



Title: One-Dimensional Numerical Simulation at the Laser-Irradiated Point in a Selective Laser Thermoregulation System

(選択的レーザー温度制御 (SLT) におけるレーザー照射点の一次元数値シミュレーション)

Authors: Tomomasa Ohkubo, Shuta Kanai, Shota Ui, Yusaku Kawarazaki, Ei-ichi Matsunaga, Ken Goto, Yutaka Kagawa

(大久保 友雅 (東京工科大学 工学部 教授)、金井秀太 (東京工科大学 工学研究科 学生)、宇井 翔太 (東京工科大学 工学研究科 学生)、河原崎 佑作 (東京工科大学 工学研究科 学生)、松永 栄一 (東京工科大学 客員研究員)、後藤 健 (宇宙科学研究所 教授)、香川 豊 (東京工科大学 片柳研究所 教授))

Journal: Journal of Laser Applications (2025) Vol.37, 042017

掲載年月: 2025 年 10 月

研究概要: 本研究は、高耐熱材料を迅速に加熱・冷却できる選択的レーザー温度制御 (Selective Laser Thermoregulation: SLT) システムにおいて、材料表面の特定点における温度応答を一次元 (厚さ方向) 非定常熱伝導モデルで記述したものである。表面のレーザー入熱と放射・対流損失を境界条件として導入し、SUS304 板 ($t = 3 \text{ mm}$) への走査レーザー照射 (スポット径 7.5 mm , 走査速度 $7/14/21 \text{ m/s}$) に対する表面温度の時間変化を数値解として求めた。実験 (高速度赤外カメラ 1000 fps) と比較した結果、ピーク表面温度は良好に一致し、入熱モデルと物性設定の妥当性が確認された。一方で、レーザー通過後の冷却は実験の方が著しく速く、モデルは冷却時間を過大評価した。その主因は一次元モデルが面内方向の熱拡散を無視している点にあり、実際には近傍への側方伝熱が冷却を加速している。以上より、1D モデルは各種走査条件下のピーク温度予測やパラメータ同定に有用であり、制御系設計の初期段階における設計指針を与える。一方で、冷却履歴や応力評価には 2D/3D モデルの導入が不可欠である。

研究背景: 高耐熱複合材料 (例: SiC/SiC CMC) の評価では、急速で再現性の高い温度サイクル付与と温度平坦化が求められる。しかし、炉加熱等の従来の方法では昇降温の応答性や局所制御性に限界がある。選択的レーザー温度制御 (SLT) は走査レーザーにより所望領域のみを素早く加熱・冷却し、温度均一化も能動的に行える点で有望である。一方で、制御設計に必要な入熱—温度応答の簡潔なモデル化が不十分であり、現場で扱える低計算負荷の解析枠組みが求められている。

研究成果: 走査速度 ($7/14/21 \text{ m/s}$) に対するピーク表面温度を実験と一致させ、SLT 条件下での一次元近似の有効範囲を定量的に示した。また、冷却過程の過大評価を通じて、側方への熱拡散 (2D 効果) が実験の急冷に本質的であると考えられる。更に、超ガウシアン型の時間入熱により、走査ビームの通過応答を解析的に記述する枠組みを提示した。以上のことから、本研究で提示した簡易 1D モデルの高速計算性を活かし、SLT のリアルタイム制御・パラメータ探索への組込み可能性を示した。

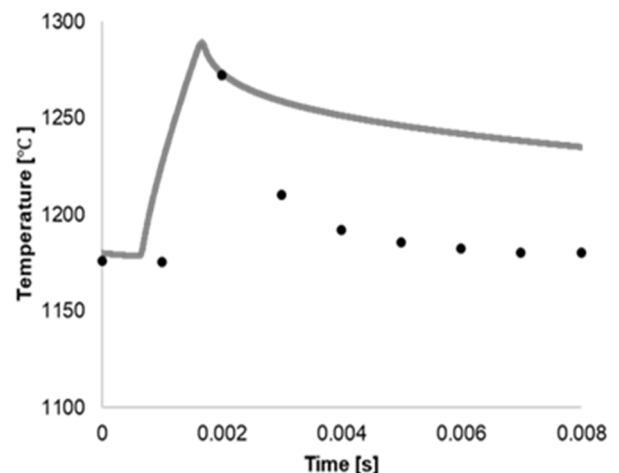


図 1 実験結果 (点) と計算結果 (実線) のある程度的一致を得られた

社会への影響: SiC/SiC CMC 等の高耐熱材料の迅速な熱サイクル試験に対し、SLT は局所加熱・動的な温度平坦化を実現する有力手段である。本研究はピーク温度の高精度予測を可能にし、装置設計・入熱制御の事前検討を加速する。航空エンジン等の極限環境模擬における試験効率向上と、AI ベース制御の学習データ基盤整備に寄与する。

専門用語：

選択的レーザー温度制御（SLT）法：レーザーを高速で走査することにより，所望の温度分布を形成する手法．

超ガウシアン（Super-Gaussian）：ガウス分布より頂部が平坦な強度分布で，ビーム品質を考慮した入熱分布を考慮可能．