

討30

二相ステンレス鋼の圧縮変形抵抗特性

名古屋大学工学部鉄鋼工学科 品川一成(院) 細井祐三

1. 緒言

近年、冷間鍛造において加工中の変形過程を有限要素法による数値解析手法を利用して理論的に解明しようとする多数の試みがなされている。そのため材料の特性を表わす変形抵抗のデータを揃えることに対して、大きな期待と要請が寄せられている。

二相ステンレス鋼の変形挙動については多くの研究¹⁾がなされているが、主に引張り試験によるものであり、圧縮で、高歪域までの変形抵抗のデータはほとんどない。また、油圧プレス等の低速な材料試験機を用いた準静的な加工では素材内の塑性仕事によって発生する熱は放散してしまい、素材自身はほとんど温度上昇しないのに対し、実際の生産現場では、生産性を向上させるために加工速度を高める傾向にあるので、変形抵抗は歪速度硬化とともに、素材内部での熱の蓄積による温度上昇のための軟化が起こることになる。従ってこのような条件下での変形抵抗の変化は歪速度、温度の影響を考慮する必要がある。

本研究では以上の点に着目し、二相ステンレス鋼の変形抵抗変化、特に温度の影響を圧縮試験によって調べた。すなわちオーステナイト体積率を変えた二相ステンレス鋼について、二相ステンレス鋼の基礎となるフェライトステンレス鋼、オーステナイトステンレス鋼と比較しながら、試験温度を変えて静的据込み試験を行った。また、動的据込み試験を行い、実際の生産現場での加工速度の大きい時の変形抵抗を測定し、温度上昇の影響を調べた。

Table 1 Chemical Compositions (wt%)

	Cr	Ni	Mo	C	Si	Mn	Al
Fe-25Cr-7Ni SUS316	23.82 17.36	6.90 12.05	— 2.40	— 0.035	<0.05 0.48	<0.01 1.07	0.010 —

2. 実験方法

2-1 供試材

供試材には、オーステナイトステンレ

ス鋼にはSUS316、フェライトステンレス鋼および二相ステンレス鋼については、25Cr-7Ni鋼を用いた。化学組成をTable1に示す。25Cr-7Ni鋼については、1300℃、1hに保持し、フェライト単相にし、室温まで水冷した。二相ステンレス鋼についてはその試料を700℃、1000℃に保持してオーステナイト相を生成させた。各試料のオーステナイト相の割合をTable2に示す。

2-2 試験法

据込み試験は高温、高速度でも適用できる、日本塑性加工学会推奨による端面拘束圧縮法²⁾に基づいて行った。この方法は冷間据込み試験用工具として基準となっている、同心円溝付き耐圧板を用いて(高さ/直径)=1.5の試験片を圧縮し、その時の荷重と圧下率の測定値を解析結果を利用して応力-歪の関係に変換するものである。

Table 2 Austenite Volume Fractions

SPECIMEN	TEPE OF STAINLESS STEEL	HEAT TREATMENT	VOLUME FRACTION OF AUSTENITE
F	FERRITIC STAINLESS STEEL	1300℃×1hr, QUENCH	0.0 (%)
D1	DUPLEX STAINLESS STEEL	" , " , 700℃×40min	9.7
D2	"	" , " , 1000℃×40min	30.6
D3	"	" , " , 1000℃×6hr	39.0
D4	"	" , " , 700℃×24hr	45.0
A	AUSTENITIC STAINLESS STEEL	1100℃×30min, "	100.0

2-3 実験装置、実験条件

静的据込み試験では、油圧プレスを用い、試験速度は変形熱による温度上昇が起こらないよう据込み速度の目安を 0.5 mm/min において（歪速度 $\dot{\epsilon} = 10^{-3} / \text{sec}$ 程度）、ほぼ一定速度になるようにしながら約70%まで圧縮加工した。試片の加熱は圧板の側壁面に市販のマントルヒータを巻き付け、まわりを石綿で包み込んで保温効果を高めた。側面に熱電対を付けた試片を圧板の中にはさみ、試験温度に調節して試験を始めた。加熱には5分程度、加工に10分程度かかり、加工中は $\pm 2^\circ\text{C}$ の範囲内で温度制御を行った。試験温度は室温、 50°C から、 350°C まで 50°C ごとに変えた。変位の測定はオンラインダイヤルゲージで、荷重の測定はプレスラム下面にロードセルを装着して行った。

動的据込み試験では機械プレス（歪速度 $\dot{\epsilon} = 10 / \text{sec}$ 程度）を用いた。試験初期温度は室温とし、荷重、変位の測定は、コンピュータを利用した高速サンプリングシステムを用いて行った。

3. 実験結果および考察

静的据込み試験および動的据込み試験における応力-歪曲線の代表例をFig.1に示す。動的据込み試験の結果は丸印で示した。これらの結果よりフェライトステンレス鋼（F）、二相ステンレス鋼（D）、オーステナイトステンレス鋼（A）について、次のような特徴が示された。

3-1 静的据込み試験

3-1-1 フェライトステンレス鋼の $250^\circ\text{C} \sim 350^\circ\text{C}$ での変形抵抗の異常

Fig.1のフェライトステンレス鋼は、試験温度が高くなると共に変形抵抗は低下しているが 250°C 、 300°C 、 350°C では変形抵抗の上昇がみられる。この温度範囲では試片側面に大きな割れが発生した。他のステンレス鋼は各試験温度による硬さの相違はなかったが、フェライトステンレス鋼はこの温度範囲で硬化していた。これらの原因は今後検討していく必要がある。

3-1-2 試験温度による軟化

Fig.2は試験温度に対して同じ歪での変形抵抗の値をプロットしたものである。フェライトステンレス鋼は 200°C 以上の硬化を除いて考えると、各歪でほぼ同じ軟化率と考えられる。オーステナイトステンレス鋼の温度軟化率は、降伏点はほとんど変化しないが高歪域になるにしたがい大きくなることかわ

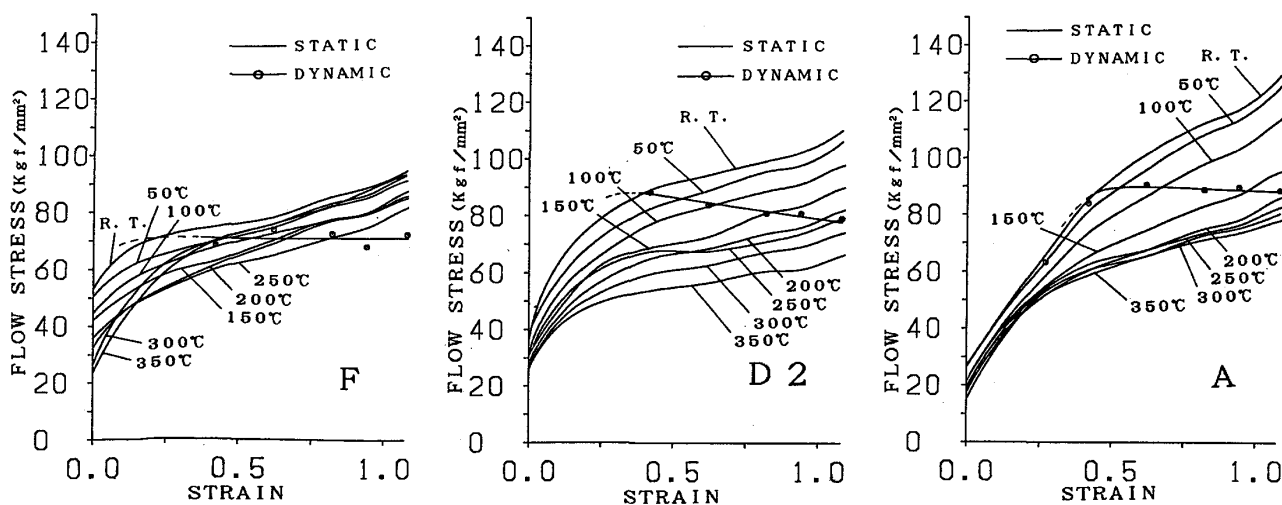


Fig. 1 Examples of static compressive stress-strain curves at various test temperatures and dynamic compressive stress-strain curve: Ferritic stainless steel(F), Duplex stainless steel(D2), Austenitic stainless steel(A)

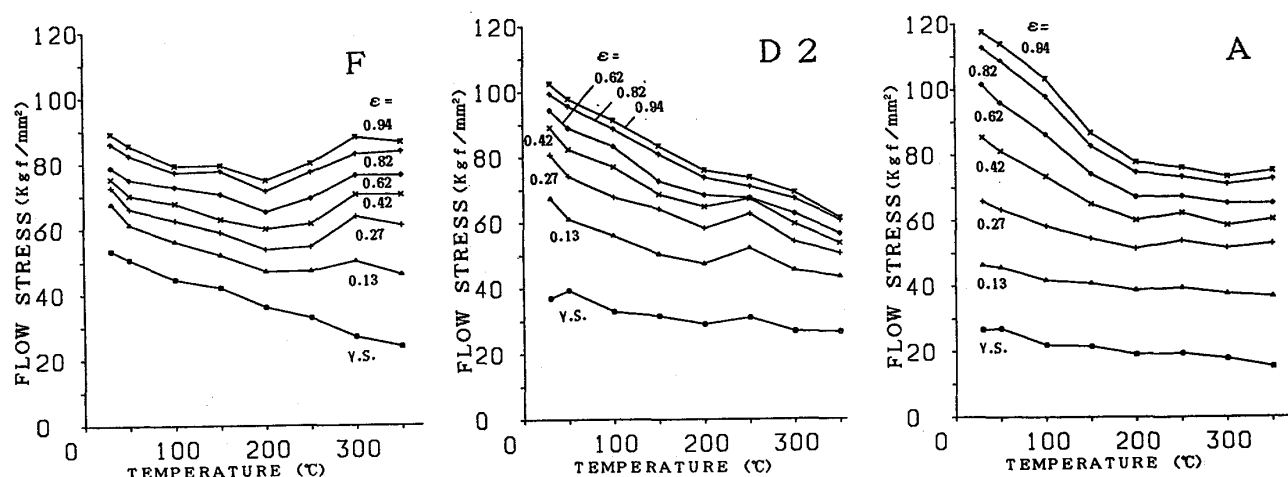


Fig. 2 Effect of test temperature on the flow stress at various strains :
Ferritic stainless steel(F), Duplex stainless steel(D2), Austenitic stainless steel(A)

かる。しかし、250℃以上では軟化が止まっている。150℃以下の高歪域での変形抵抗の上昇は加工誘起マルテンサイトの生成と関係していると考えられる。二相ステンレス鋼はフェライトステンレス鋼とオーステナイトステンレス鋼の中間の傾向を示している。低歪でフェライトステンレス鋼より軟化率が小さく高歪で大きくなり、温度が高くなってもオーステナイトステンレス鋼のように軟化が止まることはない。

3-1-3 変形抵抗のオーステナイト体積率による変化

Fig. 3は横軸をオーステナイト体積率にとり、変形抵抗の温度による変化を示したものである。室温ではフェライトとオーステナイトの降伏点および加工硬化率の差が大きい。試験温度が高くなると、オーステナイトの降伏点はあまり下がらずフェライトの降伏点の方が下がり、また、オーステナイトの加工硬化率が下がるので、オーステナイト体積率が変化しても変形抵抗はほぼ等しくなることがわかる。

3-1-4 加工硬化率

Fig. 4に加工硬化率の変化を示す。室温では変形初期において二相ステンレス鋼の加工硬化率はオーステナイトステンレス鋼

よりも大きく、歪の増加と共に急激に減少する。これは室温でオーステナイト相とフェライト相の降伏点の差が大きいため、変形初期ではオーステナイト相の変形は共存するフェライト相に拘束され、見かけ上、加工硬化が大きくなるためと考えられる。温度が高くなると降伏点の差が小さくなるためフェライト相の拘束が

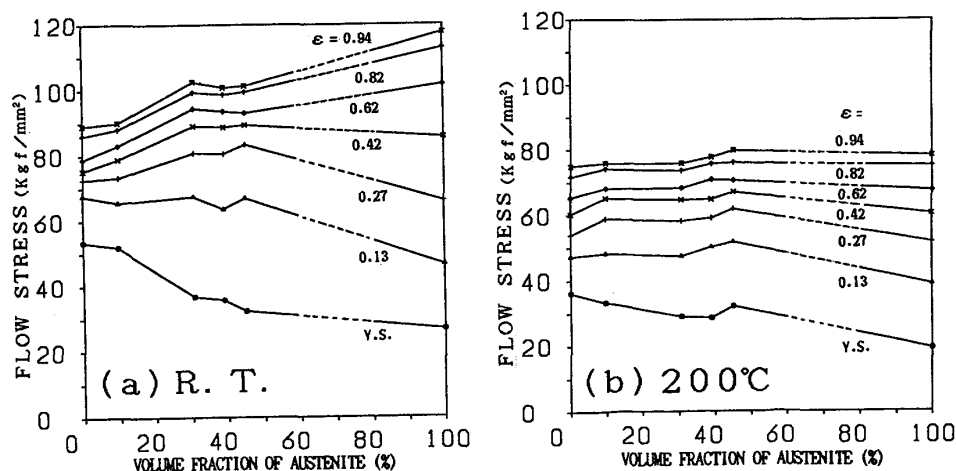


Fig. 3 Effect of austenite volume fraction on the flow stress at various strains : (a) at room temperature, (b) at 200°C

弱まり、変形初期ではオーステナイトステンレス鋼の加工硬化率とほぼ一致する。

3-2 動的据込み試験

Fig. 5 に各試験片の動的据込み試験の結果の比較を示す。機械プレスでは、高歪速度のために変形抵抗は静的据込み試験の場合より高くなっていると考えられるが、加工後半は試片の温度上昇による軟化のため、変形抵抗が低下している。加工終了時には試片の温度はそれぞれ200℃～250℃くらいに達していると考えられる。オーステナイト

ステンレス鋼は温度が余り上昇していない加工初期でフェライトステンレス鋼に比べ急速に加工硬化し、加工後半では温度上昇により加工硬化と温度軟化が相殺している。二相ステンレス鋼のD2, D3, D4は、加工初期では、オーステナイトの影響で加工硬化が大きいが、加工後半では、温度軟化が大きく変形抵抗はむしろ低下きみである。

4. 結言

静的据込み試験で、二相ステンレス鋼の温度による圧縮の変形抵抗変化を調べた結果、次のようなことがわかった。

二相ステンレス鋼の加工硬化率はフェライトとオーステナイトの降伏点、加工硬化率の相違のため、低歪域で特に大きくなる。しかし、温度が上昇するとフェライトとオーステナイトの相違が小さくなり、二相ステンレス鋼の加工硬化率はフェライトステンレス鋼、オーステナイトステンレス鋼と共にほとんど違いがなくなる。

また、温度軟化率は、低歪域でフェライトステンレス鋼より小さく、高歪域で大きくなり、オーステナイトステンレス鋼のように温度が高くなっても軟化が止まることはない。

動的据込み試験では二相ステンレス鋼は加工初期に加工硬化が大きく、加工後半では温度上昇による軟化の大きいことが分かった。これは静的据込み試験からこの傾向が説明され、以上の結果は、二相ステンレス鋼の冷間鍛造過程の解析に有用なものと考えられる。

参考文献

- 1) 例えば、友田、黒木、田村：鉄と鋼，61(1975)，107
- 2) K.Osakada, T.Kawasaki, K.Mori：Ann.CIRP, 30-1(1981)，135

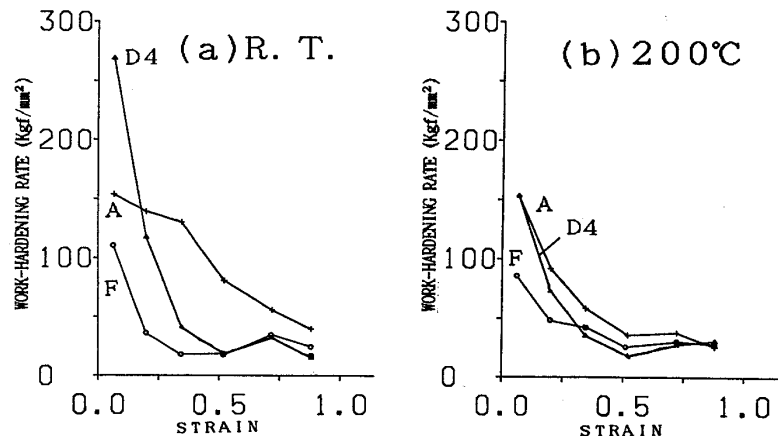


Fig. 4 Work-hardening rate vs strain for ferritic stainless steel F, duplex stainless steel D4, austenitic stainless steel A : (a) at room temperature, (b) at 200°C

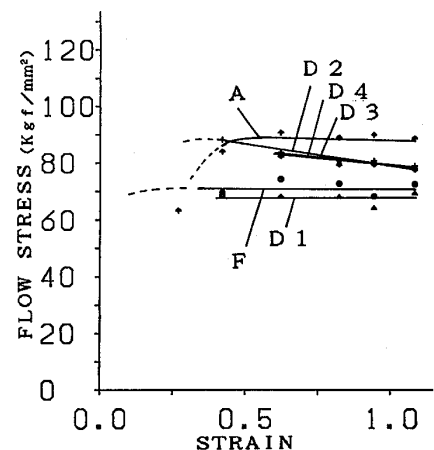


Fig. 5 Flow stress behavior under the dynamic condition for ferritic stainless steel F, duplex stainless steel D1~D4, austenitic stainless steel A