

鑄金メダル制作教材における鑄物不良の改善方法の検討

A Study on Improvement of Casting Defects in Medal-Making Materials

石上 洋明

Yomei ISHIGAMI

学校教育研究ユニット

(令和4年9月30日受付, 令和4年12月20日受理)

本稿では, 鑄金技法を用いた錫メダル制作教材における, 鑄物不良の改善について検討する。

これまでの研究で制作した教材では, デジタルファブリケーションを活用して, 専門知識を必要とする鑄型のキット化を試みた。様々な形状に切り出したMDF製のプレートを組み合わせることによって, 幼児から大人まで, 多世代にわたって気軽に鑄金を楽しむことのできる造形教材の開発に成功した。

様々な状況下で実践を繰り返す中で, 一定数, 作品の一部が凹む「収縮巣」が発生する課題に直面した。収縮巣が発生する場所と条件に規則性があったため, 再現実験を行った上で, 不具合の発生要因は「指向性凝固」の問題であると結論づけた。

指向性凝固の直接的解決法策として, 適切な湯口方案について検討・検証し, 本教材において最適な湯口, 湯道, 堰(せき)の形状と, 鑄湯方法について明らかにした。

1. はじめに

筆者はこれまで鑄金の技術を応用し, 幼児・児童を対象とした美術・造形教材の研究を行ってきた¹⁾。

研究を開始した2017年から, 授業, 講習会, 福岡教育大学附属幼稚園や, 大学近隣の小学校, 福岡県内の公共施設でのワークショップなどで実践を行い, 延べ1000個以上の錫製メダル, コースターの制作に携わった。実践を繰り返す中で, 少しずつ教材の改善を試みている。

教材は, レーザー加工機を用いて, MDFを正確に切り出し製作する。専門的な知識を要する部分をあらかじめキットとして製作しておくことによって, 誰でも気軽に鑄金を楽しむことのできる教材を目指した。

開発した教材は, 大学での授業や, 現役教員向けの講習会の他, 幼稚園, 小学校, 公共施設でのワークショップなどで活用している。対象や参加するイベントの趣旨に応じて, いくつかのアレンジを加えて使用した。

多数の参加者を対象とするワークショップで

は, 時折作品の一部が凹む, 引け巣(収縮巣)が発生することがあった。割合としてはさほど多くは無かったが, 作品の完成を心待ちにしている参加者にとっては一大事である。

そこで本研究では, 本教材における引け巣の原因を究明し, 教材の改善方法について検討する。

2. 課題の背景

本教材で用いる鑄型の形態は, 約14cm角の5枚の板を積層して構成している。メダルに模様を写しとるために, 絵柄を彫り込んだ表裏面2枚のプレートと, メダルの外形を切り出したプレートを, 厚みのある板で挟み込んで補強する。

2017年の教材開発当初, 湯口は幅4cmほど, 奥行きはメダルの厚みと同じ, 約4mmであった。細い隙間に溶けた錫を流す作業は, 補助を介しながらも, 幼児にとって多少やりづらさを感じたと思われる。

2018年の実践・研究²⁾より, 作業性の向上と, 押湯効果による作品の品質向上を目的として, 鑄型のプレートの一部に切り欠きを作り, 湯口を拡

張した。(図1)

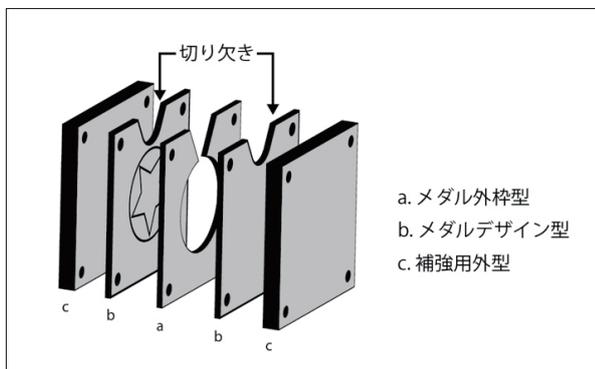


図1 鋳型のイメージ³⁾

メダル作りから教材開発を始めたが、状況に応じて鋳型の規格に収まる範囲で直径を大きくし、厚さ2.5 mmのプレートを使ってコースター作りに応用するなど、アレンジを加えて活用している。

ワークショップなど、長時間に多数の参加者に対応する場面で、作品の中央部付近に大きく凹みが出る不具合が発生することがあった。(図2)



図2 メダルの凹み

実践では、作品が綺麗な仕上がりになるまでやり直し、参加者に不具合のない作品を持ち帰ってもらうよう対応をしていた。その後も幾つかの条件下において、同様の不具合が発生することがあった。

この不具合は、プレートの一部に切り欠きを入れ、湯口を大型化した時期以降から頻度が高まった。

これらの手を加えた時期は、ある程度教材としての完成度が向上した時期でもあり、一度に大勢の参加者を対象とするイベントで活用する機会も

増えてきた。

より多くの参加者に体験してもらえよう、作業性の向上をねらって、堰の幅にも手を加えた。作品と接する部分を小さくすることにより、完成後に削る部分が少なくなるため、作品の質の向上が期待できる。また、鋳湯後の作品の仕上げの時間を少なくすることもできる。

作品の凹んだ部分を観察すると、どの作品もほとんど同じ箇所に凹みが発生していた。凹んだ部分は、ほんの少し表面に窪みができたものから、裏面に突き抜けそうなほど深いものもあった。不具合の状態は、表面の装飾模様にはほとんど影響の出していないもの、結晶状の傷があるもの、平滑な面の一部に亀裂が生じたものの、大きく3つのパターンに分けることが出来た。

3. 教材の改善に向けての仮説

不具合が発生した作品の状態を観察すると、深さや広さに違いがあるものの、いずれも作品中央部と堰の中間点あたりに凹みがあることが共通している。

この不具合は、「引け」や「引け巣」、「収縮巣」という鋳物不良であり、鋳型に流し込んだ溶湯が凝固する際に生じる収縮による欠陥である。

米国鋳物協会は、収縮巣の主な原因は、湯口周りの不良であるとしている⁴⁾。

金属は特性上、凝固時の収縮を避けることが出来ない。収縮することを前提として、作品本体に収縮による不具合を発生させないために、鋳湯後順序よく凝固が進み、湯道・湯口など、作品以外の場所を最終的に凝固させる。この凝固の方向性の制御を、「指向性凝固」という⁵⁾。

指向性凝固を確実にするためには、作品に応じた湯口、湯道、堰の構造の計画、「湯口方案」を検討する必要がある。

湯口周りの構造は、使用する金属、作りたい作品の形状など、多くの要素を考慮しつつ決定されるため、全ての作品に当てはめることのできる、絶対的な正解を求めることは困難である。

改めて問題の発生状況を整理する。作品は薄いものより、厚い方が不具合の発生率が高い。作品の直径は大径より、小径の方が不具合の発生率が高い。堰は幅広いものより、幅が狭いものの方が不具合の発生率が高い。

これまでの実践で使用した鋳型の各所のサイズを計測したところ、厚みは4 mm、2.5 mmのいずれかを使用していた。作品の直径は最小で50 mm、最大90 mm、堰は6 mm幅と9 mm幅

を使用していた。

現状の教材では直径に関わらず、鑄型の中央に作品をレイアウトすることを基本としているが、湯口拡張用の切り欠きは、全て同じ形状であるため、大きい作品では、作品と干渉しないように鑄型下端に向けてオフセットして配置している。

これらの数値を下表にまとめた。(表1)

表1 収縮巣発生率と各部の組み合わせ

	収縮巣発生率	
	高	低
作品の厚み	4mm	2.5mm
作品の直径	50mm	90mm
堰の幅	6mm	9mm

表に基づいて評価すると、厚さ2.5mm、直径90mm、堰の幅9mmの作品の制作時には、収縮巣発生の可能性が低くなることが示される。

一方、収縮巣発生の可能性の高い、厚さ4mm、径50mm、堰の幅6mmは、実践で最も鑄物不良に悩まされた組み合わせと一致している。

作品の直径が小さくなる場合、現状の通り、作品を鑄型の中央にレイアウトするパターンでは、大径の作品と比較すると湯口から堰までの長さが伸びてしまう。

湯口部分のプレートの切り欠きは、様々な形状の作品に流用できるように、前述の通り汎用性を求めて全て同じ形状としていた。50mm径の作品は、90mm径の作品と比較すると、薄い堰の部分だけが伸びてしまうこととなり、湯口の切り欠きの形状にも問題があったと考えられる。

指向性凝固を意識すると、鑄込んだのち、作品の下端から順序よく凝固が進むよう、湯口付近を工夫する必要がある。収縮巣が発生しやすい組み合わせでは、作品部分の凝固が完了する前に、最も細くなる堰付近が先に凝固してしまっているのではないだろうか。そのため、作品に対して溶湯を供給する、唯一の道が閉ざされ、押湯からの補給が出来なくなり、作品に収縮巣が発生したものと推察される。

本教材では、堰の幅を広く、湯口の切り欠きを可能な限り深くし、堰付近の保温力を高めることによって、凝固の順序を理想的な方向に制御できるのではないだろうか。

4. 実験

4.1 実験の方法

教材の改善にあたって、作品のサイズを限定してしまうことは、制作の自由度を著しく下げってしまう。そこで、本研究では、湯口、堰の適切な形状を探ることで、教材の改善を試みたい。

サンプルとして制作する作品は、これまでの実践で、収縮巣の発生率が高かった直径50mm、厚さ4mmとした。よりシビアなコンディションで実験を行うことによって、様々な作品制作への応用につなぐことをねらいとした。

鑄込み後の鑄型内の様子をモニタリングするため、現在使用している鑄型に温度計をつけた実験用治具を製作する。鑄型の4ヶ所、湯口、堰、作品中央、作品下端に温度計を挿し込む。(図3)(図4)

鑄湯から、湯口付近の凝固完了までをビデオに撮影し、温度変化を確認する。



図3 実験用治具



図4 鑄型内部の温度計センサー

温度計のセンサー部の金属棒には、金属を伝って溶湯の熱が放出しないよう、フェルトを巻き付けて保温した。外気による影響を受けにくくなるため、計測値の安定を図ることができる。

撮影した映像をもとに、鑄湯完了を基準とし、5秒刻みで4箇所の温度を記録する。

温度計の計測値をもとに、鑄型内部状態を予測する。温度計は300℃まで計測できる、市販のキッチン用温度計を使用した。キッチン用であるため、精度や計測時間に多少難はあるが、温度変化を探る用途であれば問題ないだろう。

実験は、①湯口・堰の形態による凝固状態のモニタリング実験、②温度計の有無による実験結果への影響の確認、③鑄湯時の鑄型内部の温度が作品に与える影響の確認の3つのステップで行う。

不具合の発生した状況を再現するため、堰の幅と温度条件を変えて再現実験を行う。温度計の数値をもとに鑄型内部の状況を探る。不具合の起こらない、または不具合の起きにくい条件に基づいて、改善を試みた新たな教材を作成する。

4.2 実験用の鑄型

鑄型はこれまで使ってきた教材を使用している。幅、高さ140mmの正方形の鑄型である。構造も従来のもと同様に、4mm厚の3枚のプレートと15mm厚の板で挟み込む、5層構造としている。

湯口=幅40mm、奥行12mmで固定。湯口の深さ30mm(プレート1-A)と40mm(プレート1-B)の2種類を用意した。いずれも先端部分

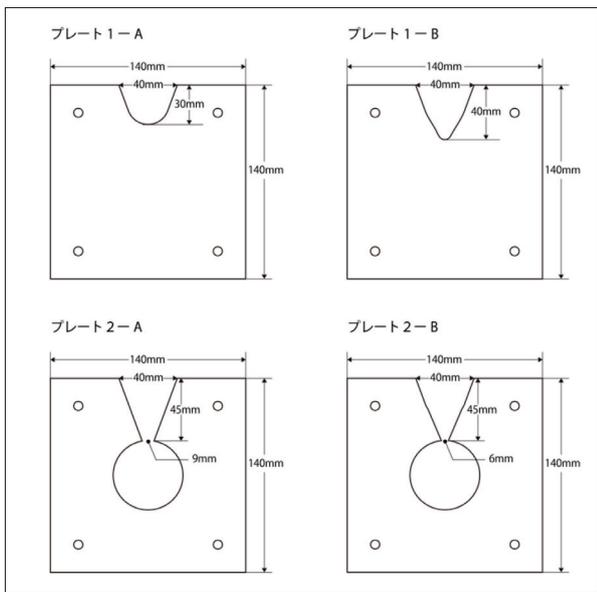


図5 実験用の鑄型(プレート)

は滑らかな曲線にして、湯の流れを乱さない形状としている。

堰の幅は6mm(プレート2-A)と9mm(プレート2-B)の2種類を用意した。(図5)

4.3 実験結果

① 湯口・堰の形態による凝固状態のモニタリング

実験は鑄湯温度を変えて行った。それぞれの結果を次のように整理した。(表2)

表2 組み合わせごとの結果

	1-A (湯口 30mm)	1-B (湯口 40mm)	
鑄湯温度 250℃	2-A (堰 9mm)	収縮巣あり	収縮巣(小)あり
	2-B (堰 6mm)	収縮巣あり	収縮巣あり
鑄湯温度 300℃	2-A (堰 9mm)	収縮巣なし 皺あり (サンプル 13)	収縮巣なし (サンプル 17)
	2-B (堰 6mm)	収縮巣(小)あり (サンプル 16)	収縮巣なし (サンプル 12)

鑄型プレートの組み合わせは、鑄湯温度250℃では、プレート1-Bと2-Aの組み合わせが、最も収縮巣が少なかった。

鑄湯温度300℃では、プレート1-Bと2-A、1-Bと2-Bの組み合わせで収縮巣が確認できなかった。プレート1-A、2-Aの組み合わせでは、目視できる範囲での収縮巣は確認できなかったが、表面的な皺、肌の荒れが確認された。(図6)

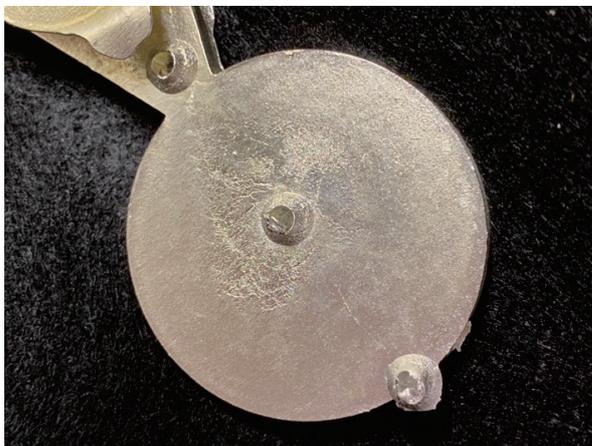


図6 表面の皺と肌の荒れ

鑄湯時の湯の温度は 300℃とした実験サンプルが、全体的に綺麗な仕上がりとっていた。

② 温度計の有無による実験結果への影響

温度計の有無による、実験結果への影響の確認のため、温度計をつけない状態で作品の仕上がりを確認した。(表 3)

表 3 温度計を外した状態での鑄湯実験の結果

250℃		300℃
2-A (堰 9mm)	僅かに収縮巣あり	収縮巣なし
2-B (堰 6mm)	収縮巣あり	収縮巣なし 皸あり

注) 湯口の深さは、プレート 1-B (湯口 40mm) に固定

湯口の深さは、プレート 1-B (湯口 40 mm) に固定し、実験を行った。実験結果は、温度計を差し込んだデータと比較しても、大きな差は見られなかった。

③ 鑄湯時の鑄型内部の温度が作品に与える影響

鑄湯時の鑄型内部の温度による、作品への影響を確認した。作品の仕上がりが良好であった、プレート 1-B と 2-A の組み合わせと、1-B と 2-B の組み合わせで、鑄型内部温度 30℃ (室温)、50℃、80℃での実験結果を表にした。(表 4)

それぞれの温度は、実践を想定して選択した。30℃は、ワークショップ開始時の常温状態、50℃は、適度に冷却時間を置きながら、連続して鑄造

する際の温度、80℃は、冷却時間を全く置かず、連続して鑄型を使用した際の温度である。

1-B と 2-A の組み合わせでは、全ての温度で収縮巣が見られなかったが、1-B と 2-B の組み合わせでは、30℃、80℃の 2つの温度で収縮巣が見られた。

表 4 鑄型内部温度と収縮巣の関連

	30℃	50℃	80℃
1-B/2-A	○	○	○
1-B/2-B	■	○	■

○ 収縮巣なし ■ 収縮巣あり

300℃で鑄湯したサンプルの鑄型内に差し込んだ、4ヶ所の温度計の数値をグラフとして示し、対応するそれぞれの作品をそれぞれ並べて示している。(図 7～10)

5. 考察

温度計の有無による実験結果への影響を調べた、(表 3) に注目すると、プレート 2-A (堰 9 mm) を 250℃で鑄湯したものについては、若干の品質の向上が見られたが、その他の結果には、特に影響は見られなかった。よって、温度計の有無は考慮しないでいいだろう。

(表 2) に示した結果から、鑄湯温度は 300℃が適切であろう。250℃で鑄湯した場合、鑄型に流し込むと即座に凝固し、堰の部分に凝固した錫が



図 7 実験サンプル 12 「温度変化のグラフと作品への影響」



図8 実験サンプル 13 「温度変化のグラフと作品への影響」



図9 実験サンプル 16 「温度変化のグラフと作品への影響」



図10 実験サンプル 17 「温度変化のグラフと作品への影響」

封鎖してしまっているものと推察される。

(図7～10)のグラフから鑄型の内部の状況を探る。全てのグラフで特に変化の大きい部分は、堰と作品中央部の温度の推移である。収縮巣がある(図9)のグラフでは、堰と作品中央部の温度が交差している。

(図8)は、作品自体に明確な収縮巣は見当たらないが、裏面の中央部付近に皺と肌の荒れが見られる。グラフを参照すると、作品中央部の温度が低下する前に、堰の温度の低下が見られる。

(図8)、(図9)は、作品部分が凝固する前に堰が凝固してしまっていることを示している。

実験で制作した作品サンプルは、プレート1-Bと2-Aの組み合わせ、1-Bと2-Bの組み合わせ、いずれも300℃で鑄湯したものが、収縮巣の発生もなく、綺麗に仕上げる事ができた。それ以外のサンプルには、収縮巣の発生、または表面に皺が発生するなどの鑄物不良が見られた。

この結果から、湯口を深く設定した方が、堰を広くするよりも有効であることが明らかとなった。

(表4)の結果から、プレート1-Bと2-Aの組み合わせの汎用性の高さが明らかとなった。実際にワークショップ等の実践で活用する場合、厳密に鑄型の温度管理を行うことは困難である。したがって、鑄型の温度状態を問わない、1-Bと2-Aの組み合わせが、現段階で最適な鑄型の形状であると考えられる。

1-Bと2-Aのプレートを組み合わせた際の湯口は、作品部分の5mmほど上まで達しており、そこから急激に絞られ、湯が作品に到達する形状となっている。

鑄造では、「鑄造温度が適切でも堰の太さが製品部に比べて細い、又は長い場合には、溶湯が製品部に到達するまでに温度が低下し、金属の収縮による引け鑄巣が発生する確率が上がる⁶⁾」としており、堰を短く、広く設定した形状は、本教材において、理想的な湯口方案といえよう。

6. おわりに

鑄金メダル作り教材において、鑄物不良の改善には、指向性凝固を意識した湯口方案の検討が有効であることが明らかとなった。

本稿で取り上げた作品は、円形の単純な形状のものであり、同時に湯口の形状も非常にシンプルである。このような単純明快とも思える構造であっても、様々な要素が絡み合いながら制作される鑄金の奥深さを感じることができた。

視認することのできない、鑄型内部の凝固の状態を探るには、温度計を用いて評価・検証することによって、凝固の指向性を明確にすることができる。新たな形状の作品に挑戦する際には、温度計を用いた評価方法で、事前に不具合の有無を確認することができるだろう。

本研究では、4mm厚、50mm径のメダルのみに注力して検証を行ったが、今後、大きさや形状、厚みを変えた作品にも挑戦したい。

堰、湯口の形状は、限られたパターンからの組み合わせによって検討を行った。今後はさらにパターンを増やし、作品の品質向上を目指して、より最適な湯口方案の検討を課題としたい。

註

- 1) 石上洋明(2018)「子どもを対象とした教材の開発と実践」福岡教育大学紀要第67号第四分冊99-106頁
- 2) 石上洋明(2020)「幼児の美術・造形活動を支援する デジタルファブリケーションを活用した教材の研究」福岡教育大学紀要第69号第四分冊、1-7頁
- 3) 前掲2) 3頁
- 4) 米国鑄物協会編(1955)「鑄物不良の原因と対策」(日本鑄物協会訳)丸善
- 5) 鹿取一男(1983)「美術鑄物の手法」アグネ
- 6) 吉田キャスト工業株式会社「堰の取り付けの基本 | 鑄造で大事な湯道方案」. <https://yoshidacast.com/> 堰の取り付けの基本 | 鑄造で大事な湯道方案 / (参照 2022年9月7日)

