

魔鏡製作における匠の技： 柔加工の解明と定型化による新プロセスの構築

報告者 大学院総合理工学研究科 メカニクス系工学専攻 教授 米田博幸
共同研究者 工学部機械工学科 講師 浅野和典
大学院総合理工学研究科 シニアサイエンティスト 釘宮公一

1. 背景

現代の一般的な鏡は、ガラスやプラスチックの片面に銀やアルミニウムなどの金属を蒸着させたものであるが、日本や中国では古くから御神体や装飾用、調度品として青銅などの金属を鑄造して作った金属鏡が使用されてきた。その中には、鏡面を見る限りは普通の鏡と変わりはないのに、光を鏡面に当ててその反射光を壁面などに投影すると、鏡背の模様（肉厚を変えて出したり、鑿で彫ったりしたもの）が写し出されるというものが知られている。このような鏡は魔鏡とよばれている（図1）。かつて鏡は貴重品であり代々におたって大切に使われてきたが、鏡面に塗布した水銀は1年も経つとはげ落ちて鏡面が曇るので、たびたび鏡磨き職人が訪れて磨き上げて輝きを取り戻していた。しかし研磨を重ねて鏡面が薄くなると、裏面の凹凸によって鏡面に加わる研磨の圧力が変化し、裏の凹凸に沿って、鏡面側にもわずかな目には見えない凹凸ができる。これが光を反射すると、裏と同じ模様を投影するのが魔鏡現象だと一般に言われている（図2，図3）。しかし研磨時の押圧により鏡面に形成する凹凸だけでは魔鏡現象の半分以下しか証明できず、残る要因は未解明になっていた。

その一方で、魔鏡現象を応用した技術は現代のハイテク産業を支える重要技術、すなわち微細な表面凹凸を瞬時に検知（表面評価）する技術として、超 LSI 用ウエハやハードディスク、液晶用ガラスなどの鏡面検査の他に、いまでも最先端部分を熟練職人の経験に委ねる研磨工程管理にとって、欠かせないものとなっている。

そこで、筆者らはこれまでに多様なデータ分析が容易にできる世界最大級の大型魔鏡（直径 1 m 超）を製作することによって、魔鏡現象の発生要因とそのメカニズムを調べ、魔鏡現象についての従来の通説である研磨工程に起因する鏡面での凹凸の発生（押圧研磨説）以外の要因について検討した。その結果、これまで軽微とされていた熱応力や加工歪みの影響も無視できないことが推察された。

本研究ではこれらの要因に絞り込んでさらなる検証実験と解析を行った。

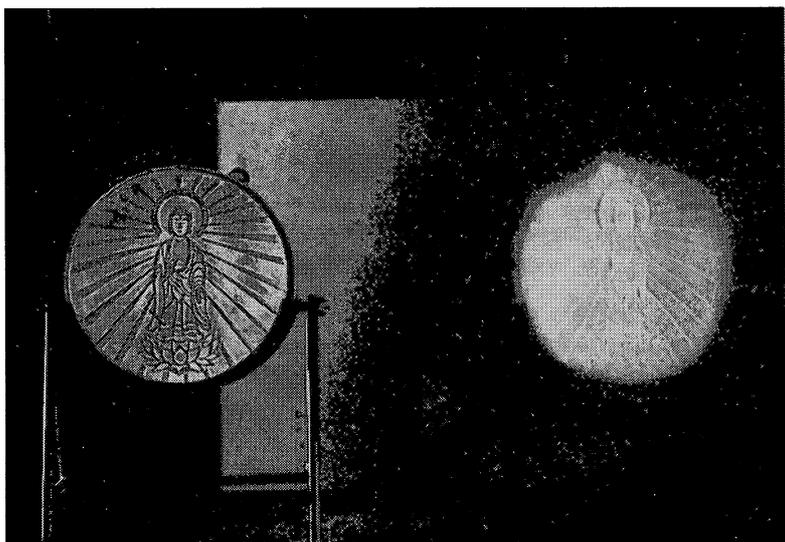


図1 代表的な魔鏡投影例(仏像)

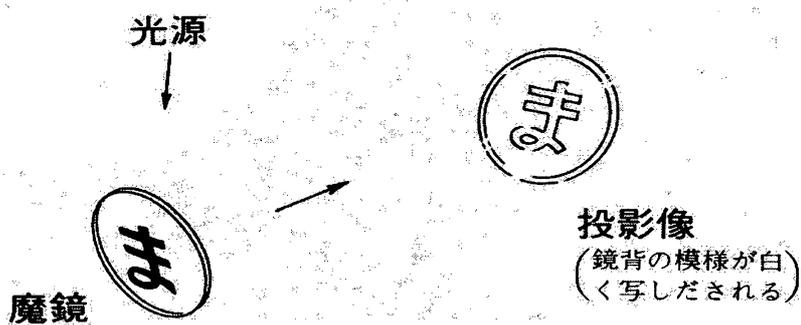


図2 魔鏡現象の概念図

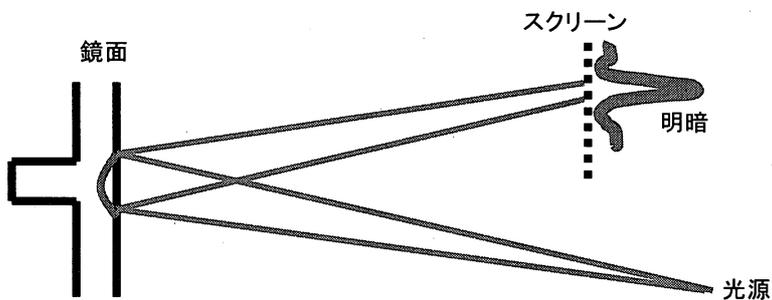


図3 魔鏡現象の機構：定説

2. 目的

筆者らの作製した世界最大級の大型魔鏡の製作過程と検証によって明確となった鏡面の機械加工の限界を越える匠の技、すなわち手研磨などの柔加工の重要性と、高輝度高精度光源を用いた光投影で始めて観察された新現象（モノリザのモザイク模様の出現）を検討する。さらにごく単純な小型の基準魔鏡を作製して、特に铸造歪みと加工歪みに注目して魔鏡原理を検証し、魔鏡現象の機構を解明する。次に手研磨等の柔加工技術の定型化を図り、新プロセスを構築して、地場産業へ向けた铸造、研磨などの加工技術を確立し、今も“職人の勘”に頼る研磨工程管理などの改善に役立てることを目的とする。

3. 研究組織

- 近畿大学 米田、浅野、釘宮
魔鏡の設計、研磨・琢磨、形状計測、魔鏡現象の解明
- 都金属工業（共同研究企業）
魔鏡の铸造方案設計、铸造、切削加工
- 京都大学 富井（学外共同研究者）
魔鏡の科学技術的調査、実証実験

4. 研究方法及び結果

4.1 大型魔鏡による検証実験

大型の魔鏡として、直径φ1020mm（世界最大級の1m級）のものと直径φ620mmのものを製作し実験に供した。裏面の文様には近畿大学の学園章である梅花紋様を選んだ。铸造型には炭酸ガス型を用い、合金には青銅CAC403(Cu-10Sn-2Zn合金)を用いた。

1m鏡の形状寸法を図4に示したが、铸造時の鏡の薄肉部（紋様のない部分）の厚さは20mmとした。合金の溶解量は440kg、P-Cu合金で脱酸処理し、铸造温度は1150℃、铸造重量は390kg、素材重量は165kgである。図5に大型魔鏡铸造の铸造型外観を示す。

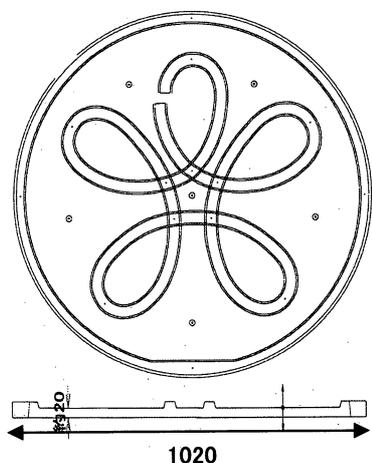


図4 大型魔鏡の形状寸法

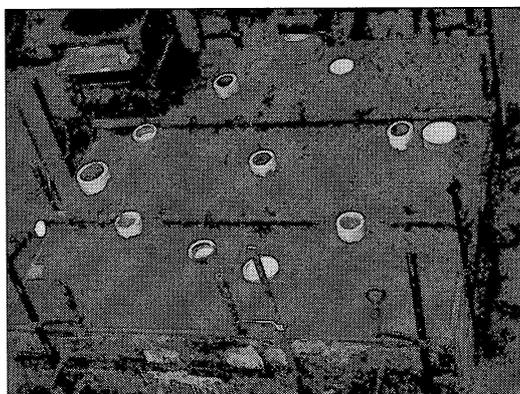


図5 大型魔鏡铸造の铸造型

京都に在る山本合金製作所の故山本鳳龍鏡師による伝統的な鏡づくりでは、鑄造後の鏡面を、ヤスリ、セン、曲げ棒などを用いて鏡を薄くしていくが、本研究では大型であることから、鑄造した鏡は標準面、外径を出した後に大型の旋盤で鏡面を約 5mm 厚にまで研削し、最終工程でヤスリを用いた手研削を行った。この手研削によって旋盤研削で生じた加工面の歪を修正し平面を出した。次いで、曲げ棒で付けた傷をヤスリで消すように研削する作業を繰り返すことで、片減りの無い均等厚の鏡面、約 3mm 厚にまで薄く削った。最後に研磨紙を用いて鏡面に仕上げた。以上の各工程における鏡面の反りを計測し、その変化から魔鏡効果への影響を推定した。

鑄造したままの鏡は、鏡面中央が凸状に変形していた。その反りは $\phi 620\text{mm}$ の鏡では約 1mm、1m 鏡で約 3mm あった。これらの曲率半径を計算すると共に 50m 程度であった。小型の魔鏡 (200mm 程度) での曲率半径は、紋様に対応する微細な凹凸部分では 0.5~5m であるから一桁小さい。一方、投影距離は 3~5 倍違うことを勘案すると十分魔鏡効果が現れる曲率半径である。この残留熱応力による変形は、その後の研削工程で反対側へ反る要因となるが、その歪みは平面研削によってほぼ除去されるので、粗研削の時点ではこの効果は除去される。しかし、紋様の近辺では複雑な残留応力が想定され、この歪みが最終の鏡面研磨で僅かに現れる恐れは除去しきれない。

一方、旋盤研削の際に、鏡面の肉厚が薄くなるにしたがって、鏡面の振動が起こり、変形して平面に仕上がっていないことが観察された。紋様の無い薄肉部が大きく凹んでおり、0.5~1mm に及んでいたが、ヤスリを用いた手研削により修正され平面が出るので、魔鏡効果には影響は無いことが分かった。

鏡面全面を概略 3mm に薄く研削し、最後に研磨紙を用いて鏡面に仕上げる過程について検討した。ヤスリによる押圧で生じた弾性変形は鏡面の歪みに直接つながる。曲げ棒やヤスリによる表面の残留応力は数 $100\mu\text{m}$ 程度まで深く入るため、今回のような鏡面研磨ではこの応力を除去出来ていないのは明白である。この応力による変形は非常に大きいと推定される。この為に、上述の熱歪みによる僅かな変形があっても、この研磨歪に埋没すると云える。図 6 にヤスリ掛け、図 7 に曲げ棒加工の様子を示す。また図 8 に研磨工程で鏡面に光線を当てた時に投影された梅花紋様とモザイク模様の写真を示す。

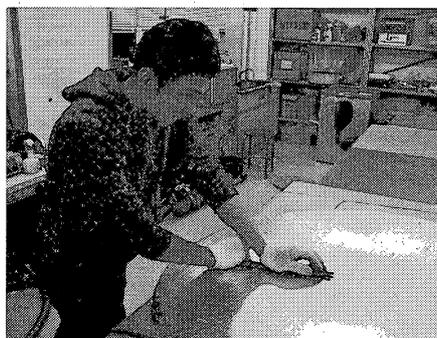


図 6 ヤスリ掛け



図 7 曲げ棒加工

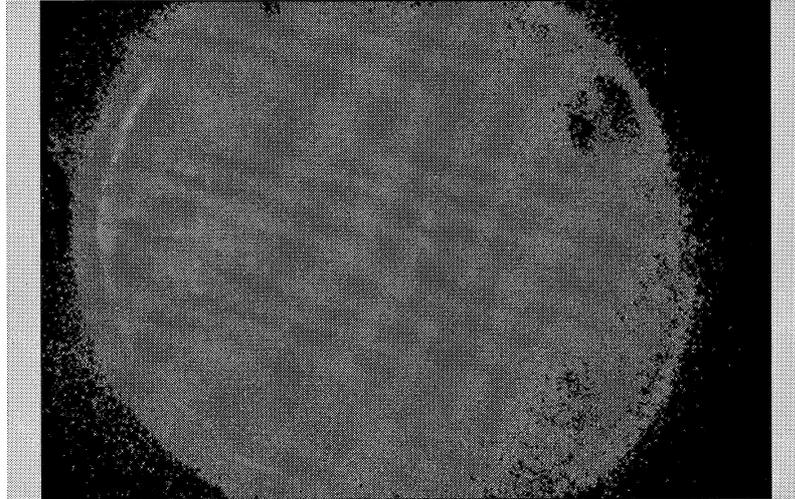


図 8 研磨工程で鏡面に光線を当てた時に出現した魔鏡現象

今回の実験で、鑄造による熱歪みは非常に大きいですが、これが直接的な魔鏡現象の原因に繋がらないことが分かった。一方、曲げ棒やヤスリ加工による残留応力は大きく、弾性変形以上の大きな魔鏡効果があると推定された。

一般的に、研削研磨は歪を残さないように加工するが、魔鏡製作では逆に歪を大きく残し、表面のみを平滑に仕上げていると判明した。

また小型鑄銅鏡における魔鏡の製作方法は故山本風龍鏡師の伝統技法による方法が確立されているが、本研究では、大型魔鏡を旋盤加工、研削などの工業的手法で作製するプロセスを見出した。ここで、魔鏡現象を大きく出現させるには、意識的に歪を大きく残す曲げ棒やヤスリ加工といった手作業の重要性が示された。

4.2 小型基準魔鏡による検証実験

応力による微小変形をより精密に行うために、小型板状の青銅鏡を鑄造し、その研磨工程や応力除去焼鈍した時の鏡面形状の変化を測定した。小型板状鏡の模型外観を図 9 に、その形状寸法図（製品の鑄放し寸法）を図 10 に示す。

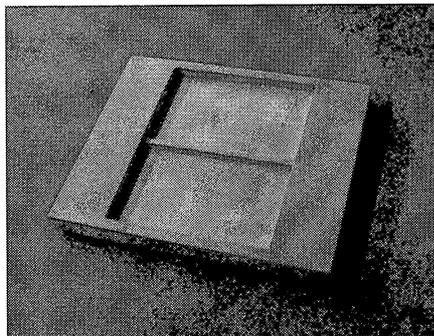


図 9 板状の銅鏡を鑄造用模型

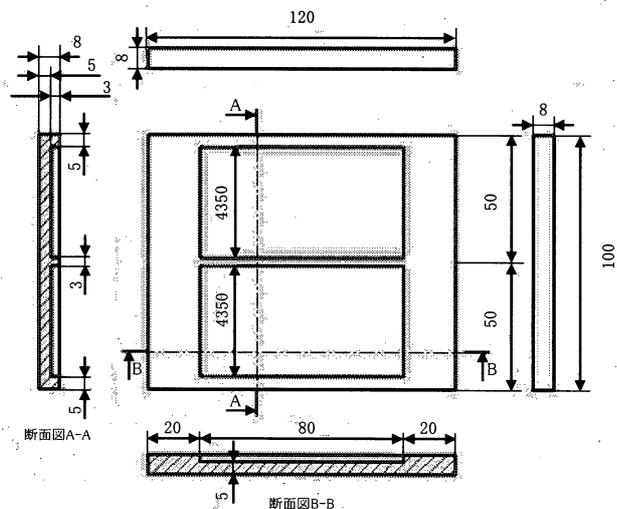


図 10 鑄放し試料の形状寸法

青銅地金には大型魔鏡と同じCAC403合金を用い、板状の試料(縦120mm×幅100mm×厚さ8mm及び6mm)を鑄造した。鑄造時の板厚が魔鏡現象に及ぼす影響を明らかにするため、板厚は2種類に変化させた。これらの試料の中心部分をフライス盤で中幅30mm、厚さ約1mmまで切削して、エメリーペーパー#5~2000と研磨剤で手作業により魔鏡現象が認められるまで鏡面に仕上げた。この試片の鏡面中央の凹凸の差(δ)を粗さ計により測定し、次に773Kで2時間焼鈍した後にもう一度 δ を測定し、焼鈍前後における δ の変化を測定した。その後試料を同じ条件で再研磨し、この作業を複数回繰り返した。図11に試料の外観を、図12に試料A及び試料Bの断面形状をそれぞれ示す。

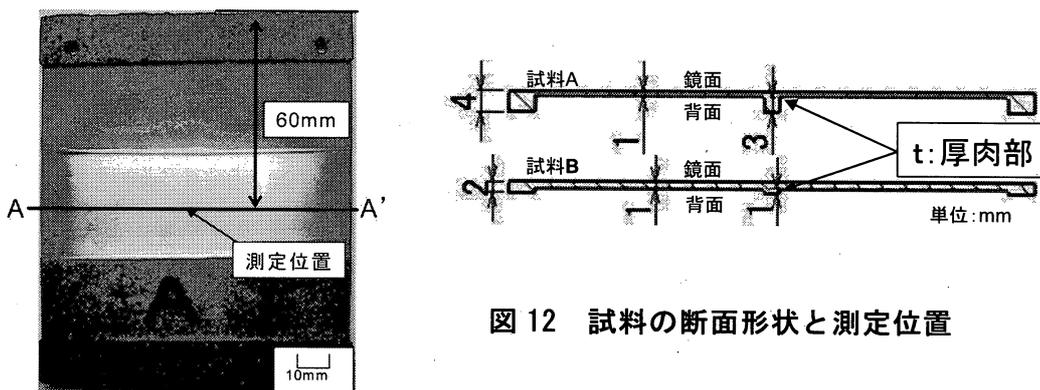


図 11 試料外観

図 12 試料の断面形状と測定位置

図 13 に粗さ計より得られた粗さ曲線の例を示したが、中央の厚肉部に相当する個所が凹面になっていることが分かる。また表 1 に δ 値の測定結果を示す。

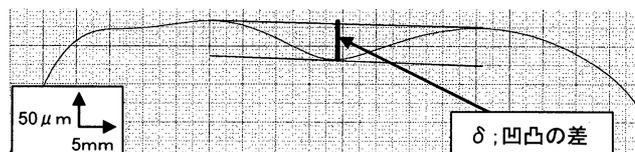


図 13 粗さ曲線の例

試料 A、B 共 1 度目の焼鈍により、研磨後に比べて δ が大きくなった。これは研磨に加え、 casting や切削時に生じた残留応力などが取り除かれその反作用により生じたものと考えられる。2 度目の焼鈍により、 δ が小さくなった。

表 1 δ 値 (単位: μm)

試料	研磨後	1 度目	再研磨後	2 度目	再研磨後	3 度目
		焼鈍後		焼鈍後		焼鈍後
A(t=3mm)	47	50.5	34	32.5	42	29.5
B(t=1mm)	1.35	1.9	1.25	1.0	2.6	3.5*

* 亀裂が発生

これは研磨時の残留応力のみが取り除かれたためと考えられる。しかし、3 度目の焼鈍で試料 B の δ が大きくなったが、これは試料 B が試料 A よりも薄いため、3 度の焼鈍で試料の中心より右の位置に縦に亀裂が生じたためと考えられる。

以上の結果から、肉厚 (板厚) に関係なく、残留応力が魔鏡現象に大きな影響を及ぼすことが定量的に確認できた。

5. 研究成果

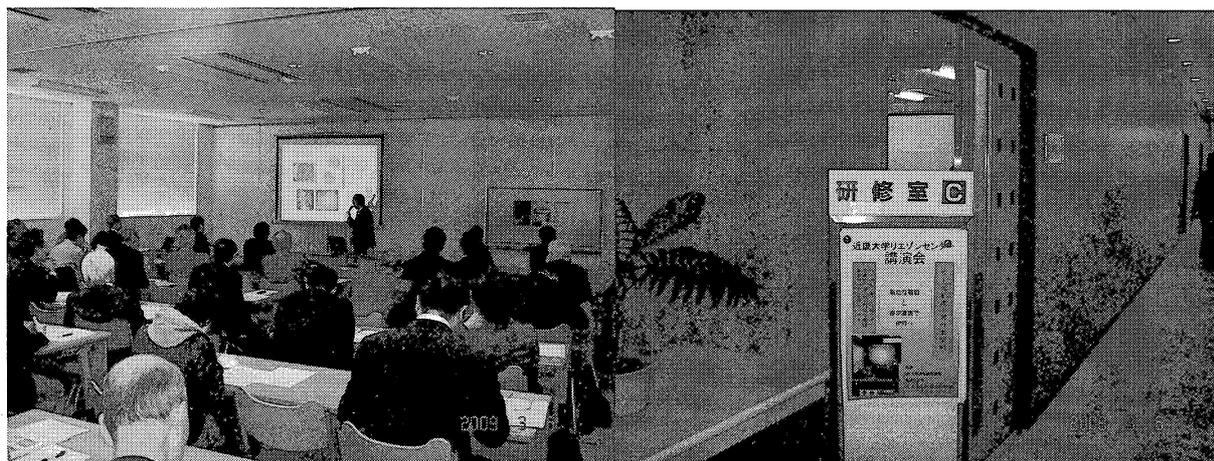
本研究の結果、 casting による熱歪みは非常に大きいですが、これが直接的な魔鏡現象の原因にならないことがわかった。一方、曲げ棒やヤスリ加工による残留応力は大きく、弾性変形以上の大きな魔鏡効果があること、高精度光源を用いて投影することにより認められた新現象 (モナリザのモザイク模様) はこれらが一因であることが推察された。一般に研削研磨は歪みを残さないように加工するが、魔鏡製作では逆に歪みを大きく残して表面のみを平滑に仕上げていることが判明した。また小型 casting 銅鏡における魔鏡については伝統技による製作方法が確立されているが、本研究では大型魔鏡を旋盤加工、研削加工などの工業的手法で作製するプロセスを見出した。魔鏡現象を大きく出現させるには、意識的に歪みを大きく残す曲げ棒やヤスリ加工といった手作業も重要なことが分かった。このことから伝統的な鏡の研削研磨方法が単純ではあるがもっとも効果的であることが明らかになり、今もなお生き続けている匠の技がものづくりにとって重要なことを再認識した。

また、今年度も、ものづくり関連の展示会などに出席し積極的に協力した。さらにいろいろな学会の研究発表会や講演会で研究報告して日本の伝統技術を広く国内外に発信した。

2009 年 3 月 6 日

近畿大学リエゾンセンター主催、(財)大阪産業振興機構、魔鏡研究会、日本鑄造工学会関西支部後援、講演会「新たな着想と産学官の連携で世界へ飛躍」に直径 1m 魔鏡を出展し、題目「古典技術「魔鏡」ハイテクに生きる、巨大魔鏡に映える」を講演。

(会場：東大阪市、クリエーションコア東大阪)



以上