

SLT 法＋デジタルツインによる新しい超高温高速加熱疲労試験を実現

東京工科大学 工学部機械工学科

大久保 友雅

1. はじめに

航空機エンジン内部で高温になる部分に用いられている材料として、「セラミックス複合材料（CMC: Ceramic Matrix Composites）」が、近年耐熱金属材料に取って代わる軽量耐熱材料として強く期待されている。長時間の耐久性を保障した CMC を製品とするためには加速試験が必須であるが、CMC の持つ材料固有の損傷許容性のために、CMC に適した加速試験方法の開発が必要である。

CMC の加速試験方法としてレーザ加熱が有望である^{[1][2]}が、従来技術では CMC の耐熱温度が 1400℃程度と期待されているにもかかわらず、1200℃程度までの加熱しか実現されていない。また、水蒸気雰囲気下での加熱や、環境変化に対する温度補償といった動的な温度分布の制御も出来ていない。

そこで研究代表者らは、水蒸気への吸収の少ないファイバレーザを光源として用い、レーザ照射位置の制御にガルバノスキャナを用いる事により、水蒸気雰囲気下であたかもレーザで塗り絵をするかのようにしてターゲットを 1400℃程度まで加熱可能な「選択的レーザ加熱(SLT: Selective Laser Thermoregulation)法」を開発している^[3]。SLT システムの概要を図 1 に示す。これまでの研究開発において、ダミーの試験片を用いて水蒸気雰囲気下での加熱や 1400℃までの加熱は実現したが、環境変化に対する温度補償等の動的な温度分布の制御が実現されていない。これは、時々刻々と変化する環境変化を計測して制御にフィードバックするシステムと、温度補償をするためのレーザ照射パラメータの決定方法がそれぞれ確立されていないことが原因である。

そこで、計測結果からレーザ照射パラメータを決定してレーザの制御へとフィードバックするデジタルツインの実現が必要である。そのため本研究では、SLT 法におけるフィジカル空間とサイバー空間とを繋ぐ部分の実装を行った。

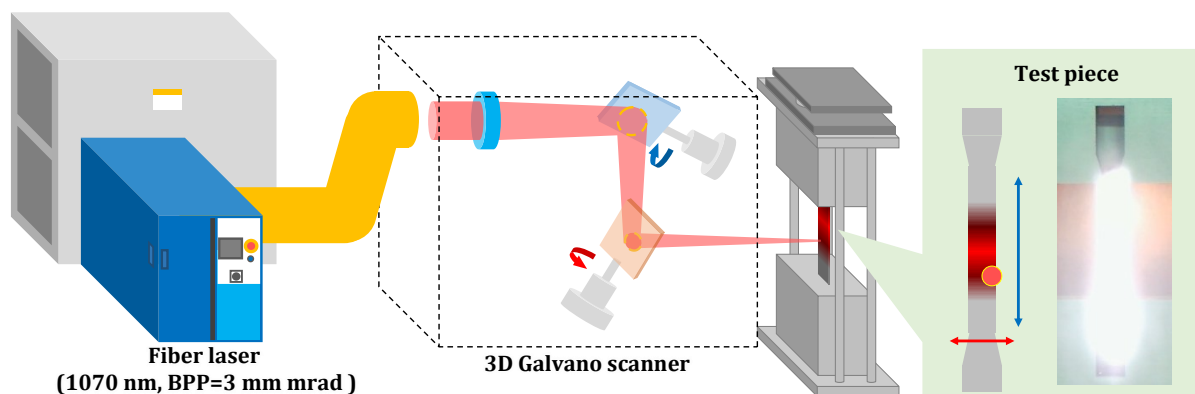


図 1 SLT システムの概要

2. 研究背景と課題

高温加熱試験の近年の研究では、炭酸ガスレーザーやファイバレーザーを用いた試験法が提案されており、これにより瞬時の高温加熱が可能になっている。しかし、これらは一般に静的な光学系を用いており、ビーム形状や照射範囲を固定的に設定するため、温度分布の時々刻々の変化に対応する柔軟な加熱制御が難しいことが課題として挙げられる。

研究代表者らは、これまでにファイバレーザーとガルバノスキャナを用いた SLT 法を開発し、レーザーを加熱対象面に高速に走査することで、任意形状に対する加熱制御を目的とするシステムの開発を進めてきた。さらに、AI を用いて温度分布から最適な照射パラメータを推定する取り組みも進めている^{[4][5]}。一方で、制御すべきレーザー照射点付近の温度分布の変化についても高速度の放射温度計による計測で明らかにしてきた^[6]。しかし、依然としてリアルタイムでの動的な温度分布の制御には至っていない。

3. 研究目的と手法

本研究の最終的な目的は、SLT 法に基づいた新たな温度制御システムを構築し、放射温度計で取得した表面温度分布を基に、レーザー照射位置をリアルタイムに決定することで、所望の温度とその分布を得ることである。

この目的の実現のために、本研究では対象面の温度分布を放射温度計により計測し、その二次元的なデータを複数領域に分割し、各領域における温度が最低となる点を検出して優先的に加熱するアルゴリズムを構築する。

本研究では、試験片が縦長であることから、放射温度計で得られた温度分布を縦方向に4分割した。そして、各領域で温度が最低となっている点を探索し、それらを繋ぐパスに沿ってレーザーを走査させるシステムとした。なお、加熱の初期段階においては、放射温度計の検出限界（750℃）に達するまでは温度分布を計測することが出来ない。そのため、その間のレーザー照射方法については、単純に試験片上を往復するだけのフィードフォワード制御とし、検出限界を超えて温度分布が正しく得られるようになった後はフィードバック制御へと切り替える段階的制御手法を導入した。

4. 実験装置と制御系構成

実験装置は、古河電気興業株式会社製のファイバレーザー（FEC4000M: 出力 4 kW, 波長 1070 nm, CWレーザー）と、株式会社ワイ・イー・データ（現株式会社安川電機）製のガルバノスキャナ（YD-3000M-5.0）を組み合わせた加熱システムが中心である。温度計測には、Optris 製の放射温度計（PI-08M）を2台使用し、高速（1000 Hz）での温度分布の均一性評価と、低速（27 Hz）でのフィードバック制御用の温度分布取得を並行して実施した。前者は評価用として限定した狭い領域を高分解能で取得し、後者は制御系へのリアルタイム入力として試験片全体を高解像度で計測する役割を担った。

計測結果を元に制御を行うフィードバックシステムの開発には、高価な SiC/SiC CMC の試験片を用いる必要は必ずしも無いと考え、照射対象は、JIS 規格に準拠した SUS304 製の比例試験片 14B とした。これは、厚さ 4 mm, 全長 120 mm である。加熱対象の中央 40 mm×8 mm の領域を照射対象として温度分布を計測し、そのデータを元に選択的なレーザー照射を行った。

制御プログラムは Python により実装した。用いた主なライブラリは、ハードウェア API との連携には ctypes を、温度データの処理には NumPy を使用した。また、レーザ照射パスの決定から実行までの一連のプロセスについて、温度分布の取得、照射点の決定、レーザの制御のそれぞれを並列処理とし、キューを介して各スレッドがデータをやりとりすることにより、データの過不足の解消のための停止時間を出来るだけ短く出来るようにした。

また、本研究では、フィードバック制御をするシステムの構築を目的としており、必ずしも必要以上の高温に加熱することを目的としていない。そのため、今回は目標温度を 1000°C として実験を行った。

5. 実験結果

図 2 に、各時間における計測した温度分布の中での最大値を示す。加熱開始から約 30 秒以内に 1000°C 以上の目標温度に到達し、短時間での高温加熱が可能であることが実証された。

また、フィードバック制御を開始して温度分布が準定常状態になった後の温度分布を 60 秒間にわたって時間平均を求めた結果を図 3 に示す。局所的に ($x=-2$, $y=6$ 周辺) 高温となっているが、それ以外の領域においてはある程度均一に近い温度分布を得ることに成功した。

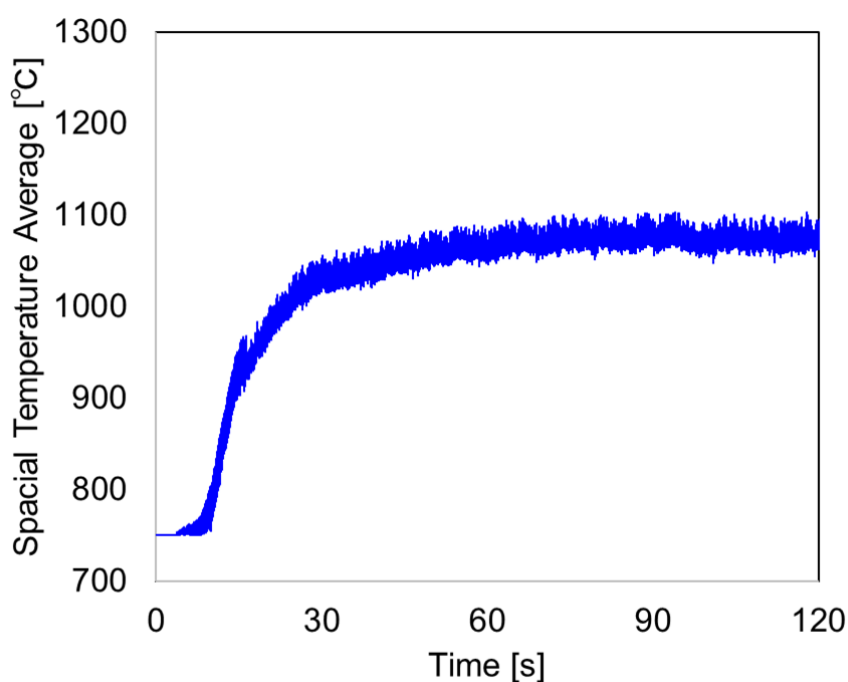


図 2 加熱領域内での最高温度の時間変化の計測結果

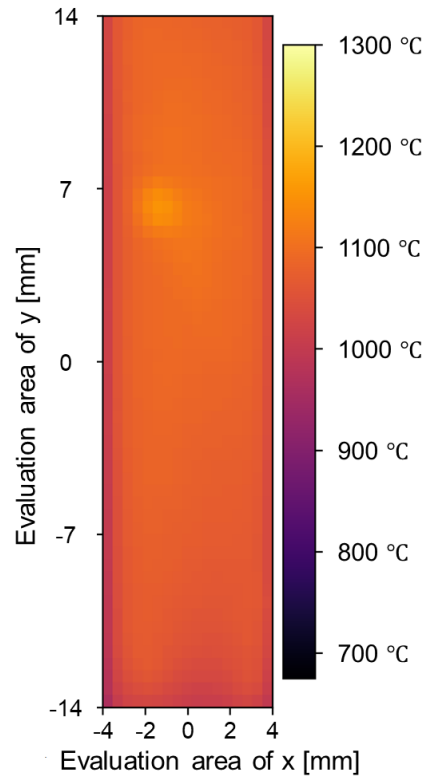


図 3 準定常状態になった後の温度分布の時間平均

6. 考察

図 3 に示した局所的な高温部については、レーザの照射開始時からその部分のみが早く高温に達していたため、恐らく SUS304 の試験片の当該箇所にレーザの吸収率が高い領域か、比熱の低い領域が存在したものと考えられる。

それ以外の箇所についてはある程度均一に近い温度分布を形成することが出来ていることから、刻一刻と冷えて行くターゲットの温度を計測した結果を元に加熱すべき点とそれを繋げたレーザ照射パスを決定し、動的に温度分布を制御するフィードバックシステムの基本的な枠組みは出来たと言える。

7. 今後の展望

本研究で構築した SLT フィードバックシステムは、耐熱材料の加熱試験における新たな手法として、新しい段階へ進んだと言える。今後は以下の点に注力することで、本技術の実用化・高機能化を図る予定である。

- レーザ出力やビーム径等、他のパラメータのリアルタイム制御機構の追加
- AI による照射条件の動的最適化
- 複雑形状材料への適応と走査軌道の高精度化
- 制御系の演算高速化とスケジューリングの改善
- SiC/SiC CMC での実験

これらを通じて、より高度な入熱分布の制御が可能となり、耐熱材料の試験だけでなく、レーザ加工への応用等も期待されると考えている。

8. まとめ

本研究では、SLT法を基盤としたフィードバック加熱制御システムを構築し、動的な温度制御の実現可能性を実証した。放射温度計によって得られたレーザー照射対象の温度分布を試験片の長手方向に4分割し、各領域の温度が最低な点を繋いだパスに沿ってレーザー照射を繰り返すことにより、ある程度高温かつ均一な温度分布の形成に成功した。

今後はパス以外のパラメータの調整やAIの導入、複雑形状への適用や高速化、SiC/SiC CMSへの適用等に取り組む予定である。

本研究の成果は、高機能材料評価技術の高度化および熱制御技術の次世代化に寄与するものであり、多様な工学的応用展開が期待されると考えている。

謝辞

本研究の一部は公益財団法人天野工業技術研究所の支援を受けて実施した。関係者の皆様に深く感謝申し上げる。

参考文献

- [1] M.P. Appleby, D. Zhu, and G. Morscher: Surf. Coat. Technol., 284, (2015) 318.
- [2] T. Whitlow et al.: Composite Structures, 210, (2019) 179.
- [3] H. Koshiji et al.: J. Laser Micro/Nanoengineering., 15, (2020), 174.
- [4] M. Nakaone et al.: J. Laser Micro/Nanoengineering., 16, (2021), 84.
- [5] M. Nakaone et al.: J. Laser Micro/Nanoengineering., 17, (2022), 194.
- [6] S. Kanai et al.: J. Laser Micro/Nanoengineering., 19, (2024), 140.