

静止ナトリウム液滴燃焼実験(Ⅱ)

(研究報告書)

2004年3月

東 邦 大 学

核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 4 9

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division ,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu , Tokai-mura , Naka-gun , Ibaraki 319-1184 ,

Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

© 東邦大学
(Toho University)

2 0 0 4

静 止 ナトリウム液 滴 燃 焼 実 験 (Ⅱ)

(研 究 報 告 書)

佐 藤 研 二 *

要 旨

ナトリウム液滴燃焼挙動の現象論的解明に向けた研究の一環として、これまでにナトリウム静止液滴を対象に常温空気流中での着火燃焼実験を実施し、高速度カメラを用いた着火挙動の観察、着火遅れ時間、液滴温度の時間変化の測定を行ってきた。

本研究では、直径 4 mm の静止液滴を用い、液滴初期温度が 300℃ と 400℃ において、周囲の乾燥空気流速を 200 cm/s までの拡張してナトリウム液滴の着火燃焼実験を実施し、空気流速、液滴初期温度が着火挙動と着火遅れ時間に与える影響を調べた。主な結果は以下のとおりである。

- (1) 実験を行った範囲では、300℃ で 200 cm/s の条件において液滴の上端（下流端）部分が空気流に暴露後縦方向に伸びてしまう現象がみられたが、その他の実験条件では液滴がほぼ球形を保った状態で着火現象が生じた。
- (2) 着火遅れ時間（着火時刻を液滴表面に接する気相部での橙色の発光の出現で定義）は流速の増加とともに減少する。ただし、着火遅れ時間の流速による変化の割合は、流速とともに小さくなる傾向がみられる。代表的な着火遅れ時間として、初期液滴温度 400℃ のときに、50 cm/s で 0.68 s, 100 cm/s で 0.52 s, 200 cm/s で 0.37 s の値が得られた。
- (3) 橙色の発光の出現（着火）はいずれの流速でも液滴上端付近を除いてほぼ同時に生じる。着火時の発光は上流側ほど強く、また流速が大きいほど着火後の発光強さが大きい。
- (4) 液滴初期温度 300℃ を中心に着火に至る過程で液滴の上流側表面に一時的に現れる多数の柱状（針状）は高流速になってもみられる。突起は低流速ではおおむね着火までに消失するが高流速では一部消滅しないままに着火に至ることもある。
- (5) 着火時刻までの間に液滴を包む煙層（微粒子の層）が形成されるがその厚さは流速の増加とともに減少する。また、高流速では、煙層の液滴下流側ではなく離現象が観察される。

より大きな空気流速で最小着火遅れ時間が現れる可能性も考えられるが、その存在についてはさらに高流速域での実験を行って確認する必要がある今後の課題と考えられる。

* 東邦大学理学部物理学科

核燃料サイクル開発機構・東邦大学共同研究「ナトリウム液滴の燃焼挙動に関する研究（Ⅲ）」

東邦大学実施分 研究報告書

核燃料サイクル開発機構担当部署：大洗工学センター要素技術開発部熱化学安全試験グループ

An Experimental Study on Suspended Sodium Droplet Combustion (II)

(Research Document)

Kenji Sato*

Abstract

As part of studies for phenomenological investigation of sodium droplet burning behavior, in our previous experimental studies for suspended single sodium droplet, behavior of ignition process and succeeding combustion, ignition delay time, and droplet temperature history had been investigated.

In the present study, by using 4 mm diam. suspended sodium droplet, combustion experiments were performed for extended free-stream velocity range of dry air up to 200 cm/s, and for the initial droplet temperatures $T_i = 300^\circ\text{C}$ and 400°C , and the effects of the free-stream velocity and initial droplet temperature on the ignition/burning behavior and ignition delay time were examined by using high speed video camera.

The obtained experimental results are as follows:

- (1) Ignition phenomena of suspended spherical shape droplet were observed for all examined experimental conditions except the case of free-stream velocity $U = 200$ cm/s at 300°C , where detachment of droplet from the support due to strained oxide film occurred.
- (2) The ignition delay time defined as the time to evolution of orange-light emitting zone or flame zone decreases with the increase of the free-stream velocity or of initial droplet temperature. Examples of typical ignition delay time are 0.68 s at $U = 20$ cm/s, 0.52 s at $U = 100$ cm/s, and 0.37 s at 200 cm/s for $T_i = 400^\circ\text{C}$.
- (3) The orange-light emission at the moment of ignition occurs simultaneously over whole surface except the top region of the droplet. The intensity of the emission at the moment of ignition takes its maximum at the bottom region or upstream region of the droplet, and the emission intensity during the stable burning period increases with the increase of U .
- (4) When T_i is 300°C , formation of temporal multiple short projections are observed before ignition for all examined free-stream velocities. The projections often do not disappear before ignition when the velocity is relatively high.
- (5) The layer or cloud composed of aerosol is formed before ignition, and its thickness decreases with the increase of U . As U increases, the separation of the layer at the downstream region of the droplet is observed.

Since there is some possibility of the existence of minimum ignition delay time with further increase of free-stream velocity of the air, further studies at higher flow velocity will be necessary to investigate it.

* Department of Physics, Faculty of Science, Toho University

目 次

1. はじめに	1
2. 実験装置と実験方法	2
3. 実験結果	4
3.1 着火遅れ時間	4
3.2 着火過程の様子	5
4. 実験結果の検討	9
5. おわりに	10
謝辞	11
参考文献	12

図リスト

図1	燃焼実験装置全体の概要	13
図2	着火遅れ時間（液滴初期直径 $D \approx 4 \text{ mm}$ ）	14
図3	着火過程の連続写真（ $T_i = 300 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 20 \text{ cm/s}$, $D = 3.92 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.02 \text{ s}$ ）	15
図4	着火過程の連続写真（ $T_i = 300 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 60 \text{ cm/s}$, $D = 3.96 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.02 \text{ s}$ ）	17
図5	着火過程の連続写真（ $T_i = 300 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 100 \text{ cm/s}$, $D = 4.07 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.02 \text{ s}$ ）	19
図6	着火過程の連続写真（ $T_i = 300 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 140 \text{ cm/s}$, $D = 4.00 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.02 \text{ s}$ ）	21
図7	着火過程の連続写真（ $T_i = 300 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 180 \text{ cm/s}$, $D = 3.84 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.02 \text{ s}$ ）	22
図8	着火過程の連続写真（ $T_i = 300 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 200 \text{ cm/s}$, $D = 3.89 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.02 \text{ s}$ ）	23
図9	着火過程の連続写真（拡大）（ $T_i = 300 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 20 \text{ cm/s}$, $D = 3.92 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ ）	24
図10	着火過程の連続写真（拡大）（ $T_i = 300 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 100 \text{ cm/s}$, $D = 4.07 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ ）	26
図11	着火過程の連続写真（拡大）（ $T_i = 300 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 180 \text{ cm/s}$, $D = 3.84 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ ）	27
図12	着火過程の連続写真（ $T_i = 400 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 20 \text{ cm/s}$, $D = 4.22 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.02 \text{ s}$ ）	28
図13	着火過程の連続写真（ $T_i = 400 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 60 \text{ cm/s}$, $D = 4.00 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.02 \text{ s}$ ）	30
図14	着火過程の連続写真（ $T_i = 400 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 100 \text{ cm/s}$, $D = 4.13 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.02 \text{ s}$ ）	32
図15	着火過程の連続写真（ $T_i = 400 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 140 \text{ cm/s}$, $D = 4.16 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.02 \text{ s}$ ）	33
図16	着火過程の連続写真（ $T_i = 400 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 180 \text{ cm/s}$, $D = 3.98 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.02 \text{ s}$ ）	34
図17	着火過程の連続写真（ $T_i = 400 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 200 \text{ cm/s}$, $D = 4.02 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.02 \text{ s}$ ）	35
図18	着火過程の連続写真（拡大）（ $T_i = 400 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 20 \text{ cm/s}$, $D = 4.22 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ ）	36
図19	着火過程の連続写真（拡大）（ $T_i = 400 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 100 \text{ cm/s}$, $D = 4.13 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ ）	38
図20	着火過程の連続写真（拡大）（ $T_i = 400 \text{ }^\circ\text{C}$, $U = 180 \text{ cm/s}$, $D = 3.98 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ ）	39

1. はじめに

本研究では、ナトリウム漏えい燃焼挙動の現象論的解明に向けて行っているナトリウム単一液滴の着火挙動，着火後の燃焼挙動，落下挙動を把握するための核燃料サイクル開発機構と東邦大学との共同研究「ナトリウム液滴の燃焼挙動に関する研究」の一環として，懸垂したナトリウム静止液滴を対象に周囲空気流速や液滴初期温度を変えて着火燃焼実験を実施し，液滴の着火および着火後の燃焼の挙動，そのときの液滴付近の温度変化を調べている。

平成15年度では，実験装置の空気供給系に変更を加えてこれまで最高で60 cm/sであった液滴周囲の空気流の速度範囲を2 m/sまで拡大して着火燃焼実験を行い，高速ビデオ撮影により，着火挙動，着火時間に及ぼす空気流速の影響をより広範囲に調べた。また，実験実施に先立ち，液滴保持用ステンレス細管の燃焼生成物による目詰まりの円滑な実験の繰り返しへの影響を軽減する目的で平成14年度に導入したカートリッジ方式細管部分の改良をはかり，その改善効果を実験において確認した。なお，当初液滴付近の温度の時間変化についても平成14年度に引き続き調べる予定であったが，実験スケジュールの関係で測定を行うまでには至らなかった。

2. 実験装置と実験方法

平成14年度は実験装置と実験方法の種々の改善，変更を行った結果，実験条件の設定の精緻化，映像の高速映画の映像の視認性の向上が図られた¹⁾。平成15年度は空気流速範囲の拡大に関する部分，懸垂用細管の部分の変更を行いそのほかの部分についてはほぼ平成14年度と同様とした。

図1に燃焼実験装置全体の概要を示す。液滴はグローブボックスのほぼ中央に形成される。液滴の生成では，まずグローブボックス上方に貯蔵されたナトリウムがリボンヒーターで加熱されて熔融し，その下にある β -アルミナに流す電流に比例する量がナトリウム供給配管中に押し出される。押し出されたナトリウムはステンレス細管（液滴懸垂用ノズル；外径 1.0 mm，内径0.6 mm）先端から管外に出て，酸化防止と保温を兼ねてガラス管の中を流れる高温ヘリウム中で液滴を生成する^{1),2),3)}。 β -アルミナに続く配管の途中から二重管となりヘリウムがナトリウムの外側を流れ，ともに二重管を囲むヒーターで加熱される。毎実験ごとに，微細シース熱電対をガラス管下端から入れてその先端を液滴に接触させて液滴温度をモニターで直接確認しながら液滴初期温度を設定した。所定の大きさの液滴が生成された後，電磁弁でヘリウムの流れを止めると同時にガラス管を電気スイッチで外して液滴を上向の常温空気流にさらして着火燃焼現象を観察した。

平成14年度に自作したカートリッジ型ステンレス細管に強度や接続部からのにじみ等の課題があったために改良型のカートリッジ式細管を用いた。このカートリッジ式細管は細管と一体となった径の大きいスカート部分が上流のステンレス配管の外側を長く包むような形になっていて，強度上の課題が解消されている。取り付け方によってはにじみの現象がみられる場合もあったがこの課題もほぼ解消された。

周囲空気は従来どおり乾燥空気とし高圧容器から供給した。必要空気量をおさえつつ流速範囲を拡大するために，グローブボックス床面中央の空気吹き出し口をこれまでの直径100 mmの円から1辺42 mmの正方形断面に変更している。

高速ビデオは毎秒250コマ，露光時間2 msで撮影した。カメラ側から2個のクセノ

ンランプで照らし，さらに液滴後方に500Wのフラッドランプを置き液滴の背後を明背景として撮影している。

実験条件は，液滴初期直径を水平方向の直径で4 mm，液滴初期温度を300 °Cと400 °Cとし，流速範囲を平成14年度の最大60 cm/s から200 cm/sに拡張した。

3. 実験結果

平成15年度は空気流速範囲を200 cm/sまで拡大し燃焼実験を行った。当初，平成14年度よりも流速が大きい範囲において液滴が流れの影響による振動や変形等を伴わずにステンレス細管下端に安定に懸垂保持されるかどうか懸念もあった。しかし，実験を行った範囲では，温度の影響がでたと思われる一部の条件でのケースを除き，液滴は着火過程の間は細管下端にほぼ安定に保持され続けた。ただし，流速が大きくなると，従来からみられている，燃焼中において現れる細管にそっての液滴の上昇の傾向が強まり，細管下端に懸垂された状態での燃焼状態の継続的な観察ができる時間はより短くなる状況がみられた。

3.1 着火遅れ時間

ナトリウム液滴が空気にさらされるときに着火過程の様子は，空気流速，液滴初期温度によって影響を受ける。着火過程の概要をみると，空気への暴露開始後，まず液滴表面では酸化膜の生成，生成した酸化膜の熔融と続き，気相では酸化膜の部分的な熔融の進行とともに液滴周囲に境界層状の褐色の煙層（微粒子雲）ができ，低流速になるほど形成される煙層の厚さがより大きくなる。やがてほぼ液滴表面全域に沿って煙層内の表面近傍に厚みの小さい橙色の火炎状の発光域が現れ，この発光域がしだいにその強度と厚みを増す。着火過程では時間変化が連続的に起き，着火と判断する時刻の決め方にはいろいろな立場があるが，本研究ではこの橙色の発光が現れる時刻を着火時刻と定義し，ガラス管の移動が始まり液滴が空気にさらされだす時点からこの着火時刻までの時間を着火遅れ時間と定義する。着火過程の様子の詳細については後述することとし，まず着火遅れ時間の測定結果について述べる。

図2に，着火遅れ時間 τ_{ig} と周囲空気流速 U との関係を示し，液滴初期温度 T_i をパラメータとして示した。液滴初期直径 D の設定値は4 mmであるが，実測値では 4.0 ± 0.25 mm 程度の範囲のばらつきがある。液滴初期温度 $T_i = 400$ °C では，10ないし20 cm/s 間隔で，また，300 °C では，20ないし40 cm/s 間隔で実験を行った。60 cm/s において

行った実験で平成14年度に行った実験結果とほぼ同じ値が得られ、再現性がよいことが確認された。液滴初期温度が300℃で $U = 200 \text{ cm/s}$ のときには、液滴が空気にさらされるとほぼ同時に液滴の上端付近が細く伸びて垂れ下がりはじめ、液滴上端がちぎれ落ちるとほぼ同時に細管先端での残存微量ナトリウムで着火が生じたが、この場合、液滴本体での着火現象ではなかったため図には測定値として示していない。なお、平成14年度は $T_i = 285^\circ\text{C}$ で $U = 40 \text{ cm/s}$ のときなど、300℃を多少下回る液滴初期温度において同じような垂れ下がり現象が観察されている。

液滴初期温度の影響をみると、いずれの流速においても液滴初期温度が高いほうが着火遅れ時間 τ_{ig} が短くなっている。一方、液滴初期温度一定下で流速を増すと、 τ_{ig} はその流速依存性（勾配の大きさ； $|d\tau_{ig}/dU|$ ）が徐々に小さくなりつつ短くなる傾向が実験を行った流速範囲全体でみられる。400℃の場合には、200 cm/s付近でのこの勾配はかなり小さくなっている。代表的な τ_{ig} の測定値として、400℃のときに、 $U = 50 \text{ cm/s}$ で0.68 s、100 cm/sで0.52 s、200 cm/sで0.37 s、の値が得られた。

3.2 着火過程の様子

図3から図8に、空気流速 20, 60, 100, 140, 180, 200 cm/sにおける、液滴初期温度300℃のときの着火過程の連続写真を時間間隔0.02 sごとに並べて示した。さらに、図9から図11に、図3, 5, 7の写真の細部を見やすいように拡大して0.1 sごとに並べた図を示した。図中、 t はガラス管が移動を開始してから経過時間を示す。ガラス管上端は動き出してから約0.05 s後に液滴付近を通過する。いずれの場合も、ガラス管が外れ始める $t = 0$ では、液滴表面にカメラ側の2個の照明ランプの光のスポット状反射光が2箇所ありその他の表面では反射がなく、液滴表面は平滑な面となっている。

流速20 cm/sのときの図3と流速60cm/sのときの図4は平成14年度の実験結果をもとにしたもので、これらの条件での変化の様子については平成14年度の報告書でも述べているが、高流速の場合との比較の意味から簡略に記す。流速20 cm/sのとき（図3, 9）をみると、液滴表面は空気にさらされると表面に膜が生じて急速に光沢を失う。

膜は初期には均質性が高いがやがて斑が現れてくる。その後、上流側を中心に表面に針状から円柱状に成長する高さが0.1～0.2 mm程度の数多くの突起が現れる。液滴表面の光沢が増し始めるとともに突起は次々と消滅するがまだ一部の突起が残っている状態のうちに液滴を取り囲むように煙層が気相に現れその厚み、濃度が時間とともに増していく。煙層の輪郭は下流側で紡錘形になっている。この煙層が可視波長域で見えるのは主に液滴背後からの照明光をさえぎる効果と手前からの照明光の反射を中心とした反射光によると考えられる。液滴の表面位置を認識するのが困難な程度までになった煙層の中で、液滴上端付近を除いて、液滴表面にそう薄い層の発光域（炎）が現れ、この発光域の厚みと発光強度が増すのと並行してそれまでの煙層の濃度が薄くなっていく。前述の着火遅れ時間の測定では、前述のようにこの発光域が現れる時刻を着火時刻としている。発光強度は上流側の方が下流側に比べて大きい。十分時間がたった段階では、この発光域とその外側の発光がいくぶん弱い煙層のような微粒子層が液滴を包む形で燃え続ける。

流速60 cm/s（図4）では、流速20 cm/sに比べて時間変化が大きくなっている。煙層の発達の中で、下流側で流れがはがれ再循環領域が形成されるような状態が一時的にみられるが、その後この状態はみられなくなる。煙層の厚みは着火時刻で最も厚くなるが、その厚さは流速20 cm/sのときと比べて小さい。炎の発光強度は大きくなっている。液滴表面での中將突起が消失する時期がいくぶん遅くなっている。なお、 $t = 1.06$ s 付近から、液滴下部で無彩色の領域が現れて広がっているが、これはカメラの電氣的な画像処理の性質によるもので、赤系の発光強度が強くなりすぎたため信号強度を落とす処理がなされ、結果的にこの領域では液滴表面の位置がわかる見え方になっている。

流速100 cm/s（図5、10）では、基本的な液滴表面での変化、炎の様子は60 cm/sの場合と似ていてるが、時間変化がより大きく、上流側での煙層、炎の厚さがさらに減少している。下流側では、煙層の途中ではなく離れる状態が継続し、炎の発生後、炎の下流側の液滴表面からはく離がみられるようになってくる。再循環領域内部では、

液滴表面付近に濃い煙状のものがみられるが逆にその上方では濃度が薄い領域が広がっているように見える。液滴は安定に保持されているが、はく離領域の外側で下流に伸びる煙あるいは炎の先端にはばたつきがみられ、炎の下流側がきれいな紡錘形となった20 cm/sの場合とはいくぶん様子が異なってきている。図10の最後の $t = 1.40$ sでは、無彩色の領域の液滴下部（上流部）表面にそって横方向に伸びる明度の低い部分が拡がりはじめているが、これは発光強度が増したために2段階の信号の抑制処理が行われたことによる。

流速140 cm/s（図6）、流速180 cm/s（図7, 11）では、流速の増加による時間変化割合の増大、下流側でははく離、炎の発光強度の増加などがより強く現れている。着火からしばらくたった時点での液滴上流部分における強い発光領域の外側位置と液滴表面との間の間隔は、流速が大きくなるほど小さくなっており、その変化の割合は流速が小さいほうが大きい。

流速が200 cm/s（図8）では、酸化膜の形成されている間に液滴上部が重さで伸びてちぎれ落ちる現象が発生している。このとき、液滴表面には縦方向のしわがみられる。細管部分に残ったナトリウムではその後着火する様子がみられる。落下開始直後の液滴の尖った上端付近にも煙状のものがみえるが、これは尖った形状による影響によると考えられる。

図12から図17には、空気流速 20, 60, 100, 140, 180, 200 cm/sにおける、液滴初期温度400℃のときの着火過程の連続写真を時間間隔0.02 sごとに並べて示した。さらに、図18から図20に、図12, 14, 16の写真の細部を見やすいように拡大して0.1 sごとに並べた図を示した。

流速が20 cm/s（図12, 18）では、300℃で同じ流速の場合と同様の厚い煙層の発達が着火時刻までにみられている。しかし、300℃の場合とは異なり液滴表面での突起の発生はみられない。着火後の安定な状態に至った後の燃焼状態は300℃, 20 cm/sの場合とほとんど同じで、そのときの発光強度も同じ程度となっている。流速60 cm/s（図13）でも途中で液滴表面の突起がないことと現象の時間変化の違いを除けば

300℃の場合と同様の現象になっている。

流速が100cm cm/s（図14, 19）のときには、詳しく表面を見ると、20 cm/sなどのような低流速の場合とはいくぶん異なり着火に至る途中で液滴表面に多数の背の低い微細な突起が一時的に発生するのがみられるが、300℃においてみられたような柱状になるまで成長することなく消失している。液滴の下流側では300℃で同流速の場合のときのように煙のはく離が顕著に観察されている。

流速が140cm/s（図15）、180cm/s（図16, 20）、200cm/s（図17）でも、基本的には、液滴表面、気相とも流速 100cm cm/sの場合と同様の時間変化を示す着火・燃焼現象となっている。300℃の場合にくらべ、着火後に細管に沿って液滴が上昇する傾向が強まっているのがこれらの写真からわかる。

4. 実験結果の検討

平成15年度の研究では、最高200cm/sと平成14年度よりも流速の大きな範囲での着火・燃焼実験を試み、現象を観察することができた。その結果、この空気流速範囲においては流速の増加とともに、変化率の減少を伴いながらも本研究で橙の気相発光がはじまるまでの時間として定義した着火遅れ時間が減少する結果が得られた。このことから、本研究での実験方法による場合、比較的低い流速範囲から流速を増すとき、着火遅れ時間が減少する範囲がある程度広範囲に続くことが示されたと考えられる。ただし、200cm/s付近ではその変化率が小さいことから、さらに流速を増した場合に最小値をとって、その後牧野らのグループの研究⁴⁾により指摘されている流速による着火遅れ時間の増加の傾向に転じるような傾向との関係に至るかどうかについてさらに実験範囲を拡大して比較する必要があると考えられる。落下実験との関連性からは、10 m/s程度までの結果があることが望ましいと考えられるが、これまでの変化の様子からは数m/s程度の範囲でもその傾向を把握できるとができると考えられる。

また、これまでの実験では主に液滴直径が4mmの場合を対象に空気流速と液滴初期温度の着火過程への影響を調べてきたが、初期液滴径によって流速あるいは温度依存性がどのように変わるかも重要であり、初期液滴直径の影響を調べるのが次の課題として考えられる。

着火後の燃焼状態での発光の強さは、流速の増加の影響を強く受けていることが明らかになった。平成14年度の液滴温度の時間変化の測定結果においては液滴温度はナトリウムの沸点に比較すると低いが、流速が大きくなるほど発光強度の増加と呼応するように液滴温度が高くなる傾向があることが示されており、発光強度の増加を考えると液滴温度が平成14年度の60 cm/sでの測定値の750℃付近よりも大きな値になっていると考えられる。

5. おわりに

直径 4 mm の静止液滴を用い、液滴初期温度が 300℃ と 400℃ について、周囲の乾燥空気流速が 200 cm/s までの広い範囲でナトリウム液滴の着火燃焼実験を実施し、高速カメラによる着火挙動観察を行い、空気流速、液滴初期温度が着火遅れ時間と着火の様子に与える影響を調べた。主な結果は以下のとおりである。

- (1) 液滴初期温度 300℃ で空気流速 200 cm/s において液滴の上端（下流端）部分が縦方向に伸びてしまう現象がみられたが、その他の実験条件では液滴がほぼ球形を保った状態で着火現象が生じた。
- (2) 着火遅れ時間（着火時刻を液滴表面に接する気相部での橙色の発光の出現で定義）は、流速の増加とともに、変化率が小さくなりながら減少する。代表的な着火遅れ時間として、初期液滴温度 400℃ のときに、50 cm/s で 0.68 s, 100 cm/s で 0.52 s, 200 cm/s で 0.37 s の値が得られた。
- (3) 橙色の発光の出現（着火）はいずれの流速でも液滴上端付近を除いてほぼ同時に生じる。着火時の発光は上流側ほど強く、また流速が大きいほど着火後の発光強さが大きい。
- (4) 液滴初期温度 300℃ を中心に着火に至る過程で液滴の上流側表面に一時的に現れる多数の柱状（針状）は高流速になってもみられる。突起は低流速ではおおむね着火までに消失するが高流速では一部消滅しないままに着火に至ることもある。
- (5) 着火時刻までの間に液滴を包む煙層（微粒子の層）が形成されるがその厚さは流速の増加とともに減少する。また、流速が大きくなると、煙層の液滴下流側でのはく離現象が観察されるようになる。

本研究で行った空気流速範囲よりもより大きな空気流速で最小着火遅れ時間が現れる可能性も考えられるが、その存在についてはさらに実験を行って確認する必要がある今後の課題である。

謝辞

本研究は核燃料サイクル開発機構大洗工学センター要素技術開発部熱化学試験グループとの共同研究「ナトリウム液滴の燃焼挙動に関する研究（Ⅲ）」の一部として実施された。同グループの宮原信哉グループリーダー，石川浩康副主任研究員，堂田哲広副主任研究員には，実験方法等についてご指導いただくとともに結果について貴重なご意見をいただいた。

実験の準備，実施および結果の整理には，本学の大学院学生武隈明子君，学部学生川尻朋之君，高橋誠一君，酒井康弘助教授の熱心な協力をいただいた。

上記の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 佐藤研二,「静止ナトリウム液滴燃焼実験(共同研究報告書)」, JNC TY9400 2004-003, 2003.
- 2) 佐藤研二,「静止ナトリウム液滴燃焼基礎実験(動力炉・核燃料開発事業団委託研究内容報告書)」, PNC TJ9807 98-001, 1998.
- 3) 佐藤研二,「静止ナトリウム液滴燃焼基礎実験(II)(核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書)」, JNC TJ9400 99-011, 1999.
- 4) 深田博一, 牧野敦, 堤規之,「ナトリウム液滴の着火遅れ時間に及ぼす酸素濃度, 液滴直径, 温度, 相対速度の影響」, 第40回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.421-422, 2002.

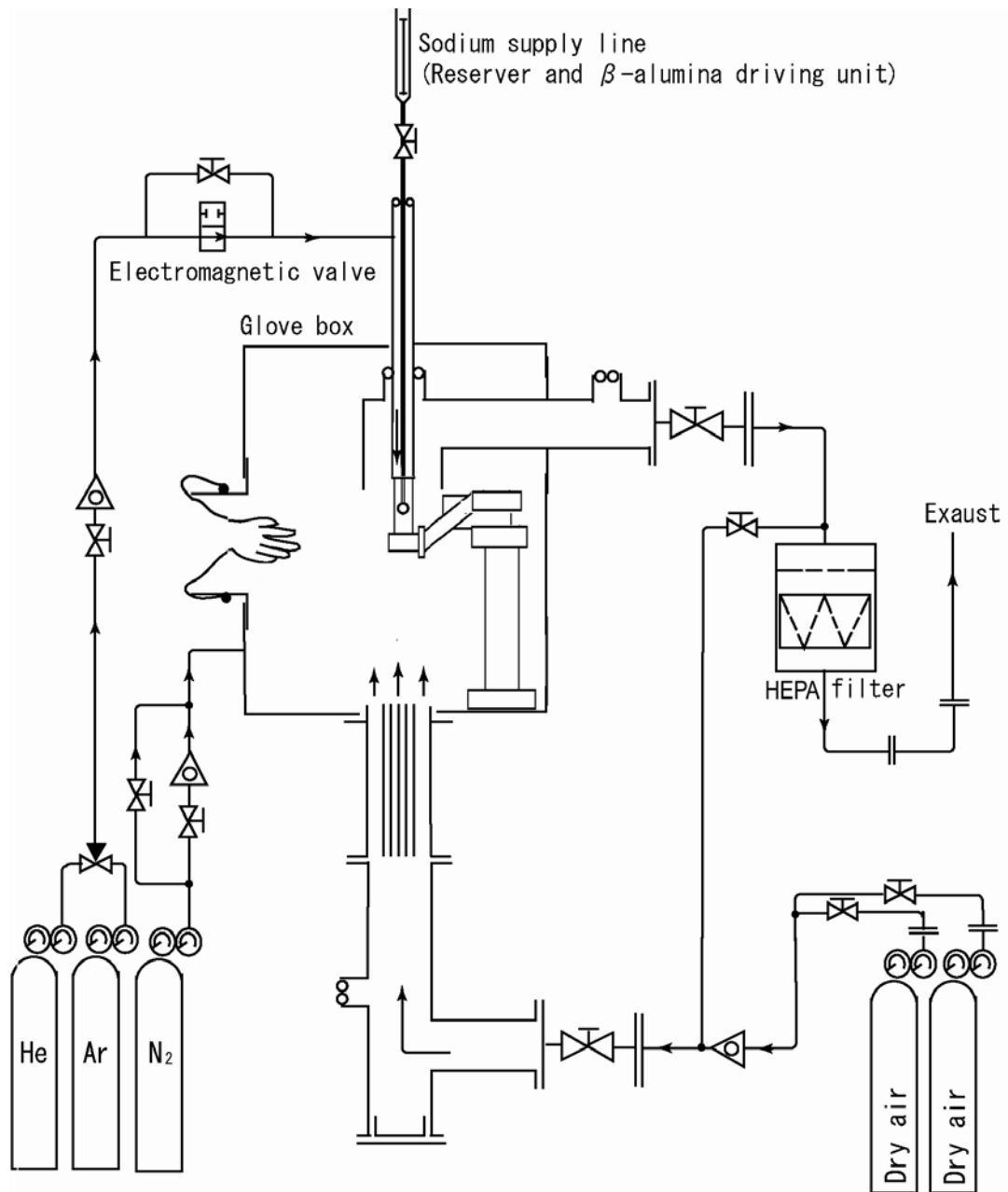


図 1 燃焼実験装置全体の概要

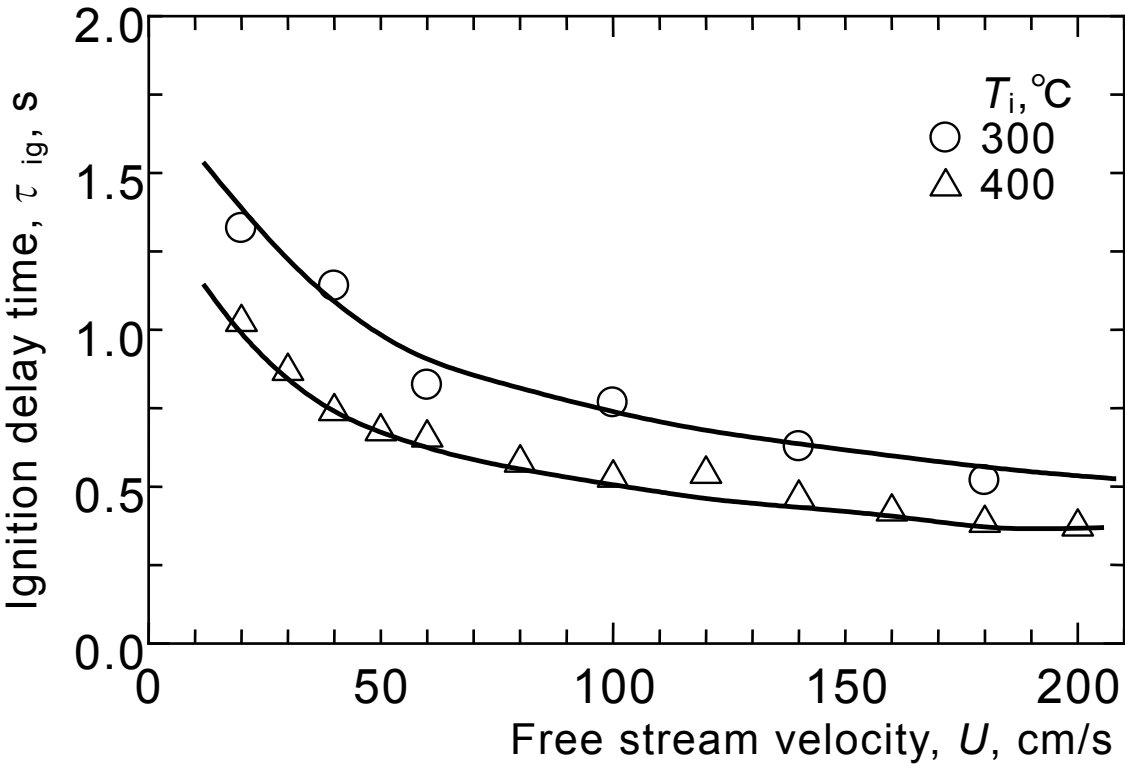


図 2 着火遅れ時間（液滴初期直径 $D \approx 4\text{ mm}$ ）

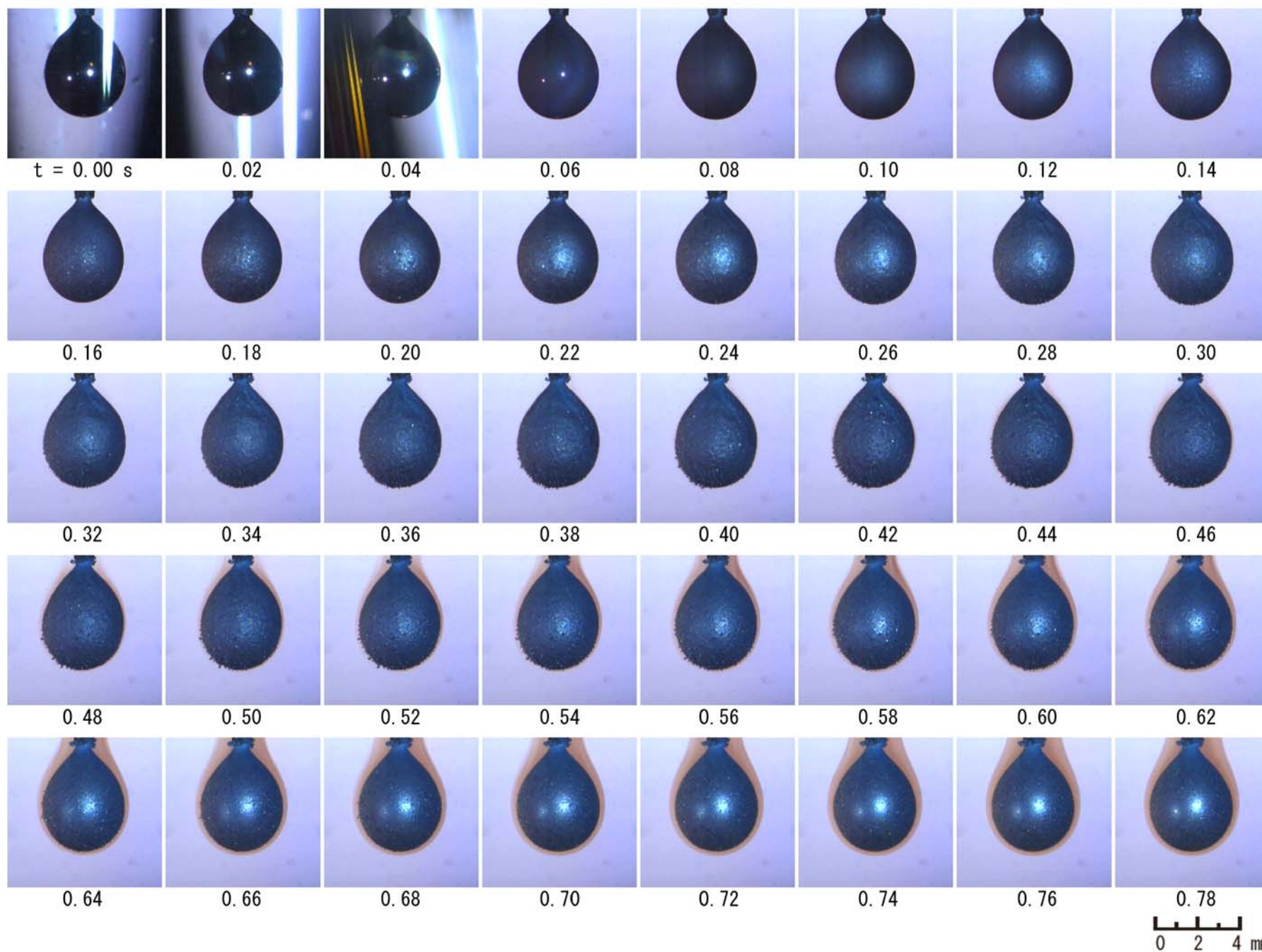


図3 着火過程の連続写真 ($T_i = 300$ °C, $U = 20$ cm/s, $D = 3.92$ mm, $\Delta t = 0.02$ s) (その1)

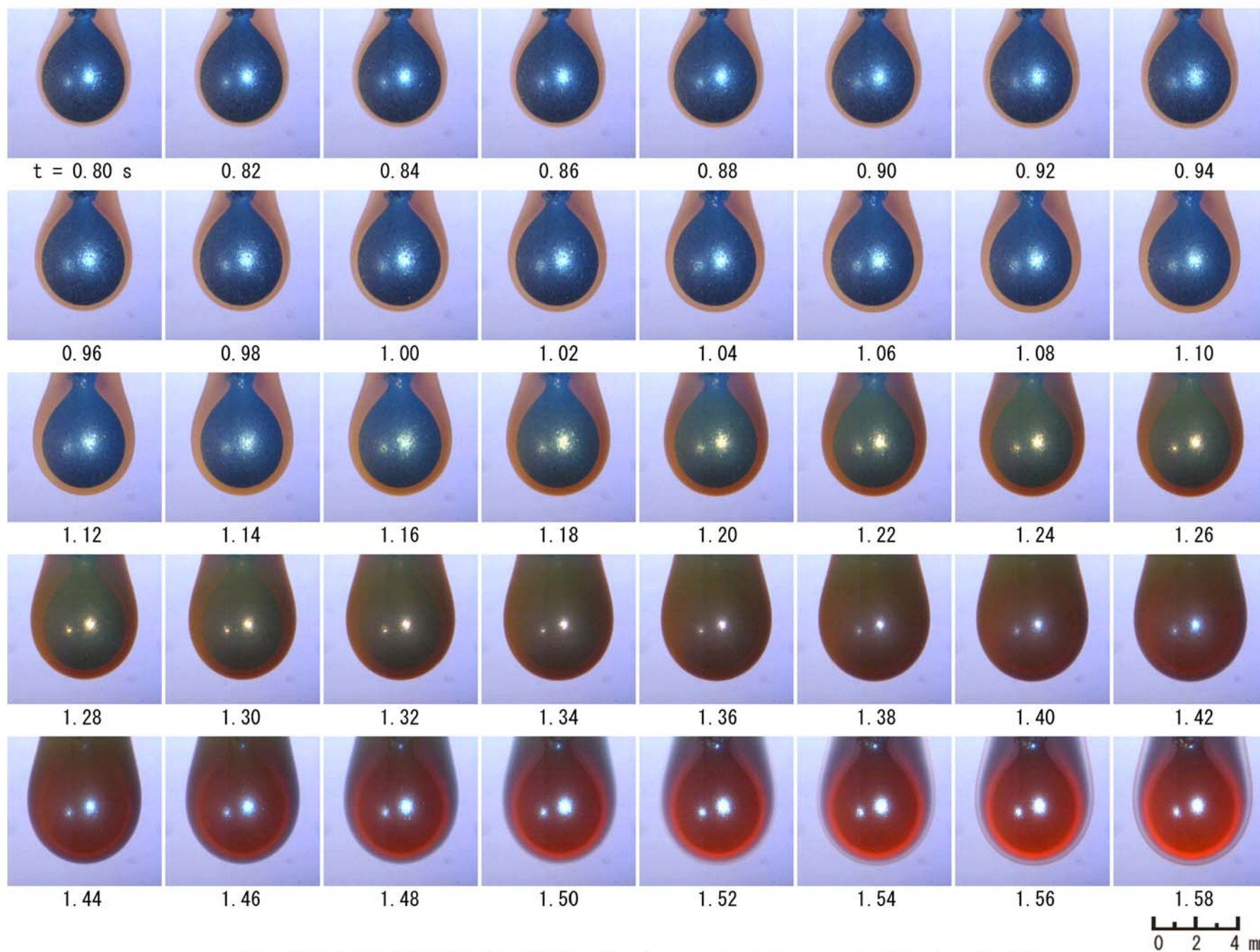


図3 着火過程の連続写真 ($T_i = 300$ °C, $U = 20$ cm/s, $D = 3.92$ mm, $\Delta t = 0.02$ s) (その2)

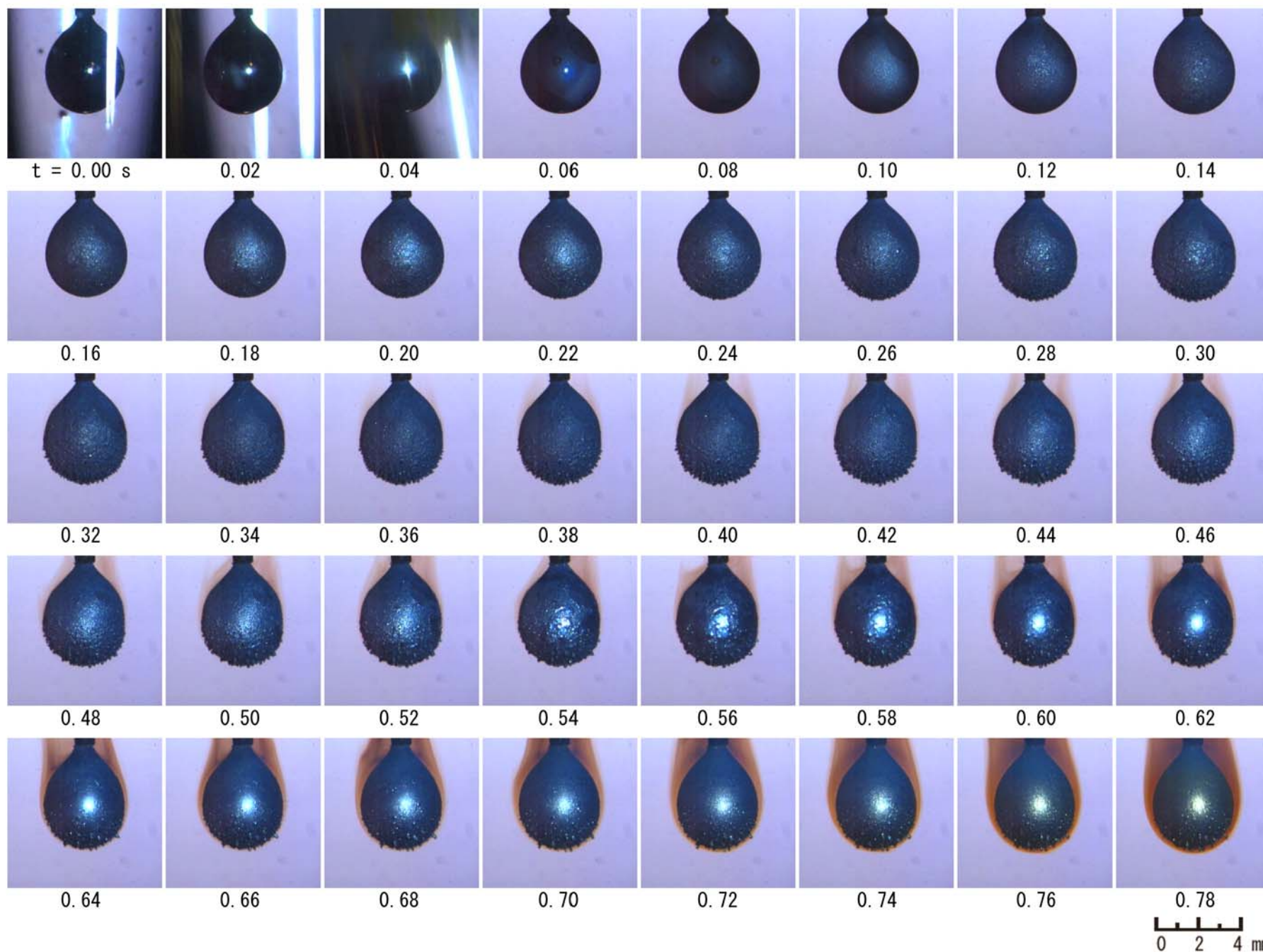


図4 着火過程の連続写真 ($T_i = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $U = 60\text{ cm/s}$, $D = 3.96\text{ mm}$, $\Delta t = 0.02\text{ s}$) (その1)

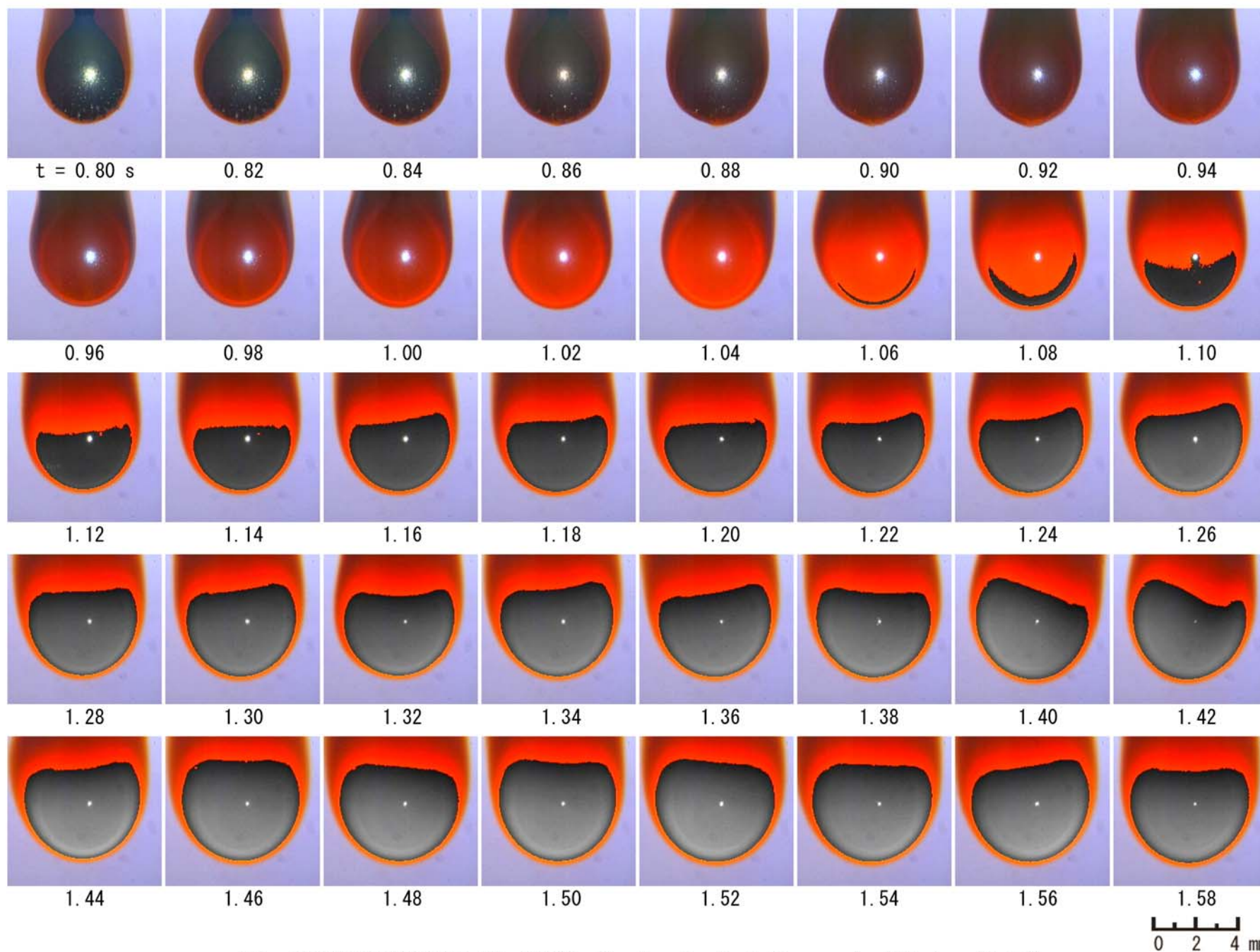


図4 着火過程の連続写真 ($T_i = 300$ °C, $U = 60$ cm/s, $D = 3.96$ mm, $\Delta t = 0.02$ s) (その2)

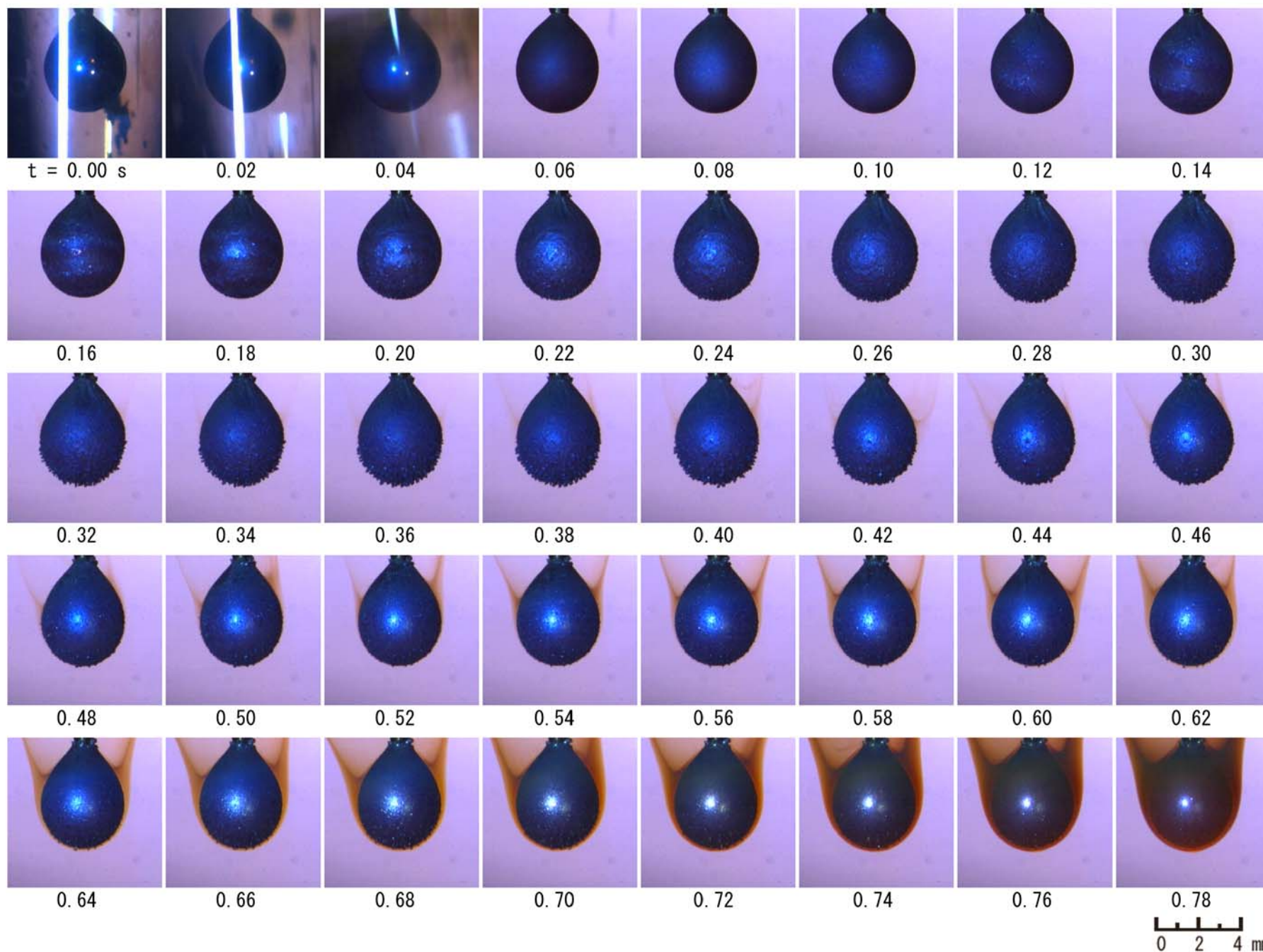


図5 着火過程の連続写真 ($T_i = 300$ °C, $U = 100$ cm/s, $D = 4.07$ mm, $\Delta t = 0.02$ s) (その1)

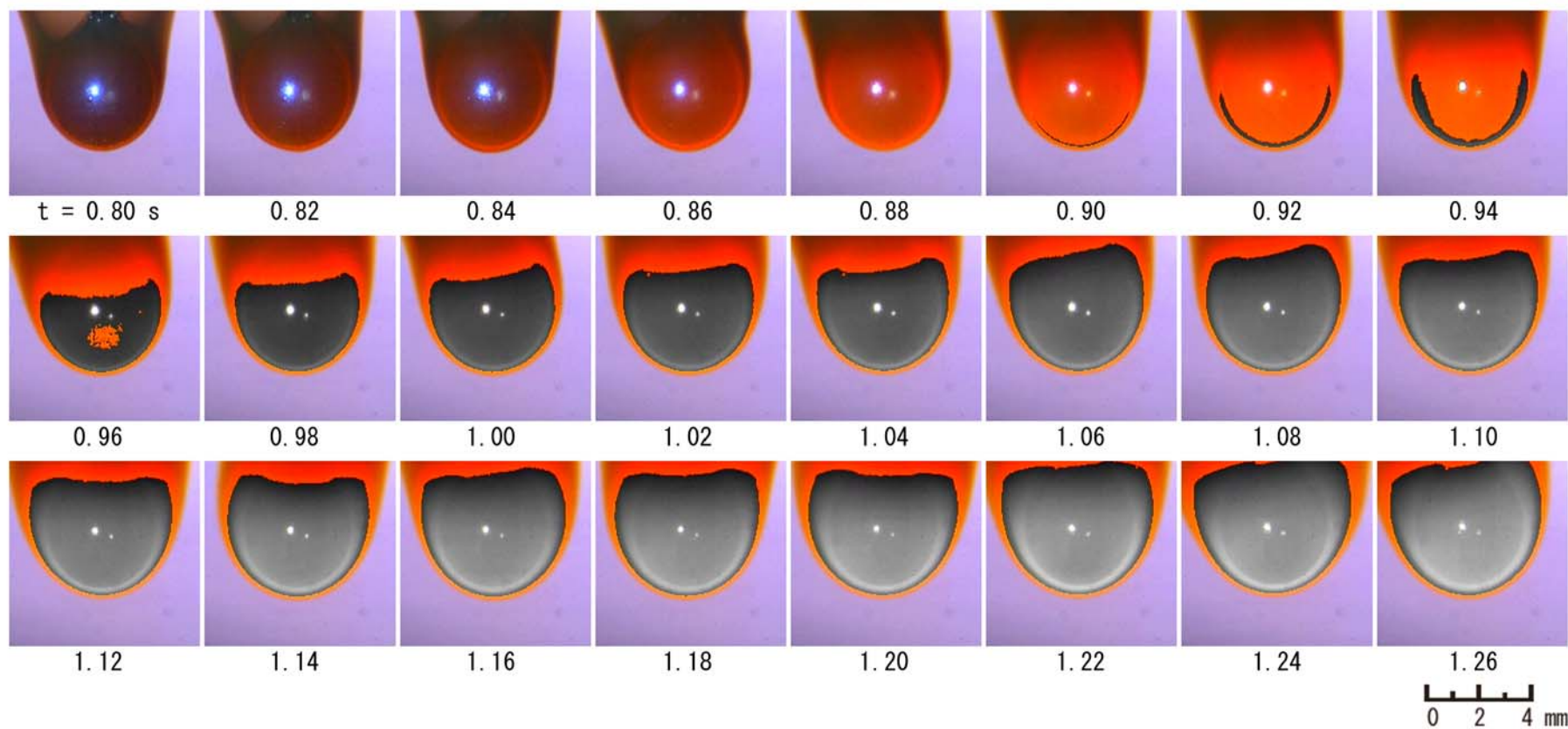


図5 着火過程の連続写真 ($T_i = 300$ °C, $U = 100$ cm/s, $D = 4.07$ mm, $\Delta t = 0.02$ s) (その2)

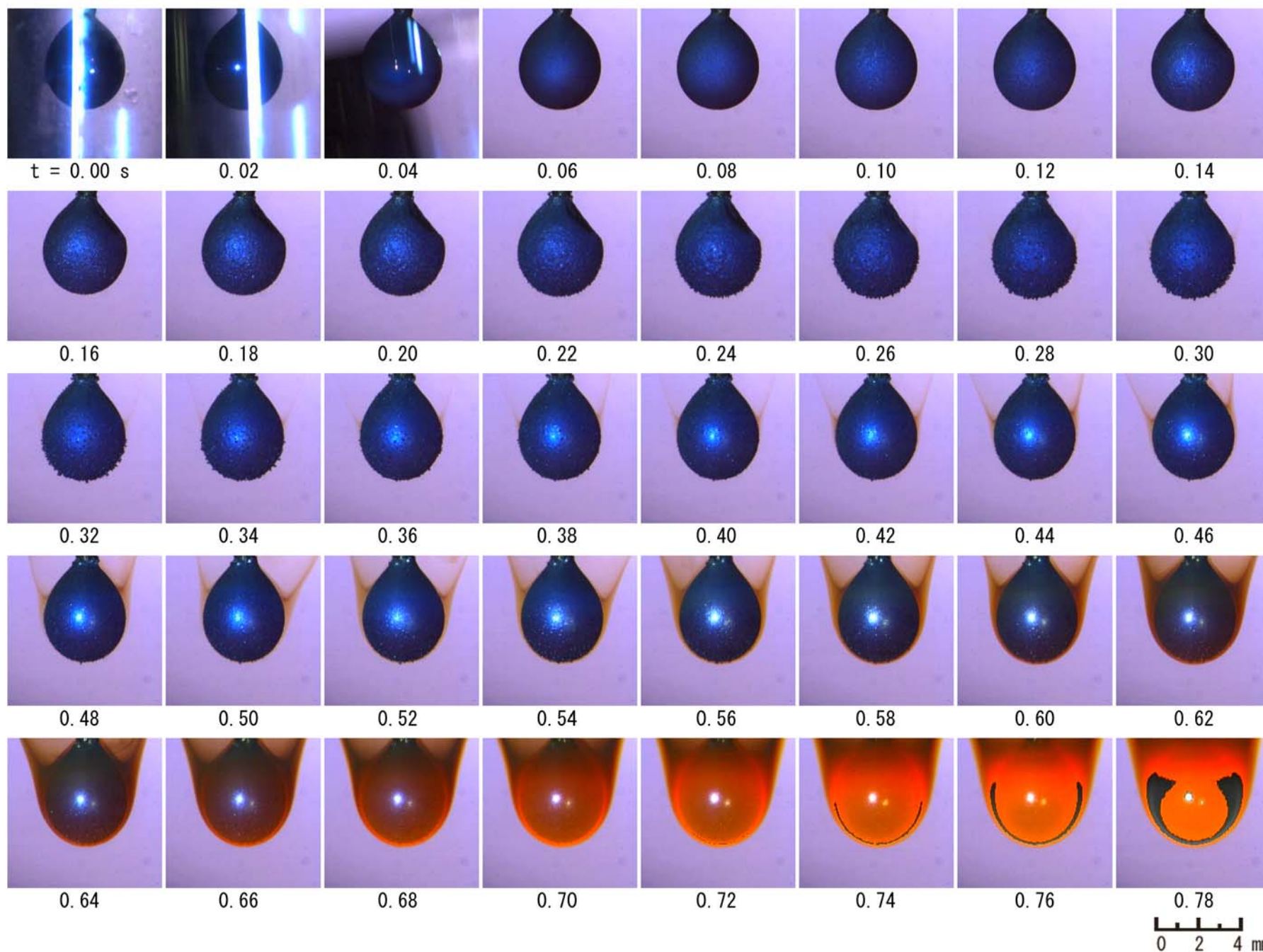


図6 着火過程の連続写真 ($T_i = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $U = 140\text{ cm/s}$, $D = 4.00\text{ mm}$, $\Delta t = 0.02\text{ s}$)

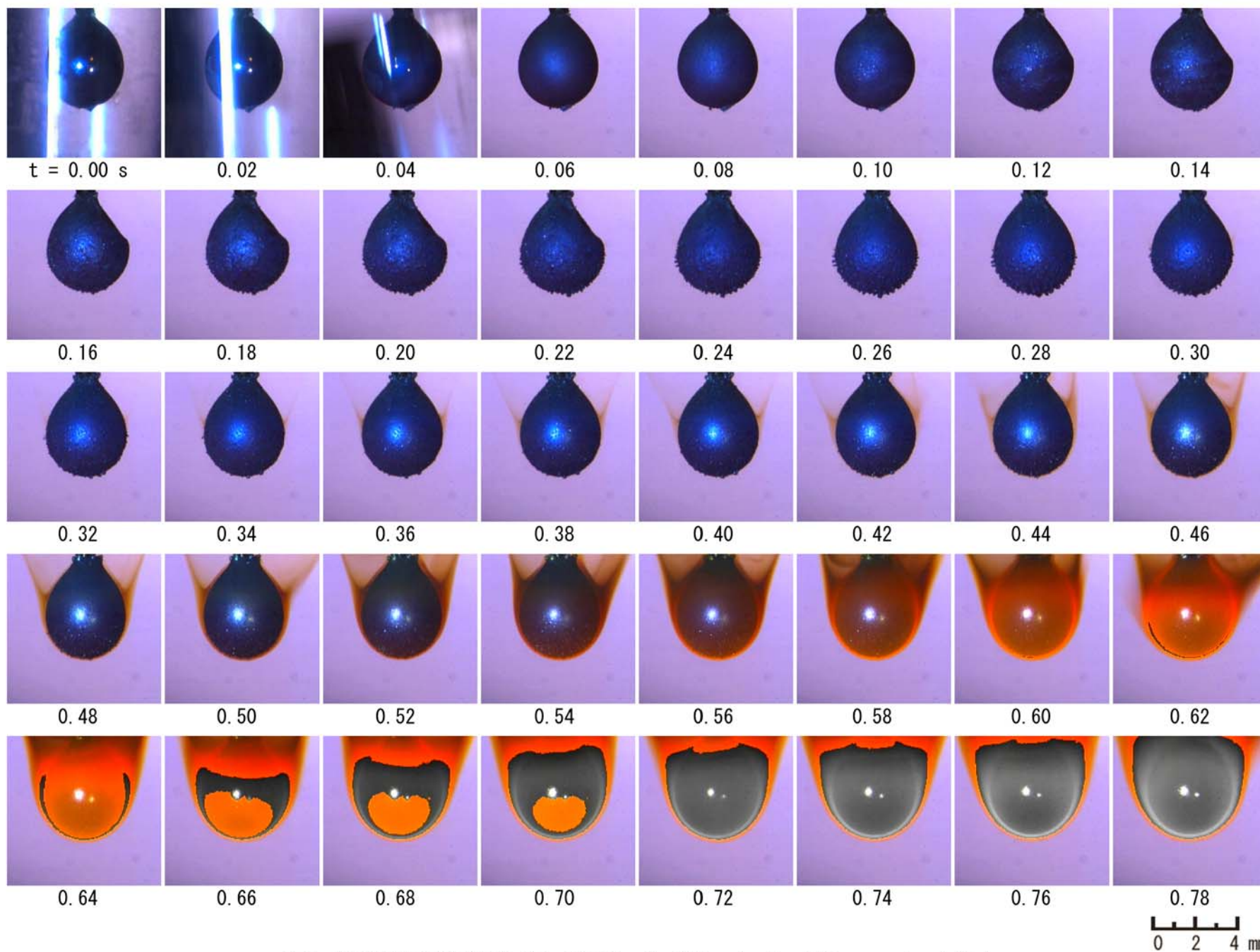


図7 着火過程の連続写真 ($T_i = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $U = 180\text{ cm/s}$, $D = 3.84\text{ mm}$, $\Delta t = 0.02\text{ s}$)

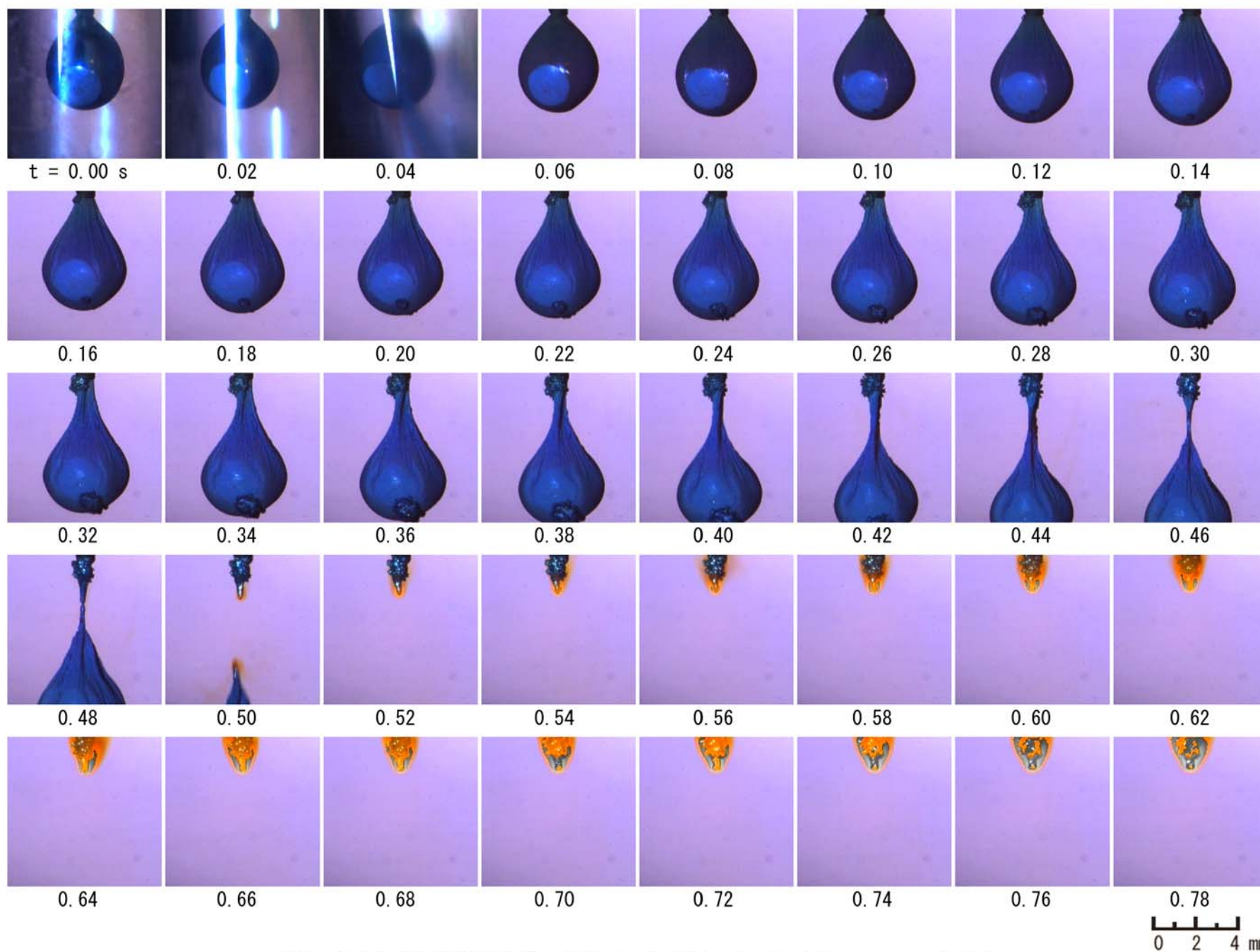


図8 着火過程の連続写真 ($T_i = 300$ °C, $U = 200$ cm/s, $D = 3.89$ mm, $\Delta t = 0.02$ s)

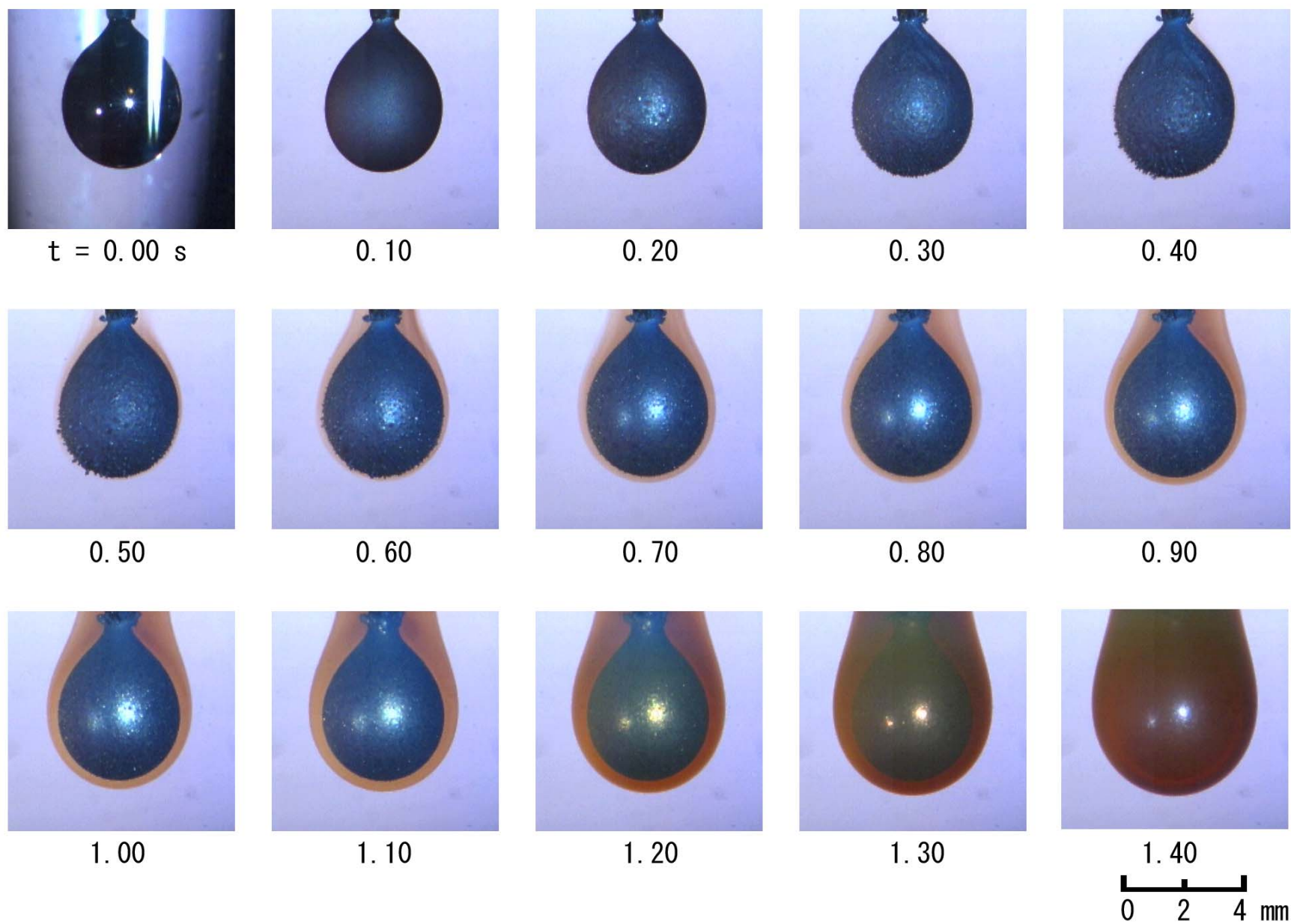


図9 着火過程の連続写真（拡大）（ $T_i = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $U = 20 \text{ cm/s}$, $D = 3.92 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ ）（その1）

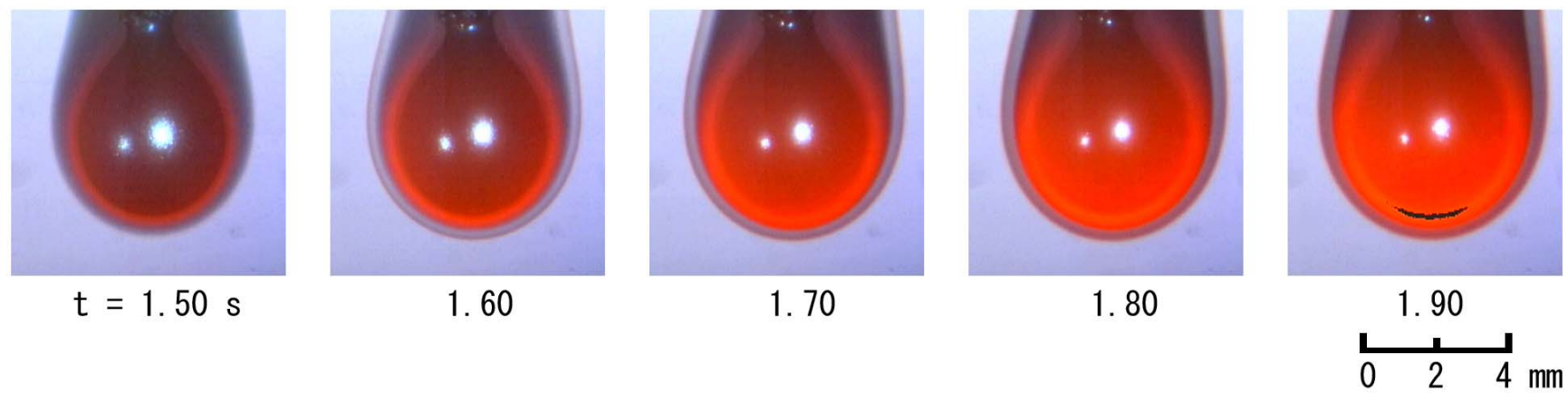


図9 着火過程の連続写真（拡大）（ $T_i = 300$ °C, $U = 20$ cm/s, $D = 3.92$ mm, $\Delta t = 0.1$ s）（その2）

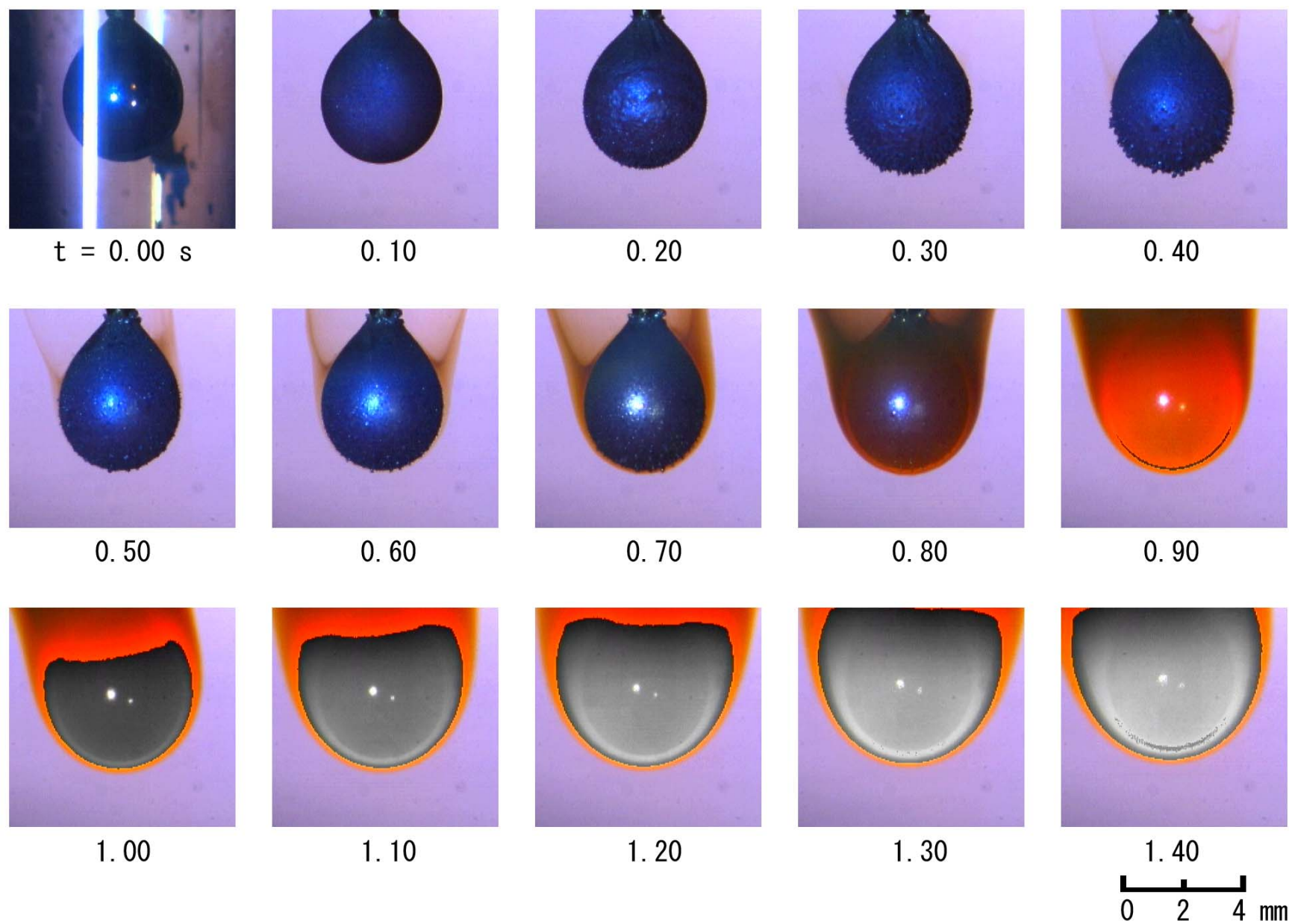


図10 着火過程の連続写真（拡大）（ $T_i = 300^\circ\text{C}$, $U = 100 \text{ cm/s}$, $D = 4.07 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ ）

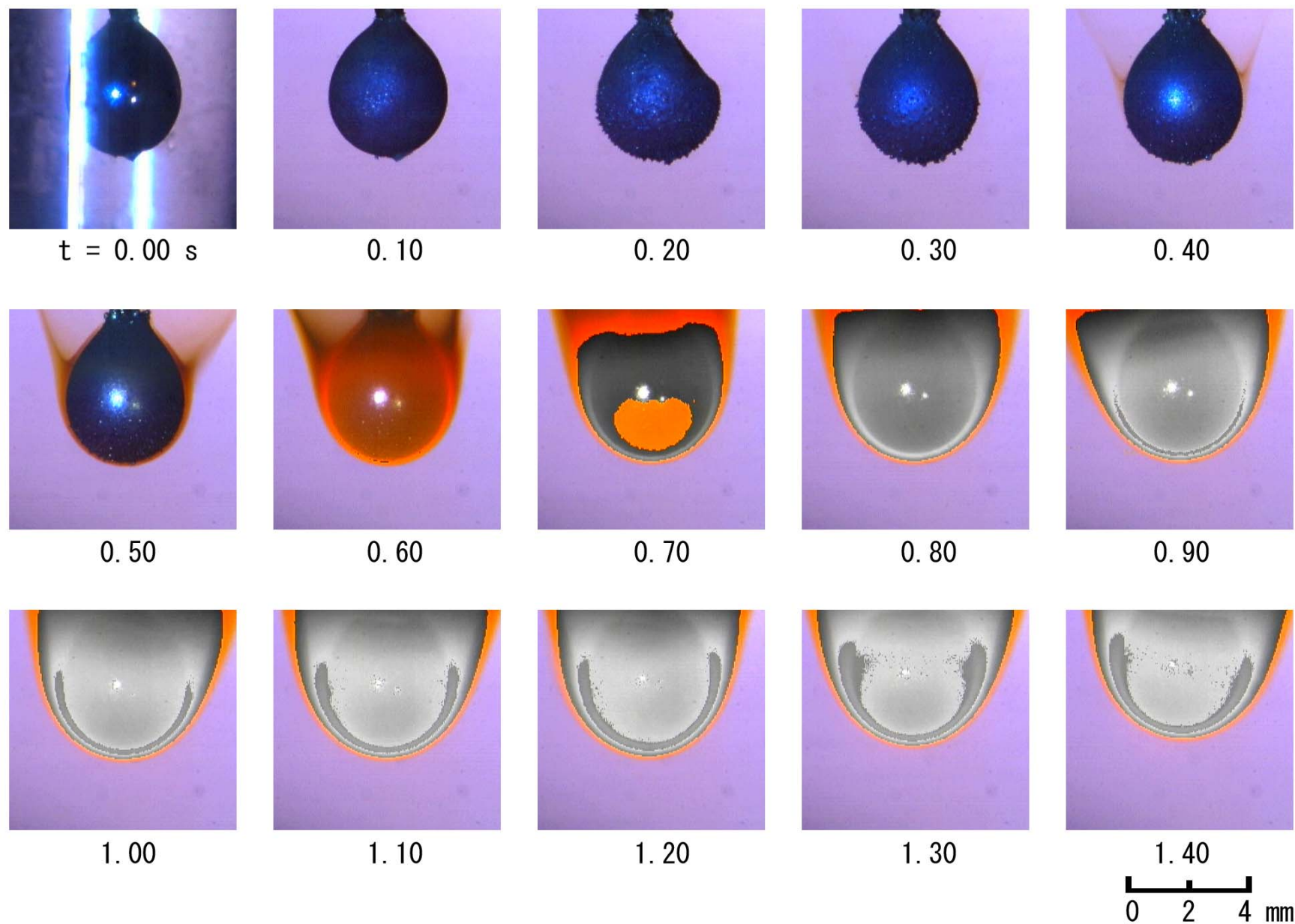


図11 着火過程の連続写真（拡大）（ $T_i = 300^\circ\text{C}$, $U = 180 \text{ cm/s}$, $D = 3.84 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ ）

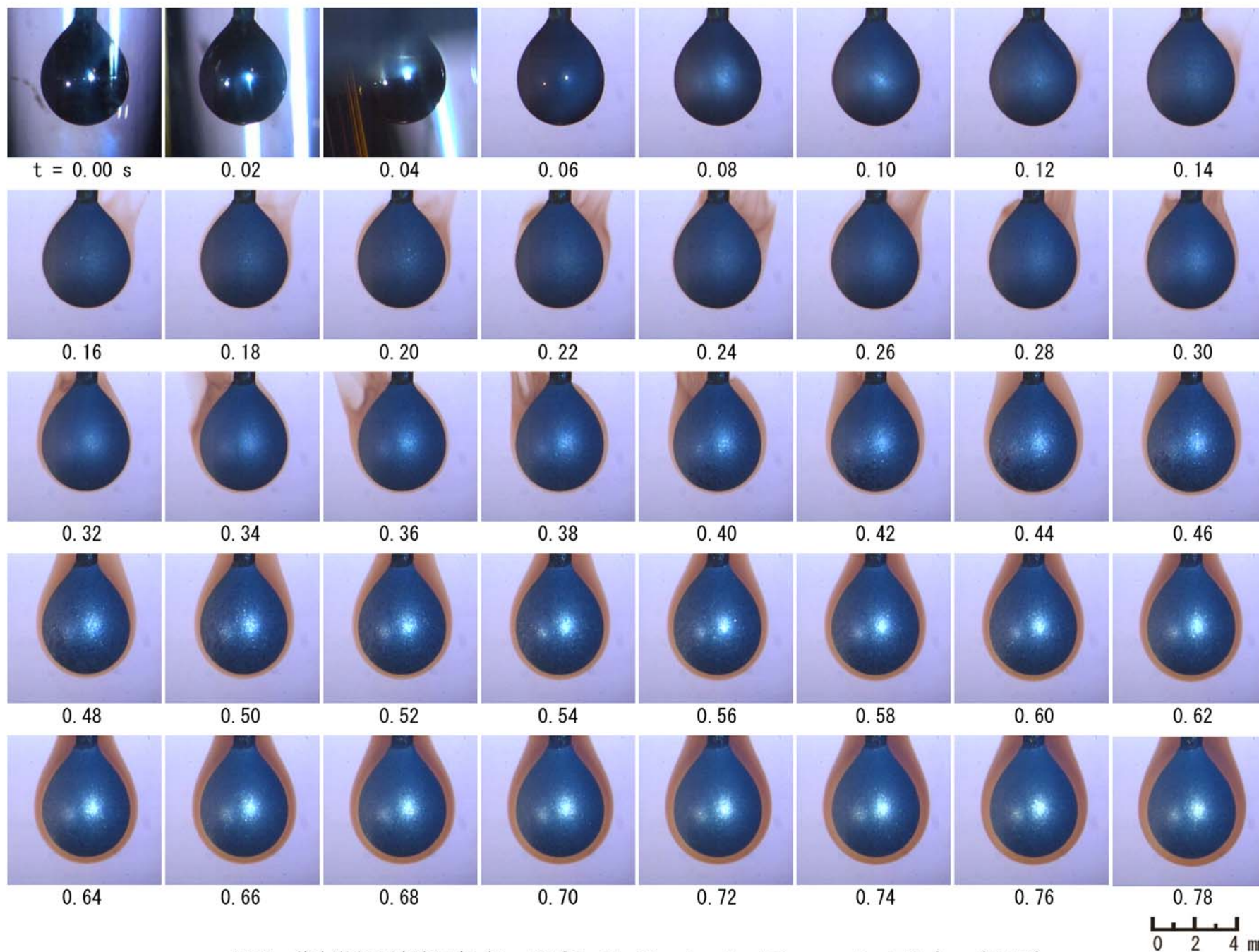


図12 着火過程の連続写真 ($T_i = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $U = 20\text{ cm/s}$, $D = 4.22\text{ mm}$, $\Delta t = 0.02\text{ s}$) (その1)

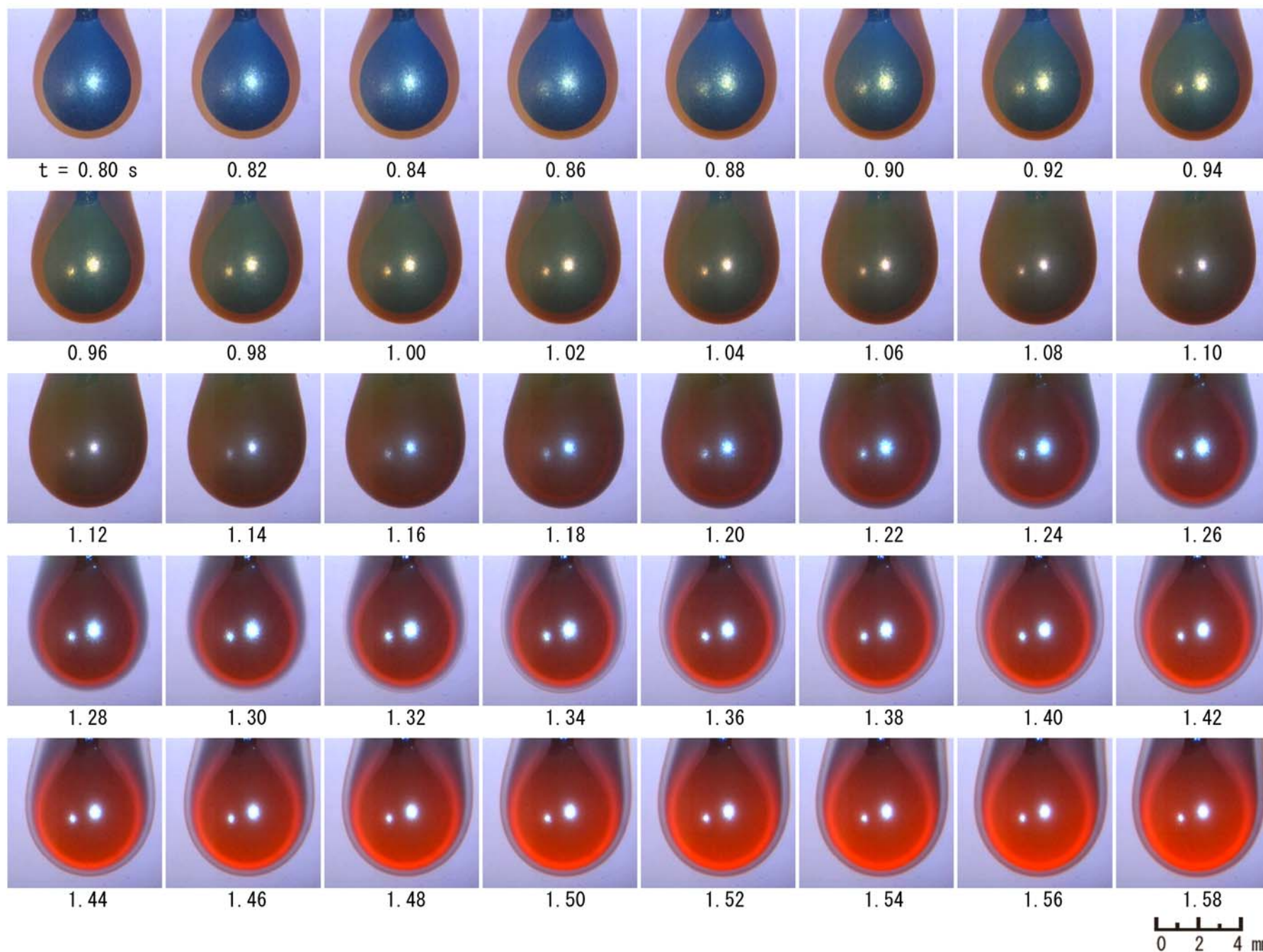


図12 着火過程の連続写真 ($T_i = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $U = 20\text{ cm/s}$, $D = 4.22\text{ mm}$, $\Delta t = 0.02\text{ s}$) (その2)

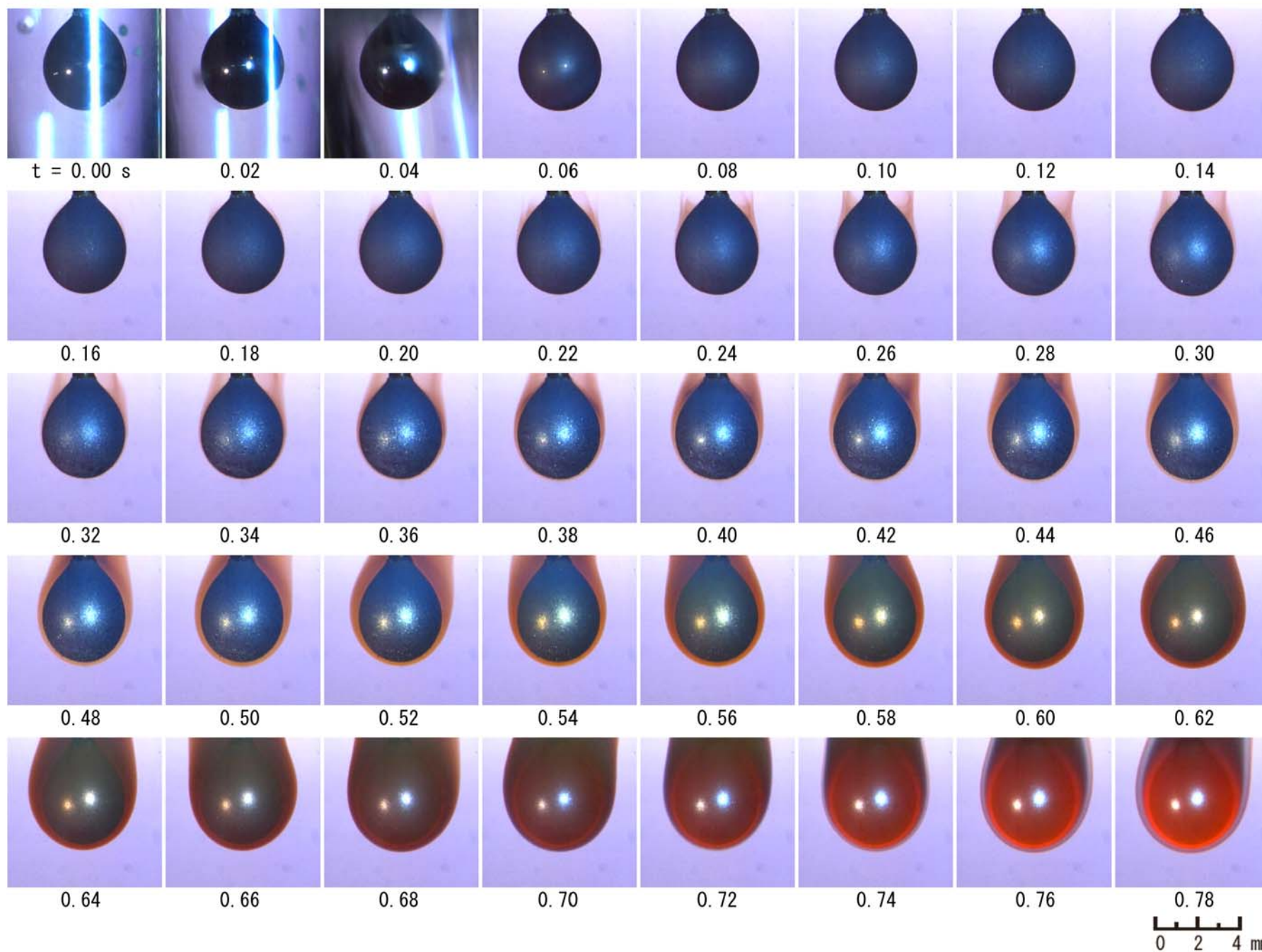


図13 着火過程の連続写真 ($T_i = 400^\circ\text{C}$, $U = 60\text{ cm/s}$, $D = 4.00\text{ mm}$, $\Delta t = 0.02\text{ s}$) (その1)

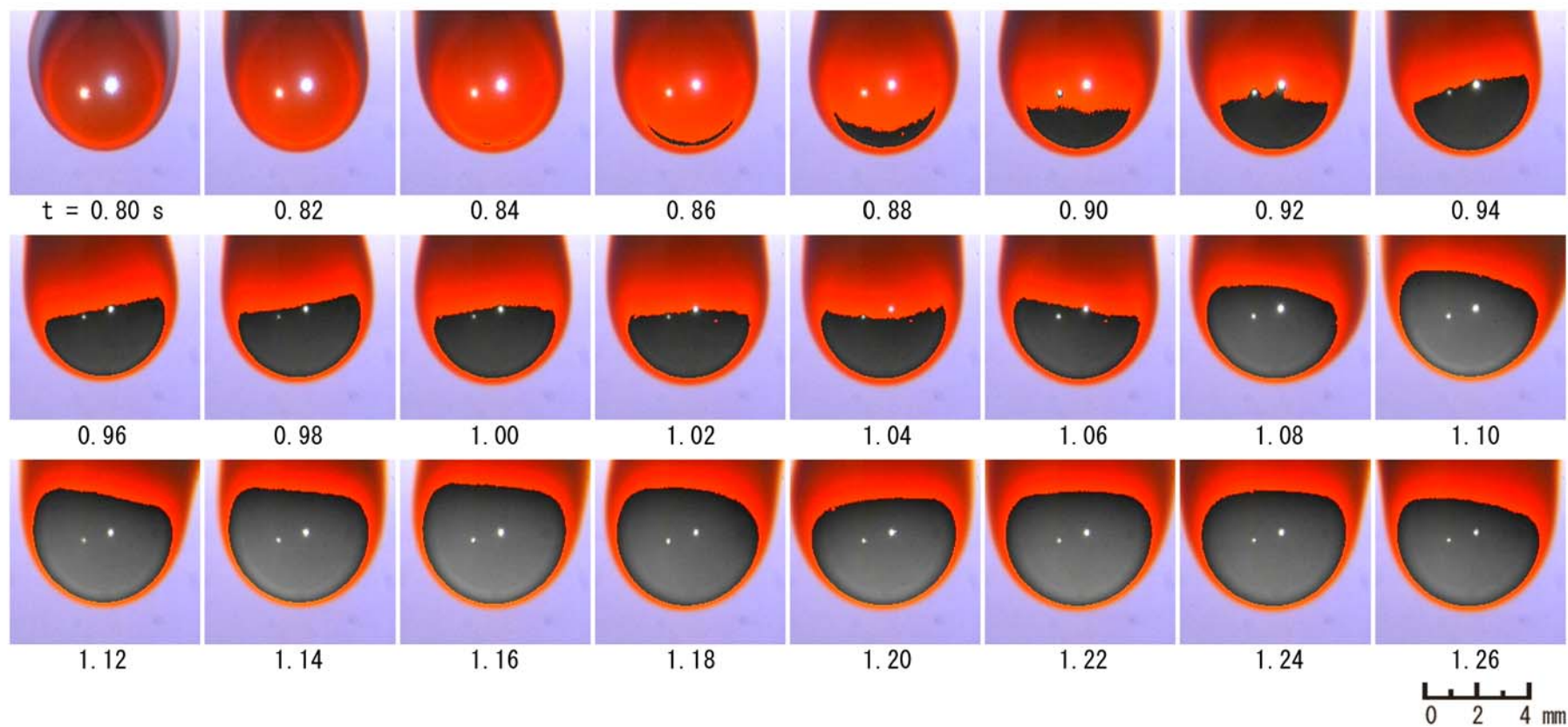


図13 着火過程の連続写真 ($T_i = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $U = 60\text{ cm/s}$, $D = 4.00\text{ mm}$, $\Delta t = 0.02\text{ s}$) (その2)

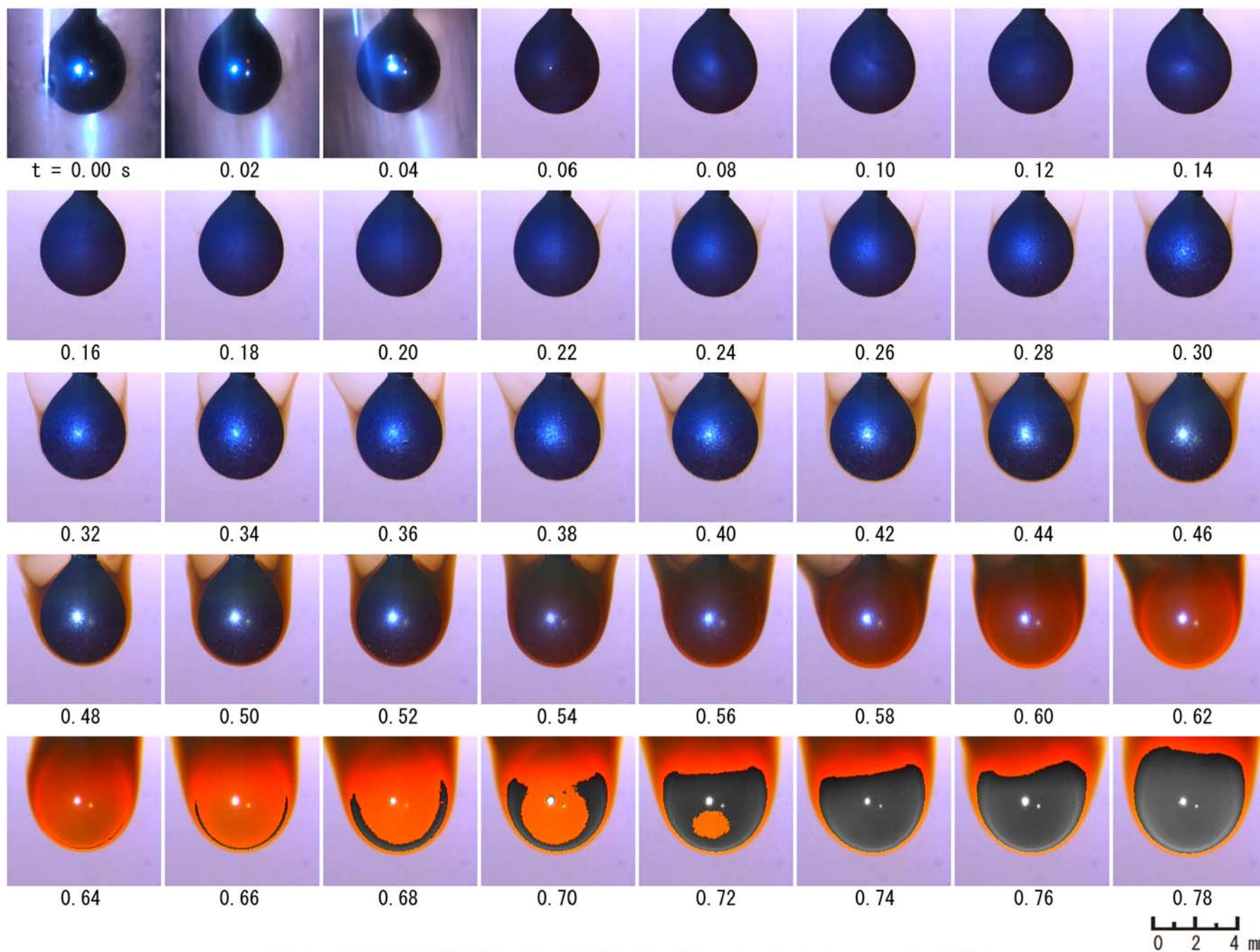


図14 着火過程の連続写真 ($T_i = 400$ °C, $U = 100$ cm/s, $D = 4.13$ mm, $\Delta t = 0.02$ s)

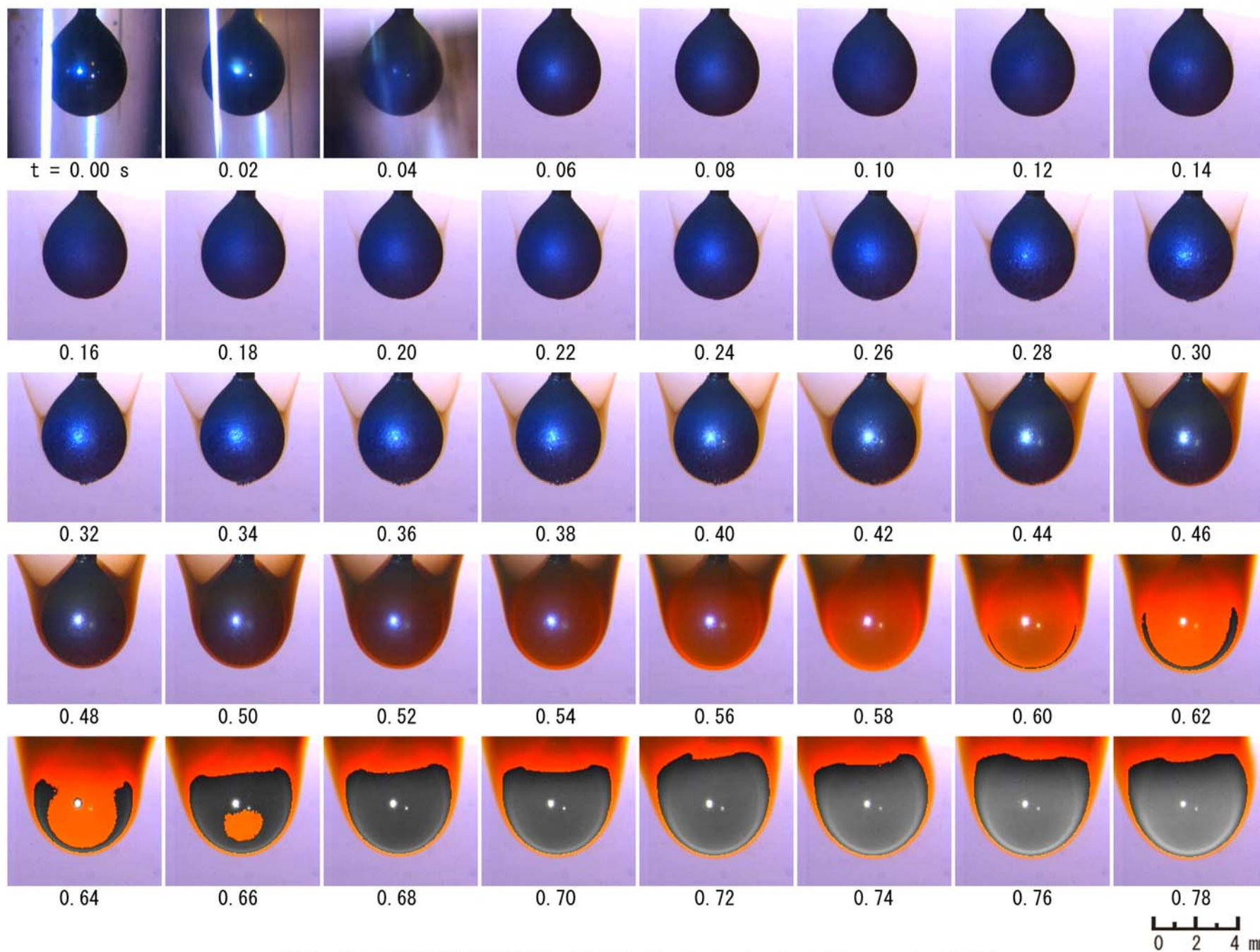


図15 着火過程の連続写真 ($T_i = 400^\circ\text{C}$, $U = 140\text{ cm/s}$, $D = 4.16\text{ mm}$, $\Delta t = 0.02\text{ s}$)

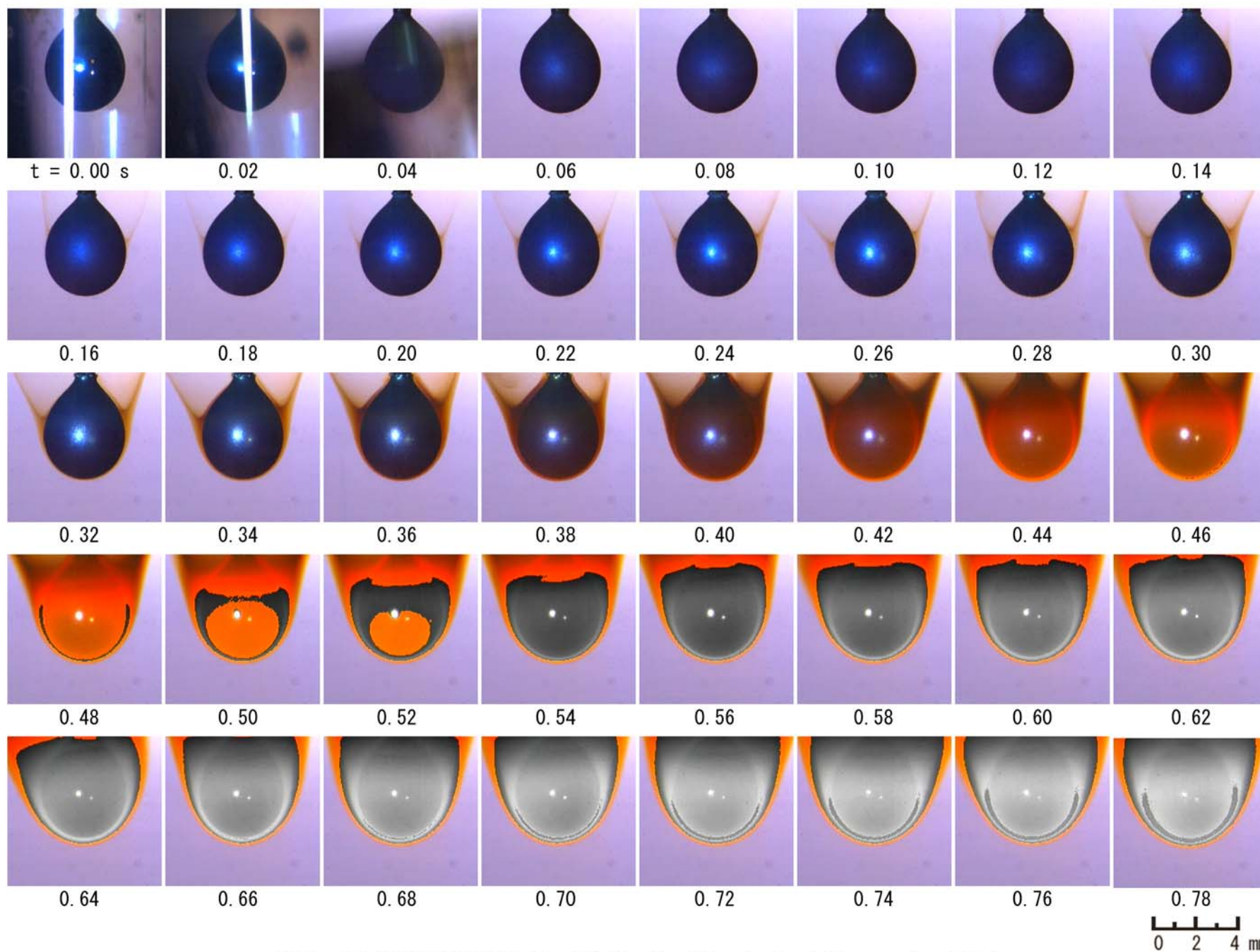


図16 着火過程の連続写真 ($T_i = 400^\circ\text{C}$, $U = 180\text{ cm/s}$, $D = 3.98\text{ mm}$, $\Delta t = 0.02\text{ s}$)

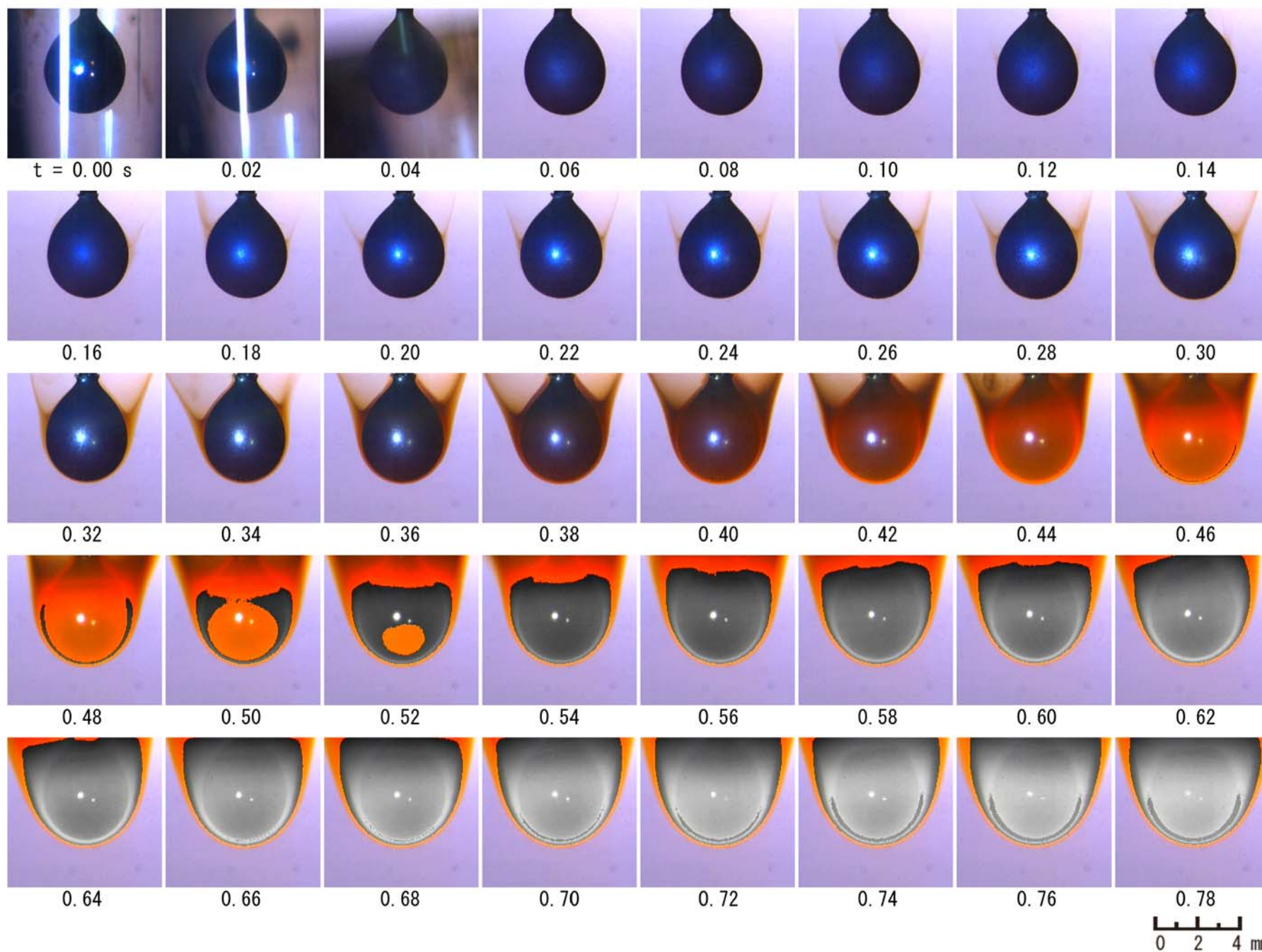


図17 着火過程の連続写真 ($T_i = 400^\circ\text{C}$, $U = 200\text{ cm/s}$, $D = 4.02\text{ mm}$, $\Delta t = 0.02\text{ s}$)

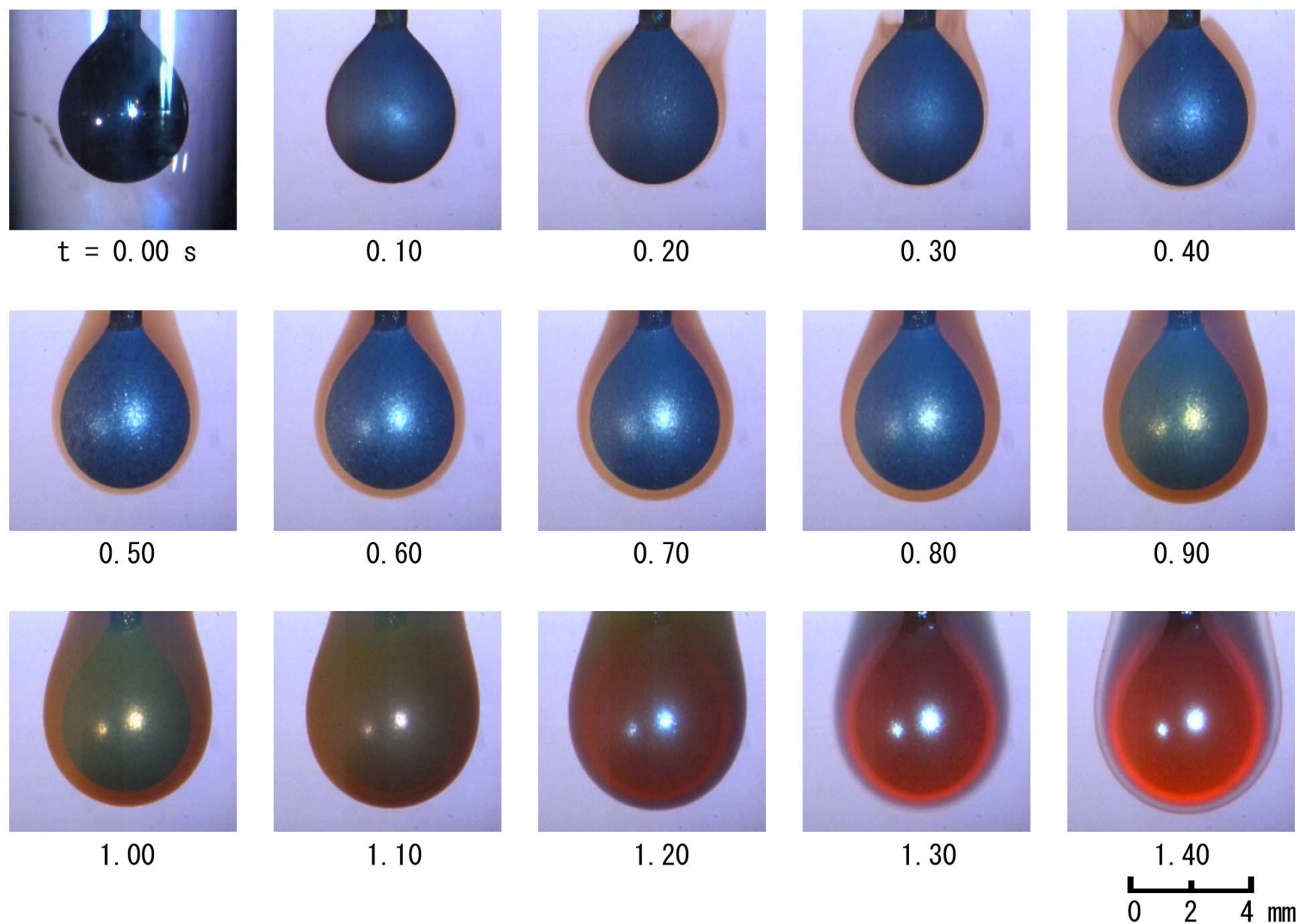


図18 着火過程の連続写真（拡大）（ $T_i = 400$ °C, $U = 20$ cm/s, $D = 4.22$ mm, $\Delta t = 0.1$ s）（その1）

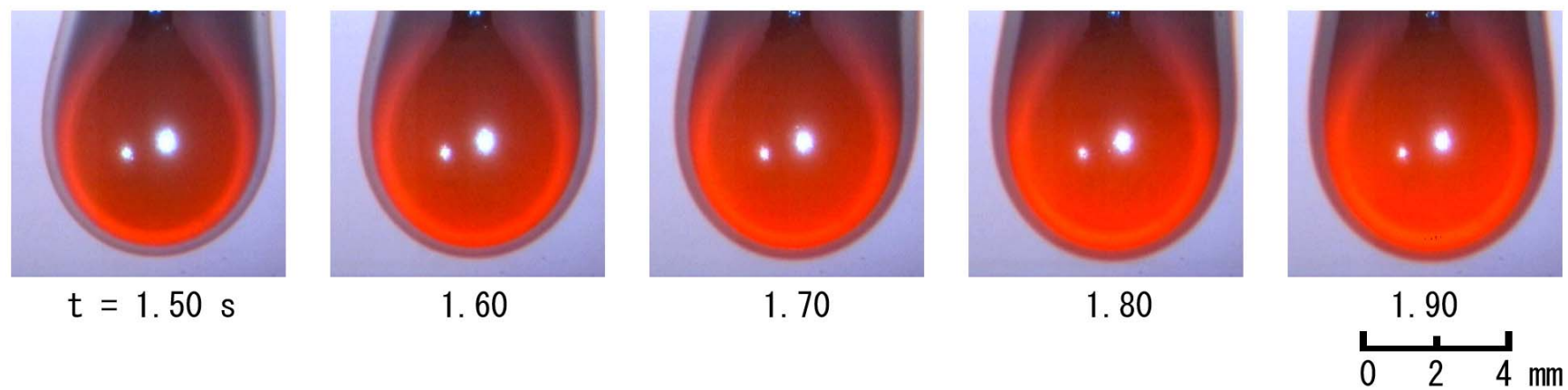


図18 着火過程の連続写真 (拡大) ($T_i = 400^\circ\text{C}$, $U = 20 \text{ cm/s}$, $D = 4.22 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.1 \text{ s}$) (その2)

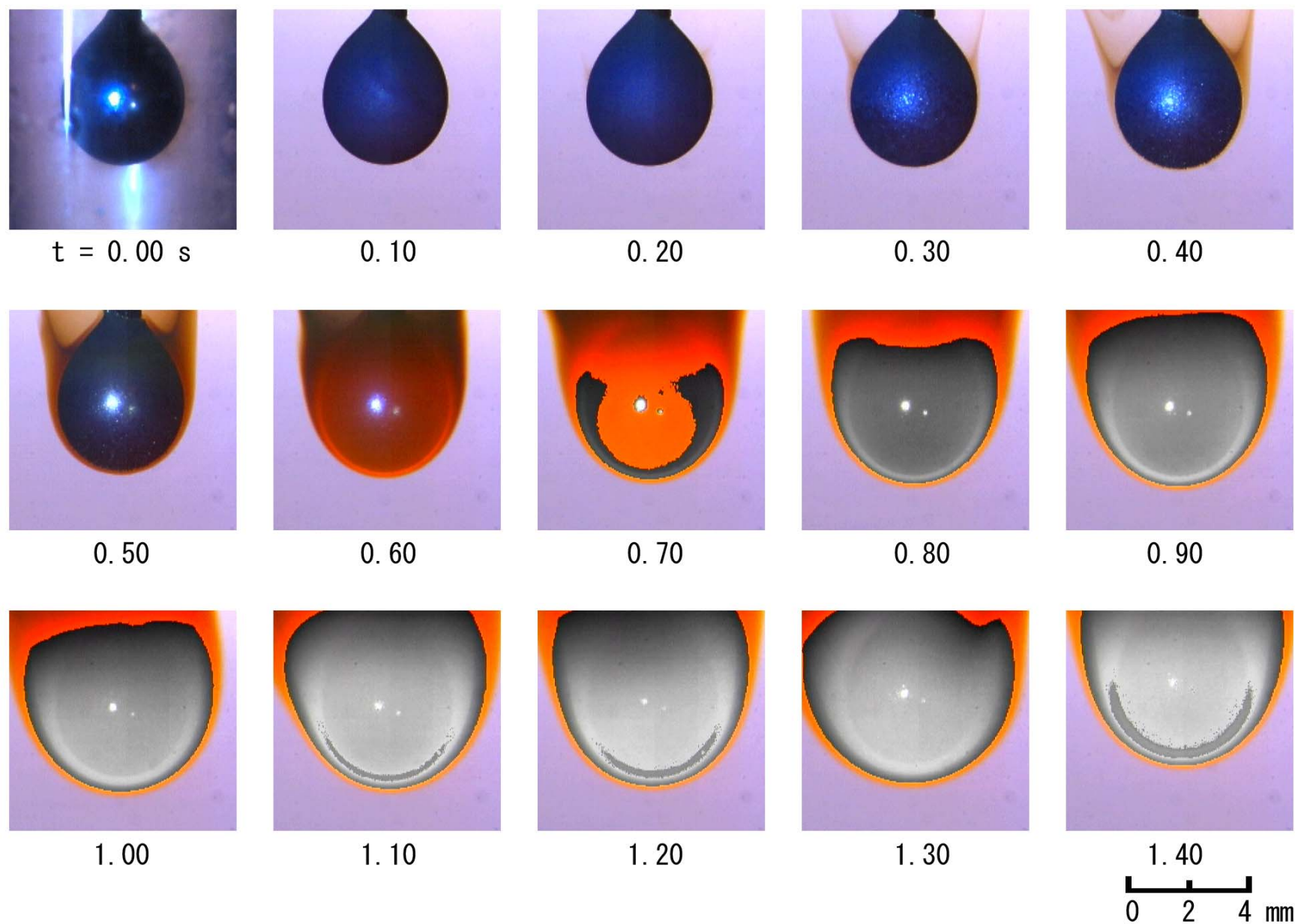


図19 着火過程の連続写真（拡大）（ $T_i = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $U = 100 \text{ cm/s}$, $D = 4.13 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ ）

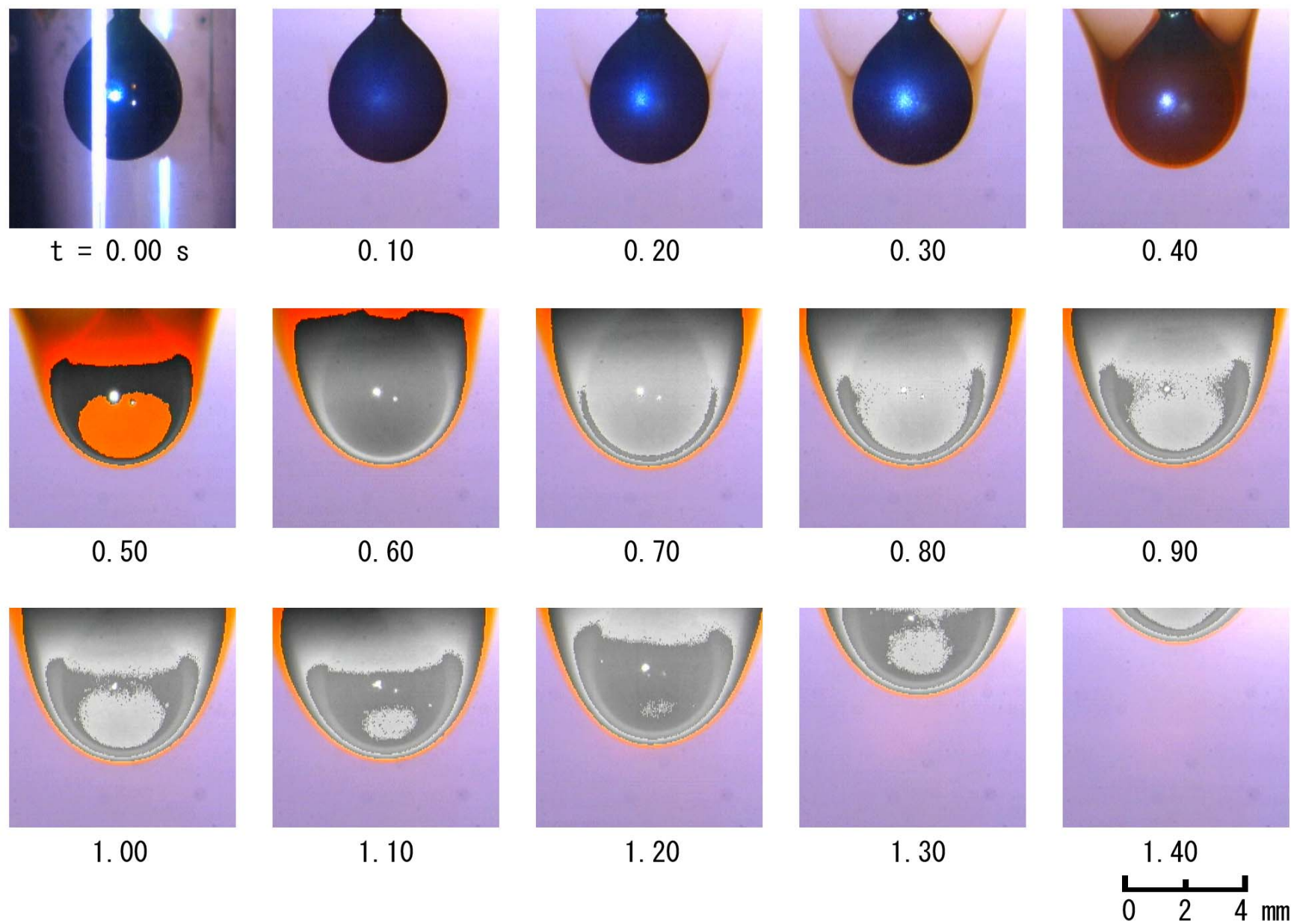


図20 着火過程の連続写真（拡大）（ $T_i = 400^\circ\text{C}$, $U = 180 \text{ cm/s}$, $D = 3.98 \text{ mm}$, $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ ）