

(様式D-2)

(別 紙)

令和 4 年度 海外派遣研究員研究報告書

令和 5 年 4 月 10 日

日本大学理事長 殿

日本大学学長 殿

所 属 生産工学部 (生産工学研究所)
資格・氏名 専任講師・中川 一人

令和 4 年度海外派遣研究員 (短期 A) の研究実績を、下記のとおり報告いたします。

記

1 区 分 短期 A

2 研究課題

高錫青銅の対する微量添加元素および残量応力付与による加工性・振動特性への影響に関する研究

3 派遣期間 西暦 2023 年 2 月 11 日 ~ 2023 年 3 月 18 日

4 派遣先 国名 インドネシア共和国・都市名 デンパサール市

5 研究目的

高錫青銅は優れた音響特性を持つことから楽器などの発音体用材料として使用され、日本では双盤や風鈴などが鑄造により製作される。これに対しインドネシア共和国ではガムラン音楽に使用される鍵盤打楽器やこぶ付きゴングの材料として使用され、熱間鍛造により目的形状の加工される。この理由の一つとして高錫青銅は高温での延性が乏しいため鍛造時に割れやすく、インドネシア共和国では伝統工芸一つとして技術が伝承されているが、日本にはこれらの技術が無いことが挙げられる。しかしながら日本においても薄物の高錫青銅製品は需要があるため、鍛造と鑄造の双方が利用できればよりニーズに合致した製品を提案できる。この問題を解決するため、本研究では高温割れの改善を目的として高錫青銅に Ni を微量添加した材料の研究を進めている。これらの材料は実験室レベルでは要求値を満たしているが、実使用での評価はまだ行っていない。そこで、本研究で製作した材料をインドネシアにて所定形状への鍛造を依頼し、加工性の評価および製品の品質評価を行う。また、インドネシアでは鍛造時の応力付加ならびに高錫青銅製品への応力付加により目的の振動特性 (調律) が行われるが、残留応力と振動特性の関係は明らかではなく、調律師の経験に基づき行われている。そこで、調律による形状変化ならびに残留応力の測定を行うことにより、振動特性と在留応力との関係を明らかにする。これらの結果より、音響特性並びに塑性加工性に優れた高錫青銅の製品作製を行う。

(様式D-2)

6 研究概要

今回の研究では高錫青銅の鍛造による影響について調査することを目的とし、1.鍛造による組織変化と延性への影響、2.Ni添加による高温延性への影響、3.残留応力による音響特性への影響について調べた。また、今回の研究では高錫青銅としてインドネシアにおいて楽器製作に用いられる Cu -23 mass%Sn 合金を用いた。なお、各実験で使用した高錫青銅は輸出規制などによる日本からの持ち込みが困難であったため、現地にて 99.9%Cu, 99.9%Sn および 99.9%Ni より溶製した。このため、正確な成分については製作した試験体を日本において定量分析を行う。

1.鍛造による組織変化と延性への影響

今回の研究では *Reyong* (図 1) を対象として各鍛造段階での温度測定および圧下率の変化について測定する。現地での聞き取り調査より鍛造の開始時より終了時の方が割れにくく、1回の工程でより薄くできるのとの意見があった。このことから鍛造の進捗状況により組織変化などが生じ、高温での延性に变化があることが考えられる。そこで、各段階の鍛造温度・厚みの変化率および試験片を採取しての組織観察を行い、鍛造による組織への影響について明らかにする。



図 1 *Reyong*.

2.Ni添加による高温延性への影響

一般的な Cu-Si 合金に対して Ni を添加することにより高温延性が改善されるとされたため、高錫青銅に関しても同様の影響があるかを調べるため、Cu-23%Sn-合金に 0.5 および 1.0%Ni を添加した試験体 (図 2) を作製し、高温引張試験を行う。また、Ni が与える音響特性の調査のため、1.0%Ni 合金を使用して音板を作製し、音高・固有減衰能などの測定を行う。



図 2 Cu-23%Sn-Ni 合金試験体.

3.残留応力による音響特性への影響

楽器の調律を行う際に、楽器上面を叩くことで音高を変化させる。この理由として形状の変化と残留応力の影響が考えられる。そこで、*kajar* を対象とし、ひずみゲージにより調律の際の残留応力変化を測定し、音高との相関について調べた。



図 3 *Kajar*.

なお、以上の実験はならびに試験体の製作はインドネシア・バリ島・*Tihingan* 村の楽器鍛冶師 I MADE SUKARYA 氏の協力のもと行った。

(様式D-2)

7 研究結果・成果

1. 高錫青銅の鍛造

1. *Reyong*を対象とした鍛造条件および組織の変化

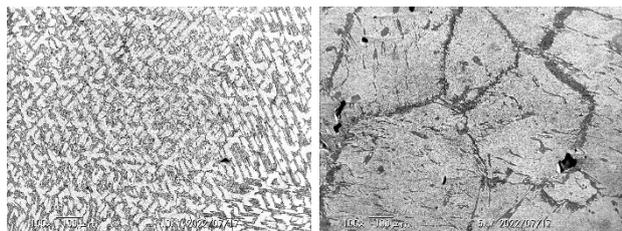
図4に本研究で作製した試験体を示す。*Reyong*の製作は6工程となっており、鑄造で製作する*Laklakan*より熱間鍛造により鍋型の*Cobekan*を製作し、目的の形状にするため底面部に絞りを持たせる*Cobekan sudaito di incep* 上面にこぶを作る*Cobekan sudaito ada moncol* 上面に膨らみを持たせた*Cobekan sudaito ada moncol dan usuk* および切削により調律を行った*Reyong*となる。なお、各鍛造工程では目的の形状のなった後に水焼き入れを行った。

鑄造条件として溶解温度 1473 K、注湯温度 1373 Kとし、鑄型には粘土型を用いた。鍛造工程として厚みの変化量が最も大きいのは1.*Laklakan* から2. *Cobekan*であったため、本実験では1から2における1行程での厚みの変化量を測定した。なお、熱間鍛造の温度は試験体表面温度で 1033 K で開始し、終了温度は 853 K であった。*Laklakan* から *Cobekan* の厚みを測定した結果、最も変化量大きい部分で 14.2mm から 2.6mm となった。また、工程数は最終的な微調整を含め 30 回程度であり、1工程は 1min 程度であった。各工程での厚みの変化は1回目が 1.0mm (圧下率約 8%) であったのに対し、15回目には 3.1mm (圧下率 50%) となった。鍛造工程では段階的に広げるため初期の厚みが一定では無いが後半の圧下率は大きく、初期段階で発生した割れは後半になり発生する機会が減少した。

図5に *Laklakan* および *Cobekan* の組織を示す。*Laklakan* の組織は微細なデンドライト状であるのに対し、*Cobekan* の組織は粗大に成長した α 相となった。*Cobekan* の組織は熱間鍛造並びに鍛造後の水焼き入れにより微細な組織となると考えたが、長時間の熱間鍛造により α 相は粗大化した。



図4 鍛造試験体



Laklakan

Cobekan

図5 *Laklakan* から *Cobekan* のマイクロ組織

(様式D-2)

[7 研究結果・成果 (つづき)]

高錫青銅の割れやすい一つの要因として微細なデンドライト組織による延性の乏しさが挙げられるが、熱間鍛造並びに長時間加熱したことにより、 α 相が塊状に粗大化し延性が改善されたと考える。これにより、鍛造において鍛造が進むにつれ1工程の圧下率も大となり、厚みが2.6 mmまでの加工が可能であると考えられる。また、組織観察の結果より、再結晶などによる合金元素の偏りあるいは相の変化が考えられるが、現地での分析が行えなかったため日本にてX線回折を行う。

2. Ni 添加による鍛造への影響

高温での延性を調べた結果、すべての温度域でNiを添加量が増加するほど延性が大となっており、塑性加工性の向上にNi添加が有効であると考えられる。また、673~773Kで中間脆性が見られたが、Niを添加することにより緩和された。得られた試験体より組織観察を行った結果、Cu-23%Sn合金の α 相はデンドライト状となったのに対し、1.0%Niを添加した際には α 相では塊状となっており、高錫青銅であってもNiを添加することによりデンドライトの成長を抑制することができた。これによりNiを添加することには高温延性の改善に有効であった。なお、Ni・Cu・Snを含む金属間化合物の影響も考えられるが、現地では十分な分析が行えなかったため引き続き分析を行う。

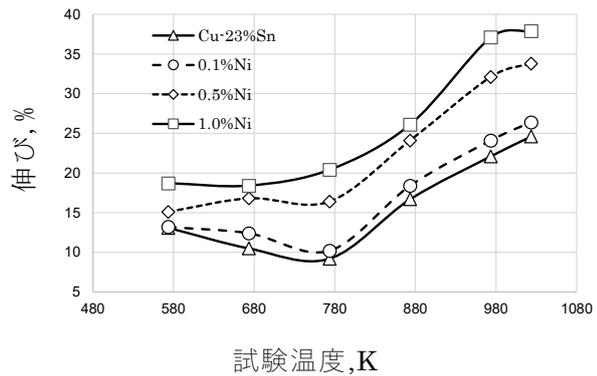


図6 Niが与える高温延性への影響。



図7 製作した試験用音板。

また、本研究で対象とする高錫青銅は楽器の発音体用としての利用を目的としているため、Niを添加したことによる音響特性の変化についてはCu-23%Sn-1%Ni合金を用いて音板(図7)を作製し引き続き音響試験を行う。

3. 応力による音響特性への影響

Kajarの音高に対する残留応力の影響を調べるため、ひずみゲージを用いて調律前後での残留応力および音高について調べた結果、残留応力の増加に伴い音高が高くなる傾向が見られた。このことから、直接ひずみを付与することで音響特性の変化させることが可能である。また、調律による形状変化についても測定したが変化量が微量であるため明確な相関を得ることはできなかった。

以 上