陶磁器製耐熱食器の熱応力解析

竹内 繁樹　中尾 俊章　久野 徹

The Thermal Stress Analysis of Ceramic Heat-resistance Ware by Finite Element Methods

by

Shigeki TAKEUCHI, Toshiaki NAKAO and Toru KUNO

従来の耐熱食器の開発は、耐熱素地の開発を中心に行われてきた。そのため、熱応力についての定量的な議論が極めて少ない。そこで、電磁調理器による誘導加熱を想定して、陶磁器製耐熱食器に発生する熱応力について有限要素法で数値解析し、加熱方法の特性と食器の形状が、熱応力に及ぼす影響について調べた。食器の形状は、底面が円形、楕円、角形の 3 種類を選定し、側面は切立ちとした。その主要寸法は、各形状でほぼ同じ内容積となるようにした。解析により、発生する熱応力は、加熱初期に高い値を示し、極大値に至った後、時間とともに低下することがわかった。この極大値に注目して各モデルでの評価を行った。食器の形状が円形、楕円、角形の順に、発生する熱応力値は高くなった。円形、楕円モデルでは、形状パラメーターに対して比較的鈍感な傾向を示したが、角形モデルでは、形状パラメーターによる熱応力値への顕著な影響がみられた。

1. まえがき

近年、調理機器が多様化し、陶磁器製耐熱食器が様々な温度環境にさらされるようになってきた。しかし、従来の耐熱食器の開発は、耐熱素地を中心に行われてきた。そのため、熱応力破壊についての定量的な議論が極めて少なく、商品開発の技術的な課題となっている[1,2]。そこで、電磁調理器による誘導加熱を想定して、陶磁器製耐熱食器に発生する熱応力について有限要素法で数値解析し、その加熱方法の特性と食器の形状が、発生する熱応力に及ぼす影響について調べた。

2. 実験方法

2.1 数値モデルの作成

耐熱食器の形状をパラメーター化し、これらの値からその 3 次元形状を自動的に有限要素分割を行い、必要な拘束条件等を与えるプログラムを作成した。

食器の形状は、底面が円形、楕円、角形の 3 種類を選定し、側面は切立ちとした(図 1、2、3)。その主要寸法は、各形状でほぼ同じ内容積(約 2 リットル)となるようにした。数値モデルは、全形の 4 分の 1 形状を用いた(図 4)。その断面には、モデルの整合性を保つために必要な拘束条件を追加した。

形状パラメーターは、図 1、2、3 に示すように食器の形状を規定するもので、表 1 に示す値の範囲で解析を行った。有限要素分割は図 4 に示すように行った。

なお、本研究の数値解析では、有限要素法プログラムとして、米国 S.R.A.C 製 COSMOS/M Ver.1.70(32000 節点仕様)を使用した。

2.2 熱応力解析

誘導加熱の原理は、交流電流をコイルに流して磁力線を発生させる。この磁力線により、導電性の加熱対象物の中に渦電流を誘導し、その対象物の電気抵抗で熱を発生させる。したがって、絶縁体である陶磁器をこの方法で加熱するためには、底面に薄膜導電層を焼き付けるなどの加工が必要となる[3,4]。このことから、数値モデルでは、この薄膜導電層(ヒーター)の位置に相当する部位に加熱による温度として、想定される上限温度 500℃を与えた(表 2、図 4)。また、食器の初期温度は 20℃とし、空炊きした状態を想定した。

表1 各モデルの形状パラメーター　(mm)

	円形モデル	楕円モデル	角形モデル
底面寸法	R = 140	Ra=140～150	W=240～280
	———	Rb=100～120	D=210
高さ　H	56	70	70
厚さ　t	10～40	10～40	10～40
曲率半径　Rf	0～20	0～20	0～20
ヒーター寸法 HRo	60～90	60～90	60～90
HRi	25	25	25

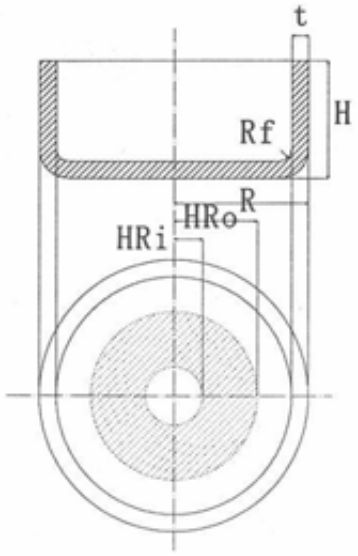

図1 円形モデルの形状パラメーター

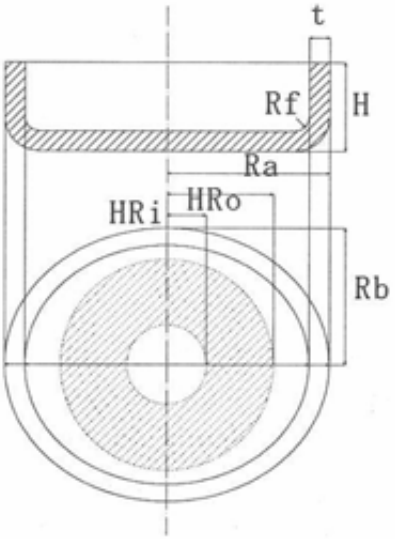

図2 楕円モデルの形状パラメーター

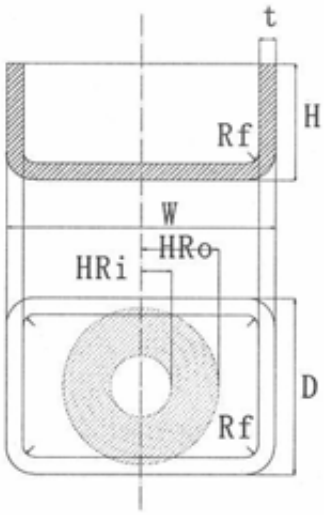

図3 角形モデルの形状パラメーター

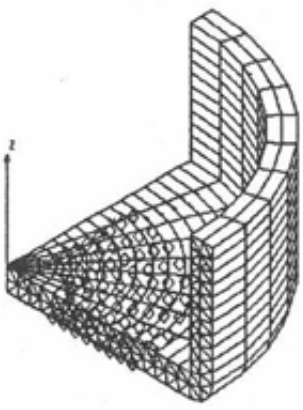

図4 有限要素分割例(円形モデル)
◇ : 500℃

表2 数値モデルの物性及び温度条件

物性及び温度条件	物性値、温度
ヤング率	20GPa
ポアソン比	0.20
熱伝導率	1.2W/(m℃)
比熱	1.0×10^{-3}J/(kg℃)
熱膨張係数	2.0×10^{-6}/℃
食器の初期温度	20℃
ヒーター部の温度	500℃

3. 実験結果及び考察

熱応力による破壊は、曲げ試験などにおける1軸応力が支配的な破壊と異なり、多軸応力状態で議論する必要がある[5]。また、現実の陶磁器の組織は、骨材、非晶質相、気孔などの複合化したものであり、破壊の起点になる欠陥は、ランダムに配向していると考えられる。これらのことを考慮すると、熱応力の評価については極めて複雑になる。そこで、単純化のため、von Mieses の降伏条件により、以下の式で定義される相当応力 σvon[6]を指標として評価することにした。σvon は、要素毎に軸応力から、次式で計算した。

$$\sigma von = \sqrt{\frac{1}{2}\{(\sigma x-\sigma y)^2+(\sigma x-\sigma z)^2+(\sigma y-\sigma z)^2\}+3(\tau xy^2+\tau xz^2+\tau yz^2)}$$

熱応力解析の結果、発生する熱応力は、いずれのモデルでも加熱初期に高い値を示し、極大値に至った後、時間とともに低下することがわかった(図 5)。したがって、熱応力による破壊は、加熱初期に発生する危険が高いと考え、σvon の極大値(以下 σmax とする)に注目して、食器形状が熱応力に及ぼす影響について評価した。

各モデルにおいて、σmax が最も高くなった場合を比較してみると、円形、楕円、角形の順に、発生する熱応力値は高くなった(図 5)。

また、それぞれのモデルにおいて、形状パラメーターが熱応力値へ及ぼす影響には差異がみられた(図 6、7、8、9)。

円形モデルは、形状パラメーターの変化に対して比較的鈍感な傾向を示した。厚さ(t)に対して、σmax はほぼ比例して変

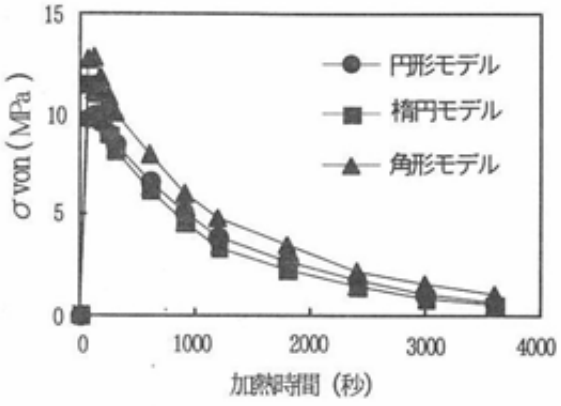

図5 σvon の時間による変化

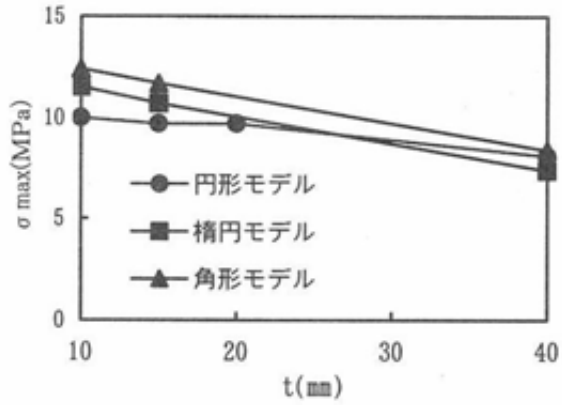

図 6 厚さ(t)がσmax に及ぼす影響
円形モデル R=140mm H=56mm Rf=0mm HRo=90mm HRi=25mm
楕円モデル Ra=140mm Rb=120mm H=70mm Rf=0mm HRo=90mm HRi=25mm
角形モデル W=240mm D=210mm H=70mm Rf=0mm HRo=90mm HRi=25mm

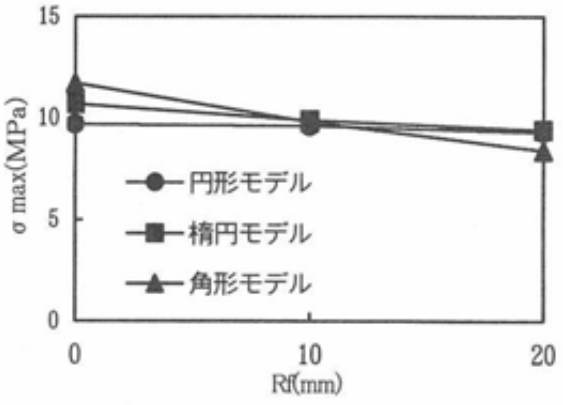

図 7 Rfがσmax に及ぼす影響
円形モデル R=140mm H=56mm t=15mm HRo=90mm HRi=25mm
楕円モデル Ra=140mm Rb=120mm H=70mm t=15mm HRo=90mm HRi=25mm
角形モデル W=240mm D=210mm H=70mm t=15mm HRo=90mm HRi=25mm

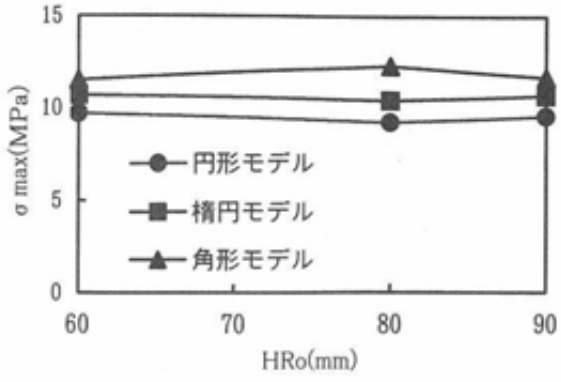

図 8 HRoがσmax に及ぼす影響
円形モデル R=140mm H=56mm t=15mm Rf=0mm HRi=25mm
楕円モデル Ra=140mm Rb=120mm H=70mm t=15mm Rf=0mm HRi=25mm
角形モデル W=240mm D=210mm H=70mm t=15mm Rf=0mm HRi=25mm

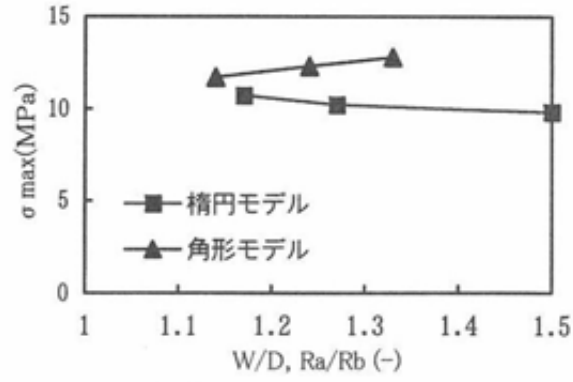

図 9 底面縦横比がσmax に及ぼす影響
楕円モデル H=70mm t=15mm Rf=0mm HRo=90mm HRi=25mm
角形モデル H=70mm t=15mm Rf=0mm HRo=90mm HRi=25mm

化した。t=10mm の σmax 値に対して t=40mm での σmax は約 20%低下する(図 6)。

楕円モデルは、円形モデルと同様に鈍感な傾向を示したが、t に対する変化は、円形モデルよりもわずかに大きかった(図 6)。また、底面寸法の縦横比が大きくなると、σmax のわずかな低下がみられた(図 9)。

角形モデルでは、円形、楕円モデルに比べ、全体に σmax が高い値となった(図 6、7、8、9)。形状パラメーターの影響も大きく、σmax は Rf 及び底面寸法の縦横比(W/D)により顕著に変化した(図 7、9)。Rf=20mm では、Rf=0mm に対して、σmax が約 30%低下し、円形モデルの σmax 値より低くなった。底面寸法の縦横比が大きくなると、σmax はほぼ比例して高まる傾向を示し、W/D=1.33 では、W/D=1.14 に対して σmax が約 10%高くなった。

さらに、σmax が食器のどの部分に発生するかについては、以下の傾向がみられた。

全体的な傾向としては、底面のヒーターより外側の離れた位置に σmax が発生した。(図 10、11、12)

円形モデルでは、食器底部から側面にかけての外側の曲面に、σmax が発生した。ただし、ヒーターの寸法 HRo が 60、80mm の場合は、σ max が発生するのは底面のヒーター部分となった。

楕円モデルでは、底部から側面にかけての外側曲面で、Ra 方向に 20～25mm、Rb 方向に 95～100mm の位置に σmax が発生した。

角形モデルでは、底部から側面にかけての外側曲面で、W 方向に 0～10mm、D 方向に 95～100mm の位置、または、W 方向に 100～110mm、D 方向に 0～10mm の位置で、底面から 10～20mm の高さに σmax が発生した。

以上の結果から、電磁調理器用耐熱食器を設計する場合に注意すべき要点は、以下のようにまとめられる。

(1) 底面形状が円形の食器は、楕円や角形に比べ発生する熱応力が低いので、熱応力破壊に対する安全性では有利である。

(2) 底面形状が角形のような異形の食器は、形状パラメーターにより、発生する熱応力の変化が大きい。特に、内側底部角の曲率半径 Rf を大きくすることは、σmax を低くする効果が高い。

(3) 底面形状が楕円や角形の食器では、底面寸法の縦横比による σmax の変化の傾向が異なる。楕円では Ra/Rb 比を大きく、角形では W/D を小さくする方が、σmax を低くできる。

最後に、本研究の議論からややはずれるが、各モデルでの σ max の発生位置が、多くの場合食器の底部外側角であることから、この部分に乾燥切れやキズなど破壊の起点となる欠陥が存在すると、使用時の熱応力破壊の危険がある。したがって、製品の安全性を高めるために、底部外側角の検査に十分注意をはらう必要があることも強調しておく。

4. まとめ

電磁調理器による誘導加熱を想定して、陶磁器製耐熱食器の形状が、発生する熱応力に及ぼす影響について、定量的に評価した結果、以下のことがわかった。

(1) 耐熱食器の形状が円形、楕円、角形の順に、発生する熱応力値は高くなった。

(2) 円形、楕円モデルでは、形状パラメーターに対して比較的鈍感な傾向を示したが、角形モデルでは、形状パラメーターによる σ max への顕著な影響がみられた。

(3) 電磁調理器用耐熱食器を設計する場合に注意すべき要点を明らかにした。

文 献

1) 技術開発ニュース, 中部電力株式会社, 86(9), p.9 (2000).

2) 日本学術会議無機材料専門委員会, 日本セラミックス協会ビジョン委員会, 21 世紀に向けたセラミックスの研究開発について, p.16(1999).

3) 杉本利夫, 電気加熱と陶磁器工業への利用, 平成元年度窯業技術講習会資料(1989).

4) 生浦京子, 光松正人, 小谷勇, 愛知県常滑窯業技術センター報告, **24**, 39～41(1997).

5) R. W. ダビッジ著, 鈴木弘茂・井関孝善共訳, セラミックスの強度と破壊, 共立出版株式会社(1982)pp.135～137.

6) 岡村弘之, 線形破壊力学入門, 培風館(1976)p.75.

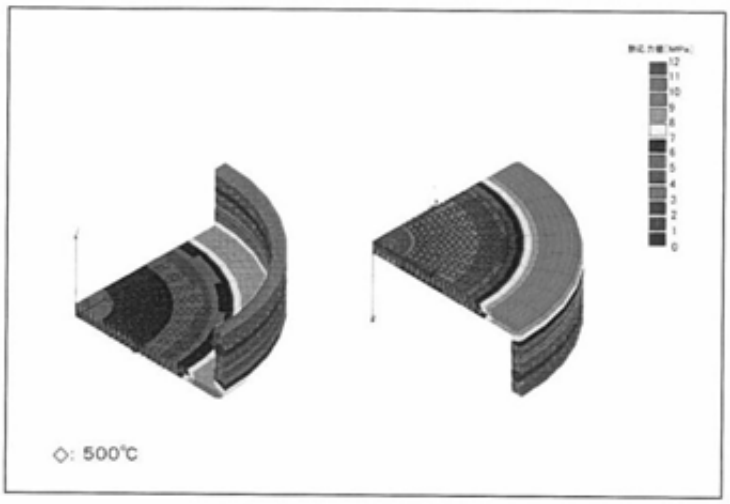

図10 円形モデルの熱応力分布(加熱120秒後)

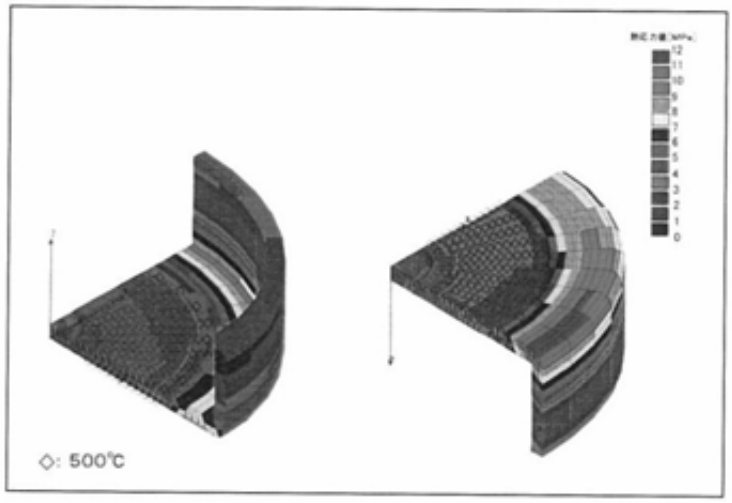

図11 楕円モデルの熱応力分布(加熱60秒後)

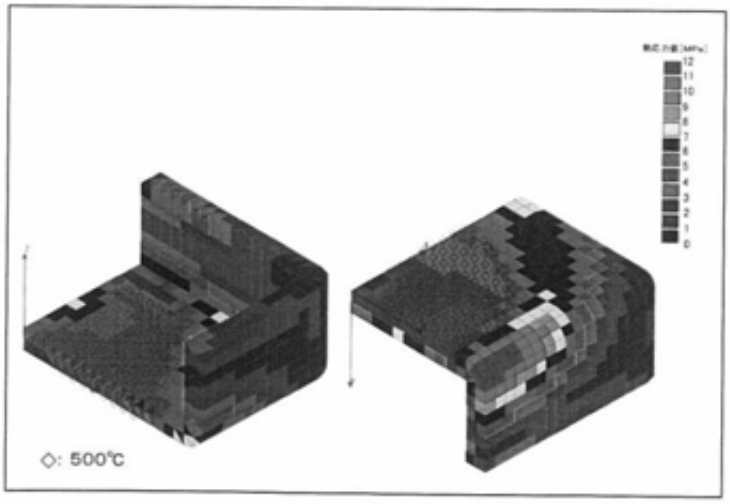

図12 角形モデルの熱応力分布(加熱120秒後)