

# 界面端形状修正による異材接合界面端の応力分布

## Stress Distribution near Interface Edge of Dissimilar Materials by Modifying Geometrical Condition of Metal

高橋 伸弥<sup>1)</sup> 梶 将季<sup>2)</sup>、村岡 駿介<sup>3)</sup>、橋本 隆斗<sup>2)</sup>  
指導教員 立野 昌義<sup>4)</sup>

- 1) 工学院大学 工学部 機械工学科 材料力学研究室
- 2) 工学院大学大学院工学研究科
- 3) 元 工学院大学大学院工学研究科
- 4) 工学院大学 工学部機械工学科

キーワード：異材接合, 接合界面, 応力分布

### 1. 緒言

構造材料には主に金属材料が使用されてきたが、単独の金属材料だけでは得られにくいような材料特性を得るため既存の材料同士を複合化した異材接合材料を実用化することの必要性が増してきている。しかし、異材接合体の界面端には応力特異場となり、応力が無限大に発散することが理論弾性論から指摘されている。

セラミックスを含む接合体を構造用材料として実用化の上では外力または温度変化に伴う負荷に対する抵抗を高めるなど信頼性を確保する対策を講じる必要がある。理論弾性解析結果に基づけば、自由縁と界面とが直交する条件下で特異応力場が発生する材料組み合わせでも、界面端幾何条件を変えることで特異応力場が消失することが予測できることから、適切な界面端形状に設定することが接合部の力学的信頼性向上に有効な方法の一つとして推察される。

本報告では、力学的な信頼性を確保することが難しいと考えられるセラミック/金属接合体を対象として、セラミックス側の界面端角度を一定として状態で、金属側の界面端形状を系統的に操作した異材接合体を製作し、金属側界面端形状と接合体引張り強度および破壊様式との関係を明らかにすることを試みる。

### 2. 数値解析

解析対象モデルは平面二次元  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ni}$  接合体モデル(平面ひずみ)を想定し、基準とする解析モデルとして定めた。

界面接合界面近傍の要素数を増大させるため、隣接要素寸法比率を 1:0.7 に設定し、放射状に 20 分割し、最小要素寸法を  $r_{\min}/W=3.42 \times 10^{-4}$  に設定した。周方向には等間隔に  $9^\circ$  毎に要素分割した。このモデルの両材料が無応力・無ひずみの状態で接合処理温度で界面が完全に結合した状態から一様に常温まで温度変化  $\Delta T$  させたときに生じるセラミックス側界面端近傍の熱残留応力を汎用有限要素法解析プログラム MSC.Marc を用いて明らかにした。

なおセラミックスおよび金属はそれぞれ温度依存性を有する弾性体および弾塑性体材料と仮定した。得られた数値解析結果を本解析モデルと同一な界面端形状を有する  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ni}$  接合体の引張り強度の界面形状依存性を比較し、応力分布と接合体強度の温度依存性について明らかにすることを試みた。

### 3. 実験結果

本実験では界面結合力が確保されている

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni 接合体試験片を対象として、界面端修正に伴う接合体引張り強度の影響を明確にする。

セラミックスには窒化ケイ素（日本タングステン社製）、金属は市販の純ニッケル材料を用いた。試験片形状の切り出しは、セラミックス片から 3mm 厚さの板をワイヤーカット放電加工機 ROBOCUT  $\alpha$ -0C (FANUC 社製) により切り出した後、所定の形状を有する試験片を切り出した。ニッケル材料については厚さ 3mm のニッケル板厚から界面端形状を操作した接合体供試材を切り出した。なお、接合体界面と自由表面のなす角を界面端角度と定義し、セラミックス側を  $\varphi_1$ 、ニッケル側を  $\varphi_2$  とした。界面端角度は、セラミックス側界面端角度を  $\varphi_1$  を直角に一定にしたまま、ニッケル側界面端角度を  $\varphi_2$  を 30~180° の範囲を 9° 刻みに設定した。

試験片の接合処理には赤外線ゴールドイメージ炉（アルバック理工社製）を使用し、活性型ろう材を用いて接合を行った。ろう材は Cusil-ABA (WESGO 製)、融点 815°C、厚さ 0.05mm を用い、接合温度は 780°C~980°C の範囲の接合処理条件で行った。製作した異材接合体試験片は引張試験機 LITTLESESTER (JT トーシ社製) を用いて、クロスヘッド速度 1mm/min の条件下で引張試験を行った。

#### 4. 解析結果および実験結果

数値解析結果の接合体の各方向の応力分布より、界面端近傍におけるセラミックス側自由表面上の界面に対して垂直方向応力が最も応力集中が生じており、厳しい応力場を示していることが確認できた。ただし、セラミックス側の界面端の極近傍の節点から出力された数値解析結果は、精度が低下していた。この理由は、隣り合う Ni 側の数値解析結果の影響を受けたものと推測される。

そのため、界面端に最近接する要素など精度低下する領域を除いた領域を対象として、セラミックス側自由表面上の界面に対して垂直方向応力を評価対象として、界面端セラミックス側の応力に及ぼす界面端形状の影響を明らかにすることを試みた。

Fig. 1 には上記の結果の代表例を示した。この

結果から、 $\varphi_2 \cong 90^\circ$  を基準として  $\varphi_2$  の変化に伴い熱応力が低減する。特に、 $\varphi_2 \geq 150^\circ$  では、 $\varphi_2$  の増大に伴い、熱応力が増大するなど界面端角度依存性を明確にした。異材接合体の引張り試験結果との対応結果より、破壊様式および接合体引張り強度の界面端角度依存性が明確になった。特に、破壊様式がセラミックス側界面端部から破壊した角度範囲では、引張り強度と界面端部の残留応力との間に正の相関を示した。

ただし、残留応力が低下している領域に対応する界面端形状が必ずしも接合体強度が上昇するとは限らない。この理由は、破壊様式から、接合体強度支配因子が界面端残留応力から他の因子に変化するためであると推察される。

#### 5. 結論

接合体強度の金属側角度変更による接合体強度上昇した領域では、セラミックス側界面端残留応力が低減していることが確認できた。ただし、金属側界面端角度が 90° 未満においては、接合界面結合力で支配されている接合体が生じるなど、最適な界面端形状には、残留応力だけではなく、界面の結合力が関与している可能性があることが確認できた。

#### 6. 参考文献 省略

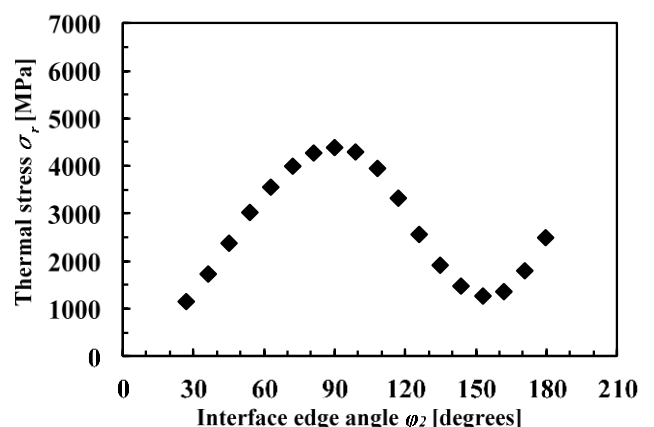


Fig. 1 セラミックス側自由表面における界面端近傍の熱応力に及ぼす Ni 側界面端角度の影響