

	わたなべ けいこ
氏名	渡辺 圭子
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成17年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 航空宇宙工学専攻
学位論文題目	パルスレーザーによる遠隔インパルス発生メカニズムとその特性に関する研究
指導教員	東北大学教授 佐宗 章弘
論文審査委員	主査 東北大学教授 佐宗 章弘 東北大学教授 升谷 五郎 東北大学教授 澤田 恵介 東北大学教授 圓山 重直

論文内容要旨

レーザーエネルギーを利用して遠隔的にインパルスを発生させる技術は、電磁波と物質のマイクロな干渉およびマクロな熱流動現象を伴い、流動ダイナミクスとして興味ある事象であるのみならず、推進、材料改質など様々な航空宇宙工学への応用につながる重要な研究課題であり、近年のレーザー発振装置の目覚ましい進展を背景にして盛んに研究が行われるようになってきた。インパルス発生方法は、レーザーブレイクダウン(絶縁破壊)とレーザーアブレーションに大別されるが、本研究では応用範囲の広いレーザーアブレーション現象を取り扱う。レーザーアブレーションのメカニズムは、レーザー光の性質(波長、ピークパワー、パルス幅、フルエンス)、固体の物性(エネルギー吸収率、表面状態、化学組成)、雰囲気環境(圧力)、力学的インピーダンスなどのパラメーターに依存するので、それに伴うアブレーションメカニズム変化の遷移領域における挙動を詳細に調べることは、これからの課題であるといえる。また、様々な応用面においても、技術を進歩、発展させるためにはレーザーアブレーションの物理的機構について、より完全に理解することが重要である。

本研究は、レーザーパルスと固体、液体、気体の相互作用により発生するインパルスの特性とそれとともなう諸現象を明らかにすることを目的とし、物質の力学的インピーダンスの違いに着目し、非定常圧力波の挙動について種々の考察を加え、相変化を伴う非定常流動現象を詳しく解明している。本論文は、6章で構成されている。第1章は緒論である。第2章では、水中でのレーザーパルスとステンレス板の相互作用によって生成する圧力パルスが、金属板近傍に誘起する圧力波および気泡の挙動について詳細に調べた。第3章では、大気圧下において、300 J クラスの大出力レーザーパルスを高分子材料に照射し、その干渉によって生成するインパルス特性を、アブレーション材料の影響および流体力学的閉じ込め効果の観点から実験的に調べた。第4章では、減圧雰囲気下で、レーザーパルスをポリアセタール樹脂に照射することにより、その干渉によって生成するインパルス特性を雰囲気圧力およびレーザーフルエンスをパラメーターとして詳細に調べた。また、雰囲気圧力とフルエンスの相互作用により起こる現象とインパルス特性を関連付け、インパルス発生メカニズムについて系統立てて調べた。第5章では、インパルス発生実験において、力の時間履歴を測定するための速度干渉計を開発し、その校正実験を行った。第6章は結論である。

第2章

水中においてレーザーパルス金属材料に照射する場合、金属表面で極く短時間(数ナノ秒)ではあるが、数GPaオーダーの高圧領域が発生し、結果として材料中に圧縮の残留応力層が形成される。これは、レーザーピーニングの基本原理であり、材料の疲労強度の向上および応力腐食割れの防止に有効であることから、航空機、自動車、原子力プラント(原子炉圧力容器壁)等ですでに応用されている。本技術は、通常、水などの液体媒質中で行われる。その理由は、液体媒質は気体媒質に比べて音響インピーダンスが高く、レーザーアブレーションによって生じるプラズマの膨張を妨げる閉じ込め効果が高いため、レーザーのエネルギーを効果的に固体材料へのインパルスとして変換することができるからである。本技術はとても単純だが、まだ明らかにされていない複雑な流体力学現象を含んでおり、科学的、工学的な観点からも大変興味深い研究課題である。

本章では、水中においてレーザーパルスと金属板の相互作用によって生成するレーザー駆動インパルスにより、金属板のレーザー照射点近傍で発生する波動、流動現象に着目し、これらの現象が金属板の板厚と照射されたレーザーエネルギーにどのように依存するかを調べた。

レーザーパルスには、QスイッチNd:YAGレーザーの第二高調波(波長; 532 nm、パルス幅(FWHM); 7 ns)を使用し、水中に設置した金属板(SUS304)の表面に集光径 1.1 ± 0.1 mmで照射した。試験板の板厚は0.05 mm~10 mmとし、レーザーエネルギーは49~470 mJとした。

以下に得られた結論をまとめる。

- ・ 水中に誘起された3種類の圧力波について、レーザー照射により駆動されるブラスト波の挙動は板厚に影響されないが、透過波、漏洩波の挙動は板厚によって異なることがわかり、その詳細が明らかになった。これらの波の挙動は、水中および試験板を伝播する波の速度の関係によって説明できた。また、透過波からは縦波の伝播速度および板厚の情報が、漏洩波からは表面の情報が得られるため、レーザー照射によって水中に発生する波の挙動を把握することにより、板厚計測や表面き裂の検出など、構造物の診断技術への応用が可能となる。
- ・ 気泡の挙動(成長・収縮の周期、位相および形状)、および気泡の崩壊により駆動される音響波の挙動は、板厚に強く依存することがわかった。特に、板厚0.1mm以下の薄板では、表側気泡が初期の成長・収縮過程で変形、分離し、さらに、裏側にも気泡が発生することがわかった。

第3章

遠隔装置からのレーザーパルスエネルギーを利用したインパルス生成は航空宇宙推進において様々な利点を持つ。それは、遠隔操作ができるというだけでなく、輸送機の搭載重量を減らすことができ、それにとりなうコストも削減できる。さらに、比入力エネルギーは、レーザー装置の出力によるが、作用している流体固有のエネルギーに制限されない。レーザーパルスを利用したインパルス生成については、衝撃振り子実験、飛行体の射出、繰り返しパルスレーザーによる垂直打ち上げ等様々な条件で実験的に研究されてきた。また、本技術はスペースデブリの軌道変換にも有効とされ、様々な研究がなされている。レーザー駆動インパルスは非線形特性を持つので、レーザーエネルギーはインパルス特性を明らかにするのに重要なパラメーターである。例えば、重さ1gの静止物体を100 m/sの速度まで加速するのに相当する、0.1 Nsオーダーのインパルスを得るためには、100 J以上のエネルギーを出力するレーザーが必要となる。このような条件下でのレーザーインパルス発生に関する研究はこれまでにほとんど報告されていない。

本章では、大気圧下で、300 Jクラスの大出力レーザーパルスを高分子材料製飛行体に照射することにより、その干渉によって生成するレーザー駆動インパルスの特性を、アブレーション材料の影響および流体力学的閉じ込め効果の観点から実験的に調べた。

レーザー発振器には、TEA (Transversely-Exited Atmospheric) 炭酸ガスパルスレーザー (波長; 10.6 μm 、最大エネルギー; 380 J) を使用し、飛行体に照射して、水平射出速度を測定することにより、インパルスを求めた。レーザーエネルギーは 285 ± 8 Jであり、飛行体上でのレーザー照射面積は 6.4 cm^2 なので、対応するレーザーフルエンスは $48 \pm 1 \text{ J/cm}^2$ となった。飛行体はカップ型形状で、直径; 42 mm、厚さ; 0.5 mmの板の周上に、厚さ; 0.5 mm、長さ; 4.5 mmのリムを有した。アブレーション材料には、4種類の高分子材料; ポリアミド、ポリエチレン、ポリアセタール、セロハンを使用した。また、推進インパルスの発生にレーザープラズマ駆動ブラスト波の閉じ込め構造がどのように影響するかを調べるために、①閉じ込めなし、②管による閉じ込め、③NaCl製窓による閉じ込めの3種類の構造を試した。

以下に得られた結論をまとめる。

- ・ アブレーション材料をポリアセタールとした場合に最も大きなインパルスが得られた。
- ・ インパルス性能は閉じ込め構造に強く依存することを確認した。ポリアセタール製飛行体における閉じ込めのない場合と比較して、管による閉じ込め構造およびNaCl製窓による閉じ込め構造では、それぞれ2.4倍および5.8倍のインパルスを得ることができた。
- ・ 1.43 gのポリアセタール製飛行体において、NaCl製窓による閉じ込め構造で最高162 m/sの射出速度を達成した。対応するインパルスと、推進性能を表す運動量結合係数は、それぞれ0.22 Nsおよび720 $\mu\text{Ns/J}$ となった。

第4章

レーザーアブレーションにより駆動されるインパルスに関して、第3章では、構造的な閉じ込め状態を作り、大気圧中でレーザー駆動ブラスト波背後の高圧領域を閉じ込めることにより、高インパルスを発生させることができた。一方、構造的な閉じ込め状態は使用せず、空気を閉じ込め媒質とみなし、その力学的インピーダンスを利用してブラスト波背後の高圧領域を閉じ込め、雰囲気圧力を徐々に減圧し、閉じ込め効果が薄れてきたときに、インパルス生成にどのような変化が現れるかを調べる研究は、まだ明らかにされていない複雑な現象を含んでおり、大変興味深い研究である。また、レーザーフルエンスも同時に変化させ、インパルス発生メカニズムやその特性がどのように変化するかを知ることは、本技術を、宇宙推進やスペースデブリの軌道変換など、宇宙空間での利用に応用するために、詳細に研究する価値のあるものである。

本章では、TEA 炭酸ガスレーザーを使用し、第3章において高いインパルス性能を示したポリアセタール樹脂をアブレーション材料として、雰囲気圧力を大気圧から2 Paまで徐々に減圧した場合に、インパルス性能に及ぼす影響を調べた。また、レーザーフルエンスの影響についても同時に調べ、高い推進性能を得るための最適フルエンスの存在、および異なるフルエンスでの雰囲気圧力依存性を調べた。フルエンスの範囲は $3.6 \pm 0.2 \text{ J/cm}^2$ から $44.5 \pm 1.1 \text{ J/cm}^2$ とした。

レーザーフルエンス; 17.6 J/cm^2 の場合の運動量結合係数; C_m およびアブレーション質量; Δm の雰囲気圧力; P との関係を図に示し、以下に得られた結論をまとめる。

- ・ フルエンス; 20 J/cm^2 以下では、低圧において推進性能が向上することがわかった。

- ・ 推進性能およびアブレーションによる質量減少量に関して、減圧下と大気圧下では異なる挙動を示し、遷移領域(図中太点線)が存在することを確認した。また、その遷移領域により区切られたそれぞれの領域では、雰囲気圧力によってインパルス生成の要因となる現象が異なることが定性的、定量的に明らかになった。図中、遷移領域に区切られた領域を領域1、領域2、領域3と呼ぶとすると、それぞれの領域におけるインパルスの挙動は次の現象に支配されることがわかった。

領域1; アブレーションジェット噴き出しによる運動量

領域2; プラズマシールドリングによるレーザーエネルギーの遮へい

領域3; 雰囲気空気による流体力学的閉じ込め効果

- ・ レーザーフルエンスの増加により、常に推進性能を表す運動量結合係数が大きくなるわけではなく、最適値が存在することを確認した。また、単位エネルギーあたりのアブレーション質量は、エネルギーの増加にともない減少し、アブレーションジェットの排出効率も低エネルギーの方が良いことがわかった。

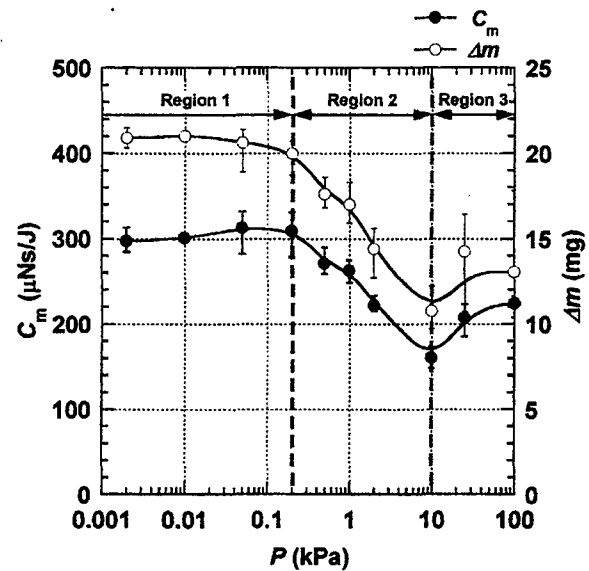


Fig. Momentum coupling coefficient; C_m and ablated mass; Δm vs. ambient air pressure; P for laser fluence; $\phi = 17.6 \text{ J/cm}^2$.

第5章

レーザーアブレーションにより駆動されるインパルスの特性は、レーザーパルスの特性、アブレーション材料、雰囲気ガスおよび雰囲気圧力などの複合的な影響によって決まるものである。3章、4章における飛行体打ち出し実験では、それらの相互作用が複雑さを助長し、材料、レーザーフルエンスおよび雰囲気圧力によるインパルス性能やアブレーション質量の差を単純に述べることはできない。これらの相互作用をよりよく理解するためには、レーザーパルス持続時間内の飛行体打ち出し速度の時間分解計測が必要となる。

本章では、レーザーフルエンスおよび雰囲気圧力のインパルス性能への影響を、レーザーパルス持続時間内の飛行体打ち出し速度の時間履歴から求め、複雑な相互作用を解明することを最終目的として、VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector) システムを開発し、エアガン実験によるシステムの校正を行った。

第6章

本論文では、力学的インピーダンスが異なる材質の界面におけるパルスレーザーによるインパルス発生メカニズムを主に実験的に調べ、非定常流動の立場から現象の普遍性を理解するとともに、水中で発生する気泡の挙動の金属板厚依存性、200 Pa以下の減圧雰囲気下におけるポリアセタールでのレーザーインパルスの増大など、工学的・物理的に重要な現象を解明した。本研究成果は、スペースデブリの軌道変換や宇宙機の姿勢制御、航空機・ロケット部品の材料改質など、有望な応用展開を期待できる。

論文審査結果の要旨

レーザーのエネルギーを利用して遠隔的に力あるいはインパルス（力積）を発生させる技術は、電磁波と物質のマイクロな干渉およびマクロな熱流動現象を伴い、流動ダイナミクスとして興味ある事象であるのみならず、推進、材料改質など様々な航空宇宙工学への応用につながる重要な研究課題である。これまでの研究は個別応用に注意が偏り、非定常流動としての普遍性を捉える視点が十分とはいえず、開発が進まない遠因にもなっている。

本研究は、パルスレーザーと固体、液体、気体の干渉によって生じるインパルスの生成に関して、物質の力学的インピーダンスの違いに着目し、非定常圧力波の挙動について種々の考察を加え、アブレーション（融除）や発泡などの相変化を伴う個々の非定常流動現象を詳しく解明している。本論文は、全編6章よりなる。

第1章は、緒論である。

第2章では、水中におかれたステンレス板の表面にレーザーパルスを照射し、アブレーションによるナノ秒、GPa オーダーの圧力パルスが周囲に誘起する応力波および音響について、実験および数値シミュレーション結果に基づいて論じている。水中に誘起される圧力波をブラスト波、透過波、漏洩波に整理してパラメータ依存性を論じるとともに、レーザーパルス照射後気泡の崩壊によって更なる音響が発生することを見出している。前者のみならず、後者の音響も板厚に大きく依存することは、本研究で得られた重要な知見である。

第3章では、大気圧下において300Jのレーザーパルスを高分子材料に照射し、アブレーション気体と雰囲気空気の力学的インピーダンスを利用した閉じ込め効果によってインパルスが増加することを実証している。実験で得られたレーザーインパルス $0.22\text{N}\cdot\text{s}$ 、運動量結合係数 $720\mu\text{N}\cdot\text{s}/\text{J}$ は、公表されているデータとしては世界最高レベルのものである。

第4章では、第3章と同じレーザー、高分子材料を用い、雰囲気圧力を変化させてインパルス特性を調べている。ポリアセタールを用いた場合、大気圧付近で空気の力学的インピーダンスを利用するよりも、200Pa以下の減圧下の方がより大きなインパルスが得られることを見出し、そのメカニズムをレーザー光の吸収機構と関連付けて論じている。さらに、レーザーエネルギー密度 $10\sim 20\text{J}/\text{cm}^2$ で運動量結合係数が最大になることを確認している。これは、宇宙空間において最適なエネルギー密度のレーザーパルスを、必要に応じた回数だけ照射することにより、任意の大きさのインパルスを遠隔的かつ効率的に発生させることが原理的に可能であることを示唆する重要な結果である。

第5章では、ナノ～マイクロ秒オーダーのインパルス発生実験において力の時間履歴を測定するための速度干渉計を開発し、その校正実験を行っている。

第6章は、結論である。

以上要するに、本論文は、力学的インピーダンスが異なる材質の界面におけるパルスレーザーによるインパルス発生メカニズムを主に実験的に調べ、非定常流動の立場から現象を理解するとともに、水中で発生する気泡の挙動の金属板厚依存性、減圧雰囲気下におけるポリアセタールのレーザーインパルスの増大など、工学的・物理的にも着目すべき現象を注意深く捉えている。その研究成果は、宇宙塵の軌道変換除去、航空機・ロケット部品の壁面改質などへの応用が期待され、航空宇宙工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。