

シンバルの打楽器音に及ぼす残留歪分布の影響に関する研究 Correlation between Percussive Sound and Residual Strain Distribution of Cymbal

小出 俊雄^a, 文珠 義之^b, 森棟 文夫^b, 小川 渉^b, 長村 光造^c, 鞍谷 文保^d, 浜手 翔^d,
工藤 倫久^d, 梶原 堅太郎^e, 菖蒲 敬久^f

Toshio Koide^a, Yoshiyuki Monju^b, Fumio Morimune^b, Wataru Ogawa^b, Kozo Osamura^c,
Fumiyasu Kuratani^d, Sho Hamate^d, Norihisa Kudo^d, Kentaro Kajiwara^e, Takahisa Shobu^f

^a(株)小出製作所, ^b(株)大阪合金工業所, ^c応用科学研究所, ^d福井大学大学院,
^e(公財)高輝度光科学研究センター, ^f日本原子力研究開発機構

^aKoide Manufacture Co. Ltd., ^bOsaka Alloy Industry Co. td., ^cRIAS, ^dFukui University,
^eJASRI, ^fJAEA

シンバルの音楽性の高い音響効果は特殊な合金と複雑かつ不均質な残留歪の存在が影響することが経験的に知られていた。そこでシンバルの音響効果の定量的な解明のため有限要素法による振動モード解析に必要な不均質な残留歪分布の情報を得ることを目的とした。本実験によりシンバルの内部残留歪の測定に世界ではじめて成功し、製作工程により残留歪が生起・変化する過程を明らかにすることができた。

キーワード： シンバル、高錫銅合金、エネルギーマッピング、残留歪

背景と研究目的：

シンバルは青銅を素材とするが、その発展の過程で「トルコシンバル」と呼称されるように、錫を 20wt%含む非常に特殊な合金が最高の素材として認知されてきたが、日本では長い間このような特殊なシンバルを生産することができなかった。最近になり大阪合金工業所と小出シンバルが連携して世界水準のシンバルの製作を始めるようになった。製造過程として素材の成分調整、熱処理およびカップリング(1次成形)→へら絞り(2次成形)→ハンマリング(3次成形)→音溝加工(製品)を経るが、いずれの過程も複雑な音響効果に欠くことができない。しかしこれまでは職人的技により経験的に製造過程の工夫がなされてきた。これを客観的に数値化できるようになればシンバルの製造方法に変革をもたらすことができ、品質向上とともにシンバルのさらなる利用範囲の拡大等の工学的メリットをもたらすものと考えられる。そこで本研究においてシンバルでは音楽性の高い音響効果のためへら絞り、ハンマリング、音溝加工の塑性加工により生起するランダムな残留応力/歪分布が本質的に重要と考えられるので、その3次元空間分布の定量的解明を目的とした。

実験：

本実験では大阪合金工業所の素材を用いて小出シンバルで製作された4種類のシンバルを残留ひずみ分布測定に供した。すなわちへら絞り直後のシンバル(I-0)、歪計測後直ちにハンマリングを行ったシンバル(II-0)およびその比較材としてハンマリングして室温に3ヶ月保持したシンバル(II-3)とさらに音溝加工を施したシンバル(III-3)である。

歪測定にはビームライン BL28B2 の高エネルギー白色 X 線を使用した。シンバルは 16 インチ径(約 400 mm φ)厚み約 1.1 mm の笠形をしており、ゴニオへはビームがシンバル笠部分の平面と垂直に交わるよう縦方向に保持具で固定した。シンバル笠部分平面の内側(カップリング部近傍)、中央部分、外縁の3ヶ所での計測を行った。測定に用いた光学系の全体を図1に示す。本研究では Ge 製半導体検出器を垂直、水平方向にそれぞれ1台ずつ設置し、一度に2方向のひずみ計測を行った。以下測定条件等である。

- 1) 検出器：ゲルマニウム(Ge)半導体検出器×2台
- 2) スリットサイズ：入射側 0.05×0.05 mm², 受光側 0.05×5.0 mm²

- 3) コリメータ：0.05×5 mm²長さ 150 mm、受光側のスリット上流に設置しゲージ体積を制限
- 4) 試験片：BL28B2 既設の回折系に保持具で固定
- 5) 測定法：ひずみスキャンニング法により、図 2(a)に示すように中心から外縁方向に座標軸 X_s をとり、深さ方向には表表面から裏表面に向かう座標軸を Y_s とした。各座標位置(X_s , Y_s)で 2次元回折エネルギーマッピングを半径方向および周方向に対して実施
- 6) ひずみ(ϵ)の算出に関しては、上記シンバルの切れ端に対して熱処理したものを無ひずみ(d_0)状態として、 $\epsilon=(d-d_0)/d_0$ から求めた。ここで、 d は試験片より得られる格子面間隔である。

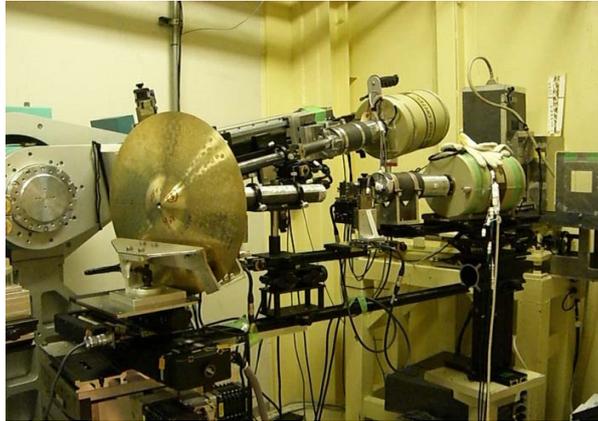


図 1. シンバル中の残留歪測定装置全景

結果および考察：

一つのシンバル毎に(X_s , Y_s)の異なる 147 点の座標位置でエネルギーマッピングを行い、回折ピーク毎の相の同定と格子面間隔を求めた。一方電子顕微鏡観察からシンバルの主相は β 相であり、副相として主に α 相が観察されている。シンバルは粗大粒であるため場所により回折ピークが得られない。面指数の異なる回折ピークの出現等が観察された。本報告では比較的広範囲に観測された β 相(420)面間隔から求めた格子定数 $a(\beta)$ の変化について考察を行った。下記のデータは垂直方向に設置した検出器からの値であり、したがってシンバルの周方向の残留歪を捉えたことになる。

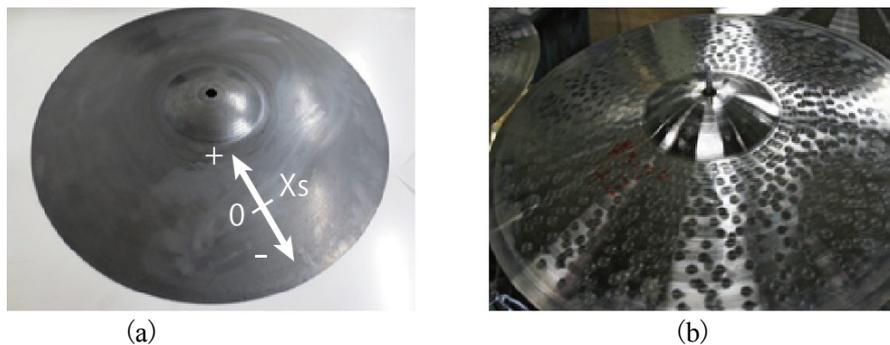


図 2. へら絞り後(a)およびハンマリング後(b)のシンバルの外観

図 3 左図にへら絞り後のシンバル外縁部($X_s=-32\sim-28$ mm)における深さ方向の格子定数変化である。 $y=-1.2$ mm は裏表面、 $y=1.2$ mm は表表面に相当し、裏から表に向かうに従い格子定数は増加することが観察された。これはへら絞りにより裏側が大きな圧縮応力をうけ、表側に向かうに従い圧縮状態が減少することを示している。なおここでデータの整理上実験的にある所定の X_s の位置でシンバルの厚み方向に 7 点の測定点を選ぶが、その時のシンバルの厚みの中心を $y=0$ と置いた。図 3 左図にみるように $y>0$ では(420)面の回折データが示されていない。これは実際上シンバルは $y=-1.2$ から $y=0$ の範囲に存在しており、 $y>0$ には無かったことを意味している。このように

形状が笠形のシンバルの実験のためには幅を持たせて計測を行い、データ整理の段階で判定することが必要であった。さて半径方向の位置が $X_s = -32 \sim -28$ mm に変化しても格子定数はほぼ同じであった。このことは深さが同じであれば圧縮残留応力が同じであったことを示している。ただし残留歪がどこまで圧縮性で、引張性に变化するかの定量的な判定は d_0 を基準にした解析後に判断される。

一方図 3 右図はハンマリング後の結果を示している。裏から表に向けての格子定数変化はへら絞りの場合と同じ傾向にあった。一方、半径方向の位置が $X_s = -26 \sim -30$ mm に変化すると格子定数は位置 X_s により変化している。ここで、へら絞り以外の試験片ではハンマリングが施されており、本測定ではハンマリングをまたぐように測定を行っている。つまり、 $X_s = -28$ がハンマリングの外輪に相当し、 $X_s = -26, -27$ はハンマリングを受けた領域、 $X_s = -29, -30$ はハンマリング外側に相当する。ゆえに、残留応力も非常に複雑に存在することが予想され、本測定では深さ y が同じであっても圧縮残留応力は位置 X_s によって異なるという結果につながったと言える。

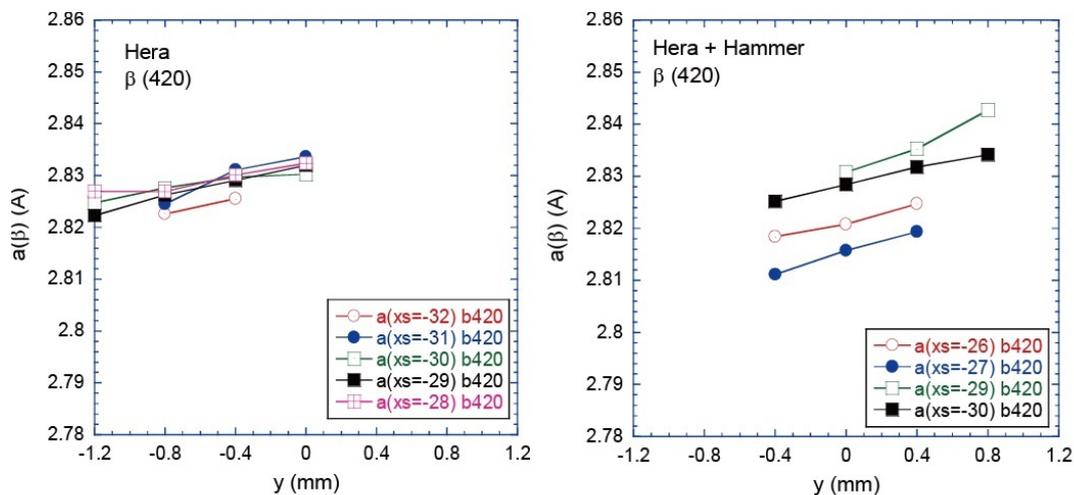


図 3. へら絞りおよびハンマリング後のシンバルの各部分における深さ方向の β 相の格子定数変化。横軸はシンバル厚さを表しており、0 が厚さの中心。

図 4 にシンバルの肉厚中央における β 相の格子定数の変化が示されている。シンバルの任意の中心から半径方向に 1mm ずつずらした位置での格子定数の変化から周方向の残留歪の変動を評価することができる。なお残留歪の絶対値の判定は現段階ではできないが、図中矢印で残留歪の変化の程度および圧縮歪と仮定したときの歪の増減の程度が示してある。へら絞り材では周方向の歪の変動は小さいが、へら絞り+ハンマリング材では圧縮歪が大きくなり、変動も大きくなる。3 ヶ月保持材では全体に残留歪は小さくなるが、変動は増幅される。このように音響特性に本質的に重要なシンバル内の不均質な残留歪の定量的な評価が可能となり、今後の高品質シンバルの製造の科学的な根拠を得ることができた。

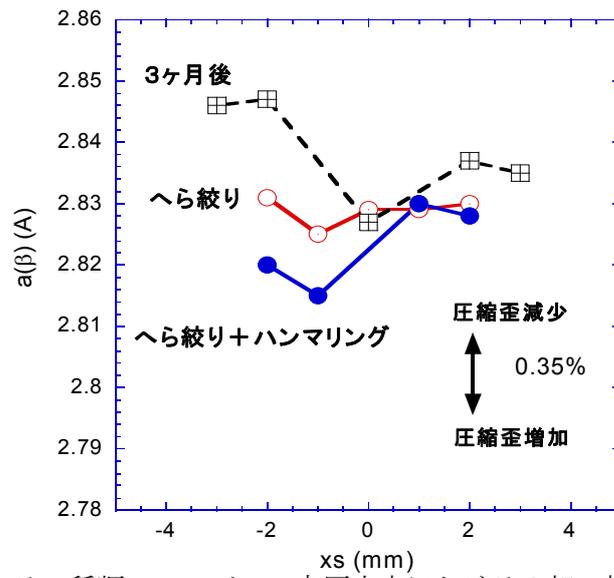


図 4. 加工条件の異なる 3 種類のシンバルの肉厚中央における β 相の格子定数の半径方向の変化