低真空中でのレーザ生成プラズマおよびレーザトリガ放電の基礎特性

学生員 大橋 敦 (名古屋大学)
 学生員 山納 康 (名古屋大学)
 正 員 加藤 克巳 (名古屋大学)
 正 員 大久保 仁 (名古屋大学)

Characteristics of Laser-induced Plasma and Laser-triggered Discharge in Low Vacuum

Atsushi Ohashi, Student Member, Yasushi Yamano, Student Member, Katsumi Kato, Member,
 Hitoshi Okubo, Member (Nagoya University)

In space vacuum, severe conditions like electron beam irradiation may influence charging and discharging phenomena on surface of space-apparatus. In addition, outgassing from the surface of space apparatus raises local gas pressure around the surface of the apparatus. The outgassing would seriously affect on discharging processes on dielectric surface and thus the quantitative evaluation of outgassing characteristics might be very important. Having with the application to the measurement of local gas pressure in mind, in this paper, we describe the fundamental characteristics of TEA-CO₂ laser-induced plasma and laser-triggered discharge. Especially under low vacuum, we measured laser-induced plasma light intensity, rise/fall time of its waveform in free space or on surface of solid materials like PMMA. We also measured laser-triggered discharge characteristics such as discharge probability, discharge current as a function of vacuum pressure. As a result, we could clarify the pressure dependence of these characteristics. These results may be useful data for the quantitative evaluation of local pressure on solid material in vacuum.

キーワード：低真空，CO₂レーザ，レーザ生成プラズマ，レーザトリガ放電

1. まえがき

宇宙ステーションやスペースシャトルの飛翔する低地球軌道は高真空領域にあるが⁽¹⁻³⁾，宇宙機の表面においては荷電粒子の衝突などによって気体放出が起こり，局所的に圧力の高い部分が存在する。気体放出は，機器表面に付着した水分の放出，表面材料中に存在する水素の放出，蒸気圧の高い絶縁物や潤滑液体の蒸発が主な原因である⁽⁴⁾。この気体放出で宇宙機表面は気体の層を形成し，絶縁物表面上において放電を起こす要因となる。また，宇宙空間に存在するプラズマやイオンの付着およびX線などの衝突によって宇宙機表面に帯電が生成されることが報告されている⁽⁵⁻⁶⁾。このような帯電・放電現象によって絶縁物が劣化したり，宇宙機内部の電子機器が故障することが報告されている⁽⁷⁾。しかしながら，気体放出と帯電・放電の相互作用はいまだ研究段階であり，詳細は未解明である。将来宇宙開発を進めるにあたり，宇宙空間における高電圧適用を考慮した宇宙機の信頼性の向上のためには，真空中におけるこれらの相互関係を明らかにし，その抑制技術を確認する必要がある。また，現在，宇宙機における帯電・放電に関するガス放出や局所ガス⁽⁸⁾あるいは低真空中の部分放電現象⁽⁹⁾が注目を集めている。

筆者らは，レーザトリガ技術⁽¹⁰⁻¹¹⁾を応用し，宇宙環境における気体放出と帯電・放電現象の関係を明らかにし，その防止技術および絶縁技術の確立を目的として研究を進めている⁽¹²⁻¹³⁾。局所圧力の定量的測定を最終的な最終目標とする中，本研究ではその前段階として，真空中におけるレーザ生成プラズマおよびそのプラズマによって誘起された放電(以後レーザトリガ放電と呼ぶ)の圧力特性の測定を行っている。今回，レーザ生成プラズマ発光の基礎的特性の取得のため低真空領域においてこれらの圧力特性の測定を行った。この結果，圧力の低下に伴いレーザ生成プラズマ領域は拡大し，また，圧力の低下および印加電圧の上昇によってレーザトリガ放電電流が増加するなど，レーザ生成プラズマおよびレーザトリガ放電の諸特性を明らかにしたので報告する。

2. 実験装置

実験装置を Fig.1 に示す。ステンレス(SUS-304)製の真空容器は直径250mm，高さ200mmの円筒形をしており，内容積は約10ℓである。レーザ光を導入するためZnSe製の窓(直径70mm，厚さ6mm)を設置し，この容器を10³Pa台まで排気した。

図1 実験装置

Fig.1 Experimental setup.

本研究ではプラズマを生成するにあたって、高効率・高出力の代表的赤外域分子レーザーであるTEA (Transversely Excited Atmospheric pressure)-CO₂パルスレーザーを使用した。Table 1に本研究で使用したレーザーの仕様を示す。このレーザーは波長10.6 μ mであり、一回の照射における最大エネルギーは4.2Jである。

このような特性を有するレーザー光を焦点距離 $f=200$ mmのZnSeレンズを用いて集光し、レーザーの集光点が真空容器中心付近に来るようにZnSeレンズおよび真空容器の位置を設定した。このようにして自由空間および集光点上に設置された各種固体ターゲット上にレーザー生成プラズマを発生させた。

さらに、レーザートリガ放電の実験を行うにあたり、Fig.2に示す2種類の電極系を用いた。Fig.2 (a)の平行平板電極

表1 TEA-CO₂レーザー特性

Table 1 Specifications of TEA-CO₂ laser.

Wavelength	10.6 μ m
Maximum energy	4.2J
Pulse width	100nsec
Power stability	$\pm 2\%$
Beam size	30mm $\times$ 30mm

図2 実験に用いた電極系

Fig.2 Electrode configurations for measuring plasma production and laser-triggered discharge.

のギャップ長を20mmとし、ギャップ間に挟んだPMMA上にレーザーを集光した。なお、ステンレス (SUS-304)製の平板電極は直径90mmで端部は $r=10$ mmの電界緩和がなされている。Fig.2 (b)の球平板電極はギャップ長を10mm、上部球電極の半径を10mmとし、平板電極はFig.2 (a)と同一とした。また本電極系では、レーザー光を球電極先端に集光した。この両電極系の上部電極には10M Ω の保護抵抗を介し、正極性直流電圧(0~20kV)を印加し、下部電極は電流導入端子およびCTを介して接地した。このようにしてレーザーを集光することでレーザー生成プラズマによるトリガ放電を誘起した。

プラズマ発光観測は、フォトダイオード(波長範囲:190~1000nm, 応答速度0.1 μ s)および静止カメラで行った。フォトダイオードではプラズマ発光強度を測定しており、レーザーからのノイズ対策のために、光ファイバの先端を真空容器中に導入し、プラズマ光を長さ8mの光ファイバでフォトダイオードまで導いた。なお、発光観測系の応答速度は0.2 μ sである。また、レーザートリガ放電電流の測定はCT(応答速度:0.5ns)を用いて行った。静止カメラによるプラズマ発光測定はレーザー照射よりプラズマ生成終了まで開放することで撮影した。

本研究においては0.8kPa~0.1MPaの圧力範囲で、実験を行った。なお、実験環境は気温20 $^{\circ}$ C, 湿度30%とした。

3. プラズマ生成のレーザーエネルギー依存性

レーザーエネルギーおよび圧力を変化させてプラズマ生成確率を求めた。なお、生成確率は100回レーザーを照射したときのプラズマ生成回数で定義した。はじめに、自由空間

図3 自由空間におけるレーザー生成プラズマ発光像およびプラズマ発光波形

Fig.3 Laser-induced plasma light image and light intensity waveform in free space in low vacuum.

においてレーザ生成プラズマの測定を行った。このときのレーザ生成プラズマの発光像および発光波形を Fig. 3 に示す。本論文においては可視光を発する領域をレーザ生成プラズマと定義している。同一条件において、レーザ生成プラズマの生成位置にはばらつきが見られるものの、大きさ、発光色等はほぼ同様であることを確認した。Fig. 4 にレーザ照射エネルギーとプラズマ生成確率の関係を示す。なお、レーザエネルギーは1.6~3.9J、圧力は27kPa~0.1MPaとした。同図から、レーザ照射エネルギーが増加するにつれて、また圧力が上昇するにつれて、レーザ生成プラズマの生成確率は高くなっていることがわかる。これは、レーザエネルギーの増加によって注入エネルギーが増加し、また圧力の上昇によってプラズマの核となる気中分子が増加するため、これらの相互作用でプラズマ生成確率が高くなったものと考えられる。

図4 自由空間におけるプラズマ生成確率

Fig.4 Probability of laser-induced plasma production.

4. レーザ生成プラズマ発光の圧力依存性

次にレーザ光をPMMA, SUS-304, Al_2O_3 の各種固体試料に集光し、圧力を0.8kPa~0.1MPaに変化させてレーザ生成プラズマを発生させた。なお、レーザエネルギーは3.2Jと一定にした。雰囲気の一様化を図るため、レーザの照射間隔は3分としてプラズマ生成確率および発光強度等の測定を行った。今回、ターゲット材料としては代表的絶縁物であるPMMAや構造材料のステンレス(SUS-304)を用いた。以下に測定結果を示す。

Fig. 5 にPMMAおよびSUS-304に3.2J一定としたレーザを集光したときのプラズマ発光像の圧力変化を示す。同図より、圧力が低下するに従い発光領域が拡大し、発光強度は低下することがわかる。これは、圧力の低下により平均自由行程が増加することでプラズマが拡散しやすくなる結果、プラズマ領域が拡大し、プラズマ密度が低下したと考えられる。また、発光色は圧力が低下するに従い、淡青色から赤紫色(PMMA)もしくは青白色(SUS-304, Al_2O_3)に変化することを確認した。これは圧力の違いによってプラズマ密度が異なること、あるいは、プラズマ化する分子が異なっていることが影響しているものと考えられる。すなわち、高い圧力領域においては空気の成分である N_2 , O_2 等が主と

してプラズマ化しているのに対し、低い圧力領域においてはプラズマ化する成分がPMMAやSUS-304などの固体ターゲットに依存していると考えられる。また、各試料とも圧力1~2kPa以下の領域になると急激に発光が微弱になることがわかり、プラズマ化する成分が急に变化する閾値の存在が示唆された。

Fig. 6 に上述のプラズマ発光における発光強度波形を示す。同図より圧力の低下によりプラズマ発光強度は低下していることがわかる。これは、先述したとおりプラズマ密度が低下したため発光が希薄になったと考えられる。また、発光の立ち上がり約1μsをみると、どの圧力においても同様の傾きを示していることがわかる。以上のことから、発光開始から1μsまでのプラズマ発光はターゲット材料のプラズマ化に、1μs以降における発光は気中分子のプラズマ化に起因していると考えられる。そのため圧力の低下により、発光強度に差が生じる。

Fig. 7 に各圧力における各試料上にレーザを集光したときのレーザ生成プラズマ発光強度のピーク値の圧力依存性を示す。この図より発光のピークは圧力の低下にしたがって徐々に減少していくことがわかる。しかしながら、今回実験を行った低真空領域においては、ターゲット材料はプラズマ発光のピークにほとんど影響を与えないことがわかる。これは、Fig. 6 で発光の後期に気中分子のプラズマ化によるピークが生じることから妥当であると考えられる。さらに低い圧力領域でのプラズマ発光を考えると、発光のピークはターゲット材料に依存するようになることがFig. 6 の発光波形よりうかがえる。なお、プラズマ発光において立ち上がりおよび立ち下がり時間が圧力の低下に伴い減少していくことを確認している。

Fig. 5 から、圧力の低下によってプラズマ発光領域が拡大し、その後、縮小することがわかる。そこで、プラズマ発光の定量化を図るため発光領域の大きさを各圧力でまとめた。Fig. 8 にレーザをPMMAに集光したときのプラズマ発光の横方向の広がりを各圧力に対して示す。同図より、レーザ生成プラズマの大きさは、ばらつきはあるものの圧力が低くなるにつれ大きくなる傾向があることがわかる。このような変化をするのは、圧力の低下により平均自由行程が増加するため、全体的にプラズマ領域の大きさが拡大するためと考えられる。また、この大きさの違いはターゲット溶融によるジェットの出射が大きく関与しているものと考えられる。

5. レーザトリガ放電の圧力依存性

Fig. 2 の電極系において、電極間に電圧を印加した状態でターゲットにレーザを集光し、発生したレーザプラズマによるレーザトリガ放電を誘起した。このときのプラズマ発光およびトリガ放電電流を測定した。なお、レーザエネルギーは3.2Jで一定とした。

図5 各種試料にレーザー照射したときのプラズマ発光像

Fig.5 Laser-induced plasma images on various materials at different pressures in vacuum.

図6 各種試料にレーザー照射したときのプラズマ発光波形

Fig.6 Waveforms of light intensity of plasma on various materials.

図7 各種試料にレーザー照射したときのプラズマ発光強度の圧力依存性

Fig.7 Light intensity of laser-induced plasma.

図8 各圧力下のレーザー生成プラズマの大きさ

Fig.8 Horizontal width H of laser-induced plasma.

(a)レーザトリガ放電確率

はじめに Fig. 2 (a) の電極系を用いて各圧力における印加電圧に対するトリガ放電確率を測定した。これより、放電開始電圧の閾値が存在し、圧力が低くなるに従いその値が低下することを確認した。トリガ放電電圧を定量化するため、100mA以上の放電電流が流れた時点の印加電圧を放電開始電圧とし、放電確率が50%となったときの印加電圧を50%トリガ放電開始電圧と定義した。レーザトリガ放電開始電圧の圧力依存性を Fig. 9 に示す。同図より、ギャップ長を一定($d=20\text{mm}$)としたときのパッシェン曲線⁽¹⁴⁾と比較して50%トリガ放電電圧の傾きが1/5程度になっていることがわかる。このように放電開始電圧が低下した原因はプラズマ生成によって導電性の領域が形成されたため、実質的にギャップ間の電界強度が高まったためと考えられる。

図9 レーザトリガ放電の50%放電開始電圧

Fig.9 50% discharge inception voltage triggered by laser-induced plasma as a function of pressure.

(b)レーザトリガ放電電流波形の検討

圧力100kPaおよび53kPaにおけるレーザトリガ放電時のプラズマ発光像および発光強度波形、トリガ放電電流波形を Fig.10 に示す。同図に示す発光像においてプラズマは球電極を包むように拡散し、それぞれ発光形態は若干異なるが電極間を短絡する微弱な放電路が確認された。トリガ放電は、レーザ照射後 $0.7\mu\text{s} \sim 0.8\mu\text{s}$ のプラズマ発光の立ち上がり初期段階で発生し、はじめプラズマのドリフトによると考えられる電流が約 $0.5\mu\text{s}$ 流れた後、絶縁破壊と考えられる急峻な電流が約 $0.1\mu\text{s}$ の間流れた。プラズマ生成開始直後に放電が発生したことからターゲット材料の熔解により生じたプラズマがトリガ放電を誘起したのであると考えている。トリガ放電は電流制限によって減少するが、プラズマ発光はその後増加し、ピークに達する。この現象は大気圧だけでなく、真空中においても同様の特性を示した。また、この時の放電開始電圧は、最も小さいもので静的な絶縁破壊電圧の約70%まで低減していることがわかった。

Fig.11 に1kPa~53kPaの圧力における印加電圧に対するトリガ放電電流高値の変化を示す。同図より圧力が低下するにつれてある印加電圧に対するトリガ放電電流が増加する特性を示した。このような現象が見られる原因としては、圧力が低下したことで導電性のレーザ生成プラズマ領域が拡大することから、放電が起こりやすくなったことがあげられる。

図10 レーザトリガ放電時のプラズマ発光像および発光・放電電流波形

Fig.10 Image of plasma and waveforms of light intensity and discharge current.

図11 各圧力における印加電圧に対するトリガ放電電流

Fig.11 Laser-triggered discharge as a function of applied voltage at different pressure.

6. まとめ

本研究では、低真空中において CO_2 パルスレーザを用いてレーザ生成プラズマおよびレーザトリガ放電の基礎特性の取得を行い、以下のことを明らかにした。

- (1) プラズマ生成確率は、レーザエネルギーの増加および圧力の上昇に伴って高くなる。
- (2) レーザ生成プラズマは圧力の低下により発光領域が拡大し、発光強度が弱くなる特性を示す。
- (3) プラズマ発光は立ち上がり約 $1\mu\text{s}$ ~ $10\mu\text{s}$ 、波尾約 $10\mu\text{s}$ の波形を示し、ターゲット材料および気中分子のプラズマ発光が重ね合ったものと考えている。
- (4) プラズマ発光はターゲット材料および気中分子のプラズマ化の双方に起因している。
- (5) レーザプラズマによって静的な破壊電圧より低い印加電圧でトリガ放電が誘起され、圧力が高いほど破壊電圧の低下率が大きくなる。
- (6) レーザトリガ放電電流は、圧力の低下および印加電圧の上昇に従って増加する。

以上のことは、宇宙機器表面における気体放出に伴う帯電・放電現象の解明に貢献するものと思われる。

(平成10年 5月25日受付, 平成10年11月 5日再受付)

文献

- (1) M. F. Rose: "Power Technology for Space Systems", 6th ISH, 45.01, 1989.
- (2) H. M. Banford, M. J. Given and D. J. Tedford: "A Space Simulation of High Voltage Breakdown in Space Power Insulation", IEEE Int. Symp. on Elect. Insul., pp. 24-27, 1992.
- (3) L. S. Belyaev, A. S. Koroteev and Y. N. Rudenko: "Power from Space: Expected Role and Influence on Energy System Development", Space Power, Vol.12, No.3&4, pp.133-142, 1993.
- (4) A. C. Logue and L. B. Gordon: "Vacuum Chamber Simulation of High Voltage Breakdown in Space", Proc. of 16th ISDEIV, pp.444-447, 1994.
- (5) 藤井, 西本: 「人工衛星の帯電放電現象」, 静電気学会誌, Vol.13, No.3, pp.172-181, 1989.
- (6) Tumiran, M. Maeyama, H. Imada, S. Kobayashi and Y. Saito: "Flashover from Surface Charge Distribution on Alumina Insulators in Vacuum", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol.4, No.4, pp.400-406, 1991.
- (7) H. C. Miller: "Electrical Discharge in Vacuum 1980-1990", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol.26, No.5, pp.949-1043, 1991.
- (8) A. R. Frederickson: "Upset Related to Spacecraft Charging", IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol.43, No.2, pp.426-441, 1991.
- (9) W. G. Dunbar, D. L. Schweickart, J. C. Horwath and L. C. Walko: "High Frequency Breakdown Characteristics of Various Electrode Geometries in Air", Proc. of the 23rd International Power Modulator Symposium, 1998.
- (10) 新藤, 三木, 和田, 相原: 「レーザ伝搬に伴うプラ

ズマ生成のシミュレーション」, 電気学会論文誌A, Vol.115, No.7, pp.589-594, 1995.

- (11) U. Ghera, R. L. Boxman, H. Kleinman and S. Ruschin: "Laser-induced electron source in a vacuum diode", J. Applied. Phys. 66, pp.4425-4430, 1989.
- (12) H. Okubo, S. Yuasa, K. Ota, N. Hayakawa and M. Hikita: "Discharge Characteristics under Non-uniform Electric Field in He, Ar and Air at Low Pressures", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol.4, No.4, pp.450-455, 1991.
- (13) H. Okubo, K. Ota, S. Yuasa, N. Hayakawa and M. Hikita: "Laser-triggered Discharge Characteristics in Low Vacuum with Residual Gas and Air", Proc. of 17th ISDEIV, pp.683-687, 1996.
- (14) 宅間, 柳父: 「高電圧大電流工学」, 電気学会, pp.49-50, 1995.

大橋 敦

(学生員) 1974年10月13日生まれ。97年3月名古屋大学工学部電気学科卒業。同年4月同大学大学院工学研究科博士課程前期課程進学, 現在に至る。真空中における絶縁物帯電およびレーザトリガ放電に関する研究に従事。

山納 康

(学生員) 1970年6月16日生まれ。96年3月名古屋工業大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了。同年4月(株)三菱重工入社。98年名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程入学, 現在に至る。真空中における帯電・放電に関する研究に従事。

加藤 克巳

(正員) 1969年5月20日生まれ。97年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了。同年4月同大学助手, 現在に至る。工学博士。主として、高電圧機器を対象とした電界解析技術および電界最適化に関する研究に従事。96年電気学会進歩賞受賞。

大久保 仁

(正員) 1948年10月29日生まれ。73年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了。同年4月(株)東芝入社。高電圧技術開発に従事。76年7月~78年2月ドイツ・アーヘン工科大学高電圧研究所およびミュンヘン工科大学高電圧研究所客員研究員。89年7月名古屋大学工学部電気学科助教授, 91年4月同教授, 現在に至る。工学博士。IEEE, VDE会員。