

ナトリウム液滴落下燃焼実験 (FD-3)

(研究報告)

2005年4月

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49

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)

2005

ナトリウム液滴落下燃焼実験 (FD-3)

(研究報告)

堂田 哲広*、石川 浩康*、
大野 修司*、宮原 信哉*

要 旨

ナトリウム漏えい燃焼形態の一つであるスプレイ燃焼の燃焼挙動に対する理解の向上、現象のメカニズムに基づく評価手法の確立を目的として、単一ナトリウム液滴の落下燃焼挙動を研究している。本研究では、同実験シリーズの FD-2 実験とは異なる初期径 (3.34mm、5.85mm) のナトリウム液滴を用いた落下燃焼実験、不活性雰囲気下でのナトリウム液滴の落下実験、ナトリウムと近い密度のポリプロピレン球の落下実験を行い、初期液滴径変化が燃焼に与える影響、燃焼が液滴の落下運動に与える影響を調べた。

得られた結果を、以下に示す。

- (1) 燃焼ナトリウム液滴の抵抗係数は、同直径剛体球の 1.4~2.2 倍に相当する。
- (2) ナトリウム液滴の空気抵抗が剛体球よりも大きい主な要因は、燃焼発熱に伴う液滴周囲ガスの粘性增加である。ナトリウム液滴は約 8m 落下時で縦横比 0.89 の橢円体に変形するが、その影響はほとんどない。また、液滴の蒸発および浮力の影響についても同様に無視できる。
- (3) ナトリウム液滴の燃焼は初期液滴径が変化した場合でも D^2 則に従うことが確認された。ナトリウム燃焼量を測定値に一致させる条件で D^2 則燃焼モデルを用いた計算を行った場合、反応生成物中の Na_2O 割合は 0.51~0.75 となる。

*要素技術開発部 熱化学安全試験グループ

April, 2005

Falling Sodium Droplet Experiment (FD-3)

Norihiro Doda*, Hiroyasu Ishikawa*,
Shuji Ohno*, Shinya Miyahara*

Abstract

The burning behavior of a single sodium droplet has been studied for understanding of spray combustion which is one of the combustion forms in sodium leakage. This study serves as the basis of the mechanistic sodium fire analysis method. A burning experiment with initial droplet size of 3.34mm and 5.85mm different from FD-2 experiment condition (4.75mm), an inert gas condition experiment and a polypropylene sphere experiment were performed to investigate the relation between initial droplet size and burnt mass, and the effect of burning phenomena on the droplet motion.

- (1) Drag coefficient of a burning sodium droplet is 1.4 ~ 2.2 times greater than that of a solid sphere of the same size.
- (2) The increase in drag force of a burning sodium droplet is mainly due to the increase in gaseous viscosity around the droplet with heat of combustion. Sodium droplet has the ellipsoidal shape with aspect ratio 0.89 when falling by about 8 meters, but the effect of droplet deformation is negligible small. In addition, evaporation and buoyancy have also little effect on the increase in drag force.
- (3) The burning of sodium droplet follows the D^2 -law when the initial droplet diameter changes. In the calculation which assumes that the sodium combustion quantity agrees with the measurement and that combustion of sodium droplet obeys that law, the Na_2O ratio of reaction products becomes 0.51-0.75.

*Thermochemistry Safety Engineering Group, Advanced Technology Division

目 次

要旨.....	i
Abstract.....	ii
目次.....	iii
表リスト.....	v
図リスト.....	v
写真リスト.....	v
 1. はじめに	1
2. 実験内容	2
2.1. 実験装置	2
2.2. 実験方法	2
2.2.1. ナトリウム液滴の生成.....	2
2.2.2. ナトリウム液滴の初期質量測定.....	3
2.2.3. ナトリウム液滴の回収時質量測定	3
2.2.4. ナトリウム燃焼量の算出.....	3
2.2.5. 落下時間測定.....	3
2.2.6. 着火遅れ時間測定.....	3
2.2.7. 液滴形状測定.....	4
2.3. 実験条件	4
2.3.1. FD-3-1 実験および FD-3-2 実験	4
2.3.2. FD-3-B1 実験	4
2.3.3. FD-3-B2 実験	4
3. 実験結果	5
3.1. FD-3-1 実験.....	5
3.2. FD-3-2 実験.....	5
3.3. FD-3-B1 実験.....	5
3.4. FD-3-B2 実験.....	5
参考) FD-2-3 実験.....	6
4. 考察	7
4.1. ナトリウム液滴の落下挙動	7
4.1.1. 剛体球の空気抵抗モデルを用いた落下運動評価.....	7
4.1.2. ナトリウム液滴の抵抗係数	8
4.1.3. 抵抗係数増加のメカニズム.....	8

4. 2. ナトリウム液滴の燃焼挙動	11
4. 2. 1. ナトリウム液滴の着火	11
4. 2. 2. 初期液滴径とナトリウム燃焼量および燃焼速度	12
4. 2. 3. ナトリウム液滴の燃焼評価	12
5. おわりに	15
6. 謝辞	16
7. 参考文献	17

表リスト

表 2-1 計測器一覧	18
表 2-2 実験条件	19
表 3-1 8m 落下時の測定値(FD-3-1)	20
表 3-2 8m 落下時の測定値(FD-3-2)	21
表 3-3 8m 落下時の測定値(FD-3-B1)	22
表 3-4 8m 落下時の測定値(FD-3-B2)	23
表 3-5 FD-2-3 実験の測定結果(8.02m 落下条件のみ)	24

図リスト

図 2-1 実験装置の概要	25
図 2-2 液滴生成装置	26
図 2-3 実験装置系統図	27
図 4-1 剛体球モデルの計算値と Na 液滴の測定値	28
図 4-2 未燃焼 Na 液滴とポリプロピレン(PP)球の測定値、剛体球モデルの計算値	29
図 4-3 抵抗係数をパラメータとした剛体球モデルの計算値	30
図 4-4 液滴周囲温度をパラメータとした Na 液滴の落下運動計算(初期径 3.34mm)	31
図 4-5 液滴周囲温度をパラメータとした Na 液滴の落下運動計算(初期径 4.75mm)	32
図 4-6 液滴周囲温度をパラメータとした Na 液滴の落下運動計算(初期径 5.85mm)	33
図 4-7 初期液滴径と着火遅れ時間	34
図 4-8 初期液滴径と燃焼量および燃焼速度	35
図 4-9 ナトリウム燃焼量の測定値と計算値	36
図 4-10 ナトリウム燃焼量の測定値と計算値	37

写真リスト

写真 2-1 落下液滴燃焼実験装置	38
写真 2-2a 落下した直後の Na 液滴を撮影する様子	39
写真 2-2b 落下した直後の Na 液滴の撮影画像	39
写真 2-3 落下した液滴を回収する瞬間の映像	40
写真 2-4 レーザ式通過検出計	41
写真 2-5 液滴の着火時の映像	42
写真 2-6 Na 液滴の落下燃焼する様子	43
写真 2-7a ナトリウム液滴の形状(1/2)	44
写真 2-7b ナトリウム液滴の形状(2/2)	45

1. はじめに

高速増殖炉の 2 次系配管からナトリウムが漏えいした場合、ナトリウムが雰囲気中の酸素と反応し、燃焼する可能性がある。ナトリウム漏えい燃焼の影響は、これまでの燃焼研究により適切な裕度のもとで評価することが可能であるが、もんじゅのナトリウム漏えい事故（1995 年 12 月）を契機に、サイクル機構では燃焼挙動に対する理解の向上、現象の機構に基づく評価手法の確立を目的に、ナトリウム燃焼の実験研究および解析コードの開発を新たに開始した。

熱化学安全試験グループでは、ナトリウム燃焼の実験研究の一環として、單一ナトリウム液滴の落下燃焼実験を行っている。漏えい時の主な燃焼形態の 1 つであるスプレイ燃焼は、燃料となる液体が液滴群となって落下燃焼する現象であるが、本実験は個々の液滴の燃焼状態を詳細に調べることを目的とした基礎実験である。これまでに、最大落下距離 2.7m の予備的実験[1]、最大落下距離 8.02m の FD-2 実験[2]を実施している。前者でナトリウム液滴の生成等の実験技術の確立、実験課題の抽出を行い、後者で初期液滴径約 5mm のナトリウム液滴を最大 8.02m 落下させる実験を行った。

その結果、初期液滴径約 5mm、初期液滴温度約 450°C のナトリウム液滴の条件において、

- (1) ナトリウム液滴の落下運動は、剛体球の落下運動よりも落下時間が 11~23% 長い。
- (2) ナトリウム液滴の燃焼挙動は、 D^2 則燃焼モデルで表わせる。

という知見が得られた。(1) は FD-2 実験で明らかになったことであり、(2) は予備的実験で検証した SPHINCS コード[3]の燃焼モデルを、落下距離条件を変えて検証したものである。

今回の課題として、(1) についてはその定量的評価と原因の解明、(2) についてはさらに条件を変えた検証をあげた。

- (A) 初期液滴径が変化した場合のナトリウム液滴の空気抵抗の評価
- (B) ナトリウム液滴の空気抵抗が剛体球に比べて増加する原因の解明
- (C) 初期液滴径が変化した場合のナトリウム液滴燃焼の D^2 則成立性の確認

本研究では、以上の課題の解決を目的に、ナトリウム液滴の初期液滴径をパラメータとした落下燃焼実験、未燃焼ナトリウムおよびポリプロピレン球の落下実験を実施した。

2. 実験内容

2.1. 実験装置

大洗工学センター内の高速炉性安全第3試験室配管信頼性建屋にある落下液滴燃焼実験装置を用いた。落下液滴燃焼実験装置の外観を写真2-1に示す。本実験装置は、実験容器、液滴生成装置、ガス供給設備、計測系から構成される。実験装置の概要を図2-1に示す。以下、各部について述べる。

(1) 実験容器

高さ8.7m、内径0.6mの鋼製(一部ガラス製)の密閉容器で、この内部でナトリウム液滴を落下、燃焼させる。実験容器には、液滴の観察と回収のための4つの観察窓と5つの回収用扉および回収容器を任意の高さに移動するためのエレベータが設置されている。本報告の実験では、実験容器の底部(ノズルから8.02m下方)に回収容器を設置した。

(2) 液滴生成装置

液滴生成装置は図2-2に示すように、ナトリウムタンク、流調弁、ノズル、ヒータ、ガスライン等で構成され、単一のナトリウム液滴を生成することができる。液滴径を変更する場合は、径の異なるノズルを取り付ける。液滴温度は各ヒータの出力で制御する。

(3) ガス供給設備

実験装置系統図を図2-3に示す。ガス供給設備は、カバーガス用アルゴンガス供給系、ノズルのページおよび加熱用ヘリウムガス供給系、パラフィンバーリング用アルゴンガス供給系、窒素雰囲気条件用窒素ガス供給系を備えている。

(4) 計測系

実験容器には、図2-1に示すようにファイバーセンサ、CCDカメラ、レーザ式通過検出計、高速度カメラ、相対湿度計、ジルコニア式および熱伝導度式酸素濃度計が設置されている。相対湿度計および酸素濃度計は、雰囲気条件を監視する目的で設置されている。計測器の一覧を表2-1に示す。

2.2. 実験方法

2.2.1. ナトリウム液滴の生成

液滴生成装置のナトリウムタンクに充填した固体ナトリウムをヒータで溶融させ、ノズル先端までナトリウムを落下させる。バルブで流量をコントロールし、ノズル先端に液滴を懸垂させる。液滴を懸垂させることによって、液滴の自重とノズル先端に働く表面張力がつり合い、落下時の液滴直径は

ほぼ均一となる。この液滴生成法は、液体の物性値（表面張力）を測定する際に用いられている方法でもある。

液滴直径はノズル外径で決まり、液滴径を変える場合はノズル自体を交換する。今回の実験では、外径 0.3mm（液滴径 4mm 用）、1mm（液滴径 5mm 用）および 2mm（液滴径 6mm 用）のノズルを使用した。液滴の初期温度は、マントルヒータ、メインヒータおよびノズル加熱用ガスラインヒータでコントロールし、今回は約 450°C とした。

2.2.2. ナトリウム液滴の初期質量測定

ノズル先端から落下した直後のナトリウム液滴を CCD カメラで撮影し、撮影した映像から画像処理で液滴体積を求め、初期液滴温度のナトリウム密度を用いて、液滴質量を算出する。液滴の落下開始は、ファイバーセンサで検出する。撮影は露出時間 1/10,000 秒のバックライト撮影で行う。液滴撮影の装置と撮影画像を写真 2-2a と写真 2-2b に示す。

2.2.3. ナトリウム液滴の回収時質量測定

ノズル先端から 8.02m 下の位置でナトリウム液滴を回収し、実験後に回収した液滴中に含まれるナトリウム量を原子吸光分析で定量する。本実験では、ナトリウム定量値を回収時の液滴質量と定義する。回収時に液滴が衝撃を受けて飛散するのを防ぐため、回収容器に流動パラフィンを入れ、さらにアルゴンガスでその半分を泡状にバブルリングする。回収時の様子を写真 2-3 に示す。

2.2.4. ナトリウム燃焼量の算出

液滴の初期質量と回収質量の差から、落下中に消費されたナトリウム量を算出する。

$$(\text{ナトリウム燃焼量}) = (\text{初期質量}) - (\text{回収質量})$$

2.2.5. 落下時間測定

液滴の落下開始をファイバーセンサで検知し、レーザ通過検出計のタイマーをスタートさせる。実験容器内に設置されているレーザ通過検出計（写真 2-4、設置位置：落下距離 1.88m、3.67m、5.67m、8.02m）で、液滴の通過を検出する。落下時間は、タイマースタート時からレーザ通過検出計の通過までの時間とする。落下時間測定の最小間隔は 1ms である。

2.2.6. 着火遅れ時間測定

落下距離約 4m および約 6m の位置に設置されている高速度カメラで、ナトリウム液滴の着火を撮影する。液滴の落下開始をファイバーセンサで検知し、それをトリガ信号として高速度カメラの録画をスタートさせる。撮影は、撮影間隔・露出時間ともに 1/125s とする。着火遅れ時間は、録画開始から再生画像の液滴の色が黒から白へ変化するまでの時間とする。時間測定の範囲は 0~0.864s、最小

間隔は 0.008s である。液滴の着火時の映像を写真 2-5 に示す。

2.2.7. 液滴形状測定

高速度カメラで約 8m 落下した地点でのナトリウム液滴を撮影する。撮影はファイバーセンサからのトリガ信号で開始し、約 2 秒間撮影する。撮影画像を画像処理し、液滴の縦横比を得る。撮影は撮影間隔 1/1,000s、露出時間 1/20,000s のバックライト条件とする。

2.3. 実験条件

実験条件を表 2-2 に示す。

2.3.1. FD-3-1 実験および FD-3-2 実験

FD-3-1 および FD-3-2 では、初期液滴径と燃焼量および液滴の落下運動の関係を調べるため、空気雰囲気、初期液滴温度 450°C で、初期液滴径をそれぞれ 4mm（実測値：3.34mm）および 6mm（実測値：5.85mm）と変化させた条件とする。これは、FD-2-3（初期液滴径の実測値：4.75mm）の結果と比較する。

2.3.2. FD-3-B1 実験

FD-3-B1 では、ナトリウムの燃焼が液滴の空気抵抗に及ぼす影響を調べるため、雰囲気を窒素として未燃焼状態とする。初期液滴径および初期温度は、FD-2-3 と同条件とする。

2.3.3. FD-3-B2 実験

FD-3-B2 では、ナトリウム液滴の変形およびその空気抵抗への影響を調べるため、ナトリウムと密度が近いポリプロピレンの球を用いる。空気雰囲気で、球径を 3.99mm から 6.34mm と変化させる。

3. 実験結果

3.1. FD-3-1 実験

初期液滴径約4mmのナトリウムを空気雰囲気中で落下させた実験である。2004年3月2日に実施し、雰囲気温度11°C、露点温度1°C（湿分濃度：6,600vppm）であった。測定結果を表3-1に示す。実際の初期液滴径は、平均3.34mmであった。ナトリウム液滴生成の際にノズル先端から飛散したナトリウムがノズル保護用ガラス管内側に付着し、鮮明な液滴映像の撮影が困難となり、液滴ごとの初期質量測定ができなかった。このため、ナトリウム燃焼量の算出には、落下直後にノズル直下で回収した液滴に含まれるナトリウム量（原子吸光分析による定量値）を初期質量の代表値として使用した。液滴の回収は個別に回収した1-S1～1-S6と、一括で回収した1-S7～1-S17があり、後者は全質量を液滴数で割った一滴あたりの平均回収質量を算出した。ナトリウム燃焼量は、初期質量の代表値と個別回収質量（1-S1、1-S3、1-S5、1-S6）の差から算出した4ケースと初期質量の代表値と平均回収質量から算出した1ケースが得られた。着火遅れ時間は、1-S5および1-S6でのみ測定した。落下時間は1-S1～1-S17で測定し、13ケース（1-S1と1-S3を除くケース）で有効なデータが得られた。

3.2. FD-3-2 実験

初期液滴径約6mmのナトリウムを空気雰囲気中で落下させた実験である。2004年2月3日に実施し、雰囲気温度13°C、露点温度0°C（湿分濃度：6,100vppm）であった。測定結果を表3-2に示す。実際の初期液滴径は平均5.85mmであった。初期液滴質量、回収液滴質量、落下時間、着火遅れ時間について、2-S2～2-S5の4ケースを取得した。このとき撮影したナトリウム液滴の落下燃焼する様子の映像を写真2-6に示す。

3.3. FD-3-B1 実験

直径3.99mm、4.79mm、6.34mmのポリプロピレン球を空気雰囲気中で落下させた実験である。2004年1月16日に実施した。測定結果を表3-3に示す。落下時間を各球径ごとに5ケースずつ取得した。また、FD-3-B2実験の参考とするため、約8m落下した地点での形状撮影を行った。ポリプロピレン球の落下形状の写真を写真2-7（最後）に示す。

3.4. FD-3-B2 実験

初期液滴径約5mmのナトリウムを窒素雰囲気中で落下させた実験である。2004年3月18日に実施した。測定結果を表3-4に示す。実験容器内部に窒素ガスを約100l/minで供給し、雰囲気中酸素濃度を1%未満に維持した。液滴の回収は、実験容器を常時密閉状態にするため、実験終了後に一括して行った。回収液滴質量は、全質量を液滴数で割った平均質量とした。また、初期液滴質量も回収液滴質量に等しいとした。落下時間はB2-S1～B2-S14で測定し、11ケースで有効なデ

ータを取得した。液滴形状は B2-S15～B2-S25 の全 11 ケースで測定し、約 8m 落下した時点では落下方向につぶれた橢円体であることを確認した。液滴形状の写真を写真 2-7 に示す。液滴の縦横比は平均 0.89 であった。

参考) FD-2-3 実験

初期直径約 5mm のナトリウムを空気雰囲気中で落下させた実験である。2002 年 8 月 22 日に実施し、雰囲気温度 30°C、露点温度 15.3°C（湿分濃度：17,400vppm）であった。夏の時期であったため、FD-3 シリーズと比較すると高湿度である。落下距離 8.02m の条件で取得した 2 ケースのデータを表 3-5 に示す。着火遅れ時間は 1 ケースのみが測定できたが、もう 1 ケースでは測定範囲外となつた。

4. 考察

4.1. ナトリウム液滴の落下挙動

4.1.1. 剛体球の空気抵抗モデルを用いた落下運動評価

既存のナトリウム燃焼解析コードにおけるナトリウム液滴の落下運動の評価は、剛体球の空気抵抗モデルを用いた落下運動計算で行われている[3, 4, 5]。しかしながら、FD-2 実験（初期液滴約 5mm 液滴、初期温度約 450°C）では、実際のナトリウム液滴の落下運動は上記のナトリウム液滴を剛体球と仮定した計算値よりも低速である結果が得られた。本実験では FD-2 実験と異なる初期液滴径条件のデータを取得し、ナトリウム液滴の落下運動について検討した。

ナトリウム液滴を剛体球と仮定した計算と実験結果を比較した。計算は、球の運動方程式と径变化の方程式を同時に解いて行った。運動方程式で用いる抵抗係数の値は、一般的な剛体球の抵抗係数式[6]にバルクのガス状態量 (ρ_{gas} , μ_{gas}) で計算したレイノルズ数を代入したもの用いた。燃焼による液滴の径変化は、落下開始時と回収時の液滴径を境界条件として、D²則モデルで模擬した。

球の運動方程式：

$$\frac{dV}{dt} = g - \frac{3\rho_{\text{gas}}V^2C_D}{4\rho D} \quad (4-1)$$

$$C_D = 24/\text{Re} \quad (\text{Re} < 0.1) \quad , \quad C_D = 18.5/\text{Re}^{0.6} \quad (6 \leq \text{Re} < 500), \quad (4-2)$$

$$C_D = 2.6 + 23.71/\text{Re} \quad (0.1 \leq \text{Re} < 6) \quad , \quad C_D = 4/9 \quad (500 \leq \text{Re}).$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_{\text{gas}}VD}{\mu_{\text{gas}}}$$

径変化の方程式：

$$-\frac{dD^2}{dt} = K \quad (4-3)$$

$$K = -\frac{(\text{初期液滴径})^2 - (\text{回収液滴径})^2}{(\text{総落下時間})} \quad (4-4)$$

ここで、 V は落下速度、 t は時間、 g は重力加速度、 ρ は密度、 C_D は抵抗係数、 D は球径、 Re はレイノルズ数、 μ は粘性係数、 K は蒸発係数を表す。

初めに、燃焼ナトリウム液滴の落下運動について、剛体球の空気抵抗モデルを用いた計算と比較した。測定結果と計算結果を図4-1に示す。FD-2実験の結果と同様に、本条件のナトリウム液滴の落下運動は、液滴を剛体球と仮定した計算よりも低速であり、落下距離8.02mの落下時間は計算よりも2.8%～15.0%長かった。剛体球の空気抵抗モデルでは考慮されていない力がナトリウム液滴に加わっていることは明らかである。

次に、未燃焼ナトリウム液滴の落下運動について、剛体球の空気抵抗モデルを用いた計算と比較した。図4-2に測定結果と計算結果を示す。また、剛体球の落下運動の参考として、ポリプロピレン球の測定値も合わせて示す。この図から、未燃焼ナトリウム液滴の落下運動と剛体球の空気抵抗モデルを用いた計算値は一致することがわかる。

以上の燃焼ナトリウム液滴と未燃焼ナトリウム液滴の落下運動の結果を合わせると、ナトリウム液滴の空気抵抗は着火後に増加していることがわかる。

4.1.2. ナトリウム液滴の抵抗係数

ナトリウム液滴の落下時間測定値を球の落下運動方程式に代入し、実際のナトリウム液滴の抵抗係数を算出した。ナトリウム液滴の抵抗係数は、単純に剛体球の抵抗係数に補正係数を掛けた1次式の形で表わされると仮定し、さらに、前節の結果を反映して、着火後から補正係数が有効になる条件を用いた。

$$C_{D,Na} = A \cdot C_D \quad (4-5)$$

$$A=1 \text{ (未燃焼時)} \quad (4-6)$$

ここで、 $C_{D,Na}$ はナトリウム液滴の抵抗係数、 A は補正係数を表す。また、蒸発係数はナトリウム燃焼量が測定値と一致する値を、(4-4)式で与えた。

各実験ケースの落下運動の計算結果と測定値を図4-3に示す。8.02m落下した地点での燃焼ナトリウム液滴の抵抗係数は0.75(初期径3.34mm)、1.28(初期径4.75mm)、0.62(初期径5.85mm)であった。これは、剛体球の抵抗係数0.44($Re > 500$)に対して、1.4～2.2倍に相当する値である。

4.1.3. 抵抗係数増加のメカニズム

液滴の抵抗係数が剛体球の抵抗係数と異なる原因については、以下のことが考えられる。

○形状によるもの

- ・液滴の形状変化

○ナトリウムの蒸発によるもの

- ・液面からの吹出しによる圧力抵抗の減少

- ・液面からの吹出しによる摩擦抵抗の減少

- ・液面からの吹出しによる蒸発抵抗の発生

○燃焼反応に伴うもの

- ・上昇流によるドラッグ

- ・液滴周囲ガスの物性値（粘性）の変化

これらについて検討した結果を、以下に示す。

(1) 液滴の形状変化の影響

楕円体の抵抗係数の相関式を用いて、ナトリウム液滴の変形が空気抵抗に与える影響を計算により検討した。楕円体は真球に比べて見かけの断面積が大きくなるため、楕円体の抵抗係数は真球の抵抗係数に断面積増加の補正を加えた以下の式で表される[7]。

$$C_{D,\text{楕円体}} = \Delta_a \cdot C_{D,\text{真球}} \quad (4-7)$$

$$\Delta_a = 1 + 1.63(1 - E)^2 \quad (980 < Re < 10^4) \quad (4-8)$$

ここで、 Δ_a は補正係数、 E は扁平率（縦径/横径）を表す。

補正係数はナトリウム液滴の扁平率（0.88；FD-3-B2 実験の平均測定値）を代入すると 1.02 となり、ナトリウム液滴の変形が空気抵抗に及ぼす影響は約 2%である。これは、前述の窒素雰囲気条件でのナトリウム液滴の落下運動が剛体球の空気抵抗モデルを用いた計算と一致した実験事実とも矛盾しない。ナトリウム液滴の変形が空気抵抗に与える影響は、無視できるといえる。

(2) ナトリウムの蒸発の影響

低レイノルズ数領域($Re \sim 0$)から中間レイノルズ数領域($Re \sim 10^2$)において、蒸発液滴の抵抗係数は剛体球に比べて小さいことが報告されている[8, 9]。蒸発液滴の抵抗係数は圧力抵抗、粘性抵抗、液滴表面での蒸発速度の不均一分布に起因する蒸発抵抗の合計で表される。

蒸発液滴の抵抗係数：

$$C_D = C_P + C_F + C_E \quad (4-9)$$

ここで、 C_P は圧力抵抗、 C_F は粘性抵抗、 C_E は蒸発抵抗を表す。

蒸発液滴では、液滴表面からの蒸発による質量流束が液滴後流部の圧力を上昇させ、液滴前流部と後流部の圧力差を小さくし、圧力抵抗が減少する。また、液滴表面からの質量流束によって液滴の境界層も厚くなり、粘性抵抗も減少する。蒸発抵抗は剛体球の抵抗に比べて増加する分であるが、他の抵抗が減少するのに比べてその効果は小さく無視される。総合的には、蒸発液滴の抵抗係数は剛体球に比べて小さくなる。参考に蒸発液滴の抵抗係数の理論式および実験式を以下に示す。

蒸発液滴の抵抗係数の理論式(Eisenklam ら) [10] :

$$C_D = \frac{24}{Re} \left[\frac{2+B}{\left(2+\frac{3}{4}B\right)-\frac{3}{16}Re(2+B)} - \frac{B(4+Re)}{3(2+B)} \right] \quad \text{ただし、 } Re \leq 1 \quad (\text{蒸発球のみ}) \quad (4-10)$$

蒸発・燃焼液滴の抵抗係数の実験式(Muggia) [10] :

$$C_D = \frac{1}{1+B} \cdot C_{D,Solid} \quad \text{ただし、 } 0.1 < Re < 3 \quad (\text{燃焼球}) , \quad 0.1 < Re < 40 \quad (\text{蒸発球}) \quad (4-11)$$

伝達数 :

$$B \equiv \frac{1}{H} \left[C_p (T_{gas} - T) + \frac{qY}{W\nu} \right] \quad (4-12)$$

ここで、 B は伝達数、 H は蒸発潜熱、 q は液滴燃焼熱、 Y はガス中酸素モル分率、 W は酸素分子量、 ν は単位質量液滴と反応する酸素モル数を表す。

レイノルズ数が中間レイノルズ数領域($Re \sim 10^2$)よりも大きくなると、液滴と周囲ガスとの相対速度が液滴界面を通過する速度(蒸発速度)を大きく上回り、蒸発の効果は相対的に小さくなる。ナトリウム液滴(対象とする液滴径: 約 3~7mm)の自由落下運動の場合、液滴のレイノルズ数は落下開始から約 0.03 秒で 100 以上となる。ナトリウム液滴が 8.02m 落下する時間の測定値は約 1.4 ~ 1.8 秒であるから、液滴の全落下過程に対してナトリウムの蒸発が抵抗係数に影響を及ぼす過程は短い。結果として、ナトリウムの蒸発が空気抵抗に与える影響は無視できる。

(3) 上昇流のドラッグによる影響

燃焼熱で温められた液滴近傍のガスとその周囲の冷たいガスの密度差で生じる上昇流は、液滴群の場合に考慮する必要があるが、单一液滴の場合は無視できる。

(4) 液滴周囲ガスの物性値(粘性)の変化

従来のナトリウム燃焼解析におけるナトリウム液滴の空気抵抗計算では、等温場（雰囲気ガス温度）のガス空間を落下する剛体球の空気抵抗で計算されている。しかしながら、実際の液滴周囲のガスはナトリウム燃焼熱で温度が上昇し、それに伴って粘性が増加している。液滴周囲のガス温度を1200°C (1473K) 程度と仮定すると、ガス（空気）の粘性係数は、25°C (298K) 時の約3倍 (300K: 18.62 μPa·s, 1500K: 56.11 μPa·s) [11]、密度は約5分の1 (300K: 1.176kg/m³, 1500K: 0.235kg/m³) [11]となる。レイノルズ数 ($\rho v D / \mu$) では25°C時の約15分の1となる。等温場では、レイノルズ数が低いほど抵抗係数が増加する傾向があり、実際のナトリウム液滴の場合でも、液滴周囲ガスの温度の上昇が液滴の抵抗係数の増加につながっていると考えられる。

ナトリウム液滴の空気抵抗と液滴周囲ガス温度の関係を調べるために、初期液滴径3.34mm、4.75mm、5.85mmのナトリウム液滴について、雰囲気ガス温度をパラメータとした計算を実施した。各液滴径に対して、雰囲気ガス温度を25°C、400°C、800°C、1200°Cとして計算を行った。計算結果を図4-4～図4-6に示す。計算では、雰囲気ガス温度の上昇でナトリウム液滴の空気抵抗が増加し、また、ある雰囲気ガス温度では実際のナトリウム液滴の落下運動に近い結果が得られた。この計算結果は反応生成物をNa₂O:60%、Na₂O₂:40%と仮定したものであるが、他の割合でも同様の結果であった。この結果から、雰囲気ガス温度の上昇によるガス粘性の増加が、ナトリウム液滴の空気抵抗を増加させている主な要因であることがわかる。

今後の課題は、等温場（雰囲気ガス）として扱った液滴周囲ガスの温度分布を考慮し、ナトリウム液滴の空気抵抗增加分を定量的に評価することである。

4.2. ナトリウム液滴の燃焼挙動

4.2.1. ナトリウム液滴の着火

ナトリウム液滴は空気雰囲気に曝されると液滴表面に酸化皮膜を形成し、その後ある時点で酸化皮膜が溶融して消失し、発光（着火）を始める。炭化水素系燃料、例えばヘプタンの場合は、酸化雰囲気に曝された時点から液滴表面の酸化反応熱で液滴温度が上昇し、液滴温度が着火温度に到達した時点で発火するが、ナトリウムの場合はこれに表面皮膜の形成・溶融というプロセスが加わる。ナトリウム液滴の着火プロセスの詳細については、静止ナトリウム液滴の自発着火実験で佐藤らが詳細な観察・測定を行っている[12]。

FD-2 実験と今回の実験で取得したナトリウム液滴の着火遅れ時間データを図4-7に示す。FD-3-1とFD-3-2のケースを比較すると、液滴径が大きい方が着火遅れ時間が長いという傾向が見られる。これは、燃焼面積（液滴表面積）に対する液滴体積の割合が液滴径の増加とともに増加するため、液滴の熱容量が大きくなり、液滴の温度上昇が遅くなるからである。ただし、FD-2のケースはFD-3シリーズのこの傾向に一致しない。これは、FD-2実験の雰囲気条件がFD-3シリーズと異なり高湿分濃度であったため、液滴表面に水酸化ナトリウムの皮膜が生成されたからと考えられる。ナトリウム酸化物皮膜は多孔質な固体で液滴内部のナトリウムが表面に浸み出しやす

いが、水酸化ナトリウム皮膜は液体のフィルム状で液滴内部のナトリウムを完全にカバーする傾向がある。そのため、着火遅れ時間は高温分条件の FD-2 のケースで長くなったと考えられる。

4.2.2. 初期液滴径とナトリウム燃焼量および燃焼速度

着火後の燃焼を検討するにあたって、ナトリウム燃焼量および燃焼速度を以下の式で定義した。

$$\Delta m = m_i - m_c \quad (4-13)$$

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{S_i \cdot (t_{total} - t_{ig})} \quad (4-14)$$

ここで、 Δm はナトリウム燃焼量、 m_i は初期液滴質量、 m_c は回収液滴質量、 \dot{m} は燃焼速度、 S_i は初期液滴表面積、 t_{total} は総落下時間、 t_{ig} は着火遅れ時間を表す。

ナトリウム燃焼量と燃焼速度を初期液滴径で整理したものを図 4-8 に示す。ナトリウム燃焼量は初期液滴径の増加とともに増加し、燃焼速度は初期液滴径の増加に伴って減少する傾向がある。初期液滴径の増加に伴ってナトリウム燃焼量が増加するのは、液滴径の 2 乗に比例して燃焼面積である液滴表面積が増加するためである。燃焼速度については、次節で考察する。

4.2.3. ナトリウム液滴の燃焼評価

(1) ナトリウム液滴の燃焼機構

ナトリウム液滴が着火した後は、燃焼の支配的な現象は液滴表面からの蒸発である。従って、ナトリウムの蒸発を予測することで燃焼を評価することができる。

静止したナトリウム液滴の燃焼について、液滴直径の二乗（すなわち表面積）の時間変化率は一定であることが報告されている [13]。

液滴燃焼の D² 則：

$$-\frac{dD^2}{dt} = K \quad (4-15)$$

ここで、 D は液滴直径、 K は蒸発係数を表す。

また、静止液滴の蒸発係数は、準定常の液滴燃焼理論を用いて以下で与えられる [14]。

$$K_s = \frac{8\lambda_{gas}}{C_{p,gas}\rho_{gas}} \ln(1+B) \quad (4-16)$$

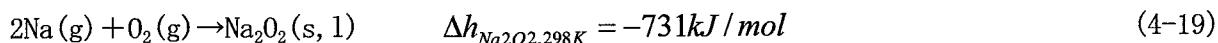
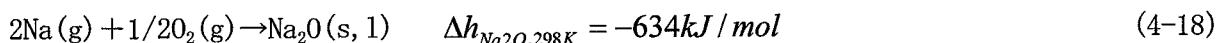
ここで、 λ_{gas} はガス熱伝導率、 $C_{p,gas}$ はガス低圧比熱、 ρ_{gas} はガス密度、 B は伝達数、添え字 s

は静止液滴を表す。

落下する液滴の燃焼評価式は、静止液滴の燃焼評価式(D^2 則)を拡張した形で、多くの実験式・半実験式が与えられ、一般的には、静止液滴の蒸発係数 K_s に強制対流効果を考慮した係数を掛けた以下の式で表される。実験定数 C_f として 0.276 が Frossling によって与えられている[10]。

$$K = K_s \cdot \left(1 + C_f \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3}\right) \quad (4-17)$$

以上で評価される量のナトリウムは、以下の 2 式で反応すると考える。



以上の燃焼モデルは、SPHINCS コード[3]で採用されている。ただし、厳密には実験定数の値に若干の違いがある。

(2) ナトリウム液滴の燃焼評価

FD-2 実験と今回の実験の条件で以上の燃焼モデルの計算を行い、ナトリウム燃焼量の計算値と測定値を比較した。この時、以下に示す反応生成物割合をパラメータとして与えた。

$$(反応生成物割合) = \frac{(M_{\text{Na}_2\text{O}})}{(M_{\text{Na}_2\text{O}} + M_{\text{Na}_2\text{O}_2})} \quad (4-20)$$

ここで、 M は反応生成物中の添え字成分のモル数を表す。また、液滴の落下速度は、落下時間測定値から得た各計測区間の平均落下速度を与えた。

反応生成物割合を 1 ($\text{Na}_2\text{O}:100\%$) および 0 ($\text{Na}_2\text{O}:0\%$) と仮定した場合のナトリウム燃焼量の測定値と計算値の相關図を図 4-9 に示す。このグラフから、計算値と測定値は直線的な相関を持つことがわかる。二つの量的変数に関する直線的な相関の程度を表す時に、ピアソンの積率相関係数が用いられる。

ピアソンの積率相関係数：

$$(x \text{と} y \text{の相関係数}) = \frac{(x \text{と} y \text{の共分散})}{(x \text{の標準偏差}) \cdot (y \text{の標準偏差})} \quad (4-21)$$

反応生成物割合を 1 および 0 と仮定した場合の計算値と測定値の各積率相関係数は 0.87 となる。一般的に積率相関係数が 0.7~1.0 の場合は強い相関があることから、本燃焼モデルはナトリウム液滴燃焼の特性をよく模擬しているといえる。

次に、反応生成物の割合を予測する目的で、ナトリウム液滴の燃焼が D² 則に従うとの仮定のもとに、ナトリウム燃焼量が測定値と一致する条件で計算を行った。この結果、反応生成物割合が 0.51~0.75 となったことから、ナトリウムの液滴燃焼では過酸化ナトリウムよりも酸化ナトリウムが多く生成されると推定される。従来のナトリウムスプレイ燃焼の解析では、プール燃焼実験の知見にもとづき反応生成物割合を 0.6 (Na₂O : 60%、Na₂O₂ : 40%) と仮定しているが、反応生成物割合を 0.6 と仮定した場合の計算値は、図 4-10 に示すように、測定値と±20%以内で一致した。これらの計算は従来解析の反応生成物割合の仮定が妥当であることを示している。

5. おわりに

初期径 3.34、5.85mm のナトリウム液滴落下燃焼実験、初期径 4.71mm の不活性雰囲気下でのナトリウム液滴落下実験、ポリプロピレン球の落下実験を実施した。

得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) 燃焼ナトリウム液滴の抵抗係数は、同直径剛体球の 1.4~2.2 倍に相当する。
- (2) ナトリウム液滴の空気抵抗が剛体球よりも大きい主な要因は、燃焼発熱に伴う液滴周囲ガスの粘性增加である。ナトリウム液滴は落下中に変形し、約 8m 落下時で縦横比 0.89 の橢円体になるが、その影響は無視される。また、液滴の蒸発および浮力の影響についても、同様に無視される。
- (3) ナトリウム液滴の燃焼は初期液滴径が変化した場合でも D^2 則に従うことが確認された。ナトリウム燃焼量を測定値に一致させる条件で D^2 則燃焼モデルの計算を行った場合、反応生成物中の Na_2O 割合は 0.51~0.75 となる。

今後の課題は、物性値温度依存性を考慮した液滴周囲ガスの流体数値計算を行い、燃焼発熱に伴う液滴周囲ガスの粘性増加がナトリウム液滴の抵抗係数増加の原因であることを定量的に評価することである。

6. 謝辞

ナトリウム液滴落下燃焼実験は、東興機械工業株式会社の方々、特に鈴木和右氏、中根啓二氏、深作和男氏、米道剛氏、佐伯理生二氏、また、原子力技術株式会社加藤一憲氏にご協力いただきました。また、東邦大学佐藤研二教授、消防研究所鶴田俊氏、宇宙航空研究開発機構牧野敦主任研究員には、有益なコメント、討論を頂きました。関係者各位に感謝申し上げます。

7. 参考文献

- [1] 宮原信哉, 荒邦章：“ナトリウム液滴落下燃焼実験－予備的実験の評価－”、PNC TN9410 98-065 (1998)
- [2] 堂田哲広, 他：“ナトリウム液滴落下燃焼実験(FD-2)”、JNC TN9400 2003-011 (2003)
- [3] 山口彰, 田嶋雄次：“SPHINCS コードのスプレイ燃焼モデルの開発と検証 液滴燃焼実験解析と技術課題の摘出”、JNC TN9400 99-059 (1999)
- [4] 大野修司, 他：“ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS Version2.1 使用説明書”、JNC TN9520 2000-001 (2000)
- [5] 岡野靖, 大平博昭：“ナトリウム液滴燃焼解析コード(COMET)の開発”、PNC TN9410 98-031 (1998)
- [6] R. B. Bird, et al. : Transport Phenomena, John Wiley & Sons, Inc. (1960)
- [7] R. Clift, et al. : Bubbles, Drops, and Particles, pp. 148, Academic press New York (1978)
- [8] G. Gogos, P. S. Ayyaswamy : “A Model for the Evaporation of a slowly Moving Droplet”, Combustion and Flame, vol. 74, pp. 111～129 (1988)
- [9] T. Sundararajan, P. S. Ayyaswamy : “Hydrodynamics and heat transfer associated with condensation on a moving drop: solutions for intermediate Reynolds numbers”, J. Fluid Mech., vol. 149, pp. 33～58 (1984)
- [10] 大竹一友, 藤原俊隆：燃焼工学、コロナ社 (1994)
- [11] 日本機械学会編、技術資料「流体の熱物性値集」、pp. 12～316, 日本機械学会 (1983)
- [12] 佐藤研二：“静止ナトリウム液滴燃焼実験”、JNC TY9400 2004-003 (2003)
- [13] Richard, J. R., et al. : “Spontaneous Ignition and Combustion of Sodium Droplets in Various Oxidizing Atmosphere at atmospheric Pressure”, 12th Symposium (International) on Combustion, pp. 39～48 (1968)
- [14] Spalding D. B. : Some Fundamentals of Combustion, Butterworths, London, England (1955)

表 2-1 計測器一覧

計測器	製品	測定項目
ファイバセンサ	アンプ：キーエンス製 FS-V11 センサ：キーエンス製 FU-12	液滴落下検出
CCD カメラ	カメラ：キーエンス製カラー画像センサ CV750 レンズ：キーエンス製 CV-L16	初期液滴径
高速度カメラ	カメラ：フォトロン製 FASTCAM-NET1000 レンズ：キャノン製 PHF3.5 1.6	着火遅れ時間
レーザ式通過検出計	キーエンス製 LX2 (×60 個)	液滴落下時間
相対湿度計	桜エンドレス製 rh-plus2250	実験容器内湿度
酸素濃度計	東レ製 LC-750 (ジルコニア式) 理研計器製 GD-F8D (熱伝導度式)	実験容器内酸素濃度

表 2-2 実験条件

Run No.	雰囲気			落下物			ノズル外 径 (mm)	実施日
	成分	温度 (°C)	露点温度 (°C)	成分	直径 (mm)	初期温度 (°C)		
FD-3-1	空気	11 ^{*1}	1 ^{*1}	Na	4 ^{*2}	450	8.02	0.35mm 2004/3/2
FD-3-2	空気	13 ^{*1}	0 ^{*1}	Na	6 ^{*2}	450	8.02	2.0mm 2004/2/3
FD-3-B1	空気	-	-	PP	3.99 4.79 6.34	-	8.02	- 2004/1/16
FD-3-B2	窒素 (O ₂ <1%)	-	-	Na	5 ^{*2}	450	8.02	1.0mm 2004/3/18

※1 測定値

※2 ノズル外径より求めた予測値

表 3-1 8m 落下時の測定値 (FD-3-1)

ケース	初期質量 (mg)	回収Na量 (mg)	総燃焼量 (mg)	着火運れ 時間(s)	落下時間(s)			備考
					@1.9m	@3.7m	@5.7m	
1-I1	—	16.68	—	—	—	—	—	落下距離 0m で回収
1-I2	—	16.75	—	—	—	—	—	落下距離 0m で回収
1-I3	—	16.29	—	—	—	—	—	落下距離 0m で回収
1-S1		9.72	6.85	×	×	×	×	
1-S3		8.96	7.61	×	×	×	×	
1-S5		9.26	7.31	0.536	0.644	1.040	1.370	1.754
1-S6		9.39	7.18	0.480	0.660	0.998	1.340	1.895
1-S7				—	0.656	0.996	1.329	1.707
1-S8				—	0.659	0.978	1.301	1.673
1-S9				—	0.658	0.998	1.326	1.870
1-S10	16.57 ^{*1}	108.9 (1滴あたり 1滴あたり り 9.90)	6.67	—	0.641	0.965	1.286	1.648
1-S11				—	0.669	—	1.310	1.704
1-S12				—	0.656	0.995	1.323	1.738
1-S13				—	0.655	0.989	1.324	1.708
1-S14				—	0.654	1.115	1.329	1.700
1-S15				—	0.662	0.988	1.318	1.897
1-S16				—	0.655	0.987	1.326	1.704
1-S17				—	0.655	0.988	1.320	1.696
平均 ^{*2}	16.57	9.75	6.82	0.508	0.656	1.003	1.323	1.746
分散 ^{*2}	—	—	—	—	0.0072	0.0393	0.0198	0.0849
誤差 ^{*2}	—	—	—	—	1.1%	3.9%	1.5%	4.9%

^{*1} 1-I1、1-I2、1-I3 の平均値^{*2} 1-S1~1-S17 の平均値

—：該当なし、×：測定不可

表 3-2 8m 落下時の測定値 (FD-3-2)

ケース	初期質量 (mg)	回収 Na 量 (mg)	総燃焼量 (mg)	着火遅れ 時間 (s)	落下時間 (s)		
					@ 1.9m	@ 3.7m	@ 5.7m
2-S2	86.19	76.60	9.59	0.736	0.638	0.925	1.190
2-S3	90.93	80.35	10.58	0.816	0.638	0.921	1.182
2-S5	90.51	81.95	8.56	0.784	0.638	0.921	1.184
2-S6	88.57	78.90	9.67	0.784	0.633	0.910	1.177
平均	89.05	79.45	9.60	0.780	0.637	0.919	1.183
分散	1.88	1.97	0.72	0.03	0.002	0.006	0.005
誤差	2.1%	2.5%	7.5%	3.7%	0.3%	0.6%	0.4%
							0.3%

表 3-3 8m 落下時の測定値(FD-3-B1)

ケース	質量 (mg)	直径 (mm)	落下時間(s)			
			@1.9m	@3.7m	@5.7m	@8.0m
B1-1	30.6	3.98	0.618	0.906	1.176	1.457
B1-4	30.4	3.97	0.610	0.901	1.171	1.463
B1-7	30.7	4.00	0.617	0.906	1.175	1.460
B1-12	28.5	4.00	0.618	0.901	1.171	1.458
B1-17	32.2	4.01	0.617	0.905	1.175	1.462
平均	30.5	3.99	0.616	0.904	1.174	1.460
分散	1.32	0.02	0.0031	0.0026	0.0022	0.0022
誤差(%)	4.3%	0.4%	0.5%	0.3%	0.2%	0.2%

ケース	質量 (mg)	直径 (mm)	落下時間(s)			
			@1.9m	@3.7m	@5.7m	@8.0m
B1-2	49.4	4.75	0.612	0.893	1.152	1.424
B1-5	48.4	4.76	0.612	0.892	1.151	1.422
B1-8	53.0	4.79	0.612	0.892	1.147	1.422
B1-13	53.4	4.83	0.612	0.888	1.147	1.418
B1-18	52.0	4.81	0.606	0.888	1.153	1.425
平均	51.24	4.79	0.611	0.891	1.150	1.422
分散	2.22	0.03	0.0028	0.0025	0.0028	0.0025
誤差(%)	4.3%	0.7%	0.5%	0.3%	0.2%	0.2%

ケース	質量 (mg)	直径 (mm)	落下時間(s)			
			@1.9m	@3.7m	@5.7m	@8.0m
B1-3	114.5	6.32	0.606	0.877	1.118	1.371
B1-6	117.3	6.33	0.606	0.873	1.119	1.375
B1-9	113.9	6.35	0.606	0.876	1.121	1.370
B1-14	122.4	6.35	0.606	0.877	1.122	1.374
B1-19	125.5	6.36	0.606	0.877	1.119	1.376
平均	118.7	6.34	0.606	0.876	1.120	1.373
分散	5.06	0.02	0.0002	0.0019	0.0017	0.0025
誤差(%)	4.3%	0.3%	0.0%	0.2%	0.2%	0.2%

表 3-4 8m 落下時の測定値(FD-3-B2)

ケース	回収質量量 (mg)	落下時間				形状 縦／横
		@1.9m	@3.7m	@5.7m	@8.0m	
B2-S1	46.4	0.631	0.914	1.178	1.452	—
B2-S2		0.630	×	1.171	1.450	—
B2-S3		0.629	×	1.169	1.452	—
B2-S4		0.629	0.905	1.167	1.449	—
B2-S5		0.628	0.909	1.166	1.443	—
B2-S6		0.627	×	1.164	1.441	—
B2-S7		0.627	0.907	1.169	1.446	—
B2-S8		0.626	0.906	1.162	1.439	—
B2-S9		0.626	×	1.161	1.444	—
B2-S10		×	×	×	×	—
B2-S11		×	×	×	×	—
B2-S12		×	×	×	×	—
B2-S13		0.625	0.898	1.158	1.434	—
B2-S14		0.625	0.902	1.162	1.434	—
B2-S15		—	—	—	—	0.91
B2-S16		—	—	—	—	0.87
B2-S17		—	—	—	—	0.84
B2-S18		—	—	—	—	0.87
B2-S19		—	—	—	—	0.89
B2-S20		—	—	—	—	0.85
B2-S21		—	—	—	—	0.87
B2-S22		—	—	—	—	0.85
B2-S23		—	—	—	—	0.91
B2-S24		—	—	—	—	0.89
B2-S25		—	—	—	—	0.91
平均	46.4	0.627	0.906	1.166	1.444	0.88
分散	—	0.0021	0.0052	0.0056	0.0065	0.026
誤差(%)	—	0.3%	0.6%	0.5%	0.5%	3.0%

— : 該当なし、× : 測定不可

表 3-5 FD-2-3 実験の測定結果(8.02m 落下条件のみ)

ケース	初期質量 (mg)	回収 Na 量 (mg)	総燃焼量 (mg)	着火遅れ 時間 (s)	落下時間(s)		
					@1.9m	@3.7m	@5.7m
FD-2-3-1	47.45	39.53	7.92	>0.864	0.641	0.983	1.369
FD-2-3-2	47.51	39.14	8.37	0.790	0.642	0.967	1.273
平均値	47.48	39.34	8.15	0.790*	0.642	0.975	1.321
							1.700

*有効なデータのみを採用した。

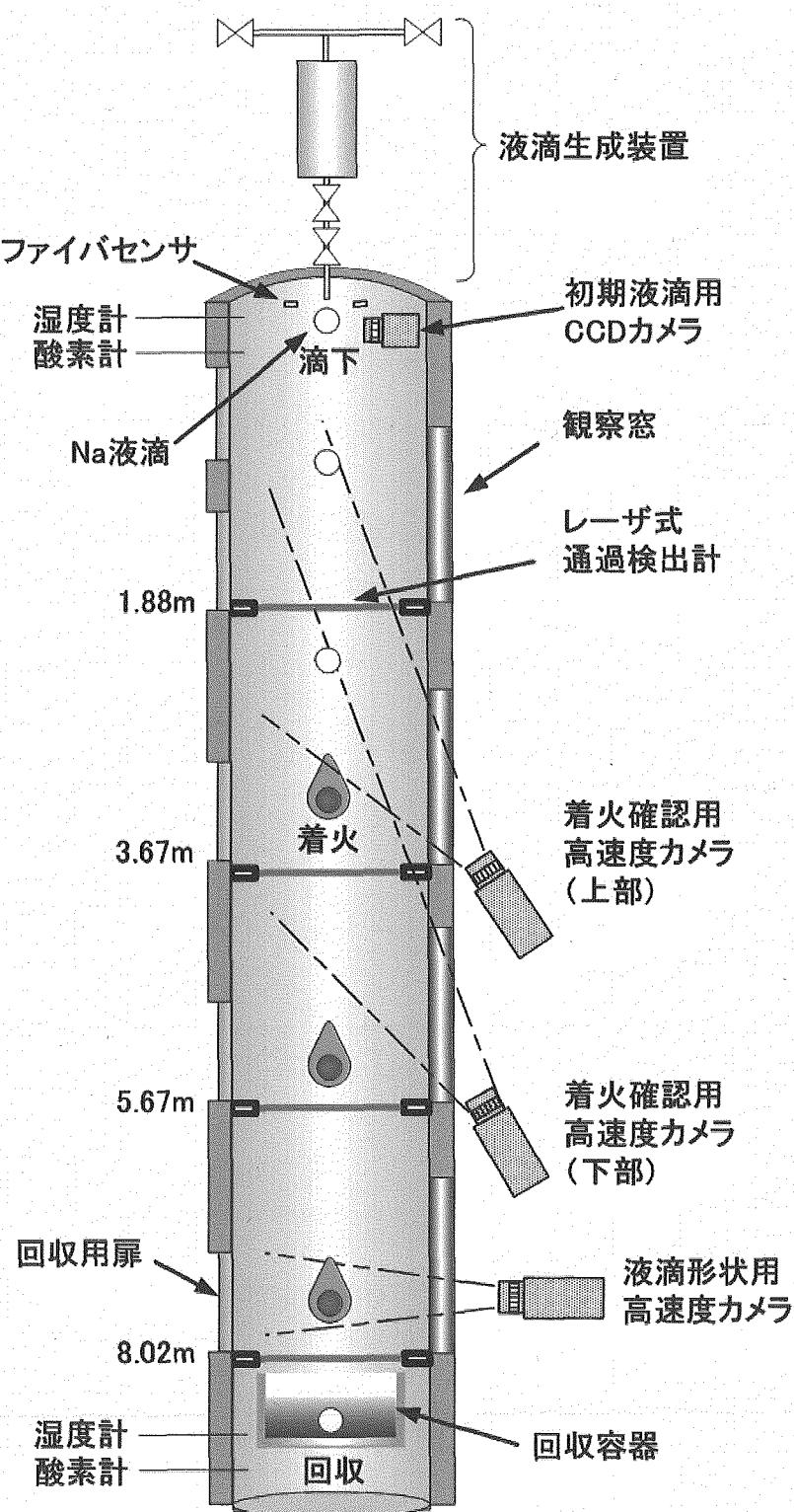


図 2-1 実験装置の概要

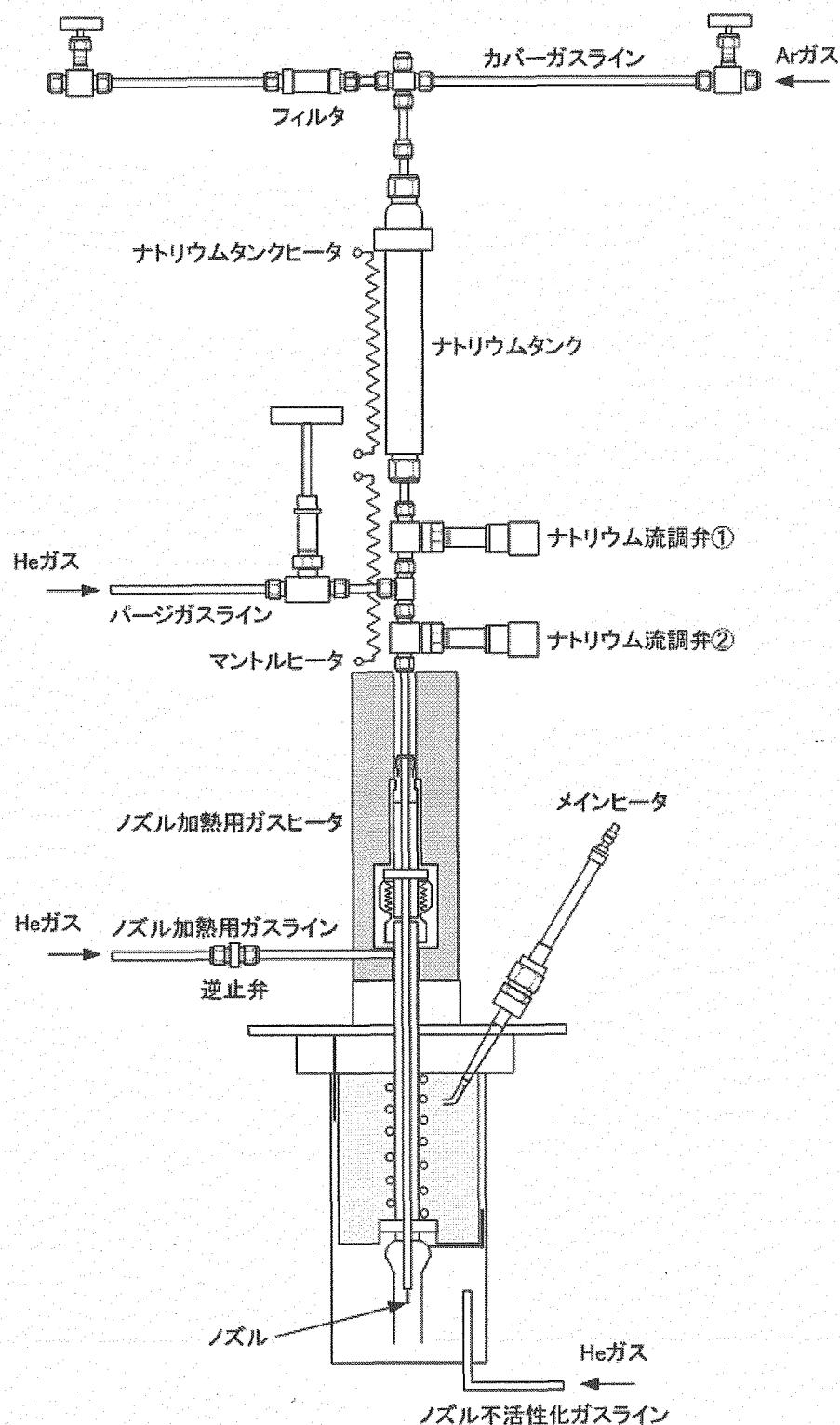


図 2-2 液滴生成装置

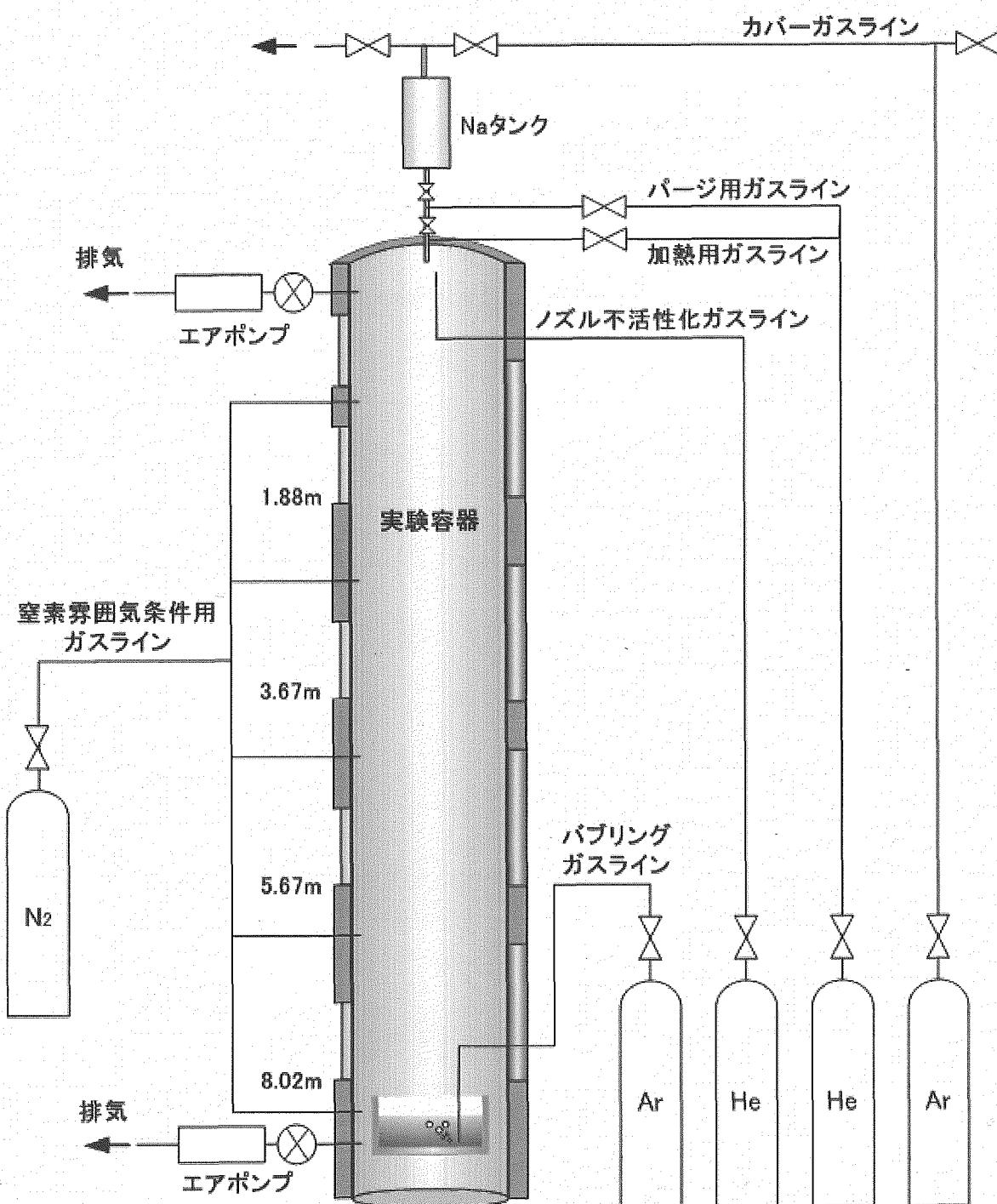


図 2-3 実験装置系統図

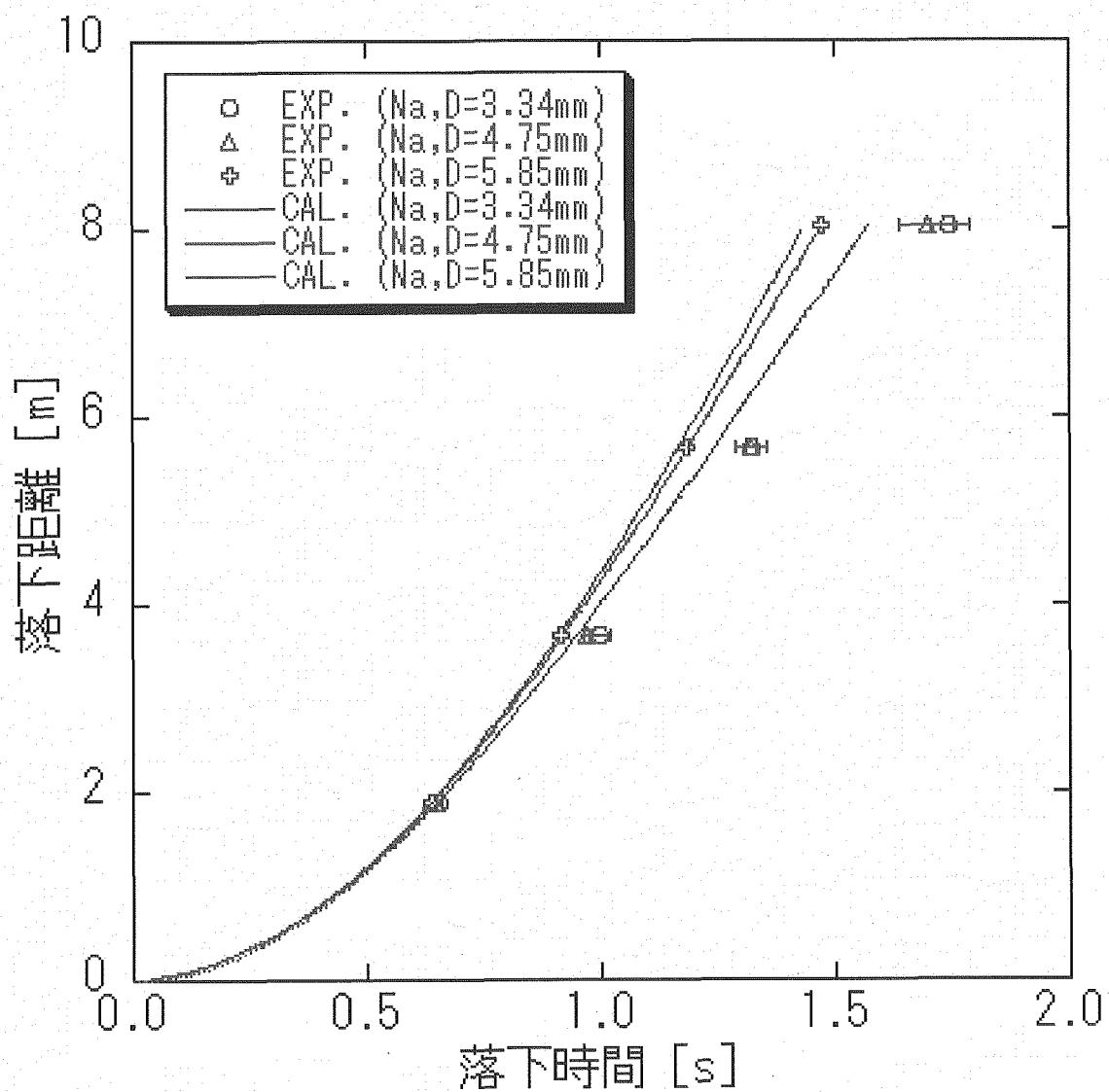


図 4-1 剛体球モデルの計算値と Na 液滴の測定値

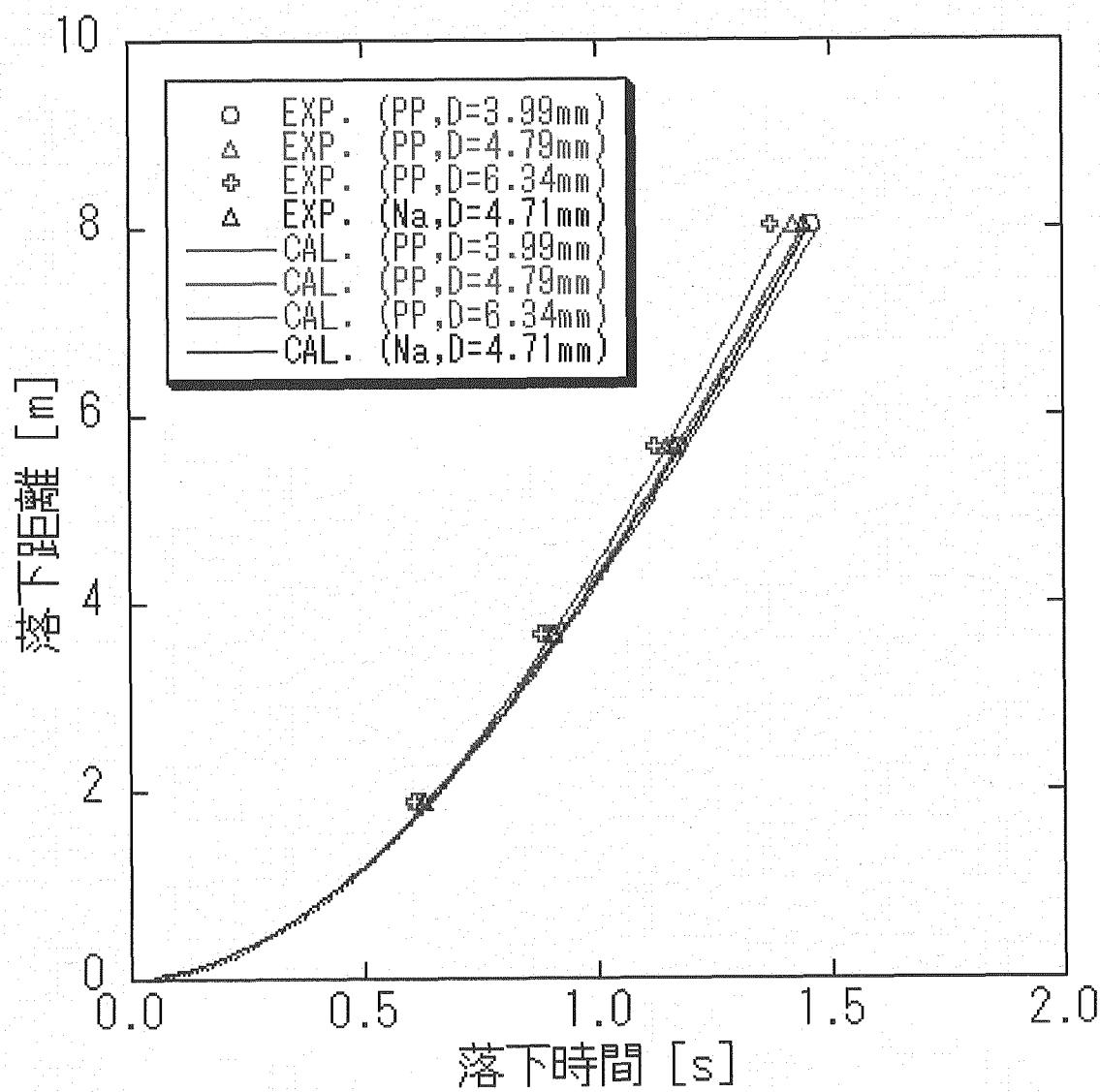


図 4-2 未燃焼 Na 液滴とポリプロピレン(PP)球の
測定値、剛体球モデルの計算値

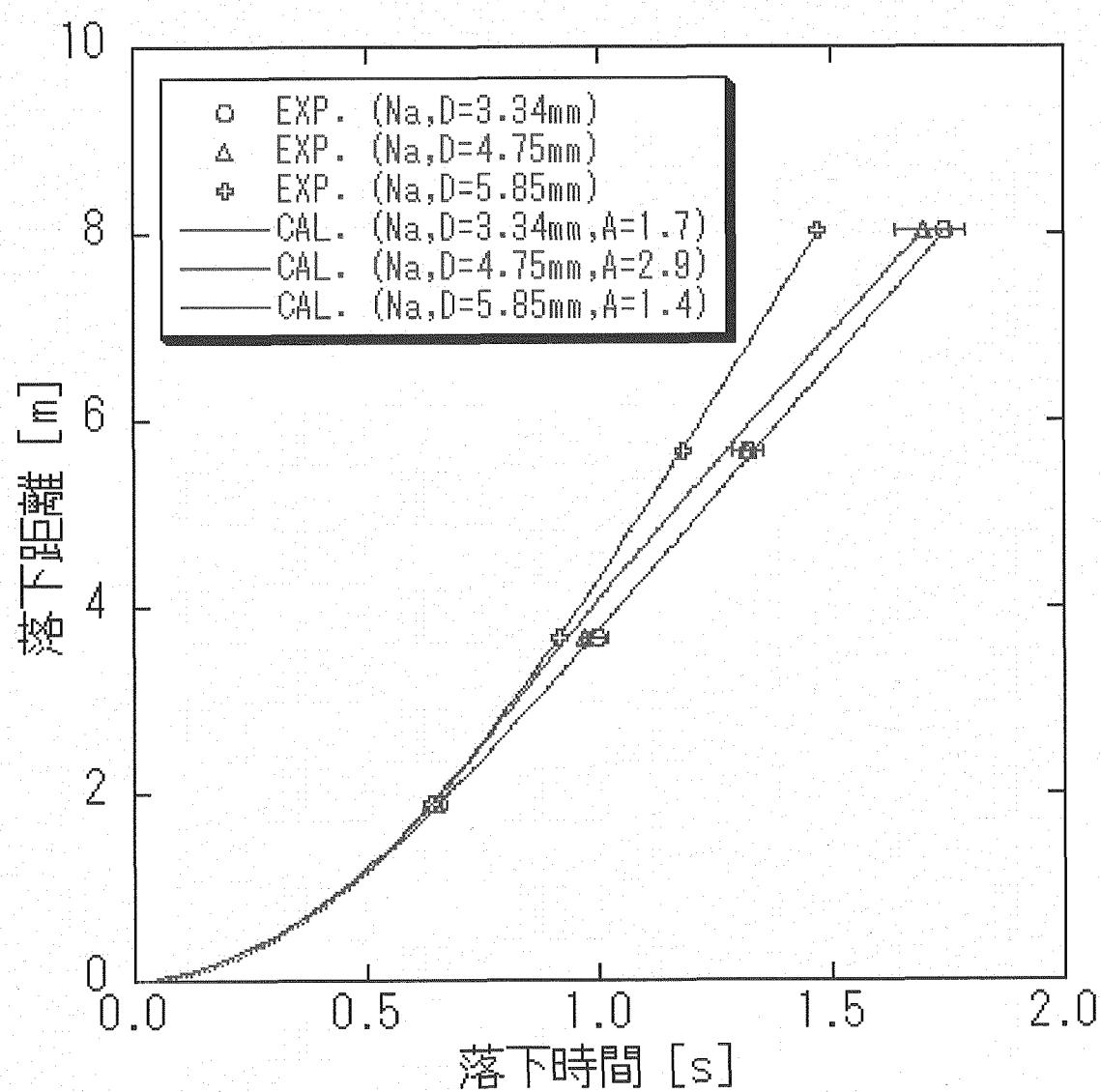


図 4-3 抵抗係数をパラメータとした剛体球モデルの計算値

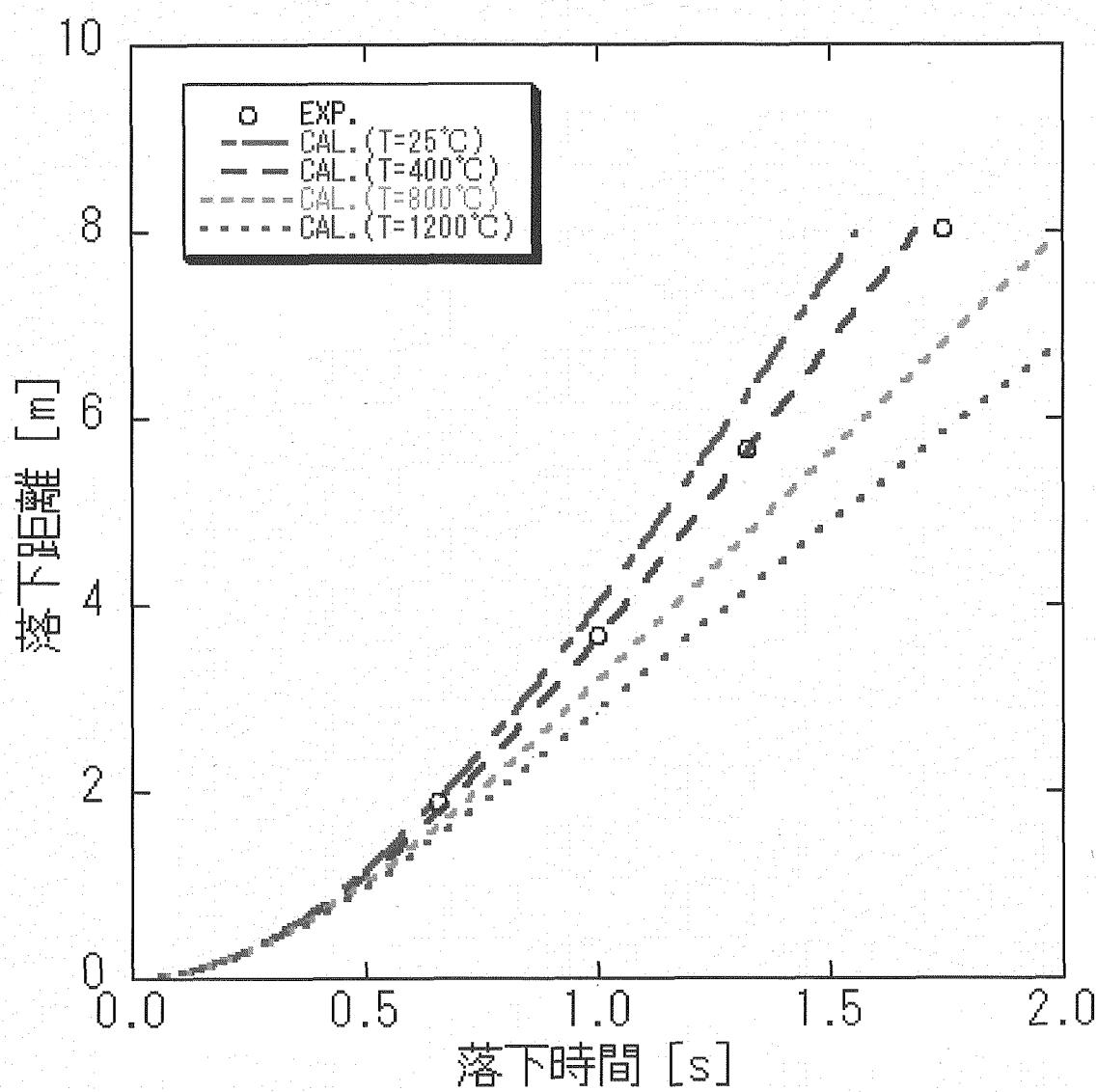


図 4-4 液滴周囲温度をパラメータとした Na 液滴の落下運動計算(初期径 3.34mm)

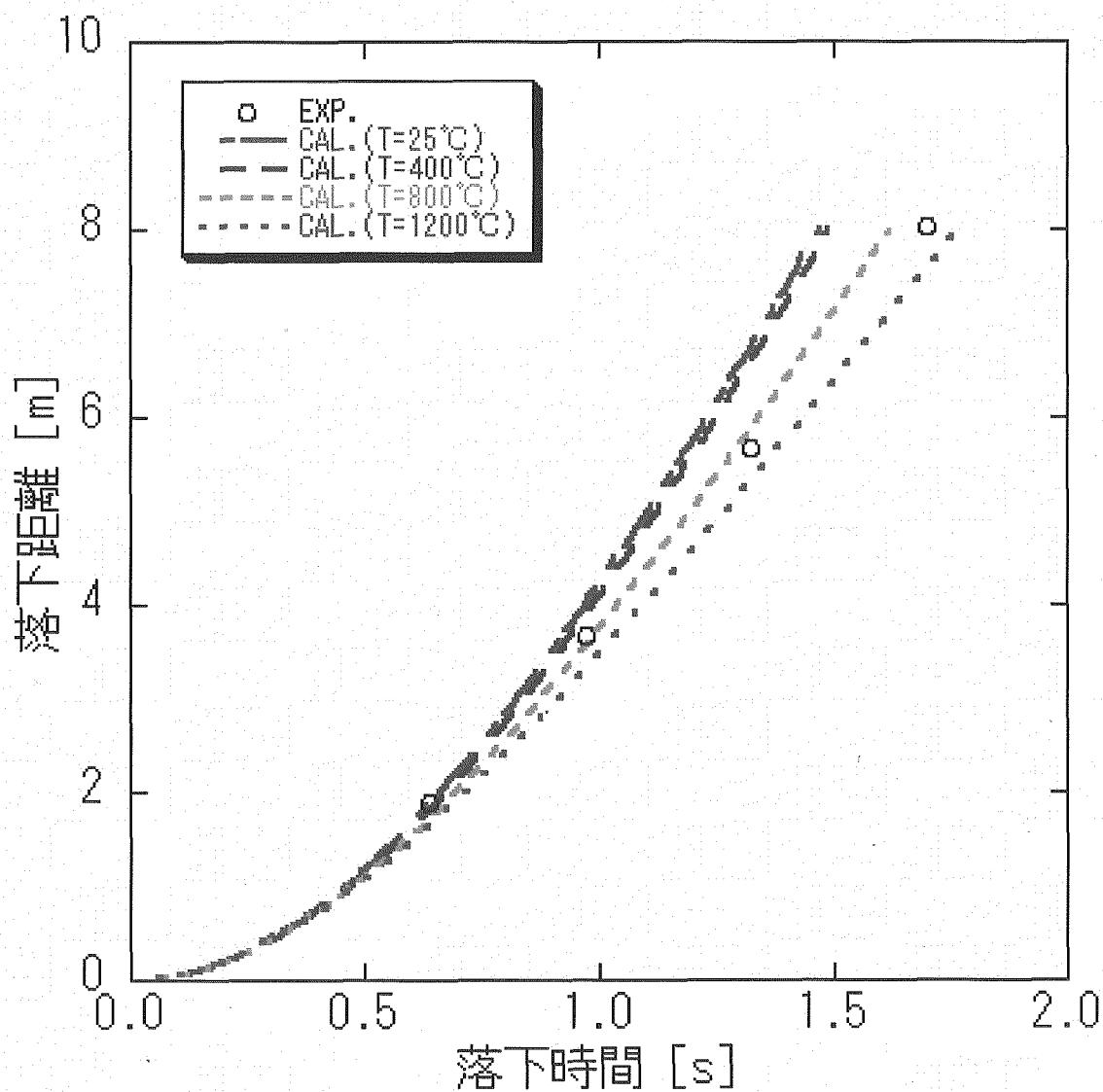


図 4-5 液滴周囲温度をパラメータとした Na 液滴の落下運動計算(初期径 4.75mm)

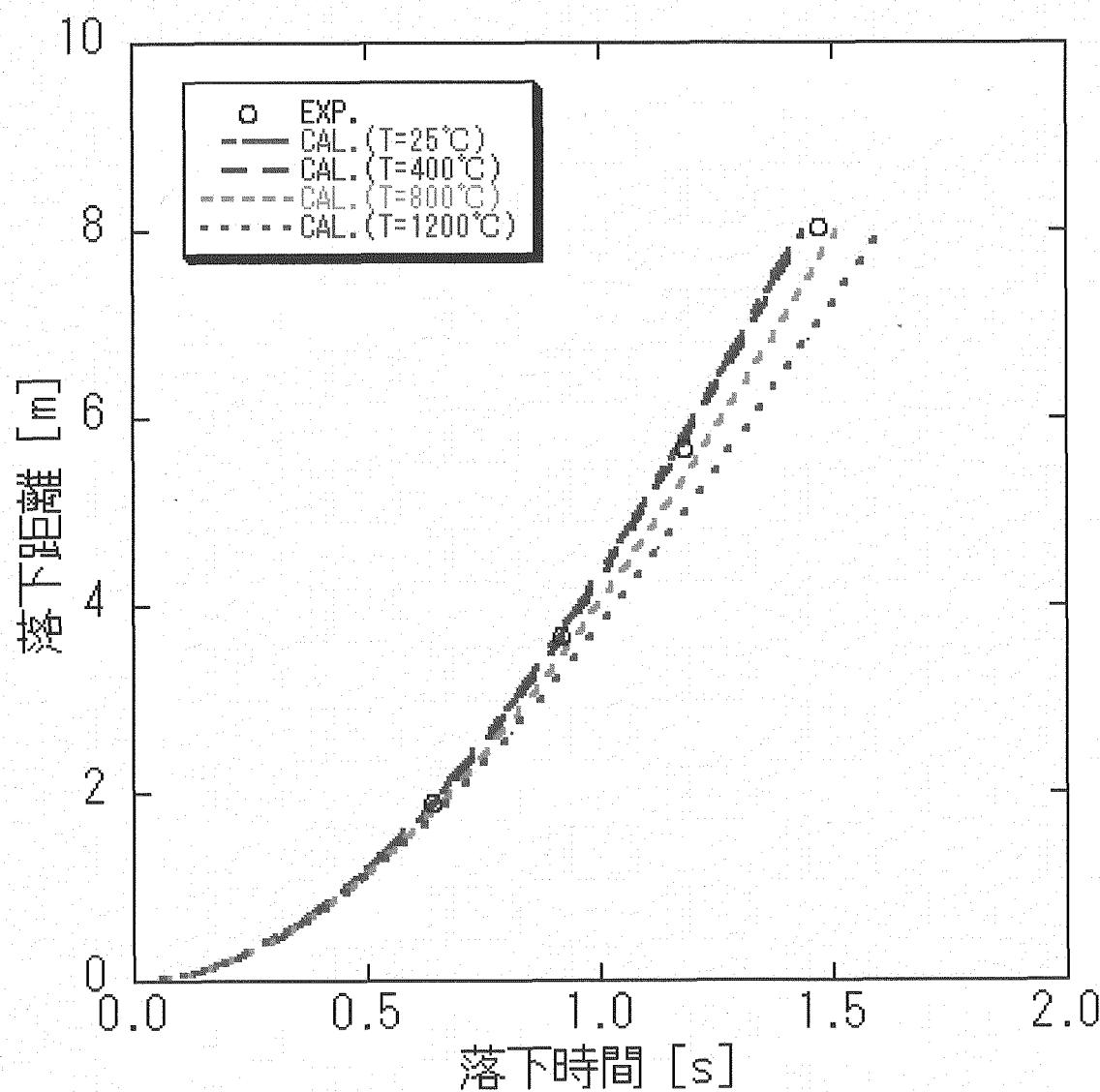


図 4-6 液滴周囲温度をパラメータとした Na 液滴の落下運動計算(初期径 5.85mm)

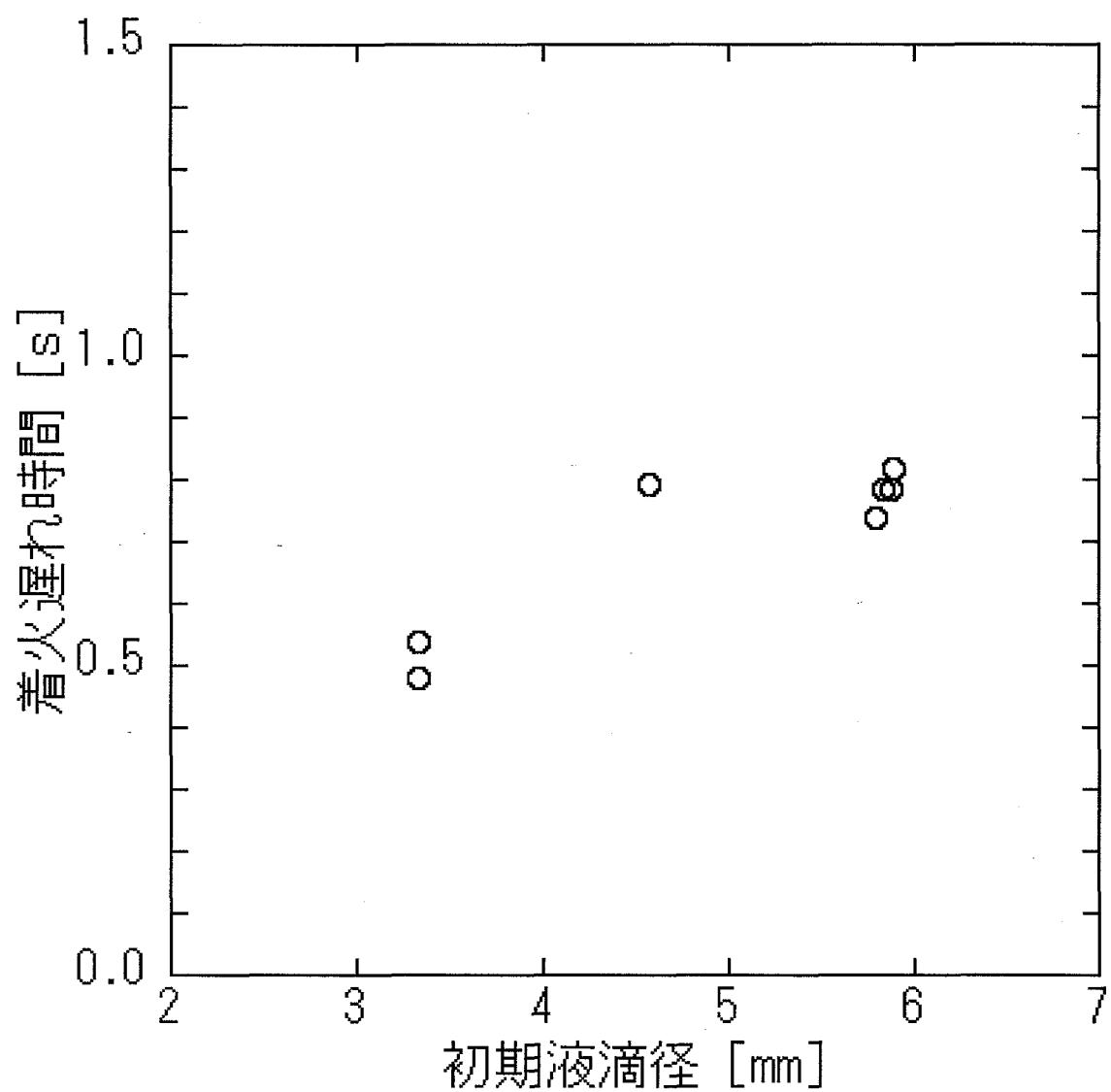


図 4-7 初期液滴径と着火遅れ時間

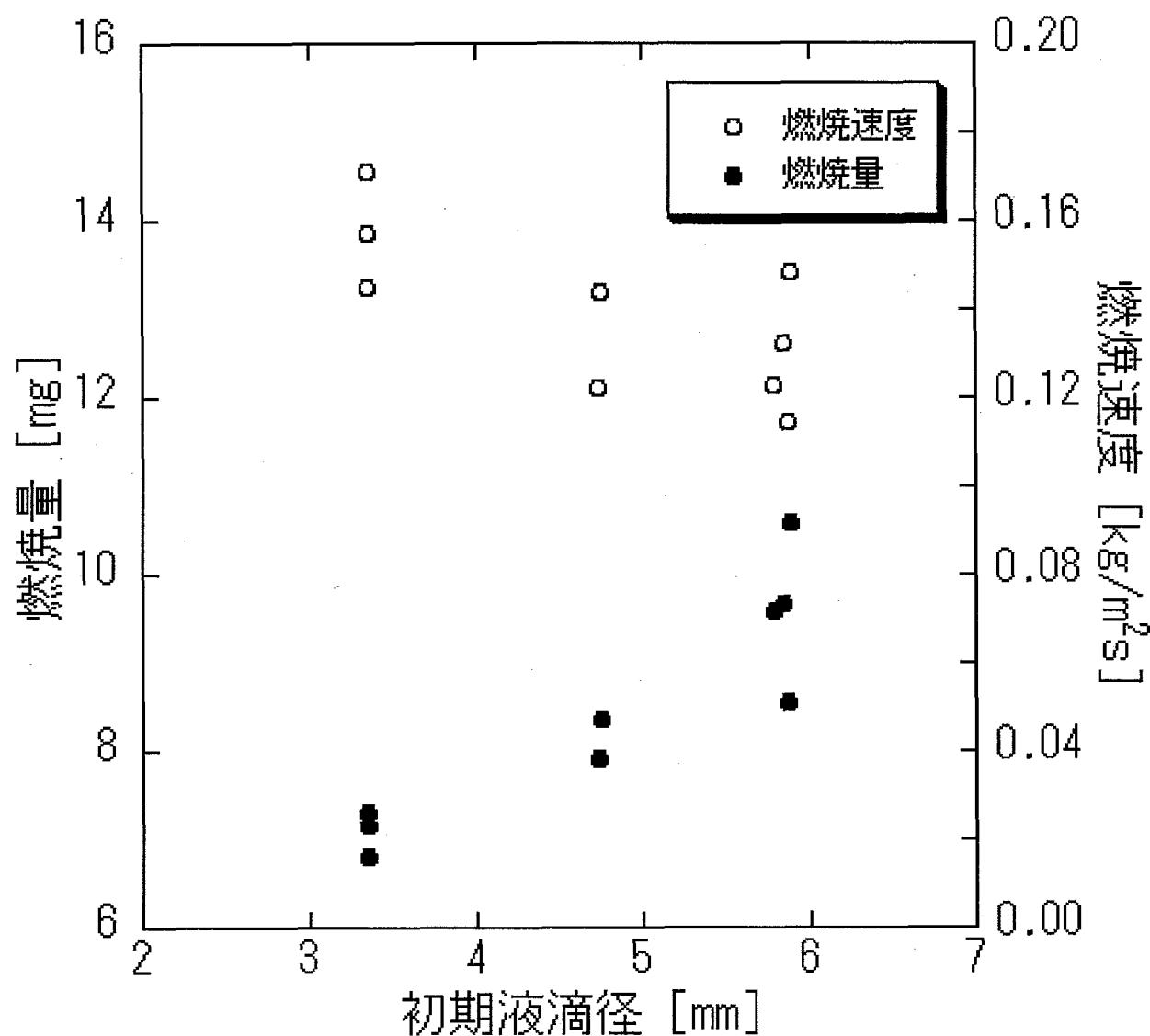


図 4-8 初期液滴径と燃焼量および燃焼速度

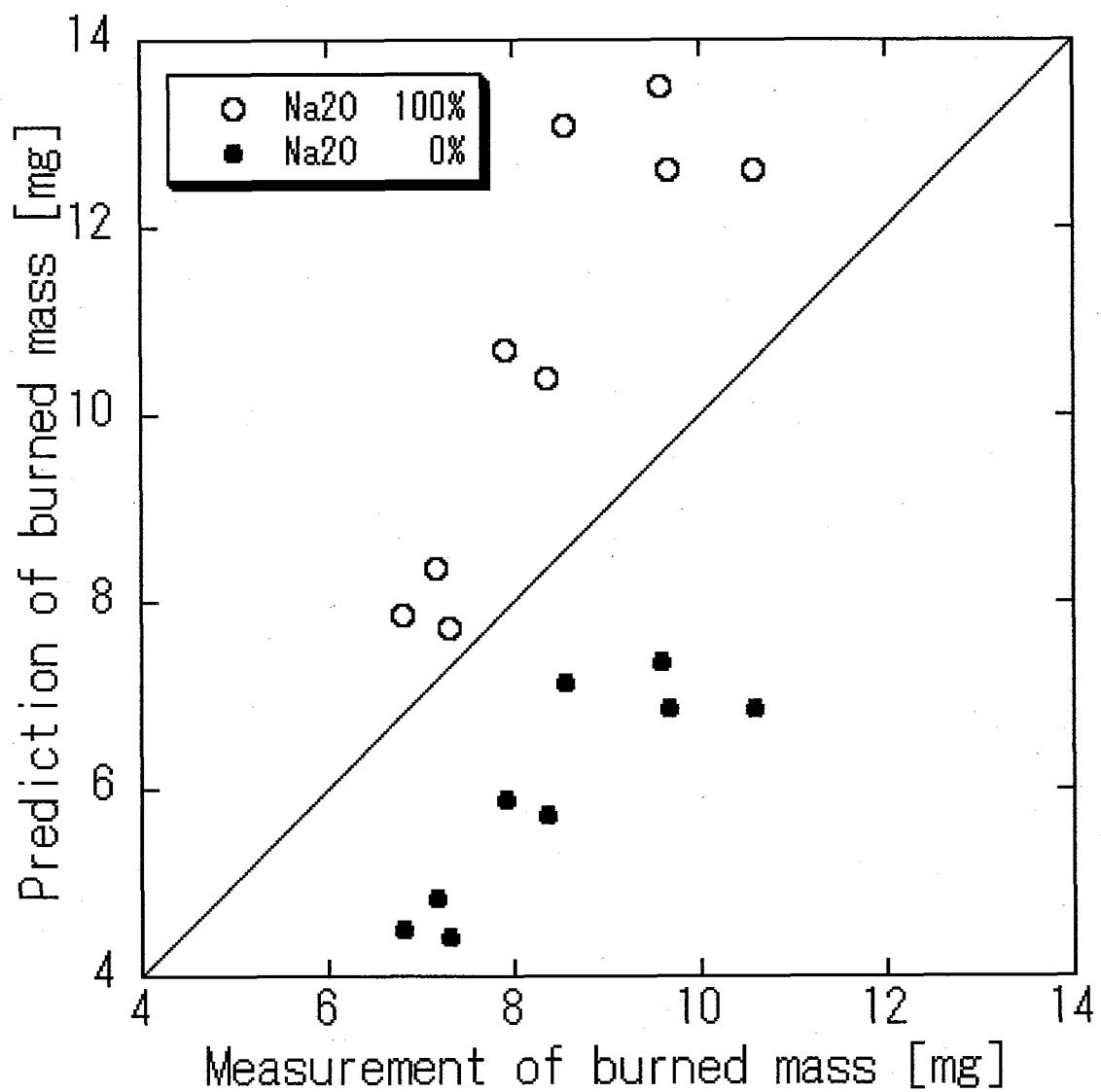


図 4-9 ナトリウム燃焼量の測定値と計算値
(生成物を Na_2O または Na_2O_2 と仮定したケース)

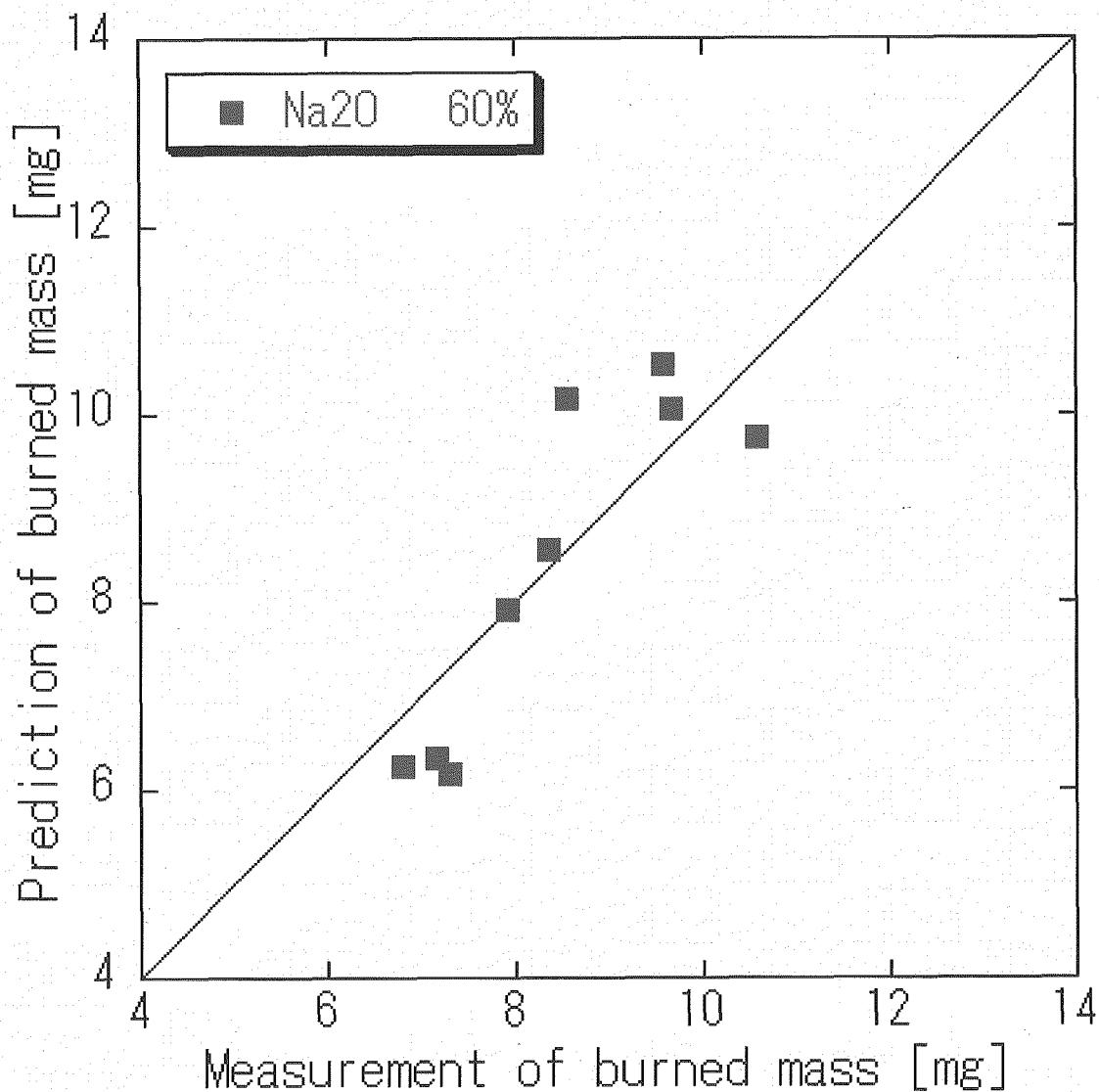


図 4-10 ナトリウム燃焼量の測定値と計算値

(反応生成物を $\text{Na}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}_2 = 60 : 40$ と仮定したケース)



写真 2-1 落下液滴燃焼実験装置

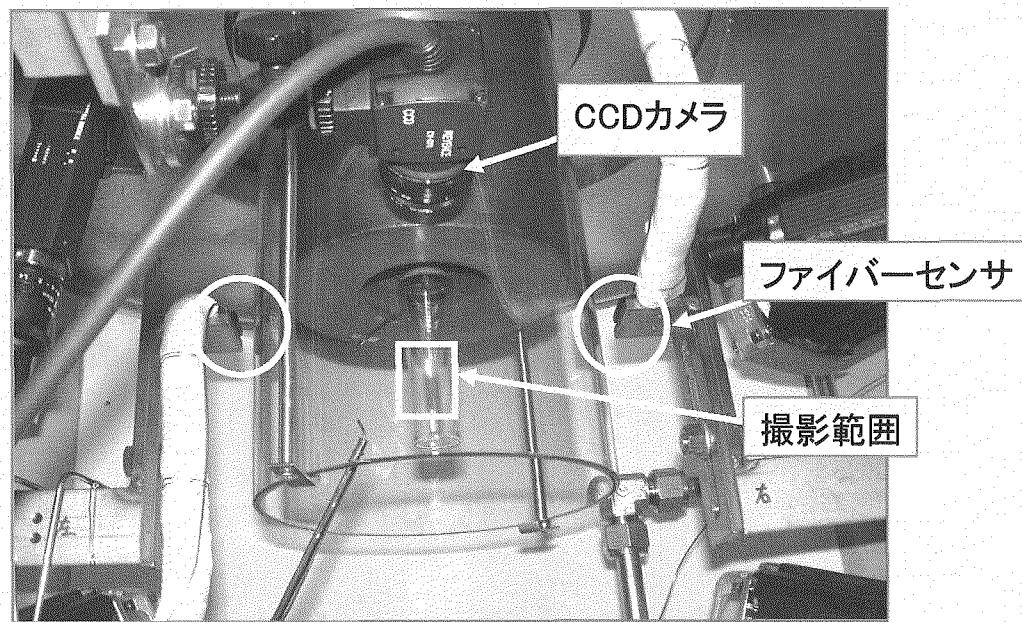


写真2-2a 落下した直後のNa液滴を撮影する様子

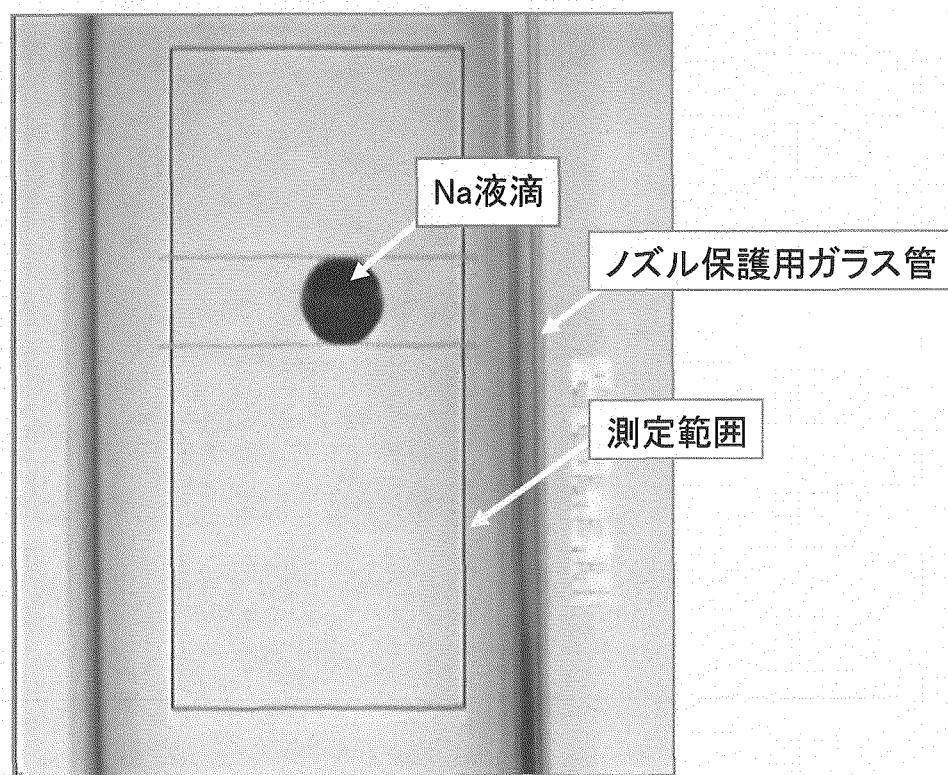


写真2-2b 落下した直後のNa液滴の撮影画像

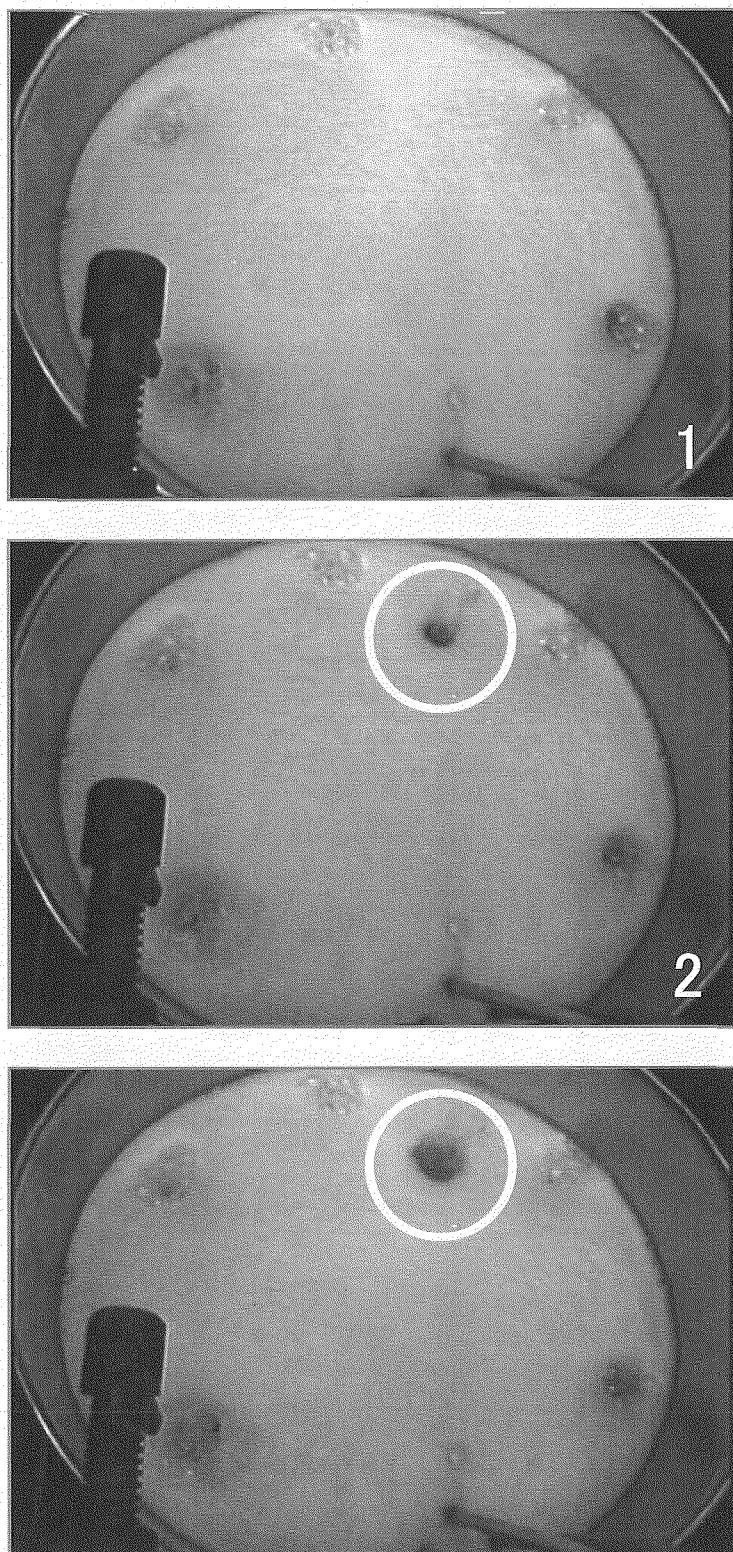


写真2-3 落下した液滴を回収する瞬間の映像

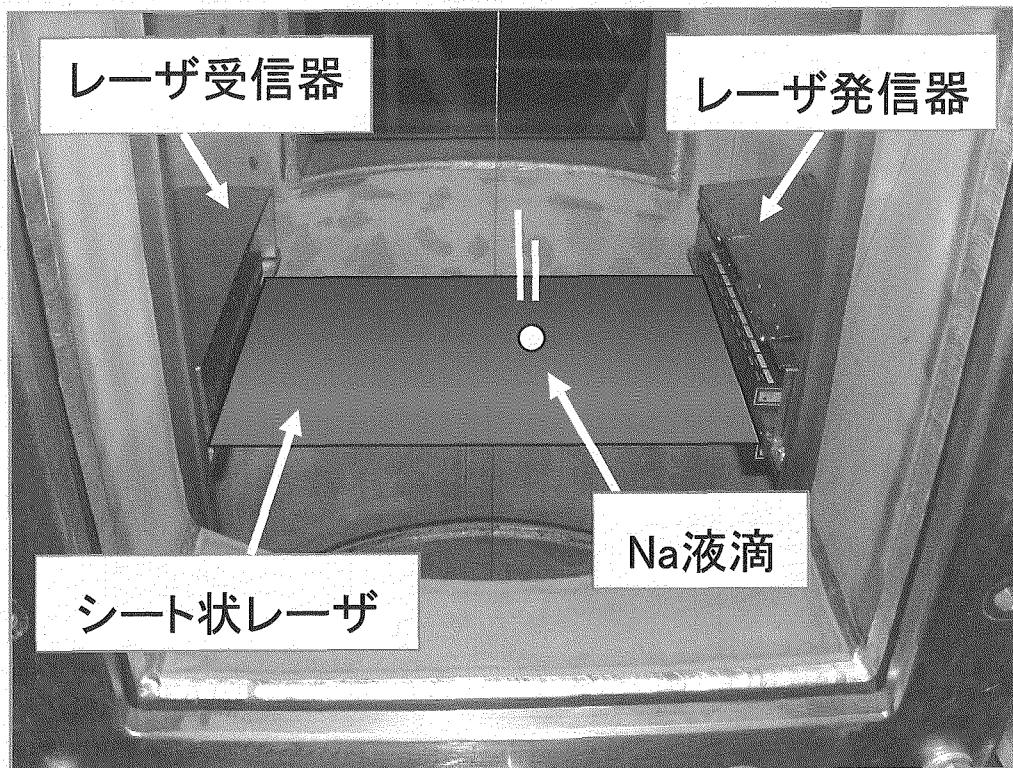


写真2-4 レーザ式通過検出計

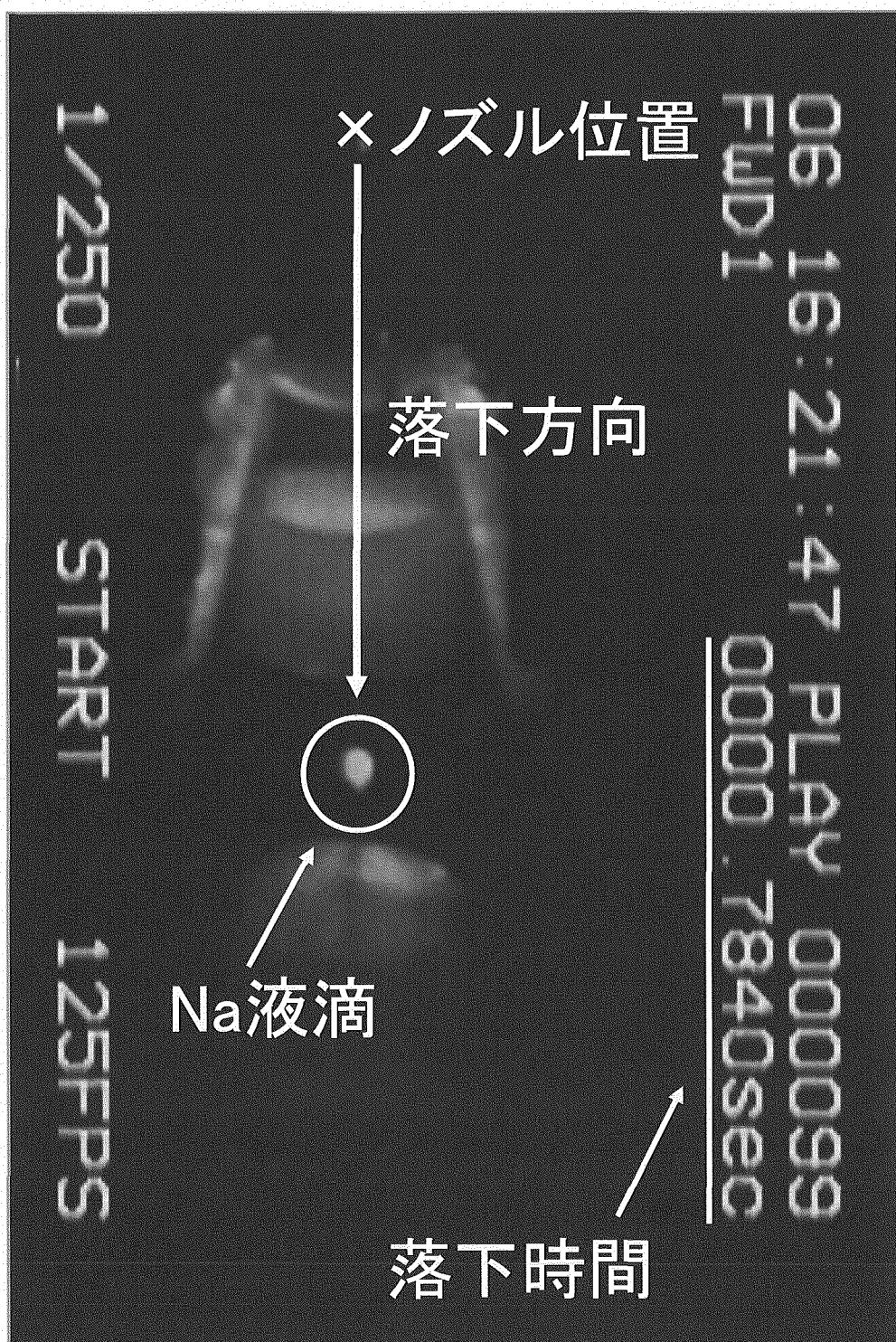


写真 2-5 液滴の着火時の映像

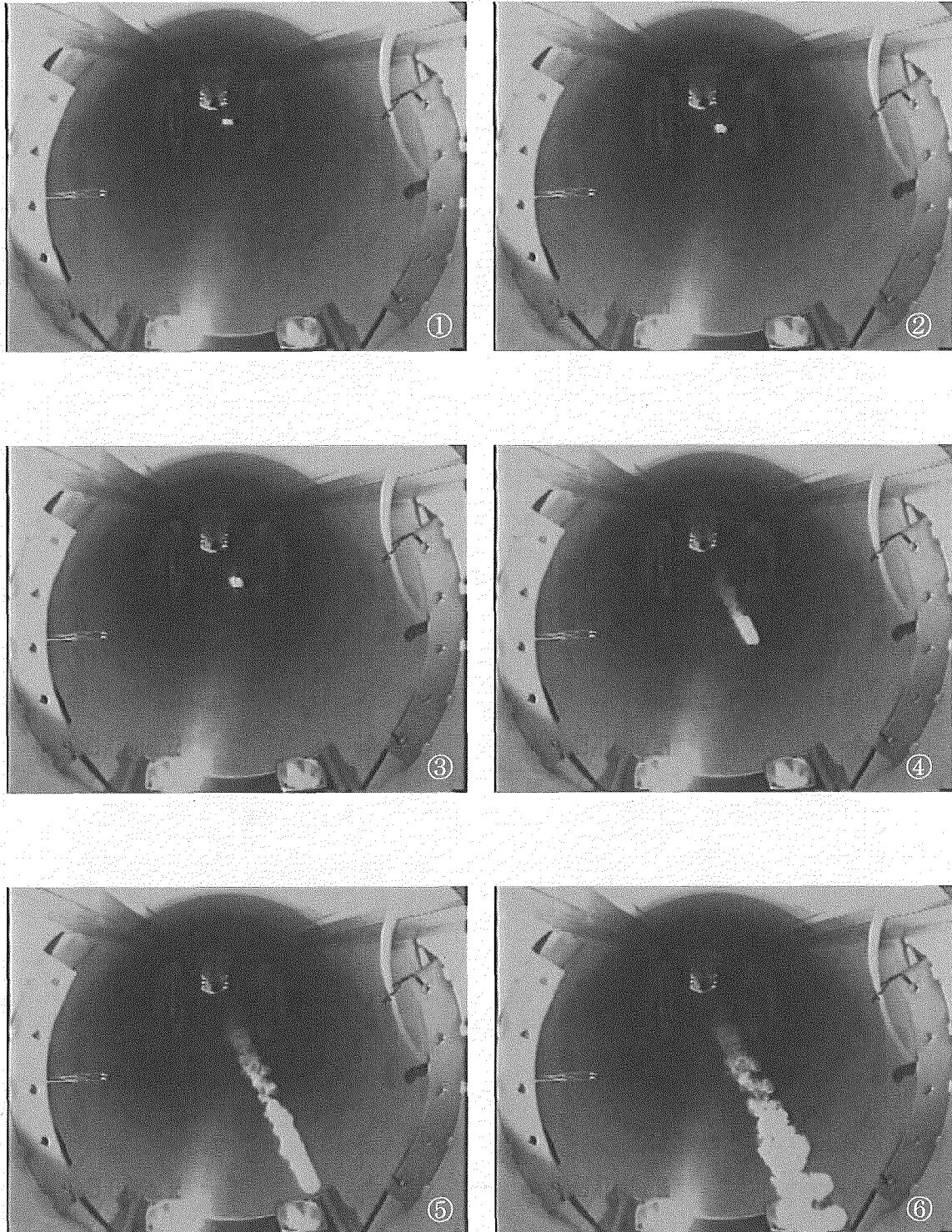
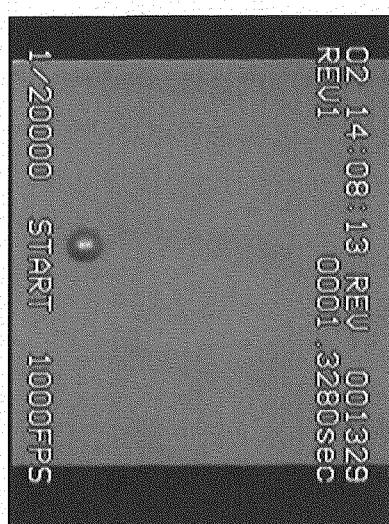


写真 2-6 Na 液滴の落下燃焼する様子
(実験容器底から見た映像)



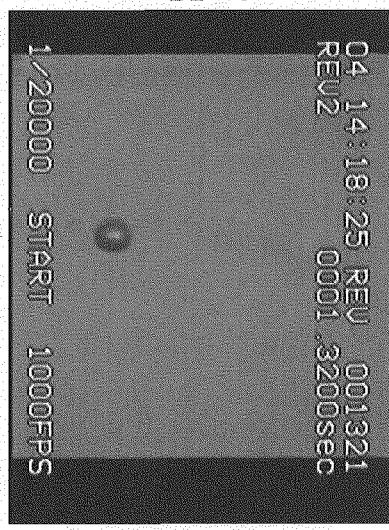
落下方向



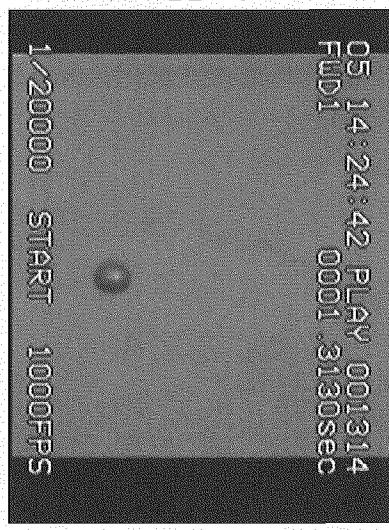
B2-15



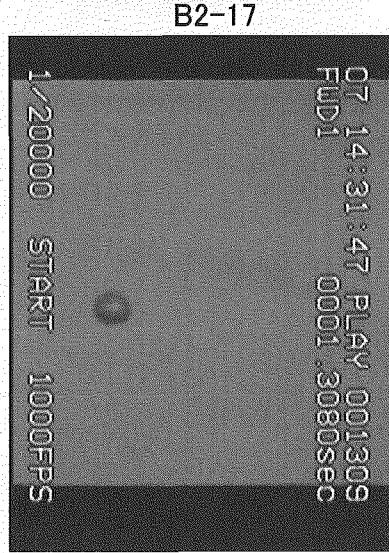
B2-16



B2-17



B2-18



B2-19

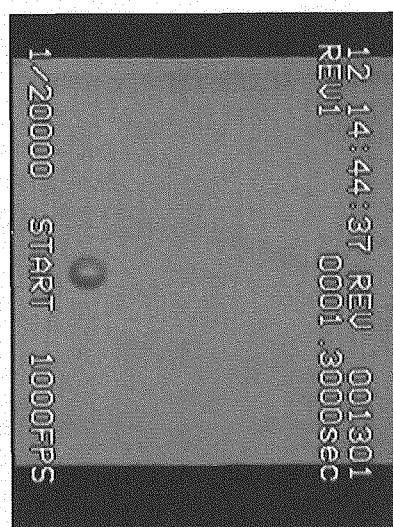


B2-20

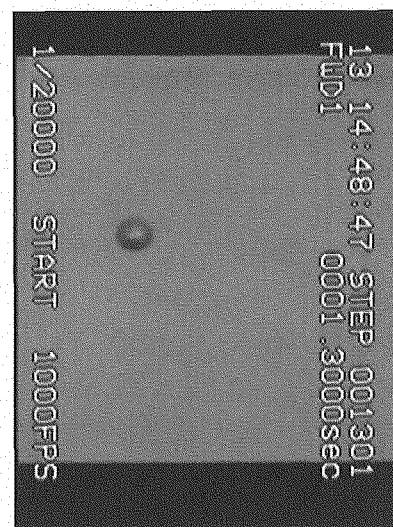
写真 2-7a ナトリウム液滴の形状(1/2)



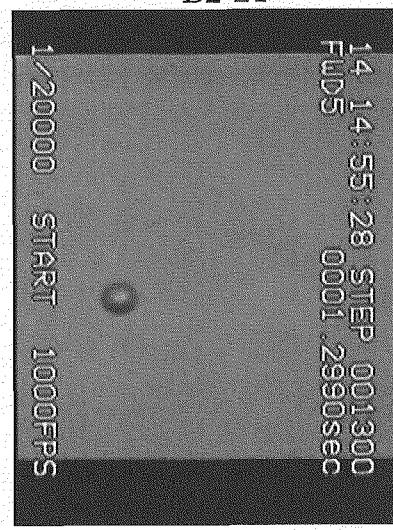
落下方向



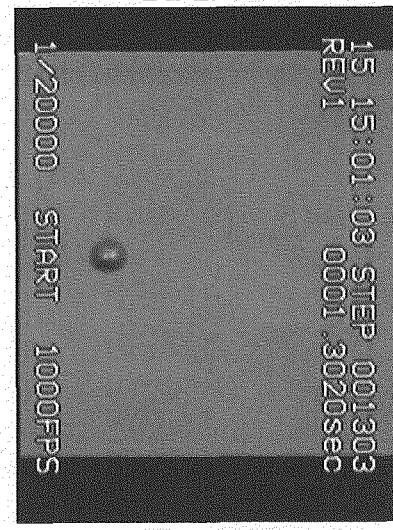
B2-21



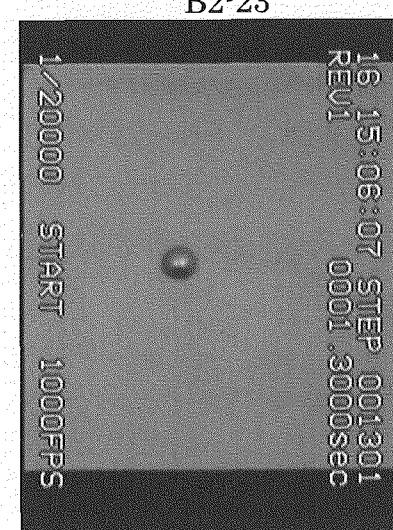
B2-22



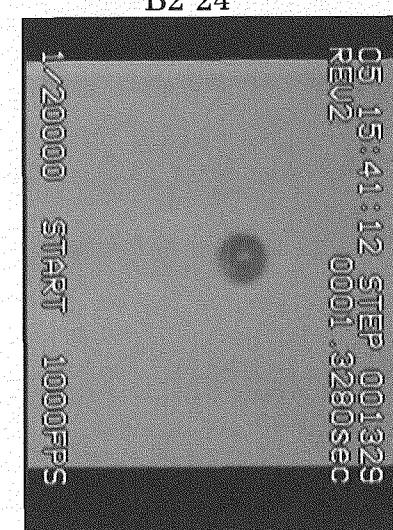
B2-23



B2-24



B2-25



PP 球 (参考)

写真 2-7b ナトリウム液滴の形状(2/2)