

(技術資料)

チタン合金鍛造品の品質安定化のための鍛造設備の自動制御化

Computer Control of Die Forging Equipment for Quality Stability in Titanium Alloy Forgings



百田悠介*
Yusuke MOMOTA



荒木重臣*
Shigeomi ARAKI



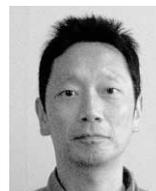
小島壮一郎*
Souichiro KOJIMA



石外伸也**
Shinya ISHIGAI



森川裕文***
Hirofumi MORIKAWA



竹内俊二郎****
Syunjiro TAKEUCHI

Kobe Steel produces the compressor disc titanium forgings for aircraft jet engines, using the die forging equipment of the 400kJ counterblow hammer. In recent years, there has been a demand for the stable production of high quality aircraft disc forgings to ensure high power and ultra-high reliability in aircraft jet engines. The equipment for the 400kJ counterblow hammer was retrofitted in May 2007, including such elements as the computer control, and measures were taken to increase the power of the compressor and accumulator. The stable production of high-quality in Ti-6246 alloyed disc forgings has been achieved by the computer control and increase in power. At the same time, Kobe Steel has improved the productivity of Ti-64 alloyed discs.

ま え が き＝当社は、400kJ カウンタブローハンマ（図1）により航空機用ジェットエンジンディスク鍛造品を製造している。近年、航空機エンジンの高出力化、高信頼化のニーズにより、航空機エンジンメーカーからはエンジン部品の品質安定化が強く求められるようになってきた。しかしながら、従来のハンマはオペレータが手動で操作するため、品質の安定化には限界があった。そこで、2007年5月にハンマのコンピュータ制御化に加え、コンプレッサおよびアキュムレータの増強による高出力化の工事を行うことにより、品質の安定化を達成したので報告する¹⁾。

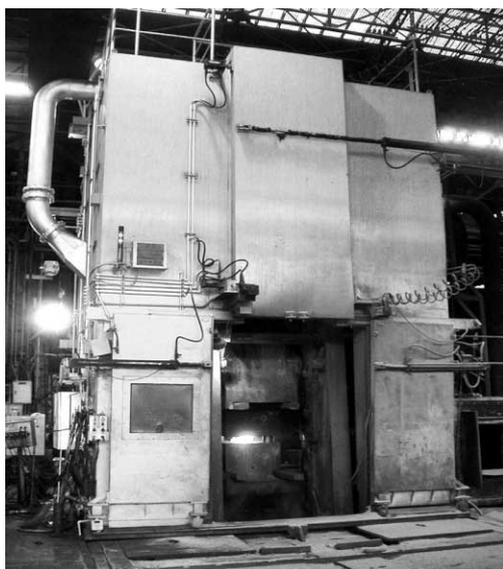


図1 400kJ カウンタブローハンマ
Fig. 1 400kJ counterblow hammer

1. 400kJ ハンマの改善

1.1 ハンマの自動制御化

1.1.1 目的

ハンマの自動制御化は以下のような目的で行った。

- i) 航空機用ジェットエンジン部品の中でもとくに高強度な Ti-6246 合金ディスク鍛造品に対しては、ベータプロセス鍛造とよばれる鍛造中の材料温度と鍛造ひずみを同時制御する特殊な鍛造熱処理技術が不可欠である。そこで、ハンマの打撃エネルギーと打撃間隔をコンピュータ制御することによって鍛造中の温度とひずみを制御し、優れた特性を持つ鍛造品の製造を可能にする。
- ii) オペレータによる手動操作技術の個人差に起因する品質のばらつきをなくし、優れた特性を持つ鍛造品を安定して繰返し鍛造する。
- iii) 難加工性材料であるチタン合金は鍛造割れや欠肉を生じやすいため、適正な打撃条件による品質向上や歩留り向上を図る。

Ti-6246 合金の β プロセス鍛造組織におよぼす温度とひずみの影響を図2に示す²⁾。Ti-6246 合金が良好な特性を得るためにはマイクロ組織が全面針状アルファ組織（図2(a)）であることが不可欠であり、そのための鍛造条件としては素材温度を 800~1,050℃、ひずみ量を 0.5 以上確保することが必要である。また、Ti-6246 合金ディスクを、ハンマの打撃エネルギーと打撃間隔をコンピュータ制御によって鍛造した場合の FEM 解析結果を図3に示す。これより、素材温度が 800℃以上から 1,050℃以下でひずみが 0.5 以上で鍛造されたことが確認できる。

*鉄鋼事業部門 チタン本部 チタン工場 **鉄鋼事業部門 チタン本部 チタン商品技術室 ***鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 技術開発部 ****鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 鋳鍛鋼工場 鍛圧部

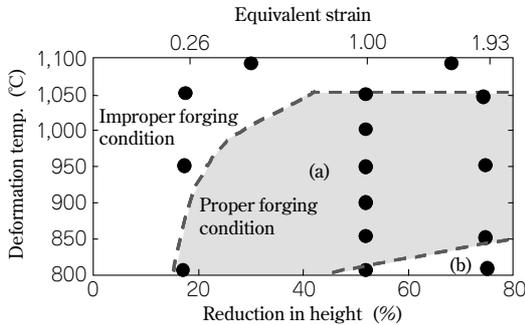
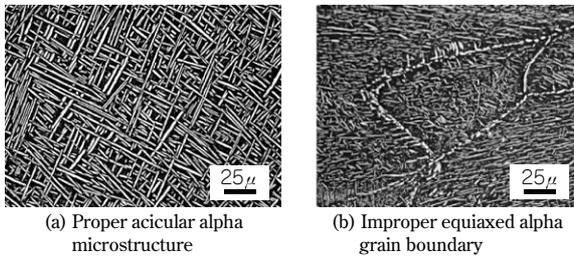


図2 Ti-6246のβプロセス鍛造組織におよぼす温度とひずみの影響
Fig. 2 Influence of temperature and strain on microstructure by beta-processed forging

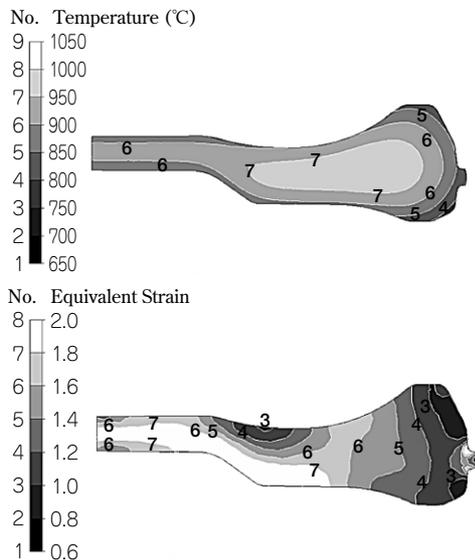


図3 FEM解析におけるディスク鍛造の温度およびひずみ分布
Fig. 3 Temperature and strain distribution during disc forging from FEM analysis

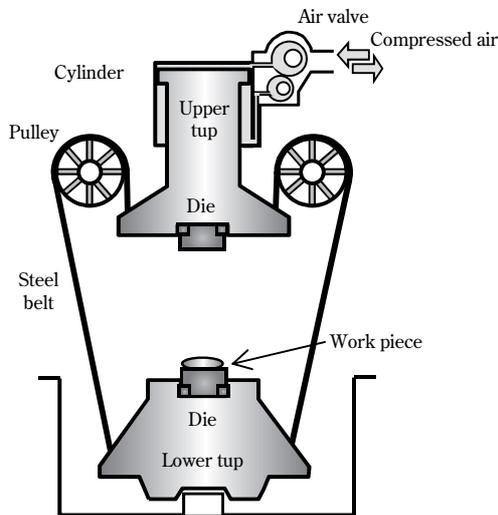


図4 カウンタブローハンマの模式図
Fig. 4 Schematic of counterblow hammer

1.1.2 カウンタブローハンマの機構

カウンタブローハンマの構造を図4に模式的に示す。カウンタブローハンマは、上金型を取付ける上タップ、上タップを圧縮空気で動かすシリンダ、下金型を取付ける下タップ、上下タップを結合するスチールベルトとプーリから構成されている。動力源である圧縮空気が上タップと一体構造になっているピストンを下方に押し下げると、上タップが下降すると同時にスチールベルトを介して下タップが上昇し、金型間の素材を上下方向から相撃鍛造する機構である。圧縮空気はエアバルブの開閉によりシリンダに給排気される。従来は、オペレータが操作レバーを使ってエアバルブの開閉を手動調整することで打撃エネルギーと打撃間隔を制御していた。

1.1.3 ハンマの自動制御の概念

この度のコンピュータによる自動制御化とは、コンピュータによってエアバルブが開いている時間や打撃速度を制御し、その結果として打撃エネルギーが制御されるシステムである。図5に示す概念に基づいてハンマの運動を考えると、エアバルブの開放時間と打撃速度との関係は、ハンマの運動方程式から以下のように表すことができる³⁾。

$$m_1 \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = m_1 \cdot g + F_{(t)} - T \dots\dots\dots (1)$$

$$-m_2 \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = m_2 \cdot g - T \dots\dots\dots (2)$$

$$F_{(t)} = A \cdot P_{(t)} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\frac{d^2x}{dt^2}$ ：上下タップの加速度

t ：タップが動き始めてから衝突するまでの時間

g ：重力加速度 (9.8m/s²)

m_1 ：上タップの質量

m_2 ：下タップの質量

T ：スチールベルトに伝わる力

$F_{(t)}$ ：タップが圧縮空気から受ける力

A ：タップのシリンダの表面積

$P_{(t)}$ ：圧縮空気の圧力

そこで、ハンマの打撃速度 (t 秒後のタップ速度) $V_{(t)}$ は、式(1)から式(2)を引いて T を消去し、タップの動き始めから t 秒後までを積分すると、

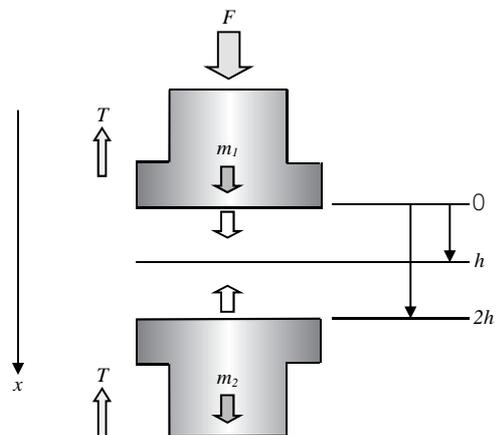


図5 ハンマの運動を考える際の概念図
Fig. 5 Schematic of hammer motion

$$(m_1+m_2) \cdot V_{(t)} = (m_1-m_2) \cdot g \cdot t + \int_0^t F_{(t)} dt \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、上下のタップはほぼ同じ質量であるので $m_1 \approx m_2$ として、

$$(m_1+m_2) \cdot V_{(t)} = F_{(t)} \cdot t = A \cdot P_{(t)} \cdot t \quad \dots\dots\dots (5)$$

これらよりタップ速度、すなわちハンマの打撃速度 $V_{(t)}$ は、圧縮空気の圧力 $P_{(t)}$ に比例し、タップが動き始めてから衝突するまでの時間 t に比例することがわかる。すなわち、コンピュータによる自動制御化とは、エアバルブが開の時間 t を電氣的に制御することによって打撃速度を制御するシステムである。また、ハンマの打撃エネルギーは、式 (2) および式 (3) のそれぞれに $\frac{dx}{dt}$ を掛けて両辺をそれぞれ加え、タップのスタート位置から打撃位置まで積分すると

$$\frac{1}{2} m_1 \cdot V_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \cdot V_2^2 = F_{(t)} \cdot h \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$E_T = \frac{1}{2} m_1 \cdot V_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \cdot V_2^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 E_T :ハンマの打撃エネルギー

V_1 : 衝撃時の上タップ速度

V_2 : 衝撃時の下タップ速度

h :ハンマ開放時の金型間の高さ

すなわち、ハンマのエネルギーは打撃速度の2乗に比例し、タップが圧縮空気から受ける力 $F_{(t)}$ に比例することがわかる。ただし本自動制御システムでは、バルブの開放時間のみでエネルギーを制御するよう、上下タップを全開にしたときの高さ h を常に一定に保つ機構を採用している。これより、コンピュータによる自動制御化とは、エアバルブが開の時間 t を制御し、打撃速度を制御することによって打撃エネルギーを制御するシステムであることがわかる。

1.1.4 自動制御システム

カウンタブローハンマの自動制御は、打撃ごとの打撃エネルギーと打撃間隔、打撃数をプログラムどおりに制御するシステムである。その自動制御を実現するための機器はここでは、PLC (プログラマブルロジックコントローラ) による制御が可能な油圧サーボユニット、タップの位置を検出するための近接スイッチ、鍛造プログラムを開始するためのフットスイッチ、エネルギー検出のためのスピードセンサ、およびプログラム入力のためのPCと操作用のモニターペンダントなどで構成した。オペレータは、打撃ごとの打撃エネルギーと打撃間隔をモニターペンダントを使ってPCに前もって入力しておく。自動制御による鍛造を行うとき、オペレータは所定のプログラムを選定し、フットスイッチを踏むことによって鍛造を開始する。本装置は、制御精度を確保する機構として①圧力補正システム、および②ストローク保証システムを持つことを特徴とする。圧力補正システムは、シリンダ内圧縮空気の圧力を検出し、圧力が+0.05~-0.05MPaまでの範囲の変動に対応してエアバルブの開閉時間を補正することによって打撃エネルギーの最大値に対して±10%以下に変動を抑えるシステムであ

る。一方、ストローク保証システムは、電磁誘導式の5個の近接スイッチによってタップスピードを計算し、エアバルブでブレーキをかけて下タップの下死点を常に一定とする機構である。これによって打撃エネルギーがエアバルブの開閉時間のみに依存するよう、上下タップ間の最大ストロークを打撃ごとに常に一定に保つ。

1.1.5 データロギング

カウンタブローハンマによる鍛造では、出力される打撃エネルギーによって材料を塑性変形させる。このとき、打撃エネルギーの全てが鍛造エネルギーに使われるわけではなく、タップの反発エネルギーなどにも使われる。そこで本データロギングでは、鍛造の直前および直後のタップの速度を速度センサで計測している。これによって打撃エネルギーと鍛造エネルギーを打撃ごとに計算し、記録することで実際の塑性変形に使われるエネルギーを把握できるシステムとした。鍛造エネルギー、打撃エネルギー、および反発エネルギーとタップ速度との関係は次式で示される。

$$E_A = E_T - E_R$$

$$E_T = \frac{1}{2} m_1 \cdot V_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \cdot V_2^2$$

$$E_R = \frac{1}{2} m_1 \cdot V_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 \cdot V_2'^2$$

ここで、 E_A :鍛造エネルギー (実際の塑性加工に使われるエネルギー)

E_T :ハンマの打撃エネルギー

E_R :反発エネルギー (鍛造後にタップが反発するエネルギー)

V_1' : 衝撃後の上タップ速度

V_2' : 衝撃後の下タップ速度

タップ速度は、速度センサに内蔵した CCD カメラで 5ms ごとに写したタップを画像処理することによって計算する。

また、本データロギングは加熱炉の扉の開閉を検知し、加熱炉抽出から鍛造開始までの時間、加熱炉の番号や加熱温度なども記録する。

1.1.6 自動制御の精度

本自動制御システムを実際の鍛造に適用し、打撃エネルギーの目標値に対する実測値の比較を行った (図 6)。鍛造プログラムは、打撃エネルギーを 120~380kJ まで 8

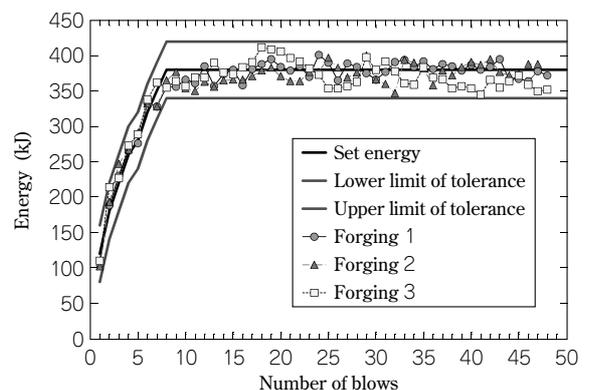


図 6 鍛造における実測エネルギー
Fig. 6 Measured energy of forging

段階に変化させ、全打撃回数は48回、打撃間隔は2.0秒とした。打撃エネルギーの上限値は目標エネルギー+40kJ、下限値は目標エネルギー-40kJである。打撃エネルギーの実測値は目標エネルギーの範囲内で推移しており、打撃エネルギーは本システムにより精度良く制御されていることが確認された。

1.2 ハンマの高出力化

1.2.1 高出力化の概要

ハンマの高出力化の目的を以下に示す。

- i) 高強度なTi-6246合金製ディスクの製造を、1回加熱のベータプロセス鍛造で可能にするために、従来以上のハンマ力量に増強する。
- ii) 従来から製造しているTi-64合金製ディスクなど大型鍛造品の加熱回数を削減し、トータルの生産性を向上させる。

従来のハンマ用の圧縮空気は当社の工場エアから供給されており、圧力は低く、供給量も不足していたため、ハンマの最大打撃エネルギーは300kJ程度と低い状態であった。そこでこのたび、ハンマの高出力化のためにコンプレッサとアキュムレータをハンマ専用設備として独立させるだけでなく、コンプレッサの高圧化とアキュムレータ容量の増強を行った。新しいコンプレッサとアキュムレータの仕様は、最大打撃エネルギー400kJを2秒間隔で50回連打してもエア圧力を0.75MPa以上に維持できる能力を持つこととした。

1.2.2 高出力化の事前準備

(1) 計算によるタップ疲労強度評価

高出力化により打撃エネルギーが約300kJから400kJに増大するため、タップの疲労寿命が懸念された。そこで、タップ速度が従来の2.5m/sから3.0m/sに増加すると、タップの疲労強度にどの程度影響を及ぼすかを検討した。まず、解析ソフトLS-DYNAによる3次元非線形衝撃応答解析を行い、打撃中のタップに生じる応力分布を求めた。その結果を図7に示す。つぎに、タップ材料の残留応力が疲労強度に及ぼす影響については、構造解析ソフトABAQUSによる3次元熱変形解析（熱伝導解析と変形解析）を行い、残留応力分布を求めた。解析に用いた上下タップおよび金型は対称性から1/4モデルとした。ここで、タップ材料の引張強さを500MPa、両振疲労強度を200MPaとして修正Goodman線図を描き、打撃

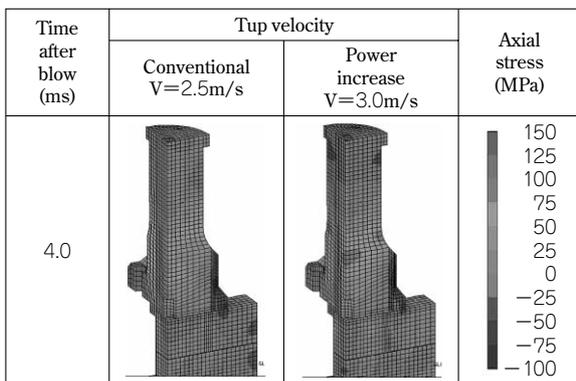


図7 打撃中のタップの応力分布

Fig. 7 Stress distribution of tup during blow

中のタップの応力分布の最大値と最小値から疲労強度の応力振幅を求め、残留応力値を疲労強度の平均応力としてタップの疲労強度を評価した⁴⁾。上タップの中心部でタップの下面から600mmの位置における平均応力45MPaのときのタップ材料の修正Goodman線図を図8に示す。タップ速度が2.5m/sから3.0m/sに増加し、応力振幅が61MPaから73MPaに上昇しても、安全率が低下することはほとんどないことが確認できた。

(2) 騒音と振動の影響調査

高出力化に伴う騒音および振動による環境問題が懸念されたため、工場敷地境界において騒音および振動を実測した。その結果、騒音は工事前の49dBAに対して工事後は45dBA、振動は工事前の46dBに対して45dBであり、騒音および振動規制法の基準値に対して十分に余裕があることが確認された。

1.2.3 高出力化の効果

高出力化前後の鍛造中の圧縮空気の圧力変動を図9に示す。工事前は、打撃間隔に対して圧縮空気の圧力の回復が間に合わず、連続的に圧力が低下して打撃力も低下していた。一方、工事後の圧縮空気の圧力は、0.93MPaの初期設定値で86秒間鍛造した後は下限値0.87MPaに低下するものの、直ちにコンプレッサが稼働して打撃終了30秒後には初期設定値まで回復する。このため、打撃を継続しても0.87MPa以下に低下することはない。このように、高出力化工事により圧縮空気の圧力変動が自動制御システムの圧力補正範囲である0.90±0.05MPa以内で安定していることが確認できたため、自動制御シス

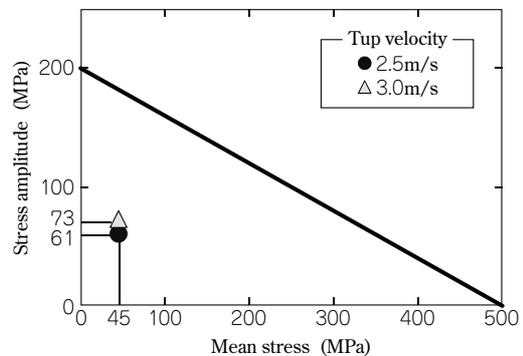


図8 タップ材料の修正グッドマン線図

Fig. 8 Modified Goodman diagram of tup material

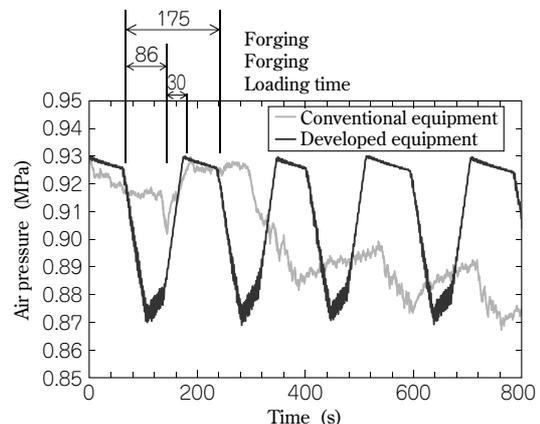


図9 鍛造中の圧縮空気圧力の変動

Fig. 9 Fluctuation of air pressure during forging

テムは正常に機能すると考えている。

さらに、打撃エネルギーが400kJに増大したことによって加熱回数が削減でき、Ti-64合金製ディスクの生産性が大幅に向上した。

むすび = 400kJ カウンタブローハンマにおいて、コンピュータ自動制御化工事と打撃エネルギーの増強工事を行うことにより、Ti-6246合金ディスクのような高品質を要求される鍛造品を安定して生産することが可能になった。さらに、従来から製造しているTi-64合金製ディスクにおいては生産性が向上した。

参 考 文 献

- 1) Shigeomi Araki et al. : 17th International Forgemasters Meeting, (2008), pp.230-236.
- 2) Yusuke Momota et al. : Ti-2007 Science and Technology, Vol.2 (2007), pp.881-884.
- 3) 荒木重臣ほか：昭和57年度 塑性加工春季講演会、カウンタブローハンマ鍛造時のエネルギー効率, (1982), pp.379-382.
- 4) 西島 敏：材料強度データシート資料 No.1 (1981), 独立行政法人物質・材料研究機構.