音場浮遊された揮発性液滴の内部流動ステレオ計測*

Stereo Measurement of Internal Flow Structure in Volatile Droplets on the Acoustic Levitation

丹羽 基 能**
NIWA Motonori

渡 邊 歩**
WATANABE Ayumu

長谷川 浩 司***
HASEGAWA Koji

金 子 暁 子**
KANEKO Akiko

阿 部 豊**
ABE Yutaka

Abstract This paper describes experimental investigation on the three-dimensional internal flow structures of the acoustic levitated volatile droplets by stereo PIV. The acoustic levitation is one of the effective techniques to levitate and manipulate droplets in air. In order to apply the acoustic levitation to various fields such as the material science, analytical chemistry, drug discovery and so on, it is essential to understand the flow structures and transport phenomena on the acoustically levitated droplet. Our observation shows the internal flow structure is changed with the increase of the saturated vapor pressure of the levitated droplets. In the case of decane, nonane, octane, heptane, hexane and pentane droplets, the rotational motion is generated in each droplet. In the case of ethanol and methanol droplets, there is the flow from the equator toward the center of the droplet in the horizontal plane. In addition, the two or four vortices are generated in the horizontal plane with the increase of the droplet diameter.

Keywords: Acoustic levitation, Droplet, Internal flow, Stereo PIV

1. 緒 言

試料を浮遊させる方法の1つとして、音場浮遊法が存在する。音場浮遊法は、音波により試料を制御する方法であり、テスト部内に音響定在波による音圧分布を形成し、その音圧の節にてミリメートルスケールの液滴を浮遊させることができる[1-3]。このような浮遊法を用いることにより、試料の無容器プロセッシングが可能となる。地上重力環境下で溶液を取り扱うためには、一般的には容器が必要である。一方、浮遊法を用いることにより無容器で溶液を取り扱うことが可能となる。そのため、容器壁に起因する問題、例えば、不均質核生成や、コンタミネーション、溶液の吸収や吸着といった問題を回避することができる

ため、材料生成や分析化学、バイオ、創薬等の分野にて応用が期待されている[4-8]。

最近では、熔融金属の過冷却凝固[7]といった材料関連や、イブプロフェンの再結晶化の分析[8]といった創薬・分析化学関連など、音場浮遊法を用いた応用研究が盛んに行われている。一方、音場浮遊液滴の内部および外部には流動が生じることが確認されており[9-18]、この内外流動が浮遊液滴周りの伝熱へ影響を与えることも考えられている[14-16]。凝固や再結晶化に代表される音場浮遊液滴の相変化挙動を任意に制御するためには、音場浮遊液滴に生じる内外流動および熱物質輸送の解明が重要である。

音場浮遊液滴の流動に関する既存研究として、

* 2016.11.22 受付

** 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 構造エネルギー工学専攻 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
TEL: (029)853-5487 FAX: (029)853-5487 E-mail: s1520908@u.tsukuba.ac.jp

*** 工学院大学 工学部 機械工学科

液滴の揮発性に依存して内外流動が変化することや[11-14]、液滴水平面に複雑流動が生じることが報告されている[17, 18]。一方、Zhao らの解析により、界面近傍において音波に関する振動境界層であるストークス層の存在を前提にした流動構造が予測されており、ストークス層内の循環によって内外流動の向きが逆転することが報告されている[19]。しかしながら、解析とは異なる流動構造も実験で確認されており[11-14, 17, 18]、音場浮遊液滴に生じる内外流動の関係は未だ明らかとなっていない。また、既存の流動可視化実験は、主として液滴の任意の2次元断面のみを対象としており[22-24]、音場浮遊液滴の内外流動の3次元性は明らかにされていない。さらには、3次元的な流動構造の揮発性依存性を検証した例はない。

そこで本研究では、音場浮遊液滴に生じる内部流動構造の3次元性の解明を目的とする。本論文では、飽和蒸気圧の異なる8種類の試料に対してステレオ PIV による内部流動計測を実施し、3次元的な流動構造を示す速度ベクトル場の計測結果から内部流動構造遷移の検討を行った。

2. 実験装置および実験方法

Fig. 1 に実験装置および計測系の概略図を示す。実験装置は、液滴を浮遊させるテスト部と周辺機器から構成されている。関数発振器（横川電機、FG120）から発振した正弦波信号をアンプ（エヌエフ回路設計ブロック、4502）で増幅させ、電力計（横川電機、WT130）を介した後に超音波振動子（日本特殊陶業、D4520PC）に入力する。超音波振動子を駆動することで、接続されているホーンを介してテスト部内に音波を印加する。その後、反射板にて音波が反射し、テスト部内に音響定在

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

波を形成する。超音波振動子の共振周波数は 19.4 kHz であり、室温条件における波長は 19 mm 程度となる。ホーンと反射板間の距離を 47.5 mm と設定することで、本条件ではホーンと反射板間に 2.5 波長分の定在波が形成され、5 つの節が存在する。実験においては、ホーンより 1.25 波長の位置に存在する定在波の節に、シリンジにより試料を注入することで液滴を浮遊させた。液滴が浮遊

Table 1 Physical property of test fluid at $T = 300\text{ K}$ [24].

	Composition formula	P_{sat} [Pa]	M [g/mol]	ρ_l [kg/m ³]	ν_l [mm ² /s]	σ [mN/m]
Decane	C ₁₀ H ₂₂	207	142	725.0	1.14	23.2
Nonane	C ₉ H ₂₀	652	128	712.6	0.86	22.3
Octane	C ₈ H ₁₈	2060	114	696.7	0.71	21.0
Heptane	C ₇ H ₁₆	6675	100	677.9	0.56	19.8
Ethanol	C ₂ H ₆ O	8841	46	783.8	1.34	21.5
Methanol	CH ₄ O	18682	32	784.5	0.67	22.2
Hexane	C ₆ H ₁₄	21865	86	653.0	0.44	17.8
Pentane	C ₅ H ₁₂	73168	72	619.0	0.35	15.3

する節の位置から上下 1/4 波長に相当する腹の位置にてプローブマイクロホン (Brüel&Kjaer、Type4182) を用いた音圧計測を行い、計測した 2 点の音圧の算術平均値を代表音圧 p とした。液滴は軸対称かつ概ね回転楕円体で浮遊することが確認されているため[2, 17]、本論文においても、その形状を回転楕円体と仮定し、体積が等しい場合における球の体積等価直径を液滴径 d と定義する。また、短軸 b に対する長軸 a の比を、アスペクト比 $As=a/b$ と定義する。周囲流体は空気であり、気温は $24 \pm 3^\circ\text{C}$ 、相対湿度は $50 \pm 15\%$ であった。実験結果の比較を行う際は、有意差を得るために実験条件を等しくして実験を行った。

Fig. 2 に示すように、液滴の内部流動の計測に際しては、液滴水平面に対してステレオ撮影を行った。音場浮遊装置の上部にハイスピードカメラを設置し、直角プリズムミラーによりカメラと液滴間の光路を 2 方向に分け、左右それぞれのミラーから液滴内部をステレオ視した。PIV 計測のために、波長が 532 nm の Nd:YAG レーザ (日本レーザー、DPGL-5W) を使用し、厚さは約 1 mm のシートレーザとして液滴水平面に照射した。また、トレーサ粒子として、平均粒子径 10 μm のシルバーコートガラス粒子 (ダンテック、S-HGS) を試料に混入した。格子間隔が 1.0 mm のプレートを、液滴浮遊位置より上下方向に 1.0 mm 間隔でトラバースした撮影画像を用いることで、キャリブレーションを行った。取得した画像群に対して PIV 処理を施すことにより、液滴水平面における内部流動の 2 次元 3 成分の速度ベクトル場を取得した。ステレオ PIV による内部流動の速度算出について、特に液滴界面付近では、界面におけるトレーサ粒子からの反射光の屈折により、速度算出が困難になっている。さらに、液滴形状が回転楕円体であることから、曲率の影響により実験値は最大で 2 割程度の誤差を含むと考えられる[23]。また、Fig. 3 に示すように液滴側部からもハイスピードカメラによる撮影を行い、画像処理を施すことにより液滴形状を取得した。

本実験では、揮発性をパラメータとするために、試験流体として、デカン、ノナン、オクタン、ヘプタン、エタノール、メタノール、ヘキサン、ペンタンを用いた。Table 1 に、それぞれの流体の組成式、および温度 $T=300\text{ K}$ における飽和蒸気圧 P_{sat} 、モル質量 M 、密度 ρ_l 、動粘性係数 ν_l 、表面張

Fig. 2 Original images of stereo visualization.

(a) Original image. (b) Droplet shape analysis.

Fig. 3 Images from the side of the droplet.

力 σ を示す[24]。Table 1 より、動粘性係数および表面張力は同程度であり、飽和蒸気圧は大きく異なることが分かる。

3. 実験結果および考察

Fig. 4 にデカン、ノナン、オクタン、ヘプタン、エタノール、メタノール、ヘキサン、ペンタン液滴の内部流動に関して、液滴水平面である xy 平面を基準面とした 2 次元 3 成分の平均速度ベクトル場を示す。Fig. 4 には、左から、内部流動を俯瞰して見た鳥瞰図、液滴水平面である xy 平面、液滴鉛直面である yz 平面、 zx 平面を示している。ハイスピードカメラの撮影速度は 2000 fps、露光時間は 250 μs 、空間分解能は 8.7 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ である。PIV の解析条件は、相関窓サイズが 48x48 pixel、オーバーラップが 50 %であり、平均速度ベクトル場を算出する際には 1000 枚(0.5 秒間)の画像を用いている。ただし、撮影は浮遊開始後から 15 秒程度経過した後に行っており、流動の撮影時間は、蒸発の時間スケールに対して十分に短時間となっている。すなわち、計測時間内において液滴径およびアスペクト比の変化は十分に小さく、流動も定常とみなせる条件にて計測を実施した。

Fig. 4 Velocity fields of the internal flow in the droplets: $d = 1.9\sim 2.5 \text{ mm}$, $p = 2.1\sim 2.7 \text{ kPa}$.

Fig. 5 Schematic of the flow structures of volatile droplets with smaller droplet diameter on the vertical plane.

デカン液滴に関して、液滴鉛直面である yz 平面に着目すると、水平軸を中心軸とした反時計回りの 1 軸の回転運動が生じていた。また、ノナン液滴に関して、液滴水平面である xy 平面に着目すると、鉛直軸を中心軸とした 1 軸の時計回りの回転運動が生じていた。

また、オクタン、ヘプタン液滴に関して、液滴鉛直面である yz 平面に着目すると、デカン液滴と同様に、水平軸を中心軸とした反時計回りの 1 軸の回転運動が生じていた。

エタノール、メタノール液滴の内部では、液滴水平面である xy 平面に着目すると、液滴中心へ向かう流動が計測された。これは、過去の液滴鉛直面における内部流動の計測結果と比較しても整合の取れた結果となっており[12]、この結果から液滴内部では、上下 2 対のトロイダル渦が生じていると推察される。

さらに飽和蒸気圧の大きいヘキサン、ペンタン

液滴では、液滴水平面である xy 平面に着目すると、鉛直軸を中心軸とした反時計回りの 1 軸の回転運動が生じており、再度 1 軸の回転運動が支配的となった。

以上に示した音場浮遊液滴の内部流動計測結果から、液滴鉛直面における、それぞれの流動パターンを模式図として Fig.5 に示す。模式図では内部流動の構造に着目しており、各試料に関する複数回の実験結果から内部流動構造の再現性を確認している。既存研究より、各液滴の外部流動計測が行われているため[13]、外部流動の模式図も合わせて示す。外部流動は x 軸および z 軸に関して対称となっているため、ここでは第 3 象限にのみ模式図を示す。デカン、ノナン液滴の外部流動に着目すると、液滴の側部から流入し、液滴の上部および下部へ流出することが明らかになっている。実験により得られているデカン、ノナン液滴の外部流動の流動方向は、Zhao らにより行

Fig. 6 Velocity fields of the internal flow in the droplets: $d = 2.4 \sim 2.7 \text{ mm}$, $p = 2.1 \sim 2.6 \text{ kPa}$.

(a) Droplets with smaller droplet diameter.

(b) Droplets with larger droplet diameter.

Fig. 7 Schematic of the flow structures of volatile droplets on the horizontal plane.

われた解析結果と一致しており、液滴界面近傍において音波に関する振動境界層であるストークス層内の循環の存在が予測される[18]。しかしながら、内部流動に関しては、Zhao らにより行われた解析結果のように上下 2 対のトロイダル渦は発生しておらず、液滴内部には 1 軸の回転運動のみが生じていた。これは、液滴を浮遊させる際の不可避な影響に起因する非対称性や不整合[3]、例えば、音波に存在するノイズやシリンジによる液滴の注入などに起因して、液滴中心を基準とする 4 つの象限に存在が予測されるストークス層の対称性が崩れたために、内部流動の駆動力が液滴周りで不均一となったためであると推察される。そのため、Fig. 5(a)のように、液滴内には回転が発生したと示唆される。また、液滴の内部に

おいて 1 軸の回転運動の回転方向が異なる結果も確認されており、その回転方向に対しても音波に存在するノイズやシリンジによる液滴の注入が影響していると考えられる。

続いて、オクタン、ヘプタン液滴の外部流動に着目すると、液滴の上部および下部から流入し、側部へ流出することに加え、液滴界面近傍に 2 つの循環渦を確認できることが明らかとなっている[13]。このように外部流動構造が変化する要因は、液滴が揮発性流体であるため、液滴から揮発した成分が音波の影響により液滴周囲に捕らわれることにあると示唆される。一方、内部流動に着目すると、飽和蒸気圧の増加に伴い液滴外部の流動構造は変化したにもかかわらず、液滴内部ではデカン、ノナン液滴と変わらず 1 軸の回転運動

が生じている。そのため、オクタン、ヘプタン液滴においても、液滴周りの駆動力が不均一のために、内部流動に関しては Fig. 5(b) のように 1 軸の回転運動が支配的であると示唆される。

エタノール、メタノール液滴の内部では、上下 2 対のトロイダル渦が生じていると推察される。このことから、1 軸の回転運動よりも液滴界面に存在が予測されるストークス層内の循環が支配的となり、内部流動構造が遷移したと示唆される。ここで Fig. 5(c) に示すように、液滴内外部の流動方向に着目すると、外部に存在する循環渦と液滴の内部流動では、流動方向が逆転していることから、理論で示される通りストークス層が存在し、その中に循環が存在することが示唆される。

ヘキサン、ペンタン液滴の内部では、再度 1 軸の回転運動が生じた。また、ヘキサン、ペンタン液滴の外部流動に着目すると、既存の実験結果 [14] より、飽和蒸気圧の増加に伴い界面近傍に存在する循環渦は小さくなることが明らかとなっている。そのため、界面近傍に存在する循環渦の大きさの減少に伴い、循環渦に起因する液滴内外の流動の相関は局所的となったため、Fig. 5(d) のように内部流動全体としては再度 1 軸の回転運動が支配的になったと示唆される。液滴内部の界面近傍においては、液滴外部に存在する循環渦の影響により、複雑な流動構造が生じている可能性があり、今後はより詳細な計測が必要である。

さらに、それぞれの試料を浮遊させた際、比較的液滴径が大きい場合に、Fig. 4 で示した流動構造とは異なる流動構造が現れた。Fig. 6 に、Fig. 4 とは異なる流動構造が現れた際の、デカン、ノナン、オクタン、ヘプタン、エタノール、メタノール、ヘキサン、ペンタン液滴の内部流動に関する 2 次元 3 成分の平均速度ベクトル場を示す。ハイスピードカメラおよび PIV 解析に関する条件は、Fig. 4 と同様である。デカン、オクタン、ヘプタン、エタノール、メタノール、ヘキサン、ペンタン液滴に関して、液滴水平面である xy 平面に着目すると、2 つの渦を持つ流動構造が生じていることが明らかとなった。さらに、ノナン液滴においては、液滴水平面である xy 平面に着目すると、4 つの渦を持つ流動構造が生じることが明らかとなった。

Fig. 4 および Fig. 6 のように得られた内部流動計測結果から、液滴水平面における内部流動の流

動パターンの模式図を Fig. 7 に示す。Fig. 7 に示すように、音場浮遊法により浮遊した 8 種類の揮発性試料の内部流動には、液滴径に依存して 2 つの流動パターンが存在することが明らかとなった。

本実験では、液滴径の増加に伴い流動構造の遷移が生じた。しかしながら、音場浮遊法においては、液滴径の増加に伴い、液滴の形状や浮遊位置など、従属して変化するパラメータが多く存在する。また、浮遊液滴は扁平形状であることから、液滴の側部では上下部よりも蒸発が促進している可能性がある。そのため、温度差もしくは濃度差に起因する表面張力差により生じるマランゴニ対流が内部流動に影響していることが示唆される。

さらには、計測時間より大きな時間スケールで見た場合、蒸発による液滴径の減少や液滴成分の変化によっても、揮発性液滴の内部流動構造は遷移することが考えられる [12]。以上より、音場浮遊液滴の内外部に関する非接触での密度場および温度場の計測に加えて、適切な無次元数を用いた流動構造の整理が今後は求められる。

4. 結 言

本研究では、蒸発挙動を伴う音場浮遊液滴に生じる内部流動構造の 3 次元性の解明を目的とし、飽和蒸気圧の異なる 8 種類の試料を用いてステレオ PIV による音場浮遊液滴の内部流動計測を実施した。

デカン、ノナン、オクタン、ヘプタン液滴においては、液滴内に 1 軸の回転運動が生じていることが明らかになった。また、エタノール、メタノール液滴では、液滴内水平面において液滴中心へ向かう流れが生じることが明らかになった。さらに飽和蒸気圧の大きいヘキサン、ペンタン液滴では、再度液滴内部に 1 軸の回転運動が生じることが明らかになった。

さらに、各試料の液滴径が増加すると、デカン、オクタン、ヘプタン、エタノール、メタノール、ヘキサン、ペンタン液滴では、液滴水平面に 2 つの渦を持つ流動構造へ、ノナン液滴では、液滴水平面に 4 つの渦を持つ流動構造へ遷移することが明らかになった。

以上より、音場浮遊液滴の内部流動は揮発性に依存して変化するとともに、液滴径に依存して 2

つの流動パターンが存在することが明らかになった。

謝 辞

本研究は JSPS 科学研究費補助金(15H03925) の助成を受けると共に、JAXA 宇宙環境利用科学委員会研究班ワーキング・グループ「浮遊液滴非線形ダイナミクス」の活動の一環として実施したものである。本研究の実施にあたり、JAXA の松本聡主任研究開発員、福井大学附属国際原子力工学研究所の渡辺正教授、東京大学の西成活裕教授、千葉大学の北畑裕之准教授より貴重なご意見を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- [1] King, L. V., On the Acoustic Radiation Pressure on Spheres, *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A*, Vol. 147, 212-240 (1934).
- [2] Yarin, A. L., Pfaffenlehner, M. and Tropea, C., On the Acoustic Levitation of Droplets, *J. Fluid Mech.*, Vol. 356, 65-91 (1998).
- [3] Trinh, E. H. and Wang, T. G., Large-Amplitude Free and Driven Drop-Shape Oscillations: Experimental Observations, *J. Fluid Mech.*, Vol. 122, 315-338 (1982).
- [4] Bouyer, C., Pu, C., Güven, S., Demirtaş, T. T., Nieland, T. J. F., Padilla, F. and Demirci, U., A Bio-Acoustic Levitational (BAL) Assembly Method for Engineering of Multilayered, 3D Brain-Like Constructs, Using Human Embryonic Stem Cell Derived Neuro-Progenitors, *Adv. Mater.*, Vol. 28, 161-167 (2016).
- [5] Sundvic, M., Nieminen, H. J., Salmi, A., Panula, P. and Hægström, E., Effects of Acoustic Levitation on the Development of Zebrafish. *Danio Rerio*, *Embryos*, *Scientific Reports*, Vol. 5, Article number: 13596 (2015).
- [6] Vasileiou, T., Foresti, D., Bayram, A., Poulikakos, D. and Ferrari, A., Toward Contactless Biology: Acoustophoretic DNA Transfection, *Scientific Reports*, Vol. 6, Article number: 20023 (2016).
- [7] Nordine, P. C., Merkley, D., Sickel, J., Finkelman, S., Tell, R., Kaiser, A. and Prieler, R., A Levitation Instrument for Containerless Study of Molten Materials, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 83, Article number: 125107 (2012).
- [8] Rehder, S., Jian, X. W., Laackmann, J., Moritz, H., Rantanen, J., Rades, T. and Leopold, C. S., A Case Study of Real-Time Monitoring of Solid-State Phase Transformations in Acoustically Levitated Particles Using near Infrared and Raman Spectroscopy, *Eur. J. Pharm. Sci.*, Vol. 48, 97-103 (2013).
- [9] Yarin, A. L., Brenn, G., Kastner, O., Rensink, D. and Tropea, C., Evaporation of Acoustically Levitated Droplets, *J. Fluid Mech.*, Vol. 399, 151-204 (1999).
- [10] Rednikov, A. Y., Hong, Z., Sadhal, S. S. and Trinh, E. H., Steady Streaming around a Spherical Drop Displaced from the Velocity Antinode in an Acoustic Levitated Field, *Q. J. Mech. Appl. Math.*, Vol. 59(3), 377-397 (2006).
- [11] Ishii, H., Hasegawa, K., Kaneko, A. and Abe, Y., Internal and External Flow Structure and Mass Transport Phenomena of an Acoustically Levitated Droplet, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 78(794), 1696-1709 (2012).
- [12] Hasegawa, K., Abe, Y. and Goda, A., Microlayered Flow Structure around an Acoustically Levitated Droplet under a Phase-Change Process, *npj Microgravity*, Vol. 2, Article number: 16004 (2016).
- [13] Goda, A., Niwa, M., Hasegawa, K., Kanagawa, T., Kaneko, A. and Abe, Y., Relationship between Internal and External Flows of an Acoustically Levitated Droplet with Evaporation, *Proc. of Japanese Multiphase Flow Symposium (in Japanese)*, USB, Paper No. C324 (2015).
- [14] Goda, A., Hasegawa, K., Kanagawa, T., Kaneko, A. and Abe, Y., External Flow Structure and Interfacial Transport Phenomena of an Acoustically Levitated Droplet, *Japanese Journal of Multiphase Flow*, Vol. 28(5), 539-546 (2015).
- [15] Shitanishi, K., Hasegawa, K., Kaneko, A. and Abe, Y., Study on Heat Transfer and Flow Characteristic Under Phase-Change Process of an Acoustically Levitated Droplet, *Microgravity Sci. Technol.*, Vol. 26, 305-312 (2014).
- [16] Niwa, M., Goda, A., Hasegawa, K., Kanagawa, T., Kaneko, A. and Abe, Y., Effect of Temperature Change on Internal-External Flow and Convective Heat Transfer of an Acoustically Levitated Droplet, *Japanese Journal of Multiphase Flow*, Vol. 29(5), 501-508 (2016).
- [17] Abe, Y., Hyuga, D., Yamada, S. and Aoki, K., Study on Internal Flow and Surface Deformation of Large Droplet Levitated by Ultrasonic Wave, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, Vol. 1077, 49-62 (2006).
- [18] Yamamoto, Y., Abe, Y., Fujiwara, A., Hasegawa, A. and Aoki, K., Internal Flow of Acoustic Levitated Droplet, *Microgravity Sci. Technol.*, Vol. 20, 277-280 (2008).
- [19] Zhao, H., Sadhal, S. S. and Trinh, E. H., Internal Circulation in a Drop in an Acoustic Field, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 106(6), 3289-3295 (1999).
- [20] Shen, C. L., Xie, W. J., Yan, Z. L. and Wei, B., Internal Flow of Acoustically Levitated Drops Undergoing Sectorial Oscillation, *Physics Letters A*, Vol. 374, 4045-4048 (2010).
- [21] Yan, Z. L., Xie, W. J. and Wei, B., Vortex Flow in Acoustically Levitated Drops, *Physics Letters A*,

- Vol. 375, 3306-3309 (2011).
- [22] Wei, Y., Deng, W. and Chen, R. H., Effects of Internal Circulation and Particle Mobility during Nanofluid Droplet Evaporation, *Int. J. Heat Mass Tran.*, Vol. 103, 1335-1347 (2016)
- [23] Minor, G., Oshkai, P. and Djilali, N., Optical Distortion Correction for Liquid Droplet Visualization Using the Ray Tracing Method: Further Considerations, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 18, L23-L28 (2007).
- [24] Lemmon, E. W., Huber, M. L., McLinden, M. O., NIST Standard Reference Database 23, NIST Reference Fluid Thermodynamics and Transport Properties – REFPROP, Version 9.0.
-