

FCC/BCC 積層 Fe-Cr-Ni 合金の 圧縮変形挙動

友 田 陽*・黒 田 卓*²

Deformation Behavior in Compression in an FCC/BCC Laminated Fe-Cr-Ni Alloy

Yo TOMOTA and Takashi KURODA

Synopsis :

The FCC and BCC Fe-Cr-Ni alloys sheets were laminated alternatively, then heated up to 1273 K and bonded under the applied stress of 28 MPa. The thickness of each layer was approximately 600 μm . The cubic compression test specimens were cut from the laminated composite material, where three directions, i.e., the compression axis of 0°, 45° and 90° against the normal direction of each component layer were adopted (hereafter they are called 0°, 45° or 90° specimen). Some specimens were aged at 753 K for 360 ks to enlarge the strength of high Cr BCC layers. The bonded interface seemed to be so strong that no decohesion was observed by the compression test down to the strain of 30%.

The 90° specimen has shown the largest flow stress and the 0° one slightly smaller. The 45° specimen deforms in a distinguished anisotropic manner and has shown the lowest flow stress. This trend is emphasized when the strength of the BCC layer is enlarged. These results are discussed from the standing points of inhomogeneous deformation, the thickness of the layer, and the size of test specimen.

Key words : laminated composite ; stainless steel ; deformation ; anisotropy.

1. 緒 言

延性な 2 相から構成される混合組織材料の変形挙動については、これまでに多くの研究がなされており、詳しい解説もなされている^{1)~4)}。そして、いくつかの変形理論が提案されてきたが、「各構成相の体積率、形状、および組織の細かさの変形応力に及ぼす影響」を十分に予測できるには至っていない。連続体力学を用いた解析結果には相似性があるので、組織の細かさの影響を直接取り入れることができない。塑性緩和機構の定量的表現が問題となるわけであるが、この問題を「転位の大きさ等の絶対的物理量を基準にしていかに一般化して表すか」がその解決の鍵と思われる。これは複合材料をはじめ不均一体の塑性変形一般に共通した課題である。

後藤らは Al/CuAl₂ 共晶合金積層材を作成して高温変形の実験を行い、各層の厚さが数 μm 程度になると変形強度の異方性も層の厚さの影響もみられないという結論を得ている⁵⁾。一方、著者らは硬質相が同一体積率であっ

て連結状態にある場合と孤立状態にある場合の DP 鋼について、変形強度の粒径依存性を調べ比較したところ、おおよそ μm 以下では硬質相形態の影響がみられなくなると推定できた⁶⁾。ところが、上記二つの研究は、ともに組織の細かさの効果を試験片の大きさとの関係から検討することは行っていない。そこで、層厚さと試験片の大きさの比を変化させて検討を加えることが望まれる。その手始めとして比較的層の厚い積層材を実験的に作成してその変形挙動を調べたところ、興味深い結果が得られたので報告し上述の問題に対して考察を加えたい。

2. 実験方法

Fig. 1 に示す状態図において 1 と 2 の化学組成を持つ BCCFe-Cr-Ni 合金 (α ステンレス鋼) と FCCFe-Cr-Ni 合金 (γ ステンレス鋼) を真空溶解によって作成した。試料の化学分析結果を Table 1 に示す。これらの合金を、均一化処理の後、熱間および冷間圧延によって薄板 (厚さ約 1 mm) とし、10 mm × 10 mm の小片

昭和 63 年 11 月本会講演大会にて発表 昭和 63 年 12 月 7 日受付 (Received Dec. 7, 1988)

* 茨城大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa-cho Hitachi 316)

*² 茨城大学大学院 (現: 石川島播磨重工業(株)) (Graduate School, Ibaraki University, Now Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.)

に切断した。表面を研磨した後、交互に重ねて、真空中 (10^{-2} Pa 以下) で 1273 K に加熱した。その温度で 1.8 ks 保持した後、28 MPa の圧縮荷重をかけて 3.6 ks 保ち、除荷した後炉冷した。このようにして圧接した試料の一部は 753 K で 360 ks の時効処理を施した。この処理の目的は高 Cr フェライト特有の時効硬化 (475°C ぜい性) を利用して BCC 層の強度を高くし、2 相間の強度比を大きくするためである。時効前後の各相のビッカース硬さはそれぞれ、HV 259 と HV 476 (BCC)、および HV 166 と HV 171 (FCC) であり、BCC 層のみが大きく硬化した。この積層板から放電加工により一辺が約 6 mm の圧縮試験片 (大略立方体) を切り出した。このときに、圧縮軸に対して接合界面の法線が 0° 、 90° 、 45° となるように試験片を切り出した。従って、試験片は、未時効材と時効材に大別され、さらにそれぞれについて、Fig. 2 に示すように圧縮面 (z 面) に対して接合界面が 0° をなすもの (以下 0° 材と呼ぶ)、 90° をなすもの (90° 材)、 45° をなすもの (45° 材) を用意した。積層材試験片は FCC 層と BCC 層を合わせて 10~16 の層からできている。さらに比較のために BCC (α ステ

ンレス鋼) 単相材と FCC (γ ステンレス鋼) 単相材も用いた。

圧縮試験は次のような方法で実施した。平面研削によって上下左右を平行にした後、最終的にバフ研磨により表面を鏡面に仕上げた試験片を、2 枚の工具鋼板ではさみダイセットに装着した。このとき試験片と工具鋼板の間には、潤滑のために二硫化モリブデンを塗布した。圧縮試験機のクロスヘッドに取り付けたロードセルを介してダイセットを降下させて試験片を圧縮し、その際の試験片の変位を工具鋼板に取り付けた差動トランスによって測定した。圧縮速度は 8.33×10^{-3} mm/s とし、ひずみ量約 30% まで圧縮変形を行った。

圧縮後の試験片のすべり線や表面起伏の様子を、光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察した。SEM 観察には、島津製作所製の EMX-SM および Hitachi X-650 を使用した。

3. 実験結果および考察

3.1 接合の状態

Photo. 1 に圧縮試験前の接合の状態を示す。接合界面がほぼ直線に保たれているのがわかる。界面の移動や中間相の生成などは確認されなかった。層間隔は平均するとおよそ $600 \mu\text{m}$ であるが、BCC 層の方が FCC 層より薄くなっている。これは接合時における高温での圧縮荷重下で、高温では強度の低い BCC 層が FCC 層より大きく変形したためである。この組織観察結果より推定した BCC 相 (α ステンレス鋼) の体積率は、従って約 45% であった。Photo. 1 のごとく接合界面には酸化物が点在しているように観察される例があったが (SEM 観察)、その同定は行っていない。Cr と Ni の濃度分布状況は Photo. 1 に示すように接合界面において急変しており、Fig. 1 の状態図からの予想と一致するよう思われた。

3.2 変形後の試験片の様相

圧縮試験では引張試験と異なり、座屈 (特に 90° 材) や樽型変形が問題となる。まず試験片の圧縮変形後の外形を目視によって判断したところ 0° 材、 90° 材は、ほぼ等方的に変形しているのに対して 45° 材 (特に時効材)

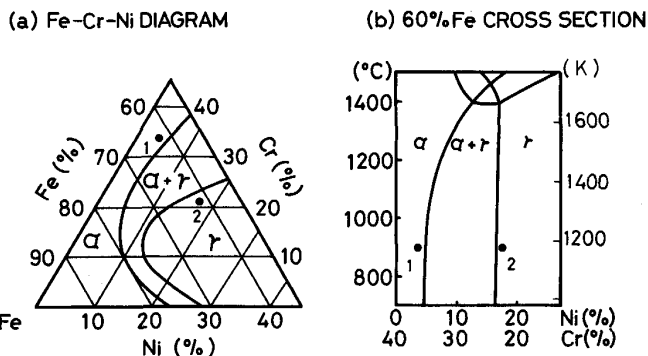


Fig. 1. Fe-Cr-Ni phase diagrams and alloys used in this investigation.

Table 1. Chemical compositions of BCC and FCC Fe-Cr-Ni alloys (wt%).

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
1: BCC	0.009	0.02	0.005	0.002	0.016	3.64	34.41	Bal.
2: FCC	0.003	0.03	0.005	0.002	0.007	17.03	20.97	Bal.

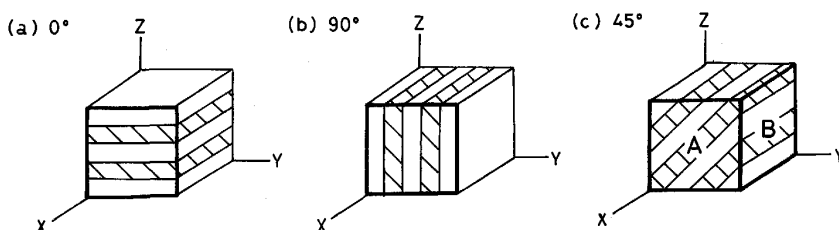


Fig. 2. Three kinds of compression specimens.

は、Y軸方向 (Fig. 2 参照) に優先的に変形しており横断面が長方形になっていた。大きく変形すると曲げ変形や座屈の影響が現れるようであり、実験は圧縮ひずみ

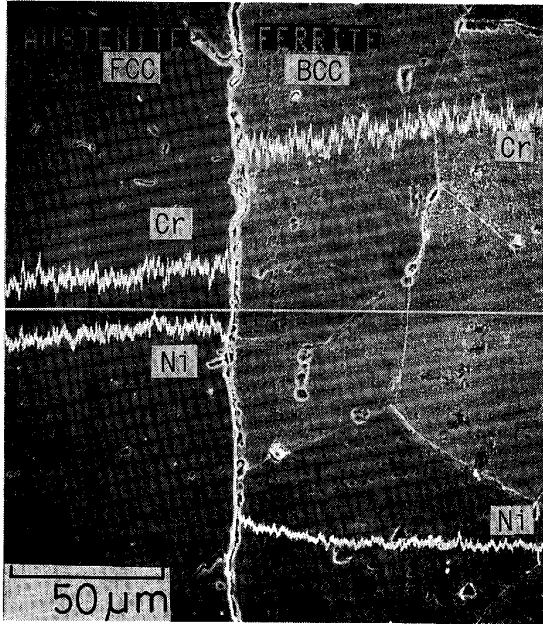


Photo. 1. Aspect of bonded interface observed by SEM and Ni and Cr concentrations near the interface.

30% までとした。また、圧縮試験によって接合界面の剝離が懸念されたが、界面剝離は実験したすべての試験片でまったく見い出されなかった。

Photo. 2 に 0° 材における変形後 (ひずみ約 30%) の様子を示す。(a) と (b) は試験片を垂直に切断したときの断面の様相であり、(a) が未時効材、(b) が時効材の結果である。(c) と (d) はそれぞれ、未時効材と時効材の試験片表面の SEM 観察例である。 0° 材の変形は、単純に考えると各層で応力が等しく (応力一定モデル²⁾ に近い)、強度の低い FCC 層が優先的に塑性変形すると予想される。しかし z 軸方向の圧縮塑性ひずみ $-\epsilon_p$ の発生は同時に X, Y 軸方向におおよそ $\epsilon_p/2$ の塑性ひずみを伴う。従って、接合界面でのひずみの適合のために、界面では FCC 層と BCC 層の変位は等しくなければならない。このひずみ適合条件のために、 X および Y 軸方向に内部応力が発生する。自由表面ではこの効果が端的に現れて (a) や (b) に示すように表面に凹凸が生じている。この凹凸の度合いは 2 層間の強度差の大きい時効材の方が未時効材より著しい。また、この凹凸は界面からかなり層の内部 (中心部) まで及んでいるようにみられ、界面による拘束の効果がかなり広い領域にわたっていることがうかがわれる。また、(c) と (d) から接合界面近傍が大きく傾斜していることが確

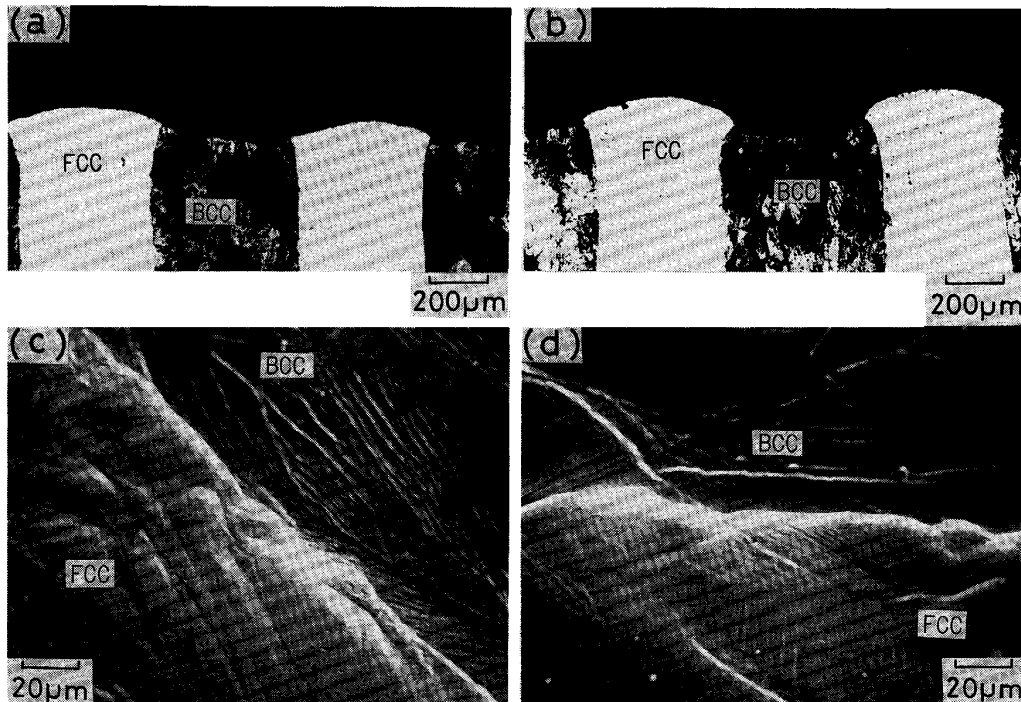


Photo. 2. Aspects of deformed 0° specimens (compression strain is about 30%): non-aged ((a), (c)) and aged ones ((b), (d)) where (a) and (b) are optical micrographs of the cross sections of (c) and (d), respectively, while (c) and (d) are SEM micrographs of specimens' surfaces (see Fig. 2).

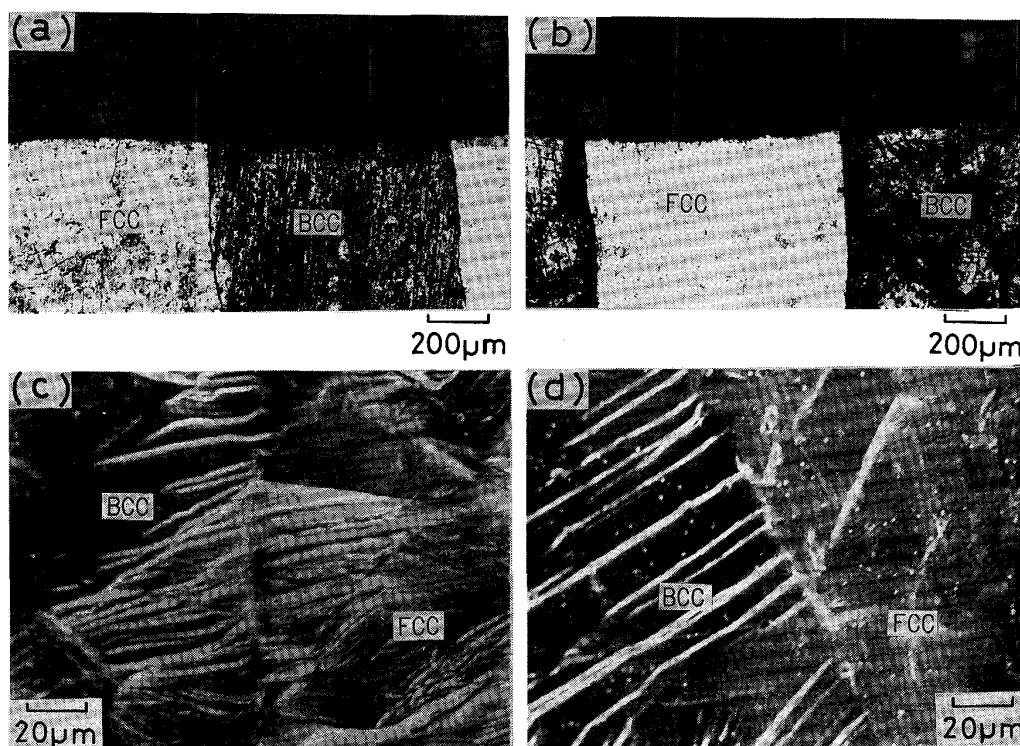


Photo. 3. Aspects of 30% deformed 90° specimens : non-aged ((a) and (c)) and aged ones ((b) and (d)). See Photo. 2 for the detailed explanation.

認される。さらに、接合界面の破壊は認められず界面は強固であることも確認できる。細かいすべり線が FCC 層内で数多くみられるのに対して、BCC 層内では粗大なすべり帯や変形双晶と思われる表面起伏がみられる。

次に 90° 材について 0° 材と同様に変形後の様相についてまとめた結果を Photo. 3 に示す。90° 材では、各層にかかる応力が異なり各層のひずみが等しくなるように (ひずみ一定モデル²⁾ に相当する) 変形が進むと考えられる。(c) では、すべり線が FCC 層、BCC 層の双方で多くみられ、両層ともに同程度に塑性変形しているようである。しかしながら、界面近傍ではすべり系の違いに起因した応力集中が局部的に発生しその緩和のために多くのすべり系が働くものと思われ、すべり線の量が多い。すなわち、この場合も微視的には 2 層間で相互作用のあることがうかがわれる。また、界面はこの場合も良好な接合状態を保っているようである。(a) と (b) はそれぞれ (c) と (d) の断面を示すものである。圧縮軸は紙面に垂直な方向であり、試験片表面に凹凸はほとんど現れていないことが先の 0° 材の場合と大きく異なる点である。

最後に 45° 材の観察結果について述べる。Fig. 2 (c) に示した B 面に関する観察結果を Photo. 4 に示す。一方、A 面についてその断面を観察した結果が Photo. 5

(a) である。45° 材の圧縮変形は主として、巨視的には界面に沿ったせん断変形によってまかなわれている。一般に軟らかい層が接合界面に平行にせん断変形のみを行う場合は界面での拘束はまったくないのでひずみ適合に伴う内部応力の発生も生じない。すなわち、自由に変形できる。試験片の幅広がりや Y 軸方向に優先的に起こるのはこのためであると思われる。しかし、単軸変形であるから、このせん断変形とともに剛体回転が起こり、試験片は 0° 材に近づいてゆくことが予想される。A 面での観察結果 (Photo. 5 (a)) が Photo. 2 と類似したものとなっているのはこのためでもあり、層の垂直方向に圧縮ひずみが生じている。2 層間での塑性変形の不均一性という観点では、この 45° 材が最も著しい。45° 材では、巨視的には 2 層間の干渉が小さいわけであるが、界面の個々の場所では個々の結晶粒におけるすべり系の存在に起因して局部的な内部応力が生じ、両層間の干渉(相互作用)が起こっていると思われる。Photo. 5 (b) は時効材の BCC 層内で発生したへき開き裂の観察例である。このようなき裂は時効した 45° 材でのみ確認された。その理由は現在のところ明らかでないが、上述の局部的内部応力が関係しているのかもしれない。また時効した材料ではいずれの角度の試験片でも BCC 層に、変形双晶が数多く観察された (表面を研磨した後腐食する

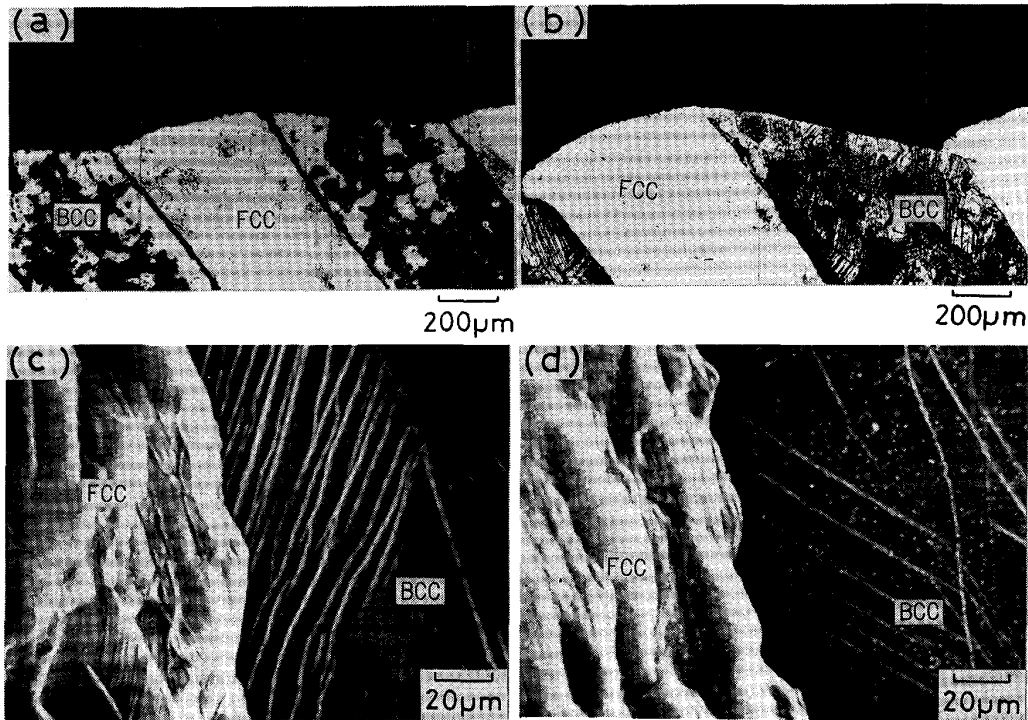


Photo. 4. Aspects of 30% deformed 45° specimens observed on the plane B of Fig. 2(c): non-aged one ((a) and (c)) and aged one ((b) and (d)). For the detailed explanation, see Photo. 2.

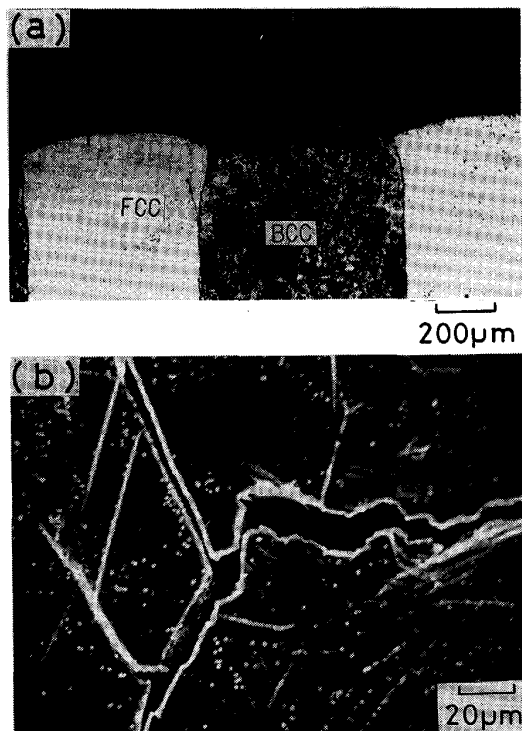


Photo. 5. Aspect of the deformed non-aged 45° specimen observed on the plane A (see Fig. 2) (a) and cracks found in the BCC layer in aged 45° specimen (b).

と再現する)。

3.3 応力-ひずみ曲線の比較

Fig. 3 に未時効の 0° 材, 90° 材, および 45° 材の真応力-真ひずみ曲線を示す. 比較のために, FCC および BCC 各単相合金の圧縮試験結果も示してある. 変形応力は FCC 単相, 45° 材, 0° 材, 90° 材, BCC 単相の順に高くなっている. 変形初期には各材の変形応力の差が大きく, 変形が進むにつれてその差が小さくなる傾向がみられる.

Fig. 4 は時効材の結果である. 未時効材の結果 (Fig. 3) が破線で描かれている. これより, 未時効材に比べて時効材の加工硬化が高いことがわかる. BCC 層を硬化させることによって 0°, 90° 材では加工硬化が著しく大きくなるが, 45° 材では比較的小さい. 変形応力が 45°, 0°, 90° 材の順に大きくなることは未時効材の場合と同じである. また, 図ではその差がひずみによってあまり変化しないが, ひずみが 20% 以上になると各試料の変形応力の差は小さくなる傾向がみられた. これらの諸現象は変形の不均一性と密接に関連しており, 次節で考察する.

3.4 不均一変形と変形応力に関する考察

FCC と BCC 各単相合金の応力-ひずみ曲線から, ひずみ一定モデルおよび応力一定モデル²⁾を用いて変形応

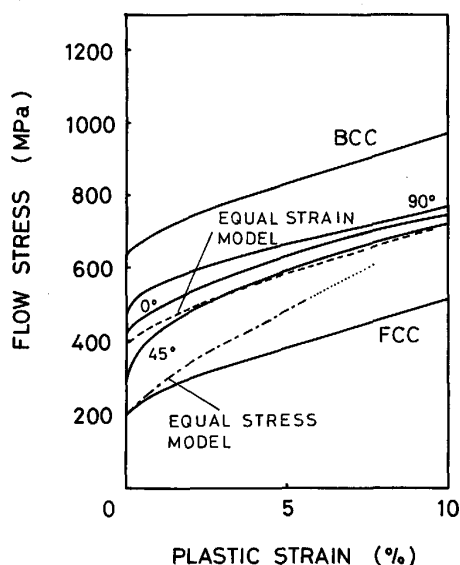


Fig. 3. True stress-strain curves of non-aged specimens.

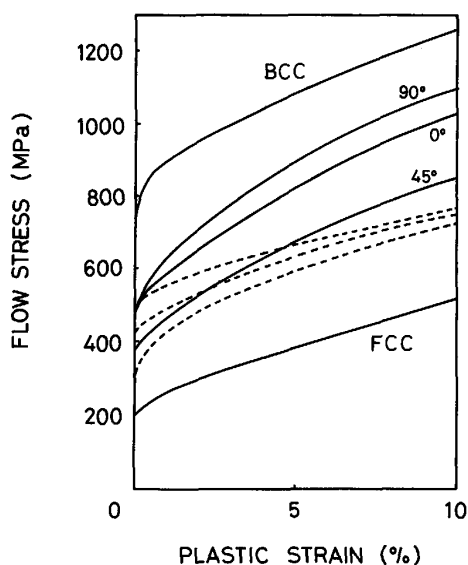


Fig. 4. True stress-strain curves of aged specimens. The dashed curves show the flow curves of non-aged specimens in Fig. 3.

力を計算したところ Fig. 3 のようになった。すなわち、前者では各構成相のひずみがいつも等しいと仮定して 2 相合金の変形応力を計算し、一方後者では各構成相がいつも等しい応力をもつと仮定して 2 相合金の全体としてのひずみを算出した。もし 2 層界面の拘束がなく各層が完全に自由に変形できれば 90° 材の変形応力はひずみ一定モデルによって推定できることになるが、実験結果はその推定値より少し高い値を示している。この不一致の原因として著者らは接合界面近傍ですべりによる変位

の適合条件を満足するために自由表面とは異なる付加的なすべりが発生して加工硬化に寄与したことであろうと考えている。その他に、単相合金と積層材の中の構成相の状態(硬さなど)がもともとと同じでない可能性、体積率の不正確さ、および熱処理による残留応力なども考えられるが、いずれも主因とは考えにくい。粒界での相互作用によって粒界近傍が硬化することは双結晶の場合について多くの研究がなされている⁷⁾。

一方、0° 材の変形応力は界面の拘束がなければ応力一定モデルより推定できると考えられるが、実験結果は推定値よりはるかに高い値となっている。本実験程度の層厚さ(おおよそ 600 μm)でも界面の拘束によって塑性変形が軟質(FCC)層では抑制、硬質(BCC)層では促進されてかなり均一に変形するようである。そのため、変形応力は 90° 材の値にかなり近いものとなっており、厚さ数 μm の積層材に関する後藤らの結果⁵⁾と類似している。界面の拘束効果が一番小さいのは 45° 材であり変形応力が最も低い。2 相合金の変形応力を塑性緩和を考慮せずに予測することは連続体モデルを利用した方法で確立されており⁸⁾、それによると積層材の変形応力は 0° 材と 90° 材がひずみ一定モデルの予想値にほとんど一致するのに対して、45° 材(厳密には層に沿ったせん断変形の場合)は応力一定モデルによる予想値に近いことが示される。従って、本結果は傾向としてはこの結論と良く一致している。時効材については図が煩雑となるために示していないが同様な傾向である。

さて、複合材料では、各構成相の変形が均一であるほど相互の拘束が強いことになり、結果として変形応力が高くなる。ここでは不均一変形の度合いの代表値として、 Δ を自由表面における凹凸の程度から

$$\Delta = \frac{\text{自由表面における凹凸の大きさ(高さ)}}{\text{FCC 層の厚さ}} \quad \dots(1)$$

として評価してみた。2 層間の塑性ひずみの差が大きくなるほど自由表面での凹凸が大きくなるので、(1)式の分子は変形の不均一性を反映した量と考えられる。層の厚さで除して Δ を定義したのは、将来層厚さの異なる試料の結果と比較できるようにするためである。各試験片の Δ 値を Photo. 2~Photo. 5 の断面観察から求め変形応力と比較した結果を Table 2 にまとめた。これより Δ 値が大きい(変形がより不均一に起こる)ほど、変形応力が小さくなっていることがわかる。

以上のような不均一塑性変形は内部応力の発生と転位密度の不均一分布をもたらすであろう。そこで、転位密度は硬さ測定に反映すると考えて変形後の試料断面の硬さ分布を測定したが、現在のところばらつきが大きく有

Table 2. Relationship between inhomogeneous deformation and flow stresses.

Specimen	Δ	0.2% proof stress		5% flow stress		
		(MPa)	Ratio	(MPa)	Ratio	
Non-aged	0	0.21	445.4	0.87	633.3	0.96
	90	0.0	513.3	1.0	662.4	1.0
	45 A 45 B	0.18 0.33	350.3	0.68	591.0	0.89
Aged	0	0.25	519.4	0.98	816.8	0.98
	90	0.0	531.5	1.0	891.9	1.0
	45 A 45 B	0.29 0.79	398.8	0.75	666.7	0.75

Δ : The parameter to show the inhomogeneous deformation defined as the surface roughness divided by the thickness of FCC layer in 30% deformed specimens.

意な結果を得るには至っていない。ただ、時効材の FCC 層の硬さの平均値に関しては十分に有意差のある結果が得られ、その値は、45°, 0°, 90° 材の順に、HV 320, 279, 259 であり、Table 2 の不均一変形の傾向を裏付ける結果となっている。

複合材料の強度は、混合則で評価されることが多く、一方組織の細かさの効果は、Hall・Petch の式でしばしば表現される²⁾。ところがこの両者を合わせた有効な一般的表現式はなく、各事例ごとに処理されてきたようである。積層材に関しては、 λ を層間隔とすると、変形応力が λ^{-1} ⁹⁾、あるいは $-\lambda$ に比例する¹⁰⁾ という報告などがある。一方、後藤ら⁵⁾ は、 λ が 3 μm と 5 μm の積層強化型 Al/CuAl₂ 共晶合金について本実験と同じ 0° 材、45° 材、および 90° 材の圧縮変形強度を調べた。彼らはその実験結果と考察から、①強度の異方性はない、②強度は λ に依存しない、という結論を導き出している。しかし、連続体力学に基づく FEM 弾塑性解析の結果などによる結論は、試料の大きさと層間隔の比が同じであれば、同じ挙動を示す(相似則が成立する)ことを意味しているので、層間隔がある値以下になると、本質的に組織形態の影響が消失するとは簡単に結論できないように思われる。Fig. 5 は本実験結果について 90° 材を基準 (1.0) にして各変形応力を規格化して表したものである。45° 材での低下が大きいのは前述の理由によるものである。そこで強度が等方的になったという後藤らの結果⁵⁾ について著者らが Fig. 5 と同様なプロットを試みた結果(文献 5 の Fig. 9 を用いて著者らが推定したところ Fig. 5 の斜線内に入るようである)ではやはり 45° 材が低いようであり、本結果とあまり差がないようにみうけられた。ただし、両実験の間には、試験温度(室温と高温)、試料(単結晶と多結晶)や絶対値に差があるので、実験誤差範囲も考慮する必要があると考

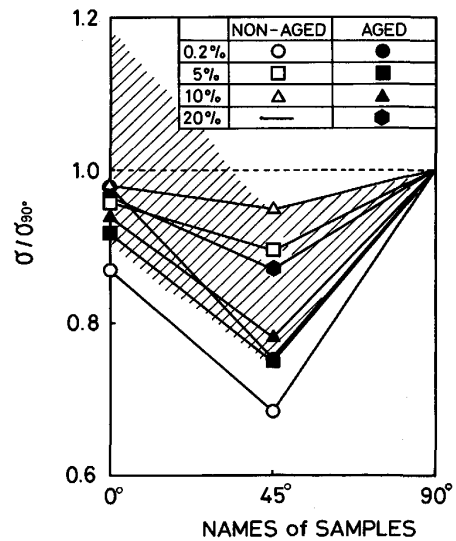


Fig. 5. Summary of normalized compression flow stress where the flow stresses of 0° and 45° specimens are divided by that of 90° one. The hatched area shows the results obtained by Goto *et al.*⁵⁾

えられ、このような比較には無理があるかもしれない。後藤らの試料では、本実験のような変形後の試料側面の凹凸は観察されていない(初期の研究で観察された表面の凹凸¹¹⁾は高温変形中に生じた酸化反応¹²⁾によるもので変形によってできたものではないことがその後の研究で明らかにされている)。すなわち、変形はきわめて均一に進行すると考えられている。変形応力の異方性を小さくするためには、次の二つが考えられる。

- ①層の厚さ自体を薄くする
- ②試験片を大きくする

いま、試験片の大きさ (D) と層の厚さ (λ) の比 D/λ を比較してみると、本実験では約 10 であるのに対して後藤らの実験試料ではおおよそ 1000 であり、100 倍大きい。このような条件の違いにもかかわらず本実験結果で 0° と 90° 材の変形応力があまり変わらないのは注目すべき結果であろう (Fig. 5)。

著者らは一般的なひずみ増分理論による FEM 解析を用いて層厚さの影響を現在検討しているが、この方法では①の効果は検討できず、②について D/λ の値でのみ傾向を調べることができる。それによれば、0° 材の変形応力は D/λ に敏感に依存するのに対して 45° は D/λ 依存性がきわめて小さい。したがって、45° 材が 90° 材と同じ変形応力を示すようになるには前述の①の効果によって、すなわち、ミクロ的な界面でのひずみ適合条件が全体の変形挙動を決めるようになるまで λ を小さくする必要があると考えられる。後藤らの試料は単結晶ですべり系も限られているので、このような条件を満足し

やすいのかもしれない。

4. 結 言

FCC および BCCFe-Cr-Ni 合金からなる積層材を作成し、圧縮試験を行って、強度の異方性や変形様式について調べた。その結果以下の結論が得られた。

(1) 本実験で用いた積層材の変形応力は、45° 材、0° 材、90° 材の順に高くなり、強度の異方性が著しい。その異方性は変形初期ほど顕著であり、硬い層を硬化させるとより大きくなる。硬い層を硬化させても 45° 材の加工硬化はあまり増加しない。

(2) 上記の傾向は、2 層間の変形不均一度の大きさとよく対応する。各層間の変形量の相違は、未時効材よりも時効材の方が大きい。0° 材と 90° 材は巨視的（目視による判断）には等方的に変形するが 45° 材は、FCC 層のせん断変形が支配的になるために一方向に優先的に変形する。

(3) 本積層材における 2 層界面における拘束（ひずみ適合）の効果は大きく、0°、90° 材の変形応力はそれぞれ単純な応力一定モデル、ひずみ一定モデルによる推定値よりも大きくなった。

(4) 変形応力の異方性を基準化して評価したとき、層の厚さ約 600 μm の本実験結果と数 μm の後藤らの結果には大きな差はないように思われ、考察を加えた。すなわち、積層材における強度の異方性は、①層の厚さを薄くする、あるいは②試験片を大きくすると小さくなると予想される。①と②の相互関係は現在のところ明らかではない。特に 45° 材の強度を 90° や 0° 材のそれに近づけるには、すべり系や転位分布などミクロな現象の特徴

が巨視的性質となって現れるまで層を薄くする必要があると思われる。

積層材の作成にあたって御助力いただいた、立命館大学理工学部、時実正治教授に深く感謝いたします。また本実験の一部に協力していただいた茨城大学大学院生、遠藤智守、照井真、および堀江潤一の各君にお礼申し上げます。九州大学総合理工学研究科の後藤正治先生からは本論文の素稿に対して貴重な御助言をいただいたことを付記し、感謝の意を表します。

文 献

- 1) H. FISCHMEISTER and B. KARLSSON: *Z. Metallkunde*, **68** (1977), p. 311
- 2) 友田 陽, 田村今男: 鉄と鋼, **67** (1981), p. 439, Y. TOMOTA and I. TAMURA: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **22** (1982), p. 665
- 3) 友田 陽, 田村今男: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 1147
- 4) K. CHO and J. GURLAND: *Met. Trans. A*, **19** (1988), p. 2027
- 5) 後藤正治, 山下慎次, 三村敏夫, 吉永日出男: 日本金属学会誌, **48** (1984), p. 513
- 6) 黒田 卓, 友田 陽: 日本金属学会秋季講演概要集, (1987), p. 309
- 7) 例えば, Y. D. CHUNG and H. MARGOLIN: *Metall. Trans.*, **4** (1973), p. 1905
- 8) Y. TOMOTA, K. KUROKI, T. MORI and I. TAMURA: *Mater. Sci. Eng.*, **24** (1976), p. 85
- 9) 柳沢 平, 矢野哲夫: 日本金属学会誌, **51** (1987), p. 1216
- 10) G. A. CHADWICK: *Acta Metallurgica*, **24** (1976), p. 1137
- 11) 栗下裕明, 吉永日出男, 高尾文雄, 後藤正治: 日本金属学会誌, **44** (1980), p. 395
- 12) 後藤正治, 西嶋裕造, 吉永日出男: 日本金属学会誌, **50** (1986), p. 162