

シンバルの減衰特性に対する金属組織の影響

小川 渉¹ 菖蒲 敬久² 筧 瑞恵³ 鞍谷 文保⁴ 小出 俊雄⁵
文珠 義之¹ 水田 泰次¹

¹株式会社 大阪合金工業所

²国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

³福井県工業技術センター

⁴福井大学

⁵株式会社 小出製作所

J. Japan Inst. Met. Mater.

© 2019 The Japan Institute of Metals and Materials

Effect of Metal Structure on Damping Characteristics of Cymbals

Wataru Ogawa¹, Takahisa Shobu², Mizue Kakehi³, Fumiyasu Kuratani⁴, Toshio Koide⁵, Yoshiyuki Monju¹ and Taiji Mizuta¹

¹Osaka Alloying Works, Co., Ltd., Fukui 910-3138

²Japan Atomic Energy Agency, Sayo-gun, Hyogo 679-5148

³Industrial Technology Center of Fukui Prefecture, Fukui 910-0102

⁴University of Fukui, Fukui 910-8507

⁵Koide Industrial Co. Ltd., Osaka 547-0006

Cymbals are percussion musical instruments with a simpler structure than other musical instruments. Therefore, their material composition basically decides the sound quality and decay time rather than the skill of the player. In this study, specimens of cymbals to which Titanium, Zirconium and Iron were added were prepared. From the difference of diffraction rings by synchrotron radiation X-rays, the crystal structure of the specimens of cymbals prepared by various manufacturing processes was analyzed in order to investigate the relationship between the crystal structure associated with the material and manufacturing process used and the damping of the sound of cymbals. As a result, it was found that the changes in the crystal structure were due to the manufacturing process used. In addition, it was clarified that the changes affected the damping of the sound of cymbals. [doi:10.2320/jinstmet.J2018056]

(Received October 5, 2018; Accepted January 8, 2019; Published February 18, 2019)

Keywords: X-ray scattering, body musical instrument, cymbal, damping, synchrotron

1. 緒 言

シンバルは体鳴楽器と呼ばれ、アジアを中心に紀元前3000年以前から作られている¹⁾。シンバルの加工工程は、まず円形にカットされた素材に熱間プレスで「ベル」と呼ばれる突起部分を成型し、ヘラで押しながら成形する「ヘラ絞り加工」で全体の形状を整形する。その後、ハンマーで無数に叩いて音を調整するハンマリング加工工程および旋盤加工で厚みを調整する音溝加工を経て出来上がるが、シンバルの基本となる音は形状およびその合金成分で変わる。その主成分はCuとSnで、特にCuに20 mass%Sn以上含まれているものは通称ベルメタルと称され、シンバルの他にもチャーチベルなどの様々な体鳴楽器に使用されており、古くからその組成は変わっていない。その理由は、シンバルを製造するメーカーは組成に関して保守的であり、シンバルの最大手メーカーでは代々受け継がれてきた門外不出の製法であるため、組成を約500年間変えることはなかった。ゆえに組成が音を

変化させることに関しては、これまであまり研究されなかった¹⁾。

筆者らは国内唯一のシンバルメーカーである(株)小出製作所に対して、シンバル用の素材の開発を10年以上前から実施するとともに、供給を行っている。本研究の目的は、シンバルの音において重要な要素となる音の減衰時間と材料の金属組織の相関を明らかにすることにより、音を制御するための材料設計及び加工工程設計の指針を得ることである。

これまでに、加工工程において素材のSn濃度が上がると加工性が悪くなることを経験的に明らかにしている。一方で、Sn濃度を高くすると音が変わることも経験的に明らかにしていたが、このままでは加工が非常に難しかったことから、21~23 mass%SnとSn濃度を高くしつつZr、TiおよびFeなど第3・第4元素を添加することで加工性を向上させる材料開発を行ってきた。この結果、主添加元素としてTiを添加(Cu-23 mass%Sn-0.3 mass%Ti-0.03 mass%Zr、以後Cu-23Sn-0.3Ti-0.03Zrと記す)することにより音の減衰が遅いシンバル、Zrを添加(Cu-21Sn-0.1Zr-0.03Fe)することによ

り音の減衰が早いシンバルをそれぞれ製作することに成功した。特に、後者の減衰が早いシンバルは、演奏のピッチが年々速くなっているドラム用としてニーズが高まっている。故に、これら減衰の原因を解明することで、クラシック向けの静かな音やロック向けの明るい音などもっと多様なジャンルのニーズに答えられるシンバルの材料・加工工程設計の指針を得られることが期待される。

2. シンバルの構造および製造工程

Fig. 1 にシンバルの基本構造と各部位を示す。シンバルは中央の突起部分をベル、外周をエッジ、およびそれ以外の部分をボウと呼ぶ。シンバルは、「①熱間加工上がり」の薄い円板を、「②熱間プレス加工」でベルを成形し、全体を「③ヘラ絞り加工」して成型される。この時、真ん中の熱間カップ成形部分は焼入れで少しゆがむため、ヘラ絞り加工でゆがみを取っている。その後、音を調整するための調整加工工程に入る。本研究では、素材と音との関係を議論するため、小出製作所において成形加工であるヘラ絞り加工後のシンバルを作製し、Zr や Ti 等の添加元素がシンバルの金属組織に与える変化を調査した。

3. 実験方法

3.1 試験片

試験片は、Zr および Ti の添加効果、特に減衰が早くなる理由を調査するため、Zr を添加していない標準試験片 Cu-21Sn-0.03Fe (以下 21F とする) を含め、Cu-21Sn-0.1Zr-0.03Fe (以下 21ZF とする) および Cu-23Sn-0.3Ti-0.03%Zr (以下 23ZT とする) の 3 種類の組成のものを準備した。ここで Ti を添加した試験片のみ Sn 濃度を 23 mass% としているのは、

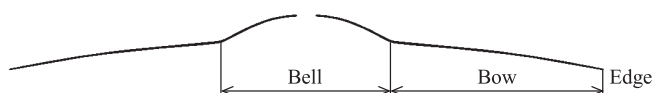


Fig. 1 Cross section of a cymbal.

音の減衰の早さを制御するためであるが、23 mass% の Sn 濃度のブロンズはほとんど伸びず、ヘラ絞り加工で割れてしまうため、加工性を向上させる目的で Ti を添加している。Fe を添加しているのは硬度を上げるためである。溶解・鑄造法としては、Zr や Ti が活性金属であること、および Sn の逆偏析を抑えるため、溶湯を坩堝ごと水で冷却し鑄造する水田式溶製法を用いた²⁾。鑄造したビレットを切断し直径 430 mm、厚み 1.6 mm まで 730°C で熱間圧延により加工したあと、730°C から水焼入れをそれぞれの組成で行った。その後、①熱間圧延上りの 1 枚を残し、(株)小出製作所において②熱間カップ成型後、③冷間ヘラ絞り加工の加工を行い、それぞれの加工工程毎に 20 mm 角の試験片を切り出した。また、ベル部およびボウ部で組織の違いがあるか検討するため、ベル部では中心から 60 mm、ボウ部では中心から 120 mm の位置でそれぞれ 2 枚ずつ試験片を切り出した。したがって試験片の枚数は、各素材が 21F、21ZF および 23ZT の 3 種類で、1 種類につきそれぞれ 5 枚、合計 15 枚である。Table 1 に試験片の種類を示す。また、加工過程③については、音の周波数分析を行うため、もう一枚ずつ $\phi 406$ mm \times 1.3 mm で Bell 部の直径が 120 mm のシンバルを作製して、音の評価を行った。

3.2 音の周波数分析

添加した Ti および Zr がシンバルの音響特性にどのような影響を与えるか調査するため、音の周波数分析を行った。一般的には叩く位置によって励起される振動モードが変わる。そのため、シンバルを外縁から 20 mm で叩く力を 40N と一定にした。解析条件としては、周波数の範囲を 40 kHz、サンプリング点数を 16384 点とし、スペクトログラムによる周波数解析を行い評価した。また、どの素材のシンバルに関しても 4 kHz 近傍の周波数のピークが大きく他の周波数より読み取り易かったため、FFT タイムトレンド解析結果から 4 kHz 付近のピークをもとに読み取り、ヒルベルト変換を用いて減衰比 τ を算出した。

$$\tau = D / (8.68 \times 2\pi f) \quad (1)$$

ここで、8.68 は dB 値を変換するための定数値、 τ は減衰比、

Table 1 Types of specimens and collection part (○ mark).

Collection part	①Hot rolling	②Hot pressing		③Cold Spinning		④A cymbal
	No distinction of Bell and Bow	Bell	Bow	Bell	Bow	
21F (Cu-21Sn-0.03Fe)	○	○	○	○	○	○
21ZF (Cu-21Sn-0.1Zr-0.03Fe)	○	○	○	○	○	○
23ZT (Cu-23Sn-0.3Ti-0.03Zr)	○	○	○	○	○	○

D は音の減衰度で 1 s 当たりの減衰量 (dB 値) で, 1/3 オクターブ分析で得られたスペクトルの波形崩落から求めた. また, f はそのスペクトルの周波数である. 今回ほどの組成のシンバルに関しても時間に比例して減衰しているため, D は 2.5 s 後および 5 s 後の音圧の値がどのくらい小さくなっているかをグラフから読み取り算出した. また, τ は減衰比で減衰振動の減衰特性を表す量 (%) である. この τ の値が小さいほど減衰は遅いこと, すなわち音が長くなることを示している.

3.3 組織観察および硬度測定

試験片を樹脂埋めして研磨した後, 硝酸の希釈水を用いてエッチングし, 日本電子 (株) 製の電子線マイクロプローブアナライザー (EPMA JXA-8500F) を用いて相がどのように存在するかを確認するため組織観察を行った.

また, 材料評価の一環として, (株) 明石製作所製のビッカース硬度計を用いて 20N の力で硬度を測定した. ここで, シンバルの組織は 2 相であることから, 比較のため, 単相の α 相として Cu-15 mass% Sn, β 相として Cu-24 mass% Sn の試験片を作製し硬度評価を行った. なお, β 相は 720°C で 5 min 熱したのち水焼き入れを行い, 組織を凍結させて作製した.

3.4 金属結晶構造解析

3.1 で切り出した試験片を用いて, シンバルの組成および加工工程毎で金属の転位密度および結晶構造を解析した. 実験は, 大型放射光施設 SPring-8, BL19B2 で実施した. Fig. 2, 3 に SPring-8 での測定の様子を示す. 放射光 X 線のエネルギーは, Si(311) 面から得られる 72 keV を使用した. 本エネルギーを使用した理由は, シンバルから切り出すため表面がいびつであることから, 表面解析よりも, 透過で材料内部を含めた平均的な結晶構造の評価が, 音の変化との相関を見出せると考えたことによる. BL19B2 の大型 X 線回折計の中央に試験片をセットし, 回折計の上部に整備した入射スリットにより 0.2 mm × 0.2 mm に成形された X 線を試料に照射した (Fig. 2). 試験片からの透過回折 X 線を, 試験片から 952.5 mm 離れた位置にセットした 400 mm × 200 mm のイメージングプレート (以下 IP) で 3.6 ks 露光し, 試験片からの回折リングを計測した (Fig. 3). これらの一連のデータの 1 次元変換には Fit2D を使用した³⁾.

4. 実験結果

4.1 21F, 21ZF および 23ZT の音の周波数解析結果

Fig. 4 に 21F, 21ZF および 23ZT のスペクトログラムによる音の周波数解析結果を示す. これは, どの周波数帯域の音成分が響いているのか, 残響に影響する周波数成分を調べるために解析した結果で, 白から黒に変わると音が無くなることを示している. 21F では, 特に 2~6 kHz 付近の音が鳴り続く. 21ZF では 2 kHz および 4 kHz 付近の音でピークが高くなっているが, 4 kHz 以上ではピークがほとんどない. 一方, 23ZT では全域で鳴っており, 他の組成に比べると全体

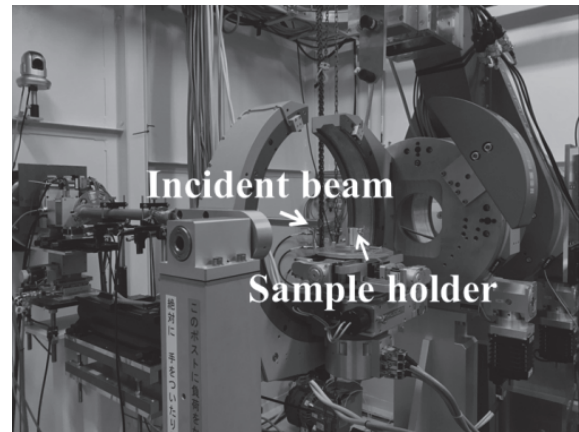


Fig. 2 Set-up around specimen on X-ray diffractometer.

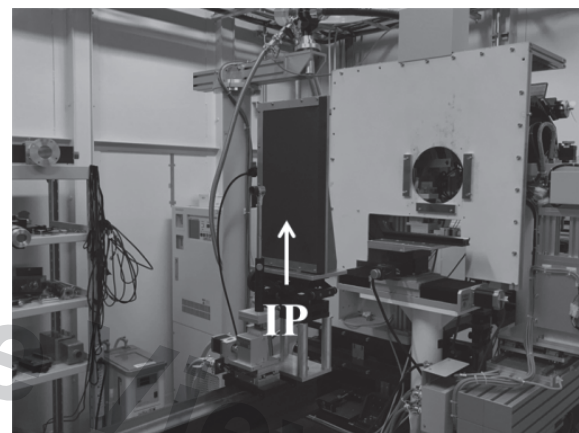


Fig. 3 Area detector (Image plate) behind specimen.

的に音の減衰時間が長い. また, 4 kHz, 10 kHz 付近の音が大きく鳴っている.

次に 3 種類ともピークが大きくなっている 4 kHz 付近に着目し, それぞれの減衰比を算出した. その結果を Table 2 に示す. 減衰比は大きいほど, その周波数の減衰時間が早いことを示している. 解析の結果, 小さい順で 23ZT → 21F → 21ZF となっており, 23ZT と 21ZF では 3 倍の差がある. 23ZT は減衰が長く, 21ZF では減衰が極端に短く, 21F はその中間となった. この結果から, 組成の違いがシンバルの音に大きく影響を与えていることがわかる. そこで, シンバルの音の減衰に与える影響を解析するため, 組織観察, 硬度測定及び X 線回折による結晶構造解析を行い評価した.

4.2 組織観察結果

Fig. 5 に Cu-Sn 合金の 2 元系状態図を示す⁴⁾. このシンバルの成分では α , β 相の近くに γ 相および ϵ 相が存在することがわかる. また, 硬くて脆い δ 相も存在する. この δ 相があるとそこを起点に簡単に割れが発生してしまうため, シンバルにおいてはヘラ絞り加工ができないことから, 720°C の水焼き入れにより δ 相を高温相である β 相に相転移させ, 組織を β 相に凍結させる必要がある.

Fig. 6 に, 21F, 23ZT の組織観察の結果を示す. 2 次電子像 (以下 SEI) で観察すると主に β 相 (灰色) と α 相 (黒) の 2 相である. α 相は初晶として dendrite 状に晶出するが, ヘ

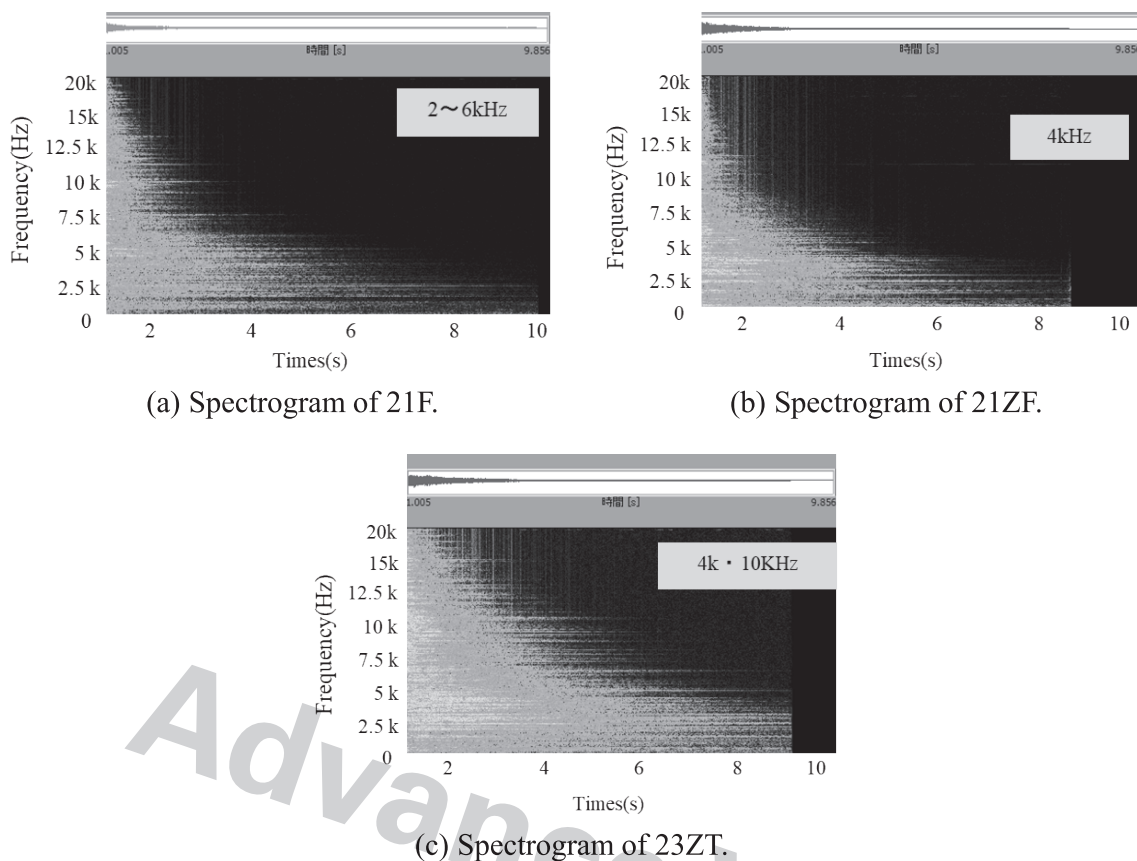


Fig. 4 Frequency analysis results by spectrogram of 21F, 21ZF and 23ZT.

Table 2 Calculation results of the damping ratios τ of 21F, 21ZF and 23ZT.

Types of specimens	21F	21ZF	23ZT
Sound pressure after 2.5 seconds	59.29dB	71.29dB	63.99dB
Sound pressure after 5.0 seconds	37.41dB	24.96dB	46.69dB
D value	8.752	18.532	6.920
Damping ratio τ (%)	0.00401	0.00923	0.00317

ラ絞り加工後の組織を見ると α 相が $30\sim 100\ \mu\text{m}$ の大きさで分散していることがわかる。これはヘラ絞り加工により初晶のデンドライトが崩されて細くなったと推察される。また、 β 相を見ると針状組織が見られるが、これは β 相のマルテンサイト相の β' 相である^{5,6)}。したがって、Sn 濃度が 21% だと主に α 相、 β 相および β' 相の 3 相ということがわかる。次に 23ZT で観察すると、この組織は主に β 相で、 α 相は見られない。また、21F 同様、2 次電子像で β 相を見るとマルテンサイト相である β' が観察される。このことから、23ZT は β 相および β' 相の 2 相で構成されているということがわかる。

Fig. 7 に 21ZF の反射電子像(以下 COMP)による組織観察を示す。主な組織は 21F と同様、 α 相、 β 相および β' 相の 3 相から構成されている。21ZF ではこの組織に加え、拡大す

ると白い部分が存在する。これは数 μm の大きさの Zr 炭化物であり、本測定から Zr 炭化物が分散しているのが観察された(Fig. 8)。21F と 21ZF で減衰比が 3 倍になったのは、この Zr 炭化物が何らかの影響を与えていると推察される。

4.3 硬度測定結果

音響と硬度との相関を明らかにするため、硬度測定を行った。Table 3 に加工工程ごとに切り出した 21F、21ZF および 23ZT の硬度測定結果を示す。また合わせて測定した単相材の硬度を示す。 α 相および β 相の硬度は、それぞれ約 110 HV、約 310 HV となり、 β 相の方が約 3 倍硬度が高い。

一方、どの素材でもヘラ絞り加工前までは、硬度は変わらない。これは、熱間上がりおよび熱間プレス後は割れる原因となる δ 相の析出を抑えるために $720\sim 730^\circ\text{C}$ での 2 次再結

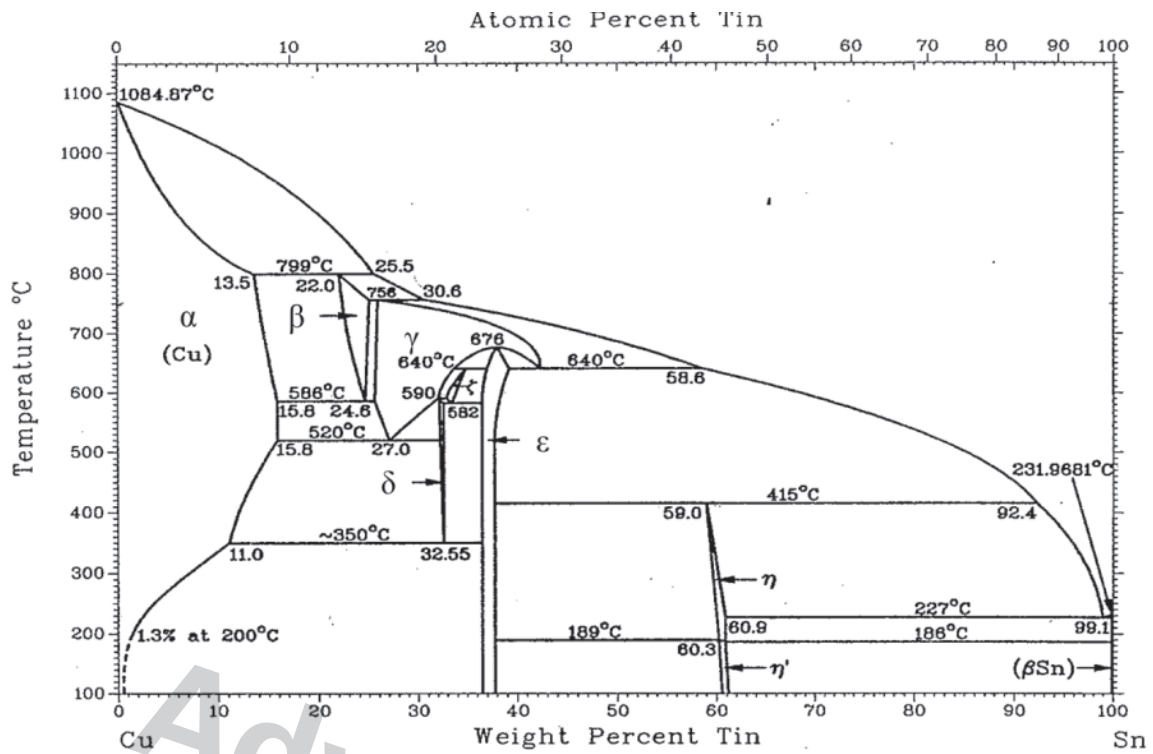


Fig. 5 Phase diagram of Cu-Sn alloy⁴⁾.

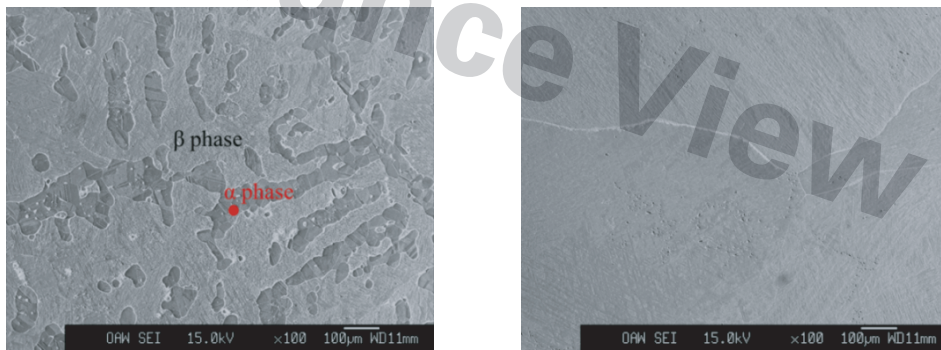


Fig. 6 Results of tissue observation of 21F (left) and 23ZT (right) (SEI).

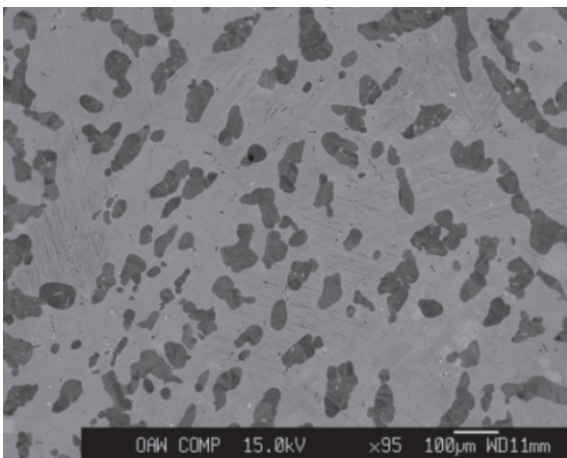


Fig. 7 Structure observation of 21ZF (COMP).

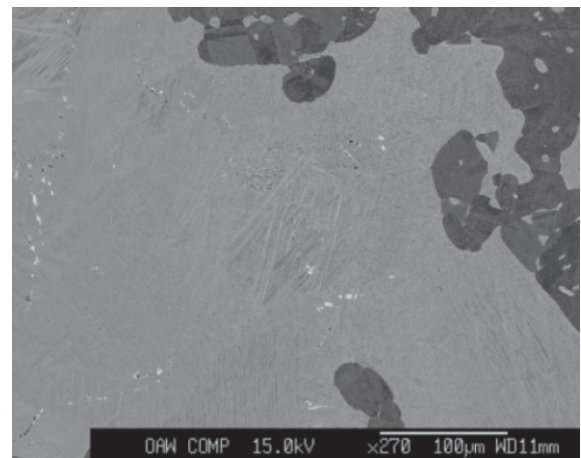


Fig. 8 Zr carbide of 21ZF (COMP).

晶温度で熱処理を行っており、加工硬化の影響が少ないと推察される。しかし、冷間でのヘラ絞り加工後に関して、21F および 23ZT では大きく変化しないのに対して、21ZF は硬

度が高くなっている。

硬度が上がる理由としては、冷間加工によるヘラ絞り加工により析出物周辺の転位密度が上がることで、もしくは加工に

Table 3 Vickers hardness of Bell and Bow in 21F, 21ZF and 23ZT. and α , β phase.

Processing		21F	21ZF	23ZT	α phase	β phase
Heat treatment		240~ 250HV	240~ 250HV	300~ 320HV	110HV	310HV
Hot hot pressing in the middle		240~ 250HV	240~ 250HV	300~ 320HV	-	-
Cold Spinning	Bell	240~ 250HV	270~ 300HV	300~ 320HV	-	-
	Bow	240~ 250HV	250~ 270HV	300~ 320HV	-	-

より金属の結晶が変化する加工誘起相転移により硬い組織が析出するためであると推察される。21ZFではZr炭化物が存在するため、その周りの転位密度が上がった、もしくは硬い組織が析出したことが、シンバルの音の減衰に影響を与えていると推察される。

4.4 IPによるX線回折リング測定結果

2次元検出器であるIPを用いて、測定される回折リングから結晶構造を解析した。また、21Fおよび23ZTについても21ZFシンバルのような加工誘起相転移と想定される現象が起きているかどうかを比較検証した。Fig. 9に21F, 21ZFおよび23ZT素材で作製した熱処理後、ベル部の熱間プレス後、ヘラ絞り加工後における回折リングを示す。いずれも複数の回折リングが得られているが、明瞭な線になっている部分が α 相、点線になっているのは β および γ 相、それに加えて β 相が得られた。次に加工工程毎に回折リングの変化を解析した結果、21Fでは加工を経ることで回折リングがぼやけ、加えてヘラ絞り加工後はストリーク状の回折が見られる。これは加工により塑性変形されて結晶が細かくなっているためと推察される。また、ストリーク状の回折は β および γ 相で見られた。23ZTでは、 α 相はなく、 β および γ 相であり上記同様にストリーク状の回折が見られた。

21ZFでは熱間加工上がりの材料に関して21Fと同様の回折リングが得られるが、熱間プレス後でストリークが大きくなり、ヘラ絞り加工後では全体的に回折リングがぼやけ、新しい相の回折リングが確認できる。この新しく析出した相を同定するため、回折リングから得られる1次元変換したX線回折パターンから、相同定を行った。

4.5 一次元化したX線回折パターン解析結果

新しい相が出現した21F, 21ZFおよび23ZTで新しい相が析出しているか検証するため、X線回折パターンを一次元化して解析した。Fig. 10にFig. 9を一次元化したX線回折パターンを、Fig. 11にはFig. 10の 5.8° から 6.8° まで範囲を拡大したX線回折パターンをそれぞれ示す。なお、相同定にはJCPDカードを用いた。21Fおよび23ZTではヘラ絞り加工で回折プロファイル幅の広がりに変がないことから、転位密度の変化もほとんどない。また、新しいピークが出現してい

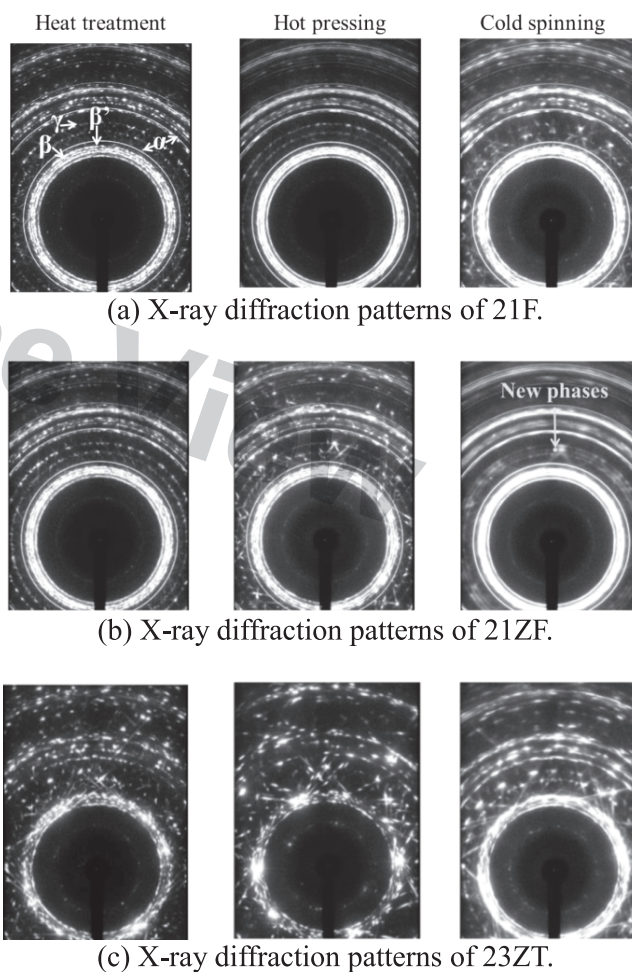


Fig. 9 X-ray diffraction patterns of each processing step.

ないため、相はほとんど変化していないといえる。しかし21ZFでは冷間加工であるヘラ絞り加工を施すことで、 6.24° でピークが確認された。Cu-Snの2元系合金は様々な相があり、その中で相同定した結果、新しいピークは ϵ 相(2 10 1)面または(0 20 2)面もしくはその両方であると推察できる。そして、この ϵ 相はビッカース硬度で377~393 HVと硬いことから⁷⁾、この相の析出が21ZFの硬度を硬くしたと推察される。また、 α 相より β 相と γ 相のピーク強度が小さくなっていることから、加工を加えることでこれらの相が ϵ 相に変化したものと考えられる。

次に21ZFに関して、どの加工工程で ϵ 相が析出したかを調査した。Fig. 12に加工工程ごとの21ZFの回折プロファイルを示す。どの部位においても熱間プレスまでは ϵ 相は析出していない。しかし、冷間加工であるヘラ絞り加工で ϵ 相が析出していることが確認できる(赤線および緑線)。ここでヘラ絞り加工後の ϵ 相のピークの大きさについて、ベル部とボウ部と比較すると、ベル部ははっきりとピークが見えるのに対して、ボウ部はわずかにピークが見えている程度とベル部よりもピーク強度が弱い。これは析出している ϵ 相の析出した割合がベル部の方が多かったためであり、この差がヘラ絞

り加工後のベル部とボウ部の硬度差として現れたと推察される。

5. 考 察

音の減衰比と組織の関係について考察した。今回測定した3つの組成に対して、減衰比は23ZT \rightarrow 21F \rightarrow 21ZFの順で大きくなっていく。21Fと23ZTを比較すると、21Fの方が減衰比の値が約1.3倍大きい。組織観察およびX線回折では α 相の割合が23ZTに比べて21Fの方が非常に多く、硬度測定

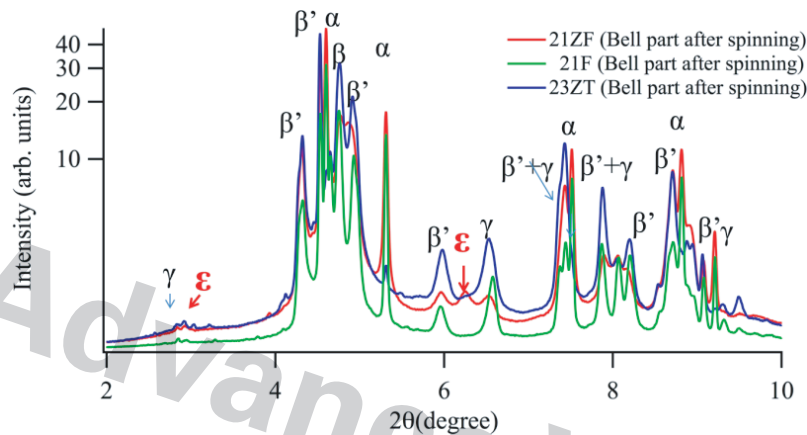


Fig. 10 Diffraction pattern of 21F, 21ZF and 23ZT after spinning.

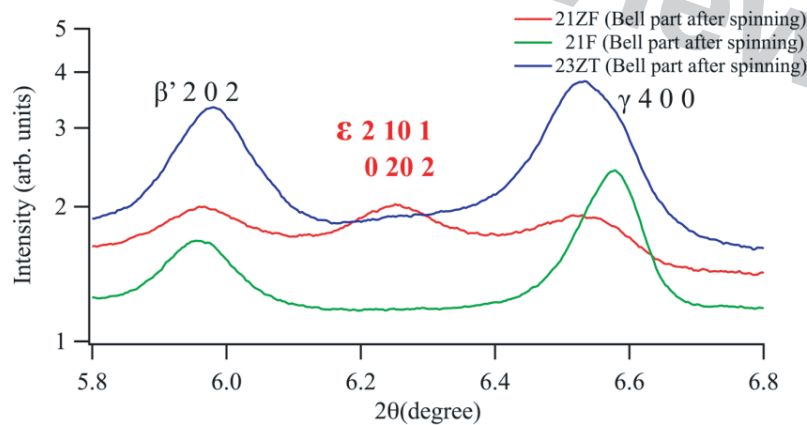


Fig. 11 Diffraction pattern of 21F, 21ZF and 23ZT enlarged from 5.8 to 6.8 degrees.

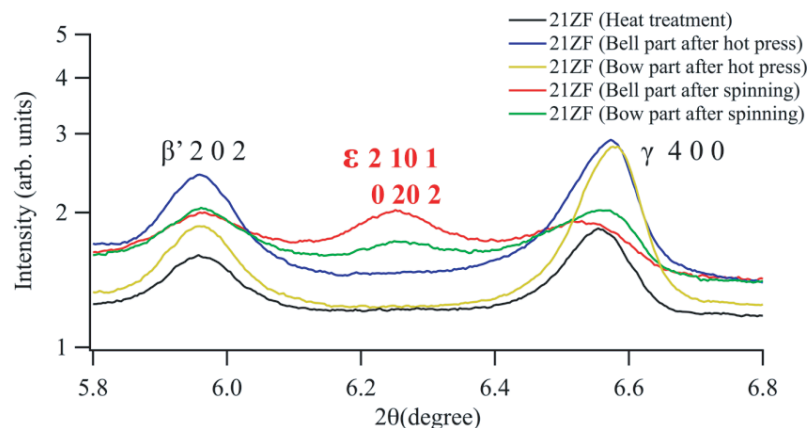


Fig. 12 Diffraction pattern for each processing step of 21ZF.

から α 相と β 相では α 相の方が柔らかいことを明らかにしている。以上の結果から、21Fの減衰比が大きい要因は、ヘラ絞り加工により分散された α 相が振動を吸収することで減衰比が大きくなったと推察される。逆に α 相がほとんどない23ZTは減衰比が小さくなっていると考えられる。音の減衰に関しては、単相よりも2つ以上の相が存在し、各相の硬さが異なる場合、柔らかい相が振動を吸収することが報告されている⁸⁾。そして、これらの2つよりも減衰率が高い21ZFに関して α 相の割合が高いことも明らかにしている。以上を踏まえると、Snの割合が21%付近のCu-Sn合金における基本的な減衰比は α 相の量に依存し、この量を調整することで音の減衰の制御ができると考えられる。

一方、21ZFは、音の減衰比が21Fと比べて約2倍大きい。回折測定の結果、21ZFでは、前述した α 相の量の違いに加えてヘラ絞り加工による加工誘起相転移により21Fおよび23ZTでは析出しなかった硬い ϵ 相がZr炭化物の周りに析出した。

この硬い相があると、母相との粒界で摩擦が生じ、その摩擦により、振動エネルギーが熱エネルギーに変換されたため、振動が減衰することが報告されている⁹⁾。ゆえに、ヘラ絞りにより析出した ϵ 相が、シンバルの音の減衰比を最も大きくした要因であると推察される。

6. 結 言

本論文では、Ti, ZrおよびFe等を添加したシンバル(Cu21~23 mass%Sn合金)の素材を作成し、シンバルとして加工する工程ごとの組織および硬度の変化と、素材ごとのシンバルの音、特に減衰比に与える影響との関係を調べた。

基本的なシンバルの音の減衰比については、単相の組織よりも2相以上の組織になっているシンバルの方が減衰比が大

きい、すなわち減衰時間が早いことを明らかにした。また、Zr炭化物が存在している素材においては、さらに減衰比が大きくなり、その要因は、ヘラ絞り加工を施すことで加工誘起相転移により硬度が高い ϵ 相が析出し、母相との粒界で振動エネルギーが熱エネルギーに変換されて振動がさらに減衰するためであると推察された。

これまで経験的に音の制御が行われてきたシンバルであるが、本研究により組織制御と析出物の制御により自在に音を制御できる糸口が見出された。

本研究はSPring-8のビームラインにおける共同利用課題の成果である(課題番号2017B1599)。実験に際してご支援頂いた産業利用推進室の佐藤真直様に感謝の意を表す。本論文を作成するにあたり、JCPDカードをご提供頂いた京都大学の野瀬嘉太郎准教授、ご助言頂いた関西大学の石敏雄元教授に感謝するとともに、心から敬意を表す。なお、本研究は戦略的基盤技術高度化支援事業の助成を受けたものである。

文 献

- 1) H. Pinksterboer: *The Cymbal Book* (Hal Leonard, Milwaukee, WI 1993) pp. 111-179.
- 2) H. Taniguchi, K. Osamura, A. Kikuchi and T. Mizuta: *TEION KOGAKU* (J. Cryo. Super. Soc. Jpn.) **50** (2015) 186-193.
- 3) A. P. Hammersley, S. O. Svensson, M. Hanfland, A. N. Fitch and D. Hausermann: *High Press. Res.* **14** (1996) 235-248.
- 4) T. B. Massalski and H. Okamoto: *Binary Alloy Phase Diagrams* (ASM International, Material Park, OH, 1990) pp. 1481-1483.
- 5) H. Morikawa, K. Shimizu and Z. Nishiyama: *Trans. JIM* **8** (1967) 145-152.
- 6) N. F. Kennon and T. M. Miller: *Trans. JIM* **13** (1972) 322-326.
- 7) F. Miyashita, S. Okuda and G. Miyatani: *Kinzoku Hyomen Gijutsu* **32** (1981) 453-458.
- 8) The Japan Institute of Metals and Materials: *Metal handbook (6th edition)*, (Maruzen Publishing Co., Ltd., Tokyo, 2000) pp. 783-787.
- 9) M. Kasai, F. Fujitsuka and A. Hibino: *J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy* **62** (2015) 400-407.