

# 構造用合金鋼 (SNCM-439) の Ms 点に 及ぼす鍛造焼入れの影響\*

小林義一\*\*・森山 実\*\*\*・片山修一\*\*\*\*

## 1. 緒 言

筆者らは、加工熱処理により構造用合金鋼の恒温変態曲線 (S 曲線) がどのように変化するかについての研究を継続的に行っており、すでに Ni-Cr-Mo 鋼の場合について、オーステナイト化後、準安定オーステナイト温度で塑性加工を加えてオースフォーム処理をしたときの S 曲線の変化<sup>(1)</sup>及び同じく準安定オーステナイト温度で塑性加工を加えたときの Ms 点の変化<sup>(2)</sup>について報告した。また Ni-Cr-Mo 鋼 (SNCM-439) を安定オーステナイト温度で塑性加工を加えたいわゆる鍛造焼入れをした場合についての S 曲線の変化についても実験し、この場合は、パーライト領域及び上部ベーナイト領域では、加工を加えない場合に比較して S 曲線は短時間側に移動するが、下部ベーナイト領域では S 曲線が長時間側に移動することを報告<sup>(3)</sup>した。そこで、今回は S 曲線の下部ベーナイト変態とともに重要な意味をもつマルテンサイト変態の Ms 点が、安定オーステナイト温度で塑性加工を加えることによってどのように変化するかについて実験し、あわせて S 曲線の下部ベーナイト変態についても考察したので、その結果を報告する。

## 2. 試料と実験方法

### 2-1 試 料

試料は、前報<sup>(1)</sup>と同様に、直径 19mm の Ni-Cr-Mo 鋼 (SMCM-439) の丸棒を熱間鍛造で直径約 8 mm にし、その後 850°C で30分間焼なまししてから直径 5 mm 長さ 5 mm に丸削りして試料とした。試料の化学分析値を表 1 に示す。

表 1 試料の化学分析値 (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.40	0.26	0.67	0.020	0.021	1.74	0.89	0.17

### 2-2 実験方法

- \* 昭和56年12月 日本金属学会北陸信越支部講演会において発表  
\*\* 機械工学科助教授  
\*\*\* 機械工学科助手  
\*\*\*\* 機械工学科教授  
原稿受付 昭和57年9月30日

図1に示すように、試料を  $850^{\circ}\text{C}$  で30分間加熱してオーステナイト化したのち加熱炉から取り出して、同温度に加熱してある加工装置に移して20%又は40%の塑性加工（高さの減少率）を加えてから $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ の間に保持してある鉛浴に急冷して10秒間保持した。また、加工度0%の場合は、 $850^{\circ}\text{C}$ で30分間加熱してオーステナイト化後加熱炉から取り出し、ただちに $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ の間に保持してある鉛浴に急冷して10秒間保持した。その後速やかに $400^{\circ}\text{C}$ に保持してある別の鉛浴に入れて10秒間保持してのち $2^{\circ}\text{C}$ の水に焼入れした。なお、加工装置の詳細についてはすでに報告<sup>(1)</sup>した。

このような処理をすると、オーステナイト化した試料を  $200\sim 300^{\circ}\text{C}$  の間のある温度に急冷したとき、もしその温度が  $M_s$  点以上の温度であれば、その後 $400^{\circ}\text{C}$ に10秒間保持しても、オーステナイトのままであるので、これを水焼入れすれば、その試料の組織は全部マルテンサイトになる。

しかし、もし急冷したその温度が  $M_s$  点以下であれば、このときマルテンサイトが生じ、その後の $400^{\circ}\text{C}$ の焼もどしによりマルテンサイトから炭化物が析出するので、 $400^{\circ}\text{C}$ から焼入れした試料の組織はマルテンサイトとともに焼もどしトルースタイトが認められるはずである。そして、 $M_s$  点以下の、より低い温度に急

冷すればするほど、焼もどしトルースタイトの量は多くなる。そこで、 $M_s$  点近くのいろいろな温度に急冷してから、 $400^{\circ}\text{C}$ に焼もどしたのち水焼入れした試料の組織を調べて、焼もどし炭化物の析出し始める温度を見つけることにより、 $M_s$  点を知ることができる。

なお、この実験において、 $200^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ に保持しある鉛浴の温度は、 $M_s$  点に直接影響を及ぼすので極めて重要である。そのため、本実験では、検定済の水銀温度計を、鉛浴の中の試料が入る近くに入れておき、試料を鉛浴に入れた瞬間に温度計の目盛りを読んで、その時の急冷時の温度とした。また、試料の組織観察は、試料の端面をエメリーペーパー及びバフ仕上げ後、5%ピクリン酸アルコール溶液で腐食し、光学顕微鏡で行なった。また、一部の試料については、日本電子製100-C型電子顕微鏡による透過電子顕微鏡組織観察と電子回折及び同社製T-200型走査顕微鏡による組織観察を行なった。透過電子顕微鏡による観察は、試料から2枚刃の精密切断機により厚さはば0.1 mmの薄板を切り出してのち、直径3 mmの円板を切り出し、過塩素酸 50ml、酢酸 950ml 混合液を $13^{\circ}\text{C}$ に保ち、ストルーアス社製テヌポールを使用し、電圧50V、電流0.16Aで電解研磨した試料について行なった。また、走査顕微鏡による観察は、試料をバフ研磨後、10%アセチルアセトン・1%テトラメチルアンモニウムクロライド・メチルアルコール混合液を使用し、電圧0.5Vで3~7分間定電位を保つようにかくはんしながら電解エッチングした試料について行なった。

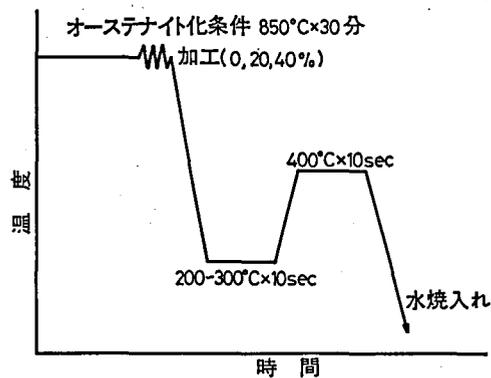


図1 実験方法

### 3. 実験結果

写真1～写真3は、850°Cでオーステナイト化後、その温度で0, 20, 40%の加工を加えてから200～300°Cの種々の温度に急冷してのち、400°Cに焼もどしてから水焼入れした試料の光学顕微鏡組織の1例で、写真1は加工度0%の場合、写真2は加工度20%の場合そして写真3は加工度40%の場合である。なお、今回の実験では、炭化物の析出し始める Ms 点近くの温度では、ほぼ3°Cおきに少しずつ温度を変えて、多数の試料の組織を観察したが、ここでは代表的な6個ずつの組織のみを示すことにする。これらによると、加工度0%の場合は、オーステナイト化後283°C以上の温度に急冷したときの組織は、その後の水焼入れによってマルテンサイトとなり、炭化物は全然認められないが、280°C以下の温度に急冷したときは、400°Cでの焼もどしにより炭化物が析出し、その後の水焼入れによってその組織はマルテンサイトの地の中に焼もどしトルースタイトが認められる。そして、急冷温度が低くなるにつれて、焼もどしトルースタイトの量は多くなっている。そこで、炭化物の析出し始める温度を外挿法により求めて、この場合の Ms 点を282°Cとした。加工度20%の場合は、277°C以上の温度に急冷したときの組織はマルテンサイトのみであるが、273°C以下の温度に急冷したときは、焼もどし炭化物が認められ、温度の低下につれて炭化物の析出量は多くなっている。そこで、炭化物の析出し始める温度を外挿法により求めて、この場合の Ms 点を274°Cとした。また、加工度40%の場合は、炭化物の析出し始める温度が263°Cであり、この場合の Ms 点は263°Cであることがわかった。

図2は、以上のようにして求めた Ms 点が、加工度の大小により、どのように変化するか

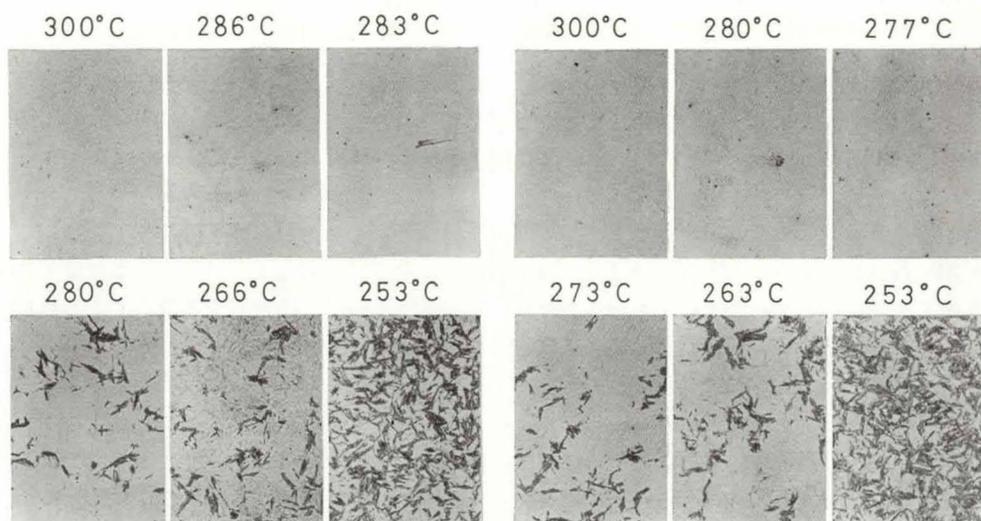


写真1 850°Cで30分間保持後、各種の温度に急冷したのち400°Cで10秒間焼もどしてから水焼入れした試料の光学顕微鏡組織 (40×5)

写真2 850°Cで30分間保持後20%加工してから各種の温度に急冷し、その後400°Cで10秒間焼もどしてから水焼入れした試料の光学顕微鏡組織 (40×5)

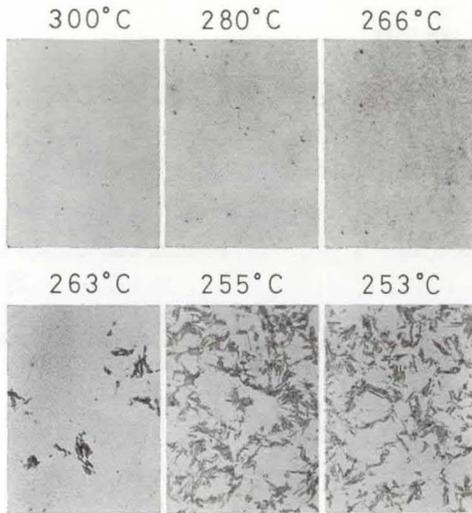


写真3 850°Cで30分間保持後、40%加工してから各種の温度に急冷し、その後400°Cで10秒間焼もどしてから水焼入れした試料の光学顕微鏡組織(40×5)

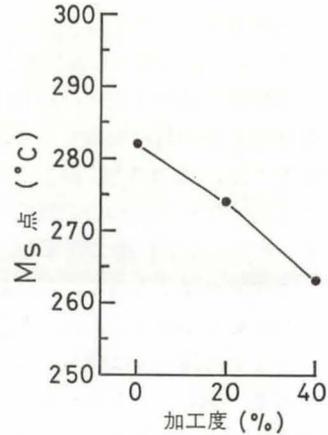


図2 Ms点と加工度の関係

についてまとめたものである。これによると、安定オーステナイト温度で塑性加工を加えてから水焼入れしたときのMs点、加工を加えない普通焼入れの場合のMs点にくらべてさき、かつ加工度が大きくなるにつれてほぼ直線的に低下する傾向にあることがわかる。

#### 4. 考 察

Ni-Cr-Mo 鋼 (SNCM-439) のMs点は、安定オーステナイト温度で塑性加工を加えることにより加工度にはほぼ比例して低下することがわかった。この現象は、筆者らがすでに報告<sup>(2)</sup>し、また荒木ら<sup>(4)</sup>も認めているように、焼入れする前に準安定オーステナイト温度に一たん保持して焼入れを中断すると、オーステナイトの安定化が起り、Ms点が下がることと似ている。しかし、準安定オーステナイト温度に保持してからその温度で塑性加工を加えるとMs点が上昇すること<sup>(2)</sup>とは異なった現象である。そこで、安定オーステナイト温度で塑性加工を加えるとなぜMs点が下がるかについて調べるために、透過電子顕微鏡による直接観察や走査顕微鏡による観察を行なって詳細な検討を加えた。

写真4は、850°Cで30分間加熱してオーステナイト化してから、その温度で0%、20%及び40%の塑性加工を加えてのち283°Cの鉛浴に急冷し10秒間保持し、さらに400°Cで10秒間焼もどしてから水焼入れした試料の透過電子顕微鏡組織であり、(a)は加工を加えない普通焼入れの場合、(b)は850°Cで20%の塑性加工を加えた場合、(c)は850°Cで40%の塑性加工を加えた場合、そして(d)は40%加工した試料のマartenサイト内部を10万倍の高倍率で観察した組織である。なお、これらの試料は、光学顕微鏡組織観察の結果からは、いずれの加工度でも炭化物の析出が全然認められなかったものである。これによると、加工度0%の場合は、極めて巾の広いラスマルテンサイトが認められ、マルテンサイト内部には、加工した場合に

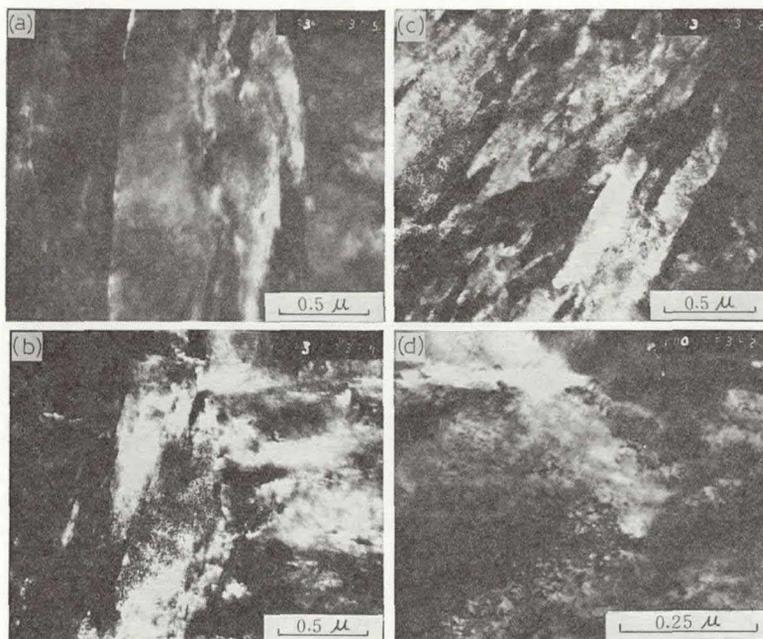


写真4 オーステナイト化後その温度で種々の加工度の塑性加工を加えてのち、283°Cに急冷してから400°Cに焼もどして後水焼入れした試料の透過電子顕微鏡組織  
(a)加工度0% (b)加工度20% (c)加工度40% (d)加工度40%の高倍率組織

見られるよりも低密度の転位と比較的大きな炭化物生成の核となるような集団が認められる。また、数は少ないが、加工を加えた場合のものに比べると比較的大きな点状の炭化物のようなものも認められる。加工度20%の場合には、マルテンサイトは塑性加工により小さくかつ湾曲され、転化密度は大部高くなり、クラスターも認められる。そして、高倍率で観察すると、加工度0%のときよりも小さい炭化物が分散しているのが認められた。さらに、加工度40%の場合には、マルテンサイト葉は大部こまかく分断され、かつもやもやとしたもつれた糸のような極めて高密度の転位やクラスター、変形双晶のような格子欠陥が多く認められ

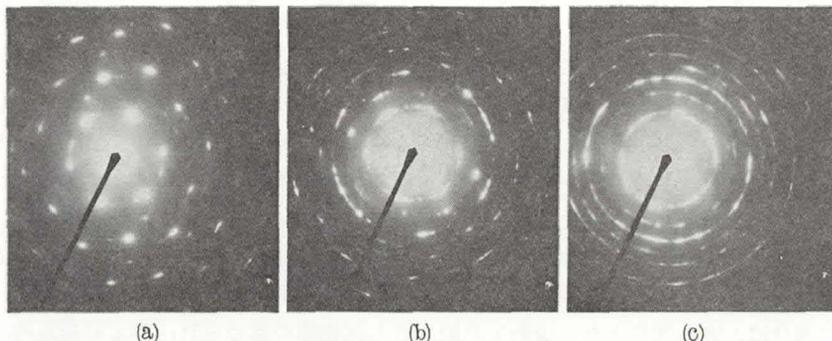


写真5 オーステナイト化後283°Cに急冷してから400°Cに焼もどして後水焼入れした試料の電子回折像  
(a) 加工度0% (b) 加工度20% (c) 加工度40%

る。そしてこれを一層高倍率（直接倍率10万倍）で観察した(d)によると、もやもやとした高密度の転位の中に、加工度20%のときよりもはるかに細かい炭化物がちらばっているのが認められ、安定オーステナイト温度での加工の影響がはっきり現われている。

写真5は、写真4の試料の電子回折像で、これによると加工度0%の場合は、回折斑点がはっきり点となって認められるが、塑性加工を加えた場合は、回折斑点が横にのびてリング状になり、加工度が高くなるにつれてその傾向が著しくなっている。すなわち安定オーステナイト温度での加工の影響が、マルテンサイトに受けつがれていることがわかる。

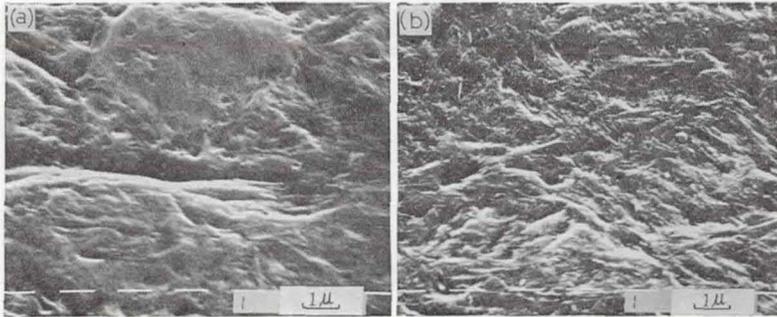


写真6 オーステナイト化後283°Cに急冷してから400°Cに焼もどして後水焼入れした試料の走査顕微鏡組織  
(a) 加工度0% (b) 加工度20%

写真6は、写真4の試料すなわちオーステナイト化後283°Cに急冷してから400°Cに焼もどして後水焼入れした試料の走査顕微鏡組織である。これによっても、加工度0%の場合は、少数の点状の炭化物が認められ、加工度20%の場合は、全面にわたって微細な炭化物が分散しているのがわかる。

写真7は、オーステナイト化後266°Cに急冷してから400°Cに焼もどして後水焼入れした試料の走査顕微鏡組織である。これによると、加工度0%の場合は、比較的大きな炭化物が曲がった帯状につらなって認められ、加工度20%の場合は、炭化物の大きさは加工度0%のときよりもやや小さくなり、その数も少ない。しかし、加工度40%の場合は、非常に微細な炭化物が全面に均一に分布している。図2によると、Ms点は加工度0%のときが282°C、加工度20%のときが274°Cそして加工度40%のときが263°Cである。したがって、この266°Cという温度は、加工度0%と20%の場合のMs点より低いので、この場合は焼もどし炭化物の存在は十分あり得る。しかし、加工度40%の場合のMs点よりは高いので、この場合は焼もどし炭化物は存在するはずがない。そこで、これらの微細な炭化物はオーステナイト時に固溶しなかった未溶解炭化物と思われる。

写真8は、さらに低い温度に急冷した場合の透過電子顕微鏡組織で、オーステナイト化後263°Cに急冷してから400°Cに焼もどして後水焼入れした場合である。これによると、加工度0%の場合は、丸太状に大きく成長した焼もどし炭化物が認められ、加工度20%の場合も加工度0%のときの炭化物よりは小さいが、柱状又は棒状の焼もどし炭化物が認められる。しかし、加工度40%の場合は、焼もどし炭化物は認められず、からまった糸のようにもつれ

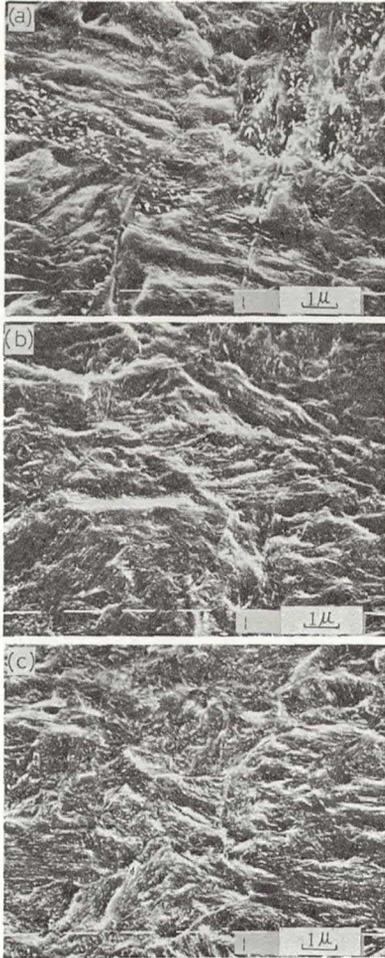


写真7 オーステナイト化後266°Cに急冷してから400°Cに焼もどして後水焼入れした試料の走査顕微鏡組織  
(a)加工度0%, (b)加工度20%, (c)加工度40%

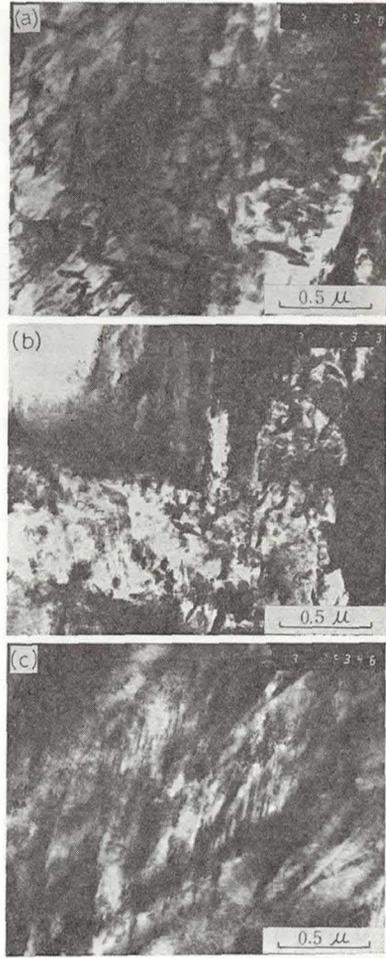


写真8 オーステナイト化後263°Cに急冷してから400°Cに焼もどして後水焼入れした試料の透過電子顕微鏡組織  
(a)加工度0%, (b)加工度20%, (c)加工度40%

あった高密度の軽位や変形双晶などの格子欠陥と極めて微細な炭化物が認められる。また、この263°Cという温度は、加工度40%のMs点であるが、この写真の部分は針状のマルテンサイトとなっている。

写真9は、写真8の試料すなわちオーステナイト化後263°Cに急冷したときの試料の電子回折像であるが、これによると、加工度0%の場合も回折斑点が横にのびてリング状となっており、オーステナイト化後283°Cに急冷した場合の加工度0%の回折像(写真5)と異なった様子を示しているが、これはおそらく焼もどし炭化物の影響であろう。加工度20%の場合も同じような傾向を示し、283°Cに急冷した場合の回折斑点に比べると斑点が横にのびて、リングに近くなっている。一方、加工度40%の場合は、焼もどし炭化物が存在しないにもかかわらず、リング状の回折斑点となり、283°Cに急冷した場合と同じように、安定オー

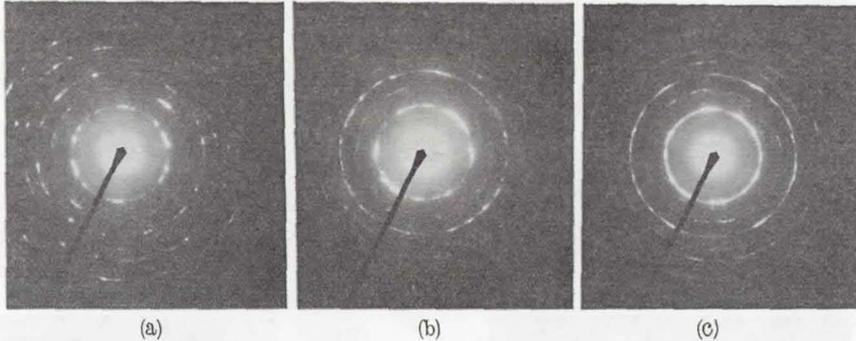


写真9 オーステナイト化後263°Cに急冷してから400°Cに焼もどして後水焼入れした試料の電子回折像  
 (a) 加工度0% (b) 加工度20% (c) 加工度40%

ステナイト温度での加工の影響がマルテンサイトを受けつがれていることを示している。

以上のように、加工を加えない普通焼入れの場合は、転位密度がそれほど高くなく、焼もどし炭化物発生の核となるべき集団のようなものは比較的大きいがその数は少なく、かつ未溶解炭化物と思われる炭化物も比較的大きく集まっているので、オーステナイトの大部分を占める地の部分は、比較格的子変態を起こしやすい状態にあると考えられる。これに対して、塑性加工を加えた場合は、オーステナイトの大部分にもやもやとしたもつれた糸のような極めて高密度の転位やクラスター、変形双晶のような格子欠陥が多くでき、未溶解炭化物と思われる炭化物も加工の影響で極めて微細に分断されかつ均一に分散されているため、オーステナイト全体がなかなか格子変態を起こしにくい状態にあると考えられる。格子変態は、多数の原子が相互に直接関連を保ちながら一団となって新しい相の位置に、ごくわずかの距離をせん断的に変位して結晶格子が変わること<sup>(5)</sup>を云うが、オーステナイト全体が上記のような状態にあれば、ごくわずかであっても、多数の原子が一団となって新しい相の位置に移動することは、より困難になるわけで、変態を起こすためには、一層大きなせん断エネルギーが必要となる。そのためには、瞬間的にオーステナイトを、より低い温度にしなければならず、その結果  $M_s$  点が低下したものと思われる。田村<sup>(6)</sup>は、準安定オーステナイト温度で加工を加えた場合の各種合金鋼のマルテンサイト変態に及ぼす変態前の加工の影響をまとめており、その中で、合金の種類によっても変わるが、一般的に数%以内の加工では変態を促進するが、それ以上の加工ではかえってオーステナイトを安定にし、変態がおくれ、 $M_s$  点が下り、この現象は合金の積層欠陥エネルギーと深い関係があるとのべているが、本実験のような安定オーステナイト温度で加工した場合にも、加工度が20%及び40%と高いので、上記のような理由で、格子変態が起こりにくいオーステナイト状態になっており、いわゆるオーステナイトの加工安定化が起こって、 $M_s$  点が下がったものと思われる。

また、前報<sup>(3)</sup>で安定オーステナイト温度で塑性加工を加えたときのS曲線の変化を調べた結果、下部ペーナイト領域においてのみ、S曲線が長時間側に移動する現象を報告したが、ペーナイト変態は、最初オーステナイトより炭素が過飽和なフェライトに格子変態し、次いで炭化物が析出したもので、この場合の過飽和のフェライトは一時的には広義のマルテンサ

イト変態によって生じたもの<sup>(7)</sup>と考えられている。すなわち、下部ベーナイト領域では、まず、マルテンサイト変態が起こってのち炭化物が析出するので、この場合に S 曲線が長時間側に移動することは、格子変態が起こりにくいからであり、今回の実験で Ms 点が下がったことにより十分説明できる。

## 5. 結 論

Ni-Cr-Mo 鋼 (SNCM-439) を 850°C で 30 分間加熱してオーステナイト化し、その温度で加工度 0%、20% 及び 40% の塑性加工を加えたときの Ms 点を光学顕微鏡組織観察により求め、透過電子顕微鏡及び走査顕微鏡による詳細な検討を加えた。また、この場合に、下部ベーナイト領域における S 曲線が長時間側に移動する現象についても考察したことをまとめるとつぎのようである。

(1) Ms 点は、安定オーステナイト温度で塑性加工を加えると、加工度にほぼ比例して低下する。これは、塑性加工をすることにより、もつれた糸のような極めて高密度の転位、クラスタ、変形双晶などのような格子欠陥が多数でき、更に未溶解炭化物と思われる炭化物も加工の影響で極めて微細に分断されかつ均一に分散し、また結晶粒も複雑に湾曲されることなどにより、格子変態が起こりにくいオーステナイト状態になっており、いわゆるオーステナイトの加工安定化の現象ではないかと推論される。

(2) 下部ベーナイト変態は、広義のマルテンサイト変態が起こってのち炭化物が析出することにより起こる現象であると言われているので、安定オーステナイト温度で塑性加工を加えることにより Ms 点が低下することは、下部ベーナイト領域において、S 曲線が長時間側に移動することを良く説明できる。

## 参 考 文 献

- (1) 小林義一, 片山修一: 長野工業高等専門学校紀要, 第 9 号 (1978), P. 17.
- (2) 小林義一, 片山修一: 長野工業高等専門学校紀要, 第 9 号 (1978), P. 29.
- (3) 森山 実, 小林義一, 片山修一: 長野工業高等専門学校紀要, 第 13 号 (1982), P. 29
- (4) 荒木透ほか: 鋼の熱処理技術, (1969), P. 59.
- (5) 矢島悦次郎, 市川理衛, 古沢浩一: 若い技術者のための機械・金属材料, (1980), P. 76
- (6) 田村今男: 日本金属学会会報, 第 2 巻 (1963) 第 8 号, P. 426.
- (7) 金属熱処理技術便覧, P. 46