

ものづくり技術を伝承した魔鏡（鋳銅鏡）の研究 — 魔鏡におけるナノデフレクション機構の解明 —

報告者 大学院総合理工学研究科 メカニックス系工学専攻 教授 米田博幸
共同研究者 理工学部機械工学科 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

鋳造青銅製金属鏡の中には、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ある。このような鏡は魔鏡と云われている（図1）。江戸時代の禁教下では裏面に隠されたキリスト像の投影に使われたと云われており、「隠れ切支丹（きりしたん）鏡」として今に伝わっている。

かつて鏡は青銅などの金属を鋳造して作った貴重品であり、代々にわたって大切に使用されてきた。しかし鏡面に塗布した水銀メッキは1年も経つとはげ落ちて鏡面が曇るので、毎冬毎に鏡磨き職人が訪れて磨き上げて輝きを取り戻していた。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いられている（図2）。しかしそのメカニズムにはいまでも多くの謎が残されており、研磨により鏡面にできる凹凸では魔鏡現象の半分以下しか証明できず、残る要因は今も解明されていない状況である。

その一方で、魔鏡の製造技術は現代のハイテク産業を支える重要技術になっている。微細な表面凹凸を瞬時に検知（表面評価）する技術は、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よって、欠かせないものとなっている。

本研究では、昨年度、多様なデータ分析が容易にできる世界最大級の巨大魔鏡（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。

そこで今年度はこれらの要因に絞り込んで検証を行った。



図1 代表的な魔鏡投影例(仏像)

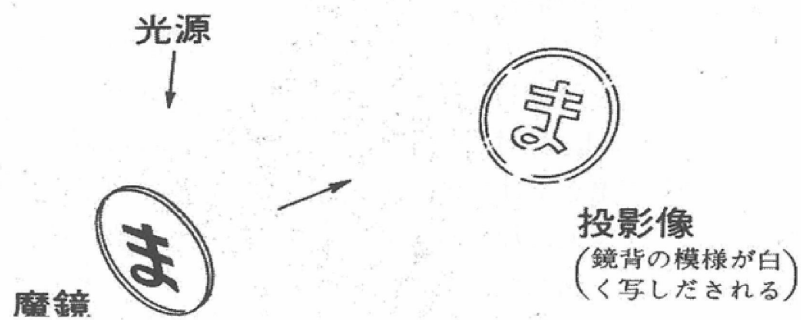


図2-1 魔鏡現象の概念図

裏の厚い文字部分に沿って表側に凹凸が形成されている

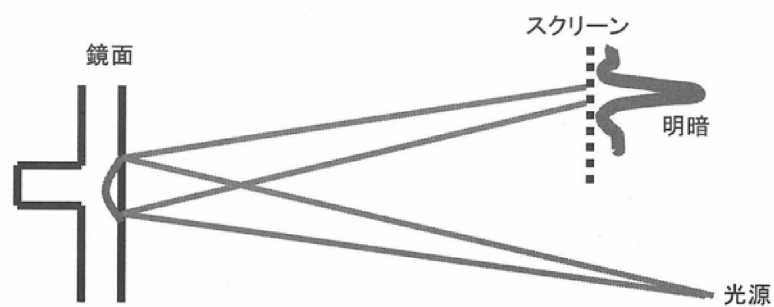


図2-2 魔鏡現象の機構：定説

2. 目的

昨年度作製した世界最大級の巨大魔鏡における魔鏡実験結果を基礎にして、ごく単純な小型の基準魔鏡を作製して魔鏡原理を検証し、魔鏡現象の機構を解明する。特に、鑄造歪みと加工歪みに注目して検証を進める。最終的には、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）
魔鏡の方案設計、鑄造、切削加工
- 京都大学 富井（学外共同研究者）
Discovery Channel 門脇（学外共同研究者）
魔鏡の科学技術的調査、実証実験

4. 検証実験用基準魔鏡の製作

(1) 模型（鑄型を作製するための模型）の製作

表面形状測定をより精密に行うために、小型の板状の銅鏡を鑄造する砂型(炭酸ガス型)を作製するための模型(図3)を作製した。模型の外観を図3-1に、その寸法（製品の鑄放し寸法）を図3-2に示す。鏡面部に相当する肉厚は5mmとした。鑄造後この部分の厚さを出来るだけ薄く研削研磨する。

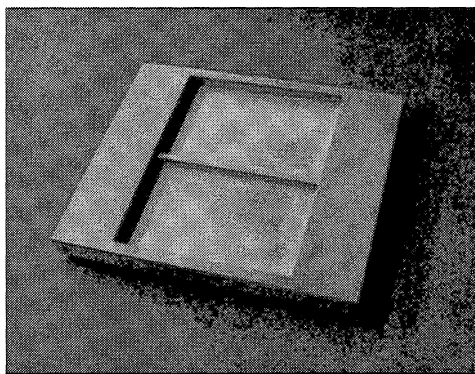


図3-1 板状の銅鏡を鑄造するための模型

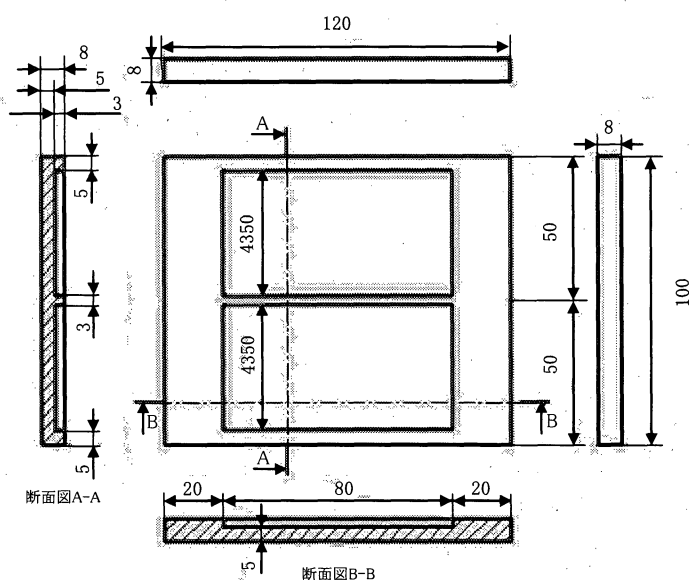


図3-2 鑄放し製品（鑄造のまま）の寸法

(2) 鑄型の作製

湯廻りなど鑄造方案を考慮した砂型（炭酸ガス型）の形状寸法を図4に示す。木枠の中にセットした板状の鏡模型の上に鑄物砂(7号けい砂)と粘結剤(水ガラス)を混合した鑄型砂を充填し、CO₂ガスと反応硬化させて鑄型（上下）を作製した。

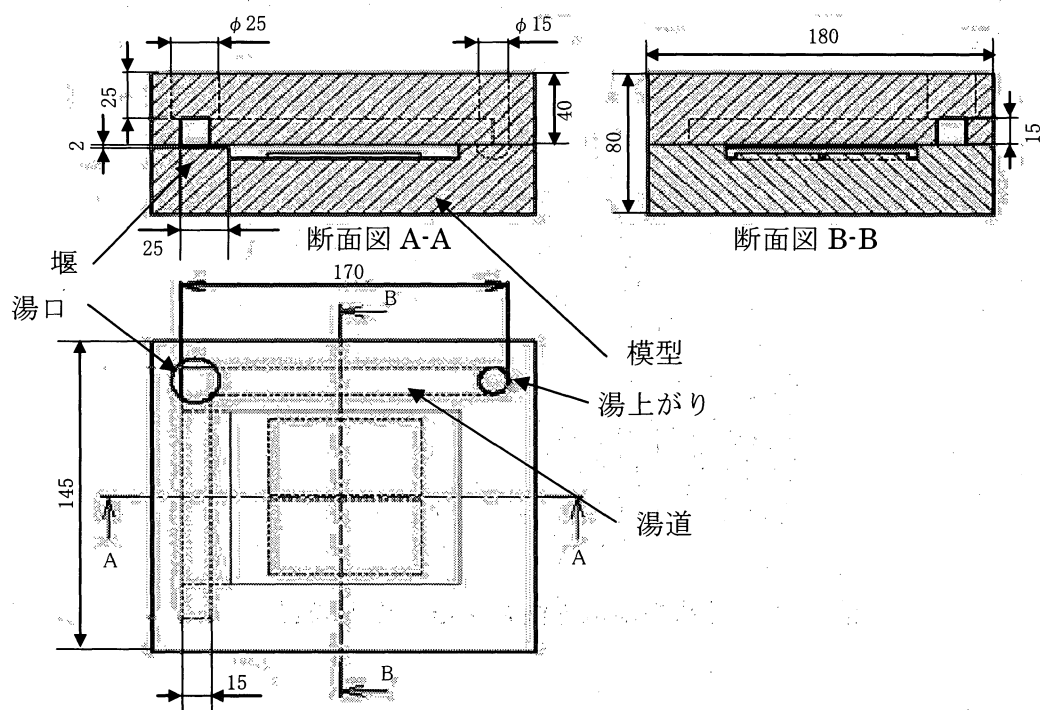


図 4 鑄型 (型合わせ) 図面

(3) 銅合金の溶解・ casting

青銅地金には、昨年度の世界最大級魔鏡（1020mm 青銅鏡）の casting と同様、耐圧性、耐摩耗性、機械的性質がよく、かつ耐食性もよい Cu-Sn-Zn 系の JIS-CAC403 合金（旧記号青銅 casting 物 BC3）を用いた。溶解には高周波誘導電気炉を用い、地金を黒鉛るつぽ内で溶解した（図5）。溶解後の溶湯は casting 型に casting 込んでそのまま冷却し、室温まで冷却後、型ばらしを行った。図6に casting 直後の製品の外観を示す。型ばらし後の casting 物は、湯口、堰などを除去し、各部の形状寸法を詳細に測定した。

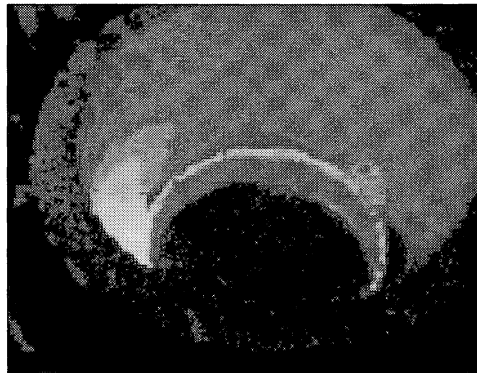


図5 青銅地金の溶解

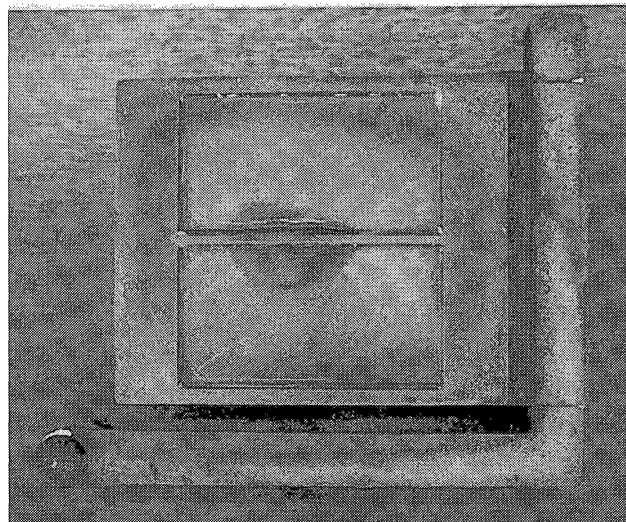


図6 湯口、堰などを含む casting 型 casting 品

図7に casting 放し（ casting のまま）鏡の厚さと平面度の測定結果を示す。平面度は鏡背の中心を基準として測定を行った。平面度から鏡背の深さの平面において中心は膨らんでおり、その周辺の方が平面度の値が小さくなっていることがわかる。これは casting 込みの歪み（ casting

熱歪み) が原因であると考えられる。

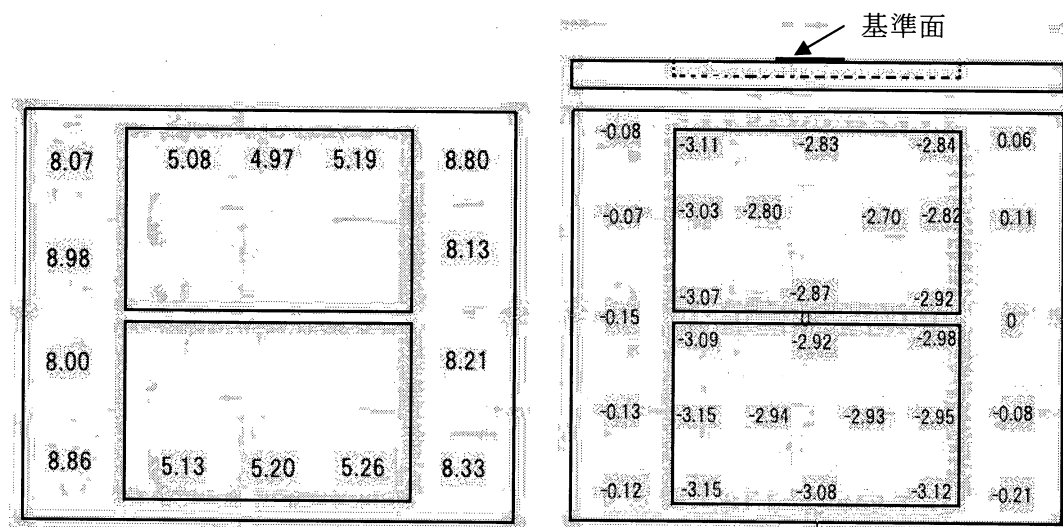


図7 厚さ(左)と平面度(右)の測定結果(単位 mm)

(4) 研削加工

基準平面を参照にして、図7の凹凸を平滑化した後に、鏡面側に溝状の研削加工(図8)を施した。なお、フライス盤による全面加工では機械歪みがあまりにも大きく、鏡の振動により、平面に加工が困難であった。次に機械歪みが小さくなるように、図8に示すように幅を狭めて加工を行った。研削条件を表1に示す。

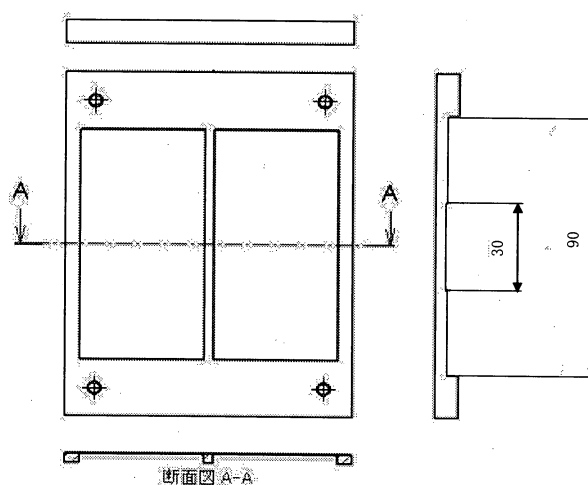


図8 研削鏡面の形状・寸法

表1 機械加工の切削条件

	基準面加工	1次加工	2次加工
使用工具	フルフェイス	フルフェイス	エンドミル(4枚刃)
工具の径	φ80	φ80	φ29
回転数	600	600	600
送り量	200	200	52
切削油	無	無	有
留め方	両端固定	ネジ固定	ネジ固定
切り込み量	0.2mm	4mm	0.1mm
備考	模様面加工	数回に別けて加工	NCによる加工

この後、鏡面側を手作業により慎重に研磨・琢磨して鏡面肉厚を薄くしかつ鏡面に仕上げながら魔鏡現象を確認した。背面の梁に依る鏡面側の微少な凹凸形状や反射光を図9に示す。

5. 研究成果

今回の実験では、鑄込み歪み、機械加工による大きな変形が認められた。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）以外に、これまで軽微とされていた熱応力や加工ひずみの影響も無視できないことが確認された。特に機械加工時には加工方法が大きく影響しており、加工時の鏡の振動など複雑な要因が輻輳しあい、複雑な変形現象が認められた。一方、やすりによる手研削では、本来の魔鏡現象に相応する微細な凹凸が鏡面に形成され、表面加工歪みによる魔鏡現象が確認された。

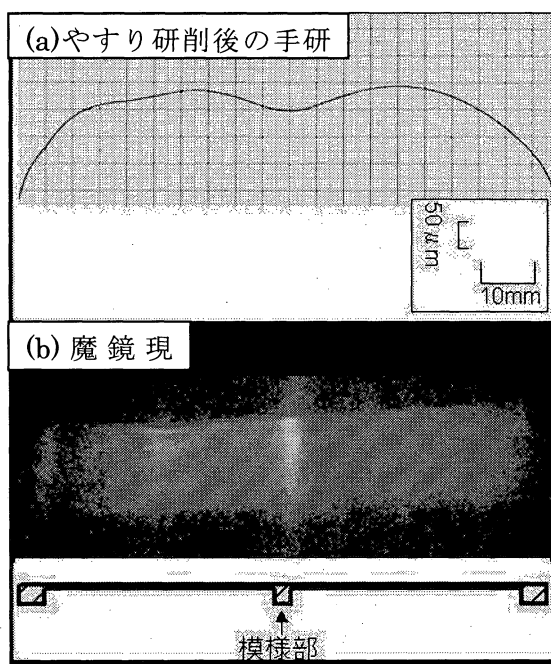


図9 表面形状と魔鏡現象、鏡背の模様の関係図

本研究からは、昔から伝わる伝統的な鏡の研削研磨方法が単純でもっとも効果的であることが判明した。手による一定の加圧により見事なまでに魔鏡現象を発生する鏡面の研磨を行うことができた。今もなお生き続けている伝統の重さが示された。

また、神秘的な魔鏡は人々の興味を強く引きつけることから、今年度も、ものづくり関連の展示会などに出展し積極的に協力した。さらにまた、いろいろな学会の研究発表会や講演会で研究報告したり、メディアを通じて日本の伝統技術を広く国内外に発信した。

6. 今後の展開

これまでの魔鏡現象の発現機構に関する実験、研究；

1. 実証実験と検証／熱応力と機械加工応力効果
2. 実験試料の作製と表面状態の精密計測
3. 魔鏡の光学的評価

を集約して、柔機械的な加工法／評価法への展開を図る。

7. 成果発表

(1) 新聞報道

2007年5月16日 読売新聞大阪本社夕刊「師あり弟あり」に世界最大の魔鏡製作に関する記事と写真が掲載された。同時に読売新聞 HPWeb にも掲載された。

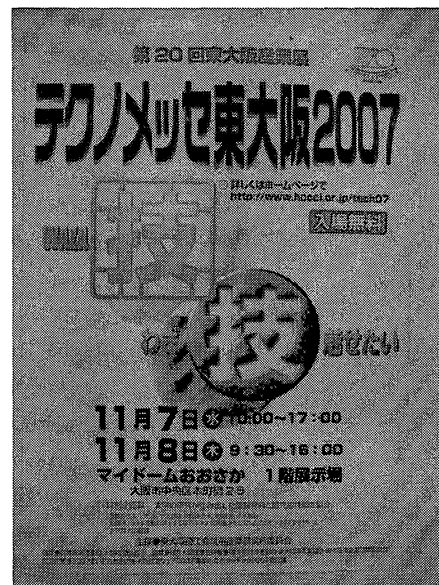
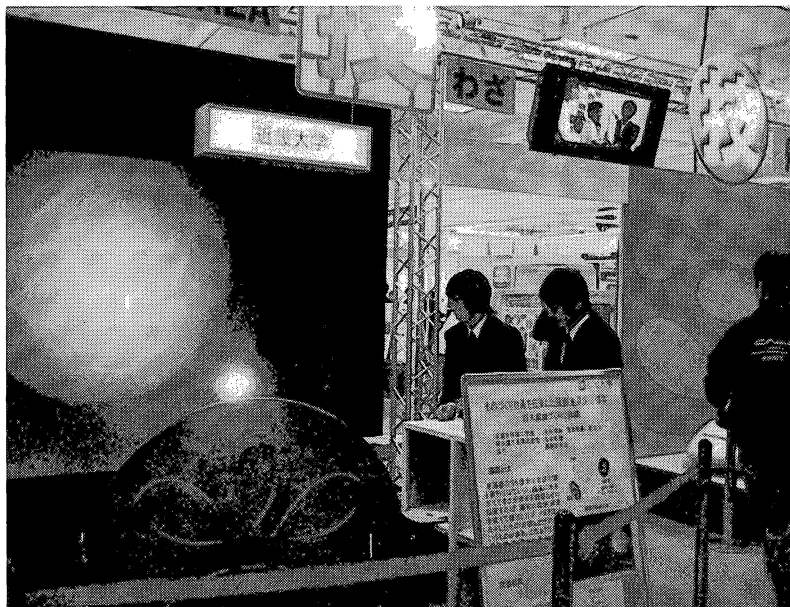


(2007. 5. 16 読売新聞夕刊より)

(2) 展示会

2007年11月7日(水)・8日(木) 東大阪商工会議所主催

第20回東大阪産業展 テクノメッセ東大阪2007 マイドームおおさかにおいて
近畿大学として巨大魔鏡を出展。テレビニュースにも取り上げられた。



(マイドームおおさかでの展示風景とテクノメッセ東大阪2007のポスター)

(3) 学協会等

2007年5月24日

日本真空工業会関西支部に於いて「世界最大の魔鏡を製作して」講演。

2007年7月28日

日本 casting 工学会関西支部 casting 懇話会に於いて「魔鏡についてー巨大魔鏡づくりに挑戦ー」講演。

2007年11月19日

高温学会溶射部会と日本溶射協会の2007年度溶射合同講演大会に於いて「魔鏡(金属鏡)におけるナノデフレクション機構について」講演。

以上