

陶土鑄型による青銅鑄物の製作

Bronze Casting by means of Porcelain Clay Mold

荒木 一郎*・鳥居 正人**・水野 頌之助**

Ichiro ARAKI・Masato TORII・Syonosuke MIZUNO

Abstract

Casting practices have been recently adopted in many schools from elementary school to upper secondary school. In these practices bronze casting were tried using CO₂ process mold that becomes hard in a short time after CO₂ gas blowing. But bronze products of Yayoi period like as mirror, bell-shaped vessel were supposed to be made by means of clay mold. Therefore in this study we tried porcelain clay as clay mold for bronze casting. As a result porcelain clay mold was found to be suitable for bronze casting, paying special attention to shrinkages of mold at drying and baking.

Keyword: Casting, Bronze, Porcelain Clay Mold, Bronze Mirror, Bronze Bell

1. はじめに

近年、教育現場において技術科でのものづくり学習や総合的学習の時間で鑄造学習が広く行われている。これは金属が溶けるといふ驚き、ものづくりとしての楽しさ、また美術、理科、歴史、環境問題の学習など他教科を横断的に学習することができるためではないかと考えられる。

ピューターなどの低融点合金は鑄造作業が容易であるため、多くの実践例がある⁽¹⁾。しかし低融点合金を溶解することで鑄造技術を正しく理解できるかという疑問が残る。またアルミ缶から再生地金を取り出し、それを使つての鑄物作りも行われている^(2,3,4)。この場合、リサイクル、環境教育などの理解を目指している。さらに融点が高く、古くから利用された青銅を材料とした鑄物づくりも行われており、金属利用の歴史を理解させようとする実践も見られる⁽⁵⁾。

ここで青銅による鑄物作りの場合、鑄型材料としては炭酸ガス鑄型が広く用いられている。これは、水ガラスなどの粘結材を珪砂と混ぜ合わせたものであり、炭酸ガスを吹き付けることで硬化する性質を持つ鑄型である。特徴として、短時間で鑄型を成型できる、通気性に優れている、収縮がないという利点がある。鑄造学習においては鑄型が短時間に成型できるという特性を生かし、銅鏡作りなど体験講座等で広く用いられている⁽⁵⁾。しかし、炭酸ガス鑄型を用いた場合、古代人が、銅鏡、銅鐸、銅矛など様々な青銅製品をどのようにして製作したのかということは少々理解しにくいと思われる。

ところで古代の青銅鑄物の製作では粘土や石を鑄型に用いていたと考えられる。そこで、本報においては鑄型に粘土を用いて、古代の製作技術を再現することにした。ここで粘土としては入手しやすさを考え、陶芸用の粘土、すなわち陶土の鑄型への適用の可能性を検討した。もとより、陶土鑄型による青銅鑄物の製作に関する報告は見られない。陶土を用いて青銅鑄物づくりを試みた結果、陶土が鑄型として十分利用できることが分かったので以下報告する。

2004. 8. 9 受理

*新潟大学教育人間科学部

**新潟大学教育人間科学部学生

2. 陶土の特性について

陶土としては、各地で多様なものが産出されているが、熱衝撃に対して比較的強いとされる楽焼粘土（白）を本報では使用することにした。陶土は乾燥防止のためビニール袋入りの荷姿となっている。

はじめに陶土の乾燥・焼成に伴う長さ、重量変化について調べることにした。試験片は、陶土を金枠に隙間がないようにつめて作製した（図1参照）。金枠の内寸は16×19×60mmであった。この金枠で成形した陶土試験片の重量は約23gである。その後、試験片を自然乾燥させ長さや重量変化を調べ、結果を図2に示した。これによると、自然乾燥において、長さは約3日で約5.7%の収縮が見られるが、それ以降は収縮が見られなくなることが分かる。一方重量は6日経過するまで減少が続き、約22%減少する。すなわち、収縮は3日で止まるが重量減少は、その後も続くことが示される。

また、図3には、実際の鋳型を自然乾燥させたときの重量変化を示した。重量が試験片の10倍以上あるが、初期の変化率は同じ結果となった。これより、自然乾燥は6～7日で十分であることが示される。

次に、陶土に砂を混ぜた試験片を作製し、収縮への影響を調べた。市販されている砂をフルイにかけ砂の粒子径が0.6mm以下のものを使用した。また陶土に水を加え、スラリー状態にし、こちらもフルイを用いて粗い粒を除去した。この陶土スラリーと細粒の砂とを一定の割合で混ぜた。

これを紙の上に広げ脱水する。標準陶土と同じ程度の硬さになったころ、金型に紙を敷き、陶土を押し込み、試験片とした（図1参照）。表1に各試験片の自然乾燥後の収縮率を示す。

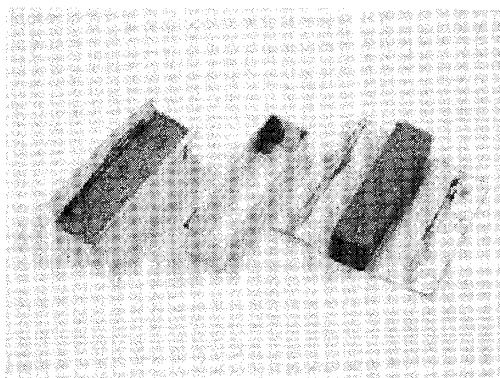


図1 陶土試験片と金枠

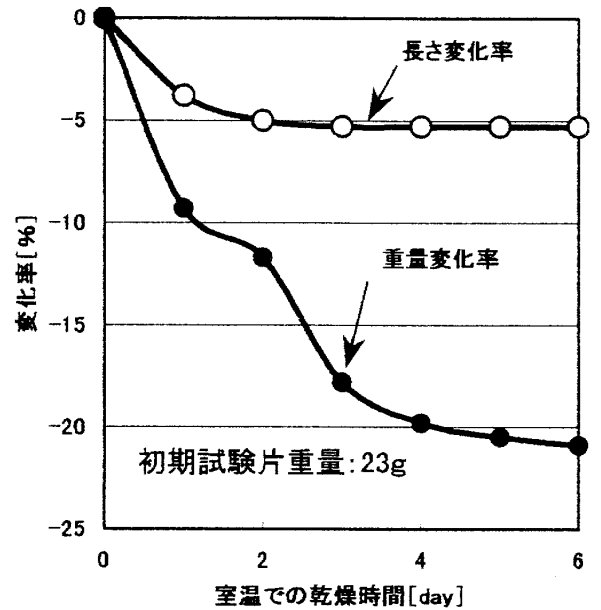


図2 陶土試験片の自然乾燥における重量変化と長さ変化

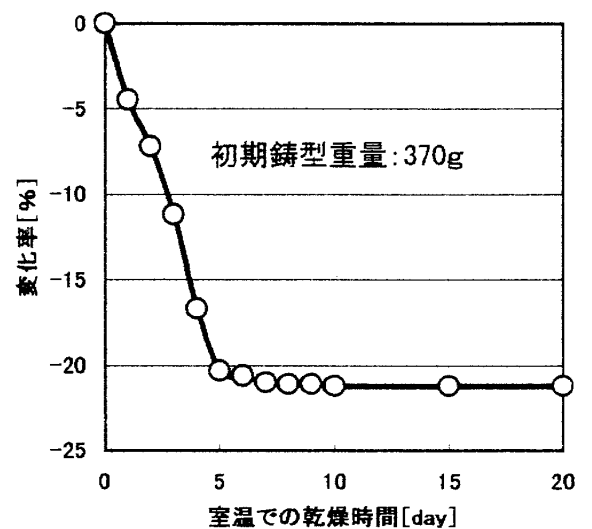


図3 陶土鋳型の自然乾燥における重量変化

表1 陶土と砂を混ぜた試験片の収縮率

試験片	陶土と砂の割合	自然乾燥後の収縮率
1	陶土：砂＝1：2	4.7
2	陶土：砂＝1：3	3.6
3	陶土：砂＝1：4	2.8
4	陶土：砂＝1：5	0.0
5	陶土：砂＝1：6	0.0

表1から分かるように、砂の割合が増加すると収縮率が減少し、試験片4、試験片5は収縮率が0%となった。自然乾燥に引き続き、素焼きを行ったが、新たな収縮は見られなかった。

陶土は、自然乾燥後において硬化するが、水分を含ませることにより、速やかに元の軟らかい粘土状態に復帰する。しかし、素焼きをすると、水分を加えても元には戻らない。素焼きを行わない限りは、何回も作り直しが可能である。

3. 溶解方法

青銅を溶解する場合、耐熱性のある溶解炉が必要である。他の報告⁽⁵⁾においては耐火レンガを用いたコークス炉で溶解が行われているが、炉体が重く、持ち運びが不便である。七輪は耐熱性が不足しているため、そのままでは青銅の溶解には使用できない。そこで本報においては、ペール缶を外容器とする溶解炉の自作を行った。炉の外観を図4に示す。炉の寸法は外径285mm、内径160mm、炉内深さ230mm、高さ350mm、となっている。炉の構造は、炉心部に耐火モルタル（東芝セラミック、TOCAST-L16、耐熱温度1600℃）で内容器を作りその外側の断熱材としてセラミックファイバークラケット（東芝セラミック）を使用した。この炉の特長は、重量が10kg

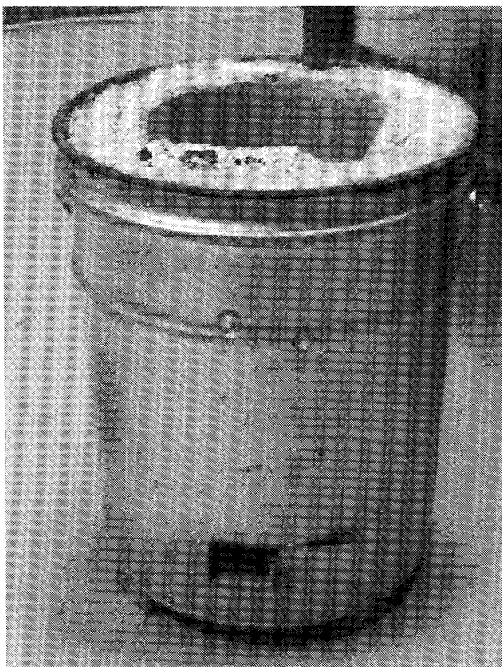


図4 溶解炉

しかなく軽量であるため、持ち運びが容易である。また断熱性にも優れるので少ない燃料で溶解できる。燃料は本実験においては木炭を使用している。コークスを燃料とした実践例の方が多いが、これはコークスが発熱量当たりの単価が安いと思われる。しかしコークスは一般に灰分が多く、高温で燃焼させるとガラス状で粘性のあるスラグが発生し、炉壁の侵食が起きやすい。これに対して木炭では、灰分が非常に少なく、スラグの発生がほとんどない。そのためコークスに代わって、燃料として木炭を使用することとした。また古代の溶解においても木炭が使用されていたことは言うまでもない。奈良の大仏なども木炭を燃料として溶解されたのである。このように木炭を使って青銅を溶解することは、木炭の発熱量がいかに大きいかを実感することもできる。

送風機としては、本実験ではドライヤー（送風出力50W）を使用した。これを炉の送風口に密着させることなく、送風を行った結果、ドライヤーでも十分に送風機としての役目を果たすことが分かった。

図5には1回あたり約270gの青銅を合計2回溶解した時の温度変化を示した。黒鉛るつぼ4.9号（内容積500ml）を用い、温度測定にはR熱電対を使用した。常温から燃焼を開始した場合、途中で木炭を追加したので、鋳込みまでに50分間を要した（1回目）が、続いて行った2回目の溶解では、炉体が熱せられた状態なので、地金投入後わずか17分で溶解できた。なお使用した木炭は1回目3kg、2回目1kgであった。

以上のことより木炭を使用した溶解炉の加熱速度が速いことが示されたが、特に事前に炉を加熱しておくことで、溶解時間をさらに短くすることができる。したがって50分授業の中においても溶解作業を行うことができる。

ところで、銅合金の溶解においては、溶銅中の水素および酸素濃度を低く保たねばならない。水素および酸素濃度が高い場合には凝固の過程で気泡を生じ、製品にふくれなどの欠陥ができることが分かっている⁽⁶⁾。ここで、図6に溶銅中の水素および酸素の平衡濃度の測定例を示す⁽⁶⁾。これによれば平衡酸素濃度が高い場合、平衡水素濃度が低くなること示される。そこで溶解手順としてはまず酸化性雰囲気中で溶解を行い、水素濃度を低下させる。次に鋳込み直前にりん銅を添加し、脱酸を行う。りん銅としては市販のCu-15%P合金を用い、りん銅の重量割合が0.2%となるようにする。

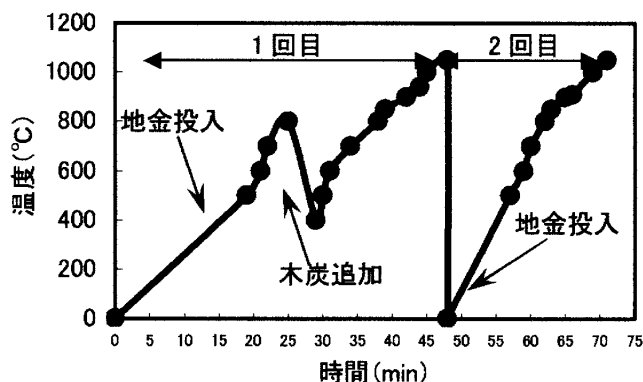


図5 溶解作業における加熱曲線

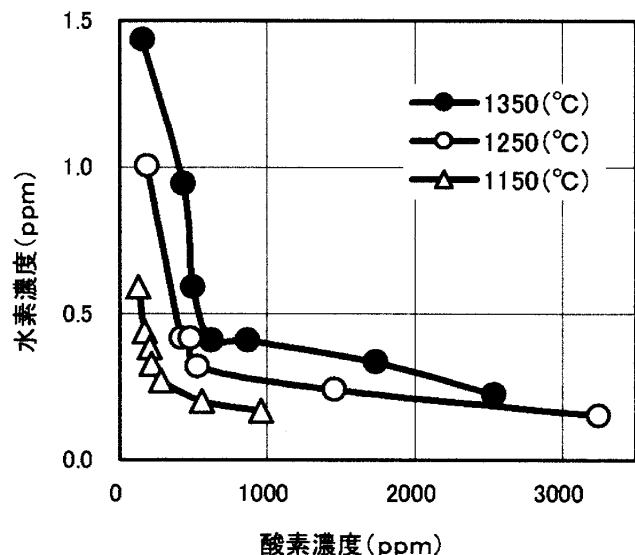


図6 溶銅中の水素および酸素の平衡濃度⁽⁶⁾

4. 銅鏡と銅鐸の製作

4-1 銅鏡の製作

鑄込み材料としては、Cu-15%Sn合金およびCu-20%Sn合金の2種類を用いた。原材料は銅の丸棒材と純スズのインゴットから合金を作製した。次に銅鏡の製作工程について述べる。

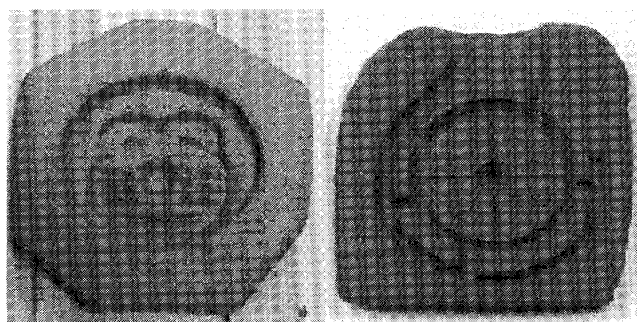
まず鑄型については、開放鑄型と密閉鑄型の2種類の方法を用いた。図7には、開放鑄型と密閉鑄型の例を示す。これらは、ボール紙などで原型を作成し、原型を陶土に押し当てる。陶土は始め、水分を含んでいるので柔らかく、成形は油粘土と同じ感

覚で行うことができる。密閉鑄型の場合は、さらに湯口や湯道を作り(図7-(b)参照)、別に平面上の鑄型を作っておき、2つを合わせて鑄型とした。

次に、鑄型の重量減少が見られなくなるまで自然乾燥を行った(約10日)。その後、800°Cで素焼きを行った。

材料を前出の炉を用いて溶解し、鑄型に鑄込んだ。図8に溶解の様子を示す。また鑄型は湯流れをよくするために事前に加熱しておいた。鑄込み後、鑄型から銅鏡を取り出すと図9のようになった。細かい模様が作られていることが分かる。

次に鏡となる側の研磨を行う。銅鏡においては顔が映るようにならなければ意味がないので研磨は特に重要と考える。研磨は時間のかかる作業であるが、丁寧に行うほど、銅鏡の表面はきれいに仕上がる。



(a)開放鑄型 (b)密閉鑄型

図7 開放鑄型と密閉鑄型

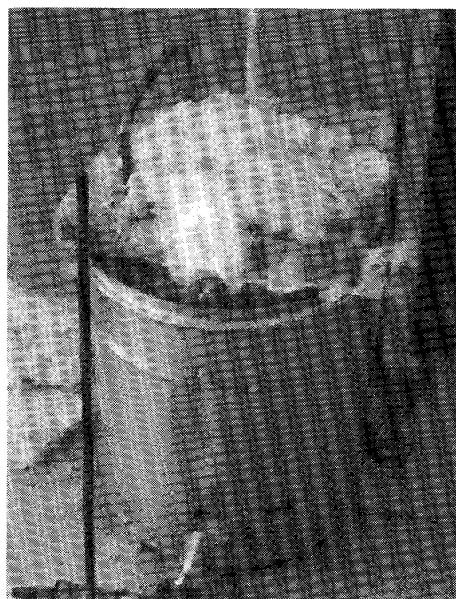
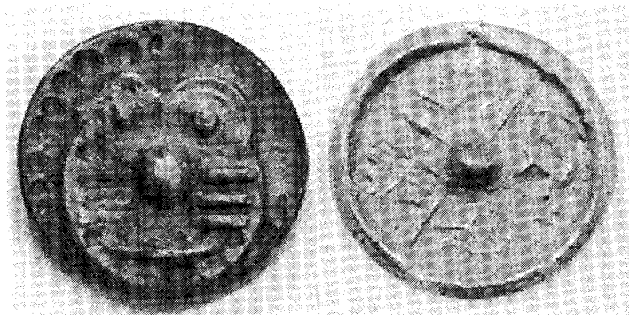


図8 溶解の様子

具体的には耐水ペーパーの粒度を粗いものから細かいものへと変えながら研磨を進めていき、仕上げは金属研磨剤（ピカール）で磨く。図10は、鏡部に物が映る状態となっていることを示す。

開放鑄型で製作した銅鏡の平均肉厚は、7～8mmであったのに対し、密閉鑄型で製作した銅鏡の平均肉厚は、3mmとなり、密閉鑄型の方が肉薄の銅鏡を作ることができた。



(a)開放鑄型

(b)密閉鑄型

図9 完成した銅鏡

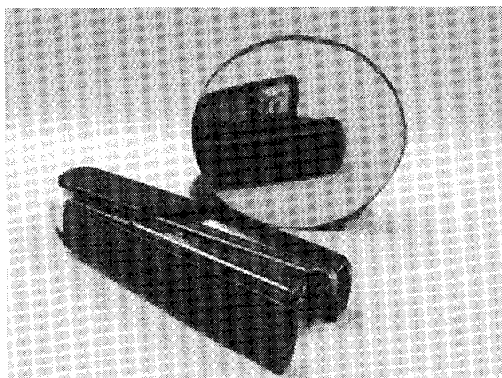


図10 銅鏡の鏡部の様子

4-2 銅鐸の製作

銅鐸の製作は、当然密閉鑄型となるが小泉武寛氏の復元製作⁽⁷⁾を参考にした。合金組成も復元製作と同じものとし、Cu-7%Sn-5%Pb合金となるようにした。次に銅鐸の製作工程について述べる。

まず図11のように木型を製作した。この木型は2つ割りとなっており、2つの凸部で一体にすることができる。また図12には、土台に木型的一方を納めた状態を示すが、土台の両脇の切り欠きは鑄型の位置合わせのためのものである。

土台と木型の上に陶土を貼り付けた様子を図13に

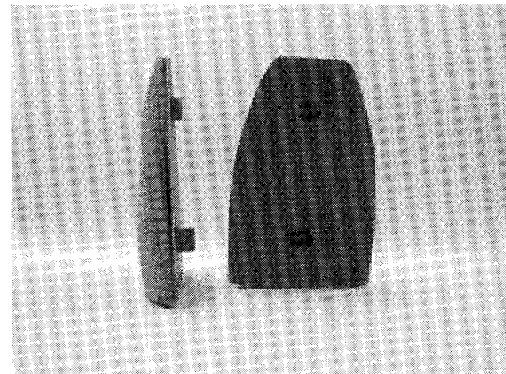


図11 2つ割木型

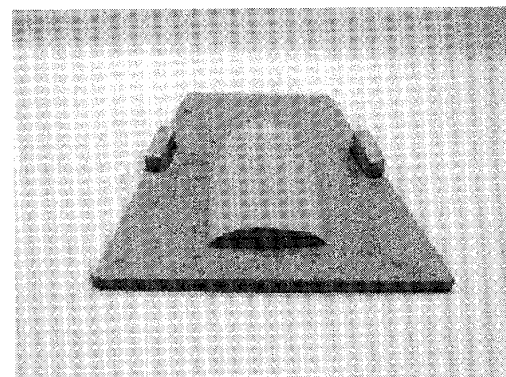


図12 原型と土台

示す。2枚の外型を成形した後、約10日間の自然乾燥を行った。銅鐸では空洞があるので、中にも鑄型が必要である（中子）。中子材料が、収縮すると鑄型に隙間が生じるため、陶土は中子に使用できないと考えられる。陶土と砂の割合が1：5の材料は収縮が0%であることが分かっている（表1）。しかし、この場合、中子強度が著しく不足することが分かったため、ベントナイトを少量混ぜたところ、使用に耐えられる強度を得ることができた。

図14では、外型から中子を作る様子を示す。この時、外型は素焼きを行っていないので、中子砂に含まれる水分が移り、変形するおそれがある。それを防ぐために、市販の防水スプレーを一吹きしておく。またはてんぷら油を塗ることも考えられる。この防水スプレーは、型同士をはがれやすくする離型材の役割も兼ねている。

外型から取り出した中子を十分乾燥させたら、図15のように型持ちが残るように削っていく。その削った部分が青銅に置き換わるので、均一に削る必要がある。小泉氏の復元製作⁽⁷⁾においても同様の方法がとられた。これを中子削り法と呼び、銅鐸の製作技

法と考えられている。図15に示した型持ちは外型の中であって、中子を支える働きをするが、この部分には当然溶湯が流れ込まないので製品には穴が空くことになる。実際銅鐸にはこの型持ちの穴が空いているものが多い。

外型の模様は、図16のように弥生時代を思わせるような、狩猟や、農耕、動物を描いた。このように模様を掘り込んだら、湯口とあがりを作る。その後外型、中子共に素焼きをする。

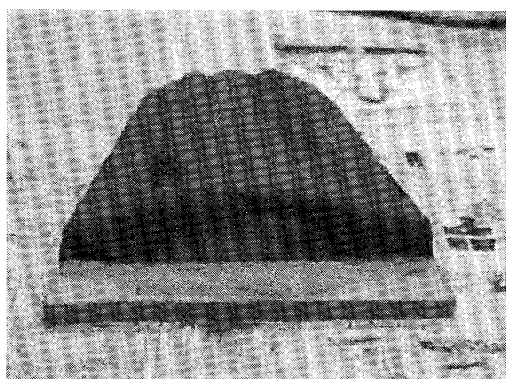


図13 木型に陶土をかぶせた状態

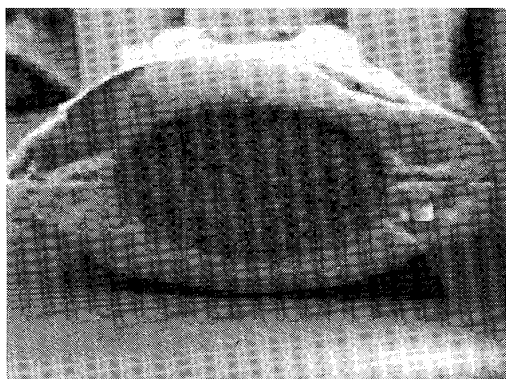


図14 外型から中子を作る



図15 型持ちを残して削った中子

図17は鑄込みの様子を示す。図18は完成した銅鐸を示す。厚みがわずか3mmと非常に肉薄に製作でき、また均一にすることができた。

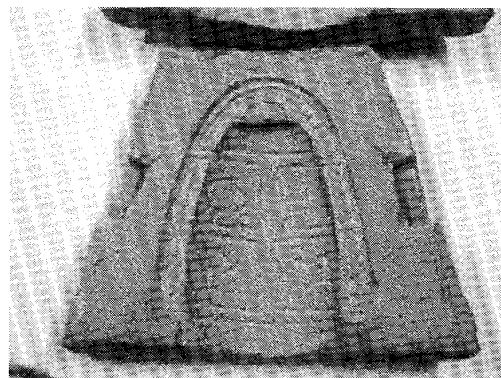


図16 外型に模様を掘り込む

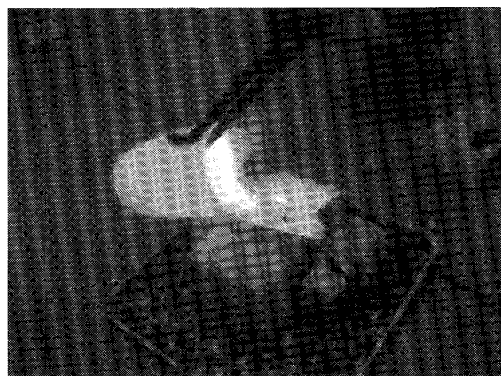


図17 銅鐸の鑄込み



図18 製作した銅鐸

以上のように、陶土（楽焼粘土（白））を用いて開放鋳型、密閉鋳型、中子のある鋳型を作製し、青銅を鋳込み、銅鏡及び銅鐸を製作することができた。このことから、陶土は、耐熱性があり、強度もあることが分かる。陶土は、安価で身近な材料であることに加えて、鋳物を製作した時に、鋳物の表面がきれいに仕上がるということが分かった。

5. 教材としての提案

銅鏡、銅鐸のいずれについても、中学校での選択技術の時間での実践を考え、生徒数は5～8人程度を想定している。

銅鏡については、題材名を「オリジナルの銅鏡を作ろう！」とした。ねらいとしては、ものづくりを楽しみ、顔が実際に映る銅鏡ができたときの感動や達成感を味わうことができるようにすることである。その他に、製作を通して、青銅に触れ、青銅という金属を知ってもらおう。さらに、銅鏡の歴史的背景にも目を向けさせることである。授業計画は、8時間の設定とし、詳しい項目は表2に示す。特に研磨の時間を長くした。

銅鐸については、題材名を「本物をつくろう！」とした。ねらいは、「資料でしか見たことのないものを実際に製作し、手にとることで、生徒の興味・関心を刺激することができる」とした。授業時数は、中子の製作が加わるので、銅鏡より長くなり、10時間の設定にした。詳しい項目は表3に示す。なお木型は教師が作製しておき、全員同じ木型をもとに銅鐸づくりを行う。そのため模様の掘り込みに時間を割いた。

このように陶土で鋳型を作る場合、自然乾燥に要する時間が長くなるので短期間での体験講座などでは利用できない。しかし、毎週の授業の中で行う場合には、大きな障害とはならないと考える。

本研究で使用した消耗品は、陶土、木炭、地金である銅、スズ、鉛である。これらの商品価格は、陶土が1kg230円、木炭が1kg100円、銅が1kg380円、錫が1kg940円、鉛が1kg125円となっている。そこで銅鏡、銅鐸1個当たりの重量を約300gとして製作に関わる費用を算出すると、銅鏡500円、銅鐸700円になる。また地金の銅の代わりに廃棄銅線をリサイクル利用すれば、その費用は銅鏡400円、銅鐸600円に抑えることもできる。

表2 授業計画（銅鏡づくり）

題材名『オリジナルの銅鏡を作ろう！』

授業時数	学 習 内 容
1	原型作り
2	鋳型作り、自然乾燥
3	自然乾燥中のため、銅鏡についての学習
4	素焼き
5	青銅の溶解と鋳込み
6	研磨(1)
7	研磨(2)
8	発表（銅鏡についての発表）

表3 授業計画（銅鐸づくり）

題材名『本物をつくろう！』

授業時数	学 習 内 容
1	導入
2	上型・下型の作製
3	中子作り
4	中子を削る(1)
5	中子を削る(2)
6	模様掘り込み(1)
7	模様掘り込み(2) 湯口・上がりの作製
8	素焼き
9	青銅の溶解・鋳込み（鋳型は前日からあたたためておく）
10	作品の仕上げとまとめ

6. まとめ

陶土を用いて銅鏡・銅鐸の製作を試みた。その結果、陶土は、十分に耐熱性があり、鋳型材料として使用できることが分かった。また陶土は成形性に優れており、開放鋳型のみならず、密閉鋳型、中子を組み合わせた鋳型などを作ることができた。陶土の特性としては、

- (1) 自然乾燥状態で約3日間収縮を続け、最終的な収縮率は5.3%、素焼きを行うことで、さらに0.4%収縮し、素焼き後には合計5.7%収縮する。陶土に砂を一定量混合すると、陶土の収縮

を0%にすることができる。

- (2) 陶土は自然乾燥後に硬化するが、水分を含ませることによって、元の軟らかい粘土状態に戻る。しかし、一旦素焼きを行うと、水分を加えても元には戻らない。

これらの結果をふまえ、中学校選択技術の中で8～10時間での授業計画の提案を行った。陶土鑄型を用いた鑄造学習を取り入れることで、今まで以上に鑄造学習の幅を広めることができると考えられた。そうすることにより、子どもたちのものづくり学習を歴史的理解に発展させることも可能であり、子どもたちにとってより深い学習ができるはずである。

参考文献

- 1) 八高, 大谷, 武田: “低融点金属による教材としての鑄造プロセス”, 横浜国立大学教育紀要, No.37 (1997), 245-251 p.
- 2) 保坂, 荒木: “石ころ鑄型によるアルミ鑄造教材の開発について”, 日本産業技術教育学会北陸支部会講演論文集, (2003) 25.
- 3) 中村, 畑, 宮坂: “空き缶を利用した「アルミ鏡」の鑄造製作による環境教育”, 静岡大学教育学部研究報告. 教科教育学篇, No.34 (2003), 199-208 p.
- 4) 山本, 牧野: “灯油バーナーるつぼ炉の製作とアルミニウム鑄造の授業実践”, 日本産業技術教育学会誌, No.40(2) (1998), 87-93 p.
- 5) 中村, 畑: “鑄造による「銅鏡」製作における鏡面仕上げとその意義について”, 日本産業技術教育学会誌, No.41(3) (1999), 145-151 p.
- 6) 梶山正孝: “非鉄金属材料”, コロナ社, (1963), 9 p.
- 7) NHKビデオ堂々日本史: “最新報告出雲の銅鐸”, NHKソフトウェア, No. 8