

マルチスケール組織制御による 高遮熱・高耐久複合遮熱コーティングの開発

千葉大学 大学院工学研究院

山崎 泰広

1. はじめに

発電分野における CO₂ 排出削減を目指して、直近では再生可能エネルギーの利用拡大、中期的には水素ガスタービンの技術開発が国内外で進められている。一方で、天候の影響を強く受ける太陽光や風力などの再生可能エネルギーでは発電量の変動が不可避である。そのため、電力系統の安定化策として機動性に優れ高効率なガスタービンを電力系統安定化システムとして活用する計画が進められている。この電力系統安定化ガスタービンにおいては、急速起動や頻繁な出力変動が求められるため、それによって生じる熱疲労破損が懸念される。一方、ガスタービンの基幹部材であるタービン動翼は、その構造部材の超合金の耐熱温度を遥かに超える高温ガスに曝されるため、翼表面で温度を遮蔽する遮熱コーティング (Thermal barrier coating, 以下, TBC) が不可欠となっている。そして、CO₂ 排出削減・発電効率向上のための稼働温度の上昇により TBC の遮熱性向上の要求が益々高くなっている (要求 1: 遮熱性の向上)。一方、調整電源として運用する場合、再生可能エネルギー源の発電量の変動に合わせた運用が要求される。その場合、急速起動や頻繁な出力変動により大きな熱応力が生じ、それによる熱疲労破損が懸念される (要求 2: 熱応力抑制)。

以上の背景に鑑み、本研究では、遮熱コーティングにおいて従来トレードオフの関係にある低熱伝導率化と内部熱応力の抑制の両立が可能かという命題に対して、ナノメートルからミリメートルにわたるマルチスケール組織構造制御によりその解決を目指す。

2. 研究の方法及び内容

本研究では、マルチスケール組織制御により準備した複合遮熱コーティング試験片を対象に、実機環境下を模擬した熱疲労試験により耐久性評価を行った。さらに、デジタル画像相関法 (DIC) による熱疲労負荷中の皮膜に生じるひずみを高温下で高倍率の測定を行い、熱応力緩和機構を定量的に評価した。また、熱・構造練成解析により微視組織と熱応力分布との関係を検討した。

3. 供試コーティング

本研究では 直径 20mm 厚さ 1mm のディスク状 Ni 基超合金 IN738LC 基材 (Sub.) 上にボンドコート (BC) として CoNiCrAlY を成膜し、BC 上に 8wt%Y₂O₃ 安定化 ZrO₂ (YSZ) 層と低熱伝導率・高遮熱機能付与を目的とした YbTa₃O₉ 層からなる複合トップコート (TC) を成膜した TBC システムを供試材として準備した。供試材の断面組織を図 1 に示す。本研究では 2 種類の微視組織を有する複合 TC を準備して実験に供した。すなわち、第 1 層を柱状 YSZ 層とし、第 2 層を層状 YbTa₃O₉ 層あるいは柱状 YbTa₃O₉ 層とした微視組織で

ある．以下，前者を層状試験片，後者を柱状試験片と呼称する．また，比較のため，TC を現在使用されている層状 YSZ 単層皮膜とした現用 TBC 試験片も準備した．

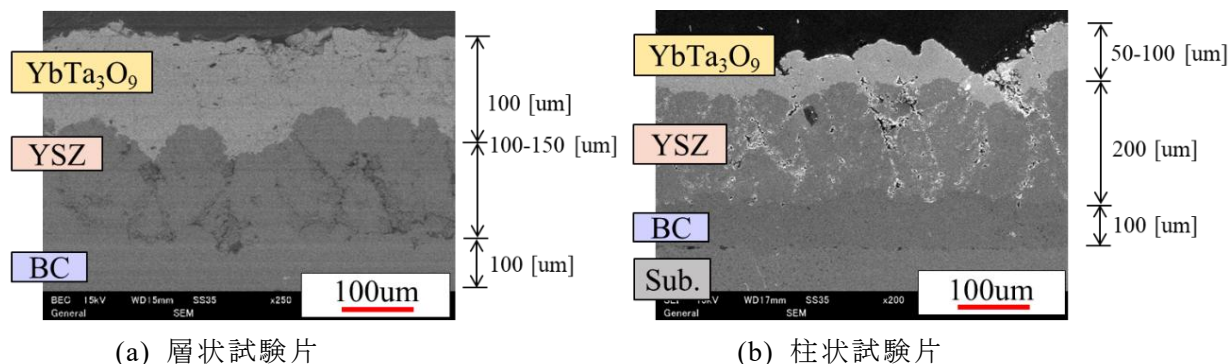


図 1 供試コーティングの断面組織

4. 熱サイクル試験および熱ひずみ測定

本研究では，大気用赤外線導入加熱装置（サーモ理工（株）GA298）を用いて，試験片を 400℃から 1100℃まで加熱し，400℃まで空冷する約 80 秒周期の熱サイクル負荷を与えて熱サイクル耐性を評価した．結果を，現用 TBC 試験片と比較して図 2 に示す．図 2 に示すように，層状試験片が 10,000cycle の熱サイクル負荷後に試験片端部の第 1 層柱状 YSZ 層と BC 界面および第 1 層柱状 YSZ 層と第 2 層層状 YbTa₃O₉ 層の複合 TC 界面において大規模剥離が生じていた．これに対し，柱状試験片では，10,000cycle 負荷後に第 1 層柱状 YSZ 層と第 2 層柱状 YbTa₃O₉ 層の界面き裂の発生による第 2 層の局所的部分剥離が一部見られるものの，大規模剥離は認められなかった．この結果は，第 1 層に加え第 2 層も柱状組織とすることにより熱サイクル耐性が向上したことを意味している．なお，現用 TBC 試験片の熱サイクル寿命 5,000cycle に比べ，層状試験片でも 2 倍の熱サイクル耐性を有していることから，本研究で開発した複合遮熱コーティングは現用遮熱コーティングに比して優れた熱サイクル耐性を有していることが確認できた．

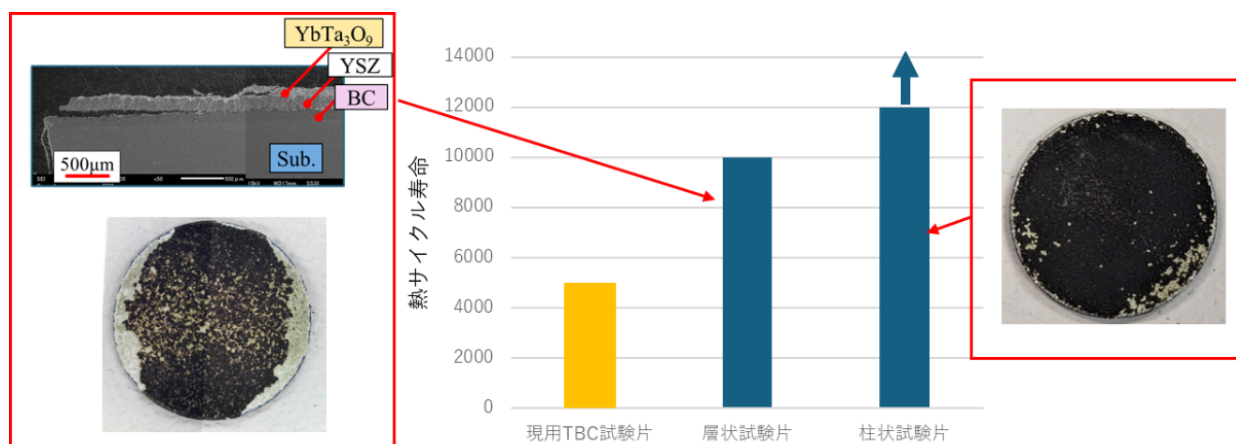
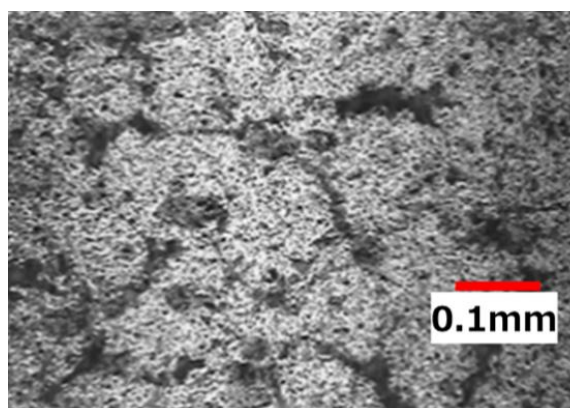


図 2 熱サイクル試験結果

本研究では、長焦点型デジタル顕微鏡と DIC 解析ソフト（本助成を受けて準備）からなる DIC システムと大気用赤外線導入加熱装置を組み合わせ、熱サイクル負荷中に生じる複合 TC 表面の熱ひずみの計測を試みた。この際、 $100\mu\text{m}$ サイズの微視組織構造を有する柱状組織内の熱ひずみを評価するため、DIC に用いるランダムパターンの微細化を試みた。図 3 に柱状試験片を例に本研究で用いたランダムパターンを、一般的なパターンと比較して示す。本研究では、精密エアスプレーとコンプレッサー（本助成を受けて準備）を用いながら工夫を施すことにより、従来のパターンに比して $1/10$ 以下のサイズで、かつ、従来パターンと同等のランダム分布でパターンの塗布が可能となった。



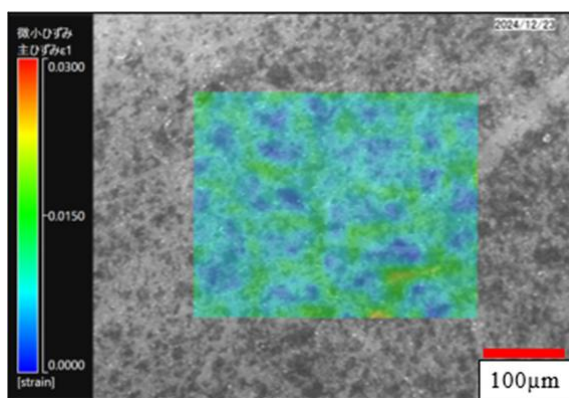
(a) 実験に用いたランダムパターン



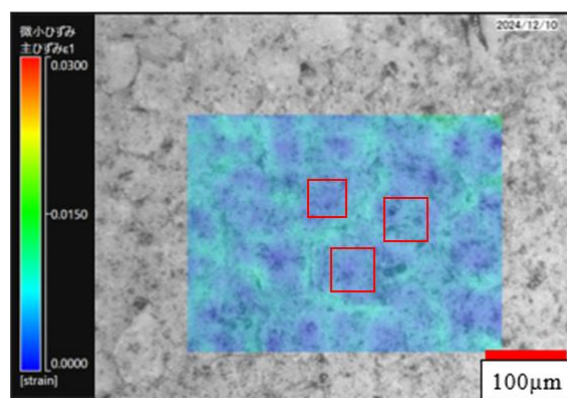
(b) 一般的なランダムパターン

図 3 ランダムパターンの例

供試コーティングの DIC 測定結果の例を図 4 に示す。図 4(b)に示すように DIC 画像においても柱状組織が確認できている。本研究では、柱状組織の熱ひずみを評価するため、観察画像中の柱内（図中の□で囲まれた領域）の熱ひずみを個々に測定し、その平均値を計測した。一方、層状組織に対しては観察領域全体の平均値とした。本研究では、皮膜中に発生する熱応力場を等二軸応力と仮定し、その主ひずみ成分を熱ひずみと定義した。熱ひずみは、各測定条件で 5 か所以上の領域を測定し、その測定結果の平均値より評価した。



(a) 層状試験片



(b) 柱状試験片

図 4 DIC 測定結果の例

図 5 に熱ひずみ測定結果を示す．比較のため，現用 TBC 試験片の結果も併記した．すべての試験片で温度に対して熱ひずみがほぼ線形に変化していることから，図 5 の結果を一次関数で近似し，見かけの熱膨張係数を評価した．結果を図 6 に示す．図中には，大気プラズマ溶射により成膜された YbTa_3O_9 単体の熱膨張係数¹⁾とバルク YSZ および基材である IN738LC の熱膨張係数も併記した．図 6 中に併記したように，基材である IN738LC の熱膨張係数がセラミックス皮膜である YbTa_3O_9 や YSZ の熱膨張係数より大きいことから，温度上昇に伴って生じる基材の熱膨張量が皮膜の熱膨張量より大きくなる．一方で，本研究に用いた試験片では，基材厚さ 1mm に対して，皮膜厚さ約 0.3mm であることから，皮膜に対して基材の剛性が高いため，皮膜の熱応力緩和特性が低いほど基材に生じた熱ひずみに追従して皮膜の熱ひずみ量が大きくなり，結果として，見かけの熱膨張係数が高く評価されるものと考えられる．以上を考慮して，図 6 の結果をみると，層状試験片や現用 TBC 試験片のような大気プラズマ溶射で成膜されたプレート状皮膜では熱応力緩和能が低く，単体の熱膨張係数より高い見かけの熱膨張係数となっている．なお，これらの見かけの熱膨張係数は単体のそれより高くなっているものの，基材の熱膨張係数より低い値となっている．これは，層状試験片では，TC 第 1 層の柱状 YSZ 層により，現用 TBC 試験片ではスプラット構造からなる多孔質層が有する柔構造により，ある程度の応力緩和がなされているものと考えられる．一方，柱状試験片の見かけの熱膨張係数は YbTa_3O_9 単体のそれとほぼ同等であることから，熱応力緩和能が極めて高いことが明らかである．

図 6 の結果から，層状試験片に比較して，柱状試験片の熱応力緩和能が高いことが示された．この柱状試験片の高い熱応力緩和能が図 2 で示した柱状試験片の高い熱サイクル耐性の要因と考えられる．

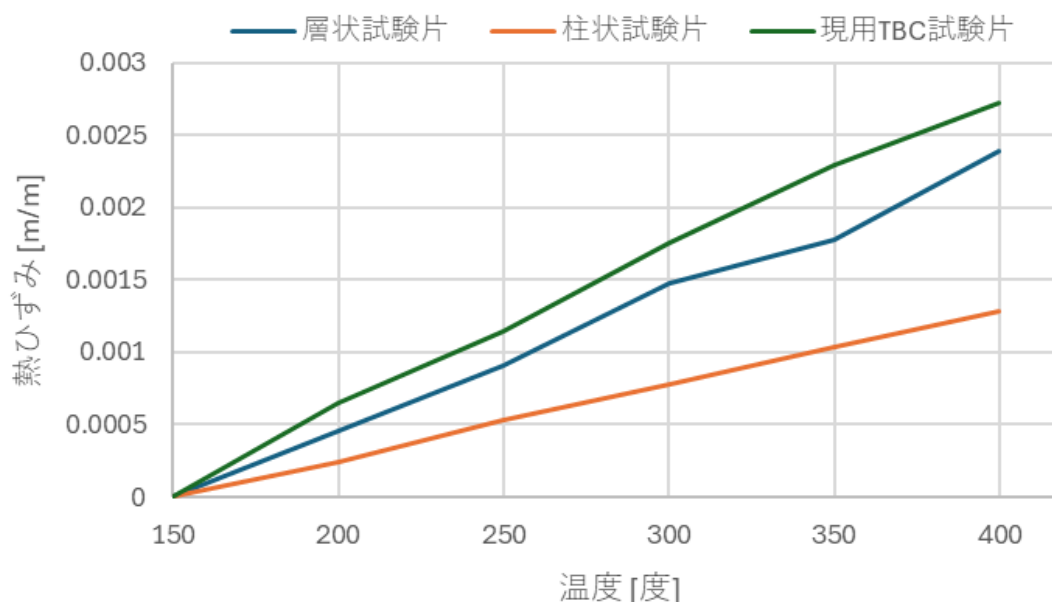


図 5 DIC 測定で得られた熱ひずみと温度の関係

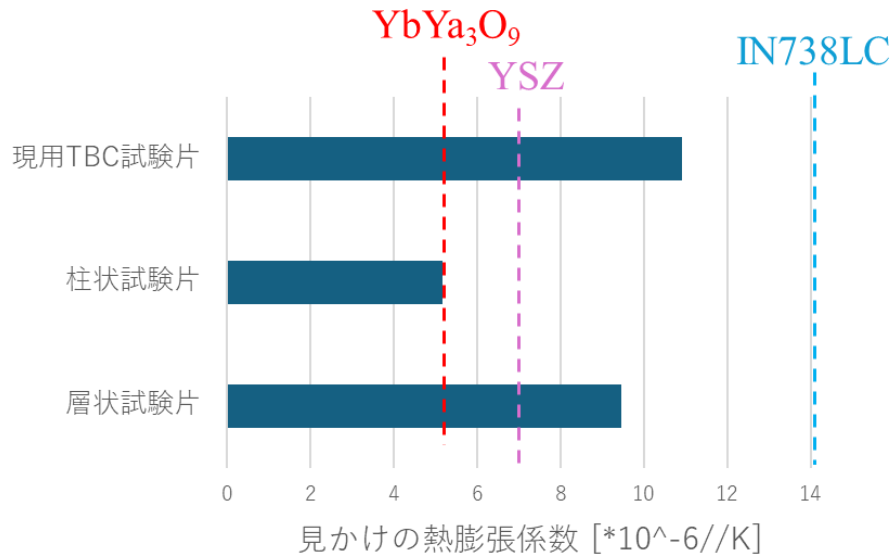


図 6 DIC 測定で得られた見かけの熱膨張係数

5. 熱・構造連成解析

本研究では ANSYS Mechanical APDL 2022 R1 および Abaqus を用いて熱・構造連成解析を実施した。解析モデルは、図 7 に示す試験片の対称性を考慮した 1/24 モデルで、層状試験片と柱状試験片の各モデルを使用して、熱サイクル負荷中に試験片中に生じる熱応力を評価した。代表的な結果を図 8 に示す。図 8(a) より、層状試験片モデルでは、試験片外周の $\text{YbTa}_3\text{O}_9/\text{YSZ}$ 界面に加え YSZ/BC 界面で高い熱応力が発生している。これらの高い熱応力の発生により層状試験片では図 2 に示したような $\text{YbTa}_3\text{O}_9/\text{YSZ}$ 界面および YSZ/BC 界面の剥離が試験片外周部から発生したものと考えられる。一方、図 8(b) に示すように、柱状試験片においても YSZ/BC 界面で熱応力が発生しているが、層状試験片に比べて低い。これは、プレート上の YbTa_3O_9 より柱状の YbTa_3O_9 の応力緩和能が高いことが要因と考えられる。

以上のように、熱・構造連成解析の結果からも層状試験片に比べて柱状試験片で高い熱サイクル耐性が得られることが示唆された。

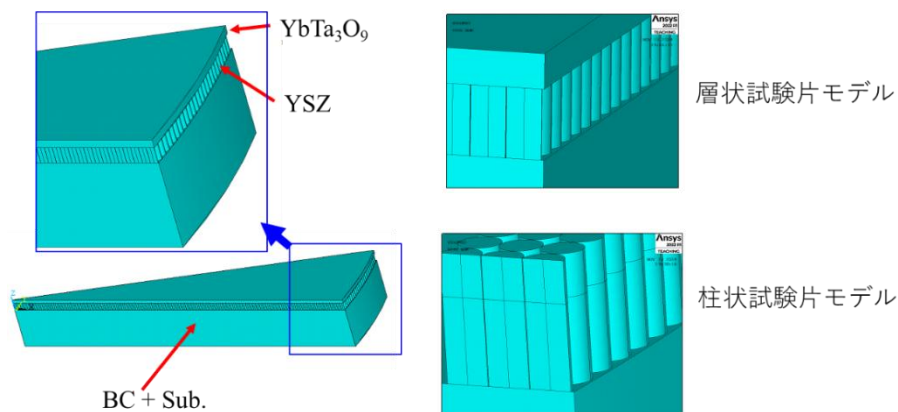


図 7 熱・構造連成解析モデル

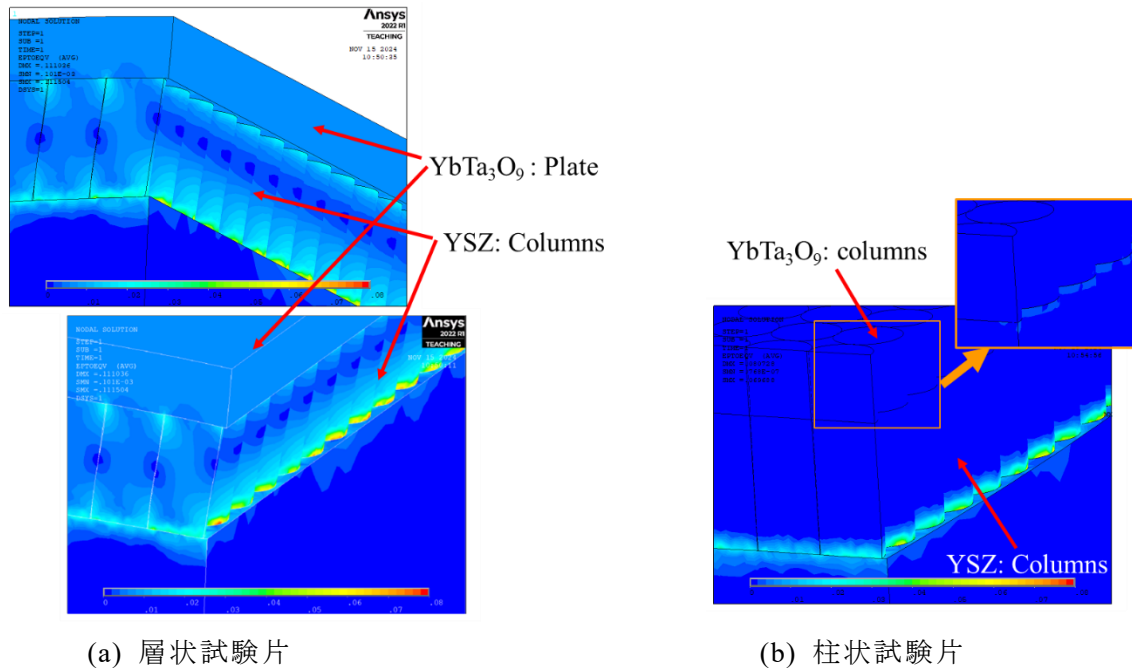


図 8 代表的な熱・構造連成解析結果

6. まとめ

本研究では、マルチスケール組織制御により準備した複合遮熱コーティング試験片を対象に耐久性評価を行うとともに、熱サイクル負荷中の皮膜に生じるひずみを評価した。また、熱・構造連成解析により微視組織と熱応力分布との関係を検討した。その結果、本研究で開発した複合遮熱コーティングは現用の遮熱コーティングに比して高い熱サイクル耐性を有すること、また、柱状複合組織を有する複合コーティングがより優れた熱サイクル耐性を有すること、を実験的に示すとともに、その要因が高い熱応力緩和能に起因することを実験的・解析的に明らかにした。

謝辞

本研究は（公益財団法人）天野工業技術研究所，2024 年研究助成を受けて実施されました。

参考文献

- 1) 奥野和馬, 荒井正行, 伊藤潔洋, 水津竜夫, 土生陽一郎, APS-YbTa₃O₉ 系遮熱コーティングの熱的・機械的特性評価, 日本機械学会論文集, 2022, 88 巻, 906 号, p. 21-00366

研究テーマ マルチスケール組織制御による 高遮熱・高耐久複合遮熱コーティングの開発

所属・研究者名 千葉大学 大学院工学研究院 准教授 山崎泰広

〔目的〕 マルチスケール組織構造制御により，現用遮熱コーティングに比べて優れた熱サイクル耐性を有する複合遮熱コーティングを開発し，その能力を実証する．

研究概要〔内容〕 複合遮熱コーティングの耐久性評価と熱サイクル負荷中に生じるひずみを実験的・解析的に評価した．

〔成果〕 複合遮熱コーティングが現用遮熱コーティングに比して高い熱サイクル耐性を有すること，また，柱状複合組織により熱サイクル耐性の向上が可能であること，を実験的に示すとともに（下左図），その要因が高い熱応力緩和能に起因することをDIC 援用により実験的に（下右図），FEM により解析的に明らかにした．

