

# 焼結複合材料の曲げ加工性改善に関する研究

千葉大学 工学部 機械工学科  
 助教授 伊藤 操  
 (平成4年度研究開発助成 AF-92008)

## 1. 研究の背景と目的

近年、熱間静水圧加圧 (HIP) 処理が各種焼結材の緻密化による材質改善の手段として用いられるようになり、航空機部品や自動車部品に焼結材料の使用が拡大しつつある。ところで、焼結金属は本質的に第2相 (ポイド、介在物、析出物など) を含むため、溶製金属にくらべその加工性は必ずしも良くないため加工性改善が強く望まれている。この加工性改善には高い静水圧力を付加することが有効であることはよく知られており、多くの研究<sup>1)</sup> がなされてきた。しかし、直接静水圧力を付加した加工は、高静水圧を発生させるための装置が必要な上、高压容器の大きさの制限から大きな材料を加工できないなどの理由によりほとんど行われていない。そこで直接高い静水圧力を付加する代わりに、圧縮力を付加することにより加工性を増加させようとする方法<sup>2,3)</sup> も採られている。

そこで、本研究では、鉄粉末に銅あるいはタングステン粉末を混合させ、HIPにより作成した焼結複合材料を用いて、まずその機械的性質に及ぼす第2相の種類および体積率の影響および延性改善に及ぼす静水圧と圧縮力付加の影響を実験的に明らかにし、さらにそれらの結果に基づいて焼結複合材料単体に圧縮力を付加することおよび他の金属とクラッド化することによる曲げ加工性改善の効果を数値シミュレーションにより検討することを目的としている。

## 2. 実験

### 2.1 供試材料

焼結複合材料として第2相粒子を含む鉄基焼結材料を用いた。ここで、焼結材料の作製に使用した粉

末は母相として鉄粉末 (川崎製鉄製アトマイズ粉 KIP-301A, 平均粒径  $80 \mu\text{m}$ )、第2相として銅粉末 (福田金属製純銅粉 SRS-CU100, 平均粒径  $100 \mu\text{m}$ ) およびタングステン粉末 (東京タングステン, 平均粒径  $24 \mu\text{m}$ ) である。第2相として銅およびタングステンを選んだのは、延性やヤング率などの力学特性が母相の鉄とかなり異なるからである。

上記の粉末を表1に示す体積率になるよう秤量しセラミックス製ミルポットにより30分間攪拌混合したものを、ステンレス製シームレスパイプに入れ、油圧試験機により平均密度が約70%になるまで圧縮した。この粉末を充填したパイプを加熱脱気・密閉し、圧力176MPa、温度1123K、時間1.5hrでHIP処理を施し供試焼結材料を作製した。試験片は焼結材料を図1に示す形状に機械加工後、温度1173K、

時間1hr 真空焼鈍を施したものである。

図2にHIP後のパイプ断面の顕微鏡写真を示す。このように銅およびタングステン粒子はほぼ均一に分布し、ポイドと思われるものは観察されなかった。焼結材料の力学特性に強く影響を及ぼすポイドの有無については後で詳しく述べる。

なお、以後各焼結材料は第2相の体積率  $V_f$  で、たとえばタングステンを20%含む場合W20材、と表記する。ただし、鉄粉末100%より作製した試料はFe100材と記す。

表1 焼結材料の第2相体積率

Second-phase particle	Volume fraction $V_f$ /%
Copper (Cu)	1, 5, 10, 20
Tungsten (W)	1, 5, 10

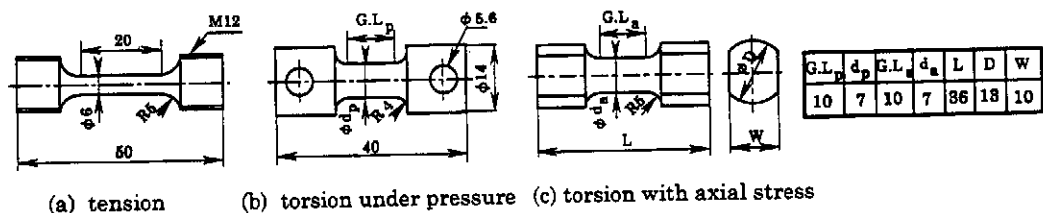
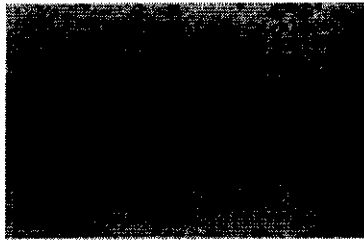


図1 試験片寸法



(a) Cu5 ( $V_f = 5\%$ )



(b) W10 ( $V_f = 10\%$ )

図2 焼結材料の微視組織

## 2.2 引張試験

供試材料の基本的力学特性を得るための引張試験は、5トン容量のインストロン型試験機を用い、クロスヘッド速度1mm/minで行った。

## 2.3 静水圧付加ねじり試験

静水圧下でのねじり試験は高圧万能試験装置<sup>4)</sup>を用い、ねじり速度は、試験片表面の相当塑性ひずみ速度が引張りのそれとほぼ等しくなるよう、0.04rpmで行った。試験圧力は98, 196 MPaとした。また、試験は途中何度か中断し、工具顕微鏡で表面のき裂長さを測定した。

## 2.4 圧縮力付加ねじり試験

圧縮の軸力を付加したねじり試験は、試作した多軸材料試験機を用いて、ねじり速度0.04rpmで行った。付加した圧縮力は試験中一定に保持した。また試験は、静水圧下ねじりの場合と同様、き裂長さを測定するため何度か中断した。ここで付加した圧縮応力 $\sigma_c$ は表2に示す値を採用した。

表2 付加した圧縮応力

Material	Compressive stress $\sigma_c / Y$ (Y: Yield stress of the material)
Fe100	0.50, 0.75
Cu20	1.00
W10	0.50, 0.75, 0.90

## 3. 実験結果

### 3.1 引張りにおける変形挙動

図3に供試材料の公称応力-公称ひずみ曲線を示す。焼結材料の変形挙動は、第2相粒子の種類、体

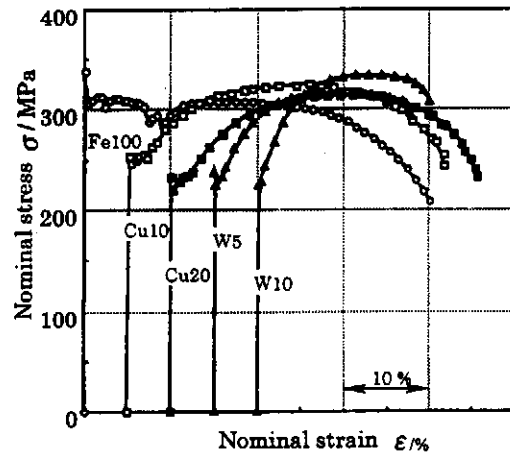


図3 供試材料の応力-ひずみ曲線

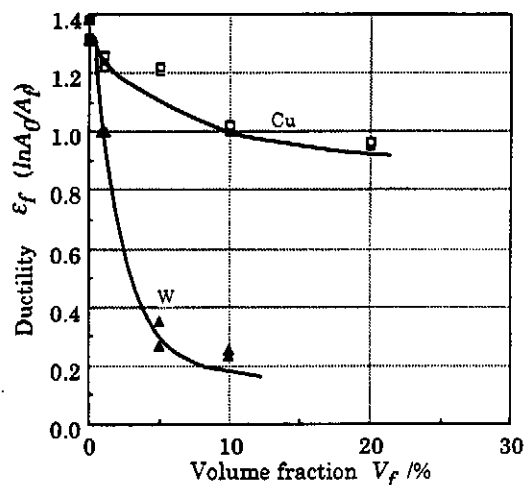
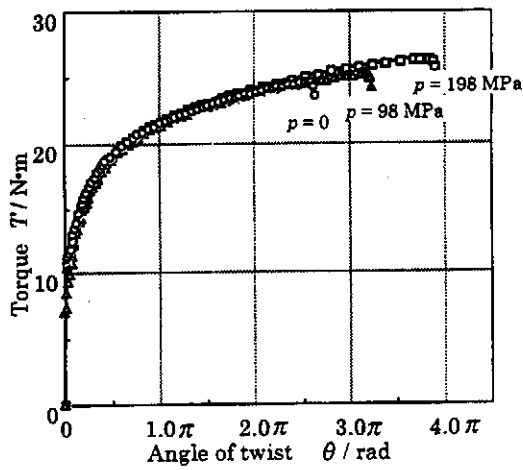


図4 破断ひずみの第2相体積率による変化

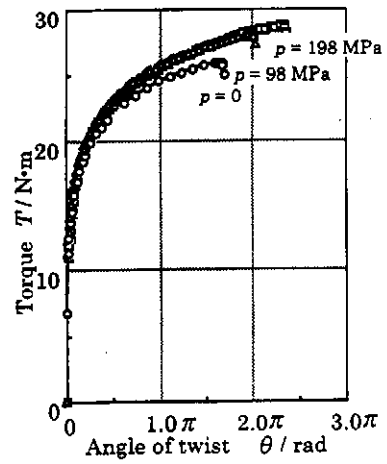
積率によりかなり異なっている。すなわち、Fe100材は明瞭な上降伏点および降伏点伸びを示し、加工硬化がほとんど無く、破断伸びも約35%と大きい。しかし、第2相を含むと、第2相の体積率の増加にともない、降伏伸びの減少あるいは消滅、加工硬化の増大、破断伸びの減少がみられる。この傾向は、W材で顕著である。

ところで焼結材料の力学的特性は初期ボイドの存在により強く影響を受けることが知られており、本実験試料もHIP処理によりボイドが完全に消滅したかが問題となる。しかし、微量のボイドを含む焼結鉄において、上降伏点および降伏点伸びが現れないという報告<sup>5)</sup>があり、本実験試料の場合図3の応力-ひずみ曲線からもHIP処理によりボイドはほぼ完全に消滅したと考えられる。したがって、以後の議論では初期ボイドの影響は考慮しない。

図4に破断ひずみと第2相体積率の関係を示す。破断ひずみは第2相体積率の増加にともない減少し

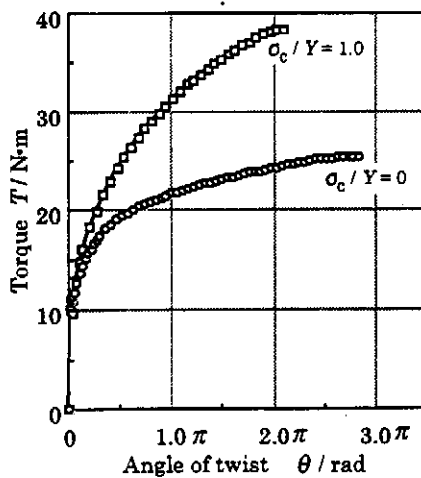


(a) Cu20

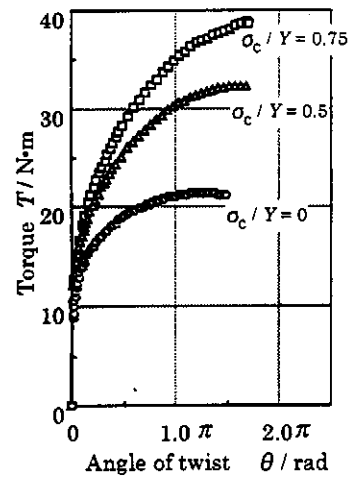


(b) W10

図5 トルクーねじれ角曲線（静水圧力付加ねじり）



(a) Cu20



(b) W10

図6 トルクーねじれ角曲線（圧縮力付加ねじり）

ているが、第2相の種類によりその低下量はかなり異なっている。この結果は、破断延性と第2相体積率の関係でしばしば引用される。銅基焼結材料を用いた Edelson ら<sup>6)</sup>の結果、すなわち、破断延性は第2相の種類によらず、体積率と一義的な関係にある、とは異なっている。これは、彼らは試料を焼結材料のスエージングと焼なましにより作製しており、この過程で第2相との界面はく離や初期ポイドが完全消滅していない可能性もあり、これらの影響が大きく現れたとも考えられる。

### 3.2 ねじりにおける変形挙動

(1) 静水圧力付加ねじりの場合 図5は、トルクーねじれ角曲線を、静水圧をパラメータとして示したものである。いずれの試料も、圧力とともに、破断までのねじれ角は増加している。

(2) 圧縮力付加ねじりの場合 図6は、トルクーねじれ角曲線を、圧縮応力 $\sigma_c$ をパラメータにして示したもので、圧縮力を付加することにより最大ト

ルクの値が増大し、破断時のねじれ角はW材では増加し、Cu材で減少している。このようにCu材で圧縮力付加により延性が低下したように見えるのは、圧縮力が大きくなると変形にともなう軸方向ひずみはかなり大きくなるからである。したがって、ねじれ角で延性の大小を比較することはできない。そこで、破断延性として破断時の試験片表面の相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p$ を用いると、いずれの材料も圧縮軸力の増加とともに破断延性は増加した。

### 3.3 破断延性増加に及ぼす静水圧応力の影響

前節で述べたように静水圧付加、圧縮力付加、いずれによっても破断延性は増加した。これは、ポイドの発生、成長・合体が高い静水圧応力により抑制されたためと考えられる。そこで、破断延性を静水圧応力 $\sigma_m (= -p)$ に対して整理すると図7のようになる。ただし、図4の結果より延性の大きく異なる、Fe100材、Cu20材およびW10材についての結果のみ示した。なお、図中には引張試験の結果も

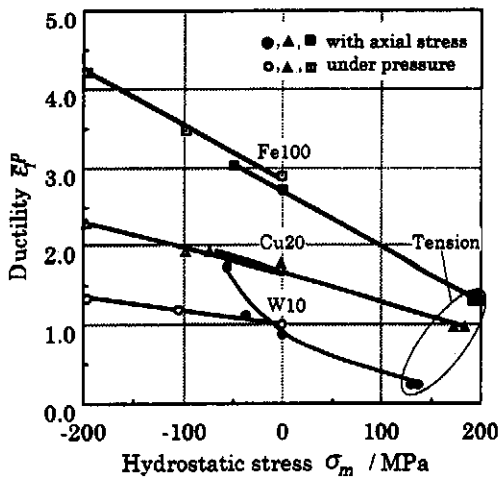


図7 破断延性の静水圧応力による変化

示してあるが、この場合の $\sigma_m$ はBridgmanの式より求めた。このように静水圧応力の減少にともなう延性増加は、W10材では、静水圧を直接付加するより圧縮力を付加するほうが大きい。一方、Fe100材およびCu20材では、静水圧付加と圧縮力付加はほぼ同じ直線上にあり両者の破断延性増加に対する効果にほとんど差はみられない。

### 3.4 き裂成長に及ぼす静水圧応力の影響

破断後の試験片表面を光学顕微鏡で観察したところ、W10材では第2相のタングステン粒子のまわりにき裂が観察され、その数は静水圧付加ねじりに比べ圧縮力付加ねじりのほうが少なかった。この観察結果は、圧縮力付加のほうがき裂の発生・成長を抑制するのに有効であることを示唆している。このき裂発生・成長抑制効果が、圧縮力付加と静水圧付加で異なることが、図7でみられた破断延性増加に及ぼす静水圧付加と圧縮力付加の違いとなって現れたと考えられる。

そこで、両ねじりでき裂長さを中断試験により詳細に測定し、き裂長さ $l$ とせん断ひずみ $\gamma$ の関係を式(1)で近似し、式(2)で示されるき裂成長速度 $D$ を定義した。

$$\gamma = Cl^n \quad \dots\dots (1)$$

$$D = \frac{dl}{l dy} \quad \dots\dots (2)$$

このき裂成長速度 $D$ と静水圧応力 $\sigma_m$ の関係を求めると図8のようになる。これより延性の大きいFe100材では、静水圧応力の減少にともないき裂成長速度はわずかに減少するが、静水圧付加と圧縮力付加の違いはほとんどみられないことがわかる。一方、比較的延性の低いW10材は、両者に明らかな違いが

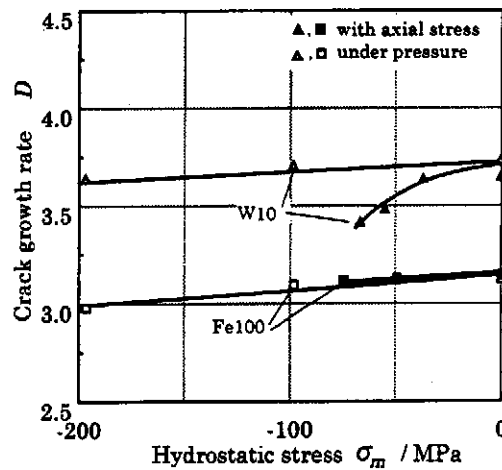


図8 き裂成長速度と静水圧応力の関係

みられる。すなわち、圧縮力付加の場合静水圧応力の減少にともなうき裂成長速度が急激に減少しているが、静水圧付加の場合その減少量は少ない。

このように低延性材料で、き裂発生・成長抑制効果が静水圧付加と圧縮力付加で異なる理由は次のように考えることができる。変形が進むと、試験片表面には微小ポイドの連結によりせん断き裂が発生する。圧縮力付加では圧縮力がポイドをつぶし、き裂の進展を阻止して最終破断を遅らせ、延性を増加させる。一方、静水圧付加ではポイドの発生、成長は抑制されるものの、試験片表面にいったんき裂が発生すると、き裂の内部にも静水圧は付加されているため、き裂の内部への進展に対する抑制効果はほとんどないと考えられる。

### 4. 圧縮力付加およびクラッド化による曲げ加工性改善の検討

前節までの結果より、延性の低いW10材は圧縮力付加が延性改善に有効であることがわかった。そこで圧縮力付加した曲げ試験を行ったが、HIP処理したパイプから比較的厚い試験片が採取できなかったため圧縮力を付加すると、試験片が座屈し曲げ加工ができなかった。また、拡散接合によるクラッド材の曲げも試みたが、接合強度が十分でないために曲げ加工途中で接合面がはく離した。

そこで、最も延性の低いW10材について、曲げ加工性改善に及ぼす圧縮力付加とクラッド化の影響を有限要素法により検討した。計算は図9に示すようなV曲げを想定し、平面ひずみ条件で行った。付加した圧縮力 $f$ はW10材の降伏応力 $Y$ の75%までとした。また、クラッド化は延性のあるFe100材により行い、W10材は常にポンチ側に配置した。ここで、Fe100材とW10材の板厚比は3:1, 1:

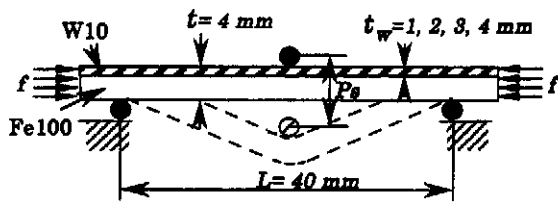


図9 計算モデルおよび寸法

1, 1:3の3種類で、クラッド板の厚さはいずれも4mmとした。なお、曲げ加工限界はW10材の相当塑性ひずみが引張の破断ひずみである0.20になった時と仮定し、このときのポンチストロークで評価した。

まず、クラッド化による曲げ加工限界時のポンチストロークの変化をクラッド比に対して図10に示す。このように、ダイス側の延性材料の板厚比を増加させることにより、限界のポンチストロークを増大させるのに有効であることがわかる。

つぎに、圧縮力付加による曲げ加工限界時のポンチストロークの変化を図11に示す。なお、縦軸は圧縮力を付加した場合の限界のポンチストロークを圧縮力を付加しない場合のそれと除した値を示している。このように限界のポンチストロークは材料の降伏応力の50%の圧縮力を付加すると約2倍、75%の圧縮力では約4倍も増大し、圧縮力付加も曲げ加工限界を向上させるのに有効であることがわかる。しかし、板厚が薄い場合、付加する圧縮力が大きくなると座屈を起こす可能性があり、この方法を実加工に適用するには、その点を考慮する必要がある。

## 5. 結 言

本研究では、HIP処理により作製した銅粒子あるいはタングステン粒子を含む鉄基焼結材料を用い、その曲げ加工性改善について検討した。得られた結果をまとめると以下ようになる。

(1) 破断延性は、静水圧付加、圧縮力付加いずれの場合も静水圧応力が代数的に減少するにつれて増加する。ただし、破断延性増加に及ぼす両者の効果は、延性が大きい材料ではほぼ同じであったが、延性が小さい材料では異なり、圧縮力を付加するほうが大きい。

(2) 静水圧応力の減少にともない、き裂成長速度は低下する。この低下量の静水圧付加と圧縮力付加による違いは、低延性材料で顕著であるが、延性の大きい材料ではほとんどみられない。

(3) 延性の低いタングステン粒子を含む焼結材料の曲げ加工性は、板の長手方向に圧縮力を付加するか、他の延性材料とのクラッド化により著しく改善する。

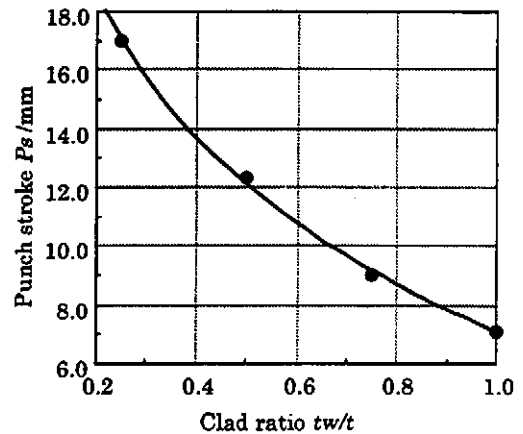


図10 限界ポンチストロークのクラッド比による変化

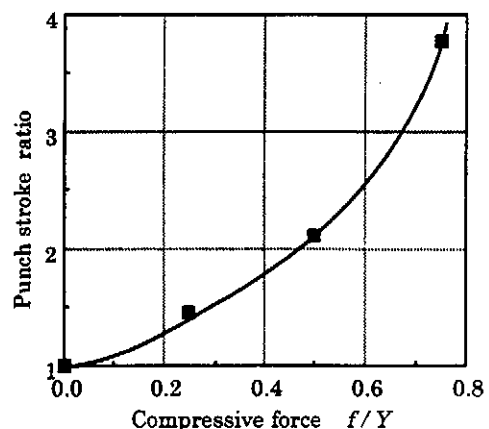


図11 限界ポンチストロークの圧縮力による変化

## 謝 辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成金の補助により行われたことを記し感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 例えば, Bridgman, P.W.: Large Plastic Flow and Fracture, (1952), McGraw-Hill Book Co., Inc.
- 2) Cupka V., 鈴木清, 中川威雄: V 曲げにおける Counter Press の効果, 23 回塑加連講論(1972), 79.
- 3) Itoh, M. Yoshida, F., Ohmorri, M. Hond, T. and Tai, Y.Z.: Proc. 6th ICM, (1991), 569.
- 4) 大森正信, 吉永芳豊, 川畑武, 実升義彦: 金属学会誌, 33-4 (1969), 509.
- 5) 大森正信, 吉田総仁, 澤幹夫, 黒木英憲: 塑性と加工, 26-294 (1985), 752.
- 6) 例えば, Edelsen, B.I. and Baldwin, W.M.: Trans. ASM 55 (1962), 230.