

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 30 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21300328

研究課題名（和文） 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

研究課題名（英文） Study on high tin bronze fabrication techniques in East Asia via chemical composition analysis and microstructural observation of excavated copper wares in Korea

研究代表者

長柄 毅一（NAGAE TAKEKAZU）

富山大学・芸術文化学部・准教授

研究者番号：60443420

研究成果の概要（和文）：韓国の慶尚南道出土の高麗時代や朝鮮時代に製作されたとみられる銅鉢、匙等、40点の金相評価ならびに成分分析を行った。なお、出土品は現代の鍮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。現代の鍮器では、銅鉢や匙などは鑄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判明した。

研究成果の概要（英文）：40 copper ware objects, including bangles, spoons, and bowls, which were excavated in Korea were subjected to chemical analysis and microstructure observation. Their chemical compositions turned out to be same as that of contemporary *yugi*, Korean high tin bronze ware. Contemporary *yugi* wares are generally made by casting, but most of the excavated objects were found to be made by forging cast alloy plate followed by annealing.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2010年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2011年度	1,800,000	540,000	2,340,000
総計	10,700,000	3,210,000	13,910,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：文化財科学・文化財科学

キーワード：蛍光 X 線分析、熱処理型高錫青銅、熱間鍛造、鑄造、焼き入れ、金属組織

## 1. 研究開始当初の背景

平成 19 年度から基盤研究(B)「韓国鍮器調査を基点としたアジア地域の青銅器熱処理技術研究の展開」において、錫 22%・銅 78% の高錫青銅で作る韓国の伝統産業である鍮器の、鑄造、鍛造による製造工程の記録を行なった。これまで 6 工房（奉化で 2 工房、金泉で 2 工房、宝城で 1 工房、居昌で 1 工房）

を訪れ、工程記録、道具の実測、工房見取り図作製を行なった。その際、鑄造時における溶湯温度や焼入れ熱処理時における加熱温度など、赤外線サーモグラフ装置を用いて実測した。職人の勘と経験によって決められる熱加工温度を実測した研究例はこれまでに無く、金属組織や機械的性質に大きな影響を及ぼす温度因子に関して重要なデータが得

られた。鋳器は、鑄造技法、バンチャ技法、半バンチャ技法の3通りの方法で作られ、現在それぞれの技法で3名が人間国宝の指定をうけている。韓国文化財庁の李恩碩氏との共同調査で、平成20年8月に人間国宝の韓相椿氏が継承している半バンチャ伝統工法を記録することができた。

韓相椿氏はこれまで技法をあまり公開しておらず、韓国国内においてもこの技法は謎とされてきた。半バンチャのなかでも特に謎の多いグングルムオクソン技法（熱間加工）といわれる韓相椿氏の成形方法について、加工中の鋳器の温度変化などの詳細なデータを取得した。また、金属組織の観察データから、試料がおよそ何度で熱処理されているかどうかを知ることができ、双晶の有無によって鍛造加工がされているかどうかを判断することが可能となった。このように、実際の伝統製作工程と加工温度を記録しその金属組織を提示する研究は、これまでに例のない手法で古代熱処理技法解明の重要な礎となる。これを背景として、本研究は韓半島出土高錫青銅遺物を科学分析し、時代、地域、器種、器形別の金属組織から古代技法を分類する。

研究を加速できる好条件として、2008年8月に、韓国の財団法人東亜細亜文化財研究院（院長 辛勇旻博士）と研究分担者（三船）が長期的な「高錫青銅製品分析 共同研究協定」を締結した。現在、研究院から実験的に数点試料提供を受け分析準備を整えている。東亜細亜文化財研究院からは、多くの青銅器を分析試料に供してもよいとの確約を得ており、青銅器時代以降の高錫青銅器の成分、組織、製造方法に関する価値あるデータベースを構築することが可能である。

このような背景をもとに、本研究を開始した。

## 2. 研究の目的

日本では、正倉院の佐波理など、高錫青銅の伝世例が数多くみられるが、現代において、工業製品で Sn20%を越える高錫製品はほとんど作られていない。古代から高錫製品は作られてきたが、考古学分野においても「高錫青銅」の明確な定義はなく、研究の空白部分であった。

青銅合金は Sn 8%以上になると常温加工が困難になる。これは、凝固温度範囲が広いことにより析出する  $\delta$  相が原因している。Sn 10%程度までならこの相は長時間の焼き鈍しで消失させることができる。そこで、10%を高錫青銅か否かの境界にすることができる。一方、Sn は 520°Cで最大 15.8%まで Cu 中に固溶する。この最大固溶限を境界にする考え方もある。Sn 15.8%以上では、焼き鈍し熱処理をしても  $\delta$  相が残り、靱性を低下させる。そのため、溶体化処理後焼き入れをいう高度な熱処理技術が必要となる。そこで、Sn 10%以上が一般に高錫青銅といわれているが、我々は特に Sn 15%以上を含むもの（上限は 25%程度）を熱処理型高錫青銅として定義した。

本研究では、韓国出土の銅製品の成分、金相分析を中心として、技術の川上にあると考えられるインドから、川下の日本に高錫青銅品（佐波理）がどのようにして伝播してきたのかを明らかにすることを目的として研究を実施した。化学組成を精密定量し、高錫製品のカテゴリーや用途を考察し、熱処理の有無や金属組織を推測するための判断基準の構築に努めた。

## 3. 研究の方法

### (1) 試料採取

韓国東亜細亜文化財研究院において時代、器種など勘案し分析試料を採取した。分析対

象として選定したのは、銅皿、銅錠、匙など 40 点である。

(2) 成分分析および金相観察

①成分分析（蛍光 X 線分析）：構成元素を解析する。

②金属組織（光学顕微鏡）：構成相を知り、製造方法を特定する。

③電子顕微鏡試験（SEM、EPMA）：構成相の成分を評価し、製造方法の特定をする。

④ X 線回折（XRD）：腐食層を分析し、腐食原因を探る。

⑤硬さ試験（硬度計）：遺物の強度を知り、利用目的を推測する。

(3) その他

技術伝播を探る目的で、インド、日本の出土品、伝世品の分析を行った。

#### 4. 研究成果

(1) 韓国出土青銅器と組成

分析に供した資料のうち 10 点を抜粋して表 1 に示す。5 点が高麗時代（KB1～KB5）の器物であり、5 点が朝鮮時代（KB6～KB10）である。サンプルの採取に当たっては、器物の本体とつなぐことができない、修復には使えない部分を選んだ。表 2 には、走査型電子顕微鏡に付属のエネルギー分散型 X 線分析装置（SEM-EDX）によって簡易定量した結果を示す。微量元素は検出限界以下であり、定量値は掲載しなかったが、組織観察などから存在が認められたものはその旨記載した。

概ね、Cu 80%、Sn 20%の組成であるが、KB7（青銅脚片、朝鮮時代）の Cu74%、Sn12%、Pb13%のように、特殊な組成のものがある。なお、KB6 の朝鮮時代の青銅錠片にはリベットがついていたので、これについても分析した。リベットは変形させることが必要であり、その組成は Cu91%、Sn4%、Pb4%と Sn 量が極めて低いものであることがわかった。

表 1 資料（抜粋）の遺跡名、品名、年代

記号	品名	遺跡	時代
KB1	청동합편 青銅盒片	부산신항 釜山新港土壤209号1759	고려 高麗
KB2	청동접시 青銅皿	거제폐왕성 巨濟廢王城蓮池67	고려 高麗
KB3	청동완저부편 青銅碗底部片	거제폐왕성 巨濟廢王城蓮池66	고려 高麗
KB4	청동접시편 青銅皿片	부산신항 釜山新港土壤114号1506	고려 高麗
KB5	청동완편 青銅碗片	부산신항 釜山新港土壤42号№1311	고려 高麗
KB6	청동합편 青銅盒片	창원가음정동 昌原加音丁洞101号37	조선 朝鮮
KB7	청동발 青銅脚片	김해본산리 金海本山里7TR7号①	조선 朝鮮
KB8	청동송가락편 スッカラク	부산신항 釜山新港土壤82 1422	조선 朝鮮
KB9	청동송가락편 スッカラク	부산신항 釜山新港土壤117㉔1515	조선 朝鮮
KB10	동시편 スッカラク	사천 용현 四川龍見43㉓	조선 朝鮮

表 2 主要構成元素の定量値

	質量濃度 (mass%)				
	S	Cu	As	Sn	Pb
KB1	微量	80	-	20	-
KB2	微量	79	-	21	-
KB3	微量	80	-	20	-
KB4	微量	80	-	20	-
KB5	微量	80	-	20	-
KB6	微量	80	-	20	-
KB6 (rivet)	0.7	91	-	3.8	4.2
KB7	微量	74	0.6	12	13
KB8	微量	80	-	20	-
KB9	微量	79	-	21	-
KB10	微量	79	-	21	-

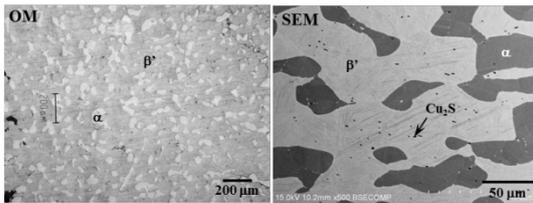
(2) 韓国出土青銅器の金属組織と製法

錫を 20%程度含む高錫青銅において特徴的な組織は  $\alpha$  相、 $\alpha + \delta$  共析相、 $\beta'$  マルテンサイト相の 3 種であり、製造方法や熱処理によって、それぞれの形態が決まる。このほか、Pb 相や不純物の  $\text{Cu}_2\text{S}$  相などが存在する。以下に、表 1 の資料について、光学顕微鏡写真（左）と電子顕微鏡写真（右）を提示してそれぞれの特徴を記す。

## ① 高麗時代の青銅器

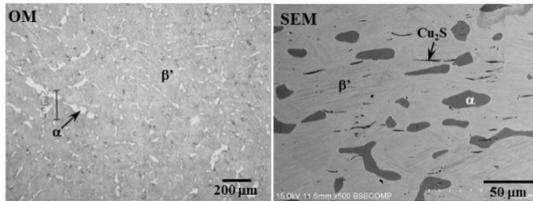
### KB1 青銅盒片

$\alpha$ 相が粒状に細かく均一に分散しており、それぞれに双晶がみられることから、鍛造されたことがわかる。 $\alpha$ 相中には14%の錫が固溶していた。また、錫を22%固溶した $\beta'$ マルテンサイトが観察され、靱性を向上させるための焼入れが施されたことがわかる。 $\text{Cu}_2\text{S}$ は細かい粒状となって分散している。



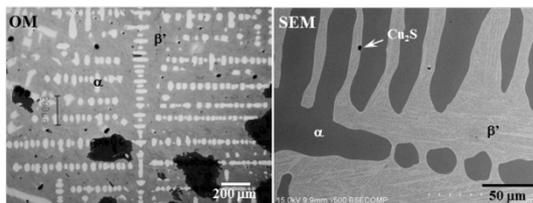
### KB2 青銅皿

双晶をもつ $\alpha$ 相と $\beta'$ 相から、鍛造後、焼入れされたものであることがわかる。 $\text{Cu}_2\text{S}$ も鍛造によって薄くつぶされている。



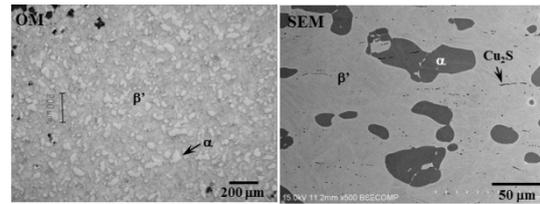
### KB3 青銅鉢底部片

$\alpha$ 相が樹枝状晶（デンドライト）となっている様子が観察できる。しかも、双晶はみられない。 $\alpha$ 相のほかは $\beta'$ マルテンサイト相であり本品は、鑄造品を焼入れしたものである。



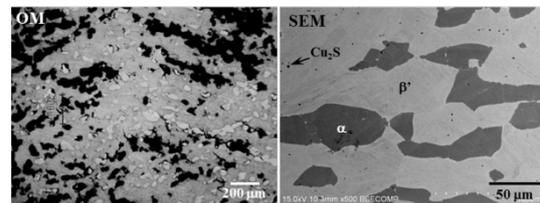
### KB4 青銅皿片

双晶をもつ $\alpha$ 相が粒状に分散しており、 $\beta'$ 相がみられることから、鍛造後、焼入れ熱処理を施されている。



### KB5 青銅鉢片

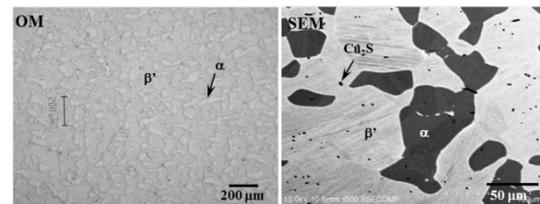
光学顕微鏡写真にみられる黒い部分は長い間、土中におかれたことにより腐食し、銅が抜けた部分である。 $\alpha$ 相の形状から鍛造されていることは明らかである。 $\beta'$ 相がみられることから、鍛造後、焼入れされたものであることがわかる。



## ② 朝鮮時代の青銅器

### KB6 青銅盒片

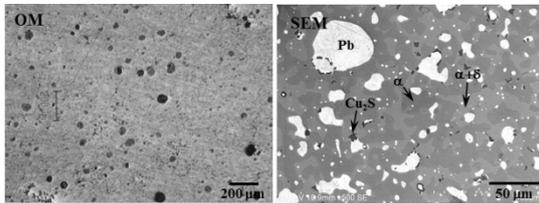
$\alpha$ 相は細かく粒上に分散しており、コントラストが低いため見えにくいですが、双晶も確認できた。そのほかの部分は $\beta'$ マルテンサイトであり、鍛造後、焼入れされたものである。



### KB7 青銅脚片

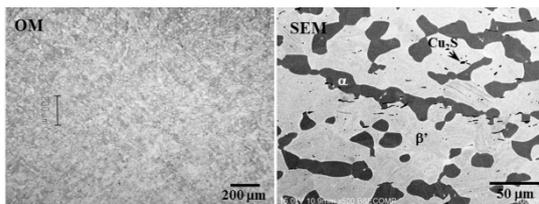
本品は他の資料と組成が全く異なっており、錫が12%と低く、鉛が多い。光学顕微鏡組織では見えにくいですが、 $\alpha$ 相が粒状ではなく繋がっている状態が確認できた。なお、 $\alpha$ 相中に双晶はなく、鍛造されたことを示す証拠がない。鉛相が比較的丸いことからみても、鑄造で作られたものと考えられる。なお、器の厚さは0.5~2 mm程度と薄いことから、鑄

造品が最終形状となっているのではなく、削りだし（ガジル）で薄くしているのではないかと推察する。なお、熱処理であるが、 $\beta'$  マルテンサイトは見られず、 $\alpha + \delta$  共析組織がみられたことから、焼入れはされていない。



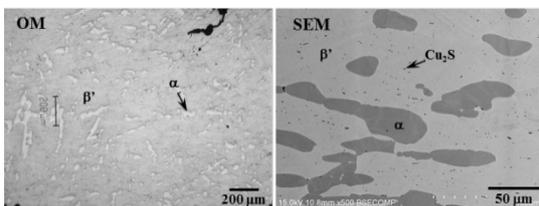
#### KB8 スッカラク(匙)

双晶をもつ $\alpha$ 相と $\beta'$  マルテンサイト相から、鍛造後、焼入れされたものである。ただし、 $\alpha$ 相は比較的長く繋がっており、デンドライトが一部残っている部分もあることから、鍛造によって変形された程度は小さいのではないかと考えられる。



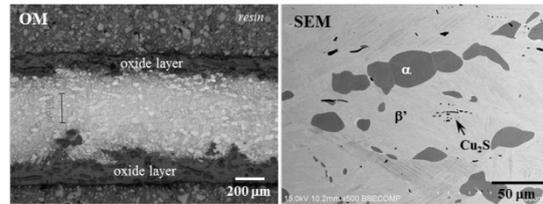
#### KB9 スッカラク(匙)

双晶をもつ $\alpha$ 相と $\beta'$  マルテンサイト相からなる。鍛造後、焼入れされている。 $\alpha$ 相がある程度分断されており、KB8 に比べると鍛造による変形量は大きいと考えられる。



#### KB10 スッカラク(匙)

双晶をもつ $\alpha$ 相と $\beta'$  マルテンサイト相からなる。鍛造後、焼入れされたものである。



#### (3) まとめ

ここに紹介した高麗時代の青銅器は、ほとんどが鍛造後、焼入れされたものであり、KB3（巨済廃王城蓮池の青銅甕底部片）のみ、鑄造後、塑性加工せずに焼入れしたものであった。朝鮮時代の青銅器についてもKB7（金海本山里の青銅脚片）を除いてすべて鍛造後、焼入れされたものである。現代の工房においては、スッカラクなどは、鑄造したものを焼入れして作っている場合が多いが、より手間のかかる鍛造をしてから焼入れをしているのが興味深い。

#### (4) 今後の展望

韓国出土青銅器の分析だけではなく、インドや日本の出土品、伝世品についてのデータも着々収集している。今後は、分析の主体を韓国から、インドに移し、インド出土品の調査分析をもとに、青銅器文化の日本への伝播のあり方を調査していく。

#### 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11件）

- ① Takekazu Nagae, Compositional and microstructural analysis of copper wares excavated at Farmana, EXCAVATIONS AT FARMANA, District Rohtak, Haryana, India 2006-2008 Edited by Vasant Shinde, Toshiki Osada and Manmohan Kumar, Indus Project, Research Institute for Humanity and Nature, Kyoto, Japan、査読無、2011、pp. 801-807
- 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 泗川龍見遺跡、査読無、Vol. 48 付録2 2011、pp. 3-18
- ③ 三船温尚、現代アジアの高錫青銅器製作技術の比較、平成22年度独立行政法人日本学術振興会国際研究集会『アジアの高錫青銅器—製作技術と地域性—』テキスト、査読無、2010、pp. 5-11
  - ④ 清水康二、佐波理伝来—二元系高錫青銅の来た道—、平成22年度独立行政法人日本学術振興会国際研究集会『アジアの高錫青銅器—製作技術と地域性—』テキスト、査読無、2010、pp. 13-22
  - ⑤ 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、平成22年度独立行政法人日本学術振興会国際研究集会『アジアの高錫青銅器—製作技術と地域性—』テキスト、査読無、2010、pp. 23-30
  - ⑥ 長柄毅一、金属組織観察による高錫青銅の熱処理技術と製作技術の解明、東亞文化、査読無、Vol. 8、2010、pp. 253-290
  - ⑦ 長柄毅一、波多野篤、向山遺跡出土銅鉢の金属組織と腐食形成層、日本金属学会誌、査読有、Vol. 74、2010、pp. 598-604
  - ⑧ 清水康二、長柄毅一、奥山誠義、三船温尚、『鑄銭図解』に見る「床焼」について、アジア鑄造技術史学会誌FUSUS、査読有、Vol. 3、2010、pp. 35-44
  - ⑨ 清水康二、アジアにおける二元系高錫青銅器の展開、平成21年度独立行政法人日本学術振興会二国間交流事業〈韓国とのセミナー〉報告書『韓半島の高錫青銅器の熱処理技術・製作技術研究』、査読無、2010、pp33-47.
  - ⑩ 長柄毅一、李相龍、高麗、朝鮮時代の高錫青銅器の金属組織、平成21年度独立行政法人日本学術振興会二国間交流事業〈韓国とのセミナー〉報告書『韓半島の高錫青銅器の熱処理技術・製作技術研究』、査読無、2010、pp81-93.
  - ⑪ 長柄毅一、三船温尚、李恩碩、権柱翰、李相龍、清水康二、庄田慎矢、村松洋介、Han Min Su、金夏廷、鑄器の熱処理と加工技術、平成21年度独立行政法人日本学術振興会二国間交流事業〈韓国とのセミナー〉報告書『韓半島の高錫青銅器の熱処理技術・製作技術研究』、査読無、2010、pp133-160.

[学会発表] (計7件)

- ① 長柄毅一、三船温尚、Vasant Shinde、小茄子川歩、清水康二、青柳泰介、インド・マフルジャリ遺跡で出土した銅鉢の製作技法、日本金属学会秋季大会、2011年11月7日、沖縄
- ② Yasuji Shimizu, Acceptance of High Tin bronze technologies in ancient Japan, 日本鉄鋼協会秋季大会国際交流プログラ

- ム、2011年9月22日、大阪
- ③ 澤田秀実、齋藤努、長柄毅一、持田大輔、6～7世紀における古墳出土銅鉢の理化学的研究、アジア鑄造技術史学会榿原大会、2011年8月27日、奈良
  - ④ 長柄毅一、前原豊、杉山秀宏、清水康二、三船温尚、群馬県前橋市元総社遺跡および天神遺跡出土銅鉢の金属組織、アジア鑄造技術史学会榿原大会、2011年8月27、28日、奈良
  - ⑤ 長柄毅一、Vasant Shinde、清水康二、青柳泰介、李相龍、三船温尚、インド・マフルジャリ (Mafurjhari) 遺跡出土の銅鉢について、アジア鑄造技術史学会出雲大会、2010年8月28、29日、島根
  - ⑥ 持田大輔、長柄毅一、澤田秀実、6-7世紀における銅製容器の生産体制(予察)、アジア鑄造技術史学会出雲大会、2010年8月28日、島根
  - ⑦ Takekazu Nagae, Han Min Su, Lee Eun Seok, Lee Sang Yong, Haruhisa Mifune, Yasuji Shimizu and Shinya Shoda, Forging technique of Korean high tin bronzeware “ban-bangjja yugi” and its microstructure, BUMA VII (7<sup>th</sup> International Conference on the Beginnings of the Use of metals and Alloys), 13-17 Sept. 2009, Bangalore, India

[その他]

ホームページ等

<http://wwwsoc.nii.ac.jp/asiacast/kousuzu.pdf>

## 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・准教授  
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)  
奈良県立榿原考古学研究所・主任研究員  
研究者番号：90250381