

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24300300

研究課題名(和文) インダス文明青銅器の金属分析を起点とした熱処理型高錫青銅の発生と東西伝播の研究

研究課題名(英文) Origin and transfer of heat treated high tin bronze making

研究代表者

長柄 毅一 (Nagae, Takekazu)

富山大学・芸術文化学部・教授

研究者番号：60443420

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円

研究成果の概要(和文)：錫を15%以上含む青銅合金は、鑄造法もしくは熱間鍛造法によって成形され、仕上げに焼き入れ熱処理が施されることから、我々はこれを熱処理型高錫青銅と呼んでいる。この技術は古くは古墳時代に日本へ伝来し、現在においてもアジア地域を中心に残されているが、その起源と伝播経路を明らかにするため、インドで出土した紀元前の遺物の成分分析や金相学的調査を行った。現時点で最も古いのは、メガリス期の遺跡から出土した銅鉢であり、紀元前1千年紀の前半には登場したことがわかった。

研究成果の概要(英文)：Heat treatable high tin bronze wares containing more than 15% tin were made by casting or hot forging and subsequent quenching. These techniques were introduced into ancient Japan from Asian continent in the Kofun period. They are no longer in use in Japan but are still in use in some Asian countries as traditional craft techniques. In order to find out an origin of fabrication techniques of heat treatable high tin bronze and their transfer route to Japan, we focused on Indian metal antiquities. More than 250 samples were analyzed. The earliest heat treatable high tin bronze wares analyzed are copper bowls which were excavated at Megalith sites in India. They are presumed to have been fabricated in the first half of the 1st millennium BC.

研究分野：文化財科学

キーワード：熱処理型高錫青銅 インド 金属組織 焼入れ

1. 研究開始当初の背景

青銅合金中の錫含有量が 10% を超えてくると、金属組織中に δ 相とよばれる極めて硬くて脆い相が析出し、常温では加工が困難になってくる。そうした錫を多く含む青銅は高錫青銅といわれている。特に、錫の量が 15% ~ 25% のものは常温での加工がほぼ不可能であり、586 以上に一旦加熱して δ 相を靱性のある β 相に変態させたのち高温で加工される。さらに、冷却後に δ 相が再析出することを防ぐための水中焼入れが施される。古代よりアジアで製作されてきたこの高錫青銅を、我々は「熱処理型高錫青銅」と称することを提唱している¹⁾。図 1 は典型的な熱処理型高錫青銅の (a) 鋳造品、(b) 鍛造品、(c) 鍛造後焼入れ品の金属組織である。このように製作方法、熱処理方法によって金属組織は明らかに異なるため、金相組織評価は熱処理型高錫青銅の製作技術(鋳造、鍛造、熱処理の有無等) 解明にきわめて有効な方法である。

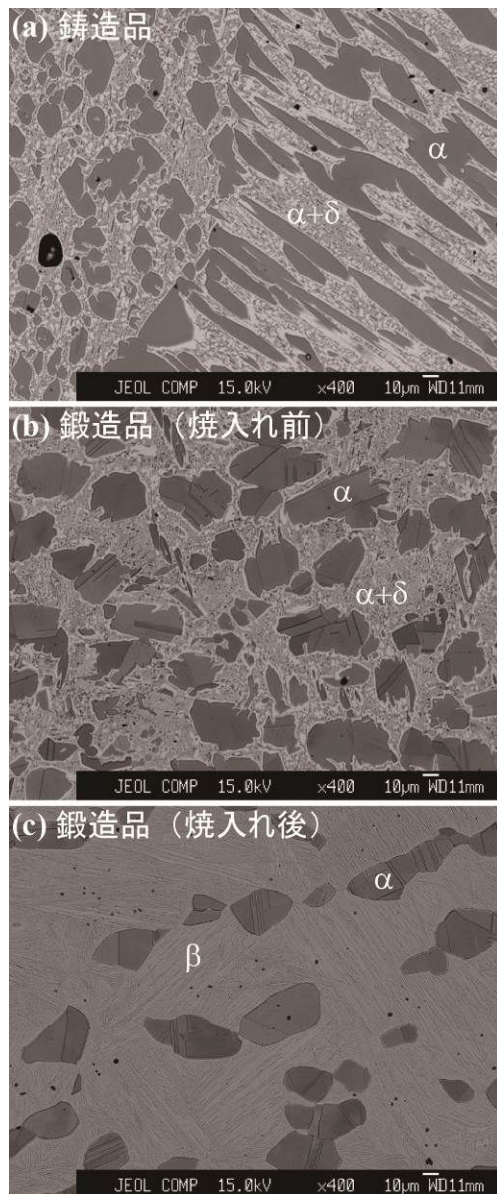


図 1 熱処理型高錫青銅の加工・熱処理と金属組織

我々は平成 21 年度から基盤研究(B)「韓国出土青銅器の成分・金相分析を基幹とした東アジアにおける高錫青銅加工技術の研究」において、韓国の財団法人東亜細亜文化財研究院の協力のもと、韓国の慶尚南道出土の高麗時代 (A.D.10~14 世紀) や朝鮮時代 (A.D.14~18 世紀) に製作されたとみられる銅鏡、匙等、40 点の金相評価ならびに成分分析を行った。韓国では、錫 22%、銅 78% の比率で作る伝統的な高錫青銅器「鎗器」製作の歴史は途絶えることなく今日も続いている。韓国出土の青銅器は、鉛や砒素、硫黄などを不純物あるいは合金元素として含む場合もあるが、その殆どは現代の鎗器とほぼ同様の組成であり、錫と銅のみで構成される二元系の熱処理型高錫青銅器であった²⁾。なお、現代の鎗器では、銅鏡や匙などは鋳造法で作られることが多いが、出土青銅器はその多くが熱間鍛造で成形されたことが、我々の研究から分かっており、ここ千年の間の技術変遷が明らかになりつつある。

2. 研究の目的

世界的視野で関連研究を見ると、インド、東南アジアでは単発的に行われているが、地域を結んだ研究は殆ど行われていない。我々はこれまで、共同研究や国際セミナー等を通じ、考古学、文化財科学、材料工学、製作技法に精通した韓国、中国そしてインドの研究者らと高錫青銅の歴史の変遷について討論してきた。そして韓国鎗器や日本の佐波理の起源地がインドである可能性が高いことを示した。インドには、銅鑼など熱処理型高錫青銅の製作技術が今でも残されており、紀元前に作られたとみられる青銅器も数多く出土している。これまでの研究で培った分析技術と研究ネットワークを駆使し、インド出土青銅器の調査を進めていくことで、韓国出土青銅器の成分・金相分析を基幹とした東アジアにおける高錫青銅加工技術の研究の内容を深化・拡張し、熱処理型高錫青銅の起源・変遷・伝播の解明を目的として研究を実施した。

3. 研究の方法

インドの大学(デカンカレッジ、ナーグプル大学)や考古局に保管されている出土青銅器から分析用資料を採取し、金属組織観察や成分分析を実施した。対象とした遺物は、インダス期から金石併用期に至る Gilund, Farmana, Kuntasi, Mitathal, Inamgaon, Nevasa の 6 遺跡と、鉄器時代の Mahrjhari, Raipur, Naikund といったメガリスの遺跡から出土した青銅器である。鏡、バングル、指輪、ナイフ、斧、釣り針などから小片を切り出し、分析に供した。また、熱処理型高錫青銅製作技術の伝播を調査するため、経路にあたと推測されるタイの博物館に所蔵されている青銅も対象として分析調査を行った。

4. 研究成果

4.1 インドにおける熱処理型高錫青銅

ここでは、調査した遺跡資料のうち、Farmana, Mitathal, Mahrjhari から出土した資料の調査結果について順に紹介する。

(1) Farmana(2500-2300BCE)

分析した資料は、Bangle や ring のような装飾品をはじめ、鏃、斧のような武器、工具などであった。比較的小さなものが多く、大きいとみられる斧でもその重さは 90 ~ 110g 程度であった。31 点の資料より分析用サンプルを採取したが、うち、9 点は腐食が内部まで進行しており、金属領域が見いだせなかった。定量分析ができなかった。分析ができた 22 点はほとんどが銅を主成分とする純銅に近い合金であり、錫が含まれるものは 1 点のみであった。亜鉛を含むものは 2 点あったが、インダス期のものではないと考えられる。砒素を含むものは 11 点見られた。合金元素というよりは、鉱石に含まれていた不純物と考えられる。そのほか、硫黄や鉄といった不純物元素が検出された。調査した資料から、代表して 2 点の金属組織を図 2 に示す。

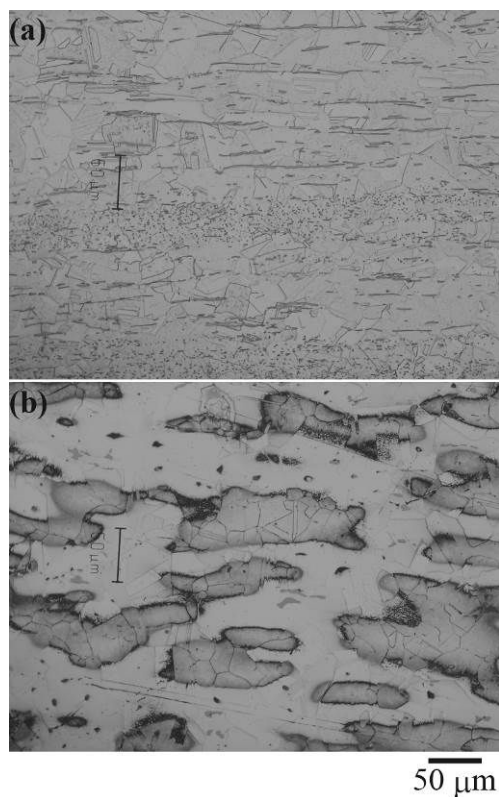


図 2 Farmana 遺跡出土銅器の金属組織
(a)腕輪、(b)斧

図 2 (a)は腕輪の金属組織である。SEM-EDX による成分分析では、硫黄を 1%程度含む純銅製である。錫や鉛は検出されていない。金属組織は双晶を含む α 相の等軸粒からなる。この腕輪は鍛造と焼きなましを繰り返して作られたものと見られる。なお、引き延ばされた硫化銅相が前面に分布している。この介在物は不純物として含まれるものであり、銅の原料鉱石から混入したものと考えられる。

もう一枚の組織写真(b)は斧の金属組織である。この斧は不純物として微量の硫黄と 1%のニッケル、2%の砒素を含む。初晶 α 相のデンドライトのような形状がみられるが、よくみると、 α 結晶は等軸粒であり、双晶も含まれている。鑄造時に初晶デンドライトの形成と砒素のミクロ偏析が発生したが、その後の鍛造と焼きなましで α 相の再結晶粒が形成され、現在の等軸粒ができたものと考えられる。焼きなましされても砒素の拡散のための十分な時間がなく、初晶デンドライトの形にエッチングされたものと考えられる。

他の遺物についても、概ね、(a)もしくは(b)に近い金属組織であり、高錫青銅に相当する青銅遺物は検出されなかった。

(2) Mitathal(2200-1800BCE)

この遺跡から出土した資料については、30 点を分析した。ロッド、斧、腕輪、刃、鑿のほか、用途の不明なものもあった。ただし、30 点中、8 点は腐食が内部まで進んでおり、金属領域を見出すことができなかった。残りの 22 点における EPMA による分析では、高錫青銅はおろか、錫を 0.1%以上含む資料は検出できなかった。不純物としては、硫黄、鉄、砒素などであり、鉛を 1%以上含む資料も 2 点検出した。

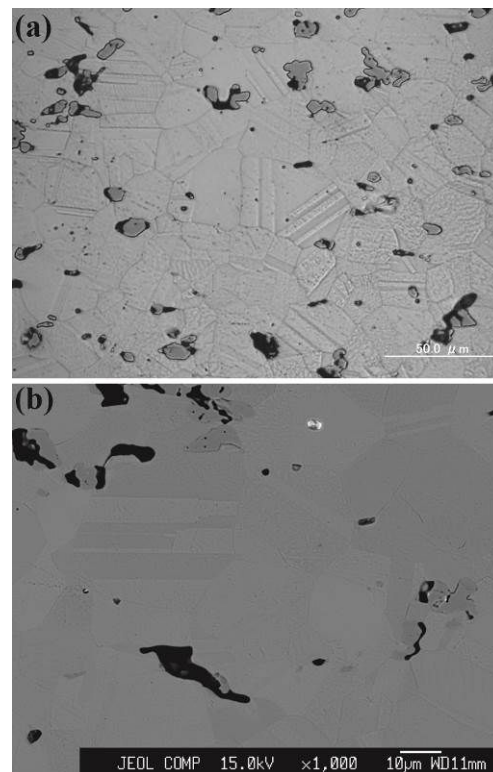


図 3 Mitathal 遺跡出土腕輪の金属組織
(a) 金属顕微鏡像、(b) EPMA による組成像

Mitathal 遺跡出土品を代表して、図 3 に腕輪の金属組織を示す。(a)が金属顕微鏡による組織写真である。Farmana 出土の腕輪と同様、双晶を含む α 相の等軸粒がみられる。また、粒状の硫化銅相が観察される。この資

料に含まれる硫黄量は 1%であり、このように多くの硫化銅が分布している。また、鉛は 0.1%含んでいることが EPMA 分析から分かっているが、金属顕微鏡組織写真では、鉛相を判別できなかった。そこで(b)に EPMA による組成像を示す。上の方にみられる白い点が鉛相である。

(3) Mahrjhari(8th-6th BCE)

南インド巨石文化の代表的遺跡である Mahrjhari 遺跡は、マハーラーシュトラ州ナグプール近郊にある。環状列石による巨石墓が特徴のこの遺跡からは、多くの鏡が出土している。図 4 に分析した鏡の外観と金属組織を示す。

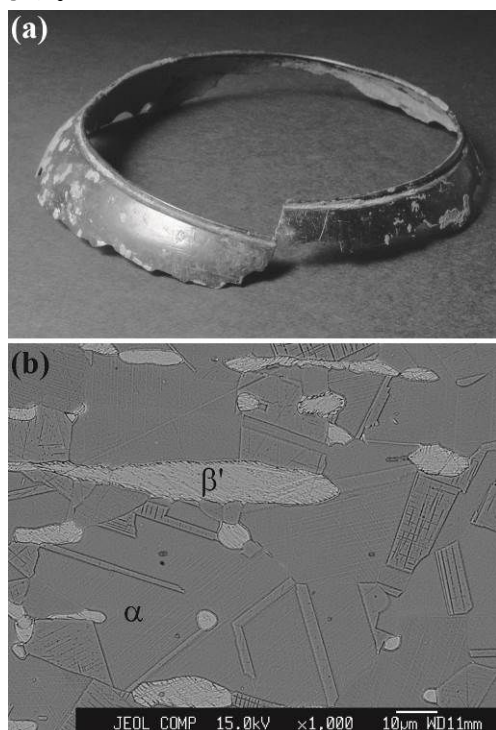


図 4 Mahrjhari 遺跡出土銅鏡(a)とその金属組織(b)

ここに示す銅鏡は口縁の部分でも厚さが 2mm 程度であり、本体部分ほど厚さが薄くなっていき 0.7mm 以下の部分もある。鑄造では湯回り不良が発生する恐れもあるこの鏡は特殊な方法で成形されている。EPMA による定量分析では、錫を 16%含む熱処理型高錫青銅であることがわかった。硫黄や鉛などは検出されず、高品質の素材を原材料としていることがわかった。組成像からみてわかるように、双晶を含む α 相の等軸粒と β' マルテンサイト組織がみられた。図 1 の熱処理型高錫青銅の組織と比較すると、 α 相と β' マルテンサイト相の比が逆転しているように見られるがこれは、含まれる錫量の違いに由来している。図 1 の高錫青銅は錫含有量が 22%であり、この Mahrjhari 出土銅鏡よりもはるかに多い。いずれにせよ、この鏡は、熱間鍛造で成形後、焼き入れをして作られたものである。特殊な成形方法であるといえるが、紀元

前 1 千年紀前葉にこのような技術が存在していたのだということがわかった。なお、Mahrjhari 遺跡出土の鏡はすべてが熱処理型高錫青銅品ではなく、むしろ大多数が硫黄や砒素を含む青銅製品であり、冷間鍛造と焼なましによって製作されたものであることも確認している。

4.2 アジアへの伝播

熱処理型高錫青銅は、現在でも韓国で鑄造、鍛造による製品製作が続けられており、技術の伝承も行われている。日本では、古墳時代にこの技術が伝えられたと考えられるが、現在では殆どすたれており、鏡などを製作する職人は皆無である。インド、あるいはその周辺地域で発生した可能性がある熱処理型高錫青銅がどのような経路で韓国や日本へ到達したのか、という解には現在のところまだたどり着けていないが、タイの調査でタイにもこうした熱処理型高錫青銅が多数残されていることがわかった。図 5 はタイの博物館から破片を譲り受けて分析した鏡の金属組織である。錫量は 22%であり、不純物として硫黄を 0.3%含む。タイは、日本へ伝播する過程での一つの中継地である可能性があり、今後も研究を継続していきたいと考えている。

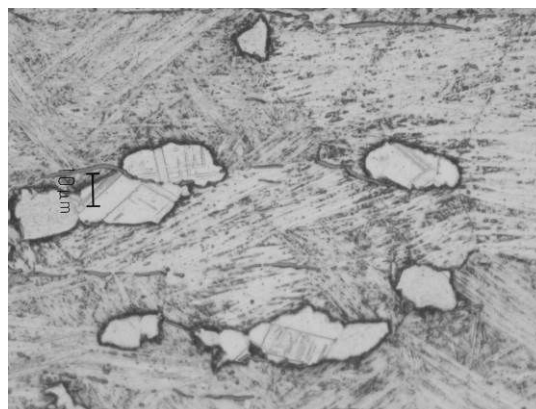


図 5 タイ国立博物館所蔵銅鏡片の金属組織

今回の研究により、多くの遺跡から出土した資料を分析することができた。これらのデータについては、今後、学会などで順次発表をしていくこととしている。

【参考文献】

- 1) 長柄毅一、現代のインド、韓国における高錫青銅器の加工と熱処理、『アジアの高錫青銅器—製作技術と地域性—』平成 22 年度独立行政法人日本学術振興会国際研究集会論文集 2010, pp.23-30
- 2) 長柄毅一、李相龍、泗川出土青銅製品の分析、東亜細亜文化財研究院発掘調査報告書第 48 集、2011

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Takekazu Nagae, Sharada Srinivasan, Srinivasa Ranganathan, R.M.Pillei, Yasuji Shimizu, Haruhisa Mifune, Thermographical Analysis of Continuing Tradition of Mirror Casting in Kerala, ISIJ International, 査読有, vol.54, 2014, pp.1172-1176

長柄毅一、古代アジアにおける高錫青銅器の発生と伝播、大阪冶金学会誌、査読無、54 巻、2014、pp.7-11

〔学会発表〕(計 7 件)

Takekazu Nagae, Yasuji Shimizu, Vasant Shinde, Preety A.Trivedi, Boonyarit Chaiswan, Lee Sang-Yong, Akinori Uesugi, Taisuke Aoyagi, Takumi Sugiyama, Haruhisa Mifune, Microstructure and mechanical properties of high tin bronze wares unearthed from Asian ancient sites, The Eighth World Archaeological Congress, Kyoto, 2016 年 8 月 28 日~9 月 2 日

Takekazu Nagae, Preety A.Trivedi, Yasuji Shimizu, Takumi Sugiyama, Akinori Uesugi, Manako Tanaka, Microstructural observation of Copper and Iron objects from Megalithic Sites in Nagpur division, 171st ISIJ Meeting International organized session, 東京理科大学, 2016 年 3 月 25 日

長柄毅一、古代アジアにおける熱処理型高錫青銅器の製作技術、日本銅学会第 55 回講演大会(招待講演)、大阪大学吹田キャンパス、2015 年 11 月 2 日~3 日

長柄毅一、李相龍、韓国忠州虎岩遺跡出土青銅器の金属組織と製作方法、第 9 回アジア鑄造技術史学会、中部大学名古屋キャンパス、2015 年 8 月 29 日~30 日

長柄毅一、三船温尚、二元系および三元系高錫青銅の熱間加工性、アジア鑄造技術史学会、京都国際交流会館、2014 年 9 月 20 日~21 日

Takekazu Nagae, Srinivasa Ranganathan, R.M.Pillei, Sharada Srinivasan, Yasuji Shimizu, Haruhisa Mifune, Thermographical analysis of continuing tradition of mirror casting in Kerala, The 8th International Conference of the Beginnings of the use of metals and alloys, Nara, 2013 年 9 月 10 日~15 日(論文の発表)

Takekazu Nagae, Yutaka Maebara, Hidehiro Sugiyama, Yasuji Shimizu, Haruhisa Mifune, Microstructure

observation on heat treatable high tin bronze bowls excavated at Japanese antiquities, Historical Metallurgy Society, London, 2013 年 6 月 14 日~16 日

6. 研究組織

(1)研究代表者

長柄 毅一 (NAGAE, Takekazu)
富山大学・芸術文化学部・教授
研究者番号：60443420

(2)研究分担者

三船 温尚 (MIFUNE Haruhisa)
富山大学・芸術文化学部・教授
研究者番号：20181969

(3)連携研究者

清水 康二 (SHIMIZU Yasuji)
奈良県立橿原考古学研究所・埋蔵文化財部・指導研究員
研究者番号：90250381

(4)連携研究者

青柳 泰介 (AOYAGI Taisuke)
奈良県立橿原考古学研究所・調査部調査課・総括研究員
研究者番号：60270774

(5)連携研究者

上杉 彰紀 (UESUGI Akinori)
関西大学・研究推進部・非常勤研究員
研究者番号：20455231

(6)連携研究者

西秋 良宏 (NISHIAKI Yoshihiro)
東京大学・総合研究博物館・教授
研究者番号：70256197

(7)連携研究者

田賀井 篤平 (TAGAI Tokuhei)
東京大学・総合研究博物館・名誉教授
研究者番号：40011738

(8)研究協力者

Srinivasa Ranganathan
National Institute of Advanced studies,
India

(9)研究協力者

Vasant Shinde
Deccan college, India