

# 準安定オーステナイト系ステンレス鋼の TRIP 効果における加工誘起マルテンサイト変態の役割

土田紀之<sup>1</sup> 守本芳樹<sup>1,\*1</sup> 岡本尚士<sup>1,\*2</sup>  
深浦健三<sup>1</sup> 原田泰典<sup>1</sup> 上路林太郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>兵庫県立大学工学部

<sup>2</sup>香川大学工学部

J. Japan Inst. Metals, Vol. 72, No. 9 (2008), pp. 769-775

© 2008 The Japan Institute of Metals

## Role of Stress-Induced Martensitic Transformation in TRIP Effect of Metastable Austenitic Stainless Steels

Noriyuki Tsuchida<sup>1</sup>, Yoshiki Morimoto<sup>1,\*1</sup>, Shoji Okamoto<sup>1,\*2</sup>,  
Kenzo Fukaura<sup>1</sup>, Yasunori Harada<sup>1</sup> and Rintaro Ueji<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Engineering, University of Hyogo, Himeji, 671-2280

<sup>2</sup>Faculty of Engineering, Kagawa University, Takamatsu, 761-0396

To investigate the role of stress-induced martensitic transformations in the TRIP effect, stress-strain curves and TRIP effects in two types of metastable austenite steel (JIS-SUS304 and JIS-SUS301L) were compared. In static tensile tests, the tensile strength (TS) of SUS301L steel was larger than that of SUS304, and the 0.2% proof stress and uniform elongation (U.El) were both similar for the two steels. The transformation rate and strength of martensite in the stress-induced martensitic transformation were compared by X-ray diffraction and Vickers hardness tests. At the same strain, SUS301L contained a larger volume fraction of martensite than did SUS304. Both steels showed similar values of the Vickers hardness. The difference between SUS301L and SUS304 is mainly due to the transformation rate of stress-induced martensite. The effects of the transformation rate and martensite strength on the TS/U.El balance in metastable austenite steels were demonstrated by means of the Weng secant method, based on a micromechanical model.

(Received April 1, 2008; Accepted June 17, 2008)

**Keywords:** transformation induced plasticity (TRIP) effect, metastable austenitic stainless steel, stress-induced martensitic transformation, tensile test

## 1. 緒 言

TRIP (Transformation Induced Plasticity) 効果は、変形中の加工誘起マルテンサイト変態を利用した強化機構であり、これまでに様々な研究が行われている<sup>1-3)</sup>。最近では、自動車用鋼板への利用が期待される、高強度、高延性、優れた高速変形挙動を示す TRIP 型複合組織鋼板に関する研究が活発に行われている<sup>4,5)</sup>。一方で、TRIP 効果において重要な役割を果たす、変形中の加工誘起マルテンサイト変態の挙動については不明な点もあり、その場中性子回折実験などによる解明が行われている<sup>6)</sup>。準安定オーステナイト鋼はこれまでに多くの研究が行われている TRIP 鋼のひとつであり、構成相の定量化<sup>7,8)</sup>やオーステナイトの加工安定性<sup>9,10)</sup>に關

る詳細な研究が行われている。鉄鋼材料の TRIP 効果を理解するためには、組織と機械的特性の関係について調査することが有効である。そこで、本研究では、加工誘起マルテンサイト変態が TRIP 効果による機械的特性の向上にどのような役割を果たしているかを検討するために、化学組成の異なる 2 種類の準安定オーステナイト鋼を用いて、静的引張試験で得られる応力-ひずみ曲線および TRIP 効果を比較した。加工誘起マルテンサイト変態については、変態速度と変態したマルテンサイト強度の 2 点に注目し、TRIP 効果との関係を調査した。一方で、マイクロメカニクス的手法を用いた計算結果<sup>11)</sup>より、TRIP 効果により優れた引張強さ-均一伸びバランスを示す加工誘起マルテンサイト変態の条件について検討した。

## 2. 実験方法

本研究では、準安定オーステナイト鋼である SUS304 鋼と SUS301L 鋼を用いた。これらの化学組成を Table 1 に示す。SUS304 鋼は 18Cr-8Ni 系の準安定オーステナイト鋼で

\*1 兵庫県立大学大学院生 (Graduate Student, University of Hyogo)

\*2 兵庫県立大学学生、現在：(株)シンワコーポレーション (Undergraduate Student, University of Hyogo, Present address: Shinwa Corporation Co. Ltd.)

あり、SUS301L 鋼は SUS304 鋼と比べ Cr, Ni, C 量を減らし、代わりに N 量を増やしたオーステナイト鋼である。

Fig. 1 に、SUS304 鋼と SUS301L 鋼の光学顕微鏡写真を示す。平均結晶粒径を切断法により求めた結果、SUS304 鋼は 23  $\mu\text{m}$ 、SUS301L 鋼は 26  $\mu\text{m}$  であった。また、これらは X 線回折によりオーステナイト単相であることを確認した。

静的引張試験は、平行部長さ 25 mm、幅 5 mm、厚さ 1.5 mm の板状試験片を作製し、ギア駆動式引張試験機を用いて常温 296 K、初期ひずみ速度  $3.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  の条件にて行った。引張試験は破断まで行うとともに、試験を途中で中断し、真ひずみを 0.1 から 0.5 まで与えた試料を準備した。

試験を中断し異なるひずみを与えた試料は、X 線回折およびピッカース硬さ試験により、オーステナイトとマルテンサイトの体積率と硬さを測定した。X 線回折は  $K\alpha$ -Cu 線を用いて、管電圧 40 kV、管電流 30 mA、回折速度  $2\theta = 1^\circ/\text{min}$  の条件で回折角  $2\theta = 40 \sim 95^\circ$  の範囲で測定を行った。この時試料は表面の加工層を電解研磨により除去した。X 線回折結果より、測定された各相、各ピークの積分強度と、Bragg 角  $\theta$ 、ミラー指数 (hkl)、物質の種類に依存する定数を求め、各相の体積率を算出した<sup>7,8,12</sup>。ピッカース硬さ試験は、電解研磨した後にピレラ試薬で腐食させた試料を用いた。荷重 0.98 N、保持時間 15 s の条件で、各試料 10 点測定し最大値と最小値を除いた 8 点の平均値を採用した。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 静的引張特性

Fig. 2 に静的引張試験で得られた公称応力-ひずみ曲線を示す。Fig. 2 には、安定オーステナイトである SUS310S 鋼

の結果<sup>13</sup>)も合わせて示した。得られた機械的特性について、SUS304 鋼の 0.2% 耐力は 307 MPa、引張強さ 790 MPa、均一伸び 79.5%、SUS301L 鋼は順に 318 MPa、883 MPa、79.4% であった。0.2% 耐力は約 10 MPa、引張強さは約 100 MPa SUS301L 鋼が大きく、均一伸びはほとんど同じであった。SUS310S 鋼の結果と比較すると、ほぼ同じ 0.2% 耐力であるが引張強さ、均一伸びは SUS304 鋼、SUS301L 鋼の方が高い値を示した。Fig. 3 には、真応力-ひずみ曲線ならびに加工硬化率曲線を示す。SUS310S 鋼の場合、変形初期から加工硬化率は低下し続け、真ひずみ 0.35 付近で塑性不安定条件 ( $\sigma = d\sigma/d\varepsilon$ ) に達する。一方で、SUS304 鋼、SUS301L 鋼の場合、いずれも低下していた加工硬化率が真ひずみ 0.2 付近で再び増大した。これは変形中の加工誘起マルテンサイト変態が関係していると思われる。このような加工硬化率の変化により、塑性不安定条件が高ひずみ、高応力

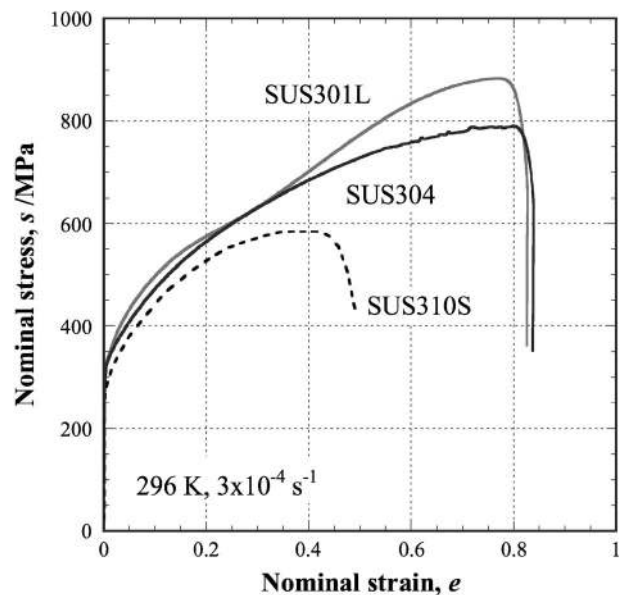


Fig. 2 Nominal stress-strain curves of the SUS304, SUS301L, and SUS310S<sup>13)</sup> steels obtained by static tensile tests with a strain rate of  $3.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  at 296 K.

Table 1 Chemical compositions of steels used.

Steel	Chemical compositions (mass%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
SUS304	0.05	0.4	0.98	0.03	0.008	8.2	18.2	0.023
SUS301L	0.028	0.47	1.04	0.03	0.0015	7.1	17.3	0.127

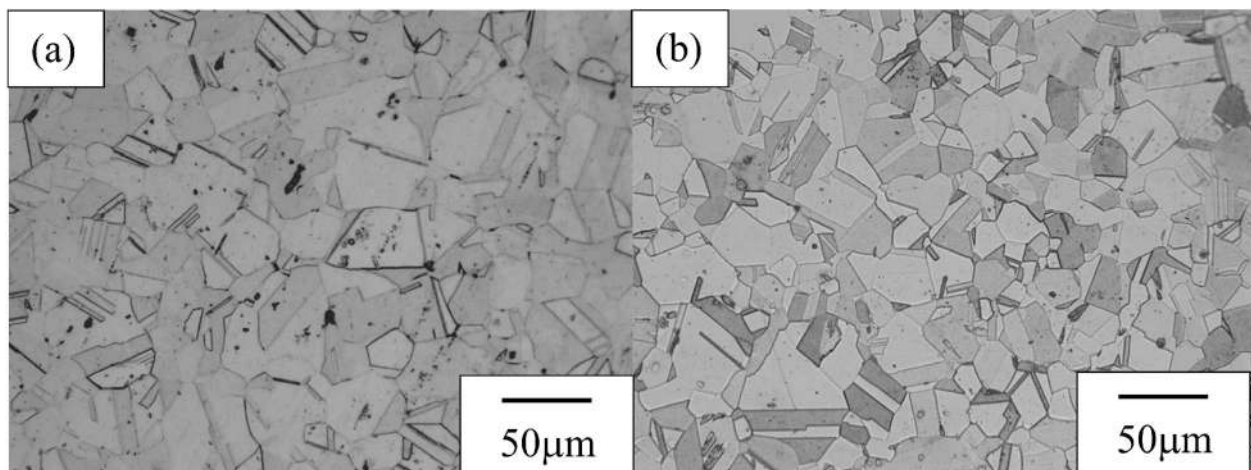


Fig. 1 Optical micrographs of (a) SUS304 and (b) SUS301L steels.

に移動し、優れた機械的特性が得られたと考えられる。また、真ひずみ 0.2 以降の加工硬化率の増大は SUS301L 鋼の方が大きかった。

### 3.2 X線回折およびビッカース硬さ試験結果

Fig. 3 に示した SUS304 鋼と SUS301L 鋼の加工硬化率曲線の違いは、変形にともなう加工誘起マルテンサイト変態の挙動が異なることを意味していると思われる。そこで、変形にともなうマルテンサイト体積率とマルテンサイトの強度を、X線回折実験とビッカース硬さ試験により比較した。

Fig. 4 に、ひずみを加えた試料の X線回折パターンを示す。いずれもひずみが増えるに従い、 $\alpha'$ マルテンサイトの

ピークが明確に、またその割合も増えていた。また、SUS304 鋼の真ひずみ 0.2 の結果のみ、 $\epsilon$ マルテンサイトのピークが確認された。しかしながら、このピークは非常に小さく、これより積分強度を求め体積率を計算するのは困難であった。このため、今回の実験結果ではいずれもオーステナイトと  $\alpha'$ マルテンサイトからなる複合組織鋼と考え、議論を進めた。

Fig. 5 に、真ひずみに対するマルテンサイト体積率の関係を示す。Table 2 には、X線回折結果より求めたオーステナイトとマルテンサイトの体積率を整理した。ひずみとともにマルテンサイト体積率は増加し、同じひずみにおけるマルテンサイト体積率は SUS301L 鋼の方が多かった。また、Fig.

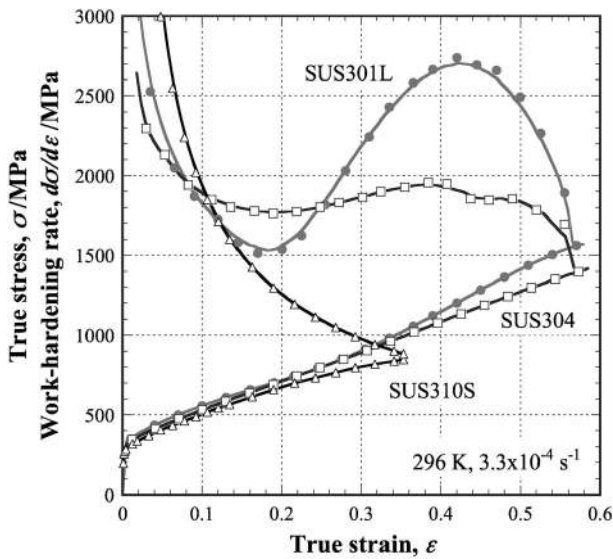


Fig. 3 True stress–true strain and work–hardening rate–true strain curves of the SUS304, SUS301L, and SUS310S<sup>13)</sup> steels obtained by static tensile tests.

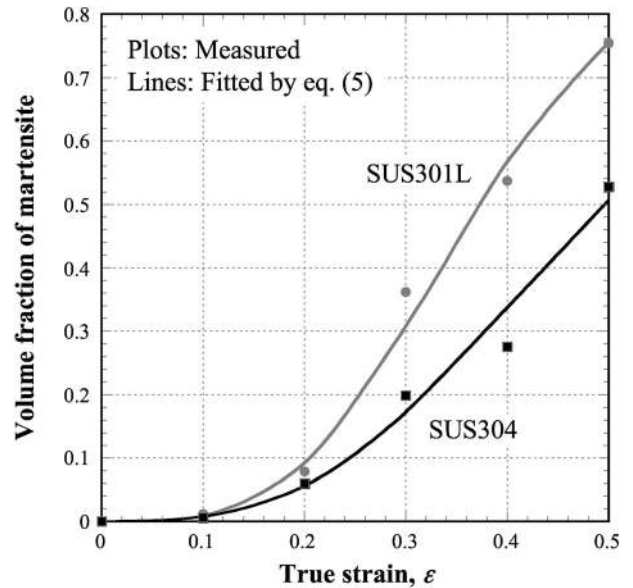


Fig. 5 Volume fraction of martensite as a function of true strain for the SUS304 steel and the SUS301L one.

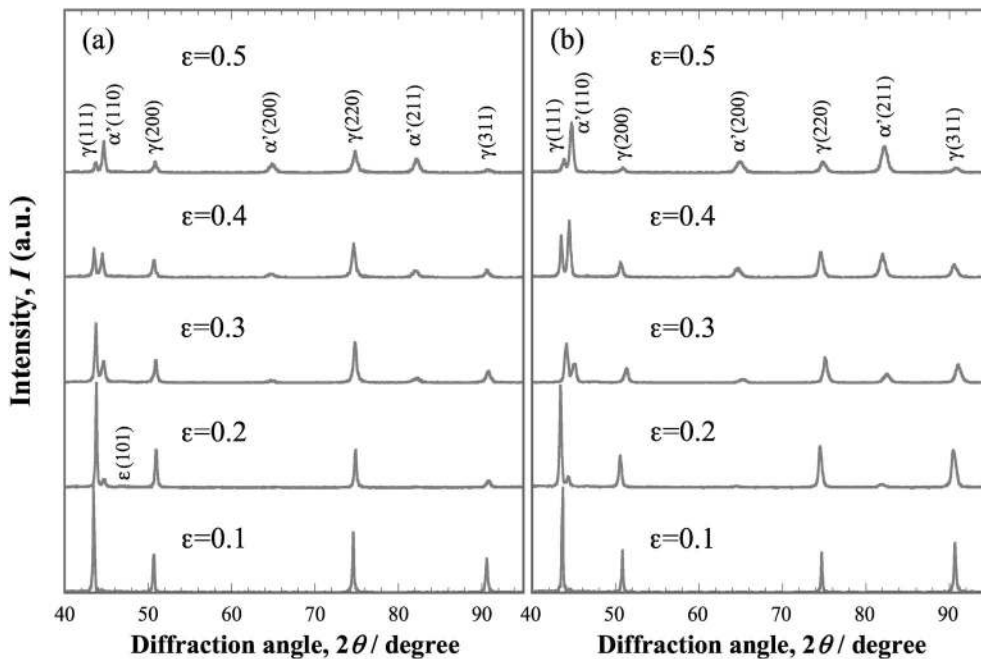


Fig. 4 X-ray diffraction profiles for the SUS304 (a) and SUS301L (b) steels.

Table 2 Austenite ( $\gamma$ ) and martensite ( $\alpha'$ ) volume fraction in SUS304 and SUS301L steels.

$\varepsilon$	SUS304		SUS301L	
	$\gamma$	$\alpha'$	$\gamma$	$\alpha'$
0	1	0	1	0
0.1	0.994	0.006	0.988	0.012
0.2	0.94	0.06	0.921	0.079
0.3	0.802	0.198	0.638	0.362
0.4	0.724	0.276	0.463	0.537
0.5	0.472	0.528	0.246	0.754

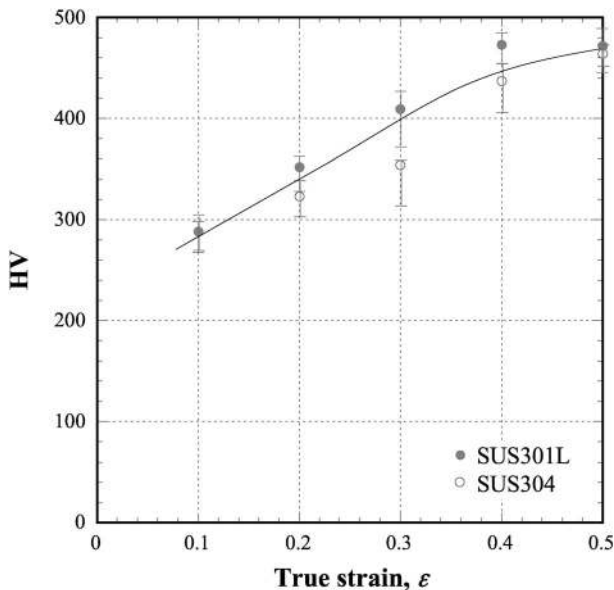


Fig. 6 Vickers hardness vs. true strain relations in the SUS304 and SUS301L steels.

6には、ひずみに対する加工誘起マルテンサイトの硬さを整理した。ひずみとともにマルテンサイトの硬さは増大した。SUS304鋼とSUS301L鋼を比較すると、ひずみ0.3の硬さに違いが見られたものの、それ以外は硬さに大きな違いは見られなかった。

X線回折およびビッカース硬さ試験結果より、変形にともなう加工誘起マルテンサイト体積率に違いがあることがわかった。以上のことから、SUS304鋼とSUS301L鋼の応力-ひずみ曲線および加工硬化率曲線の違いは、加工誘起マルテンサイト体積率が大きな影響をおよぼしていると考えられる。

### 3.3 オーステナイトの加工安定性

Fig. 5およびTable 2に示したように、同じひずみを加えた試料の加工誘起マルテンサイト体積率はSUS301L鋼の方が多かった。しかしながら、両鋼の化学組成を比較するとオーステナイト安定化元素である窒素量はSUS301L鋼が多く、窒素量のみを見る限り実験結果を説明できない。オーステナイトの加工安定性については、Ni当量や $Md_{30}$ 点<sup>1)</sup>などがその指標として用いられている。ここでは、三加らによる

Ni当量の式を用いてSUS304鋼とSUS301L鋼のオーステナイト安定性について議論した。三加らは複数の鋼材の実験結果を用いて、多種の添加元素の影響を考慮したNi当量の式を、熱力学解析に基づいて導出した<sup>9)</sup>。

$$\begin{aligned} (\text{Ni}) (\%) = & \text{Ni} + 12.93\text{C} + 1.11\text{Mn} + 0.72\text{Cr} + 0.88\text{Mo} \\ & - 0.27\text{Si} - 0.24\text{Ti} - 0.07\text{Co} + 0.19\text{Nb} \\ & + 0.53\text{Cu} + 0.90\text{V} + 0.70\text{W} - 0.69\text{Al} \\ & + 7.55\text{N} - 0.04(7 - \text{GSN}) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、Ni, C, Mn, Cr, Mo, Si, Ti, Co, Nb, Cu, V, W, Al, Nは添加元素の含有量(mass%)であり、GSNは結晶粒度番号を示す。GSNは、顕微鏡の倍率100倍における25mm平方(62,500mm<sup>2</sup>)中の結晶粒の数 $n$ により決定され、式(2)、(3)を用いて平均結晶粒径( $d$ )からGSNを求めた<sup>14)</sup>。

$$\text{GSN} = \frac{\log n}{0.301} + 1 \quad (2)$$

$$d(\mu\text{m}) = \sqrt{\frac{62,500}{n}} \quad (3)$$

式(1)を用いて、SUS304鋼とSUS301L鋼のNi当量を求めたところ、それぞれ23.1%、21.9%であり、SUS304鋼のNi当量が高かった。これは、N量はSUS301L鋼が高いものの、Ni, Cr, C量はSUS304鋼の方が高いことが影響している。これにより、SUS304鋼のオーステナイトの加工安定性がSUS301L鋼よりも高いことが示された。

### 3.4 マイクロメカニクスを利用した応力-ひずみ曲線の計算

次に、SUS304鋼とSUS301L鋼の応力-ひずみ曲線および加工硬化率曲線の違いを、計算の立場より検討した。ここでは、マイクロメカニクスのSecant法<sup>15)</sup>を用いてそれぞれの応力-ひずみ曲線の計算を試みた。準安定オーステナイト鋼は変形前はオーステナイト単相であるが、変形とともにオーステナイトの一部がマルテンサイトへと変態し、オーステナイトとマルテンサイトからなる複合組織鋼となる。複合組織鋼の応力-ひずみ曲線の計算においては、応力とひずみの分配が重要となる。この点については、Eshelbyの等価介在物法<sup>16)</sup>とMori-Tanakaの平均場の理論<sup>17)</sup>を基本に、WengのSecant法を用いて計算を行った。複合組織鋼の変形においては、各組織間の塑性変形差に起因する内部応力が生じる時に、局所的塑性変形による応力緩和を伴う。この内部応力緩和の推定について、Wengは塑性変形におけるある点を弾性係数が刻々と変化する弾性体に置き変えて考え、その時の弾性定数はその点におけるSecant係数を用いることで推定可能とした。この時、内部応力緩和した各組織鋼の応力-ひずみ状態は単一組織鋼の応力-ひずみ曲線に従うとし、これはSwiftの式を用いることで計算した<sup>15,18)</sup>。

$$s = a(b + \varepsilon)^N \quad (4)$$

ここで、 $\sigma$ は真応力、 $\varepsilon$ は塑性真ひずみ、 $a, b, N$ は定数である。また、変形にともなうオーステナイトとマルテンサイト体積率の変化については、以下に示すMatsumura et al.の式<sup>19)</sup>を用い計算に考慮した。

$$V_\gamma = \frac{V_{\gamma 0}}{1 + (k_p/b) V_{\gamma 0} \varepsilon^p} \quad (5)$$

ここで、 $V_\gamma$ はオーステナイト体積率、 $V_{\gamma 0}$ は初期オーステ

ナイト体積率,  $k_p, p$  は定数である.

計算に必要な入力データは, オーステナイト ( $\gamma$ ), マルテンサイト ( $\alpha'$ ) のヤング率 ( $G$ ), ポアソン比 ( $\nu$ ), Swift の式における  $a, b, N$  の値, および Matsumura et al. の式における定数  $k_p$  と  $p$  である. このうち, オーステナイト, マルテンサイトのヤング率とポアソン比は, とともに 200 GPa, 0.3 とした<sup>18)</sup>. オーステナイトにおける Swift の式の定数は, 引張試験結果より加工誘起マルテンサイト体積率の少ない変形初期の応力-ひずみ曲線を用いることで決定した. マルテンサイトの入力値は, Fig. 6 のビッカース硬さ試験結果より SUS304 鋼, SUS301L 鋼ともに同じ値とし, ビッカース硬さとひずみ 8% における変形応力の関係式<sup>20)</sup>を用い, 硬さを応力に換算し決定した.

$$HV = 2.7\sigma_{0.08} \quad (6)$$

ここで,  $HV$  はビッカース硬さ,  $\sigma_{0.08}$  はひずみ 8% における変形応力である. Matsumura et al. の式における定数は, X 線回折結果より求めた Table 2 より決定した. 計算で用いた各入力値は, Table 3 に整理した.

Fig. 7 に, SUS304 鋼, SUS301L 鋼の真応力-ひずみ曲線と加工硬化率曲線の, 実験結果と計算結果を示す. 多少の違いはあるものの, 計算結果は実験結果をほぼ再現できていると言える. 両鋼の入力データにおける大きな違いは, 式 (5) の  $k_p$  と  $p$  値である. 加工誘起変態における変態速度の違いを考慮するだけで実験結果との一致が得られたというこ

Table 3 Parameters used in the calculations of the Weng secant method.

		$a$ (MPa)	$b$	$N$	$G$ (GPa)	$\nu$	$k_p$	$p$
SUS304	$\gamma$	1084	0.002	0.31	200	0.3	28.7	3.15
	$\alpha'$	2200	$10^{-7}$	0.32				
SUS301L	$\gamma$	1089	0.002	0.29	200	0.3	163.2	3.8
	$\alpha'$	2200	$10^{-7}$	0.32				

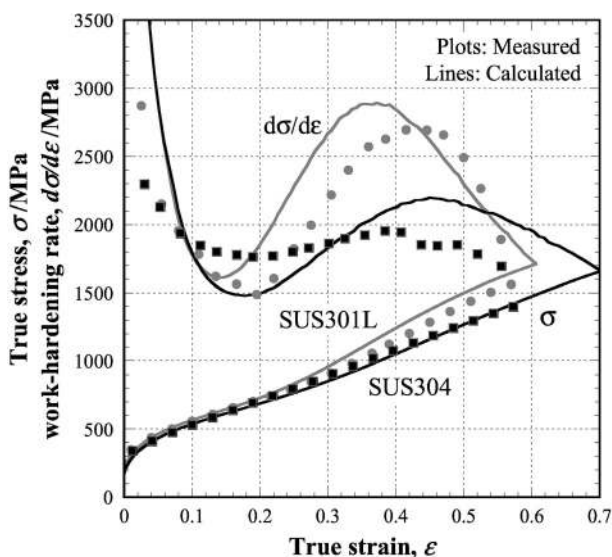


Fig. 7 Comparisons between the calculated true stress-strain curves and the measured ones in the SUS304 and SUS301L steels, where work-hardening rates are also shown.

とは, SUS304 鋼, SUS301L 鋼の応力-ひずみ曲線と加工硬化率曲線の違いは, 加工誘起マルテンサイト体積率が大きな役割を果たしていることが計算結果より明らかとなった.

### 3.5 マイクロメカニクスを用いた引張強さ-均一伸びバランスにおよぼす加工誘起マルテンサイト変態の影響

TRIP 効果により向上が期待できる機械的特性として, 引張強さと均一伸びがあげられる. Tsuchida and Tomota<sup>11)</sup> は, マイクロメカニクス Secant 法を用いて 3 種類の TRIP 鋼について計算を行い, TRIP 効果に影響をおよぼすのはオーステナイト体積率, 加工誘起変態の変態速度と加工誘起マルテンサイトの強度であることを明らかにした. ここでは同じくマイクロメカニクス Secant 法を用いて, 準安定オーステナイト鋼において優れた引張強さ (TS)-均一伸び (U.El) バランスを得るための, 加工誘起マルテンサイトの強度と変態速度の条件を明らかにすることを目的として計算を行った. 本計算では, Table 3 に示す SUS301L 鋼の入力データを用い, Swift の式におけるオーステナイトの入力値は一定とした. マルテンサイト強度については Swift の式における  $a$  と  $N$  を, 変態速度については Matsumura et al. の式における  $k_p$  と  $p$  を変化させた.

はじめに, TS-U.El バランスにおよぼすマルテンサイト強度の影響について計算した. 加工誘起変態速度に関しては, Table 3 に示した SUS301L 鋼の  $k_p, p$  を用いた. マルテンサイトの応力-ひずみ曲線の入力値は, Table 3 における SUS301L 鋼の値を元に, Fig. 8 に示す 3 種類の場合を考えた. まず, 元の応力-ひずみ曲線 (Base) を上下に変化させた場合 (Fig. 8 A), 降伏応力は Base と同じでひずみ 0.3 における応力を変化させた場合 (Fig. 8 B), ひずみ 0.3 における応力は Base と同じで降伏応力を変化させた場合 (Fig. 8 C) である. ここで, B と C の場合でひずみ 0.3 における応力に注目した理由は, オーステナイトの入力値が関係している. Table 3 に示した SUS301L 鋼のオーステナイトの入力値のうち, Swift の式における定数  $N=0.29$  であるため, オーステナイトはひずみ約 0.3 の時にくびれることが予想される. そこで, ひずみ 0.3 におけるマルテンサイトの変形応力が変化する場合を想定した. A の場合, 強度が高くなるに従い式 (4) における  $a$  は大きく,  $N$  は小さくなった. B の場合はひずみ 0.3 における応力が大きくなるに従い, また C の場合, 降伏応力が小さくなるに従い,  $a, N$  ともに大きくなった. 得られた計算結果を Fig. 9 に示す. 図における A, B, C は, Fig. 8 における A, B, C と対応する. A の場合, U.El に大きな変化はなくマルテンサイトの強度とともに TS は増大した. 一方で, B, C の結果はマルテンサイトの降伏比が低いほど優れた TS-U.El バランスを示した. これより, 加工誘起変態したマルテンサイトの加工硬化能が高いほど, 優れた TS-U.El バランスが得られることが予想される.

次に, 加工誘起マルテンサイト変態における変態速度の影響について計算した. ここでもマルテンサイト強度の影響同様, オーステナイトがくびれるひずみ 0.3 における体積率に注目し, Fig. 10 に示すように, ひずみ 0.3 におけるマルテンサイト体積率が様々に変化する場合を考えた. Fig. 10 よ

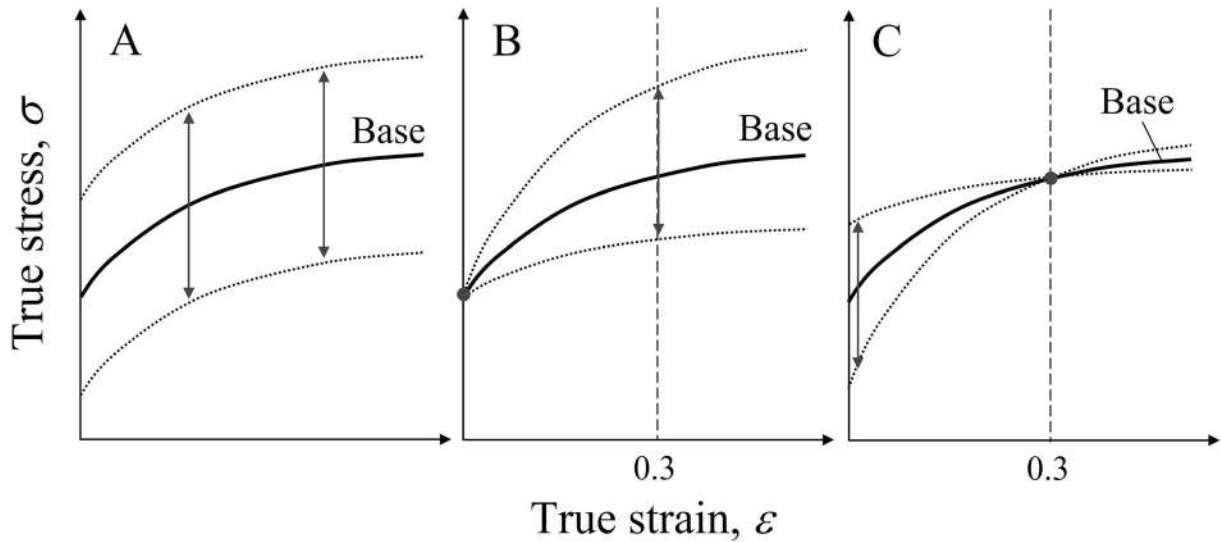


Fig. 8 Schematic illustrations of flow curves of martensite in the calculations.

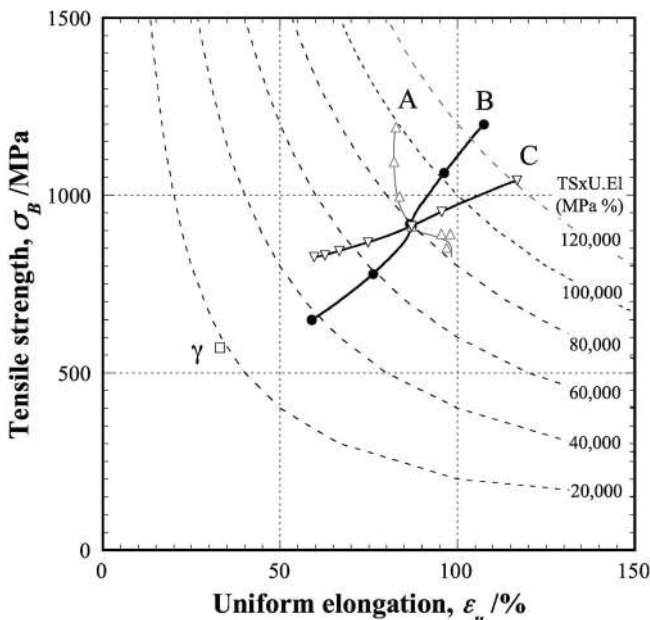


Fig. 9 Effect of the strength of stress-induced martensite on the calculated tensile strength-uniform elongation balance.

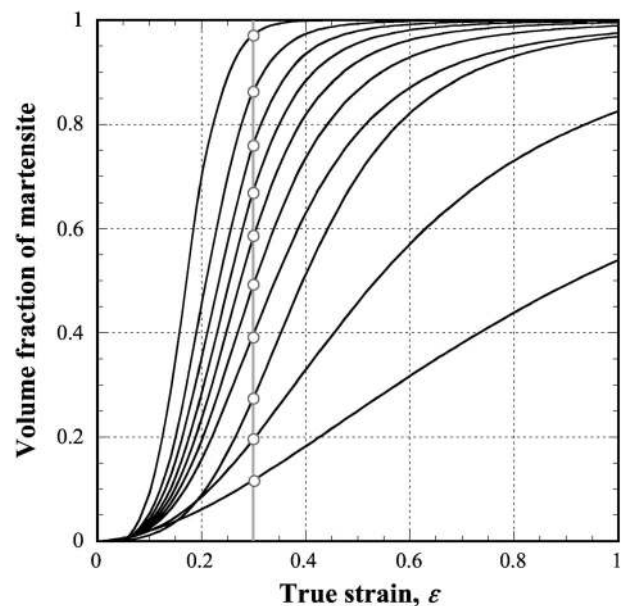


Fig. 10 Change of the volume fraction of martensite during tensile deformation used in the calculations.

り得られた  $k_p$  と  $p$  の値を Table 4 に示す。ひずみ 0.3 におけるマルテンサイト体積率が多いほど、 $k_p$ ,  $p$  ともに大きくなった。Table 4 を元に計算した TS-U.El バランスを Fig. 11 に示す。図には TSxU.El の等高線と、ひずみ 0.3 におけるマルテンサイト体積率 ( $V_M|_{\epsilon=0.3}$ ) もあわせて示した。TS-U.El バランスは  $V_M|_{\epsilon=0.3}$  の増加とともに湾曲状に変化し、湾曲点である  $V_M|_{\epsilon=0.3}$  が 0.2 から 0.3 の時優れた TS-U.El バランスを示した。Fig. 11 に示した計算結果より、優れた TS-U.El バランスを示す加工誘起変態速度の条件を明らかにすることができた。変形を加えた準安定オーステナイト鋼のマルテンサイト体積率については、Ni 等量と関係するという報告<sup>9)</sup>がある。このことから、加工誘起変態速度とオーステナイトの加工安定性の関係や、目的の変態速度を得るた

Table 4 Values of  $k_p$  and  $p$  in various stress-induced martensitic transformation rates.

Volume fraction of stress-induced martensite at $\epsilon=0.3$ (%)	$k_p$	$p$
10	2.1	1.8
20	11.7	2.5
30	113.2	3.7
40	131.5	3.4
50	342.0	3.8
60	880.8	4.1
70	2,427.4	4.5
80	8,297.9	5.0
90	52,440.6	5.8
99	11,022,324	7.9

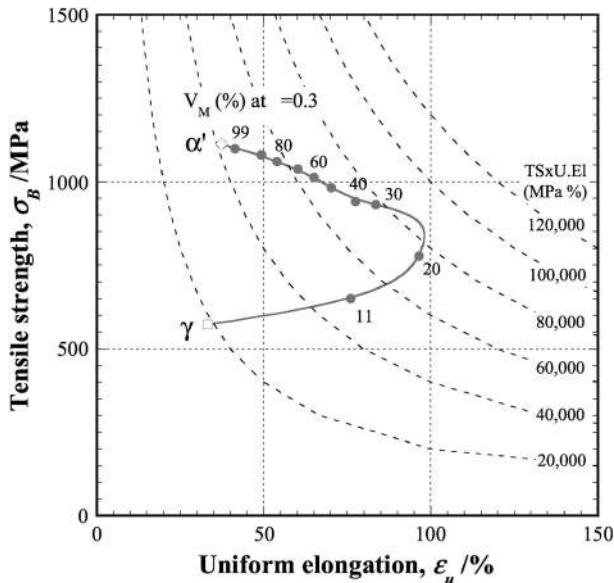


Fig. 11 Effect of the martensitic transformation rate on the calculated tensile strength-uniform elongation balance where the volume fraction of martensite at  $\varepsilon=0.3$  is shown.

めの化学成分設計について議論できるかもしれない。また、TS-U.El バランスにおよぼす変態速度の影響については、様々なマルテンサイト強度を想定した場合についても計算を行った。この場合も、オーステナイトにおける式(4)の入力値は一定とした。いずれの計算結果においても、マルテンサイトの強度にかかわらず  $V_M|_{\varepsilon=0.3}$  が 0.2 から 0.3 の時優れた TS-U.El バランスを示した。準安定オーステナイト鋼の TS-U.El バランスにおよぼす加工誘起変態速度の影響については、オーステナイトの機械的特性も関係していると思われる。今回は SUS301L 鋼のデータを元にオーステナイトの応力-ひずみ曲線の入力値は一定としたが、これが変化することによって優れた TS-U.El バランスを示す加工誘起マルテンサイト体積率の条件は異なることが予想される。

#### 4. 結 言

本研究では、準安定オーステナイト鋼の TRIP 効果におよぼす加工誘起マルテンサイト変態の役割を調べるために、SUS304 鋼と SUS301L 鋼の静的引張変形挙動、変形にともなうマルテンサイト体積率とマルテンサイトの硬さを比較した。また、マイクロメカニクス Secant 法を用いることにより、優れた引張強さ-均一伸びバランスを得るための加工誘起マルテンサイトの変態速度とマルテンサイト強度の条件について検討した。得られた主な結論は以下の通りである。

(1) 静的引張試験結果において、均一伸びはほぼ同じであ

った。一方で、0.2%耐力と引張強さは、SUS301L 鋼の方がそれぞれ約 10 MPa、約 100 MPa 高かった。

(2) X 線回折結果より、同じひずみにおけるマルテンサイト体積率は SUS301L 鋼の方が多かった。また、ピッカーズ硬さ試験結果より、加工誘起マルテンサイトの硬さに大きな違いは見られなかった。以上のことから、SUS304 鋼と SUS301L 鋼の応力-ひずみ関係および加工硬化率曲線の違いは、加工誘起マルテンサイト体積率が大きな影響をおよぼしていると考えられる。

(3) マイクロメカニクス Secant 法を用いて、SUS301L 鋼の入力データを元に、引張強さ-均一伸びバランスにおよぼす加工誘起マルテンサイトの強度と変態速度の影響について計算した。マルテンサイト強度の影響については、マルテンサイトの降伏比が低いほど、優れた引張強さ-均一伸びバランスを示した。また、変態速度の影響については、マルテンサイトの強度にかかわらずオーステナイトがくびれるひずみ 0.3 でのマルテンサイト体積率が 20% から 30% の時、優れた引張強さ-均一伸びバランスを示した。

本研究は、NEDO の産業技術研究助成事業助成金を受けて行われた。ここに謝意を表する。

#### 文 献

- 1) I. Tamura: *Tetsu-to-Hagane* **56**(1970) 429-445.
- 2) K. Hoshino: *J. Jpn. Soc. Technol.* **16**(1975) 993-1000.
- 3) T. Maki: *Tetsu-to-Hagane* **81**(1995) N547-N555.
- 4) S. Hashimoto, T. Kashima, S. Ikeda and K. Sugimoto: *Tetsu-to-Hagane* **88**(2002) 400-405.
- 5) O. Akisue and T. Hada: *Met Technol* **65**(1995) 287-294.
- 6) Y. Tomota, H. Tokuda, Y. Adachi, M. Wakita, N. Minakawa, A. Moriai and Y. Morii: *Acta Mater.* **52**(2004) 5737-5745.
- 7) Y. Iwasaki, Y. Nakasone, T. Shimizu and N. Kobayashi: *Jpn. Soc. Mech. Eng. A* **72**(2006) 1561-1568.
- 8) A. K. De, D. C. Murdock, M. C. Mataya, J. G. Speer and D. K. Matlock: *Scr. Mater.* **50**(2004) 1445-1449.
- 9) M. Sanga, N. Yukawa and T. Ishikawa: *J. Jpn. Soc. Technol.* **41**(2000) 64-68.
- 10) M. Sanga, N. Yukawa and K. Ishikawa: *J. Jpn. Soc. Technol.* **39**(1998) 72-76.
- 11) N. Tsuchida and Y. Tomota: *Mater. Sci. Eng. A* **285**(2000) 345-352.
- 12) B. D. Cullity: *Elements of X-ray Diffraction*, 2nd ed., (AGNE, Tokyo, 1992), pp. 377-381.
- 13) N. Tsuchida, Y. Tomota, H. Moriya, O. Umezawa and K. Nagai: *Acta Mater.* **49**(2001) 3029-3038.
- 14) M. Umemoto and I. Tamura: *J. Jpn. Soc. Heat Treatment* **24**(1984) 334-338.
- 15) G. J. Weng: *J. Mech. Phys. Solids* **38**(1990) 419-441.
- 16) J. D. Eshelby: *Proc. R. Soc. London A* **241**(1957) 376-396.
- 17) T. Mori and K. Tanaka: *Acta Metall.* **21**(1973) 571-574.
- 18) Rudiono and Y. Tomota: *Acta Mater.* **45**(1997) 1923-1929.
- 19) O. Matsumura, Y. Sakuma and H. Takechi: *Scr. Mater.* **21**(1987) 1301-1306.
- 20) M. Nakamura: *J. Jpn. Soc. Technol.* **23**(1982) 840-846.