

# 硬さ分布を有する 傾斜機能超硬金型の創製

松 本 良

大阪大学

塩 見 誠 規

工学院大学

内部に硬さ分布を有する傾斜機能超硬合金ダイスモデルを粉末冶金法により作製した。本作製手法において超硬粉末の圧粉および焼結条件により、焼結中の Co 拡散範囲を制御し、硬さ分布の制御が可能であった。また冷間鍛造用金型への展開を目指して、ダイス外層、内層の作製方法により焼結後に生じる残留応力についても紹介する。

## 1. はじめに

冷間鍛造用金型では表面で硬度、耐摩耗性、内部で靱性、耐衝撃性がそれぞれ優れることが望まれており、機械的特性が内部で連続的に変化する傾斜機能構造を有する金型の開発が期待されている。

一方、超硬合金 (WC-Co) は強度、耐摩耗性等の機械的特性に優れるため、切削加工用工具のみならず、塑性加工用の金型材料として広く使用されている<sup>1)</sup>。一般に超硬合金製品は粉末冶金法により作製され、粉末冶金法では超硬粉末を金型等により圧粉成形し、超硬圧粉体に炉内で焼結を施し、比較的簡易な加工工程で製品形状に近い成形が可能である<sup>2)</sup>。

超硬合金は結合材料として用いられる Co の含有率により機械的特性が変化する。Co 含有率の減少とともに高硬度となる一方、靱性が低下するため、硬度と靱性の両立が望まれており、その解決手法の一つとして傾斜機能化があげられる。

ここでは、Co 含有率の異なる超硬粉末を適所に配置して、内部に硬さ分布を有する傾斜機能超硬合金モデルについて取扱う。粉末冶金法に分類される粉末積層圧粉法<sup>3)</sup>により作製手法、作製した金型モデルの特性について紹介する。

## 2. 硬さ分布を有する傾斜機能超硬合金モデルの作製方法

図 1 は傾斜機能超硬合金モデルの作製方法を示したものである。本作製方法は積層造形と切削加工および粉末成形技術を組合わせた複合プロセスである粉末積層圧粉法<sup>3)</sup>であり、粉末冶金法に分類される。以下に手順を示す。

- (a) CAD/CAM を用いてモデルの設計およびモデルを積層ピッチごとにスライスした断面軌跡データ (スライスデータ) を作成する。
- (b) 圧粉用のコンテナ金型内に一層分の超硬粉末を充填し、プレスで加圧し、薄板状の圧粉体 (本

稿では、厚さ 0.5~1.0mm) を作製する。そして、所定の厚さまで超硬粉末の充填、圧粉を繰り返す。また繰り返しの途中で Co 含有量の異なる超硬粉末に変更して、Co 含有量の異なる超硬粉末を積層圧粉する。

- (c) 必要であれば、作成したスライスデータに従い、エンドミルにより圧粉体をモデル部と非モデル部に分離する。(a)~(c) の工程を繰り返し、Co 含有率の異なる超硬粉末を適所に配置した圧粉体を作製する。

- (d) 圧粉体に焼結を施す。
- (e) モデルの完成。

WC-25mass%Co (平均粒径: 約 $5\mu\text{m}$ ) を用いて、積層圧粉時の圧粉圧を100MPaとした。また焼結は $\text{N}_2$ 雰囲気で最高温度約 $1,300^\circ\text{C}$  (液相焼結) を30分間保持した。

本稿では、超硬粉末にCo含有量の異なる二種類の超硬合金 WC-9mass%Co (平均粒径: 約 $3\mu\text{m}$ )、

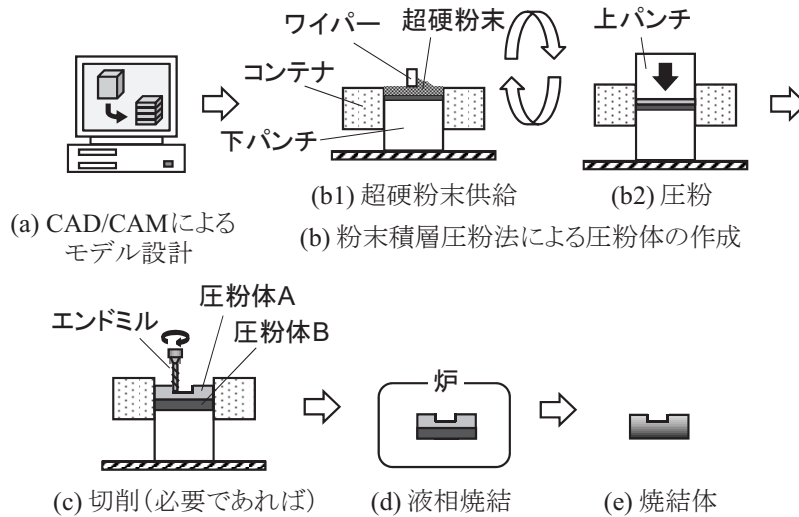


図1 硬さ分布を有する傾斜機能超硬合金型の作製手順

### 3. 傾斜機能超硬合金円盤モデルの作製

モデル上下方向に超硬粉末を順次積層・圧粉し、図2に示すような円盤モデルを作製した。図3は焼結を施した円盤モデルの硬さ分布の例である。ここで硬さ値は焼結体中央部を積層面に対して垂直方向に切断した断面での測定値であり、焼結時の収縮により厚さが圧粉時の約75%となっている。作製した焼結体の上下層間の接合は良好であり、硬さ値が傾斜分布していることが分かる。これは焼結時に積層面付近でWC-25mass%Co層からWC-9mass%Co層へCoの拡散が生じたためであり、上層、下層の

構成比率、構成材料の組合わせによりCoの拡散(硬さ分布)を制御できるものと考えられる。ここで、Co拡散範囲を硬さ値が傾斜分布する範囲(幅)として考え、硬さ測定値の誤差を考慮し、

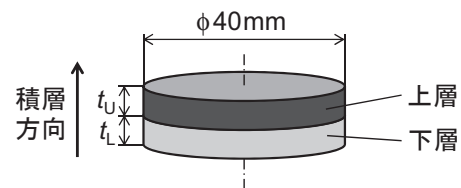


図2 傾斜機能超硬合金円盤モデル圧粉体の形状

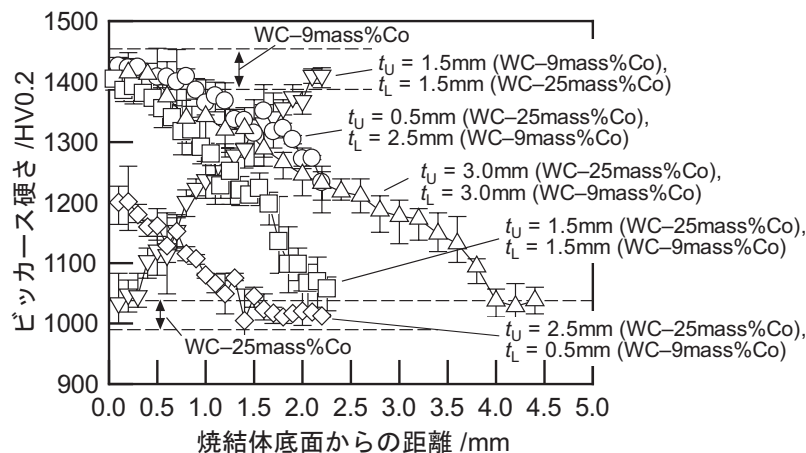


図3 傾斜機能超硬合金円盤モデルにおける硬さ分布 ( $t_U$ : 上層厚さ、 $t_L$ : 下層厚さ)

$$H_L + 0.05(H_U - H_L) \leq H \leq H_U - 0.05(H_U - H_L) \dots (1)$$

となる硬さHを有する範囲と定義する。ただし、 $H_U$ 、 $H_L$ はそれぞれ上層、下層材料の硬さである。図3より、いずれの場合も硬さ分布の傾斜範囲(Co拡散範囲)は2~3.5mmとなり、傾斜機能超合金モデルはCo拡散範囲より大きい形状に限定されることが示唆される。

次にCo拡散範囲を抑制し、硬さ分布の傾斜範囲を狭めるために圧粉体の一部に予備焼結を施した。一般に予備焼結は複雑形状の超硬製品を作製する際に超硬圧粉体に機械加工可能な強度を持たせるために行われている。ここでは、Co含有量の異なる超硬粉末を組合わせた圧粉体に対して一体焼結を施すのではなく、あらかじめ一方の超硬圧粉体に焼結(予備焼結)を施し、予備焼結体と圧粉体を重ね合わせ、再度、焼結(本稿では本焼結と呼ぶ)を施した。

図4は予備焼結温度と図2の円盤モデルにおけるCo拡散範囲の関係を示したものである。予備焼結は下層(WC-9mass%Co)に施し、最高温度20~800°C(固相焼結)、1,300°C(液相焼結)として、 $N_2$ 雰囲気中で30分間保持した。ここで焼結温度20°Cは焼結を施さず圧粉体の状態を意味する。予備焼結温度の上昇とともにCo拡散範囲は狭くなり、硬さ勾配は増大する。800°Cの予備焼結を施すことによって、Co拡散範囲を1.0mm以下にすることが可能であるが、800°C以上の予備焼結ではCo拡散範

圍のさらなる縮小幅は小さいことが分かる。

以上より、本作製手法により機械的特性が内部で連続的に変化する傾斜機能超合金の作製が可能であり、超硬粉末の積層順や各層の厚さにより、焼結体の硬さ分布の制御が可能であることが分かる。また超硬圧粉体の一部に予備焼結を施すことで、Co拡散を抑制し、硬さ分布の傾斜範囲を1mm以下にすることが可能である。なおここでは、二層構造のみを取り扱ったが、同様の作製方法により、三層以上の多層構造も作製可能である。

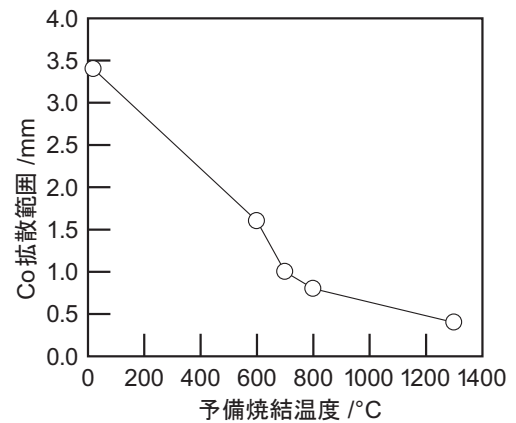


図4 傾斜機能超合金円盤モデルにおける予備焼結温度とCo拡散範囲の関係  
(上層: WC-25mass%Co、下層: WC-9mass%Co、 $t_U=t_L=3mm$ )

#### 4. 硬さ分布の数値解析<sup>4),5)</sup>

図5は傾斜機能超合金円盤モデル(図2)のCo濃度分布の数値解析結果より求めた硬さ傾斜範囲と

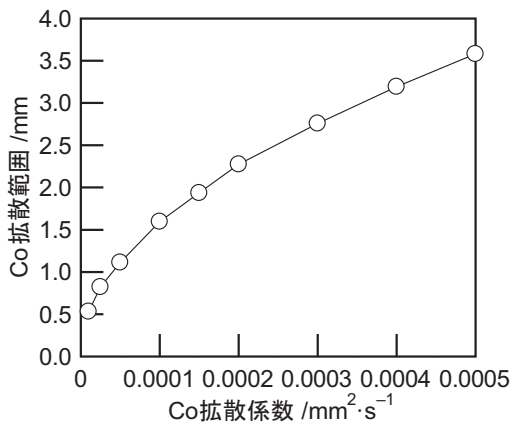


図5 傾斜機能超合金円盤モデルにおけるCo拡散係数とCo拡散範囲の関係(数値計算)  
(上層: WC-25mass%Co、下層: WC-9mass%Co、 $t_U=t_L=3mm$ )

圍のさらなる縮小幅は小さいことが分かる。Co濃度分布の数値解析では、下記の一次元非定常拡散方程式を用いて、Co拡散係数と本焼結後のCo濃度分布の関係について計算した。

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \dots (2)$$

ただし、fはCo質量濃度[mass%]、tは時間[sec]、 $\kappa$ はCo拡散係数[mm²·s⁻¹]、xは位置[mm]である。傾斜機能超合金円盤モデルの液相焼結では、Co拡散と焼結収縮が同時に生じるが、本計算では簡単のため焼結時のCo拡散を計算した後、拡散によるCoの移動を考慮して体積収縮量を算出し、焼結後のCo濃度分布を計算した。図5のCo拡散範囲を計算結果と実験結果(図4)と比較すると、800°Cの予備焼結を施すことで、Co拡散係数は予備焼結を施さない場合の1/10程度になることが分かる。

## 5. 傾斜機能超硬合金ダイスモデルの作製<sup>6)</sup>

冷間鍛造用金型への展開を目指して、図6に示す二層超硬合金ダイスモデルを作製した。コンテナ金型を想定して内層が高硬度となるように、外層にはWC-25mass%Co、内層にはWC-9mass%Coを用いて、別々に圧粉体を作製した後、外層、内層をクリアランス $C_L=0$ mmで重ね合わせ、本焼結(約1,300°C、30分)を施した。また内層には予備焼結(1,300°C、30分)を施したのも準備し、外層(圧粉体)とクリアランス $C_L=0$ mmあるいは2.5mmで重ね合わせた後、本焼結を施したのも作成した。ここで、図6は内層、外層ともに圧粉体の寸法であり、内層に予備焼結を施した場合は収縮が生じるため、内層の内径は約18mm、内層-外層の境界部の直径は約25mm、外層の外径は40mmの状態で大焼結を施した。

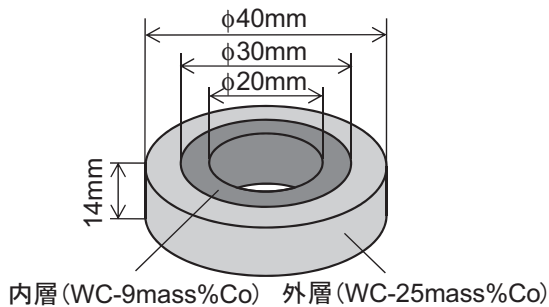


図6 傾斜機能超硬合金ダイスモデル圧粉体の形状

図7は $C_L=0$ mmで作製した二層超硬合金ダイスモデルの本焼結前後の外観写真である。いずれの焼結体も内層(WC-9mass%Co)に比べて外層(WC-25mass%Co)の方が大きく収縮し、内層-外層間で剥離が生じることなく接合されていることが分かる。図8は $C_L=0$ mmで作製した二層超硬合金ダイスモデルの半径方向硬さ分布である。ただし、硬さ値は積層面に対して垂直方向に切断した断面のモデル高さ方向中心の測定値である。いずれの場合も接合面付近で硬さ分布が傾斜分布し、硬さ分布の傾斜範囲は予備焼結なしのモデルでは約4.0mm、内層に予備焼結を施したモデルでは約1.5mmとなり、二層円盤モデルと同様の結果が得られた。

本稿で取り扱った外層(高Co)、内層(低Co)の組み合わせでは、本焼結中に生じる超硬合金の収縮は外層の方が内層より大きく、内層は締付けられるため、両層の接合が可能であ

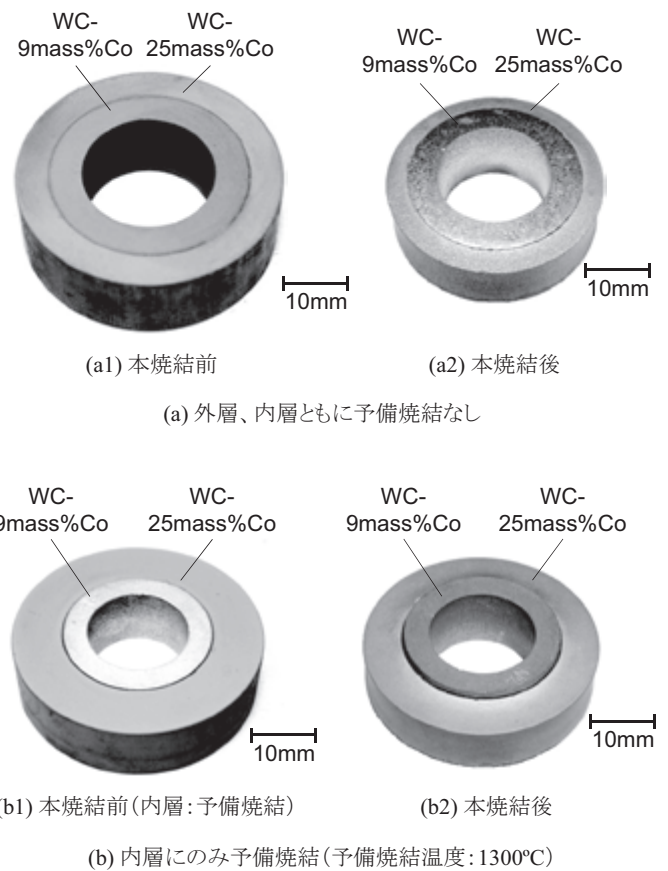


図7 傾斜機能超硬合金ダイスモデルの圧粉体と焼結体の外観写真

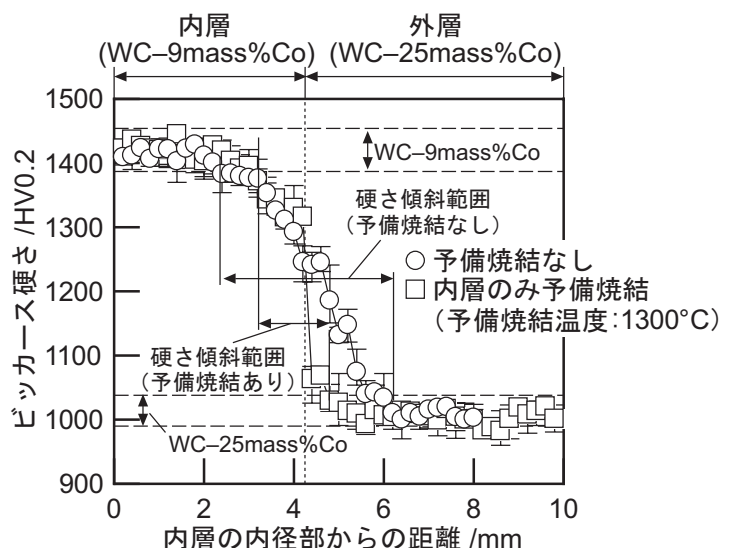


図8 傾斜機能超硬合金ダイスモデルにおける硬さ分布  
(本焼結前の外層-内層間クリアランス $C_L=0$ mm)

り、各層の収縮量の差による残留応力が生じる可能性がある。そこで、モデルの内周面および外周面に円周方向に沿って抵抗線ひずみゲージを貼り、ゲージ位置と180°離れた位置でモデルを外周面から半径方向に底面と垂直に切断した。切断による内周面および外周面の円周方向のひずみ変化量と各層の縦弾性係数からフックの法則により簡易的に残留応力を算出した。

図9は内周面および外周面での円周方向の残留応力である。内層に予備焼結を施したモデルでは焼結時の外層の収縮変形により内周面に圧縮の残留応力、外周面に引張りの残留応力がそれぞれ生じることが分かる。また本焼結前の内層-外層間クリアランスが小さい方が本焼結時に生じる外周層の収縮による内周層の締め付け力が大きくなるため、 $C_L = 0\text{ mm}$ の方が内周面に大きな圧縮方向の応力が残留した。

一般に冷間鍛造用の超合金ダイスは鋼製の補強リングへの圧入や巻付けリングにより、ダイス内周面に1~2 GPa程度の円周方向の圧縮応力を付与することでダイス内径面でのき裂発生を抑制し金型寿

命の向上を図っている<sup>7)</sup>。超合金ダイス単体の状態で内周面に圧縮の残留応力を付与することは超合金ダイスの付加価値を高めるものと考えられる。

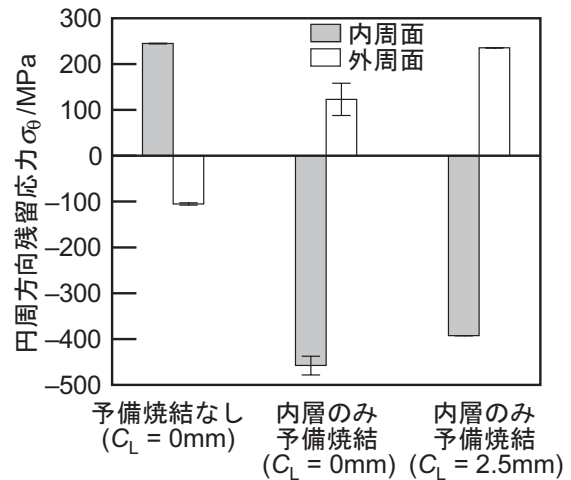


図9 傾斜機能超合金ダイスモデルの内周面、外周面に生じる円周方向の残留応力  
(外層: WC-9mass%Co、内層: WC-25mass%Co)

## 6. まとめ

本稿では、粉末積層圧粉法により硬さ分布を有する傾斜機能超合金型モデルを作製した結果を紹介した。作製された傾斜機能超合金金型モデルについて、超硬粉末の積層条件や焼結条件がCo拡散範囲(硬さ分布)や残留応力発生に及ぼす影響を示した。本研究については基礎研究段階であり、作製モデルの外観写真からも分かるように外周面の反りや高さ方向の不均一収縮等の形状制御が不十分であり、複雑形状品や小型品への対策が必要である。また残留応力については外層、内層の体積比率や超硬粉末の組み合わせによる影響を調べる必要があり、実用化に向けては多くの課題がある。

最後に超硬粉末の提供および焼結を実施していただきましたダイジェット工業(株)に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 森章司: 塑性加工工具用超合金の現状と今後, 塑性と加工, 49-564 (2008) 2-6.
- 2) 鈴木壽: 超合金と焼結硬質材料 (1986) 18-32, 丸善.
- 3) 水上良明, 小坂田宏造: 粉末圧粉積層と切削加工による超合金の三次元造形, 精密工学会誌, 69-8 (2003) 1154-1158.
- 4) 能瀬慎也, 塩見誠規, 小坂田宏造: 粉末積層圧粉法により作成した傾斜機能超硬モデルの硬さ分布, 平成17年度塑性加工春季講演会講演論文集 (2005) 81-82.
- 5) 松本良, 河合祐輔, 森章司, 小坂田宏造: 傾斜機能超硬モデルの硬さ分布に及ぼす予備焼結の影響, 第58回塑性加工連合講演会講演論文集 (2007) 209-210.
- 6) 松本良, 塩見誠規, 能瀬慎也, 河合祐輔, 小坂田宏造: 傾斜機能超合金型モデルの作製における硬さ分布の制御, 塑性と加工, 52-608 (2011) 1017-1021.
- 7) J. Groenbaek, T. Birker: Innovations in Cold Forging Die Design, Journal of Materials Processing Technology, 98-2 (2000) 155-161.