窒化けい素と鋼のろう付けによる接合材の 三次元残留応力解析[†]

栗 田 政 則* 米 田 清 博**
飯 島 純** 斎 藤 明*

Three-Dimensional Residual Stress Analysis for Silicon Nitride Brazed to Steel Plate

by

Masanori KURITA*, Kiyohiro YONEDA**, Jun IJIMA**
and Akira SAITOH**

The residual stress distributions of bonded dissimilar materials were determined by the two- and three-dimensional (2-D and 3-D) thermoelastoplastic stress analyses using FEM. A silicon nitride plate was brazed to a carbon steel plate, a thin copper plate being sandwiched between them to eliminate the high residual stress generation by brazing. Two kinds of specimens of different sizes, $30 \times 110 \times 14$ mm and $30 \times 44 \times 5$ mm, were prepared. The residual stress on the surface of the silicon nitride was also measured by X-ray diffraction.

In the 2-D FEM, the stress was calculated by assuming the plane stress state. In the interfacial region, the stress distributions of the two specimens were similar independently of the size of the specimen. In the central region on the surface of the specimen, the stress σ_x , in the direction perpendicular to the interface, calculated by the 2-D FEM changed slowly, taking tensile and compressive values in the steel and silicon nitride, respectively. On the other hand, the 3-D FEM gave sharp compressive and tensile stress peaks in the steel and silicon nitride, respectively. As the distance from the interface increased, the stresses calculated by the 2-D and 3-D FEM agreed each other and vanished at a longer distance from the interface. The maximum tensile stress σ_x appeared at the upper and lower corners near the interface in the silicon nitride. In the interfacial region, the stress σ_x calculated by the 3-D FEM changed rapidly in the cross section of the specimen, although in the 2-D FEM the stress was assumed to be unchanged through the thickness of the specimen. These results suggest the need for the 3-D stress analysis for calculating the residual stress of the bonded dissimilar materials.

Key words: Residual stress, Stress analysis, FEM, X-ray stress measurement, Silicon nitride, Steel, Brazing, Thermal stress, Joints

1 緒 言

セラミックスは耐熱、耐食および耐磨耗性などに優れている反面、じん性に乏しいという最大の欠点を持っている。この欠点を補うために、セラミックスを拡散接合やろう付けによって金属と接合して工業用材料として用いる接合技術の研究が最近盛んに行われており、このような接合材はタービンやエンジンの部品としてすでに実用に供されている。このようなセラミックスと金属の接合材の強度上の最大の問題点は、高温で接合後、冷却過程で両材料の線膨張係数の相違によって発生する残留応力で、これが接合材の強度を支配する点である。

このような接合材の残留応力解析の多くはFEMを用いた二次元応力解析である^{(1)~(3)}。しかし、^{(4)~(6)}でも明らかにしたように、丸棒などのようにその形状から応力が軸対称または二次元的に分布すると考えられる試験片を除いて、一般的には接合界面では残留応力は三次元的に分布すると考えられる。また、接合材のFEMによる三次元弾性応力解析を行った研究もあるが、セラミックスと金属の接合材では中間材の塑性変形によって、接合する際に生じる大きい残留応力を緩和している^{(7),(8)}ので、弾性解析と弾塑性解析による応力値は大きく異なると考えられる。

本研究は試験片寸法が残留応力分布に及ぼす影響を

[†] 原稿受理 平成4年9月2日 Received Sep. 2, 1992

* 正 会 員 長岡技術科学大学機械系 〒940-21 長岡市上富岡町, Dept. of Mech. Eng., Nagaoka Univ. of Tech., Kamitomioka, Nagaoka, 940-12

** 長岡技術科学大学機械系 〒940-21 長岡市上富岡町, Dept. of Mech. Eng., Nagaoka Univ. of Tech., Kamitomioka, Nagaoka, 940-12

調べるために、寸法の異なる二種類の窒化けい素と鋼のろう付けによる接合材の残留応力を、二次元および三次元 FEM を用いた弾塑性熱応力解析によって求めるとともに、X 線回折によって試験片表面の残留応力を測定し、結果を比較検討したものである。

2 試験片および X 線による残留応力測定

試験片は常圧焼結した窒化けい素 (β - Si_3N_4) と機械構造用炭素鋼 S45C を無酸素銅の板を介してろう付けした接合材で、Fig. 1 と Fig. 2 に示す二種類の試験片 A, B を用いた。ろう付けする前に研削による両材料の加工層内の残留応力を除去するために、窒化けい素は 1270K で 24 hr 焼なまし、また鋼は 1170K で 1 hr 真空焼なましを行った。無酸素銅は、窒化けい素と鋼の線膨張係数の差によって生ずる残留応力を緩和するために用いた。

残留応力測定は、Fig. 1 と Fig. 2 に示した二つの試験片表面の窒化けい素の x と y 方向の残留応力 σ_x と σ_y を X 線によって測定した。測定は当研究室で開発した自動 X 線回折装置⁹⁾に平行ビーム光学系のスリットを取りつけて、並傾法を用いて Table I の条件で行った。回折線ピーク位置は、 ϕ 一定法を用いたガウス曲線法¹⁰⁾で決定した。ピーク位置を測定した ϕ 角は 0° , 24° , 35° および 45° である。一つのピーク位置の計算に用いた X 線計数値の数は 8~12 である。

Fig. 1. Specimen A.

Fig. 2. Specimen B.

Table I. Conditions for X-ray stress measurement.

Characteristic X-rays	Copper K α
Filter	Nickel foil
Tube voltage (kV)	40
Tube current (mA)	25
Step size (deg)	0.06
Preset time (sec)	30
Diffraction plane	(323)
Irradiated area (mm ²)	1.5 $\times$ 1.5

X 線による応力測定値には X 線強度の統計的変動に起因する測定値のばらつきを伴う。このばらつきの大きさを表わす標準偏差および信頼区間は著者の提案した式^{11),13)}を用いて 1 回の測定値から解析的に求め得る。本研究で X 線によって測定した残留応力値には、このようにして求めた応力値の 95% 信頼区間を示した。

3 FEM による二次元および三次元残留応力計算

残留応力の計算は、FEM を用いた二次元および三次元弾塑性熱応力解析によって行った。FEM のプログラムは、汎用有限要素法プログラム MARC を用いた。残留応力は、試験片を 1100K でろう付け後、ろう材が機械的強度を持ちはじめると考えられる 920K から室温 (290K) まで一様に冷却する際に生じると考えて計算した。また、窒化けい素は弾性体とし、鋼と銅は弾塑性体として、ヤング率と降伏応力の温度依存性を考慮して残留応力を計算した。計算に用いた各材料の物性値は前報⁵⁾で示したので省略した。

二次元と三次元 FEM に用いた要素モデルは、それぞれ 4 節点アイソパラメトリック四辺形要素および 8 節点アイソパラメトリック立体要素である。二次元 FEM では、応力は板厚方向には変化しないものとし、平面応力状態を仮定して応力を求めた。

4 実験結果および考察

Fig. 3 から Fig. 7 には試験片 A の表面の残留応力分布を示した。Fig. 3 は試験片 A の表面の中心線に沿った x 方向の応力 σ_x の分布である。この図から二次元 FEM と三次元 FEM による残留応力の計算値は、試験片の中心に対してほぼ点対称になるように分布していることがわかる。また、二次元 FEM による応力値は試験片中心部で窒化けい素側では圧縮の値を、また鋼側では引張りの値をとって緩やかに変化している。これに対して、三次元 FEM による応力値は接合界面近傍 (試験片中心部) で窒化けい素側では引張りの、鋼側では圧縮の鋭い応力集中を生じており、二次元 FEM の結果と全く異なった応力分布を示している。しかし、界面から離れると二次元と三次元の応力値は

Fig. 3. Residual stress σ_x distribution along the x -axis for specimen A.

ほとんど一致し、試験片両端で 0 となる。X 線によって測定した窒化けい素の残留応力値は三次元 FEM による計算値にほぼ一致している。

Fig. 4 には試験片 A の表面の中心線上の応力 σ_y の分布を示した。接合界面近傍における三次元 FEM による応力値は Fig. 3 の σ_x の場合と異なり、二次元 FEM による応力値に比べて大きい差はないが応力値の絶対値が小さい。また、 σ_y は窒化けい素側では圧縮の値を、鋼側では引張りの値をとっている。これは、鋼の線膨張係数 α は窒化けい素の α よりも約 4.5 倍大きいので、高温で接合後、鋼は窒化けい素よりも y 方向に大きく収縮するためと考えられる。

Fig. 5 には、試験片 A の上端部に沿った応力 σ_x の分布を示した。二次元 FEM と三次元 FEM による応力値には、Fig. 3 に示した試験片中心線上の値と異なり、大きい差は見られない。これは、試験片の上端部では応力 σ_y と σ_z は理論上 0 となるので、応力は近似

Fig. 4. Residual stress σ_y distribution along the x -axis for specimen A.

Fig. 5. Residual stress σ_x distribution along the upper edge of specimen A.

的に単軸応力状態になるためと考えられる。Fig. 5 の試験片上端部の応力分布の傾向は、Fig. 3 に示した試験片の中心線上の三次元 FEM による応力値の分布とよく似ているが、界面近傍の応力値の絶対値は中心線上の値に比べてかなり大きい。接合材試験片に生ずる引張りの最大応力 σ_x は、Fig. 5 からわかるように窒化けい素側の上端部の界面近傍に生ずる。接合材の破壊がこの部分からよく生ずるのはこのためである。

Fig. 6 には試験片 A の窒化けい素側の界面に沿った応力 σ_x の分布を示した。いずれの方法で求めた応力値も試験片中心部では大きい変化はみられないが、試

Fig. 6. Residual stress σ_x distribution of the silicon nitride along the line 0.5 mm away from the interface for specimen A.

Fig. 7. Residual stress σ_y distribution of the silicon nitride along the line 0.5 mm away from the interface for specimen A.

験片上端部に急激に大きい引張りの値をとっている。Fig. 3と同様に、試験片中心部では二次元 FEM と三次元 FEM による応力値はかなり異なっている。X 線によって測定した応力値は、三次元 FEM による応力値よりもやや高い値をとっているが、三次元 FEM による値に最も近い。

Fig. 7 は試験片 A の表面の窒化けい素側の界面に沿った σ_y の分布を示した。いずれの方法で求めた応力値も試験片中心部でかなり大きい圧縮の値をとり、試験片上端部に近づくにつれて応力値は 0 に近づいていく。

Fig. 8 から Fig. 12 には、試験片 B の表面の残留応力分布を示した。残留応力分布の傾向は、Fig. 3 から Fig. 7 に示した試験片 A の結果とよく似ており、試験片の寸法の相違による残留応力分布に大きい相違は見られない。Fig. 9 に示した試験片表面の中心線上の応力 σ_y は、試験片の左右両端でそれぞれ圧縮と引張りの残留応力を生じている。これは高温で接合後、冷却

過程で生ずる窒化けい素よりも大きい鋼の y 方向の収縮によって Fig. 9 に示したように界面に生ずる曲げモーメント M によるものと考えられる。また、Fig. 5 と Fig. 10 に示したように試験片上端部の界面近傍に生じている窒化けい素側と鋼側の引張りと圧縮の残留応力の最大値も、このような界面に生じる曲げモーメント M によるものと考えられる。

Fig. 13 から Fig. 18 には、三次元 FEM で計算した試験片 A と B の等応力線図を示した。Fig. 13 と Fig. 14 は、それぞれ試験片 A と B の表面の σ_x の等応力線図である。これらの図から、界面近傍では高い応力 σ_x が集中しており、二つの試験片の応力分布の傾向は試験片の寸法の相違にもかかわらず、よく似ていることがわかる。試験片 A の応力分布を示した Fig. 13 および Fig. 3~Fig. 5 からわかるように、界面から試験片の幅 (30 mm) よりも大きく離れると、応力は界面の影響を受けずにはほぼ 0 となる。

Fig. 8. Residual stress σ_x distribution along the x -axis for specimen B.

Fig. 9. Residual stress σ_y distribution along the x -axis for specimen B.

Fig. 10. Residual stress σ_x distribution along the upper edge of specimen B.

Fig. 11. Residual stress σ_x distribution of the silicon nitride along the line 0.4 mm away from the interface for specimen B.

Fig. 15 と Fig. 16 は、それぞれ試験片 A と B の界面に直交する中心線 (x 軸) を含む断面内の応力 σ_x の分布である。二次元 FEM では応力とひずみは深さ方向には変化しないと仮定しているが、Fig. 15 と Fig. 16 に示した三次元 FEM による実際の応力分布は、界面近傍で応力が集中しているのみならず、応力は深さ方向にも急激に変化している。

Fig. 17 と Fig. 18 には、それぞれ試験片 A と B の界面に直交する中心線 (x 軸) を含む断面内の応力 σ_z の分布を示した。二次元 FEM では、 σ_z は断面内で 0 と仮定している。しかし、Fig. 17 と Fig. 18 に示した三次元 FEM の結果では、 σ_z は試験片表面では 0 であるが、試験片断面の中心部ではかなり高い値をとっていることがわかる。これは接合材の冷却過程で x と y 方向のみならず、 z 方向にも生ずる収縮量がセラミックと金属との大きい線膨張係数の差によって両材料で大きく異なり、この収縮が接合界面で強い拘束を受けるためと考えられる。

このように接合界面で残留応力が三次元的に分布す

Fig. 12. Residual stress σ_y distribution of the silicon nitride along the line 0.4 mm away from the interface for specimen B.

Fig. 13. Contour lines of stress σ_x on the surface of specimen A.

る詳しい理由は、接合材に発生する残留応力に対する解析解が得られていないので明らかではないが、定性的には次のように説明できる。まず、鋼と銅の線膨張係数は窒化けい素の係数よりもそれぞれ約 4.5 倍および 6.7 倍大きいので、高温で接合後、冷却過程で鋼と銅は窒化けい素よりも大きく収縮する。この収縮は三次元的に生ずるが、接合界面では特に y と z 方向にこの収縮が強く拘束され、 y と z 方向にも応力が生ずる。このような熱収縮による界面の三次元的ひずみは試験片の板厚には無関係に生ずるはずである。

また、ある一方向にひずみ ϵ が生ずるとこれに直交する二方向には $-\nu\epsilon$ (ν はポアソン比) のひずみが生ずる。しかし、界面では両材料の弾性定数の相違によってこのひずみが拘束を受ける結果、応力が生ずる。さらに、界面近傍に生ずるある方向の大きいひず

Fig. 14. Contour lines of stress σ_x on the surface of specimen B.

Fig. 15. Contour lines of stress σ_x in the cross section along the x -axis for specimen A.

Fig. 16. Contour lines of stress σ_x in the cross section along the x -axis for specimen B.

Fig. 17. Contour lines of stress σ_z in the cross section along the x -axis for specimen A.

Fig. 18. Contour lines of stress σ_z in the cross section along the x -axis for specimen B.

み ε に伴ってこれに直交する二方向に生じようとするひずみ $-\nu\varepsilon$ は、周囲のひずみの小さい部分の拘束を受ける。これも応力が三次元的に分布する一つの理由であると考えられる。

なお、本研究で用いたような接合材は両材料の線膨張係数 α の差によって生ずる残留応力を緩和するために、銅のような容易に塑性変形する材料を中間材として用いるのが通常である。このような材料は通常、融点が高いので、耐熱性に優れたセラミックスを接合材として高温で用いる際には、接合界面の強度が問題となる。したがって、セラミックスと金属の接合材には、接合する二つの材料の線膨張係数 α の差ができるだけ小さい材料の組合わせを選ぶことが理想的であるが、多くのセラミックスの α は金属の α よりもかなり小さい。

ところで、鉄鋼材料に析出物として含まれているセメントイト Fe_3C は母材のフェライトの数倍の硬度をもっているにもかかわらず、その弾性係数と α はフェライトの値と大差はない¹⁴⁾。したがってセメントイトのようなセラミックスを鉄鋼と接合すれば発生する残留応力が小さいのみならず、接合後、両材料の弾性定数の相違のために外力によって接合界面に発生する高い応力を低減することができる。強度の高いセラミックスと金属の接合材を得るために、将来このようなセラミックスの開発が望まれる。

なお、本研究における二次元 FEM 解析では、残留応力値は平面応力のみならず平面ひずみ状態¹⁸⁾についても同様に求めたが、両者には大きい差はなかった。しかし、本研究で用いた試験片の形状および試験片表面に対して平面ひずみ状態を仮定するのは妥当でないと

考えられるので、本論文では平面応力状態を仮定して求めた応力値のみを示した。

5 結 論

寸法の異なる二種類の窒化けい素と鋼のろう付けによる接合板に生ずる残留応力を二次元（平面応力）および三次元 FEM を用いた弾塑性熱応力解析によって求めるとともに、窒化けい素の表面の残留応力を X 線によって測定し、結果を比較検討した。得られた主な結論は、次の通りである。

- (1) 接合材の残留応力は三次元的に分布するので、残留応力を計算するためには三次元弾塑性応力解析が必要である。
- (2) X 線によって測定した残留応力は、三次元 FEM によって求めた応力値に最も近い値をとる。
- (3) 本研究で用いた二つの試験片の接合界面近傍の残留応力の分布の傾向はよく似ており、残留応力分布に及ぼす試験片寸法の影響は小さいと考えられる。
- (4) 高い応力は接合界面近傍に集中し、界面から遠ざかるにつれて二次元 FEM と三次元 FEM による応力値は一致するのみならず、応力値は減衰し 0 に近づく。また、試験片 A では、界面から試験片の幅 (30 mm) よりも大きく離れると、応力は界面の影響を受けずほぼ 0 となる。
- (5) 引張りの応力値 σ_x の最大値は、窒化けい素の表面の界面近傍の角部に生ずる。

なお、本研究で用いた試験片は日本溶接協会セラミック部材接合技術の試験・評価方法の研究委員会から供与されたものである。

(平成 4 年 7 月 24 日 日本材料学会第 28 回 X 線材料強度に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) S. Suganuma, T. Okamoto and K. Kamachi, J. Mater. Sci., **22**, 2702 (1987).
- 2) B. T. J. Stoop and G. den Ouden, "Joining Ceramics, Glass and Metal (ed. W. Kraft)", 235 (1989) DGM Informationsgesellschaft mbH Oberursel
- 3) K. J. Ferenc and K. Tomaszewski, "Joining Ceramics, Glass and Metal (ed. W. Kraft)", 317 (1989) DGM Informationsgesellschaft mbH Oberursel
- 4) 栗田政則, 井原郁夫, 佐藤 誠, 斎藤 明, 福沢 康, 田中俊一郎, 日本機械学会論文集, A-56, 978 (1990).
- 5) 栗田政則, 狩野 隆, 佐藤 誠, 日本機械学会論文集, A-57, 907 (1991).
- 6) M. Kurita, M. Sato, J. Advanced Science, **2-3**, 169 (1990).
- 7) 田中俊一郎, 日本金属学会会報, **29**, 924 (1990).
- 8) S. Tanaka, "Residual Stresses-III, Science and Technology (ed. H. Fujiwara and K. Tanaka)", 887 (1992) Elsevier London

- 9) 栗田政則, 崎山勝則, 酒井 均, 矢田敏夫, 宮川松男, 日本機械学会論文集, A-54, 854 (1988).
- 10) 栗田政則, 非破壊検査, 39, 243 (1989).
- 11) 栗田政則, 日本機械学会論文集, A-55, 590 (1989).
- 12) M. Kurita, J. Testing and Evaluation, 9, 285 (1981).
- 13) M. Kurita, J. Testing and Evaluation, 9, 133 (1981).
- 14) 栗田政則, 斎藤 明, 井原郁夫, 日本機械学会論文集, A-58, 987 (1992).
- 15) D. B. Bogy, J. Appl. Mech., 42, 93 (1975).
- 16) 栗田政則, 藤田 真, 永沢 茂, 高橋治道, 日本機械学会論文集, A-58, 2159 (1992).
- 17) 栗田政則, 藤田 真, 米田清博, 日本機械学会講演論文集, Vol. A, No. 920-17, 309 (1991).
- 18) 栗田政則, 飯島 純, 米田清博, 斎藤 明, 日本材料学会第28回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, 171 (1992).

書 評

“講座・レオロジー”

日本レオロジー学会 (編)

(1992年, (株)高分子刊行会発行, A 5 判, 263ページ, 4000円)

本書は, 日本レオロジー学会が十数年にわたって開催し好評を得てきた“レオロジー講座”の成果をベースに, 新しく編集されたレオロジーの入門的教科書である。

本書は全8章より成り, 第1章は「レオロジー序論」と題する入門編である。我国におけるレオロジーの展開を含めて, いわゆる現象論的取扱いが平易に解説されている。レオロジーが「物質が関与するあらゆる科学の分野を変形・流動というキーワードで横断的にカバーする一般的な概念」である以上, 一定の数学的形式を避けることはできない。この章の著者は大胆にも「本章が理解できないときは, レオロジーの勉強はあきらめていただきたい」と述べている。

第2, 3章は高分子液体および固体のレオロジーの, 主として線型粘弾性理論に基づく解説である。続いて第4章では「高分子ダイナミクス」としてレオロジーの分子論的理解への努力が記述されている。この3章は入門を越えて標準的なテキストブックのレベルに至っている。いずれも見事な解説が与えられており, 第1章を読んで解らなかった人もぜひここまでは学習を続けて, その後に第1章を再読してみれば, レオロジー攻略の第1歩は確実なものとなるだろう。

第5, 6, 7章は各論あるいは応用編の性格を有している。しかし, 第5章はむしろレオロジーの新しい基礎面に焦点をあてた記述で新鮮味がある。第6章は標準的なテキストブックでは取扱われることの少ない「反応系のレオロジー」の解説である。スペースの制限からやむを得ないとはいえ, 熱硬化性樹脂に話題が限定されている。このタイトルの下にはウレタン系を中心とした RIM (Reaction Injection Molding) やゴムの架橋などが含まれるべきであろう。リアクティブ・プロセッシングの展開と関連して, 改訂の際にはより充実した章となることが望まれる。第7章は「高分子加工のレオロジー」を簡潔にまとめている。各論に終始しがちな内容が, 「成形加工に必要なレオロジー」の観点に立ってまとめられており, 入門の仕上げとして出色のものであろう。

第8章には「高分子液体の構成方程式」がまとめて解説されている。このレベルの入門書よりは, 専門書に含まれるべきものではあるが, CAE の普及にともなって入門レベルにおいても一定の場所を占めるべきだということで, 付録として1つの章が割当てられている。

“レオロジー”という誠にパワーフルな学問に, そのパワーを全開させるべく世に出た久し振りの良書というべきであろう。本書1冊だけで充分ということではないが, レオロジーへの入門を志す人と既に学習中の研究者・技術者・学生にとって必携の1冊として自信を持って推薦できる書である。

(京都工芸繊維大学工芸学部 梶谷 信三)