

- 経常研究 -

# アルミナ強化磁器の品質向上

陶磁器科 秋月俊彦・矢野鉄也  
小林孝幸・山口英次  
研究開発科 木須一正

## 要 約

強化磁器食器の衝撃試験における破壊起点は、打点からやや内側へ入った表面上であることが有限要素法によるシミュレーションや、実証試験によって確認された。そこで、破壊起点部分の曲線形状を、直線や窪み形状とすることで、破壊を引き起こす引張り応力が分散され、衝撃強度は最大30%以上向上することが確かめられた。また、底抜けといわれる食器洗浄機で処理された碗製品の破損現象について、有限要素法を用いてシミュレーションした結果、碗内面の底面からやや上の部分に強い引張り応力の発生が認められ、この部分が底抜けの破壊起点であることが予想された。そこで実際に、給食センターにおける底抜け破損品を集めて、破壊起点を確認したところ、ほぼ予測領域内に破壊起点が存在することが確認された。また、食器と金属製の食器籠やスプーン等との接触により発生するメタルマークを除去するための熱処理条件について検討を行った結果、メタルマークは700 以上の熱処理により除去できることが分かった。

## 1. はじめに

学校給食用の食器に用いられる強化磁器の割合は、年々増加する傾向にある。そのような中、他産地製品との差別化とシェア拡大を図るには、給食食器導入において重要視される衝撃強度の向上が求められている。

この衝撃強度に関しては、素材の影響と共に、形状による影響も大きいと考えられているため、本研究では、衝撃に強い縁形状の開発を目的に研究を行った。開発においては有限要素法を用い、食器の縁先端に負荷を与えた場合の応力分布状態をシミュレーションすることで、衝撃に強い縁形状を予測した。更にその結果を基に、実際に試験体を作製し、衝撃強度の測定による確認試験を行った。

さらに、給食センターにおいて発生する底抜けについて、その破損現象を有限要素法でシミュレーションし、破壊起点を予測した。そして実際、給食現場における破損品を取り寄せ破壊起点の確認を行った。

また、給食現場において発生するメタルマークは、食器と金属の接触により生じる、頑固な汚れの一種であるが、これを除去するための熱処理条件についても検討を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 衝撃強度に及ぼす縁形状の影響

シミュレーションを行う試験体としては、既にアルミナ強化磁器食器として製品化されている「セーフティーわん」の小皿(直径160mm×高さ27mm)を想定し、その縁先端へ荷重を掛けた場合の構造解析を行なった。構造解析にはアプライド・デザイン株式会社製のソフト(Stress Check 6.2)を用い、静的負荷における解析を行った。解析条件としては図1に示したASTM-C368-88による衝撃試験を想定し、図2に示すようにVブロック接点の横方向の拘束(左側2点)と、試料台による高台の上下方向の拘束、さらに皿中央部を上から下にスプリングで加圧する。そこへ、ハンマーの打点となる縁先端部分に静的負荷(右側)を掛けるという条件で解析を行った。その解析結果から、破壊起点を予測すると共に、その破壊起点部分の形状を変化させることで、試験体内部に発生する横方向の最大引張り応力を比較し、次式によって従来の縁形状での強度を100%とした場合に予測される、新しい縁形状での強度値F(%)を算出した。

$$F(\%)=A / B \times 100$$

A : 従来の縁形状における最大引張り応力



図1 衝撃試験状況

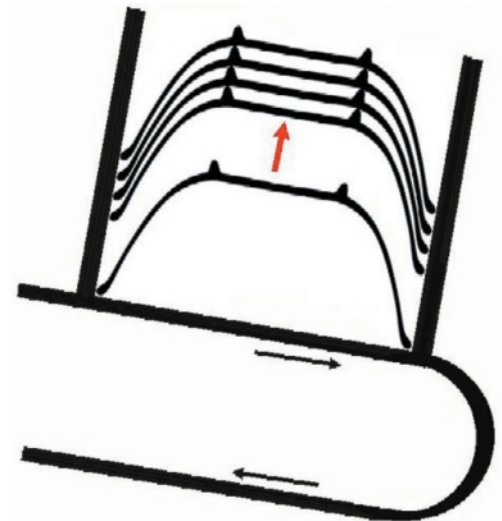


図3 底抜けの発生状況

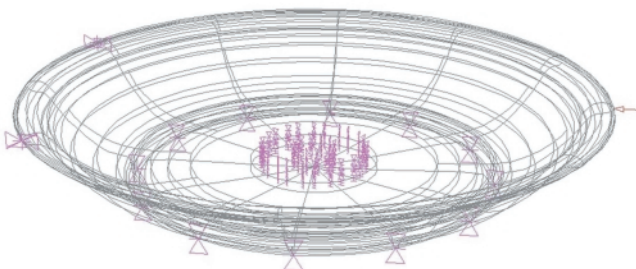


図2 解析条件図

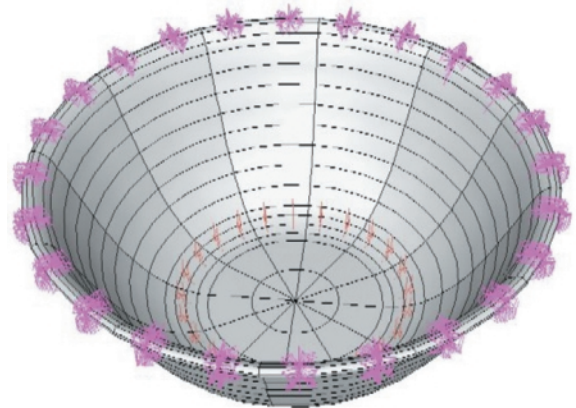


図4 底抜けの解析条件図

B：新しい縁形状における最大引張応力

さらに、最大負荷が掛かった時点での、打点からの試験体断面を取り出し、強い引張応力が発生する部分の面積を画像解析装置で計測を行った。計測した面積から、従来の縁形状における面積を100%とし、新しい縁形状での面積比(%)を算出した。また、一部の縁形状については、縁先端部分へ横方向からの負荷のみでなく、上下方向からの負荷に対しても、それぞれ構造解析を行い、強度値の比較を行った。

さらに実証試験を行うため、アルミナ強化磁器食器をローラマシーンで成形して、乾燥し、三種の縁形状に切削加工を行ない、素焼き、施釉の後、SK10で還元焼成を行った。得られた試験体を用い、リサーチアシスト有限会社製の衝撃試験機RA-112を使用し、ASTM-C368-88に準じて衝撃強度の測定を行ない、各形状とも12枚の衝撃強度値から、その平均値を算出した。また、各形状とも試験体12枚についてあらかじめ重量を測定し、その平均

値も算出した。

## 2.2 底抜け現象のシミュレーション

底抜けといわれる現象は、図3に示すように、食器洗浄機で洗浄された碗製品が、ベルトコンベアで運ばれ、積み重なって行く段階で発生しやすいといわれている。そこで、有限要素法を用い、そのような状態において製品内部に発生している応力分布をシミュレーションし、底抜けにおける破壊起点の推定を行った。解析条件としては、図4に示すように、縁の部分をも拘束すると共に、積み重ねた場合に衝撃が加わる、高台との接触部分(底面円形状)に内側から荷重を加えた。その結果から、試験体に生じる上下方向の応力分布を解析することで、底抜けの破壊起点となる引張り応力発生部分を予測した。更に実際に、給食現場から破損品を取り寄せ、その中から底抜けに近い破損形態のものを選定し、それらの破壊起点を目視により調査し、シミュレー





図5 給食食器のメタルマーク

シオン結果との比較を行った。

### 2.3 メタルマークの除去

図5に示すように、給食現場から取り寄せた、メタルマークが縁の部分に付着した強化磁器食器を、電気炉中3 /minで昇温し、所定の温度で1時間保持した後、徐冷を行った。室温まで冷却の後、試料を炉から取り出し、メタルマークの状態を目視により観察した。

## 3. 結果及び考察

### 3.1 衝撃強度に及ぼす縁形状の影響

#### 3.1.1 衝撃試験による破壊起点

構造解析により、衝撃試験を想定した条件で試料を拘束し、縁先端部分に静的負荷を掛けた場合の応力分布を図6に示す。打点付近は圧縮応力(青色)が発生し、打点よりやや内に入った表面部分に引張応力(赤色)が発生する結果となった。その引張応力の起点は今回の試験体形状においては、縁先端から6mm入った皿表面であることが示された。そこでこの結果と、動的負荷である実際の衝撃試験との関連性について調べるため、焼成した試験体を用い衝撃試験を行い、破壊起点を確認した。その結果、図7に示すように、実際の衝撃試験においても、縁先端より6~7mm程内に入った、赤丸で示した部分から破壊が生じていることが確認され、静的負荷での解析結果と一致する結果であった。これにより、衝撃強度という動的負荷も静的負荷の条件で、解析可能な部分もあることが判明したため、次に破壊起点に発生する引張応力を分散させる方向で縁形状の検討を行った。

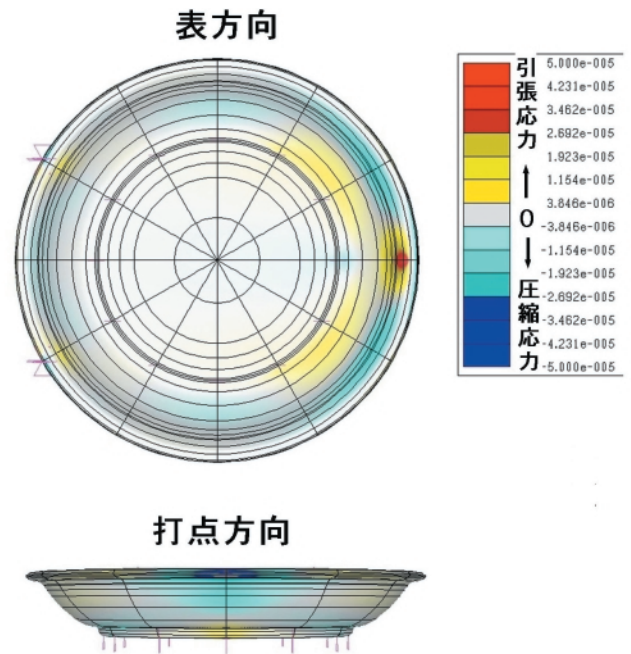


図6 応力分布図

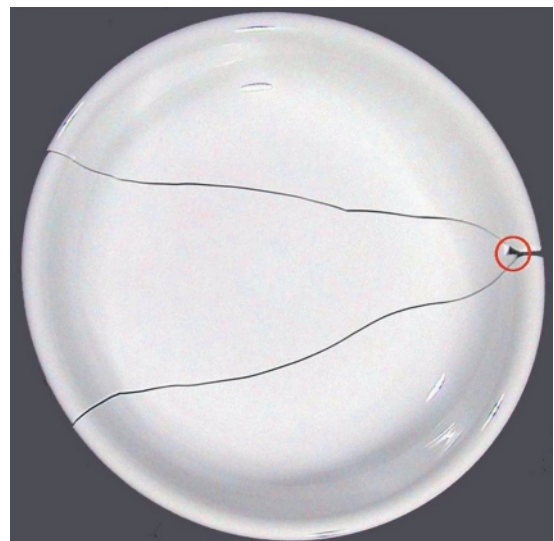


図7 衝撃試験後試料

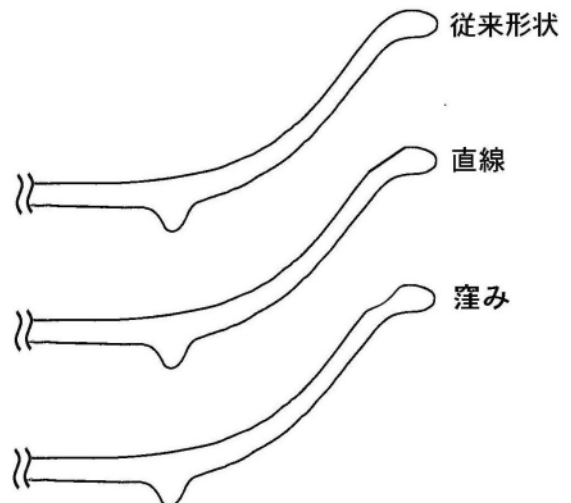


図8 縁形状断面

### 3.1.2 縁形状による応力分散

重量はできるだけ軽くし、衝撃強度は向上させる必要があるため、引張応力が大きい破壊起点部分の形状を図8に示すように直線と窪み形状に削り込んだ形で検討を行った。まず構造解析により、これら縁形状の皿における最大引張応力を測定し、その値から予測される強度を算出した。その結果、破壊起点部分を直線あるいは窪み形状とすることで、解析結果からは強度の向上が予測された（図9）。

そこで、縁形状を変えることで、試験体内部にどのような応力の変化が生じているのかを確かめるため、最大負荷時の打点部分の断面を取り出し、強い引張応力が発生している赤色部分の面積比を画像解析により測定した結果を図10に示す。同一負荷を掛けたにもかかわらず、従来形状を100%とした場合、窪みを付けることで強い引張応力が発生する部分が125%と広くなり、引張応力が素地の内部に分散されていることが確認された。

この解析結果が実際の衝撃試験においても同様の

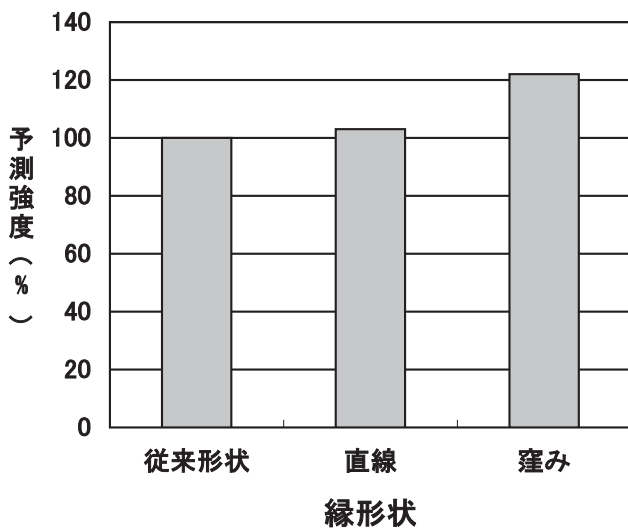


図9 縁形状による予測強度

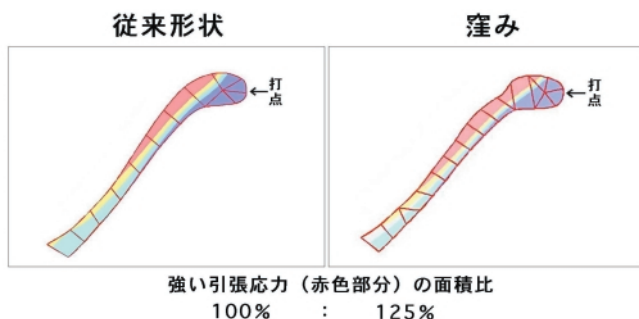


図10 断面の応力分布

結果となるのか、確認試験を行った。各縁形状とも12枚の試験体を作製し、衝撃試験を行い、その平均値を求めた結果を図11に示す。直線、窪みとも構造解析から予測された通り、従来縁形状よりも高い衝撃強度を示し、中でも窪みを付けたものは従来のものより、30%以上衝撃強度が向上する結果となった。また、図12に示す衝撃試験後の破壊形態からわかるように、縁に窪みを付けることで衝撃力が試験体全体に分散された様子が見え、図10で解析し、予測された試験体内部への応力分散を裏付ける結果となった。

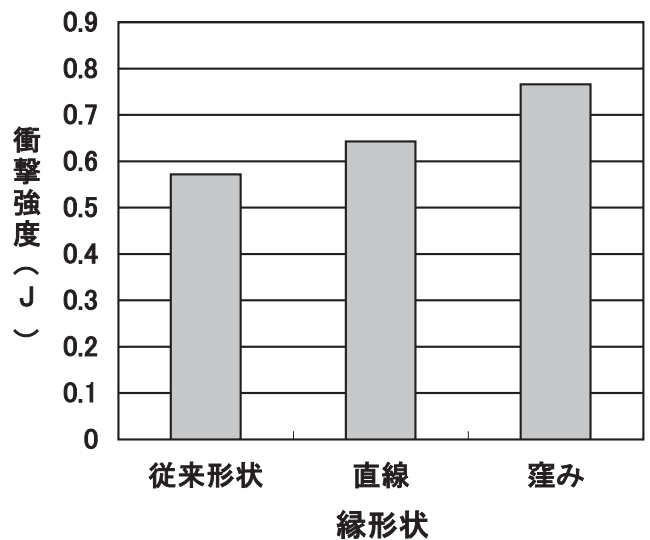


図11 試験体による衝撃強度の実測値

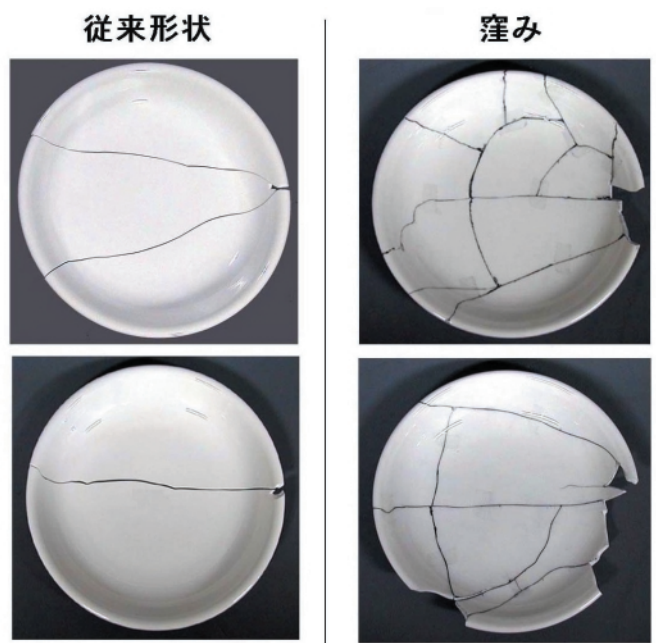


図12 衝撃試験後の破壊形態

### 3.1.3 縁形状による重量変化

今回検討した縁形状は直線、窪みともに従来形状のものから削り出して作製したことで、重量がどの程度減少したのか確認を行った。その結果を図13に示す。直線、窪みとも当然重量は減少し軽量化しているが、中でも窪み形状の方が、より軽量でしかも衝撃強度も高いことから、製品化においては実用性が高いものとする。

### 3.1.4 窪み形状の上下方向からの負荷

以上の内容から、窪み形状が衝撃強度や軽量化において優れていることが判明したが、実際食器として使用した場合、衝撃試験のように横方向からの負荷だけではなく、上下方向からの負荷も考えられることから、図14に示すような負荷に対しても構造解析を行って見た。

その結果、図15に示すように、従来の縁形状における同様の解析結果を100%とした場合、窪み形

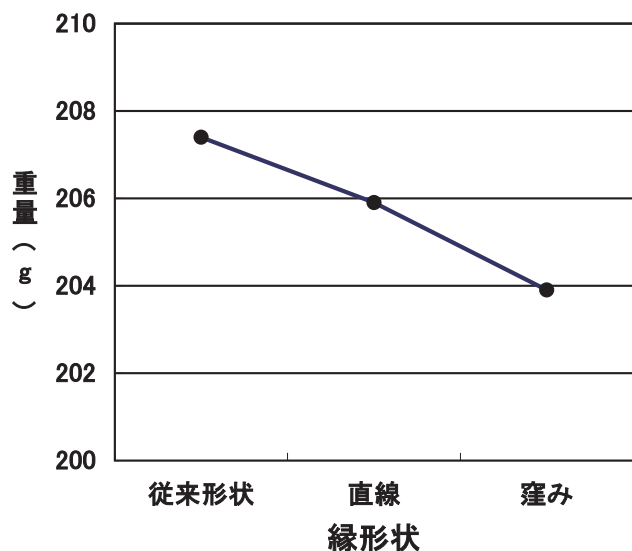


図13 試験体重量

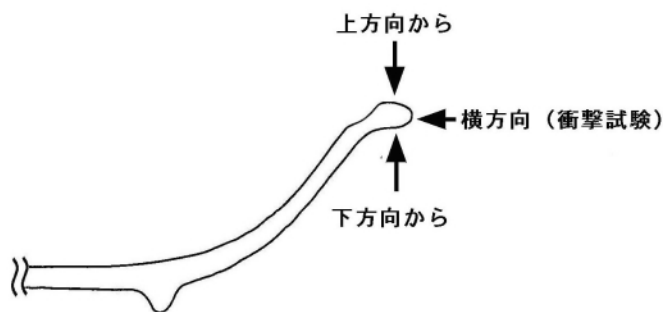


図14 負荷の方向

状とすることで、上下方向とも100%を越える値を示した。このことから、構造解析の結果では、窪み形状の方が、従来の縁形状よりも上下方向からの負荷に対しても強いことが予測される結果となった。

### 3.2 底抜け現象のシミュレーション

#### 3.2.1 シミュレーション結果

底抜けといわれる破損状況を、シミュレーションした時の応力分布状態を図16に示す。底抜けといわれる破壊現象は、上下方向の強い引張り応力が発生する製品内面の、しかも底面よりやや上の赤色で示された部分が破壊起点であることが予測される結果となった。

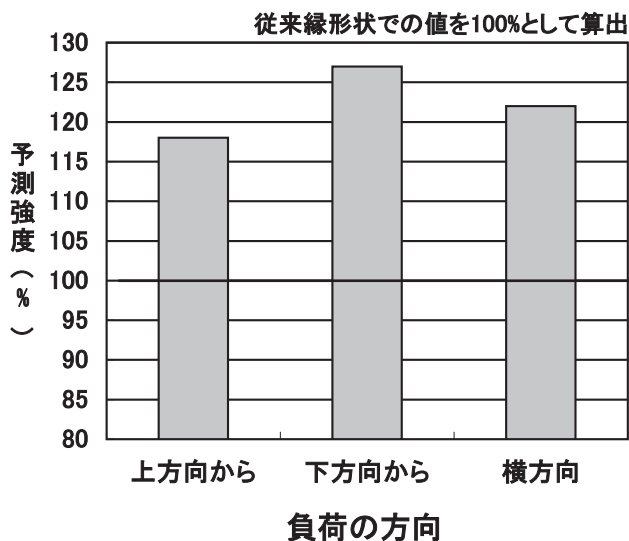


図15 負荷の方向と予測強度

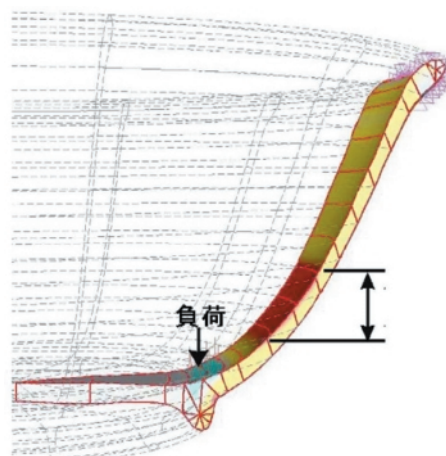


図16 有限要素法による引張り応力発生の予測範囲（矢印間）



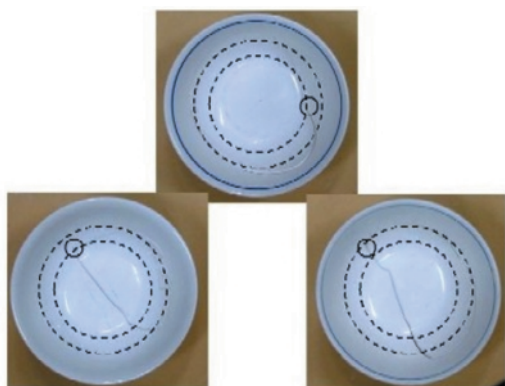


図17 引張り応力発生の予測範囲（点線間）と底抜きの破壊起点（実線丸）

### 3.2.2 破壊起点の確認

シミュレーションによる破壊起点の予測結果を確認するため、実際に給食現場で底抜けに近い状態で破損した製品を取り寄せ、それらの破壊起点を目視による確認を行い、シミュレーションから予測された破壊起点と比較した。その結果、図17に示すように、シミュレーションにより強い引張り応力が発生すると予測された範囲に、実際の破壊起点が存在することが確認された。

### 3.3 メタルマークの除去

電気炉による加熱処理で、メタルマークの除去を検討した結果を図18に示す。熱処理前、矢印で示した縁部分のメタルマークは、釉薬表面の摩耗状態などにもよるが、600 以上の加熱処理でやや赤みを帯び、700 以上で加熱した後は、乾いたスポンジで簡単に拭き取ることができた。この結果から、通常の洗浄ではほとんど落とすことのできないメタルマークも、700 以上の加熱処理で、ほぼ全て除去できることが確認され、今後、給食センターからのメタルマーク除去の要望があれば、陶磁器製造用の窯がある県内企業において、対応が可能と考えられる。

700 加熱

600 加熱

500 加熱

処理前

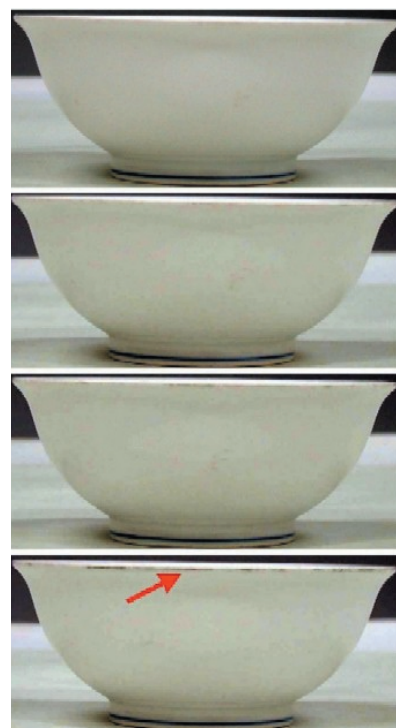


図18 加熱処理前後のメタルマーク

## 4 まとめ

以上のように、まず有限要素法による構造解析を用い、より軽く、より高い衝撃強度を持つ縁形状について検討を行った。その結果、破壊起点となる部分に窪みを付けることで、従来品に比べ重量は軽く、しかも衝撃強度は30%以上向上することが確認された。さらに、食器洗浄機で洗浄中に発生する底抜けについて、有限要素法を用いシミュレーションを行った結果、製品内面の、しかも底面よりやや上に、強い引張り応力の発生が予測され、実際の給食現場で底抜けに近い状態で破損したものの破壊起点も、この範囲に存在することが確認された。これにより底抜けは、製品内面への強い荷重により、底面よりやや上に、強い引張り応力が発生することで破壊が生じたものと考えられた。さらに、食器籠やスプーンなど、金属との接触により発生するメタルマークの除去方法として、700 以上の加熱処理が有効であることが確認された。