

# ショットピーニングされたCo-Cr合金の金属組織と 機械的性質の変化（第1報）

Changes in Microstructure and Mechanical Properties of Shot Peened Co-Cr Alloys (Report 1)

小林 祐次\*    水野 悠太\*    黒川 敦貴\*  
Yuji Kobayashi    Yuta Mizuno    Atsuki Kurokawa  
久森 紀之\*\*    福田 元樹\*\*  
Noriyuki Hisamori    Motoki Fukuda

With the development of medical technology, human life years tend to be longer. As lifetimes increase, the demand for artificial joints increases and the materials used in artificial joints are required to be highly safe. Changing these materials is difficult in terms of cost. Therefore, it is necessary to improve the mechanical properties of artificial joint materials without changing composition of the materials. Shot peening is a technology to improve fatigue strength by changing the microstructure near a metal surface and is mainly used in the automotive industry. In this study, medical Co-Cr alloy was shot-peened under various conditions. As a result, more than 60% of  $\varepsilon$  area ratio was obtained under the ceramic shot condition.

KEY WORDS: Artificial joint, Shot peening, Fatigue strength, Medical Co-Cr alloy,  $\varepsilon$  area ratio

## 1. はじめに

医療技術の発達により、寿命が長くなる傾向にある。一方、職業や生活習慣にもよるが、人体の各関節は、寿命が長くなればなるほど問題を抱えるようになる。このような課題に対処するため、人工関節への置き換え術需要は、近年増加傾向にある<sup>1)</sup>。

人工関節の寸法は、個人の特性によって個別にデザインされるべきであるが、材料の持つ機械的性質により、限界寸法が決定される。したがって、強い材料であればあるほど設計の自由度が高い。現在、人工関節用の材料は各種認証を受けたうえで指定されている。材料成分を変えた材料で再び認証を得るためには、複雑な過程を長期間にわたって受けることになり、開発コストの面で現実的でない。そのため、材料成分はそのままに、強度向上が見込める技術が求められている<sup>2)</sup>。

ショットピーニングは、ショットを金属表面に打ち付けることにより、加工硬化及び残留応力の付与が発生し疲労強度が向上する技術であるが、相手材の材料成分を変えることはない<sup>3)</sup>。したがっ

て、本研究では、医療用材料の疲労強度向上を目的とし、ショットピーニングが適用されたCo-Cr合金の金属組織と機械的性質の変化を調査した。

## 2. 実験方法

### 2.1 試験片

供試材は、ASTMに準拠した鍛造されたCo-28Cr-6Mo合金である。Table 1に化学組成を示す<sup>4)</sup>。

Table 1 Chemical component of Co-28Cr-6Mo (mass%)

Co	Cr	Mo	Ni	Mn
Bal.	26.3-30.0	5.0-7.0	≤ 1.0	≤ 1.0
Si	Fe	N	C	
≤ 1.0	≤ 0.75	≤ 0.25	≤ 0.14	

供試材を、適当な形状に切削加工後、表面をアルミナ懸濁液によって研磨仕上げし、試験片とした。

### 2.2 予備実験

医療用に使われるCo-Cr合金に対するショット

\*サーフェステックカンパニー 開発グループ 開発チーム

\*\*上智大学大学院

ピーニングに関する研究は少なく、用いるショットによりどのような変化が起こるのかわからない。したがって、予備実験として多様なショットを用いることとした。本来の用途を考慮するとショットの材料が移着しないように加工すべきだが、今回は、破碎しやすいガラスビーズも含めて様々なショット粒を用いた条件で加工した。

ショットピーニング加工は、新東工業製エア式ショットピーニングマシンを用いた。

Table 2 に非鉄系ショット、Table 3 に鉄系ショットの性質を示す。以後、ピーニングしていない試験片は NP と称す。

Table 2 Shot peening condition (Non-ferrous metals)

Name	K	D	W	Z
Material	Glass		WC	Ceramic
$\phi$ /mm	0.09	0.3	0.6	0.12
Hardness/HV	550		1450	700
Density	2.3		15.6	5.7

Table 3 Shot peening condition (Ferrous metals)

Name	100	44	06
Material	Cast iron		CCW
$\phi$ /mm	0.15	0.1	0.6
Hardness/HV	830	510	750
Density	7.9		

ショットピーニング後の試験片の表面粗さ EBSD によるフェーズマップ分析が行われた<sup>5)</sup>。

Fig. 1 にショットピーニング後の表面粗さを示す。すべての条件で、表面粗さは悪化した。特に直径が 0.6mm の W と 06 で粗さが悪い。

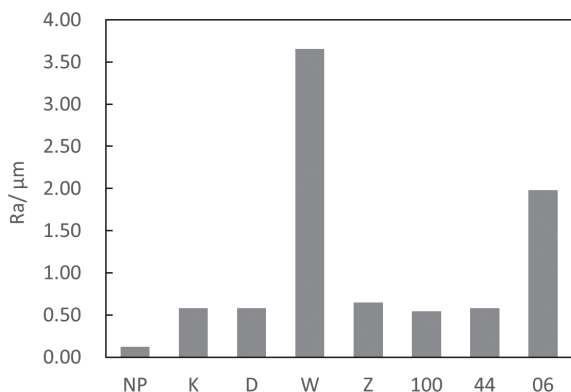
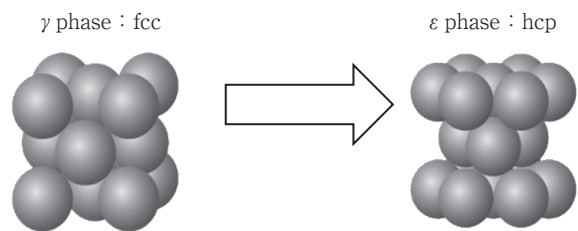


Fig. 1 Surface roughness after shot peening (Ra)

Fig. 2 に示すように、Co-Cr 合金は、fcc 構造を持つ  $\gamma$  相である。 $\gamma$  相は外部応力により hcp 構造の  $\epsilon$  相に加工誘起変態を起こすことが知られている。 $\gamma$  相よりも  $\epsilon$  相のほうが機械的性質は高い。そこで、一部の試験片を除いて、EBSD のフェーズマップ分析を行った結果を Fig. 3 に示す。NP では、表面近傍においてわずかに  $\epsilon$  相が確認できる。一方、ショットピーニングされた試験片のすべてにおいて  $\epsilon$  相と結晶粒の微細化が確認された。



Mechanical property :  $\gamma \leq \epsilon$

Fig. 2 Description of  $\gamma$  and  $\epsilon$  phase

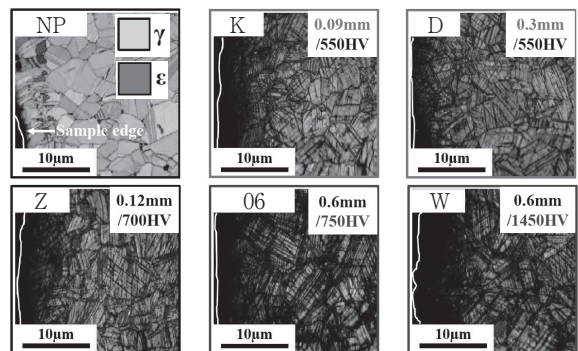


Fig. 3 EBSD Phase map ( $\gamma$   $\epsilon$ )

この結果より、 $\gamma$  相はショットピーニングによる外部応力で  $\epsilon$  相へ変態したと考えられる。そこで、解析した視野範囲における  $\epsilon$  相の割合評価を試みる。しかし、ショットピーニングによる結晶粒の微細化、ひずみの導入により表面近傍は EBSD で解析できていない。そこで、解析可能な範囲だった表面から 5  $\mu\text{m}$  から 10  $\mu\text{m}$  における  $\epsilon$  相面積割合を算出した。その結果を Fig. 4 に示す。

Fig. 4 より、 $\epsilon$  相面積割合が一番高かったのは Z だった。W と 06 はショットの直径が他より大きくショット衝突時のエネルギーも大きい。また、W は比重も大きいので、より大きな作用を組織

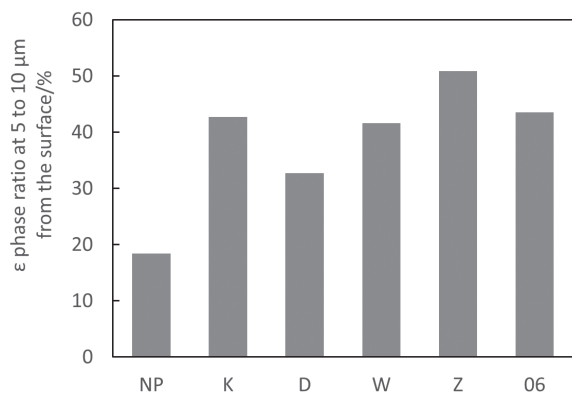


Fig. 4 ε area ratio at 5 to 10 μm from the surface

に及ぼすはずだが、Zよりは低かった。

Zと06はショットピーニング後の表面粗さに問題がある。一方、Kのε相面積割合は比較的高い。ガラス、セラミックはWC、CCWよりも熱伝導率が悪く、ショット衝突時のエネルギーがショット側の熱として変換されづらく、加工誘起変態を促進したと考えられる。しかし、ガラスは相手材金属と衝突時に破碎し、表面へ突き刺さる恐れがある。

以上の結果をもとに、セラミックショットがCo-Cr合金へのショットピーニングに最適と考えた。

### 2.3 ε相割合最大化実験

予備実験で確認した通り、Co-Cr合金にセラミックショットを用いると、加工誘起変態を促進できることがわかった。そこで、ε相面積割合を最大化できるショットピーニング条件を検討するため、各種セラミックショットを用意した。エア式ショットピーニングマシンを用いた加工条件をTable 4に示す。

Table 4 Shot peening condition (Ceramic shot)

Name	120	90	60	30	205
Material	Ceramic				
φ/mm	0.1	0.12	0.2	0.6	0.05
Hardness/HV	700	1085	700		
Coverage/%	100, 300, 1000				

加工条件のうち、エア圧は0.3MPaで固定したが、加工時間を示すパラメータであるカバレッジは100、300、1000%とした。

予備実験の時と異なり、ε相面積割合は、

EBSD解析画像のうち表面から15μmの範囲から算出する。

まず、カバレッジの及ぼす影響を調査するため、120を用いて加工された試験片のEBSDフェーズマップをFig. 5に示す。Fig. 5より、ε相は、カバレッジの増加とともに、より深い位置で見られる。

Fig. 6は、表面から15μm位置におけるε相面積割合を示す。カバレッジ100%と1000%を比較すると、倍以上ε相面積割合が異なる。したがって、表面にできるだけ多く、深くε相に変態させるにはカバレッジを増やすことが有効である。

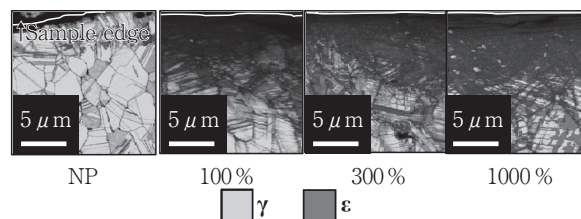


Fig. 5 Effect of coverage on the ε phase

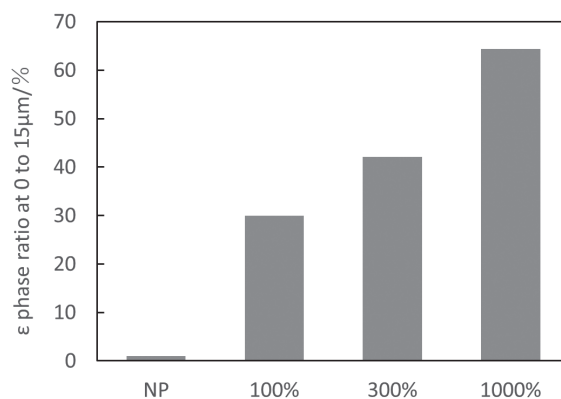


Fig. 6 ε ratio at 0 to 15 μm from the surface (120)

次に、ショットの直径が及ぼす影響を調査するため、硬さが同じでショットの直径が異なる205、120、60の条件において、カバレッジ300%で加工した結果をFig. 7に示す。

Fig. 7より、ε相は、ショットの直径が大きくなるとともに、より深い位置で見られる。

Fig. 8は、205、120、60の条件において、カバレッジ1000%で加工した時の表面から15μm位置におけるε相面積割合を示す。120(φ0.1)と60(φ0.6)は直径が6倍も違うが、ε相面積割合はほぼ同じだった。したがって、加工後の表

面粗さを考慮しなければならない場合、その直径は  $\phi 0.1$  で十分ということがわかった。

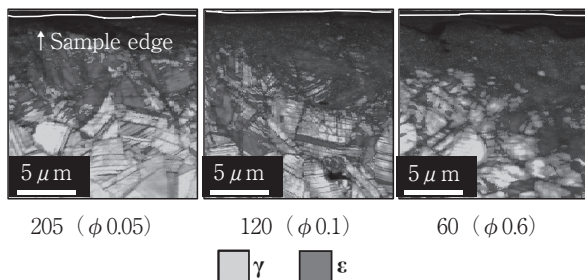


Fig. 7 Effect of shot size on the  $\epsilon$  phase

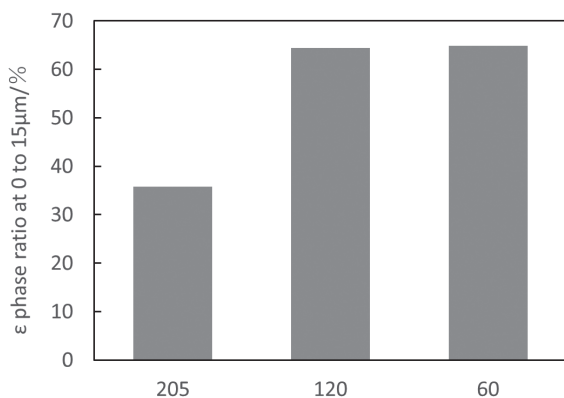


Fig. 8  $\epsilon$  ratio at 0 to 15  $\mu\text{m}$  from the surface

Fig. 9 は、直径がほぼ同じで硬さが異なる 120 ( $\phi 0.1$ ) と 90 ( $\phi 0.12$ ) において、カバレッジ 1000%で加工した後の表面から 15  $\mu\text{m}$ 位置における  $\epsilon$  相面積割合を示す。

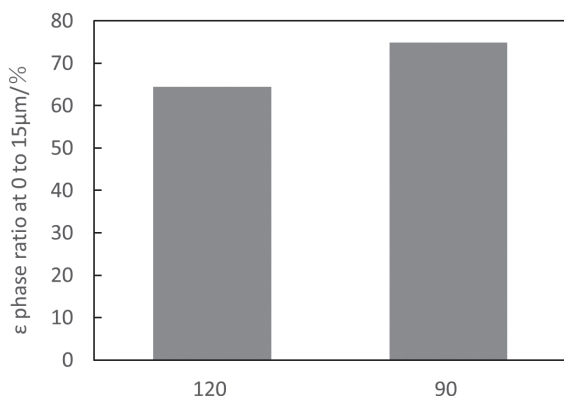


Fig. 9  $\epsilon$  ratio at 0 to 15  $\mu\text{m}$  from the surface

Fig. 9 より、90 は、120 より  $\epsilon$  面積割合が若干大きいことがわかる。しかし、90 は 120 に比べて非常に硬く、20%程度直径も大きいので当然と思われる。したがって、 $\epsilon$  面積割合を向上させるには、必要以上のショット硬さは不要だと判断した。

### 3. まとめ

本研究では、Co-Cr合金の疲労強度向上を目的とし、各種ショットピーニング条件が、Co-Cr合金の金属組織に与える影響を調査した。予備実験の結果、ショットピーニング後に  $\gamma$  相が  $\epsilon$  相へ加工誘起変態を起こすことがわかった。また、より  $\epsilon$  化しやすい条件はセラミックショットを使った条件であった。

$\epsilon$  相は、 $\gamma$  相より機械的性質が高く、疲労強度向上が見込めるため、ショットピーニングの  $\epsilon$  相面積割合最大化をめざし、再度ショットピーニング条件を検討した。その結果、以下の結論を得た。

- ①表面から 15  $\mu\text{m}$ までの  $\epsilon$  相面積割合は、カバレッジに依存し、今回の実験ではカバレッジ 1000%で最大になった。
- ②表面から 15  $\mu\text{m}$ までの  $\epsilon$  相面積割合は、ショットの直径に依存するが、今回の実験では直径 0.1mmで飽和した。
- ③表面から 15  $\mu\text{m}$ までの  $\epsilon$  相面積割合は、ショットの硬さに依存するが、今回の実験では 700HVで飽和した。
- ④  $\epsilon$  相面積割合が 60%を超えた条件は、120、90、205 であり、いずれもカバレッジ 1000%の加工条件だった (Table 5)。

Table 5 Shot peening condition

Name	120	90	205
$\phi$ /mm	0.1	0.12	0.05
Hardness/HV	700	1085	700
Air pressure	0.3MPa		
Coverage/%	1000		

### 4. 今後の進め方

今回の実験結果より、機械的性質に優れる  $\epsilon$  相をごく表層ではあるが、60%以上得ることができるショットピーニング条件を決定することができた。

今後は、ショットピーニングによって変態した  $\epsilon$  相が疲労強度に与える影響について検討を進めることとした。

参考文献

- 1) 茂呂徹：JST News (2011) Oct. 06-09
- 2) 井上貴之：まてりあ (2016) vol55. No.4 137-141
- 3) ショットピーニング技術協会：金属疲労とショットピーニング (2018) 2
- 4) ASTM F1537
- 5) 梅澤 修：軽金属 (2000) vol50、86-93