

# 「人文科学と材料科学が紡ぐ新知創造学際領域の形成 (新知創造学際ハブ)」事業

## 2024 年度共同研究課題報告書集

- IKH24001 中国西南部における鉄器出現期の銅鉄複合製品の構造と材質の研究  
東北大学大学院文学研究科 松本 圭太
- IKH24002 日本古代金属製品の微量サンプルによる材質分析方法の研究  
くらしき作陽大学 音楽学部 澤田 秀実
- IKH24003 モンゴル帝国のイスラム貨幣の成分分析による銀の流通と貨幣経済史の研究  
広島修道大学 国際コミュニティ学部 宇野 伸浩
- IKH24004 古代西アジア青銅柄鉄剣の材料分析と製作工程の復元による人工鉄の起源解明  
広島大学 大学院人間社会科学研究科 有松唯
- IKH24005 金属製文化財の脱塩、防錆処置に関する検討  
—近代の航空科学技術に関する文化財を主な対象として—  
東京文化財研究所 保存科学研究センター 犬塚 将英



# IKH24001 中国西南部における鉄器出現期の銅鉄複合製品の構造と材質の研究

研究代表者：東北大学大学院文学研究科 松本 圭太（考古学）

研究分担者：東北大学学術資源研究公開センター 藤澤 敦

キーワード：銅柄鉄剣・金属成分分析・雲南地方・ユーラシア草原地帯・鍍錫

**背景：**ユーラシア大陸では前 2 千年紀末から前 1 千年紀半ば頃に、青銅器時代から鉄器時代へと移行したことが知られている。この移行時期において、ユーラシア各地で共通して知られているのが、銅鉄複合（バイメタル）製品である。例えば、イラン（西アジア）では銅柄鉄剣が前 2 千年紀に出現するが、Spring-8 の高エネルギー X 線を用いた高分解能 CT 画像撮影によって、鉄刃の茎を手がかりにして、鋳型に青銅を流し込んで柄部を形づくる「鑄ぐるみ」技術が使われていたことが判明している。一方で、中国においては前 8 ～前 3 世紀頃にバイメタル製の剣が生産されているが、材料学・考古学を併せた視点からこれらが検討されたことは少ない。銅鉄複合技術と同時に注目されるのが、銅製品（部品）の金属成分である。一般的には歴史上、金石併用期から青銅器時代では、銅製品から錫合金である青銅製品へ、中世以降では亜鉛を含む真鍮というような、銅合金技術の発達が認められ、地域や目的によっても合金の在り方は異なっている。銅製品に含まれる主要な元素を比較することによって、合金技術の発達や各地の技術の交流を読み取ることが出来るだろう。

**実験と結果：**中国西南部（雲南地方）における銅鉄複合製品を理化学的に分析し、その製作技術を明らかにするため、雲南地方由来の青銅器を借用し、銅製部分の金属成分の測定を行った。岩手大学に試料を持ち込み、岩手大学會澤純雄氏、藤田香織氏らと XRF 測定を行った（写真）。

結果、試料表面の錫含有率が相当に高いことが判明し、鍍錫の可能性を考える必要が出てきた。また、微量元素でも一定の傾向があるらしい。

**考察：**今回測定した銅柄鉄剣や青銅製鞘は、考古学的に見て、戦国時代から漢代併行の雲南地方に由来する可能性が高い。雲南地方は位置的には中国の西南部に存在するが、青銅器文化としては華北平原（中原）よりもチベットやモンゴル高原の影響を強く受けている部分も多い。例えば、今回計測したような銅柄鉄剣は、型式学的に四川・雲南地方で発達したことが知られるが、時期的に早い型式やその祖型となるものは、甘肅・寧夏地方といった中国西北部で見つっている。同時期の中原では別の系統の剣が使用されていた。一方で、今回対象とした剣の類品を出土している雲南省石寨山遺跡では、滇王之印など漢王朝（中原）との関連を示すものも見つっている。雲南の青銅器文化の各技術が、西北（チベット・モンゴル）あるいは中原のいずれに由来するかを考える際、今回のような理化学分析の試みは重要となる。

銅柄鉄剣の柄部表面について、3 例がいずれも錫を 30-60wt.% 含んでおり、これはいわゆる高錫青銅にあたる。鉛は 3-11wt.% 程度含む。青銅製鞘は剣ほどではないが、錫が 20-30wt.% 含まれ、やはり高錫青銅にあたる。これらの鞘は鉛を 3-15wt.% 程度含む。錫を 20-30% 含む青銅器は割れやすく、脆性を改善するために焼き入れが行われるという（三船 2010）。華北・華南の高錫青銅器においても錫が 30% を超えるような例はない（何堂坤ほか 2010）。他では、石寨山遺跡出土の青銅器では、鍍錫の痕跡が認められるものがあり、中には表面の錫の含有率が 50% を超えるものもある（李曉岑ほか 2004）。報告者らは、石寨山遺跡で見られた鍍錫技術に関して、西北（チベット・モンゴルほか）由来を考えている（ibid.）。銅柄鉄剣の鉄刃部分は当初銀色であったと思われる、それに柄部の色を合わせるため高錫を用いる、あるいは鍍錫を行った可能性がある。今後、ユーラシア草原地帯の鍍錫器物も分析の必要がある。

**まとめ：**今回の学際ハブ共同研究では、古代大陸青銅器の実物を借用し、ハブメンバーで議論を行って、実際に測定を行ったことに大きな意義がある。今後より詳細な分析を進める上で、欠かせない過程であったと考えられる。

当初は銅・鉄複合技術の解明と、それに関してオリエント地域や中原との比較を目論んでおり、こちらも検討を継続する予定であるが、金属成分分析を先行して行ったことで、新たな着眼点を得ることになった。その一つが鍍錫技術であり、雲南地方（中国西南部）とチベット・モンゴルなどのユーラシア草原地帯の関連を知る手掛かりとして、今後の解明が期待される。方法としては、両地域の鍍錫試料を詳細に分析し、比較することが考えられる。その予察として内蒙古・長城地帯採集試料 2 点の分析を行った。試料表面の酸化は著しいが、内 1 点については、部分的に 30wt.% 程度の錫が検出された。

ユーラシアにおける鍍錫についてはメッキ全般の技術について、諸研究を網羅的に整理する必要もある。また、金属成分の微量元素の検討も併せて行っていきたい。



岩手大学における銅柄鉄剣計測の様子

# IKH24002 日本古代金属製品の微量サンプルによる材質分析方法の研究

研究代表者：くらしき作陽大学音楽学部 澤田秀実（日本考古学）

研究分担者：奈良女子大学 大賀克彦

キーワード：古墳時代後期・銅製品・原材料の微量成分・産出地特定・非破壊分析

**背景：**日本列島で出土した青銅製品では原材料産地を推定するために鉛同位体比分析が使用されてきたが、この方法だけでは判別が難しい事例が明らかとなっている。そこで形成過程が異なる鉱山の特徴を表す鉱物組成に着目し、青銅製品に不純物として含まれる微量成分が検討できれば、従来とは異なるレベルの研究が切り拓かれる可能性が考えられた。ただし、微量成分分析では非破壊分析が困難と予測されたため、文化財的価値の毀損を最小限に抑えた高精度分析の実施方法の開発が必要となった。

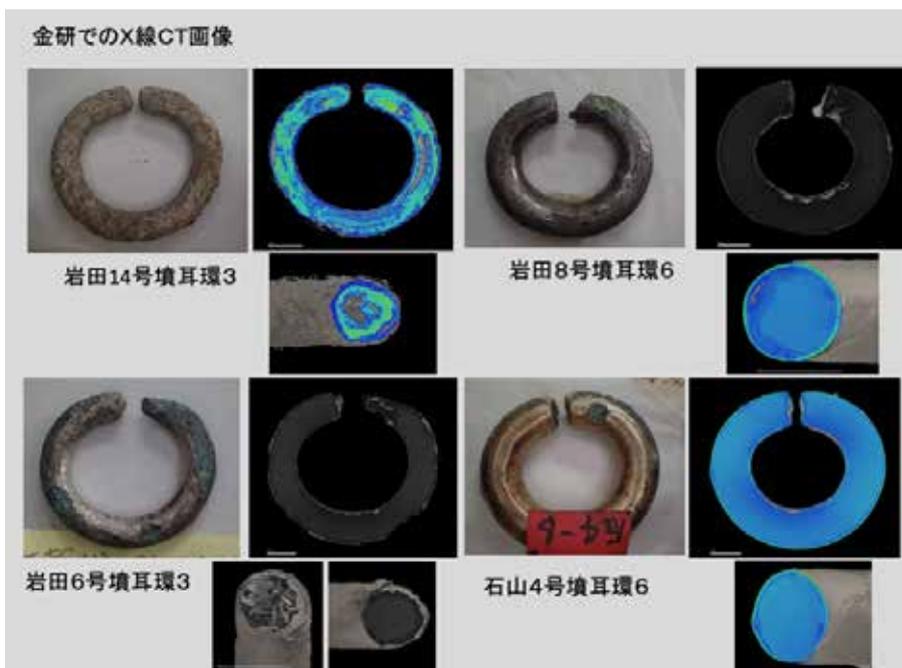
**実験方法：**2024年度は鉛同位体比分析によって原材料産地に見通しを得ている資料（赤磐市出土耳環5点）を、東北大学学術資源研究公開センター総合学術博物館の藤澤敦教授と共同で、同館の高出力X線CT撮影装置で撮影して内部の状況を確認した。撮影したX線CT画像からは、芯材の様子と芯材をくるむ金鍍金を施した筒状銅板を確認し得た（図）。今回の分析のターゲットは芯材であり、分析を行う芯材に遺る地金（無酸化で遺存している芯材）の状態と共に銅板にくるまれた芯材の分析手法をX線CT画像から検討した。

**結果と考察：**その結果、劣化の著しい資料（岩田14号墳耳環3）と比較的表層まで地金が遺存資料（石山14号墳耳環6）とが確認でき、前者ではドリルによるサンプル採取が必要となり、非破壊分析は困難と思われた。一方、後者では表層を研磨して地金を露出できれば分析が可能であると判断された。

そして、このような所見をもとに同資料の成分分析として適した方法を金属材料研究所の杉山和正教授や学際ハブ推進室のメンバーと共同で検討し、望ましい方法を探索した。

検討の結果、資料（約3×2.5cm）が装置内に納まるEDSによる微量成分の定量分析により、まずは合金成分の全体像を把握し、その後、特徴的な微量成分にターゲットを絞ってEPMAで高精度分析を加え、詳細を検討してゆく2段階の方法と手順とを確認した。

**まとめ：**2024年度は限られた資料での検討であったが、高出力X線CT撮影装置により資料内部の保存状況を確認し、まずは非破壊による微量成分分析方法に見通しを得ることができた。残念ながらEDSなどによる微量成分の実施は叶わなかったが、2025年度中には微量成分分析を実施し、どの程度何が検出でき、所期の目的（原材料産地の推定）が果たせるのか確認してゆきたい。また、必要に応じて微量サンプル採取による破壊分析についても有効な方法を検討してゆくことにしたい。



# IKH24003 モンゴル帝国のイスラム貨幣の成分分析による銀の流通と貨幣経済史の研究

研究代表者：広島修道大学 宇野 伸浩（モンゴル帝国史）

研究分担者：大阪公立大学 辻 幸一、渡辺 健哉

キーワード：蛍光 X 線分析・モンゴル帝国・銀貨

**背景：**モンゴル帝国の金属貨幣は、金貨・銀貨・銅貨・銀錠が発行され流通した。その科学的分析は、イラン・ロシア・中国において始まっているが、まだ自国に関係ある地域の分析にとどまり、モンゴル帝国全体についての科学的分析にもとづく解明はほとんど行われていない。モンゴル帝国以前に、西アジアから中央アジアにかけて銀不足が発生し、銀貨の代わりに大型銅貨が発行されたが、モンゴル帝国時代に銀不足が解消し、銀貨が発行されるようになる。それについて、近年、通貨史研究者の黒田明伸が、13 世紀後半、元朝の南宋征服以後、南中国から徴収された税が、銀として西方に流出したことにより、中央アジア、西アジアの銀不足が解消されたという仮説を提示した (Kuroda 2017, Kuroda2023)。

本研究は、研究代表者宇野が所有するモンゴル帝国の銀貨・銅貨を科学的に分析することにより、銀不足が解消する過程を解明するとともに、中国銀がイスラム銀貨の製造に使われた可能性を検討する。

**実験方法：**中央アジアにおいて銀不足が解消されていく過程において発行された大型銅貨 2 点 (Coin4, Coin6) と銀貨 2 点 (Coin1, Coin10) を選択し、大阪公立大学の辻幸一研究室において、微小部蛍光 X 線分析により、主として表面の化学組成を分析した。今回、蛍光 X 線分析を行う目的の一つは、大型銅貨 Coin4 の表面に銀のコーティングがされているという指摘 (Allsen 1987: 175, Kuroda 2023: 500) が事実であるかを検証することである。南ロシアで出土した銀貨が、表面と内部で元素分布が異なり 3 層構造をしており、表面の方が銀の濃度が高いという報告 (Shaykhutdinova 2016) があるため、共焦点型 3 次元蛍光 X 線分析により表面と内部の違いを調べた。

(1) 微小部蛍光 X 線分析：微小部蛍光 X 線分析装置（堀場製作所 XGT5000）を用いて、元素分布測定を行った。管電圧 50 kV, 1 点の測定時間 Coin1, Coin6, Coin10: 0.165 s, Coin4: 0.0412 s, 測定面積はコイン表面の約 4 分の 1, 測定点の数は Coin1, Coin6, Coin10 は 256 × 256, Coin4 のみ 512 × 512 とした。

(2) 共焦点型 3 次元蛍光 X 線分析：表面とともに、可能な範囲で内部の元素分布を調べるために、辻が製作した共焦点型 3 次元蛍光 X 線分析の装置を用いて、Coin6 と Coin10 について測定を行った。

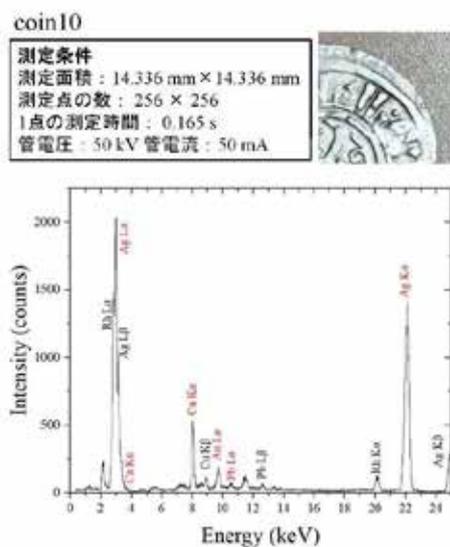
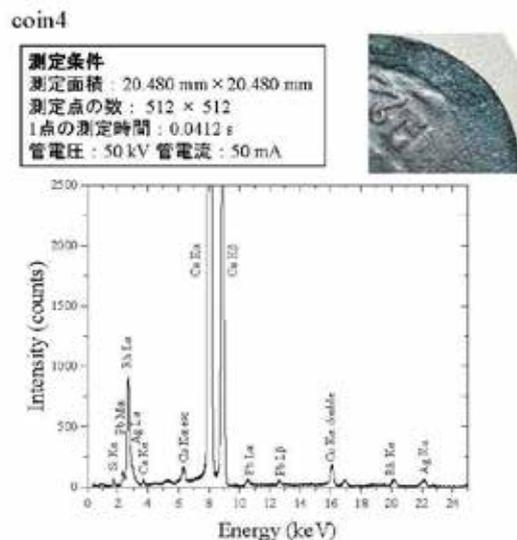
(3) 全反射蛍光 X 線分析：微量元素についてより精度の高い測定を行うために、全反射蛍光 X 線分析装置（リガク・ナノハンター 2）を用いて、Coin10 について一部をサンドペーパーで削って全反射蛍光 X 線分析を行った。

**結果と考察：**(1) 微小部蛍光 X 線装置：Coin1 と Coin10 の銀貨は、銅の含有量に差があるが、それ以外の微量元素の種類がほぼ同じである。微量元素の量の差に気をつける必要があるが、銀の産地など何らかの共通点がある可能性がある。Coin4, Coin6 の銅貨は、微量元素の違いが大きく、材料、製造方法に違いがある可能性が高い。Coin4 に銀のコーティングは存在せず、微量元素として銀が含まれているに過ぎなかった。

(2) 共焦点型 3 次元蛍光 X 線分析：Coin6：資料中央部において表面から深さ 100 μm 程度まで測定した結果、銅が最表面に、鉄とカルシウムが少し内部に存在していた。表面と内部で元素分布が異なる可能性がある。Coin10：資料中央部において表面から深さ 100 μm 程度まで測定した結果、銀、銅、鉛、金について深さ方向に対してほぼ均一に分布しており、表面と内部で明確な差は見いだせなかった。

(3) 全反射蛍光 X 線分析：Coin 10：微量元素について微小部蛍光 X 線分析と同様の結果であり、特に新しい知見は得られなかった。

**まとめ：**銀貨の銀の産地の特定には、鉛同位体比の分析が有効であるが、鉛同位体比だけに依存するのは危険だといわれており、銀貨全体に含まれる微量元素の測定も必要である (Killic et al. 2020)。今回は蛍光 X 線分析により主として表面の元素分布を調べたが、次年度は即発ガンマ線分析によりコイン全体の化学組成分析を行う。両者を合わせて銀貨に含まれる微量元素を分析し、その上で鉛同位体比の分析を行い、材料となった銀の産地の特定を行いたい。



# IKH24004 古代西アジア青銅柄鉄剣の材料分析と製作工程の復元による人工鉄の起源解明

研究代表者：広島大学 大学院人間社会科学研究科 有松唯（考古学）

研究分担者：

キーワード：バイメタル・古代西アジア・鉄・青銅・製鉄技術

**背景：**最古の人工鉄は約 3000 年前頃、西アジアで製作が始まったと考えられている。その後、約 200 年間をかけて鉄を作り加工する技術が確立し、人類社会のあらゆる場面で鉄が使われるようになっていく。西アジアではこの時期、実用化された鉄器の最初期の特徴として、青銅と組み合わされたバイメタル製品が作られるようになる。こうしたバイメタル製品の製作技術、またそこに用いられている鉄と青銅についてのデータの蓄積は人工鉄の起源解明や、その実用化技術の確立過程の復元には不可欠である。

こうした重要性にもかかわらず、古代西アジアのバイメタル製品は研究の主対象とはなり難かった。2 種類の金属を組み合わせているというその特徴的技術には容易に迫れないことによる。特に、鉄製剣身を青銅製柄で鑄包む青銅柄鉄剣については、バイメタル製品の中でも最古級且つ最高峰の技術によると目されるが、製作工程の仮説的復元も実現していない。技術の地域差や時期差なども不明なままである。この青銅柄鉄剣ではさらに、既に取得した CT 画像から、青銅に鑄包まれた鉄製剣身の茎部に関して、鉄が錆化せずに残存している可能性が高いと考えられる。最古級の人工鉄に直接迫れる稀有な資料でありながら、材料学的データを取得する技術・手法が確立されておらず、情報は得られていない。

そこで本研究では、古代西アジアのバイメタル製品、とくに青銅柄鉄剣について、用いられている鉄と青銅の冶金技術、また製品それ自体の製作技術の解明を目的とする。

**実験方法：**岩手大学平泉文化研究センターのポータブル複合 X 線回折装置（XRD）（DF-01、理研計器株式会社）にて、バイメタル剣の柄部分を構成する金属について、表面の主要元素の測定を行った（図 1）。資料 3 点（資料No. 512、513、515）について、柄頭と柄の複数箇所をそれぞれ測定した。

また、同センターの蛍光 X 線分析装置（XRF）（XGT-7200、HORIBA）で、同じく金属表面の元素組成を測定した（図 2）。1 つの資料における部位ごとの違いの有無を検証すべく、1 点の資料（資料No. 512）の両側面において、柄頭から鐔にかけてほぼ等間隔で計 24 カ所の測定を行った。



図 1 ポータブル X 線回折装置（DF-01）

**結果と考察：**XRD で測定を行ったすべての試料について、柄頭から鐔にかけて、基本的には銅と錫の合金で製造されていることを確認した。そのうち資料 2 点について、柄頭の頂部に鉄の含有箇所が確認できた。すでに撮影していたトモグラフィーによれば、これら箇所においては、茎に接続している部品が柄頭を貫いて突出していると推定できる。それら部品が鉄を含むことが今回の測定で明らかとなった。青銅部分における銅と錫の含有量については、資料間で違いがあった可能性が指摘できる。No. 512 では他の 2 点よりも全体的に錫含有比率が高く、銅の比率が低い。ただし、No. 512 は個体内でも数値の差が大きいことが指摘できる。また、測定箇所が柄頭に偏っている点にも留意が必要だろう。とはいえ錫の 20% 台や 30% 台の比率は他の資料では確認できなかった。錫含有比率が次に高いのは No. 515 で 10% 台前半の比率である。そして No. 513 は錫含有比率が 10% を下回るようになる。今回測定を行った資料の中で、No. 512 はその柄頭デザインから、他の 2 点よりも西の地域（コーカサス南部）に由来すると目せる資料である。こうした資料の地域的な違いが、銅と錫の含有比率の違いに表れている可能性が指摘できる。そうであるならば、初期鉄器の利用にあたり、少なくともその加工は地域ごとに行われていたと考えられる。このデータ・知見をさらに蓄積することによって、ミクロな範囲における鉄のアダプションの個別プロセスが復元できるかもしれない。



図 2 蛍光 X 線分析装置（XGT-7200）

No. 512 についてはさらに、青銅部分について頭から鐔まで全体的に XRF で測定した。その結果、単一資料の中で、部位ごとに、銅と錫の比率に差がみられた。おおまかには、柄頭部分は柄や鐔部分よりも、錫含有量の比率が低い傾向がみとれる。トモグラフィーからは、この資料は、柄頭部分と柄から鐔にかけての部分がそれぞれ別の鑄込みによって成形された可能性が指摘できる。また、部品としての機能にも違いが想定できる。今回確認できた元素組成の違いは、こうした可能性を裏付けるものかもしれない。

**まとめ：**XRD と XRF を併用することで、バイメタル剣について、柄を構成する金属が銅と錫の合金であることを確認した。その上で、元素組成について、資料間での違い、また一資料での部位ごとの違いを確認した。前者は製作地の違いと製作地ごとの冶金技術の特徴を反映している可能性がある。後者は、個別資料の製作工程を反映していると推測できる。製作工程に迫るといって本課題の目的に資する成果が得られた。ただ、今回示した元素比率の違いが測定の何らかの誤差による可能性についても、他のデータと合わせながら随時検証していく余地はあるだろう。また、今回の測定では資料点数に限られていた。資料点数そして測定箇所を増やして検討していく必要がある。

# IKH24005 金属製文化財の脱塩、防錆処置に関する検討

## —近代の航空科学技術に関する文化財を主な対象として—

研究代表者：東京文化財研究所 犬塚 将英（物理計測）

研究分担者：東京文化財研究所 芳賀 文絵 千葉 毅 川野邊 渉

キーワード：金属製文化財・脱塩・防錆・航空機・保存科学

**背景：**近代の工業製品、特に高度な科学技術が用いられた航空分野は、高い学術的価値を有する文化財である。しかし、金属製工業製品のように伝統材料や伝統技術ではない材料・技法で製作されたものを、文化財として保存するための保存処理方法は未確立である。文化財を保存するためには、現状を把握し、その状態や材料に応じた保存処置の実施が必要である。

航空機をはじめとして、近代の工業製品には金属が使用されていることが多いが、それらは遺棄されたのち、周囲の環境からの塩類の浸透により、錆が進行していることが多い。また、例えば海中に水没していたことで現在まで喪失を逃れた一方、海中からの引き揚げ後に適切な処置が施されなかったために、急速に酸化が進行し資料が損壊してしまうことも少なくない。そこで、異なる材料が複合的に使用されること多い近代の金属工業製品に対して、研究代表者らが近年に実施した処置事例を対象として脱塩や防錆の処置技法の改良に向けた検討を行った。

**実験方法：**検討対象とした資料は、アジア・太平洋戦争期の戦闘機に備えられた機銃「二式一三耗旋回機銃一型」である（図1）（報国515資料館所蔵）。ドイツMG131機関銃を日本がライセンス生産したもので、近年、地中から出土した。同年代の機銃の主要な素材は鋼であることから、本資料も同様と推測されている。X線透過画像から得られた情報を参考にして、以下の処置を行った。

- ・グラインダー等による物理的クリーニング
- ・脱塩（亜鉛の犠牲陽極を使用）
- ・アクリル樹脂含浸



図1 対象資料（二式一三耗旋回機銃一型）

脱塩には、約0.5%セスキ炭酸ナトリウム溶液を用いた。鉄イオンの溶出が少なくなるよう資料には亜鉛板、亜鉛テープを針金で固定した上で、常温常圧にて約7日間資料を浸漬し、日ごとの塩素イオン濃度推移を記録した。この脱塩処理を溶液を交換した上で3回繰り返した。塩素イオン濃度が10ppm以下になったことを確認し、資料を溶液から取り出した。

続いて、水洗、エタノール噴霧の上、恒温恒湿槽で乾燥させた。十分に乾燥させた後、ブラシや筆等を使用し、資料表面の錆のクリーニングを再度行った。

その後、錆の進行を防ぐため、アクリル樹脂（パラロイドB72）5%アセトン溶液に4時間程度含浸させた。ポンプを使用し減圧した上で含浸を行った。

中性子線CTをはじめとする中性子線を用いた分析における文化財への適用事例を収集したところ、海外を中心に事例が蓄積されつつあることが判明した。これらを受け、今後、図1の機銃をはじめとする金属製文化財を対象に、J-PARC等において同様の分析を実施することの可能性、あるいは実施した際のメリットや懸念に関する検討を行った。

また、防錆剤の検討を行うための試験体を作成した（図2）。

**結果と考察：**近代の金属製文化財に着目し、その材料分析と劣化状態を明らかにし、脱塩処理の手法や有効性を検討するため、最近に保存処置をした事例を対象として、処置技法の改良に向けた検討を行った。その結果、金属製文化財の保存処置、分析に関する知見を広げることができ、実際に処置を行うための検討、準備を進めることができた。

**まとめ：**金属製文化財を対象とした脱塩評価をはじめとする保存処置手法については未だ確立した技術がない。一方、東北大学金属材料研究所から教示された中性子線CT技術について、上述のように金属製文化財の非破壊分析へ応用した調査も国内外で進みつつある。今後、そのような技術も視野に入れつつ、保存処置手法の深化を図ってきたい。



図2 防錆剤比較のための試験体