

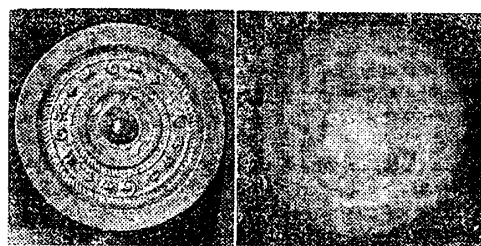
1. 緒言

魔鏡とは、平行光（例えば、太陽光など）を鏡の表面に反射すると、白壁にくっきり鏡の裏面の模様が写し出される青銅鏡である。中国では、この青銅鏡は“透光鏡”と呼ばれていることが知られている。今までの文化財調査より、中国および日本には、魔鏡の製造技術は古くから伝えられきた技法である⁽¹⁻⁵⁾。歴史としては、古代中国の前漢時代から魔鏡に関する製造記録もあり、日本では、江戸時代より仏像、文字などを描いた鏡が製作された記載があった。しかし、中国と日本に使われている魔鏡の製造技術は、まったく異なっている。中国では鑄造技術と熱処理技術を利用しているが、日本ではへら押しの方法によって鏡面に力をこめて研削する技術を使っている。19世紀後半から日本の魔鏡ははじめに世界に知られるようになり、そのへら押しの精密加工技法は研究者の注目を集めた。一方、中国の魔鏡が世界に知られたのは、その後のことであるが、歴史に記載された中国魔鏡の製造技術には、まだまだたくさん不明な点があり、とくになぜ中国魔鏡は鑄造あるいは熱処理だけで魔鏡を仕上げられるのかまだ十分に解明されていない。

このため、本研究は熱処理シミュレーションの技術を用いて、中国古代魔鏡を加熱した直後に急冷する過程における熱応力および変形のシミュレーションを試みた。その結果より、魔鏡の成因を検討し、魔鏡現象と関連する熱変形のメカニズムを解明する。

2. 魔鏡現象とその原理

魔鏡現象として、中国の魔鏡と日本の魔鏡はまったく同じである。Fig.1 は中国古代魔鏡の写真と壁に写された映像である。この青銅鏡の魔鏡裏面の肉厚の部分には「日月之光」の文字が鑄造されている。壁に写された映像には文字の輪郭ははっきり見えないが、裏面における凹凸の場所がわかる。この原理に関しては、すでに日本の魔鏡に関する研究によって解明されている。すなわちこれは Fig.2 に示すように、入射の平行光が鏡面内の微妙な凹凸によって反射光が壁の局所に収束しているので、壁の局所が明るくなるのである。



(a) (b)
Fig.1 The back of the Chinese magic mirror(a) and the reflected image (b).

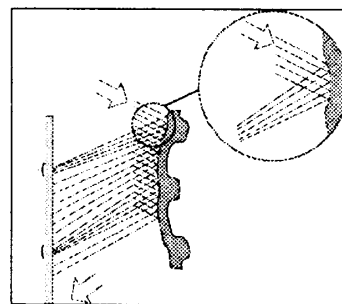


Fig.2 Principle of magic mirror.

3. 熱処理シミュレーションのモデリング

3.1 解析モデル 近年、変態・熱・力学の理論を用い、焼入れ過程における相変態、温度および応力／変形の相互作用を記述できる解析手法と汎用コード^⑥が開発されている。本研究は、このシミュレーション技術を用い、魔鏡の製造過程における残留応力、変形などについて解析する。Fig.3 は解析モデルを示す。このモデルの材料は 3% のりん成分を有する青銅鑄物とする。また、簡単のために魔鏡の裏面には 4 箇所で凸出している四角形の団塊があり、鏡裏面の外円は厚肉のリングとする。

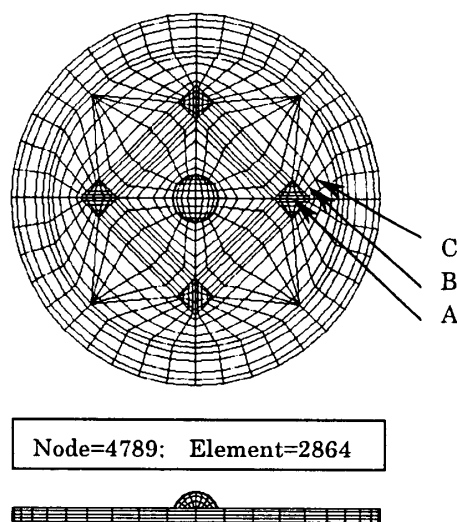


Fig.4 Model for analysis.

3.2 解析条件 実際の青銅鏡の製造法として、まず鑄造によって青銅鏡を製造し、その後青銅鏡を再度に加熱してから急冷による処理を行う。しかし、高温状態における青銅の材料物性が不明のため、本研究は、青銅鏡を 800℃までに加熱してからの過程を考慮する。冷却剤は、水道水とする。

4. シミュレーションの結果と考察

まず、温度変化を調べる。Fig.5 は焼入れ中の最高温度が 560℃であるときの魔鏡表面の温度分布を示す。この図から、魔鏡は面内の薄い部分から冷却していることがわかった。次に、魔鏡現象の原理から考えると、熱処理後で魔鏡表面に残留された変形およびひずみを解明する必要がある。魔鏡の表面および裏面の相当ひずみを Fig.6 に示す。また、時間に依存する魔鏡表面内の変位を Fig.7 に示す。これらの結果から、熱処理後の変形分布は、魔鏡裏面の模様依存しており、それによって魔鏡現象を生じることがわかる。

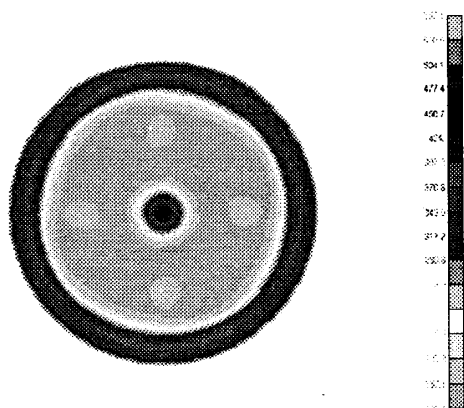
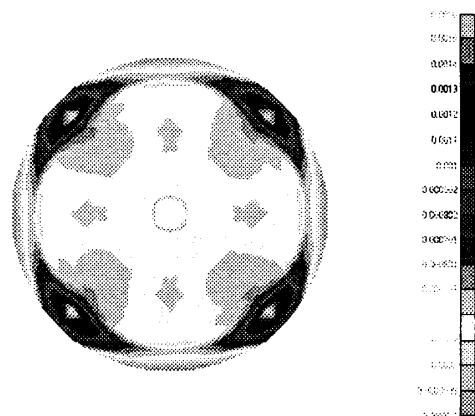
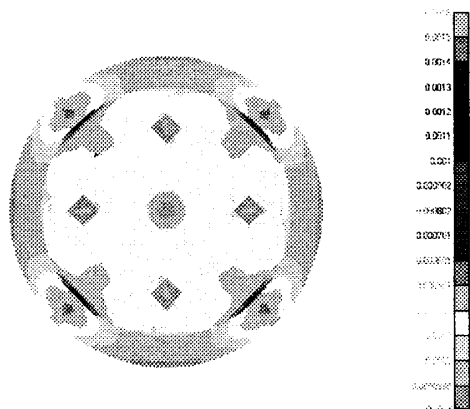


Fig.5 Distribution of temperature at t=18sec.



(a) Surface of magic mirror.



(b) Back surface of magic mirror.

Fig.6 Distribution of strain

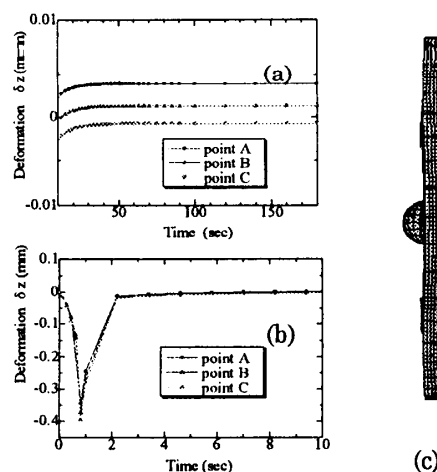


Fig.7 Variation of deformation on surface.

一方、Fig.8 に示した熱処理後の相当応力によって、魔鏡外円のリング部分において残留応力は大きくなり、薄い部分には非常に低いレベルの応力状態が現れている。すなわち、リング内応力は薄い鏡面に対して常に曲げモーメントをとって動き、その後の研磨によって鏡面がさらに薄くなるほど、厚肉と薄肉の段差部分における変形は大きくなることをわかる。

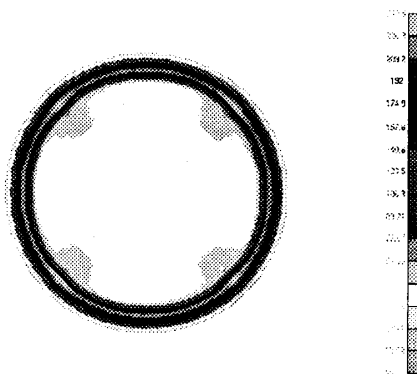


Fig.8 Distribution of equivalent stress.

5. 結論

本研究は、中国古代の魔鏡の成因を解明するために、魔鏡の熱処理過程に関するシミュレーションを行い、冷却に伴って青銅鏡内部における残留ひずみおよび残留応力を解析した。その結果から、鏡の表面における残留ひずみの分布は魔鏡現象の原理とよく一致しており、リング内の応力が薄い鏡面内の微妙な残留ひずみを保持する効果があることが分かった。

参考文献

1. 石野, 青銅鏡に現われる魔鏡現象, Boundary, pp.14-17(1998.12)
2. 野崎, 中国と日本の魔鏡, Boundary, pp.18-19(1998.12)
3. 日比野, 魔鏡の成因とその解明, 応用物理, Vol.61, No.6, pp.600-603(1992)
4. 加藤, 魔鏡の原理をハイテクに生かす, バウンダリー, No.4, pp.5-9(1990)
5. 本郷, 究極の鏡をめざして, バウンダリー, No.4, pp.10-18(1990)
6. T. Inoue, D.Y. Ju and K. Arimoto, Proc. 1st Int. Conf. on Quenching and Distortion Control, Chicago, p.205(1992).