連載

講義

不均質材の力学（その3）

3. 異材接合体の熱応力問題

豊田 政男**

Mechanics for Heterogeneous Materials [III]

3. Thermal/Residual Stresses in Bonded Joints of Dissimilar Materials*

by Masao Toyoda**

キーワード：異材接合体，セラミックス・金属接合，薄膜，熱応力，残留応力，熱応力の制御

3.1 複合化材料の応用と熱応力問題

材料のもつ特性・機能を最大限に利用して複合化しようとする場合，当然ながら材料の熱的特性や力学的特性の異なるものを接合することになる（図1に各種材料の熱膨張係数と縦弾性係数の関係を示す）。その複合過程において，接合面の活性化のため熱エネルギーが加えられる場合が多く，また複合化の目的が耐熱性向上である場合も多い。このように異材接合体の接合過程，あるいはその使用時における加熱や冷却によって熱応力が発生したり，残留応力として残ったりする。更に，最近実用・検討されている表面改質などを目的として生成される高機能・高性能異材皮膜にも同じような理由によって熱応力・残留応力が生じる。この残留応力のために接合や膜形成が十分にできないこともある。更に，これらの熱応力・残留応力は少なからず界面強度や使用中の機能に影響を与えることが指摘されている。

異材接合体に残留応力が生じることは，例えばクラッド鋼などで既に知られている。最近では，金属とセラミックスの接合，更には金属などの表面に高合金やセラミックスなどの薄膜を溶射，蒸着，イオンプレーティング，CVD，PVD等で成形することが行

われる。

- この場合，残留応力の発生原因は大きく分けて，
①熱膨張係数と縦弾性係数の差による熱応力に起因するもの，と
②薄膜形成時などで見られる表面張力，酸化物表面

図1 各種材料の縦弾性係数と線膨張係数の関係²⁾

*原稿受付 平成元年 10月 16日

**正 員 大阪大学工学部 member, Faculty of Engineering, Osaka University

層の生成、結晶の成長と分布、変態、結晶構造の差など、接合メカニズムに起因する内部固有応力、の二つに分けられる。後者の原因は薄膜などでは無視できない場合も多いが、以下に述べる力学的な取扱いでは、それらの原因で生じた残留応力を熱歪に換算して取扱うことになり、その場合は前者と同じ取り扱いとなる。

以下では、材料特性の異なる材が接合された異材接合体に生じる熱応力を取り上げる。

3.2 異材接合体の熱応力の基礎

(1) 熱応力解析の考え方

物体の一部が加熱されるとその部分が膨張しようとするが周囲の物質によってその変形が拘束されるために応力が生じる。ところが、熱膨張係数が異なる材の接合体では、例え均一に加熱されても、それぞれの熱膨張量の差のために同じように熱応力が生じる。

異材接合体の熱応力解析に用いられる解法は、①歪を抑える方法を用いた解析的手法¹⁻³⁾、②シアラグ理論を用いた解析的手法⁴⁻⁷⁾、それに③FEM, BEMなどを用いた熱弾塑性数値解法、が主に用いられている。

簡単にするために、弾性解析を取り上げるが、熱応力の解析の基本的な考え方は、図2(a)に示すように、加熱部の自由膨張を拘束するための応力 σ_{ij}' と、加熱部周辺に σ_{ij}' と逆符号の応力を作用させた場合に生じる応力 σ_{ij}'' の和として求められる。熱応力解析は、この応力をいかに求めるか、特に後者の応力解析が問題となる。この考え方は異材の接合体であっても同じである。図2(b)に異なる二材の接合体の均一加熱の場合の解析の考え方を示す。

(2) 歪を抑える方法による弾性熱応力解析

異材平板の接合体、あるいは異材皮膜をもつ材の熱応力解析は、歪を抑える方法を直接的に用いて解析解が比較的簡単に求められる。特に、板厚に比べて十分に広い平板の場合には梁理論との組み合わせによって、平板の端部を除いて(この点については後述する)解析解が求められる。表1に均質材も含め簡単な場合の求められている熱応力解をまとめている¹⁻³⁾。

(3) シアラグ理論を用いた解法⁴⁻⁷⁾

この考え方は異材の間に剪断力のみを伝達する層が存在するとし、力とモーメントの釣り合いから解く方法である。この考え方はこれまでも、隅肉溶接により力が伝達される構造の応力解析に用いら

図2 歪を抑える方法による熱応力解析の考え方

(a)基本的考え方

(b)異材平板の接合体の場合の考え方

れている。これまでも、ろう接手あるいは多層デパイスなどで柔らかい層をもつ場合の熱応力解析に用いられている。

異なる二材の接合部の解析で、中間層を仮定し、その厚さを零にした極限を取ると、当然ながら表1に示す解と全く一致することが確かめられている³⁾。

(4) 数値解析と塑性問題

表1に示すような比較的簡単な場合は解析的に解くことができ、解析解は支配パラメーターを理解するのに有効である。しかし、例えば、有限寸法の平板の接合で端部近傍の正解を求めるのは容易でな

表1 均質および異材接合体の熱応力の簡単な解析例（豊田ら）

対 象	熱 応 力 解
均質材：対称温度分布 ¹⁾	薄 板： $\sigma_x = \frac{1}{2c} \alpha E \int_{-c}^c T dz - \alpha E T$ $= \alpha E (T_{av} - T)$ T_{av} ：平均温度上昇 無限平板： $\sigma_x = \frac{\alpha E}{1-\nu} (T_{av} - T)$
均質材：非対称温度分布 ¹⁾	薄 板： $\sigma_x = -\alpha E T + \alpha E T_{av} + \frac{3z}{2c^2} \alpha E \int_{-c}^c T z dz$ $= \alpha E \left(T_{av} - T + \frac{3z}{2c^2} \int_{-c}^c T z dz \right)$ 無限平板： $\sigma_x = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left(T_{av} - T + \frac{3z}{2c^2} \int_{-c}^c T z dz \right)$
二材接合平板：各材一様温度上昇 ^{2), 3)} <p>温度上昇： A材：ΔT_A，B材：ΔT_B</p>	A材： $\sigma_{x(A)} = \frac{E_A}{1-\nu_A} (\alpha_A \Delta T_A - \alpha_B \Delta T_B) (-a^* + c^* z^*)$ B材： $\sigma_{x(B)} = \frac{E_B}{1-\nu_B} (\alpha_A \Delta T_A - \alpha_B \Delta T_B) (b^* + c^* z^*)$ ここで $a^* = A/D$, $b^* = B/D$, $c^* = C/D$, $z^* = z/t_B$ $A = k_E k_t (4k_t^2 + 9k_t + 6) + 1$ $B = k_E k_t (k_E k_t^3 - 3k_t - 2)$ $C = 6k_E k_t (k_t + 1)$ $D = (k_E k_t^2 + 1)^2 + 4k_E k_t \{(k_t + 1)^2 - k_t\}$ $k_E = E_A/E_B$, $k_t = t_A/t_B$
二材接合円筒：一様温度上昇 ²⁾ <p>温度上昇：ΔT</p>	A材： $\sigma_{\theta(A)} = \frac{E_A}{1+\nu} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{r^2} \right) c_A$ B材： $\sigma_{\theta(B)} = \frac{E_B}{1+\nu} \left(\frac{1}{c^2} + \frac{1}{r^2} \right) c_B$ ここで $c_A = A/C$, $c_B = B/C$ $A = a^2 R^2 (R^2 - c^2) E_B (\alpha_B - \alpha_A) \Delta T$ $B = c^2 R^2 (R^2 - a^2) E_A (\alpha_B - \alpha_A) \Delta T$ $C = \{(1-2\nu)R^2 + a^2\}(R^2 - c^2)E_B$ $- \{(1-2\nu)R^2 + c^2\}(R^2 - a^2)E_A$

い。そこで一般には、FEM、BEM等の数値解法が適用され、汎用プログラム等もあり多くの計算例が示されている（例えば2、8-12など多くの例あり）。数値計算に当たっては、定性的議論はともかく応力の絶対値を取り扱うときにはメッシュ分割などに十

分な注意を払う必要がある。また、塑性問題を取り扱うときも現状では数値計算に頼ることになる。

3.3 異材接合体の熱応力とその支配因子

(1) 十分に大きな寸法の二つの平板の場合

表1に示したように、二つの無限平板の接合体の

熱応力は界面に平行な応力成分のみで、表1の材料Aが ΔT_A 、材料Bが ΔT_B だけ温度変化したとき、生じる応力の大きさ $\sigma_{x(A, B)}$ は、次のような関数形で与えられる。

$$\sigma_{x(A, B)} / \{E_{(A, B)} / (1 - \nu_{(A, B)})\} = (\alpha_A \Delta T_A - \alpha_B \Delta T_B) \times f(k_E, k_t, z^*)$$

ここで、 $k_E = E_A / E_B$ 、 $k_t = t_A / t_B$ 、 $z^* = z / t_B$ と表すことができ²⁻³⁾、その支配因子は①材料特性値と②形状パラメータの二つであり、特に、

図3 二つの異なる材料の有限寸法平板の接合体の端部近傍の応力特性 (豊田ら)
(a)主応力分布
(b)端部近傍の界面に沿う各種応力分布

①は、それぞれの熱歪の差、と縦弾性係数の比 k_E 、

②は、板厚比 k_t

が主要支配因子となる。

薄膜の熱応力でも、その支配因子は同じであるが、その場合寸法比は一般に小さいので、材料特性値のみに大きく依存すると考えてよい³⁾。

(2) 有限寸法平板の接合体

有限寸法の場合には、端面の存在が大きく影響し、端面近傍では板厚方向(z 方向)の応力や界面に沿う剪断応力が生じる。図3に、一例として弾性計算における端面近傍の主応力図と界面に沿う応力分布を示す²⁾。

この場合も、応力の支配因子は(1)に述べたものと同じである^{2,9)}。しかし、端部近傍の応力分布の形は、材料の線膨張係数の大小に加え、縦弾性係数の組み合わせに大きく依存する^{2,13)}。

3.4 異材接合体の熱応力・残留応力

(1) セラミックスと金属の接合体

図1のように、一般にセラミックスは構造用鋼材に比べて、縦弾性係数が同等以上、線膨張係数は小さい。そのため、表1によって計算すると、接合過程のように一高温から冷却されるとき、接合体中央部でセラミックスには圧縮応力が生じる。しかし、接合体の端部近傍では、前述のように一高温から冷却されるとき、端部近傍のセラミックスには界面に垂直な引張り応力が生じる。この引張り応力が、接合過程における界面剥離やセラミックスの割れをもたらす原因となる。図4は図中に示す材料定数をもつ材の接合体を単位温度冷却したときの端面に沿う板厚方向応力の分布を示したものである²⁾。接合界

図4 二材A, B ($E_A > E_B$, $\alpha_A < \alpha_B$ の場合)の接合体を単位温度冷却したときの端面に沿う板厚方向(z 方向)の応力分布特性 (豊田ら)

面端部は、弾的には応力の特異点となり、その近傍の応力はかなり大きくなるため、この界面端面の処理が重要であることがうかがえる。このような観点から、円筒のような円周方向に端面の存在しない接合体はこの問題が生じない²⁾。

端面の引張り応力の大きさに及ぼす部材寸法の影響は小さく、 $k_E (=E_A/E_B)$ の影響が大きい。 k_E が小さいほど引張り応力は小さくなるが、一般にセラミックスと鋼材の組み合わせでは $k_E > 1$ となり、応力を小さくすることは難しい²⁾。

(2) 溶射皮膜の残留応力

溶射皮膜の残留応力はセラミックス系か金属系かによって傾向が異なる。金属系では、一般にかなり大きな引張り残留応力（材料の降伏点に近い値）が残る。それに対してセラミックス系では多くの場合計測される残留応力は見かけ上小さい場合が多い¹⁴⁾。これは溶射皮膜に冷却中に既にミクロな割れが生じていること、また溶滴粒子間の結合力が小さいとかポイドが生じて変形し易くて、熱膨張差を吸収するためである。

(3) 薄膜内の残留応力とその測定

蒸着やPVD、CVDなどで形成される $1\mu\text{m}$ 以下程度の薄膜内の残留応力の測定は必ずしも容易でない。代表的な測定法としては、X線回折法とたわみ法がある。後者を用いる場合、基板の材料特性の影響を正確に考慮するとともに、皮膜の材料特性の正確な把握が重要である。

図5は各種金属の蒸着膜の残留応力と膜厚の関係の実測例である¹⁵⁾。膜厚が小さい範囲では、膜を形成するに至らず応力の値も小さいが、数十nmにもなると膜としての特性を示すと言える。

このような蒸着膜では、膜だけを取り出しても残留応力が残っている。これは非情に薄い膜の内部で結晶組織などの異なる層が形成されていくため、薄膜内の残留応力の解析には、この点を考えた膜内の不均質性に注目し、膜内の一部に固有歪が存在するとして、表1に示す弾性解析を用いる方法が提案されている（図6に解析の考え方を示す）¹⁶⁾。

3.5 熱応力の制御に対する試み

材料の線膨張係数が著しく異なる材料の接合体では、加熱・冷却過程で生じる熱応力の発生は避け難く、その値もかなり大きい。そのために接合過程で剝離したり割れたりするとともに、接合体の残留応力は接合界面強度を低下させることになる。この熱応力・残留応力の緩和の手法がいろいろと検討され

図5 金属蒸着膜の残留応力と膜厚の関係(堀越ら)

図6 薄膜の固有残留応力を評価するための固有歪を導入した弾性解析の考え方(豊田ら)。(薄膜を二層に分け(a)図)、膜生成過程で生じる固有応力をそれぞれの層の固有歪に置き換える。したがって、膜のみをはくりすると(b)図のように変形する。ここでの解析では同時に膜内の縦弾性係数の差も考慮する)

(II): セラミックス・高融点金属など (I): 一般構造用金属

(a) 中間層を用いる方法

(b) 接合界面形状の制御

図 7 異材接合体の残留応力緩和手法の代表例

ている。図 7 に現在用いられている制御手法の代表的なものを示す。中間層を用いる材料特性の制御と、接合部の形状を工夫して界面端部の応力を制御する手法がある。中間層を用いて熱応力を緩和する手法は、中間層の変形によって異材間の熱歪差を吸収しようとするものである。その原理から考えて、用いる中間層は変形能に富んでいることが必要で、特に中間層が薄い場合には、中間層の熱膨張係数を制御する手法は有効ではない。中間層がある程度の厚さを確保できるときには、傾斜特性材料を用いるのも一方法である。

蒸着膜のような場合には、膜と基板の材料特性の差のみならず、薄膜の成長過程で発生する固有応力

(真性応力とも呼ばれる) が重要で、その緩和のために、基板の加熱、不純物ドーピング、イオン衝撃などを用いたり、膜形成後にアニーリングしたりイオンプラテンションするなどで緩和する方法がある。

異材接合体に生じる熱応力の制御は、高機能複合化材料の生成にとって欠くことのできないものである。そのためには熱応力の支配因子を明確にすることと、特に、定量的評価が重要である。残留応力の生成原因の解析とともに、適切な力学的評価手法の選択に注意すべきである。

参 考 文 献

- 1) Timoshenko, T. and Goodier, J. N., Theory of Elasticity, McGraw Hill, (1970), 433
- 2) Toyoda, M., et al., IIW Doc. X-1161-88, (1988)
- 3) 豊田, 吹田, 外, 溶接学会論文集, 7 (1989), 543
- 4) Chen, W. T. and Nelson, C. W., IBM J. Res. Dev., 23 (1979), 179
- 5) Ishai, O. and Gali, S., J. Adhesion, 8 (1977), 301
- 6) Chen, D., Cheng, S. and Gerhardt, T. D., J. Thermal Stresses, 5 (1982), 67
- 7) 渡辺, 日本航空宇宙学会誌, 30 (1982), 535
- 8) 菅沼, 岡本, 日本溶射協会誌, 22 (1985), 929
- 9) 寺崎, 外, 溶接学会論文集, 5 (1987), 103
- 10) 瀬尾, 外, 日本機械学会関西支部講演会, (1988)
- 11) 河野, 日置, 外, 溶接学会論文集, 3 (1985), 1-104
- 12) 浜田, 暮石, 外, 溶接学会論文集, 3 (1985), 3-47
- 13) 溝口, 小林, 外, 神戸製鋼技報, 39 (1988), 77
- 14) 納富, 外, 溶接学会論文集, 6 (1988), 341
- 15) 堀越, 田村, 真空, 第 6 巻, 第 5 号, 182
- 16) 豊田, 吹田, 外, 溶接学会構造研究委員会資料 (1989), 7 月