

古代青銅器を対象とした完全非破壊分析手法の新展開

研究代表者：島根大学法文学部 岩本 崇

New Developments in Completely non-destructive analytical methods for Ancient Bronze artifacts
Takashi Iwamoto¹³

¹Faculty of Law & Literature, Shimane University, Matsue 690-0826

Keywords: ancient bronze artifacts, bronze mirror, muonic X-ray spectroscopy, prompt gamma ray analysis

This project focuses on PGA-prompt gamma-ray analysis, an effective technique for quantifying trace elements. By combining it with muonic X-ray analysis for quantifying major elements, we aim to create and implement a fully non-destructive analytical method for bronze artifacts.

In developing and validating this new analytical method, we will actively utilize bronze artifacts for which quantitative chemical composition data has already been obtained via ICP analysis. Specifically, by performing PGA-prompt gamma-ray analysis and muonic X-ray X-ray fluorescence analysis on bronze artifacts that have undergone ICP analysis, we will cross-check existing quantitative data with new quantitative data. Through this process of verifying analytical data and resolving issues, we will develop a more reliable, fully non-destructive analytical method for bronze artifacts.

In fiscal year 2025, the first year of this research project, we conducted PGA-prompt gamma-ray analysis and muonic X-ray analysis on four bronze mirrors. While detailed examination remains a future task due to the lack of reported formal measurement analysis results, our focus on utilizing ICP analysis data revealing quantitative chemical composition enabled us to identify various issues with the preliminary analysis results. Moving forward, we aim to accumulate further measurement data and, through interdisciplinary discussions with researchers involved in data analysis and measurement method development, strive to create a reliable, completely non-destructive analysis method for bronze artifacts.

1. 緒言 (Introduction.)

青銅器生産は原料金属の入手事情によって変動が生じる側面がありながら、青銅器の化学組成の定量分析結果はいまだ十分に蓄積されておらず、考古学的な検討は深められていない。その背景には、青銅器は表面の腐食が顕著であるため、簡便な非破壊の蛍光 X 線 (XRF) 分析では正確なデータを得ることが難しいこと、定量データを得るには破壊をとまなうサンプリングを要するため分析自体のハードルがきわめて高いことなどいくつかの要因が想定される。いっぽう、近年に非破壊分析である点で注目された負ミュオン蛍光 X 線分析は青銅器内部の主要元素の分析は可能だが、青銅器の産地同定の鍵になる可能性の高い微量元素については定量把握が困難といわれる。

そこで本申請課題では、微量元素の定量分析に有効な PGA-即発 γ 線分析に着目し、負ミュオン蛍光 X 線分析による主要元素の定量分析と組み合わせることで、青銅器を対象とした完全非破壊分析手法の創出と実用化をめざす。

新たな分析手法の創出と検証にあたり、ICP 分析によって化学組成の定量データが得られている青銅器を積極的に活用する。つまり、ICP 分析を実施した青銅器を対象に、PGA-即発 γ 線分析と負ミュオン蛍光 X 線分析を実施することで、既往の定量データと新規の定量データをクロスチェックする。そして、分析データの検証・問題解決を図りながら、より信頼性の高い青銅器の完全非破壊分析手法を創出する。

2. 研究方法 (Research procedure)

島根大学で現在保管する銅鏡（漢鏡・三国晋鏡・古墳時代倭鏡）のうち約 20 点については、表面の腐食部分を除去したうえで、健全な金属組織から得たサンプルで鉛同位体比と ICP 分析をすでに実施している。本申請課題ではこれら定量的な化学的データをもつ銅鏡を対象に、PGA-即発 γ 線分析、ならびに負ミュオン蛍光 X 線分析を実施し、青銅器の新たな完全非破壊分析手法の創出を実現させる。

1) 対象資料の選定

ICP 分析により化学組成の定量値が判明している島根大学保管の銅鏡を分析対象資料として選定する。選定する資料は、考古学的特徴や化学組成が近似する例と大きく異なる例の双方とし、有意義な比較検討に備える。

2) PGA-即発 γ 線分析

選定した各資料について、同一個体の遺存状態の異なる箇所を複数選定して PGA-即発 γ 線分析により微量元素を測定する。同一個体で微量元素濃度が測定箇所により異なるのか近似するのか、異なる場合の要因として何が想定されるのかを検討し、定量把握に努める。

3) 負ミュオン蛍光 X 線分析

選定した各資料を対象に負ミュオン蛍光 X 線分析を実施して、任意の深さ方向の主要元素の定量値を取得する。できれば複数箇所を測定し、比較をおこない、有効な定量把握の方法を確定する。

4) 複数の分析手法によるクロスチェックと評価

鉛同位体比分析ならびに ICP 分析を含めて、PGA-即発 γ 線分析と負ミュオン蛍光 X 線分析の成果を突き合わせることで、得られたデータの評価をおこなう。分析方法の課題を明らかにし、より精度の高い分析方法の検討につなげる。

3. 結果および考察 (Results and discussion)

研究の1年目にあたる2025年度は、4面の銅鏡(図1)についてJRR-3にてPGA-即発γ線分析、J-PARCにて負ミュオン蛍光X線分析を実施することができた。以下、測定結果とそれをもとにした検討のために、参考まで4面の銅鏡を対象としたICP分析結果を表1に示す¹⁾。

2026年3月現在で測定結果を解析したデータの提供を受けているのは、PGA-即発γ線分析の結果である。また、4面のうち3面の解析結果が示されている(表2)。PGA-即発γ線分析の測定値は、ICP分析の結果と比べて、銅濃度については約0.8~4%の違いがみられ、錫濃度はICP分析における錫濃度と鉛濃度を合算した値に近くなっている。PGA-即発γ線分析の錫濃度とICP分析による錫と鉛濃度の合算値は0.3~3%の違いがみられるに過ぎない。ただし、微量元素の濃度はICP分析では②がほかより著しく低いが、銀とニッケル以外はPGA-即発γ線分析の結果と合致しないこととなっている。以上のデータの挙動が何に起因するのかは、今後、学際的な観点から議論をおこなう必要がある。

なお、負ミュオン蛍光X線分析の測定結果については、速報的に得た情報のみでは、銅・錫・鉛の相対的な濃度差は、ICP分析結果と合致するが、錫濃度は10%以上相違する結果となっている。この点については、正式な測定データの解析結果をうけて、検討することとしたい。



1. 方格規矩鏡(後漢) 17.8cm 527g
 2. 重圏銘帯鏡(前漢) 13.1cm 285g
 3. 神獸鏡(古墳時代) 9.4cm 111g
 4. 内行花文鏡(後漢) 12.4cm 243g

図1 2025年度の測定対象資料

表1 2025年度の測定対象資料のICP分析結果

番号	鏡式	Cu	Sn	Pb	As	Sb	Zn	Ag	S	Bi	Ni	Fe	Co	Au	Mn	Ca	P	Si	Al	合計
①	方格規矩鏡(H-5)	70.75	22.19	5.243	0.33	0.392	0.003	0.129	0.029	0.041	0.076	0.052	0.034	0.006	-	0.03	0.008	0.062	0.008	99.4
②	重圏銘帯鏡	68.34	24.64	4.81	0.010	0.010	0.002	<0.001	0.040	0.003	<0.001	0.010	0.001	<0.001	-	0.020	0.005	0.010	0.005	97.9
③	二神二獸鏡B系	78.14	13.74	4.89	0.348	0.304	0.006	0.117	0.103	0.036	0.073	0.057	0.013		<0.001	0.035	0.011	0.08	0.002	98.0
④	蝙蝠座内行花文鏡	68.32	22.61	5.15	0.298	0.286	0.005	0.112	0.085	0.029	0.066	0.060	0.018	0.004	-	0.050	0.033	0.188	0.040	97.4

表2 PGA-即発γ線分析の解析結果

	島大 No.3 (出土地不明神獸鏡) 55,000 [s] 照射		島大 No.2 (重圏銘帯鏡) 45,000 [s] 照射		島大 No.4 (蝙蝠座内行花文鏡) 24,000 [s] 照射	
	wt%	unc.	wt%	unc.	wt%	unc.
Cu (648.80 keV)	77.32%	0.860%	69.32%	0.735%	72.32%	0.807%
Sn (1171.28 keV)	21.37%	0.247%	29.74%	0.277%	26.64%	0.314%
Ag (657.50 keV)	0.415%	0.006%	0.180%	0.003%	0.368%	0.006%
Co (1830.800 keV)	0.368%	0.025%	0.316%	0.014%	0.364%	0.016%
Cl (1951.400 keV)	0.252%	0.002%	0.237%	0.002%	0.040%	0.001%
Hg (5967.02 keV)	0.191%	0.003%	0.212%	0.003%	0.199%	0.003%
Ni (8998.31 keV)	0.081%	0.006%			0.070%	0.007%
Total wt%	100%		100%		100%	
Cu + Sn wt%	98.7%	1.1%	99.1%	1.0%	99.0%	1.1%
w/o Cu wt%	22.7%	0.3%	30.7%	0.3%	27.7%	0.3%
w/o Cu + Sn wt%	1.31%	0.04%	0.95%	0.02%	1.04%	0.03%

4. まとめ (Conclusion)

研究開始の1年目にあたる2025年度の本プロジェクトでは、4面の銅鏡を対象にPGA-即発 γ 線分析と負ミュオン蛍光X線分析を実施することができた。正式な測定の解析結果が報告されていないため、詳細な検討は今後の課題となるが、ICP分析による定量的な化学組成の明らかな資料を活用することに着目したことで、暫定的な解析結果にたいしてさまざまな課題を提示することができた。今後、さらに測定データを蓄積するとともに、データ解析と測定手法の開発にかかわる研究者との学際的な議論を通じて、信頼性の高い青銅器の完全非破壊分析手法の創出を目指すこととしたい。

なお、今年度は銅鏡の材料としての化学的性質を明らかにするため、中性子イメージングのための測定（共鳴吸収イメージング）とブラッグエッジ透過法による測定も実施している。参考までにその結果を図2・3に示す。

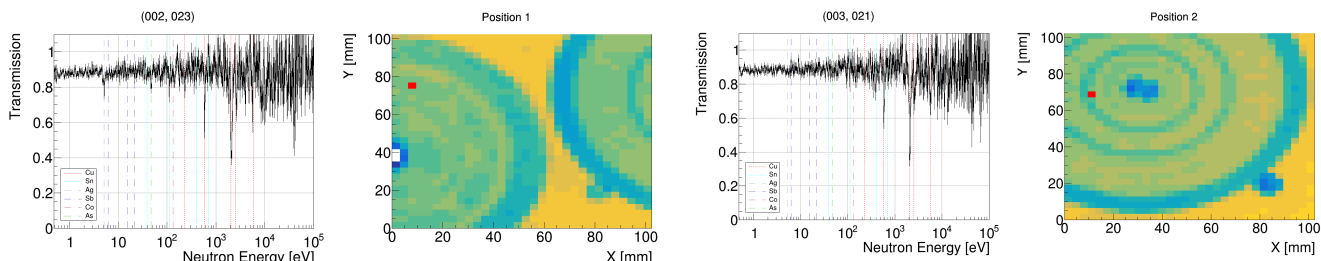


図2 共鳴吸収を利用した中性子イメージング測定の例

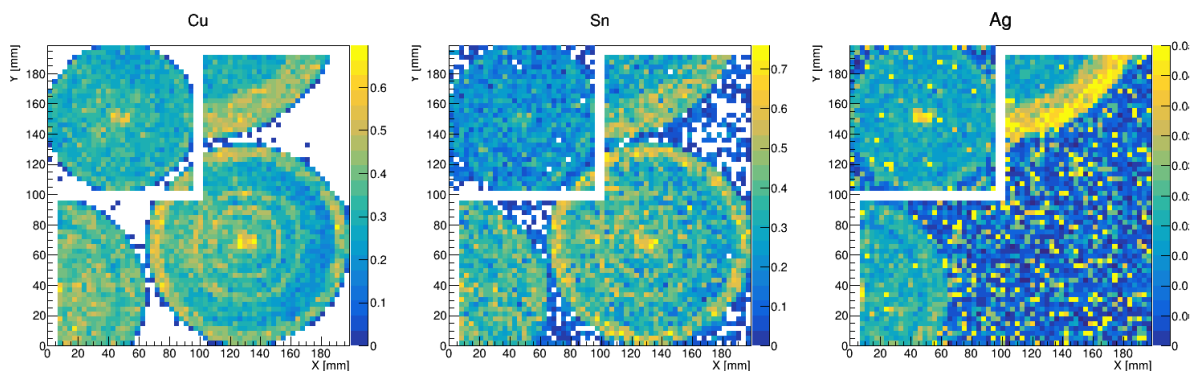


図3 中性子共鳴吸収を利用した銅鏡の元素マッピング

謝辞 (Acknowledgement)

本研究の実施にあたり、東北大学金属材料研究所・新知創造学際領域形成推進室の藤田全基先生、深堀協子氏、三河内彰子氏より多大なるご協力とご助言を賜りました。また、新知創造学際ハブプロジェクトを通じてさまざまな刺激を頂戴しました。ミュオン実験は大強度陽子加速器施設 物質・生命科学実験施設 [D2エリア]（課題番号：2025MI02）、中性子実験は大強度陽子加速器施設 物質・生命科学実験施設 [BL22]（課題番号：2025B0020）により実施しました。反保元伸氏、梅垣いつみ氏、沓名貴彦氏、鬼柳善明先生、佐藤博隆先生、加美山隆先生、土川雄介氏、甲斐哲也氏、記して感謝申し上げます。

引用文献 (Reference)

- 1) 岩本崇（編）：考古学と材料科学による東アジア青銅器の学際的研究（2026）六一書房