

樹脂表面炭酸ガスレーザー加熱における伝熱解析及びその妥当性確認法について

機械電子科 長津義之 太田幸宏 鈴木悠介 渥美博安*
光科 山下清光 植田浩安**

Heat transfer analysis and its validation of surfaces heating for resins by carbon dioxide laser irradiation

NAGATSU Yoshiyuki, OTA Yukihiko, SUZUKI Yusuke, ATSUMI Hiroyasu,
YAMASHITA Kiyomitsu and UETA Hiroyasu

For the optimization of laser processing conditions, the application of CAE seems more promising. In this study, we evaluated the following error factors of heat transfer analysis and modeling for surface heating of polycarbonate (PC) by carbon dioxide laser irradiation: (1) systematic errors of infrared thermometers derived from transmission of radiated emissions; (2) model errors for laser surface heating; and (3) a method of measuring heat transfer coefficients. In addition, we conducted analysis of laser scanning and estimated the thermal distributions. As a result, the prediction errors of surface temperature rise was less than 10%

Keywords : CAE, heat transfer analysis, carbon dioxide laser, infrared thermometer, finite difference method

CAE導入によるレーザー加工条件最適化が期待されている。しかし、樹脂表面のレーザー加工への伝熱解析の導入には、1)解析結果の妥当性確認作業における、基材の透過によって発生する放射温度計の計測誤差の抑制、2)レーザー光の基材表面の透過を考慮した熱源のモデル化、3)熱伝達係数の設定、の手法が未確立である。本報告では、炭酸ガスレーザーによるポリカーボネート(PC)板の表面加熱を対象とし、前述の課題の対策として、1)放射温度計の特性評価及びその指示値推定法、2)レーザー光の透過率測定、パワー密度分布測定法及びその伝熱モデル化、3)熱伝達係数の簡易取得法、に取り組んだ。その結果、基材表面昇温の予測誤差が10%以下となった。

キーワード : CAE、伝熱解析、炭酸ガスレーザー、放射温度計、差分法

1 はじめに

レーザー加工は、製造業での主要な加工手段の一つとなっており、CAEの導入による加工条件の最適化が期待されている。レーザー加工シミュレーションに関しては、溶接、切断及び溶着等を対象として、加工現象の解明や被加工物の挙動予測を目的とした研究と成果が多く示されているが¹⁻³⁾、それらは、解析と加工の双方の専門知識が必要なことに加え、多大な計算資源を要し、多くの加工業者が手軽に使用できない現状である。

一方、近年注目が高まっている、成膜、着色、応力緩和といった、基材の相変化を伴わない表面のレーザー加工は、基材の伝熱解析により温度分布を算

定し、それによって加工結果を予測できるものも多い。そのような対象については、汎用コードを用いたCAEの応用は比較的容易と考えられている。

しかし、レーザー加工へ伝熱解析を適用する際も、対応する市販の専用ソフトウェアはほぼなく、ユーザーがシミュレーションモデル及びパラメータを構築する必要がある。加えて、特に樹脂材料の表面加工において、高精度の温度分布予測を要求される場合、(1)レーザー照射面の温度測定には赤外線を検知する放射温度計が多く用いられるが、金属材料に比べ基材の赤外線の透過率が高く、温度計指示値と実際の表面温度との差が拡大し、解析結果の妥当性確認(Validation)において問題となるケースがある、(2)広

*現 光科 **現 繊維高分子材料科

【報告】

い範囲を均一に加熱するためにレーザー光をデフォーカスすることも多く、また、レーザー光の基材表面付近の透過は無視できず、これらを考慮した熱源のモデル作成法の確立が必要である、(3)基材の熱伝導率が低いため、表面加熱において雰囲気への放熱の影響が相対的に増大するが、その放熱のしやすさを表す熱伝達係数の直接測定は困難である、以上の課題があり、解析の専門家でない製品開発・設計者にとっては導入に障壁がある。そこで本報告では、炭酸ガスレーザーの表面照射におけるポリカーボネート(PC)板の温度分布予測を目的として、当センターが伝熱解析を導入した手順及び結果を報告する。

2 方法

加熱対象は厚さ2.0mmの各辺50mmの正形状のPC板とした。今回用いた炭酸ガスレーザーに

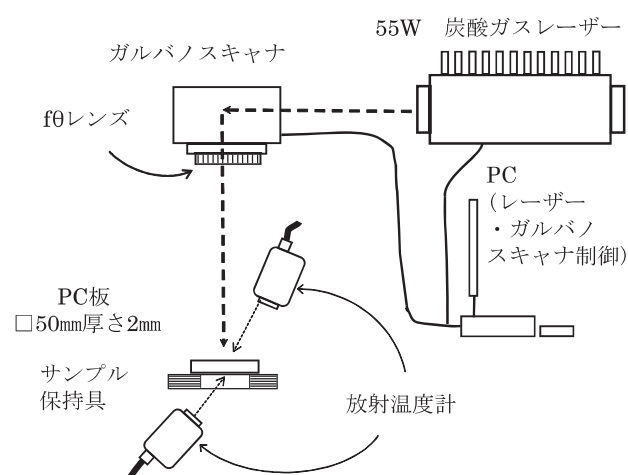


図1 レーザー加熱系の構成

よるPC板加熱の実験系を図1に示す。波長10.6 μm 、55W出力の炭酸ガスレーザーDIAMOND C-55A(Coherent製)からのレーザー光を、ガルバノスキャナSS-IIE-15 (RAYLASE製)を用いてPC板表面でスキャンし、加熱する構成とした。スキャナには焦点距離100mmのf θ レンズを取り付けた。照射面の温度測定には、炭酸ガスレーザー光やその反射光からの保護及び誤検知を防止するために、2.0~6.8 μm の波長を検知する放射温度計TMHX-CN500(ジャパセンサ(株)製)を用いた。温度計の測定スポット径は ϕ 1.6及び ϕ 5.5mmである。均一な平面加熱を実施するため、PC板をf θ レンズから450mmの位置に設置し、デフォーカスしたレーザー光を照射した。

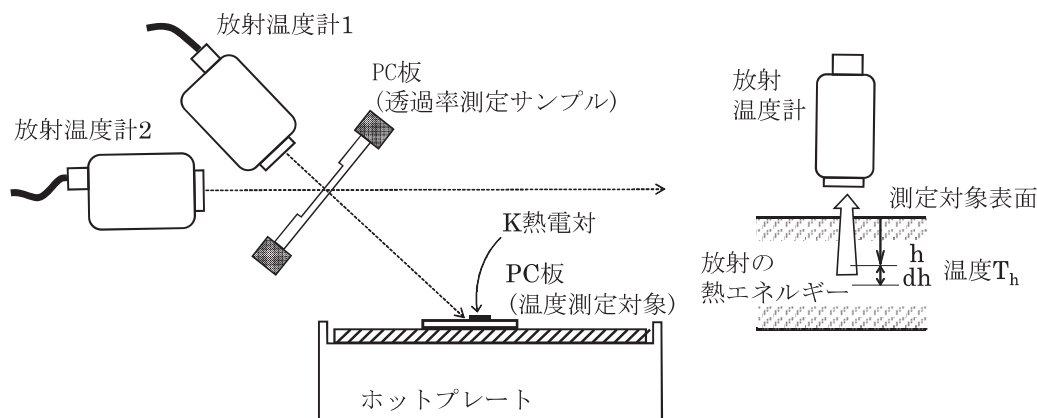
この実験系を用いたレーザー加熱の伝熱解析及び検証を行うために、(1)使用する放射温度計の、基材の表面温度測定における透過の影響の評価、(2)レーザー加熱における伝熱モデルの構築、(3)熱伝達係数の取得、を行い、その後、(4)伝熱解析と実測との比較検証、を実施した。

2.1 表面温度計測における透過の影響の評価

図1の実験系の放射温度計が検知する波長におけるPC板の透過率測定を、図2(a)の測定系で行った。

対象となるPC板に対し、HSSスクエアエンドミルで切削加工を行い、厚さを $0.36 \pm 0.02\text{mm}$ とし、これを透過率測定サンプルとした。温度測定の対象は、ホットプレートNINOS ND-3LA(アズワン(株)製)上で加熱されたPC板とし、その表面温度は、K熱電対ST-50(理化学工業(株)製)で測定した。

この加熱されたPC板に対して、透過率測定サンプル



(a)透過率測定系

(b)測定対象内部からの放射エネルギー

図2 PC板放射温度計透過率測定法

ル越しに、放射温度計1で測定を行った。また、さらに同じ型式の放射温度計2を用いて、透過率測定サンプル自体の温度を測定した。

透過率は、放射温度計1の温度指示値から放射温度計2の指示値を差し引いた値の、ホットプレート上のPC板の昇温量に対する比率とした。これらの測定は、室温を $20 \pm 1^\circ\text{C}$ で制御した試験室で実施した。PC板の透過率はLambert-Beerの法則に従い、また、反射が無視できるとすると、透過率測定サンプルの吸収係数が β 、板厚が t 、得られた透過率が τ のとき、 $\tau = e^{-\beta t}$ となる。これらより対象PC板の、放射温度計の検知する波長における吸収係数 β を算定した。

この吸収係数 β について、図2(b)のようなモデルを考えると、表面より深さ h にある厚さ dh 、温度 T_h の層が放射し、温度計が検知する単位面積あたりの放射エネルギーは、Stefan-Boltzmannの法則より、 $e^{-\beta h}(1 - e^{-\beta dh})\sigma T_h^4$ となる。なお、 σ はStefan-Boltzmann定数である。これを対象の板の厚さ分だけ積分すると、温度計が検知する測定対象の全放射エネルギーとなる。以上の温度計測モデルを、2.3及び2.4の伝熱解析結果に用いた。

2.2 レーザー加熱における伝熱モデルの構築

対象の加熱試験では、デフォーカスしたレーザー光をPC板に照射しており、また、熱伝導率が低い基材を加熱しているため、正確な温度分布の予測にはレーザー光のパワー密度の把握が必要である。また、基材の表面付近の温度計算では、レーザー光の透過も考慮する必要があるため、レーザー光の透過率の測定を行った。さらに、それらを考慮した伝熱モデルの構築を行った

(1)レーザーパワー密度分布測定

レーザーパワー密度分布を把握するため、図1のシステムにおいて、PC板に替えて、直径 ϕ 2mmの穴を開けた厚さ1mmのアルミ板をレーザー光の絞りとして設置した。絞り位置をレーザー光軸の垂直方向へ移動させ、それを通過したレーザー光のパワーを、レーザーパワーメーターF150—A(OPHIR製)を用いて測定を行うことで、その密度分布を計測した。絞りの設置は、 $f\theta$ レンズから425mm離れた位置とし、レーザー出力は12.0Wとした。レーザーはガウシアンビームとして、各パワー測定点を最小自乗法によりフィッティングを行うことで、PC板照射面におけるビーム径

$1/e^2$ を算定した。これを、伝熱解析での照射面におけるレーザーパワー密度計算に使用した。

(2)レーザー光透過率測定

PC板に対する炭酸ガスレーザーの透過率の測定についても、図1と同様の実験系を用いた。レーザー光行路上に集光レンズ(焦点距離38.1mm)を設置し、焦点距離からその5倍の距離でデフォーカスし、パワー密度分布を均一化させたレーザー光を、厚さ0.36mmに加工したPC板に照射した。PC板を透過したレーザー光のパワーを(1)と同じパワーメータで計測した。PC板を透過したレーザーパワー計測値と、PC板なしのレーザーパワー計測値の比を算定し、この板厚における透過率とした。その際、レーザー光の反射は無視している。また、2.1と同様に、計測した透過率と板厚を用いて、PC板のレーザー光の吸収係数 γ を算定した。

(3)伝熱モデルの構築

加熱対象のモデルは、レーザー加熱対象内の微小要素に対し、拡散方程式(熱伝導)に加え、熱源(照射面)、雰囲気への熱伝達及び板表面からの放射を含めたものとした(図3)。照射されたレーザー光のパワーが基材に吸収されると、瞬時に熱に変化するモデルとしている。また、熱伝達係数は同一面内では一定とした。さらに、計算量低減及び作業の簡略化のため、基材の熱伝導率は一定、PC板側面の熱伝達と放射はなしとした。

伝熱解析における熱源の設定として、図3のように照射面より深さ h にある厚み dh の層が吸収する単位面積あたりのレーザーパワー $P(t)$ は、照射面におけるレーザーパワー密度が $P_0(t)$ で、2.1の放射温度計での仮定がレーザー光の吸収にも適用されるとすると、

$$P(t) = P_0(t)e^{-\gamma h}(1 - e^{-\gamma dh})$$

となり、これを伝熱モデルの熱源に適用した。

2.3 熱伝達係数の取得

伝熱解析は、計算経過が把握しやすい差分法を用いた。

数値計算において、温度に対して線形で、影響が大きいと推測される熱伝導及び熱伝達の項に対しては、半陰的な方法であるCrank-Nicolsonの公式を用いた。一方、相対的に影響が小さい放射や比熱に関する項については陽的な方法で算定した。疎行列計算には、Python3.9のライブラリscipy.sparseのCSR方式を利用し、連立一次方程式の解はGauss-Seidel

法で求めた。

モデルは計算量の抑制のため、XY範囲を□20mmと限定した。要素数は、XY各軸方向を20等分割、Z方向を10等分割した。

解析に用いる熱物性のパラメータのうち、比熱C(T)は、DSC(示差走査熱量計)を用いて測定した。アルミ製セルに、破碎したPC板材料を7.3mg入れ、10K/minの一定昇温で、470Kまで加熱した際の熱量を測定した。DSC装置はDSC-50(株式会社島津製作所製)を用いた。参照材料は、比熱が既知であるアルミナ18.7mgを用い、相対的な熱量より、各温度での対象材料の比熱を算出した。熱伝導率λは、文献¹⁾の値を用いた。

また、使用した放射温度計が検知する波長(中～遠赤外線)の吸収率が放射率と等しく、反射はないと仮定し、2.1で求めた吸収係数βと板の厚さより放射率εを算定し、解析に用いた。

熱伝達係数は、図1の実験系において、PC板中央を一定のレーザー出力で固定照射し、熱平衡状態に達した際の照射面及び裏面の中央の実測温度と伝熱解析結果の差が最小となるような図3のパラメータα_U及びα_Lを求めた。このとき、照射するレーザーパワーは0.52及び0.68Wとした。

熱伝達係数パラメータα_U及びα_Lの具体的な計算は、パラメータ空間の規定の範囲を各軸5等分し、その格子点6×6個のすべての組み合わせの伝熱解析を行い、解析と実測との差の自乗和が最小となる点を探した。次にその点を中心として、各軸の探索範囲を前回の格子点間隔の2倍分と範囲を絞り、同様に探索を行った。以上を3回繰り返した。

2.4 伝熱解析と実測との比較検証

温度計測及び伝熱解析モデルの検証のため、固定照射(レーザー出力10.2W一定、0.5秒間PC板中央固定照射)及び走査(レーザー出力10.2W一定、走査速度30mm/s、片道60mm、1往復)(図4)の、解析と実機での照射試験を行った。なお、走査においては、解析のXY範囲を50×16mmとした。

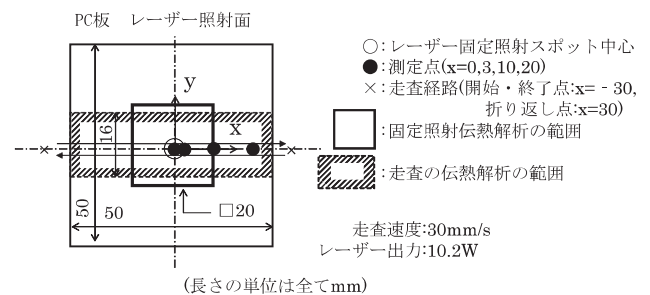


図4 レーザー加熱検証試験

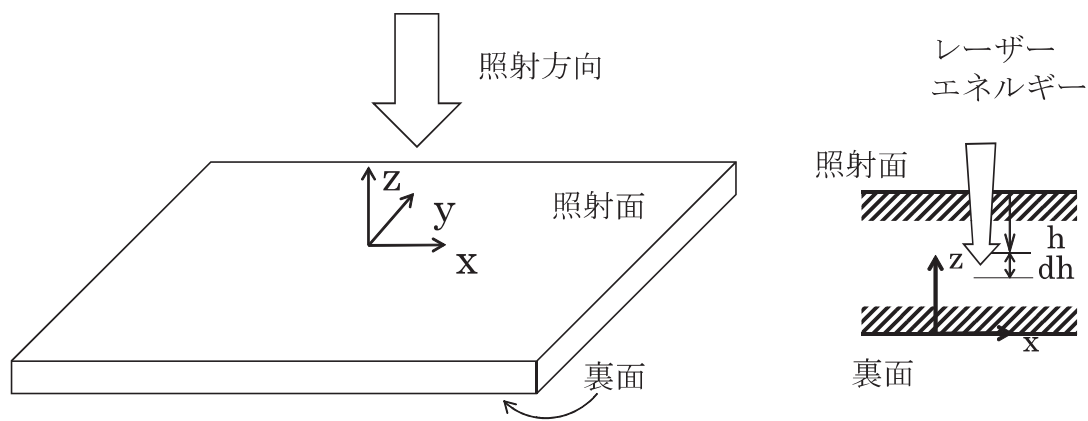


図3 レーザー加熱伝熱モデル

照射対象内の微小六面体の体積要素の熱の出入りより、温度Tは、

$$\frac{\partial T}{\partial t} C(T) \rho dx dy dz = P(t) dx dy + \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dx dy dz - \epsilon \sigma (T^4 - T_{\infty}^4) dx dy - \alpha_U (T - T_{\infty}) dx dy - \alpha_L (T - T_{\infty}) dx dy$$

ただし、右辺第3項は照射面及び裏面のみ、第4項は照射面のみ、第5項は裏面のみ適用する。

C(T):基材比熱、ρ:基材密度、P(t):レーザーパワー密度(単位面積あたり)

λ:基材熱伝導率、ε:放射率、σ: Stefan-Boltzmann定数、T_∞:内壁及び雰囲気温度、α_U:熱伝達係数(照射面)、α_L:熱伝達係数(照射面裏面)

また、レーザー光の透過の影響を検証するため、固定照射の解析では基材のレーザー光の透過を考慮した場合と、レーザーパワーがすべて照射面で吸収される透過なしの場合のそれぞれの解析を行った。

3 結果及び考察

3.1 表面温度計測における透過の影響の評価

図5は測定した厚さ0.36mmのPC板の、放射温度計が検知する波長での透過率を表す。また、その透過率から算定した吸収係数も併せて示す。この吸収係数を、後述の伝熱解析における放射率設定及び解析値の温度計指示値への変換に用いた。

測定対象であるPC板の温度が上昇すると吸収係数が低下する原因として、昇温に従い、放射スペクトルにおいて、温度計の感度が高く、透過率も高い低波長側の強度が増大したためと推測される。

3.2 レーザー加熱における伝熱モデルの構築

(1)レーザーパワー密度分布測定

図3のように座標系を設定し、計測したX及びY軸上でのレーザーパワーのプロファイルと、それをガウス分布にフィッティングした結果を図6に示す。X及びY軸上のプロファイルの差は微小であり、ガウス分布によって照射面のレーザーパワー密度分布を再現できることが確認された。

(2)レーザー光透過率測定

図7は、出力を変動させたレーザー光に対するPC板(厚さ0.36mm)の透過率と、その測定時のPC板照射面温度計指示値である。今回の温度範囲では、PC板の炭酸ガスレーザーに対する透過率の温度依存性は低い結果となった。伝熱解析では、透過率の平均値から算定した吸収係数を使用した。

3.3 熱伝達係数の取得

構築したモデルと測定したPC板の比熱(図8)を用いて伝熱解析及び熱伝達係数の最適化を実施した。0.68Wレーザー固定照射について、算定した熱伝達係数を用いた解析結果と実測値(温度計指示値)を図9に示す。熱平衡状態に達したと推測される照射開始180s後に、レーザー照射を停止している。伝熱解析値そのものと、それに取得した図5の透過を考慮に入れて温度計指示値をシミュレートしたものとを比較すると、透過を考慮したものがより実測に近い傾向があるが、その差は微小である。これは、PC板内で熱平衡状態であり、照射面と内部の温度差が比較的小さいためと考えられる。解析と実測の差の要因として、

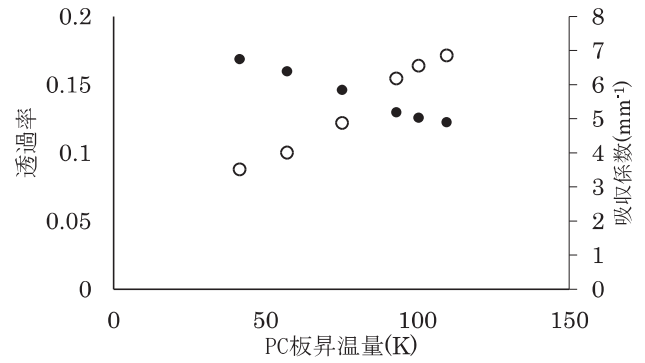


図5 PC板の透過率測定結果
(放射温度計検出波長)
○：透過率、●：吸収係数

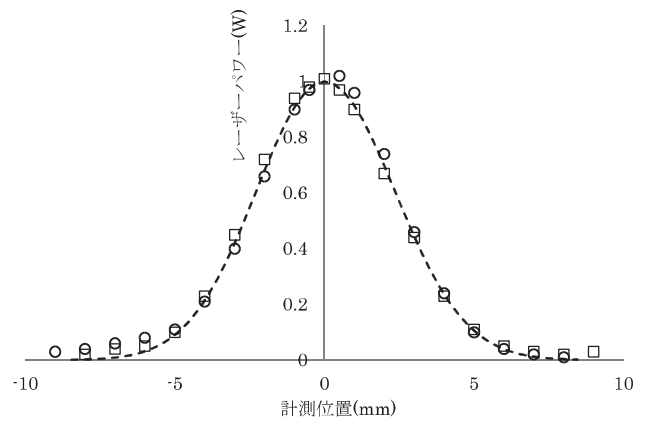


図6 レーザーパワー密度分布計測結果

□：X軸上測定値、○：Y軸上測定値、-----：フィッティング結果

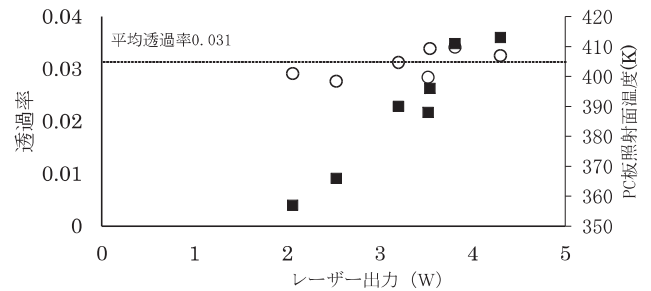


図7 PC板炭酸ガスレーザー透過率測定結果

○：透過率、■PC板照射面温度

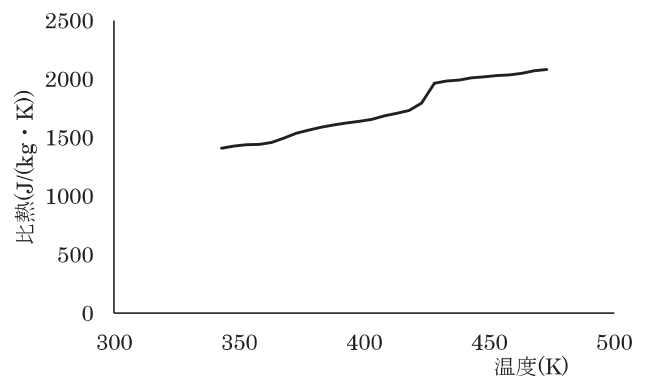


図8 PC板比熱測定結果

1)PC板昇温に伴う雰囲気温度の上昇及び熱伝達係数の分布のむら、2)基材の熱伝導率、放射エネルギー及びレーザー光の透過等のモデル誤差、3)レーザー出力の変動、以上が考えられる。

3.4 伝熱解析と実測との比較検証

図10及び11は、それぞれレーザー出力10.2Wで0.5s固定照射したものと、同出力で30mm/sで走査したものの解析及び実測の結果である。ここでの実測値は、放射温度計の指示値である。各測定点での温度ピーク時における昇温量で比較すると、解析値が、温度計の指示実測値を20%以上超過するケースも見られる。3.3のような長時間の照射後の熱平衡状態と異なり、高出力の照射開始直後は照射面と基材内部の温度差が大きくなり、透過の影響により、温度計が検知する放射エネルギーが低下したためと推測される。一方、透過を考慮して温度計指示値をシミュ

レートした値のその差は、10%以下となった。解析と実測の差の原因として、3.3で示されたものに加えて、放射温度計の測定位置のずれが考えられる。

また、図12は10.2W出力で固定照射開始後の0.25及び0.5s後の、深さ方向の温度分布の解析結果である。照射面ですべてのレーザー出力が吸収される場合と、透過がある場合の照射面温度の昇温差は、15%以上と推測される。

以上のことから、特に短時間・高出力のレーザー加熱の場合、透過の影響により、放射温度計の指示値が実際の表面温度より大きく低下するため、解析

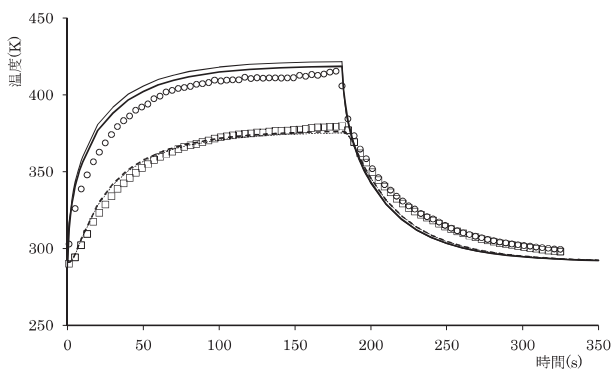


図9 熱伝達係数最適化結果(レーザー出力0.68W)

— : 照射面中央解析、 — : 照射面中央解析(透過含む)、
 - - - : 裏面中央解析、 - - - : 裏面中央解析(透過含む)、
 ○ : 照射面中央実測、 □ : 裏面中央実測

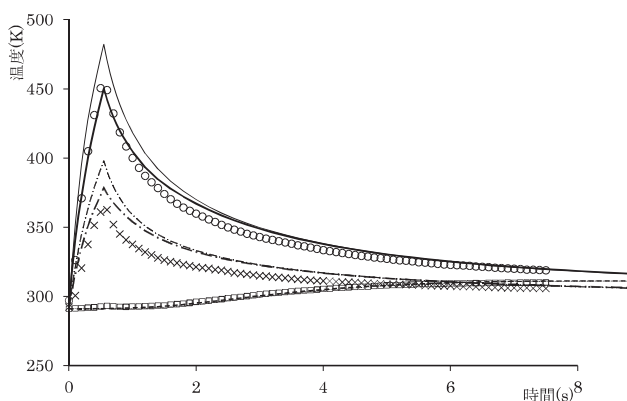


図10 レーザー固定照射(出力10.2W 0.5s)

計測及び解析結果

— : 照射面中央解析、 — : 照射面中央解析(透過含む)、
 - - - : 照射面X3mm解析、 - - - : 照射面X3mm解析(透過含む)、
 - - - : 裏面中央解析、 - - - : 裏面中央解析(透過含む)、
 ○ : 照射面中央実測、 × : 照射面X3mm実測、 □ : 裏面中央実測

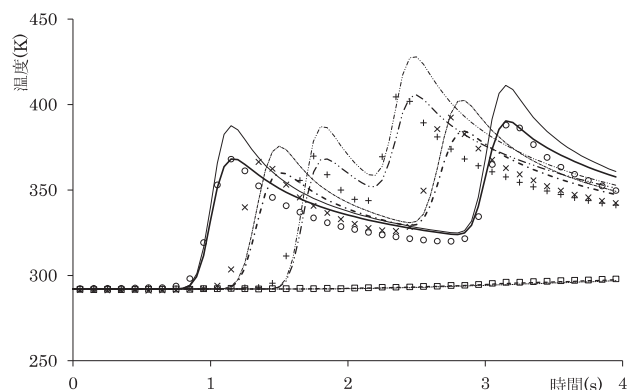


図11 レーザー走査(出力10.2W 速度30mm/s)計測及び解析結果

— : 照射面中央解析、 — : 照射面中央解析(透過含む)、
 - - - : 照射面X10mm解析、 - - - : 照射面X10mm解析(透過含む)、
 - - - : 照射面X20mm解析、 - - - : 照射面X20mm解析(透過含む)、
 - - - : 裏面中央解析、 - - - : 裏面中央解析(透過含む)、
 ○ : 照射面中央実測、 × : 照射面X10mm実測、
 + : 照射面X20mm実測、 □ : 裏面中央実測

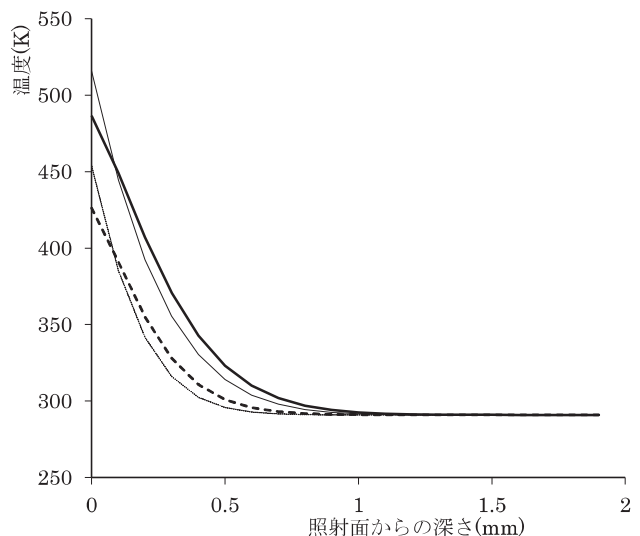


図12 レーザー固定照射(出力10.2W 0.5s)の深さ方向解析結果

- - - : 0.25s レーザー透過あり、 - - - : 0.25s レーザー透過なし、
 — : 0.5s レーザー透過あり、 — : 0.5s レーザー透過なし

の妥当性確認や温度フィードバック制御の際には注意が必要である。

また、伝熱解析において、基材のレーザー光への吸収係数が小さい場合や照射面付近の浅い層の温度を求める際には、レーザー光の透過モデルの導入により、予測精度の向上が期待できる。

4 まとめ

本報告では、炭酸ガスレーザーのPC板加熱を対象として、(1)放射温度計の特性評価及びその透過を考慮した計測のモデル化、(2)レーザー透過率とパワー密度分布測定及びその伝熱モデル化、(3)熱伝達係数の簡易取得法、を検討し、伝熱解析を実施した。その結果、解析による温度予測と実測との差は、昇温量のピーク値で10%以下であることが確認された。

今後は、他の基材の適用、シミュレーションによるレーザー加工条件の最適化に取り組む。

参考文献

- 1) 村松 壽晴：レーザーコーティングプロセスの計算科学シミュレーション．レーザー加工学会誌，25(2)，81-85(2018)．
- 2) 谷本直隆 他：アルミニウム部品のレーザー溶接シミュレーション技術の開発．自動車技術会論文集，53(1)，81-86(2022)．
- 3) 大村悦二 他：ピコ秒パルスアブレーションにおける微粒子の飛散シミュレーション．溶接学会論文集，20(3)，355-362(2002)．
- 4) 本間精一 編：ポリカーボネート樹脂ハンドブック，初版(日刊工業新聞社，東京)，pp. 316-318(1992)．