丸棒異種材料接合体の残留応力解析に関する検討* (熱弾性問題における軸対称状態と平面ひずみ状態との比較)

立野昌義^{*1}, 福沢 康^{*2}, 永沢 茂^{*3}
佐久田 博司^{*4}, 小島 陽^{*2}

Investigation of Residual Stress Analysis on Joined Cylindrical Dissimilar Materials (Comparison of Axisymmetric Condition with Plane-Strain Condition on Thermal Elastic Problem)

Masayoshi TATENO, Yasushi FUKUZAWA, Shigeru NAGASAWA,
Hiroshi SAKUTA and Yo KOJIMA

Since joined axisymmetric dissimilar materials have constant hoop stress distribution around the edge near the interface, the basic data concerning residual stress should be evaluated. To solve a 2-dimensional joined dissimilar materials system with a theoretical Thermal elastic problem, analysis under the plane-strain condition is needed, but it is possible or not possible to apply the axisymmetrical condition. In this paper, correlation between an axisymmetric condition and plane-strain analysis is discussed for a cylindrical joined material with a suitable residual stress problem.

Key Words: Finite Element Method, Plane-Strain, Axisymmetric, Joined Dissimilar Materials
Index of Stress Singularity, Residual Stress, Thermal Elastic Analysis

1. はじめに

接合する材料間の熱膨張係数及び弾性係数の差異に起因する残留応力は異種材料接合体の強度を低下させる重要な因子の1つである⁽¹⁾。接合体残留応力に関する検討は、X線等による実測及び有限要素法又は境界要素法等の数値解析を用いて行われている。これらの研究では、異種材料接合体の残留応力を評価する場合、3次元モデルを用いる必要があると指摘している⁽²⁾⁽³⁾。一方、接合体の残留応力解析を行う際、接合端部の応力特異性が重要視され、2次元理論弾性解析結果⁽⁴⁾と比較評価される。しかし、実際の平板状の接合体の応力場は3次元的な応力集中が存在するため⁽³⁾、あるいは接合体構成材料は弾塑性体であるため、2次元理論弾性解析結果を実際の平板状接合体の弾塑性挙動に適用することは困難であると考えられる。

しかし、通常、接合体の残留応力に関する基礎データ取得のための実験では、接合端部の自由表面に沿った応力分布が一定になり、応力が2次元的に分布すると思われる丸棒接合体(軸対称状態)を適用するこ

とが望ましいと考えられる。また、一方が弾性体、他方が弾塑性体で構成される接合体の熱弾塑性挙動を評価する際、弾塑性体側を非常に低い弾性係数を有する弾性体と見なして熱弾性解析することが可能である⁽⁵⁾。

これらのことから、仮に、軸対称状態が平面ひずみ状態で近似出来れば、実際の丸棒異種材料接合体の熱弾塑性挙動を2次元熱弾性解析で代替評価することが可能である。しかし、丸棒接合体の熱弾性問題において、平面ひずみ状態の熱弾性解析結果が軸対称状態に工学的に適用可能かは明かではない。従って、実際の接合体の応力特性を評価するのに適切と考えられる軸対称状態に、平面ひずみ状態の熱弾性解析結果を適用可能かを明確にしておく必要がある。そこで本報では、材料の組み合わせを系統的に変更させて、熱弾性解析を行ない、平面ひずみ状態及び軸対称状態における各方向応力の比較を行った。この結果を基にして、軸対称状態の応力分布を平面ひずみ状態のそれで代替評価の可能性を検討した。

2. 理論熱弾性解析

2・1 平面ひずみ状態

図1に示す様な局所座標を用い、弾性理論を適用することで、熱応力問題の解を得ることができる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

* 原稿受付 平成4年8月6日。

^{*1} 学生員, 長岡技術科学大学大学院 (〒940-21 長岡市上富岡町1603-1)。

^{*2} 長岡技術科学大学工学部。

^{*3} 正員, 長岡技術科学大学工学部。

^{*4} 正員, 青山学院大学理工学部 (〒157 東京都世田谷区千歳台6-16-1)。

端部の角度が、 ϕ_1, ϕ_2 である異種材料接合体に一樣な温度変化を与える場合の接合端部近傍の応力状態は2次元弾性解析結果を用いると以下のように示される。一般に、接合端部近傍の熱応力問題の解は、温度あるいは温度勾配に関する項と境界条件を満足させるために加えた項から成り立ち⁽⁵⁾⁽⁶⁾、(1)式の様に、表現する事が出来る⁽⁵⁾。

$$\sigma_{ij} = F_{ij} \cdot r^{\lambda} + \sigma_{p0j} \quad (1)$$

F_{ij} は応力場の強さ、 r は特異点からの距離を示す。 λ は、応力特異性指数であり、(2)式を満足する根のうちで、 $-1 < \text{Re}(\lambda) < 0$ を満足する最も小さい実部の根である。

$$D(\phi_1, \phi_2, \alpha, \beta, \lambda) = A\beta^2 + 2B\alpha\beta + C\alpha^2 + 2D\beta + 2E\alpha + F = 0 \quad (2)$$

ここで、

$$\begin{aligned} A &= 4K(\lambda, \phi_1)K(\lambda, \phi_2) \\ B &= 2(1+\lambda)^2[\sin^2 \phi_2 K(\lambda, \phi_1) + \sin^2 \phi_1 K(\lambda, \phi_2)] \\ C &= 4(1+\lambda)^2[(1+\lambda)^2 - 1]\sin^2 \phi_2 \sin^2 \phi_1 \\ &\quad + K(\lambda, \phi_2 - \phi_1) \\ D &= 2(1+\lambda)^2[\sin^2 \phi_2 K(\lambda, \phi_1) - \sin^2 \phi_1 K(\lambda, \phi_2)] \\ E &= -D + K(\lambda, \phi_1) - K(\lambda, \phi_2), \quad F = K(\lambda, \phi_2 + \phi_1) \\ K(\lambda, \phi) &= \sin^2[\phi(1+\lambda)] - (1+\lambda)^2 \sin^2 \phi \end{aligned}$$

である。また、 α と β は、Dundurs⁽⁷⁾の無次元化パラメータであり、次式のように定義される。

$$\alpha = \frac{kn_2 - m_1}{kn_2 + m_1}, \quad \beta = \frac{k(m_2 - 2) - (m_1 - 2)}{kn_2 + m_1}$$

$$k = \frac{\mu_1}{\mu_2}, \quad m = 4(1 - \nu)$$

さらに、 σ_{p0j} は、一樣な温度分布における熱応力の特解であり(3)式の様に示される。

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{2L}{G}(\sin 2\phi_1 \sin 2\theta - \cos 2\phi_1 \cos 2\theta - 1) \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{2L}{G}(\cos 2\phi_1 \cos 2\theta - \sin 2\phi_1 \sin 2\theta - 1) \\ \sigma_{r\theta} &= \frac{2L}{G}(\sin 2\phi_1 \cos 2\theta + \cos 2\phi_1 \sin 2\theta) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 G, L は次式で表される。

図1 接合体モデルの座標系

$$G = -(2\cos 2\phi_1 + m_1 - 2) + k(2\cos 2\phi_2 + m_2 - 2)$$

$$L = -2\mu_1(n_1\delta_1 - n_2\delta_2)\Delta T$$

但し、ここで、 $n=1+\nu$:但し、 ν はポアソン比であり、 δ は熱膨張係数である。

2・2 軸対称状態 野田ら⁽⁸⁾は、異種材料が3次元で接合され、かつ接合端部において接合面と自由境界面が任意の角度で接合されている場合の応力特異性指数を決定する特性方程式を導いている。この結果、軸対称状態の特性方程式は、平面ひずみ状態の特性方程式と同一であると結論付けている。一方、軸対称状態接合界面端部近傍の熱応力問題の解も、平面状態と同様、熱応力の定数項を考慮する必要があると考えられる。しかし、軸対称状態の熱応力の定数項の導出はなされていない。このため、工学的な観点から平面状態の熱応力の定数項が軸対称状態の熱弾性解析に適用可能かを確認する必要があると考えられる。

3. 数値解析条件

同一モデルの軸対称状態及び平面ひずみ状態の種々の材料の組み合わせを有するセラミックス-金属接合体を想定し、軸対称状態と平面ひずみ状態の熱弾性解析結果を比較した。数値解析においては、図1に示すような各材料の開き角(ϕ_1, ϕ_2)を 90° に設定し、自由表面($\theta=90^\circ, y=0$)の各方向応力成分に注目した⁽⁴⁾。熱弾性解析を行う際、反応層及び欠陥が存在しない異種材料が界面で完全に接合していると仮定した。この接合体が常温(300K)から1Kだけ一様に冷却する過程でセラミックス自由表面側に発生する熱応力を汎用有限要素法解析プログラムを用いて求めた。

これらの結果をもとにして、軸対称状態及び平面ひずみ状態との応力特性の比較を行なった。解析には、図2に示すような要素分割モデルを用いた。このモデルは、TiB₂/Ni接合体(平面ひずみ状態)を想定して

図2 解析モデル

おり、熱弾性解析を有限要素法を用いて行う際、安定して応力特異性指数を算出出来る要素分割方法⁽⁹⁾を施してある。要素分割方法の概略は以下の通りである。

接合端部の要素数を増大させるため、隣接要素寸法比を1:0.7に設定した。セラミックス側のx方向及びy方向最小要素寸法を $x[\text{Ceramics}]/W=y[\text{Ceramics}]/W=0.002$ とし、金属側要素寸法をセラミックス側要素寸法に対して $x[\text{Metal}]/x[\text{Ceramics}]=y[\text{Metal}]/y[\text{Ceramics}]=0.8$ と設定した⁽⁹⁾。

解析に用いた材料定数を表1に示す。材料定数は、セラミックスの弾性定数を $E_2=360\text{GPa}$ と一定条件とし、金属側の弾性係数 E_1 を $E_1/E_2=0.01-0.8$ となるように設定した。ここで、表1中の材料定数 E_2 、 δ_2 、 ν_2 の値は、著者らが、主に実験で取り扱うTiB₂セラミックス材料の材料定数⁽⁹⁾(常温)を想定したものである。さらに、表1中の δ_1 、 ν_1 は、著者らが、TiB₂と接合することを確認しているNiの材料定数(常温)を想定したものである。

4. 数値解析結果

4・1各要素の応力特性 図3に、種々な弾性係数を有する材料を組み合わせた接合体に関して、軸対称状態及び平面ひずみ状態を想定した時のセラミックス自由表面側の界面に垂直方向の応力 σ_x (平面ひずみ状態)及び σ_z (軸対称状態)の分布を示す。

表1 解析に用いた材料定数

Metal			Ceramics			E_1/E_2
$E_1[\text{GPa}]$	$\delta_1[1/\text{K}]$	ν_1	$E_2[\text{GPa}]$	$\delta_2[1/\text{K}]$	ν_2	
3.6-290	13.6×10^{-6}	0.30	360	5.4×10^{-6}	0.28	0.01-0.8

δ : Thermal expansion coefficient
 ν : Poisson's Ratio

図3 各要素を用いたモデルの自由表面の応力(σ_x 及び σ_z)分布(熱弾性解析結果)

広範囲の材料を組み合わせた時の傾向を把握するため、弾性係数比率(E_1/E_2)を任意に、0.8, 0.4, 0.1, 0.01を選択して図3に示した。この数値解析結果をもとに、軸対称状態と平面ひずみ状態の応力分布を比較した。図4には σ_z と σ_x とを比較した結果を示す。 σ_z と σ_x との比較において、特異点から、 $0.002 \leq x/W$ (or z/W) <0.1 の位置にあるセラミックス自由表面側の積分点から出力される数値解析結果に着目した。図4の横軸は、特異点からの距離 x (or z)を接合界面長さ W で正規化した値 $[x/W$ (or $z/W)]$ 、縦軸は平面ひずみ要素を用いた数値解析結果(σ_x)に対する軸対称要素を用いた数値解析結果(σ_z)との相対比(σ_z/σ_x)とした。この図から、 $0.002 \leq x/W$ (or z/W) <0.01 の領域における σ_z/σ_x は、積分点の座標値によらずほぼ一定と見なすことが出来る。

次に、他の応力成分比率(σ_r/σ_y 及び τ_{rz}/τ_{xy})の分布を調べた。図5には、 σ_r/σ_y と x/W (or z/W)との関係を示し、図6には、 τ_{rz}/τ_{xy} と x/W (or z/W)との関係を示した。図4,5,6から、 σ_z/σ_x 、 σ_r/σ_y 及び τ_{rz}/τ_{xy} の分布は、界面端部近傍 $[0.002 \leq x/W$ (or z/W) $<0.01]$ のごく限られた領域で一定値を示していることが確認出来る。この結果、軸対称状態の各方向応力値は、平面ひずみ状態のそれとは、厳密には一致しないが、平面ひずみ状態の応力値に対してある一定の割合でスライドしていることが確認できる。つまり、界面端部近傍において各応力比は E_1/E_2 により異なるが、双方の応力分布に大きな差がないことが確認出来る。このことから、各要素における、特異点近傍の応力比に及ぼす E_1/E_2 の影響を調査するため、 $0.002 \leq x/W$ (or z/W) <0.01 の領域から特異点に最も近い積分点 $[(x/W, y/W)=(z/W, r/W)=(0.002, 0)]$ を選び、この積分点における各要素の各応力成分比率 $\{\sigma_{ij}(\text{axisym.})/\sigma_{ij}(\text{p-strain})\}$ に及ぼす弾性係数比率(E_1/E_2)の影響を調査した。この結果を図7に示した。図7には、各応力成分比率 $\{\sigma_{ij}(\text{axisym.})/\sigma_{ij}(\text{p-strain})\}$ に及ぼす E_1/E_2 の影響を示した。

図4 各要素における自由表面応力の相対比の分布

図5 各要素の応力分布の相対比(σ_r/σ_y)の分布 図6 各要素の応力分布の相対比(τ_{zr}/τ_{xy})の分布

この結果、 E_1/E_2 の減少に伴い $\sigma_{ij}(\text{axisym.})/\sigma_{ij}(\text{p-strain})$ は、ある一定値に収束する。特に、 $E_1/E_2 < 0.3$ の材料の組み合わせにおいて、 $\sigma_z/\sigma_x \approx 1.03$ 、 $\sigma_r/\sigma_y = \tau_{zr}/\tau_{xy} \approx 1.0$ 程度となる。このことから、軸対称状態の接合界面端部近傍の応力分布は、平面ひずみ状態の応力分布と、ほぼ一致すると見なせる。この傾向は、温度降下量($\Delta T = 1\text{--}10\text{K}$)によらず一致していた。以上の結果から、熱弾性解析において、軸対称状態の接合体の弾性係数比率が $E_1/E_2 < 0.3$ であれば、接合界面端部近傍の限られた領域($0.002 \leq x/W \text{ (or } z/W) < 0.01$)で、平面ひずみ状態を近似的に適用することができる。

4・2 熱応力の定数項に関する考察 軸対称状態の熱弾性解析において、応力特異性指数を算出する際、平面問題と同様、熱応力の定数項を考慮する必要があると思われる。しかし、軸対称問題の熱応力の定数項は導出されていないため、工学的観点から、(3)式が軸対称状態の熱弾性問題に適用出来るか否かを確認する必要があると考えられる。そのため、FEMによる熱弾性解析で、平面ひずみ状態の熱応力の定数項を考慮して得られる軸対称状態の応力特異性指数(λ_{nz})と平面ひずみ状態の応力特異性指数(λ_{nx})を比較した。この結果を基に、軸対称状態の熱弾性問題に平面ひずみ状態の熱応力の定数項が適用出来るかを検討した。

図7 各要素より得られる各方向応力の比率に及ぼす E_1/E_2 の影響 図8 $\sigma_{rr} - \sigma_{prr}$ と x/W (or z/W)との関係

各要素及び各材料の組み合わせの λ_{nz} 、 λ_{nx} の算出は、図8をもとに行った。図8には、各要素の数値解析で得られるセラミックス自由表面側の界面に垂直方向の応力成分(軸対称状態の場合、 $\sigma_{rr}[\theta=90^\circ] = \sigma_z$ 、平面ひずみ状態の場合、 $\sigma_{rr}[\theta=90^\circ] = \sigma_x$)に、(3)式から得た熱応力の特解($\sigma_{prr}[\theta=90^\circ] = \sigma_{px}$)を考慮した値($\sigma_{rr} - \sigma_{prr}$)と x/W (or z/W)との関係を、両対数グラフにプロットした。図8中の x/W (or $z/W) < 0.1$ の領域で得られる $\sigma_{rr} - \sigma_{prr}$ と x/W (or z/W)との関係は、直線で近似でき、その傾きはほぼ一定と見なせる⁽⁹⁾。そのため、 $0.002 \leq x/W \text{ (or } z/W) < 0.1$ の範囲の $\log(\sigma_{rr} - \sigma_{prr})$ と $\log(x/W \text{ (or } z/W))$ との関係から、得られる直線の傾きを最小2乗法で近似し、この直線の傾きを応力特異性指数とした。図9には、 λ_{nz} 、 λ_{nx} と E_1/E_2 との関係を示した。尚参考までに、一様 z 方向及び一様 x 方向引張応力 σ_0 が負荷された時に得られる応力分布からそれぞれの状態の応力特異性指数を求め、図9にプロットした。このときの弾性解析に適用した材料定数及び要素分割方法は熱弾性解析条件と同一とした。

図9から、熱弾性解析及び弾性解析で得られる応力

特異性指数は、軸対称状態及び平面ひずみ状態によらずほぼ同等の値が算出出来ることが確認出来た。さらに、野田の理論解析から、軸対称状態の応力特異性指数は平面ひずみ状態と一致することから、軸対称状態の熱応力の定数項は、平面ひずみ状態のそれとは大差がないことが判断出来る。従って、軸対称状態の熱弾性挙動を応力特異性指数で評価する際、平面ひずみ状態の熱応力の定数項を適用することは、工学的には可能であると考えられる。

4・3セラミックスの弾性係数と各要素毎の応力分布との関係 前節で示した軸対称状態と平面ひずみ状態とを比較した結果は、TiB₂セラミックス材料を想定した場合について得られたものであり、一般性に欠ける。従って、軸対称状態と平面ひずみ状態との詳細な応力分布の対応を明かにするためには、異なる条件の解析結果が必要と考えられる。そこで、各要素の応力成分の相対比(σ_z/σ_x)に及ぼす弾性係数(E_2)の影響を調査した。4・1と同様な方法で、各要素の応力成分の相対比($\sigma_{ij}(\text{axisym.})/\sigma_{ij}(\text{p-strain})$)に及ぼす弾性係数の絶対値(E_2)の影響を調査した。但し、 E_2 以外の材料定数は、表1の値を用いた。図10には、 σ_z/σ_x に及ぼすセラミックスの弾性係数(E_2)の影響の代表例を示した。ここでは、弾性係数比(E_1/E_2)で σ_z/σ_x 値が異なるため、各材

図9 各要素の応力特異性指数と E_1/E_2 との関係

図10 応力成分に及ぼす弾性係数の影響

料の組み合わせについての $\sigma_{ij}(\text{axisym.})/\sigma_{ij}(\text{p-strain})$ と E_2 との関係を広範囲に把握するため、 $E_1/E_2=0.01, 0.1, 0.4, 0.8$ の材料の組み合わせの結果を示した。この結果、各材料の組み合わせ毎の応力特性は弾性係数の絶対値によらずほぼ一定値を示した。この傾向は、 σ_z/σ_x , τ_{xz}/τ_{xy} についても同様の結果であった。

5. 考察

以上の検討結果から、接合体の応力特性を評価するのに適切と考えられる軸対称状態の熱応力問題を平面ひずみ状態に適用が可能かを検討した。

軸対称状態を想定した解析結果を2次元平面ひずみ状態と見なし、疑似的に解析及び検討をすることが可能と思われる。このことは、Bogyの理論解析結果と有限要素法を用いて、妥当であると判定した平面ひずみ状態の要素分割方法を軸対称状態の熱弾性問題に適用可能であることも示している。さらに、軸対称状態の接合体を用いた実験結果と数値解析結果とを比較検討する場合、平面ひずみ状態の応力特性で代替評価が可能であると考えられる。しかし、軸対称状態を平面ひずみ状態で代替し、解析する場合、軸対称状態は σ_θ があり、厳密には平面ひずみ状態で近似することが出来ない。そのため、軸対称状態異種材料接合体の σ_θ が、軸方向応力 σ_z に対してどの程度の比率であるか、あるいは σ_θ の挙動が平面ひずみ状態の板厚方向応力 σ_z の挙動に対して、どの程度異なるかを明確にしておく必要がある。このため、3章と同一の数値解析条件で熱弾性解析を行い各弾性比率毎(代表として、 $E_1/E_2=0.8, 0.1$)の接合体自由表面上の σ_θ 分布と平面ひずみ状態の σ_z 分布を図11に示した。図11から、平面ひずみ状態の σ_z 分布は、セラミックス側の弾性係数 E_2 が一定値なら、 E_1/E_2 によらず一定であり、常に板厚方向には引張応力が作用する。しかし、軸対称状態の σ_θ 分布は、 E_1/E_2 により挙動が異なる。

図11 各状態を想定したときの接合体における自由表面側の σ_θ (軸対称)及び σ_z (平面ひずみ)の分布

つまり、 E_1/E_2 の比率が比較的大きくなる材料の組み合わせでは、 σ_θ は界面端部で特異性(セラミックス側には圧縮応力、金属側には引張応力が作用)を有する。また、 E_1/E_2 が比較的小さくなるような材料の組み合わせでは、界面で σ_θ は不連続になるが、セラミックス及び金属側には引張応力が作用する。 E_1/E_2 が比較的小さい組み合わせの接合体を熱弾性解析する際、界面端部の σ_θ の挙動は、平面ひずみ状態の σ_z 分布の挙動とは、(絶対値は異なるが、)類似している。また、図11から σ_θ の符号は、 E_1/E_2 の低下に伴い、マイナスからプラスに変化している。このため、 σ_θ の符号が変化する E_1/E_2 の値を調べるため、 $0.01 \leq E_1/E_2 \leq 0.8$ の範囲で E_1/E_2 毎のセラミックス側自由表面の σ_θ 分布を図12に示した。図12から、 $E_1/E_2=0.3$ 程度で、 σ_θ の符号が逆点する現象が確認出来た。さらに、 $E_1/E_2 < 0.1$ 付近の材料の組み合わせにおける σ_θ の値は、 E_1/E_2 の低下に伴い、0MPaに近づく。しかし、同時に軸対称状態の z 軸方向応力 σ_z の絶対値も低下しており、 σ_z に対する σ_θ の相対比(σ_θ/σ_z)は、 $E_1/E_2 < 0.1$ で $\sigma_\theta/\sigma_z \approx 0.2$ になる。参考までに、図13に、 σ_θ/σ_z (軸対称状態)に及ぼす E_1/E_2 の影響を示した。

(上記の様な軸対称状態の応力特性は、 E_2 の値によらず同じ傾向を示す。)

図12 各弾性係数比率毎のセラミックス自由表面側 σ_θ の分布

図13 各弾性係数比率毎のセラミックス自由表面側 σ_θ/σ_z の分布(軸対称状態)

図14には、上記の熱弾性解析結果を簡潔に評価するため、軸対称状態の σ_θ 、 σ_z 及び σ_θ/σ_z と E_1/E_2 との関係を示し、併せて特異点近傍の軸対称接合体の変形挙動の概略も示した。

但し、図14中の軸対称状態の σ_θ 、 σ_z 及び σ_θ/σ_z は、 σ_θ/σ_z の値が一定値を示すと見なせる領域($0.002 \leq z/W < 0.01$)において、特異点に最も近い積分点($z/W, r/W$) = (0.002, 0)から出力される値である。

この結果より、セラミックス側接合端部の変形は、 $E_1/E_2 < 0.3$ で拘束変形が低下していた。 $E_1/E_2 < 0.3$ においては、前章の数値解析結果から、 σ_θ の挙動が平面ひずみ状態の σ_z の挙動と近似出来る。さらに上述の材料組み合わせ($E_1/E_2 < 0.3$)は、軸対称状態の各方向応力が平面ひずみ状態のそれと近似出来る材料の組み合わせに相当する。また、この材料の組み合わせ($E_1/E_2 < 0.3$)を有する軸対称接合体では、 $\sigma_\theta/\sigma_z \approx 0.2$ であり、 σ_θ の値は、 σ_z の値に対して充分小さいと見なせる。

以上の結果から、軸対称セラミックス-軟質金属接合体モデルを熱弾性解析する際、以下のことが定性的に言える。金属によるセラミックス側接合端部の拘束が小さくなる場合、セラミックス側の周方向応力が平面ひずみ状態の板厚方向応力の挙動に近似出来、さらに界面に垂直方向の応力に対し、周方向応力が小さく無視できる。このような材料の組み合わせの時、軸対称状態接合体は平面ひずみ状態で近似できる。

本報の数値解析結果から、 $E_1/E_2 < 0.3$ であるような軸対称状態の接合体は、 E_2 の値によらず、平面ひずみ状態を想定した接合体と見なし数値解析することが可能であると思われる。

図14 軸対称状態の応力特性及び変形挙動に及ぼす弾性係数の影響

以上の結果から、軸対称状態を想定した接合体を有限要素法で検討する場合、近似的に平面ひずみ状態で得られる応力分布が適用可能である材料の組み合わせが存在し、それを明かにすることができた。

6. 結 言

接合体の応力特性を評価するのに適切と考えられる軸対称状態の熱応力問題を平面ひずみ状態に適用が可能かを検討した。さらに、軸対称接合体の熱弾性挙動を評価するのに有効な因子となる応力特異性指数を算出する際、平面ひずみ状態の熱応力の定数項の適用が可能かを検討した。そこで、軸対称状態と平面ひずみ状態の異種材料接合体を想定し、同一数値解析条件で、熱弾性解析を行った。

得られた主な結論は次の通りである。

(1)接合体の弾性係数比率が、 $E_1/E_2 < 0.3$ であるような軸対称状態の接合体は、 E_2 の値によらず、平面ひずみ状態を想定した接合体と見なし、数値解析すること

が可能と思われる。但し、平面ひずみ状態に適用可能な軸対称状態の解析対象範囲は、今回評価に適用したモデルでは、接合界面端部近傍の限られた範囲($0.002 \leq z/W < 0.01$)である。

(2)軸対称状態接合体を想定したモデルを用いたFEM解析で熱弾性挙動を評価する場合、平面ひずみ状態の熱応力の定数項の適用は工学的には可能である。

7. 文 献

- (1)佐藤・小林・荒居,材料力学講演会論文集900-86(1991),543.
- (2)田中、日本金属学会会報29-11(1987),924.
- (3)栗田・狩野・佐藤,機論57-536,A,(1991),907.
- (4)Bogy,D.B.,Trans ASME,J.Appl.Mech.,38(1971),377.
- (5)古口・金子・熊倉・矢田,機論57-537,A,(1991),1175.
- (6)Mizuno K.Miyazawa K. Suga T.,J of the Faculty of Engineering.
- (7) J. Dundurs, Discussion of J.Appl.Mech.36(1969),650.
- (8)野田・辻,機論58-546,A,(1992),275.
- (9)立野・福沢・永沢・佐久田・小島,機論58-553,A,(1992),1.