

レーザーアブレーションによる飛翔体推進の効率化

青木 圭一、矢部 孝、中川 順達、尾形 陽一
東京工業大学 理工学研究科 機械物理工学専攻

The study on the efficiency of projectile propulsion driven by laser ablation

by

Keiichi AOKI, Takashi YABE, Masamichi NAKAGAWA, Youichi OGATA
Tokyo Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering and Science

ABSTRACT

In this paper, the numerical calculations of laser propulsion for space vehicle are discussed. For calculating the behavior of ablation, it is necessary to do with the solid, the liquid and the gas at the same time. We calculated this process with the hydrocode based on a highly-accurate scheme CIP-CUP(Cubic-Interpolated Pseudoparticle Combined Unified Procedure) method. With this scheme, we evaluate the efficiency by C_m (the momentum coupling coefficient) for the cases of single pulse and some target shapes. In order to confirm the result, we performed experiments with a pendulum and a semi-conductor load-cell.

1 研究目的

現在、世界各国で宇宙輸送コストの低減を目指した低コスト再使用型輸送機の検討が盛んに行われている。現在の宇宙輸送機は、化学推進のみによるものが大部分である。しかし、エネルギー源を機体自身に搭載しなければならない、コストを多大に有するという欠点を有している。

一方、1972年に Kantrowitz⁽¹⁾氏により提案されたレーザー推進は、レーザービームによる燃料加熱に基づく反動推力を推進原理とするものである。このレーザー推進においては、可能な限りペイロード以外の重量物搭載を抑制できるという点において有望な推進システムの一つと言える。レーザーの高性能化によって低コスト再使用型宇宙輸送機の方法の一つとして、このレーザー推進が有力な候補となる。しかしながら、この技術には未だ明らかになっていない面が数多く残されている。

現在、レーザー推進システムとして様々な方法⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾が提案されているが、本研究では、レーザー照射によるターゲット燃料のアブレーション推力を利用したシステム⁽⁵⁾⁽⁶⁾を採用した。このレーザー推進システムにおいては、レーザーを照射されたターゲット上でのレーザーアブレーション現象を解明することが重要となる。しかしながら、この現象には、複雑な過程が含まれる。まず、加熱により金属が溶け、応力に支配された金属から粘性に支配された液体へと相転移する。さらに加熱されると今度は蒸発が始まる。こうして、ほとんど圧縮されない液体から圧縮されやすい蒸気へと相転移する。このときの密度変化は実に2桁から3桁にもなる。このような変化が、数 μm オーダーの薄い層で起こるのである。このときには、明確に定義された境界が存在しない。今まで固体であったものが液体となり、気体、もしくはプラズマとなって飛散していくのである。この現象を数値計算により解明しようとする、どうしても固体、液体、気体を同時に解く数値計算手法が要求される。現在、この要求を満たす数値計算手法として、C-CUP(CIP-Combined United Procedure)法⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾がある。C-CUP法には、温度の変化も正確に取り入れるよう拡張された手法⁽¹⁰⁾があり、このような蒸発を含む流動の場合に有効である。

そこで、本研究では、このC-CUP法を用いた数値計算によりレーザーアブレーション現象の流体的メカニズムを解明するとともに、飛翔体構造の違いによるレーザー推進の効率の変化を評価した。また、数値計算の結果を検証するため

に振り子による運動量測定実験と半導体ロードセルによる運動量測定実験を行なった。それらの結果から運動量結合係数を用いて計算結果との比較検討を行なった。

2 主な使用記号

C_m	: 運動量結合係数
I	: レーザー強度
W	: レーザーエネルギー
r_0	: レーザー照射半径
τ	: パルス幅
T	: 温度
λ	: 波長
l_{mel}	: 金属表面の吸収長
l_{pls}	: プラズマの吸収長
R_N	: ノズル半径

3 数値計算法

3.1 支配方程式

本研究においては、計算手法としてCIP-CUP法を用い、レーザーをアルミニウムターゲットに照射するとき起こるアブレーション現象の数値計算を行なった。また、レーザーの光軸を対称軸とし、2次元軸対称とした。

支配方程式は以下の連続の式、運動方程式、エネルギー方程式からなる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3.1.1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla P + Q_u \quad (3.1.2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial e}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla e \right) = -P \nabla \cdot \mathbf{u} + Q_e + Heat \quad (3.1.3)$$

ここで、 ρ 、 \mathbf{u} 、 P 、 e 、はそれぞれ、質量密度、速度、圧力、比内部エネルギー密度である。 Q_u は、入口粘性、実粘性の項を表わし、 Q_e は熱伝導の項を表わしている。また、 $Heat$ という項によって、レーザー光と物質との相互作用をジュール熱の吸収として表わしている。

3.2 レーザー特性

レーザーの特性は、空間分布、時間分布、ともにガウス分布とした。空間分布に対しては以下の式を用いた。

$$I = I_0 \exp\left[-\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right] \quad (\text{MW/m}^2) \quad (3.2.1)$$

ここで、 I_0 はレーザー強度の最大値である。この式から、照射半径 r_0 においてレーザー強度が最大値の $1/e$ となる。

また、時間分布に対しては以下の式を用いた。

$$I = I_0 \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)\right] \quad (\text{MW/m}^2) \quad (3.2.2)$$

照射時間 t_0 において、レーザー強度は最大値となり、レーザー強度が最大値の $1/e$ となる照射時間の幅 τ をパルス幅としている。本研究では t_0 をパルス幅と等しくとっている。

また、レーザーのパラメータとして最大レーザー強度 I_0 、パルス幅 τ 、照射半径 r_0 が与えられたときのレーザーエネルギー W は以下の式で表わされる。

$$W = I_0 \cdot \pi r_0^2 \cdot \frac{\sqrt{\pi} \tau}{2} \quad (\text{J}) \quad (3.2.3)$$

3.3 レーザー光の吸収

ターゲット表面付近でのレーザー熱吸収には以下の式を用いた。

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = (1 - R) \exp\left(-\frac{dz}{l}\right) \quad (3.3.1)$$

ここで、 I_{out} 、 I_{in} 、 R 、 l 、 dz は、それぞれ透過レーザー強度、入射レーザー強度、固体表面での反射率、吸収長、及び透過距離である。 $I_{out} - I_{in}$ が物質に吸収されるレーザー強度を表わす。固体表面ではレーザー光は反射される。その効果を表わすのが反射率 R である。反射率 R は固体表面でのみ値をもち、その値は 0.7 とした。また、熔融部表面での表面張力は無視した。固体表面での熱の吸収と、アブレーションの過程において発生するプラズマでの熱の吸収を考慮し、それぞれについて l に式を与えた。

プラズマの角周波数は

$$\omega_p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (3.3.2)$$

である。プラズマの波長 λ の電磁波に対する遮断密度は以下の式で与えられる。

$$N_{ec} = \frac{1.115 \times 10^{13}}{\lambda^2} \quad (\text{cm}^{-3}) \quad (3.3.3)$$

$$\rho_c = \frac{AM_p}{Z} N_{ec} \quad (\text{g/cm}^2) \quad (3.3.4)$$

ここで、 A 、 M_p 、 Z は、それぞれ原子量、原子の質量、荷電数である。

$\rho_c < \rho$ では固体表面での吸収、 $\rho_c > \rho$ ではプラズマでの吸収であるとした。

固体表面での吸収長 l_{ml} は以下の式で与えた。

$$l_{ml} = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\sigma}{c\lambda}} \quad (\text{cm}) \quad (3.3.5)$$

ここで、 ω 、 c 、 σ は、それぞれレーザーの振動数、光速、アルミニウムの電気伝導度である。

プラズマに対しては逆制動輻射により熱が吸収されるとして、吸収長 l_{pls} は以下の式で与えた。

$$l_{pls} = 2 \times 10^{41} \left\{ \frac{(T \times 10^3)^2}{\lambda^2 N_e^2} \right\} \quad (\text{cm}) \quad (3.3.6)$$

式(3.3.5)、(3.3.6)を式(3.3.1)に用いることで、ターゲット表面近傍によるレーザー熱の吸収を計算する。

4 評価基準

レーザー推進の効率を表わす評価基準として、運動量結合係数 C_m ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{MJ}$) という値を用いる。

C_m は以下の式で定義される。

$$C_m = \frac{m\Delta v}{W} \quad (\text{N}\cdot\text{s}/\text{MJ}) \quad (4.1)$$

ここで、 $m\Delta v$ はレーザー照射によってターゲットが得た運動量、 W はレーザーエネルギーを表わしている。

ターゲットが得る運動量は以下の式を用い、アブレーションが発生する運動量から求めた。

$$m\Delta v = \iint \rho v^2 + (P - P_0) dS dt \quad (4.2)$$

ここで、 S はアブレーションの断面積である。

式(3.2.3)、(4.2)を式(4.1)に用いることで、運動量結合係数を求めた。

5 実験装置

数値計算結果を検証するための運動量測定実験を行った。アルミニウムに YAG レーザーを照射し、レーザーアブレーション現象により得られる推進力を計測する。振り子の移動距離から運動量を求める方法と、半導体ロードセルを介してターゲットに与えられる荷重を測定する方法を用いた。全ての実験は大気圧中で行われている。図 1 に実験装置概略を示す。

6 ターゲットの構造

レーザー推進の効率を向上させるために、ターゲットの構造を次の 3 通りとした。

1. スタンダード
2. エキゾチック
3. 円筒型ノズル付き

図 2 にそれぞれの構造を示す。1 は平面形状でレーザーアブレーション現象の現象解明のためと構造変化による効率向上の基準となるもの。2 は 2 層構造、3 は円筒型ノズルによるアブレーションの整流により効率向上を期待している。

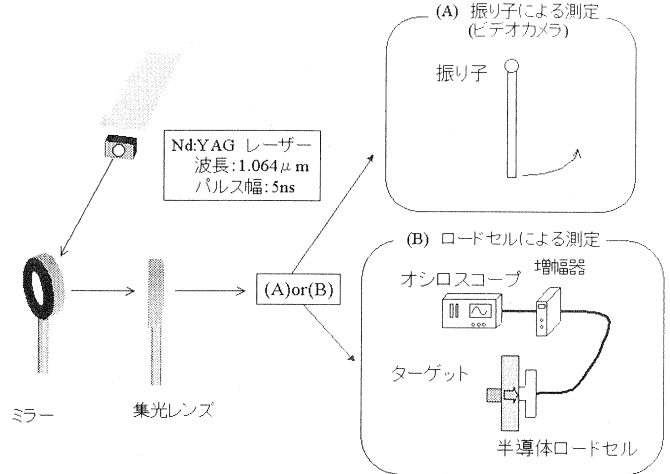


図 1：実験装置概略

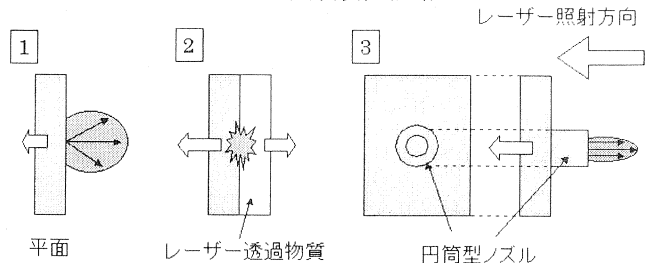


図 2：ターゲットの構造

7 スタンダード

7.1 計算結果

ターゲットにアルミニウムを用い、真空中におけるレーザー照射とした。レーザーはパルス幅 5(ns)、波長 1064(nm)とした。スタンダードターゲットに対して、レーザー強度 I (MW/m²)が $10^6 \sim 10^{11}$ におけるターゲット表面でのレーザーアブレーション現象のシミュレーションを行った。また、それぞれのレーザー強度 I に対して、運動量結合係数 C_m を求めた。図3にレーザー強度 10^8 (MW/m²)でのシミュレーション結果、図4に C_m の結果を示す。

図3から、レーザーが照射されて6ns経過すると、ターゲット表面からアブレーションが発生している。ターゲットはこのアブレーションによって運動量を得る。レーザーが照射中は、時間が経過するにつれアブレーションは大きくなる。また、温度分布から、アルミニウムターゲット表面ではなく、表面近傍で温度の高い領域が見られる。これは、レーザーが照射されたことによってアブレーション中にプラズマが発生し、レーザーエネルギーを吸収しているためである。このときプラズマの温度は数十万 K になっている。レーザー照射後(10ns 後)には、アブレーション先端部分に密度が 0.1kg/m^3 と大きな領域が見られる。これは、LSD(Laser-Supported Detonation)波と呼ばれる衝撃波であり、他の領域と比べ温度、圧力ともに高くなっていることが確認できた。

図4から運動量結合係数 C_m がレーザー強度 I に対して依存性を持つことが確認できる。レーザー強度 I が 1×10^8 MW/m²において最大値 17 となっている。レーザー強度 I_0 が、 1×10^8 MW/m²よりも小さいときは、ターゲットに照射されるレーザーエネルギーが小さいため、十分にアルミニウムを蒸発させることができずアブレーション量が少なくなる。そのためにレーザーエネルギーに対して、ターゲットの得る運動量が小さくなり、 C_m の値が小さくなると思われる。また、レーザー強度 I が、 1×10^8 MW/m²よりも大きなときはターゲットに照射されるレーザーエネルギーが過剰なため、ターゲット表面で生成されたプラズマが過剰となる。そのために、レーザーエネルギーの大部分がプラズマによる逆制動放射によって吸収されターゲット表面まで伝わらない。そのためにレーザーエネルギーに対してターゲットの得る運動量は大きくなり、 C_m の値が小さくなっているものと考えられる。

図5にレーザー強度 I_0 が $10^7, 10^8, 10^9$ のそれぞれの場合におけるアブレーションの挙動を比較したものを示す。この図5から、レーザー強度が弱いとアブレーションの発生時間が短いこと、形状が小さいことが確認できる。また、レーザー強度が強すぎると、プラズマにより吸収されるレーザーエネルギーが大きく、プラズマの温度が数百万 K と非常に大きなものとなっていること、レーザーを吸収しているプラズマが広範囲に渡っていることが確認できる。

これらのことから、 C_m はレーザー強度に対して依存性があり、ターゲットをアルミニウムとしたときには、 1×10^8 (MW/m²)において最大値をとることがわかった。

7.2 実験結果

測定した運動量から運動量結合係数を求めた。図6にレーザー強度 I と運動量結合係数 C_m の関係を示す。これよりレーザー推進の効率を表す C_m の値は、レーザー強度 I に依存性があることが確認できた。また C_m の値はレーザー強度 1×10^8 MW/m²程度でピークをとり、これは計算値(図4)とほぼ一致する。しかし値は 10 倍程度の差があり、これは実験を大気圧で行ったためであると考えられる。真空中に近い状態での実験では C_m の値が大きく減少することが報告⁽¹⁾されており、外気圧が 0.1atm 以下となると急激に C_m の値小さくな

り、およそ $C_m=10$ N.s/MJ 程度になることが確認されている。これは計算の結果と良く一致している。

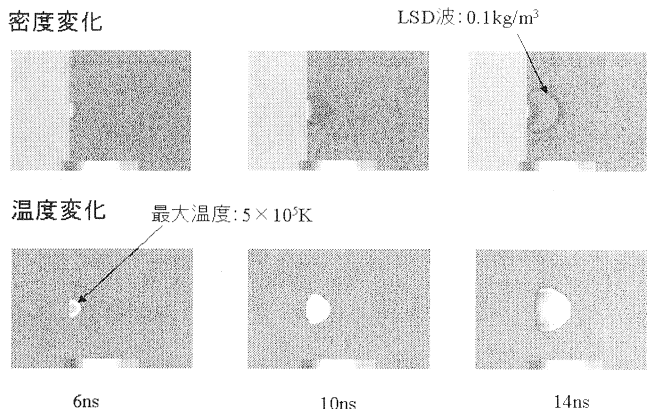


図3：アブレーションのシミュレーション結果

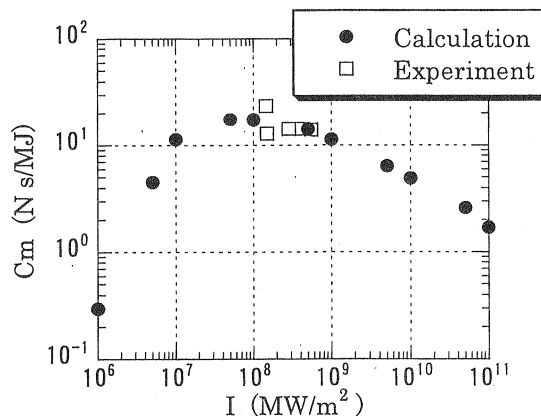


図4：レーザー強度 I と運動量結合係数 C_m の関係

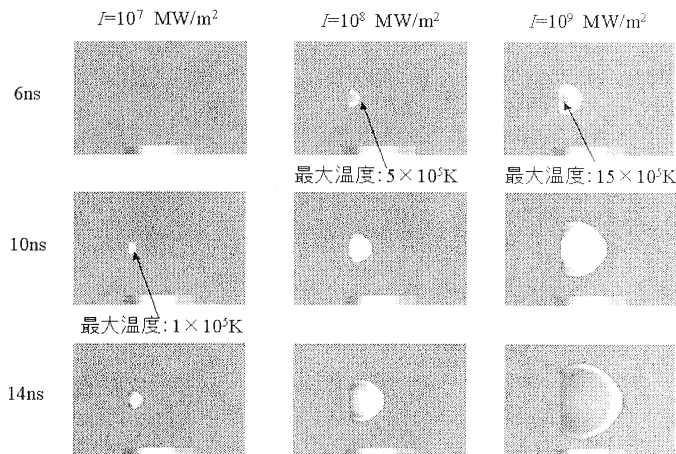


図5：レーザー強度によるアブレーション現象の違い

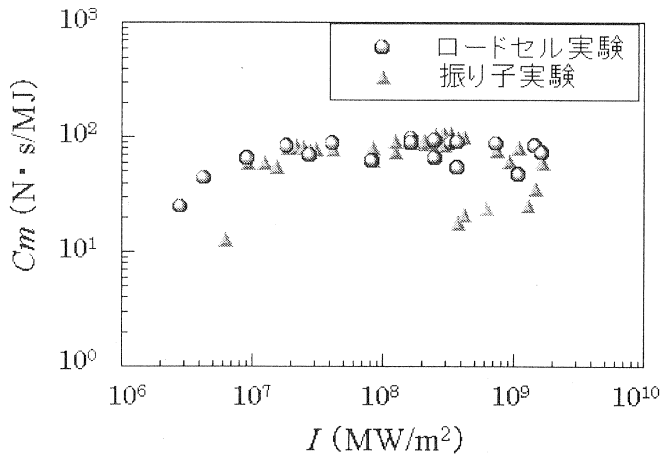


図 6 : 大気圧中でのレーザー強度と運動量結合係数との関係

8 エキゾチック

8.1 計算結果

エキゾチックターゲットにおけるレーザーを照射した場合でのシミュレーションを行い、運動量結合係数 C_m を求めた。ターゲットとしてはアルミニウム、レーザー透過物質としてガラスを用いた。

図 7 はレーザー強度 7×10^7 (MW/m²) におけるレーザー照射後のアブレーションの挙動を示す。レーザーは図中の右側から照射され、レーザー透過物質を透過し、ターゲット表面にあたっている。また、図 8 には、レーザー強度とパルス幅とのパラメータ $I\tau^{1/2}$ と運動量結合係数との関係を示している。

図 7 から、噴出したアブレーションがアルミニウムをガラスとの隙間の空間に広がり、隙間の圧力が高くなっていることが確認できる。ターゲット、レーザー透過物質はそれぞれ、この圧力により推力を受け、移動すると考えられる。図 8 から、 C_m の値はスタンダードに比べ、非常に大きな値を取ることが確認できる。これは、アブレーションによりガラスが押されて移動することで、反動推力がターゲットにかかるためである。また、レーザー強度が小さくなるに従い、 C_m の値が大きくなることを確認できる。これは、レーザー強度が大きいとプラズマ状態となりやすく、プラズマがレーザーを遮断し、アルミニウム表面での吸収が行われなくなり、そのためアブレーションが少なくなるためであると考えられる。逆に、レーザー強度が小さければ、ゆっくりではあるがアブレーションが発生し、隙間部分に充満し、高圧になるためであると考えられる。これは、ガラスがアブレーションの噴き出し方ではなく、噴き出したアブレーションにより高められ圧力によって押し出されるためであると考えられる。

これらのことから、ターゲットを 2 層構造としたエキゾチックターゲットというターゲットが、レーザー推進の効率を向上させる上で非常に有効であることがわかった。

8.2 実験結果

レーザー透過物質としてアクリルを用い、半導体ロードセルによって荷重波形を出力し、スタンダードとエキゾチックとの比較を行った。

図 9 にスタンダードとエキゾチックとの荷重波形を示す。図 9 からターゲットの構造をエキゾチックとすることで最大荷重がおおよそ 3 倍程度まで大きくなっていることがわかる。このことから、数値計算結果と同様にターゲットの構造をエキゾチックとすることによって、ターゲットにかかる荷重を大きくすることに、非常に有効であることが確認できた。

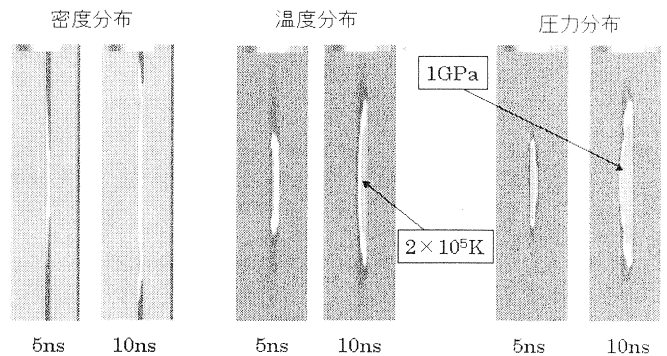


図 7 : レーザー照射後のアブレーション

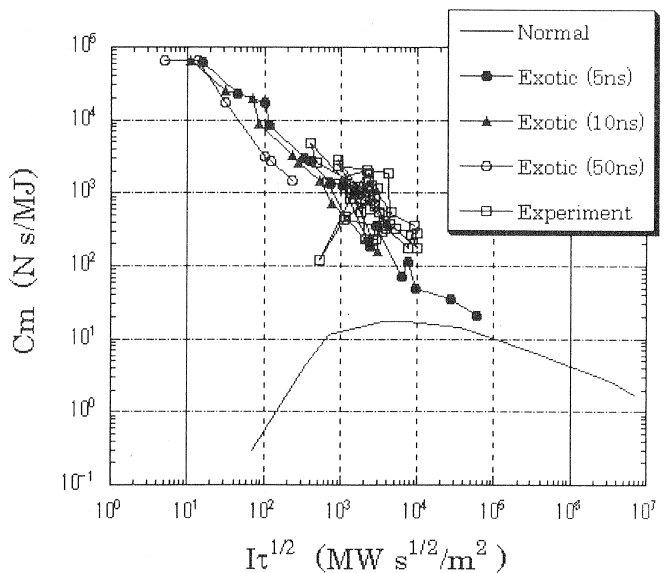


図 8 : $I\tau^{1/2}$ と運動量結合係数 C_m との関係

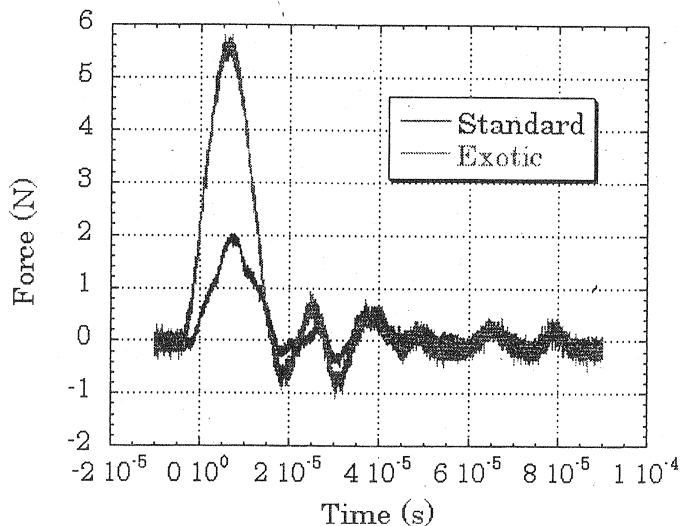


図 9 : 構造の違いによる荷重波形の変化

9 円筒型ノズル付き

9.1 計算結果

円筒型ノズル付きターゲットにおいて、レーザー強度 $10^8(\text{MW/m}^2)$ としたときのレーザーアブレーション現象のシミュレーションを行った。スタンダードターゲットの計算条件において、境界を反射境界とすることで、円筒型ノズル付きの計算とした。

図 10 にスタンダードターゲットと円筒型ノズル付きターゲットでのレーザー照射後のアブレーション流れの違いを示す。

図 10 から、スタンダードターゲットと円筒型ノズル付きターゲットでは明らかにアブレーションの流れが異なっていることが確認できる。円筒型ノズルを付けることでアブレーションが反射し、推進方向に密度が高くなっており、噴出流量が大きくなっていることがわかる。また、アブレーションの密度が高くなったことにより、アブレーションがターゲット方向に進む反射波の影響も図 10 から確認できる。これらのことから、ターゲットにかかる荷重が大きくなっていることがわかる。

9.2 実験結果

図 11, 12 にロードセルで測定したスタンダードと円筒型ノズル付きターゲットの荷重波形を示す。図 13 に円筒型ノズルの半径を 1mm から 5mm まで 1mm ごとに大きくしていったときのノズル半径と運動量結合係数との関係を示す。

図 11 から、スタンダードでは、最大で 2N ほどの荷重が $20\mu\text{s}$ かかっていることと、図 12 から、円筒型ノズル付きでは、最大で 3N ほどの荷重が $25\mu\text{s}$ かかっていることが確認できる。スタンダードと比べて、推力の最大値、持続時間ともに大きくなっていることが確認できる。また、図 11, 12 を比較すると、円筒型ノズル付きターゲットには、ノズルを付けたことによる影響として反射波の影響が荷重波形に現れていることが確認でき、数値計算結果と一致する。

図 13 から、円筒型ノズルを付けることにより、運動量結合係数は 3 倍程度まで大きくなっていることが確認できる。また、ノズル半径は運動量結合係数を最大とする最適値が存在することも確認できる。これは、レーザー照射後のアブレーションの領域に対してノズル半径が大きくなりすぎたため、ターゲットがノズルの影響を受けなくなるためであると考えられる。

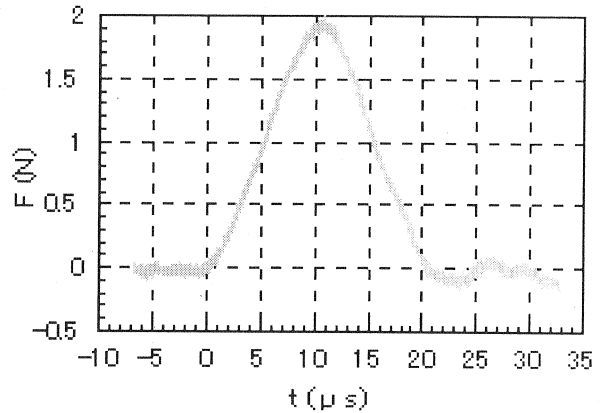


図 11：スタンダードの荷重波形

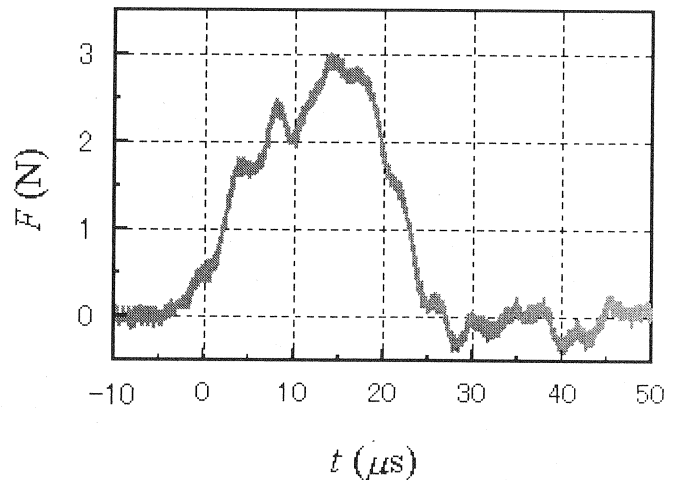


図 12：円筒型ノズル付きの荷重波形

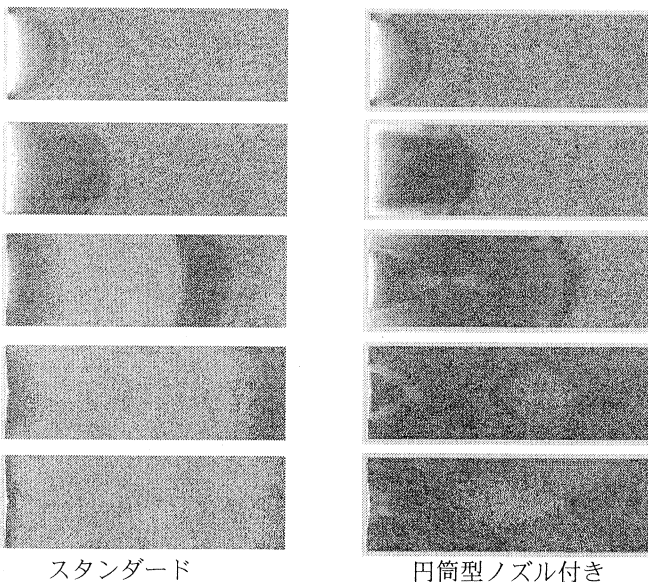


図 10：アブレーション流れの違い

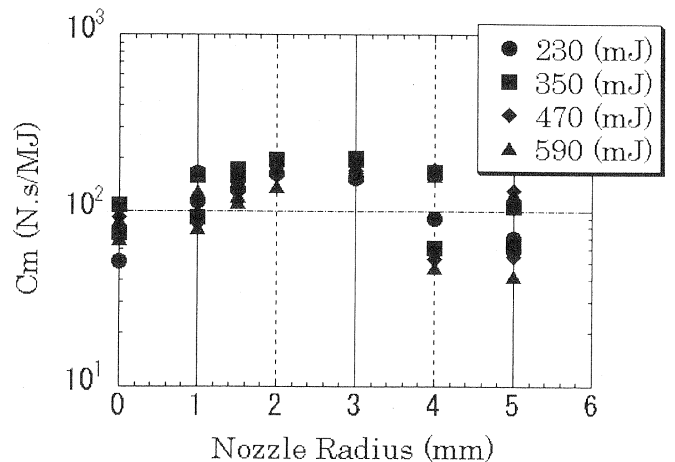


図 13：円筒型ノズルの半径と運動量結合係数との関係

10 結論

レーザーアブレーションを利用したレーザー推進の現象解明と、レーザー推進の効率化を目的とし C-CUP 法を用いたレーザーアブレーションの数値計算、また、振り子、ロードセルを用いた運動量測定実験の結果、次のような結論を得た。

- アルミニウム表面にレーザーを照射すると、アブレーションが発生し高温のプラズマ状態となり、レーザーエネルギーの吸収にはこのレーザープラズマの振る舞いが多大な影響を及ぼす。
- 運動量結合係数 C_m は、レーザー強度 I_0 に依存性を持ち、 C_m を最大にする I_0 が存在する。
- ターゲットの構造をレーザー透過物質とターゲットとの 2 層構造とすることで、運動量結合係数 C_m を大きくし、効率を向上させることができる。
- 円筒型ノズルを付けることで、アブレーションの流れを整流することができ、その結果として、ターゲットにかかる荷重を大きくすることができる。

(11) 藤原 関夫;レーザー推進-金属ターゲットを用いた運動量の測定;レーザー学会学術講演会第 21 回年次大会講演論文集, 2001 年 1 月

参考文献

- (1) Kantrowitz, A. "Propulsion to Orbit by Ground-Based Laser" *Astronaut. Aeronaut.* 10, 74. 1972
- (2) C.R.Phipps, Jr., T.P.turner, R.F.Harrison, " Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO₂ single-pulse lasers" ,*J.Appl.Phys.* 64(3), 1 August 1988 pp1083-1096
- (3) Franklin B. Mead, Jr and Leik N. Myrabo, FLIGHT EXPERIMENTS AND EVOLUTIONARY DEVELOPMENT OF A LASER PROPELLED, TRANS-ATMOSPHERIC VEHICLE, STAIF-98 *Congress, Albuquerque(NM), USA, Jan.25-29, 1998*
- (4) L. N. Myrabo and F. B. Mead, Jr., Ground and Flight Tests of a Laser Propelled Vehicle, AIAA98-1001, *Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 36th, Jan12-15, 1998*
- (5) Franklin B. Mead, Jr and Leik N. myrabo, Flight and Ground Tests of a Laser-Boosted Vehicle, AIAA 98-3735, *AIAA/ASME/SAE/ASSEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 36th July13-15, 1998*
- (6) C.R.Phipps and M.M.Michaelis, "LISP: Laser impulse space propulsion", *Laser and Particle Beams* (1994), Vol.12, no.1, pp.23-54
- (7) H.Takewaki, A.Nishiguchi and T.Yabe, *J. Comp. Phys.* 61 (1985) 261.
- (8) T.Yabe and T.Aoki, *Comput. Phys. Commun.* 66 (1991) 219.
- (9) T.Yabe and P.Y.Wang, *J.Phys.Soc.Jpn.* 60(1991) 2105
- (10) Xiao, F., et al., *Comput.Model.and Simul.Eng.*, 1, p.235 (1996)