

© 1990 ISIJ

 ///////////////
 論 文
 ///////////////

SUS 304 ステンレス鋼の冷間据込み加工 における加工誘起変態

品川一成*・西川裕之*²・石川孝司*³・細井祐三*³

Deformation-Induced Martensitic Transformation in Type 304 Stainless Steel during Cold Upsetting

Kazunari SHINAGAWA, Hiroyuki NISHIKAWA, Takashi ISHIKAWA and Yuzo HOSOI

Synopsis:

Temperature dependence of deformation-induced martensitic transformation in type 304 stainless steel is investigated by homogeneous compressive test which is carried out over large strain in the temperature range from 20 to 100°C. The results obtained for the volume fraction of martensite vs. plastic strain relationship at each temperature are formularized as a simple expression in order to develop a numerical simulation of martensitic transformation progress during cold upsetting. Distribution of martensite in specimens upset on hydraulic press or mechanical press is investigated by a coupled usage of magnetic measurement and X-ray diffraction. While the distribution profile of martensite volume fraction is rather clear in the specimens upset on hydraulic press because of inhomogeneous deformation, that found in specimens upset on mechanical press is somewhat vague due to temperature rise. Amount of deformation-induced martensitic transformation during cold upsetting is calculated by a simulation on the basis of strain and temperature distribution obtained by a coupled analysis of Finite Element Method (FEM) and Finite Difference Method (FDM). As for upsetting on hydraulic press the calculated result is smaller than the experimental result under the general complex deformation condition, however the distribution pattern looks common to both.

Key words: deformation-induced martensitic transformation; cold upsetting; stainless steel; numerical analysis.

1. 緒 言

SUS 304 などのオーステナイトステンレス鋼は耐食性に優れ、非磁性であり、磁場を乱さないことから電気計器部品や時計側などに用いられ、鍛造用としての需要も増加している。しかし、オーステナイトが不安定であり、冷間加工により容易にマルテンサイトが生成する。その場合には、非磁性でなくなると同時に耐食性が劣化するためオーステナイト本来の特性を生かすためには好ましくなく、加工時に注意が必要である。また、逆に硬さあるいは耐摩耗性を上げるためにマルテンサイトに変態させたほうがよい場合もある。従って加工中に被加工材のどの位置にどのくらいマルテンサイト変態を起こすかを予測することは重要であると考えられる。これまで

加工誘起マルテンサイト変態に関する研究は種々行われているが^{1)~9)}、マルテンサイト量は試料のマクロな歪み量に対しその試料中で変態生成した全量として測定されており、実際の加工で起こる不均一変形の場合のマルテンサイト分布について検討した例はほとんどない。また、これまでの研究のほとんどは等温状態で低加工速度で調べたものであるが、実際の加工は高速度で行われるため加工中に素材の温度が上昇し、その影響でマルテンサイト変態量は変化すると考えられる¹⁰⁾。そこで、このような実加工条件下でのマルテンサイト変態について詳しく検討する必要があると考えられる。

本研究では SUS 304 ステンレス鋼の据込み加工を例にとり、加工誘起変態に及ぼす歪み分布の影響、また、温度上昇の効果を実験的、解析的に調べた。

平成元年 5 月 10 日受付 (Received May 10, 1989)

* 名古屋大学大学院 (現:大阪大学) (Graduate School, Nagoya University, Now Osaka University)

*² 名古屋大学工学部 (現:トヨタ自動車(株)) (Faculty of Engineering, Nagoya University, Now TOYOTA MOTOR Corp.)

*³ 名古屋大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464)

Table 1. Chemical composition of material used (wt%).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	N
0.045	0.35	1.06	0.029	0.007	9.23	18.13	0.21	0.17	0.0381

マルテンサイト量と歪みの関係を高歪み域まで調べた例はないので、20~100°Cの試験温度範囲で円柱試片に油圧プレスで低速均一圧縮試験を施し、各温度におけるマルテンサイト量と歪みの関係をまず求めた。次に、両端面を拘束し、静的据込み加工を行い、不均一変形をさせた試料についてのマルテンサイト分布を調べた。また、機械プレスによって同様に端面拘束状態で動的加工を行い、温度上昇の起こる場合のマルテンサイト分布を調べた。更に、有限要素法による据込み加工の変形と温度上昇のシミュレーションを行い、これらの結果を用いてマルテンサイト分布を予測し、実測値との比較を試みた。

2. 実験方法

2.1 試験片

供試材は SUS 304 を用いた。1000°C、0.5 h の溶体化処理を行い、その後、直径 11.2 mm、高さ 16.8 mm の円柱状試片（高さ/直径=1.5）に機械加工した。化学組成を Table 1 に示す。

2.2 均一圧縮試験

まず、加工誘起変態に及ぼす歪みと温度の影響を明らかにするため、容量 300 tf の油圧式圧縮試験機を用いて高歪みまでの圧縮試験を行った。その際、均一変形をさせるため、ワセリンを塗布したテフロンシートを試料とダイスとの間にはさみ、繰り返し潤滑を行った。試験温度は 20, 30, 40, 50, 70, 100°C とし、変形熱による温度上昇が起らないよう、試験速度は約 0.5 mm/min とした（歪み速度 $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 程度）。試片の加熱は上下の各圧板のまわりにヒーターを取り付け、その間に試片をはさんで行った。その際、温度は圧板に組み込んだ熱電対と温度調節器によって一定になるよう制御した。こうして均一変形させた試料についてのマルテンサイト量を X 線解析によって定量し、歪みと温度の影響を調べた。

2.3 据込み加工

据込み加工は油圧式圧縮試験機（歪み速度 $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 程度、以後油圧プレスと呼称）を用いた場合と、容量 110 tf、毎分のストローク数が 50 r.p.m. のクランクプレス（初期歪み速度 $\dot{\epsilon} = 15 \text{ s}^{-1}$ 程度、以後機械プレスと呼称）を用いた場合とについて行った。いずれの場合も、不均一変形させるため同心円溝付き拘束圧

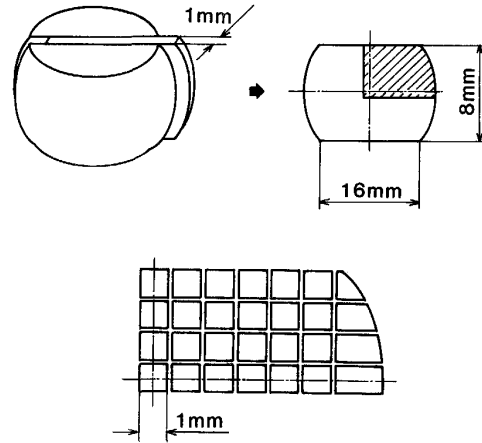


Fig. 1. Specimens for magnetic measurement.

板¹¹⁾を用いて、試片の両端面は完全固着の状態で行った。両者とも加工温度は 20°C とし、圧下率 $e = 48\%$ の加工を施した。

これらの加工後の試片のマルテンサイト分布を求めるために、Fig. 1 に示すように試片の中央部から約 1 mm 厚の板を切り出し、対称性を考えて 1/4 の領域をさらに約 1 mm 角のサイコロ状に切断した。このような微小な試料を対象とする場合は X 線解析では無理なため、それぞれについて飽和磁化量を測定し、マルテンサイト量の分布を求めた。

2.4 X線解析

X 線解析では $\text{MoK}\alpha$ を用い、マルテンサイト量を定量する際、集合組織の補正を次式で行った¹²⁾¹³⁾。

$$\frac{V_{\alpha'}}{V_{\gamma}} = \frac{1/m \sum_i \{I_{(hkl)_i}^{\alpha'} / R_i^{\alpha'}\}}{1/n \sum_j \{I_{(hkl)_j}^{\gamma} / R_j^{\gamma}\}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$V_{\alpha'} + V_{\gamma} = 1 \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 V_{α}' : マルテンサイト体積率、 V_{γ} : オーステナイト体積率、 $I_{(hkl)}$: (hkl) 面の積分強度、 R : 理論強度、 m , n : ピーク数である。

用いたピークは、マルテンサイト相については (200), (211), (220), (321), オーステナイト相については (200), (220), (311), (222), (420), (422) である。

2.5 飽和磁化測定

飽和磁化量は、電磁誘導法により行った。飽和磁化量からマルテンサイト量に変換する場合、マルテンサイト

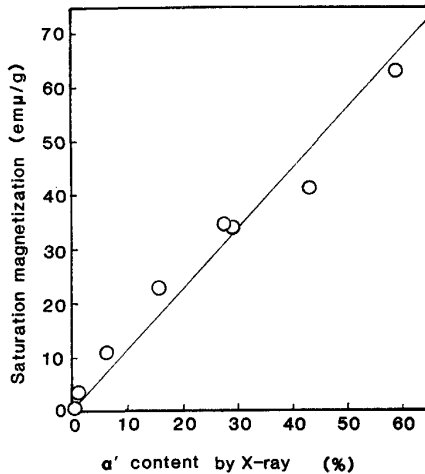


Fig. 2. Calibration line for saturation magnetization vs. martensite content by X-ray diffraction.

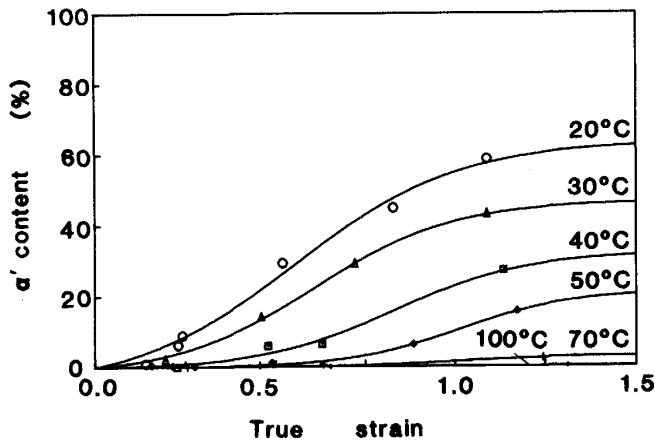


Fig. 3. Martensite content vs. compressive true plastic strain at each temperature.

100%の飽和磁化量が既知であることを要するが、SUS 304についてはその試料を得ることができない。その対策として、X線解析によってマルテンサイト量が定量された圧縮試験試料のいくつかについて飽和磁化量を求め、Fig. 2に示すような検量線を作成した¹⁴⁾。これを用いて飽和磁化量をマルテンサイト量に変換した。

3. 実験結果及び考察

3.1 マルテンサイト変態に及ぼす歪み、温度の影響

均一圧縮試験によって得られた真歪みと a' マルテンサイト量との関係をFig. 3に示す。この場合、 ϵ マルテンサイトの生成の可能性もあるが、X線解析の結果、室温以上ではほとんど生成しておらず、以下は a' マルテンサイトのみについて考える。圧縮変形により高歪み域まで変形を与えると室温でも多量のマルテンサイトが生成する。しかし、100°C以上ではマルテンサイト変態は

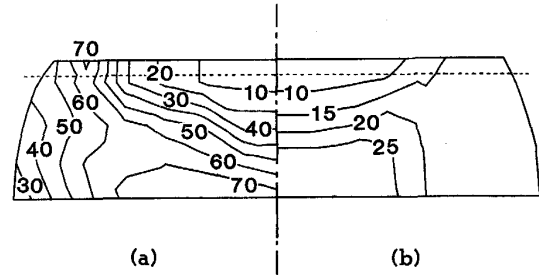


Fig. 4. Measured distributions of martensite (%) in the specimen upset on (a) hydraulic press and (b) mechanical press (Reduction in height $e=48\%$).

ほとんど起きない結果となった。すなわち真歪み $\epsilon=1.0$ で20°Cでは約55%、30°Cでは約41%、40°Cでは約23%のマルテンサイトが生成し、70°C以上ではその生成は非常にわずかである。

3.2 据込み加工におけるマルテンサイト分布

据込み加工によって不均一変形をさせた試料についてのマルテンサイト量の分布図をFig. 4に示す。(a)が油圧プレス、(b)が機械プレスで加工したものである。油圧プレスの場合は中心部とフォールディング部[†]を結んだ部分が最も変態量が多く、ダイスに接する端面の中央部はあまり変態していないことがわかる。機械プレスの場合はあまり分布がついておらず、全体的にマルテンサイト量も少ないことが分かる。機械プレスの場合、油圧プレスに比べ加工速度が大きいのに変態量が少なくなったのは、歪み速度の上昇の影響というより、それにとまなう温度上昇の影響であると考えられる²⁾¹⁰⁾。すなわち、油圧プレスでは、試片温度は変形中も加工開始温度20°Cのままであるが、機械プレスでは加工時間が短いため、変形熱が試片内に蓄積し、温度上昇が激しい。そのため、マルテンサイト変態が抑えられるものと考えられる。

また、X線解析の結果から、機械プレスの加工において ϵ マルテンサイトが生成するというようなことはなかった。

4. 解析方法

4.1 据込み加工の変形及び温度の連成解析

据込み加工の変形解析には、小坂田、森らの開発した剛塑性有限要素法¹⁵⁾に基づく冷間据込み加工の変形と熱移動の連成解析モデル¹⁶⁾を用いた。解析は素材の対称性を考えてその1/4領域のみとし、これを49(=7×7)要素に分割した。要素分割をFig. 5に示す。圧縮加

† ダイスによる加工前は試料の外周(円周)部であった部分。

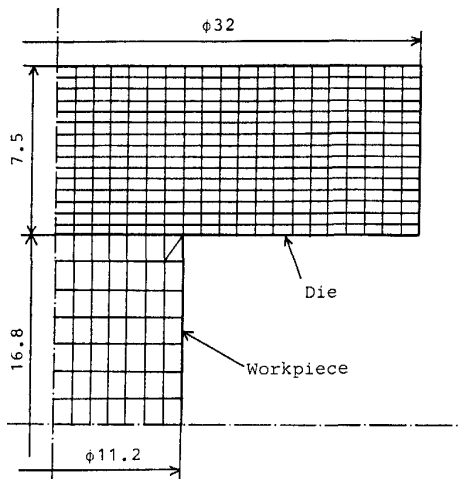


Fig. 5. Mesh for FEM and FDM.

工の1ステップは初期高さの1%とし、動的据込み試験の解析では、各ステップごとに、塑性仕事を熱に変換し、差分法により熱伝導を計算して、各要素の温度を算出した。ただし、塑性仕事の熱変換率 η は $\eta = 0.9$ とした。また、こうして求められる歪み分布や温度変化などを考慮して逐次各計算ステップの各要素の変形抵抗を決定した。熱伝導計算で用いた物性値¹⁷⁾は

$$C_p = 0.12(\text{cal/g}\cdot^\circ\text{C})$$

$$\rho = 8.03 \times 10^{-3}(\text{g/mm}^3)$$

$$\lambda = 3.88 \times 10^3(\text{cal/mm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$$

である。また、機械プレスでの加工の時間経過は、変形抵抗測定時のラムの時間-変位の実測値から得られた次式を用いて、これより逆算して求めた。

$$H = a \cdot \sin^2(bt) \quad a = 74485, \quad b = 1.2478 \times 10^{-4} \quad (3)$$

ここに、 H : 変位 (mm), t : 下死点基準の時間 (ms)

用いた変形抵抗式は室温以上で SUS 304 と変形抵抗-歪み挙動がほぼ同じである SUS 316 の変形抵抗¹⁸⁾を用いた。マルテンサイトが生成する場合は、SUS 304 の変形抵抗は SUS 316 より増加することになり、厳密にはこれを考慮しなければならないが、室温以上ではその増加は小さく、ここでは歪み分布、温度分布に与える影響は小さいと考えて考慮しなかった。

$$\begin{cases} \bar{\sigma} = 182.3 \bar{\varepsilon} + B + 5.21 \log\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{0.001}\right) \\ (\bar{\varepsilon} < \bar{\varepsilon}_1) \dots\dots\dots (4) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma = B \left\{ \frac{\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_0}{\bar{\varepsilon}_1 - \bar{\varepsilon}_0} \right\}^n + 182.3 \varepsilon_1 + 5.21 \log\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{0.001}\right) \\ (\bar{\varepsilon} \geq \bar{\varepsilon}_1) \dots\dots\dots (5) \end{cases}$$

$$\bar{\varepsilon}_0 = \bar{\varepsilon}_1 - n \frac{B}{182.3} \quad (6)$$

$$\bar{\varepsilon}_1 = 4.61 \times 10^{-2} \exp\left(\frac{302}{T}\right) \quad (7)$$

$$B = 0.271 \exp\left(\frac{226}{T}\right) \quad (8)$$

$$n = 0.071 \left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{0.001}\right)^{-0.0698} \times \exp\left\{\frac{234 + 107 \log(\dot{\bar{\varepsilon}}/0.001)}{T}\right\} \quad (9)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$: 変形抵抗 (kgf/mm²), $\bar{\varepsilon}$: 相当歪み, $\dot{\bar{\varepsilon}}$: 相当歪み速度, T : 温度 (K) である。

また、熱伝導率等の物性値も変態により変化すると考えられるがここではオーステナイトステンレス鋼の値のままにシミュレートした。これらの変形抵抗、物性値の変化はマルテンサイト変態と相互に影響し合うため、厳密にはすべて連成させて解かなくてはならないが、今回は近似的方法として、これらをオーステナイトステンレス鋼での値のままにシミュレートした。

4.2 マルテンサイト変態の計算

Fig. 3 に示すマルテンサイト変態への歪みと温度の影響を解析に組み込むため、変態式を表す必要がある。変態式はこれまで種々提案されているが⁵⁾⁷⁾¹⁹⁾、この場合、解析に組み込むことのみを目的とし、Fig. 3 の実験結果より、現象を表すのに適切でかつ単純な次式のような形とした。

$$\frac{dV}{d\bar{\varepsilon}} = a(V + b)(c - V) \quad (10)$$

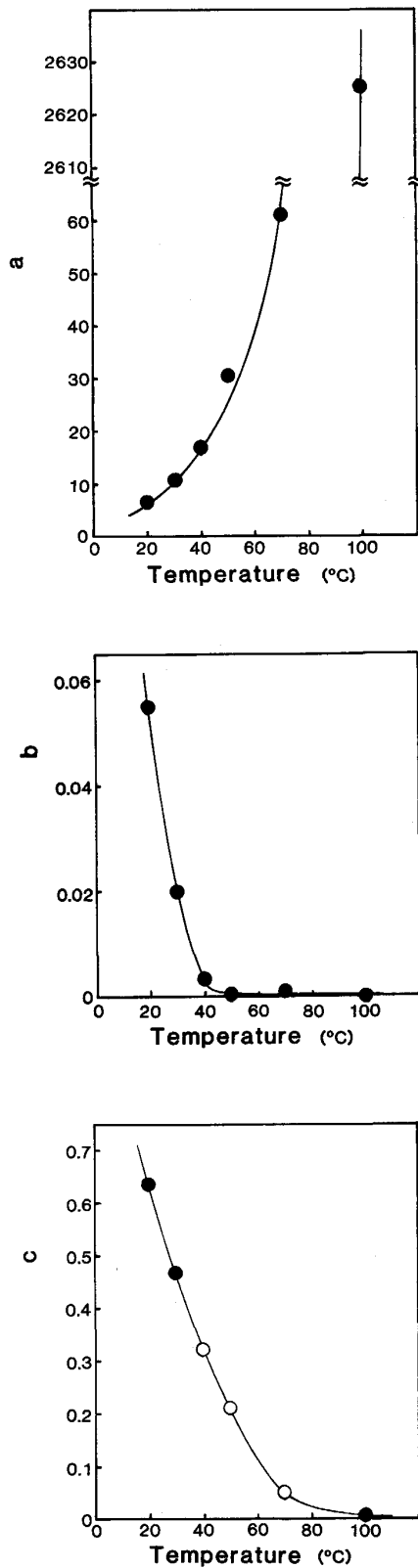
この式の積分形は次式である。

$$V = b \cdot \frac{\exp\{a(c+b)\bar{\varepsilon}\} - 1}{b/c \cdot \exp\{a(c+b)\bar{\varepsilon}\} + 1} \quad (11)$$

ここで、 $\bar{\varepsilon}$: 相当歪み, V : マルテンサイト体積率, a, b, c : 温度によるパラメーターである。 $(V+b)$ の項は変態量が増えると変態速度が増加するというマルテンサイトの自触作用を表す。 c はその温度での変態の飽和量に相当し、従って $(c-V)$ は変態可能な残りのオーステナイト量を表している。また、式(10)においては、ある歪みにおける変態速度はその時点でのマルテンサイト量と温度のみに依存し、それぞれ、その履歴には依存しないと仮定した。

各温度での a, b, c の値を Fig. 6 に示す。これらは非線形最小二乗法により決定した。なお、40°C 以上では、高歪みのデータの不足から最小二乗法が収束しなかったため、飽和量に相当する c を 20°C, 30°C の値と 100°C 以上の値 ($c=0$ と仮定) から内挿で決定し (Fig. 6c の白丸)、その後、他のパラメーター a, b を最小二乗法で決定するという手順をとった。

油圧プレスでの加工における各要素の変態量は温度変化を考慮しなくてよいため式(11)を用いて得ることがで



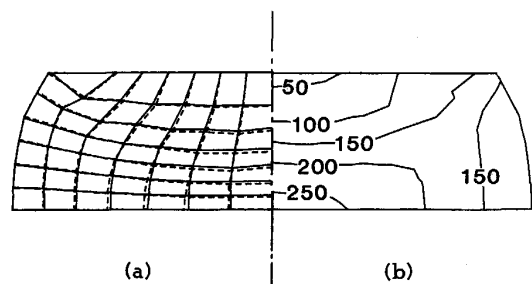
Open circles : Interpolated data
 Fig. 6. Temperature dependence of each parameter in the expression (10) or (11).

きるが、機械プレスでの加工における変態量の計算は温度上昇を伴うので、式(10)を用いて数値積分を行った。すなわち、変形・温度の連成解析のステップごとにパラメーター a, b, c をその温度での値に更新し、そのステップでの変態増分を計算し、加算するという方法をとった。

5. 解析結果及び考察

Fig. 7(a)に圧下率 $e = 48\%$ における格子変形状態、Fig. 7(b)に機械プレスで加工した場合の素材の温度分布を示す。また、マルテンサイト変態量分布を Fig. 8 に示す。

油圧プレスでの変形状態をみると、中心部からフォールディング部にかけて変形が最も大きく、端面中央部で小さいのが分かる。これにより、変形の大きい領域でのマルテンサイト量も多くなっている。一方、機械プレスでは、変形が集中する素材中心部からフォールディング部にかけての領域では変形発熱が大きいので、温度上昇が大きくなっている。そのため、歪みと温度上昇が相殺効果を生み、マルテンサイト変態が抑制され、分布がつきにくくなっているのが分かる。Fig. 4 の実験値と比



(a) Distorted grid patterns on hydraulic press (Solid line) and mechanical press (Broken line)
 (b) Distribution of temperature (°C) in the upset on mechanical press

Fig. 7. Calculated results (Reduction in height $e = 48\%$).

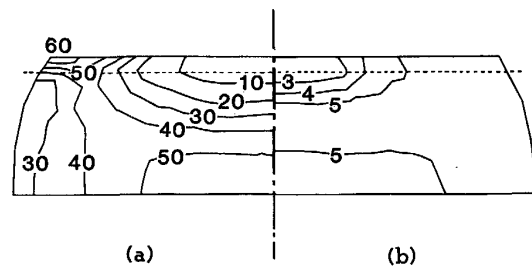


Fig. 8. Calculated distributions of martensite (%) in the specimen upset on (a) hydraulic press and (b) mechanical press (Reduction in height $e = 48\%$).

較すると定性的によく一致した。

ここで、実験値と計算値とを比較するため、試片の高さ方向の中心 (Fig. 4 および Fig. 8 の最下面) と、ダイスに接触していたブロック (Fig. 1 参照) の中心に相当する位置 (Fig. 4 および Fig. 8 の点線) における半径方向のマartenサイト量分布を取り上げ、Fig. 9 (a), (b) にそれぞれ示す。油圧プレスにおいてはマartenサイト量の少ない領域、すなわち歪みの小さい領域では実験値と計算値はほぼ一致しているが、歪みの大きい領域では実験値のほうがかなり多い。

この不一致の原因は変形状態または応力状態の差異によるものと考えられる。HECKER ら¹⁹⁾²⁰⁾ は一軸引張試験と二軸引張試験において二軸引張りの方がマartenサイト量が多くなることを見いだしている。本実験において

も、3軸変形状態でのマartenサイト生成量は単軸状態で求めた Fig. 3 の変態曲線から予想されるものより多くなったことが考えられる。

一方、機械プレスでの結果においても全体的にマartenサイト量は実験値の方が多くなっている。機械プレスの場合の不一致の原因は上記の他に、温度上昇の影響の考慮の仕方にもあると考えられる。すなわち、式(10)においてマartenサイトの変態速度はその時点でのマartenサイト量と温度とにより一義的に決まり、温度の履歴に依存しないと仮定した。しかし、本実験のように加工とともに温度が上昇する場合は、試片は加工初期には室温で加工されており、初めから高温で加工されている状態よりマartenサイト変態しやすくなっていることが考えられる。

以上のことより、不均一変形、温度上昇をする場合のマartenサイト分布を単軸圧縮試験で等温状態で求めた変態式を用いて予想した場合は、定性的にはよく一致するが、定量的には少なく見積られる結果となった。この点については今後、変態に及ぼす歪み、応力状態と温度履歴の影響を詳細に検討して解析する必要があるであろう。

6. 結 言

SUS 304 ステンレス鋼の据込み加工を行い、加工誘起変態に及ぼす歪み分布と温度上昇の影響を調べた。その結果、油圧プレスで低速で据込み加工を行った場合、その不均一変形によって試片内にかんがりのマartenサイト分布がつくことが分かった。一方、機械プレスでは温度上昇が起こるため、歪みと温度上昇が相殺効果を生み、マartenサイト変態が抑制され、分布がつきにくいことがわかった。

また、有限要素法による変形と温度上昇のシミュレーションを利用して、マartenサイト分布の予想を試みた。この結果、解析結果は実験結果を定性的によく表すことができたが、定量的には実際より少なく見積られた。

本研究を遂行するに当たり、試料を提供していただいた新日本製鉄株式会社に深く感謝する。

文 献

- 1) T. ANGEL: J. Iron Steel Inst., 177 (1954), p. 165
- 2) R. LAGNEBORG: Acta Metall., 12 (1964), p. 823
- 3) 深瀬幸重, 江波戸和男, 大久保延弘, 村尾誠一: 日本金属学会誌, 32 (1968), p. 38
- 4) F. LECROISEY and A. PINEAU: Metall. Trans., 3 (1972), p. 387
- 5) G. B. OLSON and M. COHEN: Metall. Trans. A, 6 (1975), p. 791
- 6) 川端義則, 西村 強, 若宮辰也, 山岡幸男: 鉄と鋼,

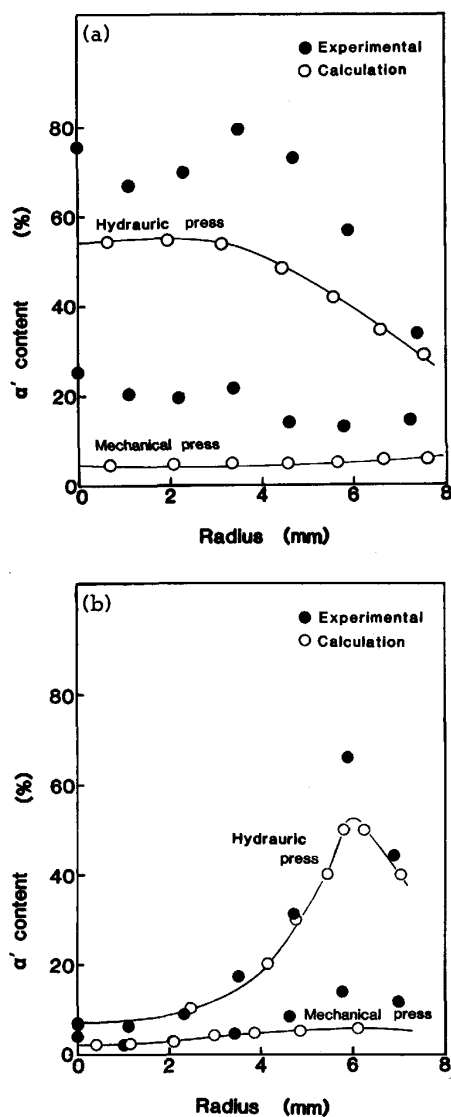


Fig. 9. Comparison between experimental and calculated distributions at (a) center and (b) top of the specimen.

- 61 (1975), p. 2028
- 7) 河合 望, 濟木弘行, 平出久徳: 塑性と加工, **17** (1976), p. 899
- 8) 大橋延夫, 小野 寛, 野原晴彦: 鉄と鋼, **63** (1977), p. 812
- 9) 小林俊朗, 若井直人, 八木 渉, 梶野利彦, 上田徹完: 鉄と鋼, **71** (1985), p. 1178
- 10) 田村今男: 鉄と鋼, **56** (1970), p. 429
- 11) 戸澤康壽: 塑性と加工, **22** (1981), p. 139
- 12) カリテュー: X線回折要論 (1982), p. 377 [アグネ]
- 13) 藤野允克, 松本義朗, 前原泰裕: 鉄と鋼, **67** (1981), p. 2039
- 14) 高木節雄, 徳永洋一, 富村宏紀: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 151
- 15) K. MORI, K. OSAKADA and M. FUKUDA: *Int. J. Mech. Sci.*, **25** (1983), p. 775
- 16) 加藤 隆, 赤井正司, 戸澤康壽: 塑性と加工, **28** (1987), p. 791
- 17) 山根寿己: ステンレス鋼便覧 (長谷川正義監修) (1973), p. 103 [日刊工業新聞社]
- 18) 品川一成, 細井祐三: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 115
- 19) D. C. LUDWIGSON and J. A. BEGER: *J. Iron Steel Inst.*, **207** (1969), p. 63
- 20) S. S. HECKER, M. G. STOUT, K. P. STAUDHAMMER and J. L. SMITH: *Metall. Trans. A*, **13** (1982), p. 619
- 21) S. S. HECKER, M. G. STOUT, K. P. STAUDHAMMER and J. L. SMITH: *Metall. Trans. A*, **13** (1982), p. 627