

## 討15

## TRIP現象を利用した準安定オーステナイトステンレス鋼の延性ならびに成形性の向上

川崎製鉄 技術研究所 工博○野原清彦 小野 寛  
工博 大橋延夫

## 1. 緒言

準安定オーステナイトステンレス鋼は応力またはひずみの付加によってマルテンサイト変態を誘発し、そのため機械的性質（強度、延性、靱性、加工硬化性）、成形性（形状性、スピニング、アイオニング、伸線加工なども含む）、耐置割れ性、耐食性、低温性質（衝撃特性）、疲労性、集合組織、ひずみ時効性などの諸性質がその影響を受ける。そしてこの加工誘発変態は種々の要因によって支配されることが知られており、その中では化学組成（合金元素）、加工温度および速度、変形量および変形様式、結晶粒度および結晶方位などの影響が大きい。これらの影響については従来より多くの研究が行なわれている。さて上記諸性質に対する加工誘発変態の効果にはプラス面とマイナス面があり、耐置割れ性や耐食性を劣化させたりひずみ時効を生じやすくさせるのはマイナス効果といえるが、反面TRIP現象（マルテンサイト変態誘起塑性）を生起させるのはプラス面で、これをうまく利用すれば種々の性質を改善しうる可能性がある。筆者らはこのTRIP現象の諸因子依存性について検討し、本鋼の機械的性質（強度、延性）、成形性、形状性、耐置割れ性などを格段に向上せしめうる二、三の新しい加工法ならびに材料設計法を見だし、さらにそれらと加工誘発マルテンサイト変態の関連性について検討を行なった。

## 2. 多段変形による延性の向上

準安定オーステナイトステンレス鋼の引張性質の加工温度依存性については多くの研究<sup>1)</sup>がなされているが、一定温度で引張変形したものがほとんどである。本鋼の機械的性質はオーステナイト母相の加工硬化のみならず、加工誘発変態によって生ずるマルテンサイト相の生成時期、生成速度、生成量などによっても影響を受けるから、引張変形の途中で加工温度を変化させれば塑性挙動に当然影響が生ずるはずである。このような観点から変形過程で雰囲気温度を段階的に変化させる多段引張の実験を行なった。図1は1次引張温度（ $T_1=80^\circ\text{C}$ ）における1次引張伸び、 $\lambda_1$ 、を種々変え、ついで2次引張温度（ $T_2=-50\sim+70^\circ\text{C}$ ）で破断

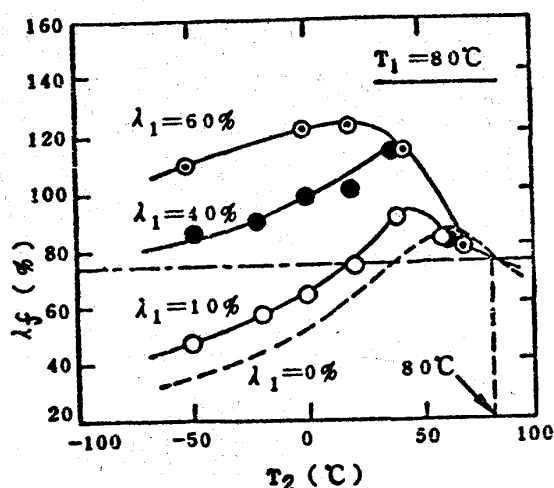


図1 SUS301鋼板（0.5 mm厚）の2段引張変形における全伸び、 $\lambda_f$ 、の2次引張温度、 $T_2$ 、依存性（ $T_1$ : 1次引張温度、 $\lambda_1$ : 1次引張伸び）

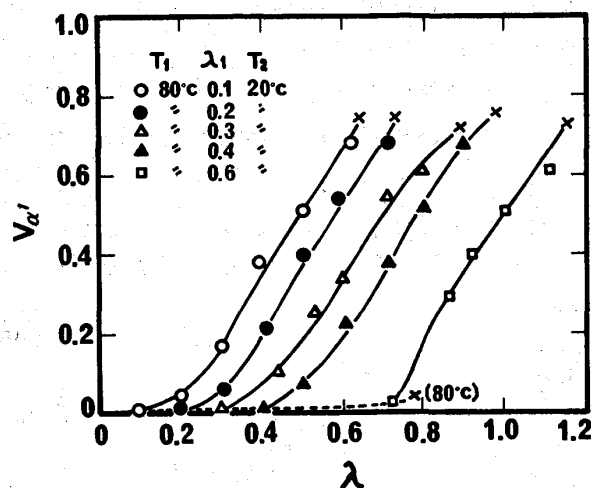


図2 SUS301鋼板（0.5 mm厚）の $T_1=80^\circ\text{C}$ 、 $T_2=20^\circ\text{C}$ の2段引張変形において $\lambda_1$ をパラメータにした場合の $\alpha'$ マルテンサイト変態量、 $V_{\alpha'}$ 、と伸び、 $\lambda$ 、の関係

まで変形したときの全伸び、 $\lambda_f$  ( $\lambda_1$  に 2 次引張伸び  $\lambda_2$  を加えたもので、 $\lambda_2$  も初期標点距離を基準にして計測した) の変化、すなわち 2 段引張変形の結果を示したものである。  $\lambda_1 = 0$  の場合が通常の引張 (1 段引張) の温度依存性を表わしているが、それと比べると 2 段変形で  $\lambda_1$  と  $T_2$  を適切に選んだ場合の延性の向上は著しく、最大 120% 以上の大きい伸びを示す。 3 段以上の多段変形を行なうと大きな伸びと高い強度を同時に実現することが可能である。このような現象は加工による  $\alpha'$  マルテンサイトの生成時期、速度、量 ( $V_{\alpha'}$ )、分布、形態などと密接な関係を有している。図 2 の 2 段変形における  $V_{\alpha'}$  測定結果によれば、 $\lambda_1$  の増加による  $\lambda_f$  の増大は破断時の  $V_{\alpha'}$  と  $dV_{\alpha'}/d\lambda$  がともに  $\lambda_1$  のいかんにかかわらずほぼ一定値をとることに起因しており、そのために格段の延性の向上がもたらされる。そして大きな全伸びが得られる際には、多段変形中の試験片上に図 3 に示すようなひずみと誘発マルテンサイトの不均一分布が観察された。図 3 によれば、試験片内位置でひずみ分布とマルテンサイト分布は互いによく対応し、最終的な破断伸びは平均で 130% であるが局部的には 150% にも達する。要するにこの場合の変形は高ひずみ状態であるにもかかわらず Lüders 現象類似のきわめて不均一な過程によって進行することがわかる。

### 3. TRIP とひずみ時効の同期による延性向上

上述のように段階的に加工温度を変化させる方法のほかに、単一の変形プロセスで著しい延性の向上を図る方法について述べる。一般に加工に伴うマルテンサイト変態は主として試験片の応力集中個所で起こり、その部分がとくに加工硬化するのでひずみが他の部分に伝播しやすく、このことがネッキングの防止と大きい破断伸びの得られる原因となっている。この場合変形はいわゆる Lüders 帯の発生とその伝播によって進行し、その際応力の変動が起こっていわゆるセレーション現象が生ずる。SUS301 や SUS304 の焼鈍材を適当な温度で引張変形したときのセレーションは図 4 に例示したように不規則な形態をとり、変形荷重は伸びとともに増加する。しかしながら一般に得られる伸びの最大値はたかだか

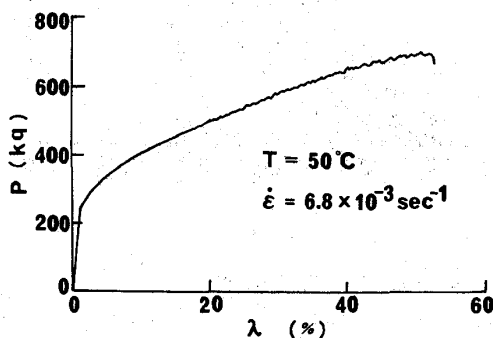


図4 不規則なセレーションを呈する荷重-伸び線図 (SUS301, 0.5 mm 厚)

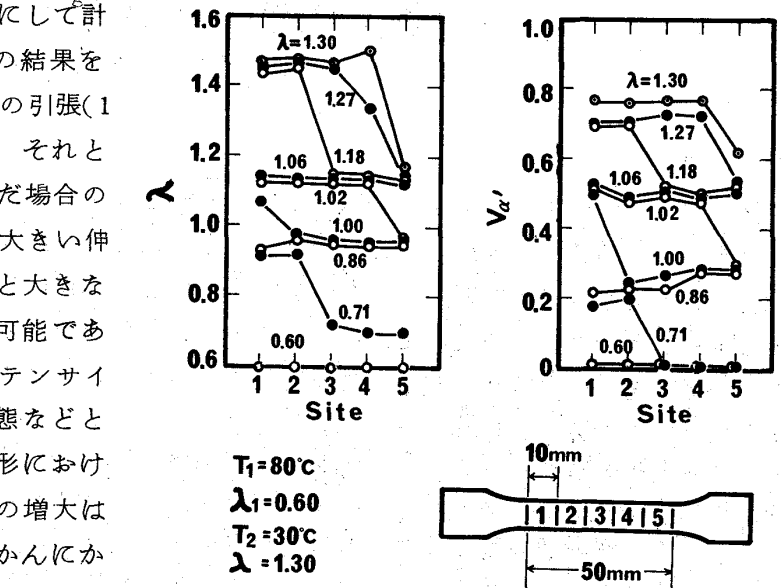


図3 SUS301 鋼板 (0.5 mm 厚) の 2 段引張変形における 2 次引張過程での試験片平行部のひずみおよび  $\alpha'$  マルテンサイト変態量の分布の変化

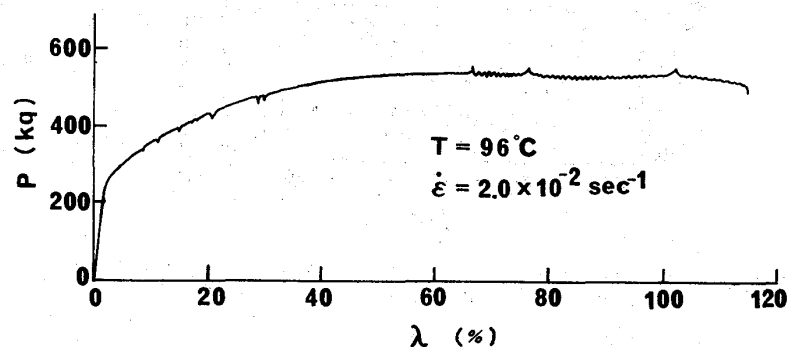


図5 規則的なセレーションを呈し、大きな伸びを示す延性向上法による荷重-伸び線図 (SUS301, 0.5 mm 厚)

70%程度である。ところが変形温度と変形速度を適切に選択してTRIP現象と動的ひずみ時効現象を同期させると、図5に示すように塑性曲線上の初期過程で可聴音を伴う鋭い荷重低下を生じたのち小さい荷重ヒックが出現し、続いて非常に規則的な周期をもつセレーションが発生する。それに伴って試験片上に規則的なLüders帯模様が現われる。そして破断に至るまで荷重の増加はほとんどみられず、加工硬化率と試験片の断面積減少率がマッチングしながら変形が進行する。そのため100%を越す大きな破断伸びが得られる。この現象を起こさせるには諸要件が満たされる必要があるが、とくに変形温度と変形速度が重要であり、SUS301鋼の場合

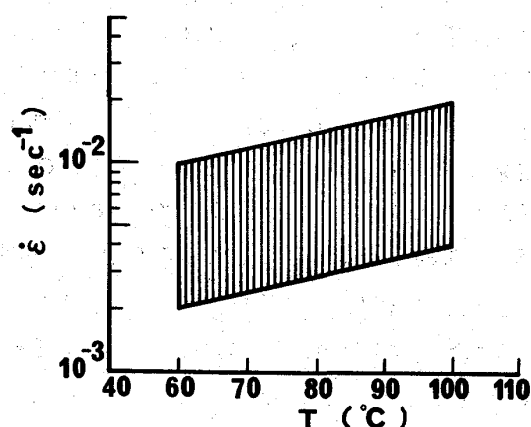


図6 規則的なセレーションを呈し延性向上が実現される変形温度と変形速度の適正条件 (SUS301)

図6に示すように変形温度に対して変形速度の適正範囲が存在し、温度が高いほど速度は大きい必要がある。これらの条件は加工誘発変態の生じやすさと運動転位の速度によって決まるものである。また温度と速度以外の要件として、材料のオーステナイト安定度、侵入型原子の炭素と窒素の含有量、熱処理条件ならびに結晶粒度などがあり、それぞれ適確に条件設定しなければならないが、条件が満たされれば多段変形と同程度の延性向上が単一プロセスで可能となる。

#### 4. 成分制御および粒度制御による成形性向上

準安定オーステナイトステンレス鋼の成形性は、主として成分組成および結晶粒組織によって定めるところのいわゆるオーステナイト安定度によって大きく左右される。オーステナイト安定度を表わす指標については従来から多くの提案がなされているが、筆者らは材料に0.30の引張真ひずみを与えたときの加工誘発マルテンサイト量で定められるところのAngel<sup>1)</sup>による $Md_{30}$ 値に着目し、これを修正、拡張することを試みた。まずAngelの式の妥当性を検討し、各成分元素に対する係数を見直すとともにCuとNbの影響を新たに考慮した。そして図7に示すように加工誘発変態に及ぼす粒度の効果をも検討した結果、Angelの修正式として

$$Md_{30}^{gs} = 551 - 462(C+N) - 92Si - 8.1Mn - 13.7Cr - 29.0(Ni+Cu) - 18.5Mo - 68Nb - 1.4(G.S.N.-80) \quad (1)$$

が得られた。<sup>2)</sup>ここに $Md_{30}^{gs}$ は粒度依存項を考慮した $Md_{30}$ の意味であり、各元素記号はその元素の重量

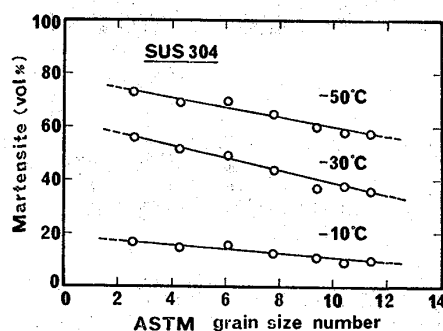


図7 種々の温度で0.30の引張真ひずみを与えたときのマルテンサイト量と粒度の関係 (板厚 0.7 mm)

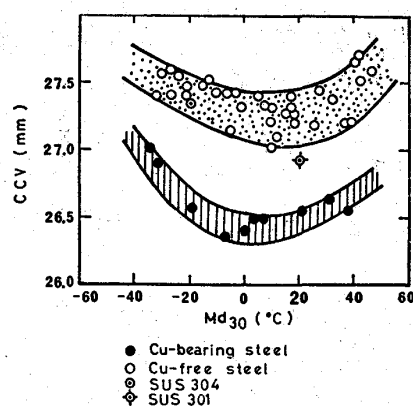


図8 オーステナイト安定度 $Md_{30}^{gs}$ とコンカルカップ値の間の関係 (板厚 0.7 mm)

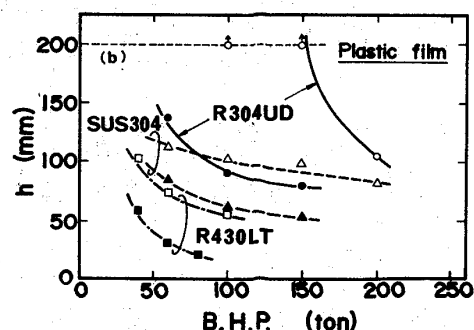


図9 長四角筒成形型による絞り深さとしわ押え力の関係 (白印: 板厚 1.0 mm, 黒印: 板厚 0.7 mm)

百分率を表わす。図8は(1)式の $Md_{30}^{GS}$ とコンカルカップ値(CCV)の関係を板厚0.7mmの試料について求めたものである。これから絞り性を最良ならしめる最適 $Md_{30}^{GS}$ 値が存在すること、すなわち絞りに対しては加工誘発変態が適度に作用することの重要性がわかる。そしてCu添加鋼と無添加鋼では、最適 $Md_{30}^{GS}$ 値はほぼ等しいが、CCVは前者のほうが優れている。張出し性を示すエリクセン値についても図8と同様の結果が得られた。これらに基づいて含Cu絞り用鋼(R304UD)が開発された<sup>3)</sup>。この鋼の200×270mm長四角筒型による常温成形性をSUS304や極低炭素フェライト鋼(R430LT)とともに図9に示す。

### 5. 加熱、冷却を利用した長四角筒の成形性向上

温度上昇に伴う破断抵抗の低下よりも変形抵抗の低下のほうが著しい温度領域でのいわゆる温間絞りはMg合金、Al合金、炭素鋼などで従来試みられている。<sup>4)</sup>しかしステンレス鋼の長四角筒成形性に関する報告はあまりみられないので、ダイス温度(成形体フランジ部温度)とポンチ温度(成形体底部温度)を独立に制御したときの深絞り性を各種オーステナイト系鋼および1種のフェライト系鋼について調べた。図10は各材料のダイス温度、 $T$ 、による限界絞り深さ、 $h$ 、の変化を示したもので、常温絞りを除いてポンチ温度はダイス温度より30~100℃低温に保持した。この結果によれば常温絞りに比較してダイス温間絞りによる成形性の向上はオーステナイト鋼、フェライト鋼ともに著しい。しかし成形性の向上が顕著

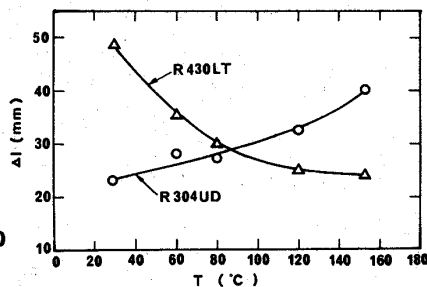
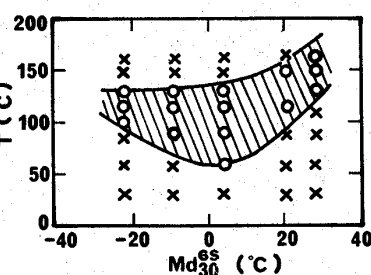
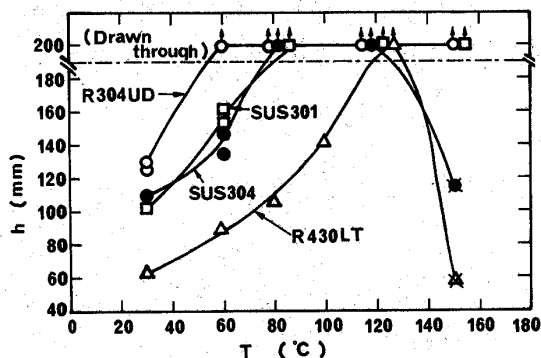


図10 200×270 mm長四角筒成形におけるダイス温度と限界絞り深さの関係(×印:ダイス肩部破断)

図11 温間絞りに対するオーステナイト安定度の影響(○:絞り抜け,×:破断)

図12 深さ200mm絞り時のフランジ残り量の異方性の絞り温度依存性

にみられる温度領域は鋼種によって差があり、R304UDがもっとも広範でフェライト系のR430LTがもっとも狭い。そしてオーステナイト系鋼に関して絞り抜けを生ずる絞り温度、 $T$ 、は図11に示すようにオーステナイト安定度 $Md_{30}^{GS}$ の影響を受け、この値が小さすぎても大きすぎても温度域は狭く、適当な $Md_{30}^{GS}$ 値が存在する。図12には200mm絞り時のフランジ幅の異方性 $\Delta l$ のダイス温度、 $T$ 、依存性を示す。 $\Delta l$ は直辺部のフランジ幅を $l_L$ 、 $l_C$ 、角隅部のそれを $l_X$ として

$$\Delta l = l_X - (l_L + l_C) / 2 \quad (2)$$

で定義される。絞り温度の増加につれてオーステナイト鋼の $\Delta l$ は増加し、フェライト鋼のそれは逆に減少する。この点からも最適絞り温度域が限定される。また温間絞りにより置割れの危険は解消される。

### 6. 結言

準安定オーステナイト鋼のTRIP現象を利用した例としてZackayらによるTRIP鋼がよく知られているが、ここでは市販のステンレス鋼についてこの現象の諸因子依存性を検討し、延性や成形性を格段に向上させる二、三の加工法ならびに材料設計法について述べた。今後さらにこの種の性質以外にも本鋼の低温性質、疲労性質、衝撃特性などの向上にTRIP現象が有効に利用されることが望まれる。

文献: 1) T, Angel: JISI, 177(1954), 165; 2) 野原, 小野, 大橋: 鉄と鋼, 63(1977), 772;

3) 公開特許公報: 昭52-117224; 4) 宮川: プレス加工辞典, (1970), 157 [日刊工業新聞]