

無鉛高錫青銅でつくる工芸品 - 熱処理による色と強度の変化 -

喜多章江^(*1) 口池晴子^(*1) 坂田有梨^(*1) 吉行良平^(*1)
横田 勝^(*2) 小堀孝之^(*2) 三船温尚^(*2)

1. 無鉛高錫青銅工芸品取り組みの経緯と意義・・・・・・・・・・・・・・・・三船温尚

人類の青銅器文化のなかで、鉛は重要な役割を果たしてきました。まず、銅の融点を下げ casting を容易にした点です。そして、削りやすくするという加工性を高める効果がありました。錫も銅の融点を下げることができますが、硬く割れやすくなるうえに削りにくくなります。こういった面から、鉛は無くてはならない重要な金属でした。そして現在もなお、鉛を効果的に活用した青銅の工業製品が多く作られています。

ところが、近年になって貯水槽の青銅バルブに無鉛青銅が義務付けられるようになり、鉛の長期的な害を未然に防ごうという動きが広がってきました。高岡短期大学の casting 実習に用いる青銅も他の大学や casting 業界に先駆けて無鉛化を目指し、幅広い研究を重ねてきました。この研究は大きく二つの方向に分かれています。一つは、アメリカの casting 現場で用いる銅と珪素の合金であるシリコンブロンズで、もう一つは、従来の青銅から鉛を除いた銅と錫の合金です。これらの研究に至る経緯は次のようなものでした。

アリゾナで長年 casting に携わった川崎 克氏が、高岡の casting 技術研究のため1999年に一時帰国し、氏との交流の中から高岡短期大学でのシリコンブロンズ研究がはじまりました。アメリカの無鉛化は想像以上に徹底されていました。シリコンブロンズが溶接接合に優れていることなど、アメリカの casting 現場の最新情報を幅広く得ることができ、高岡短期大学の無鉛化は一気に加速されました。一方で、1997年から開始した古代中国高錫青銅鏡の研究により、銅に多くの錫を加えた合金の casting 性や加工性、熱処理による性質変化など、それまで関わりの無かった高錫青銅の世界に足を踏み入れ、この合金の魅力を認識するようになっていました。そうした中から、現在の工芸品にはほとんど使われなかった無鉛高錫青銅を、新たな工芸品へ応用する試みが高岡短期大学で少しずつ行われてきました。今後は、このシリコンブロンズと高錫青銅、さらにはリン青銅などを様々に混ぜ合わせて、いろいろな性質を解明することが、無鉛青銅工芸品制作にとって重要な研究になると考えています。

高錫青銅を熱処理すると予想もしなかったいくつかの性質変化が、高岡短期大学の古代青銅鏡研究から分かってきました⁽¹⁾。一つは、ガラスのように割れる高錫青銅が焼き入れて割れなくなること、もう一つは、加熱で表面が銀白色の高錫層に変わることです。前者は、硬くて脆い高錫

(* 1) (執筆時) 高岡短期大学 産業造形学科 金属工芸コース 2 年生

(* 2) 高岡短期大学 産業造形学科

青銅が硬くて強靱な高錫青銅に変化するのですから、工芸的な利用価値は多くあります。たとえば、焼き入れた高錫青銅の刃物というものも可能になります。後者は、伝統的な青銅表面処理である味噌焼き法を高錫青銅に施した時に起こる変化です。硫黄を米ぬかで練って青銅表面に貼り付け炭火で焼くと、硫黄が表面の銅と結合して青銅外に出て行くため、表面の錫濃度が高くなり銀白色に変化します。表面を高濃度錫層に覆われた青銅器は、これまでのように、直ぐに緑青錆が発生するようなことはありません。今後研究を重ねれば、無鉛の銀白色高錫青銅を食器類の工芸品に使うことも可能になります。本稿2で喜多さんが、3で口池さんが、5で吉行君が、高錫青銅を熱処理して銀白色に変化させる実験や方法を報告していますが、実はこれらの制作時点で、我々には、はっきりとした銀白色のメカニズムが把握できてはいませんでした。その後、この三人の実験と制作を基に新たな実験を試み、加熱時に硫黄を貼り付けない部分と、貼り付けた部分では、硫黄の無い部分は銀白色に変化しないことを突き止めました。そして、金属材料学を専門とする横田 勝先生(高岡短期大学)が、前述のような、硫黄が銅だけと結合するというメカニズムを推論しました。

これまでの、このような研究の取り組みが、少しずつ学生の制作にも影響を与え、平成13年度の卒業制作では、多くの学生が無鉛高錫青銅の特長を生かした工芸作品を作るようになりました。今後の私たちの生活環境を考えれば、こういった学生の制作や研究がやがて地場の鑄造産業に少なからず貢献できるのではないかと考え、彼らの卒業制作の詳細を記録し、報告することにしました。

高岡短期大学における、平成14年4月からの鑄造実習では、込型鑄造には錫12.5%、亜鉛0.2%、銅87.3%、蠟型鑄造には錫8%、亜鉛20%、銅72%、生型鑄造には亜鉛30%、銅70%という無鉛青銅を用いています。しかし、やや硬すぎたり折れやすかったりと、今後改善しなければならない問題点があり、それぞれの金属の比率を変えることや、他のブロンズとの組み合わせなどを研究する必要が、まだまだ多くあります。

2 . 高錫青銅の味噌焼きによる銀白色皿の制作 喜多章江

(1)制作の経緯

我が家では、毎日夕食後に家族で紅茶を飲む習慣があります。気軽に飲むため、カップにソーサー(カップの受け皿)はつけていません。そこで、お茶の時間がもっと楽しめるようなおもしろいソーサーを作りたいと思いました。家族が使っているカップは各自違います。ソーサーのデザインはそれらに合うよう一つひとつ異なるものにしました。デザインは、カップを花に見立て、花に蝶が寄って来るようなイメージにしたいと思い、蝶型のソーサーを作ることにしました。そして、素材は人体に害を及ぼしにくい錫を先ず試し、次に銅と錫の合金である無鉛高錫青銅を使用しました。他にも、仕上げが銀白色になることや、融点が低い^{ろうがた}ため流動性が良く鑄造の失敗が少なく気軽に制作できることなどが理由になりました。作品が一つひとつ違うデザインであること、皿の表面に模様を描くことから、制作方法は、蠟型鑄造を選択しました。

(2)制作工程

①蠟原型制作

- ・蝶の皿のデザインをたくさん考え、その中から一つを選び実験的に一枚作り、イメージを確かめる

- ・厚さ 3 mm、W 95 × D 115 × H 10 mmの蝶の皿の蠟原型を作る
 - ・蠟原型に金属を流し込む湯道をつける(脱蠟を兼ねるので、途中で蠟が溜まらないように湯道を付ける)
 - ・鑄型焼成を確認する色見の蠟を付ける
- ②鑄型作り
- ・砥の粉を薄埴汁で溶かし、筆で蠟原型に塗り、完全に乾かす
 - ・更にもう一層砥の粉を塗り、乾かないうちに肌砂を付け、水分を取り埴汁を塗り荒土を付ける
 - ・筋金を入れ粗土を付け、乾燥後、鑄型を裏返し同じ工程を繰り返す
 - ・湯口を作り鑄型の完成
- ③脱蠟
- ・炭火の上に鑄型の湯口が下になるように置き、ゆっくりと脱蠟する
- ④鑄型焼成
- ・朝 7 時から重油バーナー炉で鑄型を焼成する。850 まで 8 時間かけ徐々に温度を上げ、色見の奥が赤くなったらバーナーを止め、鑄型をむらす
- ⑤鑄造
- ・錫 96 %、銅 4 % (純錫では柔らかいので、硬さを増すために銅を加える) で鑄造し、鑄型が冷めると鑄型を壊し製品を取り出す
- ⑥仕上げ
- ・湯口を切り落とし、バリなどをヤスリで削り完成
- ⑦実際に使ってみる
- ソーサーの上にカップを置き、お茶を飲んでみました。カップとの釣り合いや、カップをのせた時の重さ、持ちやすさなど改善したい点がたくさん出てきました。
- ⑧改善点
- 一番の改善点は、皿の重さです。厚さ 3 ミリの金属の皿なので、皿だけでも重く、お茶の入ったカップをのせると更に重くなってしまいます。そこで、できるだけ薄い、皿に挑戦することにしました。3 mm 2 mm 1.6 mmへと薄くしていきます。重さは約 200 g から 100 g へと軽くなり改善されます。しかし、強度の面が問題になります。錫 96 %は柔らかく強度的に頼りないため、銅 86 %、錫 14 %の高錫青銅で行うことにしました。この金属は流動性が良く、硬度が高く、仕上げでみそ焼きをすれば思い通りの銀白色になります。その上、緑青の錆が出にくく人体に害が無いといった利点があります。使用する金属とデザインがまとまり、再び蠟原型の制作から始め、鑄型を作り高錫青銅を鑄造しました。鑄造後、仕上げをして表面処理をします。
- 味噌焼き
- 伝統的表面処理技法の味噌焼きは、米ぬか：硫黄 = 1 : 1 を水で練った味噌を作品に薄く張り付けて完全に乾燥させ、その後、レンガで窯を作り炭火で作品を加熱する方法です。作品が真っ赤になるまで加熱し、赤になるとすぐに窯を壊し空冷します。高錫青銅の場合、金ブラシで酸化被膜を磨き落とすと、作品は銀白色に変化しています。今回、制作した 14 枚の皿は、焼く条件を実験的に以下のように変えてみました。
- (A) 作品を炭火で加熱し、作品が赤くなる前に窯から出した場合
 - (B) 作品を炭火で加熱し、作品が赤くなって窯から出した場合

この二通りの方法で行い、皿の表面の色に変化が出るか調べました。それぞれの結果は次のようになりました。

(A)味噌焼き後、金ブラシで磨きあげると、皿の縁部分は銀白色に変化しているが、中心部は銀白色が現れず青銅の地の色がうっすらと浮き出ている。また、金ブラシでこすっても酸化被膜はなかなか取れず、磨きに長時間かかった。

(B)金ブラシで磨きあげると、皿は全体的に銀白色に変化していた。また、酸化被膜は磨き取りやすく、短時間で終了した。

これらの簡単な実験からは、作品が少し赤みを帯びる程度に温度を上げたほうが、銀白色は強くなり、酸化皮膜は落としやすいことが分かりました。

(3)制作後の感想

最初はイメージが上手くまとまりませんでした。頭の中だけで考えず先ず実際に手を動かして作ってみました。漠然としたイメージは具体的な形になって、改善すべき点が見えてきました。そして、自分自身への次の新たな課題が分かってきます。比重の大きい金属で生活用品を作る場合、使いやすさを重視するとデザインに様々な規制が発生します。この卒業制作では多くのことを体験し考えさせられ、たくさんのことを勉強したように思います。

3 . 高錫青銅楽器(銅鼓)の制作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・口池晴子

(1)制作の経緯

自分を含めいろんな人が、見て触れて楽しめるものを作りたいという思いから、叩いて音の出る楽器の制作を考えました。

(2)制作工程

①中子作り

- ・ (銅鼓の長さ+幅置)から鉄の心棒の長さ、重さで曲がらない太さを決める
- ・ 心棒に機械油を塗って縄を巻き、中子土が付きやすい様に粘土を縄に擦り込む
- ・ 荒土(糊殻多め+藁ツタ多め+埴汁+ 10 番真土)を厚み約 1cm で付ける
- ・ 荒土を乾燥させて補強の筋金を入れ、更に荒土を 1cm 付け筋金を埋め込む
- ・ 太鼓になる部分に墨でだいたい円を描き、そこに荒土を盛り付ける
- ・ 太鼓の部分に筋金を入れ、筋金の内側から荒土を付け、全体が白くなるまで乾燥する
- ・ (30 番真土 20 % + 浜砂 + 濃い埴汁)を混合し、埴汁を分散させるために 10 番篩で 5 回くらいふるい中子砂を作る
- ・ 全体に厚さ 1.5cm で中子砂を付ける
- ・ 幅置の部分は少し硬めにするために、30 番真土を多めに入れた中子砂を付ける
- ・ 乾燥させて木片などで削って形を整え、形ができあがったら炭火で乾燥させる
- ・ 冷ましてからうす埴汁を塗り、乾いたら(100 番真土+薄埴汁)を塗る
- ・ 乾いたらハケで十分に付着していない真土を取り、(黒味+薄埴汁)を塗り、完全に乾燥させる
- ・ 冷めたら(松脂+シンナー)を塗る

② 蠟原型作り

中子に張る蠟の配合は、松脂：蜜蠟^{みつろう}：パラフィン蠟 = 3 : 3 : 1 にしました。

- ・ピンツケ蠟（マシン油 + 松脂）を中子に塗り板状の蠟を貼って焼きゴテで焼き付ける
- ・温めた木っ端で蠟を均して形を作る
- ・中子の固定にシリコンブロンズ片を型持ち^{かたもち}として複数個蠟原型に埋め込む
- ・蠟原型に蠟で壇^{せき}、湯道^{ゆみち}、湯口の順に付けていく。更に釣り、色見を付ける

③ 外鑄型作り

鑄型は上と下の2回に分けて作って行きました。

- ・蠟原型に砥の粉を塗り、乾いたら肌砂を厚さ3～5mm付け、水分を吸い取る
- ・次に荒土を厚さ3cmで付け、乾いたら筋金を沿わせる
- ・1回目の荒土と筋金の間に埴汁を塗り、荒土と「すわせ」を詰め込んで行く
- ・鑄型が厚くなり過ぎないように、筋金の上から荒土を込めて行く
- ・「素灰」を立ててつけ、砂をかぶせて充分水分を吸い取る
- ・鑄型を反転し、残り半分の鑄型を同手順で作し、全体が一体になるよう筋金を固定する
- ・縄を抜き取りながら心棒を抜き、両端にコの字形と円の筋金を入れ鑄型を固定する
- ・湯口を整え湯口の蠟を切り取り、湯口に塗型^{とがた}（100番真土+薄埴汁）を塗る
- ・中子内面に「とろ真土」（30番真土+薄埴汁）を流し補強する

④ 脱蠟

- ・湯口を下にしてレンガの上にはほぼ垂直になるように鑄型を立て、空気穴を作って周りをレンガで囲んで行く
- ・鑄型の周りに火の着いた炭を置き、レンガを上積み上げて窯を作りながら脱蠟する
- ・炭火を更に増やし、4～5時間かけて脱蠟する
- ・最後に薪^{まき}を入れて高温にし、煙が落ち着いたら窯の上に素灰を立てて空気穴を絞る

⑤ 窯焚き（鑄型焼成）と鑄造

- ・薪を井桁に組み、中に新聞や木っ端を入れて火をつけ、薪が充分燃えたら窯に入れる
- ・燃えている薪を窯全体に広げ、次の新しい薪を入れ、レンガで窯の蓋をする
- ・最初の2時間くらいは薪をどんどん入れて窯の温度を上げる。その後はできるだけ空気穴をふさいで熱を中に閉じ込めるように焚く
- ・色見穴が赤くなったら型焼きを終了する
- ・地金は錫14%、銅86%の無鉛高錫青銅を使用し、鑄型に流し込む。鑄型は翌日に開ける

⑥ 仕上げ

- ・金ブラシで砂を落とし、湯道をグラインダーで切断する
- ・色見を金鋸で切断し、内側の鑄バリはリュウターで削り落とす
- ・蠟型独特の玉金は「きさげ」で落とし、40番のペーパーヤスリで全体を磨く

⑦ 味噌焼き

- ・銅鼓を垂直に立てて下から順に味噌（硫黄＋米ぬか）を付け、味噌が硬くなるまで乾かす
- ・レンガで窯を作りあまり強くない炭火でゆっくり硫黄を燃やす
- ・硫黄の煙が落ち着いたら1cmの太さに割った薪を上からパラパラと入れる
- ・銅鼓が少し赤みを帯びてきたら窯を壊して味噌焼きを終了する
- ・金ブラシで酸化膜を落とすと、高錫濃度の層が現れ銀白色に変化している

⑧おはぐろ着色

- ・銅鼓を炭火で温めて、水で3倍くらいに薄めたおはぐろ液を刷いていく
- ・時々きれいな布で水拭きし、気に入った色になったら蝋留めして完成

(3)感想

鑄物は型を開ける楽しみがありますが、今回はそれに加えて音を聴く楽しみがありました。いろいろ試した結果、銅鼓を床に置くより吊り下げの方が響くことが分かりました。また、吊り下げの際にチェーンを使うと響きが悪くなりました。叩くパチによっても音が変わるので、少しでも良い音が出るようにといろいろ実験しましたが、試していく中での発見にはこれまでにない喜びを感じました。良い音を出すための工夫も含め、制作後も楽しめるものができたと満足しています。

4. 高錫青銅の脚による座卓制作・・・・・・・・・・・・・・・・・・坂田有梨

(1)制作の経緯

卒業制作において、私は日常使用できるものを制作しようと考えました。いろいろと考えた末、座卓を制作することに決めました。天板には樹木を使うことにしましたが、脚を鉄の鍛造かそれとも青銅の鑄物にしようか迷いました。自分の性格は鑄物作業に合っていると考え青銅鑄物で制作することにしました。

鑄型作りを進めていくうちに、具体的にどのような地金（青銅）を流し込むのか考えなければならなくなりました。座卓の脚なので、どんな青銅を使っても良いのですが、仕上がりは金属本来の色を活かした研磨仕上げにしようと思い、銅、錫の比率を吟味しました。また、脚は直接手に触れる機会が多いため、無鉛の青銅を選択しました。そして、私の色の好みで、黄銅ほど黄味が強くなく、青銅ほど赤みがなく、白銅ほど白くない、やや白色を帯びた黄金色である高錫青銅に決めました。

(2)制作工程

①原型の制作

- ・天板に用いる樹木を購入し、それに合うよう脚のデザインをする
- ・全体の1/3サイズの模型を作りデザインを検討する
- ・脚の実物大の原型を油土で制作し、石膏取りをする
- ・天板と脚の接合部分を蝋で作り、石膏原型と組み合わせる

②鑄型作り

今回は、込型鑄造法と蠟型鑄造法を組み合わせ、原型を垂直に立てて鑄型を作る方法で行いました。

- ・石膏原型に蠟原型を付け、垂直に立てて縦半分に分割する線を墨汁で書く
- ・押し台（10 番篩でふるった土間土 + 水）を作る
- ・蠟原型の部分に「砥の粉」「肌砂」を付け、更に「荒土」を付ける
- ・石膏原型には「紙土」、幅置には「玉土」を付け、更に「荒土」を付ける
- ・石膏原型部分は、下から順に「すわせ（鑄型片）」で水分を吸わせながら徐々に上部に鑄型を作り上げていく
- ・鑄型補強の筋金を入れ、同様に下から順に「荒土」を付けていく
- ・押し台の土を取り去り、幅置に鑄型のずれ防止の「はまり」を作り、もう一つの鑄型を同じ手順で作る
- ・鑄型を縛り横に倒して水平に固定し、蠟原型の天板との設置部分の鑄型を作り始める
- ・押し台を作り、蠟の部分に「砥の粉」「肌砂」、幅置部分に「玉土」を付け全体に「荒土」を付ける
- ・垂直に作った鑄型の筋金としっかり接合するように筋金を入れ、「荒土」を付ける
- ・反転し反対側の鑄型を同様に作る
- ・乾燥させ、鑄型を開き、石膏原型部分の鑄型面のひび割れを修正する
- ・金属の厚さになる 4 mm の粘土板を鑄型面に張り付ける
- ・その上に中子砂（浜砂 + 埴汁）を 1 cm 厚さで敷き詰め、幅置に「玉土」を付ける
- ・中子の補強に針金を入れ、中子砂で埋め込む
- ・鑄型を合わせて中子を一体にして乾燥させる
- ・乾燥したのを確認し、鑄型を再び開け、中子の修正や湯道、堰を掘り込む

③脱蠟

鑄型の中にある蠟を溶かし流し焼き切るため、重油バーナー炉に入れ加熱します。およそ 5 時間かけ 650 まで温度を上げました。冷めて炉の外に出し、鑄型面のひび割れを修正し、中子を外型に入れ鑄型が完成します。

④鑄型の焼成

鑄型を素焼きするため、約 7 時間かけ 830 まで重油バーナー炉で鑄型を焼成します。バーナーを止めて炉の中で更に 2 時間鑄型をむらし、隅々まで温度を行き渡らせませす。

⑤地金作りと鑄造

先に銅線だけを坩堝に入れ溶かします。次に純錫を入れ溶かし合わせて 14 % 錫の高錫青銅を作り、一度インゴットケースに流して固めます。今回は銅 17.2 kg、錫 2.8 kg で 20 kg の青銅を作りました。炉から出した鑄型表面には割れがいくつもあり、荒土で修正をした後、再度青銅を溶かしこれを鑄型に流し込みました。

⑥仕上げ

翌日、流し込んだ鑄型を開けると、鑄バリがあるものの、青銅は流れていました。仕上げは次

のような手順です。

- ・中子の砂を抜き取り、湯道を切断する
- ・ディスク・グラインダーで表面をおおまかに研磨する
- ・剥き仕上げのため、鑄^むがけの後、ペーパーヤスリ^{やすり}で2000番まで磨き、研磨剤で磨く
- ・天板の檜に塗料を塗り、鋳物の脚とは木ネジで固定する

こうして制作期間、約三ヶ月をかけた私の卒業制作は完成を迎えました。

(3)卒業制作を終えての感想

卒業制作に与えられた時間は長いようで、実質的にはかなり短かったような気がします。卒業制作は自分で課題を決めるので、制作に取りかかるまでの期間や、とりかかってからの制作スケジュールなどすべてが自己責任になります。ですから、自分のペースで制作できるという良い点もありますが、いろんな意味でいい経験になったと思います。

でき上がった座卓は、一生ものです。高錫青銅の光った脚、オスモカラー塗装によって黒くなった天板。一見ミスマッチなようですが、それがいいのです。制作の思い出がたくさん詰まった、世界に一つしかないテーブルだからです。

卒業制作とは、個人の学生生活の想い、そしてこれからの想いを形にした、自分的遺産だと私は思っています。

5 . 23%高錫青銅の焼き入れによる栓抜き制作・・・・・・・・・・吉行良平

(1)制作の経緯

栓抜きを作ろうと考えた理由は、居酒屋を開きたいという友人の話聞いたからです。「居酒屋」と聞いてまず頭に浮かんだのはビールの栓が「ポンッ」とあく音でした。ほとんどの店では店員があけてしまう栓を、私は自分であけたいと毎回思っていました。「テーブルの上にあるとつい自分で手にとって栓をあけなくなる」そんなどこにもない、面白い栓抜きをたくさん作ろうと考えました。

(2)制作工程

先ず制作にあたって栓抜きに必要な素材の条件を考えました。

- ・使用に耐えうる硬さを持っている事
- ・人体に安全である事
- ・色の美しいものである事

これらの条件を満たす事ができるのは、焼き入れした高錫青銅（錫23%、銅77%）であると考えこの素材を今回の栓抜きに使用することにしました。

制作工程は次のようになりました。

①デザインの決定（インダストリアルクレイによる原型制作）

自分の考えた8種類の栓抜きのデザインを、先ずインダストリアルクレイで形作ります。

②真鍮の原型制作

インダストリアルクレイで制作した原型をもとに量産に耐えうるよう丈夫な金属原型をそれぞれ1個ずつ作ります。それは、生型鑄造法で鑄型を作り、そこに真鍮（亜鉛30%、銅70%）を流しこむ方法です。鉄製の栓（王冠）よりも柔らかい真鍮の栓抜きは、実用には適さないのので、この真鍮の栓抜きを原型にして生型鑄型を量産し、鉄製王冠に負けない硬さの高錫青銅をそこに流し込みます。

③高錫青銅用鑄型の製作

大量生産型の生型鑄造法で鑄型を短時間でいくつも作ります。手順は次の通りです。

- ・真鍮の原型をヤスリで仕上げ、1つの鑄型枠に2個ずつ原型を入れる
- ・ちょうど半分のところを見切り線にし、捨て型（鑄型にしない台になる型）を作る
- ・捨て型の上に半分の鑄型を作る
- ・できた半分の鑄型を反転し、残り半分の鑄型を作る
- ・鑄型を開けた後、原型を抜き取り高錫青銅の流れ込む湯道、堰を掘る
- ・2つの鑄型を合わせ凝固時のガスが抜ける穴をあけ、鑄型は完成

この方法で1種類につき10個の栓抜きができるように鑄型を合計40個量産しました。

④高錫青銅の溶解と鑄造

錫23%、銅77%の高錫青銅を銅線と純錫を溶かし合わせて作ります。この高錫青銅は鉄の栓（王冠）に負けない硬さを持っていますが、少しの衝撃でガラスのように割れてしまいます。量産した鑄型に高錫銅合金を流し込む時の湯（溶けた金属）の流れ具合はとても良いものでした。そして、鑄造後の栓抜きの色は銀白色をしていました。

⑤一回目の焼き入れ

湯道を切断しディスク・グラインダーで研磨しようとしたのですが、摩擦熱ですぐに割れてしまいました。そこで割れないように焼き入れを行ってから研磨し、最後に表面を銀白色にする為に再度焼き入れを行う事にしました。

湯道を切断した栓抜きを電気窯に入れ650℃まで温度をあげ、その状態で20分保持しました。それを冷めないうちに塩水（高温のものを水中に入れた時に発生するガスが急冷を不均一にするため、ガスの発生を防ぐ目的で塩をいれる）に入れ均一に急冷します。急冷された栓抜きは、表面の色が少し黄色味をおびた色になります。なかでも、湯道を切断した面は他の鑄肌面に比べ強い黄色になっていました。そして、この焼き入れで、割れやすく硬い高錫青銅が、ハンマーでたたいても割れない性質に変化し、ハンマーの打撃点が窪まない硬さを維持します。

⑥二回目の焼き入れ

研磨してバリなどを落とした栓抜きの色を銀白色にするため、再度焼き入れしました。まず1m×1m×(高さ)80cmの窯をレンガで築きます。最初はその窯のなかの一段高いレンガ台の上に栓抜きを並べた状態で、薪を燃やして窯をたいていましたが、温度が急激に上がり栓抜きが溶けたり割れたりしてしまいました。また色も酸化銅が表面を覆い赤くなってしまいました。そこで栓抜きを窯の上で温めながら薪を焚き、薪がおきになって温度が安定してから栓抜きを中にいれ20分保持しました。その後、冷めないうちに塩水で急冷しました。

⑦ 研磨

焼き入れした栓抜きを金ブラシで磨き完成です。二回の焼き入れで栓抜きは割れることはありませんが、色を銀白色にすることはできませんでした。

⑧ 銀白色にする焼き入れ実験

焼き入れで銀白色にするには一体どうすればいいのか、残った作品で実験することにしました。仕上げ中の割れを防ぎ磨きやすくするために一回目の焼き入れを行い、その後色を銀白色にする為に再度焼き入れを行うという想定をし、二回の焼き入れを行いました。一回目の焼き入れは650 で20分保持した後塩水で急冷し、二回目は温度、保持時間の異なる6種類の焼き入れを行いました。焼き入れ後金ブラシで表面を磨いて色の変化を確認し、ハンマーで栓抜きを強く叩いて硬さと割れない事を確認しました。実験方法と結果は<表-1>の通りです。

<表-1> 二回目の焼き入れ方法と結果

実験方法	変化した色	割れやすさ	備考
330 で20分保持し塩水で急冷	銀黒色	割れる	
500 で20分保持し塩水で急冷	銀黒色	割れる	
600 で20分保持し塩水で急冷	黄黒色	割れない	
650 で10分保持し塩水で急冷	黄白色	割れない	
650 で20分保持し塩水で急冷	黄白色	割れない	酸化銅が出てくる 銀白色の部分も見える
800 で20分保持し塩水で急冷	黄白色	割れない	酸化銅が増える

このことから、以下の2点のことが分かりました。

- ・色は焼き入れ温度が低いと黒っぽく、上がるにつれて黄色っぽくなっていく。
- ・硬さは二回目の焼き入れ温度が600 を越せば保持時間が短くとも割れなくなる。

この実験で銀白色に変化したのは、650 で20分保持したものでだけでしたが、それも一部分だけでした。この二回の焼き入れは、高錫青銅で作品や製品をつくるうえでどうしても必要な工程だと思います。今後も、どうすれば銀白色にすることができるのか少しずつ研究していきたいと考えています。

(3) 感想

この栓抜き制作を通して思ったのは、伝統技法(生型鑄造法)はものすごく最先端であるということです。機械を使わなくても自分の作りたい形が作り出せるし、量産だって可能です。ゴミもでません。伝統技法は古いという人が多いのですが、そんなことはありませんでした。私の技術はまだ未熟ですが、今回の制作の中で見つけたいくつかの小さな発見は私なりの技法となり、それは実際に私を支えてくれました。そして、私だけの発見のような気がしてうれしいものでした。また、使ったことのない素材を使用した事も貴重な経験となりました。

途中で作品が割れたり、溶けたりと幾度となく、くやしい思いもしましたが、その代わりに発見できた事もありました。自分の作品のイメージをしっかり持つことの重要さとそれを完成させる厳しさを知りました。これからもたくさんの発見ができるような制作をしていこうと考えています。

6 . 高スズ青銅の材料科学 - 熱処理による機械的性質の改善 - 横田 勝

銅とスズの合金を青銅といいますが、実用合金としての青銅は銅にスズを約 10 % まで含んだ合金です。この合金は板材などの加工材としてはあまり使われず、もっぱら鑄造材として使われており、その性質は耐食性に優れ、また耐磨耗性にも優れているので私たちの身の回り物にいろいろな形で利用されています。

一方、古代の青銅器、特に青銅鏡にはスズ濃度が 20 % から 30 % と大変高い銅 - スズ合金、いわゆる高スズ青銅合金が使われていました。どうしてこのような高スズ青銅合金が使われたのか、その理由は鏡としての合金の色彩、硬さの改善などが考えられます。ここでは高スズ青銅を熱処理することにより、その機械的強さ、割れにくさ、硬さを変化させることができる材料学的根拠を示したいと思います。

銅とスズの合金状態図を用いて、銅 - 17 % スズ合金が溶解後、冷却中にどのように合金として固まるか、過去の報告書²⁾でその変化を詳しく示しました。ここではその結論だけを挙げます。鑄造凝固の合金中には初晶の 相と + の共析相が混在した状態にあります。一般に、青銅の鑄造組織は大変複雑で、スズ濃度の高い部分と低い部分が顕著に分かれて現われます。スズ濃度が高い部分として という相があります。これは銅 - スズ約 33 % の化合物です。この 相の出方は鑄造条件により色々変化しますが、どんな出方をしても、この 相が存在しますと、鑄造材は一般に固く、また脆くなります。この性質を改善するために、次のような熱処理をしますと、<表 - 2>に示すように³⁾、引張強さ、伸び、硬さが大きく変化することがわかります。なお、青銅の熱処理による機械的性質には、合金成分として鉛を添加してもしなくてもまったく変化がないと判断してよいでしょう。

青銅の熱処理による機械的性質は表 2 に示した焼入れ温度 520 を境に、これ以下の低い場合には引張強さは低く、また伸びも少なく、硬さが高くなっています。すなわち硬いにもかかわらず、わずかな力で変形しないで割れやすいことを表しています。一方、焼入れ温度が 545 より高くなると、引張強さが一挙に高くなり、しかも伸びも大きくなる一方、硬さは低くなります。すなわち焼入れ温度が 545 以上では機械的性質は強く、変形もしやすくなり、強靱性（強く、割れにくい）を増すこととなります。

高スズ青銅を熱処理によってさらに強靱にしたい場合は、次のような熱処理方法があります³⁾。鑄造材をまず、600 以上 750 内の温度で数時間保持（これを溶体化処理と言います）の後、水焼入れし、再び 200 ~ 350 で 2 ~ 5 時間保持（これを時効処理と言います）の後、水焼入れまたは空冷すると強靱で硬い材料が得られます。具体的な数値を示しますと、鑄造状態でのブリネル硬さが 161 であったのが、時効処理によりブリネル硬さが 212 と大きく改善されます。

ここで、上に述べた溶体化処理と時効処理による機械的性質の改善を図る場合に注意すべき点は溶体化処理時の保持時間を十分長くする必要があるということです。保持時間が短かすぎると却って機械的性質を悪くすることがあるのです。昔の人たちは高スズ青銅にいろいろな熱処理を

施すことによって、時には強靱な武器として、また時には自然の光を反射させる鏡としてその用途を使い分けていたものと考えられます。

<表 - 2 > 20 %スズを含む高スズ青銅合金を各温度から焼入れしたときの機械的性質

焼入れ温度 ()	420	470	520	545	570	595	620	670
引張強さ (kg/mm ²)	22	22	22	54	55	46	43	40
伸び (%)	2	1	2	5	5	6	6	2
ブリネル硬さ	150	152	150	144	140	135	129	142

7. 無鉛高錫青銅の今後の活用と展開・・・・・・・・・・・・・・・・小堀孝之

古来より錫や高錫青銅は人間社会において大いに利用されてきました。たとえば正倉院御物に、サハリ(砂張、佐波理)と呼ばれる高錫青銅の匙がありますし、法隆寺献納宝物の八重椀等がよく知られているところです。また、昔から高錫合金は良い音色が出ることが知られており、現在も梵鐘や銅鑼の材料として盛んに利用されています。古代中国ではその硬い性質から鋭利な武器として、刀や刃物にも利用されました。日本では古くから、神社の御神体として鏡を崇め奉ってきましたが、その鏡もまた、鏡銅といわれる高錫合金でできています。一方、錫器は身体に無害で保温性に優れ、昔から、酒器(ビールジョッキ、銚子、徳利など)や茶器等の利用がよく知られています。今後は、現代の生活に合わせた、錫や高錫青銅の新たな利用が望まれるところです。

高錫青銅は錫の比率が通常の青銅合金よりも高いものをいいます。一般的な美術青銅では錫の含有率は5~6%でせいぜい10%未満です。昔から、錫の比率が高くなるにつれ、色は黄金色から白色に変化し硬度を高め、そして、金属の性質が変わり、叩くと高い澄んだ音になることが知られてきました。この性質を利用して日常生活のなかで使う「鳴り物」などが今後、製品として考えられるところです。また、銅鑼の製作にあたって居られた魚住為楽氏の報告によると高錫青銅を焼入れし鍛造加工することにより割れ難くなり、音に余韻が出ることが分かっています。

近年、鉛の害が問題になっています。青銅から鉛を除くべく、いろいろな取り組みが試されています。利用頻度の高い半田は錫と鉛の合金ですが、鉛の代わりに銀を使用する例も紹介されています。鉛を含まない青銅は銅とシリコンの合金であるシリコンブロンズや銅と亜鉛や錫の合金である真鍮や高錫青銅などで、これらは同じ青銅でもそれぞれの機械的性質や金属の色が異なります。鉛による白錆びの影響を受けない無鉛高錫青銅の新たな利用方法のひとつに屋外モニュメントが考えられ、この青銅を用いて高岡短期大学専攻科学生が高岡駅前に交通安全記念碑を2002年9月21日に設置しました。

このように高岡短期大学において、鉛レスの銅合金鑄物は今後積極的に取り組まなければならない問題であり、鑄造や研磨、着色、耐食性などの実験を先駆的に行う義務があると思っています。学生はこういった問題に先例として取り組み、交通安全記念碑のような事例を得ることができました。今後の若い学生の感性に大いに期待するところです。

金属工芸の今後がどうなっていくのかは、ひとえに彼ら若い人達の生活習慣や、考え方による

ところが大きいと考えます。先人の豊かな知恵に学び、それらを伝え、新しいものを得て行くことは我々の喜びとするところです。今後もまだまだ無鉛青銅の試行錯誤は続くと思いますが、より良い合金を探していきたいと思っています。

引用文献・脚注

- (1)清水康二、三船温尚、清水克朗「鏡の熱処理実験 面反りについて(その1)」古代学研究紀要 vol.144,1998
二上古代鑄金研究会(横田 勝、菅谷文則、小堀孝之、三船温尚、宮原晋一、清水克朗、清水康二)鏡の熱処理実験 面反りについて(その2)」古代学研究紀要vol.154,2000
- (2)武村聡子,清水康二,横田 勝,三船温尚「巨大青銅鏡をつくる - 古代鑄造技法への挑戦」高岡短期大学紀要,第16巻(2001), pp.71 - 90 .
- (3)梶山正孝「非鉄金属材料(標準金属工学講座)」コロナ社(1963)pp.48 - 55 .
- (4)響銅(さはり)は錫15~20%の高錫青銅で主として鳴り物などのための地金をいう。叩くと澄んだ金属性の良い音が出る。また、砂張、佐波理とも書き、水指、建水、花器等にも利用されてきた。



写真1.「卒業制作品」喜多章江
蠟型鑄造で制作した無鉛高錫青銅の皿を、熱処理(味噌焼き)して銀白色に変化させた作品

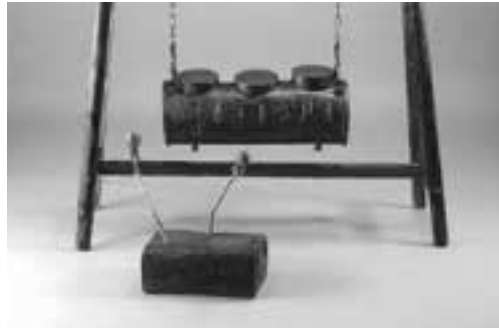


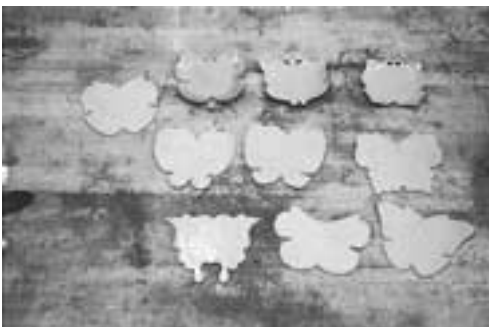
写真2.「卒業制作品」口池晴子
蠟型鑄造で制作した無鉛高錫青銅の銅鼓を、熱処理(味噌焼き)して銀白色に変化させオハグロ着色した作品



写真3.「卒業制作品」坂田有梨
込型鑄造と蠟型鑄造を組み合わせて制作した無鉛高錫青銅の座卓の脚を、研磨仕上げした作品



写真4.「卒業制作品」吉行良平
生型鑄造で制作した錫23%の無鉛高錫青銅の柱抜きを、焼き入れにより折れない性質に変化させ、さらに色調を白色にしようと試みた作品



喜多1. 蜜蝋と松脂を混ぜ合わせた蠟を薄く延ばし、蝶形に切り抜き、曲げて、皿の蠟原型を作る



喜多2. 真土式蠟型鑄造法で鑄造し、研磨して仕上げる



喜多3. 味噌 米ぬかと硫黄を薄く付け、レンガの上に置き、炭火で焼く。この方法では、銀白色に変化するものの、ワイヤーブラシで磨いて容易に除去できない酸化膜が発生する



喜多4. 金網に置いて、炭火を下から直接当てて焼く。この方法は、比較的、酸化膜除去が容易である



喜多5. 味噌焼き直後の酸化膜が付着した状態



喜多6. ワイヤブラシに砂をつけて磨き、酸化膜を取る



喜多7. 厚さが極めて薄い大皿を铸造した直後。湯道、堰、釣りは多く付ける



口池1. 鉄棒に縄を巻き、鑄物土を付けて中型「中子」を作り、炭火で乾燥する



口池2. 中子表面に炭粉を塗り、蜜蝋の板を貼り付けていく



口池3. 木片を温めて蠟の表面を撫でて形を整える



口池4. 完成した蠟原型に湯道、堰、釣りを付ける



口池 5. 蠟原型に鑄物土を付け外型を作る。補強のために鉄棒を埋め込む



口池 7. 研磨仕上げ後、味噌を付け、炭火と細い薪で焼いた直後



口池 6. 鑄型を焼成して、無鉛高錫青銅を2箇所から同時に注湯する



坂田 1. 座卓脚の石膏原型に取り付け部の蠟原型をつけ、垂直に外型を作り始める



坂田 2. 半面の鑄型が完成し、蠟原型に砥の粉を塗って、もう一つの鑄型を作り始める



坂田 3. 2つの鑄型が完成したら、幅置部分の押し台を作る



坂田 4. 蠟を溶かしてできあがった脚の外型



吉行 1. 量産した栓抜き生型鑄型



吉行 2. 23%錫の無鉛高錫青銅を注湯する



吉行 3. 研磨仕上げ中に、折れないよう1回目の熱処理 焼入れをする。加熱炉に入れてレンガに並べる



吉行 4. 薪を燃やして炉内の温度を上げる。温度を上げすぎ溶けたものもあった



吉行 5. 1回目の焼き入れ後、研磨仕上げし、白色に変化させるために2回目の焼き入れをする。炉の上で温めて炉内に入れる



吉行 6. いろいろな条件の時に、ハサミで挟んで塩水に入れ、2回目の焼き入れをして、実験を重ねる