

## 4) 応力解析による食器の耐衝撃強度改善

蒲地伸明

磁器製食器の耐衝撃特性を形状設計によって改善する為の手法として、破壊解析、応力解析塗料による衝撃負荷時の歪分布解析、そして FEM(有限要素法)によるシミュレーションを実施した。破壊解析では破断面に破壊の痕跡が明瞭に残り破壊起点を特定可能であった。また、応力解析塗料によって磁器の微小な歪も検出できることが明らかになった。FEM と実験計画法を組み合わせた解析では衝撃強さに影響の大きい形状因子が明らかになった。

### 1.はじめに

陶磁器は本質的に脆く破損しやすい材料である。業務用食器の分野において、食器の破損は目に付きやすいコスト増の要因であるため、消費者の破損しにくい食器を求める声が強くなっている。また学校給食などの集団給食用食器において強化磁器食器はプラスチックや金属に変わりシェアを拡大しているが、更なるシェア拡大のためにはより強い製品の開発が必要である。

磁器食器における製品強さを向上させるためには素材強度の向上と製品形状の改善の2つの手法が用いられることが多い。素材強度の向上に関しては、すでに多くの研究がなされており、製造現場にも、研究成果が応用されている。一方で、製品形状の研究に関してはこれまでほとんど行われておらず、経験に基づく試行錯誤に頼っている現状がある。試作の繰り返しによる時間と資源の浪費を減らし、食器形状を効率良く改善するためには食器に衝撃が負荷された時の食器の変形や応力の発生状況を確認し、破損の発生しやすい部位を効率よく強化していく必要がある。

そこで、本研究では食器に衝撃を負荷した時の変形や試料に発生する応力の解析のために FEM(有限要素法)によるシミュレーションを試みた。コンピュータによるシミュレーションの結果は実際の試料と比較することで再現性を確認し、精度を高めることが出来る。今回は、実試料での変形・応力分布を広範囲に把握するために、応力の目視観察を可能にする応力解析塗料による歪・応力観察を行った。応力解析塗料とは、試料表面の応力解析に用いられる非常に脆い樹脂性の塗料であり、塗料を塗布、乾燥、硬化させた後に試料に力を負荷すれば歪により生

じる応力のために塗膜に亀裂が生じる。亀裂の方向や密度は応力方向と相関性があり、実試料に加わった応力を直接観察・解析できる。更に、試料を破損させたときの破面解析、あるいは破損状況のハイスピードカメラによる観察を実施し破壊起点等を確認した。これらの手法を組み合わせることにより形状による食器の耐衝撃強度改善について検討を行った。

### 2.実験方法

#### 2.1 破壊解析

##### 2.1.1 破面解析

強化磁器食器の製品強さは振子式の衝撃試験(ASTM C368)によって評価されることが多い。破壊起点や亀裂進展方向を確認するために、衝撃試験によって破損した強化磁器食器の破片を回収し破断面に傷が入らないように再構築し、金属顕微鏡(BX60M,OLYMPUS Co.)による破面観察を行った。

##### 2.1.2 ハイスピードカメラによる破損観察

強化磁器食器の衝撃試験における破損の様子をハイスピードカメラ(EX-F1,CASIO Co.)にて撮影し、破損時の試料の変形や亀裂の様子を確認した。

#### 2.2 応力解析塗料による応力観察

応力解析塗料は樹脂性の塗料であり、その歪感度は塗装あるいは試験時の温度と湿度の影響を強く受ける。そのため応力解析塗料は使用温度帯に応じて数種類が用意されている。本研究で用いた応力解析塗料、STRESS MARK II シリーズ(株式会社テック技販製)の使用基準温湿度を表1に示す。他に、硬化時間、膜厚も歪感度に影

表1 応力解析塗料の種類と標準使用温湿度範囲

塗料記号	使用温度範囲 ( )	使用湿度範囲 %
ST-15	14 ~ 19	47 ~ 55
ST-20	19 ~ 24	
ST-25	24 ~ 29	

響することが知られており、これらの因子が、歪感度に与える影響について調査した。

### 2.2.1 塗料の乾燥時間と歪感度

スライドガラス(26×76×1mm:ソーダガラス)表面を脱脂後、応力解析塗料(ST-25)を塗布し、恒温恒湿器(SC-H65Y-40R:佐竹化学機械工業株式会社)を用い16, 22, 24, 26, 40, 45, 70 時間乾燥して歪感度確認用の試料とした。乾燥条件は温度 30℃、湿度 50%とした。応力の負荷は精密万能材料試験機(AGX-10kN:島津製作所製)を用いて行った。図1に歪感度試験の写真を示す。3点曲げ試験用の治具を用い、スパン60mm、クロスヘッドスピード 10mm/min で応力を負荷し、試料の変位を変位計で検出した。変位を 0.1mm 単位で増加させながら塗料面への亀裂の有無を確認した。塗料面に亀裂が生じたときの変位から(1)式により歪を計算した。

$$= \frac{6t}{L^2} L \dots\dots(1)$$

- ε :歪 (μ ε)
- t :試験片の厚さ (mm)
- L :支点間距離 (mm)
- ΔL :変位量 (mm)

### 2.2.2 塗料の膜厚と歪感度

応力解析塗料(ST-15)スプレーによる塗装を 8, 9, 10, 12 回繰り返して膜厚を変化させた試料をそれぞれ 3 枚ずつ作成した。恒温恒湿器中で温度 20℃湿度 50%の条件で 46 時間乾燥し、2.2.1 と同様の方法で歪感度の測定を行った。

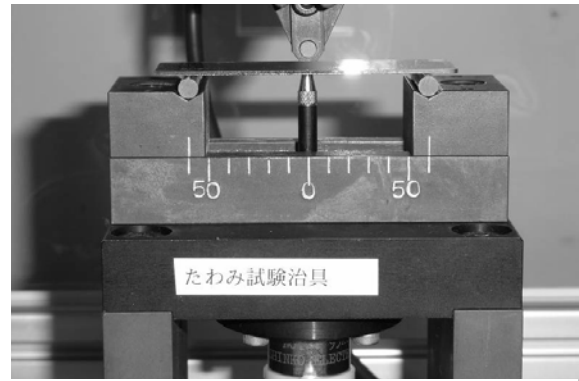


図1 万能材料試験機による歪測定の様子。

### 2.2.3 基材と応力解析塗料の関係

2.2.1と2.2.2の実験では試料として準備の容易なスライドガラスを用いたが、実際の試験においては施釉された強化磁器を用いる。そこで強化磁器の皿から切り出した試験片とスライドガラスに対して同じ条件で塗装、乾燥を行い、歪感度を比較した。

### 2.2.4 応力解析塗料による強化磁器食器の歪観察

種々の強化磁器食器に応力解析塗料を塗布し衝撃試験を行うことで、衝撃負荷時に発生する歪を確認した。強化磁器食器には、打撃予定の1.2倍の衝撃エネルギーをあらかじめ負荷し、破損が発生しないことを確認した。応力解析塗料を塗布後、40時間以上の乾燥を行い、衝撃試験を行った。

## 2.3 強化磁器食器形状のFEM(有限要素法)による検討

### 2.3.1 実験計画法

シミュレーションに用いた食器形状のCAD図面の例を図2に示す。形状は学校給食用碗を参考に形状決定因子として図に示す4種を選択した。4種(A~D)の形状決定因子についてそれぞれ3水準の値を設定し、水準値の組み合わせにより様々な形状データを作成した。4因子3水準の組み合わせを完全に実施した場合その総数は3<sup>4</sup>=81通りとなる。81種の形状のシミュレーションは時間の関係から実施困難であったため、直交配列表により組み合わせ数を削減した。各因子の水準値を表2に、L27(3<sup>4</sup>)直交表における組み合わせを表3に示す。直交表に従い27種の形状について有限要素法解析を行った後、結果に関して分散分析を行い各因子の影響について検討した。

表.2 実験計画法における各因子の水準値.

因子 (単位)	縁部開角 °	玉縁半径 mm	縁部 面取り半径 mm	縁厚 mm
水準 1	10	0.75	5	2
水準 2	15	1.00	10	2.25
水準 3	20	1.25	15	2.5

表.3 L27(3<sup>13</sup>)直交表への各因子の割付

列番	1	2	5	12
因子	縁部開角	玉縁半径	縁部 面取り半径	縁厚
Run01	10	0.75	5	2.00
Run02	10	0.75	10	2.25
Run03	10	0.75	15	2.50
Run04	10	1.00	5	2.50
Run05	10	1.00	10	2.00
Run06	10	1.00	15	2.25
Run07	10	1.25	5	2.25
Run08	10	1.25	10	2.50
Run09	10	1.25	15	2.00
Run10	15	0.75	5	2.25
Run11	15	0.75	10	2.50
Run12	15	0.75	15	2.00
Run13	15	1.00	5	2.00
Run14	15	1.00	10	2.25
Run15	15	1.00	15	2.50
Run16	15	1.25	5	2.50
Run17	15	1.25	10	2.00
Run18	15	1.25	15	2.25
Run19	20	0.75	5	2.50
Run20	20	0.75	10	2.00
Run21	20	0.75	15	2.25
Run22	20	1.00	5	2.25
Run23	20	1.00	10	2.50
Run24	20	1.00	15	2.00
Run25	20	1.25	5	2.00
Run26	20	1.25	10	2.25
Run27	20	1.25	15	2.50

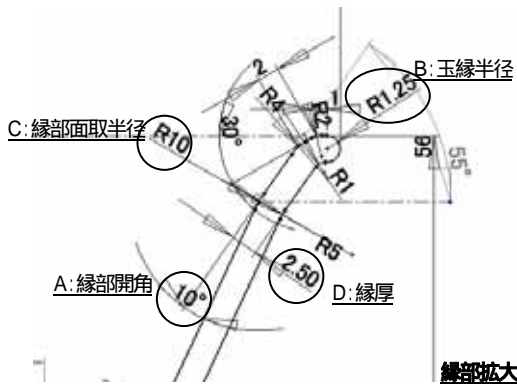
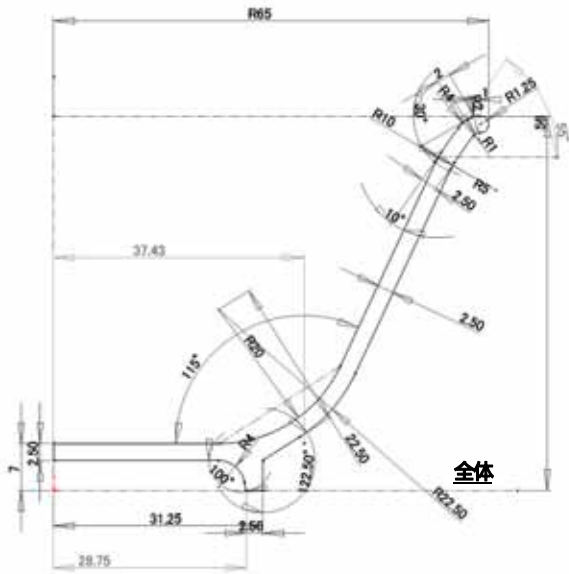


図2 食器形状における各形状決定因子の位置。(Run08)  
(A:縁部開角, B:玉縁半径, C:縁部面取半径, D:縁厚)

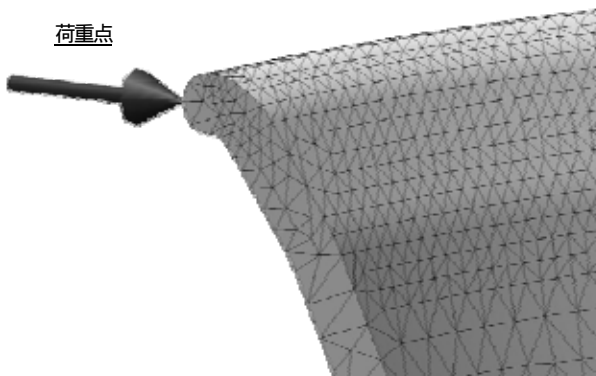


図3 形状データのメッシュ分割の例(Run08).

### 2.3.2 有限要素法

有限要素法による応力解析は COSMOS DesignSTAR (SRAC 社)を用いて実施した。解析に用いる試料の形状は直交表に基づき作製した断面を 360° 回転させることで作製した。実際の解析においては衝撃試験における応力分布が打撃方向に対して左右対称であることを考慮し、試料形状を半分に分割し分割面を対象拘束を行うことで解析の効率化を図った。荷重点付近のメッシュ分割の例を図3に示す。

試料の拘束条件は衝撃試験を模して底面に仮想壁を設定して法線拘束を行い、バックストップが接する部分も法線拘束とした。この状態で衝撃試験においてハンマーが打撃する試料縁部に 100N の集中荷重を負荷した。試料拘束の様子を図4に示す。

表3に示した各試料において、荷重負荷時に発生した最大引張応力の大きさを、さらに製品重量を分散分析することで各形状決定因子が試料に発生する最大引張応力や製品重量に与える影響について検討した。

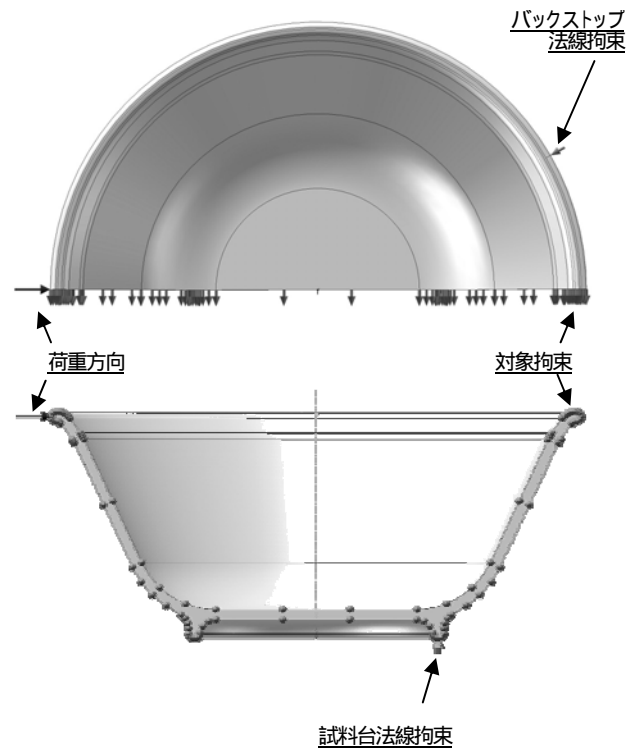


図4 試料拘束と荷重負荷方向

### 3. 結果と考察

#### 3.1 破壊解析

##### 3.1.1 亀裂進展パターン

強化磁器碗を衝撃試験によって破壊したときに現れる亀裂進展パターンを図5に示す。一般的に、強化磁器碗の衝撃試験で観察される亀裂は3種に分類できる。図中Aで示した打撃点付近から食器中央部を通過する亀裂、Bで示す打撃点付近からバックストップへ向けて進展する亀裂、そして亀裂Bから分岐し外縁部へ向かうCである。これらの亀裂の発生は試料の衝撃強さと関係している。

表4に観察された亀裂パターンで分類した衝撃強さの平均値を示す。亀裂A,Bのみが観察された試料群に対し亀裂Cも発生する試料群の平均衝撃強さが高いことから亀裂Cは衝撃強さ強い試料で発生しやすいことがわかる。なお普通磁器の代表的な破壊である亀裂Aのみの発生は強化磁器食器ではほとんど無く、亀裂A,Bが同時に観察されることがほとんどである。

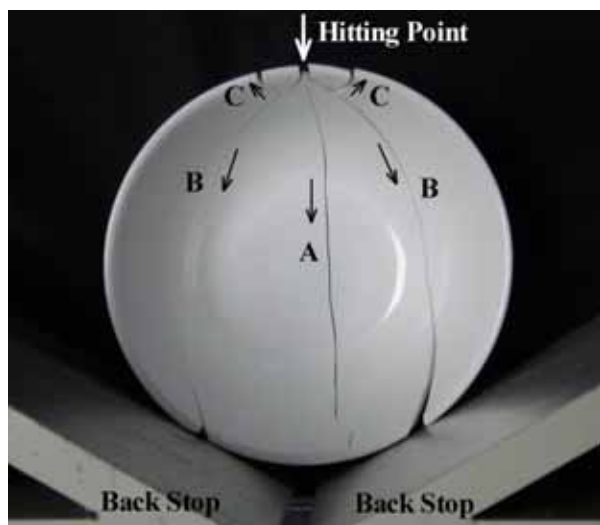


図5 衝撃試験における亀裂進展パターン。

表4 強化磁器碗の亀裂パターンと衝撃強さの関係

破壊パターン	破損個数	平均衝撃強さ
亀裂A,B	11	0.43J
亀裂A,B,C	8	0.51J
異常破壊	1	0.36J

##### 3.1.2 破面解析

衝撃試験における強化磁器食器の破壊起点を明らかにするために、破断面の観察を行った。図6に衝撃試験で破壊した強化磁器碗の破断面の写真を示す。図中、破壊起点として示した部分から放射状に広がるハックルが確認できる。つまり、衝撃試験における強化磁器の破壊は、打撃点の反対の面から始まっており、試料の変形によって碗内側に生じる引張応力が初期破壊の原因となっていることが判る。

破壊起点をより明確にするために破壊起点付近の釉層を金属顕微鏡で観察した。図7において、釉層中の気泡から黒矢印で示すように線状の模様が伸びていることが判る。気泡から伸びる線状の模様はウェイクハックルと呼ばれる脆性破面の特徴で、ウェイクハックルが伸びる方向に亀裂が進展したことを示している。放射状に広がるウェイクハックルの収束点から、破壊起点は釉層表面に存在することが明らかになった。

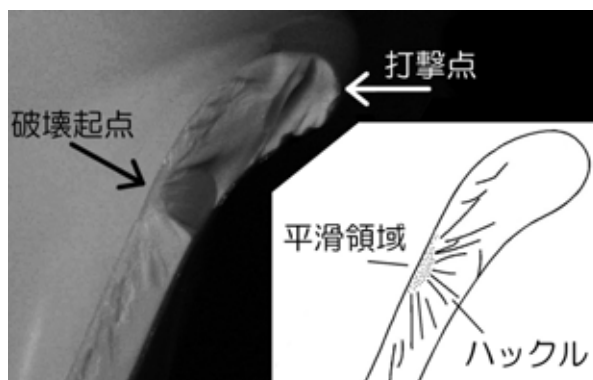


図6 強化磁器碗の破断面。

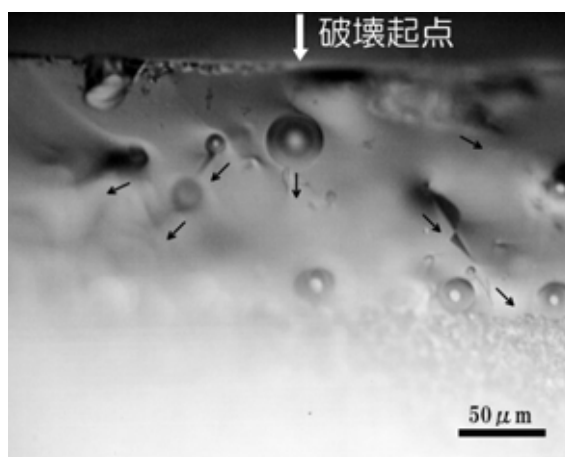


図7 破壊起点付近の釉層の金属顕微鏡写真

### 3.1.3 ハイスピードカメラによる破損の観察

ハイスピードカメラにより 1200fps で撮影した衝撃試験における強化磁器碗の破壊の様子を図8に示す。最上段はハンマーが試料に衝突する直前の状態であり、3/1200で示した3段目では試料に亀裂が僅かながら認められた。そこで1段目と3段目の写真を合成し比較することで衝撃試験における試料の変形を調べた。図9における試料部で灰色の部分は2つの試料で重なり合った部分、黒い部分は変形前の形状のみが確認される部分、そして白い部分は変形後の形状のみが確認される部分を示している。図から明らかなように試料は打撃により左上方向に変形をしており、変形量は少なくとも1mm以上ある。このように、破面解析で明らかになった試料を破壊に導く変形を直接確認することができた。

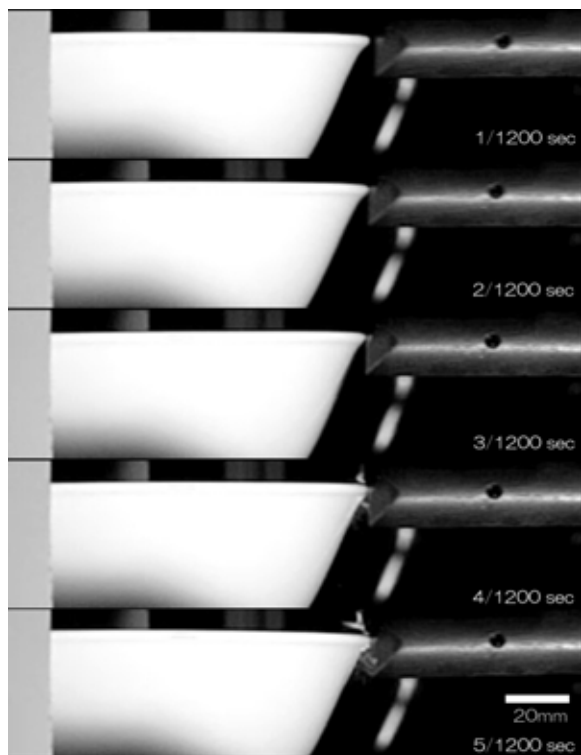


図8 強化磁器碗の衝撃試験における破損の様子(1/1200fps).

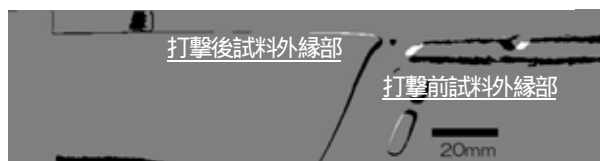


図9 強化磁器碗の衝撃試験における変形.

## 3.2 応力解析塗料による応力観察

### 3.2.1 塗料の乾燥時間と歪感度

応力解析塗料は塗布後、乾燥、硬化が徐々に進行する為乾燥時間によって歪感度が異なる。図10に乾燥時間と歪感度の関係を示す。縦軸は(1)式で算出した歪であり数字が小さいほど歪か小さいことを示す。塗布後16時間では亀裂が発生する歪量が $2700 \mu \epsilon$ 以上であったものが、乾燥時間の経過と共に低下し、乾燥40時間以降は $1600 \mu \epsilon$ 前後で安定した。そこで、他の試験においては全て40時間以上の乾燥を行った。

### 3.2.2 塗料の膜厚と歪感度

応力解析塗料の塗装回数と膜厚、歪感度の関係を図11に示す。プロット中のx軸方向の範囲はそれぞれの塗装回数における膜厚の最大、最小値を、Y軸方向の範囲は検出できた最小歪の範囲を示している。塗装回数8回で平均膜厚は0.086mmであり、その後、9、10、12と塗装

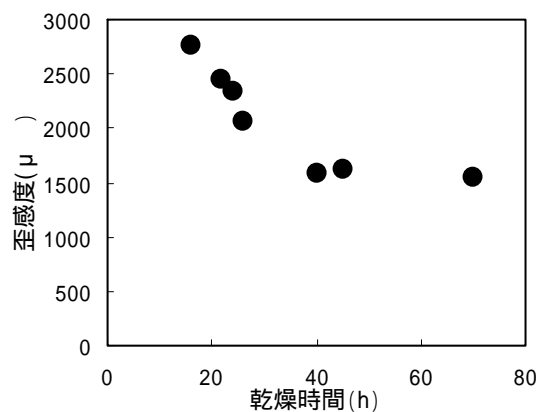


図10 乾燥時間と歪感度の関係(ST-25).

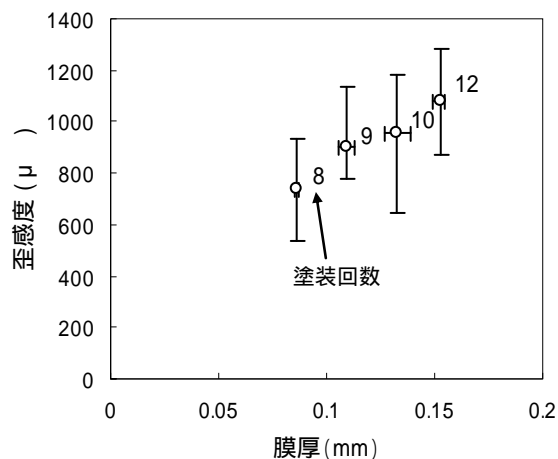


図11 塗装回数と塗膜厚、歪感度の関係(ST-15).

回数を増やすに従い膜厚は 0.110, 0.132, 0.153 と増加した。また、それぞれの塗装回数における膜厚のブレ範囲は最もブレが大きかった塗装回数 10 回でも 0.012mm 程度と狭く、塗装回数で膜厚が細かく制御可能であった。

本実験の範囲において、歪感度は膜厚が薄くなるほど良くなる傾向が確認されるが、それぞれの膜厚における歪感度のブレ範囲は大きい。ブレの原因は測定時の環境の変化が影響していると考えられる。歪感度の測定順序と歪感度の関係を示すために、4 種の膜厚それぞれで 3 枚ずつ測定した、全 12 回の測定結果を測定順序と共に図 12 に示す。図から明らかなように、それぞれの膜厚において測定順序が遅くなるに従い歪感度が鈍くなっている。

歪感度が測定中に変化した原因として室温の上昇と、応力緩和特性の 2 つが考えられる。応力解析塗料は線膨張係数がメーカーのカタログ値で  $1.5 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$  程度有り、今回、基材として使用したスライドガラスの平均線膨張係数  $8.21 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  と比較して大きい。そのため乾燥温度よりも低い温度で歪測定を行うことで塗膜にあらかじめ引張応力を負荷することが可能となり、歪感度が向上する。一般に、空冷増感法と呼ばれる方法である。本測定において試験開始時の室温は  $17^{\circ}\text{C}$  であり乾燥温度より  $3^{\circ}\text{C}$  低い状態であった。しかし 1 時間程度の測定の間に室温が上昇した結果、試験終了時の室温は  $19^{\circ}\text{C}$  となり、乾燥温度との差は  $-1^{\circ}\text{C}$  となった。塗料中に熱膨張差により発生した引張応力が小さくなったことが歪感度低下の主な原因と考えられる。また、応力解析塗料は非常に脆いものの、樹脂であり粘弾性挙動を示すため、時間経過と共に応力緩和が発生する。恒温恒湿器から取り出し、測定室との温度差で生じた引張応力が、測定までの時間経過と共に緩和されたことも歪感度低下の原因と考えられる。

和が発生する。恒温恒湿器から取り出し、測定室との温度差で生じた引張応力が、測定までの時間経過と共に緩和されたことも歪感度低下の原因と考えられる。

### 3.2.3 基材と応力塗料の関係

空冷増感法は基材と塗膜の熱膨張差を利用していることから基材が異なる場合には効果が異なると予想され、また、基材の表面状態による塗膜の密着性も歪感度に影響することが考えられる。前節までは応力塗料の性質を把握するために、入手が容易なスライドガラスを用いてきたが、本研究の目的は強化磁器食器の歪測定である。スライドガラスと本研究に用いた強化磁器の線膨張係数は、それぞれ、 $8.27 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、 $5.56 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  であり、スライドガラスの非常に滑らかな表面に比べると強化磁器の釉面は荒れている。なお、皿から切り出した強化磁器試料の厚さは平均で 3.58mm であった。両試料における歪感度測定の結果を図 13 に示す。横軸は測定の繰り返し数を示している。スライドガラスの歪感度は平均で  $1,027 \mu \epsilon$ 、強化磁器の歪感度は平均で  $1,131 \mu \epsilon$  であり、スライドガラスのほうが若干歪感度が良い結果となった。線膨張係数だけを考慮すると強化磁器のほうが良い感度を示しそうであるが結果は逆となっており、塗料の密着性等が影響していると推察される。なお本測定において室温は  $18^{\circ}\text{C}$  で安定しているが、両試料で測定順による感度の低下が確認されることから、恒温恒湿器から取り出し測定を行うまでの経過時間により応力緩和が発生していることが改めて確認された。

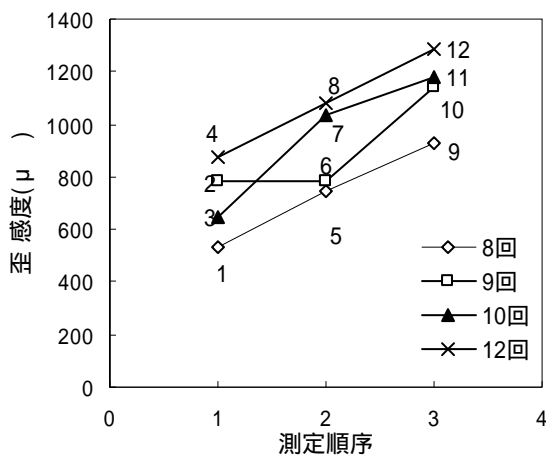


図 12 応力塗料の測定順序による歪感度変化(ST-15).

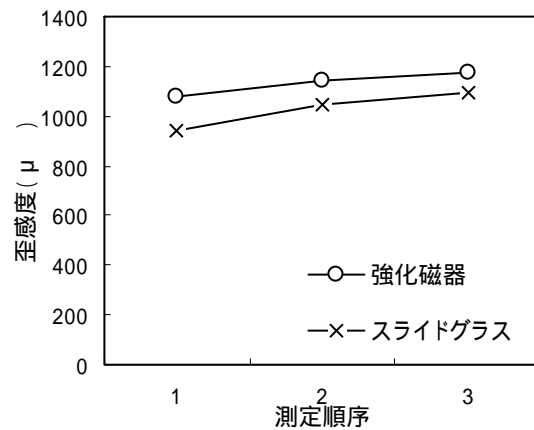


図 13 スライドガラスと強化磁器の歪感度



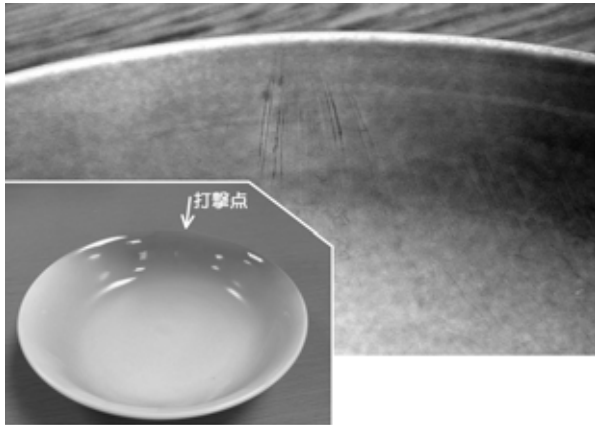


図 14 応力解析塗料の亀裂パターン。

### 3.2.4 応力解析塗料による強化磁器食器の歪観察

衝撃試験終了後に食器内側の応力解析塗料に現れた亀裂パターンを図 14 に示す。亀裂方向は最大引張応力方向に対して垂直に入ることから、食器の縁への衝撃負荷時には最大引張応力が食器の縁に平行な方向へ発生していることがわかる。また、亀裂の線密度は破壊時の破壊起点付近で最も密になっており、応力解析塗料による歪解析が強化磁器においても利用可能であることが確認された。

しかしながら、3.2.1～3.2.3 項で示したように応力解析塗料は試験温度のわずかな変化や試験までの経過時間によって歪感度が増加するため、歪量を精度良く測定することは困難であった。

## 3.3 形状シミュレーション

### 3.3.1 FEM 解析例

FEM による荷重負荷時に強化磁器食器に生じる応力解析の結果の例を図 15 に示す。図中、赤い部分は引張応力、青い部分は圧縮応力の発生を示す。引張応力は応力解析塗料での解析を基に X 軸方向の引張応力で評価している。27 種の形状のいずれにおいても最大引張応力は荷重点の反対側の内側表面に現れ、実試料による衝撃試験における破壊起点の位置と傾向が一致している。一定荷重を与えたときに算出される最大引張応力が小さければ、その形状は破壊荷重までにまだ余裕があり、衝撃強さも強いと推測される。明確な引張応力はバックストップによる試料支点の内側にも観察され、さらに荷重点と

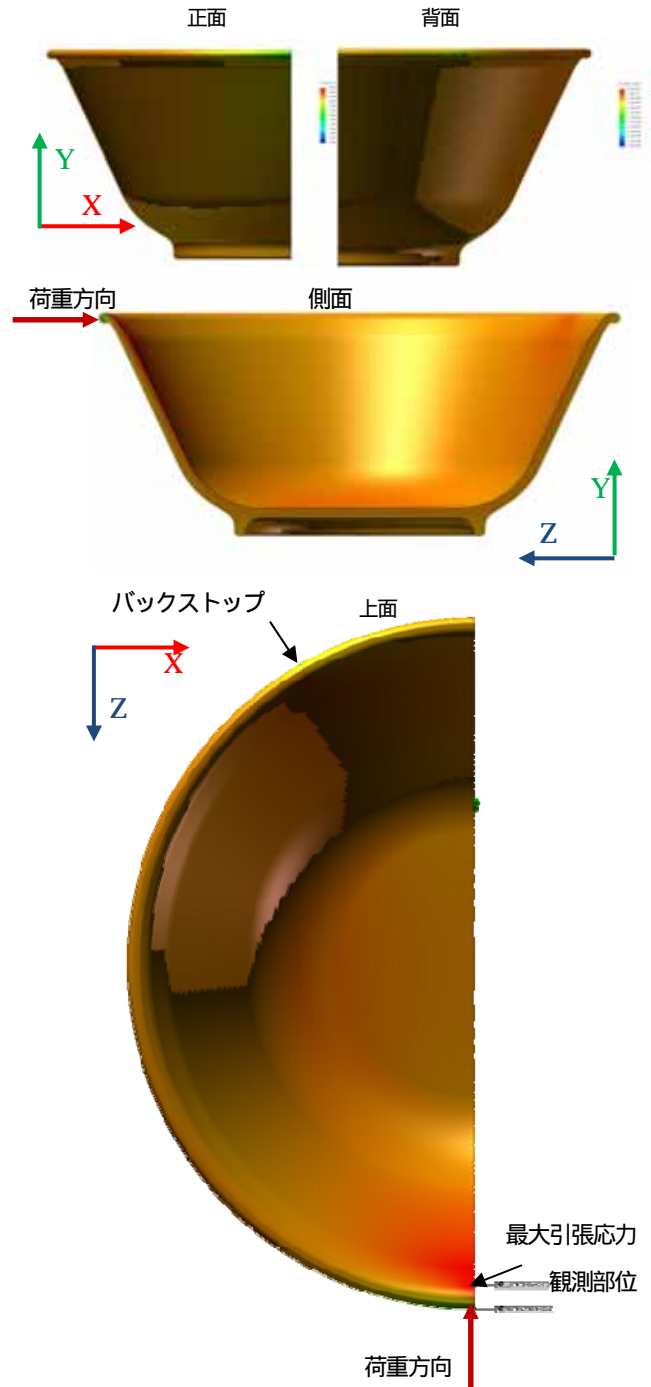


図 15 FEM による応力解析結果例

バックストップを結ぶ線上の底面付近にも確認できる。これらの引張応力の分布は衝撃試験において亀裂が進展する領域と、ほぼ一致している。また圧縮応力は荷重点付近とバックストップ接触部付近にのみ確認された。



### 3.3.2 最大引張応力の分散分析

27種の形状のFEM解析結果について、それぞれの形状モデルに発生した最大引張応力に関する分散分析を実施した。なお27種の形状における最大引張応力の範囲は68~78MPaであった。図16は最大引張応力に対する各形状因子の寄与率を示している。危険率5%で行った分散分析の結果、最大引張応力に最も影響する因子は玉縁の半径であった。寄与率は50%であり支配的因子であることが判る。縁部開角と縁部面取り半径の寄与率はそれぞれ18%と14%であった。分散分析の結果、縁厚に関しては水準間の差は棄却されほとんど影響しないことが明らかとなった。なお、各形状因子間の交互作用は確認されなかった。

図17に各形状因子の効果を示す。このグラフは各形状因子における3水準それぞれの平均を比較したものである。玉縁半径は半径が大きくなるほど最大引張応力は小さくなっており、打撃を受ける部位が厚くなるほど食器が強くなるという妥当な結果が確認された。縁部開き角に関しては開き角が小さくなるほど衝撃強さが強いという結果

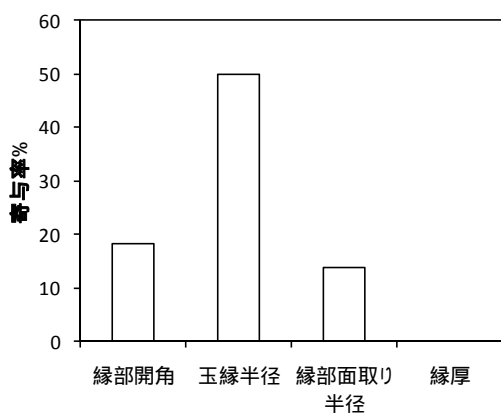


図16 最大引張応力に対する各因子の寄与率

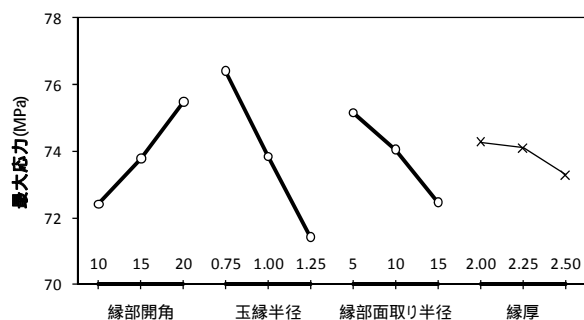


図17 最大引張応力に対する各因子の効果

を示した。しかしながら、一般的には縁部開角は大きいほど衝撃強さが高いとされており、シミュレーションにおける結果と矛盾が生じている。この因子に関しては後で詳細に検討を行う。縁部と胴部の接続部分のなめらかさを示す縁部面取り半径に関しては大きいほど最大引張応力が小さくなった。縁部と胴部の接続部の角には引張応力が集中する傾向があり、面取り半径が大きくなることでより広い面積に応力が分散されたことが原因と考えられる。玉縁直下の縁厚に関しては危険率5%の分散分析による有意差は棄却されたものの縁厚が厚くなるに連れ最大引張応力は小さくなる傾向を示した。

一般的な強化磁器食器のデザインセオリーと矛盾が生じた縁部開角に関して追加のシミュレーションを行った。縁部開角の影響を詳しく調べるために開き角が更に小さい5°、開角なしの0°そして閉じる方向となる-5°の3水準のシミュレーションを追加した。同時に最も影響の大きかった玉縁半径も0.75, 1.00, 1.25mmの3水準で変化させ、3×3の9つの形状について検討した。残りの形状因子については、それぞれ最も良い結果を示した縁部面取り半径15mm、縁厚は2.50mmに固定した。この9形状におけるFEM解析の結果、最大引張応力の範囲は表5に示すように79~119MPaであった。図18に2因子の最大引張応力に対する影響を示す。縁部開角においては5°の平均が最も小さい最大引張応力である85MPaを示した。しかしながらこの値は10°から20°の範囲で試験した前回の27形状における最大引張応力の範囲68~78MPaに比べ大きくっており縁部開角が10°より小さくなると荷重が集中しやすくなり製品強さが低下することが

表5 玉縁半径と縁部開角の組み合わせによる最大引張応力の変化

		玉縁半径(mm)			平均
		0.75	1	1.25	
縁部開角 (°)	-5	119MPa	112MPa	105MPa	112.0
	0	107MPa	101MPa	95MPa	101.0
	5	91MPa	85MPa	79MPa	85.0
平均		105.7	99.3	93.0	

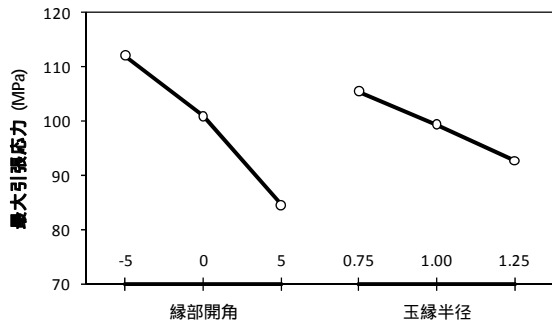


図18 最大引張応力に対する玉縁半径と縁部開角の影響

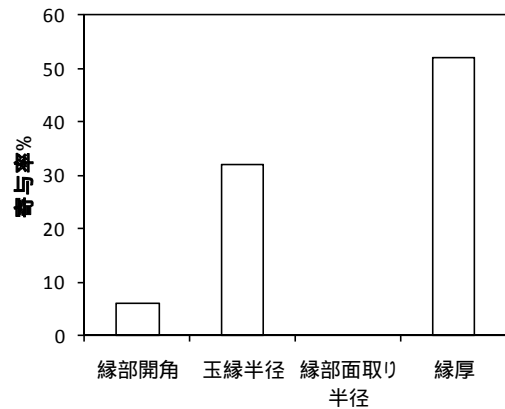


図19 製品重量に対する各因子の寄与率

示唆された。この縁部開角 0° 付近における縁部開角の影響は極めて大きく、前回のシミュレーションで最大の寄与率を示した玉縁半径よりも水準間の変化率が大きくなっている。縁部開き角-5° においては、5° に比べ 30%も最大引張応力が増加し、前回の 10° から 20° の変化時における 4%の増加率と比較して影響が大きくなったことは明確である。同時に、玉縁半径の影響も大きくなっており縁部開角が食器の強さに極めて強い影響を与えることが明らかになった。

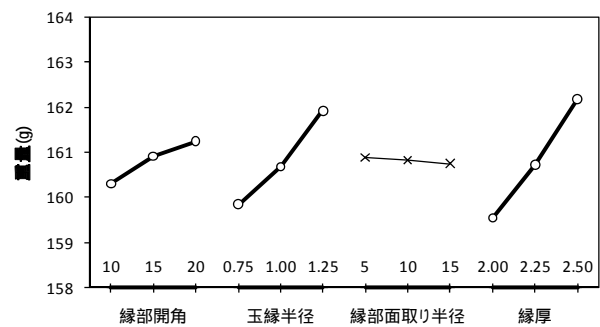


図20 製品重量に対する各因子の効果

### 3.3.3 製品重量の分散分析

それぞれの形状モデルの重量に関する分散分析を行った結果を図19、20に示す。図19は重量に関する各形状因子の寄与率を示している。最大引張応力と同様に危険率5%で行った分散分析の結果、重量に最も影響する因子は縁厚であった。寄与率は52%であり支配的因子である。玉縁半径の寄与率は32%と2番目に大きく縁部開角は6%と寄与率は低い。また、縁部面取り半径における有意差は棄却された。なお各形状因子間の交互作用に関しては、確認されなかった。

図20は重量に対する各形状因子の効果を示す。もっとも寄与率の高い縁厚に関しては縁厚が厚くなるほど、2番目に寄与率の高い玉縁半径に関して半径が大きくなるほど重量が増加した。縁部開き角に関しては若干ではあるが開き角が小さくなるに従い重量が軽くなっている。また分散分析で棄却された縁部面取り半径に関しては水準間でほとんど変化が無いことが判る。

各形状データにおける最大引張応力と重量に関する分析結果を総合して考えた場合、最適な強化磁器の形状

因子は次のようになる。縁厚に関しては最大引張応力にはほとんど影響せずに重量に影響することから、薄くすることで製品強さを損なうことなく重量を軽減できる。また縁部開角は10°付近にすることで、製品強さを高めつつ重量の低減が実現できる。縁部の面取り半径に関しては製品強さだけに影響し、大きいほうが有利となる。最後に玉縁半径に関しては製品強さの向上に最も寄与するが同時に重量も増加させるため、製品の重量と強さ、より重視する項目に応じて最適な半径を選択する必要がある。

### 4.まとめ

本研究では食器形状による製品強さ向上のために、3種のアプローチを実施した。

破面解析は実際に破損した試料の破壊起点や亀裂進展方向の特定に有効であった。特に気泡を含むガラスで構成される釉層には亀裂進展の痕跡が明瞭に残っており、どのような力で破壊が生じたか、その製品の弱点がどこにあるのか判断するのに効果的であった。

応力解析塗料による歪解析は微小な変形で破損が生じる磁器においても利用可能であった。荷重によって引張荷重の集中する部分が非破壊で特定可能であり、また亀裂の生じた範囲から試料の変形量も半定量が出来た。変形は磁器食器を破損に導く引張応力の原因となるが、破損した試料の破面解析では変形量の確認は困難であり、変形のし易さを確認できる本手法は製品強さ向上に有効な分析手法といえる。

有限要素法による解析において、強化磁器の製品強さに最も影響するのは玉縁の半径であった。玉縁半径は同時に製品重量も増加させるので強さと重量のバランスで適切な半径を選択する必要がある。縁厚に関しては製品強さにほとんど影響しなかった、よってこの玉縁直下の肉厚を削ることで製品強さをほとんど変えることなく製品の軽量化が期待できる。縁部開角に関しては $-5^{\circ}$  ~  $20^{\circ}$  までの調査で  $10^{\circ}$  付近が最適であり、 $5^{\circ}$  以下で製品強さを大きく低下させることが明らかになった。製品胴部の開き角が  $115^{\circ}$  であるので最終的な最適な縁部開角は底面から  $125^{\circ}$  付近となる。胴部と縁部の開きを結ぶ角部分は応力が集中しやすいため、出来るだけ面取り半径を大きくすることで製品強さの向上が期待できる。これらの、結果を確認するためには有限要素法によって導き出した理想形状をもつ食器を実際に作成し実試料における試験を今後、実施する必要がある。このためには、焼成後に理想形状とするために、焼成変形等を考慮した高精度の型作製が必要である。

今後、本研究成果を基に、より軽く強い磁器食器の形状設計を行っていく予定である

## 参考資料

### 破壊解析

- 1) V. D. Frechette, 脆性材料破面解析マニュアル, 新技術開発センター
- 2) George D. Quinn, Fractography of Ceramics and Glasses, NIST
- 3) 吉田 亨, 破断面の見方, 日刊工業新聞社

### 応力解析塗料

- 4) 菅野昭, 井上康博, 材料, 30, 309-314 (1981)
- 5) 畑俊明, 紅林秀治, 静岡大学教育学部研究報告

自然科学篇, 38, 77-86 (1987)

### 実験計画法

- 6) 田口玄一, 直交表による実験のわりつけ方, 日科技連
- 7) Martin W. Weiser, Keith B. Fong, Am. Ceram. Soc. Bull., 72, 87-92 (1993)
- 8) Martin W. Weiser, Keith B. Fong, Am. Ceram. Soc. Bull., 72, 83-86 (1994)