

## シンバルの音響特性に対して材料の金属組織が及ぼす影響に関する研究 Study on the Influence of Metallographic Structure on Acoustic Characteristics of Cymbals

小川 渉<sup>a</sup>, 鞍谷 文保<sup>b</sup>, 菖蒲 敬久<sup>c</sup>, 佐藤 眞直<sup>d</sup>, 寛 瑞恵<sup>e</sup>,  
小出 俊雄<sup>f</sup>, 文珠 義之<sup>a</sup>, 長村 光造<sup>g</sup>

Wataru Ogawa<sup>a</sup>, Fumiyasu Kuratani<sup>b</sup>, Takahisa Shobu<sup>c</sup>, Masugu Sato<sup>d</sup>, Mizue Kakehi<sup>e</sup>,  
Toshio Koide<sup>f</sup>, Yoshiyuki Monju<sup>a</sup>, Kozo Osamura<sup>g</sup>

<sup>a</sup>(株)大阪合金工業所, <sup>b</sup>福井大学, <sup>c</sup>(国究)日本原子力研究開発機構,

<sup>d</sup>(公財)高輝度光科学研究センター, <sup>e</sup>福井県工業技術センター,

<sup>f</sup>(株)小出製作所, <sup>g</sup>(公財)応用科学研究所

<sup>a</sup>Osaka Alloying works. Co.Ltd., <sup>b</sup>University of Fukui, <sup>c</sup>JAEA, <sup>d</sup>JASRI,

<sup>e</sup>Industrial Technology Center of Fukui Prefecture, <sup>f</sup>Koide Industrial. Co.Ltd.,

<sup>g</sup>Research Institute for Applied Sciences.

本研究の目的は、シンバルの金属組織が音質、特に減衰時間に与える影響を明らかにすることである。素材と加工工程を変化させた試験片に高エネルギー放射光 X 線を照射し、イメージングプレートによる透過回折 X 線リング測定から結晶構造の解析を行なった。その結果、素材と加工工程に応じた特有の結晶構造が観測され、加工による材料強度向上と結晶構造との関係を明らかにし、音の減衰時間制御の 1 つの指針を見出した。

**キーワード：** 小角散乱、金属組織、炭化物、体鳴楽器、シンバル、減衰、高錫ブロンズ合金、加工誘起相転移

### 背景と研究目的：

大阪合金工業所は、国内唯一のシンバルメーカーである小出製作所にシンバル用の素材を開発・供給している。本研究の目的は、シンバルの音質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、音質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。

シンバルに使われる青銅は Sn を 20 wt% 含む Cu-Sn 合金である。加工工程は、まず円形にカットされた素材を熱間プレスで中央の「カップ」と呼ばれる突起部分を成型、続いてヘラ絞り加工で全体の形状を整形、最後に音を調整する工程を経て出来上がる[1]。ここで、Sn 濃度が高い素材は加工性が悪いため、他社では Sn 濃度が低い素材を使用している。一方、申請者らは Sn 濃度を高くすると音質が良くなるという知見を得ていた。そこで Zr、Ti および Fe など第 3・第 4 元素を添加し、21~23Sn と Sn 濃度を高くしても従来の加工性が確保できる手法を取り入れた。これにより Cu-23 Sn-0.3 Ti-0.03 Zr (以下、「23 ZT」という)では「華やか」な音質を、Cu-21 Sn-0.1 Zr-0.03 Fe (以下、「21 ZF」という)では「静か(ダーク)」な音質を作り分けることに成功した。ここで両者の音質の違いは音の減衰時間にあり、前者は遅く、後者は早い。この差を発現している原因を解明できれば、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。

まず、この Zr 添加により音の減衰が速くなる理由について調べたところ、中央の「カップ」部が Ti 添加したものより硬度が高くなっていることがわかった。次にこの Zr 添加したシンバルのカップの硬度が上がっている原因を加工工程ごとに調べた。その結果、①ヘラ絞り加工の工程で硬度があがっていること、②電子顕微鏡により Zr 添加した材料の金属組織を調べた結果、微細な Zr 炭化物の析出物が分散していること、がわかった。これらのことから、金属組織中に分散している Zr 炭化物の析出物周辺の高密度の転位がヘラ絞り加工時に導入されることがカップの硬度が上がる原因であると推察した。

そこで、2017A 前期に SPring-8 の BL19B2 で採択された課題において、工程ごと(①焼き入れ材(加工前の素材)、②熱間プレス成形ままのカップ部、③ヘラ絞り加工したカップ部とその他の部

分)について Zr 添加材のシンバルから切り出した試験材の X 線回折を行い、回折ピークプロファイル解析による転位密度評価により各工程の転位密度変化の検証を試みた[2]。その結果予想に反し、得られた回折プロファイルには、転位密度の差はほとんどなく、加工工程を経るにつれて主安定結晶相の  $\alpha$  相および  $\beta$  相からの回折ピークに加え、準安定相の  $\zeta$  相、 $\gamma$  相および  $\varepsilon$  相起因と思われる回折ピークが出現しているという結果が得られた[3]。これは、加工が主安定相から準安定相への相変態を誘起していることを示唆しており、当初の推論の見直しが必要である。この解決策としては 2 次元検出器であるイメージングプレート(以下 IP)を用いて、測定される回折リングから結晶構造を解析する。試験片としては Ti や Zr を添加していない Cu-21 Sn-0.03 Fe(以下 21F)を標準試料とし、23 ZT シンバルの試験片についても測定し、21 ZF 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する。もし 21 F および 23 ZT のシンバルで問う現象が起きていなかったら、カップ硬度が高くなるメカニズムが Zr 添加により加工誘起相転移を起こしたことによる可能性が高いと言える。

### 実験：

供試材 21 F、21 ZF および 23 ZT を用い、それぞれに対して 4 水準の試験片を 20 mm×20 mm×1.5 mm 厚で作成した。

- ①熱間上がり
- ②熱間プレスによるカップ成型後(CUP 部)
- ③へら絞り加工後のカップ部(CUP 部)
- ④へら絞り加工後のその他の部分(BOW 部)

放射光実験は BL19B2 にて行った。X 線のエネルギーは約 72keV である。第 2 ハッチに整備されている大型 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(図 1)。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で 1 時間露光し、試験片からの回折リングを計測した(図 2)。これらの一連のデータの 1 次元変換には Fit2D を使用した[4]。



図 1. 測定の様子 (ビーム入射側)

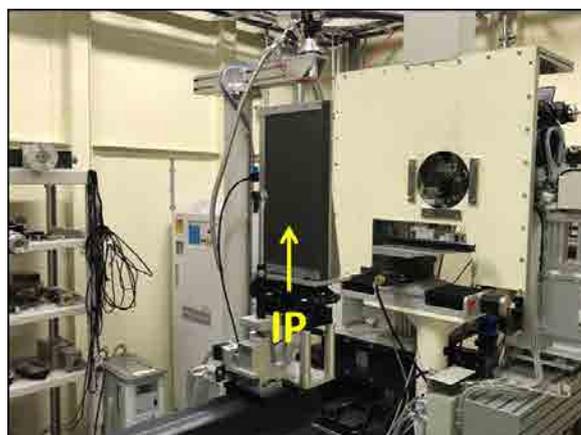


図 2. 測定の様子 (検出器側)

### 結果および考察

#### (1) IP による X 線回折リングの測定結果

図 3 に 21F、21ZF 素材で作成したカップ部の熱間圧延後、熱間プレス後、へら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  $\alpha$  相、点線になっているのは  $\beta$  および  $\gamma$  相、それに加えて  $\beta'$  相が得られた[5]。次に加工工程毎で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、加えてへら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子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  $\beta'$  および  $\gamma$  相で見られた。23ZT では、 $\alpha$  相はなく、 $\beta'$  および  $\gamma$  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、へら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。

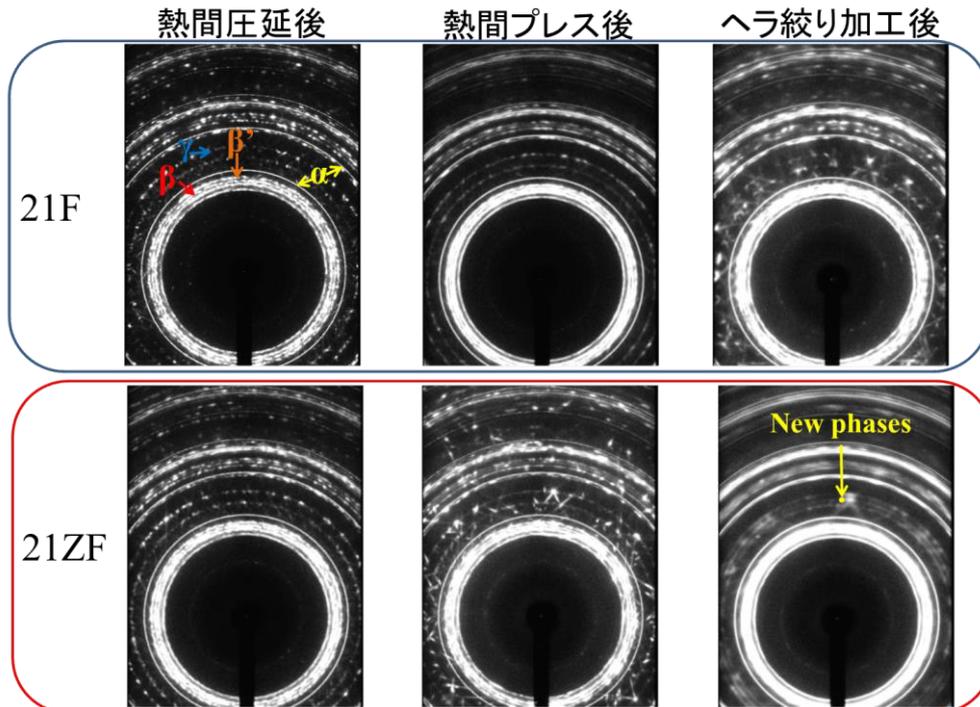


図 3. 21F および 21ZF の X 線の回折リングの結果

### (2) 21ZF の X 線回折パターンの結果

図 4 および図 5 に 21ZF の素材で作成した熱間プレス後およびへら絞り加工後の X 線回折パターンを示す。冷間加工であるへら絞り加工を施すことで、2.94°および 6.24°で熱間プレス後ではなかったピークが確認できる。相同定した結果、ε相だと判定した。この相はビッカース硬度で 550HV と非常に硬いことから、カップ部の硬度を硬くしたと推察される。これに対して、カップ部以外の場所を測定した結果では、カップ部と比較すると若干ではあるが ε 相の強度ピークが小さい。この結果、場所により硬度に差が出たと推察される。

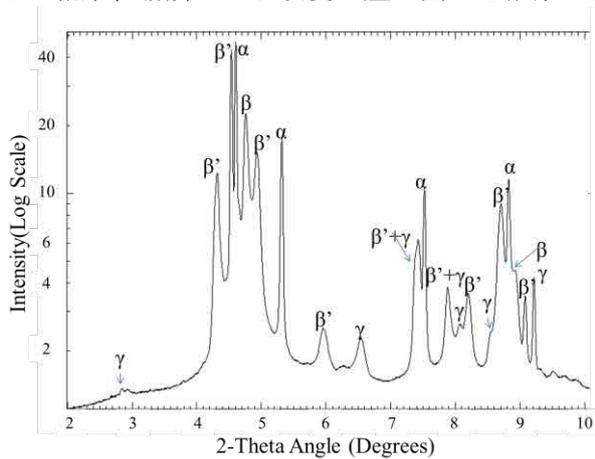


図 4. 熱間プレス後の回折パターン

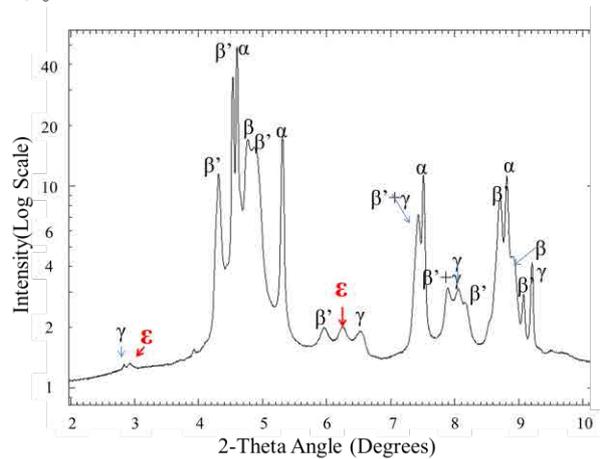


図 5. へら絞り加工後の回折パターン

### (3) 考察

表 1 にまとめた結果を示す。解析した組織観察結果とシンバルの音響解析結果をまとめている。減衰比に関しては、1/3 オクターブのタイムトレンド解析結果から 4000 Hz 付近のピークをもとに読み取り、下記式にて算出した。

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

ここで、D は音の減衰度で 1 秒当たりの減衰量 (dB 値) で、2.5 秒後および 5 秒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。 $\zeta$  は減衰比で減衰振動の減衰特性を表す量 (%) である。この  $\zeta$  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。

21F と 23ZT を比較すると、21F の方が減衰比の値が 2 倍大きいので、減衰も早い。この理由としては、分散された  $\alpha$  相 (約 110HV) が  $\beta$  相 (約 300HV) と比較して柔らかいため、振動を吸収し減衰が早くなったためと推察される。したがって、基本的な音の長さは  $\alpha$  相の量に依存すると考えられる。また、ストリークが見られる  $\gamma$  相や  $\beta'$  相の割合が増えると音の減衰が長さに影響を与えられと推察され、その結果、23ZT の減衰比が低くなったと思われる。しかし、21F と 23ZT の回折リングの結果からは、結晶構造が大きく変化することはなかった。

21ZF で音の減衰が早くなった理由は、へら絞り加工で与えられる加工によって加工誘起相転移が起こった結果、Zr 炭化物周りに硬い  $\epsilon$  相が析出し、この硬い相が振動を抑制しているためと推察される。その結果、シンバルの音の減衰比に大きな影響を与えていると考えられる。また、CUP とその他の部分で硬度の差がある。これは  $6.24^\circ$  の強度のピーク値が CUP 部では 2.02、その他の部分では 1.72 と差があったため、CUP 部の方が  $\epsilon$  相の析出が多く、その結果、硬度の差が表れたと推察される。

表 1. 組成別のシンバルの減衰と組織のまとめ

試料の組成 (wt%)	4000Hz 付近の減衰比 $\zeta$	加工ごとの組織の変化	へら絞り加工後の硬度
Cu-21Sn-0.03Fe	0.00401	$\beta'$ 相と $\gamma$ 相のストリークが強くなる	CUP:240~250HV BOW:240~250HV
Cu-21Sn-0.1Zr-0.03Fe	0.00923	へら絞り加工で $\epsilon$ 相が析出	CUP: <b>270~300HV</b> BOW:250~270HV
Cu-23Sn-0.3Ti-0.03Zr	0.00199	$\beta'$ 相と $\gamma$ 相のストリークが強くなる	CUP:300~320HV BOW:300~320HV

#### 今後の課題：

音質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つつある。今後は、21ZF で CUP 部と BOW、および Zr 添加と  $\epsilon$  相との体積分率の相関を図り、それがシンバルの音の減衰比に与える影響を解析する。

#### 参考文献：

- [1] N.H. Fletcher, T.D. Rossing, "The Physics of Musical Instruments Second Edition", Springer Science+Business Media, Inc, 1998, Chapter 20, P 649
- [2] 小川 渉 他, SPring-8/SACLA 利用研究成果集 2017A1587, <https://user.spring8.or.jp/resrep/?p=9749>.
- [3] S. Furtauer, other, *SciVerse Science Direct*. Rev. 142, 34(2013).
- [4] AP Hammersley, etc. ESRF98HA01T, FIT2D 9, 129
- [5] Z. Nishiyama and S. Kajiwara: *Trans. JIM*, (1968), 307.