

冷間圧延したオーステナイト系ステンレス鋼板の 平坦化に及ぼす低温熱処理時の負荷応力の影響

青山 春男*

Effect of Applied Stress on Flatness of
Cold Rolled Austenitic Stainless Steels during Low Temperature Annealing

Haruo AOYAMA

Synopsis : In some cases, cold rolled austenitic stainless steels are heat-treated at a low temperature to improve the threshold value of spring and the fatigue life. Also, the flatness of stainless steel strips is improved by tensile loading given during such low temperature annealing. In order to find suitable condition for better flatness, the relationship between the strain and the stress evolved during low temperature annealing for 1 hour is investigated by heat-treating cold rolled stainless steels. The following conclusions are obtained; (1) The strain increases linearly with tensile stress up to 600N/mm², and the slope to stress is as small as the reciprocal of Young's modulus. (2) A tensile stress near 200N/mm², which is far below the yield strength, is required to improve the flatness of the strips, because of the small slope to stress. (3) The mechanism of micro deformation at low temperatures is considered to relate with stress relaxation, because most of plastic strain is evolved during heating to the annealing temperature.

Key words : austenitic stainless steel; cold rolled strips; flatness; creep; stress relaxation; low temperature annealing; martensite.

1. はじめに

オーステナイト系ステンレス鋼は耐食性や耐酸化性に優れているだけでなく、極めて大きな加工硬化特性を持っているため、冷間圧延を制御することにより、必要とする高強度を容易に得ることができる。加工硬化した状態においてもかなりの加工性を有することから、高強度用素材として冷間圧延状態で使用に供される。しかし、冷間圧延状態のオーステナイト系ステンレス鋼は、ばね限界値や疲労寿命がその引張り強度に比して低い。これらを改善するため、しばしば300°C~500°Cの低温熱処理を施した後、実用に供せられる。板や線などのばね材では、この熱処理時に張力を負荷することにより内部応力の均一化や平坦度の改善が同時に図られる¹⁾。電子機器分野を始めとして高強度でかつ平坦な素材の要求が高まっているが、弾性限界が高くスプリングバック量が大きいこと、変形抵抗が大きく、レベラーなどに高い剛性が必要とされること、などから良好な平坦度を得るには多くの困難がともない、市場の要求に十分応えられないのが実状である。一方、熱処理による平坦度の改善は有益な手段であるが、設備上の制約もあり、積極的に利用するに至っていない。また、熱処理によって板の平坦度は変わるがそれを引き起こす塑性変形量は極めて小さく、測定結果を報告している例もないため、熱処理による平坦度改善の効果の大きさを理解し難くし

ている。

本研究は冷間圧延状態のオーステナイト系ステンレス鋼板について、その平坦化に及ぼす低温熱処理時の負荷張力の影響を調査したものである。平坦度がどの程度改善可能であるかを調べ、かつ平坦化の機構について若干の考察をおこなった。

2. 実験

オーステナイト系ステンレス鋼5種類および比較材としてSUS430を供試材とした。供試材の化学成分をTable 1に示す。板厚1.0~1.5mmの冷延板からt×110×300mmの形状に切り出し、ワークロール径110mmの実験室圧延機により、素材の圧延方向と同じ方向に圧延した。圧延は25°Cでおこない、板厚減少率は30%である。加工率の影響を調べるために、SUS301とSUS304は板厚減少率10%と50%の試料も

Table 1. Chemical composition. (mass%)

Grade	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	N
301	0.094	0.60	0.97	7.17	17.12	0.11	0.23	0.051
304	0.063	0.63	0.98	8.19	18.37	0.27	0.34	0.063
316	0.057	0.74	1.02	10.16	17.11	2.21	0.25	0.034
304J1	0.022	0.69	1.88	7.38	16.11	0.20	2.10	0.015
Hi.Mn	0.17	0.39	14.43	1.28	17.06	0.11	0.10	0.35
430	0.063	0.24	0.46	0.24	16.55	0.07	0.06	0.020

作成した。圧延方向平行にJIS13号B引張り試験片を加工し、塑性ひずみ測定のための試験片とした。試験片平行部に間隔40mmのビッカース圧こん(荷重10kgf)を表裏に2組ずつ付け、それらの間隔を二次元微測器により測定した。試験片に0~600 N/mm²の静荷重を負荷した後、予め熱処理温度に加熱してある炉を平行移動して試験片を加熱した。熱処理温度は300°C、400°C、500°Cで、所定温度に到達後60分保持した。均熱保持後、炉を退避させ試料を冷却し、除荷した。熱処理後再度ビッカース圧こんの間隔を測定し、熱処理前後の長さの差から塑性ひずみを求めた。なお、ビッカース圧こんを用いた長さ測定で得られる繰り返し測定誤差は4μm(ひずみ量で 1×10^{-4})程度である。また、上記の加熱方式で所定温度に達するまでの時間は5分程度である。

さらに、SUS304の30%圧延材を用い440N/mm²の張力を負荷し、300°C~500°Cで30sec~65Hr保持した時の塑性ひずみの時間依存性を調べた。また、30%圧延材については、変形挙動を理解するのに必要となる、短時間の高温機械的性質とFischer社製フェライトスコープでα'マルテンサイト量を測定し、成分よりMd₃₀(°C)²⁾と積層欠陥エネルギー³⁾を算出した(Table 2)。

Table 2. Elevated temperature mechanical properties and austenite stability of 30% pre-cold-rolled stainless steels.

Grade	Temperature	Tensile strength	Yield strength	Elongation	Amount of martensite	Md ₃₀	Stacking fault energy
	°C	kN/mm ²	kN/mm ²	%	%	°C	mJ/m ²
301	300	1.25	1.13	5	20	20	12
	400	1.16	1.00	6			
	500	0.97	0.83	5			
304	300	0.91	0.83	4	8	-25	23
	400	0.89	0.76	6			
	500	0.77	0.70	7			
316	300	0.86	0.79	3	0	-83	50
	400	0.85	0.75	5			
	500	0.81	0.72	3			
304J1	300	0.83	0.74	3	14	13	51
	400	0.77	0.67	3			
	500	0.65	0.61	6			
Hi.Mn	300	1.11	0.92	11	0	-86	16
	400	0.97	0.77	14			
	500	0.88	0.71	10			
430	300	0.58	0.57	1	-	-	-
	400	0.57	0.56	1			
	500	0.50	0.47	1			

$$\text{Md}_{30}(\text{°C}) = 551 - 462[\%C + \%N] - 9.2[\%Si] - 8.1[\%Mn] - 29[\%Ni + \%Cu] - 13.7[\%Cr] - 18.5[\%Mo] - 68[\%Nb]$$

$$\text{SFE}(\text{mJ/m}^2) = 16.7 + 2.1[\%Ni + 3 \times \%Cu] - 0.9[\%Cr] + 3.2[\%Mn] + 9.3[\%Mo]$$

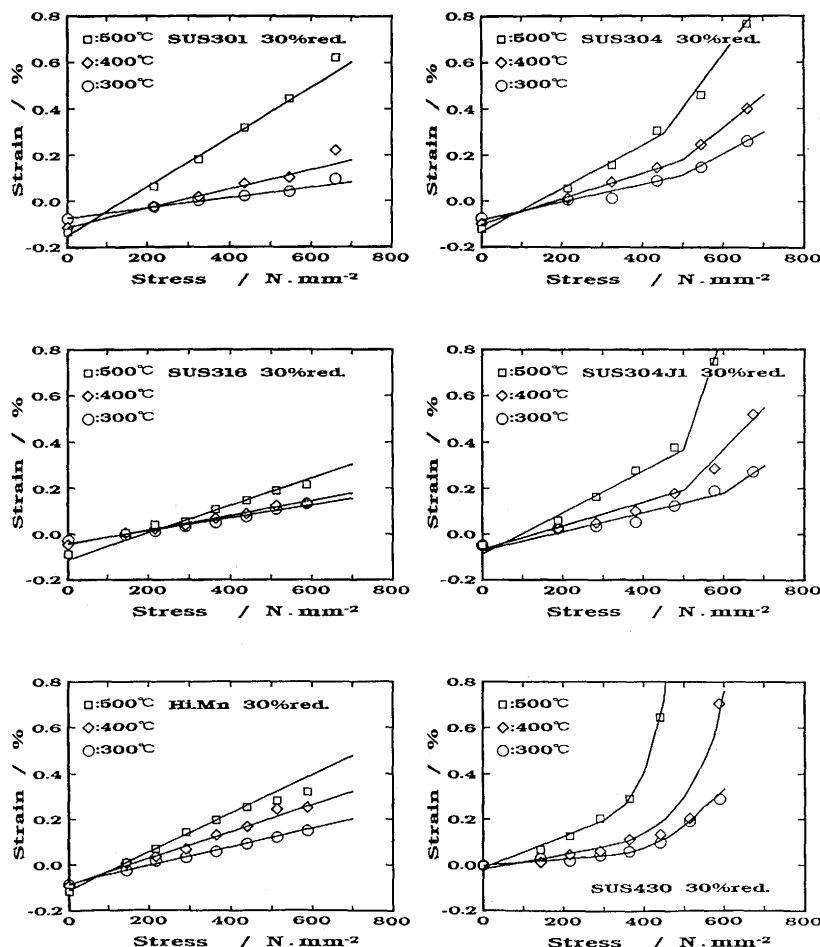


Fig. 1. Relationship between plastic strain and tensile stress during one-hour annealing of 30% pre-cold-rolled stainless steels.

3. 結果

3.1 熱処理による塑性ひずみと張力の関係

室温(25°C)で30%の冷間圧延を施したオーステナイト系5鋼種とフェライト系鋼種のSUS430を300°C~500°Cで1時間熱処理した時に得られる塑性ひずみ量と張力の関係をFig. 1に示す。

オーステナイト系鋼種は無負荷の熱処理で収縮し、張力を負荷すると600N/mm²までの範囲で塑性ひずみが張力とともに直線的に増加する。SUS304J1やSUS304は500°C, 500N/mm²以上の高張力領域で塑性ひずみが急速に増加し、異なる変形モードにはいる。他方、SUS430は無負荷の熱処理で変化しないが、張力を付加するとオーステナイト鋼と同様に変形する。しかし、塑性ひずみ量が張力により直線的に増加する応力域は狭く、300°Cの比較的低温でも300N/mm²以上で急速に増加し、その後塑性加工領域にはいる。

オーステナイト系鋼種の塑性ひずみが直線的に増加する時の勾配をTable 3に示す。なお、SUS304J1などの高張力域で塑性ひずみが急速に増大する場合は、その領域を除き相関係数が0.95以上となる範囲で勾配を求めた。勾配は

Table 3. Slope of strain to tensile stress.
[$\times 10^{-6}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$]

Grade	Temperature		
	300°C	400°C	500°C
301	2.2	4.2	10.7
304	4.0	5.7	9.6
316	2.8	3.2	5.9
304J1	4.5	5.2	12.7
Hi.Mn	4.0	5.8	8.5
430	1.6	3.1	6.9

$2\sim 13\times 10^{-6}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$ の範囲にある。オーステナイト系ステンレス鋼の300°C~500°Cにおける縦弾性係数は $1.6\sim 2.0\times 10^{-5}\text{N}/\text{mm}^2$ の範囲にあり⁴⁾、その逆数は $5\sim 6\times 10^{-6}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$ となり、勾配と同レベルである。どの鋼種でも勾配は熱処理温度が高くなるほど大きくなるが、500°Cの勾配は300°Cの2倍程度である。

3.2 鋼種の影響

塑性ひずみの勾配は鋼種により異なるが、その順位は熱処理温度により変化する。300°CではSUS304J1>SUS304, Hi.Mn鋼>SUS301>SUS316の順となるが、この順位は無負荷時の収縮率と強い相関をもつ⁵⁾積層欠陥エネルギーやオーステナイト安定度を示すMd₃₀と直接関連していない。勾配が大きくなる500°CではSUS304J1>SUS301>SUS304>Hi.Mn鋼>SUS316の順になり、Md₃₀とかなり良い対応を示す。 α' マルテンサイトが多い鋼種の勾配は大きく、 $9\times 10^{-6}/(\text{N}\cdot\text{mm}^2)$ 以上である。一方、SUS430は500°Cで塑性ひずみと張力の関係がべき乗近似でき、応力範囲によって勾配が異なる。これは純鉄が500°Cで5N/mm²の低い応力でべき乗則クリープ⁶⁾となることと対応する。500°Cでは α' マルテンサイトはほとんど逆変態しない⁷⁾ので、フェライトに類似した変化を示し、大きな勾配を持つ時は勾配が応力とともに増大するものと考えられる。SUS301は $10\times 10^{-6}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$ の大きな勾配を持ち、かつ500N/mm²までの範囲で直線的に塑性ひずみが増加することから、オーステナイト相が支配している反応と推定される。この場合、 α' マルテンサイトが低応力範囲でもオーステナイトより容易に変形する必要がある。 α' マルテンサイトが高い転位密度を持つことや圧延後に引張応力を受けることなどからフェライトより低

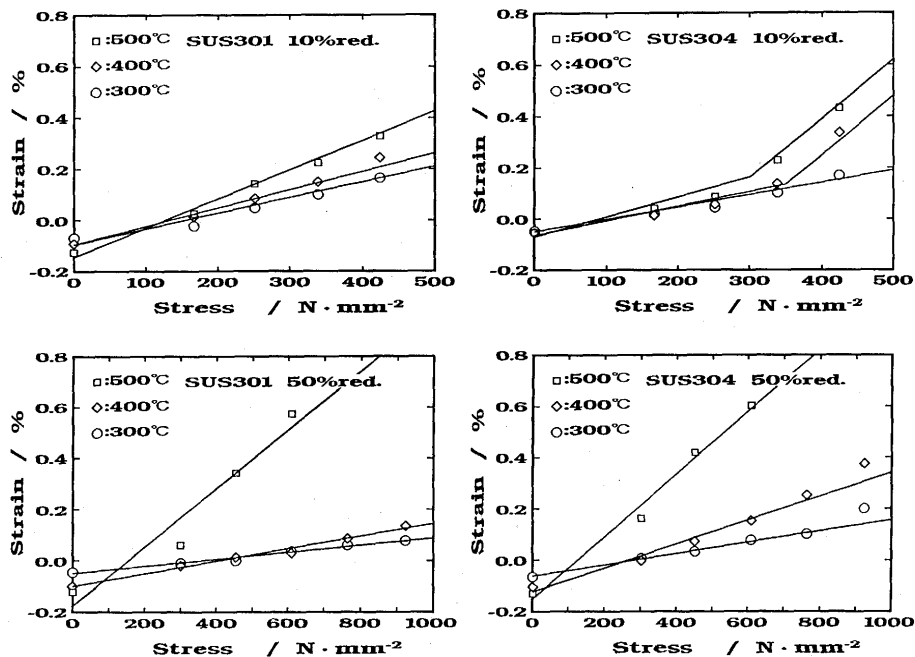


Fig. 2. Effect of cold working on the relationships between plastic strain and tensile stress loaded during low temperature annealing in stainless steels.

応力でも容易に変形するものと考えられる。

3.3 板厚減少率の影響

SUS301とSUS304の板厚減少率10%および50%材の塑性ひずみと張力の関係をFig. 2に示す。全体の傾向は30%圧延材と同じであるが、塑性ひずみが直線的に増加する領域は異なる。SUS301の10%圧延材は500°Cでも500N/mm²まで直線的に増加するが、SUS304の10%圧延材は500°Cで直線的に増加するのは300N/mm²以下の低応力域だけで、高応力域では張力の増加にともないひずみは急速に増加する。他方、50%圧延材では鋼種の差は顕著でなく、両鋼種とも300°Cと400°Cの低温域では1000N/mm²の極めて高い応力範囲まで直線的に増加し、500°Cでは勾配が大きく、塑性ひずみが0.5%を越える600N/mm²で塑性ひずみが急増し始め、直線的に増加する応力範囲は30%圧延材とあまり変わらない。塑性ひずみが直線的に増加する領域での勾配をTable 4に示す。両鋼種とも300°Cと400°Cの低温では勾配は板厚減少率が増加するほど小さくなる傾向を示す。他方、500°CではSUS301の勾配はほぼ一定であり、SUS304の勾配は板厚減少率とともに増加する。両鋼種とも板厚減少率が大きくなればα'マルテンサイトが増加するので、500°Cにおける30%圧延材の鋼種間比較の結果から、板厚減少率が大きくなるほど勾配が大きくなることが期待される。SUS304は予測された結果と同じ傾向にあるが、SUS301はα'マルテンサイトが増えても勾配は大きくならず、異なる傾向を示す。また、300°Cや400°Cで板厚減少率が増えるほど、勾配が小さくなる。これらを考え合わせると、加工度が増えるほど転位が動ける温度が上昇し、さらに、SUS301とSUS304の比較からC,Nが多いほど転位の運動できる温度が上昇する。その結果、SUS301は、α'マルテンサイトが増え、オーステナイトにかかる負荷が増大しても、可動転位が増えず、勾配が変化しない結果が得られたものと考えられる。

3.4 保持時間の影響

SUS304の30%圧延材に440N/mm²の張力を加え300°C~500°Cに30sec~65hr保持した時の塑性ひずみと保持時間の関係をFig. 3に示す。塑性ひずみと時間との間に(1)式の関係がほぼ成立する。

$$\epsilon = \alpha \log(t) + \beta \dots\dots\dots (1)$$

Table 4. Effect of cold working on slope of strain to tensile stress. [$\times 10^{-6}/(N \cdot mm^{-2})$]

Grade	Reduction %	Temperature		
		300°C	400°C	500°C
301	10	6.2	7.2	11.4
	30	2.2	4.2	10.7
	50	1.4	2.4	11.5
304	10	4.3	5.5	7.8
	30	4.0	5.7	9.6
	50	2.2	4.7	12.2

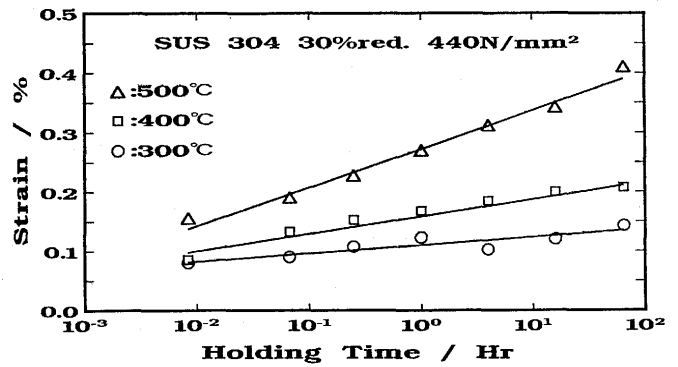


Fig. 3. Change in creep strain with low temperature annealing in 30% pre-cold-rolled SUS304.

これより、低応力下では対数クリープが生じていると考えられる。得られた回帰式から保持1分の塑性ひずみを求め、それを昇温中の塑性ひずみとし、1時間保持の塑性ひずみと比較すると、300°Cの1時間保持の塑性ひずみのうち8割が、400°Cでは7割が、また勾配の比較的大きい500°Cの場合でも6割が昇温中に生じた塑性ひずみとなる。熱処理で得られる塑性ひずみを大きくするには保持時間を多くすればよいが、24時間で得られる塑性ひずみは勾配の比較的大きい500°Cでも1時間の塑性ひずみの1.3倍に過ぎない。したがって、熱処理時間が形状きょう正に及ぼす影響は比較的小さく、短時間の熱処理でも十分きょう正することができる。

昇温に要した時間は約5分と短いので、昇温時に生ずるひずみにはC,Nの拡散などが関与する時間はなく、圧延材を加熱した時に観察される収縮⁵⁾と同様に、応力緩和やεマルテンサイトの逆変態が関係しているものと考えられる。

一方、対数クリープも熱活性過程であることから

$$\epsilon = A \exp\left(\frac{-Q + A^* b \sigma}{KT}\right) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、A*は活性化面積。

と表現され、運動転位が消耗されAが減少する反応と考えられる⁸⁾。これを時間で積分し、(1)式と関係づけると、

$$\int_0^t A dt = B(t) - B(0)$$

$$B(t) \exp\left(\frac{-Q + \Omega \sigma}{KT}\right) = \alpha \log(t) \dots\dots\dots (3)$$

$$B(0) \exp\left(\frac{-Q + \Omega \sigma}{KT}\right) = \beta$$

とすることが⁹⁾できる。傾度因子が温度の影響をあまり受けないとして、Fig. 3の勾配から活性化エネルギーを求めると、 $(Q - A^* b \sigma) = 28 \text{ kJ/mole}$ となる。空孔拡散では440N/mm²の張力を負荷すると $A^* b \sigma = 3.2 \text{ kJ/mole}$ であるから、対数クリープの活性化エネルギーは31kJ/moleと見積もることができる。この値はスネークピークから求められたC, Nのα-Fe中における拡散の活性化エネルギー(84kJ/mole, 76kJ/mole)⁹⁾より小さく、活性化エネルギーがより低いキンク対

形成による緩和が関係するものと考えられる。

4. 考察

4.1 圧延板の形状改善

平坦度不良のうち、板にうねりを与えるものは形状不良と呼ばれる。これは板幅の各部で圧延方向の長さが異なり、それが板形状の中に封じ込められることにより発生する。形状不良は波長(L)と波高さ(H)の比である急しゅん度(λ)で表現される。

$$\lambda = L/H \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、このうねりを作り出す長さの差は単位長さとの比で表現され、周長差($\Delta\varepsilon$)と呼ばれる。うねりをsin曲線で近似すると急しゅん度と次式¹⁰⁾で関係づけられる。

$$\Delta\varepsilon = (\pi\lambda/2)^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

圧延材は細いロールで高荷重の変形を受けた影響により急しゅん度は焼なまし材に比してかなり劣る。注意深く圧延された板でも急しゅん度にして2%程度の形状不良(波長: 300mm, 波高さ: 6mm)は避けがたい。2%の急しゅん度で周長差は 1×10^{-3} であり、縦弾性係数を200kN/mm²とすれば、張力を与えてうねりが弾性変形で見えなくなる時、長い部分と短い部分の間に200N/mm²の引張り応力の差ができる。この状態で300°Cに1時間保持すると30%圧下したSUS304で 8×10^{-4} だけ周長差が減少し、板形状は急しゅん度で0.9%(波長: 300mm, 波高さ: 2.7mm)となり、かなり改善される。塑性ひずみの張力に対する勾配は600N/mm²まで一定であり、かつ長い部分と短い部分の応力差は高い張力を与えても周長差による応力差以上にならないことから、これ以上の形状改善は期待できない。

他方、200N/mm²の応力差を与えるには長い部分に張力がかからないことを考慮しても、平均張力は200N/mm²に近い大きな値になる。これは熱処理装置において大きな張力であり、また幅広のフープで幅方向のそりを発生させやすい。応力差が100N/mm²となる張力を付加して熱処理した時、各鋼種の急しゅん度がどの程度になるか、塑性ひずみの張力に対する勾配から算出したものをTable 5に示す。なお、各鋼種は30%の冷間圧延を受け、初期に2%の急しゅん度を持つものとする。

Table 5. Improved steepness after annealing under tensile stress of 100N/mm². (%)

Grade	Temperature		
	300°C	400°C	500°C
301	1.8	1.5	0
304	1.5	1.3	0.3
316	1.7	1.6	1.3
304J1	1.5	1.4	0
Hi.Mn	1.5	1.3	0.7
430	1.8	1.7	1.1

急しゅん度が1%以下の優れた形状を持つようにするには、いずれの鋼種も300°Cや400°Cの熱処理では無理で、勾配が縦弾性率の逆数より大きい500°Cでのみ可能である。ただし、SUS316は張力に対する勾配が小さく500°Cでも困難である。

また、短時間クリープ試験の結果から、塑性ひずみは保持時間の影響が小さいので、ライン熱処理でも形状を改善できる。200N/mm²の応力差を与えて昇温時間5min、保持時間1minの熱処理をおこなうと、急しゅん度2%の素材が300°Cで1.2%、400°Cで0.9%、500°Cで0%の急しゅん度を持つ板となることが期待される。

4.2 変形モード

オーステナイト系ステンレス鋼の塑性ひずみが張力に対し600N/mm²までの広い範囲で直線的に増加するが、これは1)Cobleクリープ、2)応力緩和によるものと考えられる。

H.J.Frost⁹⁾によれば結晶粒径50 μ mのSUS304でCobleクリープが起きる限界応力は400°Cで150N/mm²(縦弾性係数=190kN/mm², ポアソン比=0.3として算出)である。この耐力を250N/mm²とすれば、加工を受けて耐力が上昇した分、限界応力が上昇したと考えられる。しかし、400°CのCobleクリープ域での最大ひずみ速度は 10^{-10} /sと極めて遅く、SUS304を負荷応力440N/mm²で1時間保持した時に得られる 1.6×10^{-3} のひずみを説明することはできない。また、ひずみの大部分が昇温過程で得られることもCobleクリープと異なる。これに対しては、クリープひずみが空孔拡散に律速される場合、ひずみ速度は(6)式¹¹⁾の形で与えられる。

$$\dot{\varepsilon} = A \frac{D_L \Omega \sigma}{K T d^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$D_L \propto D_V C_{ve} \Omega \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで D_L は格子自己拡散係数、 D_V は空孔の拡散係数、 C_{ve} は空孔の熱平衡濃度を表す。

圧延材においてはクリープに関与する空孔は熱平衡濃度より多い。加工により導入される空孔濃度は 10^{-3} 、400°Cで熱平衡濃度は $10^{-7} \sim 10^{-8}$ と概算¹²⁾される。圧延により導入された空孔がすべてクリープに関与したとすれば、ひずみ速度が 10^{-6} /sとなり1時間保持で 10^{-3} のひずみを得ることができ。したがって、昇温時のひずみを除く、1時間の保持中に得られる 0.5×10^{-3} の対数クリープによる伸びは、圧延によって導入された空孔が拡散して生じるクリープと考えることもできる。

他方、加工を受けたオーステナイト系ステンレス鋼は室温においても非弾性挙動が認められ¹³⁾、加工後除荷すると転位が平衡位置に戻る途中で侵入型元素などと結び付き、変形が停止し、圧縮応力を内包した状態になる。これに熱を加えると侵入型元素が転位からはずれ、再び転位が平衡位置に向かって移動¹⁴⁾し、応力が緩和される。この時、外部応力を加えれば平衡位置が弾性ひずみの量だけ変化し、その方向に転位が移動して塑性ひずみが生じる。したがって、

転位が平衡位置まで移動すれば塑性ひずみの勾配は縦弾性係数の逆数となる。実験で得られた勾配はそれの1/2~2倍であり、かなり良い対応を示す。300°Cや400°Cの勾配はそれより小さいが、転位と侵入型元素の相互作用により移動が途中で停止したためと考えられる。また、500°Cの勾配はそれより大きい、1時間で得られるひずみの42%が対数クリープのひずみであるので、昇温中に得られるひずみの勾配は $5.5 \times 10^{-6}/(N \cdot mm^{-2})$ となり、高温の縦弾性係数の逆数に近い数値になる。また、対数クリープは勾配の温度依存性から求めた活性化エネルギーが低いことからキック対の形成による応力緩和が関係するものと考えられることができる。

4.3 残留応力

無負荷の低温熱処理により生ずる収縮反応に応力緩和や ϵ マルテナイトの逆変態が関与すると考えられる⁵⁾が、この収縮は昇温過程で完了する極めて速い反応である。本実験で得られた塑性ひずみは昇温過程で発生する初期クリープのひずみと保持中に発生する対数クリープのひずみに分けられるが、初期クリープは応力状態を変えただけで、収縮と同じ反応と考えられる。内部応力と外部応力の和が0となる条件での初期クリープのひずみは0となる。他方、SUS304の30%圧延材を用いた短時間クリープ試験の結果から、300°Cの熱処理では塑性ひずみの大部分が昇温中に生ずる初期クリープのひずみであるので、ひずみが0となる張力に相当する圧縮応力が材料に残留していることになる。300°Cの熱処理の結果から求めた各鋼種の残留応力をTable 6に示す。得られた残留応力も300°Cの耐力も積層欠陥エネルギーとよい相関を示し、積層欠陥エネルギーが低下するほど大きくなる。その結果、残留応力と耐力の比は約1/4となっている。圧延材の耐力に影響を与えるものに α' マルテナイトやオーステナイト相自身の加工硬化に関する積

層欠陥エネルギーがあるが、Hi.Mn鋼の例に見られるように耐力は積層欠陥エネルギーの影響を大きく受ける。これから残留応力も積層欠陥エネルギーに強く影響されるものと考えられる。

5. まとめ

オーステナイト系ステンレス鋼に張力を負荷しながら低温熱処理を施す際に観察される微小な塑性ひずみ量と負荷応力の関係を求め、低温熱処理を圧延材の平坦度改善に利用する条件を検討した。その結果以下の知見が得られた。

(1) 10~50%の冷間加工を受けたオーステナイト系ステンレス鋼は低温熱処理時に0~600N/mm²の広い負荷応力範囲で塑性ひずみが直線的に増加し、塑性ひずみと張力のなす勾配は縦弾性係数の逆数と同レベルにある。

(2) 塑性ひずみの勾配は小さいので、平坦度を改善するには200N/mm²程度の張力を負荷する必要がある。これでも耐力(800~100N/mm²)の1/4以下である。

(3) 熱処理でひずみを生じないために必要とされる張力から、圧延材が持つ残留応力の大きさは300°C耐力の1/4程度と推定される。

(4) 低温熱処理時に張力を負荷して得られるひずみの大部分は昇温過程の短時間に得られ、応力緩和などが関与しているものと考えられる。

文 献

- 1) 西畑三樹男：塑性と加工, **14** (1973), p.130
- 2) 野原晴彦, 小野 寛, 大橋延夫：鉄と鋼, **63** (1977), p.772
- 3) R.E.Schramm and R.P.Reed: Metallurgical Transaction, **6A** (1975), p.1345
- 4) ステンレス鋼便覧(長谷川正義監修)(ステンレス協会編), (1975), p.111 [日刊工業新聞社]
- 5) 青山春男：鉄と鋼, **81** (1995), p.577
- 6) H.J.Frost and M.F.Ashby: Deformation-Mechanism Maps, (1983), p.65 [Pergamon Press]
- 7) 富村宏紀, 高木節雄, 徳永洋一：鉄と鋼, **74** (1988), p.1649
- 8) 辛島誠一：金属・合金の強度学, 日本金属学会, (1972), p.150
- 9) C.Wert: Physical Acoustics, ed.by W.P.Manson, Vol.3, Part A, (1965), p.44 [Academic Press]
- 10) 山崎 平, 山本啓二, 瀬戸口節男：住友重機械技報, **25** (1977), 75, p.38
- 11) 鈴木 平, 吉永日出男, 竹内 伸：転位のダイナミクスと塑性, (1985) p.148 [裳華房]
- 12) 日本金属学会編：転位論, (1971), p.9 [丸善]
- 13) E.Krempf: J. Mech. Phys. Solid, **27** (1979), p.363
- 14) 岡田 実, 渡辺統市：日本金属学会誌, **22** (1958), p.440

Table 6. Residual stress in 30% pre-cold-rolled stainless steels.

Grade	R.S.	Y.S.	Ratio	SFE
	N/mm ²	N/mm ²		mJ/m ²
301	335	1130	0.30	12
304	213	830	0.26	23
316	152	790	0.19	50
304J1	162	740	0.22	51
Hi.Mn	206	920	0.22	16

R.S.: Residual stress

Y.S.: Yield strength at 300°C

Ratio: R.S./Y.S.