研 究

青銅切りくずを再利用した焼結摺動材料の機械的性質と摩擦摩耗特性

加藤 寛敬^{☆1}, 加戸 真樹^{☆1}, 田口 佑介^{☆1}, 鷲田 一夫^{☆2}^{☆1} 福井工業高等専門学校機械工学科, 〒916-8507 鯖江市下司町.^{☆2} 福井県工業技術センター, 〒910-0102 福井市川合鷲塚町.

Mechanical and Tribological Properties of Sintered Materials by Reuse of Bronze Chips

Hirotaka Kato^{☆1}, Masaki Kato^{☆1}, Yuusuke Taguchi^{☆1} and Kazuo Washida^{☆2}^{☆1} Dept. Mech. Eng., Fukui National College of Technology, Geshi-cho, Sabae 916-8507.^{☆2} Industrial Technology Center of Fukui Prefecture, Kawaiwashizuka-cho, Fukui 910-0102.

Received July 21, 2004

SYNOPSIS

Cu-Sn sintered materials were developed by utilizing bronze chips. The bronze chips, which were produced by dry-turning of BC3 bar, were mixed with electrolytic copper powder and atomized tin powder. The mixed powders were cold-compacted and then sintered without pressure. The limit of mixing amount of the chips to produce green compacts increased as the size of chips decreased. The effects of size and mixing amount of the chips on the density, microstructure and mechanical properties of the sintered specimens were investigated. It was found that the sintered density and mechanical properties increased as the mixing amount of chips increased up to 10mass%, but decreased slightly above 10mass%. There was no significant influence of size of chips on the sintered density. Cu-10mass% Sn-20vol% graphite sintered composites, which contained not only the bronze chips but also copper-coated graphite powder, showed low wear and friction under dry sliding conditions.

KEY WORDS

Cu-Sn sintered material, machined chip, mechanical property, tribological property, graphite

1 緒 言

地球環境問題の対策として、資源の再利用・リサイクル技術の重要性が増している。機械工場で生じた大量の金属切りくずは、通常再溶解して金属資源としてリサイクルされている。しかし、切削切りくずの一部は粉末状になっており、その切りくずをそのまま焼結材料用の原料粉末として使用できれば、さらなる有効な利用法となる。

これまでに、切削切りくずを焼結材料の原料として再利用する試みがなされている。切削切りくずは通常の焼結材料に用いられる粉末より粒子サイズが大きく、通常の粉末冶金用原料粉末と比べて成形性や焼結性が低下するという問題点がある。その対策として、切削切りくずを粉碎して再利用した研究や^{1,2)}、焼結鍛造^{3,4)}や熱間押し出し^{5,6)}などの工程を取り入れた研究が報告されている。しかしながら、切りくず粉碎などの後処理や、焼結鍛造や押し出しなどの塑性加工の導入は、実用上生産工程が増えるという問題がある。

そこで本研究では、次の3点を特徴として実施した。

(1) ドライ加工により得られた青銅切りくずを、洗浄や乾燥、

熱処理、粉碎などの後処理を全く行わないで、そのまま原料粉末とした点。

(2) 生産性の観点より「原料粉末→冷間金型成形→無加圧焼結」の工程により材料作成した点(ホットプレス・熱間押し出し・焼結鍛造などの工程はない)。

(3) 成形性・焼結性を確保するために、切削切りくずを通常の粉末冶金用の粉末と混合した点。なお、切りくずと混合する粉末は、遷移的液相焼結⁷⁾が可能なCuとSnの素粉末とした。

すなわち、青銅BC3から旋削により切りくずを作成し、これを粉末冶金用の電解Cu粉とアトマイズSn粉と混合して、切りくずを再利用したCu-Sn焼結摺動材料を開発した。今回は、切りくずのサイズや混合割合が及ぼす成形密度や焼結密度、焼結材の機械的性質や摩擦摩耗特性への影響について検討した。

2 試料および実験方法

切削切りくずは、外径40mmのTable 1に示す組成のBC3

(Cu-10Sn) 丸棒素材を旋盤で外丸削りにより作成した。旋削は、切削油を使用しないドライ切削を行った。用いた工具は、ETGN R/L2020-K33W 型外径一般切削用ホルダに、TNGG 160308R-ST型チップを取り付けたものである。この工具形状は、平行すくい角: -5° 、垂直すくい角: -5° 、前逃げ角: 5° 、横逃げ角: 5° 、前切れ刃角: 30° 、横切れ刃角: 0° 、コーナー半径: 0.8mm で、工具材質はサーメットである。切削条件は、切削速度 100m/min 、切り込み 0.01mm の一定条件において、送りを $0.025, 0.05, 0.1\text{mm/rev}$ と変化させることにより3種類の切りくず(A, B, C)を得た。Table 2に、今回得られた切りくずの外観を示す。切りくずの大きさ(長さ)は、A, B, Cそれぞれ $0.3\sim 0.7\text{mm}$, $0.5\sim 1.0\text{mm}$, $1.5\sim 3\text{mm}$ 程度で、切削送りが大きくなるにしたがって切りくずも大きくなっている。得られた切りくずは、洗浄や乾燥、熱処理、粉碎などの後処理を全く行わないで、そのまま原料粉末とした。

切りくずと混合した粉末は、福田金属箔粉工業(株)製の粒度-200メッシュ($\sim 75\mu\text{m}$ 相当)の電解銅粉(CE15)と、粒度-250メッシュ($\sim 60\mu\text{m}$ 相当)のアトマイズ錫粉(Sn-At-250)である。材料組成がCu-10mass%Snとなるようにこれらの粉末を混合した。切りくずの混合割合は $0\sim 80\text{mass\%}$ まで変化させた。また、焼結材の摺動特性を向上させるために、これらの粉末に(株)日鉱マテリアルズ製の鍍銅黒鉛粉(粒度-100メッシュ, PC-350)を添加したCu-10mass%Sn-20vol%黒鉛の組成の試料も作成した。この鍍銅黒鉛粉は、黒鉛粉末の周りに数 μm の銅が重量割合で50mass%コーティングしており、銅をコーティングしていない黒鉛粉を使用した場合よりも焼結材料の機械的性質や耐摩耗性が向上する⁹⁾ため、この粉末を使用した。

混合粉末は、室温にて面圧 400MPa で金型成形し、 $42\times 12\times 8\text{mm}$ の成形体を得た。成形体の焼結は、真空度 10Pa の減圧雰囲気、温度 1093K で 3.6ks 行った。得られた焼結材は、

焼結密度、ビッカース硬さ、3点曲げ強度、光学顕微鏡組織、摩擦摩耗特性について調査した。

3 実験結果および考察

3.1 成形密度

Fig.1に、切りくず混合割合が及ぼす成形密度への影響を示す。この図で矢印 $\downarrow$ は、それぞれの切りくずにおいて成形体を作成することが可能であった限界の切りくず混合割合を示している。今回の実験で最もサイズの小さい切りくずAでは、混合割合 $100\text{mass\%}$ 、すなわち原料粉末の全部が切りくずの場合では成形は不可能で、混合割合 $80\text{mass\%}$ まで切りくずを混合して成形体の作成が可能であった。切りくずAよりもサイズの大きい切りくずB, Cでは、成形可能な混合割合はそれぞれ $60\text{mass\%}$, $10\text{mass\%}$ と少なくなった。すなわち、サイズの小さい切りくずを用いた方が成形可能な切りくず混合割合を多くすることができた。なお、成形面圧を高めて 600MPa で成形しても成形可能な限界の切りくず混合割合は同じであった。また、切りくずの混合割合が増加するにしたがって成形密度は若干低下したが、切りくずの種類による影響はほとんど無かった。組成がCu-10mass%Snの試料とCu-10mass%

Fig.1 Effects of type and mixing amount of machined chips on green density. 「 $\downarrow$ 」 shows the limit of mixing amount of chips to produce green compacts.

Table 1 Chemical composition (mass%) of BC3.

Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Ni	P
Bal	9.48	0.08	2.32	0.02	0.19	0.17

Table 2 Appearance of BC3 machined chips.

Chips	A	B	C
Feed rate (mm/rev)	0.025	0.05	0.1
1mm			

Sn-20vol%黒鉛の試料を比較すると, Cu-10mass% Sn-20vol% 黒鉛の方が若干高い相対密度を示した。

3.2 焼結材料の密度および組織

Fig.2に, 切りくず混合割合が及ぼす焼結密度への影響を示す。まず材料組成がCu-10mass% Snについてみると, 切りくず混合割合が0 mass%, すなわち切りくずを混合していない試料では67%の低い相対密度を示し, この場合では焼結により試料が膨張した。3種類の切りくずとも, 切りくず混合割合が増加すると10mass%までは焼結密度が増加しそれ以上になると若干低下した。10mass%の混合割合では, 90%前後の高い相対密度を示した。一方, Cu-10mass% Sn-20vol% 黒鉛の焼結密度は, 切りくず混合割合の影響は少なく, どの混合割合でも75~80mass%の範囲内の相対密度が得られた。ま

Fig.2 Effects of type and mixing amount of machined chips on sintered density.

た, 両者の組成の材料において, 切りくずのサイズによる焼結密度への影響はほとんど無かった。

Fig.3に, 焼結材の光学顕微鏡組織写真を示す。Fig.3(a)は, 材料組成がCu-10mass% Snで切りくずを混合していない焼結材である。この組織では大きな気孔が観察され, このためにこの試料では焼結時に膨張し焼結密度が低くなったことがわかる。この大きな気孔は, Sn 粉の流出孔⁹⁾で, 焼結中の液相により発生したガスが内部に閉じ込められたため¹⁰⁾にできたと考えられる。

Fig.3(b)~(d)は, 材料組成がCu-10mass% Snの焼結材で, Fig.3(b)は切りくずAを20mass%混合した試料, Fig.3(c)は切りくずAを80mass%混合した試料, Fig.3(d)は切りくずCを5mass%混合した試料の組織を示す。Fig.3(b)をFig.3(a)と比較すると, 切りくずAを混合すると大きな気孔は無くなり, 気孔の数も少なくなった。この理由についてはよくわからないが, 切りくずを混合すると切りくずが骨格となって焼結中のガスが抜けやすくなったためと考えられる。また, Fig.3(b)をみると, 長さ0.3mm程度の切りくずの形跡と思われる組織が認められ, 切りくずとその周りの粉末の境界には未接合部や小さい気孔が存在していたが, 切りくずが周りの粉末と接合している部分も観察された。この接合している部分は, 焼結時に切りくずの表面にCu-Sn液相が濡れて接合してできたと考えられる。また, 遷移的液相焼結では液相の量は十分でないために切りくずとの接合は完全にならなかったと考えられる。

切りくずAを80mass%と多く混合した焼結材(Fig.3(c))では, 20mass%混合した焼結材(Fig.3(b))と比べて気孔が大きくなっているが, 切りくずの境界は認められなくなった。切

Fig.3 Microstructures of sintered specimens. (a) Cu-10mass% Sn, without chips (b) Cu-10mass% Sn, chip A, 20 mass% (c) Cu-10mass% Sn, chip A, 80 mass% (d) Cu-10mass% Sn, chip C, 5 mass% (e) Cu-10mass% Sn-20vol% Graphite, without chips (f) Cu-10mass% Sn-20vol% Graphite, chip C, 10 mass%.

Fig.3(e),(f) は、材料組成が Cu-10mass%Sn-20vol% 黒鉛の焼結材で、Fig.3(e)は切りくずを混合していない試料、Fig.3(f)は切りくずCを10mass%混合した試料の組織を示す。これらの組織で、扁平状の灰色の部分は黒鉛である。この組織は、粉末圧縮の成形方向と平行な試料断面で観察しており、黒鉛が扁平状になったのは粉末成形時の圧縮により黒鉛粉が押しつぶされたためと考えられる。Fig.3(e)とFig.3(f)を比較すると、Fig.3(f)では切りくずの形跡が認められるものの、両者の組織には大きな差はなかった。

Fig.4に、焼結材の機械的性質に及ぼす切りくず混合割合の影響を示す。Fig.4(a)はピッカース硬さ(試験荷重0.98N)を、Fig.4(b)は3点曲げ強度(下部荷重点間距離20mm, 上部荷重点負荷速度0.6mm/min)を示している。両者とも焼結密度と同じような傾向の結果が得られた。すなわち、材料組成がCu-10mass%Snの焼結材では、切りくず混合割合が増えると、混合割合が10mass%までは機械的性質が向上し、それ以上になると若干低下した。組成がCu-10mass%Sn-20vol%黒鉛の焼結材では、切りくずの混合割合の影響は少なく、Cu-10mass%Snの焼結材と比較すると黒鉛添加による強度低下が顕著であった。また、両者の材料組成において、切りくずのサイズによる影響は少なかった。焼結材の機械的性質は、焼結密度の影響が大きかったと言える。

焼結材料の摩擦摩耗特性は、固定したプレート試験片に回転するシリンダ試験片の端面を押し付けて摩擦摩耗を行うシリンダオンプレート摩耗試験⁹⁾により評価した。プレート試験片は、焼結材をフライス加工により7×10×42 mmの寸法に仕上げて用い、シリンダ試験片には、炭素鋼 S45C 焼きならし材を旋盤加工により外径19.6 mm、内径16 mm、長さ20 mmの寸法に加工したものを用いた。摩擦試験は、油潤滑なしの大気中の室温で、試験荷重127 N、摩擦速度0.27 m/s、試験時間1800 sの同一条件で行った。

Mixing amount (mass%)	A (Cu-10Sn) [mm]	B (Cu-10Sn) [mm]	C (Cu-10Sn) [mm]	A (Cu-10Sn-20vol%Gr) [mm]	B (Cu-10Sn-20vol%Gr) [mm]	C (Cu-10Sn-20vol%Gr) [mm]
0	0.25	0.25	0.25	0.03	0.03	0.03
10	0.17	0.18	0.20	0.02	0.02	0.02
40	0.20	0.23	0.20	0.00	0.01	0.01
80	0.26	-	-	0.03	-	-

Figure 10 is a line graph showing the friction coefficient (Y-axis, ranging from 0.0 to 1.0) versus the mixing amount of machined-chips / mass% (X-axis, ranging from 0 to 100). The graph compares the friction coefficient for three different chip compositions: A (Cu-10Sn), B (Cu-10Sn), and C (Cu-10Sn). The data points are plotted for three different mixing amounts: 0, 10, and 40 mass%.

Mixing amount of machined-chips / mass%	A (Cu-10Sn)	B (Cu-10Sn)	C (Cu-10Sn)
0	0.68	0.38	0.38
10	0.68	0.22	0.42
40	0.65	0.29	0.38

2005年2月

4 ま と め

本研究では、青銅 BC3 から旋削により切りくずを作成し、これを通常の粉末冶金用の電解 Cu 粉とアトマイズ Sn 粉と混合して、切りくずを再利用した Cu-Sn 焼結摺動材料を開発した。特に、切りくずのサイズや混合割合が及ぼす成形密度や焼結密度、焼結材の機械的性質や摩擦摩耗特性への影響について検討した。得られた結論は、次の通りである。

- (1) サイズの小さい切りくずを用いた方が、成形体の作成が可能な切りくずの混合割合を多くすることができた。
- (2) Cu-10mass% Sn 焼結材において、電解 Cu 粉・アトマイズ Sn 粉に BC3 切りくずを混合すると、混合割合が 10mass% までは焼結密度・機械的性質が向上し、それ以上になると若干低下した。
- (3) 切りくずを混合した焼結材の組織では、切りくずの形跡が認められ、切りくずとその周りの粉末の境界には未接合部や小さい気孔が存在していたが、切りくずと粉末が接合している部分も観察された。この接合している部分は、焼結時に切りくずの表面に Cu-Sn 液相が濡れて接合してできたと考えられる。
- (4) Cu-10mass% Sn-20vol% 黒鉛焼結材では、切りくずの混合やその割合による焼結密度・機械的性質・耐摩耗性への影響はほとんどなかった。摩擦係数はサイズの最も小さい切りくずを用いた焼結材で低くなった。
- (5) Cu-10mass% Sn, Cu-10mass% Sn-20vol% 黒鉛焼結材の両者で、焼結密度・機械的性質・耐摩耗性に及ぼす切りくずのサイズによる影響はほとんど見られなかった。したがって、切りくずのサイズにバラツキがあっても再利用の可能性はある。

文 献

- 1) P.Vernia: "Convert your chips to powder", Machinery, 79(1973) 52-55.
- 2) K.Hanawa, K.Akechi, Z.Hara and T.Nakagawa: "Graphite Morphologies in Sintered Products of 1.7%C Cast Iron Swarf Powder from Nodular Cast Iron", J.Japan Inst. Metals, 46(1982)551-554.
- 3) T.Nakagawa and F-S.Dai: "Powder Forging of Swarf Powder Preform Compacted by Briquetting Machine", Seisan Kenkyu, 33(1981)282-285.
- 4) T.Nakagawa and F-S.Dai: "Manufacturing of Brass Billet for Powder Forging", Seisan Kenkyu, 34(1982)259-262.
- 5) M.Mabuchi, K.Kubota and K.Higashi: "Mechanical Properties of AZ91 Magnesium Alloy Processed from its Machined Chips", J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, 40(1993)397-400.
- 6) Y.Chino, M.Mabuchi, H.Iwasaki, A.Yamamoto and H.Tsubakino: "Solid-State Recycling of Magnesium Alloy In-House Scraps", Materia Japan, 43(2004)270-274.
- 7) R.M.German: Liquid Phase Sintering, Uchida Rokakuho Publishing, (1992)201.
- 8) H.Kato, M.Takama, K.Washida, Y.Sasaki and S.Miyashita: "Mechanical and Wear Properties of Sintered Cu-Sn Composites Containing Copper-Coated Solid Lubricant Powders", J. Jpn. Soc. Powder and Powder Metallurgy, 50(2003)968-972.
- 9) T.Watanabe: "Studies on the Sintering Process and Characteristic of Oil-Impregnated Bearing", J. Jpn. Soc. Powder and Powder Metallurgy, 12(1965)219-230.
- 10) H.Mitani: "Abnormal Expansion of Cu-Sn Compacts during Sintering", J. Jpn. Soc. Powder and Powder Metallurgy, 8(1961) 43-48.