

有限要素法を用いた耐熱陶器の形状による強度評価

林 茂雄*

Computer Simulation for Thermal Stress of Heat-resistant Ceramic Ware by the Finite Element Method

Shigeo HAYASHI

1. はじめに

近年のコンピュータの高性能化にともない、製品の性能をシミュレーション解析することが可能となってきた。特に、3次元CAD(computer-aided design, コンピュータを利用した設計)と連携したCAE(computer-aided engineering, コンピュータ援用エンジニアリングシステム)を利用した解析は、自動車産業や電気産業等では必須となっている。このようにCAEを用いたシミュレーション解析が、工業製品で一般化してきている。一方、陶磁器産業においてもアルミナ強化磁器について、衝撃に強い食器の縁形状を設計するために、食器の先端に負荷を与えた場合の応力分布状態のシミュレーションが試みられている¹⁾。そこで、三重県の陶磁器産業における主要生産品である耐熱陶器(土鍋)について、その耐熱性の評価にCAEを利用したシミュレーション解析の適用が可能であるかを検討したので報告する。

2. 解析方法

2.1 定常熱伝導解析と熱応力解析

耐熱陶器の製品強度は、機械的強度と使用時の加熱状態における熱衝撃強度を考慮しなければならない。機械的強度については、製品に欠点でもない限り問題とならないので、加熱時の熱衝撃強度が解析対象となる。一般に用いられているCAD/CAM/CAE統合システムでは、熱伝導解析であれば、定常状態、すなわち、熱的に平衡状態における有限要素解析が行える。本研究では、(株)日本ユニシスの統合型3

次元CADシステムであるCADCEUS Ver.6.4Bを用いて3種類の形状が異なるモデル(耐熱陶器)について、定常熱伝導解析を行った。解析した3種類のモデルであるお椀型、浅型と深型モデルをそれぞれ図1から図3に示す。

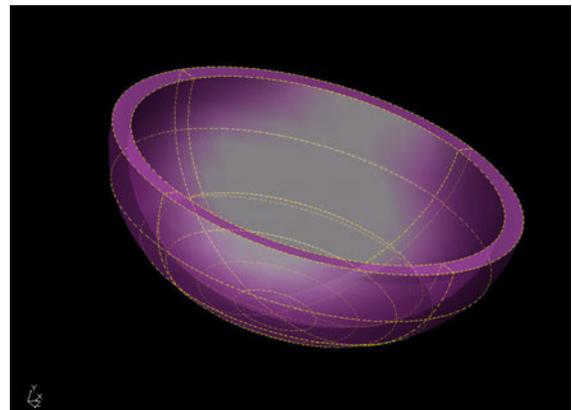


図1 お椀型モデル

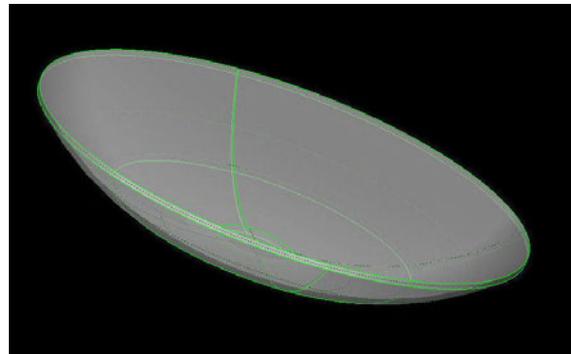


図2 浅型モデル

そして次に、金属材料のような弾性体であるとの仮

* 窯業研究室応用技術グループ

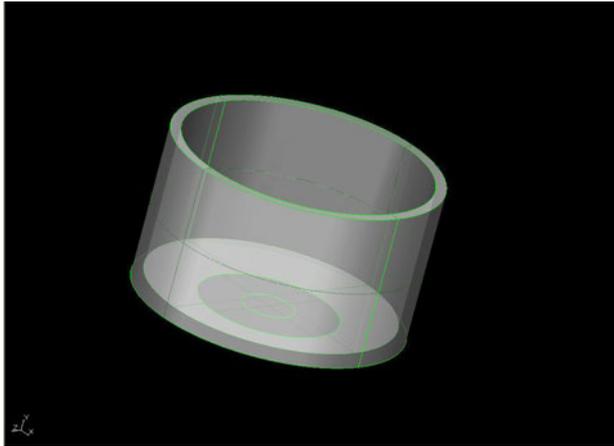


図3 深型モデル

定のもとに熱応力解析を行うことで、耐熱性（耐熱強度、加熱時に破壊する可能性）を評価した。なお、解析に際して用いた材料の物性値²⁾を表1に示す。また、温度拘束条件として、耐熱陶器の底面がドーナツ円状に500℃で加熱されたとし、雰囲気温度は20℃で、雰囲気との熱伝達係数は1W/m²Kとした。

表1 材料の物性値

| | |
|-------|----------------------------------------|
| ヤング率 | 2.599 × 10 ⁸ Pa |
| ポアソン比 | 0.173 |
| 熱膨張係数 | 1.82 × 10 ⁻⁶ /°C (at 400°C) |
| 熱伝達率 | 0.0078 W/mm·K |

なお、CADCEUSの有限要素解析のエンジンは米国のNASAが開発したNastranである。

2. 2 非定常熱伝導解析と熱応力解析

熱画像測定装置を用いて、土鍋をカセットコンロにて空焚きした場合（図4）の温度の経時変化を測定した（図5）。その結果より、実際に耐熱陶器（土鍋）を加熱する場合、ガスの炎等の熱源が直接当たる場所が最初に高温となり、時間とともにそれ以外の場所が加熱されることが当然ながらわかる。また、加熱して50～100秒後が加熱面とその周囲との温度差が大きく、熱衝撃も大きいと考えられる。

耐熱陶器が加熱時に破壊に至る場合の多くは、加熱初期であり、製品の一部分が高温状態の時であることが経験的に知られている。これは、素材の問題を除けば、製品形状に原因があると考えられる。

そこで、製品形状による耐熱性の違いを評価するために、土鍋の底と胴との角度を変化させたモデルと土鍋の直径を変化させたモデルについて、（株）ト



図4 土鍋の空焚き時の熱画像測定

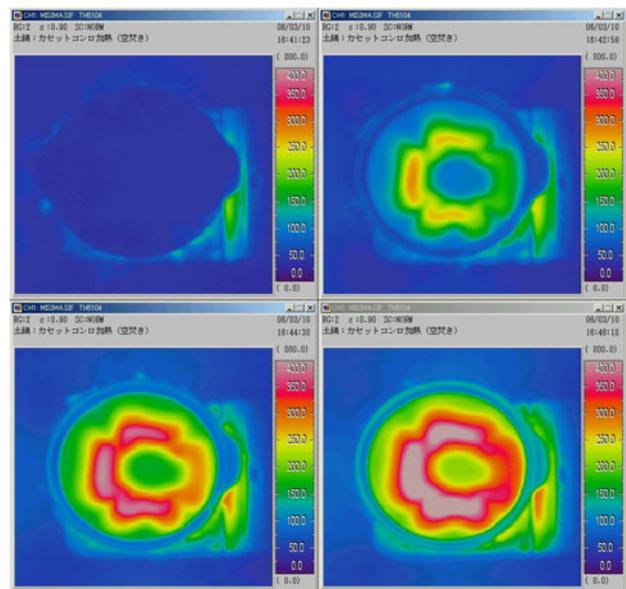


図5 土鍋空焚き時の熱画像（左上：加熱開始時，右上：加熱50秒後，左下：加熱100秒後，右下：加熱150秒後）

ヨタケラムの3次元CADであるCealumXXenとクボタソリッドテクノロジー(株)の有限要素解析システムである3GAを用いて、加熱開始から熱的平衡状態に達するまでの任意時間における熱伝導解析（非定常熱伝導解析）と熱応力解析を行った。

具体的には、土鍋の底と胴との角度を94°～109°まで5°間隔で増加させたモデル（図6）と土鍋の底の直径を164mm～284mmまで40mm間隔で増加させたモデル（図7）について、2.1と同じ材

料物性と加熱条件で解析を行った。耐熱強度の評価は、まず、土鍋を 500℃で加熱した時の 100 秒後における非定常熱伝導解析を行い、次にその結果から土鍋を弾性体と仮定して熱応力解析を行った。

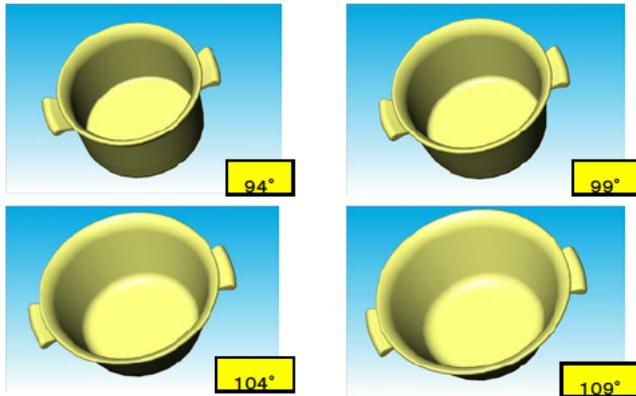


図 6 土鍋の底と胴との角度を変化させたモデル

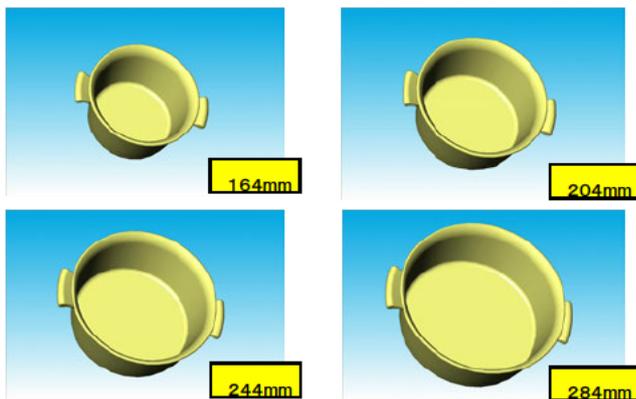


図 7 土鍋の底の直径を変化させたモデル

3. 結果と考察

3. 1 定常熱伝導解析と熱応力解析

定常状態での熱応力解析結果として、お椀型、浅型と深型モデルの変位表示を図 8 から図 10 にそれぞれ示す。

お椀型と浅型の 2 つのモデルで形状が大きく異なっているにもかかわらず、熱的に平衡状態であるから、図 8 と図 9 は、同じような熱応力変位図となっている。また、深型モデルは他の 2 つのモデルと異なり、底に接する胴部分にも比較的大きな応力が発生していることがわかるが (図 10)、熱応力変位図全体としては他の 2 つのモデルと大きな違いはない。それゆえ定常解析を用いた土鍋の形状の違いによる耐熱性の評価から、その破壊を予測することは困難であることがわかった。

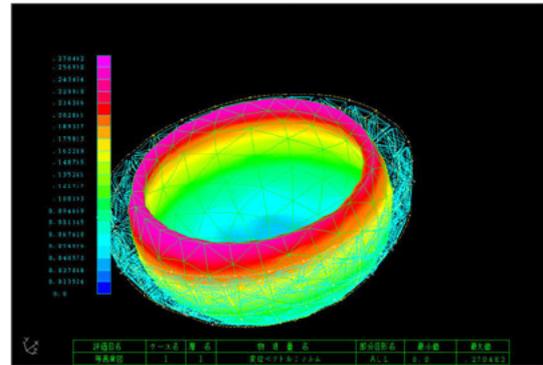


図 8 お椀型モデルの熱応力解析結果

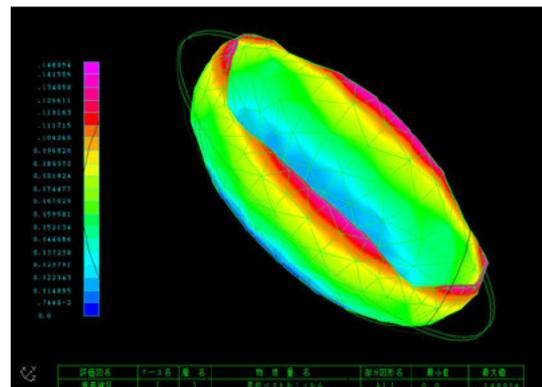


図 9 浅型モデルの熱応力解析結果

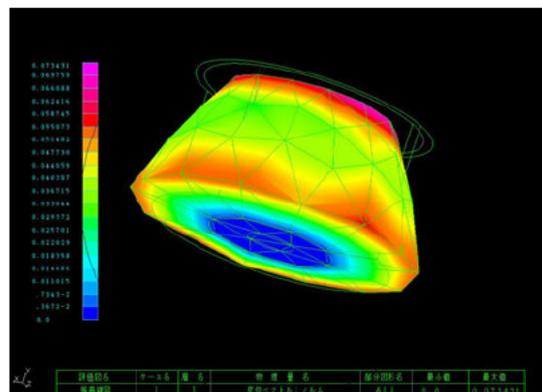


図 10 深型モデルの熱応力解析結果

3. 2 非定常熱伝導解析と熱応力解析

土鍋の底と胴の角度を変化させたモデルの熱応力解析結果の一部について、図 11 から図 13 に底と胴の角度を 94°、99° と 104° に変化させた場合の加熱 100 秒後の熱応力解析で求めた降伏予測応力であるフォンミーゼス応力の表示結果をそれぞれ示す。

角度を変化させたモデルの非定常での熱応力解析の結果より、角度が 99° のモデル (図 12) は、角度が 94° のモデル (図 11) と比べて、底と胴の接

合部分の応力が小さく、底部分の応力も小さいことから、耐熱性に優れることがわかった。実製品においても角度が 90° に近いものが破壊する機会が多く、同じ素材であっても角度が 90° よりやや大きいものの方が破壊しないという実例があったことから本解析結果は妥当であるといえる。

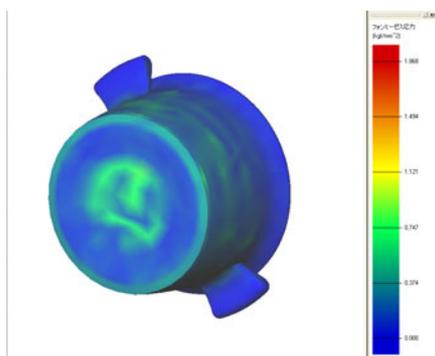


図 11 熱応力図（底と胴の角度が 94° のモデル）

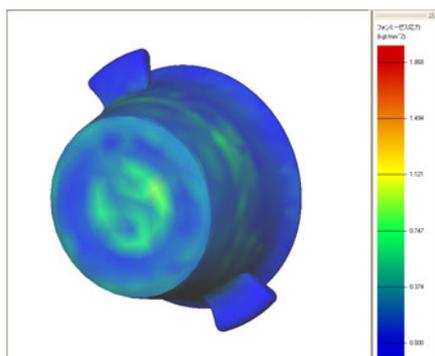


図 12 熱応力図（底と胴の角度が 99° のモデル）

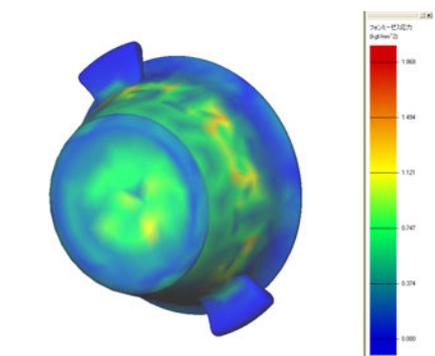


図 13 熱応力図（底と胴の角度が 104° のモデル）

次に、土鍋の底の直径を変化させたモデルの熱応力解析結果の一部について、図 14 から図 16 に底の直径を 164mm, 204mm と 244mm に変化させた場合の加熱 100 秒後の熱応力解析で求めたフォンミー

ゼス応力の表示結果をそれぞれ示す。

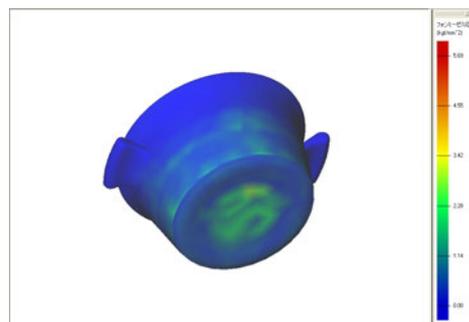


図 14 熱応力図（底の直径が 164mm のモデル）

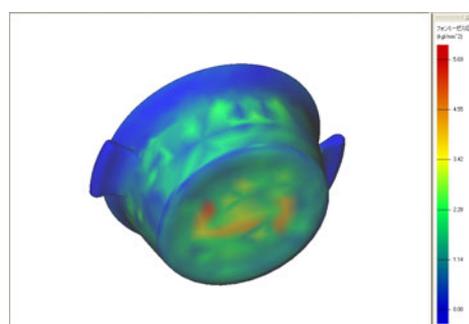


図 15 熱応力図（底の直径が 204mm のモデル）

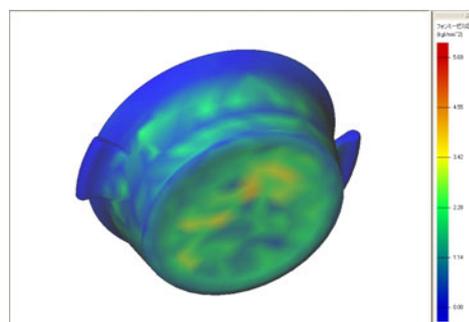


図 16 熱応力図（底の直径が 244mm のモデル）

底の直径を変化させたモデルの非定常での熱応力解析結果より、直径が大きくなるほど、底部分、特に中心近傍の応力が大きいことから、直径が小さいモデルの方が、耐熱性に優れることがわかった。実製品においても同じ形状の土鍋の場合、直径が大きくなるほど耐熱性が劣ることからも本解析結果は妥当であるといえる。

例えば、容量の大きな土鍋を設計する場合、単に容量の小さな土鍋の直径を長くするのではなく、底と胴の角度を 95° 程度にする、底の形状を平面ではなく曲面にする、あるいは素材の厚みを増やす等の

工夫をすることで、製品の品質化が期待できる。本研究における非定常熱伝導解析と熱応力解析を用いたシミュレーション解析は、これら形状に関する設計が製品強度に与える影響を予測するのに有効である。

4. まとめ

耐熱陶器を弾性体と仮定して、有限要素法を用いてシミュレーション解析を行ったところ、定常熱伝導解析では形状差による耐熱性の評価は不可能であった。一方、非定常熱伝導解析と熱応力解析を組み合わせることで、形状の異なるモデルについて耐熱性の評価が可能であることがわかった。この方法を用いることで、製品強度、特に加熱使用時の強度を予測することが可能となり、より品質の高い耐熱陶器の製品設計が可能になると期待できる。

謝辞

本研究を実施するにあたり、(株)トヨタケラム

とクボタソリッドテクノロジー(株)に CAE ソフトウェアの試用と技術提供でご協力をいただきました。また、鈴鹿工業高等専門学校 辻正利名誉教授(三重県科学技術振興センター工業研究部特別顧問)のご指導をいただきました。ここに紙面を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1)秋月俊彦ほか：“アルミナ強化磁器の品質向上”。長崎県窯業技術センター研究報告, 52, p15-20 (2004)
- 2)稲垣順一：“セラミックスの熱衝撃抵抗性と高周波特性に関する研究(Ⅱ)多孔質耐熱セラミックスの耐熱衝撃抵抗性と高周波特性”。三重県窯業試験場年報, 28, p11-19 (1993)

(本研究は法人県民税の超過課税を財源としていません)