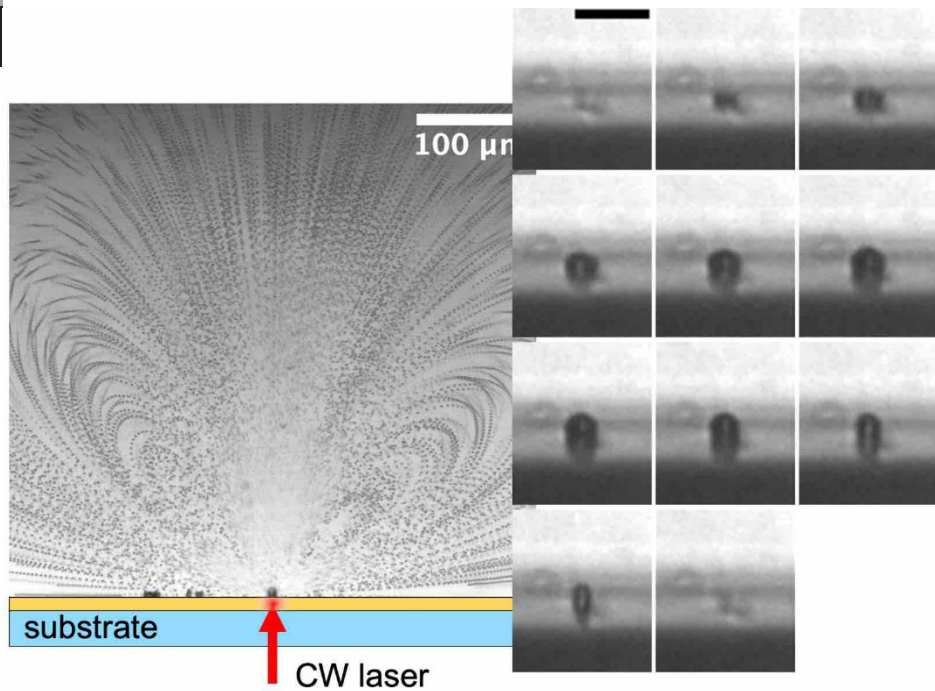


# 高速度ビデオカメラを用いた 水蒸気バブルの振動解析 —サブMHzオーダーの振動を捉える—

名村 今日子<sup>1</sup>、西川 祐貴<sup>2</sup>、矢野 文彬<sup>2</sup>



Life Science

## ■ 要旨

脱気水を局所加熱すると、主に水蒸気でできたマイクロバブルが生成され、バブル周辺に強い流れが発生します。この水蒸気バブルが約0.5 MHzで振動している様子を撮影するため、高速度ビデオカメラHyper Vision™ HPV™-X2を用いました。これにより、バブルの振動と流れ発生との関係を調べるための有用な知見を得ることができました。

## 1. はじめに

少量の流体を扱うデバイスはマイクロ流体デバイスと呼ばれ、様々な分野で広く活用されています。扱う流体の量を減らすことで、例えば生化学分析などにおいては少ない検体量で迅速に分析を行うことが可能となります。しかし、マイクロメートルスケールでは流体の粘性の効果が顕著になるため、狭い流路の中で流体を強く攪拌することは未だに容易ではありません。

近年の報告で、光熱加熱とマイクロバブルを用いたマイクロ流体の操作事例が報告されています<sup>1)~3)</sup>。金ナノ粒子薄膜やFeSi<sub>2</sub>薄膜などにレーザーを集光すると、光を吸収して熱に変換します。そのため、薄膜上のレーザースポットを局所熱源として用いることができます。この熱を利用して水中にマイクロバブルを生成し、さらにこのバブルに温度勾配を与えます。すると、バブルの表面に表面張力勾配

が生じ、周囲にマランゴニ対流が生成されます。水を脱気していない場合には、生成されるバブルは主に空気できており、バブル近傍のみに対流が生じます。一方、水を脱気すると、主に水蒸気でできたバブルが生成されます<sup>4)~6)</sup>。そして、水蒸気バブルの周りには、空気バブルの周りに生成される対流よりも桁違いに速い対流が誘起されることがわかりました。その流速は、バブルのごく近傍で1 m/sオーダーに達します。この現象は新しいマイクロ流体の駆動・攪拌技術として有用であると期待されます。しかし、その対流の発生メカニズムは未だ完全には解明されていません。

水蒸気バブル周辺の対流の発生要因の一つはマランゴニ力です。これは温度勾配に起因する表面張力勾配によって生じる剪断力です。しかし、マランゴニ力だけで対流が発生すると仮定すると、バブルの直径方向に60 K以上の温度差が必要です。水蒸気バブルの直径は10 μm程度であり、そこに大きな温度差を保つことは困難です。そこで、もう一つの対流発生要因として考えられるのがバブルの振動です。バブルからの散乱光を捉えることで、バブルがサブMHzオーダーで振動していることがわかっています<sup>6)</sup>。バブルの振動による対流の強さを評価するには、バブルの大きさ、形の時間変化を知る必要があります。しかし、水蒸気バブルの振動周波数は一般的なカメラの撮影速度に比べて速く、その動きを捉えることは困難でした。本稿では、最高10 Mfpsでの撮影が可能なHPV-X2を用いて、この水蒸気バブルの振動の観察に成功した事例をご報告します。

1 京都大学 大学院工学研究科 マイクロエンジニアリング専攻  
2 (株) 島津製作所 分析計測事業部 Solutions COE

## 2. 水蒸気バブルの生成と光の散乱を使ったバブル振動の検出<sup>4),6)</sup>

まずは脱気水を局所加熱することで水蒸気バブルを生成し、その周辺に発生する対流を確認しました<sup>4)</sup>。光熱変換薄膜として、金ナノ粒子薄膜をガラス基板上に成膜しました。この薄膜を真空超音波脱気した水に浸し、薄膜上に波長785 nmのCWレーザーを集光しました。

図1は光熱変換薄膜上のレーザースポットの周りで観察されるバブルと対流の典型的な顕微鏡像です。薄膜表面の水平方向から観察しています。レーザースポット上、つまり局所加熱点に見える小さな黒い球体が生成した水蒸気バブルで、流体中の点是对流を可視化するために加えたポリスチレン球です。球の軌跡を可視化するため、1秒間に撮影した100枚の画像を重ねて表示しています。バブルが生成されると、脱気水は基板表面に垂直な方向に加速され、強い回転流が発生しました。

次に、生成したバブルをもう少し拡大して観察しました。一般的な高速度カメラを用いて、フレームレートを100 kfps、露光時間を7 μs程度に設定してバブルの様子を観察した結果を図2に示します。すると、レーザー照射を開始してバブルが生成された後、50 μsほどでバブルの見かけ上の大きさは直径10 μm程度になりました<sup>6)</sup>。その後、1分以上レーザー照射を続けても、バブルの見かけ上の大きさは変わりませんでした。このように見かけ上バブルは安定状態になりますが、このバブルに光学顕微鏡の焦点をいくら合わせようとしても、図2に示す通り輪郭に焦点が合いませんでした。これは、バブルがカメラの露光時間よりも短い周期で振動しているためと考えました。

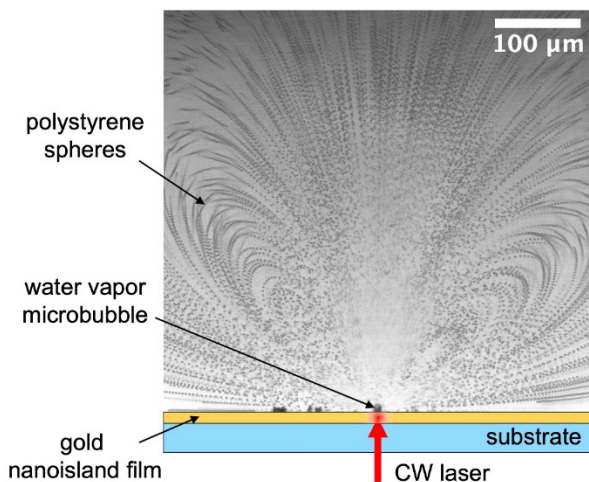


図1 光熱変換を利用した水蒸気バブルの生成と周辺対流の様子

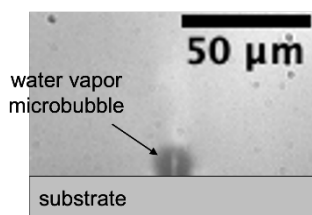


図2 露光時間7 μsで撮影した水蒸気バブルの顕微鏡像

そこでまず、バブルが散乱する光を検出し、バブルの振動を捉えることにしました<sup>6)</sup>。図3(a)に測定の概略図を示します。光熱変換薄膜 (FeSi<sub>2</sub>薄膜、50 nm) を成膜した基板と脱気水をガラスセルに封入しました。そして薄膜上にCWレーザーを集光して水蒸気バブルを生成しました。このとき、バブルを生成するために照射したレーザー光のうち10%程度は、薄膜を透過してバブルに照射されます。この光はバブルによって散乱されますが、その方向はバブルの大きさや形に依存して変化します。そこで、基板表面の水平方向に対物レンズを介して光電子増倍管 (浜松ホトニクス社製 R928) を設置しました。この光電子増倍管により、対物レンズに入射する散乱光強度の時間的な変化を測定しました。

検出された光強度の時間変化を図3(b)に示します。横軸が時間で、縦軸が光強度を表しています。光強度は明らかに周期的に変化しており、その周波数は0.26 MHzでした。この周波数でバブルが振動しているとすると、7 μsのカメラの露光時間の間に2回程度バブルが振動していることになります。つまり、バブルの振動が一般的な高速度カメラで捉えられなかったのは妥当であると言えます。さらに、レーザー強度やスポットサイズを変えて実験した結果、水蒸気バブルが0.1–0.7 MHz程度で振動していることがわかりました。また、バブルの振動周波数はバブルの見かけ上の直径に依存し、直径が大きくなるほどバブルの振動周波数が低くなることがわかりました。

このようにバブルからの散乱光を捉えることで、バブルが振動していることや、見かけ上の大きさと振動周波数の関係を明らかにすることができました。しかし、バブルがどのように振動しているかまでは解明できていません。周期的にバブルの大きさが変わっているのではなく、バブルの形や位置、もしくは全てが同時に変わっている可能性も考えられます。このようなサブMHzオーダーのバブルの振動をカメラで捉えるには、振動周波数の10倍程度のフレームレートが必要になります。そこで注目したのが最大10 Mfpsでの撮影が可能な高速度ビデオカメラHPV-X2でした。

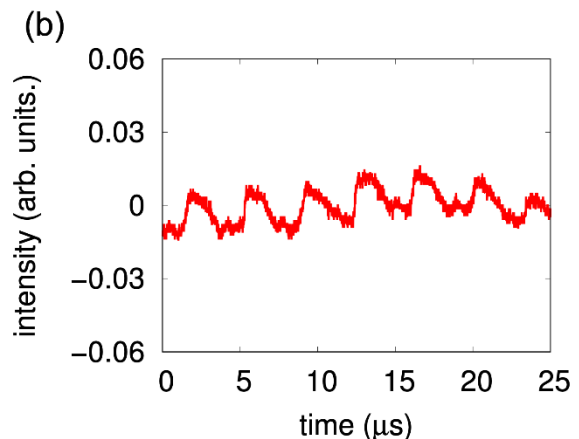
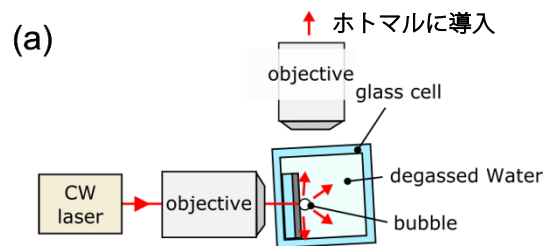


図3 (a) 水蒸気バブルからの散乱光を捉えるための光学系の模式図 (b) 得られた散乱光強度の時間変化

### 3. HPV-X2による水蒸気バブルの高速撮影

脱気水中で生成される水蒸気バブルの振動を捉えるために、HPV-X2を用いてバブルを観察する実験を行いました。実験装置の模式図を図4に示します。まず、光熱変換薄膜（FeSi<sub>2</sub>薄膜、50 nm）を成膜したガラス基板と脱気水をガラスセルに封入しました。これを顕微鏡にセットし、ガラス基板の裏側から光熱変換薄膜にCWレーザー（波長830 nm、Thorlabs社製 FPL830S）を集光しました。薄膜上でのレーザーの集光具合は薄膜表面に垂直な方向からcamera 1（Baumer社製 HXC20）を使って確認しました。生成したバブルの様子は、基板表面の水平方向からcamera 2（HPV-X2）を用いて観察しました。このとき、フレームレートは5 Mfpsとしました。試料を照明光で加熱することを避けるため、照明光には波長640 nm、パルス幅20 nsのパルスレーザー（Cavitar社製、CAVILUX Smart system）を用いました。HPV-X2とパルスレーザーを繋いで撮影と発光のタイミングを同期させることで、簡単に明るい画像を得ることができます。また、カメラのライブモードを活用することで、一般的なカメラを利用するときと同様に、試料の様子をカメラで確認しながら観察位置の調整を行うことができます。

バブルの高速撮影は、バブル生成用のレーザーを照射開始してから数秒後に行いました。そのため、観察されたバブルの様子は準定常状態であると推測されます。

図5にHPV-X2を用いて撮影された水蒸気バブルの様子を示します。基板表面の水平方向から撮影しており、バブルの像の下には、基板の表面に反射したバブルの鏡像が見えています。5 Mfpsで撮影することでバブルの振動を捉えることに成功しました。高速ビデオカメラを用いて得られたバブルの振動の周期は約2 μsであり、光の散乱を使って測定したバブルの振動周波数とよく一致しました。そのため、十分なサンプリングレートでバブルの振動1周期の動きを捉えられていると考えられます。さらに本観察によって、バブルが成長するときには基板に対して横に広がった形をしており（time = 0.0–1.0 μs）、収縮時は基板表面に垂直な方向に伸びた形となることがわかりました（time = 1.2–1.8 μs）。また、バブルの大きさは振動周期の中で大きく変化しており、カメラで見えなくなるほど小さくなる瞬間があることがわかりました（time = 2.0 μs）。これらの結果は、バブル周辺対流形成への振動寄与の解明に役立ちます。

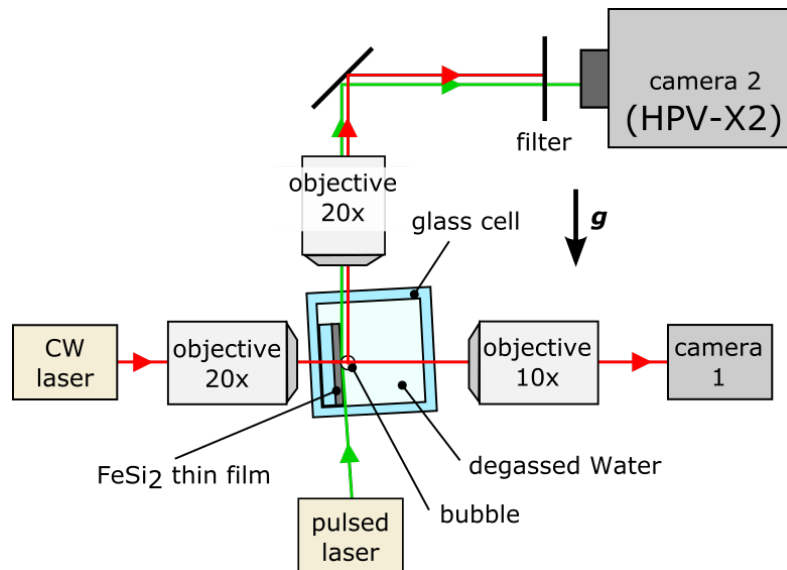


図4 水蒸気バブルの振動を撮影するための光学系の模式図

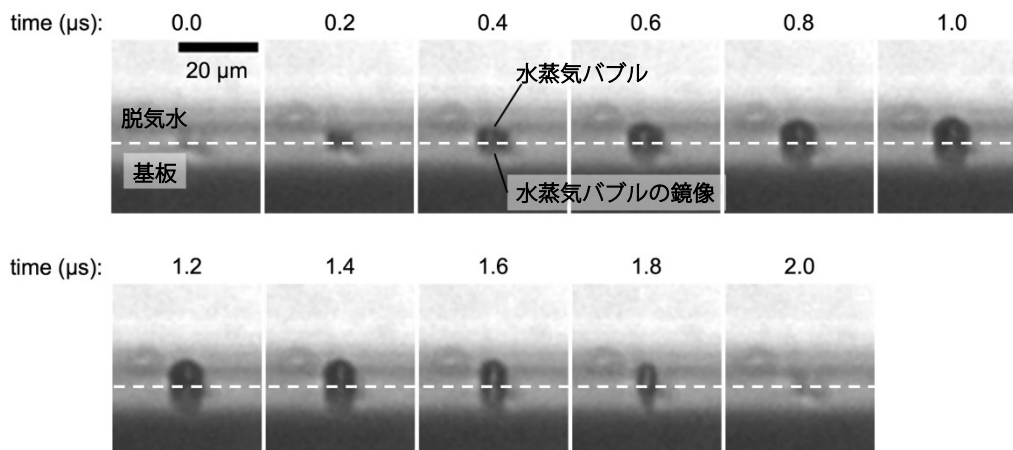


図5 HPV-X2で撮影された水蒸気バブルの振動

## 4. おわりに

本稿では、高速度ビデオカメラHPV-X2による水蒸気バブルの振動観察についてご紹介しました。水蒸気バブルの1周期の振動のなかで、大きさや形がどのように変化しているのかが明らかになりました。この結果から、水蒸気バブル周辺対流の発生原理の解明に近づくことができました。また HPV-X2を今後さらに活用することで、複数のバブルを同時に生成したときに、それぞれのバブルがどのように動くのか、バブルの動きに相互作用はあるのかなど、これまで評価することが難しかった現象の解明が可能になると考えられます。さらにバブルの振動に限らず、マイクロ・ナノメートルスケールの流動現象の解明に広く利用されることで、新しい分野が確立されると期待しています。

撮影協力： 京都大学 大学院工学研究科 マイクロエンジニアリング  
専攻

### <参考文献>

- 1) Namura, K., Nakajima, K., Kimura, K., Suzuki, M.: Applied Physics Letters, 106 (4) (2015) 043101.
- 2) Namura, K., Nakajima, K., Kimura, K., Suzuki, M.: Applied Physics Letters, 108 (7) (2016) 071603.
- 3) Namura, K., Nakajima, K., Suzuki, M.: Nanotechnology, 29 (6) (2018) 065201.
- 4) Namura, K., Nakajima, K., Suzuki, M.: Scientific Reports, 7 (2017) 45776.
- 5) Namura, K., Imafuku, S., Kumar, S., Nakajima, K., Sakakura, M., Suzuki, M.: Scientific Reports, 9 (1) (2019) 4770.
- 6) Namura, K., Okai, S., Kumar, S., Nakajima, K., Suzuki, M.: Advanced Materials Interfaces, 7 (18) (2020) 2000483.

Hyper Vision、HPVは、株式会社 島津製作所またはその関係会社の日本およびその他の国における商標です。

**株式会社 島津製作所** 分析計測事業部  
<https://www.an.shimadzu.co.jp/>

初版発行：2023年6月

本資料は発行時の情報に基づいて作成されており、予告なく改訂することがあります。  
本文中に記載されている会社名、製品名、サービスマークおよびロゴは、各社の商標および登録商標です。  
本文中では「TM」、「®」を明記していない場合があります。

本資料の掲載情報に関する著作権は当社または原作者に帰属しており、権利者の事前の書面による許可なく、本資料を複製、転用、改ざん、販売等することはできません。  
掲載情報については十分検討を行っていますが、当社はその正確性や完全性を保証するものではありません。また、本資料の使用により生じたいかなる損害に対しても当社は一切責任を負いません。