レーザプラズマ加速器：噴霧スプレーを定量的に画像化するための新ツール

ディエゴ・ゲノ、オッレ・ルンド、エドアール・ベロカル

噴霧スプレーによって発生した液滴構造のX線画像と蛍光画像を融合させることにより、燃焼研究に重要な、液体-気体相転移の物理学をよく理解することができる。

噴霧スプレーは、車両や船舶、航空機などの燃焼エンジンに液体燃料を注入するために広く使われている。液体-気体の相転移の物理学を理解することは、汚染物質を大幅に削減し、より効率的で環境にやさしい車両を設計するために非常に重要である。概念実証のレーザプラズマ加速器は、噴霧スプレーの研究において、軟X線吸収と2光子レーザ誘起蛍光（two-photon Laser-Induced Fluorescence：2p-LIF）を同時に使用して過渡散乱媒体を視覚化するという、魅力的な新しい手法である。

同時に撮影した軟X線吸収と2p-LIFの画像の融合には、2つの利点がある。1点目は、多重の光散乱によるぼかし効果を最小限に抑えることだ。2点目は、高度に相補的な噴霧の情報を提供できることである。X線吸収は液体の質量分布を定量化できる。一方で、2p-LIF画像は液滴（droplet）、液糸（ligament）及びその他の不規則な液体構造の高コントラスト像を生成する（**図1**）。これらのレーザプラズマ加速器によるスナップショット画像は、表示領域が2cm×2cmと比較的大きく、液体噴霧の物理学に対する科学的な理解を拡大させる。

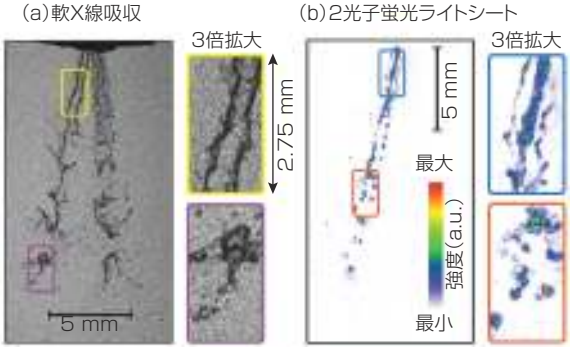

図1　X線ラジオグラフィ（a）と2光子蛍光ライトシート（b）のイメージングは、レーザプラズマ加速器を用いて取得された。ここでは、ポート燃料インジェクタが使用されており、注入された液体は、目に見える注入の開始後850μs時点のものである。

スプレーシステムの用途

スプレーシステムは、人の気道への薬剤の噴霧、表面への塗装やコーティング、食品及び製薬業界における噴霧乾燥による粉末の製造、作物への農薬の散布、ウォータージェットカッターを使用した金属の切断、消火、高温環境の冷却、プリンターにおけるインクの注入、やけどの治療における細胞懸濁液の塗布、その他さまざまな場面で使われる。それでもやはり、最も重要なアプリケーションは、燃焼ベースの車両や輸送デバイスにおいて、液体燃料をピストンへ噴射したり、ガスタービン燃焼エンジンへ噴射したりすることにより、必要な機械的パワーを生み出すことだといえる。

液体燃料は、気体燃料よりも単位体積当たりのエネルギーがはるかに多く、貯蔵や輸送も容易である。しかし、液体燃料の燃焼は、亜酸化窒素、炭化水素、一酸化炭素や二酸化窒素、及びすすなどの汚染物質の主な排出源でもある。大気汚染物質の排出量を削減するということは、より効率的でクリーンな液体燃料駆動の燃料デバイスを開発することを意味する。

これらの目標を解決するための直接的な方法の1つは、各燃焼装置に対して適切なスプレーシステムを使用することである。すなわち、サイズ、速度、濃度、軌道、そして蒸発状態が望み通りとなる液体が作られるシステムだ。このアプローチは、エタノール混合燃料やバイオディーゼルなど、将来の代替燃料の噴射にも適用できる。このことから、液体燃料の燃焼の改善及び制御のためには、液体の微粒化のプロセスをより深く理解する必要がある。

スプレーの直接観察は、液滴によって引き起こされる複数の光散乱と、大きな液滴ボディによる屈折及び反射により、大幅に制限される。これらは噴霧スプレーに容易に到達できる定量的情報の量を制限する。言い換えると、

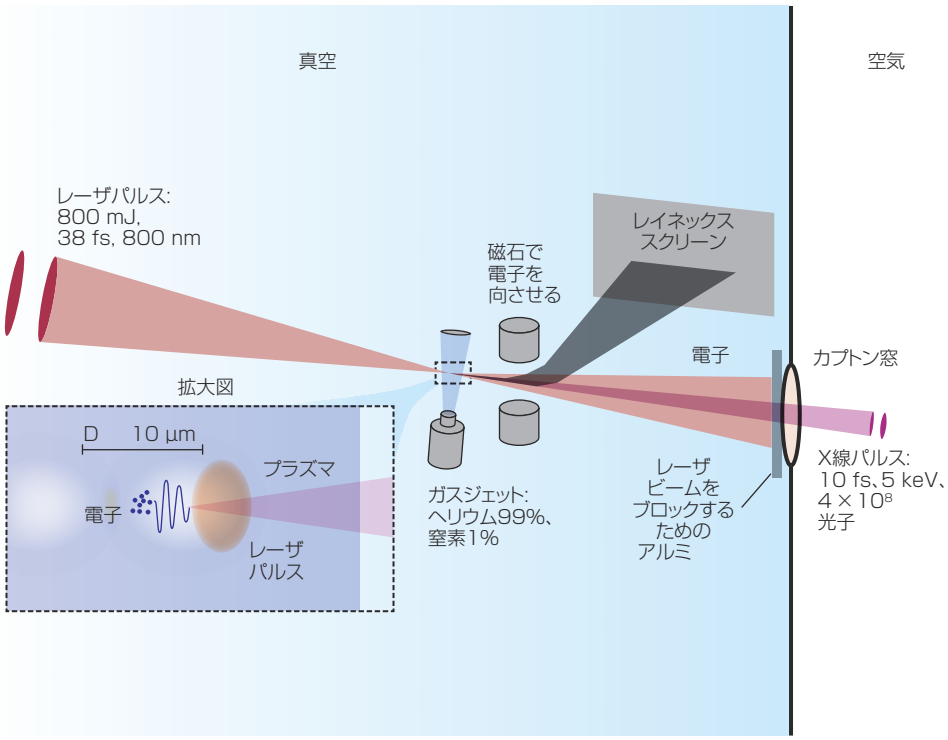

図2 スウェーデンのルンド大のレーザプラズマ加速器では、強力なレーザパルスがガスジェットに集束され、プラズマが生成される。電子は光パルスの背後で加速され、超短パルスのX線が生成される。放出された電子は、強力な双極子磁石を使用してX線ビームからそらされる。アルミ薄片とカプトン真空窓がレーザ放射を遮断し、X線ビームが真空チャンバから出射する。

噴霧スプレーの散乱特性は、液体の分裂の原因となる複雑な流体機械プロセスを、ぼかして隠す原因となる。

その他の問題としては、超高速イベントをキャプチャする必要や、スプレーシステムのマイクロメートルからセンチメートルスケールというマルチスケールにわたる特性を管理することが挙げられる。結果的に、噴霧プロセスの定量的情報と、噴霧プロセスの詳細な可視化はまだ十分ではなく、信頼性の高いスプレー形成の予測を行えるような分析モデルと数値モデルの開発の進展を阻んでいる。

X線画像と蛍光画像の融合

複数の光散乱や画像のボケに関する問題を克服するために、ここ20年にわたり、高度な画像技術の実験開発が増加している。複数の光散乱からの寄与を減少させるいくつかの光学的手法は、タイムゲーティング、構造化照明、最近では2p-LIFライトシートイメージングといった、さまざまなフィルタリング手法を使用する。

光学的に密度の高いスプレーにおける2p-LIF検出の利点は、1光子液体LIFまたは弾性散乱よりはるかに高いコントラストの画像を得られることである。この主な理由は、複数の散乱光子が空間及び時間的に広がり、2つの光子が同時に蛍光トレーサーに吸収される確率が大幅に減少するためである。

それどころか、照明用ライトシートの焦点が合っている場所では、2p-LIFプロセスの発生する確率が最も高く、カメラの被写体の物体表面でのみ生成される信号が提供される。その結果、ライトシート2p-LIFは、液体本体の非常に正確な画像を提供し、ボイド構造を明らかにする。従って、2p-LIFライトシートイメージングは、従来のイメージング手法では見えない小さな液滴や、小さな液体要素の詳細な情報を提供できる。

複数の光散乱の発生を抑制するための別の解決策は、X線を使用することである。注入された例えば水のような液体におけるX線の屈折率は、可視光とは異なり、キロ電子ボルトの範囲の光子において1近くになり、一方で吸収は大幅に増加する。従って、X線ラジオグラフィにおける信号は、主に散乱ではなく吸収によるものになる。このアプローチは、大きく不規則な液体構造がまだ存在し、液体の密度が最も高いノズル付近の領域において、液体の質量分布を測定する場面で、もっとも信頼性が高くなる。

液体の質量分布は、液体の分裂速度や、気体のエントレインメント（蒸気による水滴の巻き込み）に関係する。このことから、質量分布を調べることは、どのようにスプレーが形成されるかを理解するために重要である。分解プロセスの時間スケールは非常に短く、一般的にマイクロ秒よりも短く、そのような時間分解能に到達できる高X線フラックスへの要求に応えるため、

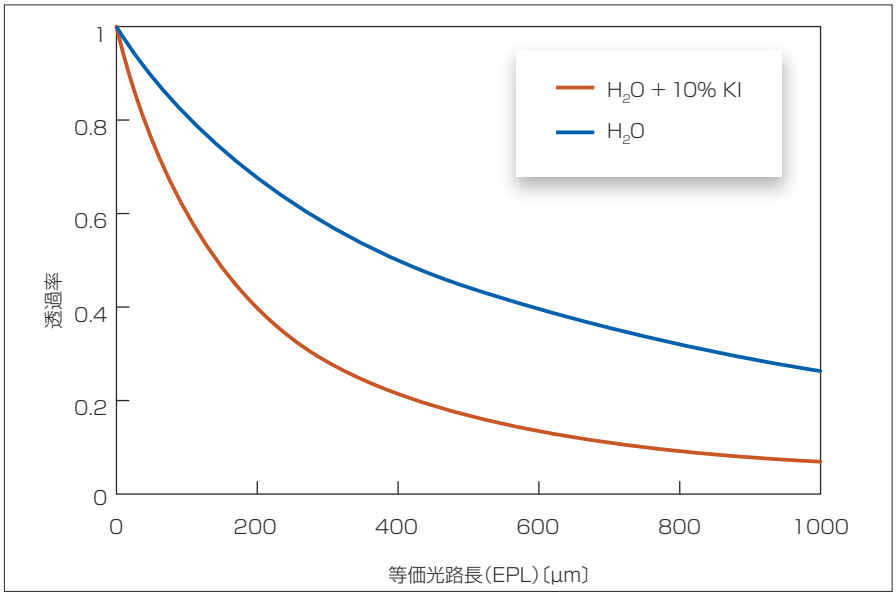

図3 校正曲線は、純水と10%ヨウ化カリウム(KI)水溶液の等価経路長の関数として、検出器で測定されたものと同じスペクトルのX線ビームの透過率を示す。

過渡状態のスプレーのラジオグラフィに関連するほとんどの研究努力は、米アルゴンヌ国立研究所(Argonne National Laboratory)の先端放射光施設(Advanced Photon Source)のようなシンクロトロン施設でなされている。

スプレーイメージングに使用する高フラックスの軟X線パルスを生成するための新たな解決策は、コンパクトレーザプラズマ加速器を使用することである。X線は高エネルギーのフェムト秒レーザパルスから生成されるため、入射パルスの一部もまた、2p-LIF信号を生成するのに使われる。このユニークな機器構成を使用することで、高度な可視光及びX線イメージングを同時に行うことができ、スプレーの内部について相補的な情報を提供する。

レーザプラズマ加速器からのフェムト秒X線

スウェーデンのルンドレーザセンター(Lund Laser Centre)では、電子をプラズマの波(荷電粒子の高温ガス)で「サーフィン」させ、ミリメートルの短い距離で数百メガ電子ボルトの高エネルギーを得る粒子加速の手法が研究されている。

レーザ航跡場加速器では、1J、30fsの強力なレーザパルスがヘリウムガスに集中して照射されると、すぐに電離が起こりプラズマを生成する(**図2**)。レーザパルスは、レーザのタイムスケール上ではほぼ静止した状態のより重いイオンを残したまま、電子を押しのける。結果として生じる電荷の分離は、駆動レーザパルスの航跡をたどる縦プラズマ波を駆動する(そのためウェークフィールド:航跡場と呼ばれる)。

この波は、1mあたり100GVを超える、従来の加速器よりけた違いに高い電場をサポートできる。集団の「立ち会った」電子が適切な場所に適切なエネルギーで注入されると、それらはプラズマ波をとらえてサーフィンし、加速するに従って光速に近い相対論的速度をすばやく獲得する。経験的に、これは単純にヘリウムガスに少量の窒素を混合することによって達成できる。

プラズマ加速器は、それ自身でX線のビームを生成することができる。ウェークフィールドによる強い前方加速に加えて、放射状に集束する力により、加速された電子は横方向に振動する(いわゆるベータトロン振動)。従って、相対論的電子がアンジュレータ内の周期的な磁場を通過するときとほぼ同じように、前方にキロ電子ボルトのX線を放射する。超短X線パルスは本質的にレーザに同期しており、高い時空間分解能で高速及び超高速の現象を研究するための、独自のプラットフォームを提供する。

たとえばスプレーイメージングでは、レーザパルスの一部をX線ラジオグラフィに使用し、別の部分は2p-LIFなどの高度な光技術を使用して、同時にイメージングすることが可能である。レーザプラズマ加速器によって生成された軟X線は、スプレー経路に沿った、コンマ1ミリメートル以上の液体の吸収を測定するのに理想的である。さらに、発散するX線ビームは、メートル単位の短い伝播距離の後の、センチメートル単位の比較的大きなスプレー領域のイメージングを可能にする。

液体質量の定量測定

校正の役割は、X線強度を等価光路長(Equivalent Path Length:EPL)に変換することである。X線測定のEPL感度は、シングルショット画像のノイズよりも大きな吸収を引き起こすのに必要な水の量を計算することによって求められる。ノイズはRMS変動として定義される。校正吸収曲線を使用することで、ノイズより高い信号損失を生成するために必要な水の量を推定することができる(**図3**)。

X線が液体ジェットを透過すると、スペクトルが変化することには注意すべきである。これは吸収特性を変化さ

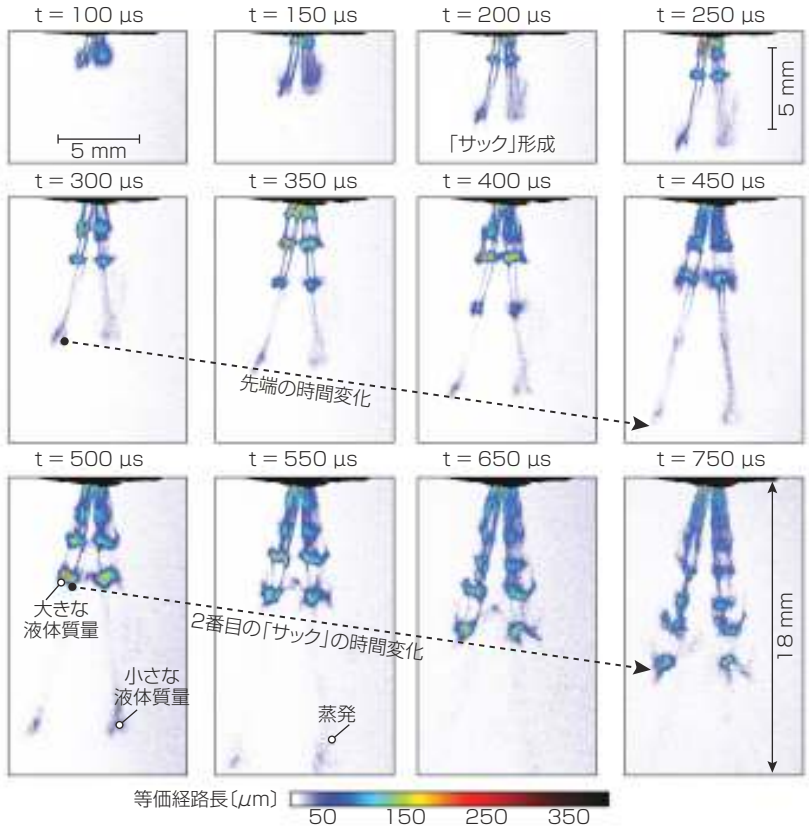

図4　目に見える注入の開始から750μsまでの液体等価経路長（EPL）の時間変化を示している。EPLは、レーザプラズマ加速器から取得されたX線ラジオグラフィ画像を校正した後の、液体がX線ビームと交差する距離に相当する。各画像は50枚のシングルショットのX線イメージを平均したものである。その結果から、液体の質量分布をはっきりと見ることができ、大きな液体質量が存在する場所や、蒸発の起こっている場所がわかる。

せる「ビームハードニング（beam hardening）」として知られている現象だ。そのために、検出可能な水の量は距離とともに減少する。この液体質量に対する感度の低下は、より高いエネルギーの光子を使用することで軽減できる。

液体の経路長が約100μmのスプレーの場合、最適なエネルギーは純水で4keVである。500μmの液体経路長では、最適なエネルギーは約7keVだ。ほかの選択肢は、エネルギーと一致するように混合物中のヨウ化カリウム（KI）の濃度を調節することだが、これには液体の特性、すなわち表面張力と粘度の変化という犠牲を伴う。

最終的に、50枚以上の校正済みのラジオグラフィ画像を平均化することによって、液体の質量分布の統計的な時間変化を得ることができる（**図4**）。

ルンド大は、強力なフェムト秒レーザパルスを使用し、一般的な内燃エンジンで使用されるスプレーシステムの動的変化について、X線と可視光（それぞれレーザプラズマ加速と2光子蛍光による）で同時にイメージングする能力を実証した。結果は、液体の質量に対する感度が、シンクロトロンでこれまでに達成されたものに匹敵する（それ以上とは言わないまでも）ことを示している。さらに、定量的X線画像により、トモグラフィック3D再構成を実現できる可能性がある。

将来的には、スプレーや他の瞬間的な散乱媒体の更なる研究は、レーザプラズマ加速器設備を使用することで達成されるだろう。これにより、長期的には、よりクリーンで効率的な燃焼エンジンの開発が促進される。

参考文献

(1) D. Guénot et al., Optica, 7, 2, 131–134 (2020).
(2) M. A. Linne et al., Proc. Combust. Inst., 32, 2, 2147–2161 (2009).
(3) E. Berrocal et al., Opt. Express, 16, 22, 17870–17881 (2008).
(4) E. Berrocal et al., OSA Continuum, 2, 3, 983–993 (2019).
(5) A. G. MacPhee et al., Science, 295, 1261 (2002).
(6) I. Gallardo Gonzalez et al., New J. Phys., 20, 053011 (2018).
(7) K. Svendsen et al., Opt. Express, 26, 26, 33930–33941 (2018).
(8) B. Kettle et al., Phys. Rev. Lett., 123, 254801 (2019).

著者紹介

ディエゴ・ゲノ（Diego Guénot）はスウェーデンのルンド大の原子物理学の博士研究員、オッレ・ルンド（Olle Lundh）は同大の原子物理学の講師、エドアール・ベロカル（Edouard Berrocal）は同大の燃焼物理学の上級講師及び研究者。

LFWJ