遮熱コーティングの機械的特性評価法の標準化に向けて ー積層梁の曲げによる弾性係数測定ー

Standardization for evaluating mechanical properties of heat resistant coatings -Elastic modulus measurement based on bending of composite beam-

○ 脇 裕之・大阪電通大

藤岡秀典・大阪電通大院

原田良夫・トーカロ (株)

Hiroyuki Waki,
Osaka Electro-Communication UniversityHidenori Fujioka,
Osaka Electro-Communication UniversityYoshio Harada,
TOCALO Co.,Ltd.

岡崎正和・長岡技科大

川崎 亮・東北大

Masakazu Okazaki, Nagaoka University of Technology

Akira Kawasaki, Tohoku University

Key Words: Thermal barrier coating, Elastic modulus, Standardization, Mechanical properties, Composite beam, MCrAlY, YSZ

遮熱コーティングの弾性係数評価法の標準化を目的とし、4点曲げ試験を実施した。積層梁の曲げ理論を用い、常温で高精度に測定できる手法としてひずみゲージ法、高温への適用も可能なたわみ法の両手法で評価した。ひずみゲージ法では皮膜ひずみ法が最も高精度であることが分かった。たわみ法では曲げスパンが長い場合に良好に評価可能であり、適切なスパンを明らかにした。ひずみゲージ法・たわみ法とも皮膜の厚さが基材の厚さと比べて大きい場合良好に評価可能であり、適切な厚さ比を明らかにした。

1. 緒言

発電用ガスタービンの作動温度の高温化には遮熱コーティングが必要不可欠となっている。熱解析、応力解析に基づいたコーティングの設計を行うためには、コーティングの熱的・機械的性質を明らかにする必要がある。本研究は熱的・機械的性質の標準試験法の確立を目的とした NEDO 委託「耐熱コーティング膜の特性評価試験方法に関する標準化調査研究」の一環として、弾性係数評価法の標準化を実験的に検討したものである。

弾性係数の評価法として積層梁の曲げ理論を用い、様々な試験片形状で系統的に曲げ試験を行った。常温で高精度に測定できる手法としてひずみゲージ法、高温への適用も可能なたわみ法の両手法を標準化することを目的とした。特に以下の点について検討した。(1)ひずみゲージ法として、皮膜のひずみあるいは基材のひずみ何れを用いた評価法が適切であるかの検討。(2)たわみ法では、皮膜のヤング率を評価可能な必要最低限の曲げスパンを明らかにする必要がある。(3)ひずみゲージ法・たわみ法とも、皮膜と基材の厚さ比 h_1/h_2 、ヤング率比 E_1/E_2 (添え字 1,2 はそれぞれ皮膜および基材) が小さくなると感度が悪くなるので、精度良く測定できる厚さ比を限定する必要がある。

2. 積層梁の曲げによるヤング率評価法

次の5種類の方法を用いてヤング率を評価し、それらを比較した。基材とボンドコート(BC)の2層試験片では、基材のヤング率を既知とし、2層梁理論を用いた。基材とBCとトップコート(TC)の3層試験片では、基材とBCのヤング率を

Fig. 1 Four point bending test of composite beam

既知とし、基材とBCの等価ヤング率を与え、等価基材とTCの2層梁理論を用いた。 $P, \epsilon, h, b, a, \eta, I$ はそれぞれ、荷重、ひずみ、厚さ、幅、スパン、皮膜表面から中立軸の距離、断面二次モーメントを表す。添え字 1 は皮膜、2 は基材を意味する。

(1) 皮膜ひずみ法 荷重と皮膜ひずみの勾配($\Delta P/\Delta \epsilon_1$)から皮膜のヤング率 E_1 を求める。

$$E_1 = \frac{a\eta}{I_1} \left| \frac{\Delta P}{\Delta \epsilon_1} \right| - E_2 \frac{I_2}{I_1} \quad (1)$$

(2) 基材ひずみ法 荷重と基材ひずみの勾配($\Delta P/\Delta \epsilon_2$)から皮膜のヤング率 E_1 を求める。

$$E_1 = \frac{a(h_1 + h_2 - \eta)}{I_1} \left| \frac{\Delta P}{\Delta \epsilon_2} \right| - E_2 \frac{I_2}{I_1} \quad (2)$$

(3) 中立軸法 中立軸の位置 η を皮膜ひずみ ϵ_1 と基材ひずみ ϵ_2 から求め、皮膜のヤング率 E_1 を求める。

$$E_1 = \frac{E_2(h_2^2 + 2h_1h_2 - 2\eta h_2)}{2\eta h_1 - h_1^2}, \quad \eta = (h_1 + h_2) \times \frac{|\epsilon_1|}{|\epsilon_1| + |\epsilon_2|} \quad (3)$$

(4) 荷重点たわみ法 荷重と荷重点たわみの勾配($\Delta P/\Delta y_b$)から皮膜のヤング率 E_1 を求める。

$$E_1 = \frac{5a^3}{6I_1} \left| \frac{\Delta P}{\Delta y_b} \right| - E_2 \frac{I_2}{I_1} \quad (4)$$

(5) 最大たわみ法 荷重と最大たわみの勾配($\Delta P/\Delta y_c$)から皮膜のヤング率 E_1 を求める。

$$E_1 = \frac{23a^3}{24I_1} \left| \frac{\Delta P}{\Delta y_c} \right| - E_2 \frac{I_2}{I_1} \quad (5)$$

3. 実験方法

3-1 試験片 基材は SUS304(厚さ h_b)、ボンドコートは CoNiCrAlY(厚さ h_{bc})、遮熱皮膜は 8%Y₂O₃-ZrO₂(YSZ)(厚さ h_{tc})とした。表 1 に示す皮膜と基材の厚さ比の異なる試験片を 10 種類準備した。試験片幅は 10mm とした。また基材と皮膜のヤング率比の異なる試験片としてトップ層を Al₂O₃ としたものも準備した。また比較のため、厚さ 1.5~2.0mm の皮

Table 1 Dimensions of composite specimens [mm]

Code	h_s	h_{bc}	Code	h_s	h_{bc}	h_{tc}
BC2-5	2	0.5	YSZ2-5	2	0.1	0.5
BC2-3	2	0.3	YSZ2-3	2	0.1	0.3
BC3-3	3	0.3	YSZ3-3	3	0.1	0.3
BC4-3	4	0.3	YSZ4-3	4	0.1	0.3
BC2-1	2	0.1	Al ₂ O ₃ -2-3	2	0.1	0.3

膜単体試験片も作製した。

3-2 曲げ試験 負荷は油圧サーボ式材料試験機を用い、負荷速度は0.5mm/minとした。曲げスパン a は12, 20, 28の3種類とした。荷重はロードセル(容量500N, 0.215N/ μ st)で測定した。最大たわみはひずみゲージ式変位計(容量5mm, 0.0005mm/ μ st)、荷重点たわみは試験機変位(容量25mm: 0.25mm/V)を用いた。校正試験を行い、4点曲げ変位はこれらの変位からジグ(試験機を含む)の変形を差し引いたものを用いた。皮膜表面および基材表面にひずみゲージ(標点長さ1mm)を貼付した。ゲージ接着剤はシアノアクリレート系を用いた。なお、一般に皮膜のヤング率は引張と圧縮では異なるので、両者をそれぞれ別々に測定した。

4. 実験結果

皮膜単体で最も大きくヒステリシスしたYSZに関しても、基材一体試験片ではほとんどヒステリシスしなかった。また僅かに生じたヒステリシスも1,2回の繰返し負荷で消滅し、ほぼ線形な関係が得られることが分かった。ヤング率の評価には数回繰返し負荷した後の安定した荷重-ひずみ、荷重-変位関係を採用した。

次に、式(1)-(3)の3種のひずみゲージ法の測定精度を比較した。最も高精度であるのは皮膜ひずみ法であることが明らかとなった。また皮膜にゲージを接着すると接着剤の含浸が懸念されたが、低粘度・高粘度の接着剤とも含浸は無く両者のひずみはほぼ同一で、一般的ゲージセメントで十分であることを確認した。

次に、式(4),(5)の2種のたわみ法を比較したところ、両者に精度の差はほとんど無いことが分かった。

次に、皮膜ひずみ法と荷重点たわみ法について、皮膜と基材の断面二次モーメント比とヤング率比の積を横軸にとったものをそれぞれ図2(a),(b)に示す。図中の分数は計算エラーが生じた割合を示している。式(1),(4)を鑑みると、横軸が大きい場合は測定感度が高いことを意味し、小さい場合は第二項が大きくなり誤差を含むと左辺が負になり正しいヤング率が得られないこともあり得る。図より実験でも横軸が大きい場合に安定した値を得ていることが確認できる。特にたわみ法ではその傾向が顕著である。ひずみ法では $(E_1/E_2)*(I_1/I_2) > 0.05 \sim 0.2$ 、たわみ法では、 $(E_1/E_2)*(I_1/I_2) > 0.15 \sim 0.2$ が望ましいことが明らかとなった。なお、これらの横軸が大きい条件では、残留応力により試験片は反っている。例えば $(E_1/E_2)*(I_1/I_2) = 0.4$ の条件では全長100mmに対して、中央部の反りは0.56mmであり、大きく反っていた。このような場合でも、反りがその1/2程度の場合($(E_1/E_2)*(I_1/I_2) = 0.25$)と同様に良好な値が得られている。反りはヤング率測定に悪影響を与えないことを確認できた。

次に、図2の引張と圧縮のヤング率を比較すると、その差はCoNiCrAlYについてはほとんど無い様子が分かる。一方YSZとAl₂O₃については引張のヤング率は圧縮より小さくなる傾向がある。引張と圧縮のヤング率を別々に評価可能な片側コーティング試験片は妥当な試験片構造と言える。

次に、荷重点たわみ法について、曲げスパンの影響を調べたものを図3に示す。横軸は式(4)の第1項の係数をとっており、これが大きいと感度が高いことを意味するが、実験でも横軸が大きい場合に安定した値を得ていることが確認できる。たわみ法では $(a^3/I_1) > 1 \times 10^3 [1/mm]$ が望ましいことが明らかとなった。なお、皮膜ひずみ法は、たわみ法よりスパン

の感度は低いことを確認した。

最後に、これらの基材一体で得られた値を皮膜単体で得られた値や同一の試験片のインデント法で得られた値と比較する(表2)。表には一例として、皮膜ひずみ法で最も良好な試験片形状で得られた値を示している。基材一体試験片は、皮膜単体やインデント法と比較して小さな値となっている。

5. 結言・参考文献 略

謝辞 本研究は、(財)大阪科学技術センター附属ニューマテリアルセンターが、(独)新エネルギー・産業技術総合研究開発機構から委託を受けて実施した「耐熱コーティング特性評価試験方法の標準化調査研究」の成果の一部である。

(a) method of coating strain

(b) method of displacement at loading point

Fig.2 Effects of the ratio $(E_1/E_2)*(I_1/I_2)$ on measured E_1 .

Fig. 3 Effects of bending span on measured E_1 by y_b .

Table 2 Young's modulus [GPa]

	CoNiCrAlY	YSZ	Al ₂ O ₃
Composite beam	75.4 (Comp.)	24.4 (Comp.)	61.2 (Comp.)
	74.4 (Tens.)	27.3 (Tens.)	52.5 (Tens.)
Free-standing beam	110.4 (Ave.)	51.5 (Ave.)	190.1 (Ave.)
Indentation	135 (in plane)	115 (in plane)	48 (out plane)