし温度の影響を示す。ひずみ時効条件はいずれも標準処理とした比較のためにひずみ時効処理を行なわない焼もどしはまの結果も併記したが、これらの比較からひずみ時効処理によって引張強さは変わらないが耐力が著しく上昇することがわかる。また耐力の上昇にもかかわらず伸びおよび絞りには変化せず、衝撃値はむしろ上昇することが認められる。このようなひずみ時効処理の効果は素材の焼もどし温度が低いものほど大きく、400°Cをこえて焼もどした素材では著しく減少している。

ところでマルテンサイトのひずみ時効処理による耐力の増加分には予ひずみによって導入された内部ひずみが関与する本来のひ

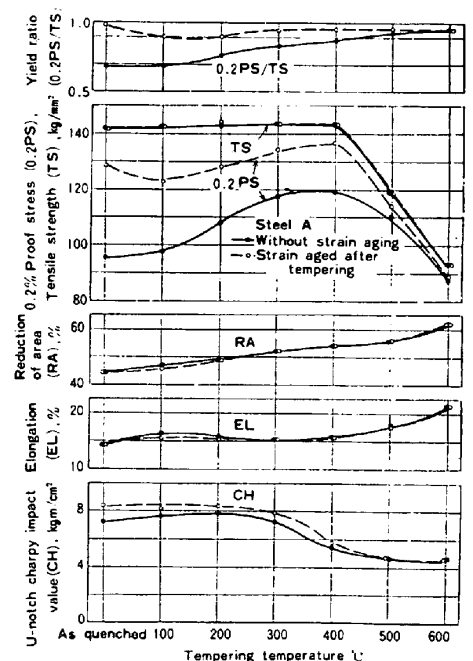


図1 焼もどしおよびひずみ時効処理後の機械的性質におよぼす素材の焼もどし温度の影響

ひずみ時効効果のほかにマルテンサイトがもともと持っている内部ひずみと過飽和固溶炭素の微細析出の寄与（焼もどし効果）が含まれている。

焼入したままのマルテンサイトにひずみ時効処理を施した場合の耐力について模擬的に示せば図2のようになる。 $\varepsilon\%$ の予ひずみを加えて時効加熱することにより、焼入ままのマルテンサイトの耐力は $\Delta\sigma$ 上昇する。焼入ままのマルテンサイトに $\varepsilon\%$ の予ひずみを加えた場合の加工硬化による耐力の増加は $\Delta\sigma_c$ であり、また焼入ままのマルテンサイトに予ひずみを加えることなく時効加熱を施した場合の焼もどし効果による $\varepsilon+0.2\%$ ひずみでの流動耐力の上昇は $\Delta\sigma_t$ である。 $\Delta\sigma_a = \Delta\sigma - (\Delta\sigma_c + \Delta\sigma_t)$ は予ひずみを加えたうえ時効加熱した際の附加的な耐力の増分であって、もし予ひずみがマルテンサイトの焼もどし過程に対してまったく影響を与えないならば $\Delta\sigma_a$ はひずみ時効効果による耐力の増分を表わすことになる。

焼もどし温度の異なる素材に標準のひずみ時効処理を施した場合の耐力の増分 $\Delta\sigma$ を上述の方法によって各要素に分離した結果を図3に示す。ひずみ時効処理による耐力の増分 $\Delta\sigma$ は焼入ままの素材に対して最も大きく、素材の焼もどし温度の上昇につれて減衰し、 300°C 付近で緩やかとなったのち 400°C 以上で急激に減ずる。加工硬化の寄与 $\Delta\sigma_c$ も同様に焼入ままの素材に対して最大で、素材の焼もどし温度が上昇するにつれて緩やかに減ずる。 $\Delta\sigma_t$ は焼入ままの素材では大きいが時効加熱温度 200°C まで急激に減じ、それ以上の温度で焼もどしたものは無視できるほど小さい。ひずみ時効による附加的な耐力の増分 $\Delta\sigma_a$ は素材の焼もどし温度 $200\sim 400^\circ\text{C}$ で最大となり、 400°C をこえると急激に減じていく。

以上のようにひずみ時効処理による耐力の増加は素材の焼もどし温度が時効加熱温度（ 200°C ）以下では主として $\Delta\sigma_t$ と $\Delta\sigma_c$ に、また 200°C 以上では $\Delta\sigma_a$ と $\Delta\sigma_c$ に依存することがわかった。図3において素材の焼もどし温度が低いところでは $\Delta\sigma_a$ が小さい理由としては次のようなことが考えられる。焼もどし温度が低く、炭化物が不安定な素材にひずみ時効処理を加えると、耐力の増加に寄与すべき焼もどし効果が減少され、附加的な効果 $\Delta\sigma_a$ は本来のひずみ時効効果より少ない値となる。

写真1(a)~(c)は焼入後各温度に焼もどしたものの、(d),(e)は予ひずみを加えてから各温度で焼もどしたものの、また(f)は焼もどしたのちにひずみ時効処理を行なったものの電顕像である。写真に認められる長さ 0.1μ 程度の析出物は電子線回折の結果セメントライトであることがわかった。これらの観察結果によると焼入材に加工を加えると焼もどし加熱時におけるセメントライトの析出を過剰せしめ、また、 300°C 程度の焼もどしによって析出していたセメントライトはその後のひずみ時効処理によって再固溶する傾向が認められる。これは予ひずみ加鋼の焼もどし過程に影響を与えることを示している。²⁴⁾

また、低い温度で焼もどされたマルテンサイト中の転位の固着は十分に強くはないため、これに予ひ

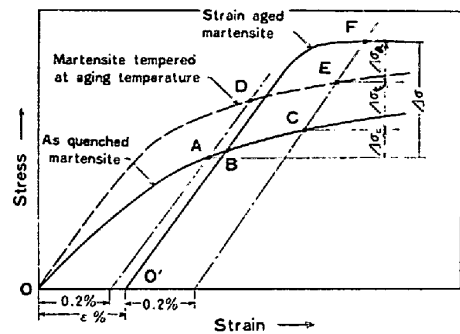


図2. マルテンサイトのひずみ時効効果を示す説明図

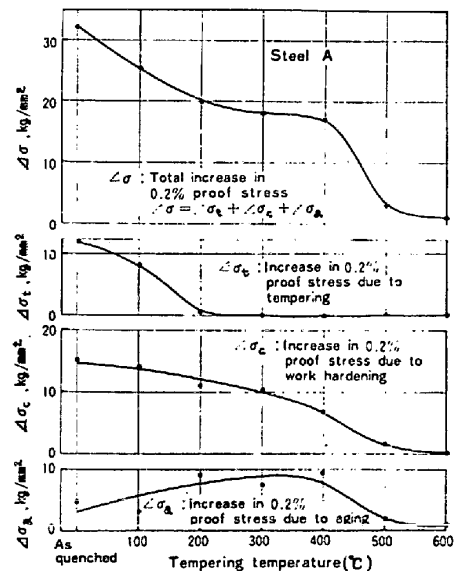


図3 ひずみ時効処理による耐力の増分 $\Delta\sigma$ 、焼もどし効果 $\Delta\sigma_t$ 、加工硬化 $\Delta\sigma_c$ 、および附加的な効果 $\Delta\sigma_a$ に及ぼす素材の焼もどし温度の影響

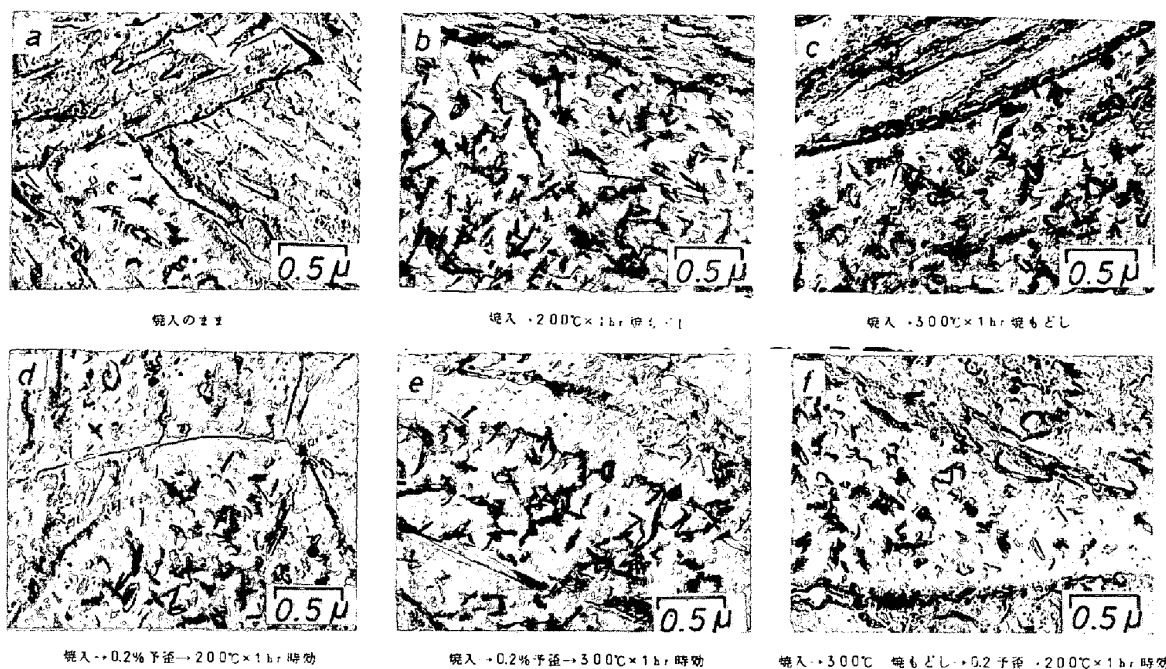


写真 1 各種の処理を施した低C-Si-Mn-Cr鋼の抽出レバカ法による電顕像

ずみを加えるときは転位の増殖が少なく済むと考えられる。ひずみ時効効果は転位の導入とその固着によるものであるから、予ひずみによって導入された転位の数が少なければひずみ時効効果も小さいであろう。

本供試材には焼もどし温度が400℃をこえると急激に内部ひずみを減じ、また炭化物も凝集しはじめる。これは予ひずみ時効時の転位の増殖を妨げてひずみ時効効果を減ずる。400℃以上で焼もどした素材のひずみ時効処理において

$\Delta\sigma_a$ が急激に減ずるのはこのような理由によると思われる。

図4および図5はそれぞれ焼入材および300℃焼もどし材のひずみ時効処理後の機械的性質におよぼす予ひずみ量の影響を示す。

予ひずみ量の増加に伴って耐力は上昇し、次第に引張強さに近づく。耐力が引張強さにほぼ一致する予ひずみ量は焼もどし材のほうが焼入材よりも小さく、これ以上の予ひずみを加えると引張強さが上昇するとともに伸びおよび絞りも低下する。

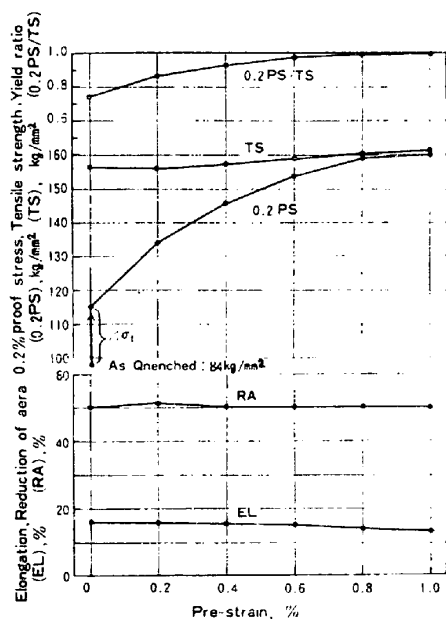


図4 焼入材のひずみ時効処理による機械的性質の変化におよぼす予ひずみ量の影響

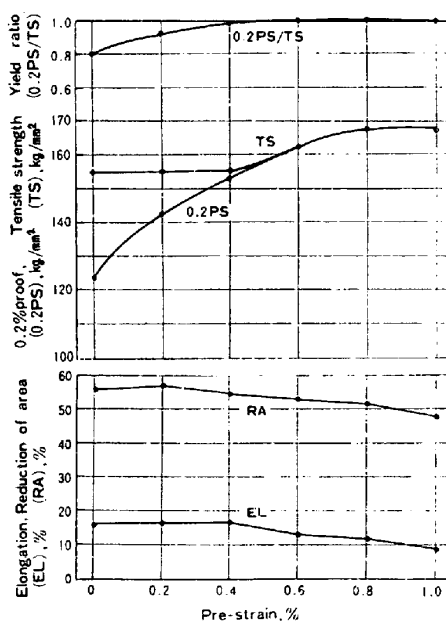


図5 300℃焼もどし材のひずみ時効処理による機械的性質の変化におよぼす予ひずみ量の影響

焼入材および焼もどし(300°C)材のひずみ時効処理による耐力の増加におよぼすひずみ量の影響を前と同様に各効果に分けて示したのが図6である。両材ともひずみ量の増加につれて $\Delta\sigma$ は増すが焼入材ではひずみ0のときにすでに焼もどし効果分 $\Delta\sigma_t$ だけ大きく、ひずみ量の増加につれて $\Delta\sigma_t$ は減少するがひずみ量による $\Delta\sigma_c$ の増加が焼もどし材よりも大きいため、結局ひずみ量にかかわらず $\Delta\sigma$ は焼入材のほうが焼もどし材よりも大きくなっている。焼もどし材は300°Cで焼もどしてあるため $\Delta\sigma_t$ は無視しうるほど小さい。 $\Delta\sigma_c$ がひずみ量を増すにつれて増加するのは当然であるが、焼入材のほうが焼もどし材よりも増加の割合が大きい。これは図2に示した両材の応力ひずみ線図の特性を比較すると容易に理解できる。ひずみ時効処理による附加的效果 $\Delta\sigma_a$ は両材ともひずみ量を増すにつれて増加する。これはひずみの附与による転位密度増加の効果が前述のごとき焼もどし効果の低減に打ち勝っているためと考えられる。焼入材の $\Delta\sigma_a$ が焼もどし材のそれより小さいのは図3の結果と同様である。

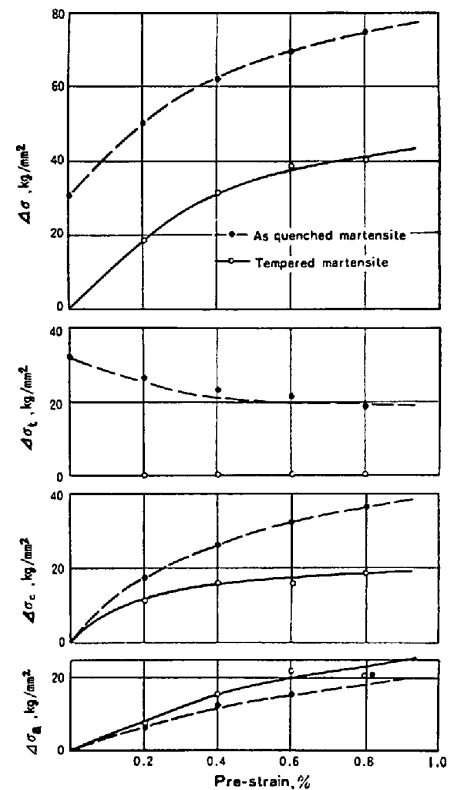


図6 焼入材および焼もどし(300°C)材のひずみ時効処理による耐力の増加 $\Delta\sigma$ 、焼もどし効果 $\Delta\sigma_t$ 、加工硬化 $\Delta\sigma_c$ および附加的效果 $\Delta\sigma_a$ におよぼすひずみ量の影響

4. まとめ

ひずみ時効処理による低合金低炭素マルテンサイトの耐力の増加 $\Delta\sigma$ をひずみによる加工硬化 $\Delta\sigma_c$ 、時効加熱温度における焼もどし効果 $\Delta\sigma_t$ および時効加熱による附加的效果 $\Delta\sigma_a$ の各要素に分けて調べた。

ひずみ時効処理による耐力の増加 $\Delta\sigma$ は焼入ままのマルテンサイトに対して最も大きく、素材の焼もどし温度が上昇するにつれて減少した。 $\Delta\sigma_t$ は素材の焼もどし温度がひずみ時効の加熱温度以下の場合に大きく、 $\Delta\sigma_c$ は素材の焼もどし温度の上昇につれて減少した。 $\Delta\sigma_a$ は焼入のままでは小さく、焼もどし温度が200~400°Cで最大を示した。素材の焼もどし温度が400°Cをこすとすべての効果は著しく減少した。

焼入材ではひずみ量の増加につれて $\Delta\sigma_t$ は減るが、 $\Delta\sigma_c$ と $\Delta\sigma_a$ の増加が大きく、また300°C焼もどし材では $\Delta\sigma_t$ の寄りは少ないが $\Delta\sigma_c$ と $\Delta\sigma_a$ が増加するためにひずみ量が多いほど $\Delta\sigma$ が大きいことがわかった。

参考文献

- 1) E. T. Stephenson and M. Cohen; Trans ASM, 54(1961), 72.
- 2) 渡辺, 福井, 浅田; 鉄と鋼, 52(1966), 724. 電気製鋼: 38(1967)3, 146.
- 3) M. B. Belous and V. T. Cherepin; Fizika Metallor i Metallobedenie, 14(1962), 48.
- 4) D. V. Wilson; Acta Met., 5(1957), 293.