

討14 加工誘起マルテンサイト変態を伴う塑性応力について

日新製鋼 岡南製鋼所 星野和夫

1. 緒言

オーステナイト(γ)系ステンレス鋼は、加工によってマルテンサイト(α')相が誘起されることは広く知られている。この α' 相が材料の諸性質に及ぼす功罪は種々あり、多くの報告がなされている。

しかし、この α' 相が強度に及ぼす効果を定量的に取り扱った報告は少なく、GUIMARÃESら¹⁾とLUDWIGSONら²⁾の報告に限定される。前者は γ 相と α' 相の界面に存在する ledge を転位源とし、転位密度から塑性応力を算出しているが、 α' 相自体の強度は2次的要因とみなし無視している。後者は α' 相と γ 相との間に混合則が成り立つと仮定して塑性応力の解析を試みたものであるが、 γ 相の加工硬化が著しく低く評価されているという難点を有する。本報告は変形によってその量を変える α' 相と γ 相との間に基本的には混合則を適用し、塑性応力を解析する実験式を求めたものである。

2. 供試材および実験方法

用いた供試材の化学成分および結晶粒径を表1に示す。S1は、本実験の範囲では α' 相が誘起されない材料である。板厚0.7 mmのJIS 13B号試験片を $23 \pm 2^\circ\text{C}$ にコントロールされた部屋でひずみ速度 $1 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ で変形させた。

注意のひずみ量まで変形させた試験片より、 α' 量測定用試料および組織観察用試料を採取した。 α' 量は5 mmφの小円板を作成し、試料振動磁力計を用いて飽和磁化量を求め算出した。³⁾

表1. 供試材の化学成分および結晶粒径

No.	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	N	(C+N) acid sol. (μ)	G.S. (μ)
S1	0.011	0.15	0.20	18.24	11.95	—	0.015	0.025	22
M1	0.070	0.59	1.06	18.38	8.91	—	0.010	0.080	16
U1	0.106	0.57	0.99	17.20	7.58	—	0.016	0.120	48
U2	0.127	0.53	1.13	17.38	7.37	—	0.012	0.132	26
U3	0.051	0.33	0.36	17.59	8.61	—	0.015	0.065	29
U4	0.035	0.33	0.37	17.42	8.69	—	0.026	0.060	29
U5	0.008	0.21	0.05	15.88	10.65	0.31	0.020	0.005	31

3. 実験結果および考察

3. 1. 塑性応力

真応力(σ)—真ひずみ(ϵ)線図を図1に示す。(厳密にはU1, U2の高ひずみ側でセレーションが発生しているが、図1では省略した)。変形初期の塑性応力は、固溶炭素(窒素)の多少、結晶粒の大きさなどによって支配されているが、高ひずみ側の塑性応力は γ 相の安定性に依存している。

S1, U1の σ — ϵ 線図を対数で表わしたものを図2に示す。Lowら⁴⁾は、各種の実用材料の加工硬化特性を検討し、18-8ステンレス鋼以外は $\sigma = K\epsilon^n$ のn乗硬化式で表示しようが、18-8ステンレス鋼は加工誘起 α' のために本実験式は適用しえないとした。すなわち、図2の ϵ 以降の塑性応力の立ち上りを α' 相に起因するものとみなした。この考え方はそれ以降の一部の報告に受け継がれてきた。^{2),5)}しかし、S1のようにマクロ的(磁性的)にも、ミクロ的(電顕観察)にも α' 相の誘起されない材料においてもこの現象は観察される。すなわち、ここで取り扱っている γ 系ステンレス鋼は直線硬化領域(ほぼ ϵ

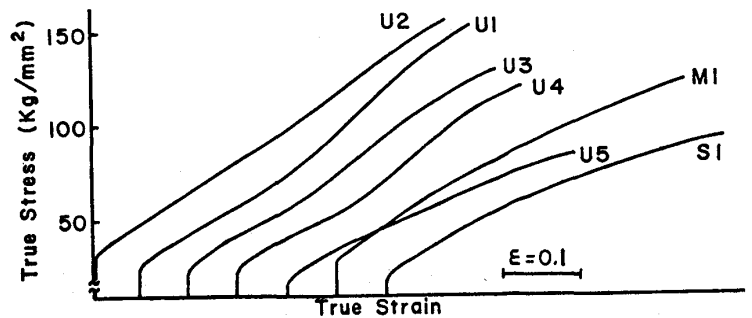


図1. 真応力—真ひずみ線図

まづ)が長く、放射線硬化領域での加工硬化が大きいため、この現象が現われているにすぎない。したがって、このような材料の全ひずみ領域についての塑性応力を表わす別の実験式を必要とするが、ここで扱っている材料は ϵ_i 以降で α' 相が誘起され、問題とするひずみ領域は ϵ_i 以降なので、 γ 相自体の塑性応力は(1)式で与えられるとする。

$$\sigma_A = K_A \epsilon^{n_A} = \sigma_i (\epsilon/\epsilon_i)^{n_A} \quad \cdots (1)$$

(K_A : γ 相の強度因子, n_A : γ 相の加工硬化係数, S1の結果より0.5, σ_i : 放射線硬化領域の始点 ϵ_i での真応力, ϵ_i : 正確に定め難いが、伸び率10% ($\epsilon = 0.095$) とする。

塑性応力より求まる σ_i , K_A の値を表2に示す。

3. 2. 塑性応力に及ぼす α' 相の効果

いま、 α' 相と γ 相との間に混合則がなり立つとする。

$$\sigma = \sigma_A + \sigma_M = \sigma_A^u \times V_A + \sigma_M^u \times V_M \quad \cdots (2)$$

(σ_A, σ_M : γ 相, α' 相が受ける応力, σ_A^u, σ_M^u : 単位 γ 相, 単位 α' 相の強度, V_A, V_M : γ 相, α' 相の量)

(1), (2)より求まる σ_M^u と σ_A^u との比 P_{app} と ϵ との関係の一部を図3に示す。

一方、変形中の α' 相の挙動は定性的には、①変形の前半に誘起された α' 相は後続する材料の変形に伴ない加工硬化する。②変形の後半に誘起される α' 相は、高い加工硬化のもとで変形された γ 相の強度を受け継ぐ、と考えられる。これらを平均して、 α' 相は n_M 乗硬化式で与えられるとする。

$$\sigma_M^u = K_M \epsilon^{n_M} \quad \cdots (3) \quad (K_M: \alpha' \text{相の強度因子}, n_M: \alpha' \text{相の加工硬化係数})$$

σ_M^u と σ_A^u との比を相対強度比 P とすると、 P は(4)式で与えられる。

$$P = (K_M/K_A) \times \epsilon^{n_M - n_A} = (K_M \cdot \epsilon_{mt}^{n_M} / K_A \cdot \epsilon_{mt}^{n_A}) \times \epsilon_{mt}^{n_A - n_M} \times \epsilon^{n_M - n_A} = g \times \epsilon_{mt}^{n_A - n_M} \times \epsilon^{n_M - n_A} \quad \cdots (4)$$

(ϵ_{mt} : P_{app} の極大値を示すひずみで、後述する α' 変態率の遷移点に一致する。 g : ひずみ ϵ_{mt} での σ_M^u と σ_A^u との比で、 P と区別して強度比と名付ける。

本実験から直線 n_M は求められないが、焼入れマルテンサイトの加工硬化挙動⁶⁾からみて、 n_M は n_A (=0.5)よりは小さく、 P は ϵ の増加につれて漸次減少する様相を呈すると考える。すなわち、図3の ϵ_{mt} よりも大きいひずみ領域での P_{app} の挙動は P の値を示すものと考えれば、 $n_A - n_M$ は推定しうる。 $n_M - n_A = 0.2$ として計算した P の値を図3では実線で示している。

一方、 ϵ_{mt} よりも小さいひずみ領域では、 P_{app} と P は相反する挙動をとり、 P_{app} の挙動は、 γ 相の加工硬化係数よりも α' 相のそれの方が大きいことや低いひずみ領域では σ_M^u の方が σ_A^u よりも軟質であることを意味し、 α' 相の特性として矛盾する。この矛盾は全ひずみ領域にわたって混合則を適用したこと

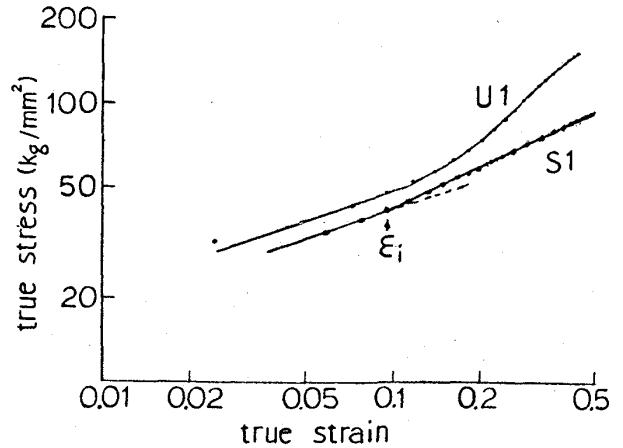


図2. $\log \sigma - \log \epsilon$ 線図の一例

表2. 供試材の強度因子

	S1	M1	U1	U2	U3	U4	U5
σ_i (kg/mm²)	43	54.4	47.9	55.3	46.9	45.7	39.4
K_A (kg/mm²)	39.3	176.2	155.2	179.1	151.9	148.0	127.6

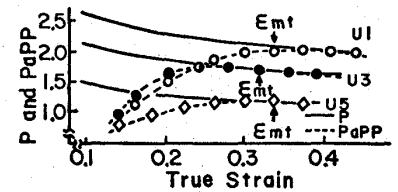


図3. P_{app} , P のひずみ依存性

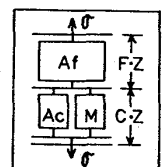


図4. 中間型モデル

にあると考えられ、 ϵ_{mt} よりも小さいひずみ領域においては図4のような中間型モデル⁷⁾を導入する。このモデルにおいて、C・Z部は α' 相と γ 相との間に混合則が成り立ち、F・Z部は α' 相の影響を受けずに変形する領域であり、C・Z部とF・Z部との間に応力一定モデルが成り立つとする。このモデルによる塑性応力は(5)式で与えられる。

$$\sigma = KA \{ \epsilon^2 \cdot E / \epsilon^2 - (\epsilon^2 - 1)(1 + \delta^{-1}) \cdot V_M \}^{0.5} \dots (5)$$

(δ : C・Z部での α' 相と γ 相との比 V_M/V_A で近似的に ϵ_{mt} での V_M/V_A で与える。 ϵ : $(1 + \delta S)/(1 + \delta)$)

また、 ϵ_{mt} よりも大きいひずみ領域の塑性応力は(2)式を変形した(6)式で与えられる。

$$\sigma = KA \cdot \epsilon^{0.5} (V_A + P V_M) \dots (6)$$

(5), (6) 式より算出した塑性応力の一例を図5に示す。この算出に用いた ϕ , δ , ϵ_{mt} の値を表3に示す。

図5. 塑性応力の計算例

表3. 各供試材の ϕ , δ , ϵ_{mt}

	M1	U1	U2	U3	U4	U5
ϕ	1.24	2.02	1.63	1.63	1.60	1.17
δ	0.25	0.64	0.52	0.74	0.84	0.96
ϵ_{mt}	0.770	0.337	0.422	0.320	0.320	0.340

3. 3. 組織との関連性

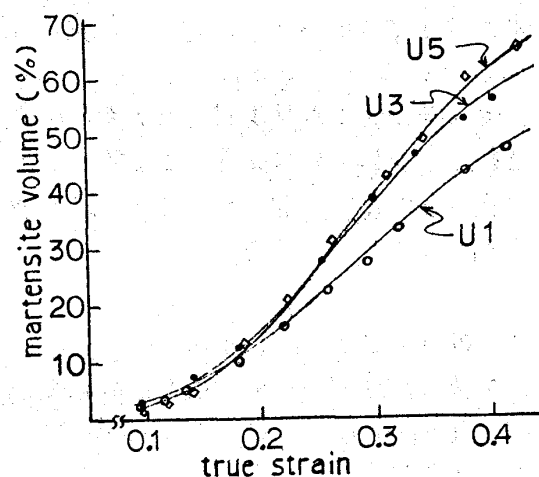
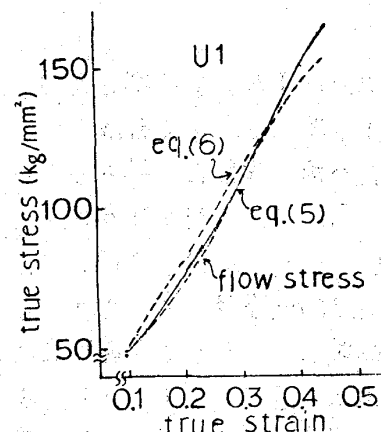
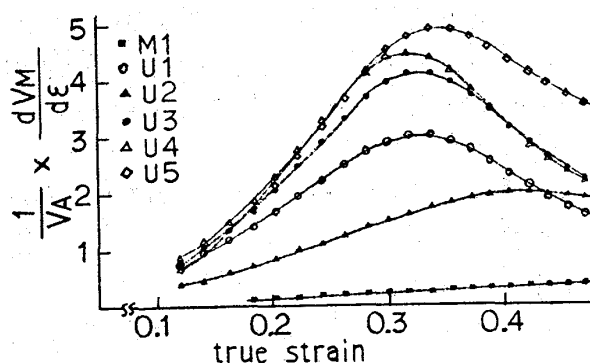
塑性応力を求めるときと同じ条件下で注意のひずみ量まで変形させたときの α' 相の生成量を図6に示す。 α' 相と ϵ との関係は、Sigmoidalとする説⁸⁾とparabolicとする説⁹⁾があるが、本実験では前者の方がよく適用しうる。なお、図中の実線は実験式 $V_M/V_A = \alpha \epsilon^{\beta - (\phi + P V_M)}$ (α : 見掛け上の γ 相の安定性, β : 定数) による計算値である。本実験式より求まる α' 変態率 $1/V_A \times dV_M/d\epsilon$ を図7に示す。この α' 変態率の遷移点 ϵ_{mt} は実験誤差範囲で前述の ϵ_{mt} とよく一致する。

写真1に変形過程中の光顕組織を示す。変形初期には直線的な変形帯の観察される結晶粒と変形帯の観察されない結晶粒とが存在する。変形がすすむにつれて、変形帯はwavyな様相を呈してくるとともに変形帯の観察される結晶粒の数が増加する。一方、電顕観察の結果では、変形の初期には、 ϵ 相、 α' 相、 γ 相の共存する領域と較位密度の高い γ 単相領域とに分れ、変形がすすむにつれて γ 単相領域の占有率が低くなる。光顕組織と電顕組織とは直接対応しえないが、変形帯の観察されない結晶粒や変形帯の粗な領域が電顕組織の γ 単相領域に対応すると考えられる。

この γ 単相領域は図4のF・Z部と対応でき、 ϵ 相、 α' 相、 γ 相の共存する領域をC・Z部に対応さす。

3. 4. 考察

変形初期に誘起される微量の α' 相が材料全体の強化に影響を及ぼすということは概念的にも受け入れ

図6. α' 量におよぼすひずみの効果図7. α' 変態率とひずみとの関係

難い。また、混合則を適用する場合、微量 β 相領域においては β 相による強化を大きく評価しなければならず、LUDWIGSONらは β 相の強化の項に指数 Q を導入している。

図8に、 γ 相の強度因子 K_A の固溶元素(窒素)依存性を示す。

U3, U4, U5はほぼ同じ結晶粒径(約 30μ)のものであり、他の供試材は結晶粒径を異にしている。 K_A も塑性応力と同じくHALL-PETCHの式に従うとして結晶粒径の項を補正すると、結晶粒径 30μ を基準に図中に記したような実験式が得られる。

図9に、 ϵ_{mt} での β 相の強度 $\sigma_m^u(\epsilon_{mt})$ と $(C+N)$, $(C+N)^{1/2}$ との関係および β 相の加工硬化係数を0.3とし $\sigma_m^u(\epsilon_{mt})$ より算出した β 相の強度因子 K_M と $(C+N)$, $(C+N)^{1/2}$ との関係を示す。M1の σ_m^u が他のそれよりも大きい値を示すのは ϵ_{mt} が大きいためであり、 β 相の強度にひずみによる加工硬化を考慮しなければならないことを意味していると考える。ひずみを統一したときの強度の指標すなわち K_M に対する実験式は図中に示した。

マルテンサイト強度はCの1乗則に従うとする説¹⁰⁾、Cの $1/2$ 乗則に従うとする説¹¹⁾、Cの $1/3$ 乗則に従うとする説¹²⁾などがあるが、本実験では $1/2$ 乗則がよくあてはまる。

4. 結言

β 量の微量領域に中間型モデルを導入し、 β 相の誘起される γ 系ステンレス鋼の塑性応力に対する実験式を求めた。

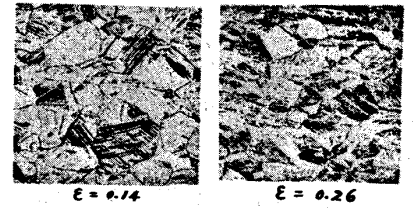


写真1. U1の光顕組織(x200)

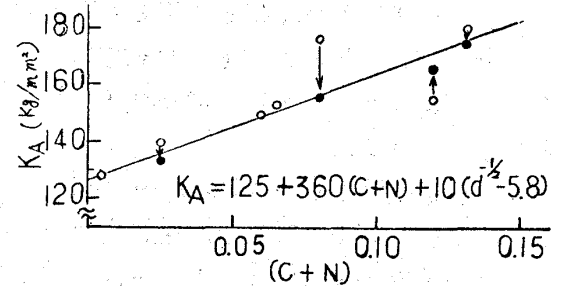


図8. K_A によらず $(C+N)$ の影響

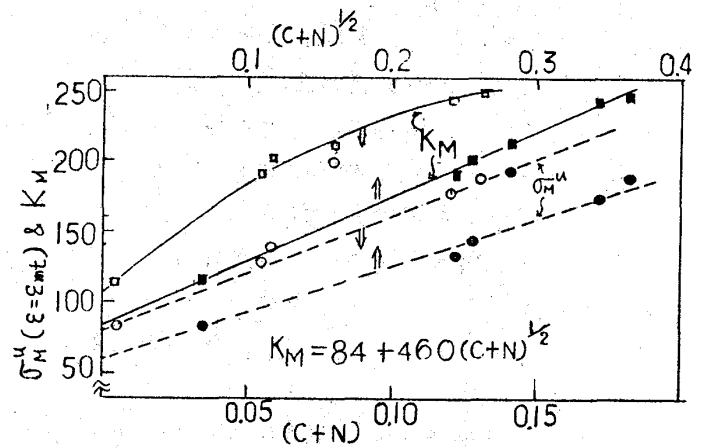


図9. σ_m^u , K_M と $(C+N)$, $(C+N)^{1/2}$ との関係

参考文献

- 1) J.R.C. GUIMARÃES and R.J. DE ANGELIS : Materials Science and Engineering, 15(1974)291
- 2) D.C. LUDWIGSON and J.A. BERGER : JISI, 207(1969), 63
- 3) 星野, 伊東, 小松: 日新製鋼技報, 29(1973), 26
- 4) J.R. Low and F. GAROFALO : Proc. Soc. Exper. Stress Analys., 44(1947), 16
- 5) 例えば, C.K. DIVERS : Metal Progress, 86(1964), 115
- 6) 友田, 黒木, 田村: 鉄と鋼, 61(1975), 107
- 7) 曾山: 材料, 15(1966), 17
- 8) T. ANGEL : JISI, (1954), 165
- 9) B.L. JONES and P.N. JONES : Script. Met., 8(1974), 445
- 10) W.C. LESLIE and R.J. SOBER : Trans. ASM, 60(1967), 457
- 11) G.R. SPEICH and H. WARLIMONT : JISI, 206(1968), 385
- 12) P.G. WINCHELL and M. COHEN : Trans. ASM, 55(1962), 347