

[2024105205]

積層材の三軸応力状態の評価

Evaluation of triaxial stress state in multilayered material

古賀紀光^{#,A)}, 松長祥太郎^{A)}
Norimitsu Koga^{#,A)}, Shotaro Matsunaga^{A)}
^{A)} Kanazawa University

Abstract

The triaxial strain state during tensile deformation in Cu/martensite multilayered sheet was measured by using *in-situ* neutron diffraction method. The Poisson's ratio of martensite layer in the multilayered sheet differed from that in the martensite single layer sheet, indicating that the neighboring Cu layer affected the stress state of martensite layer in the multilayered sheet.

Keyword: multilayered material, Poisson's ratio, *in-situ* neutron diffraction, triaxial strain state,

1 はじめに

異種金属板を積層させ、熱間圧延により両層を結合して作製される積層材は、優れた機械的・機能的特性を発現することが報告されている^[1-3]。報告者は、これまでに Cu/炭素鋼積層材に焼入れ処理を施すことで、炭素鋼層を硬質なマルテンサイト(α')層へと変態させ、優れた強度-導電率バランスが発現できることを明らかにしている^[4]。しかし、硬質な α' 層によって、本積層材の延性は乏しく、実用導電材料で求められる曲げ加工を施すことができなかった。そこで、報告者らは、本積層材に焼戻し処理を行うことで延性の改善を行った^[5]。その結果から、焼戻し α' 単層鋼と比較して、Cu/焼戻し α' 鋼積層材では、優れた局部伸びが発現することがわかった。この要因として、ボイドの数密度が積層材では少なくなることがわかっている。さらに、デジタル画像相関法により引張変形により導入されるひずみの分布状態を可視化した結果、Cu/焼戻し α' 鋼積層材では、最大せん断応力方向に高ひずみ域が連続する“ひずみ帯”^[6]の分布間隔が、焼戻し α' 単層材と比較しても疎になっていた。このひずみ帯の交点でボイドが形成する傾向にあったことから、ひずみ帯の分布状態の変化が、積層材における優れた局部伸びをもたらす要因と結論付けられた。しかし、積層材においてひずみ分布が単層材と変化した理由については定かでない。一方、Jiang らは、Ti/Nb 積層材において、両層のポアソン比の差や強度特性の差に起因して、単層材とは異なる応力状態が形成することを報告している^[7]。Cu/焼戻し α' 積層材においても、このような応力状態の変化が結果として、ひずみ分布の変化をもたらしている可能性がある。

そこで、本研究では、焼戻し α' 単層材と Cu/焼き戻し α' 鋼積層材について、引張その場中性子線回折により 3 軸（応力負荷方向(LD)、試験片幅方向(WD)、試験片厚さ方向(ND)) のひずみ変化を測定し、積層化による三軸の応力状態の変化を考察した。

2 実験方法

2.1 供試材

供試材には、無酸素 Cu と炭素鋼(SCM435)の板材

を用いた。これらの板材を炭素鋼の体積率が 80% となるように積層させた後に、熱間圧延により Cu/炭素鋼積層材を作製した。次いで、本試料に 1063 K で 0.6 ks の溶体化後に氷水中に焼入れを行い、その後、773 K で 1.8 ks の焼戻し処理を行った。以降、単に積層材と呼称する。比較材として、炭素鋼単層板に同様の熱処理を施した焼戻し α' 単層材を用いた。

2.2 引張その場中性子線回折による 3 軸の弾性ひずみ測定

3 軸の中性子線回折実験には、JRR-3 ビームホールの T2-1 ポートに設置された中性子応力測定装置 RESA を使用した。RESA の試料ステージにオイラークレドールおよび DEBEN 製小型引張試験機を設置して実験を実施した。引張変形を加えながら、中性子回折測定を行った。中性子回折測定は波長 1.5535 Å, 入射スリット 5×5 mm, 受光スリット 5 mm で実施した。Fe の回折線は(211), Cu の回折線は(311)を用いた。変形前の回折角(θ_0)をもとに、下記の式からひずみを算出した。

$$\varepsilon = \frac{1/\sin\theta - 1/\sin\theta_0}{1/\sin\theta_0} \quad (1)$$

図 1(a)に示すように小型引張試験機を横向きに設置し、LD 方向のひずみを取得した。次いで、図 1(b)に示すように小型引張試験機を縦置きの状態にし、オイラークレドールを用いて χ 軸回転を調整することで、WD 方向と ND 方向のひずみを取得した。

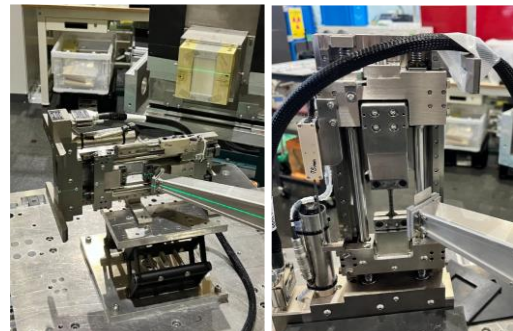


図 1 (a)横向きと(b)縦向きに設置した小型引張試験機の外観

3 実験結果と考察

3.1 積層材の初期組織と残留応力

図2に、積層材のSEM像を示す。湾曲や途切れのない層状構造が観察される。また、その厚さは、 α' 層で100 μm 、Cu層で30 μm であった。よって、その体積率は約80%であり、想定通りの積層材が作製できている。変形前のディフラクションピークから、積層材の α' 層の格子定数と α' 単層材の格子定数を比較したところ、ほぼ同程度の値を示しており、積層材の α' 層には残留応力はほとんど存在していないことがわかった。一方、Cu層単層材の測定は行っていないが、無酸素Cuの格子定数3.615Å^[8]を用いて、残留応力を計算したところ50~100MPa程度の引張の残留応力が存在していると推定された。Cuは α' 層よりも熱膨張が大きいことを考慮すると冷却中にその熱膨張差によって、Cu層には引張の残留応力が発生することが予測される。実際に、Cu/Fe積層材では、Cu層に引張の残留応力が発生していることが確認されている^[9]。一方、応力のバランスを考えるならば α' 層にも残留応力が入っているべきではあるが、このような残留応力は積層材の界面付近に限定されることが考えられ、残留応力がそれほど大きくないこと、 α' の体積率が大きく、またその層厚もCuよりも厚かったことなどが積層材の α' で残留応力が測定できなかった理由と考えられる。

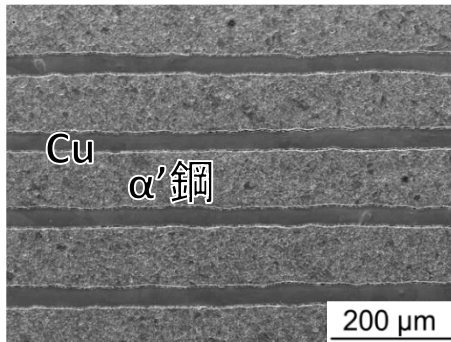


図2 積層材のSEM組織

3.2 引張変形に伴う三軸ひずみの変化

図3に、(a) α' 単層材と(b)積層材の引張その場中性子線回折実験のために行った中断引張試験と単調引張試験より得られた公称応力-公称ひずみ曲線を示す。いずれの試料においても、図中赤線で示す引張その場中性子線回折を行った中断試験の応力が高くなっている。これは、各軸のひずみ測定のために、約8時間、ひずみを負荷した後に室温で放置したために、ひずみ時効が生じたのが原因と考えられる。また、試験中断後は連続的に応力が低下する所謂リラクセーションが観察された。そのため、応力低下が安定する30分後から中性子線回折によるひずみ測定を実施した。

図4に、中性子線回折より得られた各軸のひずみと引張試験より得られた真応力の関係を示す。積層材の α' 層、Cu層、 α' 単層材でそれぞれ分けて表している。弾性域である500MPaで測定を行ったところ、積層材中の α' が最も大きなLD方向のひずみを示し

ている。一方で、Cu層のLD方向のひずみは低く、マクロな降伏後に測定したひずみと同程度の値であることからCu層は500MPaの応力負荷までには降伏していることがうかがえる。同様の早期降伏はFe/Cu積層材でも確認されている^[9]。積層材および単層材の α' も、マクロな降伏後はLD方向のひずみはほぼ一定になっている。しかし、Cuは特に変形後期でLD方向のひずみが急激に増加しており、加工硬化が生じていることがわかる。WD方向、ND方向のひずみは、積層材および単層材の α' ではいずれも圧縮のひずみが生じているが、Cu層ではひずみが小さく、ほぼ0か僅かに引張のひずみが出ている点もある。ここで、500MPa負荷時に得られた各ひずみについて、WD方向とND方向のひずみとLD方向のひずみの比、つまりは、ポアソン比を表1にまとめた。 α' 単相材では0.28程度の値となっており、SCM435のポアソン比(0.28~0.29)と合致している。他方、積層材の α' では、各軸のポアソン比が低く、その平均値も単相材と比較して小さくなっている。積層材のCu層では、ポアソン比が一般に報告されているCuのポアソン比(0.33)と比較しても著しく低い値を示している。前述のようにCu層は500MPa負荷時には既に降伏が生じているために、正しくポアソン比を評価できていない可能性がある。また、負荷されているひずみが小さいために解析精度の問題も考えられる。しかし、Cu層は α' 層と比較して薄いことからより積層化の影響が出ている可能性もあり、本点については今後より詳細な検討が必要である。以上から、積層化によって、少なくとも α' 層のポアソン比が変化した、つまりは応力状態が変化していることが示唆された。

LD方向への負荷応力は、3軸のひずみ(ϵ)とヤング率(E)、ポアソン比(ν)を用いて下記の式から算出が可能である。

$$\sigma_{LD} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \{ (1-\nu)\epsilon_{LD} + \nu(\epsilon_{WD} + \epsilon_{ND}) \} \quad (2)$$

ここで、ヤング率は、回折ヤング率を用いた(α' : 221 GPa, Cu: 130 GPa)^[10]。また、ポアソン比は、表1より得られた値を用いた。(2)式から算出された応力と引張試験より得られた真応力について表2に示す。なお、積層材では複合則が成立することが知られているため^[4]、積層材の応力は各層の(2)式から算出された応力と体積率から下記の式より算出した。

$$\sigma_{Cu/\alpha' steel} = \sigma_{Cu} \times V_{Cu} + \sigma_{\alpha' steel} \times V_{\alpha' steel} \quad (3)$$

5~10%程度の誤差はあるが、3軸のひずみから算出された応力は、引張試験から得られた真応力とほぼ同程度の値を示していることがわかる。本結果は、用いた回折ヤング率やポアソン比が妥当であることを示唆しているといえる。

以上から、積層材の α' ではポアソン比が変化しており、応力状態が変化していることが示唆された。このような応力状態の変化が、積層材における塑性ひずみ分布状態を変化させ、結果として、優れた延性を示したと考えられる。本点について議論を深めるためにも、今後より詳細な3軸の応力状態につい

て解析を行う予定である。

表 1 中性子線回折より得られたポアソン比

	Poisson's ratio		
	WD/LD	ND/LD	Average
α' single layer sheet	0.306	0.260	0.283
α' layer in multilayered sheet	0.275	0.253	0.264
Cu layer in multilayered sheet	0.095	-0.005	0.045

表 2 引張試験より得られた真応力と 3 軸のひずみから算出された応力

	True stress (MPa)	Estimated true stress (MPa)	Percent difference
α' single layer sheet	500	528	5.6%
	767	709	-7.5%
	803	711	-11.4%
	830	749	-9.7%
	867	803	-7.3%
Multilayered sheet	500	558	11.7%
	681	774	13.7%
	752	752	0%
	781	759	-2.7%

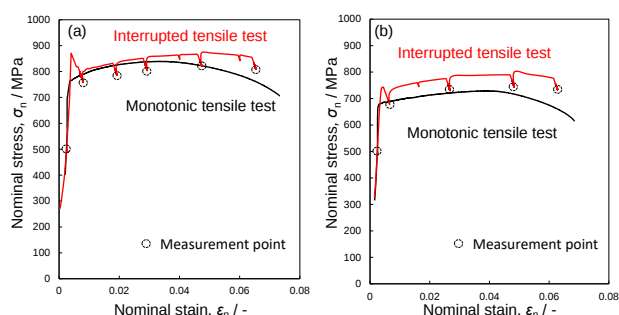


図 3 (a) α' 単層材と (b) Cu/ α' 積層材の中断試験と単調試験の公称応力-公称ひずみ曲線

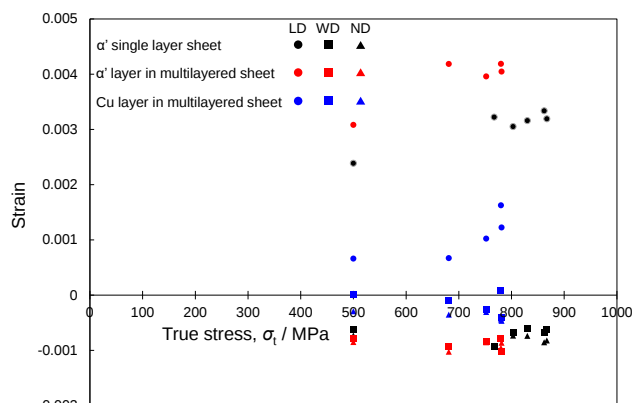


図 4 真応力と中性子線回折より算出された各軸のひずみ

4 まとめ

積層材において、Cu 層には引張の残留応力が存在しており、 α' 層では、残留応力は測定できなかった。3 軸のひずみから計算されたポアソン比は、 α' 単相鋼では文献値と同程度の値になったが、積層材の α' 層では、低い値を示した。また、積層材の Cu 層についてもポアソン比は文献値と比較して著しく低かった。測定された 3 軸のひずみとポアソン比および複合則を用いて算出された積層材の応力は、引張試験より測定された真応力とおおよそ一致した。よって、用いたポアソン比が妥当であることが示され、

参考文献

- [1] T. Koseki, J. Inoue and S. Nambu: Mater. Trans., 55 (2014) 227-237.
- [2] M. Pozuelo, F. Carreño and O.A. Ruano: Compos. Sci. Technol., 66 (2006) 2671-2676.
- [3] J. Park, M.C. Jo, T. Song, H.S. Kim, S.S. Sohn and S. Lee: Mater. Sci. Eng. A, 759 (2019) 320-328.
- [4] R. Kato, N. Koga and C. Watanabe: Mater. Trans., 65 (2024) 205-211.
- [5] R. Kato, N. Koga, C. Watanabe: Metallurgical and Materials Transactions A, 56(2025) 1327-1338.
- [6] Y. Kai, T. Ogawa, Z. Wang and Y. Adachi: ISIJ Int., 61 (2021) 481-486.
- [7] S. Jiang, R.L. Peng, Z. Hegedüs, T. Gnäupel-Herold, J.J. Moverare, U. Lienert, F. Fang, X. Zhao, L. Zuo and N. Jia: Acta Mater., 15(2021) 116546.
- [8] 藤原英道, 里 達雄, 神尾彰彦: 日本金属学会誌, 62(1998) 301-309
- [9] T. Yamashita, N. Koga, T. Kawasaki, S. Morooka, S. Tomono, O. Umezawa, S. Harjo: Materials Science and Engineering A, 819(2021) 141509.
- [10] 高木節雄, 増村拓朗, Fulin Jiang, 土山聡宏: 材料, 67 (2018) 855-860.