

# 熱間工具鋼(SKD6)の機械的性質におよぼす オースフォームと複合加工熱処理の影響

片 山 修 一\*

## The Effects of Ausforming and the Complex Thermomechanical Treatment on the Some Mechanical Properties of Hot Work Tool Steel (SKD6)

Shuichi Katayama

### 1. 緒 言

近年、加工と熱処理を併用した加工熱処理による鋼材の強靱化についての研究が盛んに行なわれ、その進歩はめざましいものがある。加工熱処理にも種々の方法が考えられるが、その一つはオースフォームとよばれ、オーステナイト化した鋼を等温変態線図の入江の温度まで急冷し、その温度で加工した後、焼入してマルテンサイト変態をおこさせ、しかる後焼もどしを行なう処理で、鋼は靱性をそこなうことなしに著しく強化するといわれている<sup>(1)~(3)</sup>。また加工焼入とよばれ、安定オーステナイト領域で熱間鍛造あるいは圧延した後、直ちに焼入を行ないマルテンサイト変態を起させ、その後焼もどしを行なう方法で、鋼の硬化態が著しく上昇すると同時に、鋼の強靱化にも相当寄与すると報告されている<sup>(2),(4)</sup>。筆者は、オースフォームの加工温度が大体鋼の再結晶温度以下<sup>(5)</sup>であろうと考えられることにより、オースフォームと加工焼入の両処理を併用する、すなわち鋼を安定オーステナイトの温度領域で熱間加工を加えた後、直ちにS曲線の入江の温度付近まで急冷し、この温度で再び加工して常温に急冷し、マルテンサイト変態を起させれば(以下この処理を複合処理とよぶ。)オースフォームのみで処理した鋼よりもさらに強靱な鋼を得られる可能性があり、またたとえオースフォーム処理以上の性能が得られなくても、安定オーステナイト領域での加工はきわめて容易であり、両処理の併用によりオースフォーム処理の加工度を下げて、高い加工度の場合と同程度の性能が得られれば、この方法も製造上の意義があると考え、この実験を計画した。そこでS曲線の入江の時間が長くてオースフォーム処理に適した熱間工具鋼 SKD6を使用して、普通の焼入処理とオースフォーム処理および加工焼入処理と複合処理の実験を行ない、引張強さ、伸び、硬度および衝撃値を調べ、これら処理の効果を比較検討したので、その結果を報告する。

### 2. 試料および実験方法

#### 2-1 試 料

実験に供した試料は、19<sup>mm</sup>φの市販のSKD6(日特鋼名DKA)の丸棒で、その化学組成を表1に示す。

\*機械工学科

表1 試料の化学組成 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0.35 ~0.40	0.90 ~1.20	0.20 ~0.50	<0.030	<0.030	4.75 ~5.25	0.85 ~1.05	0.45 ~0.55

また、この種材料のS曲線は、文献<sup>(6)</sup>によると図1のごとくである。

2-2 オースフォーム処理

オースフォームに使用した素材は、熱間鍛造後、850°Cで焼鈍してから、下記寸法になるよう機械仕上を行なって作成した。この寸法は、それぞれの加工度でオースフォームしたとム処理をき、板厚がすべて3mmになるよう考慮した。

表2 単位：mm

加工度%	0	25	40	60
<i>l</i>	約280	約220	約170	約110
<i>a</i>	10	10	10	10
<i>t</i>	3	4	5	8

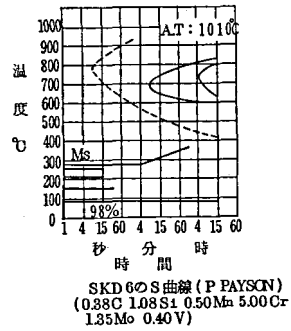
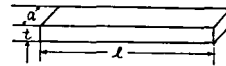


図1



素材の形状

図2

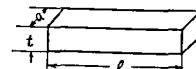
図2の形状の素材を1050°Cで20分間加熱してオーステナイト化したのち、500°Cに保持した低温ソルトバス中に焼入れ、約1分間保持したのち取り出し、500°Cの温度に保ってある電気炉に装入し、この炉中に約10分間保持した。その後炉より取り出し、50HPの熱間2段圧延機ですばやく圧延したが、1回の圧延では所定の加工度に達しないので、圧延後は再び炉に装入し、この炉中に約5分間保持してから再び圧延し、所定の板厚になるまでこれを繰返したのち油冷した。このとき使用した圧延機は、ロールの直径300mm、圧延速度は17m/minおよび34m/minの2段切り替えの可能なものであったので、それぞれの加工度について加工速度の速い場合(34m/min)と遅い場合(17m/min)の2種類の素材を作成し、加工速度の大小による影響をみるための試料とした。なお、加工度0%の素材は、普通処理の試験片用とし、普通の焼入焼もどし処理を行なった。

2-3 複合処理

複合処理には、鍛造後焼鈍して、図3、表3に示された形状寸法に機械仕上した素材を使用した。この寸法は熱間圧延後の板厚が、オースフォーム処理用の素材と同じようになるよう考慮したものである。したがって複合処理後の板厚は、オースフォーム処理後の肉厚と同じで3mmである。

表3 単位：mm

加工度%	0	25	40	60
<i>l</i>	約140	約110	約85	約55
<i>a</i>	10	10	10	10
<i>t</i>	6	8	10	15



素材の形状

図3

この素材を1050°Cで20分間加熱して、オーステナイト化したのち取り出し、圧延機です

ばやく加工度50%の熱間圧延をしたのち、500°C のソルトバス中に焼入れ、約1分間保持したのち取り出し、再び圧延機にかけた。1回の圧延では所定の加工度に達しないので、圧延後は500°Cの温度に保ってある電気炉に装入し、約5分間保持してから再び圧延し、所定の板厚になるまでこれを繰返したのち油冷した。この処理に使用した圧延機は、オースフォームに使用したのと同じ圧延機であり、圧延速度は17m/minである。なお、加工度0%の素材は、加工度50%の熱間圧延後、たぐちに油中冷却したもので、加工焼入した素材に相当し、加工焼入の効果をみるための試料とした。

#### 2-4 焼もどし

オースフォームおよび複合処理により作られた約3×10×280mmの素材は、処理したままのものを必要量残し(焼入状態の試料用)その他のものは、N<sub>2</sub>ガスを使用した電気雰囲気炉を使用して100°C~600°Cの各温度で90分焼もどしをした。

#### 2-5 試験片

引張試験用試験片および衝撃試験用試験片は、図4および図5に示すごとき形状寸法のものでオースフォーム及び複合処理をしたものは普通の機械加工が困難なので、治具を製作してすべて研削加工によって仕上げた。また最後の仕上げは、ハンドグラインダーを使ってバフ仕上げを行なった。

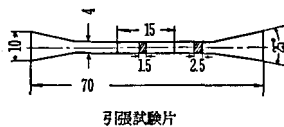


図4 単位: mm



図5 単位: mm

衝撃試験片は、切欠をつけることが困難であったので、切欠のないまま試験をしたが、各処理間の相対的關係を比較するには、差支えないものと考えた。

#### 2-6 材料試験

引張試験は、島津製万能試験機(50t~2.5t)を用い、引張強さを求めるとともに荷重-伸び曲線も調べた。伸びは、試験片平行部にあらかじめ約10mmの間隔に標点をけがき、その距離を津上製工具顕微鏡を用いて1/100mmの単位まで測定し、これを標点距離として求めた。硬度は、引張試験を実施する前に、試験片の側面について、ロックウェル硬度計(Cスケール)で測定し、4つの測定値の平均をもって、その試料の硬度とした。衝撃試験は、容量3ft-lbの小型アイゾット試験機を用いて行ない、全吸収エネルギーの値をそのまま衝撃値とした。

### 3. 実験結果とその考察

#### 3-1 加工度と機械的性質の関係

オースフォーム材および複合処理材について、各加工度に対し、引張強さ、硬度、伸びお

よび衝撃値がどのように変化するかについて述べる。

### (1) オースフォーム

図2および表2に示すがごとき形状寸法の鋼片を1050°Cで20分間加熱してオーステナイト化したのち、500°Cに保たれたソルトバス中に焼入れ、約1分間保持後、500°Cに保持された電気炉に装入し、約10分経過後取り出して圧延加工(加工度25~60%)したものについて、室温で引張強さ、伸びおよびロックウェル硬度(Cスケール)を測定した結果を図6

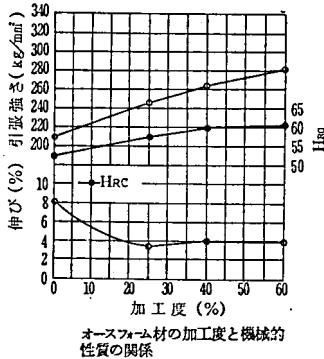


図6

オースフォーム材の加工度と機械的性質の関係

に示す。なお、この値は、加工速度 17m/min のものについての測定値を示す。図6によれば、引張強さと硬度は加工度が増すにつれてほぼ直線的に増加し、加工度60%のオースフォーム材を加工度0%すなわち普通焼入材と比較すると、オースフォーム材は、普通焼入材より引張強さでは約35%弱、硬度では約 Hrc7.5 の増加となり、引張り強さの増加率は、加工度1%当り約 1.15kg/mm<sup>2</sup> となる。この値は、すでに報告されている H-11 鋼 (SKD61 相当) の数値<sup>(7)</sup> と比較した場合や、大きいようであるが、試験片の形状等を考慮すると、ほぼ妥当な値と考えられる。なお、引張強さ、硬度の増加の割合を各加工度について観察すれば、引張強さは加工度40%までは、増加率が1%当り約 1.25kg/mm<sup>2</sup> であるが、加工度が40~60%間では、1%当り約 1kg/mm<sup>2</sup> の増加率となる。硬度についてもほぼ同様の傾向を示し、これは五弓らのように、加工度の増加に伴ない次第にその効果の影響が飽和してくる傾向のあることを表わしているものといえる。伸びは加工度が増すにつれて減少するが、40%および60%については余り変化がみられなかった。伸びの減少については、Zacky らが述べているように、SKD6 の鋼種には、約 1000°F (540°C) 以上の温度で加工するか、あるいはこれより低温で加工するとしても約75%以上の加工度で加工しないと伸び、絞りが低下するという、いわゆる臨界加工温度、臨界加工度があり、本実験においては、複合処理の効果を見るため回復、再結晶の現象をできるだけおさえる目的で、加工温度を 500°C と比較的低温にしたため、その結果、加工温度が臨界加工温度以下であり、しかも加工度も60%までで臨界加工度以下であったと思われるので、伸び

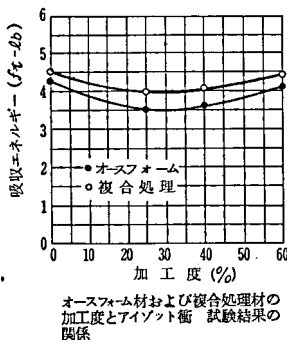


図7

オースフォーム材および複合処理材の加工度とアイゾット衝撃試験結果の関係

が普通処理の場合に比べ、相当減少する結果となって表われたものと考えられる。つぎに室温における衝撃値と加工度との関係を図7に示す。衝撃値は2mm×2mmの試験片の吸収した全エネルギーをもって表わした。これによると、衝撃値は、加工度によって著しい影響は受けにくいようであるが、加工度25%および40%の付近で若干小さくなる傾向がみられる。

つぎに、オースフォーム処理について、加工速度を変化させた場合、機械的性質にどのような影響を与えるかについて、加工速度17m/min、および34m/minのときのそれぞれの結果を図8、図9に示す。

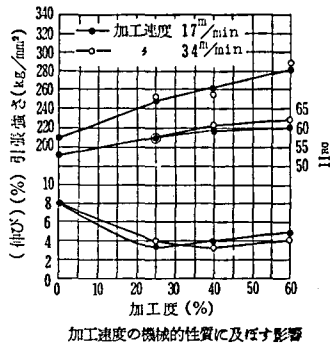


図 8

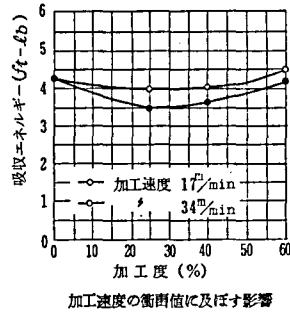


図 9

これによると、この程度の加工速度の変化では、引張強さ、硬さおよび伸びは殆んど変化がないといえる。しいていえば、加工速度の大きい方が、幾らか引張強さ、硬さが大きくなる傾向があるといえそうである。衝撃値については、加工速度の大きいときが、全加工度について大きい衝撃値を示し、加工速度が大きいと衝撃値は改善されるようであるが、加工速度が余り大きいと加工による発熱の影響も無視できなくなると考えられるので適正な加工速度の決定は、今後の研究に待たなくてはならないと思われる。

(2) 複合処理

図 3 および表 3 に示す形状寸法の鋼片を 1050°C で 20 分間加熱してオーステナイト化したのち、加工度 50% の熱間圧延加工を施し、たゞちに 500°C に保たれたソルトバス中に焼入れ、約 1 分間保持后、圧延加工 (加工度 25~60%) を施したものについて、室温で引張強さ、伸びおよびロックウェル硬度 (C スケール) を測定した結果を図 10 に示す。複合処理の場合

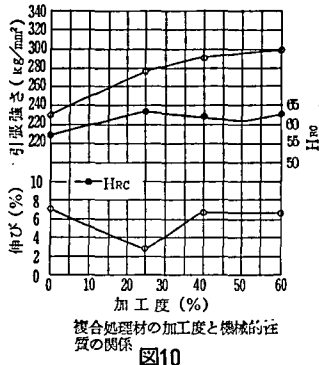


図 10

は、オースフォーム処理に比べ、硬度、引張強さとともに、かなり増加しているが、その傾向は大分異なる。硬度についてみれば加工度 0% すなわち加工焼入の場合は、Hrc 57.1 を示し、これを普通焼入のときの硬度 Hrc 52.7 に比べると、Hrc で約 4.4 程度の増加を示している。さらに加工度を増してゆくと、加工度 25% で最大に達して Hrc 63.0 を示し、40% では逆に、Hrc 61.2 と源少し、それ以後は加工度の増加に伴ない若平増加する傾向がみられる。加工度 25% で硬度が最大を示す理由については、後述の焼もどしのときの挙動と併せ考えると、恐らく、熱間加工による M<sub>s</sub> 点の上昇および

準安定オーステナイト領域における低歪量によるマルテンサイト変態の促進<sup>(5)(7)</sup> に関係があるものと考えられ、加工度 25% の場合には、加工時における若干の加工温度の低下と M<sub>s</sub> 点の上昇が重なり、結果的には、加工温度が M<sub>a</sub> 点以下になったためではないかと考えられるが、詳細については今のところよく分らない。つぎに引張強さについてみれば、加工度 0% すなわち加工焼入の場合、普通焼入材に比し、約 20 kg/mm<sup>2</sup> の増加を示し、加工焼入が本鋼種の場合、強度増加に相当効果であることを示している。複合処理すなわち加工焼入した試料にオースフォーム処理を付加してゆくと、加工度が増加するに従って引張強さも増大するが、引張強さの増加率は、加工度 1% 当り約 1.1 kg/mm<sup>2</sup> を示し、オースフォームの場合の値とはほぼ一致することは興味深い。しかし引張強さの増加率を細かく観察すれば増加率

は加工度40%までは加工度1%当り約1.5kg/mm<sup>2</sup>で非常に大きく、加工度が40~60%の間では、1%当り約0.5kg/mm<sup>2</sup>となり大きく減少する。このことより、オースフォームの場合も加工度の上昇に伴ない、その影響が飽和する傾向が見られたが、複合処理の場合は、その影響の飽和する加工度が低加工度側に移行する傾向のあることを示している。したがって複合処理による強化は、加工焼入によって付加された強度増加の寄与量に、その後のオースフォーム処理による強度増加の寄与量が単純に加算されたとはいえず、加工の影響の飽和する加工度が低加工度側にずれたことと、加工焼入による若干の強度増加分が重なって、低加工度における強度の著しい向上、高加工度における強度増加の鈍化となって現われているように考えられる。伸びは、加工度25%の場合は異常に小さい値を示すが、これを除けば、加工度によって著しい影響を受けないようである。

つぎに室温における衝撃値と加工度との関係についてみれば(図7参照)、オースフォーム材も複合処理材も、加工度によって著しい影響は受けにくいようであるが、やはり25%の付近で若干小さくなる傾向が見受けられる。また図から明らかなように、複合処理材は、オースフォーム材に比較して大きい衝撃値を示し靱性にまさることが分る。

### 3-2 焼もどし温度と機械的性質の関係

各加工度のオースフォーム材および複合処理材について、焼もどし温度を100°~600°Cに変えた場合、引張強さ、伸び、硬度および衝撃値がどのような影響を受けるかについて述べる。

#### (1) オースフォーム

各加工度(25~60%)におけるオースフォーム材(加工速度17m/min)を100°~600°Cの各温度で90分間焼もどしをして、常温におけるロックウェル硬度(Cスケール)引張強さおよび伸び(普通焼入と加工度60%)を測定し、普通の焼入、焼もどし材と比較した結果を図11および図12に示す。

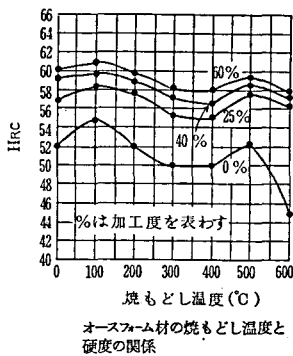


図11

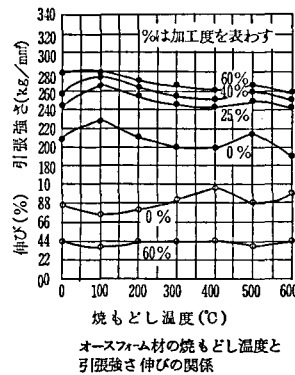
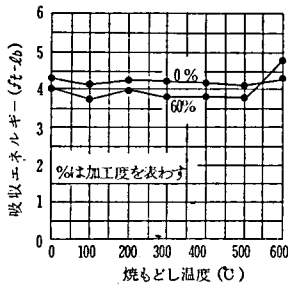


図12

図11, 12によれば、オースフォーム材は、普通焼入材に比べて、焼入したままの状態では、加工度が増加するに従って、加工度に比例してほぼ直線的に、引張強さおよび硬度を増してゆくが、これを焼もどした場合も、本実験の焼もどし温度600°Cまでは、普通の焼入材の焼もどし曲線とその形状はほとんど変わらず、加工度の増加に伴ない、その増加分に比例してほぼ平行的に変化する。また普通焼入材を焼もどしたときは、明らかに500°C付近で焼もどして2次硬化を起すが、加工度が増加するに従って、200°~400°C間の焼もどしによる硬度および引張強さの低下は減少し、2次硬化の現象が漸減して行く傾向がよく分る。恐

らく加工度80~90%位になると2次硬化は殆んど認められなくなるのではないかとと思われる。また焼もどし軟化低抗性も加工度の上昇に従って漸次改善されている。

つぎに、衝撃値に及ぼす焼もどし温度の影響について述べる。図13は、普通焼入材と加工



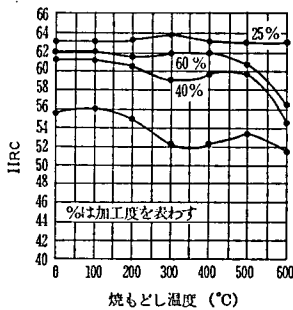
オースフォーム材の焼もどし温度と  
アイソット衝撃試験結果の関係

図13

度60%のオースフォーム材の各焼もどし温度に対する衝撃値の変化を表わす。これによれば、普通焼入材とオースフォーム材、いずれの場合も、衝撃値は焼もどし温度 600°C 位までは、ほとんど変化がみられない。また衝撃値は、500°C 以下の焼もどし温度では、普通焼入材の方がオースフォーム材より若干大きい、600°C 以上になると、その逆になり、オースフォーム材の方が大きい値を示すようになる。

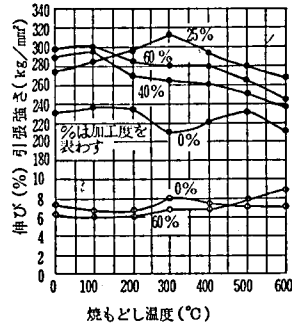
(2) 複合処理

各加工度 (25~60%) における複合処理材を、100~600°C の各温度で90分間焼もどしをしたときロックウェル硬度 (C スケール)、引張強さおよび伸び (加工焼入と加工度60%) を測定し、加工焼入材を焼もどしたときのそれらの値と比較した結果を図14および図15に示す。



複合処理材の焼もどし温度と  
硬度の関係

図14



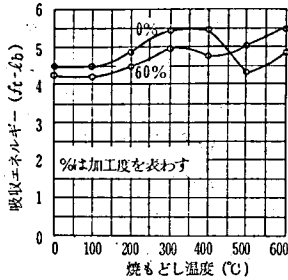
複合処理材の焼もどし温度と引  
張強さ伸びの関係

図15

図14, 15によれば、複合処理材は、オースフォームの場合とは異なり加工焼入材の焼もどし曲線を、強度増加分だけ、平行的に移動したような形にはならず、2次硬化を示すところのピークが加工焼入材では 500~600°C 付近にあらわれているが、加工度の上昇 (加工度25%は例外) につれて、そのピークが低温側に移動し、2次硬化が促進される傾向がうかがわれる。この傾向は、安中ら<sup>(10)</sup>が研究した時効硬化型鉄合金の時効が、加工度の増加に従って促進される現象と似ており、複合処理の場合も、熱間加工により加えられたエネルギーがオーステナイト中における部分的な溶質原子の凝集など炭化物析出の前段階の駆動力となり、これが以後の2次硬化の析出を容易にする働きをなすものと思われる。したがって、焼もどし温度 500°C 位までは、高い硬度および引張強さを維持するが、500°C をこえると引張強さは相当低下する傾向を示す。また2次硬化の現象は、加工度40%までは比較的顕著に現われるが、加工度60%になると殆んど現われなくなる。加工度25%のものは、低加工度にもかかわらず焼もどし温度 600°C まで異常に高い硬度 (HRC 約63) を保ちつづけ、かつ引張強さが、焼もどし温度 300°C で約 310kg/mm<sup>2</sup> という非常に高い値を示しているが、これは、オーステナイトの Md 点以下の加工により、マルテンサイトを生成しながら変形して著し

く強化した鋼を焼もどしたときに見られる現象<sup>(11)</sup>とよく一致する。伸びについては、加工度25%のものは例外として、加工度40%以上のものについては、かなり大きい値を示す。

つぎに、補合処理材の衝撃値に対する焼もどし温度の影響を図16に示す。これによると、



複合処理材の焼もどし温度とアイゾット衝撃試験結果の関係

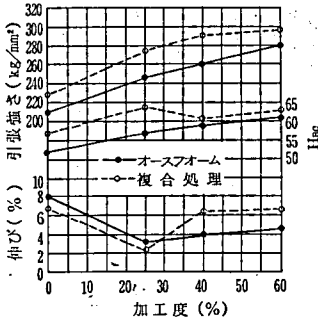
図16

加工焼入材は、焼もどし温度約 200°~400°C の間で高い衝撃値を示し、また加工度60%のものは、焼もどし温度が高くなるに従って衝撃値が漸増する傾向がみられる。また焼もどし温度約 200°~400°C の間では、加工焼入材の方が複合処理材に比べ若干大きい衝撃値を示すが、焼もどし温度が 500°C 以上になると、逆に複合処理材の方が大きい衝撃値を示すようになる。

### 3-3. オースフォームと複合処理の比較

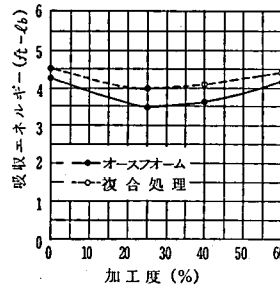
いままでオースフォーム処理と複合処理のそれぞれについて、加工度ならびに焼もどし温度を変えた場合、機械的性質にどのように影響するかについて述べてきたが、こゝでは両処理を比較しやすいように、それぞれの性能曲線を一括して再録し、その相違について検討する。

まず、図17および図18には、普通焼入材と各加工度のオースフォーム材および加工焼入材



オースフォーム材と複合処理材の機械的性質の比較

図17



オースフォーム材と複合処理材の衝撃試験の比較

図18

と各加工度の複合処理材の焼入状態における引張強さ、伸び、硬度および衝撃値を示す。これによれば、引張強さは、普通焼入材（オースフォームの加工度0%）と加工度60%のオースフォーム材を比べると、オースフォーム材が約 70kg/mm<sup>2</sup> の強度の増加を示し、その増加率は加工度1%当り約 1.15kg/mm<sup>2</sup> となる。また、加工焼入材（複合処理材の加工度0%）と加工度60%の複合処理材を比べると複合処理材の方が約 66kg/mm<sup>2</sup> の強度の増加を示し、その増加率は加工度1%当り 1.1kg/mm<sup>2</sup> となり、オースフォーム材の場合とはほぼ同じ値を示す。これは、準安定オーステナイト領域における加工による強化は、加工温度が同じである場合、オースフォーム処理も複合処理もほぼ加工度に比例することを意味する。しかし強度の増加の状況を、各加工度ごとにみれば、加工度0%すなわち普通焼入材と加工焼入材では、加工焼入材の方が約 20kg/mm<sup>2</sup> 大きく、また加工度40%では約 30kg/mm<sup>2</sup>、加工度60%では約 15kg/mm<sup>2</sup>、いずれも複合処理材の方が大きい値を示すが、強度の増加量は一定ではなく、性能曲線の形からも想像されるように複合処理の方が、オースフォーム処



理に比べ低加工度側で早く飽和する傾向を示すものといえる。加工度をさらに増していった場合、その最大を示す飽和点が、複合処理とオースフォーム処理を比較した場合、何れが高いかいまのところ分らないが、複合処理のように安定オーステナイト領域で熱間加工を加えることにより、準安定オーステナイト領域での加工度を下げて、すなわち低加工度で所要の強度を得ることが可能であり、またさらに炭化物の析出挙動になんらかの影響を与えるとすれば、加工条件を変えることにより、本実験で得られた値よりも、さらに強靱な鋼を得ることができるかも知れない。加工度25%の複合処理材は、強化の過程が他のものと若干異なると考えられるので、例外として扱ったが、引張強さについては、25%のものも、ほぼ同じ曲線上に乗ることは、偶然かあるいは意味のあることがよく分らないが面白い現象である。硬度については、引張強さの場合とほぼ同様の傾向を示し、やはり高加工度側で複合処理材とオースフォーム材との差が小さくなり、複合処理材が、低加工度側で早く飽和する傾向のあることを示している。伸びについては、普通焼入材と加工焼入材では普通焼入材の方が若干大きい値を示すが、加工度が增加すると逆に複合処理材の方が大きい値を示すようになる。また硬度および伸びについて、加工度25%のものを除き加工度0%、40%および60%のときのそれぞれの値がほぼ1つの曲線上に乗ることは、加工度25%の現象を考える場合意味のあることである。衝撃値については、複合処理材の方がオースフォーム材より全加工度を通じ大きい値を示し、複合処理材が靱性の大きいことを示している。

つぎに、普通焼入材—オースフォーム材および加工焼入材—複合処理材の各焼もどし温度 (100°~600°C) に対する機械的性質の変化を図19, 図20, 図21に示す。

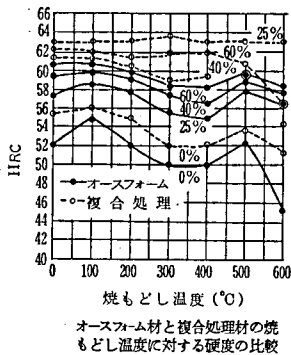


図19

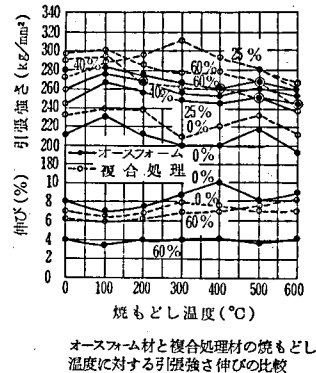


図20

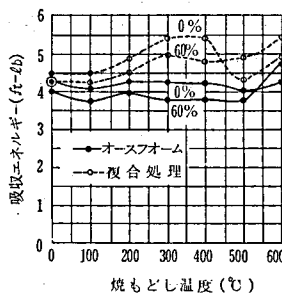


図21

まず、引張強さおよび硬度についてみれば、一般的にいうて加工焼入材および複合処理材の方が、普通焼入材およびオースフォーム材に比べて大きい値を示し、複合処理が効果的であることを示している。しかし各加工度における性能曲線の形は両者大分異なっていることが分る。すなわちオースフォーム処理の場合には普通焼入のときの性能曲線の形に加工による強度寄与量を加えた形で変化し、二次硬化のピークの位置に変化はほとんどなく、

加工度の増加に従ってそのまま平行に移動した形になっているが、複合処理の場合は、加工

焼入のときの性能曲線に加工による寄与量を単純に加えた形にはならず、二次硬化のピークの位置が加工度の増加に従って低温度側に移行する傾向のあることを示している。このことより、加工焼入材については、普通焼入材に比し焼もどし軟化抵抗性は改善され、中村ら<sup>(12)</sup>の研究による炭素鋼の加工焼入の場合と同様の効果を示すが、複合処理材は、加工度の増加に伴ない軟化開始温度が早くなり、焼もどしに対する軟化抵抗性に若干の問題があるといえる。つぎに伸びおよび衝撃値については、全般的にみて、複合処理材がオースフォーム材より大きい値を示し、靱性においてもすぐれた性質を示すことが分る。

以上、複合処理材とオースフォーム材について、機械的性質に及ぼす加工度および焼もどし温度の影響についてその概要を述べたが、複合処理が鋼の強度および靱性の向上に対し極めて効果的であることを示し、とくに低加工度において大きな効果を示すところに意義があるといえる。

複合処理の強化機構については、オースフォームの強化機構が判然としない現在、極めて困難な問題といわざるを得ないが、いずれにしても English ら<sup>(13)</sup> および Sokolkov ら<sup>(14)</sup>の報告にもあるように安定オーステナイト温度領域で加えられた加工による効果が再結晶温度以下の加工温度まで若干保持され、その効果が、準安定オーステナイトにおける加工によるその後の強化ならびに炭化物の析出挙動に影響を与えているものと考えられる。この場合、焼もどし二次硬化を起す炭化物の析出がオースフォーム処理においては、焼もどし温度500°C前後で起るが、複合処理においては、なぜ加工度の増加に従い低温側に移行するのか、その原因の詳細については、判然としない。筆者も、現在組織の解析について研究を進めているが、光学顕微鏡による観察では、オースフォームおよび複合処理を施した試料について今のところその相違を認めることができない。たゞ試料の Etching に際し、その腐蝕速度に相当の差（たとえば、腐蝕液に5%のナイトールを使用した場合、普通焼入材—40秒、加工焼入材—1分20秒、加工度60%で焼入れたまゝのオースフォーム材—2分30秒、加工度60%で焼入れたまゝの複合処理材—3分30秒）が認められ、同じ加工度のものを比較した場合、概して複合処理材の方がオースフォーム材より腐蝕に要する時間が長くなることを確認している。

#### 4. 総 括

オースフォームおよび複合処理（加工焼入とオースフォームの組合せ）をした熱間工具鋼（SKD6）の機械的性質——引張強さ、伸び、硬度および衝撃値——を調べ、普通焼入焼もどしおよび加工焼入焼もどしを施した同鋼材のそれらと比較して検討した結果、つぎのことが明らかになった。

(1) 焼入れたまゝの状態の引張強さおよび硬度は、オースフォーム処理の場合、加工度の増加とともにほぼ直線的に増加し、加工度60%と普通焼入を比較したとき、引張強さで約70 kg/mm<sup>2</sup>、ロックウエル硬度（Cスケール）で約7.5の増加となり、引張強さの増加率は加工度1%当り 1.15kg/mm<sup>2</sup>であった。

加工焼入の場合、普通焼入と比較したとき引張強さで約 20kg/mm<sup>2</sup>、ロックウエル硬度（Cスケール）で約4.4の増加となった。

複合処理の場合、加工度の増加とともに増加し、加工度60%と加工焼入と比較したとき、引張強さで約 70kg/mm<sup>2</sup>、ロックウエル硬度で約5.5増加し、またオースフォーム処理と比

較すると加工度によって変るが、加工度40%で約30kg/mm<sup>2</sup>、加工度60%で約20kg/mm<sup>2</sup>増加し、複合処理がオースフォーム処理に比べ効果的であり、また引張強さ、硬度がオースフォーム処理に比べ低加工度側で飽和する傾向のあることが分った。なお、加工度25%で異常に大きい硬度を示したが、これはマルテンサイトの変態途中の加工によるものであろうと思われる。

(2) 伸びは、オースフォームの場合、加工度25%では減少するが、それ以上の加工度では余り変化がなかった。複合処理の場合も、加工度25%を例外とすれば、加工度によって余り変化せず、オースフォーム処理より大きい値を示す。

(3) 衝撃値は、オースフォーム処理の場合、加工度によって大きい変化はないが、加工度25~40%で幾分小さくなる。複合処理の場合も同じ傾向を示すが、オースフォーム処理と比べると全体を通じ大きい値を示す。

(4) 引張強さ、硬度に及ぼす焼もどし温度 (100°~600°C) の影響は、オースフォーム処理の場合、普通焼入材を焼もどしたときの性能曲線とほぼ同じ形で加工度の増加とともに平行に移動し、二次硬化の現象も低加工度では判然としているが加工度の増加とともにはっきりしなくなる傾向がある。

複合処理の場合は、オースフォームと傾向が異なり、二次硬化を示すピークの位置が、加工度の上昇とともに低温度側に移行し、かつ二次硬化の現象の消滅がオースフォームに比べ低加工度で起る。その結果、複合処理材は低温度側の強化は著しいが、焼もどし軟化抵抗は小さくなる傾向がある。

(5) 伸びは、普通焼入と加工焼入では、普通焼入の方が焼もどし温度全体を通じ若干大きい値を示す。加工度60%では、オースフォームも複合処理も焼もどし温度により余り変化せず、その値は複合処理の方が大きいことが分った。

(6) 衝撃値は、オースフォーム (加工度60%) の場合、焼もどし温度 500°C 以下では普通焼入の方が大きい値を示すが、600°C 以上になるとオースフォームの方が大きくなる。加工焼入は、普通焼入に比べ高い衝撃値を示し、200°~400°C の焼もどし温度でとくに大きい値を示す。複合処理では、オースフォームに比べ大きい値を示し、かつ焼もどし温度が高くなるにつれて漸増し、500°C 以上では加工焼入材よりも大きい値を示す。

(7) オースフォームにおいて加工速度を変えてみた結果 (17m/min, 34m/min), この程度の変化では、引張強さ、伸び、硬さにはほとんど変化はみられなかった。衝撃値は加工速度の速い方が若干大きい値を示した。

以上のことから、複合処理は、焼もどし軟化抵抗性に若干の問題を残すが、オースフォーム材に比し強度および靱性にすぐれ、とくにS曲線の Bay 領域における低加工度で強化が著しいことは注目に値する。焼もどし軟化抵抗性についても、鋼の化学組成、安定および準安定オーステナイ領域における加工温度および加工度等を検討すれば改善される余地もあり、またさらに強度および靱性についても、本処理により一段と強靱な鋼を開発する可能性をもつものといえよう。

終りに、本実験の遂行にあたり、圧延作業および小型衝撃試験機の使用等について絶大な御援助を賜った科学技術庁金属材料技術研究所研究部長木村啓造博士をはじめとする同研究部の方々および試料切断機の使用等について終始御協力を賜った長野工業試験所の諸氏に深

く感謝致します。また本実験に終始真面目に協力下さった石川良知，下山雄二，石山佳夫，伊藤光人（以上本校第2回卒業生）ならびに鈴木貴雄，武重勉（本校在学中）の諸君に厚く敬意を表します。

### 参 考 文 献

- (1) D.J. Schmatz and V.F. Zackay : Trans. ASM, 51(1959), 476
- (2) E.B. Kula and J.M. Dhosi : Trans. ASM, 52(1960), 321
- (3) J.C. Shyne and V.F. Zackay : Trans. ASM, 52(1960), 346
- (4) 前田，河部，遠藤：日本金属学会誌，27(1963)，415
- (5) 田村：日本金属学会会報，2(1963)，426
- (6) 特殊鋼規格集（日特鋼），29
- (7) 田村：鉄と鋼 52(1966)，140
- (8) 五弓，木原，岸：日本金属学会誌，31(1967)，1177
- (9) V.F. Zackay and W.M. Justusson : Iron and steel Inst. Special Rept. 76 High-strength steel (1962), 14
- (10) 安中，荒木：日本金属学会誌，31(1967)，1058
- (11) 小高：日本金属学会誌，18(1954)，392，396，および455
- (12) 中村，浅村，山中：日本金属学会誌，32(1968)，28
- (13) A.T. English and W.A. Backofen : Trans. AIME, 230(1964), 396
- (14) Ye.N. Sokolov and Yu. P. Surkov : Phys. Met. and Metallography, 16(1963), 107

(44. 9. 20 受理)