

チタン合金の熱間押出加工における変形、温度及び組織解析

An Analysis of Deformation, Temperature and Microstructure
of Hot-Extruded Titanium Alloy

木 村 欽 一^{*(1)} 石 井 満 男^{*(2)} 吉 村 博 文^{*(3)}
Kin'ichi KIMURA Mitsuo ISHII Hirofumi YOSHIMURA

抄 録

熱間変形抵抗の大きい材料の熱間押出加工は加工発熱が大きく、押出材の組織、材質が局部的に変化しやすいので、押出時の材料各部の歪量、歪速度及び温度分布を詳細に把握しておくことが必要である。Ti-6Al-4V 合金ビレットを用いて、加熱温度：950, 1100°C、押出比：6 及び12の場合の歪量、温度及び組織を格子線解析法と熱解析によって調べた。熱押加工中の同一断面内において、歪量は押出材の中心部から表層部にかけて大きくなる一方、温度は加熱されたビレットが熱押加工までにかかり冷却され、そのため中心部から表層部にかけて低下していた。組織はこれらの歪量及び温度に従って α 粒が変形したものとなった。

Abstract

In the hot extrusion of materials with high hot deformation resistance, heat is generated in large amounts, and consequently the microstructure and properties of extruded material are apt to be locally changed. It is, therefore, necessary to have an exact understanding of the amount and rate of strain and the temperature distribution in the material being extruded. Using Ti-6Al-4V alloy billets, the amount of strain, temperature and microstructure at heating temperatures of 950°C and 1,100°C and extrusion ratios of 6 and 12 were examined by the visioplasticity method and thermal analysis. In the same cross section of the material being hot-extruded, the amount of strain increases from the center toward the surface. On the other hand, as the heated billet is considerably cooled until it is subjected to hot extrusion, the temperature drops from the center toward the surface. In the microstructure of this billet, α -grains are deformed depending on the amount of strain and the temperature distribution.

1. 緒 言

純チタン及びチタン合金は、優れた耐食性及び高い比強度を有することから、航空機など、高い信頼性が要求される構造部材に多く使用されている。そして、部材の形状も多様化し、少量多品種化の傾向が増してきており、このため様々な断面形状を有する形材を容易に製造できる熱間押出（以下、熱押と記す）加工が注目されている。

熱押加工は、1 回の加工でほぼ最終製品に近いものをつくりだす、いわゆる near net shape 加工の一種であり、きわめて有効な加工法である。ただ、1 回での加工度が大きく、特にチタン合金などのように熱間変形抵抗の高いものは加工発熱が大きいため、目的とする熱押材の材質、組織を均一にするためには、熱押加工時の断面各部での歪及び材料温度を詳細に把握し、種々の熱押条件によってつくられる熱押材の材質、組織を予測する手段を前もって確立しておく必要がある。従来、押出加工に関する研究では、材料のメタルフロ

ーに関する研究が多く、例えば軸対称押出についての Shabaik ら¹⁾ の格子線解析法による解析や、異形材押出では Altan 及び Nagpal²⁾ の流れ関数を導入した解析、UBET (Upper Bound Elemental Technique) を用いた木内ら³⁾ の解析がある。しかし、これらは全て材料流れを解析するのみで、加工に伴う歪量や温度変化による材料の材質、組織への影響等の冶金的な考慮はあまり行われていない。

そこで著者らは、将来社会的にますますニーズが高くなると考えられるチタン系材料に焦点をあて、今回は代表的な合金である Ti-6Al-4V 合金（以下、6-4合金と記す）を用いて、熱押加工時における材料各部の歪、歪速度及びそれに伴う温度分布を解析し、そして変形過程の組織を観察し、これらの関係について調べた。熱押の変形解析については、上界法、すべり線場法、有限要素法等の解析があるが、ここではこれらの近似解法ではなく、実際の熱押加工におけるメタルフローの様相がよくわかり、変形状態が直接把握できる格子線解析法¹⁾ を用いた。温度解析には、熱伝導項に材料の物質移動項及び加工発熱項を導入した方法⁴⁾ をそれぞれ用いた。尚、実際の熱押加

^{*(1)} 技術開発本部 光技術研究部 主任研究員
 (現、光製鐵所 生産技術部 掛長)

^{*(2)} 技術開発本部 鉄鋼研究所 ステンレス・チタン研究部
 主任研究員

^{*(3)} 技術開発本部 光技術研究部 主幹研究員 工博

工時の温度分布をより正確に推定するため、ビレットとコンテナの間の熱伝達係数を別途測定した。

2. 実験方法

供試素材として6-4合金の $\alpha+\beta$ 域温度で鍛造されたビレットを用いて、熱押用に62mm 径×155mm 長さの丸ビレットをまず切り出した。更に熱押時の歪量を測定するために、このビレットを中心線に沿って半割りし、その断面に5×5 mmの格子線を放電加工(線幅:0.3mm)により罫書いた。この格子線を罫書いた半割りビレットを又元の状態に合わせて、その外側をチタン薄板(板厚:1mm)で造られた円筒状容器(64mm 径×150mm 長さ)に入れて熱押試験用に供した。

このビレットを大気中で950及び1100°C、5分間加熱保定後、熱押試験機にて、ダイス:45°のコニカルダイス、押出比:6(65mm 径→26.5mm 径)及び12(65mm 径→18.7mm 径)、ステム速度:70 mm/sの条件で押出し途中で止め、熱押前後及び途中の状態を調べた。又、この時の潤滑剤はSiO₂系のガラスを用いた。尚、加熱炉から抽出し熱押するまでのビレットの冷却速度は同形状の別ビレットに熱電対を表面より半径方向に12mm 間隔で4箇所設置し、950°Cに均一に加熱した後、空冷、コンテナ挿入そしてステムで加圧し、つまり材料がコンテナ内面に接触するまでの温度を測定した。

熱押後、外套のチタン円筒材を除去し、ビレットの半割り面を開いて、中心断面に付せられた格子線の変形様相を測定して各部の歪量及び歪速度を算出した。又、熱押材の断面組織を観察し、組織の変態及び初析 α 粒(以下、 α 粒と記す)の形態等について調査した。

熱押材の各部の歪、歪速度は熱押時のステム速度及びビレットの格子線変形の測定結果より、次に示す手順¹⁾で求めた。まず、ビレットの押出時の座標系を図1に示す。これより定常軸対称押出における材料の流線 j は、流れ関数 Ψ を用いて $\Psi_j = \pi R_j^2 V_0$ で与えられる。ここに R_j は流線の変形前の半径、 V_0 はステム速度である。流れ関数 Ψ は半径方向 r と軸方向 z の距離の関数で表されるので、任意の点での速度成分は、図1より u を半径方向速度成分、 v を軸方向速度成分とすると(1)式で与えられる。

$$u = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \Psi}{\partial z}, \quad v = -\frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \quad \text{.....(1)}$$

又、任意の点での速度成分(u , v)から、半径方向、円周方向、軸方向及び剪断の各歪速度 $\dot{\epsilon}_r, \dot{\epsilon}_\theta, \dot{\epsilon}_z$ 、及び $\dot{\gamma}_{rz}$ は次の(2)式により求められる。

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \dot{\epsilon}_\theta = \frac{u}{r}, \quad \dot{\epsilon}_z = \frac{\partial v}{\partial z}, \quad \dot{\gamma}_{rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \quad \text{.....(2)}$$

相当歪速度 $\dot{\bar{\epsilon}}$ は(3)式で表され、これを流線に沿って時間で積分すると

(4)式のように相当歪 $\bar{\epsilon}$ が求められる。計算は差分法を用いて数値計算した。

$$\bar{\epsilon} = (2/3(\dot{\epsilon}_r^2 + \dot{\epsilon}_\theta^2 + \dot{\epsilon}_z^2 + 1/2 \cdot \dot{\gamma}_{rz}^2))^{1/2} \quad \text{.....(3)}$$

$$\bar{\epsilon} = \int \dot{\bar{\epsilon}} dt \quad \text{.....(4)}$$

次に温度分布については、以上のようにして求めた歪速度及び歪分布を用いて、(5)式に示す材料の物質移動項及び内部加工発熱量を含む二次元熱伝導方程式を差分法を用いて数値計算した。

$$\lambda \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + r \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \rho c \left(\frac{\partial}{\partial r} (T \cdot u \cdot r) + r \frac{\partial}{\partial z} (T \cdot v) \right) + \dot{q} \cdot r = 0 \quad \text{.....(5)}$$

ここに、 λ :熱伝導率、 ρ :比重、 c :比熱、 T :温度、 q :内部の加工発熱量である。加工発熱量 $\dot{q}$ は $\sigma \cdot \dot{\bar{\epsilon}}$ で与えられ、熱間変形抵抗 σ は次の(6)式より求めた。

$$\sigma = C_\beta \exp[-8.4546 + (13457/T)] \cdot \bar{\epsilon}^{-(1.319 - 0.001T)} \cdot \dot{\bar{\epsilon}}^{-1.061 + 0.00104T} \quad \text{.....(6)}$$

$$C_\beta = 1.6 - (0.00495T_0 - 3.953)$$

材料の変形応力は温度に依存するため、この時の計算は温度について収束計算した。又、6-4合金の物性値は各々、 $\lambda = 14.8 \text{ J/ms}^\circ\text{C}$ 、 $\rho = 4510 \text{ kg/m}^3$ 、 $c = 0.54 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ を用いた。このときの温度分布の具体的計算には格子線解析による熱押実験に合わせて、ビレット加熱後に20秒間の空冷後コンテナに接触して2秒間冷却された状態、つまり中心部から表層部にかけて温度低下している分布を有する状態で熱押され、更に熱押加工中の加工発熱を考慮して行った。尚、熱押加工中の6-4合金とダイスの間には潤滑ガラスが通常厚さが10mm程度あるので、その間は断熱とした。

コンテナ等による冷却については、まず実測データからビレットの表面の熱伝達係数を次の(7)、(8)式により求め、この熱伝達係数からビレット内の温度分布を推定した。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \text{.....(7)}$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{r=R_0} = K(T_s - T_c) \quad \text{.....(8)}$$

ここに、 T は温度、 t は時間、 r は半径、 a は温度伝導率($\lambda/\rho c$)、 R_0 はビレット半径、 K はビレットとコンテナ間の熱伝達係数、 T_s はビレット表面温度、 T_c はコンテナ内面温度(140°C)である。

3. 実験結果及び考察

950°Cの $\alpha+\beta$ 域加熱押出での熱押材中心断面の格子線による変形様相例(押出比6の場合)を写真1に示す。これより求めた変形量から先に示した(1)~(4)式を用いて算出した相当歪分布を各々図2(a)、(b)に示す。これらから押出比:6及び12では相当歪は押出が進むにつれて、かつビレット中心部から表層部にかけて大きくなり、特に

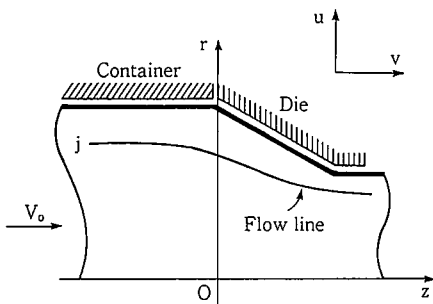


図1 座標系及び流線

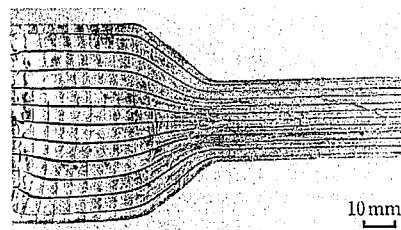


写真1 950°C加熱、押出比:6での熱押時の格子線変形

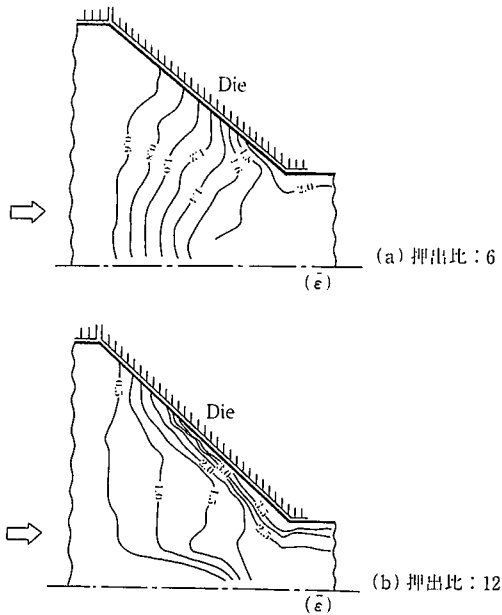


図 2 950°C加熱—熱押時の相当歪分布

表層部のダイス出口部が最も大きくなることがわかる。まず押出比：6の場合の相当歪は、ダイス出口部断面において、表層部は中心部の約1.2倍である。又、相当歪は、押出比：6では、押出比：12に比べ低く、例えばダイス出口部での中心部で7割程度である。

次に1100°Cの β 域加熱押出での押出比：6における格子線による変形様相を調べた。 $\alpha + \beta$ 域押出の場合と異なり格子線を歪書いた面がかなり歪んでいると同時に面の垂直方向にかなりの凹凸が生じていた。そのため、変形した格子線が不明確なので変形量の測定及び計算誤差が多少含まれると考えられるが、950°C加熱押出と同様に(1)～(4)式を用いて、相当歪分布を算出した結果を図3に示す。歪分布の傾向は前述の950°C加熱の $\alpha + \beta$ 域押出の場合と同様にビレット中心部から表層部にかけて大きくなる。但し、 $\alpha + \beta$ 域押出の場合と異なる点として、内部の歪分布がやや大きい、つまり材料の中心部の変形量が β 域加熱押出の方がやや大きいことがわかる。又、押出比：12の方は押出加工後の変形した格子線が殆ど判別不能であったので、歪等の算出ができなかった。

図2及び図3で示した押出中の歪分布から、(5)～(8)式を用いて、加工発熱とビレットの冷却速度の実測結果を考慮した場合の押出加工時の温度分布を推定した。まず、熱押加工時の材料温度を推定する際の、初期条件として次の実測データを考慮に入れた。950°Cに加熱したビレットの加熱後熱押するまでの温度履歴を図4に示す。これよりビレット表面は加熱後、特にコンテナとの接触によってかな

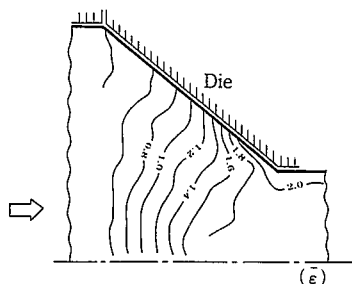


図 3 1100°C加熱、押出比：6での熱押時の相当歪分布

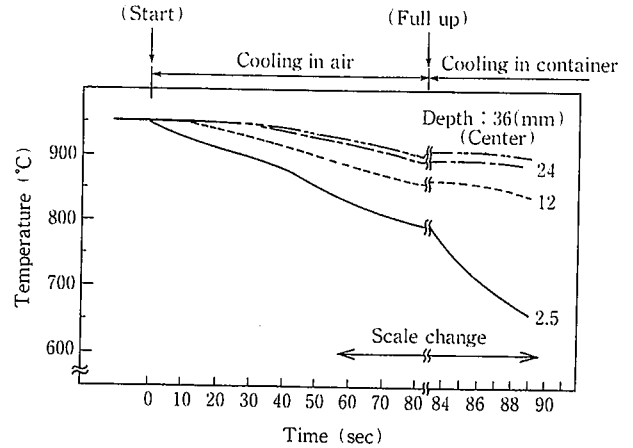


図 4 950°C加熱ビレットの冷却曲線

り温度が低下することがわかる。この結果より求めたコンテナとの接触時のビレット表面の熱伝達係数 K は $1.0 \text{ kJ/m}^2\text{s}^\circ\text{C}$ であった。この熱伝達係数を用いてビレット加熱温度が950°Cの場合のビレット加熱後、20秒間の空冷更に2秒間のコンテナとの接触により急冷された熱押加工直前の温度分布の推定結果を図5に示す。この状態を初期条件として熱押中の温度分布を推定した。

このようにして求めたビレット加熱温度：950°C、押出比：6及び12の場合の熱押加工中の温度分布を図6(a),(b)に示す。押出比：6の場合、熱押加工による変形に伴い加工発熱によって温度が上昇するが、ダイス出口部において、中心部は表層より高温であるものの変態点を越えない。一方、押出比：12の場合は、押出による変形に伴い加工発熱によって、温度が上昇しダイス出口部において中心部は変態点を越えるが、表層部は変態点以下であることがわかる。

次に、熱押材の組織観察結果について、950°Cの $\alpha + \beta$ 域加熱押出材での押出比：6における組織変化を写真2に示す。未変形部での α 粒が変形に伴って長手方向に伸びた形状になっている。但し、未変形部からダイス出口部に至るまですべて α 粒が残存しており、この押出比：6の場合、押出中において β 変態点以上に温度が上昇しなかったことがわかる。これは、先に示した温度分布の推定結果と一致する。一方、950°Cの $\alpha + \beta$ 域加熱押出での押出比：12における組織変化については、押出比：6の場合と同様に未変形部の α 粒が変形とともに長手方向に伸ばされた形状であった。但し、ダイス出口部では、押出材表層部は α 粒が残存しているが、中心部では $\beta \rightarrow \alpha + \beta$ 変態した針状組織となっており、中心部では加工発熱のために β 変態点(990°C)以上に温度が上昇したと考えられる。又、1100°C

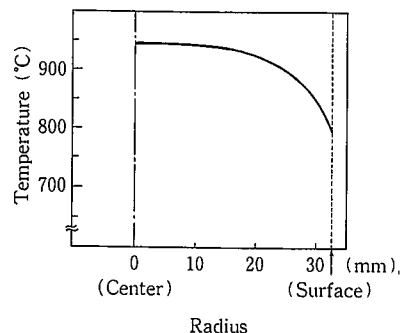


図 5 950°C加熱ビレットの熱押直前の半径方向温度分布

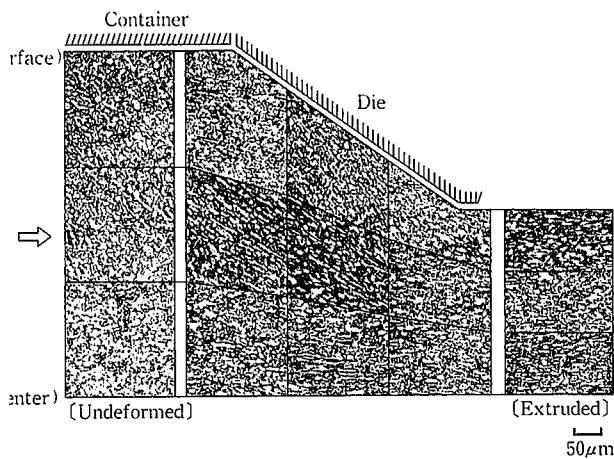


写真 2 950°C加熱、押出比：6での熱押材組織変化

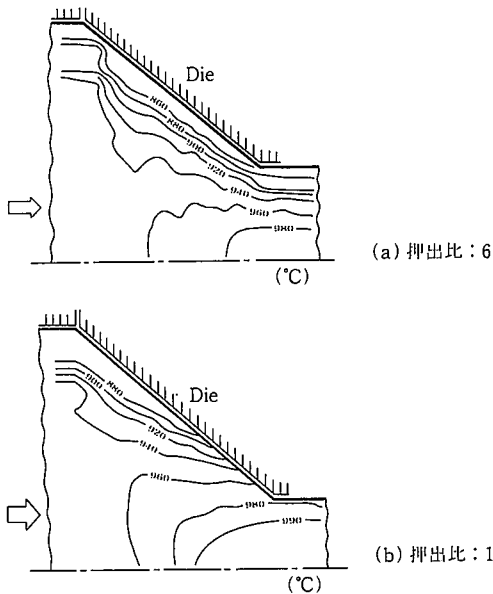


図 6 950°C加熱一熱押時の温度分布

β域加熱押出材の組織は、押出比6及び12とも、押出前、押出加工中及び押出加工後全ての箇所針状組織であった。

熱押材の組織を均一なものにすることはその製品特性として重要なことであり、β域加熱押出の場合は、全て針状組織であるが、α+β域加熱押出の場合は、α粒の形状及び大きさを均一にすることが破壊靱性及び疲労特性上重要である。今回得られた熱押加工時の変形歪（押出比）、温度及びα粒の定量的な把握より、950°Cのα+β域加熱押出における歪量、温度及び組織の関係を定量的に整理した結果を写真3に示す。同一温度では、歪量が大きくなるに従いα等軸粒が変形し伸びている。又、同一歪量では温度が高い程、α粒が小さくなっているのがわかる。このα粒の長短軸比と歪量及び温度の関係を図7に示す。これより、歪が大きい程、α粒は伸びて、又、歪度が高い程等軸的になっていることがわかる。温度が高いほどα粒が等軸化するのは、β変態点に近付くにつれα相の体積比率が減少するため見かけ上等軸化すると考えられる。

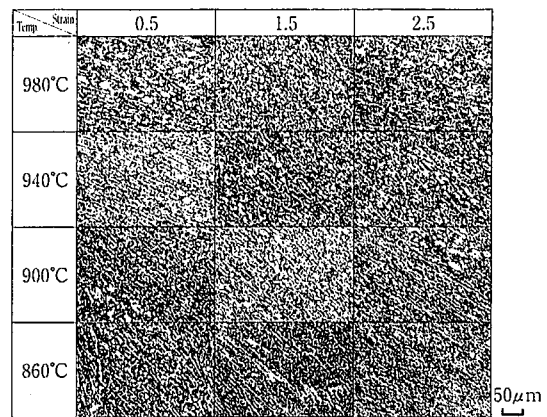


写真 3 950°C加熱一熱押時の組織と歪量及び温度の関係

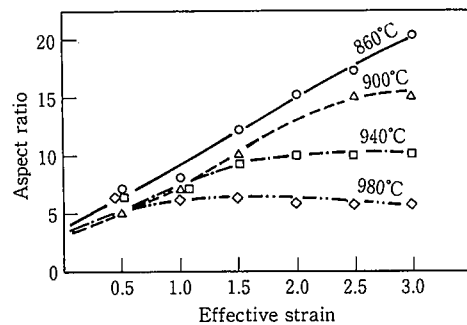


図 7 950°C加熱一熱押材組織の初析α相の長短径比と歪及び温度の関係

4. 結 言

今回、Ti-6Al-4V合金ビレットを用いて、加熱温度：950、1100°C、押出比：6及び12の場合の歪量、温度及び組織を格子線解析法及び熱解析によって調べた。その結果、熱押加工中の同一断面内において、歪量は押出材の中心部から表層部にかけて大きくなる一方、温度は加熱されたビレットが熱押加工までにかなり冷却され、そのため中心部から表層部にかけて低下している。組織は、これらの歪量及び温度に従ってα粒が変形したものとなっている。このように、熱押加工はビレット加熱温度、押出比は勿論のこと、ビレットのコンテナ等による冷却の影響も大きく、そのため不均一組織となりやすい。しかし、歪量と温度の不均一分布をうまく利用することによって、熱押材温度を均一化できる可能性が考えられる。つまり、熱押加工での歪量に従って発生する加工発熱に見合うだけ、予め熱押加工直前のビレットの温度を、中心部から表層部にかけて温度が低い分布に制御すれば、ビレット表層部の温度上昇は中心部に比べて大きくなるので、結果的にダイス出口部での断面内において均一な温度分布にすることが可能と考えられる。

参 照 文 献

- 1) Shabaik, A., Lee, C. H., Kobayashi, S. : Proc. Int. Machine Tool Design and Research Conf. (1966) p.663
- 2) Altan, T., Nagpal, V. : Proc. 3rd North American Metalworking Research Conf. (1975) p.26
- 3) 木内学, 岸英敏, 石川政和 : 塑性と加工, 24, 290(1983)
- 4) 麻田祐一, 森謙一郎, 吉川勝幸, 小坂田宏造 : 塑性と加工, 22, 448(1981)