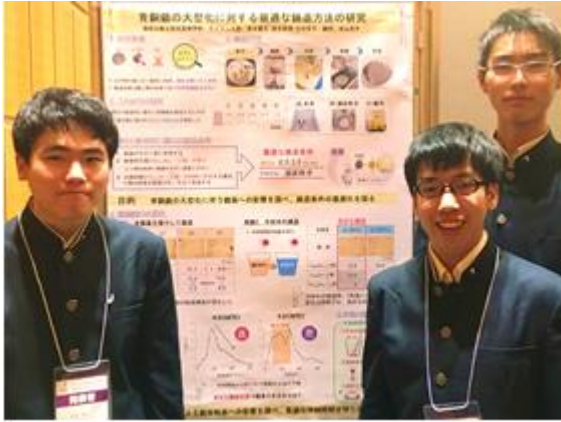


青銅鏡の大型化に対する最適な鑄造条件の研究



実施担当者 神奈川県立弥栄高等学校
教諭 米山 洋平

1 はじめに

本校サイエンス部では、青銅鏡の鑄造技術に関する研究活動を行っている。現代では、鏡の多くは、アルミニウムや銀をガラスへ蒸着することで作られており、青銅鏡を鏡として使用する機会は少なくなった。しかし、その鑄造技術は大変高度なものであり、現在もその技術を解明する研究がおこなわれている^{1)、2)}。また、背面の紋様に多くの注目が集まる一方で、鏡面側の加工に関する研究の報告例は少ない。こうした青銅鏡の技術的な背景に関心を持った生徒たちが、ここ数年にわたり、青銅鏡の鑄造技術を科学的に解明しようと、部活動の研究テーマとして取り組んでいる。

これまで、青銅鏡を鑄造する際の、銅とスズの配合比や融解後の冷却方法について検証を行い、それらの違いによって青銅鏡の鏡面に形成される結晶構造（金属間化合物）の割合と、輝き（光の反射強度）や耐食性の比較を行ってきた。その結果、配合比は銅：スズ＝6.5：3.5（モル比）において、輝きに富んだ青銅鏡が鑄造されやすく、その鏡面には結晶構造 Cu_6Sn_5 （イータ η 相）が多く形成されていることが判明した。また、冷却方法では、江戸時代頃に開発された「湯床吹き」を用いることにより、鏡面の結晶塊が小さく密に形成し、優れた耐食性を示すことも確認された。

しかしながら、これまで鑄造した青銅鏡は直径 1cm 程度と小さく、実用性は低い。そのため、本研究では、銅とスズを増量することで、従来よりも大型な青銅鏡の鑄造を試みる。そして、両金属の増量による青銅鏡の鏡面への影響を調べ、大型化に対する鑄造条件の再検証を行うことを目的とした。

2 青銅鏡の大型化と鑄造条件の再検証

2-1 外部講師による研修会

研究をはじめるとあって小田原鑄物研究所より講師を招き、金属鑄造における実技講習会を実施した。講習では、講師による青銅製の風鈴鑄造の様子を見学し、鑄造時における工夫や注意点についての説明を受けた。特に、鑄造時の安全の確保について、実演を交えながら細かに指導を受けることができ、鑄造技術のノウハウを新たに学ぶことができた。生徒たちは、自身の研究に役立つ知識・技術はないかと熱心に質問を行い、有意義な機会となった。



写真1 講習会の様子

2-2 青銅鏡の鑄造

青銅鏡は、①銅とスズの融解、②冷却、③研磨といった工程を経て鑄造される。

① 銅とスズの融解

銅 Cu とスズ Sn の配合比を 6.5 : 3.5 (モル比) とし、従来の量よりも 2 倍および 3 倍に秤量した。秤量した銅とスズをるつぼへ移し、るつぼにマッフルを被せて、ガスバーナーにて 20 分間加熱することで、両金属を融解させた。

② 冷却

融解した両金属は、湯床吹きを用いて冷却を行った。この方法では、まず、バケツに 70°C のお湯を高さ約 12 cm 用意し、お湯の底に布を沈める。そして、お湯中の布に向けて融解した金属を流し込みことで冷却が行われる。冷却にお湯を用いることで、冷却時の金属に対する応力が和らげられ、金属間の歪みができにくい効果がある。

③ 研磨

冷却により得られた青銅に対して、表面を研磨剤カーボラダム#150 を用いて、岩石研磨機にて平らになるまで削り、鏡面を作った。その後、鏡面を研磨剤カーボラダム#500、#1000、#2000、金属磨き (ピカール)、酸化クロム(Ⅲ)の順に用いて研磨を行った。

2-3 分析と評価

鑄造した青銅鏡の鏡面に対し、金属顕微鏡や X 線回折による結晶構造の解析を行った。また、鏡面の光の反射強度を測定することで、青銅鏡の輝きを比較した。

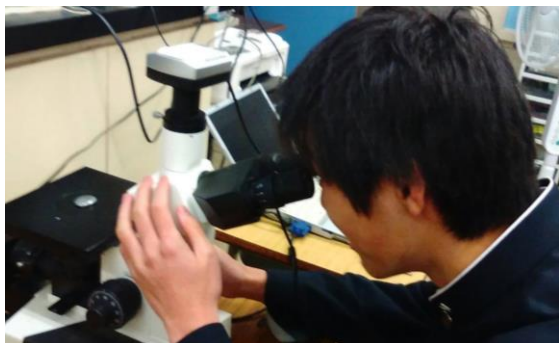


写真 2 金属顕微鏡による鏡面観察



写真 3 X 線回折に関する講義

X 線回折による実験および解析は、東京藝術大学大学院の桐野教授にご支援をいただき実施した。桐野教授からは、試料分析の協力に加えて、X 線回折に関する講義を受けた。生徒たちは、X 線回折の原理や測定値の読み方について理解を深め、講義で得た知識を活かして、データ解析を行うことができるようになった。生徒たちの解析結果を以下に記す。

金属量	従来	2倍量	3倍量
鏡面写真			

写真 4 青銅鏡の鏡面

0.5cm

2倍・3倍量で鋳造すると、青銅鏡の鏡面には大きな針状結晶が形成していた。そのため、結晶の凹凸による光の乱反射が鏡面で起きており、これら青銅鏡の鏡面はやや曇って見えた。また、従来よりも2倍・3倍量の青銅鏡では、光の反射強度（輝き）が低下しており、これは鏡面の乱反射が影響したと言える。

表1 X線回折の解析結果

結晶構造	従来量	2倍量	3倍量
η 相 (Cu_6Sn_5)	6.9	11.7	9.8
δ 相 (Cu_4Sn)	16.4	11.4	13.6
ζ 相 ($\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$)	0	7.2	8.5

表1にX線回折による解析結果を示す。2倍・3倍量では、どちらも従来と比べて δ 相が減少し、 $\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$ （ゼータ ζ 相）が新たに出現していた。これは、金属量の増加に伴って冷却時間が延びたことにより、デルタ δ 相が ζ 相へと結晶構造の変態を起こしたためと考えられる。一方で、 η 相の比率は増加しており、これは η 相の成長を抑制する結晶であった δ 相が減少した影響と考えられる。これより、 η 相は針状に成長しやすいため、鏡面に見られた針状結晶は増加した η 相であると推察される。

以上のような、2倍・3倍量にて見られた鏡面の変化は、熱量の増加により、冷却時に金属が熱を失うまでの時間（冷却時間）が延びたことによって引き起こされたと考えられる。したがって、冷却時間を短縮させるため、冷却時に湯床吹きで用いるお湯の温度を 50°C に減温して、同様に鋳造を行うことにした。

表2 X線回折の解析結果（ 50°C 減温時における）

η 相結晶構造（ Cu_6Sn_5 ）	21倍量	31倍量
δ 相 (Cu_4Sn)	10.6	9.4
ζ 相 ($\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$)	—	7.4

お湯を 50°C に減温すると、2倍量では、従来（1倍量）と似た小さく密な結晶が形成され、良好な状態となった。このことは、表2のX線回折の解析結果からも言える。減温時、2倍量の鏡面には、従来と同じく η 相と δ 相の結晶構造が共存し、 ζ 相への変態が見られなかった。これは、お湯の減温によって冷却時間が短縮され、従来と近い条件で冷却することができたためと考えられる。一方で、減温しても3倍量では、鏡面に大きな結晶が存在し、 δ 相から ζ 相への変態も見られることから、冷却時間が十分に短縮されなかったことが分かる。これら結果より、金属量の増加による鏡面の変化は、冷却時間と密接な関係を持つことが明らかとなった。

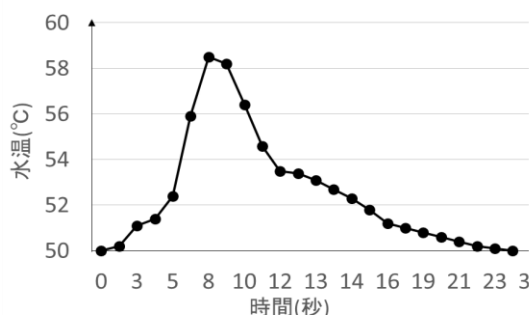


図1 冷却時の水温変化（2倍量、 50°C ）

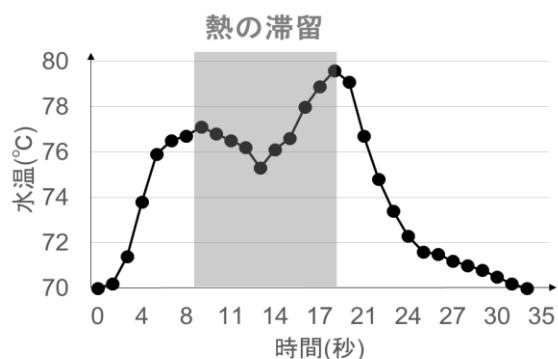


図2 水温時の温度変化（3倍量、 70°C ）

これまでの各鑄造条件における冷却時間を求めた。図1には、良好な鏡面状態が得られた条件における代表的な水温変化を示す。図1では、水温の上昇後に速やかな下降が起きている。冷却開始から約10秒後には水温の下降が見られ、青銅からの熱の放射が弱まっていることがわかる。一方、図2には、針状結晶が形成するなど不適切な鏡面になった条件での代表的な水温変化を示す。図2では、はじめに水温が急激に上昇後、10秒ほど高温を保ち、冷却開始から15秒以上経ってから下降が起きている。ここで、図中の矢印の部分では青銅に熱が滞留し、十分に熱の拡散できていない様子が伺える。そして、この時点の熱の滞留が結晶構造の成長や変態を引き起こしていると考えられる。

以上より、良好な鏡面状態となる場合には、冷却時10秒以内に周囲の水温の下降が見られることがわかった。これより最適な冷却時間の指標を求めることができた。

2-4 成果発表

実験後、研究で得られた成果をまとめ、外部で開催された高校生向けの発表会にて報告を行った。特に、10月に参加した高校化学グランドコンテストでは、英語による口頭発表の機会に恵まれ、生徒たちは発表準備に苦労しながらも、科学英語での表現について実践的に学ぶことができた。また、同発表会では金賞を受賞し、研究活動への励みともなった。



写真5 英語での口頭発表

3 まとめ

以上の研究活動より、金属量を増やし青銅鏡の大型化を図ると、冷却時間が伸びてしまい、鏡面では結晶の変態や成長が起きてしまうことが確認された。一方で、冷却時間を適切な長さなるよう調節することで、良好な鏡面状態を得られることが判明した。今後は、3倍量以上の金属量においても適切な冷却時間へと調節可能な鑄造方法を模索していく。そして、実用性のある大きさの輝きや耐食性に優れた青銅鏡を鑄造することを目指していきたい。

謝辞

本研究を行うにあたり、東京藝術大学大学院美術研究科文化財保存学専攻の桐野 文良教授には、青銅鏡の分析支援や終始有益なご助言をいただいた。公益財団法人 中谷医工計測技術振興財団には活動費の助成により、研究の進展を支えていただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 崔禎恩, 北田正弘, 日本金属学会誌, 2009, 73 巻 5 号, pp. 381-386
- 2) 川西敏雄他, 精密工学会誌, 1992, 58 巻 11 号, pp. 1828-1830
- 3) 武村聡子他, 高岡短期大学紀要, 2001, 16 巻, pp. 71-90

以上