

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月5日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23650570

研究課題名（和文）結晶構造解析に基づく弥生時代の青銅器破砕行為のプロセス復元

研究課題名（英文）Reconstruction of Yayoi-period ritual destruction of bronzes through crystal structure analysis

研究代表者

福永 伸哉（FUKUNAGA SHINYA）

大阪大学・文学研究科・教授

研究者番号：50189958

研究成果の概要（和文）：本研究では、弥生時代終末期（3世紀前半）の遺跡から細片となって出土する銅鐸や銅鏡の歴史的な意味について考古学と金属工学の学際的な分析によって検討した。その結果、ヤマト政権成立直前において、銅鐸は神聖性が急速に失われ、青銅器の原料として再利用するため人為的に700℃以上に加熱して破片化されたのに対して、銅鏡片（とくに内行花文鏡片）は瀬戸内～畿内の首長連合のシンボルとして、数量不足を補うべく打ち割られ、貴重品として分割所持されたという差異を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Informed by an interdisciplinary approach between archaeology and metal engineering, this study presents an analysis of bronze bell and mirror fragments unearthed from sites dating to the early-3rd-century (Final Yayoi), temporally situated on the eve of the Yamato Kingdom's emergence. The results indicate that bronze bells, having rapidly lost their sanctity, were heated to over 700°C and shattered in order to be reused in the production of other bronzes; in contrast, bronze mirrors (particularly those with designs of interconnected arcs [naikō-kamon-kyō]), in an effort to overcome deficient supply, were shattered and distributed as an authority symbol of the elite confederacy centered on the Setouchi and Kinai regions.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,400,000	420,000	1,820,000

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：弥生時代、青銅器、銅鐸片、鏡片、鉛溶融、高温強度、X線回折、結晶粒界

1. 研究開始当初の背景

古代国家形成へ向けて日本列島の社会が複雑化し始める弥生時代には、各地で輸入青銅器や「国産青銅器」が登場し、共同体の農耕祭器として、あるいは地域の政治シンボルとしての役割を担っていた。しかし、それら弥生青銅器は次なる古墳時代の到来を前にすべて姿を消すことがわかっている。近年では、弥生終末期の遺跡から、銅鐸や銅鏡などが長さ数cmの小さな破砕断

片となって出土する例が数百例に達しており、その意味が俄然注目されつつある。弥生社会に不可欠であった青銅器が破砕される現象の実態と意味を正確に捉えることは、古墳時代の成立、すなわちヤマト政権成立過程の解明にも直結する重要な課題である。

では、いかなる行為によって青銅器がかくも小さな断片となったのか。残念ながらこの点は、いくつかの推測や実験考古学的成果が提示されてはいる

ものの、なお大きな謎となっている。また、銅鐸と銅鏡の破片には何か意味の違いがあるのかという点も、これまでほとんど検討課題とされたことがない。弥生時代終末期に破碎の対象となった各種青銅器の特性を踏まえた上で、破碎青銅器片が生じたプロセスを復元的に検討することは、主観的推測段階にとどまっている現在の研究水準を飛躍的に高める成果につながる。

2. 研究の目的

ヤマト政権成立直前の弥生時代終末期（3世紀前半）の遺跡から、銅鐸や青銅鏡などが長さ数cmの小さな破碎断片となって出土する例が急増している。本研究の目的は、弥生終末期（3世紀前半）の遺跡から細片となって出土するこれら青銅器を対象として、(1)破片となったプロセスを金属工学的に考察し人為的な関与の有無を明らかにするとともに、(2)破片青銅器の型式や分布の特徴を考古学的に分析検討することによって、破片青銅器が有していた歴史の意味を解明することである。

3. 研究の方法

研究は、金属工学的な結晶構造解析による青銅器破碎プロセスの解明、考古学的な青銅器片の種類や分布にかんする分析という文理二者のアプローチを融合させる独創的な方法で実施し、具体的には以下の3点を柱とした。

(1)金属工学的研究 弥生時代青銅器の中でも近年出土例が急増している破片銅鐸の結晶構造を分析し、長さ数cmの一樣な細片となった破碎プロセスの復元を行い、破碎行為の実態を解明する。

(2)考古学的研究 破片銅鐸、破片銅鏡の最新事例を収集するとともに、種類・型式・分布等を検討する。

(3)研究の統合 以上の作業に基づき、ヤマト政権成立過程における青銅器の役割の変化、青銅器から見た政治関係などについて、新しい理解を提示する。

4. 研究成果

(1)金属工学的研究

桜井市纏向遺跡、大福遺跡等の遺跡出土銅鐸片、桜井市立埋蔵文化財センター、兵庫県立考古博物館等で製作されたレプリカ銅鐸片（成分組成は実物に準拠）などを借用して、X線回折による構造解析、元素分析型走査型電子顕微鏡による組織形態および元素

分布調査、硬度試験による機械的特性の調査、高温に加熱した際の破壊挙動と組織・結晶構造の関係の解析（レプリカ試料による）等、多角的なアプローチを試行した。このうちを中心としたアプローチが銅鐸の破碎プロセスを解明する上で特に有効であった。

分析は、破片青銅器の高温に加熱した際の破壊挙動と組織・結晶構造の関係を解析することで、青銅器の破碎機構の復元に関する知見を得る目的で行った作業である。一般に青銅（銅Cu-錫Sn合金）は、常温において高い延性（粘り）を有するため、機械的に破壊した場合、大きな変形を伴うと共に、出土されているような小さい破片として均一に粉碎することはない。ゆえに、当時は、青銅器を高温で加熱した状態で破壊した可能性が考えられる。そこで、本実験ではその破壊機構を再現すべく、500～750の温度範囲で加熱した青銅試料の組織構造および成分（元素分布状態）の変化を解析すると同時に、高温引張試験を通じて試料の強度と破壊形態（亀裂進展を誘発する含有元素の影響）を調査し、破碎プロセスの主な支配要因の特定を試みた。

青銅器を模擬した鉛含有青銅合金試料を対象に、加熱過程での組織構造変化について、示差熱量分析を行った。雰囲気に関して、当時を想定した大気中（酸化雰囲気）と、アルゴンガスを流入（流量450ml/min）した非酸化環境とし、両者を比較することで大気中に含まれる酸素との反応の影響について解析した。図1に示すように、いずれ

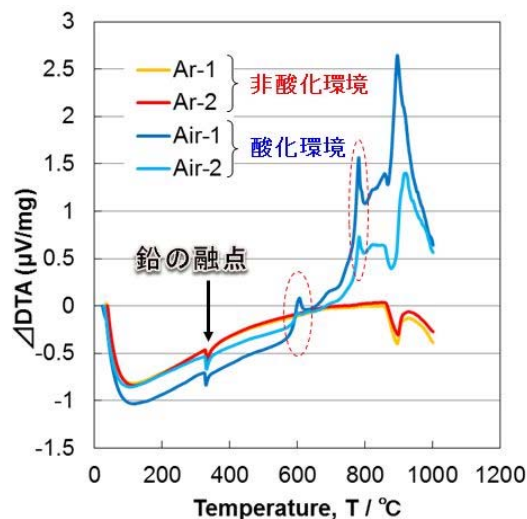


図1 青銅試料サンプルの示差熱量分析結果（大気加熱時の酸化現象の影響）

の加熱環境においても、372 付近に吸熱ピークが観察されるが、これが青銅試料に含まれる鉛の溶融に起因する吸熱反応である。他方、アルゴンガス雰囲気では、その後に明瞭な発熱・吸熱ピークは無く、相との共晶領域における吸熱反応が830 付近に観察される。他方、大気中（酸化雰囲気）加熱では、600 と780 付近で明確な発熱反応が見られ、試料重量の増加が確認されており、それぞれ 相、相の溶融に伴う顕著な酸化現象が生じたと考えられる。X線回折結果よりCu-Sn-Pb-O系酸化物粒子の存在が確認されたことから、600 を超える大気中加熱過程では、Cu-Sn系酸化物が生成し、外力が青銅試料に作用した際にこれらの酸化物が破壊の起点となり得ることが考えられる。次に、試料サンプルを500~750の各温度で10分間、加熱保持した後、常温に冷却した際の組織観察を行った。その結果を 図 2 に示す。加熱温度の増加に伴い、黒色粒子同士の連結が進行し、粗大粒子の生成が確認さ

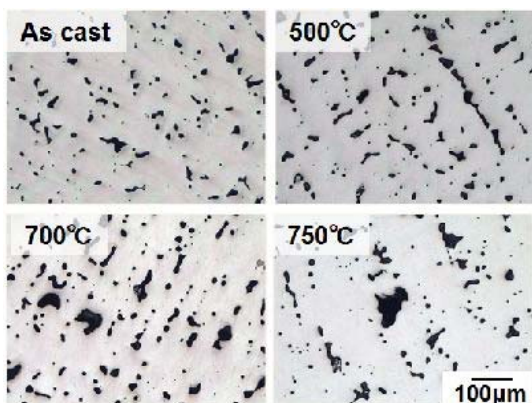


図 2 高温加熱による青銅試料サンプルの組織変化（鉛の溶融・合体成長の観察）

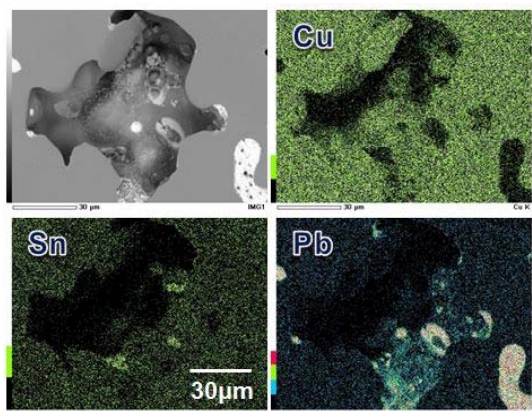
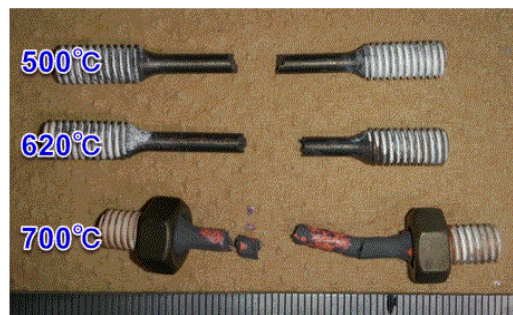
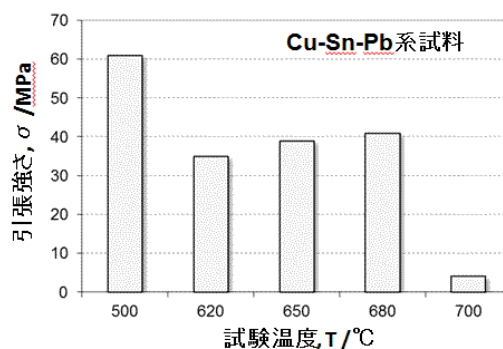


図 3 700 加熱サンプルにおける溶融鉛成分の粗大化に関するEDS分析結果

れる。700 にて加熱した試料を対象に、SEM-EDSにより黒色部近傍の元素分析を行った結果、 図 3 に見るようにPbの凝集が確認されたことから、図 2 の組織写真において黒色部は鉛に相当しており、加熱温度の増加に伴い、溶融した鉛の合体による粗大粒子の生成が確認された。次に、大気雰囲気にて各温度で加熱した状態で引張試験を行った結果（引張強さの温度依存性と破断試験片の外観）に 図 4 に示す。500 での引張強さ（62MPa）に対して620~680 では35~41MPaと低下し、さらに700 では4MPaと著しく低い値を示した。また破断後の試験片形状を比較すると、700 では試験片が数か所で破断しており、脆弱化していること 図 4 青銅試料サ



サンプルの高温引張試験結果と試験後の試料片外観

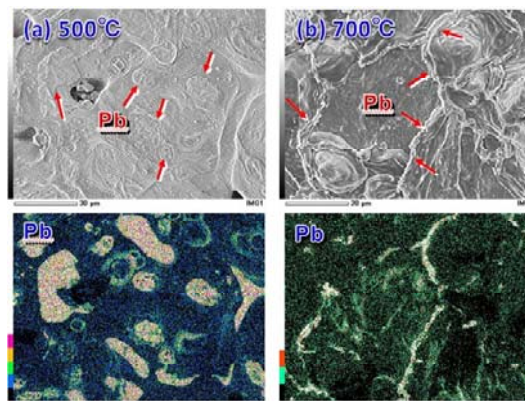


図 5 700 での高温引張試験後の破断面のSEM-EDS分析結果

とがわかる。両試験片の破断面をSEM-EDSにより分析した結果(図5)、鉛の分布に着目すると、500℃では球状に存在するのに対して700℃では結晶粒界に沿って鉛が分布しており、粒界での脆性破壊形態を呈していることから鉛を起点として破壊が進行したと考えられる。

ただし、いずれも各温度から徐冷状態で室温に到達した後の試験片を対象に分析した結果であり、各温度での鉛の分布状態を把握する必要がある。そこで、青銅試験片を各温度で加熱保持した後、直ちに水中に焼入れ処理を施し、各温度状態での組織を凍結することで鉛の分布状態を光学顕微鏡により調査した。その結果を図6に示す。

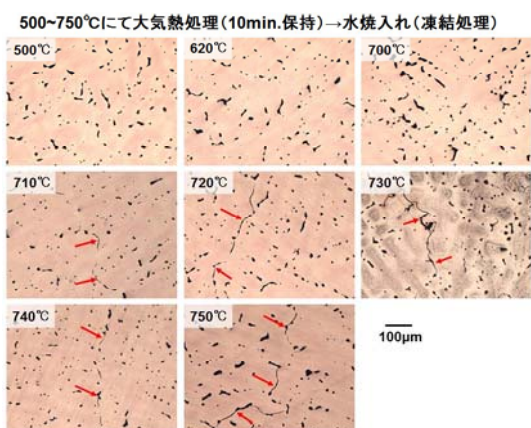


図6 高温加熱状態から水中への急冷による青銅試料の凍結組織観察(溶融鉛の分布状態の評価)

前述の通り、700℃では鉛同士の合体による粗大化が確認できるが、710℃以上では鉛が粒界に沿って線状に分布し、しかも加熱温度と共にそれらが連結して、その長さが増大している様子がわかる。

以上の結果より、青銅器の鑄込み性を改善するために有効な添加元素である鉛が融点以上の高温域では青銅素地中にて合体・粗大化し、しかも線状に連結した状態で分布するため、外力が作用すると低い応力で鉛に沿って破壊することを確認した。ゆえに、上述した鉛の連結分布状態が、出土時に確認されている数cm程度の小さい破砕片の形状を支配する要因であると推察できた。

(2)考古学的研究

銅鐸については、破片出土銅鐸資料

を集成し、破片の割れ方、大きさ、銅鐸型式との対応関係などを検討した。把握した約50例のうち、8割以上が1辺の長さ10cm未満の細片になっている。兵庫県久田谷遺跡で一括出土した117点の破片銅鐸は9割以上が9cm未満であり、銅鐸破碎の実行にあたっては、当初から細片にすることが意図されていたこと、そうした細片化を可能とする方法によって破碎行為がなされたことが推定される。具体的なプロセスとしては、700℃以上に加熱することで製品中の鉛の局部溶融現象が生じ、連結亀裂によって等分割破壊に至ったと推定する上述の金属工学的分析成果がきわめて示唆的である。このことと奈良県桜井市脇本遺跡、大福遺跡などで銅鐸片と土製外型などの鑄造関係資料が共伴出土した事例などを考え合わせると、銅鐸破碎は、別種青銅器の原材料とするために意図的に破碎されたと理解するのが妥当であり、高温加熱破碎という方法をとっていたとすれば、青銅の金属的特性を熟知している鑄造工人が、破碎から別種青銅器の製作までの作業に一貫してかかわったと考えることもできよう。

なお、このように細片となって出土する銅鐸のほとんどが、近畿式の突線鈕式鐸である点も重要である。福永は、弥生後期の突線鈕式鐸(近畿式)は内面突帯に揺り鳴らした際の使用痕が認められないため、農耕祭器から近畿地域連合の政治的シンボルへと性格を変えた「銅鐸形青銅器」として理解すべきであると考えている。それが破碎されて原材料に回される現象は、突線鈕式鐸を地域シンボルに立てて他地域と対峙するような「地域勢力並立時代」が終焉を迎えたために、聖なる地域シンボルであった銅鐸の役割が失われたためととらえれば理解しやすい。時期的には弥生終末期(庄内式期)のことであり、「卑弥呼共立」からヤマト政権成立へ向かう倭人社会の政治統合が進展した時代状況ときわめて整合的な現象といえよう。

いっぽう銅鏡片については、銅鐸とは違って常温でも打撃によって容易に破碎することができ、かつ破片そのものが墳墓の副葬品になる事例も多いことから、破碎行為の背景には銅鐸片とは異なる事情が存在していたと推定した。具体的には、弥生終末期において共同体内の階層分化の進展により中国

鏡の所持を望む有力層が増加したことをうけて、数量不足を補うために完鏡が分割されるに至ったという理解である。このことは出土鏡片の大半が内行花文鏡や方格規矩鏡といった中国鏡であり、同時期に製作された列島製の倣製鏡を含まないこととも関連しているのではないかと推定されている。つまり、威信財として価値の高い中国鏡を破片でも所持することが有力者の地位を表示するうえで有効だったということであろう。

注目されるのは、近畿地方の遺跡から出土する中国鏡（鏡片も含む）の鏡種が圧倒的に内行花文鏡に偏る点である。表1には、兵庫県域の出土鏡を例にあげたが、同時期の代表的な中国鏡種である方格規矩鏡との数量差は歴然としており、近畿の有力層にとって内行花文鏡を選択所持することが共通の意義を有していたと推定できる。内行花文鏡と方格規矩鏡の関係をさらに地域を広げて検討すると、弥生後期～終末期の北部九州においては福岡県井原鏡溝遺跡、平原遺跡などで20～30面の方格規矩鏡が副葬されたようにあきらかに方格規矩鏡への指向が顕著である。これに対して瀬戸内～畿内にかけては内行花文鏡が卓越しており、なかでもヤマト政権本拠地の奈良県桜井茶臼山

表1 兵庫県域出土の中国鏡2種

	遺跡	内行花文鏡	方格規矩鏡
1	尼崎市・池田山古墳		
2	芦屋市・阿保親王塚古墳		
3	神戸市・東求女塚古墳		
4	〃		
5	神戸市・得能山古墳		
6	神戸市・吉田南遺跡(鏡片)		
7	小野市・敷地大塚古墳		
8	〃		
9	西脇市・滝ノ上20号墳		
10	加古川市・長慶寺山1号墳		
11	加古川市・西条52号墓		
12	たつの市・白鷺山1号墳(鏡片)		
13	たつの市・岩見北山1号墓		
14	たつの市・吉島古墳		
15	佐用町・西ノ土居墓(鏡片)		
16	播磨町・大中遺跡(鏡片)		
17	姫路市・手柄山(鏡片)		
18	朝来市・向山2号墳		
19	豊岡市・深谷1号墳(鏡片)		
20	豊岡市・森尾古墳		

古墳では、2010年に明らかになった81面の副葬鏡のうち、内行花文鏡19面に対して方格規矩鏡が2面という偏差が見られた。これらのことから、本研究では北部九州＝方格規矩鏡、瀬戸内以東＝内行花文鏡という鏡種選択の対照性を見だし、このことがヤマト政権成立へ向かう地域間の政治的な対抗関係を反映していたというあらたな仮説を研究論文「漢中期の鏡と表六甲の前期古墳」として提示した。

(3)研究の総括

以上の金属工学的研究、考古学的研究を統合して、ヤマト政権成立直前の弥生終末期において、銅鐸は神聖性が急速に失われ、再利用のため人為的に加熱して破片化されたのに対して、内行花文鏡片は連携を深めつつあった瀬戸内～畿内の首長連合のシンボルとして、数量不足を補うべく、貴重品として分割所持されたという差異を明らかにした。同じ破片青銅器であっても器種ごとに歴史的な意義が異なることを学際的なアプローチによって明確に提示し、ヤマト政権成立過程の中で合理的に説明したことは、今後の青銅器研究にあらたな方法と展望を与えるものと考えられる。

なお、研究遂行上の反省材料としては、実物資料の分析が非破壊的方法では可能であったが、「破壊分析」としては実施できなかった点があげられる。計画段階で出土品を保管する地方公共団体の実務担当者レベルでは理解をいただいていたものの、実施段階では担当者レベルの判断だけでは実現が困難であった。本研究においては、いくつかの機関が原品に忠実に複製していたレプリカの提供を受けて有効な分析を実施することができたが、今後研究の進展にとっては、克服すべき課題である。

本研究の成果はH25年度に桜井市立纏向学研究センター紀要にて論文として公表する予定である。そうした機会をとらえてアプローチの有効性を周知していくことが、実物資料の「破壊分析」への理解を得る一つの取り組みにもなるであろう。

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)

福永伸哉、漢中期の鏡と表六甲の前期古墳、菟原、査読無、(2012)、p p.375-386

福永伸哉、古墳時代研究の新たな広がり、古墳時代の考古学、査読無、8巻、(2012)、pp.1-5

〔学会発表〕(計1件)

福永伸哉、銅鏡から見た邪馬台国連合、兵庫県立考古博物館開館5周年記念シンポジウム(招待講演)、2012年9月30日、兵庫県神戸新聞松方ホール

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福永 伸哉 (FUKUNAGA SHINYA)
大阪大学・文学研究科・教授
研究者番号：50189958

(2) 研究分担者

近藤 勝義 (KONDO KATSUYOSHI)
大阪大学・接合科学研究所・教授
研究者番号：50345138

(3) 連携研究者

なし