

CFRP のレーザ加工の新しい数値計算手法の開発

東京工科大学 工学部機械工学科

准教授 大久保 友雅

(平成 27 年度 一般研究開発助成 AF-2015209)

キーワード：CFRP，有限体積法，除去加工

1. 研究の目的と背景

近年軽量で丈夫である CFRP が材料として注目されているが、その加工性の低さが普及への妨げの一因となっている。そこで、CFRP の加工方法として非接触かつ高速に複雑形状の加工が可能であるレーザ加工が注目されている。

レーザ加工は非接触ではあるものの熱的加工である。CFRP は熱伝導率の高い炭素樹脂と熱伝導率の低い樹脂との複合材料であるので、単純に CFRP にレーザ照射を行った場合、樹脂部のみが除去され、炭素繊維部が残ってしまう熱的影響領域が発生する。その結果として CFRP に対してレーザ加工を施すと、加工断面が均一とならず、加工精度が低下する問題が生じてしまう。

CFRP のような複合材料では、レーザ照射時や、その後の熱の移動による温度変化によって引き起こされる材料の変化は単一組成の材料と比較して複雑であるが、レーザ加工はレーザ照射時に材料の変化が一瞬で起こるため、実験による変化の計測は困難であり、レーザ照射時にどのような変化が起こっているのか未だ不明瞭な点が多い。そのため、数値計算による現象把握及び加工の最適化が望まれるが、これまでに他者により行われてきた研究においては熱伝導率のみを考慮する程度で、相変化や化学反応、流体的挙動による熱の移動等は考慮されておらず、現象の理解が進んでいない。

本研究は、CFRP の加工をレーザ加工で行おうとする場合に生じる熱的影響領域が出来るメカニズムを熱伝導方程式、流体方程式、各物質の除去温度を考慮した物理モデルを数値計算により解くことにより把握することを目的とする。そのためには従来他者によって行われてきたような熱伝導の影響のみではなく、雰囲気ガスによる化学反応の影響や、レーザによって除去された材料の流体的振る舞いをも計算モデルに組み込む必要がある。このような、これまでの研究では組み込まれてこなかった新しい計算モデルを作り上げるのが本研究の目的である。

この分野における従来の数値計算は、ほとんどが商用数値計算パッケージを用いた計算である。そのため、計算モデルに対する自由度が低く、複雑な現象に対する計算モデルを入れられない。本研究はこれまでに著者が成したコードを拡張するため、新たに考慮する物理現象を計算モデルに組み込むことが可能である。

本報告では、これまでに得られた、炭素繊維部と樹脂部の除去のされ方の差についての数値計算¹⁾と、アブレーション

チャンセルが材料表面に与える影響についての数値計算²⁾との二つの数値計算について報告する。

2. 実験及び計算方法

2.1 CFRP の乾燥空気下での燃焼

まず初めに、数値計算に燃焼の影響を入れるために、CFRP の大気雰囲気下での高温における挙動を把握する必要がある。そのため、島津製作所製の熱分析装置 DTG-60 を用いて、CFRP の温度に対する質量変化及び発熱量を計測した。その結果を図 1 に示す。図に示される通り、460℃付近で樹脂が燃焼し、850℃付近で炭素繊維が燃焼する事を計測することが出来た。

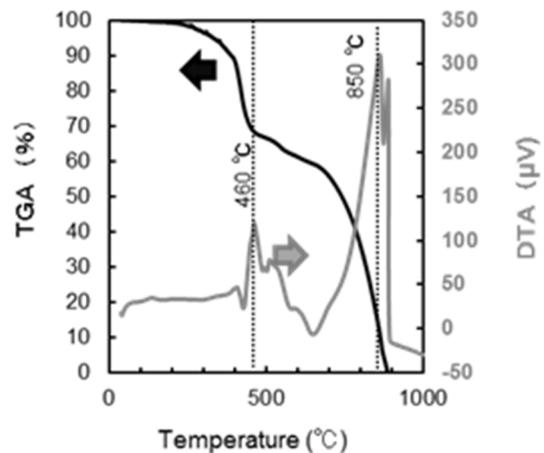


図 1 CFRP の示差熱・熱重量同時計測結果

2.2 炭素繊維と樹脂の除去のされ方の差についての数値計算

レーザ照射時の各材料の温度分布の時間発展を計算した。支配方程式は式(1)の通りである。

$$\rho_i c_i \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_i \nabla^2 T \quad (1)$$

ここで λ, T, ρ, c はそれぞれ各位置にある材料の熱伝導率、温度、密度、比熱である。なお、添え字の i は、樹脂、炭素繊維、除去領域の区別を表している。除去領域は空気とした。それぞれの物質に対して用いた物性値を表 1 に示す。

これらの支配方程式に対して有限体積法によって計算を行った。プログラムの実装に当たっては、オープンソースの有限体積法のライブラリである OpenFOAM³⁾を用いた。計算の次元については、まず 2 次元で作り^{4) 5)}、そ

の後3次元へ拡張した¹⁾。本報告では最終的な3次元での計算結果について報告する。

計算領域は3次元直交座標系により表現し、炭素繊維5本とその周りの樹脂についての計算を行った。境界条件は、樹脂が繰り返し同じように配置されている事を模擬することから、炭素繊維の側面方向は全周囲を対称境界とした。更に、炭素繊維の先端部分にレーザー照射を模擬した高温を与え、反対端面は自由境界とした。レーザー照射部の温度は分光分析による温度計測の結果からウィーンの変位側によって求められた6673Kとした⁶⁾。また、レーザー照射部から十分離れた境界は常温を仮定し、300Kとした。これらの概要を図2に示す。

各材料の蒸発・分解温度に到達すると物質が除去されるようモデル化した。なお、除去された部分の物性値には空気の値を用いた。このようにすることにより、ブルームの熱がどのように伝わり、どこがいつ除去されるのかを計算することが可能となる。

表1 各物質の物性値^{1) 7) 8) 9)}

	樹脂	炭素繊維	空気
密度 [kg/m ³]	1250	1850	1.293
熱伝導率 [W/(m*K)]	0.2	5(平行) 5(垂直)	0.0241
比熱 [J/(kg*K)]	1200	710	1005
除去温度 [°C]	460	850	

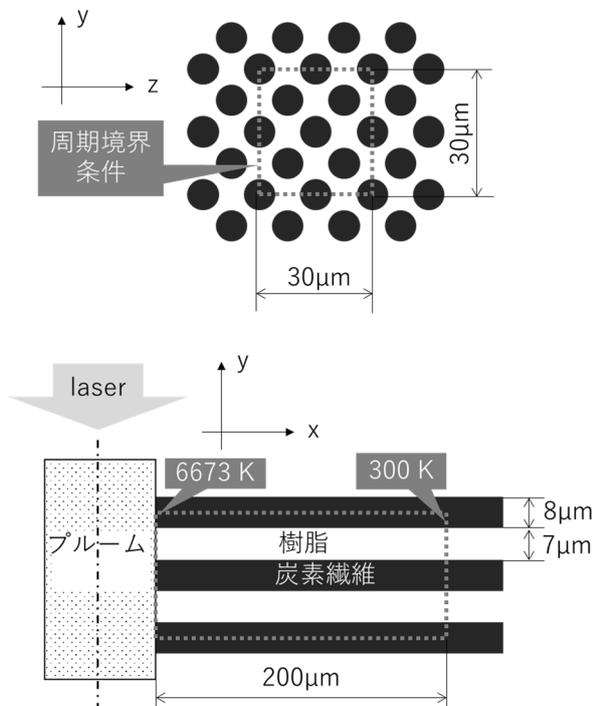


図2 計算領域の概要図。点線内が実際の計算領域

2.3 アブレーションブルームが材料表面に与える熱影響についての数値計算

CFRPにパルスレーザーを照射した後は、材料の相変化、化学変化等の複雑な反応が起こり高温高压のガスが発生し、そのガスがその圧力によって噴出すると考えられる。しかし、これらの反応について全てモデル化することは極めて困難である。本研究では、パルスレーザー照射によって発生した高温高压のガスの挙動が材料表面にどのような影響を与えるのかを定性的に調べるため、実験によって得られたアブレーションのレートとレーザーのフルエンスからアブレーションの初期内部エネルギーを仮定し、さらにそれが理想気体として断熱膨張した状態を初期状態とするという簡易的なモデルによる計算を行った。

以上のように推定した圧縮性流体を、加工によって生じた穴を模擬した凹みの中に配置し、式(2)~(4)に示す連続の式と運動量保存の式、エネルギー保存の式を連立して解くことにより、アブレーションブルームがどのように広がるかを計算した。なお、 ρ, U, p, T, E, t はそれぞれ密度、速度、圧力、温度、単位体積当たりの内部エネルギーと運動エネルギーの和、時間であり、 σ, ν, λ はそれぞれ、応力テンソル、動粘度、熱伝導率である。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot (U \cdot U) = -\nabla p - \nabla \cdot (\nu \nabla U) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U E) = -\nabla \cdot (\sigma \cdot U) - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (3)$$

計算領域は二次元対称空間とした。対称軸を中心にレーザーを照射し、レーザー照射スポット径と同じ大きさの穴が空いた状態を模擬し、その穴の中に、初期状態として仮定した圧縮性流体を穴の底に配置した。対称面は鏡面对称境界条件とし、CFRPを模擬した材料の表面は温度が300K固定でノンスリップの壁境界とした。さらに大気側の境界条件は衝撃波が反射しないように、流出境界条件を与えた。計算領域の概要を図3に示す。なお、本計算のプログラムの実装にもOpenFOAMを用いている。

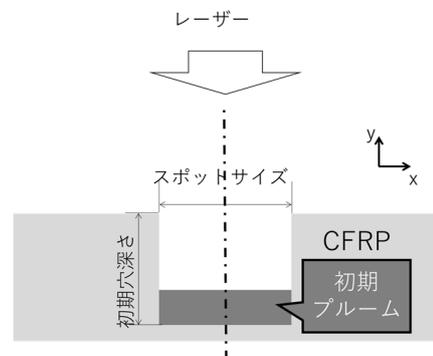


図3 計算領域の概要図

3. 計算結果

3.1 炭素繊維と樹脂の除去のされ方の差についての数値計算

図 4 に、2.2 で述べた系でのレーザー照射後 50 μs 後の計算結果を示す。図 4 の上の図に示されるように、炭素繊維が除去されず、周辺の樹脂が除去される様子を再現することに成功した。これは、図 5 に示した実験によって得られた断面の SEM 観察の結果と定性的に一致しており、実験を良く再現した計算が出来ていることがわかる。

図 6 に炭素繊維と樹脂の深さ方向への除去長さの比較を示す。最初は熱伝導率の高い炭素繊維が急激に除去されるが、その後は炭素繊維の除去速度は下がる。一方で熱伝導率の低い樹脂は最初の除去速度は速くないが、除去温度が低いために炭素繊維が引き込んだ熱によって除去されている様子が分かる。すなわち、図 4 の下の図に示したように、熱伝導率の高い炭素繊維が熱を加工断面から離れた領域まで伝導させている。炭素繊維によって引き込まれた熱によって、除去温度の低い周囲の樹脂のみが除去され、除去温度の高い炭素繊維は除去されなかった結果、このような形状が形成されることがわかった。更に、図 6 に示されているように、レーザー照射後 28 μs 程度で、炭素繊維と樹脂の除去長さが等しくなる点がある。そのため、熱源であるブルームをタイミング良く除去することにより、炭素繊維と樹脂の断面の揃ったきれいな切断面が得られる可能性が示唆された。

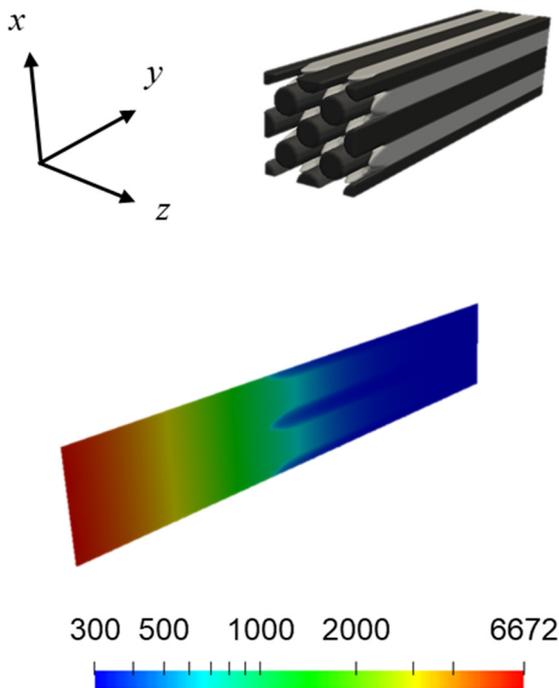


図 4 レーザ照射後 50 μs 後の、物質の様子(上)と $z=7.5 \mu\text{m}$ における温度分布 (下) ¹⁾

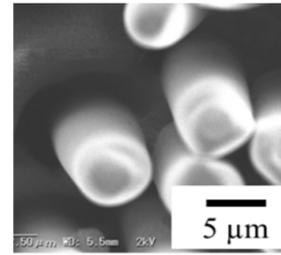


図 5 SEM で観察した、実際の加工断面の様子 ¹⁰⁾

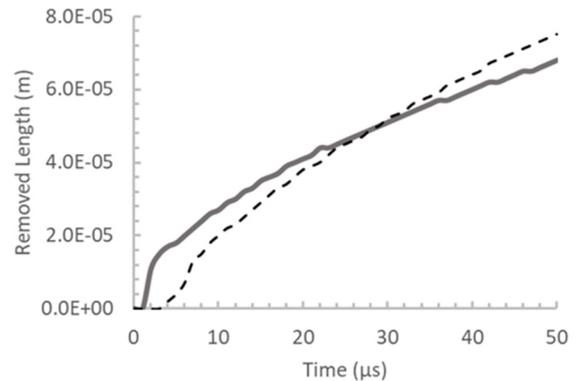


図 6 炭素繊維と樹脂の除去長さの比較 ¹⁾. 実線が炭素繊維、破線が樹脂を示す。

3.2 アブレーションブルームが材料表面に与える熱影響についての数値計算

図 7 に、高速度カメラで撮影したアブレーションブルームの様子 ¹⁰⁾ と、2.3 で述べた系における温度分布の計算結果 ¹⁾ との比較を示す。実験結果はアブレーションブルームの発光部のみを観察しているため、高温領域の分布が測定されていると考えられることから、計算結果は実験結果のきのこ雲のような形状を模擬出来ていると言える。

このアブレーションブルームが材料表面へ与える熱的影響を考えるために熱流束に比例する量 H を定義した。この熱影響量 H の空間分布を示したものが図 8 である。横軸は対称面からの距離を示している。計算では、初期穴深さを 30 μm ~ 500 μm まで変化させた。

図 8 から、初期穴深さが深い場合は加工部付近に大きな熱流束を与える一方で、初期穴深さが浅い場合には広く小さな熱影響を材料表面に与えることが示唆された。この結果から、図 9 に示した加工後の材料表面が二段階に除去されている様子を説明することが可能である。すなわち、炭素繊維が一部除去された加工部付近は加工穴が深くなった時に形成され、広く樹脂のみが除去された領域は加工穴が浅い内に形成されたと解釈することができる。このことから、材料表面の加工精度を上げるには、加工深さに応じてレーザーのパラメーターコントロールを行う必要があることが示唆された。

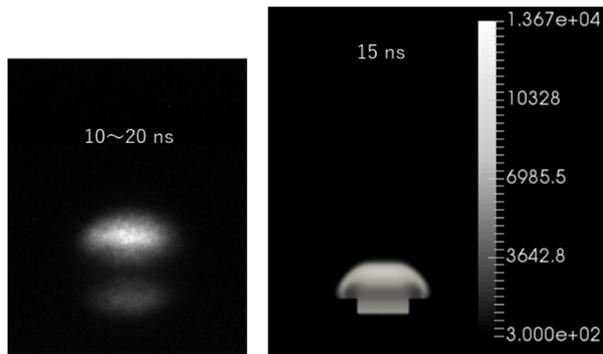


図 7 高速度カメラで撮影したアブレーションプルームの様子 (左)¹⁰⁾ と、温度分布の計算結果 (右)²⁾

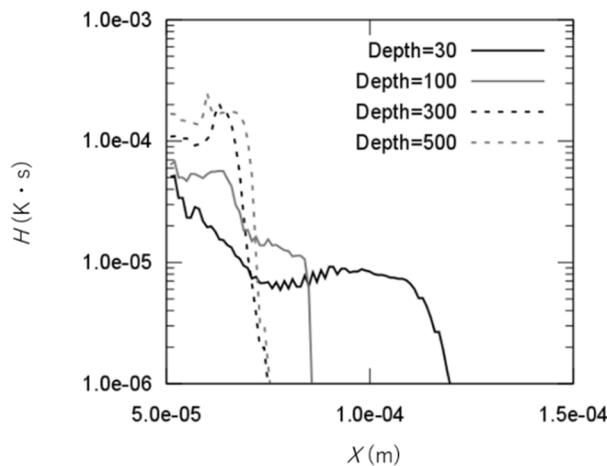


図 8 熱影響量 H の分布²⁾

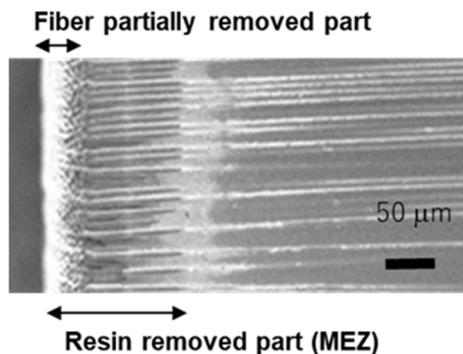


図 9 SEM で観察した表面の様子¹⁰⁾

4. 結論

材料断面および表面に及ぼされる熱影響を定性的に説明することが可能となる数値計算モデルおよびコードの開発を行った。

断面においては、樹脂と炭素繊維との除去温度および熱伝導率の差によって、炭素繊維が露出してしまう現象を計算により再現した。また、炭素繊維と樹脂との除去深さが等しくなり得ることを示した。

表面においては、アブレーションプルームの挙動を定性的に模擬することに成功した。また、加工穴深さの違いに

より、材料表面に与える熱的影響に差があることを示した。このことから、加工深さの変化とともにレーザーのパラメーターコントロールを行うことにより、より良い加工が出来る可能性を示した。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団の一般研究開発助成 (AF-2015209) によっておこなわれたことを付記するとともに、ここに深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Ohkubo, T., Sato, Y., Matsunaga, E., Tsukamoto, M.: Three-dimensional numerical simulation during laser processing of CFRP, Appl. Surf. Sci. 417, (2017), 104-107.
- 2) Ohkubo, T., Sato, Y., Matsunaga, E., Tsukamoto, M.: Thermal effect of laser ablation on the surface of carbon fiber reinforced plastic during laser processing, Appl. Phys. A, 124 (2018), 149.
- 3) <http://www.openfoam.org>
- 4) Ohkubo, T., Tsukamoto, M., Sato, Y.: Numerical Simulation of Laser Beam Cutting of Carbon Fiber Reinforced Plastics, Phys. Procedia 56, (2014), 1165.
- 5) Ohkubo, T., Sato, Y., Tsukamoto, M.: Numerical simulation of combustion effects during laser processing of carbon fiber reinforced plastics, Appl. Phys. A 122, (2016), 196.
- 6) Y. Sato, M. Tsukamoto, T. Ohkubo, K. Takahashi, S. Masuno, "Nanosecond Laser-Induced Ablation of Carbon Fiber Reinforced Plastic for High Speed Processing", 3, 1, pp. 54-59 (2014) (in Japanese)
- 7) Sheng C., Chryssolouris G., "Theoretical Model of Laser Grooving for Composite Materials", Journal of Composite Materials, 29, pp96-112 (1995)
- 8) Djurisiu A. B., Li E. H., "Optical properties of graphite", Journal of Applied Physics, 85, 10, pp7404-7410 (1999),
- 9) Goeke A., Emmelmann C., "Influence of Laser Cutting Parameters on CFRP Part Quality", Physics Procedia, 5, pp253-258 (2010)
- 10) Sato, Y., Tsukamoto, M., Nariyama, T., Nakai, K., Matsuoka, F., Takahashi, K., Masuno, S., Ohkubo, T.: Effect on Several Gas Ambiences for CFRP Processing with Nanosecond Laser, Rev. Laser Eng., 42 (2014), 4.