

異種材料接合界面端の熱応力解析

Analysis of Thermal Stresses near Interface Edges on Bonded Dissimilar Materials

山口 郁永¹⁾, 橋本 隆斗²⁾, 梶 将季²⁾
指導教員 立野 昌義³⁾,

- 1) 工学院大学 工学部機械工学科 材料力学研究室
- 2) 工学院大学院 工学研究科 機械工学専攻
- 3) 工学院大学 工学部機 機械工学科

キーワード：異材接合, 接合界面, 残留応力

1. 緒言

異なる材料を高温で接合処理した後に常温まで温度を低下させた際に、異種材料の接合界面と自由表面との交わる接合端近傍に応力集中が生じ、この応力集中が接合体強度を著しく低下させる問題がある⁽¹⁾⁻⁽³⁾。接合界面端の応力分布の詳細を把握するためには、有限要素法などの数値解析による応力分布の評価が有効であると考えられる⁽²⁾。ただし、接合界面近傍の応力は理論上応力が無限大に発散することが指摘されているため、数値解析を行う場合には応力値を用いて評価することが困難であると予想される⁽¹⁾⁻⁽³⁾。したがって数値解析においても界面端部を特徴づける力学的なパラメータ⁽¹⁾⁻⁽³⁾を求めることが有効であると考えられる。

そこで本研究では、これまで多くの実験が行われている板状窒化珪素/ニッケル接合体を想定した平面ひずみモデルを対象として熱弾性解析の汎用有限要素プログラムを用い、接合界面端部の応力分布を求めた。さらに、熱弾性解析結果を基礎にして、応力場を特徴づけるパラメータの一つである応力特異性指数を界面端部の要素数を増大させるように要素分割パターンを変えた数種類の解析モデルを適用することにより求めた。得られた応力特異性指数を理論弾性解析から得られたそれと比較することで適正なモデルの要素分割パターンについて検討を行った。

2. 実験方法

2.1 理論解析

2つの異なる弾性特性を有する均質・等方性材料で構成される平面異材接合体モデルを用いて、弾性理論より導かれる界面端の極近傍の応力は、材料の組み合わせおよび界面端形状に依存して、異なるタイプの応力特異性が出現することが明らかにされている⁽¹⁾。その中でもべき関数型の応力特異性を示す際には、応力特異性指数が界面端部の応力分布を特徴づけるパラメータとして用いられる場合が多い。この応力特異性指数は、Bogyおよび井上ら⁽¹⁾により導かれた特性方程式を満足する根 λ ($-1 < \lambda < 0$) を求めることにより得られる。理論弾性論から導かれる特性方程式は式(1)で表され、式(2), (3)で定義されるDundursのパラメータ⁽¹⁾ α , β および界面端の幾何学条件（界面と自由表面とのなす角度） φ_1 , φ_2 と λ を変数とする。応力特異性指数を導く場合、4つの異なる弾性定数（各材料のヤング率とポアソン比）を α , β に置き換え、 $\varphi_1 = \varphi_2 = 90^\circ$ を式(1)に代入し、式(1)を満足する根 λ ($-1 < \lambda < 0$) 求めることで応力特異性を得ることが可能となる。

$$\begin{aligned} D(\alpha, \beta, \varphi_1, \varphi_2, \lambda) \\ = A\beta^2 + 2B\alpha\beta + C\alpha^2 - 2D\beta - 2E\alpha + F \\ = 0 \end{aligned} \quad -(1)$$
$$K(p, \varphi) = \sin^2(p, \varphi) - p^2 \sin^2 \varphi$$
$$A = 4K(p, \varphi_1)K(p, \varphi_2)$$

$$\begin{aligned}
B &= 2p^2 \sin^2 \varphi_1 K(p, \varphi_2) \\
&\quad + 2p^2 \sin^2 \varphi_2 K(p, \varphi_1) \\
C &= 4p^2(p^2 - 1) \sin^2 \varphi_1 \sin^2 \varphi_2 \\
&\quad + K(p, \varphi_1 - \varphi_2) \\
D &= 2p^2 \{ \sin^2 \varphi_1 \sin^2(p\varphi_2) \\
&\quad - \sin^2(p\varphi_1) \sin^2 \varphi_2 \} \\
E &= -D + K(p, \varphi_2) - K(p, \varphi_1) \\
F &= K(p, \varphi_1 + \varphi_2) \\
p &= \lambda + 1 \\
\alpha &= \frac{km_2 - m_1}{km_2 + m_1} \\
\beta &= \frac{k(m_2 - 2) - (m_1 - 2)}{km_2 + m_1}
\end{aligned}
\tag{2}$$

ここで、 k ：剛性比 ($= G_1/G_2$)、 G_δ ：せん断弾性係数 ($= E_\delta/(2(1+\nu_\delta))$)、 m_δ ： $(= 4(1-\nu_\delta))$ 、 $\delta: (1, 2) = (\text{Si}_3\text{N}_4, \text{Ni})$ とした。なお用いた弾性定数は表1に示す。

2.2 数値解析

理論解析に用いるモデルを数値解析に適用する場合、界面近傍の要素分割や境界条件など様々なパターンが考えられる。本解析では、実験で多く用いられる窒化珪素/ニッケルを想定したモデルを用いた。平面ひずみモデルを用いた弾性体材料（材料定数は表1参照）を想定し、図1のように要素分割した。異材接合体モデルは、均質等方性材料と仮定し、接合界面と材料の長さを同程度に設定した。接合温度780°Cにおいて界面が完全に結合した状態で、一様に常温20°Cまで温度変化させた場合のセラミックス側の自由表面上の熱応力を評価する。界面端角度はセラミック側および金属側をそれぞれ $\varphi_1 = \varphi_2 = 90^\circ$ とした。界面端部の要素数を増大させるために r 方向の隣接要素寸法を1:0.7と設定し、要素分割を変更した3つのモデル（ r 方向分割20, 40, 60で最小要素寸法はそれぞれ $r_{min}/W = 3.4 \times 10^{-4}$, 2.7×10^{-7} , 2.8×10^{-10} ）を用いた。

3. 結果と考察

表1の材料定数に基づく λ と特性方程式Dの関係から（図2参照）、特性方程式を満足する根 $\lambda_{th} = -0.02153$ を得た。数値解析結果から得られた自由表面の σ_x は応力の特異性が生じていた。応力特異性指数を求める際には、理論弾性解析から決まる熱応力の定数項⁽¹⁾を考慮し、両対数グラフ上に表示され

るこの応力分布の勾配を最小二乗法で求め、これを数値解析から得られた応力特異性指数 λ_F とした。この λ_F は理論弾性解析から得た値 λ_{th} とほぼ一致した。なお、界面端部のごく近傍は数値解析精度が低下し、評価対象から外した。あわせて、界面から離れた領域 ($r/W \geq 0.1$) では理論解析で用いられる仮定が成立しない可能性がある。本要素分割モデルにおいてで20分割した場合であれば、界面端近傍の熱弾性挙動を精度良く解析できると考えられる。

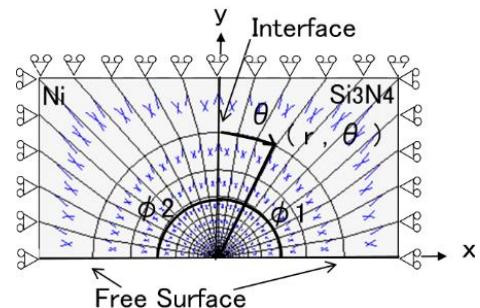


図1. 数値解析モデル

表1. 数値解析の物性値

	Si ₃ N ₄	Ni
E _δ [GPa]	340	210
ν _δ	0.27	0.3
α _δ [1/K]	5.5 × 10 ⁻⁶	16.3 × 10 ⁻⁶
φ _δ	90°	90°

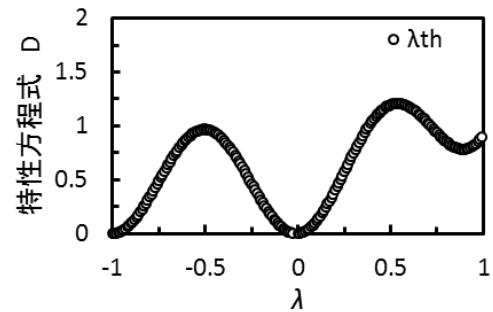


図2. 理論解析結果⁽³⁾

4. 結言

接合界面端部の応力分布を求め、理論弾性解析、熱弾性解析より導出した応力特性指数を比較した結果。高精度数値解析結果を得る上で有効な指針を得た。

5. 参考文献 省略