

セラミックス/金属接合残留応力の
有限要素解析の基礎的検討*
(切断による残留応力の再配分)佐藤 拓哉*¹, 小林 英男*², 荒居 善雄*³Finite Element Analysis of Residual Stresses of Ceramics/Metal Joints
(Effect of Cutting on Redistribution of Residual Stresses)

Takuya SATO, Hideo KOBAYASHI and Yoshio ARAI

A two-dimensional finite element analysis was performed to study a redistribution of residual stresses due to cutting in a ceramic/metal joint. The cutting process was simulated based on a tying function of the program where two kinds of nodes (one is the tied node and the other is a retained node) were defined at the same point on a cutting line. Release of restraint of these points means cutting. It is concluded that the residual stresses redistribute after cutting the ceramic/metal joint and the peak tensile stress occurs on the new free surface near the interface in a ceramic side. It is emphasized that the residual stress at a same point decreases after cutting, but the maximum value does not decrease.

Key Words: Stress Analysis, Ceramics/Metal Joint, Residual Stress, Cutting, Finite Element Analysis

1. 緒 言

セラミックスの優れた特性を構造材料として活用する方法として、金属との接合が有望である。セラミックス/金属接合材の強度を支配する力学因子として、接合残留応力が重要であり⁽¹⁾、実測および解析の両面から研究されている^{(2)~(5)}。セラミックス/金属接合材の実用化のためには、その強度評価方法の確立が必要である。強度評価方法は、接合材の実体強度を直接評価する方法と、接合材から試験片を切り出して、接合部の強度を評価する方法の二つに大別できる。後者の場合、接合残留応力は切断の影響を受けて再配分すると考えられるが、この点について検討した研究はない。

本研究では、銅を中間層として窒化けい素と炭素鋼を接合した場合の接合残留応力を、有限要素法による二次元弾性解析によって求め、接合残留応力の再配分に及ぼす切断加工の影響について検討した。

2. 解析方法

銅を中間層としたセラミックス/金属接合材では、銅が降伏することによって残留応力が緩和する。したがって、残留応力の再配分を解析するためには、接合工程が切断工程まで連続した三次元弾塑性解析が必要となり、計算量と計算時間が膨大となる。本研究では、残留応力の再配分に及ぼす切断の影響の基本的特性を把握するため、第一段階として、弾塑性を弾性に、三次元を二次元に簡略化して検討した。

汎用構造解析プログラム MARC を用いて、弾性応力解析を行った。解析モデルは、切断工程をシミュレートするためのモデル(切断モデル)と、接合材の寸法(幅と長さ)の影響を検討するためのモデル(モデル1~6)の2種類とした。それぞれの解析モデルの形状と寸法を図1に示す。モデル1~3は接合材の幅の影響について検討するためのものであり、左右の端面の影響がないよう幅に対して十分長いモデルとした。一方、モデル4~6は接合材の長さの影響について検討するためのものであり、幅に対して比較的短いモデルとした。モデル1~6は等価な点(接合面から応力の評価点までの距離を幅で正規化した値が同一になる点)で応力が比較できるように、同一の要素分割とし

* 平成2年9月24日 第68期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成2年11月14日。

¹ 正員、日揮(株) (〒232 横浜市内南区別所 1-14-1)。

² 正員、東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

³ 正員、埼玉大学工学部 (〒338 浦和市下大久保 255)。

た。モデル4～6は、解析モデルの両端部の縦弾性係数を零とおくことにより、幅に対して短いモデルであることを簡便的に表した。

要素分割を図2に示す。モデル1～6は対称性を考慮して、1/2モデルとした。応力の高くなる接合面、端面近傍および切断ライン近傍は細分割、その他の領域は粗分割とした。切断モデルは540要素、1865節点、モデル1～6は320要素、1057節点である。

弾性解析の場合、接合残留応力の三次元分布は、接合材の幅方向、厚さ方向それぞれの拘束に起因して生じる二次元分布の重ね合わせによって近似できる⁽²⁾。切断によって変化するのは幅方向の拘束だけであるので（せん断応力 τ_{xy} が解放されるので）、切断の影響を平面応力問題として扱うことができる。したがって、解析は平面応力状態を仮定し、8節点アイソパラメトリック要素を用いた。

材料特性を表1に示す。接合時の温度条件は、800 K

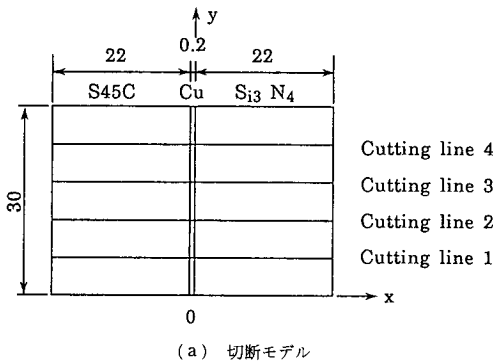
から300 Kに一樣に低下させた。したがって、解析には、縦弾性係数としては300 Kにおける値を用いた。温度が800 Kから300 Kまで変化した時の熱ひずみは、逆に300 Kから800 Kまで変化した時と絶対値が等しいので、熱膨張係数としては800 Kにおける値を用いた。

接合材の切断による残留応力の変化を、次のように模擬した。

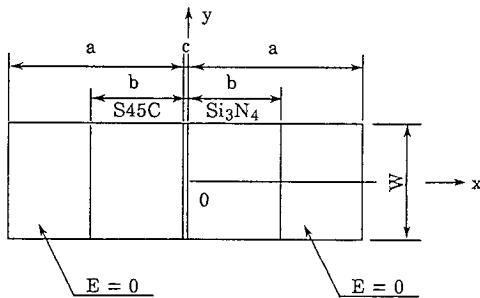
- ①切断線上(図1のCutting line 1～4)に節点を二重に定義し、対応する節点どうしの変位が同一となるように拘束条件を与える。
- ②熱応力解析(残留応力解析)を行う。
- ③最初の切断線上の拘束を解放する。
- ④残留応力解析を行う。
- ⑤上記③、④を切断線ごとに繰り返す。

3. 解析結果

切断モデルについて、切断前と切断後の x 方向残留応力 σ_x の分布を図3に示す。図3(a)は切断前の分布である。接合面近傍、かつ自由表面(端面)近傍に応力が集中し、セラミックス側で引張り、金属側で圧縮となっている。図3(b)はすべての切断線を切断した後の分布である。切断によって応力が再配分し、新たにできた自由表面(切断面)近傍にも応力が集中して



(a) 切断モデル

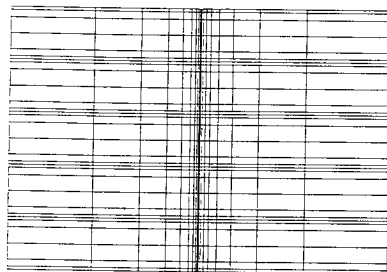


(b) モデル1～6

図1 解析モデル

表1 材料特性

	Temp	Si ₃ N ₄	Cu	S45C
E (GPa)	300 K	304	108	206
	800 K	304	83	188
ν	300 K	0.27	0.33	0.3
	800 K	0.27	0.33	0.3
α ($\times 10^{-6}$)	300 K	3.0	17.7	12.0
	800 K	3.0	21.0	14.0



(a) 切断モデル



(b) モデル1～6

図2 要素分割

いる (特異点を持つ)。

また、切断前に比較して切断後は、この応力が集中している領域は局所化している。

上端面近傍 ($y=30$ mm) における x 方向残留応力について、切断前と切断線 1 から順番に切断線 4 まで切断した後の x 方向分布を比較して図 4 に示す。切断前の分布は、解析が弾性解析であるために絶対値は異なるが、X線応力測定法による実測結果⁹⁾ と分布形は定性的に一致している。また、同一位置における残留応力を切断前後で比較すると、切断によってその絶対

値は低下している。

セラミックス側の x 方向残留応力について、接合面に沿った y 方向分布を切断前と切断線 1 から順番に切断線 2 まで切断した後と、切断線 4 まで切断した後について比較して図 5 に示す。切断前は、応力は自由表面 (端面) 近傍に集中している。切断後は、新たにできた自由表面 (切断面) 近傍にも同様に応力が集中している。

図 5 に対応する y 方向残留応力 σ_y の y 方向分布を図 6 に、せん断残留応力 τ_{xy} の y 方向分布を図 7 に示す。 x 方向残留応力の場合と同様に、同一位置における y 方向残留応力とせん断残留応力の絶対値は切断後に低下しており、実測結果⁹⁾ と定性的傾向は一致している。

残留応力分布に及ぼす切断の影響を正しく評価するためには、接合材の寸法 (幅と長さ) の変化の影響を明らかにする必要がある。もちろん、弾性解析では、中間層の厚さを含めて接合材が相似形状であれば、寸法の変化によって残留応力の最大値と分布が影響を受けることはない。しかし、切断の場合を想定すれば、中間層の厚さは一定であり、寸法の変化の影響を受ける可能

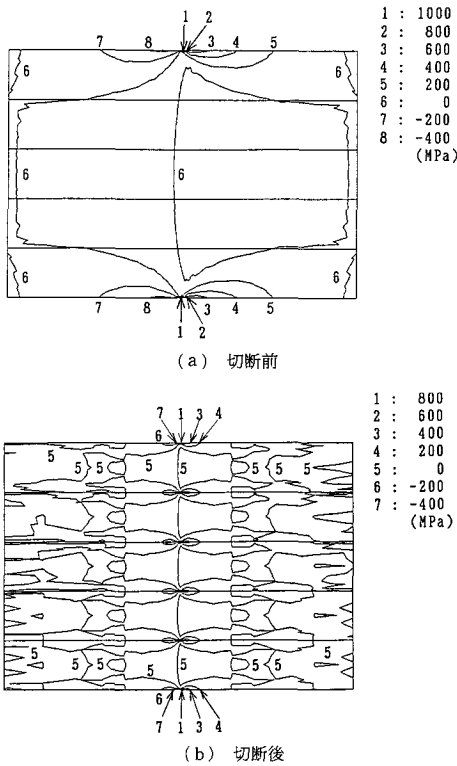


図 3 x 方向残留応力 σ_x の分布

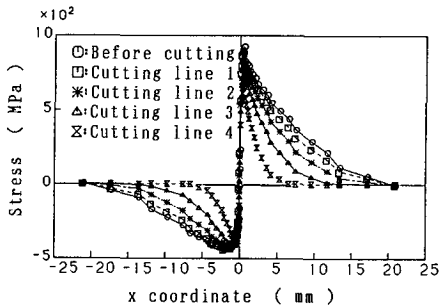


図 4 x 方向残留応力 σ_x の上端面近傍における x 方向分布の変化

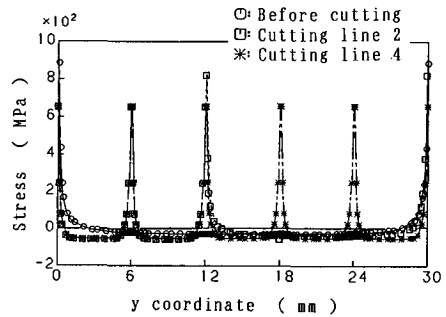


図 5 セラミックス側の x 方向残留応力 σ_x の接合面に沿った y 方向分布の変化

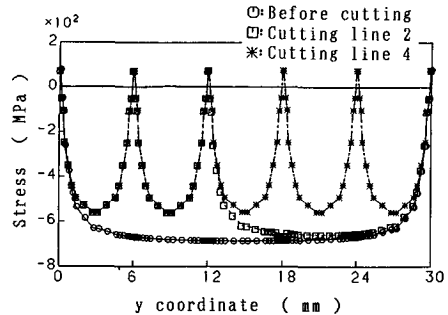


図 6 セラミックス側の y 方向残留応力 σ_y の接合面に沿った y 方向分布の変化

性がある。

中間層の厚さ ($c=0.2$ mm) および接合材の幅と長さの比 ($W/b=3/11$) を一定とし、幅を $W=12$ mm (モデル 1), $W=6$ mm (モデル 2), $W=3$ mm (モデル 3) とした場合について、上端面近傍 ($y=3$ mm) における x 方向残留応力の x 方向分布を図 8 (a) に示す。応力が生じているのは、接合面から接合材の幅程度の距離の範囲のみであり、左右の端面の影響を受けていない。幅の減少に伴い応力こう配が大きくなるが、最大応力はほぼ同じ値となっている。

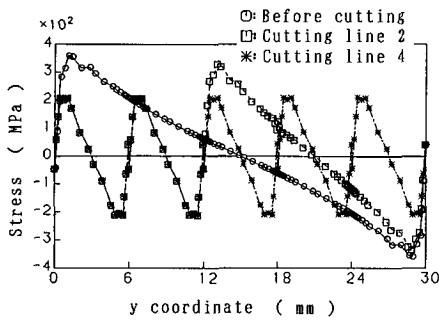


図 7 セラミックス側のせん断残留応力 τ_{xy} の接合面に沿った y 方向分布の変化

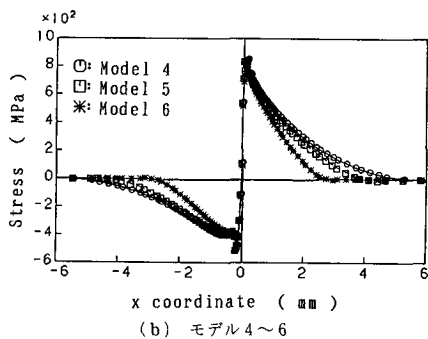
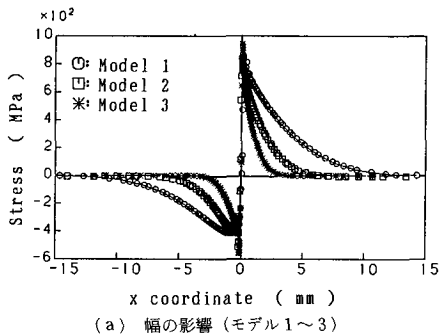


図 8 x 方向残留応力 σ_x の上端面近傍における x 方向分布

中間層の厚さ ($c=0.2$ mm) と幅 ($W=6$ mm) を一定とし、接合材の長さを $b=6$ mm (モデル 4), $b=4.5$ mm (モデル 5), $b=3$ mm (モデル 6) とした場合について、上端面近傍における x 方向残留応力の x 方向分布を図 8 (b) に示す。長さの減少に伴い左右の端面の影響を受け、応力こう配が大きくなるが、最大応力はほぼ同じ値となっている。

図 8 (a) と (b) の結果をそれぞれ、横軸を幅で正規化した x 座標 ($2x/W$), または横軸を長さで正規化した x 座標 (x/b) として図 9 (a) と (b) に示す。特に、セラミックス側の応力分布は、相似形状で幅を変えた図 9 (a), 幅を一定として長さを変えた図 9 (b) のいずれの場合も、幅と長さに関係なくよく一致している。

同様に、各モデルのセラミックス側の接合面に沿って、 x 方向残留応力の y 方向分布を図 10 に、 y 方向残留応力の y 方向分布を図 11 に、せん断残留応力の y 方向分布を図 12 に示す。横軸はいずれも幅で正規化した y 座標 ($2y/W$) である。図 9 と同様に、各モデルのセラミックス側の応力は幅と長さに関係なくよく一致している。

以上、図 9 ~ 図 12 の結果から明らかのように、接合

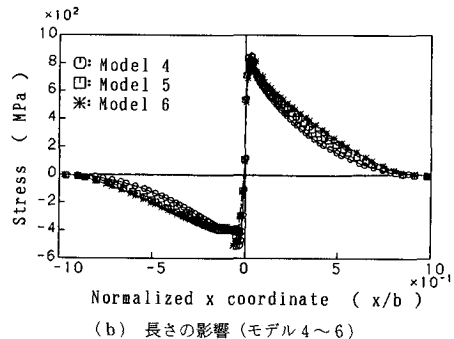
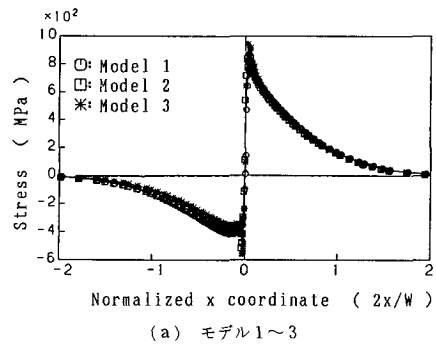


図 9 x 方向残留応力 σ_x の上端面近傍における x 方向分布に及ぼす接合材寸法の影響

材の寸法（幅と長さ）を変化させた場合のセラミックス側の残留応力分布は、幅または長さで正規化することにより、ほぼ一義的に表示できる（分布形は変化しない）ことが結論される。ただし、金属側の残留応力分布は、幅または長さで正規化することにより、必ずしも一義的に表示できない（分布形はわずかに変化する）ことは注意を要する。

以上のことは切断モデルについても同様であると考えられる。図8より、接合材の幅に比較して長さの短い切断前は、左右の端面の影響を多少受けているが、

切断後は影響を受けていないものと考えられる。したがって、図4～図7の結果をそれぞれ、横軸を幅で正規化した x, y 座標として、図13～図16に示す。ただし、 W はそれぞれに対応する切断前の幅、切断線2まで切断した時の幅、あるいはすべての切断線を切断した後の幅である。図13は図9と同様に、応力の分布形状はよく一致している。しかし、接合面近傍の応力の絶対値は切断に伴い低下している。図14～図16を図10～図12と比較した場合も、同様の傾向が認められる。

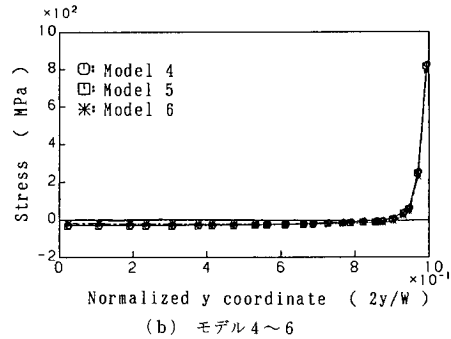
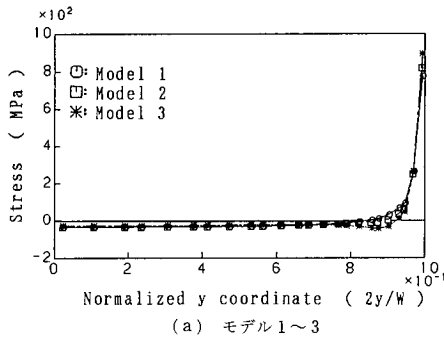


図10 セラミックス側の x 方向残留応力 σ_x の接合面に沿った y 方向分布に及ぼす接合材寸法の影響

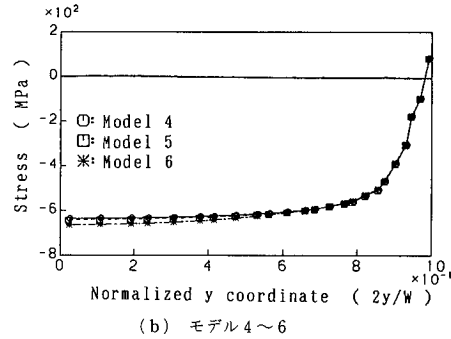
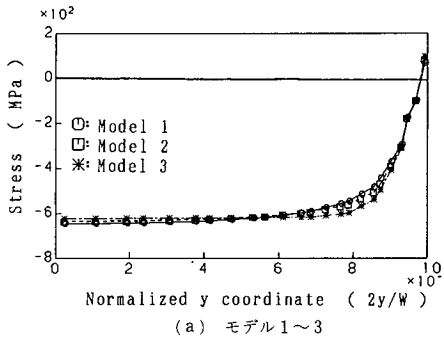


図11 セラミックス側の y 方向残留応力 σ_y の接合面に沿った y 方向分布に及ぼす接合材寸法の影響

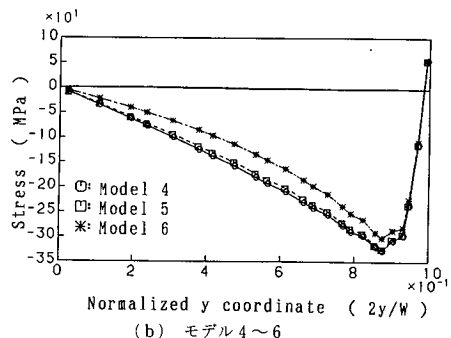
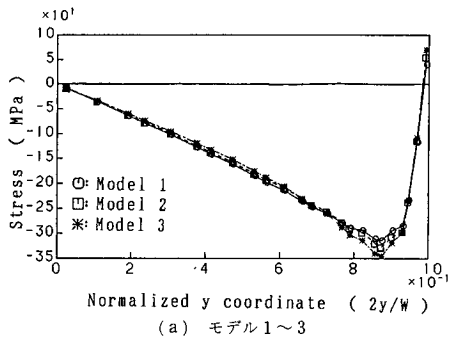


図12 セラミックス側のせん断残留応力 τ_{xy} の接合面に沿った y 方向分布に及ぼす接合材寸法の影響

4. 考 察

切断モデルによる切断前後の残留応力分布の比較から、切断によって応力が再配分し、自由表面(端面)の近傍に集中していた応力が、新たにできた自由表面(切断面)の近傍にも集中する(特異点を持つ)こと、および切断前に比較して切断後は、この応力の集中する領域が局所化することが明らかとなった。また、同一位置における応力を切断前後で比較すると、その絶対値は低下している。

一方、残留応力に及ぼす接合材の寸法の変化の影響を明らかにするため、中間層の厚さを一定としたモデル1~6では、等価な点(接合面から応力の評価点までの距離を幅で正規化した値が同一になる点)で応力を比較した。その結果、接合材の幅あるいは長さの減少に伴い応力こう配は大きくなるが、最大応力はほぼ同じ値となった。さらに、セラミックス側の応力分布は、幅または長さで正規化することにより、ほぼ一義的に表示できた(分布形は変化しない)。これに反して、金属側の応力分布は、幅または長さで正規化することにより、必ずしも一義的に表示できない(分布形はわずかに変化する)。これは中間層の厚さを一定としたこ

との影響と考えられる。中間層の厚さの接合材寸法に対する相対的な変化が金属側にのみ現れたのは、中間層(銅)の材料特性(熱膨張係数と縦弾性係数)はセラミックス(窒化けい素)の材料特性よりも金属(炭素鋼)の材料特性に近く、中間層と金属が一体の材料として、セラミックス側の応力に影響を及ぼしていると考えられる。

接合材の寸法を変化させた場合と同様に、接合材を切断した場合のセラミックス側の残留応力分布は、切断後の寸法で正規化することにより、ほぼ一義的に表示できる(分布形は変化しない)と判断される。しかし、同一位置における応力を切断前後で比較すると、その絶対値は低下している。切断モデルの場合、切断によって接合材の幅が小さくなるにもかかわらず一定の要素分割で解析を行っているため、切断後は切断前に比較して相対的に粗い要素分割を用いていることになる。これが同一位置における応力の絶対値が切断によって低下することの原因と考えられる。

以上の結果より、弾性解析の場合の切断は寸法の変化と等価であると結論される。したがって、本計算の範囲内において、切断あるいは寸法の減少に伴い、残留応力の最大値は変化しないが、同一位置における残

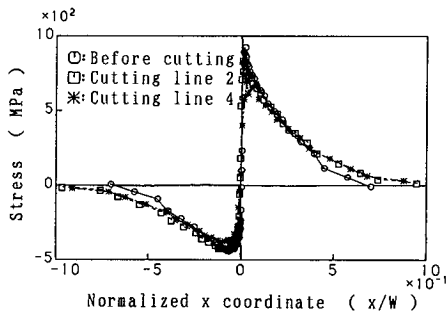


図 13 x 方向残留応力 σ_x の上端面近傍における x 方向分布に及ぼす切断による寸法変化の影響

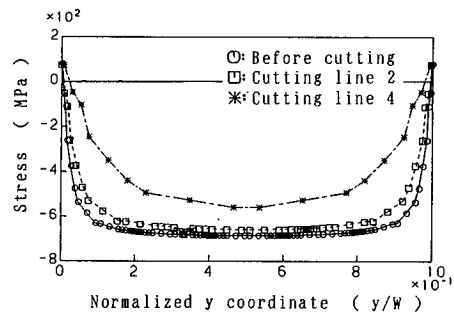


図 15 セラミックス側の y 方向残留応力 σ_y の接合面に沿った y 方向分布に及ぼす切断による寸法変化の影響

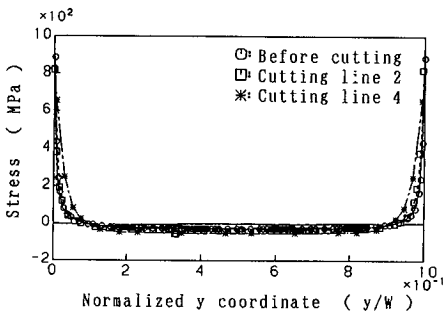


図 14 セラミックス側の x 方向残留応力 σ_x の接合面に沿った y 方向分布に及ぼす切断による寸法変化の影響

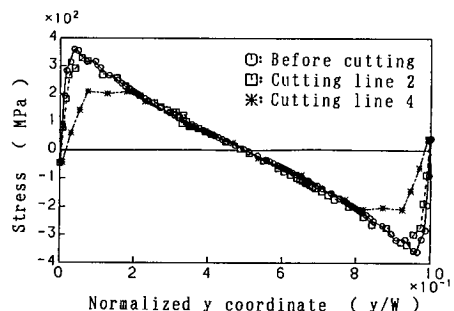


図 16 セラミックス側のせん断残留応力 τ_{xy} の接合面に沿った y 方向分布に及ぼす切断による寸法変化の影響

留応力の絶対値は低下することが明らかである。このことは、X線などで残留応力を実測する場合に、十分注意しなければならない。

本解析は弾性解析であるので、応力の絶対値を直接に実測結果と比較することはできない。しかし、実際の接合の場合あるいは弾塑性解析の場合にも、塑性変形するのは中間層のみであり、着目しているセラミックスが弾性を保つならば、接合面近傍の残留応力は低減しても、特異応力場としての特性は弾性解析の場合と変わらないと考えられる。したがって、以上の弾性解析による応力分布の再配分の特性の評価は有効と判断される。ただし、残留応力は特異性をもっており最大応力による評価には問題がある。この点については、要素分割を含めた詳細な検討が必要であり、別に報告する予定である⁽⁶⁾。

5. 結 論

本研究では、銅を中間層として窒化けい素と炭素鋼を接合した場合の接合残留応力を、有限要素法による二次元弾性解析によって求め、接合残留応力の再配分に及ぼす切断加工の影響について検討した。得られた結果を要約すれば、以下のとおりである。

(1) 接合残留応力は切断によって再配分し、新たにできた切断面に応力が集中する(特異点を持つ)。

(2) 切断による残留応力の再配分は、接合材の寸法の変化の影響と等価である。

(3) 中間層の厚さを一定とした場合、切断あるいは寸法変化によるセラミックス側の残留応力分布は、幅または長さで正規化することにより、ほぼ一義的に表示できる(分布形は変化しない)。

(4) したがって、本計算の範囲内において、切断あるいは寸法の減少に伴い、残留応力の最大値は変化しないが、同一位置における残留応力の絶対値は低下する。

文 献

- (1) 小林・荒居・中村・中村, 機論, 55-512, A(1989), 750.
- (2) 佐藤・小林・荒居, 機械学会第67期通常総会講演論文集, No. 900-14, A(1990-3), 81.
- (3) 栗田・井原・佐藤・斎藤・福沢・田中, 機論, 56-524, A(1990), 978.
- (4) 古口・加屋・大谷・矢田, 機論, 55-513, A(1989), 1121.
- (5) 瀬尾・日下・野方・寺崎・中尾・才田, 機論, 55-510, A(1989), 312.
- (6) 佐藤・小林・荒居, 機械学会材料力学講演会講演論文集, No. 900-86(1990-11), 545.