

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760153

研究課題名（和文） 液中プラズマの内部熱特性と気泡挙動との連携性に関する研究

研究課題名（英文） Study on relationship between internal thermal characteristics and bubble behavior of in-liquid plasma

研究代表者

向笠 忍（MUKASA SHINOBU）

愛媛大学・大学院理工学研究科・講師

研究者番号：20284391

研究成果の概要（和文）：液中プラズマは自身の熱によって周囲の液体を蒸発させて気泡を発生させる。10～101kPaにおける27.12MHzの高周波水中プラズマについて、1台の高速度カメラとダイクロイックミラー等の光学系を組み合わせることにより、2つのプラズマ発光分布ならびにプラズマ発光分布と気泡挙動との同時撮影を行った。2つのプラズマ発光分布から励起温度分布が算出された。圧力の増加にともない気泡の成長・電極離脱周期は規則的となり、離脱直前に電極と気泡間に伸びる長い気泡内で温度は最大になることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：In-liquid plasma evaporates a surrounding liquid by their heat and generates bubbles. As to the 27.12MHz high frequency underwater plasma in 10-101kPa, simultaneous observation of two plasma emission distributions or a plasma emission distribution and bubble behavior was performed by assembling a high-speed camera and optical systems, such as a dichroic mirror. Excitation temperature distribution was calculated from two distributions of plasma emission. The periodicity of the cycle of the growth and the departure of bubble became more regular with the increase in a pressure. Just before the departure of the bubble the temperature in the bubble which was stretched between the electrode and the rising bubble was found to reach the maximum.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,400,000	410,000	1,820,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：熱物性、液中プラズマ

1. 研究開始当初の背景

現在、プラズマを利用した技術はエネルギー、物質創生、環境、宇宙分野など多岐にわたる。これまで、プラズマは気相中で発生すると認識されていた。しかし、気相中では高エネルギー粒子の拡散が大きいいため熱効率

の低下を招き、余分なエネルギーは熱エネルギーに変化するので、空間全体が高温になり、装置や蒸着基板などに耐熱性を要する。

私の所属する研究グループでは液体中でプラズマを発生させることに成功した。液中プラズマとは、液体中に高周波やマイクロ波

を照射することで発生するプラズマである。プラズマの高いエネルギーは周囲の液体を蒸発し、あたかも気泡の中でプラズマが発生しているように観察される。プラズマによる高温度場は気泡内部に限定され、外部の液温はほとんど変わらない。

これまで行ってきた高速度カメラを用いた気泡の挙動観察により、気泡は水温や印加電力、圧力などによって様々な様相を見せる。プラズマ内部の様子を知るために分光測定を行ってきた。水素のバルマー系列である $H\alpha$ (656nm) と $H\beta$ (486nm) の発光強度比から電子温度が、 $H\beta$ の発光分布のシュタルク広がりから電子密度が測定された。電子温度は約 4000 K、電子密度は 10^{20} m^{-3} 程度となる。しかし、これら測定結果の再現性は悪い。このことは、測定される位置がわずかにずれることによって温度が大きく変化するためである。直径 5~15 mm 程度の気泡内で、温度は数千 K から 100°C 程度まで変化している。

さらに、気泡は時々刻々と複雑に変化しておりプラズマの状態もこれに追従している。これまでの液中プラズマの研究において、気泡の観察と分光測定は個々別々に行われており、統合した形で行われてはいない。

2. 研究の目的

本研究では液体中に高周波やマイクロ波を印加して発生する液中プラズマの現象を明らかにすることを目的として、気泡の運動と連動した形でのプラズマ内温度と生成種の発光強度分布について調査する。具体的には、高速度カメラとバンドパスフィルターを併用して気泡の挙動とプラズマ発光による $H\alpha$ と $H\beta$ の空間分布の観測を行う。

3. 研究の方法

実験装置の概要を図 1 に示す。反応容器は、横方向に貫通する穴に直径 30mm のステンレス管が接続されたアルミニウムブロックである。ブロックの前後も貫通しており透明石英製の観察窓が設けられている。ブロックの底面からも穴が開けられており、電極が挿入されている。電極は直径 3mm のタングステン棒であり、外径 6mm の透明石英ガラス管の中を通されている。電極先端はプラズマが発生し易いように半球状に加工されている。

27.12MHz、130~150W の高周波は、電源から整合回路を介して電極へ供給される。水温は制御されていないが、プラズマによって発生する熱と装置から外気への放熱とのバランスによってほぼ 40°C に維持されている。装置全体はアスピレータで減圧されており、10kPa から大気圧の間としている。

光学装置の組合せによってプラズマの発光から $H\alpha$ と $H\beta$ の発光のみを観察できるようにしている。光学系の概要を図 2 に示す。プ

ラズマの像はダイクロイックミラーによって特定波長から長波長域を反射、短波長域を透過させることにより分割される。反射した長波長域の像は鏡によって透過した像と隣り合わせになるように方向をそろえられる。長波長域の像には $H\alpha$ 、短波長域の像には $H\beta$ のみを透過させるバンドパスフィルターを用い、1 台の高速度カメラによって並べられた 2 つの像は同時に撮影される。

さらに、気泡の像と $H\alpha$ の発光像の同時撮影を行っている。この場合の光学系も図 2 に示すものとほぼ同じであるが、撮影系の反対側から $H\beta$ に近い波長(最大発光波長:480nm)の発光 LED で気泡を照射している。

高速度カメラのフレームレートを 2000fps、撮影時間を 250ms、シャッターを開放として、1 回の撮影で 500 枚の画像が取得される。画像は 1280x720 ピクセルで、12bit 階調の白黒画像である。

4. 研究成果

励起温度分布の時間平均は、以前行なった分光器による測定結果と比較することができる。10kPa における $H\alpha$ と $H\beta$ の発光強度分布の時間平均を図 3(a) と図 3(b) にそれぞれ示す。図中の背景の画像は同じ位置での電極の画像であり、発光がみられなかった領域である。発光がみられなかった領域のノイズ量を平均し、その値を発光領域における発光量から減じている。光学回路等を介しているので、

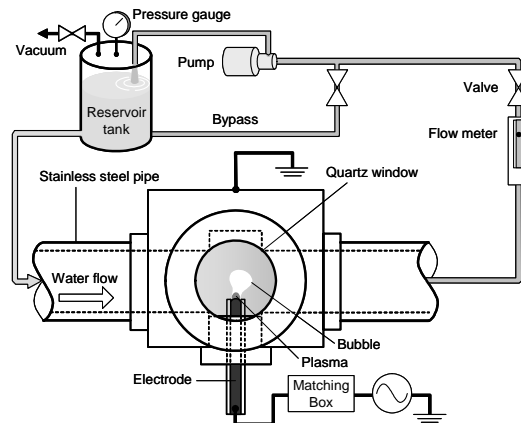


図 1 実験装置概略図

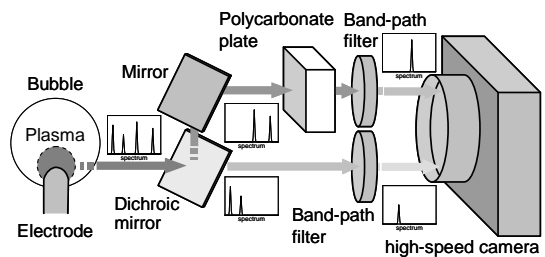
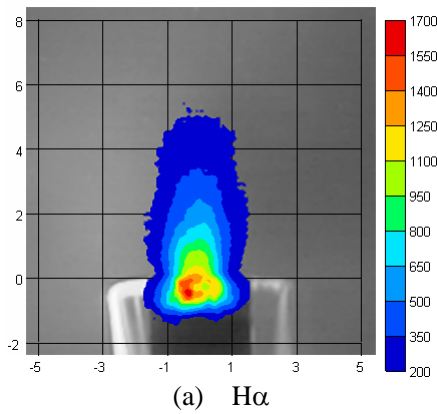
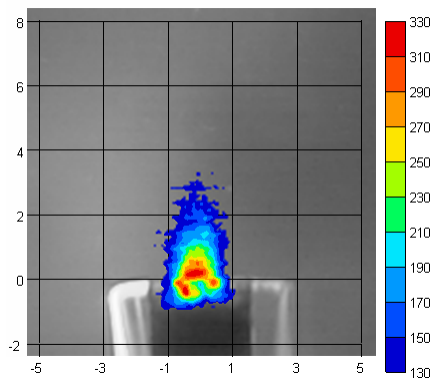


図 2 プラズマ発光分割撮影の光学系概略図



(a) $H\alpha$



(b) $H\beta$

図3 $H\alpha$ と $H\beta$ の発光強度分布図

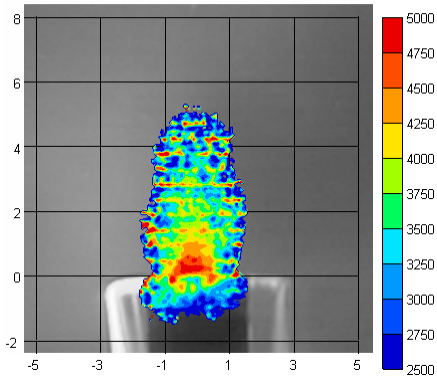


図4 励起温度分布

高速度カメラで取得される発光量は正しい発光量とはいえないため、直接励起温度を求めることはできない。そのため、以前分光器を用いて測定した発光強度と比較して、最大発光強度で規格化を行った。そうして得られた励起温度分布を図4に示す。水平方向に伸びる等間隔の高温領域は高速度カメラのノイズである。ノイズを無視した場合、電極表面の中心部分で温度が高くなっている。この結果は以前分光器を用いた測定結果とほぼ同じであるが、今回の高温領域の方が小さい。これは、前回の測定の空間分解能が低かったためだと考えられる。さらに、前回の測定では50kPa以上の圧力下において励起温度の最

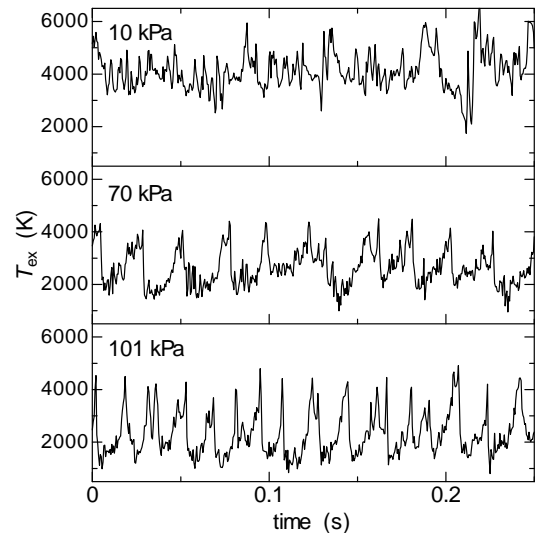


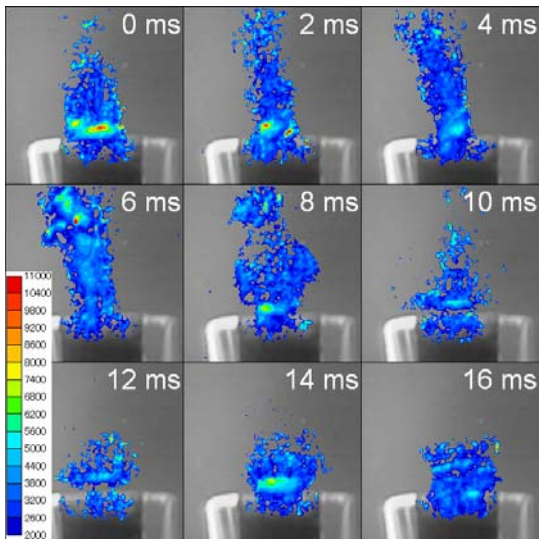
図5 プラズマ領域での励起温度の時間変化

大位置が分布の左下端となったが、今回の撮影ではそのような分布の傾向はみられず、すべての圧力下において電極表面の中心付近で最大温度となった。理由は不明である。

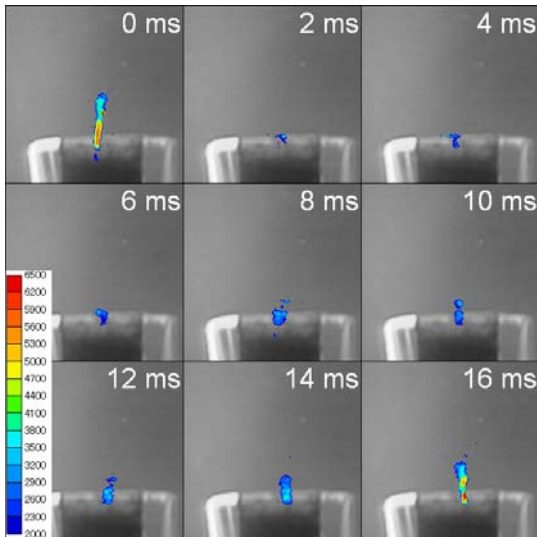
励起温度の、電極表面中心から高さ1mm、幅2mmの領域における空間平均の時間変化を図5に示す。この領域内では強い発光がみられる。励起温度は10kPaにおいて3000~6000Kの間で変動し、70kPaと101kPaにおいて1500~4000Kの間で変動した。圧力の増加にともない、温度変動の周期はより規則的となった。1周期において、大部分は最小温度からの漸増であり、急激に増加し最大となった後、急激に最小温度まで減少する。

励起温度分布の時間変化を図6に示す。圧力が低いときには図6(a)に示すように温度分布が電極表面全体を覆って不規則に変動していたが、圧力が高いときには図6(b)に示すように細長い高温領域の分布が電極面から垂直に現れた。出現した細長い分布は横方向に徐々に移動していたと考えられる。

大気圧下における $H\alpha$ の発光強度と気泡体積の時間変化を図7に示す。気泡体積の周期的な変化は電極面での気泡の発生・成長・離脱、再び新たな気泡発生の繰り返しを示している。気泡発生後の体積は、はじめは直線的に増加するが、やがてほとんど増加しなくなる。気泡が小さいときには気泡周りの水温はすでに飽和温度に近くまで熱せられているため、気泡からの放熱は小さくプラズマの熱がそのまま気泡の体積増加へと変換される。気泡が十分に成長すると、バルクの水温は飽和温度よりも低いため気泡周りの水温は低くなり、さらに気液界面がプラズマから離れることにより、プラズマからの熱と気液界面からの放熱の間でバランスが取られるために気泡体積は増加しなくなると考えられる。 $H\alpha$ の発光は気泡体積が最大から最小へと変



(a) 10kPa



(b) 101kPa

図 6 励起温度分布の時間変化

わるときに最も強められる。先の実験結果から $H\alpha$ の発光が最大となる時励起温度が最も高くなることから、気泡体積と励起温度の関係について議論することができる。

気泡挙動と $H\alpha$ の発光分布の重ね合わせを図 8 に示す。強い発光が得られる領域は、10kPa においてほぼ電極表面全体に広がっているのに対して、101kPa において電極表面の局所的なところのみとなった。発光として捉えられているものの一部は気泡表面で反射したものであると考えられる。101kPa において気泡が新たに生じた気泡を引き連れながら上昇するとき、この新たに生じた気泡は電極表面から引き伸ばされ、内部の発光が最も強くなる。上昇する気泡が引き伸ばされた気泡から離れた直後に、引き伸ばされた気泡は球形へと変形し、内部の発光は弱まる。その後、新たな気泡は再び成長と上昇を始める。

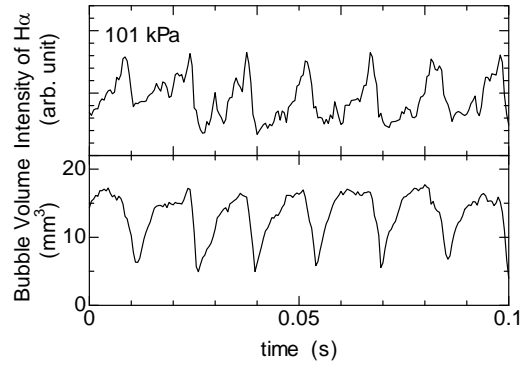
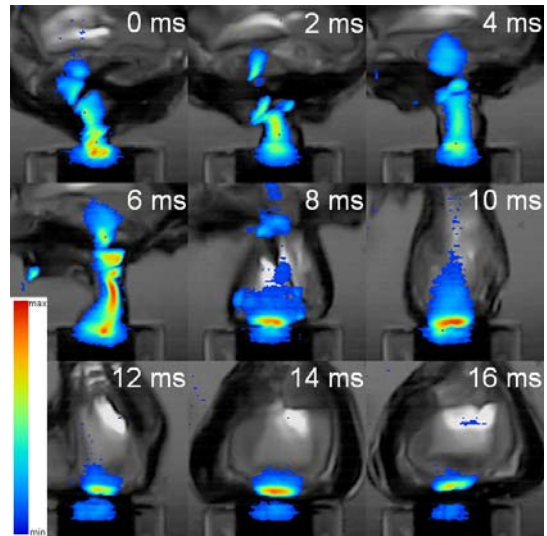
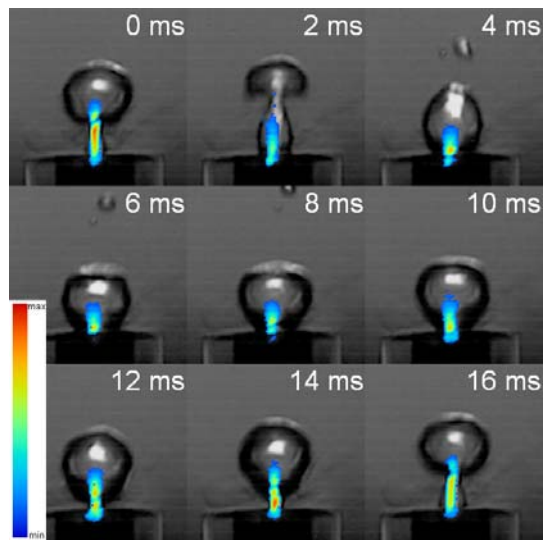


図 7 $H\alpha$ の発光強度と気泡体積の時間変化



(a) 10kPa



(a) 101kPa

図 8 気泡と $H\alpha$ の発光分布の合成図

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

〔学会発表〕（計 3 件）

- ① Shinobu Mukasa, Shinfuku Nomura and Hiromichi Toyota, Measurement of Excitation Temperature of Radio-Frequency Plasma in Water Using a High-Speed Camera, The 20th International Symposium on Plasma Chemistry, July 25 2011, Loews Philadelphia Hotel (Philadelphia, USA)
- ② 向笠 忍, 野村 信福, 豊田 洋通, 林 拓広, 高周波水中プラズマの励起温度の高時間・空間分解能測定, 第 48 回日本伝熱シンポジウム, 2011 年 6 月 2 日, 岡山コンベンションセンター (岡山)
- ③ 向笠 忍, 林 拓広, 野村 信福, 豊田 洋通, 高速度カメラを用いた液中プラズマの電子温度分布測定と気泡挙動の観察, 日本機械学会中国四国支部第 49 期総会・講演会, 2011 年 3 月 5 日, 岡山理科大学 (岡山)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

向笠 忍 (MUKASA SHINOBU)

愛媛大学・理工学研究科・講師

研究者番号：20284391