

局部モデルによるセラミックスシェル鑄型の解析条件に関する考査

—光造型システムによる複雑形状部品の一品生産に関する研究—

何 仕栄・ 吉浦洋之・ 森 智明
機械電子部

Investigation on Analytical Condition of Ceramics Shell Molds by Localized Model
—Application of Stereo Lithography System to Mono Production of Complex-Shape Part —

Shirong HE, Hiroyuki YOSHIURA, Tiaki MORI
Mechanics & Electronics Division

要旨

光硬化樹脂モデルを用いたセラミックスモールド法において、ロストワックス法の脱蠟に相当する過程として、加熱溶解できない光硬化樹脂マスターモデルを高温燃焼による脱模型を行う。その過程に発生する鑄型の破壊機構を解明するために脱模型実験を実施し、全体モデルの結果より局部モデルの諸条件について検討し、主断面に沿って拘束がない滑りという境界条件が適切であると判明した。その上局部モデルを用いて亀裂の進展状況をシミュレートし、亀裂の進展に伴いエネルギー解放による阻止効果より面積減少による促進効果が大きく、応力拡大係数が破壊靱性値に達すると亀裂は一気に進展し、脆性的に破壊することを明らかにした。又、脱模型時樹脂の熱膨張に耐え得る鑄型を得るのにセラミックス材の破壊靱性値を高め、コーナー部応力の特異性を低減するなどの方法が有効であると考えられた。

1. 緒言

光硬化樹脂モデルを用いたセラミックスモールド法は、熱膨張率の高い光硬化樹脂をマスターモデルに用い、複雑形状の部品を設計から製品まで一連の作業を一体化してロストワックス法に準ずる精密鑄造法を確立することを目的とする。ロストワックス法の脱蠟に相当する過程は光硬化樹脂マスターモデルでは樹脂の加熱溶解が期待できないため、高温燃焼による消失を行う。しかし、脱模型時、樹脂モデルの熱膨張により鑄型の破壊が多発しており、従来のロストワックス法同様のプロセスを確立する前に脱樹脂実験により破壊状況を調査する必要がある。また材料内部の破壊現象は直接に観察できないため、数値解析により破壊機構を解明し、破壊過程のシミュレーションをする必要がある。本研究では破壊機構を調査するために複雑形状部品の局部解析要素の抽出と数値解析の影響条件について検討する。

2. 実験による破壊状況の観察

脱樹脂実験では Fig. 1 に示すような階段型モデルを用いた。樹脂モデルの階段型のソリッドモデルをCADで作成し、光造型システムによって光硬化樹脂モデルを成型する。鑄型の作製は樹脂モデルをマスターモデルとし、ロス

トワックス法と同様の手法でセラミックスのコーティング及び乾燥を繰り返す方法によった。脱樹脂実験は鑄型を電気炉に挿入し、室温から樹脂の発火点530℃まで徐々に昇温して行った。Fig. 2 に示すように温度が350℃付近でセラミックス鑄型表面角部に割れ目が観察された。

3. 解析手法

3.1 全体モデルによる解析結果

セラミックス鑄型は外部から荷重を受けないので、応力の発生は樹脂の熱膨張にしかよらないとして解析を行った。解析は境界要素法を用い、樹脂とセラミックスの弾性係数をそれぞれ27kgf/mm²及び22000kgf/mm²とし、また膨張率をそれぞれ9×10⁶/℃及び130×10⁶/℃とした。階段型鑄型全体を数値解析した結果を Fig. 3 に示す。樹脂モデルの熱膨張により、セラミックス鑄型内側に直接観察できない表面力が生じ、この表面力が鑄型の荷重条件となる。Fig. 3 に示すようにセラミックス鑄型の界面荷重は主に内側隅部の極小さい範囲に集中して作用する圧縮力であり、各コーナー部における圧縮表面力は場所によらず似たような分布パターンを示す。また、各コーナーでは直角に隣接する二つの面で同様な分布の垂直力がペアで作用し、隅部に亀裂を発生させるような様態を示す。

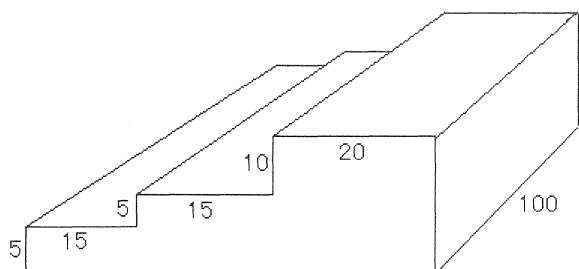


Fig.1 階段型樹脂モデルの寸法形状

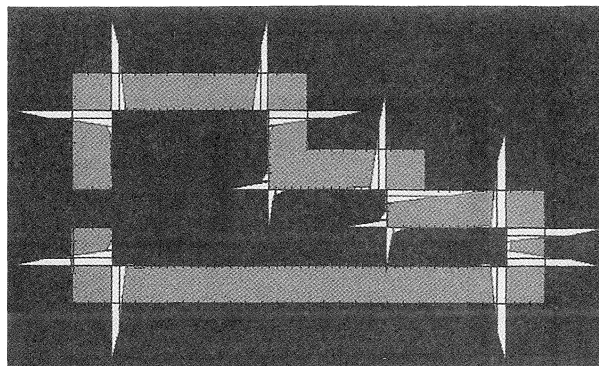


Fig.3 樹脂の熱膨張による鋳型の表面力

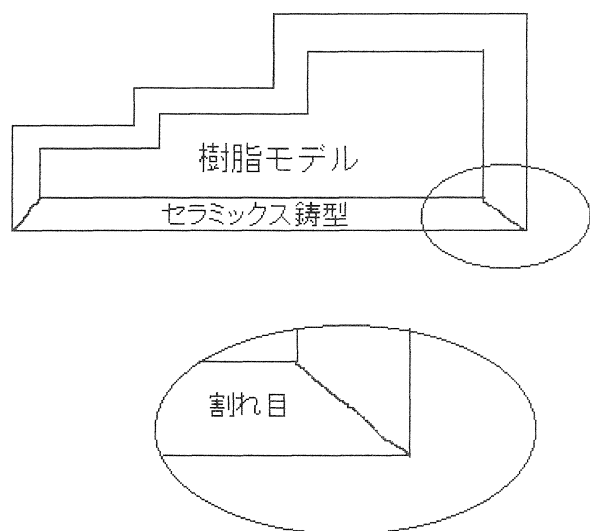


Fig.2 セラミックス鋳型の割れ目

3.2 鋳型の破壊要因

Fig. 4 に全体モデルより解析した断面応力の分布状況を示す。コーナー部の斜め断面では応力は引っ張り応力であり、応力の分布には先端部分で発散する特異性が見られた。このような応力分布では破壊靱性が低い場合、鋳型は通常の強度水準よりかなり低い平均応力値で破壊が発生する可能性がある。破壊がコーナー部に発生する場合は材料の破壊靱性が低いことが破壊の原因と考えられる。

コーナー部から離れた横断面では応力の分布は滑らかであり、材料の強度が低い場合はこの部分の最大主応力が強度限に達して破壊することがある。ただし、脱樹脂実験から観察された結果として、亀裂が発生する箇所は主にコーナー部にあるため、破壊はコーナー部斜め断面上の応力状態によるものと考えられる。

3.3 局部解析モデルの境界条件

部品形状によりセラミックス鋳型の断面形状は多種多様であるが、断面形状の輪郭の特徴として滑らかな境界線

と勾配の不連続な折線部に分類できる。割れ目は一定の温度でコーナーの部分に発生することから、その部分の応力状態を調べるのが重要である。しかし部分領域の応力解析で全体モデルを用いると、要素の作成に膨大な時間と労力がかかり、境界条件の設定が難しく計算時間が長い。基本要素を抽出し、局部の解析モデルを作成することは、解析を正確且つ迅速に行うのに必要である。

階段型鋳型の場合はコーナー部の境界条件を抽出すれば、局部解析モデルとして簡単で且つ少量な要素と境界条件で解析が実施できる。Fig. 5 に示すように幾何学的に二つの主断面でシェル構造体を切り離せば境界条件の単純な局部解析モデルが得られる。

3.4 異なる境界条件の解析結果

一般に材料定数のほかに境界条件が解析の結果に大きく影響を与えるため、まずその影響について調べる。

4種類の境界条件を設定し局部解析モデルを用いて数値解析した結果を Table1 に示す。ここで固定境界とは境界上で境界に平行する方向と境界に垂直する方向で自由に移動できない境界条件であり、滑り境界とは境界上で境界に平行する方向で自由に移動できるが、境界に垂直する方向で自由に移動できない境界条件である。

- A, 垂直断面固定境界, 斜め断面滑り境界
- B, 斜め断面固定境界, 垂直断面滑り境界
- C, 2つの主断面とも固定境界
- D, 2つの主断面とも滑り境界

表中、先端応力状態以外は斜め断面中央部における数値である。境界条件の違いにより垂直応力の数値だけでなく、応力の分布状態まで異なる。特に右側固定及び両側固定境界の場合は断面に大きなせん断応力が発生している。それは固定境界という余分な拘束により内部に実際より大きい歪が発生したからである。またコーナー部先端では固定境界条件の場合特異分布を示さなかった。Fig.5 にこれらの境界条件における断面上の応力分布状態を示す。図中、

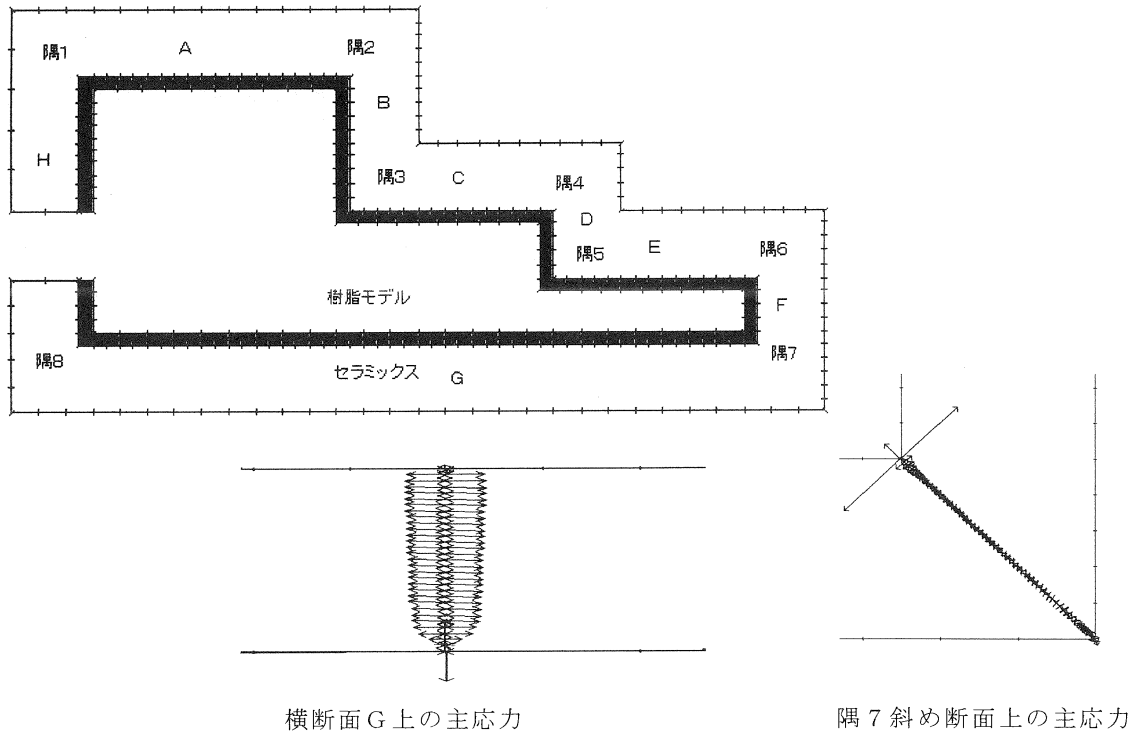


Fig.4 全体モデルによる断面応力状態

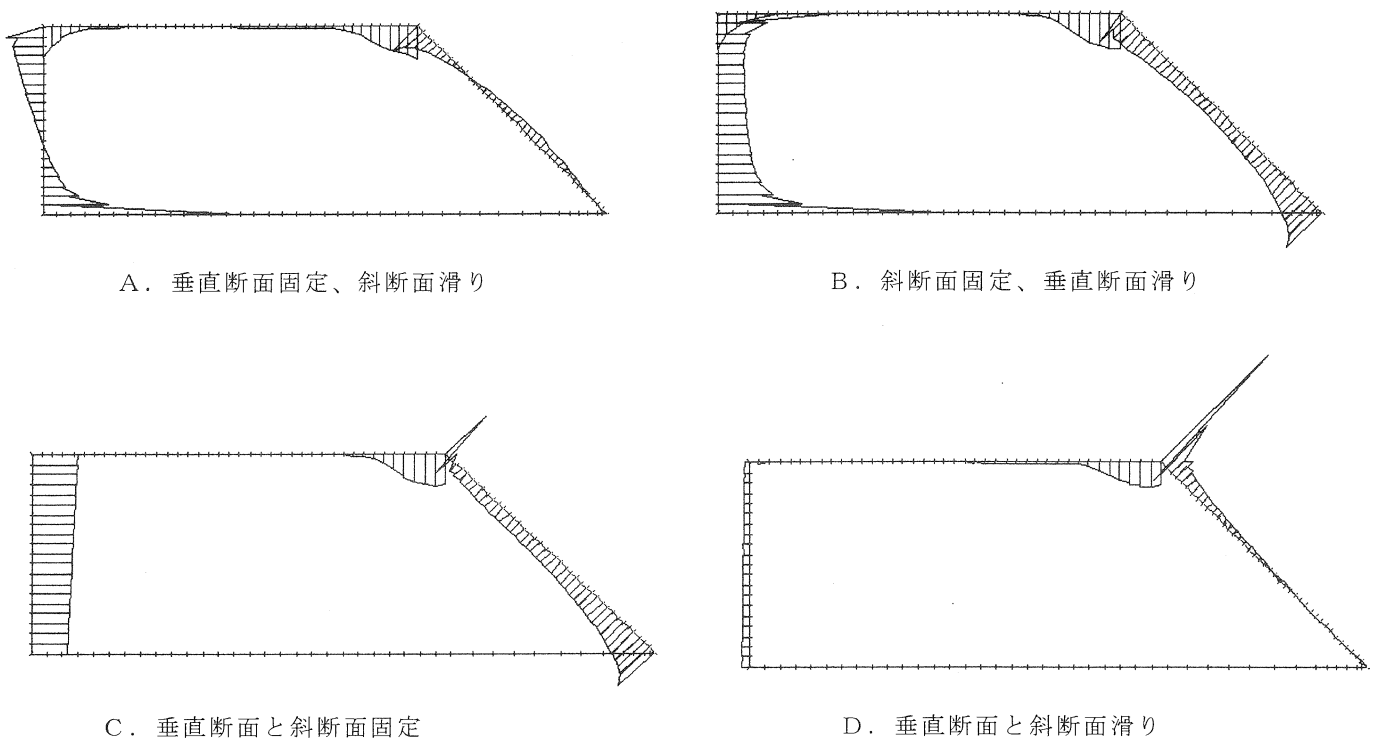


Fig.5 各種局部モデル境界条件における断面応力状態

Table 1 各種境界条件における斜断面中央部の指標

主断面境界条件	せん断力応力相対値	垂直応力相対値	垂直変移	平行変移(相対値)	先端の応力状態
A	0	4.31	0.	0.91	圧縮
B	11.44	6.26	0	0	圧縮
C	10.81	5.34	0	0	圧縮
D	0	1	0.	1	引張(特異分布)

応力の相対値はD境界の垂直応力を基準にしている。

境界の外側に描かれるのは引っ張り状態の表面力であり、境界の内側に描かれたのは圧縮状態の表面力である。又各表面力は同じ縮図で描かれている。

Fig. 4の全体モデルの解析結果より、主断面上の応力状態には主な特徴が2つある。1つはコーナー部の斜め断面の垂直応力は特異分布になる。もう1つは主断面上のせん断応力は垂直応力と比べ無視できるほど遥かに小さい。これらの特徴を持つ解析結果をもたらしたのは両端滑りという境界条件しかなかった。

また、鋳型の内部にある樹脂モデルは熱膨張時の応力状態が鋳型と似たような結果が得られたため、樹脂モデルの局部モデルとして鋳型と同様の境界条件となる。

4. 斜断面の応力状態と破壊機構

4.1 角部の応力拡大

亀裂が進展する時、進展方向前方の断面上の応力分布状態を Fig.6 に示す。亀裂先端の位置は移動するが、応力の特異分布状態は変わらない。

一般に亀裂の成長に伴い、新たな亀裂表面が形成することにより亀裂先端のエネルギーが解放され、亀裂の更なる進展を阻止する効果がある。一方では亀裂の成長は応力の分布の変化をもたらすため、この変化は応力場の幾何学的寸法形状により断面積が減少し亀裂先端部で応力がさらに集中し拡大する状態になり、破壊を促進する効果がある。すなわち、亀裂が進展するとき応力場が変化するので応力拡大係数は一定にならず常に変化している。

応力の分布が亀裂先端部で特異性を示すとき、最大主応力が無効になり、応力拡大係数が破壊条件を決定するパラメーターになる。亀裂が進展するのかわど止まるのかわどはエネルギー解放による阻止効果と面積の減少による促進効果の合成効果による。同様の脱模型温度で異なる亀裂長に対する応力拡大係数の変化を Fig.7 に示す。応力拡大係数の数値は上記2つの要因の総合効果を示すことから、本研究では亀裂の進展に伴いエネルギー解放による阻止効果よ

り面積減少による促進効果が大きく、応力拡大係数は増加するため、応力拡大係数が破壊靱性値に達すると亀裂は一気に進展し、脆性的に破壊すると考えられる。

4.2 セラミックス鋳型の亀裂発生条件

実験より観察された割れ目の発生温度は350℃付近であり、このとき応力拡大係数の値は約3.49 k g f / mm^{3/2}である。セラミックスの破壊靱性値は数 k g f / mm^{3/2}から10数 k g f / mm^{3/2}にある。セラミックス鋳型の破壊靱性値は単体焼成体の数値範囲中に入っているが数値として低い方である。それは脱模型の温度はセラミックスの焼成温度よりはるかに低いため、セラミックスの強度と破壊靱性が十分生まれていないということが原因であると考えられる。

4.3 脱模型中鋳型の破壊過程

上記解析の結果から鋳型の破壊過程が次のとおりと考えられる。まず光硬化樹脂の熱膨張が原始的な原因となり、部品形状によりコーナー付近に大きい表面力が発生する。次にこの表面力が2次的要因となって鋳型内側コーナー部に応力拡大係数の大きい特異分布の応力が発生する。最後に、昇温につれて応力拡大係数がセラミックスの固有破壊靱性値に達し亀裂が生じて鋳型が一気に破壊する。セラミックス鋳型の破壊過程は Fig.8 に示す。

以上の結果から、脱模型時の熱膨張による破壊に耐え得る鋳型を得るためにセラミックス材の破壊靱性値を高め、コーナー部応力の特異性を低減しなければならない。

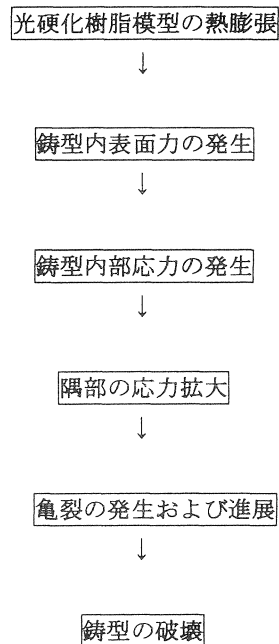


Fig.8 鋳型の破壊過程

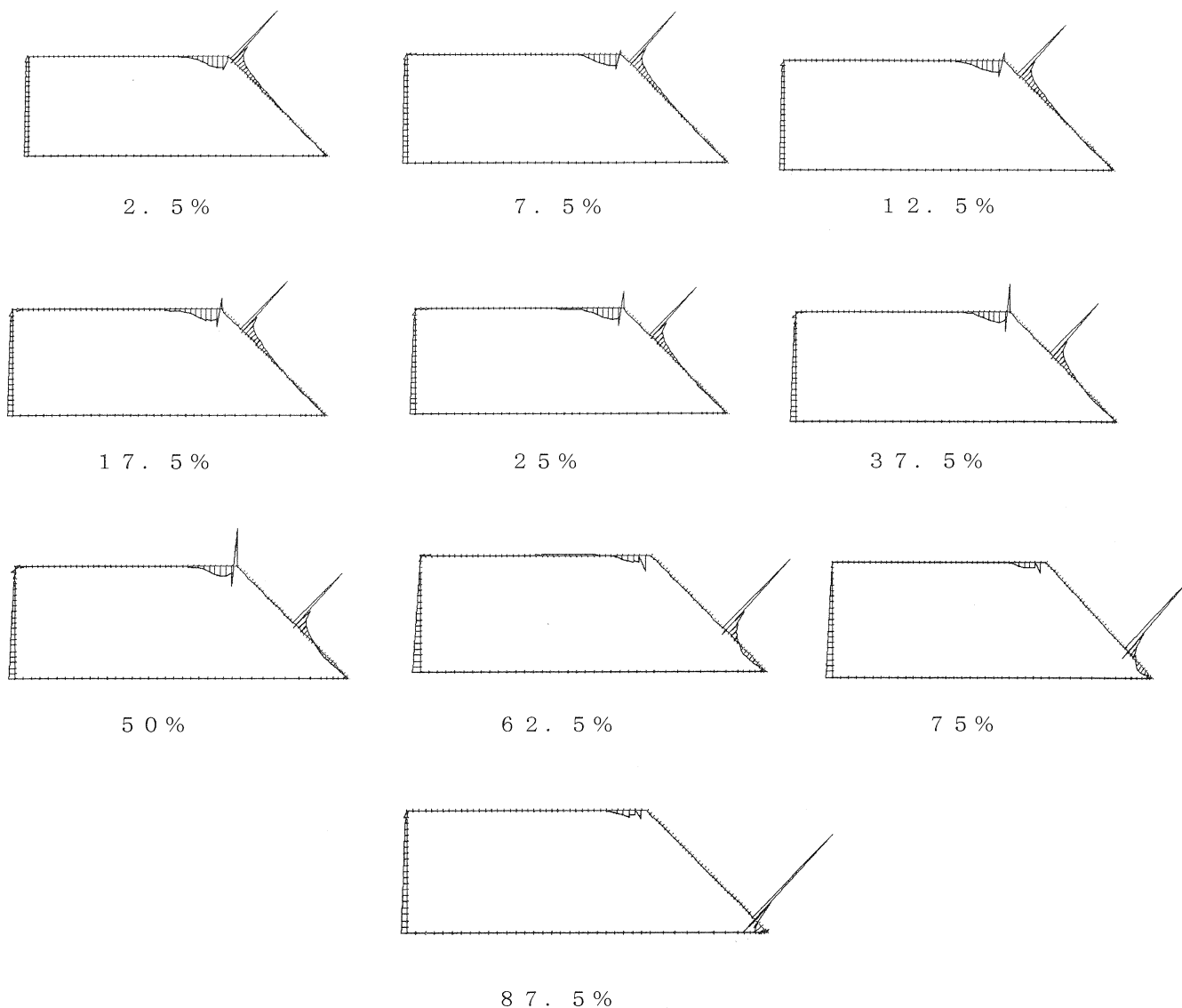


Fig.6 亀裂進展時の先端応力状態

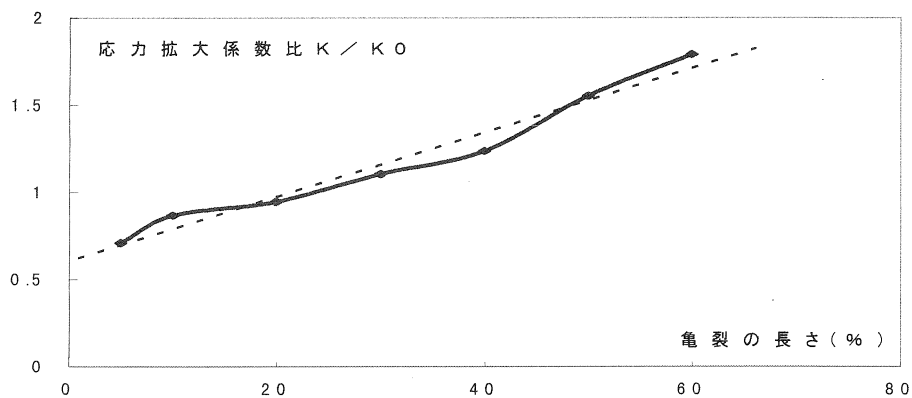


Fig.7 亀裂長に対する応力拡大係数の変化

5. まとめ

本研究では、樹脂マスターモデルの脱模型実験に基づいて各種条件を設定して数値解析を行った結果、次のようなことを明らかにした。

- 1) 亀裂は一定の温度でコーナーの部分に発生し、その部分の応力状態を調べるのに、主断面上の応力状態として、コーナー部の斜め断面の垂直応力は特異分布になり、また、主断面上のせん断応力は垂直応力と比べ無視できるほど遥かに小さく、主断面が滑りという境界条件が適切である。
- 2) 亀裂の進展と停止はエネルギー解放による阻止効果と面積の減少による促進効果の合成効果による。本研究では亀裂の進展に伴いエネルギー解放による阻止効果より面積減少による促進効果が大きく、応力拡大係数は増加するため、応力拡大係数が破壊靱性値に達すると亀裂は一気に進展し、脆性的に破壊すると考えられる。
- 3) 鋳型の破壊過程は、光効果樹脂の熱膨張が原始的な原因となり、コーナー付近に大きい表面力が発生し、この表面力が2次的要因となって鋳型内側コーナー部に特異分布の応力が発生し、昇温につれて応力拡大係数がセラミックスの固有破壊靱性値に達し鋳型が破壊すると考えられる。
- 4) 脱模型時の熱膨張による破壊に耐え得る鋳型を得るのにセラミックス材の破壊靱性値を高め、コーナー部応力の特異性を低減するなどの方法が有効である。

文 献

- 1) 何 仕栄, 森 智明, 吉浦洋之:「光硬化樹脂モデルを用いたセラミックス鋳型の破壊メカニズム」, 第15回ラピットプロトタイピングシンポジウム, 1998年11月, PP75-80
- 2) 森 智明, 吉浦洋之, 高橋芳朗: 樹脂模型を用いたセラミックス鋳型への検討(第2報), 大分県産業科学技術センター, 平成9年度研究報告, PP29-34
- 3) 寺崎俊夫他2名: 残留応力のパラメーター、溶接学会論文集、第5巻