

光ファイバー先端部高温発生によるレーザー加熱推進機

○近藤圭佑（東海大・院），原嘉宏，浜田裕史，大澤隼（東海大・学），堀澤秀之（東海大・工）

Keisuke Kondo, Yoshihiro Hara, Hirofumi Hamada, Hayato Osawa, Hideyuki Horisawa

(Department of Aerospace Engineering, Tokai University)

Abstract

Studies on a novel microthruster with fiber tip heat source excited by a semiconductor laser were conducted. In the field of laser medical technology, the high temperature source formed by laser is used for the skin surgery. One of the technologies to form high temperature heat source is fiber tip heat source excited by a semiconductor laser. This study aimed at the development of the small and high performance propulsion system applied this technology. In this report, the thermal simulations are conducted to optimize the condition and the development of the prototype was also conducted.

1. はじめに

年間に打上げられる超小型衛星の数は年々増加傾向にあり，特に 2013 年は 92 機の超小型衛星が打上げられ，前年の 33 機と比較し，急激に増加した．今後とも予測によれば，商業利用が拡大し，打上機数ベースで平均年 23.8% の成長が見込まれている．¹⁾ 実用利用の拡大や衛星技術の向上を背景として，衛星ミッションの多様化・高度化に進んでおり，ミッション需要に対応するため，各国で超小型衛星搭載用の推進機の開発が進められている．

一方で，超小型衛星はリソースが非常に限られており，搭載機器はシステムサイズや消費電力の面で強い制約を受ける．一方で推進機は厳しい制約の中でミッション要求を満たす推進性能を発揮しなければならない．本研究では，このような課題に対し，新たに半導体レーザーによる光ファイバー先端部高温発生を用いたレーザー加熱推進機を提案し，その概念を実証実験結果について述べる．

2. 光ファイバー先端部高温発生

2.1 光ファイバー先端部高温発生技術

光ファイバー先端部高温発生は，半導体レーザーによって光ファイバーの先端部に高温の熱源を形成する技術

である．この技術はレーザーによって，生体の切除や切断を行うレーザー医療の分野において利用されており，図 1 に示した Jeisys 社の Plasma Lipo に代表されるように既に医療分野では実用化されている．



図 1 Jeisys 社 Plasma Lipo

原理としては，まず，図 2 のように光ファイバー先端部にレーザーの吸収剤として酸化チタンを融着する．

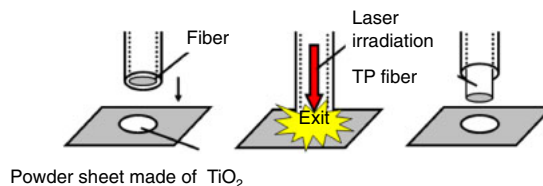


図 2 光ファイバーへの酸化チタンの融着

酸化チタン粉末のシートに光ファイバーの先端部を接

触させ、レーザーを照射することで光ファイバーの先端部に酸化チタンが融着される。酸化チタンが融着された状態で、レーザーを照射すると、光ファイバー先端部の酸化チタンがレーザー光を吸収し、加熱される。これにより、光ファイバーの先端部に高温源が形成される。高温源の温度は、2.2 項で後述するように藤本らが行った赤外線放射計測による温度測定の結果によると、最高で約 3000K 以上に到達することが報告されている。²⁾

2.2 ファイバー端面の温度解析

ここでは、まずファイバー端面の温度を熱解析により求めた。図 3 に熱解析の条件を示す。

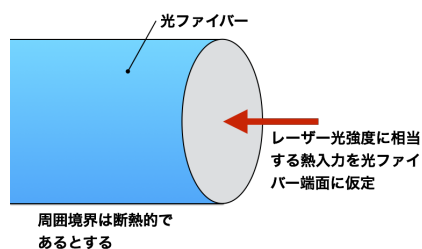


図 3 熱解析条件

光ファイバーを石英ガラス製の円柱としてモデル化し、その端面にレーザー光強度に相当する熱入力があると仮定し、光ファイバーの端面及び端面から光ファイバー内部に一定距離離れた位置の温度推移を解析した。熱入力は、図 1 に示した機器の動作条件から一定の熱入力が 0.18 [s] 継続し、その後、熱入力はないものとして 0~0.3 [s] まで 0.02 [s] の計算間隔で解析を行った。なお、光ファイバーの周囲境界条件は断熱的と仮定した。ファイバーのコア径は 400 [μm]、熱入力は 6 [W] としている。

熱解析の結果と実験による温度測定の結果²⁾を比較したものを図 4 に示す。

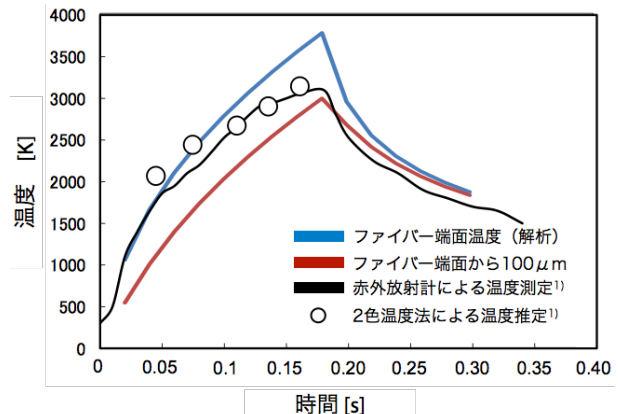
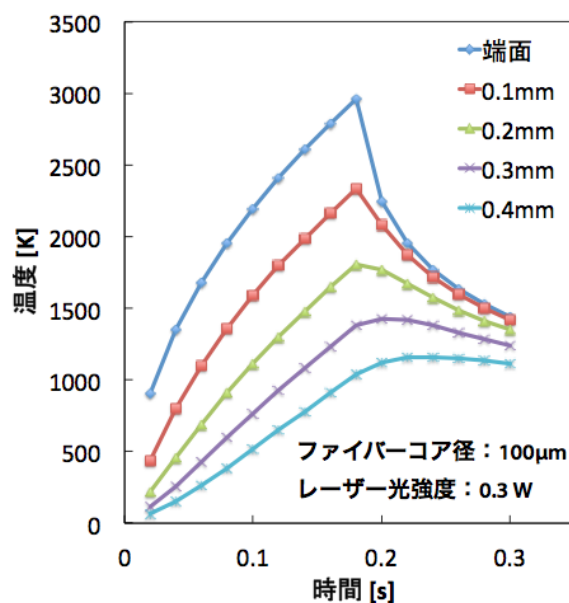
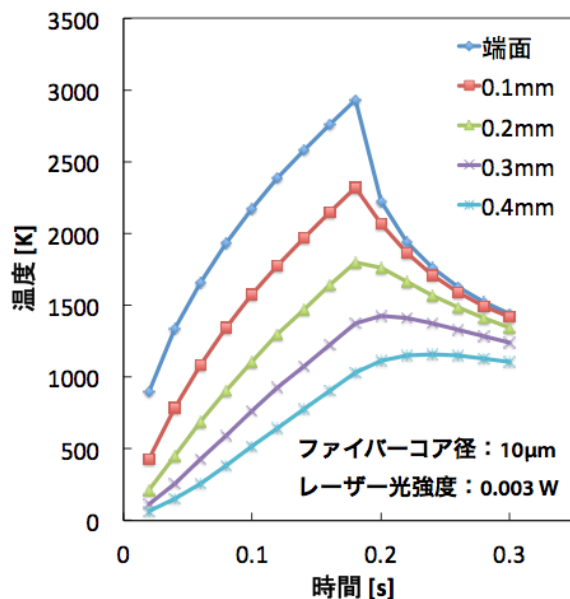


図 4 解析結果と実験結果の比較

解析結果の傾向は実験による温度測定の結果と良く一致しており、0.18 [s] において温度は最大となる。実験では最高温度が約 3000 [K] であるのに対して、解析では 3500 [K] 以上となっているが、これは解析においてファイバー側面からの熱的損失を考慮していないためと考えられる。また、ファイバー径をそれぞれ 100 [μm]、10 [μm] とし、レーザー光強度を 0.3 [W]、0.003 [W] とした結果図 5 を示す。熱入力の継続時間や解析時間間隔は同様である。



(a) ファイバーコア径 100 [μm],
レーザー光強度 0.3 [W]



(b) ファイバーコア径 10 [μm],

レーザー光強度 0.003 [W]

図 5 ファイバー端面の熱解析結果

図 5(a) (b)両方の場合において、ファイバー端面の最高到達温度が約 3000K となっており、ファイバーコア径を細くすることにより、より低消費電力で高温源を形成できる可能性が示唆された。

3. レーザー加熱推進機

3.1 推進原理

本研究では、2 節で述べた光ファイバー先端部高温発生を用いたレーザー加熱推進機を新たに提案する。推進機概念図を図 6 に示す。

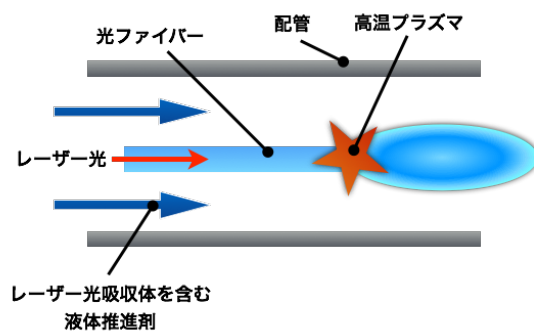


図 6 推進機概念図

推進機の構造としては、推進材の流路内に光ファイバ

ーを挿入する。レーザー端面にレーザー光の吸収体となる物質を継続的に供給する必要があるため、液体推進材にレーザー光のアブソーバとして機能する物質を混合し、推進材とともに光ファイバーの先端部に供給する。光ファイバーを通して、レーザーを照射すると、アブソーバがレーザー光を吸収し、加熱され、液体推進材を加熱する。生成された高温ガスはノズルを介して、熱力学的に加速され、推力を得る。

液体推進材を用いるため、固体推進材と比較して推進の貯蔵・供給に関わるシステムは複雑であるが、一方でスラストヘッドの構造は非常に単純であり、低電力で高い推進性能を得る事ができる。

3.2 概念実証実験

推進機概念を実証するため、図 7 に示すような簡易的な実験モデルを構築した。

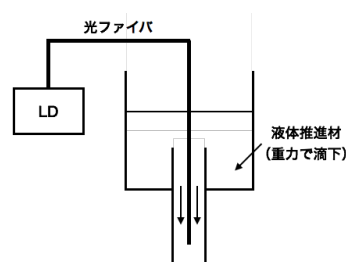


図 7 実証実験

推進材の貯蔵部の底部に配管(φ 0.85 [mm]) を挿入し、重力により推進材を滴下する。半導体レーザー (808 [nm])に接続されたコア径 400 [μm] の光ファイバーを介して、レーザー光を照射することで液体推進材が加熱される。レーザーは CW で運用し、出力は 10[W] とした。推進材には水を用い、アブソーバとして黒色塗料を添加している。また、実験は大気圧環境下で行われた。図 8 にその結果を示す。

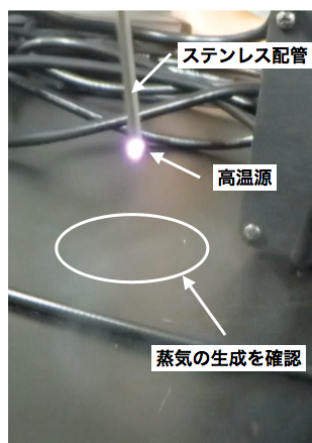


図 8 概念実証実験の様子

実験の結果、蒸気の生成が確認され、3.1 項の原理を用いて、推進材を加熱できることを確認した。しかし、流量が無制御であるため、レーザー強度に対して流量が大きく、気化するためにレーザー光強度を 10 [W] 要した。

3.3 熱解析

3.2 項で述べたように、概念実証実験においては、流量が必要以上に大きく、推進材の気化に大きなパワーを要した。そのため、熱解析により、最適な推進材流量とレーザー強度の最適化を試みた。図 9 に解析のモデルを示す。

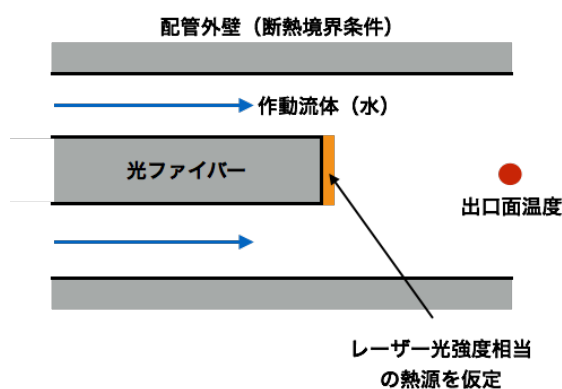


図 9 熱解析モデル

2.2 項における熱解析と同様にコア径 $400 \mu\text{m}$ の光ファイバーをモデル化し、その端面にレーザー光強度相当の熱源があると仮定した。ここでは、その周囲に径 0.85 [mm] の配管を想定し、内部には推進材として液体の水が一定流量で流れているとする。配管内壁の境界条件は断

熱的であると仮定して、配管の出口面における温度を解析により求めた。なお解析には、Autodesk Simulation CFD を使用した。解析結果を図 10 に示す。

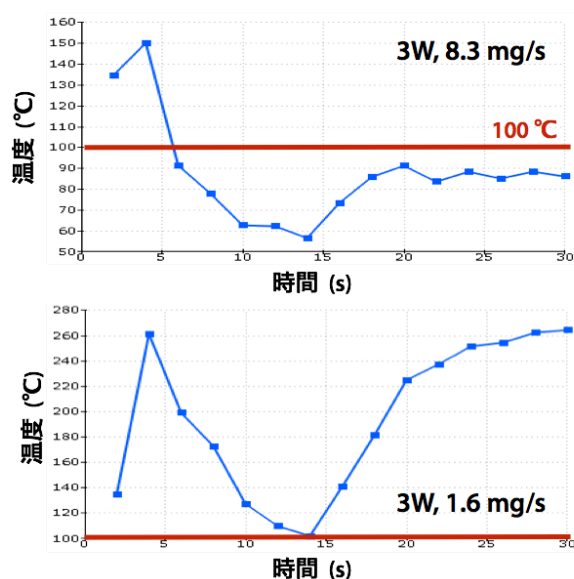


図 10 熱流体解析の結果

図 10 より、レーザー光強度 3W とした場合、推進材流量が 8.3 [mg/s] の場合では出口端面において水の温度が沸点である $100 [^{\circ}\text{C}]$ に達せず、推進材を気化できないことがわかる。一方で、推進材流量を小さくし、1.6 [mg/s] とした場合、推進材の出口面温度は $100 [^{\circ}\text{C}]$ に達し、推進材を気化できることがわかる。

一方で、定常的な熱源を仮定しているのにも関わらず、時間 10~15 [s] の間において、一度上昇した温度が下降する現象が見られる。この原因は分かっておらず、またこのモデルでは液相のみを取り扱い、気液混相流を考慮できていないため、今後さらに 2 相流を考慮に加えたモデルで解析を行う必要がある。

3.4 推進材流量及びレーザー光強度の最適化

3.3 項の解析結果を確認するため、実験を行った。図 11 に実験装置図を示す。

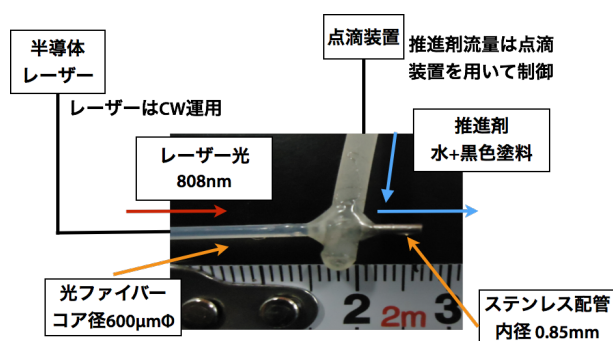


図 11 実験装置図

3.2 項と同様のステンレス製の配管(内径 0.85mm)に半導体レーザー (808nm) に接続された光ファイバー (コア径 600[μ m]) を挿入した。本実験では点滴装置を用いて推進材流量を制御し、水に黒色塗料を添加したものを推進材として使用した。ここでは、レーザー光の強度は 3 [W]とし、流量を変化させ、気化せずに出口面から排出される液量を調べた。その結果を表 1 に示す。

表 1 推進材流量及び

流量 [mg/s]	未蒸発液量 [mg/s]	残量比率 [%]
9.3	8.8	95
3.6	1.8	51
1.7	0.6	36
0.95	0	0

表 1 より流量が 9.3 [mg/s]では 95%が十分に加熱されず、液体のまま排出されてしまうが、流量を 0.95 [mg/s]まで減少させると、気化されずに排出される液量が 0 となり、十分に加熱がなされていることがわかる。

熱解析の結果と比較すると、レーザー光強度が 3 [W]の場合、解析では推進材流量が 1.6 [mg/s]の場合でも推進材が完全に気化される結果が示されていたが、実験では推進材流量が 1 [mg/s]の場合で完全に推進材が気化した。これは、解析では配管内壁からの熱的損失やレーザー光の物質に対する吸収率を考慮していないため、解析結果の流量よりもさらに推進材流量を小さくする必要があったと考えられる。

まとめ

超小型衛星への推進機搭載を目的として、新たに光ファイバー先端部高温発生を用いたレーザー加熱推進機概念を提案し、その検証や基礎的な実験を行った結果について報告した。

光ファイバー先端部高温発生は医療技術として用いられているものであり、実験により数 W 程度でも局所的に 3000 [K]以上の高温を得られることが明らかとなっている。また、さらに熱解析により、ファイバーコア径を細くすると、高温領域が小さくなるものの、1 [W]以下の低電力でも高温源が形成できる可能性が示唆されており、超小型推進機の熱源として最適であると考えている。

この技術を用いて、液体推進材を加熱することにより推力を得るレーザー加熱推進機概念を提案し、その概念が有効であることを実験的に確認した。また、解析と実験の両面から最適なレーザー光強度と推進材流量の最適化を試みた。

現時点では、解析モデルが非常に単純であり、また実験データも不足しているため、今後も継続してレーザー光強度と推進材流量の最適化を行うとともに、推進機の実験モデルを改良し、推進性能の測定なども行っていく予定である。

参考文献

- 1) Spaceworks Enterprize, Inc., “2014 Nano/Microsatellite Market Assessment”, (2014)
- 2) T. Fujimoto et al., “Development of A Semiconductor Laser Based High Temperature Fine Thermal Energy Source in an Optical Fiber Tip for Clinical Applications,” Jpn. J. Appl. Phys., **52** (2013)