



解説

水中放電による圧力波の生成と利用

Generation and Application of Pressure Wave by Discharge in Water

佐藤 岳彦

SATO Takehiko

東北大学流体科学研究所

(原稿受付：2021年2月28日)

水中放電を用いて生成する衝撃波は、医療や環境などの分野に応用され、現在も精力的に研究が進められている。著者らは、水中放電現象のより深い理解をめざし、水中負ストリーマ進展中に発生する微弱な衝撃波の可視化法を新たに開発し、負ストリーマの詳細な進展過程を解明した。また、水中スパーク放電で発生する衝撃波の反射により生成した正圧と負圧の圧力波を利用し、キャビテーション気泡崩壊時に指向性マイクロジェットを生成した。本解説ではこれらの研究成果について紹介する。

Keywords:

shockwave, negative streamer, cavitation bubble, directed microjet, compression wave, expansion wave, discharge in water

1. はじめに

水中放電が生成する、化学活性種、衝撃波、気泡、紫外線、高電界などを利用した水処理や殺菌、環境浄化、材料加工、医療応用が進んでいる[1]。水処理では、キャビテーション微小気泡群放電を用いた難分解性物質の処理[2]、環境浄化では、衝撃波を利用したシアノバクテリアの気泡破壊による沈殿[3]、材料加工では、衝撃波を利用したマグネシウム合金の成形[4]、医療応用では、体外衝撃波結石破碎術 (ESWL) の改良に向けた衝撃波収束効率の向上[5]、ウォータージェットメスの開発のための細管内放電流動現象の解明[6]、低温アブレーションや手術用メス PEAK (Pulsed Electron Avalanche Knife) [7]がある。気泡生成では、マイクロ・ナノメートルサイズの気泡生成や帯電作用[8]や食品の殺菌に向けて空気プラズマガスを微細気泡にする方法の研究[9]などがある。

以上のように、水中放電による圧力波は、基礎から応用まで幅広く研究が進められている。本解説では、水中の絶縁破壊の前駆現象である負ストリーマの詳細な進展過程の解析と水中放電で生成した衝撃波を利用した指向性液体マイクロジェットの生成について紹介する。

2. 水中負ストリーマの進展過程

2.1 水中正ストリーマと負ストリーマの違い

著者らは、水中正ストリーマの進展過程について、詳細に明らかにしてきた[10-15]。図1に水中ストリーマのシャドウグラフ写真を示す。正1次ストリーマは、図1(a)に示すように半球状に多数のフィラメント状ガスチャネルが2 km/s程度で進展する。2次ストリーマは、図1(b)に

示すようにフィラメント形状のガスチャネルが樹枝状に20 km/s以上で進展する。いずれも、背景から入射したレーザー光の影を撮影するシャドウグラフ法[16]でストリーマチャネルの進展の観察が可能である。一方、負ストリーマは、図1(c)に示すように進展の様子が珊瑚状に広がり全体が影として撮影されてしまうため内部構造が可視化できない。また、正ストリーマより発光領域や発光強度が小さく、生成するストリーマチャネルが電極付近の微小領域に限られるなど、自発光による進展過程の観察も極めて難しく、詳細な進展過程は不明であった。本解説では、負ストリーマ進展中に断続的に発生する微弱な圧力波を可視化することで進展過程を解析した[17]。

2.2 圧力波可視化法の開発

図2に新たに開発した負ストリーマ中の圧力波を可視化する装置を示す。超純水を満たしたキュベット内に白金の針電極と接地電極を設置し、針電極に-18 kV印加した。電圧は、666 pFのコンデンサーに蓄えた電荷をMOS-FETスイッチを介して与えた。撮影は、高速度カメラ(ナック

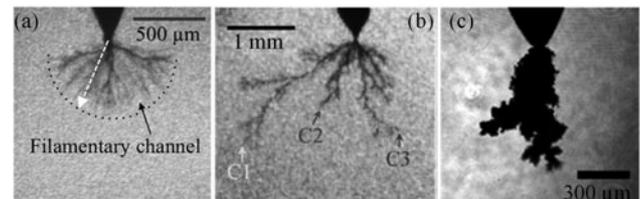


図1 水中ストリーマのシャドウグラフ写真。(a)正1次ストリーマ[11]、(b)正2次ストリーマ[13]、(c)負ストリーマ[17]。

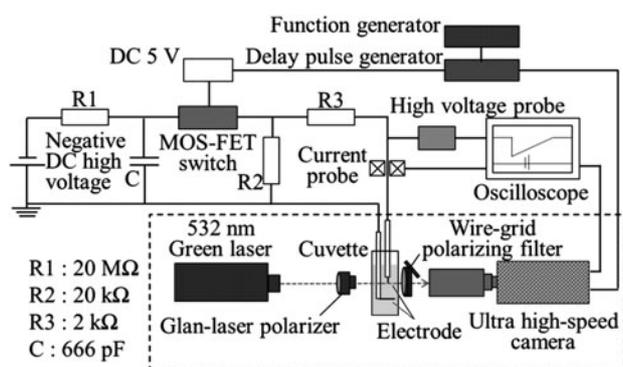


図2 負ストリーマ進展過程可視化装置[17].

イメージテクノロジー, Ultra Neo) に顕微鏡レンズ(キーンエンス, VH-Z50L)を装着し, 532 nmのレーザー光を背景光にして行った. 撮影速度は40 Mfpsとし, 露光時間は5 nsとした. 同期は, デレイジェネレータを利用し, 放電電圧と放電電流を高速オシロスコープにより同時計測した.

圧力波の可視化には, 図2に示すようにレーザー発信器とキュベットの間にグラフレザープリズム(シグマ光機, GLPB2-10-26 SN-3/7)を, カメラとキュベットの間にワイヤグリッド偏光フィルター(シグマ光機, WGP-30C)をそれぞれ挿入した. ここで, 背景光として用いたグリーンレーザーの出力は直線偏光であり, 挿入した2つの偏光板の透過軸はレーザー光の偏光軸と一致するように設定した. また, それぞれの偏光板をわずかに回転させることで, 微小な圧力変動を捉えられるように調整した. これにより, 2つの偏光板を挿入するだけでシャドウグラフ法では観察できなかった微弱な圧力波を負ストリーマの影と同時に可視化することに成功した. なお, 得られた画像から波面が円状に広がること, 波面の速度が約1480 m/sであり水中の音速程度であることから, 観測された波は圧力波であると判断した.

2.3 圧力波解析による負ストリーマ進展過程の解明

図3に, (a)負ストリーマ進展時の圧力波発生時の連続写真と(b)その時の電流・電圧波形を示す. 図3(c)は, (b)の一部を拡大して表示し(a)の撮影タイミングを示している. 使用したカメラの記録できる連続写真フレーム数が最大12フレームであるためストリーマ進展途中からの写真となる. 時間表示は(a)では撮影開始時を $t=0$ nsとし, (b)(c)では電圧印加開始時を $t=0$ nsとしている. 図3(a)の $t=0$ nsにおいて既にストリーマはわずかに進展しており, そのときに発生したと見られる圧力波が下方に伝播する様子が示されている. 図3(c)の電流波形から, 2枚目の写真($t=25$ ns)以降に繰り返しパルス電流が発生し放電していることが示されている. これより, ストリーマは放電発生と共に進展し, 円状の圧力波の広がり方が繰り返し発生している様子が捉えられている. 圧力波が発生する理由としては, 水中におけるストリーマ形成時のジュール熱によるガスチャネルの急速膨張によること, ストリーマガスチャネルの先端の気液界面に放電が衝突する衝撃などが原因と考えられる.

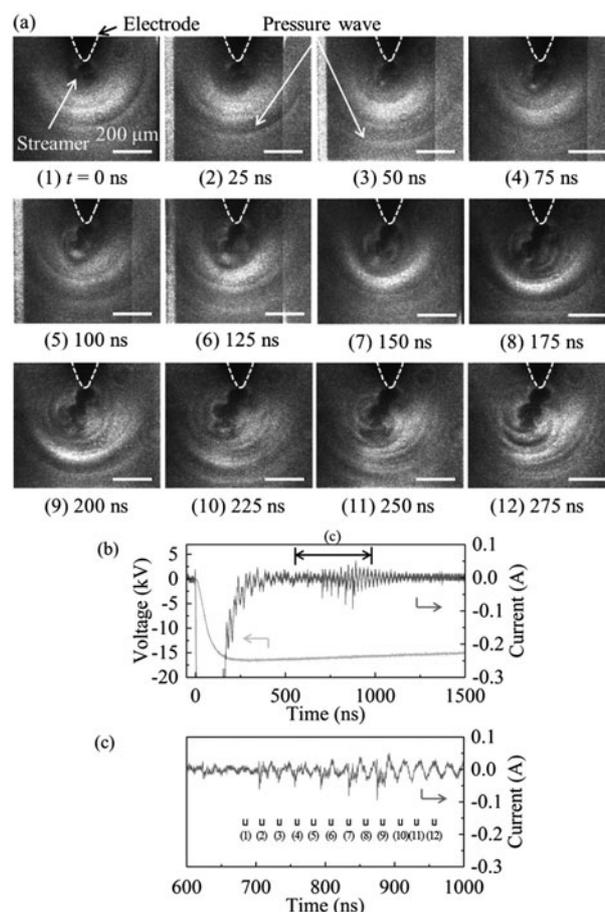


図3 圧力波発生時の可視化と電流電圧波形[17]. (a)負ストリーマ進展時に発生する圧力波の連続写真, (b)印加電圧と放電電流波形, (c)放電電流波形における連続写真の撮影タイミング.

ここで, この円状の圧力波を解析することで, 圧力波の発生位置と発生時間が特定できると考えた. 圧力波が多数撮影されている写真に着目し解析した結果を図4に示す. 図4(a)は9枚目の写真($t=200$ ns)を解析し圧力波の中心を示した結果, (b)は11枚目の写真($t=250$ ns)の圧力波の中心を示した結果, (c)は解析した圧力波中心を図3(a)の連続写真に重ねた結果, (d)は放電電流と圧力波発生時間の関係を示した. さらに, 図5に, 図4(c)の中心位置と発生時間を抽出した負ストリーマの進展過程をまとめた結果を示す.

図4(a)では, 半径 $R_1 \sim R_4$ の円形波面について解析し, それぞれ中心位置 $C_1 \sim C_4$ を特定した. 図4(d)に各圧力波の発生時間 $T_1 \sim T_4$ を示すが, これは水中の音速と半径から伝播時間を計算し求めた. 同様に, 図4(b)では, 半径 $R_5 \sim R_8$ の円形波面について解析し, それぞれ中心位置 $C_5 \sim C_8$ を特定し, 図4(d)に各圧力波の発生時間 $T_5 \sim T_8$ を示した. 図4(c)に示すように, 求めた中心位置は図3(a)の連続写真上において, ストリーマの先端に位置することが明らかになった. また, 図5よりストリーマは, C_4 (R_4)において分岐し, C_5 (R_5)から C_7 (R_7)と C_6 (R_6)から C_8 (R_8)と2方向に進展していることが示された. このときの圧力波面の半径 R_5, R_6 と R_7, R_8 の違いより, 発

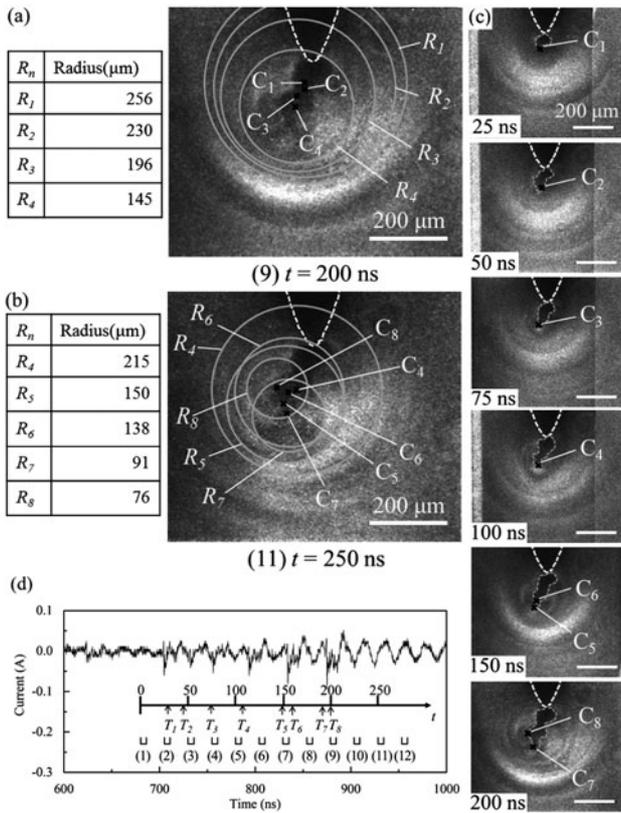


図4 圧力波解析方法[17]. (a)図3 (a)の写真9枚目 ($t = 200$ ns) の圧力波発生位置の解析, (b)図3 (a)の写真11枚目 ($t = 250$ ns) の圧力波発生位置の解析, (c)図3 (a)の連続写真における圧力波発生位置の特定, (d)圧力波発生時間と放電電流.

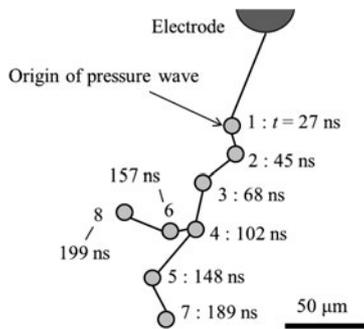


図5 負ストリーマの進展過程の解析結果[17].

生時間が、 R_5 と R_6 で 9 ns, R_7 と R_8 で 10 ns, 異なることから、ストリーマが分岐するときの進展開始時間に差があることが明らかになった。

ここで、ストリーマの分岐過程について考察する。電流パルスの発生に伴い C_4 から C_5 に向けたストリーマ進展が最初に関起り、放電の電荷供給により C_5 のポテンシャルは高くなる。 C_5 に帯電する電荷により形成される C_4 と C_5 の間の内部電界は、外部電界と逆向きで外部電界強度を低減させる。そのため、 C_5 に供給される電荷が減少し、 C_4 に蓄積し C_4 のポテンシャルが高くなる。一方、このポテンシャルに応じた C_6 方向への局所的な電界が新たに形成され、ある一定の電界に達したときに、 C_6 にストリーマが進展する。分岐後は、形成されたストリーマがガスチャンネルを

通じて電荷が C_5 と C_6 に供給される。 C_5 で形成される電界強度が十分に大きくなると C_7 に進展し、その後 C_6 の電界強度も閾値を越え C_8 に進展する。このような過程で分岐進展すると考えられる。

過去のストリーマ研究によれば、分岐の要因として、ストリーマの進展経路にある気泡などの不均質性が、低密度で電離しやすい領域となり分岐を導くこと[18,19]、ストリーマ先端における衝突電離の不安定性と電子拡散の安定性のバランスから、ストリーマ先端の半径が大きくなると不安定になり分岐が起こること[19-21]が報告され、いずれも分岐時の時間差はないものとして扱われている。また、局所電界による分岐形成についての報告も見当たらない。

なお、図4 (d)より、圧力波の発生時間は電流パルスの発生時間に概ね一致することが示された。このことは、ガスチャンネル内で放電が起きストリーマが進展する時に圧力波が発生することを示唆しており、前述の考察を裏付けている。

2.4 水中負ストリーマ進展過程のまとめ

以上の結果より、従来の可視化方法で観察できなかった微弱な圧力波を精密に可視化し解析することに成功した。この可視化された圧力波を利用した解析により、図5に示すように負ストリーマは、20~50 ns 毎に 20~50 μm の進行・停止・分岐を繰り返しながら進展することが明らかになった。また、ストリーマ内部における現象の考察から局所電界による分岐モデルの提言や分岐が時間差で発生することを発見し、負ストリーマの新しい進展モデルの提唱につながった。

3. 指向性液体マイクロジェットの生成

3.1 液体マイクロジェット

「キャビテーション」[22]は、圧力減少に伴う発泡現象であり、液体圧力が飽和蒸気圧より低くなるときに発生する。発生した気泡は成長後収縮し、崩壊時に衝撃波の生成[23]、発光[24]、化学反応[25]、液体マイクロジェット(以降:マイクロジェット)の生成[26]などの特異現象をもたらすことが知られている。ここで、図6に著者が撮影した膨張波により生成したキャビテーション気泡の収縮、崩壊、再膨張、マイクロジェット生成の過程を示す[27]。ここで、膨張波とは負圧の圧力波であり、後述する圧縮波は正圧の圧力波である。マイクロジェットは、収縮時に気泡の一部が凹状に変形し針状となり気泡内部に向かい、反対側の気泡壁を貫いて形成される液体のジェットであり、圧力勾配がある場合、半球形の気泡が固体表面に付着している場合、気泡付近に固体壁がある場合などに発生することが知られている[28]。マイクロジェットは流体機械の壊食の原因となるが、近年では医療への応用が進められ、細胞膜に微小孔を形成して細胞膜の透過性を高め薬剤の輸送効率を向上させるなどの研究が進められている[29]。

3.2 圧力発生方法とマイクロジェット生成過程の概要

図7にスパーク放電を利用した圧力波を発生させる装置

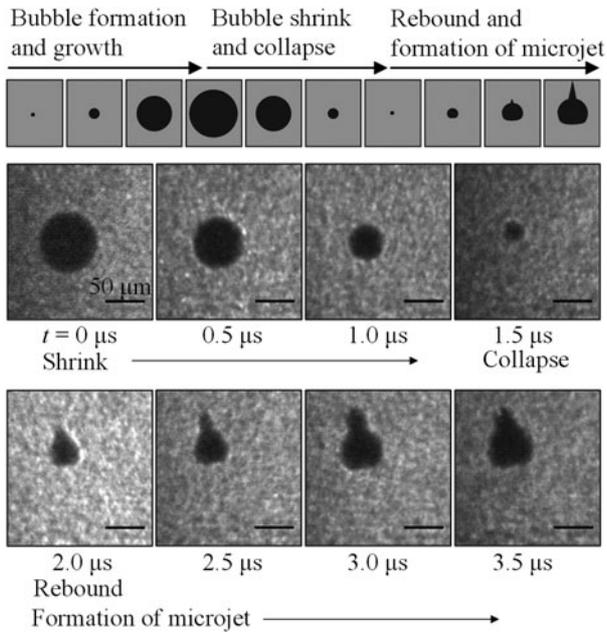


図6 キャビテーション気泡の収縮、崩壊、リバウンド、マイクロジェット生成過程の連続写真[27].

を示す[27]. また、図8にこの装置を利用した圧力波生成過程の概要を示す。純水を満たした容器内に2本の対向する針状電極を設置し、コンデンサーからギャップスイッチを介して電圧を与えスパーク放電を発生させ、水中に衝撃波を発生させる。本解説では、複数の圧縮波と膨張波を利用するため、スパークで発生した衝撃波を1次圧縮波と呼ぶこととする。水中を伝播する圧力は、光ファイバーハイドロフォン (FOPH 2000, RP Acoustics) で測定した。水中に生成されるキャビテーション気泡とマイクロジェットは、高速度カメラ (ナックイメージテクノロジー, Ultra Neo) と顕微鏡レンズ (キーエンス, VH-Z50L) を用いて可視化した。

図7(a)は、電極間にスパーク放電を発生させ球状の圧力波を生成する装置である。図8(a)に示すように、1次圧縮波は水面で反射し膨張波となり逆向きに球状に伝播する。これは、水の音響インピーダンスが空気より大きいことによる。膨張波は、スパーク放電で生成された球状の気

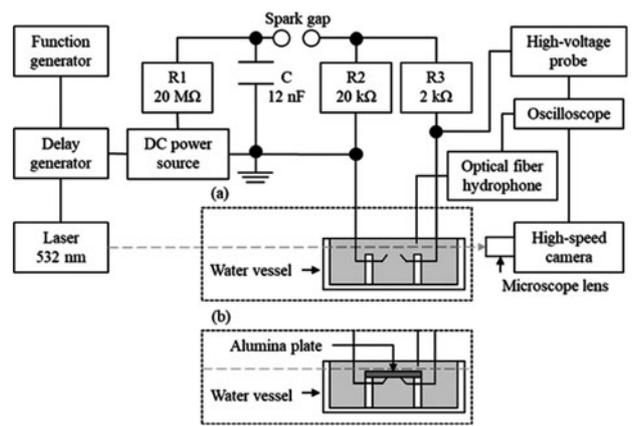


図7 スパーク放電による圧力波発生装置。(a)球状圧力波発生装置、(b)平面状圧力波発生装置[27].

泡表面で反射し、再び球状の2次圧縮波として水面に伝播する。このとき、電極間を通る垂直軸方向の反復する圧力波において、圧縮波は常に水面に向かう方向のみとなる。膨張波が通過すると気泡が現れ成長を始めるがその間に2次圧縮波が通過する。気泡は非球形崩壊しマイクロジェットを形成し、再膨張の過程で観察できるようになる。

図7(b)は設置した2本の電極の上部に厚さ0.2 mmのアルミナ平板を固定することで、平面状の圧力波を生成する装置である。図8(b)に示すように、電極間にスパーク放電が発生すると、アルミナ平板が衝撃を受け振動することで、水面に向かう平面状の1次圧縮波が発生する。1次圧縮波は、水面で反射し膨張波となりアルミナ平板に向かって伝播する。膨張波は、アルミナ平板で反射し膨張波のまま平面状に水面に向かって伝播する。これは、水の音響インピーダンスがアルミナより小さいことによる。膨張波が通過すると気泡が生成され成長するが、その間に2次圧縮波が通過する。気泡は非球形崩壊しマイクロジェットを形成し、再膨張の過程で観察できるようになる。

3.3 圧縮波の方向と液体マイクロジェットの方向の関係

図9に球状圧力波の結果を示す。(a)に示すようにスパーク放電により発生した球状の1次圧縮波(1)が水面で反射し膨張波(2)として伝播し、(b)に示すように最大径

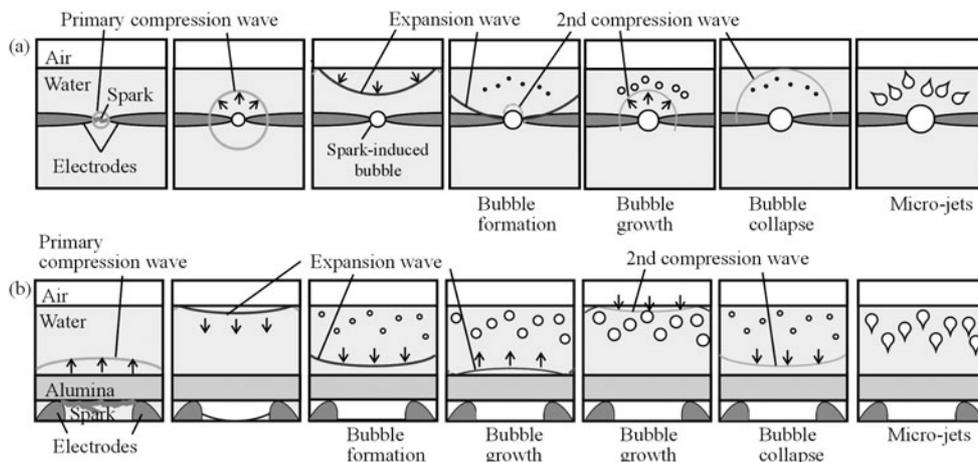


図8 スパーク放電による圧力波の発生とマイクロジェット生成過程。(a)球状圧力波を用いた場合、(b)平面状圧力波を用いた場合。

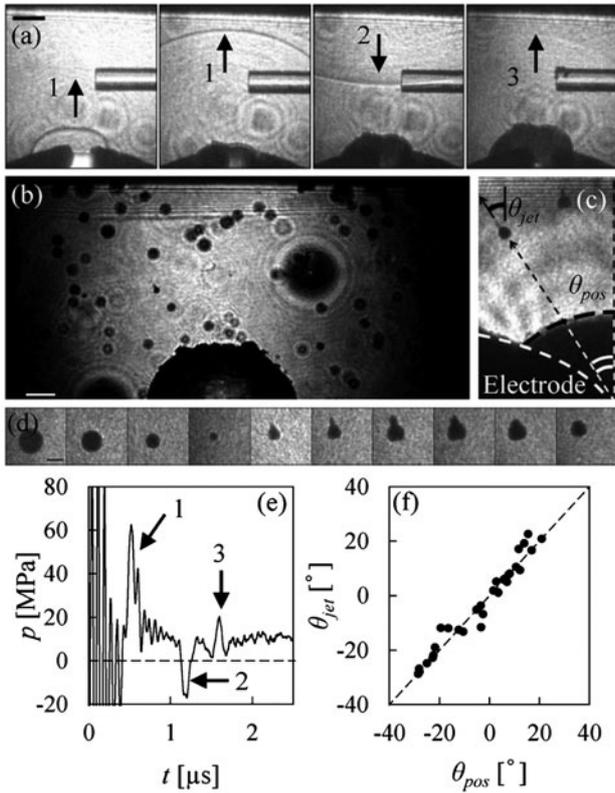


図9 球状圧力波の場合の解析結果[27]. (a)圧力波伝播の連続写真. (1)1次圧縮波, (2)膨張波, (3)2次圧縮波. フレーム間隔は400 ns, スケールバーは200 μm である. 上部は気液界面, 下部にあるのは電極, 中央右側は光ファイバーハイドロフォン. (b)膨張波により生成したキャビテーション気泡. スパーク放電発生から3.3 μs 後の写真. スケールバーは200 μm . (c)電極間中心を原点とした気泡位置角度 θ_{pos} と垂直軸を基準としたマイクロジェット方向角度 θ_{jet} の定義. (d)キャビテーション気泡からのマイクロジェット生成過程の連続写真. フレーム間隔は0.5 μs , スケールバーは50 μm . (e)光ファイバーハイドロフォンにより計測されたスパーク放電後の圧力の時間変化. (f)気泡位置角度 θ_{pos} とマイクロジェット方向角度 θ_{jet} の相関. それぞれの角度の定義は(c)に記載.

が20~120 μm のキャビテーション気泡が生成される. 膨張波はスパーク放電で生成された電極間の気泡表面で反射し, 球状の2次圧縮波(3)として水面に向かう. 伝播する圧力波の最大圧力は, (e)に示す圧力の時間変化より, (1)60 MPa, (2)-18 MPa, (3)20 MPaであり, (1)と(3)は圧縮波, (2)は膨張波であることが確認できる. (d)に示すようにマイクロジェットは再膨張の過程で現れ, (f)に示すようにマイクロジェット方向は1次圧縮波の進行方向と同じ方向であることが明らかになった. 一方, マイクロジェット生成は気泡周囲の圧力勾配により生成されることが知られている. キャビテーション気泡を通過する複数の圧力波があることから, マイクロジェットの方向を決定する圧力波があると考えた. そこで, どの圧力波が方向を決める因子となるのかを同定するため, 平面状の圧縮波を利用し, 圧力波の方向とマイクロジェットの方向の関係を検証した.

図10に平面状圧力波の結果を示す. (a)に示すようにスパーク放電によりアルミナ平板を介して発生した平面状の

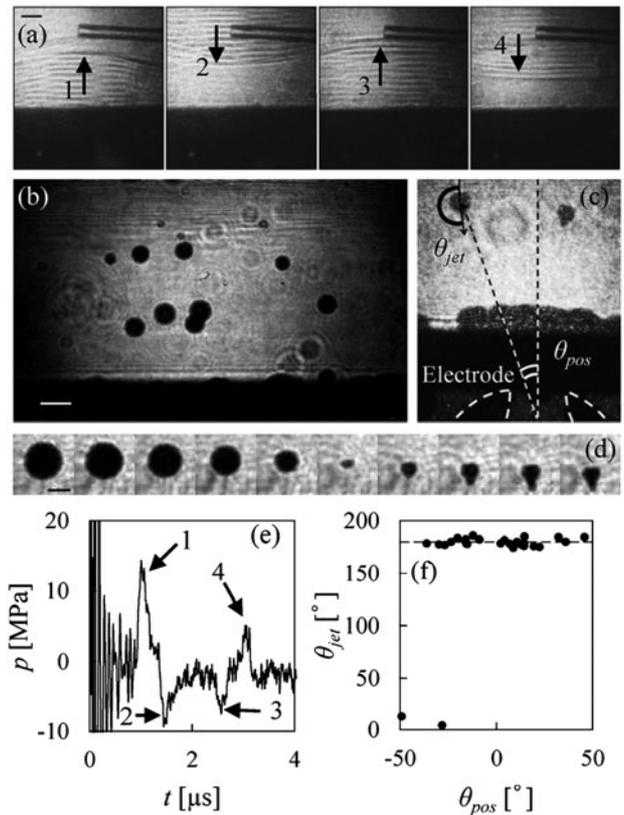


図10 平面状圧力波の場合の解析結果[27]. (a)圧力波伝播の連続写真. (1)1次圧縮波, (2)膨張波, (3)反射膨張波(4)2次圧縮波. フレーム間隔は400 ns, スケールバーは200 μm である. 下部にあるのは電極, 中央右側は光ファイバーハイドロフォン. (b)膨張波により生成したキャビテーション気泡. スパーク放電発生から9 μs 後の写真. スケールバーは200 μm . (c)電極間中心を原点とした気泡位置角度 θ_{pos} と垂直軸を基準としたマイクロジェット方向角度 θ_{jet} の定義. (d)キャビテーション気泡からのマイクロジェット生成過程の連続写真. フレーム間隔は1.4 μs , スケールバーは100 μm . (e)光ファイバーハイドロフォンにより計測されたスパーク放電後の圧力の時間変化. (f)気泡位置角度 θ_{pos} とマイクロジェット方向角度 θ_{jet} の相関. それぞれの角度の定義は(c)に記載.

1次圧縮波(1)が水面で反射し膨張波(2)として伝播する. その後, 平板において反射膨張波(3)が水面に向かい, 圧縮波(4)が生成され伝播する. 伝播する圧力波の最大圧力は, (e)に示す圧力の時間変化より, (1)15 MPa, (2)-9.5 MPa, (3)-7.7 MPa, (4)5.2 MPaであり, (1)と(4)は圧縮波, (2)と(3)は膨張波であることが確認できる. 平面状圧力波でも球状と同様に(b)に示すようにキャビテーション気泡が生成され, (d)に示すように再膨張過程においてマイクロジェットが出現する. マイクロジェット方向を解析すると, (f)に示すように気泡位置角度に関係なく, 2次圧縮波の伝播方向と同じ平板方向に向いていることが示された. 3次圧縮波以降は圧力が減衰する上, マイクロジェット方向と圧縮波伝播方向の関係には強い相関は見られなかった. この結果より, マイクロジェット方向は, 1次圧縮波ではなく, 2次圧縮波の進行方向で決まることが明らかになった.

球状圧力波の場合においても, 2次圧縮波は球状に1次

圧縮波とほぼ同じ方向に伝播することから、マイクロジェット方向を決める因子は、2次圧縮波の伝播方向であることが明らかになった。

最後に、一般に壁面近傍に形成されるマイクロジェットの方向は壁面方向に向くことが知られているため、壁面近傍におけるマイクロジェット方向を圧縮波の進行方向に変えられるかどうかについて検討した。これは、壁面近傍のマイクロジェット方向の制御が可能になれば、応用上の優位性が大いに高まるためである。ここでは、壁面近傍のキャビテーション気泡が生成するマイクロジェットの方向と2次圧縮波の進行方向との関係を検証した。図11に球状圧力波によりポリジメチルシロキサン (Polydimethylsiloxane (PDMS)) 平板上に生成されたキャビテーション気泡の再膨張時に出現したマイクロジェットの様子を示す。PDMS 平板は電極と水面の間に挿入した。PDMS は音響インピーダンスが水に近く、圧力波はそのまま透過する性質を持つ。ここでは、固体壁表面と固体壁から離れた気泡が生成するマイクロジェットの様子が示されているが、固体壁表面のマイクロジェットは固体壁から離れた場合と同じ方向の水面方向に向いていることが示されている。一般に固体壁上では、マイクロジェットは壁方向に向かうが、圧縮波の圧力が十分に大きい場合は、固体壁よりも圧縮波の影響の方が大きくなる場合があることが明らかになった。これより、指向性マイクロジェットの生成が可能であること、さらには指向性マイクロジェットの応用展開が可能であることを示した。

4. まとめ

本解説では、著者らの今までの研究から、水中における圧力波を用いた、水中負ストリーマの詳細な進展過程の解析方法や正圧・負圧などの特徴を生かした指向性マイクロジェットの生成について紹介した。流体现象の理解は、プラズマや放電のみならず、幅広い現象の理解に繋がるため、今後も流体科学の手法を利用して新しい未知の現象の理解に努めたい。

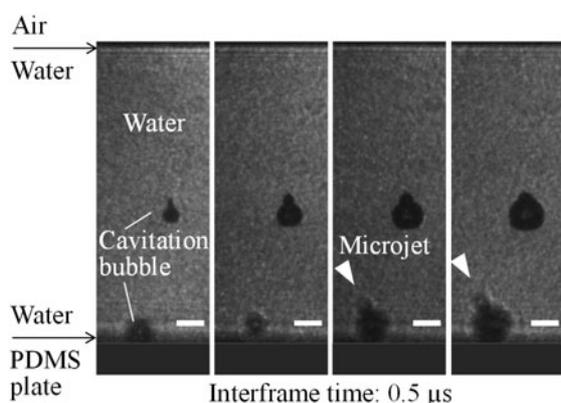


図11 PDMS 平板上のキャビテーション気泡から壁面と逆方向のマイクロジェットが生成される様子。スケールバーは 50 μm 、フレーム間隔は 0.5 μs である [30]。

謝辞

本解説で紹介した、負ストリーマ進展過程については、金澤誠司 (大分大)、熊谷 諒、大谷清伸、小宮敦樹、金子俊郎、中嶋智樹 (東北大) (敬称略) との共同研究であり、指向性マイクロジェットの生成については、Outi Supponen, Mohamed Farhat (EPFL (スイス)), 南 共哉、中嶋智樹、上原聡司、大谷清伸、金子俊郎 (東北大) (敬称略) との共同研究の成果である。ここに、共同研究者に謝意を表す。なお、所属は研究当時の所属を表記した。

参考文献

- [1] H. Akiyama and M. Akiyama, IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng. **16**, 6 (2020).
- [2] 猪原 哲: 電気学会論文誌 A **132**, 656 (2012).
- [3] T. Sakugawa *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. **42**, 794 (2014).
- [4] H. Iyama *et al.*, Int. J. Multiphys. **13**, 269 (2019).
- [5] M. Sato *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. **48**, 2639 (2020).
- [6] T. Koita *et al.*, Shock Waves **27**, 257 (2017).
- [7] 崎山幸紀: プラズマ・核融合学会誌 **83**, 613 (2007).
- [8] T. Sato *et al.*, Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol. **12**, 44 (2019).
- [9] M.-C. Wu *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **53**, 485201 (2020).
- [10] 佐藤岳彦: プラズマ・核融合学会誌 **93**, 573 (2017).
- [11] H. Fujita *et al.*, J. Appl. Phys. **113**, 113304 (2013).
- [12] H. Fujita *et al.*, J. Appl. Phys. **116**, 213301 (2014).
- [13] H. Fujita *et al.*, EPL **105**, 15003 (2014).
- [14] H. Fujita *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. **42**, 2398 (2014).
- [15] 藤田英理 他: 静電気学会誌 **39**, 21 (2015).
- [16] 浅沼 強: 流れの可視化ハンドブック (朝倉書店, 1977).
- [17] R. Kumagai *et al.*, J. Appl. Phys. **124**, 163301 (2018).
- [18] N.Y. Babaeva and M. J. Kushner, IEEE Trans. Plasma Sci. **36**, 892 (2008).
- [19] J. Jadidian *et al.*, J. Appl. Phys. **114**, 063301 (2013).
- [20] M. Arrayas *et al.*, Phys. Rev. Lett. **88**, 17 (2002).
- [21] M. Arrayas *et al.*, Phys. Rev. Lett. **95**, 165001 (2005).
- [22] 加藤洋治: キャビテーション (槇書店, 1979).
- [23] O. Supponen *et al.*, Phys. Rev. Fluids **2**, 093601 (2017).
- [24] M.P. Brenner *et al.*, Rev. Mod. Phys. **74**, 425 (2002).
- [25] L.H. Thompson and L.K. Doraiswamy, Ind. Eng. Chem. **38**, 1215 (1999).
- [26] O. Supponen *et al.*, J. Fluid Mech. **802**, 263 (2016).
- [27] O. Supponen *et al.*, Appl. Phys. Lett. **113**, 193703 (2018).
- [28] E.A. Brujan *et al.*, Exp. Therm. Fluid Sci. **101**, 48 (2019).
- [29] A. Delalande *et al.*, Gene **525**, 191 (2013).
- [30] 南 共哉: 平成27年度東北大学大学院工学研究科修士論文 (2016).



さとう たけひこ
佐藤 岳彦

東北大学 流体科学研究所 教授, 1995年東北大学 博士 (工学)。気液プラズマの熱流動現象や水中放電進展機構、微細な気泡や液滴の生成や挙動、プラズマ刺激に対する

細胞応答、プラズマ殺菌などの研究を進めています。特に、微小域の高速現象の可視化法の開発に力を入れています。ハイキングや写真を撮るのを楽しんでいます。