

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04172

研究課題名(和文)セラミックス粒子積層過程中の応力発生機構の解明

研究課題名(英文)Elucidation of stress formation mechanism during deposition process of ceramic particles

研究代表者

脇 裕之(WAKI, Hiroyuki)

岩手大学・理工学部・教授

研究者番号：30324825

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：セラミックス溶射皮膜はプラズマジェットによりセラミックスを半熔融状態とし、下地に衝突させ皮膜が形成される。本研究では、粒子積層過程中の応力形成機構の研究を行った。まず、試験片の曲率に基づく応力履歴解析モデル(中間層を有する3層モデル)を構築した。次に、プラズマ溶射中の粒子積層過程での試験片の曲率履歴の計測によって、堆積応力の形成履歴を評価した。様々なプロセス条件の実験により、堆積応力の過渡状態、堆積応力と材料物性の関係、堆積応力と皮膜組織との関連を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

セラミックス皮膜はガスタービンなどの高温部品で不可欠であり、プラズマ溶射で施工されている。過酷な粒子積層環境において、セラミックス皮膜の応力履歴を正確に評価することが困難であり、残留応力の形成機構の解明が重要な課題となっている。本研究では粒子積層中の過渡的な堆積応力を実験的に評価し、応力形成機構を検討した貴重な結果である。特に、明らかにした堆積応力の物性依存や、堆積応力と皮膜組織との関連は、今後、応力制御セラミックス皮膜や組織制御セラミックス皮膜の開発に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：Ceramic thermal sprayed coating is formed by sequential impact of semi-molten particles into the substrate with a plasma jet. In this study, we investigated the stress formation mechanism during the particle deposition process. Firstly, a stress analytical model, three-layer model with an intermediate layer, was constructed based on the curvature of the specimen. Secondly, by measuring the curvature history of the specimen during plasma spraying process, the deposition stress history during the particle deposition process was evaluated. Experimental studies under various process conditions clarified the transient state of the deposition stress, the relation between deposition stress and material properties, and the relation between deposition stress and the coating microstructure.

研究分野：材料力学

キーワード：機械材料・材料力学 構造・機能材料 遮熱コーティング 残留応力 弾性係数

1. 研究開始当初の背景

セラミックス皮膜はガスタービンなどの高温部品で不可欠であり、プラズマ溶射で施工されている。プラズマジェットによりセラミックスを半熔融状態とし、下地に衝突させ皮膜が形成される。過酷な粒子積層環境中において、セラミックス皮膜の応力履歴を正確に評価することが困難であり、残留応力の発生機構の解明が重要な課題となっている。

粒子積層中の応力形成機構に関しては、粒子の急凝固による引張、クラッキングによる応力緩和、粒子の衝突によるピーニング圧縮、の3つが想定されるが、プロセス中のこれらの機構の影響度が不明で応力の制御が困難であった。セラミックス溶射中の応力履歴を正確に評価することが可能となれば、応力形成機構の解明と、応力と皮膜組織の制御指針の導出が期待される。

2. 研究の目的

セラミックス溶射中の応力履歴を正確に評価するために、試験片の曲率に基づく応力履歴解析モデル(中間層を有する3層モデル)を構築する。次に、様々なプロセス条件で3つの機構の影響度を変化させ、セラミック粒子積層中の応力を実測する。応力履歴と皮膜組織の関係を評価し、応力形成機構の解明や、応力と皮膜組織の制御指針の導出を目指す。

3. 研究の方法

皮膜の応力履歴を、粒子積層中の堆積(積層)応力と、積層完了から常温への冷却中に発生する熱応力に分離する。特に堆積応力は、理論的に評価することが困難であり、本研究で実施する実験的研究が重要となる。

研究の手法は以下の3ステップである。それぞれの目的を述べる。

(1) 弾性係数の膜厚依存(溶射履歴依存に対応)の把握

応力計算に弾性係数が必要不可欠である。完成皮膜を逐次除去し、弾性係数の膜厚依存を把握する。弾性係数の評価は、共振法により行う。

(2) 試験片の曲率に基づく応力履歴解析モデル(中間層を有する3層モデル)の構築

試験片の曲率履歴から皮膜の応力履歴を評価するために解析モデルが必要である。セラミックス皮膜の実用に即した3層モデル(中間層を有する)を構築する。

(3) 様々なセラミック溶射条件での粒子積層中の曲率履歴の実測

プラズマ溶射中の粒子積層過程での試験片の曲率履歴の計測によって、堆積応力の形成履歴を評価する。様々な条件で実験を行ったが、本報では代表例として以下の2件を示す。

アルミナおよびジルコニアセラミックスの比較

アルミナは線膨張係数が低く、ジルコニアより凝固収縮が小さい。また、アルミナの弾性係数はジルコニアより高い。これら物性値が堆積応力に及ぼす影響を調べる。

高出力および標準出力プラズマの比較

高出力プラズマでは粒子温度が高く、凝固収縮が大きい。標準出力と比較し、これが堆積応力に及ぼす影響を調べる。また堆積応力と皮膜組織の関係も調べる。

4. 研究成果

(1) 弾性係数の膜厚依存の把握

ヤング率は界面近傍を除いて、ほぼ一定であることが分かった。界面近傍では残留応力の影響でヤング率が変化していると考えられた。応力計算では積層完了時の曲率を用いた堆積応力と、冷却完了時の曲率を用いた残留応力を求める。本研究では薄膜ではなく、実用的な数100mmの厚膜を扱う。そのため、応力計算に利用するヤング率は、厚膜の値を採用することにした。

(2) 試験片の曲率に基づく応力履歴解析モデル(中間層を有する3層モデル)の構築

セラミックストップコーティング(TC)は、通常は中間層(BC)を有するため、3層システム材で薄層が連続積層する解析モデルを作成し、その有効性をFEMで示した[主な発表論文 雑誌論文2]。このモデルにより厳密な応力を解析可能となった。ただし簡単のため、本報では、厚膜が一度に積層するブロックモデル(図1)による2層モデルの結果を示す。

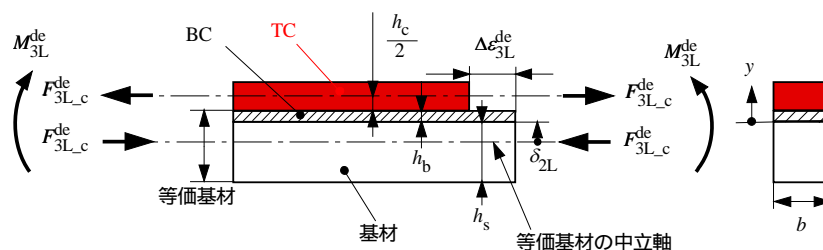


図1 中間層を考慮した応力評価モデル

(4) 様々なセラミック溶射条件での粒子積層中の曲率履歴の実測

プラズマ溶射中の粒子積層過程での試験片の曲率履歴の計測によって、堆積応力の形成履歴を評価した。製作した実験装置の模式図を図2に示す。3点変位により曲率を正確に評価できる。

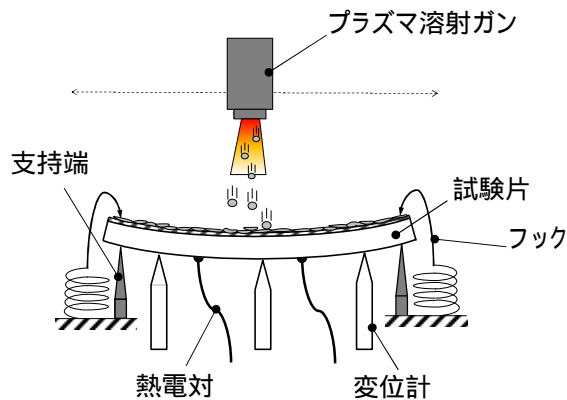


図2 粒子積層中の曲率測定装置

溶射 1pass 中の曲率履歴を詳細に見ることによって、堆積応力は過渡的には、圧縮を伴いながら、最終的には引張が蓄積されて行くことを解明した。過渡的に圧縮となるのは、粒子が衝突した瞬間は膨張し、それが下層から拘束されるためと考えられた。最終的に引張が蓄積されるのは、衝突の瞬間の膨張よりも、その後の凝固収縮の影響度が大きかったためと考えられた。

本研究では、様々なプロセス条件で粒子積層中の応力を実測したが、代表例として以下の2件を示す。

アルミナ (Al₂O₃) およびジルコニアセラミックス (YSZ) の比較

図3は、2つのセラミックス皮膜の、(a)曲率履歴、(b)残留応力を堆積応力と熱応力に分離した結果、である。線膨張係数はアルミナの方がジルコニアより低く、弾性係数はアルミナの方がジルコニアより高い。線膨張係数の影響でアルミナの堆積応力は低くなるが、弾性係数が高いため堆積応力が高くなり、これら2つの効果が重畳すると予想される。熱応力は、基材との線膨張係数差が大きく、弾性係数の高いアルミナが高くなると予想される。得られたアルミナとジルコニアの堆積応力と熱応力の相対関係を見ると、それらが反映された合理的な結果になっている。

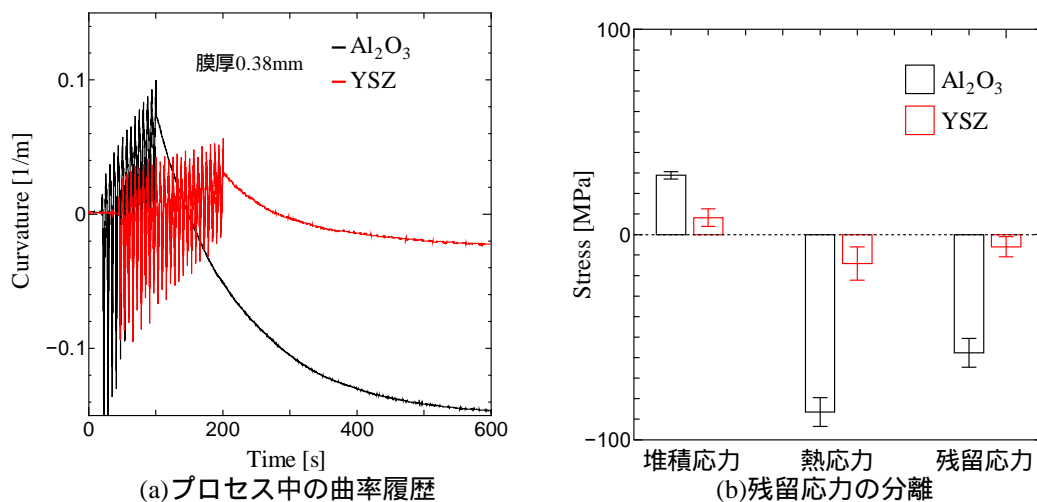
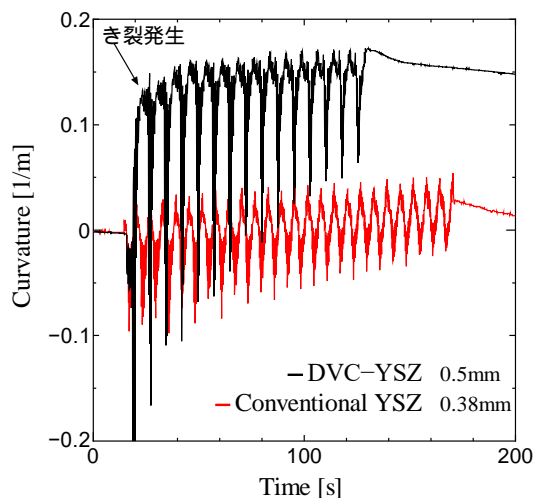


図3 線膨張係数・弾性係数の影響

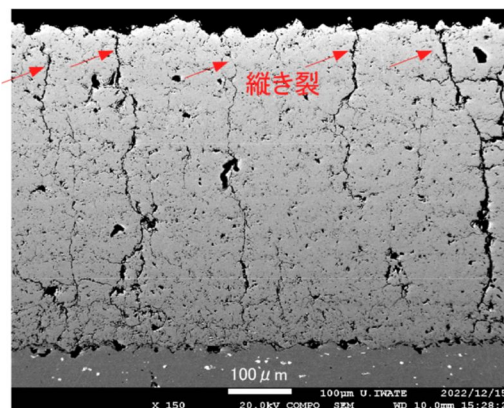
高出力および標準出力プラズマの比較

図4は、ジルコニア皮膜について、粒子温度の高い高出力プラズマ溶射 (DVC-TBC) と標準出力溶射 (Conventional-TBC) についての、(a)曲率履歴、(b)高出力で作製した皮膜組織、である。なお、高出力溶射ではヤング率が高い緻密な皮膜が得られることを確認している。図4(a)より積層中の曲率変化は、基材と粒子の温度差が大きい高出力条件の方が高いことが分かる。この原因は、高出力条件の方が、凝固粒子の温度変化が大きく、かつヤング率も高く、堆積応力が高い条件が揃っているためと考えられた。次に、図4(a)より高い堆積応力により積層途中でクラッキングが生じ応力が緩和されている様子が分かる。図4(b)はその断面組織であるが、皮膜表面から見ると亀の甲羅状になっており、面内方向応力を緩和できる組織である。本研究から縦割れき裂は堆積応力を用いて導入できることが明らかとなった。このことから、堆積応力を制御すると、縦

割れ組織も制御できる可能性があることも分かった。



(a) 粒子積層中の曲率履歴



(b) 縦割れ組織 (高出力)

図4 粒子温度の影響

本研究で得られた知見は、過酷なプラズマジェット下で実験的に堆積応力の形成機構を実測した貴重な結果であり、今後、組織制御セラミックス膜や応力制御皮膜の開発に貢献すると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 WATANEBE Masahiro, WAKI Hiroyuki, ADACHI Kanta	4. 巻 71
2. 論文標題 Evaluation of Residual Stress Distribution in Thermal Barrier Coating System by Extended Thin Layer-Removal Method for Three-Layered Model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Materials Science, Japan	6. 最初と最後の頁 524 ~ 531
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.71.524	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hayase Tomoyuki, Waki Hiroyuki, Adachi Kanta	4. 巻 30
2. 論文標題 Evaluation of the Residual Stress Evolution in Thermal Barrier Coating System Using the In Situ Curvature of a Three-Layered Specimen	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Spray Technology	6. 最初と最後の頁 1183 ~ 1198
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11666-021-01221-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 OKUBO Noriyuki, WAKI Hiroyuki, ADACHI Kanta	4. 巻 70
2. 論文標題 Evaluation Method for Inelastic Constitutive Equation of Thermal Sprayed Ceramic Coating by Bending Strain of Coating System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Materials Science, Japan	6. 最初と最後の頁 758 ~ 765
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.70.758	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 SATO Ryuta, WAKI Hiroyuki, ADACHI Kanta, KATO Masahiko, TAKAHASHI Satoru	4. 巻 70
2. 論文標題 Evaluation Method of High Temperature Nonlinear Constitutive Equation of Top Coat Using Resonant Young's Modulus of TBC System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Materials Science, Japan	6. 最初と最後の頁 853 ~ 860
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.70.853	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 SHIBATA Ai, WAKI Hiroyuki, ADACHI Kanta	4. 巻 71
2. 論文標題 Evaluation Method of High Temperature Nonlinear Constitutive Equation of Thermal Barrier Coating Based on in Situ Curvature Measurement during Thermal Cycling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Materials Science, Japan	6. 最初と最後の頁 189 ~ 196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.71.189	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 TSUGE Tomoya, WAKI Hiroyuki, ADACHI Kanta, HOJO Tomohiko	4. 巻 69
2. 論文標題 Relationship between Interfacial and Coating Fracture Toughnesses of Thermal Barrier Coating	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Materials Science, Japan	6. 最初と最後の頁 863 ~ 868
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.69.863	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 藤井悠大, 脇 裕之, 足立寛太
2. 発表標題 プラズマ溶射中の曲率履歴計測による皮膜残留応力の成膜速度依存の検討
3. 学会等名 日本材料学会第71期学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	足立 寛太 (ADACHI Kanta) (50823879)	岩手大学・理工学部・助教 (11201)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------