

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抽出

1999年6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。

〒319-1194 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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Sections,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49, Muramatsu, Tokai-Mura, Naka-Gun, Ibaraki-Ken, 319-1194,

Japan

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

1999

# 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抽出

山口 彰<sup>1</sup>、田嶋 雄次<sup>2</sup>

### 要旨

高速炉のナトリウム燃焼安全評価のため、SPHINCS (Sodium fire PHenomena IN multi-Cell System)コードを開発している。本報告書には、SPHINCS のスプレイ燃焼モデルについて詳述するとともに、スプレイ燃焼モデルの検証のため、単一液滴燃焼実験の解析を行った。また、実験結果と解析結果の比較に関する考察を踏まえてスプレイ燃焼評価モデル確立のための課題を整理した。

SPHINCS のスプレイ燃焼モデルは、液滴群の直径の分布として抜山-棚沢分布を仮定している。スプレイ燃焼量はスプレイを構成する個々の液滴燃焼量の総和として求められる。単一液滴の燃焼モデルは $D^2$ 則に基づく拡散燃焼モデルである。また、強制対流により液滴周囲の火炎帯が球対称でなくなり、蒸発速度が増加する効果を考慮している。液滴が着火するまでは、移流拡散による気体のフラックスから反応量を評価する。反応生成物に関しては、化学平衡理論によりナトリウム-酸素-水蒸気系での反応割合を定量化している。落下液滴の運動方程式では、重力と抗力を考慮しており、液滴レイノルズ数に依存する球体の抗力係数の実験値を用いて液滴位置と速度を求めている。

温度 $500^{\circ}\text{C}$ 、直径 $3.8\text{mm}$ の液滴を $2.7\text{m}$ の高さからナトリウム液滴を自由落下させて燃焼量を測定した実験の解析を行った。解析の結果、液滴の着火温度を実験観察結果より決定すれば、液滴燃焼量の予測値は実験結果と良好に一致することを確認した。

スプレイ燃焼に関しては、液滴の着火温度の評価と着火に至る過程の解明、液滴群の直径分布関数の妥当性確認、群燃焼モデルの評価方法の確立が今後の研究開発課題である。

---

<sup>1</sup>大洗工学センター 熱流体技術開発グループ

<sup>2</sup> ENO 数理解析リサーチ

# Development and Validation of SPHINCS Program for FBR Sodium Fire Analysis

## Study on Droplet Combustion and Unresolved Issues in Spray Fire Modeling

Akira Yamaguchi<sup>1</sup>, Yuji Tajima<sup>2</sup>

### Abstract

SPHINCS (Sodium Fire Phenomenology IN multi-Cell System) computer program has been developed for the safety analysis of sodium fire accident in a Fast Breeder Reactor. The program can deal with spray combustion and pool surface combustion. In this report the authors put focus on spray combustion phenomena. The main features of the spray combustion model of SPHINCS are as follows. First of all, Nukiyama-Tanasawa distribution is used to represent the statistical characteristics of the liquid droplet size. Total amount of spray combustion rate is expressed by the sum of the burning rate of individual liquid droplet. The liquid droplet-burning rate is based on the D-square law and a diffusion flame assumption. Forced convection effect that skews the sphere shape of the flame zone surrounding a droplet is taken into consideration. It enhances the burning rate. Before a droplet is ignited, the burning rate is evaluated by mass flux of oxidizer gases. The chemical equilibrium theory is used to determine the resultant fraction of reaction products of Na-O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system. The kinetic motion of free-falling droplet is based on the Newton's equation in which gravity force

---

<sup>1</sup> O-arai Engineering Center, , Thermalhydraulic Research Group

<sup>2</sup> ENO Suri Kaiseki Research

and drag force are considered. The drag force is evaluated using the drag coefficient for non-reacting sphere droplet as a function of the droplet Reynolds number.

A series of experiments of single droplet combustion are analyzed using the SPHINCS code with above-mentioned physical models. The diameter of the droplet is approximately 3.8 mm. The initial temperature is kept at 500 degree C. The burning rate is evaluated by comparing the initial mass and the mass of retrieved droplet after 2.7 m fall. It has been found that the computed burning rate is in accordance with the experimental results if one assume the ignition temperature appropriately based on the experimental observation.

Future works are 1) evaluation of ignition temperature and pre-ignition phenomena, 2) applicability of the Nukiyama-Tanasawa distribution to the droplet size distribution, and 3) appropriate modeling of group combustion that should be the actual reactor situation.

## 目次

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 要旨 .....                       | 2   |
| Abstract.....                  | 3   |
| 図表リスト .....                    | 7   |
| 1. 序論 .....                    | 1-1 |
| 2. ナトリウム液滴燃焼モデル .....          | 2-1 |
| 2章の変数リスト .....                 | 2-1 |
| 2.1. 概要 .....                  | 2-2 |
| 2.2. 静止液滴の燃焼量評価 .....          | 2-2 |
| 2.3. 自由落下液滴の燃焼量評価 .....        | 2-4 |
| 2.4. 液滴の熱伝達 .....              | 2-5 |
| 2.5. 液滴の運動方程式 .....            | 2-6 |
| 2.6. スpray燃焼のナトリウム液滴径分布 .....  | 2-7 |
| 3. 単一液滴の燃焼モデルの検証解析 .....       | 3-1 |
| 3.1. 実験の概要 .....               | 3-1 |
| 3.2. 解析結果と考察 .....             | 3-2 |
| 3.2.1. 解析条件 .....              | 3-2 |
| 3.2.2. 解析結果 .....              | 3-2 |
| 3.2.3. 液滴の着火温度 .....           | 3-3 |
| 4. Spray燃焼に関する課題 .....         | 4-1 |
| 4.1. 着火温度と表面反応 .....           | 4-1 |
| 4.1.1. 液滴の温度分布 .....           | 4-1 |
| 4.1.2. 着火前反応 .....             | 4-2 |
| 4.2. 液滴径分布 .....               | 4-3 |
| 4.2節の変数リスト .....               | 4-3 |
| 4.2.1. 抜山-棚沢分布 .....           | 4-4 |
| 4.2.2. 対数正規分布 .....            | 4-5 |
| 4.2.3. 抜山-棚沢分布と対数正規分布の比較 ..... | 4-6 |

|        |                      |      |
|--------|----------------------|------|
| 4.3.   | 群燃焼 .....            | 4-7  |
| 4.3    | 節の変数リスト .....        | 4-7  |
| 4.3.1. | スプレイ燃焼モデルの適用限界 ..... | 4-8  |
| 4.3.2. | 群燃焼モデル .....         | 4-11 |
| 4.4.   | 今後の課題と実験の提案 .....    | 4-14 |
| 5.     | 結論 .....             | 5-1  |
| 6.     | 謝辞 .....             | 6-1  |
| 7.     | 参考文献 .....           | 7-1  |

## 図表リスト

|  |      |
|--|------|
| 表 2-1 強制対流条件下での燃焼率 .....                             | 2-8  |
| 表 3-1 液滴燃焼実験結果 .....                                 | 3-4  |
| 表 4-1 液滴径分布パラメータの比較 .....                            | 4-17 |
| 表 4-2 空気の物性、および空気中の酸素の拡散係数 (単位は $M^2/SEC$ ) .....    | 4-17 |
| 表 4-3 群燃焼評価用のパラメータ .....                             | 4-17 |
| 図 2-1 液滴燃焼の形態 .....                                  | 2-9  |
| 図 2-2 蒸発係数の実測値例 .....                                | 2-10 |
| 図 2-3 剛体球の抗力係数 .....                                 | 2-11 |
| 図 3-1 ナトリウム蒸気中の 1 原子分子と 2 原子分子の割合 .....              | 3-5  |
| 図 3-2 液滴の落下距離と積算燃焼量 .....                            | 3-6  |
| 図 3-3 液滴温度 .....                                     | 3-7  |
| 図 3-4 液滴の落下速度 .....                                  | 3-7  |
| 図 3-5 液滴の着火温度を沸点 ( $880^{\circ}C$ ) としたときの液滴温度 ..... | 3-8  |
| 図 4-1 液滴内部の各点の温度過渡変化 .....                           | 4-18 |
| 図 4-2 液滴中心温度の時間変化 (解析解と数値解) .....                    | 4-19 |
| 図 4-3 ナトリウム液滴の平均、表面、中心温度の時間変化 .....                  | 4-20 |
| 図 4-4 ナトリウム液滴温度分布の時間変化 .....                         | 4-20 |
| 図 4-5 ナトリウム液滴燃焼時の平均、表面、中心温度の時間変化 .....               | 4-21 |
| 図 4-6 ナトリウム液滴燃焼時の温度分布の時間変化 .....                     | 4-21 |
| 図 4-7 ナトリウム液滴の着火過程と時間経過[21] .....                    | 4-22 |
| 図 4-8 抜山-棚沢分布と対数正規分布の比較 (幾何標準偏差=2.64) .....          | 4-23 |
| 図 4-9 抜山-棚沢分布と対数正規分布の比較 (幾何標準偏差=1.64) .....          | 4-24 |
| 図 4-10 液滴群の燃焼形態 .....                                | 4-25 |
| 図 4-11 隣接液滴燃焼の相互作用 .....                             | 4-25 |
| 図 4-12 液滴体積と燃焼に必要なガス容積の比 .....                       | 4-26 |
| 図 4-13 液滴の群燃焼形態マップ .....                             | 4-27 |
| 図 4-14 漏洩率と液滴個数の関係 .....                             | 4-28 |
| 図 4-15 漏洩率と液滴間距離の関係 .....                            | 4-29 |
| 図 4-16 漏洩率と無次元化液滴間距離の関係 .....                        | 4-30 |
| 図 4-17 漏洩率と群燃焼パラメータの関係 .....                         | 4-31 |



# 1. 序論

高速炉の安全評価において、冷却材バウンダリより漏洩したナトリウムの燃焼影響を定量化する必要がある。このとき、ナトリウムの燃焼形態として、スプレー燃焼とプール燃焼が想定されている。スプレー燃焼は、配管などの冷却材バウンダリ破損部（ナトリウムの漏洩部）から床までの間にナトリウム液滴群が落下しながら燃焼する現象である。ナトリウムスプレーは、さまざまな直径の液滴群により構成されており、個々の液滴ごとにその燃焼特性は異なっている。プール燃焼は、未燃焼のまま床に落下した液体金属ナトリウムがプール状に堆積して燃焼する現象である。本研究は、スプレー燃焼を対象としている。

スプレー燃焼において評価すべき現象としては

- ◆ 冷却材バウンダリ破損部からの漏洩形態
- ◆ 単一液滴の運動と燃焼挙動
- ◆ 液滴間相互作用を考慮した液滴群の運動と燃焼挙動
- ◆ 液滴直径の統計的分布ならびに空間的分布

が列挙される。ナトリウム燃焼は熱流動と化学反応が相互作用する複雑な現象であり、これらの諸現象を周辺空気の対流や伝熱とともに解析・評価することは容易ではない。また、それぞれの物理モデルの全てが厳密な意味で個別に検証され、解析精度が定量化されているとは言い難い。従って、スプレー燃焼評価へのアプローチとして、空間平均的な解析手法の開発、そこで用いる物理モデルを構築するための詳細な解析手法の開発、現象把握と仮説構築のための実験的な研究が必要である。

著者らは、ナトリウム燃焼の機構論的解析コードシステム[1、2]を開発している。SPHINCS (Sodium fire PHenomena IN multi-Cell System)はその一部を担う解析プログラムである。その特徴は多点近似（ゾーンモデル）に基づいており、スプレー燃焼とプール燃焼を扱えることである。このコードは、上に述べた分類によれば空間平均的な解析手法であり、ナトリウム漏えい燃焼時の各部屋のガス温度、圧力、ライナ温度、水素生成量などを包括的に評価する機能を備える。このように燃焼影響の安全評価に適用することを SPHINCS 開発の目的としているが、ナトリウム燃焼に関して不確定要因がある中で、SPHINCS コードを安全評価に利用するためには、多様な側面から検証実績と現象論的考察を積み重ね、適切な保守性を見極めることが大切である。

SPHINCS の検証に関しては、これまでに実施された燃焼実験の結果を、全エネルギーや温度等のマクロな物理量に着目して解析している。例えば、旧動燃事業団で実施[3]したスプレイ燃焼実験 (Run E1) とプール燃焼実験 (Run D1) の解析[4]、漏洩燃焼実験 I 及び II の解析[5]を SPHINCS コードで実施し、各部位の温度や化学種の質量濃度などが実験結果と良好に一致することを確認している。従って、総じて言えば SPHINCS は、ナトリウム燃焼の安全評価を実施する精度を備えているといえる。しかし、安全確保を合理的に達成するためには、解析モデルによって重要な現象を互いに矛盾なく説明できるべきである。

プール燃焼に関しては、最近、ライナやプールの温度の空間分布や過渡変化を詳細に測定する、より精緻な実験が行われている (小プール燃焼実験 Run F7 シリーズ) [6]。これは、実験の着眼点を特定の現象 (ライナ上のプール拡大とライナ温度分布) に絞ったことに加えて、詳細な測定系の設置により、物理モデルの検証に有用なデータが取得されている。SPHINCS コードでプールの拡大挙動、ライナの二次元的な温度分布、プール燃焼量を解析し、実験結果と比較検討した結果、ライナ温度評価には現状のモデルが有効でかつ十分であることが確認できた[7]。

スプレイ燃焼についても関連する現象を十分に分析し、機構論的な物理モデルを構築する必要性が指摘される。そこで、上に述べた諸現象を分離してコード検証データを取得するための実験が必要である。本研究では、多数の液滴がスプレイ状に広がりながら燃焼するという複雑な状況ではなく、単一の液滴に着目した燃焼実験の解析を行った。ナトリウム液滴の落下開始時の温度は 500℃、直径 3.8mm である。2.7m の高さからナトリウム液滴を自由落下させて燃焼量を測定した。この実験解析により、スプレイ燃焼モデルの基礎となる単一液滴の燃焼量に関してその妥当性を議論することが可能になると期待される。

報告書の構成を以下に示す。第 2 章では SPHINCS コードのスプレイ燃焼モデルについて詳述する。第 3 章ではスプレイ燃焼モデルの検証のため、単一液滴の燃焼実験の解析を行った結果並びに考察を述べる。第 4 章では、第 3 章にて述べた実験結果と解析結果の比較と SPHINCS モデルの現状を踏まえて、高速炉の安全評価を行うという視点から、スプレイ燃焼モデル確立のための課題を整理した。第 5 章には結論を述べる。

## 2. ナトリウム液滴燃焼モデル

### 2章の変数リスト

|             |                       |
|-------------|-----------------------|
| $B$         | トランスファー数              |
| $C$         | 酸素濃度                  |
| $C_d$       | 抗力係数                  |
| $\hat{C}_d$ | 蒸発あるいは燃焼する球の抗力係数      |
| $C_f$       | 液滴燃焼率の強制対流効果に関する実験定数  |
| $C_p$       | 混合ガスの比熱               |
| $D$         | 液滴の直径                 |
| $D_d$       | 酸素の拡散係数               |
| $D_e$       | 体積平均直径                |
| $D_i$       | 初期の液滴直径               |
| $f(D)$      | 抜山—棚沢分布関数             |
| $H_c$       | 燃焼発熱量                 |
| $h_{fg}$    | ナトリウムの蒸発潜熱            |
| $i$         | 化学量論比 (酸素質量対ナトリウム質量)  |
| $K$         | 蒸発係数                  |
| $\dot{m}$   | 静止液滴の燃焼率              |
| $\dot{m}_f$ | 自由落下液滴の燃焼率            |
| $Nu$        | ヌセルト数                 |
| $Pr$        | プラントル数                |
| $q_b$       | 燃焼による単位時間あたりの発熱量      |
| $q_g$       | 燃焼熱のうち単位時間あたりのガスへの伝熱量 |
| $q_v$       | 燃焼に必要な単位時間あたりの熱量      |
| $Re$        | 液滴レイノルズ数              |
| $Sc$        | シュミット数                |
| $Sh$        | シャーウッド数               |
| $T_b$       | ナトリウムの沸点              |
| $T_g$       | 遠方のガス温度               |
| $T_s$       | 液滴表面温度                |
| $V_F$       | 液滴落下速度                |
| $Y$         | 酸素の質量分率               |

|           |           |
|-----------|-----------|
| $\rho$    | 液滴の密度     |
| $\rho_g$  | ガスの密度     |
| $\lambda$ | 混合ガスの熱伝導度 |

## 2.1. 概要

高速炉の主冷却系は常圧に近い圧力であり、配管の周囲には保温材が設置されている。従って、ナトリウムの漏えいは、水道水が蛇口から流れるように漏えい口から流出するか、保温材などの構造物をつたわって滴下するといった形態であると予想される。

一方、SPHINCS のスプレイ燃焼モデルは、上方に向かうナトリウムのジェットが容器の天井に衝突することによりナトリウムスプレイが発生し、それが落下しつつ燃焼するという状況に対応している。このようなスプレイにはさまざまな直径の液滴が含まれている。SPHINCS コードではスプレイ中の全ての液滴に関して燃焼量の総和をとることによって、スプレイ全体の燃焼量を評価している。従って、燃焼をスプレイ状に想定していることと、液滴間の熱流力的な相互作用を無視していることにより、燃焼量を過大に評価する傾向にあると考えることができる。

本章ではスプレイ中の単一液滴の燃焼および運動モデル、ならびに液滴径の統計的分布関数[8]に関して述べる。それらのモデルの限界あるいは改良すべき課題に関しては4章で考察する。

## 2.2. 静止液滴の燃焼量評価

図 2-1に液滴燃焼の概念図を示す[9]。図中で(a)は無重力状態で浮力が働かない静止雰囲気中での火炎である。火炎の形状は球対称になる。(b)は重力下で浮力の影響がある場合の静止雰囲気中での火炎である。一方、強制対流下では液滴と空気の相対流速に応じて(c)、(d)の性状となる。ウェーク炎では流速が速いため前方よどみ点で火炎を保持できなくなり、液滴後方にのみ火炎が形成されている。

まず、(a)の状況での燃焼量評価モデルを示す。液滴は球形であるとし、火炎

は液滴と同心球であるとする。液滴から蒸発して火炎領域に到達したナトリウムは瞬時に燃焼すると仮定する。定常状態になれば液滴の燃焼率は液滴表面からのナトリウムの蒸発率に等しいはずである。そして、液滴表面からのナトリウムの蒸発率は液滴への入熱に支配される。

単一静止液滴の燃焼率  $\dot{m}$  は液滴直径の減少率と対応しており次式で表される。

$$(Eq. 2-1) \quad \dot{m} = -\frac{d}{dt} \left\{ \frac{4\pi}{3} \left( \frac{D}{2} \right)^3 \rho \right\} = -\frac{d}{dt} \left\{ \frac{\pi}{6} D^3 \rho \right\}$$

ここで  $\rho$  は液滴の密度、 $D$  は液滴の直径である。炭化水素系燃料液滴の燃焼実験により液滴直径の二乗（すなわち表面積）の時間変化率は一定であることが知られている。(Eq. 2-1)式を書きなおすことにより、

$$(Eq. 2-2) \quad K \equiv -\frac{d(D^2)}{dt} = \frac{4\dot{m}}{\pi\rho D}$$

が得られ、一定値である蒸発係数  $K$  が定義される。これは  $D^2$  則としてよく知られている。Richard ら[10]はナトリウム液滴も  $D^2$  則に従うことを示した。図 2-2 には Richard の求めた蒸発係数を示す。蒸発係数は酸素のモル濃度の線形関数となっている。従って、(Eq. 2-2)式より質量燃焼率は次式で表される。

$$(Eq. 2-3) \quad \dot{m} = \frac{\pi\rho K}{4} D$$

(Eq. 2-2)式を積分すれば  $D^2$  則は次式で表される。

$$(Eq. 2-4) \quad D^2 = D_i^2 - Kt$$

準定常の液滴燃焼理論より  $K$  を与えれば燃焼率を評価できる。Spalding[11]によれば、トランスファー数  $B$  を用いて次式により蒸発係数を与えた。

$$(Eq. 2-5) \quad K = \frac{8\lambda}{C_p\rho} \ln(1+B)$$

$$(Eq. 2-6) \quad B \equiv \frac{1}{h_{fg}} \left\{ C_p (T_g - T_s) + \frac{H_c Y}{i} \right\}$$

ここで  $\lambda$  と  $C_p$  はそれぞれ混合ガスの熱伝導度と比熱である。 $h_{fg}$  はナトリウムの蒸発潜熱、 $T_g$  と  $T_s$  はそれぞれ遠方のガス温度と液滴表面温度である。 $H_c$  は燃焼発熱量、 $Y$  は酸素の質量分率、 $i$  は化学量論比（反応する酸素の質量とナトリウムの質量の比）である。なお、蒸発のみで化学反応がない場合には(Eq. 2-6)式

の右辺括弧内の第二項が不要となる。

### 2.3. 自由落下液滴の燃焼量評価

前節に述べた静止液滴の燃焼量評価式を、自由落下する液滴の場合に拡張するため、強制対流の効果を考慮する。強制対流により、図 2-1の(c)、(d)に示すように火炎形状は球ではなくなるとともに、燃焼率は増加する。一般に、強制対流下における液滴燃焼率を解析的に求めることは困難であるため、実験式が用いられる。

液滴表面近傍における反応は、ナトリウムが蒸発・燃焼する以前の着火前過程と着火後過程に分けられる。米国の SPRAY コードやフランスの SOMIX コードのスプレイ燃焼モデルでは、液滴は生成後直ちに着火するモデルであり着火前過程を無視している[8]。SPHINCS は Tsai[12]の着火前過程のモデルを用いている。液滴が着火する前には主として拡散物質伝達により酸素が液滴表面に供給されるので、熱伝達と物質伝達の相似が成立する。そこで酸素の質量フラックスを求めるために強制対流時の球の熱伝達相関式である Ranz-Marshall の式[13]

$$(Eq. 2-7) \quad Nu = 2 + 0.6Re^{1/2} Pr^{1/3}$$

を用いる。熱伝達と物質伝達の相似性から

$$(Eq. 2-8) \quad Sh = 2 + 0.6Re^{1/2} Sc^{1/3}$$

酸素の質量フラックスと化学量論比から燃焼率は次式で表される。

$$(Eq. 2-9) \quad \dot{m}_f = \frac{\pi CD_d YD}{i} (2 + 0.6Re^{1/2} Sc^{1/3})$$

ここで  $C$  は酸素の質量濃度、 $D_d$  は空気中の酸素の拡散係数である。

液滴が着火した後は液滴表面からの蒸発・燃焼が支配的な現象となるので 2.2節に述べた燃焼率の式(Eq. 2-3)に強制対流効果を考慮する係数を乗じる。これには多くの実験式や半実験式が与えられている (例えば Ref.[9]の pp.89 からの引用を表 2-1に示す)。一般には(Eq. 2-3)式と(Eq. 2-5)式を用いて

$$(Eq. 2-10) \quad \dot{m}_f = \dot{m}(1 + C_f Re^{1/2} Pr^{1/3}) = 2\pi \frac{\lambda D}{C_p} \ln(1 + B) (1 + C_f Re^{1/2} Pr^{1/3})$$

と表せる。 $C_f$ は実験により 0.24 から 0.31 程度であると評価されているが、Ranz-Marshall による 0.3 という値はナトリウム燃焼に近い温度条件における実験に基づいており、これを採用することが合理的である。

## 2.4. 液滴の熱伝達

反応熱の一部は液滴に伝達され、液滴の温度上昇とナトリウムの蒸発に消費される。そのほかは雰囲気ガス中に伝熱される。先ず、着火前過程では、液滴に拡散で供給された酸素や水蒸気が表面で反応することから、反応熱を液滴に入熱する。そして、液滴からガスへの伝熱は、強制対流熱伝達によっており、単位時間あたりの伝熱量は Ranz-Marshall の式を用いて次式で与えられる。

$$(Eq. 2-11) \quad q_g = \frac{\lambda}{D} (2 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3}) (T_s - T_g)$$

着火後は蒸発・燃焼過程であり、液滴の蒸発は燃焼により供給される熱による。その他の蒸発に消費される熱以外は、雰囲気ガスに伝えられる。燃焼量は(Eq. 2-10)式によって与えられるので、燃焼による単位時間あたりの発熱量 $q_b$ は次式によって与えられる。

$$(Eq. 2-12) \quad q_b = \dot{m}_f H_c = \frac{2\pi\lambda}{C_p} D (1 + 0.3 Re^{1/2} Pr^{1/3}) H_c \ln(1+B)$$

一方、燃焼量に相当するナトリウムを供給するために消費される単位時間のエネルギー $q_v$ は沸点までの温度上昇と蒸発潜熱であり、次式で与えられる。

$$(Eq. 2-13) \quad q_v = \dot{m}_f \{ C_p (T_b - T_s) + h_{fg} \}$$

ここで $T_b$ はナトリウムの沸点である。

液滴が既に沸点に達しているときには(Eq. 2-13)式で与えられる量以外は雰囲気ガスへ伝達される。すなわち

$$(Eq. 2-14) \quad q_g = q_b - q_v = \frac{2\pi\lambda}{C_p} D (1 + 0.3 Re^{1/2} Pr^{1/3}) (H_c - h_{fg}) \ln(1+B)$$

が雰囲気ガスへの伝熱量である。液滴温度が沸点に達していないときには、

$$(Eq. 2-15) \quad \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{6(q_b - q_v)}{\pi D^3 \rho C_p}$$

により液滴の温度上昇を計算したのち、(Eq. 2-11)式より雰囲気ガスへの伝熱量

が与えられるものとする。沸点以下の液滴温度における着火後の蒸発・燃焼過程は、火炎構造が形成されつつあり、液滴が安定な火炎はいまだ形成されていないと考えられる。従って、液滴温度が沸点に達する前に着火する場合には、Ranz-Marshall の式による伝熱評価は妥当と考えられる。

## 2.5. 液滴の運動方程式

剛体球が落下するときの抗力係数については多くの実測値がある[14]。しかし、蒸発、燃焼しながら落下する液滴の運動に関する測定値はほとんどない。蒸発しながら、落下する液滴の運動方程式では、剛体球の運動方程式に液滴表面からの蒸発質量フラックスによる慣性力の補正を加える必要がある。一方、液滴表面からナトリウムが蒸発しているときには、境界層が厚くなるために抗力が減少する。さらに燃焼ガスは液滴後流の低圧力領域に流入するため、これも抗力を低下させる要因となる。また、蒸発しなくとも、高レイノルズ数領域では変形する液滴の場合には液滴の扁平化により抗力係数は増加する。

現状では液滴燃焼時の抗力係数に関する信頼性の高い相関式はないため、以下に示す剛体球の抗力係数[14]を用いる（図 2-3）。

$$(Eq. 2-16) \quad C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re} & Re \leq 0.1 \\ 2.6 + \frac{23.71}{Re} & 0.1 \leq Re \leq 6 \\ \frac{18.5}{Re^{0.6}} & 6 \leq Re \leq 500 \\ \frac{9}{4} & 500 \leq Re \end{cases}$$

液滴の運動方程式は

$$(Eq. 2-17) \quad \rho \frac{\pi D^3}{6} \frac{dV_F}{dt} = \rho \frac{\pi D^3}{6} g - \frac{1}{2} \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 \rho_g V_F^2 C_d$$

あるいは

$$(Eq. 2-18) \quad \frac{dV_F}{dt} = g - \frac{3\rho_g V_F^2 C_d}{4\rho D}$$

で表される。これにより、液滴の落下速度が計算できるので、(Eq. 2-9)式あるいは(Eq. 2-10)式より燃焼量が求められる。なお SPHINCS では、(Eq. 2-18)式



を Runge - Kutta 法により解いている。

参考までに、液滴レイノルズ数が小さいときには、Eisenklam に従えば、トランスファー数を用いた次式が提案されている [9]。

$$(Eq. 2-19) \quad \hat{C}_d = \frac{1}{1+B} C_d$$

蒸発球では  $0.1 \leq Re \leq 40$

燃焼球では  $0.1 \leq Re \leq 3$

ナトリウム液滴燃焼では、液滴レイノルズ数は 100 以上であり、蒸発による影響はほとんどないため、剛体球とみなしても良い。

## 2.6. スpray 燃焼のナトリウム液滴径分布

SPHINCS では Spray の液滴径分布をよく表現できるといわれている抜山-棚沢分布を用いている。抜山-棚沢分布によれば、半径が  $D$  と  $D+dD$  の範囲にある液滴の体積割合は

$$(Eq. 2-20) \quad f(D)dD = \left( \frac{3.915}{D_e} \right)^6 \frac{D^5}{5!} \exp \left\{ -\frac{3.915}{D_e} D \right\} dD$$

で表される。ここで  $D_e$  は体積平均直径である。抜山-棚沢分布を 11 群に離散化し、それぞれの液滴径に関して落下速度や燃焼率を計算した上で全液滴について総和をとって Spray 燃焼量を評価している。

一方、SPRAY コードでは液滴直径の統計的分布を考慮していない。しかし、液滴のエネルギー保存や運動を記述するときには体積平均直径を、燃焼率を計算するときには面積平均直径を用いている。従って、面積平均直径を評価する必要があり、対数正規分布を仮定して体積平均直径から面積平均直径を求めている。しかし、Spray 燃焼においては、比較的小さい径の液滴は、着火が早く燃焼率は高いので、全燃焼率にはより大きな寄与をする。一つの代表的な直径で Spray 燃焼全体を代表させることは誤差を生じる要因となる。

表 2-1 強制対流条件下での燃焼率 [9]

| 研究者名          | 条 件                                  | 関 係 式  |
|---------------|--------------------------------------|--|
| Frössling     | 室温での蒸発実験<br>$2 < Re < 800$           | $\frac{dm}{dt} = \left(\frac{dm}{dt}\right)_0 (1 + 0.276 Re^{1/2} Sc^{1/3})$   |
| Ranz-Marshall | 473K までの周囲<br>温度での蒸発実験               | $\frac{dm}{dt} = \left(\frac{dm}{dt}\right)_0 (1 + 0.3 Re^{1/2} Sc^{1/3})$<br>高温で蒸発あるいは、燃焼させるときは   |
| Agoston ら     | 2 200~2 920K<br>球状物体より燃料<br>をしみ出して燃焼 | $\frac{dm}{dt} = \left(\frac{dm}{dt}\right)_0 (1 + 0.3 Re^{1/2} Pr^{1/3})$<br>$\frac{dm}{dt} = \left(\frac{dm}{dt}\right)_0 (1 + 0.24 Re^{1/2})$ |
| Spalding      | $800 < Re < 4 000$<br>$0.6 < B < 5$  | $\frac{dm}{dt} = 0.53 B^{3/5} Re^{1/2} \mu/d$<br>$B = \{c_p(T_{g\infty} - T_i) + Y_{O_2} \xi Q_i\} / L_0$  |
| Eisenklam     | 非固定燃焼滴<br>$0.1 < Re < 5$             | $\bar{N}_* = 4.9 Re^{0.3} / (1 + B)$   |
| How           | 蒸発あるいは燃焼<br>中の液滴                     | $\frac{dm}{dt} = \left(\frac{dm}{dt}\right)_0 (1 + 0.22 Re^{1/2})$   |

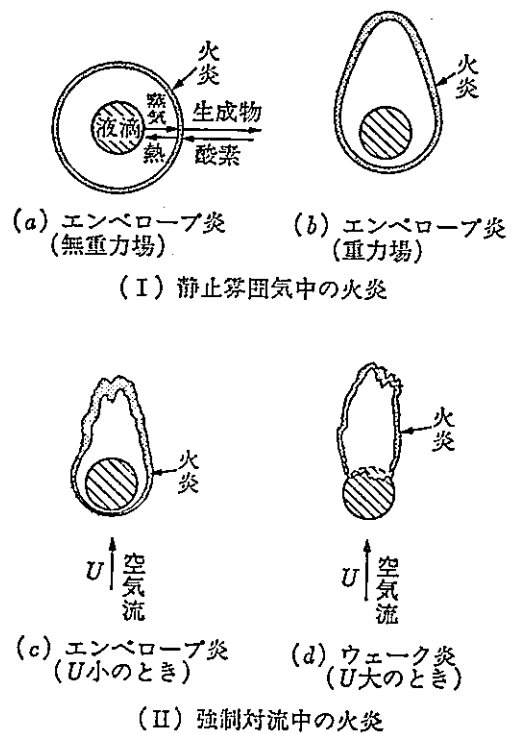


図 2-1 液滴燃焼の形態 [9]

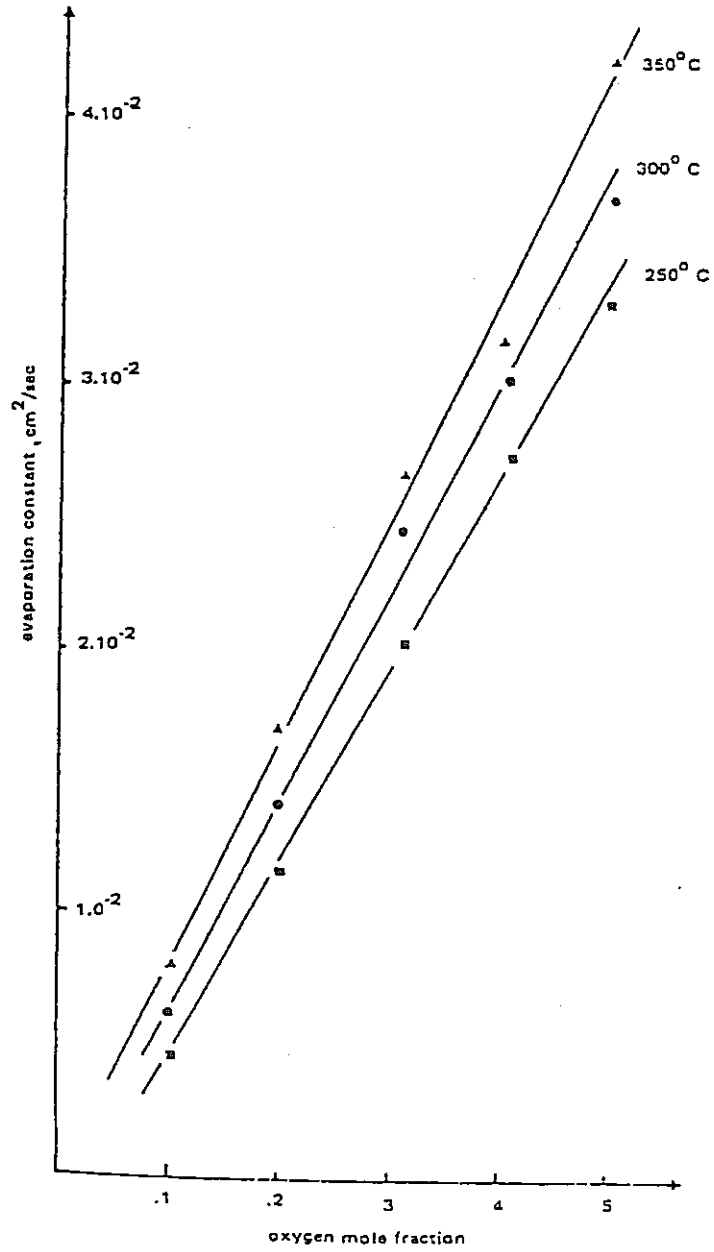


図 2-2 蒸発係数の実測値例 [10]

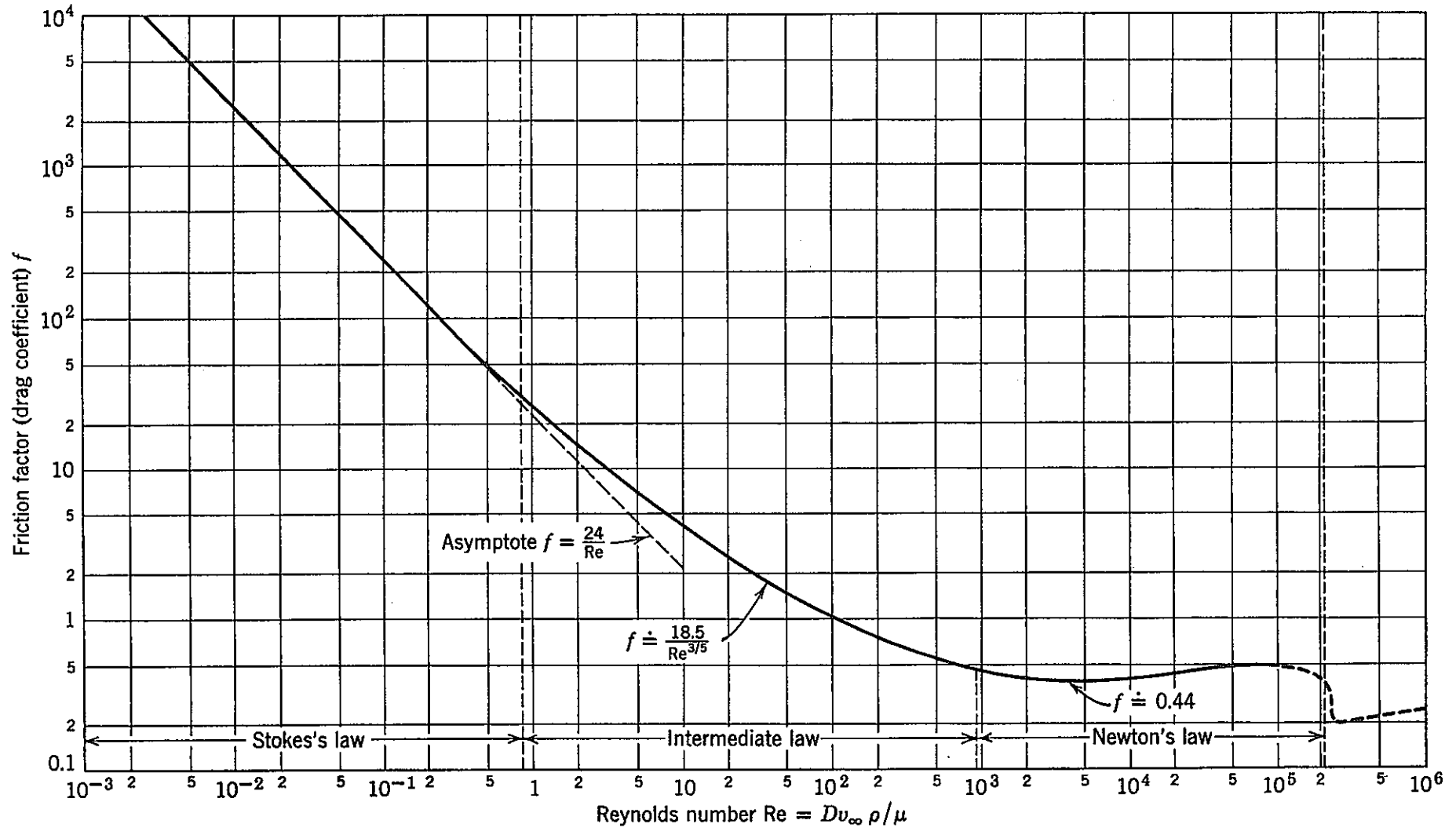


図 2-3 剛体球の抗力係数 [14]

### 3. 単一液滴の燃焼モデルの検証解析

#### 3.1. 実験の概要

単一のナトリウム液滴が、空気雰囲気中を自由落下するときの燃焼率を測定する実験[15,16]の解析を行った。実験は $\beta$ アルミナ固体電解質を利用した液滴生成装置[17]を用いて実施されており、ほぼ均一な直径の液滴を生成することができる。実験は空気中で6回実施されたが、そのうち2回は雰囲気の酸素濃度が低下したため採用しないこととする。液滴の落下開始時の温度は約500℃、液滴直径はいずれの実験でも約3.8mmである。液滴は高さ2.7mの位置から自由落下させ、床上に流動パラフィンの容器を置いて回収している。回収した液滴の質量を測定し、落下させた液滴の質量との差をとって燃焼量とした。実験結果のまとめを表3-1 [16]に示す。

液滴生成装置の周辺は加熱したアルゴンガスを流し、温度を一定に保つとともに、液滴を生成させているときに空気と反応しないようにしている。しかし、液滴生成時に蒸発することにより若干質量が減少していることが確認された。不活性ガス雰囲気で30cm落下させた実験の結果より液滴生成時のナトリウム蒸発量を補正した。以下では、これを差し引いた質量を落下時の液滴質量とする。表3-1には実験での誤差評価の結果も示されている。

実験ではさらに、液滴の落下速度も測定している。これは液滴生成装置から2.4mの位置で高速度ビデオで撮影し、コマ間に移動した液滴の距離から落下速度を求める方法である。この結果から2.4m位置での液滴の速度は5.5から5.6m/sであった。

主要な実験結果をまとめれば以下のとおりとなる。

- (1) 直径3.8mm、温度約500℃の液滴を2.7mの高さから落下させたとき、平均燃焼量は $3.37 \pm 0.69 \text{mg}$  (4回の実験はそれぞれ3.30、3.06、4.36、2.77mg)であった
- (2) 2.4m落下後の液滴の速度は5.5から5.6m/sであった。
- (3) 液滴はノズル直下から約63mmの不活性ガス領域を通過後、24cmから30cm落下した位置で着火した。

なお、詳しくは実験に関する文献を参照していただきたい。

## 3.2. 解析結果と考察

### 3.2.1. 解析条件

SPHINCS では化学反応の計算には、BISHOP コード[18]を組み込んでいる。BISHOP は、化学平衡を仮定して Gibbs の自由エネルギー極小化法により反応割合を評価している。考慮した化学種は、 $Na$ 、 $O_2$ 、 $H_2O$ 、 $Na_2O$ 、 $Na_2O_2$ 、 $NaOH$ 、 $Na_2$ 、 $H_2$ 、 $N_2$ である。酸素とナトリウムの反応は着火温度と液滴温度を比較して、(Eq. 2-9)式あるいは(Eq. 2-10)式を用いて評価する。ここで、着火温度は  $600^{\circ}C$  と仮定した。着火温度の妥当性については4章で考察する。水蒸気は、蒸発・燃焼過程ではなく、拡散による物質伝達率(Eq. 2-9)式に基づいて反応量を求めている。

ナトリウム蒸気中には 1 原子分子と 2 原子分子が混在するため、その存在比を評価している。図 3-1 に存在比を温度の関数として示す。この結果は、BISHOP コードで大気圧条件を仮定して計算したものである。この図から低温ではほとんど  $Na_2$  が蒸気として存在するが、 $850K$  程度で  $Na$  と  $Na_2$  のモル数の大小関係は逆転してそれ以上の温度では  $Na$  が主体となる。液滴燃焼で考慮すべき温度域は  $800K$  から  $1500K$  程度と考えられるので、1 原子分子と 2 原子分子の双方を考慮する必要がある。

### 3.2.2. 解析結果

図 3-2 に液滴燃焼量を解析した結果を示す。横軸は落下距離であり、およそ  $30cm$  で着火しているため、曲線の勾配が変化している。 $2.7m$  の点は床上である。ナトリウムと酸素の反応において一酸化物と二酸化物の割合を、BISHOP を用いて評価した場合、全て一酸化物とした場合、全て二酸化物とした場合、両者が半分ずつ生成されるとした場合の割合の、合計 4 ケースの結果を示している。BISHOP を用いれば実験結果と良好に一致していることがわかる（解析が  $3.15mg$  に対して実験の平均値は  $3.37 \pm 0.69mg$ ）。

図 3-3 には液滴の温度を示す。反応生成物割合によって、液滴が沸点に達する時間が異なっている。この実験では静止液滴ではなく、落下する液滴の燃焼を観察したため、残念ながら火炎構造の形成過程を詳細に観察することは不可能である。表面反応が始まってから着火まで、また火炎構造が現れ始めてから

十分に発達するまでの燃焼の様子、液滴温度などが測定されれば有益なデータになると考えられる。

図 3-4には、液滴の落下速度を示す。実験で落下速度を測定したのは 2.4m の位置であり、図からこの点での落下速度は 5.55m/s と解析されている。落下速度に関しては反応生成物割合を変えた 4 ケースの差はほとんどなかった。この解析結果は実験結果の 5.5 から 5.6m/s という結果を良好に再現しているといえる。なお、抗力を無視すれば、同じ位置で 6.93m/s に達するので、抗力の考慮が重要であり、かつそれのみを考慮すれば十分であることが理解される。

### 3.2.3. 液滴の着火温度

3.2.1節で述べたように、解析では液滴の着火温度を 600℃と仮定した。SPHINCS コードのモデルでは液滴の燃焼が着火前過程と着火後過程に分かれ、前者では拡散による物質伝達が、後者では液滴表面からのナトリウム蒸発が燃焼反応を律速する。従って、液滴の燃焼率を評価するためには、着火温度を決定する必要がある。

図 3-5に、液滴の着火温度を沸点とした場合の液滴温度の変化を示す。この条件では 1.8m 落下したところで液滴は沸点に達しており、着火位置に関する、実験結果（およそ 30cm 程度の位置で着火）を説明できない。従って、反応生成物割合の不確定性を考えても着火温度は沸点よりもかなり低いと見積もることができる。なお  $Na_2O$  のみが生成されるとしたケースでは 20cm の位置で、 $Na_2O_2$  のみが生成されると仮定したケースでは 40cm の位置で着火している。

現状の知見では、空気雰囲気中で 600℃を着火温度とすればもっとも実験結果を矛盾なく説明できる。従って、燃焼解析においては、この仮定を用いることを推奨する。酸素濃度が増加すれば着火温度は低下するであろうが、実炉の評価ではこのような状況はありえない。また酸素濃度が低下すれば着火温度は上昇するであろうが、低酸素濃度での十分な知見はないので、安全側に見て 600℃を着火温度とすればよいであろう。なお、ここでいう着火温度は自発着火温度とは異なっている。自発着火温度と着火温度の関係は、液滴着火前の表面反応の過程において、液滴表面からの除熱と表面反応発熱のどちらが支配的かによって決定される。これらの点も含め、600℃を着火温度とする妥当性について4.1節で考察する。



表 3-1 液滴燃焼実験結果 [15]

|  | 単位                 | 1回目               |                     | 2回目               |            | 3回目                   |                       |
|--|--------------------|-------------------|---------------------|-------------------|------------|-----------------------|-----------------------|
|  |                    | 1                 | 2                   | 1                 | 2          | 1                     | 2                     |
| 雰囲気酸素濃度  | vol%               | 約21 <sup>*1</sup> | 18~15 <sup>*1</sup> | 約21 <sup>*2</sup> |            |                       |                       |
| 雰囲気露点  | ℃                  | -3.5              | -7.5                | -0.5~-0.7         |            | 2~4.5                 |                       |
| 滴下時の液滴温度   | ℃                  | 493               |                     |                   |            | 502                   |                       |
| 電荷量評価液滴質量 (mc±σ <sub>1</sub> )                         | mg/滴               | 24.80±0.75        | 24.37±0.45          | 27.53±0.42        | 26.44±0.66 | 26.26±0.92            | 24.87±0.46            |
| ノズル部での蒸発量 (mv±σ <sub>2</sub> )                         | mg                 | 1.88±0.58         |                     |                   |            |                       |                       |
| 初期液滴質量 (mc-mv)   | mg                 | 22.92±0.95        | 22.49±0.73          | 25.65±0.72        | 24.56±0.88 | 24.38±1.09            | 22.99±0.74            |
| 初期液滴直径   | mm                 | 3.74              | 3.72                | 3.89              | 3.83       | 3.83                  | 3.75                  |
| 分析液滴質量 (ma±σ <sub>3</sub> )                            | mg/滴               | 20.65±0.24        | 21.40±0.27          | 22.35±0.32        | 21.50±0.31 | 20.02±0.34            | 20.22±0.31            |
| 分析評価液滴直径 (881℃仮定)                                      | mm                 | 3.76              | 3.81                | 3.86              | 3.81       | 3.72                  | 3.74                  |
| 液滴燃焼量 (mb=mc-mv-ma)                                    | mg                 | (2.27)            | (1.09)              | 3.30              | 3.06       | 4.36                  | 2.77                  |
| 標準偏差 ( $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}$ ) | —                  | (±0.97)           | (±0.78)             | ±0.78             | ±0.93      | ±1.14                 | ±0.80                 |
| 相対誤差 ((標準偏差/mb)×100)                                   | %                  | —                 | —                   | 23.6              | 30.4       | 26.1                  | 28.9                  |
| 上部測定位置での平均落下速度   | m/s                | 1.4±0.33          | 1.3±0.33            | 1.3±0.33          | —          | —                     | —                     |
| 下部測定位置での平均落下速度   | m/s                | 5.5±0.48          | 5.6±0.48            | 5.6±0.48          |            | 5.5±0.48              |                       |
| 液滴落下時間   | s                  | —                 | —                   | —                 |            | 0.81                  |                       |
| 平均燃焼速度   | g/s                | —                 | —                   | —                 |            | 5.38×10 <sup>-3</sup> | 3.42×10 <sup>-3</sup> |
| 平均蒸発係数   | cm <sup>2</sup> /s | —                 | —                   | —                 |            | 2.49×10 <sup>-2</sup> | 1.57×10 <sup>-2</sup> |

注) \*1: 試験容器下部の上部計測ポート位置、\*2: 試験容器上部の下部計測ポート位置  
 ( ) 内数値は実験中に雰囲気酸素濃度が低下したため、参考値とする

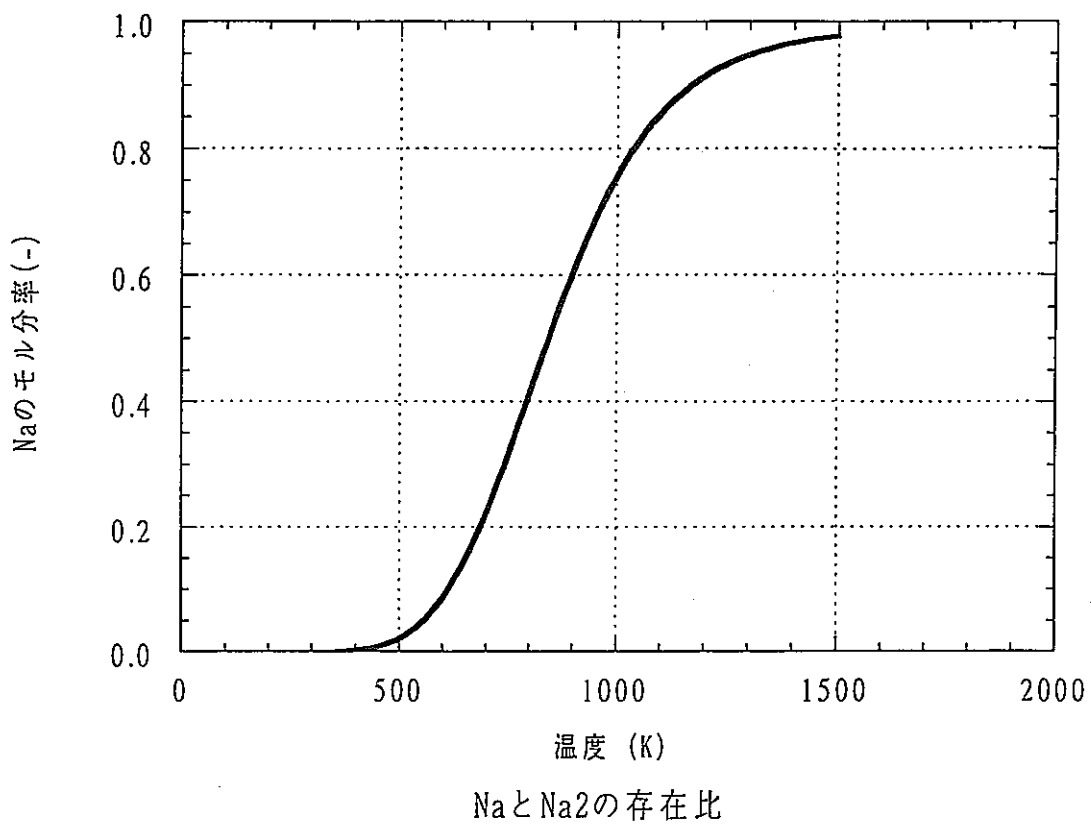


図 3-1 ナトリウム蒸気中の 1 原子分子と 2 原子分子の割合

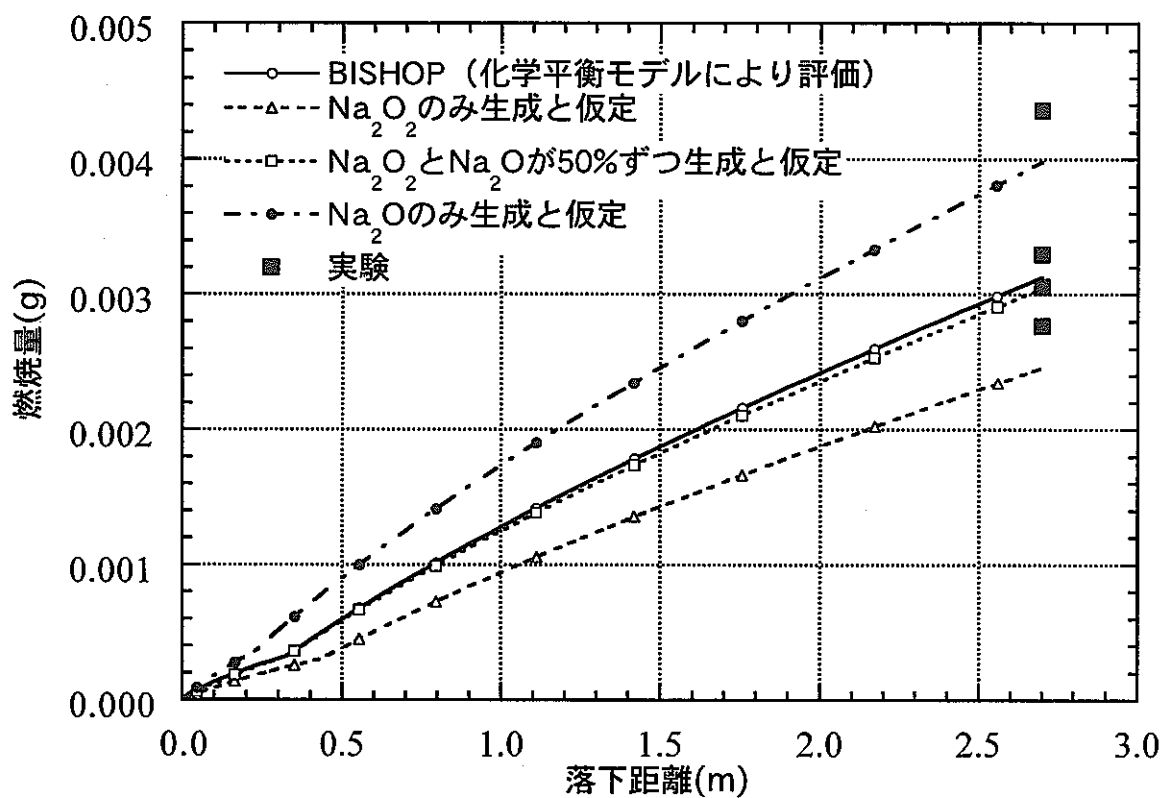


図 3-2 液滴の落下距離と積算燃焼量

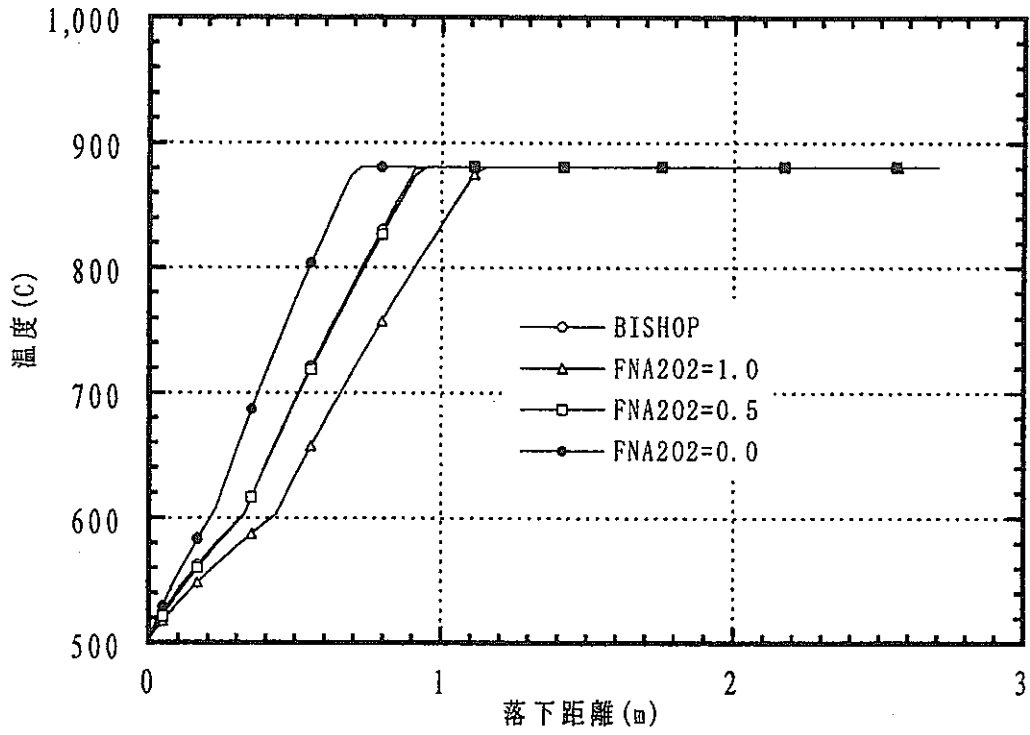


図 3-3 液滴温度

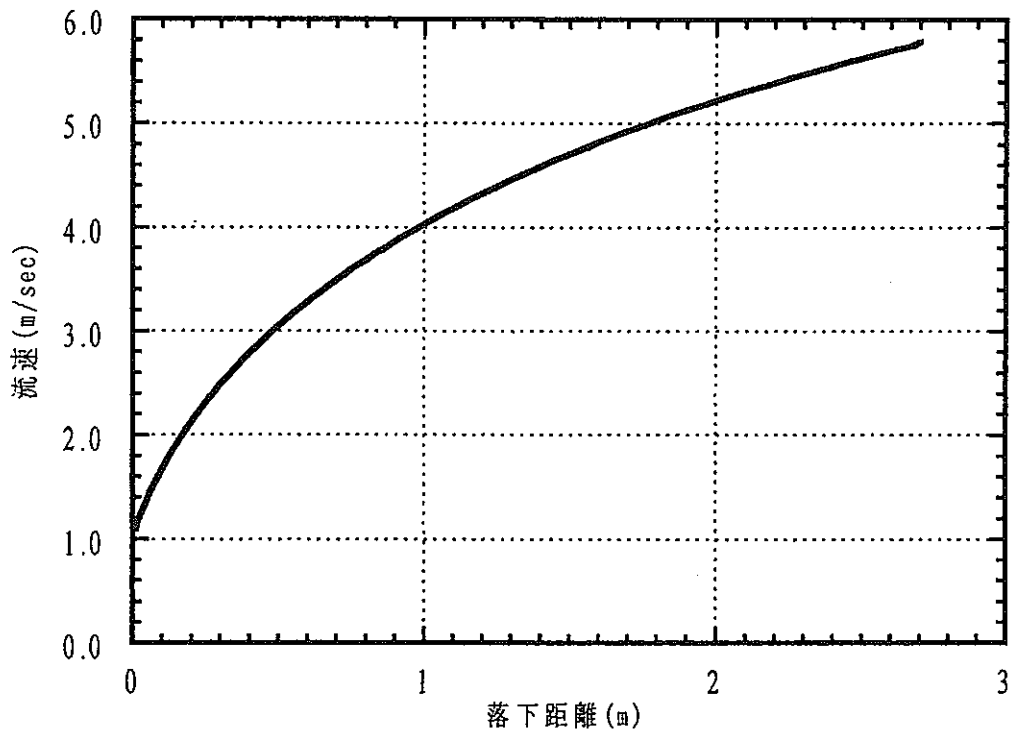


図 3-4 液滴の落下速度

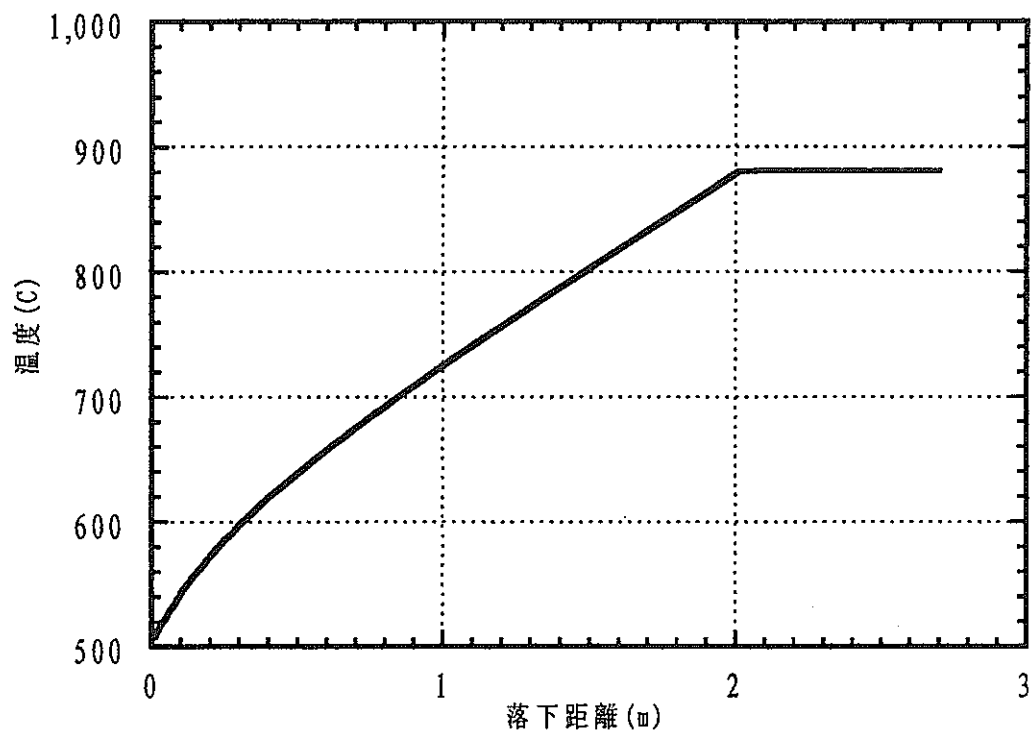


図 3-5 液滴の着火温度を沸点 (880°C) としたときの液滴温度

## 4. スpray 燃焼に関する課題

### 4.1. 着火温度と表面反応

SPHINCS コードでは着火温度を与えて、着火前後で反応過程が異なることに対応して(Eq. 2-9)式と(Eq. 2-10)式を使い分けている。3.2.3節に述べたように、着火温度の液滴燃焼量に対する感度は大きく、液滴燃焼率を評価するために着火温度を適切に決定することが重要である。また、着火前には拡散律速の液滴表面酸化反応が主体であり、着火後には液滴表面からの蒸発・拡散燃焼が主体であるという、反応メカニズムを確認することもまた重要である。

#### 4.1.1. 液滴の温度分布

SPHINCS では液滴内部の温度分布を均一と仮定している。液滴の着火は、液滴表面からナトリウムが蒸発して燃焼する過程であるから、液滴の表面温度に関係していると考えられる。火炎部からの輻射と熱伝導により液滴表面に伝達されるエネルギーは、液滴の温度上昇と液滴表面からのナトリウムの蒸発に消費される。液滴内部では熱伝導により液滴温度は上昇する。表面におけるナトリウムの蒸発速度と液滴内部の熱伝導の時定数との大小関係により、液滴の温度分布が決定される。たとえ液滴平均温度は低くても、表面温度が高いために蒸発量が多くて着火することがありえるかを確認するために、液滴の熱伝導方程式を解いて温度分布の過渡変化を評価した。

液滴の熱伝導方程式は

$$(Eq. 4-1) \quad \frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

で与えられる。ここで  $a$  は熱拡散率である。(Eq. 4-1)式を変数分離して解けば、

$$(Eq. 4-2) \quad \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ 2 \left( \frac{\sin v_n - v_n \cos v_n}{v_n - \sin v_n \cos v_n} \right) \times \exp(-v_n^2 Fo) \frac{\sin(v_n r/R)}{v_n r/R} \right]$$

を得る[19]。ここで、 $T_0$  は液滴の初期温度、 $T_{\infty}$  は液滴周りの空気の温度、 $R$  は液滴半径、 $Fo$  はフーリエ数で無次元時間に相当する。 $v_n$  は  $Bi$  をビオ数として  $v \cot v = 1 - Bi$  の正根である。液滴内部の各点で計算した温度変化結果を図 4-1 に示す。また、(Eq. 4-1)式を数値的に解いた結果得られた液滴中心温度の時間

変化を解析解(Eq. 4-2式)とともに図 4-2に示す。数値解は解析解と一致していることが確認できる。

このプログラムを用いて非定常温度分布を計算した。液滴直径は3章に示した実験解析と同様、3.8mmとした。図 4-3に液滴初期温度を500℃として液滴表面を沸点(880℃)としたときの液滴平均温度、表面温度、中心温度の時間変化を示す。平均温度は直ちに表面温度に追従し、0.04秒後には液滴全体が均一温度になる。図 4-4には初期条件から0.03秒までの液滴温度分布の変化を示す。ナトリウムの熱伝導特性はきわめて優れているため、ほぼ瞬時に液滴温度は表面温度と等しくなる。

図 4-5には3章で解析した実験とほぼ同じ条件で液滴表面温度が上昇するときの液滴平均温度と中心温度を示す。また図 4-6には液滴内部の温度分布を示す。液滴燃焼時のように液滴表面が約0.8秒程度かけて沸点まで上昇するとき、液滴内部の温度もほとんど時間遅れなしに追従している。

以上の結果から、SPHINCS コードの液滴内部の温度分布は均一という仮定はナトリウムに関しては成立すると考えられる。

#### 4.1.2. 着火前反応

佐藤[20]は静止ナトリウム液滴の自発着火実験を行い、液滴が着火するまでの過程を詳細に観察している。液滴の初期温度は250℃、300℃、350℃である。実験結果によれば、250℃では着火せず、300℃では液滴直径が小さい(2mm)場合は着火しなかった。着火したケースではほぼ共通した傾向が得られている。

液滴が着火するまでに液滴表面に白灰色の酸化被膜が形成されていることが撮影されている。これは表面酸化反応が生じているためと考えられる。その後、ある時点でこの酸化被膜は溶融するように消失し、金属光沢液体面が拡がり、その後に煙が発生し始める。そして、火炎構造が現れ始めてからある程度の時間を経て火炎構造ができあがる。このときの経過時間とどのような現象が起きていたかを図 4-7に示す。

佐藤の実験では着火したときの温度は不明であるが、着火前の表面反応が比較的長い時間継続した後に火炎が形成されることが図 4-7からうかがえ、SPHINCS の着火前の表面反応と着火後の蒸発・燃焼の過程の考え方と整合していると考えられる。また自発着火に関しては、表面反応の発熱と気流による

除熱のバランスにより液滴温度が上昇するか否かによって影響されていると考えられる。液滴温度が上昇するか否か、あるいは上昇するときに着火遅れ時間が液滴径や初期温度によってどのように影響されるかは、伝熱流動と反応の相互作用の問題であり、実験と解析による研究が待たれるところである。

3章の解析では、室温空気雰囲気条件では着火温度を 600℃ とすれば、実験で観察された着火位置と解析結果が良く一致することが示された。消防研究所の廖ら[21]は直径 15mm のカップ上でナトリウムを燃焼させた実験を行っており、以下の事実を観察している。ナトリウム温度が 600℃ 以下の場合には、ナトリウムが容器からしみだして下方に流れ落ちながら多くの突起が形成し、その先端に着火する。着火の位置は容器プール表面よりやや低い容器の縁付近である。一方、650℃ の場合には着火位置はプール上方の気相であり、燃焼時の火炎が大きいことが観察されている。結論として、600℃ 以上となれば着火は気相で発生すると報告している。この二つの実験はいずれも 600℃ を超えると気相で着火することを示したものであると考えられる。廖らの実験で、600℃ 以下での現象は、ナトリウムの蒸発・燃焼よりもプールの表面に酸素が拡散で運ばれてきて、プール表面に反応性生物が蓄積したことを説明すると考えられる。着火は、反応生成物の突起にしみこんだナトリウムが燃焼したものであり、空気との接触面積が大きいこととも含め、液滴やプールの表面からナトリウムが蒸発・燃焼する過程とは異なると考えられる。

これらの観察は、SPHINCS の反応モデルで仮定しているように、着火の前後で反応を支配する現象が変わることを示唆している。また、蒸発・燃焼により着火する場合についても、空気雰囲気中の廖らの実験とここで解析した実験の双方で 600℃ で着火するとの結果が得られている。

今後、実験的に確認すべき項目としては、液滴の表面酸化反応率と液滴着火温度が周囲の酸素濃度や強制対流流速、液滴径などでどの程度変化するかの評価である。着火温度や着火遅れ時間、自発着火温度などは、ナトリウムと空気の接触面積、空気中の酸素濃度などに依存すると考えられるので、これらをパラメータとする必要がある。

## 4.2. 液滴径分布

### 4.2 節の変数リスト

*D* 液滴直径



|             |        |
|-------------|--------|
| $D_e$       | 体積平均径  |
| $\bar{D}$   | 平均径    |
| $D_g$       | 幾何平均径  |
| $\bar{D}_s$ | 面積平均径  |
| $\bar{D}_v$ | 体積平均径  |
| $g(D)$      | 液滴個数分布 |
| $\sigma$    | 幾何標準偏差 |

## 4.2.1. 抜山-棚沢分布

半径が  $D$  と  $D+dD$  の範囲にある液滴の体積割合は

$$(Eq. 4-3) \quad f(D)dD = \left( \frac{3.915}{D_e} \right)^6 \frac{D^5}{5!} \exp\left\{ -\frac{3.915}{D_e} D \right\} dD$$

で表される。

$$(Eq. 4-4) \quad a = \frac{3.915}{D_e}$$

$D_e$  は体積平均径である。すると

$$(Eq. 4-5) \quad f(D) = \frac{a^6}{5!} D^5 \exp\{-aD\}$$

今、 $\int_0^{\infty} x^n \exp(-ax) = \frac{n!}{a^{n+1}}$  であるから (Eq. 4-5) 式の 0 から  $\infty$  までの積分は 1 である。

(Eq. 4-5) 式は体積分布であるのでこれを個数分布に変換する。個数分布を  $g(D)$  とすれば

$$(Eq. 4-6) \quad f(D) = \frac{\frac{4\pi}{3} \left( \frac{D}{2} \right)^3 g(D)}{\int_0^{\infty} \frac{4\pi}{3} \left( \frac{D}{2} \right)^3 g(D) dD}$$

が成立するので

$$(Eq. 4-7) \quad g(D) = \frac{f(D)}{\frac{4\pi}{3} \left( \frac{D}{2} \right)^3} \int_0^{\infty} \frac{4\pi}{3} \left( \frac{D}{2} \right)^3 g(D) dD$$

従って

$$(Eq. 4-8) \quad g(D) = \frac{a^3}{2} D^2 \exp(-aD)$$

よって、平均径は

$$(Eq. 4-9) \quad \bar{D} = \int_0^{\infty} Dg(D)dD = \frac{3}{a} = 0.766D_e$$

面積平均径は

$$(Eq. 4-10) \quad 4\pi \left( \frac{\bar{D}_s}{2} \right)^2 = \int_0^{\infty} 4\pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 g(D)dD = \frac{12\pi}{a^2} = \frac{12\pi}{3.915^2} D_e^2$$

$$(Eq. 4-11) \quad \bar{D}_s = \frac{2\sqrt{3}}{3.915} D_e = 0.8848D_e$$

体積平均径は

$$(Eq. 4-12) \quad \frac{4}{3}\pi \left( \frac{\bar{D}_v}{2} \right)^3 = \int_0^{\infty} \frac{4}{3}\pi \left( \frac{D}{2} \right)^3 g(D)dD = \frac{10\pi}{a^3} = \frac{10\pi}{3.915^3} D_e^3$$

$$(Eq. 4-13) \quad \bar{D}_v = \frac{\sqrt[3]{60}}{3.915} D_e = D_e$$

なお、(Eq. 4-8)式は一般的な抜山-棚沢分布式

$$(Eq. 4-14) \quad g(D) = \frac{qb^{(p+1)/q}}{\Gamma\left(\frac{p+1}{q}\right)} D^p \exp(-bD^q)$$

において  $b=a$ 、 $q=1$ 、 $p=2$  とした場合に相当する。

#### 4.2.2. 対数正規分布

対数正規分布は、幾何平均径を  $D_g$ 、幾何標準偏差を  $\sigma$  とするとき

$$(Eq. 4-15) \quad g(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D \ln \sigma}} \exp\left[-\frac{(\ln D - \ln D_g)^2}{2 \ln^2 \sigma}\right]$$

となる。n 次平均半径は

$$(Eq. 4-16)$$

$$(\bar{D}_n)^n = \int_0^{\infty} D^n \frac{1}{\sqrt{2\pi} D \ln \sigma} \exp\left[-\frac{(\ln D - \ln D_g)^2}{2 \ln^2 \sigma}\right] dD = \exp\left(n \ln D_g + \frac{n^2}{2} \ln^2 \sigma\right)$$

$$(Eq. 4-17) \quad \bar{D}_n = \exp\left(\ln D_g + \frac{n}{2} \ln^2 \sigma\right)$$

体積平均直径は

$$(Eq. 4-18) \quad \ln \bar{D}_v = \ln D_g + \frac{3}{2} \ln^2 \sigma \quad \text{あるいは} \quad \bar{D}_v = \exp\left(\ln D_g + \frac{3}{2} \ln^2 \sigma\right)$$

面積平均直径は

$$(Eq. 4-19) \quad \ln \bar{D}_s = \ln D_g + \ln^2 \sigma \quad \text{あるいは} \quad \bar{D}_s = \exp(\ln D_g + \ln^2 \sigma)$$

(Eq. 4-16)式から、体積分布を求める。定義より

$$(Eq. 4-20) \quad f(D) = \frac{\frac{D^2}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma} \exp\left[-\frac{(\ln D - \ln D_g)^2}{2 \ln^2 \sigma}\right]}{\int_0^{\infty} \frac{D^2}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma} \exp\left[-\frac{(\ln D - \ln D_g)^2}{2 \ln^2 \sigma}\right] dD}$$

であるから、

$$(Eq. 4-21) \quad f(D) = \frac{D^2}{\sqrt{2\pi} D_g^3 \ln \sigma \exp\left(\frac{9}{2} \ln^2 \sigma\right)} \exp\left[-\frac{(\ln D - \ln D_g)^2}{2 \ln^2 \sigma}\right]$$

である。

#### 4.2.3. 抜山—棚沢分布と対数正規分布の比較

体積平均直径が 4.57mm であるとき、抜山—棚沢分布によれば面積平均径は 4.04mm、平均径は 3.50mm となる。

一方、対数正規分布を用いたとき、体積平均径が 4.57mm、幾何標準偏差  $\sigma$  を 2.64 とすれば、幾何平均径は 1.112mm、面積平均径は 2.85mm、平均径は 1.78mm となる。この場合には図 4-8に示すように、抜山—棚沢分布とは異なり、質量（体積）分布で表せばブロードな分布となる。ここで、抜山—棚沢分布とよく対応するようにパラメータを設定してみる。幾何標準偏差  $\sigma$  を 1.64 とすれば図 4-9に示されるように抜山—棚沢分布と対数正規分布は良く一致する。

以上の3ケースのパラメータを表 4-1に示す。

### 4.3. 群燃焼

#### 4.3 節の変数リスト

|             |                        |
|-------------|------------------------|
| $a$         | 熱拡散係数                  |
| $D$         | 拡散係数                   |
| $D_0$       | 標準状態での拡散係数             |
| $d$         | 液滴の直径                  |
| $G$         | 群燃焼パラメータ               |
| $Le$        | ルイス数                   |
| $\ell$      | 平均液滴中心間距離              |
| $Pr$        | プラントル数                 |
| $M$         | 液滴1個当たりの平均質量           |
| $M_S$       | 落下中の液滴の全質量             |
| $m_{ox}$    | 液滴1個が燃焼するのに必要な酸素の質量    |
| $m_D$       | 液滴1個当たりの質量             |
| $N$         | 液滴の総個数                 |
| $P$         | 空気圧力                   |
| $Re$        | レイノルズ数                 |
| $r_\ell$    | 液滴の半径                  |
| $S$         | 無次元液滴間距離               |
| $Sc$        | シュミット数                 |
| $T$         | ガス温度                   |
| $u$         | 液滴落下時の相対速度             |
| $V$         | スプレイコーンの体積             |
| $V_{air}$   | 液滴1個が完全に燃焼するのに必要な空気の体積 |
| $V_D$       | 液滴1個の体積                |
| $V_S$       | スプレイコーン中の液滴の全体積        |
| $V_{Seq}$   | スプレイコーン中に液滴を並べたときの全体積  |
| $W$         | 漏洩率                    |
| $\alpha$    | 酸素のモル濃度                |
| $\beta$     | スプレイにより燃焼する割合          |
| $\rho$      | ナトリウム液滴の密度             |
| $\rho_{ox}$ | 酸素の密度                  |

- $\tau$  液滴が床面に落下するまでの時間  
 $\nu$  動粘性係数

#### 4.3.1. スpray燃焼モデルの適用限界

スプレイ燃焼の評価では、漏洩率をパラメータとしてガス温度や圧力を計算するが、漏洩率が大きくなるにつれてスプレイ中の液滴の個数密度が高くなるので単一の液滴の燃焼速度をそのまま外挿して適用できるか議論の余地がある。漏洩燃焼室の容積と漏洩率の関係において、どのような制限を規定すべきかを以下に検討する。

スプレイ状の燃焼形態は図 4-10に示されるように、液滴の個数密度あるいは質量密度により異なる[9]。一般には漏洩率が多くなると(a)の状態に近くなり、スプレイ中心部には酸素が到達しなくなるため燃焼が抑制される。一方、漏洩率が小さい場合には (d)の状態に近く、スプレイ中の個々の液滴は単一の液滴と同等の燃焼速度をもつ。(d)の状態に近いときには SPHINCS のスプレイ燃焼モデルは問題なく適用できるが、(a)の状態に近づくにつれて酸化剤が供給されなくなることによる燃焼抑制の効果を考慮する必要がある。

図 4-11は 2 個あるいは 5 個の油滴をある距離をおいて燃焼させたときの  $D^2$  則の燃焼速度定数を示したものである[22]。縦軸は(Eq. 2-2)式あるいは(Eq. 2-4)式で定義される蒸発係数である。粒子間隔が粒子直径の数倍以下になると明らかに燃焼速度が低下していることが示されている。この図から粒子間距離が 4mm から 6mm のときに燃焼速度は極大になるが、これは火炎が相互に熱源として作用して蒸発を促進させることによる。この実験は 2 個あるいは 5 個の油滴を用いているが、SPHINCS のスプレイ燃焼モデルでは周囲の液滴個数が十分に多いこと、また燃焼中のガスは高温でエアロゾルが充満しておりガスの透明性が低いことなどから、図 4-11にあるような極大値は見られず、同図よりも大きな粒子間隔から燃焼率は低下し始めると予想される。

室内容積を  $V$  とする。また、液滴が床面に落下するまでの時間を  $\tau$  とする。液滴の直径を  $d$ 、漏洩率を  $W$ 、ナトリウム液滴の密度を  $\rho$  とする。すると室内に浮遊している液滴の全質量と全体積は

$$(Eq. 4-22) \quad M_s = W\tau$$

$$(Eq. 4-23) \quad V_s = \frac{W\tau}{\rho}$$

である。ナトリウム液滴は床上に落下するまでに蒸発・燃焼するため、ナトリウム液滴とナトリウム蒸気および反応生成物も考えれば、これらが占有する体積はさらに大きいと考えられる。

さて、液滴 1 個当たりの体積は

$$(Eq. 4-24) \quad V_D = \frac{1}{6}\pi d^3$$

であるから、室内の液滴の個数は、(Eq. 4-23)式を(Eq. 4-24)式で割って

$$(Eq. 4-25) \quad N = \frac{6W\tau}{\rho\pi d^3}$$

で与えられる。1 個の液滴を包絡する立方体の占有する体積は  $d^3$  であるから、全ての液滴が重ならないで配置されるために、最低限必要な空気の体積は

$$(Eq. 4-26) \quad V_{Seq} = \frac{6W\tau}{\rho\pi}$$

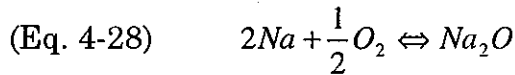
である。

$\tau = 1\text{sec}$ 、 $\rho = 840\text{kg}/\text{m}^3$  とする。 $\tau = 1\text{sec}$  というのは約 5m の漏洩高さから自由落下する時間に相当する。スプレー状に液滴が存在するためには、(Eq. 4-26)式と室内容積  $V$  の比

$$(Eq. 4-27) \quad \frac{V_{Seq}}{V} = \frac{6W\tau}{\rho\pi V} = 2.3 \times 10^{-3} W/V \ll 1$$

でなければならないと考えられる。例えば  $V = 230\text{m}^3$  の室内では、漏洩率が  $100\text{ton}/\text{sec}$  を越えると、室内が液滴で埋め尽くされる状況になる。これほどの漏洩量にスプレー状燃焼モデルを適用する意味はない。

次に、燃焼に必要な酸素供給の観点から考察する。液滴が燃焼するためには、その周辺に酸素を供給できる空間が必要である。そのために必要十分な空気容積も含めた液滴 1 個あたりの等価半径が目安となる。直径  $d$  の液滴が完全に燃焼するために必要な空気容積がいくらかを以下に検討する。大規模の燃焼では雰囲気温度は高くなっているから、次式に示す反応が支配的となり、ほとんど一酸化物が生成されると考えられる。



液滴 1 個の質量を  $m_D$  とすれば、液滴 1 個が燃焼するのに必要な酸素の質量は

$$(Eq. 4-29) \quad m_{ox} = \frac{16}{46} m_D$$

である。液滴 1 個が完全に燃焼するのに必要な酸素を含むガスの体積を  $V_{air}$ 、酸素のモル濃度を  $\alpha$  とする。酸素の密度を  $\rho_{ox}$  とすれば、酸素の質量は、

$$(Eq. 4-30) \quad m_{ox} = \rho_{ox} V_{air} \alpha$$

である。従って(Eq. 4-29)式と(Eq. 4-30)式を比べれば、液滴 1 個に対してそれが燃焼するのに必要な空气体積は次式で与えられる。

$$(Eq. 4-31) \quad V_{air} = \frac{16}{46} \frac{m_D}{\alpha \rho_{ox}}$$

一方、液滴 1 個の体積は

$$(Eq. 4-32) \quad V_D = \frac{m_D}{\rho_D}$$

ここで理想気体を仮定する。ガスの圧力を  $P$ 、温度を  $T$  とすれば

$$(Eq. 4-33) \quad PV = mRT$$

$$(Eq. 4-34) \quad \rho_{ox} = \frac{m}{V_{air}} = \frac{P_{air}}{RT_{air}}$$

標準状態では、 $P_0 = 1.013 \times 10^5 Pa$ 、 $T_0 = 273K$ 、 $V_0 = 22.4 \times 10^{-3} m^3$ 、 $m_0 = 32 \times 10^{-3} kg$  である。従って

$$(Eq. 4-35) \quad R = \frac{P_0 V_0}{m_0 T_0} = 2.598 \times 10^2 (J/kg/K)$$

(Eq. 4-31)式に(Eq. 4-34)式を代入して

$$(Eq. 4-36) \quad V_{air} = \frac{16}{46} \frac{m_D RT_{air}}{\alpha P_{air}}$$

従って、液滴の体積と空気の体積比は(Eq. 4-32)式と(Eq. 4-36)式より

$$(Eq. 4-37) \quad \frac{V_D}{V_{air}} = \frac{46}{16} \frac{\alpha P_{air}}{\rho_D RT_{air}}$$

を得る。(Eq. 4-37)式は液滴全量が燃焼すると仮定したものである。液滴がスプレーにより燃焼する割合を  $\beta$  とすれば、

$$(Eq. 4-38) \quad \frac{V_D}{V_{air}} = \frac{46}{16} \frac{\alpha P_{air}}{\beta \rho_D R T_{air}}$$

を得る。

図 4-12に温度の関数として(Eq. 4-38)で与えられる体積比を示す。ここではスプレー燃焼割合 $\beta$ を 0.1、酸素濃度 $\alpha$ を 0.2、圧力を 1 気圧とした。この図から、600℃から 1000℃程度のガス温度の時、液滴の空気に対する体積比は 0.003 程度でなければならない。液滴と空気の体積比が 0.003 の場合には液滴直径と空気の等価直径の比は  $0.003^{1/3} = 0.14$  となる。従って、液滴間平均距離は、液滴直径の約 7 倍でなければならない。(Eq. 4-26)式の液滴が占める体積は、空間容積の 0.3%とすれば(Eq. 4-27)  $\frac{V_{Seq}}{V} = \frac{6W\tau}{\rho\pi V} = 2.3 \times 10^{-3} W/V \ll 1$  (Eq. 4-27) 式の関係から、漏洩率  $W$  (kg/sec) と室容積  $V$  ( $m^3$ ) は同程度の数字である必要がある。

以上の考察は、室内にスプレーが均一に分布すると仮定し、かつ、ナトリウム蒸気や反応生成物の存在を無視している。従って、燃焼に必要な酸素が液滴周辺に輸送されるためには液滴間平均距離はさらに大きいことが必要であると考えられるが、ある目安としては、スプレーで空間容積の 0.3%程度をスプレーが占めているとき、漏洩率の 10%程度までは燃焼するあるいは液滴間平均距離が液滴直径の 7 倍程度であれば漏洩率の 10%程度までは燃焼するということができる。

#### 4.3.2. 群燃焼モデル

既に述べたように液滴は飛散しながら蒸発し、その蒸気は酸素と拡散混合して燃焼する(図 4-10参照)。そのとき、蒸発速度と拡散混合の速度の大小関係で様々な燃焼形態が見られる。液滴の密度が薄いときには単独の液滴と近い燃焼形態となるが、液滴間の距離が小さくなるとその発熱により蒸発が促進されて燃焼速度は大きくなる。ところがさらに接近すると酸素の拡散供給が不足して燃焼速度は低下する。これらの特性は精緻な多次元解析を行うか、実験的に確認することによりモデル化される。ここでは、実験に基づいて Chiu ら [23] が提案した群燃焼の考え方を検討する。

Chiu らは群燃焼パラメータ

$$(Eq. 4-39) \quad G = 3(1 + 0.276 Re^{1/2} Sc^{1/3}) Le N^{2/3} \left( \frac{r_d}{l} \right)$$



を導入した。ここで  $Re$  は液滴レイノルズ数、 $Sc$  はシュミット数、 $Le$  はルイス数、 $N$  は液滴の総個数、 $r_t$  は液滴半径、 $\ell$  は平均液滴中心間距離である。ここで、

$$(Eq. 4-40) \quad Re = \frac{ud}{\nu}$$

$$(Eq. 4-41) \quad Sc = \frac{\nu}{D}$$

$$(Eq. 4-42) \quad Le = \frac{Pr}{Sc} = \frac{D}{a}$$

$$(Eq. 4-43) \quad N = \frac{W\tau}{\rho} \frac{6}{\pi d^3}$$

$$(Eq. 4-44) \quad r_t = \frac{d}{2}$$

$$(Eq. 4-45) \quad \ell = 2 \left\{ \frac{3}{4\pi} \frac{V}{N} \right\}^{1/3} = 2 \left\{ \frac{\rho r_t^3 V}{WT} \right\}^{1/3}$$

ここで、 $u$  は液滴と空気の相対速度、 $\nu$  は動粘性係数、 $a$  は熱拡散係数である。拡散係数  $D$  は

$$(Eq. 4-46) \quad D = D_0 \left( \frac{T}{273.15} \right)^m \frac{101325}{P}$$

で計算される[20]。酸素と水蒸気に関して  $m=1.75$ 、酸素では  $D_0=17.8\text{mm}^2/\text{sec}$ 、水蒸気では  $D_0=22.0\text{mm}^2/\text{sec}$  である。また、空気の物性、および空気中の酸素の拡散係数は表 4-2の通りになる。

これら諸量を用いて Chiu らの群燃焼パラメータを計算する。粒子間距離の無次元数  $S$  を導入して

$$(Eq. 4-47) \quad G = 3 \times 0.15 \frac{LeN^{2/3}}{S}$$

と群燃焼パラメータを表す。ここで  $S$  は

$$(Eq. 4-48) \quad S = \frac{0.05}{1 + 0.276 Re^{1/2} Sc^{1/3}} \left( \frac{\ell}{r_t} \right)$$

である。

液滴燃焼における、無次元化液滴間距離  $S$  と液滴個数の関数として群燃焼パラ

メータを評価した結果を図 4-13に示す[24]。Chiu らは、液滴群燃焼を 4 つの領域に分けて、各領域を区別する唯一の無次元数である群燃焼数  $G$  を提案した。 $G$  は液滴の蒸発速度とガスの拡散による輸送速度の比を表しており、液滴総数の  $2/3$  乗と無次元液滴間距離  $S$  の逆数の積で表される。

液滴群燃焼の 4 つの領域は(1)外部殻燃焼 (External sheath combustion)、(2)外部群燃焼 (External group combustion)、(3)内部群燃焼 (Internal group combustion)、(4)単一液滴燃焼 (Single droplet combustion) である。外部殻燃焼では、液滴群の中心部に液滴が蒸発しない領域があり、外殻部で蒸発した燃料のみが拡散燃焼する。従って、これは殻燃焼とみなせる。外部群燃焼では液滴内部は液滴蒸発領域であり、液滴群の外周部のみで群燃焼を行う。スプレイ核を包絡するひとつの拡散燃焼火炎が形成される。内部群燃焼では、燃料が蒸発するのみで燃焼を伴わない内部予加熱領域と、液滴群の外部燃焼領域で構成され、その境界は液滴群包絡火炎を形成する。

Chiu らは、N-ブチルベンゼンでは群燃焼パラメータ  $G$  が 1.36 のときに安定に群包絡火炎が存在する。 $G$  が小さくなると包絡火炎は液滴群の内部まで貫通し、 $G$  が 0.1 以下では群包絡火炎は液滴群の中心点に到達し消滅すると述べている。すなわち、液滴群や燃料スプレイの燃焼では、燃料蒸気と酸化剤の混合を妨げる液滴間の相互作用により、スプレイ領域に空気が不足する不燃領域が生じる (低酸素濃度)。 $G \leq 10^{-2}$  のときには単一液滴燃焼とみなせるが、それ以外の状況では、液滴は単一液滴の燃焼理論で記述されるようには燃焼しない。

今、ナトリウムのスプレイ燃焼と群燃焼マップを比較するため、表 4-3のパラメータを設定する。これは 10m 四方の部屋で流速 5m/s でナトリウムが漏洩し、床上に落ちるまで 1 秒間燃焼するという想定である。ガス温度を 1000K と 600K とし、漏洩率をパラメータとして室内の液滴個数  $N$ 、平均液滴間距離  $l$ 、無次元液滴間距離  $S$ 、及び群燃焼パラメータ  $G$  をそれぞれ図 4-14、図 4-15、図 4-16、および図 4-17に示す。これらの図からスプレイにおける燃焼抑制効果を適切に考慮すること、群燃焼パラメータの適用可能性の確認が必要であることがわかる。

群燃焼の概念は、図 4-10に示されるように燃料の蒸発供給速度と酸化剤の拡散供給速度の大小関係をもって火炎帯が存在する位置とその大きさを規定するものである。ここで、スプレイ燃焼モデルに群燃焼の概念を導入する方法について考察する。液滴径の分布を抜山—棚沢分布とすると、液滴の体積平均径を  $D_v$  とするとき、面積平均径  $D_s$  は

$$(Eq. 4-49) \quad D_s = 0.8848D_v$$

により表される。液滴 1 個当たりの平均質量は

$$(Eq. 4-50) \quad M = \frac{4}{3} \rho \pi \left( \frac{D_v}{2} \right)^3$$

液滴の表面積の合計は

$$(Eq. 4-51) \quad \begin{aligned} S_D &= 4\pi \left( \frac{D_s}{2} \right)^2 \frac{W}{M} = 4\pi \left( \frac{0.8848D_v}{2} \right)^2 \frac{W}{M} \\ &= 4\pi \left( \frac{0.8848D_v}{2} \right)^2 \frac{3W}{4\pi\rho} \left( \frac{2}{D_v} \right)^3 \\ &= 4.70 \frac{W}{\rho D_v} \end{aligned}$$

個々の液滴が独立に燃焼するためには個々の液滴表面に十分な酸素が供給される必要がある。またその酸素の質量フラックスが通過する仮想面の面積を  $A$  とすれば、第一次近似として、(Eq. 4-51)式で与えられる液滴の総表面積が酸素供給面の面積を超えないという条件を課す。すなわち

$$(Eq. 4-52) \quad S_D \leq A$$

(Eq. 4-51)式より、

$$(Eq. 4-53) \quad D_v \geq 4.70 \frac{W}{\rho A}$$

漏洩率が十分に大きく  $W \geq \frac{\rho A D_v}{4.70}$  のときには(Eq. 4-52)式が成立しない。これは酸素供給に比べて漏洩ナトリウムの量が大きすぎることを意味するので、ナトリウムは酸素に接することができない。従って、実質的には漏洩形態がカラム状になると考えて液滴径を次式のように大きく設定する方法が考えられる。

$$(Eq. 4-54) \quad D_v = 4.70 \frac{W}{\rho A}$$

#### 4.4. 今後の課題と実験の提案

高速炉の安全評価でスプレイ燃焼の影響を定量化するとき、特に大規模漏洩では燃焼量を過大評価していると考えられる。本報告書に述べたように、単一

液滴の燃焼についてはその燃焼量を精度良く評価できている。また、空気雰囲気での着火温度に関しても、600℃程度と考えるとここで解析した実験や廖ら[22]の実験を矛盾なく説明できそうである。しかし、燃焼に伴い酸素濃度が低下したり、著しく室温が上昇したときの着火温度に関しては、系統的なデータはない。このような条件は、大規模漏洩の評価で漏洩・燃焼につれて室温上昇、酸素濃度低下が見られるときに重要となる。

着火温度が明らかになったとして、着火以前の反応量評価が必要である。この場合には拡散による酸素や水蒸気輸送が反応量を決定する要因となっていると考え、熱伝達と物質伝達の相似性にに基づき反応量を評価している。このような考え方で、液滴が温度上昇して燃焼に至るという実験結果は概ね説明できている。しかし、液滴表面に酸化被膜ができることなどの現象も含め、着火遅れ時間や自然着火限界に関しては、実験的観察が不十分である。静止液滴が着火するまでの液滴温度上昇を、酸素濃度と相対流速などをパラメータとして測定すれば、着火前過程に関する現象を確認することができる。

スプレイ燃焼の評価を行うためには、液滴群としての燃焼挙動の定量化が必要である。SPHINCS では、単一液滴の燃焼量を評価してそれを液滴個数倍することによりスプレイ燃焼量を評価している。しかし、過去の実験（Chiu らの論文等）を参考にすれば、液滴数の密度がある値を超える群燃焼では、液滴間に相互作用があることが示されている。4.3節の結果から、高速炉の安全評価で考慮される漏洩率は、液滴間相互作用を考慮すべき領域に入っている。従って、液滴密度の関数としてナトリウムの群燃焼に関するモデル構築とその実験的確認が必要である。

スプレイ燃焼で漏洩率を決めたとして、液滴径分布が燃焼量に影響を及ぼす要因となる。SPHINCS で用いている抜山-棚沢分布が、スプレイ燃焼のような $10^{-1}$ mm から $10^1$ mm 程度の液滴に適用できるかを確認する必要がある。ナトリウムの物性値を反映した分布形の提案があれば有用である。一方、実炉での漏洩形態は、散布ノズルから噴出させたようにスプレイ状に漏洩するのか、あるいは水道の蛇口をひねったようにカラム状に漏洩するのかを考察し、漏洩量や配管内部の圧力に応じた代表的な漏洩形態を示すことも大切である。このとき、水とナトリウムの液滴径に関する相似則が得られれば漏洩形態を検討するときに有益な情報となる。

スプレイ燃焼に関して今後の課題をまとめれば以下のとおりとなる。

- (1) 液滴着火温度の測定（雰囲気温度、酸素濃度と着火温度の関係）

- (2) 静止液滴燃焼による着火前過程の反応機構と反応率測定（拡散律速の物質伝達率の妥当性、強制対流効果、酸素濃度）
- (3) 群燃焼モデルの構築と実験的確認（例えば、比較的小さなセル内に複数のノズルを設置して、液滴個数密度を変化させた実験など）
- (4) ナトリウムの液滴径分布の測定と水-ナトリウムの相似則（抜山-棚沢分布の妥当性、水とナトリウムの相似則）
- (5) 実炉の配管系からの漏洩形態と（漏洩率、配管内外の圧力差、漏洩面積をパラメータとした水実験、安全解析で使用すべき液滴径の提示）。

表 4-1 液滴径分布パラメータの比較

|         | コード     | 平均径  | 面積平均 | 体積平均 | 備考            |
|---------|---------|------|------|------|---------------|
| 抜山 棚沢分布 | SPHINCS | 3.50 | 4.04 | 4.57 | a=0.857       |
| 対数正規分布  | ASSCOPS | 1.78 | 2.85 | 4.57 | $\sigma=2.64$ |
| 対数正規分布  | ASSCOPS | 3.58 | 4.04 | 4.57 | $\sigma=1.64$ |

表 4-2 空気の物性および空気中の酸素の拡散係数 (単位は  $m^2/sec$ )

|       | 300K    | 600K    | 800K    | 1000K   | 1500K   |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 動粘性係数 | 1.58E-5 | 5.24E-5 | 8.45E-5 | 1.22E-4 | 2.39E-4 |
| 熱拡散係数 | 2.21E-5 | 7.37E-5 | 1.17E-4 | 1.67E-4 | 3.05E-4 |

表 4-3 群燃焼評価用のパラメータ

|         |              |
|---------|--------------|
| 液滴落下速度  | 5 m/s        |
| 液滴直径    | 4.60E-03m    |
| 室内圧力    | 101325 Pa    |
| 液滴落下時間  | 1 sec        |
| Na液滴の密度 | 850 $kg/m^3$ |
| 空間容積    | 1000 $m^3$   |
| Re      | 1.88E+02     |
| Sc      | 7.08E-01     |
| Le      | 1.03E+00     |

液滴の温度過渡変化

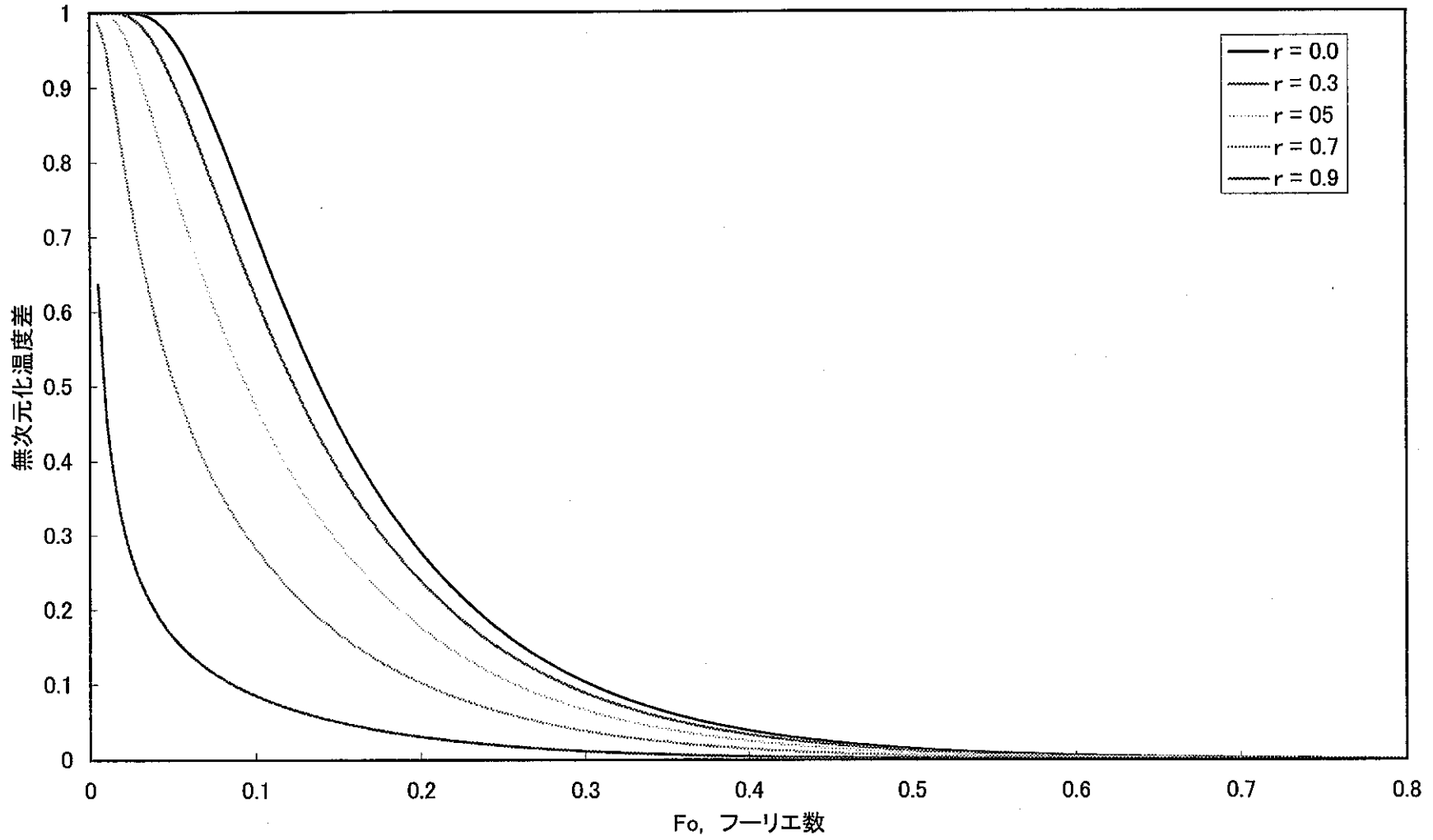


図 4-1 液滴内部の各点の温度過渡変化

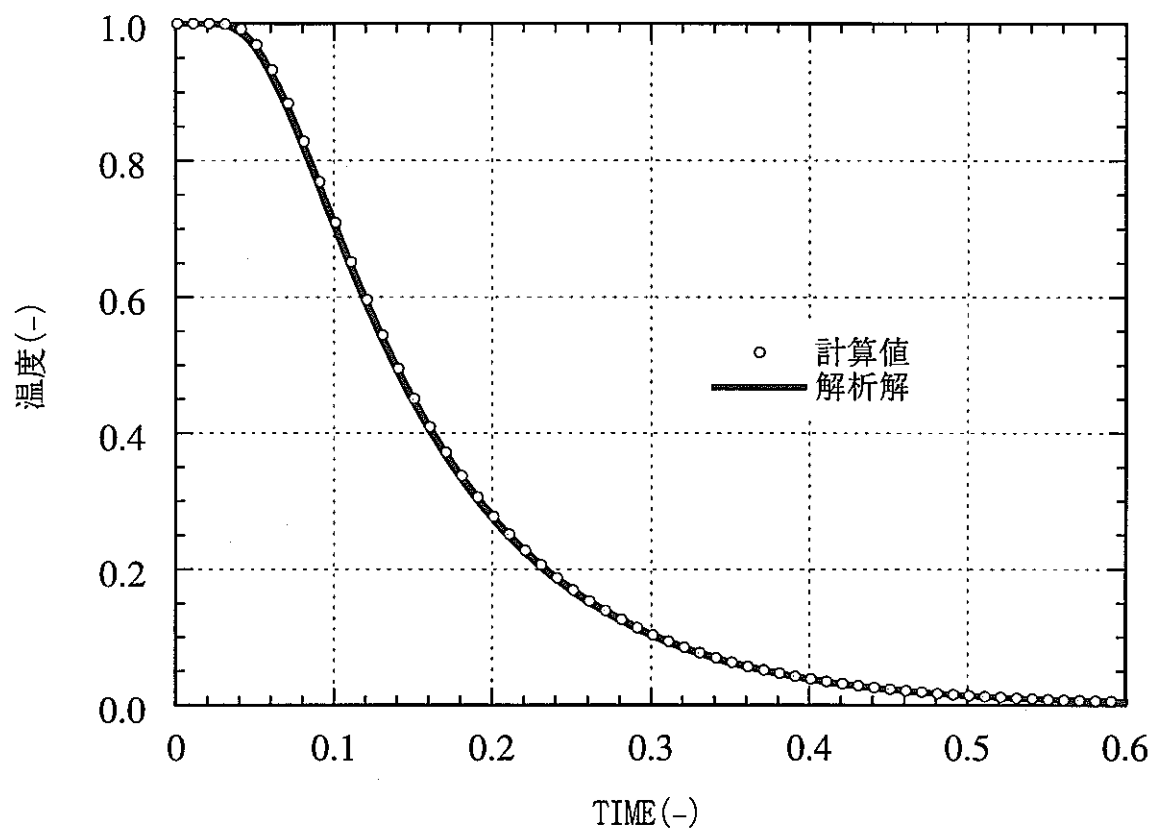


図 4-2 液滴中心温度の時間変化 (解析解と数値解)



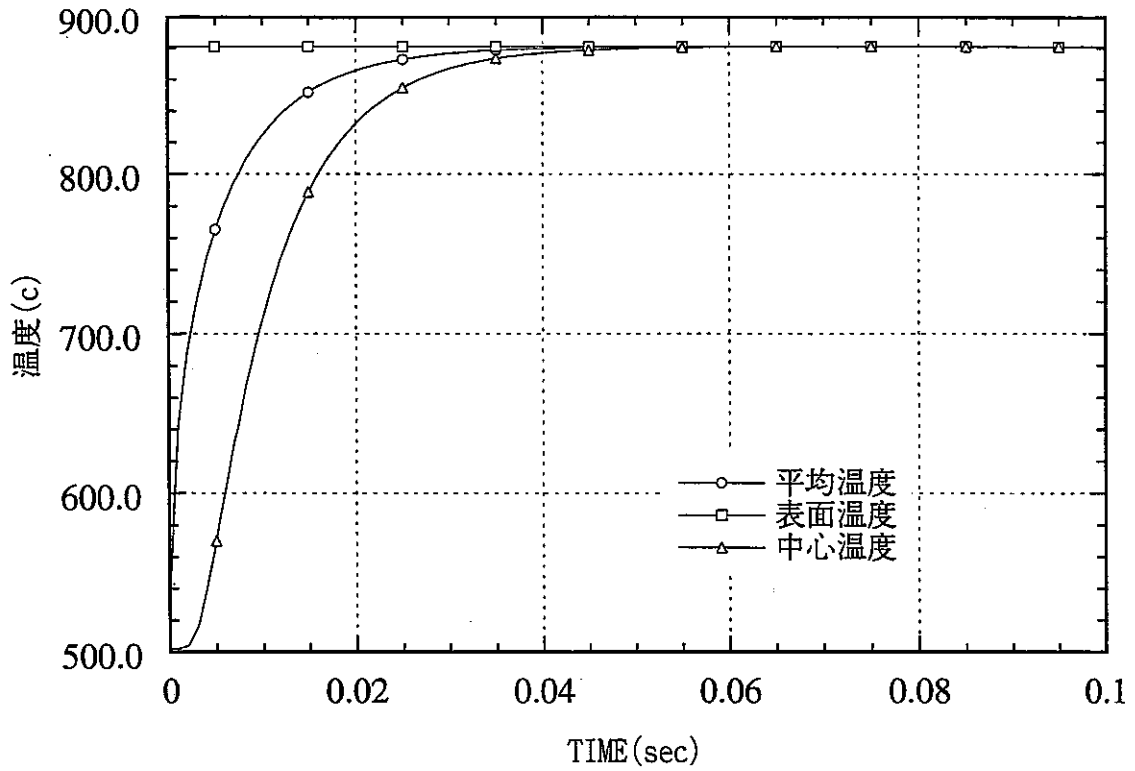


図 4-3 ナトリウム液滴の平均、表面、中心温度の時間変化

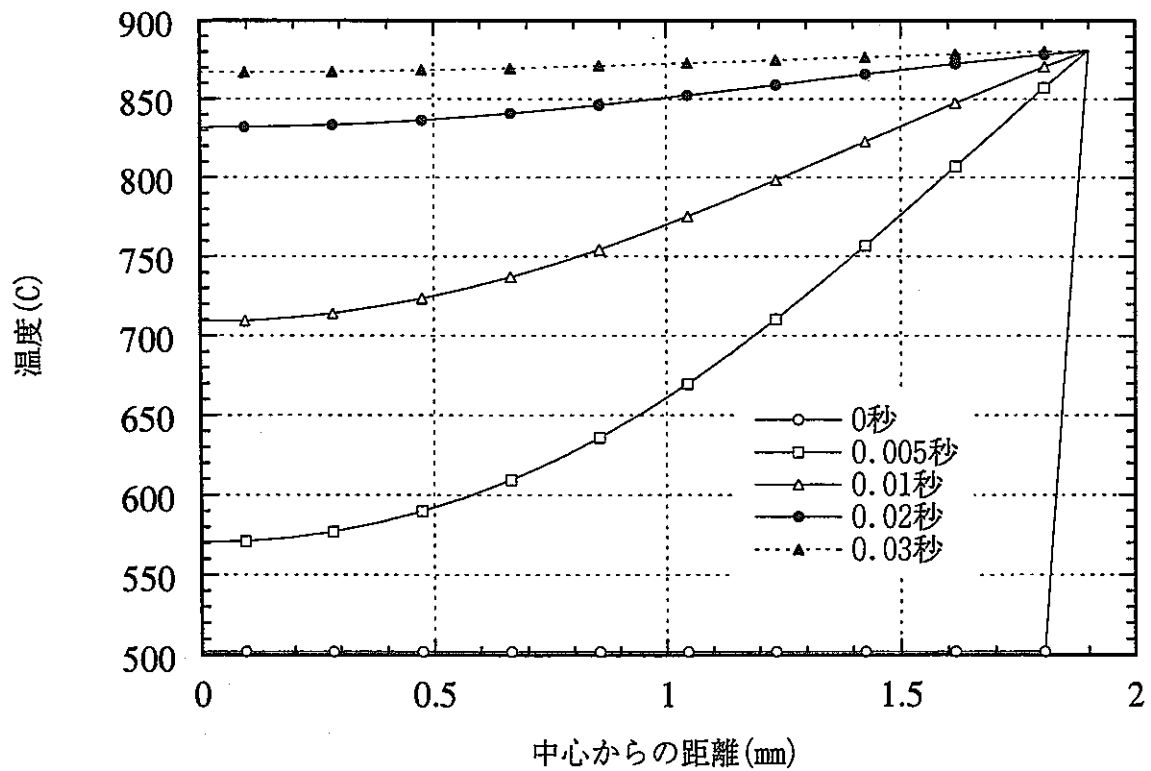


図 4-4 ナトリウム液滴温度分布の時間変化

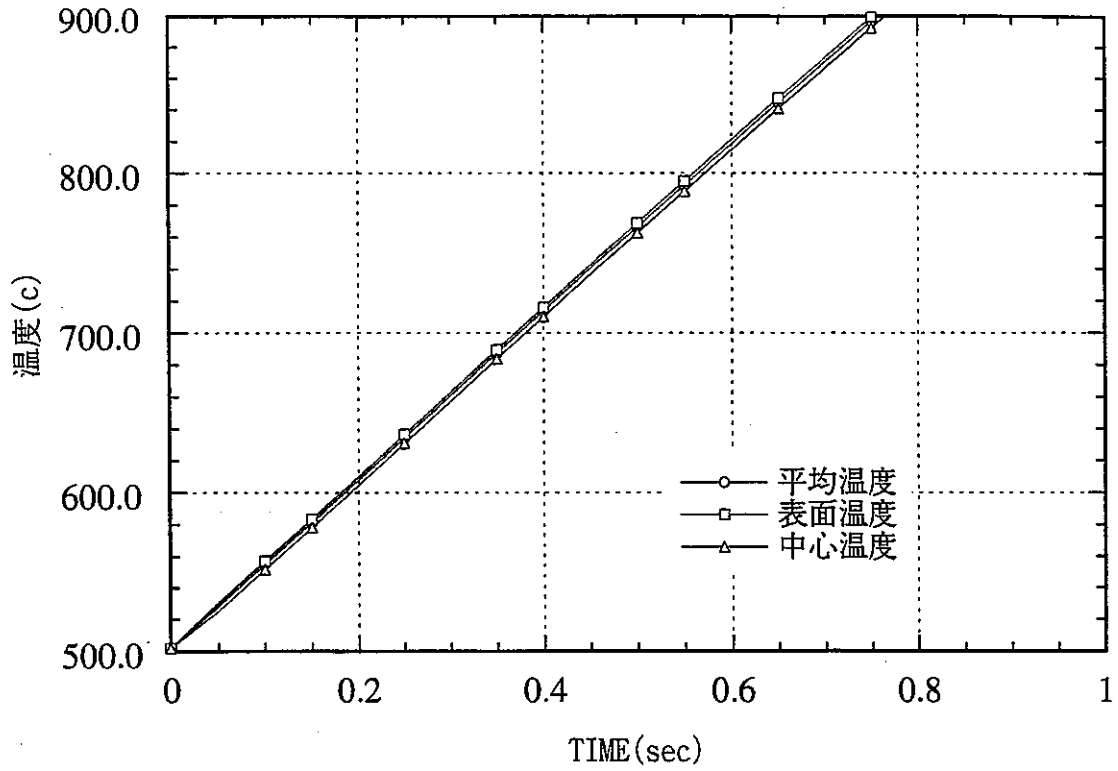


図 4-5 ナトリウム液滴燃焼時の平均、表面、中心温度の時間変化

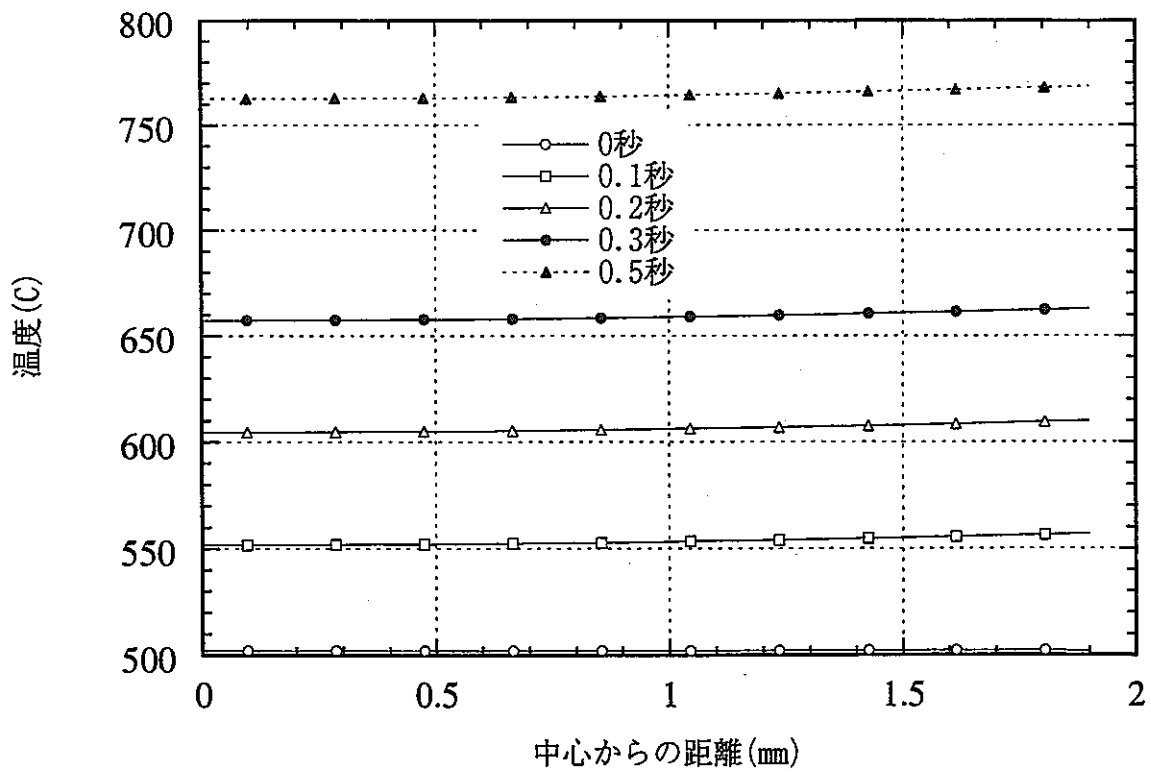


図 4-6 ナトリウム液滴燃焼時の温度分布の時間変化

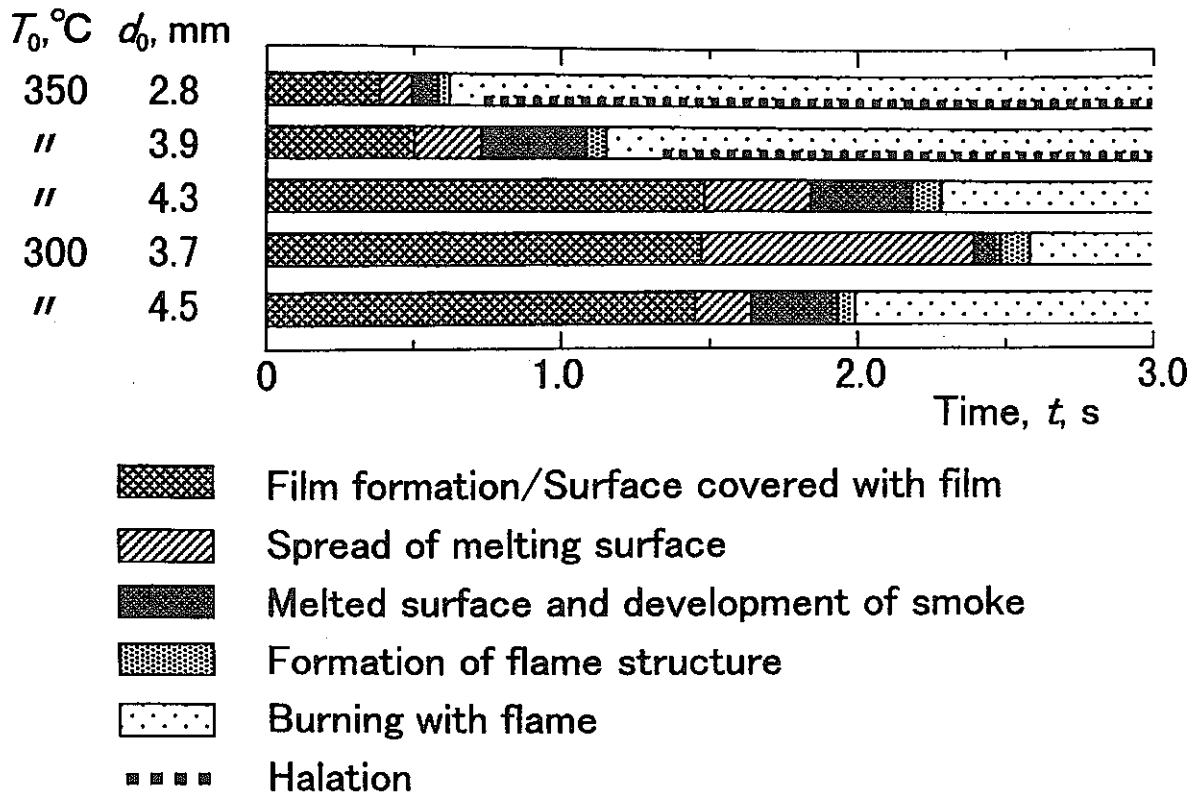


図 4-7 ナトリウム液滴の着火過程と時間経過[21]

抜山-棚沢分布と対数正規分布の比較  
体積平均径=4.57mm、幾何標準偏差=2.64

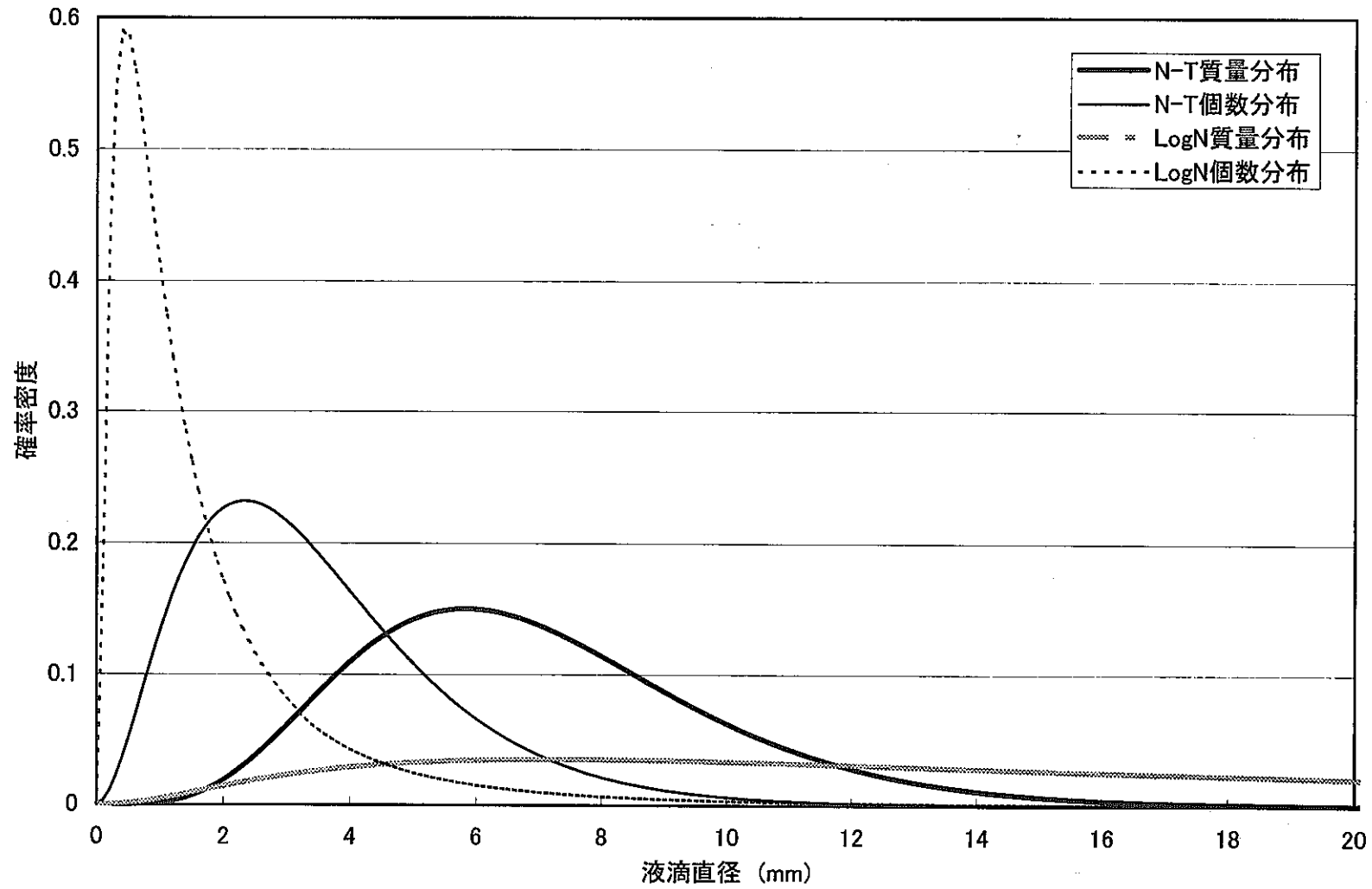


図 4-8 抜山-棚沢分布と対数正規分布の比較 (幾何標準偏差=2.64)

拔山-棚沢分布と対数正規分布の比較  
 体積平均径=4.57mm、幾何標準偏差=1.64

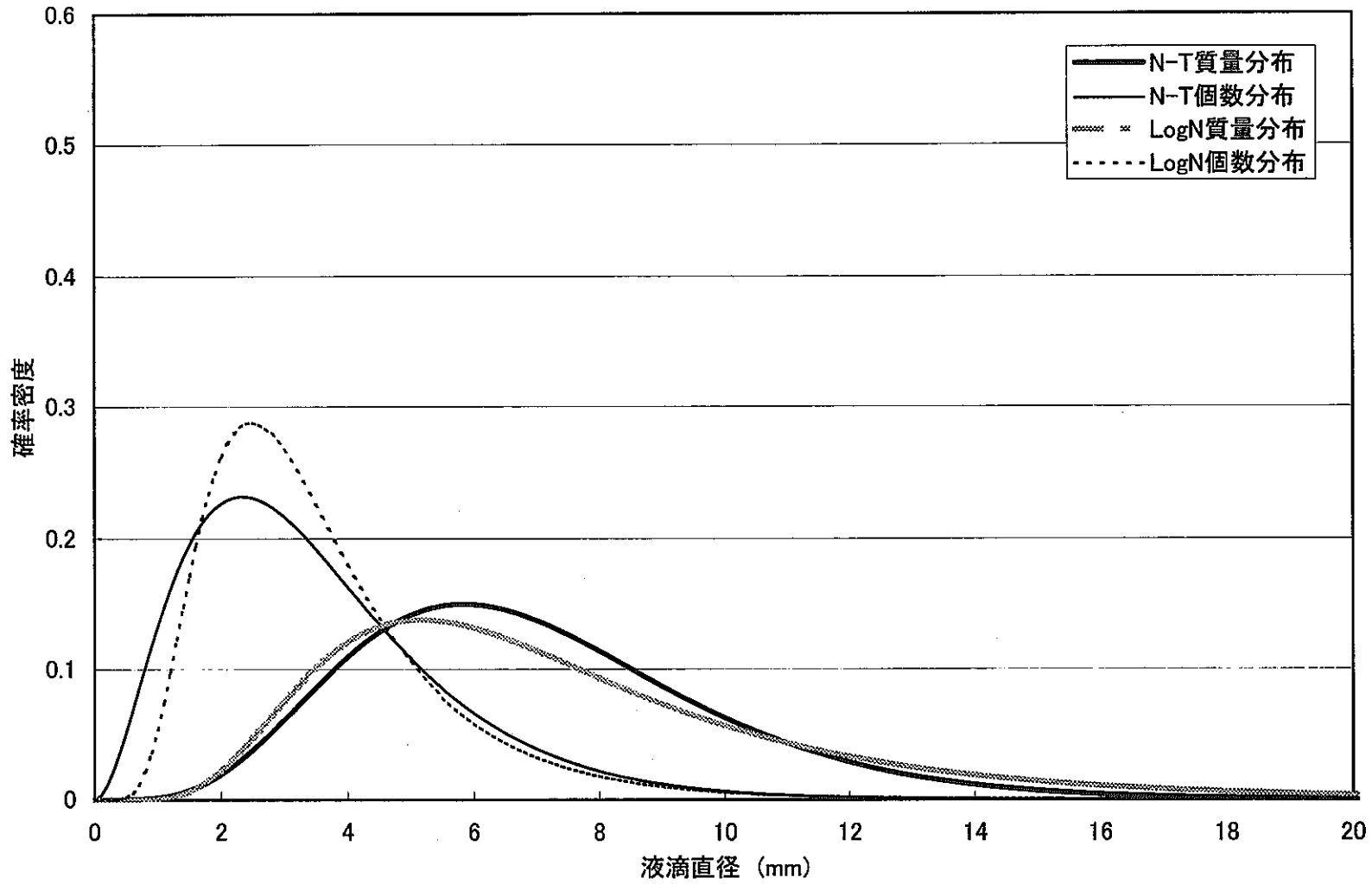


図 4-9 拔山-棚沢分布と対数正規分布の比較 (幾何標準偏差=1.64)

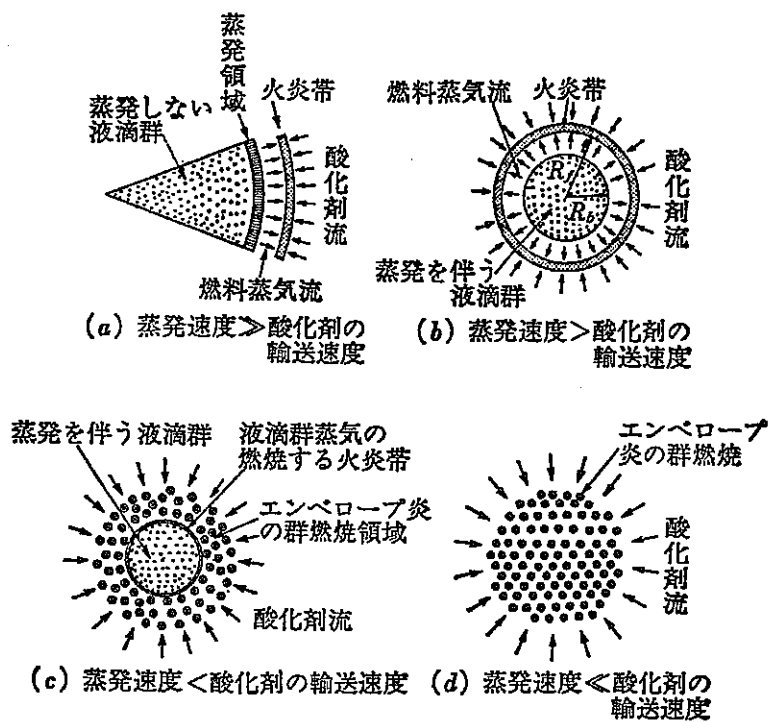


図 4-10 液滴群の燃焼形態 [9]

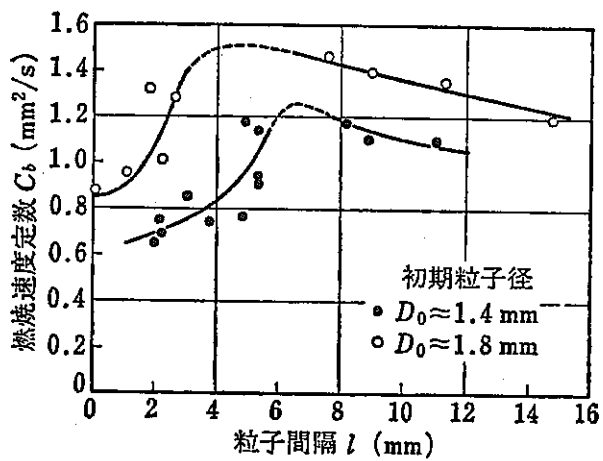


図 4-11 隣接液滴燃焼の相互作用 [22]

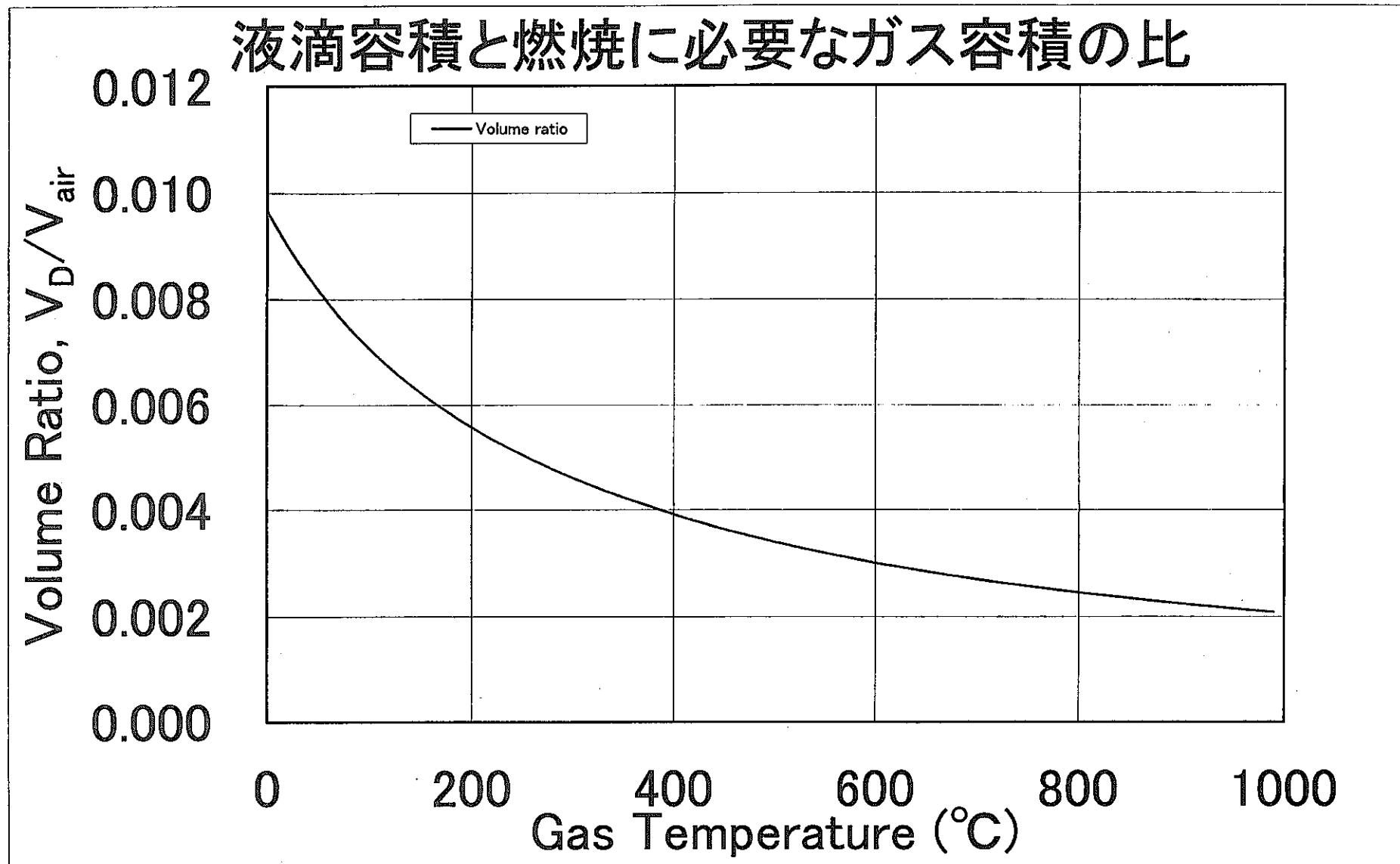


図 4-12 液滴体積と燃焼に必要なガス容積の比

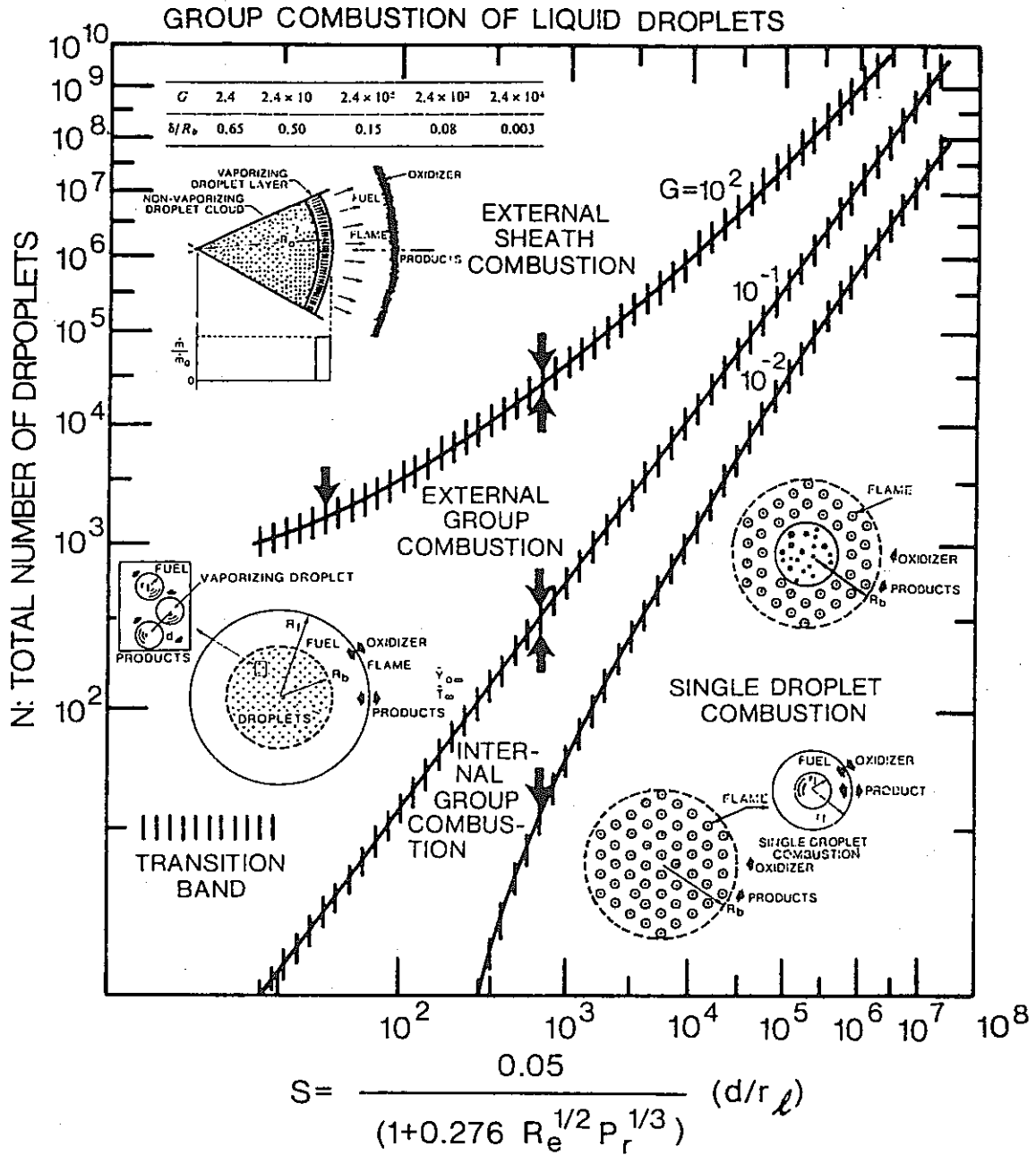


図 4-13 液滴の群燃焼形態マップ [23]



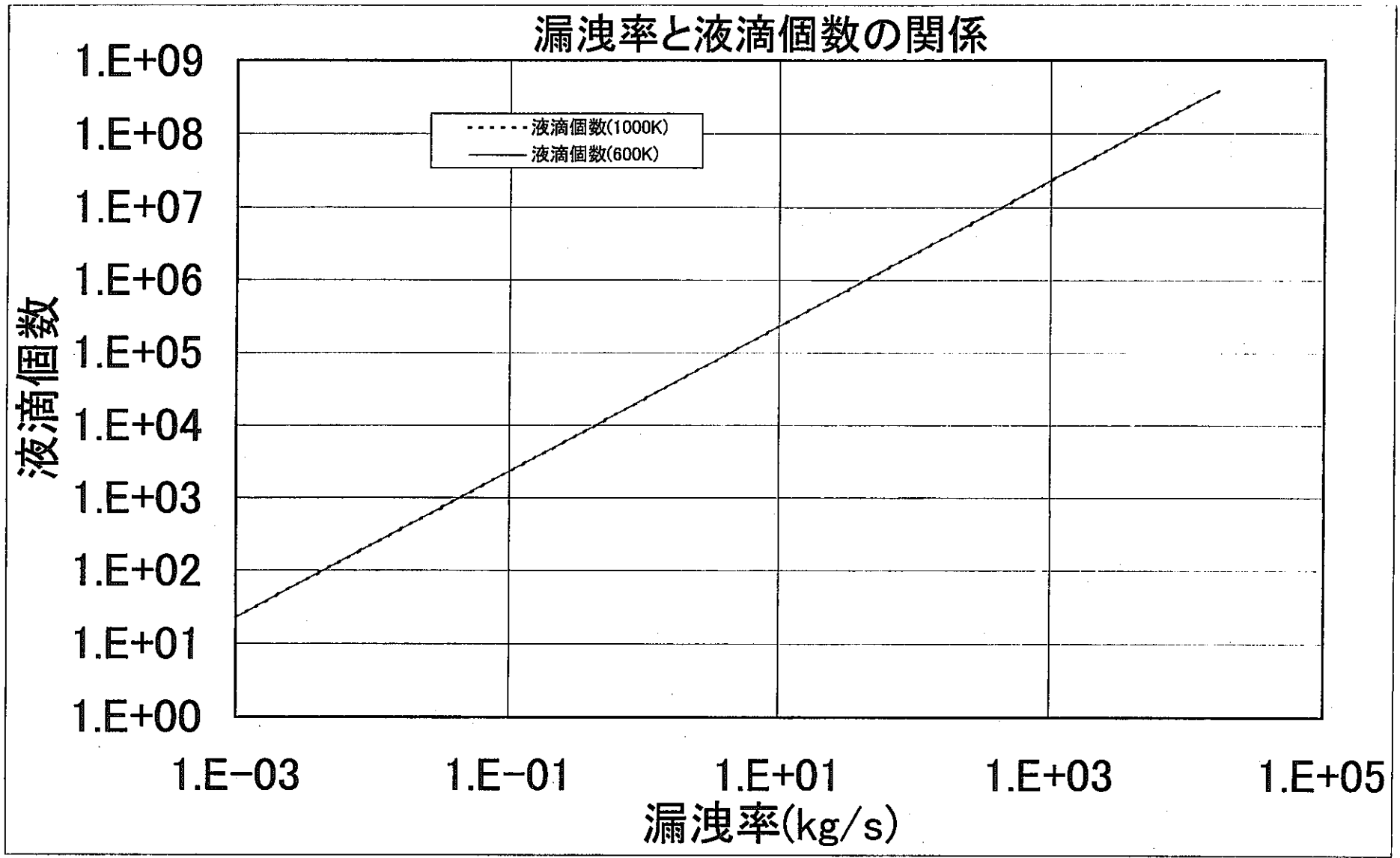


図 4-14 漏洩率と液滴個数の関係

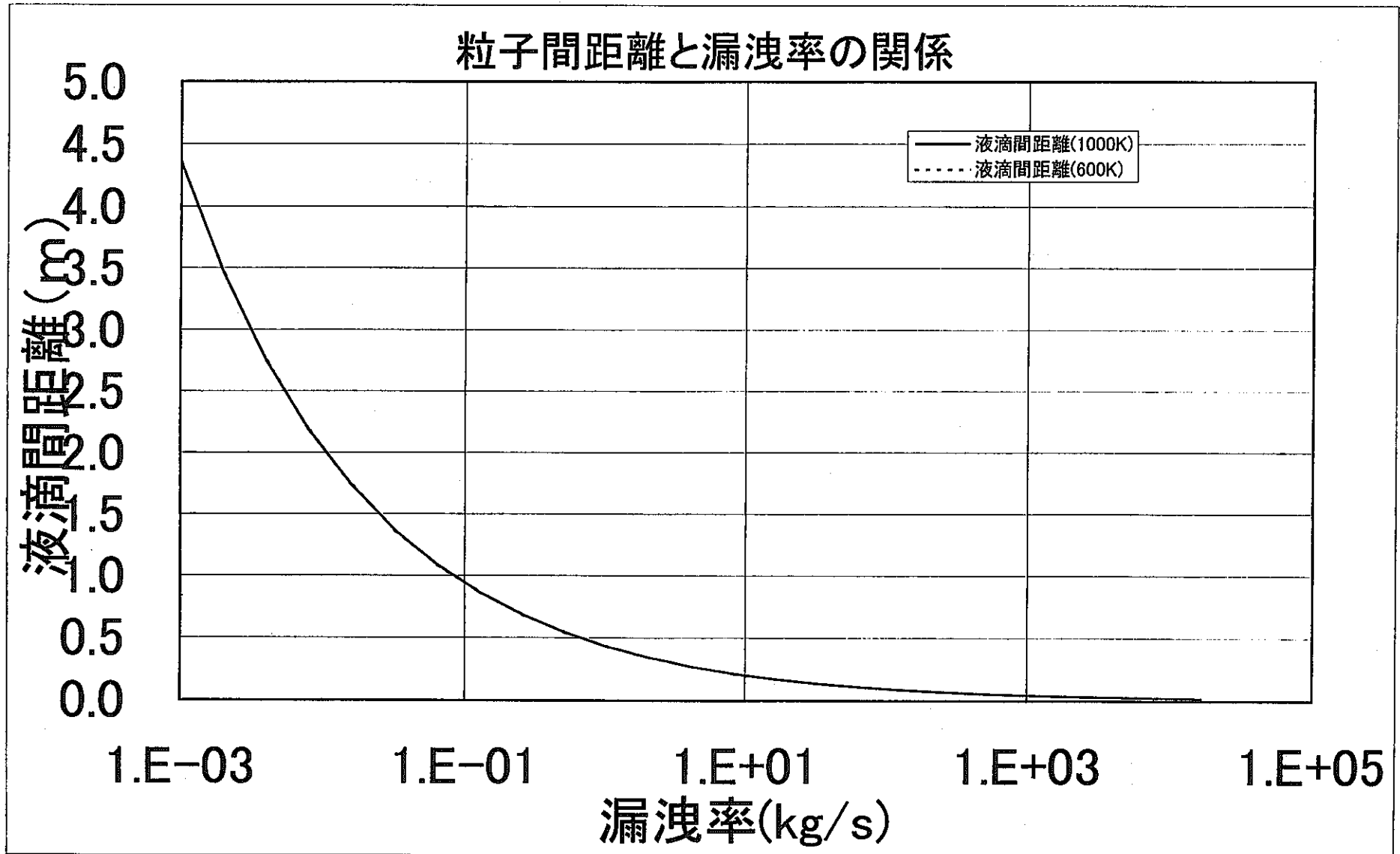


図 4-15 漏洩率と液滴間距離の関係

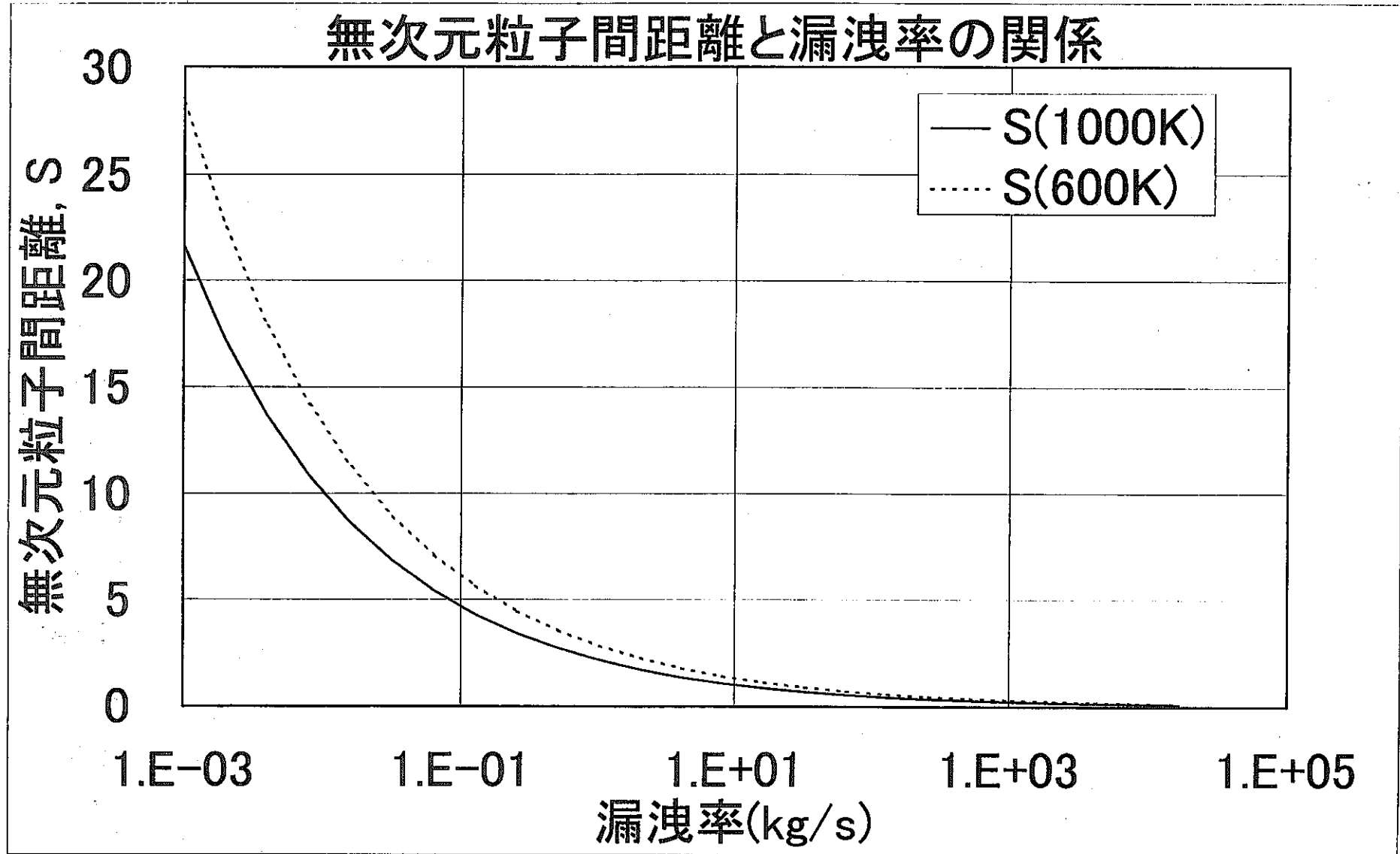


図 4-16 漏洩率と無次元化液滴間距離の関係

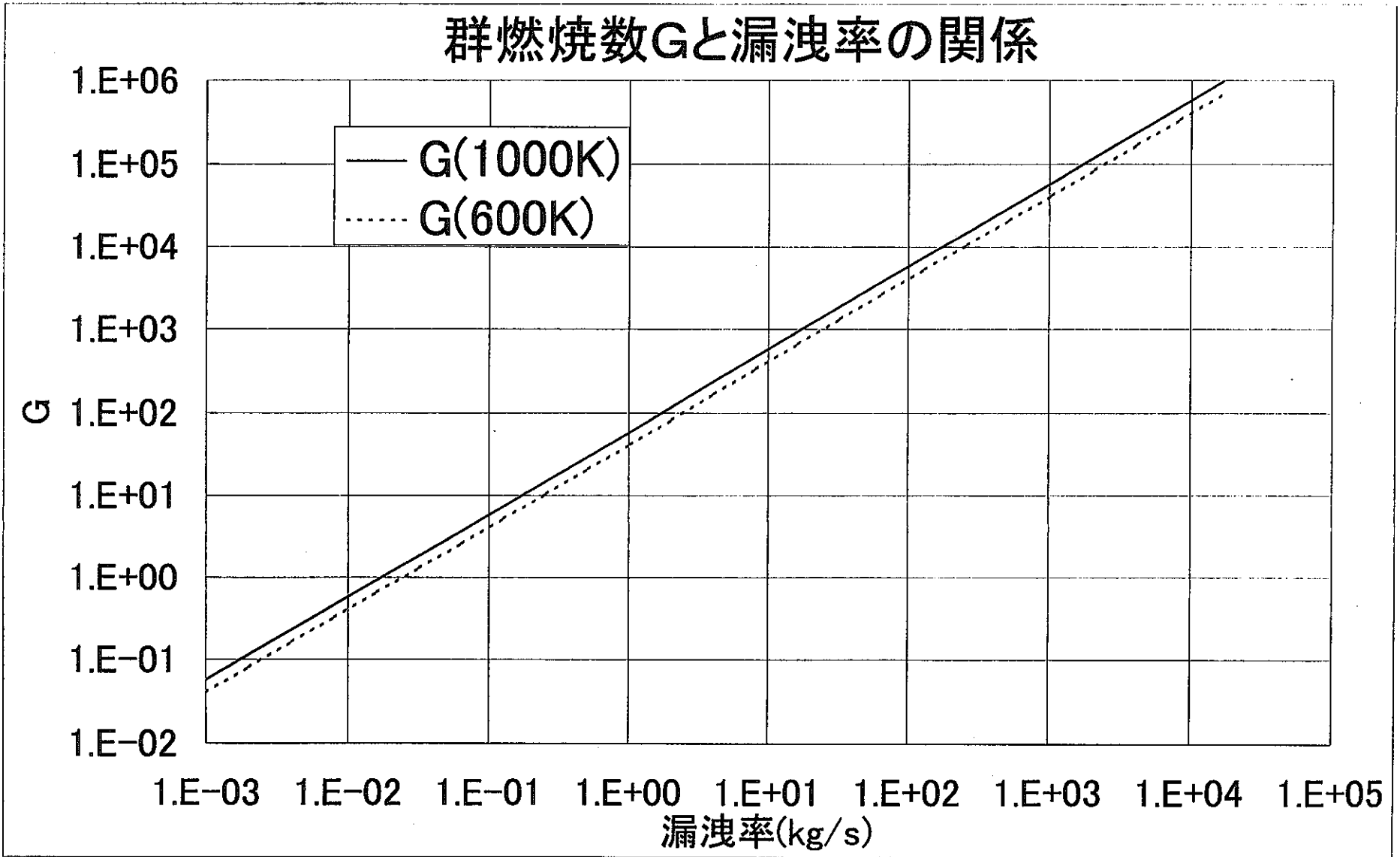


図 4-17 漏洩率と群燃焼パラメータの関係

## 5. 結論

高速炉のナトリウム燃焼安全評価コード SPHINCS のスプレイ燃焼モデルについて詳述し、スプレイ燃焼モデルの検証のため、単一液滴燃焼実験の解析を行った。この実験は、温度 500℃、直径 3.8mm のナトリウム液滴を 2.7m の高さから自由落下させて燃焼量を測定したものである。実験解析の結果、液滴の着火温度を実験観察結果より 600℃とすれば、液滴燃焼量の予測値は実験結果と良好に一致することを確認した。

実験結果と解析結果の比較に関する考察や高速炉の安全評価に適用するため不確定要因の考察を踏まえて、スプレイ燃焼モデル確立のための課題を整理し、実験および解析研究の提案を行った。スプレイ燃焼に関する今後の課題は、液滴の着火温度の評価、液滴群直径分布関数の妥当性の確認、群燃焼モデルの確立に関連する項目に大別される。

## 6. 謝辞

ここで解析した液滴燃焼実験は、ナトリウム安全工学試験部プラント安全工学グループおよび株式会社日立製作所で実施されたものである。また、プラント安全工学グループと熱流体技術開発グループの方々には有益なコメント、討論を頂いた。関係者各位に感謝申し上げます。

## 7. 参考文献

- [1] 山口 彰、大平 博昭、村松 壽晴、飯田 将雄、ナトリウム燃焼の機構論的解析手法の開発、PNC TN9410 97-040,1997年4月
- [2] 山口 彰、ナトリウム燃焼解析評価手法の開発(6)、全体概要と解析コード体系、1998年原子力学会春の年会,H39
- [3] 大野 修司、川田 耕嗣、宮原 信哉、ナトリウム漏洩燃焼に関する研究、動燃技報 92, pp18-31, 1994
- [4] 橋本 昭彦、山口 彰、岡部 綾夫、ナトリウム燃焼解析評価手法の開発(11)、プールおよびスプレイ燃焼実験解析による SPHINCS の検証、1998年原子力学会秋の大会、G12
- [5] 橋本 昭彦、山口 彰、大平 博昭、ナトリウム燃焼解析評価手法の開発(8)、多セル統合燃焼解析コード SPHINCS の検証、1998年原子力学会春の年会、H41
- [6] 西村 正弘、二上 敏、川田 耕嗣、他、ナトリウムプール燃焼実験 (Run-F7) 中間報告、PNC TN9410 98-074、1998年8月
- [7] 山口 彰、田島 雄次、ナトリウム燃焼解析評価手法の開発(15)、SPHINCSコード検証と小漏洩時のライナ温度評価、1999年原子力学会春の年会、I31
- [8] K.K. Murata, et al., User's Manual for CONTAIN 1.1: Computer Code for Severe Nuclear Reactor Accident Containment Analysis, NUREG/CR-5026, SAND87-2309 R4, November 1989.
- [9] 大竹 一友、藤原 俊隆、燃焼工学、コロナ社 (1985)
- [10] Richard, J.R., Delbourgo, R., Laffitte, P., Spontaneous Ignition and Combustion of Sodium Droplets in Various Oxidizing Atmosphere at atmospheric Pressure, 12<sup>th</sup> Symposium (International) on Combustion, pp.39-48 (1968)
- [11] Spalding, D.B., Some Fundamentals of Combustion, Butterworths, London, England (1955)
- [12] Tsai, S.S., Surface Oxidization Process Prior to Ignition of a Sodium Droplet, Trans Am. Nucl. Soc., Vol.27, 524 (1977)
- [13] Ranz, W.E., and Marshall, W.R., Evaporation from Drops, Chem. Eng. Progr., Vol.48, No.4, pp.173-180 (1952)
- [14] Bird, R.B., et al., Transport Phenomena, John Wiley & Sons, Inc., (1960)
- [15] 高橋 和雄、床井 博見、他、ナトリウム液滴生成実験、PNC TJ9124 98-

003、1998年1月

- [16] 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  
一、PNC TN9410 98-065、1998年8月
- [17] K. Takahashi, M. Uetake, and S. Itooka, Development of Apparatus for  
Forming Sodium Liquid Droplets, 7th Intl. Conf. On Nuclear  
Engineering, Tokyo, (1999)
- [18] 岡野 靖、山口 彰、ナトリウム燃焼解析評価手法の開発 (13) - 化学平  
衡計算コード BISHOP の開発と検証一、日本原子力学会 1998 年秋の大会、  
G14
- [19] 日本機械学会、伝熱工学資料 改訂第 4 版(1986)
- [20] 佐藤 研二、静止ナトリウム液滴燃焼基礎実験、PNC TJ9807 98-001、1998  
年8月
- [21] 廖 赤虹、斎藤 直、鶴田 俊、600~700℃におけるナトリウムプールの着  
火挙動、火災学会論文集、A-18 (1999)
- [22] 小林 清志、荒木 信幸、牧野 敦、燃焼工学 - 基礎と応用一、理工学社  
(1988)
- [23] H.H. Chiu, H.Y. Kim, E.J. Croke, Internal Group Combustion of Liquid  
Droplet , 19<sup>th</sup> Symposium on Combustion, pp971, (1982)