

# 低合金鋼の機械的性質におよぼす改良オースフォームと 温間加工, または変態区間熱処理の複合効果

大森宮次郎\*, 山崎 明\*

(昭和58年9月6日受理)

Combined Effects of Modified Ausforming and either Warm Working or Intercritical Heat Treatment on the Mechanical Properties of Low-Alloy Steels

MIYAJIRO OHMORI\* and AKIRA YAMAZAKI\*

**Abstract** — Ni-Cr and Cr-Mo low-alloy steels were subjected to warm working during tempering in succession after modified ausforming. The steels were then retempered in the conventional range of tempering temperature except some tension test specimens.

On the other hand, an intercritical heat treatment was combined with modified ausforming for the Ni-Cr steel to ascertain the combined effect on the mechanical properties. The modified-ausformed martensitic steel was reheated at the intercritical temperature of 700°C or 720°C, quenched and retempered conventionally.

Warm working combined with modified ausforming has caused higher strength and lower ductility, but does not rearrange the strength-ductility relation in the case of unrettempered steels. Retempering after warm working has, however, deteriorated the combination of the strength and ductility for those steels.

Since the recovery in ductility by the intercritical heat treatment surpasses the loss in the yield strength or the tensile strength, the combined process of modified ausforming and the intercritical heat treatment seems to be a possible technique for positive toughening of the steel.

## 1. 緒 言

低合金鋼の強じん化の1手法として改良オースフォーム(modified ausforming)が有効であることは、著者らのこれまでの研究で示してきた。この方法は、鋼の通常の焼入れにおけるオーステナイト化温度から約700°C以上の準安定オーステナイト温度範囲で塑性加工を行い、ただちにマルテンサイト変態を生ぜしめ、続いて焼もどしを行う処理である。改良オースフォームによって、鋼のマルテンサイトの強化はもちろん、焼もどし後も延性

やじん性をあまり犠牲にすることなく、強化が達成され、特に疲れ強さの向上が著しい<sup>1),2)</sup>。

しかし、改良オースフォームによって強化した鋼は、その後の機械加工に対して難削材となり、その優れた性質の利用が立遅れていることは否定できない。そこで著者らは、改良オースフォームにより強化した鋼を焼もどす過程の温間で成形することを目的とした基礎的調査を行った。そして、機械構造用合金鋼を通常の焼もどし温度範囲で温間加工を行う場合、変形抵抗および変形能の挙動からは、この温度範囲での温間加工が可能であることを示した<sup>3)</sup>。しかるに、温間で成形する場合、その加工

\* 茨城大学工学部機械工学科(日立市中成沢町)

材の性質が、直接製品の機械的性質となるため、改良オースフォームした鋼のもつ優れた性質が、温間加工後にどのように変化するかは重要な点である。本研究の1つの目的は、改良オースフォームした鋼を焼もどし中に温間加工する場合、その加工条件によって、機械的性質がどのように変化するかを明らかにすることである。

ところで、改良オースフォームにより強化した鋼の難削性の改善策として、強度をあるレベルにおさえ、むしろ延性やじん性を増す方法が考えられる。この方法は、機械構造用合金鋼では、安全性の面から延性やじん性を高くとって使用するという目的に合致する。その場合、特殊な用途の鋼等には、強度よりも延性、じん性を高くするため、鋼を $\alpha + \gamma$ 温度域まで加熱、急冷を繰り返したり、あるいは加熱、冷却の1サイクルを行い $\alpha + \text{retained } \gamma$ の混合組織とする処理法がある。この方法は、変態区間熱処理 (intercritical heat treatment, IHT) と呼ばれ、じん性の向上に優れた効果のあることが示されている<sup>4), 5)</sup>。

改良オースフォームは、鋼の強じん化処理の部類に入れることができるであろうが、厳密にみれば、強化が主であり、延性やじん性が低下しないか、または低下しても、わずかであるということ、積極的な延性、じん性の改善法とはいえない。そこで、改良オースフォームにより強化した鋼に、じん化処理と考えられる変態区間熱処理により強度を下げることは、難削性の緩和につながる事が期待される。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試鋼材

実験には、Table 1 に示す化学組成の機械構造用合金鋼の Ni-Cr 鋼 (SNC631) および Cr-Mo 鋼 (SCM435) を用いた。直径32mmの市販棒鋼を温度900°Cで熱間圧延して所要の厚さとしたのち、900°C×1hの温度および保持で、窒素ガス雰囲気中で焼なましを行い、試片素材とした。

Table 1 Chemical compositions of steels used (wt.%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	Fe
SNC631	0.27	0.22	0.52	0.028	0.015	2.84	0.85	0.13	—	Bal.
SCM435	0.35	0.24	0.70	0.024	0.016	0.03	1.04	0.01	0.01	Bal.

### 2.2 熱処理

#### 2.2.1 通常焼入れおよび改良オースフォーム

Fig. 1 (a) にそのプロセスを示す。通常焼入れ (CHT) は、オーステナイト化温度880°Cに25分間保持してオーステナイト化し、油中に急冷してマルテンサイト変態を生ぜしめる処理である。改良オースフォーム (以後図中にはMAと記してある) では、温度880°Cで25分間オーステナイト化し、その温度より圧延によって塑性加工を行い、油中に急冷した。圧延は、ロール直径150 mmの2段式小型圧延機を用い、ロール周速5.3 m/minで行い、いずれの試片も1パスで圧延した。引き続き、これらの焼入れした鋼を温度-78°Cのドライアイス中に浸漬して30分間保持しサブゼロ処理した。

#### 2.2.2 焼もどし温間加工

上述の通常焼入れおよび改良オースフォームした鋼を、Fig. 1 (b) に示す方法で温間加工 (以後図中にはWWと記してある) した。すなわち、温間加工温度を500~700°Cの範囲とし、その温度で圧延によって塑性加工を

行い、油中に急冷した。温間加工までの保持時間は、かたさ試片では20分間とし、引張試片では60分間とした。かたさ試片は、続いて図に示す温度で60分間の再焼もどしを行った。また、600°Cで温間加工した引張試片は、再焼もどしを行わず、温度700°Cで温間加工した引張試片は、600°C×1hの再焼もどしを施した。

#### 2.2.3 変態区間熱処理

通常焼入れおよび改良オースフォームした試片を、Fig. 1 (c) に示すプロセスで変態区間熱処理した。この処理には、Ni-Cr鋼 (SNC631) のみ使用した。変態区間、すなわち $\alpha + \gamma$ 2相域への加熱は、 $\alpha \rightarrow \gamma$ への部分変態を生ずる温度を鋼の化学成分より推定し<sup>6)</sup>、また以前の結果<sup>3)</sup>をも考慮して温度700°Cと720°Cの2種を選んだ。これらの温度に鋼を30分間保持し、油中に急冷する1サイクルのみの処理とした。続いて600°C×60 minの焼もどしを行った。

なお、比較の目的として、通常焼入れおよび改良オースフォームを行ってのち、600°C×60 minの条件で焼もどしを施した試片も用意した。

2.3 試験片および試験方法

上記処理の効果を調査するためのかた試験片は, 厚さ2mm, 幅20~25mm, の長方形に切断し, 両面を平行に研削し, さらに鏡面仕上げを行ったものである。かたさ試験は, ビッカース試験機により, 荷重20kgを用いて測定した。

引張試験片は, 試験部幅6mm, 標点距離18mm, 厚さ1.8mmの板状試験片であり, 両面とも研削仕上げしている。引張試験は, 万能材料試験機(容量10ton)を用いて行い, 降伏強さ, 引張強さおよび伸びの値を求めた。

また, 衝撃試験片は, その長さ方向と圧延方向を一致させて採取し, 切欠きは, 温間加工材は, crack divider 方位に入れ, 変態区間熱処理材では, crack arrester 方位につけた<sup>7)</sup>。試験片は, JIS 3号シャルピーU-notch 試験片に合致し, crack divider 方位の試験片は, 厚さ5mmの half size であり, crack arrester 方位のものは, 断面が $10 \times 10 \text{mm}^2$ の full size のものである。衝撃試験は, 標準のシャルピー試験機(容量30kg・m)を用い, 室温で実施した。

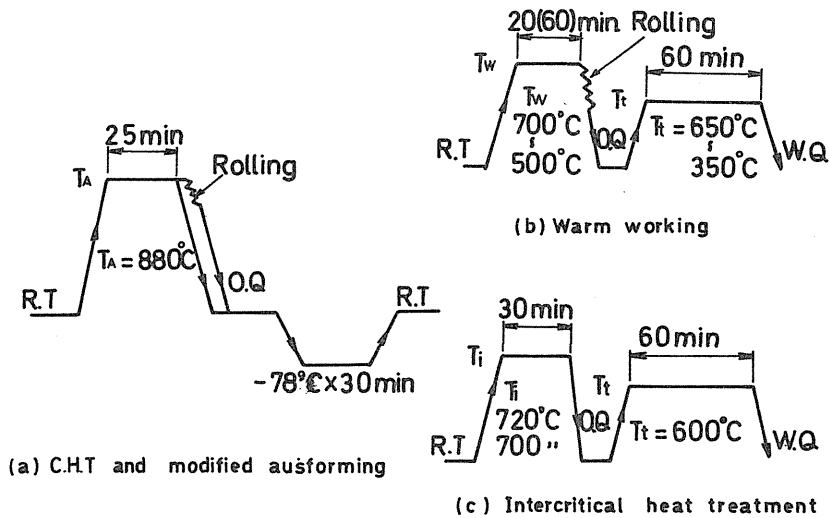


Fig. 1 Schematic diagrams of combined process

3. 実験結果と検討

3.1 改良オースフォームと温間加工の複合効果

3.1.1 かたさ変化

Fig. 2 は, Cr-Mo 鋼の温間加工後のかたさにおよぼす加工温度と加工度の影響を示す例で, 通常焼入れ材 (CHT) と50%改良オースフォーム材 (MA) について比較してある。加工度は, 厚さ減少率で示してある。加工温度の低いほど, また加工度の大きいほどかたさが高くなる。また, 改良オースフォーム材の方が通常焼入れ材に比べ, 同じ加工条件ではかたさが高い。したがって, 温間加工したままのかたさには, 改良オースフォームの効果が残存することがわかる。

次に, これらの温間加工材を, その加工温度より低い温度および高い温度範囲に再加熱して焼もどし処理した場合のかたさ変化を Fig. 3 および 4 に示す。Ni-Cr 鋼は, 通常焼入れ材と50%改良オースフォーム材にさらに図に示す各温度で50%温間加工した試験片 またCr-Mo 鋼は, 30%の温間加工を行った試験片の例である。この再焼もどしによるかたさ変化を調べることは, 再加熱によって, かたさが大きく変化しなくなる温度範囲を見出し, subgrain の安定な状態となる条件を把握することにつながる。加工温度 $500^\circ\text{C}$ の場合, 再焼もどし温度 $600^\circ\text{C}$ 以上で, 大きなかたさ変化がみられず, 加工硬化が回復し, subgrain の形成が進行<sup>8)</sup>, それが安定化しつつあるものと考えられる。加工温度 $600^\circ\text{C}$ および $680^\circ\text{C}$ では, 焼もどし温度全般を通じ, 大きなかたさ変化がなく,

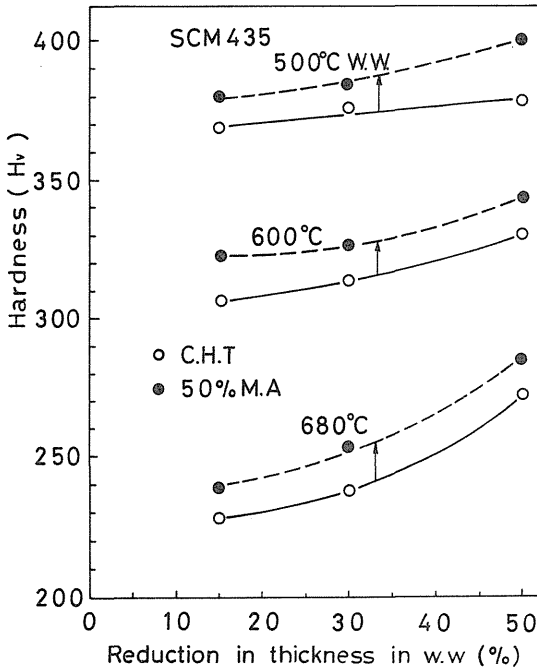


Fig. 2 Effect of reduction in thickness in warm working on the hardness of as-quenched SCM435 steel after warm working

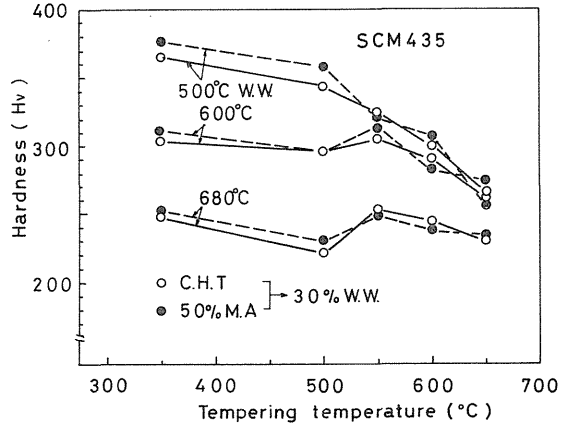


Fig. 4 Effect of retempering temperature on hardness of warm worked SCM 435 steel

加工と同時に、あるいは加工後ただちに回復が生じ、すなわち動的回復<sup>9)</sup>が生じ、安定なsubgrainが形成されるものと考えられよう。

また他方では、加工温度600°Cおよび680°Cの場合、温度550°C以上での再焼もどしにより、通常焼入れ材と改良オースフォーム材間にかたさの相違がほとんどみられなくなり、また温間加工における加工度の相違によってもかたさの相違がみられなくなる。このことは、温間加工後、再焼もどしによって、改良オースフォームの効果が消滅する恐れのあることを示唆する。すなわち、温間加工後の再焼もどし処理が改良オースフォームによって得られる優れた性質を継承し、発展させるとは限らないことを意味する。

3.1.2 機械的性質

上述のように、温間加工のままの材料には、改良オースフォームによる強化が残存するが、温間加工後の再焼もどしによって、安定な subgrain 等の形成が期待できる反面、改良オースフォームの効果が失われるかも知れないという複雑な示唆がえられた。そこで、温度600°Cで加工した試片は、再焼もどしを行わず、また温度700°Cで加工した試片には、600°C×1hの再焼もどしを行い、引張試験により機械的性質を調べた。その結果をFig.5および6に示す。図の横軸は、改良オースフォームにおける加工度(厚さ減少率)を示す。また、図中の矢印をもつ縦線は、通常焼入れおよび改良オースフォーム材を基準にして、温間加工によって性質の変化する方向を示し、各加工度におけるその矢印線の長さは、性質の変化

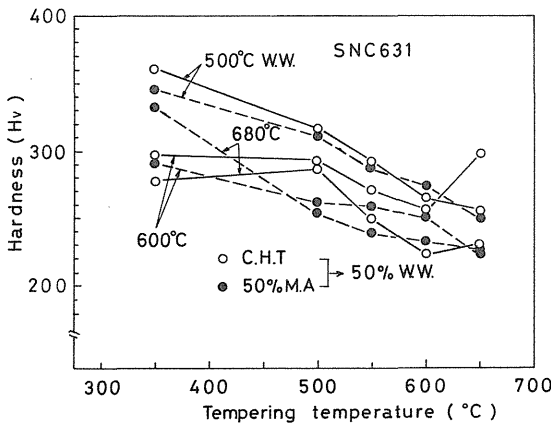


Fig. 3 Effect of retempering temperature on hardness of warm worked SNC 631 steel

量を示すことになる。加工度0%の×印のデータは、通常焼入れと600°C×1hの焼もどしを行った試片の値である。温間加工温度600°Cの場合、降伏強さおよび引張強さとともに大きく向上し、伸びは下がる。その度合は、通常焼入れ材の方が著しい。衝撃値もこの温度での温間加工により低下する。温間加工温度700°Cの場合、Ni-Cr鋼の通常焼入れ材を除き、温間加工後、600°C×1hの再焼もどしによって、降伏強さおよび引張強さが、改良オースフォーム材より低くなり、伸びが高くなる。なお、加工温度700°Cは、Ni-Cr鋼では、前述のように $\alpha \rightarrow \gamma$ 部分変態の起る限界の温度であり、Cr-Mo鋼では、この部分変態は起り得ない温度である。このように、高い温度で温間加工し、高い温度で再焼もどしすると、降伏強さが低下し、改良オースフォームの効果が消滅するのが明瞭にみられる。

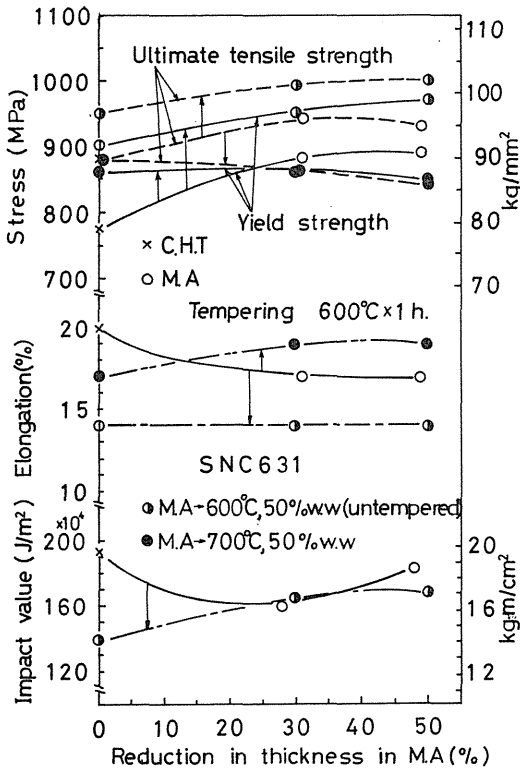


Fig. 5 Combined effect of modified austempering and warm working on the mechanical properties of SNC 631 steel

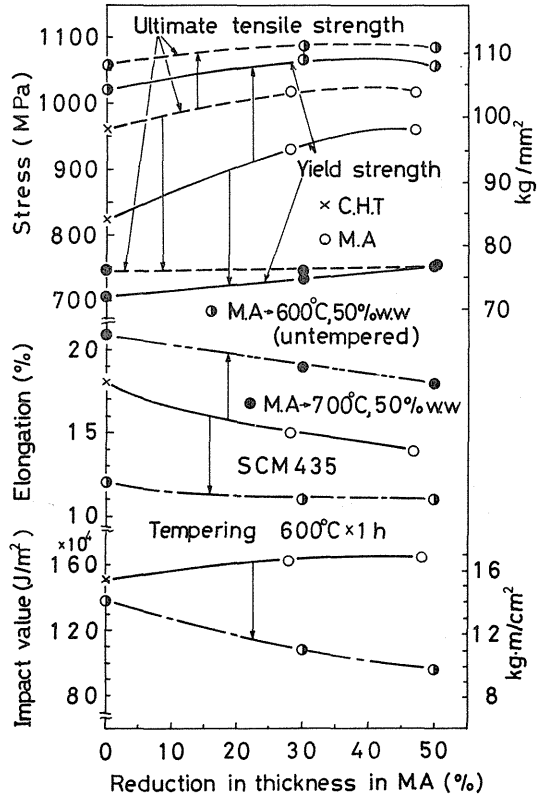


Fig. 6 Combined effect of modified austempering and warm working on the mechanical properties of SCM 435 steel

### 3.2 改良オースフォームと変態区間熱処理の複合効果

前述のように、改良オースフォームと温度700°Cでの温間加工を複合し、さらに再焼もどしをすると、強度が大きく低下する割には延性の回復が大きくない。そこで、温間での加工を省略し、変態区間温度に加熱後、急冷して焼入れし、さらに600°C×1hの再焼もどしを行った試片についてその機械的性質を調査した。ただし、本実験は、Ni-Cr鋼のみについて行った。その結果をFig. 7に示す。横軸はやはり改良オースフォームにおける加工度(厚さ減少率)を示す。通常熱処理材および改良オースフォーム材を基準にして、変態区間熱処理材の降伏強さおよび引張強さは低下するが、加熱温度700°Cの場合より720°Cの場合の方が、その強度の低下が小さく、延性および衝撃値の上昇は同程度となる。加熱温度は、 $\alpha \rightarrow \gamma$ 部分変態が生ずる限界の温度よりも幾分高い方がよいように思われる。また、変態区間熱処理したものは、改良

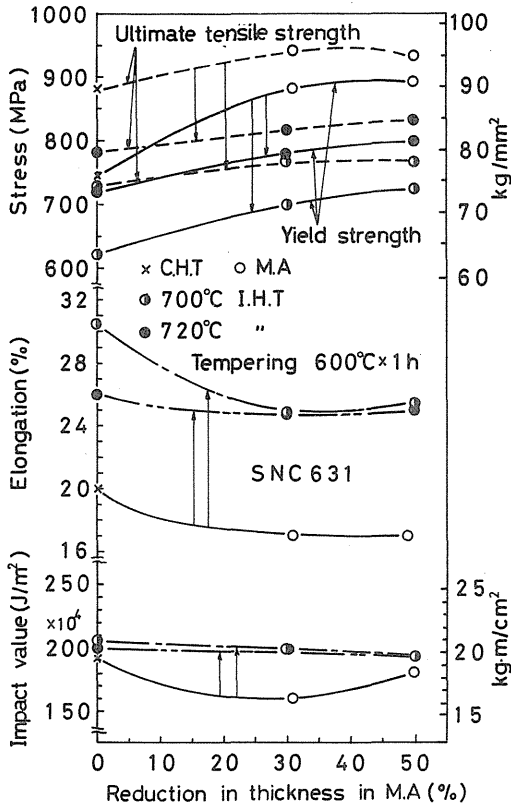


Fig. 7 Combined effect of modified ausforming and intercritical heat treatment on the mechanical properties of SNC631 steel

オースフォームにおける加工度の大きい方が、降伏強さおよび引張強さが高く、伸びや衝撃値は、加工度の増加によりわずかに下がる傾向を示すが、その低下度合いは非常に小さい。

$\alpha \rightarrow \gamma$  部分変態域への加熱によって、もとのオーステナイト粒界等に細粒の  $\gamma$  相があらわれ、加熱温度によって  $\alpha$  + 炭化物相と変態した  $\gamma$  相の量がバランスし、その状態から急冷することにより、 $\gamma$  相はマルテンサイトに変態し、また  $\alpha$  + 炭化物は、その状態で急冷される。この混合組織を変態区間温度より低い温度で再焼もどしすると、 $\alpha$  + 炭化物の部分は、再焼もどしを受けるが、大きな組織変化がなく、マルテンサイト部は焼もどしにより軟化する。

したがって、本実験の場合、再焼もどし後は、 $\alpha$  + 炭化物の部分は、700°Cまたは720°C×30minおよび600°C×60minの焼もどしを受け、また変態区間熱処理によって

生成したマルテンサイト部は、600°C×60minのみの焼もどしを受け、それらの混合組織が得られる。後者の相は、前者に比べて延性は低いが、強度は高く、前者はその逆の性質をもち、特に延性に富む組織となることが考えられる。したがって、変態区間熱処理で加熱温度の高い方が、マルテンサイト量が多く、強さが高くなり、他の部分は延性を増すので、それらの混合組織は、高い強さと高い延性を示すことになる。しかし、より良い強度-延性あるいはじん性の組み合わせを得る変態区間熱処理の加熱条件については、今後の調査をまたねばならない。

### 3.3 強度と延性の比較

金属は、強化すれば一般に延性やじん性が下がる。たとえば、冷間加工によって加工硬化させる場合は、延性やじん性がかなり低くなるのが常である。また、オースフォームや改良オースフォームした鋼は、強化とじん性が同時に達成されるかと言えば、必ずしもそうではなく、じん性の低下をほとんど起さずに強化を達成できることを意味し、消極的なじん化である。したがって、構造材料では、種々の強化処理の効果を比較するには、強度、延性あるいはじん性等の個々の性質の比較では、材料のもつ性質の総合的優劣を見出すことが不可能であり、同一試片のもつ強度と延性、あるいは強度とじん性を組み合わせて比較するのが望ましいと言えよう。

Fig. 8は、通常熱処理、改良オースフォームのみとこれらの処理に温間加工を複合した場合について、降伏強さと延性の関係を比較して示したものである。温度600°Cでの温間加工では、降伏強さ-延性の関係は、通常熱処理および改良オースフォーム材の延長上に分布し、改良オースフォームに温間加工を複合することによって、降伏強さ-延性の関係が変化しないことを示している。しかるに、温度700°Cで加工し、600°C×1hの再焼もどし処理材の降伏強さ-延性の関係は、他のものと異なる傾向を示し、これは、引張強さ-延性の組み合わせをプロットしたFig. 9に明瞭にみられる。すなわち、温度700°Cで温間加工後、600°C×1hの再焼もどし材は、他の処理条件の試片のデータと全く別の位置に分布しており、引張強さ-延性の組み合わせが劣化する左下方に位置する。

次に、改良オースフォームと変態区間熱処理を複合させた試片の降伏強さ-延性の関係をFig. 10にし、通常熱処理材、改良オースフォーム材および温度700°Cでの温間加工材と比較してある。温度700°Cで変態区間熱処理した試片は、降伏強さの上昇により延性が急激に下が

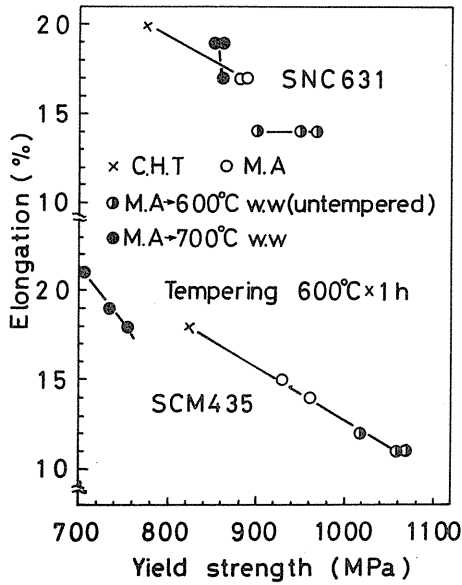


Fig. 8 Comparison of the yield strength-ductility relation after various treatment

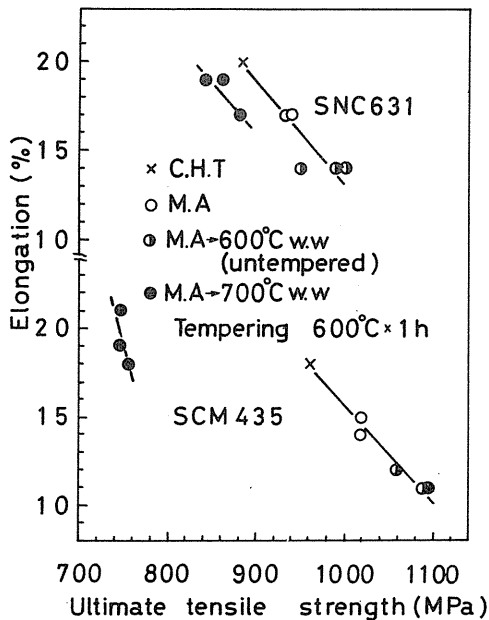


Fig. 9 Comparison of the ultimate tensile strength-ductility relation

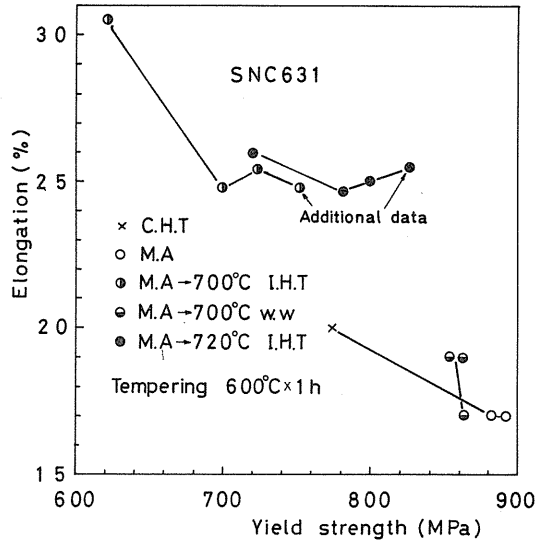


Fig. 10 Influence of intercritical heat treatment on the yield strength-ductility relation of SNC631 steel

るが、それ以上の降伏強さの増加により、延性は大きな変化を示さなくなる。温度700°Cで変態区間熱処理した試片も、同様に降伏強さの増加により延性の大きな変化はみられない。降伏強さ700~830MPa (70~85kg/mm<sup>2</sup>)の範囲で、変態区間熱処理材は、25%程度の伸びを示す。これに対し、通常熱処理材、改良オースフォーム材および温度700°Cで温間加工した試片は、降伏強さ770~900MPa (79~92kg/mm<sup>2</sup>)の範囲で、伸びが約17~19%と低く、しかも変態区間熱処理した試片の降伏強さ-延性の関係を表わす曲線の延長上に分布するようには思われない。改良オースフォームと変態区間熱処理の複合が、鋼の積極的じん化への1手法となることが期待される。

#### 4. 結 論

改良オースフォームにより強化した低合金鋼に温間加工, あるいは変態区間熱処理を複合し, 機械的性質の挙動を調査してきた。そのおもな結果をまとめると、次のようになる。

- (1) 改良オースフォームに温間加工を複合させる場合
  - (a) 温間加工したままのかたさは、加工温度の低いほど、また加工度の大きいほど高い値を示し、改良オースフォームによる強化効果が残存する。
  - (b) 温間加工後、再焼もどしすると、焼もどし温度

600°C以上では、かたさ変化が小さくなり、また通常焼入れ材と改良オースフォーム材間に、かたさの相違がみられなくなる。

- (c) 温間加工のみの場合、降伏強さ-延性、あるいは引張強さ-延性の組み合わせは、改良オースフォーム材と同等に維持されるが、再焼もどしによって、その組み合わせが劣化することがある。
- (2) 改良オースフォームと  
変態区間熱処理を複合させる場合
- (a) 降伏強さ、引張強さは下がるが、延性、じん性が大きく回復する。変態区間への加熱温度は、 $\alpha \rightarrow \gamma$  部分変態ぎりぎりの温度より幾分高い方がよい。
- (b) 降伏強さ-延性の組み合わせが、通常熱処理、改良オースフォーム処理のみの場合、および同じ加熱温度での温間加工材より優れている。

### 参 考 文 献

- 1) 大森、川又、機論, 43-371 (昭52), 2404.
- 2) 大森、横川、山崎、機論, 46-411 (昭55), 1166.
- 3) 大森、大倉、山崎、塑性と加工, 22-247 (1981), 809.
- 4) S. Jin, S.K. Hwang, and J.W. Morris, Jr., Metal. Trans., 6A-9 (1975), 1721
- 5) E.G. Nisbett, R.D. Asp, and D.E. Morgan, Metal Prog., 114-2 (1978), 55.
- 6) 大和久, 金属熱処理用語辞典, 第8版, 日刊工業新聞社 (昭49), 12.
- 7) 大森, 山崎, 佐藤, 茨大工研集報, 25 (1977), 57.
- 8) D.L. Bourell, O.D. Sherby, Metal Trans., 12A-1 (1981), 141.
- 9) M.L. Bernshtein, Steel in the USSR, 2-2 (1972), 151.