

ST レベル3 パートD・E試験のポイント

近年出題された二次試験のパート D・E 試験問題のうち、特に正答率の低かった問題の類題により、各パートのキーポイントを解説する。以下に取り上げた問 1～問 3 はパート D (一般)、問 4～問 6 はパート E (専門) の試験問題の類題である。なお、ST レベル3 の試験問題の類題のキーポイントについては、前回の NDT フラッシュ欄(Vol.73, No.6, 2024) にも関連する解説があるので、ぜひ参照してほしい。ここでは重複するので取り上げなかったが、前回の解説で取り上げた類題も依然として正答率が低いので、その復習をお勧めする。

パートDの類題

問1 図に示すような一方向に炭素繊維を並べて強化した複合材料 (CFRP) において、繊維方向を 0° としたとき、最も弾性係数が大きい方向はどの方向か。次のうちから正しいものを一つ選び、記号で答えよ。

- (a) 0° (b) 30° (c) 45° (d) 90°

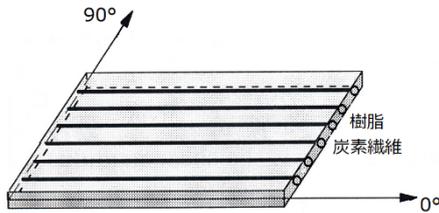


図1 一方向炭素繊維強化単層板

正答 (a)

図1 は炭素繊維と樹脂からなる単層板の模式図を表している。この単層板を高温高压下で同一方向に何層にも積層することで、一方向強化複合材料が成形される。一般的な炭素繊維の弾性係数 $E_f \approx 230 \sim 290$ GPa で、樹脂として例えばエポキシ樹脂の場合、弾性係数 $E_{epo} \approx 3.4 \sim 4.3$ GPa であり、炭素繊維の弾性係数の方が著しく大きい。上図から予想されるように、一方向炭素繊維強化複合材料 (CFRP) の弾性係数が最も大きい方向は 0° (繊維方向) となり、最も小さい方向は 90° となる。したがって、正答は (a) となる。

問2 図に示すように両端が完全に拘束された丸棒の温度が常温 (20°C) から 80°C に上昇した場合、丸棒の軸方向に生じる熱ひずみ (伸びを正とする) はいくらになるか。ただし、線膨張係数を α ($^\circ\text{C}$) とする。次のうちか

ら正しいものを一つ選び、記号で答えよ。

- (a) -80α (b) -60α (c) 60α (d) 80α

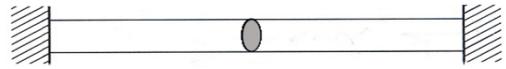


図2 両端を拘束された丸棒

正答 (b)

熱ひずみは、部材の線膨張係数 α ($^\circ\text{C}$) と温度変化 ΔT ($^\circ\text{C}$) の積として求められる無次元量 $\alpha\Delta T$ で定義される。ここで、温度変化 ΔT は温度上昇時では +、温度低下時では - となる。題意から、温度上昇は $\Delta T = 80 - 20 = 60^\circ\text{C}$ となるので、拘束のない丸棒に発生する膨張による熱ひずみは $\varepsilon_T = 60\alpha$ (伸び) となる。しかし、図2のように丸棒の両端が拘束されている場合、見掛け上、全ひずみ $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_T$ (ε_e : 弾性ひずみ) は発生しないため $\varepsilon = 0$ となり、 $\varepsilon_e = -\varepsilon_T = -60\alpha$ (縮み) となる。したがって、正答は (b) となる。このとき丸棒内に発生する熱応力は、丸棒の弾性係数 E を乗じて、 $-60\alpha E$ (圧縮) となる。

問3 構造部材の「疲労限度」は部材の形状寸法が大きくなると、一般的に低下する。この効果を何というか。次のうちから正しいものを一つ選び、記号で答えよ。

- (a) 寸法効果 (b) 表面効果
(c) 板厚効果 (d) 切欠き効果

正答 (a)

構造部材または疲労試験片の形状寸法が大きい程、疲労限度は一般的に低くなる傾向がある。これを、寸法効果と呼ぶ。したがって、正答は (a) となる。寸法効果の主な原因としては、曲げ荷重の場合では試験片断面内に生じる応力勾配と、応力勾配の生じない引張・圧縮荷重では統計的要因 (材料内部のき裂、介在物などの欠陥を含む存在確率の上昇) である。試験片寸法が大きくなれば応力勾配が小さくなり、疲労限度は低下する。(b) 表面効果とは、疲労き裂は表面から発生するため、疲労限度が表面仕上げ (表面粗さ) の影響を受けることをさす。(c) 板厚効果とは、部材または疲労試験片の板厚が厚くなるにつれて、疲労限度が低下する効果をいう (板厚だけに限定した寸法効果ともいえる)。(d) 切欠き効果とは、切欠き部を有する疲労試験片の不連続断面における応力集中により疲労限度が低下する効果をいう。

パート E の類題

問 4 次の文は、ひずみゲージ法以外の各種応力・ひずみ測定法について述べたものである。次の記述のうちから、正しいものを一つ選び、記号で答えよ。

- (a) 光弾性被膜法を用いると、物体内部の 3 次元応力分布を求めることができる。
- (b) X 線応力測定法は、物体の表面近くの残留応力の測定に最適である。
- (c) スペックル干渉法では、物体表面の面内変位の測定はできない。
- (d) 音弾性法では、物体に作用する応力によって生じる超音波の振幅の変化を利用している。

正答 (b)

(a) 光弾性被膜法では、測定物体の表面に光弾性材料の薄い膜を貼り付けて、反射光が生じた光弾性縞模様から 2 次元の応力・ひずみ分布が測定できるが、3 次元の応力分布は測定できない。(b) X 線応力測定法は、物体の表面近傍での残留応力の測定ができる。(c) スペックル干渉法では、レーザー光の干渉により生じる物体粗面の粒状模様を利用して、面内面外の変位測定ができる。(d) 音弾性法は、物体内を伝ばする超音波の速度が内部応力の存在により変化する現象を利用した応力測定法である。以上の説明から、正答は (b) となる。

問 5 試験体の熱ひずみの影響を除去する自己温度補償ゲージの原理を説明している関係式は、どのように表せるか。次のうちから正しいものを一つ選び、記号で答えよ。

- (a) $\varepsilon_T = \frac{\{\beta_g - K_T(\alpha_s - \alpha_g)\}\Delta T}{K_m}$
- (b) $\varepsilon_T = \frac{\{\beta_g - K_m(\alpha_s - \alpha_g)\}\Delta T}{K_T}$
- (c) $\varepsilon_T = \frac{\{\beta_g + K_m(\alpha_s - \alpha_g)\}\Delta T}{K_T}$
- (d) $\varepsilon_T = \frac{\{\beta_g + K_T(\alpha_s - \alpha_g)\}\Delta T}{K_m}$

ここで

- ε_T : 温度 T での熱ひずみ
- α_s : 試験体の線膨張係数 ($1/^\circ\text{C}$)
- α_g : ひずみゲージの抵抗体の線膨張係数 ($1/^\circ\text{C}$)
- β_g : ひずみゲージの抵抗体の抵抗温度係数 ($1/^\circ\text{C}$)
- K_T : 温度 T でのひずみゲージのゲージ率
- K_m : 測定器に設定したひずみゲージのゲージ率
- ΔT : 温度変化量 ($^\circ\text{C}$)

正答 (d)

ひずみゲージを接着した試験体は温度変化により熱膨張(または熱収縮)する。ひずみゲージの温度変化による抵抗変化 ΔR は、抵抗体自体の温度変化 ΔT による効果 ($=\beta_g R \Delta T$) および試験体の線膨張係数 α_s と抵抗体の線膨張係数 α_g との差による効果の両者の和として

$$\Delta R = \beta_g R \Delta T + K_T(\alpha_s - \alpha_g) R \Delta T \quad (1)$$

と表せる。ここで、式(1)から抵抗変化率を求めると

$$\frac{\Delta R}{R} = \{\beta_g + K_T(\alpha_s - \alpha_g)\}\Delta T \quad (2)$$

となる。一方、上式の左辺の抵抗変化率は、熱ひずみ ε_T とひずみ測定器で設定されたひずみゲージ率 K_m から

$$\frac{\Delta R}{R} = K_m \varepsilon_T \quad (3)$$

と書ける。式(2)と式(3)を等値して熱ひずみ ε_T について解くと、次式を得る。

$$\varepsilon_T = \frac{\{\beta_g + K_T(\alpha_s - \alpha_g)\}\Delta T}{K_m} \quad (4)$$

よって、熱ひずみを表す式は式(4)となり、正答は (d) となる。 $\varepsilon_T \neq 0$ となるように、 β_g を選定すればよい。

問 6 半導体ゲージを使用したロードセル(荷重変換器)の特徴に関する次の記述のうちから、正しいものを一つ選び、記号で答えよ。

- (a) ひずみゲージが小さいので、小型で応答性が悪い。
- (b) 箔ひずみゲージなどの金属抵抗ひずみゲージに比べてゲージ率が非常に大きいので、温度の影響を受けにくい。
- (c) 出力が大きいため、増幅器を用いない荷重測定が可能である。
- (d) 専用の増幅器が必要である。

正答 (c)

半導体ゲージの特徴は、ゲージ率が通常の箔ゲージなどのゲージ率 (≈ 2) と比較して約 50~80 倍も大きいので、出力が大きく増幅器を使用せずに測定できる利点がある。一方、そのゲージ率の温度依存性が大きい欠点をもつ。この両者の特徴を正しく説明しているのは、(c) だけである。したがって、正答は (c) となる。(a) は「半導体ゲージの応答性が悪い」という記述が、誤りである。(b) は「半導体ゲージのゲージ率が温度の影響を受けにくい」という記述が、誤りである。(d) は「荷重測定で専用の増幅器が必要である」という記述が、誤りである。この「半導体ゲージ」に関する類題が、ST レベル 2 にも出題されているので、注意されたい。

TT レベル1 一般・専門試験のポイント

近年に出題された TT レベル1 の一般試験と専門試験の問題のうち、正答率の低かった問題と類似した例題について解説する。なお、過去の NDT フラッシュ記事でも試験問題のポイントを紹介しているのでそれらも参考にしていきたい。

一般試験の類題

問1 次は、黒体塗料等を使用せずに、赤外線サーモグラフィ装置を用いて試験対象物の正確な温度を測定する場合に用いる最も正しい放射率の値を示したものである。正しいものを一つ選び記号で答えよ。

- (a) ハンドブック等の文献に示されている値
- (b) 赤外分光器 (FT-IR) を用いて、試験対象物の透過率と反射率を測定し、放射率+反射率+透過率=1 の関係から求めた値
- (c) 試験に用いる赤外線サーモグラフィ装置とは別の高感度の素子冷却型赤外線サーモグラフィ装置を用いて試験対象物から求めた値
- (d) 試験に用いる赤外線サーモグラフィ装置を用いて試験対象物から求めた値

正答 (d)

放射率を得る方法としては、文献から得る方法、赤外分光器を用いて測定する方法、実際に試験で用いる赤外線サーモグラフィ装置を用いて測定する方法がある。以下に方法と特徴を述べる。

・文献を用いる方法

物質の放射率一覧が掲載されている文献によって調べる。放射率一覧表の例を表1に示す。ただし、放射率は波長依存性や表面状態、温度などによって変化するため、文献に示されている値は参考程度にとどめる。

表1 材料の放射率 (一例)

材質	放射率
鉄	0.1 程度
鉄 (酸化)	0.8 程度
紙	0.9 程度
水	0.96 程度
コンクリート	0.9~0.95

・赤外分光器 (FT-IR) を使用する方法

赤外分光器を用いて、試験対象物の透過率と反射率を測定し、放射率+反射率+透過率=1 の関係より、放射率を求める。しかし、赤外線サーモグラフィ装置固有の波長特性は考慮できないため、試験における正しい放射率が得られるわけではない。

・試験で用いる赤外線サーモグラフィ装置を用いて測定する方法

前述の通り、放射率には波長依存性があるため、厳密な放射率測定を行うには、試験に使用する赤外線サーモグラフィ装置そのものを用いるのが好ましく、正答は (d) である。以下に、一般的な測定手順を述べる。

- 1) 黒体塗料 (黒体テープでも可) を試験対象物の一部に塗布し、ヒータなどにより一様の温度に加熱する。
- 2) 黒体塗料の放射率を赤外線サーモグラフィ装置に設定し、黒体塗料を塗布した部分の温度を測定する。(事前に黒体塗料の放射率を調べておく)
- 3) 測定対象物の黒体塗料を塗布していない部分の温度が、2)で測定した温度と一致するまで赤外線サーモグラフィ装置の設定放射率を下げ、一致したときの放射率が測定対象物の放射率となる。

問2 次は、温度分解能 0.2 K の赤外線サーモグラフィ装置を用いて、4 回の画像加算平均処理を行った場合の画質改善後の温度分解能を示している。正しいもの一つを選び記号で答えよ。

- (a) 約 0.4 K
- (b) 約 0.1 K
- (c) 約 0.05 K
- (d) 約 0.025 K

正答 (b)

画像加算平均処理は、試験対象物に対して複数枚の温度画像を撮影し、加算して平均をとる方法である。加算回数の平行根倍の画質改善が可能となり、4 回の場合、 $\sqrt{4}=2$ 倍の改善が行われる。したがって、正答は (b) である。なお、画像加算平均処理は装置の電氣的ノイズなどのランダム誤差の低減に有効な方法であり、感度不良などの欠陥画素に対しては有効ではない。そのような場合には、周囲画素の平均値で置き換える方法がとられる。状況に応じて適切な画像処理法や補正法を選択することが重要となる。

問3 次は、セルシウス温度 T_c と絶対温度 T の関係を示したものである。正しいものを一つ選び記号で答えよ。

- (a) $T_c = T - 373.15$
- (b) $T_c = T - 273.15$

- (c) $T_c = T + 373.15$ (d) $T_c = T + 273.15$

正答 (b)

国際単位系 (SI) ではケルビン $T(K)$ を用いており、水の三重点を $273.15 K$ とし、物理的に到達しうる最低の温度を $0 K$ としている。我が国で広く使われているセルシウス温度 $T_c (°C)$ は、1 気圧のもとでの水の氷点と沸点を 100 等分した単位温度を $1 °C$ として氷点を $0 °C$ 、沸点を $100 °C$ としたものである。 T_c と T の間には、(b) の関係がある。

問 4 次は、 $20 °C$ の黒体から放射される赤外線エネルギーが最も大きくなる波長帯域を示したものである。正しいものを一つ選び記号で答えよ。

- (a) $1 \mu m \sim 3 \mu m$ (b) $3 \mu m \sim 5 \mu m$
 (c) $5 \mu m \sim 8 \mu m$ (d) $8 \mu m \sim 13 \mu m$

正答 (d)

黒体の単色射出能を示す図 1 のように、温度が低くなるほど赤外線エネルギーのピーク波長が長波長側にシフトする。赤外線エネルギーが最大となる波長 λ_{max} と絶対温度 T の関係 (図中の点線) は、以下の式 (1) で表すウィーンの変位則で与えられる。

$$\lambda_{max} \cdot T = 2898 (\mu m \cdot K) \quad (1)$$

したがって、

$$\lambda_{max} = 2898 / (273.15 + 20) = 9.9 (\mu m) \quad (2)$$

となり、正答は (d) となる。

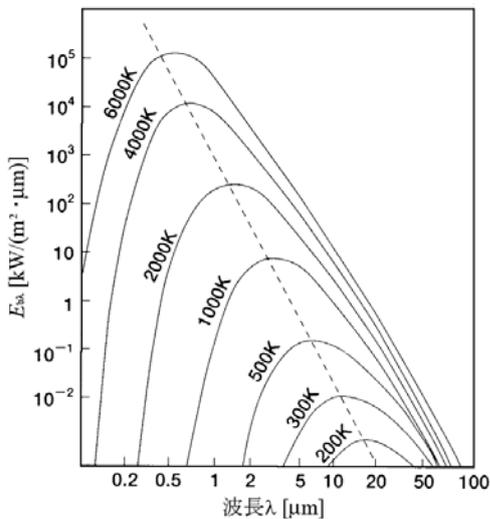


図 1 黒体の単色射出能 (両対数目盛)

専門試験の類題

問 5 次の文は、赤外線反射ミラーを用いた赤外線サーモグラフィ試験を実施する際の注意点について述べたものである。正しいものを一つ選び、記号で答えよ。

- (a) 赤外線用の反射ミラーに金は用いられるがアルミニウムは使用できない。
 (b) 撮像された画像は、上下又は左右に反転する。
 (c) ガラスの裏面鏡も使用できる。
 (d) ミラーの反射率はほぼ 1 のため、補正の必要はない。

正答 (b)

直接撮像することができない試験対象物は、赤外線反射ミラーを用いて間接的な撮像を行う。反射ミラー越しに測定すると、撮影された画像は上下又は左右が反転することに注意が必要であり、正答は (b) である。

赤外線用の反射ミラーには、金又はアルミニウムなどの金属がコーティングされた表面鏡がある。一般によく使われる鏡はガラスの裏側に反射材がある裏面鏡であり、赤外線サーモグラフィ装置で測定すると単なるガラス板になってしまうので使用することができない。赤外線用の反射ミラーは、反射率が高いものでも 1 より小さく無視できないので補正が必要となる。

問 6 次は、赤外線サーモグラフィ装置を用いたパッシブ法によって、石油タンクの液面やスラッジ (堆積物) の高さを計測する上で留意すべき点を示している。正しいものを一つ選び記号で答えよ。

- (a) タンク内表面の放射率
 (b) 計測時刻
 (c) タンク内部の圧力
 (d) 大気圧

正答 (b)

タンク外面の放射率には注意が必要だが、タンク内表面の放射率は重要ではなく、(a) は誤りである。本手法では、タンク外面に日射による熱負荷が加わった際の、液体やスラッジ部での熱伝導特性の違いにより現れる温度変化を利用している。計測時刻が変化すると、測定面に与えられる日射エネルギーが変わるため、計測時刻や測定面の方向には注意が必要であり、正答は (b) となる。タンク内外の圧力は、測定面の温度に大きな影響を及ぼすものではないため、(c)、(d) は誤りである。