セラミックス/金属接合残留応力分布の有限要素解析*

羅 芳 毅^{*1}, 小 林 英 男^{*2}
佐 藤 拓 哉^{*3}, 朴 榮 哲^{*4}FEM Analysis of Residual Stress Distribution
in Ceramics/Metal JointsFangyi LUO, Hideo KOBAYASHI,
Takuya SATO and Young-chul PARK

Residual stress distributions of Si_3N_4 /SUS304 joints with insert layer of copper were analyzed by a 2-dimensional thermo-elastic-plastic finite-element method (FEM). By superposition of plane-stress and plane-strain models, the analytical result showed good agreement with the measurement result of the X-ray diffraction method. It was found that residual stress was concentrated near the interface. The stress perpendicular to the interface is tensile at the ceramic side and compressive at the metal side. Stress singularities near the interface can be also studied by finite-element analysis. The result showed that the exponent of a stress singularity at an edge was smaller than that at the center of the specimen, although the intensity coefficient at the edge was larger.

Key Words: Ceramics/Metal Joint, Residual Stress, Thermal Stress, Finite-Element Method, Superposition Principle, Stress Concentration, Stress Singularity

1. 緒 言

セラミックスの優れた耐食性、耐熱性を活かし、低靱性を補う方法として、靱性の高い金属との接合が脚光を浴びている。セラミックス/金属接合は通常、中間層を挿入して高温で固相(拡散)接合やろう付けによって行われるので、接合材には冷却の過程で両材料の熱膨張係数と弾性係数の相違によって接合残留応力が発生し、接合材の強度に大きな影響を及ぼす⁽¹⁾⁽²⁾。接合強度の向上と接合の信頼性の確保には、接合残留応力の大きさと分布を正確に知ることが重要であり、残留応力の測定と解析の両面から研究が進められてきた⁽³⁾⁻⁽¹⁰⁾。測定方法としては、X線法、超音波法、IF法などがあり、残留応力分布の定量的測定に有効であるが、界面近傍の残留応力の測定は難しいので、残留応力の特異応力場の特性を調べることができない。中間層の弾塑性挙動が問題となる実用接合材の解析方

法としては、有限要素法と境界要素法が用いられている。接合残留応力を正確に評価するために、3次元解析が必要とされるが、3次元弾塑性解析の計算量は膨大となる。そこで、2次元解析結果から3次元分布を推定する手法が研究されてきた⁽⁶⁾。

著者らはX線法を用いて、銅(Cu)を中間層とした窒化珪素(Si_3N_4)とオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)の接合材の残留応力を定量的に測定し、その分布特性を明らかにした⁽¹¹⁾。本研究では、実験に供した試験片を対象として、有限要素法による接合残留応力の2次元熱弾塑性解析を行った。2次元解析結果の適切な重ね合わせによって3次元分布を推定し、X線法による測定結果と比較した。また、界面近傍の残留応

図1 試験片と解析領域 (単位: mm)

* 原稿受付 平成5年8月19日。

^{*1} 東京工業大学大学院。^{*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, 日揮(株) DE本部技術部 (〒232 横浜市南区別所1-14-1)。^{*4} 東亜大学校工科大学 (韓国釜山市沙下区下端洞840)。

力の特異応力場の特性について検討した。

2. 解析方法

セラミックスと金属の接合は高温で行われるが、高温ではろう材が強度を持たないので、セラミックス、金属ともに自由に熱変形し、応力は生じない。冷却が進み、ろう材が強度を持ち始めると、熱膨張係数の異なるセラミックスと金属が接合面で熱変形を拘束し合うようになり、接合熱応力が発生する。ここでは、ろう材が強度を持ち始める温度を800Kとし、この温度から室温(300K)まで冷却される場合について、汎用構造解析プログラムMARCを用いて、熱弾塑性応力解析を行った。なお、温度変化は十分緩やかに行われ、非定常温度分布の影響はないものとした。

解析対象は実験に供した試験片と同一で、銅(Cu)を中間層とした窒化珪素(Si_3N_4)とオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)の接合材である。試験片の形状と寸法を図1に示す。試験片の対称性を考慮し、さらに接合界面から10mm以上離れた領域では界面の影響がほとんどないと考えられるので、図1に示す上表面ABCD、端面BFGCと中央縦断面AEHDをそれぞれ解析領域とした。面ABCDと面BFGCは面垂直方向応力が0であるので、平面応力モデルとし、面AEHDは面垂直方向ひずみが0で

表1 室温における材料特性

	Si_3N_4	Cu	SUS304
E(GPa)	304	108	193
ν	0.27	0.33	0.3
α (/K)	3.0×10^{-6}	17.7×10^{-6}	16.5×10^{-6}
σ_y (MPa)	—	20	—
H(MPa)	—	84	—

あるので、平面ひずみモデルとした。

要素分割を図2に示す。応力が集中する接合界面と端部近傍(平面応力モデルABCDとBFGCのBCライン、平面ひずみモデルAEHDのADライン)は細分割、その他の領域は粗分割とした。使用した要素は8節点平面応力要素(平面応力モデル)、あるいは8節点平面ひずみ要素(平面ひずみモデル)、要素数は540個、節点数は1749個である。境界条件は対称条件のみとし、それ以外の変形は自由とした。

室温における各材料の材料特性を表1に、縦弾性係数(E)、熱膨張係数(α)の温度依存性を図3に示す⁽¹⁰⁾。窒化珪素のEと α は温度依存性を示さないが、オーステナイト系ステンレス鋼と銅のEは温度上昇に伴い減少し、逆に α は温度上昇に伴い増大する。ポアソン比(ν)は温度によらず一定とした。銅の室温における応力-ひずみ関係(線形ひずみ硬化則近似、降伏応力 σ_y 、ひずみ硬化係数H)を図4に示す⁽¹⁰⁾。銅の応力-ひずみ

図2 メッシュ分割

(a) 縦弾性係数 (b) 熱膨張係数

図3 材料特性の温度依存性

図4 銅の応力-ひずみ関係

関係は温度依存性を示すが、室温における接合残留応力は銅の室温における降伏応力に支配されるので⁽¹²⁾、解析には銅の室温における応力-ひずみ関係(図4)を用いた。銅の降伏条件としては、ミーゼス条件を仮定した。なお、ろう材は非常に薄いので($<50\mu\text{m}$)、解析モデルにはろう材を含めていない。

3. 解析結果

X線法で残留応力を測定した領域は、図1に示す試験片の上表面である。したがって、試験片の上表面の残留応力分布を検討の対象とする。

3.1 界面垂直方向残留応力 平面応力モデルABCDの解析結果として、端部線上(BCライン, $y=0.014\text{mm}$)と中央線上(ADライン)に沿う界面垂直方向残留応力 σ_x の分布を図5に示す。端部線上の σ_x は界面近傍に集中しており(応力特異性を示す)、セラミックス側で引張、金属側で圧縮となっている。界面からの距離 x の増大に伴い応力の絶対値が減少し、界面から約4.0mmの位置ではほぼ0になる。端部線上の σ_x 分布は、後述するように、X線法による測定結果と定性的に一致して

図5 平面応力モデルABCDの端部線上と中央線上の σ_x の x 方向分布

図6 平面応力モデルBFGCの端部線上の σ_x の x 方向分布

いる(図8参照)。一方、中央線上の σ_x は逆にセラミックス側で圧縮、金属側で引張となっている。界面近傍でセラミックス側の圧縮から金属側の引張へと連続的に変化しており(応力特異性を示さない)、後述するように、X線法による測定結果とまったく異なる分布をしている(図9参照)。この原因として、平面応力モデルABCDでは、試験片の厚さ方向(z 方向)の収縮が考慮されていないことが考えられる。

試験片の厚さ方向の収縮の影響を考慮するためには、3次元解析を必要とするが、計算量が膨大になる。そこで、2次元解析結果から3次元分布を推定する手法が開発されてきた。佐藤らは弾性解析の場合に、平面応力モデルABCDとBFGCの端部線上(BCライン)の σ_x を単純に重ね合わせれば、3次元分布の端部線上の σ_x が近似的に得られること、また平面応力モデルABCDの中央線上(ADライン)の σ_x と平面ひずみモデルAEHDの端部線上(ADライン)の σ_x を単純に重ね合わせれば、3次元分布の中央線上の σ_x が近似的に得られることを示した⁽⁶⁾。本解析は弾塑性解析であるが、中間層しか降伏していないので、上記の重ね合わせの原理を適用する。

平面応力モデルBFGCの端部線上の σ_x の x 方向分布を図6に、平面ひずみモデルAEHDの端部線上の σ_x の x 方向分布を図7に示す。

セラミックス側の3次元分布の端部線上の σ_x を近似的に得るために、平面応力モデルABCDとBFGCの端部線上の σ_x を重ね合わせた結果を△印で図8に示す。比較のために、重ね合わせる前の平面応力モデルABCDの σ_x を□印で、X線法による測定結果(23の本試験片の平均値と標準偏差, $y=0.5\text{mm}$)を▲印で示す。解析結果の位置($y=0.014\text{mm}$)と測定結果の位置($y=0.5\text{mm}$)は多少異なるが、 σ_x の y 方向の変化は小さく、比較に問題はない。重ね合わせの解析結果は測定結果と定量的に

図7 平面ひずみモデルAEHDの端部線上の σ_x の x 方向分布

よく一致している。

セラミックス側の3次元分布の中央線上の σ_x を近似的に得るために、平面応力モデルABCDの中央線上の σ_x と平面ひずみモデルAEHDの端部線上の σ_x を重ね合わせた結果を○印で図9に示す。比較のために、重ね合わせる前の平面応力モデルABCDの σ_x を□印で、X線法による測定結果(14本の試験片の平均値と標準偏差)を●印で示す。重ね合わせの解析結果は測定結果よりも少し低めであるが、定性的な傾向は一致している。

X線法によるセラミックス側の σ_x の測定結果は、端部線上(BCライン)と中央線上(ADライン)で定性的には一致するが、定量的には異なる⁽¹¹⁾。この差異の原因が、上記の2次元モデルの重ね合わせの解析結果で明らかにされた。すなわち、セラミックス側の残留応力 σ_x に注目すれば、接合界面におけるセラミックスと金属の幅方向(y方向)の熱収縮差は端部線上で引張残留応力を生ずるのに対して、中央線上で圧縮残留応力を生ずる(平面応力モデルABCD、図5参照)。しかも、端部線上の引張残留応力は界面近傍に集中する(応力特異性を示す)のに反して、中央線上の圧縮残留応力は界面近傍で集中しない(応力特異性を示さない)。一方、X線法による測定結果では、中央線上の引張残留応力

図8 重ね合わせによる端部線上の σ_x のx方向分布

図9 重ね合わせによる中央線上の σ_x のx方向分布

も界面近傍に集中しており(応力特異性を示す)、上記の平面応力モデルABCDの解析結果と全く異なる。図1を参照して、3次元を考慮した場合、表面ABCD上の中央線上(ADライン)は、断面AEHD上の端部線上(ADライン)にはかならない。厚さ方向(z方向)の熱収縮差は端部線上で引張残留応力を生じ、応力特異性を示す(平面ひずみモデルAEHD、図7参照)。上記の2次元モデルの解析結果を重ね合わせれば、中央線上で引張残留応力が応力特異性を示し、かつ界面から離れた位置で比較的大きな圧縮残留応力のピークを示すというX線法による測定結果を説明できる。

以上のセラミックス側の界面垂直方向残留応力 σ_x の解析結果と測定結果を比較して、面ABCD上の分布を図10に示す。

3.2 界面平行方向残留応力 平面応力モデルABCDのセラミックス側の中央線上の界面平行方向残留応力 σ_y のx方向分布を○印で、X線法による測定結果(3本の試験片の平均値と標準偏差)を●印で図11に示す。 σ_y は界面近傍で圧縮で、界面からの距離xの増大に伴い0に急減する傾向を示す。解析結果は測定結果と定性的に一致している。

平面応力モデルABCDのセラミックス側の界面近傍($x=0.01\text{mm}$)の σ_y のy方向分布を△印で、 $x=0.42\text{mm}$ の分布を○印で、X線法による測定結果(3本の試験片の平均値と標準偏差、 $x=0.5\text{mm}$)を●印で図12に示す。界面近傍の σ_y のx方向の変化は著しく(図11参照)、測定結果はX線の照射面積 $\phi 0.5\text{mm}$ の平均値と考えられる。測定結果は両端部で△印($x=0.01\text{mm}$)と○印($x=0.42\text{mm}$)の解析結果の中間に位置し、中央部で△印($x=0.01\text{mm}$)

図10 上表面の界面垂直方向残留応力 σ_x の分布

の解析結果とはほぼ一致している。したがって、解析結果は測定結果とはほぼ一致しているとみなせる。

上記の解析結果とX線測定結果の比較からわかるように、界面におけるセラミックスと金属の幅方向（y方向）の熱収縮差は、界面垂直方向残留応力 σ_x と界面平行方向残留応力 σ_y に影響を及ぼす。また、厚さ方向（z方向）の熱収縮差は、界面垂直方向残留応力 σ_x に影響を及ぼし、界面平行方向残留応力 σ_y には影響を及ぼさない。したがって、界面垂直方向残留応力 σ_x を予測する場合には、幅、厚さの両方向の熱収縮差を考慮しなければならないので、重ね合わせの必要があり、界面平行方向残留応力 σ_y を予測する場合には、幅方向の熱収縮差だけを考慮すればよいので、重ね合わせの必要はないと考えられる。

一般には、2次元弾塑性解析の重ね合わせの結果は、3次元弾塑性解析結果と一致しないと考えられる。しかし、き裂の問題のように、小規模降伏であれば、両者は一致する。セラミックス/金属接合材の場合には、塑性変形が局所的な中間層に限定されていることが、重ね合わせが成立する条件となっていると考えられる。接合残留応力の解析では、重ね合わせが成立する条件を定量的に検討することは、不適切である。今後、負

図11 中央線上の σ_y のx方向分布

図12 界面近傍の σ_y のy方向分布

荷応力の解析で、重ね合わせが成立する条件を詳細に検討する必要がある。

3.3 残留応力の弾塑性特異性 接合残留応力は接合界面近傍で応力特異性を持つことが指摘されている^{(13)~(16)}。X線法による残留応力測定では、特異応力場の特性を調べることができない⁽¹¹⁾。したがって、解析結果を用いて特異応力場の特性を検討する。

重ね合わせの解析結果を用いて、セラミックス側の端部線上と中央線上の σ_x のx方向分布を、両対数表示して図13に示す。界面から約0.6mm以内の領域で応力分布は直線的になっていることがわかる。すなわち、次式が成立する。

$$\log \sigma_x = \log K - \lambda \log x \quad (1)$$

$$\sigma_x = K/x^\lambda \quad (2)$$

式(2)は残留応力分布の応力特異性を示す。Kは特異応力場の強さ、 λ は応力特異性の指数である。弾性体の場合、Kと λ は接合材料の縦弾性係数、ポアソン比、熱膨張係数に依存する。中間層の銅が降伏する場合には、さらに銅の弾塑性特性の影響を受ける⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

最小二乗法近似で得られたKと λ を図13に示す。端部線上の λ は中央線上の λ より小さく、端部線上のKは中央線上のKより大きい。なお、重ね合わせの解析結果を用いない場合、結果が大きく異なることは注意を要する。例えば、平面応力モデルABCDの端部線上の λ は変わらないが、Kは1/2に減少し、中央線上では応力特異性を示さない。特に、中央線上の σ_x が平面応力モデルABCDの予測に反して、応力特異性を示すことは重要である。これは前述したように、表面ABCD上の中央線上は、断面AEHD上の端部線上にほかならないということである。

以上、有限要素法による接合残留応力分布と界面近傍残留応力分布の特異性について検討したが、有限要

図13 界面近傍の σ_x の応力特異性

素法による解析に際しては、中間層、ろう材の物性値、接合温度条件などの設定の精度が結果にかなり大きな影響を及ぼす。また、実際の接合材の接合状態や残留応力に影響を与える因子は複雑であるので、有限要素法で得られた残留応力が実際の試験片の残留応力と必ずしも一致するとは限らない。したがって、残留応力の解析結果を部分的に測定結果と比較し、解析条件の設定の検証を行う必要がある。この目的に対して、X線法による残留応力測定が有用である。解析条件の設定が検証されれば、多岐にわたる接合材の形状・寸法を対象として、有限要素法による簡便な残留応力の評価が可能となる。

4. 結 論

銅(Cu)を中間層とした窒化珪素(Si_3N_4)とオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)の接合材について、接合残留応力の有限要素法による2次元熱弾塑性解析を行った。2次元解析結果の適切な重ね合わせによって3次元分布を推定し、X線法による測定結果とよく一致することを示した。また、接合残留応力の特異応力場の特性について検討した。得られた結果を要約すれば、以下のとおりである。

(1) 接合材の幅方向、厚さ方向のそれぞれの拘束を表示する2次元の平面応力モデルと平面ひずみモデルの解析結果の適切な重ね合わせによって、3次元残留応力分布の推定が可能であり、解析結果はX線法による測定結果とよく一致する。

(2) 界面ごく近傍で残留応力分布は応力特異性を示す。有限要素法による解析によって、特異応力場の特性を評価できる。界面垂直方向残留応力の端部線上の応力特異性の指数は、中央線上の応力特異性の指数

より小さいが、特異応力場の強さは大きい。

本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託により、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が実施した「セラミック部材接合技術の試験・評価方法の開発」の一環として行われた。関係各位に謝意を表する。

文 献

- (1) 小林, 溶接学会誌, 58-8(1989), 559.
- (2) 小林・荒居・中村・中村, 機論, 55-512, A(1989), 750.
- (3) 田中, 日本金属学会会報, 29-11(1987), 924.
- (4) 栗田・井原・佐藤・斉藤・福沢・田中, 機論, 56-524, A(1990), 978.
- (5) 佐藤・小林・荒居, 圧力技術, 29-4(1991), 230.
- (6) 佐藤・小林・荒居, 機論, 57-540, A(1991), 1801.
- (7) 佐藤・小林・荒居, 機論, 57-543, A(1991), 2702.
- (8) 佐藤・小林・荒居, 機論, 58-548, A(1992), 552.
- (9) 荒居・小林, 機論, 59-559, A(1993), 627.
- (10) 小林・他, セラミック部材接合技術の試験・評価方法の研究成果報告書, 日本溶接協会, (1990-1993)
- (11) 羅・朴・小林, 機構論, No. 930-70, (1993), 619.
- (12) 羅・小林・佐藤, セラミックス/金属接合残留応力に及ぼす熱サイクルの影響に関する有限要素法解析, 機論, 60-569, A(1994), 掲載予定.
- (13) Bogy D.B., Trans ASME J. Appl. Mech., 35(1968), 460.
- (14) Bogy D.B., Int. J. Solids Structures, 6(1970), 1287.
- (15) Bogy D.B., Trans ASME J. Appl. Mech., 38(1971), 377.